

「イットリウム系超電導電力機器技術開発」
(事後評価) 第1回分科会
資料5-1

「イットリウム系超電導電力機器技術開発」

事業原簿【公開】

担当部	独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 省エネルギー部
-----	------------------------------------

目次

概要

プロジェクト用語集

I. 事業の位置付け・必要性について

1. NEDOの関与の必要性・制度への適合性…………… I-1.1
 - 1.1 NEDOが関与することの意義…………… I-1.1
 - 1.2 実施の効果…………… I-1.2
2. 事業の背景・目的・位置づけ…………… I-2.1

II. 研究開発マネジメントについて

1. 事業の目標…………… II-1.1
 - 1.1 超電導電力貯蔵システム(SMES)の研究開発…………… II-1.4
 - 1.2 超電導電力ケーブル研究開発…………… II-1.9
 - 1.3 超電導変圧器の研究開発…………… II-1.17
 - 1.4 超電導電力機器用線材の技術開発…………… II-1.23
 - 1.5 超電導電力機器の適用技術標準化…………… II-1.30
2. 事業の計画内容…………… II-2.1
 - 2.1 研究開発の内容…………… II-2.1
 - 2.1.1 超電導電力貯蔵システム(SMES)の研究開発…………… II-2.9
 - 2.1.2 超電導電力ケーブル研究開発…………… II-2.18
 - 2.1.3 超電導変圧器の研究開発…………… II-2.35
 - 2.1.4 超電導電力機器用線材の技術開発…………… II-2.45
 - 2.1.5 超電導電力機器の適用技術標準化…………… II-2.65
 - 2.2 研究開発の実施体制…………… II-2.68
 - 2.3 研究の運営管理…………… II-2.73
 - 2.4 研究開発成果の実用化、事業化に向けたマネジメントの妥当性…………… II-2.82
3. 情勢変化への対応…………… II-3.1
 - 3.1 国内における研究開発動向…………… II-3.1
 - 3.2 海外における研究開発動向…………… II-3.5
 - 3.3 その他の情勢変化…………… II-3.18
 - 3.4 プロジェクトとしての対応…………… II-3.28

III. 研究開発成果について

1. 事業全体の成果…………… III-1.1
 - 1.1 開発成果概要…………… III-1.1
 - 1.1.1 超電導電力貯蔵システム(SMES)の研究開発…………… III-1.1
 - 1.1.2 超電導電力ケーブル研究開発…………… III-1.10
 - 1.1.3 超電導変圧器の研究開発…………… III-1.26
 - 1.1.4 超電導電力機器用線材の技術開発…………… III-1.40
 - 1.1.5 超電導電力機器の適用技術標準化…………… III-1.55
2. 研究開発項目毎の成果…………… III-2.1.1
 - 2.1 超電導電力貯蔵システム(SMES)の研究開発…………… III-2.1.1
 - 2.1.1 2 GJ 級高磁界・大電流コンパクトコイルの構成技術開発…………… III-2.1.1

2.1.2	高効率コイル伝導冷却技術開発	III-2.1.44
2.1.3	SMES 対応線材安定製造技術開発	III-2.1.73
2.1.4	高磁界コンパクト SMES システムモデル検証	III-2.1.91
2.1.5	高信頼性・高耐久性 SMES コイル要素技術開発	III-2.1.127
2.2	超電導電力ケーブル研究開発	III-2.2.1
2.2.1	66 kV 大電流ケーブル化技術の開発	III-2.2.1
2.2.2	66 kV 大電流ケーブルシステム検証	III-2.2.89
2.2.3	275 kV 高電圧ケーブル化技術の開発	III-2.2.110
2.2.4	275 kV 高電圧ケーブルシステム検証	III-2.2.181
2.2.5	超電導電力ケーブル対応線材開発	III-2.2.202
2.2.6	超電導電力ケーブルの熱収支に関する評価研究	III-2.2.246
2.3	超電導変圧器の研究開発	III-2.3.1
2.3.1	超電導変圧器巻線技術開発	III-2.3.2
2.3.2	冷却システム技術開発	III-2.3.27
2.3.3	限流機能付加技術開発	III-2.3.67
2.3.4	超電導変圧器対応線材開発	III-2.3.99
2.3.5	2 MVA 級超電導変圧器モデル検証	III-2.3.139
2.4	超電導電力機器用線材の技術開発	III-2.4.1
2.4.1	線材特性の把握	III-2.4.1
2.4.2	磁場中高臨界電流(I_c)線材作製技術開発	III-2.4.32
2.4.3	低交流損失線材作製技術開発	III-2.4.108
2.4.4	高強度・高工業的臨界電流密度(J_e)線材作製技術開発	III-2.4.180
2.4.5	低コスト・歩留向上技術開発	III-2.4.211
2.5	超電導電力機器の適用技術標準化	III-2.5.1
2.5.1	超電導線関連技術標準化	III-2.5.3
2.5.2	超電導電力ケーブル関連技術標準化	III-2.5.32
2.5.3	超電導電力機器関連技術標準化等	III-2.5.61
2.5.4	超電導電力機器技術の動向調査	III-2.5.78
2.5.5	パネル討論会の結果	III-2.5.94

IV. 実用化、事業化に向けての見通し及び取り組みについて

1.	実用化に向けての見通し及び取り組み	IV-1.1
2.	今後の展開	IV-2.1

(添付資料)

・イノベーションプログラム基本計画	添付資料 1.
・イノベーションプログラムについて	添付資料 2.
・イノベーションプログラム俯瞰図	添付資料 3.
・プロジェクト基本計画 (H20 当初版)	添付資料 4.
・プロジェクト基本計画 (H25 改訂版)	添付資料 5.
・技術戦略マップ (分野別技術ロードマップ)	添付資料 6.
・事前評価関連資料	
・事前評価資料	添付資料 7.
・パブリックコメント募集の結果	添付資料 8.
・中間評価コメント及び評点票	添付資料 9.
・特許論文リスト	添付資料 10.

概要

最終更新日

平成25年8月1日

<p>プログラム (又は施策)名</p>	<p>エネルギーイノベーションプログラム</p>																		
<p>プロジェクト名</p>	<p>イットリウム系超電導電力機器技術開発</p>	<p>プロジェクト番号</p>	<p>P08016</p>																
<p>担当推進部/担当者</p>	<p>省エネルギー部 担当者 楠瀬 暢彦 (平成24年9月～平成25年8月現在) 省エネルギー部 担当者 松林 成彰 (平成23年9月～平成24年8月) エネルギー対策推進部 担当者 松林 成彰 (平成23年7月～平成23年9月) エネルギー対策推進部 担当者 酒井 清 (平成22年7月～平成23年6月) 新エネルギー技術開発部 担当者 木戸口 幸司 (平成20年6月～平成22年6月)</p>																		
<p>0. 事業の概要</p>	<p>経済社会の基盤となる電力の安定的かつ効率的なエネルギー供給システムを実現するため、システムを適正に制御し、電力供給を安定化させるための技術及び発電電力を無駄なく輸送するための高効率な送電技術の確立は重要な課題である。 本プロジェクトでは、「超電導応用基盤技術開発(第Ⅱ期)」(平成15年度～19年度)及び「超電導電力ネットワーク制御技術開発」(平成16年度～19年度)によって得られた開発成果を踏まえて、実用レベルに達したコンパクトで大容量の電力供給が期待できるイットリウム(Y)に代表されるレアアース系酸化物高温超電導線材(以下「Y系超電導線材」という)を用い、次世代電力機器として第3期科学技術基本計画のエネルギー分野の重点科学技術「送電技術」、「電力系統制御技術」、「電力貯蔵技術」に位置付けられ、さらに、超電導技術分野の技術マップ(平成19年4月制定)のエネルギー・電力分野機器開発にも位置づけられている、①超電導電力貯蔵システム(SMES)、②超電導電力ケーブル及び③超電導変圧器の実用化に目途をつけることを目的に研究開発を実施した。さらに、それら超電導電力機器に最も適応した④超電導電力機器用線材の研究開発、並びに超電導電力機器及び超電導線材の⑤超電導電力機器の適用技術標準化に向けた取組も併せ行った。</p>																		
<p>I. 事業の位置付け・必要性について</p>	<p>[事業の背景・目的・位置付け] 資源に乏しい我が国が、将来に亘り持続的発展を達成するため、革新的なエネルギー技術の開発、導入・普及によって、各国に先んじて次世代型のエネルギー利用社会の構築に取り組んでいくことを目的とした「エネルギーイノベーションプログラム」の一環として本研究開発を実施した。</p> <p>[NEDOが関与する意義] 米国を初めとして、アジア、欧州でも超電導電力機器を含む高温超電導技術の応用研究・開発にしのぎを削っており、我が国産業界も超電導技術のさらなる先導的研究開発を求めている。本事業は、幅広い産業分野にわたり潜在的ニーズを持っているが、ほとんど実用化の例がない高温超電導を扱う革新的な技術開発であり、その実用化には多くの技術課題を有するため、民間のみで事業を行うのは困難である。そのため、国及びNEDOが主体となり実施することが必要である。</p> <p>[実施の効果] 我が国は、経済活動の大半が大都市に集中しており、大都市での電力供給支障事故は日本全体の経済活動に大きな影響を及ぼすこととなる。また、大都市での電源立地が困難な状況において、益々遠距離化する電源立地点からの遠距離送電の安定性の確保も重要な課題である。 さらにCO₂排出量削減は各産業界共通の至上命令であり、電力機器も低炭素化社会の実現に貢献できる新技術を駆使した開発が必要である。 このような状況を踏まえ、2020年以降増大する大都市の地下ケーブルのリプレース需要や長距離・大容量送電に合わせ事故や災害に強く、電力需要の増大や新エネ導入による系統影響にも柔軟に対応できる超電導技術を活用した電力機器の開発により、大都市の電力供給信頼度を大幅に向上することができる。</p> <p>[超電導技術導入によるCO₂削減量] 単位: kt/年</p> <table border="1" data-bbox="443 1848 1398 1977"> <thead> <tr> <th></th> <th>2020年</th> <th>2025年</th> <th>2030年</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>超電導電力貯蔵システム(SMES)</td> <td>43</td> <td>—</td> <td>2126</td> </tr> <tr> <td>超電導電力ケーブル</td> <td>28</td> <td>58</td> <td>95</td> </tr> <tr> <td>超電導変圧器</td> <td>32</td> <td>99</td> <td>176</td> </tr> </tbody> </table> <p>出典:「高温超電導電力応用機器の市場調査研究報告書」(平成19年2月、ISTEC)</p>				2020年	2025年	2030年	超電導電力貯蔵システム(SMES)	43	—	2126	超電導電力ケーブル	28	58	95	超電導変圧器	32	99	176
	2020年	2025年	2030年																
超電導電力貯蔵システム(SMES)	43	—	2126																
超電導電力ケーブル	28	58	95																
超電導変圧器	32	99	176																

II. 研究開発マネジメントについて

事業の目標	① 超電導電力貯蔵システム(SMES)の研究開発 [中間目標]—2 GJ 級 SMES の開発を見通す高磁界かつコンパクトなコイル設計技術の開発並びにメンテナンスを容易とするコイルの伝導冷却技術開発を行う。 [最終目標]—2 GJ 級 SMES に必要となる Y 系超電導線材及びコイルの構造を評価し、高磁界コンパクト SMES コイルシステム化技術のための重要な要素技術開発に向けた課題を抽出し、解決策を提案する。
	② 超電導電力ケーブルの研究開発 [中間目標]—電力ケーブルの大電流・低交流損失ケーブル化技術、高電圧絶縁・低誘電体損失ケーブル化技術に関する要素技術の開発を完了する。 [最終目標]—ケーブル対応線材の安定作製技術開発及び 66 kV 大電流ケーブルシステム、275 kV 高電圧ケーブルシステムの課通電特性や送電損失等の実用性を検証し、各々のケーブルシステムの実用可能性を証明する。
	③ 超電導変圧器の研究開発 [中間目標]—超電導変圧器用の低損失化技術、限流機能付加技術及び冷却システム技術の開発を行うとともに、66 kV/6.9 kV-2 MVA 級変圧器の設計を完了する。 [最終目標]— 2 MVA 級超電導変圧器モデルを試作・試験・評価し、低損失（細線化しない線材に比べ交流損失 1/3 以下）、大電流（2 kA 級）、耐短絡強度等の特性を有する 66/6 kV 20 MVA 級超電導変圧器システムの成立性を検証する。
	④ 超電導電力機器用線材の技術開発 [中間目標]—電力機器応用の長期信頼性試験等を実施する実用化技術開発の際に必要な性能及び製造速度等を満足させる Y 系超電導線材作製技術の開発を実施する。 [最終目標]—開発対象機器([SMES][超電導電力ケーブル][超電導変圧器])の最終目標達成に向けそれぞれの項目に目標値を設定し対応する同線材の線材長及び臨界電流等の再現性確認による安定製造技術開発を行う。さらに、2020 年頃を想定した超電導電力機器の導入・普及の際のコストを含めた必要条件に耐え得る線材の作製技術を開発する。
	⑤ 超電導電力機器の適用技術標準化 [中間目標]—超電導電力機器の早期市場導入や実用化を円滑に進めるために共通基盤となる標準化を進める。 [最終目標]—超電導線材及びその試験方法並びに超電導電力ケーブル及びその試験方法について、国際標準化に資する規格素案を作成する。また、Y 系超電導線材等を適用した変圧器等の機器及びこれらの試験方法の規格素案を作成する。

事業の計画内容 (単位：百万円)	主な実施事項	H20fy	H21fy	H22fy	H23fy	H24fy	総額
	超電導電力貯蔵システム(SMES)の研究開発	484	502	506	75	79	1,646
	超電導電力ケーブルの研究開発	542	693	585	938	1,154	3,912
	超電導変圧器の研究開発	584	598	657	778	773	3,389
	超電導機器用線材の技術開発	1,147	1,137	1,214	622	899	5,019
	超電導電力機器の適用技術標準化	18	15	20	19	25	96
開発予算 (会計・勘定別に事業費の実績額を記載) (単位：百万円)	会計・勘定	H20fy	H21fy	H22fy	H23fy	H24fy	総額
	一般会計						
	特別会計 (電源・需給の別 (電多・高度化・石油の別))	2,760	2,775	2,772	2,375	2,414	13,095
	加速予算 (成果普及費を含む)	15	169	210	56	517	967
	総予算額	2,775	2,944	2,982	2,431	2,931	14,062

開発体制	経産省担当原課	資源エネルギー庁 電力基盤整備課
	プロジェクトリーダー	塩原 融 (公財) 国際超電導産業技術研究センター 理事 超電導工学研究所 所長
	サブプロジェクトリーダー	長屋 重夫 中部電力(株) 技術開発本部 電力技術研究所 研究主査 林 秀美 九州電力(株) 技術本部 総合研究所 電力貯蔵技術グループ長 藤原 昇 (財) 国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所 電力機器研究開発部長 (平成 20 年 6 月～平成 22 年 6 月) 大熊 武 (公財) 国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所 電力機器研究開発部長 (平成 22 年 7 月～) 和泉 輝郎 (公財) 国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所 線材研究開発部長
	委託先	(公財) 国際超電導産業技術研究センター(ISTEC)、中部電力(株)、九州電力(株)、住友電気工業(株)、古河電気工業(株)、(株)フジクラ、昭和電線ケーブルシステム(株)、大陽日酸(株)、(株)前川製作所、(一財) ファインセラミックスセンター(JFCC)、富士電機(株) (平成 23 年 4 月～)
情勢変化への対応	<p>我が国における超電導技術の研究開発は、本プロジェクト以外では、Bi 系線材を用い、ケーブル単体ではなく冷却技術等も統合し、実系統に連携して総合的な信頼性を実証する「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」、Y 系超電導線材を用い、超軽量高性能モータ等を実現するため超長尺線材の実現、並びに希少金属の希土類元素使用低減を図る「希少金属代替材料開発プロジェクト」、高温超電導線材を用い、直流応用に特化した「超伝導システムによる先進エネルギー・エレクトロニクス産業の創出」S-イノベプロジェクト、鉄系超電導物質を中心とした新物質探索、それら新材料を対象に線材開発、機器応用を目指す「新超電導及び関連機能物質の探索と産業用超電導線材の応用」等が実施され、情報交換等を実施し効果的に開発を進めた。</p> <p>海外における研究開発動向に関しては、米国では、エネルギー省の補助のもと 3 つの超電導限流器プログラムと 2 つの超電導ケーブルプログラムが実施された。また、2012 年度より ARPA-E プロジェクトの中で、Y 系超電導線材を用いた 3.4 MJ@4.2 K & 30 T の SMES の開発が 3 年計画で開始した。さらに限流機能を持つ超電導変圧器開発プログラムも推進されている。この他ニューヨーク市内に超電導ケーブルを設置するプロジェクト、米国三大電力ネットワークを Y 系直流超電導ケーブルで接続する計画等が進行している。欧州では、EU のフレームワークプログラムのもと、Y 系超電導電力ケーブルの試作・機能検証プロジェクトが実施されるとともに、Y 系超電導限流器プロジェクトも行われている。米欧以外では、中国、韓国、ニュージーランド等の研究開発が活発で、特に韓国では Y 系超電導線材を使用した超電導 SMES の開発が進行し、超電導ケーブル、超電導限流器の開発・実証計画が進められている。</p> <p>Y 系超電導線材の開発に関しては、欧米では米国 SuperPower 社、AMSC 社、ロスアラモス研、オークリッジ研、ドイツ テーバ社、EHTS 社を中心に、IBAD-PLD、IBAD-MOCVD 法、RABiTS-MOD IBAD-RCE 法等による高性能線材の作製報告がなされており、さらに近年では韓国の伸長が著しく、日米欧韓で熾烈な開発競争が行なわれていた。</p> <p>その他の情勢変化としては、2050 年までに温室効果ガスを半減させる Cool Earth 50 を受け Cool Earth-エネルギー革新技術「21」がとりまとめられ、21 の重点的エネルギー革新技術に「超電導高効率送電」が選ばれた。</p> <p>我が国が、長期に亘り技術イノベーションにより競争力を維持・向上させるため、平成 22 年 6 月経済産業省より「産業構造ビジョン 2010 骨子」が制定・発表された。その中で、「高温超電導」は特に有望な 10 の先端分野の 1 つとして捉え、積極的に支援していくことが提言された。</p> <p>2010 年 9 月 1 日に開催された中間評価分科会において、評価委員の「問題点・改善すべき指摘点」につき反映すべき点は基本計画および実施計画書、PJ 推進に反映した。</p> <p>2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災の影響により、設備の故障等や夏季節電対策に伴う業務の停止等、本プロジェクトにおける工程遅れに対する対策を実施し、計画どおり最終目標を達成できた。</p> <p>プロジェクトとしての対応として、実施計画、外部有識者を委員に加えた推進委員会等を通じ、情報共有や水平展開を行い、予算の効率的運用、計画の効率的組み替え等を行った。具体的な対応は、以下のとおりである。</p>	

<p style="text-align: center;">情勢変化への 対応</p>	<p>(1) 低交流損失化に資する長尺細線フィラメント線材の評価のため、多層導体構造の内部欠陥評価も可能な SQUID センサー開発を推進し線材加工技術開発を促進した。</p> <p>(2) ケーブル開発用 Y 系超電導線材の製造能力のさらなる向上のため、超電導薄膜を形成する高品質・高出力エキシマレーザ発振装置を導入し、さらなる特性向上、歩留り向上、成膜速度の高速化を図った。</p> <p>(3) SMES 用線材への IBAD-MgO 基板及び IBAD-PLD 線材の適用で、SMES 開発の高効率化を図った。</p> <p>(4) Y 系超電導線材を用いた 4 巻線構造の小型超電導変圧器モデルでの特性検証、限流応答特性解明、限流効果による巻線保護の確認に世界で初めて成功したことを受け、数百 kVA 級限流機能付加変圧器の試作を前倒し、2MVA 級変圧器モデル開発を効率的に進めた。</p> <p>(5) SMES 用コイルの開発を進める中、コイル通電特性が変化する現象が見いだされた。SMES の実用化のためには、この現象が発生する原因究明が必須であるため、当初計画の 2 MJ 級評価用試験コイルモデルを用いた 2 万回以上の繰返し充放電による特性検証を取り止め、コイル構造の再検討・評価を最優先に行うこととした。</p> <p>(6) 超電導ケーブルの交流損失の低減方策の一つとして、線材の臨界電流を高めて負荷率を低減することの有効性が知られている。平成 20~23 年度までの超電導機器用線材の技術開発における成果により、高臨界電流を有する線材が開発されてきたことから、高J_c-IBAD-PLD 線材を超電導ケーブルに適用した際の交流損失特性を評価することで、交流損失の目標値となっている 2 W/m-相を下回る低交流損失ケーブルの交流損失到達度を検証した。</p> <p>(7) 震災等に伴う結晶粒配向金属基板調達遅延の影響抑制のため、投入量を当初予定より増やすとともに、線材製造工程を検討して良品の選別を実施し効率化を図った。その結果、J_c 15~20 kA/cm² 以上の線材の製造量は、1 cm 幅換算で平成 23 年度が 1.8 km、平成 24 年度が 1.6 km であり、平成 24 年 7 月末までに 66 kV 大電流ケーブルシステム検証のために必要な線材の作製と提供を完了した。</p> <p>(8) ケーブル冷却システムの適用法規変更に伴い、冷却システム室内に設置されている既存設備の配管交換に加え端末容器への冷却配管を新規に製作する必要が生じ、これに対応した。</p> <p>(9) 震災等の影響に伴うケーブル用線材提供遅延抑制のため、線材開発研究を一時中断し、節電等の制約のなか、処理能力が不足していた基板・中間層・MOD 超電導層の成膜工程及び線材評価について一部バックアップして対応した。さらに下工程を加速するために線材細線化加工を一部フォローすることで、当初想定していた遅延を最小限に抑制し、震災前に計画したケーブルに関する実施内容を達成した。</p> <p>(10) 中間評価を踏まえた超電導ケーブルの研究開発の対応として、高電圧ケーブルのみに計画されていた中間接続部技術の開発を大電流ケーブルにおいても実施し、劣化が無いことを確認した。また、長期課通電試験にて約 30 年相当の加速劣化を模擬した電圧を課電することで絶縁設計の健全性を評価した。さらに海外電力貿易を視野に入れ 275 kV 高電圧ケーブルの検証試験は、中国にて実施し、高電圧ケーブル試験を海外に向けて広く発信した。</p> <p>(11) 中間評価を踏まえた超電導変圧器の研究開発の対応として、超電導変圧器のメリットをさらに詳しく説明するとともに、高信頼性確保に向けた今後の課題を再度整理した。</p> <p>(12) 震災の影響により、超電導電力機器用線材の技術開発を一部先送りし、機器開発への線材提供を実施した。これに伴い、線材開発実施内容の一部を次年度に先送りした。</p> <p>(13) 震災に伴う線材提供の遅延発生の可能性のため、「希少金属代替材料開発プロジェクト」で導入した線材作製装置及び評価設備の一部を本プロジェクトへ供用換えし設備増強することで、開発の遅延回復に努めた。</p> <p>(14) 中間評価を踏まえた超電導電力機器用線材の技術開発の対応として、低コスト化の目標値を超電導機器の実用化促進が見込める値として、「3 円/Am 未満の実証」から「2 円/Am の実証」と変更した。また、機器開発との連携を強化した。さらに、剥離の原因究明と解決方法の開発を行った。量産化・歩留り改善の観点から、H24 年度の追加予算で、供試する線材数 (N 数) を増大させ、量産化・歩留り改善研究開発の精度を上げるとともに促進を図った。</p> <p>(15) 中間評価における「国際的な情勢や技術動向の変化に合わせた目標の修正・課題の絞り込みを行う柔軟な対応が必要である」との指摘への対応として、H24 年度調査事業「高温超電導電力機器の適用拡大と標準化に資するケーススタディ」を実施し、海外情勢も含めた調査により、高温超電導電力機器の実用化に向けた課題と目標を明確にした。</p>	
	事前評価	H20年度実施 担当部 新エネルギー技術開発部
	中間評価	H22年度実施 担当部 エネルギー対策推進部
	事後評価	H25年度実施 担当部 省エネルギー部

Ⅲ. 研究開発成果
について

- ① 超電導電力貯蔵システム(SMES)の研究開発
- (1) 2 GJ 級高磁界・大電流コンパクトコイル構成技術開発では、φ650 mm 級の 4 束導体コイルを作製し、3.5 T 級大口径マグネット中で繰り返しフープ応力試験を実施することで、目標を達成した。
- (2) 高効率コイル伝導冷却技術開発では、模擬発熱体を用いてコイル発熱量 (3 W/m²) の 7 倍 (21 W/m²) の発熱量に対し冷却システムが成立することを実証した。絶縁性能においては 2 kV の 3 倍 (6 kV) の電圧に対し設計は完了しており、性能を確認した。φ650 mm 級コイルにおいて伝導冷却と電気絶縁性能を検証し、目標を達成した。
- (3) SMES 対応線材安定製造技術開発では、中間層の欠陥抑制、基板平滑化および原料供給系の温度適正化によって、線材の歩留りが向上し、線材作製技術の安定化を達成した。モデルコイル用の線材作製を行い供給目標・安定製造を達成した。
- (3) 高磁界コンパクト SMES システムモデル検証では、具体的支持構造検討により 2 GJ 級 SMES コイル基本システムの最適化を検討し、評価用試験モデルの内、伝導冷却試験システムの設計・製作を実施した。クエンチ検出・コイル保護方法の検証等の試験計画立案に必要なコイル特性を取得した。
- (3) 高信頼性・高耐久性 SMES コイル要素技術開発では、高強度で電磁応力や熱応力に優れた耐性を有するコイル構造 (Yoroi-coil) を開発し、剥離やフープ応力耐性に対する課題解決が図られた。さらに伝導冷却適用性の検証やクエンチ検出技術評価によって、実使用に必要な要素技術を開発した。
- ② 超電導電力ケーブルの研究開発
- (1) 大電流・低交流損失ケーブル化技術の開発では、構造設計を「超電導導体 4 層、超電導シールド 2 層」とし、導体最外層のみに 2 mm 幅線材を、その他の層には 4 mm 幅線材を用いた Hybrid 構造のケーブルコアにより ケーブル損失を 1.5 W/m・相 (@71 K, 5 kA) まで低減した。また、機器用線材の技術開発成果で得られた高 I_c の IBAD-PLD 線材を用いて 10 m 級ケーブル検証システムを作製し、高 I_c 線材の使用により負荷率を低減させることで 0.95 W/m・相 (@67 K, 5 kA) を達成した。さらにモデルケーブルにより短絡試験、機械的特性試験で性能低下や異常無きことを確認した。
- (2) 高電圧絶縁・低誘電損失ケーブル化技術の開発では、3mm 幅線材を用いた導体により損失を 0.124 W/m・相 (@73.7 K, 3 kA) を達成し、シールド層の損失および誘電体損失とあわせて目標の 0.8 W/m・相以下を達成した。超電導・超電導接続部は数 nΩ の低抵抗を実現し、中間接続部モデルの課電試験において導体、接続部で異常無きことを確認した。
- (3) 超電導電力ケーブルの熱収支に関する評価研究では、定常運転時の伝熱特性、温度特性を解析し、設計にフィードバックするとともに、スラッシュ窒素の生成・搬送試験装置を作製し、冷却特性の評価・検討を行い、スラッシュ窒素冷却の有用性を検証した。
- (4) ケーブル対応線材安定製造技術開発では、低磁性クラッドタイプの結晶粒配向基板・PLD 線材作製技術開発を実施し $J_c = 17 \text{ kA/cm}^2$ の特性を有する線材を作製・実証した。
- (5) 66 kV 大電流ケーブルシステム検証ではシステム設計を完了。課通電試験計画案を作成し、これまでの要素技術開発の成果を適用して 15 m 長ケーブルシステムを製造し、課通電試験等を実施することによって試験計画書の性能を満足することを検証した。
- (6) 275 kV 高電圧ケーブルシステム検証では、275 kV・3 kA の試験条件の選定、長期課通電試験の計画書を作成し、これまでの要素技術開発成果を適用して中間接続部を有する 30 m 長ケーブルシステムを製造し、課通電試験等を実施することによって試験計画書の性能を満足することを検証した。

III. 研究開発成果
について

③ 超電導変圧器の研究開発

- (1)超電導変圧器巻線技術開発では、最適転位長、保護銅層付加多層巻線の過電流特性を確認し、12層2並列導体の転位均流巻線モデルにより転位法の最適化等を確認した。400kVA短絡変圧器モデルを試作し短絡試験を実施した。2kA級の通電特性と巻線劣化や異常が無いことを検証し、中間目標を達成した。2kA級大電流巻線モデルを設計、製作し、電流分流率が±10%以内で2kA通電を確認した。また、100m級3分割線材を用いた低損失巻線モデルにて、交流損失が1/3(対細線化しない線材)となることを確認し、最終目標を達成した。
- (2)冷却システム技術開発では、小型膨張タービンで72%の断熱効率を達成した。小型ターボ式圧縮機でも断熱効率70%を達成し、中間目標を達成した。膨張タービンとターボ圧縮機を組み合わせたネオン冷凍機を試作し、冷凍能力2.17kW@65K、COP0.06@80Kを確認し、最終目標を達成した。
- (3)限流機能付加技術開発では、短絡電流の数十分の一の限流動作確認や短絡電流応答の数値解析プログラムと実験値との比較検討等を実施した。さらに400kVA級限流機能付加単相変圧器モデル設計、試作を行い、中間目標を達成した。400kVA級限流機能付加単相変圧器モデルの限流特性試験を実施し、0.25sec後に短絡電流を定格電流の3倍以下に抑制できることを確認し、最終目標を達成した。
- (4)超電導変圧器対応線材開発では、5mm幅3分割のレーザスクライビング細線溝加工技術を開発し、 $I_c=50\text{ A}@65\text{ K}$ 、0.01T、100m以上の線材安定製造技術を確立し、中間目標を達成した。切断及びスクライビング細線溝加工前後の線材の超電導特性評価及び安定製造技術開発へのフィードバックにより線材特性の均一性を向上させ、2MVA級超電導変圧器モデルや大電流巻線モデル等に線材を供し、最終目標を達成した。
- (5)2MVA級超電導変圧器モデル検証では、66kV/6.9kV-2MVA級超電導変圧器モデルの設計及び冷却システムの開発を実施した。66kV/6.9kV-20MVA級配電用変圧器実機の設計を実施し、中間目標を達成した。66kV/6.9kV-2MVA級超電導変圧器モデルを試作し、冷却システムと組み合わせて課通電試験を行い、試験計画書の性能を満足することを確認した。これらの成果を踏まえ66kV/6.9kV-20MVA級配電用変圧器の設計を行い、最終目標を達成した。

④ 超電導電力機器用線材の技術開発

- (1)線材特性の把握では、電力ケーブルにおける線材の耐久性を評価し、電力ケーブル耐久試験適正条件を決定し、変圧器対応として分割加工線材の耐久性を評価するとともに剥離現象の機構解明及び強化手法を確立し最終目標を達成した。
- (2)磁場中高 I_c 線材作製技術では、(a)50A/cm-w@77K、3T-200mの最終目標はPLD線材で達成(54A/cm-w@77K、3T-200m)し、(b)400A/cm-w@65K、0.1T-100mの最終目標は、PLD(770A/cm-w@77K、0.1T-158m)、MOD(524A/cm-w@65K、0.1T-100m)両線材ともに達成した。
- (3)低損失線材作製技術では、(a)2~4mm幅-500A/cm-w-200mの最終目標に対し、PLD線材で達成(2mm-w- $I_c \geq 540\text{ A/cm-w}$ -200m)し、(b)5mm幅-10分割-100m-無分割に対し損失1/10の最終目標では、PLD、MOD線材ともに達成した。
- (4)高強度・高 J_c 線材作製技術では、(a)500A/cm-w-1GPa-200m及び(b) $J_c=50\text{ kA/cm}^2$ -200mの最終目標に対し、PLD線材で達成(500A/cm-w-1GPa-250m及び $J_c=52\text{ kA/cm}^2$ -200m)した。
- (5)低コスト・歩留向上技術では、2円/Amの最終目標は、PLD、MOD両線材ともに達成した。また、(b)中間目標の安定製造技術開発における最終目標は、全線材メーカーで達成した。

⑤ 超電導電力機器の適用技術標準化

- (1)超電導線関連技術標準化では、超電導線材の通則に関する規格素案の作成、Y系超電導線材の臨界電流測定に関する規格素案を作成、線材の短尺臨界電流測定方法に関する国内ラウンドロビンテストを行い、さらに国際標準化合意の醸成に努めることで、目標を達成した。
- (2)超電導電力ケーブル関連技術標準化では、超電導線材を適用した超電導電力ケーブル並びにその試験方法に関する規格素案を作成し、国際標準化合意の醸成に努めることで、目標を達成した。
- (3)超電導電力機器関連技術標準化等では、技術動向並びに標準化ニーズ調査を実施し、Y系を含む超電導線材等を適用した超電導変圧器、SMESの機器仕様並びにこれらの試験方法の標準化素案を作成し、国際合意醸成活動を行った。さらに、規制緩和に向けた提案資料を作成することで、目標を達成した。

投稿論文

[査読付き] 165件、[その他] 30件、[プレス等] 57件

	特許（国内/海外）	[出願済] 101/19 件、[登録済] 5/0 件、[実施] 0 件
<p>IV. 実用化・事業化の見通しについて</p>	<p>本プロジェクトにより開発されるSMESは、電力分野においてコスト面で成立する初の実用超電導機器となると考えられ、超電導技術の広範な産業応用に大きく貢献が期待される。また、系統制御技術としての要求よりは、小規模で済む産業応用への波及分野として、電気エネルギーに高い品質と信頼性を要求するハイテク産業における瞬低対策技術として、広汎な普及が期待されている。</p> <p>CO₂削減対策のひとつとして、送電ロスが殆どない超電導高効率送電が挙げられる。電力の送電ロスは現在の技術をもっても 5%前後で推移しており、送電ロスをさらに低減できるような有効な対策がないのが現状である。この送電ロスを抜本的に削減するような超電導電力ケーブル技術開発が強く求められている。超電導電力ケーブルは、現用電力ケーブルと比較して低損失で、導体部分のエネルギー密度が非常に高く、冷却に必要なスペースを考慮してもケーブル收容断面積を小さくすることが可能となる。つまり従来の電力ケーブルは、都市部において洞道と呼ばれる直径約 2~3 m のトンネルに布設されているが、これが超電導電力ケーブルに置換わると、管路と呼ばれる地中埋設された内径 150 mm の管に布設することができ、既設設備の有効利用により、コンパクトで大容量化ケーブルの設置が可能となる。</p> <p>一方、既設の電力ケーブルのうち、OF(Oil Filled)ケーブルや POF(Pipe-type Oil Filled)ケーブルは布設後約 40 年が経過しているものも多く、老朽化に伴う漏油の問題が生じており、地中化率の年々の増加とともに順次取替が必要となってきた。将来に亘り現用ケーブルによる新たな送電設備を地下に設けるには莫大なコストと地下埋設のスペースが必要となる。さらには、電力需要の増加、高信頼度の系統構成の構築により、火力発電所の増強等のリプレースによる熱効率の向上や稼働率の向上に伴って、電力流通設備の新増設や超高压送電線の冷却設備の建設等の電力流通設備に対する増容量対策が必然となってきた。このような状況の中、超電導電力ケーブル技術は、上記のすべての課題を解決できる唯一の革新技術であり、次世代の電力送電網の構築においても重要な技術と位置づけられ実用化が期待されている。</p> <p>Y系超電導線材を変圧器に適用すると、大幅な小型・軽量化が図れるとともに、冷媒は液体窒素であるため不燃となる。これらの特長から、超電導変圧器は、都心部を主とした変電所やビル等での新増設に有利であり、特に、地下式変電所では、火災予防、コンパクト、環境性等のニーズが高く早期実用化が期待されている。さらには、限流機能を付加することにより、電力システムのループ運用や再生可能エネルギー等の分散電源の大量導入に伴う限流器運用に加え、超電導ケーブル適用時の送電容量と短絡容量対策に貢献でき高効率な電力供給システムとなり、米国ではスマートグリッド等への適用も考えられている。</p> <p>電力用超電導変圧器の国内市場に関する見通しは、東日本大震災の発生により本プロジェクト開始時点に比べ不透明な状況ではあるが、産業用を加えた変圧器全体でみると、今回の開発対象である 20 MVA 級相当で年間約 500 台、300 億円程度の生産実績があり、油入変圧器から超電導変圧器へと移行すれば相当の市場規模が見込まれる。</p> <p>Y系超電導線材の技術開発では、我が国は世界最高水準の成果を挙げている。既に実用化・事業化のための足がかりとしてY系超電導線材の販売も開始し、Y系超電導線材の電力機器以外の産業機器応用を検討している研究機関等へ提供している。今後、更なる特性改善、超電導原料の作製コスト削減、歩留り向上等によりコスト低減にも注力し、より安価で高性能な超電導線材の供給ができるよう努力を継続していくとともに、事業規模のさらなる拡大を目指している。</p>	

V. 基本計画に関する事項	策定期期	平成 20 年 3 月 制定
	変更履歴	<p>平成 20 年 7 月 イノベーションプログラム基本計画の制定により、「(1) 研究開発の目的」の記載を改訂。</p> <p>平成 21 年 3 月 P L、サブ P L の氏名を追記して改訂。</p> <p>平成 22 年 3 月 2 事業（高温超電導ケーブル実証プロジェクト、イットリウム系超電導電力機器技術開発）を統合して「超電導技術研究開発」として新たに制定。</p> <p>平成 23 年 1 月 平成 23 年度より、研究開発項目①「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」の共同研究事業（NEDO 負担率 2 / 3）への変更及び加速による研究内容を追加する変更。また、研究開発項目②「イットリウム系超電導電力機器技術開発」について、中間評価を踏まえ開発項目（イ）の内容縮小並びに開発項目（ロ）の実施内容追加、開発項目（二）の追加による改訂。</p> <p>平成 23 年 7 月 根拠法を変更。</p> <p>平成 24 年 3 月 研究開発項目①「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」の実施期間を延長。</p>

プロジェクト用語集

[あ]

圧縮機サージ

圧縮機と配管からなる系を流れる気体全体が、流れの方向に激しく振動する現象で、激しい場合、気体が圧縮機出口から入口に向かって逆流する。流量を絞ったとき、直接的な加振力を作用しなくともひとりでに流量や圧力が周期的に大きく変動する現象。

安定化材 (層)

超電導体に複合化されて超電導体の安全性を増加させる常電導金属材料。銀、銅やアルミニウムなどは極低温で電気抵抗が低く、熱伝導が良いために、超電導体を良く冷却して臨界温度以下に保つとともに外部磁束変動をダンピングし、超電導から常電導への転移を抑える。また、転移したときでも電流をバイパスして発熱を抑え、冷媒に熱を伝達して、冷却するので安定化材として用いられる。

[い]

イオンビーム

IBAD 法において中間層を配向させるために、中間層元素をスパッタ蒸着する際に、Ar 等をイオン化しアシストイオンビームとして材料に応じたある特定の角度から同時に照射する。

イットリウム

元素記号 Y、原子番号 39 の希土類元素のひとつ。常温、常圧で安定な結晶構造は六方最密充填構造 (HCP)、密度 4.472 kg/cm³、融点 1520 °C、沸点 3300 °C。YBa₂Cu₃O_{7-δ} (YBCO)超電導体の構成元素のひとつ。

イットリウム系線材 (Y 系線材)

YBa₂Cu₃O_{7-δ} (YBCO)あるいは Y のサイトを他の希土類元素 (RE) で置換した REBa₂Cu₃O_{7-δ} (RE:希土類元素)の超電導材料で作られた線材。一般的に、金属テープ上に成膜されており、超電導部分は薄膜形状であることから薄膜線材、また第 2 世代線材とも呼ばれている。

インピーダンス

直流におけるオームの法則の電気抵抗の概念を複素数に拡張し、交流に適用したもの。複素数であるインピーダンスにおいて、その実部をレジスタンス(resistance)または抵抗成分、虚部をリアクタンス(reactance)と呼ぶ。

[う]

渦電流損失

電磁誘導により発生する渦電流によって生じるジュール損失。

[え]

エキシマレーザ

希ガスやハロゲンなどの混合ガスを用いてレーザ光を発生させる装置。希ガスはアルゴン、クリプトン、キセノンが、ハロゲンはフッ素、塩素が一般に使用される。混合ガス中でのパルス放電によって生成する励起状態希ガス原子とハロゲン原子によって形成されるエキシマからの放射光によってパルス発振する。

液体窒素

冷却された窒素の液体で無色透明。密度：0.81 g/cm³ 沸点：-195.79℃ (77.3 K)、蒸発潜熱：47 kcal/kg。液化空気に分留により工業的に大量に製造される。LN₂とも記述される。

液体ヘリウム

ヘリウムは標準沸点が 4.21 K と最も液化しにくい気体であるため液体ヘリウムとして極低温冷媒として用いられる。液体ヘリウムは高価であるが、臨界温度の低い従来の金属系超電導体の冷媒として用いられる。

エッチング(化学エッチング)

金属表面に対する浸食作用によって金属をその表面から除去する処理技術。化学エッチングは化学溶解作用の利用で、金属を表面から浸食除去する方法。

エピタキシ

ある結晶の特定の面の上に他種の結晶の特定の面が見かけ上くっついて重なり合って成長する現象。同形の結晶の場合には結晶軸を同じくする方向に成長するのが普通。

[お]

応力-歪み効果

超電導線を巻いて超電導マグネットを作製する場合、超電導体には、巻線、冷却、運転の各過程で応力・ひずみが印加される。巻線時には巻テンションによる引張応力、コイル状に曲げることで生じる曲げひずみ、冷却時には安定化材、巻枠、コイル構成材と超電導体との熱収縮率の違いによって生じる引張・圧縮応力(ひずみ)、コイル運転時には電磁力によるフープ(引張)応力などが印加される。これらの応力・ひずみを受けた超電導体はその大きさに応じて変形し、超電導特性が変化する。

オーバーオール電流密度 (J_c)

多層構造を持つ Y 系線材において、基板・中間層などを含む全線材断面積で臨界電流値を割ることにより規格化した臨界電流密度であり、実用機器設計に際して重要である。

[か]

開閉サージ

電源、開閉器、ケーブル及び架空線が種々組み合わさった線路に電源、負荷の開閉によって発生し進行する異常電圧または電流。

化学蒸着法 (MOCVD 法)

原料となる物質をガス状態で供給し、これを固体表面で反応させることにより少なくとも 1 種類の固体反応性生物を獲る手法をいう。原料ガスには生成物元素を含むガス(複数のことがある)とキャリアガス(用いられないこともある)の混合ガスが使用される。 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 超電導体の合成の際には、有機金属を原料ガスとして用いる、MOCVD(Metal Organic Chemical Vapor Deposition)法が多く用いられる。

過負荷試験(系統)

系統の事故などで事故線以外の線路に一時的に過負荷送電を行う必要がある。この時、限流素子温度が短時間許容温度に到達するまでの時間以内に所定の過負荷電流を流すことができるかを確認する試験。

過冷却

沸点と凝固点の間の液体の状態を指す。液体窒素では大気圧下で 77 K から 63 K の間となる。

[き]

希少金属

非鉄金属全体を呼ぶ場合もあるが、狭義では、鉄、銅、亜鉛、アルミニウム等のベースメタル(コモンメタルやメジャーメタルとも呼ばれる)に対し、金、銀などの貴金属以外で、産業に利

用されている非鉄金属を指し、レアメタルとも呼ばれる。経済産業省では現在、将来に渡り工業用需要がある 30 鉱種(リチウム、ベリリウム、ホウ素、チタン、バナジウム、クロム、マンガ、ン、コバルト、ニッケル、ガリウム、ゲルマニウム、セレン、ルビジウム、ストロンチウム、ジルコニウム、ニオブ、モリブデン、パラジウム、インジウム、アンチモン、テルル、セシウム、バリウム、ハフニウム、タンタル、タングステン、レニウム、白金、タリウム、ビスマス)に、レアアース(Rare Earth; RE、生産が特定少数国に偏っていたり、埋蔵量が少なかったりする金属で、17 鉱種をまとめて 1 鉱種と数える)を加えた 31 種類を希少金属と定義している。

き電

線路上を走行する鉄道用車両に必要な電力を供給することで、直流き電方式と交流き電方式がある、語源上は動くものに餌を与えるということ。車両への電力は、電気鉄道用に設けられた変電所から供給される。変電所は電力会社の送電線から受電し、き電形式に適した電力に変換する。饋電。

希土類元素 (RE: Rare-earth element)

ランタン(La)からルテチウム(Lu)までの一連の元素はいずれも 3 価が主な原子価で性質が類似している。これらの元素をランタノイドと総称し、周期表では、ランタンと同じ位置に全部いれている。希土類として元素を分類したときは、ランタノイドとスカンジウム(Sc)とイットリウム(Y)を含めている。(近角聡信等、「最新元素知識」より)ランタノイド類の中で、Gd よりも元素重量が軽い元素を軽希土類元素(LRE: light rare-earth elements)と呼び、通常、(LRE)Ba₂Cu₃O_{7-δ}系材料とした際に超電導体となる、La, Nd, Sm, Eu, Gd を指す。これらの元素を用いた場合には、(LRE)と Ba が置換した固溶体を形成しやすく、超電導特性が変化する。

【く】

クエンチ

通電中の超電導体において熱的、電磁氣的または機械的擾乱によって生じる急激かつ制御不能な常電導転移。

クリーブ

磁束は超電導状態でピン止めされ、電流を磁場中で流してもローレンツ力に抗してとまっているが、高温超電導体では液体窒素(77K)の高温では、熱活性により磁束が動く。これにより、電圧が発生する状態を言う。

【け】

結合損失

常電導物質及び常電導状態にある部分に結合電流が流れることによって発生するジュール損失。

結晶粒面内配向度

超電導層及び中間層等の結晶軸の揃い方の程度を示したものが配向度である。値が小さい方が配向性が優れていると言える。基板に垂直な方向(膜厚方向, c 軸方向)への配向が面外配向、基板の長手方向(a-b 面)の配向が面内配向である。YBa₂Cu₃O_{7-δ} の面外配向度($\Delta\omega$)は、(005)または(006)面の X 線回折ロックングカーブ測定の半値全幅で、面内配向度($\Delta\phi$)は、(103)面の X 線極点図測定を行い、その ϕ スキャンピークの半値全幅で評価する。

限流器

系統に流れる短絡電流を、電路に直列に抵抗やリアクトルなどを挿入して抑制するもので基本的に検出部、転流部(故障電流を系統から限流部へバイパスさせる)、限流部、遮断部(故障電流が遮断能力以内になった後電流を遮断する)、復帰部から構成される。また、超電導体のクエンチ現象(常時は抵抗零、クエンチ発生時は抵抗有)を利用するものも考えられている。

[こ]

高温超電導体

1986 年以降に発見された酸化物を中心とした超電導材料の総称。それ以前の超電導体の使用が液体ヘリウム温度で行われていたことに対して、高温超電導材料は液体窒素にて超電導特性を示すことから、相対的な意味で「高温」と名づけられた。

交流損失

超電導体、超電導導体、または超電導マグネットなどを変動磁界中に置いたときに発生する損失。超電導体のヒステリシス損失、導体の結合損失及び渦電流損失、構造材料の渦電流損失などを含む。

[さ]

サージ

電線路あるいは、電気所母線を進行する電圧または電流。過渡的な過電圧や過電流全般。

サージインピーダンス

雷サージや開閉サージなどの電流、電圧を関係づけるインピーダンス。系統のインダクタンス、静電容量をそれぞれ L,C とすると $\sqrt{L/C}$ で表される。

サブクール (Sub-cool)

液体がその沸点温度より低い状態にあること。例えば、大気圧の水の沸点は 100 °C であるが、これより低い温度にあること。ちなみに大気圧の液体窒素の沸点は-196 °C (77 K) で、融点(凝固点)は-210 °C (63 K)。サブクール液体窒素は 63 K~77 K の液体窒素のこと。

三心一括型

3つのケーブルコア(導体、絶縁体、シールド等からなる)が一つの断熱管の中に収納された超電導ケーブルの構造。

三相短絡

商用の電力系統における交流送電の形態は、電氣的に120度ずつ位相の異なる3相によって行われている。これら3相は適切な離隔距離を保って設置されているが、ごく稀に雷撃その他によって電氣的に接触する場合があります、これを短絡と呼んでいる。特に三相短絡とは3相すべてが短絡することである。

[し]

磁化損失

超電導線材に交流外部磁界を印加したときに生じる損失。

磁気光学磁束観察

磁気光学効果(ファラデー効果)を用いた磁束観察手法。試料の上にガーネット膜あるいはEuカルコゲナイド膜を密着させて、試料表面の磁束を映像化する。高磁場までリアルタイムにマクロな磁束の挙動を観察できる。

磁気ナイフ法 (Magnetic knife method)

高温超電導テープ線材の幅方向にわたり、高磁界～ゼロ磁界～高磁界と分布した線材面に垂直な磁界をかけて臨界電流を測定すると、ゼロ磁界の部分に電流が集中して流れ、この部分の臨界電流密度を強く反映した臨界電流が測定される。この測定を、ゼロ磁界の部分に線材幅方向にずらして繰り返し、得られた「臨界電流－線材幅方向のゼロ磁界の部分の位置」から数学的変換により、幅方向臨界電流密度分布を得る測定法。

自己配向

PLD法やスパッタ法などによりCeO₂、MgOなどの材料を適当な条件で成膜する事により、結晶粒が膜厚と共に大きくなるに連れて結晶粒配向性が向上していく現象。IBAD中間層上で広く用いられている。

終端接続部

ケーブルの端が気中リード線と接続できるように接続端子を備えた接続箱。ケーブルヘッド。CH。超電導分野での通称は、「端末」。ただし、「端末」はケーブルの切断面に施す防水キャップの意で使用されることもあるので注意が必要。

従来ケーブル

既に実用化されている電力ケーブル。CVケーブル、OFケーブル、POFケーブルなどがある。

ジュール損失

電気抵抗×(電流の2乗)であらわされる発熱量。

瞬停

電力系統における瞬断、即ち電源からの電力供給が短い時間(数マイクロ秒から数百マイクロ秒)絶たれてしまう電源障害現象をいい、完全には停電しないものも含めて「瞬時電圧低下」(瞬低)とも称される。

シールド

導体層に通電した際に発生する磁場を外部に漏らさないように、導体層と逆位相の電流を誘起させる層のこと。

シングルパンケーキ型コイル

線材を巻く場合にコイルの軸方向に転位させず、単純に巻き回されて製作されたコイル。コイル軸方向転位がなく、捻り歪みが負荷されないため、断面アスペクト比が大きいテープ状線材の巻線に適しているが、線材両端の電極がコイル内径側と外径側に形成される。

人工ピン (Artificial Pinning Center : APC)

単結晶も含めた全ての高温超電導体において、混合状態でも電気抵抗がゼロになるという事象はピン止めセンターとして作用する欠陥が存在することを示している。特に Y 系超電導薄膜では、膜中に自然に形成される欠陥(転位、結晶粒界、不純物等)がピン止めセンターとして高密度で存在することにより高い磁場中特性を実現している。人工ピンは、さらに優れた磁場特性を得るために Y 系超電導薄膜中に人工的な結晶欠陥を導入、制御することでピン止めセンターとして機能させる手法で、高温で有効な量子化磁束のピン止めセンターの増加に有効である。

浸漬冷却方式

液体ヘリウムなどの沸点にある液体冷媒に超電導体を直接浸して冷却する方法。コイルを周囲から冷却するため、温度を均一に保持しやすく、ポンプなどの特別な設備も必要としないため、構造が単純になるなどの特長がある。

侵入熱

超電導ケーブルの断熱管外部(室温部)から内部に侵入する熱。超電導ケーブルでは侵入熱を抑えるため、二重の SUS コルゲート管の間を真空引きし、伝熱を抑えるとともに、スーパーインシュレーションと呼ばれる熱絶縁体を巻き付けて、輻射に伴う侵入熱の低減を行なう。

[す]

スパッタリング (Sputtering)

原子あるいはイオンを固体(ターゲット)表面に衝突させた際に、その個体表面原子が外

部に放出される現象をいい、この放出された原子を対向する基板に堆積することにより薄膜を形成する。種々の材料を比較的容易に作製でき、回路素子構成等のための技術として工業的に積極的に利用されている。スパッタリングの手法として、マグネトロンスパッタリング、高周波(RF)スパッタリングなどがある。

スラッシュ窒素

液体窒素と微細な固体窒素が混在したゲル状の流体。固体窒素の融解潜熱は液体窒素の比熱の約 13 倍で液体窒素よりも低温かつ熱容量が大きい。

[せ]

線材の負荷率

超電導線材の臨界電流(I_c)と通電電流(I_t)の比(I_t/I_c)によって定義される値。交流通電時には、電流のピーク値(I_p)を用いて、 I_p/I_c で定義される。

[そ]

送電損失

電力ケーブルが電力を輸送する際に発生する損失。超電導ケーブルの場合、ケーブルの交流損失、絶縁体の誘電損失、断熱管の侵入熱などが上げられる。また、それらの損失は極低温で発生するが、それを冷却するための動力が必要。一般に、その損失を COP で割った値を送電損失としている。

送電容量

ケーブルが送電する電力(MVA)。三相交流の場合、相間電圧×電流× $\sqrt{3}$ で表される。

ソレノイド型

導線を同一軸に沿って均一に何回も細長く巻いたコイル。

[た] 対破壊電流

超電導電子対(クーパー対)が外場(電流、温度、磁場、不純物添加他)によって壊されて、常伝導の 2 つの電子になること。理論的な臨界電流値

ダブルパンケーキ(巻線)コイル

シングルパンケーキ型コイルを軸方向に 2 段積層したような形状をしているが、コイル最内層で軸方向に線材幅相当分転位させることで 1 本の線材での製作が可能なコイル。このため、コイルの内径側での接続が不要であり、線材両端の電極はともにコイル外径側(上段と下段に各 1 個)に形成することができる。

短絡事故

交流送電の3相の内、2相が導通して起こる電気事故。

短絡電流

電力系統の任意の地点において短絡事故が発生した場合に流れる事故電流。

短絡容量

電力系統の任意の地点において短絡事故が発生した場合に流れる電流を短絡電流といい、これにその地点の定格電圧を乗じた値を短絡容量と呼んでいる。短絡電流を遮断する遮断器などの定格は短絡容量によって決まるので、系統運用上は短絡容量の高精度の評価と適切な管理が必要である。発電機から生じる短絡電流は次過渡あるいは次々過渡リアクタンスによって決まるが、超電導発電機の場合これらリアクタンスの値を比較的自由に設定できるため、短絡容量の面からは設計の自由度が現用機に比べて高いといえる。

[て]

電磁力

アンペアが右ネジの法則に関連して電流の流れている二導線間に働く力について、両導線に流れる電流の積に比例し、両導線の間隔に反比例する力が働くことを発見した。両導線に流れる電流の向きが同方向のときは吸引力に反対方向のときは反発力になる。

伝導冷却

超電導コイルを冷却する際に、液体ヘリウムや液体窒素などの冷媒を用いず、冷凍機などで発生した寒冷を熱伝導で超電導コイルまで伝えることにより、冷却する方法。

電流密度

電気導体に電界が与えられたときに、単位面積に垂直な方向に単位時間に流れる電気量(電荷)のこと。

電流リード

電流を導入する役割をもつ導体(金属等)。電流を常温からクライオスタット内の超電導コイルや超電導ケーブル導体に導入する役割をもつ金属等から成る導体。低熱侵入性に優れた酸化物超電導体等から成る。

[と]

トリフルオロアセテート (TFA:Trifluoroacetate)

トリフルオロ酢酸(CH_3COOH)。酢酸と同様の構造で、炭素と直接結合している水素がフッ素に置き換わった化合物。溶液原料から超電導線材を作製する際に使用する。

トロイダル配置、トロイダル型コイル

トカマク形核融合炉のプラズマの封じ込めなどに用いられるコイルで、複数のコイルを円環状の磁場空間に垂直に、これを取り囲むようにドーナツ状に配置したコイル。円環状に磁場が閉じこめられて漏れ磁界が低減されるため、SMES 等にも適用が検討されている。

[な]

ナノ粒子

ナノサイズの微細粒の呼称。ナノ(nano-) 10^{-9} の意味の接頭語。記号は n。

ナノ・ロッド(Nano-rod)

c 軸に平行に生じる、半径が数 nm の円柱状の常電導化合物相で、強いピン止め作用があることが知られている。

[ね]

熱侵入

低温容器内に室温領域から熱伝導、熱輻射などで侵入してくる熱量。熱浸入とも表記する。

熱損失

超電導ケーブルシステムにおいて発生するジュール損や交流損失に伴う熱や侵入熱に伴う損失。これら損失に伴う熱により、冷媒の温度が上昇するため、必要な温度に冷却する必要がある。

熱暴走

超電導線または超電導コイルにおいて、通電時の損失などによる温度上昇により超電導特性が低下し、さらに発熱量が増加することにより温度上昇が緩やかに継続しコイルが常電導化すること。一般にクエンチよりも時定数が長い現象であるため、通電電流の制御により超電導状態に復帰させることが可能である。

[は]

配向金属基板

Ni に圧延強化加工を加えると塑性変形の際に一方向に延ばされた集合組織を形成する。特定の条件で再結晶化熱処理する事により、YBCO 超電導体の結晶格子と格子整合性が高い(100)を優先配向させた組織を作ることができる。

ハステロイ (Hastelloy™)

ニッケル合金の一種で、アメリカの Haynes Stellite Co. で製造している耐熱性ニッケル合金の商品名。組成は(54.5~66.5)Ni-(15~30)Mo-C-Fe(-Cr-W)系。高温において機械的強度が高く、しかも耐酸化性に富んでいる。

ハフニウム

周期表第 4 族に属し、チタン族元素の一つ。原子番号 72、元素記号 Hf。ジルコニウム鉱物中に Zr : Hf=60 : 1 程度の比率で含まれ、イオン交換法、溶媒抽出法などによって両者が分離される。酸化数+が化学的に安定で、原子半径 (1.6 Å)、イオン半径 (0.78 Å) はジルコニウム (Zr) とほとんど同じであり、Zr とほとんど同じ化合物を生成する。PLD 法で REBCO 系薄膜として成膜する際、Zr, Hf あるいは Sn を同時添加することで BaAO₃ (A=Zr, Hf, Sn)化合物が REBCO 結晶の c 軸に平行なナノロッド状に析出し、 J_c 向上に大きく寄与する。

[ひ]

ヒステリシス損失 (ピン止め損失)

交流損失のうち、低周波領域で 1 周期当たりの損失エネルギーが周波数に依存しない成分。ピン止め損失は磁束線の移動速度で変化しない。すなわち、低周波領域では磁束線の移動速度が遅いため、1 周期当たりの損失エネルギーが周波数に依存しない部分が損失の主体となる。このような条件では、静的な磁場-磁化のヒステリシス曲線の面積だけで損失が求まる。

ヒステリシス損失 (鉄損)

鉄心の磁区が交番磁界によって磁界の向きを変えるとききの損失。

比熱比

比熱比 κ とは定圧比熱 C_p と定容比熱 C_v の比。

ピン止め、ピン止め中心

外部磁界を全く侵入させない(マイスナー効果)超電導体は、第 1 種超電導体と呼ばれている。これに対して第 2 種超電導体では下部臨界磁場 H_{c1} を超えると一部量子化磁束が侵入した混合状態となる。この状態で外部から電流を流すと、量子化磁束はローレンツ力を受けて動こうとするが、超電導体内の格子欠陥、析出相(絶縁相、常伝導相)、不純物、転位、粒界等の不均質な部分に外部磁束が捕捉され動きが妨げられる。これをピン止めという。ローレンツ力よりピン止め力のほうが大きければ、磁束は動かないが、電流または磁場が増加して、ピン止め力よりローレンツ力のほうが大きくなれば、磁束が動き電圧が発生する(電気抵抗が生じる)。このローレンツ力とピン止め力が拮抗した限界の状態における単位面積当たりの電流値が臨界電流密度 J_c となる。

[ふ]

フォーマ

超電導線材を用いて超電導層を形成する際の芯材。主に銅線を寄り合わせることで構成

され、機械的な芯としての役割を担うとともに、短絡電流通過時のバイパス回路にもなる。

不可逆磁場 (B_{irr})

外部磁場の増加とともに臨界電流密度は低下するが、臨界電流密度がゼロとなる磁場のことを不可逆磁場 B_{irr} という。実用上は臨界磁場よりも不可逆磁場 B_{irr} の方が重要である。

フラックスフロー (フラックスジャンプ) 損失

高温超電導線内の磁束が電磁力により動くことにより生じる電磁的損失で高温超電導コイルの発熱の原因となる。

プルーム (アブレーションプラズマ)

ターゲット等の固体材料に強度のレーザーや粒子ビーム等を照射した際、材料を構成する元素が様々な形態(原子、分子、イオン、クラスタ等)で爆発的に放出され、表面上にプラズマが形成される。レーザーアブレーション法は、固体ターゲットに大出力のパルスレーザー(エキシマレーザー等)を照射することにより、プルームと呼ばれるアブレーションプラズマを生成させる方法であるが、このアブレーションプラズマ中に含まれる粒子は、再結合や雰囲気ガスとの衝突・反応などにより状態を変化させながら、対面に位置している基板へと移動する。この際に生じる発光をプルームという。基板に到達した粒子は、基板上を拡散し、安定なサイトに落ち着いて薄膜を形成する。

[へ]

ヘリウム (He)

分子量 2 の単原子分子。元素記号 He。極めて安定であり他の物質と化学反応を起こすことはない。沸点が 4.2 K とあらゆる物質中で最も低く、極低温冷凍機の動作ガスとして用いられる。天然ガス中から分離採取されるが日本は全量を米国から輸入している。

[ほ]

ホール素子法

線材の幅方向に 1 列に配置されたホール素子アレーによって、線材に侵入する磁場を測定し、その分布から臨界電流値を求めるものである。電極を用いた直接通電ではないので、非破壊測定が可能な点にメリットがある。これを応用したのが、Tapestar™ 装置 (THEVA 社商標) がある。

[ま]

巻線型限流器、巻線型素子

超電導を用いた限流器のうち、例えば整流器型のリアクトル部に用いられるような、主として発生するインダクタンスを利用するものに多いが、無誘導の抵抗型も考えられる。超電導線材をコイル巻線したものをを用いた限流器をいう。またコイル組立ユニットを素子という。

マルチプルーム

Reel-to-Reel を用いた PLD による成膜を行う際、レーザの発振周波数と光学系のミラーを同期させてスキャンすることで、見掛け上複数のプルームを線材長手方向及び幅方向に発生させる手法。PLD 法による成膜では、一般的にレーザ発振周波数が高い程単位時間あたりに基板表面に到達する粒子数が多くなるため製造速度は向上する。しかしながら、単位面積当たりの過飽和度が高くなるため結晶成長時において核生成頻度が高くなり、膜表面の粗れ、a 軸配向粒の増加、結晶面内及び面外配向度の低下等の要因となり膜の特性は劣化する。そのため、高いレーザ発振周波数を用いた高製造速度と、膜の高特性を両立させるためマルチプルームが用いられる。

[ゆ]

有効電力

瞬時電力のうちの平均的な流れの分のことである。電力の伝送という面からは電源と負荷との間でやりとりされる正味の分である。このため有効電力と呼ばれている。

誘電正接

→ $\tan\delta$

誘電損失

ケーブルの絶縁物(誘電体)に電圧をかけた際に発生する損失。

[ら]

雷インパルス耐電圧値 (LIWV)

雷撃に対して、避雷器を含まない線路が備える絶縁強度の標準値。避雷器の制限電圧はこれより低く設定され、これと組み合わせることで線路の絶縁協調が図られている。

雷撃

異常電圧を生じる送電線路への落雷。雷撃箇所、侵入経路、波形及び電流が、雷サージ解析の解析条件となる。

雷サージ

雷撃に起因して線路に発生し進行する、異常電圧または異常電流。

[り]

臨界温度(T_c)

温度上昇に伴い超電導状態(電気抵抗ゼロ)から常電導状態(電気抵抗を生じる)へと相転移する温度のこと。

臨界磁場(H_c)

第一種超電導体では超電導状態から常電導状態へ転移を起こすときの磁場のことを示す。また、第二種超電導体ではマイスナー状態から混合状態への転移を起こすときの下部臨界磁場(H_{c1})、混合状態から常電導状態へ転移を起こすときの上部臨界磁場(H_{c2})の総称のことを示す。

臨界電流密度(J_c)

単位断面積当たりの超電導体に抵抗ゼロで流すことのできる最大の電流値のこと。臨界温度、臨界磁場と並んで超電導の基本特性を示す3要素の一つで、実用上重要な値。通常 J_c と略す。超電導体の J_c が高ければ、バルク超電導体に捕捉できる磁場強度が向上する。また、線材では、同じ断面積で大電流が流せるし、同じ電流値を流すのであれば、線材の断面積、すなわち、線材の量が少なくてすむ。同じ磁場発生なら、高い J_c をもつ超電導線で作ったコイルはコンパクトにできる。

[れ]

励磁突入電流

変圧器に電流を印加したときに生じる電流。

冷凍機の効率

動作温度において発熱量 $Q[W]$ を汲出すに必要な冷凍機の効率で、冷凍機所要動力 $W[W]$ とすると $COP=Q/W$ で表される。COP(Coefficient of Performance)とも表記する。

用語解説集(英字順)

[A]

AFM (Atomic Force Microscope)

原子間力顕微鏡。非常に鋭い針先(数 10 ナノメートル)で結晶の表面をなぞると原子サイズの凹凸が針の上下振動をおこす。この変化を、針に当てた光の反射光の振れとして、拡大して読みとる顕微鏡。

[B]

Batch 式焼成

超電導膜作製法の1つである MOD(Metal Organic Deposition)プロセスにおいて、用いられる焼成手法の1つ。短尺試料で得られた焼成条件を容易にフィードバック出来る他、装置の安定性が高い。一括で長尺処理が可能であることから処理速度を速く出来る等の利点がある。

[C]

CO₂ 排出係数

1 kWh 当たりの電力量を発電するのに、CO₂ 排出量がどの程度となるかを示す係数。単位は、kg-CO₂/kWh が多く用いられる。

COP

Coefficient of Performance の略で、冷凍機の「成績係数」である。動作温度において発熱量 Q[W]を汲出すに必要な冷凍機の効率で、冷凍機所要動力 W[W]とすると $COP=Q/W$ で表される。

[G]

GFRP (Glass Fiber Reinforced Plastics)

ガラス繊維強化プラスチック。ガラス繊維と樹脂を用いてプラスチックを補強することによって強度を著しく向上し、宇宙・航空産業をはじめさまざまな分野で用いられている。主な特性としては、耐熱性、電気絶縁性、さまざまな形状に対応可能、軽量かつ強度が大きいことなどである。

[H]

He (Helium)

原子番号 2 の元素。単原子分子として存在し、分子量は 4.00。無色無臭で、最も軽い希ガス元素である。すべての元素の中で最も沸点が低く、超高压下でしか固体にならない。沸点は-268.9 °Cで、大気圧、0°Cでの密度は 0.1785 kg/m³。空気中に 0.0005 %含まれ、天然ガス中に多く含まれるため天然ガスの液化・分留の過程で作られる。

[I]

IBAD (Ion-Beam-Assisted Deposition)

Ion Beam Assisted Deposition 法の略。成膜中にイオンビームを材料に適した角度から照射する事により、無配向の下地に2軸配向結晶を成膜する手法で、材料により高速かつ高配向が得られる。金属基板と Y 系超電導体との間に設けられる YSZ 中間層を面内配向させる技術。これにより中間層の上に成膜される Y 系超電導体膜は、十分面内配向したも

のが得られる。したがって中間層上の Y 系超電導体の成膜手段は、レーザ蒸着法(PLD)でも化学蒸着法(CVD)でも可能となる。

in-plume 法

PLD 法は、プルームに指向性があるため、他の成膜手法と比較して成膜速度が遅いという欠点をもっている。また、通常の PLD 法(out-plume 法)はプルームのショックフロント部あたりに基板を配置することで成膜を行うが、この方法では成膜レートが遅いという問題がある。そこで、完全にプルーム内部入る様に基板を配置して成膜を行うことで成膜レート及び材料収率の向上を目的とした PLD 法。通常の PLD 法(out-plume 法)に比べて、T-S(Target-Substrate)間距離を短くすることでターゲットと成膜された膜とは組成ずれが起きるため、ターゲットの組成比を変える必要がある。

[J]

J_c - B 特性

臨界電流密度と磁束密度の関係。超電導体の臨界電流密度は、磁場の大きさに対して減少する特性を示す。臨界磁場近くで急激に減少し、臨界磁場でゼロとなる。

JEC 2200

電気学会 電気規格調査会標準規格(変圧器)。JEC は Japanese Electrotechnical Committee の略。

[M]

MOD 法 (Metal Organic Deposition)

有機金属化合物を原料として、アモルファス状の活性な前駆体を基板表面に形成し、これを熱処理し結晶化することにより超電導相を得るための手法。超電導体作製において用いられる有機金属化合物としては、オクチル酸塩、TFA 金属塩などがある。

[N]

n 値 (超電導)

超電導線材の電流-電圧特性を、電流を横軸として両対数グラフ化した場合の傾き。n 値が大きいほど、電流の増加に伴う電圧の発生が急激に起こる。

n 値 (電気絶縁)

課電電圧の上昇に伴い部分放電が生じ、高分子材料が部分放電にさらされると、高分子材料の放電劣化が生じる。課電電圧(V)と絶縁に至るまでの時間(t)の関係を V-t 特性と言い、通常、経験則である逆 n 乗則($V^n t = \text{一定}$)で整理できる。n は V-t 特性を両対数グラフ化した場合の傾きとなる。

out-plume 法

通常の PLD 法であり、基板がプルームの外にある場合の作製方法。一般的に蒸着速度がゆっくりであり、そのため緻密で配向性の良い膜ができる。in-plume 法との区別のために out-plume 法と表記している。

[P]

PLD (Pulsed Laser Deposition) 法

パルスレーザー堆積法。物理気相蒸着法の一種で、真空チャンバー内のターゲット(酸化物の焼結体等)に高出力のパルスレーザー(エキシマレーザー等)を断続的に照射し、ターゲットをアブレーションすることにより爆発的に放出されるイオン、クラスタ、分子、原子等を、ターゲットに対向して設置された基板上に堆積させて成膜を行う手法。比較的ターゲットと膜の組成ずれが少なく、高特性の膜を得易い手法として知られている。

PPLP®

溶融押出 PP フィルムの両側をクラフト紙でサンドイッチ下構造をしている。その優れた絶縁破壊特性と低誘電率、低 $\tan\delta$ により低誘電損失特性を有し、数多くの AC 及び DC 超高压ケーブル用絶縁材料として採用されている。

[R]

RE123 系超電導体

希土類元素(RE)、バリウム(Ba)、銅(Cu)が 1:2:3 の元素比で構成された酸化物材料で、化学式 $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ の略式表記。RE(希土類元素)をイオン半径の大きいネオジウム(Nd)、サマリウム(Sm)等とした系は臨界温度 T_c や高磁場での臨界電流密度 J_c がイットリウム(Y)とした系に比べ優れており、液体窒素温度(77 K)での高磁場応用にとって重要な材料である。

Reel to Reel 式成膜法

PLD 法、MOD 法による線材作製において、長尺基板上に成膜する際、左右のリールで送り・巻き取りを行い、基板を動かしながら成膜を行う手法。

Y 系超電導線材

「次世代高温超電導線材」と呼ばれる $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO)に代表される $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 系(RE: rare earth, 希土類酸化物 Gd, Sm, Er, Nd 等)超電導線材。これらは、磁場中での臨界電流(I_c)・臨界電流密度(J_c)が高く、また、Bi 系線材のような銀シースを不要とする構造であるため低コスト化が可能であり、さらに線材の構造上後加工が容易なため、超電導ケーブル、変圧器、モータ、SMES 等の電力応用に対して低交流損失化が可能である等の観点から現在注目されている高温超電導線材である。

[S]

s.f.

自己磁界。Self-field の略。

[T]

T(テスラ)

磁束密度の SI 単位。1T=10⁴G(G:ガウス)。

tanδ

電気機器に使用する絶縁物に交流電圧を印可すると、絶縁体の漏れ電流による損失、誘電分極にもとづく損失及び部分放電にもとづく損失などが生ずる。このような損失分の電流位相は、理想的な絶縁物に流れる無損失電流より遅れる。その遅れ角 δ の正接を tanδ(誘電正接)とよぶ。tanδ 値は絶縁物の寸法や、形状に無関係の誘電体損失の大小を表す指標として、絶縁物の吸湿、乾燥、汚損、ボイドの状態などの絶縁の性状、あるいは劣化の程度を判断する値として使用されており、tanδ 試験は絶縁材料、特に電力機器の絶縁試験の重要な試験項目である。

Technical Committee 90 (TC90)

国際電気標準会議(IEC)内に設置される超電導関連の標準化専門委員会。IEC の中で日本が初めて幹事国をつとめた TC。

TFA-MOD 法

トリフルオロ酢酸(TFA)塩を前駆体として、水蒸気雰囲気中で熱処理することにより Y 系超電導相膜を成膜する手法。

—

I. 事業の位置づけ・必要性について

1. NEDO の関与の必要性・制度への適合性

1.1 NEDO が関与することの意義

電気抵抗零が代表的な特徴である超電導現象を応用することにより、電力、情報通信、運輸、医療、先端科学など、幅広い分野における種々の機器に関して、飛躍的な性能向上や技術革新が期待されている。

超電導現象が 1911 年に発見されて以来、より高い臨界温度 T_c を持つ超電導物質の探索が進められてきた。1986 年、従来の T_c を大幅に超える酸化物系の高温超電導物質が発見され一大エポックとなった。それまでは液体ヘリウム（4K： -269°C ）を冷媒とする極低温の条件が必要なため、その応用が研究分野に留まっていた超電導技術は、この酸化物系超電導物質の登場により、比較的取り扱いが容易な液体窒素温度（77K： -196°C ）を超えた条件下にあっても超電導現象の発現・維持が可能なことから、社会活動を支える様々な技術分野への可能性が拡大した。

高温超電導物質を実用化のレベルにまで引き上げるには、高い臨界電流密度、臨界磁界等の性能を持ち、安定かつ信頼性が高い材料を開発することが求められ、探索的な側面を強く有する。しかもその長尺線材化は技術的にハードルが高く、リスクも大きい。このため設備投資や研究開発における人的及び資金面にて大きな負担が掛かる状況にあることから、民間企業個々の活動による高温超電導技術開発の自立化からの実用化は、非常に困難な状況にあると言わざるを得ない。まして高温超電導線材を用いた機器を実用化開発するには、我が国における当該分野の総力を結集することが必要である。

高温超電導技術は広範囲な社会分野への適用が考えられるが、特に省エネルギー技術として直接の貢献が可能である。なかでもその効果の大きさから、電力分野への応用が有効であり、エネルギー安定供給や地球環境問題への対応の緊急性から、日本の社会基盤である電力系統における各種機器へ、早期に高温超電導技術を実用化／導入普及することが必要であると考えられる。

このように高温超電導技術を応用し、実用化する技術開発は、公共性が高く、様々な社会活動の根幹となる技術であることから、本プロジェクトを含み現在まで、国及び NEDO が一貫して高温超電導技術の研究開発を支援してきた経緯がある。

1.2 実施の効果

本事業は、イットリウム(Y)に代表されるレアアース(RE)系酸化物高温超電導線材(以降、Y系超電導線材と称す)を作製するプロセス技術の開発を基礎とし、Y系超電導線材を導体構成要素として用いる電力機器(超電導電力貯蔵システム(SMES)・超電導電力ケーブル・超電導変圧器)の実用化に向けた技術開発であり、それら超電導電力機器の国際的な標準化も考慮に入れている。

これら三種の電力機器を実システムへ導入する時期は、高度経済成長期に導入された多くの機器のリプレースが本格化する2020年を目標としている。これにより、発電所立地地域から都市地域への効率的な送電網の整備が期待できることから、省エネルギー及び地球温暖化ガスCO₂削減に資する有力なエネルギー関連技術としての機能が期待できる。また、2011年3月11日の東日本大震災以降のエネルギー供給における原子力発電の見直しが必至となることから、2020年頃には、現在にも増して太陽光(PV)や風力など、再生可能エネルギーが大量に導入されていることが確実視されていることから、より機能的な系統安定化技術導入の重要性がより顕著になっていることは言うまでもない。

さて、現時点で想定できる超電導電力機器導入による省エネルギーの効果は、従来からの常電導電力機器との比較におけるエネルギー損失量が、超電導電力ケーブルで1/4、超電導変圧器で1/3程度と見込まれる。またSMESに関しては、系統安定化の効果により、負荷周波数制御(LFC)の機能を担ってきた部分での火力発電の役割が軽減されることから、エネルギー変換効率に優れた定格運転の比率が高まる。これに伴う一年間のCO₂削減効果は、超電導電力機器へのリプレース本格化から10年後の2030年にて、超電導電力ケーブル404kt、超電導変圧器36kt、SMES1,673kt、と算出され、合計で約2,100ktが見込まれている^{*}。なお、参考として環境省によれば、2008年度“エネルギー転換部門(発電所等)”CO₂排出量は、78,200ktと公表されている。

※ 出典：「超電導分野における技術戦略マップのローリングに係わる調査」
平成22年版/METI-NEDO

2.事業の背景・目的・位置づけ

エネルギー資源の大半を海外に依存する日本は、世界のエネルギー需給動向によって社会・経済が大きな影響を受けることから、より効率的なエネルギー活用の方策が求められている。また、その技術は、地球環境に関する問題意識の高まりに伴い、環境に掛ける負荷が少ないことも大切な要因である。

電力は、様々な社会活動を支える基盤と言えるエネルギー形態であることから、その供給システムは、より安定でより効率的な系統へと再構成していく必然性がある。本事業においては、発電所にて変換した電気エネルギーを無駄なく輸送する高効率送電技術、また、適正に系統を制御する電力供給安定化技術の確立をめざしている。その手段としては、日本が世界をリードしている技術レベルにあると判断されている高温超電導技術を活用し、高効率・大容量・コンパクトな電力機器を開発することを目的としている。具体的には、イットリウム(Y)に代表されるレアアース系酸化物高温超電導線材(Y系超電導線材)を主たる構成要素に用い、超電導電力貯蔵システム(SMES)、超電導電力ケーブル及び超電導変圧器の実用化に向けた技術を開発することである。

本事業が取り組む超電導電力機器及びその主要構成要素となるY系超電導線材の位置付けは、次の政策・施策による。第3期科学技術基本計画を踏まえた総合科学技術会議にて、推進4分野におけるとして、エネルギー分野/超電導電力機器、ものづくり分野/Y系超電導線材、として重要な研究開発課題に取り上げられた。また経済産業省の施策としては、イノベーションプログラム/エネルギーイノベーションプログラムにおける原子力等利用の推進とその大前提となる安全の確保/共通分野の技術開発、Cool Earth-エネルギー革新技術計画にて選定されたCO₂大幅削減21技術のなかの超電導高効率送電に選定され、技術開発ロードマップが策定された。

NEDO が取り組んできた高温超電導技術開発における本事業の位置付けは、「超電導応用基盤技術開発(第II期)」(平成15~19年度)、「超電導電力ネットワーク制御技術開発」(平成16年度~19年度)の後継プロジェクトであり、長尺線材化開発を進めてきたY系超電導線材を用いた、SMES、ケーブル、変圧器による次世代電力機器の実用化に目処を付けることを目的とした。

II. 研究開発マネジメントについて

1. 事業の目標

経済社会の基盤となる電力の安定的かつ効率的な供給システムを実現するため、システムを適正に制御し、電力供給を安定化させるための技術及び発電電力を無駄なく輸送するための高効率な送電技術の確立をめざす。そのため、世界的にも我が国が最先端の技術力を有する超電導技術を活用して、コンパクトで大容量の電力供給が期待できるイットリウム（Y）に代表されるレアアース（RE）系銅酸化物高温超電導線材（以降、Y系超電導線材と称す）を用いた超電導電力機器の開発を事業の目標とする。図1-1に電力機器（SMES、ケーブル、変圧器）の超電導化による都市部への大容量安定供給の概念図を示す。



図1-1 超電導電力機器による都市部への大容量安定供給の概念図

・研究開発目標

超電導技術の産業利用の早期実現を図ることにより、経済社会を支える重要なエネルギーである電力の一層の安定的かつ効率的な供給システム実現に資することを目的とし、超電導電力貯蔵システム（SMES）、超電導電力ケーブル及び超電導変圧器の実用化に向けた重要な要素技術を開発し、また、これらの超電導電力機器用線材の技術開発並びに実用化の共通基盤となる超電導電力機器の適用技術標準化を進める。

超電導電力貯蔵システム（SMES）の研究開発に関しては、平成 22 年度までに、2 GJ 級 SMES の開発を見通す高磁界かつコンパクトなコイル設計技術の開発並びにメンテナンスを容易とするコイルの伝導冷却技術開発を行い、プロジェクト終了時の平成 24 年度までに、2 GJ 級太陽量 SMES コイルの技術見通しを得るため、それに必要な SMES コイル要素技術開発を行う。

超電導電力ケーブルの研究開発に関しては、平成 22 年度までに、電力ケーブルの大電流・低交流損失ケーブル化技術、高電圧絶縁・低誘電体損失ケーブル化技術に関する要素技術の開発を行うとともに、「ケーブルシステム検証」に必要となるシステム設計、試験条件の検討を行う。この成果に基づき、後半 2 ヶ年（平成 23 年度～24 年度）に「ケーブル対応線材の安定製造技術開発」を行うとともに、「66 kV 大電流ケーブルシステム検証」、「275 kV 高電圧ケーブルシステム検証」において課通電特性や送電損失等の実用性を検証し、実用化に目途をつける。

超電導変圧器の研究開発に関しては、平成 22 年度までに、超電導変圧器用の低損失化技術、大電流巻線技術、耐短絡強度技術及び限流機能の開発を行い、66 kV/6.9 kV-2 MVA 級変圧器の設計を完了し、プロジェクト終了時の平成 24 年度までに、2 MVA 級超電導変圧器モデルを試作・評価し、低損失（従来線材対比の交流損失 1/3 以下）、大電流（2 kA 級）、耐短絡強度を有する 66 kV/6.9 kV -20 MVA 級超電導変圧器システムの成立性を実証する。

超電導電力機器用線材の技術開発に関しては、SMES、電力ケーブル、及び変圧器の性能向上とともに導入促進に資する Y 系超電導線材開発を行う。SMES 用高磁界コンパクトコイル構成のためには、積層複合導体・SMES 本体の構造を含めた機器サイドの開発だけでなく、磁場中臨界電流特性の向上に代表される課題の解決を図ることが重要である。大電流及び高電圧電力ケーブルを実現するためには、損失低減やコンパクト化等の課題があり導体・ケーブルの構造を含めた機器サイドの開発としても線材の詳細な特性を把握し、性能向上を図ることが重要である。20 MVA 級超電導変圧器を実現するためにもケーブル開発と同様に、交流損失低減に代表される課題の解決のために超電導変圧器構造を含めた機器サイドの開発とともに線材の詳細な特性把握に加えてさらなる性能向上が不可欠である。

また、各機器においての導入促進には安定した線材製造技術の確立とともにより安価な製造方法の確立が求められる。平成 22 年度までに平成 25 年度以降に想定される各機器の長期信頼性試験等を含めた実用化技術開発時に必要な仕様の線材の作製技術を開発し、プロジェクト終了時の平成 24 年度までに、普及・導入開始時（平成 32 年頃、2020 年頃）に必要と想定される仕様の線材の作製技術を開発するとともに実用化技術開発に必要な線材を安定に作製

可能な技術（再現性等を確認）を確立する。

超電導電力機器の適用技術標準化に関して、超電導電力機器の早期市場導入や実用化を円滑に進めるために共通基盤となる標準化を進める。平成 24 年度までに、超電導線材及びその試験方法並びに超電導電力ケーブル及びその試験方法について、国際規格提案に向けた標準化をめざす。また、Y 系超電導線材を適用した変圧器、SMES 等の機器及びこれらの試験方法の標準化素案を作成する。

なお、本プロジェクトは、「超電導応用基盤技術開発（第Ⅱ期）」（平成 15 年度～19 年度）及び「超電導電力ネットワーク制御技術開発」（平成 16 年度～19 年度）によって得られた開発成果を踏まえて、実用レベルに達した Y 系超電導線材を用いて開発を行う。また、本プロジェクトの研究対象機器（SMES、電力ケーブル、変圧器）は、第 3 期科学技術基本計画のエネルギー分野の重点科学技術「送電技術」、「電力系統制御技術」、「電力貯蔵技術」に位置付けられており、さらに、超電導技術分野の技術マップ（平成 19 年 4 月制定）のエネルギー・電力分野機器開発にも位置づけられている。

表 1-1 近年の NEDO 超電導プロジェクトの推移及び概要

H15	H16	H17	H18	H19	H20	H21	H22	H23	H24
超電導応用基盤技術研究開発(第Ⅱ期) ・Y(イットリウム)系線材の開発 ・Y系線材による機器(*1)の要素技術開発 (*1)超電導ケーブル、超電導変圧器、超電導モータ、超電導限流器、高性能冷凍機					イットリウム系超電導電力機器技術開発 ・Y系超電導線材を用いた超電導電力機器、「SMES」、「電力ケーブル」、「変圧器」、「高性能Y系線材」の技術開発				
超電導電力ネットワーク制御技術開発 SMESシステムの開発 ・Nb系線材によるSMESの実系統連系試験 ・電力ネットワーク制御システムの技術開発 ・SMESの実用化を目指したトータルシステムの低コスト化の検証					希少金属代替材料開発 「超軽量高性能モータ等向け超長尺Y系超電導線材の開発」				
高温超電導ケーブル実証プロジェクト ・Bi(ビスマス)ケーブルシステムによる実系統連系実証試験 ・線路建設、運転、保守を含めたトータルシステムの信頼性の実証									1年延長

1.1 超電導電力貯蔵システム (SMES) の研究開発

本プロジェクト開始時点において、NEDO による超電導電力貯蔵システム技術開発プロジェクトにより、機器化可能な金属系超電導コイルのコストミニマム設計及び実機との等価性を考慮したモデルコイルの製作・性能試験により、コスト競争力と技術性能の両立性が検証された。SMES が競合技術と比肩しうる経済性を有することの見通しができるようになったことを踏まえ、早期の SMES の実系統適用に向けて、コイル以外の構成技術との統合・最適化をめざすシステム技術開発を図るためにトータル SMES システムの低コスト化、及び実系統連系試験によるネットワーク制御システム技術の開発・検証が行なわれた。そのため、さらなる経済性向上の可能性が期待できる Y 系超電導 SMES コイルの技術開発が緊要である。

このため、本プロジェクト開始時期までに NEDO が推進してきた超電導電力貯蔵システムの技術開発で得られた成果を踏まえ、金属系超電導線材を用いた SMES コイルでは実現不可能であった 2 GJ 級大容量 SMES コイルを可能とする Y 系超電導線材を用いた高磁界・コンパクトコイルの要素技術開発を行う。また、SMES 対応 Y 系超電導線材の開発は、高磁界・コンパクトコイルの技術開発に適用可能な線材の安定製造技術の確立とともに、実用化に向けて磁場中臨界電流特性や線材機械強度の向上をめざすものである。

1.1.1 研究開発項目毎の目標

1.1.1-1 2 GJ 級高磁界・大電流コンパクトコイル構成技術開発

(1) 研究開発の必要性

2 GJ 級大容量 SMES コイル実現のためには、従来の金属系低温超電導 SMES では達成できなかったレベルへの貯蔵エネルギー密度の向上が課題となり、磁場中特性に優れる Y 系超電導線材によるコイルを用いた高磁界化による貯蔵エネルギー高密度化が必要となる。この高磁界コイルの実現には、コイル通電時に発生する通電電流と最大経験磁場、コイル径に比例して加わる強力な電磁力（フープ応力）の繰返し負荷に耐えるコイル構成を開発することが不可欠である。

(2) 研究開発の具体的な内容

高磁界化による高エネルギー密度化コンパクトコイルをめざし、従来の金属系低温超電導 SMES コイルの許容可能なフープ応力(300 MPa 程度)の 2 倍の応

力 (600 MPa) を連続して繰返し加えても使用可能な高機械強度コイルとして、2 GJ 級大容量 SMES コイルの技術見通しを得るために必要なコイルの要素技術開発を行う

(3) 開発目標

● 中間目標 (平成 22 年度)

- ・フープ応力 600 MPa 以上、2 kA 以上の通電容量を持つ SMES コイル構成技術を開発する。

(4) 目標設定の根拠

2 GJ 級 SMES 用高磁界・大電流コンパクトコイル実現のためには、従来の金属系低温超電導 SMES では達成できなかった高磁界化による貯蔵エネルギー高密度化が必要となり、この高磁界コイル実現には、強力な電磁力 (フープ応力) の繰返し負荷に耐えるコイル構成を開発することが不可欠である。「超電導電力ネットワーク制御技術開発 (平成 16~19 年度)」のプロジェクトにおいて 2 GJ 級 SMES システムの概念設計で最適化を行った結果、従来の金属系低温超電導 SMES コイルの許容可能なフープ応力(300 MPa 程度)の 2 倍の応力で現実的なコイルサイズや仕様を得られたことから、600 MPa のフープ応力を連続して繰返し加えても使用可能な高機械強度コイルの構成技術を開発する。また、2 GJ 級 SMES システムとして大容量出力コイルを開発する必要がある、「超電導電力ネットワーク制御技術開発」等のプロジェクトにおいてシステムの最適化を実施してきた結果、変換器、電流リード等の取り合いから 2 kA 程度で成立することから、2 kA 以上通電可能な大電流容量コイルの構成技術を開発する。なお、これらの成果は高磁界コンパクト SMES システムモデル検証に反映する必要があることから、平成 22 年度のプロジェクト中間目標までに開発することとした。

1.1.1-2 高効率コイル伝導冷却技術開発

(1) 研究開発の必要性

20 K~40 K 温度領域においては、従来の液体ヘリウムの温度領域に比べ、コイルが非常に高い熱安定性を有することを確認しており、この高い熱容量を活かした短時間過負荷運転が可能であり、また、高効率な冷凍機で冷却することが可能である。ただし、同温度領域においては、4 K 温度領域と異なり固体熱伝導のみによる冷却システムでは十分な熱伝達の実現が困難である。一方、SMES システムとして必要な出力容量を実現するために必要となる高熱伝導性能とトレードオフの関係になる電気絶縁性能に関しては、同温度領域での真空/固体

複合絶縁系に関する試験評価データは少ない。このため、20 K～40 K 温度領域における熱伝導／熱伝達と絶縁に関する研究開発を行う。

(2) 研究開発の具体的な内容

20 K～40 K温度領域の熱伝達・電気絶縁に関するコイル特性評価を行い、高効率伝導冷却性能を有するとともに2 kV以上の絶縁性能を有するコイル構造を検討する。

さらに、2 kV以上の耐電圧を有する伝導冷却型コイル構造等を検討・評価する。また、20 K～40 K温度領域において十分な熱伝達を得るため、例えばガス冷媒配管を一部活用した冷却システムやヒートパイプを用いた冷却システム等の検討・評価を行うとともに、20 MJ級システムの要素コイル規模である外径700 mm級コイルを対象とした伝導冷却試験によりSMES運転時に想定される発熱に対し冷却可能なシステムの成立性を検討し、「超電導電力ネットワーク制御技術開発」プロジェクトにおいて概念検討した一例であるコイルシステムの形状と発生熱量から必要とされる少なくとも3 W/m²以上の熱流束を可能とする高熱伝導冷却システムの開発を行う。

(3) 開発目標

● 中間目標（平成 22 年度）

- ・ 20 K～40 K 付近の温度領域における伝導冷却を可能とするコイル伝導冷却技術を開発する。
- ・ 2 kV 以上の電気絶縁性能を有する高伝熱コイル構造を開発する。

(4) 目標設定の根拠

20 K 以上の温度領域においては、4 K 温度領域と異なり高い熱安定性並びに高効率な 1 段式冷凍機冷却が期待されるとともに、40 K レベル以下の温度領域においては、Y 系超電導線材は高磁場中においても高い通電特性を示すことから、20 K～40 K 付近の温度領域におけるコイル伝導冷却技術を開発する。ここで、コイルの電気絶縁性能は伝導冷却特性とトレードオフの関係になるが、SMES システムとして必要な大容量出力を実現するためには、電流 2 kA 変換器の直並列組合せにより 2 kV の絶縁性能で対応可能なことから、2 kV 以上の絶縁性能を有する高伝熱コイル構造を開発する。これらの成果は高磁界コンパクト SMES システムモデル検証に反映する必要があることから、平成 22 年度のプロジェクト中間目標までに開発することとした。

1.1.1-3 SMES 対応線材安定製造技術開発

(1) 研究開発の必要性

SMES用超電導コイルでは、長尺線材が必要とされ、長尺線材の実現には、連続したY系超電導線材の安定製造技術が要求される。化学気相蒸着法（CVD: Chemical Vapor Deposition）は高い作製速度を有していることが実証されており、また、CVDで形成した超電導層は中間層との界面結合性に優れ、良好な機械特性を有していることが、本プロジェクト開始時点までの成果で確認されていることから、さらに磁場中臨界電流特性等の超電導特性を改善することによって、高強度で磁場中における通電特性に優れたSMES対応Y系超電導線材の安定製造技術の確立をめざすことが必要である。

(2) 研究開発の具体的な内容

CVD装置の原料ガスと酸素ガスの混合系の改善や成膜領域の形状適正化等の改造により超電導層形成の均質連続性の向上を図ることで、 $I_c = 100 \sim 200$ A/cm-w @77 K、s.f. の臨界電流の均質な特性を有する線材を作製し、特性の安定性を検証する。

(3) 開発目標

●中間目標（平成22年度）

- ・SMES システムモデル試作に必要な仕様例に相当する線材の安定製造技術を確立する。

仕様例： $I_c = 20$ A/cm-w @77 K、3 T で引張強度 1 GPa を有する 100 m に相当する線材

(4) 目標設定の根拠

本プロジェクトにおける、SMESシステム検討では、高強度長尺線材で臨界電流 200 A/cm-w @ 20 K、10 T が必要とされ、中間目標の、機械強度1 GPa、100 m；20 A/cm-w @ 77 K、3 Tは、SMESシステム検討の安全率を持たせる線材仕様である。

1.1.1-4 高磁界コンパクトSMESシステムモデル検証

(1) 研究開発の必要性

SMES 実用化のためにはさらなる低コスト化の見通しを得ることが必要であ

り、このためには複数個のコイルの組み合わせにおいてクエンチ等の動的な変化等が発生した場合を想定したコイルの限界性能を把握し、コイル自体並びにコイルシステムとしての裕度の適正化を図ることで、Y系超電導線材を用いたコイルの限界設計技術を確立する必要がある。

(2) 研究開発の具体的な内容

Y系 SMES コイル評価結果を反映して 2 GJ 級 SMES コイル基本システム構成の最適化を図るとともに、そのために検証すべき複数個のコイルの組み合わせにおいてクエンチ等の動的な変化等が発生した場合の保護方法等を含めた評価試験方法を立案し、評価試験用モデルコイルシステムの設計を実施する。

(3) 開発目標

●中間目標（平成 22 年度）

- ・ 2 GJ 級 SMES コイル基本システム構成の最適化並びに高磁界コンパクト・高効率伝導冷却コイルを用いた評価用試験モデルの設計を完了する。
- ・ SMES システムとしての適用性を検証評価する試験計画を作成する。

(4) 目標設定の根拠

実用化には「超電導電力ネットワーク制御技術開発」のプロジェクトで実施した概念設計結果をさらに進め、監視・保護システム等を検討する必要があるため、それらを含めた 2 GJ 級 SMES コイル基本システム構成の最適化を検討する。また、この検討結果を反映し、SMES システムとしての適用性を検証評価するため、評価用試験モデルの設計を行う。これらの結果は 2 MJ 級 SMES システムモデル検証に反映する必要があることから、平成 22 年度の中間目標とする。

1.1.1-5 高信頼性・高耐久性SMESコイル要素技術開発

(1) 研究開発の必要性

SMES 用コイルの開発を進める中、平成 22 年度に新しい知見としてコイル通電特性が変化する現象が見いだされた。この現象が発生する原因を究明し対策を立てなければ、Y系コイルを用いた SMES の実用化にはつながらないため、コイル構造の再検討・評価を最優先に行い、SMES コイルとしての信頼性・耐久性技術を向上させる必要がある。

(2) 研究開発の具体的な内容

プロジェクト前半3カ年の研究開発における SMES コイル特性の評価結果から、最終目標である繰り返し運転に耐え得るコイル技術開発に向けて、特性変化に影響する要因を検討し、現状で想定される Y 系超電導線材の剥離強度からコイルの径方向応力を低減する設計手法を確立するために必要となる課題を抽出し、高耐久性・高信頼性コイル構成技術の検討を行う。また、種々の対策を施した小規模な検証用サンプルコイルにて評価することで、コイルの最適な設計手法を確立し、SMES コイルとしての信頼性・耐久性を向上させる。

また、実運転における故障発生を考慮し、クエンチ検出・保護も考慮したコイル要素技術の開発に向けて、クエンチ保護方法について検討を実施し、上記検証用にて使用するサンプルを用いて、クエンチ時の素線・コイル相互間におけるクエンチ発生条件や転流の大きさ等の定量的な評価を行ない、前期3ヶ年に実施した解析結果を実証するための検証試験を実施する。

(3) 開発目標

○最終目標（平成24年度）

- ・実運転条件におけるコイル線材及びコイル構造を評価することで、2万回繰り返し充放電試験と同等レベルの信頼性・耐久性を持つコイル要素技術開発に向けて課題を抽出し、解決策を提案する。

(4) 目標設定の根拠

SMES 実用化のためには、充放電や温度変化による繰り返し応力に耐える信頼性の高いコイルを設計・製作できる技術を確立する必要がある。線材構造に起因したコイル特性変化現象について、線材の強度によらないコイル化技術を確立することで、高い信頼性、耐久性を有したコイル要素技術が確立できると考え、線材自体には応力が大きく係らない設計技術の確立をめざすこととした。

1. 2 超電導電力ケーブル研究開発

超電導電力ケーブルは、コンパクトで大容量送電を可能とし、既存管路を有効に活用して送電容量の増加を可能とする。Y 系超電導線材を用いた超電導電力ケーブルは、低損失化・コンパクト化・大容量化が期待できることから、66 kV/5 kA 大電流ケーブルと 275 kV/3 kA 高電圧ケーブルの2種類の超電導ケーブルの開発を目的とする。

具体的には、66 kV/5 kA 大電流ケーブル開発の重要な要素技術である低交流損失技術・大電流導体化技術・大容量接続技術・三心一括技術・コンパクト化技術等の開発を行い、275 kV/3 kA 高電圧ケーブル開発の重要な要素技術である高電圧絶縁技術（高電圧絶縁材料選定・絶縁設計・ブッシング）・高電圧接続

技術・コンパクト化技術等の開発を行う。また、電流通電時のケーブルの熱挙動・電磁界の影響について解析する。冷却方式として、スラッシュ窒素冷媒を用いた超電導電力ケーブル冷却の検討を行う。ケーブルシステム開発として、上記の開発要素技術を組み合わせたケーブルシステムを開発・検証し、導入・普及に向けた要素技術開発を行う。

1.2.1 研究開発項目毎目標

1.2.1-1 大電流・低交流損失ケーブル化技術開発

(1) 研究開発の必要性

大電流通電が可能な Y 系超電導線材を用いた大電流ケーブルは、既存ケーブルに比べて、損失の軽減、設備量の削減、既設設備利用が可能であり、電力需要の増大や老朽設備のリプレース対策として期待できることから開発が必要である。

(2) 研究開発の具体的な内容

66 kV/5 kA 大電流ケーブルの重要な要素技術開発であるコンパクトで低損失なケーブル設計技術及び大容量接続技術等を確立する。

(3) 開発目標

66 kV/5 kA 大電流ケーブル開発

●中間目標（平成 22 年度）

- ・大電流ケーブル導体等の特性試験によって、コンパクトで低損失なケーブル設計技術及び大容量接続技術を確立する。
- ・ケーブル損失（交流損失（導体層、シールド層）） 2 W/m-相@5 kA 以下
- ・短絡試験（ 31.5 kA-2 sec 相当）でケーブルの性能に劣化が無いこと。
- ・熱的な定常状態が得られるまで 5 kA 連続通電を行い、ケーブル導体、超電導-常電導接続部、電流リードに異常がないこと。

○最終目標（平成 24 年度）

- ・中間接続部を有する大電流ケーブルコアを作製し、課電及び機械強度特性の評価を行い、中間接続部の要素技術を確立する。また実用化に向けて、さらなる交流損失の低減に向けたケーブル構造を検討し設計する。

(4) 目標設定の根拠

大電流通電を可能とする Y 系超電導線材を使用することで、大電流電力ケー

ブルの開発が可能となる。既存ケーブルに比べて、大容量送電が可能となり、設備量の削減が期待できる。また既存管路を使用することで、建設コストを削減できる。

「超電導応用基盤技術開発（第Ⅱ期）」プロジェクトにおける、Y系超電導線材作製技術開発、機器要素技術開発等の成果を基に、66 kV/5 kA 超電導電力ケーブルの重要な要素技術を開発する。Y系超電導線材を用いた1 kA 級ケーブルにおいて、0.1 W/m-相@1 kA 以下の交流損失を確認しているが、交流損失が通電電流の2乗で増加すると仮定した場合、2.5 W/m-相@5 kA 程度の損失が発生する。このことから5 kA 通電時の損失を2 W/m-相以下とした。66 kV 級実系統に導入する場合、31.5 kA、2 sec 相当の短絡電流に耐えることが必要であると規定されており、ケーブル線路にこの短絡電流が通電した際、ケーブルは劣化なく耐えることとした。また、5 kA 通電を可能する終端接続部は、これまで開発されていないことから、1 kA 級の接続構造を基に、5 kA 級の電流リードを開発し、超電導導体、超電導-常電導接続部、電流リード、終端接続部において、安定的に連続通電できることも目標とした。さらに長尺ケーブルシステムとして不可欠な超電導ケーブル同士を接続する中間接続部の開発について、これまで5kA 級の大電流高温超電導機器向けの実績がないことから大容量接続技術の開発を行う。中間接続部の構造設計検証においては冷却時の熱収縮によって発生する引張力に対して超電導特性に影響を受けないことを課電及び機械強度特性により評価を行う。

1.2.1-2 高電圧・低誘電体損失ケーブル化技術開発

(1) 研究開発の必要性

都市部及び近郊のケーブルや高電圧線は、電力需要の増大、既設設備の老朽化、地中化による設備増強や更新が行なわれている。Y系超電導線材を用いた高電圧ケーブルの開発は、コンパクトで低損失・大容量送電を可能とするものであり、設備量の軽減・既設設備の利用・送電損失軽減等が期待できることから開発が必要である。

(2) 研究開発の具体的な内容

275 kV/3 kA 高電圧ケーブル開発の重要な要素技術である高電圧絶縁材料特性を把握し、コンパクトで低損失なケーブル設計及び高電圧接続技術を確立する。

(3) 開発目標

275 kV/3 kA 高電圧ケーブル開発

●中間目標（平成 22 年度）

- ・ケーブル損失（交流損失(導体層)、誘電体損失) 0.8 W/m-相@3 kA 以下。
※交流損失(導体層):シールド層に生じる交流損失は含まないものとする。
- ・短絡試験（63 kA-0.6 sec 相当）でケーブル性能に劣化が無いことを確認する。
- ・275 kV 連続課電を行い、ケーブル導体、超電導-常電導接続部、電流リードに異常がないことを確認する。

○最終目標（平成 24 年度）

- ・ケーブル損失（交流損失(導体層、シールド層)、誘電体損失) 0.8 W/m-相 @3 kA 以下。
- ・中間目標で得られた技術を用いて、短尺ケーブルコアモデルを作製し、その性能について評価・検討し、各種コア構造のシステム設計の妥当性を検証することによって、275 kV 高電圧ケーブルシステム検証用ケーブル作製に反映する。

(4) 目標設定の根拠

これまで行われてきた国内外の超電導ケーブル開発は、DAPAS プロジェクト（韓国）における 154 kV がもっとも高い電圧階級であった。275 kV ケーブルを開発するには、これに耐える電気絶縁性能を有することが必要である。ケーブルの絶縁性能を満足するためには、絶縁体の厚みを増すことが有効であるが、超電導線材の冷却性能低下やコンパクト性が失われる。

高電圧絶縁技術の開発として、電気絶縁材料の電気基礎特性の把握、絶縁材料と誘電体損失の関係等の基礎特性の把握を行い、コンパクトで低損失なケーブル絶縁設計を行うとした。交流損失については、Y 系超電導線材 1 kA 級ケーブルにおける 0.1 W/m-相@1 kA より、3 kA 通電時の損失換算値 0.9 W/m-相の半分弱の 0.4 W/m-相以下とし、誘電体損失 0.4 W/m-相を加えてトータルの損失を 0.8 W/m-相と設定した。また、275 kV 実系統に導入する場合、63.0 kA、0.6 sec 相当の短絡電流に耐えることが必要であると規定されており、事故時の通電電流によるケーブル熱特性を把握し、熱的な劣化が生じないこととした。275 kV 級の高電圧中間接続技術は、接続抵抗による温度上昇や絶縁破壊の懸念がある。そのため、Y 系超電導線材の接続技術開発及び絶縁層形成において補強絶縁等の設計・施工技術を開発し、275 kV 連続課電を行いケーブル導体、接続部、電流リードに異常がないこととした。

1.2.1-3 電力ケーブルの熱収支に関する評価検証

(1) 研究開発の必要性

コンパクト化・大電流化・低損失化をめざすケーブル開発においては、事故時の通電電流による電磁的影響・熱特性等の把握が必要である。

また、電気絶縁材料層の厚い 275 kV/3 kA 高電圧ケーブルにおいては、定常運転時の交流損失及び誘電体損失と冷却のバランスを考慮した設計が必要である。

スラッシュ窒素による冷却は、定常時はケーブル温度を低温化しケーブル能力が向上し、過渡的熱負荷に対しては大きな融解潜熱によるケーブル温度上昇の抑制が期待できることから、スラッシュ窒素の固相率を一定として連続供給可能な制御方法の開発が有効である。

(2) 研究開発の具体的な内容

定常時・事故時の発熱・冷却に関する熱収支検討を行い、ケーブルの最適設計手法を確立することによって、定常通電時の熱特性把握、事故電流通電時の非定常伝熱特性及び電磁的影響を把握する。

スラッシュ窒素システム設計と部分試作評価によりケーブル冷却に適したシステム開発及び各構成要素の最適化を図る研究開発を行う。

(3) 開発目標

●中間目標（平成 22 年度）

- ・超電導電力ケーブル構造の最適化のために伝熱及び電磁界数値シミュレーションを行う。
- ・ケーブルのスラッシュ窒素冷却を実現するためのシステムを構築する。

○最終目標（平成 24 年度）

- ・システム検証結果に合致する汎用性のあるシミュレーション技術を確立する。
- ・スラッシュ窒素冷媒のシステム検討を行い、有用性を明らかにする。

(4) 目標設定の根拠

電力ケーブルの伝熱解析においては、「超電導応用基盤技術開発（第Ⅱ期）」プロジェクトにて開発した 66 kV/20 m 長のケーブルにおいて 1 kA 通電及び 31.5 kA、2 sec の短絡時のケーブル温度上昇についてシミュレーション及び検証を行った実績がある。今回のケーブル開発において、定常時・事故時通電の

熱特性や他相の電磁的影響を把握し、コンパクト化に寄与する。

また、66 kV/5 kA 大電流ケーブルでは誘電体損失は小さいため、交流損失低減に着目したケーブル設計が行われてきたが、275 kV/3 kA 高電圧ケーブルでは誘電体損失も考慮する必要があるため、設計パラメータにより損失低減と伝熱特性のトレードオフの関係がある場合が想定され、最適設計に資する研究開発を行うこととした。

スラッシュ窒素は固体と液体窒素の混合物質であり、固体窒素の存在により液体窒素よりも低温度と大きな熱容量を有する。スラッシュ窒素冷媒に関する基本的な特性把握は「交流超電導電力機器基盤技術研究開発」プロジェクトにおいて行った。本プロジェクトにおける開発では、固体窒素を生成する機器開発、スラッシュ窒素が持つ潜熱、顕熱の利用法、液体窒素と固体窒素の混合物質の流れ等を考慮したケーブルシステム構成の検討が必要であるとした。

1.2.1-4 ケーブル対応線材安定製造技術開発

(1) 研究開発の必要性

大電流及び高電圧ケーブルの開発には、交流損失低減が重要な要素技術となり、この損失低減を実現させるためには、線材の巻き付け形状を円形に近づけ、線材間のギャップを小さくすることが有効である。このためには、円形状に巻き付けやすい可撓性の優れた基板を用いた Y 系超電導線材もしくは細線化によるケーブル断面の円形状化に対応した Y 系超電導線材の開発が求められる。そこで、可撓性に優れた結晶粒配向金属基板を用いたレーザ蒸着法（PLD プロセス）による Y 系超電導線材及び細線化時の強度に優れた IBAD 系中間層基板を用いた化学液相法（MOD プロセス）による Y 系超電導線材を対象に長尺線材を安定に製造するために必要となる技術開発を行う。

(2) 研究開発の具体的な内容

大電流ケーブル用 Y 系超電導線材については、加工条件や研磨条件の適正化により平坦性の高い金属基板を安定に製造するとともに、高臨界電流密度を得るために結晶粒の配向性向上、中間層及び PLD プロセスによる超電導層形成の基板温度、プルーム形状等の成膜条件の安定化を図り、安定製造技術開発を行う。

高電圧ケーブル用 Y 系超電導線材については、上記と同様に金属基板の平坦性の安定化とともに、気相法による中間層形成、超電導層形成では、基板温度・プルーム形状等の成膜条件の安定化を図る。MOD プロセスによる超電導層形成では、原料溶液の粘性制御や塗布条件適正化等による塗布膜厚の安定化やガス

流下での定常反応の最適化により製造歩留り向上を行う。

(3) 開発目標

●中間目標（平成 22 年度）

- ・ケーブルシステム検証に必要な下記仕様に相当する線材を安定に作製可能な技術を確立する。

仕様： $J_e=15 \text{ kA/cm}^2$ （2 mm 幅×20 m 以上）に相当する線材

○最終目標（平成 24 年度）

- ・上記仕様に相当するシステム検証用線材の安定作製、加工、評価を確実に実施する。

(4) 目標設定の根拠

大電流ケーブル用線材について、結晶粒配向金属基板線材では、これまでに Ni 系磁性金属基板を用いて 200 m 長で $I_c=205 \text{ A/cm-w}(@77 \text{ K, s.f.})$ の Y 系超電導線材の作製に成功している。低交流損失化に有効な低磁性結晶粒配向金属基板では、20 m 長で $I_c=120 \text{ A/cm-w}(@77 \text{ K, s.f.})$ を得るとともに、 $259 \text{ A/cm-w}(@77 \text{ K, s.f.})$ の短尺線材での実績がある。これらの技術を統合し、20 m 長で $J_e=15 \text{ kA/cm}^2(@77 \text{ K, s.f.})$ を安定に製造可能な技術を開発することとした。

高電圧ケーブル用線材については、「超電導応用基盤技術開発（第 II 期）」プロジェクトにて高強度金属基板を用いて、500 m 長で $I_c=300 \text{ A/cm-w} (@77 \text{ K, s.f.})$ を達成していることを踏まえ、IBAD/MOD 線材において、ケーブル開発に必要な性能を有する線材を安定的に製造する技術の確立を目標とした。

1.2.1-5 66 kV 大電流ケーブルシステム検証

(1) 研究開発の必要性

ケーブル実用化時の課電条件・熱サイクル条件等を検討し、課通電試験計画書を作成し、ケーブル実用化のためのシステム基本設計を確立する必要がある。

(2) 研究開発の具体的な内容

終端接続部を有した 66 kV/5 kA、三心一括の 15 m 長ケーブル及び冷却システムを組み合わせたケーブルシステム設計を行う。システム設計・課通電試験計画書に基づき、課通電試験等を行い、長尺ケーブルシステムの熱・機械的な挙動、電気特性、運転の安定性等を評価し、ケーブルシステムの妥当性を評価する。

(3) 開発目標

●中間目標（平成 22 年度）

- ・両端に終端接続部を有する検証用 66 kV/三心一括/5 kA,15 m 長の超電導電力ケーブルシステムのシステム設計を完了する。
- ・耐久性を評価できる課通電試験計画書を作成する。

○最終目標（平成 24 年度）

- ・下記性能を有する 66 kV/三心一括/5 kA,15 m 長の超電導電力ケーブルを作製する。
- ・ケーブル外径；内径 150 mm ϕ の管路に収納できること。
- ・ケーブル損失（交流損失、誘電体損失）；2.1 W/m-相@5 kA 以下。
- ・中間目標で得られた課通電試験の設定条件下における課通電試験を実施し、試験計画書の性能を満足することを検証する。

(4) 目標設定の根拠

66 kV/5 kA 大電流ケーブルにおいては、1.2.1-1, 1.2.1-3, 1.2.1-4 項の研究開発成果を基に、三心一括ケーブル・終端接続部・冷却システム及びその他付属設備を組み合わせた超電導ケーブルシステムの仕様・設計技術を構築することとした。

1.2.1-6 275 kV 高電圧ケーブルシステム検証

(1) 研究開発の必要性

275 kV 高電圧ケーブル実用化のため、課電条件、試験電圧、熱サイクル条件等を検討し、課通電試験計画書を作成し、ケーブル実用化のためのシステム基本設計を確立する必要がある。

(2) 研究開発の具体的な内容

中間接続部・終端接続部を有した 275 kV/ 3 kA、単心 30 m 長の超電導ケーブル及び冷却システムを組み合わせたケーブルシステム設計を行う。システム設計・課通電試験計画書に基づき、長尺ケーブルシステムの熱・機械的な挙動、電気特性、運転の安定性等を評価し、ケーブルシステム設計の妥当性を検証する。

(3) 開発目標

●中間目標（平成 22 年度）

- ・両端に終端接続部と中間接続部を有する検証用 275 kV/単心/3 kA,30 m 長の超電導電力ケーブルシステムのシステム設計を完了する。

- ・耐久性を評価できる課通電試験計画書を作成する。
- 最終目標（平成 24 年度）
 - ・下記性能を有する 275 kV/単心/ 3 kA,30 m 長の超電導電力ケーブルを作製する。
 - ・ケーブル外径；150 mm φ 以下。
 - ・ケーブル損失（交流損失、誘電体損失）；0.8 W/m-相@3 kA 以下。
 - ・中間目標で得られた課通電試験の設定条件下における課通電試験を実施し、試験計画書の性能を満足することを検証する。

(4) 目標設定の根拠

275 kV/3 kA 高電圧ケーブルにおいては、1.2.1-2～1.2.1-4 項の研究開発成果を基に、単心ケーブル・中間接続部・終端接続部・冷却システム及びその他付属設備を組み合わせた超電導ケーブルシステムの仕様・設計技術を構築することとした。

1.3 超電導変圧器の研究開発

既存の常電導変圧器は電気抵抗による損失が大きいが、電気抵抗が殆ど無い超電導線材を変圧器に適用すると、その低損失かつ高電流密度の特性から巻線や鉄心の断面積を小さくすることが可能であり、変圧器の高効率化や大幅なコンパクト化・軽量化が期待できる。また、冷媒は液体窒素で不燃であることから環境にやさしく保守性に優れた機器となる。これらの特長から、超電導変圧器は都市部を主体とした電力需要増に伴う変圧器増容量対策や変電所の新設対策、及び経年に伴う変圧器のリプレース対策に貢献すると考えられている。また、大容量コンパクト送電を可能とする超電導電力ケーブルと組み合わせることにより、高効率な電力供給システムが可能となることも期待されている。

このため、Y 系超電導線材による低交流損失で大電流容量の巻線技術、冷却システム技術、及び限流機能付加変圧器技術の開発を行うとともに、それらの成果に基づく超電導変圧器の試作と特性検証を行うことにより、コンパクトで高効率な配電用超電導変圧器の実現に資する重要な技術を開発することを目的とする。

また、変圧器巻線技術開発、限流機能付加技術開発、2 MVA 級超電導変圧器モデル検証等の超電導変圧器の技術開発に適用可能な Y 系超電導線材の安定製造技術の確立を目的とした開発を進める。図 1-2 に 66 kV/6.9 kV-20 MVA 級配電用超電導変圧器の概念図を示す。

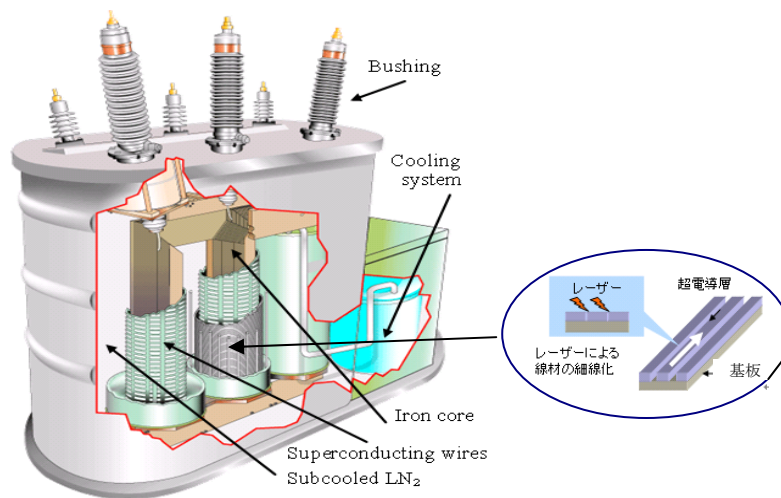


図 1-2 66 kV/6.9 kV-20 MVA 級配電用超電導変圧器の概念図

1.3.1 研究開発項目毎の目標

1.3.1-1 超電導変圧器巻線技術開発

(1) 研究開発の必要性

20 MVA 級超電導変圧器の実現のためには、従来の金属系超電導線材や Bi 系超電導線材では達成できなかった大電流化、低損失化が課題となる。これら課題の解決には、細線化した Y 系超電導線材を積層し、大電流化するための多層並列導体による巻線製作技術が必要となる。また同時に、同構造の巻線が系統や変圧器の故障により発生する短絡電流に対しても、変圧器を健全に維持できる強度を有する構成・構造とする必要がある。

(2) 研究開発の具体的な内容

前 NEDO 事業の「超電導応用基盤技術開発（第Ⅱ期）」プロジェクトにおける検証の結果を反映させ、以下の開発を行う。① 多層並列転位構造を最適化し、2 kA が通電可能な巻線モデルを開発する。② 細線化線材により、無加工線を使用した場合に対し損失が 1/3 以下となる 100 m 級巻線モデルを開発する。③ 短絡電流（20 MVA 級変圧器%インピーダンス 15 %相当）により劣化しない巻線モデルを開発する。

(3) 開発目標

● 中間目標（平成 22 年度）

- ・ 短絡電流（20 MVA 級変圧器%インピーダンス 15 %相当）により、巻線

が劣化しないことを検証する。

○最終目標（平成 24 年度）

- ・ 2 kA 級の通電特性を検証する。また、100 m 級巻線モデルにて、交流損失が 1/3 以下（対細線化しない線材）となることを検証する。

(4) 目標設定の根拠

変圧器巻線の損失低減には 2 kA 級で電流分流率 10 %程度以下とする技術が必要である。このため、2 kA 級の巻線モデルで多層並列導体の転位均流巻線技術を確立する。多層転位並列導体を用いた変圧器巻線が、系統事故時等に発生する短絡電流（定格電流 6 倍程度）による電磁力に対しても、超電導巻線が損傷や劣化せずに変圧器機能を健全に維持できる強度を有する必要がある。超電導変圧器の運用性や経済性から 1/10 程度（対細線化無し線材）に交流損失を低減することが要求されており、変圧器構成による一次・二次巻線の形態から線材単長は 100～300 m 程度が必要である。前 NEDO 事業の「超電導応用基盤技術開発（第Ⅱ期）」プロジェクトの成果である単長 5 m の 5 分割線材による単相巻線モデルで 1/5 に交流損失が低減できる技術を開発していることから、本プロジェクト中の長尺細線化加工の歩留り等を勘案して 3 分割線による交流損失 1/3 を目標に設定した。

1.3.1-2 冷却システム技術開発

(1) 研究開発の必要性

過去最大規模の超電導変圧器を高効率かつコンパクトな姿で実現するには、超電導巻線を低温に維持する保冷容器は変圧器に対して過大とまらない範囲で従来より大きいものが必要であり、また冷却システムは保守性能を高めて高効率化する必要があるため、新たな開発が必要である。なお、保冷容器及び冷却システムの一部は、超電導変圧器システム全体が従来にない大きさのため、設計技術についても開発する必要がある。

(2) 研究開発の具体的な内容

冷却システムの内容は以下の 3 項目である。① 超電導変圧器に適用可能な大型非磁性保冷容器を開発する。② 高効率で保守性能に優れた高効率冷却装置を開発する。③ 保冷容器と冷却装置からなる冷却システムは後述の超電導変圧器モデルと組み合わせて性能を検証する。

(3) 開発目標

●中間目標（平成 22 年度）

- ・ 保守性能の高いコンパクトな冷却システム用の高効率圧縮機（断熱効率 $\geq 65\%$ ）及び高効率膨張タービン（断熱効率 $\geq 65\%$ ）を検証する。

○最終目標（平成 24 年度）

- ・ 三相非磁性で容器容量 10 m^3 級の大型非磁性保冷容器を開発し、保冷性能（既存の小型容器相当の 20 W/m^2 以下）を試験にて検証する。
- ・ 試作した冷却システムの試験にて冷凍性能（冷凍機冷凍能力 2 kW@65 K 、冷凍機効率 $\text{COP} \geq 0.06@80\text{ K}$ ）を検証する。

(4) 目標設定の根拠

冷却システムの冷凍能力は、変圧器を適用する変電所や変圧器の形態、変圧器の利用率、及び細線化線材による損失低減の技術等で異なるが、超電導巻線の交流損失や電流リードや保冷容器からの熱侵入等により 2 kW@65 K 程度とされている。変圧器用冷却装置には長寿命でコンパクト化、運用性や経済性に優れた性能も要求されている。冷凍容量の 2 kW@65 K は既存冷凍機（スターリング式）で容量 1 kW 以下@ 80 K の約 3 倍、冷凍機効率 $\text{COP} \geq 0.06$ は既存技術の約 1.5 倍で、かつコンパクト性や運用性に優れた設定値である。

1.3.1-3 限流機能付加技術開発

(1) 研究開発の必要性

超電導変圧器は限流機能を備えることにより自身の健全性を維持するとともに、電力系統の事故時の過大な事故電流を瞬時に抑制して事故の拡大を防ぎ、電力系統の短絡容量対策にも貢献する。さらに、将来的に超電導電力ケーブルと超電導変圧器を連系して適用する場合にも限流機能は相互の導入促進に貢献すると考えられる。

(2) 研究開発の具体的な内容

- ① 限流技術の基礎試験を行い、限流機能付加変圧器の設計手法を確立する。
- ② 数百kVA級変圧器単相巻線モデルを試作し、限流特性を検証する。

(3) 開発目標

●中間目標（平成 22 年度）

- ・ 限流機能付加変圧器の設計手法を確立する。

○最終目標（平成 24 年度）

- ・ 数百kVA級単相変圧器の巻線モデルにより、過大電流の限流機能（過大電

流を定格電流の3倍以下に抑制)を検証する。

(4) 目標設定の根拠

4巻線構造の小型超電導変圧器モデルでは、限流機能を評価するための電流測定用として一次側、二次側ともに主巻線と並列に接続された補助巻線を持つ4巻線構造の小型超電導変圧器モデルを試作して限流機能を検証する。同巻線モデルの通電試験にて限流動作のメカニズム、巻線用線材に必要な特性及び巻線構成の条件等最適化を見極めなければならない。また、数百kVA級単相限流機能付加変圧器の限流機能条件として、短絡電流は20 MVA級変圧器の%インピーダンス(15 %相当)により定格電流の6倍程度に抑制されること、過去に金属系超電導線材の試験結果等から短絡電流は超電導巻線のクエンチによる抵抗分によってさらに限流されるが、逆に、クエンチ限流時の過電流による発熱での巻線の温度上昇に対応する巻線の許容範囲を考慮して、限流機能による抑制範囲を短絡電流の半分程度とし、定格電流の3倍以下を目標とした。なお、数百kVA級単相限流機能付加変圧器は、2巻線構造でコンパクト性も明確化する。

1.3.1-4 超電導変圧器対応線材開発

(1) 研究開発の必要性

超電導変圧器の実現には交流損失の低減は不可欠であり、使用される線材は垂直磁界変動に起因した交流損失の低減のためにスクライビング溝加工による細線化が必須となる。このため長手方向、幅方向の特性が均一な長尺線材の安定製造技術を開発する必要がある。

(2) 研究開発の具体的な内容

①システム検証用に必要な線材量(約10 km 総長)の安定製造に重要である歩留り向上等をめざし、線材作製最適プロセス条件拡大のための材料、組成の最適化等を実施する。②レーザ加工等によるスクライビング溝加工の細線化技術の加工技術を開発する。③切断及びスクライビング溝加工線材の超電導特性の評価及び線材安定製造技術へのフィードバックにより線材特性均一性向上に反映する。

(3) 開発目標

●中間目標(平成22年度)

- ・5 mm 幅3分割溝加工にて $I_c=50 \text{ A}/5 \text{ mm-w}@65 \text{ K}$ 、0.01 T、100 m 以上に相当する線材を安定に製造可能な技術を開発する。

- ・2 MVA 級変圧器モデル用等の線材として、PLD 線材 5 km (1 cm 幅換算)、PLD 線材基板 4 km (1 cm 幅換算)、MOD 線材 2 km (1 cm 幅換算) を供する。

○最終目標 (平成 24 年度)

- ・ 大電流巻線技術の検証用等の線材を供する。

(4) 目標設定の根拠

変圧器のシステム検証用線材では、上記線材にスクライビング溝加工を施し、電氣的絶縁性を確保しなければならないが、分割した際に、特性の分布や加工処理の影響等によりフィラメント特性が低下する。特性の目標値は、磁場・温度環境及び加工等の影響を考慮し、設定している。200 A/cm-w@77 K、s.f.に幅係数(0.5)、磁場・温度係数 (1.6) 及びスクライビング溝加工低下率(0.3)を乗じて $I_c=50 \text{ A}/5 \text{ mm-w}$ 、3 分割@65 K、0.01 T が求められる。

1.3.1-5 2 MVA 級超電導変圧器モデル検証

(1) 研究開発の必要性

配電用変圧器 (66 kV/6.9 kV-20 MVA 級) の実現には、巻線技術 (低損失技術、大電流技術等) や冷却システム技術等の要素技術を総合的に組み合わせた実機を製作し、実用化時の要求仕様に基づいた課通電試験による検証を行う必要がある。

(2) 研究開発の具体的な内容

20 MVA 級超電導変圧器の実現に向けて、66 kV/6.9 kV-2 MVA 級超電導変圧器モデルを開発し、前記、1.3.1-1 節の変圧器巻線技術開発、及び 1.3.1-2 節の冷却システム技術開発の成果を踏まえつつ、変圧器システムの設計・試作を行い、課通電試験によって性能を検証する。① 要素技術 (巻線、保冷容器、冷却システム等) を組み合わせて 66 kV/6.9 kV-2 MVA 級超電導変圧器モデルを開発する。② 交流損失低減や耐電圧性等を考慮した試験条件の設定を行い、開発した変圧器モデルの課通電試験を実施する。③ 66 kV/6.9 kV-2 MVA 級超電導変圧器モデルの特性を検証する。

(3) 開発目標

● 中間目標 (平成 22 年度)

- ・ 66 kV/6.9 kV-2 MVA 級超電導変圧器モデルのシステム設計を完了する。
- ・ 交流損失低減や耐電圧性等を考慮した課通電試験計画書を作成する。

○最終目標（平成 24 年度）

- ・ 66 kV/6.9 kV-2 MVA 級超電導変圧器モデルを試作し、中間目標で得られた設定条件における課通電試験を実施し、試験計画書の性能を満足することを検証する。

(4) 目標設定の根拠

20 MVA 級変圧器の技術を見通すために、耐電圧や機器構成に必要なブッシング、鉄心等は 20 MVA 級相当とし、また、電流に起因する巻線構成等は 20 MVA 級と等価にするために、巻線のターン数、内径等のサイズ及び超電導導体の多層並列構造は実機と同等とし、さらに巻線の並列導体数を極力低減することも必要である。それらを考慮した最低容量は 2 MVA となる。

1.4 超電導電力機器用線材の技術開発

Y 系超電導線材の開発においては、プロジェクト開始以前の開発により長尺高特性の線材の作製技術が開発され、機器の開発が開始できるレベルに到達はしたものの、実用化にはさらなる基礎特性の向上とともに各機器の特殊仕様に対応した線材開発が必要である。イオンビームアシスト蒸着 (IBAD) 法による結晶粒配向中間層上にパルスレーザ蒸着 (PLD) 法及び化学液相 (MOD) 法により超電導層を形成する手法で作製する Y 系超電導線材は、プロジェクト開始までに、500 m 長で $I_c = 300 \text{ A/cm-w} (@77 \text{ K, s.f.})$ を達成した実績がある。

本項の開発では IBAD-PLD 及び MOD 線材に加え結晶粒配向金属基板-PLD 線材、IBAD-MOCVD 線材も含めて電力機器応用の実用化技術開発、さらには導入・普及時に要求される仕様を満足させる Y 系超電導線材を作製する技術開発を目的とした。

1.4.1 研究開発項目毎目標

1.4.1-1 線材特性の把握

(1) 研究開発の必要性

「超電導応用基盤技術研究開発 (第 II 期)」における線材開発で、線材の長さ、特性、製造速度等の基盤となる性能を確保することに成功し、本プロジェクトにおける電力応用機器開発へ展開するステージに至っている。ここで、実用化を想定すると基本的超電導性能に加えて機械的強度や耐久性等の要件も機器作製や運転の場面で重要な因子となっており、定量的な評価とともに経年劣化を含めた劣化の抑制手法の開発も必要である。

(2) 研究開発の具体的な内容

実用線材を想定し、保存環境、運転環境及び事故環境を加速・模擬した様々な環境下に線材を供し、臨界温度(T_c) や臨界電流(I_c) 等の特性の経時・経年変化を評価する。必要に応じてX線回折による構成相の確認とともに微細組織観察を実施し、劣化機構とともにこれを抑制する手法の提案をめざす。

(3) 開発目標

- 中間目標 (平成 22 年度)
 - ・ 電力ケーブル耐久試験適正条件の決定
- 最終内部目標 (平成 24 年度)
 - ・ 各種機器環境に対する耐久性評価

(4) 目標設定の根拠

本プロジェクト内での機器開発の中で耐久性に関わる目標が設定されている超電導電力ケーブル研究開発に対応し、上記目標を設定した。ケーブルにおける耐久試験条件決定には、線材としての保存環境への耐性や過電流耐性を明確化する必要がある、これらの要素を明確にすることを意図している。最終目標に関しては、中間目標で設定されているケーブル耐久試験適正条件に関わる経時・経年変化等における知見を基本とし、他の電力機器 (SMES、変圧器) にも拡張し、広い応用分野での導入・普及に耐え得る線材開発をめざすべく目標を設定した。

1.4.1-2 磁場中高臨界電流 (I_c) 線材作製技術開発

(1) 研究開発の必要性

より高温でコンパクトな超電導機器をめざす観点からは、各機器の使用環境において、より高い性能が求められている。具体的には、変圧器応用での 0.1 T 近傍の低磁場領域から SMES での 11 T 程度の高磁場領域まで広い磁場領域でのさらなる臨界電流及び機械強度等の特性向上が必要である。

(2) 研究開発の具体的な内容

「人工ピン止め点導入関連技術開発」及び「高不可逆磁場材料の材料開発」により「SMES」及び「超電導変圧器」開発に求められる磁場中での高 I_c 特性を有する Y 系超電導線材の作製技術を開発する。

(3) 開発目標

- 中間目標（平成 22 年度）
 - ・ $I_c=30 \text{ A/cm-w @77 K, 3 T} \cdot 50 \text{ m}$
 - ・ $I_c=300 \text{ A/cm-w @65 K, 0.02 T} \cdot 50 \text{ m}$
- 最終目標（平成 24 年度）
 - ・ $I_c=50 \text{ A/cm-w @77 K, 3 T} \cdot 200 \text{ m}$
 - ・ $I_c=400 \text{ A/cm-w @65 K, 0.1 T} \cdot 100 \text{ m}$

(4) 目標設定の根拠

中間目標値に関して、SMES の実用化技術開発段階では、導入・普及時の 2 GJ 級 SMES の検証として 20 MJ 級の SMES が想定（「超電導電力ネットワーク制御技術開発」報告会資料参照）されており、本プロジェクトにおけるシステムモデル検証よりも特性に優れた Y 系超電導線材が必要となる。ここではコンパクト性等の観点から $I_c=300 \text{ A/cm-w@10 T}$ の特性が求められており、これを 20 K で運転すると想定すると、本プロジェクト開始時の換算値で上記の 77 K, 3 T における目標に相当することになる。また、超電導変圧器の実用化技術開発では、3 相 66 kV 変圧器の最小容量である 6 MVA 以上の変圧器による検討が想定されている。この 6 MVA 級超電導変圧器の粗設計によれば、一次側コイル 1033 ターン、内側二次コイル 54 ターン、外側二次コイル 54 ターンの条件で、実効値として $I_c=約 60 \text{ A/} 5 \text{ mm-w}$ の特性の線材が必要になる。臨界電流値（直流）への変換値($\sqrt{2}=1.41$)を乗じ、負荷率(0.8)で除すると $I_c=約 100 \text{ A/} 5 \text{ mm-w}$ の目標臨界電流値が求められる。この特性を実現すべき環境としては、想定している冷媒の液体窒素温度である 65K と上記粗設計で求められた最大垂直磁場強度で 0.02 T である。線材のレベルとしては、溝加工技術も分割数が 5 分割であり難易度は高くなっているが加工技術の開発が進むことを考慮し劣化度を約 2/3 と想定し、上記の 65 K,0.02 T における目標に相当することになる。

最終目標値に関しては、SMES の導入・普及時に必要な線材の作製が可能になることと設定した。SMES の導入・普及段階では、2 GJ 級 SMES が想定（「超電導電力ネットワーク制御技術開発」報告会資料参照）されており、その構成や仕様の詳細は今後の検討課題でもあるが、一例として、10 T 以上の磁場中で 500 A/cm-w の臨界電流特性が必要との報告がある。これを 20 K で運転すると想定すると、本プロジェクト開始時の換算値で上記の 77 K,3 T における目標に相当することになることから、これを目標値に設定した。また、超電導変圧器の導入・普及時には、適用対象として電力応用として最も台数の多い配電用変圧器を想定しており、配電用変電所に設置する変圧器容量である 20 MVA 級が想定されている。この 20 MVA 級超電導変圧器の粗設計によれば、前述の 6 MVA 級超電導変圧器と基本構造は同様で並列数、層数を増やして容量を 3 倍強に増

大きせる。従って、1本の線材に求められる実効電流値は6 MVA級と同様の約60 A/5 mm-wで設計しており、目標臨界電流 (I_c) 値としても同様の約100 A/5 mm-wとなる。温度も同様に65 Kであるが、容量増大に伴い磁場環境が変化し、最大垂直磁場強度が0.1 Tとなる。溝加工技術も分割数が10分割と極めて難易度は高くなっていることより劣化度を約1/2とすると上記の65 K, 0.02 Tにおける目標に相当することになる。

1.4.1-3 低交流損失線材作製技術開発

(1) 研究開発の必要性

交流応用が想定されている超電導電力ケーブル、超電導変圧器において交流損失を低減するために、超電導電力ケーブルでは、真円断面形状からのずれや線材間ギャップ数・間隔等の制御が適用され、超電導変圧器では、コイル形状における垂直磁場成分の変動に伴う交流損失低減のためのフィラメント（細線）化、転位巻線等の技術が適用される。これらの機器作製に対応可能なY系超電導線材の作製技術が必要である。

(2) 研究開発の具体的な内容

「特性均一線材作製技術開発」及び「細線化加工技術開発」により「超電導電力ケーブル」及び「超電導変圧器」開発に求められる低交流損失線材の作製技術を開発する。

(3) 開発目標

● 中間目標（平成22年度）

- ・ 2 mm 幅- $I_c=300$ A/cm-w(@77 K, s.f.) – 50 m
- ・ 5 mm 幅 5 分割-50 m ; 分割無し線材に比して交流損失 1/5

○ 最終目標(平成24年度)

- ・ 2 ~ 4mm 幅- $I_c=500$ A/cm-w(@77 K, s.f.) – 200 m
- ・ 5 mm 幅 10 分割-100 m ; 分割無し線材に比して交流損失 1/10

(4) 目標設定の根拠

中間目標値に関して、超電導ケーブルの実用化技術開発では、負荷率70%以下において交流損失がCVケーブルに比してメリットが創出できるレベルを想定した。この観点からは、層数を減らして均流化を容易にすることが考えられる。一例として、「大電流ケーブル」では6層構造で、「高電圧ケーブル」では3層構造で見通せると考えられており、5 kA及び3 kAを実現するための素線 I_c

値としては何れも $60 \text{ A}/2 \text{ mm-w}(@77 \text{ K, s.f.})$ が必要であることより上記の $300 \text{ A}/\text{cm-w}(@77 \text{ K, s.f.})$ 線材の目標値を設定した。また、超電導変圧器の実用化技術開発では、3相 66 kV 変圧器の最小容量である 6 MVA 以上の変圧器による検討を想定した。この 6 MVA 級超電導変圧器の粗設計によれば、一次側コイル 1033 ターン、内側二次コイル 54 ターン、外側二次コイル 54 ターンの条件で、損失低減の観点からは加工を施さない線材における交流損失を少なくとも $1/5$ に低減することが必要である。そこで、超電導変圧器を想定した中間目標値として 5 mm 幅線材 5 分割の目標値を設定するとともに、線材の分割数に対応（比例）して交流損失を低減することを確認することとしている。

最終目標値に関しては、超電導ケーブルの導入・普及時には、負荷率 60% 以下において交流損失が CV ケーブルに比してメリットが創出できるレベルであることに加えて、低コスト化が必要である。これに対し、特性向上による素線数軽減の効果により線材費用及びケーブル化費用軽減が必要であり、一例として、「大電流ケーブル」では 4 層構造で、「高電圧ケーブル」では 2 層構造で見通せると考えられる。ここで、それぞれ 5 kA , 3 kA を実現するための素線 I_c 値としては何れも $100 \text{ A}/2 \text{ mm-w}(@77 \text{ K, s.f.})$ が必要になっていることより上記の $500 \text{ A}/\text{xm-w}(@77 \text{ K, s.f.})$ 線材の目標値を設定した。ここでは、本プロジェクトにおける「超電導電力ケーブルの研究開発」において、低損失ケーブル実現に際し、線材幅として $2\sim 4 \text{ mm}$ 幅線材を用いた実績を反映してケーブル対応低交流損失線材作製技術開発における最終目標の線材幅を 2 mm 幅から $2\sim 4 \text{ mm}$ 幅と変更した（平成 23 年 1 月）。

また、超電導変圧器の導入・普及時には、適用対象として電力応用として最も台数の多い配電用変圧器を想定しており、配電用変電所に設置する変圧器容量である 20 MVA が想定されている。この 20 MVA 級超電導変圧器の粗設計によれば、前述の 6 MVA 級超電導変圧器と基本構造は同様で並列数、層数を増やして容量を 3 倍強に増大させる中で、損失低減の観点からは加工を施さない線材における交流損失を少なくとも $1/10$ に低減することが必要である。そこで、超電導変圧器を想定した最終目標値として 5 mm 幅線材 10 分割の目標値を設定した。

1.4.1-4 高強度・高工業的臨界電流密度 (J_c) 線材作製技術開発

(1) 研究開発の必要性

強磁場下での強いフープ力が想定される SMES 及び冷却時収縮長の裕度を内部構造での確保が困難であり、冷却時の応力負荷が想定される大電流ケーブルに対しては、高強度、高 J_c 線材の開発が必要である。

(2) 研究開発の具体的な内容

「高強度金属基板対応線材作製技術開発」及び「高臨界電流 (I_c) 化技術開発」により「SMES」及び「超電導電力ケーブル」開発に求められる磁場中での高強度、高 J_c 線材の作製技術を開発する。

(3) 開発目標

● 中間目標 (平成 22 年度)

- ・ $I_c = 300 \text{ A/cm-w} (@77 \text{ K, s.f.}) \cdot 1 \text{ GPa}$; 50 m
- ・ $J_c = 30 \text{ kA/cm}^2 (@77 \text{ K, s.f.})$; 50 m

○ 最終目標 (平成 24 年度)

- ・ $I_c = 500 \text{ A/cm-w} (@77 \text{ K, s.f.}) \cdot 1 \text{ GPa}$; 200 m
- ・ $J_c = 50 \text{ kA/cm}^2 (@77 \text{ K, s.f.})$; 200 m

(4) 目標設定の根拠

中間目標値に関して、SMES の実用化技術開発段階では、導入・普及時の 2 GJ 級 SMES の検証として 20 MJ 級の SMES が想定(「超電導電力ネットワーク制御技術開発」報告会資料参照)されており、本プロジェクトにおけるシステムモデル検証よりも特性に優れた線材が必要となる。ここではコンパクト性等の観点から $I_c = 300 \text{ A/cm-w} @ 10 \text{ T}$ の特性が求められており、77K, s.f. (自己磁場) 中の特性との比率を 1 と仮定し、さらに運転する磁場電流環境からのフープ力に耐えうる線材強度として 1 GPa とした。また、超電導ケーブルの実用化技術開発では、負荷率 70 %以下において交流損失が CV ケーブルに比してメリットが創出できるレベルが想定されている。この観点からは、層数を減らして均流化を容易にすることが考えられる。一例として、「大電流ケーブル」では 6 層構造で、「高電圧ケーブル」では 3 層構造で見通せると考えられており、それぞれ 5 kA, 3 kA を実現するための素線 I_c 値としては何れも 60 A/2mm-w (@77K, s.f.) が必要になっている。これは、10 mm-w 換算で 300 A/cm-w (@77K, s.f.) であり、コンパクト化のための基板厚さ薄肉化開発成果として総線材厚さを 100 μm (システム検証用線材は 130 μm 厚) と想定することから断面積が 1 mm^2 となり J_c 値として 30 kA/cm^2 (300 A/cm-w を総断面積 0.01 cm^2 で除した値) の目標値を設定した。

最終目標値に関しては、SMES の導入・普及時に必要な線材の作製が可能になることと設定した。SMES の導入・普及段階では、2 GJ 級 SMES が想定(「超電導電力ネットワーク制御技術開発」報告会資料参照)されており、その構成や仕様の詳細は今後の検討課題でもあるが、一例として、10 T 以上の磁場中で 500 A/cm-w (@20K) の I_c 特性が必要との報告がある。77K, s.f. 中の特性との比

率を 1 と仮定し、さらに運転する磁場電流環境からのフープ力に耐えうる線材強度として 1 GPa として上記目標値を設定した。また、超電導ケーブルの導入・普及時には、負荷率 60 %以下において交流損失が CV ケーブルに比してメリットが創出できるレベルに加えて、低コスト化が必要である。これに対し、特性向上による素線数軽減の効果により線材費用及びケーブル化費用軽減が必要であり、一例として、「大電流ケーブル」では 4 層構造で、「高電圧ケーブル」では 2 層構造で見通せると考えられる。ここで、それぞれ 5 kA, 3 kA を実現するための素線 I_c 値としては何れも 100 A/2 mm-w (@77K, s.f.)が必要になる。これは、10 mm-w 換算で 500 A/cm-w (@77 K, s.f.)であり、総線材厚を 100 μ m と想定し、 J_c が 50 kA/cm² (@77 K, s.f.) (500 A/cm-w を総断面積 0.01 cm² で除した値)の目標値を設定した。

1.4.1-5 低コスト・歩留向上技術開発

(1) 研究開発の必要性

本プロジェクト開始時には、技術コストとして 8~12 円/Am の技術を実現しているが超電導機器の実用化にはさらなるコスト低減が必要である。

(2) 研究開発の具体的な内容

結晶粒配向中間層付き金属基板形成技術としては、IBAD-MgO 中間層系と Ni 配向金属基板系を基軸として安価な金属基板の使用等を含め、製造速度の高速化、プロセス組み合わせの簡素化等と併せて低コスト化を図る。超電導層形成技術に関しては、PLD 法及び MOD 法を基軸に、高 I_c 化、高速化、高材料収率化、高製造歩留り化等の技術を開発し、さらなる低コスト化を図る。

(3) 開発目標

- 中間目標 (平成 22 年度)
 - ・技術コスト 3 円/Am の実証
- 最終目標 (平成 24 年度)
 - ・中間目標の安定製造技術
 - ・技術コスト 2 円/Am の実証

(4) 目標設定の根拠

実用化技術開発の段階では、本質的に導入・普及時に求められるコスト(3 円/Am 以下)を見込める線材構造が必要であることより中間目標として上記の目標を設定した。また、実際に中間目標で実現した低コスト作製技術を実用化技術

開発に供するためには、このレベルの線材の安定製造を可能とする技術が必要である。この観点から、最終目標には中間目標における線材作製技術の安定製造技術の開発を設定した。また、導入・普及時に超電導機器を拡大・展開するには、より低コストな線材が必要であることより最終目標を技術コスト 3 円/Am 未満の実証とした。ただし、この 3 円/Am 未満の目標値の定量性が不明確であることから、超電導機器の実用化促進が見込める目標値として、最終目標値を 2 円/Am の実証と変更した（平成 23 年 1 月）。

1.5 超電導電力機器の適用技術標準化

我が国の超電導標準化事業は、1986 年から進められているが、これまでその対象は超電導関連用語規格及び超電導の基本的試験方法規格の発行に留まっていた。しかし、昨今の高温超電導線材の技術開発の急進展と相俟って、今後、電力・エネルギー、産業・輸送、診断・医療等の分野において、超電導応用製品の市場拡大が見込まれており、我が国が技術的に先行するこれらの分野で、用語規格等に留まらない領域での国際標準化が求められている。

そこで、本事業では、電力・エネルギー、産業・輸送、診断・医療等の分野における標準化の一環として、不可欠な要素となる超電導線材やこれを適用した超電導電力ケーブル等超電導電力機器に関する標準化に必要な技術動向や標準化ニーズ動向の調査を実施し、国際標準化合意醸成を図りつつ、国際的な規範文書のベースとなる規格素案を作成し、国際規格提案に資することを目的とする。

1.5.1 研究開発項目毎目標

1.5.1-1 超電導線関連技術標準化

(1) 研究開発の必要性

高温超電導線材の技術開発は日本、米国、欧州、韓国、中国等で活発に行われており、わが国の線材化技術は世界トップレベルを維持している。超電導線材の標準化についても他国に先行して国際規格を提案することは、我が国発の技術を世界に普及させるために極めて重要である。

(2) 研究開発の具体的な内容

超電導線材の通電特性並びに機械特性・電磁気特性の試験方法の共同実施並びに超電導電力機器技術調査委員会及び超電導線小委員会において、Y 系超電導線材並びに実用超電導線材の特徴調査を行い、規格化のための技術的課題を

纏める。また、超電導線材に係わる IEC 国際標準化の国際合意を目標として情報集約並びに国際合意状況の把握を行う。

(3) 開発目標

●中間目標（平成 22 年度）

- ・ Y 系を含む超電導線材を実用超電導線材とした超電導線材並びにその試験方法の規格素案を作成するとともに、IEC 国際標準化合意の醸成を行う。

○最終目標（平成 24 年度）

- ・ 超電導線材並びにその試験方法の規格素案と国際合意を背景に、IEC 国際規格提案に資する。

(4) 目標設定の根拠

今後実用化される超電導電力機器の中では高温超電導線材と低温超電導線材がともに応用されうることも想定されるため、両者に共通した規格素案が必要である。また、Y 系超電導線材については、すでに低温超電導線材で規格化されている臨界電流、臨界温度、機械特性等の基本的な特性の試験方法の規格化が必要である。

1.5.1-2 超電導電力ケーブル関連技術標準化

(1) 研究開発の必要性

高温超電導線材を適用した超電導電力ケーブルは日本、米国、欧州、韓国、中国で開発競争が行なわれており、日本のケーブル技術開発と並行して日本発の国際規格を提案することは、わが国で開発された超電導ケーブル技術を世界に普及させるために極めて重要である。

(2) 研究開発の具体的な内容

これまでに開発された超電導電力ケーブル関連技術の技術標準化調査結果に海外の現地調査結果を加え、超電導電力機器技術調査委員会及び超電導電力ケーブル小委員会において規格素案の中間結果を纏める。また、国際大電力システム会議（CIGRE）等との連携により IEC 国際標準化の国際合意を目標として情報集約並びに国際合意状況の把握を行う。

(3) 開発目標

●中間目標（平成 22 年度）

- ・ Y 系を含む超電導線材を適用した超電導電力ケーブル並びにその試験方法

の規格素案を作成するとともに、これらに並行して国際大電力システム会議（CIGRE）、他の IEC/専門委員会 TC 等との IEC 国際標準化合意の醸成を行う。

○最終目標（平成 24 年度）

- ・超電導電力ケーブル並びにその試験方法の規格素案について、国際合意を確立し、IEC 国際規格提案に資する。

(4) 目標設定の根拠

本プロジェクト内で進められている Y 系超電導線材を適用した超電導電力ケーブル、及び高温超電導ケーブル実証プロジェクトで開発中の Bi 系超電導線材を適用した超電導電力ケーブルに対応した日本の技術を国際規格に提案するために、上記目標を設定した。

1.5.1-3 超電導電力機器関連技術標準化等

(1) 研究開発の必要性

超電導電力機器の早期の実用化、市場導入を円滑に進めるためには、超電導線材を適用した超電導電力機器適用技術の標準化等を行うことが必要であり、特に本プロジェクトで実施中の SMES 及び変圧器の技術の標準化に関する調査は、前述の超電導ケーブルの技術の標準化と同様に重要である。

(2) 研究開発の具体的な内容

超電導電力機器技術調査委員会及び超電導電力機器小委員会における調査並びに海外の現地調査や国際専門家討論会を実施する。また、超電導電力機器に係わる阻害要因、法規制緩和並びに国際的法規制緩和の調査検討を行う。

(3) 開発目標

●中間目標（平成 22 年度）

- ・ Y 系を含む超電導線材を適用した超電導変圧器、SMES 等の機器仕様並びにこれらの試験方法の標準化の基礎となるデータ等の体系化を行う。

○最終目標（平成 24 年度）

- ・ Y 系を含む超電導線材を適用した超電導変圧器、SMES 等の機器仕様並びにこれらの試験方法の標準化素案を作成するとともに、IEC 国際標準化合意の醸成を行う。
- ・ 冷却システムの安全性、運用性を考慮した規制緩和に向けた提案資料を作成する。

(4) 目標設定の根拠

本プロジェクト内で進められている超電導電力機器として、超電導ケーブルの技術の標準化と同様に重要である SMES 及び変圧器に対応した日本の技術を国際規格に反映させるために、上記目標を設定した。

・実用化、普及・導入へのシナリオ・スケジュール

本プロジェクトで開発を進めた電力機器（SMES、ケーブル、変圧器）のプロジェクト開始当初における実用化、普及・導入へのシナリオ・スケジュールを、図 1-3 に示す。



図 1-3 実用化、普及・導入へのシナリオ・スケジュール

2. 事業の計画内容

2.1 研究開発の内容

酸化物高温超電導物質が発見されてから 27 年が経過した。発見当初は高温超電導を示す新物質の探索や特性研究に多くの時間がかげられた。線材応用は、実用化が実現した場合の産業・社会への影響の大きさから世界的に開発競争が繰り広げられている。既に、Bi 系銀シーす超電導線材でキロメートル級の線材が生産されている。この 10 年で、臨界電流磁場特性、機械強度等において Bi 系線材のポテンシャルを大きく凌駕するイットリウム (Y) に代表されるレアアース (RE) 系銅酸化物高温超電導線材 (図 II-2.1) の研究開発が急速に進んできた。我が国においては、NEDO が推進した平成 10 年度から 14 年度までの「超電導応用基盤技術開発 (第 I 期)」における Y 系超電導線材・材料研究開発、平成 15 年度から平成 19 年度までの「超電導応用基盤技術開発 (第 II 期)」における Y 系長尺超電導線材作製プロセス及びケーブル、変圧器、限流器、冷凍機、電動機の開発をめざした機器要素研究開発による成果、さらには平成 16 年度から平成 19 年度までの「超電導電力ネットワーク制御技術開発」における電力貯蔵(SMES) システムの開発の成果が大きい。

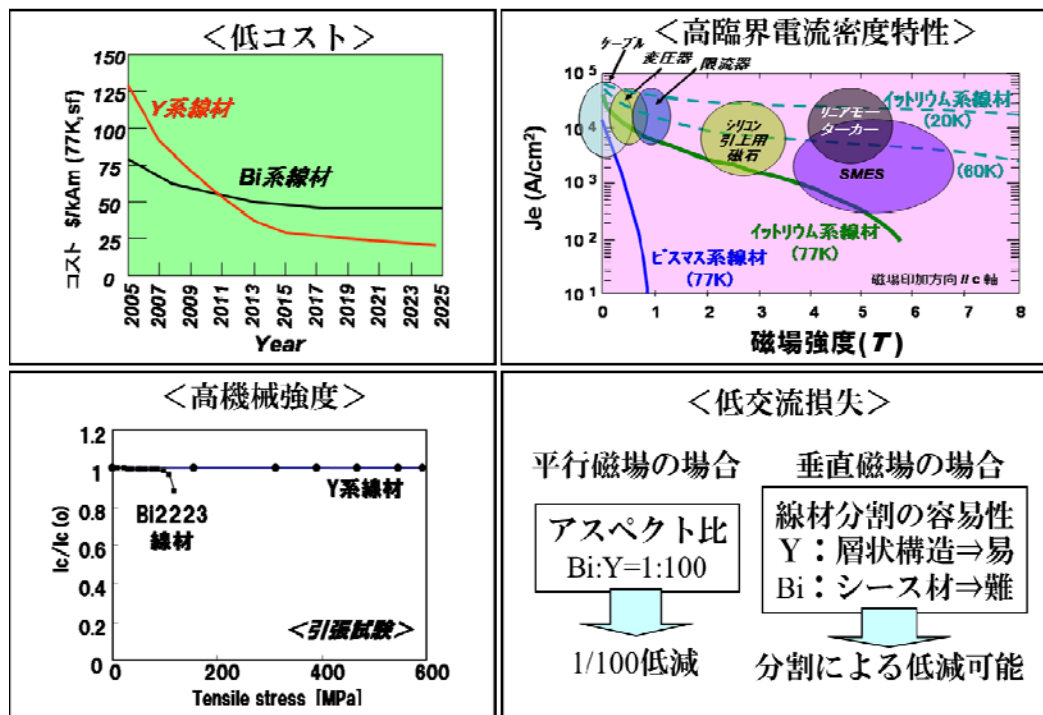


図 2.1-1 Bi 系超電導線材に対する Y 系超電導線材のメリット

優れた超電導特性を示す Y 系超電導線材は低温（～20 K）から液体窒素温度(64～77 K)の広範な温度領域においても高磁場臨界電流特性が優れている。また、自己磁場下における臨界電流密度も高く、高強度金属基板の使用により線材の高機械強度化も可能であるとともに、細線化等による低交流損失線材加工技術の適用も可能であること等が明らかになっている。超電導線材の主たる応用である電力用低損失大電流及び高電圧コンパクトケーブルへの利用、線材の高磁場高強度特性を利用した SMES（超電導電力貯蔵技術）を含めたマグネット用等の高磁場応用、細線化した線材を用いた低交流損失が必須となるコンパクト・高効率変圧器への応用等に対しての極めて高い優位性を有する材料であることが、日米欧での熾烈な開発競争の要因となっており、本プロジェクト開始時点での我が国の研究実績は世界をリードしている状況にある。

「超電導応用基盤技術開発（第 II 期）」プロジェクトにおける、Y 系超電導線材開発の成果において、200 m～500 m 長級の線材に対して、1 cm 幅の線材で液体窒素温度(77 K)において 200 A/cm-w から 300 A/cm-w の臨界電流 (I_c) を超える特性を有した線材開発が数種類の作製プロセスにおいて成功した。また、77 K, 3 T の磁場中で 30 A/cm-w を超える磁場中臨界電流特性向上の解決策となる磁束ピンニング点としての人工ピン止め点の導入にも成功している。本プロジェクト開始時点では、日米欧の熾烈な開発競争において、超電導特性の点で我が国が世界をリードしている状況にある。しかしながら、長さ及び生産速度において米国の開発に遅れている事実は否めない。我が国の技術的蓄積と開発能力を集中し、Y 系超電導線材の優れた特性を実現する線材作製技術において、高速製造、低コスト化、歩留り向上、量産化要素技術等のさらなる技術開発により、国際的産業技術競争力を維持し、新たな高温超電導線材産業の創出等、我が国の経済再生にも大きく貢献することができると考えられる。また、Y 系超電導線材の高特性を有効に活用した電力機器として、超電導電力貯蔵システム (SMES)、超電導電力ケーブル、超電導変圧器を対象に、「超電導応用基盤技術開発（第 II 期）」プロジェクトにおける、機器要素研究成果をさらに発展させ、将来の実用化、導入・普及に目途をつける重要な要素技術開発を行う。

SMES は、数秒の出力時間で良いが大出力が必要な電力ネットワークの系統安定化用途や、繰返しの変動が発生する分散電源や自然エネルギーによる発生電力を補償する用途に最適な電力貯蔵装置である。SMES は、NAS 電池やレドックスフロー電池等の 2 次電池やコンデンサ等の競合技術に比して電力貯蔵効率がよく、短時間に大電力の出し入れ可能という特長を有するとともに、比肩しうる経済性を持ちうる見通しができるようになってきた。このことから、早期の SMES の実系統適用に向けて、さらなる経済性向上の可能性を有する

Y系超電導 SMES コイルの技術開発が緊要である。今後の電力系統を考えた場合、原子力発電を含む電源設備は、電力需要地から遠方に立地することが考えられ、送電線の距離が長くなると電圧変動等々が生じやすくなることが懸念される。また、風力や分散電源が需要地近傍の系統に連系することも想定され、これらの発電電力の変動によっては電力系統が不安定になることが考えられる。SMES は、有効電力と無効電力を独立して短時間に大出力でき、また、繰返しの入出力も可能な電力機器である。この特長を活かすことで、上記の課題を解決する電力系統の制御が可能となる。

本プロジェクトでは、系統安定化用及び負荷変動補償・周波数調整用途に適用できる規模である 2 GJ 級 SMES を想定した大容量コイルシステムの実現に向け、金属系コイルでは実現不可能な高磁界コンパクトコイルの要素技術開発や伝導冷却構造の開発を実施する。また、2 GJ 級コイルシステムの成立性を確認するために、コイル配置や運転条件等の最適化を行い、これらの結果を踏まえコイルを試作し、その性能を検証する。

超電導ケーブルは、発電電力を無駄なく輸送するための革新的な高効率送電技術として期待されている。この目的に対応する超電導ケーブルとしては、66kV 級の大電流超電導ケーブルと、275 kV 級の高電圧超電導ケーブルであり、ケーブルの超電導化により、送電損失を現用のケーブルに比べて 1/2 から 1/3 に低減することが可能で、高効率な送電ケーブルが実現できると考えられる。

本プロジェクト開始時点で、実証段階まで開発が進められている超電導ケーブルは、高温超電導材料で唯一商業化されている Bi 系超電導線材が用いられている。しかしながら、Bi 系超電導線材は、良導体の銀をマトリックスに使うために超電導体の細線フィラメント化の効果が薄れ、母材の中を電流が流れる結合損失等で交流損失が大きくなる課題がある。一方で、Y 系超電導線材は、Bi 系超電導線材に比べ磁場中での臨界電流特性、機械強度に優れている。また、薄膜構造であることから、ヒステリシス損失が小さく、構造上線材の細線化による交流損失の低減も可能である。さらには将来のコスト低減も優利であると期待されている。この Y 系超電導線材を超電導ケーブルに応用するにあたっては Bi 系超電導ケーブルと異なる技術課題を明確化してクリアする必要がある。

66 kV/5 kA の低損失大電流ケーブルは 500 MVA 級の容量をもち、従来ケーブルでは、154 kV 級の OF ケーブル、POF ケーブルの容量に匹敵する。このクラスのケーブルは、国内では既に設置導入後 30～40 年経過したものが多く、その寿命が近づいて来ており、リプレースを行う時期が到来しつつある。これを超電導ケーブルで置き換えれば、必要スペースが小さくて済むため、空いた

スペースを有効活用することが可能であるとともに、送電損失が小さくなる。さらに、リプレースにより、CO₂の排出を抑制する効果も期待できる。

本プロジェクト開始時点における Y 系超電導線材でのケーブル開発実績は 1 kA 級のものであり、5 kA 級の大容量・大電流ケーブルは開発されていなかった。大電流化を行うには、超電導線材を多層（6～8 層程度）に積層する必要がある。この多層導体の場合の交流損失への影響、ケーブル機械的特性の評価等を実施する必要があるとともに、終端接続部では、多層の場合の導体接続方法、5 kA 級電流リードの低熱侵入化等も開発検証する必要がある。

Y 系超電導線材は、線材テープ面に平行な磁界変動に対しては、薄膜線材構造であることから非常に小さな交流損失特性であるが、テープ面に垂直な磁界変動に対しては、交流損失は無視できない。この Y 系超電導線材を用いてケーブル導体を形成する場合、電流による磁場は同心円状となり、理想的には線材にはテープ面に平行な磁場のみ印加され、ケーブルの交流損失は非常に小さくなることが期待できる。しかしながら、実際は、超電導線材はフォーマ（巻き中心）にスパイラル状に巻きつけられるため、フォーマに沿わない線材の部分は、テープ面に垂直な方向の磁界を受け、その変動による交流損失は期待されるものよりも大きくなる。これを防ぐため、Y 系超電導線材のテープ幅をより狭くし、線材をフォーマに沿わせることで、損失低減が可能であることが、これまでの NEDO プロジェクトの成果として原理検証されている。本プロジェクトでは、細線化した線材（～2 mm 程度）を用いることで線材にかかる垂直磁場を低減させる方法を継承し、低損失で大電流のケーブル導体化開発を行う。垂直磁場をより効果的に低減させるには、線材間のギャップを小さくすることも重要であり、その導体集合技術の開発を行う。また、後述する結晶粒配向金属基板の可撓性を活かし、幅が広い線材をフォーマに沿わず技術の開発についても検討する。

275 kV/3 kA の低損失高電圧超電導ケーブルは、送電容量が 1500 MVA と架空送電線並みで、競合技術となる CV ケーブルの 3 倍の大容量送電が可能である。そのため、新規地中送電線の建設に当たり、ケーブル本数を 1/3 にすることができ、さらに、管路、洞道の地下設備のコンパクト化も可能であり、大幅なコストダウンが期待できる。この低損失高電圧超電導ケーブルの開発に関しての関連技術としては、インパルス耐電圧、交流耐電圧、寿命データ等のケーブルに対する絶縁設計のロジック、超電導ケーブルの冷却、課通電試験での知見、Y 系超電導線材を低抵抗で接続する技術、Bi 系超電導ケーブル製造実績及び 1 kA 級 Y 系単相超電導ケーブルの製造実績に基づいたケーブル製造技術、また、短絡電流対策として、20 m 長の単相 Y 系超電導ケーブルを用いて 31.5 kA、2 sec までの短絡試験を実施して、劣化等が無いことの確認等、保

護導体を含めた導体構造設計技術において、これまでの NEDO プロジェクトで培ってきた実績がある。これらの多くの要素技術成果を継承し、高電圧超電導ケーブル開発において、電気絶縁設計等のケーブル設計パラメータと誘電体損失の関係を明確にし、低交流損失化とともに、コンパクトで低損失なケーブル開発を進める。絶縁厚の厚い 275 kV 超電導ケーブルの常時運転において、交流損失、誘電体損失、冷却のバランスを考慮した最適設計高電圧接続技術については、66 kV/77 kV 級超電導ケーブルの接続技術で達成した低抵抗接続技術をベースとして、275 kV 級のケーブルの中間及び終端接続を開発する。さらに、30 m 超電導ケーブルを冷却システムとあわせて長期試験場に布設して、所定の電圧、電流による課通電試験により初期性能特性を確認する。その後、所定の試験条件で長期課通電試験を実施して、ケーブル、システム設計の妥当性について検証する。

また、固体窒素と液体窒素を混合したスラッシュ窒素を冷媒として用いる冷却システムでは、固体の融解温度(63 K)での冷却が可能となり、液体窒素冷却時に比べケーブル温度が低温化し、ケーブルの性能向上が期待できる。さらには、固体の融解潜熱に相当する熱容量をスラッシュ窒素が保有するため、系統事故時のような急激な発熱に対しケーブル温度の上昇を抑制することで系統の安定性向上が期待できると考える。本プロジェクトでは、スラッシュ窒素のケーブル冷却に適した装置構成とその最適化、特に、固液二相混合流体に対する圧力損失への影響が大きい固相率の制御方法の開発、実用化を見据えた連続的で大容量な生成方法の開発、スラッシュ窒素冷却によるケーブル冷却効果の把握をめざした研究を進める。

近年、地球環境を考慮した電力供給に貢献し、今後増加が想定される高経年機器にも対応できる電力機器が必要とされている。これらに対応するために、変圧器は小型で不燃かつ保守性や経済性に優れたものが期待されている。従来の変圧器は電気抵抗による損失が大きい、電気抵抗が殆ど無い超電導線材を変圧器に適用すると、その低損失や高電流密度の特性から巻線や鉄心の断面積を小さくでき、変圧器の高効率化や大幅なコンパクト化・軽量化が図れる。また、冷媒は液体窒素で不燃なことから環境にやさしく保守性に優れた機器となる。これらの特長から、超電導変圧器は都市部を主体とした電力需要増に伴う変圧器容量対策や変電所の新設対策、及び経年に伴う変圧器のリプレース対策に貢献すると考えられている。さらに、大容量送電を可能とする超電導電力ケーブルとの組み合わせにより高効率な電力供給システムが可能となる技術として期待されている。

本プロジェクト開始時期までに、Bi2223 線材による 22 kV/6.9 kV-800 kVA 級単相超電導変圧器を開発し、系統連系試験等も行われてきた。しかし、磁界

中の臨界電流向上や交流損失低減等の課題が残った。一方、Y系超電導線材は高電流密度で、線材の分割加工技術による低交流損失化が実現できるとともに、将来的に低コストになると想定されている。また、高効率で大容量な冷却装置の開発も進んでいる。これらの技術を変圧器に適用すると、小型・軽量で高効率かつ経済的な超電導変圧器が実現できると考えられる。NEDO プロジェクトの「超電導応用基盤技術開発（第Ⅱ期）」において、Y系超電導変圧器の要素技術として、分割加工されたY系超電導線材を用いたコイルでの低交流損失化基礎技術、66 kV級の高電圧化技術、1 kA級巻線の大電流化要素技術が開発された。本プロジェクトでは過去のプロジェクトの成果を活用し、コンパクトで高効率な超電導変圧器の、巻線技術、高電圧絶縁技術等の重要な技術開発を行う。さらに2 MVA級超電導変圧器モデルを開発し、実現性を検証することによって、高効率な変電技術を確立する。具体的には、超電導変圧器巻線技術開発として、線材の多層並列転位構造技術とともに低損失化技術を開発し、2 kAが通電可能な鉄心付大電流巻線モデルを開発する。さらに、短絡電流の電磁力によって、巻線が劣化しない安定巻線技術による短絡変圧器モデルを開発する。超電導変圧器に限流機能を備えることにより自身の健全性を維持するとともに、電力系統の事故時の過大な事故電流を瞬時に抑制して事故の波及抑制が可能で、電力系統の短絡容量対策にも貢献すると期待されている。さらに、将来的に超電導電力ケーブルと超電導変圧器を連系して適用する場合にも限流機能は相互の導入促進に貢献すると考えられる。そのため、変圧器に対して限流機能を付加する技術の基礎試験を行い、その結果に基づき数百 kVA級限流機能付加単相変圧器モデルの設計・試作を行い、限流特性を検証する。

配電用超電導変圧器（66 kV/6.9 kV-20 MVA級）の実現には、巻線技術（低損失技術、大電流技術等）や冷却システム技術等の要素技術を総合的に組み合わせた実機を作製し、実用化時の要求仕様に基づいた課通電試験による検証を行う必要がある。そのため、本プロジェクトでは、20 MVA級変圧器を検証可能な66 kV/6.9 kV-2 MVA級超電導変圧器モデルの設計・試作を行い、課通電試験によって性能を検証する。

また、冷凍機は、超電導変圧器に限らず、超電導機器を実現するために必要不可欠な機器である。超電導電力機器の冷却には数 kW@40 K~70 Kの冷凍能力が必要であるが、本プロジェクト開始時点でこの仕様に合致した冷凍機は未開発である。超電導機器冷却用の冷凍機には、長期寿命が要求されている。そこで、長寿命が実現できる無摺動・メンテナンスフリーの冷凍機を本プロジェクトで開発する。超電導電力機器冷却に適した冷凍機の主要構成機器として必要な摺動部を持たない圧縮機は本プロジェクト開始時点で存在していなかった。メンテナンス不要な無摺動冷凍機を開発するためには、摺動部を持たな

い小型圧縮機の開発が不可欠である。また、冷凍機の高効率化を図るためには単なる無摺動圧縮機の研究開発だけではなく、断熱効率 70 %以上の高効率な圧縮機の開発が必要となる。本プロジェクトでは、NEDO の「超電導応用基盤技術開発 (第 II 期)」プロジェクトにおいて既に開発済みの膨張タービンの改良により、70 %以上の高効率タービンの開発も同時に行う。

Y 系超電導電力機器開発に不可欠な超電導線材の開発も上記機器開発に並行して進めることが、将来の超電導電力機器の実用化、導入・普及には重要であると考えられる。これまでの電力機器用線材としては、「銅線」「NbTi 超電導線」「MgB₂ 超電導線」「Bi 系銀シース超電導線」がある。銅線はコストが安価であるものの、Y 系超電導線材に比して輸送可能な電流密度が 1/100 程度であり、大容量時のコンパクト化に難がある。NbTi 超電導線材もコストが 1 円/Am(@4.2 K)以下と安価ではあるが、臨界温度(T_c)が低いことから使用温度が液体ヘリウム温度に限られ、冷媒にコストがかかるのに加えて低温で比熱が小さいことからクエンチが起きやすい。MgB₂ 超電導線材もコストが安く、加工性にも優れているが、NbTi 超電導線材と同様に T_c が低いこと、及び磁場中での特性低下が激しい点で Y 系超電導線材が有利である。 T_c も高く、開発も進んでいる Bi 系銀シース線材との関係は、開発が先行していることから長尺線材の安定製造の観点からは Bi 系銀シース線材が有利であるといえるが、将来低コストが可能であること、磁場中の高臨界電流特性、高機械強度、低交流損失化のための可加工性の点で Y 系超電導線材が勝っている。このことから、日米欧で熾烈な Y 系超電導線材及び Y 系超電導電力機器の開発競争が繰り広げられている。平成 19 年度まで実施されていた「超電導応用基盤技術開発 (第 I 期、第 II 期)」プロジェクトを通して様々な手法で線材作製研究開発が実施された。長尺線材として 504 m (I_c は 330 A/cm-w@77 K, s.f.)、高 I_c 線材 (短尺) として 735 A/cm-w (@77 K, s.f.)、磁場中高 I_c 線材 (短尺) として 40 A/cm-w(@77 K, 3 T)、極低コスト線材開発として、IBAD(MgO)-MOD 線材で 3 円/Am の原理検証の成果が実績として得られており、世界をリードしていた。これらの線材性能のレベルは、機器開発が可能な長さ及び特性を満たすものであり、平成 18 年度から、機器を念頭においた要素技術が開発され、ケーブル、変圧器、電動機、限流器、SMES 等の機器を対象に必要な要素技術の開発が行われ、一部では小型のデモ機も試作された。しかしながら、実用レベルの機器を考えると、何れの機器に対しても必要となる線材としての基本的条件として、線材の経時・経年変化の把握、特性の向上とともに安定製造技術や高速製造技術等の量産技術の開発が必要である。また、コストの面からも 3 円/Am 以下で可能な限り安価な線材が求められている。この低コスト化に対しては、高速製造技術や高特性化技術は有効であるが、これに加えて原料収率

や歩留の向上も必須の開発課題となる。また、適用機器個別の要求に応え得る線材の技術開発も必要となる。例えば、SMES では、高磁界下において大電流通電によりエネルギーを出し入れすることから、磁場中高臨界電流特性とともに発生する強いフープ力に耐え得る高機械強度を有した線材の開発が求められている。電力ケーブルでは、限られたスペースで大容量通電を実現するためには線材の全断面積に対する臨界電流密度値である工業的臨界電流密度 (J_c) の向上が重要な因子となる。変圧器においては、容量増加時の変圧器本体でのコンパクト性は期待できるものの交流損失を低減しなければ冷却システムが大きくなり、トータルシステムとしてのコンパクト化、効率向上が困難になる。従って、交流損失を低減させるための Y 系超電導線材の細線化技術が必要である。その際に特性が低下しないように特性均一な線材とともに加工技術の開発が求められている。上記の通り、本プロジェクト開始時点までの開発により長尺高特性の線材の作製技術が開発され、機器の開発が開始できるレベルに到達はしたものの、実用にはさらなる基礎特性の向上とともに各機器の特殊仕様に対応した線材開発が必要であった。具体的には、経時変化特性把握、磁場中高 I_c 線材作製技術、低交流損失線材作製技術、高強度・高 J_c 線材作製技術、低コスト・歩留向上技術開発を進めることが重要である。表 2.1-1 に各研究開発テーマの開発項目を示す。

表 2.1-1 研究開発項目

SMES (電力貯蔵)	ケーブル	変圧器	Y系線材
<ul style="list-style-type: none"> ○2GJ級高磁界・大電流通コンパクトコイル構成技術開発、 ○高効率コイル伝導冷却技術開発、 ○SMES対応線材安定製造技術、 ○高磁界コンパクトSMESシステムモデル検証 	<ul style="list-style-type: none"> ○大電流・低交流損失ケーブル化技術開発、 ○高電圧絶縁・低誘電損失ケーブル化技術開発、 ○超電導電力ケーブル熱収支評価研究、 ○超電導電力ケーブル対応線材安定製造技術、 ○66kV大電流ケーブルシステム検証、 ○275kV高電圧ケーブルシステム検証 	<ul style="list-style-type: none"> ○超電導変圧器巻き線技術開発、 ○冷却システム技術開発、 ○限流機能付加技術開発、 ○超電導変圧器対応線材安定製造技術、 ○2MVA級超電導変圧器モデルの検証 	<ul style="list-style-type: none"> ○線材特性把握、 ○磁場中高臨界電流 (I_c) 線材作製技術開発、 ○低交流損失線材作製技術開発、 ○高強度・高工業的臨界電流密度(J_c)線材作製技術開発、 ○低コスト・歩留向上技術開発
 2GJ SMES	 66kV-5kAケーブル 275kV-3kAケーブル	 66kV/6.9kV-20MVA級変圧器	 イットリウム系超電導線材

2.1.1 超電導電力貯蔵システム (SMES) の研究開発

電力自由化の進展や、新エネルギー等の安定度の異なる分散電源の導入・拡大、電気エネルギー供給主体の多様化が進むなかで、国民生活・産業活動全般の共通基盤的な財である電気エネルギーを需要先へ適確に供給する電力ネットワーク機能の安定化や品質の維持は、電気事業者においてのみならず、国民経済における喫緊の課題である。そのような状況下で、技術面での優位性や立地の柔軟性が期待できる SMES は、経済性においても低コスト化の見通しを得ることで、新規の大変有効な手段となると考えられる。

本プロジェクト開始時点までの NEDO の「超電導電力貯蔵システム技術開発」プロジェクトにより、現状で機器化可能な金属系超電導コイルのコストミニマム設計及び実機との等価性を考慮したモデルコイルの製作・性能試験により、コスト競争力と技術性能の両立性が検証された。SMES が競合技術と比肩しうる経済性を持ちうることを見通せるようになったことを踏まえ、早期の SMES システムの実系統適用に向けて、コイル以外の構成技術との統合・最適化をめざすシステム技術開発を図るためにトータル SMES システムの低コスト化、及び実系統連系試験によるネットワーク制御システム技術の開発・検証が行なわれた。今後は、さらなる経済性向上可能性を秘めた Y 系 SMES コイルの技術開発が緊要である。

このため、本プロジェクト開始時点までに得られた成果を踏まえ、金属系超電導線材を用いた SMES コイルでは実現不可能であった 2 GJ 級大容量 SMES コイルを可能とする Y 系超電導線材を用いた高磁界・コンパクトコイルの要素技術開発を行うことを目的とする。また、SMES 対応 Y 系超電導線材の開発は、高磁界・コンパクトコイルの技術開発に適用可能な線材の安定製造技術の確立を目的とした開発を進める。これらの開発成果を踏まえて、後期 2 か年（平成 23 年度～平成 24 年度）は SMES コイルシステム化技術のために必要となる高耐久性・高信頼性コイルを検討・評価することにより、2GJ 級 SMES の実現に資する重要な要素技術を開発することを目的とする。また、コイル保護技術の確立を目的とした開発を進める。

2.1.1-1 2 GJ 級高磁界・大電流コンパクトコイル構成技術開発（中部電力、京都大学、早稲田大学、鹿児島大学、東北大学）

2 GJ 級大容量 SMES コイル実現のためには、従来の金属系 SMES では達成できなかったレベルへの貯蔵エネルギー密度の向上が課題となり、磁場中特性に優れる Y 系超電導線材によるコイルを用いた高磁界化による貯蔵エネルギー高密度化が必要となる。この高磁界コイルの実現には、コイル通電時に発生す

る通電電流(J)と最大経験磁場(B)、コイル径(R)の積(BJR)として加わる強力な電磁力(フープ応力)の繰返し負荷に耐えるコイル構成を開発することが不可欠である。「超電導電力ネットワーク制御技術開発」プロジェクトにおいて CVD 法により作製された Y 系超電導線材の機械強度を評価し、77 K 液体窒素中においてフープ応力方向の一軸引張応力が 1 GPa を超えても I_c が可逆領域であること、また、SMES 充放電繰返し動作のように引張応力を 10^6 回繰返しても 1 GPa を超える領域まで疲労破断による劣化がなく、高磁場 SMES へ高いポテンシャルを有する線材特性であることを検証した。さらに、IBAD/CVD-Y 系超電導線材を用いて、応力集中が懸念されるコイル電極部構造への対策を施した小型コイルを作製してフープ応力試験を実施し、実際に耐フープ応力 1 GPa を有することを実証した。

平成 20 年度～22 年度は、高磁界化による高エネルギー密度化コンパクトコイルをめざし、従来の金属系 SMES コイルの許容可能なフープ応力(300 MPa 程度)の 2 倍の応力 (600 MPa) を連続して繰返し加えても使用可能な高強度コイルとして、外径 250mm 級の小コイルを開発した。また、2GJ 級大容量 SMES コイルの技術見通しを得るために必要な 20MJ 級システムの要素コイル規模である外径 700mm 級コイルを開発した。既存仕様レベルの $I_c=200$ A/cm-w で 200 m 級線材を用いて目標レベルのフープ応力の検証評価が可能となるように配置した外部マグネット磁場下において、開発した外径 250mm 級コイルを励磁し、フープ応力を繰返し作用させ、コイルが一体変形で約 850MPa と中間目標値である 600MPa 以上の耐フープ応力特性を有することを実証した。次に、要素コイル規模である外径 700mm 級コイルについては、中間層・超電導層等の作製方法・構造等が異なる線材の SMES コイルへの適用性検討も含めて、フープ応力試験における特性の評価を行った。

また、SMES システムとして必要な出力容量を実現するため、大電流容量コイルの開発を行った。大電流容量化のためには素線の並列化が必要であるが、「超電導電力ネットワーク制御技術開発」プロジェクトにおいて、Y 系超電導線材特有の積層構造による電極部の不均一な構造・接合により電流の偏流が生じ、従来の集合導体化手法では困難であったため、均流化を実現する電極構成により集合導体化コイルを開発した。高磁界コイルは電極部での高応力に耐える必要があることから、大電流容量を実現できるコイルとして 600MPa 級フープ応力コイルの電極部において高応力を許容できる導体コイル構成を開発し、2kA 以上通電可能な大電流容量コイルの構成技術開発を行った。加えて、線材積層構造でのコイルの場合、製作誤差等による電流偏流のため損失の増大が懸念されることから、電極部だけでなくコイル全体の構造最適化を図った。これらの開発成果を基に外径 650 mm 級のコイルを試作し、SMES システムとして

必要となる通電容量である 2kA 以上の大電流通電特性を実証した。

2.1.1-2 高効率コイル伝導冷却 (中部電力、九州大学、名古屋大学、日本大学、核融合科学研究所)

テープ線材を用いたパンケーキ型積層コイルの巻線間相互作用の評価が「超電導電力ネットワーク制御技術開発」プロジェクトの課題として残されていたため、その評価を実施した。また、20 K~40 K 温度領域においては、従来の液体ヘリウムの温度領域に比べ、コイルが非常に高い熱安定性を有することを同プロジェクトにおいて確認しており、高い熱容量を活かした短時間過負荷運転が可能であり、また、高効率な冷凍機で冷却することが可能である。ただし、同温度領域においては、4 K 温度領域とは異なり固体熱伝導のみによる冷却システムだけでは十分な熱伝達の実現が困難である。一方、SMESシステムとして必要な出力容量を実現するために必要となる高熱伝導性能とトレードオフの関係になる電気絶縁性能に関しては、「超電導応用基盤技術研究開発 (第II期)」プロジェクトにおいてY系超電導線材の剥離等の劣化を回避できる材料開発も含めた含浸樹脂技術を開発した。「超電導電力ネットワーク制御技術開発」プロジェクトにおいて樹脂含浸コイルを試作して20 K~40 K 領域において絶縁性能評価試験を行い、含浸コイルの部分放電開始電圧が3 kV 程度であることを検証しているものの、同温度領域での真空/固体複合絶縁系に関する試験評価データは少ない。以上のことから、平成20~22年度は20K~40K温度領域における高効率伝導冷却性能かつ高耐電圧性能を有する高効率コイル伝導冷却技術を開発した。

同温度領域の熱伝達・絶縁に関するコイル特性評価を行い、高効率伝導冷却性能を有するとともに2kV以上の絶縁性能を有するコイル構造を検討し、2kV以上の耐電圧を有する伝導冷却型ダブルパンケーキコイル構造等を検討評価した。また、20~40K温度領域において十分な熱伝達を得るため、例えばガス冷媒配管を一部活用した冷却システムやヒートパイプを用いた冷却システム等の検討評価を行うとともに、20MJ級システムの要素コイル規模である外径700mm級コイルを対象とした伝導冷却試験によりSMES運転時に想定される発熱に対し冷却できるシステムの成立性を検討し、「超電導電力ネットワーク制御技術開発」プロジェクトにおいて概念検討した一例であるコイルシステムの形状と発生熱量から必要とされる 3W/m^2 以上の熱流束を可能とする高効率熱伝導冷却システムの開発を行った。

これらの開発成果から、高効率でコイルシステム全体を合理的に冷却できる伝導冷却システム構成を設計・製作し、模擬発熱体を用いた試験で目標値 3W/m^2 を超える冷却性能を確認した。あわせて、伝導冷却時において2 kV以上の電気

絶縁性能を有した高伝熱コイル構造を検証し、電力機器に求められる電気絶縁規格を満足する性能となる13 kV以上の耐電圧性能を有することを確認した。

2.1.1-3 SMES 対応線材安定製造技術開発（中部電力、古河電気工業、フジクラ、ISTEC、九州大学、九州工業大学）

(1) SMES 対応線材安定製造技術開発

SMES用超電導コイルでは、長尺線材が必要とされ、長尺線材の実現には、連続した超電導線材の安定製造技術が要求される。

本プロジェクト開始時点までに、化学気相蒸着法（CVD：Chemical Vapor Deposition）を用いて、「超電導応用基盤技術開発（第Ⅱ期）」プロジェクトにおいて、IBAD-GZO系中間層付基板を使用して単長200 m、臨界電流100 A/cm-w級の線材を「超電導電力ネットワーク制御技術開発」プロジェクトへ総長4 km以上、「超電導応用基盤技術開発（第Ⅱ期）」ケーブル開発に総長500 m以上のY系超電導線材を提供した実績があり、高い作製速度を有していることが実証された。また、CVD法で形成した超電導層は中間層との界面結合性に優れ、良好な機械特性を有していることがそれらの成果で確認された。そこで、平成20年度～22年度は、CVDの高速製造性と、超電導特性や機械特性を活用し、さらに磁場中臨界電流特性等の超電導特性を改善することによって、引張応力強度1GPa、100m-20A/cm幅（@77K, 3T）の特性を有するSMES対応線材の安定製造技術の確立をめざした。

超電導コイル導体作製には、表面性状が平坦で高い寸法精度が線材に要求される。線材の平坦性を維持するために、内部応力の大きなIBAD中間層は薄化することが望ましい。また、IBAD中間層の薄化は成膜速度を増大させるとともに線材の変形を抑制することができる。IBAD中間層の薄化には従来のGZO層を主体とした手法に加えMgO層を用いる手法が開発されてきた。薄化したIBAD中間層を、超電導層の歩留りの検討等に使用するため、高機械強度金属基板上を含めて、平成20年度～22年度にかけて、総計約10km程度を作製し、安定した中間層形成の見通しを得た。また、中間層が薄いためIBAD-GZOより製造速度の大きなIBAD-MgO基板を導入した。

超電導層形成については、CVD装置の改造によるCVDの原料ガスと酸素ガスの混合系の改善や成膜領域の形状適正化等で、超電導層形成の均質連続性の向上を図った。これにより、100～200A/cm幅 @77Kの臨界電流の均質な特性を有する線材を総長約3kmを作製して、特性の安定性を検証した。次に超電導層形成の均質化の成果を長時間成膜に適用し、総長約4kmの線材を作製して長時間成膜に伴う特性低下の要因の把握と解消を図った。最終的には、均質な

特性を有する線材を総長約2kmを作製して、特性の均質化と作製サイクルの安定化を図り、100m長にて $I_c=20\text{A/cm幅}@77\text{K},3\text{T}$ で強度1GPaを有する線材の安定製造技術を確立した。

さらに、超電導線材の磁場中臨界電流の改善を図り、50mで20A/cm幅(@77K, 3T)の実証をめざした。また、高機械強度が確認され、人工ピン止め点導入や希土類元素の置換によって磁場中臨界電流特性が向上したIBAD-MgO線材磁場特性や機械強度を評価しSMESへの適用性について要素検討した。

SMESコイル用導体に使用される超電導線材は、高磁場中での大電流通電時のフープ応力に耐え得るために、機械的強度の高い線材であることが必要であり、長尺にわたり I_c の安定な線材が必要である。また、Y系積層型超電導線材では、中間層や超電導層の剥離の懸念があり、各層の接合性の向上も要求される。これらの観点から、平成20年度～22年度において、以下の内容を実施し、コイル構成技術開発、システムモデル検証に必要な線材の安定製造技術の確立をめざした。

基板に対しては、基板表面の平滑性が臨界電流 (I_c) に大きく影響することから、研磨等のプロセス技術の適正化を行い、長尺にわたり表面平滑性が高い金属基板を作製し、 I_c の長尺にわたる安定化の見通しを得た。まず、精度の高い表面平滑化技術の検討を行い、既存の金属基板の調査を行うことで、基板の表面欠陥の原因を把握した。製造工程と研磨方法の検討を行い、100～200A/cm-w (@77K, 0T)の I_c が長尺にわたり安定な線材となる基板作製の見通しを得た。この成果を基に、さらなる長尺安定性の向上ならびに表面平滑化技術の向上を図り、最終的に100m-20A/cm幅 (@77K, 3T)の特性を有するSMES対応線材の安定製造技術の確立をめざすめざした。平成21年度～22年度に総長約10kmを目安とした基板作製を行った。

中間層については、「超電導応用基盤技術研究開発(第Ⅱ期)」プロジェクトにおいて、結晶粒配向金属基板上への酸化物層、あるいは酸化物層上への異種酸化物層の電子ビーム蒸着法(EB)、スパッタ法(SP)によるヘテロエピタキシャル成長技術の検討を行った。EB-CeO₂/SP-YSZ/SP-CeO₂中間層上に、CVD法によるY系超電導層を作製して200A/cm幅を越える I_c を長尺線材で達成した。この中間層作製技術を活用して、IBAD層/キャップ層は中部電力等で開発の薄化IBAD構造とし、スパッタ法による高速かつ安定な成膜を行った。既存のReel to Reel中間層成膜装置にスパッタガンとイオンビームガンを付加することでIBAD装置に改造し、高速かつ安定な作製技術を検証した。また、キャップ層に関しても、既存のReel to Reel中間層成膜装置(スパッタ)を用いてCeO₂等のキャップ層の成膜条件の適正化の検討を進め、キャップ層の高速かつ安定な作製技術を検証した。さらに、膜厚、成膜条件の適正化を進め、

超電導特性の安定化技術を検討し、最終的には100m-20A/cm幅 (@ 77K, 3T) の特性を有するSMES対応線材の安定製造に資する中間層形成技術の確立をめざした。平成21年度~22年度に総長約5kmのIBAD層を作製した。さらに、スパッタによるキャップ層は、IBAD基板上の成膜を含め、平成20年度~22年度にかけて総長約8kmを作製した。さらに、製造速度がIBAD-GZOより大きなIBAD-MgO中間層へのスパッタによるキャップ層の形成技術を適用した。

YBCO層に対しては、CVD技術を導入して線材作製を行った。また磁場中臨界電流特性等の超電導特性を改善することによって、100m-20A/cm-w (@ 77K, 3T) の特性を有するSMES対応線材の安定製造技術の見通しを得ることをめざした。まず、CVD技術を導入し、上述の基板/IBAD層/キャップ層上に長尺にわたり、100~200A/cm-w (@ 77K, 0T) の I_c を持つ超電導層の安定製造の見通しを得た。最終的には100m-20A/cm-w (@ 77K, 3T) の特性を有するSMES対応線材の安定製造に資するYBCO層形成技術を確立した。平成21年度~22年度に総長約2.5kmの超電導層を作製した。

安定化層については、「超電導応用基盤技術研究開発(第II期)」プロジェクトでCVD線材にも適用した銅複合化技術だけでなく、めっき法による安定化層も検証し、SMES導体用の線材の安定性と加工歩留の向上に適した安定化層を作製した。

まず、めっき法による銅安定化層の検証を行い、超電導特性の劣化がなく、線材で安定化層の剥離がない作製技術を検討した。さらに既存の銅複合法との比較検討を行い、SMES導体に適した安定化層の構造を検討した。次にSMES導体に適した銅安定化層の長尺製造技術の検討を行ない、超電導層上やIBAD-PLDプロセスで作製した超電導層も含めて、平成20年度~22年度にかけて合計約13km程度の安定化層を作製した。

(2) 長尺IBAD-PLD線材の安定製造の検討

200A/cm幅級IBAD-PLD線材によるSMESモデルコイルの成立性を確認するため、IBAD-PLD線材の安定製造技術の開発を行い、2kA以上の通電が可能な大電流容量コイルの構成技術開発のために、平成22年度に総長約1kmの線材を作製した。

(3) IBAD-MgO線材の安定製造技術の開発

極低コスト線材として中間層にIBAD-MgOを用いた超電導線材のSMESへの適用性を評価するために200A/cm幅級IBAD-MgO線材の安定製造技術開発を行い、平成22年度に単長数十mの線材を作製した。

2.1.1-4 高磁界コンパクトSMESシステムモデル検証（中部電力、核融合科学研究所、鹿児島大学、九州大学、京都大学、名古屋大学、日本大学、北海道大学、早稲田大学）

SMES コイルシステムの技術開発においては、前述の 2.1.1-1、2.1.1-2 の要素コイル開発結果を反映し、複数個のコイルの組合せにおいてクエンチ等の動的な変化等が発生した場合を想定したコイルの限界性能を把握し、コイル自体ならびにコイルシステムとしての裕度の適正化を図ることで、Y 系コイルの限界設計技術を確立し SMES のさらなる低コスト化の見通しを得ることが不可欠である。

平成 20 年度は、2GJ 級 SMES コイル基本システム構成の検討を行うとともに、クエンチ発生時の挙動に関する事前解析等を実施し、動的な変化が発生した場合のコイルの健全性等を評価するために必要となる試験方法の検討を行い、電気機器や超電導技術に関する学識経験者、重電メーカー各社、及び各電力会社等からなる委員会において、SMES システムモデル検証方法等を十分に議論した上で開発を進め、「超電導電力ネットワーク制御技術開発」において実施した試験方法の検討結果に加えて、新たに Y 系 SMES として追加すべき試験項目を明確化した。

平成 21 年度からは、前述の 2.1.1-1、2.1.1-2 で実施した Y 系 SMES コイル評価結果を反映して 2 GJ 級 SMES コイル基本システム構成の改善を図り、2GJ 級トロイド型コイルにおいて、コイル間・巻棒構造等による向心力等を評価し、適正化された支持構造の有効性を確認する。また、複数個のコイルの組合せにおいてクエンチ等の動的な変化等が発生した場合の保護の考え方を整理し、素線クエンチ時に他素線へ転流が速やかに発生することを解析及び実験により明らかにする。これによって偏流によるクエンチ検出方法を検討し、トロイド型配置のコイル保護における安定化層厚さを求める。

2.1.1-5 高信頼性・高耐久性SMESコイル要素技術開発（中部電力、京都大学、東北大学、早稲田大学）

平成 23、24 年度は、前期 3 カ年の研究開発における SMES コイル特性の評価結果から、最終目標である実運転に耐え得るコイル技術開発に向けて、特性変化に影響する要因を検討し、現状で想定される Y 系超電導線材の剥離強度からコイルの径方向応力を低減する設計手法を確立するために必要となる課題を抽出し、高耐久性・高信頼性コイル構成技術の検討を行った。また、種々の対策を施した小規模な検証用サンプルにて評価することで、コイルの最適な設計

手法を確立し、SMES コイルとしての信頼性・耐久性を向上させた。

さらに、SMES コイルの構成技術開発のため検討したコイルの設計手法を用いたモデルコイルについて伝導冷却特性の評価を行った。

また、実運転における故障発生を考慮し、クエンチ検出・保護も考慮したコイル要素技術の開発に向けて、クエンチ保護方法について検討を引き続き実施し、上記検証用にて使用するサンプルを用いて、クエンチ時の素線・コイル相互間におけるクエンチ発生条件や転流の大きさ等の定量的な評価を行ない、前期3ヶ年までに実施した解析結果を実証するための検証試験を実施した。

2.1.1-6 研究開発細目とスケジュール

表 2.1.1-1 超電導電力貯蔵システム(SMES)の研究開発スケジュール

事業項目	平成20年度	平成21年度	平成22年度	平成23年度	平成24年度
(1)2 GJ 級高磁界・大電流コンパクトコイル構成技術開発	フープ応力 600MPa 以上、2kA 以上の通電容量の SMES コイル構成技術開発				
(2)高効率コイル伝導冷却技術開発	20~40K 付近のコイル伝導冷却技術開発				
(3)SMES 対応線材安定製造技術開発	2kV 以上の電気絶縁性能を有する高伝熱コイル構造開発				
	(a) SMES 対応線材安定製造技術開発				
	表面平滑化基板技術開発				
	中間層安定形成技術開発				
	薄化中間層の評価・検討				
	MOCVD プロセスによる超電導線材作製技術開発				
	(b) 長尺 IBAD-PLD 線材の安定製造の検討				
	総長約 1km の線材作製				
	(c) IBAD-MgO 線材の安定製造技術の開発				
	単長数 10m の線材を作製				
(4)高磁界コンパクト SMES システムモデル検証	2GJ 級 SMES コイル基本システム構成最適化、評価用試験モデルの設計検討 SMES システムの適用性検証評価の試験計画作成				
(5)高信頼性・高耐久性 SMES コイル要素技術開発	コイル最適設計手法の確立 コイル伝導冷却性能評価 クエンチ検出・保護手法の確立				
予算 (百万円)	484	502	506	75	79

注) 各研究項目の予算は NEDO 管理費等を含まない。(税込)

2.1.2 超電導電力ケーブル研究開発

Y系超電導線材を用いた超電導電力ケーブルを開発するため、ケーブル構造・接続部・ケーブルシステム等の要素技術に関して、交流損失解析・熱解析・電気絶縁材料特性・試作ケーブル試験等から技術検証を行い、開発目標を達成する重要技術の確立を行うとともに、大電流ケーブル・高電圧ケーブルシステムを構築できることを検証する。

2.1.2-1 大電流・低交流損失ケーブル化技術開発（住友電気工業、フジクラ、京都大学、早稲田大学、ISTEC）

(1) 大電流・低交流損失技術の基礎特性評価

大電流ケーブルに使用する超電導線材の多層導体化の交流損失を含めた電気的特性及び機械的特性の基礎データを短尺のモデルケーブル導体を用いて収集し、コンパクトで低損失なケーブル設計技術を確立する。

a. 交流損失の測定・評価

細幅線材、あるいは可撓性線材を用いて多層導体を作製し、それぞれの交流損失の評価を行い、垂直磁場成分の線材への影響、線材ギャップ間の影響を評価する。

平成20年度はシミュレーションを基に、線材間ギャップの影響、細線幅の効果、多層の影響を調べ、その結果を基に、構造の異なる3kA級導体を数本試作し、これらを検証することで、低損失導体設計の基礎データを収集する。平成21年度は平成20年度の結果を基に、まず0.7 W/m-相@3 kAの検証を行い、その結果を基に、5 kA級の大電流導体の試作を行い、設計データの修正を行う。平成22年度は、それらのデータを基に5 kA級導体を作製し、2 W/m-相@5 kAの交流損失の目処を得る。平成23年度は、平成22年度までの成果を反映して、多層導体を作製し、実用化時を想定した極低損失なケーブル構造設計の基礎データを取得する。

b. ケーブル導体の曲げ、引張り特性の評価

ケーブル製造に必要な機械特性として、曲げ、引張り、圧縮等の特性を確認する。

平成20~21年度は、単心ケーブルコアの特性評価として、上記の曲げ、引張り、圧縮等の機械特性を評価し、ケーブル製造に大きな課題がないか確認する。

c. コンパクトな低損失ケーブルの設計

平成20~22年度は、150 mmφ管路に収納可能なケーブルをめざし、低損

失設計、電気絶縁設計、断熱管設計を実施する。

(2) 大容量接続技術の開発

a. 超電導—常電導接続部の構造設計検証

超電導線材と常電導金属との接続基礎特性として、ケーブル用 Y 系超電導線材と接続部の接続抵抗とラップ長との関係を調査し、5 kA 連続通電においても温度上昇が所定の範囲内に入る接続構造の設計検討・検証を行う。

平成 20~22 年度は、まず、ケーブル用 Y 系超電導線材の接続抵抗測定を行い、接続部の基礎設計を行う。次に、5 kA 級端末接続部の設計を行い、試作により 5 kA 通電の検証を行う。

b. 5 kA 級電流リードの開発

端末のサイズを考慮し、電流リードの断面積、長さをパラメータとして、5 kA 通電時の侵入熱と発熱との和である熱負荷が最小となるような、電流リードの設計検討を行う。

平成 20~22 年度は、まず、5 kA 級電流リードの設計検討を行う。次に、5 kA 電流リードを試作し、5 kA 連続通電を行い、電流が安定に通電できることを確認するとともに、熱負荷の実測を行い、設計値との比較を実施する。

c. 中間接続部の構造設計

平成 23 年度は、66 kV 級大電流ケーブルの中間接続部の設計検討を行い、中間接続部を有するケーブルコアを用いて課電試験及び機械強度特性の評価を行い、中間接続部の要素技術を確立する。

(3) 三心一括ケーブル導体の検証

a. 三心一括ケーブル導体の試作・評価

三心ケーブルの試作を行い、三心ケーブルの引張り特性、曲げ特性の測定を行う。また、熱収縮応力下でのケーブルコア変形が懸念されるので、その変形度合いの確認、絶縁特性への影響を検討する。平成 20~22 年度は、三心ケーブル（Y 系超電導線材+ダミー線材）の試作・特性評価を行い、最終設計の妥当性を確認する。

b. 短絡電流通過時のケーブル性能への影響調査

66 kV 級電力ケーブル線路にて規定されている短絡電流 31.5 kA・2 sec の短絡電流が通過した際、超電導導体、シールドへのダメージがないことを確認する。また、三相短絡が起こった場合の各相間に働く電磁力による影響調査を行う。

平成 20~22 年度は、まず、単心ケーブルの短絡試験を行い、31.5 kA・2 sec

の短絡電流が通過した際、超電導導体、シールドへのダメージがないことを検証する。次に、短絡電流が通過した際の電磁力の影響を検討する。平成 23 年度は、短絡電流が通過した際の電磁力と熱応力の複合的な影響を検証し、三心一括ケーブル設計の妥当性を確認する。

(4) 高 I_c -IBAD-PLD 線材による大電流・低交流損失の評価

これまでの超電導電力機器用線材の技術開発により、高 I_c を有する線材が開発されてきたことから、 $I_c=500$ A/cm 級線材を用いた 66 kV/ 三心一括 /5 kA、10 m 級ケーブル 1 相分の試作及び終端接続部・冷却システムを有する試験設備等を製作し、高 I_c 線材による交流通電特性を検証することで、実用化に向けたさらなる低交流損失ケーブル構造等を検討する。

(5) 交流損失低減の基礎的研究

線材幅、線材間ギャップ、線材可撓性とケーブル断面の真円度、層間隔、金属基板磁性等の諸要素がケーブル交流損失に与える影響について系統的に評価・整理を実施する。あわせて、局所的交流損失測定技術を開発する。また、複合・加工を施した Y 系超電導線材の J_c 分布等を測定し、線材の機器適応性を評価する。機器対応線材単体の交流損失を評価し金属基板磁性等が交流損失に与える影響について検討する。

平成 20～22 年度は、まず、ケーブルアーキテクチャ諸要素が交流損失に与える影響について、評価・整理を行い、5 kA 通電時の交流損失 2 W/m-相に向けた技術的シミュレーションを行う。また、これに並行して試作されたケーブルの交流損失計測、評価を行うとともに機器への適用性について評価を行う。次に上記成果を踏まえ、2 W/m-相に向けた技術的な諸要素の見通しを得ることを経て、2 W/m-相をモデルケーブル導体で実証する。

平成 23 年度は、平成 22 年度までの成果を基に、線材 J_c 分布測定と連携した統括的な交流損失解析を行い、中間目標値以下の極低損失化の可能性の見通しを得るとともに、実用化を想定した極低損失ケーブル設計の構造に反映する。平成 24 年度は、全て 2 mm 幅線材を適用した極低損失化ケーブル設計解析、線材可撓性を考慮した大電流導体の交流損失解析を行い、あわせて、磁気ナイフ法により線材の横方向の J_c 分布を評価する。これにより実用化をめざした Y 系超電導線材の特徴を活かすケーブル設計指針を検討する。

2.1.2-2 高電圧絶縁・低誘電損失ケーブル化技術の開発（古河電気工業、京都大学、名古屋大学、早稲田大学、ISTEC）

(1) 高電圧絶縁・低誘電損失技術の基礎特性評価

高電圧絶縁技術の開発においては、超電導電力ケーブルに使用する電気絶縁材料の電氣的基礎特性を取得する必要がある。特に、275 kV 級のケーブル設計を考慮した絶縁データでは、絶縁厚さが厚くなることから、交流損失と絶縁材料中の誘電体損失により、導体周辺の温度が上昇し、さらに絶縁厚さが厚いために熱の伝達が妨げられて気泡の発生等、絶縁耐力を下げる懸念がある。これらの対策としては、交流損失の低減と、誘電体損失の低減が有効と考えられ、前者においては「超電導応用基盤技術研究開発（第 II 期）」プロジェクトにて、線材の細線化による方法で、0.1 W/m-相@1 kA 交流損失（3 kA 換算で 0.9 W/m-相）を達成しているが、さらにそれを半減するための交流損失低減技術開発を行う。また、誘電体損失においては、従来の超電導電力ケーブルで用いていた半合成紙（PPLP[®]：Polypropylene laminated paper）に加えて、誘電率及び誘電正接（ $\tan\delta$ ）の小さな材料の検討を始め、それら材料の適用性について検討する。また、中間目標で得られた技術を用いて、ケーブルコアを作製し、設計の妥当性を評価する。

a. 275 kV 高電圧ケーブル用導体の交流損失の評価

平成 20～22 年度においては、 $I_c = 200 \text{ A/cm-w}$ 級の Y 系超電導線材の適用により I_{op} / I_c の最適化による交流損失の低減、さらに細線化による線材幅と導体巻きつけ時の線材間のギャップの最適化、多層化構成による損失低減の効果を調べ、導体設計に反映して低交流損失を実現する。

平成 20 年度は 3 kA 級の導体の試作を行い、導体直径、線材の幅、ギャップの影響について基礎データを収集する。平成 21 年度は電気絶縁からの要請による導体構造を考慮した設計に修正して、交流損失の評価を行う。平成 22 年度は I_{op} / I_c の最適化を含めた 3 kA 導体を試作して、誘電体損失とあわせた値で 0.8 W/m-相以下の交流損失を確認することで、中間目標を達成し、後期 2 ヶ年の研究の低交流損失ケーブル実現のための条件の見通しを得る。

平成 23 年度は中間目標までに得られた技術を用いて、275 kV ケーブルシステム検証用ケーブルと同仕様のケーブルを作製し、誘電体損失と交流損失（超電導導体と超電導シールド）を合わせて、安定的に 0.8 w/m-相@3 kA 以下を達成できることを確認する。平成 24 年度は、システム検証用のケーブル設計において MOCVD 線材の可撓性による損失低減効果の解析と短尺ケーブルにて評価し、設計の最適化を図る。

b. 絶縁材料・絶縁設計の検討

平成 20～22 年度における高電圧超電導電力ケーブルの開発としては、これまでの絶縁材料としての PPLP[®]の高電圧ケーブルへの適用性について評価し、また新しい絶縁材料について有効性を検証して、ケーブル設計データを収集する。

平成 20 年度はこれまでのデータで PPLP[®]を用いたケーブルの設計、誘電体損失について解析・実験で確認する。また、新しい絶縁材料候補について調査して、電氣的、機械的な評価を実施する。それら候補材料を用いて、モデルケーブル（30 cm 長）を用いた電気特性の基礎データの取得を行う。平成 21 年度は、候補材料を絞込み、基礎的な測定として、交流破壊電圧測定、インパルス破壊電圧測定、部分放電測定を行い、絶縁体の厚さ依存性の調査、含浸する液体窒素の状態（圧力など）の影響調査を行う。また、長期寿命特性（V-t 試験データ）の評価も n 数を複数個として、100 時間までの特性を評価する。平成 22 年度は、長期寿命特性（V-t 試験データ）の傾向を把握するために、1,000 時間相当の特性の評価を行う。これらケーブル設計の基礎データと、寿命特性として 1,000 時間までの電気絶縁特性の低下の傾き係数を用いて 275 kV 級のケーブルの絶縁設計を行う。平成 23 年度は中間目標で得られた技術を用いて、275kV ケーブルシステム検証用ケーブルと同仕様のケーブルコアを作製し、ヒートサイクルなどの履歴を受けても初期特性と同様の設計耐電圧性能を持っている事を確認することで、システム設計の妥当性を検証する。平成 24 年度は複合的な絶縁材料を用いた短尺ケーブルにて電気絶縁特性を評価するとともに、損失（交流損失・誘電体損失）・熱収支においても理想的な高電圧ケーブル設計を行う。

(2) 高電圧接続技術の開発

a. 中間接続部の開発

高電圧接続技術については、「超電導応用基盤技術研究開発（第 II 期）」プロジェクトにおいて 66 kV/77 kV 級超電導電力ケーブルの接続技術の基礎を確立し、中間接続部を試作して課電試験、通電試験、短絡試験をそれぞれ個別に行い、問題が無いことを確認した。275 kV 高電圧ケーブルの中間接続部としては、局所的な発熱と電気絶縁の問題、 I_c の高い線材の接続技術と接続抵抗の把握が重要であり、これらを反映した信頼性の高い中間接続部を開発を実施する。中間接続部開発は、ケーブル本体の仕様・構成が明確になった時点から本格的な研究を始める。

平成 20 年度は高 I_c の Y 系超電導線材の接続抵抗評価や、電界計算等を行うための解析モデルの設計を行う。平成 21,22 年度はケーブル開発検討により

絞り込まれてきた絶縁候補材料、ケーブル設計モデルを用いて、中間接続部の設計を行う。局所発熱と絶縁破壊の関係については部分放電試験を実施して影響を把握し、さらに絶縁破壊試験を実施して破壊のメカニズムの検討に必要なデータの収集を行う。これら評価を通して、中間接続部の設計に反映するデータを蓄積する。平成 22 年度はこれまでのデータを基に、中間接続部の設計さらに試作を行い、課電試験を実施して、システム検証用の中間接続部の設計に反映させて設計を確立する。

b. 終端接続部の開発

275 kV 高電圧ケーブルのシステム検証を行うためには、超電導電力ケーブルの両端には課通電用の終端接続部として気中終端接続部が必要である。システム検証で超電導電力ケーブルとしての機能を検証するために、超電導特性評価、初期電気試験及び長期課通電試験を実施する。電気試験においては、たとえば OF (Oil Filled) ケーブルの試験基準としては、交流電圧耐電圧 350 kV (3 時間)、インパルス耐電圧-1260 kV (3 ショット) を設定しており、試験期間 6 ヶ月の長期課通電試験では対地電圧 230 kV (相間電圧 400 kV)、通電電流 3 kA の運転条件となる。終端接続部はケーブルの試験を実施するために、ケーブルと同等の性能を持つ必要がある。

平成 20 年度は、ケーブル用の試験端末を製作することを目的として、室温部から低温部への温度勾配、電界勾配を担うブッシングの開発、液体窒素中での必要離隔距離を所有している試験設備で確認して、これらデータを基に設計、製作を行う。

平成 21 年度から、ケーブル絶縁の開発のために、試験端末を用いた交流課電試験、インパルス課電試験、部分放電試験を実施して、終端接続部としての問題及び懸念箇所の抽出を行う。平成 22 年度は、IEC, JEC, 他のケーブル試験を参考にして、275 kV 高電圧ケーブルシステム検証の中間目標の成果である課電条件により、終端接続部を構成する部品毎に試験を実施する。これらデータを蓄積して、システム検証用としての終端接続部の設計を行う。

(3) 超電導電力ケーブル電気絶縁特性の調査

275 kV 高電圧ケーブルを想定した液体窒素／積層テープ複合絶縁系の電気絶縁特性及びメカニズムの検討を行うとともに、ケーブルの短絡電流通過環境下における電気絶縁特性に関して知見を得る。また、低誘電特性と耐電圧性能との両立の可能性についての研究を行う。新しい電気絶縁材料 (テープ) を用いた液体窒素／積層テープ複合系について、その絶縁破壊のメカニズムについての研究を行う。さらに、長時間課電時の絶縁劣化特性 (V-t 特性) について、絶縁破壊の起点の存在について検討する。また、短絡電流が流れた場合、導体周辺

には突発的な熱の放出が予想されるために、そのような状況下での電気絶縁特性について、モデル実験等により評価を行う。

平成 20 年度は、超電導電力ケーブルの電気絶縁材料の長時間課電時の絶縁劣化特性(V-t 特性)の試験計画を立案し、平成 22 年度の試験条件案策定に必要な試験をスタートする。なお、試験計画については「超電導電力ケーブル絶縁検討小委員会」で検討を行いながら進める。平成 21 年度は、平成 20 年度の成果を踏まえ、超電導電力ケーブル用の電気絶縁材料を選定し、電力ケーブルの絶縁性能に関する見通しを得る。平成 22 年度は、システム検証に必要な試験条件案を提示するためのデータを取得する。なお、導入・普及時の試験条件については、本事業の成果を踏まえ別途検討する。

平成 23 年度は、選定した絶縁紙の厚みを変えて、その基礎特性を取得し、その厚みの組み合わせによって、さらなる低誘電特性の可能性を検討する。さらに、選定した絶縁紙と低誘電体絶縁紙を複合して、中間目標で得られた成果と同等の耐電圧性能を有し、誘電特性においてはさらなる低損失化が可能かを検討する。平成 24 年度は低誘電体損失絶縁材料の性能・安定性を調査し、これによる電気絶縁材料としての可能性を評価するとともに、複合的な電気絶縁材料の基礎的な誘電・絶縁特性を調査し、高電圧超電導ケーブルの耐電圧性能と低誘電体損失特性との両立・最適化を図り、実用化をめざした Y 系超電導線材の特徴を活かすケーブル設計指針を検討する。

(4) 交流損失の解析と評価

平成23年度は、システム検証向けの30 m長超電導電力ケーブルに使用する線材の J_c 分布を測定しシステム検証用ケーブル用の交流損失を理論的に見積もるとともに、ケーブルシステム運転時の温度等の条件にフィードバックさせる。さらに、理想的な超電導導体（線材の幅方向 J_c 、長手方向 I_c 、素線間ギャップ、層構造）を解析結果から導き、その構造に適合する超電導線材を使用して、短尺の超電導電力ケーブルを作製し、中間目標で得られた成果よりもさらなる性能向上の見通しを得る。

平成 24 年度は、30 m ケーブルの交流損失の妥当性を数値解析により評価するとともに、線材可撓性も考慮した高電圧ケーブル導体の交流損失解析を行い、併せて磁気ナイフ法により線材の幅方向 J_c 分布を評価する。また、シールド付ケーブルの交流損失を液体窒素蒸発法により測定する。さらに、複合的な電気絶縁材料を用いたケーブルの交流損失解析を行うとともに、実用化をめざした Y 系超電導線材の特徴を活かすケーブル設計指針を検討する。

2.1.2-3 超電導電力ケーブルの熱収支に関する評価研究（前川製作所、早稲田大学、ISTEC）

(1) 定常通電時及び事故時の伝熱特性検討

超電導電力ケーブルにおける伝熱解析を行い、定常通電時、事故時の発熱・冷却に関する熱的挙動の解析を行い、熱収支やコンパクト性との関連から技術の成立性、信頼性に関する評価を行う。定常通電時の熱的挙動については、他相の電磁的影響も考慮した熱伝導解析を行うことにより、ケーブルの熱特性を把握し、熱収支やコンパクト化の検討を行う。また事故時の熱的挙動については、実運転時の運転条件についてシミュレーションを行う。絶縁厚の厚い 275 kV 高電圧ケーブルの常時運転において、トレードオフの関係にある交流損失及び誘電体損失と冷却のバランスを考慮した設計について検討を行う。さらに、ケーブルの機械特性評価も含めて、単に損失が最小になる構造だけでなく、布設における機械応力の問題や、冷却に関わる熱収縮の問題に十分耐えるケーブルであることなども考慮した検討を行う。

平成 20～22 年度は、まず、シミュレータの開発を行いながら大電流ケーブルの短絡電流通過時の温度上昇解析、高電圧ケーブルの定常運転時の熱挙動解析等を行う。この際、基礎的な評価実験結果との整合性について確認を行い、データベース化とシミュレータへの反映を行う。次に上記成果を踏まえ、大電流ケーブル短絡電流通過時の温度上昇解析及び高電圧ケーブルの熱挙動、中間接続部の熱挙動についてシミュレーションを行いシステム検証用ケーブルの設計に反映する。さらに、上記成果を踏まえ、システム検証用ケーブルの設計から熱解析を行い、シミュレーション結果を設計へフィードバックする。

平成 23 年度は、平成 22 年度までの成果を受け、実用化時を想定した長尺ケーブルで、線材均一性が定常通電時及び短絡電流通過時の伝熱特性に及ぼす影響について数値シミュレーションに基づく評価を行う。また三心一括ケーブルの短絡電流通過時の電磁氣的・熱的環境に対する線材の機械特性を解析・評価する。また、システム検証試験に合致する汎用性のあるシミュレーション技術を確立するために、275 kV ケーブルシステム検証用ケーブルと同仕様のケーブルコア及び中間接続部への短絡電流通電試験を実施し、その結果から、275 kV システム検証用 30 m 長の超電導電力ケーブルの短絡電流時挙動を解析するとともに、長尺線路（数 km 以上）の短絡電流時挙動を解析するための計算モデルを構築する。平成 24 年度は局所劣化による発熱、ケーブル内の電流転流現象の評価を行うとともに、複合的な絶縁材料の熱伝導率を測定し、従来使用されている絶縁紙と比較することでケーブルでの熱収支上の適用性を評価し、得られた熱伝導率を用いて、理想的なケーブル設計における定常時及び過電流通電

時における熱収支を解析にて評価する。また、これまでに得られた知見及び評価結果に基づき、実用化をめざした Y 系超電導線材の特徴を活かすケーブル設計指針を検討する。

(2) スラッシュ窒素の研究

スラッシュ窒素冷媒を用いたときの超電導電力ケーブルにおける冷却上のメリット評価が可能なことを確認する。

a. システムの検討

スラッシュ窒素とは固体窒素と液体窒素の混合した物質であり、固体窒素の存在により液体窒素よりも低い温度と大きな熱容量を有することが特徴である。スラッシュ窒素を用いる冷却システムにおいて、スラッシュ窒素の温度が融解点であり、液体窒素に比べて低く、その分、冷凍機の理論効率が低下する。また固体窒素生成のための付加的な機器が必要となる。冷却方法についてもスラッシュ窒素の持つ潜熱、顕熱をすべて使うか、固体の融解潜熱のみをケーブル冷却に用いるかで冷却量、冷却ステーションの数等が異なってくる。また液体窒素とスラッシュ窒素では流れの状態も異なる。これらを考慮した検討を行い、スラッシュ窒素の特徴を生かしたシステム構成を検討していく。

平成 20 年度は超電導電力ケーブルの冷却に関し調査を行い、スラッシュ窒素冷却を行った場合の問題点を抽出する。平成 21 年度は抽出された問題点からスラッシュ窒素冷却に適したケーブル冷却方法を検討し、実用化をめざしたスラッシュ窒素冷却システムを明確に示すとともに今後の課題の抽出を行う。

b. 固相率制御方法の研究

安定して一定固相率のスラッシュ窒素を冷却部に供給するための制御方法の研究を行う。固相率とは全流体中に占める固体の質量割合を示すが、状態量とは異なり熱平衡状態となっても固相率は 0~100 %間で任意の値を取りうる。また、超電導電力ケーブル冷却において、液体窒素を用いる場合、ケーブル入口温度を一定とすることでケーブルが必要とする冷却量を安定的に供給している。しかしスラッシュ窒素の場合は温度に代わり固相率を一定にすることで常に一定の冷却量を供給する必要がある。そのため固相率の制御はスラッシュ窒素冷却の実用化に欠かせない技術である。固相率を制御するには、固体窒素と液体窒素を混合し、スラッシュ状態とした後ヒータにより固相率を調節する方法、固相率の高いタンクを別途設け、液体窒素と混合し固相率を調節する方法、固体窒素生成装置で固体生成量を調節する方法等が考えられる。これらの得失を検討するとともに、最も有効な方法と考えら

れる固体窒素生成装置で固体生成量を調節する方法に関し、固体窒素生成部分試作機の運転方法を変えることで固体窒素生成量を調節する方法の研究を行う。

平成 20 年度は固相率制御となりうるパラメータを明確化し、固体窒素生成部分試作機設計に活かすとともに、その試験方法を検討し、試験装置の検討を行う。平成 21 年度は後年度の搬送試験装置に組み込むことを想定した試験装置の設計・製作を行い装置類の健全性を確認する。平成 22 年度は固体窒素生成部分試作機を同試験装置に組み込み、同部分試作機の運転状態を変化させ、固体窒素生成状況を下記に示す固相率計測器試作機にて計測し、固相率制御方法の検証を行う。また、圧力損失、熱伝達等実用規模の冷却システムの設計に必要となるデータを取得することで液体窒素冷却と比べたスラッシュ窒素冷却の特徴を明確にする。

平成 23 年度は、長時間の生成、循環運転を可能とするために必要な貯液タンク、循環ポンプ、計測機器類等の設計製作を行い、これらを上記試験装置に組み込んだ循環試験装置を構築し、その健全性を確認する。この試験装置を基に平成 24 年度は各種試験を実施しスラッシュ窒素冷却の特徴を定量的に把握することで、スラッシュ窒素冷媒の有用性のシステム検証を行う。さらに構築された循環試験装置を基に各種試験を実施しスラッシュ窒素冷却の特徴を定量的に把握することで、スラッシュ窒素冷媒の有用性のシステム検証を行う。

c. 連続生成方法の研究

スラッシュ窒素冷却技術の核となる、微細な固体窒素を連続的に生成するための固体窒素生成部を部分試作し、運転研究によりその最適化を図る。固体窒素の生成には低温ガス（ヘリウム等）を用いたバブリング法やエジェクタ法、真空引きで三重点に到達させ固体を生成する **FREEZE THAW** 法があるが、前者は窒素中に溶け込んだガスの分離に課題があり、後者は連続的な生成ができない。そこで伝熱面に固体を生成し、それを剥離させて生成する固体窒素生成法の検討を行う。本プロジェクトの開始時点で、この方法は固体水素生成に関する報告はあるが、固体窒素を生成した研究は報告されていない。従って固体窒素生成装置の開発がスラッシュ窒素冷却技術のキーとなる新規開発技術である。

この中で伝熱面に生成した固体窒素を剥離させるための最適熱流束、剥離器具の形状・材質、その回転速度が固体窒素の生成・分離に大きな影響を持つと考えられ、これらのパラメータを変化させ固体の生成量を検証する。

平成 20 年度は生成装置及び固相率計測の検討を行い、計測器については概念設計を行い、生成部分試作機の設計・製作を行う。平成 21 年度は生成部

分試作機の運転研究を行い、生成方法に関する知見を得る。また、固相率計測器試作機的设计・製作を行い、固相率ごとのデータ計測を行い、計測技術を確立する。平成 22 年度には後年度の搬送試験装置への組み込みを考慮し、固体窒素生成部分試作機、固相率計測器試作機の性能向上と運転方法を検証する。

平成 23 年度は前述の循環試験装置に上記装置を組み込み、健全性を確認する。平成 24 年度は循環試験装置による連続試験を実施する。

(3) 超電導電力機器の冷却設備の調査研究

超電導電力機器に用いる冷却設備の最新動向について調査を行いながら、超電導電力ケーブル等に要求される冷却設備の仕様について検討する。また、冷却設備に要求される法的規制についての調査及び提言のための分析を行う。要求される冷却設備の仕様については、平成 23 年度以降に行うシステム検証用及び導入・普及時の設備を対象とする。

2.1.2-4 超電導電力ケーブル対応線材安定製造技術開発（住友電気工業、フジクラ、昭和電線ケーブルシステム、JFCC、ISTEC）

本項目の開発では、「超電導電力ケーブルの研究開発」の「ケーブルシステム検証」に必要な線材を安定に作製可能な技術を確立する。

(1) 大電流用線材の安定製造技術の開発

大電流ケーブルシステムに対しては、交流損失低減が最も厳しい課題となる。損失低減を実現するためには、本プロジェクト開始時点までの成果で、線材の巻き付け形状（ケーブル断面形状）を真円形に近づけ、線材間ギャップを小さくすることが有効であることがわかっている。そこで、本項目の開発では、可撓性に優れフォーマに沿い易い結晶粒配向金属基板を用いた Y 系超電導線材（以後、配向基板系と称す）の開発とともに、もう一つのアプローチである細線化によるケーブル断面の真円形状化に対応して強度に優れた IBAD 系中間層基板を用いた Y 系超電導線材に関して開発を行う。配向基板系に対して、これまでの Ni 系磁性金属基板の長尺化技術や低交流損失化に有効な低磁性結晶粒配向金属基板での高 I_c 化技術等を統合することで、平成 20 年度は、 $20\text{m}\cdot 11\text{ kA/cm}^2$ の安定製造を行い、平成 21 年度は $20\text{ m}\cdot 13\text{ kA/cm}^2$ の安定製造を検討し、平成 22 年度には中間目標である $20\text{ m}\cdot 15\text{ kA/cm}^2$ を安定に製造可能な技術を検討する。安定製造技術としては、配向基板系では結晶粒のさらなる配向性向上も含めて成膜毎のプラズマ、雰囲気、温度等の再現性向上により安定製造技術を開発する。また、配向基板系では気相法による中間層形成において、さらに超電

導層形成においては配向基板系または IBAD 系中間層基板系で、基板温度、ブルーム形状等の成膜条件の再現性向上により安定製造技術を開発し中間目標を達成する。ケーブル用線材は、ケーブル開発の進捗に合わせて総長、単長、 J_e 、線材幅等の提供に必要な性能を検討する必要がある。平成 20～22 年度は 1 cm 幅での長さは総長 8 km レベルを目安として提供することをめざす。平成 22 年度は線材の長尺化・歩留り改善を実施し、線材の製造能力を向上させ、ケーブル開発用線材の供給及び増産を確実に実現する。この目的に合わせ、超電導薄膜を形成するための高品質・高出力タイプエキシマレーザ発振装置を導入する。出力の安定性及び現有装置の 1.5 倍 (200 W→300 W) の高エネルギー化により、Y 系超電導線材のさらなる特性向上、歩留り向上、成膜速度の高速化を図る。平成 23 年度は、 $J_e=15\sim 20\text{ kA/cm}^2$ (2～4 mm 幅×20 m) に相当する大電流ケーブルシステム検証用線材の安定作製、加工、評価を実施する。なお、東日本大震災等の影響に伴う基板調達遅延抑制のため、長尺線材の連続誘導 I_c 測定装置を導入することで並行して評価を行うとともに、超電導機器用線材の技術開発を担当する実施者 (ISTEC) が線材の安定作製、加工の一部を担当し、今年度は線材の総長を 1.5 km (1 cm 幅) レベルとする。平成 24 年度は、大電流ケーブルシステム検証用として $J_e=15\sim 20\text{ kA/cm}^2$ (2～4 mm 幅×20 m) に相当する総長 0.5 km (1 cm 幅) レベルの線材を安定に作製するとともに、加工・評価を実施して供給する。なお、線材提供遅延抑制のため、加工・評価の一部を超電導機器用線材の技術開発を担当する実施者 (ISTEC) が担当する。上記の技術開発に当たっては、必要に応じて線材の特性分布や欠陥の評価とともに微細組織観察・評価も駆使し、安定製造技術を促進させる。

(2) 基板・中間層テープの開発

交流電力機器に Y 系超電導線材を適用する際に問題となるのは、アスペクト比の非常に大きなテープ状線材の表面に対して垂直方向にかかる磁界成分に伴う交流損失が無視できなくなることである。超電導電力ケーブルの場合はこれを回避するために円筒状に線材を敷き詰める構造となるが、その際の成形性の問題から幅の狭い線材の開発が求められている。2 次元構造の Y 系超電導線材においては、隣接する結晶の粒界で生じる弱結合の分布によって有効な通電断面積が決まってしまうため、パーコレーション的に不利な配置になる確率を低減するためにはできるだけ結晶粒径が小さいことが望ましい。IBAD 法線材は、結晶粒が無配向で粒径の小さい金属テープを基板とし、結晶粒配向中間層の結晶粒径が非常に小さいため、超電導膜中における粒径も小さくなる傾向がある。本プロジェクト開始時点までに開発してきた基板・中間層テープの長尺製造技術を有効活用し、2mm 幅の幅狭線材においても 20 m 長において $J_e=15\text{ kA/cm}^2$

の通電特性を実現し得る基板・中間層テープの安定で高速な製造技術を検討する。プロトタイプケーブル用線材の基板として結晶粒面内配向度 16 度以下の特性を有する IBAD 中間層テープ（中間層基板）を平成 20～22 年度で合計 20 km 長の提供を行い、ケーブル要素技術開発に資する。提供線材作製にあたっては各年度の開発成果を反映して作製原料の調達等を行う。平成 23 年度は、平成 20～22 年度までに開発された上記技術を用いて、ケーブル要素技術開発及び 30 m 高電圧ケーブルシステム検証に資するための IBAD 中間層基板を 6 km 長（5 mm 幅換算）供給する。なお、東日本大震災及び夏季節電対策の影響によるケーブル用線材製造の遅延抑制のために、超電導機器用線材の技術開発を担当する実施者（ISTEC）が IBAD 中間層基板及び線材の供給を一部担当する。

(3) MOD プロセスによる高電圧ケーブル用超電導線材の開発

超電導電力ケーブルで使用される線材は交流損失低減の見地から、将来的には 2 mm 幅の細線化が求められている。線材の幅を細くすることは、線材の幅方向に膜厚の分布や欠陥が存在すると、これらの不均一性に起因する臨界電流特性の低下を引起す。従って、超電導電力ケーブル用の線材では幅方向の均一性を上げることとその均一性を全長に亘って維持することが重要となる。

a. 仮焼膜の膜厚分布の調査

MOD プロセスでは、原料溶液塗布の工程で生じる線材端部に表面張力に起因する液溜りが形成され、膜の中央部と端部で膜厚の不均一性が生じる傾向にある。塗布直後に端部に過剰に付着した溶液を除去する対策を採っているが、作製線材長が長くなるに連れて十分ではない。平成 19 年度末時点の技術での幅方向と膜厚分布を個々の線材で n 数を増やした調査を平成 20 年度に行う。さらに仮焼プロセスにおける塗布工程の再検討を平成 20 年度後期～平成 21 年度にかけて行い、平成 22 年度には塗布膜の膜厚均一性を $\pm 10\%$ 以内に収める製造法を検討する。

b. 長手方向の特性分布向上の検討

TFA-MOD 法では、超電導膜の結晶化プロセスにおいて発生した残留 HF ガス濃度に起因する結晶成長速度の差が風上側と風下側で生じる傾向にある。バッチ式本焼プロセスではチャンバ内に投入した線材から一斉に HF ガスが発生するために特に顕著に影響を受ける。流体のコンピュータシミュレーションを併用しながらバッチ式本焼プロセスの作製条件の最適化を行い、長尺線材の作製プロセスにフィードバックをかけることにより、200 m 級線材で長手方向の特性分布誤差を平成 22 年度末に $\pm 15\%$ 以下にする検討を行う。

年度毎の目標は幅 5 mm、 $I_c=200$ A(1 cm 幅換算)の仕様の線材で、平成 20

年度が 20 m 長の線材で特性分布誤差を±15 %以下、平成 21 年度は 100 m 長の線材で±15 %以下、平成 22 年度は 200 m 長で 15 %以下に分布を収める製造プロセス技術を検討、開発する。

c. 長尺 Y 系超電導線材の安定製造の検討

平成 20 年度は、平成 19 年度末までに固まった製造プロセスをベースに、IBAD-GZO または IBAD-MgO 基板上にスパッタ装置により CeO₂ 中間層を形成し、TFA-MOD 法により Y 系超電導層の形成を行い、歩留りのデータ収集を行う。ここで得られたデータは a. と b. のテーマにフィードバックして、平成 20 年度末に達成した 50 % の歩留りを平成 21 年度末に 60 %、平成 22 年度末に 70 % を達成できるよう、製造技術的な改善要因を調査検討する。ここで得られた線材はケーブル導体を作製する実施者に供給し、種々のケーブル試験に供する。平成 21 年度以降は、超電導機器用線材の技術開発を担当する実施者 (ISTEC) において検討する特性向上の結果を逐次長尺作製にフィードバックしつつ、線材の特性向上を図る。供給する線材は、5.0 mm 幅の線材に対し、1.0 cm 幅換算で 200 A 通電可能とする仕様で、平成 20~22 年度で合計 6.5 km (単長 10~30 m 以上) を供給する。平成 23 年度は、平成 20~22 年度までに開発された上記技術を用いて、30 m ケーブルシステム検証用として 1.3 km (単長 30 m 以上) 及び短尺導体評価用として 0.3 km を供給する。なお、東日本大震災及び夏季節電対策の影響によるケーブル用線材製造の遅延抑制のために、超電導機器用線材の技術開発を担当する実施者 (ISTEC) が IBAD 中間層基板及び線材の供給を一部担当する。

(4) 微細構造解析

超電導電力ケーブル研究開発のケーブルシステム検証に必要な Y 系超電導線材について、透過型電子顕微鏡等を用いて詳細にその微細構造解析を行う。これらの結果を製造プロセスにフィードバックし、超電導電力ケーブル対応線材の安定製造技術開発支援を行う。

(5) IBAD-PLD 線材の安定製造技術の開発

200 A/cm-w 級 IBAD-PLD 線材による電力ケーブルのシステム成立性を確認するため、IBAD-PLD 線材の安定製造技術の開発を行う。平成 20 年度、平成 21 年度はケーブルの重要な要素技術開発のために数十 m の線材を作製する。平成 23 年度は IBAD-PLD 線材を用いたケーブル導体の交流損失等の要素技術を開発するため、300 A/cm-w 級の超電導線材を作製する。平成 24 年度は、極低交流損失ケーブル導体評価用に 300 A/cm-w 級の超電導線材を作製・提供する。

(6) 線材の評価技術の開発

Y系超電導線材を用いた電力ケーブルが所要の性能を達成するためには、線材の安定的な製造技術の確立とともに、線材の性能を的確に把握する評価技術が重要である。テープ状の超電導線材を電力ケーブルへ組み込む前段階において、Y系超電導線材の臨界電流性能、幅方向の臨界電流均一性評価、機械的欠陥評価、欠陥除去等の評価技術を開発する必要がある。こうした評価技術は、産業用としての見通しを得るために、効率的かつ効果的に行われる必要がある。こうした線材の評価技術の開発を行うとともに、Y系超電導線材をホール素子法、長尺線材 I_c 評価装置等の装置での評価を行い、評価パラメータによる効率的、効果的な評価についての検証を行う。平成23年度は開発された評価技術を用いて主にケーブルシステム検証に使用される線材に対して各種評価を行い、それらの効率・効果を検証する。

2.1.2-5 66 kV 大電流ケーブルシステム検証（住友電気工業）

66 kV 大電流ケーブルの実用性検証のために、大電流低損失ケーブル導体、大電流接続部のそれぞれの要素技術を組合せ、超電導電力ケーブルシステムを構築し、送電線路として機能するか否かの検証を行う必要がある。ケーブル導体は、終端部と組み合わせられることで初めて電圧、電流を印加することが可能となる。また、その端部を固定することで、長尺ケーブルとしての熱的・機械的な挙動を検証することが可能となる。一方、終端部はケーブルの動きを止めるための反動が加わり、実際の応力が印加される。このような応力下で、所定の電圧、電流を印加できる性能を発揮する必要がある。

平成22年度は66 kV級大電流ケーブルシステムの設計検討を行とともにケーブル実用化時の長期間運転を念頭において、課電条件、ヒートサイクル条件等を検討し、課通電試験計画書を作成する。

平成23年度は、これに基づきシステム検証試験向けの長期課通電試験に必要な、冷却システムや終端接続部、課電設備等の機器の製造を開始する。なお、東日本大震災及び夏季節電対策の影響による一部ケーブル用線材製造遅延により、15 m長の超電導ケーブルの製造は平成24年度に実施する。

平成24年度は、ケーブル冷却システムの適用法規変更に伴う既存冷却設備の配管の改造を行うとともに、システム検証向けの15 m長ケーブルを製造し、冷却システムや終端接続部等の機器の製造・組み合わせた66 kV三心一括ケーブルシステムを構築する。さらに中間目標で設定された長期課通電試験を行い、システムの熱的・機械的な挙動、電気的特性、運転の安定性・信頼性等を評価し、システム設計の妥当性を確認する。また、これまでのプロジェクトの成果

を踏まえ、Y系超電導線材を用いた超電導電力ケーブル設計指針を示す。

2.1.2-6 275 kV 高電圧ケーブルシステム検証（古河電気工業）

本システム検証の目的としては、275 kV 高電圧ケーブルとしての特性を有するかを検証するもので、初期設計性能を確認することに加えて、定常通電時、事故時、さらに30年の長期運転における信頼性についてどのような課題があるかを調査するものとする。

275 kV 高電圧ケーブルの実用性検証のために、ケーブル開発、中間接続部開発、終端接続部開発の研究開発成果と、定常通電時及び事故時の伝熱特性検討の成果（前述）を活かし、両端に終端接続部と、ケーブルの途中に中間接続部を有する275 kV級、単心、3 kA、30 m長の超電導電力ケーブルシステムを設計・製作し、冷却システムと組み合わせて、検証用の超電導電力ケーブルシステムを構築する。システム設計、システムの試験計画等構築するにあたっては、技術開発内容が適切に行われていることを評価・確認するため、ISTECが設置する委員会（後述）において、専門家の意見・アドバイスを受けながら研究開発を進める。

平成22年度より研究を行い、後期2ヶ年で実施するシステム検証での評価内容について試験条件やその根拠について検討し、課通電試験計画書を作成する。さらに、この計画書の試験条件を反映させたケーブル及び中間接続部等の再設計を行う。平成23年度は、システム検証試験向けの30 m長の超電導電力ケーブルを製造する。また、長期課通電試験に必要な、冷却システムの設計・製造及び終端接続部の製造を開始する。平成24年度はシステム検証向けの30 m長超電導電力ケーブルの初期特性（損失、侵入熱、圧力損失、耐電圧等）を取得し、中間目標で設定された長期課通電試験を行い、試験後に初期特性を再度確認し電気絶縁設計の妥当性を確認する。これまでのプロジェクトの成果を踏まえ、Y系超電導線材を用いた超電導電力ケーブル設計指針を示す。

2.1.2-7 超電導電力ケーブルの研究開発スケジュール

超電導電力ケーブルの研究開発スケジュールと予算を表2.1.2-1に示す。

表 2.1.2-1 超電導電力ケーブルの研究開発スケジュール

事業項目	平成20年度	平成21年度	平成22年度	平成23年度	平成24年度
1. 大電流・低交流損失ケーブル化技術の開発	<p>大電流・低交流損失技術の基礎特性評価</p> <p>大容量接続技術の開発 (5 kA 連続通電) 中間接続部の構造設計</p> <p>三心一括ケーブル導体の検証(31.5 kA・2s の耐性)</p> <p>高 I_c-IBAD-PLD 線材による大電流・低交流損失の評価 (5kA 通電特性)</p> <p>交流損失低減の基礎的研究(2 W/m・相@5kA) 極低損失ケーブル設計</p>				
2. 高電圧絶縁・低誘電体損失ケーブル化技術の開発	<p>高電圧絶縁・低誘電体損失技術の基礎特性評価</p> <p>交流損失 (導体層), 誘電体損失 (0.8 W/m・1 相@3 kA) 交流損失, 誘電体損失 (0.8 W/m・1 相@3 kA)</p> <p>高電圧接続技術の開発 (275 kV 連続課電)</p> <p>超電導ケーブル電気絶縁特性の調査 (63 kA・0.6s の耐性) 低誘電体損失絶縁材評価</p>				
3. 電力ケーブルの熱収支に関する評価研究	<p>定常通電時および事故時の伝熱特性検討 (シミュレーションの実施) (シミュレーション技術の確立)</p> <p>スラッシュ室素の研究 (システム構築) (システム検証)</p> <p>超電導電力機器の冷却設備の調査研究 ケーブル冷却特性評価</p>				
4. 超電導電力ケーブル対応線材安定製造技術開発	<p>大電流用線材の安定製造技術の開発 (線材の安定作製・加工・評価) ($J_e = 15 \text{ kA/cm}^2$ 20m 長)</p> <p>基板・中間層テープの開発 作製・提供</p> <p>MOD プロセスによる高電圧ケーブル用線材の開発 ($J_e = 15 \text{ kA/cm}^2$ 20m 長)</p> <p>微細構造解析</p> <p>IBAD-PLD 線材の安定製造技術の開発 線材作製・提供</p> <p>線材の評価技術の開発</p>				
5. 66 kV 大電流ケーブルシステム検証	<p>システム開発 システム作製・試験・評価</p>				
6. 275 kV 高電圧ケーブルシステム検証	<p>システム設計 システム作製・試験・評価</p>				
予算 (百万円)	542	693	585	938	1,154

注) 各研究項目の予算には NEDO 管理費等を含まない。(税込)

2.1.3 超電導変圧器の研究開発

Y系超電導線材を用いた超電導変圧器を開発するため、巻線技術・冷却システム技術・限流機能付加変圧器技術等の要素技術に関して、低損失かつ大電流巻線技術の確立、高効率な液体窒素冷却装置の開発を行い、2 MVA級超電導変圧器モデルの特性試験によって、66/6.9 kV 20 MVA級超電導変圧器システムが成立することを検証する。また、数百 kVA級限流機能付加変圧器の試作・試験により、Y系超電導線材を利用した限流機能を検証する。

2.1.3-1 超電導変圧器巻線技術開発（九州電力、富士電機、九州大学、ISTEC）

(1) 超電導変圧器巻線の大電流化技術開発

平成20～22年度では、超電導変圧器二次巻線に必要な2 kA級の大電流通電に向け、まず、多層化に伴う安定化材を付加した線材曲げ特性を測定して確認する。さらに、線材を多層並列導体とし、素線の転位によってインダクタンスを同等にして各素線電流を均一にする転位均流化のための変圧器二次巻線モデル（転位均流巻線モデル）及び巻線口出し部モデル等を設計・製作し、転位均流化のパラメータ最適化・試験によって変圧器巻線の多層転位並列導体の構成法及びこれによる超電導変圧器の大電流巻線構成技術を評価する。

平成23年度では、5 mm幅線材（細線化加工なし）を用いて、多層転位並列導体の一次・二次巻線で鉄心付大電流巻線モデルを設計する。

平成24年度では、平成23年度に設計した鉄心付大電流巻線モデルの試作、試験、評価を実施する。

(2) 超電導変圧器巻線の低損失化技術開発

平成20～22年度では、前NEDO事業の「超電導応用基盤技術開発（第Ⅱ期）」プロジェクトで得られた技術成果を反映し、線材長が100 m級で交流損失1/3以下の細線化線材を用いて、変圧器用巻線モデルの交流損失が無加工線材に対して1/3以下となることを検証するため、鉄心を有し一次・二次巻線からなる低損失化巻線モデルを設計する。

平成23年度では、同モデル製作及び交流損失特性試験を実施する。

(3) 超電導変圧器巻線の耐短絡強度技術開発

平成20～22年度では、多層転位並列導体を用いた変圧器巻線が、系統事故時に発生する短絡電流（20 MVA級変圧器%インピーダンス15%相当）による強大な電磁力対しても劣化せず、その機能を健全に維持できる強度を有する巻線構造を開発し、一次・二次巻線からなる鉄心付の短絡変圧器モデルを試作す

る。同モデルの特性を短絡電流試験により巻線の健全性を検証して、耐短絡強度の巻線技術进行评估する。

(4) 変圧器の巻線構成技術及び最適転位技術の検討

フィラメント化溝加工により低交流損失化を図った細線化 Y 系超電導線材を用いて線材素線レベルでの低交流損失性能を維持したまま、大電流量導体・巻線（ソレノイド型）を構成する技術及び電流分流比の均一化を考慮した最適転位技術の確立をめざす。

平成 20～22 年度では、単層、多層の転位並列導体を用いた超電導巻線の交流損失、電流分流等の電磁特性について、理論及び実験の両面から低損失化を検討する。

平成 23 年度では、引き続き、転位並列導体の電流分流特性（巻線内自己・相互インダクタンスの定量性、任意層数巻線の転位パターン）及び交流損失特性（積層／横並列の違いに伴う特性解明）について、理論及び実験の両面から検討を重ね、変圧器巻線の構成法、最適転位巻線方法について検討する。

平成 24 年度では、引き続き、転位並列導体の電流分流特性（素線同士の巻線内自己・相互インダクタンスの定量性、任意層数巻線転位パターン）及び並列導体の導体構成に伴う付加的交流損失（積層並列導体特性、横並列導体特性の解明）について、理論及び実験の両面から検討し、20 MVA 級超電導変圧器巻線や鉄心付大電流巻線モデルの構成法、最適転位方法について考察する。

(5) モデルコイル、変圧器設計のための交流損失データ取得、提供

平成 23 年度では、巻線モデル及び変圧器の低交流損失化の設計に資するため、鞍型ピックアップコイルを用いて巻線モデル用線材（3 分割、無分割）の交流損失特性进行评估し、コイル化技術開発を支援する。

平成 24 年度では、引き続き、鞍型ピックアップコイルを用いて 2 MVA 級超電導変圧器モデル用線材の積層時の交流損失特性进行评估するとともに、変圧器巻線における交流損失の定量的評価見積手法について検討し、20 MVA 級超電導変圧器の設計検討に資する。

2.1.3-2 冷却システム技術開発（大陽日酸、九州大学、ISTEC）

超電導変圧器用の高効率で運用性に優れた冷却システムの達成のためには、摺動部の無い小型ターボ式圧縮機と小型膨張タービン、さらには熱交換器の小型化及び冷凍機と変圧器とのインターフェース技術開発が必要であることから、その基礎技術を試験や解析で確立し、回転機の断熱効率 65 % の実現やシステム化を行う。

(1) 小型膨張タービンの高効率化

平成 20～22 年度では、前 NEDO 事業の「超電導応用基盤技術開発（第Ⅱ期）」プロジェクトにて開発した無摺動小型膨張タービンの技術成果及び知見に基づき、効率向上、高度な信頼性、長寿命化を確立するために磁気軸受けを採用した小型膨張タービンを試作する。試作タービンは試験評価により特性を分析し、断熱効率 65 %以上となる改良を行う。

(2) 小型ターボ式圧縮機開発

平成 20～22 年度では、超電導変圧器用の冷却システムの摺動部の無い小型ターボ式圧縮機の技術開発に向けて、インペラ、ケーシング等の小型ターボ式圧縮機の要素部品について、構造・応力解析ソフトによるシミュレーションを駆使して小型・高効率化の設計検討を行う。

また、小型ターボ式圧縮機の基礎特性把握用のターボ式圧縮機モデルを試作して特性試験を行い、その試験結果による運転性能の検討や冷却状況等を熱流体シミュレーションにて解析して評価することにより、小型ターボ式圧縮機製作に必要な基礎技術や知見を得る。これらの基礎試験や解析の成果により、ターボ式圧縮機の効率や運用性等の特性を明らかにし、ターボ式圧縮機の試作・改良等により断熱効率 65 %以上を達成する。

平成 23 年度では、低温圧縮プロセスの最適設計に資する目的で、ターボ式圧縮機の低温回転試験を実施する。

(3) 熱交換器の小型化

熱交換器は元来冷凍機の重要な構成機器であり、冷凍機の性能に大きく係わる要素である。熱交換器の小型化は冷凍機の効率低下を引き起こす要因でもあり、熱交換器の最適化が、最終目標「冷凍機効率 0.06 以上」達成のためには欠かせない要素研究である。熱交換器性能は、圧縮機や膨張タービンにより決定される冷凍機のプロセス圧力に大きく影響されるため、熱交換器の検討は圧縮機や膨張タービンの開発と並行して実施されるべきものである。

平成 20～22 年度では、熱交換器の性能検討及び設計・試作、熱交換器の試験・シミュレーションにより、冷却システムのプロセスシミュレーション手法を用いて、冷凍機システム全体を俯瞰した立場から熱交換器を小型化する。

平成 23 年度では、熱交換器を 4 ブロック化し、ターボ圧縮機と組み合わせた性能・耐久試験を実施する。

(4) 冷凍機開発と冷却システム開発

冷凍機のさらなる高効率化をめざし、かつ現在の法規等を考慮し、冷凍プロ

セスの高圧力側の圧力を前 NEDO 事業の「超電導応用基盤技術開発（第Ⅱ期）」プロジェクトにおける 2 MPa から低圧への変更を検討する。

平成 20～22 年度では、冷凍機の基本プロセス検討、冷凍機組立に伴うコールドボックス他設計、運転プロセスシミュレーションの検討を行う。

平成 23 年度では、モデル冷凍機の製作・冷却試験を実施するとともに、モデル冷凍機とサブクール液体窒素循環装置を組み合わせた総合試験により冷却システムの定常運転を確認する。

平成 24 年度では、モデル冷凍機の冷凍機単体での冷却試験を実施するとともに、モデル冷凍機とサブクール液体窒素循環装置を組み合わせたサブクール液体窒素の循環冷却試験、及び 2 MVA 級超電導変圧器モデルと組み合わせた総合的な冷却試験を実施する。

(5) 冷凍機と機器とのインターフェースの検討

平成 20～22 年度では、冷凍機の冷媒であるネオンガスから変圧器巻線の冷媒であるサブクール液体窒素への冷熱の伝達方法について、変圧器及び冷却システムの構造簡略化、熱交換の高効率化の観点から冷凍機と機器とのインターフェースの検討を行う。

平成 23 年度では、ヘリウム液化冷凍機を用いたサブクール液体窒素熱交換システムの実験により液体窒素の熱伝達、対流、冷却能力を評価するとともに、熱交換器の配置・形状の最適化を含め、冷凍機と機器の効果的なインターフェース構成を検討する。

平成 24 年度では、引き続き、その実験を継続して液体窒素の熱伝達、対流、冷却能力を評価するとともに、熱交換器の配置・形状の最適化を検討し、20 MVA 級超電導変圧器の設計検討に資する。

2.1.3-3 限流機能付加技術開発

(九州電力、富士電機、九州大学、岩手大学、ISTEC)

超電導変圧器は限流機能を備えることにより自身の健全性を維持するとともに、電力系統の事故時の過大な事故電流を抑制して事故の波及抑制も可能となる。電力系統の短絡容量対策にも貢献する。さらに、将来的に超電導電力ケーブルと超電導変圧器を連系して適用する場合にも限流機能は相互の導入促進に貢献すると考えられることから、限流機能付加変圧器の技術を開発する。

具体的には、限流機能付加変圧器の基礎技術として、4 巻線構造の小型超電導変圧器モデルによる特性検証、限流応答特性解明と限流効果による巻線保護の検討、熱伝導率等の熱的特性の評価、及び数百 kVA 級限流機能付加単相変圧器モデルの設計・試作を行い、変圧器性能及び限流機能を評価する。

(1) 4 巻線モデルによる特性検証

平成 20～22 年度では、限流機能付加変圧器の基礎技術の検証用として、一次側、二次側ともに主巻線と並列に接続された各巻線評価用の補助巻線を持つ 4 巻線構造の小型超電導変圧器モデルを試作する。ここで、本モデルは、通常の変圧器運転時には電流の大部分を主巻線に流し、事故時には主巻線が事故電流にてクエンチして、発生した主巻線のフラックスフローにより補助巻線に分流させる構成とする。そのため主巻線は常電導抵抗が大きく、補助巻線は短絡電流相当の容量を持ち十分安定な Y 系超電導線材を適用する。次に、本巻線モデルを用いて突発短絡事故を模擬した試験を行い、主巻線における常電導領域の発生過程を観測するとともに、Y 系超電導線材の液体窒素温度における過大電流に対する基礎的な応答特性を定量的に検証・評価する。なお、実用化する場合の限流機能付加超電導変圧器は主巻線と補助巻線を複合した 2 巻線構成である。

(2) 限流応答特性解明と限流効果による巻線保護の検討及び熱伝導率等の熱的特性の評価

平成 20～22 年度では、上記の 4 巻線構造変圧器モデルを用いて突発短絡事故を模擬した巻線モデルの特性試験等の各種の実験を行い、その結果等に基づき変圧器巻線の短絡電流に対する電氣的、熱的応答特性を記述しうる基礎方程式の導出について検討し、Y 系超電導線材の液体窒素温度における過電流に対する電氣的、熱的応答特性を理論及び実験の両面から明確にする。また、巻線保護に適した方法についても検討する。さらに、限流特性を設定するための安定化層の厚さや配置の最適化のために、安定化層条件の異なる Y 系超電導線材の熱伝導率等の熱的特性の試験・解析及び評価を行う。

平成 23 年度では、ケーブルとの一体運営を考慮した限流機能の系統解析を行い、限流機能付加超電導変圧器の設計に資するとともに、過大事故電流発生時の熱伝搬解析を実施する。

平成 24 年度では、限流機能を付加した 20 MVA 級超電導変圧器の突発短絡応答特性を数値解析により模擬するとともに、過大事故電流発生時の熱伝搬解析に必要な線材の熱的特性値の取得を行い線材構成の最適条件を明確化し、限流機能を付加した 20 MVA 級超電導変圧器の設計検討に資する。

(3) 数百 kVA 級限流機能付加変圧器の試作

平成 20～22 年度では、上記の 4 巻線構造変圧器モデルの試験や解析の成果及び熱的特性の評価について総合評価を行い、4 巻線構造の主巻線と補助巻線を複合した 2 巻線構成とし、過大電流による過渡特性が確認できる数百 kVA 級限流

機能付加単相変圧器モデルに関して、励磁突流印加時や地絡事故時に巻線で発生する常電導抵抗及びこの常電導抵抗による限流特性、さらに変圧器で消費される総熱量を見積り、巻線と絶縁の健全性を確保しうる変圧器形態の設計・試作を行う。また、過電流通電時の超電導ー常電導 (S - N) 転移による限流動作時の巻線温度上昇及び液体窒素の沸騰 (発泡) 状態については、超電導巻線モデルによる定量的データ取得及び高精度な観測を行い、巻線構造の最適化が必要である。このため、異なる超電導導体構造の巻線モデル及び発泡試験器具によって、過電流通電時の巻線特性及び液体窒素の気泡挙動を解明し、変圧器巻線の電気絶縁設計に反映する。

平成 23 年度では、数百 kVA 級限流機能付加単相変圧器モデルの過電流試験により限流機能を検証する。

2.1.3-4 超電導変圧器対応線材開発

(フジクラ、昭和電線ケーブルシステム、JFCC、九州大学、ISTEC)

超電導変圧器用の線材は交流損失低減が不可欠である。アスペクト比の非常に大きなテープ状線材である Y 系超電導線材を適用する際には、細くスリットを切って等価的に非常に幅の狭い線材の開発が求められているが、2 次元構造の Y 系超電導線材においては、隣接する結晶の粒界で生じる弱結合の分布によって有効な通電断面積が決まってしまうため、パーコレーション的に不利な配置になる確率を低減するためにはできるだけ結晶粒径が小さいことが望ましい。本プロジェクト開始時点までに開発してきたイオンビームアシスト蒸着法 (IBAD 法) 線材は、結晶粒が無配向で粒径の小さい金属テープを基板とし、結晶粒配向中間層の結晶粒径が非常に小さいため、超電導膜における結晶粒径も小さくなる傾向がある。これを有効活用し、優れた変圧器用線材の基板・中間層の安定製造技術を開発する。

また、変圧器用線材はケーブル用以上に細くする必要があるほか、1 本の線の中で臨界電流の分布が生じていると十分な交流損失低減が出来ないことから、結晶粒径だけでなく、超電導線材の長手方向、幅方向の特性の不均一を極力低減する必要があり、超電導層作製時の条件の安定性を改善する必要がある。

Y 系超電導線材を適用する超電導変圧器の技術開発にあたり、IBAD-PLD (パルスレーザー蒸着法) 線材及び IBAD-MOD (有機酸塩熱分解法) 線材にて、前 NEDO 事業の「超電導応用基盤技術開発 (第 II 期)」プロジェクトで開発された成果を用いて、超電導変圧器の技術開発に必要な 5 mm 幅 3 分割にて $I_c=50$ A/5 mm-w @65 K、0.01 T で 100 m 以上に相当する線材を安定的に生産し提供する技術開発を行う。また、スクライビング細線溝加工前後の微細組織変化を詳細に解析し、加工条件等の適正化、及び線材の特性評価と温度スケール

則を用いた巻線の交流損失見積り手法について検討する。

(1) 超電導変圧器対応線材安定製造技術開発 (PLD 線材)

本プロジェクト開始時点までに、IBAD 中間層基板上に超電導層をパルスレーザ蒸着法 (PLD 法) により成膜する技術を開発しており、比較的欠陥の少ない安定した成膜に成功しつつある。この技術を活かして 5 mm 幅、100 m 長以上の Y 系超電導線材に対して、3 分割のスクライビング細線溝加工後に所定の特性 ($I_c=50\text{ A}/5\text{ mm}\cdot\text{w}@65\text{ K}$ 、0.01 T) を得ることを可能とする特性均一な長尺線材の安定製造技術を開発するとともに、プロジェクト後期 2 ヶ年で開発する 2 MVA 級超電導変圧器モデル用線材として、平成 20～22 年度の 3 年間で総量約 5 km (1 cm 幅線材で換算) を供する。また、Y 系超電導線材用の IBAD 中間層基板の安定製造技術を開発するとともに、次項で説明する MOD 線材用の IBAD 中間層基板を平成 20～22 年度の 3 年間で総量約 4 km (1 cm 幅線材で換算) を供する。

平成 23 年度では、2 MVA 級超電導変圧器モデル用線材として総量約 11 km (1 cm 幅線材で換算) を供するとともに、MOD 線材用の IBAD 中間層基板として総量約 1 km (1 cm 幅線材で換算) を供する。

平成 24 年度では、鉄心付大電流巻線モデル用線材として総量約 2 km (1 cm 幅線材で換算) を供する。

(2) 超電導変圧器対応線材安定製造技術開発 (MOD 線材)

将来の低コスト化が見込める線材作製法として、本プロジェクト開始時点までに超電導層を有機酸塩熱分解法 (MOD 法) により開発しており、高性能な線材の安定製造 (歩留り向上) に成功しつつある。この技術を活かして 5 mm 幅、100 m 長以上の Y 系超電導線材に対して、3 分割のスクライビング細線溝加工後に所定の特性 ($I_c=50\text{ A}/5\text{ mm}\cdot\text{w}@65\text{ K}$ 、0.01 T) を得ることを可能とする特性均一な長尺線材の安定製造技術を開発するとともに、プロジェクト後期 2 ヶ年で開発する 2 MVA 級超電導変圧器モデル用線材として、平成 20～22 年度の 3 年間で総量約 2 km (1 cm 幅線材で換算) を供する。

平成 23 年度では、低損失化巻線モデル用線材として総量約 1 km (1 cm 幅線材で換算) を供する。なお、東日本大震災及び夏季節電対策の影響による変圧器用線材製造の遅延抑制のために、超電導機器用線材の技術開発を担当する実施者 (ISTEC) が低損失化巻線モデル用線材の供給を一部担当する。

(3) 超電導変圧器対応安定製造技術線材の評価及び細線安定加工技術開発

超電導変圧器で使用される線材は、垂直磁場変動に起因した交流損失の低減

のため、スクライビング細線溝加工による細線化が必須である。スクライビング細線溝加工を施すと、欠陥の大きさによっては細線化したフィラメントに通電できない場合も生じる。ここでは、本プロジェクト開始時点までに開発しているレーザ加工等によるスクライビング細線溝加工技術を活用した安定製造加工技術を開発する。

平成 20～22 年度では、変圧器用として 100 m 長以上の Y 系超電導線材で 5 mm 幅への切断及び 3 分割のスクライビング細線溝加工を安定して実施可能な技術を開発する。

平成 23 年度では、2 MVA 級超電導変圧器モデル用線材に対してのスクライビング細線溝加工を実施するとともに、切断及びスクライビング細線溝加工前後の線材の超電導特性を評価して、安定製造加工技術開発に資する。なお、この評価・加工技術を Y 系超電導線材製造プロセスにフィードバックすることにより、幅方向及び長手方向の超電導特性の均一性向上に反映させ、システム検証用線材の安定作製、加工、評価の確実な実施を図る。

平成 24 年度では、鉄心付大電流巻線モデル用線材に対しての切断及び加工前後の線材の超電導特性を評価して、安定製造加工技術開発に資する。

(4) 超電導変圧器対応線材安定製造技術の評価

超電導変圧器に対応する Y 系超電導線材について、透過型電子顕微鏡(TEM)等を用いてその微細組織・構造解析を行う。これらの結果を Y 系超電導線材製造プロセスにフィードバックし、線材の安定製造技術開発支援を行う。また、細線化のため、スクライビング細線溝加工前後の微細構造組織変化を詳細に解析し、加工条件等の適正化にフィードバックする。

(5) 線材特性評価と温度スケーリング則による巻線の交流損失見積り手法検討

平成 20～22 年度では、温度スケーリング則手法により機器巻線の交流損失を簡略に推定する手法の確立をめざす。PLD 法及び MOD 法で作製された Y 系超電導線材について、細線化溝加工線材のフィラメント間抵抗、臨界電流(I_c)、磁化及び交流損失特性を測定し、温度スケーリング則の適用性を明らかにする。さらに、この磁界印加角度依存性、Y 系超電導線材の積層数依存性についても検討する。

2.1.3-5 2 MVA 級超電導変圧器モデル検証 (九州電力、富士電機)

(1) 2 MVA 級超電導変圧器モデルの設計検討

66 kV/6.9 kV-20 MVA 級配電用変圧器実機の実現に向けて、超電導変圧器の特性や製作技術を見通し、冷却システムと組み合わせて検証するためには、実機と同一電圧で、実機相当の巻線構成となる最低容量の 2 MVA 級超電導変圧器モデルを製作し、検証する必要がある。

平成 20～22 年度では、実機変圧器を見通す技術を早期に効率的かつ経済的に開発するため、以下の方針により 66 kV/6.9 kV-2 MVA 級超電導変圧器モデルの設計検討を行う。

- ・損失低減技術に関しては、細線化線材による巻線を適用する。
- ・定格 66 kV の耐電圧（耐 350 kV インパルス、耐 140 kV 交流過電圧）や機器構成に起因する技術（変圧器のブッシング、鉄心、巻線構成等）は極力実機相当とする。
- ・電流に起因する変圧器巻線技術等は、多層並列導体や転位均流巻線技術を適用する。
- ・前述で得られた要素技術の開発成果を同変圧器モデルに反映する。
- ・また、同変圧器モデルの交流損失低減や耐電圧特性等を検証・評価できる課通電試験の計画を検討する。

平成 23 年度では、2 MVA 級超電導変圧器モデルの詳細設計を行い、同変圧器の巻線製作に着手する。

平成 24 年度では、2 MVA 級超電導変圧器モデル用保冷容器の設計・製作、巻線製作、変圧器組立を行い、変圧器巻線性能試験を実施した上で、冷却装置と組み合わせて超電導変圧器システムを構成し、課通電試験計画書に基づき性能試験、評価を実施する。

(2) 20 MVA 級超電導変圧器の設計検討

66 kV/6.9 kV-2 MVA 級超電導変圧器モデルの設計検討結果に基づき、平成 22 年度に 66 kV/6.9 kV-20 MVA 級超電導変圧器実機の設計検討を行う。定格 66 kV の耐電圧や機器構成に起因する技術は上記設計を反映し、電流に起因する巻線構成、冷却システム技術は 2 MVA 級の設計結果と前述で得られた要素技術の開発成果に基づき設計検討する。また、それらの設計検討の結果に基づき、超電導変圧器の特長であるコンパクト性、高効率性等の既存機器に対する技術的な優位性をまとめる。さらに、超電導変圧器のトータルコストを概略算定し、既存機器に比較しての経済的な優位性についても概略検討する。

平成 24 年度では、2 MVA 級超電導変圧器モデル単体及び冷却装置と組み合わせた性能試験、評価に加え、鉄心付大電流巻線モデル等の検証、検討結果を踏まえ、平成 22 年度に行った 66 kV/6.9 kV-20 MVA 級超電導変圧器の設計にフィードバックする。

2.1.3-6 超電導変圧器の研究開発スケジュール

超電導変圧器の研究開発スケジュールと予算を表 2.1.3-1 に示す。

表 2.1.3-1 超電導変圧器の研究開発スケジュール

事業項目	平成20年度	平成21年度	平成22年度	平成23年度	平成24年度
(1)超電導変圧器巻線技術開発	← 転位均流巻線モデルの検証 →		← 大電流化技術開発 →		
	← 低損失化技術開発 →				
	← 耐短絡強度技術開発 →				
(2)冷却システム技術開発	← 小型膨張タービンの高効率化 →			← 低温圧縮試験 →	
	← 小型ターボ式圧縮機開発 →			← 最適ブロック化 →	
	← 熱交換器の小型化 →				
	← 冷凍機プロセス検討 →			← 冷凍機・冷却システム開発 →	
	← 冷凍機と機器とのインターフェースの検討 →				
	← 4巻線モデルの特性検証 →			← 数百kVA級限流機能付加変圧器の開発 →	
	← 限流応答特性解明と巻線保護の検討、熱的特性の評価 →				
(4)超電導変圧器対応線材開発	← 変圧器対応線材安定製造技術開発 (PLD・MOD) →				
	← 変圧器対応線材の評価及び細線安定加工技術開発 →				
	← 線材安定製造技術の評価 →				
	← 線材特性評価と巻線の交流損失見積手法検討 →				
(5)2 MVA級超電導変圧器モデル検証				← 2 MVA級変圧器モデルの試作・検証 →	
				← 20 MVA級変圧器設計へのフィードバック →	
				← 20 MVA級変圧器設計 →	
予算 (百万円)	584	598	657	778	773

注) 各研究項目の予算には NEDO 管理費等を含まない。(税込)

2.1.4 超電導機器用線材の技術開発

本項の開発では IBAD-PLD 及び IBAD-MOD 線材に加え、結晶粒配向金属基板-PLD 線材、IBAD-MOCVD 線材も含めて電力機器応用に対しての長期信頼性試験等の実用化技術開発の際に必要な性能及び製造速度等を満足させる Y 系超電導線材作製技術の開発を前期 3 ヶ年で実施し、その安定製造技術開発を後期 2 ヶ年で実施する。さらには、2020 年頃を想定した電力機器の導入・普及開始の際のコストを含めた必要条件に耐え得る線材の作製技術の開発を目的とする。

臨界電流等の超電導特性、交流損失、機械強度等の評価、超電導微細構造解析、伝熱解析等の評価を通して、線材作製技術開発にフィードバックすることによりの確で効率的な線材開発を図る。将来の実用化に向けて、磁場中臨界電流特性や線材機械強度の向上、工業的臨界電流密度 (J_c) の向上、交流損失低減技術開発と密接に関係する線材特性の均一性向上等のさらなる線材性能の向上を目的とした開発を進める。

2.1.4-1 線材特性の把握

(ISTEC、住友電気工業、JFCC、九州大学、早稲田大学、京都大学)

本項の開発では、実用線材を想定し、保存環境（湿度、温度等）、運転環境を模擬した様々な環境下（真空中、液体窒素中、曲げ、引っ張り等）に線材を保存し、臨界温度 (T_c) や臨界電流 (I_c) 等の特性の経時・経年変化を評価する。必要に応じて X 線回折による構成相の確認とともに微細組織観察を実施し、劣化機構とともにこれを抑制する手法の提案をめざす。

平成 20 年度は、まず各応用機器の運転環境の把握と課題抽出を行う。また、想定された環境に対応した線材試験方法の調査を行うとともに、線材試料保存及び加速試験用の装置を導入し、IBAD-PLD 及び IBAD-MOD、結晶粒配向金属基板-PLD 線材等の現状線材に対し予備的な試験（高温多湿環境における保管等）を行い、経時特性変化を把握する。平成 21 年度には、組成、作製条件の異なる種々の線材に対し、様々な環境下での経時特性評価を行い、経時変化主要因となる微細組織の影響等を調査するとともに、劣化を抑制する線材作製条件への指針を得る。超電導特性評価に加え、経時変化要因の解明のため、磁気光学法による特性分布評価や詳細な電磁気挙動評価を行う。さらに、平成 22 年度には、ケーブル応用を念頭に置き、経時特性に加え、安定化層の厚さ、種類や加工方法の異なる素線に対する過電流試験により、事故電流に対する裕度や劣化要因及びその対策を検討し、ケーブル耐久試験条件として試験項目や試験条件を決定する。

平成 23 年度は、変圧器応用を念頭に置き、製作環境及び課通電、過電流等の運転環境に対する耐性検討を行い、変圧器応用の特殊性に対応した線材試験方法の検討を行い、評価を実施する。平成 24 年度では、引き続き変圧器等の機器に対する様々な環境への耐性評価と対策手法の開発を行うことにより最終目標を達成する。

全開発期間を通して、環境負荷前後の微細組織変化を透過型電子顕微鏡 (TEM) 等により詳細に解析し、耐久性を比較・評価し、劣化機構とともにこれを抑制する手法の提案を支援する。

2.1.4-2 磁場中高臨界電流 (I_c) 線材作製技術開発

(ISTEC、昭和電線ケーブルシステム、中部電力、古河電気工業、JFCC、九州大学、九州工業大学、東北大学、名古屋大学、新潟大学、上智大学、物質材料研究機構、核融合科学研究所、大阪大学、理化学研究所、ロスアラモス国立研究所、東京大学、東京工業大学)

本項の開発では、高磁場中 (~ 10 T) での応用となる SMES 及び比較的低磁場 (~ 0.1 T) ながら垂直磁場成分が関与するソレノイドコイルが想定されている超電導変圧器等の応用を想定し、Y 系超電導線材の磁場中特性の向上技術を開発する。

(1) 人工ピン止め点導入関連技術開発

本項の開発では、「RE 混晶系材料」及び「異相人工ピン止め点の導入」のアプローチで磁場中での特性向上技術を開発する。RE 混晶系材料としては、PLD 法、MOD 法等のそれぞれで実績のある混晶系を基軸にプロセス適正化を進める。PLD 法では GdBCO 及び La 置換系、MOD 法においては Y の一部を Sm 等での置換系を基本に組成、作製条件の最適化を進めるとともに、さらに効果的な RE 材料の組合せ等の検討も行う。CVD 線材においては、Y の一部を Sm や Gd に置換することによって超電導層自体の臨界電流密度を向上させ、磁場中臨界電流も向上させることが可能であることが確認されている。このような、超電導層の高品質化技術を取り入れ、元素添加や熱処理によるキャリア濃度の最適化等により磁場中特性の改善をめざす。一方、異相人工ピン止め点の導入においては、PLD 法における BaZrO₃ 材料のバンブー構造及び MOD 法における等方的磁束人工ピン止め点の導入の技術を基軸に異相材料に関して、添加量、作製条件等の因子の適正化を行うとともに、より効果的な異相材料及び粒径等の微細組織制御法等の検討により磁場中特性の向上を図る。

PLD 法による開発では、平成 20～22 年度において 3 円/Am 以下の技術コスト (以下、極低コスト線材と呼ぶ) が見込める IBAD-MgO 等の低コスト基板上

で、GdBCO等のRE混晶系材料に対してLaを添加、Ba組成の適正化により磁場中特性向上を図る。また、BaZrO₃等の酸化物ナノロッド等による人工ピン止め点を導入し、ピンの濃度、サイズ、分布状態の最適化を図り、特性向上をめざす。また、高 I_c には厚膜化が必要であるが、そのための手法として、例えば人工ピン層や酸化物層とのサンドイッチ構造による厚膜化やa軸配向粒による人工ピン止め点等の制御も行う。以上、短尺で得た材料、製造技術を統合して、長尺により特性を実現する。これらのアプローチにより、平成20年度では、上記材料技術の最適化とそれに適応した連続製造技術の改良を行ない、 $I_c = 20$ A/cm-w (@77 K, 3 T)、 $I_c = 400$ A/cm-w (@65 K, 0.01 T)を実現する。平成21年度には他の磁束人工ピン止め点材料の検討やレーザ照射条件の検討を行い、さらなる特性向上を実現する。平成22年度では、これらの知見を基に安定して長尺が可能になるように長尺プロセス技術を開発し、中間目標を達成する。平成23年度では、前半3ヶ年で得られた成果を基に、長尺線材における厚膜高速成膜技術にRE混晶系材料、超電導層の厚膜化、人工ピン止め点導入技術を融合、成膜条件の適正化により最終目標(50 A/cm-w @77 K, 3 T、400 A/cm-w @65 K, 0.1 T)級の特性を実証する。平成24年度では、それまでに得られた厚膜高速成膜技術と人工ピン止め点導入等の磁場中高臨界電流(I_c)線材作製技術を融合し、これを長尺線材に適用するための成膜条件の適正化により最終目標を達成する。

MOD法による開発では、平成20~22年度において極低コスト線材が見込めるIBAD-MgO等の低コスト基板上で、SmやGd等のRE置換を行うとともに同時にBa組成の適正化により結晶粒の結合強度を向上させ、磁場中特性向上を図る。また、異相人工ピン止め点導入技術に関しては、これまでの実績のある酸化物人工ピン止め点の濃度とともに微細分散を実現する熱処理条件の最適化を図る。上記のアプローチにより、平成20年度では、短尺試料で成果のあるRE及び磁束人工ピン止め点材料を対象に連続製造技術を開発するとともに、極低コスト条件(基板、高速製造対応原料等)における磁束人工ピン止め点導入技術を開発する。平成21年度では、混晶及び異相人工ピン止め点導入技術を統合し、さらなる特性向上を図る。平成22年度では、長尺線材作製に対応した減圧プロセス焼成条件の最適化も含めて長尺化技術を開発し、中間目標を達成する。平成23年度では、人工ピン止め点導入時の本焼成プロセスにおける中間焼成等の効果を明らかにするとともに、さらなる厚膜化、高速化の技術開発を行う。なお、震災等の影響に伴う機器用線材製造の遅延抑制のため、ISTECが機器用線材の供給を一部担当することにより、最終目標(50 A/cm-w @77 K, 3 T、400 A/cm-w @65 K, 0.1 T)の特性に対して、平成23年度は、40 A/cm-w @77 K, 3 T、400 A/cm-w @65 K, 0.1 Tの特性を実証する。平成24年度では、これまで開

発した人工ピン止め点を含む微細組織制御技術を長尺線材へ適用するための仮焼、中間焼成、本焼技術を開発するとともに、厚膜化技術の最適化により最終目標を達成する。

CVD 線材における開発では、平成 20～21 年度で、元素の一部置換や元素添加等を、高強度線材作製技術開発により作製される長尺の高強度平滑基板上の成膜に適用して、50 m 長で $I_c = 30 \text{ A/cm-w}$ (@77 K, 3 T) で強度 1 GPa の線材作製をめざす。平成 22 年度では、さらなる磁場中特性向上のアプローチである厚膜化による中間目標達成をめざす。ここでは a 軸成長を抑制可能な超電導層成膜条件の開発とともに、超電導層の厚膜化に適した中間層の開発を行う。このために LMO 中間層作製装置を導入し、中間層構造も含めた検討を行い、元素の一部置換や元素添加等と併せて中間目標の達成をめざす。

全開発期間を通して、人工ピン止め点の形状、組成、分布等を解析し、磁場中における超電導特性との関連、人工ピン止め点の形成機構を検討し、等方性ピン導入、長尺線材製造プロセスにフィードバックすることにより線材開発を促進する。

これらの開発において、結晶成長制御の知見を反映させ、プロセス条件と微細組織の関係及び、詳細な交流損失を含めた電磁気挙動評価、伝熱挙動、機械的強度評価と連携することで開発を促進させる。

(2) 高不可逆磁場材料の開発

本項の開発では、本プロジェクト開始時まで線材作製に用いられてきた Y 系銅酸化物超電導材料に比べ、より高い臨界温度やより小さな異方性をもつ材料を開発することにより、本質的により高い不可逆磁場をもつ材料を実現し、磁場中高 I_c 線材の作製裕度の向上に資することをめざす。超電導材料の異方性はキャリアドーピング量に大きく依存するため、銅酸化物材料及び臨界温度や臨界磁場が高く応用上のメリットが期待できる新規物質系について、組成やキャリアドーピング量を変えた良質試料を合成し、結晶構造や微細組織の評価を行うとともに、磁気特性及び輸送特性測定等によりその異方性の評価を行う。また、磁束ピン止め機構及び磁束ダイナミクス理解に基づき、小さな磁場角度依存性を実現する新規異相人工ピン止め点材料やその導入方法の開発も行う。平成 20 年度は、多層系の銅酸化物材料に加え、最近発見された鉄系超電導材料について、異方性とキャリアドーピング量との関係を把握する。また物質系の電子構造や、銅酸化物材料で超電導機構と密接な関係があると考えられているスピンや格子ゆらぎ等をラマン散乱、核磁気共鳴、X 線散乱、X 線光電子分光法等を利用し評価する。また、高 I_c 試料に対する低温高磁場までの詳細な電磁気挙動評価を行うとともに、磁束人工ピン止め点の形状、密度、また角度の制御

が比較的容易である重イオン等照射を行った試料との特性比較を行う。さらに、20～40 K 程度の低温動作が想定されている SMES 用の線材材料の性能向上指針として、強磁場施設を利用した詳細な電磁気特性評価を行う。平成 21 年度には、これら結晶構造、電子構造、キャリアドーピング機構及び異方性、ピン止め点導入機構、電磁気特性の知見に基づき、組成やキャリア密度の最適化を試み、異方性低減への指針を得る。さらに、平成 22 年度には、キャリアドーピング制御や人工ピン止め点導入により異方性を低減した銅酸化物材料について、低温高磁場での電磁気特性評価を行うとともに、長尺線材プロセスへの適用性の検討を行う。また、新規磁束人工ピン止め点を導入した線材等について、微細構造解析からその開発を支援する。

2.1.4-3 低交流損失線材作製技術開発 (ISTEC、住友電気工業、フジクラ、JFCC、早稲田大学、九州大学、九州工業大学、京都大学、鹿児島大学、産業技術総合研究所)

本項の開発では、交流応用が想定されている超電導電力ケーブル、超電導変圧器から求められる線材として交流損失の低減化技術を開発する。超電導電力ケーブルでは、真円断面形状からのずれや線材間ギャップ数・間隔等の制御、超電導変圧器では、コイル形状における垂直磁場成分の変動に伴う交流損失低減のための細線化、転位巻線等の技術が適用される。これらの機器作製に対応可能な Y 系超電導線材の作製技術が必要である。

(1) 均一線材作製技術開発

本項の開発では、基板/中間層での平坦性及び完全性、結晶粒配向性等の幅方向、長さ方向の均一性を向上するとともに、超電導層の膜厚や結晶性の均一性を向上させることにより交流損失低減に耐えうる線材作製技術開発を行う。

IBAD 層を用いた基板中間層の開発では、平成 20～22 年度において極低コスト線材が見込める高速 IBAD 基板の開発を、PLD 超電導層と MOD 超電導層用にそれぞれ開発、同時進行で進める超電導層の開発と併せて効率的に研究開発を行う。具体的には、「超電導応用基盤技術研究開発 (第 II 期)」プロジェクトにおいて開発した、3 円/Am を見通せる技術段階の基板に対し、幅方向及び長手方向のそれぞれに表面平坦性や中間層結晶粒配向度等の変化を測定し、基板研磨条件や中間層成膜条件等の適正化により表面平坦性や中間層結晶粒配向度等の均一性向上を図る。中間層成膜においては、高速 IBAD の一種である IBAD-MgO 基板には異なる 4 層の中間層が必要であり、それらのコンビネーションにより最終特性が決定されるため、それぞれの層において適した条件を求

める。平坦性に関しては、下地の平坦性が大きく影響する薄肉化 IBAD 層の下層にあたるベッド層の段階での短周期及び長周期での高均一平坦性を確保するため、基板に存在する研磨傷や圧延痕をカバーし得る MOD 法による成膜技術や高速研磨技術等の開発を行う。また、IBAD 層及び上部中間層においては、ターゲット材料や基板の位置、ビーム条件、チャンバ内圧力等のパラメータ制御により、結晶粒配向度とその幅方向均一性向上を図る。ここでは、結晶粒配向度や欠陥の位置依存性等の新たな指標が重要であり、透過電子顕微鏡 (TEM) 等による微細構造分析結果等をプロセスへフィードバックする。これらの手法により、平成 20 年度には結晶粒面内配向度の分布を抑えて数 μm 級線材で高い J_c (基板等を含めた線材の全断面積で臨界電流を除いた工業的臨界電流密度) 特性を有する細線及び分割線材の作製を可能とする基板の開発を行う。平成 21 年度には長尺化と高均一化を進めて中間目標達成の指針を得る。平成 23 年度には、それまでに培った評価技術、MOD ベッド層を用いた欠陥修復技術を発展させ、線材長手方向、幅方向の高均一化と低コスト化との両立を図る。平成 24 年度では、低コストかつ高均一化を実現可能とするプロセスを用いて長尺線材を作製し、超電導層成膜プロセス・後加工プロセス・各種評価と連携して詳細条件を最適化し、最終目標を達成する。

PLD 法による超電導層形成技術開発では、平成 20～22 年度において、極低コスト線材が見込める IBAD-MgO 等の低コスト中間層付き金属基板を用いて、特性の不均一性の一因となっている超電導層の不均一性を改善する。まず、詳細に線材の幅方向及び長手方向の特性分布、不均一性を調べ、製造因子との相関を把握し、これを改善するためにレーザ照射条件及び蒸着装置の温度、ガス圧等の安定性、均一性を制御した蒸着方法の開発を行い、条件の適正化を図る。このためには、PLD 装置、特にレーザの安定性制御、大型均一プルーム発生等の手段も検討する。上記のアプローチにより、平成 20 年度では、10 mm-w の線材について幅、長手方向の不均一性を調査するとともに、5 mm-w 線材に関して 5 分割化に適応した均一線材への課題抽出と対策を検討する。平成 21 年度には、前年度の成果に基づいて 5 mm-w 5 分割に適応した線材を実証する。平成 22 年度には、長尺化を進め、中間目標を達成する。平成 23 年度には、開発した均一線材作製技術を進展させるとともに、低コスト化との両立及び加工後の特性向上をめざしたさらなる高速厚膜化技術の開発を行い、最終目標 (500 A/cm-w (@77 K, s.f.) - 2 mm-w、5 mm-w 10 分割 - 交流損失 1/10) 級の特性を実証する。平成 24 年度では、これまで開発した成膜技術の長尺化適用の開発を行う。具体的には、温度、レーザ発振条件の長時間安定化を行うことで線材の長尺化を実現し、最終目標を達成する。

MOD 法による超電導層形成技術開発では、平成 20～22 年度において、極低

コスト線材が見込める IBAD-MgO 等の低コスト中間層付き金属基板を用いて、特性の不均一性の一因となっている塗布膜厚の不均一性に関して、塗布溶液の粘性等を制御した原料の開発とともに仮焼用高速塗布駆動装置の改造を行い、複数の塗布方法に対し塗布条件の適正化を図る。また、焼成（仮焼・本焼）プロセスでは、大面積マルチターン焼成方式での温度、ガス流、雰囲気等の条件及び制御性向上による超電導層生成反応の均一化を図る。ここでは、特に反応を考慮したガス・雰囲気の適正化に対し、流体シミュレーション技術を用いて均一条件の指針を得る。上記のアプローチにより、平成 20 年度では、10 mm 幅の線材について幅、長手方向の不均一性を調査するとともに、5 mm-w 線材に関して 5 分割化に適応した均一線材への課題抽出と対策を検討する。平成 21 年度には、前年度の成果に基づいて 5 mm-w 5 分割に適応した線材を実証する。平成 22 年度には、長尺化を進め、中間目標を達成する。平成 23 年度には、塗布方法、条件の検討による塗布膜厚の均一化を図るとともに、均一中間層／基板の適用によるさらなる均一性向上等を行う。なお、震災等の影響に伴う機器用線材製造の遅延抑制のため、ISTEC が機器用線材の提供を一部担当することにより、最終目標（500 A/cm-w (@77 K, s.f.) - 2mm-w、5mm-w 10 分割 - 交流損失 1/10）の特性に対して、平成 23 年度は、400 A/cm-w (@77 K, s.f.) - 2mm-w、5mm-w 10 分割 - 交流損失 1/10 の特性を実証する。平成 24 年度では、引き続き塗布方法・条件の適正化により、さらなる均一性向上を行うとともにこれらの条件の長尺線材への適用を図る。ここでは、線幅方向に膜厚均一化が可能な新塗布方法に適応した設備（MOD 中間層連続焼成炉の改造）を導入することにより、開発を加速させ、最終目標を達成する。

結晶粒配向金属基板-PLD 線材に関する開発では、特性均一性の向上を中間層表面の平坦性、均一性の向上、その形成条件の安定化を行う。平成 20～22 年度では、中間層成膜時のプラズマ、雰囲気、温度等の成膜条件検討と安定性向上により特性均一性の向上を行う。さらに、PLD 法による超電導層形成に関しては、上記と同様に成膜条件（温度、雰囲気、プルーム）の安定性の向上を図ることで特性の均一化を達成する。平成 23 年度は、平成 22 年度までに開発した技術を基に、200 m 長線材に向けた長尺線材作製に着手する。平成 24 年度では、結晶粒配向金属基板における結晶配向性向上の技術開発と 3cm-w PLD プロセスにおいて成膜温度均一化による幅方向 J_c 特性均一性向上の技術開発を組み合わせることにより、結晶粒配向金属基板-PLD 線材の I_c 特性を 3cm-w 基板の全領域で 500 A/cm-w (@77 K, s.f.) 級に向上させる。さらに、長尺細線加工においても J_c 特性劣化の少ないレーザ加工技術を適用することによって、最終目標（2～4 mm-w · $I_c=500$ A/cm-w (@77 K, s.f.) - 200 m）を達成する。

全開発期間を通して、電磁気挙動評価と透過型電子顕微鏡(TEM)等の複合評

価により、線材の長さ方向及び幅方向の均一性を損なう原因を示し、これらを改善することにより交流損失低減に有効な線材作製技術開発を支援する。

これらの開発において、製造プロセス条件と微細組織の関係の解明及び詳細な交流損失を含めた電磁気挙動評価と連携することで開発を促進させる。

(2) 細線加工技術開発

本項の開発では、ケーブルや変圧器等機器仕様に適応した低交流損失線材実現に不可欠となる特性劣化を抑制した細線加工技術の開発を行う。ケーブル用長尺線材に対しては、銅ラミネート後に 2~5 mm-w への切断が必要となる。一方、変圧器用長尺線材に対しては、Ag 安定化層のみの線材を 5 mm-w に切断し、さらにスクライビング溝加工により 5 分割、また導入・普及時のレベルでは 10 分割のフィラメント（細線）に溝加工する技術開発が必要である。

切断加工技術については、平成 20~22 年度において、本プロジェクト開始時までに実績のある YAG レーザによる加工技術及びスリッタによる機械加工技術を検討する。YAG レーザによる加工技術開発では、本プロジェクト開始時において 7 m/h 程度の加工速度の向上と切断面での劣化抑制が課題となり、レーザー照射条件の最適化が必要である。平成 20 年度には、安定化層ラミネート線材の 2 mm-w 分割を検討し、現状線材に対しての I_c 低下率の把握を行う。平成 21 年度には、レーザー加工速度向上や端部の劣化抑制方法の検討を進め、2 mm-w 分割技術を確立する。平成 22 年度には、長尺化技術を開発するとともに、前述 (1) の「均一線材作製技術開発」及び、後述する 2.1.4-4 の「高強度・高工業的臨界電流密度 (J_c) 線材作製技術開発」の成果を統合し、超電導電力ケーブル対応線材中間目標実現への指針を得る。平成 23 年度には、さらなる長尺化への対応として、切断速度の向上をめざしてレーザー出力向上等の切断条件の最適化等を行うとともに切断による特性劣化をさらに抑制する技術を開発する。平成 24 年度では、YAG レーザ等による加工技術を長尺の結晶粒配向金属基板-PLD 線材にも適用することによりを達成する。一方、スリッタによる機械加工技術開発では、特性劣化防止、歩留り向上等の課題に対し、機械加工方法の選択とともに条件の適正化を図り、平成 20~22 年度では、2 mm-w へ細線化した時の J_c 維持率 90%以上を目標として検討する。平成 23 年度では、平成 22 年度までに開発した機械加工による細線加工技術を基に、200 m 長線材に向けた長尺線材作製に着手する。

スクライビング細線溝加工技術については、平成 20~22 年度において、本プロジェクト開始時までに成果を挙げている YAG レーザ処理と熱処理及び化学エッチング法の組み合わせによる加工技術を主として検討し、歩留り向上、長尺化、剥離防止、フィラメント間高抵抗化、保護効果確保等の課題の解決を図

る。平成 20 年度は、レーザ照射角度やガス吹きつけ角度の制御による、ドロス残留抑制技術の検討を行うとともに、エッチングあるいはアニール処理の条件の適性化により、フィラメント間高抵抗を確保する技術を開発し、5 mm-w 線材の 5 分割溝加工に対する課題抽出と対策を検討する。平成 21 年度には、前年度の成果に基づいて 5 mm-w 5 分割溝加工線材を実証するとともにレーザのマルチビーム化に対応した装置改造を行い、複数溝の同時加工により、5 分割の溝加工速度の向上及び加工位置の検出・制御により加工精度の向上技術を開発する。また、加工による I_c 劣化を抑制する技術を開発するとともに、樹脂塗布等による剥離防止技術を開発する。さらに、補修用極薄肉金属基板の加工条件を明らかにする。平成 22 年度には、長尺化を進め、中間目標を達成する。平成 23 年度には、スクライビング細線溝加工により除去される溝幅削減のため、レーザ照射、エッチングの有無を含めた条件、手法の最適化等により 5 mm-w 10 分割が可能な極細溝加工技術の開発を行う。平成 24 年度では、YAG レーザ照射と化学エッチング法の組み合わせによる加工において 100 m 長以上の長尺線材で 5 mm-w 10 分割する加工技術を開発する。さらに、エキシマレーザを用いたエッチングレス加工技術を長尺線材に適用する技術を開発し、溝幅 50 μm 以下でフィラメント間抵抗を確保した 5 mm-w 10 分割 100 m 長以上の細線加工が可能であることを実証する。

一方、加工技術の長尺化、細線化に対応した長尺細線フィラメント線材の評価技術開発に関しては、平成 20 年度では、本プロジェクト開始時までフィラメント中のマクロ欠陥位置評価法として原理確認ができていた SQUID センサアレイ渦電流法に対し、欠陥の種類や I_c 劣化度合との関係把握を行うとともに、誘導法により分割線全体の I_c 劣化を非破壊検出する技術や磁気光学法により各フィラメントの交流応答を個別に評価する技術の開発を行う。また、多層導体構造の内部欠陥評価をねらいとした SQUID センサの開発を行う。平成 21 年度には、SQUID 渦電流法に対し、線材冷却法の改良を行い、5 mm-w 5 分割線材に対応した 50 m/h 以上の高速評価技術の開発を行うとともに、誘導法、磁気光学法による Y 系超電導線材評価の見通しを得る。さらに、平成 22 年度には、5 mm-w 10 分割線材に対応したセンサアレイの開発を行い、装置の空間分解能の向上を図る。平成 23 年度には、高速ステージの適用等による長尺線材への対応を行い、長尺線材の高速評価技術を開発するとともに、5 mm-w 10 分割線材に適用可能な非接触評価技術を開発する。また、線材製造・加工プロセス条件と微細組織の関係及び、詳細な電磁気挙動の評価とともに、加工線材における熱的、機械的挙動も併せて評価することで、上記加工技術開発を促進させる。平成 24 年度では、5 mm-w 10 分割線材対応の SQUID センサアレイを評価装置本体に組み込んで実質的な線材評価を可能とするとともにこれまで開発を進めて

きた複数の評価手法を用いて線材開発の促進を図る。

全開発期間を通して、分割及び細線化を行った線材について、切断面の組織変化（変質層の有無、ポアの発生）等を詳細に解析し、これらの結果を分割・細線化プロセスにフィードバックし、加工条件等の適正化支援を行う。

上記の開発において、プロセス条件と組織の関係及び、詳細な電磁気挙動評価と連携することで開発を促進する。

2.1.4-4 高強度・高工業的臨界電流密度(J_c)線材作製技術開発

(ISTEC、住友電気工業、古河電気工業、JFCC、九州大学、東北大学、早稲田大学、中部大学)

本項の開発では、強磁場下での強いフープ力が想定される SMES 及び冷却時収縮長の裕度を内部構造での確保が困難で冷却時の応力負荷が想定される大電流ケーブルから求められる高強度、高 J_c 線材の開発を行う。

(1) 高強度金属基板対応線材作製技術開発

本項の開発では、強度を維持した条件で金属基板の薄肉化を行い、これに適合した中間層、超電導層の形成技術を開発する。

基板・中間層の開発では、平成 20～22 年度において、超電導層成膜方法により異なる構造の開発を行う。MOD 線材に対しては薄膜超電導層により線材作製を行うため、極低コスト長尺線材における I_c 値が 250～300 A/cm-w(@77 K, s.f.) 以上と基板の薄肉化がともに必須となるのに対し、PLD 線材では 500～600 A/cm-w(@77 K, s.f.) の I_c 値を有する線材を想定し、既に 20 m 長さで 500 A/cm-w 以上の高 I_c 値を有する線材が開発されている。この PLD 線材の J_c 値は約 25 kA/cm² (I_c 500 A/ (金属基板 100 μ m + 安定化層 100 μ m)) であり、中間目標に近い J_c 値を有しているため、目標達成への課題は基板の薄肉化や高 I_c 化よりも長尺化に重きが置かれる。そこで PLD 法を用いた線材開発用には、従来肉厚基板を用いて、より長尺の基板作製を行い、高い I_c 値の特性を活かして $J_c \times L$ (長さ) 値の向上を行うとともに、薄肉高強度金属基板を用いて研磨条件を含めた、成膜条件の再検討を全ての中間層成膜プロセスに対して行い、従来基板と同等あるいはそれ以上の結晶粒配向度を有する基板を作製する。また、補修線材には、補修部の盛り上がりを抑えるため、極薄肉の超電導線材が望ましいため、補修線材用に極薄肉基板の開発及びこれに適した中間層成膜条件の適正化も行う。これには高強度が必要条件とならないことから、上記のアプローチに加えて金属基板の選定も行い、より安価で高い特性を有する極薄補修線材用基板中間層を開発する。金属基板の薄肉化は強度のみならず、特にケーブル応用時の

クエンチ・発熱による常伝導伝播に影響を及ぼすため、機械強度特性、伝熱挙動解析等の特性評価を利用して機器仕様を満足するよう開発を進める。上記のアプローチにより、平成 20 年度には、70 μm 以下の極薄肉金属基板を用いて従来基板と同等の結晶粒配向度を有する基板を作製する。ここで、薄肉高強度基板としては SMES の線材強度仕様を満足する金属基板を用いる。平成 21 年度は長尺線材用としては薄肉化と長尺化を進め、中間目標を達成する。上記の開発においては、金属基板特性の評価と適した成膜条件の探索を連携することで開発を促進する。平成 23～24 年度では、平成 22 年度までに開発する薄肉高強度金属基板及びそれに対応した中間層形成技術の長尺化を図るとともに、高 I_c 化技術を統合し、最終目標対応技術を達成する。

PLD 法による超電導層形成技術では、平成 20～22 年度において、極低コスト線材が見込める IBAD-MgO 等の低コスト中間層付き金属基板において、薄肉高強度・高工業的臨界電流密度 (J_c) 基板／中間層適応した張力、温度等の製造条件を検討し、従来の基板の場合と同様の特性を高強度・高工業的臨界電流密度 (J_c) 基板で実現すべく技術開発を行う。特に機器応用上重要な高 J_c 実現のために、基板の薄肉化、高強度化、超電導層の高 I_c 、 J_c 化を行い、高 J_c を実現する。「超電導応用基盤技術研究開発 (第 II 期)」プロジェクトで開発された極低コスト PLD 長尺線材 (20 m 長で $I_c = 500 \text{ A/cm-w}$ 線材) において、 J_c は 25 kA/cm^2 程度 ($=500 \text{ A}/(100 \mu\text{m}$ 金属基板+100 μm 安定化層)) であったため、これを 30 kA/cm^2 へ高めるとともに長尺化と極低コスト構造の実証を進める。平成 20 年度では、薄肉金属基板を用いた成膜においてプロセス条件の適正化により、薄肉金属基板での連続プロセス技術を開発する。また、安定化層も 30 μm 程度に抑える熱的安定性の理論検討とともに、これを実現する開発を行う。平成 21 年度は、この線材の長尺化と次項の高 I_c 化技術開発の成果と統合し、高 J_c 化、 $>30 \text{ kA/cm}^2$ (@77 K, s.f.) を実現する。平成 22 年度では、長尺化を図り、中間目標を達成する。平成 23 年度には、得られた技術をさらに発展させるとともに長尺化を図る。平成 24 年度には、引き続きこれまで得られた技術を基に長尺線材の作製を実施し、最終目標を達成する。上記の開発において、プロセス条件と組織の関係及び、詳細な強度評価 (線材そのもの、新たな膜構造における接着強度、剥離強度等)、電磁気挙動評価、熱的安定性評価で開発を促進させる。

MOD 法による超電導層形成技術では、平成 20～22 年度において、極低コスト線材が見込める IBAD-MgO 等の低コスト中間層付き金属基板において、薄肉基板／中間層に適応した張力、温度制御技術を開発し、従来の基板厚み (100 μm 厚) の場合と同様の特性を薄肉基板で実現すべく技術開発を行う。また、機械的負荷に対する積層界面での剥離強度向上のための材料選択及び微細組織制御

を行う。これらの開発を通して、平成 20 年度では、薄肉基板を用いた成膜で連続製造プロセス技術を開発する。さらに、平成 21 年度では、前年度開発技術を基に長尺化を進めるとともに次項の高臨界電流化技術の開発成果を反映させ、平成 22 年度では、さらなる長尺化技術を開発し、中間目標を達成する。上記の開発において、製造プロセス条件と微細組織の関係及び、交流損失を含めた電磁気挙動評価、伝熱挙動、機械的強度評価と連携することで開発を促進させる。平成 23 年度では、最終目標をめざしてさらなる長尺化を進める。平成 24 年度には、引き続きこれまで得られた技術を基に長尺線材の作製を実施し、最終目標を達成する。また、超電導層及び中間層の結晶粒の配向性、欠陥構造、第 2 相の有無、各層の界面構造等を詳細に解析し、薄肉基板上での作製条件の最適化に貢献する。

CVD 法で作製する線材に関しては、超電導層と中間層の界面結合性が良好なため機械的強度に優れているが、加えて、基板と中間層、あるいは中間層同士の結合性、剥離強度のさらなる向上の要求を、高強度基板に適合した中間層の形成技術の開発によって克服することをめざす。平成 20 年度は、厚さの異なる基板において、1 GPa の強度を持つような加工プロセス開発を検討する。平成 21 年度は、高強度基板を長尺で作製できるように、基板加工プロセスの安定・高度化を図る。また、平成 21 年度までに、作製した高強度基板上で中間層の成膜条件の適正化を行い、基板や中間層の結合性・剥離強度の向上をめざす。平成 22 年度は、先述の磁場中高臨界電流 (I_c) 線材作製技術開発の技術と、長尺基板の高度加工技術、適正化した中間層の形成技術を組み合わせることにより、強度 1 GPa、50 m 長で $I_c=30$ A/cm-w (@77 K, 3 T) の特性の実証をめざす。加えて、平成 22 年度では、薄肉化した高強度基板を用いた線材作製技術開発により高 J_c 線材開発における中間目標達成を図る。ここでは、薄肉基板に適応した中間層、超電導層の成膜条件の適正化を行う。特に中間層に関しては、LMO 中間層作製装置を導入して、温度条件、張力条件等の基板厚に依存する因子とともに中間層構造の適正化を行い、中間目標達成を図る。

(2) 高臨界電流 (I_c) 化技術開発

本項の開発では、長尺線材の特性を、短尺で得られている高い I_c (700 A/cm-w 級@77 K, s.f.) により近づけることにより長尺高特性線材の実現をめざす。

極低コスト基板中間層の開発に関しては、平成 20～22 年度において、高い J_c を得るための結晶粒配向度の改善等による高機能化と、 I_c 劣化部の原因となるマイクロクラック、研磨傷等の欠陥を抑制する等の基板の完全化との二つのアプローチにより行う。まず、極低コスト構造基板である高速 IBAD 基板中間層の高機能化においては、研磨材や研磨条件の最適化等による基板平坦性の向上、

IBAD 層及びその上に成膜するバッファ層の材料と条件を改良して、それらの層の結晶粒配向度を向上させるとともにキャップ層成膜時の結晶粒自己配向メカニズムの高効率化の促進、あるいは効率を維持したままでバッファ層成膜時に結晶粒配向度を大きく改善する製造プロセスを開発する等により、キャップ層最上層の結晶粒配向度改善を行う。一方、基板中間層の完全化においては、金属基板に存在する欠陥の修復と中間層成膜プロセス中の欠陥発生の抑制の二つの課題に大別され、前者の欠陥修復については、前項でも取り上げた、研磨技術向上による欠陥除去あるいは MOD 法を用いた成膜による穴埋め等を行い、無欠陥中間層実現への道筋をつけるとともに、後者の欠陥発生の抑制については、超電導層成膜手法に応じた中間層成膜条件の最適化を行う等により、超電導層成膜までを含めた欠陥抑制に資する中間層成膜プロセスを開発し、欠陥修復と欠陥抑制とを統合することにより J_c を規定する最小 J_c 値の向上技術を開発する。これらの欠陥修復・抑制については欠陥の検出と原因調査が欠かせないため、TEM 等を用いた微細構造解析と連携し、研究を進める。上記アプローチにより平成 20 年度は IBAD 中間層直上のバッファ層結晶粒面内配向度 10 度を得、平成 21 年度は 10 m 程度に長尺化することにより中間目標の達成への指針を得る。平成 22 年度はさらに長尺化を進め、中間目標を達成する。平成 23 年度は、低コスト化との両立をめざして基板中間層の薄肉化、結晶粒高配向化等を進める。平成 24 年度は、これまでの成果を基に長尺化を進めて最終目標を達成する。

PLD 法による超電導層形成技術開発では、平成 20～22 年度において、極低コスト線材が見込める IBAD-MgO 等の低コスト中間層付き金属基板を用いるが、その中で、超電導層が 2～3 μm の厚膜化が可能な材料、製造プロセスの改善により、高 J_c 化を図る。具体的には、厚膜化にともない増える a 軸配向結晶粒、不純物相、反応相の増加を抑え、高臨界電流密度 (J_c) で厚膜が可能な製造プロセス、材料を開発する。このためには、GdBCO や他の RE 系材料を均一反応性の観点から検討し、また、PLD に用いるターゲット材料の均一性も高める。例えば、ターゲット組成の分布（特に影響のある Ba 濃度）、嵩密度分布、及びロット間バラツキ等の改善を行う。以上の材料的検討に加えて、PLD 気相反応の均一性向上のための温度、雰囲気、反応時間等の適正化を図る。平成 20 年度では、PLD 厚膜高 J_c 連続プロセス技術を開発し、連続作製線材において 10 m 長で 550 A/cm-w(@77K,s.f.) の高 J_c 化を行う。さらに、平成 21 年度は、高 J_c による高 J_c 化と長尺化を進展させ、機器用高 J_c 線材開発の技術的指針を得る。平成 22 年度では、 J_c 、長さを向上させ中間目標を達成する。上記の開発において、プロセス条件と組織の関係及び、詳細な強度評価（線材、新たな膜構造における接着強度、剥離強度等）、電磁気挙動評価、熱的安定性評価と連携す

ることで開発を促進させる。平成 23 年度では、さらなる厚膜化による I_c 向上を進める。上記の開発において、線材製造プロセス条件と微細組織の関係及び、詳細な強度評価（線材、新たな膜構造における剥離強度等）、電磁気挙動評価、熱的安定性評価と連携することで開発を促進させる。平成 24 年度では、これまでの成果を基に IBAD-MgO 系基板とともに結晶粒配向金属基板を用いて長尺化を進めて最終目標を達成する。

MOD 法による超電導層形成技術では、平成 20～22 年度において、極低コスト線材が見込める IBAD-MgO 等の低コスト中間層付き金属基板を用いて、厚み増加時のクラック発生、結晶性低下等の課題を解決し、高 I_c 化を図る。具体的には、膜厚の不均一に起因する局所的な厚膜領域からのクラック発生を抑制するために、均一膜厚形成技術を適用する。また、厚膜時に高い J_c を膜厚方向に維持するためには、厚膜仮焼膜の均一性の向上が必要であり、仮焼反応促進のための温度、雰囲気、反応時間等の適正化を図るとともに、本焼プロセスでは、高速で成長させる条件が必要となることから、連続長尺対応炉において温度やガス流、雰囲気の適正化により超電導層の高速成長条件を実現する。これらのアプローチにより平成 20 年度では、IBAD-MgO 基板を用いた厚膜連続プロセス技術を開発し、連続作製線材において 20 m 長で $I_c = 200 \text{ A/cm-w} (@77\text{K, s.f.})$ の特性を実現する。さらに、平成 21 年度では、高 J_c 化及び厚膜での均一性のさらなる向上を図る。平成 22 年度では、長尺化技術開発を行い、中間目標を達成する。上記の開発において、製造プロセス条件と組織の関係及び、詳細な電磁気挙動評価と連携することで開発を促進させる。また、超電導層及び中間層の結晶粒配向、欠陥構造、第 2 相の有無、各層の界面構造等を詳細に解析し、高 I_c 化への作製条件の最適化に貢献する。平成 23 年度では、さらに厚膜化を進めるとともに、膜の緻密化等による高 J_c 化技術を開発する。平成 24 年度では、厚膜化時に顕著となる端部の J_c 低下の抑制と長尺化を進めて最終目標を達成する。上記の開発において、線材製造プロセス条件と微細組織の関係及び、詳細な電磁気挙動評価と連携することで開発を促進させる。

結晶粒配向金属基板-PLD 線材においては、高 J_c 線材をめざして、平成 23 年度では、高 I_c 長尺線材を確実に達成するために、両面結晶粒配向金属基板を用いた中間層及び超電導層の両面成膜プロセスの確立を図る。平成 24 年度では、超電導電力ケーブルへの適用性について偏流等の課題が明らかになった両面線材に替えて、結晶粒配向金属基板の薄肉化技術開発を行う。100 μm 以下の長尺薄肉基板を開発するとともに、中間層及び超電導層の結晶配向性向上技術と組み合わせ、 $I_c = 500 \text{ A/cm-w}$ 級 (@77 K, s.f.) の特性を得るためのプロセス開発を行い、最終目標 ($J_c = 50 \text{ kA/cm}^2 - 200 \text{ m}$) を達成する。

全開発期間を通して、高 I_c 化をめざして製造された線材について、超電導層

及び中間層の結晶粒配向、超電導層に形成された異相の分布、各層の界面構造等を詳細に解析し、高 I_c 化への作製条件の最適化に貢献する。

2.1.4-5 低コスト・歩留向上技術開発

(ISTEC、住友電気工業、古河電気工業、フジクラ、昭和電線ケーブルシステム、JFCC、九州大学、東北大学、京都大学、早稲田大学、名古屋大学)

(1) 低コスト対応高速・高 I_c 化技術開発

本項の開発では、従来、各工程での製造速度や構造等に関して個別に検証している 3 円/Am 以下の条件を統合し、高速化、高特性化を図ることで、さらなる低コスト線材技術を開発する。

高速 IBAD 法による中間層形成技術では、平成 20～22 年度において、IBAD 層を含む各中間層の高速化を図る。高速化に寄与する因子は各層によって異なるが、方向性としては薄膜化等による成膜時間の短縮と成膜速度の向上、装置の大型化等による成膜時間を維持しての製造プロセス時間短縮とに大別される。薄膜化については、プロジェクト開始時点の構造において 18 nm 厚の LMO バッファ層、2.5 nm 厚の IBAD (MgO) 層についてはその余地は少なく、110 nm の GZO ベッド層、400 nm の CeO₂ キャップ層がその主な対象となる。金属基板からの金属原子の拡散防止を担うベッド層においては材料改良、アモルファス化による欠陥や粒界等拡散パスとなる箇所を除去等により、CeO₂ キャップ層においては IBAD 層、バッファ層の結晶粒配向度改善と、バッファ層の結晶粒微細化や成膜条件の最適化等による自己配向速度向上により、それぞれ薄膜化を図る。IBAD 層については、「超電導応用基盤技術研究開発 (第 II 期)」プロジェクトにおいて導入された大型イオンビーム成膜装置を用いることにより 100 m/h 以上への高速化が実現可能であるが、IBAD 層の結晶粒高配向化により CeO₂ キャップ層の必要膜厚を減らし、さらなるコストの低減をめざす。また、各層において MOD 法やスパッタリング法等、高い成膜速度や低コスト装置のプロセスを用いることによる成膜速度や装置コストの改善を行い、極低コスト用基板を実証する。上記のアプローチにより、平成 20 年度には IBAD 層の成膜速度 100 m/h を実現し、かつバッファ層の結晶粒面内配向度 10 度を得るとともに現状基板の長尺化を行う。その後は高特性化とともに長尺化を推し進めて中間目標を達成する。最終目標に向けてはさらなるコスト削減が必要だが、基板中間層の開発においては、成膜コストと I_c 特性、絶縁特性、剥離強度等とのバランスを取る必要があるため、総合的に判断して平成 23 年度中に構造・プロセスの最適化を行う。平成 24 年度では、前年度までの構造・プロセス検討結果に基づき長尺線材を作製し、最終目標を達成する。

PLD 法による超電導層形成技術では、平成 20～22 年度において、製造プロセス改善条件検討として、マルチターンによる蒸着面積向上、超電導層における層内不純物相の低減、原材料収率向上、また結晶粒配向度の向上を行い、同時に、これに適したターゲット、超電導材料、組成の検討を行う。これにより、極低コスト化が可能な $J_c > 500 \text{ A/cm-w}$ (@77 K, s.f.) で 10 m/h～数十 m/h の高速製造技術を開発する。平成 20 年度では、PLD 条件の適正化、連続成長技術開発を行い、大型装置で、製造（搬送）速度 10 m/h 以上で高 J_c の 10 m 長の線材を作製する。平成 21 年度は、PLD プロセスのさらなる高速化とともに J_c 値の向上及び長尺化を図る。平成 22 年度は、50 m 化へ向けたさらなる長尺化検討と高速化を行い、中間目標とした技術コスト 3 円/Am 以下の条件(20 m/h、500 A/cm-w@77K,s.f.)で 50 m 作製を実証する。平成 23 年度では、平成 22 年度までの成果を基に、高速成膜に有利なプルーム内成膜条件と高 J_c に有利なプルーム上方成膜条件を勘案した適正位置の検討を行うとともに、レーザパワーの有効活用や気化原料への励起手段として用いること（レーザ CVD 法）等による高速化、組成最適化等による高 J_c 化を行うことで最終目標を見通す。レーザ CVD 法の開発では、東北大学において固定成膜による基礎的な検討を行い、ISTEC では連続成膜装置により長尺線材作製技術の開発を行う。平成 24 年度では、平成 23 年度までの成果に基づき、高速成膜と高 J_c を両立させたプロセスを用いて、最終目標を達成する。

MOD 法による超電導層形成技術では、平成 20～22 年度においては、高速塗布かつ一回塗布膜厚の向上に資する原料の開発とこれに適したプロセス条件の適正化を図る。ここでは、これまで長尺実績のある IBAD-GZO 基板との比較を含めて開発を実施する。平成 20 年度では、MOD 中尺焼成装置の改造により、10 m/h 以上の高速移動(搬送)条件での仮焼時間確保を図ることにより高速、高特性が可能な仮焼膜形成技術を開発する。また、本焼プロセスでは、短尺試料成果及び結晶成長モデルで高速成長が予測されている減圧状態を作り出すために、高速 TFA-MOD 製造装置の改造を行い、成長速度の高速化を図ることにより、これまで個別に原理検証してきた高速塗布・仮焼技術と高速本焼技術を統合し、高速（塗布仮焼 $\geq 10 \text{ m/h}$; 本焼 $\geq 5 \sim 10 \text{ m/h}$ ）で高特性線材を作製するための指針を明らかにする。さらに、平成 21 年度では、高速 TFA-MOD 製造装置の反応領域を拡大する改造を行い、本焼速度の原理検証での速度レベルを向上させるとともに、安定製造実現に必要な因子の解明を行う。平成 22 年度では、長尺化技術開発を行うとともに高速化、高特性化を推し進め、中間目標とした技術コスト 3 円/Am の条件を実証する。上記の開発において、製造プロセス条件と微細組織の関係解明及び、交流損失を含めた電磁気挙動評価、伝熱挙動、機械強度評価と連携することで開発を促進させる。また、超電導層及び中

間層の結晶粒配向性、欠陥構造、第 2 相の有無、各層の界面構造等を詳細に解析し、作製条件の最適化に貢献する。平成 23 年度では、平成 22 年度までの開発成果を基に、原料溶液の開発による塗布・仮焼プロセスの高速化と厚膜化、各種本焼条件の最適化による本焼成プロセスの高速化を進め、最終目標への見通しを得る。平成 24 年度では、これまでに開発された塗布・仮焼プロセスの高速化及び膜厚均一性に優れた厚膜化技術、本焼成プロセスの高速、高特性化技術を長尺線材作製プロセスに適用する。ここでは、線幅方向に膜厚均一化が可能なことで厚膜化が期待できる新塗布方法に適応した設備（MOD 中間層連続焼成炉の改造）及び低圧力雰囲気中での焼成で高速焼成が可能となる設備（高速 TFA-MOD 製造装置の改造）を導入することにより開発の加速させることで最終目標を達成する。

結晶粒配向金属基板-PLD 線材開発に関しては、平成 23 年度に中間層のさらなる結晶粒配向性向上による高 J_c 化、超電導層の厚膜時の高 J_c 化、及び両面成膜プロセスによる高 I_c 化、スループット向上をめざした幅広化により、最終目標を見通すためのデータを取得する。平成 24 年度では、金属基板の結晶粒配向性向上による高 J_c 化、超電導層成膜条件最適化による高 I_c 化と線材幅方向の I_c 均一化、中間層と超電導層の幅広化プロセスにおけるスループット向上により、最終目標を達成する。

全開発期間を通して、低コストをめざして製造された超電導線材について、透過型電子顕微鏡(TEM)等を用い、超電導層及び中間層の膜厚の均一性評価、クラックの有無、結晶粒配向度、欠陥構造、第 2 相の有無、各層間の界面構造等を詳細に解析し、作製条件の最適化に貢献する。

上記の開発において、線材製造プロセス条件と微細組織の関係及び、交流損失を含めた電磁気挙動評価、伝熱挙動、機械的強度評価と連携することで開発を促進させる。

(2) 接続・補修技術開発

本項の開発では、線材の接続技術及び細線加工等により特性の不均一性が顕在化して低特性となった箇所に健全な線材を貼り合わせて補修する技術を開発し、長尺線材及び加工線材の歩留り向上に資する。これまで線材の接続方法として実績のある、ハンダ接着法や Ag 安定化層を利用した拡散接合法を主として検討し、界面の密着性や接続抵抗の均一性及び剥離を含めた機械強度等の課題の解決を図るとともに、低温短時間で接続あるいは補修が可能となる技術の開発を行う。ケーブルの中間接続用には安定化銅層を分離しての接続技術、また、変圧器用線材に対してはフィラメント化線材接続技術等、機器に応じた接続技術の開発を行う。

平成 20 年度には、各応用機器の使用条件の調査を行うとともに、本プロジェクト開始までに短尺線材で原理検証を終えている Ag 拡散法やハンダ接着法による接続・補修技術に関して長尺線材対応加工技術を開発する。また、スクライビング溝加工線材対応技術として、分割線材を想定した補修技術を開発する。さらに、ケーブル用銅安定化層付き線材に対応した接続部周囲の温度上昇を考慮したハンダ材料の探索を含む接続技術の検討や、インサート法等による超電導接続の可能性検討を行う。平成 21 年度では、5 mm-w 5 分割溝加工線材に対し、低抵抗かつばらつきの小さな再接続・補修技術への見通しを得るとともに、接合条件の最適化により補修時間短縮への見通しを得る。また、接合前後の加工処理による接合・補修部の薄層化の条件把握を行う。さらに、限流機能付き変圧器用の Ni-Cr 高抵抗安定化層ラミネート線材に対応した接続技術の検討を行う。平成 22 年度では、平成 21 年度までの成果の長尺化を図り、中間目標を達成する。平成 23 年度では、複数のプロセスを組み合わせること等によりさらなる接続抵抗の減少を図る。平成 24 年度では、引き続き低抵抗をめざした技術の開発を図るとともにプロセスの安定化を行う。

全開発期間を通して、超電導層及び中間層等各層の接続、補修界面構造等を詳細に解析し、接合・補修加工条件の最適化に貢献する。

(3) 実用化技術開発用線材安定製造技術開発

本項の開発では、平成 22 年度末までに開発する「SMES 実用化技術開発用線材製造技術」、「超電導電力ケーブル実用化技術開発用線材製造技術」及び「超電導変圧器実用化技術開発用線材製造技術」を後期 2 ヶ年において安定に作製できる技術開発を行う。具体的には、線材メーカーが開発した技術は継続して線材メーカーが、その他の機関で開発した技術は、線材メーカーに移管し、線材メーカーにおいて再現性を確保すべく安定製造技術を開発する。ここでは、同時に将来の実用化を鑑み、長尺化の可能性を評価しつつ、目標達成をめざす。

住友電工では、PLD 線材を用いて、「超電導電力ケーブル実用化技術開発用線材」を念頭に置いた安定製造技術の開発を行う。平成 23 年度では、高 J_c 線材、2 mm-w 線材それぞれの中間目標値の特性を有する線材を安定に作製するプロセスの確立を図る。平成 24 年度では、結晶粒配向型金属基板の結晶粒配向性の向上を行い、3 cm-w PLD プロセスにおいて成膜温度の均一化によって幅方向の歩留りを向上するとともに長尺での I_c 不均一性を改善する。これらの技術開発に基づき、中間目標値の特性を有する線材の製造歩留り向上・安定製造技術の開発を行う。ここでは、加速財源により線材製造量増を図り（50 m 単長線材を 30 本以上、及び 100 m 単長線材を 5 本以上）、機器設計に資する線材特性基準データ取得のための安定製造技術を確立する。

古河電工では、MOCVD 線材を用いて、「超電導電力ケーブル実用化技術開発用線材」を念頭に置いた実用化技術開発用線材安定製造技術開発を行う。平成 23 年度では、ISTEC 等が開発した線材細線化技術を導入し、細線化技術の習得を図り、50 m 長の線材の細線化を行うことにより、その再現性を確認する。また、平成 22 年度までに導入するバッファ層成膜用スパッタ装置等を用いて開発される $J_e=30 \text{ kA/cm}^2$ (@77 K, s.f.) の特性を有する MOCVD 線材において、歩留り低下の要因の把握と解消を図り、50 m 級の線材を安定に作製できる技術の開発を行う。平成 24 年度では、高 J_e 、分割線材で中間目標値の特性を有する MOCVD 線材を作製し、製造歩留り向上・安定製造技術の開発を行う。ここでは、加速財源により線材製造量増を図り（50 m 単長線材を 10 本以上、及び 100 m 単長線材を 5 本以上）、機器設計に資する線材特性基準データ取得のための安定製造技術を確立する。また、線材使用の際に発生の可能性のある劣化に関し基板厚さ等の影響も評価する。

フジクラでは、PLD 線材を用いて、「超電導変圧器実用化技術開発用線材」を念頭に置いた安定製造技術の開発を行う。平成 23 年度では、低磁場高 I_c 、分割線材それぞれの間目標値の特性を有する線材を安定に作製するプロセスの確立を図る。平成 24 年度では、これまで実施してきた線材作製技術を総合し、中間目標値の特性を有する長尺線材の製造歩留り向上・安定製造技術の開発を行う。ここでは、加速財源により線材製造量増を図り（300 m 単長線材 6 本を含む総長 5.6 km）、機器設計に資する線材特性基準データ取得のための安定製造技術を確立する。

昭和電線ケーブルシステムでは、MOD 線材を用いて、極低コスト線材の安定製造技術開発を行う。平成 23 年度では、技術コスト 3 円/Am 以下のプロセス条件で 50 m 長線材を安定して作製するプロセスの確立を図る。平成 24 年度では、前年度で確立した塗布方法、仮焼条件、膜厚分布均一化技術を組み合わせ、技術コスト 3 円/Am 以下のプロセス条件での製造歩留り向上・安定製造技術の開発を行う。ここでは、加速財源により線材製造量増を図り（100 m 単長線材を 10 本以上）、機器設計に資する線材特性基準データ取得のための安定製造技術を確立する。さらに、500 m バッチ炉の改造を行うことで、より低コストを目指した技術開発を行う。

2.1.4-6 超電導電力機器用線材の技術開発スケジュール

超電導電力機器用線材の技術開発スケジュールと予算を表 2.1.4-1 に示す。

表 2.1.4-1 超電導電力機器用線材の技術開発スケジュール

事業項目	平成20年度	平成21年度	平成22年度	平成23年度	平成24年度
1. 線材特性の把握	機器環境調査			変圧器対応試験	
2. 磁場中高臨界電流線材作製技術開発	ケーブル対応試験				
	厚膜化ピン力向上 (30 A@3 T 等)			磁場中特性向上及び長尺化	
	添加人工ピン力向上 (30,50 A@3 T 等)				
	高不可逆磁場材料開発				
3. 低交流損失線材作製技術開発	長手方向均一化技術 (50 m 対応)			長手方向均一 (200 m 対応)	
	幅方向均一化技術 (5 分割対応)			幅方向均一 (10 分割対応)	
	細線化基礎技術				
	長尺加工技術 (5 mm ² W -5 分割/2 mm ² W)			細線化・加工長尺化 (5 mm ² W -10 分割/2 mm ² W)	
4. 高強度・高工業的臨界電流密度技術開発	薄肉高強度基板 (70 μm-1 GPa-50)		薄肉高強度基板長尺化 (70 μm-1 GPa-200 m)		
	薄肉基板上高 I_c 化 ($J_c=30$ kA/cm ²)			薄肉基板上高 I_c 化 ($J_c=50$ kA/cm ²)	
5. 低コスト・歩留向上技術開発	金属基板中間層高速化・高配向化		基板中間層簡素化・高配向化		
	超電導高速・高 I_c 化 (3 円/Am 対応)			高速・高 I_c 化 (2 円/Am)	
				実用化技術開発 (技術移管)	
	連続・5 分割対応接続・補修技術			接続部低抵抗化技術開発	
予算 (百万円)	1,147	1,137	1,214	622	899

注) 各研究項目の予算には NEDO 管理費等を含まない。(税込)

2.1.5 超電導電力機器の適用技術標準化

超電導電力機器の適用技術標準化の実施にあたり、超電導線材作製技術、超電導線材試験技術及び超電導線材を適用した超電導電力ケーブル等に関する超電導電力機器技術の動向調査と標準化ニーズ動向調査並びに関連技術を集約する目的で、有識者による超電導電力機器技術調査委員会を組織する。また、超電導線材、超電導電力ケーブル等の一般要求事項や試験方法・手順調査並びに規格素案作成を行う目的で、有識者と技術者による超電導線材小委員会、超電導電力ケーブル小委員会及び超電導電力機器小委員会を組織する。

2.1.5-1 超電導線材関連技術標準化 (ISTEC、住友電気工業、フジクラ、中部電力、昭和電線ケーブルシステム、古河電気工業、九州大学、東北大学)

平成 20 年度から平成 22 年度においては、超電導線材の一般要求事項 (通則) の作成を目標として、超電導線材の通電特性並びに機械的電磁気特性の試験方法について共同研究を実施する。また、超電導電力機器技術調査委員会及び超電導線材小委員会において Y 系超電導線材並びに実用超電導線材の特徴調査結果をまとめ、規格素案の中間結果をまとめる。さらに、この規格素案作成に並行して超電導線材に係わる IEC 国際標準化の国際合意を目標として、米国、欧州、アジア等の現地調査や国際専門家討論会を踏まえ、情報集約並びに国際合意状況の把握を行う。

平成 23 年度から平成 24 年度においては、Y 系を含む超電導線材並びにその試験方法について調査を行い、各種超電導線材の特徴調査をまとめ、規格素案を作成する。また、超電導線材の通電特性並びに電磁気特性の試験方法について共同実施するとともに、Y 系超電導線材の短尺臨界電流測定方法の規格素案作成のためにラウンドロビンテスト (RRT) を行う。IEC/TC90 と連携し、超電導線材試験方法に関連した WG に技術情報を提供し、IEC 国際規格提案に資する。

2.1.5-2 超電導電力ケーブル関連技術標準化 (ISTEC、住友電気工業、古河電気工業、フジクラ、昭和電線ケーブルシステム)

平成 20 年度から平成 22 年度においては、超電導線材を適用した超電導電力ケーブルの一般要求事項 (通則) の作成を目標として、過去に技術開発された超電導電力ケーブル関連技術の技術標準化調査結果に米国、欧州、アジア等における現地調査結果を踏まえ、超電導電力機器技術調査委員会及び超電導電力ケーブル小委員会において規格素案の中間結果をまとめる。また、この規格素案作成に並行して IEC 国際標準化の国際合意を目標として、国際大電力システム会議 (CIGRE) との合同作業交渉、IEC/TC90 (超電導) と IEC/TC20 (電力

ケーブル) との合同作業交渉や国際専門家討論会を踏まえ、情報集約並びに国際合意状況の把握を行う。

平成 23 年度から平成 24 年度においては、これまでに技術開発された超電導電力ケーブル関連技術の調査を行い、Y 系を含む超電導線材を適用した超電導電力ケーブルの一般要求事項(通則)並びに試験方法に関する規格素案を作成する。また、IEC/TC90、IEC/TC20 及び国際大電力システム会議(CIGRE)と連携し、CIGRE/WG の活動に試験方法項目等の技術情報を提供し、IEC 国際規格提案に資する。

2.1.5-3 超電導電力機器関連技術標準化等(ISTEC、中部電力、古河電気工業、九州電力、フジクラ、昭和電線ケーブルシステム)

平成 20 年度から平成 22 年度においては、超電導変圧器、SMES 等超電導電力機器の国内外の技術動向と標準化ニーズ動向を把握する目的で、超電導電力機器技術調査委員会及び超電導電力機器小委員会における調査並びに米国、近隣諸国等における現地調査や国際専門家討論会を実施する。また、冷却設備の安全性、運用性を考慮した法規制の在り方を調査することを目的とし、超電導電力機器に係わる阻害要因、法規制緩和並びに国際的法規制緩和の調査検討を行う。

平成 23 年度から平成 24 年度においては、超電導電力機器の技術動向と標準化ニーズ動向の把握を目標として国際専門家討論会等で調査を行い、Y 系を含む超電導線材を適用した超電導変圧器、SMES 等の機器仕様並びに試験方法の標準化素案を作成する。また、IEC/TC90、国際大電力システム会議(CIGRE)等と連携し、国際合意の醸成を行う。さらに、冷却システムの安全性、運用性について調査を行い、規制緩和に向けた方向性を議論し、冷却システムの安全性、運用性を考慮した規制緩和に向けた提案資料を作成する。

2.1.5-3 超電導電力機器の適用技術標準化スケジュール

超電導電力機器の適用技術標準化スケジュールと予算を表 2.1.5-1 に示す。

表 2.1.5-1 超電導電力機器の適用技術標準化スケジュール

事業項目	平成20年度	平成21年度	平成22年度	平成23年度	平成24年度
1. 超電導線材関連 技術標準化	H20 通則素案	H21 通則素案	H22 試験法素案	H23 通則素案 試験技術調査	H24 通則・試験 法素案 国内RRT
2. 超電導電力ケー ブル関連技術標準 化	H20 通則素案	H21 試験法素案	H22 素案 国際合意醸成	H23 通則・試験 法素案 国際合意醸成	H24 通則・試験 法素案 国際合意醸成
3. 超電導電力機器 関連技術標準化 等	技術動向・標準化 ニーズ把握	超電導機器別 特質国内規制 緩和指針	電力機器規格 化マップ 国際規制緩和 指針	H23 素案骨子 冷却システム 技術調査	H24 標準化素案 国際合意醸成 規制提案資料
予算（百万円）	18	15	20	19	25

注) 各研究項目の予算には NEDO 管理費等を含まない。(税込)

2.2 研究開発の実施体制

本プロジェクトにおける研究開発では、プロジェクト開始時点までに実施してきた種々の超電導基盤技術開発の成果を踏まえつつ、基本計画に即して、コンパクトで大容量の電力供給が期待できる Y 系超電導線材を用いた超電導電力機器として、電力系統制御技術に該当する超電導電力貯蔵装置 (SMES)、送電技術に該当する電力ケーブル並びに変圧器の開発、これらの超電導電力機器に使用される Y 系超電導線材の高性能化、低コスト化をめざした技術開発を実施した。同時に、基本計画の目標の達成のみならず本プロジェクト終了後の実用化展開を促進・円滑化するため、標準化調査を含めた実用化促進調査を行った。

なお、単独企業、研究機関で線材開発並びに全ての機器開発を進めることは不可能であることから、プロジェクト参画企業及び研究機関との共同研究体方式を採用した。基本計画に示された目標を達成するためには、我が国の産学が保有する技術蓄積、人的資源、設備、及びノウハウを含めた知的資産を結集して、最大限に活用する必要がある。これを実現するため、研究開発に参加する各研究開発グループの有する研究開発ポテンシャルの最大限の活用により効率的な研究開発の推進を図る観点から、公益財団法人国際超電導産業技術研究センター (ISTEC)、中部電力 (株)、九州電力 (株)、住友電気工業 (株)、古河電気工業 (株)、(株)フジクラ、昭和電線ケーブルシステム (株)、大陽日酸 (株)、(株)前川製作所、(財)ファインセラミックスセンター (JFCC)、富士電機 (株)の連名提案企業・研究機関、及びその共同実施先 (大学等) と連携し、Y 系超電導電力機器技術開発共同研究体 (研究体) を組織し、その進捗状況を管理することによりプロジェクト全体の研究管理を行った。実施者間の強力な連携体制のもと、公益財団法人国際超電導産業技術研究センター、超電導工学研究所所長の塩原融をプロジェクトリーダー(PL)とし、中部電力株式会社電力技術研究所、研究主査の長屋重夫 (SMES 開発担当)、公益財団法人国際超電導産業技術研究センター、超電導工学研究所、電力機器研究開発部長の藤原昇 (超電導ケーブル開発担当：平成 20 年 6 月～平成 22 年 6 月)、公益財団法人国際超電導産業技術研究センター、超電導工学研究所、電力機器研究開発部長の大熊武 (超電導ケーブル開発担当：平成 22 年 7 月～平成 25 年 2 月)、九州電力株式会社、技術本部、総合研究所、電力貯蔵技術グループ長の林秀美 (超電導変圧器開発担当)、及び公益財団法人国際超電導産業技術研究センター、超電導工学研究所、線材研究開発部長の和泉輝郎 (Y 系超電導線材開発担当) をサブプロジェクトリーダー(SPL)として、PL 及び SPL 間での密接な連携をとりながら研究開発を効果的、効率的に推進した。なお、具体的な Y 系超電導電力機器技術開発共同研究体組織及び研究開発項目の分担は図 2.2.1 及び表 2.2.1 の通りである。

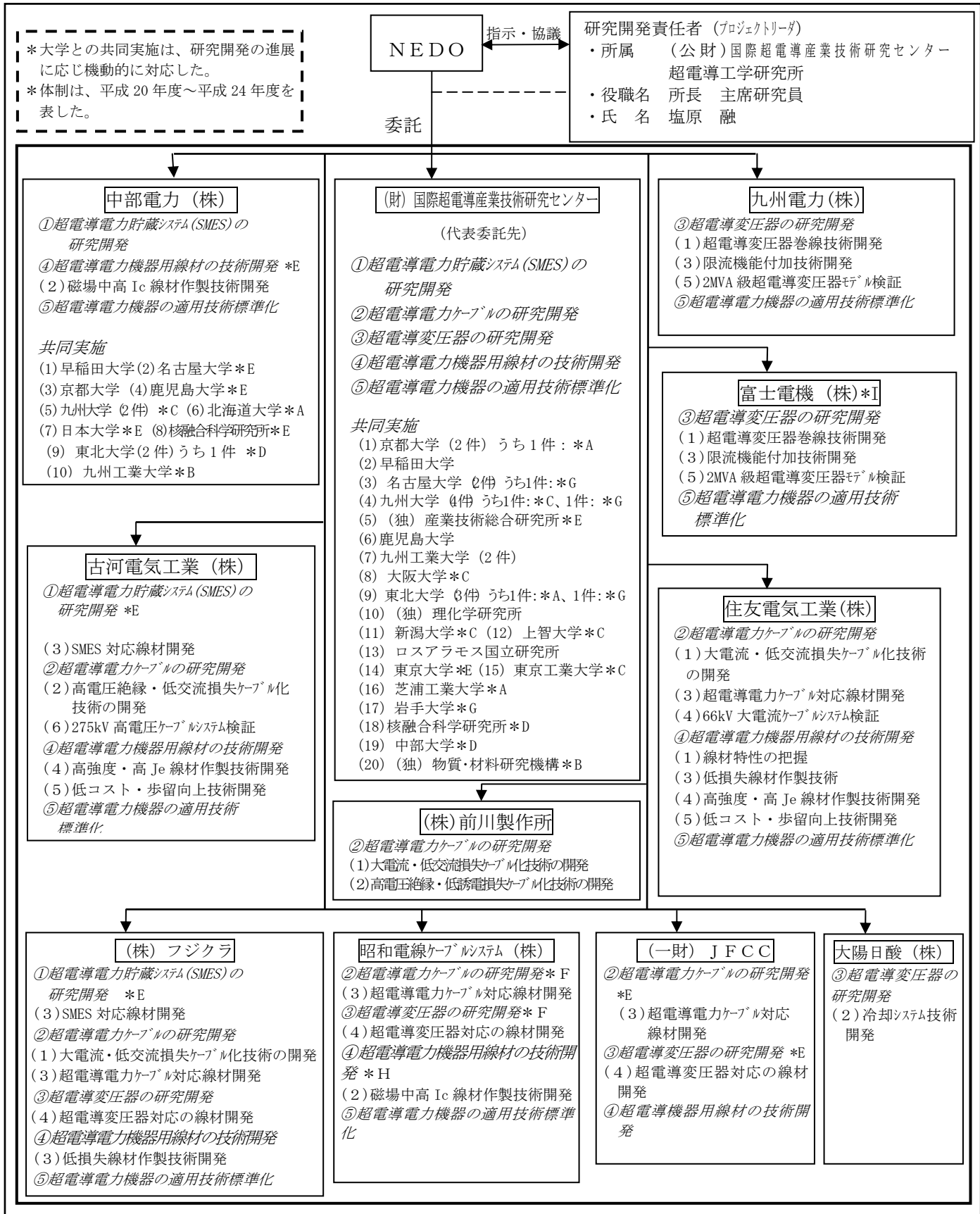


表 2.2.1 研究開発分担

Y系超電導電力機器技術開発

- ① 超電導電力貯蔵システム(SMES)の研究開発
- (1) 2 GJ 級高磁界・大電流コンパクトコイル構成技術開発
 ----- 中部電力、京都大学、早稲田大学、鹿児島大学、東北大学
- (2) 高効率コイル伝導冷却技術開発
 -----中部電力、九州大学、名古屋大学、日本大学、核融合科学研究所
- (3) SMES 対応線材安定製造技術開発
 -----中部電力、古河電工、フジクラ、ISTEC
- (4) 高磁界コンパクト SMES システムモデル検証
 -----中部電力、核融合科学研究所、鹿児島大学、九州大学、京都大学
 名古屋大学、日本大学、北海道大学、早稲田大学
- (5) 高信頼性・高耐久性 SME S コイル要素技術開発
 -----中部電力、核融合科学研究所、鹿児島大学、九州大学、京都大学
 名古屋大学、日本大学、北海道大学、早稲田大学、東北大学
- ② 超電導電力ケーブルの研究開発
- (1) 大電流・低交流損失ケーブル化技術開発
- (a) 大電流・低交流損失技術の基礎特性評価 -----住友電工
- (b) 大容量接続技術の開発 -----住友電工
- (c) 三心一括ケーブル導体の検証 -----住友電工
- (d) 高 I_c -IBAD-PLD 線材による大電流・低交流損失の評価 ---フジクラ
- (e) 交流損失低減の基礎的研究 -----ISTEC、京都大学
- (2) 高電圧絶縁・低誘導損失ケーブル化技術の開発
- (a) 高電圧絶縁・低誘導損失技術の基礎特性評価 -----古河電工
- (b) 高電圧接続技術の開発 -----古河電工
- (c) 超電導電力ケーブル電気絶縁特性の調査 -----ISTEC、名古屋大学
- (d) 交流損失の解析と評価 -----京都大学
- (3) 超電導電力ケーブルの熱収支に関する評価研究
- (a) 定常通電時及び事故時の伝熱特性検討 -----ISTEC、早稲田大学
- (b) スラッシュ窒素の研究 -----前川製作所
- (c) 超電導電力機器の冷却に関する調査研究 -----ISTEC
- (4) 超電導電力ケーブル対応線材安定製造技術開発
- (a) 大電流用線材の安定製造技術の開発 ----- ISTEC、住友電工
- (b) 基板・中間層テープの開発 ----- ISTEC、フジクラ
- (c) MOD プロセスによる高電圧ケーブル用超電導線材の開発

	----- ISTECC、昭和電線ケーブルシステム
(d) 微細構造解析	-----JFCC
(e) IBAD-PLD 線材の安定製造技術の開発	-----ISTECC
(f) 線材の評価技術の開発	-----ISTECC
(5) 66 kV 大電流ケーブルシステム検証	
(a) システム開発	-----住友電工
(6) 275 kV 高電圧ケーブルシステム検証	
(a) システム設計	-----古河電工
③ 超電導変圧器の研究開発	
(1) 超電導変圧器巻線技術開発	
(a) 超電導変圧器巻線の大電流化技術開発	-----九州電力、富士電機
(b) 超電導変圧器巻線の低損失化技術開発	-----九州電力、富士電機
(c) 超電導変圧器巻線の耐短絡強度技術開発	-----九州電力
(d) 変圧器の巻線構成技術及び最適転移技術の検討	-----ISTECC、九州大学
(e) モデルコイル、変圧器のための交流損失データ取得、提供	-----ISTECC、九州大学
(2) 冷却システム技術開発	
(a) 小型膨張タービンの高効率化	-----大陽日酸
(b) 小型ターボ圧縮機開発	-----大陽日酸
(c) 熱交換器の小型化	-----大陽日酸
(d) 冷凍機開発と冷却システム開発	-----大陽日酸
(e) 冷凍機と機器とのインターフェースの検討	-----ISTECC、九州大学
(3) 限流機能付加技術開発	
(a) 4 巻線モデルによる特性検証	-----九州電力
(b) 限流応答特性解明と限流効果による巻線保護の検討及び熱伝導率等の熱的特性の評価	-----ISTECC、九州大学、岩手大学
(c) 数百 kVA 級限流機能付加変圧器の試作	---九州電力、富士電機、ISTECC
(4) 超電導変圧器対応線材安定製造技術開発	
(a) 超電導変圧器対応線材安定製造技術開発	-----フジクラ
(b) 超電導変圧器対応線材安定製造技術開発	-----ISTECC、昭和電線ケーブルシステム
(c) 超電導変圧器対応安定製造技術線材の評価及び細線安定加工技術開発	-----ISTECC
(d) 超電導変圧器対応線材安定製造技術の評価	-----JFCC
(e) 線材特性評価と温度スケーリング則による巻線の交流損失見積り手法検討	-----ISTECC、九州大学

- (5) 2 MVA 級超電導変圧器モデル検証
 - (a) 2 MVA 級超電導変圧器モデルの設計検討 -----九州電力、富士電機
 - (b) 20 MVA 級超電導変圧器の設計検討 -----九州電力
- ④ 超電導機器用線材の技術開発
 - (1) 線材特性の把握-ISTEC、九州大学、早稲田大学、京都大学、住友電工、JFCC
 - (2) 磁場中高臨界電流(I_c)線材作製技術開発
 - (a) 人工ピン止め点導入関連技術開発 ----ISTEC、九州大学、九州工業大学、東北大学、名古屋大学、新潟大学、上智大学、物質材料研究機構、JFCC、中部電力
 - (b) 高不可逆磁場材料の開発 -----ISTEC、大阪大学、理研、九州大学、ロスアラモス国立研究所、東京大学、東京工業大学、JFCC
 - (3) 低交流損失線材作製技術開発
 - (a) 均一線材作製技術開発-----ISTEC、九州工業大学、九州大学、京都大学、鹿児島大学、住友電工、JFCC
 - (b) 細線加工技術開発 -----ISTEC、九州大学、鹿児島大学、産総研、京都大学、早稲田大学、住友電工、JFCC
 - (4) 高強度・高工業的臨界電流密度(J_c)線材作製技術開発
 - (a) 高強度金属基板対応線材作製技術開発 ---ISTEC、九州大学、東北大学、早稲田大学、中部大学、JFCC、古河電工
 - (b) 高臨界電流(I_c)化技術開発 -----ISTEC、九州大学、早稲田大学、JFCC
 - (5) 低コスト・歩留向上技術開発
 - (a) 実用化技術開発用線材安定製造技術開発
 - (b) 低コスト対応高速・高 I_c 化技術開発 ----ISTEC、東北大学、京都大学、九州大学、早稲田大学、JFCC
 - (c) 接続・補修技術開発 -----ISTEC、九州大学、名古屋大学、JFCC
- ⑤ 超電導電力機器の適用技術標準化
 - (1) 超電導線関連技術標準化 -----ISTEC、住友電工、フジクラ、中部電力、昭和電線ケーブルシステム、古河電工、九州大学、東北大学
 - (2) 超電導電力ケーブル関連技術標準化 -----ISTEC、住友電工、古河電工、フジクラ、昭和電線ケーブルシステム
 - (3) 超電導電力機器関連技術標準化等 -----ISTEC、中部電力、古河電工、九州電力、フジクラ、昭和電線ケーブルシステム

2.3 研究開発の運営管理

研究開発全体の管理・執行に責任を有する NEDO は、経済産業省及び研究開発実施者と密接な関係を維持しつつ、プログラムの目的及び目標、並びに本研究開発の目的及び目標に照らして、必要に応じて、外部有識者により構成される省エネルギー部（プロジェクト前半は新エネルギー部）が主催の「超電導技術委員会」において、プロジェクトリーダー等を通じてプロジェクトの進捗について報告を受け、その開発内容について審議し、その意見を運営管理に反映させてきた。本プロジェクトの推進方針及び省エネルギー部（プロジェクト前半は新エネルギー部）が所管する他の超電導関連プロジェクトとの調整についても「超電導技術委員会」において、有識者の意見を取り入れつつ進めた。

プロジェクト内においても、研究開発を効率的かつ効果的に推進するために、「Y系超電導電力機器技術開発推進委員会」を設け、実施者以外の外部有識者からも意見を頂く体制をとった。また、各機器（SMES、ケーブル、変圧器）及びY系超電導線材の開発の計画及び進捗を集中的に運営管理する目的で、下記の機器毎の研究開発委員会、さらに課題毎の検討小委員会等を設け、各機器開発の成果を相互補完することも含めて、効果的に研究開発を進めた。

各機器に共通基盤的な開発要素（線材開発・加工技術や冷却技術）について、プロジェクトリーダーが委員長を務める技術開発推進委員会等の場を活用し、情報共有や水平展開を行い、プロジェクトの全体予算や各機器開発の個別予算の効率的な運用に努めた。また、技術開発項目毎の進捗状況に応じた計画の効率的組み替え・見直しを実施し、同一予算でより多くの成果を引き出すことにより、効率的運用を徹底した。

(1) 「超電導技術委員会」

NEDO 内に、産学官の有識者を集めた超電導技術委員会（平成 20 年度委員長：正田英介 東京理科大学教授、平成 21 年度から委員長：大久保仁 名古屋大学教授）を設け、NEDO が管理する個々の超電導技術開発及び全体に関する研究方針の審議、成果・進捗のレビュー、課題解決のための方策の検討、ならびに技術情報・成果の共有化を進め、そこで得られた助言等を基に超電導技術開発の効率的、効果的運営を図った。本プロジェクトからも定期的な研究方針・計画の審議と研究開発成果・進捗の報告を行い、並行して進められている Bi 系高温超電導線材を用いた「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」の技術開発とのすり合わせを行う等、研究開発の効率的かつ効果的な実施に結びつけた。

(2) 「Y系超電導電力機器技術開発推進委員会」

プロジェクト内に設置した最も上位に位置づけられる推進委員会は委員長（プロジェクトリーダー）のもと、この事業目標を達成するため、強力かつ効果的にプロジェクトを推進することを目的とし、本プロジェクトの計画や進捗状況について、プロジェクト参加機関の上級管理者及び外部有識者により、俯瞰的、総合的にコメントを頂くとともに、評価・審議頂いた。本推進委員会の委員リストを表 2.3.1 に示す。

委員会開催実績：

（平成 20 年度）平成 21 年 3 月 2 日

（平成 21 年度）平成 22 年 3 月 29 日

（平成 22 年度）平成 22 年 11 月 11 日

（平成 23 年度）平成 23 年 8 月 12 日、平成 24 年 3 月 12 日

（平成 24 年度）平成 25 年 2 月 26 日

表 2.3.1 Y系超電導電力機器技術開発推進委員会 委員リスト

（平成 24 年度）

	氏名	所属・役職
委員長	塩原 融	(公財)国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所 所長
委員	木須 隆暢	九州大学 大学院システム情報科学研究院 電気システム工学部門 教授
	岩熊 成卓	九州大学 大学院 システム情報科学研究院 教授
	松下 照男	九州工業大学 大学院 情報工学研究院 継続研究員
	雨宮 尚之	京都大学 大学院工学研究科 電気工学専攻 教授
	仁田 旦三	明星大学 理工学部 電気電子システム工学科 教授
	石山 敦士	早稲田大学 理工学術院 教授
	林 秀美	九州電力(株)技術本部 総合研究所 電力貯蔵技術グループ長
	長谷川 隆代	昭和電線ケーブルシステム(株)常務取締役 技術開発センター長
	磯嶋 茂樹	住友電気工業(株)パワーシステム研究所 技師長
	秦 多計城	大陽日酸(株) 開発・エンジニアリング本部副本部長 兼 つくば研究所長
	長屋 重夫	中部電力(株)技術開発本部 電力技術研究所 研究主査(超電導プロジェクトリーダー)
	富田 優	(公財)鉄道総合技術研究所 材料技術研究部 超電導応用研究室 室長
	一瀬 中	(一財)電力中央研究所 電力技術研究所 上席研究員
	本庄 昇一	東京電力(株)技術開発研究所 超電導技術グループマネージャー
	野村 俊自	(株)東芝 電力システム社 新技術応用事業推進統括部 新技術応用システム技術部 新技術応用第一担当 担当部長
	平山 司	(一財)ファインセラミックスセンター ナノ構造研究所 所長代理グループ長 主幹研究員
齊藤 隆	(株)フジクラ 新規事業推進センター 超電導事業推進室 超電導事業推進シニアコーディネーター	
北西 啓一	富士電機(株)発電・社会インフラ事業本部 発電プラント事業部 原子カプラント部 部長	
井上 至	古河電気工業(株)研究開発本部 高温超電導事業化チーム 超電導応用開	

		発部 部門統括
	町田 明登	(株)前川製作所 技術研究所 副所長
	大熊 武	(公財)国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所 電力機器研究開発部長
	和泉 輝郎	(公財)国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所 線材研究開発部長
事務局	高橋 保	(公財)国際超電導産業技術研究センター 企画部 部長代理 主管研究員

(3) 「超電導電力貯蔵システム研究開発委員会」(略称：SMES 委員会)

Y系超電導線材を用いた大容量 SMES コイルを可能とする、高磁界・コンパクトで高耐電圧伝導冷却コイルの要素技術開発において、整合的かつ効率よく推進できるように、プロジェクト内に学識経験者、線材・重電メーカ各社、各電力会社等からなる SMES 委員会を設置し、研究内容や方向性につき連絡調整を行い、具体的方針の策定等について研究開発実施者相互の協力連携を図った。

本 SMES 委員会の委員リストを表 2.3.2 に示す。

委員会開催実績：

(平成 20 年度) 平成 21 年 2 月 9 日

(平成 21 年度) 平成 22 年 3 月 16 日

(平成 22 年度) 平成 22 年 7 月 16 日

(平成 23 年度) 平成 23 年 8 月 26 日、平成 24 年 3 月 1 日

(平成 24 年度) 平成 25 年 2 月 13 日

表 2.3.2 超電導電力貯蔵システム研究開発委員会 委員リスト
(平成 24 年度)

	氏名	所属・役職
委員長	石山 敦士	早稲田大学 理工学術院 教授
委員	川畑 秋馬	鹿児島大学 大学院 理工学研究科 教授
	木須 隆暢	九州大学 大学院システム情報科学研究院 電気システム工学部門 教授
	北條 正樹	京都大学 大学院工学研究科 機械理工学専攻 教授
	塚本 修巳	横浜国立大学 名誉教授
	大崎 博之	東京大学 大学院 新領域創成科学研究科 先端エネルギー工学専攻 教授
	淡路 智	東北大学 金属材料研究所 強磁場超伝導材料研究センター 准教授
	濱島 高太郎	八戸工業大学 大学院工学研究科 電気電子・情報工学専攻 教授
	仁田 旦三	明星大学 理工学部 電気電子システム工学科 教授
	横井 賢二郎	関西電力(株)研究開発室 研究推進グループ マネジャー
	林 秀美	九州電力(株)技術本部 総合研究所 電力貯蔵技術グループ長
笠原 奉文	(一財)電力中央研究所 電力技術研究所 電力応用領域 主任研究員	

	本庄 昇一	東京電力(株)技術開発研究所 超電導技術グループマネージャー
	野村 俊自	(株)東芝 電力システム社 新技術応用事業推進統括部 新技術応用システム技術部 新技術応用第一担当 担当部長
	木戸 修一	(株)日立製作所 核融合・加速器部 核装置設計グループ主任技師
	横山 彰一	三菱電機(株)先端技術総合研究所 電機システム技術部 磁気応用・加速器グループ 主席研究員
SPL	長屋 重夫	中部電力(株)技術開発本部 電力技術研究所 研究主査(超電導プロジェクトリーダー)
PL	塩原 融	(公財)国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所 所長
事務局	渡邊 亮	(公財)国際超電導産業技術研究センター 企画部 兼 超電導工学研究所 電力機器研究開発部 主任研究員

(4)「超電導電力ケーブル研究開発委員会」(略称：ケーブル委員会)

Y系超電導線材を用いた電力ケーブルの研究開発を、効率的に推進することを目的に、プロジェクト内に学識経験者、線材・重電メーカー各社、各電力会社等からなるケーブル委員会を設置し、研究内容や方向性につき連絡調整を行い、具体的方針の策定等について研究開発実施者相互の協力連携を図った。

本ケーブル委員会の委員リストを表 2.3.3 に示す。

委員会開催実績：

- (平成 20 年度) 平成 20 年 9 月 29 日、平成 21 年 2 月 2 日
- (平成 21 年度) 平成 21 年 5 月 20 日、平成 22 年 3 月 24 日
- (平成 22 年度) 平成 22 年 6 月 29 日、平成 23 年 1 月 12 日
- (平成 23 年度) 平成 23 年 8 月 1 日、平成 24 年 2 月 29 日
- (平成 24 年度) 平成 24 年 7 月 20 日、平成 24 年 12 月 17 日
- 平成 25 年 2 月 22 日

表 2.3.3 超電導電力ケーブル研究開発委員会 委員リスト
(平成 24 年度)

	氏名	所属・役職
委員長	雨宮 尚之	京都大学 大学院工学研究科 電気工学専攻 教授
委員	早川 直樹	名古屋大学 エコトピア科学研究所 教授
	石山 敦士	早稲田大学 理工学術院 教授
	横井 賢二郎	関西電力(株)研究開発室 研究推進グループ マネージャー
	長谷川 隆代	昭和電線ケーブルシステム(株)常務取締役 技術開発センター長
	増田 孝人	住友電気工業(株)超電導製品開発部 主幹
	鳥居 慎治	(一財)電力中央研究所 企画グループ スタッフ 上席
	本庄 昇一	東京電力(株)技術開発研究所 超電導技術グループマネージャー
	齊藤 隆	(株)フジクラ 新規事業推進センター 超電導事業推進室 超電導事業推進シニアコーディネーター
	向山 晋一	古河電気工業(株)研究開発本部 高温超電導事業化チーム 超電導応用開発部 部長

	矢口 広晴	(株)前川製作所 技術研究所 課長
	田辺 圭一	(公財)国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所副所長兼デバイス研究開発部長兼材料物性バルク研究部長
	山田 穰	(公財)国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所 特別研究員
	和泉 輝郎	(公財)国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所 線材研究開発部長
SPL	大熊 武	(公財)国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所 電力機器研究開発部長
PL	塩原 融	(公財)国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所 所長
事務局	丸山 修	(公財)国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所 電力機器研究開発部 研究員

(5) 「超電導変圧器研究開発委員会」(略称：変圧器委員会)

Y系超電導線材を用いた超電導変圧器の研究開発に対して、将来の実用化、導入・普及をめざし、各要素技術の整合を図り、効率的かつ的確に実施されていることの確認・評価を行った。また、研究開発の進捗及び成果に基づく新たな研究実施指針等に関しても、議論検討を行い、的確に推進することを目的に、プロジェクト内に学識経験者、線材・重電メーカー各社、各電力会社等からなる変圧器委員会を設置し、研究内容や方向性につき連絡調整を行い、具体的方針の策定等について研究開発実施者相互の協力連携を図った。

本変圧器委員会の委員リストを表 2.3.4 に示す。

委員会開催実績：

(平成 20 年度) 平成 20 年 9 月 24 日、平成 21 年 1 月 7 日

(平成 21 年度) 平成 21 年 8 月 6 日、平成 22 年 2 月 5 日

(平成 22 年度) 平成 22 年 7 月 8 日、平成 23 年 2 月 16 日

(平成 23 年度) 平成 23 年 7 月 12 日、平成 24 年 2 月 20 日

(平成 24 年度) 平成 24 年 8 月 3 日、平成 24 年 12 月 14 日、
平成 25 年 2 月 8 日

表 2.3.4 超電導変圧器研究開発委員会 委員リスト

(平成 24 年度)

	氏名	所属・役職
委員長	岩熊 成卓	九州大学 大学院 システム情報科学研究所 教授
委員	藤代 博之	岩手大学 工学部 マテリアル工学科 教授
	住吉 文夫	鹿児島大学 大学院 理工学研究科 教授
	原 雅則	九州大学 名誉教授
	大崎 博之	東京大学 大学院 新領域創成科学研究科 先端エネルギー工学専攻 教授
	仁田 旦三	明星大学 理工学部 電気電子システム工学科 教授
	三戸 利行	大学共同利用機関法人自然科学研究機構 核融合科学研究所 連携研究統括主幹 ヘリカル研究部 装置工学・応用物理研究系 教授
	江口 徹	九州電力(株) 技術本部総合研究所 電力貯蔵技術グループ 副主幹研究員

	池尻 吉隆	(株)キューヘン 技術開発部長
	長谷川 隆代	昭和電線ケーブルシステム(株)常務取締役 技術開発センター長
	吉田 茂	大陽日酸(株)開発・エンジニアリング本部 つくば研究所 超電導プロジェクトマネージャー
	鳥居 慎治	(一財)電力中央研究所 企画グループ スタッフ 上席
	齊藤 隆	(株)フジクラ 新規事業推進センター 超電導事業推進室 超電導事業推進シニアコーディネーター
	加藤 丈晴	(一財)ファインセラミックスセンター ナノ構造研究所 主任研究員
	今野 雅行	富士電機(株)発電・社会インフラ事業本部 発電プラント事業部 原子力プラント部 主査
	隅 和憲	富士電機(株)産業インフラ事業本部 千葉工場 購買部長
	田辺 圭一	(公財)国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所 副所長兼デバイス研究開発部長兼材料物性バルク研究部長
SPL	林 秀美	九州電力(株)技術本部 総合研究所 電力貯蔵技術グループ長
PL	塩原 融	(公財)国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所 所長
事務局	田子森 秋彦	(公財)国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所 電力機器研究開発部 部長代理 主管研究員

(6)「超電導機器用線材研究開発委員会」(略称：線材委員会)

Y系超電導線材を用いた超電導電力機器が、将来の実用化、導入・普及に目途をつける重要な要素技術開発である線材作製技術において、我が国の技術的蓄積と開発能力を集中し、高速製造、低コスト化、歩留り向上、量産化要素等のさらなる技術開発を行うことが重要である。このため、各要素技術の整合を図り、効率的かつ的確に研究開発が実施されていることの確認・評価を行った。また、研究開発の進捗及び成果に基づく新たな研究実施指針等に関しても、議論検討を行い、的確に推進することを目的に、プロジェクト内に学識経験者、線材・重電メーカー各社、各電力会社等からなる線材委員会を設置し、研究内容や方向性につき連絡調整を行い、具体的方針の策定等について研究開発実施者相互の協力連携を図った。

本線材委員会の委員リストを表 2.3.5 に示す。

委員会開催実績：

(平成 20 年度) 平成 20 年 9 月 30 日、平成 20 年 2 月 16 日

(平成 21 年度) 平成 21 年 5 月 18 日、平成 22 年 2 月 4 日

(平成 22 年度) 平成 22 年 10 月 15 日

(平成 23 年度) 平成 23 年 7 月 25 日、平成 24 年 2 月 22 日

(平成 24 年度) 平成 25 年 1 月 15 日

表 2.3.5 超電導機器用線材研究開発委員会 委員リスト

(平成 24 年度)

	氏名	所属・役職
委員長	木須 隆暢	九州大学 大学院システム情報科学研究所 電気システム工学部門 教授
委員	住吉 文夫	鹿児島大学 大学院 理工学研究科 教授
	岩熊 成卓	九州大学 大学院 システム情報科学研究所 教授
	松本 要	九州工業大学 大学院 工学研究所 物質工学研究系 教授
	雨宮 尚之	京都大学 大学院工学研究科 電気工学専攻 教授
	淡路 智	東北大学 金属材料研究所 准教授
	吉田 隆	名古屋大学 工学研究科 教授
	石山 敦士	早稲田大学 理工学術院 教授
	林 秀美	九州電力(株)技術本部 総合研究所 電力貯蔵技術グループ長
	長谷川 隆代	昭和電線ケーブルシステム(株)常務取締役 技術開発センター長
	大松 一也	住友電気工業(株)パワーシステム研究所 グループ長
	長屋 重夫	中部電力(株)技術開発本部 電力技術研究所 研究主査(超電導プロジェクトリーダー)
	本庄 昇一	東京電力(株)技術開発研究所 超電導技術グループマネージャー
	野村 俊自	(株)東芝 電力システム社 新技術応用事業推進統括部 新技術応用システム技術部 新技術応用第一担当 担当部長
	加藤 丈晴	(財)ファインセラミックスセンター ナノ構造研究所 主任研究員
	齊藤 隆	(株)フジクラ 新規事業推進センター 超電導事業推進室 超電導事業推進シニアコーディネーター
	今野 雅行	富士電機(株)発電・社会インフラ事業本部 発電プラント事業部 原子力プラント部 主査
	山本 潔	古河電気工業(株)研究開発本部 高温超電導事業化チーム 超電導応用開発部 マネージャー
	大熊 武	(公財)国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所 電力機器研究開発部長
	山田 穰	(公財)国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所 特別研究員
	田辺 圭一	(公財)国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所副所長兼デバイス研究開発部長兼材料物性バルク研究部長
中尾 公一	(公財)国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所 特別研究員	
吉積 正晃	(公財)国際超電導産業技術研究センター 線材研究開発部 部長補佐 主任研究員	
SPL	和泉 輝郎	(公財)国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所 線材研究開発部長
PL	塩原 融	(公財)国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所 所長
事務局	高橋 保	(公財)国際超電導産業技術研究センター 企画部 部長代理 主管研究員

(7) 「超電導電力機器技術調査委員会」(略称：標準化本委員会)

SMES、超電導電力ケーブル、超電導変圧器等超電導電力機器の適用技術標準化において、超電導電力機器に関する国内外の技術動向並びに標準化ニーズ調査が整合的かつ効率よく推進できるように、研究内容や方向性につき連絡調整を行い、具体的国際標準化方針の策定等について委員相互の協力連携を図ることを目的に、プロジェクト内に学識経験者、線材・重電メーカー各社、各電力会

社等からなる標準化本委員会を設置し、研究内容や方向性につき連絡調整を行い、具体的方針の策定等について研究開発実施者相互の協力連携を図った。

本標準化本委員会の委員リストを表 2.3.6 に示す。

委員会開催実績：

(平成 20 年度) 平成 20 年 10 月 8 日、平成 20 年 11 月 20 日、平成 21 年 2 月 18 日

(平成 21 年度) 平成 21 年 7 月 2 日、平成 21 年 10 月 5 日、平成 21 年 12 月 21 日、
平成 22 年 3 月 8 日

(平成 22 年度) 平成 22 年 7 月 8 日、平成 23 年 1 月 14 日、
平成 23 年 3 月 8 日

(平成 23 年度) 平成 23 年 7 月 13 日、平成 23 年 12 月 8 日、
平成 24 年 3 月 7 日

(平成 24 年度) 平成 24 年 7 月 20 日、平成 24 年 12 月 17 日、
平成 25 年 1 月 31 日

表 2.3.6 超電導電力機器技術調査委員会委員リスト

(平成 24 年度)

	氏名	所属・役職
委員長	松下 照男	九州工業大学 大学院情報工学研究院 継続研究員
委員	松本 要	九州工業大学 大学院工学研究院 教授
	新富 孝和	日本大学 大学院総合科学研究科 教授
	山崎 裕文	(独)産業技術総合研究所 エネルギー技術研究部門 超電導技術グループ長
	奥野 清	(独)日本原子力研究開発機構 核融合研究開発部門 研究主席
	林 秀美	九州電力(株)技術本部 総合研究所 電力貯蔵技術グループ グループ長
	宮崎 隆好	(株)神戸製鋼所 企画担当 次長
	佐藤 謙一	住友電気工業(株)材料技術研究開発本部 フェロー
	増田 孝人	住友電気工業(株) 超電導製品開発部 主幹
	長屋 重夫	中部電力(株)技術開発本部 電力技術研究所 研究主査(超電導プロジェクトリーダー)
	三村 智男	東京電力(株)技術開発研究所 超電導技術グループ 主任研究員
	戸坂 泰造	(株)東芝 電力・社会システム技術開発センター 電気計装システム開発部 超電導・加速器応用技術開発担当 主査
	宮下 克己	日立電線(株)高機能材料事業本部 伸銅製造統括部 土浦工場 電伸部 電伸課 主任技師
	齊藤 隆	(株)フジクラ 新規事業推進センター 超電導事業推進室 超電導事業推進シニアコーディネーター
	井上 至	古河電気工業(株)研究開発本部 高温超電導事業化チーム 超電導応用開発部 部門統括
	中尾 公一	(公財)国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所 特別研究員
	大熊 武	(公財)国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所 電力機器研究開発部長
PL	塩原 融	(公財)国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所 所長
事務局	角田 好喜	(公財)国際超電導産業技術研究センター 標準部長
	佐波 真紀子	(公財)国際超電導産業技術研究センター 標準部 主任

(8) 各課題毎の「検討小委員会」

上記の各研究開発委員会における各課題をさらに詳細な内容について審議・協議するために以下の小委員会を設け、実施者間での情報・意見交換を実施し、研究開発の進捗管理を行うとともに、詳細な内容、連携の取り方、効率的な研究開発手法について協議した。本検討小委員会での内容は各テーマ担当のサブプロジェクトリーダー(SPL)により上記の研究開発委員会及び推進委員会で報告し、効果的に研究開発を進めた。なお、開催は4～6回/年で、原則サブプロジェクトリーダーの要請に応じて開催した。

<検討小委員会>

- ・「SMES用Y系集合導体検討小委員会」(H20年度～22年度)
- ・「SMESコイル検討小委員会」(H20年度～22年度)
- ・「SMES試験法検討小委員会」(H23年度～24年度)
- ・「超電導電力ケーブル絶縁検討小委員会」
- ・「超電導変圧器設計検討小委員会」(H23年度～24年度)
- ・「線材特性の把握及び低交流損失線材作製技術開発小委員会」
- ・「磁場中高臨界電流線材作製技術開発及び高強度・高 J_c 線材作製技術開発小委員会」
- ・「低コスト・歩留向上技術開発小委員会」
- ・「超電導電力機器技術調査超電導線材小委員会」
- ・「超電導電力機器技術調査超電導ケーブル小委員会」
- ・「超電導電力機器技術調査超電導電力機器小委員会」

2.4 研究開発成果の実用化に向けたマネジメントの妥当性

Y系超電導線材を用いた高温超電導電力機器の実用化、事業化に向けては、本事業終了後の平成25年度より、電力実システムにおける各機器の長期信頼性確認を目的とする実証試験のフェーズへ移行する。その間に進むであろう同線材の量産化技術の事業化レベルと相俟って、導入可能な機器及び電力システムから適宜、実用化導入を進め、2020(平成32)年度からの本格的な同機器のリプレースの動きに遅延することなく対応する。

2.4.1 実用化につなげる戦略

2.4.1-1 一般への普及啓発活動

研究開発成果及び超電導技術の普及・啓蒙活動は、一般への新しい技術として超電導技術を理解して頂くことは新技術の実用化・事業化には重要である。その戦略の一環として、日本経済新聞社が毎年東京ビッグサイトで開催しているエコプロダクツ展に出展し、超電導技術の進捗とCO₂等の温室効果ガス排出削減がエネルギー効率向上により貢献できること等の展示を行った。2008年からは毎年同展に出展し、超電導の解説展示を一般来場者向けに開催した。(公財)国際超電導産業技術研究センター(ISTEC)は、超電導の未来をイメージしたジオラマや超電導のデモ実験を展示した。3日間開催のエコプロダクツ展には毎年平均で延べ17万人の入場者があり、若年層から年配層まで幅広い層が来訪した。アンケート調査では、超電導への関心の高さが示され、特にジオラマのイメージから環境分野、輸送・交通分野への期待が高かった。

直近の2012年にはバルク体の浮上で注目を浴び、さらに奈良市立一条高校及び(株)島津理科と共同でファラデーの原理から超電導までを楽しく理解できる教材を展示し、来訪した学生へも説明して好評であった。同時にクイズラリーを実施し、超電導がどのような現象で何に期待されているか、ということを知りやすく解説した。

2.4.1-2 超電導産業における国際協調・連携

日米欧ニュージーランドに加えて韓国が参加し、毎年持ち回りで国際超電導産業サミットを開催している。国際超電導産業サミットは、超電導技術の産業化、商業化といった目標に向けて、関係の企業、研究機関等の経営幹部、マネージャー等が一同に会して討議を行う国際フォーラムである。なお、本プロジェクトの代表受託のISTECに加えて、海外の国際超電導産業サミット加盟の団

体は、CCAS: The Coalition for the Commercial Application of Superconductors(米国)、CONNECTUS: The Consortium of European Companies determined To Use Superconductivity(欧州)、NZHTSIA - New Zealand High Temperature Superconductor Industry Association(NZ)、KICS - Korea Industries Confederation for Commercialization of Superconductivity、であったが、2012年にはRSCO - Russian Superconductor Organizationが正式に参加の意向を表明した。国際超電導産業サミットの使命は、世界各地で産学官の国際協調や情報交換を促進することにより、超電導分野の研究計画を活発化し、超電導体を利用した製品の開発や実用化を早めることにある。2011年度は韓国で開催され、本年度は10月にアメリカ(第21回会合)で開催された。

国際超電導産業サミットにおいては、超電導技術の実用化に向けた各国の動向についての意見交換が行われるほか、実用化に向けた課題やこれに対する取り組みについて議論を深めている。このような議論の中で、会合では「さらに幅広い分野で超電導技術の商品化を行うためには、電力応用の様々な分野で開発努力を続け、一層の強化を図り、拡大を図ることが必要である。将来の消費者から、超電導技術には経済的合理性があり技術的にも信頼性の高いことを理解してもらうよう努めることが、電力応用を目的とする開発プロジェクト全てにとって肝腎なことである。」といった考え方が打ち出された。また、会合では、「超電導実用化拡大のためには超電導産業を市場が牽引するようにしなくてはならず、そのためにエンドユーザとの緊密な連携が必要であり、また、既存技術に打ち勝つ魅力的な提案を行っていく必要がある。」といった議論が行われた。

国際超電導産業サミットで得られた情報や議論は、今後の企業の実用化に向けた取り組みの中で有効に活用されるものと期待しており、このような観点から国内企業等には国際超電導産業サミットへの参加を呼びかけ、経営幹部、マネージャー等の積極的参加を得た。また、国際超電導産業サミットの結果は発表資料集の配布や新聞報道等を通じ、関係企業も含めた関係者に広く周知を図った。

2.4.1-3 研究開発成果の実用化に向けた対応

平成21年4月22日、鈹工業技術研究組合法を技術研究組合法に改正する法案が可決・成立し、新たな研究開発パートナーシップ制度(技術研究組合制度)が創設された(平成21年6月22日施行)。この技術研究組合制度では、国支援型研究開発プロジェクトの成果の実用化が、組織変更、新設分割、組合分割設立等により、研究成果をそのまま共同で実用化、あるいは研究成果が得られたものから順次実用化することができることになった。

この新しい技術研究組合制度を積極的に活用すべく、本プロジェクト参画の(株)フジクラ、昭和電線ケーブルシステム(株)、(公財)国際超電導産業技術研究センター(ISTEC)は、協同による超電導技術を利用した次世代の産業用機器及び当該機器に用いる線材の技術開発に関する試験研究、その他組合員の技術水準の向上を図るための事業を行うことを目的に、経済産業大臣による設立認可を平成21年9月11日に受け、9月24日に、「産業用超電導線材・機器技術研究組合(Industrial Superconductivity Technology Research Association: ISTERA)」を設立し、本プロジェクトの研究開発成果の早期実用化をめざしている。今後は、線材産業界のみならず、超電導機器製造分野を含めた重電、重工等各社の組合員を増強し、世界をリードするAll Japan体制での超電導産業育成をめざしている。また、この研究組合から、Y系超電導線材のサンプル提供等を積極的に行うことにより、電力機器以外の産業用等超電導機器開発研究においても世界に遅れをとることがないような体制を構築しつつある。

2.4.1-4 標準化事業の展開

IEC/TC90は1989年にIECとして我が国で初めて幹事国を引き受けたTechnical Committeeであり、1990年に本「Y系超電導電力機器技術開発プロジェクト」の実施者で代表受託者である(公財)国際超電導産業技術研究センター内にIEC/TC90超電導委員会が設置され、超電導分野の国際標準化活動を実施している。これまでに超電導関連用語、低温超電導線材及び高温超電導線材に関する試験方法、超電導体の表面抵抗測定方法、バルク超電導体の捕捉磁場測定方法、電流リード等について18件の国際規格を我が国が主導して制定し発行された。

本プロジェクトでは、超電導電力機器にとって共通の基盤となる要素技術であるY系を主とした超電導線材関連技術並びに、超電導電力ケーブル等の超電導電力機器適用技術の標準化に資する調査研究を実施した。今後の超電導電力機器の早期の実用化、市場導入を円滑に進めていくために、調査結果をベースとした国際規格案をIEC/TC90に提案し、高温超電導技術に関する日本発の国際規格の制定をめざした。

超電導電力機器分野では、超電導線材及びこれを適用した超電導電力ケーブルに関して、NEDO事業である「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」(通称:Biケーブル実証プロジェクト)と緊密な連携のもと、IEC/TC20(電力ケーブル)、CIGRE(国際大電力システム会議)等関連する団体との連携を図りながら、製品規格化への国際合意の形成をめざし、この分野の国際標準活動に対して主導的役割を果たした。

2.4.2 実用化につなげる知財マネジメント

2.4.2-1 Y系超電導電力機器技術開発共同研究体としての知財等の成果管理

「リットリウム系超電導電力機器技術開発」プロジェクト参画機関は、共同で技術開発を実施するに当たり、機能的で柔軟な研究体制を構築し、密接な協調を図るためリットリウム系超電導電力機器技術開発共同研究体を置き、共同研究体協定書を締結した。また、共同研究体内での職務により得た知的財産権については、共同研究体知的財産権取扱規定で、その公正な取り扱いを定めた。

プロジェクト内の NEDO からの受託者は、NEDO との業務委託契約に基づき、委託業務の成果に係る産業財産権等に関して、原則として NEDO に対して産業技術力強化法第 19 条の適用を申請することとした。共同研究体内での単独並びに共同して行った発明等に係る産業財産権等は、原則として当該受託者または共同実施者に帰属することとした。なお、複数の研究体参加者による共同発明等に係る産業財産権等は、原則として、当該発明等への寄与度に応じて研究体参加者の持ち分を定めた。

プロジェクトリーダーが主宰する特許審査会により、出願要否の判定、発明者の認定、共同発明等における権利の帰属等の審議を行った。

産業財産権等を共同研究体内の参画者が自己実施する場合は、プロジェクトの代表受託者である ISTEK 事務局に実施届出書を提出することで、実施できることとした。また、共有に係る産業財産権等を自己実施する場合は、共有権者との協議により実施料を定めた実施契約を締結して、実施できることとした。ISTEK と共同で開発した共有産業財産権等に関しての自己実施は、ISTEK の持ち分に関して、無償で実施することが可能であり、実用化を推進している。

上記産業財産権等に関して、共有権者は他の共有権者の同意を得て、その産業財産権等の通常実施権を第三者に許諾することが可能であるとともに、プロジェクトの成果の実用化を推進することから、他の共有権者は合理的な理由無くして拒否若しくは延期してはいけないと取り決めた。

このように、本プロジェクトで得られた成果に係る知的財産権等産業財産権を発明者の寄与度に応じて持ち分を定めているものの、その実施に関しては、自己実施並びに第三者の通常実施が遅滞なく行われることが可能な体制を構築し、プロジェクトの研究開発成果の実用化に向けたマネジメントを行った。

2.4.2-2 特許調査

「リットリウム系超電導電力機器技術開発」プロジェクトにおいて、SMES、送電ケーブル、変圧器等の超電導電力機器の研究開発が進められ、これらの電

力機器に適する性能を発揮する線材の特性向上及び安定製造技術の研究開発とともに、Y系超電導電力機器の実用化が大きく前進した。

このような超電導機器の実用化ならびに事業化の観点から、平成20年度から平成24年度において「イットリウム系超電導電力機器」ならびに「イットリウム系超電導線材」について、国内特許及び米国特許を対象とし調査を行い、企業における事業化シナリオの策定に資することを目的とした特許調査を実施した。

本調査では「超電導応用基盤技術研究開発（第II期）」プロジェクトの特許調査において確立した特許評価ツールを用いた。このツールは収集した個々の特許に技術区分を設定し、書誌データ、要約、特許請求の範囲を表示し、さらに二階層構造の分類項目に従って分類選別を行うことで特許情報を効率的に把握し、かつ、データベースの構築を行うものである。調査対象関連特許群に対してこの特許評価ツールを適用し特許記載内容の確認を行うことでプロジェクトに関連する特許を抽出するとともに、これらの特許の重要度を判定し、一般に基本特許と呼ばれる、請求範囲が広範であり、事業化において抵触する可能性のある特許やその改良特許等を主要特許として抽出した。

(1) Y系超電導電力機器の特許調査

Y系超電導電力機器の特許調査では、平成20年度に送電ケーブル、変圧器、限流器、冷凍機の国内特許と米国特許、及びSMES国内特許を対象として調査を行った。平成21年度以降平成24年度まではこれらに加えSMES米国特許を調査対象に加え調査を行った。対象期間は平成19年4月から平成24年3月までの国内特許、及び平成19年1月から平成23年12月までの米国特許(SMES米国特許は昭和62年1月から平成23年12月)である。以下に、国内特許と米国特許におけるプロジェクト関連特許累計数と、それらから抽出した主要特許数を示す。

表 2.4.2-1 Y系超電導電力機器 国内・米国主要特許件数 (H20-H24)

	国内特許		米国特許	
	プロジェクト関連特許	主要特許	プロジェクト関連特許	主要特許
S M E S	107	5	107	5
ケーブル	268	17	80	11
変圧器	107	17	20	2
限流器	271	14	85	7
冷凍機	77	11	26	6

(2) Y系超電導線材の特許調査

Y系超電導線材の特許調査では、平成20年度から平成24年度に、基材、中間層、超電導層、保護層、その他、の5技術分野において国内特許及び米国特許を対象として調査を行った。対象期間は平成19年4月から平成24年3月までの国内特許、及び平成19年1月から平成23年12月までの米国特許である。

以下に、国内特許について「プロジェクト参加企業出願」と「プロジェクト非参加企業出願」の分類における主要特許数とプロジェクト関連特許累計数を、米国特許については「日本企業・機関出願」と「日本以外の企業・機関出願」の分類におけるプロジェクト関連特許累計数と主要特許数を示す。

表 2.4.2-2 Y系超電導線材 国内主要特許件数 (H20-H24)

	プロジェクト参加企業出願		プロジェクト非参加企業出願	
	プロジェクト関連特許	主要特許	プロジェクト関連特許	主要特許
基 材	37	8	27	8
中 間 層	62	26	44	13
超電導層	131	64	171	40
保 護 層	18	4	15	2
そ の 他	28	4	30	2

表 2.4.2-3 Y系超電導線材 米国主要特許件数 (H20-H24)

	日本企業・機関出願		日本以外の企業・機関出願	
	プロジェクト関連特許	主要特許	プロジェクト関連特許	主要特許
基 材	5	1	27	8
中 間 層	10	6	66	29
超電導層	121	14	173	29
保 護 層	10	0	31	3
そ の 他	9	0	25	2

本調査研究を通じ、国内ならびに米国のY系超電導電力機器及びY系超電導線材に関わる特許について、主要特許を抽出するとともに、Y系超電導関連分野の特許公報をPDFファイルとして閲覧する機能により容易に確認できるデータベースを構築した。研究開発成果を知的財産として特許出願しようとする研究者に限らず、実用化・事業化を図る企業の知財部門においても、このデータベースを利用することで効率的かつ効果的な関連特許情報の収集が可能である。企業における事業化フェーズにおいては、製品技術と製造技術の観点から、それぞれの企業の製品カテゴリにより独自の観点から他社(他機関)の特許出願状

況ならびに特許取得状況の把握が事業戦略策定にとって重要であることから、本調査研究で明らかになった主要特許等が事業化に及ぼし得る阻害要因を回避するとともに、先行特許情報の把握による各企業個別製品の「自社実施特許」の戦略的取得による超電導製品の新たな市場開拓と市場拡大への展開が期待される。

2.4.3 研究開発スケジュールと予算

研究開発スケジュールと予算を表 2.4.3-1 に示す。

表 2.4.3-1 研究開発スケジュールと予算

	H22	H23	H24	H25	H26
1. 「超電導電力貯蔵システム (SMES) の研究開発」	フープ応力 600MPa 以上、2kA 以上の通電容量の SMES コイル構成技術開発 20~40K 付近のコイル伝導冷却技術開発 2kV 以上の電気絶縁性能を有する高伝熱コイル構造開発 SMES 対応線材安定製造技術開発 MOCVD プロセスによる超電導線材作製技術開発 IBAD-PLD 線材の安定製造技術の開発 IBAD-MgO 線材の安定製造技術開発 2GJ 級 SMES コイル基本システム構成最適化、クエンチ検出・保護手法検討 高信頼性・高耐久性 SMES コイル要素技術開発				
	484	502	506	75	79
2. 「超電導電力ケーブルの研究開発」	大電流・低交流損失ケーブル化技術の開発 高電圧絶縁・低誘電損失ケーブル化技術の開発 電力ケーブルの熱収支に関する評価研究 超電導電力ケーブル対応線材安定製造技術・加工評価技術の開発 66 kV 大電流ケーブルシステム検証 275 kV 高電圧ケーブルシステム検証				
	542	693	585	938	1,154
3. 「超電導変圧器の研究開発」	転位均流モデルの検証 大電流化技術開発 低損失化技術開発 耐短絡電流技術開発 小型膨張タービン・ターボ式圧縮機開発 冷凍機プロセス検討 冷凍機・冷却システム開発 4 巻線モデルの特性検証 限流機能付加変圧器の開発 変圧器対応線材安定製造技術・細線安定加工技術の開発 20MVA 級変圧器の設計 2MVA 級変圧器モデルの試作・検証				
	584	598	657	778	773

	H22	H23	H24	H25	H26
4. 「超電導電力機器用線材の技術開発」					
	1,147	1,137	1,214	622	899
5. 「超電導電力機器の適用技術標準化」					
	18	15	20	19	25
予算額合計（百万円）	2,775	2,944	2,982	2,431	2,931

注1) 各研究項目の予算は NEDO 管理費等を含まない。(税込)

注2) 上記の内、追加予算の投入実績は、表 2.4.3-2 に示した。

注3) 情勢変化による計画変更に関しては、「II.2.1 研究開発の内容」における各テーマのスケジュールに記載した。

追加予算の投入実績を表 2.4.3-2 に示す。

表 2.4.3-2 追加予算の投入実績

年度	件名	金額 (百万円)	目的	成果
H20	SQUID 関係 機械装置導 入	15	細線加工技術開発は、ケーブルや変圧器等機器仕様に適応した低交流損失線材実現に不可欠である。Y 系線材の長尺化、細線化が進むに従って、長尺細線ファイラメント線材の評価が必要となった。大電流化をめざした多層導体構造の内部欠陥評価をねらいとした SQUID センサーの開発を目的とした。	ケーブル等の細線化した Y 系線材の多層導体構造の内部欠陥検出をねらいとしたベースライン長の長い SQUID グラジオメータセンサを開発するとともに、シールド、絶縁材の上から内部導体のマクロ欠陥の検出を基礎実験と磁場解析により明らかにし、機器評価技術の基盤を確立した。
H21	高品質・高出 力レーザー発 信装置一式 導入	169	超電導薄膜を形成するための高品質・高出力タイプエキシマレーザー発振装置を導入し、線材の長尺化・歩留り改善を実施し、線材の製造能力を向上させ、線材安定製造技術の開発を加速し、大電流ケーブル開発用線材の供給及び増量を確実に実現することを目的とした。	出力の安定性及び現有装置の 1.5 倍（200W→300W）の高エネルギー化により、超電導線材のさらなる臨界電流特性向上、歩留り向上、成膜速度の高速化を図り、H22 年度には総長 4km レベルを目安として大電流ケーブル用に線材を提供した。
H22	LMO 中間層 作成装置導 入他	210	MOCVD 線材の磁場中特性向上のための中間層の成膜条件の適正化や高強度・高 J_c 線材開発における薄肉基板に適応した付加中間層の導入も含めた成膜条件の適正化のため、LMO 中間層作成装置を導入による開発促進、及び超電導変圧器の過電流通電時の S-N 転移における巻線の絶縁特性について定量かつ可視データを取得し、変圧器巻線の電気絶縁設計を可能とすることを目的とした。	低コスト化が見込めるスパッタ法での中間層形成が可能となり、MOCVD 線材による機器用線材開発の将来コスト低減が加速された。また、超電導変圧器の限流機能の検証を 1 年程度前倒しできるため限流機能付加変圧器開発が加速された

H23	連続誘導 I_c 測定装置導入 他	56	震災等の影響に伴う基板提供遅延及び夏季節電対策の影響による線材開発の遅延を抑制するため、長尺線材の連続誘導 I_c 測定装置をさらに1台導入して検査評価能力の向上を計り超電導電力ケーブル対応線材開発の遅延を抑制することを目的とした。	震災及び夏季節電対策の影響による超電導電力ケーブル対応線材開発の遅延を解消出来た。
H24	高 I_c 、 IBAD-PLD 線材による 5 kA 級 Y 系高 温超電導ケ ーブルの開 発 機器用線材 基準データ 取得のため の安定製造 技術確立 他	517	超電導ケーブルにおける交流損失低減に関し、臨界電流 I_c が高い線材を用いて導体交流損失を低減することが必要とされた。そのため、 $I_c = 500 \text{ A/cm}$ 級の高 I_c 線材を適用した超電導ケーブルを作製し、交流損失の目標値となっている 2 W/m をさらに低減が可能とすべく、低交流損失ケーブルの交流損失到達度を検証する。また、Y系超電導線材を実用化するために重要な超電導線材の安定製造の確立をめざし、これまで実施してきた線材作製技術を統合し、長尺線材の試作を行うことを目的とした。	$I_c = 500 \text{ A/cm}$ 級線材を用いた超電導ケーブルを試作し、交流損失の目標値となっている 2 W/m のさらなる低減が可能となる低交流損失ケーブル開発技術を検証した。 また、長尺線材の製造量を増やすことで、機器設計に資する線材特性基準データ取得のための安定製造技術の確立を図った。

3. 情勢変化への対応

3.1 国内における研究開発動向

我が国における超電導技術の研究開発は本「イットリウム系超電導電力機器技術開発」プロジェクト以外では、経済産業省からの NEDO 事業としての Bi 系超電導線材を使った「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」及び「希少金属代替材料開発プロジェクト」が挙げられる。また、文部科学省からの科学技術振興機構(JST)の“産学イノベーション加速事業；戦略的イノベーション創出推進（略称；S-イノベ）”のテーマである「超伝導システムによる先進エネルギー・エレクトロニクス産業の創出」プロジェクトも進行している。さらに内閣府からの日本学術振興会(JSPS)の「世界最先端研究開発支援プログラム」30 テーマの中に選ばれた「新超電導および関連機能物質の探索と産業用超電導線材の応用」の研究開発も進められている。

Bi 系超電導線材を使った「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」（平成 19～25 年度）では、高温超電導ケーブルや冷却技術等を統合する高温超電導ケーブルシステムを構築して、高温超電導ケーブル単体ではなく、線路建設、運転、保守を含めたトータルシステムの信頼性を実証するために、実系統に連系した実証試験を実施しており、高温超電導ケーブルのトータルシステムとしての総合的な信頼性を実証するとともに、革新的な高効率送電技術の開発・検証を行うことを目的としている。具体的には、将来の送電システムを想定した、66 kV、200 MVA 級の Bi 系超電導線材を使った高温超電導ケーブルシステムの開発を行っている。そのために、高温超電導ケーブルの重要な要素（ケーブル、中間接続、冷却システム等）に関して、モデルシステムにて実系統に適用しうる所定の性能・機能を有することを検証し、その後、中間接続部を有する三心一括型高温超電導ケーブルを冷却装置や保護装置等の設備とともに 66 kV 実系統に接続し、長期連系試験を行っている。また、実証試験を通じて、運転管理や評価・計測技術等の超電導送電システムの国際規格化を進めるために、標準化項目を整理して必要なデータ収集を行い、適用標準化の検討を行っている。なお、本「イットリウム系超電導電力機器技術開発」プロジェクトでは、効率的に研究開発を進める上で、特にイットリウム（Y）系超電導ケーブル開発及び国際標準化等で密接な連携をとって、NEDO 省エネルギー技術開発部が主催の「超電導技術委員会」等で成果・計画等の情報交換を実施した。

「希少金属代替材料開発プロジェクト」（平成 21～22 年度）においては、“超軽量高性能モータ等向け Y 系複合材料の開発”の研究項目の中で、Y 系超電導線材の超長尺化技術開発が進められた。このプロジェクトでは、Y 系複合材料

(Y系超電導線材)を用いた超軽量高性能モータ等実現するために必要な超長尺Y系超電導線材製造プロセスの安定化・均一化技術開発、希少金属である希土類元素の使用量を低減させるために、原料高収率プロセスの開発、モータに対する適正構造化のためのシミュレータの開発ならびに鉄心フリーの超軽量高性能モータ開発の基軸となる異形コイル化技術の開発を実施し、概念設計検討・要素技術開発に活用した。具体的には、IBAD/PLD、IBAD/TFA-MOD法により300 A/cm-w (@77 K, s.f.)の特性を有し、1 kmを超える超長尺Y系超電導線材の作製を見通す技術開発を実施した。なお、本「イットリウム系超電導電力機器技術開発」プロジェクトにおいては、効率的に研究開発を進める上で、特に高性能化(高 I_c 、 I_c - B 特性等)、低交流損失化、高機械強度、低コスト・高歩留り化を目標とした超電導電力機器用線材の技術開発では密接な連携をとり、実用化に資する超長尺Y系超電導線材の作製技術開発に繋がるべく、前述のNEDO省エネルギー技術開発部が主催の「超電導技術委員会」等で成果・計画等の情報交換を実施した。

S-イノベのテーマである「超伝導システムによる先進エネルギー・エレクトロニクス産業の創出」プロジェクトでは、高温超電導材料とその応用の推進を大学等の基礎研究と企業の研究開発を並行させる産学連携による研究開発推進体制を構築し、合計で最長10年を3つのステージ(応用基礎研究、要素技術の研究開発、アプリケーションの研究開発)に分け、研究開発が進められている。アプリケーションとしては、エネルギー・環境、産業・輸送、医療・バイオ、センシング、情報・通信の各分野が含まれて公募され、(1)高温超伝導SQUIDを用いた先端バイオセンシング技術開発、(2)高温超伝導を用いた高機能・高効率小型加速器システム、(3)高温超伝導材料を利用した次世代NMR技術開発、(4)大出力超伝導回転機に向けたキーハードの開発、(5)次世代鉄道システムを創る超伝導技術イノベーションの5つの研究開発が採択された。その中で船舶用回転機、鉄道用直流き電システム、医療用加速器、次世代NMRの4テーマが高温超電導線材を用いたアプリケーションである。なお、交流応用が主体の超電導電力機器開発をめざしている本「イットリウム系超電導電力機器技術開発」プロジェクトとは、応用形態が直流応用で課題等が異なるものの、将来のY系超電導線材の実用化・事業化には重要な分野であり、前述のプロジェクト内の各種委員会に外部有識者委員として参画頂き、情報交換等を実施し、効果的に開発を進めた。

「世界最先端研究開発支援プログラム」30テーマの中に選ばれた「新超電導および関連機能物質の探索と産業用超電導線材の応用」(平成21~25年度)の研究開発は、鉄の層状化合物(La-Fe-As-O_{1-x}-F_x)で $T_c=26$ Kを発見した東京工業大学の細野教授を中心研究者として始められたプロジェクトであり、鉄系

超電導物質を中心として新物質探索を行うとともに、触媒能や熱電能等の関連機能の探索を行っている。また、鉄系等の新材料を対象に、産業応用を目的とした高性能な長尺線材作製技術を確立し、新物質と線材作製技術を含めた超電導産業機器応用技術で世界をリードする研究を推進している。特性の優れた新物質が見出されれば、現状の鉄系物質の線材化の検討を、新物質へと対象を切り替える可能性も残されている。本「イットリウム系超電導電力機器技術開発」プロジェクトとは対象材料が大きく異なるものの、新物質の超電導特性、二次元性等の評価を、本「イットリウム系超電導電力機器技術開発」プロジェクトの代表受託者である ISTEK が担当する体制であり、この連携による成果を通じて、Y 系超電導材料の欠点である二次元性の解消にヒントとなる理論・実験結果等の情報を得つつ、Y 系超電導線材の性能向上の研究開発を効率的に進めた。

本「イットリウム系超電導電力機器技術開発」プロジェクトで開発を進めている各電力機器（SMES、ケーブル、変圧器）に関しての国内の研究開発動向は以下の通りである。

国内では 80 年代後半から 90 年代にかけて電力会社（東北電力、東京電力、中部電力、関西電力、九州電力、電源開発）、大学等で、1 MJ 級の SMES の試作・模擬送電線に接続しての系統導入効果の検証をはじめとする種々の研究開発が開始された。

国内における超電導ケーブル開発については、前述の通り住友電工・東京電力・前川製作所により、240 m 長の Bi 系超電導ケーブル（66 kV-200 MVA 級）を東京電力管内にある旭変電所構内に布設した「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」が 2008 年より行われており、2012 年 10 月より系統への接続が開始された。なお、その他の国内における主なケーブル開発プロジェクトについて以下に記す。

東京電力と住友電工は平成 13 年 6 月より電力中央研究所で 100 m 長、66 kV/1 kA の三相一括 Bi 系超電導ケーブルシステムを試作し、実用に近い状態で課電・通電を開始した。約 1 年間に渡り検証試験を行い、システムの長期信頼性を確認するとともに、撤去時の試験においても劣化の生じていないことを確認した。

Super-Ace プロジェクトでは古河電工、東京電力、中部電力、関西電力により当時世界最長であった 500 m 長 単心/単相 Bi 系超電導ケーブルの開発が行われ、平成 16 年から 17 年まで電力中央研究所 横須賀研究所にて実証試験が実施された。ケーブルのフィールド試験についてすべての予定した試験を完了し、将来の高温超電導ケーブルの実用化に向けた基本的な技術の確立に成功した。

超電導応用基盤プロジェクトでは ISTECC、中部電力、古河電工、住友電工により 20 m 長の三心一括 Y 系超電導ケーブル (66 kV/1 kA) による交流損失低減化技術等の要素技術開発が平成 18 年から 19 年まで行われ、本「トリウム系超電導電力機器技術開発」プロジェクトへのステップとしての成果を挙げた。

中部大学では中部大学、ナノオプトニクス・エナジー、住友電気工業、JFE スチール、アイシン精機、昭和電線ケーブルシステム、フェローテック、ジェック東理社、クリハラントにより開発された CASER-2 により Bi 系超電導ケーブル(10.5 kV/2 kA)の直流送電実験が平成 22 年に実施され、世界で初めて 200 m の送電に成功した。

戦略的イノベーション創出推進プログラムでは鉄道総研が主体となり、鉄道き電線用の直流超電導ケーブルの開発を進めている。これまでに Bi 系超電導線材を使用した 2 m 級のモデルケーブル(1.5 kV/1.5 kA)を評価しており、今後 30 m 級の超電導ケーブル(1.5 kV/5 kA)を作製し、電車への送電実験を 2013 年 4 月より開始する。

国内における超電導変圧器の開発については、九州大学グループが 1993 年に Bi 系超電導線材を使用して単相 500 kVA (6.6 kV/3.3 kV, 77 K) を試作し、その後、単相 1 MVA (22 kV/6.9 kV, 77 K) を開発した後に、約 200 時間連続の系統連系試験を実施した。

また、旧通商産業省プロジェクト「交流超電導電力機器基盤技術開発」(2000 年度～2004 年度: Super-ACE) では、①66～77 kV 級の高電圧化技術、②1 kA 級の通電のための低損失・大電流化技術、③サブクール液体窒素 (66 K) による冷却技術に関する実証試験を行った。2003 年には Bi 系超電導線材による単相 2 MVA (66 kV/6.9 kV, 66 K) を開発し、JEC 2200 「変圧器」に準拠した耐電圧試験等の工場試験を実施した。経済産業省プロジェクト「超電導応用基盤技術開発」のうち「超電導変圧器要素技術開発」(2006 年度～2007 年度) では、Y 系超電導線材を使用して、①多層コイルの損失低減、②66 kV/6.9 kV 変圧器の一次二次間の交流耐電圧 140 kV、雷インパルス耐電圧 350 kV の絶縁、③20 MVA 変圧器 2 次 (6.9 kV) の 1 kA 級多層並列巻線の要素技術開発を行った。2006 年には、10 mm 幅 Y 系超電導線材を 3 分割した 30 m 級モデルコイルによって、損失の 1/3 低減を実証した。

さらに鉄道総研では、車両搭載用変圧器として 2004 年に Bi 系超電導線材による単相 3.5 MVA (25 kV/1.2 kV/440 V, 66 K) を試作し、JIS に準拠した通電・耐電圧試験を実施した。

名古屋大学では、2012 年に超電導限流変圧器の電力システムへの導入効果の実証を目的に一次に Bi 系超電導線材を二次に Y 系超電導線材を用いた単相

0.67 MVA (12.7 kV/3.81 kV, 77 K) の超電導限流変圧器を設計・製作し、各種の機能検証試験を通じて有効性を検証した。

3.2 海外における研究開発動向

米国では、民生用 Y 系超電導線材及びこれを使った超電導電力機器の開発は、主としてエネルギー省(DOE)の補助を受けて実施されている。これまで、Bi 系超電導線材を使ったケーブル等、いくつかの電力機器実証プログラムが実施されてきたところであるが、エネルギー省は 2007 年に補助総額 5,180 万ドルの超電導電力機器プロジェクト(SPI: Superconducting Power Equipment Project)を発表した。以来、同プロジェクトの下、3 つの超電導限流器プログラムと 2 つの超電導ケーブルプログラムが実施された。また、2009 年発足したオバマ政権はスマートグリッド計画を精力的に推進しており、2009 年 11 月、エネルギー省はスマートグリッド関連技術開発の一環として限流機能を持つ超電導変圧器開発プログラム(事業総額 2,300 万ドル)を推進するとの発表を行った。また、2012 年度から、ARPA-E(Advanced Research Project Agency-Energy)のプロジェクトの中で、Y 系超電導線材を用いた 3.4 MJ @ 4.2 K & 30 T の SMES の開発が 3 年計画で開始したと発表があった。この他、国土安全保障省(Department of Homeland Security)の資金によりニューヨーク市内に超電導ケーブルを設置するというプロジェクト Hydra や民間資金のみで、米国 3 大電力ネットワーク(East, West & Texas)接続地域で Y 系直流超電導ケーブルを使用して結合するという Tres Amigas 計画が進行している。なお、現在米国で進行している各種超電導応用機器開発プログラムでは基本的に Y 系超電導線材が採用される計画である。

米国の民間における実用 Y 系超電導線材の開発・製造については、アメリカンスーパーコンダクター(amsc)社及び SuperPower 社の 2 社が担っている。これら 2 社はすでに Y 系超電導線材の販売を行っているものの、実用化に向けては線材性能向上、製造コスト低減等の課題が残されており、これらに必要な技術をエネルギー省傘下の国立研究所(主として、オークリッジ(Oak Ridge)国研及びロスアラモス(Los Alamos National Lab., LANL)国研)と協力して開発、その成果を線材製造プロセスに反映するという仕組みで課題解決に向けた技術開発を推進している。

欧州における超電導研究開発は、EU が資金を提供するもの、各国が資金を提供するもの、企業が独自で進めるものが混在している。Y 系超電導線材を使った超電導応用電力機器としては、EU の第 6 次フレームワークプログラムの下、総額 515 万ユーロの Y 系超電導電力ケーブルの試作、機能実証プロジェクト(Super 3C)が実施された。また、現在の 7 次フレームワークプログラムの下で

は、総額 464 万ユーロの Y 系超電導限流器実証プロジェクト(ECCOFLOW)が 2010 年 1 月にスタートした。さらに、ジーメンス(Siemens)社、ネクサンス(Nexans)社、Zenergy 社等の欧州メーカーは、上記米国におけるケーブル及び限流器の超電導応用機器開発プログラムにも参画しており、その活動を欧州外にまで拡大している。この他、欧州では超電導発電機・モータ、金属加工用超電導加熱装置の開発・実用化が進められているが、これらの装置には現時点では、Bi 系超電導線材が使用されているものと思われる。

欧州の民間における実用 Y 系超電導線材の開発・製造については、Zenergy 社、Bruker Energy & Supercon Technologies 社、THEVA 社等が担っている。また、Zenergy 社はインクジェットプリンティング方式による Y 系超電導線材低コスト化開発等のためドイツ連邦政府から資金援助を受けている。

上記米欧以外では、中国、韓国、ニュージーランド等で超電導開発が活発化してきている。特に、韓国では 2001 年から政府補助を含め毎年約 1,000 万ドルを投入した 10 年計画の DAPAS プログラムの下、ケーブル、変圧器等の超電導応用機器及び高温超電導線材の開発を推進してきており、Y 系超電導線材については、韓国電気技術研究所(KERI)及び民間企業の SuNAM 社がその開発を担った。また、これと並行して Y 系超電導線材を使った超電導 SMES の開発も進行している。2009 年からは、韓国電力の資金による GENIE プログラムがスタートし、Y 系超電導線材を使った超電導ケーブル及び超電導限流器の開発・実証を行う計画が進められているところである。

本プロジェクトで開発を進めている各電力機器 (SMES、ケーブル、変圧器) に関する海外の研究開発動向は以下の通りである。

超電導電力貯蔵システム (SMES) の研究開発は 1970 年代初頭の米国 Wisconsin 大学の揚水発電代替の大規模 SMES (18~36 TJ (5~10 GWh)) の概念設計に端を発し、それ以降、国内外で種々の研究開発が行われてきた。

欧米では、米国企業の 1~3 MJ 級の金属系 SMES が瞬低用等に一部導入された実績があるが、わが国電力系統に適用するには容量、仕様、性能面ではるかに遠い。韓国、中国、欧州等においても SMES の研究開発が実施されてきており、現在の主流は高温超電導材料を用いた開発がなされている。しかしながら、10 MJ 級の金属系 SMES によるコイル技術の確立や酸化物系 SMES コイルの研究水準から見て、わが国が圧倒的にリードしている状況である。しかし、前述したように、平成 22 年度から、ARPA-E(Advanced Research Project Agency-Energy)のプロジェクトの中で、Y 系超電導線材を用いた 3.4 MJ @4.2 K & 30 T の超高磁場 (UHF-) SMES の開発が 3 年計画で開始されており、ABB 社が主体で SuperPower 社、ブルックヘブン(Brookhaven)国研が開発を推進している。

韓国では国家プロジェクトにおいて 2.5 MJ 級の SMES を開発中である。Y 系超電導線材のみでなく、Bi 系超電導線材を用いた SMES コイルの設計が行われており、比較評価が行われた。2.5 MJ 級 SMES コイルを製作する予定であるが、性能、プロジェクトの予算等を考慮してどちらの線材による SMES が優位かを検討し、Y 系線材でのコイル製作が進められている。なお、日本が設計した結果と同様に、多分割であるトロイド形状が検討されている。SMES コイルの伝導冷却システムの開発においては、伝導冷却温度は 20 K が想定されているが、評価の結果、低い熱伝導によりコイルにおいて温度差が大きくなり、冷却効果が十分でなく、冷却構造を再検討中である。

ポーランドにおいて、各種コイル形状による SMES 設計検討が行われ、トロイド形状の計算結果についての比較評価結果が報告された。設計・製作予定と思われる小型コイルにおいて最適化されていたが、実用化規模のコイル製作に至るまでの開発段階ではなく、基礎評価レベルではないかと思われる。

フランスにおいても電磁推進用として SMES の開発が行われており、これまでの Bi 系超電導線材を使用して 0.8 MJ 級のコイル製作評価が実施されたが、今後 Y 系超電導線材を用いた SMES 開発が実施される予定と思われる。

超電導ケーブル開発に関して、米国では系統の脆弱性に起因する停電や事故の問題が深刻であり、その対策として超電導ケーブルの開発が期待され、進められている。現在、大型の超電導ケーブルプロジェクトは以下の通りである。

Ohio 州では Southwire と NKT の合弁会社 Ultera とオークリッジ国立研究所により American Electric Power (AEP) 社の変電所内に設置された 13.2 kV/3 kA/200 m の超電導ケーブル実証試験を行っている。特徴として、三相の導体がひとつのフォーマ上に層状に巻きつけられ三相同軸型ケーブルであり、AEP 社の変電所構内に布設し、2006 年 9 月から実系統へ接続しての運転を開始。2012 年末にプロジェクトは終了し、Southwire は必要なデータを全て取得したと報告。

ニューヨーク州アルバニーでは、SuperPower 社、住友電工、BCO のグループによる 34.5 kV/800 A/350 m の超電導ケーブルの実証試験が 2006 年 2 月に布設がスタートして、端末組立等が行われ、2006 年 6 月に実系統に接続された。このケーブルは、住友電工製の Bi 系超電導線材を用いた三心一括ケーブルであり、中間接続部を有している。実系統へ接続して 2006 年 7 月～2007 年 3 月まで運転。その後、第 2 期として、上記のうち 30 m 部分を SuperPower 社製の Y 系超電導線材を使用し、住友電工が製作したケーブルに置き換え、再運転を 2008 年 1 月～2008 年 4 月まで実施。それぞれ、問題なく運転を実施することができ、プロジェクトは終了した。

Long Island Power Authority (LIPA) 社の系統で amsc 社/NEXANS 社/Air

Liquid 社により amsc 社製の単芯型超電導ケーブル×三相 (Bi 系超電導線材定格 138 kV/2.4 kA/600 m) を製造し、Long Island の変電所と発電所間を結ぶ線路に布設し、2008 年 4 月から実系統へ接続しての運転を開始。その後、第 2 期として、三相のうち一相のみを Y 系超電導線材を用いた超電導ケーブルに変更を実施。LIPA 2 は、上記 LIPA 1 の Bi 系ケーブルを Y 系ケーブルに置き換える計画で、限流器と組み合わせたシステムが開発されており、2012 年 10 月末に布設予定だったがハリケーンに見舞われたため、2013 年に布設が延期された。

HYDRA プロジェクトは、ニューヨークの Consolidated Edison 社の 2 つの変電所をつなぐ回路にケーブル自体に限流器機能を付加した三相同軸型ケーブルを開発している。13.8 kV/4000 A の容量の送電ケーブルで、最大で 40 kA の短絡電流に対して限流機能を有するケーブルである。このプロジェクトは、DHS (Department of Homeland Security) がサポートし、amsc、ConEdison、Southwire 社が参画している。計画当初は 2010 年に運用開始の予定であったが、経済の低迷により 2014 年末に延期され、ケーブル長も 170 m に変更された。

New Orleans プロジェクトは Louisiana 州に 13.8 kV/2.0 kA/1700 m の三相同軸型超電導ケーブルを建設し、実系統での運転を行う。当該地区の増容量を行うのに、従来ケーブルでは変電所を増設する必要があるが、低電圧・大容量の超電導ケーブルで電力を導入すれば、変電所を省略することができることから、2011 年の運転開始をめざし 2008 年にプロジェクトがスタートした。しかし、当該地区の需要増加が鈍化し、増容量が不要となったため、2010 年 5 月にケーブルの設置が取り消され、2009～2010 年のプロジェクトは延期された。

韓国においても超電導ケーブルの開発が進められている。KERI、LS Cable、KIMM らが、協同で開発に取り組んだ DAPAS プロジェクトは、2001 年にスタートし、2003 年には 22.9 kV/1260 A/30 m 単心ケーブルが開発された。2004 年には 30 m 単心ケーブルが開発・評価されたのち、2004 年に 30 m 三心ケーブルが開発され、KEPCO のコチャン試験所に設置され、各種試験が実施された。2007 年には、22.9 kV/1260 A/100 m のケーブルが開発され、さらに、154 kV、1 GMVA 級超電導ケーブルの開発を行い、上述のコチャン試験所に電力を供給する送電系統に布設して、2012 年に試験が完了した。

KEPCO 管内では、ソウル近郊の変電所構内に 22.9 kV/1260 A/500 m の三心一括型超電導ケーブルを建設し、実系統での運転を行う計画している。参加者は、LS ケーブル、KEPCO、他である。2008 年度に GENI プロジェクトとしてスタートし、2011 年に運転が開始された。また、KEPCO は Smart Grid の検討を始め、済州島を Smart Grid test village に選定した。その一環で、済州島にある Hanlim 変電所に 154 kV/2.25 kA/1000m 交流超電導ケーブル及び 80 kV/3.125 kA/500 m 長の直流超電導ケーブルを実系統に導入することを計画し

ている。

中国では雲南地区の変電所構内に、35 kV/2 kA/33.5 m の超電導ケーブルが布設され、2004 年 3 月に運転が始まっている。プロジェクトの主管、ケーブルの設計は、Innopower が行った。その他に雲南電力会社、プラズマ物理研究所、での協力を実施、Innova Superconductor Technology 社、Tsinghua 大学、China Electronics Technology Corporation、上海ケーブル、NEXANS が参加している。ケーブル構造は、単心×三相、常温絶縁タイプ、直径 112 mm である。線材は Bi 系超電導線材を用い、4 層構造である。超電導ケーブルは、実際のグリッドに接続され、10 万人のユーザに電力を供給している。

蘭州地区では、6.6 kV/600 A、75 m の超電導ケーブルが布設され運転されている。このプロジェクトには、電気技術研究所、中国科学院、物理化学技術研究所、Changtong 電力ケーブル会社が参加しており、事前のテストで電圧 10.5 kV/1600 A の運転を確認した。実際に運転を実施したのち、プロジェクトは終了した。

北京近郊では CEPRI が Y 系超電導線材を用いた 110 kV/3 kA/ 1 km 長の超電導ケーブルを開発し、実証試験を行う計画がある。

欧州の状況については、EU 資金援助を受け Nexans、Bruker HTS 等が参加した Super-3C にて Y 系超電導線材を使用した世界最初のケーブル開発が行われた。2004 年に開発が始まり、2008 年に 30 m 単相の超電導ケーブルシステムを開発し、17 MW 送電を達成した。

オランダ・アムステルダム市内では 50 kV/3000 A/250 MVA/ 6 km 長の限流機能を有した三相同軸型超電導ケーブルを適用する計画を検討中。現在、3 回線の POF ケーブルが使われているが、そのうちの 1 回線を超電導ケーブルに増容量して置き換える。

ドイツのエッセン市では、2 変電所間 1000 m を 10 kV-40MVA の Bi 系超電導ケーブルでつなぐ Ampacity project が実施されており、30m 級のプロトタイプケーブルの評価が 2012 年末に終了し、2013 年にケーブルを布設する計画である。

ロシアのモスクワでは VNIIEP が中心となり、Bi 系超電導線材を用いた 20 kV/2.0 kA/ 30 m の超電導ケーブルを開発・評価した。この成果を基に、ENIN がマネジメントを、VNIIEP が Bi 系超電導線材を用いて 20 kV/50 MVA/ 200 m の単相 3 本の超電導ケーブルを建設・検証テスト等を実施し、モスクワ電力所管の変電所内への導入を検討している。また、サンクトペテルズブルグでは長さ 2500 m の Bi 系超電導線材を用いた 20 kV/2.5 kA の直流超電導ケーブルの布設を計画している。

変圧器の研究開発に関して、米国では、オークリッジ国立研究所、Waukesha

社や SuperPower 社等のチームは高温超電導変圧器 30 MVA 級が実用化のステップと捉え、3 相 5/10 MVA(24.9 kV/4.2 kV)の開発を試みたが、絶縁試験での不具合の発生及び交流損失低減の課題が解決される見込みが薄いこと等から、開発は一時中断していた。2011 年より、3 相 28 MVA(70.5 kV/12.47 kV)の超電導変圧器の研究開発がスタートした。このプロジェクトはカリフォルニア州 Irvine の SCE 社の変電所に、限流器と組み合わせたシステムとなる Y 系超電導線材を用いた超電導変圧器を設置する Smart Grid 実証プロジェクトである。

欧州では ABB 社が 3 相 630 kVA (18.2 kV/420 V) の高温超電導変圧器を開発し、これを 1997 年から 1 年間の実系統連系試験で、その可能性を実証した。また、2012 年から 1 MVA 限流機能付超電導変圧器を開発し、常電導転移時の特性や線材、冷却、交流損失等を検証する予定である。

韓国では、超電導電力機器の商業化を目指し、2001 年から DAPAS (Dream of Advanced Power system by Applied Superconductivity Technologies) プログラムをスタートさせている。この中で、高温超電導変圧器は単相 1 MVA 級 (22.9 kV/6.6 kV) が開発された。

中国では、TBEA (Tebian Electric Apparatus Company) が 3 相 630 kVA 級 (10.5 kV/0.4 kV) の Bi 系超電導線材を使用した変圧器を開発し、1 ヶ月間の実負荷試験を実施した。

ニュージーランドでは、IRL や HTS110 社が YBCO Roebel 導体を使用した 3 相 1 MVA(11 kV/0.4 kV)限流機能付超電導変圧器を開発中である。

ロシアでは、ROSATOM 社を中心に超電導産業を開拓するため、2011 年から 2015 年にかけて限流器、エネルギー貯蔵、モータ、発電機の超電導機器を開発する一として、3 相 10 MVA(10 kV/0.4 kV)超電導変圧器を開発中である。

Y 系超電導線材開発に関しては、日米欧三極で熾烈な開発競争が進められている。米国では、SuperPower 社、amsc 社を中心として、米国ロスアラモス研究所、米国オークリッジ研究所等の国立研究所が米国エネルギー省(DOE)のプロジェクトを中心に共同で開発を実施している。以下に、それぞれのこれまでの成果をまとめる。SuperPower 社は、ハステロイTM 基板上に IBAD-MgO を主とした複数の中間層を配し、その上に MOCVD 法により超電導層を形成する手法で長尺線材の開発を行ってきた。同社は、日本の ISTEK 及び(株)フジクラと臨界電流 \times 長さ($I_c \cdot L$)の積で常に最高値を競っているトップ企業であるといえる。これまでの長尺線材としては、2009 年 8 月に 1065 m で 282 A/cm-w@77 K, s.f. の特性を有する線材が当時の世界最高の $I_c \cdot L$ 値 (300 kAm 強)を示している。最近では、磁場中での特性向上に力を入れており、Y の一部を Gd で置換した系 (YGdBCO 系)に BaZrO₃(BZO)を人工ピン止め点として導入するプロセス開発を行っている。導入した BZO の形態としては PLD 法に

対するものと類似して超電導層の c 軸に沿ってロッド状に成長するために、磁場が c 軸に平行に印加された条件で強い効果を表している。これまでのところ、短尺では 15%以上の高い Zr ドープ濃度に対するプロセス適正化を行い、Modified Process なる方法で特性向上を実現し、代表値として $1353 \text{ A/cm-w}@50 \text{ K}, 3 \text{ T}$ という非常に高い成果を得ている、また長尺線材としては、50 m 長線材において $14 \text{ A/cm-w} (@77 \text{ K}, 3 \text{ T})$ を得ている。交流損失低減に対する技術開発としては、本プロジェクトと同様に、超電導線材の超電導層のみを細線化するスクライビング法の開発他、複数の加工技術の検討を行っており、その中で、機械的にスクライブ加工した後に選択的に Cu を電気めっきすることでフィラメント上だけに安定化 Cu を配した構造を実現し、短尺ではあるものの 12mm 幅線材を 12 分割し、損失低減を確認している。ただし、長尺の報告はなされていない。薄肉高強度線材の開発に関しては、 $50 \mu\text{m}$ 厚の金属基板上での成膜を行なった実績があり、超電導特性を維持する耐力として低温で 800 MPa が報告されている。その他のトピックスとしては、低コスト化を目的として金属基板直上のベッド層を MOD 法で成膜する手法に関して米国サンディア (Sandia) 研究所から米国ロスアラモス研究所を通して技術移管を受け、長尺化を図っている。

amsc 社は、結晶粒配向金属基板 (RABiTS™) 上に複数の中間層を配して、その上に TFA-MOD 法により超電導層を形成する手法で長尺線材の開発を行ってきた。同社は、開発当初よりコスト低減を強く意識し、当時 IBAD 中間層付き基板に比して安価であった結晶粒配向金属基板を選択して開発を進めている。一時期、長尺化の成果が滞っていたが、2009 年より成果が挙がり始め、現在では、 $466 \text{ A/cm-w}@77 \text{ K}, \text{s.f.}$ を有する 540 m 長の線材の作製に成功している。amsc 社は、幅広金属基板を用いた成膜をしていることからマルチターン法は適用できず、一回塗布膜厚の向上が必要となっている。最近では、原料及び成膜条件の適正化により一回塗布膜厚の向上に力を入れており、 $1.4 \mu\text{m}$ の膜を一回塗布で実現し、高 I_c を得ている。また、結晶粒配向金属基板で課題となる磁性に関しても、複合材料化やタングステン(W)濃度制御等により低磁性化を図っている。一方で、磁場中の特性向上に関しては、以前より Y の一部を Dy に置換し、総 RE 量を増やした系で特性向上を図っている。これまでのところ短尺の結果として I_c は $10 \text{ A/cm-w}@77 \text{ K}, 3 \text{ T}$ に留まっており、長尺線材の報告はない。

米国の線材開発における最新のトピックスとしては、DOE プロジェクトである ALPA-E と称するプロジェクトで、風力発電用の Y 系超電導線材の開発が主たる目的で、ブルックヘブン国立研究所と amsc 社及びヒューストン大学と SuperPower 社の二つのグループが取り組んでいる。この中では、理論限界値の

対破壊電流の10%しか利用できていない現状の第二世代Y系超電導線材を50%まで向上させる線材開発目標が設定されている。この目標は、77 K、自己磁場で数千 A/cm-w となる非常に高いレベルであり、第三世代線材と呼んでいる。

また、欧州では、独国の THEVA 社が共蒸着法による線材作製を行なっているが、長尺実績があるのは唯一、独国の EHTS 社だけである。ここは、SUS 金属基板上に ABAD と呼ばれる IBAD に類似した手法で結晶粒配向中間層を形成させ、高速 PLD(HR-PLD)法により超電導層を形成する手法で長尺線材の開発を行っている。本法の特徴は、ホットウォール型のチャンバ内で PLD 成膜することにより高速で高結晶性の膜を形成することである。近年、大型装置の導入を行なっている報告はあるが、これを使用した成果は未だなく、数年前の 100 m 長で I_c で 253 A/cm-w@77 K, s.f. の値が最高値である。欧州における最近のトピックスとしては、新たな材料開発プロジェクトの開始である。EUROTAPPE と称するもので 2012 年から 5 年間のプロジェクトで欧州の多くの研究機関が参画し、500 m 長 400 A/cm-w@77 K, s.f. で 100 €/kAm との線材仕様を目標値として開発が始められた。

最近、伸長著しいのは韓国で、数年前よりから急激に進展している。従来は、研究所レベル(KERI)で EDDC (Evaporation using Drum in Dual Chamber) 法と呼ばれる共蒸着法の一つで SmBCO 超電導膜を用いた線材開発が行われてきたが、この原理を適用した Reel to Reel 式成膜装置を SuNAM 社内で開発し、本格的に長尺線材の開発が進んでおり、最新データとしては、2012 年 1 月に 1000 m 長線材において I_c で 422 A/cm-w@77 K, s.f. を高速で製造しており、 $I_c \cdot L$ 値で現在ではフジクラの成果 (467 kAm = 572A · 816 m) に次ぐ世界 2 位の値である。

上述の通り、海外では性能向上と高速製造、低コスト化を各社・企業単位で開発している状況である。これに対し、本プロジェクトにおいては ISTEK を中心として大学等を含めた研究共同体で集中して線材開発を行い、その成果を線材メーカーに技術移管する体制を取った。開発の手法も、単独の機器を対象とせず、複数の機器を対象として、それぞれの機器に必要な共通要素技術を抽出し、高い効率で機器対応線材の開発を行った。具体的には、要素技術として、磁場中特性向上技術、交流損失低減技術、高強度・高 J_e 化技術等とともに全ての機器共通の要素技術として、低コスト化技術や経時経年変化対応技術等の技術の開発を行った。

また、海外においては特にケーブル応用の展開が顕著であることから、本プロジェクトでは、既存の計画に加えて高性能 IBAD-PLD 線材を用いた低交流損失ケーブル開発を最終年度に実施して国際競争力の堅持に対応した。この例に代表されるように、ISTEK、大学、線材メーカーによる線材開発と機器開発を同

時に進めている体制の特長を活かして、プロジェクト進行中に線材開発と機器開発が密接に連携し、速やかに成果を反映した。例えば、**275 kV** 高電圧ケーブルへの線材として、性能の向上した低コスト **IBAD-MOD** 線材を適用するとともに、安定したスクライビング技術を超電導変圧器の、ダメージの少ない切断技術を **5 kA** 大電流ケーブルの何れも低損失技術開発へ適用し、優れた成果に繋げている。

各機器及び Y 系線材開発の国内外の比較を、表 3.2-1～3.2-4 に示す。

表 3.2-1 国内外における超電導電力貯蔵システム (SMES) 開発動向

国名	プロジェクト名 (商品名)	設置場所	蓄積 エネルギー	定格出力	コイル寸法 (クライオ)	コイル構造	線材種	期間 (実系統運転)	運転温度	冷却方式	主たる参加企業
米国	マイクロSMES		2.7MJ	1.7MVA		ソレノイド	NbTi		4K	液体He浸漬冷却	AMSC
米国	系統安定化SMES	Tacoma変電所	30MJ	8MW	(3.9(OD)*2.7(H))	ソレノイド	NbTi	1982-1984 (1983/11-1984/3)	4K	液体He浸漬冷却	
米国			3.4MJ				Y系		4K		ABB, SuperPower
フランス			0.8MJ		0.30(ID)*0.81 (OD)*0.22(H)	ダブルパン ケーキ積層	Bi2212	2004-2007	20K	冷凍機伝導冷却	DGA, Grenoble INP, cnrs, Nexans, NEEL, G2E lab
フランス							Y系	2008-2011	-	-	DGA, Grenoble INP, cnrs, Nexans, NEEL, G3E lab
韓国			3MJ	750kVA		ソレノイド	NbTi	1999/7-2003/12	4K	液体He浸漬冷却	KERI, KIMM, HHI
韓国			0.6MJ	450kW			Bi2223	2004-2007	-	-	KERI, KIMM, HHI
韓国			2.5MJ				Bi2223 or Y系		20K	伝導冷却	
中国			1 MJ								
日本	中部電力プロジェクト	名古屋市緑区	1MJ	1MW	0.53(ID)*0.65 (OD)*0.7(H)	ソレノイド積層	Bi2212	2004-2006	4K	液体He浸漬冷却	東芝
日本	中部電力プロジェクト	三重県亀山市	7MJ	5MW	0.53(ID)*0.65 (OD)*0.7(H)	マルチポール ソレノイド配置	NbTi	(2003/7~2006/5)	4K	液体He浸漬冷却	東芝
日本	中部電力プロジェクト	三重県亀山市	20MJ	10MW	0.69(ID)*0.94 (OD)*1.53(H)	マルチポール ソレノイド配置	NbTi	(2005/10~2007/8)	4K	液体He浸漬冷却	東芝
日本	中部電力プロジェクト	三重県亀山市	20MJ	10MW	0.69(ID)*0.94 (OD)*1.53(H)	マルチポール ソレノイド配置	NbTi	(2007/7~)	4K	液体He浸漬冷却	東芝
日本	九州電力プロジェクト	福岡市西区	3.6MJ	1MW	0.75(W)*1.0 (H)	6コイルのトロ イダル配置	NbTi	1994-2001 (1998/3-2001)	4K	液体He浸漬冷却	東芝、日立、富士電機、 神戸製鋼
日本	超電導電力ネットワー ク制御技術開発	栃木県日光市	20MJ	1MW	0.69(ID)*0.94 (OD)*1.53(H)	マルチポール ソレノイド配置	NbTi	2004/6~2008/3 (2007/8~12)	4K	液体He浸漬冷却	三菱電機、アイシン精機、 東芝、住友重機械
日本	イットリウム系超電導 電力機器技術開発	名古屋市港区	2MJ	1MW	最適設計 検討中	シングルパン ケーキコイル 積層配置	Y系	2008/6~2013/3	20~ 40K	ガスヘリウム伝導冷却	東芝、古河電工

表 3.2-2 国内外における超電導電力ケーブル開発動向

国名	プロジェクト名	設置場所	定格電圧	定格電流	長さ	ケーブル構造	線材種	期間	連係	主たる参加企業	資金援助
米国	Albany Project	Albany	34.5 kV	800 A	350 m (Y:30 m)	三心一括	Bi, Bi/Y	2006/7~2008/4	○	SuperPower, 住友電工、BOC、National Grid	DOE NYSERDA
米国	LIPA Project	Long Island	138 kV	2,400 A	600 m	単心×3相	Bi	2008/4~2012	○	AMSC、NEXANS、Air Liquid、LIPA	DOE
米国	LIPA-2 Project	Long Island	138 kV	2,400 A	<600 m	単心×3相	Y	2013~(運転予定)	○	AMSC、NEXANS、Air Liquid、LIPA	DOE
米国	Columbus Project	Ohio	13.2 kV	3,000 A	200 m	三相同軸	Bi	2006/9~2012	○	Southwire、AMSC、Plaxair、AEP	DOE
米国	HYDRA Project	New York	13.8 kV	4,000 A	170 m	三相同軸	Y	2008~2014(運転予定)	○	Southwire、AMSC、ConEdison	DHS
米国	New Orleans	New Orleans	13.8 kV	2,000 A	1760 m	三相同軸	Y	中止	○	AMSC、Southwire、NKT、ORNL	DOE
米国	Southwire	Gerogia carrollton	12.5 kV	1,250 A	30 m	単心×3相	Bi	2000~	○	Southwire、JGC 他	DOE
米国	Detroit Edison	Detroit	24 kV	2,400 A	120 m	単心×3相	Bi	2001/10~終了	×	Pirrelli、EPRI、AMSC	DOE
米国	Tres Amigas	New mexico	DC±200 kV	12,500 A	2 km	バイポーラ	Y	2014~	○	AMSC、LS cable、NEXANS 他	Tres Amigas 三井物産 他
ドイツ	Ampacity Project	Essen	10 kV	1,000 A	1,000 m	三相同軸	Bi	2013~(運転予定)	○	RWE、Nexans、Nexans superconductors、KIT	-
オランダ	Neuron Project	Amsterdam	50 kV	3,000 A	6,000 m	三相同軸	Y	2012運転目標	○	Ultera、Plaxair	TBD
EU	Super-3C	スペイン	10 kV	1,000 A	30 m	単心	Y	2009	×	NEXANS、BRUKER	EU
デンマーク	コペンハーゲン	コペンハーゲン	36 kV	2,000 A	30 m	単心×3相	Bi	2001~2003	○	NKT、DEFU、デンマーク工科大学	デンマークエネルギー省
ロシア	Russian Project	Moscow	20 kV	1,500 A	200 m	単心×3相	Bi	2012(布設予定)	○	VNIIEP、RAO USE、ENIN、住友電工	-
ロシア	St. Petersburg	サンクトペテルズブルグ	DC 20 kV	2,500 A	2,500 m	-	Bi	2014(布設予定)	○	FGC UES、Irkutskkable、Kurchatov in stitute	-
韓国	KEPCO 100m	Goachnag KEPRI	22.9 kV	1,250 A	100 m	三心一括	Bi	2006~	○	住友電工、韓国電力	韓国政府
韓国	DAPAS Project	Goachnag KEPRI	22.9 kV	1,260 A	100 m	三心一括	Bi	2007~	○	KERI、LS Cable、KIMM	韓国科学技術省
韓国	DAPAS Project	Goachnag KEPRI	154 kV	3,750 A	100 m	単心×3相	Y	2001~2011/3	○	KERI、LS Cable、KIMM	韓国科学技術省
韓国	GENI Project	ソウル	22.9 kV	1,260 A	500 m	三心一括	Y	2009~2012	○	LS Cable、韓国電力、他	韓国政府
韓国	JEJU Project	JEJU島	154 kV DC 80 kV	2,250 A 3,125 A	1,000 m 500 m	三心一括 単心	Y Y	20011/7~2016/6	○ ○	LS Cable、韓国電力、KEPRI、KERI、CNU他	韓国電力
中国	雲南プロジェクト	雲南地区	35 kV	2,000 A	33.5 m	単心×3相	Bi	2003~2005	○	Innopower、雲南電力、プラズマ物理研、IST、Tsinghua大学、上海ケーブル、Nexans他	中国科学科学技術省 北京市 雲南省 YEPG
中国	蘭州プロジェクト	蘭州地区	10.5 kV	1,500 A	75 m	単心×3相	Bi	2003~2005	○	電気技術研、中国科学院、物理化学研、Changtong電力ケーブル	-
中国	IEE-CAS	アルミニウム工場	DC 1.3 kV	10,000 A	360 m	-	Bi	2011/12~(運転予定)	○	中国科学院 他	-
中国	北京プロジェクト	北京市	110 kV	3,000 A	1 km	単心×3相	Y	-	○	国家电网、CEPRI	-
日本	実用性検証プロジェクト	電中研(横須賀)	66 kV	1,000 A	100 m	三心一括	Bi	2001~2002	×	東京電力、住友電工	東京電力 住友電工
日本	Super Ace	電中研(横須賀)	77 kV	1,000 A	500 m	単心	Bi	2004~2005	×	古河電工、東京電力、中部電力、関西電力	NEDO
日本	超電導応用基盤技術研究開発プロジェクト	京都	66 kV	1,000 A	20 m	三心一括	Y	2006~2007	×	ISTEC、中部電力、古河電工、住友電工	NEDO
日本	高温超電導ケーブル実証プロジェクト	神奈川県横浜市旭変電所	66 kV	3,000 A	200~300 m	三心一括	Bi	2007~2013	○	東京電力、住友電工、前川製作所	NEDO
日本	超伝導直流送電実証実験装置(CASER-2)	中部大学	DC±10 kV	2,000 A	200 m	単心 バイポーラ	Bi	2010~	×	中部大学、住友電工、JFEスチール、アイシン精機、昭和電線ケーブルシステム、フェローテック、ジェック東理社、クリハラント	株式会社ナノオプトニクス 研究所
日本	次世代鉄道システムを創る超伝導技術イノベーション	鉄道総合研究所試験場内(国分寺)	DC 1.5 kV	5,000 A	30 m	単心	Bi	2013/4~	×	鉄道総研、NIMS 他	科学技術振興機構 他
日本	イットリウム系超電導電力機器技術開発プロジェクト	住友電工(熊取) 瀋陽古河(中国)	66 kV 275 kV	5,000 A 3,000 A	15 m 30 m	三心一括 単心	Y Y	2008~2012	×	ISTEC、住友電工、京都大学、早稲田大学 ISTEC、古河電工、フジクラ、昭和電線、京都大学、早稲田大学	NEDO NEDO

表 3.2-3 国内外における超電導変圧器開発動向

国名	プロジェクト名	用途	定格電圧	構造	容量*	温度	線材種	開発期間	主たる参加企業	資金援助
日本	九大	電力	6.6/3.3kV	単相	500kVA	77K	Bi-2223	～1996	九州大、富士電機	
日本	福岡県コンソシアム	電力	22/6.9kV	単相	1MVA	77K	Bi-2223	～1998	九州大、富士電機	METI
日本	Super-ACE	電力	66/6.9kV	単相	2MVA	66K	Bi-2223	～2003	九州大、富士電機	METI
日本	鉄道総研	鉄道車両	25/1.2kV	単相	4MVA	66K	Bi-2223	～2005	JR総研、九州大、富士電機	METI
日本	名大	電力	12.7/3.81kV	単相	0.67MVA	77K	Bi-2223 YBCO	～2010	名古屋大	
米国	SPI	電力	13.8/6.9kV	単相	1MVA	25K	Bi-2212	～1998	Waukesha、ORNL、IGC、SCE	DOE
米国	SPI	電力	24.9/4.2kV	3相	5/10MVA	25K	Bi-2223	～2003	Waukesha、ORNL、Superpower、SCE	DOE
米国	SPE	電力	70.5/12.5kV	3相	28MVA	70K	YBCO	2011～2015	Waukesha、ORNL、Superpower、SCE	DOE
欧州	ABB	電力	18.7/0.4kV	3相	630kVA	77K	Bi-2223	～1997	ABB、EDF、SIG他	BEW、PSEL
欧州	Siemens	鉄道車両	5.5/1.1kV	単相	100kVA	77K	Bi-2223	～2001	Siemens他	
欧州	Siemens	鉄道車両	25/1.4kV	単相	1MVA	66K	Bi-2223	～2006	Siemens他	BMBF
欧州	KIT	電力			1MVA		YBCO	～2015	ABB	KIT
韓国	DAPAS	電力	22.9/6.6kV	単相	1MVA	65K	Bi-2223	～2004	KPU、HYU、KSU（大学のみ）	KETEP
中国	TBEA	電力	10.5/0.4kV	3相	630kVA	77K	Bi-2223	～2005	TBEA、CAS	MOST
新西蘭	TRST	電力	11/0.4kV	3相	1MVA	70K	YBCO- Roebel 導体	2010～2013	IRL、HTS-110、WTC、ETEL	TRST
露国	ROSATOM	電力	10/0.4kV	3相	10MVA		YBCO	2011～2015	ROSATOM	

* 下線付き容量は、限流機能付変圧器を示す

表 3.2-4 国内外における Y 系超電導線材開発動向 (*単長 50 m 以上の長尺線材作製実績を有する機関のみを掲載)

開発機関		自己磁場特性 (@77K)					磁場中特性 (@77K, 3T)				
		超電導層 (プロセス) - 配向技術 (プロセス)	長尺線材			短尺試料	超電導層 (プロセス) - 配向技術 (プロセス)	長尺線材		短尺試料	
			Ic, A/cm ² w	L, m	Ic×L, A・m	Ic, A/cm ² w (厚み, μm)		Ic min., A/cm ² w (厚み, μm)	長さ, m	Ic min., A/cm ² w (厚み, μm)	
日本	フジクラ	GdBCO (PLD)・GZO (IBAD)	572	816	466752	1003 (5.6)	GdBCO (PLD)・MgO (IBAD)	50 (3.4)	615	70 (5.6)	
		GdBCO (PLD)・MgO (IBAD)	645	170	109650						
	住友	HoBCO (PLD)・NiW (RABiTS)	205	200	41000	660 (2.5)					
	昭和	YBCO (MOD)・GZO (IBAD)	310	500	155000	450 (2.0)	YGdBCO+BZO (MOD)・MgO (IBAD)	31 (1.5)	50	56 (1.8)	
	中部	YBCO (MOCVD)・GZO (IBAD)	205	198	40590	294 (1.8)	YGdBCO+BZO (MOCVD)・MgO (IBAD)			21 (1.4)	
	ISTEC	YBCO (PLD)・GZO (IBAD)	212.6	245	52087	751 (3.0)	REBCO+BiO (MOD)・MgO (IBAD)	54 (1.7)	10	107 (3.5)	
YBCO (MOD)・MgO (IBAD)		372	200	74400	791 (2.9)	YGdBCO+BZO (MOD)・MgO (IBAD)	28 (1.8)	50	55 (3.0)		
米国	SuperPower	YBCO (MOCVD)・MgO (IBAD)	282	1065	300330	813 (3.3)	YGdBCO+BZO (MOCVD)・MgO (IBAD)	14	50	86 (3) @R/c	
		540	337	181980							
	AMSC	YDyBCO (MOD)・NiW (RABiTS)	250	500	125000	660 (2.0)	YDyBCO (MOD)・NiW (RABiTS)			10 (0.8)	
LANL	YBCO (RCE)・MgO (IBAD)				950 (6.0)						
	YBCO+BZO (PLD)・MgO (IBAD)				1006 (1.95)	YBCO+BZO (PLD)・MgO (IBAD)			234 (1.95) @1T		
韓国	SuNAM	GdBCO (RCE)・MgO (IBAD)	422	1000	422000	510	GdBCO+Gd ₂ O ₃ (RCE-DR)・MgO (IBAD)			30	
	KERI	SmBCO (EDDC)・MgO (IBAD)	187	68	12716	638 (3.0)					
欧州	BEST	YBCO (PLD)・YSZ (IBAD)	253	100	25300	574 (3.6)					
	THEVA	DyBCO (EB)・MgO (ISD)	158 ave.	38		>500					

3.3 その他の情勢変化

3.3.1 Cool Earth-エネルギー革新技術「21」

平成 19 年 5 月 24 日に地球温暖化に関する当時の総理大臣のイニシアティブ「美しい星 50 (クールアース 50)」が発表され、世界全体の温室効果ガス排出量を現状に比して 2050 年までに半減するという長期目標が提案された。平成 19 年 6 月に開催されたハイリングダムサミットでは、気候変動が主要テーマの一つとなり、「2050 年までに世界全体の温室効果ガスの排出量を少なくとも半減すること等を真剣に検討する」こと、技術開発については「エネルギー安全保障を強化するとともに、気候変動を抑える鍵である」との位置づけで G8 首脳の合意が得られている。エネルギー分野において、世界トップ水準の技術を有する我が国において、2050 年を見通した上で、エネルギー分野における革新的な技術開発の具体的な取り組みのあり方について検討が進められ、各技術開発のロードマップが「Cool Earth-エネルギー革新技術計画」として報告書がとりまとめられた。その中で、重点的に取り組むべきエネルギー革新技術「21」が選定されている。低炭素エネルギーの利用拡大とエネルギー効率向上、供給側技術と需要側技術の双方の観点から、この 21 の技術が大別され、「超電導高効率送電」がエネルギー供給側技術で効率向上をめざす発電・送電部門に位置づけられた。この超電導高効率送電の技術概要には「高温超電導線材を送電ケーブルに活用することにより、現行の 5 %程度の送電ロスがこの技術を適用する区間で 1/3 程度に削減することが可能である」と紹介されている。また、技術開発ロードマップには、「Y 系超電導線材の技術開発では住友電工、昭和電線ホールディングス、フジクラ、古河電工、中部電力等の企業が国家プロジェクトに参画し、米国の SuperPower 社等と競い合いをしながら世界の技術開発を牽引している」さらに「長期的には 2020 年以降の実用化が見込まれる Y 系超電導線材による超電導送電技術が進められている。これらは、我が国が国家プロジェクトとして計画しているほか、我が国企業は世界の超電導送電プロジェクトに重要な役割を担っている。具体的には Y 系超電導線材の技術開発として、さらなる送電容量の向上、低コスト化をめざしており、線材の長尺化、低コスト化のための技術開発や冷却の高効率化、大型化を進めているところである。」と記述された。このように、我が国の国策として「超電導高効率送電」が取り上げられた。

出典：経済産業省 Home Page 「Cool Earth-エネルギー革新技術計画」(平成 20 年 3 月)P.2～4, P.16～17

エネルギー源毎に、供給側から需要側に至る流れを俯瞰しつつ、効率の向上と低炭素化の両面から、CO₂大幅削減を可能とする「21」技術を選定。



図 3.3.1-1 重点的に取り組むべきエネルギー革新技術

3.3.2 グリーンイノベーションの実現に向けた「科学・技術重要施策アクション・プラン」

平成 21 年 9 月の「国連気候変動サミットにおける鳩山総理演説」で掲げられた「すべての主要国による意欲的な削減目標の合意を前提として、温室効果ガスを 2020 年までに 1990 年比で 25 %削減する」という目標達成をめざすためには、革新的な環境・エネルギー技術で日本が世界をリードすることが極めて重要であり、地球温暖化防止に向けた研究開発の加速化・新技術創出のため、これらの施策を最重要政策課題と位置付け、資源を重点配分する。そして、その研究成果の実利用・普及を強力に推進するために社会システムの転換を図り、これを通じて産業・社会活動の効率化、新産業の創造や国民生活の向上に資するグリーンイノベーションを推進し、我が国のみならず世界規模での環境と経済が両立した低炭素社会の構築に努めると、平成 21 年 10 月 8 日の総合科学技術会議で決定された。

また、我が国では内閣府が主導で、5～10 年程度を見越した上で、とくに平成 23 年度予算編成に向けて、「科学・技術重要施策アクション・プラン」の策定を通じ、総合科学技術会議が施策の質の向上に向けた政策誘導に取り組んでおり、最終とりまとめを平成 22 年 7 月 8 日の総合科学技術会議にて決定した。このアクション・プランとは、鳩山内閣における新たな取組として、我が国を取り巻

く課題の克服をめざし、2020年を見据えて策定する我が国政府全体の科学・技術施策の行動計画である。このグリーンイノベーションの実現に向けたアクション・プランの中に、地球的規模の課題である気候変動問題を克服し、世界に先駆けた環境先進国日本の将来像をめざし、「エネルギー供給・利用の低炭素化」を克服すべき課題として、その解決方策の一つである化石資源の効率的利用の中に「超電導送電技術」が取り上げられており、この「エネルギー供給・利用の低炭素化」にあたっては、原子力発電、高効率火力発電、超電導送電、石油関連技術等、多様な技術を多面的に展開すべきであり、温室効果ガス排出削減に大きく貢献するとともに海外展開も拡大するとの期待が大きいと記述されている。この平成22年7月8日に正式決定されたアクションプラン中の方策推進の俯瞰図中での超電導送電技術において、2015年度までに超電導技術による基盤技術の開発（超電導材料、線材化の研究開発）を実施し、基盤技術を確立することになっている。さらに、周辺技術も含めたさらなる性能向上、低コスト化を図り、2020年以降の超電導送電による送電ロスを1/3に低減し、国内の温室効果ガス排出削減や経済成長への貢献と優れた技術の海外展開による世界への普及を推進することが記載されている。

「化石資源の効率的利用」

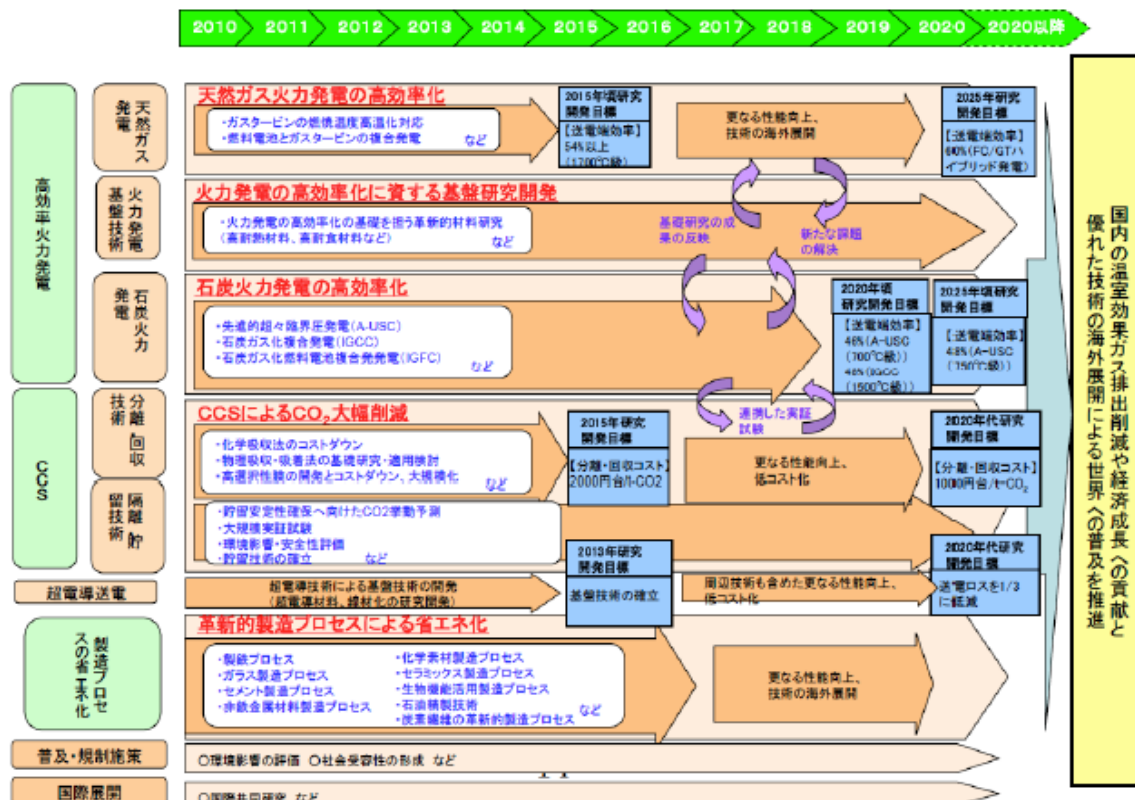


図 3.3.2-1 「科学・技術重要施策アクション・プラン」中の方策俯瞰図

出典：総合科学技術会議 Home Page:[決定事項；平成 22 年 7 月 8 日、
件名「平成 22 年度科学・技術重要施策アクションプラン」、P.16、 P.57]

3.3.3 新成長戦略分野としての高温超電導

世界の産業は、イノベーションの創生とその普及・拡大を両輪として、発展を遂げてきた。2008 年の金融危機を契機に、世界の中での先進国市場の相対的な位置づけが低下し、代わりにアジアを中心とした新興国市場が世界市場を牽引すると考えられている。新興国市場の成長速度は極めて速く、先進国と同様に機能・質を求めるようになる日も、そう遠くないと考えられている。また、先進国市場も、緩やかではあるが回復していくことが想定されており、こうしたことを踏まえれば、イノベーションの重要性は従来と変わらない、と考えるべきである。また、環境・エネルギー問題等、地球規模の課題を解決するには、技術的要素も極めて重要である。天然資源に恵まれない我が国が、長期に渡り競争力を維持・向上させるには、技術・イノベーションにより、世界のフロンティアを開拓し続けることが必要であることから、平成 22 年 6 月に経済産業省から「産業構造ビジョン 2010 骨子」が制定・発表された。その中の(「何で稼ぐか」)戦略 5 分野に先端分野が挙げられ、高温超電導は特に有望な 10 の先端分野の一つとして捉えられ、積極的に支援していくことが提言された。

ここで、「高温超電導」は、極低抵抗によりエネルギー・ロスを抑え、従来よりも大電流を流せる高温超電導の特長を活かし、様々な分野での小型・軽量化、省エネ化等の高性能化等により、革新的機器の開発が可能となる。また、高温超電導は、スマートグリッド等の次世代社会システムを支える基盤技術であり、世界市場の拡大が見込まれる(2020 年の市場規模：国内約 2,735 億円、海外約 2 兆 5,110 億円)。

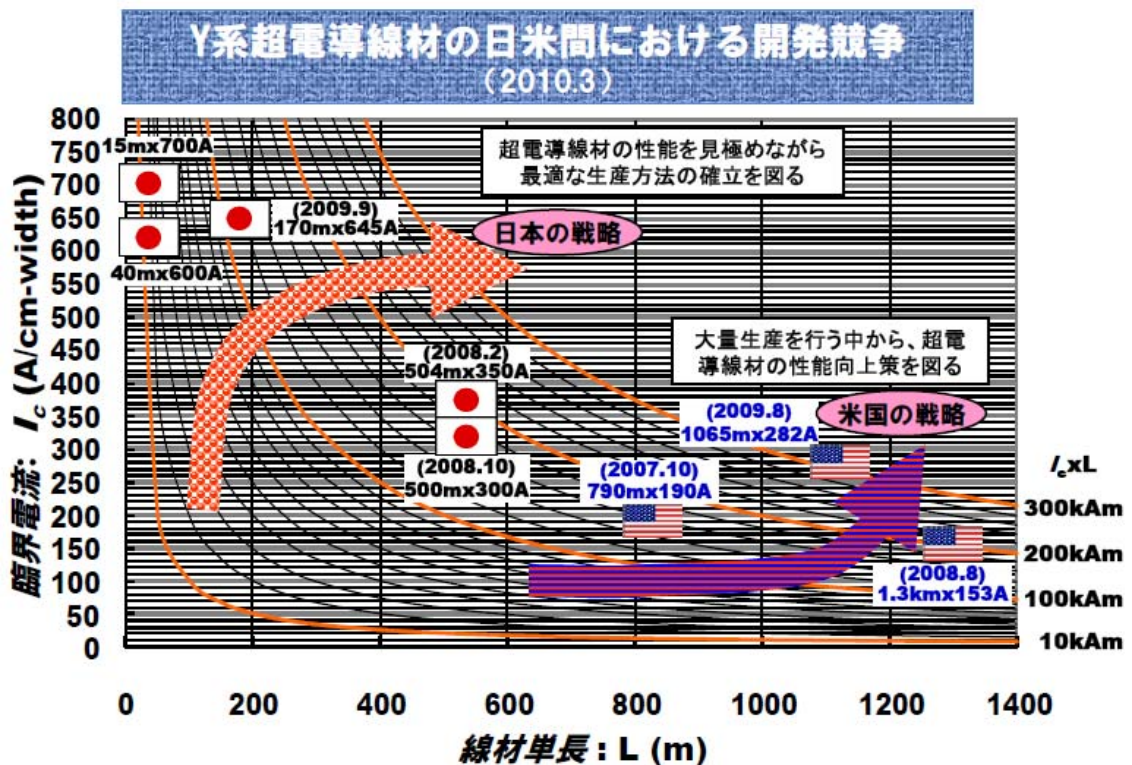


図 3.3.3-1 Y系線材の日米間における開発競争

高温超電導線材については、2015年頃の我が国が発見したBi系超電導線材の実用化に加え、性能面で優れるY系超電導線材の2020年以降の実用化に向け、日米を中心に、官民を挙げた熾烈な開発競争が展開されている。我が国が、超電導線材の性能を見極めながら、最適な生産方法・利用方法の確立を図る戦略で進めてきたのに対し、米国は、大量の線材生産能力を背景に、ケーブルやモータ、風力発電機における超電導利用技術の確立に向けた開発・実証を積極的に実施している。

近年、米国等により実利用における国際標準、知財を押さえられる懸念が大きくなっており、我が国の戦略の立て直しが求められている。現在、高温超電導は、積極活用が可能な技術的段階に達しつつあるが、その本格利用には既存の技術体系や社会システムの変更等が必要であり、関連企業による共同開発（周辺装置の開発等）や、関係企業による共同事業（トータルシステムの管理・安全対策等）を実施している。このような現状の認識のもと、経済産業省での新成長戦略分野としての高温超電導技術の実用化の方向性を実現するため、「各種回転機(モータ、発電機)の開発・実証を前倒して実施し、システム化・実用化の遅れを挽回する。また、高温超電導線材の供給体制の早期確立を推進する。」「スマートグリッドの高度化を実現するインフラとして、モデル事業による超電導

技術による省エネ効果等の実証導入を推進する。」「現在着手している、本格導入に向けた安全対策(関連保安法規の整備等)の検討を着実に進める」この3つのアクションプランの具体的施策に取り組むことが記述されている。

出典：経済産業省、産業構造審議会、産業競争力部会報告書「産業構造ビジョン2010」III-5, 「先端分野」P.173

3.3.4 超電導技術分野の技術戦略マップ

超電導技術は、電気抵抗がゼロであるという特徴的な性質により電流が流れる際のエネルギー・ロスを抑えることができることや、磁石から出る磁力線を超電導物質が跳ね返す性質（マイスナー効果）、超電導物質内部に侵入した磁力線を捕捉する性質（ピンニング効果）等の様々な特長を有している。このことから、科学技術の大幅な加速・進展のみならず、エネルギー・電力分野を始め、産業・輸送分野、診断・医療分野、情報・通信分野等の幅広い分野において、これまで超電導技術の応用に関する期待が世界中で高まり広く研究に取り組まれてきた。工業化を図るために不可欠な技術が近年出そろい始めており、超電導材料を用いた様々な機器の開発・実証・実用化が現実のものとなりつつある。また、地球温暖化緩和策の一環としての省エネルギー技術の開発・導入や各種資源の枯渇・高騰等も喫緊の課題となっており、超電導技術を早期に実用化することによって、環境負荷の低減と資源の有効な利用という2つの目的を効率的かつ実効的に達成し、多様な分野におけるエネルギーの効率的利用に資すること等が強く期待されている。

「技術戦略マップ」は、新産業の創造やリーディングインダストリーの国際競争力を強化していくために必要な重要技術を絞り込むとともに、それらの技術目標を示し、かつ研究開発以外の関連施策等を一体として進めるプランをとりまとめたものであり、いわば、産学官の研究開発投資の戦略的実施の羅針盤ともいべき俯瞰的ロードマップである。経済産業省は2005年3月に技術戦略マップ2005を策定・公開して以来、毎年改訂を重ね、産学官の専門家の英知を結集し、第6版となる「技術戦略マップ2010」（平成22年6月14日 公表）をとりまとめた。技術戦略マップはNEDO等に設置した委員会に、第一線の若手研究者、ユーザ・メーカ企業の研究者や現場のメンバーが参画し策定され、以下の(1)導入シナリオ、(2)技術マップ、及び(3)技術ロードマップで構成されている。

(1) 導入シナリオ

超電導技術応用機器の開発に際しては、全ての機器開発の共通基盤技術である超電導線材等の超電導材料開発と冷凍・冷却技術等の機器適用周辺技術開発とを同時並行的に進め、要求仕様を相互にフィードバックさせながら、各種応

用機器を実現するためのタイムリーな技術開発を進めていくことが必要不可欠である。しかし、研究開発を推進した結果として国際的な競争力を発生させ得るに足る研究成果が得られたとしても、実用化・事業化が行われなければ何の役にも立たない。研究開発の初期段階から将来の事業化を想定した企業が参画すること等により、スムーズな事業化につながる方策を講じていくことが重要である。

超電導技術を適用した機器の実現が期待される分野は、①エネルギー・電力分野（電力ケーブル、限流器、変圧器、発電機、フライホイール、SMES（超電導電力貯蔵装置）等）、②産業・輸送分野（船用モータ、磁気浮上式鉄道用マグネット、半導体引上装置、磁気分離装置等）、③診断・医療分野（MRI、NMR、MCG（心磁計）、MEG（脳磁計）、質量分析器等）、④情報・通信分野（ルータ・スイッチ、SFQ コンピュータ、バンドパスフィルタ、AD コンバータ等）の4分野に大別され、それぞれにおける代表的かつ戦略的な機器について、開発・導入・普及に係る想定シナリオを見直している。

エネルギー・電力分野の技術開発は、エネルギー貯蔵、送変配電、発電、共通基盤技術（線材、バルク、冷凍・冷却）に分類されている。技術戦略マップ2008では、関連施策としてCool Earth-エネルギー革新技術計画を、海外での取り組みについて米国、韓国等における研究開発の最新動向を、エネルギー・電力分野の技術開発（送変配電）、産業・輸送分野の技術開発（磁場応用）等について、最近の研究開発の進展状況に伴う見直しを行ない、導入シナリオを追記した。具体的には、2007年頃のBiケーブル信頼性実証を2008年頃に、2014年頃のAC66 kV級・DC125 kV級ケーブル信頼性実証を2013年頃のAC66 kV-5 kA級/275 kV-3 kA級Y系ケーブルシステム実証に変更している。

技術戦略マップ2009では、海外での取り組みについて、米国、欧州における最新の研究開発プロジェクト等を追記するとともに、技術開発のシナリオについて最近の研究開発の進展状況に伴う見直しを行なっている。具体的には2013年頃の風力用発電機実証を2012年頃に、2015年頃の風力用発電機実用化を2014年頃に変更している。

技術戦略マップ2010では、エネルギー・電力分野及び産業・輸送分野について2030年までの技術開発及び実用化のシナリオを追加するとともに、技術開発及び実用化のシナリオについて、最近の研究開発の進展状況に伴う見直しを行ない、今後の次世代電力システムへの展開の可能性も視野に入れ、従来のエネルギー貯蔵、送配電、発電用の機器を統合する「システムインテグレート」という領域を追加し、さらにCO₂の25%削減目標（2020年）を加え、海外での取組について、米国、欧州、アジアにおける最新の研究開発プロジェクト等が追記されている。具体的には、フライホイール装置(50 kWh)実用化を2012年頃から

2016年頃に、2011年頃の負荷変動補償・周波数調整用SMES実用化及び2013年頃の系統安定化用SMES実用化を見直し2020年頃のY系系統制御用SMES実用化としている。また、2016年頃の66 kV級変圧器実用化及び66 kV級限流器実用化を2020年頃に変更している。2015年頃の電力用発電機実証は2019年頃、2018年頃の電力用発電機実用化は2020年以降に、2012年頃の風力用発電機実証を2016年頃に、2014年頃の風力用発電機実用化を2020年頃としている。

(2) 技術マップ

超電導技術は、効率的かつ各々の導入目的に合致した研究開発を行うための技術指標を明確化する必要があるとの観点から、「エネルギー・電力」、「産業・輸送」、「診断・医療」、「情報・通信」の4分野に技術をカテゴライズするとともに、これらと同時並行的に進めていく必要がある共通基盤技術について技術もカテゴライズしている。

技術戦略マップ2010では、エネルギー・電力分野ならびに産業・輸送分野を中心に、最新動向を踏まえた改訂を行なっている。エネルギー・電力分野においては、電力ケーブルの技術小分類について、超電導ケーブルを実用化するために低コスト化が重要な課題であることから「低コスト化」を重要技術に位置づけている。産業・輸送分野では「車載用モータ」の技術小分類である小型軽量化、高速回転、効率向上を、小型軽量化、可変速駆動に対して高効率、高トルク密度化に修正するとともに、今後実用化が期待される「鉄道用直流き電」が新たに追加されている。

(3) 技術ロードマップ

技術マップに示された技術課題のうち、重要技術として選定されたものについて、2020年頃迄を目途に、中長期的視点から各技術課題に必要と考えられるマイルストーンを配し、4つの技術分野及び共通基盤技術のそれぞれにおけるロードマップとして示されている。

技術戦略マップ2008では、エネルギー・電力分野の機器開発において開発目標の明確化が進んだことを受け目標時期・目標値等の見直しを行なっている。また産業・輸送分野の機器開発において、廃水磁気分離装置用マグネットの技術動向を踏まえて目標値の見直しを行っている。また、半導体引上装置の目標値についてITRSとの整合を図っている。

技術戦略マップ2009では、電力ケーブルの長尺化（2011～2012）等の数値等について、最新の研究開発プロジェクトにおける開発目標値等を踏まえた見直しを行なっている。共通基盤技術（線材、及び冷凍・冷却）については、最新の技術レベルやコストの状況を踏まえ、各材料・機器・技術課題に係る数値、

時期等について見直しを行なっている。

技術戦略マップ2010では、エネルギー・電力分野、産業・輸送分野について従来の2020年までのロードマップを2030年まで延長している。電力ケーブルについては、技術マップの技術小分類において「低コスト化」を重要技術に位置づけたことを受けて、対応する項目・記述を技術ロードマップに追加している。共通基盤技術では、Bi2223線材の大電流化について、最新の状況に合わせて数値を改訂するとともに、量産ベースの数値であることを明記した。また、Y(RE)系線材のコストについて技術コストからプライスまでを含む値であることを確認している。

図3.3.4-1に2010年度の戦略マップを示し、図3.3.4-2に本プロジェクトと強く関連している機器及び共通基盤技術のロードマップ（2009年度版）を示す。ロードマップに示されているマイルストーンに沿った研究開発目標で本プロジェクトの技術開発は進められている。今後は、本プロジェクトの波及効果としての産業機器応用へのY系超電導線材の展開も視野に入れつつ、開発を推進して行く。

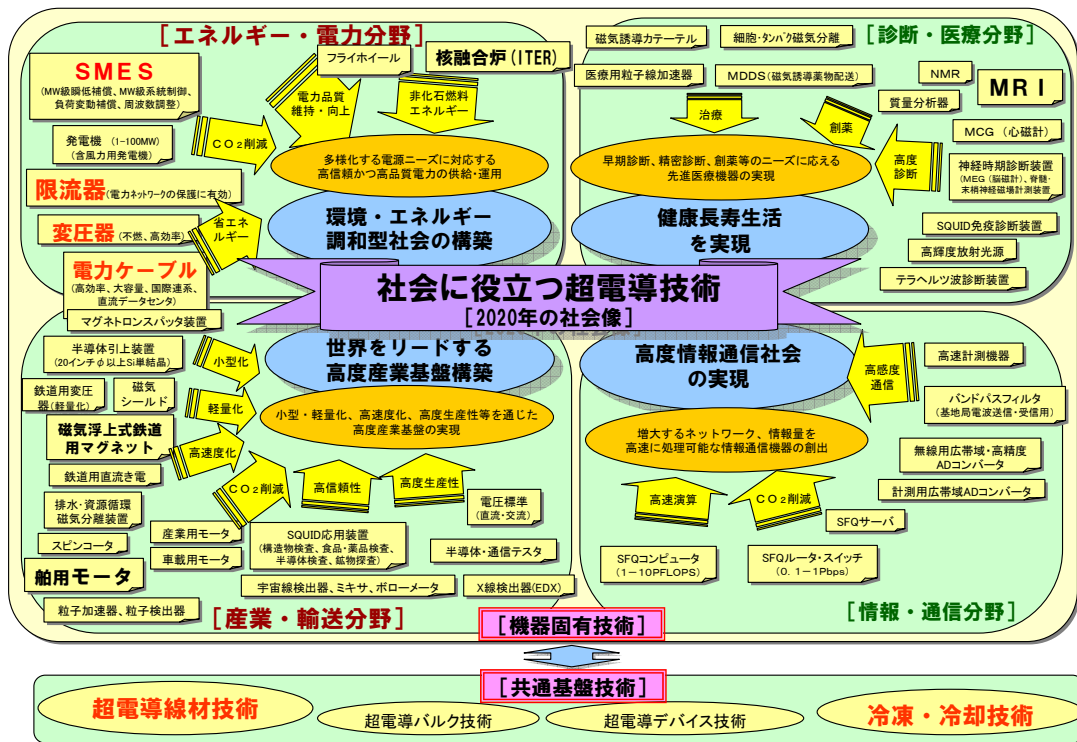


図3.3.4-1 2010年度の戦略マップ

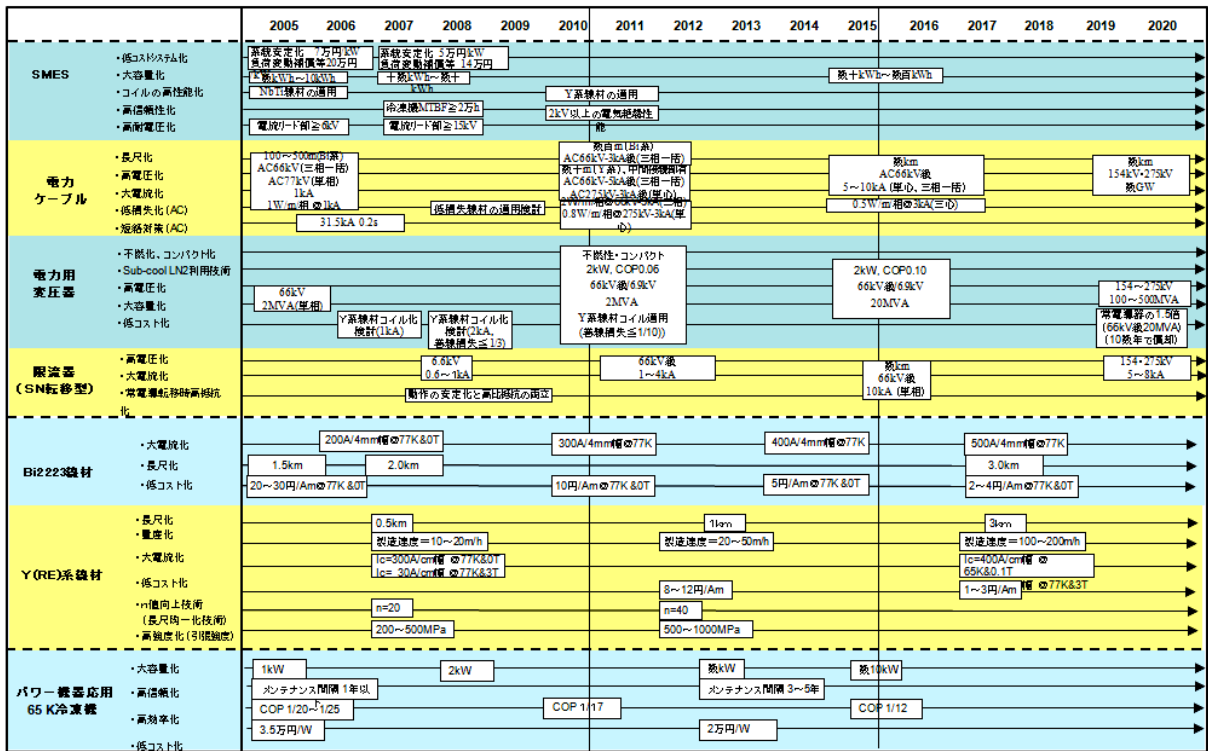


図3.3.4-2 本プロジェクトと強く関連している機器及び共通基盤技術のロードマップ（2009年度版）

3.3.5 中間評価

2010年（平成22年）9月1日、研究評価委員会「イットリウム系超電導電力機器技術開発」（中間評価）分科会が開催された。この評価委員会は、NEDOの技術評価実施規定により定められた委員会であり、プロジェクトの目標達成度の把握とともに、以後の資源配分を必要に応じて見直すために実施されるものである。本中間評価分科会において、委員の方々より様々なコメントを頂き、それに対応すべく計画の修正を行った。詳細を3.4項に記載した。

3.3.6 東日本大震災

2011年（平成23年）3月11日午後2時46分頃、東北地方太平洋沖を震源とする大地震によって大災害が引き起こされた。地震の規模はM（マグニチュード）9.0で気象庁観測史上最大の地震であり、宮城県北部で震度7を記録したほか、茨城、埼玉、千葉等の各県で震度6強から6弱を観測し、阪神・淡路大震災を上回る戦後最大の災害となった。

地震発生後、福島第一原子力発電所において重大事故が発生し、福島原発の停止等によって東京電力の供給量が不足し、計画停電（突発的な停電を防ぐため、地域と時間を限定して行う停電）が実施された。

この未曾有の大災害により、設備の故障等の直接的な被害の他、夏季節電対策に伴う業務の停止等、本プロジェクトにも様々な影響があり、実施スケジュールの修正等を行わなくてはならなくなった。具体的な計画修正は、3.4項に記載した。

3.4 プロジェクトとしての対応

3.4.1 研究開発テーマの再編

本プロジェクトの公募に対して受託した研究共同体では、研究開発効率化の観点から、研究開発テーマの構成を再編し、NEDO に提案し採択委員会で採択された。具体的には、以下の通りである。

当初の基本計画においては、「超電導電力貯蔵システム (SMES) の研究開発」、「超電導電力ケーブルの研究開発」、「超電導変圧器の研究開発」、「超電導電力機器適用技術の標準化」で構成されており、先の三機器の研究開発テーマの中に Y 系超電導 線材開発が含まれていた。そこでは、それぞれの機器開発テーマにおいて「本プロジェクト内で実施する機器開発に使用する仕様の線材を安定に製造する技術開発」とともに本プロジェクト終了直後に実施すると想定されている長期信頼性確認を目的とした「実証試験時期に必要な高い仕様の線材の開発」、さらには、その後 2020 年頃に始まるとされている「導入・普及時に必要となる、さらに高い仕様の Y 系超電導線材の開発」が含まれている。これらの線材開発に関わる目標値をまとめると表 3.4.1-1 の通りになる。

同表で示された目標値の中で、「本プロジェクト使用に必要な仕様の線材」に対応する線材は、本プロジェクト開始時において、作製可能なレベルとして設定されていることを受けて、本プロジェクト内では、それぞれの機器開発テーマの中で、安定して製造可能な技術開発を実施することとした。

一方で、「実証試験時期に必要な仕様の線材」及び「導入普及時に必要な仕様の線材」に関しては、大きな技術開発が必要な目標値である。これらの目標を達成するためには、磁場中での特性向上、高強度線材、薄肉基板線材、特性の均一化、細線加工技術等の要素技術の開発が必要になるが、一つの要素技術が一つの目標値だけに対応しているわけではなく、複数の目標値に対応している。具体的には、磁場中での特性向上技術は、「超電導電力貯蔵システム (SMES) の研究開発」と「超電導変圧器の研究開発」で求められる共通要素技術である。同様に、特性の均一化と細線加工技術の組み合わせによる低損失線材は、「超電

導電力ケーブルの研究開発」及び「超電導変圧器の研究開発」で必要な開発技術である。また、「超電導電力ケーブルの研究開発」で必要な高 J_c 化には金属基板の薄肉化が必要であるが、肉厚が薄くなっても必要な強度を維持しなければならないことを考えると、高強度化が必要であり、「超電導電力貯蔵システム (SMES) の研究開発」で必要な要素技術と共通テーマとなる。

表 3.4.1-1 基本計画における目標構成

	中間目標 (平成 22 年度中)		最終目標 (平成 24 年度中)
	本プロジェクト使用に必要な仕様の線材	実証試験時期に必要な仕様の線材	導入・普及時に必要な仕様の線材
超電導電力貯蔵システム (SMES) の研究開発	$I_c=20$ A/cm-w @77K&3T で強度 1 GPa を有する 100 m に相当する線材	$I_c=30$ A/cm-w @77K&3T で 強度 1 GPa を有する 50 m に相当する線材	$I_c=50$ A/cm-w @77K&3T で 強度 1 GPa を有する 200 m 以上に相当する線材
超電導電力ケーブルの研究開発	$J_c=15$ kA/cm ² (2 mm 幅×20 m) に相当する線材	$J_c=30$ kA/cm ² (2 mm 幅×50 m 以上) に相当する線材	$J_c=50$ kA/cm ² (2 mm 幅×200 m 以上) に相当する線材
超電導変圧器の研究開発	5 mm 幅 3 分割にて $I_c=50$ A@65K&0.01T, 100 m 以上に相当する線材	5 mm 幅 5 分割にて $I_c=100$ A@65K&0.02T, 50 m 以上に相当する線材	5 mm 幅 10 分割にて $I_c=100$ A @65K&0.1T, 100 m 以上に相当する線材

さらには、「実証試験時期に必要な仕様の線材」及び「導入・普及開始時に必要な仕様の線材」に求められる Y 系超電導線材は、いずれの機器に関しても極低コスト線材である必要があり、より安価な線材が求められるとともに、これまで系統的な検討がなされてこなかった経時変化や過電流耐性等の信頼性に関する評価、検討も必要である。

上記の状況を踏まえて、「実証試験時期に必要な仕様の線材」及び「導入・普及開始時に必要な仕様の線材」の開発に関しては、機器開発テーマと同列で線材開発を目的とした「超電導電力機器用線材の技術開発」を新設し、統合した共通要素技術を実施することとした。また、上述の共通課題である「低コスト・歩留向上技術開発」と信頼性に関する検討を「線材特性の把握」とした項目で開発を実施することとした。以上の再編により新たに創設した「超電導電力機器用線材の技術開発」に関するテーマ構成は以下の通りである。

● 「超電導電力機器用線材の技術開発」

- 1) 線材特性の把握
- 2) 磁場中高臨界電流 (I_c) 線材作製技術開発
- 3) 低交流損失線材作製技術開発
- 4) 高強度・高工業的臨界電流密度 (J_c) 線材作製技術開発
- 5) 低コスト・歩留向上技術開発

また、それぞれの小項目のテーマに対応する目標は、それぞれの目標値を統合することで表 3.4.1-1 に示された目標値が実現できるよう設定した。

3.4.2 実施計画の見直し

PL が委員長を務める技術開発推進委員会等の場を活用し、情報の共有と水平展開を行うこと等により、プロジェクトの全体予算及び各機器開発の個別予算の効率的な運用に努めた。技術開発項目毎の進捗状況に応じて計画の見直しを実施し、同一予算でより多くの成果を引き出した。

3.4.2-1 低交流損失化のための線材細線化線材の評価技術

変圧器等の超電導化には低交流損失化技術が重要であり、加工技術の長尺化、細線化が進むに従って、Y 系長尺細線(フィラメント)線材の評価が必要になってきた。プロジェクト開始当初、フィラメント中のマクロ欠陥位置評価法として原理確認ができていた SQUID センサアレイ渦電流法に対し、欠陥の種類や I_c 劣化度合との関係把握を行うとともに、誘導法により分割線全体の I_c 劣化を非破壊検出する技術や磁気光学法により各フィラメントの交流応答を個別に評価する技術の開発を行ってきた。さらに、多層導体構造の内部欠陥評価をねらいとした SQUID センサの開発を行うべく、実施計画を見直し、変更した。この変更により、平成 21 年度には、SQUID 渦電流法に対し、線材冷却法の改良を行い、5 mm 幅 5 分割線材に対応した 50 m/h 以上の高速評価技術の開発を行うとともに、誘導法、磁気光学法による評価の見通しを得た。さらに、平成 22 年度には、5 mm 幅 10 分割線材に対応したセンサアレイの開発を行い、装置の空間分解能の向上を図り、また、プロセス条件と組織の関係及び、詳細な電磁気挙動の評価とともに、加工線材における熱的、機械的挙動も合わせて評価することで、上記加工技術開発を促進した。

3.4.2-2 ケーブル開発用線材の安定製造技術開発における設備増強

ケーブル開発用 Y 系超電導線材は、ケーブル開発の進捗に合わせて総長、単長、 J_c 、線材幅等の提供に必要な性能を検討する必要がある。平成 20 年度は 1 cm 幅での長さは総長 1 km レベル、平成 21 年度は 3 km レベルを目安として提供

した。平成 22 年度は線材の長尺化・歩留り改善を実施し、線材の製造能力を向上させ、ケーブル開発用線材の供給及び増量を確実に実現するために、実施計画を見直し、超電導薄膜を形成するための高品質・高出力タイプエキシマレーザ発振装置を導入した。出力の安定性及び現有装置の 1.5 倍 (200 W→300 W) の高エネルギー化により、超電導線材のさらなる特性向上、歩留り向上、成膜速度の高速化を図り、4 km レベルを目安として提供することをめざしている。この技術開発に当たっては、必要に応じて線材の特性分布や欠陥の評価とともに組織評価も駆使し、安定製造技術を促進させた。

3.4.2-3 SMES 用線材への IBAD-MgO 基板及び IBAD-PLD 線材の適用による高効率化

SMES 用超電導コイルの導体作製に使用する Y 系超電導線材には、平坦で高い寸法精度が要求される。線材の平坦性を維持するために、内部応力の大きな IBAD 中間層を薄層化することが望ましい。また IBAD 中間層の薄層化は成膜速度を増大させるとともに線材の変形を防止する効果がある。IBAD 中間層の薄層化については、GZO 層を主体とした従来手法に加え MgO を用いた手法の開発に成功した。平成 22 年度以降は、中間層が薄く、IBAD-GZO より製造速度の大きな IBAD-MgO 基板の導入を推進することで研究開発の更なる高効率化を図った。

また、平成 22 年度からは 200 A/cm-w 級の磁場中 I_c 特性が高い IBAD-PLD 線材の安定製造技術の開発・検討を実施するとともに、IBAD-PLD 線材による SMES モデルコイルの成立性を確認するべく、実施計画を変更した。さらに、2 kA 以上の通電が可能な大電流容量コイルの構成技術開発のために、平成 22 年度に総長約 1 km の線材を作製し、SMES 開発の高効率化を図った。

3.4.2-4 数百 kVA 級限流機能付加変圧器の試作の前倒し

限流機能付加変圧器の基礎技術として、Y 系超電導線材を用いた 4 巻線構造の小型超電導変圧器モデルによる特性検証、限流応答特性解明と限流効果による巻線保護の確認に、世界で初めて成功した。この成果を受け、平成 22 年度に、数百 kVA 級限流機能付加単相変圧器の設計・試作を行うべく、実施計画を変更し、2 MVA 級変圧器開発を効率的に進めることとした。

3.4.2-5 SMES コイル要素技術開発の優先実施とそれに伴う SMES システムモデル検証の中止

SMES 用コイルの開発を進める中、平成 22 年度に新しい知見としてコイル通電特性が変化する現象が見いだされた。この現象が発生する原因を究明し対策

を立てなければ、Y系コイルを用いた SMES の実用化にはつながらないため、プロジェクト後半の 2 年は、コイル構造の再検討・評価を最優先に行うこととした。これに伴い、当初計画の 2 MJ 級評価用試験コイルモデルを用いた 2 万回以上の繰返し充放電による特性検証を取り止めた。

3.4.3 中間評価以降の情勢変化へのプロジェクトとしての対応

3.4.3-1 高 I_c -IBAD-PLD 線材による大電流・低交流損失の評価

超電導ケーブルにおいて、交流損失の低減は重要な開発課題の一つである。交流損失の低減はこれまで実施されてきているが依然として大きな課題である。交流損失低減には種々の方策があるが、その一つに線材の臨界電流を上げて負荷率を低減することにより、導体交流損失を低減することができる。一方、平成 20~23 年度までの超電導機器用線材の技術開発における成果により、高臨界電流を有する線材が開発されてきたことから、臨界電流 500 A/cm-w 級線材を超電導ケーブルに適用し、高臨界電流線材を用いた超電導ケーブルを試作し、その交流損失特性を評価することで、交流損失の目標値となっている 2 W/m-相を下回る低交流損失ケーブルの交流損失到達度を検証した。

3.4.3-2 震災等に伴う基板調達遅延の影響抑制のための対策

東日本大震災以降の夏季節電対策による結晶粒配向金属基板（配向金属基板）調達遅延の影響抑制のため、投入量を当初予定より増やすとともに、線材製造工程を検討して工程途中で誘導法による I_c 連続測定装置での線材全長特性検査による良品の選別を実施した。また、検査工程においても誘導法による I_c 連続測定装置による検査を併用して、効率化を図った。なお、検査加工工程の一部は、超電導機器用線材の技術開発を担当している実施者（ISTEC）が実施した。その結果、 J_c 15~20 kA/cm² 以上の線材の製造量は、1 cm 幅換算で平成 23 年度が 1.8 km、平成 24 年度が 1.6 km であり、平成 24 年 7 月末までに 66 kV 大電流ケーブルシステム検証のために必要な線材の作製と提供を完了した。

3.4.3-3 ケーブル冷却システムの適用法規変更に伴う既存冷却設備の配管改造

66 kV-5 kA-15 m 大電流モデル超電導ケーブルシステム構築において、高圧ガス保安協会での取り決めが変更になったことにより、システムに適用する冷却設備に関し「冷凍則」から「高圧ガス一般則」へ適用法規を変更する必要が顕在化した。このため高圧ガス一般則の法規対応を実施するにあたり、冷却システム室内に設置されている既存設備の配管交換に加え端末容器への冷却配

管を新規に製作する必要が生じ、これに対応した。

3.4.3-4 震災等の影響に伴うケーブル用線材提供遅延抑制

東日本大震災及び夏季節電対策の影響により、線材開発委託先工場の稼働が制限されケーブル開発に対する超電導線材の提供について大幅な遅延が見込まれ、その納入遅れから平成 24 年度に予定されていたケーブルシステムの検証期間が短縮されることで、プロジェクト最終目標が未達となる恐れがあった。そこで、超電導機器用線材の技術開発を担当している実施者（ISTEC）における線材開発研究を一時中断し、節電等の制約のなか、処理能力が不足していた基板・中間層・MOD 超電導層の成膜工程及び線材評価について一部バックアップして対応した。さらに下工程を加速するために線材細線化加工を一部フォローすることで、当初想定していた遅延を最小限に抑制し、震災前に計画したケーブルに関する実施内容を達成した。

3.4.3-5 中間評価を踏まえた超電導ケーブルの研究開発の対応

「引っ張り、曲げ以外の強度面で不安がある Y 系超電導線材だけに、接合部の耐久性の評価が長尺ケーブル開発には重要である。」との中間評価のコメントに対し、高電圧ケーブルのみに計画されていた中間接続部技術の開発を大電流ケーブルにおいても実施することとし、中間接続部込みのモデルケーブルを作製するとともに機械特性試験にて I_c に劣化が無いことを確認した。また、「通電量変動、温度変動に対するケーブルの耐久性、液体窒素中での絶縁物の経年変化等調べるのが望ましい」とのコメントに対し、通電量変動については、長期課通電試験にて昼夜の負荷変動を模擬して、電流の 8h-オン、16h-オフを 20 サイクル繰り返し、ケーブル特性に劣化が無いことを確認した。また、液体窒素中での絶縁物の経年変化の調査に関しては、長期課通電試験にて約 30 年相当の加速劣化を模擬した電圧を課電することで絶縁設計の健全性を評価してきた。さらに海外市場に関した「まずは交流を意識した開発となっているが、ヨーロッパ、米国、アジア等、いずれの国も電力貿易は視野に含まれている。その際の次世代の高電圧直流送電のための技術開発はどの程度必要となるのか。このような点がより明確になるべきである。」「超電導は世界的に誇れる技術なのでぜひとも海外市場で成功したい。2020 年目標を達成してからの売り込みでは韓国や中国に先を越される懸念が強く、海外市場調査や売り込みのタイミングや技術要件等、マーケティングを視野に入れるべきである。」との中間評価のコメントに対し、今回実施した 275 kV 高電圧ケーブルの検証試験は、中国瀋陽にて実施された。これにより、これまでにない高電圧ケーブル試験を海外に向けて広く発信できたとともに、本事業にて実施した大電流化技術及び高電圧化技術

等は、高電圧直流送電につながる技術としても確立できるものと考えられ、事業化シナリオとして、海外ユーザを取り込んだ海外実証の可能性があると考えられる。

3.4.3-6 中間評価を踏まえた超電導変圧器の研究開発の対応

平成 22 年 9 月に開催された中間評価分科会では、超電導変圧器に対する指摘として、(1) 超電導変圧器のメリットの説明、(2) 高信頼性のアピール の 2 点があった。このため、以下に指摘の具体的な内容をまず述べた上で、その対応について整理した。

(1) 超電導変圧器のメリット

「超電導化によるメリットとして重量 1/2、面積 2/3 というコンパクトネスを前面に押し出すのみではリプレース需要は難しいため、変電所新設の繰り延べ効果等についても、さらに論理的に説明していく必要がある。また、コスト比較等で超電導変圧器の優位性をさらにアピールする必要がある。」が具体的な指摘であり、これに対する本プロジェクトの成果を踏まえたメリットは次のとおりとなる。

電気抵抗が殆ど無い超電導線材を適用した超電導変圧器は、その低損失かつ高電流密度の特性から巻線や鉄心の断面積を小さくすることが可能であり、重量 1/2、面積 2/3 という大幅なコンパクト化・軽量化が期待できる。また、冷媒は液体窒素で不燃であることから、油を冷媒とする既存変圧器に比べ環境にやさしく保守性に優れた機器となる。このため、その不燃性から防火用設備が不要となり同一室内に超電導変圧器と開閉装置が設置でき、変電所レイアウトのコンパクト化と自由度が増し、変電所敷地や建物等の縮小化に伴う大幅な建設コストの削減が可能となる。

これらの特長から、超電導変圧器は都市部を主体とした電力需要増に伴う変圧器増容量対策、変電所新設の繰り延べ効果、及び経年に伴う変圧器のリプレース対策に貢献すると考えられている。また、大容量コンパクト送電を可能とする超電導電力ケーブルと組み合わせることにより、高効率な電力供給システムが可能となることも期待されている。

(2) 高信頼性のアピール

「既存技術（油入変圧器）は極めて高いレベルにあるため、コンパクトネスだけでなく、高信頼性をアピールできるようにすべきである。」が具体的な指摘であり、これに対する本プロジェクトの成果を踏まえた高信頼性については次のとおりとなる。

本プロジェクトでは、2MVA 級超電導変圧器モデル及び冷却システムを試作し、それらを組み合わせた課通電試験等によって、試験計画書の性能を満足することを実証した。この試験は JEC-2200-1995 変圧器に準拠しており、これをクリアしたことは、超電導変圧器が電氣的・熱的な性能面で既存変圧器とほぼ同等の高信頼性を有すると言える。

しかしながら、実用化に資する高信頼性をアピールするためには、電力用機器としての長期信頼性の検証や電圧調整機能の開発等の課題が残されており、それらを克服することが必要である。

このため、本プロジェクトでの要素技術開発により確認できた超電導変圧器システムの成果を踏まえ、実用化技術開発をターゲットとして、長期信頼性、系統連系検証、コスト低減、高効率、コンパクト化等の課題に対して 10 MVA 級限流機能付加超電導変圧器の設計、試作、検証を行う次期フェーズに取り組んでいくことが重要となる。

3.4.3-7 震災に伴う超電導電力機器用線材の技術開発の計画の修正

平成 23 年 3 月に発生した東日本大震災の影響を受けて超電導電力機器用線材の技術開発における計画を以下の通り修正した。まず、東日本大震災直接的被害としては、PLD 装置を始めとする装置類に一部修理を必要とする損壊が生じた。(修理期間は最大で 3 ヶ月) また、同震災による原子力発電所事故に伴い、同年夏季節電指示対策が必要となり、機器開発へ線材を提供することになっていた線材メーカーが必要な作製作業を実施することが困難となった。上記の状況を受けて、NEDO 及び PL の指導により、機器開発への線材提供を優先する立場から、超電導電力機器用線材の技術開発を一部先送りし、機器開発への線材提供を実施した。これに伴い、線材開発に関する H23 年度実施内容の一部を次年度に先送りする措置で対応した。(平成 23 年 7 月)

3.4.3-8 震災に伴う設備補強

平成 23 年 3 月に発生した東日本大震災の影響を受けて、上記の通り、機器開発への線材提供に遅延発生の可能性が生じ、超電導電力機器用線材の技術開発の遅延が避けられない状態となった。そこで、線材開発を残された短期間で実施するために、平成 23 年 5 月 31 日に終了した「希少金属代替材料開発プロジェクト」で導入した線材作製装置及び評価設備の一部を本プロジェクトへ供用換えし(平成 23 年 11 月)、開発の遅延回復に努めた。

3.4.3-9 中間評価を踏まえた超電導電力機器用線材の技術開発の対応

1) 目標値の変更

中間評価の 1.2 各論 3) 研究開発成果における「線材の量産化・歩留り改善と低コスト化の実現と剥離の課題解決が最も肝要であり、これらが達成できないと機器開発は空転する」とのコメントに対し、低コスト化の目標値をより明確化し、超電導機器の実用化促進が見込める値として、(5)低コスト・歩留り向上技術開発の最終目標値をこれまでの「3 円/Am 未満の実証」から「2 円/Am の実証」と変更した。(平成 23 年 1 月)

また、同 2.4 超電導機器用線材の研究開発 1) 研究開発成果におけるコメント「本機器用線材の研究開発は、SMES、変圧器及びケーブル開発と引き続き密接に連携し、これまでややアピール力に欠ける点を解消することが望まれる。」への対応の一環として、「超電導電力ケーブルの研究開発」の中間評価までの成果において、低損失ケーブル実現に際し、線材幅として 2~4 mm 幅線材を用いた実績を反映して、(3) 低交流損失線材作製技術開発における最終目標の線材幅を 2 mm 幅から 2~4 mm 幅と変更した。(平成 23 年 1 月)

2) 剥離現象の解明と解決方法の開発

中間評価の 1.2 各論 3) 研究開発成果における「線材の量産化・歩留り改善と低コスト化の実現と剥離の課題解決が最も肝要であり、これらが達成できないと機器開発は空転する。」とのコメントに対し、剥離の課題解決の観点から、(1) 線材特性の把握の研究項目において、線材剥離現象・機構の解明と強化方法を開発内容に組み込み(平成 22 年 10 月)、材料学的見地から原因究明と解決方法の開発を行った。

3) 実用化技術開発用線材安定製造技術開発における N 数の増大

中間評価の 1.2 各論 3) 研究開発成果における「線材の量産化・歩留り改善と低コスト化の実現と剥離の課題解決が最も肝要であり、これらが達成できないと機器開発は空転する。」とのコメントに対し、量産化・歩留り改善の観点から、また、2.4 超電導機器用線材の研究開発 1) 研究開発成果におけるコメント「本事業では研究予算の配分増によって重点的にこれを推進することが望ましい。」を受けて、(5) 低コスト・歩留り向上技術開発(a)実用化技術開発用線材安定製造技術開発テーマにおいて、H24 年度の追加予算で、供試する線材数(N 数)を増大させ、量産化・歩留り改善研究開発の精度を上げるとともに促進を図った。(平成 24 年 4 月)

4) 機器開発との連携

中間評価の 2.4 超電導機器用線材の研究開発 1) 研究開発成果における「本機器用線材の研究開発は、SMES、変圧器及びケーブル開発と引き続き密接に連携し、これまでややアピール力に欠ける点を解消することが望まれる。」とのコメントへ対し、上記の 1) 目標値の変更の中の(3) 低交流損失線材作製技術開発における最終目標の線材幅の変更に加えて下表の対応を実施した。

表 3.4.3-1 機器開発との連携

連携テーマ	連携内容
超電導電力ケーブルの研究開発 (共通)	「線材の特性把握」の成果であるケーブル耐久試験適正条件の決定(線材開発)をケーブルモデル試作における線材評価条件へ適用した。
超電導電力ケーブルの研究開発 (高電圧ケーブル)	「高 I_c 特性化技術開発」の成果(線材開発)を適用し、高 I_c 線材を使用することでケーブル低損失化に貢献した。
超電導電力ケーブルの研究開発 (大電流ケーブル)	低損失条件に関する京都大学の解析結果に基づいて、切断端部の特性低下を抑制すべく、「細線加工技術開発」の成果(線材開発)であるレーザ加工技術を適用することで、ケーブル低損失化に貢献した。
	「低コスト対応高速高 I_c 化技術開発」の成果(線材開発)を適用し、IBAD-MgO 上での高 I_c 線材を用いたケーブル試作テーマを追加し、ケーブル低損失化実証に貢献した。
超電導変圧器の研究開発	「細線加工技術開発」の成果(線材開発)であるスクライビング細線溝加工技術を適用し、変圧器の研究開発における、低交流損失化技術開発に貢献した。

3.4.4 その他の情勢変化へのプロジェクトとしての対応

3.4.4-1 CO₂削減効果について

CO₂削減効果については、正式に刊行されている「高温超電導電力応用機器の市場調査研究報告書(平成19年2月、ISTEC)」の結果等をベースとしてIV-1項に整理しているが、本プロジェクトを推進する中では、グリーンイノベーション等への対応から別途CO₂削減効果を試算した。

その結果、SMES、ケーブル、変圧器を合計した2030年のCO₂削減量は、

最大ケースで 429 万 t/年、最小ケースでも 283 万 t/年となった。なお、試算結果の概要及び算出条件は以下のとおりである。

表 3.4.4-1 超電導機器による CO₂削減効果の試算（最大ケース）

単位：万 t/年

	2020 年	2030 年	2040 年	2050 年
SMES	18.3	258.4	365.7	494.5
ケーブル	29.4	117.8	206.1	294.4
変圧器	9.4	53.2	128.7	204.2
合計	57.1	429.4	700.5	993.1

表 3.4.4-2 超電導機器による CO₂削減効果の試算（最小ケース）

単位：万 t/年

	2020 年	2030 年	2040 年	2050 年
SMES	4.3	212.6	271.7	342.6
ケーブル	8.2	32.8	57.4	82.1
変圧器	9.4	37.4	65.4	93.5
合計	21.9	282.8	394.5	518.2

<主な算出条件>

- ・ CO₂排出源単位：0.41 kg/kWh（2006 年度 実績値 電気事業連合会）
- ・ ケーブル及び変圧器の設備量（2008 年版）は、電事連 HP から抜粋
- ・ 超電導ケーブルの普及率は 2020 年：10%、2030 年：40%、2040 年：70%、2050 年：100%として算出
超電導変圧器の普及率は、配電用変圧器はケーブルと同様に 2020 年：10%、2030 年：40%、2040 年：70%、2050 年：100%として算出
ただし、系統用変圧器は配電用変圧器よりも 10 年遅れで 2020 年：0%、2030 年：10%、2040 年：40%、2050 年：70%として算出
- ・ また SMES については、SMES による周波数調整を前提に新エネ発電＋SMES 補償プラント建設、既設電源代替として算出
なお、2020 年、2030 年の新エネルギー導入量は「長期エネルギー需給見通し（再計算）」資源エネルギー庁 H21.8 のデータを引用。なお、2040 年、2050 年は導入量が鈍化し、1.2 倍／10 年のペースと仮定。
- ・ 各超電導機器の CO₂削減効果における最大・最小ケースについては、以下の条件にて算出した。

●SMES

最大ケース：新エネルギーを最大限普及させたケースを想定

最小ケース：耐用年数を迎えた機器を順次入れ替えを想定

●ケーブル

最大ケース：電圧階級 275 kV 以下のケーブルを導入対象

最小ケース：電圧階級 110 kV 以上 275 kV 以下のケーブルを導入対象

●変圧器

最大ケース：配電用変圧器及び系統用変圧器を導入対象

最小ケース：配電用変圧器を導入対象

また、限流機能付加超電導変圧器の開発及び導入に伴う再生可能エネルギーへの波及効果についても検討した。

前述のとおり、超電導機器の導入によって CO₂ 削減効果が一層増大することから、超電導機器導入の加速方策の 1 つとして考えられるのが、限流機能の付加である。今後、風力や太陽光等の再生可能エネルギーの導入拡大に伴い、電力系統の不安定化が助長され、特に電力系統に異常が発生した場合に事故電流が増大するため、これをいかに抑制できるかが重要になってくる。

限流機能付加超電導変圧器は、電力系統への異常発生時の事故電流を瞬時に抑制することができるため、電力系統運用の安定化に大きく貢献する。したがって、限流機能付加超電導変圧器が設置されている電力系統では、再生可能エネルギーの連系制約が大幅に緩和され、その結果再生可能エネルギーの連系量が増大することから、間接的に CO₂ 削減効果に寄与する。

このように、限流機能を付加する技術の早期確立が実現すれば、超電導機器の導入が加速されるとともに、同技術の海外輸出により、この分野の技術開発で鎊を削る欧米各国に対して優位な立場を確保することができる。

なお、超電導限流器の導入効果（リプレース分）については、前述の「高温超電導電力応用機器の市場調査研究報告書（平成 19 年 2 月、ISTEC）」において、表 3.4.4-3 のとおり 2020 年までの累計で約 26 億円、CO₂ 削減量は 5.7 kt/年と試算されているが、将来的な電源構成の変更（化石燃料発電所から再生可能エネルギー発電所への全面的なシフト）を考慮すると、それに伴う超電導限流器の市場規模及び CO₂ 削減量は、上記リプレース分の数 10 倍以上の規模になるものと想定される。

表 3.4.4-3 超電導限流器の導入量推移と CO₂ 削減効果

年度	2020	2030
累計導入量 (MW)	531	2,402
累計導入額 (億円)	26	120
CO ₂ 削減量 (kt/年)	5.7	25.8

3.4.4-2 超電導電力貯蔵システム(SMES)の波及効果

SMES については、系統制御技術の要求よりは、小さな規模で済む産業応用への波及分野として、電気エネルギーに高い品質と信頼性を要求するハイテク産業における瞬低対策技術として、広汎な普及が期待される。

国内における瞬低の産業への影響の調査としては、平成 2 年 7 月の「電気協同研究 46 巻 3 号」がある。ここでは、産業需要家あたり瞬時電圧低下を年間 12 回程度経験し、電圧が 20 %以上低下する瞬低の回数はそのうち年平均 5 回程度になると言う測定結果が出ている。

表 3.4.4-4 はその調査におけるヒアリング結果をまとめたもので、LSI 工場では 1 回の瞬低で 1 億円程度の被害が出てくると答えている。瞬低発生時に必ずしも、被害が発生するとは限らないが、1 箇所の LSI 工場あたり、年間 1、2 回の瞬低が起こると仮定すると、国内の LSI 工場を 100 箇所程度と見積り、年間約 100～200 億円の被害が発生していると考えられる。また、この被害は、半導体ウエハの作成工程に遡って歩留りを悪化させているとも考えられ、省エネ面でも悪影響を及ぼしていると思われる。

半導体産業では、SMES を設置し、1、2 回の瞬低を回避することで、投資額が回収可能と考えられる。一般産業では、1 回あたりの瞬低被害は数百万～数千万円と、半導体産業ほど深刻ではないが、SMES が瞬低被害を長期間回避することで累積的に、コストメリットが出てくると考えられる。さらに、欧米のプレミアム・パワー（インダストリー）パーク等、工業団地単位で SMES を設置し、複数の工場を瞬低の被害から守ることでコストメリットを得ることも可能である。

また、今後増加が予測される太陽光・風力等の再生可能エネルギーの系統連系に対し、需給バランス制御や系統安定化、余剰電力対策等の必要性の高まりから、一層電力貯蔵技術への期待が高まるものと考えられ、SMES も有力な電力貯蔵技術の一つとして実用化に向けた開発が望まれる。

表 3.4.4-4 国内における瞬低の産業への影響調査ヒアリング結果

工場	瞬低頻度	被害様相	被害金額	対策
半導体(LSI)	10回/年	製品不良、設備機器故障	1億円/回	コジェネ、UPS
自動車製造	15回/年	稼働率低下(数十分)	数千万円/回(最悪)	コジェネ、UPS
油脂化学	3.6回/年	製品不良、1、2日の工場停止	3千万円/回	コジェネ、UPS
電線メーカー	1, 2回/年	製品不良	6千万円/回(最悪で)	非常用発電機
家電製品	ごく少数	NC 機械の停止、不具合	—	部分的バックアップ電源
化学繊維	2回/年	紡糸糸切れ(復旧1時間)	800万円/回	UPS
石油化学	数年に1度	機械故障	—	UPS, 電池
鉄鋼製造	4, 5回/年	半製品の不良	数千万円/回(最悪)	MG, UPS
鉄鋼製造	1回/2年	製造ラインの混乱停止	3千万円/回	UPS
鉄鋼製造	1年に1回前後	製造ラインの混乱停止	—	
製紙・パルプ	数回/年	製品不良・自家発停止	5千万円/回(自家発停止時)	発電機, UPS
半導体製造	6回/年	空調機器の停止	—	UPS

3.4.4-3 希少金属プロとの連携強化による新成長戦略分野における線材提供体制の構築

3.3 項の「その他の情勢変化」の中で記述した通り、我が国の経済産業省での新成長戦略分野としての高温超電導技術の実用化の方向性を実現するためのアクションプランの中に、「各種回転機(モータ、発電機)の開発・実証を前倒して実施し、システム化・実用化の遅れを挽回する。また、高温超電導線材の供給体制の早期確立を推進する。」が謳われていることを受けて、本プロジェクトでは、並行実施されている「希少金属代替材料開発プロジェクト」(平成 21~22 年度)との連携を強化することで長尺高性能線材の供給体制の構築を図った。同プロジェクトでは、IBAD/PLD、IBAD/TFA-MOD 法により 300 A/cm-w (@77 K, s.f) の特性を有し、1 km を超える超長尺 Y 系超電導線材の作製を見通す技術開発を実施した。一方、「超電導電力機器用線材の技術開発」では、長さは 50 m 及び 200 m ではあるが、各機器の特別な仕様を満たす線材開発を実施した。それぞれの要素技術は、補完関係にあることから、それぞれの成果を融合することにより、各種の機器に対応可能な超長尺線材の実現が可能になる。そこで、両者のプロジェクト間での情報の交換を密に行なうことにより、速やかに高性能長尺線材の供給体制構築を図った。

3.4.5 高温超電導電力機器の実用化に向けた課題と目標の明確化

平成 24 年度調査事業「高温超電導電力機器の適用拡大と標準化に資するケーススタディ」の実施

(株)三菱総合研究所を委託先として以下の調査事業を実施した。

本調査では、高温超電導電力機器に関する研究成果の適用先を拓げることで早期実用化を加速すると共に、適用法に共通して必要となる技術を洗い出して標準化に結びつけることを目的とした。

電力分野の中でも早い時期に実用が期待される電力ケーブルについて、超電導を利用するメリットが大きいと期待される適用ケースを具体的に検討し、それを実現するための技術面及び経済面の課題や目標を明確化した。

超電導限流器についても、実用化を促進するうえで詳細な検討を行う重要性が高いと判断される適用ケースを検討した。

超電導ケーブル及び超電導限流器の適用ケースについては、電力システム及び超電導ケーブルの専門家からなるケーブル分科会、電力システム及び超電導限流器の専門家からなる限流器分科会を設置し、検討を進めた。両分科会の検討結果を議論し、助言を与える組織として、電力システム及び超電導の専門家からなる超電導電力機器適用拡大委員会を設置した。

超電導ケーブルについては、ケーブル分科会委員より 42 の適用ケース候補が提案され、これら適用ケース候補を 16 の適用ケース候補に集約した。集約された適用ケース候補を、ケーブル分科会において、適正性、有効性、効率性、事業化・波及効果の観点から評点法により評価し、評価の高い上位 7 ケースを抽出した。この 7 ケースを再度集約し、発電機－昇圧変圧器、都市内送電、長距離送電、スマコミへの送電、鉄道用き電補助線の 5 ケースとした。この 5 ケースについて、コスト、省エネルギー効果、CO₂ 削減効果、系統へ導入した場合の課題について詳細なケーススタディを実施した。さらに、実現可能性があるケーススタディについては将来市場規模の推計を行った。

超電導限流器については、限流器分科会委員より 24 の適用ケース候補が提案され、11 の適用ケース候補に集約した。実用化ハードルの高さ、超電導ケーブルとのシナジー効果といった視点から、限流器分科会で合意形成を行い、比較的近い将来に実現可能な分散電源への適用ケース、他の超電導機器との併用ケースを選択し、詳細なケーススタディを実施した。

詳細なケーススタディ結果より、共通課題を整理し、今後必要となる技術開発内容を整理した。同時に、超電導電力機器の標準化動向について調査を行い、今後標準化すべき内容を明らかにした。

Ⅲ 研究開発成果について

1. 事業全体の成果

1.1 開発成果概要

1.1.1 超電導電力貯蔵システム (SMES) の研究開発

本研究で得られた成果及び目標達成について、個別項目ごとに以下のとおり記す。また、表 1.1.1-1 に達成度を含めた成果を、表 1.1.1-2 に最終目標達成をそれぞれまとめて示す。

1.1.1-1 2 GJ 級高磁界・大電流コンパクトコイル構成技術開発 (中部電力、京都大学、早稲田大学、鹿児島大学、東北大学)

高磁界化による高エネルギー密度化コンパクトコイルをめざし、従来の金属系 SMES コイルの許容可能なフープ応力(300 MPa 程度)の 2 倍の応力 (600 MPa) を連続して繰返し加えても使用可能な高強度コイルとして、2 GJ 級大容量 SMES コイルの技術見通しを得るために必要な 20 MJ 級システムの要素コイル規模である外径 700 mm 級コイルを対象とし、フープ応力 600 MPa 以上、2 kA 以上の通電容量を持つ SMES コイル構成技術を開発することを目標とした。

平成 22 年度までに得られた成果としては、CVD 法により作製する Y 系超電導線材を用いたフープ応力評価用小型コイル(外径 250 mm)を作製し、従来の金属系 SMES コイルの許容フープ応力の 2 倍となる 600 MPa 級のフープ応力試験を CVD-Y 系コイルを用いて実施したことが挙げられる。また、2 GJ 級大容量 SMES コイルの技術見通しを得るために必要な 20 MJ 級システムの要素コイル規模となる SMES コイルの開発を開始した。SMES システムとして必要な出力容量を実現するため、機械特性や交流損失等を評価して構造を決定した大電流容量 Y 系集合導体を用いて、高強度・低損失が実現可能な定格 2 kA 級、外径 650 mm 級のコイルを作製し、通電特性等の基礎検証試験を開始した。

本開発においては、電気機器や超電導技術に関する学識経験者、重電メーカー各社、および各電力会社等からなる超電導電力貯蔵システム研究開発委員会の下、「SMES コイル検討小委員会」を開催し、コイル構造等を十分に議論した上で開発を進めた。

超電導電力貯蔵システム研究開発委員会を開催し、コイル構造等を十分に議論した上で開発を進めた。具体的には、平成 22 年度末には、NbTi コイルと組み合わせ、外径 650 mm のコイルにおいて 600 MPa 以上の電磁力を発生させる試験を実施し、コイルの健全性を評価した。

1.1.1-2 高効率コイル伝導冷却技術開発（中部電力、九州大学、名古屋大学、日本大学、核融合科学研究所）

20 K～40 K温度領域の伝熱・電気絶縁に関するコイル特性評価を行い、高効率伝導冷却性能とともに2 kV以上の電気絶縁性能を有するコイル構造を検討した。さらに、2 kV以上の耐電圧を有する伝導冷却型コイル構造等を検討・評価した。また、20 K～40 K 温度領域において十分な熱伝達を得るため、例えばガス冷媒配管を一部活用した冷却システムやヒートパイプを用いた冷却システム等の検討評価を行うとともに、20 MJ級システムの要素コイル規模である外径 700 mm 級コイルを対象とした伝導冷却試験によりSMES運転時に想定される発熱に対し冷却可能なシステムの成立性を検討し、「超電導電力ネットワーク制御技術開発」プロジェクトにおいて概念検討した一例であるコイルシステムの形状と発生熱量から必要とされる少なくとも3 W/m² 以上の熱流束を可能とする高熱伝達冷却システムを開発することを目標とした。

本研究で得られた成果としては、テープ線材を用いたパンケーキ型積層コイルの巻線間相互作用の影響を評価したとともに、20～40 K 温度領域における高効率伝導冷却性能と、2 kV 以上の絶縁性能を有する伝導冷却型ダブルパンケーキコイル構造を検証するための模擬コイルを作製したことが挙げられる。さらに、20～40 K 温度領域において十分な熱伝達を得るため、ガス冷媒配管を一部活用した冷却システムの検証を行う試験装置を製作し、3 W/m² 以上の熱流束を可能とする高熱伝達冷却システムの試験を実施した。また、ヒートパイプを用いた冷却システムにおいては、ヒートパイプを試作し、冷媒ガスを変えることで20～80 K 温度領域で効率よく排熱できることを検証した。

20 ～40 K 温度領域において十分な熱伝達を得ることが可能なガス冷媒配管を一部活用した冷却システムにおいて、模擬発熱体を用いて3 W/m² 以上の熱流束が可能であることの検証試験結果を基に、平成 22 年度末には製作した外径 650 mm のコイルにおいて、上記冷却システムにより20～40 K 温度領域の冷却試験を実施した。その結果、試験電圧 13 kV の耐電圧性能を確認し、コイル通電時に20 K 温度領域の伝導冷却下での大電流通電性能を確認し、高効率なコイル伝導冷却技術を確立できた。

1.1.1-3 SMES 対応線材安定製造技術開発（中部電力、古河電気工業、フジクラ、九州大学、九州工業大学、ISTEC）

CVD 装置の原料ガスと酸素ガスの混合系の改善や成膜領域の形状適正化等の改造により超電導層形成の均質連続性の向上を図ることで、 $I_c=100 \sim 200 \text{ A/cm-w}$ @77 K, s.f.の臨界電流の均質な特性を有する線材を作製し、品質と製造方法の検証をすることを目標とした。

平成 20 年度には金属基板表面の平滑化の検討を行い、長尺にわたり平滑な表面

を持つ基板を作製した。これにより、IBAD 層の均質性や配向が向上し、IBAD-GZO を用いた長尺線材の超電導特性および特性の均質連続性の向上の見通しを得た。平成 21 年度は、平成 20 年度成果を長時間成膜に適用して、フープ応力試験用コイル用および均流化試験用コイル用の線材を作製した。さらに実規模コイル試験用パンケーキコイルに使用する線材の作製を実施した。これらの線材の作製を通じて、基板については、繰り返し作製における表面平滑度、強度の安定性の検討を、中間層については、より安定な超電導特性が得られるよう、構成、成膜条件等の検討を行い、良好な配向性を有する IBAD-MgO の長尺成膜結果を得た。超電導層については、CVD による長時間成膜に伴う特性低下の要因の把握とその解消の検討を開始し、局所的な低特性箇所発生の原因の一つとして気化器の原料導入部の温度安定性が影響を与えていることが判明した。また、安定化層形成では、超電導特性の劣化がなく、安定化層の厚さが均質な銅めっき技術を検討した。この銅めっき技術を、長尺線材作製に適用し、上述のコイル用線材作製を推進した。これにより、平成 22 年度は IBAD-MgO を用いて、 $I_c=200$ A/cm-w 以上 (@77 K, s.f.) の長尺線材を、製作し目標を達成するとともに、フープ応力試験コイルや集合導体コイルに供した。

平成 22 年度は、IBAD-PLD 線材の SMES モデルコイルへの適用を検討するため、約 600 m の線材を作製し、線材の殆どにおいて $I_c>200$ A/cm-w (@77 K, s.f.) の特性を得た。

1.1.1-4 高磁界コンパクト SMES システムモデル検証（中部電力、核融合科学研究所、鹿児島大学、九州大学、京都大学、名古屋大学、日本大学、北海道大学、早稲田大学）

2 GJ 級 SMES コイル基本システム構成の最適化並びに高磁界コンパクト・高効率伝導冷却コイルを用いた評価用試験モデルの設計を完了した。また、SMES システムとしての適用性を検証評価する試験計画を作成することを中間目標とした。これらの目標を達成した後、2 MJ 級評価用試験モデルを用いて、適用性検証評価試験計画に基づいて SMES 動作検証を行うとともに、「超電導電力ネットワーク制御技術開発」プロジェクトにおいて日光で実施した試験をベースとした 2 万回以上の繰り返し充放電による特性検証をプロジェクト最終年度までに行う計画であった。しかし、平成 22 年度に見いだされたコイル通電特性の変化について、喫緊に対策を講じる必要が生じたことから、最終目標を変更し、次 1.1.1.1-5 節に示す新たな技術開発項目を設けてコイル要素技術開発を進めることとした。

本研究の成果としては、2 GJ 級トロイド型 SMES において、Y 系集合導体構造コイルのクエンチ保護方法について検討したことが挙げられる。SMES コイルを構成する絶縁素線集合化導体でクエンチが発生した場合、素線間で転流が発生することをシミュレーションで確認し、クエンチ検出法への素線間転流現象の適用性検討を開始し、実験にも有効性を確認でき、特許出願した。

電気機器や超電導技術に関する学識経験者、重電メーカ各社、各電力会社等からなる超電導電力貯蔵システム研究開発委員会を開催するとともに、「SMES 試験法検討小委員会」において、コイル構造等を十分に議論した上で開発を進めた。具体的には、Y系集合導体構造コイルの特徴を活かしたクエンチ検出方法とコイル保護方法について、モデルによる試験検証を実施しており、すでに明らかとなった絶縁素線集合化導体でクエンチが発生した場合の素線間転流シミュレーション結果との比較検証を実施した。

1.1.1-5 高信頼性・高耐久性 SMES コイル要素技術開発（中部電力、京都大学、東北大学、早稲田大学）

2GJ 級 SMES の実現に資する要素技術の開発、及びコイル保護技術の確立を目的として、SMES コイルシステム化技術に必要である高耐久性・高信頼性コイルの検討・評価を実施した。

コイルの通電特性を低下させる要因の一つである Y 系超電導線材の剥離について、評価方法、及び試験結果による剥離強度の確率的予測について検討した。スタッド方式の箔耐性試験では、ロッド特有の応力場が生じるため、強度の設計には、その影響を考慮する必要があることが判明した。超電導線材の剥離強度をワイブルプロットにより整理することで、強度の確率的予測が可能となり、線材の欠陥分布から線材の剥離強度を予測した。その結果、コイルに対し、剥離応力が作用する面積が大きくなると、小さな剥離応力でもコイルの特性低下に至る可能性が示された。

線材耐力に適合した SMES コイルの最適コイル化技術を検討し、コイル構造体全体でフープ応力によって発生する歪みを抑制する新規コイル構造（Yoroi-coil）を開発した。本コイル構造では 1.7 GPa のフープ応力に耐え得るという試験結果を得た。また、このコイル構造の応力分担の状況を解析し、コイル巻線のみでなくコイルの枠材や側板がコイルに作用する電磁力を分担していることを明らかにし、本コイル構造が優れた耐久性を有していることを明確にした。

さらに、コイルをパラフィン含浸することにより、含浸なしのコイルと比較して温度上昇が約 1/5 に抑えられ、最高温度に到達するまでの時間は約 1/2 に抑えられた。よって、コイルの冷却効果はほぼ理想的な状態（冷却板とコイルが完全に接触している状態）まで改善することができることが示された。新規コイル構造（Yoroi-coil）が適用された結果であり、伝導冷却が適用可能であることが確認された。

電流転流監視によるクエンチ検出手法の妥当性を確認するため、素線絶縁した YBCO 集合導体によるダブルパンケーキモデルコイルを用いて伝道冷却によって実験を行った。常電導領域発生に伴う電流転流が発生することを確認できた。一方、従来の両端電圧監視による手法ではノイズに埋もれてしまい、常電導検出は極めて困難となることも示すことができた。積層導体内の素線で常電導領域が発生しても、

素線間の偏流を観測することによって、ホットスポット発生の危険性を回避するクエンチ検出が可能になると推定された。

以上のように高強度で電磁応力や熱応力に優れた耐性を有するコイル構造を開発し、剥離やフープ応力耐性に対する課題解決が図られた。さらに伝導冷却適用性の検証やクエンチ検出技術評価によって、実使用に必要な要素技術を開発した。

本開発においては、「超電導電力貯蔵システム研究開発委員会」を開催し、先述のコイル構造の検討、剥離強度評価、伝導冷却特性評価等について議論した。

1.1.1-6 超電導電力貯蔵装置の技術開発における成果のまとめ

表 1.1.1-1 に中間評価時点までに得られた成果をまとめて示す。

表 1.1.1-1 超電導電力貯蔵装置の技術開発における成果のまとめ

中間目標	研究開発成果	達成度
(1) 2 GJ 級高磁界・大電流コンパクトコイル構成技術開発 フープ応力 600 MPa 以上、2 kA 以上の通電容量を持つ SMES コイル構成技術を開発する。	多層巻コイル(外径 250 mm)を作製し、600 MPa を超えるフープ応力耐性を実証した。 4 束導体コイル (外径 650 mm) を作製し、2.6 kA 通電を実証した。	達成
(2) 高効率コイル伝導冷却技術開発 ①20~40 K 付近の温度領域における伝導冷却を可能とするコイル伝導冷却技術を開発する。 ②2 kV 以上の電気絶縁性能を有する高伝熱コイル構造を開発する。	模擬コイルを使ったコイル伝導冷却システムを検証する試験装置を製作し、冷却試験を実施した。 左記絶縁性能を有する伝導冷却型コイル構造の設計を実施した。	達成
(3) SMES 対応線材安定製造技術開発 SMES システムモデル試作に必要な下記仕様例に相当する線材の安定製造技術を確立する。 仕様例： $I_c=20 \text{ A/cm-w@77 K\&3 T}$ で機械強度 1 GPa を有する 100 m に相当する線材	フープ応力試験用コイルおよび均流化試験用コイルに線材を提供し、実規模モデルコイル用の線材を作製した。これらの作製を通じて、特性向上と歩留り改善を進めた。	達成

<p>(4) 高磁界コンパクト SMES システムモデル検証</p> <p>①2 GJ 級 SMES コイル基本システム構成の最適化並びに高磁界コンパクト・高効率伝導冷却コイルを用いた評価用試験モデルの設計を完了する。</p> <p>②SMES システムとしての適用性を検証評価する試験計画を作成する。</p>	<p>具体的支持構造検討により 2 GJ 級 SMES コイル基本システムの最適化を検討し、評価用試験モデルの内、伝導冷却試験システムの設計・製作を実施した。</p> <p>クエンチ検出・コイル保護方法の検証等の試験計画立案に必要なコイル特性を取得した。</p>	<p>達成</p>
---	---	-----------

1.1.1-7 最終目標達成状況のまとめ

表 1.1.1-2 に、超電導電力貯蔵システム研究開発の最終目標達成状況についてまとめる。

表 1.1.1-2 超電導電力貯蔵装置の最終目標達成のまとめ

研究テーマ	最終目標	達成状況
(1) 2 GJ 級高磁界・大電流コンパクトコイル構成技術開発	フープ応力 600 MPa 以上、2 kA 以上の通電容量を持つ SMES コイルによるモデル検証	φ 650 mm 級の 4 束導体コイルを作製し、3.5 T 級大口径マグネット中で繰り返しフープ応力試験を実施することで、最終目標を達成した。
(2) 高効率コイル伝導冷却技術開発	繰り返し充放電試験における 20-40 K, 2 kV 以上の冷却システムの検証	模擬発熱体を用いてコイル発熱量 (3 W/m ²) の 7 倍 (21 W/m ²) の発熱量に対し冷却システムが成立することを実証した。絶縁性能においては 2 kV の 3 倍 (6 kV) の電圧に対し設計は完了しており、性能を確認した。φ 650 mm 級コイルにおいて伝導冷却と電気絶縁性能を検証し、最終目標を達成した。
(3) SMES 対応線材安定製造技術開発	下記仕様例を満足する線材の安定製造による 2 MJ 級モデルコイルへの線材供給仕様例： $I_c=20 \text{ A/cm}\cdot\text{w} @77 \text{ K}$, 3 T で強度 1 GPa を有する 100 m に相当する線材	中間層の欠陥抑制、基板平滑化および原料供給系の温度適正化によって、線材の歩留りが向上し、線材作製技術の安定化を達成した。モデルコイル用の線材作製を行い供給目標・安定製造を達成した。

<p>(4) 高磁界コンパクト SMES システムモデル検証</p>	<p>①2 GJ 級 SMES コイル基本システム構成の最適化並びに高磁場コンパクト・高効率伝導冷却コイルを用いた評価用試験モデルの設計を完了する。</p> <p>②SMES システムとしての適用性を検証評価する試験計画を作成する。</p>	<p>具体的支持構造検討により 2 GJ 級 SMES コイル基本システムの最適化を検討し、評価用試験モデルの内、伝導冷却試験システムの設計・製作を実施した。</p> <p>クエンチ検出・コイル保護方法の検証等の試験計画立案に必要なコイル特性を取得した。</p>
<p>(5) 高信頼性・高耐久性 SMES コイル要素技術開発</p>	<p>実運転条件におけるコイル線材及びコイル構造を評価することで、コイルの径方向応力に耐える構造の設計手法を確立し、2 万回繰返し充放電試験と同等レベルの信頼性・耐久性を持つコイル要素技術開発に向けて課題を抽出し、解決策を提案する。</p>	<p>高強度で電磁応力や熱応力に優れた耐性を有するコイル構造 (Yoroi-coil) を開発し、剥離やフープ応力耐性に対する課題解決が図られた。さらに伝導冷却適用性の検証やクエンチ検出技術評価によって、実使用に必要な要素技術を開発した。</p>

1.1.1-8 本開発成果の海外との比較および位置づけ

本項では、上記の超電導電力貯蔵装置の技術開発における成果に関して、世界との比較を行うことにより成果の意義を明確にする。

海外の開発動向については、II.3.2「海外における研究開発動向」に示したが、規模や Y 系超電導線材を使用するという点で競合するプロジェクトは韓国、フランス、米国で実施されているものである。それぞれの開発動向については、詳細な内容や実施スケジュールが不明確な点もあるが、本プロジェクトとの比較を行うと、下記の通り評価できる。

表 1.1.1-3 海外における SMES 開発動向

海外におけるSMES開発動向							
国名	蓄積エネルギー	定格出力	コイル構造	線材種	期間 (実系統運転)	運転温度	冷却方式
米国	3.4MJ			Y系		4K	
フランス	0.8MJ		ダブルパンケーキ積層	Bi2212	2004-2007	20K	冷凍機 伝導冷却
フランス				Y系	2008-2011	—	—
韓国	3MJ	750kVA	ソレノイド	NbTi	1999/7-2003/12	4K	液体ヘリウム 浸漬冷却
韓国	0.6MJ	450kW		Bi2223	2004-2007	—	—
韓国	2.5MJ			Bi2223orY系		20K	伝導冷却

(1) 中間評価（平成 22 年度）時点

「2 GJ 級高磁界・大電流コンパクトコイル構成技術開発」における実証試験に使用している外径 650 mm 級の 4 束導体の Y 系コイルについては、平成 22 年度時点で世界最大、最高性能と思われる。また、この試験において 600 MPa 以上のフープ応力、2.6 kA 通電を実証し、実用化の目途をつけたことも世界最先端であると思われる。

「高効率コイル伝導冷却技術開発」においては、20～40 K の運転領域における伝導冷却で 6 kV 以上の絶縁性能を有したコイルを開発しており、これも世界最高水準と思われる。さらに、模擬発熱体を用いた実冷却システムを構築し、実証試験についても実施し、これも世界最先端の開発成果であると思われる。

「高磁界コンパクトモデル SMES システムモデル検証」においては、クエンチ検出として、偏流現象を利用する画期的な方法を世界で初めて考案し、これによって、高精度なクエンチ保護システムを実現できる目途を得た。

(2) 最終目標（平成 24 年度）時点

表 1.1.1-4 SMES 開発に関する世界動向との比較

研究テーマ	世界動向	本プロジェクト達成と位置付け
(1) 2 GJ 級高磁界・大電流コンパクトコイル構成技術開発	フランス（規模不明） 韓国（最終目標 2.5 MJ）	（中間目標） ・ 外径 650 mm、4 束導体の Y 系コイル ・ 600 MPa 以上の耐フープ応力 ・ 2.6 kA 通電 ↓ 世界最大・最高性能のコイル開発
(2) 高効率コイル伝導冷却技術開発	フランス、韓国 （伝導冷却技術）	（中間目標） ・ 伝導冷却 ・ 6 kV 以上の絶縁性能 ・ 実システムでの実証試験実施 ↓ 世界最高水準の冷却技術確立
(3) 高磁界コンパクト SMES システムモデル検証	フランス（規模不明） 韓国（最終目標 2.5 MJ）	（中間目標） ・ 偏流現象を利用するクエンチ保護システムの考案 ↓ 世界初
(4) 高信頼性・高耐久性 SMES コイル要素技術開発	米国(3.4MJ 30T, 4.2K)	（最終目標） ・ コイルの径方向応力に耐える構造の設計手法を確立 ↓ 外部構造による応力分担により、2GPa 級の高応力にも耐えられる世界最大・最高性能のコイル化技術を開発

1.1.2 超電導電力ケーブル研究開発

1.1.2-1 66 kV 大電流ケーブル（住友電気工業、フジクラ、京都大学、早稲田大学、ISTEC）

(1) 大電流・低交流損失技術の基礎特性評価

- 中間目標：ケーブル交流損失(導体層、シールド層) 2 W/m-相@5 kA 以下
- 最終目標：さらなる交流損失の低減に向けたケーブル構造の検討・設計

超電導線材の多層導体化の交流損失を含めた電気的特性及び機械的特性の基礎データを短尺モデル導体・ケーブルを用いて収集し、コンパクトで低損失なケーブル設計を検討した。

ケーブル設計として、開発目標である 150 mmφの管路に収納できる大電流ケーブルの構造設計を行い、「超電導導体 4 層、超電導シールド 2 層構造」を選定した。

交流損失低減において、線材特性・導体構造等を加味した交流損失シミュレーション及び 4 層構造多層ケーブル導体の試作・評価の結果より、130 A/4 mm-w(@77K, s.f.)もしくは 50 A/ 2 mm-w(@77K, s.f.)の I_c 特性を有する線材を使用することで中間目標値を検証できることが分かった。4 mm 幅線材の I_c 向上及び 2 mm 幅線材の端部の J_c 劣化改善により損失 1.8 W/m-相(@64 K, 5 kA)（推定総 I_c 値@64 K：導体 13 kA, シールド 12 kA）を確認し、目標値以下の損失特性を達成した。

平成 23 年度以降には、レーザスリットにより線材幅方向 J_c 分布を改善した 2 mm 幅線材を用いて、導体最外層のみに 2 mm 幅線材を、その他の層には 4 mm 幅線材を用いた Hybrid 構造のケーブルコアを試作して交流損失特性を検証した結果、1.5 W/m-相(@71 K, 5 kA)（推定総 I_c 値@71 K：導体 11.5 kA, シールド 8.8 kA）を確認した。さらに、全て 2 mm 幅線材を用いた導体を試作して交流損失特性を検証した結果、0.4 W/m-相(@74 K, 5 kA)（推定総 I_c 値@74 K：導体 10.1 kA）の低損失値を確認した。

また、高 I_c の IBAD-PLD 線材を用いて 10 m 級ケーブルを有する 5 kA 通電特性の検証システムを作製した。高 I_c 線材の使用により負荷率を低減させることで 0.95 W/m-相(@67 K, 5 kA)（推定総 I_c 値@67 K：導体 26.7 kA, シールド 22.6 kA）の低損失を確認した。さらに、製造余長の短尺サンプルにて 1.4 W/m-相(@77 K, 5 kA)（推定総 I_c 値@77 K：導体 15.1 kA, シールド 12.8 kA）を確認した。

(2) 大容量接続技術の開発

- 中間目標：熱的な定常状態が得られるまで 5 kA 連続通電を行い、ケーブル導体、超電導-常電導接続部、電流リードに異常がないこと。
- 最終目標：中間接続部を有する大電流ケーブルコアの作製、課電及び機械強度特性評価

大容量電流リードを開発し、5 kA 連続通電に成功した。また、超電導-常電導接続部金具の構造設計を完了した。超電導ケーブルと超電導-常電導接続金具を組み合わせた 5 kA 連続通電試験を実施し、熱的な定常状態が安定に得られていることを確認した。

平成 23 年度以降には、中間接続部の構造設計検証において電気絶縁試験では、所要性能を満足することを検証するとともに、機械特性試験では、液体窒素の冷却条件下において、2000 kgf の引張条件(想定 1000 kgf)及び 200 kgf の圧縮条件(想定 167 kgf)の試験を実施し、試験前後で I_c 値に劣化がなく中間接続部の機械設計の妥当性を検証した。

(3) 三心一括ケーブル導体の検証

- 中間目標：短絡試験（31.5 kA, 2 sec 相当）でケーブルの性能に劣化が無いこと。

モデルケーブルを用いて、31.5 kA・2 sec の過電流を通電し、ケーブルコアにダメージが無いことを確認した。二相短絡事故（31.5kA、2sec）を想定して、ケーブルコア間に発生する電磁力の検討を行い、影響が無いことを確認した。平成 22 年度は、長尺ケーブル製造用巻き線機による試作により三心一括ケーブル製造工程における健全性を確認し、試作した単心ケーブルコア及び三心ケーブルコアの曲げ特性を検証した。また、冷却時に発生する熱収縮に対する健全性を確認した。

(4) 66 kV 大電流ケーブルシステム検証

- 中間目標：検証用システムの設計（66 kV/5 kA、三心一括、15 m 長）。
- 最終目標：検証システム作製・課通電試験実施（66 kV/三心一括/5 kA、15 m 長）。

150 mmφの管路に収納可能、ケーブル損失（交流損失(導体層、シールド層)、誘電体損失) 2.1 W/m-相@5 kA 以下。

※世界最小レベルの低損失・世界最大の送電密度を有するコンパクトな三心一括ケーブル

ケーブル実用化時の長期間運転に対して、課電特性、熱サイクル特性等を検証するシステム設計案及び課通電試験計画書案を作成した。

平成 23 年度以降には、これまでに開発された要素技術を用いて 15 m 長ケーブルシステムを製造し、中間目標で得られた課通電試験の設定条件下における課通電試験を実施し、試験計画書の性能を満足することを検証した。

1.1.2-2 275 kV 高電圧ケーブル（古河電気工業、京都大学、名古屋大学、早稲田大学、ISTEC）

(1) 高電圧絶縁・低誘電損失技術特性評価

●中間目標：交流損失(導体層)＋誘電体損失 0.8 W/m-相@3 kA 以下

●最終目標：交流損失(導体層、シールド層)＋誘電体損失 0.8 W/m-相@3 kA 以下

3 kA での交流損失評価を実施。レーザ細線化による交流損失低減に成功、世界最小記録となる 0.235 W/m-相(@68.7 K, 3 kA)（推定総 I_c 値@68.7 K：導体 9.2 kA）を確認した。

275 kV 級超電導ケーブルの試験電圧に関して検討した結果、電気絶縁厚は 25.5 mm となり、誘電体損失は 0.46 W/m-相となる。これにより、ケーブル損失（交流損失（導体層）、誘電体損失）は 0.70 W/m となり、中間目標である 0.8 W/m 以下を達成した。

平成 23 年度以降には、銅フォーマ形状を見直し、3 mm 幅の線材を使って導体を作製した結果、0.124 W/m-相(@73.7 K, 3 kA)（推定総 I_c 値@73.7 K：導体 9.02 kA）となり、数値解析結果ともよい一致を示した。シールドの損失も解析により見積もり、導体とシールドを合わせて 0.2 W/m-相となり、誘電体損失 0.6 W/m-相と合わせて、目標の 0.8 W/m-相以下を達成した。

(2) 高電圧接続技術の開発

●中間目標：ケーブルと接続部を組み合わせた 275kV 連続課電を行い異常がないこと。

3 kA 級超電導導体の作製・評価を通して、ケーブル導体、超電導-常電導接続部に異常がないことを確認した。また、超電導-超電導接続部を作製し、数 nΩ の低抵抗であることを確認した。中間接続部の破壊モデルを設計・製作し、破壊試験を実施し、補強絶縁部の径方向ストレス 40 kV/mm、沿層方向ストレス 3 kV/mm を得た。雷インパルス 1260 kV を想定して中間接続部を設計・作製し、3 回の熱サイクルを経た後も AC310 kV の部分放電フリーと 1155 kV の耐インパルス特性を確認した。

ケーブル、端末で世界最高値の 320 kV の耐圧特性を確認した。気中終端部の仕様耐電圧は AC400 kV で部分放電フリー、Imp1260 kV で破壊しない構造とした。長期に使用して、熱サイクルを経た後も、ブッシングの誘電特性に変化はなく、AC310 kV の部分放電フリーと 1155 kV の耐インパルス特性を維持した。

(3) 超電導電力ケーブル電気絶縁特性の調査

●中間目標：短絡試験（63 kA、0.6 sec 相当）の耐性。

●最終目標：短尺ケーブルコアモデルを作製・評価・検討し、各種コア構造のシステム設計の妥当性を検証、ケーブルシステムに反映する。

275 kV の電気絶縁材料として、複数の絶縁材料の電気特性を評価し、最終的に PPLP®-C を選定した。絶縁厚 1 mm のケーブルによる電気特性データ、10 mm 厚のケーブルの AC 課電試験、Imp（インパルス）試験データを取得した。

ケーブルフォーマや銅保護層の断面積の最適化、ならびに線材の銅メッキ層の最適化により世界最高 63 kA の過電流通電(0.6 sec)による温度上昇の抑制ができた。また、ケーブルの伝熱及び電磁界数値シミュレーション手法を確立して、予想される交流損失、誘電体損失に対して、ケーブル構造から定常運転時において伝熱特性上問題ないことを確認した。

平成 23 年度以降には、63 kA-0.6 sec 時の温度上昇を抑えるために、銅フォーマ仕様を丸撚り（銅断面積 325 mm²）から中空（400 mm²）に設計変更し、通電・伝熱特性を解析、試験により評価した。その結果、温度上昇の抑制を 70 K から 20 K に、77 K への超電導復帰特性も 2 時間から 10 分以内に改善された。

(4) 275 kV 高電圧ケーブルシステム検証

●中間目標：検証用システムの設計（275 kV/3 kA、単心、30 m 長）。

※世界最高電圧、最大送電容量

●最終目標：検証システム作製・課通電試験実施（275 kV/単心/3 kA、30 m 長）。

外径 150 mm 以下。ケーブル損失（交流損失(導体層、シールド層)、誘電体損失) 0.8 W/m-相@3 kA 以下。

※世界でもトップの低損失・コンパクトなケーブル

275 kV 高電圧ケーブルの特性を有することを検証するため、単心の高電圧ケーブル、高電圧終端接続部、中間接続部等を組み合わせ、超電導電力ケーブルシステムを設計した。平成 22 年度は、システム検証の試験条件について検討し、長期課通電試験計画書案を作成した。

平成 23 年度以降には、これまでに開発された要素技術を用いて中間接続部を有する 30 m 長ケーブルシステムを製造し、中間目標で得られた課通電試験の設定条件下における課通電試験を実施し、試験計画書の性能を満足することを検証した。

1.1.2-3 超電導電力ケーブル対応線材安定製造技術開発（住友電気工業、フジクラ、昭和電線ケーブルシステム、JFCC、ISTEC）

(1) 大電流用線材の安定製造技術の開発

- 中間目標： $J_e=15 \text{ kA/cm}^2$ (@77 K, s.f.) (2 mm-w×20 m) に相当する線材を安定に作製可能な技術を確立する。

大電流ケーブル用線材総長 8 km (1 cm 幅)を安定製造・提供する。

- 最終目標：上記仕様に相当するシステム検証用線材の安定作製、加工、評価を確実に実施する。

大電流ケーブル用線材総長 2 km を安定製造・提供する。

低磁性クラッドタイプの結晶粒配向金属基板-PLD 線材作製技術開発を実施し、ケーブル化に必要な性能及び製造速度等を満足する Y 系超電導線材安定製造の要素技術を確立した。本技術を基にして、 $J_e = 17 \text{ kA/cm}^2$ (@77 K, s.f.) (2 mm 幅線材×28 m、 J_e は 20 μm の Cu メッキを含む線材厚さ 170 μm で算出) の特性を有する線材を作製・実証した。また、平成 20～22 年度においてケーブル用線材を 1 cm 幅換算で総長 8 km の提供計画に対し実績は 8.5 km であり中間目標を達成した。

平成 23 年度以降には、これらの要素技術を基に、主に大電流ケーブルシステム検証用線材を製造した。加工・検査も含めた工程の検討を行い、ケーブル用線材の製造工程を確立した。短尺検証用線材も含めた $J_e 15\sim 20 \text{ kA/cm}^2$ (@77 K, s.f.)以上の線材の製造量は、1 cm 幅換算で総長 2 km の計画に対し実績は 3.4 km であり最終目標を達成した。

(2) 基板・中間層テープの開発

- 中間目標：IBAD 中間層テープ総長 20 km (5mm 幅)を提供。

$J_e=15 \text{ kA/cm}^2$ (@77 K, s.f.) (2 mm-w×20 m) の特性を得ることができる基板・中間層テープの安定・高速な製造技術を検討する。

- 最終目標：IBAD 中間層テープ総長 6 km を提供

平成 22 年度末までに高電圧ケーブル化技術開発用として 5 mm 幅 IBAD-GZO 基板を、計画 20 km に対して約 29 km を製造・提供した。

100 m 長の IBAD-GZO 中間層を使用した線材において 380 A/cm-w(@77 K,s.f.)の I_c 、170 m 長の IBAD-MgO 中間層を使用した線材は 300 A/cm-w(@77 K,s.f.)以上の I_c を実現しており、 $J_e = 15 \text{ kA/cm}^2$ (@77 K, s.f.)以上の通電特性を実現し得る基板・中間層テープの安定製造技術を開発した。

平成 23 年度以降には、高速成膜が可能な IBAD-MgO 層を成膜した中間層基板について計画 6 km (5 mm 幅) に対し 6.9 km を提供した。

(3) MOD プロセスによる高電圧ケーブル用超電導線材の開発

- 中間目標：TFA-MOD 法による長尺安定製造技術の確立を図る。

線材の安定製造供給：6.5 km (1 cm 幅)、歩留り向上：70 %達成。

- 最終目標：線材の安定製造供給：総長 1.3 km (1 cm 幅)

短尺導体評価用供給：総長 0.3 km (1 cm 幅)

平成 20～22 年度において、IBAD-MOD 線材を供給総長 6.5 km の計画に対し、6 km(1 cm 幅換算)を高電圧ケーブルプロジェクトへ供給した。なお、試作用ケーブルの長さが 30 m であることから、平成 22 年度に製造したケーブル用の線材に関し、単長を 30 m として計算された歩留りは 72 %となった。なお、基板の傷等明らかな欠陥以外に工程内で発生する異物の付着が確認されており、平成 22 年度は工程内欠陥の対策を施すことにより 50～100 m 単長の歩留りを上げ、さらに 100 m を超える長さの線材の歩留り向上を図った。

平成 23 年度以降には、IBAD-MgO 中間層基板を用いた単長 50m 以上の超電導線材を計画通り、1 cm 幅換算にてケーブルシステム検証用として 1.3 km、短尺導体評価用として 0.3 km 程提供した。

(4) 微細構造解析

- 中間目標：超電導層等を微細構造観察し、評価結果をフィードバックして、安定製造を支援する。

銅めっき後の線材サンプルを SEM、TEM により断面観察し、Cu/Ag は非常に密着性を示しており、超電導特性が健全な領域で YBCO/CeO₂/GZO の積層構造は保たれていた。ハンダ処理により超電導特性が劣化していた領域を調査したところ、Hastelloy™ 構成元素の成分が安定化 Ag 層と超電導層の間に堆積・混入していることが判明した。また、超電導ケーブル用に線材を幅狭に分割・裁断するプロセス開発を支援するため、種々の線材切断手法とめっき手順を変えたサンプル切断面を SEM・TEM 観察し、それぞれのプロセスにおける切断面近傍の超電導層及び中間層の微細組織変化を示し、中間目標を達成した。

(5) IBAD-PLD 線材の安定製造技術の開発

- 中間目標：200 A/cm-w(@77 K, s.f.)級 IBAD-PLD 線材による電力ケーブルのシステム成立性を確認するため、IBAD-PLD 線材の安定製造技術開発を行う。
- 最終目標：極低交流損失ケーブル導体評価用に 300A/cm-w(@77 K, s.f.)級の超電導線材を作製・提供する

IBAD-MgO/PLD-GdBCO 線材を作製し、90 m 長で $I_c = 200 \text{ A/cm-w}(@77 \text{ K, s.f.})$ の特性を持った線材開発を行い、この線材を用いて、超電導ケーブルの要素技術である細線化技術にて、細線加工し、40 A/2 mm-w(@77 K, s.f.)線材を作製した。この加工線材(2 mm 幅)50 本を用いて 2 層構造を持った超電導導体(1 m)を作製し、 $I_c=2750 \text{ A}@77 \text{ K}$ の特性を得た。また、導体の交流損失として、0.0258 W/m@1 kA (負荷率 0.51) を得た。以上の通り中間目標を達成した。

平成 23 年度以降には、極低交流損失ケーブル導体評価用に 500A/cm-w(@77 K, s.f.)級の超電導線材を作製・提供し、この線材を用いて作製したケーブル導体(1 m)により、0.6 W/m@5kA の低交流損失を確認した。

(6) 線材の評価技術の開発

- 中間目標：Y 系超電導線材を長尺線材 I_c 評価装置等で評価を行い、評価パラメータによる効率的、効果的な評価についての検証を行う。
- 最終目標：開発された評価技術を用いてケーブルシステム検証用線材に対して各種評価を行い、それらの効率・効果を検証する。

平成 20～22 年度には、「超電導応用基盤技術研究開発」プロジェクトで開発された超電導線材評価装置を用いて線材評価を行い、評価装置としての性能を確認した。それぞれの特徴を活かした適材適所の評価運用を行うことで、効率的に評価できる。線材特性を効率的・簡易に評価するには、Reel to Reel・ホール素子法が優れているが、 I_c 特性は見積値であり、真値が必要な場合には、Reel to Reel -I-V 特性評価装置である。劣化・剥離等を効率的に確認するには、Reel to Reel -SQUID 装置であり、細かく評価するには Reel to Reel -MOI 評価装置である。以上の通り中間目標を達成した。

平成 23 年度以降には、高電圧ケーブルシステム検証に使用される線材に対して、これらの評価技術を組み合わせることで、効率・効果的な評価が可能であることを検証した。

1.1.2-4 超電導電力ケーブルの熱収支に関する評価研究（前川製作所、早稲田大学、ISTEC）

(1) 定常通電時及び事故時の伝熱特性検討

- 中間目標：ケーブル構造最適化のための伝熱・電磁界数値シミュレーションの実施。
- 最終目標：システム検証結果に合致する汎用性のあるシミュレーション技術の確立。

定常通電時及び事故時の伝熱特性に対するシミュレーションを行い、超電導電力ケーブル構造設計の最適化にフィードバックした。

超電導モデルケーブルを用いて過電流通電試験を行い、超電導モデルケーブル内の温度上昇と電流分布について数値シミュレーションの結果と比較検討を行った。解析結果は実験結果とよく一致しており、開発した計算機シミュレータの妥当性が確認できた。

66 kV 大電流超電導ケーブルシステム検証においては、短絡電流通過時の温度上昇解析・評価及び短絡電流通過時の三心ケーブルに働く電磁力解析・評価を行い、ケーブル設計の妥当性を確認した。275 kV 高電圧超電導ケーブルシステム検証用ケーブルの余長にて過電流通電試験を行い、解析結果と比較した結果、良い一致を示していることを確認した。

(2) スラッシュ窒素の研究

- 中間目標：ケーブルのスラッシュ窒素冷却を実現するためのシステム構築。
- 最終目標：スラッシュ窒素冷媒の有用性のシステム検証の実施。

高温超電導ケーブルの冷媒としてスラッシュ窒素の冷却特性を評価するため、システムの検討、固相率制御方法の研究、連続生成方法の研究を実施した。

システムの検討については、スラッシュ窒素の冷却システムでは微細な固体窒素を連続的に生成する生成装置、生成装置に付属する冷凍機、貯留するスラッシュ窒素を攪拌する攪拌機、一定にした固相率でケーブルにスラッシュ窒素を供給するための濃度計が必要となることが分かった。さらに、スラッシュ窒素の特性を活かした早期の適応場所として、低電圧大電流の発電機端から昇圧トランスに至る部分及びケーブル端末等が想定されることが分かった。

固相率制御方法の研究では、開発したスラッシュ窒素生成装置にて固体の生成量及び粒子径の制御が可能なが分かった。最大約 5 g/sec の固体の生成、及び平均粒子径 100 μm 程度の固体粒子生成が出来る生成装置を開発した。

平成 23 年度以降には、製作したスラッシュ窒素生成・搬送試験装置を用いて循環試験装置の製作を行い、スラッシュ窒素の固相率を変化させてスラッシュ窒素と液体窒素の 2 相混合冷媒による冷却特性を把握し、さらに、循環試験装

置の冷却容量の拡大やモデルケースに基づく設計検討を実施し、スラッシュ室素のケーブル冷却用冷媒としての有用性を検証した。

(3) 超電導電力機器の冷却に関する調査研究

- 中間目標：冷却設備の最新動向、超電導ケーブル等に要求される冷却設備の仕様及び法的規制に関する調査の実施。

- 最終目標：超電導ケーブルの冷却特性に関する調査の実施

冷凍機の能力を確認し、超電導機器に必要な冷凍能力を確認した。また超電導ケーブルを布設するための必要な冷凍能力を検討した。法令・規則に関しては、対応が必要と思われる関連法規則を調査した。導入・布設時は、該当する法規則を管理する関係箇所と協議・確認・許可・申請を的確に行う必要がある。

平成 23 年度以降には、超電導ケーブルの定常通電時及び過電流通電後の復帰特性、端末からの熱侵入による影響に関する調査を実施した。

1.1.2-5 超電導電力ケーブル開発における成果のまとめ

超電導電力ケーブル開発における中間目標に対する成果のまとめを表 1.1.2-1 に記載する。

表 1.1.2-1 中間目標に対する成果のまとめ

項目	目標 (平成 22 年度達成)	これまでの成果	達成度
1. 66 kV 大電流ケーブル化技術の開発			
大電流・低交流損失	ケーブル交流損失 (導体層、シールド層) 2 W/m・相@5 kA 以下	<ul style="list-style-type: none"> ・ 導体構造を導体 4 層、シールド 2 層に絞込み ・ 線材幅 2 mm、4 mm の導体を試作 ・ 1.8W/m・相@5kA まで低減 	達成
三心一括ケーブル導体の検証	短絡試験 (31.5 kA, 2 sec 相当) でケーブルの性能に低下が無いこと	モデルケーブルコアを作製し、31.5 kA、2 sec で性能が低下しないことを確認した。コア間に発生する電磁力を評価し、問題無い範囲であることを確認した。	達成
大容量接続技術の開発	5kA 連続通電を行い、ケーブル導体、超電導-常電導接続部、電流リードに異常がないことを確認する	大容量電流リード及び超電導-常電導接続部を開発して 5 kA 通電を実施し、異常のないことを確認した。	達成
2. 66 kV 大電流ケーブルシステム検証			
システム検証	検証用超電導ケーブルシステムのシステム設計完了 課通電試験計画書の作成	システム設計案及び課通電試験計画書案を作成した。	達成
3. 275 kV 高電圧ケーブル化技術の開発			
高電圧絶縁・低誘電損失技術の基礎特性評価	<ul style="list-style-type: none"> ・ ケーブル損失 (交流損失 (導体層)、誘電体損失) 0.8 W/m・相@3 kA 以下 ・ 絶縁材料の絶縁設計検討 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 超電導導体の 3 kA における交流損失は 0.235 W/m・相達成。 ・ PPLP^{TR}-C を絶縁紙として採用し、設計で 0.46 W/m の誘電体損失見込み ・ 交流損失と誘電体損失を合わせて 0.70 W/m・相となった。 	達成
高電圧接続技術の開発	<ul style="list-style-type: none"> ・ 中間部、終端部接続部を開発 ・ 275 kV 連続課電を行い、ケーブル導体、超電導-常電導接続部、電流リードに異常がないことを確認する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 超電導-超電導接続部は数 nΩ の低抵抗を達成した。 ・ 3 kA の超電導導体を作製・評価を通して、ケーブル導体、超電導-常電導接続部に異常がないことを確認した。 	達成
超電導電力ケーブル電気絶縁特性の調査	<ul style="list-style-type: none"> ・ 長時間課電時、及び短絡電流が流れた場合の絶縁特性について、モデル実験により評価を行う。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ モデルケーブルでの連続課電、寿命特性を取得。 ・ 絶縁厚 10 mm までの課電試験を実施し、誘電特性、破壊特性、部分放電特性を取得。 ・ 交流損失、誘電体損失とケーブル構造から定常運転時において伝熱特性上問題ないことを解析的にも確認した。 ・ ケーブルフォーマや銅保護層の断面積の最適化、ならびに線材の銅メッキ層の最適化により過電流通電 (63 kA-0.6 sec) による温度上昇の抑制ができた。 	達成
4. 275 kV 高電圧ケーブルシステム検証			
システム検証	<ul style="list-style-type: none"> ・ ケーブルシステムのシステム設計をする ・ 耐久性を評価できる課通電試験計画書を作成する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ ケーブルシステムを設計した。 ・ 他規格等を調査し、275 kV-3 kA の試験条件の選定。長期課通電試験の計画書を作成した。 	達成

5. 超電導電力ケーブル対応線材技術開発			
大電流用ケーブル対応線材安定製造技術開発	<ul style="list-style-type: none"> $J_e=15 \text{ kA/cm}^2$(@77K, s.f.) (2 mm-w×20 m) に相当する線材を安定に作製可能な技術を確立する 大電流ケーブル用線材総長 8 km を安定製造・提供する。 	<p>ケーブル化に必要な性能及び製造速度等を満足する Y 系超電導線材製造の要素技術を確立し、$J_e=17 \text{ kA/cm}^2$(@77K, s.f.) (2 mm 幅線材×28 m) の特性を有す線材を作製・実証した。</p> <p>計画通り平成 21 年度時点で 4.3 km 作製し、平成 22 年度に 4.2km 作製した。</p>	達成
基板・中間層テープの開発	<ul style="list-style-type: none"> IBAD 中間層基板・線材提供 20 km $J_e =15 \text{ kA/cm}^2$(@77K, s.f.) (2 mm-w×20 m) の特性を得ることができる基板・中間層テープの安定・高速な製造技術を検討する 	<ul style="list-style-type: none"> IBAD-GZO 基板を平成 21 年度時点で 16.2 km 提供した。平成 22 年度に 29.0 km 提供。 100 m 長の IBAD-GZO 中間層を使用した線材において 380 A/cm-w(@77K,s.f.) の I_e 値を、170 m 長の IBAD-MgO 中間層を使用した線材は 300 A/cm-w(@77K,s.f.) の I_e 値を実現しており、$J_e = 15 \text{ kA/cm}^2$ (@77K, s.f.)以上の通電特性を実現し得る基板・中間層テープの安定製造技術を開発した。 	達成
MOD プロセスによる高電圧ケーブル用線材の開発	TFA-MOD 法による長尺安定製造技術の確立を図る。 線材供給 6.5 km (平成 20- 22 年度) 歩留り向上 70 %達成(平成 22 年度)	平成 22 年度時点で TFA-MOD 法により作製された線材 6.5 km(10 mm 幅換算)を供給し、歩留り 70%以上を達成した。	達成
微細構造解析	超電導層等を微細構造観察し、評価結果をフィードバックして、安定製造を支援する。	MOD 線材の構造観察を行い、フィードバックすることで、線材開発・ケーブル開発に寄与した。	達成
IBAD-PLD 線材の安定製造技術の開発	200 A/cm-w(@77K, s.f.) 級 IBAD-PLD 線材による電力ケーブルのシステム成立性を確認するため、IBAD-PLD 線材の安定製造技術開発を行う。	IBAD-PLD 線材を用いて、2 層導体を作製し、 $I_e=2750 \text{ A}$ (@77K, s.f.)の特性を得た。また、導体の交流損失として、 0.0258 W/m -相@1 kA (負荷率 0.51) を得た。ケーブルシステムの成立性を確認した。	達成
線材の評価技術の開発	Y 系超電導線材を長尺線材 I_e 評価装置等で評価を行い、評価パラメータによる効率的、効果的な評価についての検証を行う。	超電導電力ケーブル用線材評価装置として、現在使用されている評価装置の性能を確認し、その目的に適した評価装置について検討した。	達成
6 超電導電力ケーブルの熱収支に関する評価研究			
定常通電時及び事故時の伝熱特性検討	システム検証用ケーブルの設計から熱解析を行い、シミュレーション結果を設計へフィードバックする。	定常運転時の伝熱特性を解析し、ケーブルフォーマ・設計にフィードバックした。 過電流通電時の温度特性を解析し、ケーブル設計にフィードバックするとともに、実験により妥当性を確認した。	達成
スラッシュ窒素の研究	スラッシュ窒素冷却に適したケーブル冷却方法を検討し、実用化をめざしたスラッシュ窒素冷却システムを明確にするとともに課題を抽出する。	スラッシュ窒素の冷却特性を評価。 スラッシュ窒素の冷却システムの要素研究。 約 5 g/sec の固体の生成及び、平均粒子径 100 μm 程度の粒子生成が出来る連続生成装置を開発。	達成
超電導電力機器の冷却設備の調査研究	冷却設備の最新動向・超電導ケーブル等に要求される冷却設備の仕様・法的規制に関する調査。	冷却設備の動向を調査し、超電導ケーブルに要求される冷却設備・仕様を検討した。導入・普及に向けた法令・規制関係を調査した。	達成

1.1.2-6 最終目標と達成状況のまとめ

超電導電力ケーブル開発における最終目標に対する達成状況を表 1.1.2-2 に記載する。

表 1.1.2-2 最終目標に対する達成見込み

項目	目標（平成 24 年度達成）	これまでの成果	達成度
1. 66 kV 大電流ケーブル化技術の開発			
大電流・低交流損失	さらなる交流損失の低減に向けたケーブル構造の検討・設計	<ul style="list-style-type: none"> Hybrid 構造にて 1.5 W/m・相 (@71 K、5 kA) を確認した。全て 2 mm 幅線材を用いた導体を試作し、0.4W/m・相 (@71 K、5 kA) を確認。 高 I_c の IBAD-PLD 線材を用いたケーブルを作製し、0.95W/m・相 (@67K、5 kA) の低交流損失を確認。 	達成
大容量接続技術の開発	中間接続部を有する大電流ケーブルコアの作製、課電及び機械強度特性評価	電気絶縁試験及び機械特性試験により設計の妥当性を検証した。	達成
2. 66 kV 大電流ケーブルシステム検証			
システム検証	検証システム作製・課通電試験実施（66 kV/三心一括/5 kA,15 m 長） ・150 mmφの管路に収納可能 ・ケーブル損失 2.1 W/m・相@5 kA 以下	これまで蓄積してきた設計データ、要素技術を用いることでケーブルの健全性を確保して、成功裡にすべての試験を完了した。	達成
3. 275 kV 高電圧ケーブル化技術の開発			
高電圧絶縁・低誘電損失技術の基礎特性評価	<ul style="list-style-type: none"> ケーブル損失（交流損失、誘電体損失）0.8 W/m・相@3 kA 以下 	銅フォーマ形状を見直し、3 mm 幅導体にて交流損失 0.124 W/m・相を確認。シールドの損失も解析により見積もり、導体とシールドを合わせて 0.2 W/m。誘電体損失 0.6 W/m・相と合わせて、目標の 0.8 W/m・相以下を達成	達成
超電導電力ケーブル電気絶縁特性の調査	<ul style="list-style-type: none"> 短尺ケーブルコアモデルを作製・評価・検討し、各種コア構造のシステム設計の妥当性を検証、ケーブルシステムに反映する。 	63 kA-0.6 sec 時の温度上昇を抑えるために、中空銅フォーマ 400 mm ² の通電・伝熱特性を解析、試験により評価した。その結果、温度上昇の抑制を 70 K から 20 K に、復帰時間特性も 2 時間から 10 分以内に改善された。	達成
4. 275 kV 高電圧ケーブルシステム検証			
システム検証	検証システム作製・課通電試験実施（275 kV/単心/3 kA、30 m 長） ・ケーブル外径 150 mm φ 以下 ・ケーブル損失 0.8 W/m・相@3 kA 以下	これまで蓄積してきた設計データ、要素技術を用いることでケーブルの健全性を確保して、成功裡にすべての試験を完了した。	達成
5. 超電導電力ケーブル対応線材技術開発			
大電流用ケーブル対応線材安定製造技術開発	大電流ケーブルシステム検証用線材総長 2km を提供する。	計画通り提供を実施した。	達成
基板・中間層テープの開発	IBAD 中間層基板・線材 6 km 提供する	計画通り提供を実施した。	達成

MOD プロセスによる高電圧ケーブル用線材の開発	高電圧ケーブルシステム用線材供給 1.3 km (30m 長) 及び短尺導体評価用 0.3km 提供する	計画通り提供を実施した。	達成
IBAD-PLD 線材の安定製造技術の開発	極低交流損失用の 300 A/cm-w (@77K, s.f.)級 IBAD-PLD 線材を作製・提供する。	500A/cm-w(@77K, s.f.)級の超電導線材を作製・提供した。作製したケーブル導体にて、0.6W/m-相@5kA の低交流損失を確認した。	達成
線材の評価技術の開発	開発された評価技術を用いてケーブルシステム検証用線材に対して各種評価を行い、それらの効率・効果を検証する。	高電圧ケーブルシステム検証に使用される線材に対して、評価技術を組み合わせることで、効率的かつ効果的な評価が可能であることを検証した。	達成
6. 超電導電力ケーブルの熱収支に関する評価研究			
定常通電時及び事故時の伝熱特性検討	システム検証結果に合致する汎用性のあるシミュレーション技術を確認する。	ケーブルシステム検証における、温度上昇解析・短絡電流通電時の電磁力解析を行うことで目標を達成した。	達成
スラッシュ窒素の研究	スラッシュ窒素冷媒の有用性のシステム検証を行う。	製作した搬送試験装置を用いて循環試験装置の製作を行い、スラッシュ窒素の固相率を変化させてスラッシュ窒素と液体窒素との冷却特性を把握した。さらに、循環試験装置の冷却容量の拡大やモデルケースに基づく設計検討を実施した。	達成
超電導電力機器の冷却に関する調査研究	超電導ケーブルの冷却特性に関する調査	平成 23 年度以降には、超電導ケーブル及び端末における定常通電時及び過電流通電後の復帰特性に関する調査を実施した。	達成

1.1.2-7 本開発成果の海外との比較及び位置づけ

世界各国で超電導ケーブル開発が進められている中、本プロジェクトの研究開発目標の特徴は、Y 系超電導線材の特性を活かし、世界に先駆けて、66 kV/5 kA 大電流ケーブルをコンパクトな三心一括型構造、275 kV/3 kA 高電圧ケーブルをコンパクトな単心構造とし、既存設備を使用できる構造とすることである。本プロジェクトにて開発されるケーブルは、Y 系超電導線材の特性を活かし、大容量化・コンパクト化・低損失化を実現することが可能である。大電流ケーブルは、大電流化による導体技術・電流リード技術・接続部技術等を開発し、その送電容量は 570 MVA 級となり、日本の適用条件に合わせて外径 150 mmφ 管路に収納可能であるコンパクトな三心一括型を指向していることから、現状でもっとも容量の大きな LIPA ケーブル (570 MVA 級) と比較すると、エネルギー密度は約 4 倍となり、世界最高の送電密度といえる。また、本プロジェクトの大電流ケーブルにおける交流損失のターゲットは、2 W/m-相@5 kA であるが、これは、従来ケーブルの損失の 1/3 のレベル (冷凍機効率 COP : 0.1 を想定) に相当する。交流損失については、公表された他プロジェクトのデータが少ないが、米国製 Y 系超電導線材で開発された Albany プロジェクトの三心一括型ケーブル (34.5 kV/0.8 kA, 30 m 長, 135 mm φ) の交流損失 0.35 W/m-相

@0.8 kA (約 13.7 W/m-相@5 kA に相当) と比べると、約 1/7 に相当する。このように、大容量・コンパクト、低損失といった観点から考えて、世界最高のケーブル開発に成功した。

表 1.1.2-4 にコンパクト化が可能な三心一括型ケーブルと三相同軸型ケーブル構造の特長比較を示す。ともに三相を 1 つの断熱管内に収納した構造でありコンパクト化が可能である。高電圧絶縁設計においては、三相同軸型では同軸に配置された各相導体間に相間電圧が印加されることから絶縁厚みを大きくする必要があり末端部の絶縁設計が難しく、本三相同軸型ケーブル構造を採用したあるいは採用するプロジェクトは全て 10~14 kV の低電圧配電システムでの実証試験である。一方、三相一括型ではこれまでに送電システム 66 kV におけるシステム試験の実績があり、三相同軸型に比べ高電圧対応が可能であるといえる。

また、低損失化の観点からは、三相一括型ではコアのコンパクト化ゆえに導体部に高磁界が印加される。よって、低損失化のためには低損失型超電導線材が必要であり、Y 系超電導線材の特性を活かす構造であるといえる。

なお、超電導シールド層が必要である三心一括型に対して、シールド層が不要である三相同軸型の方が超電導線材必要量は少なく、ケーブルコストの観点からは三相同軸型が有利である。しかし、短絡電流等の過電流に対する安定化対策として、限流器と三相同軸型ケーブルを組み合わせたものや限流機能付き三相同軸型ケーブル等が検討されている。

表 1.1.2-5 に電圧階級と超電導ケーブル構造対応表 (DOE 資料より抜粋) を示す。上記比較の通り、三相一括型では 66 kV 級の送電システムに対応できるのに対して、高電圧絶縁設計の難しい三相同軸型では 14 kV 級の配電システムでの適用実績に留まる。よって、本プロジェクトでの研究開発ターゲットである 66 kV 級への適用に関しては三相一括型ケーブル構造が最も適しているといえる。

275 kV 高電圧ケーブルは、これまで行われてきた国内外の超電導ケーブル開発では、DAPAS プロジェクト (韓国) における 154 kV が最も高い電圧階級であったが、それを超える世界最高の電圧と、世界最大の送電容量を持つもので、本プロジェクトにおいて末端を含む超電導ケーブルシステムとして、320 kV の課電試験に成功した。この先、長期信頼性検証等ケーブル開発が完遂すれば、これまで架空送電線、管路気中ケーブルでしか送電できなかった 1 GVA 級の送電が、地中送電設備において実績の豊富な 275 kV の電圧階級で実現できることになる。また、CO₂ 削減や経済的な 275 kV 超電導ケーブルの実現のために、交流損失低減が重要な技術であるが、Y 系超電導線材の細線化技術により世界最小の交流損失を達成することができた。

表 1. 1. 2-3 超電導ケーブル開発に関する世界動向との比較

項目	世界動向	本プロジェクト成果と位置づけ
(1) 66 kV 大電流ケーブル化技術の開発	<ul style="list-style-type: none"> ●送電容量 送電容量密度について LIPA ケーブル (米国) 送電容量: 570 MVA 級 (現状世界最大) 送電容量密度: 約 10000 MVA/m² ●交流損失について Albany Project (米国) <ul style="list-style-type: none"> ・ Albany ケーブル 0.35W/m-相@0.8 kA DAPAS プロジェクト (韓国) <ul style="list-style-type: none"> ・ LS ケーブル 1.14 W/m @ 1.4 kA 	<ul style="list-style-type: none"> ●送電容量 送電容量密度について 本プロジェクト 送電容量: 570 MVA 級 送電容量密度: 約 37000 MVA/m² ↓ 送電容量も世界最大級といえるが、コンパクトな三心一括型であるため、送電密度は LIPA の約 4 倍であり世界最高である。 ●交流損失について 本プロジェクト 2.1w/m-相@5 kA 以下 ↓ Albany ケーブルの約 1/7 に相当 LS ケーブルの約 1/7 に相当 <p>大容量・コンパクト、低損失といった観点から考えて、世界最高のケーブル開発に成功した。</p>
(2) 275 kV 高電圧ケーブル化技術の開発	<ul style="list-style-type: none"> ●送電電圧 送電容量 DAPAS プロジェクト (韓国) ※開発中 154 kV /3.75 kA ●交流損失について ・ LANL, ORNL (米) の最新情報(2010 peer review) 1 W/m@3 kA (導体) 	<ul style="list-style-type: none"> ●送電電圧 送電容量 本プロジェクト 275 kV/3 kA、 ↓ 世界最大の電圧、送電容量 ケーブル損失 0.8 W/m-相@3 kA これまで架空送電線、管路気中ケーブルでしか送電できなかった 1 GVA 級の送電が、地中送電設備において実績の豊富な 275 kV の電圧階級で実現可能 ●交流損失について 本プロジェクト 導体損失 0.235 W/m-相 (LANL, ORNL の 1/4 以下) ケーブル外径 150 mmφ以下 (管路布設可) ↓ 世界でもトップの低損失・コンパクトなケーブルを実現した <p>CO₂削減可能な高効率送電、建設コスト低減による低コスト送電の実現の見込みを得ることができた。</p>

表 1.1.2-4 三心一括型と三相同軸型ケーブル構造との比較表


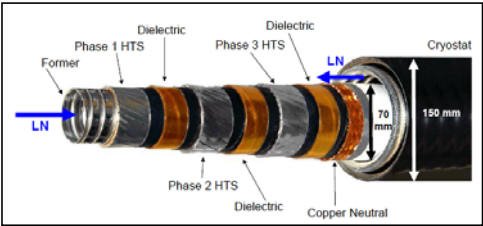
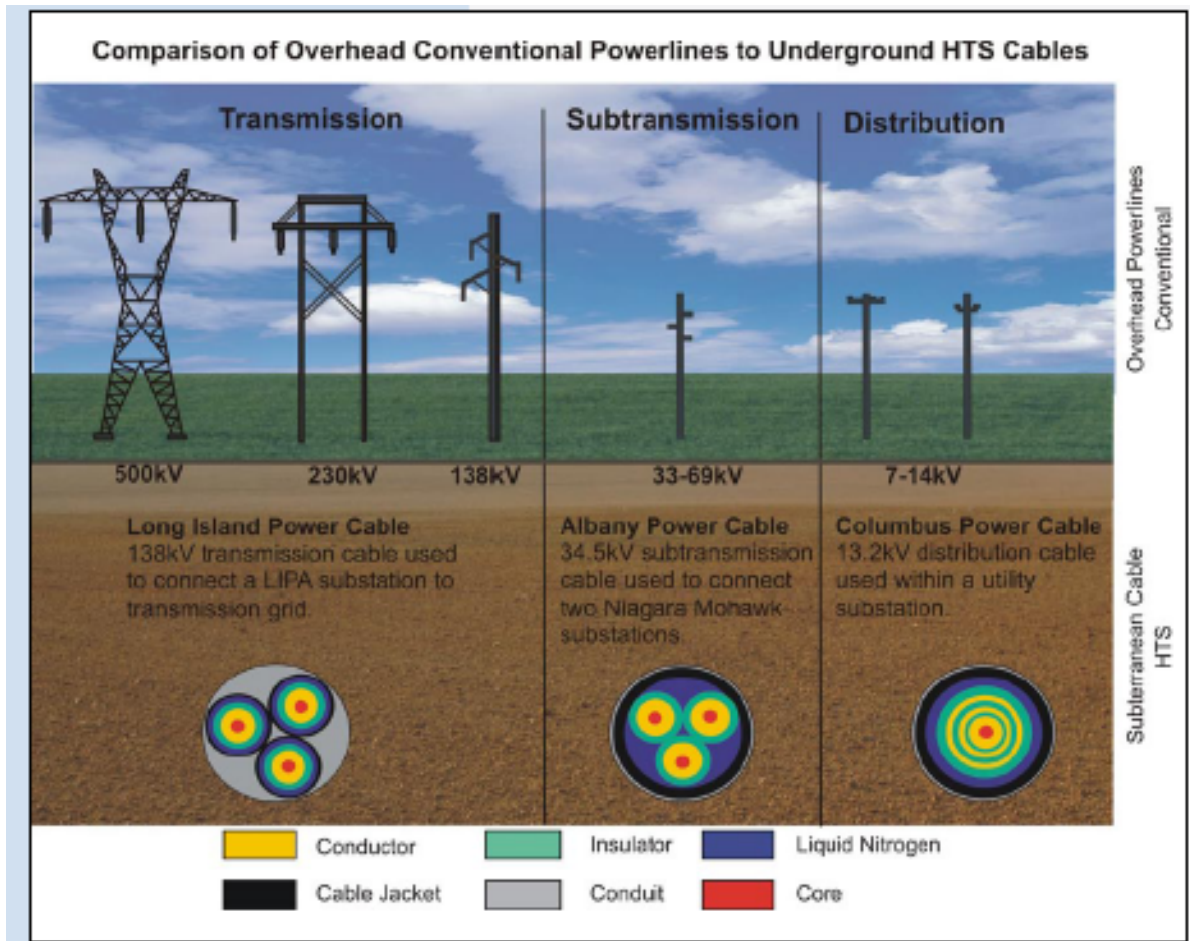
		三心一括型ケーブル構造	三相同軸型ケーブル構造
ケーブル構造			
特長	コンパクト	○(三相を1クライオスタットに収納)	○(三相を1クライオスタットに収納)
	高電圧絶縁設計	○	×(コア各相導体間に相間電圧がかかる)
	コア低損失化	△(線材巻き付け径小→磁場大) (HTS線材の高性能化必要)	○
	短絡電流対応	○(31.5kA-2sec対応可能)	○
	端部&中間接続 線材必要量	○(実績あり)	○(実績あり)
備考	<p>【送電: ~77kVレベル】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・東京電力/住友電工100mケーブル (日本: 66kV/1kA) ・ALBANYケーブル(米国: 34.5kV/0.8kA) ・東京電力(株)旭変電所実証ケーブル (日本: 66kV/1.75kA) 	<p>【配電: ~20kV】</p> <ul style="list-style-type: none"> オハイオAEPプロジェクト(米国: 13.2kV/3kA) Hydraプロジェクト(米国: 13.8kV/4kA) AmpaCity Essen(独: 10kV/2.3kA) 	

表 1.1.2-5 電圧階級に対する超電導ケーブル構造対応表(DOE公表資料より抜粋)



1.1.3 超電導変圧器の研究開発

超電導変圧器技術開発は、Ⅱ-2.1.3 節に述べた計画内容に基づき、①Y系超電導線材による巻線技術開発、②冷却システム技術開発、③限流機能付加変圧器技術開発、④超電導変圧器対応線材開発、⑤66/6.9 kV-2 MVA 超電導変圧器モデルの検証と配電用 20 MVA 級超電導変圧器の設計を進めてきた。その結果、各項目とも最終目標を達成した。

なお、中間評価時点で、線材コスト低減に有効な IBAD-MgO 中間層基板線材の巻線基礎技術で良好な成果を得たこと、また、4巻線限流モデル変圧器の限流機能試験が良好だったことから、当初計画から次の 2 項目を変更した。①IBAD-MgO 中間層基板適用による線材工程を平成 23 年度まで延期した。②数百 kVA 級限流機能付加変圧器製作を平成 23 年度から 22 年度に前倒しした。(2.3 節参照)

1.1.3-1 超電導変圧器巻線技術開発（九州電力、富士電機、九州大学、ISTEC）

(1) 超電導変圧器巻線の大電流化技術開発

○最終目標（平成 24 年度）

- ・ 2 kA 級の通電特性を検証する。

平成 20～22 年度では、2 kA 級の大電流通電に向け、安定化銅付の線材曲げ特性と過電流試験（単線と三重ね巻線モデル）で短絡（410 J/線材）の 2 倍のエネルギーでの健全性を確認した。また、12 重 2 並列の多層並列導体の転位均流巻線モデル（空心巻線モデル）を製作し、通電試験をした結果、各素線の電流分流のバラツキは最大で 14 %となり、変圧器用として対応可能であることを確認した。

平成 23 年度以降では、二次巻線（12 重 2 並列）にヘリカル転位で巻線した鉄心付大電流巻線モデルを設計、製作し、20 MVA 級変圧器の二次巻線の電流容量である 2 kA 通電ができることを確認した。なお、鉄心付大電流巻線モデルの各素線の電流分流のバラツキは最大で 9.9 %であり、転位均流巻線モデル（空心巻線モデル）よりもバラツキが少ないことを確認した。

(2) 超電導変圧器巻線の低損失化技術開発

○最終目標（平成 24 年度）

- ・ 100 m 級巻線モデルにて、交流損失が 1/3 以下（対細線化しない線材）となることを検証する。

平成 20～22 年度では、細線化線材(5 mm 幅線材を 3 分割溝加工)による巻線モデルの過電流試験で健全性を確認した。変圧器二次巻線口出し部モデルにて、接続部損失が保冷容器の熱侵入量等より十分低いこと、4 分割型方式は損失で一括型と

同等だが製作性が有利であることを確認した。

平成 23 年度以降では、100 m 級 3 分割溝加工線材による低損失巻線モデルにて交流損失を測定し、無分割線材に対し 1/3 に低減できることを確認した。

(3) 超電導変圧器巻線の耐短絡強度技術開発

●中間目標（平成 22 年度）

- ・短絡電流（20 MVA 級変圧器%インピーダンス 15 %相当）により、巻線が劣化しないことを検証する。

平成 20～22 年度では、短絡電流（20 MVA 級変圧器%インピーダンス 15 %相当）による電磁力等に対して劣化しない巻線構造を考案して短絡変圧器モデルを製作した。その短絡電流試験で良好な耐短絡強度を確認した。

(4) 変圧器の巻線構成技術及び最適転位技術の検討

平成 20～22 年度では、細線化線材による多層の転位並列導体による巻線の交流損失、電流分流等の電磁特性について、最適な巻線構成法や最適転位巻線方法を開発し、理論と実験にて確認した。

平成 23 年度以降では、転位並列導体構成による大電流容量導体化に伴って交流損失は増大しないことを確認した。

(5) モデルコイル、変圧器設計のための交流損失データ取得、提供

平成 23 年度以降では、低損失巻線モデルや鉄心付大電流巻線モデルの交流損失を測定した結果、短尺線材の交流損失測定結果から見積もった解析値と概ね一致することを確認し、Y 系超電導線材の交流損失から変圧器巻線交流損失を予測する技術を確立した。

(6) MgO 中間層基板線材の超電導変圧器用線材としての適用性評価（追加成果）

平成 20～22 年度では、IBAD-MgO 中間層基板の変圧器用巻線としての適用性について、曲歪み・過電流特性及び線材素線間抵抗(1 M Ω /m 以上)の観点から実証し、良好な結果を得た。

1.1.3-2 冷却システム技術開発（大陽日酸、九州大学、ISTEC）

(1) 小型膨張タービンの高効率化

●中間目標（平成 22 年度）

- ・保守性能の高いコンパクトな冷却システム用の高効率膨張タービン（断熱効率 ≥ 65 %）を検証する。

平成 20～22 年度では、前 NEDO 事業の「超電導応用基盤技術開発（第 II 期）」

プロジェクトの無摺動小型膨張タービンの開発成果に基づき、効率向上、高度な信頼性及び長寿命化をめざして 5 軸制御の磁気軸受を適用した完全非接触の膨張タービンを開発し、3 種類のタービンインペラを試作した試験にて、全て断熱効率 65 %以上を確認した。

平成 23 年度以降では、インペラとハウジング間のギャップ調整等の最適化により、断熱効率 70 %以上を確認した。

(2) 小型ターボ式圧縮機開発

●中間目標（平成 22 年度）

- ・保守性能の高いコンパクトな冷却システム用の高効率圧縮機（断熱効率 \geq 65 %）を検証する。

平成 20～22 年度では、摺動部の無い小型ターボ式圧縮機の開発のため、インペラ等の部品の構造・応力の解析を行い、5 軸制御磁気軸受を採用した小型ターボ式圧縮機を試作した。まず、モータ温度上昇のため定格流量 (1,200 Nm³/h) の 75 % (900 Nm³/h) までの計測であるが、断熱効率 68 %を確認した。

平成 23 年度以降では、中間羽根インペラの採用やインペラと固定壁のギャップの最適化により流量 1200 Nm³/h及び圧力比 2.0 の定格仕様値で、断熱効率は最終的に目標を上回る 70 %を達成し、冷凍機のCOP向上に貢献した。また、開発した小型ターボ式圧縮機を用いて低温回転試験を行い、低温圧縮によるCOPのさらなる向上と低温でのターボ回転機の運転が問題ないことを確認した。

(3) 熱交換器の小型化

平成 20～22 年度では、熱交換器の小型化を図るため、熱物性を考慮したネオン冷凍機プログラムを開発した。解析にて、熱交換器のブロック 3 個（熱交換器寸法を 3/5 に縮小）で冷凍性能確保が可能である結果を得た（「超電導応用基盤技術開発（第Ⅱ期）」プロジェクトでは 5 個で実施）。

平成 23 年度以降では、「超電導応用基盤技術開発（第Ⅱ期）」プロジェクトで試作した冷凍機を活用し、熱交換器ブロック数を 5 個から 3 個へ改造し、本プロジェクトで新規開発した膨張タービンと組み合わせた熱交換器の性能評価試験により、前述した性能予測プログラムの妥当性を検証した。これらの取り組みにより、2 MVA 級超電導変圧器モデル用冷却システムの設計と性能予測が可能となった。

(4) 冷凍機開発と冷却システム開発

○最終目標（平成 24 年度）

- ・試作した冷却システムの試験にて冷凍性能（冷凍機冷凍能力 2 kW@65 K、冷凍機効率 COP \geq 0.06@80 K）を検証する。

平成 20～22 年度では、冷凍機の基本プロセス、コールドボックス他の設計、及び運転プロセスシミュレーションにて COP 0.06(最終目標 \geq 0.06)を理論的に確認した。

平成 23 年度以降では、ターボ圧縮機と膨張タービンを組み合わせたネオン冷凍機の単独性能試験において、冷凍能力 2.17 kW@65 K、COP 0.06@80 K を確認した。また、サブクール液体窒素の循環冷却試験では冷却システムの負荷変動に対する良好な追従性を確認するとともに、長期連続試験によって冷却システムの健全性と耐久性を検証した。

(5) 冷凍機と機器とのインターフェースの検討

平成 20～22 年度では、冷凍機の冷媒（ネオンガス）から変圧器巻線の冷媒（サブクール液体窒素）への冷熱の伝達方法について、保冷容器内にコールドヘッドを設置した新方式のサブクール液体窒素冷却方式を考案し、熱伝達シミュレーションにて、従来方式（蓄冷式冷凍機によるサブクール液体窒素冷却）よりも高い熱交換効率を示した。

平成 23 年度以降では、保冷容器内で液体窒素と熱交換する模擬冷却システムを試作し、保冷容器内の熱伝達、対流、冷却能力を確認した。

1.1.3-3 限流機能付加技術開発

(九州電力、富士電機、九州大学、岩手大学、ISTEC)

(1) 4 巻線モデルによる特性検証

●中間目標（平成 22 年度）

- ・限流機能付加変圧器の設計手法を確立する。

平成 20～22 年度では、限流機能付加変圧器の基礎技術の検証用として、一次側、二次側ともに主巻線と並列に接続された補助巻線を持つ 4 巻線構造の小型超電導変圧器モデルを試作した。本巻線モデルを用いて突発短絡事故を模擬した試験を行い、主巻線における常電導領域の発生過程を観測するとともに、Y 系超電導線材の液体窒素温度における過大電流に対する基礎的な応答特性を定量的に検証・評価した。

(2) 限流応答特性解明と限流効果による巻線保護の検討及び熱伝導率等の熱的特性の評価

平成 20～24 年度では、変圧器巻線の短絡電流に対する電氣的、熱的応答特性を記述しうる基礎方程式の導出について検討し、Y 系超電導線材の液体窒素温度における過電流に対する電氣的、熱的応答特性を理論及び実験の両面から解明した。

(3) 数百 kVA 級限流機能付加変圧器の試作

○最終目標（平成 24 年度）

- ・数百kVA級単相変圧器の巻線モデルにより、過大電流の限流機能（過大電流を定格電流の3倍以下に抑制）を検証する。

平成 20～22 年度では、4 巻線構造変圧器モデルの試験や解析の成果について総合評価を行い、400 kVA 級限流機能付加単相変圧器モデルに関して、励磁突流印加時や地絡事故時に巻線で発生する常電導抵抗及びこの常電導抵抗による限流特性、さらに変圧器で消費される総熱量を見積り、巻線と絶縁の健全性を確保しうる変圧器形態を設計・試作した。

平成 23 年度以降では、限流特性試験を実施し、0.25 sec 後に短絡電流を定格電流の 3 倍以下に抑制できることを確認した。

1.1.3-4 超電導変圧器対応線材開発

（フジクラ、昭和電線ケーブルシステム、JFCC、九州大学、ISTEC）

●中間目標（平成 22 年度）

- ・5 mm幅 3 分割溝加工にて $I_c=50 \text{ A} / 5 \text{ mm}\cdot\text{w} @ 65 \text{ K}$ 、0.01 T、100 m以上に相当する線材を安定に製造可能な技術を開発する。

○最終目標（平成 24 年度）

- ・大電流巻線技術の検証用等の線材を供する。

(1) 超電導変圧器対応線材安定製造技術開発（PLD 法）

平成 20～22 年度では、IBAD中間層基板上に超電導層をパルスレーザ蒸着法（PLD法）により成膜した 10 mm幅、100 m長以上のY系超電導線材に対して、5 mm幅への切断、3 分割のスクライビング細線溝加工後に所定の特性（ $I_c=50 \text{ A} / 5 \text{ mm}\cdot\text{w} @ 65 \text{ K}$ 、0.01 T）を得ることを可能とする特性均一な長尺線材の安定製造技術を開発した。線材は、4 km（計画 22 年度末で総量約 5 km）を供給した。また、Y系超電導線材用のIBAD中間層基板の安定製造技術を開発するとともに、MOD線材用のIBAD中間層基板を 4 km（計画 22 年度末で総量約 4 km）を供給した。

平成 23 年度以降では、平成 23 年度に 10 km（計画 総量約 11 km）、平成 24 年度に 2 km（計画 総量約 2 km）を供給した。また、MOD 線材用の IBAD 中間層基板を平成 23 年度に 1 km（計画 総量約 1 km）を供給した。供給した線材は Y 系超電導線材の基板として用いられた。

(2) 超電導変圧器対応線材安定製造技術開発（MOD 法）

平成 20～22 年度では、超電導層を有機酸塩熱分解法（MOD法）により 5 mm幅、100 m長以上のY系超電導線材に対して、3 分割のスクライビング溝加工後に

所定の特性 ($I_c=50\text{ A @}65\text{ K}\&0.01\text{ T}$) を得ることを可能とする特性均一な長尺線材の安定製造技術を開発した。線材は、2 km製造(計画 22 年度末で総量約 2 km)、1 kmをモデルコイル用に供給し、560 mをスクライビング細線化技術の検証用として活用した。

平成 23 年度以降では、平成 23 年度に 1 km 製造(計画 総量約 1 km) し、コイル基礎技術検証(過通電特性、曲げ歪み特性等)に活用した。

(3) 超電導変圧器対応安定製造技術線材の評価及び細線安定加工技術開発

平成 20~22 年度では、変圧器用として 100 m 長以上の Y 系超電導線材で 5 mm 幅への切断及び 3 分割のスクライビング溝加工を安定して実施可能な技術を開発した。

平成 23 年度以降では、2 MVA 級超電導変圧器モデル及び鉄心付大電流巻線モデル用として 300 m 長級の Y 系超電導線材で 5 mm 幅への切断及び 3 分割のスクライビング溝加工を安定して実施可能な技術を開発した。切断及びスクライビング溝加工前後の線材の超電導特性を評価して、超電導変圧器対応線材安定製造技術開発にフィードバックすることにより幅方向及び長手方向の超電導特性の均一性向上に反映した。

(4) 超電導変圧器対応線材安定製造技術の評価

平成 20~22 年度では、超電導変圧器に対応する Y 系超電導線材について、透過型電子顕微鏡を用いてその微細構造解析を行い、その結果は Y 系超電導線材製造プロセスにフィードバックし、Y 系超電導線材の安定製造技術開発支援を行った。また、細線化のため、スクライビング溝加工前後の微細構造組織変化を詳細に解析し、加工条件等の適正化にフィードバックした。

(5) 線材特性評価と温度スケーリング則による巻線の交流損失見積り手法検討

平成 20~22 年度では、モデルコイル用線材の交流損失特性は鞍型ピックアップコイルを用いて評価し、温度スケーリング則手法により機器巻線の交流損失を簡略に推定する手法を確立した。PLD法及びMOD法で作製されたY系超電導線材について、細線化溝加工線材のフィラメント間電気抵抗、臨界電流(I_c)、磁化及び交流損失特性を測定し、温度スケーリング則の適用性を確認した。さらに、交流損失に対する臨界電流の磁界印加角度依存性及びY系超電導線材の積層数依存性も検討した。

1.1.3-5 2 MVA 級超電導変圧器モデル検証 (九州電力、富士電機)

- 中間目標 (平成 22 年度)

- ・ 66 kV/6.9 kV-2 MVA 級超電導変圧器モデルのシステム設計を完了する。
- ・ 交流損失低減や耐電圧性等を考慮した課通電試験計画書を作成する。

○最終目標（平成 24 年度）

- ・ 三相非磁性で容器容量 10 m³級の大型非磁性保冷容器を開発し、保冷性能（既存の小型容器相当の 20 W/m²以下）を試験にて検証する。（Ⅱ.1.事業の目標：冷却システム技術開発の最終目標）
- ・ 66 kV/6.9 kV-2 MVA 級超電導変圧器モデルを試作し、中間目標で得られた設定条件における課通電試験を実施し、試験計画書の性能を満足することを検証する。

(1) 2 MVA 級超電導変圧器モデルの設計検討

平成 20～22 年度では、66 kV/6.9 kV-2 MVA 級超電導変圧器モデルは 20 MVA 級超電導変圧器の実用機との相関性（耐電圧や機器構成に起因する技術は極力実機相当 [変圧器のブッシング、鉄心、巻線構成等]）を反映して、巻線技術等の成果を基に設計検討を行った。巻線構成は線材並列数を一次 1 本：二次 8 本とし、%インピーダンスは限流機能を考慮して 2 MVA 基準で 4.5 %とした。また、同変圧器モデルの交流損失低減や耐電圧特性等を検証する課通電試験の基本計画を策定した。

平成 23 年度以降では、容器容量 10 m³級の大型非磁性保冷容器を設計・製作し、既存の小型容器相当（20 W/m²以下）の保冷性能を有していることを確認した。

また、同変圧器モデルの設計検討に基づき巻線製作、変圧器組立を行い、変圧器巻線性能試験を実施した上で、冷却システムと組み合わせて超電導変圧器システムを構成した。課通電試験については、上記基本計画を充実させた試験計画書に基づき試験、評価を行い、性能が設計どおりであることを確認した。さらに、冷却システムについても超電導変圧器の運転に必要な性能を有していることを確認した。

(2) 20 MVA 級超電導変圧器の設計検討

平成 20～22 年度では、既存の油入変圧器をもとに超電導変圧器の特長であるコンパクト性、高効率性等から巻線構成を主体に 20 MVA 級超電導変圧器の設計検討を行い、概略の設計で既存油入変圧器と比較し、低損失で小型等高性能化を確認した。

平成 23 年度以降では、2 MVA 級超電導変圧器モデルの設計、単体及び冷却装置と組み合わせた性能試験、評価に加え、大電流巻線モデル等の検証、検討結果を踏まえ 20 MVA 級超電導変圧器を設計した。設計結果を既存油入変圧器と比較すると、損失は冷凍動力を考慮しても油入変圧器の 46 %で、重量及び設置面積は鉄心の軽減等から 50 %程度となる結果を得た。

1.1.3-6 超電導変圧器開発における成果のまとめ

超電導変圧器に関する5つの技術開発要素（①巻線技術、②冷却システム技術、③限流機能付加技術、④対応線材開発、⑤2 MVA 級超電導変圧器モデル検証）の成果は前述のとおりであり、それを整理した結果を図 1.1.3-1 及び表 1.1.3-1 に示す。なお、参考に中間評価時点の成果表を表 1.3.1-2 に示す。

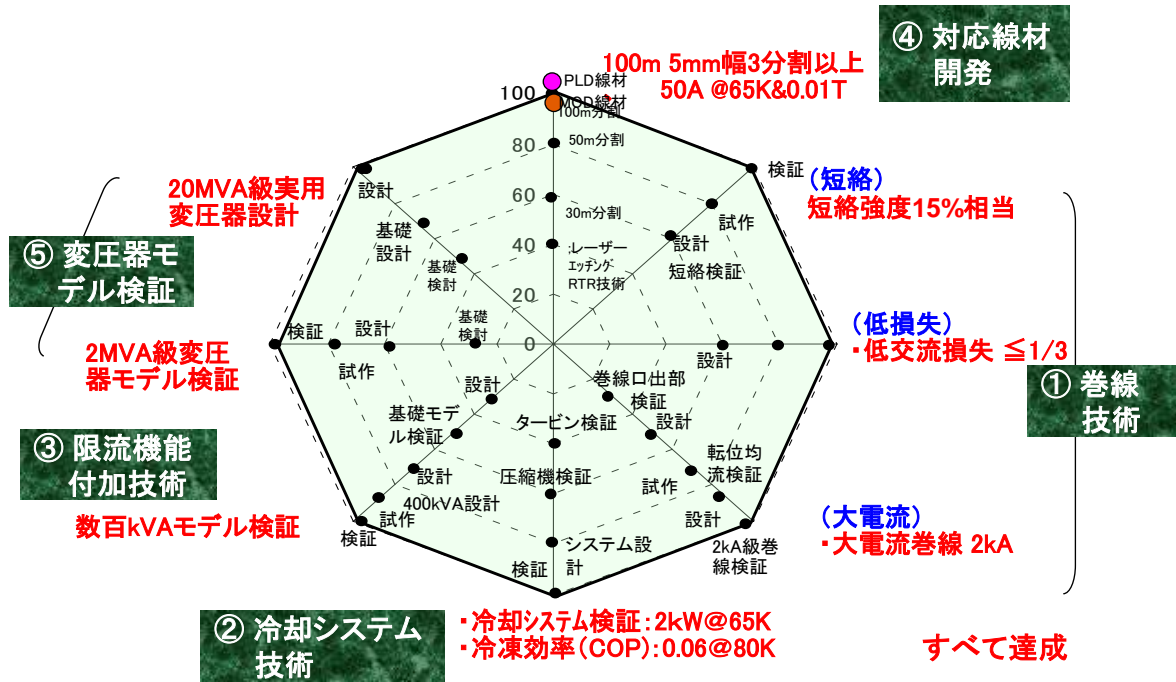


図 1.1.3-1 超電導変圧器プロジェクトの進捗（対最終目標）

表 1.1.3-1 超電導変圧器の最終目標達成状況まとめ

項目	最終目標	研究開発成果	達成度
(1) 超電導変圧器巻線技術開発	<ul style="list-style-type: none"> 2 kA 級巻線技術の確立 巻線の低交流損失 $\leq 1/3$ (対細線化なし線材) 	<ul style="list-style-type: none"> 鉄心付大電流巻線モデルを設計、製作し、電流分流率が $\pm 10\%$ 以内で 2 kA 通電を確認。 100 m 級 3 分割線材を用いた低損失巻線モデルにて交流損失を測定し、1/3 に低減できることを確認。 	達成
(2) 冷却システム技術開発	<ul style="list-style-type: none"> 冷凍能力：2 kW@65 K 冷凍効率 (COP)：0.06@80 K 	<ul style="list-style-type: none"> ネオン冷凍機を試作し、冷凍能力 2.17 kW@65 K、COP 0.06@80 K を確認。 	達成
(3) 限流機能付加技術開発	<ul style="list-style-type: none"> 数百 kVA 級限流機能付加変圧器による機能検証(過大電流を定格電流の 3 倍以下に抑制) 	<ul style="list-style-type: none"> 保護銅層の最適化した巻線構成の 400 kVA 級限流機能付加単相変圧器モデルを試作し、短絡電流を定格電流の 3 倍以下に抑制する限流性能を確認。 	達成

(4) 超電導変圧器対応線材開発	・安定製造、加工技術の向上	・安定製造や加工技術の改良により線材の長手・幅方向の I_c 特性向上技術を開発。	達成
(5) 2 MVA 級超電導変圧器モデル検証	・66/6.9 kV 2 MVA 級超電導変圧器モデルの課通電試験による性能検証	・66 kV/6.9 kV-2 MVA 級超電導変圧器モデルを試作、冷却システムと組み合わせ試験を実施し、変圧器システムの性能を確認。	達成

(参考) 表 1.1.3-2 中間評価時点の目標達成状況

項目	目標 (H22 年度達成)	研究開発成果	達成度
1. 超電導変圧器巻線技術開発			
大電流化技術開発	・保護銅層を付加した線材の曲げ特性の確認。 ・多層並列導体の転位均流巻線モデルの構成法の評価。	転位巻線構造の曲げ特性試験による最適転位長の確認。保護銅層付加の多層巻線の過電流特性の確認。12重2並列導体による転位均流巻線モデルによる転位法最適化と各素線の電流分流率の確認。	達成
低損失化技術開発	交流損失 1/3 となる細線化線材を用いた低損失巻線モデルによる変圧器の設計、試作。	100~300 m 級の3分割線材による低損失巻線モデルの設計及び巻線モデルの試作。	達成
耐短絡強度技術開発	多層並列導体の短絡変圧器モデルによる変圧器の設計、短絡電流 (20 MVA 級変圧器%インピーダンスの 15 %相当) 試験で巻線の健全性の検証と耐短絡強度を評価。	400 kVA 短絡変圧器モデル (6.6/2.3 kV、15 %) を設計、製作し短絡試験を実施。設計どおりの短絡電流通電による巻線の耐短絡強度を確認。	達成
低交流損失性・大電流容量導体及び巻線技術の検討	細線化線材、転位導体の交流損失、電流分流等の特性についての理論、実験による検討。	転位導体の電流分流の均等化方法の理論、実験による解明。並列導体の付加的交流損失の理論を解明。	達成
2. 冷却システム技術開発			
小型膨張タービンの高効率化	断熱効率 65 %以上。	磁気軸受けを採用した小型膨張タービンを平成 20 年度に試作、試験・評価により約 70 %を実証。	達成
小型ターボ式圧縮機開発	断熱効率 65 %以上。	応力解析ソフトによるシミュレーションで小型・高効率化の設計・検討を実施。基礎特性把握用のターボ圧縮機モデルの試作、試験により定格の 75 %流量で効率 65 %を達成。	達成
熱交換器の小型化	熱交換器の性能検討、設計・試作及び試験・数値解析による小型化の検討。	冷凍機システムの数値解析プログラムを開発し、開発する膨張タービンと圧縮機との組み合わせによる熱交換器のブロック数等を算定。	達成
冷却システム開発	冷凍効率 COP \geq 0.06 を数値解析で検討。	数値解析により COP=0.06@80 K の達成を確認。	達成
冷凍機と機器とのインターフェースの検討	冷凍機冷媒 (ネオン) と変圧器冷媒 (サブクール液体窒素) の冷熱伝達のための構造簡素化等の検討。	変圧器容器 (クライオスタット) に冷凍機ヘッドの設置方式 (新提案) における数値解析を実施。	達成

項目	目標 (H22 年度達成)	研究開発成果	達成度
3. 限流機能付加技術開発			
4 巻線モデルによる特性検証	4 巻線モデル変圧器による突発短絡試験の実施、過大電流の応答特性の検証、評価。	短絡電流の数十分の一の限流動作を確認。巻線の常電導領域抵抗の一次電圧依存性を確認。	達成
限流応答特性解明と限流効果による巻線保護の検討及び熱伝導率等の熱的特性の評価	・変圧器巻線の短絡電流に対する電氣的、熱的応答特性の解明 ・Y 系線材の銀層及び保護金属層 (Cu と CuNi) の熱伝導率と電気抵抗率の評価。	短絡電流応答の数値解析プログラムの開発と実験値との比較検証。 Y 系線材の熱伝導特性 (銀層が支配的、中間層の影響は無視可能) の確認及び保護金属層の熱通過特性 (銅貼付時は銅が寄与し、CuNi 貼付時は銀層が寄与) を推測。	達成
数百 kVA 級限流機能付加変圧器の設計試作	数百 kVA 級限流機能付加変圧器の設計、試作。	保護銅層の最適化した巻線構成の 400 kVA 限流機能付加単相変圧器モデルを設計。	達成見込み
4. 超電導変圧器対応線材開発			
対応線材安定製造技術開発 (PLD 法)	5 mm幅 3 分割にて $I_c=50$ A /5 mm-w @65 K、0.01 T、100 m以上に相当する線材を安定に作製可能な技術を確立。	150 m 級の PLD 法安定製造技術の開発。100 m 長 IBAD-MgO 中間層線材の製造技術の開発。	達成
対応線材安定製造技術開発 (MOD 法)	5 mm幅 3 分割にて $I_c=50$ A/5 mm-w @65 K、0.01 T、100 m以上に相当する線材を安定に作製可能な技術を確立。	100 m 級の MOD 法安定製造技術の開発。25 m 長 MOD-MgO 中間層線材の製造技術の開発。	達成見込み
細線安定加工技術開発	100 m 長 5 mm 幅 3 分割溝加工線材の技術開発。	レーザによる 7 m/h 級の安定な切断技術の確立、100 m/h 級切断技術の検討。100 m 長級 5 mm 幅 3 分割のレーザスクライビング溝加工技術の開発。	達成見込み
対応線材安定製造技術の評価	透過型電子顕微鏡による線材の微細構造解析及びスクライビング溝加工前後の微細構造組織変化を詳細に解析し、加工条件等にフィードバック。	透過型電子顕微鏡による微細構造解析による成果を線材製造や細線化溝加工のプロセスの適正化の支援を実施。	達成
線材特性評価と温度スケーリング則による巻線の交流損失見積り手法検討	交流損失について、測定評価、温度スケーリング則による推定法の確立及び線材の積層数依存性等を検討。	鞍型ピックアップコイル法による交流損失測定データを基に I_c - B 特性、交流損失の温度スケーリング則の成立を確認。	達成
5. 2 MVA 級超電導変圧器モデル検証			
2 MVA 級超電導変圧器モデルの設計検討	66 kV/6.9 kV-2 MVA 級超電導変圧器モデルのシステム設計を完了。	66 kV/6.9 kV-2 MVA 級超電導変圧器モデルの設計及び冷却システムの検討を実施。	達成
20 MVA 級超電導変圧器の設計検討	66 kV/6.9 kV-20 MVA 級配電用変圧器実機の設計検討。	66 kV/6.9 kV-20 MVA 級配電用変圧器実機の設計を実施。	達成

1.1.3-7 本開発成果と海外との比較及び位置づけ

超電導変圧器の開発は、各国で基礎技術は開発されていたが、交流損失の低減が困難なことや効率的な冷却が難しいことから進展がみられなかった。しかし、近年、限流機能付加変圧器を中心に開発が進められている。

本プロジェクトでは線材細線化とその巻線技術により、世界に先駆けて開発を進め、さらに限流機能付加変圧器の開発も実施した。超電導変圧器開発の世界動向との比較を表 1.1.3-3 に、国内外の超電導変圧器の開発状況を図 1.1.3-2 に示す。

(1) 米国の超電導変圧器プロジェクト

a DOE(SPI)プロジェクト

Waukeshaのグループは、Bi-2212線材により1998年に単相1 MVA (13.8 kV/6.9 kV, 25 K)、Bi-2223線材により2003年に三相5 /10 MVA (24.9 kV/4.2 kV, 25 K)を開発した¹⁻²⁾。しかし、三相5 /10 MVAは、試験中に巻線の絶縁破壊のため開発が中止となった。

b DOE(Irvine Smart Grid Demonstration)プロジェクト【開発中】

2009年に、Y系超電導線材による三相28 MVA (70.5 kV/12.5 kV, 70 K)の開発計画が発表された³⁾。2011年より研究開発がスタートしたこのプロジェクトは、Waukeshaのグループがカリフォルニア州IrvineのSCE社の変電所に限流器と組み合わせたシステムを設置するSmart Grid実証プロジェクトである。

(2) 欧州の超電導変圧器プロジェクト

a ABBプロジェクト

Bi-2223線材により1997年に三相630 kVA (18.7 kV/420 V)を開発し、1年間実系統試験を実施した⁴⁾。その後、立案された三相10 MVA開発プロジェクトは中止された⁵⁾。

b Siemensプロジェクト

鉄道車両用として、Bi-2223線材により2001年に単相100 kVA (5.5 kV/1.1 kV, 77 K)、さらに2006年に単相1 MVA (25 kV/1.4 kV, 66 K)を開発し高周波運転時の課題を明らかにした⁶⁻⁷⁾。

c KITプロジェクト【開発中】

2012年から2015年までにABBと1 MVA限流機能付超電導変圧器を開発し、常電導転移時の線材や冷却、交流損失等を検証する。

(3) 韓国の超電導変圧器プロジェクト

・DAPASプロジェクト

2011年までに超電導電力機器の商業化をめざし、2001年からDAPAS (Dream of Advanced Power system by Applied Superconductivity technologies) プログラムを開始した。Bi-2223線材により、2004年に単相1 MVA (22.9 kV/6.6 kV)を開発した。パンケーキ巻線を採用し、高圧-低圧-高圧-高圧-低圧-高圧の巻線配置を採る。冷却

は変圧器直付けのGM-冷凍機によるサブクール液体窒素冷却である。77 Kにおける無負荷試験，絶縁耐力試等が行われた⁸⁾。

(4) 中国の超電導変圧器プロジェクト

・TBEA プロジェクト

TBEA (Tebian Electric Apparatus Company) は、超電導変圧器開発を 2001 年に開始した。Bi-2223 線材により、2005 年に三相 630 MVA (10.5 kV/0.4 kV) を開発した⁹⁾。

(5) ニュージーランドの超電導変圧器プロジェクト

・TRST プロジェクト【開発中】

政府系の 100 %出資のIRL及びHTS110 社等により、YBCO Roebel 導体を使用した 1 MVA限流機能付加超電導変圧器(11 kV/0.4 kV)を 2013 年までに開発する¹⁰⁾。

(6) 露国の超電導変圧器プロジェクト

・ROSATOM プロジェクト【開発中】

ROSATOM 社を中心に、超電導産業を開拓するため、2011 年から 2015 年にかけて限流器、エネルギー貯蔵、モータ、発電機の超電導機器を開発する一環として、10 MVA(10 kV/0.4 kV)超電導変圧器を開発する。

表 1.1.3-3 超電導変圧器開発の世界動向との比較

研究テーマ	世界動向	本プロジェクト成果と位置づけ
(1) 超電導変圧器巻線技術開発	<ul style="list-style-type: none"> 低損失化は NZ プロジェクト等における Roebel 導体の採用。 	<ul style="list-style-type: none"> 大電流化と低損失化は細線化及び転位巻線構造の最適化により達成。耐短絡強度技術は 400 kVA 短絡変圧器モデルで実証。 世界初の Y 系変圧器巻線技術（大電流化、低損失化、耐短絡強度）を実証
(2) 冷却システム技術開発	<ul style="list-style-type: none"> タービン方式冷却システムは、米国の限流器開発プロジェクトで適用計画あり。 	<ul style="list-style-type: none"> メンテナンスフリーの膨張タービン及びターボ圧縮機の断熱効率 > 65 % 達成。 ブレイトン冷凍機で 2 kW 級 @ 65 K, 冷凍機効率 0.06 @ 80 K を達成。 世界に先駆けメンテナンスフリー高効率小型タービン方式冷却システムを開発
(3) 限流機能付加技術開発	<ul style="list-style-type: none"> 変圧器巻線による限流機能開発は数カ国の変圧器プロジェクトで開発中。 	<ul style="list-style-type: none"> Y 系線材の 4 巻線モデルにより限流特性を実証。さらに 400 kVA 限流機能付加単相変圧器モデルで実証。 世界初の Y 系変圧器の限流特性を実証
(4) 超電導変圧器対応線材開発	<ul style="list-style-type: none"> 低損失化対応細線化線材は米国で開発中。 	<ul style="list-style-type: none"> 3 分割 100 m 長線材 (50 A / 5 mm-w @ 65 K, 0.01 T) の製造・加工技術の開発。 世界に先駆け細線化線材加工技術を開発
(5) 2 MVA 級超電導変圧器モデル検証	<ul style="list-style-type: none"> Y 系変圧器の開発は数カ国のプロジェクトで開発中。 	<ul style="list-style-type: none"> 上記技術開発の成果をもとに 2 MVA 級超電導変圧器モデルを製作、検証。 世界に先駆け Y 系変圧器を開発

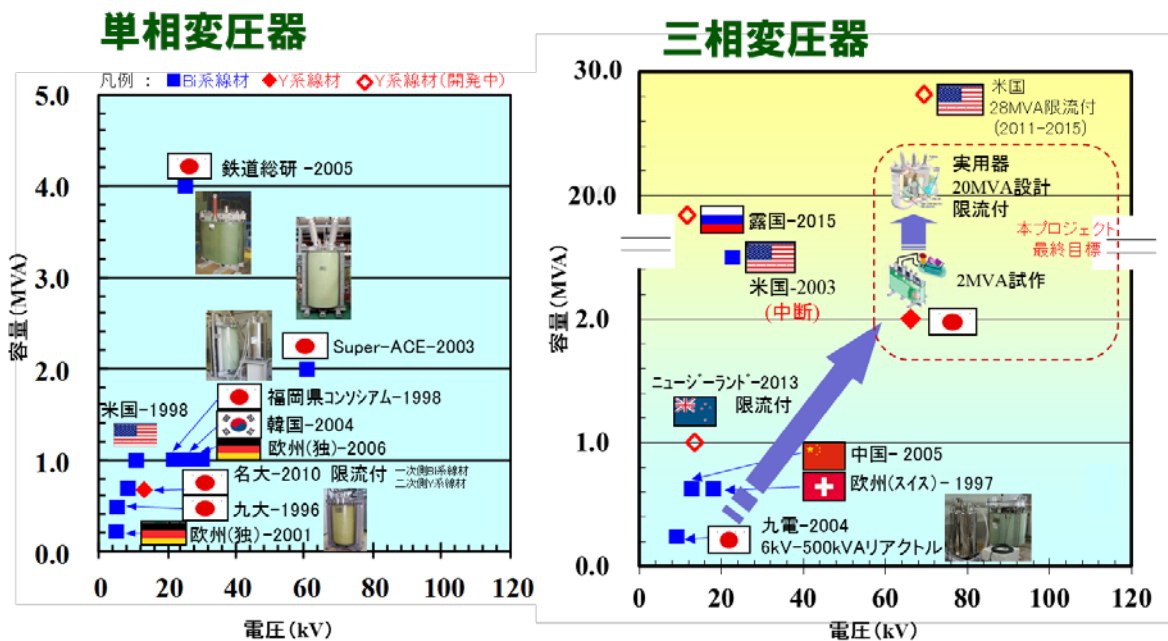


図 1.1.3-2 国内外の超電導変圧器の開発状況

引用論文リスト

- (1) S. W. Schwenterly, S. P. Mehta, M. S. Walker, “HTS Power Transformers”, resented at the 2000 DOE Peer Review Committee, July 18, 2000.
- (2) S. W. Schwenterly, B. W. McConnell, J. A. Demko, A. Fadnek, J.Hsu, and F. A. List, “Performance of a 1MVA HTS demonstration Transformer”, IEEE Trans. Appl. supercond., vol 9, no 2, pp.680-684, 1999.
- (3) DOE 2010 peer Review
- (4) H. Zueger, “630 kVA high temperature superconducting transformer”, Cryogenics, vol.38, pp. 1169-1172, 1998.
- (5) A. Bitterman, “ABB connects HTS transformer to Geneva power supply network” Supercond. Week, vol. 11, no. 6, p. 1, March 1997.
- (6) P. Kummeth et al. : “Development and test of a 100MVA superconducting transformer operated at 77K”, Supercond. Sci. Technol., 13, pp. 503-505, 2000.
- (7) R. Schlosser et al. : “Development of High-temperature superconducting transformers for Railway Application”, IEEE Trans. On Applied Superconductivity, 13, 2, pp.2325-2330, 2003.
- (8) S. H. Kim, W. S. Kim, K. D. Choi, H. G.. Joo, G.. W. Hang, J. H. Han, H. G.. Lee. J. H. Park, H. S. Song, and S. Y. Hahn, “Characteristic Test of a 1MVA Single Phase HTS Transformer With Concentricly Arranged Windings”, IEEE Trans. Appl. Supercond, vol. 15, no 2, pp. 2214-2217, 2005.
- (9) Y. S. Wang, X. Zhao, J. J. Han, H. D. Li, Y. Guan, Q. Bao, L. Y. Xiao, L. Z. Lin, X. Xu, N. H. Song, and F. Y. Zhang, “Development of a 630 kVA Three-Phase HTS Transformer With Amorphous Alloy Cores”, IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol. 17, no. 2, pp. 2051-2054, 2007.
- (10) Neil Glasson, Mike Staines, Robert Buckley, Mohinder Pannu, and Swarn Kalsi. ” Development of a 1 MVA 3-Phase Superconducting Transformer using YBCO Roebel Cable”, IEEE/CSC & ESAS European Superconductivity News For m (ESNF), No.15, January 2011

1.1.4 超電導電力機器用線材の技術開発

1.1.4-1 線材特性の把握 (ISTEC、住友電気工業、九州大学、早稲田大学、京都大学、JFCC)

本研究開発項目では、保存環境や運転環境を模擬した様々な環境下に線材を保存し、 I_c 等の特性の経時・経年変化の評価を行うとともに、劣化機構の解明やその抑制方法の検討を行った。

- 中間目標：電力ケーブル耐久試験適正条件の決定
- 最終目標：各種機器環境に対する耐久性評価

まず、超電導送電ケーブル機器開発で対象としている高電圧ケーブル、大電流ケーブルについて、機器開発担当へのヒアリングを行い、ケーブルの製作、布設、運転、保守時に素線が受ける負荷の種類と条件を抽出し、これを基に「湿度」、「加熱履歴」、「応力歪み」、「通電・過電流」という負荷に対する試験項目と試験方法を決定し、評価を行い以下の結果を得た。

ケーブル作製前の保存環境（40℃、相対湿度100%）に対する湿度への耐性の評価として高温、高湿度化での劣化挙動を調査し、 I_c の劣化速度が温度に対してアレニウス式に従うことを明らかにした。この解析に基づいて、上記保存環境での劣化開始時期として9年を要することが推測された。

加熱負荷に対しては、ケーブル製作時の乾燥工程での負荷条件（真空、150℃、24時間）に対し、100時間の負荷においても劣化がないことを確認した。また、ハンダ温度（180℃）での加熱試験に対し、230℃においても素線の劣化は生じないことを確認した。

応力歪み耐性に関しては、室温引張試験、繰返し曲げ試験において、素線の可逆歪み限界（0.6%程度）を超えない歪みを繰返し加えても劣化は生じず、ケーブル製作時の最大歪み0.39%に対し十分な裕度があることがわかった。室温と液体窒素温度間の熱サイクルでの熱歪み量は0.05%程度と小さく、劣化は生じないことを確認した。

通電・過電流負荷に対する評価としては、 I_c は超えているが熱暴走に至る前の条件で長時間交流通電試験を行い、1000時間通電試験を行っても、 $I-V$ 特性の変化は全く観測されず、通常の I_c 以下のケーブル運転条件では素線の劣化が生じる可能性は非常に低いと判断された。また、事故電流を想定した交流過電流試験において、想定される最大事故電流に対し約1.5倍の裕度を持つことが明らかになった。劣化機構としては、素線が500K程度までに温度上昇が起きたときに熱歪みによるクラック発生に起因する可能性が高いことが明らかになった。ケーブルの設計で

は、事故電流による温度上昇は 100 K 以下に抑えるべく設定されており、この条件においては、素線が劣化する可能性は非常に小さいと考えられる。

これらの検討により、現状の素線はケーブル開発で想定されているケーブル製作・運転・事故・保守環境条件に比べ十分高い裕度を持ち、素線劣化の可能性は極めて低いことが分かった。

上記の結果に基づいて、ケーブル開発担当と連携し、高電圧ケーブル用耐久試験計画書を作成し中間目標を達成した。また、大電流ケーブルにおいては、同様に耐久性試験計画書の案を作成し、中間目標をほぼ達成した。劣化挙動について系統的に評価した例はなく、世界的にも初めての重要な成果といえる。

最終目標に向けては、変圧器応用を念頭に置き、同機器において低損失化に必要なスクライブ線材の耐環境性の評価を行うとともに、剥離現象に対する機構解明及びその強度向上法の開発を行った。スクライブ線材における耐環境性としては、分割線材における耐湿性環境試験を無分割線材と比較した。具体的には、10mm-w 5 分割線材を 40 °C-RH100%条件等の高温高湿度環境下で特性の経時変化の加速試験により評価し、無分割線材と大きな差異がないことを確認し、25 °C環境では5%の劣化に10年以上かかることを示した。一方、剥離現象に対する検討では、種々の線材に対する剥離強度試験とそれぞれの剥離面観察を実施し、剥離強度決定要因と強度の関係を調査した。その結果、破面の種類と剥離強度には相関が観られ、大きく3つのグループ (<20 MPa、20~50 MPa、>50 MPa) に分類できることが分かった。20 MPa 以下の弱強度グループは、全てベッド層が MOD 法で作製されており、剥離面に GZO 層が露出していることから、この層に起点があることが分かった。次に、20~50 MPa の中強度グループでは、剥離面に金属基板成分が露出しており金属基板とベッド層界面が起点であることが分かった。一方、50 MPa 以上の高い強度を示すグループは、全て剥離面が超電導で覆われており、超電導層の本質的な剥離強度は、基本的に高い強度を有していることが分かった。これらの解析結果に基づいて、弱強度起点及び中強度起点の要因を排除することにより、線材として 50 MPa 以上の高強度線材を実現すべく開発を行った。弱強度グループの起点除去に関しては、MOD ベッド層の熱処理温度の高温化により、Gd-Zr-O の結晶化を抑制しつつ緻密化に成功し、高強度化に成功した。次に、中強度起点に関しては、最も高温で長時間の成膜環境となる超電導層の成膜時間と強い相関があることを見出した。長時間成膜した線材で 50 MPa 以下の中強度を示す頻度が大きくなるのに対し、例えば PLD 法でレーザーパワーを増大させ、短時間で成膜し、長時間高温状態を経験させないことで金属基板とベッド層界面の剥離が抑制され、劇的に中強度頻度が減少した。これらの結果より、線材全体での剥離強度向上に必要な要素を明らかにし、高強度線材作製方法を明らかにすることができた。スクライブ線材に関する剥離強度に関しては、エッチング法を用いたスクライブ法の場合は、スクライブ処理による溝部分の超電導層界面の面積低下率よりも大きな強度低下が確認

されたが、この原因がオーバーエッチングであり、エキシマレーザを用いたエッチングフリー法では強度低下が面積低下分で説明できることを確認した。また、電着樹脂コートにより、これらの強度を向上させることがさらに可能な強化法の開発にも成功した。

上記の検討を通して、主に変圧器を対象とした耐久性評価とともに課題の解決を図ることで最終目標を達成した。剥離強度を材料学的に機構解明した例はこれまでになく、スクライブ溝加工線材における種々の評価も皆無に等しい。従って、何れも世界的に見て初めての重要な知見といえる。

1.1.4-2 磁場中高臨界電流(I_c)線材作製技術開発 (ISTEC、中部電力、古河電気工業、昭和電線ケーブルシステム、名古屋大学、九州大学、九州工業大学、新潟大学、上智大学、大阪大学、理化学研究所、東京工業大学、JFCC、物質・材料機構、核融合科学研究所、ロスアラモス米国立研究所)

本研究開発項目では、高磁場中(～10 T)での応用となる SMES、及び比較的
低磁場(～0.1 T)ながら垂直磁場成分が関与するソレノイドコイルが想定されて
いる超電導変圧器等の応用を想定し、磁場中高臨界電流線材作製技術開発を目的と
した。

- 中間目標： $I_c=30$ A/cm-w @77 K, 3 T - 50 m
 $I_c=300$ A/cm-w @65 K, 0.02 T- 50 m
- 最終目標： $I_c=50$ A/cm-w @77 K, 3 T- 200 m
 $I_c=400$ A/cm-w @65 K, 0.1 T- 100 m

上記の目標値に対し、PLD 法、MOD 法、MOCVD 法において、人工ピン止め
点導入や高 J_c 厚膜化等のアプローチにより目標達成をめざした。

IBAD-PLD 線材においては、磁場中の特性向上のアプローチとして、高 J_c 厚膜
化で極低コスト技術開発における自己磁場中での特性向上と併せて改善すること
をめざした。レーザのエネルギー密度の向上等により高速化、高 I_c 化を図り、10 m/h
の製造速度で膜厚 1.5 μ m、長さ 51 m 線材を作製し、33 A/cm-w(@77 K,3 T)及び
492 A/cm-w(@77 K,0.02 T)以上を確認し、中間目標を達成した。本成果は、当時の
長尺線材での磁場中 I_c 特性として、世界最高で第 2 位の SuperPower 社 (50 m 線
材で 14 A/cm-w(@77 K,3 T)に比べて 2 倍以上の特性を示していた。

一方、IBAD-MOD 線材に関しては、人工ピン止め点無添加系の 50m 線材で 445
A/cm-w(@65 K, 0.02 T)を確認し、中間目標を達成した。また、BaZrO₃(BZO)ナノ
粒子の均一分散技術を短尺試料での開発を行い、YGdBCO 膜に BZO 粒子を添加
した系で 34 A/cm-w(@77 K, 3 T)を実現し、長尺線材では 50 m 線材において 23
A/cm-w(@77 K,3 T)を確認した。本成果は amsc 社の 10 A/cm-w(@77 K, 3 T)に比

べても3倍以上にもなる特性でMOD線材として世界でトップの特性を記録した。長尺線材では、12 m長線材において、14 A/cm-w(@77 K, 3 T)を確認するとともに50 mパッチ試験において、約12 A/cm-w(@77 K, 3 T)での均一特性を確認した。また、50 m長で400 A/cm-w(@65 K, 0.02 T)を超える中間目標特性条件を達成した。また、IBAD-MOCVD法に関しては、YGdBCO混晶膜に対するGd置換量の適正化及びZr添加を行い短尺試料において、21 A/cm-w(@77 K, 3 T)を確認した。

最終目標に向けては、人工ピン止め点の有無による I_c の磁場依存性の結果に基づいて、低磁場(0.1 T)目標と高磁場(3T)目標達成のためにそれぞれ異なるアプローチを選択した。PLD法においては、人工ピン止め点導入により T_c が低下することでこの影響の大きい低磁場目標は人工ピン止め点を導入しない線材でめざすことにした。MOD法では、 T_c の低下はないものの、成膜実績が豊富で安定して長尺特性が期待できる人工ピン止め点を導入しない線材で先行して低磁場目標の達成をめざした。一方で、高磁場特性はPLD法及びMOD法の何れの線材においても人工ピンを導入した線材が高い特性を示すことから、高磁場目標達成には人工ピン止め点導入線材において目標達成をめざすこととした。

まず、低磁場目標達成に対するIBAD-PLD線材においては、中間層の結晶粒高配向化に加えてレーザーパワーのさらなる向上とともに酸素分圧制御によるブルーム形状制御を行う等により、人工ピン止め点を導入していないGdBCO線材で、高速製造条件での厚膜高 J_c 線材を実現し、158 m長(膜厚1.6 μm)で725 A/cm-w(@65 K, 1 T以上)の線材作製に成功し、最終目標を達成した。一方、IBAD-MOD線材においても、結晶粒高配向中間層を適用し、これに加えて中間熱処理(本焼プロセス中に500°C近傍で等温焼成を付加する処理)という手法を開発し、超電導膜の緻密化、均質化を図り、100 m長(膜厚2.0 μm)で524 A/cm-w(@65 K, 1 T以上)の線材作製に成功し、最終目標を達成した。

高磁場目標達成に対しては、IBAD-PLD線材において新たな材料の発見があった。本プロジェクト開始前まで効果的な人工ピン止め点として主流であったBZOに対し、厚膜での磁場中特性の劣化の少ないより効果的なピン止め点の材料としてBaHfO₃(BHO)が有効であることを見出だした。膜厚で2 μm を超えると磁場中 I_c 特性に飽和傾向が見られるBZO添加系に比べてBHO添加系では3 μm 以上の膜厚においても磁場中特性が膜厚増大に伴い直線的に向上することを確認している。最終的に、短尺では141 A/cm-w(@77 K, 3 T; 膜厚3.9 μm)の値を実現した。この材料は、TEM観察によると、BHOナノロッドがBZOに比べて短く、長軸の膜厚方向からのばらつきが大きいことが特徴で、磁場角度に対する異方性も小さく、低温高磁場領域においても優位性を維持する特長を有している。長尺線材に関しては、まず10m長線材において磁場角度依存性を含めて均一性を確認した上で、さらなる長尺化を実施し、200 m長(膜厚1.7 μm)で54 A/cm-w(@77 K, 3 T以上)の線材作製に成功し、最終目標を達成した。一方、IBAD-MOD線材においては、

上述の中間熱処理を BZO 添加膜に施すことにより、BZO ナノ粒子が細径化するとともに均一分散化が進むことを見出して特性の向上に成功した。この知見を適用して、まず、50 m 長（膜厚 1.5 μm ）で 31 A/cm-w(@77 K, 3 T 以上)の線材作製に成功することで中間目標をクリアした。さらに、高 I_c 化に必要な厚膜化における課題であった膜厚の幅方向の不均一（端部で極端に厚膜化し、クラックの発生・起点となる）に対し、膜厚分布不均一発生機構の解明とこの知見に基づいた解決法の開発により 3 μm 厚でクラックフリーを実現し、この技術を長尺線材に適用して、124 m 長（膜厚 2.5 μm ）で 50 A/cm-w(@77 K, 3T 以上)の線材作製に成功した。

上記の成果の世界的な位置付けとしては、気相法においては SuperPower 社が最近、BZO の高濃度試料での作製条件適正化で著しい成果を挙げており、1353 A/cm-w@50 K, 3 T の成果を報告している。この値は、温度条件が異なるが上記の BHO 添加の成果とほぼ同等であるが、長尺に関するデータは、中間評価の際のデータ（50 m 線材で 14 A/cm-w@77 K, 3 T）であることから、さらに差を広げたことになる。一方、MOD 法においては、amsc 社の成果が中間評価時のデータから更新されていないことから、長尺線材特性で amsc 社の短尺最高値の 5 倍の特性を示したことになる。

1.1.4-3 低交流損失線材作製技術開発（ISTEC、住友電気工業、フジクラ、九州大学、九州工業大学、京都大学、鹿児島大学、産業技術総合研究所、JFCC）

本研究開発項目では、交流応用が想定されている超電導電力ケーブル、超電導変圧器から求められる線材として交流損失の低減化技術を開発する。超電導電力ケーブルでは、真円断面形状からのずれや線材間ギャップ数・間隔等の制御、超電導変圧器では、コイル形状における垂直磁場成分の変動に伴う交流損失低減のためのフィラメント化等が求められており、これらの要求に応えるべく、超電導特性均一線材作製技術及び細線加工技術の開発を行った。

- 中間目標：2 mm-w $\cdot I_c = 300$ A/cm-w(@77 K, s.f.) – 50 m
5 mm-w 5 分割-50 m；分割無し線材に比して交流損失 1/5
- 最終目標：2 ~4mm-w $\cdot I_c = 500$ A/cm-w(@77 K, s.f.) – 200 m
5 mm-w 10 分割-100 m；分割無し線材に比して交流損失 1/10

上記の目標値に対し、IBAD-PLD 線材、結晶粒配向金属基板-PLD 線材、IBAD-MOD 線材において、基板/中間層、超電導層の膜厚や結晶性の均一性を向上させることにより交流損失低減に耐えうる線材作製技術開発を行うとともに、特性劣化を抑制した細線加工技術の開発を行うことにより目標達成をめざした。

IBAD 系基板/中間層に関しては、PLD-CeO₂/Sputter-LMO/IBAD-MgO/Sputter-GZO/ハステロイ™ 中間層付き基板について、各層の長時間安定成膜条件を把握するとともに、各層堆積プロセス後の欠陥密度の評価をフィードバックす

ることにより、細線化に有利な欠陥密度の小さな中間層作製プロセスを実現した。これにより、200 m 線材に亘って CeO_2 層の面内結晶粒配向度約 3 度の均一性を実現した。また、面内結晶粒配向度はテープ端の両側 100 μm 程度の領域を除いて幅方向でほぼ均一であることが判明した。

IBAD-PLD 線材においては、レーザ安定性の改善、基板温度の均質化、レーザ照射条件のターゲットスウィング条件等の適正化により、50 m 長線材の長手方向の I_c 均一化（標準偏差 2 %以下）に成功し、ケーブル用線材の中間目標値である 2 mm-w 線材に対し 300 A/cm-w(@77 K, s.f.以上)の I_c 値を達成した（最小 I_c の 5 倍で 388 A/cm-w）。また、線材の両端 1 mm の領域で I_c 低下が見られるものの、5 分割加工後に連続局所測定で交流損失が 1/5 に低減されていることを確認し、長尺（コイル）評価でも損失低減と等価な均流状態の確認を行い、中間目標を達成した。世界的には、短尺でスクライビング溝加工により交流損失が抑制可能な現象を確認しているが長尺線材を用いた系では損失低減の報告はなく、50 m 長で確認できた成果は、大きく世界をリードした成果といえる。

また、将来の可能性を示唆する新たな成果として、高い結晶粒面内配向度を有する GdBCO/IBAD-PLD 線材に対し、1~4 T 程度の磁場が線材面に対し 15~60 度程度の角度で印加された場合、そのヒステリシス交流損失が理論に比べ 1~2 桁も小さくなる新現象を発見した。この現象は機器の交流損失低減に大きく貢献するものと考えられる。本成果は、Y 系超電導線材特有の現象で画期的かつ世界的な発見といえる。この現象の積極的な利用が可能になれば、高磁場応用での交流損失低減に非常に有効であり、SMES のみならずモータ、発電機等にも効果的で高効率コンパクトな機器が期待できるものである。

一方、IBAD-MOD 法に関しては、塗布方法開発により濃化液体生成を抑制し、条件を適正化することで幅方向の膜厚均一性の向上を図り、2 mm-w · 50 m 長線材において、397 A/cm-w(@77 K, s.f.) の I_c 値を確認し、中間目標を達成した。また、同様に 50 m 線材において 5 mm-w 5 分割溝加工線材において連続測定で交流損失が 1/5 に低減されていることを確認し、フィラメント間抵抗も確保できていることからコイル形状においても PLD 線材と同様に損失低減効果を得られるものとして中間目標を達成した。IBAD-PLD 線材における成果概要で紹介したとおり、50 m 長 5 分割線材における交流損失低減実証は、世界トップの成果であり、特に AMSC 社の線材は報告もなく、結晶粒配向金属基板では粒子が大きく、スクライビング技術適用が困難であることからと想定できるが、MOD 線材に関しては世界的にも大きく先行した技術レベルといえる。

結晶粒配向金属基板-PLD 線材においては、30 mm-w の結晶粒配向クラッド基板上での超電導層成膜条件の安定性（温度、雰囲気、プルーム）の向上を図ること、及び、スリッタを用いた機械加工条件の適正化を行うことにより、変形の小さな切断エッジ形状が得られ、Cu めっき後の I_c 維持率 90 %以上となる加工プロセスを確立し、2 mm-w 線材に対し 310 A/cm-w(@77 K, s.f.)の I_c 値を有した 28 m 長線材

加工に成功した。

スクライビング溝加工技術に関しては、低パワーでのレーザ照射と2段階化学エッチングからなる改良型のレーザスクライビング溝加工技術を開発し、加工の高速化とともに、高いフィラメント間電気抵抗を保ちながらオーバーエッチによる I_c 値低下も低減できる見通しを得るとともに、50 m 長の 5 mm-w 線材の 5 分割溝加工に成功した。

最終目標に向けては、IBAD-PLD 線材及び IBAD-MOD 線材共通の IBAD 系中間層形成技術において洗浄工程導入による効果を確認することができた。金属基板表面から、各中間層表面のそれぞれの工程において洗浄処理を施し、特性の均一性に及ぼす効果を調査したところ、最上層である CeO_2 層形成後の洗浄処理により長尺線材において局所的な特性劣化が抑制できることが分かった。

また、同様に共通要素技術としての切断及びスクライビング技術開発としては、レーザの形状を点状から長楕円形状とすることで加工の連続性の向上を図った。スクライビングにおけるエッチング工程に関しては、エッチング液濃度制御法を開発することで長尺線材に均一処理が可能となり、フィラメント間電気抵抗を確保しつ



上記の技術を適用し IBAD-PLD 線材では、200 m 長の均一線材を作製し、これし、ケーブル対応最終目標値を達成した。同様に、100 m 長線材を作製し、これを 5 mm-w へ切断後 10 分割スクライビングすることで変圧器対応線材を作製した。この長尺線材は、長手方向にも均一で、全長に亘って無加工線材に対して 1/10 の損失低減効果を確認し、最終目標を達成した。一方で、IBAD-MOD 線材では、上述の均一基板を適用し、50m 長 5 分割線で高特性 ($I_{c,min}/2mm-w$ の 5 倍で 121 A/cm-w@77 K, s.f.) を維持した低損失化に成功し、さらに、さらなる分割数の増大を図り、エキシマレーザ加工技術を適用し、100 m 長線材で 5 mm-w10 分割加工を施し、 最終目標を達成した。

上記の成果の世界的な位置付けとしては、気相法において SuperPower 社が複数の加工技術の検討を行っており、その中で、機械的にスクライプ加工した後に選択的に Cu を電気めっきすることでフィラメント上だけに安定化 Cu を配した構造を実現し、短尺ではあるものの 12mm-w 線材を 12 分割し、損失低減を確認している。ただし、残念ながら長尺の報告はなされていない。一方、MOD 法においては、amsc 社の線材では、構造的に分割処理が容易ではないことからこれまで報告はない。従って、上述の本プロジェクト成果は、変圧器のコイルにおける低損失技術も併せて他の追随を許さない世界的に圧倒的な技術力といえる。

赤枠非公開部

1.1.4-4 高強度・高工業的臨界電流密度(J_c)線材作製技術開発 (ISTEC、古河電気工業、東北大学、中部大学、JFCC)

本研究開発項目では、強磁場下での強いフープ力が想定される SMES、及び冷却時熱収縮長の裕度を内部構造で確保しにくく冷却時の応力負荷が想定される大電流ケーブルから求められる高強度、高 J_c 線材の開発を目的とした。

- 中間目標 : $I_c = 300 \text{ A/cm-w} (@77 \text{ K, s.f.}) - 1 \text{ GPa}$; 50 m
 $J_c = 30 \text{ kA/cm}^2 (@77 \text{ K, s.f.})$; 50 m
- 最終目標 : $I_c = 500 \text{ A/cm-w} (@77 \text{ K, s.f.}) - 1 \text{ GPa}$; 200 m
 $J_c = 50 \text{ kA/cm}^2 (@77 \text{ K, s.f.})$; 200 m

上記の目標値に対し、PLD 法、MOD 法において、基板の薄肉高強度化及びこの基板に適応した中間層、超電導層の臨界電流値の向上技術を開発することで目標達成をめざした。

薄肉金属基板の開発に関しては、強加工により従来の $100 \mu\text{m}$ 厚基板に比べて薄肉となる $70\sim 80 \mu\text{m}$ 厚の基板開発を行い、基板強度として 0.2% 耐力で 1.6 GPa の強度を確認した。この高強度薄肉基板上での超電導層形成技術として IBAD-PLD 線材においては、高温成膜時における焼鈍効果抑制条件等の適正化を施すことで、高強度 $80 \mu\text{m}$ 厚の 57m 長ハステロイ™基板上での成膜で、 30 m/h の製造速度で作製した線材において $400 \text{ A/cm-w} (@77 \text{ K, s.f. 以上})$ の I_c 値を確認しており、同線材で安定化層厚みを $30 \mu\text{m}$ と想定した場合の J_c 値は 36 kA/cm^2 となり、 J_c に関する中間目標値を達成した。また、この線材を低温 (77 K) において 1 GPa に相当する応力で引っ張り試験を行い、その前後で特性を評価した結果、低下率が 1% 程度で大きな低下は見られなかった。これにより、高強度に関する中間目標も達成したことになる。一方、IBAD-MOD 法による成膜技術開発としては、 $100 \mu\text{m}$ 厚ハステロイ™基板上での成膜で 50 m 線材で $432 \text{ A/cm-w} (@77 \text{ K, s.f.})$ の高い I_c 値を得ており、安定化層厚みを $30 \mu\text{m}$ と想定した場合の J_c 値として 33 kA/cm^2 を実現し、 J_c に関する中間目標値を達成した。

最終目標に向けては、プロジェクト前半で開発した高強度基板等の利用において、さらなる高 I_c 化技術を展開し、目標達成をめざした。IBAD-PLD 線材において、中間層の結晶粒高配向化に加えてレーザーパワーのさらなる向上とともに酸素分圧制御によるブルーム形状制御を行う等により、人工ピン止め点を導入していない GdBCO 線材で、高速製造条件での厚膜高 J_c 線材を実現し、 $70 \mu\text{m}$ 厚の高強度金属 217 m 長の基板上で成膜を行い、最低 I_c で $539 \text{ A/cm-w} (@77 \text{ K, s.f.})$ を得て、 J_c 値として 52 kA/cm^2 以上を実現し、 J_c に関する最終目標値を達成した。さらに、 $100 \mu\text{m}$ 厚の高強度金属基板を用い、 200m 長線材を作製し、 I_c で $500 \text{ A/cm-w} (@77 \text{ K, s.f.})$ 以上を得ると共に 1 GPa 以上の強度の確認により最終目標を達成した。

1.1.4-5 低コスト・歩留向上技術開発 (ISTEC、昭和電線ケーブルシステム、九州大学、東北大学、名古屋大学、JFCC)

本研究開発項目では、電力機器応用の実用化技術開発の際に必要な性能及び製造速度等を満足させる Y 系超電導線材作製技術の開発を行い、より低コストで提供できる線材開発をめざした。具体的には、「実用化技術開発」及び「導入・普及」時に求められる技術コスト仕様である 3 円/Am 以下の製造技術の実現とともにこれに資する接続・補修技術の開発を行った。

また、プロジェクト後半では、平成 22 年度末までに開発した中間目標レベルの各種線材を後期 2 ヶ年において再現性を確保すべく安定製造技術を開発した。ここでは、同時に将来の実用化を鑑み、長尺化の可能性を評価しつつ、目標達成をめざした。

- 中間目標：技術コスト 3 円/Am の実証
- 最終目標：中間目標の安定製造技術
技術コスト 2 円/Am の実証

基板/中間層に関しては、高速 IBAD-MgO 法による低コスト基板とその中間層及び PLD 法、MOD 法超電導層の高性能化により、低コスト・歩留り向上技術開発を行った。まず、研磨工程の高速化とともに MOD 法による平坦化及びベッド層の形成技術開発を行った。また、IBAD-MgO 層の最適条件化による高速化、結晶粒高配向化で 200 m/h で 4 度の結晶粒面内配向度を実現した。さらには、LMO 層及び CeO₂ 層の最適条件による薄膜化、高速化により、設定された技術コスト 3 円/Am に必要な成膜条件、品質を実現した。最終目標達成に向けては、IBAD を含む中間層で 200 円/m、基板 180 円/m、研磨 60 円/m、安定化層 60 円/m の低コスト化技術開発を設定している。これらの条件を満足するには、「基板/中間層」において、PLD 成膜領域拡大改造や結晶粒高配向薄肉化等による CeO₂ 膜高速化、層数削減、MOD ベッド層の適正化等により低コスト化を図った。

上記の基板/中間層の上に、PLD 法により超電導層の低コスト成膜技術として、レーザーパワー、周波数等の作製条件最適化、マルチターン数の増加による蒸着面積の増加、ヒータ改造等の装置改善、プルーム位置の最適化等を施し、代表的な例として、70 m 長で製造速度 30 m/h で $I_c=460$ A/cm-w(@77 K,s.f.) の特性を得て 2.4 円/Am の技術コストを実証することができ、中間目標の 3 円/Am を達成した。

また、同様に MOD 法においては、塗布方法の改善、仮焼・本焼工程の改善、特に反応上重要な水蒸気に関する最適条件化等を行い、長さ 50 m、製造速度 5 m/h (本焼 10m/h) で $I_c > 432$ A/cm-w(@77 K,s.f.) の特性を得ることで 1.9 円/Am の技術コストを実証し、中間目標を達成した。

接続・補修技術開発においては、主に拡散接合法を用いて、GdBCO 線材におい

て低抵抗接続、フィラメント形状分割線材、長尺化検討を行った。その結果、PLD-GdBCO 線材 5 mm-w 3 分割溝加工線材において、 I_c 値の劣化が少ない技術を開発することができた。長さは、10 m（補修実績が 4 回以上）あり、現時点での歩留りは 5 割以上である。

最終目標に向けては、製造装置の初期投資分の回収に高速化が必要であるが、その感度は高速化とともに鈍くなってくる。特に、PLD 法においては上記の速度以上での劇的なコスト低下は望めず、むしろ同じ条件で I_c を向上させることが有効である。そのためには、 J_c の向上もしくは成膜面積増大やレーザーパワーの有効利用等による厚膜化が必要である。基板/中間層開発においては、ベッド層に Y_2O_3 を配することにより、IBAD 層成膜時に結晶化を抑制した状態で結晶粒高配向化を実現するアシストビームのさらに強い照射が可能となり、結果的に中間層としての結晶粒配向度の向上に成功した。PLD 線材においては、この中間層の結晶粒高配向化技術の適用による高 J_c 化とともにレーザーパワーのさらなる向上とともに酸素分圧制御によるブルーム形状制御等により高特性厚膜化の技術開発を行い、30 m/h で $I_c=604$ A/cm-w(@77 K,s.f.) の特性を得て 1.6 円/Am の技術コストを実証することができ、最終目標の 2 円/Am 以下を達成した。

一方、IBAD-MOD 線材では、中間熱処理プロセスの開発により、緻密化及び均一化の向上が見られた。加えて、厚膜時の特性低下の原因となっていた線幅方向の膜厚分布によるクラック発生の課題に対し、塗布法の改善を図り、クラック発生を抑制して厚膜化することに成功し、 $2.3\mu\text{m}$ の厚膜超電導線材において、製造速度 5 m/h（本焼 10m/h）で $I_c > 605$ A/cm-w(@77 K,s.f.) の特性を得ることで 1.6 円/Am の技術コストを実証し、最終目標を達成した。

また、本プロジェクト終了後に想定されている実用化技術開発時期に必要な中間目標レベルの線材の安定製造技術開発に関して線材メーカーが主体となり開発を行った。住友電気工業(株)及び古河電気工業(株)はケーブル対応線材を、(株)フジクラは変圧器対応線材を、昭和電線ケーブルシステム(株)は低コスト線材技術に関して安定製造技術を実施した。ここでは、基本的には、中間目標レベルの線材を複数本作製することで再現性を確保することとしていたが、追加財源により試験供試線材量を増加し、歩留り評価を行った。住友電工では、50 m-36 本、100 m-6 本の線材を作製し、代表値として 50 m 長線材の 2 mm-w 線材特性に対する歩留りで 47%を確認した。古河電工では、50 m-11 本、100 m-5 本の線材を作製し、代表値として 100 m 長線材で歩留りが向上し、 J_c 特性に対する歩留りで 36%を確認した。フジクラは、単長 300 m-10 本を含む 6.4 km の線材を作製し、代表値として 100 m 線材の低磁場特性に対する歩留りで 88%を確認した。昭和電線は、100 m 長線材-10 本を作製し、代表値として 50 m 長線材の低コスト条件歩留りで 64%を確認した。以上の歩留り評価を実施したことで最終目標を達成した。

1.1.4-6 超電導電力機器用線材の技術開発における成果のまとめ

超電導電力機器用線材の技術開発における中間目標に対する成果のまとめを表 1.1.4-1 に記載する。

表 1.1.4-1 超電導電力機器用線材の技術開発における中間目標達成状況
(平成 22 年度末時点)

中間目標	研究開発成果	達成度
(1) 線材特性の把握 ●電力ケーブル耐久試験 適正条件の決定	■「湿度」、「加熱」、「応力歪み」、「通電・過電流」という必要な負荷に対する試験を実施。 ■電力ケーブル耐久試験適正条件を決定	中間 目標達成
(2) 磁場中高 J_c 線材 作製技術開発 ●30 A/cm-w @77 K, 3 T-50 m ●300 A/cm-w @65 K, 0.02 T-50 m	<PLD> ■33 A/cm-w@77 K, 3 T- 51 m ■492 A/cm-w@77 K, 0.02 T- 51 m <MOD> ■23 A/cm-w@ 77 K, 3 T-50m ■>300 A/cm-w@65 K, 0.02 T- 50 m <CVD> ■23 A/cm-w@77 K, 3 T-53m <高 Birr> ■BZO 添加 MOD 線 で 65 T で高 B_{irr}	中間 目標達成
(3) 低損失線材 作製技術開発 ●2 mm-w -300 A/cm-w-50 m ●5 mm-w -5 分割-50 m -無分割に対し損失 1/5	<PLD> ■2 mm-w- $J_c \geq 388$ A/cm-w -50 m ■5 mm-w・5 分割 損失 1/5 - 50m <MOD> ■2 mm-w- $J_c \geq 397$ A/cm-w-50 m ■5 mm-w・5 分割損失 1/5 - 50 m <RABiTS-PLD> ■2 mm-w-28 m- $J_c \geq 310$ A/cm-w <加工> ■スクラビング: 5 mm-w 5 分割- 50 m ■スリッター切断: 2 mm-w-30 m - J_c 劣化 $\leq 10\%$	中間 目標達成
(4) 高強度高 J_c 線材 作製技術開発 ●300A/cm-w-1GPa-50m ● $J_c = 30$ kA/cm ² -50 m	■強加工 70, 80 μ m ハステロイ TM 基板線材 <PLD> ■ $J_{c, min} = 400$ A/cm-w- $J_c > 36$ kA/cm ² - 50 m-1 GPa <MOD> ■ $J_c > 33$ kA/cm ² - 50 m <CVD> ■272 A/cm-w@77 K, s.f.-50m-1 GPa <RABiTS-PLD> ■ $J_c > 21$ A/cm ² - 50 m	中間 目標達成
(5) 低コスト・歩留向上 技術開発 ●3 円/Am の実証@50 m 例) PLD: $J_c = 420$ A -15 m/h or 325 A 30 m/h MOD: 350 A 5 m/h	<基板中間層> ■MOD ベット層: MOD-YBCO 膜で $J_c = 2.5$ MA/cm ² ■IBAD-MgO 結晶粒配向度向上 ⇒セリア 500 nm $\Delta\phi(\text{CeO}_2) \sim 3$ 度 ■IBAD-MgO: 200 m/h- $\Delta\phi(\text{CeO}_2) < 4$ 度 <PLD> ■ $J_c = 460$ A/cm-w @30 m/h-70 m 2.9 円/Am <MOD> ■ $J_c = 432$ A/cm-w @5 m/h, 10m/h-50 m 1.9 円/Am	中間 目標達成

1.1.4-7 最終目標と達成状況のまとめ

超電導電力機器用線材の技術開発における最終目標に対する達成状況を表 1.1.4-2 に記載する。

表 1.1.4-2 超電導電力機器用線材の技術開発における最終目標達成状況
(平成 24 年度末時点)

最終目標	研究開発成果	達成度
(1) 線材特性の把握 ●各種機器環境に対する 耐久性を評価	<ul style="list-style-type: none"> ■剥離現象機構解明⇒低中強度原因除去 ■分割線材耐久性評価 	最終 目標達成
(2)磁場中高 I_c 線材 作製技術開発 ● 50 A/cm-w @77 K,3 T-200 m ●400 A/cm-w @65 K,0.1 T-100 m	<ul style="list-style-type: none"> <PLD> ■54 A/cm-w@77 K,3 T- 200 m ■770 A/cm-w@77 K,0.1 T- 158 m <MOD> ■50A/cm-w@77 K,3 T-124m ■524 A/cm-w@65 K,0.1 T- 100 m 	最終 目標達成
(3)低損失線材 作製技術開発 ●2~4 mm-w -500 A/cm-w-200 m ●5 mm-w -10 分割-100 m -無分割に対し損失 1/10	<ul style="list-style-type: none"> <PLD> ■2 mm-w -$I_c \geq 540$ A/cm-w -200 m ■5 mm-w · 10 分割 損失 1/10 - 100m <MOD> ■4 mm-w-$I_c \geq 590$ A/cm-w -80 m ■5 mm-w · 10 分割 損失 1/10 - 100m <RABiTS-PLD> ■2 mm-w-$I_c \geq 400$ A/cm-w -78 m 	最終 目標達成
(4)高強度高 J_e 線材 作製技術開発 ●500A/cm-w-1GPa-200m ● $J_e = 50$ kA/cm ² -200 m	<ul style="list-style-type: none"> <PLD> ■$I_{c,min} > 500$ A/cm-w - 1GPa - 200 m ■$J_e > 52$ kA/cm² - 200 m <RABiTS-PLD> ■$J_e > 52$ A/cm² - 短尺 	最終 目標達成
(5)低コスト・歩留向上 技術開発 ●2 円/Am の実証 ●中間目標の 安定製造技術	<ul style="list-style-type: none"> <PLD> ■$I_c=604$ A/cm-w @30 m/h -35 m 1.6 円/Am <MOD> ■$I_c=605$ A/cm-w @5,10m/h -30 m 1.6 円/Am <住友電工>ケーブル対応線材 ■50 m-36 本、100 m-6 本作製 ⇒(代表値) 2 mm-w 線材特性歩留り : 47% <古河電工>ケーブル対応線材 ■50 m-11 本、100 m-5 本作製 ⇒(代表値) J_e 特性歩留り : 36% <フジクラ>変圧器対応線材 ■300 m-10 本を含む 6.4 km 作製 ⇒(代表値) 低磁場特性歩留り : 88% <昭和電線>低コスト線材 ⇒(代表値)低コスト条件歩留り : 64% 	最終 目標達成

1.1.4-8 海外との比較

本項では、上記でまとめた超電導電力機器用線材の技術開発における成果に対して世界との比較を行うことにより、成果の意義を明確にする。

「線材特性の把握」においては、保存環境、機器（ケーブル）作製環境、使用環境に則した負荷試験を系統的に実施し、「湿度」、「加熱」、「応力歪み」、「通電・過電流」という要素に対する負荷試験を系統的に実施し、それぞれに対して定量的な評価結果を得ている。また、スクライブ線材に対する耐久性評価を行い、剥離現象も機構解明とその対策方法の提案をした。これまで、海外においては、機械的応力に対する評価は NIST を始めとして精力的に行われてきたが、その他の劣化挙動については系統的に評価した例はなく、剥離強度を材料学的に機構解明した報告や、スクライブ線材における種々の評価も皆無に等しい。従って、本プロジェクト成果は、世界的でも初めての実用上重要な成果といえる。

「磁場中高臨界電流(I_c)線材作製技術開発」においては、短尺試料に対する検討は数多くの報告がある。代表的な例としては、米国ロスアラモス国立研究所が PLD 法により YBCO 膜の中に BZO ロッドを分散させた系で 1 T の磁場中で 234 A/cm-w(@~77 K)の高い I_c 値を報告しているが 3 T の特性は報告されていないとともに長尺プロセスへの適用は難しい手法である。一方、SuperPower 社では、最近、BZO の高濃度試料での作製条件適正化で著しい成果を挙げており、1353 A/cm-w(@50 K, 3 T)の成果を報告している。しかしながら、長尺に関するデータは、中間評価時のデータ (50 m 線材で 14 A/cm-w@77 K, 3 T) で留まっている。一方、MOD 法においては、amsc 社の成果が中間評価時のデータ (10 A/cm-w@77 K, 3 T) から更新されていない。

気相法の結果を比較すると、短尺では SuperPower 社の結果が高い結果を報告 (1353 A/cm-w@50K, 3T) しているが、本プロジェクトにおける 141 A/cm-w(@77 K, 3 T)は 50K, 3T に換算すると 1400 A/cm-w(@50 K, 3 T)に相当することから同じオーダーながら優位性を確保している。一方で、長尺線材に関しては、SuperPower 社の 4 倍の特性で 4 倍の長さとなり、大きく先行していると言える。一方、液相法では、本プロジェクトでは気相法にはやや劣るものの世界的に見れば長尺で 50 A/cm-w(@77 K, 3 T)の成果は独走状態といえる。

「低交流損失線材作製技術開発」に関しては、スクライビング溝加工技術で成功に至っている機関は少なく、SuperPower 社のみである。同社では、複数の加工技術の検討を行っており、その中で、機械的にスクライブ加工したのちに選択的に Cu を電気めっきすることでフィラメント上だけに安定化 Cu を配した構造を実現し、短尺ではあるものの 12mm-w 線材を 12 分割し、損失低減を確認している。

ただし、長尺の報告はなされていない。一方、MOD 法においては、amsc 社の線材では、構造的に分割処理が容易ではないことからか、これまで報告はない。従って、本プロジェクトにおいて、100 m 長の PLD 線材及び MOD 線材において交流損失を 1/10 へ低減できた技術レベルは、変圧器のコイルにおける低損失技術も併せて他の追随を許さない世界的に圧倒的な技術力といえる。

「高強度・高工業的臨界電流密度(J_c)線材作製技術開発」に関しては、SuperPower 社が 50 μm 厚の Hastelloy™ を用いた線材開発をしており、耐応力として 800 MPa を報告している。一方、AMSC 社は結晶粒配向金属基板を使用していることから強度的には難易度が高く、クラッド基板において 426 MPa の強度を報告している程度である。これらの海外実績に比して、本プロジェクトの成果は、基板厚みとしては 70~100 μm 厚で SuperPower 社成果にはやや劣るものの強度的には約 1 GPa を実現しており、一歩リードしているといえる。

「低コスト・歩留向上技術開発」に関しては、世界的にコストの詳細計算が公表されていないのが実情で比較が困難であるが、基礎データの一つとして、 $I_c \times L$ 積がある。同指標により比較すると、現在の世界最高値は、本プロジェクト参画機関である(株)フジクラから報告された成果 ($467\text{kAm} = 572\text{A} \cdot 816\text{m}$) である。最近の動向としては、韓国の SuNAM 社の著しい進展である。2010 年から約 2 年の間に $I_c \times L$ 積で約 7 倍の進展がみられ、現在では SuperPower 社を抜いて、世界第 2 位の値 ($422\text{kAm} = 422\text{A} \cdot 1000\text{m}$) を報告している。最近になって、世界の各社から、価格の現状及び目標等の情報がでてきている、SuperPower 社は、 $\$350 \sim 450/\text{kAm}@77\text{ K, s.f.}$ であり、SuNAM 社がほぼ同等の $\$400/\text{kAm}@77\text{ K, s.f.}$ であることである。これに対し、低コストプロセスの amsc 社は $\$175/\text{kAm}@77\text{ K, s.f.}$ であることである。しかしながら、本項の冒頭の通り、内訳は不明であるとともにユーザーの仕様の下での価格が最終的には問題になることから、ここで優劣を議論するのは妥当ではない。

表 1. 1. 4-3 Y系超電導線材開発に関する世界動向との比較

研究テーマ	世界動向	本プロジェクト成果と位置づけ
(1) 線材特性の把握	<ul style="list-style-type: none"> 劣化挙動、剥離挙動については系統的に評価した例はない 	必要な負荷に対する試験を実施 剥離機構解明及び解決策提案 世界初の系統的な成果
(2) 磁場中高臨界電流(I_c)線材作製技術開発	LANL (米国) : IBAD-PLD(短尺) $I_c = 234 \text{ A/cm-w@75 K, 1T}$ SuperPower(米国) : IBAD-MOCVD 短尺 $I_c = 1353 \text{ A/cm-w@50 K, 3 T}$ 50 m $I_c = 14 \text{ A/cm-w@77 K, 3 T}$ amsc (米国) : RABiTS-TFA-MOD 短尺 $I_c = 10 \text{ A/cm-w@77 K, 3 T}$	短尺 $I_c = 141 \text{ A/cm-w@77 K, 3 T(PLD)}$ $\rightarrow I_c = 1400 \text{ A/cm-w@50 K, 3 T}$ 相当 200 m $I_c = 54 \text{ A/cm-w@77 K, 3 T(PLD)}$ 短尺 $I_c = 56 \text{ A/cm-w@77 K, 3 T(MOD)}$ 124 m $I_c = 50 \text{ A/cm-w@77 K, 3 T(MOD)}$ ↓ 世界最高の磁場特性 (特に長尺)
(3) 低交流損失線材作製技術開発	SuperPower(米国) : IBAD-MOCVD 短尺 12 mm-w 線材を 12 分割 長尺 報告なし	100 m-5 mm-w 10 分割-損失 1/10(PLD) 100 m-5mm-w 10 分割-損失 1/10 (MOD) 世界的に先行した技術
(4) 高強度高工業的臨界電流密度(J_c)線材作製技術開発	SuperPower(米国) : 50 μm 厚ハステロイ TM 金属基板 $\Rightarrow 800 \text{ MPa}$ amsc (米国) : 結晶粒配向金属基板 $\Rightarrow 426 \text{ MPa}$	70 μm ハステロイ TM 基板線材 $I_{c,\text{min}} = 539 \text{ A/cm-w} \cdot J_c > 52 \text{ kA/cm}^2 \cdot 200 \text{ m}$ 100 μm ハステロイ TM 基板線材 $I_{c,\text{min}} > 500 \text{ A/cm-w} \cdot 1 \text{ GPa} \cdot 200 \text{ m}$ (Ag30 μm 想定) 世界最高強度
(5) 低コスト・歩留向上技術開発	SuNAM (韓国) : IBAD-共蒸着法 1000 m- $I_c = 422 \text{ A/cm-w@77 K, s.f.}$ ($I_c \times L = 422 \text{ kAm}$) SuperPower(米国) : IBAD-MOCVD 1065 m 長- $I_c = 282 \text{ A/cm-w@77 K, s.f.}$ ($I_c \times L = 300 \text{ kAm}$)	フジクラ : IBAD-PLD 816 m- $I_c = 572 \text{ A/cm-w@77 K, s.f.}$ ($I_c \times L = 467 \text{ kAm}$) ↓ 長尺特性でリード 長さは米韓が先行

1.1.5 超電導電力機器の適用技術標準化

超電導電力機器の適用技術標準化においては、5ヶ年のプロジェクト終了までに、「超電導線材並びにその試験方法の IEC 国際規格提案に資すること」、「超電導電力ケーブル並びにその試験方法の IEC 国際規格提案に資すること」、及び「超電導変圧器、SMES 等の機器仕様並びにこれらの試験方法の標準化素案の作成等」を最終目標としている。

このため、前期 3 ヶ年においては、超電導線材と超電導電力ケーブルでは IEC 国際規格の提案に必要な規格素案の作成と国際標準化合意の醸成を目標に定め、また変圧器や SMES 等の超電導電力機器では機器仕様並びにこれらの試験方法の標準化の基礎となるデータ等の体系化を目標とし、これらを達成するために技術調査研究を行ってきた。その結果、個々に設定されたすべての中間目標について達成した。

後期 2 ヶ年においては、超電導線材と超電導電力ケーブルについては規格素案を作成し、国際合意を背景に IEC 国際規格提案に資することを目標に定めた。また、変圧器や SMES 等の超電導電力機器について標準化素案を作成することと冷却システムの安全性、運用性を考慮した規制緩和に向けた提案資料の作成、国際標準化合意の醸成を目標とした。活動の結果、すべての最終目標を達成した。以下に、個々の実施項目に対する目標達成の状況を記す。

1.1.5-1 超電導線材関連技術標準化 (ISTEC、住友電工、フジクラ、中部電力、昭和電線ケーブルシステム、古河電気工業、九州大学、東北大学)

前期 3 ヶ年においては、Y 系を含む超電導線材を実用超電導線材とした超電導線材並びにその試験方法の規格素案を作成した。また国際会議等を通じて日本提案の国際規格に対して国際合意の醸成を図り、中間目標を達成した。後期 2 ヶ年においては、超電導線材の通則及び Y 系超電導線材の臨界電流測定に関する規格素案を作成した。また、Y 系超電導線材の短尺臨界電流測定方法に関する国内ラウンドロビンテスト(RRT)を行い、IEC/TC90 の WG に技術情報を提供し、国際規格提案に貢献し最終目標を達成した。以下に小項目に対する成果概要を記す。

前期 3 ヶ年
(規格素案作成)

- ・ 超電導機器側からの試験項目要件を調査し、「超電導線材に対する一般要求事項」の規格素案に反映した。
- ・ 超電導線材小委員会において、各国のコメントを反映して「超電導線材に対する一般要求事項」及び「超電導線材の試験方法」の規格素案を作成した。

(国際標準化合意醸成)

- ・ 2008年6月ドイツ・ベルリンにて開催した第11回 IEC/TC90 国際会議において、日本(JNC)から「超電導線の国際標準化」の必要性を提案し、同国際会議において、IEC/TC90 内に超電導の国際標準化に向けたアドホックグループを設置することが承認され、2009年1月アドホックグループ3として発足した。
- ・ 2009年9月ドイツドレスデンにおける第7回パネル討論会の開催並びにドイツ、中国、韓国、ポーランド及び米国とも意見交換を実施し、日本(JNC)提案の「超電導線の国際標準化」の合意醸成に努めた。
- ・ これらの意見交換を通じて、規格適用範囲(スコープ)、出荷表示及び附属書の再検討案が提起され、アドホックグループ3の活動に付された。
- ・ 2010年8月米国ワシントンにおける第8回パネル討論会において、実用超電導線材の通則が扱う対象について議論が行なわれ、統一的でオープンな標準が望まれるという点で意見の一致が見られた。2010年10月米国バークレーでアドホックグループ3会議が開催され、実用超電導線材の通則が見直しされ、大筋で合意が得られた。

後期2ヶ年

(規格素案作成)

- ・ 実用超電導線材の通則に関する規格素案について検討し、IEC/TC90 の WG13 に情報提供した。
- ・ Y系超電導線材の短尺臨界電流測定に関する規格素案を作成した。

(国際標準化合意醸成)

- ・ 2011年4月に超電導線材の通則の NP(新業務項目提案)が承認され、IEC/TC90 の WG13 の設置が承認された。
- ・ 2011年10月タワーホール船堀で開催された第9回パネル討論会において、実用超電導線材の通則が二分割になることが説明され、出荷時のラベル表示内容等について議論された。

(国内 RRT)

- ・ Y系超電導線材の短尺臨界電流測定方法に関する国内ラウンドロビンテスト(RRT)を行い、IEC/TC90 の WG に技術情報を提供し、国際規格提案に貢献した。

(試験法調査)

- ・ Y系超電導線材の剥離試験方法について、技術動向調査、学会調査を行った。

1.1.5-2 超電導電力ケーブル関連技術標準化 (ISTEC、住友電気工業、古河電気工業、フジクラ、昭和電線ケーブルシステム)

前期3ヶ年においては、Y系を含む超電導線材等を適用した超電導電力ケーブル

並びにその試験方法の規格素案の概要を作成した。また、国際大電力システム会議 CIGRE 及び TC20（従来の電力ケーブル）との連携を図り IEC 国際標準化合意の醸成を行なっており、中間目標を達成した。後期 2 ヶ年においては、Y 系を含む超電導線材等を適用した超電導電力ケーブル並びにその試験方法の規格素案を作成した。また、CIGRE のガイドラインの検討を行い、CIGRE に情報提供した。これらの結果、ジョイントアドホックタスクフォース(J ahTF)が設置されることになり、国際合意を背景に超電導電力ケーブルの IEC 国際規格提案を目指した活動が行なわれることになった。これらの活動を通じて超電導電力ケーブルの IEC 国際規格化に向けた活動に貢献し、最終目標を達成した。以下に小項目に対する成果概要を記す。

前期 3 ヶ年

(規格素案作成)

- ・ 超電導電力ケーブルのライフサイクルに係わる環境側面並びに安全側面を調査し、超電導電力ケーブルの規格素案に反映した。
- ・ 超電導電力ケーブル小委員会において、現行 IEC 規格、現行 JEC 規格を参考にし、現行 NEDO プロジェクトにおける Bi 系及び Y 系の超電導電力ケーブル開発成果を基に「超電導電力ケーブルシステムに対する一般要求事項」及び「交流超電導電力ケーブルの試験方法」の規格素案を作成した。

(国際標準化合意醸成)

- ・ 2008 年 6 月ドイツ・ベルリンにて開催した第 11 回 IEC/TC90 国際会議において、日本(JNC)から「超電導電力ケーブルの国際標準化」の必要性を提案した。同国際会議において、IEC/TC90 と IEC/TC20（電力ケーブル）が超電導電力ケーブルの国際標準化を推進するために、まず国際大電力システム会議(CIGRE)との共同作業の実施が承認され、CIGRE SC B1 内にワーキンググループ(WG)の設置を目指した 1 年間のタスクフォース(TF)が設置された。
- ・ 2009 年 9 月ドイツドレスデンにて第 7 回パネル討論会を開催し、「超電導電力ケーブルの国際標準化」の重要性を討論し、合意醸成に努めた。
- ・ 2009 年 9 月ポーランドにて開催された CIGRE 会議において、CIGRE SC B1 のタスクフォース(TF)報告が承認された。また、同時に 3 年間のワーキンググループ(WG)設置も承認された。2009 年 12 月日本の WG メンバーを届け出た。
- ・ CIGRE ポーランド会議に向けた TF 報告書を超電導ケーブル小委員会と TC90/TC20 国内リエゾンアドホックグループが連携して検討した。

後期 2 ヶ年

(規格素案作成)

- ・ Bi ケーブル実証プロジェクトの試験項目、CIGRE で検討されている試験方法のガイドラインを受けて、Y 系を含む超電導線材を適用した超電導電力ケーブル並びにその試験方法に関する規格素案を作成した。

(国際標準化合意醸成)

- ・ 2011 年 10 月タワーホール船堀で開催された第 9 回パネル討論会において、CIGRE WG B1.31 における超電導電力ケーブルの検討状況の説明の後、質疑応答が行なわれ合意醸成に努めた。
- ・ 2012 年 10 月米国ポートランドで開催された第 10 回パネル討論会において、超電導電力ケーブル試験法に関する IEC/TC90 の活動、IEC/TC90 と CIGRE WG B1.31 とのリエゾン関係、活動状況等が説明された。
- ・ CIGRE の試験方法のガイドラインに関して、特に日本担当のタイプテスト (形式試験) について検討を行い CIGRE に情報を提供した。これらの活動の結果、IEC/TC20 及び IEC/TC90 を中心としたジョイントアドホックタスクフォース (J ahTF) が設置されることになり、今後は、この国際合意を背景に国際規格提案を目指した活動が行なわれることになった。超電導電力ケーブルの IEC 国際規格化に向けた活動に貢献した。

(技術動向調査)

- ・ 国際学会に委員を派遣し超電導電力ケーブルに関する動向調査を行った。

1.1.5-3 超電導電力機器関連技術標準化等 (ISTEC、中部電力、古河電気工業、九州電力、フジクラ、昭和電線ケーブルシステム)

前期 3 ヶ年においては、Y 系を含む超電導線材等を適用した超電導変圧器、SMES 等の機器仕様並びにこれらの試験方法の標準化の基礎となるデータ等の体系化を行っており、中間目標を達成した。後期 2 ヶ年においては、これらの成果をベースとした標準化素案を作成した。また、他機関との連携が必要との議論がなされた中で IEC/TC90 と CIGRE D1 との間でリエゾン関係が結ばれることになり、国際合意醸成活動を行った。さらに、冷却システムの規制緩和に向けた提案資料を作成した。以上の活動を通じて最終目標を達成した。以下に小項目に対する成果概要を記す。

前期 3 ヶ年

(超電導電力機器別調査)

- ・ SMES、超電導変圧器、超電導限流器及び超電導回転機の技術動向並びに標準化ニーズ調査を実施した。
- ・ EUCAS2009 に委員を派遣し、SMES、超電導変圧器等超電導電力機器の国際技術動向を調査した。

(規格骨子案作成)

- ・ SMES、超電導変圧器等超電導電力機器の国際標準化に関して、従来の試験方法等技術側面の調査を行い、規格骨子案に反映した。
- ・ 超電導電力機器小委員会において、SMES 及び超電導変圧器の規格骨子案を作成した。

後期 2 ヶ年

(標準化案作成)

- ・ Y系を含む超電導線材等を適用した超電導変圧器、SMES の機器仕様並びにこれらの試験方法の標準化素案を作成した。

(国際標準化合意醸成)

- ・ 超電導限流器等超電導電力機器の標準化を進めていく上で他機関との連携が必要との議論がなされた。IEC/TC90 と CIGRE D1 との間でリエゾン関係を結ぶことになり、国際合意醸成活動を行った。

(規制緩和提案)

- ・ 冷却システムの安全性、運用性を考慮した規制緩和に向け、過去の超電導電力ケーブルに関する提案資料の調査を行い、また、関係機関へのヒアリング等により最新の動向調査を行い、規制緩和に向けた提案資料を作成した。

(技術動向調査)

- ・ 国際学会に委員を派遣し、超電導電力機器に関する動向調査を行った。
以上の成果を表 1.1.5-1 及び表 1.1.5-2 にまとめて示す。

表 1.1.5-1 超電導電力機器の適用技術標準化の成果全体のまとめ (前期 3 ヶ年)

項目	目標 (H22 年度達成)	研究開発成果	達成度
超電導線材関連技術標準化	超電導線材並びにその試験方法の規格素案を作成	各国のコメントを反映して「超電導線材に対する一般要求事項」及び「超電導線材の試験方法」の規格素案を作成	達成
	IEC 国際標準化合意の醸成	パネル討論会等において各国と意見交換を実施し、日本(JNC)提案の「超電導線材の国際標準化」の合意醸成に努めた	達成
超電導電力ケーブル関連技術標準化	超電導電力ケーブル並びにその試験方法の規格素案を作成	超電導電力ケーブル小委員会において、超電導電力ケーブルシステムに対する一般要求事項」及び「交流超電導電力ケーブルの試験方法」の規格素案を作成	達成
	国際大電力システム会議 CIGRE、他の IEC/専門委員会 TC 等との IEC 国際標準化合意の醸成	パネル討論会等において各国と意見交換をするとともに、CIGRE 会議や TC20 と連携して国際標準化合意の醸成に努めた	達成
超電導電力機器関連技術標準化等	超電導変圧器、SMES 等の機器仕様並びにこれらの試験方法の標準化の基礎となるデータ等の体系化	技術動向並びに標準化ニーズ調査を実施し、これを基に規格素案作成を開始	達成

表 1.1.5-2 超電導電力機器の適用技術標準化の成果全体のまとめ（後期 2 ヶ年）

項目	最終目標	研究開発成果	達成度
超電導線材関連技術標準化	○超電導線材並びにその試験方法の規格素案を作成するとともに、国際合意を背景に IEC 国際規格提案に資する。	○超電導線材の通則に関する規格素案を作成した。Y 系超電導線材の臨界電流測定に関する規格素案を作成した。 ○Y 系超電導線材の短尺臨界電流測定方法に関する国内ラウンドロビンテスト（RRT）を行い、IEC/TC90 の WG にその技術情報を提供し、国際規格提案に貢献した。	達成
超電導電力ケーブル関連技術標準化	○超電導電力ケーブル並びにその試験方法の規格素案を作成するとともに、国際合意を背景に IEC 国際規格提案に資する。	○超電導線材を適用した超電導電力ケーブル並びにその試験方法に関する規格素案を作成した。 ○CIGRE の試験方法のガイドラインに関して、特に日本担当のタイプテスト（形式試験）について検討し CIGRE に情報を提供した。ジョイントアドホックタスクフォース（J ahTF）が設置され、この国際合意を背景に国際規格提案を目指した活動が行なわれることになった。超電導電力ケーブルの IEC 国際規格化に向けた活動に貢献した。	達成
超電導電力機器関連技術標準化等	○Y 系を含む超電導線材等を適用した超電導変圧器、SMES 等の機器仕様並びに試験方法の標準化素案を作成する。国際合意の醸成（アドホック設置活動）を行う。 ○冷却システムの安全性、運用性を考慮した規制緩和に向けた提案資料を作成する。	○Y 系を含む超電導線材等を適用した超電導変圧器、SMES の機器仕様並びにこれらの試験方法の標準化素案を作成した。IEC/TC90 と CIGRE D1 との間でリエゾン関係を結ぶことになり、国際合意醸成活動を行った。 ○過去の関連する提案資料の調査を行い、関係機関へのヒアリング等により最新の動向調査を行い、規制緩和に向けた提案資料を作成した。	達成

2. 研究開発項目毎の成果

2.1 超電導電力貯蔵システム (SMES) の研究開発

2.1.1 2 GJ 級高磁界・大電流コンパクトコイル構成技術開発

2 GJ級大容量SMESコイル実現のためには、従来の金属系SMESでは達成できなかったレベルへの貯蔵エネルギー密度の向上が課題となり、磁場中特性に優れるY系超電導線材によるコイルを用いた高磁界化による貯蔵エネルギー高密度化が必要となる。この高磁界コイルの実現には、コイル通電時に発生する通電電流と最大経験磁場、コイル径の積として加わる強力な電磁力（フープ応力）の繰返しに耐えるコイル構成を開発することが不可欠である。「超電導電力ネットワーク制御技術開発」プロジェクトにおいてIBAD/ CVD-YBCO線材の機械強度を評価し、77 K液体窒素中においてフープ応力方向の一軸引張応力が1 GPaを超えても I_c 値が可逆領域であること、及びSMES充放電繰返し動作のように引張応力を 10^6 回繰返しても1 GPaを超える領域まで疲労破断による劣化がなく、高磁場SMESへ高いポテンシャルを有する線材特性であることを検証した。さらに、IBAD/ CVD-YBCO線材を用いて、応力集中が懸念されるコイル電極部構造への対策を施した小型コイルを作製してフープ応力試験を実施し、実際に耐フープ応力1 GPaを有することを実証した。本プロジェクトでは、高磁界化による高エネルギー密度化コンパクトコイルをめざし、従来の金属系SMESコイルの許容可能なフープ応力(300 MPa程度)の2倍の応力(600 MPa)を連続して繰返し加えても使用可能な高強度コイルとして、2 GJ級大容量SMESコイルの技術見通しを得るために必要なコイル要素技術を開発した。既存仕様レベルの I_c 値 200 A(@77 K,s.f.)-200 m長級線材を用いて目標レベルのフープ応力の検証評価ができるよう配置した外部磁場下において、開発コイルを励磁し、フープ応力を繰返し作用させ、コイルが600 MPa以上の耐フープ応力特性を有することを実証した。なお、要素コイル規模のコイル試験評価に先立ち、外径200 mm級の小コイルを試作評価することでコイル化技術の確立を図った。

また、SMES システムとして必要な出力容量を実現するため、大電流容量コイルの開発を行った。大電流容量化のためには素線の並列化が必要であるが、「超電導電力ネットワーク制御技術開発」プロジェクトにおいて、Y系超電導線材特有の積層構造による電極部の不均一な構造・接合により電流の偏流が生じ、従来の集合導体化手法では困難であったため、均流化を実現する電極構成により集合導体化コイルを開発した。高磁界コイルは電極部での高応力に耐える必要があることから、本プロジェクトでは、600 MPa 級フープ応力コイルの電極部において高応力を許容できる導体コイル構造を開発し、2 kA 以上通電可能な大電流容量コイルの構成

技術開発を行った。加えて、線材積層構造のコイルの場合、製作誤差などによる電流偏流のため損失の増大が懸念されることから、電極部だけでなくコイル全体の構造最適化を図った。

2.1.1-1 集合導体・コイルの応力歪み特性検討（中部電力、京都大学）

(1) 研究開発目的

大容量 SMES コイルの開発には、大電流導体の開発が不可欠である。Y 系超電導線材は従来の超電導線材構造と異なり、基板に薄膜を積層した厚さ方向に非対称なテープ状構造であるため、Y 系超電導線材の大電流容量導体化について、集合導体コイル構造の最適化の観点から応力歪み特性について評価した。

(2) Y 系集合導体の積層構造間の応力歪み評価

Y系超電導線材は薄膜積層構造をしているため、厚さ方向に非対称である。このため、集合導体の構成方法において、パターン別にコイル巻線時に負荷される応力歪みの比較評価を実施した¹⁾。ここで、安定化層を構成するCu層に関しては、弾性変形のみの場合と塑性変形を含む場合の両方について検討した。計算に用いた積層構造モデルは図 2.1.1-1-1 の 3 パターンである。ただし、Cu層とハステロイ™基板のヤング率 E_{Cu} 、 E_H 、厚さ t_{Cu} 、 t_H はそれぞれ、 $E_{Cu}=120$ GPa、 $E_H=200$ GPa、 $t_{Cu}=t_H=0.1$ mmとした。

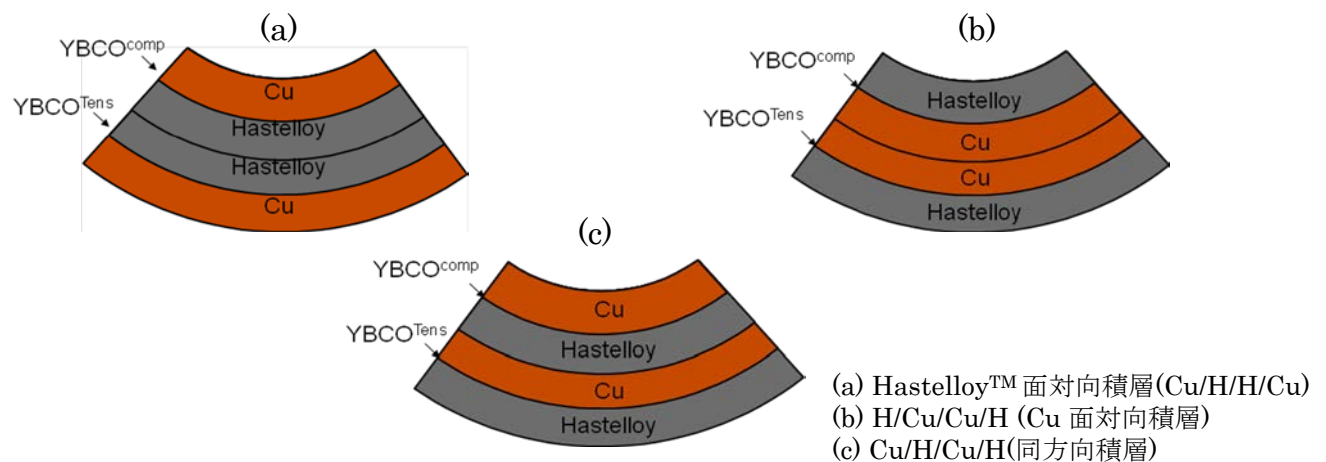


図 2.1.1-1-1 Y 系線材 2 本集合化時の積層パターン

導体中心から中立軸までの距離 (mm)をパターン別に表 2.1.1-1-1 に示す。また、Y 系超電導層に発生する引張曲げ歪みを図 2.1.1-1-2 に示す。大容量 SMES コイルサイズにおいては、いずれの場合も小さく、問題ないレベルと考えられる。

表 2.1.1-1-1 導体中心から中立軸までの距離 (mm)

	Cu/H/H/Cu	H/Cu/Cu/H	Cu/H/Cu/H
Cu:Elastic	0	0	0.0125
Cu:Plastic	-0.0346	-0.0117	0.0038

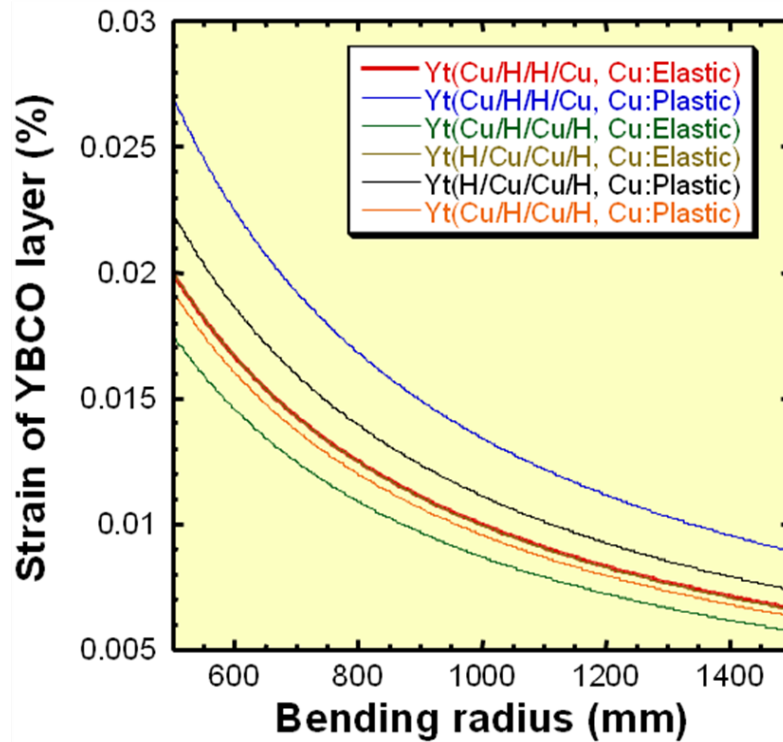


図 2.1.1-1-2 引張曲げ歪みと曲げ半径の関係

次に、導体の曲げ、せん断応力の計算を実施した。3点曲げにより、2点支持の間は 100 mm とし、曲げ半径 1 m で評価した。パターン別のせん断応力分布及び曲げ応力分布を図 2.1.1-1-3～図 2.1.1-1-5 に示す。パターン別に応力の違いがあるが、いずれの場合も絶対値は小さい。

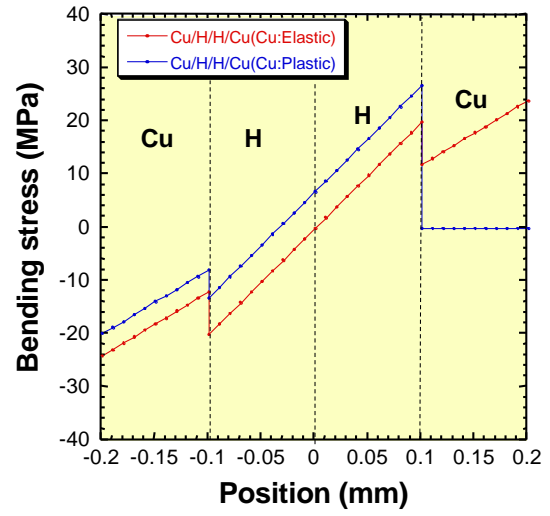
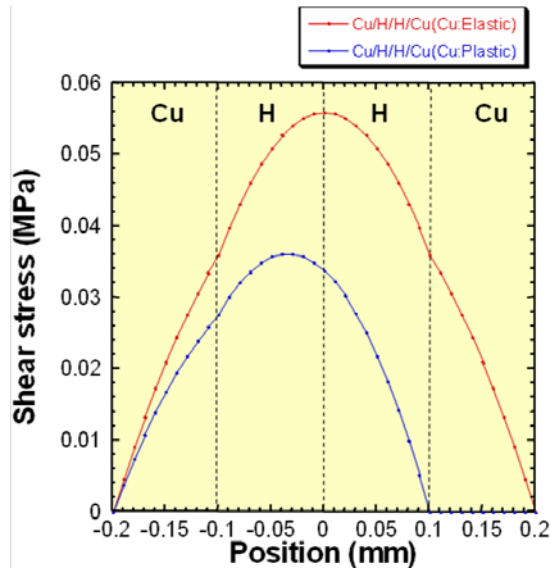


図 2.1.1-1-3 Hastelloy™面対向積層(Cu/H/H/Cu)時のせん断応力及び曲げ応力

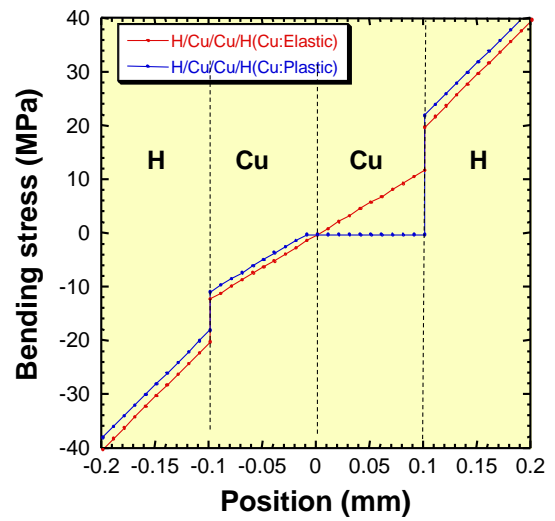
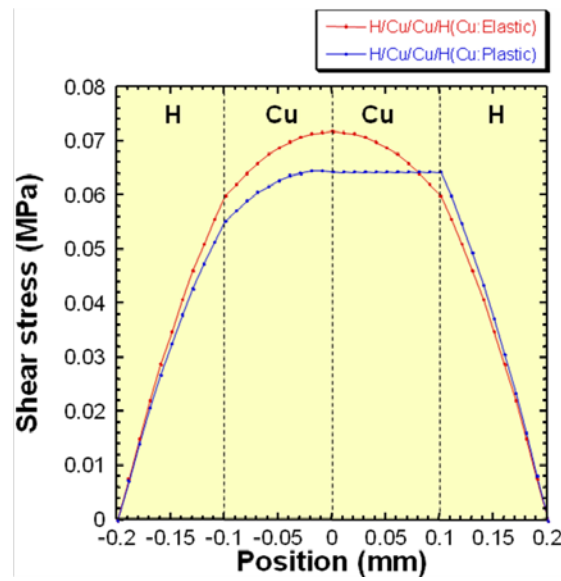


図 2.1.1-1-4 H/Cu/Cu/H (Cu 面対向積層)時のせん断応力及び曲げ応力

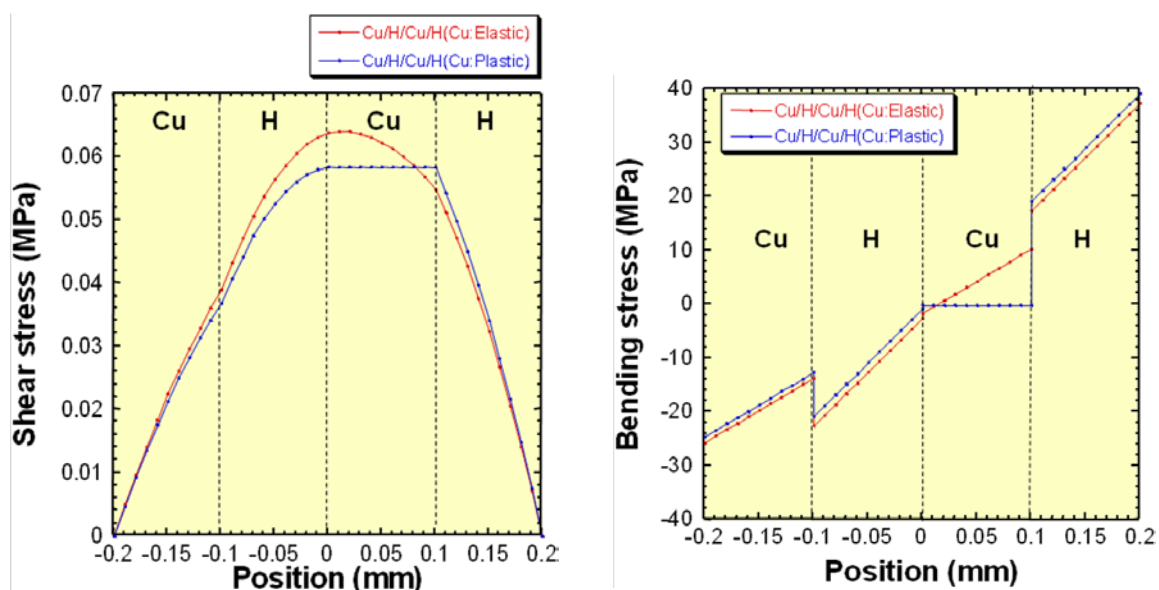


図 2.1.1-1-5 Cu/H/Cu/H(同方向積層)時のせん断応力及び曲げ応力

(3) 結果

集合導体の構成方法において、パターン別にコイル巻線時に負荷される応力歪みの比較評価を実施した。その結果、大容量SMESコイル規模では、いずれの積層構造についてもY系超電導層に発生する曲げ歪みは 0.015 %以下と小さく、Cu/Hastelloy™界面に働くせん断応力は、導体厚さが薄いため非常に小さいことが確認された。よって、SMESコイル設計においては、導体の曲げ応力、せん断応力以外の応力（フープ応力、樹脂/線材間の熱残留応力等）への配慮がより重要と考えられる。

引用論文リスト

(1) 「材料力学の基礎」 培風館 p.68

2.1.1-2 集合導体・コイルの構造最適化検討（中部電力、早稲田大学）

(1) 研究開発目的

大容量 SMES コイルの開発には、大電流導体の開発が不可欠である。このため、Y 系超電導線材を用いた大電流容量集合導体コイルの構造最適化のため、通電特性・熱特性について評価した。

(2) 集合導体・コイルの通電特性・熱特性評価

SMES用コイルの素線として想定するY系超電導線材は、テープ幅は 10 mm、超電導層の厚さ 1 μm 、77 Kにおける自己磁界中の臨界電流(I_c)は 280 A/cm-wである。この線材を用いて設計したSMES用コイルの諸元を表 2.1.1-2-1 に示す。内半径 1.0

m、外半径 1.4 m、厚さ 0.6 m の要素コイル 180 個が、半径 3.7 m でトロイダル状に配置される。1 要素コイルは 4 つのパンケーキコイルから成り、1 ターンの幅は 1.1 mm である（表 2.1.1-2-2）。この SMES 用コイルに 1 素線当たり 540 A の電流を通電すると、動作温度 20 K で 2.4 GJ の磁気エネルギーを蓄積できる。

表 2.1.1-2-1 2 GJ 級トロイダル SMES の諸元

貯蔵エネルギー	2.4 GJ
運転温度	20 K
要素コイル数	180
トロイダル中心半径	3.7 m
最大運転電流	2160 A
最高磁場 (垂直成分)	11 T (0.67 T)

表 2.1.1-2-2 2 GJ 級トロイダル SMES を構成するパンケーキコイルの諸元

内径	ϕ 2.0 m
外径	ϕ 2.8 m
高さ	0.06 m
線材巾	15 mm
線材厚さ (絶縁材・補強材込)	1.1 mm
導体素線数	4
巻数	91

Y 系超電導線材はテープ形状をしているため、導体は積層導体となる。2 kA の導体の場合、想定される素線の通電電流が 540 A であるから、基本的に 4 枚を積層することになる。そこで、図 2.1.1-2-1 に示すような Y 系超電導線材を 4 枚束ねた Y 系集合導体について検討した。

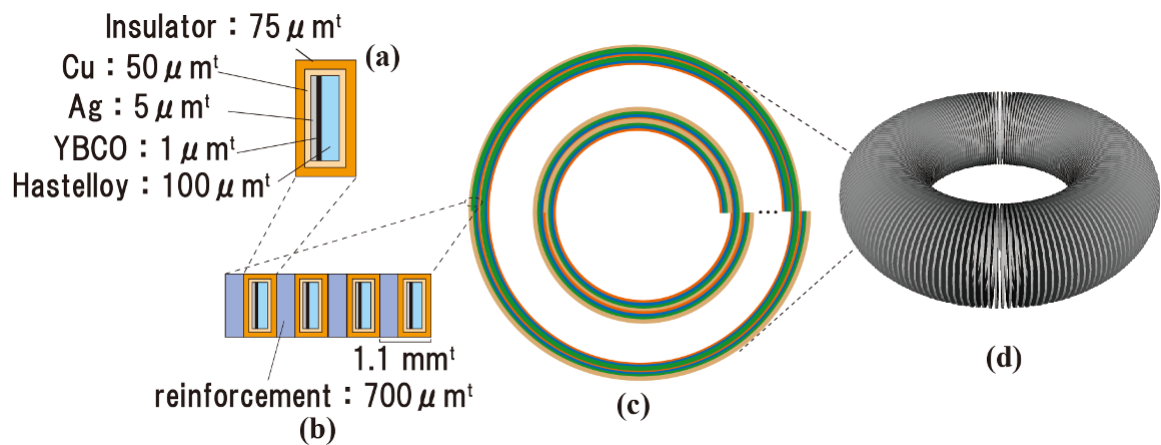
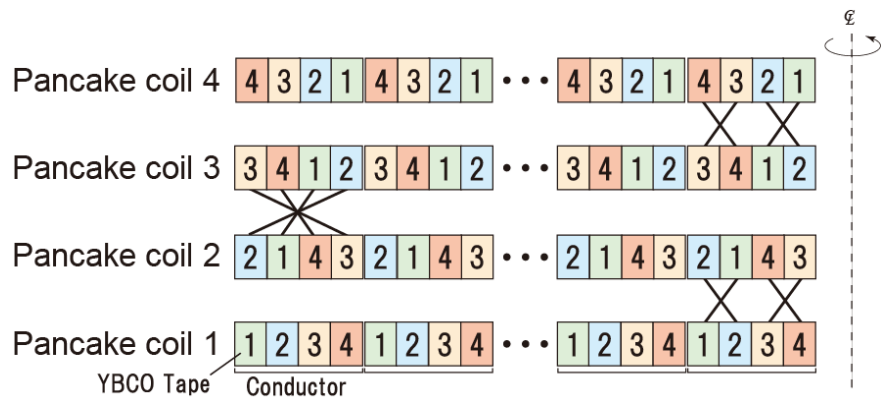


図 2.1.1-2-1 (a) Y 系超電導線材、(b)集合導体、(c)パンケーキコイル、
(d)トロイダルコイルの概略図

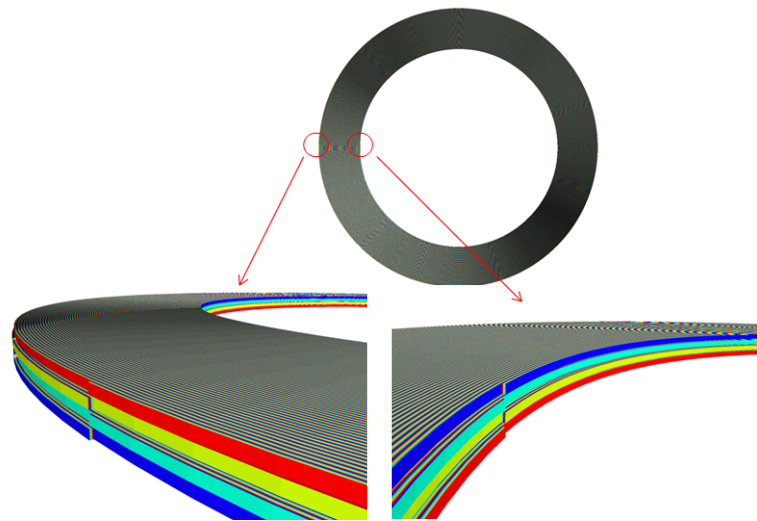
テープを積層して導体化する場合、偏流と交流損失が問題となる。偏流が発生すれば、導体の電流容量の低下、交流損失の増大が問題となるため、均流化が不可欠となる。一方、交流損失はテープ面に垂直な磁界変動が損失を支配するが、これは多モジュールコイル／トロイダル方式の採用により、垂直磁界の低減を図る方向で検討した。一方、積層導体の素線間の電磁結合が大きいと平行磁界に対する結合損失が大きくなるため、素線間の電磁結合の抑制が課題となる。そこで、検討した集合導体の素線には、交流損失を低減するため、素線間電気絶縁を施した。素線間絶縁された素線を集合導体にした場合、素線間の電流転流が端部で起きる。導体の均流化には転位が必須であるが、Y 系超電導線材はテープ形状をしているため、ツイストによる転位ができない。従って、パンケーキ間の接続部で転位を行う必要がある。

本プロジェクトで想定している導体は、図 2.1.1-2-1 (b)のように超電導層厚さ $1 \mu\text{m}$ × 幅 1 cm の線材が 1.1 mm 間隔で 4 枚巻かれる。トロイダルコイルを構成するユニットコイルは 4 個のパンケーキコイルから成る。したがって、接続転位はユニットコイル内では 3 回まで可能である。そこで、図 2.1.1-2-2 に示すような転位を考えた。コイルの諸元は表 2.1.1-2-1 で示したとおりである。このときインダクタンスは表 2.1.1-2-3 で与えられる。結合係数は表 2.1.1-2-4 のように 0.999 程度になり、素線間結合は非常に強い。

ユニットコイルのインダクタンスは図 2.1.1-2-3 に示す。ユニットコイルの各線材に流れる電流を計算すると、電流の分布は図 2.1.1-2-4 のようになり、均流していることが確認できた。



(a) 接続部の転位



(b) インダクタンス計算のモデル

図 2.1.1-2-2 4 枚積層導体、4 パンケーキコイルの転位

表 2.1.1-2-3 コイルに巻かれた集合導体内の素線のインダクタンス

	Tape 1	Tape 2	Tape 3	Tape 4
Tape 1	0.51215 H	0.51207 H	0.51200 H	0.51207 H
Tape 2	0.51207 H	0.51215 H	0.51207 H	0.51200 H
Tape 3	0.51200 H	0.51207 H	0.51215 H	0.51207 H
Tape 4	0.51207 H	0.51200 H	0.51207 H	0.51215 H

表 2.1.1-2-4 コイルに巻かれた集合導体内の素線の結合係数

	Tape 1	Tape 2	Tape 3	Tape 4
Tape 1	--	0.99983827	0.99970913	0.99982753
Tape 2	0.99983827	--	0.99983084	0.99970913
Tape 3	0.99970913	0.99983084	--	0.99983827
Tape 4	0.99982753	0.99970913	0.99983827	--

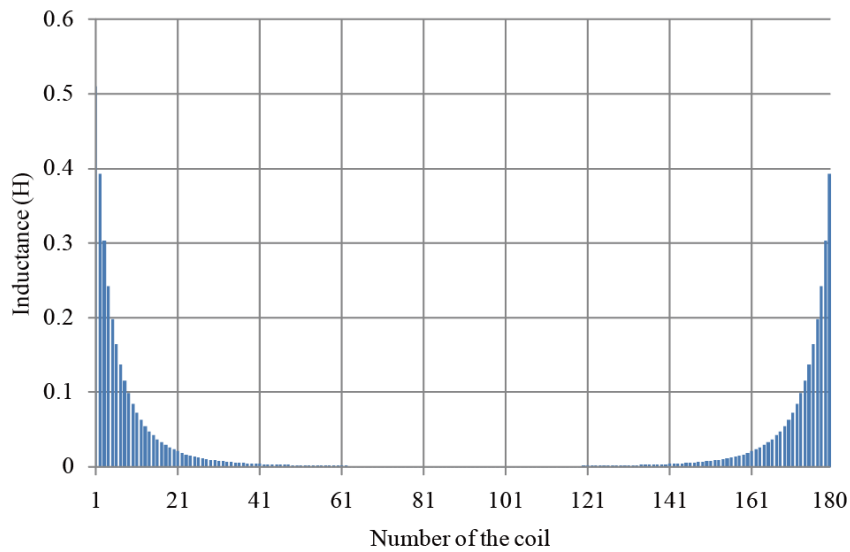


図 2.1.1-2-3 ユニットコイルのインダクタンス

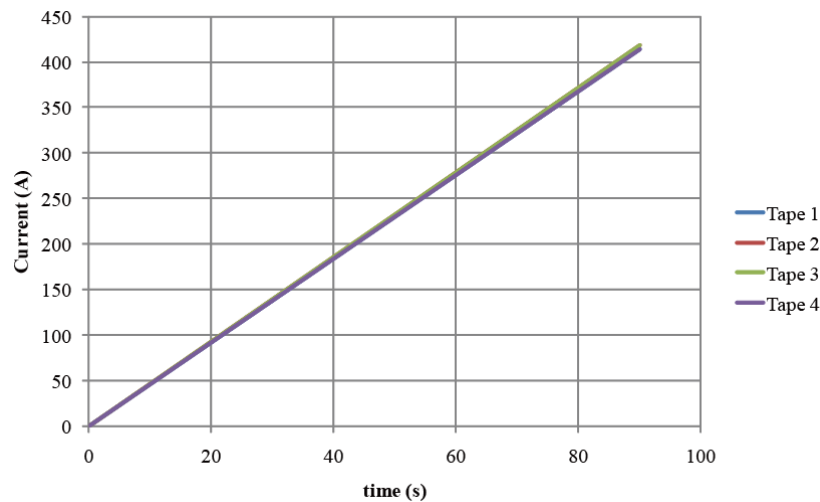


図 2.1.1-2-4 4枚積層導体の素線の電流分布

コイルは集合導体で巻かれるが、電流が各素線に均等に流れると仮定すれば、素線 1 本について常電導伝播解析をすればよい。そこで、安定化層の厚さが異なる Y 系超電導線材に局部的に常電導部が発生した場合の線材内の温度分布、発生電圧について調べた。

解析において、Y系超電導線材の抵抗発生は I - V 特性 (J_c 、 n 値) の分布に依存するため、有限要素法で解くことにした。Y系超電導線材は、幅 1 cm、ハステロイ™ 厚さ 100 μm 、Cu層厚さ 25~200 μm で、 $I_c=600 \text{ A/cm-w}$ (@1 $\mu\text{V/cm}$ 、@20 K)、 n 値は 30 のものを想定した。

I_c 値の温度依存性は、以下のように仮定した。

$$E = E_c \left(\frac{I}{I_c} \right)^n \quad (\text{式 } 2.1.1-2-1)$$

$$I_c = I_{c0} \frac{T_c - T}{T_c - T_{op}} \quad (\text{式 } 2.1.1-2-2)$$

ここで、 E_c は I_c を定義する電界、 I_{c0} は運転温度 T_{op} における臨界電流である。

通電電流は $I_c=600$ A (@ $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ 、 20 K) に対して負荷率 0.5、0.6、0.7、0.8、0.9 に相当する値を流し続けた。

図 2.1.1-2-5 は、長手方向に 1 cm の劣化 ($I_c = 0$ A) が発生した場合について、コイル両端電圧が 0.1 V に達する時間及びそのときの温度を縦軸に、Cu 層の厚さを横軸に整理したものである。この結果から、0.1 V 発生時のホットスポットの温度は負荷率の増加に伴って、減少する傾向があることが示された。また、安定化層の厚さが大きくなると、ホットスポットの温度は減少した。0.1 V 発生時のホットスポットの温度は最高で 140 K 程度であった。

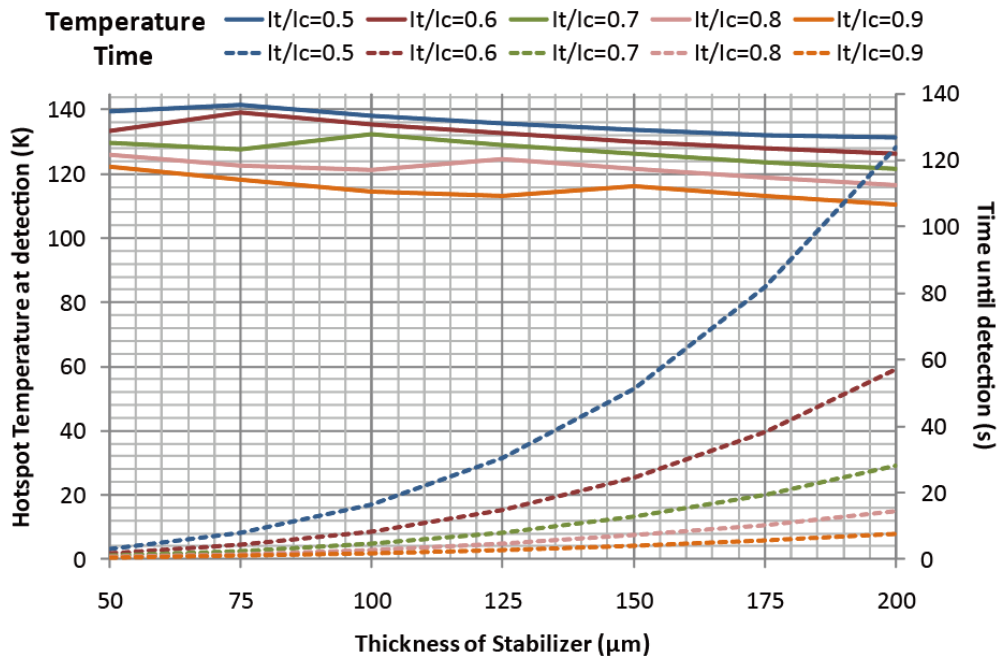


図 2.1.1-2-5 1 cm の劣化が発生した時の線材両端で 0.1 V 発生するのに要する時間と劣化部の温度

(3) 結果

テープを積層して導体化する場合、素線間の電磁結合が大きいと平行磁界に対する損失が大きくなるため、素線間の電磁結合の抑制が課題となる。そこで、交流損失を低減するため、集合導体の素線に素線間絶縁を施すこととした。Y 系超電導線材はテープ形状をしているため、ツイストによる転位ができない。このため、パンケーキ間の接続部で転位を行うこととした。その時のユニットコイルの各線材に流れる電流を計算した結果、電流の分布は均流していることが確認された。また、電

流が各素線に均流している場合において、素線絶縁を施した集合導体コイルの常電導発生後の温度変化について評価した。その結果、素線絶縁を施した集合導体内で、ある素線で常電導領域が発生しても、速やかに転流することが明らかとなった。

2.1.1-3 均流化に関する検討（中部電力、東北大学）

(1) 研究開発目的

超電導コイルに用いる高温超電導体（HTS）は、一般的にBi系、あるいはY系のテープ線材である。1本のHTSテープ線材の電流容量は約100 A以下であるので、それ以上の大電流に対して、多数のテープ線材を用いる必要がある。そこで、超電導コイルの大容量化を図る構成として、多数のHTSテープ線材を一組の導体とし、それを並列に積層して巻線した並列多層超電導コイルがある。例えば、並列4線材多層ダブルパンケーキコイルは、外径側に計8個の電極を形成する。これにより単線式のものと比較して線材の枚数に応じて容量が大きくなり、要素コイルあたりの使用線材単長が短くなる。しかし、このように多重テープ導体を単純に多層に巻線する構成のコイルでは、電流が最も内側のテープ線材に集中する偏流現象が発生する。単純に多重線材を多層に巻き合わせた構成の並列多層超電導コイルでは、各線材におけるリアクタンスが不均一となるため電流が内側の線材に多く流れてしまう。この現象を偏流現象と呼び、SMES用超電導コイルの通電能力低下などの特性劣化現象が多く見つかっている。偏流を防止する方法の一つとして、矩形断面を持った並列線材に対し適切な箇所転位を施すことにより各線材におけるリアクタンスを均一にする方法がある¹⁾²⁾。ここで、ダブルパンケーキコイルでは最内層において軸方向に一度の転位を施すが、要素コイル当たりでは転位は一度しかできない。よって並列2線材多重超電導コイルでは一度の転位で偏流が防止できるが、並列3線材以上では一度の転位ではリアクタンスが対称とならない線材が存在してしまう。この制約条件により、任意の層数及び線材本数に対する超電導ダブルパンケーキコイルを構成することができない。

本研究では、SMESを構成する要素コイルの導体構成パラメータを直接扱うことのできる電流分布の評価方法を確立することを目的とした。具体的には、コイルの最内層で軸方向転位を施す並列多層超電導ダブルパンケーキコイルを対象として、任意の層数、任意の線材本数において偏流のない様な電流分布を得る方法を新しく提案し、並列多層超電導ダブルパンケーキコイルの電流分布と線材の構成パラメータとの関係を明らかにした。

(2) 並列多層超電導コイルの構造選択

Y系超電導テープ線材の1本の電流容量は数100 A程度であるので、それ以上の大電流をめざすには多数のテープ線材を用いる必要がある。HTSテープ線材を多数用いる場合の最も単純な方法は、多数のテープを並列に重ねて1導体を構成す

b. 2パンケーキによる方法：

各テープ線材の鎖交する磁束を等しくするために、図 2.1.1-3-2 に示すように、テープ間に追加の絶縁物、又は補強材を追加する方法である。本方法では、2つのパンケーキの内側の導体渡り部による1箇所の転位で均流化が可能となる。4枚のテープ線材で構成する導体の場合には、図中の②と③の間、及び③と④の間に追加厚を挿入する。

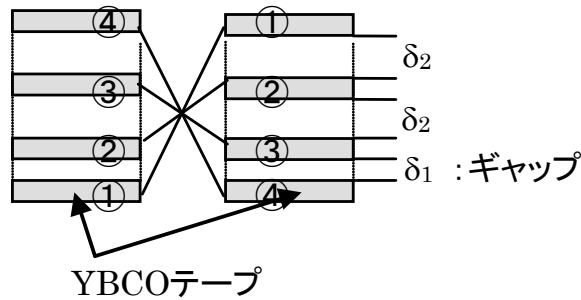


図2.1.1-3-2 ダブルパンケーキ内の1回の転位のテープ導体構成図

(4) 超電導導体と試験コイル

本パンケーキに用いる Y 系超電導テープ線材と導体の諸元を表 2.1.1-3-1 に、また、その構成図を図 2.1.1-3-3 に示す。追加厚が必要な場合には、図に示すように、絶縁物を挿入する。

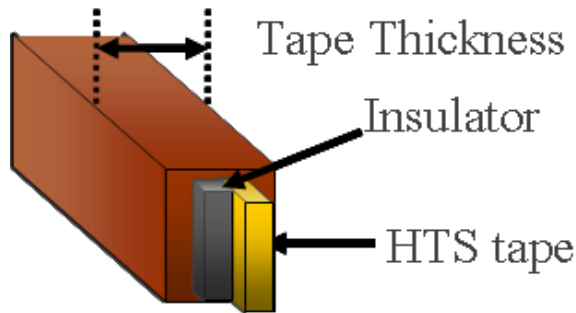
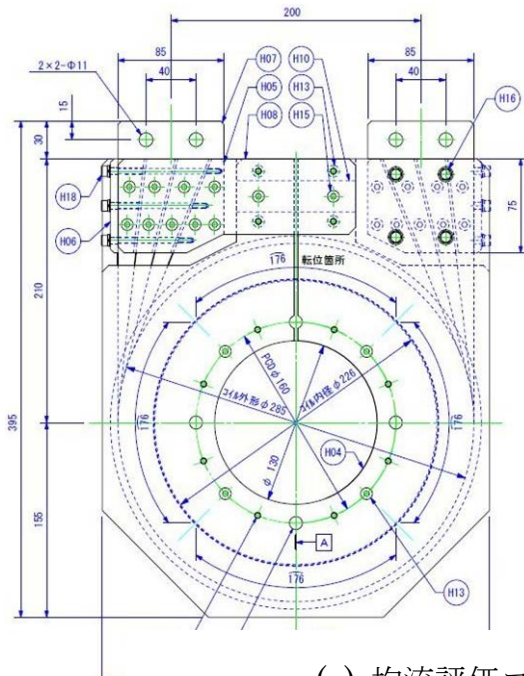


図2.1.1-3-3 テープ線材の構成図

表 2.1.1-3-1 HTS テープ線と導体の諸元

HTS テープ構成	
(1) IBAD/CVD-YBCO 寸法	10 mm w x 0.1 mm t
(2) 銅めっき厚さ	0.05 mm
(3) カプトンテープ	0.025 mm x 2 層ラップ巻
(4) テープの寸法	10.2 mm w x 0.3 mm t
導体構成	4 枚並列
追加厚のないときの導体寸法	10.2 mm w x 1.2 mm t

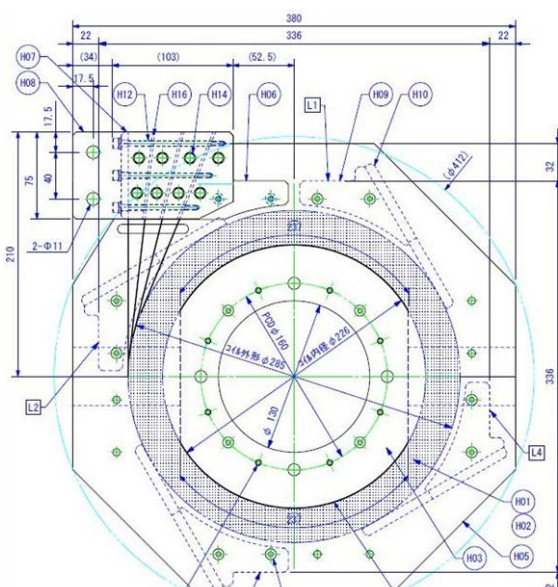
今回用いた試験コイルの諸元と構成図を図 2.1.1-3-4 に示す。



(a) 均流評価コイル (2パンケーキ)

均流評価コイル(単独タイプ)諸元

線材	CuメッキCVD-YBCO線材
断面形状	10.1 mm×0.21 mm(絶縁前) 10.2 mm×0.31 mm(絶縁後)
導体	絶縁素線4枚束導体
断面形状	No. 4, No. 3 素線に0.075mm厚 10.2 mm×1.39 mm
コイル形状	ダブルパンケーキ型
コイル内径	226 mm
コイル外径	283 mm
コイル高さ	24 mm
巻数	20×2 ターン



(b) 均流評価コイル (4パンケーキ)

均流評価コイル(2積層タイプ)諸元

線材	CuメッキCVD-YBCO線材
断面形状	10.1 mm×0.21 mm(絶縁前) 10.2 mm×0.31 mm(絶縁後)
導体	絶縁素線4枚束導体
断面形状	10.2 mm×1.24 mm
コイル形状	ダブルパンケーキ型2積層
コイル内径	226 mm
コイル外径	280 mm
コイル高さ	24 mm
巻数	20×2 ターン

図 2.1.1-3-4 試験コイル

(5) 試験装置と測定方法

装置は図 2.1.1-3-5 に示すように、試験コイルを液体窒素中に浸漬冷却し、可変周波数電源で電流をコイルへ供給し、各テープ線に鎖交する電流をログスキーコイルで測定する。ログスキーコイルは必ずしも均一に巻線されていないことや、設置場所の関係でテープ線を中心とした円形に取り囲むことができないために、全体を通電したのちに、各テープ線に単独に通電してログスキーコイルの出力の校正を行った。ログスキーコイルの校正のために、電極は脱着可能な接続構成として、各テープ線に単独通電ができる構成である。したがって、ハンダ接続のような低電気抵抗とならないため、電極表面にインジウム薄膜を挟んで接触抵抗の低減を行い、直流接触抵抗値として $20 \mu\Omega$ 以下で実験を行った。解析によると、この程度以下の接触抵抗では抵抗による位相のずれを無視できる。

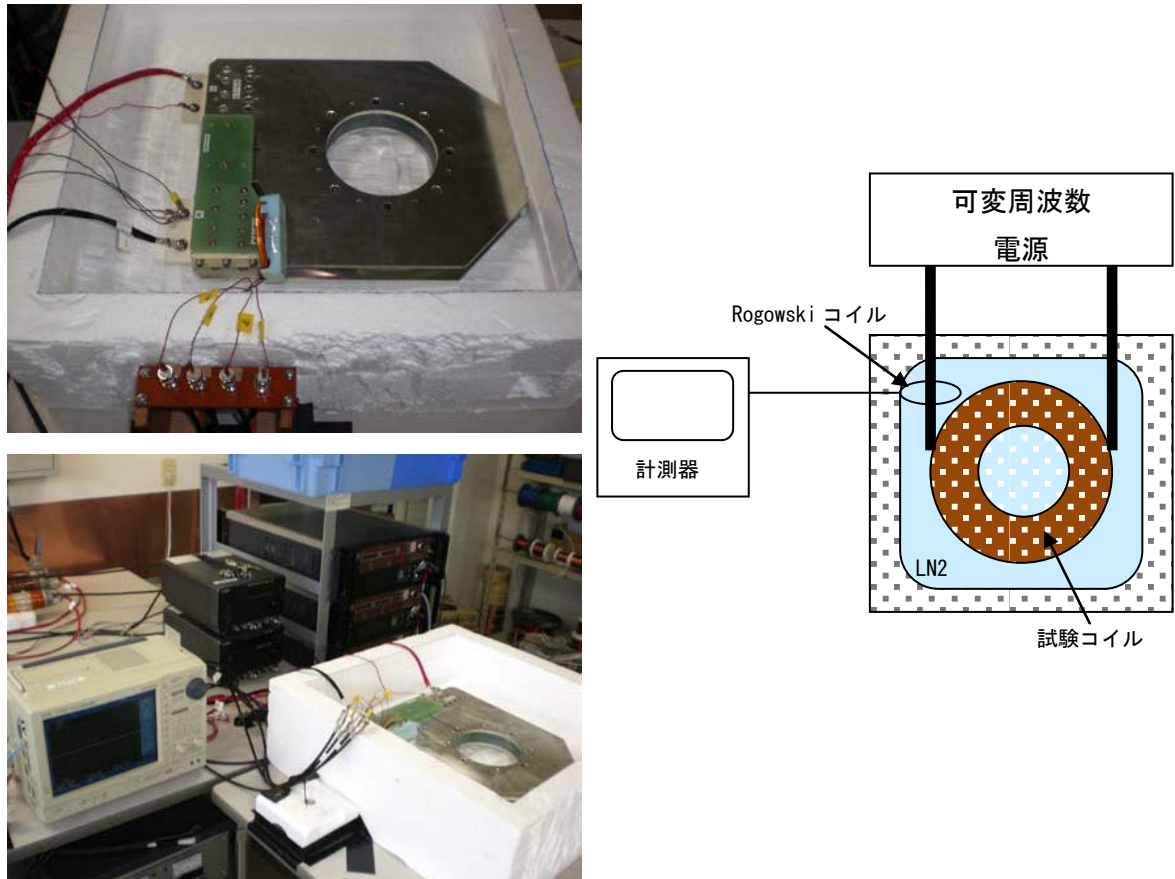


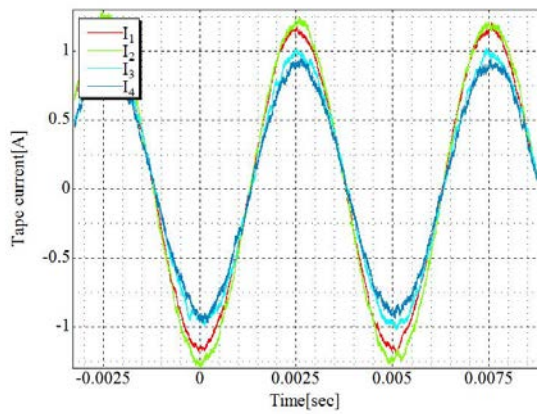
図 2.1.1-3-5 実験装置の写真と配置図

(6) 試験結果と考察

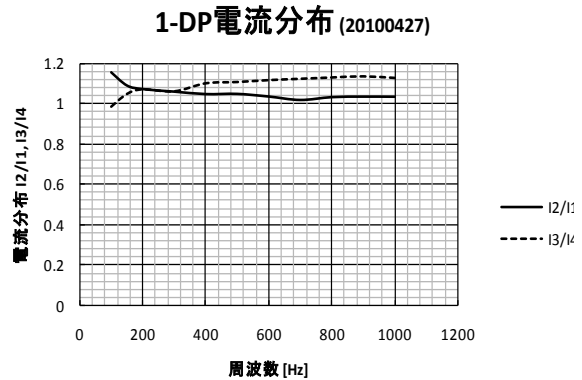
a. 2パンケーキ試験コイル

図 2.1.1-3-6(a)に 2パンケーキ試験コイルのロゴスキーコイル出力を校正して各テープ線に流れる電流波形結果を、並びに図(b)に同試験コイルの I_2/I_1 及び I_3/I_4 の電流分布の周波数依存性を示す。

図の 2パンケーキコイルの波形と周波数依存性から、各テープ線の電流分布における I_2/I_1 及び I_3/I_4 の比の不均一度は約 5%である。図 2.1.1-3-7には、20ターンの試験コイルのテープ追加厚さと均一度のターン数依存性の解析結果を示す。図から、追加テープ厚さが $75\ \mu\text{m}$ では、約 5%の分布の不均一度があることが分かり、ほぼ試験結果と一致する。



(a) 2パンケーキコイルの各テープ電流波形 (200 Hz)



(b) 2パンケーキコイルの I_2/I_1 と I_3/I_4 の周波数依存性

図 2.1.1-3-6. 1-DP 試験コイルの各テープの電流波形

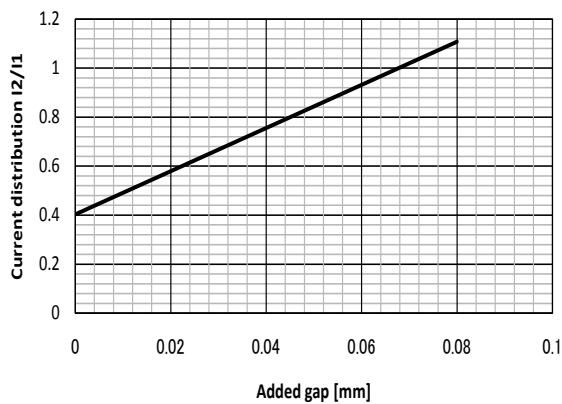


図 2.1.1-3-7 2パンケーキ試験コイルのテープ厚さと均一度の解析結果

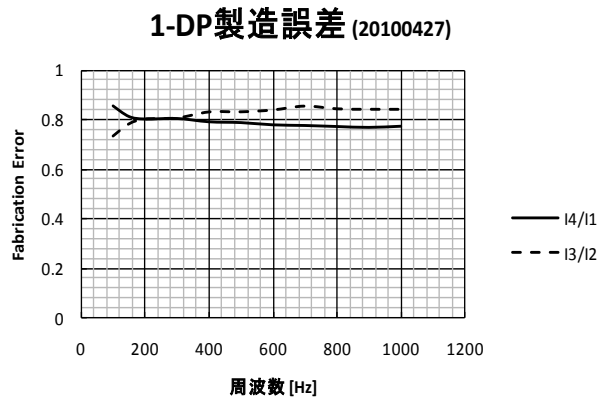


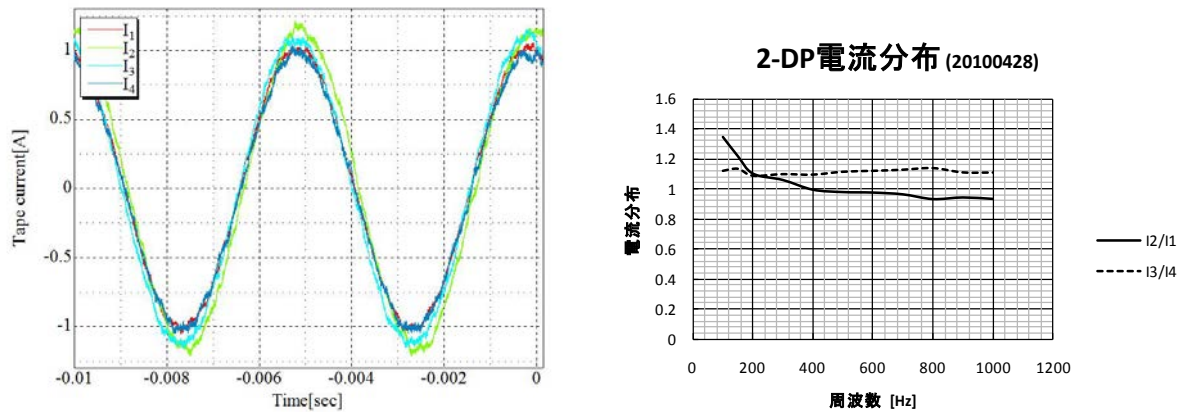
図 2.1.1-3-8 2パンケーキコイルの I_4/I_1 と I_3/I_2 の製造誤差

一方、テープ線の本来の特性から、全く同様に製作されるならば、 $I_1 = I_4$ と $I_2 = I_3$ との同じ特性を示す筈であるが、図 2.1.1-3-6 では少し特性が異なるように見えるので、図 2.1.1-3-8 に I_4/I_1 と I_3/I_2 の特性を示す。図 2.1.1-3-8 の不均一度は製造誤差によるものと考えられ、その大きさは約 20 %程度である。この製造誤差の原因を確かめるために、片側パンケーキの最内層 1 層のテープ間隔がそれぞれ、(1-2)間=0.141 mm、(2-3)間=0.262 mm、(3-4)間=0.148 mm の誤差厚が生じたとして解析すると、均一度は $I_2/I_1=1.07$ 、 $I_3/I_1=0.86$ 、 $I_4/I_1=0.81$ となり、約 20 %の不均一度は製作時の僅かな誤差によるものと考えられる。

b. 4 パンケーキ試験コイル

図 2.1.1-3-9 には、4 パンケーキ試験コイルの電流波形と、 I_2/I_1 と I_3/I_4 の電流分布の周波数依存性を示す。電流分布 I_2/I_1 は周波数に多少依存するが、 I_3/I_4 はほぼ一定で 9 %程度の不均一度である。図 2.1.1-3-10 には、4 パンケーキ試験コイルの均一度の層数依存性の解析結果を示す。層数が 20 ターンの試験コイルでは約 9 %の不均一度であるので、 I_3/I_4 はほぼ予定値である。

また、図 2.1.1-3-11 には、 I_4/I_1 と I_3/I_2 の特性を示す。図から、 I_4/I_1 は幾何学的に同じ特性であり、同じように製造されているようで、ほぼ 1 に近い値である。一方、 I_3/I_2 は周波数に依存して変化しているが、最大でも 15 %程度の製造誤差に伴う不均一度が認められる。



(a) 4 パンケーキコイルの各テープ電流波形 (200Hz)

(b) 4 パンケーキコイルの I_2/I_1 と I_3/I_4 の周波数依存性

図 2.1.1-3-9 4 パンケーキ試験コイルの各テープの電流波形

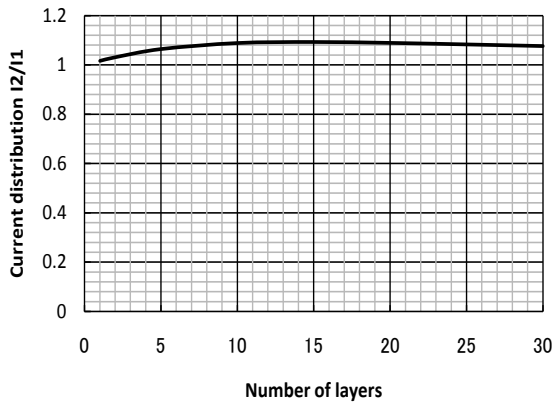


図 2.1.1-3-10 4 パンケーキ試験コイルの層数と均一度の解析結果

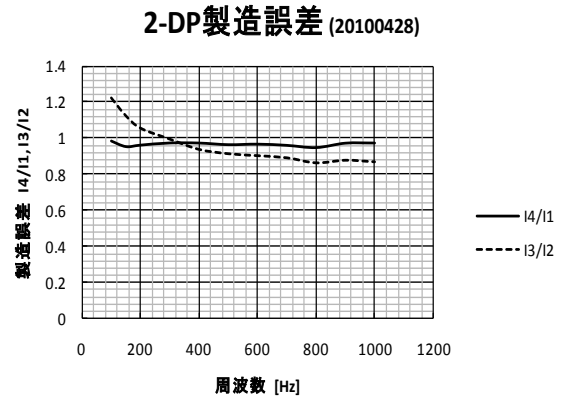


図 2.1.1-3-11 I4/I1 と I3/I2 の製造誤差

(7) 結果

今回の試験では、各テープ線の電流分布を正確に計測するためにロゴスキーコイルを電極に取り付け、その校正のために電極間を単なる締め付けで行なった。したがって、ハンダ接続と異なり、コイルのターン数が少なく、インダクタンスも小さい本試験コイルでは、接触抵抗の影響を完全に無くすることはできなかった。しかし、解析では抵抗分による位相のずれを無視できる程度になることが予想できる値である数 $10 \mu\Omega$ 以下にまで抑えて実験を行った。試験結果は、予想した均一度をほぼ満足して得ることができたので、理論の基本的な実証ができた。

以上のことから、多層導体でコイルを構成して導体内の電流分布を均一化する方法には、テープ本数に等しいパンケーキを用いてパンケーキ毎に転位して均一電流分布を得る方法や、今回の実験で証明できたように、2 パンケーキの 1 箇所での転位とテープ間厚さを調整して電流分布を均一化する方法があることが分かった。

引用論文リスト

- (1) 後村直紀, 千葉悠太, 谷貝剛, 津田理, 濱島高太郎, 式町浩二, 平野直樹, 長屋重夫: 「SMES 用ダブルパンケーキコイルに用いる並列多層 HTS テープ導体内の電流分布解析」, 第 82 回 2010 年度春季低温工学・超電導学会講演概要集, p22, 2010
- (2) 千葉悠太, 後村直紀, 津田理, 濱島高太郎, 式町浩二, 平野直樹, 長屋重夫: 「ダブルパンケーキコイル用並列多層 HTS テープ導体内の電流分布の一様化」, ASC-10-034, pp89-94, 2010

2.1.1-4 低損失化に関する検討（中部電力、鹿児島大学）

(1) 研究開発目的

大容量 SMES コイルの開発には、大電流導体の開発が不可欠である。Y 系超電導線材を用いた大電流容量集合導体コイルの損失を低減する構造について最適化を検討するため、トロイダル形状に依存した磁場中での交流損失特性について評価した。

(2) トロイダル型 SMES コイルの交流損失評価

磁化損失とは、Y系超電導線材に外部磁界を印加した際に超電導部分で発生する損失である。要素コイル単体とトロイダル配置したコイルにおける巻線に印加される磁界の分布の比較を図2.1.1-4-1 に示す。ソレノイドコイルに対して、コイルをトロイダル配置にし、全てのコイルに通電するとコイルの1 ターン分の磁界分布は導体長手方向に変化し不均一になる。したがって、磁化損失は不均一磁界中で発生することになる。不均一な磁界中での磁化損失測定を行うために、一様磁界空間内に、Y系導体を捻った状態で設置した。作製した導体は、Y系超電導線材1 枚及びY系超電導線材を4 枚積層させたものの2 種類である。積層枚数によって磁化損失特性が変化するので、Y系超電導線材1 枚の導体とY系超電導線材を4 枚積層した導体を用意した。Y系超電導線材を4 枚積層したものは銀面とハステロイ™面が向き合うように重ね、線材間に絶縁シートを挿入して絶縁処理を施している。また、導体幅広面に垂直に印加される磁界成分を導体長手方向に対して変化させるため導体の両端を捻り、捻り角度を0度から360度まで変化させ、不均一の特性長が磁化損失に及ぼす影響を調べた。

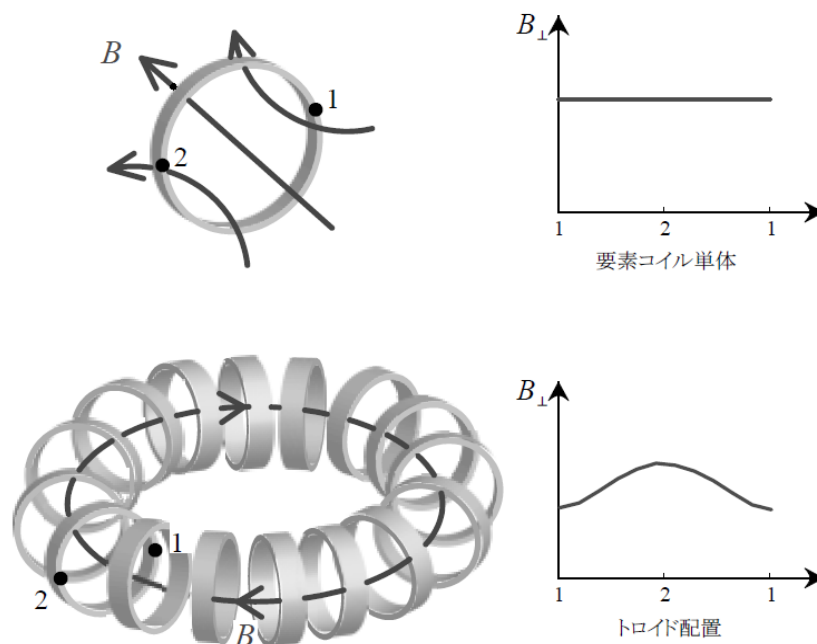


図 2.1.1-4-1 要素コイル単体とトロイダル配置にしたコイルの磁界分布

1 枚導体の捻り角度が0度の際の交流損失測定結果を図2.1.1-4-2 に、捻り角度を0度から360度まで変化させたときの交流損失測定結果を図2.1.1-4-3 に示す。4 枚積層導体の捻り角度が0度の際の交流損失測定結果を図2.1.1-4-4に、捻り角度を0度から360度まで変化させたときの交流損失測定結果を図2.1.1-4-5 に示す。縦軸は一周期あたり、単位体積あたりの交流損失をとっている。また、図中の(a)、(b)はそれぞれ周波数特性、印加磁界特性である。図2.1.1-4-3、図2.1.1-4-5は捻り角度を変化させた際に、1 枚導体、4 枚積層導体の交流損失特性に変化があるかを確かめるために (a) は10 mT に、(b) は0.04 Hz と1 Hz に注目した。測定結果から以下のことが分かる。(1) 捻り角度を変化させた1 枚導体、4 枚積層導体どちらの場合でも測定値に周波数依存性はない。このことから、測定した損失は導体幅広面に垂直な磁界成分による磁化損失であり、周波数依存性のある渦電流損失は磁化損失に対して非常に小さい。(2) 測定値は、1 枚導体において印加磁界の約2.65 乗に、4 枚積層導体において印加磁界の約2.7 乗に比例しており印加磁界に対する損失の傾きが一定である。このことから、印加磁界はそれぞれの導体の中心到達磁界より十分小さい。(3) 捻り角度及び線材の積層枚数で周波数特性や印加磁界特性等の交流損失特性に大きな変化は見られない。

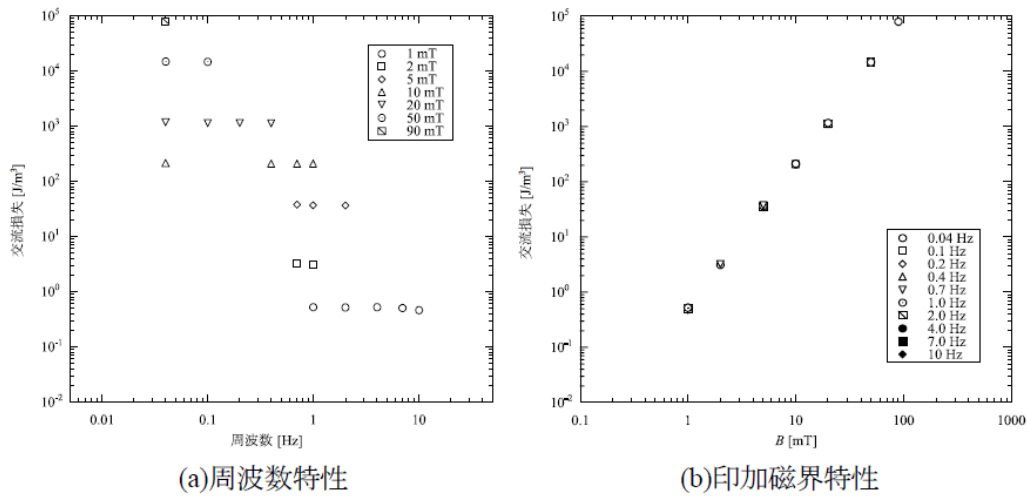
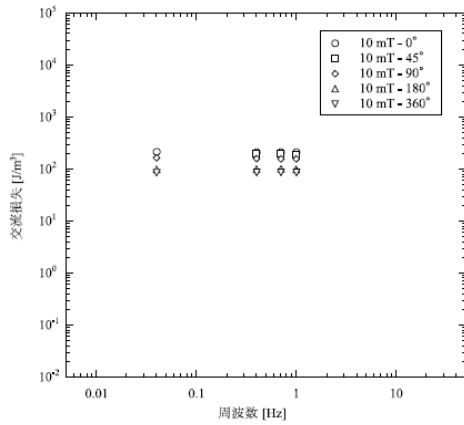
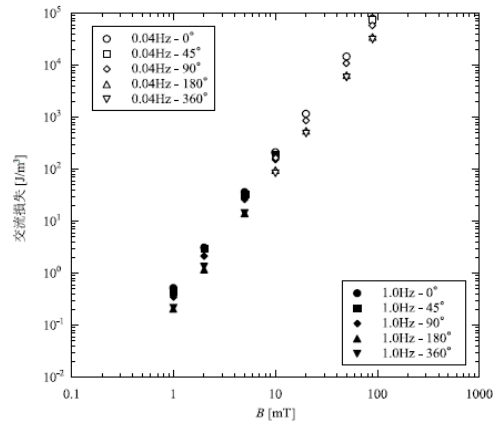


図 2.1.1-4-2 1 枚導体を 0 度捻った場合の磁化損失測定結果

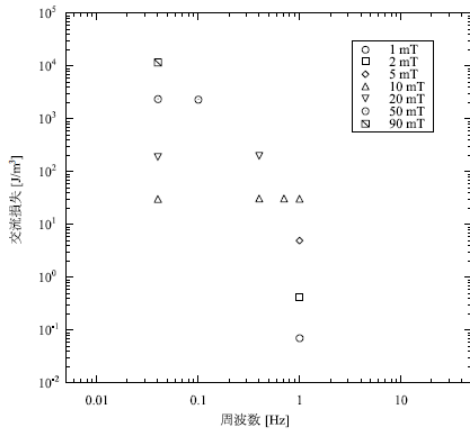


(a)周波数特性

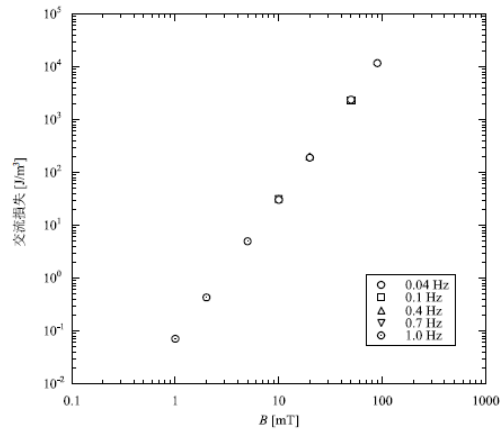


(b)印加磁界特性

図 2.1.1-4-3 1 枚導体を 0~360 度捻った場合の磁化損失測定結果

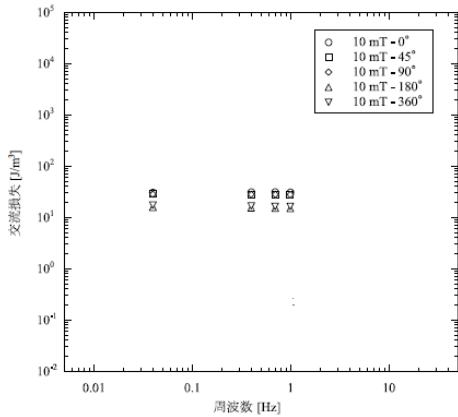


(a)周波数特性

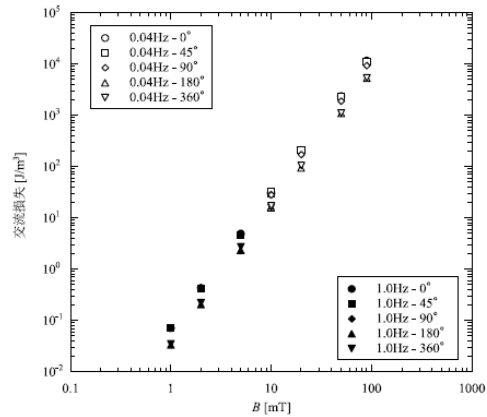


(b)印加磁界特性

図 2.1.1-4-4 4 枚導体を 0 度捻った場合の磁化損失測定結果



(a)周波数特性



(b)印加磁界特性

図 2.1.1-4-5 4 枚導体を 0~360 度捻った場合の磁化損失測定結果

サンプル導体を捻った状態で一様な垂直磁界を印加すると、導体には導体幅広面に垂直な磁界成分と、導体幅広面に平行な磁界成分が印加される。導体幅広面に平行な磁界成分による磁化損失は、導体幅広面に垂直な磁界成分によるものに比べて非常に小さいことが明らかにされている。このため、磁化損失の検討は印加された磁界のうち導体幅広面に垂直な磁界成分によって発生する損失のみを検証する。

一様磁界空間内にサンプル導体を捻った状態で設置すると、図2.1.1-4-1 に示したように導体幅広面に垂直な磁界成分が長手方向に対して変化する。これに伴い、磁化損失も長手方向に対して変化する。ここで、磁化損失に周波数依存性がないことは明らかであるため、印加磁界依存性のみを考える。1枚導体の捻り角度0度の場合、磁化損失は印加磁界の2.64 乗に、4枚積層導体の捻り角度0度の場合には印加磁界の2.67 乗に比例している。したがって、Y系超電導導体の各場所で発生する磁化損失が、1枚導体は印加磁界の2.64 乗に、4枚積層導体は印加磁界の2.67 乗に比例するとして、各場所で発生する損失を導体全長にわたって積分したものを磁化損失の計算値とする。

まず、1枚導体の磁化損失の捻り角度依存性について検討する。1枚導体の捻り角度依存性を図2.1.1-4-6に示す。また、測定値、計算値を捻り角度0度の値で規格化したものを示している。図2.1.1-4-6から測定値は計算値とよく一致していることがわかる。このことから、1枚導体では不均一磁界が交流損失に及ぼす影響は殆どないと考えられる。

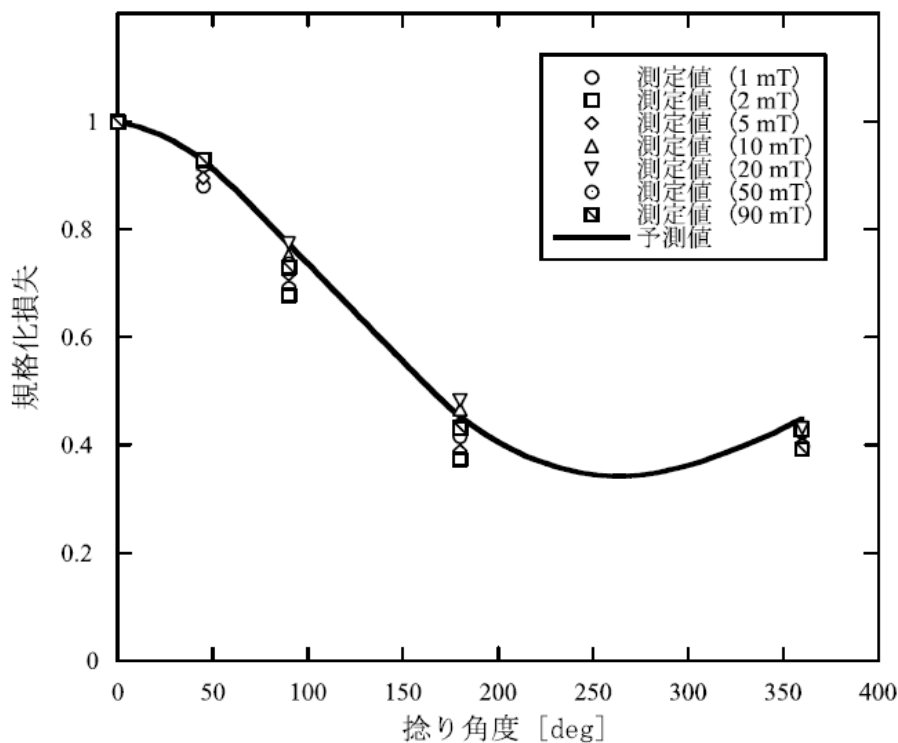
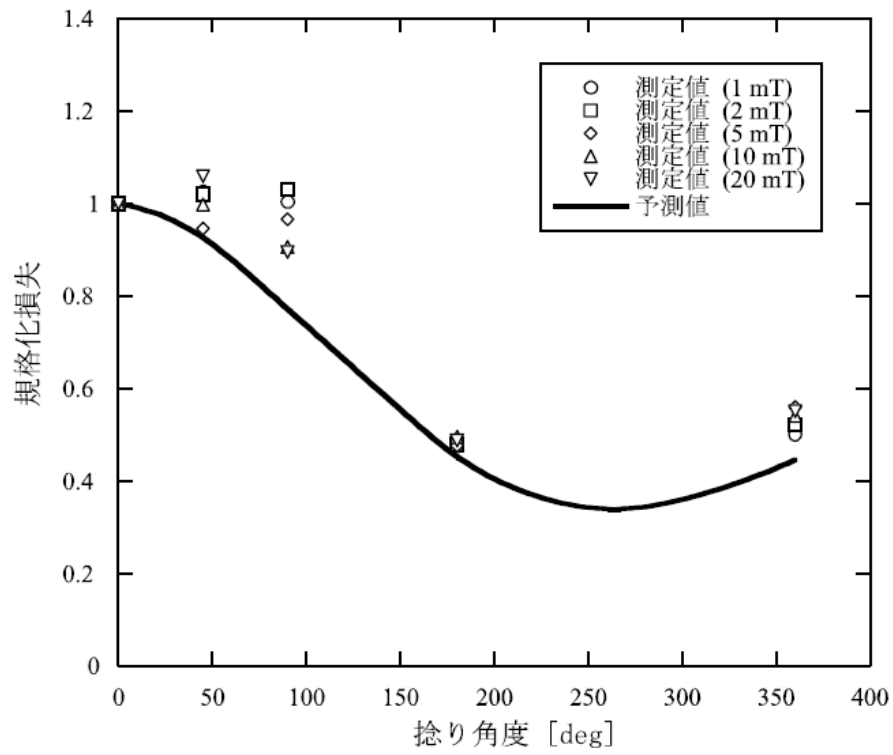
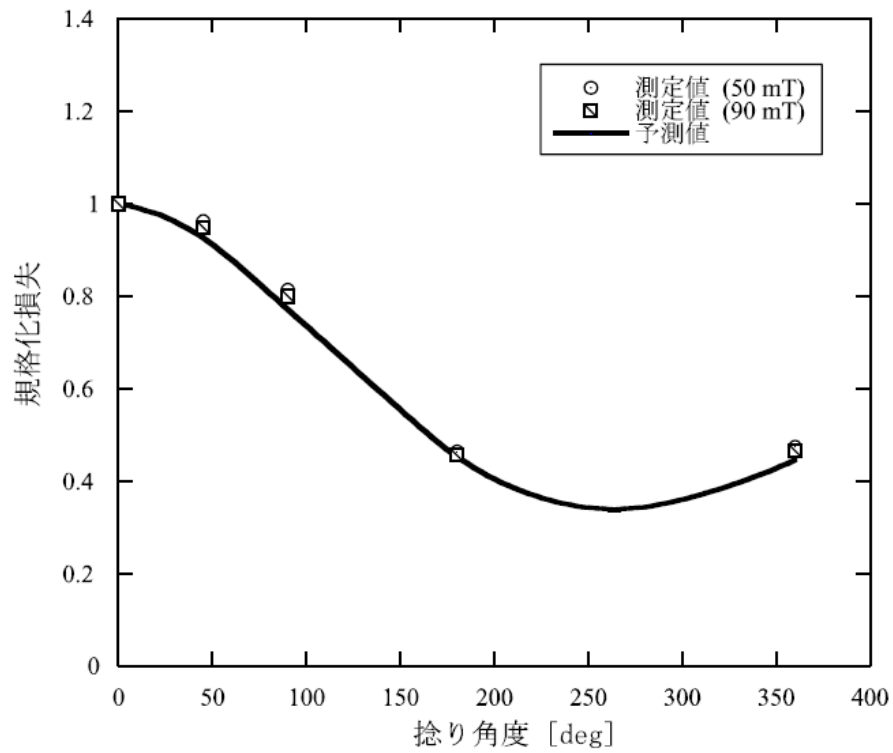


図 2.1.1-4-6 1枚導体の磁化損失の捻り角度依存性



(a) 印加磁界 1~20 mT



(b) 印加磁界 50,90 mT

図 2.1.1-4-7 4 枚積層導体の撻り角度依存性

次に、4枚積層導体の磁化損失の捻り角度依存性について検討する。4枚積層導体の捻り角度依存性について、印加磁界が1~20 mTのものを図2.1.1-4-7(a)に、印加磁界が50、90 mTのものを図2.1.1-4-7(b)に示す。図2.1.1-4-7には測定値、計算値を捻り角度0度の値で規格化したものを示している。図2.1.1-4-7(a)より印加磁界が1 mTから20 mTのときの捻り角度が45度と90度では、測定値が計算値よりも大きくなっている。これは不均一磁界が交流損失に及ぼす影響と、4枚積層した線材のうちいずれかの線材が他の線材と比べて臨界電流分布が極端に不均一であること、線材間の相互作用等が考えられる。また、図2.1.1-4-7(b)より印加磁界が50 mTと90 mTの場合は測定値と計算値がよく一致しているため、測定値は導体幅広面に垂直な磁界成分による磁化損失であることがわかる。以上のことから、トロイダル配置のコイルで導体長手方向に生じる不均一磁界中での磁化損失は、印加磁界が小さい場合は不均一磁界が交流損失に及ぼす影響等により大きくなるが、印加磁界が大きい実用条件（垂直磁界が0.6 T近傍）では導体幅広面に垂直な磁界成分を考慮すれば求まることが分かった。

(3) 結果

SMES用トロイダルコイルでは、コイル1ターン分の磁界分布が、ソレノイドコイル1つだけに通電した場合とは異なり、不均一になる。そこで、不均一な磁界分布が交流損失に及ぼす影響を調べるため、不均一磁界中でのY系短尺超電導導体の磁化損失を測定し、その検討を行った。その結果、不均一磁界中での磁化損失特性においては、1枚導体では、捻り角度を変化させた場合でも、発生する損失は導体幅広面に垂直な磁界による磁化損失であることが分かった。さらに4枚積層超電導導体では、印加磁界が小さい場合、導体幅広面に垂直な磁界成分による磁化損失よりも大きくなったが、印加磁界が大きい実用条件(0.6 T近傍)では導体幅広面に垂直な磁界成分を考慮すれば求まることが分かった。

2.1.1-5 高耐フープ応力特性評価（中部電力、東北大学）

(1) 研究開発目的

これまでCVD法により作製されたY系超電導線材（以降CVD-YBCO線材と称す）の機械特性評価¹⁾²⁾³⁾⁴⁾とともに単層ソレノイド巻コイルのフープ応力基礎検証評価⁵⁾を実施し、高強度特性を検証してきた。今回、長尺のCVD-YBCO線材を使用した小型多層巻パンケーキコイルを製作し、外部磁場中で600 MPa級のフープ応力試験を実施し、CVD-YBCOコイルの電磁応力耐性を評価した。

(2) CVD-YBCO コイルのフープ応力試験評価

a. コイル製作

SMES開発で目標としているフープ応力 600 MPaを実証するため、長尺CVD-YBCO線材を用いてフープ応力試験用小型コイルを製作した。使用した線材は幅 10 mm、厚さ 100 μm のハステロイTM基板にIBAD法による中間層、CVD法によるYBCO層を成膜後、5mm幅に切断し、安定化銅を線材全周囲に厚さ 50 μm めっきした。Cuめっき後の線材寸法は、幅約 5.5 mm、厚さ約 250 μm である。この線材を用いて製作したシングルパンケーキ(SP)コイル 2 個を積層した 2-SPコイルの諸元を表 2.1.1-5-1 に、その設計図、外観写真を図 2.1.1-5-1、図 2.1.1-5-2 に示す。コイルはエポキシ樹脂により真空含浸した。

表 2.1.1-5-1 フープ応力試験用 2-SP コイル諸元

線材種類	Cuめっき IBAD/ CVD-YBCO テープ線材
線材長	50 m + 50 m
絶縁線材平均幅	5.7 mm
絶縁線材平均厚さ	350 μm
コイル形状	シングルパンケーキ型コイル 2 積層
内径	ϕ 200 mm
外径	ϕ 249 mm
高さ	12 mm
巻数	139

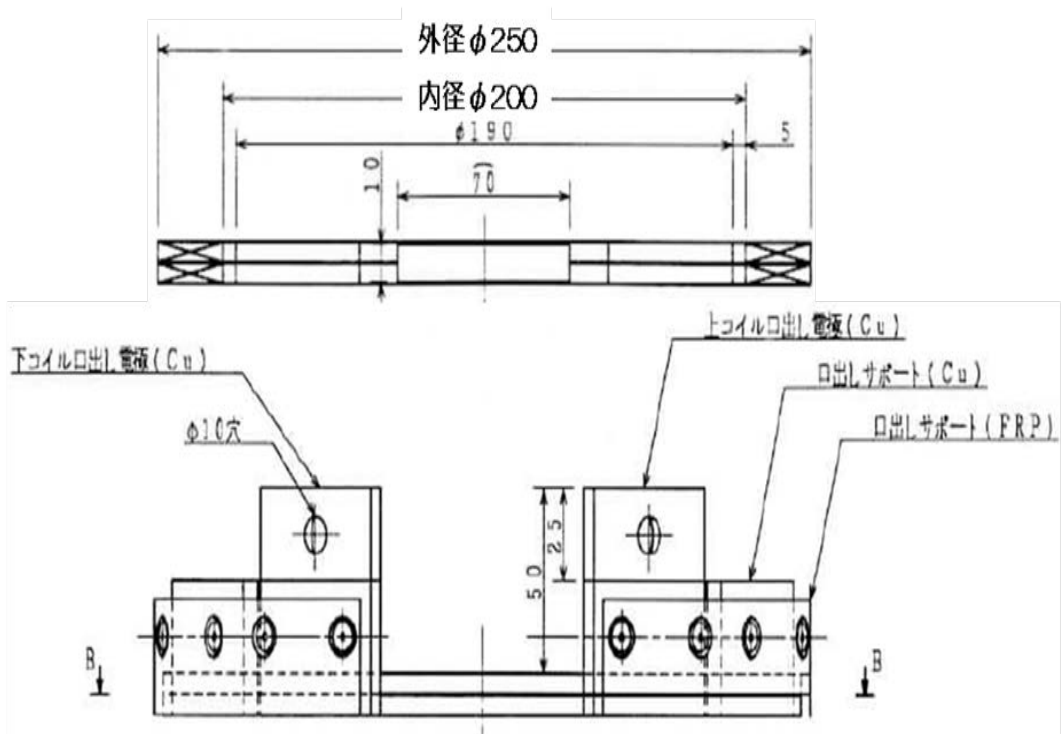


図 2.1.1-5-1 フープ応力試験用 2-SP コイル図

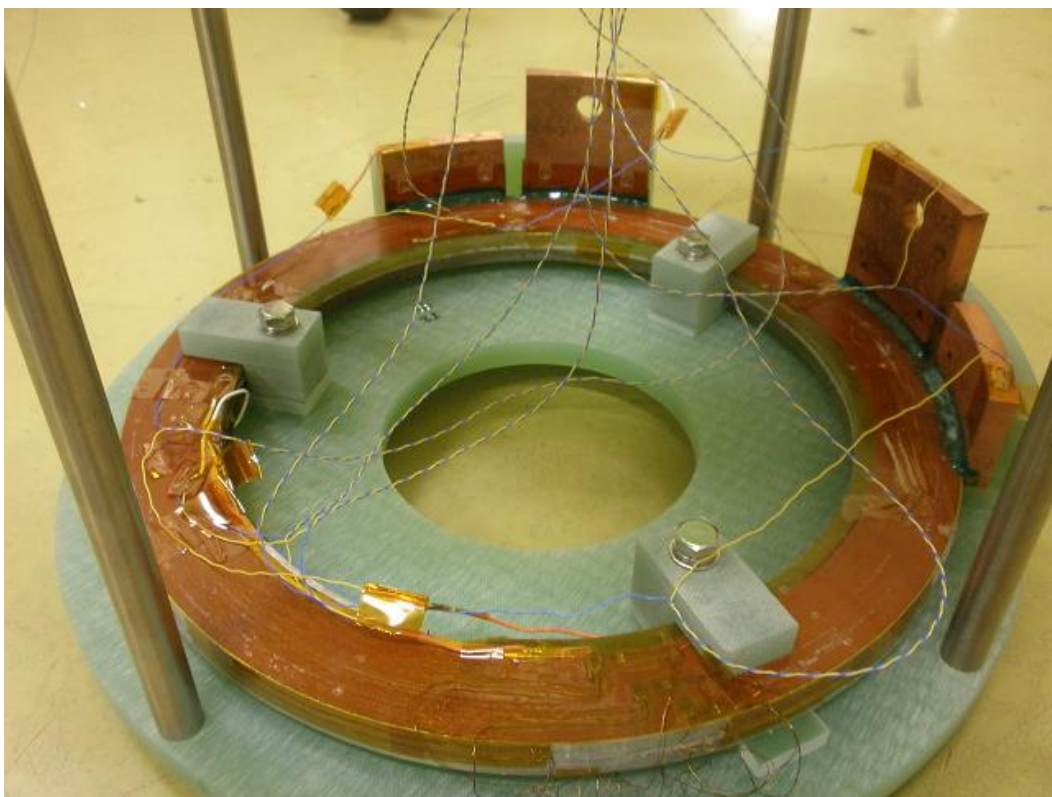


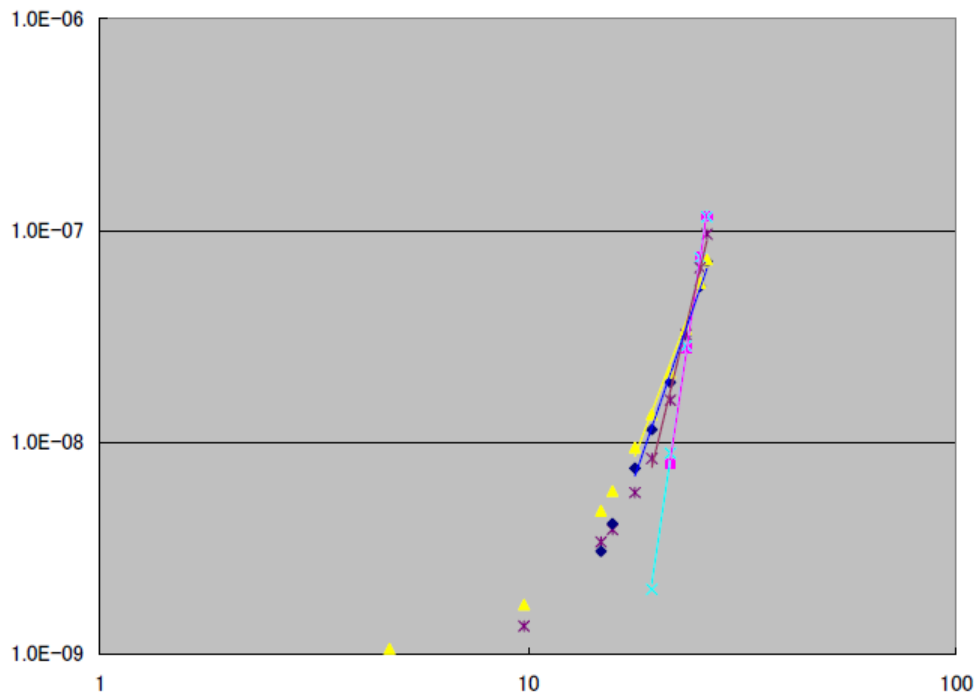
図 2.1.1-5-2 フープ応力試験用 2-SP コイル外観

b. 通電確認試験

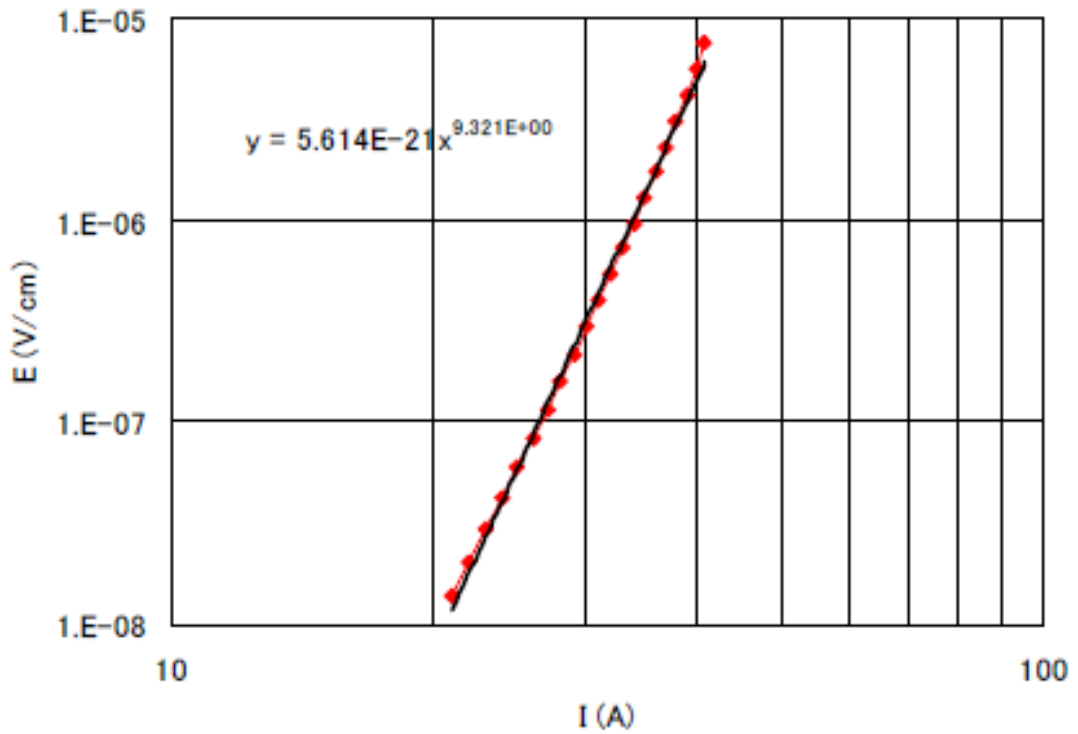
液体ヘリウム中でのフープ応力試験の実施に先立ち液体窒素浸漬冷却によりコイルの通電試験を実施し、2-SPコイルの特性を確認した。上・下段コイル（電極込・除）、2-SPコイルの各部 I - V 測定結果を図 2.1.1-5-3(a)に示す。コイル 2 個を積層する前に通電した結果、電極部を除いた上段コイルの I_c 値及び n 値はそれぞれ 31 A、14 であり、下段コイルではそれぞれ 42A、6 であった。また、上下段 2 個積層した 2-SPコイルの I_c 値は 35 A、 n 値は 8 程度であった。また、Cuめっき前の線材 I - V 特性から 2-SPコイル I - V 特性を推定した計算結果を図 2.1.1-5-3 (b)に示す。使用したCVD-YBCO線材の I_c - B - T - θ 特性は網羅できていないが、計算結果は表 2.1.1-5-1 の結果からコイル自己磁場を考慮して I_c 値低下を概略見込んでいる（磁場分布に応じ線材 I_c 値の 0.46-0.71 倍）。コイルの I - V 実測結果は推定結果とほぼ一致しており、CVD-YBCO線材は問題なく巻線されたと考えられる。

c. フープ応力試験

液体ヘリウム浸漬冷却により 2-SPコイルを 4.2 Kまで冷却し、外部磁場を印加後に通電することで、多層巻CVD-YBCOコイルとしてのフープ応力耐性を検証した。図 2.1.1-5-4 に 2-SPコイルの電圧タップ取り付け位置を示す。図 2.1.1-5-5 に外部磁場 11 Tにおいて 2-SPコイルを 3 回繰り返し通電した時の上段コイル両端、下段コイル両端及び上下段コイル間接続電極の I - V 測定結果を示す。上段コイルは下段コイルと比較して I_c 値は高いものの n 値が低いため、120 A付近から上段コイルにおいて電圧が発生し始めている。1 回目に 176 A付近まで通電した際、コイル間接続電極の電圧が跳ね上がった。その後、再通電、再々通電により電流値を増加し、通電電流の増加とともに発生電圧が上昇し、最終的に 214 A付近で過電圧により通電不能となった。試験後の検査により、電圧の跳ね上がりはコイル間接続電極の不具合が原因であることが判明した。本試験において 11 T中では 3 回繰り返し通電を実施したが、電極部を除くコイル電圧は常に同じ軌跡を辿っており、今回のフープ応力負荷によるコイル巻線部の劣化はなかったと考えられる。



(a)



(b)

図 2.1.1-5-3 2-SP コイルの I-V 特性 (a) 測定値 (b) 計算値

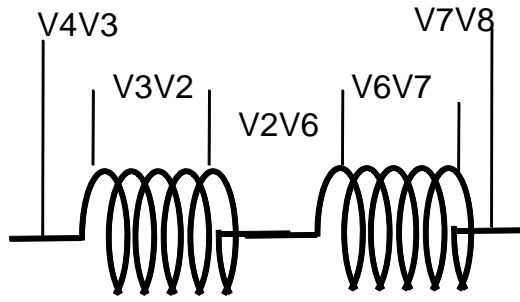


図 2.1.1-5-4 2-SP コイルの電圧タップ位置

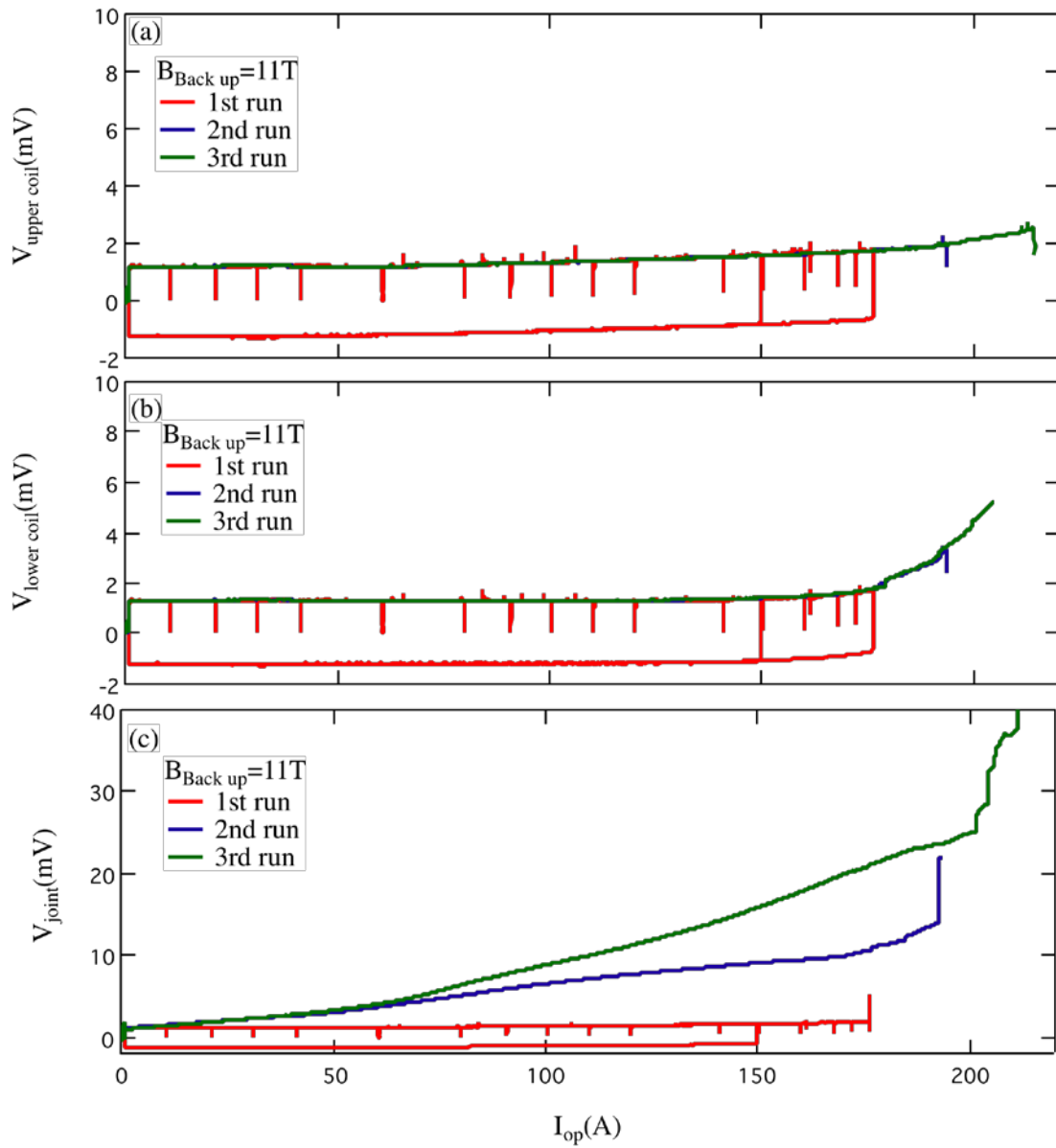


図 2.1.1-5-5 2-SP コイルの I-V 特性

(a) 上段コイル (b) 下段コイル (c) 上下段コイル接続部

図 2.1.1-5-6 に 214 A 通電時に 2-SP コイルに誘起される電磁応力分布を示す。ここで σ_{bjr} , σ_{θ} , σ_r は、それぞれ線材を独立とした時の周方向応力、一体変形する場合の周方向応力、径方向応力である。特にコイル周方向の応力であるフープ応力は、線材が完全に独立であるとして磁場 (B) \times 電流密度 (J) \times 半径 (R) で計算した値 σ_{bjr} とコイルが一体変形した場合の値 σ_{θ} を示している。ただし、応力はハステロイ™ 基板にかかる応力としている。なお、 σ_{θ} は無限長のコイルを仮定して Wilson の式から計算した結果である。図から分かるように、コイルが完全に一体変形を起こす場合には、コイル内部応力は BJR から計算される値とは異なる。この違いは、コイルの径方向に働く応力が影響するためであり、コイルが発生する自己磁場と外部磁場の割合によって振る舞いが異なる。今回の場合では、 σ_{bjr} と σ_{θ} の半径方向の分布が大きく異なっていることが分かる。結果として、最大フープ応力は σ_{bjr} より σ_{θ} の方が大きくなる。これらの結果から、214 A の通電によって、一体変形を仮定すると 636 MPa、 BJR の場合には 560 MPa の最大フープ応力が 2-SP コイルに負荷されたと考えられる。

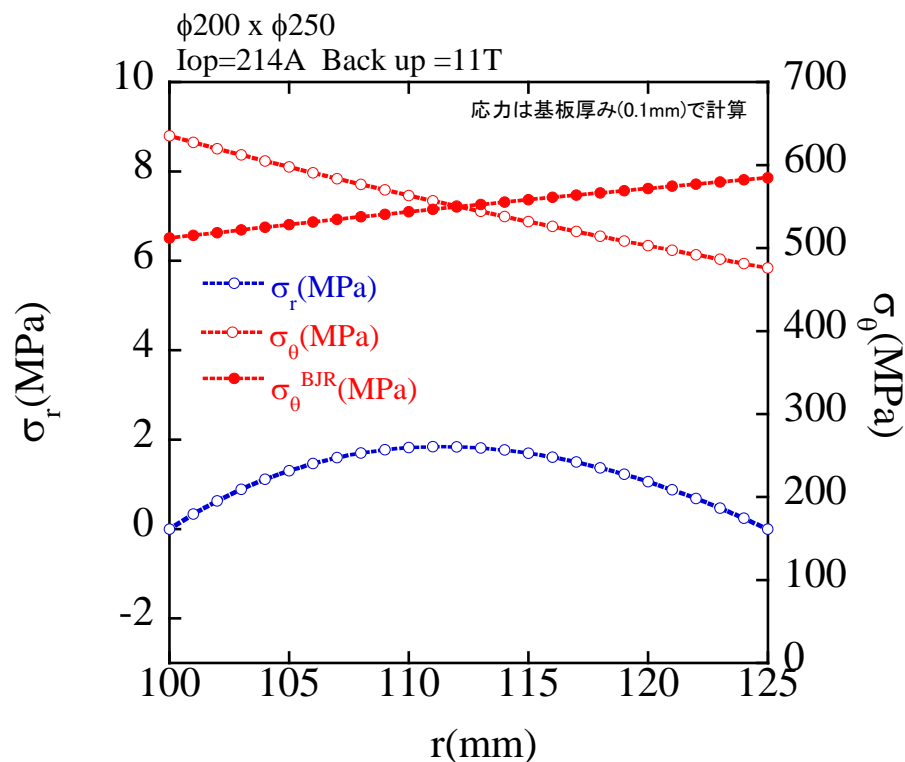


図 2.1.1-5-6 外部磁場 11 T 中で 214 A 通電時の 2-SP コイルの応力分布

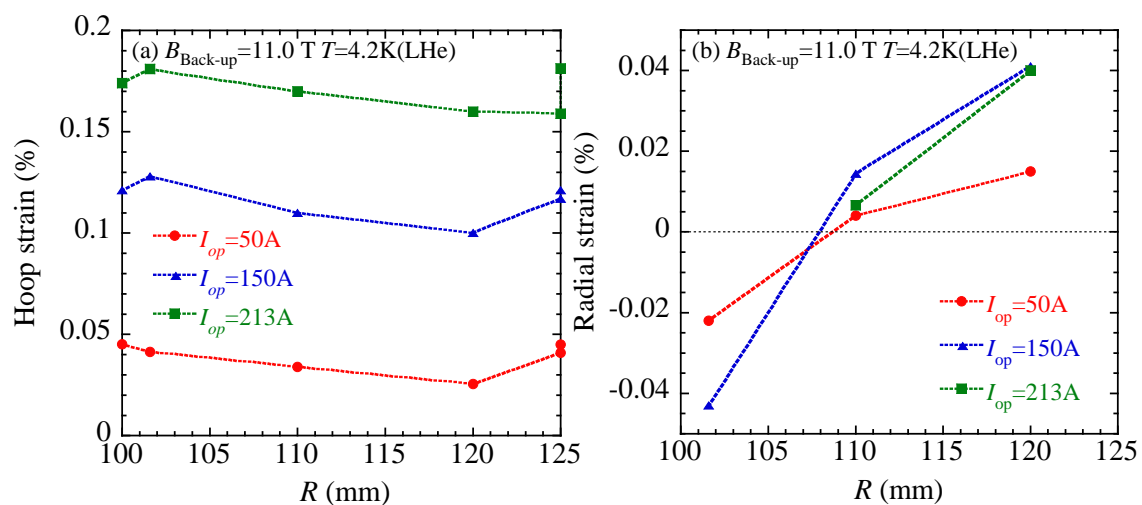
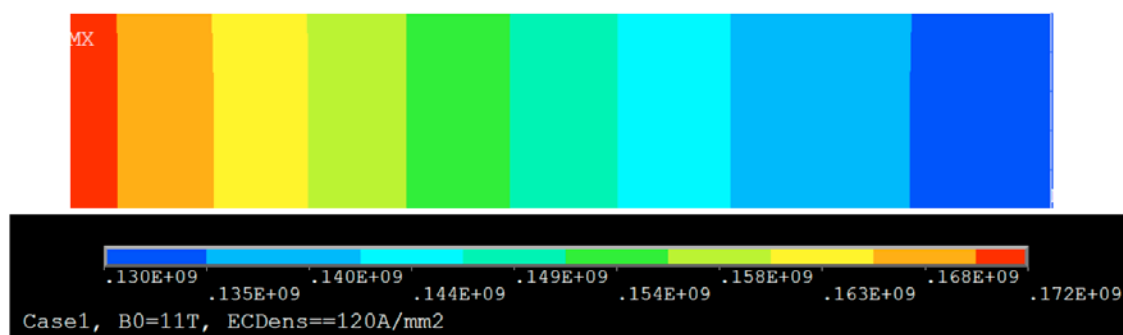


図 2.1.1-5-7 外部磁場 11 T 中で励磁時の 2-SP コイルの歪み分布
(a) 周方向 (b) 径方向

歪みゲージで測定した各部の歪み分布を図 2.1.1-5-7 に示す。フープ応力により誘起された歪み(図 2.1.1-5-7 (a))は最内層で最大となりコイル外側に向かって減少し、さらに最外層部分で増加する傾向が見られた。この結果、図 2.1.1-5-6 と比較すると、コイルが一体変形すると仮定した結果と定性的に一致する。また、コイル径方向(コイルの内層-外層間)の歪みは、最内層で圧縮を示したがコイル中心では引っ張りとなり、最外層ではさらに大きくなっている。したがって、少なくとも印加した応力レベルでは、コイルは一体変形を起こしたと結論できる。図 2.1.1-5-8 に、有限要素法によってさらに詳細に計算した内部応力分布の結果を示す。図 2.1.1-5-8 より、フープ応力は最内層で最大となる図 2.1.1-5-6 の結果と概ね一致していることが分かる。一方で、径方向の応力分布は最内層で負となり外に向かって増大する傾向を示し、図 2.1.1-5-6 の解析的な計算結果とは異なっているが、図 2.1.1-5-7 の実験結果と定性的な一致が見られている。図 2.1.1-5-6 の計算結果は、無限長のコイルを仮定しコイル内部の磁場分布を線形としているために、実際の結果とは若干相違が見られていると考えられる。従って、本実験ではコイルの一体変形挙動が歪み分布の測定結果から実証することができた結論できる。

(a) Hoop stress (Pa)



(b) Radial stress (Pa)

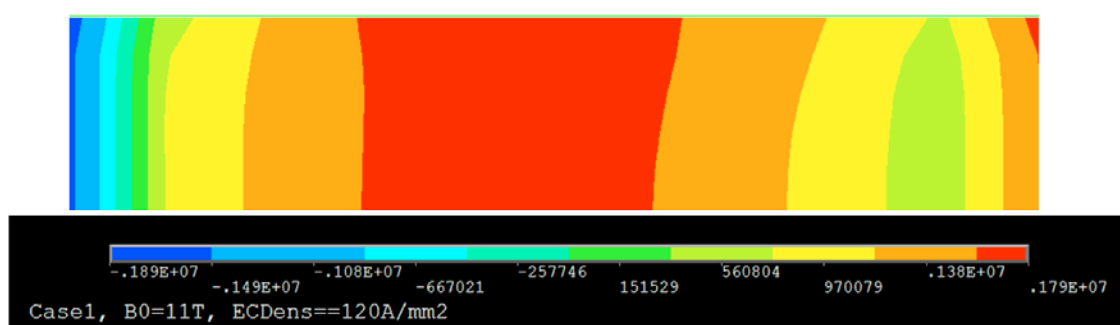


図 2.1.1-5-8 有限要素解析による外部磁場 11 T 中で 214 A 通電時の応力分布
(a) 周方向フープ応力 (b) 径方向応力

d. フープ応力再試験

幅 10 mm のテープを用いて中間ジョイントのないシングルパンケーキ SP (2nd SP coil) を作製し、さらに大きな電磁力試験を行った。コイルサイズは上述のコイルと同じ内径 200 mm x 外径 250 mm である。本コイルには 3 箇所の J_c 低下部分の補修を施し、その影響も調べた。

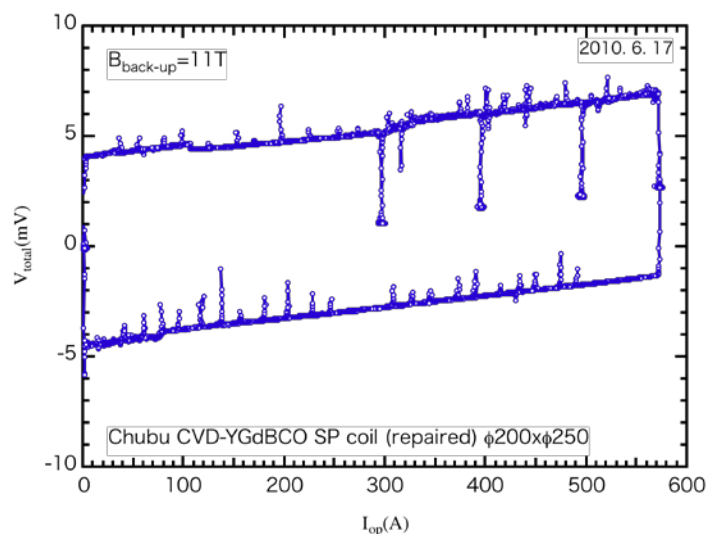


図 2.1.1-5-9 外部磁場 11 T 中での補修有り線材を用いた再試験用コイルの全電圧

図 2.1.1-5-9 は 2nd SP coilのバックアップ 11 Tにおける電流-電圧特性である。発生電圧には、コイルのインダクタンスに起因したヒステリシスを伴う電圧約 4 μV と両端電極の接触抵抗成分が現れているが、最高 572 Aまでの通電に対して常伝導転移に伴う電圧発生は見られなかった。

図 2.1.1-5-10 に 572 A通電時に 2nd SPコイルに誘起される電磁応力分布を示す。ここで σ_{bjr} , σ_{θ} , σ_r は、2.1.1-5-6 同じ内容を示している。ただし、応力はハステロイTM基板にかかる応力としている。この時の最大電流によってコイルに誘起される電磁応力は、ハステロイTM基板に対してBJRで約 744 MPa、一体変形で約 854 MPaと見積もられる。

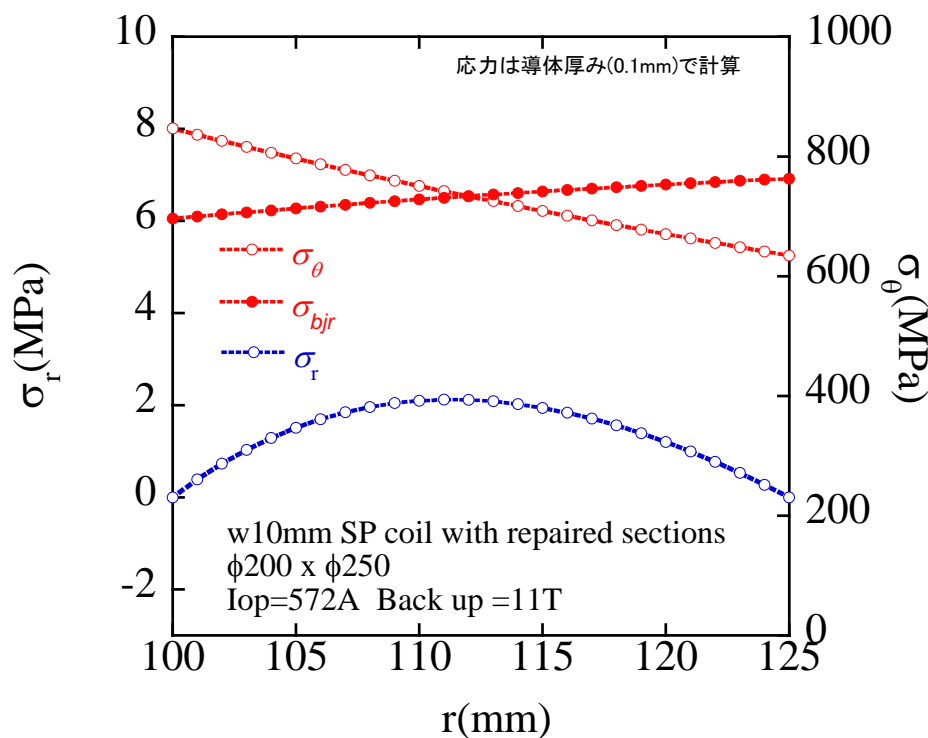


図 2.1.1-5-10 外部磁場 11 T中で 572 A通電時の 2nd SPコイルの応力分布

図 2.1.1-5-11 は、各補修箇所における電流-電圧特性である。補修 1 及び 3 からは電圧の発生が全く見られていない。また補修 2 には線形抵抗が観測されているが、これは補修時に残った接触抵抗であり、電磁力印加による劣化はないと見なすことができる。従って、補修箇所すべては、液体窒素温度で試験した結果をほぼ再現しており、600 MPa を越えるフープ力による劣化は全く見られていないことが確認できた。

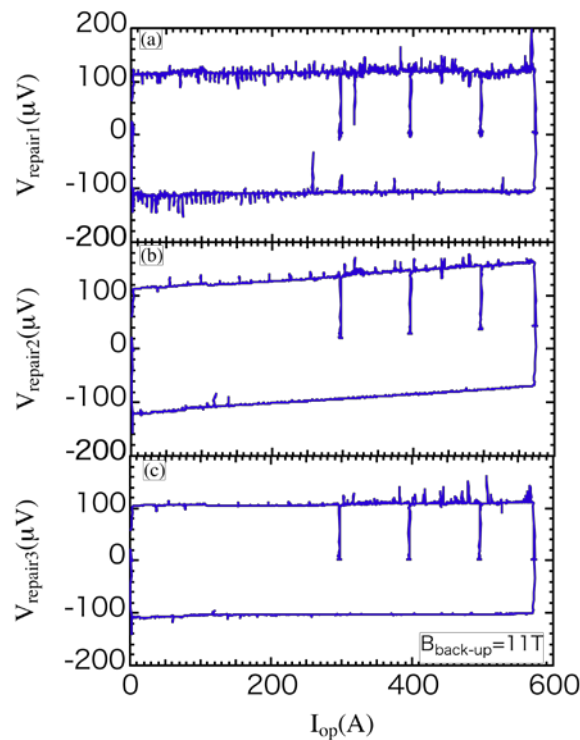


図 2.1.1-5-11 外部磁場 11 T 中で 572 A 通電時の 2nd SP コイルの補修部 3 箇所
の I-V 特性

(3) 結果

大規模 SMES のコイル化要素技術を開発するため、CVD-YBCO 線材を使用した小型多層巻コイルを製作し、フープ応力特性を評価した。液体ヘリウムで浸漬冷却し、11 T の外部磁場中で通電することで、多層巻 CVD-YBCO コイルが線材基板に対し 600 MPa のフープ応力に耐えることを実証した。さらに今回の評価結果から、コイルが一体変形していることが検証できた。一体変形の場合は最大フープ応力が軽減されており、一体変形の最大フープ応力を許容可能とした場合、さらに高磁界コンパクト化を高めることが可能であると考えられる。

引用論文リスト

- (1) M. Sugano, T. Nakamura, K. Shikimachi, N. Hirano, S. Nagaya, “Stress tolerance and fracture mechanism of solder joint of YBCO coated conductor,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 17, pp. 3067-3070, 2007.
- (2) M. Sugano, K. Shikimachi, N. Hirano, S. Nagaya, “Simultaneously Bending and Tensile Strain Effect on Critical Current in YBCO Coated Conductors,” *Physica C* 463-465 (2007) 742-746.
- (3) M. Sugano, Y. Yoshida, M. Hojo, K. Shikimachi, N. Hirano, S. Nagaya, “Two different mechanisms of fatigue damage due to cyclic stress loading at 77 K

for MOCVD-YBCO coated conductors,” *Supercond. Sci. Technol.* 21 (2008) 054006.

- (4) M. Sugano, T. Nakamura, T. Manabe, K. Shikimachi, N. Hirano, S. Nagaya, “The intrinsic strain effect on critical current under a magnetic field parallel to the c axis for a MOCVD-YBCO-coated conductor,” *Supercond. Sci. Technol.* 21 (2008) 115019.
- (5) G. Nishijima, H. Oguro, S. Awaji, K. Watanabe, K. Shikimachi, N. Hirano, S. Nagaya, “Transport Characteristics of CVD-YBCO Coated Conductor under Hoop Stress”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 18, pp. 1131-1134, 2008.

2.1.1-6 実規模コイルの作製と性能評価（中部電力）

(1) 研究開発目的

大出力容量を実現するため、SMESコイルには高耐電圧とともに大電流が要求される。想定しているSMESの100 MW級出力には2 kA以上の電流容量が必要となるため¹⁾、Y系超電導線材を集合導体としてコイル化する必要がある。今回、素線絶縁したCVD-YBCO線材(CVD法により作製されたY系超電導線材)4本を共巻きした集合導体コイルを製作し、液体ヘリウム中で2 kA級の大電流通電試験を実施し、集合導体コイルの通電特性を評価した。

(2) CVD-YBCO 集合導体コイルの大電流特性評価

a. 集合導体コイル製作

SMESコイルに要求される2 kA以上の電流容量を確保するため、Y系超電導線材4枚を並列に束ねた集合導体としてコイル巻線した。また、コイルサイズは2 GJ級トロイダル型SMES主要諸元(11 T、600 MPa)と同等となる20 MJ級トロイダル型SMESの要素コイルの外径φ650 mm級とした。そのコイル諸元を表2.1.1-6-1に、その外観写真を図2.1.1-6-1に示す。コイルは円盤型の一体内側電極に、4素線を90度ずらした対称配置でハンダ付けして巻き始め、90度ずつずらして対称配置された外側電極で巻き終わる形とすることで、回転対称の形状を確保し、4素線のインダクタタンス等の電気定数を合わせることで、4素線の均流化を図っている。

表 2.1.1-6-1 大電流通電試験用 4 束導体コイル諸元

線材種類	Cu めっき絶縁 CVD-YBCO 線材
線材幅	10 mm
導体素線数	4
コイル形状	シングルパンケーキ
内径	ϕ 520 mm
外径	ϕ 611 mm
高さ	11 mm
巻数	33 ターン

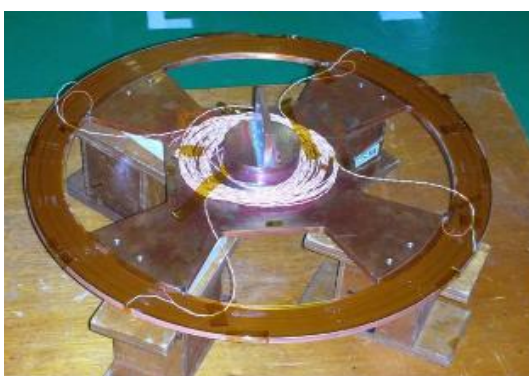


図 2.1.1-6-1 大電流通電試験用 4 束導体コイル外観 (含浸後)

b. コイル通電確認試験

2 kA 級大電流通電に先行して、4 束導体コイルを液体窒素中で通電し、コイルの通電特性を確認した。素線電流は各素線にシャント抵抗を接続し、測定した。通電結果を図 2.1.1-6-2 に示す。4 束集合導体コイルの各素線電流には大きなばらつきが観測され、218 A 通電時、#4 素線の電流割合は 10 % 以下であった。各素線の外径側末端部の電圧をそれぞれ測定した結果、#4 素線抵抗値が他より高く観測された。#4 線材は電極接続部において Cu めっきが十分ではなかったため、接触抵抗が高くなり、偏流が生じたと考えられる。

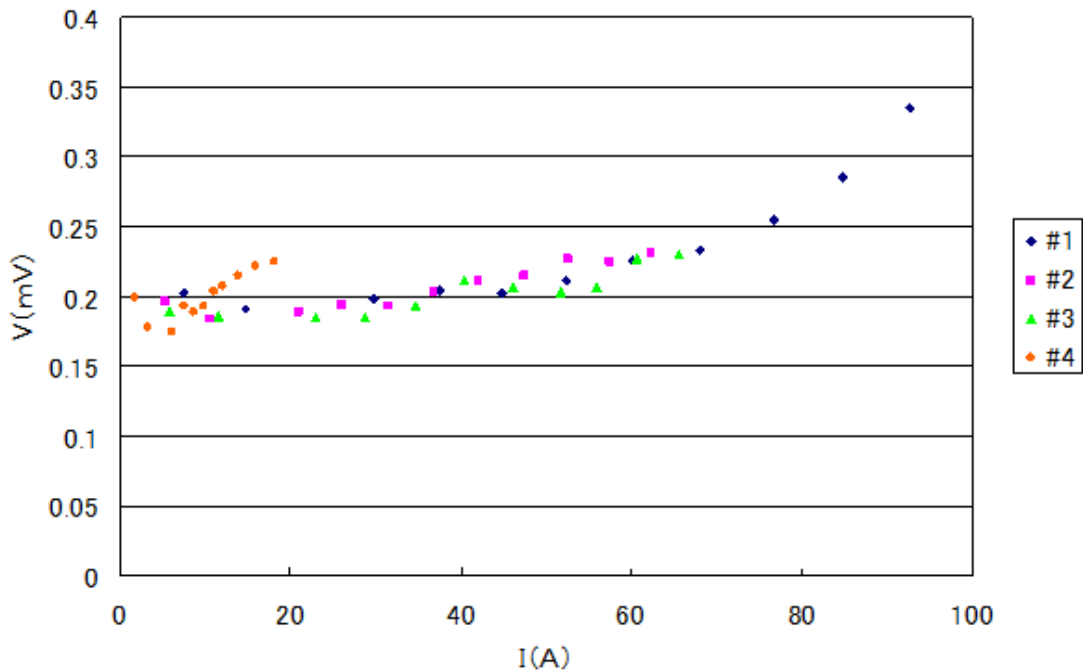


図 2.1.1-6-2 液体窒素中での 4 束導体コイル各素線 I-V 特性

c. 2 kA 級大電流通電試験

通電確認試験において 4 束導体電極部の抵抗差による偏流が生じたため、液体ヘリウム浸漬冷却通電試験を実施する前に、端末接続部を除き、Cu めっきが比較的良好な部位にて電極を形成した。電極部における線材接続長は全て 100 mm である。また、各素線の発生電圧を測定するための内側電極－外側端部間電圧端子他、各素線間の偏流特性を評価するため、各外側電極近傍にホール素子を、また、4 束導体の各素線の外側端部－外側電極間に電圧端子設置した。図 2.1.1-6-3 にコイルに設置したこれらの計測センサーの位置を示す。

液体ヘリウム中においてコイルに大電流を通電した時のコイル各素線の発生電圧を図 2.1.1-6-4 に示す。横軸はコイルの全通電電流を示したものである。コイルの全通電電流が 1 kA 付近までは各素線の発生電圧に大きな差異は観測されていないが、1 kA 付近から各素線の発生電圧に明確な差異が観測されているため、素線間に偏流が発生していることが推測される。

各素線の電流値を観測するために設けたホール素子で測定した各外側電極部での磁界の 1 次関数からの差異分、及び外側端部－外側電極間電圧の 1 次関数からの差異分をそれぞれ図 2.1.1-6-5、及び図 2.1.1-6-6 に示す。ホール素子で測定した各外側電極部での磁界の一次関数からの差異は、各素線間の偏流に基づく磁界と考えられる。また、外側端部－外側電極間電圧は、接続抵抗や Cu 電極そのものの抵抗による電圧降下が支配的であることから、外側端部－外側電極間電圧は各素線の通電電流と比例関係にあると考えられる。図 2.1.1-6-5、2.1.1-6-6 に示されるように両者は同様の傾向を示しており、全通電電流が 1 kA を超えた付近から素線#3 の電流割合が低下し、その後、素線#4 の電流割合が増加し、電流が増加するにつれ、

素線 #3 から素線 #4 へ偏流が顕著に発生していると考えられる。

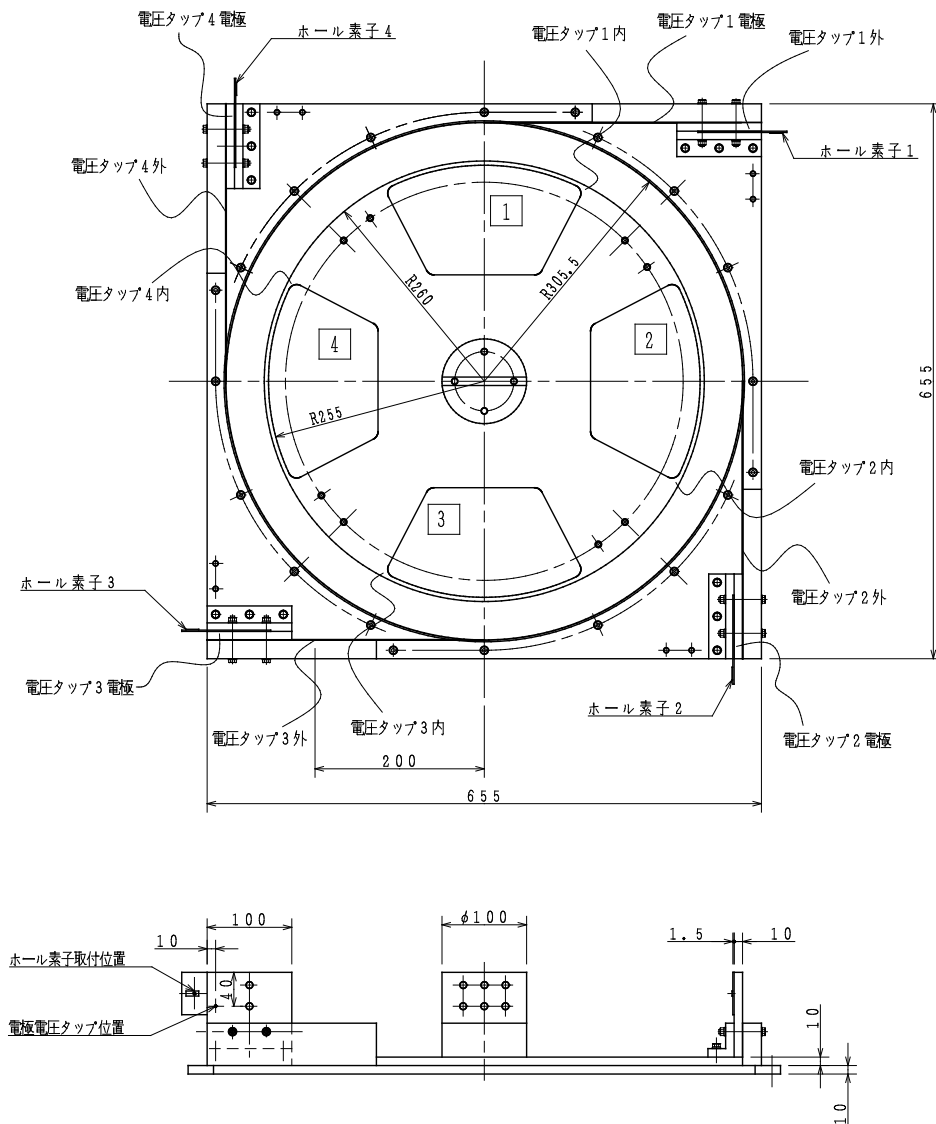


図 2.1.1-6-3 4 束導体コイルの電圧・磁界計測位置

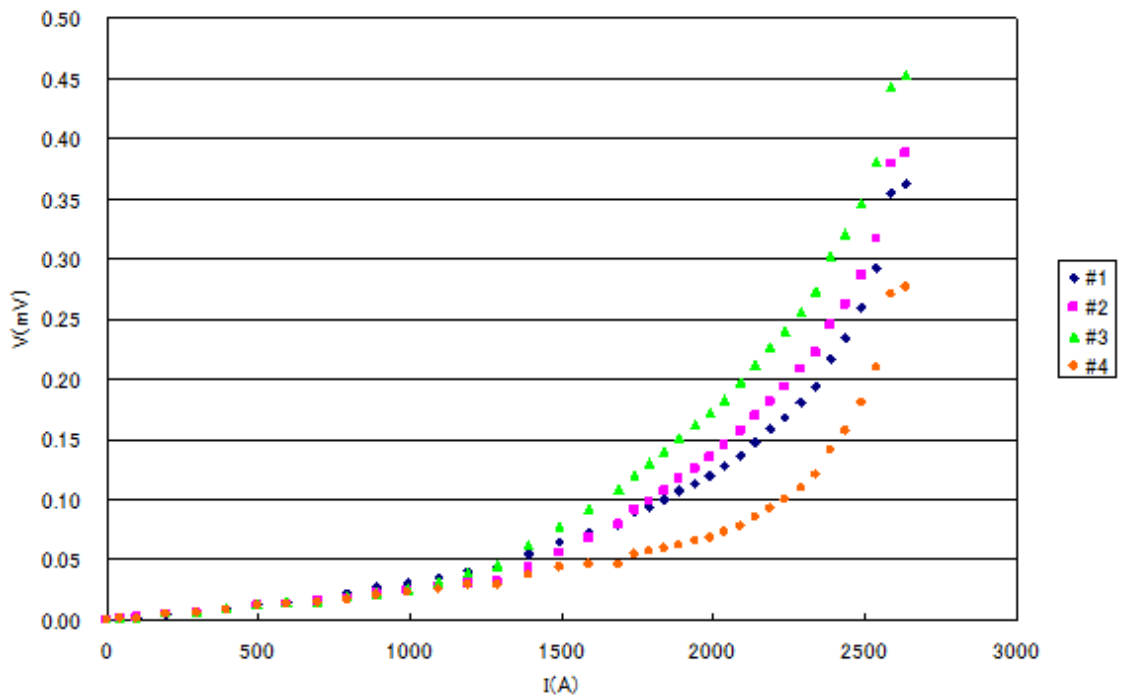


図 2.1.1-6-4 液体ヘリウム中での 4 束導体 I-V 特性
(横軸の電流値はコイル全電流)

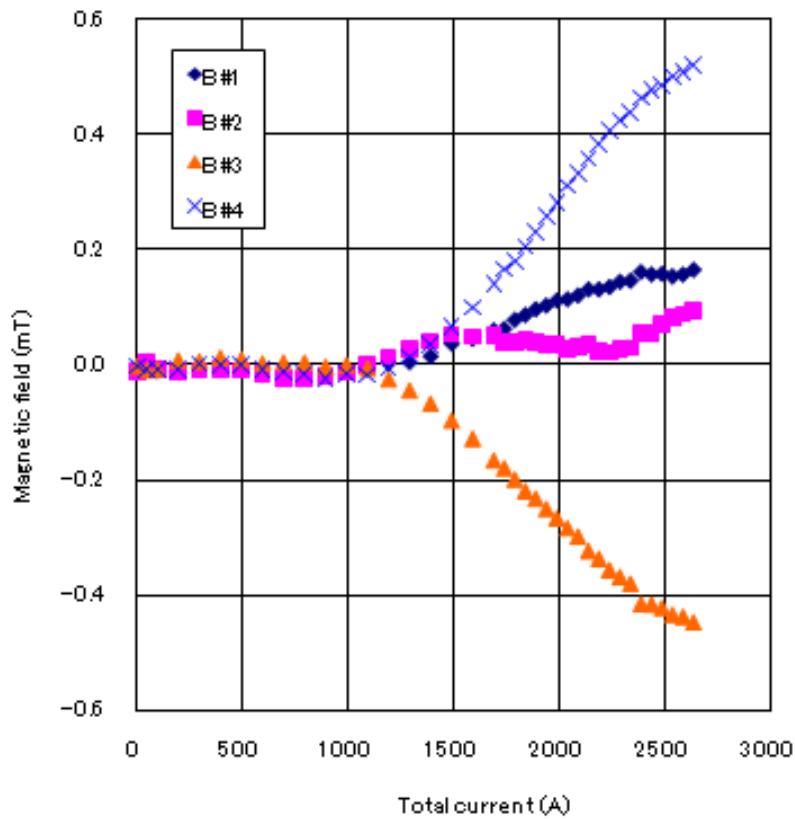


図 2.1.1-6-5 外側電極部での測定磁界 (一次関数からの差異分)

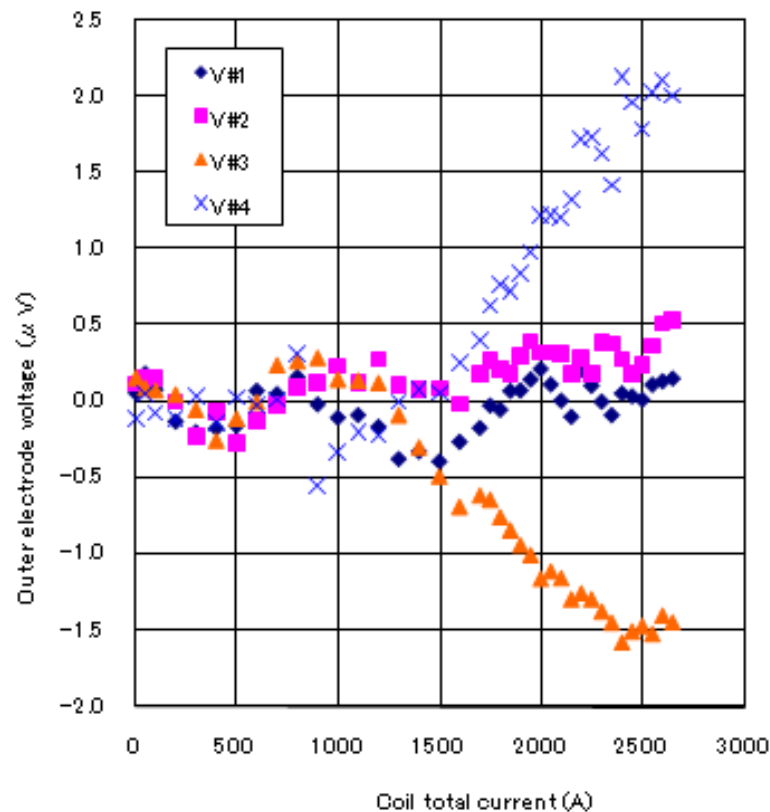


図 2.1.1-6-6 外側電極部の測定電圧（一次関数からの差異分）

これらのデータから各素線に流れた電流値を下記の 2 通りの方法で推定した。

まず、測定された磁界と解析解との比較から各素線に流れる電流値を推定した。ただし、以下の仮定を設定した。

- ・対象外の素線外側電極を流れる電流による影響は無視
- ・全電流 1 kA まで偏流はなく、1 kA 以上での磁界の変動は偏流によるものとし、データを補正(1 次係数の決定)
- ・推定した各素線電流の和が全電流と一致するように補正(2 kA 時で 3 %程度)

次に、外側端部－外側電極間電圧は主に抵抗成分によるものとし、1 kA までの発生電圧から、1 kA 以上の領域での通電電流値を推定した。ただし、以下の仮定を設定した。

- ・全電流 1 kA まで偏流はなく、1 kA 以上での電圧の変動は偏流によるものとし、データを補正(1 次係数の決定)
- ・推定した各素線の電流値の和が全電流と一致するように補正。(2 kA 時で 3 %程度)

以上の条件で算出した大電流通電試験時の各素線の電流値を図 2.1.1-6-7、図 2.1.1-6-8 に示す。両者は同様の傾向を示しており、1.2 kA 付近からコイル電流の増加に伴い偏流が顕著となり、最大 2,637 A 通電時の素線 #3 と素線 #4 の間には約 2 倍の電流差が生じたと推定される。これは、4 本の素線そのものの通電特性

に差があり、通電時の各素線インピーダンスに対して磁束フローによる発生電圧が無視できないレベルまで増加したためと考えられる。磁束フロー発生領域までのコイル通電を含めた SMES 運転を想定する場合は、冷却コストとの兼ね合いとなるが、集合化導体の素線通電特性が偏流に影響を及ぼし、さらに損失や電磁力へも影響を及ぼすことに留意する必要がある。

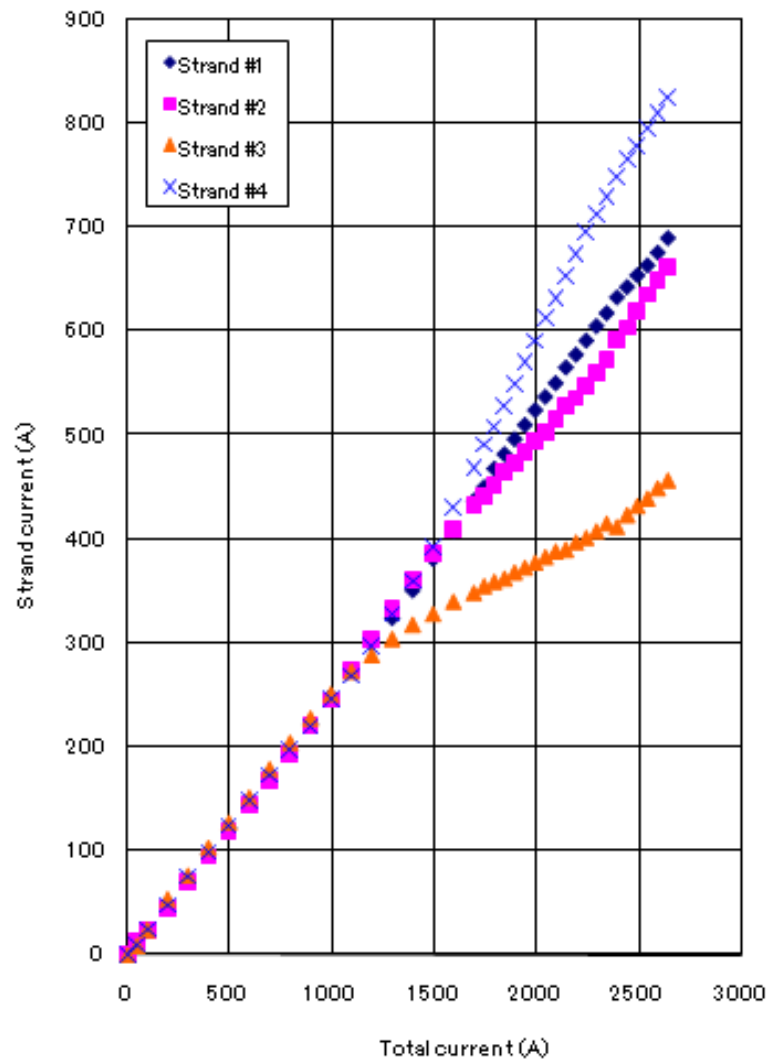


図 2.1.1-6-7 測定磁界から算出した 4 束導体コイルの各素線電流

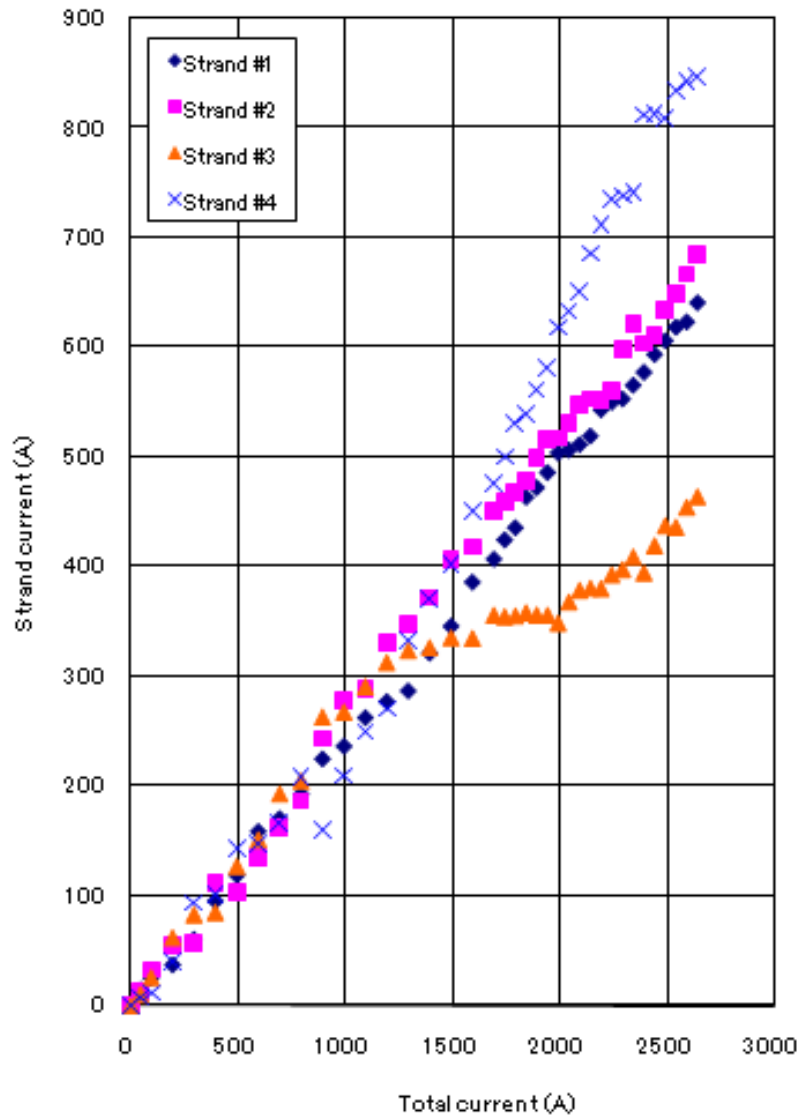


図 2.1.1-6-8 電極電圧から算出した 4 束導体コイルの各素線電流

(3) 結果

大出力容量 SMES コイルに要求される大電流通電特性を評価するため、CVD-YBCO 線材 4 本を束ねた集合導体コイルを製作し、2.6 kA の大電流通電を実証するとともに均流特性を確認した。

引用論文リスト

- (1) K. Shikimachi, N. Hirano, S. Nagaya et al., “System Coordination of 2 GJ Class YBCO SMES for Power System Control”, IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.19, no.3, pp.2012-2018, 2009.

2.1.1-7 2 GJ 級高磁界・大電流コンパクトコイル構成技術開発のまとめ

従来の金属系 SMES コイルの許容可能なフープ応力(300 MPa 程度)の 2 倍の応力(600 MPa)を連続して繰返し加えても使用可能な高強度コイルとして、2 GJ 級大容量 SMES コイルの技術見通しを得るために必要な 20 MJ 級システムの要素コイル規模である外径 700 mm 級コイルを対象とした、フープ応力 600 MPa 以上、2 kA 以上の通電容量を持つ SMES コイル構成技術確立することを目標とし、開発を進めた。

CVD-Y 系超電導線材を用いたフープ応力評価用小型コイル(外径 250 mm)を製作し、従来の金属系 SMES コイルの許容フープ応力の 2 倍となる 600 MPa 級のフープ応力試験を CVD-Y 系コイルを用いて実施した。また、2GJ 級大容量 SMES コイルの技術見通しを得るために必要な 20 MJ 級システムの要素コイル規模となる SMES コイルを開発した。SMES システムとして必要な出力容量を実現するため、機械特性や交流損失等を評価して構造を決定した大電流容量 Y 系超電導集合導体を用いて、高強度・低損失が実現可能な定格 2 kA 級、外径 650 mm 級のコイルを製作し、通電特性等の基礎検証試験を行った。

電気機器や超電導技術に関する学識経験者、重電メーカー各社、及び各電力会社等からなる超電導電力貯蔵システム研究開発委員会等を開催し、コイル構造等を十分に議論した上で開発を進めた。

具体的には、22 年度末には、NbTi コイルと組み合わせ、外径 650 mm のコイルにおいて 600 MPa 以上の電磁力を発生させる試験を実施し、コイルの健全性を評価した。

2.1.2 高効率コイル伝導冷却技術開発

テープ線材を用いたパンケーキ型積層コイルの巻線間相互作用の評価が前 NEDO 事業の「超電導電力ネットワーク制御技術開発」プロジェクトの課題として残されていたため、その評価を実施した。また、20 K～40 K 温度領域においては、従来の液体ヘリウムの温度領域に比べ、コイルが非常に高い熱安定性を有することを同プロジェクトにおいて確認しており、高い熱容量を活かした短時間過負荷運転が可能であり、また、高効率な冷凍機で冷却することが可能である。ただし、同温度領域においては、4K 温度領域と異なり固体熱伝導のみによる冷却システムだけでは十分な熱伝達の実現が困難である。一方、SMES システムとして必要な出力容量を実現するために必要となる高熱伝導性能とトレードオフの関係になる電気絶縁性能に関しても、前 NEDO 事業の「超電導応用基盤技術研究開発（第 II 期）」プロジェクトにおいて Y 系超電導線材の剥離等の劣化を回避できる材料開発も含めた含浸樹脂技術を開発し、「超電導電力ネットワーク制御技術開発」プロジェクトにおいて樹脂含浸コイルを試作して 20-40 K 領域において絶縁性能評価試験を行い、含浸コイルの部分放電開始電圧が 3 kV 程度であることを検証しているものの、同温度領域での真空／固体複合絶縁系に関する試験評価データは少ない。以上のことから、同温度領域の伝熱・電気絶縁に関するコイル特性評価を行い、高効率伝導冷却性能を有するとともに 2 kV 以上の電気絶縁性能を有するコイル構造を検討した。

さらに、2 kV 以上の耐電圧を有する伝導冷却型ダブルパンケーキコイル構造を検討評価した。また、20-40 K 温度領域において十分な熱伝達を得るため、例えばガス冷媒配管を一部活用した冷却システムやヒートパイプを用いた冷却システム等の検討評価を行うとともに、20 MJ 級システムの要素コイル規模である外径 ϕ 700 mm 級コイルを対象とした伝導冷却試験により SMES 運転時に想定される発熱に対し冷却できるシステムの成立性を検討し、「超電導電力ネットワーク制御技術開発」プロジェクトにおいて概念検討した一例であるコイルシステムの形状と発生熱量から必要とされる少なくとも 3 W/m^2 以上の熱流束を可能とする高熱伝導冷却システムの開発を行った。

上記開発により、高効率伝導冷却性能かつ高耐電圧性能を有する高効率コイル伝導冷却技術を開発した。

2.1.2-1 コイル損失検討(中部電力、九州大学)

(1) 研究開発目的

2 GJ 級 SMES コイルは、多数のパンケーキコイルをトロイダル配置した構造を有するが、パンケーキコイルで発生する交流損失、特に超電導体内部への不可逆な

磁束侵入に伴うヒステリシス損失の評価手法はまだ確立されていない。そこで、本研究では、パンケーキコイル特有の内部構造や、SMES として想定される運転パターンを考慮したヒステリシス損失の算出方法を検討し、SMES コイル内で発生する交流損失を定量的に評価する。

(2) 通電電流の影響を考慮した SMES コイルの交流損失評価

電力系統制御用として概念設計された 2 GJ 級 SMES コイル¹⁾に関して、 図 2.1.2-1-1 に示すような 2 つのパターンで SMES を運転した場合を想定して、発生する交流損失を見積もった。ただし、通電電流の影響を考慮した各ターンの平行磁界損失と垂直磁界損失をそれぞれ評価し、その和を全交流損失とした²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾。交流損失の全積算値（コイル 180 個分）に対する結果を表 2.1.2-1-1 に示す。外部磁界のみを考慮した場合と同様に、通電電流の影響を考慮した場合もパターン 2 の方が磁界変化の振幅が大きく、結果として発生する交流損失も大きくなる。外部磁界のみと比較して、平行磁界損失の大きさはほとんど変わらず、通電電流の影響は無視できることが分かる。これは、平行磁界成分の磁界振幅が中心到達磁界に比べて非常に大きいためである。一方、垂直磁界損失は通電電流の影響を強く受け、値が 2 倍以上増加した。その結果、パターン 2 の場合で全交流損失は 0.47 kW となる。SMES システム全体コストの観点から、全損失を 10 kW 以下に抑えることが必要であるが、この場合でも十分小さく、問題ないレベルである。

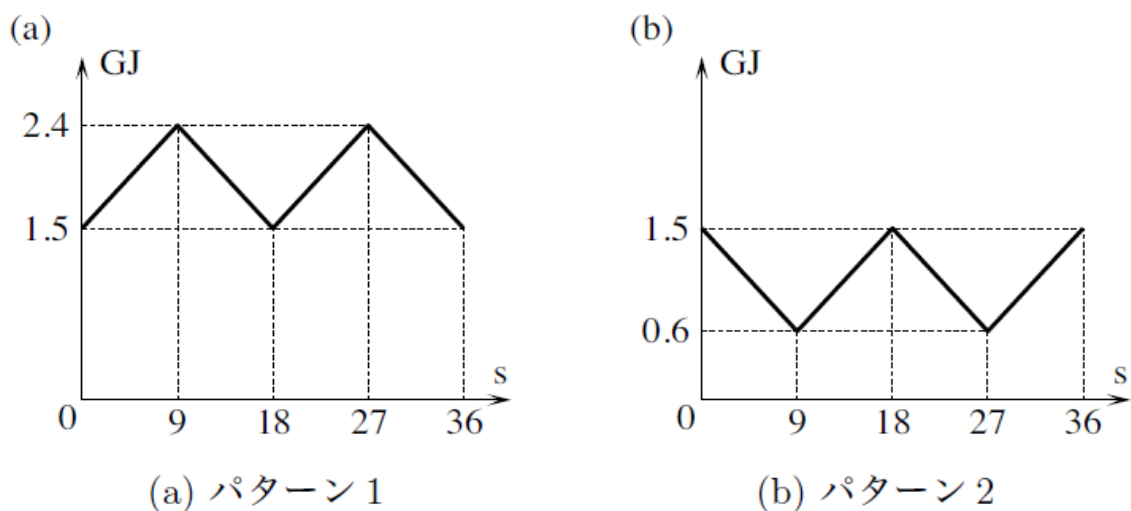


図 2.1.2-1-1 SMES の典型的な運転パターン

表 2.1.2-1-1 通電電流の影響を考慮した SMES コイルの交流損失

成分	パターン 1	パターン 2
平行磁界損失	0.05 kW	0.07 kW
垂直磁界損失	0.18 kW	0.40 kW
全交流損失	0.23 kW	0.47 kW

(3) 結果

Y系超電導線材からなるパンケーキコイルを多数トロイダル配置した SMES 用コイルで発生する交流損失を定量的に評価した。負荷変動補償用 SMES の運転パターンを分析することにより、パンケーキコイルが晒される複雑な電磁環境を明らかにし、従来の外部磁界のみに加え、通電電流の影響を考慮して交流損失を算出したが、冷却コストから制約される目標 10 kW より十分低い値であることを確認した。

引用論文リスト

- (1) K. Shikimachi, N. Hirano, S. Nagaya, H. Kawashima, K. Higashikawa and T. Nakamura: “System coordination of 2 GJ class YBCO SMES for power system control,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 19, No. 3 (2009) pp. 2012-2018.
- (2) W.J. Carr, Jr.: “AC loss from the combined action of transport current and applied field,” *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 15, No. 1 (1979) pp. 240-243.
- (3) K. Funaki, M. Iwakuma, K. Kajikawa, M. Takeo, J. Suehiro, M. Hara, K. Yamafuji, M. Konno, Y. Kasagawa, K. Okubo, Y. Yasukawa, S. Nose, M. Ueyama, K. Hayashi and K. Sato: “Development of a 500 kVA-class oxide-superconducting power transformer operated at liquid-nitrogen temperature,” *Cryogenics*, Vol. 38, No. 2 (1998) pp. 211-220.
- (4) K. Kawasaki, K. Kajikawa, M. Iwakuma and K. Funaki: “Theoretical expressions for AC losses of superconducting coils in external magnetic field and transport current with phase difference,” *Physica C*, Vols. 357-360, Part 2 (2001) pp. 1205-1208.
- (5) 柁川一弘、船木和夫、式町浩二、平野直樹、長屋重夫: 「SMES の充放電動作を模擬したパンケーキコイル巻線の交流損失評価」、第 80 回 2008 年度春季低温工学・超電導学会(2009) 1P-p19.
- (6) K. Kajikawa, K. Funaki, K. Shikimachi, N. Hirano and S. Nagaya: “Numerical and theoretical evaluations of AC losses for single and infinite numbers of superconductor strips with direct and alternating transport currents in external AC magnetic field,” *Physica C* (2010) in press.

2.1.2-2 高耐電圧・高熱伝導コイル構造検討（中部電力）

(1) 研究開発目的

伝導冷却システムに組み合わせることが可能で、対地絶縁性能 2 kV（設計目標 6 kV）、及び表面での熱流束 3 W/m²（一様）となるコイルについて構造検討する。なお、表面での熱流束については、2 GJ級SMESの運転に伴い発熱する熱量を、冷却できるコイル断面積で除した値として設定したものである。

(2) 絶縁設計の考え方

はじめに、対地絶縁性能 2 kV（設計目標 6 kV）を満たす絶縁厚さを計算する。巻線機器の直流機器の試験電圧は、JEC によると定格電圧 E(kV)の場合に 2E+1 kV の試験電圧と定められている。本装置でも目標定格電圧 6 kV に対して試験電圧を 2E+1 の 13 kV とする。設計値はこれに裕度を考慮する。ケーブルでは規格が決まっているが、電力機器ではこのようなものは無く、各メーカーで基準が異なる。

設計裕度として絶縁耐圧の経時劣化を考慮し以下のように設定した。絶縁耐圧の時間変化には $t \propto V^{-n}$ の関係があり、FRP では $n = 12 \sim 14$ になるとされている。ここではより劣化の大きい $n = 12$ の場合を想定する。1 分間の耐電圧試験で確認した耐電圧が 30 年後にどこまで劣化するかを図 2.1.2-2-1 に示す。この場合、30 年後には 25 % まで低下するので、これを見越して裕度 4 倍以上が必要である。ここでは $13 \times 4 = 52$ kV を設計値とする。

ここで、絶縁破壊電圧は耐電圧試験で確認した電圧より高いこと、 n が 12 より大きければ経時劣化はもっと小さいこと、真空中・低温の環境で使用する超電導コイルでは熱及び酸化劣化が小さいと考えられることから、4 倍の裕度は安全側と考えられる。

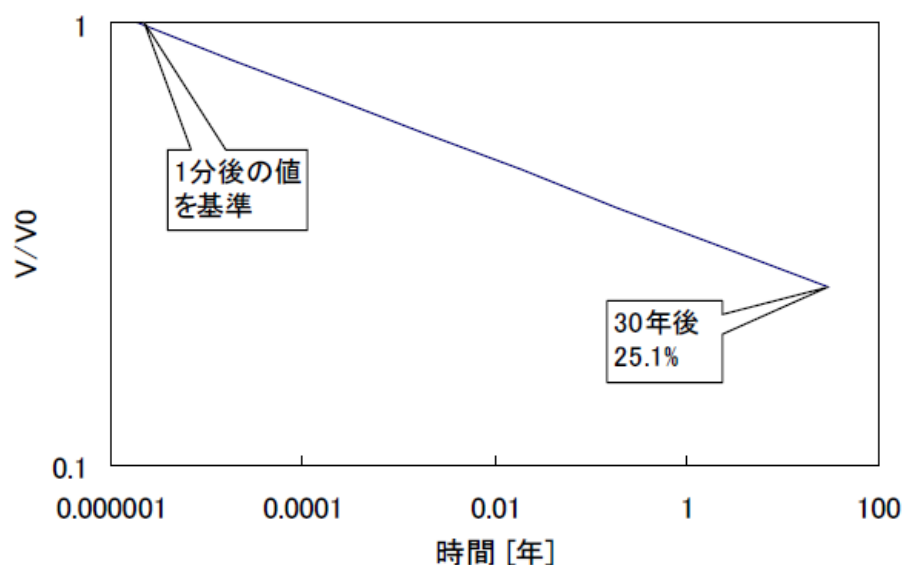


図 2.1.2-2-1 絶縁耐力の経時変化

一方、GFRP 板の絶縁耐圧は材料により異なるが安全側のデータとして、厚さ 3.175 mmの板で 15.7 kV/mmの値を用いた。また絶縁板の厚さと絶縁耐圧の間には $V \propto d^n$ の関係があり、 n は 0.6~1 の値を示す。図 2.1.2-2-2 に n が 0.6 の場合と 1 の場合の絶縁板厚さと絶縁耐圧の関係を示す。2 本の線の低い方の値を採用することにして、この図から 52 kVに耐える厚さを求めると 3.4 mm 以上となる。本検討では絶縁用FRP 板の厚さを 4 mm とした。

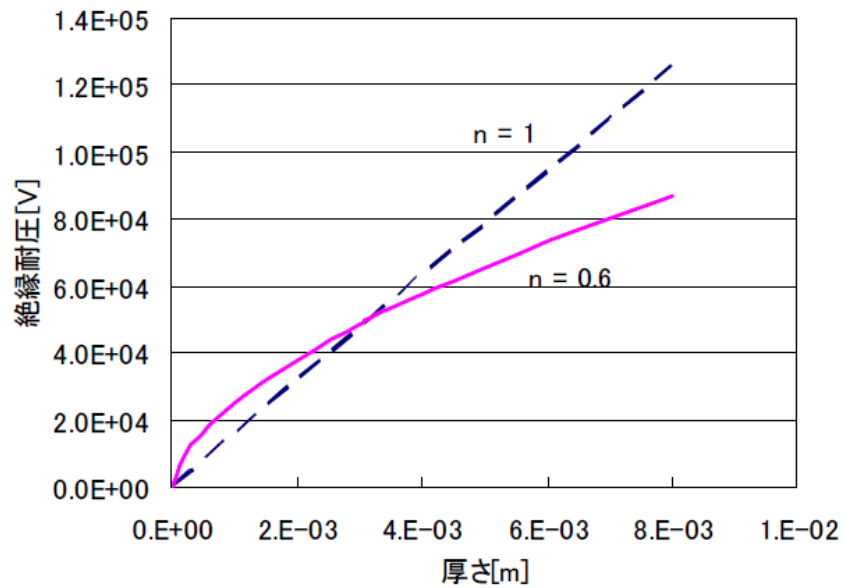


図 2.1.2-2-2 GFRP の厚さと絶縁耐圧の関係

(3) コイルの伝熱量の考え方

コイル断面構造を仮定し、コイル表面で 3 W/m^2 の一様な熱流束があった場合のコイル内部及び対地絶縁部で生じる温度差について検討した。

計算モデルとしてコイル断面形状を図 2.1.2-2-3 に示す。コイル表面での熱流束が一様な条件なので r 、 θ 方向の対称性から z 軸のみの 1 次元モデルとした。また、対称性を考慮して 4 パンケーキの下半分の 2 パンケーキ分をモデル化した。計算モデルを図 2.1.2-2-4 に示す。

コイルへの熱負荷としては、コイル発熱と外部からの輻射熱が考えられるが、コイル発熱と比較して輻射熱は小さいため、熱負荷としてコイル発熱のみを考慮した。コイル発熱はコイル表面での熱流束が 3 W/m^2 となる条件とし、コイル巻線部で一様に発熱するとした。

計算に用いた諸元を表 2.1.2-2-1 に示す。

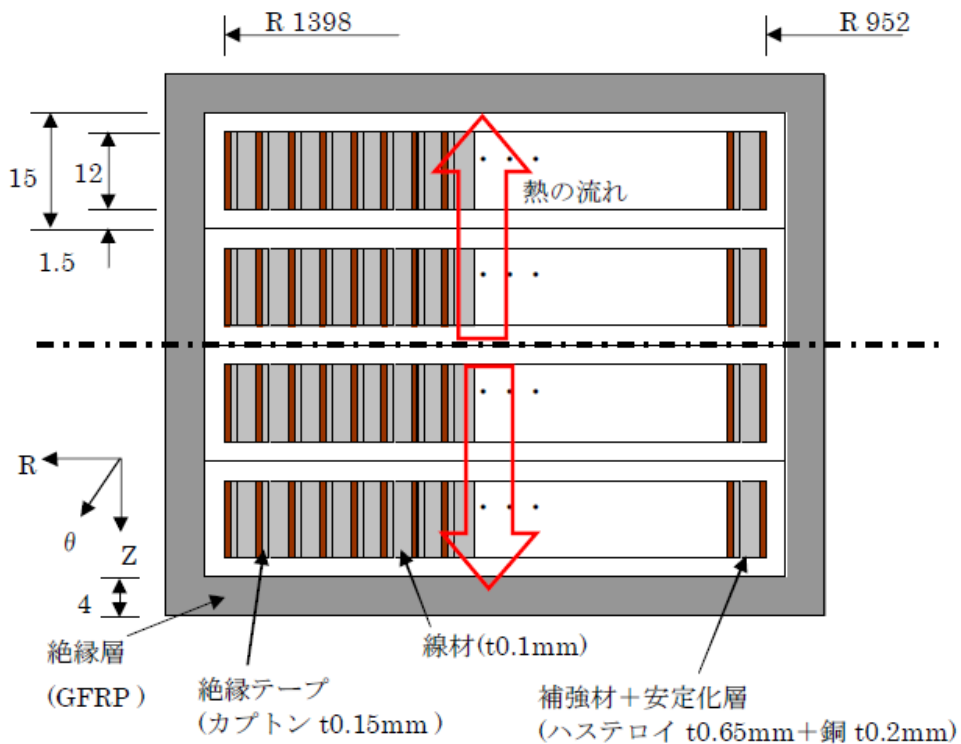


図 2.1.2-2-3 コイル断面形状

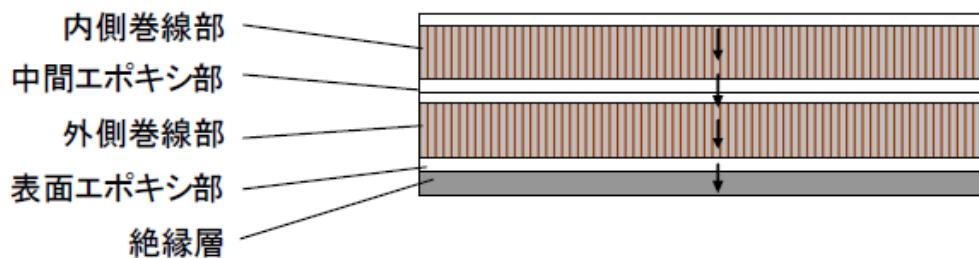


図 2.1.2-2-4 計算モデル(1次元)

表 2.1.2-2-1 検討条件

要素コイル寸法	外半径	1.4 m
	内半径	1.0 m
	高さ	60 mm
	表面積(両側面)	6.03 m ²
熱流束 (一様)		3.0 W/m ²
伝熱量(1 コイル当り)		18.1 W

コイル内部の z 方向温度分布は、コイル内をセルに分割して各セルの温度差を計算し、この温度差を積算する方法を用いた。各セルの温度差は式 2.1.2-2-1 で表される。

$$q = \frac{Q}{A} = \lambda \frac{dT}{dx} \quad \text{式 2.1.2-2-1}$$

ここでλは、絶縁層とエポキシ部及びFRP 板ではエポキシの熱伝導率を用い、コイル巻線部ではコイル巻線部z 軸方向の等価熱伝導率を用いた。コイル巻線部の z 軸方向の等価熱伝導率λ_z は、線材と補強材の熱伝導率としてハステロイ™の値を、絶縁テープと絶縁材の熱伝導率としてエポキシの値を用い、安定化層を銅として式 2.1.2-2-2 から計算した。

$$\lambda_z = \frac{A_{\text{ハステロイ}}}{A} \lambda_{\text{ハステロイ}} + \frac{A_{\text{エポキシ}}}{A} \lambda_{\text{エポキシ}} + \frac{A_{\text{銅}}}{A} \lambda_{\text{銅}} \quad \text{式 2.1.2-2-2}$$

各材料の熱伝導率と等価熱伝導率を表 2.1.2-2-2 に示す。温度分布計算には 20K での値を用いた。

表 2.1.2-2-2 各材料の熱伝導率と等価熱伝導率

材質	厚さ	熱伝導率
線材(ハステロイ™)	0.10 mm	2.8 W/m K
補強材(ハステロイ™)	0.65 mm	2.8 W/m K
安定化銅	0.20 mm	833 W/m K
カプトン	0.15 mm	0.10 W/m K
巻線部 z 軸方向	1.10 mm	153 W/ mK

(4) 結果

伝導冷却に用いるコイルの形状について検討した。このときの線間の絶縁厚については、解析結果より、FRB の厚み 4 mm あれば 2 kV 以上の絶縁を確保できることが分かった。ここで、コイル内の温度差の分布の計算結果を図 2.1.2-2-5 に示す。コイル巻線部と絶縁部では熱伝導率が異なるため温度分布に違いが生じ、コイ

ル表面と絶縁層の温度差は 0.17 K で、コイル内部の温度差を合わせても 0.21 K となる。コイルと冷凍機との温度差としてこの温度差を見込むこととした。伝導冷却システムの検証の中で、今回設計した絶縁性能について確認した。

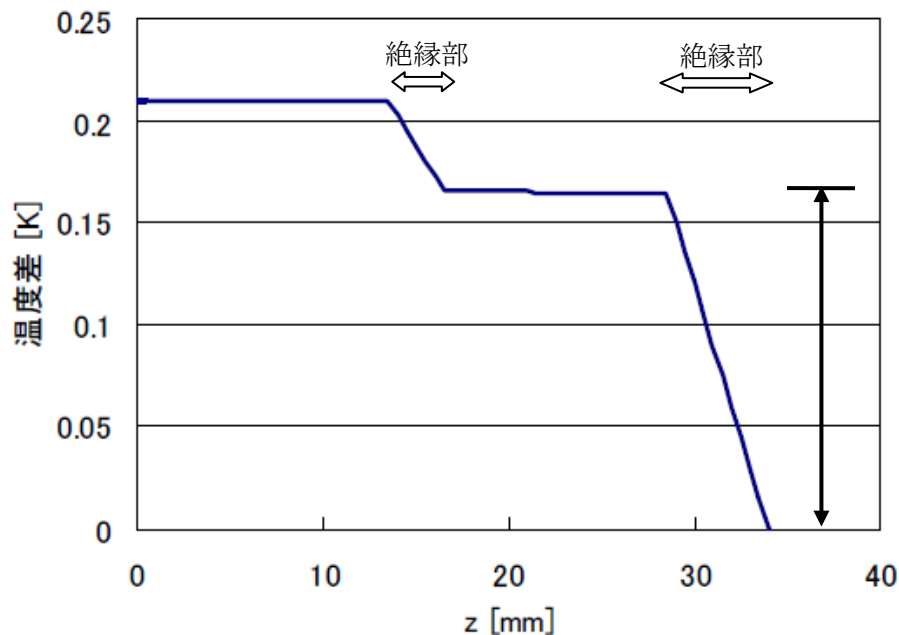


図 2.1.2-2-5 コイル内の温度差分布

引用論文リスト

- (1) 放電ハンドブック 第2版 下巻 p251
- (2) 超伝導・低温工学ハンドブック p1088

2.1.2-3 長距離伝導冷却システム試作・評価（中部電力）

(1) 目的

2 GJ 級 SMES の冷却システム実現に必要な伝導冷却特性（2 GJ 級 SMES の熱負荷を加えてコイル温度を 20 K 程度に冷却できる能力）及び電気絶縁性を満足する冷却試験モデルシステムを作製し、性能を検証する。

具体的には、2 GJ 級コイル表面での熱流束 3 W/m^2 を模擬するため、試験発熱体で約 9 W 相当の熱量を発生（模擬コイル表面積 3 m^2 ）させ、試験体各部の温度を測定・記録し、コイル表面温度が上昇しないことを確認する。

(2) 冷却系の構成

伝導冷却試験装置の構成を図 2.1.2-3-1 に示す。1 台のコイル用冷凍機で冷却したガスを用いて試験用発熱体を冷却した。

この冷却系における配管出口温度を検討し、構成が妥当であることを検証した。ここでは配管の熱伝達による温度差等は無視し、冷凍機の温度上昇と配管入口出口の温度差のみを考慮した。検討に用いた冷凍機の冷凍能力を図 2.1.2-3-2 に示す。また、熱交換器効率を 95 %、室温温度は 300 K とした。熱負荷条件を表 2.1.2-3-1 に示す。

検討結果として、 3 W/m^2 の熱負荷での流量と配管出口温度の関係を図 2.1.2-3-3 に、 9 W/コイル の熱負荷での流量と配管出口温度の関係を図 2.1.2-3-4 に示す。配管出口温度は 20 K 程度であり、冷却系の構成は妥当であると考えられる。

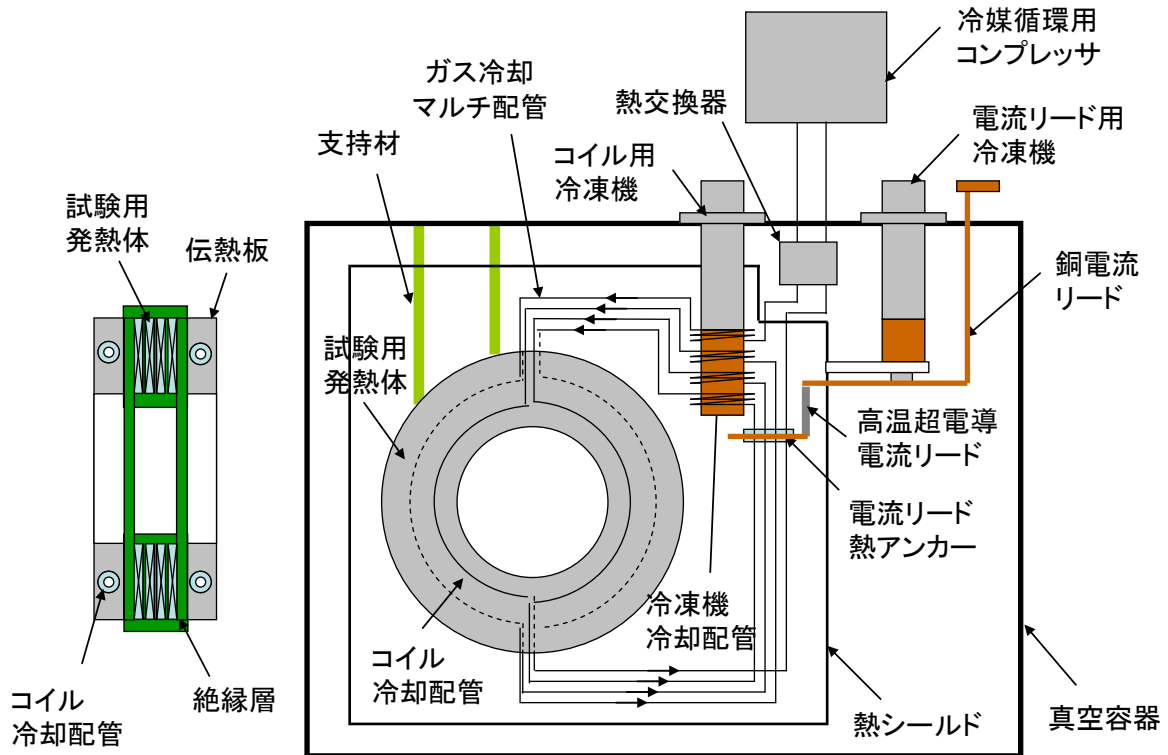


図 2.1.2-3-1 伝導冷却試験装置の構成

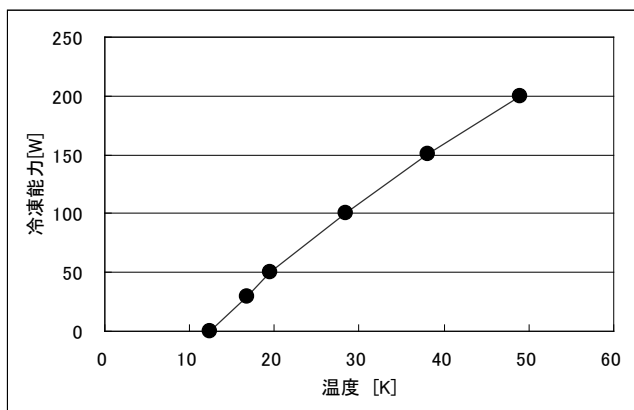


図 2.1.2-3-2 冷凍機温度と冷凍能力の関係

表 2.1.2-3-1 試験用発熱体の熱負荷

	条件 1	条件 2
コイル発熱(模擬)	1.23 W	9.0 W
1 配管当りの伝熱量	0.31 W	2.25 W

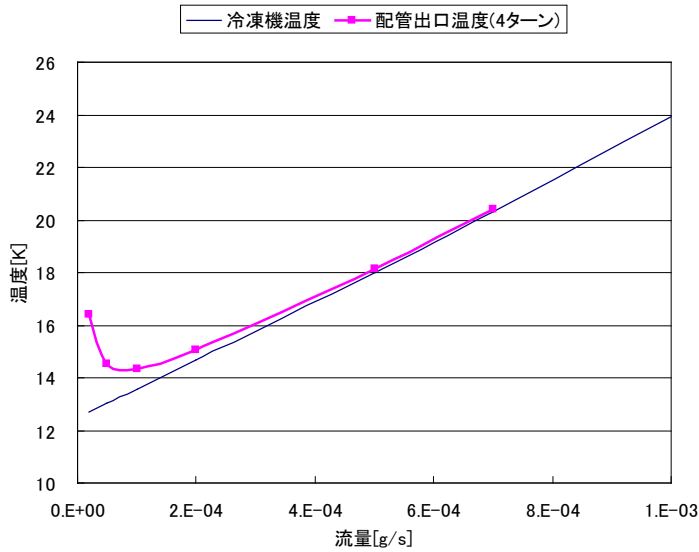


図 2.1.2-3-3 3 W/m²相当の熱負荷での流量と配管出口温度の関係

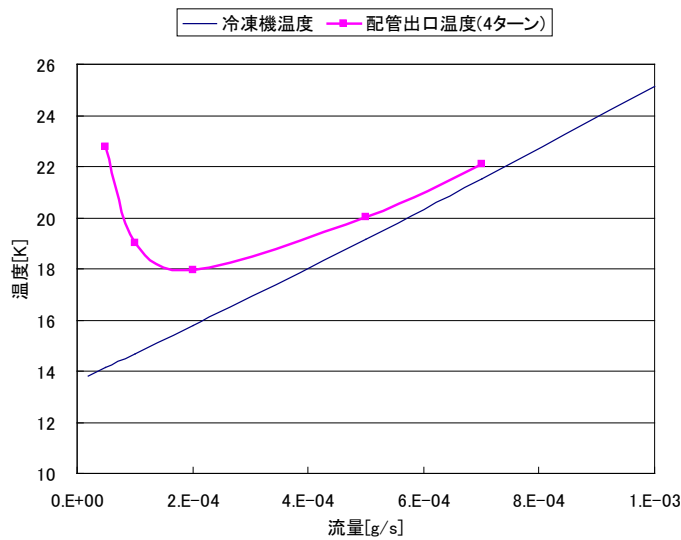


図 2.1.2-3-4 9 W/コイル相当の熱負荷での流量と配管出口温度の関係

(3) 試験用発熱体の構成

試験用発熱体の寸法は実規模コイルの寸法に合わせ表 2.1.2-3-2 の数値とした。また r 、 θ 、 z 方向の等価熱伝導率が 2 GJ 級 SMES コイルに近くなるような構成を考える。2 GJ 級 SMES コイルの材質と等価熱伝導率を表 2.1.2-3-3 に示す。等価熱伝導率の計算は直列の場合は式 2.1.2-3-1 を並列の場合は式 2.1.2-3-2 を用いた。

$$\text{直列の場合} \quad \lambda = \left(\sum_k \frac{l_k}{l} \frac{1}{\lambda_k} \right)^{-1} \quad (\text{式 2.1.2-3-1})$$

$$\text{並列の場合} \quad \lambda = \sum_k \frac{A_k}{A} \lambda_k \quad (\text{式 2.1.2-3-2})$$

θ 、 z 方向の等価熱伝導率は153 W/m Kと大きく、アルミ(A1100)と同程度である。一方、 r 方向の等価熱伝導率はかなり小さくこれを模擬するためにはアルミ板を分割してFRPを挟む構成とする。試験用発熱体の断面形状を図2.1.2-3-5に、この構成での等価熱伝導率を計算した結果を表2.1.2-3-4に示す。

表 2.1.2-3-2 試験用発熱体の寸法

外径	650 mm
内径	400 mm (1.29 mm 幅×160 m 線材 97 ターンと仮定)
厚さ	60 mm

表 2.1.2-3-3 コイルの構成と等価熱伝導率

	材質	厚さ	比率	熱伝導率
線材	ハステロイ TM	0.10 mm	9.1 %	2.80 W/m K
補強材	ハステロイ TM	0.65 mm	59.1 %	2.80 W/m K
安定化材	銅	0.20 mm	18.2 %	833 W/m K
絶縁材	エポキシ	0.15 mm	13.6 %	0.10 W/m K
合計		1.10 mm		

巻線部等価熱伝導率(θ 、 z) 153 W/m K

巻線部等価熱伝導率(r) 0.62 W/m K

表 2.1.2-3-4 試験用発熱体の分割構成と等価熱伝導率

	材質	幅	比率	熱伝導率
アルミ板	A1100	105 mm	84.0 %	200 W/m K
絶縁材	FRP	20 mm	16.0 %	0.10 W/m K

巻線部等価熱伝導率(θ 、 z) 168 W/m K

巻線部等価熱伝導率(r) 0.62 W/m K

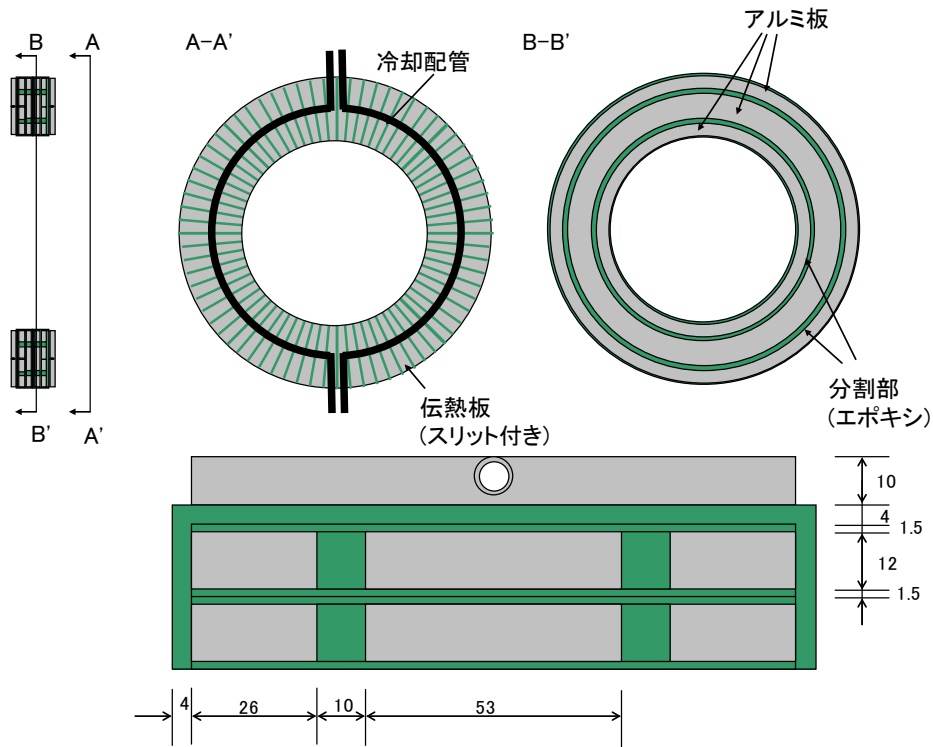


図 2.1.2-3-5 試験用発熱体の断面形状

(4) 実規模コイルの発熱分布モデルと冷却シミュレーション

これまではコイルが均一発熱している場合について検討してきたが、2 GJ 級 SMES コイルには発熱分布が存在する (図 2.1.2-3-6)。

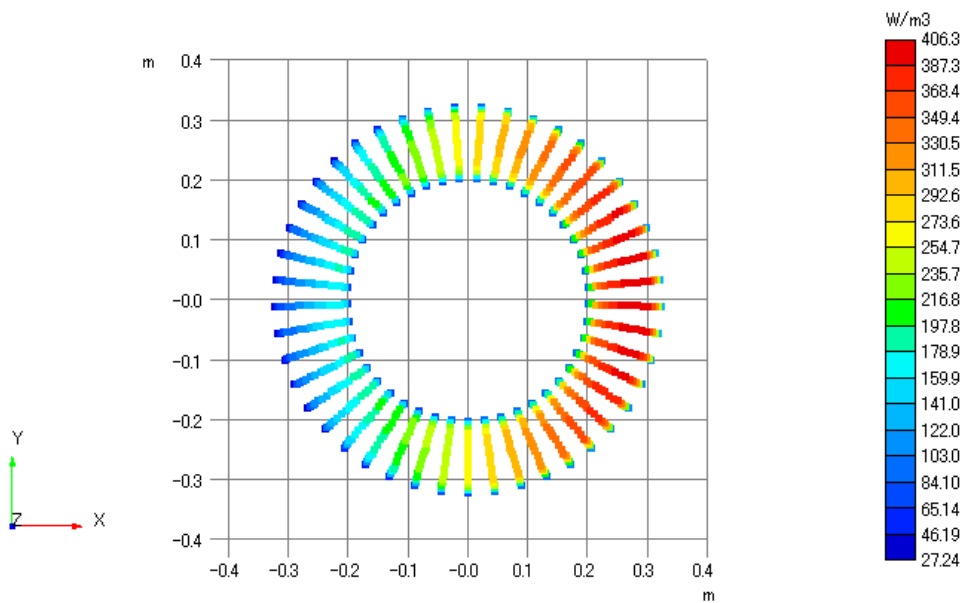


図 2.1.2-3-6 実規模コイルの発熱分布 (外側コイル)

この発熱分布がある実規模コイルに対し冷却シミュレーションを実施した。解析条件を表 2.1.2-3-5 に示す。

表 2.1.2-3-5 発熱分布がある実規模コイルの冷却シミュレーション条件

	C 1
コイル表面熱流束	21.8 W / m ²
配管 1 本当たり発熱量	2.25 W / 配管
配管長	825 mm
配管径	外径φ8 mm、内径φ6 mm
ガス流量	0.56 g / sec
発熱分布	分布

注)ガス流量は 2 GJ 級 SMES コイルにおいて計算上冷却能力が最も高くなる値を採用

解析結果を図 2.1.2-3-7 に示す。

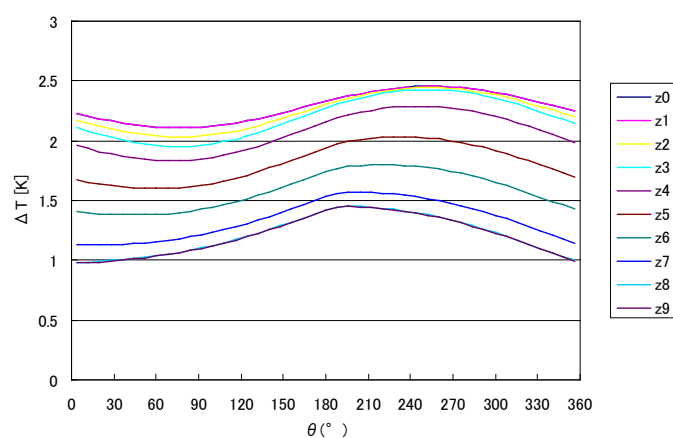


図 2.1.2-3-7 実規模コイルの ΔT 分布 (1 配管当たり発熱 2.25 W)
(最外周部、配管入口温度基準、z0 がコイル内側、発熱分布有り)

(5) 試験用発熱体のヒータ取付け位置

前項の結果を受け、発熱分布を模擬できるようにヒータは周方向に 6 等分配置することとする。取付け位置を図 2.1.2-3-8 及び図 2.1.2-3-9 に示す。

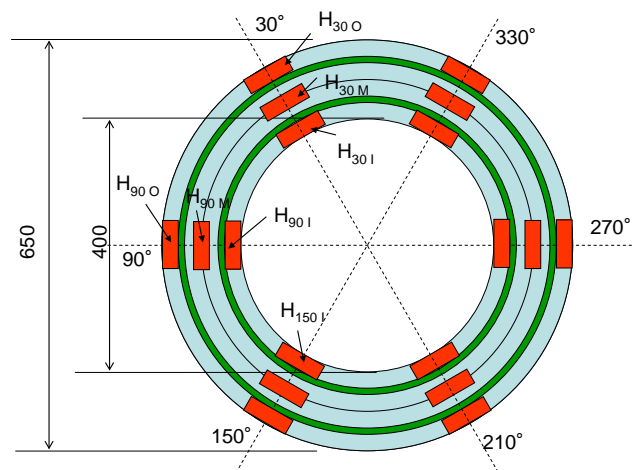


図 2.1.2-3-8 ヒータ取付け位置（平面図）

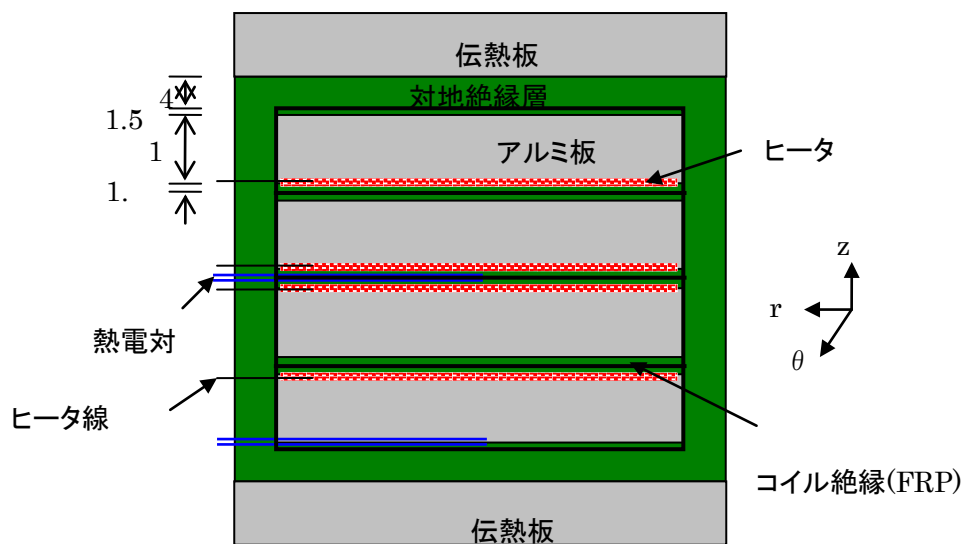


図 2.1.2-3-9 ヒータ取付け位置（断面図）

(6) 伝導冷却試験装置製作

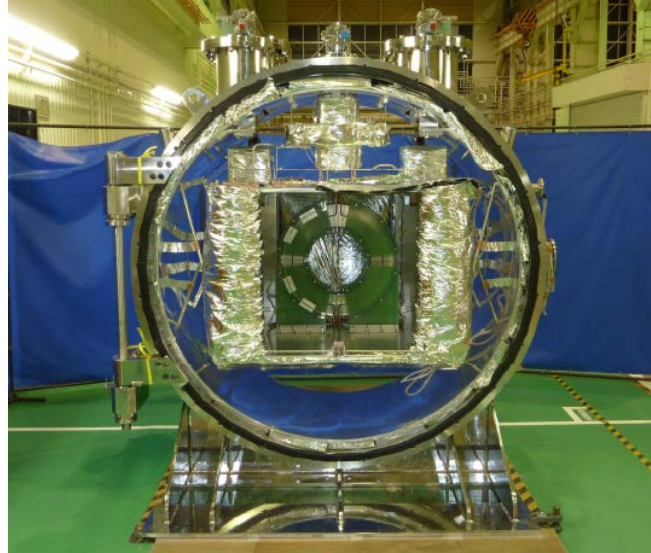
a. 伝熱性能

コイル（試験用発熱体）表面で平均熱流束 3 W/m^2 の熱交換を行い、コイル（試験用発熱体）温度を 20 K 程度に冷却できる能力とした。また、冷却性能を検証するため、以下のア～オの温度を $4 \sim 80 \text{ K}$ 領域において 0.1 K 程度の精度で計測を行えるものとした。

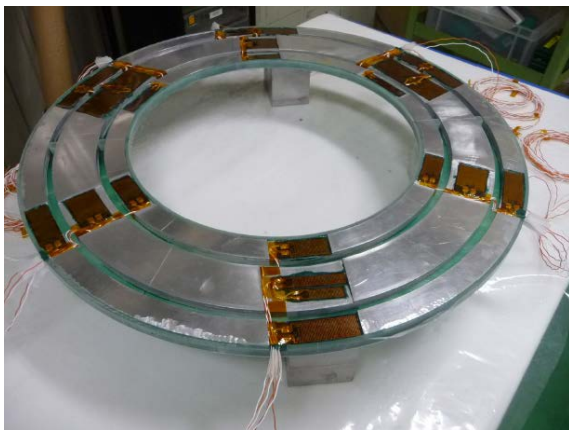
- ア) コイル（試験用発熱体）温度
- イ) コイル（試験用発熱体）－伝熱板間の絶縁層温度
- ウ) 伝熱板温度
- エ) コイル冷却配管内の入口及び出口温度
- オ) 冷凍機冷却配管の入口及び出口温度

b. 絶縁性能

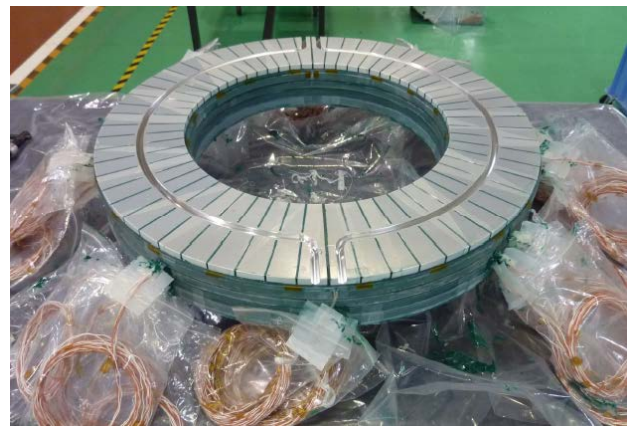
コイル（試験用発熱体）－伝熱板間の電気絶縁性能を 6 kV 以上とする。
これらの性能を満たす伝導冷却試験装置を、図 2.1.2-3-10 のように製作した。



(a) 伝導冷却試験装置全体



(b) 試験用発熱体



(c) 試験用発熱体冷却部

図 2.1.2-3-10 伝導冷却試験装置

(7) 模擬コイルによる伝導冷却試験

図 2.1.2-3-10 の伝導冷却試験装置は、冷凍機で冷却したヘリウムガスを循環させることで、コイルを模擬した試験用発熱体を冷却した。冷凍機－伝熱板間のガス冷却系での伝熱と、伝熱板とコイル内部の伝導冷却系の伝熱特性を測定した。ガス冷却系は循環用コンプレッサ、熱交換器、冷凍機伝熱部、コイル伝熱部、電流リード熱アンカーとそれらをつなぐ配管で構成した。ガス冷却系の測定項目としては、コンプレッサ流量特性、熱交換器効率、各伝熱部の伝熱特性、各部の圧力損失がある。また、伝導冷却系は伝熱板、絶縁層、コイル（試験用発熱体）で構成される。伝導冷却系の測定項目としてはコイル内伝熱特性、絶縁層伝熱特性、伝熱板伝熱特性がある。

伝導冷却試験装置の温度、圧力、流量の計測点を図 2.1.2-3-11 に示す。また、コイルに与えるヒータ入力値を表 2.1.2-3-5 に示す。

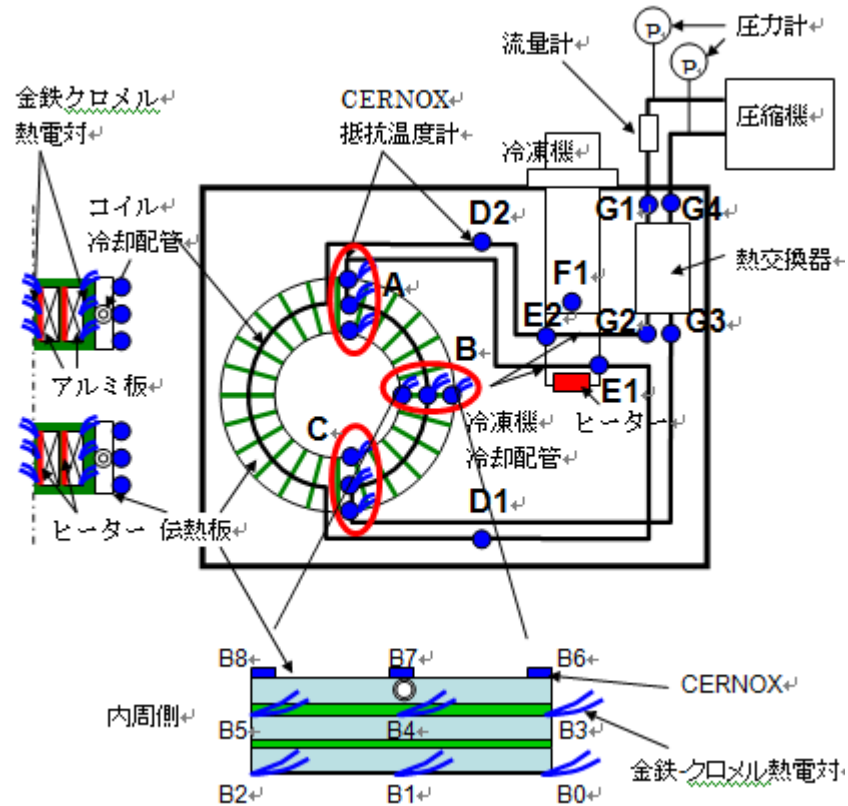


図 2.1.2-3-11 伝導冷却試験装置の計測点

表 2.1.2-3-5 発熱分布を模擬した場合のヒータ入力値 (合計 9 W)

	内側コイル			外側コイル		
	内側:内周	内側:中間	内側:外周	外側:内周	外側:中間	外側:外周
0° -60°	0.009 W	0.023 W	0.014 W	0.084 W	0.306 W	0.125 W
60° -120°	0.009 W	0.023 W	0.014 W	0.084 W	0.226 W	0.125 W
120° -180°	0.009 W	0.023 W	0.014 W	0.084 W	0.306 W	0.125 W
180° -240°	0.009 W	0.023 W	0.014 W	0.153 W	0.500 W	0.227 W
240° -300°	0.009 W	0.023 W	0.014 W	0.200 W	0.575 W	0.227 W
300° -360°	0.009 W	0.023 W	0.014 W	0.153 W	0.500 W	0.227 W

模擬発熱体を使った伝導冷却システム試験装置を運転し、設計通り冷却できているかを評価した。また、模擬発熱体を実規模コイルに置き換え、実規模コイルにおいても冷却性能を確認した。具体的には、まず、コイルを約 20K に伝導冷却した上で、コイルに直流 +13kV を 1 分間、逆極性でも 1 分間印加し、異常ないことを確認し、次に電流リードに外部電源のマルチセル変換器からのケーブルを接続し、コイルを約 20K に冷却した状態で、電源からコイルへの電流を制御しながら通電し、ピーク電流 400A で 10 秒サイクル 100 回以上の繰返し充放電をさせたところ、異常なくコイル充放電できることを確認した。

2.1.2-4 絶縁特性向上に関する検討（中部電力、名古屋大学）

(1) 研究開発の目標

SMES 開発において解決すべき技術課題の一つとして、電気絶縁設計が挙げられる。SMES の電力機器としての基礎性能である耐電圧性能については未解明な部分が多く、実用化に向けての技術的障壁となっている。特に、伝導冷却 SMES では、極低温／真空／固体絶縁物による複雑な絶縁環境が形成される。このような複合絶縁系においては、絶縁破壊の前駆現象としての部分放電（PD）特性の把握が重要となるが、極低温／真空／固体複合絶縁系の PD 特性に関する研究は皆無であると言っても過言ではない。そこで、本研究では、伝導冷却 SMES における超電導コイルの絶縁性能向上を目標として、電界解析によりターン間絶縁及び対地絶縁方法を検討した。さらに、伝導冷却コイルモデルを用いて、PD 開始特性を実験的に評価した。

(2) 研究開発の内容

a. SMES コイルの印加電圧波形

SMES システムは、図 2.1.2-4-1 に示すようにインバータ、チョッパ、超電導コイルで構成され、超電導コイルには図 2.1.2-4-2 に示すような直流電圧とサージ電圧が重畳した両極性繰り返し電圧が印加される。このような複雑な電圧波形が印加される SMES コイルの絶縁性能を評価する際、正弦波交流電圧による絶縁試験が考えられる。これは、SMES コイルの電圧波形がピーク値を持つこと、両極性の繰り返し波形であること等の類似点に基づいている。また、サージ電圧に対する耐電圧が交流電圧に対する耐電圧よりも一般的に高いことを考慮すれば、安全サイドの絶縁性能を確保するという意味においても妥当である。以上のような観点から、本研究では正弦波交流電圧（60 Hz）を用いることとした。

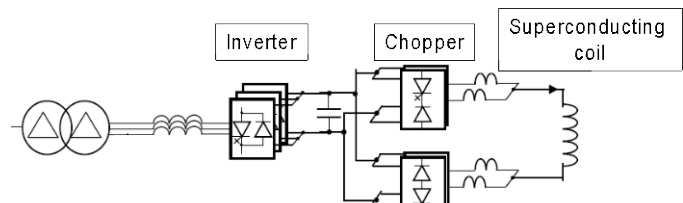


図 2.1.2-4-1 SMES システムの構成

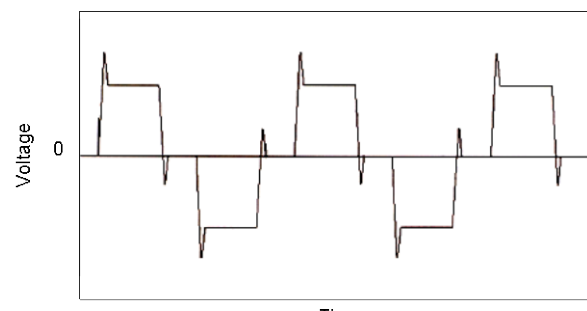


図 2.1.2-4-2 SMES コイルの印加電圧

b. Y系超電導コイルモデルの電界解析

① Y系超電導コイルモデル

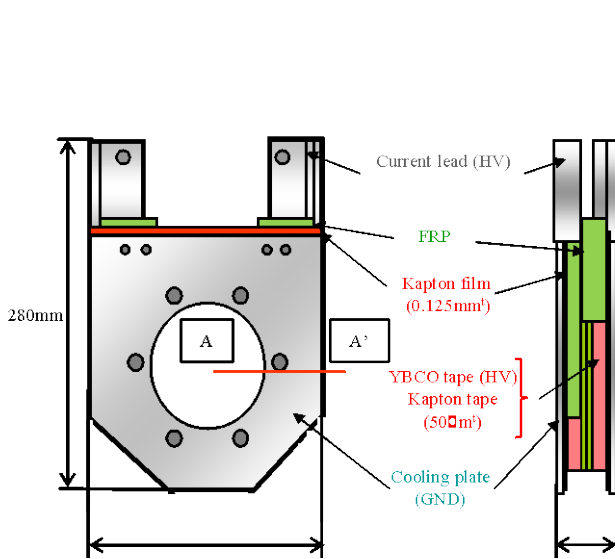


図 2.1.2-4-3 SMES コイルモデル

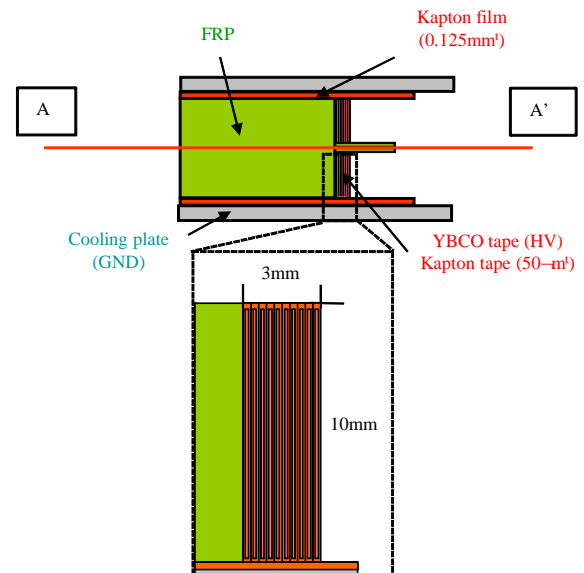


図 2.1.2-4-4 SMES コイルモデルの断面図

Y系超電導コイルモデルの構造を図 2.1.2-4-3 に示す。図 2.1.2-4-4 は図 2.1.2-4-3 の A-A'断面図である。Y系超電導コイルは 10 mm 幅の Y系超電導線材テープを 1 層あたり 10 ターン巻回したダブルパンケーキコイルであり、両側面は冷却板 (Cu) でサンドイッチされた構造である。コイルと冷却板の間は厚さ 0.125 mm のカプトンフィルム、Y系超電導線材テープは厚さ 50 μm のカプトンテープ、ダブルパンケーキの層間絶縁は厚さ 1.5 mm の FRP2 枚を介して絶縁されている。

Y系超電導コイルモデルにおける絶縁特性向上方法として、超電導コイルのターン間絶縁方法の「共巻き」と「ラップ巻き」を検討した。ここで、「共巻き」とはテ

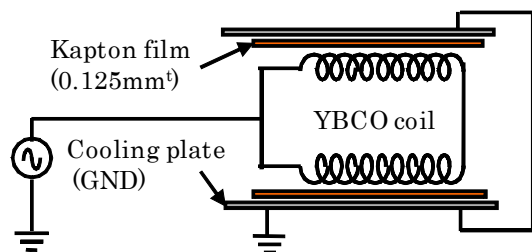
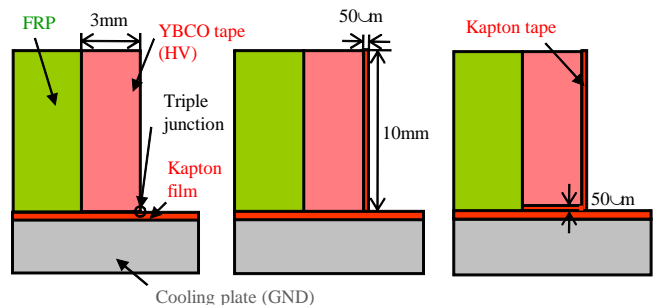


図 2.1.2-4-5 SMES コイルモデルの絶縁構成



(a) Triple junction (b) Laminated insulation (c) Lapped insulation

図 2.1.2-4-6 Y系超電導線材テープの絶縁モデル

ープ導体（Y系超電導線材）と絶縁テープ（カプトン）を重ね合わせて巻く方法である。また、「ラップ巻き」とはテープ導体に絶縁テープを螺旋状に巻きつけてテープ導体を完全に覆う巻き方である。

② 電界解析

供試コイルの絶縁試験において、図 2.1.2-4-5 に示すようにY系超電導線材コイルを高電圧電極として正弦波交流電圧を一括印加し、カプトンフィルムを介して、冷却板を接地する。超電導コイルのターン間絶縁として共巻きを用いた場合、Y系超電導線材テープとカプトンテープとの重なり具合により、Y系超電導線材テープのエッジ部分において高電圧電極（コイル）－固体絶縁物（カプトンフィルム）－真空のトリプルジャンクションが形成されて電界が集中し、耐圧の低い真空側が弱点となり、放電が発生する可能性がある。図 2.1.2-4-6 にトリプルジャンクション近傍領域をモデル化した図を示す。(a)図はトリプルジャンクションが形成された場合のコイルモデル、(b)図は共巻きのコイルモデル、(c)図はラップ巻きのコイルモデルである。各モデルにおいてY系超電導線材テープ（HV側）に電位 $1 \text{ kV}_{\text{rms}}$ を与え、有限要素法により 2次元モデルとして電界解析を行った。

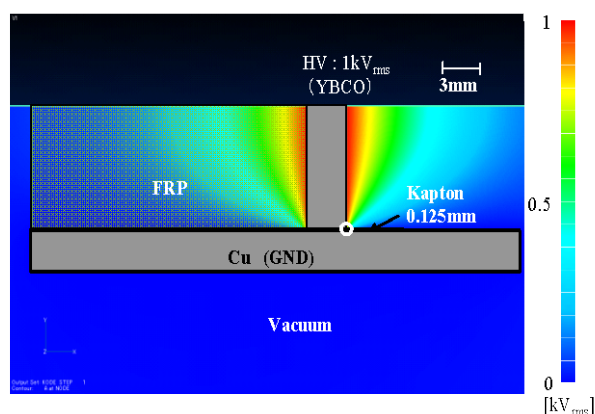


図 2.1.2-4-7 SMES コイルモデルの電位分布

トリプルジャンクションがあるY系超電導コイルモデルの電位分布を図 2.1.2-4-7 に示す。ここで、図中の白丸で囲まれたトリプルジャンクション近傍の電位分布及び電界分布を図 2.1.2-4-8 及び図 2.1.2-4-9 にそれぞれ示す。両図において、トリプルジャンクション近傍において電界が集中しているこ

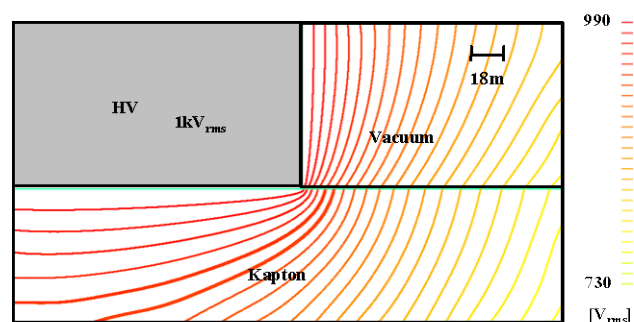


図 2.1.2-4-8 トリプルジャンクション近傍の等電位線

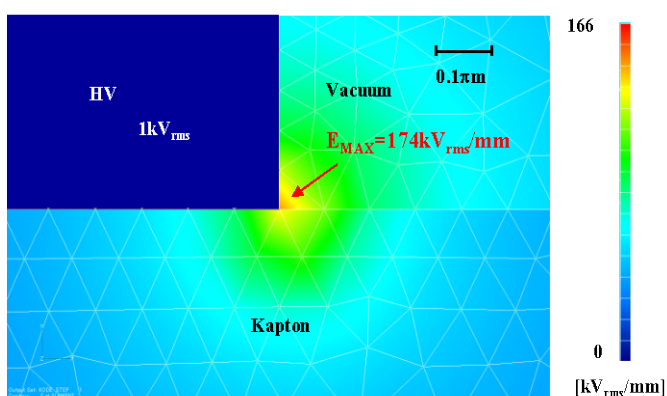


図 2.1.2-4-9 トリプルジャンクション近傍の電界分布

とがわかる。

Y系超電導コイルのY系超電導線材テープ（HV側）－冷却板（GND側）間のカプトンフィルムの厚さを変化させ、図 2.1.2-4-6 の各絶縁モデルにおいて同様の電界解析を行った。Y系超電導線材テープの絶縁方法とカプトンフィルムの厚さ依存性を調べるために、真空中最大電界のカプトンフィルム厚さ依存性を図 2.1.2-4-10 に示す。同図の縦軸は、トリプルジャンクションあり/カプトンフィルムの厚さ 0.125 mm のケースで規格化している。同図より、トリプルジャンクションありのケースと比較して、共巻きモデルでは 15%、ラップ巻きモデルでは 13%にまで最大電界が緩和されることがわかる。さらに、ラップ巻きモデルにおいて、カプトンフィルムの厚さを 1 mm に増加することにより、最大電界が 5%にまで緩和されることがわかる。

以上の電界解析から、超電導コイルのターン間絶縁をラップ巻きにしてトリプルジャンクションの形成を防止し、対地絶縁のカプトンフィルムを厚くすることで最大電界を 5%にまで緩和できることを定量的に明らかにした。このような絶縁方法により、Y系超電導コイルの耐電圧向上が期待される。

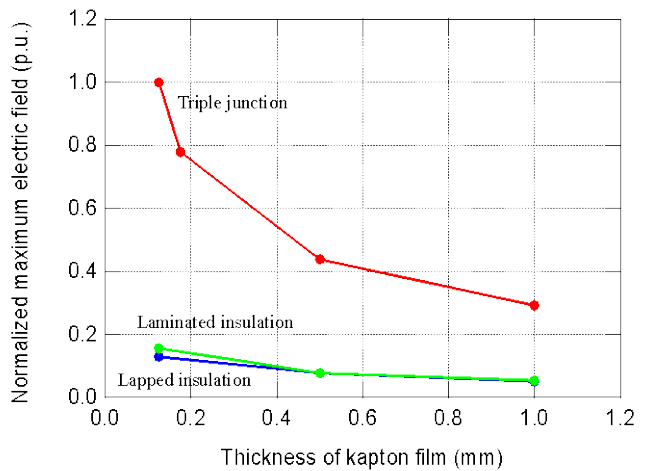


図 2.1.2-4-10 真空中最大電界のカプトンフィルム厚さ依存性

c. Y系超電導コイルモデルの絶縁特性

① 実験方法

本プロジェクトで用いたY系超電導コイルサンプルの外観を図 2.1.2-4-11、実験系を図 2.1.2-4-12 に示す。同図のダブルパンケーキコイルにおいて、コールドヘッド側のコイルをコイル A、反対側のコイルをコイル B とする。冷凍機のコールドヘッドから L 字型の高純度アルミプレート（純度 99.99%以上）2 枚を介してコイル両側面の冷却板に接続し、伝導冷却系を構成した。Si ダイオードセンサを冷却板下部側の左右の 2 箇所及び上部側の 1 箇所に取り付け、冷却過程の温度分布及び温度推移を取得した。

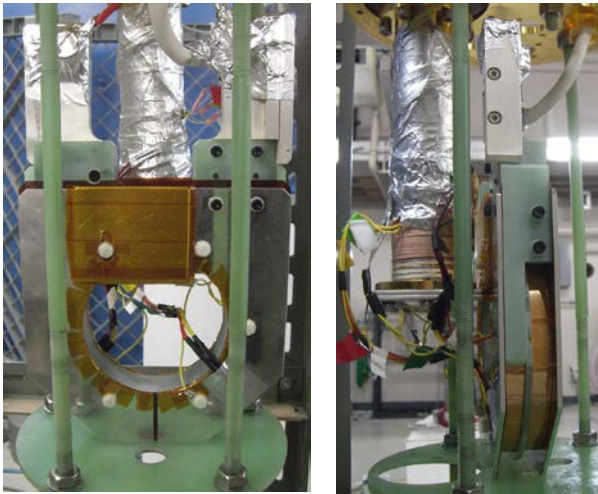


図 2.1.2-4-11 コイルサンプル

交流電圧印加時の部分放電開始電圧 (PDIV) を測定するために構築した実験回路を図 2.1.2-4-13 に示す。交流電源 (60 Hz) を用いて、クライオスタット内に設置したコイルサンプルに課電した。コイルサンプルと冷却板を電氣的に絶縁し、CR 検出回路を介して PD 信号を検出した。PD 検出感度は 40 pC である。

② 実験結果及び考察

ターン間の絶縁方法としてラップ巻を用い、カプトンフィルムの厚さが 0.125 mm の Y 系超電導コイルモデルの伝導冷却特性を図 2.1.2-4-14 に示す。同図より、冷却開始から 10 時間後に各測定点の温度が約 20 K で一定になり、コイル全体が一様に冷却されていることがわかる。

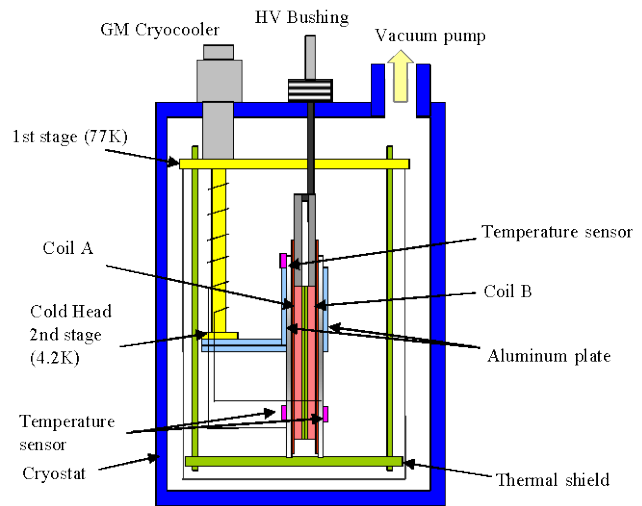


図 2.1.2-4-12 実験系

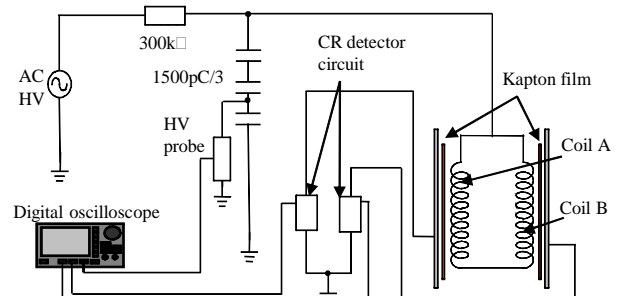


図 2.1.2-4-13 実験回路

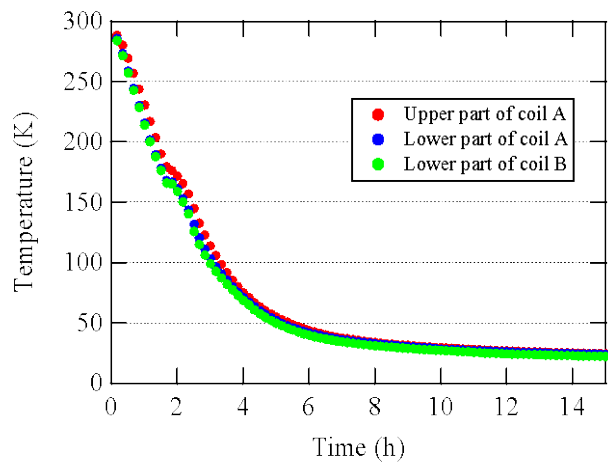


図 2.1.2-4-14 コイルサンプルの冷却特性

供試コイルモデルにおいて、ターン間絶縁方法とカプトンフィルムの厚さをパラメータとして、PDIVを繰り返し測定した結果を図 2.1.2-4-15 に示す。同図には、共巻き/カプトンフィルム厚さ 0.125 mm¹⁾、ラップ巻き/厚さ 0.125 mm、ラップ巻き/厚さ 1 mmにおけるPDIVの電圧印加履歴を示している。同図より、どの

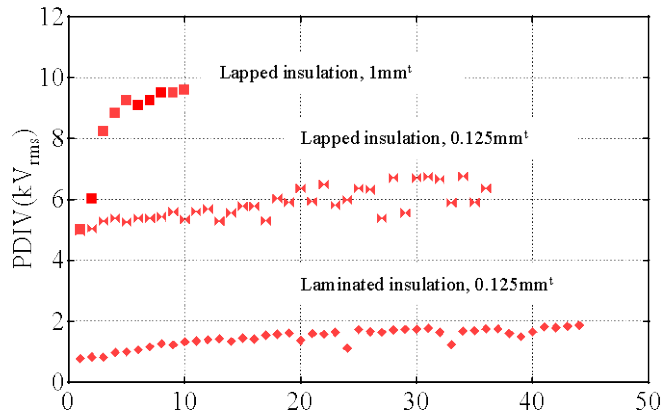


図 2.1.2-4-15 PDIV の電圧印加履歴

ケースにおいても電圧印加回数の増加に伴い、PDIVが向上・飽和していることがわかる。これは真空放電現象特有のコンディショニング効果²⁾によるものと考えられる。PDIVの飽和後の平均値は、共巻き/厚さ 0.125 mmのとき 1.7 kV_{rms}、ラップ巻き/厚さ 0.125 mmのとき 6.3 kV_{rms}、ラップ巻き/厚さ 1 mmのとき 9.5 kV_{rms}であった。すなわち、供試コイルのPDIVは、共巻きからラップ巻きにすることで 3.7 倍、さらにカプトンフィルムの厚さを 0.125 mmから 1 mmにすることで 5.6 倍に向上した。

以上の実験結果から、先に述べたラップ巻きによる最大電界緩和効果、Y系超電導線材テープ (HV側) - 冷却板 (GND側) 間のカプトンフィルムの厚さ依存性を検証することができた。

(3) 具体的な成果

本研究では、伝導冷却 SMES の電気絶縁特性の向上をめざし、電界解析によってラップ巻きによる最大電界緩和効果と電極間の固体絶縁物の厚さ依存性を評価した。また、Y系超電導コイルモデルを用いて絶縁試験を実施し、以下の結果を得た。

- a. 電界解析により、超電導コイルのターン間絶縁方法として共巻きを用いると、トリプルジャンクションありのケースに対して最大電界を 15%、ラップ巻きを用いると 13%にまで緩和できることを明らかにした。さらに、ラップ巻きにしてトリプルジャンクションの形成を防止し、カプトンフィルムを 1 mm に厚くすることで最大電界を 5%にまで緩和できることを定量的に明らかにし、Y系超電導コイルの耐電圧向上の可能性を示唆した。
- b. Y系超電導コイルモデルにおける真空中コンディショニング飽和後の PDIVは、共巻きをラップ巻きにすることで 3.7 倍、さらに電極間のカプトンフィルムを 0.125 mm から 1 mm に厚くすることで 5.6 倍に向上することを明らかにした。

引用論文リスト

- (1)大村、早川、小島、遠藤、平野、長屋、大久保:「伝導冷却 SMES コイルモデルの真空/固体複合絶縁系における電気絶縁特性」、電気学会全国大会、No.5-122 (2009)。
- (2)塩入、上川路、横倉、大島、柳父:「真空ギャップのコンディショニング効果に関する実験的検討」、電気学会論文誌 B、Vol.120、No.10、pp.1343-1349 (2000)。

2.1.2-5 高効率伝導冷却技術の開発 (中部電力、日本大学、核融合科学研究所)

(1) 研究概要

超電導技術の電力機器への応用を妨げている理由として、液体ヘリウム温度の極低温までの冷却が必要なことによる取り扱いの煩雑さ、信頼性の低下や高コストなどが挙げられてきた。酸化物高温超電導体の発見によって、冷却の煩雑さから開放され、その応用が一気に加速するものと期待されている。しかしながら、超電導コイルの運転温度の上昇に伴い、構成材料の熱拡散率の低下により、コイル内で発生した熱を速やかに外部に取り出すことが困難になる等、新たな技術開発課題も明らかとなってきている。そこで、超電導コイルの冷却に新技術を導入することにより、高効率かつ高熱負荷への対応が可能な伝導冷却技術を開発する。さらに、コイル構造に関して安定性、安全性の両面からの詳細な検討を行い、今後の超電導コイルの主流になると考えられる伝導冷却型コイルシステムの設計指針を確立する。また、20~40 K 付近の温度領域における高信頼、高効率な冷凍システムをめざし、スターリング型パルス管冷凍機における 40 K 以下の温度で最適となる低温部構造も併せて検討することを目的とする。

(2) 自励振動式ヒートパイプの極低温での動作特性

a. 固体熱伝導冷却と自励振動式ヒートパイプの比較

固体熱伝導とヒートパイプを用いた冷却方式の違いについて図 2.1.2-5-1 に示す。固体熱伝導 (銅バー) による冷却では、銅バーと加熱端、冷却端の間の温度差 ΔT_{hs} 及び ΔT_{cs} は小さく、大部分の温度差は銅バーの長手方向に生じる。一方、ヒートパイプ冷却では、作動流体とのパイプ壁面との熱伝達+パイプ肉厚方向の熱伝導+加熱端、冷却端での接触熱抵抗による温度差 (ΔT_{hs} 及び ΔT_{cs}) が支配的で、ヒートパイプ内部の作動流体の温度差はほとんど発生しない。従って、熱輸送距離が長くなるほど固体熱伝導に対するヒートパイプ冷却の優位性は高く、熱輸送特性及び時間遅れの両方の観点から明らかである。

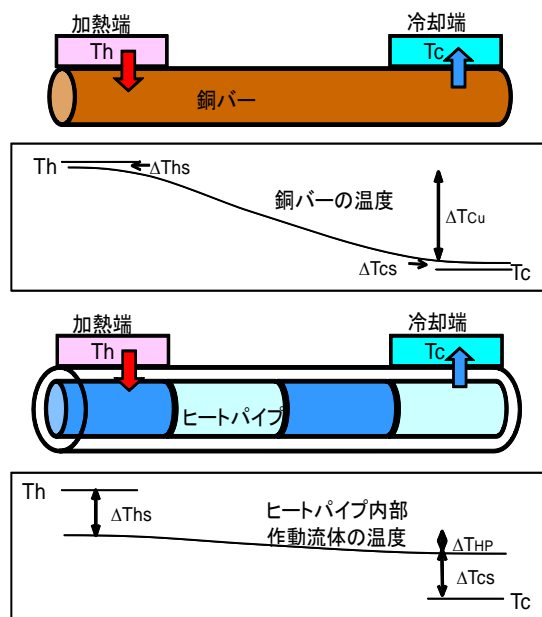


図 2.1.2-5-1 固体熱伝導とヒートパイプ冷却の特性比較

b. 自励振動式ヒートパイプの低温での動作実験

自励振動式ヒートパイプは、ヒートパイプ内に封入した作動流体の気液 2 相の密度変化及び温度勾配によって発生する自励振動を利用した高性能の熱輸送素子である。図 2.1.2-5-2 にその動作原理を示す。パイプを繰り返し折り返し、両端を接続したループ形状のパイプ内に、気液の混合比が 50 % 程度の作動流体を充填し、気体と液体のプラグが縞模様をなした状態とする。加熱部と冷却部の間に温度差が生じると気体と液体の密度差に起因して自励振動が発生する。この自励振動を駆動力として凝縮端から蒸発端に気液混合状態の作動流体を環流させる。自励振動式ヒートパイプは、重力による液体の環流を利用したサーモサイフォン等と違い、設置方向の制限がないこと及び薄いシート状に加工できることから、超電導マグネット内に組込む高熱伝導率の冷却素子として適している。

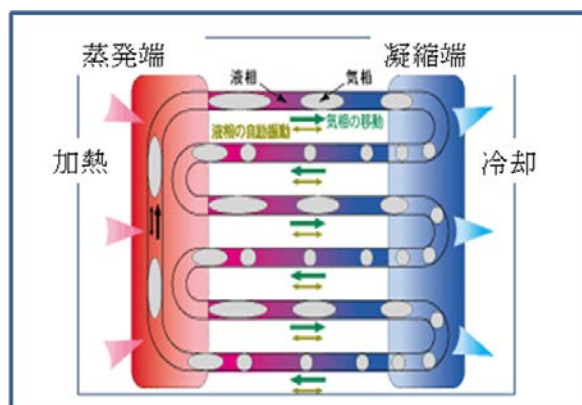


図 2.1.2-5-2 自励振動式ヒートパイプの動作原理

低温での作動流体のリークを防止し、作動流体の種類を変えた実験を可能とする自励振動式ヒートパイプ構造として、図 2.1.2-5-3 に示した外径 1/16 インチ (1.59 mm)、内径 0.78 mm のステンレス配管を 10 回折り返し、両端を 1/16 インチのエッジロック T 字継手に接続している。T 字継手の先端の空いた部分は作動流体の導入部となる。加熱端及び冷却端となる銅ブロックはステンレス配管のピッチに合わ

せた溝加工を施してあり、配管とはハンダで接合されている。加熱端の銅ブロックの裏面にヒータを貼り付け、入熱量の制御を行う。冷却端の銅ブロックは冷凍機のコールドヘッドに接続された冷却銅板に取り付けられ、冷却端の温度を一定の試験温度に保つ。ヒートパイプ全体の形状を保つため、ステンレス製の枠に銅ブロックが固定されている。加熱端、冷却端の銅ブロックには抵抗温度計測素子を取り付けられ、ヒータ入熱量と温度差との関係を測定することにより、ヒートパイプの熱輸送特性が測定可能となっている。

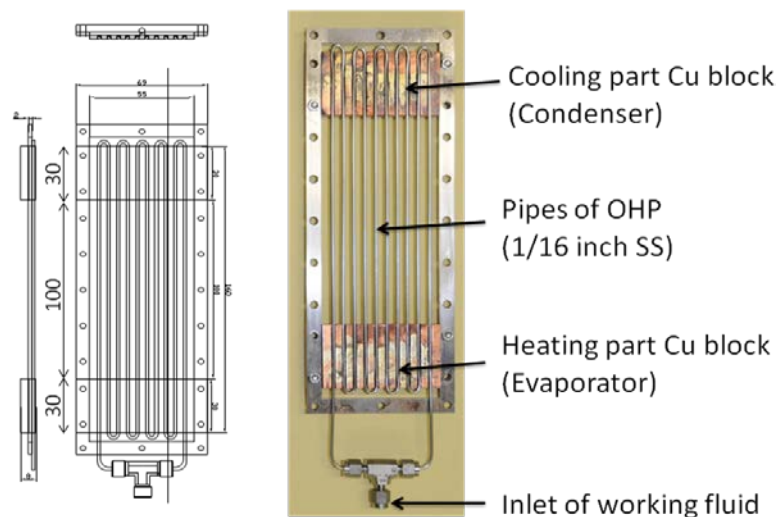


図 2.1.2-5-3 低温動作実験用自励振動式ヒートパイプ

c. 作動流体の種類による動作特性の相違

作動流体を変更することにより、ヒートパイプの動作温度範囲を変更することができる。表 2.1.2-5-1 に作動流体を、窒素、ネオン、水素にした場合の動作温度範囲、液体封入率、入熱量を変化させた場合の等価的な熱伝導率をまとめた。作動流体を適切に選択することにより、17 K～91 K の幅広い温度範囲で、自励振動式ヒートパイプを動作させることが可能である。

表 2.1.2-5-1 自励振動式ヒートパイプ(1/16 インチ)の作動流体の相違による動作特性の比較

作動流体	動作温度範囲 [K]	液体封入率 [体積 %]	入熱量 [W]	等価的な熱伝導率 [W/(m*K)]
窒素	67 - 91	17 - 70	0 - 7	5,000 - 18,000
ネオン	26 - 34	16 - 95	0 - 1.5	1,000 - 8,000
水素	17 - 27	31 - 80	0 - 1.2	500 - 3,500

d. ヒートパイプの設置方向による影響

本来自励振動式ヒートパイプは設置方向の制限がないことが特徴となっている。しかし、図 2.1.2-5-4 に示すように、自励振動を起こしやすい上側冷却一下側加熱のヒートパイプの設置方向に対し、逆向きの上側加熱一下側冷却の方向に設置したところ、自励振動を誘発することができず、自励振動式ヒートパイプの動作が確認できなかった。そこで、図 2.1.2-5-5 に示したように、単体では動作しない上側加熱一下側冷却のヒートパイプと上側冷却一下側加熱のヒートパイプの両端を直列に接続した動作実験を行った。

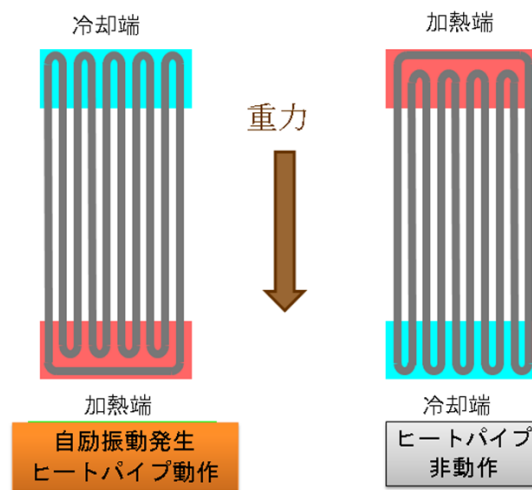


図 2.1.2-5-4 自励振動式ヒートパイプの設置方向の影響

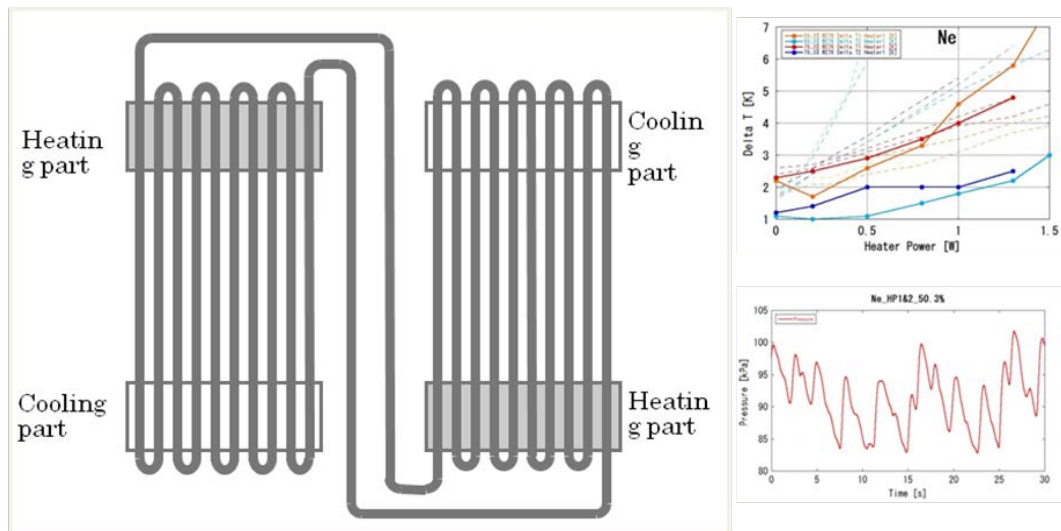


図 2.1.2-5-5 設置方向の異なる自励振動式ヒートパイプの直列接続動作結果

結果として、2つのヒートパイプの直列接続により、上側加熱一下側冷却のヒートパイプに自励振動を誘発することができ、両者を同時に動作させることが可能であることが明らかとなった。

e. 両端冷却中央加熱ヒートパイプの動作実験

超電導マグネット内に組み込む自励振動式ヒートパイプについて、設置方向の相違による動作特性の差が起こり難いことが望ましい。今後、配管径や並列流路の最適化等により、上側加熱一下側冷却のヒートパイプについても動作可能となる可能性もあるが、より確実で安定な動作が見込める方法として、図 2.1.2-5-6 に構造示した両端冷却—中央加熱方式の自励振動式ヒートパイプを開発した。

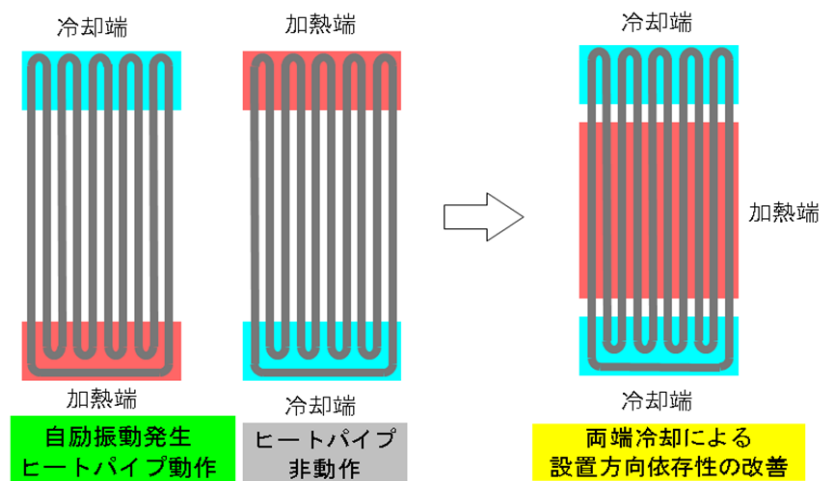


図 2.1.2-5-6 両端冷却型自励振動式ヒートパイプの構造

図 2.1.2-5-7 に低温動作実験用に試作した両端冷却中央加熱の自励振動式ヒートパイプを示す。

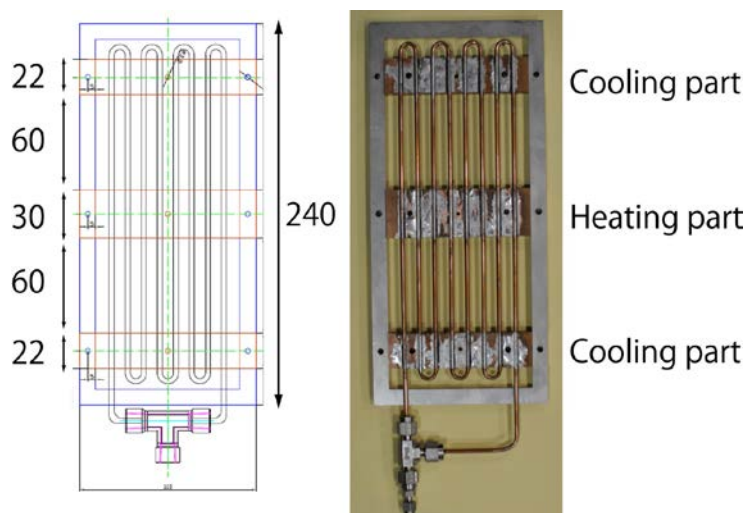


図 2.1.2-5-7 試作した両端冷却型自励振動式ヒートパイプ

図 2.1.2-5-8 に圧力波形を示すように、片側冷却、片側加熱のヒートパイプ単独動作時と同様な安定な圧力振動が得られており、安定な自励振動動作が発生していることが確認できた。

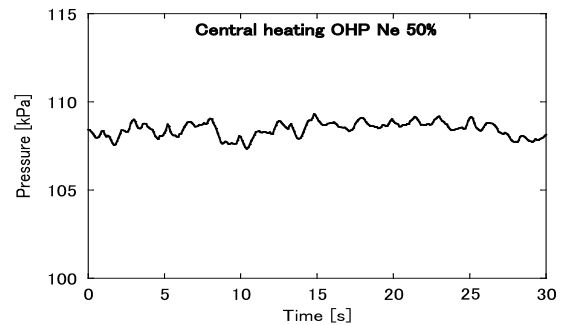


図 2.1.2-5-8 自励振動式ヒートパイプ
圧力波形

(3) 高効率冷凍機システムの開発

図 2.1.2-5-9 に代表的なイナータンス方式パルス管冷凍機に対する多段化の構成例を示す。圧力振動源としては GM 型、スターリング型いずれにも適用できる。

図 2.1.2-5-9(a)の構成では各段のパルス管と蓄冷器とはそれぞれ同一の温度レベルで動作している。すなわち下段パルス管の高温端に熱的に統合されている。このような直列型パルス管による多段化方式の問題点は、下段パルス管内でのエンタルピーの流れで上段パルス管の冷凍仕事の一部を消費することによってのみ取り去らなければならないため、効率の良い多段冷凍機を構成させることが難しいと考えられる。そこで、パルス管用として、(b)や(c)に示すようにパルス管を並列にした多段化方式が新たに提案され、(b)方式の 3 段パルス管では極低温 3.6 K も達成され、並列方式の優位性が実証されるようになった。

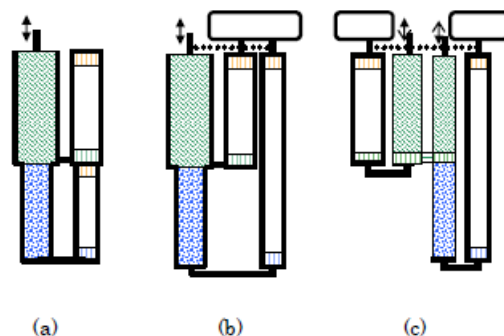


図 2.1.2-5-9 イナータンス方式の多段パルス管冷凍機の構成例
(a)直列型多段方式、(b)並列多段方式 (直列蓄冷材)、(c) 並列多段方式 (並列蓄冷材)
(塗り込められた部分は蓄冷材、両端に色付けしたのはパルス管、両端矢印は圧力振動、白抜き四角はバッファータンク)

本プロジェクトでは、蓄冷材の検討が重要となるため、2 段蓄冷部が比較的容易に切り離され、独立して改変し易い(c)の方式を採用することにした。また、20 K 温度領域における蓄冷材として鉛が有効的なため、図 2.1.2-5-10 のような蓄冷材を

充填する容器を考案し、性能確認できるようにした。これらを冷凍機に組み込み冷凍性能を確認した。

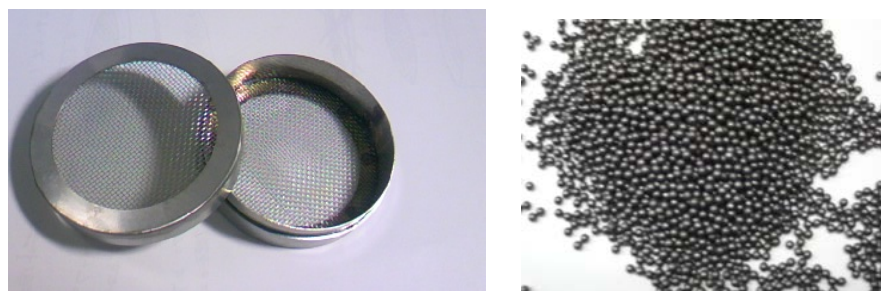


図 2.1.2-5-10 蓄冷材充填容器と充填材（鉛）

2.1.2-6 高効率コイル伝導冷却技術開発のまとめ

20～40 K付近の温度領域において十分な熱伝達を得るため、ガス冷媒配管を一部活用した 3 W/m^2 以上の熱流束を可能とする高熱伝導冷却システムについて検討を行い、伝導冷却システムを検証する試験装置の製作を完了した。平成 22 年度中に、試験を実施し、評価した。また、自励式ヒートパイプを用いた伝導冷却システムにおいて単体での動作確認が完了し、模擬コイルに組み込み、コイル伝導冷却技術の検証を実施した。

2 kV 以上の電気絶縁性能を有する高伝熱コイル構造については、平成 22 年度中に実際に装置に組み込み、絶縁性能を確認した。以上により、高効率伝導冷却性能かつ高耐電圧性能を有する高効率コイル伝導冷却技術について、当初目標を達成した。

2.1.3 SMES 対応線材安定製造技術開発（中部電力、古河電気工業、ISTEC、フジクラ、九州大学、九州工業大学）

高磁界・コンパクトコイルの技術開発に適用可能な、SMES対応Y系超電導線材の安定製造技術の確立を目的とした開発を進める。そのため、金属基板は高磁場中の大電流通電によるフープ力に耐える機械強度を有すること、中間層は薄化され線材の平坦性を維持できることが必要とされる。また、Y系超電導層はSMES運転条件下において必要とされる通電特性を有していること、安定化層はSMES用導体の通電時の安定性と加工歩留りの向上に適していることが肝要とされる。本開発では、前述の要素を兼備したSMESモデルコイル作製に必要なとされる超電導線材の供給を通じて安定製造技術の確立を図る。線材仕様の一例として、「 $I_c=20\text{ A/cm-w}$ (77 K, 3 T)で引っ張り強度 1 GPaを有する 100 mに相当する線材」が挙げられる。この仕様例はSMESモデルコイルの経験磁場とその磁場中における超電導線材の臨界電流によって定義される。図 2.1.3-1 は素線 1 本に 540 A/cm-w (20 K) を通電するモデルコイルにおける超電導線材の経験磁場とその磁場下の超電導線材の臨界電流の推定値を示す。素線 1 本に 540 A/cm-w を通電するコイルにおいて、コイルの磁場により超電導線材の通電電流が 540 A/cm-w 以上であるためには、77 K、3 T で超電導線材表面に平行から 10 度傾斜した磁場中で $I_c=20\text{ A/cm-w}$ 以上であることに相当することになる。

さらに、磁場中の通電特性の改善を図り 3 T の垂直磁場下で $I_c=20\text{ A/cm-w}$ (77 K, @3 T) で引っ張り強度 1 GPa を有する 50 m の線材の安定製造技術開発をめざす。

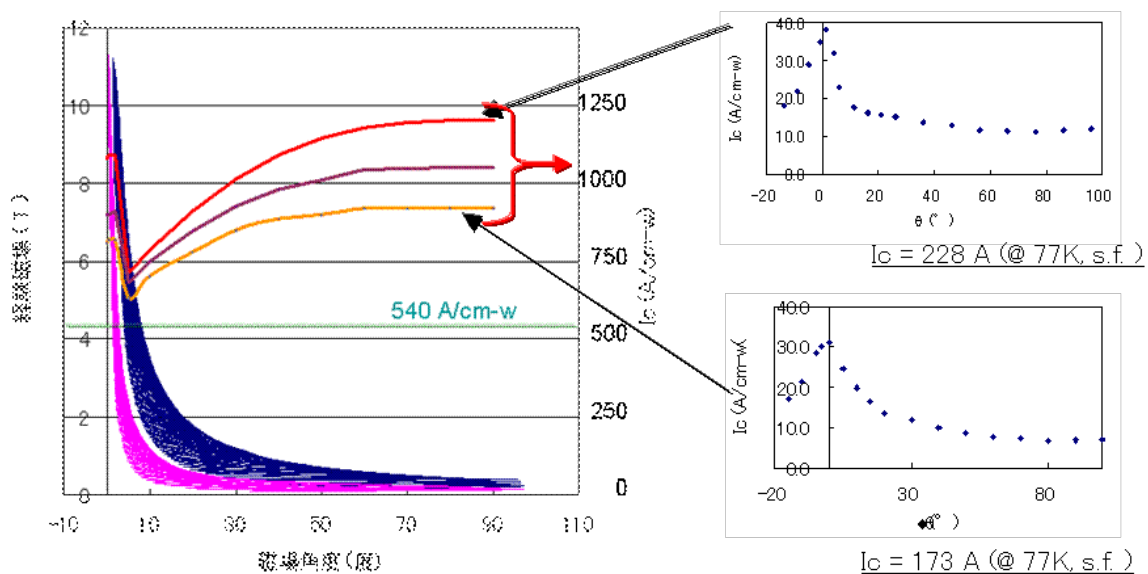


図 2.1.3-1 2 GJ 級 SMES コイルにおける Y 系超電導線材の経験磁場と臨界電流の推定値

2.1.3-1 SMES 対応線材安定製造技術開発 (IBAD-MOCVD 線材)

(1) MOCVD プロセス対応金属基板作製技術開発

SMES コイル用導体に使用される超電導導体は、高磁場中での大電流通電時のフープ応力に耐え得るために、機械的強度の強い線材であることが必要であり、長尺にわたり安定な線材が必要である。また、Y 系積層線材では、中間層や超電導層の剥離の懸念があり、各層の接合性の向上も要求される。これらの観点から、コイル構成技術開発、システムモデル検証に必要な Y 系超電導線材の安定製造技術開発の確立をめざした。

金属基板に関しては、基板表面の平滑性が I_c 値に大きく影響することから、研磨等のプロセス技術の適正化を行い、長尺にわたり表面平滑性が高い基板を作製し、 I_c 値 安定化の見通しを得ることを目標に開発を行った。まず、既存のハステロイTM基板の調査から、基板表面欠陥は、図 2.1.3-1-1 に示すような、基板圧延時の異物の巻き込み、接品との擦れ、圧延ロール表面荒れの転写などであることを突き止め、ロール、接品管理などにより、その改善を図った。また、電解研磨、精密機械研磨などの表面平滑化方法の検討を行い(図 2.1.3-1-2)、精密機械研磨法により、算術平均粗さ (R_a) ≤ 3 nm の表面を持つ短尺基板サンプルを作製した。この短尺基板上に IBAD-GZO 層/PLD-CeO₂ 層/MOCVD-YBCO 層を作製し評価した結果、膜厚 1 μm の YBCO 層で $I_c=300$ A/cm-w(@77 K, s.f.) が得られた。さらに、精密機械研磨法により試作した 200 m 長の表面平滑化基板は、光学検査において全長にわたり著しい欠陥が無いこと、40 m 毎に切り出した試料基板に IBAD-GZO 層/PLD-CeO₂ 層/MOCVD-YBCO 層を形成し評価した結果、いずれの試料も $I_c = 250$ A/cm-w(@77 K, s.f.) 以上を膜厚 1 μm の YBCO 層で達成できることが確認された。この結果から長尺に亘り安定な特性を有する超電導線材を作製するための基板作製技術の見通しを得た。この知見を基に、平成 20 年度後半より長尺基板の作製を行った。図 2.1.3-1-3 に基板表面性状の一例として、精密機械研磨前後の基板表面の原子間力顕微鏡(AFM)像を示す。表 2.1.3-1-1 に平成 20 年度及び 21 年度における基板の作製結果を示す。作製本数を重ねるに従い、圧延後、及び平滑化後の表面粗さ (R_a) が改善される傾向にある。また、図 2.1.3-1-4 に基板の応力-伸び曲線を示す。基板強度は 0.2 % 耐力で 1.6 GPa 程度が安定に得られた。

次に、研磨によって平滑化したハステロイTM基板の超電導線材作製への適用を検討した。非研磨ハステロイTM基板を用いた超電導線材の I_c 値分布は、図 2.1.3-1-5 に一例を示すように低 I_c 値箇所が頻繁に出現し、高 I_c 値箇所も少ない。一方、研磨したハステロイTM基板を使用することで到達 I_c 値が向上し、かつ低 I_c 値箇所も減少させることが可能であることが判明した。その結果、図 2.1.3-1-6 に示すような高 I_c ・長尺線材を平成 20 年度に作製した。図 2.1.3-1-5 および図 2.1.3-1-6 に示されるように同じ中間層構造全長 (PLD-CeO₂ (450 nm) / IBAD-GZO (500 nm) / IBAD -YNbO₄ (30 nm)) であっても、平滑化基板を使用すると長尺線材において

200 A/cm-w(@77 K, s.f.)以上の I_c 値が得られ、金属基板の平滑化により特性向上と均質化が図られることが確認された。

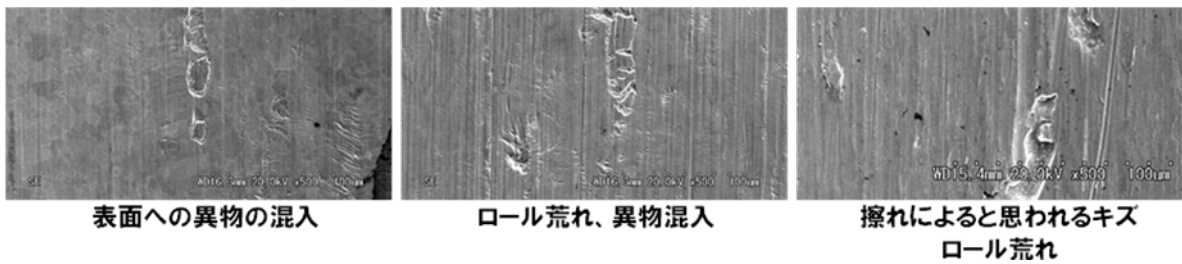


図 2.1.3-1-1 従来基板における表面欠陥の例

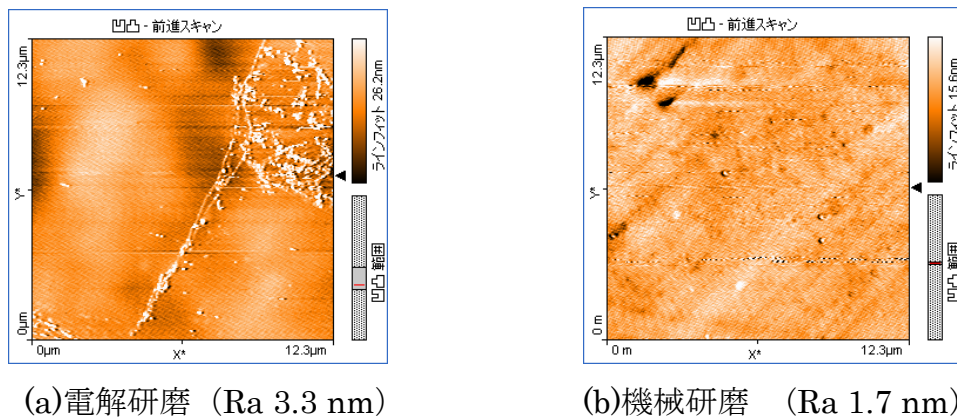


図 2.1.3-1-2 各種研磨法における基板表面

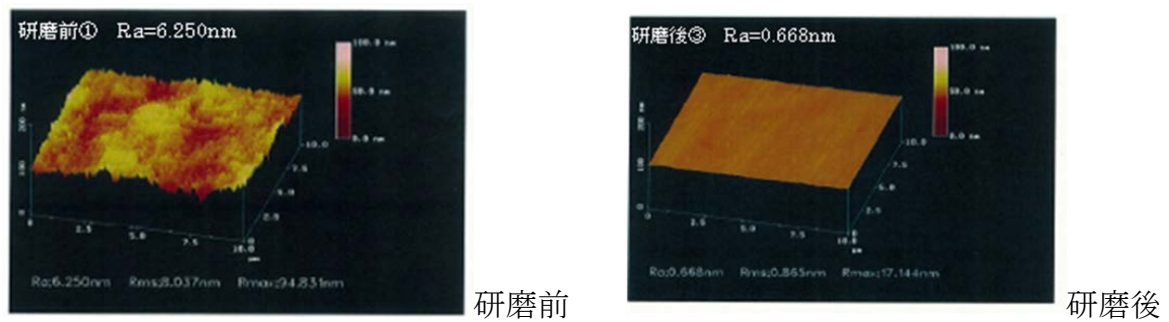


図 2.1.3-1-3 精密機械研磨前後における基板表面の原子間力顕微鏡 (AFM) 像

表 2.1.3-1-1 平滑化基板の作製結果

作製期間	作製量の和 (m)	平滑化前の基板の Ra (nm)		平滑化後の基板の Ra (nm)	
		先頭	後端	先頭	後端
平成 20 年度	1364	4.8-13.7	5.3-12.1	1.1-2.3	1.1-2.9
平成 21 年度	6238	3.8-11.7	4.4-11.9	0.7-1.7	0.7-2.0

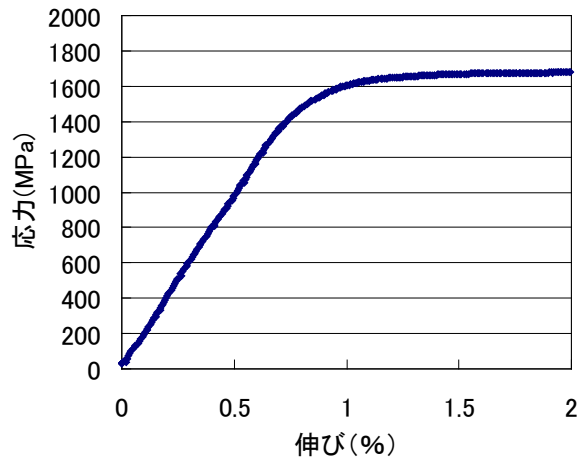


図 2.1.3-1-4 基板の応力-伸び線図 (室温)

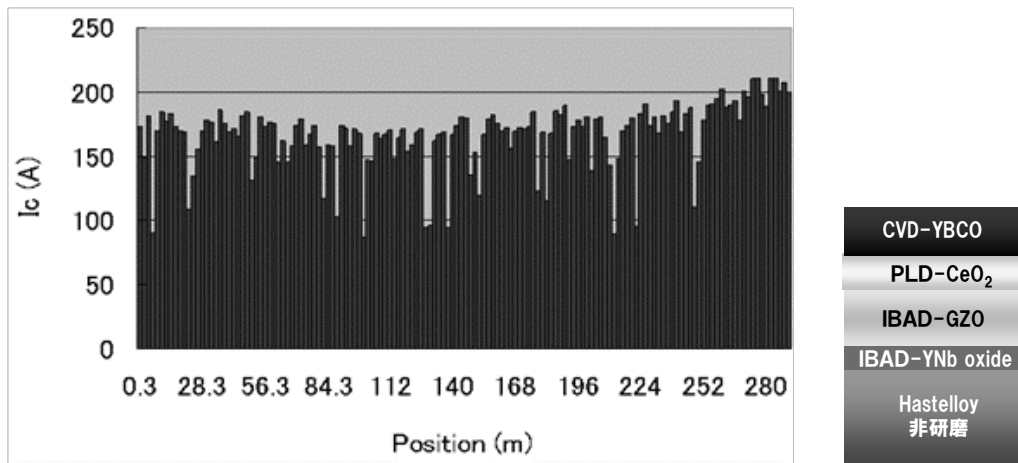


図 2.1.3-1-5 非研磨ハステロイ™基板を用いて作製したMOCVD線材の I_c 分布の一例

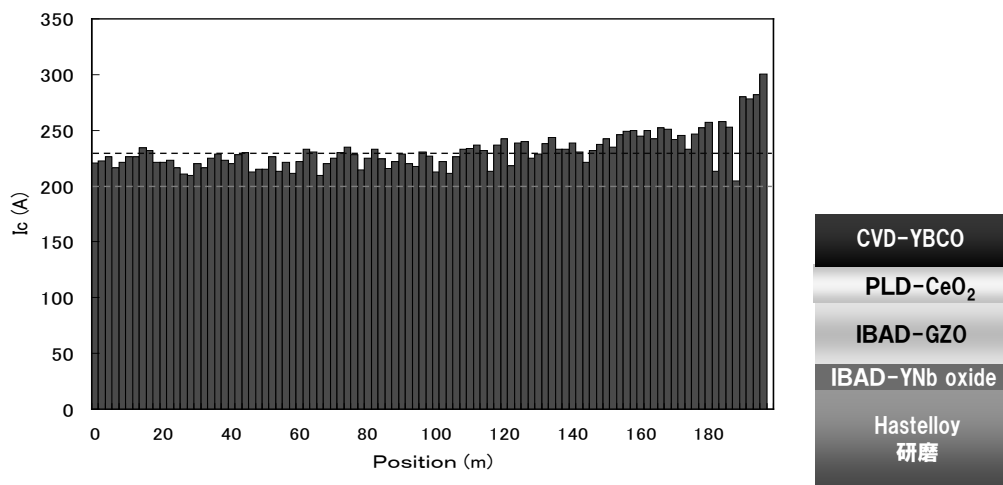


図 2.1.3-1-6 研磨ハステロイ™基板を用い作製したMOCVD線材の I_c 値分布の一例

(2) MOCVD による超電導層形成の安定化

MOCVD による超電導層形成では、原料ガスとキャリアガス、酸素ガスのガス流経路の形状を適正化するために平成 20 年度に MOCVD 装置の改造として、図 2.1.3-1-7 に示すようなガス流のバランスシステムを 3 基の 12 段 MOCVD ユニットに設置した。12 段 MOCVD ユニートを 3 基連結した MOCVD 装置では、1 つのユニットの真空状態の変動が他のユニットの真空も変動させたり、ガス流経路を歪ませるなど、相互にユニットが影響することが問題であった。ガスバランスシステムを MOCVD ユニット間で動作させることで、雰囲気制御時のユニット間の連動した真空の変動のような相互の影響が抑制されるので、単独のユニットを各々制御することで複数のユニットの同時運転が可能となった。



図 2.1.3-1-7 ガスバランスシステム

次に、平滑化基板を用いて複数の 12 段 MOCVD ユニートを使用した長時間成膜を行い、超電導層の成膜サイクルの高速化と長時間成膜に伴う特性低下の要因の把握を図った。図 2.1.3-1-8 に示すように局所的な低 I_c 値箇所を有する線材の超電導層の表面を、銀安定化層を除去して観察したところ原料ガスの導入ノズルと似た形状の変色領域が観察された。変色箇所は図 2.1.3-1-9 に示すように、正常箇所と比較して粒状の組織になっており、銅などの元素の偏析が確認された。変色領域がノズルに似た形状であることから、気化器もしくは原料配管からの噴出によって低 I_c 値箇所が発生したと推察された。有機溶剤に有機金属原料を溶解させた液体原料を気化させる際、不適正な気化温度では、溶剤の優先蒸発等で原料の析出や分解が生じる。原料ガスの噴出防止のため、気化器の原料導入部での急激な溶剤の蒸発を抑制し、原料配管までに完全に気化するように気化器内に温度傾斜を設定し原料の気化の適正化を推進した。その結果、図 2.1.3-1-10 に示すように高 I_c 線材を作製した。線材の焼損防止のため通電は 205 A までとした。中央部のハンドリングミスにより線材に折れが生じた箇所を除いて、2m の電圧端子間距離で測定した際の I_c 値が 150 A/cm-w (@77 K, s.f.) 以下に低下することは無く、均質性が向上したことを確認した。

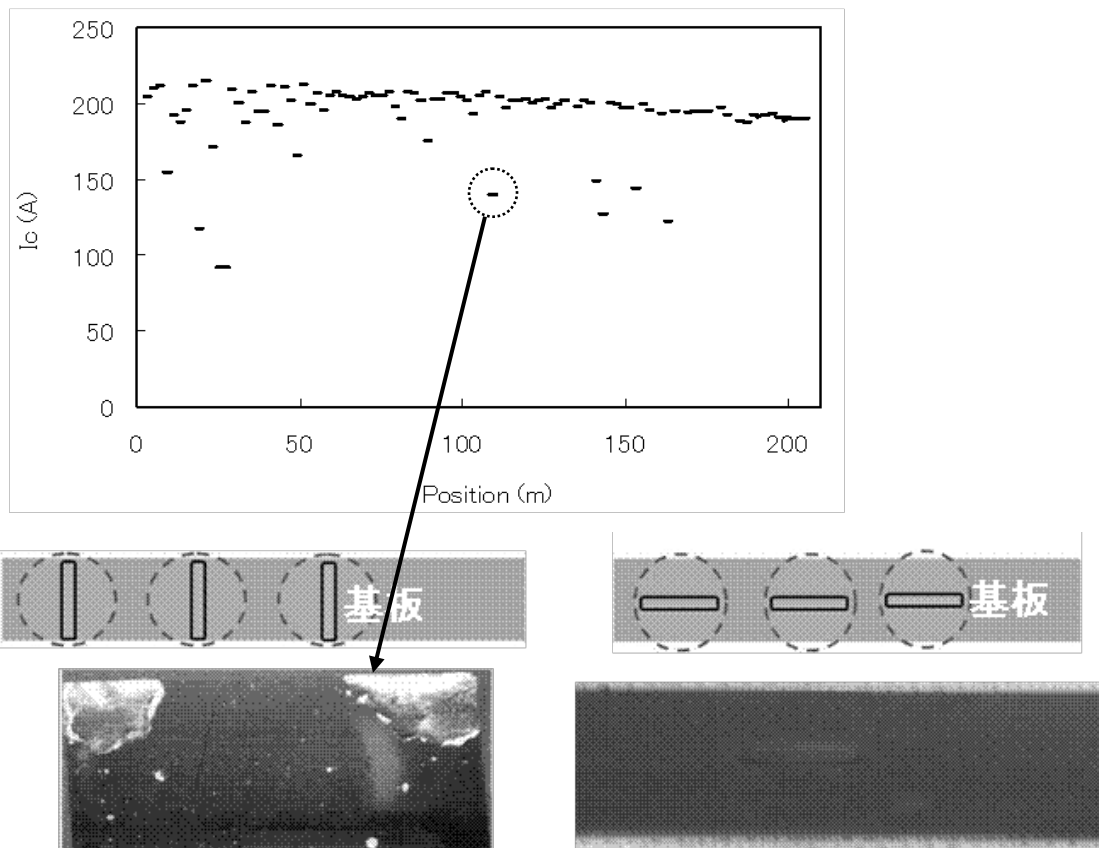


図 2.1.3-1-8 原料ガスの導入ノズルと超電導層の変色領域の形状

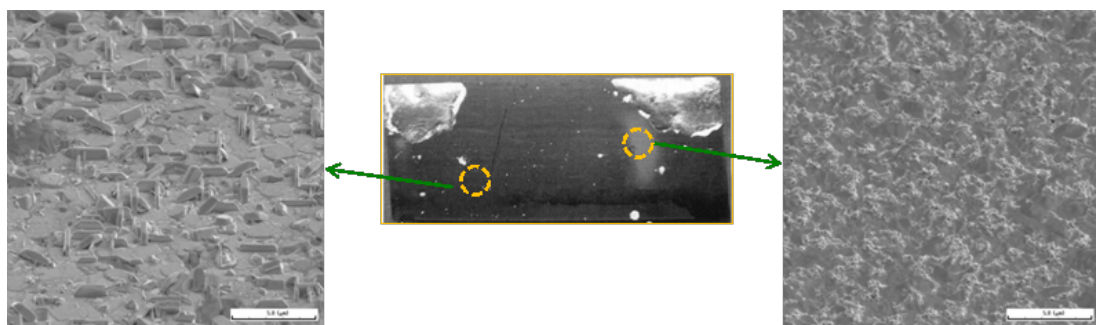


図 2.1.3-1-9 超電導層の正常領域(左)と変色領域(右)の表面観察結果

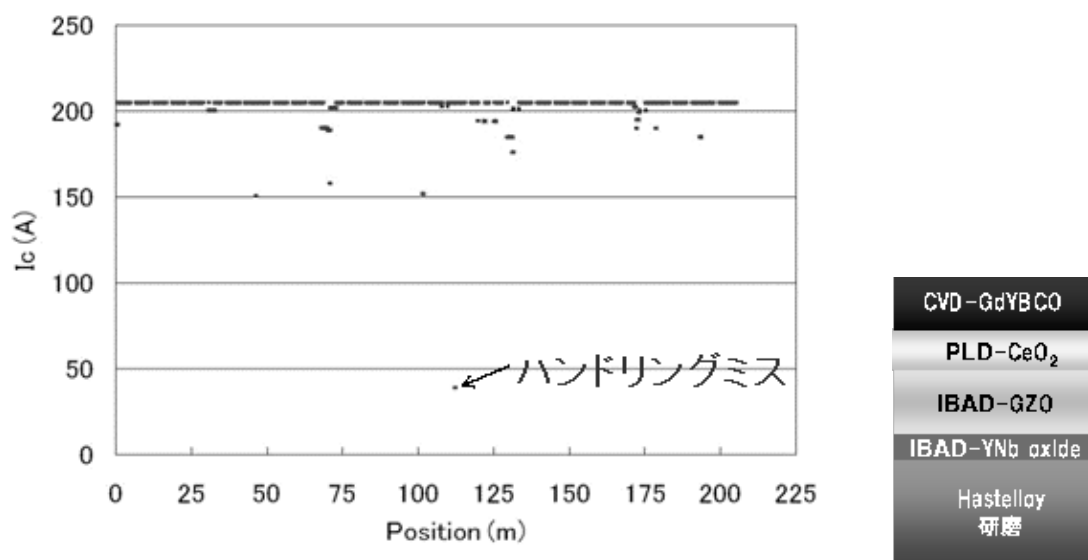


図 2.1.3-1-10 気化器及び配管の温度を調整して作製したMOCVD線材の I_c 分布例

また、平滑化基板を用いて磁場中通電特性の向上のため、Y-Gd混晶系の超電導層の厚膜化による高 I_c 化を検討した。MOCVDプロセスに混晶系を適用すると、厚膜化時の a 軸成長結晶粒の生成が抑制される傾向が、X線回折およびSEMによる表面観察の結果から確認され、 I_c 膜厚依存性も図 2.1.3-1-11 に示すように、 I_c の増大が厚膜化しても維持される傾向にあった。膜厚 $1.5 \mu\text{m}$ の混晶系超電導層の短尺試料では $I_c=390 \text{ A/cm-w}(@77 \text{ K, s.f.})$ という高い通電特性を得、さらに図 2.1.3-1-12 に示す磁場中特性 ($77 \text{ K, } B \perp \text{テープ線材面}$) の評価結果を得た。磁場 3 T における I_c 値は $20 \text{ A/cm-w}(@77 \text{ K, } 3\text{T.})$ であり、磁場中超電導特性向上の指針を得た。

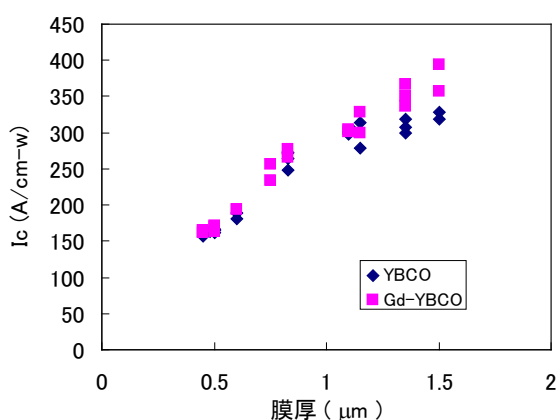


図 2.1.3-1-11

平滑化基板上に MOCVD で形成した超電導層の膜厚依存性

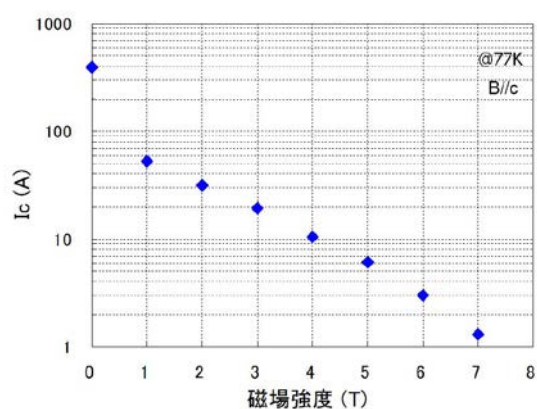


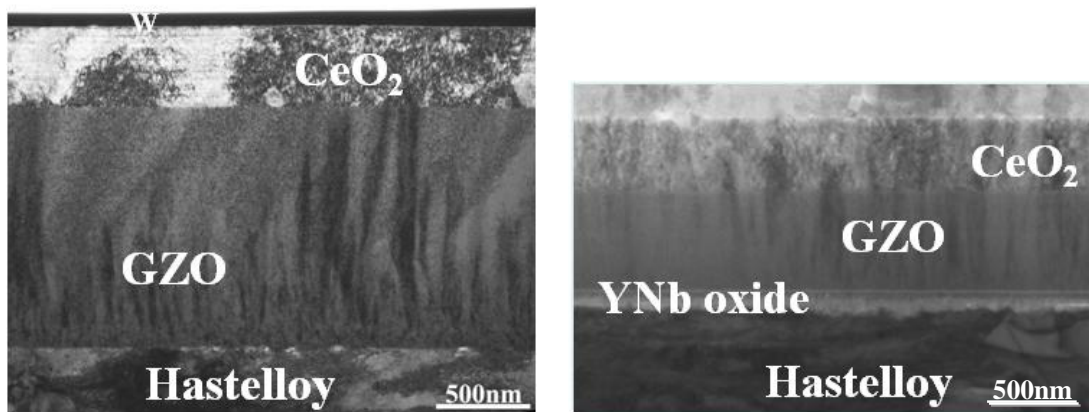
図 2.1.3-1-12

平滑化基板上に MOCVD で形成した Gd-YBCO 層の磁場特性

(3) MOCVD プロセス対応中間層作製技術開発

MOCVD による超電導層形成では、中間層に関しては、SMES 用超電導コイルにおいて、超電導線材に必要とされる長尺性、平坦性を有する中間層を作製することによって、製造工程と線材品質の安定化を検討した。

線材の平坦性の保持には、IBAD中間層を薄化する必要があり、かつIBAD中間層の薄化は中間層の作製速度の増大につながる。IBAD中間層は従来のGZO層のみの構造から、GZO層を主体としてY-Nb複合酸化物を組み合わせた構造で薄化を図り、長尺基板を作製した。図 2.1.3-1-13 に両者の構造の違いを示す。また、金属基板は当初、非研磨の Hastelloy™ を使用していたが、研磨した Hastelloy™ 基板を用いた短尺試験の結果で通電特性の向上が確認できたため、研磨基板を使用した開発に変更した。表 2.1.3-1-2 に作製した基板の結晶粒の配向度をまとめた。基板前・後端のIBAD中間層の $\Delta\phi$ が 17 度以下で安定して得られており、同様に PLD-CeO₂ キャップ層の $\Delta\phi$ も基板前後端で 6 度以下に制御されているので、安定製造に貢献し得るものと考えた。



従来の IBAD-GZO 中間層

Y-Nb 酸化物を用いた IBAD-GZO 中間層

図 2.1.3-1-13 Y-Nb 複合酸化物を用いて薄化した IBAD-GZO 中間層構造

表 2.1.3-1-2 GZO を主体とした IBAD 基板の作製結果

作製期間	構造	作製量の和(m)	$\Delta\phi$ (GZO層)		$\Delta\phi$ (PLD-CeO ₂ 層)	
			先頭	後端	先頭	後端
平成20年度	GZO/非研磨 Hastelloy	373	11.2 - 12.7	10.9 - 12.8	3.4 - 4.8	3.2 - 4.8
	GZO/YNbO/非研磨 Hastelloy	1,763	12.0 - 15.8	13.4 - 16.9	4.3 - 5.4	4.4 - 5.7
	GZO/YNbO/研磨 Hastelloy	967	11.4 - 14.3	10.9 - 15.5	3.3 - 4.1	2.9 - 3.7
平成21年度	GZO/YNbO/非研磨 Hastelloy	1,578	11.0 - 16.7	12.4 - 16.9	3.8 - 5.8	4.0 - 5.9
	GZO/YNbO/研磨 Hastelloy	3,227	10.2 - 14.6	11.9 - 15.2	2.6 - 3.4	3.8 - 4.5


IBAD 基板上的キャップ層に関しては PLD による CeO₂ キャップ層形成だけでなく、スパッタを用いて、高速かつ安定な作製技術の検証を進めた。まず、スパッタ法による CeO₂ キャップ層と IBAD 層の界面接合性を確保するため、折り曲げ破断に

においても、CeO₂キャップ層とIBAD層との剥離が認められず、CeO₂キャップ層とIBAD層の接合性が確保される成膜条件を確認した。次に、図 2.1.3-1-14 に示す様に種々のIBAD基板上でCeO₂キャップ層厚と、CeO₂キャップ層の $\Delta\phi$ を検討することにより、平滑化基板上、CeO₂キャップ層厚 200 nmにおいて、 $\Delta\phi \leq 6$ 度の見通しを得た。これにより、1 μ m厚のYBCO層成膜において $I_c = 300$ A/cm-w(@77 K, s.f.)の結果を得た。さらに、スパッタ法によるCeO₂キャップ層成膜の高速化を行うため、複数ターゲット化およびReel to Reel成膜のマルチターン化の検討を進めた。マルチターン成膜における影響及びレーン間における特性分布を検討し、CeO₂キャップ層成膜の安定性、中間層の接合性に問題がないことを確認した。この結果から、複数ターゲット化およびマルチターン化により、CeO₂キャップ層厚 200 nmにおいて成膜速度 10 m/hの高速成膜が可能であることを確認した。スパッタによるCeO₂キャップ層の長尺成膜の結果の例を図 2.1.3-1-15 に示す。平滑化基板上において $\Delta\phi = 6$ 度が安定に得られている。スパッタ法を用いたCeO₂キャップ層に関しては、平成 20 年度に総量 983 mを作製した。

さらに、中間層の安定性の向上を図るため、GZO層よりIBAD中間層の薄化が可能なIBAD-MgO系中間層の導入を、ISTECの協力の下、推進した。IBAD層直上へのCeO₂キャップ層形成よりも、IBAD層とCeO₂キャップ層の間へLMO層を導入した構造の方が、 $\Delta\phi$ が 5 度程度のCeO₂キャップ層が安定に二軸配向することを確認した。表 2.1.3-1-3 に中間層の構造と酸化物キャップ層 (PLD-CeO₂) の結晶粒配向を作製結果のまとめとして示す。いずれのPLD-CeO₂酸化物キャップ層の $\Delta\phi$ も基板前後端で 5 度以下に制御されており、結晶粒配向の安定性が示された。また、PLD-CeO₂酸化物キャップ層の表面をAFMにより観察した結果、図 2.1.3-1-16 に示すように、IBAD-MgO層上では欠陥の発生が比較的抑制されていることが確認された。

表 2.1.3-1-3 IBAD-MgO層上のPLD-CeO₂キャップ層の配向

試料 No.	基板長 (m)	$\Delta\phi$ (LMO層)		$\Delta\phi$ (PLD-CeO ₂ 層)	
		先頭	後端	先頭	後端
1	205	—	—	3.73	4.63
2	213	13.7	13.8	4.17	2.68
3	223	14.6	13.5	4.43	3.73
4	222	16.6	18	3.93	3.64



スパッタ法によるCeO₂キャップ層形成においては、GZO中間層と同等の条件では長尺において特性の低下が生じたが、成膜条件の適正化により、図 2.1.3-1-17 に示す様に $\Delta\phi = 5$ 度程度の安定した長尺成膜が可能となった。この、より薄化したIBAD-MgO(LMO/CeO₂)層に関しては、平成 22 年度までに「2GJ級高磁界・大電流コンパクトコイル構成技術開発」に提供するため、総長 2.4 km程度作製した。

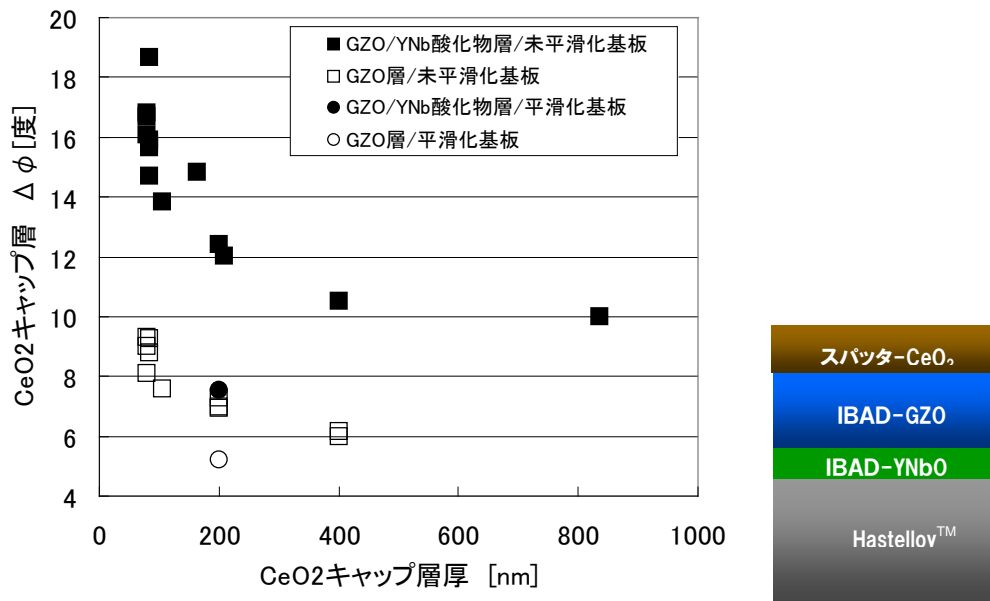


図 2.1.3-1-14 種々のIBAD基板上でCeO₂キャップ層厚と、CeO₂キャップ層のΔφの比較

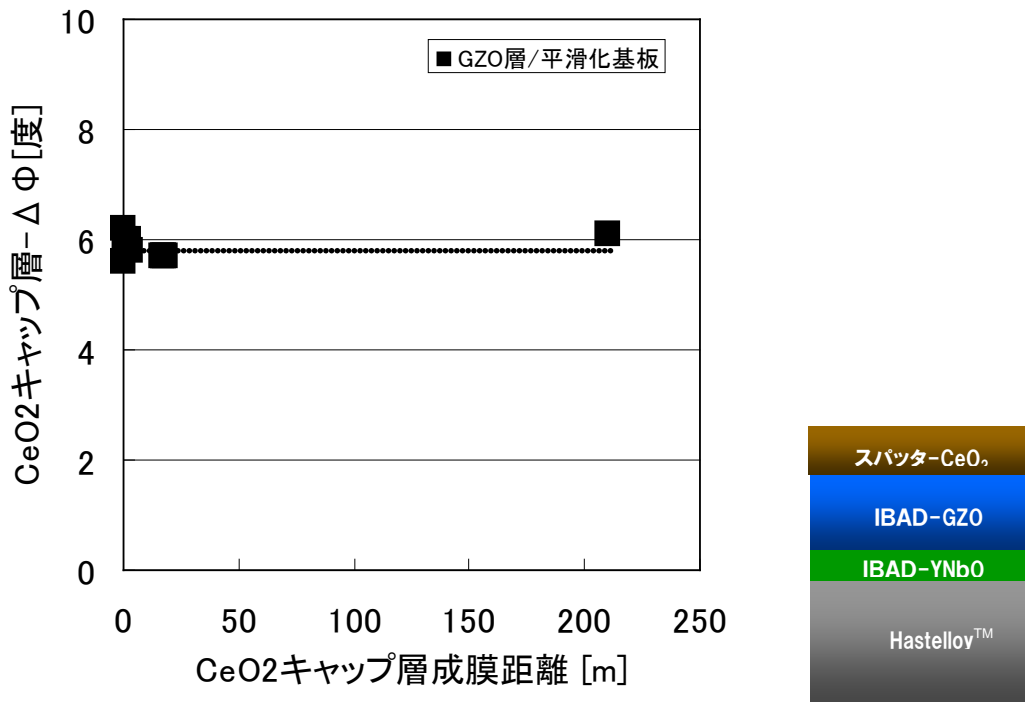


図 2.1.3-1-15 スパッタ法によるCeO₂キャップ層長尺成膜結果 (IBAD-GZO層上)

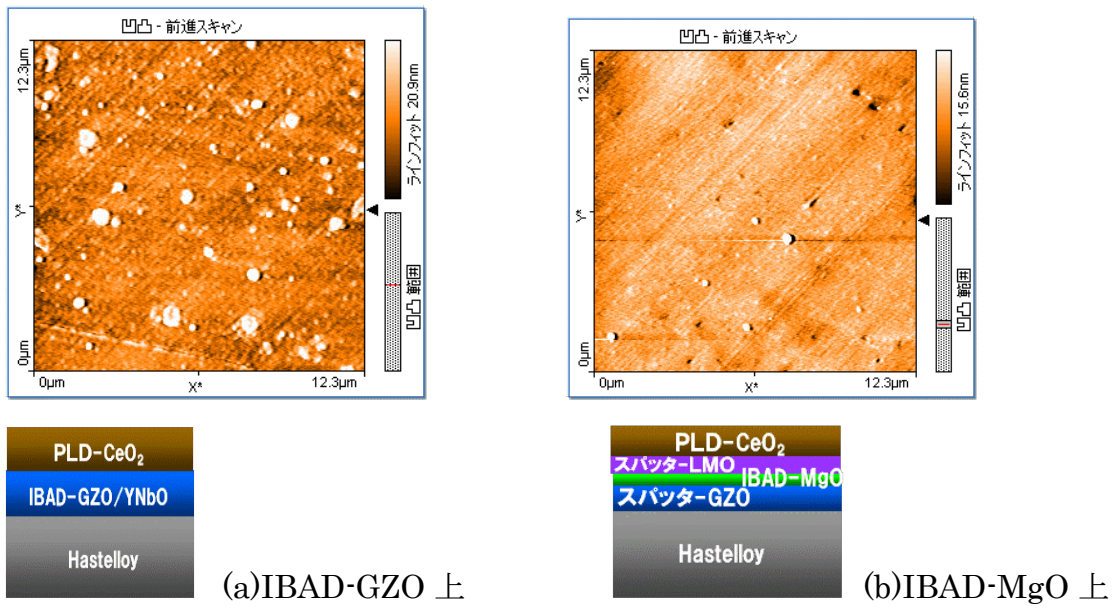


図 2.1.3-1-16 各構造のIBAD中間層上のPLD-CeO₂キャップ層表面

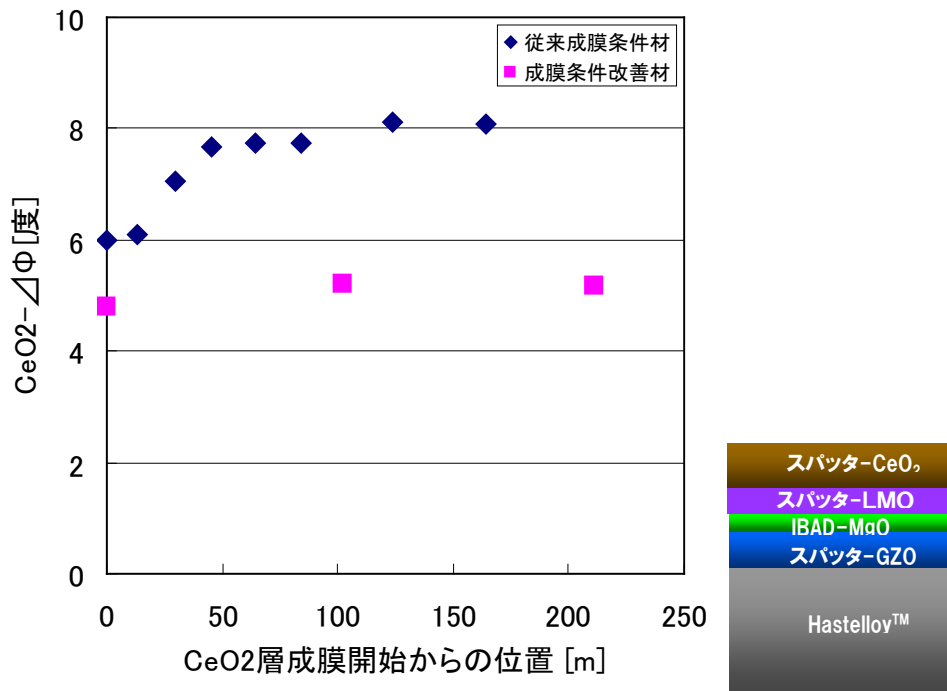


図 2.1.3-1-17 スパッタ法によるCeO₂キャップ層長尺成膜結果 (IBAD-MgO/LMO 層上)

続いて、薄化によって中間層の欠陥が抑制されたIBAD-MgO基板を用いて超電導線材作製を行った。図 2.1.3-1-18 にIBAD-MgO基板を用いて作製した線材の I_c 値分布を示す。線材の焼損防止のため通電は 205 Aまでとして測定を行った。若干の低 I_c 値箇所が認められるが、殆どの箇所で $I_c > 205 \text{ A/cm-w} (@77 \text{ K, s.f.})$ 以上を達成し、高い通電特性を有する線材を複数本作製することが可能になった。

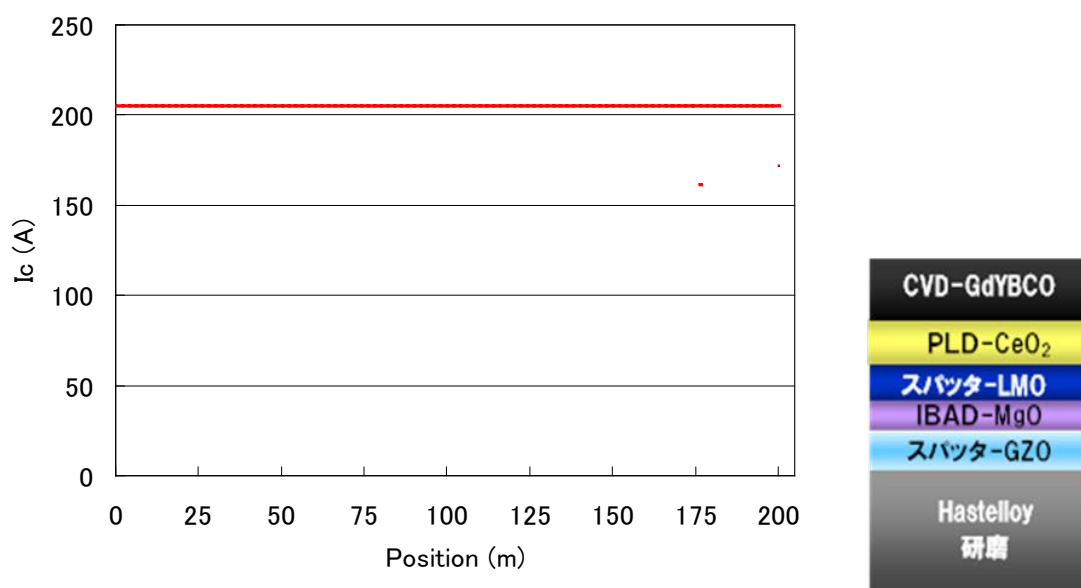


図 2.1.3-1-18 IBAD-MgO基板を使用して作製したMOCVD線材の I_c 分布例

以上の超電導製造技術開発によって、SMESモデルコイル用導体用の安定化層複合化技術開発やSMESモデルコイルの要素技術検討、要素試験などに平成 20 年度は総長で 1.5 km、平成 21 年度は 4.8 kmの超電導線材を供給した。表 2.1.3-1-4 にこれまでに作製した線材量とその歩留りを示す。金属基板の平滑化、中間層構造の適正化、MOCVDの原料ガス供給系（気化器・配管）の温度の適正化を行なってきた結果、平成 22 年度に入ってから、 I_c 値：200 A/cm-w(@77 K,s.f.)、150 m長を超える線材の歩留りも向上した。

表 2.1.3-1-4 IBAD-MOCVD 線材の製造実績

期間	作製長 (m)	100 A以上、50 m以上		200 A 級、75 m以上		200 A級、150-300m	
		本数	歩留	本数	歩留	本数	歩留
H20	1,503	11	48.4	1	14.3	1	14.3
H21	4,363	33	58.0	0	0	0	0
H22(~7月)	841	6	84.1	3	59.2	2	50.0
歩留: 作製長に対する所定 I_c と所定単長を達成した線材長の割合							

(4) Cu めっきを用いた安定化層形成技術開発

安定化層に関しては、まず、硫酸銅浴を用いた電解Cuめっき法により銅安定化層の短尺試作を行い、片側 50 μ m厚のCuめっきが可能で、まためっき後も臨界電流特性の低下がないことを確認した（図 2.1.3-1-19）。Cu複合法とCuめっき法との比較では、表 2.1.3-1-5 に示すようにハンダでCuテープを複合するCu複合法に比べ、Cuめっき法がSMES用導体として適していることを確認した。平成 21 年度には、Reel to Reel式の超電導線材用Cuめっき装置を導入し、Cu安定化層の長尺化を図った。図 2.1.3-1-20 (a) に初期のCuめっきによるCu安定化層材の断面写

真を示す。この図から明らかなように、線材の端部においてCuめっき厚が厚い。めっきにおいては、線材端部に電界集中が生じるため線材端部にCuが偏肉してめっきされる。コイル化のためには、断面形状が一樣であることが望ましいため、Cuめっき槽内における線材端部への電界集中を避ける検討を行い、図 2.1.3-1-20 (b)に示す線材形状を得た。SMES用線材の場合、積層導体における電流偏流の抑制のために、線材形状の均一性は重要な開発要素であるため、Cuめっき材の厚さの長手方向分布を測定した。その結果を図 2.1.3-1-21 に示す。めっき材の両端において厚さの変動があるが、これは、超電導線材とその両側のダミー線との抵抗の違いによってめっき厚に違いが生じたものである。この部分を除くと、長手方向においても厚さ変動は少ないと考えられる。図 2.1.3-1-22 に長尺のCu安定化線材のCuめっき前後における I_c 値の測定結果を示す。線材の焼損防止を目的にCuめっき前は $I_c = 205 \text{ A/cm-w} (@77 \text{ K, s.f.})$ でCuめっき後においても $225 \text{ A/cm-w} (@77 \text{ K, s.f.})$ で通電制限をしているため、Cuめっき前後における詳細な I_c 値の比較は行っていない。しかし、 I_c 値がCuめっき前に低下していた箇所において、Cuめっき後の I_c 値も同じく低下する傾向が確認されている。基本的に I_c 値が大きく低下している箇所は、コイルに使用されないが、今後の線材製造歩留りの向上のため、Cuめっきの条件の適正化により、Cuめっきの影響による I_c 値低下を防ぐことができるか、若しくはAg保護層/超電導層の界面の接合性に問題があり、それにCu層が付加されることでより顕著になるのか等の検討も含めて、安定化製造技術開発を行った。

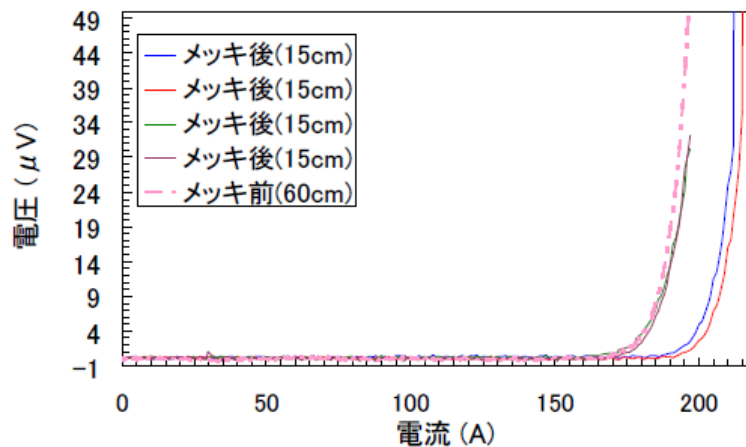


図 2.1.3-1-19 短尺試料におけるCuめっき前後の I_c 変化

表 2.1.3-1-5 Cuめっき法とCuテープ複合法の比較 (概要)

項目	Cuテープ複合法	Cuめっき法
片厚50 μm の安定化層	◎：Cuテープ寸法精度良好	○：めっき条件により調整
銅層と銀層の密着性	△：端部に複合不良部有	◎：密着性良好
複合後の厚さ	△：複合不良部の厚さ大 ハンダ部の厚み付加	○：断面内の厚さにばらつき有



(a) 改善前の Cu めっきによる Cu 安定化線材 (1cm 幅)



(b) 改善後の Cu めっきによる Cu 安定化線材 (1cm 幅)

図 2.1.3-1-20 Reel to Reel 式 Cu めっき装置による線材断面 (形状改善前後)

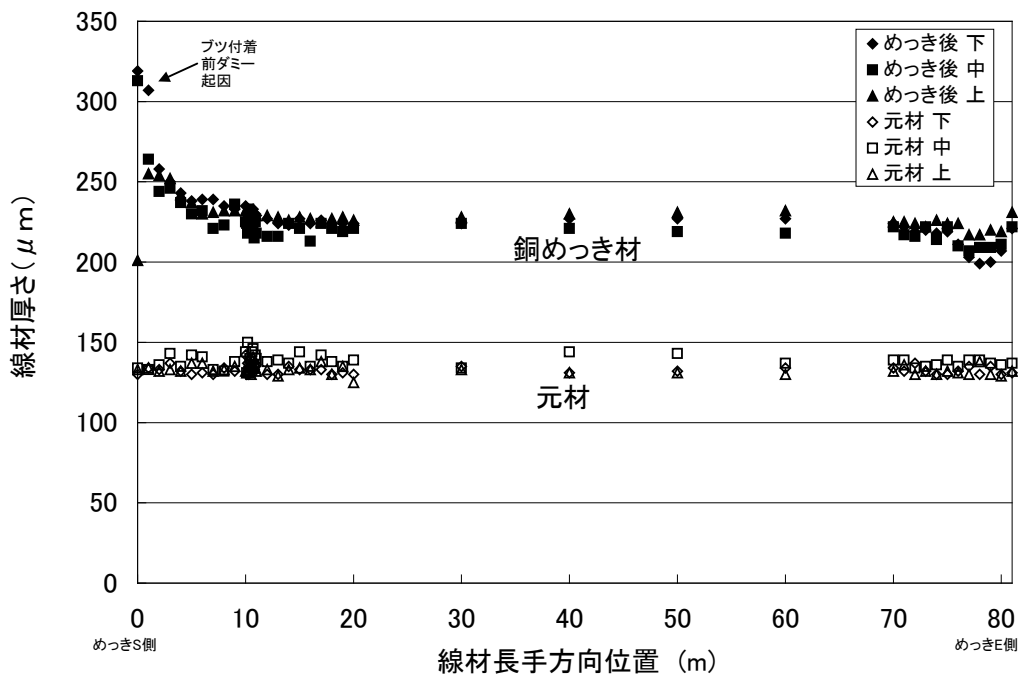
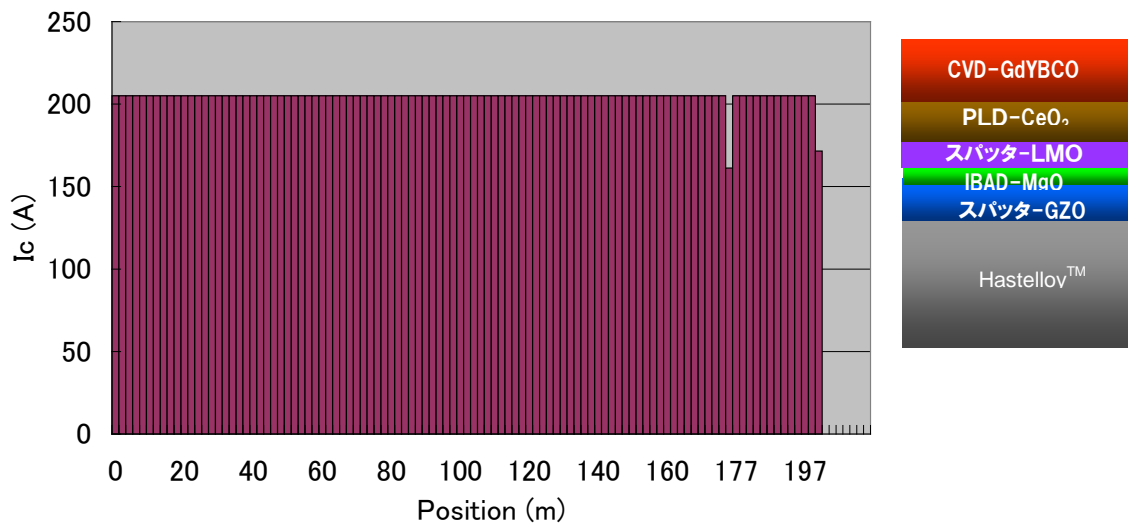
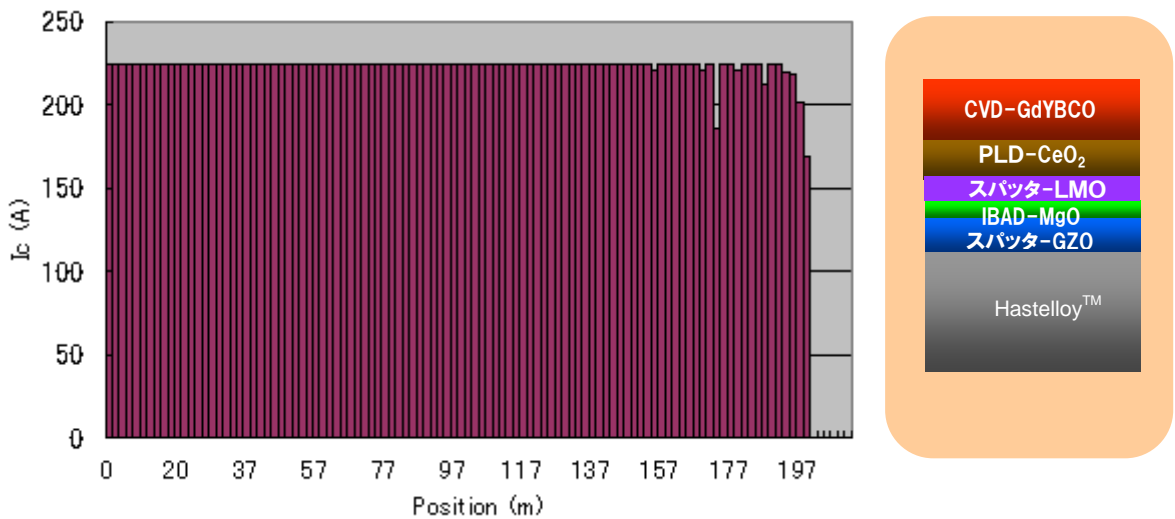


図 2.1.3-1-21 Cu めっき材の寸法の長手方向分布例



(a)Cu めっき層付加前 (205 A で通電制限)



(b)Cu めっき層付加後 (225 A で通電制限)

図 2.1.3-1-22 Cuめっき安定化層付加前後の I_c 比較

2. 1. 3-2 SMES 対応線材安定製造技術開発(IBAD-PLD 線材)

(1) 長尺 IBAD-PLD 線材の安定製造の検討

200 A/cm-w(@77 K, s.f.)級 IBAD-PLD 線材を用いた SMES モデルコイルの成立性を確認するため、2 kA 以上の通電が可能な大電流容量コイルの導体の評価用の IBAD-PLD 線材の安定製造技術の開発を行ってきた。

本テーマで開発を行った線材における超電導線材は図 2.1.3-2-1 に示すように PLD-CeO₂ (500 nm)/ IBAD-MgO(10 nm)/Y₂O₃-ベッド層(20 nm)/ Al₂O₃ベッド層(100 nm)の構造の中間層を Hastelloy™ 上に形成し、超電導層は PLD で GdBCO

を厚さ 約 2.2 μm 成膜した。図 2.1.3-2-2 に作製した線材の I_c 値分布図を示す。300 m 以上の全長にわたって $I_c > 300 \text{ A/cm-w}(@77 \text{ K, s.f.})$ 以上を達成し、測定箇所数から求めた平均 I_c 値は $437 \text{ A/cm-w}(@77 \text{ K, s.f.})$ に達した。特性の長手方向の位置依存性として中央部が若干 I_c 値が低い傾向があるが、これは中間層の結晶粒配向等に起因する特性低下で、IBAD-MgO もしくはキャップ層の成膜時の成膜条件の時間変動によるものと推定される。今回の線材作製結果は全長で高い特性を得ており、歩留りは 100 % で、安定製造という観点からは、十分な安定性を示し、目標を達成した。

材料	厚さ
銀	16 μm
GdBa ₂ Cu ₃ O _x	~2.2 μm
CeO ₂	500nm
MgO	~10nm
Y ₂ O ₃	~20nm
Al ₂ O ₃	~100nm
ハステロイ	100 μm

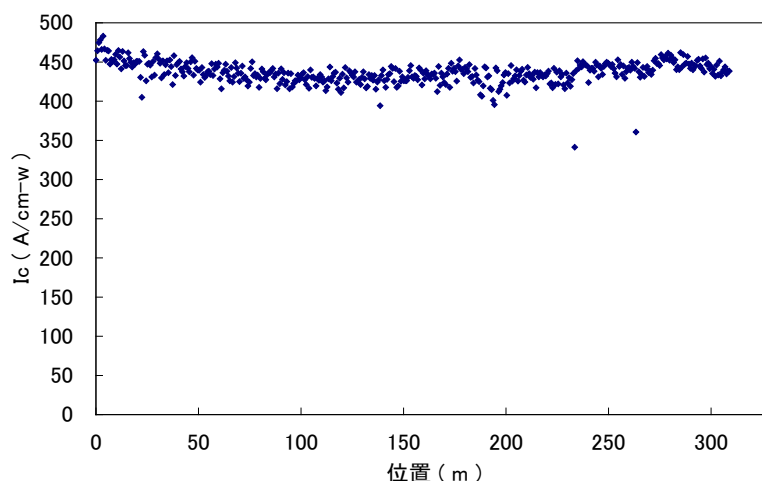


図 2.1.3-2-1

長尺 IBAD-PLD 線材の構造

図 2.1.3-2-2

長尺 IBAD-PLD 線材の I_c 値分布図

(2) 長尺 IBAD-PLD 線材の安定製造の検討

極低コスト線材として中間層に IBAD-MgO 層を用いた超電導線材の SMES への適用性を評価するために 200 A/cm-w(@77 K, s.f.)級 IBAD-MgO 線材の安定製造技術開発を行った。本項では、IBAD-MgO 中間層を用いた線材の安定製造技術開発の成果をまとめる。IBAD-MgO 線材は、ベッド層、IBAD 層、バッファ層、キャップ層から成るが、構造、材料によって省略される層もある一方、ベッド層などは複数の層で形成される場合もあり、4 つ以上の中間層を有する 경우가一般的である。全部で 2 層の IBAD-GZO 線材に比べて複雑な構造ではあるが、それぞれの層が非常に薄く、高速で成膜が出来るメリットがある。中間層厚みが 2 層合わせて 2 μm にもなる GZO 系の場合に比べて、MgO 系の場合は全中間層層の合計厚みは 1 μm 以下であり、層数が多くかつそれぞれが薄いという特徴を有する。高製造速度化が可能な特徴から将来線材として位置付けられている IBAD-MgO 基板であるが、薄い多層構造であるため、長尺での安定性確保が難しく、また、界面が多いため GZO 系に比べて剥離しやすいことも考えられる。そこで、SMES への IBAD-MgO 線材の適用性評価のため、200 A/cm-w(@77 K, s.f.)級の単長数十 m 線材を作製す

ることを目標とし、安定製造技術の開発を行った。

今回開発を行った線材における中間層の構造はPLD-CeO₂ (500 nm) / スパッタ-LMO (18 nm) / IBAD-MgO(5 nm) / スパッタ-GZO(110 nm) / ハステロイ™であり、超電導層の材料及び作製プロセスとしてはPLD-GdBCO (厚み：1.2~1.5 μm) を選択し、単長 75 m、150 A/cm-w(@77 K, s.f.)を仕様として4本の線材A-Dを作製した。図 2.1.3-2-3(a)~(d)に作製した線材のI_c値分布図を示す。線材Cを除く3本は目標の単長 75 m、150 A/cm-w(@77 K, s.f.)をクリアしたが、線材Cは一ヶ所目標I_c値を下回る結果となった。この低I_c値部は磁化法測定により 2 cm程度のサイズと確認出来、この場所は中間層付き基板に同程度のサイズの欠陥が確認されており、特性劣化が欠陥に起因するものであることが示唆される。また、線材A及びCには、特性の位置依存性に全体として減少あるいは増加の傾向があるが、これは基板の結晶粒配向度の分布に起因する特性低下であり、IBAD-MgO層成膜時に成膜条件が時間経過によって変化したことによるものと考えられる。

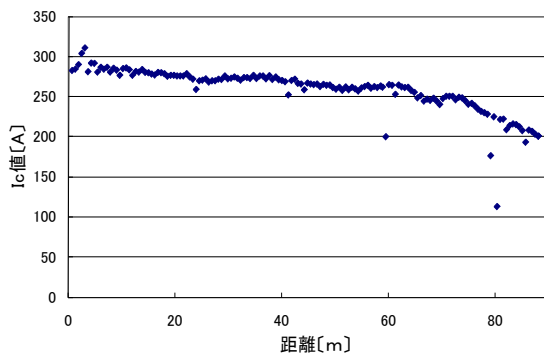


図 2.1.3-2-3(a) 線材AのI_c値分布図

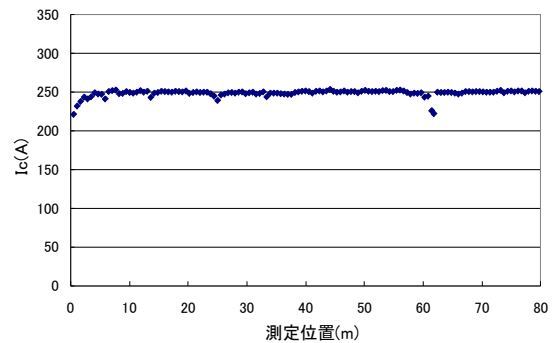


図 2.1.3-2-3(b) 線材BのI_c値分布図

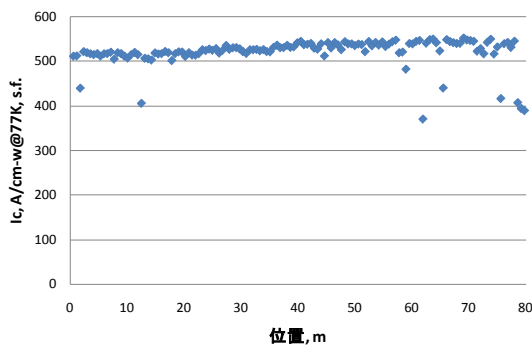


図 2.1.3-2-3(c) 線材CのI_c値分布図

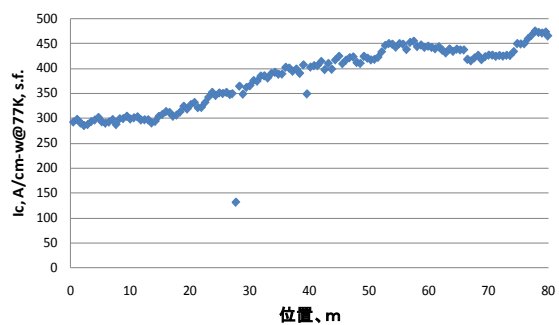


図 2.1.3-2-3(d) 線材DのI_c値分布図

平成 21 年度までに、様々な線材における特性劣化部位とその原因究明を行った結果、大きな特性低下の原因となる欠陥は、中間層成膜時、特に IBAD-MgO 層成膜までに金属基板に付着した汚れが主要因ではないかと考えられており、基板の清

浄化と成膜条件の安定化により特性劣化部の抑制が可能になると考えられる。

安定製造という観点からは、平成 22 年度の線材作製における歩留りとしては 3/4 と、開発途中の線材としては十分な安定性を示した。また、作製した線材の殆どの部分では $I_c > 200 \text{ A/cm-w} (@77 \text{ K, s.f.})$ の特性を得ており、目標を達成した。

2.1.3-3 SMES 対応線材安定製造技術開発のまとめ

高磁界・コンパクトコイルの技術開発に適用可能な SMES 対応 Y 系超電導線材の安定製造技術の確立を目的として Y 系超電導線材を作製し、モデルコイル作製への寄与を図ってきた。

IBAD-MOCVD 線材の安定製造において、以下のような安定製造に向けた技術の進展が達成された。

- (1) ハステロイ™基板の圧延加工および精密機械研磨の検討により長尺基板の高强度化と平滑性の向上が達成された。
- (2) 平滑化ハステロイ™基板の使用によって、到達 I_c 値及び I_c 値分布の向上が可能であるという知見を得た。また MOCVD 装置の気化器および周辺温度の適正化によって、局所的な低 I_c 値箇所の発生を低減し、均質性の向上が図られた。
- (3) 中間層の薄化について、GZO 層を主体として Y-Nb 複合酸化物を組み合わせた IBAD 中間層構造の検討を行い、 CeO_2 酸化物キャップ層の $\Delta\phi$ が長尺基板の前後端で 6 度以下に制御された長尺基板が安定して作製された。
- (4) Y-Nb 複合酸化物を組み合わせた中間層より更に中間層の薄化有効な IBAD-MgO 中間層の検討を行い、 CeO_2 酸化物キャップ層の $\Delta\phi$ が長尺基板の前後端で 6 度以下に制御されている長尺基板を再現性よく作製した。これにより、中間層の薄化により製造速度が向上し、コスト面で改善が図られた。また、IBAD-MgO 基板上で高い通電特性を有する線材が複数本作製され、歩留りが向上した。
- (5) Cu 安定化層形成では、長手方向において厚さ変動が少なく、課題となるような I_c 値の低下を抑えることが可能と思われる長尺線材に向けた Cu めっき技術を開発した。

IBAD-PLD 線材の SMES モデルコイルへの適用性検討においては、これまでに約 600 m の線材を作製し、線材の殆どにおいて $I_c > 200 \text{ A/cm-w} (@77 \text{ K, s.f.})$ の特性を得た。また、作製した線材はコイル開発に使用する導体の作製検討に供した。

IBAD-MOCVD 線材はこれまでの開発によって不良箇所発生を抑制し、歩留り向上を図った。金属基板、中間層、超電導層にそれぞれ改善が施されたことによってプロジェクト中間評価時まで歩留りが向上した。コイル試験用超電導線材の作製供給を通じて、さらなる歩留り向上を図り、平成 22 年度までの目標を達成した。

IBAD-PLD 線材の安定製造技術開発では、 $I_c > 200 \text{ A/cm-w} (@77 \text{ K, s.f.})$ の特性を

線材の殆どで得ており、高い歩留りと超電導特性の安定性を得た。Y系超電導線材をコイル開発用導体の作製検討に提供するとともに、Cuめっき技術による安定化層複合化やコイル加工を行い、コイル適用への課題抽出とその解決を図り、適用化検討した。

2.1.4 高磁界コンパクト SMES システムモデル検証

本プロジェクトにおける SMES システムモデル検証の最終目標としては、2.1.1 項、2.1.2 項 に記載の要素コイル開発結果を反映し、複数個のコイルの組合せにおいてクエンチ等の動的な変化等が発生した場合を想定したコイルの限界性能を把握し、コイル自体ならびにコイルシステムとしての裕度の適正化を図ることで、Y系コイルの限界設計技術を確立し SMES のさらなる低コスト化の見通しを得ることにある。

平成 20 年度は、2 GJ 級 SMES コイル基本システム構成を検討するとともに、クエンチ発生時の挙動に関する事前解析を実施し、動的な変化が発生した場合のコイルの健全性等を評価するために必要となる試験方法の検討を行った。また、電気機器や超電導技術に関する学識経験者、重電メーカー各社、及び各電力会社等からなる委員会において、SMES システムモデル検証方法等を十分に議論した上で開発を進めた。

平成 21 年度からは 2.1.1 項、2.1.2 項(1)、(2)に記載の Y 系 SMES コイル評価結果を反映して 2 GJ 級 SMES コイル基本システム構成の改善を図るとともに、そのために検証すべき複数個のコイルの組合せにおいてクエンチ等の動的な変化が発生した場合の保護の考え方を整理した。また、クエンチ時の挙動検証を含めた評価試験方法を立案するとともに、評価試験用モデルコイルシステムの設計を実施した。

2.1.4-1 コイル構成最適化の検討（中部電力、北海道大学）

(1) 研究開発の目標

トロイダル配置した 180 個の要素コイルの間には、電気絶縁、冷却手段、機械的強度サポートなどを配置する必要がある。また、設計諸元に対し、実際の製作が実現可能であることが必須である。これらを勘案し、構成要素の寸法制約を検討して、「超電導電力ネットワーク制御技術開発」プロジェクトの概念設計結果を踏まえて、コイルの基本電気設計を見直し、最適化検討を実施した。

(2) 2.4 GJ コイル設計最適化の考え方

a. トロイダル中心半径の計算

トロイダル配置した 180 個の要素コイルの間には、電気絶縁、冷却手段、機械的サポートなどを配置する必要がある。これらの構成要素の寸法制約を検討して、前 NEDO 事業の「超電導電力ネットワーク制御技術開発」プロジェクトの概念設計結果に対して要素コイル間のスペースを考慮したコイルの基本電気設計を見直した。基本設計を検討する際の拘束条件を表 2.1.4-1-1 に示す。トロイダル中心半径を大きくした場合には蓄積エネルギーが小さくなるが、コイルの内径を小さくして巻数を増やすことで対応する方針とした。

表 2.1.4-1-1 基本設計の条件

項 目	値
最大蓄積エネルギー	2.4 GJ
運転温度	20 K
要素コイル数	180 コ
パンケーキコイル数／要素コイル	4 コ
線材寸法	幅 12 mm×厚 0.2 mm

コイルと、基本的な構成要素である対地絶縁構成、冷却構成、機械的強度サポート等の概略を図 2.1.4-1-1 に示す。コイルを冷却するために、巻線部端面には絶縁板を介して冷却板を取り付ける。これを要素コイル 1 ユニットとして、これらの中に機械的強度サポート部品を配置する。以下のように各項の寸法を検討した。

① 要素コイル

要素コイルを構成するパンケーキコイルは、12 mm 幅の線材を 13 mm 幅の巻枠に巻き、端面に FRP を接着する。パンケーキコイル間の絶縁は、要素コイル両端に 6 kV 印加時、隣接コイル間で耐圧 3 kV が必要になる。耐電圧を考慮して、片側に 1 mm ずつの FRP 板を接着した 2 mm の FRP による絶縁を想定した。パンケーキコイル幅は 15 mm となる。ターン間の絶縁については、要素コイル両端に

6 kV を印加時のターン間電圧は 4 V 程度であり、線材間にカプトンを介在させる。

② 絶縁板

対地絶縁は、巻線部とコイル冷却板との間で 6 kV を確保するため、厚さ 4 mm の FRP 絶縁板を入れることを想定した。

③ 冷却板

各要素コイルの端面に、冷却配管を埋設したアルミ製の冷却板を接着する。配管は、冷媒の圧力損失を考慮して内外径を決め、冷却板はこの配管を埋設できる厚さとする。配管の内径は「超電導電力ネットワーク制御技術開発」プロジェクトで成立性が確認された内径 6 mmφ(外径 8 mmφ)を最大とし、これを埋め込む冷却板は厚さ 10 mm を想定した。

④ コイル間サポート

電磁力に対する補強構造設計にとって、向心力サポートが重要である。向心力サポートは、要素コイル間にウェッジ形状の FRP 板を挟みこんで接着する方法とする。この部材のトロイダル中心側は、製作性を考慮して厚さ 5 mm を想定した。

以上の結果により、角度 2 度毎の周長 d は、

$$d = (\text{パンケーコイル} \times 4 \text{ 個}) + (\text{絶縁板} \times 2 \text{ 枚}) + (\text{冷却板} \times 2 \text{ 枚}) + (\text{コイル間サポート端部})$$

$$= (15 \text{ mm} \times 4) + (4 \text{ mm} \times 2) + (10 \text{ mm} \times 2) + (5 \text{ mm})$$

$$= 93 \text{ mm}$$

となり、次式よりトロイダル中心半径 R が 4064mm 必要であることが分かった。図 2.1.4-1-2 に構成図を示す。ただし、図 2.1.4-1-2 中の内径は「超電導電力ネットワーク制御技術開発」プロジェクトにおける値である。

$$93 = 2\pi(R - 1400) \times \frac{2}{360}$$

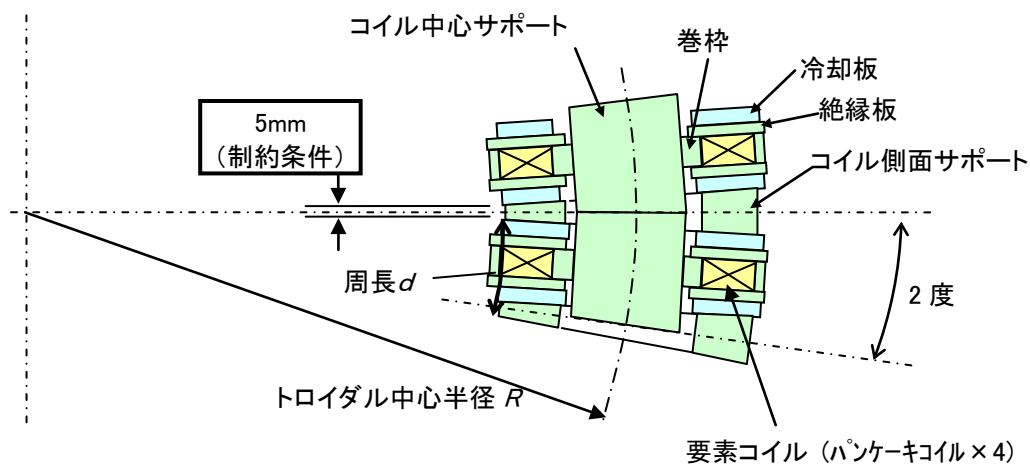


図 2.1.4-1-1 コイル間に必要な構成要素

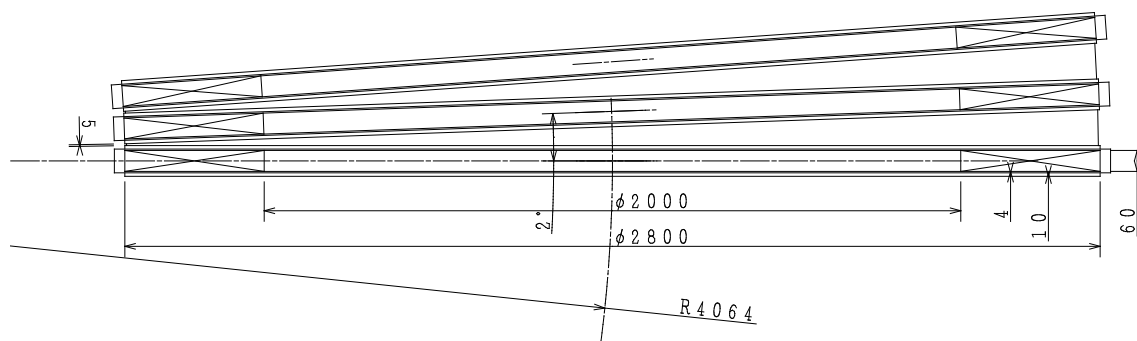


図 2.1.4-1-2 コイル配置の成立性に関わる構成要素と寸法制約

b. 全体構成の検討

向心力サポートがあることによって電極及び冷却配管の構成が制約されるため、それらの全体構成について検討した。

電極やフィーダは、向心力サポートとの干渉を避けて配置する必要がある。また、バンドルする線材間の偏流を抑制するために、線材に同じ磁場を経験させる構成にする必要があった。偏流抑制に関しては、各コイルが上下対称・トロイダル内/外側で非対称であり、また、4 シングルパンケーキの積層中心で対称である形状を考慮してバンドル数を 4 枚とし、電極 4 個を 90 度ずらした 4 回対称に配置する構造が適していると考えられた。

冷却配管は、電極部や口出しをかわすためにコイルの上下から導入する構成とした。冷却板は、磁場変動による渦電流を定量的に検討し、スリットを入れる等の対策を施す必要があった。

全体構成の概略を図 2.1.4-1-3 に示す。要素コイルの自重量は、コイル側面サポートに取り付けた吊サポートで保持することができる。

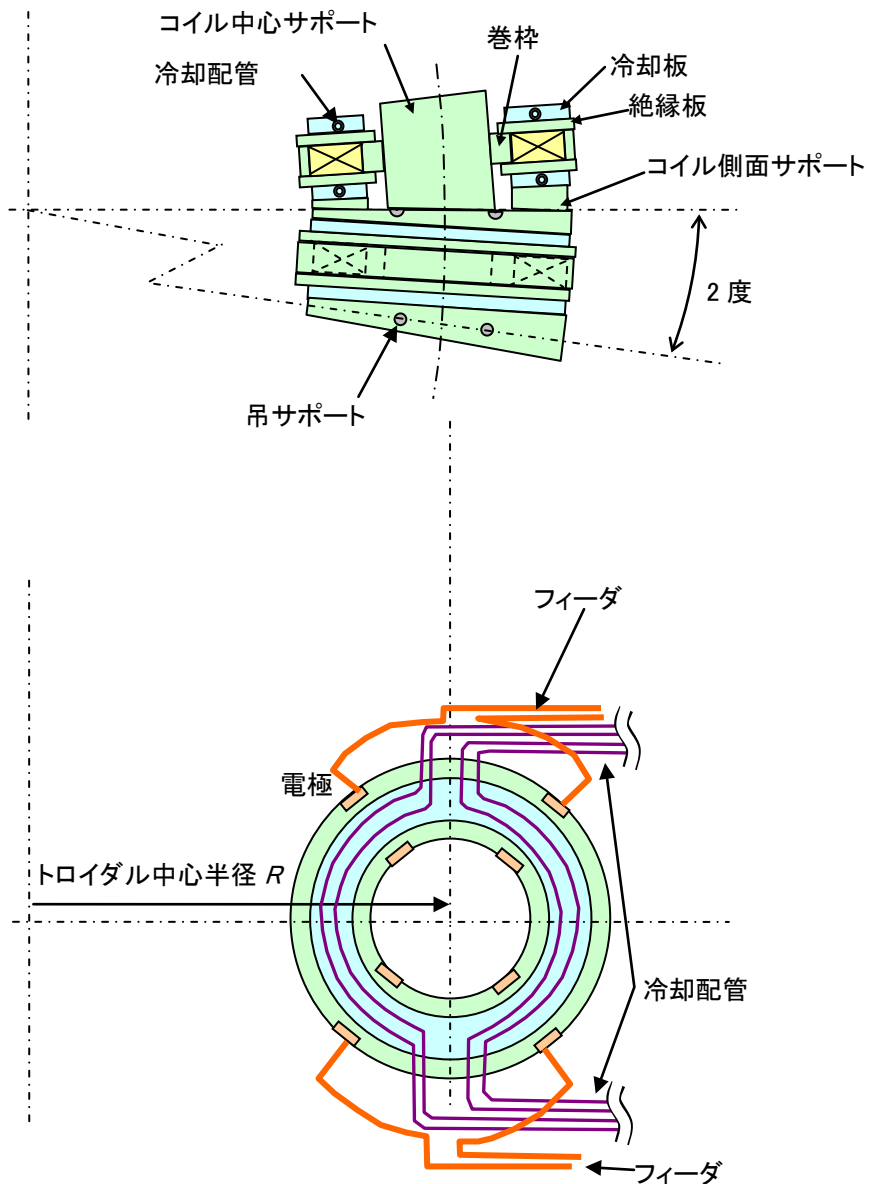


図 2.1.4-1-3 全体構成案

c. 2.4 GJ コイルの基本設計

トロイダル中心半径を増加し、コイル内半径を調節して蓄積エネルギー2.4 GJを維持させたコイルの基本設計をした。主要な諸元を表 2.1.4-1-2 に示す。図 2.1.4-1-4 に、パンケーキコイルの断面構成を示す。1 ターン分の厚さ 1.1 mmのうちY系超電導線材（主にハステロイ™基板）は 0.1 mmとする。安定化層（銅）の厚さは、前NEDO事業の「超電導応用基盤技術開発（第II期）」プロジェクトでの検討結果に基づいて 0.2 mmと仮定し、線材寸法を 0.1 mmとして、絶縁 0.15 mmを引いた残り 0.65 mmをハステロイ™補強材とした。コイル外半径は 1,398 mmとなり、巻数を増やすためにコイル内径は 952 mmと小さくした。フープ力をハス

テロイ™断面で担うとすると、*BJR*最大値は 588 MPaになる。

表 2.1.4-1-2 トロイダルコイルの諸元

蓄積エネルギー	2.4 GJ
運転温度	20 K
要素コイル数	180
トロイダル中心半径	4064 mm
コイル内半径	952 mm
コイル外半径	1398 mm
コイル高さ	60 mm
ターン数/要素コイル	1620
使用線材長	2153 km
線材幅	12 mm
1 ターン厚さ	1.10 mm
ハステロイ基板	0.10 mm
安定化層	0.20 mm
補強材(ハステロイ™)	0.65 mm
絶縁材	0.15 mm
通電電流@素線	540 A (2160 A/4 枚バンドル)
最大磁界	10.3 T
<i>BJR</i> 最大値 ※1	588 MPa
向心力@要素コイル	3.42 MN

※1 *BJR*はハステロイ™の断面（基板+補強材）で負担と仮定

$$J = 540 / \{12 \times 10^{-3} \times (0.10 \times 10^{-3} + 0.65 \times 10^{-3})\} \text{ [A/m}^2\text{]}$$

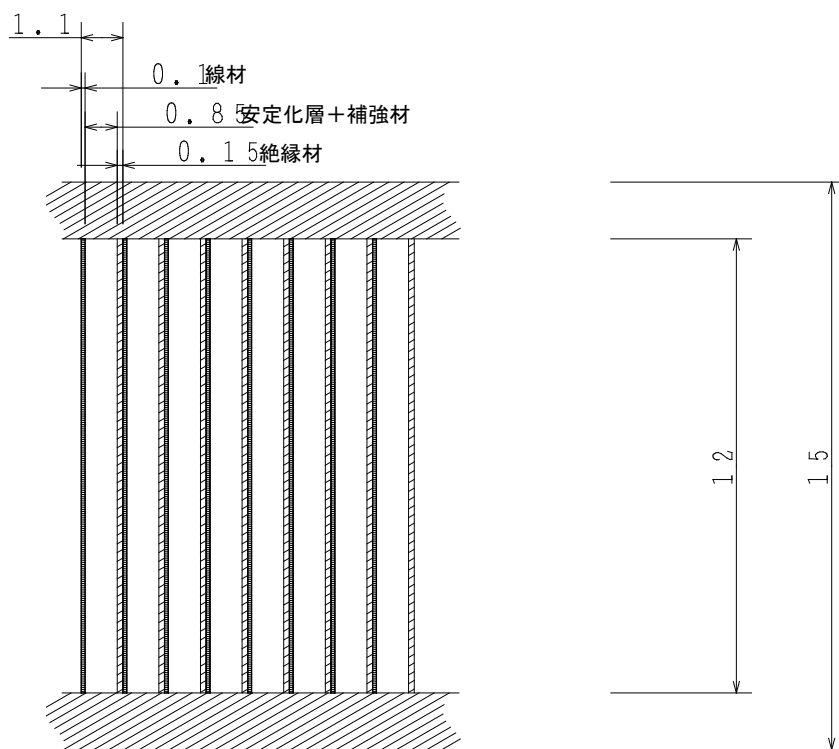


図 2.1.4-1-4 パンケーキコイルの断面構成

d. 磁場解析結果

要素コイル 180 個をトロイダル配置し、素線に電流 540 A (4 並列で 2160 A) を通電した時の発生磁場を計算した。180 個のコイルを配置した外観を図 2.1.4-1-5 に示す。1 つの要素コイルについて、経験磁場分布の解析結果を図 2.1.4-1-6 に示す。

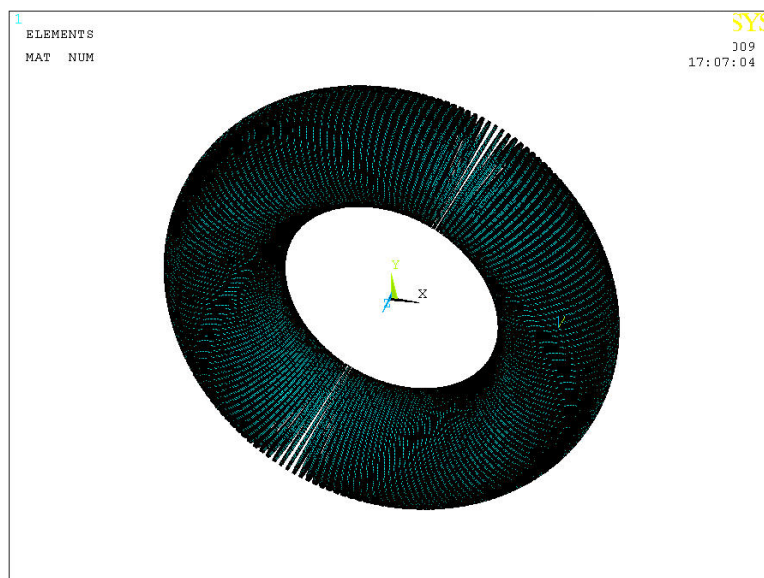


図 2.1.4-1-5 要素コイルを 180 個配置した外観

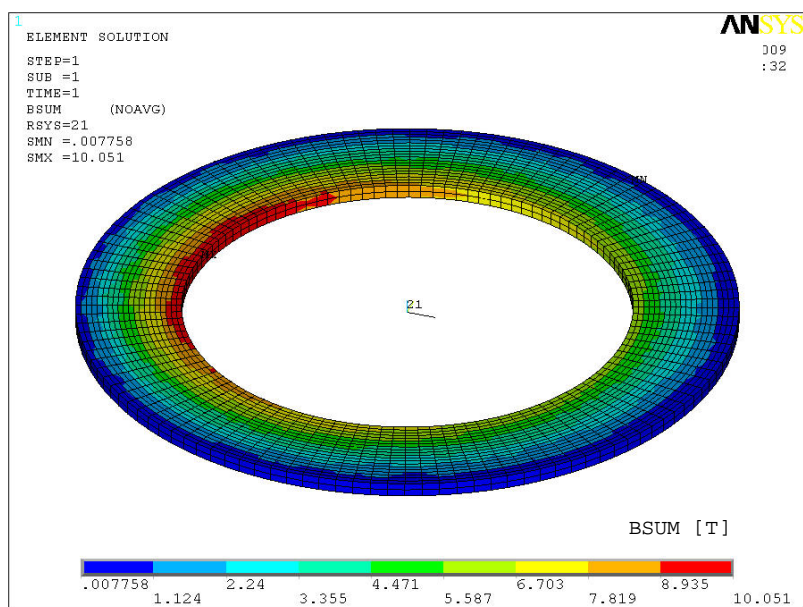


図 2.1.4-1-6 要素コイルの磁束密度分布

(3) トロイダル型コイルの機械強度評価

コイルの支持構造は、コイル間サポートとコイル中心サポートとで隣接コイル同士を支えあう構造とした。支持構造の構成を図 2.1.4-1-7 に示す。以下に考慮したポイントごとに検討した内容をまとめる。

a. 向心力

励磁により定常的にコイルに生じる向心力は、トロイダル周方向の圧縮力で保持される。したがって支持部材はこの圧縮力に耐えられるように、面積を確保する必要がある。以下に、圧縮力を支持する 2 つの方法について検討した結果を示す。

要素コイル間に「コイル側面サポート」を入れ、向心力をコイル側面（ $\phi 1904 - \phi 2796\text{mm}$ のドーナツ型、 3.3 m^2 ）で支持する方法が考えられる。その場合、圧縮力 $F=106 \text{ MN}$ ($3.71 \text{ MN}=F\cos 89 \text{ 度} \times 2$) が加わり、面圧は 32 MPa になる。これはFRPの強度で耐えられる値である。

コイル巻枠の側面で圧縮力を受ける方法もあるが、同等の面圧にするには、直径 $\phi 1700 \text{ mm}$ 程度の巻枠内側全体を支持体で埋める必要がある。この「コイル中心サポート」で圧縮力を受けると、面圧は 46 MPa になる。コイル側面サポートに加えてこの巻枠内側のコイル中心サポートを併用することで、面圧を低減することができる。ただし、コイル中心サポートは巻線部の内径側（高負荷率）部分に圧縮力を与えることになる。コイル内側は高磁場であり渦電流による発熱が問題になる可能性があるため、材質はFRPとした。

b. 転倒力

コイル間隔の製作誤差があった場合や保護時などの不均衡なコイル電流が発生した場合には、コイルに転倒力が発生するため、その支持構造が必要となる。この転倒力に対しても、前述のコイル側面サポートが有効である。

c. せん断力

トロイダル配置の外側方向成分の力により、くさび型の面（ウェッジ）の摩擦力が低いとすべりが生じる。コイル間サポートの面積に向心力がほぼ水平に加わるとき、せん断応力は 0.6 MPa になる。これは、コイル側面とコイル側面サポートとの摩擦力（接着力）で保持できる値であると考えられる。

また、製造寸法誤差の影響で要素コイルがトロイダル配置の θ 方向にずれた場合にはコイル間の吸引力が、 r 、 z 各方向にずれた場合にはコイル側面にせん断力が生じる。これらもコイルとコイル間サポートとの接着力で拘束させる。

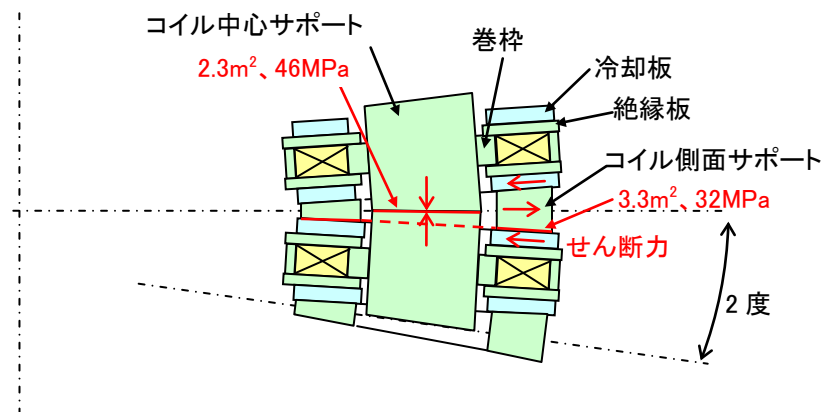


図 2.1.4-1-7 支持構造の構成（圧縮応力はそれぞれ単独での値）

コイル構造及び支持構造について解析モデルを基に r 方向・ θ 方向・ z 方向の応力、トロイダル半径方向変位量について評価した。解析モデルの全体図を図 2.1.4-1-8 に、モデルの構成を図 2.1.4-1-9 に示す。巻棒の厚さは 100 mm とした。

なお、解析ケースは以下の 4 通りで実施した。

- 解析ケース（1）：コイル中心サポートあり、巻棒あり
- 解析ケース（2）：コイル中心サポートなし、巻棒あり
- 解析ケース（3）：コイル中心サポートなし、巻棒なし
- 解析ケース（4）：コイル中心サポートなし、巻棒なし、コイル側面サポートの物性値変更

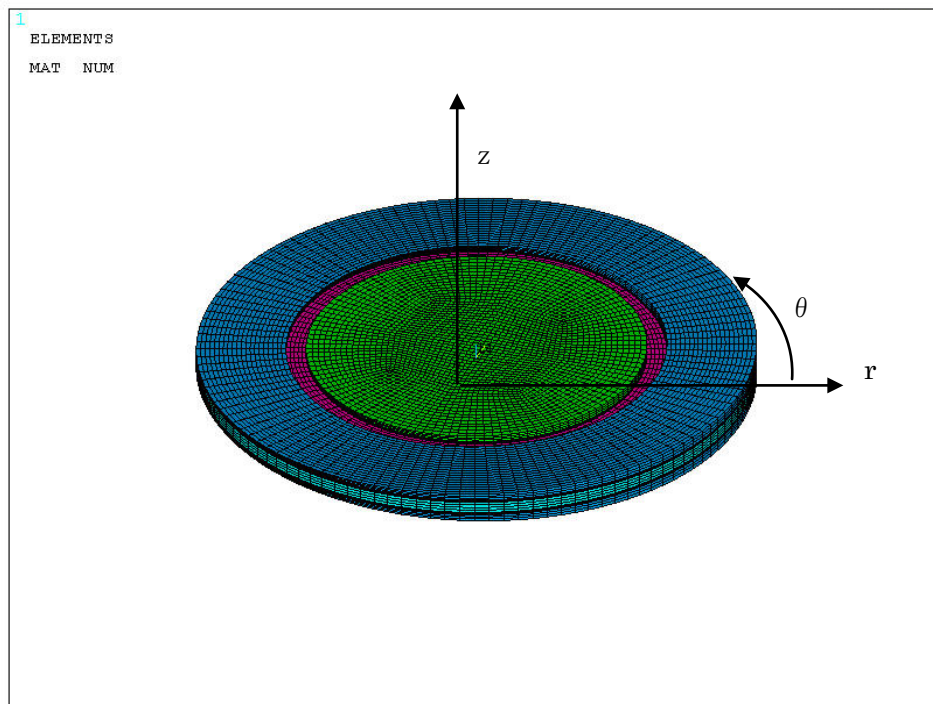


図 2.1.4-1-8 解析モデルの全体図

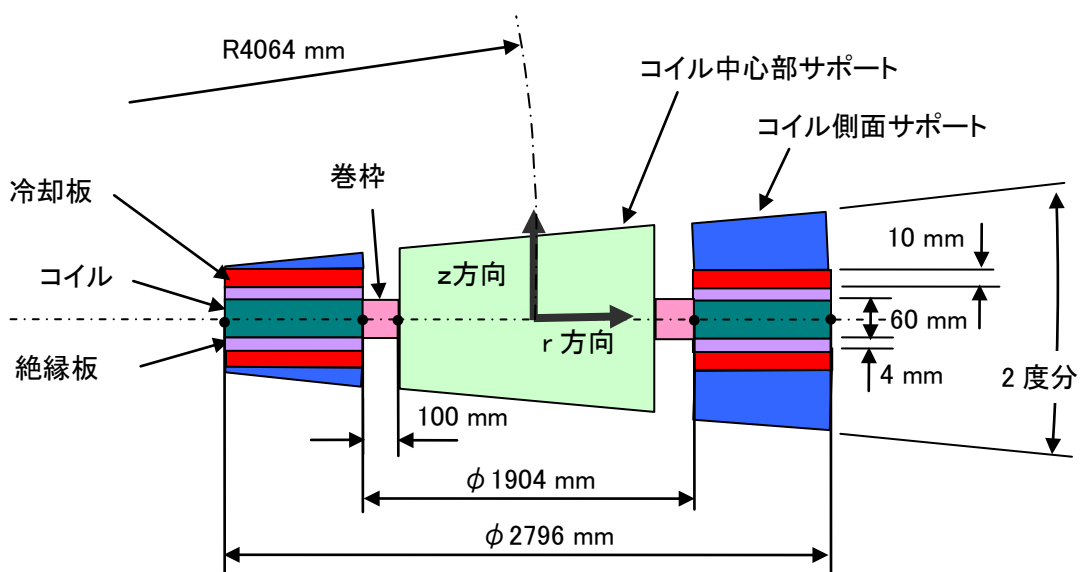


図 2.1.4-1-9 解析モデルの構成 (断面図)

Y系超電導線材の剥離方向の力となるために最も懸念されたコイルのr方向の引張り応力に関しては、「コイル中心サポートなし、巻枠なし、コイル側面サポートの材質をFRP-B」とした場合が2MPaと最も小さくなり、支持構造として適していると考えられる。このケースでの他の応力成分は、コイルのθ方向の最大引張り応力は251MPa（Y系超電導線材に換算して460MPa）、最大圧縮応力は-123

MPa、コイル z 方向の最大引張り応力は 130 MPa、最大圧縮応力は、-100 MPa となった。

また、要素コイルが完全に設計図どおりに配置されず、製造寸法誤差等が原因でずれた場合にコイルに加わる電磁力についても評価したが、問題ないレベルであることが確認された。

(4) 結果

2 GJ 級コイルの概念設計結果を基にして、要素コイル 180 個からなるトロイダルコイルの基本電気設計を行った。要素コイルの間に必要な、電気絶縁、冷却手段、機械的サポートなどの構成要素を検討し、それらの寸法制約からトロイダル中心半径とコイル内半径を調節して、蓄積エネルギー 2.4 GJ のコイルの基本設計を得た。

2 GJ 級 SMES 用高強度コイルとしてのトロイダル型 Y 系コイル構造の成立性を確認するため、向心力、フープ応力などを考慮して支持構造を仮定し、構造解析を実施した。その結果、Y 系超電導線材の剥離方向の力となるために最も懸念されたコイルの r 方向の引張り応力に関して、最も小さい場合で 2 MPa となり、Y 系 SMES コイルの支持構造として実現可能と考えられる。

2.1.4-2 システム安定性に関する検討（中部電力、早稲田大学）

(1) 研究開発目的

大容量 SMES では、漏れ磁束を少なくし、磁気エネルギーを効率よく蓄積するために、複数のコイルをトロイダル配置することが想定される。超電導コイルでは、1 つのコイルに何らかの異常が発生した場合、保護のため、外部抵抗によってそのコイルのエネルギーをダンプすることになる。コイルをトロイダル配置すると、1 つのコイルをダンプした場合、他のコイルを永久電流モードのままにしておくと、ダンプするコイルの電流減衰による誘導電流が重畳されることとなる。こうしたトロイダル配置の SMES コイルシステムにおいて、1 個あるいは複数のコイルが保護動作に入った場合の他のコイルの挙動を解析し、システムとしての安定性について評価した。

(2) トロイダルコイルシステムの安定性

解析評価に用いたコイルの諸元を表 2.1.4-2-1、表 2.1.4-2-2 に示す。パンケーキコイル 4 段を要素コイルとし、それを 180 個トロイダル配置する。図 2.1.4-2-1 にインダクタンスの計算結果を示す。

表 2.1.4-2-1 2 GJ 級 SMES 用トロイダルコイル諸元

要素コイル内半径	1.0 m
要素コイル外半径	1.4 m
要素コイル高さ	0.06 m (15mm × 4 layers)
1ターン幅	15 mm
1ターン厚(補強材)	1.10 mm (0.85 mm)
導体構成	4枚バンドル(導体厚4.4mm)
ターン数	364 (91 turns × 4 bundles)

表 2.1.4-2-2 2 GJ 級 SMES 用トロイダル要素コイル諸元

運転温度	20 K
要素コイル	180
位置(トロイダル中心半径)	3.7 m
要素コイル内半径	1.0 m
要素コイル外半径	1.4 m
要素コイル高さ	0.06 m
通電電流@素線	540 A

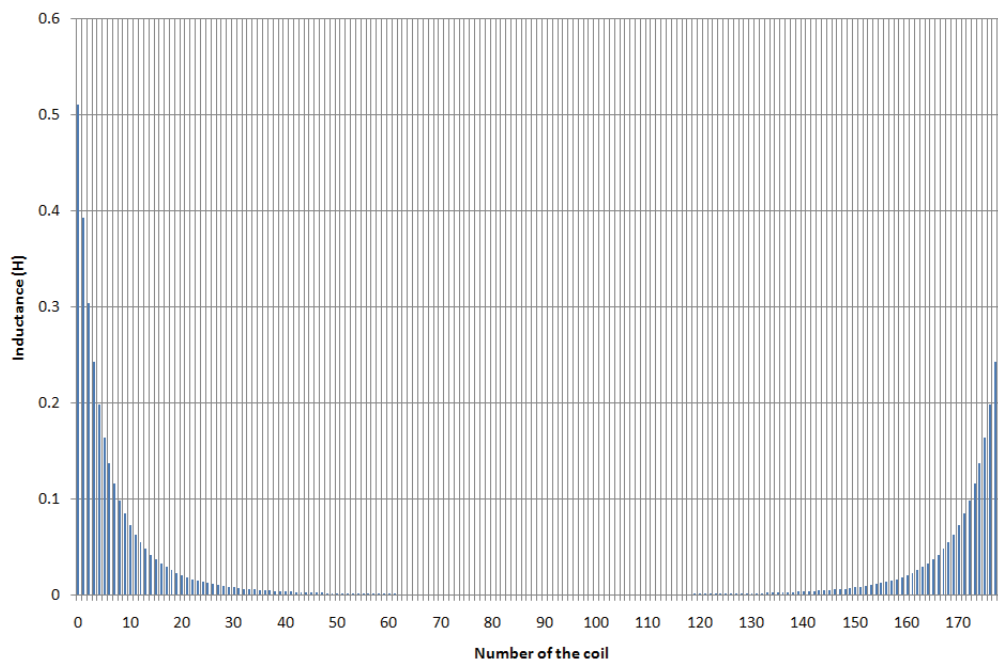


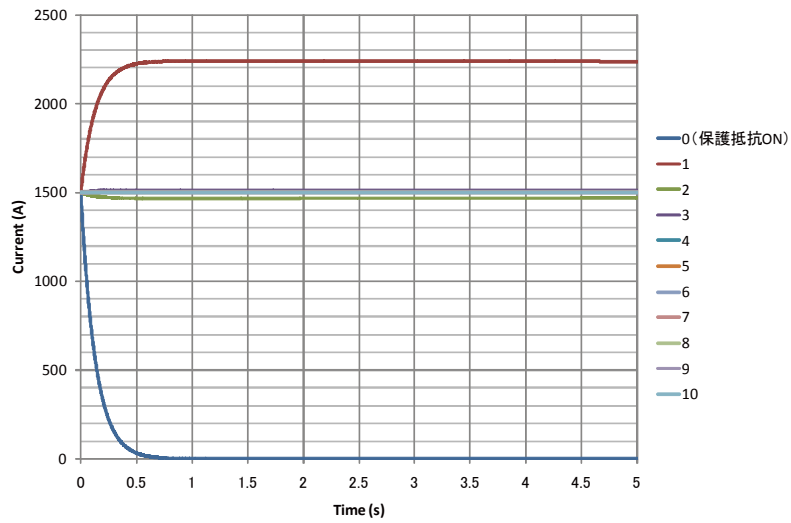
図 2.1.4-2-1 トロイダル要素コイルの各インダクタンス

a. 永久電流モード

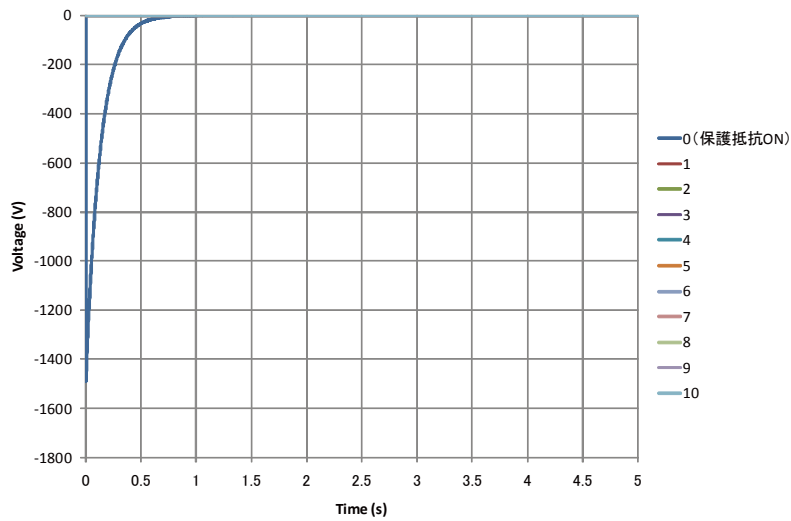
180 個のコイルが独立に電流 1500 A (素線 375 A × 4 枚バンドル) で永久電流モードにあるとする。その状態から、いくつかのコイルが外部抵抗保護モード(抵抗 1 Ω で閉ループ)、他のコイルが、そのまま永久電流モード(電気抵抗零で閉ループ、超電導状態を維持)の場合、各コイルの電流、電圧変化を回路方程式と熱解

析も連成して計算した。Y系超電導線材は幅 1cm、ハステロイTM厚さ 100 μm 、銅層厚さ 100 μm で 4 枚バンドル、 $I_c=2160$ A (@20 K、0.05 $\mu\text{V}/\text{cm}$ 基準)、 $n=30$ とした。 I_c 値の温度依存性と銅層電気抵抗の温度依存性を考慮したが、磁場依存性は考慮していない。また、交流損失は考慮していない。熱解析においては、銅とハステロイTMの熱容量の温度依存性を考慮した。

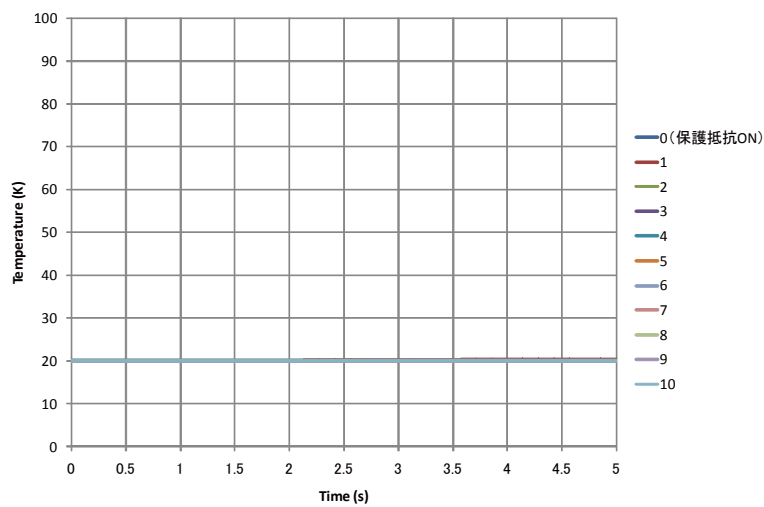
コイル 1 個及び 5 個ダンプした場合の計算結果をそれぞれ図 2.1.4-2-2、図 2.1.4-2-3 に示す。1つのコイルが保護動作を開始したとき、隣のコイルの超電導状態が維持される限り、磁場の変化はそのコイルで殆ど遮蔽されるため、隣のコイルの電流が 1.5 kA から 2.2 kA に増加する。増加した場合でも超電導状態は維持される。2つ以上のコイルが保護動作に入った場合、1つ隣のコイルの電流上昇が大きいため、超電導状態が維持できなくなる。従って、コイル自身の電気抵抗によって、電流減衰が始まる。その結果、2つ隣のコイルの電流が上昇する。以下、クエンチが次から次へとコイルに伝播していく。



(a) 電流

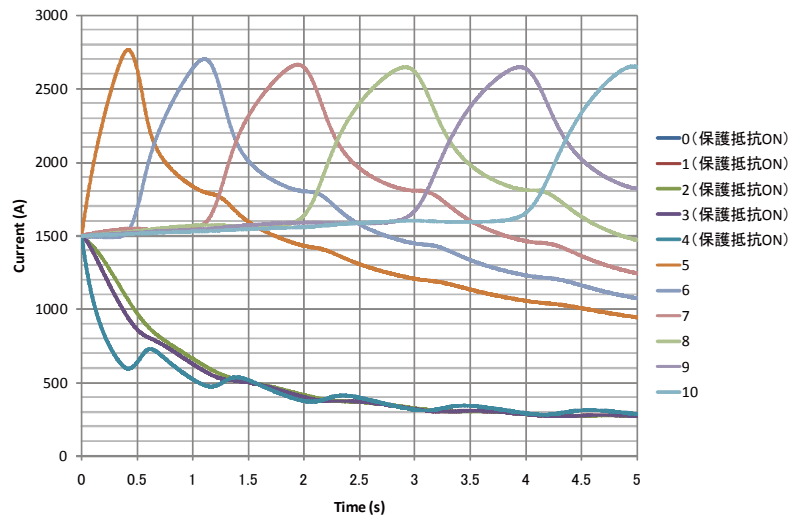


(b) 電圧

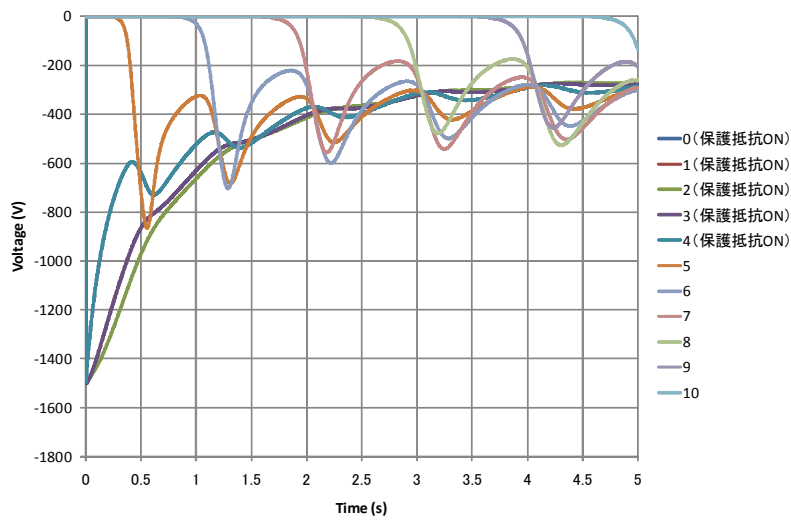


(c) 温度

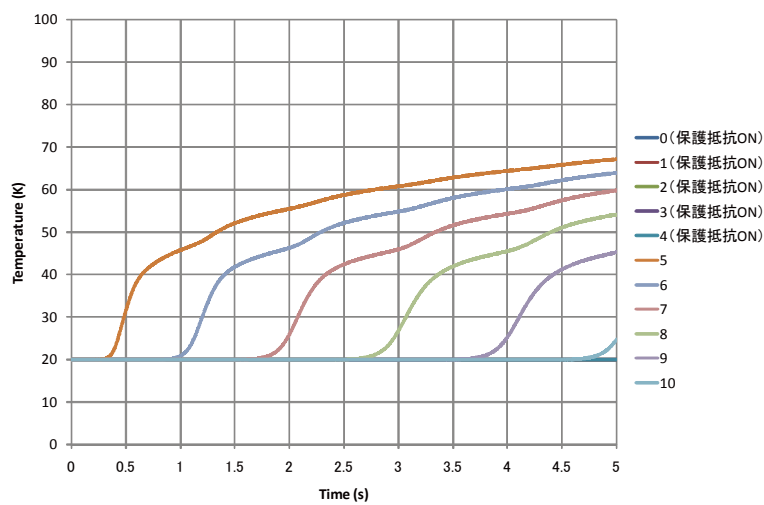
図 2.1.4-2-2 永久電流モード運転の場合の保護動作時の電流・電圧・温度変化 (コイル 1 個をダンプ)



(a) 電流



(b) 電圧



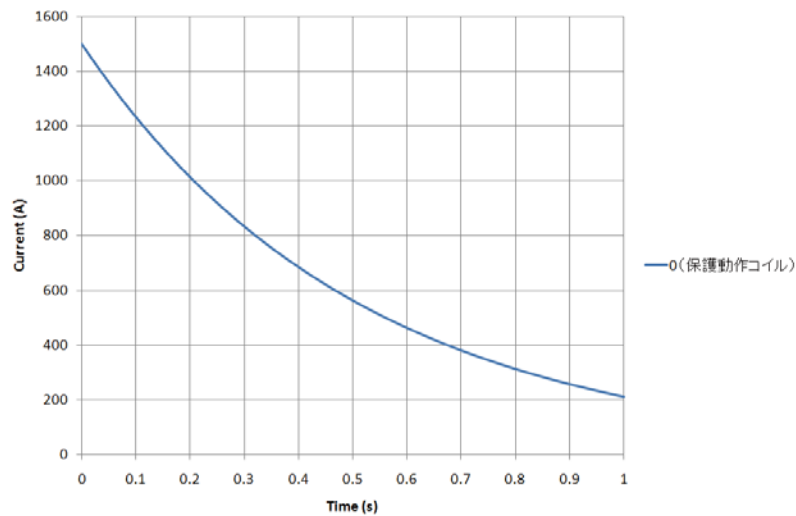
(c) 温度

図 2.1.4-2-3 永久電流モード運転の場合の保護動作時の電流・電圧・温度変化 (コイル 5 個をダンプ)

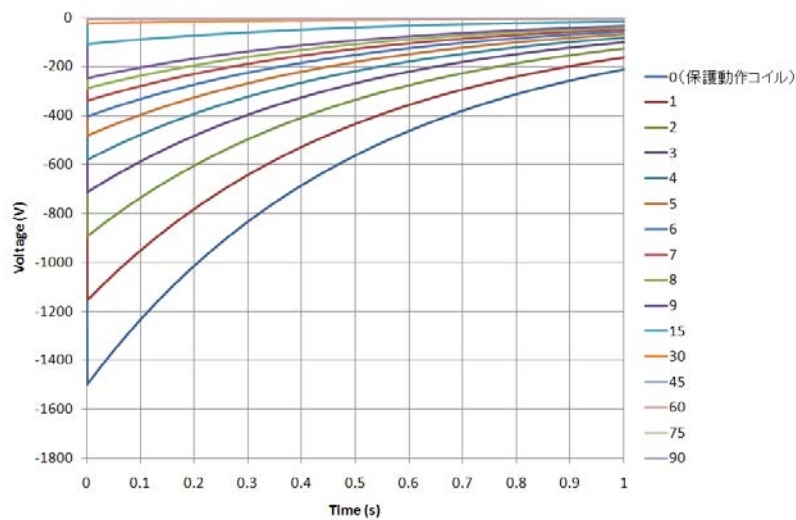
b. 定電流モード

180個のコイルが独立に電流 1500 A ($375 \text{ A} \times 4$) で定電流モードにあるとする。1つのコイルがある時定数 (1 Ω相当) で強制減衰し、他のコイルはそのまま定電流モードを維持した場合の、各コイルの電流、電圧の変化を求めた。

結果を図 2.1.4-2-4 に示す。各コイルは、ダンプするコイル以外は、定電流であるため、そのコイルとの誘導成分の電圧が発生する。この結果から、1つのコイルが保護モードの入った場合、他のコイルが定電流を維持できれば、最大発生電圧は保護動作中のコイルで 1.5 kV、隣のコイルで 1.15 kV であることが分かった。



(a) 電流



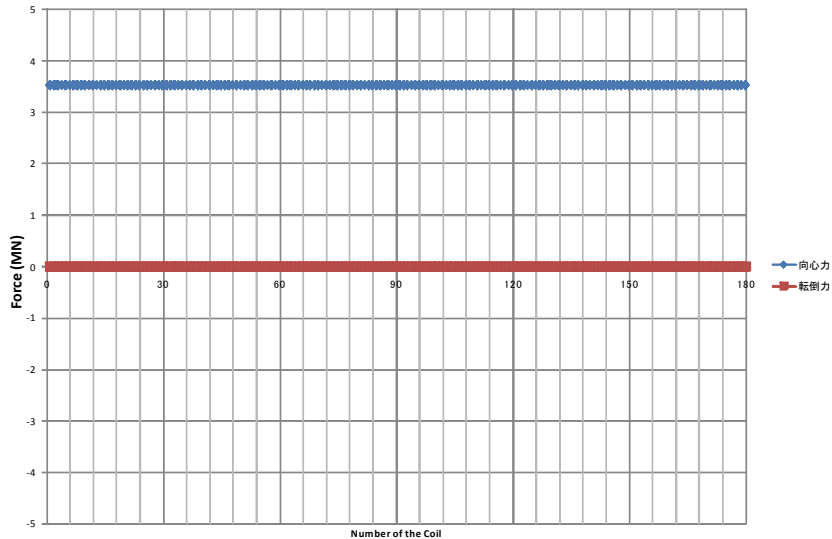
(b) 電圧

図 2.1.4-2-4 定電流モード運転の場合の保護動作時の電流・電圧変化

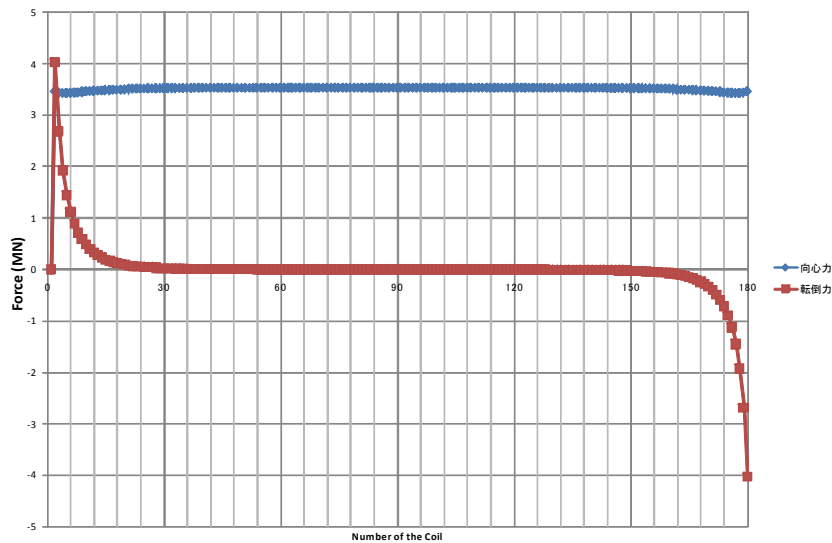
c. コイルに作用する転倒力

コイルをトロイダル配置した場合、すべてのコイルに同じ電流が流れていれば、転倒力は発生しない。しかし、これまで述べてきたような保護動作によって1つのコイルがダンプすると、力の平衡がくずれて、転倒力が発生する。図 2.1.4-2-5 に

定常運転時と保護動作時の向心力及び転倒力の計算結果を示す。定常運転時、向心力は 3.5 MN、転倒力は零であるが、保護動作時は、向心力は 3.5 MN、転倒力は 4 MN が発生する。



(a) 定常時



(b) 保護動作時

図 2.1.4-2-5 定常運転時と保護動作時の向心力及び転倒力

(3) 結果

大容量 SMES 用トロイダル配置のコイルにおいて、いくつかのコイルが保護動作に入った場合の他のコイルの挙動を回路解析によって評価した。その結果、永久電流モードにおいて運転する場合は、隣接コイルの電流が増加するため、そのマージンを考慮した保護システムを構築する必要がある。変換器と要素コイルを 1 対 1 で構成するような定電流モードにおいて運転することができる場合は、保護動作時においても隣接コイルの誘導電圧は低く抑えられることが確認された。また、トロイダル配置において、いくつかのコイルが保護動作に入った場合、不平衡荷重によ

り転倒力が作用するが、解析結果、問題ないレベルであることが確認された。

2.1.4-3 クエンチ検出・保護方法に関する検討（中部電力、早稲田大学）

(1) 研究開発目的

コイルのクエンチ検出は、一般にコイル端子間電圧を監視することにより行われる。コイル内の常電導部で発生した電圧が一定の閾値を超えるとクエンチが発生したと判断される。HTS 線材・コイルは、LTS に比べて圧倒的に高い熱的安定性を有しているが、何らかの要因で常電導転移が発生すると、常電導領域の伝播が極めて遅いため、局所的な温度上昇発生の可能性がある。一方、集合導体内の素線は結合損失を抑制するために、絶縁を施しており、常電導発生後の転流は接続部で発生する。この転流による電圧は非常に微小で数 mV レベルであるため、検出は困難である。また、SMES の運転を想定した場合、変換器などのノイズレベルによっては常電導による発生電圧が埋もれてしまって、検出が困難になることが考えられる。したがって、素線絶縁を施した集合導体コイルのクエンチ検出は電圧を監視する方法では困難であるため、新たな検出法について検討した。

(2) クエンチ時の集合導体コイルの挙動

集合導体は、素線間絶縁を施しているため、線材の途中で他の線材に転流せず、線材端部でのみ転流が起きる。従って、素線レベルの自己及び相互インダクタンス L 、 M を集中定数で与えた。熱解析は有限要素法を用いて、電流分布解析と連成することで、発熱分布を考慮できるようにした。冷却条件は断熱とした。運転温度は 20 K とし、導体を構成する 4 枚の線材 1 枚で長手方向に 1 cm 劣化した場合 ($I_c = 0$) の常電導伝播特性を解析した。なお、計算は線材の温度が 400 K になった時点で終了した。

a. 待機状態 1680 A (1 枚当たり 420 A) 通電

待機状態 1680 A (1 枚当たり 420 A) 通電時に線材 1 枚 (Tape 1) で 1 cm の劣化が発生した場合について、各素線の電流及び両端電圧と温度を計算した。図 2.1.4-3-1 に導体及び各線材に流れる電流、各線材の劣化部の温度、導体及び各線材両端に発生する電圧を示す。図 2.1.4-3-1(a) より、10 秒程度で劣化が発生した Tape 1 の電流が約 200 A 減衰し、他の線材に転流するが、Tape 2、4 の電流が線材の I_c 値に到達し、Tape 3 に転流が始まる。転流が起きている間、両端電圧は殆ど発生しない。この時点で線材の劣化部の温度は図 2.1.4-3-1 (c) より、約 30 K である。100 sec 後には、電流の変化がなくなり、Tape 2、3、4 の電流値が同じになる。その後、170 sec で Tape 2、3、4 の電流が減衰し、Tape 1 に転流が始まる。これは、Tape 2、3、4 で温度が徐々に上昇し、 I_c 値が下がり、抵抗が発生したためである。この後、図 2.1.4-3-1 (b) のように導体両端の電圧が急上昇する。このとき、0.1 V

発生時で 120 K、0.5 V発生時で 245 Kである。

b. ピーク状態 2160 A (1 枚当たり 540 A) 通電

動作ピーク時に相当する 2160 A (540 A/tape) 一定で通電し続けた際、線材 1 枚 (Tape 1) で 1 cmの劣化が発生した場合について、各素線の電流および両端電圧と温度を計算した。図 2.1.4-3-2 に導体および各線材に流れる電流、各線材の劣化部の温度、導体及び各線材両端に発生する電圧を示す。図 2.1.4-3-2 (a)より、3 sec程度で劣化が発生したTape 1 の電流が約 100 A減衰し、他の線材に転流するが、Tape 2、4 の電流が線材の I_C 値に到達し、Tape 3 に転流が始まる。この時点で線材の劣化部の温度は図 2.1.4-3-2 (c)より、約 30 Kである。その後、10 secでTape 2、3、4 の電流が減衰し、Tape 1 に転流が始まる。これは、Tape 2、3、4 で温度が徐々に上昇し、 I_C 値が下がり、抵抗が発生したためである。この後、図 2.1.4-3-2 (b)のように導体両端の電圧が急上昇する。このとき、0.1 V発生時で 115 K、0.5 V発生時で 228 Kである。

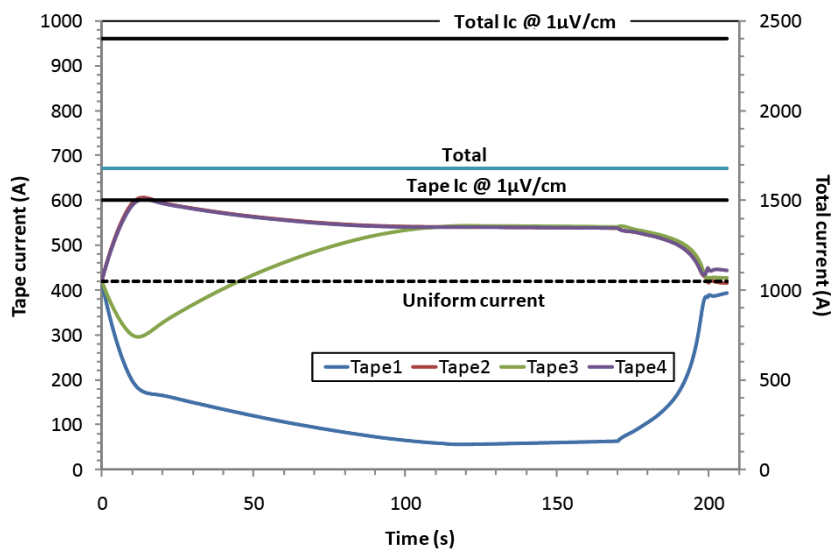
c. 系統安定化運転

系統安定化SMESの運転パターン (1680 A \Rightarrow 2160 A \Rightarrow 1680 Aの 3 秒周期の三角波パルス を 5 回) を通電する際、最初のパルスが入った時に、線材 1 枚 (Tape 1) で 1 cmの劣化が発生した場合について、各素線の電流および両端電圧と温度を計算した。図 2.1.4-3-3 に導体および各線材に流れる電流、各線材の劣化部の温度、導体および各線材両端に発生する電圧を示す。図 2.1.4-3-3 (a)より、パルス通電中に転流が発生し、パルス終了後に、20 sec程度で劣化が発生したTape 1 の電流が約 200 A減衰する。その後、Tape 2、4 の電流がTape 3 に転流する。この時点で線材の劣化部の温度は図 2.1.4-3-3 (c)より、約 30 Kである。その後、110 secでTape 2、3、4 の電流が減衰し、Tape 1 に転流が始まる。これは、Tape 2、3、4 で温度が徐々に上昇し、 I_C 値が下がり、抵抗が発生したためである。この後、図 2.1.4-3-3 (b)のように導体両端の電圧が急上昇する。このとき、0.1 V発生時で 115 K、0.5 V発生時で 228 Kである。

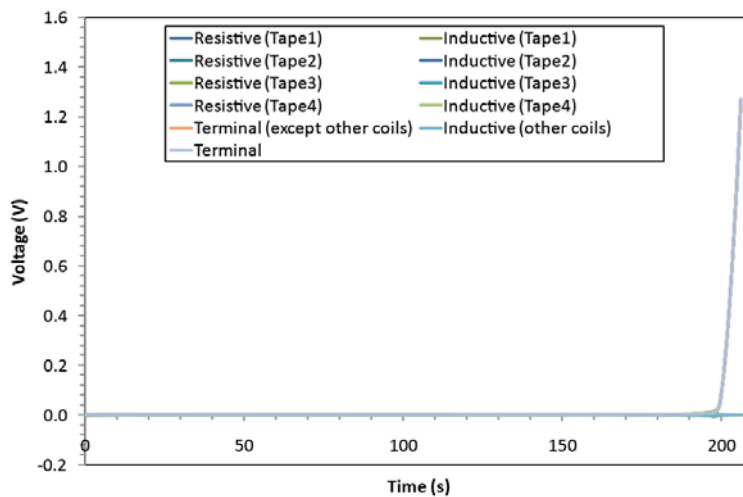
d. 負荷変動補償運転

負荷変動補償SMESの運転パターン (1680 A \Rightarrow 2160 A \Rightarrow 1680 Aの 18 秒周期の三角波パルスの繰り返し) を通電する際、最初のパルスが入った時に、線材 1 枚 (Tape 1) で 1 cmの劣化が発生した場合について、各素線の電流及び両端電圧と温度を計算した。図 2.1.4-3-4 に導体及び各線材に流れる電流、各線材の劣化部の温度、導体および各線材両端に発生する電圧を示す。図 2.1.4-3-4 (a)より、パルス通電中に転流が発生し、パルス終了後に、5sec程度で劣化が発生したTape 1 の電流が約 100 A減衰する。その後、Tape 2、4 の電流がTape 3 に転流する。この時点で線材の劣化部の温度は図 2.1.4-3-4 (c)より、約 30 Kである。その後、25 secでTape 2、3、4 の電流が減衰し、Tape 1 に転流が始まる。これは、Tape 2、3、4

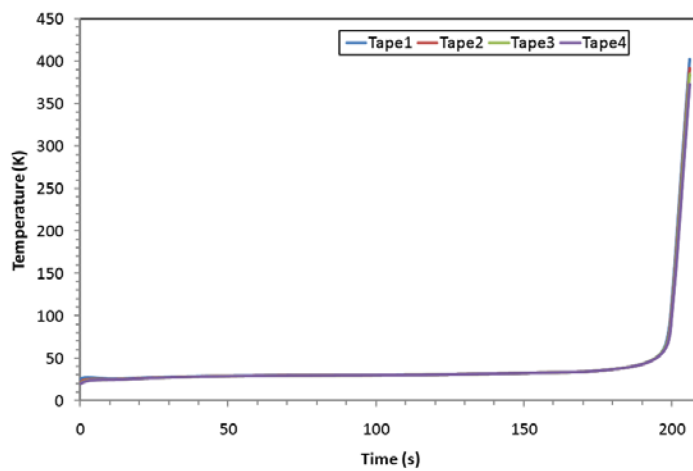
で温度が徐々に上昇し、 I_c 値が下がり、抵抗が発生したためである。この後、通電電流は減衰しているものの、図 2.1.4-3-4 (b)のように導体両端の抵抗性電圧は急上昇する。ただし、導体の全電圧は 100 V級の誘導性電圧が重畳されるためこのとき、殆ど変化は見られない。抵抗性電圧が 0.1 V発生時で線材温度は 130 K、0.5 V発生時で 250 Kである。



(a) 集合導体の電流

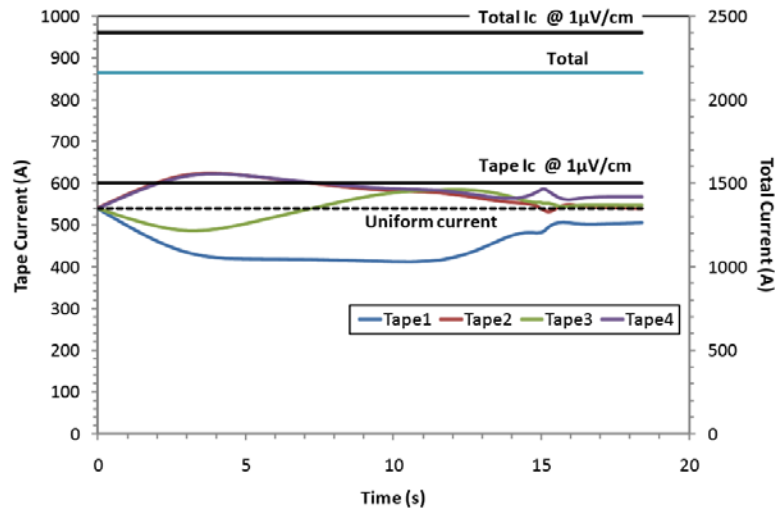


(b) 電圧

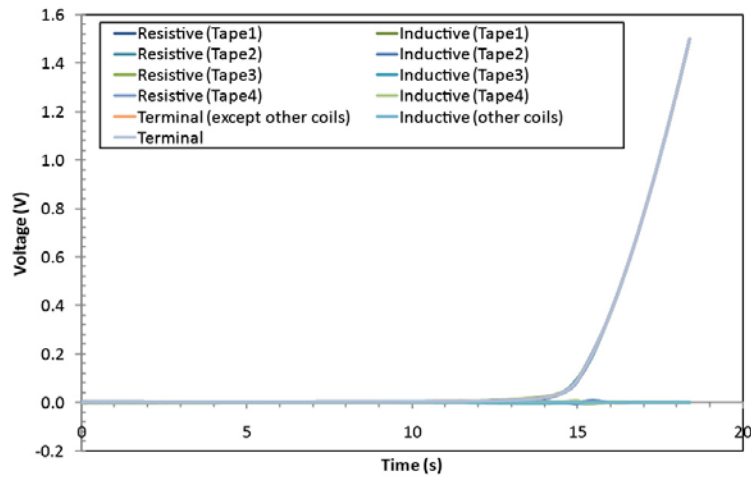


(c) 劣化部の温度

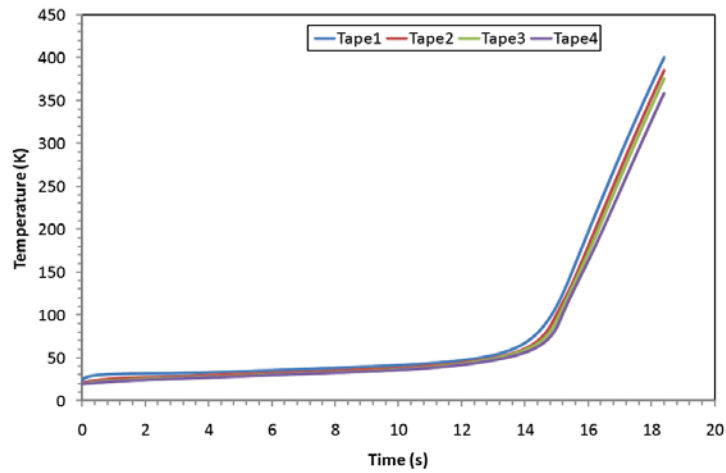
図 2.1.4-3-1 待機状態 1680 A (1 枚当たり 420 A) 通電時に線材 1 枚で 1 cm の劣化が発生した場合の集合導体内の電流分布、電圧、温度



(a) 集合導体の電流

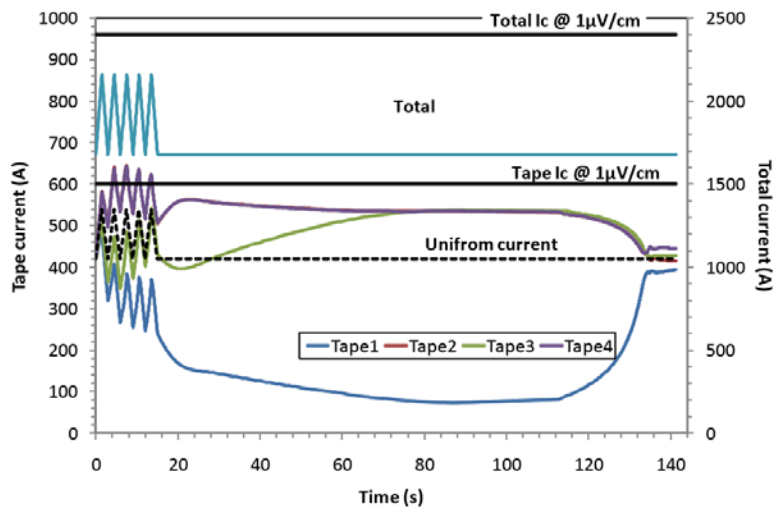


(b) 電圧

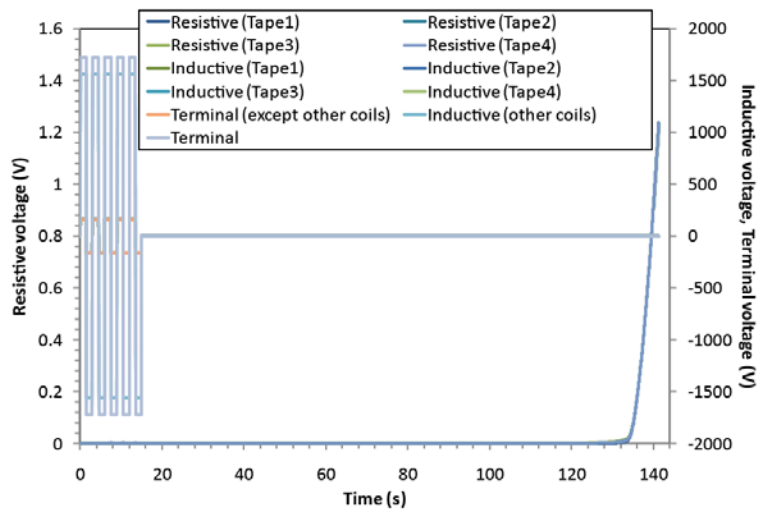


(c) 劣化部の温度

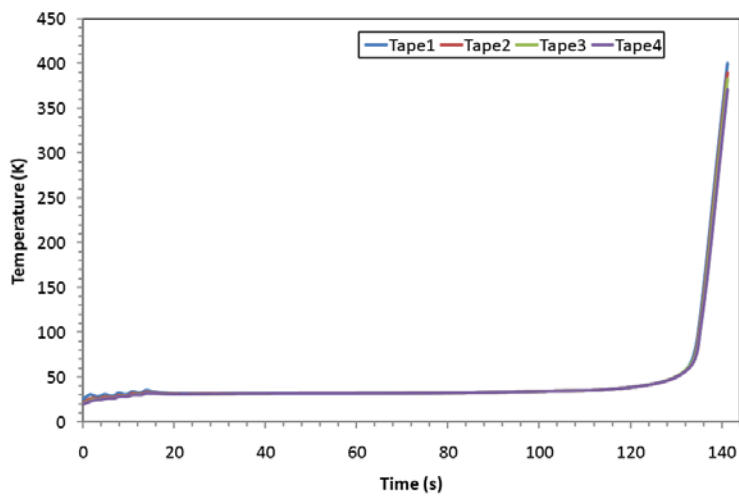
図 2.1.4-3-2 ピーク状態 2160 A (1 枚当たり 540 A) 通電時に線材 1 枚で 1 cm の劣化が発生した場合の集合導体内の電流分布、電圧、温度



(a) 集合導体の電流

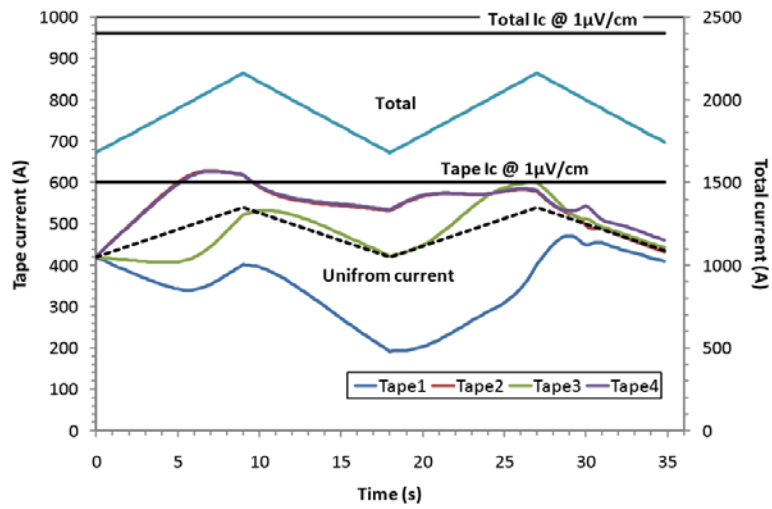


(b) 電圧

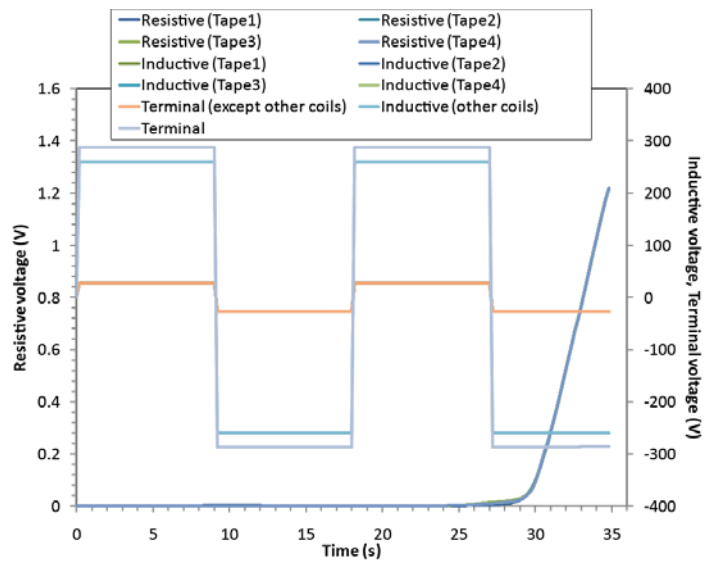


(c) 劣化部の温度

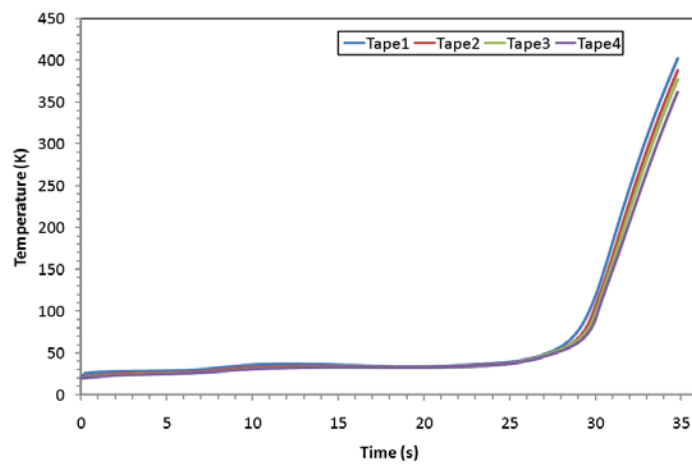
図 2.1.4-3-3 系統安定化運転時に線材 1 枚で 1 cm の劣化が発生した場合の集合導体内の電流分布、電圧、温度



(a) 集合導体の電流



(b) 電圧



(c) 劣化部の温度

図 2.1.4-3-4 負荷変動補償運転時に線材 1 枚で 1 cm の劣化が発生した場合の集合導体内の電流分布、電圧、温度

(3) クエンチ検出方法の検討

「(2) クエンチ時の集合導体コイルの挙動」で述べたように素線絶縁を施した集合導体内で、ある素線で常電導領域が発生しても、転流は速やかに発生する。ここで発生する転流を監視すれば、クエンチの検出が可能になると考えられる。そこで、集合導体内の素線 1 枚で常電導が発生した場合と同様に 2～4 枚で常伝導が発生した場合についても評価し、表 2.1.4-3-1 に偏流（導体内の素線の最大電流と最小電流の差）が 100 A になるまでの時間と温度を示す。これによると、偏流 100 A を検出した時点で、常電導部の温度は 30～40 K である。積層導体内の素線で常電導領域が発生しても、偏流によってクエンチ検出が可能と考えられる。この考え方に基づく新たなクエンチ検出手法の開発については、2.1.5-4 節に述べる。

一方、抵抗性電圧が 0.1 V 発生するのにかかる時間とその時の温度を表 2.1.4-3-2 に示す。偏流によるクエンチ検出は 4 枚の線材で発生する常電導領域の抵抗の差がある場合に有効である。しかしながら、抵抗の差がない場合、特に 4 枚の線材で全く同じ常電導領域が発生した場合、偏流は発生しない。この場合は電圧検出を利用することになる。表 2.1.4-3-2 より、0.1 V 発生時の線材の温度は 120～150 K となる。

以上の結果を踏まえ、既に提案している「外部保護抵抗によるエネルギー回収に基づく安定化層厚の決定法」によって、必要な安定化層厚を求めることが可能となる。

表 2.1.4-3-1 線材に 1 cm の劣化が発生した場合の集合導体内で偏流 100 A 時点の温度

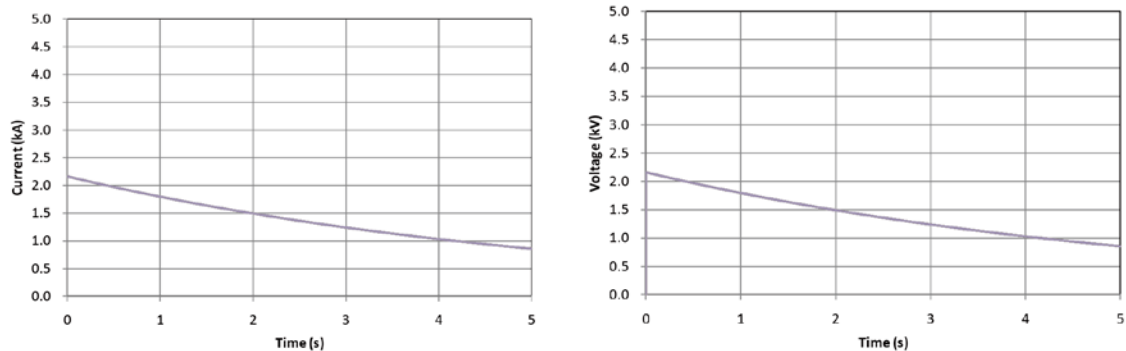
	1 枚劣化	2 枚劣化	3 枚劣化	4 枚劣化
待機状態	1.85 s 27 K	6.75 s 37 K	1.95 s 34 K	偏流なし
ピーク状態	1.45 s 31 K	3.80 s 46 K	1.50 s 41 K	偏流なし
系統安定化	1.60 s 30 K	5.10 s 43 K	1.70 s 39 K	偏流なし
負荷変動補償	1.80 s 28 K	5.85 s 41 K	2.00 s 36 K	偏流なし

表 2.1.4-3-2 線材に 1 cm の劣化が発生した場合の集合導体内で抵抗性電圧 0.1 V 時点の温度

	1 枚劣化	2 枚劣化	3 枚劣化	4 枚劣化
待機状態	200 s 118 K	32.2 s 127 K	18.1 s 133 K	13.4 s 136 K
ピーク状態	15.1 s 117 K	8.5 s 125 K	5.8 s 131 K	4.8 s 134 K
系統安定化	135 s 119 K	15.1 s 132 K	9.8 s 135 K	7.4 s 138 K
負荷変動補償	30.0 s 119 K	13.0 s 138 K	9.6 s 149 K	8.0 s 139 K

(4) トロイダル型集合導体コイルの保護

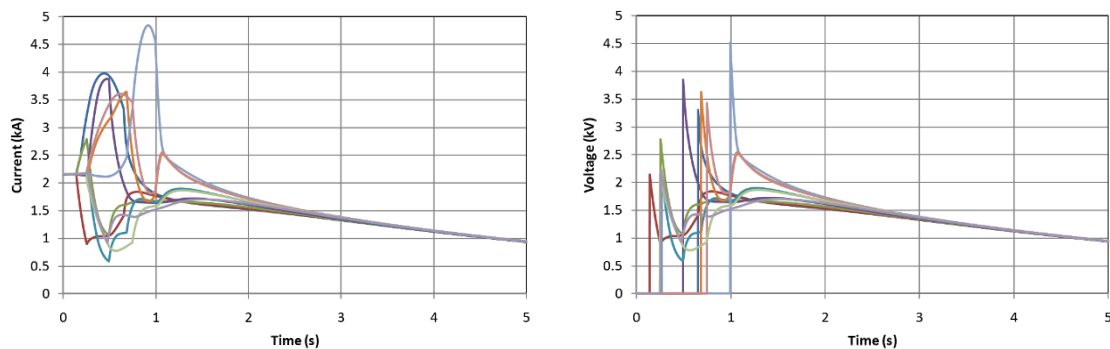
現在、想定されている 2 GJ 級 SMES では 180 個のパンケーキコイルが系統から見ると変換器を介して並列に接続されている。例えば、コイルが永久電流モードの状態では 1 つのコイルでクエンチが検出され、外部抵抗でエネルギーを回収する場合、隣のコイルに電流が誘導され、運転電流に重畳されることになる。さらに、180 個のコイルが完全に同時ダンプすれば、図 2.1.4-3-5 のように全てのコイルが同じ電流・電圧でエネルギー回収がなされるが、ダンプ開始にばらつきがあれば、ダンプ開始が遅れたコイルでは電流が重畳された状態でエネルギー回収が開始するため、コイル両端電圧 ($V = R_{ext}I$) は図 2.1.4-3-6 のように運転電流で想定される値よりも大きくなる。したがって、重畳される電流値が耐絶縁電圧 $V_{max} = R_{ext}I$ を超えない時間内に 180 個のコイルがエネルギー回収を始める必要がある。ダンプ抵抗 R_{ext} が小さい方が、重畳される電流値が許容値を超える時間に余裕ができるが、エネルギー回収時定数が長くなる。



(a) Current

(b) Voltage

図 2.1.4-3-5 トロイダルコイルにおいて全てのコイルが同期してダンプした場合の電流および電圧変化



(a) Current

(b) Voltage

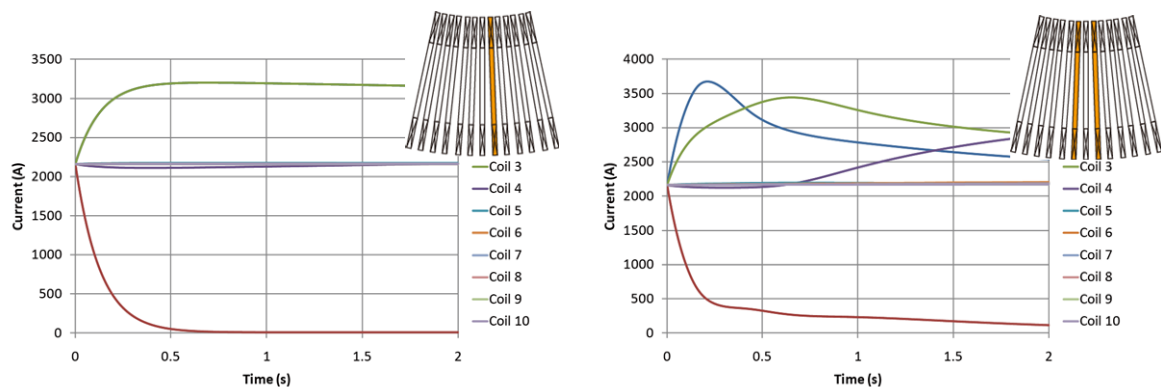
図 2.1.4-3-6 トロイダルコイルにおいてダンプのタイミングがずれた場合の電流および電圧変化

a. 誘導電流

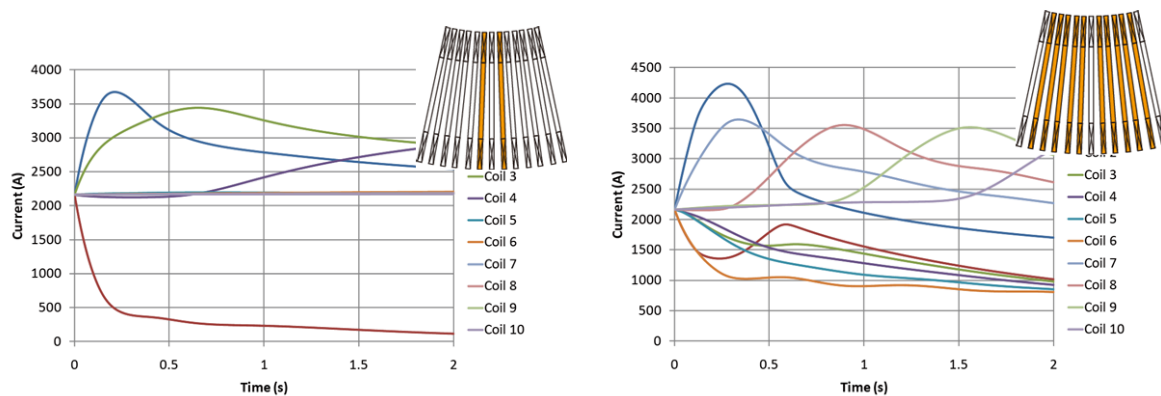
解析結果の一例として、保護抵抗 $1.0\ \Omega$ で1個、2個、4個、10個のコイルがダンプした場合の電流変化を図 2.1.4-3-7 に示す。1個のコイルがダンプした場合、隣のコイルの超電導状態が維持される限り、磁場の変化は殆ど遮蔽されるため、隣のコイルの電流が $2.16\ \text{kA}$ から $3.2\ \text{kA}$ に増加する。しかし、温度上昇はないため、クエンチせずその状態で電流が流れ続ける。一方、2個以上のコイルがダンプした場合、健全なコイルに誘導される電流が I_C 値を超えるため、コイル自身の抵抗によって、電流減衰が始まる。その結果、さらに隣のコイルの電流が上昇する。以下、クエンチが次から次へとコイルに伝播していく。10個のコイルがダンプした場合、電流のピーク値は $4.3\ \text{kA}$ となる。

b. 向心力および転倒力

解析例として、保護抵抗 $1.0\ \Omega$ で1個、2個、4個、10個のコイルがダンプした場合の向心力及び転倒力を図 2.1.4-3-8、2.1.4-3-9 に示す。1個のコイルがダンプした場合、向心力は $5.2\ \text{MN}$ 、転倒力は $4\ \text{MN}$ 発生する。ダンプするコイルの数が増えると、向心力、転倒力ともに増加する。10個のコイルがダンプした場合、向心力は $6.8\ \text{MN}$ 、転倒力は $12\ \text{MN}$ 発生する。

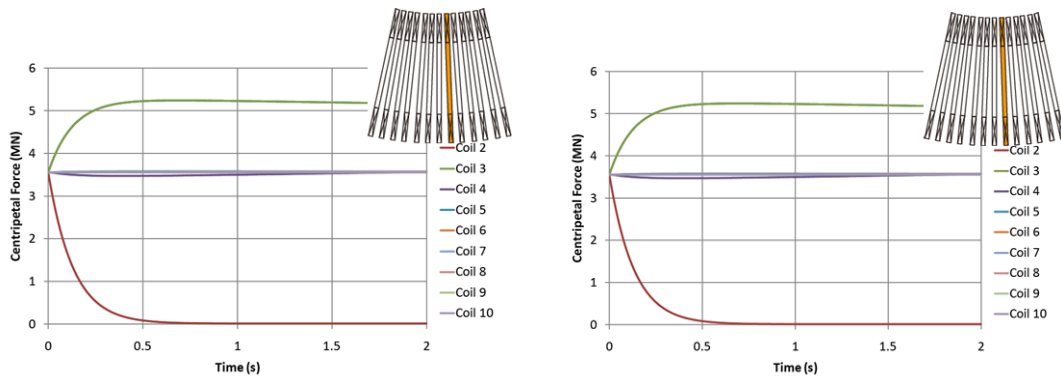


(a) dump of 1 coil (b) dump of 2 coils

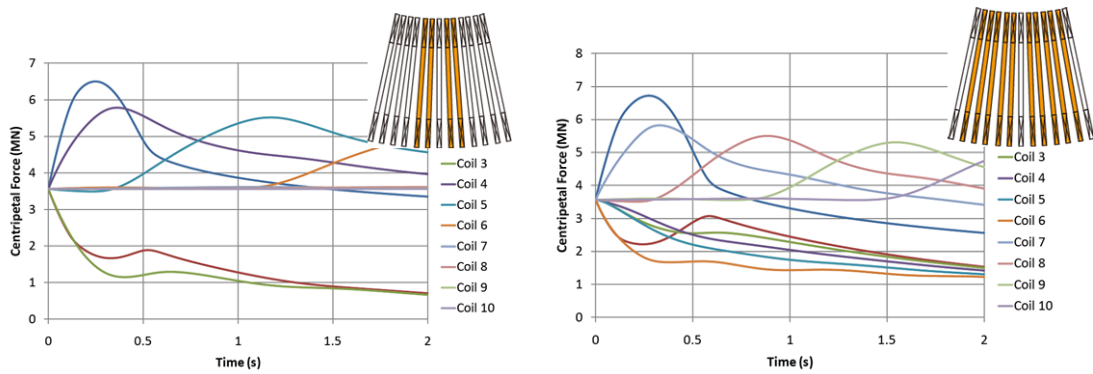


(c) dump of 4 coil (d) dump of 10 coils

図 2.1.4-3-7 $1.0\ \Omega$ でダンプした場合の電流変化

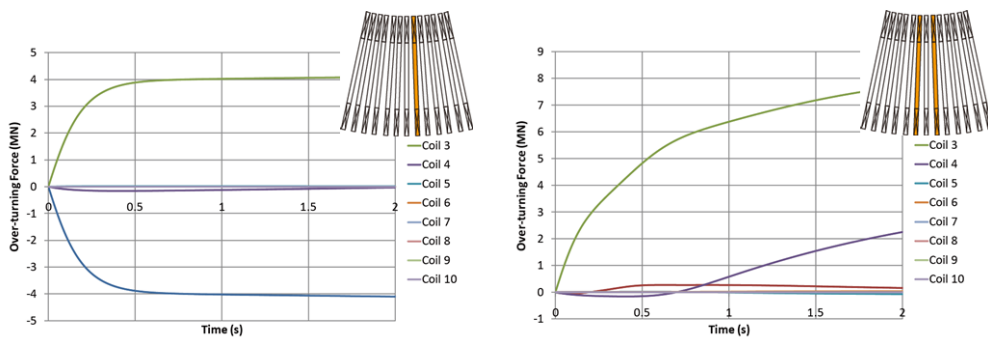


(a) dump of 1 coil (b) dump of 2 coils

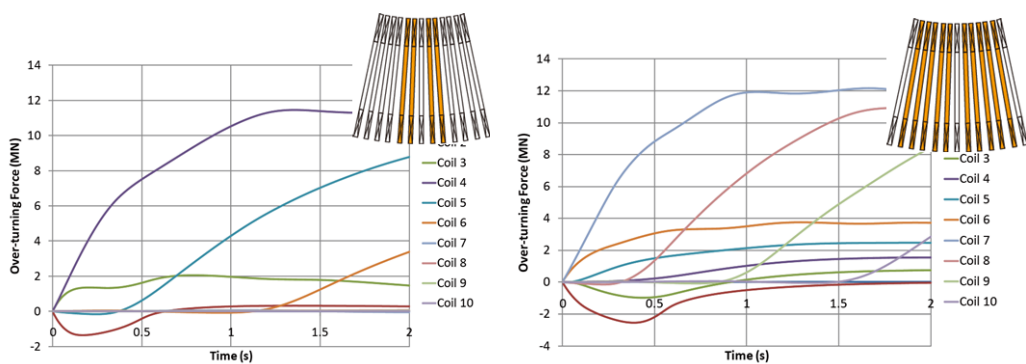


(c) dump of 4 coil (d) dump of 10 coils

図 2.1.4-3-8 1.0 Ω でダンプした場合の向心力の変化



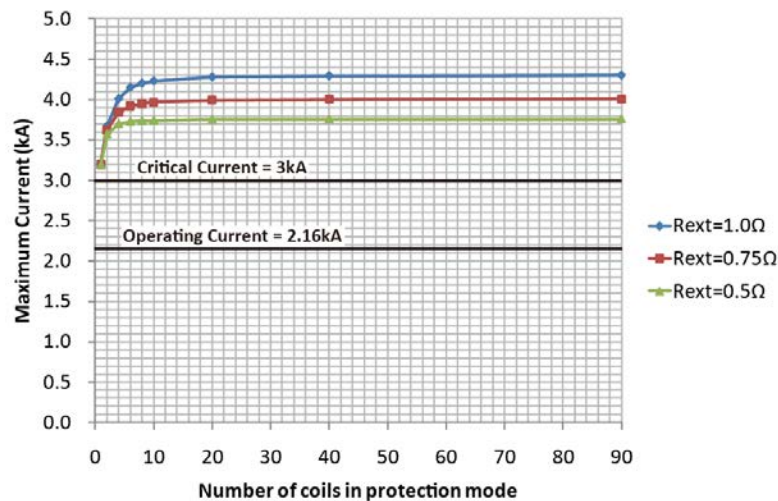
(a) dump of 1 coil (b) dump of 2 coils



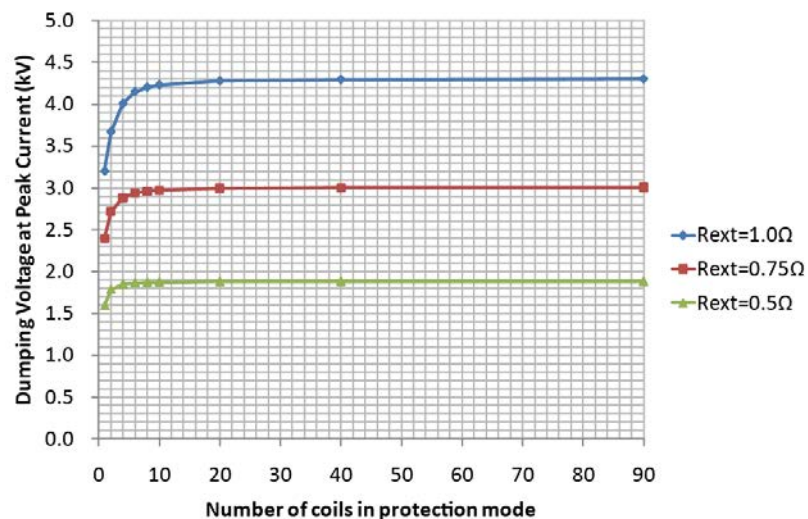
(c) dump of 4 coil (d) dump of 10 coils

図 2.1.4-3-9 1.0 Ω でダンプした場合の転倒力の変化

図 2.1.4-3-10 にダンピングするコイルの個数と電流の最大値、コイル両端電圧の最大値を示す。保護抵抗が 1.0、0.75、0.5 Ω の場合、最大電流はそれぞれ、4.3、4.0、3.8 kA になり、コイル両端電圧はそれぞれ 4.3、3.0、1.9 kV となる。図 2.1.4-3-11 にコイル両端の最大発生電圧を 2.0、2.5、3.0 kV に抑えるためにダンピングを開始する時間を示す。表 2.1.4-3-3 に保護抵抗と最大電流、最大電圧の結果をまとめる。以上の結果から、保護抵抗 1.0 Ω の場合、コイル両端電圧を 2.0 kV に抑えることはできない（完全に同時にダンピングした場合でも 2.16 kV 発生する）が、20 msec、50 msec 以内にすべてのコイルがダンピングを開始すれば、それぞれ 2.5、3.0 kV に抑えることができる。保護抵抗 0.75 Ω では、コイル両端電圧を 2.0 kV 以下に抑えるためには 40 msec の以内にすべてのコイルでダンピングを開始する必要がある。保護抵抗 0.5 Ω では、コイル両端電圧は常に 2.0 kV 以下に抑えられる。



(a) Maximum current



(b) Maximum voltage

図 2.1.4-3-10 保護動作中の最大電流及び最大電圧

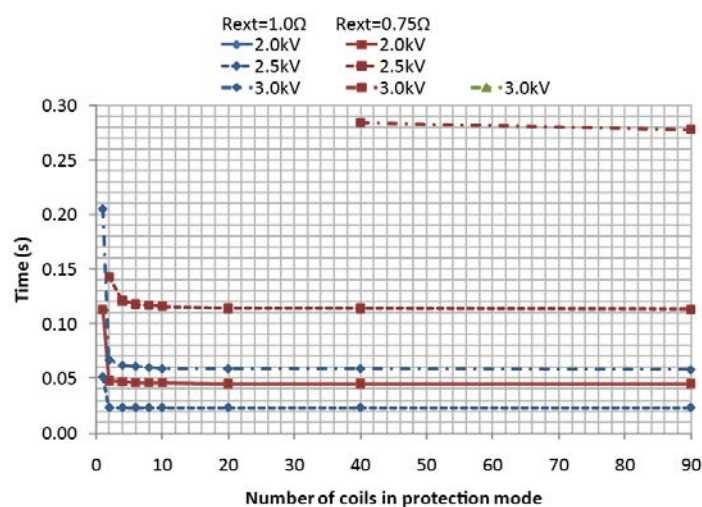


図 2.1.4-3-11 ダンプした際の電圧が 2.0、2.5、3.0 kV で抑えるための遅れ許容時間

表 2.1.4-3-3 保護動作中の最大電流および最大電圧

保護抵抗		1.0 Ω	0.75 Ω	0.5 Ω
最大電流		4.3 kA	4.0 kA	3.8 kA
(I_{max}/I_t)		(2.0)	(1.86)	(1.74)
(I_{max}/I_c)		(1.43)	(1.34)	(1.25)
最大電圧		4.3 kV	3.0 kV	1.9 kV
遮断時定数		5.4 sec	7.2 sec	10.8 sec
許容可能遮断遅れ時間	< 2.0 kV	×	40 msec	○
	< 2.5 kV	20 msec	0.1 msec	○
	< 3.0 kV	50 msec	0.25 sec	○

超電導コイルが常電導転移すると、コイルに蓄積されていた磁気エネルギーは常電導転移領域で熱として消費されて温度が上昇し、最終的に特性劣化や焼損に至ることがある。したがって、コイルと並列にダンプ抵抗を接続し、この抵抗によって事故時にコイル内に蓄積されていた磁気エネルギーを回収する方法（外部抵抗保護法）が採られる。本プロジェクトでは、Y系線材を4枚バンドルした集合導体で2 GJ級のトロイダル型SMESコイルを構成した場合のエネルギー回収について調べた。例えば、長手方向に1 cmの劣化（ I_c 値=0 A）が発生した場合、「(3)クエンチ検出方法の検討」の結果から、偏流100 A発生時の温度は50 K、クエンチ検出電圧0.1 Vのときの温度は150 Kである。この温度からダンプした場合、最高到達温度300 Kを抑えるために必要な銅安定化層の厚さを求める。保護抵抗は、「(4)トロイダル型集合導体コイルの保護」の結果を考慮すると、コイル両端電圧2 kV以下に抑えるためには、0.75 Ωあるいは0.5 Ωが適している。コイル両端電圧2.5 kV

まで許容すれば保護抵抗 1.0Ω でもエネルギー回収が可能である。ユニットコイル 1 つ当たりのエネルギーを $E = 2.4 \text{ GJ} / 180 \text{ coils} = 13.4 \text{ MJ}$ 、線材積層数 $N = 4$ 、線材幅 $w = 1 \text{ cm}$ 、Y系超電導層の厚さ $d_{\text{YBCO}} = 1.0 \mu\text{m}$ 、中間層は無視、基板の厚さ $d_{\text{sub}} = 800 \mu\text{m}$ (補強材 $700 \mu\text{m}$ を含む) として、必要な銅安定化層の厚さを求めた。表 2.1.4-3-4 に結果をまとめる。

表 2.1.4-3-4 エネルギー回収条件から要求される安定化層の厚さ
(a) 保護抵抗 1.0Ω

トロイダルコイルの貯蔵エネルギー	2.4 GJ			
要素コイル数	180			
要素コイルの貯蔵エネルギー, E	13.4 MJ			
運転電流, I_0	2.16 kA			
要素コイルのインダクタンス, L (相互インダクタンス込)	5.74 H			
保護抵抗, R	1.0 Ω			
端子間電圧, V_m	2.16 kV			
遮断時定数	5.74 s			
YBCO層厚さ, d_{YBCO}	1.0 μm			
基板厚さ, d_{sub}	100 μm			
補強材厚さ, d_{reinf}	700 μm			
導体素線数, N	4			
クエンチ検出時の温度, T_0	50 K		150 K	
最高到達温度, T_m	300 K			
保護動作開始遅れ時間, t_d	0 s	0.5 s	0 s	0.5 s
銅安定化層厚さ, d_{stab}	95 μm	110 μm	197 μm	226 μm

(b) 保護抵抗 0.75 Ω

トロイダルコイルの貯蔵エネルギー	2.4 GJ			
要素コイル数	180			
要素コイルの貯蔵エネルギー, E	13.4 MJ			
運転電流, I_0	2.16 kA			
要素コイルのインダクタンス, L (相互インダクタンス込)	5.74 H			
保護抵抗, R	0.75 Ω			
端子間電圧, V_m	1.62 kV			
遮断時定数	7.66 s			
YBCO層厚さ, d_{YBCO}	1.0 μm			
基板厚さ, d_{sub}	100 μm			
補強材厚さ, d_{reinf}	700 μm			
導体素線数, N	4			
クエンチ検出時の温度, T_0	50 K		150 K	
最高到達温度, T_m	300 K			
保護動作開始遅れ時間, t_d	0 s	0.5 s	0 s	0.5 s
銅安定化層厚さ, d_{stab}	123 μm	137 μm	250 μm	277 μm

(c) 保護抵抗 0.5 Ω

トロイダルコイルの貯蔵エネルギー	2.4 GJ			
要素コイル数	180			
要素コイルの貯蔵エネルギー, E	13.4 MJ			
運転電流, I_0	2.16 kA			
要素コイルのインダクタンス, L (相互インダクタンス込)	5.74 H			
保護抵抗, R	0.5 Ω			
端子間電圧, V_m	1.08 kV			
遮断時定数	11.5 s			
YBCO層厚さ, d_{YBCO}	1.0 μm			
基板厚さ, d_{sub}	100 μm			
補強材厚さ, d_{reinf}	700 μm			
導体素線数, N	4			
クエンチ検出時の温度, T_0	50 K		150 K	
最高到達温度, T_m	300 K			
保護動作開始遅れ時間, t_d	0 s	0.5 s	0 s	0.5 s
銅安定化層厚さ, d_{stab}	175 μm	187 μm	346 μm	369 μm

(5) 結果

素線絶縁を施した集合導体コイルの常電導発生後の転流現象について、数値解析によって評価した。その結果、素線絶縁を施した集合導体内で、ある素線で常電導領域が発生しても、転流は速やかに発生することが明らかとなった。

SMES の運転を想定した場合、変換器などのノイズレベルによっては常電導による発生電圧が埋もれてしまって、検出が困難になることも考えられる。そこで、今回、集合導体の転流を監視する方法を検討した。集合導体内の素線で常電導が発生した場合、偏流（導体内の素線の最大電流と最小電流の差）が 100 A を検出した時点で、常電導部の温度は 30～40 K となった。積層導体内の素線で常電導領域が発生しても、偏流によってクエンチ検出が可能と考えられる。

この結果を踏まえ、外部保護抵抗によるエネルギー回収に基づく安定化層厚の決定法によって、必要な安定化層厚を求めることが可能となる。現在、想定している 2 GJ 級 SMES では 180 個のパンケーキコイルが系統から見ると変換器を介して並列に接続されている。例えば、コイルが永久電流モードの状態ですべてのコイルでクエンチが検出され、外部抵抗でエネルギーを回収する場合、隣のコイルに電流が誘導され、運転電流に重畳されることになる。そこで、ダンプするコイルの個数と電流の最大値、コイル両端電圧の最大値について評価し、必要となる安定化層の厚さを求めた。その結果、保護抵抗が 0.75 Ω の場合、初期温度（クエンチ検出時温度） $T_0 = 150$ K、最高到達温度 $T_m = 300$ K とすると、必要な銅安定化層の厚さは 108 μm となる。保護抵抗が 0.5 Ω の場合、同様に必要な銅安定化層の厚さを計算すると 154 μm となった。

2.1.4-4 高磁界コンパクト SMES システムモデル評価試験方法の検討（中部電力）

(1) 研究開発目的

通電特性や冷却性能、絶縁性能などの Y 系 SMES コイル評価結果を反映し、2 GJ 級 SMES コイル基本システム構成の改善を図るとともに、トロイダルコイル配置となるコイルシステムを構成する複数個のコイルの組み合わせにおいて、クエンチ等の動的な変化などが発生した場合のクエンチ検出ならびに保護の考え方を前項において検討・整理した。本項では、クエンチ時の挙動検証等を含めた高磁界コンパクト SMES システムモデルの評価試験方法について検討した。検討に当たっては、前フェーズにおいて実施した試験法検討結果を踏襲し、新たに Y 系超電導コイルシステムとして追加すべき評価試験方法について検討を実施した。

(2) SMES 試験法

前フェーズにて検討した SMES 試験方法を以下に示す。

a. SMES デバイス試験法

今後の標準となりうる SMES システム試験法について検討した。SMES システムは図 2.1.4-4-1 のように構成される。

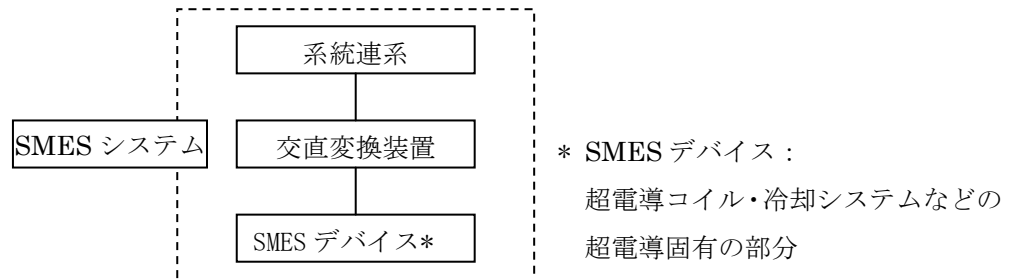


図 2.1.4-4-1 SMES システムの構成

このうち、交直変換装置と系統連系に関しては、他の電力貯蔵装置における標準的な試験法が既に存在している。そこで、まずは SMES デバイスに関する試験法の検討を行い、成果として、SMES デバイス試験法を取りまとめた。

試験とはすなわち「性能」の確認である。ここでいう「性能」には、狭義の性能（使用に足ること）と、安全性の2つの意味合いがある。また、安全性の確認として、機械的な安全性と、電気的な安全性の2面がある。これらを峻別することは特にユーザの使用に際して非常に重要であり、表 2.1.4-4-1 に取りまとめた。

表 2.1.4-4-1 試験項目の分類

機械的安全性の確認に係る試験	<ul style="list-style-type: none"> ・ 外観検査・寸法検査 ・ 耐圧力試験 ・ 気密試験 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 真空リーク試験 ・ 安全確認試験
電気的安全性の確認に係る試験	<ul style="list-style-type: none"> ・ 絶縁抵抗測定 ・ 電気絶縁耐力試験 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 電流遮断試験 ・ 漏洩磁界測定
使用に足ることの確認に係る試験	<ul style="list-style-type: none"> ・ 冷却試験 ・ 熱侵入量測定 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 定格通電試験 ・ 繰返し充放電試験

b. SMES システムの試験法

SMES デバイス試験法を基に、SMES システム全体の試験法について検討した。

まず、他の電力貯蔵装置における試験法の調査、そして今回のフィールド機における試験法検討のなかで、次の2つの規格を引用・参照できることが判明した。

- ① JEC-2470-2005 分散形電源系統連系用電力変換装置
- ② JEAC 5006-2000 電力貯蔵用電池規程

上記2規格の引用参照範囲と、SMES デバイス試験法の対象範囲の関係は図 2.1.4-4-2 のとおりである。

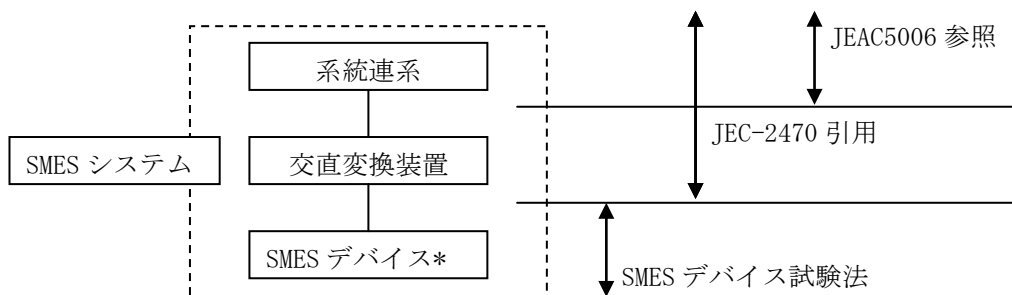


図 2.1.4-4-2 引用・参照範囲および対象範囲の関係

以上により、SMES デバイス試験法をベースに、JEC-2470 を引用し、JEAC5006 を参照することで、SMES システム全体について一通りカバーできることになる。

前項に倣って、狭義の性能（使用に足ること）の確認、機械的安全性の確認、電気的安全性の確認の、いずれに該当するかを以下の表 2.1.4-4-2 に取りまとめた。

表 2.1.4-4-2 試験項目の分類

	SMES デバイス	SMES システム (SMES デバイスを除く)
機械的安全性の確認に係る試験	<ul style="list-style-type: none"> ・外観・寸法検査 ・耐圧力試験 ・気密試験 ・真空リーク試験 ・安全確認試験 	<ul style="list-style-type: none"> ・外観検査
電気的安全性の確認に係る試験	<ul style="list-style-type: none"> ・絶縁抵抗測定 ・電気絶縁耐力試験 ・電流遮断試験 ・漏洩磁界測定 	<ul style="list-style-type: none"> ・接地抵抗測定 ・絶縁抵抗測定 ・電気絶縁耐力試験 ・保護インターロック試験 ・負荷遮断試験
使用に足ることの確認に係る試験	<ul style="list-style-type: none"> ・冷却試験 ・熱侵入量測定 ・定格通電試験 ・繰返し充放電試験 	<ul style="list-style-type: none"> ・起動・停止試験 ・監視制御装置試験 ・過渡応答特性試験 ・充放電試験

(3) 高磁界コンパクト SMES システムモデル評価試験方法

Y 系 SMES システムモデルは、複数個のコイルが伝導冷却状態で通電されることとなる。このため、伝導冷却性能試験や低温真空中での電気絶縁性能を評価試験することが求められる。また、コイルクエンチした場合、隣接するコイルに与える影響を考慮した保護手法の検証評価を、コイルがトロイダル配置されることにより経験する磁界が不均一であることを盛り込んだ評価試験を実施することが求められる。

本件については、製造メーカーや学識経験者などの有識者からなる試験法検討小委員会において、具体的な試験項目や試験方法を検討した。

2.1.4-5 高磁界コンパクト SMES システムモデル検証のまとめ

2 GJ 級 SMES コイル基本システム構成の最適化並びに高磁界コンパクト・高効率伝導冷却コイルを用いた評価用試験モデルの設計と、SMES システムとしての適用性を検証評価する試験計画を作成することを中間目標とし、これらの目標を達成した後、2 MJ 級評価用試験モデルを用いて、適用性検証評価試験計画に基づいて SMES 動作検証を行うとともに、「超電導電力ネットワーク制御技術開発」プロジェクトにおいて実施した試験をベースとした 2 万回以上の繰返し充放電による特性検証を実施することを最終目標として検討を進める計画であったが、中間評価後に後半 2 年間の実施内容を大幅に変更することとなった。これに伴い、本節の実施内容は前半 3 か年の範囲に留め、後半は線材構造に起因したコイル特性変化の要因究明とその対策に当たることとなった。

平成22年度までの成果として特筆すべきことは、2 GJ 級トロイダル型 SMES において、Y 系集合導体構造コイルのクエンチ保護方法について検討したことが挙げられる。SMES コイルを構成する絶縁素線集合化導体でクエンチが発生した場合、素線間で転流が発生することをシミュレーションで確認し、クエンチ検出法への素線間転流現象の適用性検討を開始し、有効な検出手法となることを確認した。詳細は2.1.5-4節に記す。

本開発項目においても、電気機器や超電導技術に関する学識経験者、重電メーカー各社、および各電力会社等からなる超電導電力貯蔵システム研究開発委員会等を開催し、コイル構造やクエンチ挙動等を十分に議論した上で開発を進めた。

具体的には、Y 系集合導体構造コイルの特徴を活かしたクエンチ検出方法とコイル保護方法について、モデルによる試験検証を実施しており、すでに明らかとしている絶縁素線集合化導体でクエンチが発生した場合の素線間転流シミュレーション結果との比較検証を実施した。

2.1.5 高信頼性・高耐久性 SMES コイル要素技術開発

本研究開発では、実運転条件におけるコイル線材及びコイル構造を評価することで、コイルの径方向応力を 10MPa 級に低減する設計手法を確立し、2 万回繰返し充放電試験と同等レベルの信頼性・耐久性を持つコイル要素技術開発に向けて課題を抽出し、解決策を提案することを目標として、以下の内容の研究開発を展開した。

平成 22 年度までに実施した「2GJ 級高磁界・大電流コンパクトコイル構成技術開発」及び「高効率コイル伝導冷却技術開発」の要素コイル開発結果を反映し、複数個のコイルの組み合わせにおいてクエンチ等の動的な変化等が発生した場合を想定したコイルの限界性能を把握し、コイル自体及びコイルシステムとしての裕度の適正化を図り、並びに Y 系超電導コイルの限界設計技術を確立した。これにより SMES のさらなる低コスト化の見通しを得た。

前期 3 ヶ年の研究開発における SMES コイル特性の評価結果から、最終目標である実運転に耐え得るコイル技術開発に向けて、特性変化に影響する要因を検討した。想定される Y 系超電導線材の剥離強度からコイルの径方向応力を低減する設計手法を確立するために必要となる課題を抽出し、高耐久性・高信頼性コイル構成技術の検討を行った。また、種々の対策を施した小規模な検証用サンプルにて評価することで、コイルの最適な設計手法を確立し、SMES コイルとしての信頼性・耐久性を向上させた。

さらに、SMES 実運転条件を模擬した試験システムによりコイル線材及びコイル構造を評価するとともに、SMES コイルの構成技術開発のために検討したコイルの設計手法を用いたモデルコイルによって伝導冷却特性の評価を行った。

また、実運転における故障発生を考慮し、クエンチ検出・保護も考慮したコイル要素技術の開発に向けて、クエンチ保護方法について検討を実施し、上記検証用にて使用するサンプルを用いて、クエンチ時の素線・コイル相互間におけるクエンチ発生条件や転流の大きさなどの定量的な評価を行ない、前期 3 ヶ年までに実施した解析結果を実証するための検証試験を実施した。

以上により、SMES コイルシステム化技術のために必要となる高耐久性・高信頼性コイルを検討・評価し、2GJ 級 SMES の実現に資する重要な要素技術を開発すること、ならびに、コイル保護技術の確立を目的とした開発を進めた。

2.1.5-1 Y系線材剥離耐性評価 (中部電力、京都大学)

(1) 研究開発目標

薄膜積層構造であるY系超電導線材を用いたコイルは、冷却や通電によりコイルに径方向の応力が加わると、Y系超電導線材の剥離によって超電導特性の劣化が生じるという報告がこれまでに多数なされており、特に、コイルを樹脂含浸して一体化したコイルでは顕著にこの現象が発生している¹⁾²⁾³⁾。したがって、Y系超電導コイルの力学的特性として剥離耐性の評価・把握は重要な課題である。線材中の欠陥の分布を考慮した検討が必要であると考えられる。

そこで本研究では、Y系超電導線材の剥離耐性評価を行うため、ロッドを用いた剥離試験を実施すると同時に、線材中の欠陥の分布を調べることにより、得られた強度のばらつきや線材の破壊メカニズムを検討することを目的とした。また、剥離耐性の評価面積依存性について破壊力学的・統計学的観点からも考察して、コイル設計の指針について検討した。

(2) Y系線材の剥離耐性評価試験

本研究では供試材としてGdBCO薄膜超電導線材（以下GdBCO線材）を用いた。図2.1.5-1-1に示すような断面構造であり、100 μm 厚の HasteloyTM基板上にIBAD / PLD法により中間層から超電導層までを形成し、銀の保護層を蒸着した後、酸素気流中でアニール処理を施した試料であった。剥離試験はスタッドプル法で実施した。スタッドプル法では、サンプルを固定用の台座にエポキシ系接着剤を用いて接着し、台座と線材の接着が完了した後ガイドを台座に固定し、エポキシ系接着剤を用いてロッドと超電導線材を接着した。図2.1.5-1-2に剥離耐性試験の試料のセッティング状況を示す。ガイドを用いることで、超電導線材に対して垂直に引張荷重が作用し、精度よく剥離耐性を評価できるようにした。次に、引張変位速度一定 ($5 \times 10^{-4} \text{mm/sec}$) で負荷を加えた。破壊が生じたときの荷重を評価面積 (接着面積 = ロッド断面積) で除したものを剥離強度とした。図2.1.5-1-3にロッド径を変化さ

材料	厚さ
銀	16 μm
GdBa ₂ Cu ₃ O _x	~2.2 μm
CeO ₂	500nm
MgO	~10nm
Y ₂ O ₃	~20nm
Al ₂ O ₃	~100nm
Hasteloy	100 μm

図 2.1.5-1-1 剥離耐性評価に使用した超電導線材の構造



図 2.1.5-1-2 剥離耐性試験方法

せて剥離強度を測定した結果を示す。縦軸を剥離強度、横軸を評価面積とし、赤丸は試験に成功した試験片、緑三角は各評価面積において成功した試験片の強度の平均値を示す。また、青中空丸は接着剤で破壊したが線材には損傷が見られなかった試験片であり、これらは線材自体の強度がそれ以上であったと考えられる。このグラフから、評価面積が小さい

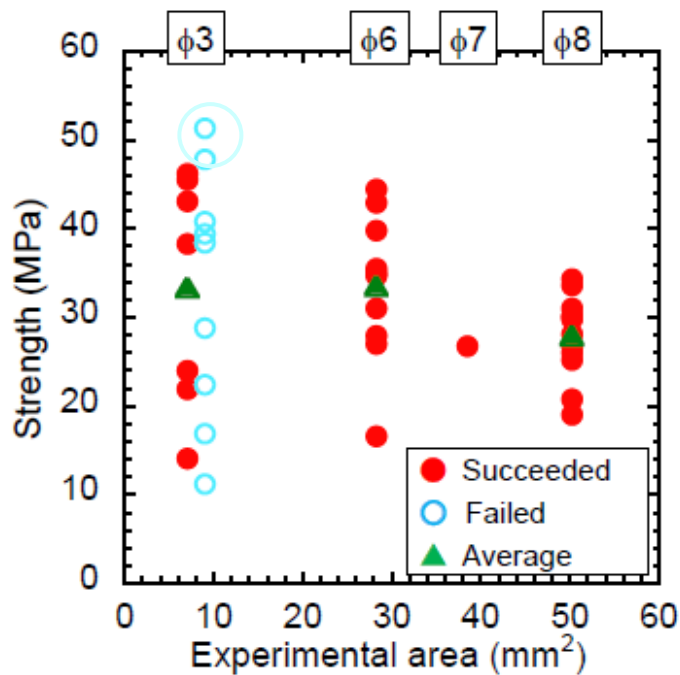


図 2.1.5-1-3 ロッド径を変化させて測定した引張強度

ほど強度のばらつきが大きいことが示された。なお、ロッド径を変化させたのは、セラミクス材料の強度には評価体積依存性が生じるため、セラミクス薄膜を積層した超電導線材においても評価面積依存性が生じる可能性を考慮したことによる。

続いて得られた結果をモデル化し、検討するため、試験片の破面性状や破壊起点等の破壊形態を観察し、元素分析を用いて破壊している層を特定した。破面の積層方向における位置特定には、AESによる元素分析を用いた。図 2.1.5-1-4 に試験後の試験片の写真を示す。試験片の損傷した部分を切開し、表面性状観察と元素分析を行なったところ、主として、GdBCO超電導層内に凹凸のある破面が確認された。また、凹凸が小さく、元素分析ではGdBCO層とCeO₂層の両方の成分が検出され、破面がGdBCO/CeO₂界面であると考えられる破面も観察された。線材の破壊メカニズムを検討するため、線材の保護層である銀をエッチングし、破面観察を行って破壊起点を探った。破面を詳しく観察すると、図 2.1.5-1-5 に示すような、扇形の損傷箇所先端部分に起点となるような丸い形状をした欠陥が確認された。これを円で近似し直径を計測すると、106 μmであった。また、この周りにもいくつかの欠陥が観察されたが、いずれも起点となっ



図 2.1.5-1-4 剥離耐性試験後の試験片

たと思われる欠陥より小さいものであった。破面観察より、図 2.1.5-1-5 のような比較的大きな欠陥が線材中に存在し、それを起点として破壊が生じた可能性が示唆され、強度やそのばらつきの評価面積依存性を検討するためには、線材中の欠陥の分布を調べる必要であると考えられる。そこで、無加工の線材中における欠陥サイズの分布を測定することにより、線材に本来存在する欠陥を調べ、そこから線材の強度やそのばらつきを予測することとした。長さ 10 mm 程度に切り出した線材の銀保護層をエッチングし、その線材の表面の光学写真と一部を拡大したデジタルマイクロスコープ画像を

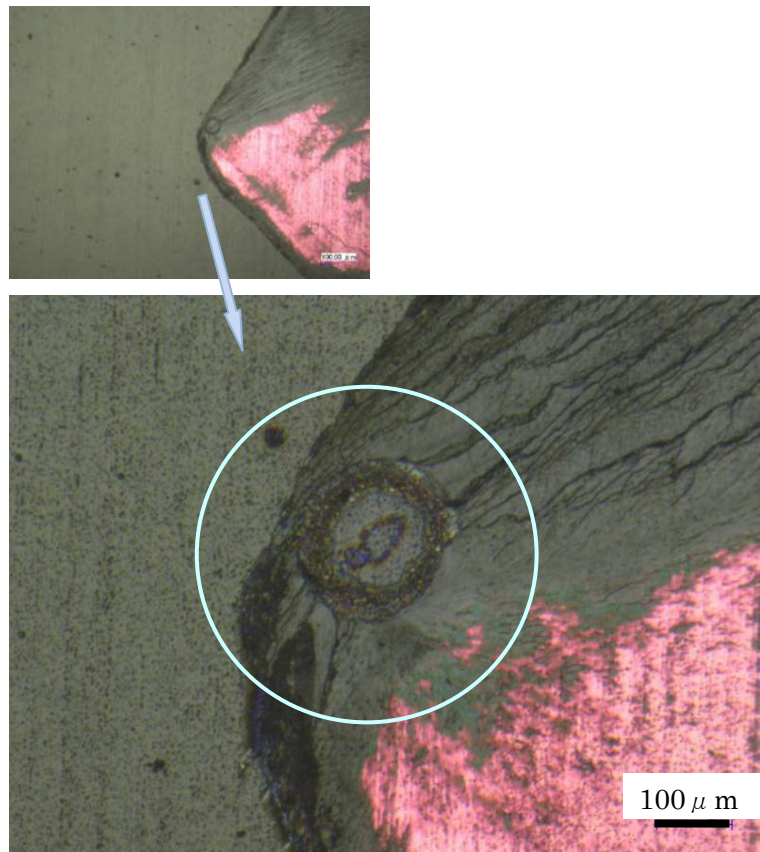


図 2.1.5-1-5 剥離試験後に観察された超電導線材表面の欠陥

たデジタルマイクロスコープ画像を図 2.1.5-1-6 に示す。画像より、線材表面に見られる欠陥は比較的丸い形状をしたものが多いこと、大型の欠陥は直径が $100\mu\text{m}$ 級であることが観察された。また、中心部の大きな欠陥以外では直径 $1\mu\text{m}$ 未満の微小粒子が無数に存在し、欠陥の外側には $5\text{-}10\mu\text{m}$ 程度の比較的大きな粒子がいくつか存在することが観察された。

次にAESによる元素分析を行ない、欠陥の形態を観察した。その結果、微小粒子は周りの層と同じGdBCOの結晶粒であること、線材に元来存在する欠陥は破面と同じGdBCO層内もしくは

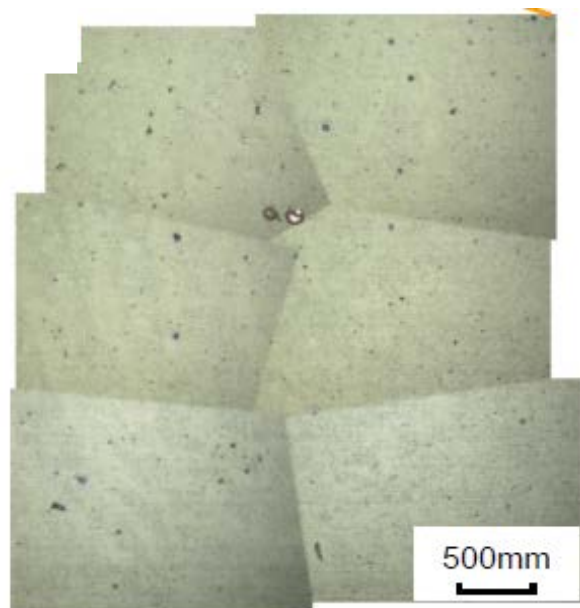


図 2.1.5-1-6 超電導線材表面の欠陥

GdBCO/CeO₂界面付近に存在するものであることがわかった。また微小粒子が

GdBCOの結晶粒であることから、これが超電導層成膜時に生じたものであると考えられ、これらを踏まえると、破壊に結びつくような大きな欠陥は超電導層成膜時に生じたものであることが考えられる。図 2.1.5-1-6 に示した線材表面の領域で、欠陥サイズの測定を行った。欠陥サイズの測定を行った領域の面積は 14.9 mm²であり、直径 10 μm以上の欠陥は 243 個観察された。これらの欠陥の直径を四捨五入により整数値とし、縦軸を度数、横軸

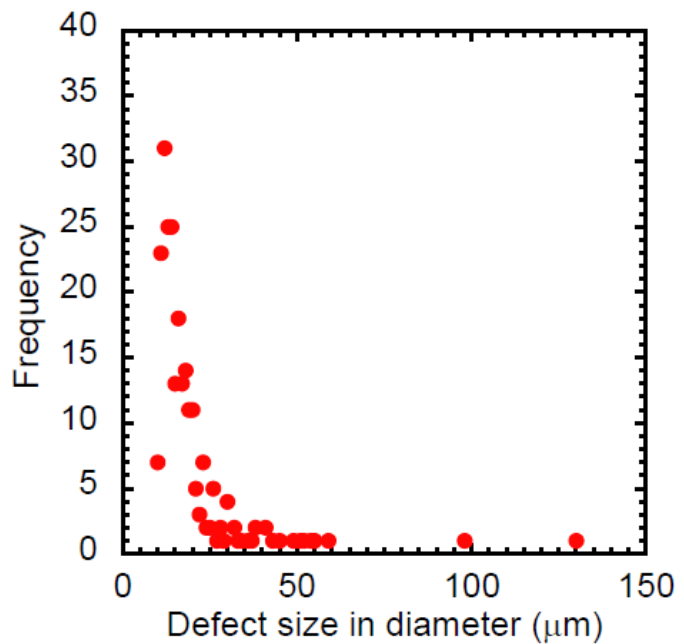


図 2.1.5-1-7 超電導線材表面の欠陥の存在度数

を欠陥の直径(μm)として表したものを図 2.1.5-1-7 に示す。このグラフを見ると、度数のピークは 12 μmであり、観察された最大値は 130 μmであった。

(3) Y系線材の剥離耐性評価試験および破壊形態の特定

剥離強度の信頼性評価としてワイブル分布関数により評価を、ロッド径により類別して行なった。それぞれのロッド径の剥離耐性試験結果をワイブルプロットした結果を図 2.1.5-1-8 に示す。これらの結果からワイブル係数 m は 2.5~6.8 であった。一方、先述の欠陥分布を適用して予測した強度分布に基づくワイブル係数は 4.6 であった。

また、予測した強度分布で決定したパラメータは表 2.1.5-1-1 にまとめて示す。 K_{IC} は破壊じん性値と呼ばれ、一様応力が負荷された均質弾性体中に存在する円盤状き裂の応力拡大係数が K_{IC} を超えた時にき裂が進展すると考えられる数値である。代表強度 σ_c は、 K_{IC} に達したときの応力示す。坂井³⁾⁴⁾は、GdBCO 薄膜線材の 4 点曲げはく離試験より $m=0.47$, $K_{IC}=0.73 \text{ MPa} \cdot$

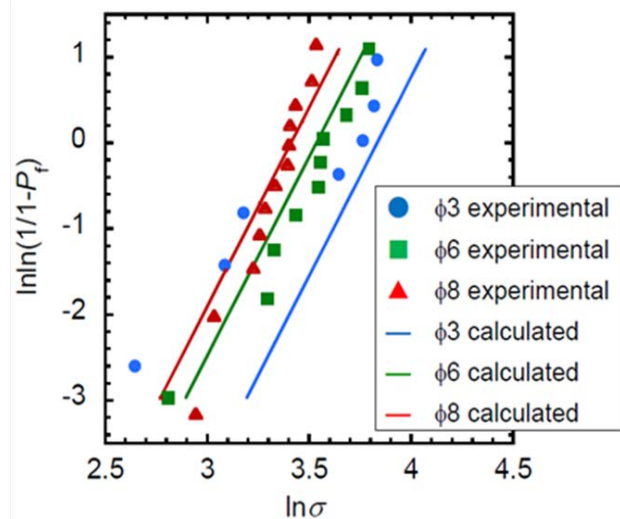


図 2.1.5-1-8 各ロッド径の破壊強度試験結果のワイブルプロット

$m^{1/2}$ を得ており、本研究で予測された破壊じん性は小さい値であるが、坂井らの結果とは近い値であった。

求めたパラメータを用いて、観測された欠陥サイズの分布から予測される強度の確率密度分布を描いたものを図 2.1.5-1-9 に示す。ここで、グラフは縦軸に確率密度、横軸に強度をとり、累積確率 0.05-0.95 の範囲でプロットした。これにより、本項で求めた値と各ロッドの評価面積を用いることにより、同一の欠陥分布から異なる強度分布が導かれ、評価面積が大きくなるほど平均強度とばらつきが小さくなることが予測できた。また、平均強度と標準偏差は表 2.1.5-1-2 に示す。

続いて、剥離評価試験結果と予測された分布との比較を行った。まず各ロッド径について、欠陥サイズの分布から予測される強度の確率密度分布で得られた平均強度と標準偏差を用いて、剥離強度試験結果と比較したグラフを図 2.1.5-1-10 に示す。見やすさを考慮し、予測された強度のデータは全体的に右側へずらして描いた。このグラフでは、 $\phi 6$ 、 $\phi 8$ では平均値、ばらつきともに比較的一致しているが、 $\phi 3$ では平均強度に 10 MPa 程度の違いが見られた。 $\phi 3$ ではいくつかの試験片が接着剤で破壊したことがあげられ、接着剤で破壊した試験片が存在するという事は、接着剤よりも強度が小さい試験片のデータを得て強度の大きいデータが除かれていると考えられる。そのため、 $\phi 3$ で得られる線材本来

表 2.1.5-1-1 剥離強度のワイブルプロットから決定したパラメータ

ワイブル係数 m	4.6
破壊じん性値 K_{Ic}	0.34 (MPa · m ^{1/2})
代表強度 σ_0	40 (MPa)

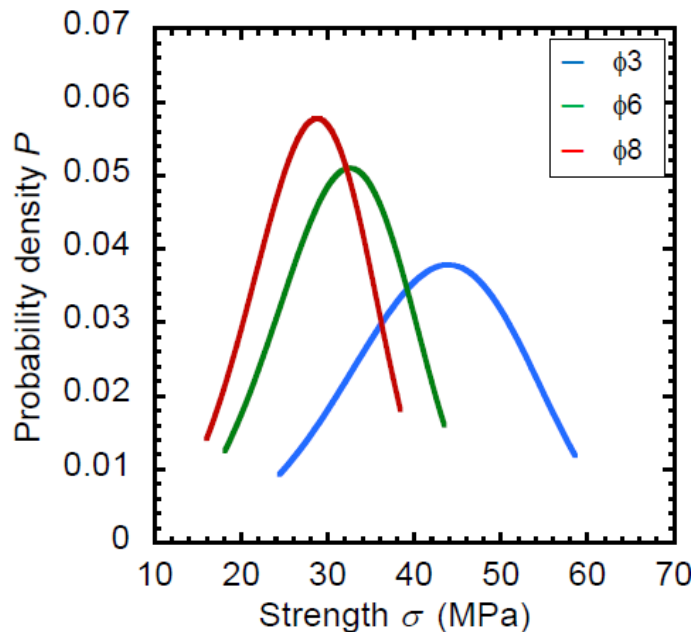


図 2.1.5-1-9 欠陥サイズの分布から予測される剥離強度の各ロッドでの確率密度分布

表 2.1.5-1-2 欠陥サイズの分布から予測される剥離強度の確率分布から求めた平均強度と標準偏差

	$\phi 3$	$\phi 6$	$\phi 8$
$\sigma_{ave(cal)}$ (MPa)	42.6	31.6	27.9
$D_{(cal)}$ (MPa)	10.4	7.7	6.8

$\sigma_{ave(cal)}$: 予測される平均強度
 $D_{(cal)}$: 予測される強度の標準偏差

の強度は実験結果よりも大きいと考えられ、より予測された強度に近づくので、予測強度と実験結果は比較的良い一致をみていると考えられる。

次に、ワイブル係数について考察する。ロッド試験から得られた線材強度のワイブル係数 m は 2.5-6.8 であり、欠陥分布から予測したワイブル係数 m は 4.6 であった。ロッド試験から得られた値はロッド径により多少ばらつきがあるが、予測とはおおまかに一致している。

また、村上ら⁵⁾がGd123バルク超電導体の引張試験を行った際の結果では、ワイブル係数は 4.5 と 4.9 を示していた。バルク材の引張であり、材料や試験の条件も異なるが、本研究のロッド試験と予測で得られた値はおおよそ妥当であり、Gd超電導層内で発生する剥離はバルク材の破壊と同傾向であると推定される。さらに、坂井ら⁴⁾が本研究と同様に $\phi 2.7$ の円柱を用いて 30 本の試験片について剥離強度を評価した結果では、強度が著しく小さい結果を含めるとワイブル係数は 4.7 で、本研究で求めたワイブル係数とよく一致している。

以上の考えを踏まえる試験結果と予測強度分布が比較的一致しており、欠陥の分布から線材の強度が予測できたと考えられる。つまり、コイル設計のための剥離強度評価としては、ロッド試験を行い、ワイブル分布を用いて整理することができると考えられる。ロッドの径が大きくなるにつれて、剥離強度が低下する傾向が観られる。機器では超電導線材全体に剥離応力が作用することも考えられる。剥離の起点となるような欠陥が存在すると、小さな剥離応力でもコイルの特性低下につながる可能性が示された。

今回の試験結果で観られたように、接着面積が小さくなると接着剤の破壊が生じる可能性が大きかった。そのため、ロッド試験を行う際には、より接着面積の大きなロッドを用いることが良いと考えられる。また、実際の電力機器設計のためには、線材の剥離強度を評価する際のばらつきが小さく評価でき、平均強度も安全側に評価できる大きな径のロッドを用いることが良いと考えられる。また、ロッドを用いた試験の性質上ロッド外縁付近での応力集中が生じる。ロッド試験をモデル化し

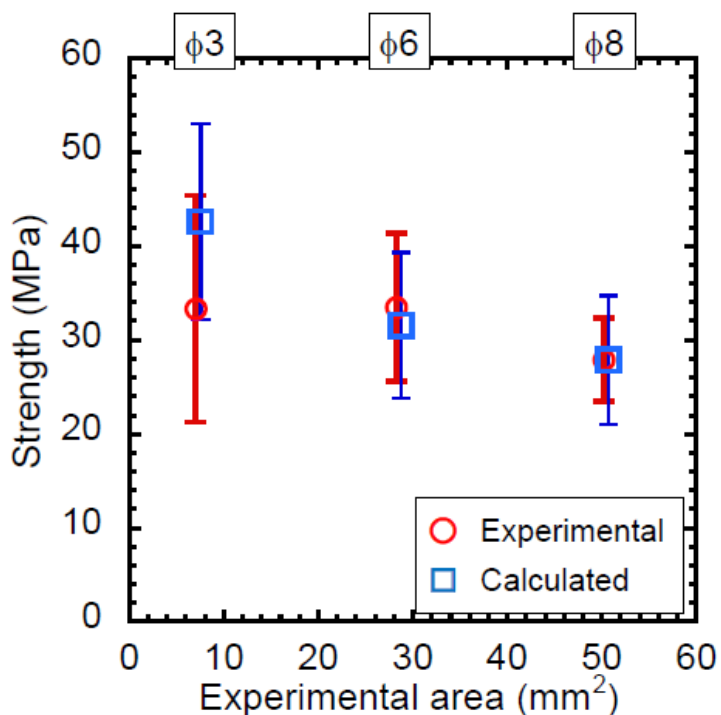


図 2.1.5-1-10 剥離耐性試験結果と欠陥サイズの分布から予測される剥離強度の比較

た有限要素法解析により、ロッド試験をモデルとして応力集中部の応力場を求めた結果を図 2.1.5-1-11 に示す。この図では、ロッド中心からの距離をロッド半径で除したものを横軸にとっている。解析結果よりロッド外縁付近における応力集中が、ロッド径が小さくなるほど GdBCO 層に大きく影響することが分かる。ただし、応力集中が大きくなる領域は非常に小さく、破壊起点となる欠陥が観察された試験片においては、ロッド中央付近から破壊したと考えられるものが優位であることも示された。

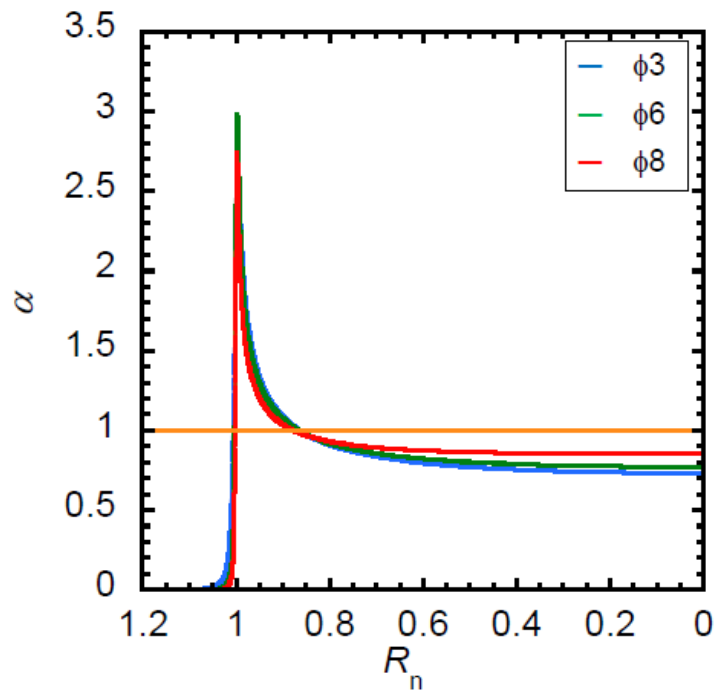


図 2.1.5-1-11 GdBCO における応力集中係数 α の分布の有限要素法による解析結果

そのため、ロッド外縁付近での応力集中部で破壊する試験片の数は小さく、一定応力を仮定したワイブル分布（最弱リンクモデル）により実験結果を表すことができたと考えられる。

$\phi 8$ の場合には、外周部の応力集中の影響が最も小さく、他の部分の応力集中係数が 1 に近いので剥離強度を小さく見積もる危険が小さくなることが示された。逆に、ロッド径が小さい場合は、応力集中係数が 1 を大きく下回るため、見かけより作用した剥離応力が小さくなる部分が多く、線材の剥離強度を実際より大きな値で評価すると考えられる。したがって、小さな径のロッドを用いた試験では、機器の設計の当たり、上記の応力分布を踏まえた安全率を採用するなどの考慮が必要であると考えられる。

(4) まとめ

ロッド試験を用いて Y 系超伝導線材の剥離強度の評価について、評価方法の検討、並びに試験結果と剥離強度の確率的予測の検討を行った。これにより以下のことを明らかにした。

ロッドを用いた剥離耐性評価は、評価面積、応力集中などの影響を踏まえると、線材幅に対して十分に大きな評価面積のロッドを用いることが重要である。ロッド試験では特有の応力場が生じるため、得られた強度を設計に用いる場合にはその影響を考慮する必要がある。

超電導線材の剥離強度をワイブル (Weibull) プロットにより整理することで、

強度の確率的予測ができることが分かった。線材の欠陥分布から線材の剥離強度を予測すると、コイルに作用する剥離応力が大面積になると、小さな剥離応力でもコイルの特性低下に至る可能性が示された。

以上より、SMES等のコイル応用にあつて、Y系超電導線材の剥離評価試験並びにコイル化に関する剥離強度の評価に関する指針を得た。

引用論文リスト

- (1) T. Takematsu, R. Hu, T. Takao, Y. Yanagisawa, H. Nakagome, D. Uglietti, T. Kiyoshi, M. Takahashi, H. Maeda, “Degradation of the performance of a YBCO-coated conductor double pancake coil due to epoxy impregnation”, *Physica C*, 470, (2010), 674-677.
- (2) D. C. van der Laan, J. W. Ekin, C. C. Clickner, T. C. Stauffer, “Delamination strength of YBCO coated conductors under transverse tensile stress”, *Superconductor Science and Technology*, 20, (2007), 765-770.
- (3) N. Sakai, S. Lee, N. Chikumoto, T. Izumi, K. Tanabe, “Delamination behavior of Gd123 coated conductor fabricated by PLD”, *Physica C*, 471, (2011), 1075-1079.
- (4) 坂井 直道、重森 正隆、衣斐 顕、町 敬人、遠藤 佐保、中岡 晃一、種子田 賢宏、吉積 正晃、田辺 圭一、和泉 輝郎、“PLD-GdBCO 線材の耐剥離性とレーザースクライプ加工の影響に関する検討”, 第 86 回 2012 年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集, (2012) 46.
- (5) A. Murakami, K. Katagiri, K. Kasaba, Y. Shoji, K. Noto, H. Teshima, M. Sawamura, M. Murakami, “Mechanical properties of Gd123 bulk superconductors at room temperature”, *Cryogenics*, 43, (2003) 345.

2.1.5-2 高信頼性・高耐久性 SMES コイル試作・評価

(1) 研究開発目標

SMES に代表される超電導線材の高磁場マグネット応用には、コイル冷却時の収縮に伴う熱応力が作用する。また超電導コイルの通電時には発生する磁場、コイルの電流密度およびコイル径に応じて強い電磁力が作用し、コイルには拡張しようとする応力が働き、コイル中の超電導線材には引き伸ばそうとする応力（フープ力）が作用することになる。そこでコイルには強い電磁力耐性が要求される¹⁾²⁾。

Y 系超電導線材は、図 2.1.5-2-1 に応力-歪み曲線を示すように超電導線材自体 1GPa 級の高い引張強度を有し、線材自体で強い電磁応力を支えるコイル構造の実現が可能となると考えられた。しかし、剥離が生じて特性が低下するという別の課題が発覚し、線材の強度を利用することすら出来なかった。すなわち、Y 系超電導コイル開発には、コイル中の Y 系超電導線材の剥離を防止したうえで、超電導線材の特性を十分発揮できるコイル化手法が求められるのである。

本研究開発では Y 系超電導線材を用いたパンケーキコイルにおいて、剥離による超電導特性の低下の抑制を図るとともに、超電導線材の強度に依存するのではなく、コイルの構成材料を含むコイル構造全体で電磁力を支えることで、従来に比較して大幅に電磁力の耐性を向上させる新規のコイル化手法の検討を行なった。

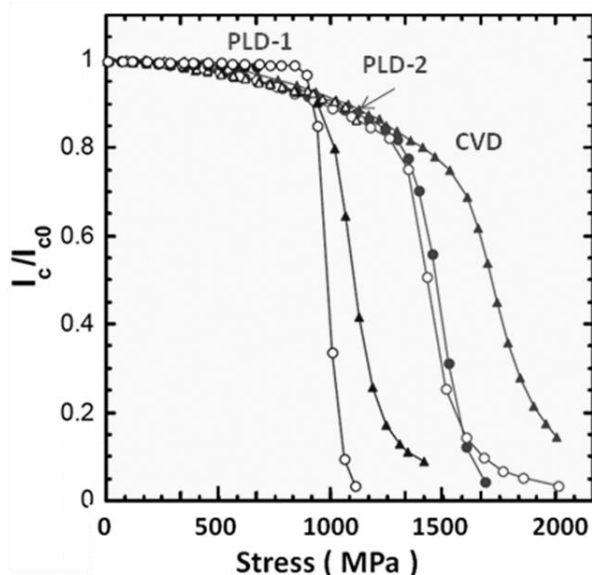


図 2.1.5-2-1 異なるプロセスで製作した Y 系超電導線材の応力 - 歪曲線

(2) Y 系超電導パンケーキコイルの剥離防止技術

Y 系超電導パンケーキコイルの冷却時の熱収縮によって、超電導線材に剥離が生じコイル特性の低下が引き起こされるという課題に対して、まず、剥離の原因となるコイル系方向の熱応力を解析によって求めた。100 μ m 厚さの HastelloyTM を基板とした Y 系超電導線材を用い、超電導線材が一体化したパンケーキコイルの、外径/内径の比を変化させてコイル内の応力分布を求めた結果を図 2.1.5-2-2 に示す。縦軸が径方向応力、横軸が内半径に対するコイル内の位置を示し、図中の α が外径/内径の比である。超電導線材が一体化したパンケーキコイルに作用する径

方向応力の最大値は、コイルの大きさに関わらず外径／内径比によって決定されることが判明した。この解析結果から剥離方向に作用する径方向応力を低減するためには一体化したコイル部分の外径／内径比を小さくすることが有効であることが判る。

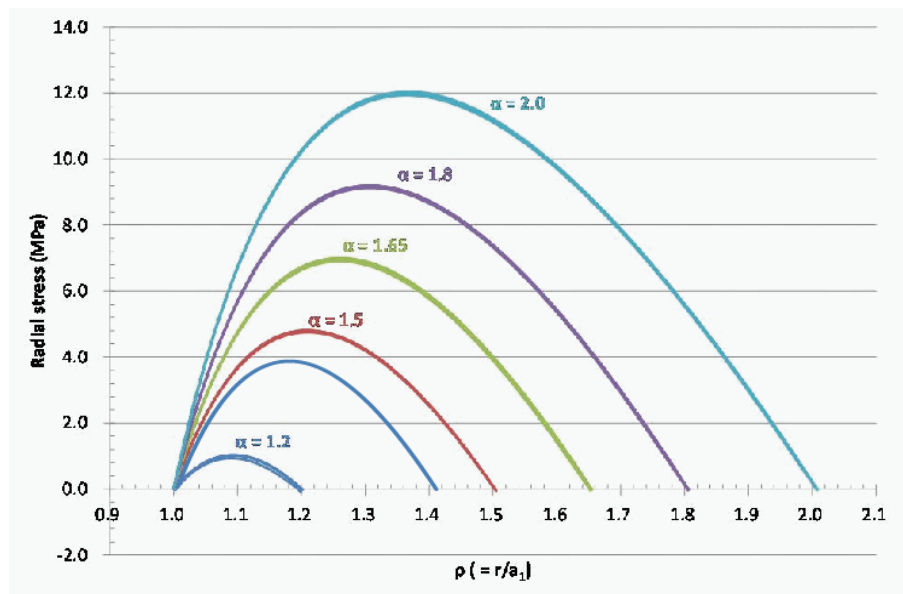


図 2.1.5-2-2 冷却により Y 系超電導パンケーキコイルに作用する径方向応力

一方で、

前章で明らかになったように、Y 系超電導線材は広い範囲で剥離応力が作用すると剥離強度が低下すると考えられ、剥離応力はできる限り低減する必要がある。そのためには、パンケーキコイル内で一体化した部分の外径／内径比を最小にする、すなわち、一体化しないことが最善の方法となる。コイルを一体化しないということは、パンケーキコイルを含浸しないということになり、エポキシ樹脂などによる強固な含浸で絶縁を確保することができなくなる。そのため、超電導線材に確実な素線絶縁を施して、コイルの絶縁を確保することを検討した。銅線などに通常施されているエナメルなどの被覆は硬化処理温度が 300℃付近の高温のため、酸化物超電導線材の超電導特性に影響を及ぼす可能性が高い。したがって酸化物超電導線材の絶縁では、カプトンなどの樹脂テープを巻きつける手法が採用されている。しかし、樹脂テープを巻きつけた超電導線材は、コイルなどに超電導線材を曲げ加工する際、樹脂テープが偏ったり、超電導線材の幅方向端部で切れたりして絶縁性能が低下することや、テープの重なりによって凹凸が生じ、局所的な応力が超電導線材に加わって特性低下を引き起こす可能性がある。そこで本開発では、150℃以下の温度での硬化が可能で、極低温でもフレキシブルな液状樹脂を酸化物超電導線材の絶縁に適用することを検討した。被覆試験として、厚さ 100μm の Hastelloy を基板とし、銅の安定化層が形成された幅 10 mm、厚さ約 0.22 mm の Y 系超電導線材に連続的に塗布と熱処理を施して絶縁層を形成し、断面を観察して塗布や熱処理の条件を適正化した。図 2.1.5-2-3 に液状樹脂で被覆した超電導線材の断面を示す。さらに、図 2.1.5-2-4 にコイル通電電流の高密度化のため、絶縁被覆を薄化した超電

導線材の断面を示す。双方とも、超電導線材が良好に被覆されていることを確認した。低温硬化型変成ポリアミドと称するこの被覆用の液状樹脂は、被覆の熱処理温度や体積変化が超電導特性に影響を及ぼさないことを被覆

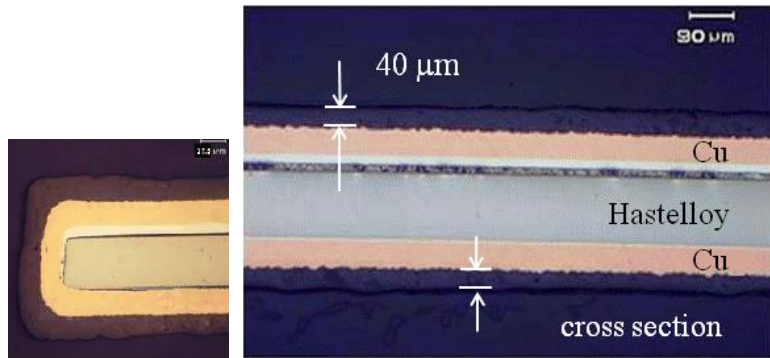


図 2.1.5-2-3 液状樹脂で被覆した超電導線材の断面

前後の液体窒素中での通電測定で確認した。また、Y系超電導線材の安定化層である銅メッキやBi系超電導線材の銀合金などと密着性がよいことも確認した。低温硬化型変成ポリアミドのAC破壊電圧は10 kV/25 μm(厚さ)でカプトンテープとほぼ同等の絶縁性であり、フレキシブルなので含浸に頼らなくても超電導線材を確実に被覆して絶縁することが期待できる。また、熱伝導率が2 W/K・mで

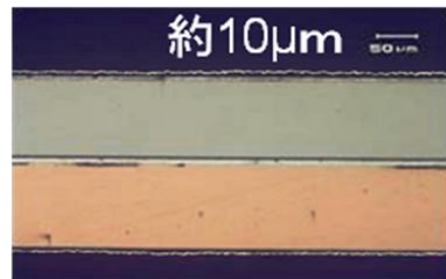


図 2.1.5-2-4 液状樹脂による絶縁被覆を薄化した超電導線材の断面

カプトンテープの10倍程度の高い値なので、冷凍機を用いた伝導冷却の適用にも有効と考えられる。この塗布絶縁をコイル化に適用する有効性を確認するため、11 m長のY系超電導線材に塗布絶縁を施し、シングルパンケーキ(SP)コイルを製作して、通電特性の変化を観察した。Y系超電導線材は、10 mm(幅)×100 μm(厚)の Hastelloy 基板上に、IBAD/MOCVD プロセスで中間層と Y系超電導層

が形成されており、安定化層としてめっきにより形成された銅層が約50 μm厚さで全周囲を覆う構造となっている。したがって、銅めっき後のY系超電導線材の暑さは約220 μmになる。超電導線材に絶縁被覆を施した後、パラフィンによるモールドを行なった。製作したSPコイルの諸元を表

表 2.1.5-2-1 冷却サイクル試験に用いた SP コイルの諸元

超電導線材	IBAD/ CVD - (Y, Gd)BCO 線材
線材長	22 m
線材幅 (絶縁被覆含む)	10.3 mm (最大)
線材厚 (絶縁被覆含む)	315 μm (最大)
コイル形状	シングルパンケーキ
コイル内径/外径	143 / 171 mm
コイルターン数	45

2.1.5-2-1 に、外観を図 2.1.5-2-5 示す。パラフィンによるモールドは、コイル形状の維持、線材間のスペーサーなどとともに、コイルが応力を受けた際モールド自体が割れて応力を緩和しコイル巻線を保護することを目的としている。コイル巻線加工とパラフィンモールドした際に、液体窒素温度と室温の間で 10 回の冷却サイクルをコイルに経験させ、コイルの通電特性を評価した。図 2.1.5-2-6 に示すように、超電導特性に一切の劣化は認められず、この絶縁およびモールド手法が液体窒素温度までの冷却に有効であることを確認した。



図 2.1.5-2-5 絶縁被覆とパラフィンモールドを施した SP コイルの外観

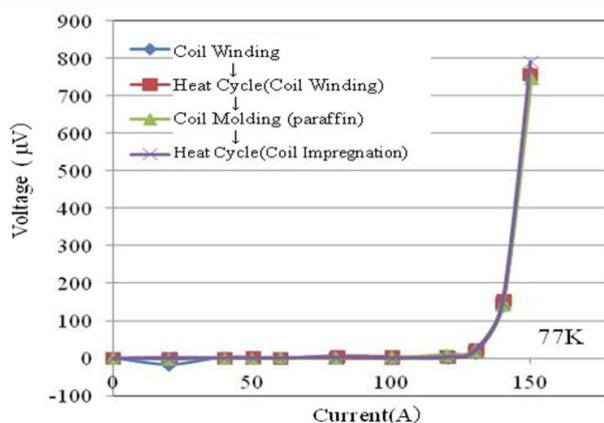


図 2.1.5-2-6 絶縁被覆とモールドおよび冷却サイクル試験後の SP コイルの $I-V$ 特性

(3) 高信頼性・高耐久性超電導コイル構造開発

コイルに作用するフープ応力は、コイルの発生磁場 (B) と電流密度 (J) とコイル径 (R) の積 ($B \times J \times R$) が大きいほど強く作用する。超電導線材の強度だけに依存したコイル構造では、

フープ力の分布によって強く応力が作用する箇所や線材の強度の不均質性によって、超電導線材が局所的に引き伸ばされることも考えられる。

今回開発した、

Yoroi-coil (Y-based oxide superconductor and reinforcing outer

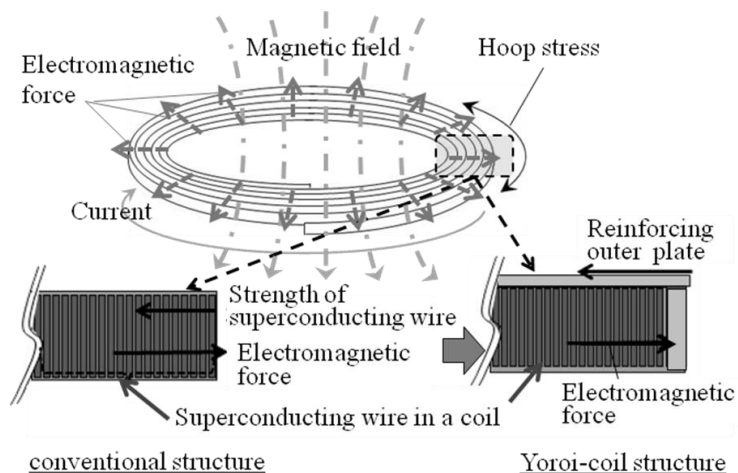


図 2.1.5-2-7 Yoroi-coil 構造が電磁力に耐える設計概念の模式図

integrated coil) と称するコイル化手法について報告する。図 2.1.5-2-7 に Yoroi-coil 構造が電磁力に耐える概念を模式的に示す。パンケーキコイルのコイル巻線は電磁力によって拡張するように応力を受けるが、その応力をコイル巻線の外周に配置された枠材で受ける。枠材はコイル巻線の上下面に設置された側板と接続してあり、側板が枠材に伝えられた応力を支えることによって、超電導線材だけでなくコイル構造体全体が応力を支えることになるのである。コイル巻線に作用する応力をコイル表面にシフトさせて、コイル径とほぼ同じ径で数 mm 程度の厚さの側板に応力を分担させるため、コイル径を大きくすることなく補強効果を得ることができる。これによって、コイル巻線に作用するフープ力を大幅に減じることで、超電導線材の強度の限界を超える電磁力にコイル全体で耐えることを可能にする。超電導線材の強度のみに頼るのではなく、枠材や側板など「よろい」を用いてコイル構造全体で応力を支えるのである。

続いて、Yoroi-coil 構造を、Y 系超電導線材を用いたダブルパンケーキコイルに適用し、フープ力に対する耐性を検証した。低温硬化型変成ポリアミドを使用して絶縁被覆を施した(Gd,Y)BCO 超電導線材 (IBAD+CVD プロセスで作製)を用いて、Yoroi-coil 構造のダブルパンケーキ (DP) コイルを作製した。表 2.1.5-2-2

表 2.1.5-2-2 フープ応力試験に用いた Yoroi-coil 構造の DP コイルの諸元

超電導線材	IBAD/ CVD - (Y, Gd)BCO 線材
線材長	52 m
線材幅 (絶縁被覆含)	10.2 mm (最大)
線材厚 (絶縁被覆含)	315 μm (最大)
コイル形状	ダブルパンケーキ
コイル内径/外径	219 / 240 mm
コイル高さ	30 mm (巻き線部 24 mm)
モールド	パラフィン
コイルターン数	34 (上下各コイル当たり)

に試験コイルの諸元を示す。枠材と側板および上下のコイルを分けるセパレート板は G-FRP 製で、枠材内のコイル巻線はパラフィンでモールドしてある。図 2.1.5-2-8 にコイル外観を示す。液体ヘリウム浸漬によりこの DP コイルを 4.2K まで冷却し、8 T の外部磁界を印加後にコイル通電することで、フープ応力耐性を検

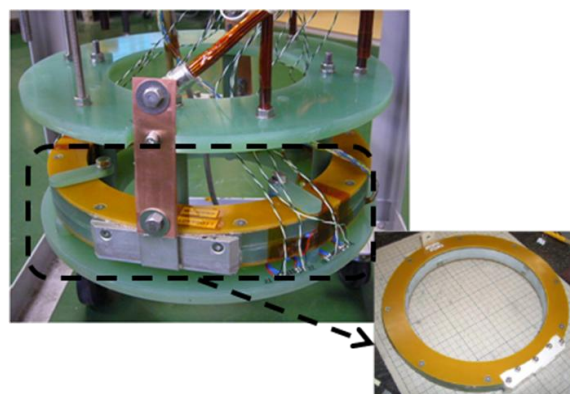


図 2.1.5-2-8 フープ力試験に用いた Yoroi-coil 構造の DP コイルの外観

証した。

図 2.1.5-2-9 に Yoroi-coil 構造の DP コイルを、外部磁界 8 T において繰り返し通電した際の、電極を除くコイル全体の I-V 測定結果を示す。測定装置の上限である 1,500 A まで通電を行ったところ、超電導コイルには誘導で発生した電圧のみが観

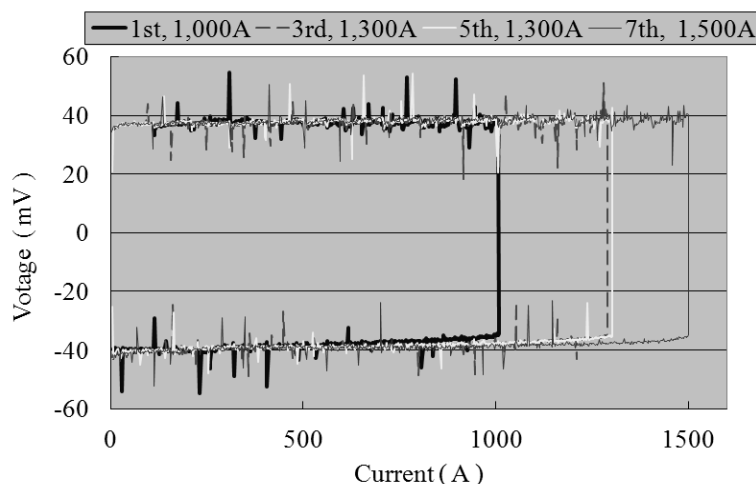


図 2.1.5-2-9 Yoroi-coil 構造 DP コイルのフープ力試験における通電結果

察されコイルに抵抗が生じて発生した電圧は認められず、超電導状態を維持していた。このとき、コイル巻線の周方向に作用するフープ応力は、 $B \times J \times R$ で計算し、かつ実質的に応力を負担する Hastelloy 基板のみに応力が負荷されたとすると、最大で 1.74 GPa であった。図 2.1.5-2-10 に $B \times J \times R$ で計算したフープ応力のコイル内の分布を示す。作用する応力の最大値は、Y 系超電導線材の不可逆応力をはるかに超えているのである。³⁾⁴⁾⁵⁾このフープ応力試験中に、実際にコイル巻線中の超電導線材の歪みを歪みゲージで測定した。

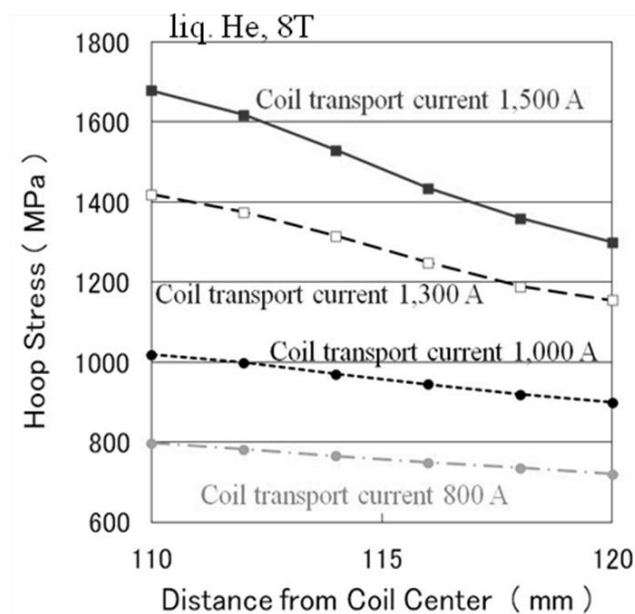


図 2.1.5-2-10 外部磁場 8 T で 1,500 A 通電時の DP コイル内のフープ応力分布

図 2.1.5-2-11 に DP コイル中の超電導線材の歪みの通電電流に応じた変化を測定した結果を示す。ここに示したのは、DP コイルの上部コイルで、最内層と最外層の超電導線材にそれぞれ 3 箇所歪みゲージを設置して測定した結果である。超電導線材の最大歪みは約 0.4 % であった。Y 系超電導線材の限界歪みは引っ張り試験で 0.7 % 程度なので、さらに大きな 2 GPa 級のフープ力でも限界歪みに到達するまで余裕がある可能性を示している。また、0.4% 程度の歪みなので、これまでの報告⁴⁾によると超電導線材には最大での 500~800 MPa 応力が加わ

っていることとなり、超電導線材に作用する応力が、今回の試験用 DP コイル内では低減されていることが明らかである。フープ応力試験前後で、DP コイルの液体窒素中での通電特性を評価し、コイルの特性低下が生じていないかを確認した。図 2.1.5-2-12 にフープ応力試験前後の I-V 測定結果を示す。コイル通電特性の低下は認められず、Yoroi-coil 構造が電磁力に耐えて超電導特性を維持したことが確認できた。また、液状変成ポリアミドを使用した絶縁被覆が液体ヘリウム中の試験でも特性低下を引き起こすことなく良好な絶縁を維持していたことも確認できた。これらの結果から、Yoroi-coil 構造が強大な電磁力に対する耐性に優れた構造であり、用いた樹脂被覆絶縁手法は極低温下で応力を受けても絶縁を維持できることが判明した。Yoroi-coil 構造では、コイルに作用する電磁力に対してコイルの歪みが半分程度である結果が得られた。Y 系超電導線材の応力-歪み特性[4]とコイルの歪みからフープ力を求めると、500~800 MPa の応力をコイル巻線が分担していることになる。外部磁場 8 T で 1,500 A 通電した際のコイル巻線に作用するローレンツ力からこのフープ力分を差し引いて導出した DP コイルの単位長さあたりに作用するローレンツ力の分布を図 2.1.5-2-13 に示す。各ターンのローレンツ力は 8,100~6,730 N/m に分布し、コイル巻線の 34 ターン全層分を足し合わせると、コイル巻線を介して合計で約 252 kN/m のローレンツ力がコイル巻線外側の枠材に加わることになる。G-FRP 枠材は 10.5 mm の高さの内面で応力を受けるので、約 24 MPa の応力が枠材の内面にコイル巻線から誘起されることになる。円筒

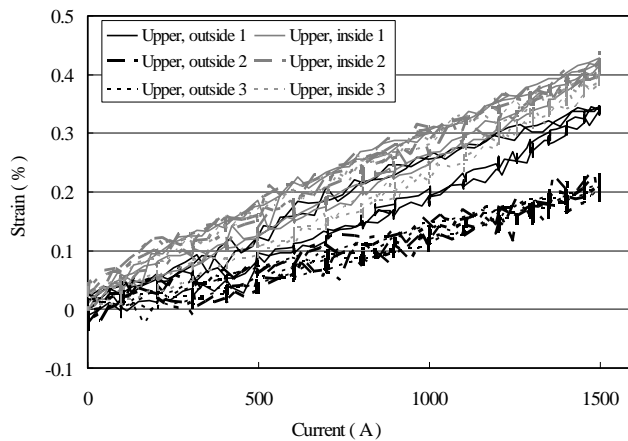


図 2.1.5-2-11 Yoroi-coil 構造 DP コイルのフープ応力試験におけるコイル巻線の歪みの変化

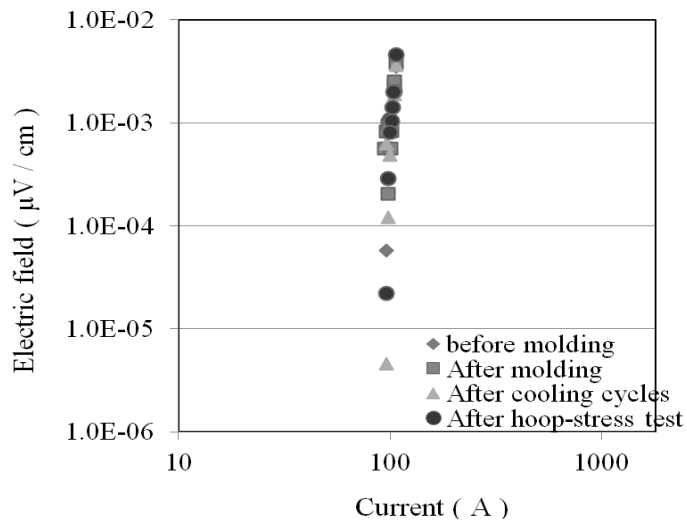


図 2.1.5-2-12 Yoroi-coil 構造ダブルパンケーキコイルのフープ力試験前後の通電特性の比較

ことができることが判明した。Yoroi-coil 構造では、コイルに作用する電磁力に対してコイルの歪みが半分程度である結果が得られた。Y 系超電導線材の応力-歪み特性[4]とコイルの歪みからフープ力を求めると、500~800 MPa の応力をコイル巻線が分担していることになる。外部磁場 8 T で 1,500 A 通電した際のコイル巻線に作用するローレンツ力からこのフープ力分を差し引いて導出した DP コイルの単位長さあたりに作用するローレンツ力の分布を図 2.1.5-2-13 に示す。各ターンのローレンツ力は 8,100~6,730 N/m に分布し、コイル巻線の 34 ターン全層分を足し合わせると、コイル巻線を介して合計で約 252 kN/m のローレンツ力がコイル巻線外側の枠材に加わることになる。G-FRP 枠材は 10.5 mm の高さの内面で応力を受けるので、約 24 MPa の応力が枠材の内面にコイル巻線から誘起されることになる。円筒

圧力容器のモデル計算をコイル枠材および側板の内部応力分布に適用すると図 2.1.5-2-14 に示すような応力分布が導き出される。なお、円筒圧力容器の関係式は以下のように表される。

$$\sigma_{\theta}(r) = P_1 \left\{ \left(\frac{R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \right) \left(1 + \left(\frac{R_2}{r} \right)^2 \right) \right\} - P_2 \left\{ \left(\frac{R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \right) \left(1 + \left(\frac{R_1}{r} \right)^2 \right) \right\}$$

$$\sigma_r(r) = P_1 \left\{ \left(\frac{R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \right) \left(1 - \left(\frac{R_2}{r} \right)^2 \right) \right\} - P_2 \left\{ \left(\frac{R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \right) \left(1 - \left(\frac{R_1}{r} \right)^2 \right) \right\}$$

σ_{θ} は周方向の応力、 σ_r は径方向の応力、 P_1 は円筒圧力容器の内圧、 P_2 は外圧を示す。 R_1 、 R_2 はそれぞれ円筒容器の外半径と内半径にあたる。すなわち、側板や枠材それぞれの外半径と内半径に相当する。コイル枠材と側板は最外周で接続されており双方の最外周歪みは等しくなるように P_2 を選択した。このとき、側板と枠材の厚さはそれぞれ 2mm と 10.5mm であるから

$P_{2(\text{circle plate})} = (10.5 / 2) \times P_{2(\text{outer ring})}$ の関係がある。コイル枠材にかかる内圧を前の計算で求めた $P_{1(\text{outer ring})} = 24 \text{ MPa}$ とし、側板最内層は径方向応力を受けないので $P_{1(\text{circle plate})} = 0$ とした。図 2.1.5-2-14 に示す応力分布では、枠材で最大 120 MPa、側板で約 150 MPa のフープ応力がかかることで、コイル巻線の電磁力の一部を支持していることが分かる。一般的な FRP の降伏応力は 250 MPa 程度であるので、十分に強度を保つことができていると考えられる。このように、コイルの変形から推定されるコイルに加わっている電磁力を除く残りの電磁力が、コイル巻線の外枠とコイル上下の側板によって支持されているとすると、概ね計算結果と一致し、Yoroi-coil 構造の補強効果の説明

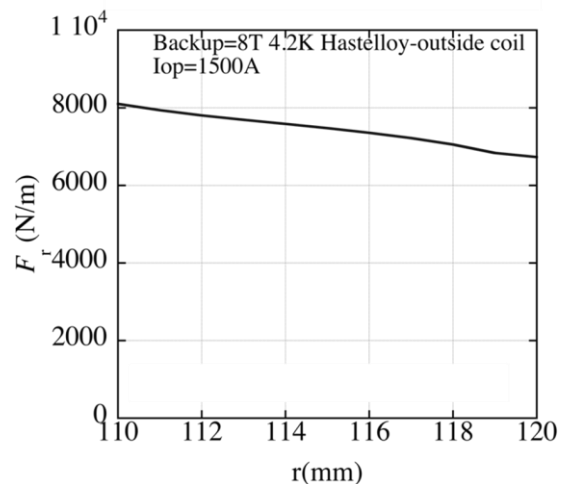


図 2.1.5-2-13 外部磁場 8 T で 1,500 A 通電時の DP コイル内の単位長さあたりのローレンツ力分布

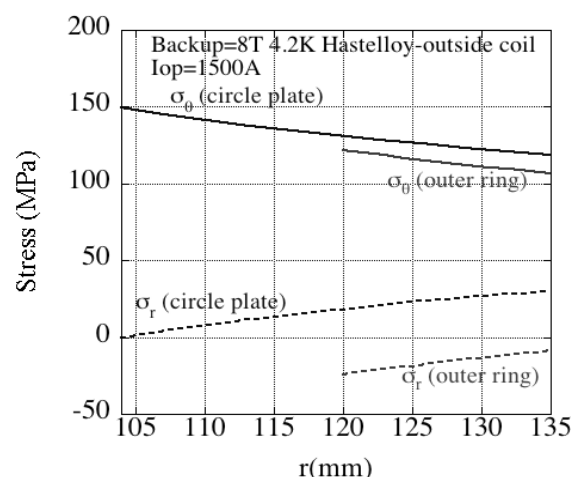


図 2.1.5-2-14 外部磁場 8 T で 1,500 A 通電時の DP コイルで枠材、側板が受ける応力の分布計算結果

ができる。

さらに、3次元有限要素解析に基づいて、Yoroi-coil のフープ力試験結果の最大電磁力におけるコイル巻線およびコイル構成材内の応力・歪み分布の評価を行った。ダブルパンチキコイルはコイル巻線と上下の側板、中央で上下のコイルを分けるセパレート板、コイル巻線の外周を囲む枠材から構成される。コイル構造を図 2.1.5-2-15 に示す。コイル巻線と G-FRP 製の枠材および側板、セパレート板からなる構造の、円周で 1/4、断面で 1/2 を解析モデルとした。枠材および側板による補強構造の隣接面は対称境界とし、コイルを挟む側板とセパレート板の最内周を滑動端とした。枠材と側板、セパレート板はネジ止め構造で、ネジはステンレス (SUS304) の円柱状のソリッド要素とし、M3 相当が解析モデル中に 2箇所設けてある。コイル構成材料はネジおよび接触のみによって力が伝達されると定義した。側板や枠材の G-FRP はヤング率 35.4 GPa、ポアソン比 0.21、ネジ材はヤング率 193 GPa、ポアソン比 0.3 を適用した。〈3・3〉で述べたように、コイルの歪みとローレンツ力を考慮して、コイル枠材の内周に約 24 MPa の外力が加わっているとす。図 2.1.5-2-16 に周方向応力の解析結果を示す。枠材の最外周で周方向応力は約 80 MPa となり、側板とセパレート板の最内周で約 120 MPa となった。すなわちコイルから発生した電磁力は巻枠の上下の側板と中央プレートにも伝わり、G-FRP 枠材だけでなくコイル構成材全体が分担することが分かった。そのため電磁力

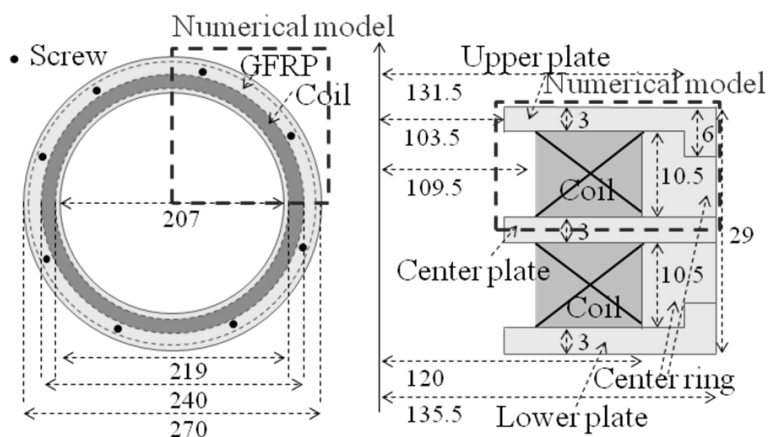


図 2.1.5-2-15 3次元構造解析に用いたコイル構造の模式図

($B \times J \times R$) が 1.7 GPa に達してもコイル I_c の劣化がなかったと考えられる。なお、ネジ周辺では 500 MPa 以上の応力集中が発生する結果となり、接着などで均等に応力が加わるような設計に変更することが好ましいと考えられる。



図 2.1.5-2-14 周方向応力分布の解析結果

(4) まとめ

液状変成ポリアミドを用いた低温硬化塗布絶縁手法を開発し、パラフィンによるモールドと組み合わせることで Y 系超電導線材の剥離による特性低下のないコイルを製作することができた。

コイル構造全体で電磁力を支持する Yoroi-coil 構造によって、超電導線材の耐力を超える電磁力を支えるコイルの実現が可能となった。

応力と歪の解析から Yoroi-coil 構造は、コイルを構成する枠材や側板が分担していることを明らかにし、大型コイルになると補強効果がさらに有効になると推定された。

3次元数値構造解析によって、電磁力はコイルの枠材のみでなく上下の側板と中央のセパレート板にも伝わり、コイル構造材全体が電磁力を支持することが明らかになった。Cu メッキによる Y 系線材の応力歪特性への影響を評価し、問題ないことを確認した。

以上により、信頼性・耐久性を持つコイル要素技術開発に向けて課題を抽出し、剥離やフープ力による特性低下を抑制した高耐久性のコイル構造の実現が図られ、解決策を提案するという目標が達成された。

引用論文リスト

- (1) K. Higashikawa, T. Nakamura, M. Sugano, K. Shikimachi, N. Hirano, S. Nagaya, "Performance Improvement of YBCO Coil for High-Field HTS-SMES Based on Homogenized Distribution of Magnetically-Mechanically Influenced Critical Current," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 18, pp. 758-761, June 2008.
- (2) K. Shikimachi, N. Hirano, S. Nagaya, H. Kawashima, K. Higashikawa, T. Nakamura, "System Coordination of 2 GJ class YBCO SMES for Power System Control," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 19, pp. 2012-2018, June 2009.
- (3) M. Sugano, T. Nakamura, K. Shikimachi, N. Hirano, S. Nagaya, "Stress tolerance and fracture mechanism of solder joint of YBCO coated conductor," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 17, pp. 3067-3070, June 2007.
- (4) M. Sugano, K. Shikimachi, N. Hirano, S. Nagaya, "Simultaneously Bending and Tensile Strain Effect on Critical Current in YBCO Coated Conductors," Physica C, vol. 463-465 pp. 742-746, 2007.
- (5) M. Sugano, Y. Yoshida, M. Hojo, K. Shikimachi, N. Hirano, S. Nagaya, "Two different mechanisms of fatigue damage due to cyclic stress loading at 77 K for MOCVD-YBCO coated conductors," Supercond. Sci. Technol. vol. 21, p. 054006, 2008.

2.1.5-3 コイル伝導冷却検証 (中部電力、早稲田大学)

(1) 研究開発目標および概要

超電導コイルが、電力機器としての絶縁耐性（～数 kV）を得るためには、超電導線材は素線絶縁され、コイル全体には固体絶縁が施されると考えられる。SMESのように伝導冷却方式を採用する機器では、コイル内で発熱が発生した場合、絶縁材などを経由して冷却されることになるため、伝導冷却下でのコイルの冷却特性の確認、コイル内部の温度分布と熱の流れの把握が不可欠となる。

パラフィンモールドが、Y系超電導パンケーキコイルの熱応力に対して有効で、超電導線材の剥離による超電導特性低下の防止に効果を発揮したことはⅢ-2.1.5-2で述べた。しかし、パラフィンモールドによるコイルの冷却特性に関しては明らかになっていない。そこで特性の面から、本研究では、非含浸コイルとパラフィンモールドコイルの伝熱特性を実験と解析により評価して、冷却特性の面からパラフィンモールドコイルの実用性を検討した。

(2) 銅モデルコイルによる伝導冷却の通電・電熱特性試験

超電導コイルの大容量化実現するためには積層導体が必要となる。同時に素線間の電磁結合を抑制し、交流損失を低減するため、各素線には素線間絶縁を施すことが前提となり検討が進められている。その熱的特性を評価するために、図 2.1.5-3-1 に示した伝導冷却評価用銅ダミーモデルコイルを使用して伝熱特性試験を行った。銅ダミーコイルは銅テープでコイルを製作することにより一様な熱負荷が発生するようにしたものである。実際の SMES 用伝導冷却 YBCO コイルの運用において、コイルは冷却板から GFRP や絶縁材を通して冷却される。これらの条件を考慮してダミーコイルを作製した。ダミーコイルは内径 50 mmφ、外径

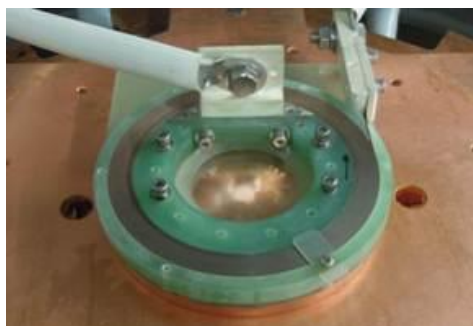


図 2.1.5-3-1 伝導冷却評価用銅ダミーモデルコイル

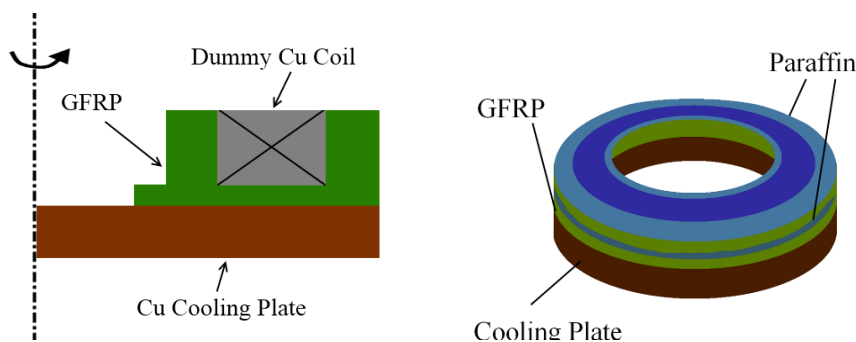


図 2.1.5-3-2 ダミーコイルの構造

61.72 mm ϕ であり、コイルの構造を図 2.1.5-3-2 に、ダミーコイルの諸元を表 2.1.5-3-1 に示す。このダミーコイルを非含浸、パラフィン含浸の状態を実験した。なお、コイルに使用する各素線は素線絶縁が施されることが想定されており、また、今回の目的である交流損失による

定常発熱に対するコイルの熱的振舞いを評価するために、コイル全体で定常発熱するように設計する必要がある。これらを考慮して図 2.5.1-3-3 に示す構造のダミー線材を用いてダミーコイルを作製した。絶縁には低温硬化型変成ポリアミドを使用し、銅層によってコイル全体を定常発熱させ、YBCO 線材の構造を模擬するために SUS316 基板を銅とともに層構造にした。ダミー線材の諸元を表 2.1.5-3-2 に示す。

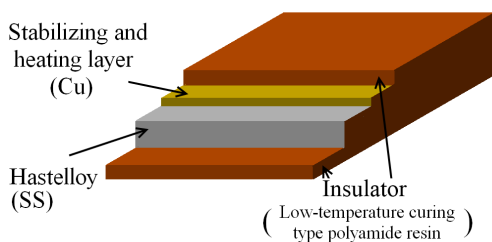


図 2.1.5-3-3 ダミー線材の構造

試験は、真空断熱されたクライオスタット内で、冷凍機と接続された冷却板を通してコイルを伝導冷却した。冷却板となるサンプルステージ上のダミーコイルはコイル下部に取り付けられた GFRP を通してのみ冷却されることになる。クライオスタット内はサンプルステージの温度が 20 K に保たれている。ダミーコイルへの通電は、電源のノイズによってコイルのインダクタンスにより電圧が発生することを防ぐためノイズの少ない直流電源を用いた。図 2.1.5-3-4 に試験装置の概要を示す。コイル温度の測定は Cernox 温度計を用いて行った。選定した Cernox 温度計は 20 K で少なくとも 0.1K 以下の誤差で測定したと言える。これらの Cernox 温度計を図 2.1.5-3-5 に示すように配置した。実験手順を図 2.1.5-3-6 のフローチャートに示す。本手順により、Sweep Rate を 0.1 A/sec、0.25 A/sec、1.0 A/sec、発熱量を 0.02 W、0.04 W、0.06 W のそれぞれの組み合わせで、非含

表 2.1.5-3-1 ダミーコイル諸元

ダミーテープ全長	19.18 m
コイル内径	50 mm
コイル外径	61.72 mm
コイル形状	シングルパンケーキ
コイル高さ	15.5 mm
巻数	50

表 2.1.5-3-2 ダミー線材の諸元

	幅(mm)	厚さ(μm)
銅	9.98	27.5
SUS	9.98	80
絶縁層	9.98	130 (両面)

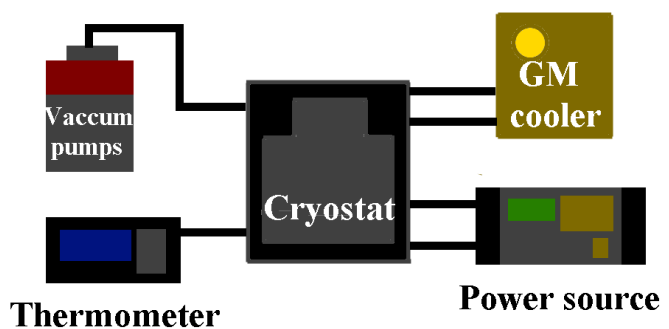


図 2.1.5-3-4 実験装置

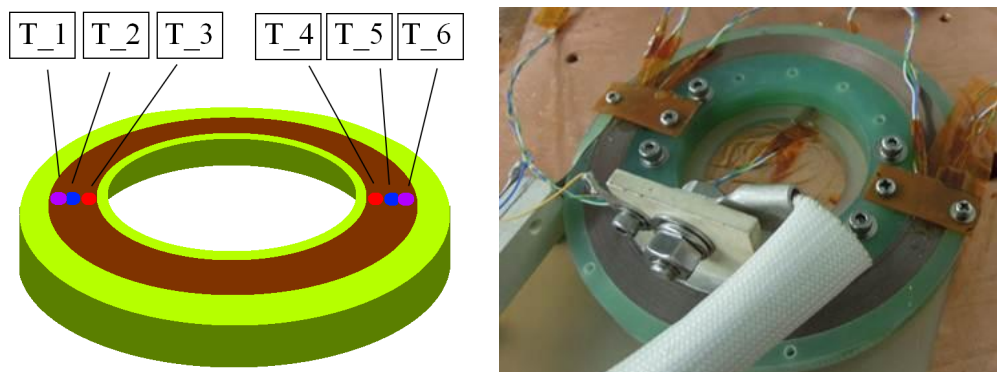


図 2.1.5-3-5 Cernox 温度計の配置

浸コイル、パラフィン含浸コイルに対して行った。SMES 用伝導冷却 YBCO 超電導コイルにおいて想定される交流損失のプロジェクト目標値はトロイダルコイル全体で 10 kW であり、単位体積当たりの発熱量を求め、今回の実験に用いたダミーコイルの体積での発熱量を計算した。その結果、今回は 0.018 W となった。これを基にハンドリングのしやすさのために 0.02 W をダミーコイルに与える発熱量の基準とした。今回の実験では発熱量もパラメータとしたのでこの整数倍である 0.04 W、0.06 W を投入した。

以下に代表的な試験結果を非含浸コイルとパラフィンモールドコイルで比較して示す。

Sweep Rate 0.1 A/sec でのコイルの温度の時間変化を図 2.1.5-3-7、図 2.1.5-3-8、図 2.1.5-3-9 に示す。それぞれ定常時の発熱が 0.02 W にお

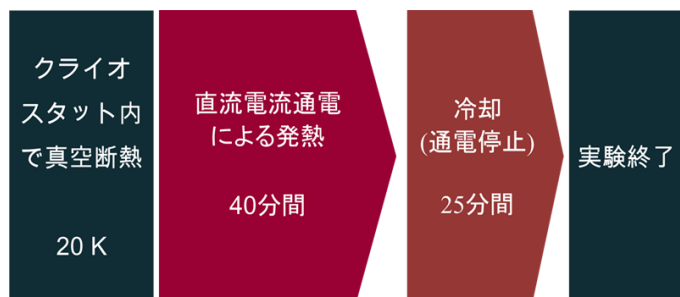


図 2.1.5-3-6 実験手順

ける温度計 1~3、0.04 W における温度計 1~3、0.06 W における温度計 1~3 の結果を非含浸コイルとパラフィンモールドコイルで左右に並べて比較したものである。

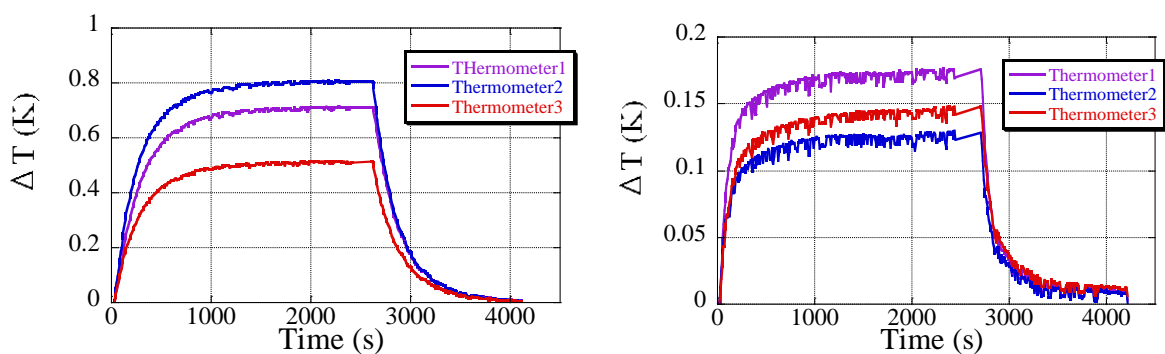


図 2.1.5-3-7 Sweep Rate 0.1A/sec, 0.02 W, 温度計 1~3
(左：非含浸コイル、右：パラフィンモールドコイル)

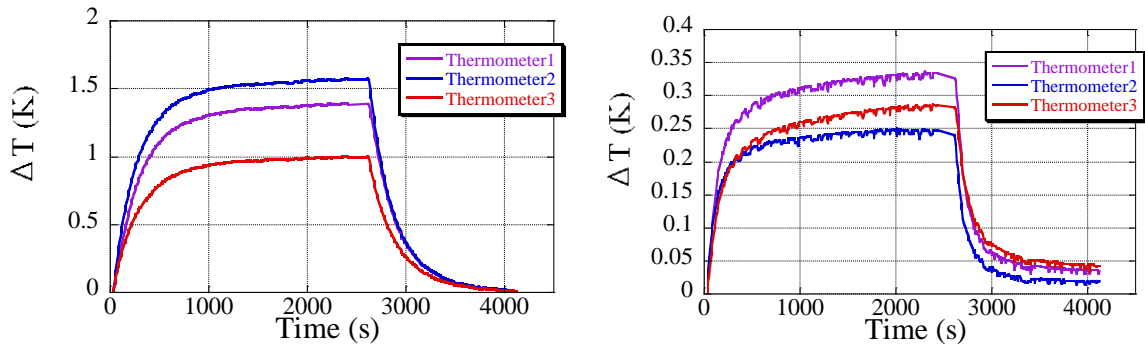


図 2.1.5-3-8 Sweep Rate 0.1A/s, 0.04 W, 温度計 1~3
 (左：非含浸コイル、右：パラフィンモールドコイル)

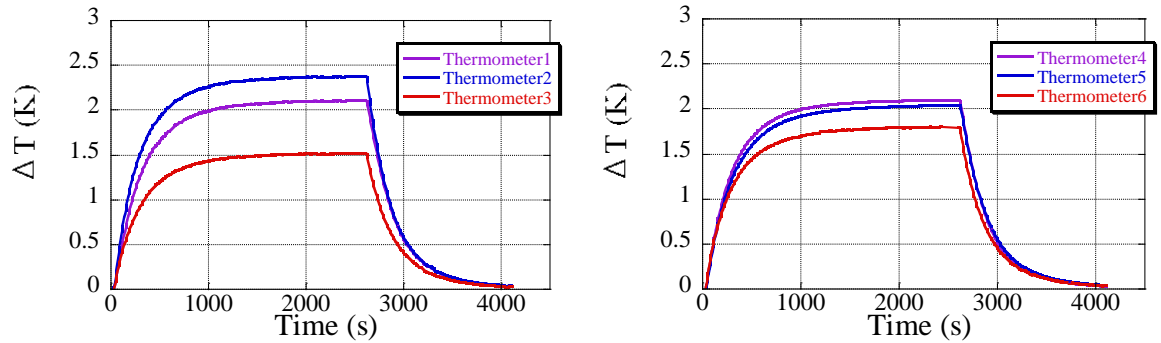


図 2.1.5-3-9 Sweep Rate 0.1A/s, 0.06 W, 温度計 1~3
 (左：非含浸コイル、右：パラフィンモールドコイル)

Sweep Rate 0.25 A/sec でのコイルの温度の時間変化を図 2.1.5-3-10、図 2.1.5-3-11、図 2.1.5-3-12 に、それぞれ定常時の発熱が 0.02 W における温度計 1~3、0.04 W における温度計 1~3、0.06 W における温度計 1~3 の結果を比較して示す。

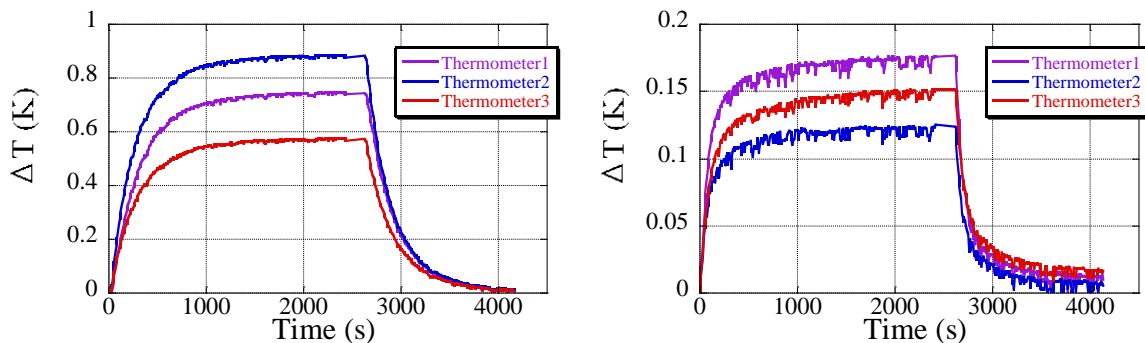


図 2.1.5-3-10 Sweep Rate 0.25A/sec, 0.02 W, 温度計 1~3
 (左：非含浸コイル、右：パラフィンモールドコイル)

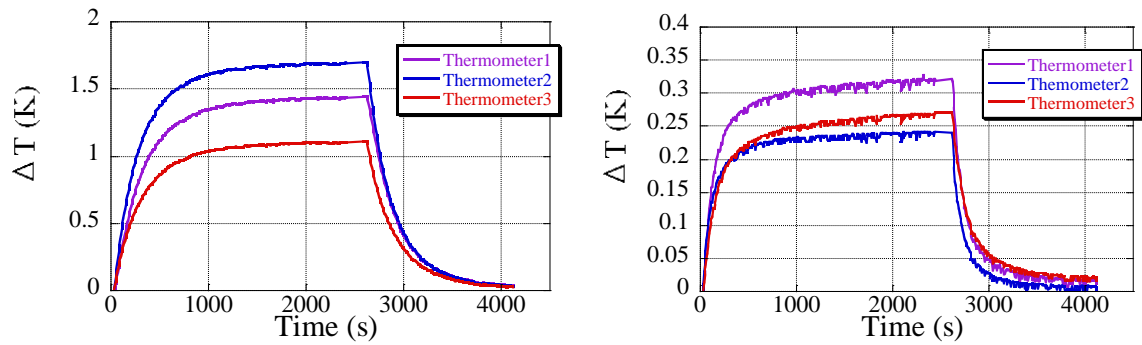


図 2.1.5-3-11 Sweep Rate 0.25A/sec, 0.04 W, 温度計 1~3
(左：非含浸コイル、右：パラフィンモールドコイル)

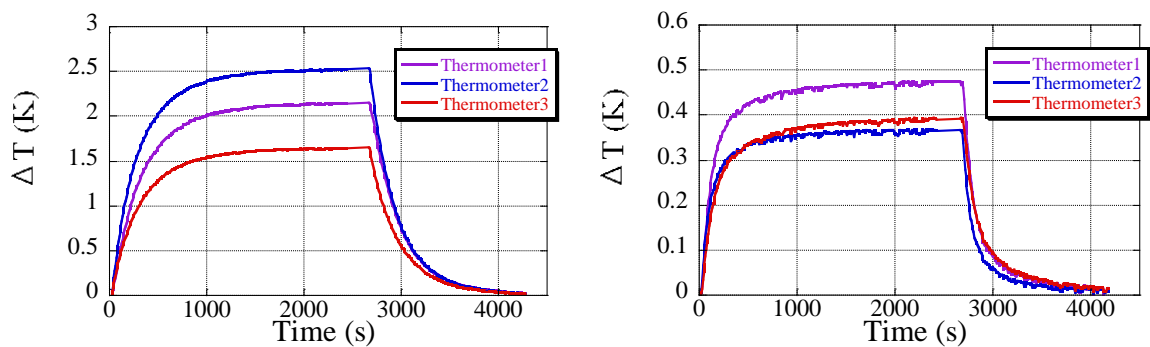


図 2.1.5-3-12 Sweep Rate 0.25A/sec, 0.06 W, 温度計 1~3
(左：非含浸コイル、右：パラフィンモールドコイル)

Sweep Rate 1.0 A/sec でのコイルの温度の時間変化を図 2.1.5-3-13、図 2.1.5-3-14、図 2.1.5-3-15 に、それぞれ定常時の発熱が 0.02 W における温度計 1~3、0.04 W における温度計 1~3、0.06 W における温度計 1~3 の結果を比較して示す。

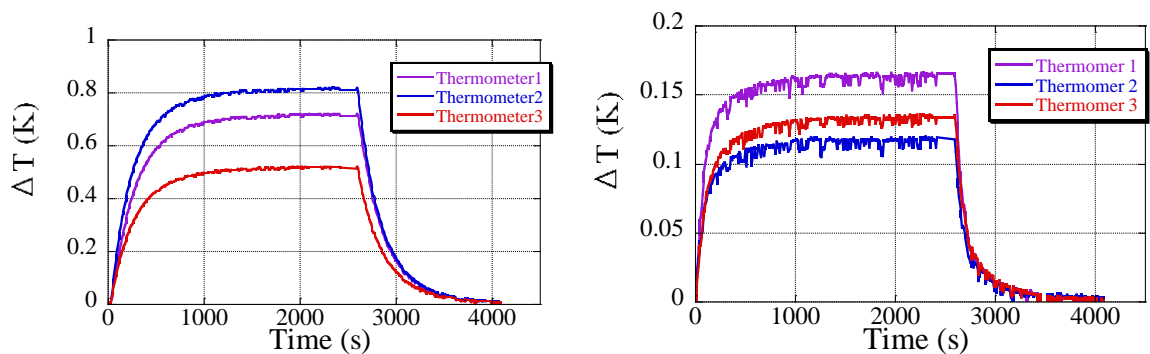


図 2.1.5-3-13 Sweep Rate 1.0 A/sec, 0.02 W, 温度計 1~3
(左：非含浸コイル、右：パラフィンモールドコイル)

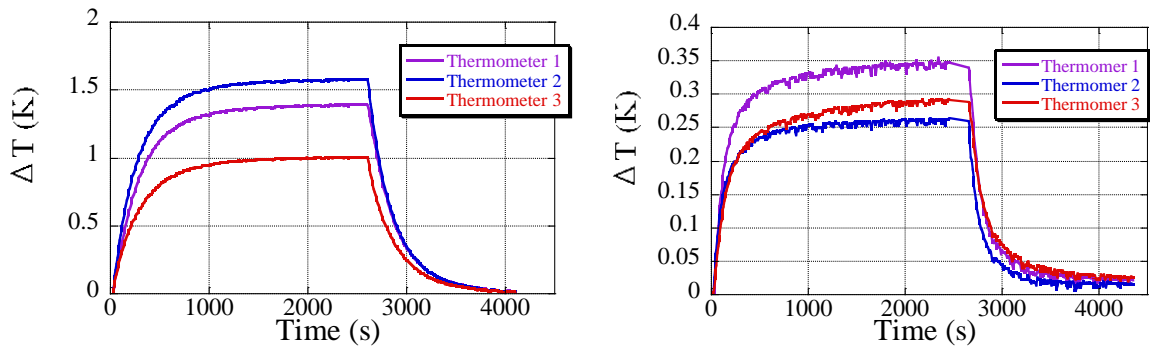


図 2.1.5-3-14 Sweep Rate 1.0 A/sec, 0.04 W, 温度計 1~3
(左：非含浸コイル、右：パラフィンモールドコイル)

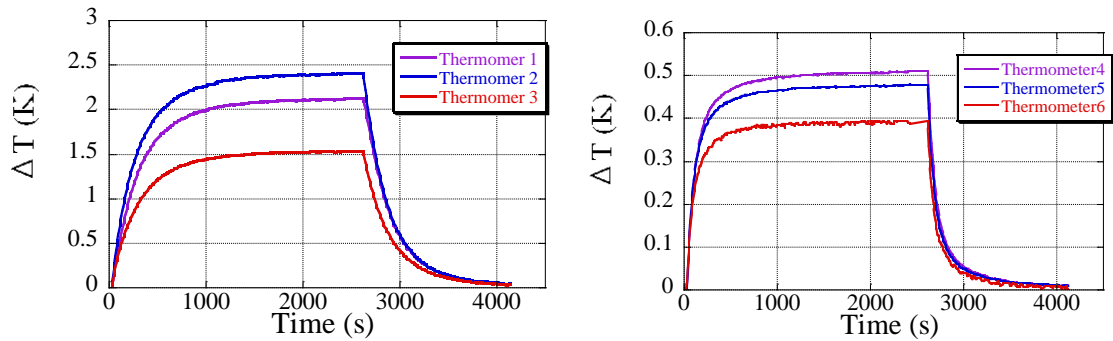


図 2.1.5-3-15 Sweep Rate 1.0 A/sec, 0.06 W, 温度計 1~3
(左：非含浸コイル、右：パラフィンモールドコイル)

非含浸コイルもパラフィンモールドコイルでも、コイルの温度上昇は発熱量にはほぼ比例し、Sweep Rate にはほぼ依存しないことが確認できた。ただし、Sweep Rate に関しては、サンプリングレートが 8sec であったため、測定精度が低く誤差に埋もれている可能性がある。正確な評価には、短いサンプリングレートで精度の良い測定をすることが必要である。

パラフィンモールドによる冷却効果の改善を、実験結果を比較して定量的に明らかにした。非含浸コイル、パラフィン含浸コイルの最高到達温度を一つのグラフにまとめたものを図 2.1.5-3-16 に示す。なお、Sweep Rate の違いによる最高到達温

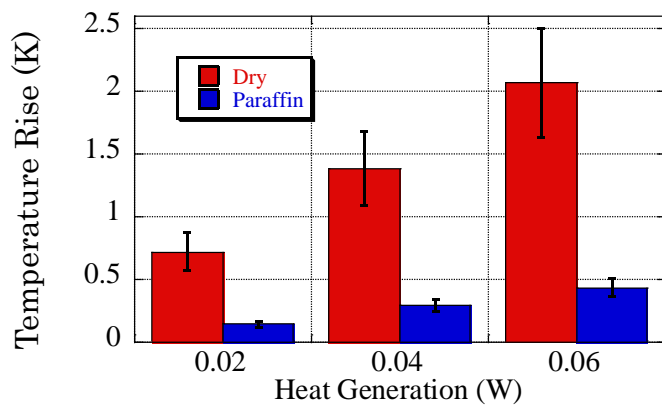


図 2.1.5-3-16 非含浸コイルとパラフィン含浸コイルの最高到達温度の比較

度の違いは観られなかったので Sweep Rate 1.0 A/sec の結果を代表して用いた。図中のエラーバーは最高到達温度の振れ幅を示す。棒グラフは温度計 1~6 の平均値を示し、それぞれの温度計の温度はエラーバーの範囲内に収まっている。図 2.1.5-4-16 よりパラフィン含浸コイルでは非含浸コイルに比べ温度上昇が約 1/5 に抑えられていることが確認できた。また、パラフィン含浸では繰り返しの通電によって、その冷却効果が低下する可能性が指摘されているが、本研究で繰り返した実験回数(9回)では冷却効果の低下は確認できなかった。

続いて非含浸コイルの時定数とパラフィン含浸コイルの時定数を比較したものを図 2.1.5-3-17 に示す。時定数は、通電開始 (0 秒) におけるコイルの温度の時間変化曲線の接線が最高到達温度に達するまでの時間であるが、0 秒時の傾きが不明確なため、ここでは最高到達温度の $(1 - 1/e)$ 倍 (およそ 63.2%) に達するまでの時間を時定数とした。その概念図を図 2.1.5-3-18 に示す。なお、今回の実験では Sweep Rate と時定数の明確な関係性は確認できなかったので Sweep Rate 1.0 A/sec の結果を代表して示す。図 2.1.5-3-17 より、パラフィン含浸コイルでは非含浸コイルに比べ時定数が約半分になっている。これはパラフィン含浸により冷却効果は温度上昇に加え、応答速度の点でも改善されたことを示す。

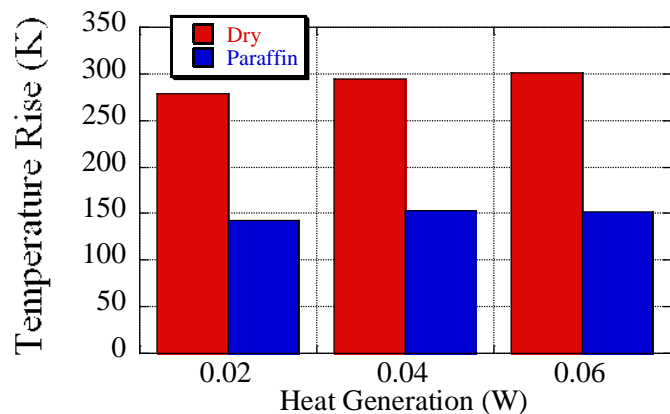


図 2.1.5-3-17 非含浸コイルとパラフィン含浸コイルの最高到達温度の比較

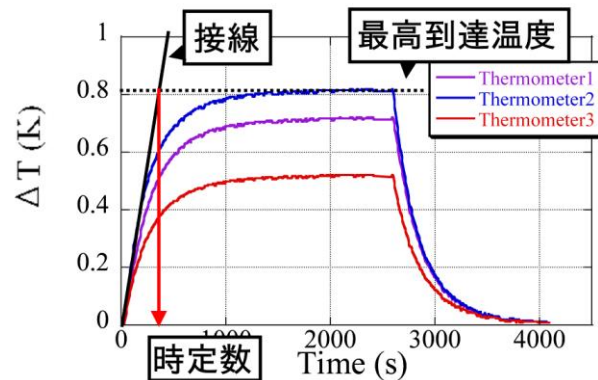


図 2.1.5-3-18 時定数の定義

以上よりパラフィン含浸によって伝導冷却コイルは以下の点で改善されたことが確認できた。

- ・ 温度上昇が約 1/5 に抑えられる
- ・ 最高温度に到達するまでの時間は約 1/2 に抑えられる

(3) 有限要素法を用いた数値解析

今回試験に用いたモデルコイルについて、有限要素法による数値解析に基づいて伝熱特性評価を行なった。解析方法は、二次元回転対称有限要素法を用い、解析においても冷却板以外の境界は断熱条件とした。また、冷却板の境界条件は固定境界条件(第一種境界条件)とし、20 K に固定した。その様子を図 2.1.5-3-19 に示す。銅ダミーコイル下部と FRP 板が接触する面に関して、完全に面接触しているときの接触率を 100%として、接触率を変化させた際の温度上昇について数値解析を行なった。コイル内の熱の移動において、温度勾配による熱の移動と発熱による熱の流入は温度の時間変化とバランスする。これは式 3.1 の熱平衡方程式によって表される。

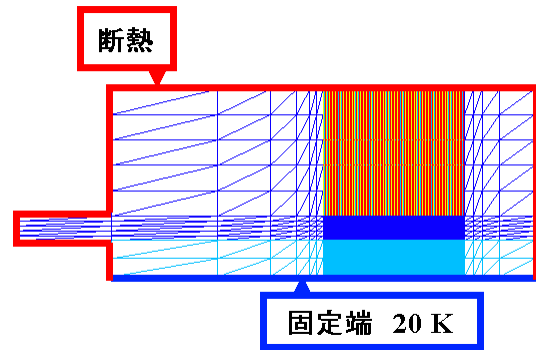


図 2.1.5-3-19 メッシュと境界条件

$$\nabla \cdot \{k(\nabla T)\} + Q_g - C \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (3.1)$$

k は熱伝導率、 T は温度、 Q_g はジュール発熱、 C は比熱、 t は時間

非含浸コイルと比べパラフィン含浸コイルの温度上昇が抑えられるのはコイルと冷却板との接触面積が増えたことによる。今回の試験では冷却板とコイルの間に GFRP が挟まれているので、正確にはコイルと GFRP との接触面積が改善されたことによって冷却効果が上昇したと考えられる。非含浸コイルにおいてコイルと冷却板が完全には接触していないと考えられる。コイルを巻くにあたり、コイルのテープ線材は冷却板に対して完全な平行には巻けないことや、テープ線材自体のがたつきによって冷却板からテープが浮いている部分が生じることは避けられないと考えられる。一方でパラフィン含浸を施した場合にはそのコイルと冷却板の隙間にパラフィンが充填され、実効的なコイルと冷却板の接触面積が増える事になると考えられる。そこで接触面積をパラメータとしてコイル上部の最高到達温度を解析し、結果を図 2.1.5-3-20 に示す。横軸の接触面積は 100% で冷却板とコイルが完全に接触し、0% で完全に浮いている状態を表す。縦軸の

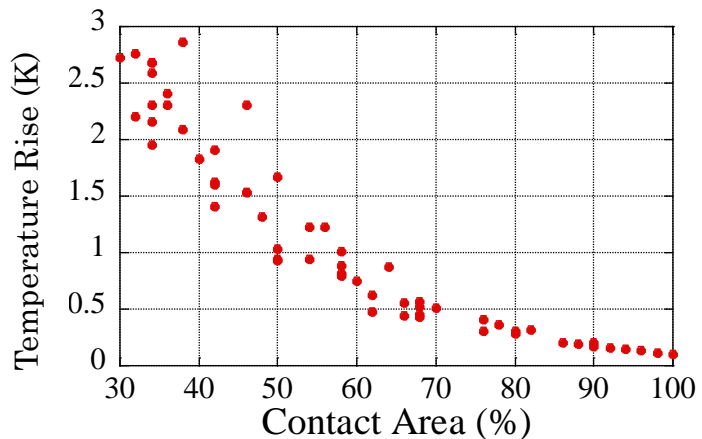


図 2.1.5-3-20 接触面積と最高到達温度の関係

最高到達温度はコイル上部の全テープ(50 ターン)の最高到達温度の平均値である。図 2.1.5-3-20 では接触面積が同じにもかかわらず最高到達温度に差が生じているが、これは冷却板と接しないテープを乱数によって与えたため生じた温度差だと考えられる。例えば、冷却板と接していないテープが一か所に集中した場合は熱がその場所でより集まるようになり、コイル全体の温度上昇も高くなり、逆にうまく分散した場合にはそれぞれの周りから吸熱され、コイル全体の温度上昇は小さくなると考えられる。非含浸コイルとパラフィン含浸コイルの最高到達温度を数値解析の結果と比較したグラフを図

2.1.5-3-21 に示す。図

2.1.5-3-21 中の非含浸コイルとパラフィンコイルの最高到達温度を示す色つきの帯は実験結果のぶれ幅を示す。例えば非含浸コイルを示す帯は実験結果の最低値 0.51 K から最高値 0.81 K を示している。グラフより非含浸コイルは数値解析結果上での

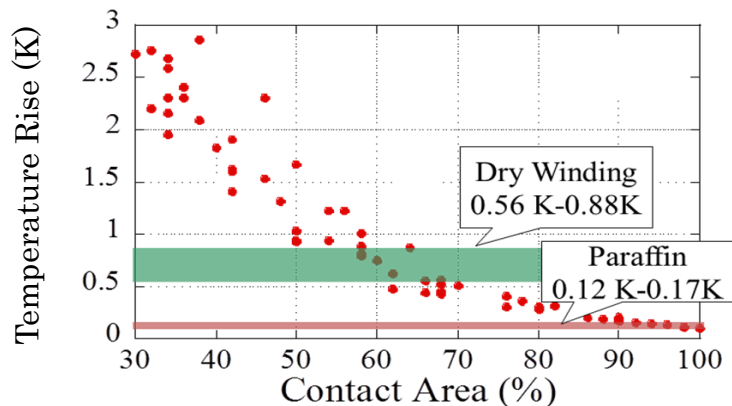


図 2.1.5-3-21 実験結果と数値解析結果の比較

接触面積 60%-70%の温度上昇に相当し、パラフィン含浸コイルは接触面積 90%-100%に相当している。これによって、非含浸コイルではテープのガタつきにより半数弱が冷却板から浮いてしまっていたものがパラフィン含浸によってほぼすべての隙間が埋められたと評価することができる。以上の結果を踏まえ、接触面積を 96%の想定した場合の数値解析結果と実験結果の比較を図 2.1.5-3-22 に示す。

図 2.1.5-3-22 より実験結果が数値解析結果の最高温度と最低温度の間に位置しており、パラフィン含浸ではコイルと冷却板との接触面積が 90%-100%という評価に合致している。

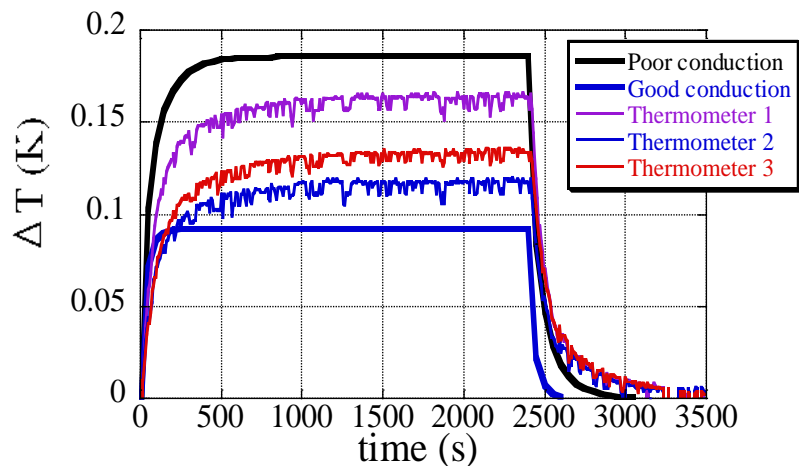


図 2.1.5-3-22 接触面積 96%での実験結果と数値解析結果の比較

(4) まとめ

コイルをパラフィン含浸することによ

り、1) 温度上昇が約 1/5 に抑えられ、2) 最高温度に到達するまでの時間は約 1/2 に抑えられた。よって、コイルの冷却効果はほぼ理想的な状態 (冷却板とコイルが

完全に接触している状態)まで改善することができることが示された。試験用モデルコイルは前項「2.1.5-2 高信頼性・高耐久性 SMES コイル要素技術開発」の高強度コイル構造 (Yoroi-coil) が適用されている。これにより、高耐久性パンケーキコイル構造の超電導コイルに伝導冷却が適用可能であることが確認され、機器への展開において、冷却特性の面からパラフィンモールドコイルが実用性を有していることが明らかになった。

2.1.5-4 転流によるクエンチ検出・保護方法手法の開発（中部電力、早稲田大学）

(1) 研究開発目標

大容量 SMES 用超電導コイルには、大電流導体の開発が不可欠となる。Y 系超電導線材はテープ形状であるため、大電流導体はテープ積層導体（集合導体）になる。これまでに大電流導体として 4 枚の Y 系超電導線材を束ねた集合導体を検討してきており、集合導体の素線は交流損失の低減や電力機器としての耐電圧確保のため素線絶縁を施すことが前提である。素線絶縁を施した集合導体コイルのクエンチ検出は、従来の電圧を監視する方法を使用するには、転流やノイズ等により検出が遅れるため、別の方法を検討しなければならない。

2.1.4 節の「高磁界コンパクト SMES システムモデル検証」において、数値シミュレーションを行い、コイル端部での転流を監視し、集合導体内の各素線の偏流を監視することによりクエンチ検出ができる可能性を確認した。本研究では、積層導体を用いたダブルパンケーキコイルより、集合導体内の偏流監視方式によるクエンチ検出の可能性を実験的に検証した。

(2) ダブルパンケーキモデルコイルによるクエンチ検出実験

素線絶縁された Y 系超電導線材を 4 本（tape 1-4）集合導体化し、これをパンケーキ状に巻線したダブルパンケーキコイルを用いた試験用モデルコイルの外観を図 2.1.5-4-1 に、諸元を表 2.1.5-4-1 に示す。また、ダブルパンケーキコイルに用いた YBCO 系超電導線材とコイル間の転位の模式図を図 2.1.5-4-2 に示す。パンケーキコイル 1 層あたりの巻き数は 16 ターンであり、コイルの内径は 200 mm ϕ 、外径は 242 mm ϕ である。また、Y 系超電導線材の線幅は 10 mm、線厚は 317 μm である。モデルコイルは伝導冷

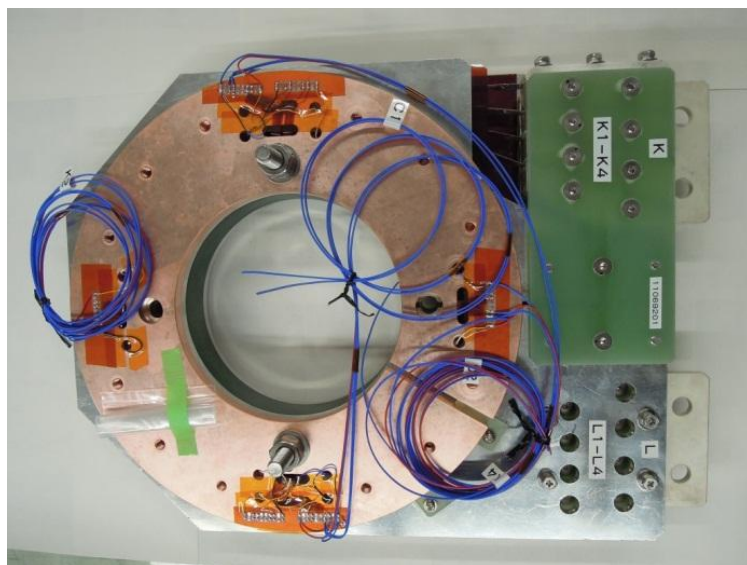


図 2.1.5-4-1 実験に用いた YBCO 集合導体モデルコイル

表 2.1.5-4-1 コイルの諸元

Inner radius	200 mm
Outer radius	242 mm
Number of tapes in conductor	4
Number of pancake coils	2
Number of turns	16 \times 2 turns
I_c of tape 1, 2, 3, and 4@77 K, s,f,	159, 155, 150, 152 A

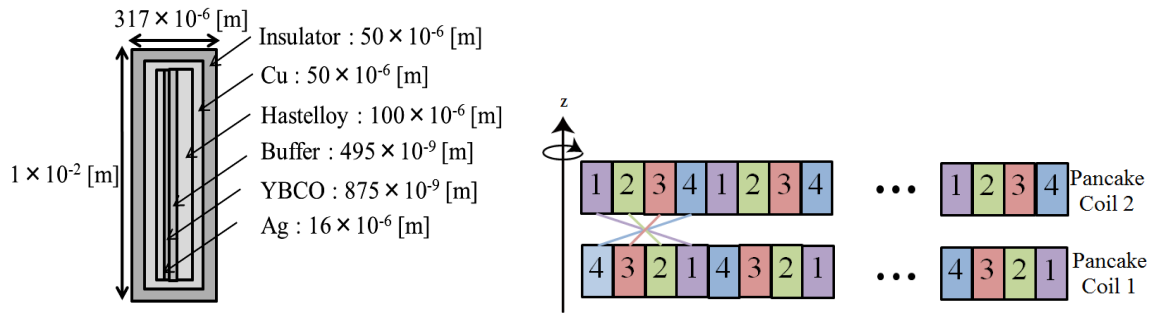


図 2.1.5-4-2 Y系超電導線材構造とコイル間の転位の模式図

却方式で冷却した。本実験で使用した実験装置を図 2.1.5-4-3 に示す。コイルフランジ下部が銅製の冷却板を介して冷凍機のステージに接続されている。また、下部冷却版から銅編組線を介して、上部冷却版が熱的に接続されている。なお、試験用コイルは真空容器中に設置されて

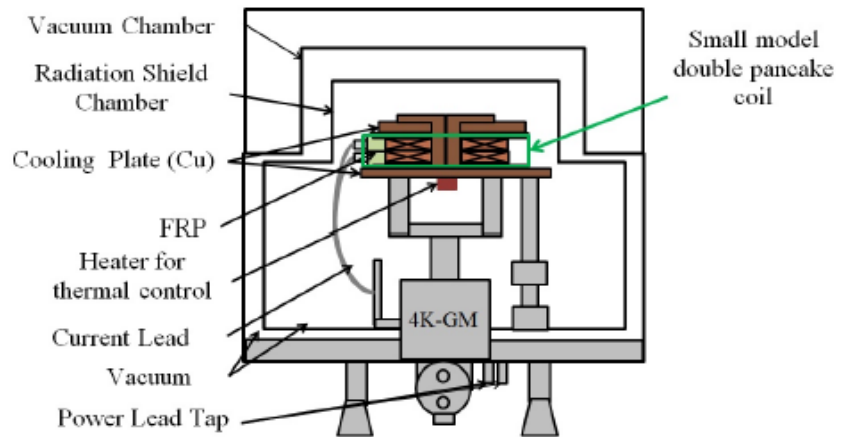
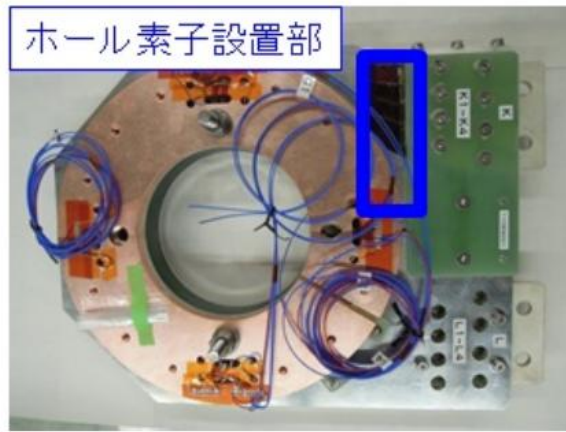


図 2.1.5-4-3 実験装置

いるためコイル部材との接続箇所以外は絶縁・断熱の状態にある。本実験ではコイル内に常電導領域を発生させるため、コイル保護の方法として外部抵抗保護法を採用し、ダブルパンケーキコイルと並列に外部抵抗 0.25Ω を設置した。

集合導体内の各素線に流れる電流は直接測定できないため、測定にはホール素子を用いた電流値の逆算方法を採用した。ホール素子は磁場の絶対値に応じた電圧を出力する素子である。本試験においては、電極部で線材が複数本並列に接続されている。線材上部の線材厚み方向に平行な向きの磁場成分は、並列に接続したそれぞれの線材に電流が流れた際も重ね合わせによる磁場の減衰が起こりにくい領域であると考えられる。そのため、本試験においては各線材上部の位置にホール素子を固定し、線材厚み方向に平行な向きの磁場成分を測定することとした。本実験でホール素子を設置した箇所の全体写真、ホール素子設置箇所の写真、模式図を図 2.1.5-4-4 に示す。各素線の電流推定は、コイルに直列に接続されたシャント抵抗から求めた電流値とホール素子の電圧から推定した各素線の電流値を比較し、ホール素子による電流推定の妥当性を確認した。また、各素線の電流のばらつきの原因としては、電流リードとテープ間の接触抵抗が影響していると考えられる。

クエンチ検出実験では、コイル内に局所的な常電導転移を発生させるためにヒータ（歪みゲージ($120\Omega \times 2$)) をコイル内に設置し、ヒータに電流を流すことにより、局所的な発熱 0.6 W (通電電流 $I=0.05\text{ A}$)を発生させた。図 2.1.5-4-5 にヒー



(a)

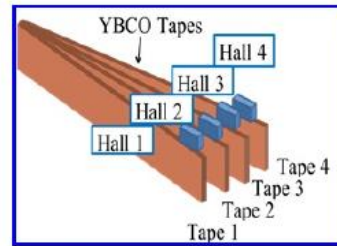
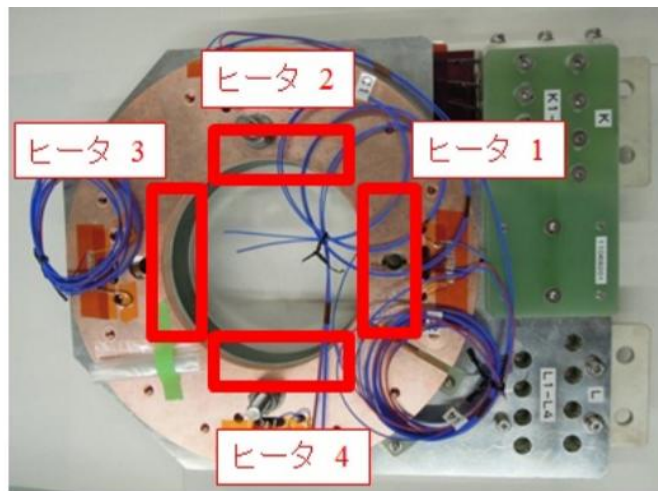


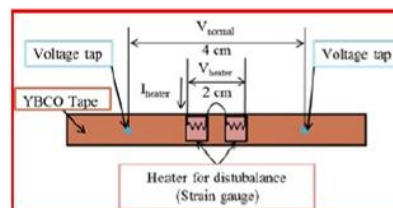
図 2.1.5-4-4 ホール素子の(a) 全体写真(b) 端末の写真(c) 模式図



(a)



(b)



(c)

図 2.1.5-4-5 ヒータの(a) 全体写真(b) 設置箇所の写真(c) 模式図

タ設置箇所の様子を示す。パンケーキコイル間の渡りの部分に素線それぞれにヒータを設置し、選択的にそれぞれのテープに常電導領域を発生できるようにした。なお、ヒータ投入による常電導転移を確認するため、電圧端子を 4 cm 間隔に設置し計測を行った。

ホール素子による電流値推定の際、コイル素線に電流は均等には流れなかった。各素線間の偏流の原因を考察するため、各素線と電流リード間 (1 本の素線につき 2 ヶ所) に電圧端子を設置し、液体窒素浸漬冷却中で接触抵抗の測定実験を行った。実験方法は、コイルに 100A 通電時に電圧端子から計測した電圧値を、ホール素子によって電流推定した各素線の電流値でそれぞれ除することで、接触抵抗を計算した。本実験より得た接触抵抗測定実験の結果を表 2.1.5-4-2 に示す。各素線の接触抵抗の大きさは Tape 1 > Tape 4 > Tape 2 > Tape 3 の順に大きかった。また、ホール素子によって推定した各素線の電流値は Tape 3 > Tape 2 > Tape 4 > Tape 1 となり、接触抵抗の大きさとは逆の順番に大きくなった。これは素線絶縁された集合導体では、各素線を並列回路と見なすことができるため、接触抵抗の大きさと各素線の電流値は逆比例したと考えられる。また、表 2.1.5-4-2 より、各素線の接触抵抗の値は、 $10^{-6} \sim 10^{-4} \Omega$ のオーダーであることが分かった。

表 2.1.5-4-2 接触抵抗の測定結果

	tape 1	tape 2	tape 3	tape 4
Contact resistancel	3.60988E-06	2.39169E-06	6.00040E-06	1.84545E-04
Contact resistance 2	3.90511E-05	1.47053E-05	1.79956E-05	3.68536E-04
Contact resistance (total)	5.53081E-04	2.39960E-05	1.70970E-05	4.26610E-05

電流転流試験は、モデルコイルを伝導冷却(77 K)した後、モデルコイルにランプ状の電流(100 A)を通電した(通電波形を図 2.1.5-4-6、表 2.1.5-4-3 に示す)。定常状態において、各素線にヒータ(0.6 W)を 10 sec 間投入することで局所的な常電導領域を発生させ、ホール素子の電圧から各素線に流れる電流を推定するという手順で行なった。

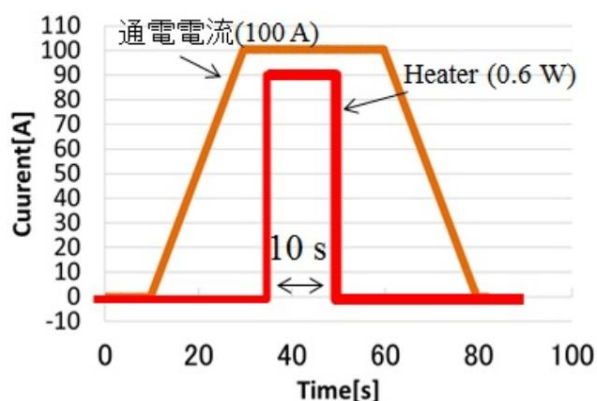


図 2.1.5-4-6 通電波形

通電時間	約 70 s
通電電流	100 A
電流の Sweep rate	5 A/s
誘導性電圧 $L \frac{di}{dt}$	1.75 mV

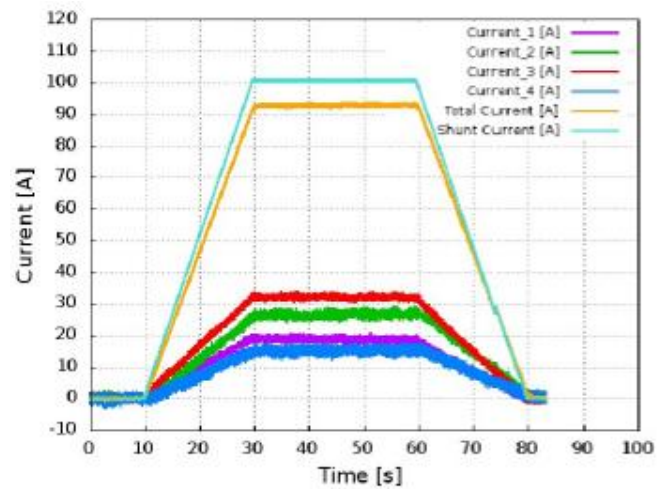
表 2.1.5-4-3 接触抵抗の測定結果

(3) ダブルパンケーキモデルコイルによるクエンチ検出実験（待機状態）

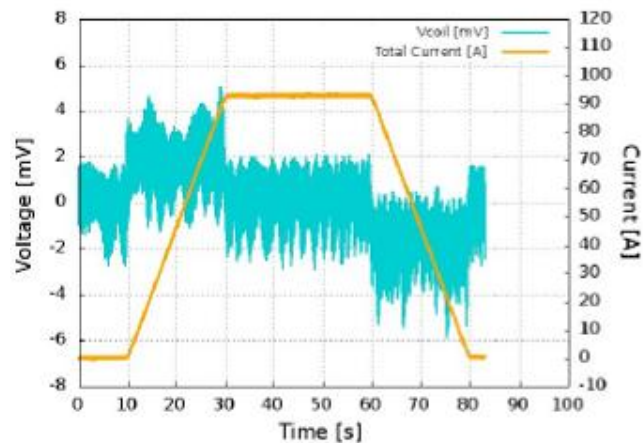
伝導冷却下で、モデルコイルに 100A を通電した際の各素線の電流波形とコイルの両端電圧波形を図 2.1.5-4-7 に示す。図 2.1.5-4-7(a) より、コイルに 100A 通電時には、各素線には Tape1=19A、Tape2=27 A、Tape3=32 A、Tape4=16A 流れることがホール素子による電流推定により確認できた。電流にばらつきがあるが、この原因としては、以下の 2 項目が考えられる。1 点目は本実験で用いたコイルはダブルパンケーキコイルであるため、素線間の転位が異なる（Tape1=Tape4、Tape2=Tape3）。そのため、インダクタンスが不揃いとなり、各素線に流れる電流が Tape1=Tape4、Tape 2=Tape 3 となる。2 点目としては、先述の電流リードと各素線間の接触抵抗が影響したと考えられる。

続いて、劣化発生を想定して、100 A コイル通電が定常状態にあるときにヒータ通電を行った場合の電流検出検証試験結果を報告する。

まず、素線 1 本（Tape 1）で劣化発生を想定した場合について報告する。Tape1 にヒータを投入し、0.60 W の熱擾乱を各素線長手方向 1 cm に加えた時の(a) ヒータ投入部の電圧、(b)コイルの両端電圧、(c)各素線の電流の実験結果を図 2.1.5-4-8 にそれぞれ示す。図 2.1.5-4-8(a)より、ヒータ投入約 4.5 sec 後に電圧が上昇し始め、常電導領域が発生して抵抗性電圧は最大約 0.20 mV であった。また、図 2.1.5-4-8(b)より、コイル両端部における電圧は 4 mV 程の電圧ノイズが発生したため、ヒータ投入による電圧の変化を観測することができなかった。図 2.1.5-4-8 (c)より、常電導領域発生 0.9、1.4、1.8、2.3 sec 後に $\Delta I_{\max} - \Delta I_{\min}$ （定常状態から



(a)



(b)

図 2.1.5-4-7 待機状態（100A）通電時の
(a) 電流波形(b) 電圧波形

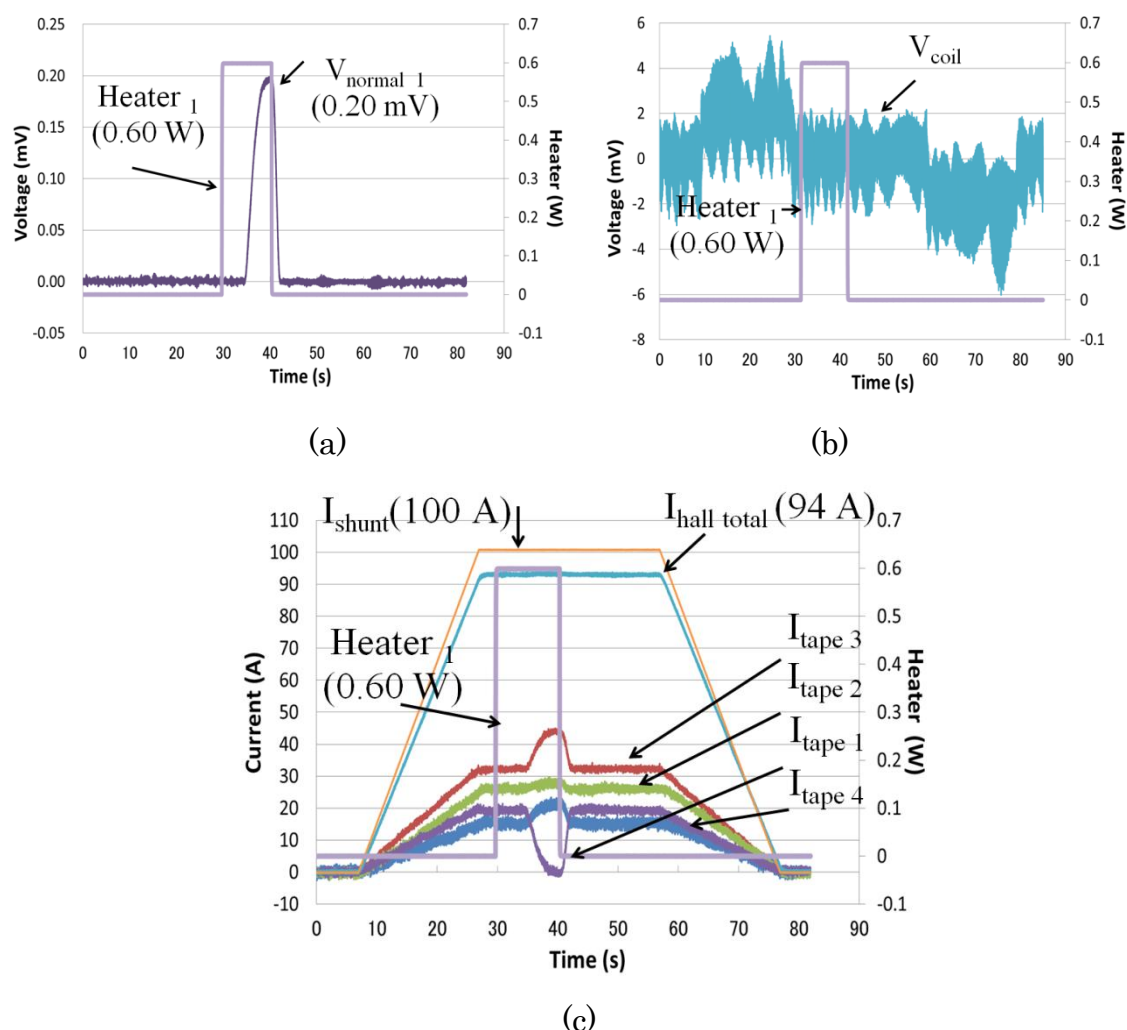


図 2.1.5-4-8 素線 1 本で劣化発生を想定した場合の(a)ヒータ投入部の電圧、(b)コイルの両端電圧、(c)各素線の電流の実験結果

の電流の変化量の最大値(I_{max}) と電流の変化量の最小値(I_{min}) の差) = 5、10、15、20 A の素線間の電流転流を確認し、10 sec 間のヒータ投入によって Tape1 の電流が 19A 減少し、Tape 2, 3, 4 の電流はそれぞれ 1A、12A、6A 増加することを観測した。またヒータ通電終了 2 sec 後に各素線の電流値がヒータ投入前と同じ電流値に戻ることを確認し、ヒータの投入前後で各素線の推定電流の総和は変化しなかった。なお、ヒータ投入前の各素線に流れる電流はコイル両端の接続抵抗により不均一となっている。ホール素子から推定した各素線の電流合計値とシャント抵抗から求めた電流合計値に 6 A の差が生じたが、これは熱収縮等でホール素子の相対的な位置が変化したため校正値が変化した等の要因が考えられる。

さらに、素線 1 本の劣化発生を含め、素線 2 本、素線 3 本、素線 4 本すべての劣化発生を想定した場合の実験結果を表 2.1.5-4-4 に示す。ヒータ投入した素線に局所的な常電導領域が発生し、ヒータを投入した素線の電流が減衰し、その他の素線に電流転流することを確認できた。また、ヒータ投入によって各素線に発生する

電圧にばらつきがあることが分かる。これはヒータ投入のタイミング、ヒータと線材の熱接触、線材の諸元(I_c , n 値) が起因して発生したと考えられる。ヒータ投入から常電導発生までの時間は投入枚数が多い程、常電導電圧が早く立ち上がり常電導領域発生に伴う抵抗性の電圧が大きくなる。なお、コイルの両端電圧では、

表 2.1.5-4-4. 実験結果

ヒータを投入した Tape	ヒータ投入から常電導領域発生までの時間 [s]	ヒータ投入により発生した 4 cm 区間の常電導電圧 (tape)[mV]	電流転流による各素線の電流値の増減 [A]			
			1	2	3	4
1	4.5	0.2(1)	-19.0	1.0	12.0	6.0
2	5.3	0.16(2)	2.0	-8.0	4.0	2.0
3	3.5	0.29(3)	16.0	8.0	-42.0	18.0
4	3.9	0.19(4)	6.0	2.0	11.0	-19.0
1,2	4.6	0.22(1),0.21(2)	-19.0	-8.0	18.0	9.0
1,3	3.3	0.44(1),0.46(3)	-17.0	18.0	-40.0	39.0
1,4	4.3	0.26(1,4)	-17.0	5.0	30.0	-18.0
2,3	3.4	0.30(2),0.34(3)	22.0	-4.0	-41.0	23.0
2,4	4.3	0.20(2),0.21(4)	9.0	-10.0	18.0	-17.0
3,4	3.5	0.42(4),0.44 (3)	37.0	20.0	-34.0	-23.0
1,2,3	2.9	0.62(3),0.60(1),0.55(2)	-16.0	-3.0	-39.0	58.0
1,2,4	3.5	0.31(1),0.30(4),0.28(2)	-18.0	-9.0	45.0	-18.0
1,3,4	3.0	1.08(3),1.03(1,4)	-12.0	-19.0	-35.0	66.0
2,3,4	2.3	0.59(3),0.55(4),0.52(2)	56.0	-1.0	-40.0	-15.0
1,2,3,4	2.8	2.55(1,4),2.5(2),2.9(3)	2.0	15.0	-19.0	2.0

ヒータを投入した tape	常電導領域発生から電流転流検出までの時間 [s]				ヒータ投入終了から定常状態に戻るまでの時間 [s]
	$\Delta I_{max} - \Delta I_{min} =$				
	5[A]	10[A]	15[A]	20[A]	
1	0.9	1.4	1.8	2.3	2.0
2	1.3	2.1	-	-	1.0
3	1.6	1.9	2.2	2.5	3.4
4	0.7	1.1	1.4	1.8	2.3
1,2	0.9	1.3	1.7	2.0	1.7
1,3	0.6	0.9	1.2	1.5	2.9
1,4	0.8	1.2	1.4	1.7	1.5
2,3	0.9	1.2	1.5	1.8	1.0
2,4	0.6	1.0	1.4	1.7	1.2
3,4	0.8	1.1	1.4	1.6	2.9
1,2,3	0.7	1.0	1.3	1.6	4.0
1,2,4	1.2	1.5	1.8	2.0	1.3
1,3,4	0.7	1.1	1.3	1.6	3.4
2,3,4	1.4	1.7	1.9	2.1	3.6
1,2,3,4	1.0	1.3	1.6	1.8	3.4

全ての素線に同時にヒータを投入したときのみ、電圧の変化をわずかに観測することができた。常電導領域が発生してから、電流転流の差が 5、10、15、20 A を超えるまでの最大時間はそれぞれ 1.6、2.1、2.2、2.5 sec であった。これらの結果から非常に短時間で、電流転流を検出できることが分かった。また、今回の 0.6 W のヒータ投入では、ヒータ投入終了後超電導状態に復帰した。ヒータ投入終了から超電導状態に復帰するまでに要した時間は最大で 4.0 sec であった。

(4) 負荷変動補償を想定した模擬実験(50 A → 100 A → 50A)

実際の SMES の通電パターンでは、待機状態や定格容量いっぱいには電力が貯蔵されたピーク状態の他に系統安定化や負荷変動補償の三角波も通電が考えられる。そのため、本実験でも三角波を通電中に常電導領域が発生した際の電流転流の様子を調査した。負荷変動補償と同様の三角波で、50 A → 100 A → 50A の電流をモデルコイルに通電した際の各素線の電流波形とコイルの両端電圧波形を図 2.1.5-4-9 に示す。図 2.1.5-4-9 (a) より、負荷変動補償の電流を通電した際の各素線の電流のばらつきとしては、待機状態と同様に接触抵抗やホール素子の相対的な位置がずれた可能性が考えられる。図 2.1.5-4-9(b) より、三角波通電時にはノイズを含んだ誘導性の電圧(約±40mV)が発生することを確認した。

検証実験として素線 1 本

(Tape1) で劣化発生を想定した場合について報告する。コイルに負荷変動補償波形通電時に 4 枚積層導体の内 1 枚(Tape1) にヒータを 10 sec 間投入した場合のヒータ投入部の電圧波形、コイルの両端電圧波形、電流推定より求めた各素線

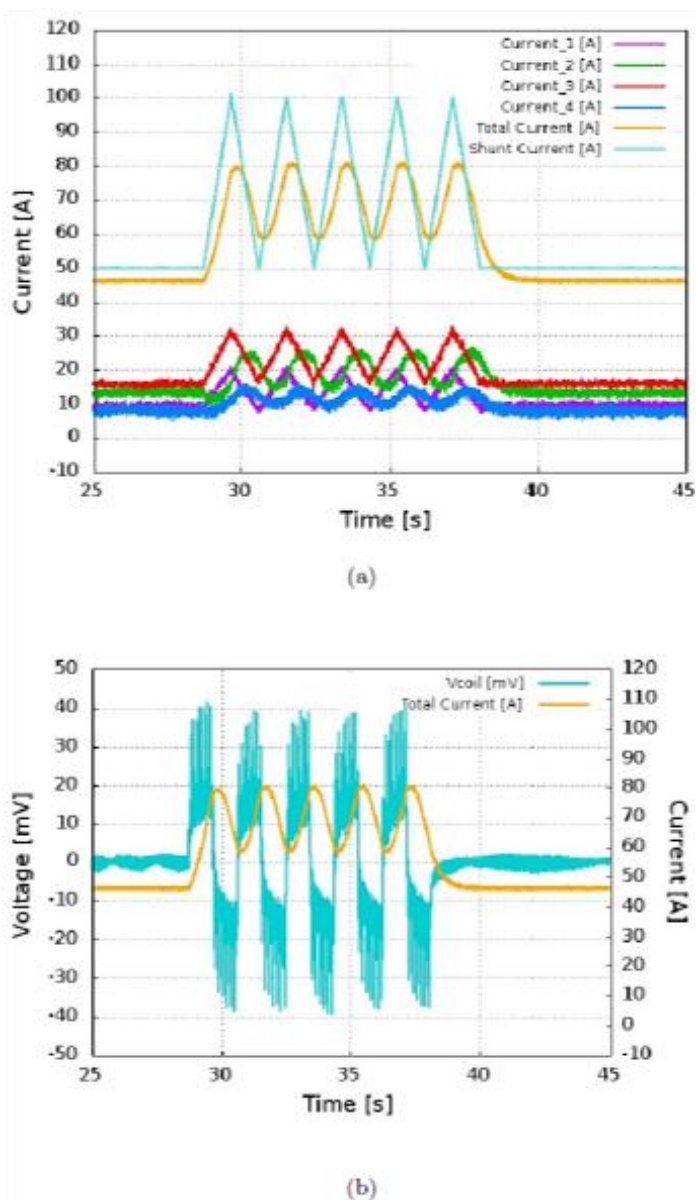


図 2.1.5-4-9 負荷変動補償波形通電時の
(a) 電流波形(b) 電圧波形

の電流波形の実験結果を図 2.1.5-4-10 に示す。図 2.1.5-4-10(a) より、ヒータ投入 5.9 sec 後に常電導領域が発生し、最大 0.20mV の常電導転移に伴う電圧発生を確認できた。図 2.1.5-4-10(b) より、コイルの両端電圧では常電導転移に伴う電圧の変化はノイズに埋もれてしまい観測できなかった。図 2.1.5-4-10(c) より、常電導領域発生 0.42、0.64、0.83 sec 後に $\Delta I_{\max} - \Delta I_{\min} = 5、10、15\text{A}$ の常電導転移に伴う電流転流を確認することができた。なお、ヒータの投入前後で、各素線の推定電流の総和は変化しなかった。

コイルに負荷変動補償波形通電時に各素線にヒータを 10 sec 間投入した際の実験結果を表 2.1.5-4-5 に示す。負荷変動補償波形通電時に常電導領域が発生した際にも、電流転流が発生し、短時間で検出できることが確認できた。なお、従来のコイル両端電圧による検出手法では、負荷変動補償波形通電時にもノイズに埋もれてしまい、極めて困難であることが分かった。

表 2.1.5-4-5 負荷変動補償(50 A → 100 A → 50A) 通電時の実験結果

ヒータを投入した Tape	ヒータ投入から常電導領域発生までの時間 [s]	ヒータ投入により発生した 4 cm 区間の常電導電圧 (tape) [mV]	常電導領域発生から電流転流検出までの時間 $\Delta I_{max} - \Delta I_{min} =$			
			5[A]	10[A]	15[A]	20[A]
1	5.9	0.2(1)	0.42	0.64	0.83	-
1,2	5.4	0.23(1),0.22(2)	1.4	1.56	1.74	1.9
1,2,3	4.2	0.60(1),0.56(2),0.63(3)	1.38	1.52	1.56	1.73
1,2,3,4	5.0	2.42(1),2.23(2),2.52(3),2.45(4)	0.1	0.23	0.34	0.41

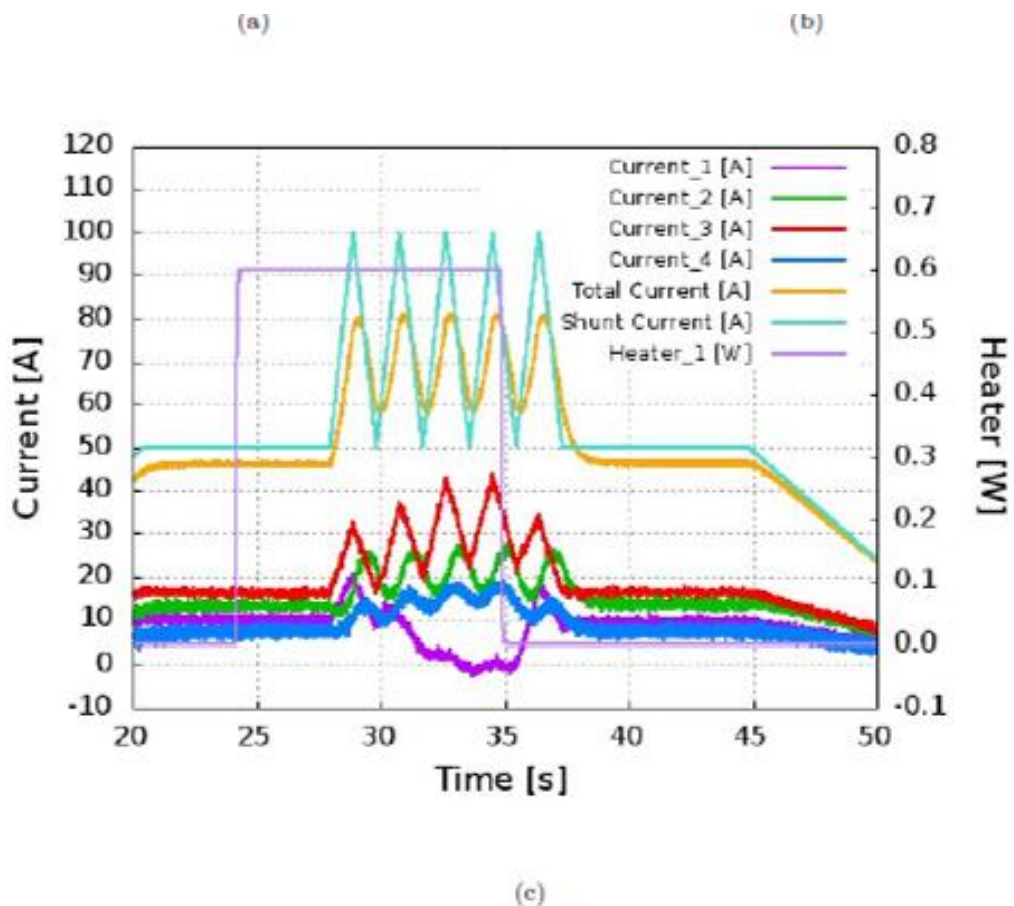


図 2.1.5-4-10 負荷変動補償波形通電時に 1 枚(tape1) 劣化を想定した場合の
 (a) ヒータ投入部の電圧波形(b) コイルの両端電圧波形
 (c) 電流推定より求めた各素線の電流波形

(5) まとめ

電流転流監視によるクエンチ検出手法の妥当性を確認するため、素線絶縁した Y 系超電導集合導体によるダブルパンケーキモデルコイルを用いて伝道冷却によって実験を行った。各素線の電流分布はホール素子を用いて推定し、常電導領域の発生はヒータ発熱により模擬した。実験では、待機状態(100A)と負荷変動状態(50A→100A→50A)において局所的な常電導領域を発生させて、コイルの両端の電圧と各素線の電流を測定した。実験結果では、ヒータ投入 0.6W で局所的な常電導領域が発生することを確認するとともに、この常電導領域発生に伴う電流転流が発生することが確認できた。一方、従来の両端電圧監視による手法ではノイズに埋もれてしまい、常電導検出は極めて困難となることも示すことができた。

以上より、積層導体内の素線で常電導領域が発生しても、素線間の偏流を観測することによって、ホットスポット発生の危険性を回避するクエンチ検出が可能となると考えられる。そしてこの結果を踏まえ、Ⅲ-2.1.4-3 クエンチ検出・保護方法に関する検討の(4)トロイダル型集合導体コイルの保護で述べた「外部保護抵抗によるエネルギー回収に基づく安定化層厚の決定法」によって、想定する SMES 用コイルのクエンチ検出・保護が可能となると考える。

本研究では高信頼性・高耐久性コイル化技術に関して、課題を抽出し、解決策を提案することを目的とした。ここまでの報告の通り、高強度で電磁応力や熱応力に優れた耐性を有するコイル構造を開発し、剥離やフープ応力耐性に対する課題解決が図られた。さらに伝導冷却適用性の検証やクエンチ検出技術評価によって、実使用に必要な要素技術を開発した。

2.2 超電導電力ケーブル研究開発

2.2.1 66kV 大電流ケーブル化技術の開発

Y系超電導線材はBi系超電導線材に比べ高い臨界電流密度を有し、また低交流損失を実現できる可能性も有している。このことから、66 kV / 5 kA 級のコンパクトで大容量の超電導ケーブルの開発をめざしている。過去の検討から、交流損失を低減するためにはY系超電導線材テープ表面に対しての垂直磁場の影響を低減する必要があり、細線化線材の適用や、多層化時の影響を考慮したケーブル設計を行う必要がある。本開発では、ケーブル形状に導体化した場合の線材特性への影響、多層導体構造での低交流損失設計の検討及び低損失化の実証、ケーブルの機械的強度特性に関する検証等を行った。併せて大電流適用に対応した電流リード部と超電導-常電導接続部の構造設計の開発を行った。また、三心一括型ケーブルとする場合には、三心形状での機械特性や熱収縮応力下でのケーブル変形の影響、短絡電流通過時の電磁力によるケーブルコアへの影響等が懸念されるため、それらの検証・評価を行った。

さらに、66 kV 級大電流ケーブルの実用性を検証するためには、大電流通電技術、交流損失低減技術等の開発成果を活かしたケーブルを作製し、実用化時の要求仕様に基づいた課通電試験を行う必要がある。このため、課通電試験向けケーブルシステムの設計及び課通電試験計画案を作成した。

なお、本プロジェクトで設定した目標を表 2.2.1-1 にまとめる。

表 2.2.1-1 大電流ケーブルの開発目標

項目	中間目標	最終目標
①大電流・低交流損失 交流損失の測定・評価 ケーブル導体の評価	ケーブル交流損失 2 W/m-相@5 kA 以下	左記、各要素特性を備えた 66 kV / 5 kA / 15 m ケーブルを 開発し、2.1 W/m-相（交流損失 、誘電体損失）以下の損失検証 と、課通電試験計画書に沿った 試験を行い、ケーブルがそれら の特性を有していることを検 証する
②三心一括ケーブル導体の検証 三心一括型導体の試作・評価 過電流通過時の影響評価	短絡試験（31.5 kA, 2 sec 相 当）でケーブルの性能に劣化 が無いこと	
③大容量接続技術の開発 接続部の構造設計検証 5 kA 級電流リードの開発	5 kA 連続通電を行い、ケー ブル導体、超電導-常電導接 続部、電流リードに異常がな いこと	
④システム検証 システム設計 試験条件検討	検証用超電導ケーブルシス テムのシステム設計完了 課通電試験計画書の作成	

2.2.1-1 大電流導体技術(住友電気工業)

(1) 研究開発目標

超電導ケーブルの通電電流を 5 kA に大容量化するためには多層導体を形成する必要がある。一方で、導体多層化時の課題としては、ケーブルの大径化や各層に対して通電電流を均等に分配させる(均流化)設計の必要性が挙げられる。このため、大容量化に伴う多層導体に関する検討を行うとともに、内径 150mm φ の管路に収納可能な 66 kV 級三心一括型超電導ケーブルの構造に関する設計検討を行った。

(2) 三心一括型超電導ケーブルの構造

三心一括型超電導ケーブルの構造を図 2.2.1-1 に示す。三本のコアを 1 つの断熱管に収納する構造であり、それぞれのコアに断熱管を必要とする単心型超電導ケーブル・3 条と比較して、ケーブルの布設スペースや外部侵入熱が小さくなるメリットを有している。ケーブルコアは、銅撚り線フォーマの上に、超電導導体層(HTS 導体層)、電気絶縁層、超電導シールド層(HTS シールド層)、銅シールド層を同軸上に巻付けた構造となっている。定常時は超電導導体層に送電電流が流れる。この際、両端末で三心コアのシールド層を短絡接続することにより、超電導シールド層には電磁誘導によって導体電流とほぼ同じ大きさの電流を逆位相で流すことができる。本構造により、磁気遮蔽が実現でき、ケーブルの外部に対して EMI (Electromagnetic Interference : 電磁波障害) フリーとなる。

また、短絡事故時においては、定格電流の数倍の大電流が導体やシールドに流れるが、この事故電流を超電導線のみで流すように設計すると非経済的である。よって、超電導導体層に対しては銅フォーマを、超電導シールド層に対しては銅シールド層を設けることにより、事故電流をこれらの保護層に分流させ、温度上昇を抑制する構造を採用している。

ケーブルコアを収納する二重ステンレスコルゲート管の間には多層断熱層を設けるとともに、高真空に維持することにより、高い断熱性能を得ている。

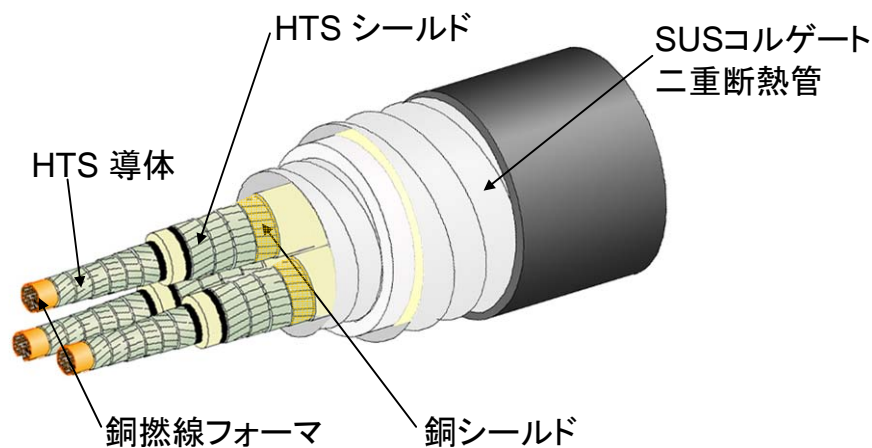


図 2.2.1-1 三心一括型超電導ケーブルの構造

(3) 三心一括型超電導ケーブルの設計検討

上記のような構造を有する三心一括型超電導ケーブルに対して、超電導導体層及び超電導シールド層の層数をパラメータとして構造設計を行った結果を表 2.2.1-2 に示す。一例として、「超電導導体 4 層、超電導シールド 2 層」構造の設計結果を表 2.2.1-3 に示す。フォーマにはこれまでに 66 kV 級超電導ケーブル用フォーマとして使用した実績のある分割集合タイプの銅撚り線フォーマを採用し、絶縁層は液体窒素中で良好な課電実績を有する PPLP[®]-A (Polypropylene laminated paper) を主絶縁とし、実績のある 6 mm 厚で設計を行った。なお、Y 系超電導線材の厚みは 0.17 mm とした。本ケーブルの開発目標である内径 150 mm φ の管路内に収納するためには、ケーブル外径を 140 mm 以下に抑える必要があり、図 2.2.1-3 に示す結果から「導体 6 層、シールド 3 層」が多層化の限界であることが分かる。なお、「導体 2 層、シールド 1 層」構造では、中間評価時に製造した線材特性に対して 5 kA の通電容量を確保することが困難なため設計候補から除外した。

表 2.2.1-2 多層超電導ケーブルの設計結果

	導体 2 層 シールド 1 層	導体 4 層 シールド 2 層	導体 6 層 シールド 3 層	導体 8 層 シールド 4 層
コア外径 (mm)	39.7	41.7	43.6	45.6
ケーブル外径 (mm)	131.5	135.8	140.0	144.3

表 2.2.1-3 多層超電導ケーブルの設計例 (導体 4 層、シールド 2 層)

項目	諸元	外径 (mm)
フォーマ	140 mm ² 分割集合銅撚り線導体	18.0
超電導導体	4 層、層間絶縁あり	20.3
絶縁層	内部半導電層 主絶縁層 : PPLP [®] -A、厚さ 6 mm 外部半導電層	33.7
超電導シールド	2 層、層間絶縁あり	34.7
銅シールド	4 層、層間絶縁あり	39.2
保護層 (ケーブルコア外径)	クラフト紙、不織布	41.7
断熱管 (ケーブル外径)	二重ステンレスコルゲート管 真空多層断熱方式 PVC 防食層	135.8

交流超電導ケーブルにおいて導体を多層化した場合、各層の巻付けピッチ（スパイラルピッチ）を同じにすると、各層のインダクタンスが外層ほど小さくなるために電流は外層に集中して流れる。このような偏流状態にある導体では各層の負荷率（臨界電流値に対する通電電流ピーク値の割合）が大きく異なり、大容量化や低損失化が困難となる。この偏流現象を解消するため、各層のスパイラルピッチを調整して、各層の電流を均一に（均流化）する方法が一般的に用いられている。

多層導体の各層を図 2.2.1-2 に示す円筒モデルで近似し、電流がスパイラル方向と平行に流れていると仮定した場合、各層の自己インダクタンスと相互インダクタンスは式(2.2.1-1&2)で表される。ここで、 d はケーブルの長さ、 a は各層の中心半径、 p は各層の撚りピッチ、 s は撚り方向の係数（S撚りが1、Z撚りが-1）である。

$$L_i = \mu_0 \frac{\pi a_i^2}{p_i^2} d + \frac{\mu_0 d}{2\pi} \left(\ln \frac{2d}{a_i} - 1 \right) \quad (2.2.1-1)$$

$$M_{ij} = \mu_0 s_i s_j \frac{\pi a_i^2}{p_i p_j} d + \frac{\mu_0 d}{2\pi} \left(\ln \frac{2d}{a_j} - 1 \right) \quad (j > i) \quad (2.2.1-2)$$

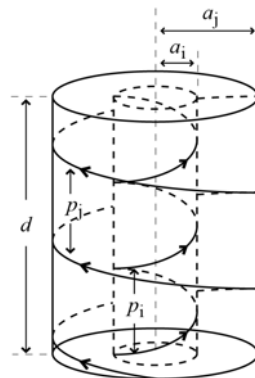


図 2.2.1-2 多層導体の円筒モデル

上記インダクタンスを用いて多層導体の電気回路方程式をたて、各層の電流値が等しくなるような条件で解いたときに得られる解が、各層を均流化するスパイラルピッチとなる。このとき注意すべき点として以下の3点が挙げられる。

- ① 線材をフォーマ上に巻きつけたときに曲げ歪み等による特性が低下しないスパイラルピッチ以上で構成する。
 - フォーマに対するスパイラル試験の結果、100 mm ピッチ以下では線材の歪みが限界歪み（0.2 %）を超え I_c が低下するため、最小スパイラルピッチを 120 mm とし導体設計を実施した。
- ② ケーブルをドラム曲げた際に特性が低下しないスパイラルピッチ以下で構成する。
 - 集合機を用いた導体化後の曲げ試験において、600 mm ピッチ以上では線材に座屈が発生したため、最大スパイラルピッチを 500 mm とし

てケーブル設計を実施した。

③ 製造時や布設時に発生するピッチ乱れを許容できる解を選択する。

図 2.2.1-3 は、最小スパイラルピッチを 120 mm として多層導体の均流化ピッチを検討した結果であり、2 層導体及び 4 層導体については設計可能な解が存在するが、6 層導体については解が存在しない。なお、最小スパイラルピッチを 100 mm として 6 層導体の均流化ピッチを検討した場合には、600 mm 以下の範囲で解が存在するが、この際には要求されるスパイラルピッチの精度が数 mm 以下と非常に厳しく、ケーブル設計が困難と判断した。なお、各層の巻方向を変えたり、超電導シールド層が存在したりする場合の均流化ピッチの解は異なるが、必要な最大スパイラルピッチは大きくは変わらない。

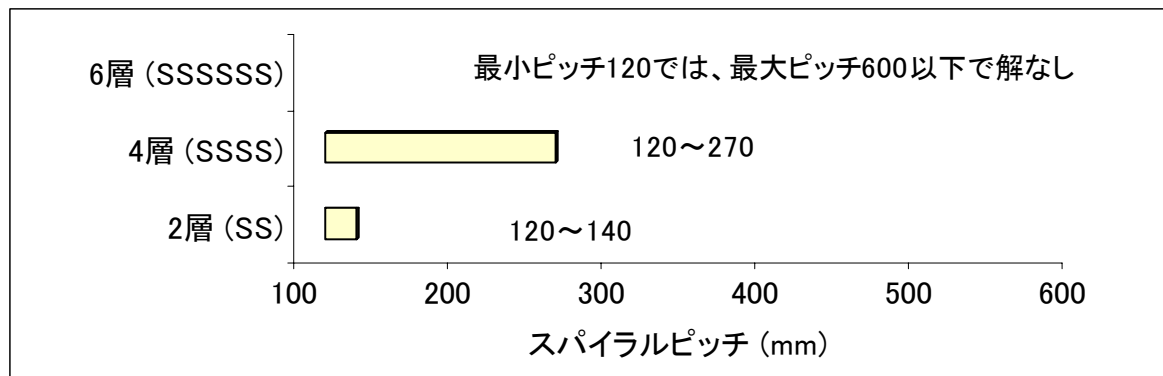


図 2.2.1-3 均流化ピッチ検討結果

(4) まとめ

- ・ 内径 150 mm ϕ の管路に収納できる大電流ケーブルの構造に関する設計検討を行った結果、「超電導導体 4 層、超電導シールド 2 層」構造を選定し、各種要素技術開発を進めることとした。

引用論文リスト

- (1) NEDO 事業原簿、「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」

2.2.1-2 交流損失低減技術(住友電気工業、京都大学)

(1) 研究開発目標

従来ケーブルと比較して超電導ケーブルの送電損失を低減するために、交流損失の低減は重要な技術課題である。Y系超電導線材の超電導層は非常に薄く、断面アスペクト比が非常に大きいため、その交流損失特性は著しい異方性を示す。すなわち、線材面に平行な交流磁界変動に対する交流損失は大変小さく、線材面に垂直な交流磁界変動に対する交流損失は大きくなる。一般的に、超電導ケーブルにおいては、磁界は線材面に平行な成分が主となるが、Y系超電導線材においては、その著しい異方性ゆえに、交流損失は実質的には線材幅方向端部近傍の垂直磁界成分に支配され、その低減が交流損失低減の鍵となる。下記のプロジェクト目標を達成するため、線材の細線化と可撓性の利用という二つのアプローチを用いて、交流損失低減に関する技術開発を行った。

- 中間目標（平成 22 年度）
 - ・ ケーブル損失（交流損失(導体層、シールド層)）2 W/m-相@5 kA 以下
 - ・ 熱的な定常状態が得られるまで 5kA 連続通電を行い、ケーブル導体、超電導-常電導接続部、電流リードに異常がないこと
 - ※ケーブルの熱平衡が得られるまで連続通電を行う
- 最終目標（平成 24 年度）
 - ・ さらなる交流損失の低減に向けたケーブル構造を検討し設計する

(2) 低損失化への指針

薄い超電導層で真円状断面の円筒を構成し、それに交流電流を通電した場合、磁界は超電導層に完全に平行になるため、交流損失は極めて小さくなる。高臨界電流密度の単層円筒超電導体が交流損失低減の観点から超電導ケーブルの理想形であるが、このようなケーブルを製造することは難しく、現実のケーブルは数 mm 幅の超電導線材を多角形状、多層に集合化して構成されている。この場合、集合導体断面が真円でなく多角形であること、線材間の有限のギャップ数で導体周りの磁力線が乱れることに起因して線材面に対する垂直磁界成分が発生し、交流損失を増加させている。このため、図 2.2.1-4 に示すように、「線材の細線化」と「線材の可撓性を活かした導体化」により、集合導体断面を真円に近づけ、垂直磁界成分を減少させることにより低損失化を図った。

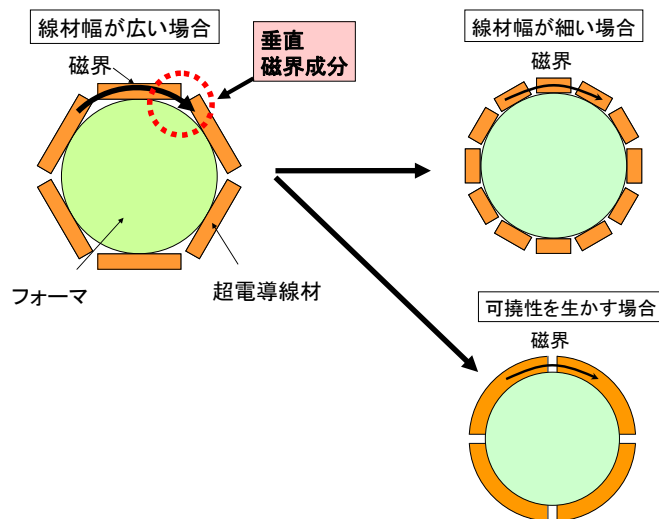


図 2.2.1-4 低損失化の指針（細線化と可撓性）

(3) 細線化による交流損失低減

集合導体断面を真円形状に近付けて垂直磁界成分を減少させ、交流損失を低減するためには、線材を細線化して、層を構成する線材数を増加させればよい。これにより、臨界電流と導体層の径を一定に保ったままで多角形の角数が増加して真円に近づく。一方で、現実の集合導体では、線材間のギャップの存在も垂直磁界成分発生につながるが、線材数を増やすということはギャップ数を増やすことであり、細線化（線材数増加）に伴うギャップ数増加は交流損失を増加させる可能性もある。そこで、数値電磁界解析によって超電導ケーブルの交流損失を求め、細線化による交流損失低減効果について理論的に評価した。

実際のケーブルでは、各層を構成する線材はケーブル（集合導体）軸に対して螺旋（スパイラル）を成しているが、このようなスパイラル構造は無視して線材はケーブル軸に等しいと仮定し、ケーブル（集合導体）軸に垂直な 2 次元平面内で解析を行った。さらに、Y 系超電導線材の超電導層は極めて薄いことから、各線材について、線材面に平行な磁束密度成分・線材面に垂直な電流密度成分を無視した薄板近似を適用した¹⁾。

まず、基礎的な現象を把握するため、表 2.2.1-4 に線材幅と各層の構成を示した線材間ギャップ 0.2 mm の 2 層導体（断面を図 2.2.1-5 に示す）及び、その外層と同構成の単層導体に対して解析を行った。交流損失の計算値を図 2.2.1-6 に示す。

●単層導体の解析結果（図 2.2.1-6(a)参照）

- ・ 線材幅を 8 mm から 4 mm に減らすと交流損失は大幅に減少する。これは、導体の断面が真円形状に大きく近付き、これにより線材面に対する垂直磁界成分が大幅に減るためと考えられる。
- ・ 線材幅を 4 mm から 2 mm に減らしても損失はあまり減少しない。この領域では、導体断面が真円に近づくというメリットと、ギャップ数増加というデメリットが拮抗してしまうためと考えられる。

●2層導体の解析結果（図 2.2.1-6(b)参照）

- ・ 線材幅を 4 mm から 2 mm に減らしても交流損失は大きく減少する。その原因は外層の損失減少にある。外層の交流損失の主要因は、内層電流の作る外部磁界であり、内層電流が作る外部磁界に関して言えば、線材間ギャップの存在が外層線材に対する垂直磁界成分を増加させることはない。このため、細線化によって、線材間ギャップの数が増えることは外層の損失を押し上げず、断面が円に近付くという細線化のメリットがうまく利用され、交流損失が低減すると考えられる。
- ・ 線材間ギャップを 0.2 mm から 0.4 mm に広げることにより交流損失は増加する。層数の少ない導体において、細線化によって交流損失を低減する場合には、線材間ギャップを小さく保った状態で線材を集合する技術が重要である。

表 2.2.1-4 線材幅と 2 層導体の内層・外層の線材数

線材幅	2 mm	4 mm	8 mm
1 層目（内層）の線材本数	32	16	8
2 層目（外層）の線材本数	36	18	9
線材間ギャップ	0.2 mm		
内径	22.3 mm	21.1 mm	19.8 mm
外径	25.2 mm	23.8 mm	22.6 mm
内層と外層の距離	1.4 mm	1.35 mm	1.36 mm

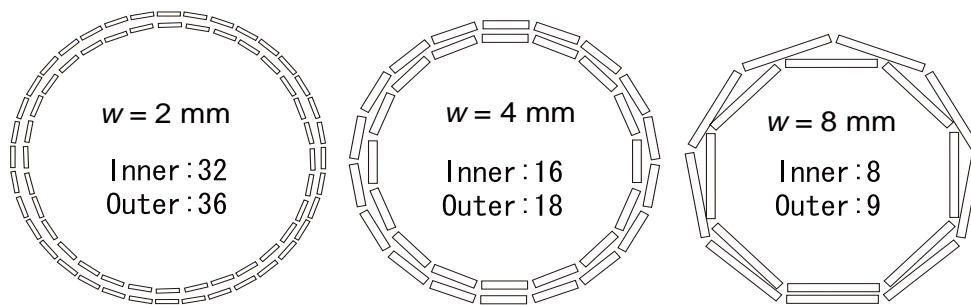
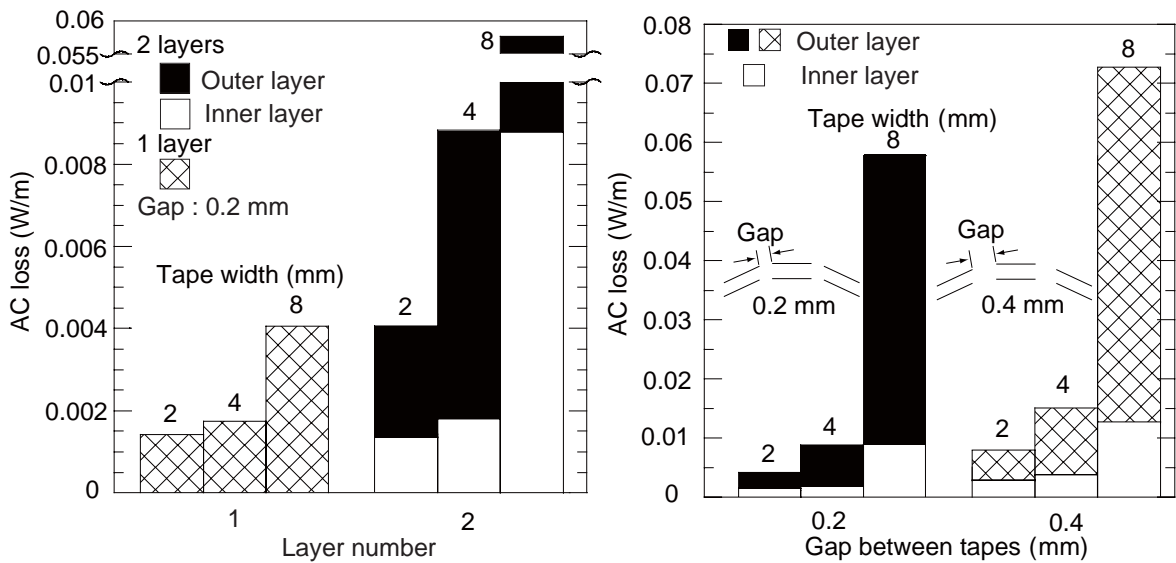


図 2.2.1-5 2 層導体の断面図



(a)線材幅の影響、(b)線材間ギャップの影響

図 2.2.1-6 単層及び 2 層導体の交流損失解析結果

次に、表 2.2.1-5 に諸元を示すような 2 mm 幅及び 4 mm 幅線材で構成した 4 層導体の交流損失を計算して比較した。導体臨界電流は 11.8 kA に、通電電流は 5 kA_{rms} に固定した。ギャップは表に示すような 3 通りをパラメータとし、線材幅方向の J_c 分布については、図 2.2.1-7 に示すように、一様な場合、線材端部 0.2 mm で J_c が低下している場合、線材端部 0.3 mm で J_c が低下している場合の 3 通りについて計算を行った。図 2.2.1-8 に交流損失の計算結果を示す。

●4 層導体の解析結果

- ・ 4 層導体においても、線材幅を 4 mm 幅から 2 mm 幅に減らす効果は大きい。
- ・ 2 層導体と比較して、線材間ギャップが交流損失に与える影響は小さく、0.4 mm 程度のギャップであれば損失の増加は小さい。
- ・ 線材幅方向 J_c 分布が交流損失に与える影響は大きい。特に 2 mm 幅線材を用いた場合には、理想的な Flat な J_c 分布 (J_c 均一) を有する線材と、端部 0.3 mm で J_c が低下している線材では損失が倍程度異なる。
- ・ 2 mm 幅線材を用いた導体の損失は 1 W/m@5 kA 程度に収まっており、4 層導体で 12 kA 級の I_c を有する導体の実現できれば損失目標達成の可能性が高い。
- ・ 4 mm 幅線材を用いた導体の損失は 2 W/m@5 kA 程度であり、損失目標達成には、導体の高 I_c 化、あるいは後述する線材の可撓性を活かした低損失化等が必要である。

表 2.2.1-5 2 mm 幅及び 4 mm 幅線材で構成する 4 層導体の諸元

線材幅	線材本数	ギャップ (mm)	線材 I_c (A)	導体 I_c (kA)	通電電流 I_{op} (kA _{rms} /kA)
2	25	Small: 0.26/0.25/0.24/0.23	111	11.8	5/7.07
	26	Midium: 0.36/0.35/0.34/0.33			
	27	Large: 0.56/0.55/0.54/0.53			
4	13	Small: 0.26/0.25/0.24/0.23	203	11.8	5/7.07
	14	Midium: 0.36/0.35/0.34/0.33			
	15	Large: 0.56/0.55/0.54/0.53			
	16				

※ ギャップ数値は内層側から外層側へ順番に記載

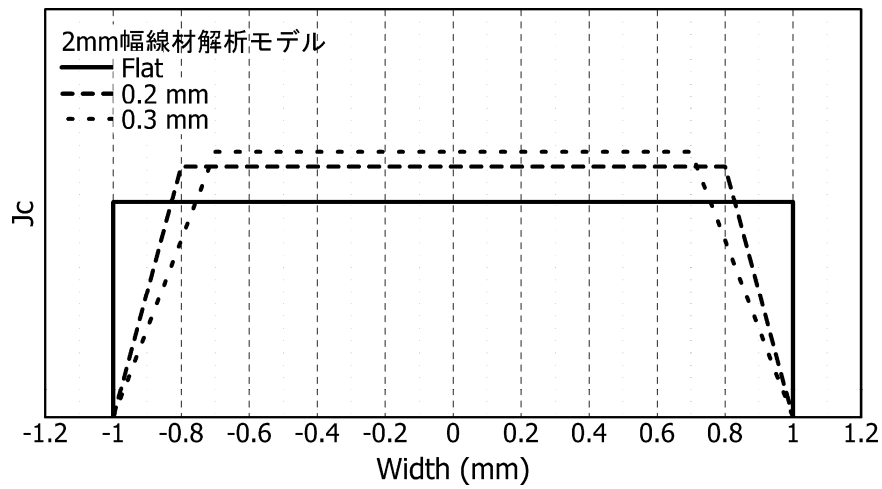
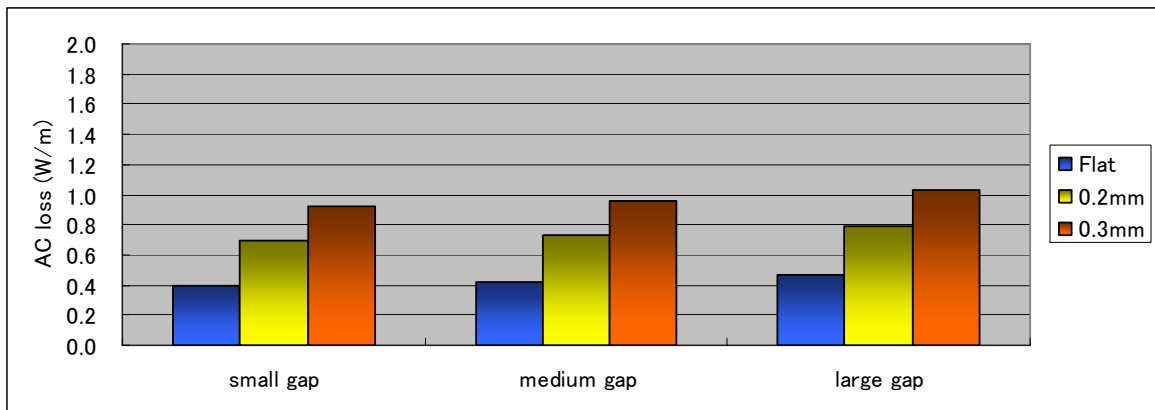
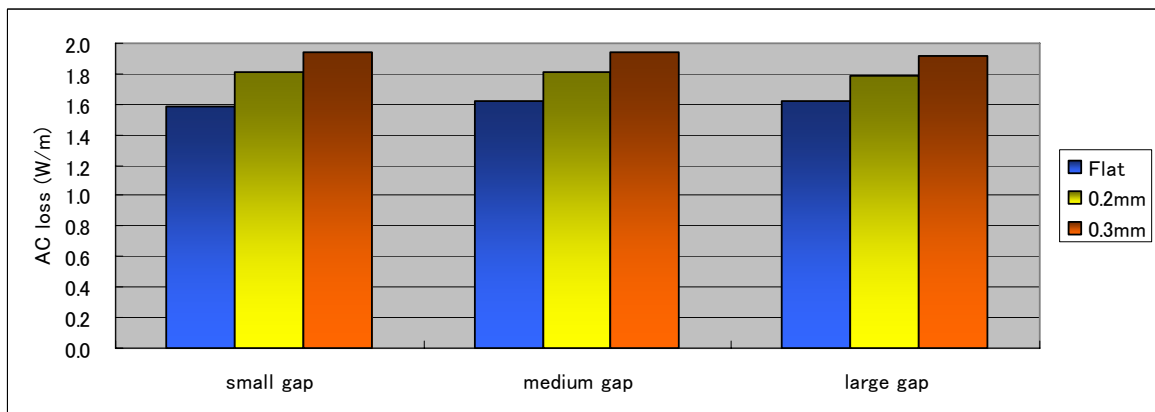


図 2.2.1-7 線材端部 J_c 低下を模擬した幅方向 J_c 分布モデル (2 mm 幅線材)



(a) 2 mm 幅線材の解析結果



(b) 4 mm 幅線材の解析結果

図 2.2.1-8 4層導体の交流損失解析結果

(線材間ギャップと線材端部 J_c 低下が損失に与える影響)

●シールド付きケーブルコアの解析結果

表 2.2.1-6 に諸元を示すような、「導体 4 層、シールド 2 層」構造のケーブルコアの交流損失を計算して比較した。なお、導体層は 2 mm 幅の線材を用いて構成し、シールド層は 2 mm 幅線材を用いた場合と、4 mm 幅線材を用いた場合の 2 通りを計算した。導体層及びシールド層の臨界電流は 11.8 kA に、通電電流は 5 kA_{rms} に固定した。なお、線材の幅方向 J_c 分布は Flat (J_c 均一) である。図 2.2.1-9 に交流損失の計算結果を示す。

- ・ シールド層に対しても、線材幅を 4 mm から 2 mm に減らす効果は大きい。
- ・ 4 mm 幅線材を用いた場合でも、シールド層の損失は全体の 1/4 程度であり、ケーブルコアの主たる損失は導体層で発生する。

本解析結果より、シールド層の損失は導体層に比べて小さいことが予想されるため、まずは導体層の低損失化に目処をつけることとした。この際、導体層の低損失化の目標値としては、ケーブルコア全体の損失目標値 (2 W/m-相@5 kA) の 3/4 に相当する 1.5 W/m-相@5 kA とした。

表 2.2.1-6 ケーブルコアの諸元 (導体 4 層、シールド 2 層)

導体層数	シールド層数	ギャップ (mm)	線材 I_c (A)	導体 I_c (kA)	通電電流 I_{op} (kA _{rms} /kA)
4 (2mm 幅)	-	0.26/0.25/0.24/0.23	111	11.8	5/7.07
4 (2mm 幅)	2 (2mm 幅)	0.26/0.25/0.24/0.23 - 0.23/0.22	111 - 119	11.8 - 11.8	
4 (2mm 幅)	2 (4mm 幅)	0.26/0.25/0.24/0.23 - 0.23/0.22	111 - 231	11.8 - 11.8	

※ ギャップ数値は内層側から外層側へ順番に記載

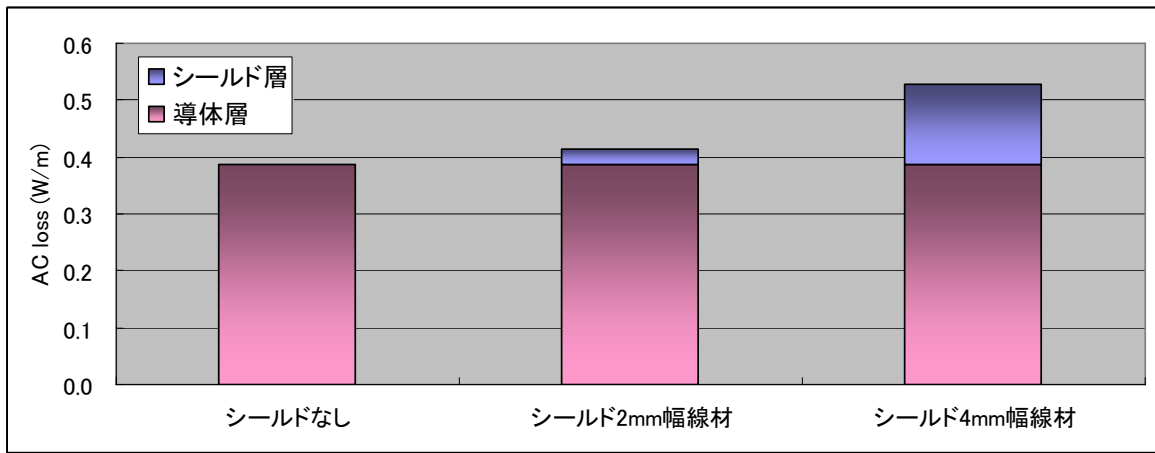


図 2.2.1-9 ケーブルコアの交流損失解析結果 (導体 4 層、シールド 2 層)

以上の解析結果から、細線化による低損失化の方針として、まずは導体層に 2 mm 幅線材を適用した 4 層導体を試作して損失特性を検証することとした。損失目標値は導体層だけで 1.5 W/m-相@5 kA 以下とし、使用する線材の幅方向の J_c 分布が損失特性に大きく影響することに注意する必要があるため、使用する線材の J_c 分布の測定も併せて行うこととした。

(4) 可撓性を利用した交流損失低減

ハステロイ™基板と異なり、結晶粒配向金属基板はある程度軟らかく可撓性を有している。円形フォーマの上に、配向金属基板上に超電導層を積層した Y 系超電導線材を並べ、その可撓性を利用して円形フォーマに沿わせて変形させれば、多角形導体に比較して線材面に対する垂直磁界成分を低減でき、交流損失を低減できる可能性がある。

まず、可撓性を利用した集合導体の円断面化による損失低減を理論的に検証するため、数値電磁界解析による交流損失計算を行った。円断面化した集合導体においては、損失が低減された結果として線材面に対して平行な磁界成分の交流損失への寄与が無視できなくなる可能性があるため、ここでは、前項で述べた薄板近似は適用せず、線材面に垂直な磁束密度成分と平行な磁束密度成分の双方を考慮して、ケーブル（集合導体）軸に垂直な 2 次元平面内で解析を行った²⁾。解析は図 2.2.1-10 に示したような集合導体断面が円形になるように線材を変形させた導体と、比較のために平らな線材を集合した六角形導体について行った。解析に用いた有限要素モデルを図 2.2.1-11 に示す。解析対象は線材数 6 本の単層集合導体であるが、対称性から、線材 1 本を実際の解析領域とした。解析結果の磁束線分布と交流損失を図 2.2.1-12、図 2.2.1-13 にそれぞれ示す。円断面化によって、線材端部での線材面に対する垂直な磁束が減り、交流損失は約 10 分の 1 になっている。

次に、幅 10 mm の結晶粒配向金属基板（クラッド基板）線材 6 本を用いて円断面導体と六角形導体を実際に製作し、その交流損失を実測した。それぞれの臨界電流は 887 A と 903 A、線材間ギャップは 0.47 mm と 1.34 mm である。測定にあたっては、線材間の電流分布を一様にするために 6 本の線材を直列接続して通電した。損失測定結果を図 2.2.1-13 に併せて示す。円断面化によって、交流損失が約 3 分の 1 に低減できていることがわかる。なお、理論値と実験値を比較すると、理論値では交流損失が約 10 分の 1 になっているのに対して、実験値では交流損失の減少は約 3 分の 1 にとどまっている。この理由としては、用いた線材の幅方向の臨界電流密度分布の不均一性や基板の磁性の影響、及び導体断面構成の誤差（ギャップの不均一性等）の影響が考えられる。

解析及び実験の両面から、線材の可撓性を活かした導体化によって損失の低減が可能であることが示された。しかしながら、線材をフォーマに沿わせて曲げた場合、線材の幅方向曲げによる臨界電流の低下が問題となり得る。表 2.2.1-7 に、上記実験で用いた円断面導体を構成する 6 本の線材の、集合化前（曲げる前の平らな状態）の臨界電流と、集合化後（フォーマに沿わせて曲げた後）の臨界電流を比較して示す。線材によりばらつきはあるものの、線材 1 を除いて 1 割前後の臨界電流の低下が発生している。このように、幅広の線材を完全に小径フォーマに沿わせて集合化した状態では臨界電流が低下するため、実際には、幅 4~5 mm 程度の細線化と可撓性を利用した円断面化とを組み合わせることが現実的と考えられる。

図 2.2.1-8 に示したように、4 mm 幅線材を用いた 4 層導体 ($I_c=11.8$ kA) では、 1.5 W/m-相@5 kA 以下にすることは難しいが、可撓性を組み合わせることにより 2 割程度損失が低減されれば損失目標を達成できる可能性がある。

このため平成 23 年度以降には、4 mm 幅線材を用いた 4 層導体について、可撓性を活かして円形に沿わした場合と、多角形配置した場合の損失について解析評価を行った。解析モデルと解析結果は図 2.2.1-14 および図 2.2.1-15 (可撓性なし：撓み率 0.0、可撓性あり：撓み率 1.0) に示すとおりであり、4 mm 幅線材では、既に導体の断面が真円にほぼ近い形状となっているため、可撓性を活かした低損失化の効果がないことが判明した。このため、本プロジェクトでは細線化による低損失化を目指すこととした。なお、線材基板の薄肉化等により、小径フォーマに完全に沿わせても、上述したように I_c が低下しない線材ができれば、10 mm 幅程度の幅広線材を用いて可撓性を活かした低損失化の可能性もある。

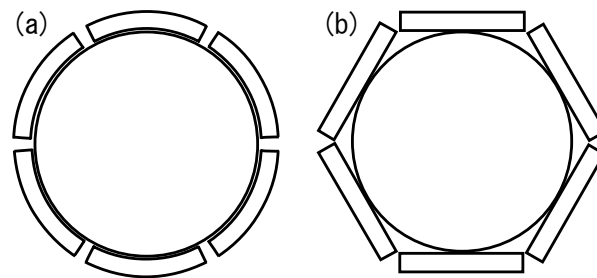
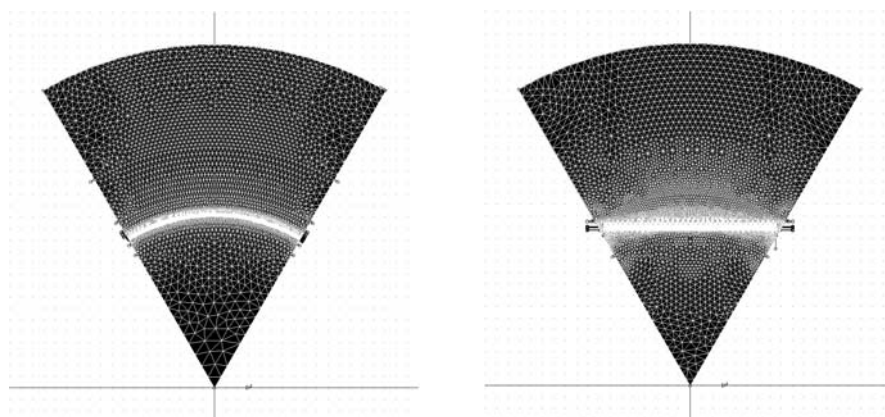
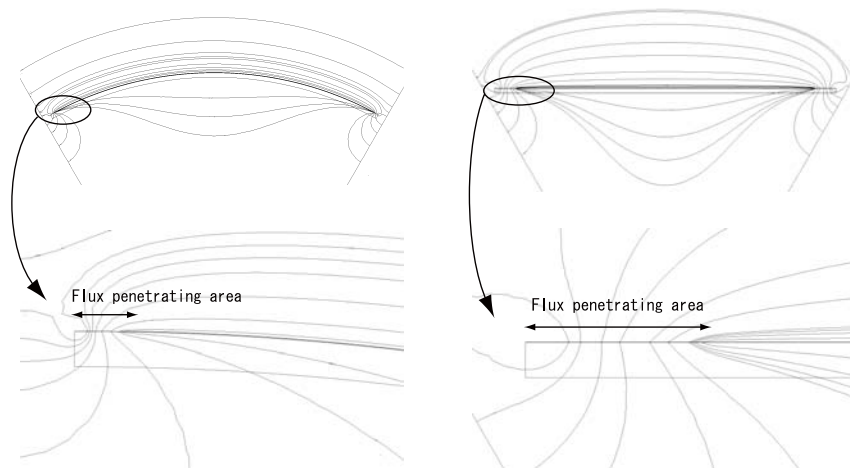


図 2.2.1-10 円断面導体と六角形導体



(a)可撓性を利用した円断面導体 (b)六角形導体

図 2.2.1-11 解析対象の有限要素モデル



(a)可撓性を利用した円断面導体 (b)六角形導体

図 2.2.1-12 解析によって求められた磁束分布図

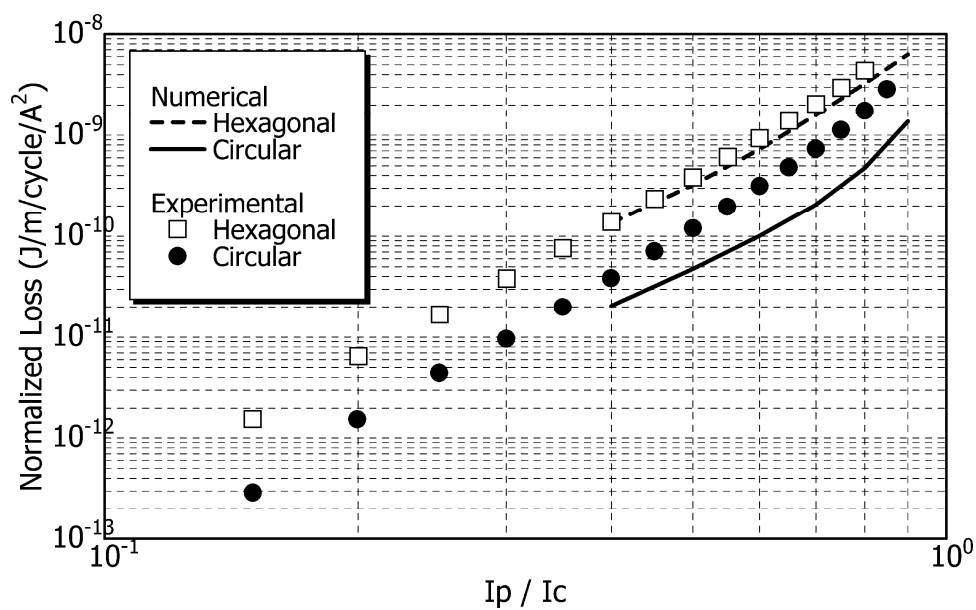


図 2.2.1-13 円断面導体と六角形導体の交流損失比較 (解析及び実験結果)

表 2.2.1-7 円断面集合導体における各線材の幅方向曲げによる臨界電流低下

線材番号.	1	2	3	4	5	6
曲げ前の I_c	168 A	168 A	164 A	162 A	168 A	169 A
曲げた状態の I_c	136 A	151 A	151 A	146 A	147 A	155 A

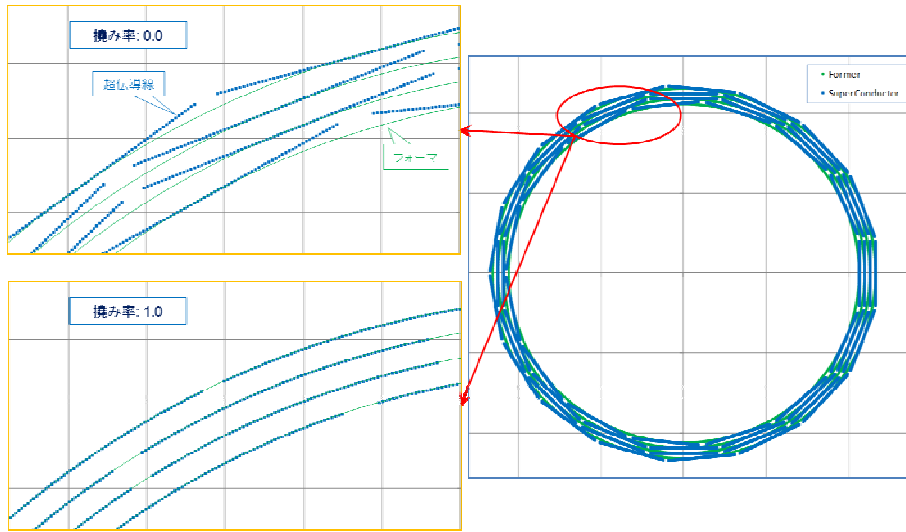


図 2.2.1-14 4mm 幅線材を用いた導体の交流損失解析モデル
 (可撓性なし：撓み率 0.0、可撓性あり：撓み率 1.0)

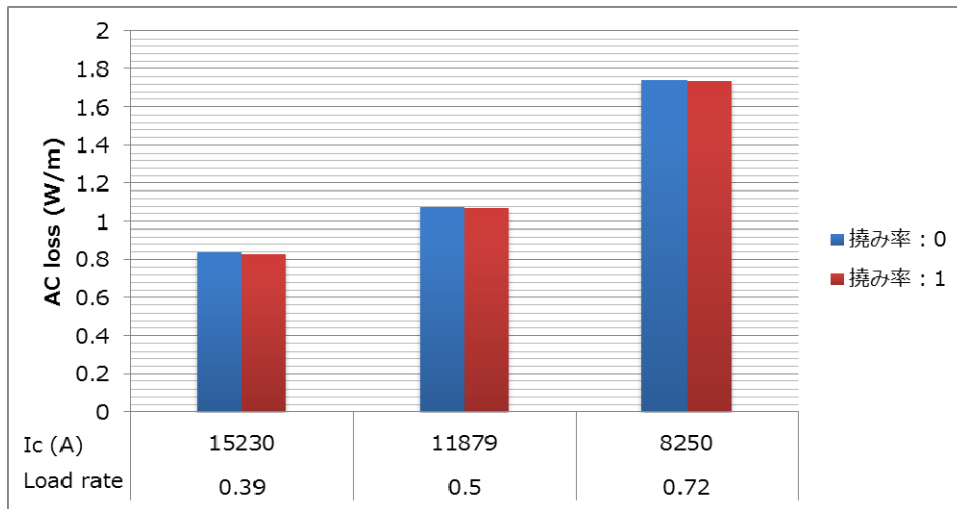


図 2.2.1-15 4mm 幅線材を用いた導体の交流損失解析結果 (4.2kA_{rms})
 (可撓性なし：撓み率 0.0、可撓性あり：撓み率 1.0)

(5) 線材細線化と可撓性の効果についての考察

まず、テープ線材の通電損失特性について、Norris の理論式をもとに考える。Norris の理論式によれば、単位長さあたりの通電損失は、負荷率 (I_{op}/I_c) が等しいならば、臨界電流 I_c の二乗に比例する。従って、ある臨界電流のテープ線材があったとき、これを N 本の細いテープ線材（臨界電流は $1/N$ ）に分割し、この N 本に電流が均等に流れ、かつ N 本の細いテープ線材間の距離が大きく相互の電磁的影響が無視できるならば、もとのテープ線材の通電損失に比べ、分割後のテープ線材全体（臨界電流の和はもとの線材と同じ）の通電損失は、 N 分の 1 になる ($(1/N)^2 \times N$)。分割後のテープ線材間が近接していて相互が電磁的に影響を及ぼしあう場合でも、分割したテープ線材間に電流が均等に流れていれば、 N 分の 1 にはならないが、もとの幅広線材よりは通電損失は小さくなる。この効果を「分割効果」と呼ぶことにする。

Y系線材では、超電導層は非常に薄いため線材面に垂直な磁界成分が交流損失を支配し、平行な磁界成分による交流損失は極めて小さいことに注意しながら、単層導体の通電損失特性について考えていく。単層導体の究極の形として超電導薄膜円筒を考えると、通電電流による磁界は超電導薄膜に完全に平行になるので通電損失は極めて小さくなる。次に、辺の長さの総和が円筒の周長と同じ多角形が交流電流を輸送している場合を考えると、多角形化のために超電導層に垂直な磁界成分が発生し、このため、円筒に比べて通電損失は増大すると考える。これを「多角形効果」と呼ぶことにする。

一つの辺の長さを小さくし辺の数を増やせば、断面が円に近づくため、多角形効果は抑制され通電損失は円筒の通電損失に近づいていく。さらに、多角形の各辺をテープ線材と考え、テープ線材間にギャップが存在するとすると、その部分で、導体全体を周方向に囲むような磁力線がギャップに落ち込むように変形するため、超電導層（テープ）に対して垂直な磁界成分が発生し、通電損失が増大する。これを「ギャップ効果」と呼ぶことにする。

単層導体において、過度に細線化を施すと、分割効果や辺数増加による多角形効果の抑制というメリットだけでなく、ギャップ効果というデメリットが顕在化するため、交流損失は低減できず、場合によっては増加してしまう。前項の単層導体の解析において（図 2.2.1-6 参照）、4 mm 幅線材を用いた場合と 2 mm 幅線材を用いた場合で、通電損失がほとんど変わらなかったのは、メリットとデメリットが均衡したためと考えられる。

次に多層導体（例：4層導体）の通電損失特性について考えていく。多層導体の通電損失の数値解析結果では、1層目の損失は単層導体の損失とほぼ等しく、外層に行くほど損失は大きくなり、導体全体の損失は、主に外層の損失によって支配される。これは、外層の線材は、その層を流れる電流による磁界に加えて、内層の電流による磁界にもさらされるためと考えられる。このことは、数値解析における線

材幅方向の磁束分布をみると、テープの周方向位置が、1層目と3層目で等しく、2層目と4層目が等しく、1層目と2層目はテープの幅の半分だけずれた **tape on gap** 配置のときに特に顕著である。ギャップによる磁力線の変形は、着目した層自身を流れる電流による磁界についてのみ起こり、外層の線材間にギャップがあっても内層の電流が作る磁界の磁力線が変形することはない。つまり、ギャップ効果による損失増大は、外層の線材に対してかかる内層の磁界に対してはあてはまらない。従って、外層ではギャップ効果による損失増大は、内層に比べて軽減される。また、分割効果も細線化によるケーブルの損失低減に寄与すると考えられる。例えば、1層目から4層目の線材の位置がすべてそろった **tape on tape** 配置のときの磁束分布、損失分布をみてみると、1層目はやや小さいものの2層目から4層目まではほぼ等しくなっており、いわばバンドル導体のようにふるまっているとみることもできる。4 mm 幅線材のバンドル導体と2 mm 幅線材のバンドル導体×2本では後者の損失の方が小さいのと同じように、多層導体でも分割効果による損失低減は期待できる。

以上、まとめると、多層導体において細線化を行うと、ギャップ効果によるデメリットは顕在化せず、多角形効果の低減と分割効果によるメリットのために、総合的にみると通電損失が低減できると考えられる。

可撓性の高い線材を用いて断面を円に近づけた導体の場合、多角形効果の低減は期待できるものの分割効果は期待できない。その結果、そのような導体の交流損失はあまり低減されなかったものと解釈できる。

(6) 低損失配向基板線材の評価

上記(4)の検討により、2 mm 幅への細線化、4 mm 幅程度の線材で可撓性を活かすという二つのアプローチがともに交流損失低減に有効であるという見通しを得ることができた。一方で、結晶粒配向金属基板線材を用いる場合、基板自体が有する磁化損失（ヒステリシス損失）の低減が課題となる。住友電気工業では、これまで Ni 合金配向基板を用いた線材開発を行っていたが、金属基板の磁化損失が大きく、機械強度も弱いという問題点があった。このため、高強度のステンレステープの表面を、2 軸配向を有する銅及びニッケル膜で覆ったクラッドタイプの結晶粒配向金属基板（Clad 基板）を開発した。図 2.2.1-16 は、Clad 基板及び Ni 合金基板のヒステリシス曲線を示しており、Ni 合金基板に比べて Clad 基板の磁性が大きく低下しているのが分かる。表 2.2.1- 8 に示すように、基板の磁化損失は 1/25 に低減、強度は 2.5 倍に向上し、安価で高強度かつ低損失な配向基板の開発に成功した。

表 2.2.1- 8 基板の磁化損失と機械強度

基板	磁化損失 (J/m ³)	機械強度 (MPa)
Clad 基板	52	500
Ni 合金基板	1300	200

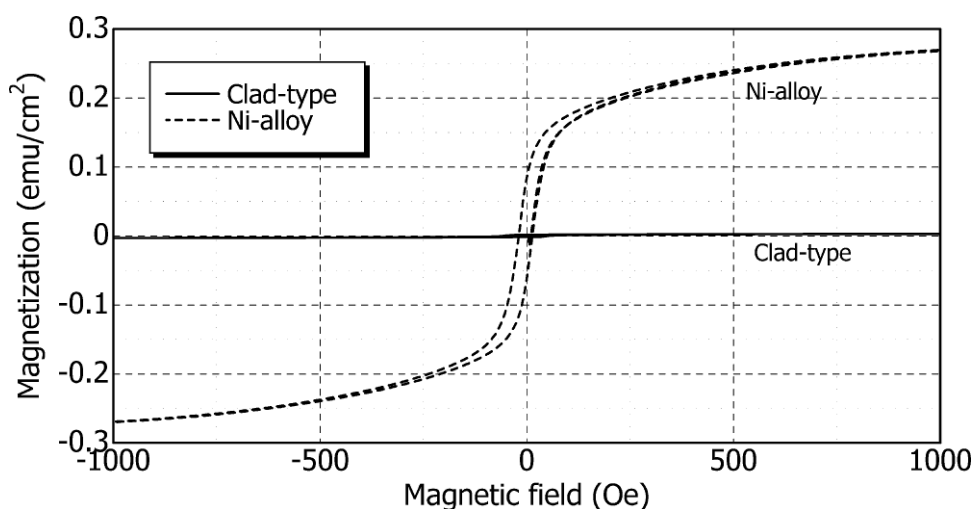


図 2.2.1-16 基板のヒステリシス曲線

Clad 基板線材のケーブルへの適性を検証するため、10 mm 幅で成膜した Clad 基板線材を 2 mm 幅に機械スリットを施して 2 層導体（C-1）を作製した。作製した導体の諸元を表 2.2.1-9 に示す。なお、比較対象として 4 mm 幅の Ni 合金基板線材を用いて作製した導体（C-2）の諸元も同表中に示す。図 2.2.1-17 に 2 本の導体の交流損失測定結果を示す。使用した線材の臨界電流値（ I_c ）の差異により導体 I_c が大きく異なるため、横軸は I_c で規格化した通電電流ピーク値、縦軸は I_c の 2 乗で規格化した交流損失値で示す。主に基板の磁化損失（ Q_{Sub} ）の低減により、

C-1 の損失は C-2 に比べて大きく低減している。Clad 基板線材を用いた C-1 の損失は $0.08 \text{ W/m}@1 \text{ kA}_{\text{rms}}$ であり、本線材を用いたケーブルの低損失化の可能性を実証した³⁾。

表 2.2.1-9 超電導導体の諸元

導体番号	C-1	C-2
フォーマ直径	17.5 mm	18.5 mm
超電導導体層 (2 layers)	Clad-type wires 2 mm-w, 52 本	Ni-alloy wires 4 mm-w, 28 本
外径	18.5 mm	19.5 mm
長さ	1.5 m	1.0 m
導体臨界電流 (I_c)	2440 A	1340 A

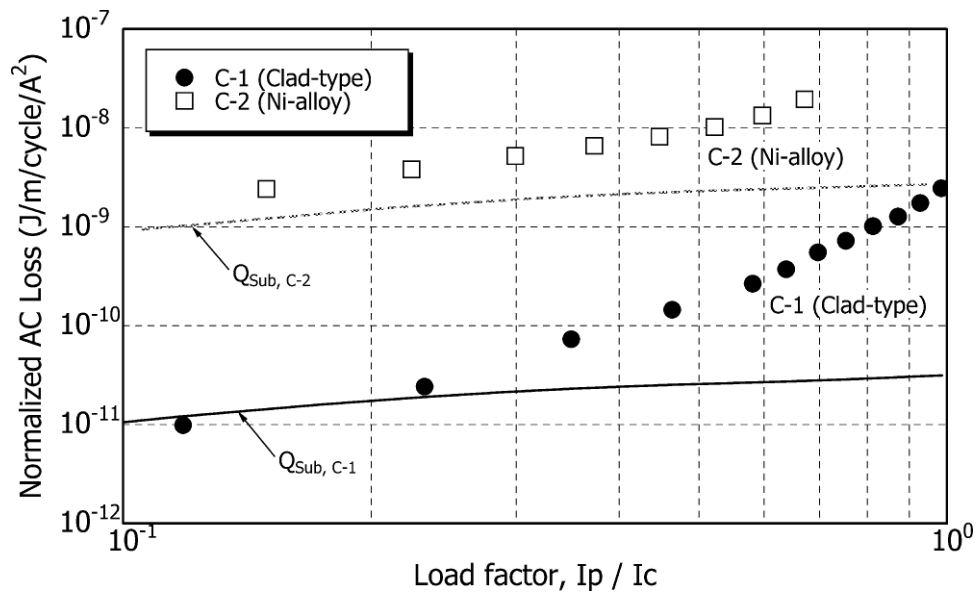


図 2.2.1-17 超電導導体の交流損失測定結果 (規格化)

(7) 大電流導体の試作・評価

次ステップとして、4層構造の多層ケーブル導体の試作を行い、交流損失特性の評価を実施した。使用した線材の仕様を表 2.2.1-10 に示す。線材は、幅 30 mm の Clad 基板の上に $\text{CeO}_2 / \text{YSZ} / \text{CeO}_2$ の中間層を積層し、中間層上に $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ の超電導層を PLD 法により成膜したものである。上記線材は、Ag 安定化層をスパッタリングした後に 2 mm 幅あるいは 4 mm 幅に機械スリットされ、全周に銅めっきを施してある。ケーブル導体の諸元を表 2.2.1-11 に示す。FRP パイプ上に線材をスパイラル状に巻き付けた 4 層導体であり、各層のスパイラルピッチは、交流通電電流が均等に分流するように調整を行っている。なお、導体の有効長は約 1.5 m である。試作した 2 本の導体の臨界電流測定結果 (77 K、大気圧) を図 2.2.1-18 に示す。1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ で定義した臨界電流は、C-3 が 4510 A、C-4 が 4180 A であり、使用した線材の I_c 総和と J_c - B 特性を考慮した計算値と一致することを確認した。

表 2.2.1-10 使用線材の諸元

	2 mm 幅線材	4 mm 幅線材
幅 (mm)	2	4
厚さ (mm)	0.15	0.15
臨界電流@77 K (A)	40~50	70~90

表 2.2.1-11 4 層ケーブル導体の諸元

	C-3 (2 mm 幅線材)	C-4 (4 mm 幅線材)
フォーマ	FRP フォーマ、18 mmφ	FRP フォーマ、18 mmφ
超電導層	4 層 2 mm 幅 Clad 基板線材 (104 本)	4 層 4 mm 幅 Clad 基板線材 (52 本)
臨界電流@77 K (A)	4510	4180

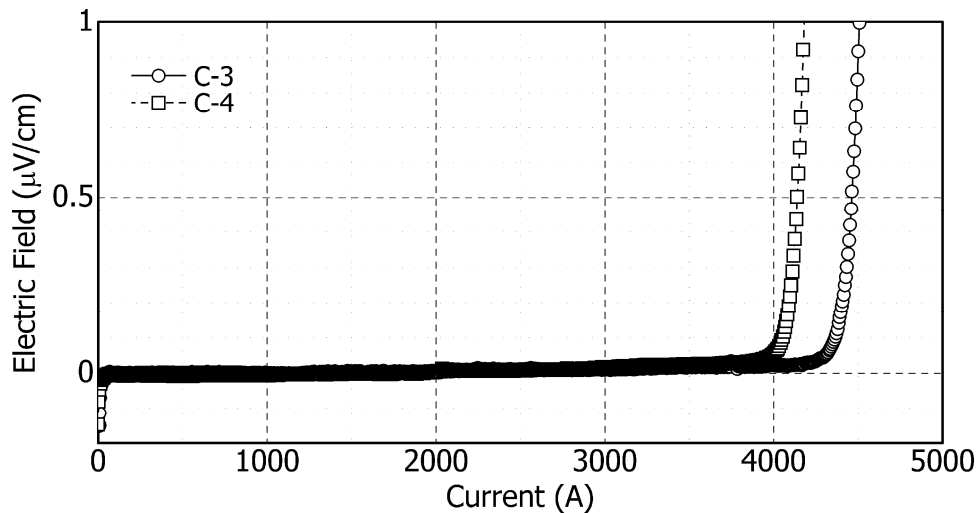


図 2.2.1-18 4層導体の臨界電流測定結果 (77 K、大気圧)

77 Kにおける4層導体の交流損失測定結果を図 2.2.1-19 に示す。同図中には、線材端部の J_c 低下を模擬して、図 2.2.1-7 に示すように、幅方向の J_c 分布が均一でない線材で構成した4層導体の交流損失解析結果(解析導体の臨界電流は全て4500 A)も示してある。また、実際に2 mm幅及び4 mm幅 Clad 基板線材の幅方向の J_c 分布を磁気ナイフにより測定した結果を図 2.2.1-20 に示す。

- 2 kA_{rms} 通電時の損失は、2 mm 幅線材を用いた4層導体 (C-3) が 0.33 W/m (50 Hz, 負荷率 0.63)、4 mm 幅線材を用いた4層導体 (C-4) が 0.47 W/m (50 Hz, 負荷率 0.68) であり、導体 I_c の違いによる負荷率の相違を考慮すると、両者の交流損失はほぼ同程度であると考えられる。
- C-3 (2 mm 幅) について、図 2.2.1-20 に示すように実際の線材の端部 J_c 低下領域が 0.3 mm 程度であるのに対して、導体交流損失実測値は「端部 0.6 mm- J_c 低下」を模擬した解析値とほぼ同等である。
- C-4 (4 mm 幅) について、導体交流損失実測値は「端部 0.3 mm- J_c 低下」を模擬した解析値とほぼ一致し、実際の線材の端部 J_c 低下と一致する (図 2.2.1-20 参照)。

これまでの解析による検討結果から、実験結果と解析結果の乖離の一因として線材幅方向の J_c 分布の不均一性が挙げられる。 J_c 分布測定を行った線材は図 2.2.1-20 に示した1サンプルずつのみであり、導体作製に使用した線材の J_c 分布が測定結果とは異なる可能性もあり、線材スリット工程の精度向上を進めた。

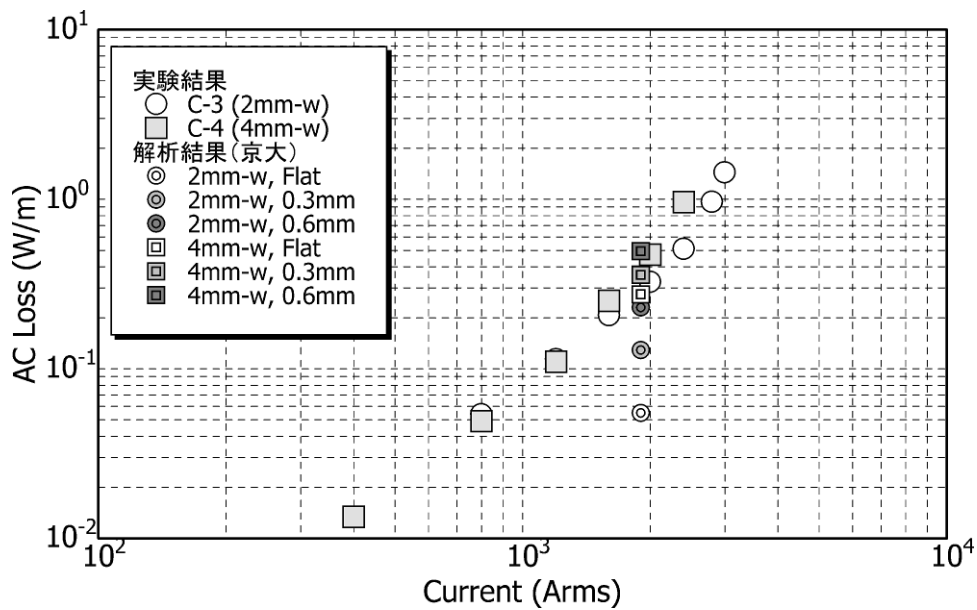


図 2.2.1-19 4層導体の交流損失測定結果 (77 K、大気圧)

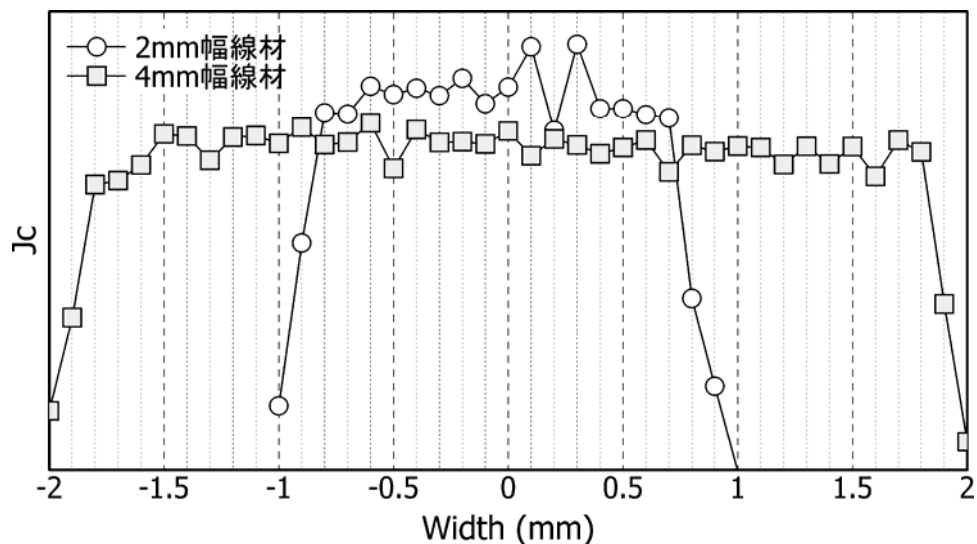


図 2.2.1-20 Clad 基板線材の磁気ナイフによる幅方向 J_c 分布測定結果

上記測定結果及び解析結果を踏まえて、A：4 mm 幅線材を用いた場合の目標達成の方策、B：2 mm 幅線材を用いた場合の目標達成の方策を以下に示す。なお、下記の線材必要特性については、ケーブル外径を 140 mm まで大きくした場合 (20 mm ϕ フォーマ) を想定して計算を行っている。

A：4 mm 幅線材を用いた場合の目標達成の方策

図 2.2.1-21 は、図 2.2.1-19 に示した交流損失測定結果をもとに、線材 I_c が向上した場合を想定して導体損失を予想した曲線である。損失目標である 2 W/m・相@5 kA は「導体層+シールド層」の損失であり、導体層のみの損失としては 1.5 W/m・相@5 kA が目標達成の目安となる。図 2.2.1-21 より目標達成には 14000 A 程度の

I_c が必要となる。このとき必要な線材 I_c は下記の通りである。

$$14000 \text{ A} / 59 \text{ 本} (4 \text{ mm}\cdot\text{w}) = 237 \text{ A} / 4 \text{ mm}\cdot\text{w} (= 593 \text{ A/cm}\cdot\text{w}) (@77 \text{ K, s.f.})$$

中間評価時に製造した線材 I_c は $100 \text{ A} / 4 \text{ mm}\cdot\text{w} (@77 \text{ K, s.f.})$ ($250 \text{ A/cm}\cdot\text{w}$) 程度であるが、2.2.3-1 項で述べるように、新レーザの導入によって $320 \text{ A/cm}\cdot\text{w} (@77 \text{ K, s.f.})$ 級の特徴が得られている。例えば、 65 K まで運転温度を下げた場合には 1.9 倍程度の臨界電流向上が見込まれるため、上記高 I_c 線材を用いることで、 14300 A 程度の導体 I_c が期待できる。これにより、中間目標である $2 \text{ W/m}\cdot\text{相} @ 5 \text{ kA}$ の検証を行った。

なお、図 2.2.1-19 に示した導体 (C-4) を液体窒素のサブクール冷却により 64 K まで温度を下げて損失を測定した結果は図 2.2.1-22 に示すとおりであり、損失の実測値は $2.8 \text{ W/m} @ 4.5 \text{ kA}$ であった。このときの導体 I_c は 8730 A であり、必要である 14000 A には満たないため、中間目標値には達していないが、 77 K の導体 I_c (4180 A) よりも I_c が高くなることで、ほぼ予想通りに損失が低下することを確認した。これにより本指針は、目標達成に向けた方策として有効であると考えられ、採用した。

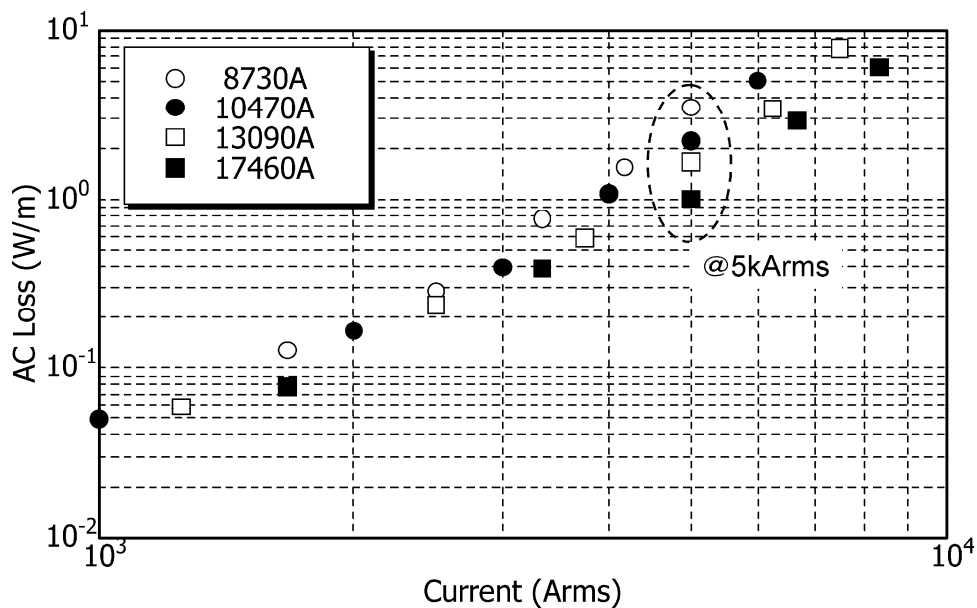


図 2.2.1-21 導体 I_c をパラメータとした損失予想 (4 mm 幅線材)

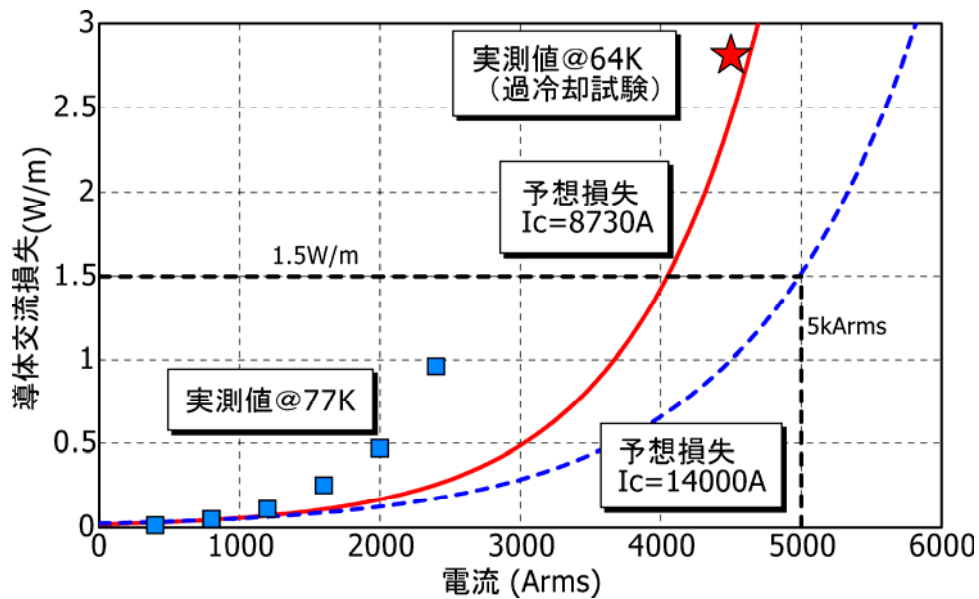


図 2.2.1-22 4 mm 幅線材を用いた 4 層導体のサブクール冷却試験結果

B : 2 mm 幅線材を用いた場合の目標達成の方策

2 mm 幅線材を用いた導体に対して同様の議論をした場合、必要線材 I_c は 400 A/cm-w(@77 K, s.f.) を上回る。一方で、図 2.2.1-19 に示したように、2 mm 幅線材を用いて導体を構成した場合には線材端部の J_c 低下が損失に大きく影響する。線材スリット方法の改善により、線材端部の劣化領域が損失の 0.6mm から 0.3mm まで改善すると想定した損失予想を図 2.2.1-23 に示す。この場合には、導体 I_c は 10000 A 程度で目標を達成することが可能となり、このとき必要な線材 I_c は下記の通りである。

$$10000 \text{ A} / 118 \text{ 本 (2 mm-w)} = 85 \text{ A} / 2 \text{ mm-w} (= 425 \text{ A/cm-w} (@77 \text{ K, s.f.}))$$

50 A/2 mm-w (250 A/cm-w) (@77 K, s.f.) 級の線材を用いて構成した導体に対して、65 K まで運転温度を下げた場合、11000 A 以上の導体 I_c が期待できるため、中間目標を検証することが可能と推測した。また、2 mm 幅に細線化した線材においても 65 A/2 mm-w (320 A/cm-w) 級の I_c が実現できれば、より 77 K に近い温度領域で目標を検証することが可能と推測した。

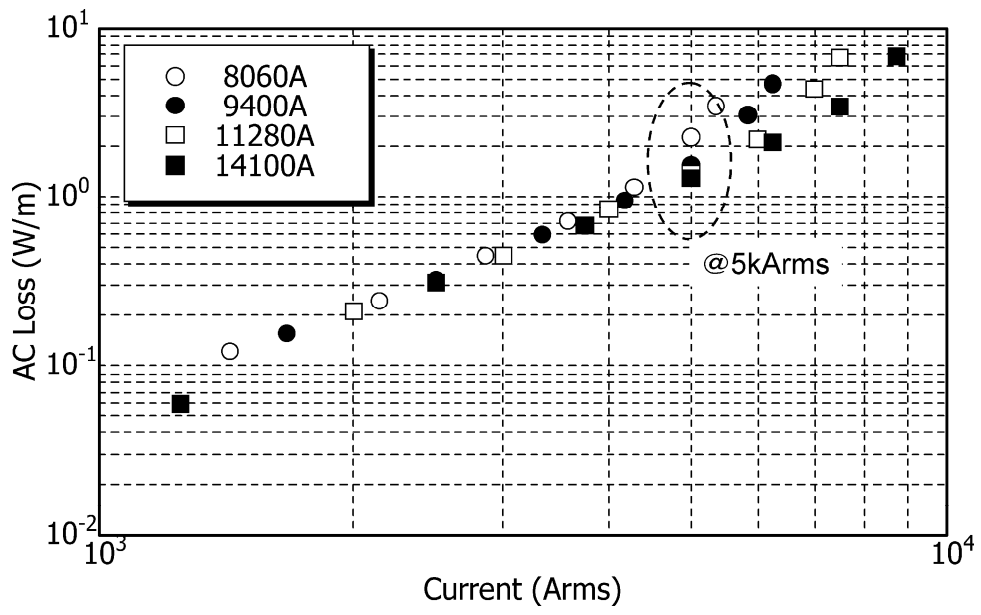


図 2.2.1-23 導体 I_c をパラメータとした損失予想 (2 mm 幅線材)

(8) 大電流ケーブルの試作・評価

上記(7)の方針 A に従い、300~400 A/cm-w 級の高 I_c 線材を用いてケーブルコアの試作を行い、交流損失特性を検証した。使用した線材の仕様を表 2.2.1-12 に示す。なお、印加磁場の大きい外層に I_c の高い線材を配置した。ケーブルコアの諸元を表 2.2.1-13 に示す。フォーマ上に線材をスパイラル状に巻き付けた導体 4 層、シールド 2 層構造であり、各層のスパイラルピッチは、交流通電電流が均等に分流するように調整を行っている。なお、導体の有効長は約 2 m である。試作したケーブルコアの臨界電流測定結果 (77 K、大気圧) は、導体層が 7200 A、シールド層が 6100 A であり、使用した線材の I_c 総和と J_c - B 特性を考慮した計算値とほぼ一致することを確認した。

表 2.2.1-12 使用線材の諸元

項目	諸元
幅 (mm)	4
厚さ (mm)	0.17
臨界電流@77 K (A)	110~170

表 2.2.1-13 ケーブルコアの諸元

項目	諸元	外径 (mm)
フォーマ	FRP フォーマ	21
超電導導体層	4 層 4 mm 幅 Clad 基板線材 (59 本)	23
絶縁層	PPLP®、6mm 厚	37
超電導シールド	2 層 4 mm 幅 Clad 基板線材 (50 本)	38
保護層	クラフト紙、不織布	40
臨界電流@77 K (A)	導体 : 7200A シールド : 6100A	

74 K 及び 64 K におけるケーブルコアの交流損失測定結果を図 2.2.1-24 に示す。

- ・ 液温 64 K における 5 kA_{rms} 通電時の損失は 1.8 W/m (50 Hz) であり、目標値である 2 W/m-相以下の損失特性を達成した。
- ・ なお、64 K における臨界電流特性は、導体層が 13000 A、シールド層が 12000 A 程度と推測され、ほぼ想定どおりの負荷率において損失目標を達成した。

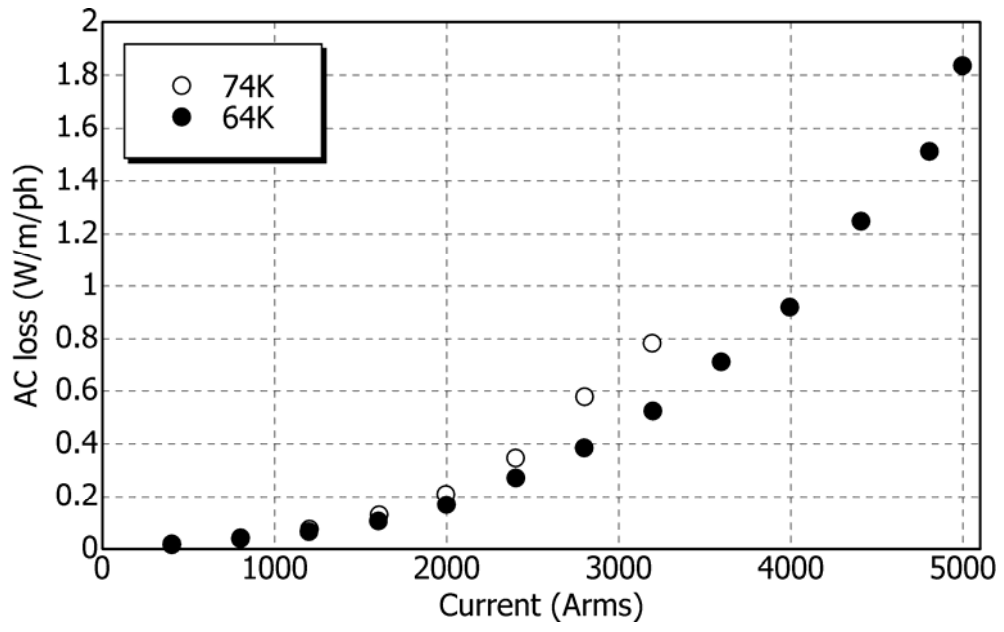


图 2.2.1-24 交流損失測定結果

(9) 極低損失化検証

4 mm 幅線材を用いたケーブルコアにより交流損失目標を達成したが、Y系線材の特性を活かした極低損失ケーブルの実現に取り組んだ。

平成 23、24 年度は 2 mm 幅及び 4 mm 幅線材を用いた 4 層導体（3 種類）の交流損失の解析結果を図 2.2.1-25 に示す。通電電流は 4.2 kA_{rms} で固定し、ケーブルの I_c をパラメータとして、負荷率 I_{op}/I_c が 0.39、0.5、0.72 の 3 通りについて解析を実施した。なお、負荷率 0.72 の場合について、各層毎の損失内訳を図 2.2.1-26 に示す。

- ・ 負荷率が高いケースにおいては、最外層のみに 2mm 幅線材を用いた「Hybrid 導体 (4-4-4-2)」の損失は、「全て 4mm 幅線材を用いた導体 (4-4-4-4)」と比較して 30 %程度小さい。
- ・ 図 2.2.1-26 から分かるように、損失割合の大きい最外層 (C4) に 2 mm 幅線材を用いることで効果的に低損失化が可能となる。
- ・ なお、負荷率が低いケースにおいては、「Hybrid 導体」の低損失化効果は殆どない。
- ・ いずれの負荷率においても、「全て 2 mm 幅線材を用いた導体 (2-2-2-2)」の低損失化効果は大きい。

ただし、(6)の方針 B に示したとおり、2 mm 幅線材についてはスリット時の線材幅端部 J_c 低下を抑制する必要があり、レーザスリット方式を採用した。このため、15 m ケーブル検証試験と線材供給スケジュールを検討した結果、15 m ケーブルの設計検討と極低損失化の検証は切り離し、以下の方針で実施することとした。

- 極低損失化：様々な線材の組み合わせで短尺導体サンプルを作製し、交流損失特性を検証する。
- 15 m ケーブル：「Hybrid 構造」で交流損失目標を達成できる見込みが十分にあり、「Hybrid 構造」を最終設計候補として試作・検証を進めた。

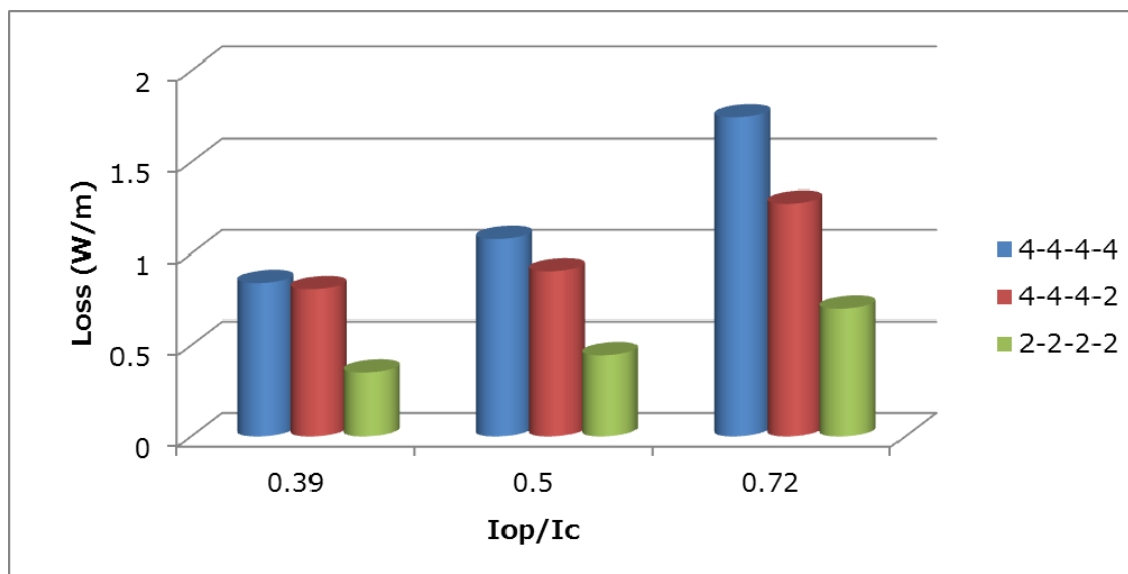


図 2.2.1-25 交流損失解析結果 (4層導体)

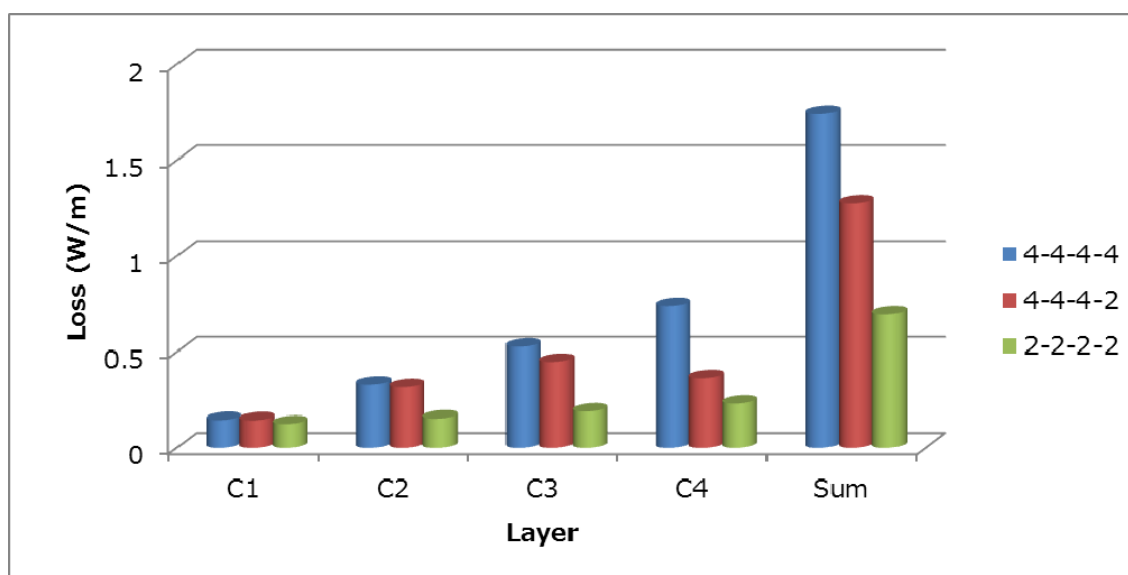


図 2.2.1-26 交流損失解析結果 (4層導体、 $I_{op}/I_c=0.72$)

2 mm 幅線材の適用による極低損失化を検証するため、表 2.2.1-15 に諸元を示す 5 種類の 4 層導体を試作して交流損失特性を検証した。

使用した線材の仕様は表 2.2.1-14 に示すとおりであり、4 mm 幅線材は従来どおりの機械スリット、2 mm 幅線材はレーザスリットにより細線化を行った。各スリット方法における 2mm 幅線材端部の I_c 劣化領域を測定した結果を図 2.2.1-27 に示す。縦軸「Equivalent width」は、台形電流分布を仮定して、測定データの繰返しフィッティングすることにより求めた半値幅であり、数値が大きいほど I_c 劣化領域が小さいことを示している。線材端部の劣化領域幅は、レーザスリットでは 0.1~0.2 mm、機械スリットでは 0.3~0.4 mm であり、レーザスリットの方が I_c 劣化領域が少ないことを示している。

表 2.2.1-14 使用線材の諸元

項目	4 mm 幅 Clad 線材	2 mm 幅 Clad 線材	2mm 幅 IBAD 線材
幅 (mm)	4	2	2
厚さ (mm)	0.17	0.17	0.15
臨界電流@77 K (A)	126~164	60~90	110~130

表 2.2.1-15 ケーブルコアの諸元

導体		導体 A		導体 B		導体 C		導体 D		導体 E	
フォーマ		FRP pipe, PPLP [®]									
超電 導 導 体	1 層 目	機械 スリット 4mm 幅 Clad 線材	15	機械 スリット 4mm 幅 Clad 線材	15	レーザ スリット 2mm 幅 Clad 線材	30	機械 スリット 4mm 幅 Clad 線材	15	レーザ スリット 2mm 幅 IBAD 線材	30
	2 層 目	機械 スリット 4mm 幅 Clad 線材	15	機械 スリット 4mm 幅 Clad 線材	15	レーザ スリット 2mm 幅 Clad 線材	30	機械 スリット 4mm 幅 Clad 線材	15	レーザ スリット 2mm 幅 IBAD 線材	30
	3 層 目	機械 スリット 4mm 幅 Clad 線材	15	機械 スリット 4mm 幅 Clad 線材	15	レーザ スリット 2mm 幅 Clad 線材	30	機械 スリット 4mm 幅 Clad 線材	15	レーザ スリット 2mm 幅 IBAD 線材	30
	4 層 目	機械 スリット 2mm 幅 Clad 線材	29	レーザ スリット 2mm 幅 Clad 線材	29	レーザ スリット 2mm 幅 Clad 線材	30	機械 スリット 4mm 幅 Clad 線材	15	レーザ スリット 2mm 幅 IBAD 線材	30
保護層		クラフト紙、布テープ									
I_c		10.4kA@74K		10.5kA@74K		10.9kA@74K		10.6kA@74K		12.4A@77K	
I_{op} / I_c		0.73@5kA, 74K		0.72@5kA, 74K		0.69@5kA, 74K		0.72@5kA, 74K		0.56@5kA, 77K	

各導体の臨界電流特性を合わせるため、ほぼ同じ I_c 値の線材を用いて導体を作製した。ただし、導体 E のみは IBAD 線材の I_c 特性が高いため、他の 4 導体よりも I_c が高い。4 層導体の諸元は表 2.2.1-15 に示すとおりであり、導体の有効長は約 1.2 m である。試作した導体の臨界電流測定結果 (77 K、大気圧) は図 2.2.1-28 示す通りであり、導体 A~D は約 8 kA の特性で揃っているのに対して、導体 E は約 12 kA と特性が高い。導体 I_c を近づけるため、導体 A~D は 74 K、導体 E は 77K において測定した交流損失を図 2.2.1-28 に示す。

- Hybrid 構造を採用した導体 A 及び B の 5 kA_{rms} 通電時の損失は、導体 D (4mm 幅線材導体) と比較して 30~40%低減し、解析結果と同等の低損失化効果を確認した。
- 導体 A と導体 B を比較すると、レーザスリットを採用した導体 B の方が損失は小さく、端部 J_c 分布特性の改善によるものと推定される。
- 全て 2 mm 幅線材を用いた導体 C の損失は他の導体と比較して非常に小さく、導体 D (4mm 幅線材導体) に対して 70%の損失低減を実現した。図 2.2.1-25 に示した解析結果では約 60%の損失低減効果であることから、ほぼ解析結果が示す指針どおりの損失低減効果が確認された。
- 同じ 2mm 幅線材を使用した導体 C (Clad 線材) と導体 E (IBAD 線材) の損失を比較すると導体 C の方が小さい。本原因の 1 つとして、Clad 線材の基板が有する磁性 (高透磁率特性) の影響が考えられる。NiW 基板線材を用いた 2 層導体の損失解析において、非磁性基板線材を用いた導体よりも外層の交流損失が低減するとの報告もあり、Clad 線材でも同様の現象により非磁性基板線材よりも損失が低減する可能性が考えられる。

以上の検証結果から、Y 系線材の特色を活かした細線化により、極低損失ケーブルを実現できることを実証した。

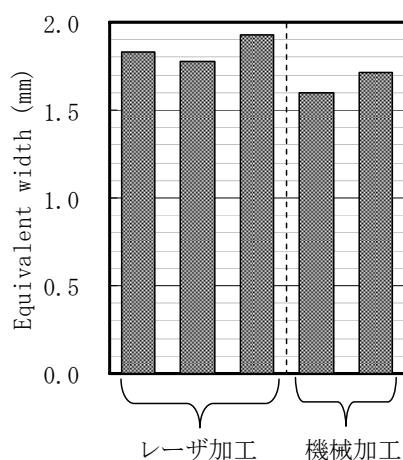


図 2.2.1- 27 2 mm 幅線材の Equivalent width

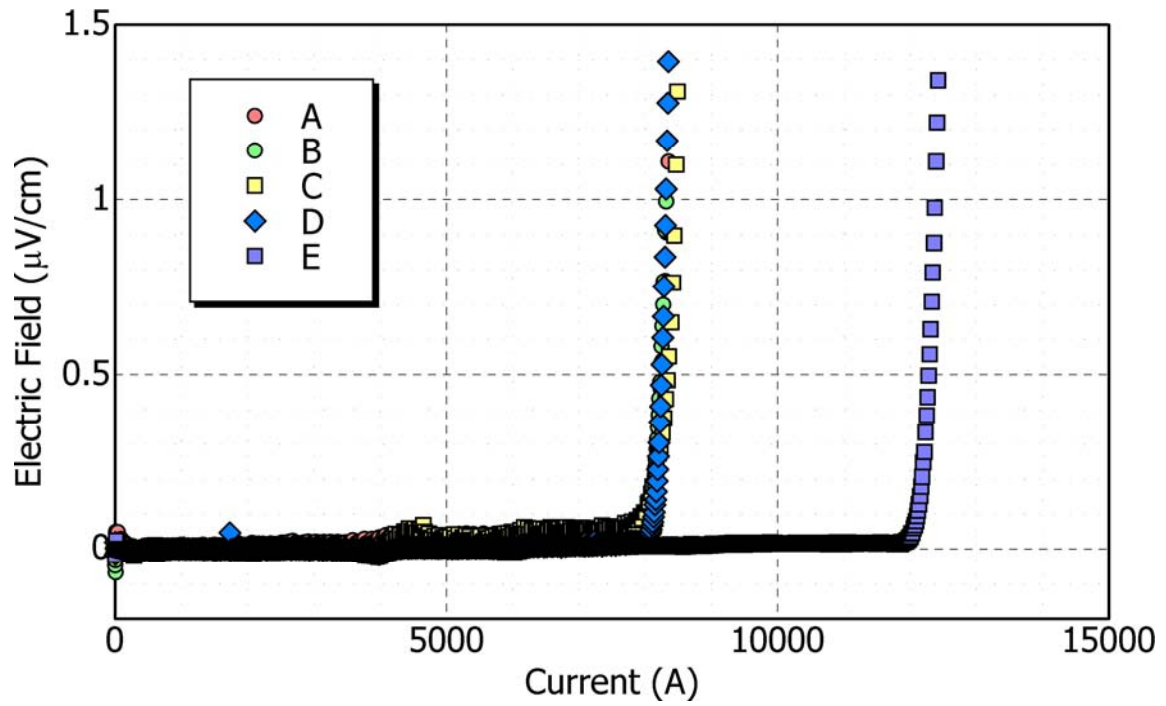


图 2.2.1-28 臨界電流測定結果 (@77K)

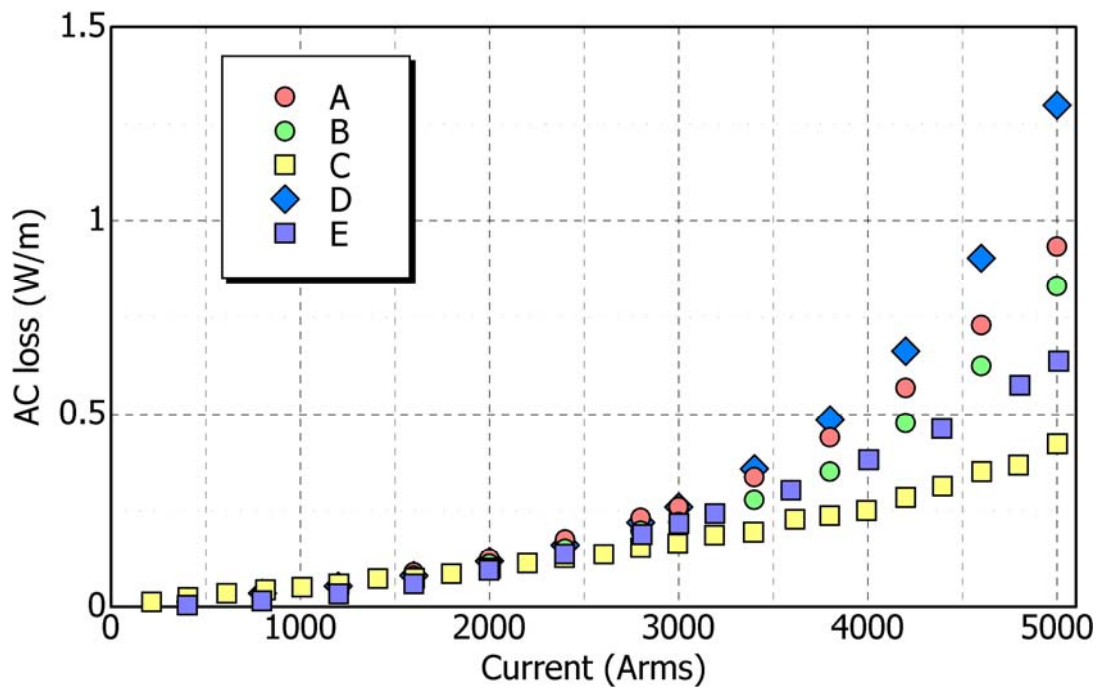


图 2.2.1-29 交流損失測定結果 (@77K)

(10) 15 m 検証試験向け最終設計ケーブルの検証

平成 23、24 年度は、システム検証試験向け 15 m ケーブルの最終設計の妥当性を検証するため、ケーブルコアを試作して交流損失特性及び連続通電特性を検証した。使用した線材の諸元は表 2.2.1-16 に示すとおりであり、ケーブルコアの諸元は表 2.2.1-17 に示すとおりである。効果的に交流損失を低減するため、導体最外層のみに 2 mm 幅線材を適用し、他の層は 4 mm 幅線材を適用した。ケーブルコアの有効長は約 2 m であり、臨界電流測定結果 (77 K、大気圧) は図 2.2.1-30 に示す通りである。導体層の I_c は 8100 A、シールド層の I_c は 6200 A であり、使用した線材の I_c 総和と J_c - B 特性を考慮した計算値とほぼ一致することを確認した。

77 K 及び 71 K におけるケーブルコアの交流損失測定結果を図 2.2.1-31 に示す。

- ・ 71 K において、交流損失 1.5 W/m-相 (50 Hz、5 kA_{rms}) を検証し、目標値である 2 W/m-相以下の損失特性を達成した。
- ・ (8) で示した「全て 4 mm 幅線材を用いたケーブルコア」の結果 (1.8 W/m-相、64 K) と比較して、より高い液温において、より低損失なことを検証した。

この後、71 K において 5 kA_{rms} の連続通電試験を実施した結果を図 2.2.1-32 に示す。3 時間の通電において損失値に大きな変動は見られず、大電流を安定に通電可能なことを確認した。

以上の結果から、15 m ケーブルの最終設計を確定した。

表 2.2.1-16 使用線材の諸元

項目	2 mm 幅線材諸元	4 mm 幅線材諸元
幅 (mm)	2	4
厚さ (mm)	0.17	0.17
スリット方式	レーザスリット	機械スリット
臨界電流@77 K (A)	69~86	120~164

表 2.2.1- 17 ケーブルコアの諸元

項目	諸元	外径 (mm)
フォーマ	銅撚り線フォーマ	21
超電導導体層	3層 4 mm 幅 Clad 基板線材 (45 本)	23
	1層 2 mm 幅 Clad 基板線材 (27 本)	
絶縁層	PPLP®、6mm 厚	37
超電導シールド	2層 4 mm 幅 Clad 基板線材 (50 本)	38
保護層	銅シールド、クラフト紙、不織布	40
臨界電流@77 K (A)	導体 : 8100A シールド : 6200A	

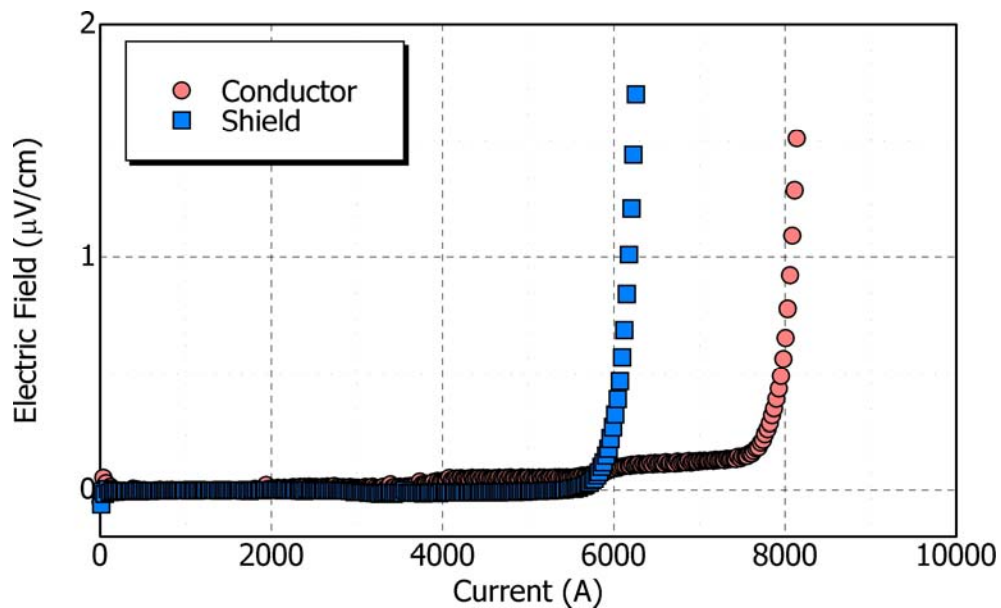


図 2.2.1-30 臨界電流測定結果 (@77K)

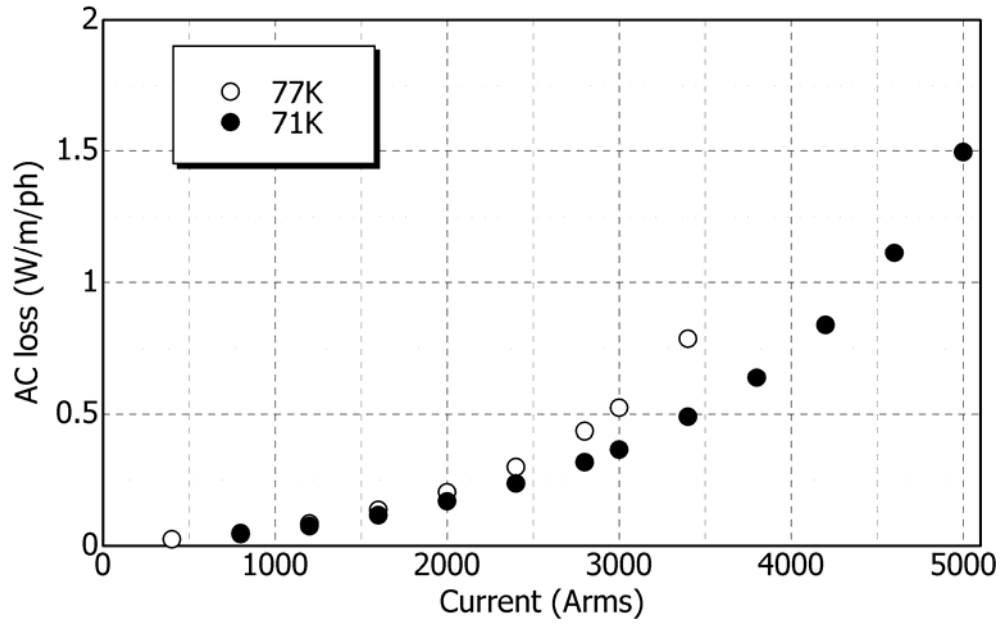


図 2.2.1-31 交流損失測定結果

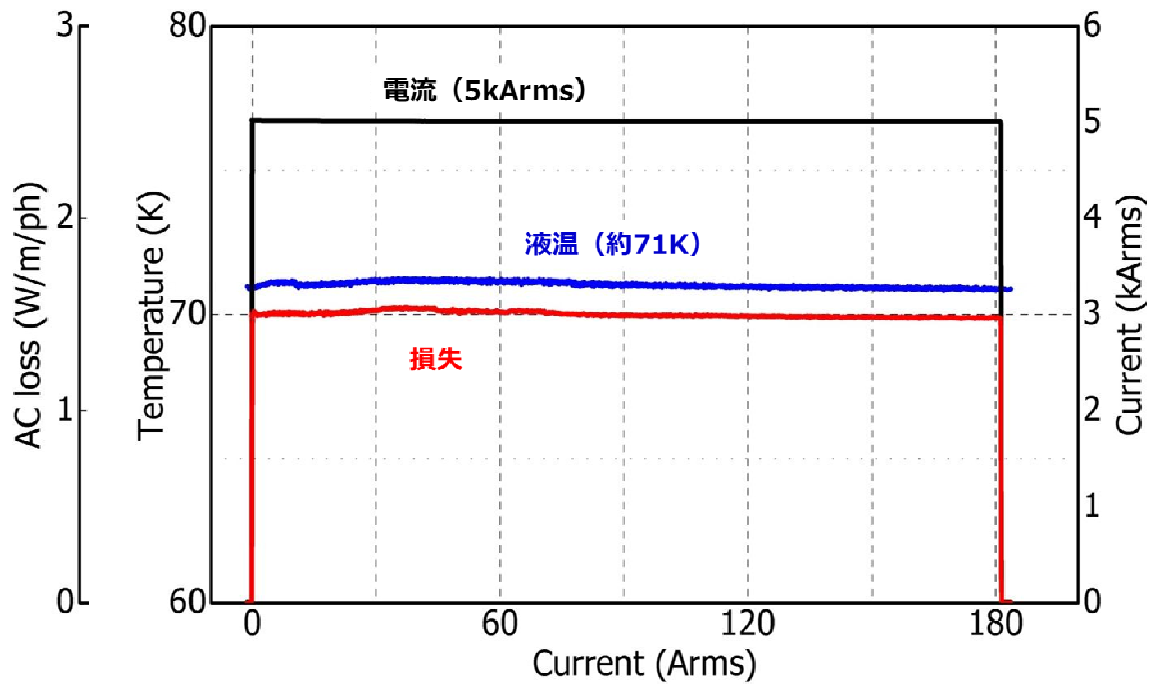


図 2.2.1-32 5kA 連続通電試験結果

(11) まとめ

- 数値解析及び実験により、2 mm 幅への細線化による低損失化、線材可撓性を活かした低損失化の可能性を示した。
- 2 mm 幅線材を用いた 4 層導体では、現実的な線材間ギャップやスリット時の線材端部 J_c 低下を考慮しても、12 kA 程度の I_c を有する導体を実現することにより 1 W/m-相@5 kA 程度に低損失化できる解析結果を得た。
- 10 mm 幅線材の可撓性を活かした低損失化について導体試作・評価を試みたが、フォーマに巻付けた際に線材 I_c 低下が発生することが判明したため、10 mm 幅線材の可撓性による損失低減効果は解析のみにより検討を行った。
- 2 mm 幅及び 4 mm 幅線材を採用候補として 4 層多層導体を作製し、交流損失特性を評価した。2 mm 幅を用いた導体の交流損失は解析結果の 2 倍程度と大きく、使用した線材幅方向の端部 J_c 低下が懸念される。4 mm 幅を用いた導体の交流損失は解析結果とほぼ同等であり、2 mm 幅を用いた導体とほぼ同等の交流損失特性を示した。
- 4 mm 幅線材を用いた導体については、中間評価時より I_c を向上させた線材 (130 A/4 mm-w = 320 A/cm-w 級(@77 K, s.f.)) を適用することにより目標値を達成でき、2 mm 幅線材を用いた導体については、線材幅方向の J_c 分布の改善により中間評価時の 2 割程度損失特性が改善されれば、中間評価時の線材 I_c (50 A/2 mm-w = 250 A/cm-w 級(@77 K, s.f.)) でも目標値の達成が可能との方針を示した。
- 300~400 A/cm-w 級の 4 mm 幅線材を用いたケーブルコアを試作して交流損失特性を検証した結果、1.8 W/m-相 (64 K、5 kA_{rms}) であり、損失目標値 2 W/m-相以下を達成した。
- レーザスリットにより線材幅方向の J_c 分布均一性を改善した 2 mm 幅線材を用いて、導体最外層のみに 2 mm 幅線材を適用した Hybrid 導体を試作して交流損失特性を検証した結果、数値解析結果の指針どおり、全て 4 mm 幅線材を用いた導体と比較して 30~40 % の損失低減に成功した。
- 上記結果を反映して Hybrid 構造のケーブルコアを試作して交流損失特性を検証した結果、1.5 W/m-相 (71 K、5 kA_{rms}) であり、損失目標値 2 W/m-相以下を達成した。さらに、5 kA_{rms} の大電流を安定に通電可能なことも検証し、検証試験向け 15m ケーブルの最終設計として確定した。
- 全て 2 mm 幅線材を用いた導体を試作して交流損失特性を検証した結果、数値解析結果の指針どおり、全て 4 mm 幅線材を用いた導体と比較して 70 % の損失低減に成功した。

引用論文リスト

- (1) Q. Li, N. Amemiya, K. Takeuchi, T. Nakamura, and N. Fujiwara, “AC loss characteristics of superconducting power transmission cables: gap effect and J_c distribution effect”, *Supercond. Sci. Technol.* Vol.23 No.11 (2010) 115003 (7pp)
- (2) N. Amemiya, Q. Li, K. Ito, K. Takeuchi, T. Nakamura, and T. Okuma, “Ac loss reduction of multilayer superconducting power transmission cables by using narrow coated conductors”, *Supercond. Sci. Technol.* Vol.24 No.6 (2011) 065013 (10pp)
- (3) N. Amemiya, Q. Li, K. Takeuchi, T. Nakamura, M. Yagi, S. Mukoyama, Y. Aoki, and N. Fujiwara, “Effects of lateral-tailoring of coated conductor for Ac loss reduction of superconducting power transmission cables”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* Vol.21 No.3 (2011) 943-946
- (4) Q. Li, N. Amemiya, K. Takeuchi, T. Nakamura, and N. Fujiwara, “Effects of unevenly distributed critical currents and damaged coated conductors to AC losses of superconducting power transmission cables”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* Vol.21 No.3 (2011) 953-956
- (5) K. Takeuchi, N. Amemiya, T. Nakamura, O. Maruyama, and T. Ohkuma, “Model for electromagnetic field analysis of superconducting power transmission cable comprising spiraled coated conductors”, *Supercond. Sci. Technol.* Vol.24 No.8 (2011) 085014 (12pp)
- (6) N. Amemiya, Q. Li, R. Nishino, K. Takeuchi, T. Nakamura, K. Ohmatsu, M. Ohya, O. Maruyama, T. Okuma, and T. Izumi, “Lateral critical current density distributions degraded near edges of coated conductors through cutting processes and their influence on ac loss characteristics of power transmission cables”, *Physica C* Vol. 471 (2011) 990-994
- (7) N. Amemiya, R. Nishino, K. Takeuchi, M. Nii, T. Nakamura, M. Yagi, and T. Okuma, “Ac loss analyses of superconducting power transmission cables considering their three-dimensional geometries”, *Physica C*, to be published, “Numerical Simulation on Fault Current Condition in 66 kV Class RE-123 Superconducting Cable”, *Physica C* vol.470 (2010) 1580-1583.
- (8) N. Amemiya, M. Nakahata, N. Fujiwara, Y. Shioharaa, “Ac losses in two-layer superconducting cables consisting of coated conductors with a magnetic substrate”, *Supercond. Sci. Technol.* Vol.23 (2010) 014022 (8pp)

2.2.1-3 高 I_c -IBAD-PLD 線材による大電流・低交流損失の評価

(1) 研究開発目標

平成 24 年度は、これまでの本プロジェクトにおける超電導機器用線材の技術開発において得られた研究成果である高 $I_c = 500 \text{ A/cm-w} (@77\text{K, s.f.})$ 級線材を用いて、66 kV / 三心一括 / 5 kA_{rms}、10 m 級ケーブル 1 相分の試作及び通電用終端接続部・冷却システムを有する試験設備等を製作し、高 I_c 線材による交流通電特性を検証することで、実用化に向けたさらなる低交流損失ケーブル構造等を検討する。以下に、下記の試作・評価及び検証結果について述べる。

- ・大電流・低交流損失ケーブルの試作・評価
- ・交流通電特性の検証

なお、交流通電特性の検証にあたっては、図 2.2.1-33 に示す試験設備と線路をフジクラ佐倉事業所内に構築し実施した。

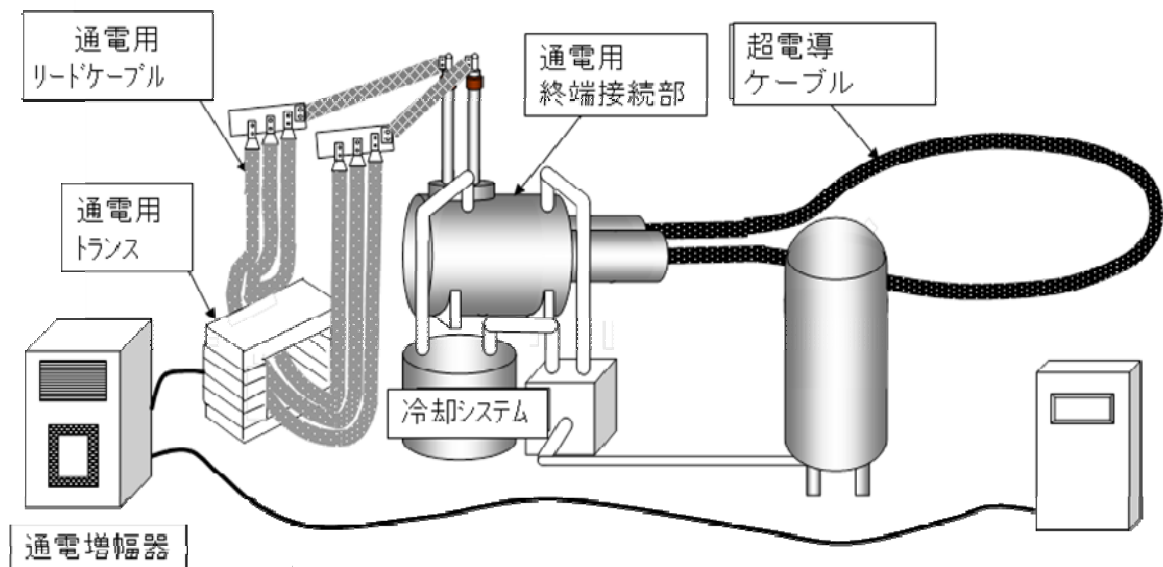


図 2.2.1-33 交流通電試験設備と線路の構成

(2) 大電流・低交流損失ケーブルの試作・評価

a ケーブルの構造

ケーブルコア設計の目標は以下の通りである。

- ・定格容量：66 kV / 5 kA_{rms} 級 三心一括構造の 1 相分
- ・交流損失：2 W/m-相@5 kA_{rms} 以下
- ・コア外径：150 mm ϕ 管路に収納可能な三心一括構造のコア外径

ケーブル構造を表 2.2.1-18 と図 2.2.1-34 に示す。フォーマは定常時の交流損失低減と短絡電流に対する交流抵抗低減を図るため素線絶縁銅撚り線構造とし、外径

は主絶縁厚さ 6 mm としてコア外径の制約から 20 mm とした。断面積は既に本プロジェクトで検討されている成果¹⁾²⁾に準拠し 140 mm² とした。超電導導体は目標臨界電流値を、負荷率 50 % として既に 5 kA_{rms} 通電時に損失目標を達成している 64 K での臨界電流値 12.6 kA³⁾ を考慮して 14 kA (@77 K, s.f.) と設定した。4 mm 幅線材の臨界電流値から必要本数を求め、4 層巻きとした。したがって、オール 4 mm 幅線材の構成となる。線材の構造を表 2.2.1-19 示す。超電導シールド層は負荷率 55 % として目標臨界電流値を 12.7 kA とし、導体と同様、線材はオール 4 mm 幅で 2 層巻きとした。銅シールド層は短絡電流による温度上昇抑制の観点から既に報告⁴⁾されている必要断面積 100 mm² に準拠した。

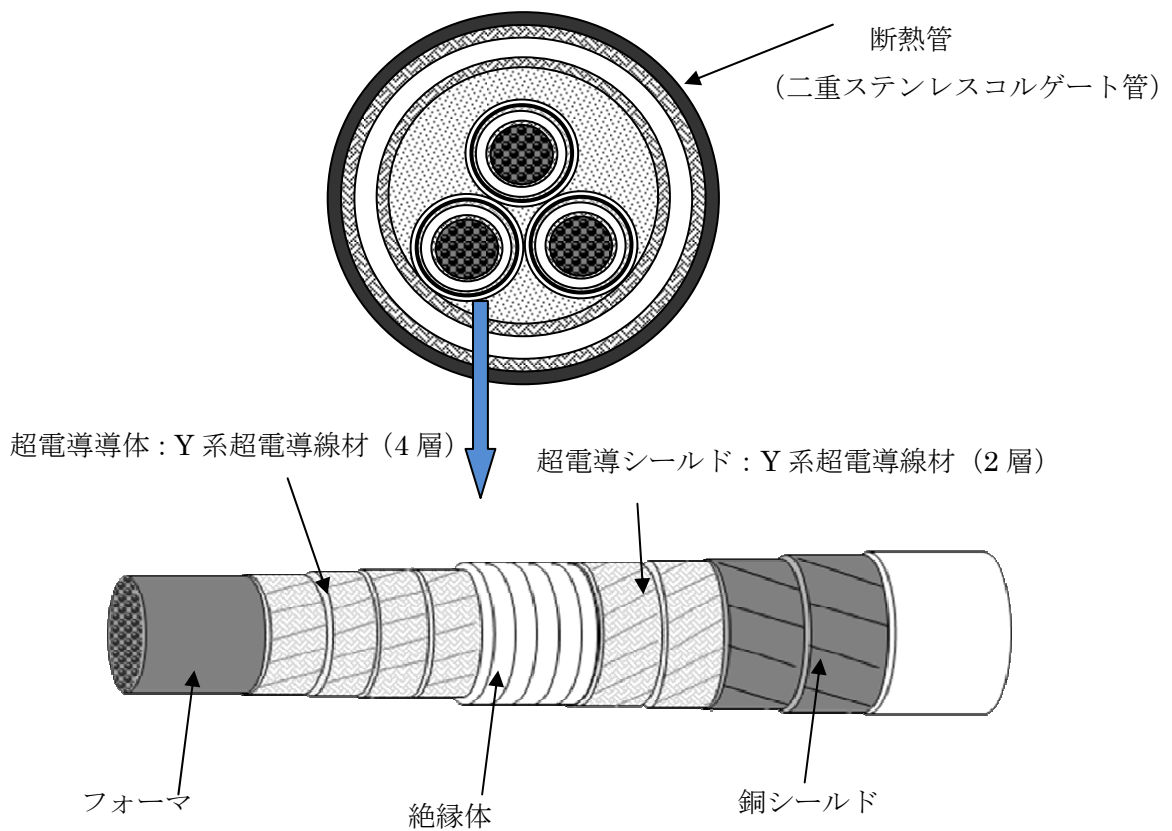


図 2.2.1-34 超電導ケーブルの構造

表 2.2.1-18 超電導ケーブルの設計

項目	仕様	外径(mm)
フォーマ	銅より線 (140 mm ²)	20
テープ層	半導電層	22
超電導導体 ($I_c=14$ kA)	4 mm 幅線材 4 層 (59 本) $I_c=240$ A/4 mm-w	26
絶縁体	内部半導電層 主絶縁層 : クラフト紙、厚さ 6 mm 外部半導電層	40
超電導シールド層 ($I_c=12.7$ kA)	4 mm 幅線材 2 層 (53 本) $I_c=240$ A/4 mm-w	42
銅シールド層	銅テープ 2 層 (100mm ²)	44
保護層 (ケーブルコア外径)	不織布	45
断熱管 (ケーブル外径)	二重ステンレスコルゲート管 (内径 64 mm、外径 110 mm) 真空断熱方式、 防食層	114

表 2.2.1-19 超電導導体用線材構造 (高 I_c -IBAD-PLD 線材)

構成材料	数値
金属基板	100 μ m
Al ₂ O ₃	~150 nm
Y ₂ O ₃	~30 nm
MgO	~10 nm
CeO ₂	~500 nm
GdBa ₂ Cu ₃ O _x	3.5~4.5 μ m
Ag	2~5 μ m
Cu	20 μ m

b 試作

超電導導体とシールド用に供試した線材の全数 I_c 測定結果をそれぞれ図 2.2.1-36、37 に示す。通電測定による I_c の最小値をヒストグラムにして示した。導体、シールドの線材 1 本当当たりの平均はそれぞれ 260 A/4 mm²、243 A/4 mm² で、1 cm 幅換算でそれぞれ 650 A/cm²、610 A/cm² となり、これまでに類のない高 I_c 線材の適用となった。

作製したケーブル単心コア約 20 m 長の外観を図 2.2.1-38 に、その断面を図 2.2.1-39 に示す。作製したケーブルコアの各部寸法実測値は、表 2.2.1-20 に示すようにほぼ設計値通りとなっている。このケーブルコアに断熱管施工後の完成ケーブルを試験ループに曲げた後の状態を図 2.2.1-40 に示す。断熱管の被覆されたケーブル長約 16 m を直径 3 m φ の円弧状に曲げ、シールド層のループ短絡部（常電導）を極力短くした。これはシールド層に導体電流から誘導される電流が実線路と同様にほぼ導体電流の大きさになるように、短絡部のインピーダンスを極力小さく抑えたことによる。これにより、後述の導体・シールドの交流損失測定を実線路に則したものとした。

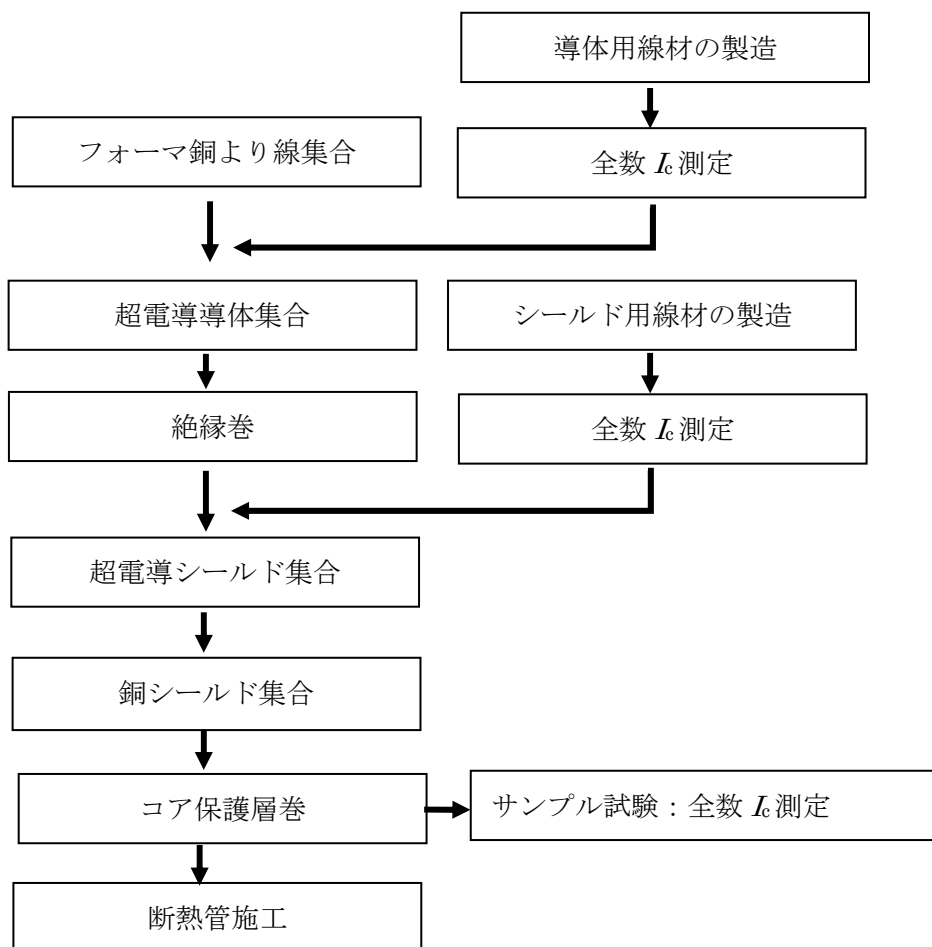
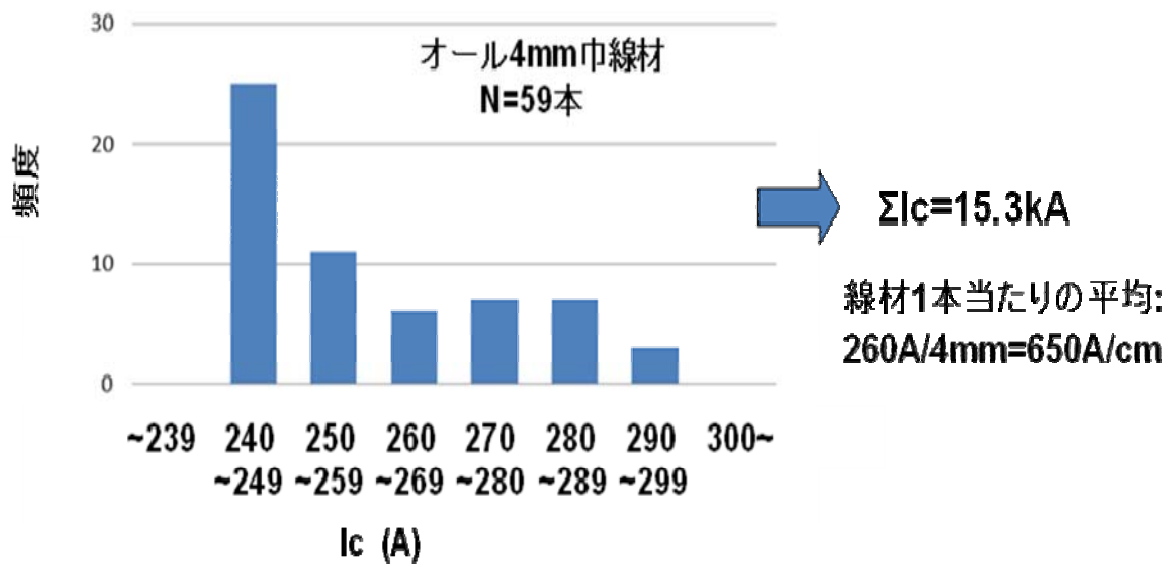
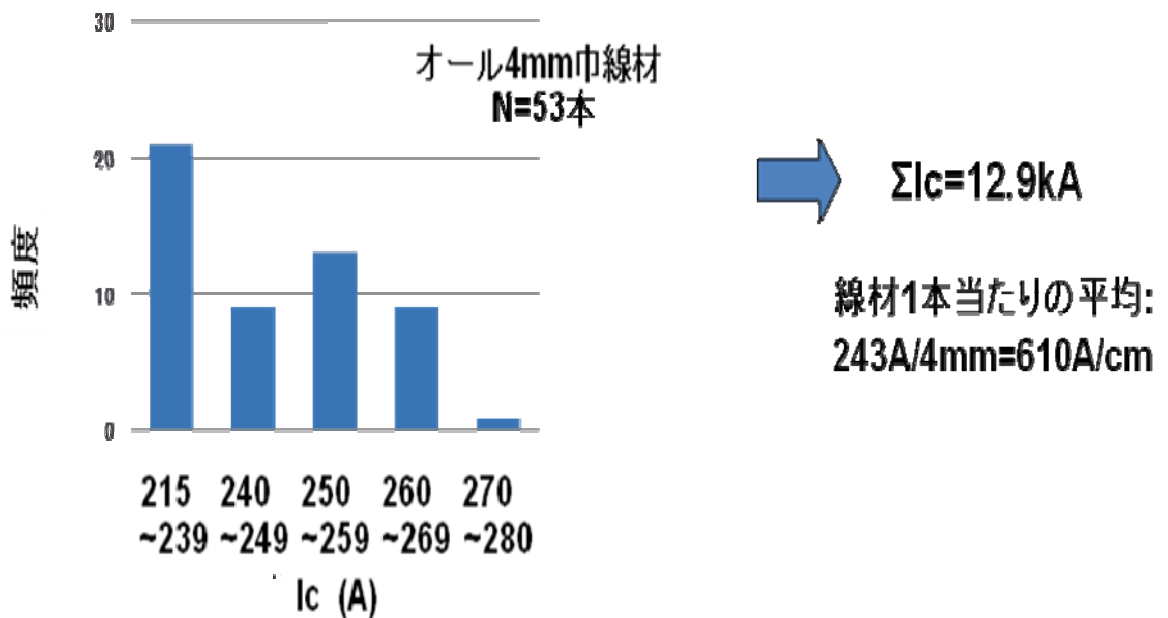


図 2.2.1-35 ケーブル製造概略工程



➤通電測定による $I_c \min$ の測定結果のヒストグラム(@77K,s.f.)

図 2.2.1-36 導体用供試線材の I_c 測定結果



➤通電測定による $I_c \min$ の測定結果のヒストグラム(@77K,s.f.)

図 2.2.1-37 シールド用供試線材の I_c 測定結果

表 2.2.1-20 超電導ケーブルコアの作製結果

項目	外径(mm)	
	設計値	実測値
フォーム	20	20.4
テープ層	22	22.2
超電導導体	26	26.1
絶縁体	40	40.4
超電導シールド層	42	42.2
銅シールド層	44	44.1
保護層 (ケーブルコア外径)	45	45.3
断熱管 (ケーブル外径)	114	114.1



図 2.2.1-38 ケーブル単心コアの外観



図 2.2.1-39 ケーブルコア断面

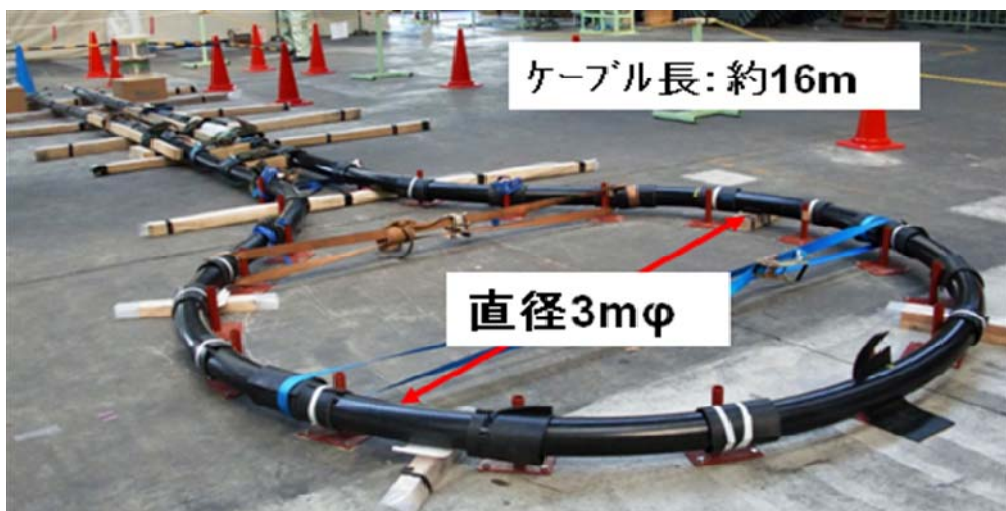


図 2.2.1-40 ケーブル完成後に試験ループに曲げた状態

c 短尺品での事前検証（臨界電流、各層電流分布）

実証試験線路での検証の前に、短尺品による臨界電流、各層電流分布及び交流損失の測定・評価を実施した。

● 臨界電流測定・評価

ケーブルコア製造前後におけるトータル線材 I_c の測定結果を図 2.2.1-41 に示す。製造前の初期の値は図 2.2.1-36、37 に示した値である。コア製造後の値は製造余長から切り出した短尺サンプルの値で、その設計諸元・ I_c 値は 10 m 級と同様である。超電導導体層、超電導シールド層ともにケーブルコア製造前後において各線材のトータル I_c の変化は確認されなかった。これは超電導導体層及び超電導シールド層を構成する超電導線材とともにケーブルコア製造の履歴を受けても概ね初期特性が維持できていることを示している。

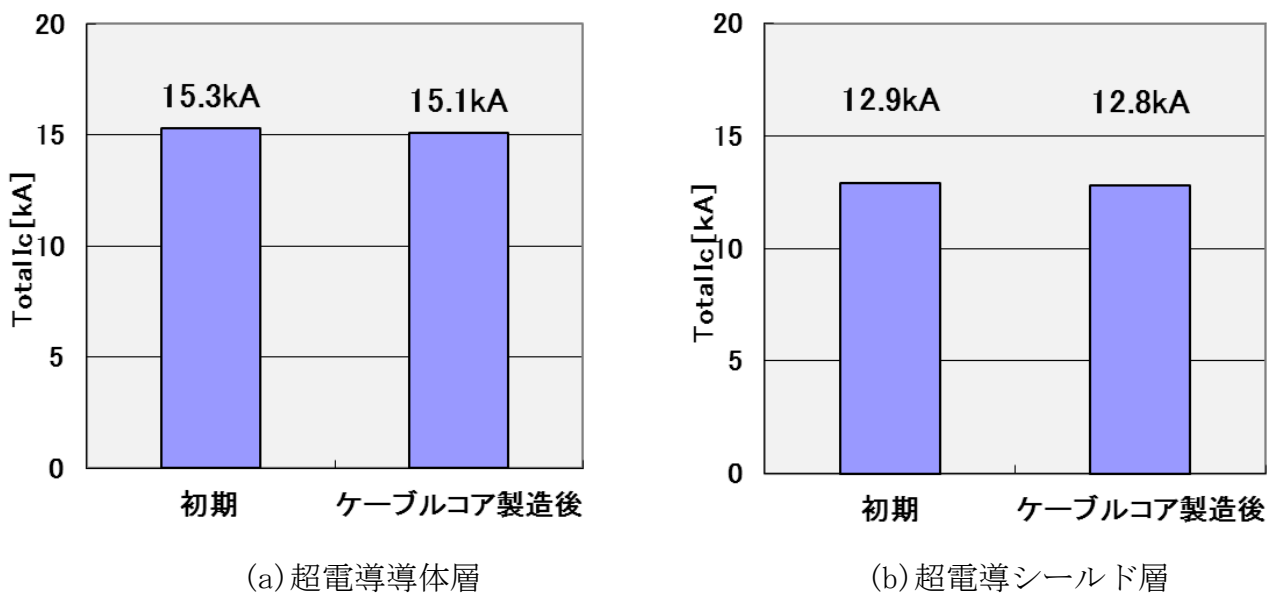


図 2.2.1-41 ケーブルコア製造前後のトータル線材 I_c 測定結果

通電時の超電導導体層及び超電導シールド層の I_c は超電導線材が有する J_c -B 特性の影響を受ける。そこでケーブルコア製造に使用する超電導線材の J_c -B 特性から $5 \text{ kA}_{\text{rms}}$ ($7.1 \text{ kA}_{\text{peak}}$) 通電時の I_c を推定した。図 2.2.1-42 にケーブルコア製造に使用した超電導線材の 77K における J_c -B 特性を示す。通電試験条件である $5 \text{ kA}_{\text{rms}}$ ($7.1 \text{ kA}_{\text{peak}}$) にて超電導導体層及び超電導シールド層の各層にかかる磁場が設計より得られる。図 2.2.1-42 の超電導線材の J_c -B 特性から、各層にかかる平行磁場による I_c の低下率 (I_c/I_{c0}) を表 2.2.1-21 に、垂直磁場による低下率 (I_c/I_{c0}) を表 2.2.1-22 に示す。これらの各層の低下率 (I_c/I_{c0}) から得られた $5 \text{ kA}_{\text{rms}}$ ($7.1 \text{ kA}_{\text{peak}}$) 通電時の推定 I_c (規格化に際して使用する I_c 値) と負荷率を表 2.2.1-23 に示す。また、同様に求めた 67 K における通電時の推定 I_c 値と負荷率を表 2.2.1-24 に示す。

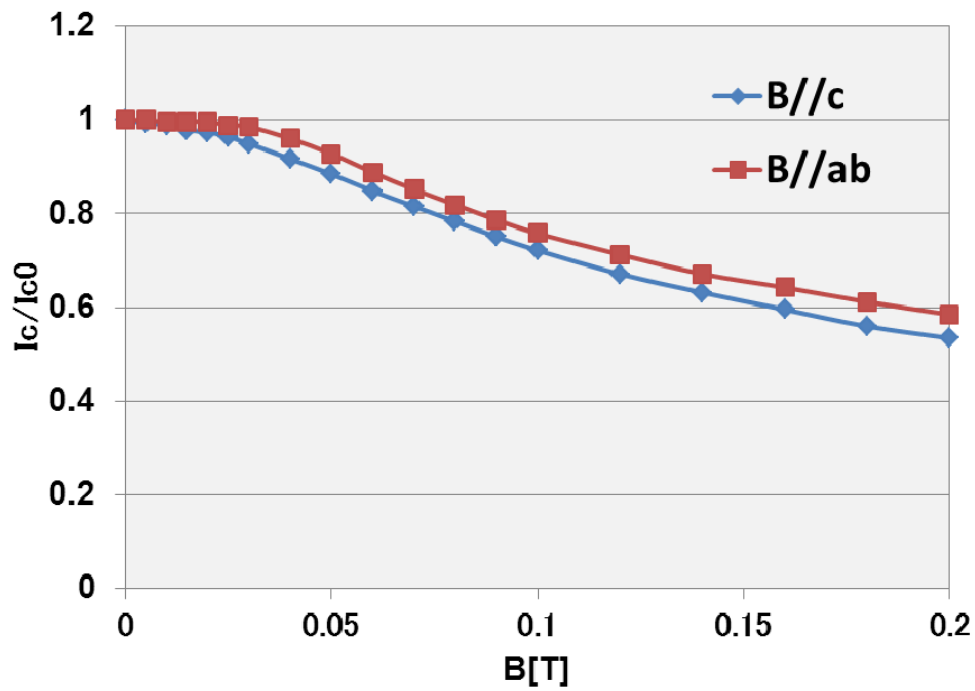


図 2.2.1-42 超電導線材の J_c -B 特性 (@77K)

表 2.2.1-21 超電導ケーブルコアを形成する各層の平行磁場 (B//ab) と I_c の低下率 (I_c/I_{c0}) $I_{c0} : @B=0$

		B [T]	I_c/I_{c0}
導体	1層	0.016	1
	2層	0.03	0.99
	3層	0.06	0.89
	4層	0.08	0.82
シールド	1層	0.07	0.85
	2層	0.03	0.99

表 2.2.1-22 超電導ケーブルコアを形成する各層の垂直磁場 (B//c) と I_c の低下率 (I_c/I_{c0}) $I_{c0} : @B=0$

		B [T]	I_c/I_{c0}
導体・シールド	各層	< 0.013	> 0.99

表 2.2.1-23 通電時の磁場と J_c -B 特性を考慮した推定 I_c と負荷率@77K
(規格化に際して使用する I_c 値)

	線材 I_c の総和@77 K		5 kA _{rms} (7.1 kA _{peak})通電時@77 K	
	初期	コア製造後	推定 I_c	負荷率
導体	15.3 kA	15.1 kA	14.0 kA	51%
シールド	12.9 kA	12.8 kA	11.8 kA	59%(*)

(*)7.1kA_{peak} × 0.98 (シールド電流誘導率) / 11.8kA = 59%

表 2.2.1-24 通電時の磁場と J_c -B 特性を考慮した推定 I_c と負荷率@67K
(規格化に際して使用する I_c 値)

	線材 I_c の総和@77 K		5 kA _{rms} (7.1 kA _{peak})通電時@67 K	
	初期	コア製造後	推定 I_c	負荷率
導体	15.3 kA	15.1 kA	25.2 kA	28%
シールド	12.9 kA	12.8 kA	21.1 kA	33%(*)

(*)7.1 kA_{peak} × 0.98 (シールド電流誘導率) / 21.1 kA = 33%

● 各層電流分布測定・評価

超電導ケーブルコア (導体・シールド) の均流化を確認するために、製造余長の短尺サンプルにて各層の電流分布測定を実施した。

測定方法として、①各層間に電流測定用ロゴスキーコイルを挿入、②端末部の抵抗による分流比への影響を小さくするため電流の周波数を上げて測定、③ロゴスキーコイルの校正精度を上げるため測定終了後に外層から開放して実施。

各層電流分布の周波数特性結果 (周波数と分流比率の関係) を図 2.2.1-43 に示す。

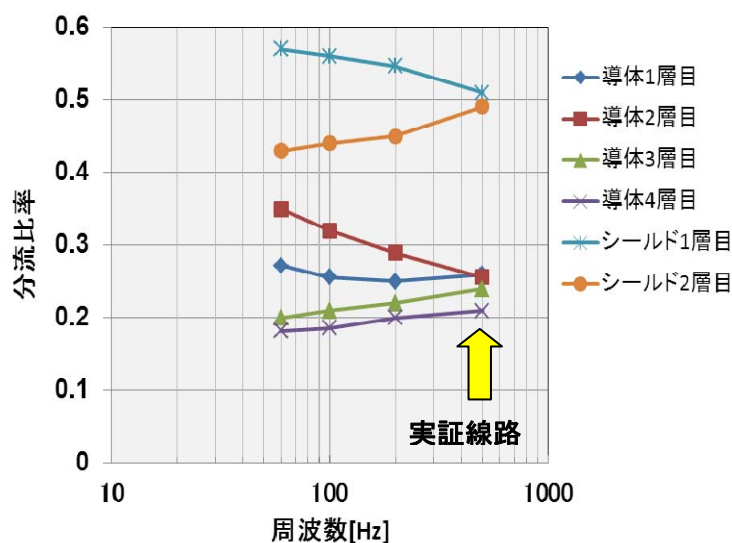


図 2.2.1-43 各層電流分布の周波数特性結果 (周波数と分流比率の関係)

実証線路相当の周波数(500 Hz)*にてほぼ均流化が図れていることが確認でき、設計上問題ないことを検証した。

* ケーブル部のインピーダンス $\approx j \cdot 2\pi f L$

[f: 周波数、L: インダクタンス \propto ケーブル長]

実証試験線路で長さ約 16 m、周波数 60 Hz が、短尺試料では長さ約 1.5 m、周波数 600 Hz (測定は 500 Hz) と等価。

● 交流損失測定・評価

超電導ケーブルコア(導体・シールド)の交流損失測定を製造余長の短尺サンプルを用いて交流四端子法で、液体窒素温度 77 K にて実施した。得られた交流損失測定結果を図 2.2.1-44 示す。目標である液体窒素温度 77 K で 2.0 W/m(@5 kA_{rms}) 以下を確認した。なお、今回の通電評価に使用した通電・評価設備は実証試験線路で行った交流損失測定時のものと同一である(図 2.2.1-49 参照)。

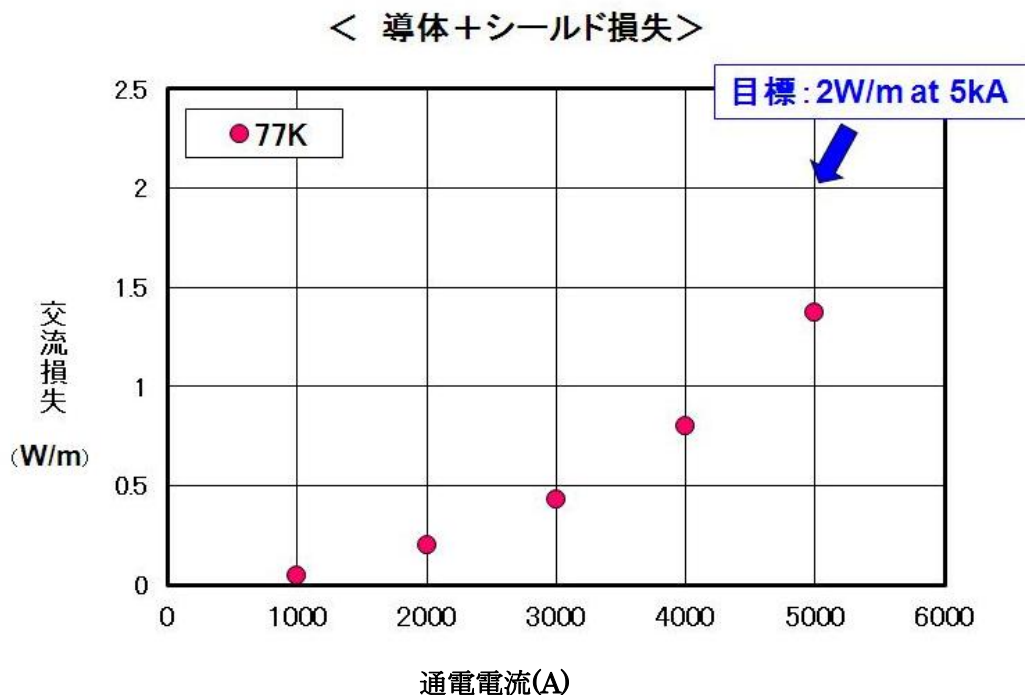


図 2.2.1-44 交流損失測定結果(短尺サンプル) (@77K)

(3) 交流通電特性の検証

a 検証システムの構成

図 2.2.1-45 に、検証システムの構成を示す。

ケーブルは、SUS 管部の長さが 16 m の単心型である。中央部で 180 度曲げの往復線路とし、二つの通電端末を一つの断熱容器に納める構造とした。インピーダンスを極力小さくしてシールド電流の誘導率を上げるため、線路両端の超電導シールドは、できるだけ短距離になるよう断熱容器内の液体窒素中で短絡した。通電損失を評価するためケーブルには、通電電流とそれによる電圧降下を測定するリード線を取り付けた。

ケーブル線路を冷却するシステムは、液体窒素サブクール方式とした。減圧排気で冷却したサブクーラ内の一次液体窒素によって、線路を冷却する二次液体窒素冷媒を冷却した後、線路に送り込み、循環した。超電導ケーブルと通電端末を確実に冷却するため、二次液体窒素は、流量を制御してケーブルと端末へ個別に供給した。冷却仕様は次のとおりである。

- ・液体窒素温度 67 K ~ 77 K
- ・循環流量 ~ 50 L/min
- ・冷却容量 2 kW

図 2.2.1-46 に検証システムの全景を示す。

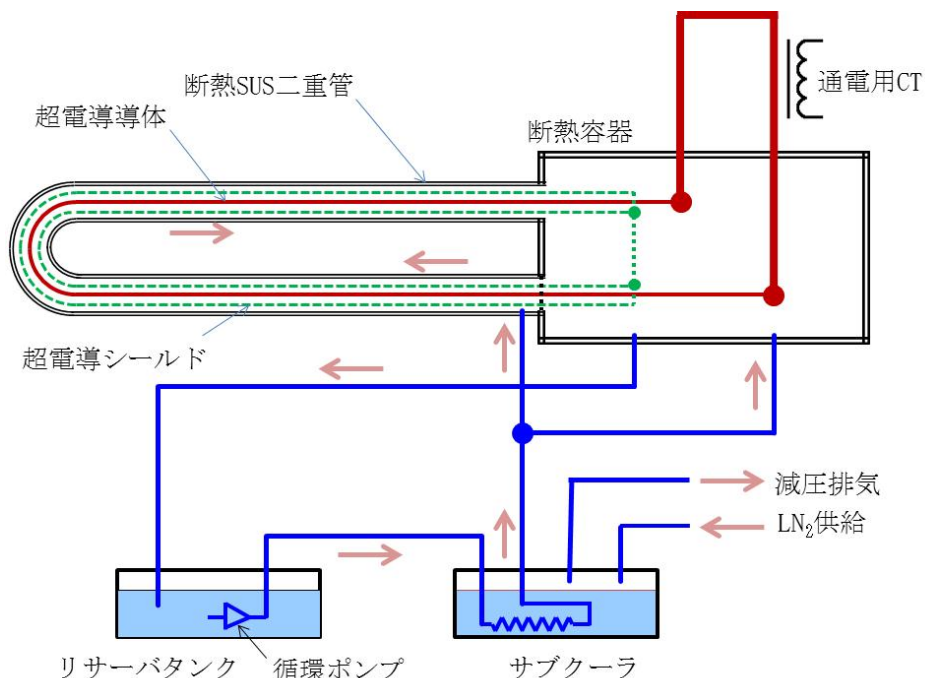


図 2.2.1-45 検証システムの構成



図 2.2.1-46 検証システムの全景

b 通電サイクル試験

ケーブル線路は、真空引き・窒素ガス充填を数回繰り返した後、蒸発冷却した窒素ガスにて徐冷した。そして、ケーブル線路からの排出ガス温度が $-190\text{ }^{\circ}\text{C}$ 前後になったとき、液体窒素を導入した。冷却開始から液体窒素温度に達するまでに要した時間は約 50 時間である。

通電サイクル試験は、下記の条件で実施した。通電試験サイクル期間中の電流パターンを、図 2.2.1-47 に示す。

- ・ 通電電流 $1,000\text{ A}_{\text{rms}} \sim 3,000\text{ A}_{\text{rms}}$
- ・ 供給液体窒素温度 73 K
- ・ 供給液体窒素流量 10 L/min (ケーブル)
 40 L/min (断熱容器)

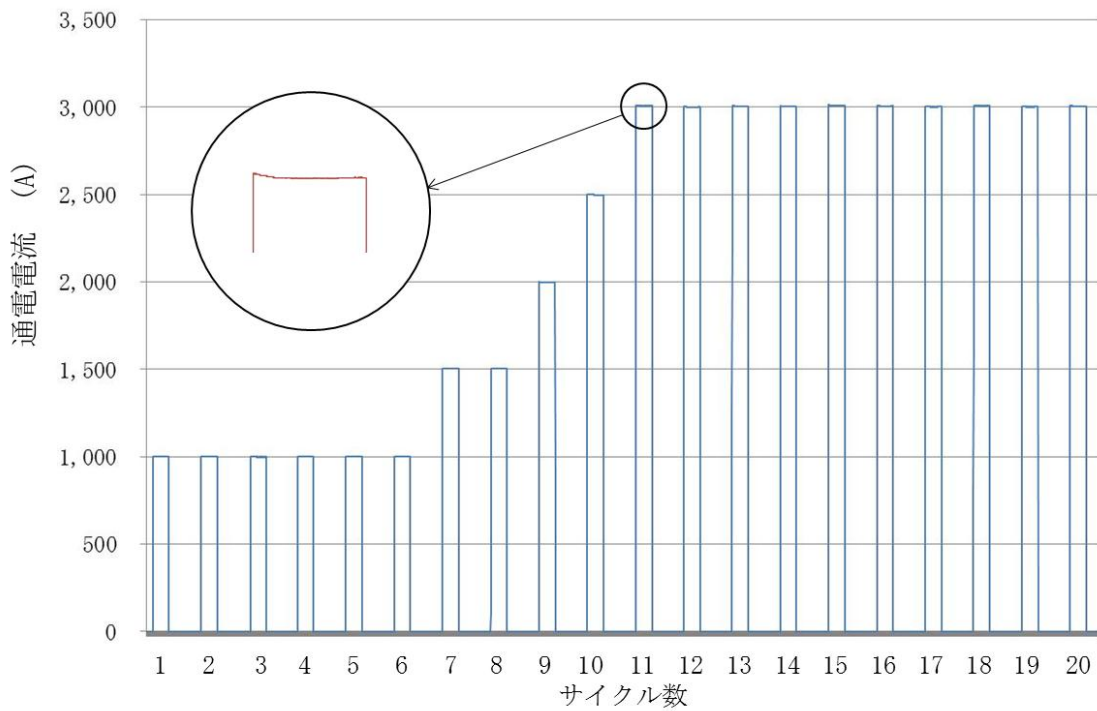


図 2.2.1-47 通電電流パターン

c シールドの誘導電流

実証試験線路での交流通電試験の一環として、通電電流 $5 \text{ kA}_{\text{rms}}$ 、液体窒素温度 77 K にて図 2.2.1-48 に示すように、超電導導体層、超電導シールド層の交流通電特性（電流波形）を確認した。超電導シールド層には超電導導体層電流の約 98 % の電流が誘導されており、想定値通りでシールド層に異常がないことが確認された。

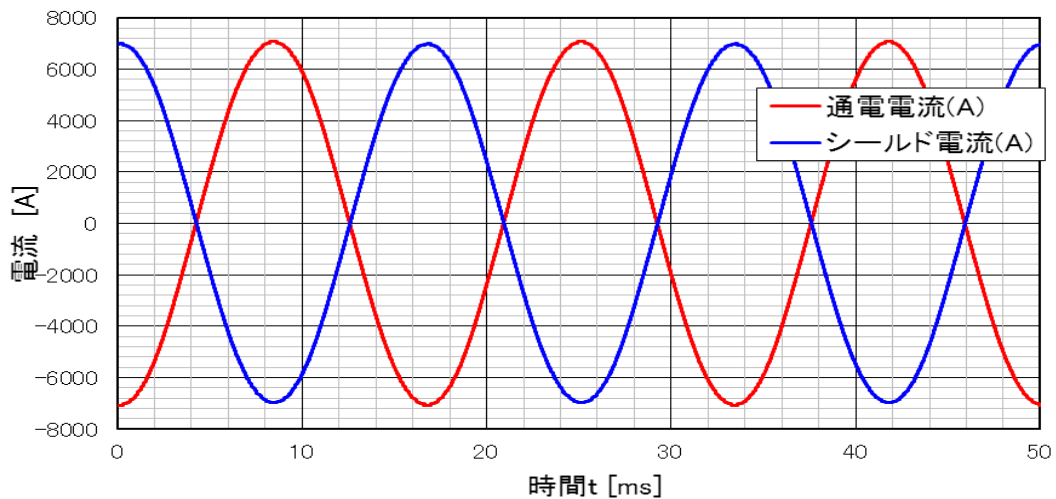


図 2.2.1-48 導体電流とシールド電流の波形 ($5,000 \text{ A}_{\text{rms}}$ 通電時)

d 交流損失測定・評価

実証試験線路での交流通電試験の一環として、交流損失を交流四端子法にて実施した。今回の通電評価に使用した通電・評価設備を図 2.2.1-49 に、交流損失測定部位を図 2.2.1-50 に示す。

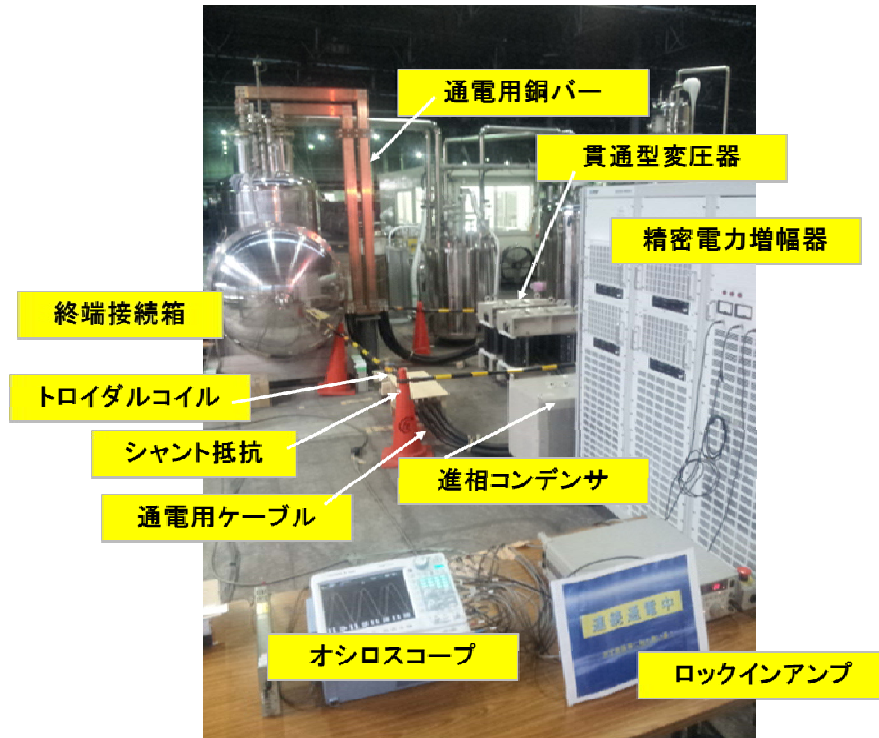


図 2.2.1-49 交流通電・評価設備

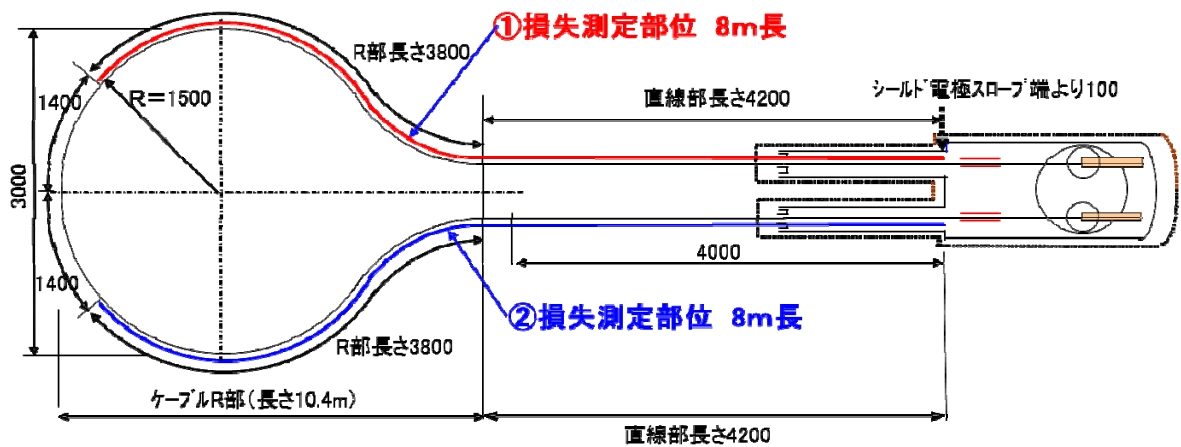


図 2.2.1-50 交流損失測定部位

上記通電・評価設備を用い、得られた交流損失測定結果（液体窒素温度 67 K、77 K）を図 2.2.1-51-1、図 2.2.1-51-2 に示す。交流損失として、通電電流 $5 \text{ kA}_{\text{rms}}$ にて 0.95 W/m -相（液体窒素温度 67 K）、さらに、図 2.2.1-44 と本図より 1.5 W/m

以下（液体窒素温度 77 K）が得られた。今回のプロジェクト目標である 2.0 W/m(@5kA_{rms})の約半分以下の値を液体窒素温度 67 K で確認した。さらに、77 K においても目標損失を達成できる見込みであることがわかった。なお、77 K における交流損失は、前述したように製造余長の短尺サンプルにて目標値以下の損失値であることを確認済みである（図 2.2.1-44 参照）。

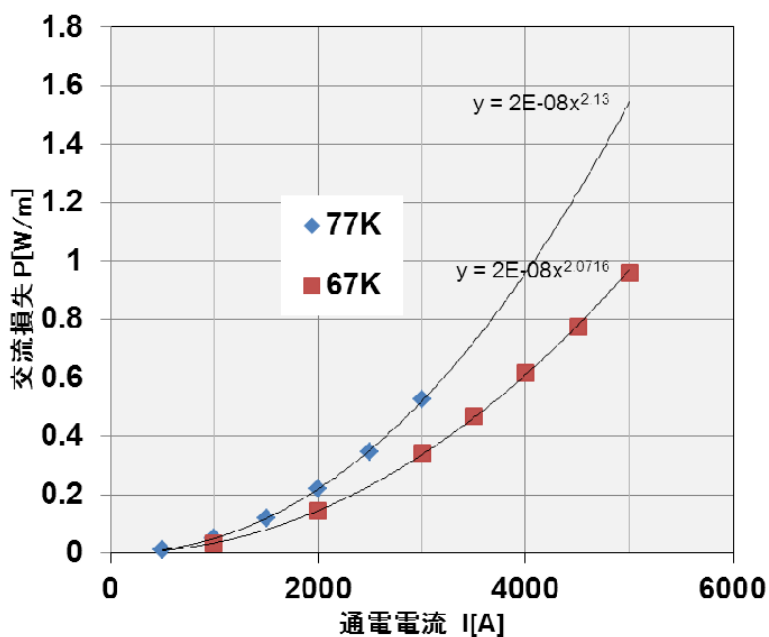


図 2.2.1-51-1 交流損失測定結果（1）

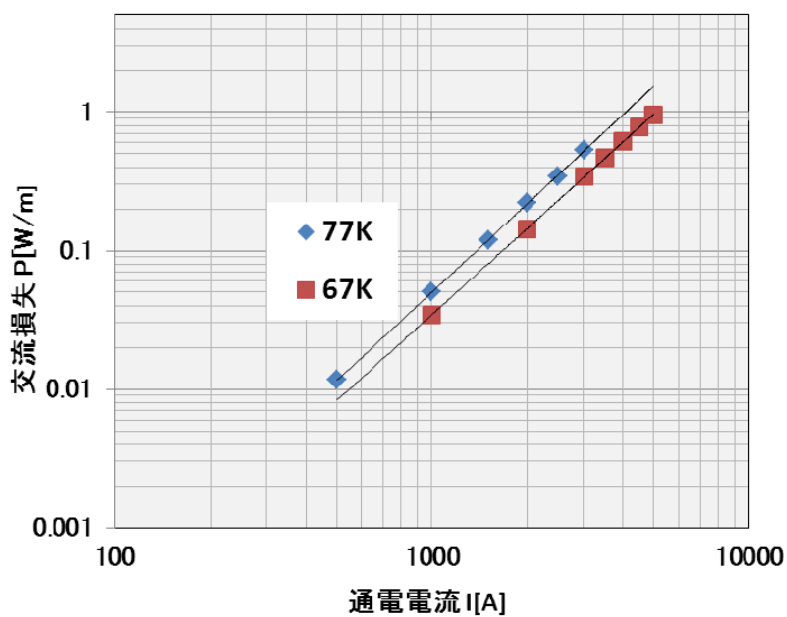


図 2.2.1-51-2 交流損失測定結果（2）

(4) まとめ

- ・ オール 4 mm 幅 Y 系高 I_c 線材 ($I_c = 500 \text{ A/cm-w} (@77 \text{ K, s.f.})$ 級) による三心一括ケーブル 10 m 級の一相分を設計・試作し、製造工程において概ね特性が低下しないことを確認した。
- ・ 各線材のトータル I_c 値と線材の J_c -B 特性から通電時の導体とシールドの I_c 値と負荷率を推定し、ほぼ設計通りであることを確認した。
- ・ 短尺コアでの各層電流分布の周波数依存性を測定した結果、実証線路長相当の周波数でほぼ均流化が図られていることを確認した。
- ・ フジクラ佐倉事業所内に通電用終端接続部・冷却システム試験設備を有する 10 m 級試験線路を構築し、交流通電試験により超電導シールド層には導体電流と逆向きのほぼ同じ電流 (約 98%) が誘導された。実線路状態を再現でき、シールド設計の妥当性を確認した。
- ・ 本 10m 級試験線路での交流損失と短尺コアで導体・シールドの交流損失を電氣的四端子法で測定を行い、今回のプロジェクト目標である $2.0 \text{ W/m} (@5 \text{ kA}_{\text{rms}})$ の約半分以下の値を液体窒素温度 67 K で確認した。さらに、77 K においても短尺サンプルにて目標以下の損失値であることを確認した。

引用文献リスト

- (1) NEDO 事業原簿、平成 21 年度中間評価分科会、「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」、pIII-27~pIII-31 (2009 年 11 月)
- (2) NEDO 事業原簿、「イットリウム系超電導電力機器技術開発プロジェクト」、pIII-2.2.3~pIII-2.2.5 (2010 年 8 月)
- (3) NEDO 事業原簿、「イットリウム系超電導電力機器技術開発プロジェクト」、pIII-2.2.18~pIII-2.2.19 (2010 年 8 月)
- (4) NEDO 事業原簿、「イットリウム系超電導電力機器技術開発プロジェクト」、pIII-2.2.26~pIII-2.2.29 (2010 年 8 月)

(5) IBAD-PLD 高 I_c 線材を使用したケーブルと Clad-PLD 線材を使用したケーブルの交流損失の比較検討 (ISTEC)

本プロジェクトにおいて、実用化に向けたさらなる低交流損失化対策として、Clad-PLD 線材による線材細線化及び可撓性を適用したケーブルコアと IBAD-PLD 高 I_c 線材による交流損失の低減効果に関して、負荷率 (I_{op}/I_c) を揃えた場合と測定温度を揃えた場合の 2 条件にて比較・検討を行った。

表 2.2.1-25-1 に Clad-PLD 線材によるケーブルコアと IBAD-PLD 高 I_c 線材によるケーブルコアの交流損失特性について比較したものを示す。

Clad-PLD 線材は磁性を有する結晶粒配向金属基板 (Clad 基板) に PLD にて超電導成膜を施した線材を使用し、2.2.1-2(8)に示したように超電導導体 4 層のうち

最外層のみにレーザスリットにて細線化した 2 mm 幅線材を適用し、他の層は 4 mm 幅線材を適用した Hybrid 構造としている。一方、IBAD-PLD 線材は非磁性の Hastelloy™ 基板に IBAD 中間層および PLD 超電導層を成膜した $I_c = 600$ A/cm-w(@77 K, s.f.)級の線材を使用している。なお、4mm 幅線材については、Clad-PLD 線材・IBAD-PLD 線材ともに機械スリットにより細線化した線材であり、線材幅方向端部の I_c 劣化領域は測定した結果、ともに同程度であった。両者の主な違いとしては、導体 4 層目の 2 mm 幅線材を使用している点である。最外層への 2 mm 幅線材の適用は、1-4 層全てに 4mm 幅線材を使用するよりも交流損失を低減する効果があることは前述の評価 2.2.1-2 (8)の図 2.2.1-29 にて明らかになっている。しかし今回の両者の交流損失を比較してみるとほぼ同等の負荷率において、同等の損失値が確認されている。これは図 2.2.1-25 に記載の通り、最外層に 2 mm 幅線材を使用する Hybrid 構造については、負荷率が高い場合は損失低減効果があるが、負荷率が低くなってくるとその効果が薄くなっていくためと考えられる。

表 2.2.1-25-1 Clad-PLD 線材・高 I_c IBAD-PLD 線材のケーブルの損失値比較
(負荷率を揃えた場合)

	Clad-PLD 線材	IBAD-PLD 高 I_c 線材
損失値 @ 5kA	1.4 W/m	1.4 W/m
負荷率 (I_{op}/I_c)	0.5	0.5
液体窒素温度	68 K	77 K
ケーブル I_c (推定)	導体 : 14300 A シールド : 11800 A	導体 : 14000 A シールド : 11800 A
線材 I_c (@77 K, s.f.)	380 A/cm-w	650 A/cm-w
線材基板	Clad-PLD	IBAD-PLD
ケーブル構造	導体 4 層 - シールド 2 層	
	1-3 層 : 4 mm 幅 4 層 : 2 mm 幅 シールド : 4 mm 幅	1-4 層 : 4 mm 幅 シールド : 4 mm 幅
線材スリット方法 (端部 I_c 低下幅)	2 mm 幅 : レーザスリット (端部 I_c 低下幅 0.1-0.2 mm 程度) 4 mm 幅 : 機械スリット (端部 I_c 低下幅 0.3-0.4 mm 程度)	
測定対象	短尺サンプル	
測定方法	電氣的測定	

続いて、77 K における両ケーブルコアの交流損失測定値について比較を行った。表 2.2.1-25-2 に 4 kA 通電時における交流損失特性を示す。IBAD-PLD 高 I_c 線材によるケーブルコアの損失値は Clad-PLD 線材によるケーブルコアの損失値よりも小さいことが確認されており、これは IBAD-PLD 線材のケーブルコアが高 I_c 線材を使用しており、Clad-PLD 線材を使用したケーブルコアよりも負荷率が小さくなるため交流損失が低減したと考えられる。また、両ケーブルコアの 77 K における交流損失値を I_c の 2 乗にて規格化したグラフを図 2.2.1-52 に示す。表 2.2.1-25-1

で示した通り、負荷率 0.5 付近では両者の交流損失値は同程度となっているが、負荷率が 0.5 以上の領域では、全て 4 mm 幅線材を使用した IBAD-PLD 線材のケーブルコアより Hybrid 構造である Clad-PLD 線材のケーブルコアの損失値の方が小さくなるのが推定される。従って、前段落にて記載の通り負荷率が高い領域での Hybrid 構造による交流損失低減効果を確認することができた。

以上のように負荷率が高い領域では最外層に 2 mm 幅線材を使用する Hybrid 構造が交流損失の低減に効果的であることを確認できた。また、高 I_c 線材を使用した場合や液体窒素温度が低い場合などの負荷率が低くなる領域では、Hybrid 構造による交流損失低減効果は薄くなり、4 mm 幅線材の使用が効果的となることが分かった。

表 2.2.1-25-2 Clad-PLD 線材・高 I_c IBAD-PLD 線材のケーブルの損失値比較
(測定温度を揃えた場合)

	Clad-PLD 線材	IBAD-PLD 高 I_c 線材
損失値@ 4 kA	0.92 W/m	0.8 W/m
負荷率 (I_{op}/I_c)	0.66	0.4
液体窒素温度	77 K	77 K
ケーブル I_c (推定)	導体：8630 A シールド：7140 A	導体：14000 A シールド：11800 A
その他、線材諸元・ケーブル構造等は表 2.2.1-25-1 と同様		

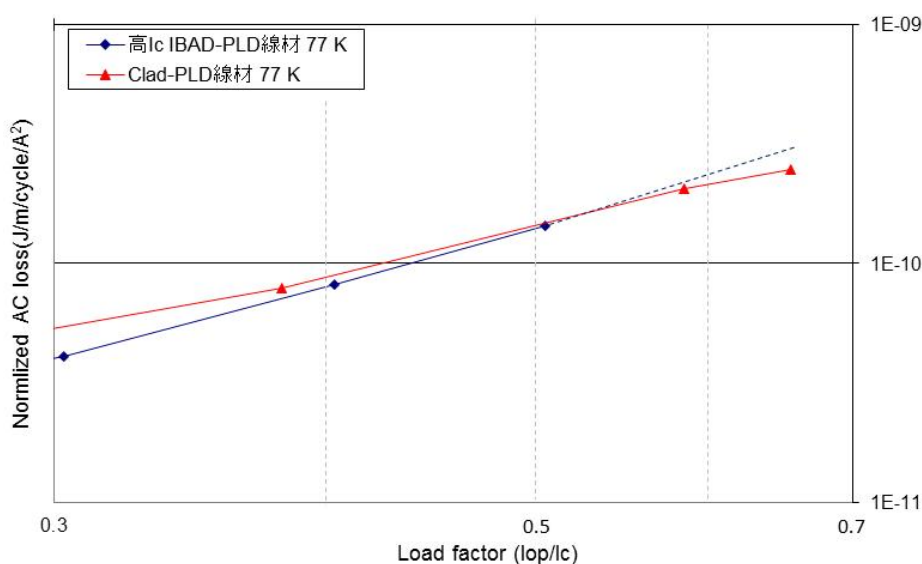


図 2.2.1-52 Clad-PLD 線材・高 I_c IBAD-PLD 線材のケーブルコア損失値の比較
(77 k における交流損失値を I_c^2 にて規格化)

2.2.1-4 耐過電流ケーブル設計技術（住友電気工業、早稲田大学）

(1) 研究開発目標

電力系統においてケーブルの相間短絡事故が起こった場合、定格電流に比べて非常に大きな短絡電流が流れる。例えば、本ケーブルのターゲットである 66 kV 系統においては、最大「31.5 kA、2 sec」の短絡電流が流れると想定されている。超電導ケーブルの場合、この電流を超電導状態で流すためには非常に多くの本数の超電導線材が必要であり、ケーブルの寿命期間に発生するかしないかの短絡事故のために、定格電流の数倍もの事故電流を流すための超電導線材を用いることは非常に不経済であるといえる。本項では、経済性も考慮し、短絡電流が流れた場合は超電導状態から常電導状態に移り、常電導抵抗によるジュール熱が発生することを許容する設計方針とし、短絡電流が流れてもケーブルが健全であることを検証した。

●中間目標（平成 22 年度）

- ・ 短絡試験（31.5 kA, 2 sec 相当）でケーブルの性能に劣化がないこと
- ・ 超電導電力ケーブル構造の最適化のために伝熱及び電磁界数値シミュレーションを行う

(2) 耐過電流設計

設計コンセプトとしては、短絡電流が流れた場合に超電導状態を維持できないことを許容し、常電導抵抗によるジュール熱が発生してもケーブルが健全性を保てることを保証する設計とする。そのためには、定格電流以上の短絡電流が流れた場合に、超電導層以外の常電導保護層に電流を分流させ、ケーブルコア内の発熱を小さくすることで、温度上昇を抑制する必要がある。一方で、過剰な常電導保護層を設けることはケーブル径を大きくし、内径 150 mmφの管路に収納できるサイズに抑えることを困難にする。このため、早稲田大学の計算機シミュレータ（電流分布－熱伝導連成解析プログラム）を用いて過電流が流れた場合の温度上昇を解析し、耐過電流保護設計の妥当性を検証した。

66 kV 級大電流超電導ケーブルの保護設計の概要及び数値シミュレーションモデルを図 2.2.1-53 に示す。電流分布解析は 3 次元有限要素法（ ϕ 法）を用いて定式化し（式(2.2.1-3)）、Y 系超電導線材の I - V 特性には n 値モデルを採用した（式(2.2.1-4)）。ここで、式(2.2.1-3)の ϕ は電気スカラーポテンシャル、 σ は導電率である。式(2.2.1-4)の I は超電導線材に流れる電流、 V は発生電圧、 I_c は臨界電流、 V_c は基準電界（1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ ）、 n は n 値である。なお、超電導線材の臨界温度を 90 K とし、臨界電流の温度依存性を線形近似している。

$$\nabla \cdot \sigma (\nabla \phi) = 0 \quad (2.2.1-3)$$

$$V = V_c \left(\frac{I}{I_c} \right)^n \quad (2.2.1-4)$$

自己インダクタンス L 及び相互インダクタンス M は集中定数として回路方程式(式(2.2.1-5)) に代入し、3次元有限要素法より求めた各導体内のスカラーポテンシャル(電位 ϕ) より各導体両端の電位差 V を求め、各導体に流れる電流 I を求めた。なお、式(2.2.1-5)の R は端末部の常電導接続抵抗、 E は導体層の両端電圧であり、シールド層は三相短絡を想定して両端電圧を 0 としている。それぞれの変数に対する添え字の *cond* は導体層を、*shield* はシールド層を意味する。

$$\begin{bmatrix} R_{cond} & 0 \\ 0 & R_{shield} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} I_{cond} \\ I_{shield} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{cond} & M \\ M & L_{shield} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{Bmatrix} I_{cond} \\ I_{shield} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} V_{cond} \\ V_{shield} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} E_{cond} \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2.2.1-5)$$

銅フォーマのインダクタンス算出に際しては円柱モデルを用い、電流が断面内を一樣に分布して長手方向に流れると仮定した。超電導導体層と超電導シールド層及び銅シールド層の各層は図 2.2.1-53 示す円筒モデルで近似し、電流が断面内を一樣に撚りピッチと並行に流れると仮定した。銅フォーマの自己インダクタンス及び他層との相互インダクタンスを式(2.2.1-6)及び式(2.2.1-7)に示す。超電導導体層と超電導シールド層及び銅シールド層の各層の自己インダクタンス及び多層との相互インダクタンスを式(2.2.1-8)及び式(2.2.1-9)に示す。式(2.2.1-6)-(2.2.1-9)の d はケーブルの長さ、 a は銅フォーマの半径及び他各層の中心半径、 p は銅フォーマ以外の各層の撚りピッチ、 s は撚り方向の係数 (S 撚りで 1、Z 撚りで -1) である。

$$L_i = \frac{d}{2\pi} \left(\frac{\mu_0}{4} + \mu_0 \left(\ln \frac{2d}{a_i} - 1 \right) \right) \quad (2.2.1-6)$$

$$M_{ij} = \frac{\mu_0 d}{2\pi} \left(\ln \frac{2d}{a_j} - 1 \right) \quad (j > i) \quad (2.2.1-7)$$

$$L_i = \mu_0 \frac{\pi a_i^2}{p_i^2} d + \frac{\mu_0 d}{2\pi} \left(\ln \frac{2d}{a_i} - 1 \right) \quad (2.2.1-8)$$

$$M_{ij} = \mu_0 s_i s_j \frac{\pi a_i^2}{p_i p_j} d + \frac{\mu_0 d}{2\pi} \left(\ln \frac{2d}{a_j} - 1 \right) \quad (j > i) \quad (2.2.1-9)$$

熱伝導解析は 3次元有限要素法を用いてモデル化し、式(2.2.1-10)より定式化した。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_j - Q_q \quad (Q_q = h(T - T_b)) \quad (2.2.1-10)$$

上式の ρ は密度、 c は定圧比熱容量、 k は熱伝導率、 T は温度、 Q_j は電流分布解析から求まるジュール発熱、 Q_q は液体窒素冷却を示し、 h は液体窒素への熱伝達係数、 T_b は液体窒素の温度 (77.3 K) である。比熱容量、熱伝導率等の各物性値には非線形性を考慮し、各時間ステップにおけるケーブル各層の温度分布を計算している。境界条件は、ケーブル最外層の保護層の表面が液体窒素に接触しているとし、

液体窒素への熱伝達係数は非線形熱伝達特性を考慮した。なお、PPLP®の比熱容量と熱伝導率は、液体窒素との混合状態を考慮した一定値とした。

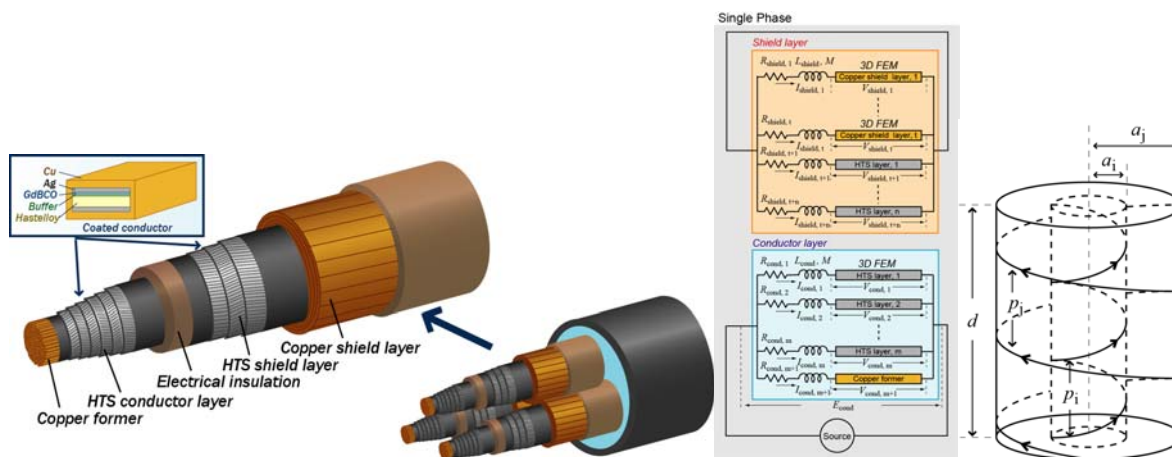


図 2.2.1-53 超電導ケーブルの保護設計と数値シミュレーションモデル

数値シミュレーションの対象とした超電導ケーブルコアの諸元を表 2.2.1-26 に示す。フォーマは銅撚り線を用いた分割集合導体であり、銅の断面積は 140 mm^2 である。超電導導体層は 4 層構成で、トータルの I_c を 3060 A とした。超電導導体層と超電導シールド層の主絶縁層は PPLP® で構成し、厚さは 6 mm である。超電導シールド層は 2 層構成で、トータルの I_c を 2700 A とした。銅シールド層は 4 層構成で、トータルの銅の断面積が 100 mm^2 である。超電導線材は厚さ 0.17 mm 、幅 4 mm であり、安定化層として厚さ $20 \text{ }\mu\text{m}$ の銅めっき加工が施されている。Y 系超電導線材の常電導転移後 (90 K 以上の温度領域) の「抵抗-温度特性」は実際の線材の測定値をプログラムに組み込んだ。

表 2.2.1-26 66 kV 級超電導ケーブルコアの諸元

項目	諸元	外径 (mm)
フォーマ	140 mm^2 分割集合銅撚り線導体	18.0
超電導導体	4 層、層間絶縁あり	20.3
絶縁層	内部半導電層 主絶縁層：PPLP®、厚さ 6 mm 外部半導電層	33.7
超電導シールド	2 層、層間絶縁あり	34.7
銅シールド	4 層、層間絶縁あり、 100 mm^2	39.2
保護層	クラフト紙、不織布	41.7 (ケーブルコア外径)

「 31.5 kA 、 2 sec 」の過電流に対する数値シミュレーションの結果を図 2.2.1-54 に示す。超電導導体層及び超電導シールド層の温度上昇 (ΔT) は常電導保護層に

比べて小さく、それぞれ 142 K 及び 160 K である。また、導体層を構成する超電導線材 1 本に流れる電流波形は図 2.2.1-55 に示す通りである。

想定される過電流が超電導線材に流れて温度が上昇した際の、線材の臨界電流特性 (I_c) の健全性を検証するため、線材単体に対する耐過電流試験を実施した⁵⁾。図 2.2.1-56 に示すように、線材を FRP 製の治具に固定した状態で低温真空容器内に配置し、伝導冷却により温度を 77 K まで下げた。この後、図 2.2.1-55 に示す電流波形の相似形状の電流を印加し、線材の温度上昇及び過電流印加前後の I_c の変化を測定した結果を図 2.2.1-57 に示す。横軸は線材に流した電流と想定電流 (図 2.2.1-55 の電流波形) との比を示している。なお、本試験で過電流を印加する 2 sec 間において線材は断熱状態と見なすことができ、周囲に液体窒素が存在する実際のケーブルよりも厳しい条件下における試験となっている。超電導線材に対して、事故時に想定される過電流を流した際の温度上昇は 170 K であり、図 2.2.1-54 の温度上昇解析結果よりも若干大きいにも関わらず I_c の低下は発生していない。また、想定電流の 1.3 倍の電流を流しても I_c に低下は見られず、図 2.2.1-54 に示したケーブルコアに対する解析結果 (温度上昇) は超電導線材にダメージが発生しない範囲内に収まっていると考えられる。以上の検討結果より、表 2.2.1-26 に示す常電導保護層を有するケーブルコアに対して短絡電流試験を実施することとした。

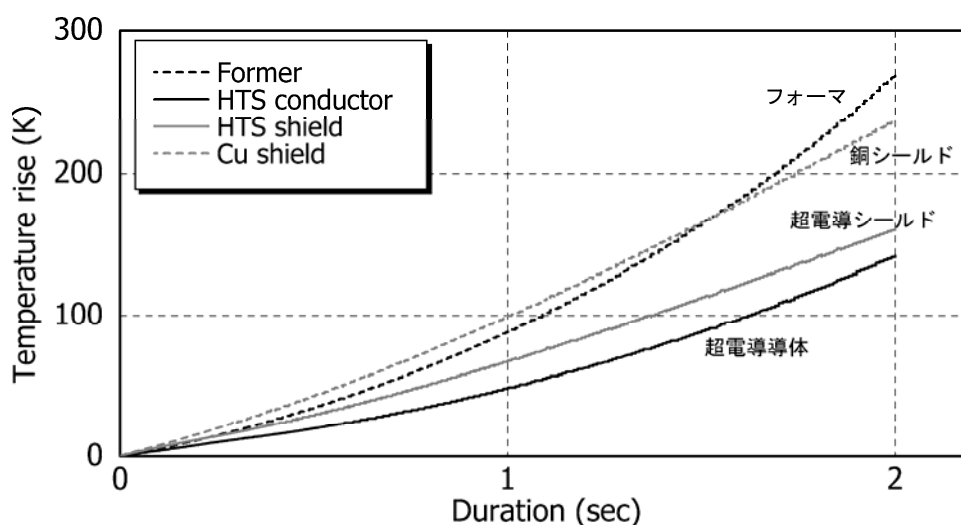


図 2.2.1-54 過電流印加時の温度上昇解析結果 (31.5 kA、2 sec)

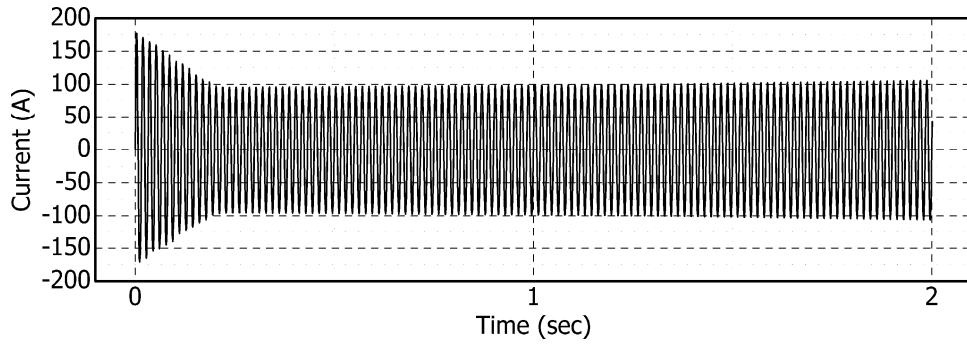


図 2.2.1-55 短絡事故時に超電導線材 1 本に流れる電流

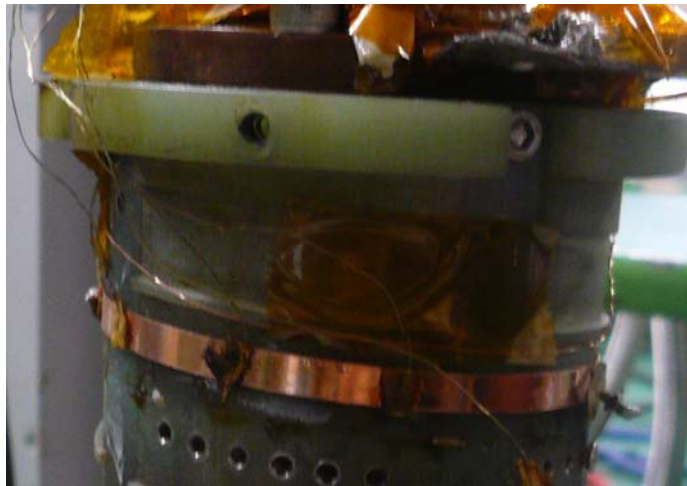


図 2.2.1-56 線材単体の耐過電流試験の概要

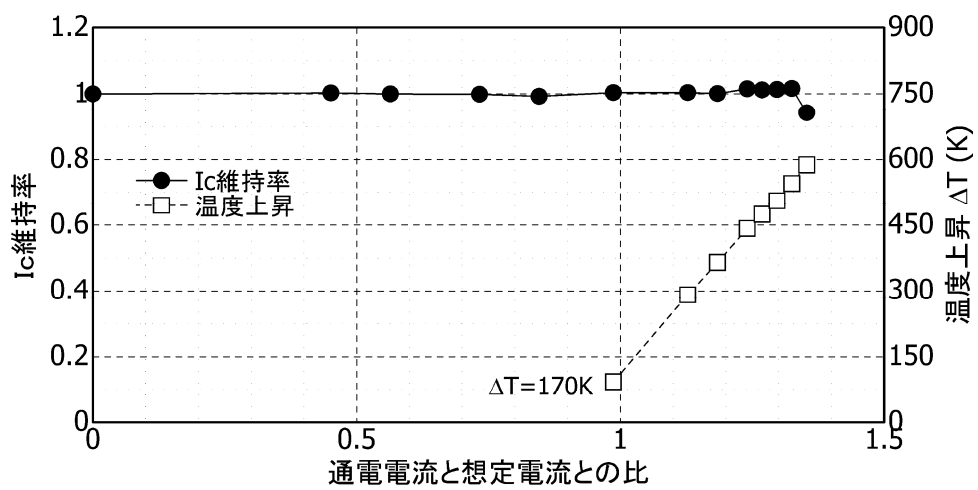


図 2.2.1-57 線材単体の耐過電流試験結果

(3) 耐過電流試験

超電導ケーブルコアに、最大「31.5 kA、2 sec」の過電流が流れても導体が健全であることを確認するため、図 2.2.1-58 に示す短絡発電機を有する試験設備を用いて、過電流が流れた際の温度上昇の確認及び過電流が超電導特性に与える影響について検証した。

過電流試験は、図 2.2.1-59 に示すように、約 2.7 m の 2 本の超電導ケーブルコアを並べ、2 本のコアのシールド層を短絡、閉回路とした状態で導体層に往復通電を行うことで、シールド層に遮蔽電流が誘起される方式とした。試験サンプルの諸元を表 2.2.1-27 に、写真を図 2.2.1-60 にそれぞれ示す。試験サンプルの臨界電流 (I_c) は、コア 1 の導体層が 3270 A、コア 2 の導体層が 3670 A、コア 1 のシールド層が 3650 A、コア 2 のシールド層が 2900 A であり、計測素子として、過電流印加時のコア内部温度上昇を計測するための熱電対、シールド層の誘導電流を計測するためのログスキーコイル及びコアの漏れ磁場を計測するためのホール素子が取り付けられている。

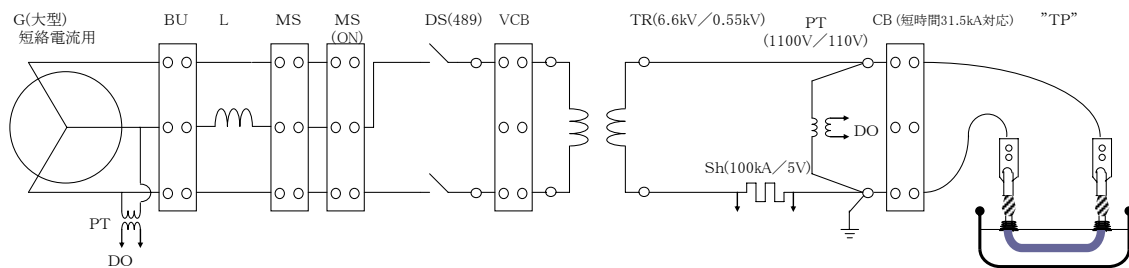


図 2.2.1-58 耐過電流試験回路の概要図

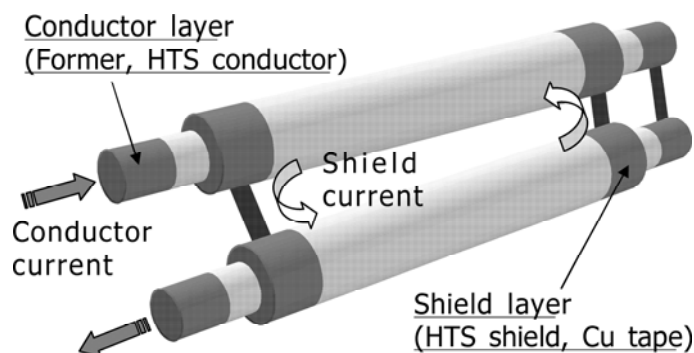


図 2.2.1-59 耐過電流試験サンプルの概要

表 2.2.1-27 耐過電流試験用ケーブルコアの諸元

項目	Core 1	Core 2
フォーマ	140 mm ² 分割集合銅撚り線導体	140 mm ² 分割集合銅撚り線導体
超電導導体	4層、4 mm 幅線材 $I_c=3270$ A	4層、2 mm 幅線材 $I_c=3670$ A
絶縁層	内部半導電層 主絶縁層：PPLP®、厚さ 6 mm 外部半導電層	内部半導電層 主絶縁層：PPLP®、厚さ 6 mm 外部半導電層
超電導シールド	2層、4 mm 幅線材 $I_c=3650$ A	2層、4 mm 幅線材 $I_c=2900$ A
銅シールド	4層、層間絶縁あり、100 mm ²	4層、層間絶縁あり、100 mm ²
保護層	クラフト紙、不織布	クラフト紙、不織布

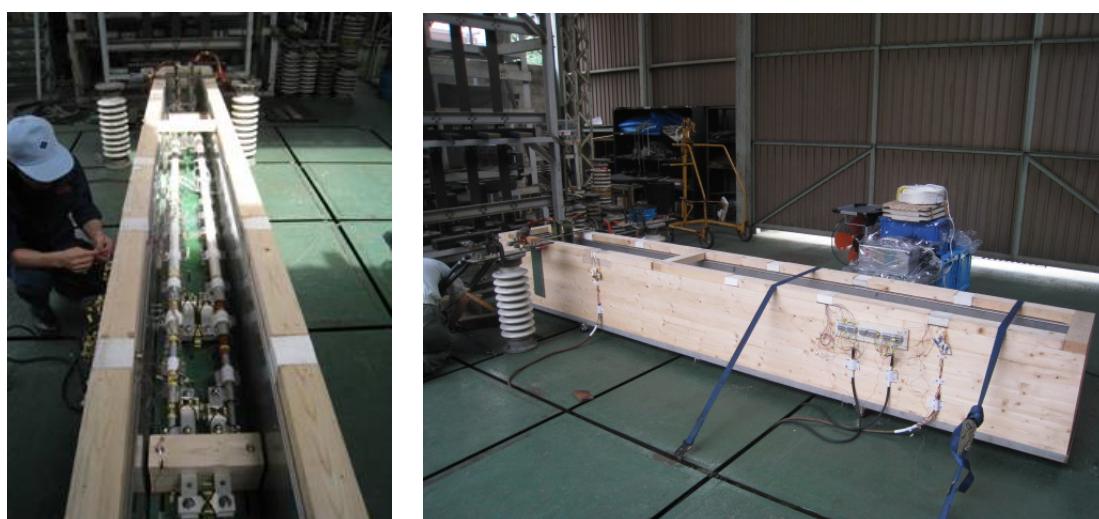


図 2.2.1-60 過電流試験サンプル及び試験場の写真

「31.5 kA、2 sec」の耐過電流試験時の導体層及びシールド層の電流波形を図 2.2.1-61 に、ケーブルコアの温度上昇を図 2.2.1-62 に示す。最大「31.5 kA、2 sec」印加時の温度上昇は、超電導導体層で約 100 K、超電導シールド層で約 120 K である。同図中には、数値シミュレーション結果（図 2.2.1-54 に示した結果）も示しており、試験結果は解析結果から想定される範囲内である。短絡電流試験後のケーブルコアの健全性を確認するために実施した臨界電流測定結果を、試験前の測定結果と合わせて図 2.2.1-63 に示す。試験前後において、2 本のコアの導体層及びシールド層すべてにおいて臨界電流特性に変化は見られず、最大「31.5 kA、2 sec」の過電流に対してケーブルコアにダメージが発生しないことを確認した。

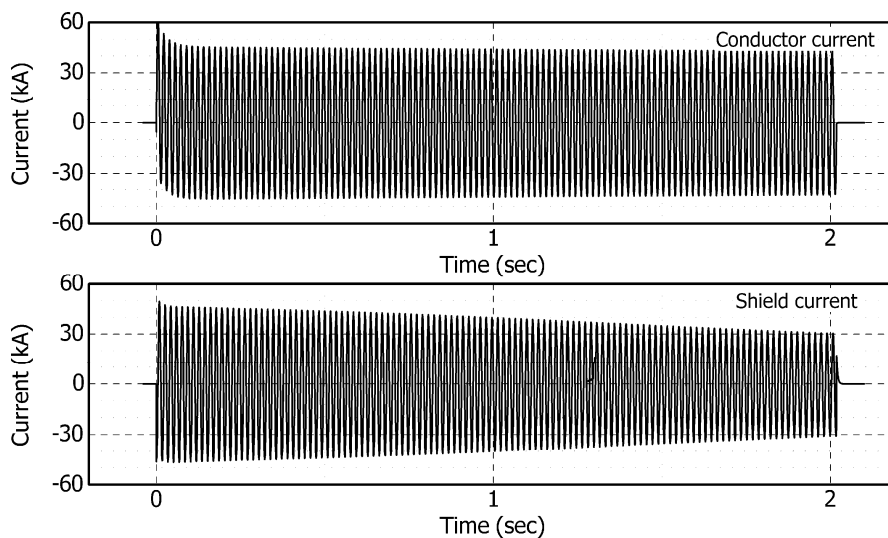


図 2.2.1-61 過電流試験時の電流波形

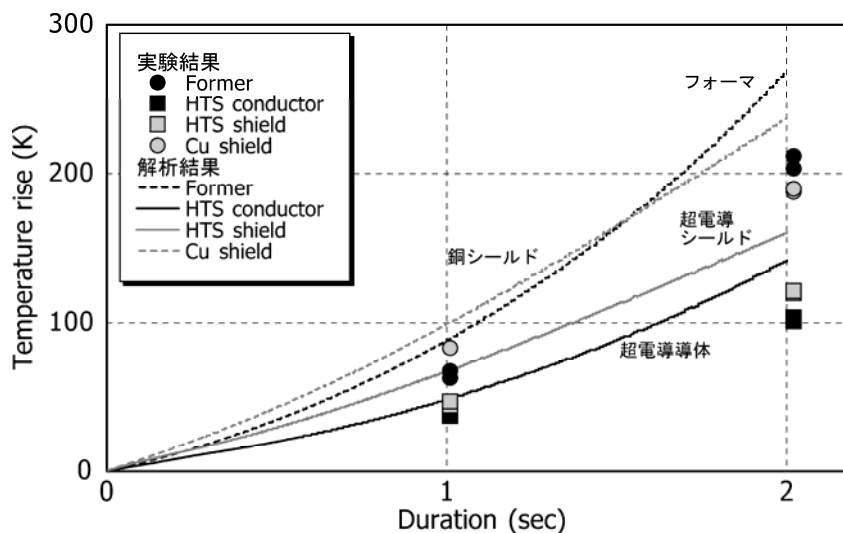


図 2.2.1-62 過電流試験時の導体温度上昇と解析結果との比較
(実験結果の各 2 点はコア 1 とコア 2 の結果を示す)

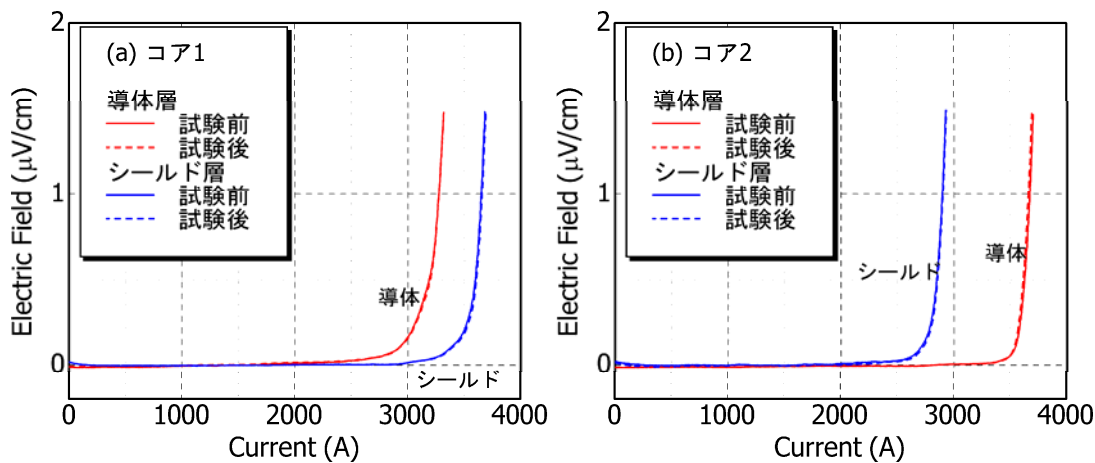


図 2.2.1-63 過電流試験前後の臨界電流測定結果

(4) 短絡事故時の電磁力の影響検討

超電導シールド層を有する三心一括型ケーブルにおいて、定常時は、超電導導体層に流れる送電電流とほぼ同じ大きさで逆位相の電流が超電導シールド層に誘導されて磁気遮蔽を実現するため、ケーブルコア間に発生する電磁力は無視できる。一方で、臨界電流を超える事故電流が流れた場合には、超電導シールド層が常電導転移し、図 2.2.1-61 に示したようにシールド電流が減衰するため、コア外部への漏れ磁場が発生してコア間に電磁力が発生する。この電磁力による影響が懸念されるため、シミュレーション結果を基に検討を行なった。

漏れ磁場が最大となるのは、シールド電流の減衰が大きい遮断直前であり、短絡事故時 (31.5 kA、2 sec) の電流波形解析結果の遮断直前の拡大図を図 2.2.1-64 に示す。本図において、導体電流(A)とシールド電流(B)との和、つまり非遮蔽電流(C)に起因した漏れ磁場が発生すると想定される。前項の耐過電流試験において、コア直上に取り付けたホール素子によって測定した漏れ磁場の大きさは、この非遮蔽電流(C)によって発生する磁場の大きさと同等であることを確認しており、以下の議論では、最大 20 kA_{peak} の非遮蔽電流によって発生する漏れ磁場の影響を検討した。

図 2.2.1-65 に示すように、三相のうち二相間で短絡事故が発生した場合、事故相 (W, V 相) には位相が反転した事故電流が流れると想定され、2 コア間に反発力が発生する。上述のように、非遮蔽電流 20 kA_{peak} に対して 2 コア間に発生する反発力 (側圧) を計算した結果、1860 N/m となった。本側圧値は、これまでの開発実績から考えて、ケーブルの特性に影響を及ぼさない範囲に収まっていると考える。

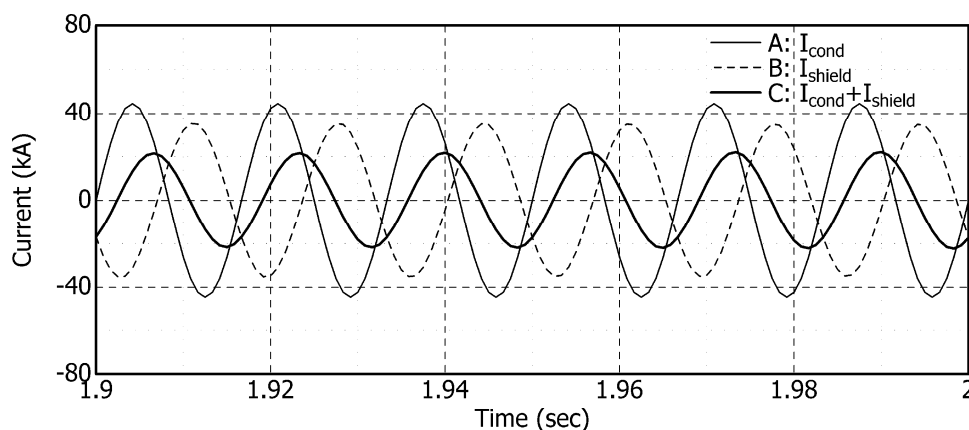


図 2.2.1-64 短絡事故時 (31.5 kA、2 sec) の電流波形解析結果 (拡大図)

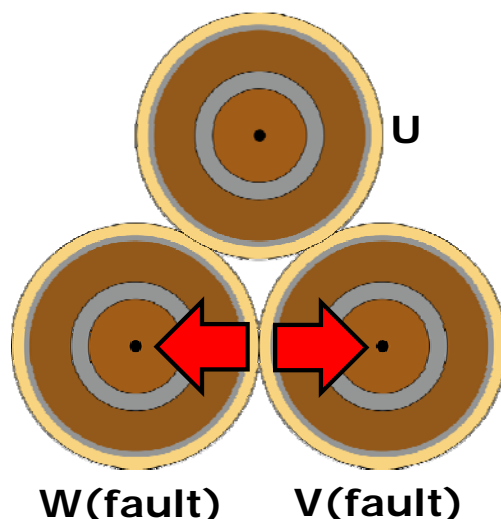
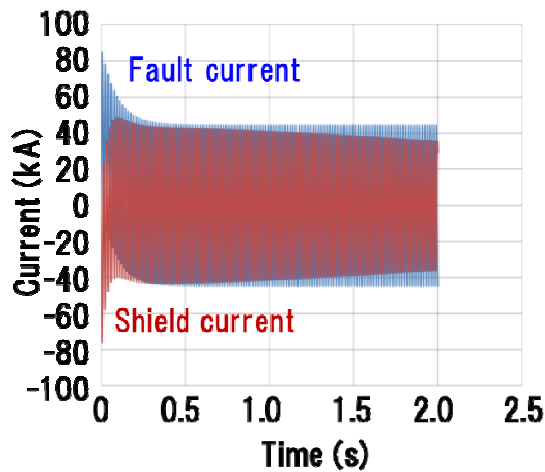


図 2.2.1-65 二相短絡時のモデル

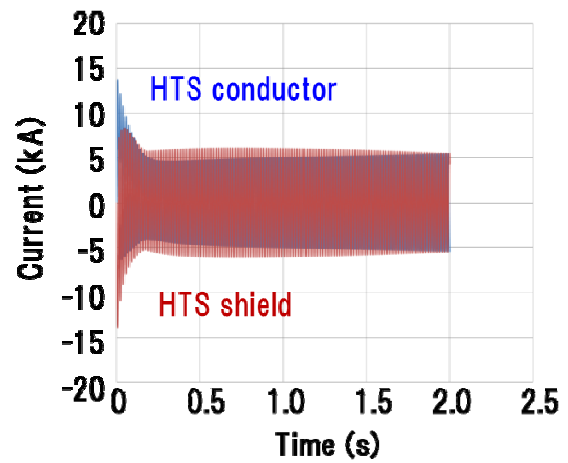
平成 23、24 年度は、超電導線材に発生する電磁力を詳細に評価するため、事故電流（31.5 kA_{rms}、2 sec、直流減衰時定数 90 ms）に対する電流分布と電磁応力を解析し、さらに素線の電流裕度を実験により評価した。電流分布の解析結果を図 2.2.1-66 に示す。HTS 導体層（高温超電導導体層）と HTS シールド層（高温超電導シールド層）の素線に流れる事故電流のピーク値はそれぞれ 340 A と 358 A である。

図 2.2.1-66 から素線にかかる剥離方向（正）と圧縮方向（負）の電磁応力を解析した結果を図 2.2.1-67 に示す。事故時に超電導導体層と超電導シールドの線材にかかる剥離方向の電磁応力は最大で約 20 kPa であり、先行研究で報告されている剥離限界値数 MPa に対して 2 桁小さい。よって、事故時に電磁応力による超電導特性の劣化はまず起こらない。

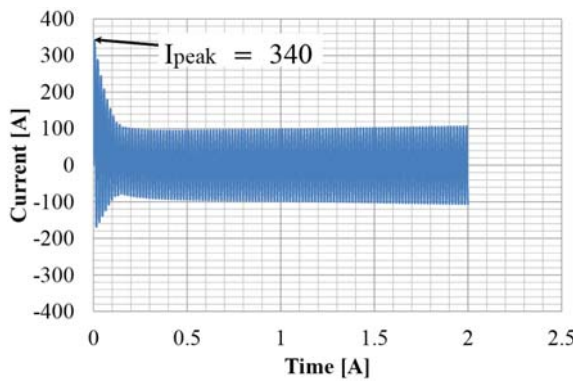
超電導導体層と超電導シールド層の線材が、図 2.2.1-66（c、d）に示す電流に対してどれだけの電流裕度を有しているか検証した結果を図 2.2.1-68 に示す。超電導導体層と超電導シールド層の線材の電流裕度はそれぞれ約 1.3 と 1.2 倍であり、十分な裕度を有していることが検証された。



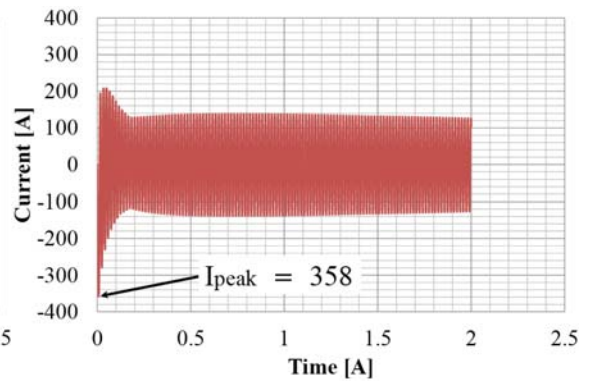
(a) 事故電流と遮蔽電流



(b) HTS 導体層と HTS シールド層

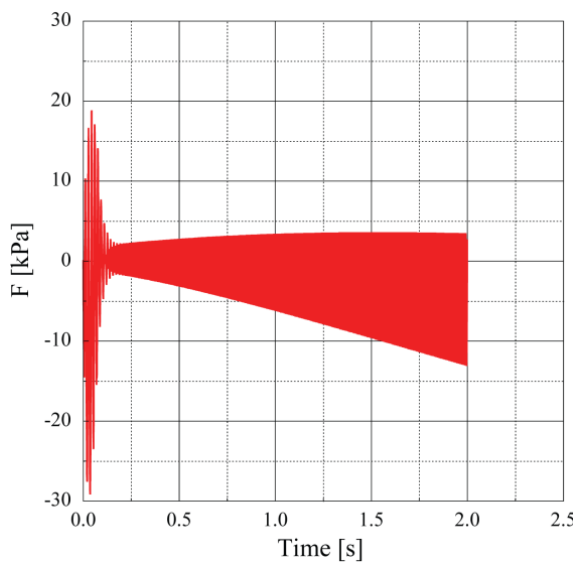


(c) HTS 導体層の素線電流

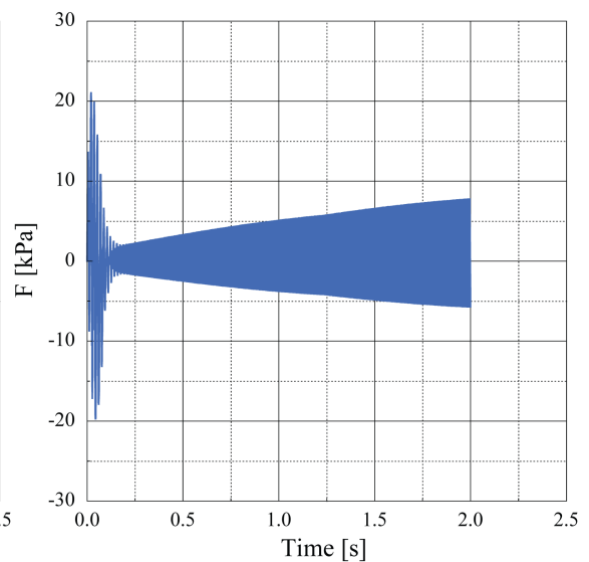


(d) HTS シールド層の素線電流

図 2.2.1-66 事故時の電流分布

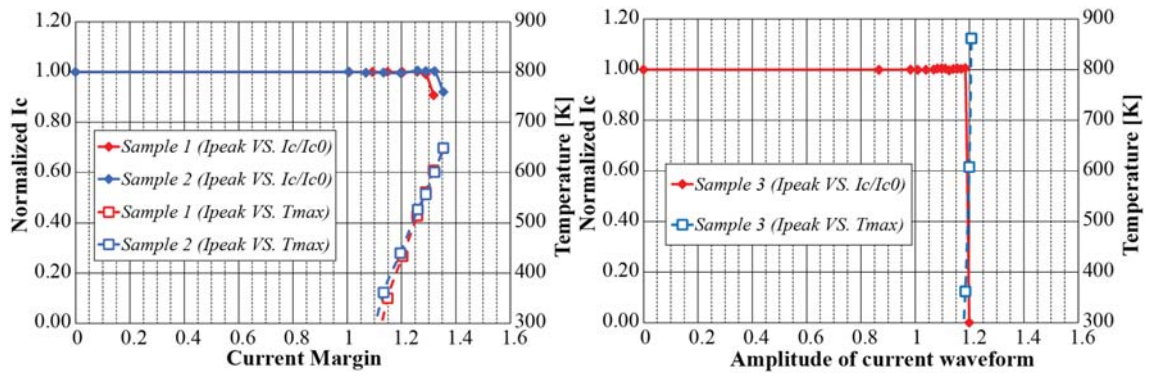


(a) HTS 導体層の素線



(b) HTS シールド層の素線

図 2.2.1-67 事故時の電磁応力



(a) HTS 導体層の素線

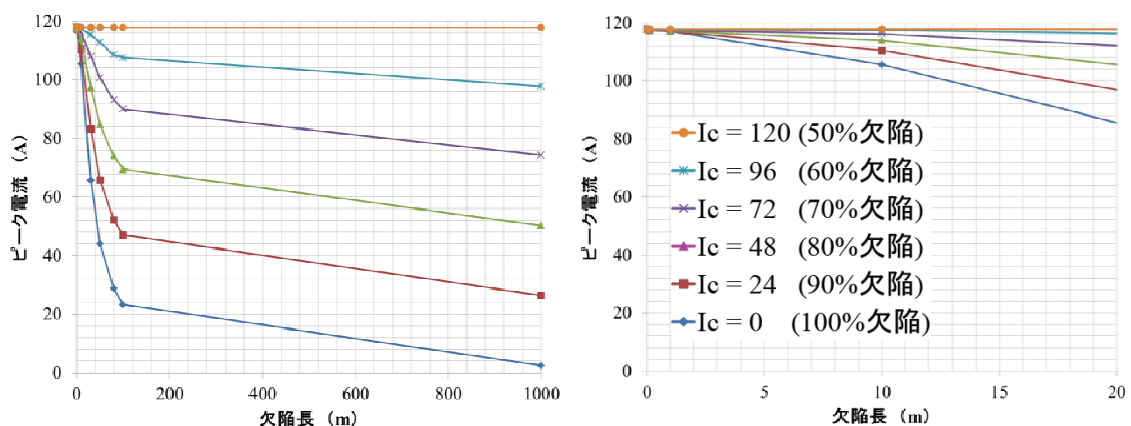
(b) HTS シールド層の素線

図 2.2.1-68 短絡事故に対する電流裕度

(5) 定常時の電磁力の影響検討

a 局所的な I_c 特性のばらつきを想定した定常時及び事故時通電・伝熱特性解析

平成 23、24 年度は、超電導線材の局所的欠陥が定常時の通電特性に及ぼす影響を解析的に検証した。ケーブル長は 1 km とし、超電導導体層 4 層を 1 層（超電導線材 15 本）に簡略化したモデルに対して解析を行った。15 本の超電導線材の誘導成分と抵抗成分を考慮した並列回路モデルを構築し、1 本の超電導線材に局所的な I_c 特性欠陥が生じたケースについて解析を行った。1 層分の定格電流は 1.25 kA_{rms} (5 kA_{rms} の 4 分の 1) とした。健全部の線材 I_c は 240 A@77K とし、欠陥レベルはパラメータ化して 0(100%)、24(90%)、48(80%)、72(70%)、96(60%)、120 A(50%)@77 K とした。欠陥長は 1 mm~1 km の間で設定した。局所欠陥が存在する超電導線材のピーク電流と欠陥長との関係を図 2.2.1-69 に示す。なお、欠陥がない場合には超電導線材 1 本あたりのピーク電流は約 117A である。図 2.2.1-69 の結果を基に欠陥部全体の発熱（交流の 1 周期平均）と欠陥長との関係を計算した結果を図 2.2.1-70 に示す。ケーブル長 1 km に対して欠陥レベルが大きいほど、また欠陥長が長いほど健全な線材に転流しやすくなる。しかし、欠陥長が 10 m 以下（全長の 1%以下）では、0A の欠陥でも殆ど転流が生じない。図 2.2.1-70 より、欠陥部全体の発熱は欠陥長が 10~50 m において最大となる。以上の検討結果から、局所欠陥による発熱がホットスポットを発生させ、定常運転に悪影響を及ぼす可能性があることが分かる。



(a) 欠陥長 1mm~1km

(b) 欠陥長 1mm~20m 拡大

図 2.2.1-69 局所欠陥が存在する素線のピーク電流

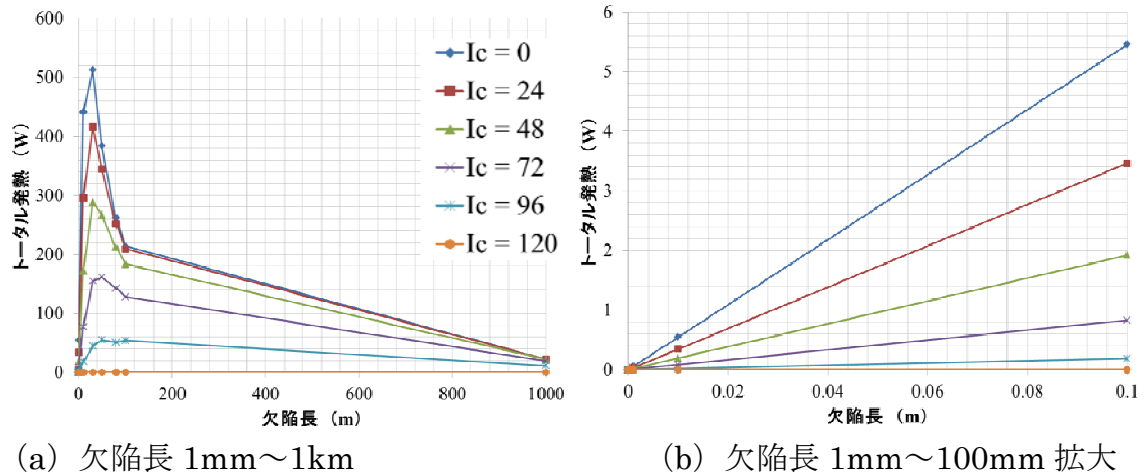
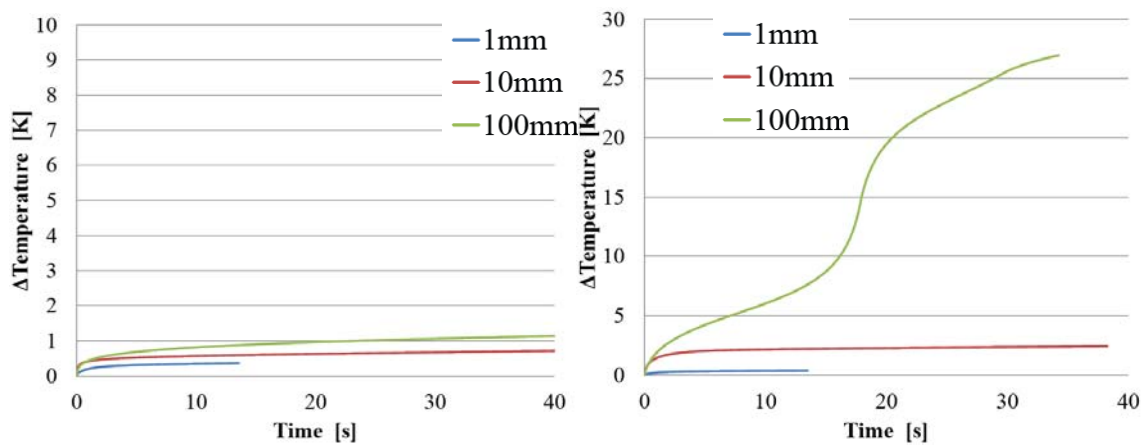


図 2.2.1-70 欠陥部全体の発熱

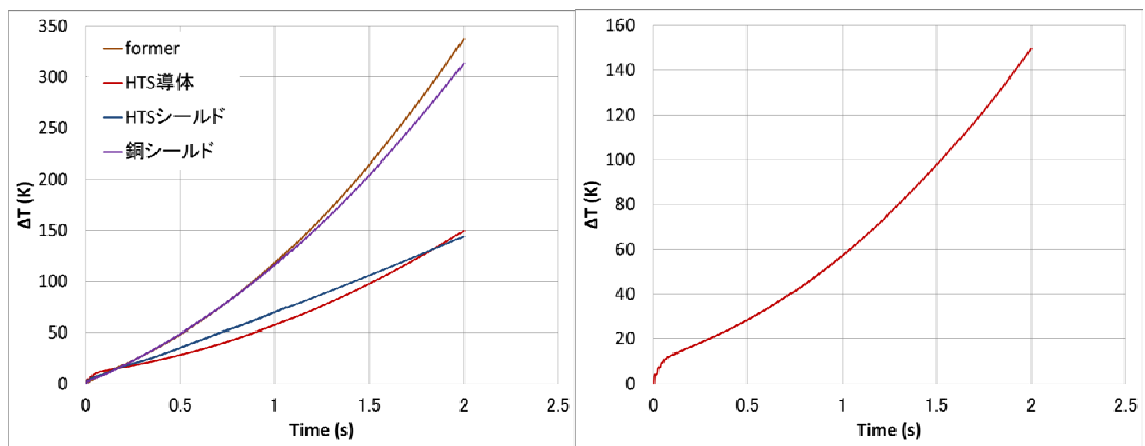
通電解析の結果をもとに、欠陥長 1 mm, 10 mm, 100 mm の場合について伝熱解析を行った。各欠陥長における欠陥部全体の発熱は 0.02 W、0.2 W、2 W である。定常時の伝熱解析は 3 次元有限要素法により欠陥部周辺をモデル化し、定常時の交流損失（例、負荷率 0.5 : 1.6 W/m）とケーブル最外層表面の液体窒素冷却を考慮した。メッシュ分割は欠陥素線と隣接する素線との間に熱伝導があるかない場合についてそれぞれ行った。健全部の線材 I_c は 240 A@77K とし、欠陥部は想定できる最小の I_c を n 値モデルより算出し 48(80%)@77K とした。欠陥長は 1 mm, 10 mm, 100 mm とし、初期温度は 77 K とした。局所欠陥が存在する素線の最高温度上昇と欠陥長との関係を図 2.2.1-71 に示す。素線間に熱伝導がある場合は欠陥素線の発熱が健全素線に速やかに移り最高到達温度は 100 mm 長の欠陥において 2 K 以下である。しかし、素線間に熱伝導がない場合は欠陥素線にホットスポットが生じやすくなり、100 mm 長の欠陥では熱暴走となった。実用ケーブルにおいて素線間の熱伝導が良好でない可能性があるため、定常時の熱暴走を防ぐ局所欠陥の上限は 10 から 100 mm の間に存在する。



(a) 欠陥素線と隣接素線に熱伝導がある場合と (b) 熱伝導がない場合

図 2.2.1-71 欠陥部の最高温度上昇

事故時の通電・伝熱解析は、平成 23 年度までに開発してきた 3 次元有限要素法と回路モデルを基に、ケーブル長を 200 m としてケーブル構造をモデル化した。解析は局所欠陥のないモデルとあるモデルについて比較した。局所欠陥は超電導導体層 (4 層) の 1 層目のうち 1 本について設定し、欠陥長は定常時に熱暴走しない 10 mm とした。健全部の線材 I_c は 240 A (@77 K, s.f.)、欠陥部は 48(80 %) (@77 K, s.f.) とした。事故電流は 31.5 kA_{rms}、2 sec とし、直流減衰時定数を 90 ms とした。初期温度は 77K とした。局所欠陥のないモデルとあるモデルについて、事故時の各層と欠陥素線の最高温度上昇を図 2.2.1-72 に示す。10 mm の欠陥において欠陥ありとなしによる温度上昇の差が確認されなかった。これは事故時の短絡電流が殆ど銅保護層に流れるためである。



(a) 各層

(b) 欠陥素線

図 2.2.1-72 事故時の最高温度上昇

b 局所的な n 値特性のばらつきを想定した定常時通電・伝熱特性解析

次に、局所的な低 n 値線材について解析評価を行った。ケーブル長を 1 km とし、超電導層（4 層）の 1 層目の線材 15 本についてモデル化した。超電導特性は n 値モデルとしてモデル化し、15 本の線材の誘導成分と抵抗成分を考慮した並列回路モデルを構築した。1 層分の定格電流は 1.25 kA_{rms}（5 kA_{rms} の 4 分の 1）とした。健全部の n 値は 30 とし、欠陥部はパラメータ化して 20, 10, 5 とした。欠陥長は 1 mm～10 m の間から設定した。局所欠陥が存在する素線のピーク電流と欠陥長との関係を図 2.2.1-73 に示す。なお、欠陥がない場合は素線あたりのピーク電流は約 118 A である。図 2.2.1-73 の結果を基に欠陥部全体の発熱（交流の 1 周期平均）と欠陥長との関係を図 2.2.1-74 に示す。

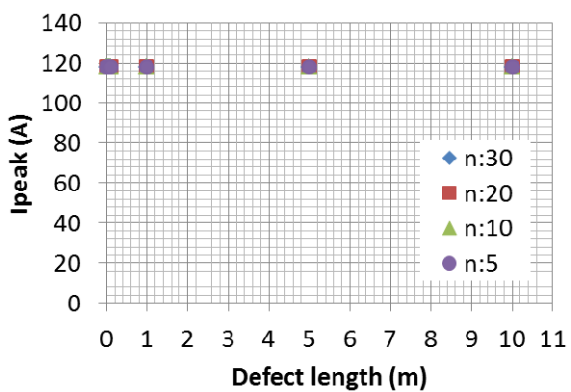


図 2.2.1-73 欠陥素線のピーク電流

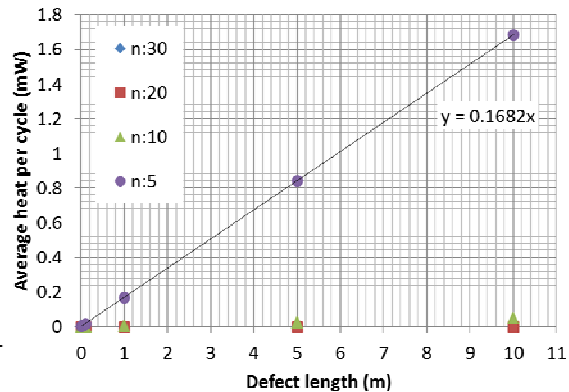


図 2.2.1-74 欠陥部全体の発熱

図 2.2.1-73 より、n 値欠陥を 10 m（ケーブル全長の 1%）まで想定して解析を行った結果、欠陥素線から健全素線への転流は起こらなかった。これは、欠陥部の抵抗性電圧（1 μ V/cm 未満）が極めて低いため、誘導性電圧が支配的となり電流転流は発生しなかったと考えられる。また、欠陥長がケーブル全長にまで広がったとしても、抵抗性電圧（1 μ V/cm 未満）は小さく電流転流は生じないと予想される。図 2.2.1-74 より、n 値欠陥による発熱は数 mW 程度であり、 I_c 欠陥の評価結果に比べてかなり小さく、仮に全長 1 km の n 値がすべて 5 だとしても発熱（周期平均）は 0.17 W 程度である。よって、n 値の局所欠陥は定常運転時において、熱暴走を引き起こす可能性は極めて低いと考えられる。

(6) まとめ

- 計算機シミュレータを用いて過電流通電時の温度上昇解析を行い、内径 150 mmφの管路に収納可能なケーブルの保護設計を行った。
- 過電流保護設計の妥当性を確認するため、ケーブルコアを作製して短絡試験を行った結果、ケーブルコア内の温度上昇はシミュレーション結果から想定される範囲内であり、最大「31.5 kA、2 sec」の過電流に対してケーブルコアにダメージが発生しないことを確認した。
- 二相短絡事故（31.5 kA、2 sec）を想定して、ケーブルコア間に発生する電磁力の検討を行った。詳細解析の結果、線材に発生する剥離応力は 20kPa 程度であり、剥離が発生する可能性は低い。
- 超電導線材の局所的な特性劣化を考慮した伝熱解析の結果、 I_c 特性の局所劣化は定常時にホットスポットを発生させる可能性があり、線材特性の均一性が通電時安定性を確保するための重要なポイントとなる。

2.2.1-5 三心一括ケーブル技術（住友電気工業）

(1) 研究開発目標

検証用超電導ケーブルの最終設計に際しては、前項 2.2.1-2 項の交流損失低減技術、2.2.1-3 項の耐過電流設計技術を基にケーブル構造を決定するが、それら以外に考慮すべき点として、ケーブル製造時のドラム曲げや三心撚りによってケーブルに機械的な応力（引張り、曲げ）が加えられるため、その応力に対してもケーブルの健全性が保たれることが重要となる。さらに、両端末を固定した状態で初期冷却を行う三心一括型ケーブルにおいては、室温から液体窒素温度まで冷却した際に発生する約 0.3 %の熱収縮に対するケーブル特性の劣化が懸念される。

本項では、三心一括型ケーブルの製造から初期冷却までの工程において、ケーブル（Y系超電導線材）が経験する機械的な応力に対する健全性を検証するため、下記の試験を実施した結果について述べる。

- ・ 実際の製造ラインを通した三心ケーブルコアの試作・検証
- ・ 初期冷却を模擬した三心ケーブルコアの熱機械特性検証試験

(2) 三心ケーブルコアの試作・検証

各種要素試験により決定した試作用三心一括型ケーブルの設計を表 2.2.1-28 に示す。フォーマは分割集合導体であり、銅の断面積は 140 mm²である。超電導導体層は 2 mm 幅の Clad 基板線材を用いて構成した 4 層構造である。なお、超電導導体層に使用する線材幅は 4 mm 幅を本命としているが、スリット技術の改善によって 2 mm 幅線材を採用する可能性も残っているため、機械的な特性に劣る 2 mm 幅線材を用いた試作を実施することにした。超電導導体層と超電導シールド層の間の絶縁層は PPLP®-A で構成し、厚さは 6 mm である。超電導シールド層は 4 mm 幅の Clad 基板線材を用いて構成した 2 層構造である。銅シールド層は 4 層で構成され、銅の総断面積が 100 mm²である。Y系超電導線材には安定化層として銅がめっき加工されており、めっき厚が 20 μm である。なお、ケーブルコア 3 心のうち、超電導線材が入っているのは 1 心（超電導コア）のみであり、残りの 2 心は機械強度特性を揃えるために基板を同幅にスリットしたダミー線材を用いて構成したダミーコアである。また、超電導コアの各超電導層に使用した Y系超電導線材は 3 本であり（超電導導体層(4層)：計 12 本、超電導シールド層(2層)：計 6 本）、残りの線材は機械特性及び表面摩擦係数を揃えるために基板を同幅にスリットしたダミー線材に同厚の銅めっきを施した線材を用いている。

上記設計に対して試作した「10 m 三心ケーブルコア」の試作概略工程と試作時の状況写真を図 2.2.1-75 に示す。本試作は超電導ケーブルの製造に使用する実際のラインを通じて行った。超電導線材集合工程において、2 mm 幅に細線化した線材のギャップ管理等に問題がないことを確認した。

表 2.2.1-28 試作用三心一括型超電導ケーブルの設計（導体 4 層、シールド 2 層）

項目	諸元	外径 (mm)
フォーマ	140 mm ² 分割集合銅撚り線導体	18.0
超電導導体	4 層、2mm 幅 Clad 基板線材 層間絶縁あり	20.3
絶縁層	内部半導電層 主絶縁層：PPLP [®] 、厚さ 6 mm 外部半導電層	33.7
超電導シールド	2 層、4mm 幅 Clad 基板線材 層間絶縁あり	34.7
銅シールド	4 層、層間絶縁あり、100 mm ²	39.2
保護層 (ケーブルコア外径)	クラフト紙、不織布	41.7
三心撚り (三心コア外径)	緩み無し三心集合	89.8

【製造概略工程】

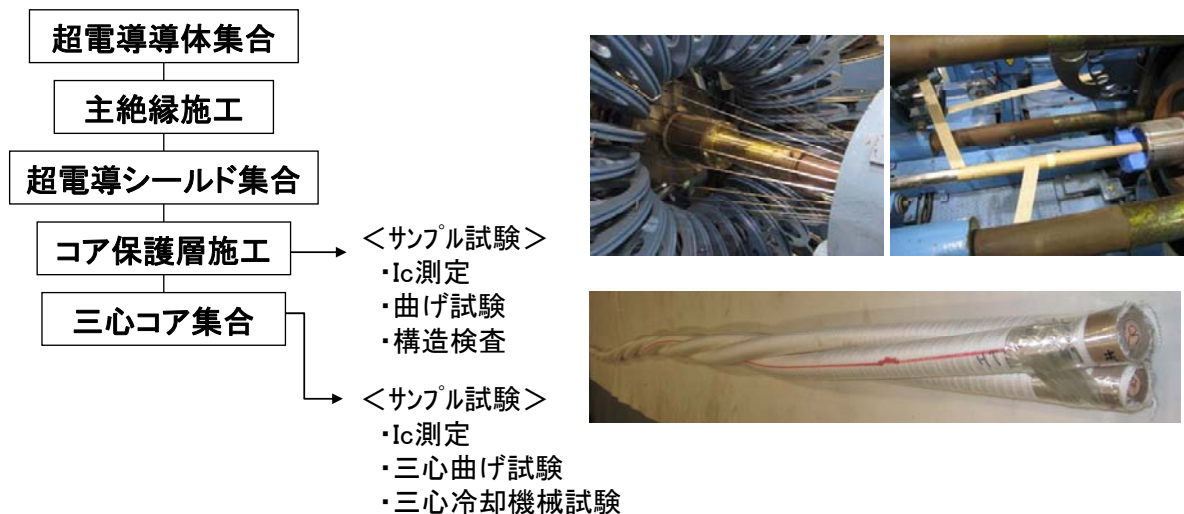


図 2.2.1-75 10 m 三心ケーブルコアの試作概略工程と試作時の写真

●単心ケーブルコア検証結果

コア保護層施工後に切り出した 2.5 m 単心ケーブルコアの I_c 測定を行った結果、全ての線材で I_c の低下がないことを確認した。本結果から、単心コア製造工程において、2 mm 幅及び 4 mm 幅に細線化した Clad 基板線材の特性が低下しないことを確認した。

図 2.2.1-76 は、 I_c 測定終了後の 2.5 m 単心ケーブルコアに対して実施した曲げ試験結果である。曲げ試験では、所定の直径を有する曲げ治具に対して 2 回の往復曲

げを行った後に直状に戻した状態で I_c 測定を実施した。なお、縦軸はケーブル化後（曲げ試験前）に測定した I_c に対する曲げ試験後の I_c の維持率を示しており、各層 3 本の超電導線の維持率の平均値で示している。試験結果から分かるように、試作したコアは 1500 mmφ の曲げに対しても I_c 低下が生じることはなく、十分な機械特性を有していることが確認された。

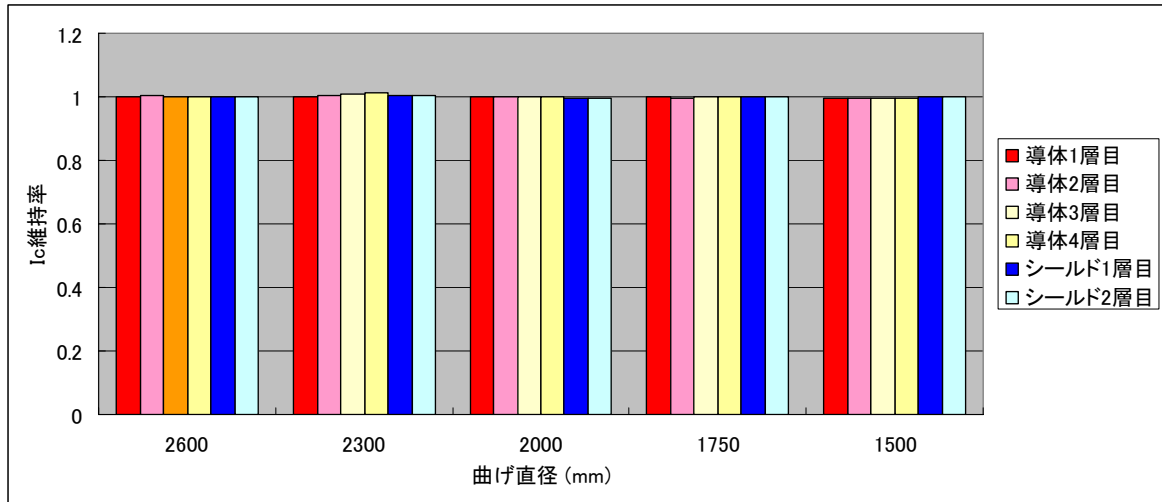


図 2.2.1-76 単心ケーブルコアの曲げ試験結果

●三心ケーブルコア検証結果

三心撚り工程後に切り出した 7 m 三心ケーブルコアの I_c 測定を行った結果、全ての線材で I_c の低下がないことを確認した。本結果から、三心コア製造工程において、2 mm 幅及び 4 mm 幅に細線化した Clad 基板線材の特性が低下しないことを確認した。

図 2.2.1-77 は、 I_c 測定終了後の 7 m 三心ケーブルコアに対して実施した曲げ試験結果である。曲げ試験では、2300 mm φ の直径を有するドラムに対して 2 回の往復曲げを行った後に直状に戻した状態で I_c 測定を実施した。なお、縦軸は曲げ試験前に測定した I_c に対する曲げ試験後の I_c の維持率を示しており、各層 3 本の超電導線の維持率の平均値で示している。試験結果から、試作した三心コアは 2300 mm φ の曲げに対して I_c 低下が発生しないことが確認された。140 mm φ のケーブルに対する出荷試験で規定されている曲げ直径は 2500 mm φ（ケーブル外径の 18 倍）程度であり、十分な機械特性を有していることが確認された。

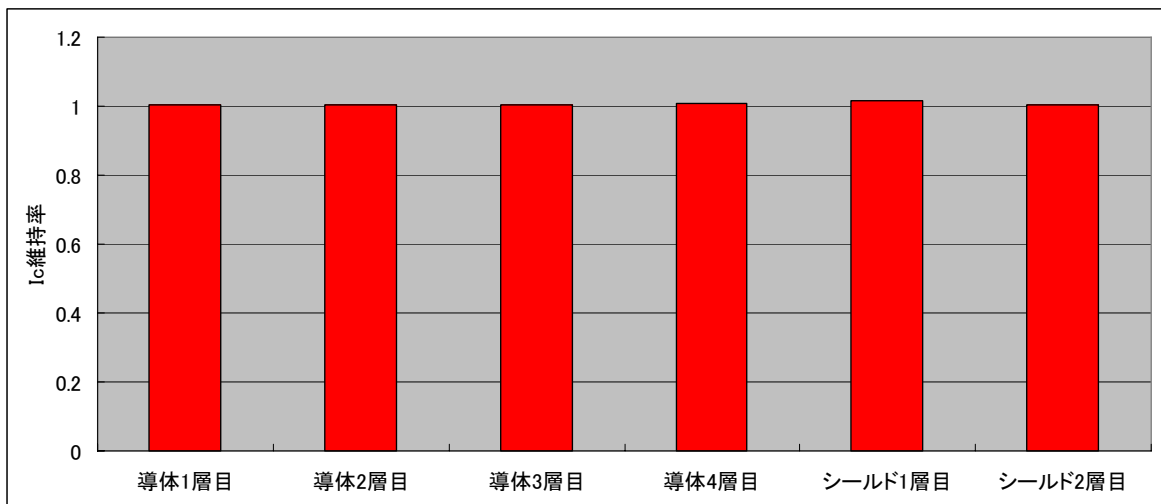


図 2.2.1-77 三心ケーブルコアの 2300 mm φ曲げ試験結果



図 2.2.1-78 三心ケーブルコアの曲げ試験

(3) 三心ケーブルコアの熱機械特性検証試験

ケーブルは室温から液体窒素温度に冷却すると約 0.3 %の熱収縮を起こす。本プロジェクト開始時点では、三心ケーブルを弛ませて冷却時の熱収縮を弛みで吸収する方法が検討されてきた。一方、本プロジェクトでは、150 mm φ管路に適用するケーブルをめざしており、そのコンパクト化が求められている。これまでの設計検討の結果、従来通り三心を弛ませる構造では、ケーブルサイズをコンパクトにすることが難しく、三心を弛ませないことを前提にケーブル設計を進めている。三心を弛ませず、かつ端末を固定した状態においてケーブルを室温から冷却すると、ケーブルコアに熱収縮による引張力が印加される。ここでは、この引張力を試作した三心ケーブルコアを用いて実測するとともに、熱収縮に対するケーブル性能の健全性について検証した。

試験装置の概略図及び概観写真を図 2.2.1-79 及び図 2.2.1-80 に示す。三心コアサンプルは試験容器の両端に固定されており、サンプルを液体窒素中に浸漬した状

態で試験容器を引っ張ることにより引張試験を行う。試験容器部には、引張試験時に容器自身が分担する張力を抑制するためにベローズが 2 箇所挿入されており、0.3 % 伸びに相当するサンプル引張時に容器が分担する張力は約 20 kg である。上記張力は、サンプルに発生する張力約 3 t レベルに比べ無視できるほど小さい値である。なお、試験時の引っ張り量は 1.5 mm ピッチのボルトナットの回転数により管理した。試験状況を図 2.2.1-81 に示す。

液体窒素中における引っ張り試験結果を図 2.2.1-82 に示す。液体窒素中において最大 0.35 % の引っ張り歪みをサンプルに印加したが、線材の I_c 特性に低下は見られなかった。また、0.3 % 熱収縮に相当する引張力は約 3 t であり、フォーマの機械特性から想定される値とほぼ同等であることを確認した。なお、本サンプルで確認した引張力は直線状態での値であり、実際の長尺ケーブルでは曲がり及びオフセット等が存在することから、実際のケーブルに発生する引張力は上記値よりも小さくなると予想される。

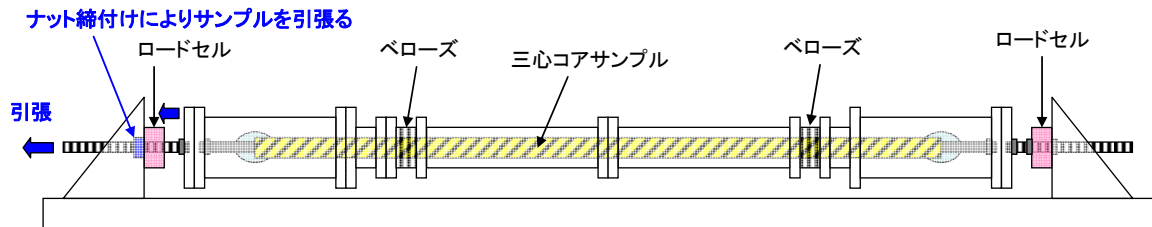


図 2.2.1-79 三心コア引張試験装置の概略図



図 2.2.1-80 三心コア引張試験装置の概観写真



図 2.2.1-81 三心コアサンプルの LN₂ 中での引張試験状況

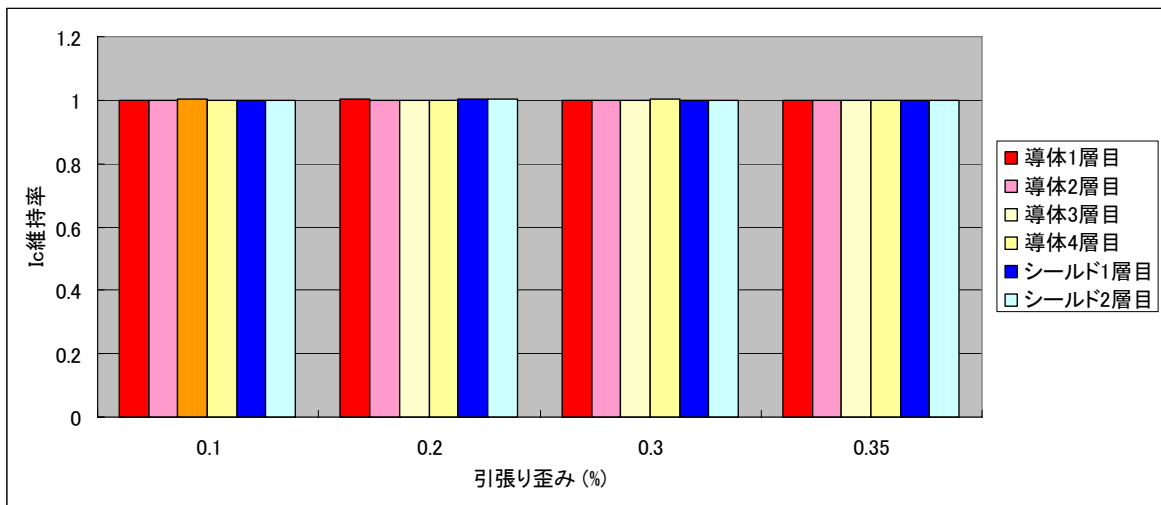


図 2.2.1-82 三心コアサンプルの熱機械試験結果

(4) まとめ

- ・ 実際の製造ラインを通した三心ケーブルコアの試作により、2 mm 幅及び 4 mm 幅線材ともに製造工程において特性が低下しないことを確認した。
- ・ 試作した単心ケーブルコア及び三心ケーブルコアに対して曲げ試験を実施した結果、十分な機械特性を有することを確認した。
- ・ ケーブル両端末を固定した状態で冷却した際に発生する熱収縮によって、ケーブルの特性が低下しないことを確認した。

引用論文リスト

- (1) X. Wang, H. Ueda, A. Ishiyama, M. Ohya, H. Yumura, N. Fujiwara, “Numerical Simulation on Fault Current Condition in 66 kV Class RE-123 Superconducting Cable”, *Physica C: Superconductivity*, vol. 470, pp. 1580–1583 (2010)
- (2) A. Ishiyama, H. Momotari, X. Wang, M. Arai, H. Ueda, M. Ohya, K. Ohmatsu, N. Fujiwara, “Current Margin Against the Fault Current in REBCO Coated Conductors”, *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*, vol. 21, no. 3, pp. 3033–3036 (2011)
- (3) X. Wang, A. Ishiyama, M. Ohya, N. Fujiwara, “Over-Current Characteristics of 66-kV RE123 HTS Power Cable”, *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*, vol. 21, no. 3, pp. 1013–1016, (2011)
- (4) Xudong Wang, Kentaro Kojima, Masaya Kanemitsu, Atsusi Ishiyama, Masayoshi Ohya, Kazuya Ohmatsu, Osamu Maruyama, Takeshi Ohkuma, “Current margin of 66 kV class HTS power cable against fault current,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 22, no. 3, 5800604, (2012)
- (5) Xudong Wang, Atsushi Ishiyama, Masayoshi Ohya, Osamu Maruyama, Takeshi Ohkuma, “Overcurrent tests and numerical simulations on a 66-kV-class RE123 high-temperature superconducting model cable,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 22, no. 3, 5800904, (2012)
- (6) X. Wang, A. Ishiyama, M. Ohya, O. Maruyama, T. Ohkuma, “Numerical analyses of the electromagnetic force acting on high-temperature superconducting power cables due to fault current,” *Superconductor Science and Technology*, vol. 25, no. 5, 054018, (2012)
- (7) Xudong Wang, Kentaro Kojima, Masaya Kanemitsu, Atsusi Ishiyama, Masayoshi Ohya, Kazuya Ohmatsu, Osamu Maruyama, Takeshi Ohkuma, “Current margin of 66 kV class HTS power cable against fault current,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 22, no. 3, 5800604, (2012)

2.2.1-6 中間・終端接続技術（住友電気工業）

(1) 研究開発目標

大電流・低損失超電導ケーブルシステムの実現のためには、超電導ケーブルの開発だけでなく、それと常電導機器（送電線、遮断器、変圧器等）と接続する終端接続部の開発に加え、一般的に数 km～数十 km の電力送電線路においてケーブル間をマンホール内にて接続する中間接続部の開発が不可欠である。

しかしながら、これまでに 5 kA 級の大電流高温超電導機器向けの終端接続部及び中間接続部の開発が行なわれた実績は殆どなく、本項では大容量接続技術の開発を行った結果について述べる。

終端接続部及び中間接続部の特徴をまとめると、以下のように記述できる。

- ▶ 電気的特性：超電導部と常電導部との電気的な接続部には接続抵抗が存在する。ここで発生するジュール熱がケーブル部に伝達し、ケーブルの温度を上昇させて常電導転移させることなく安定に通電できる必要がある。
- ▶ 熱的特性：接続する外部常温機器からの侵入熱や上述した接続抵抗による発熱等、終端接続部はケーブル部と比べて熱損失が大きくなる箇所である。特に極低温部から常温部へ電気を引き出す電流リードからの侵入熱は大きく、その侵入熱の低減が重要な課題である。
- ▶ 機械的特性：超電導ケーブルシステムが室温から液体窒素温度まで冷却された際に発生する熱収縮によりケーブル部に引張力が発生するため、終端接続部及び中間接続部はその引張力を引止める構造を有する必要がある。

5 kA の大電流化超電導ケーブルシステム用機器を開発するにあたり、終端接続部の開発においては電流リードの大容量化及び超電導－常電導接続部の熱的安定性の確認を実施した。また、中間接続部の構造設計検証においては冷却時の熱収縮によって発生する引張力が印加した場合に超電導性能に影響を受けないことの確認及び課電性能評価を実施した。

●中間目標（平成 22 年度）

- ・ 5 kA 連続通電^{*}を行い、ケーブル導体、超電導－常電導接続、電流リードに異常がないこと

※ケーブルの熱平衡が得られるまで連続通電を行う

●最終目標（平成 24 年度）

- ・ 中間接続部を有する大電流ケーブルコアを作製し、課電及び機械強度特性の評価を行い、中間接続部の要素技術を確立する。

(2) 終端接続部用 大容量電流リードの開発

電流リードのサイズは、端末容器やブッシング等の終端接続部全体のサイズを決定する要因であることから小型化が期待されている。本プロジェクトでは定格電流が 5 kA_{rms} と大電流であることから、小型化に適している絶縁被覆を有する細径銅素線を撚り合わせた素線絶縁銅撚り線を用いた電流リードを採用した。

終端接続部全体の熱損失は電流リード部の損失が支配的であることから、低損失設計が望まれている。電流リードの熱損失は電気抵抗から発生するジュール損失と常温側からの熱伝導による侵入熱が主なファクターであり、これらの熱損失を低減するために、電流リード断面積をパラメータとした検討を実施した。

電流リード長さは 66 kV 級の碍子サイズから 2.7 m と決定し、電流リードの断面積と 5 kA 通電時における熱損失の相関を定常熱伝導シミュレーションにより求めた結果を図 2.2.1-83 に示す。図(b)から分かるように、 5 kA 通電時の熱損失を最小にするためには断面積が約 6000 mm^2 の電流リードが必要となる。一方で、図(a)から分かるように、断面積を大きくすれば無負荷時の熱損失は大きくなり、同時に電流リード自体のサイズも大きくなる。ここではよりコンパクトな電流リードを指向することとし、電流リードの断面積を 3500 mm^2 に決定して試作・検証を行った。電流リードの熱損失測定試験状況を図 2.2.1-84 に示す。電流リードは 66 kV 級の FRP ブッシングを貫通した状態で容器内に挿入され、2本の電流リードに往復通電を行って熱損失を測定した。電流リードの熱損失測定結果を解析結果と合わせて図 2.2.1-85 に示す。実験により得られた熱損失は解析結果から想定される範囲であり、設計の妥当性を確認した。さらに、熱損失測定試験に引き続き、 5 kA の連続通電試験を実施した結果を図 2.2.1-86 に示す。電流リード各部の温度をモニタしながら通電を行った結果、通電中に急激な温度変化等は見られず、熱的な平衡が安定に得られていることを確認した。 66 kV 大電流ケーブルシステム検証試験では、この開発した電流リードを終端接続部に採用した。

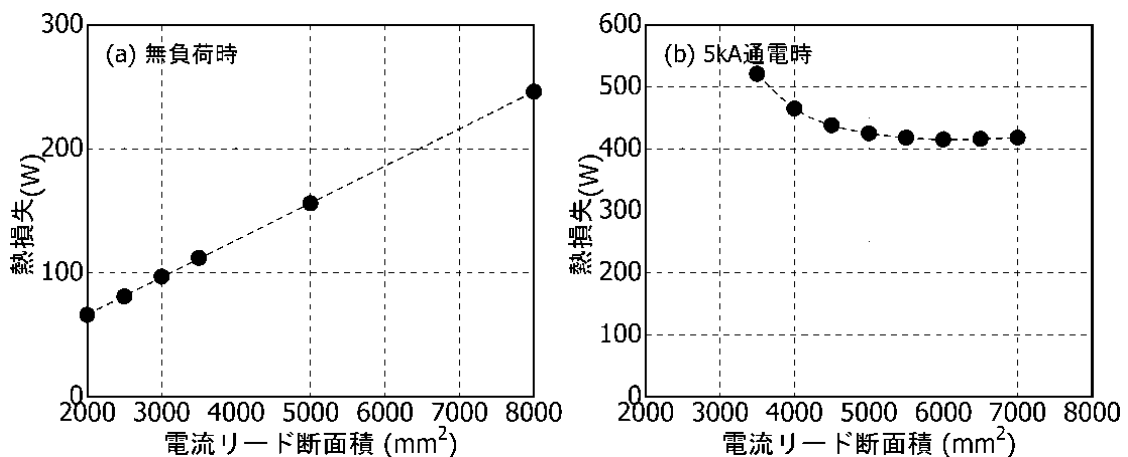


図 2.2.1-83 電流リード熱損失数値解析結果



図 2.2.1-84 3500 mm² 電流リードと熱損失測定試験

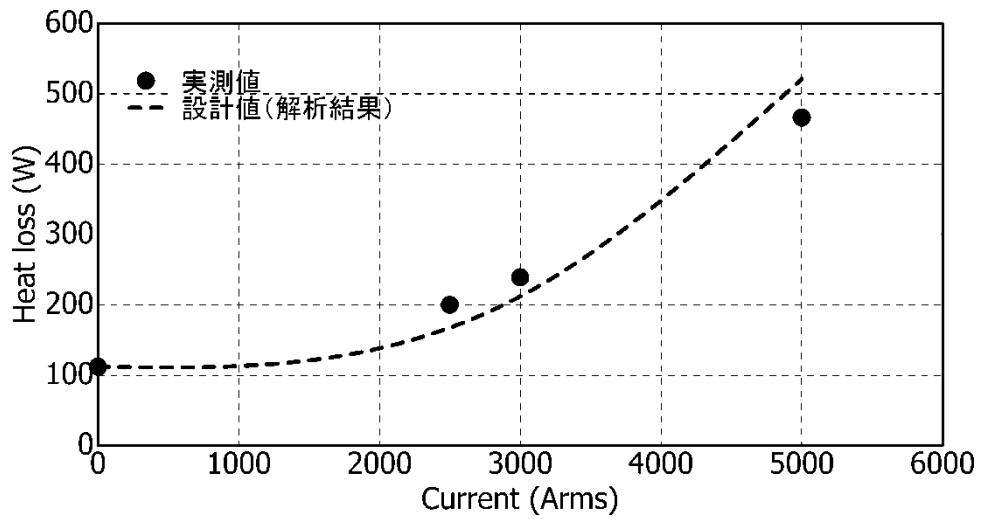


図 2.2.1-85 3500 mm² 電流リードと熱損失測定試験結果

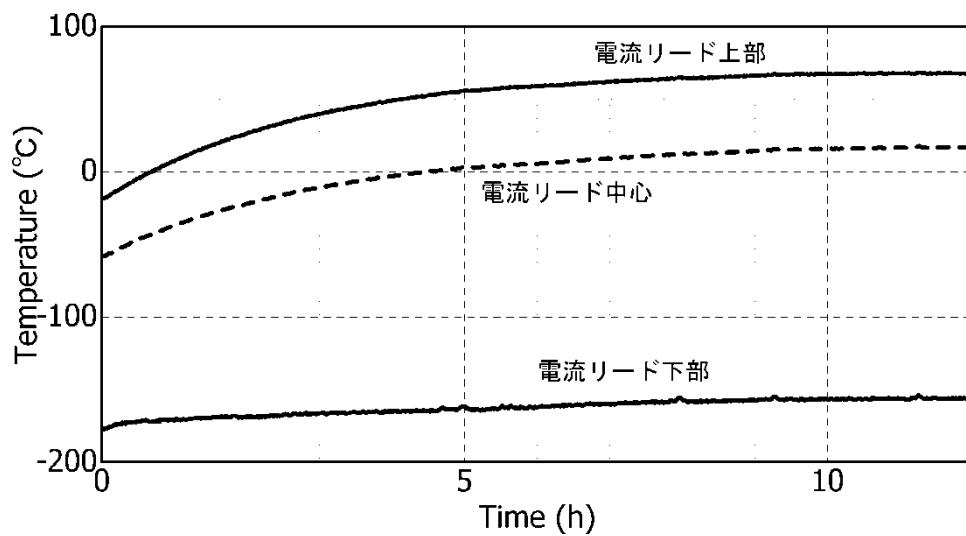


図 2.2.1-86 5 kA 通電時の電流リード各部の温度変化

(3) 終端接続部用 超電導—常電導接続部の開発

超電導—常電導接続部では、超電導線と銅製の接続金具とがハンダで接続される。接続金具の設計において重要なパラメータとなるのが、接続長と金具厚みである。接続長を長くすれば接続抵抗は小さくなるが金具のサイズが大きくなる。また、金具厚みを厚くすれば直流抵抗は小さくなるが、交流通電時には表皮効果により通電に寄与する断面積が増加しない懸念がある。この2つの設計寸法を決定するため、以下の試験及び解析を実施した。

超電導線と接続金具との接続長を決定するため、図 2.2.1-87 のような治具を用いた接続抵抗測定試験を実施した。接続長をパラメータとして接続抵抗を測定した結果を図 2.2.1-88 に示す。なお、使用した線材は4 mm 幅の Clad 基板線材である。試験の結果、20 mm 以上の接続長では接続抵抗の変化は殆どなく、施工時のズレを加味して接続長を 25 mm に決定した。

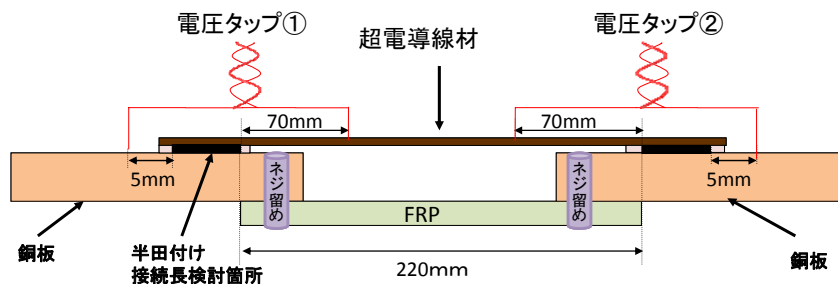


図 2.2.1-87 接続抵抗測定試験モデル図

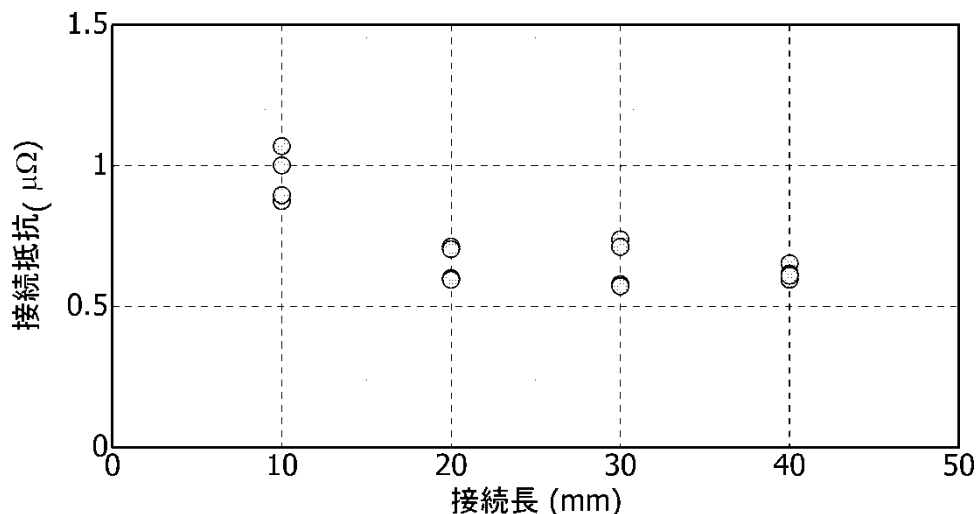


図 2.2.1-88 接続抵抗測定試験結果

次に、接続金具（銅板）の厚みを決定するため、金具厚みをパラメータとして電流分布解析を実施した結果を図 2.2.1-89 に示す。図には典型的な例として厚みが 3 mm の場合と 10 mm の場合の 2 通りを示しているが、金具が厚くなるほど電流は表面を流れ、断面積の大部分が通電に寄与しない結果、交流抵抗は 3 mm と 10 mm

で殆ど差異がない。実際に1層導体を用いて金具の交流抵抗を測定した試験においても同様の結果が得られた。以上の結果から接続金具の厚みを3mmに決定した。

66kV大電流ケーブルシステム検証試験では、この開発した電流リードを終端接続部に採用した。以上の検討結果を反映して設計した超電導-常電導接続金具の構造を図2.2.1-90に示す。本金具とケーブルとを組み合わせた5kA連続通電試験を実施し安定に通電できることを確認し、66kV大電流ケーブルシステム検証試験では、この開発した超電導-常電導接続構造を終端接続部に採用した。

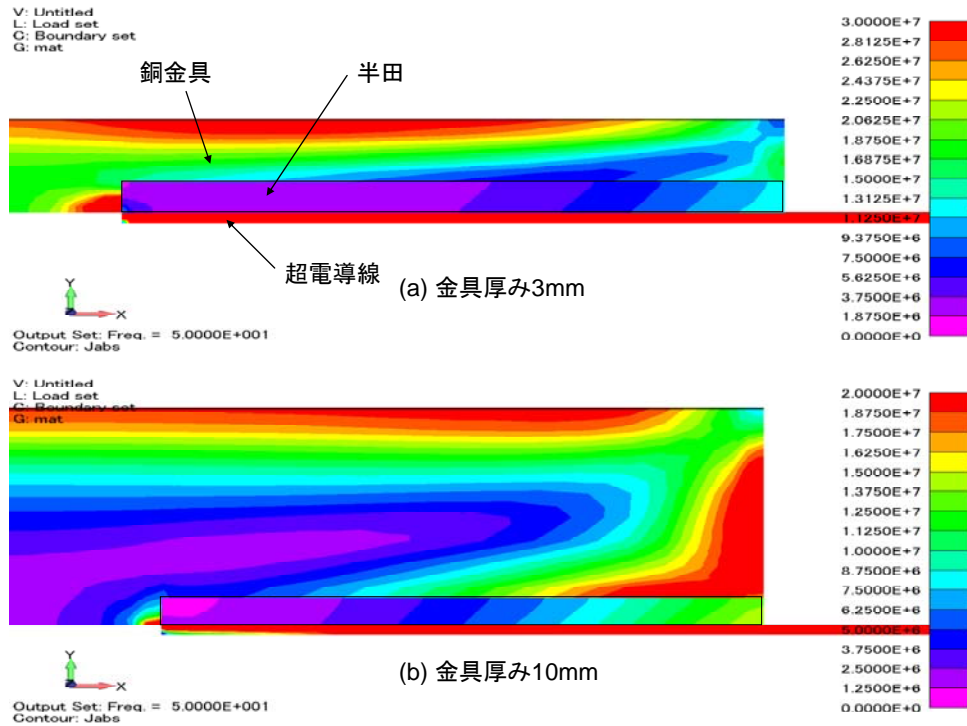


図 2.2.1-89 金具厚みをパラメータとした電流分布解析結果

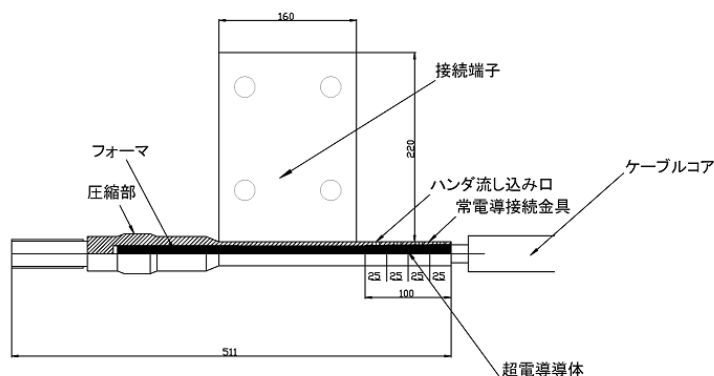


図 2.2.1-90 超電導-常電導接続金具の構造

(4) 中間接続部の構造設計検証

平成 23 年度は中間接続部の基本構造は三心一括型の各ケーブルコアをそれぞれ接続し、一つの容器に入れる三心一括型の構造とする。ケーブルコアの接続はコア中心に位置する銅撚り線フォーマを銅製の導体接続スリーブを用いて機械的な圧縮力で接続する。その導体接続スリーブ上に両側ケーブルの超電導線同士を接続するためケーブルコアとは別に準備した Y 系超電導線材の渡しを設け、ハンダを用いて電氣的な接続を行う。この Y 系超電導接続構造において 5 kA 連続通電試験を実施し安定運転ができることを確認済み。電気絶縁層は補強絶縁紙（クラフト紙）を巻き付け、ストレスコーンを形成する。アース側の電気遮蔽層はクレープカーボン紙とメッシュテープ等の巻き付けにより形成する。超電導シールド層は、導体側と同様に Y 系超電導線材の渡しを設けハンダ接続を行う。中間接続部の基本構造を図 2.2.1-91 に示す。

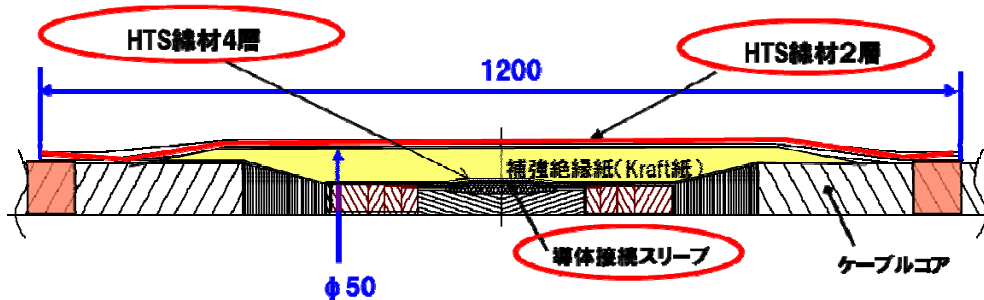


図 2.2.1-91 中間接続部の基本構造

超電導ケーブルシステムとして中間接続部の電気絶縁性能はケーブルと同等以上が必要である。絶縁層が PPLP® (Polypropylene Laminated Paper) の 6 mm 厚のケーブルコアを用いて中間接続部を組み立て、温度 77 K、圧力 0.2 MPa・G の循環冷却の条件下において電力用規格 A 251 66 kV・77 K アルミ被覆 OF ケーブル用接続箱規格及び OF ケーブル JEC-3401 に準拠した表 2.2.1-29 に示す内容の試験を実施し良好な結果を得た。図 2.2.1-92 に中間接続部の課電試験風景を示す。

表 2.2.1-29 中間接続部 課電性能評価試験結果

	試験内容	試験結果
1	AC 課電試験	①90 kV-3 時間 良好 ②130 kV-10 分 良好
2	Imp 課電試験	±385 kV 各 3 回 良好



図 2.2.1-92 中間接続部の課電試験風景

超電導ケーブルシステムにおいて、システム完成後の初期冷却時にケーブルコアの熱収縮に伴う引張張力が中間接続部に印加される。またケーブルシステムの昇温時には圧縮力が印加される。中間接続部においては、これらの熱応力が繰り返し印加されてもケーブルと同様に超電導性能が低下しないことが必要である。

図 2.2.1-89 のケーブルコアの冷却機械試験の結果から、ケーブル構造においては最大引張力 3000 kgf/3 相 (1000 kgf/1 相)、最大圧縮力 500 kgf/3 相が発生すると想定される。

単相のケーブルコアを用いて中間接続部試験サンプルを組立て、オープンバスの液体窒素の冷却条件下において引張及び圧縮試験を実施し引張条件においては 1000 kgf の想定荷重に対し 2000 kgf まで、また圧縮条件は 200 kgf まで荷重を印加し試験前後で I_c 値に劣化がないことを確認した。 I_c 測定結果を図 2.2.1-93 に、試験状況の写真を図 2.2.1-94 に示す。

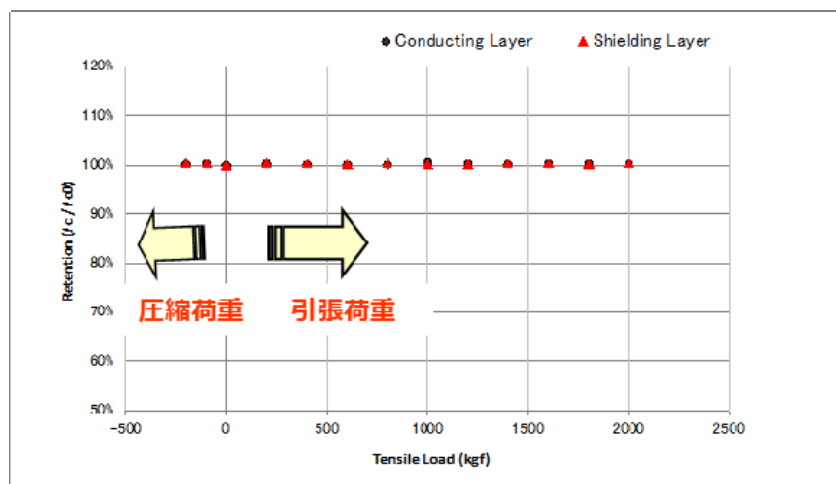


図 2.2.1-93 引張及び圧縮荷重印加時の I_c 測定結果

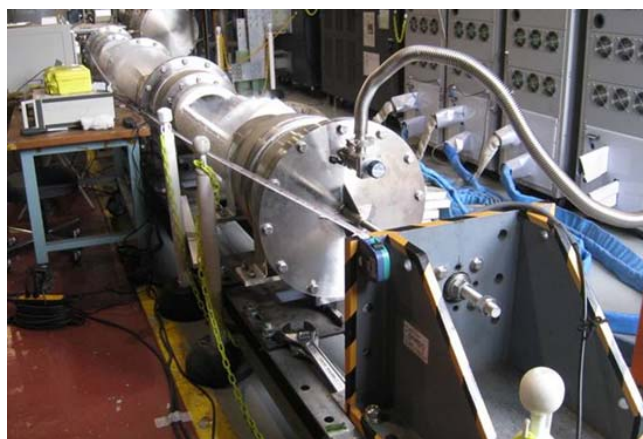


図 2.2.1-94 中間接続部の冷却機械試験風景

(5) まとめ

- ・ 5 kA 級電流リードの設計検討を行った結果、3500 mm² 撚り線構造を採用した。
- ・ 3500 mm² 電流リードを試作して熱損失を評価した結果、設計値と同等の 470 W@5 kA であることを確認した。
- ・ 電流リードの 5 kA 連続通電に成功した。この際、電流リード各部分で熱的な平衡が安定に得られていることを確認した。
- ・ 超電導-常電導接続金具の設計パラメータである接続長と金具厚みに対して実験及び数値解析による検討を行い、構造設計を完了した。
- ・ 中間接続部の構造設計検証において電気絶縁試験では、AC90 kV・3 h、AC130 kV・10 min、Imp±385 kV/3 回の所要性能を満足することを検証した。
- ・ 中間接続部の構造設計検証において機械特性試験では、単相の中間接続部試験サンプルを組立て、液体窒素の冷却条件下において、2000 kgf の引張条件及び 200 kgf の圧縮条件の試験を実施し、試験前後で I_c 値に劣化がなく中間接続部の機械設計の妥当性を検証した。

2.2.2 66 kV 大電流ケーブルシステム検証

2.2.2-1 システム開発

(1) 研究開発目標

66 kV 大電流ケーブルの実用性を検証するためには、大電流通電技術、交流損失低減技術の開発成果を活かしたケーブルを開発し、実用化時の要求使用に基づいた課通電試験を行う必要がある。このため、前記大電流・低損失ケーブル化技術の開発成果を踏まえて、検証用超電導ケーブルシステムの設計を行い、課通電試験計画案を作成した。平成 23、24 年度は、これに基づき 66 kV 三心一括ケーブルシステムを構築し、さらに長期課通電試験等の検証試験を行うことによってシステム設計の妥当性を確認する。

●中間目標（平成 22 年度）

- ・両端に終端接続部を有する検証用 66 kV / 三心一括 / 5 kA, 15 m 長の超電導ケーブルシステムのシステム設計を完了する。
- ・耐久性を評価できる課通電試験計画書を作成する。

●最終目標（平成 24 年度）

- ・下記性能を有する 66 kV / 三心一括 / 5 kA, 15 m 長の超電導ケーブルを作製する。

- ◇ ケーブル外径：内径 150 mm ϕ の管路に収納できること。
- ◇ ケーブル損失（交流損失、誘電体損失）：2.1 W/m-相@5 kA 以下。
- ◇ 中間目標で得られた課通電試験の設定条件下における課通電試験を実施し、試験計画書の性能を満足することを検証する。

(2) 検証試験項目

66 kV 大電流ケーブル実用化時の耐久性を評価するためにとりまとめた試験条件を表 2.2.2-1 に示す。15 m ケーブルシステムを用いて検証すべき主要試験項目は以下の 3 点となる。

- ・ 66 kV 級電力ケーブルに要求される耐電圧試験
- ・ 30 年間運用に相当する加速試験条件における課通電試験
- ・ ケーブル損失 2.1 W/m/-相@5 kA, 66 kV の確認

耐電圧試験及び課通電試験（加速試験）条件の算定根拠を表 2.2.2-2 に示す。試験条件の決定に際しては、超電導ケーブル実証プロジェクト(2007 年)、Super-GM-500 m ケーブル試験結果（2004 年）、及び JEC3401（66 kV / 77 kV 級ケーブルの試験電圧、2006）を参考にした。課通電試験（加速試験）は試験スケジュールを考慮して試験期間を 1 ヶ月とし、30 年運用に相当する加速試験条件として試験電圧を 51 kV に設定した。なお、通電は実線路における負荷変動を考慮して 8 時間 ON、16 時間 OFF のサイクル試験とした。

表 2.2.2-1 検証試験項目

No.	項目	出荷試験 (サンプル試験)	15m 検証試験	残存試験
1	商用周波長時間耐電圧試験 (90 kV, 3 h)			○
2	商用周波耐電圧試験 (100 kV, 10 min)			○
3	部分放電試験		○	○
4	雷インパルス耐電圧試験 (±385 kV, 3 回)			○
5	長期課通電試験 (1 ヶ月)		○	
6	外観検査	○	○	○
7	静電容量試験	○ (室温) ●	○	○
8	誘電正接試験	●	○	○
9	絶縁抵抗試験	● (室温)	○ (メガ)	
10	導体抵抗試験 (フォーマ)	●		
11	構造試験	●		▲
12	曲げ試験	●		
13	I_c 測定	●	○	○▲
14	シールド電流測定		○	○
15	交流損失測定	●	○	▲
16	断熱管侵入熱測定		○	
17	気密試験	○ (室温)	○ (室温)	
18	真空リーク試験	○ (室温)	○ (室温)	
19	圧力損失測定		○ (参考)	
20	インダクタンス測定	● (参考)		

●サンプル試験、○全長試験、▲解体後のサンプル試験

表 2.2.2-2 試験電圧の算定根拠

試験項目	OF ケーブル (JEC-3401(2006))	超電導ケーブル (15 m 検証ケーブル)
<p>形式試験 商用周波 長時間 耐電圧試験 (サンプル)</p>	<p>$V_{ac} = \frac{U_m}{\sqrt{3}} \times K1 \times K2 \times K3$ U_m : 最高使用電圧 72 kV $K1$: 時間係数 (30 年/3 時間) $^{(1/n)}$, $n=30$ $K2$: 抜き取り試験に対する安全率 1.1 $K3$: その他係数 1.25 $V_{ac} = 90 \text{ kV @3 時間}$</p>	<p>超電導ケーブルの n については、Super-GM にて $n=49$ が報告されているが、データ数が少ないため、厳しい側として OF ケーブルで使われている $n=30$ を使用。 $V_{ac} = 90 \text{ kV @3 時間}$</p>
<p>開発試験 商用周波 耐電圧試験 (サンプル)</p>	<p>試験電圧 $V=U_m \times C1 \times K3$ $C1=k1 \times k2 \times k3 \times k4$ $k1$: 1 線地絡時の健全相の電圧上昇倍率 1.0 at 66 kV $k2$: 時間換算係数 (2/600)$^{(1/n)}$; $n=20$ (短時間) $k3$: 負荷遮断時の電圧上昇倍率 1.35 @66 kV $k4$: 機器の耐電圧試験裕度 1.14 $K3$: 不確定要素に対する裕度 1.1 $V = 100 \text{ kV at 10 分}$</p>	<p>左記計算式より計算。 $K2$ の値は未確定。 「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」の試験条件にならない、OF ケーブルと同様の試験条件とした。 $V=100\text{kV @10 分}$</p>
<p>開発試験 雷インパルス試験 (サンプル)</p>	<p>試験電圧=$LIWV \times K2' \times K3' = 425 \text{ kV}$ $LIWV = 350 \text{ kV}$ (66 kV 級) $K2'$: 温度係数 1.1 (常温) $K3'$: 裕度 1.1 $\text{回数} : \pm 3 \text{ 回}$</p>	<p>左記計算式より計算。 温度係数については、温度変化が小さいため、$K2'=1.0$ として計算。 $\text{試験電圧 } 385 \text{ kV @}\pm 3 \text{ 回}$</p>
<p>開発試験 長期 課通電試験 (全長)</p>	<p>試験電圧 $= (30 \text{ 年/試験期間})^{(1/n)} \times U_m / \sqrt{3}$ 試験期間=30 年/2M $M = (\text{試験温度} - \text{基準温度}) / 7$ 通電条件 : 当事者間で協議 ※例 電圧 : 48 kV 試験期間 0.5 年、$n=30$、$U_m=72 \text{ kV @66 kV}$</p>	<p>左記計算式より計算。 $n=30$、試験期間 1 ヶ月として、 $\text{電圧} : 51 \text{ kV}$ $\text{通電} : 8 \text{ 時間 ON, } 16 \text{ 時間 OFF}$</p>

(3) 検証試験システム構成

図 2.2.2-1 に検証用超電導ケーブルシステムの構成を示す。超電導ケーブルは 15 m 長の三心一括型であり、三心とも超電導コアである。超電導ケーブルの緒元及び特徴を表 2.2.2-3、4 に示す。ケーブル両端には終端接続部（端末）を設けており、A 端末はブッシング及び電流リード 3 本を有する端末であり、B 端末はシステム全体の熱負荷を低減するために容器内部（液体窒素中）で三相コアを短絡するため、ブッシング及び電流リードはない。なお、両端末内においてケーブルは大地に対して固定され、この状態で冷却及び昇温を行う。本ケーブルシステムを冷却システムに接続し、液体窒素を循環させることで冷却を行う。冷却システムは、サブクーラ（減圧 LN₂ による熱交換タイプ）、循環ポンプ、リザーバータンク等で構成され、冷却容量は 3.5 kW 以上@65 K である。

三心コアのシールド層は両端末内で短絡接続されているため、シールド層には導体層とは位相が反転したシールド電流が誘導される。ケーブルの交流損失測定は、ケーブル各部に取り付けられた温度センサーを用いて液体窒素の温度差を測定し、熱損失に換算するカロリメトリック法を用いた。

長期課通電試験後に超電導特性の劣化等を引き起こす要因として、通電電流により生じる交流損失による発熱、特にスポット的な発熱の影響が考えられる。

そこで、課通電試験条件として 2 コアで 5kA を往復通電する「1Go-1Return」での検証に加え、長期課通電試験は、1 コアに 5kA を通電し 2 コアで 5kA をリターンする（即ち 2 コアにはそれぞれ 2.5kA 流れる）「1Go-2Return」条件にて実施した。本条件で課通電を行うことで、コア間で発熱の大小の差（5kA 通電時の発熱と 2.5kA 通電時の発熱の差）をつけることが可能となり、万が一、長期課通電試験後にケーブルに I_c 低下等が見つかった場合に、 I_c 劣化が見られたコアを確認することで、それが熱的要因の影響かどうかを判別できるよう配慮した。

- ・三心一括型超電導ケーブル
(三心超電導コア)
- ・A端末：三相ブッシング & 電流リード付き
- ・B端末：ブッシング & 電流リードなし
(液体窒素中で三相短絡)
- ・冷却システム容量：3.5kW級@65K

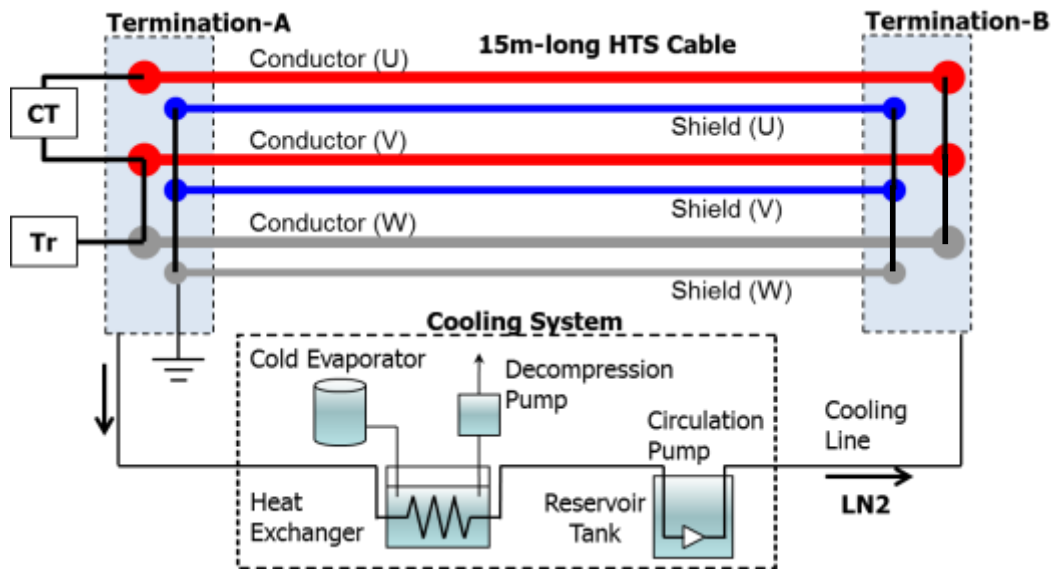
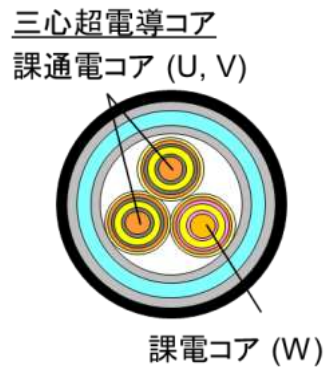


図 2.2.2-1 15 m 長 超電導ケーブル検証システムの構成

表 2.2.2-3 15m 長 超電導ケーブルの諸元

項目	諸元	外径 (mm)
フォーマ	銅撚り線フォーマ	21
超電導導体層	3層 4 mm 幅 Clad 基板線材 (45 本)	23
	1層 2mm 幅 Clad 基板線材 (27 本)	
絶縁層	PPLP®, 6mm 厚	37
超電導シールド	2層 4 mm 幅 Clad 基板線材 (50 本)	38
保護層	銅シールド、クラフト紙、不織布	44
三心撚り	緩み無し	96
断熱管	SUS 二重コルゲート管 真空断熱 & SI	133
防食層	PVC	140

表 2.2.2-4 15 m 長 超電導ケーブル検証システムの特徴

項目	内容
構成	15 m、三心超電導コア ブッシング付き端末 1 台、ブッシングなし端末 1 台
課通電	「1Go-1Return」通電：二心へ单相（往復）通電（通電用 CT×1 台） 「1Go-2Return」通電：一心へ往路電流を二心で復路電流を通電 三心へ单相電圧課電
I_c 測定	導体のみ測定（二相一括、課通電相のみ測定）
AC ロス	二相分の AC ロス測定（熱的手法）
熱機械特性	三相両端固定にて、冷却及び昇温
必要冷却容量	3.5 kW @65 K
最終目標達成	三心形状の実現、66 kV 課電、5 kA 通電、AC ロス評価等、目標の検証可能

(4) 検証試験スケジュール

検証試験用超電導ケーブルの製造及び検証試験のスケジュールを図 2.2.2-2 に示す。平成 24 年 6 月末までに導体用の線材を、7 月末までにシールド用の線材製造を終了させ、8 月末までに検証用 15 m 長ケーブルの製造を完了した。併せて、終端接続部の製造を平成 24 年 8 月末に完了させ、ケーブル布設・システム建設工事を 9 月より開始した。さらに、ケーブルシステムと冷却システムを組み合わせた検証試験システム建設を 11 月末までに完了、12 月より検証試験を開始した。この後、約 2 ヶ月間の検証試験を実施し、残存性能の確認を行って平成 24 年 2 月末に検証試験を終了した。

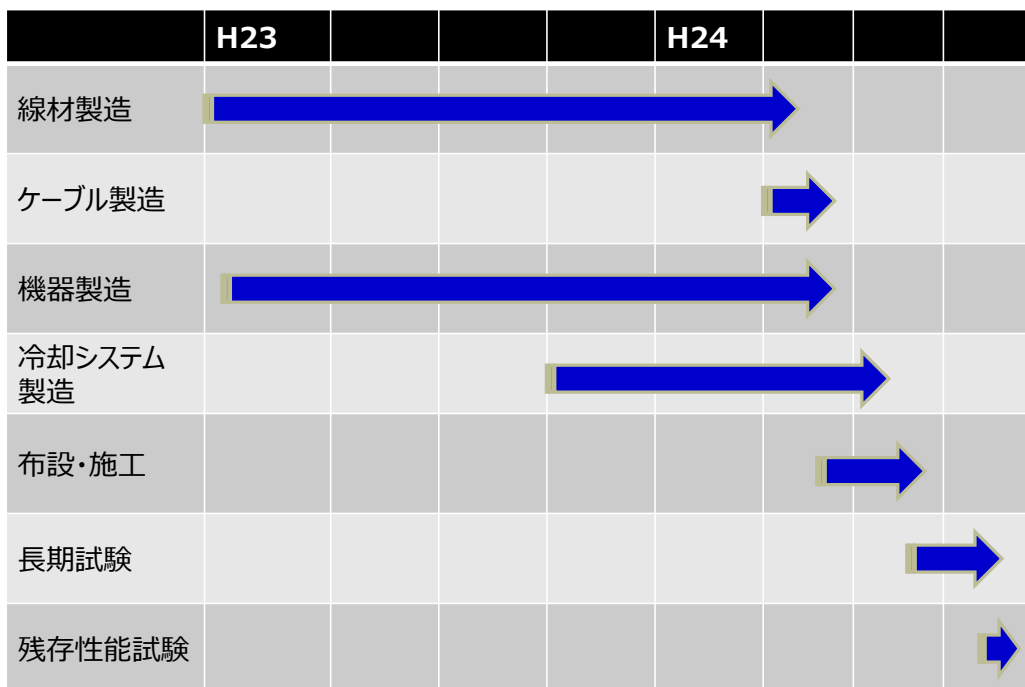


図 2.2.2-2 検証試験スケジュール

(5) 検証試験システム建設

平成23年度までの低交流損失化並びに短絡電流対応等の要素開発結果を基に15 m長ケーブルの設計を行い、ケーブル製造を行った。

製造したケーブルを住友電工ファインポリマー株式会社内の超電導ケーブル試験場に布設、端末施工を行い、冷却システム及び計測監視システムと組み合わせることにより、15 m長検証試験ケーブルシステムを構築した。図2.2.2-3に検証試験ケーブルシステムのレイアウト図を、建設後の検証試験ケーブルシステムの写真を図2.2.2-4示す。

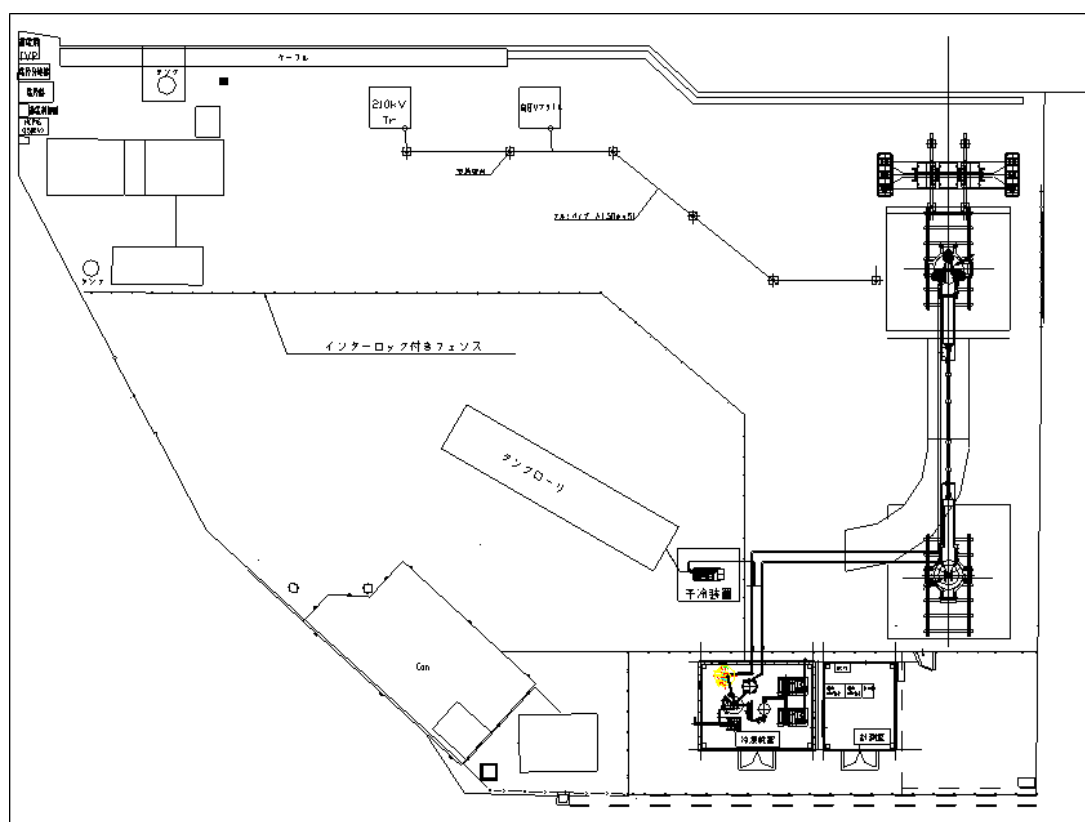


図 2.2.2-3 15 m 長 検証試験ケーブルシステムのレイアウト図



図 2.2.2-4 15 m 長 検証試験ケーブルシステム写真

(6) 検証試験結果

検証試験項目と試験結果をケーブル出荷試験（サンプル試験）結果とともに表 2.2.2-5 にまとめた。

① サンプル試験結果

15 m 長ケーブルの端部から切り出したサンプルの I_c 測定結果 (77.5K) を図 2.2.2-5 に示す。図 2.2.2-6 に示すように、測定されたケーブルサンプルの I_c 値は使用した線材の I_c 及び I_c -B 特性から算出した予想値に対して 5~10%大きく、製造プロセスにおける劣化もなく、良好な結果が得られた。

また、同サンプルの交流損失測定結果 (71K) を図 2.2.2-7 に示す。5 kA_{rms} 通電時の損失は、U 相が 1.5 W/m-相、V 相が 1.8 W/m-相であり、ともに目標値 2.0 W/m-相以下であることを確認した。

② 初期冷却

図 2.2.2-8 に初期冷却時のケーブル長手方向の温度プロファイルを示す。ケーブルシステムは「-100 °C の N₂ ガス」冷却、「-150 °C の N₂ ガス冷却」の「LN₂ 貯液」を行い、真空リーク等の問題なく約 52 時間で常温から LN₂ 温度に冷却完了し、冷却システムと接続した循環冷却試験に移行できた。

③ 静電容量・誘電正接試験

ケーブル初期冷却完了後にケーブルの静電容量及び誘電正接試験を実施した。三心コアの静電容量は、PPLP®に液体窒素が含浸された場合の比誘電率 2.12 を用いた計算結果 (11.8 nF) と一致する結果が得られた。また、 $\tan \delta$ も 0.059 % と十分小さいことを確認した。

④ I_c 測定

図 2.2.2-9 に U,V 相導体の I_c 測定結果を示す。 I_c 測定結果は、使用線材 I_c と 2 コア往復通電時に他コア通電電流により印加される磁場の影響から予想した値と同等であり、布設、組立、冷却時に劣化無きことが確認できた。

⑤ 交流損失測定結果

無負荷時の断熱管の侵入熱並びに 5 kA 通電時のコア交流損失をカロリメトリック法により測定した。5 kA 通電時の電流及びケーブル入口・出口温度の変化を図 2.2.2-10 に示す。測定の結果、ケーブルコアの交流損失は 1.8 W/m-相 (@5 kA) の結果が得られた。なお、断熱管の侵入熱は 1.7 W/m であった。また、端末容器 (端末 A) の損失は無負荷時が 600 W、5kA 通電時が 1.8kW であり、設計値とほぼ一致する結果が得られた。

ケーブルの誘電損失 Wd については以下の式で計算できる。②項で示したケーブルコアの静電容量及び $\tan \delta$ を用いて三心コアの誘電損失を計算すると、227 W/km となる。本結果より単心コアでは 76 W/km-相となり、0.076 W/m-相と計算できる。

よって、5kA 通電時の交流損失実測値 1.8 W/m-相に誘電損失を加えても < 1.9 W/m-相となり、課通電時の交流損失目標値 (≤ 2.1 W/m-相) を満足することが確認できた。

$$Wd = 2\pi f n C \times (E^2/3) \times \tan\delta \times 10^{-6} \quad (W/km) \quad \dots\dots\dots (2.2.2-1)$$

f : 周波数 (Hz: ここでは 50)

n : 線心数 (ここでは 3)

C : 静電容量 ($\mu F/km$ 静電容量)

E : 線間電圧 (V)

⑥ シールド電流測定

5kA 通電時のシールド電流波形を図 2.2.2-11 に示す。誘導されたシールド電流の導体電流に対する比は 0.91、導体電流との位相差は 180°、導体電流に対して電流波形の乱れは見られず、シールド層に異常がないことが確認できた。なお、シールド電流比が若干小さいのは、ケーブルコア長が短く、また端末処理構造から導体部に対してシールド部の長さが短いことによる端部効果 (端部の接続抵抗の寄与、端部の磁場漏れ) の影響と考えられる。

⑦ 長期課通電試験

ケーブルシステムの基本特性を確認した後、システムを一度昇温し、再度冷却して 30 年間運用に相当する長期課通電試験を実施した。図 2.2.2-12 に 1 ヶ月間に亘る長期課通電試験結果を示す。大きな温度上昇なく良好に 51 kV 連続課電及び 5 kA 通電サイクルを完了した。

その他試験に関しても表 2.2.2-5 に示すように、出荷試験並びに 15 m 検証試験において、全ての試験項目で仕様を満足する結果が得られた。

⑧ 残存性能試験

- ・ 長期課通電試験を実施した 1 ヶ月の間、シールド電流値を監視したが、誘導率は 91% で変化せず、シールド特性が劣化しないことを確認した。
- ・ 長期課通電試験後に実施したケーブル I_c 測定結果を図 2.2.2-13 に示す。長期課通電ケーブル I_c に変化はなく、良好な結果が得られた。
- ・ I_c 測定後に、商用周波長時間耐電圧試験として、90kV、3 時間の課電試験を行い、PD 発生なく良好な結果が得られた。また、本試験において、静電容量及び誘電正接の値も変化なく、良好なことを確認した。
- ・ その後、商用周波耐電圧試験として、100kV、10 分の課電試験を行い、良好な結果を得た。
- ・ さらに、雷インパルス耐電圧試験として、±385kV、3 回を実施し、良好な結果を得た。
- ・ 上記試験完了後、ケーブルシステムを解体して切り出したケーブルサンプルの I_c 測定を実施した。図 2.2.2-14 に示すとおり、出荷試験と同等の性能が確認された。同サンプルの交流損失測定結果 (77.3K) を図 2.2.2-15 に示す。交流損失についても出荷試験と同等の性能が確認された。さらに、解体調査を行い、超電導線材や絶縁紙に異常がないことを確認した。

表 2.2.2-5 検証試験項目と試験結果まとめ

No.	項目	出荷試験 (サンプル試験)	15m 検証試験	残存試験
1	商用周波長時間耐電圧試験 (90 kV, 3 h)	—	—	良好
2	商用周波耐電圧試験 (100 kV, 10 min)	—	—	良好
3	部分放電試験	—	PD 発生なし (感度 50 pC)	PD 発生なし
4	雷インパルス耐電圧試験 (±385 kV, 3 回)	—	—	良好
5	長期課通電試験 (1 ヶ月)	—	良好	—
6	外観検査	異常なし	異常なし	異常なし
7	静電容量試験	—	設計通り (11.8 nF)	変化無し (11.7nF)
8	誘電正接試験	—	良好 (0.059%)	変化無し (0.080%)
9	絶縁抵抗試験	異常なし (14325 MΩ・km)	異常なし (カバー) (≥2000MΩ)	—
10	導体抵抗試験 (フォーマ)	設計通り (0.14mΩ /m@20°C)	—	—
11	構造試験	異常なし		異常なし
12	I _c 測定 (U 相)	設計通り (8200A@77.3K)	計算通り (8040A@77.5K)	劣化なし (8090A@77.5K)
13	シールド電流測定	—	異常なし (91%)	変化なし (91%)
14	交流損失測定 (5 kA, 50 Hz)	1.5 W/m・相	1.8 W/m・相	変化なし
15	断熱管侵入熱測定	—	1.7 W/m	—
16	気密試験	異常なし	異常なし	—
17	真空リーク試験	リークなし	リークなし	—
18	圧力損失測定 (参考) (AB 両端末間)	—	約 2 kPa (at 40 L/min)	—
19	インダクタンス測定 (参考)	0.1μH (計算通り)	—	—

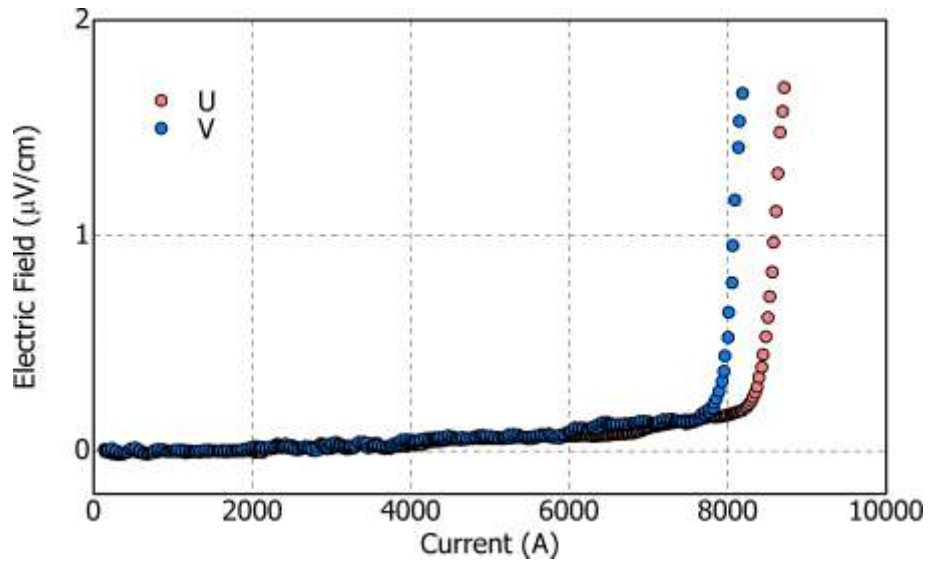


図 2.2.2-5 15 m ケーブルサンプルの I_c 測定結果

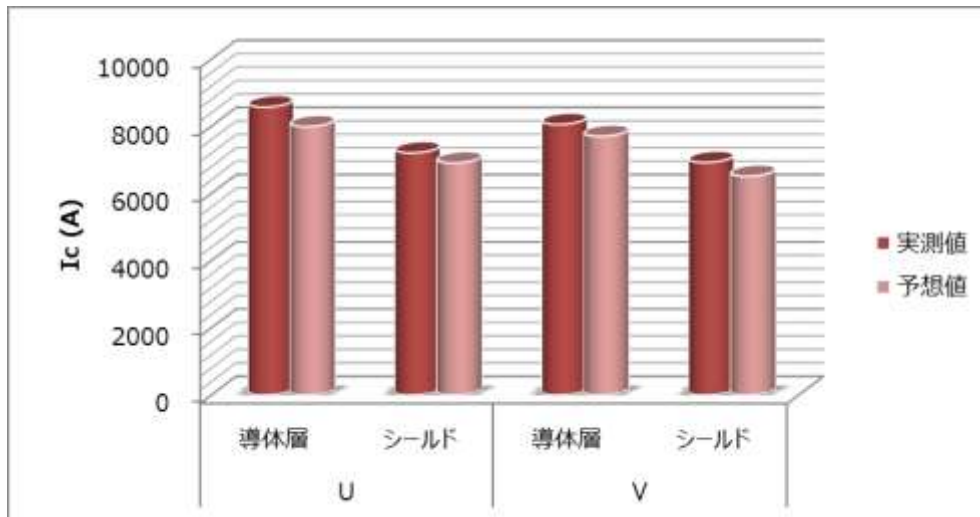


図 2.2.2-6 15 m ケーブルサンプルの I_c 測定結果

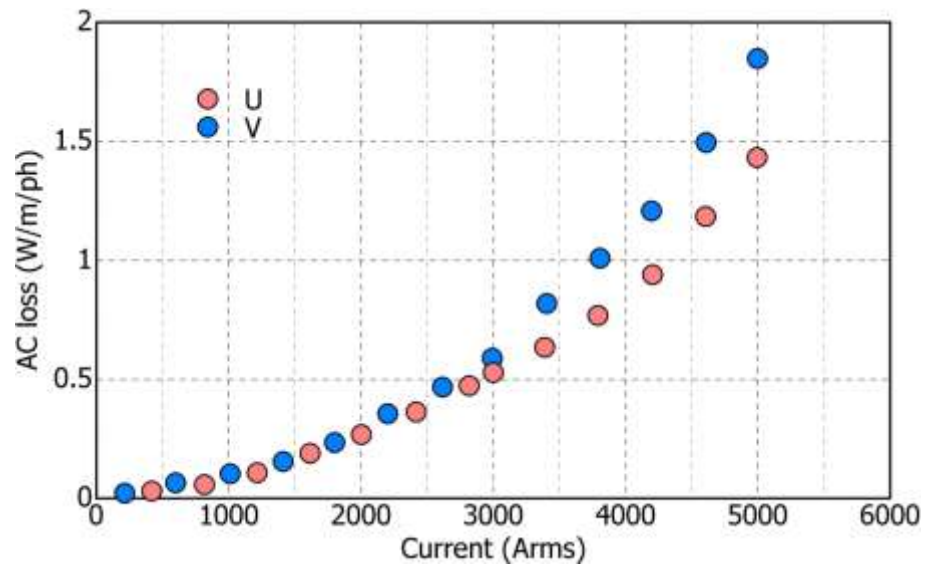


図 2.2.2-7 15 m ケーブルサンプルの交流損失測定結果

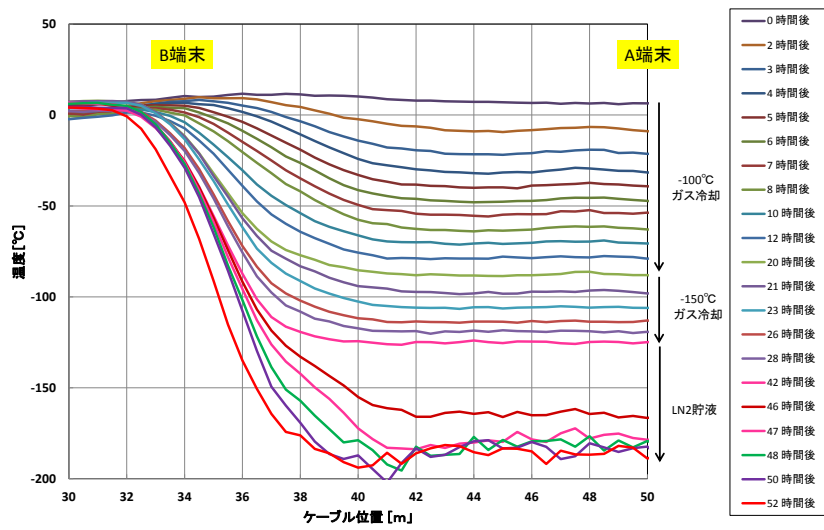


図 2.2.2-8 検証試験ケーブル初期冷却時のケーブル長手方向の温度プロファイル

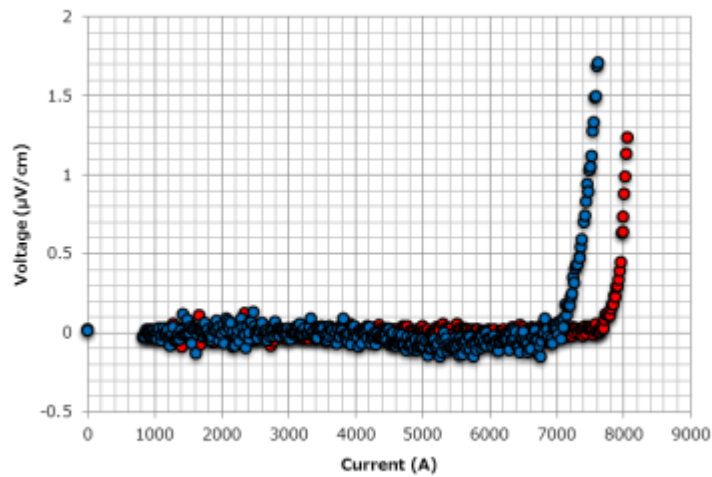


図 2.2.2-9 I_c 測定結果 (I-V カーブ @77.5K)

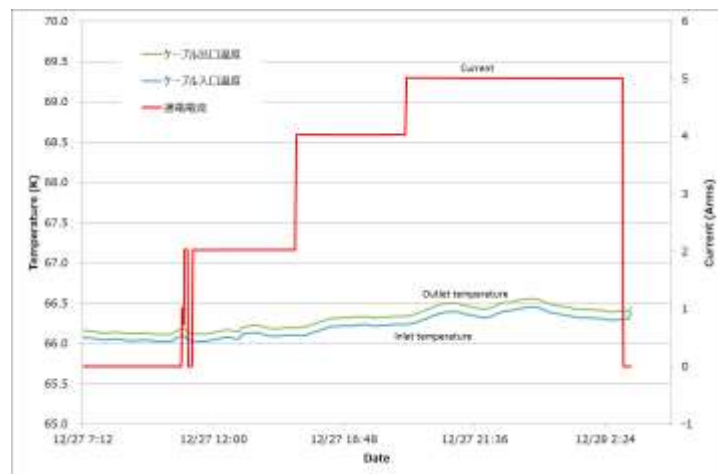


図 2.2.2-10 5 kA 通電時の電流及び温度波形

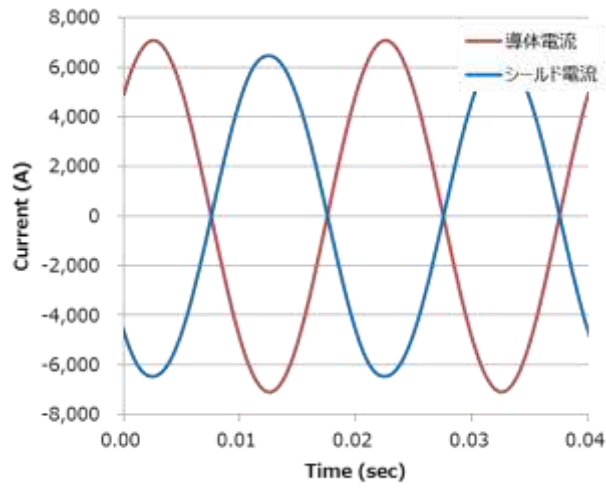


図 2.2.2-11 シールド電流測定結果

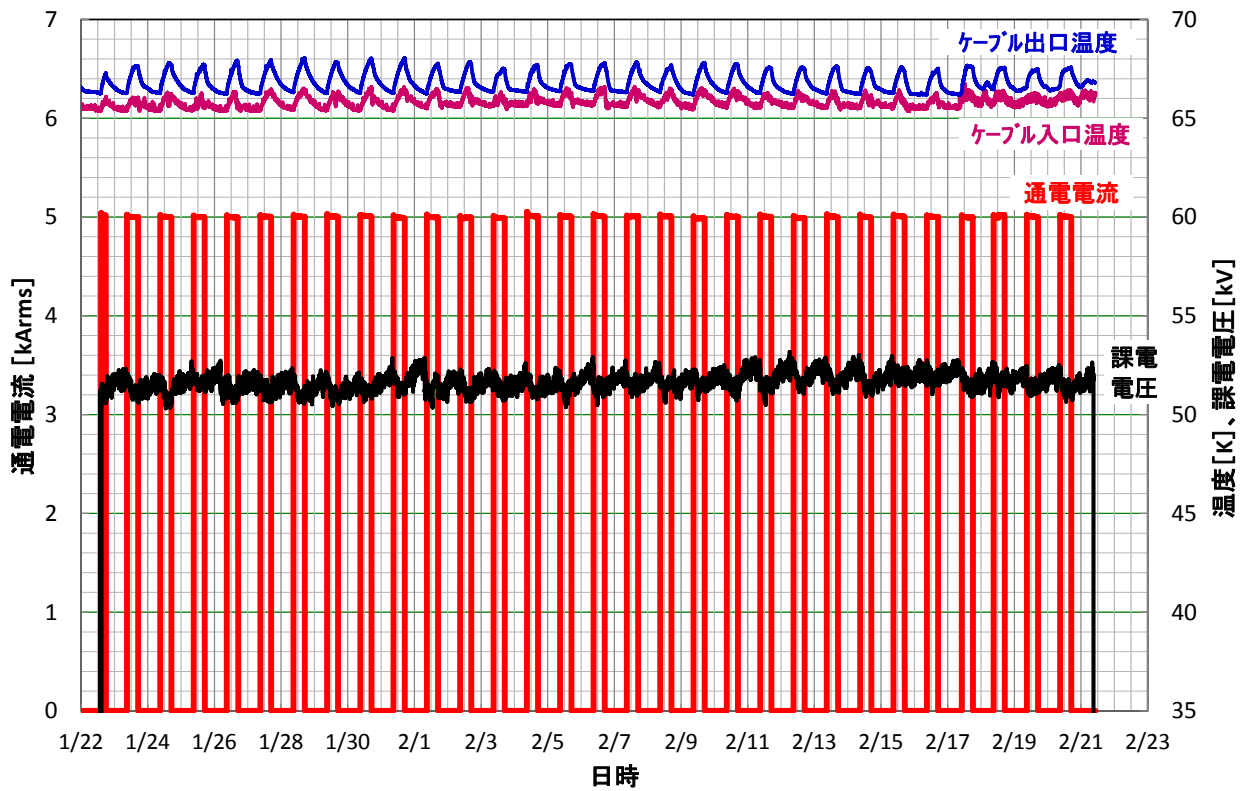


図 2.2.2-12 長期課通電試験結果

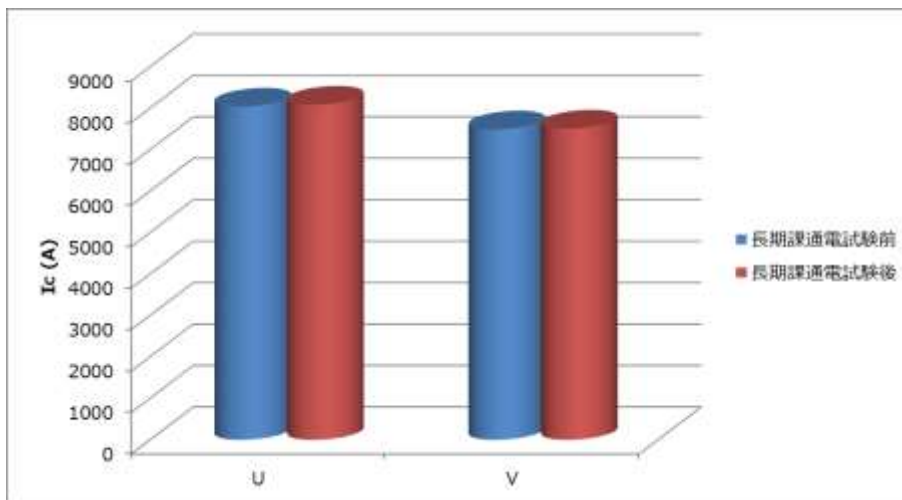


図 2.2.2-13 長期課通電試験前後の I_c 測定結果比較

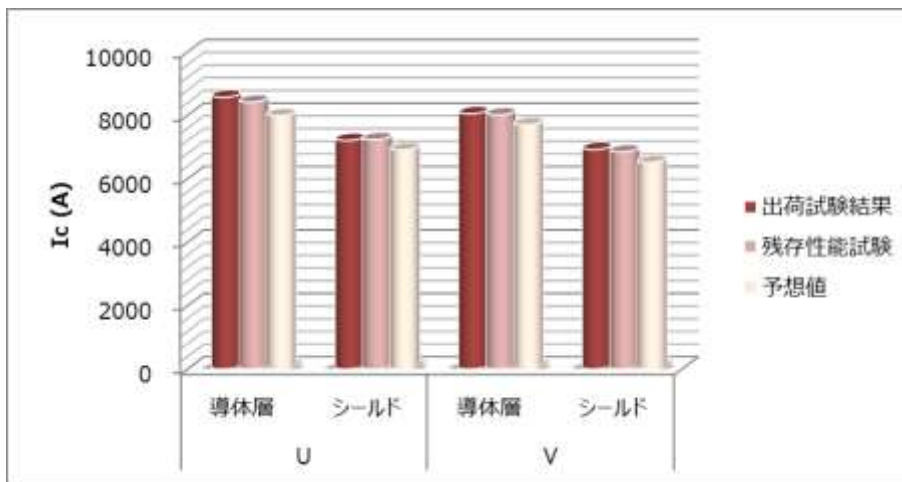


図 2.2.2-14 残存試験 (サンプル試験) : I_c 測定

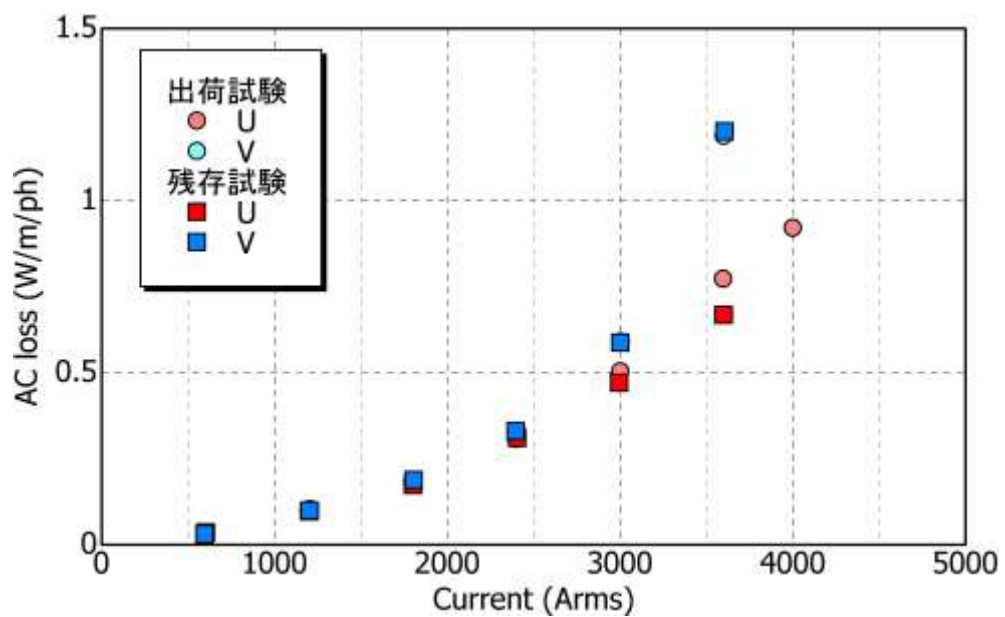


図 2.2.2-15 残存性能試験 (サンプル試験) : 交流損失測定

2.2.2-2 設計指針の検討(住友電気工業、京都大学、早稲田大学)

(1) 研究開発目標

これまでのプロジェクトの成果を踏まえ、Y系超電導線材を用いた超電導電力ケーブル設計指針を示す。以下に設計指針についてとりまとめた結果を示す。

(2) 三心一括型超電導ケーブルの設計フロー

三心一括型超電導ケーブルの設計フローを図 2.2.2-16 に示す。

- ・ ケーブルに要求される「電圧・電流、外径、長さ」等の仕様に対して、ケーブル外周側から設計を進める。
- ・ Y系ケーブルの設計において重要なプロセスとなるのが「損失設計、耐短絡電流設計、定常伝熱設計」であり(図 2.2.2-16 の右側)、それぞれの項目は相互に干渉するため、まずは早稲田大学及び京都大学の設計指針を参照して概略設計を行ったのち、詳細な設計解析を実施して設計の妥当性を確認する。
- ・ 上記3項目の設計ポイント及び最適化の方向性を図 2.2.2-17 に示すとおりである。
- ・ 各項目において対策が必要な場合の対処、あるいは最終的に外径に余裕がある場合の最適化の方針は表 2.2.2-6 に示すとおりである。

このような設計検討を行うことにより、Y系超電導線材の特性を活かした超電導電力ケーブルの設計を行うことが可能となる。

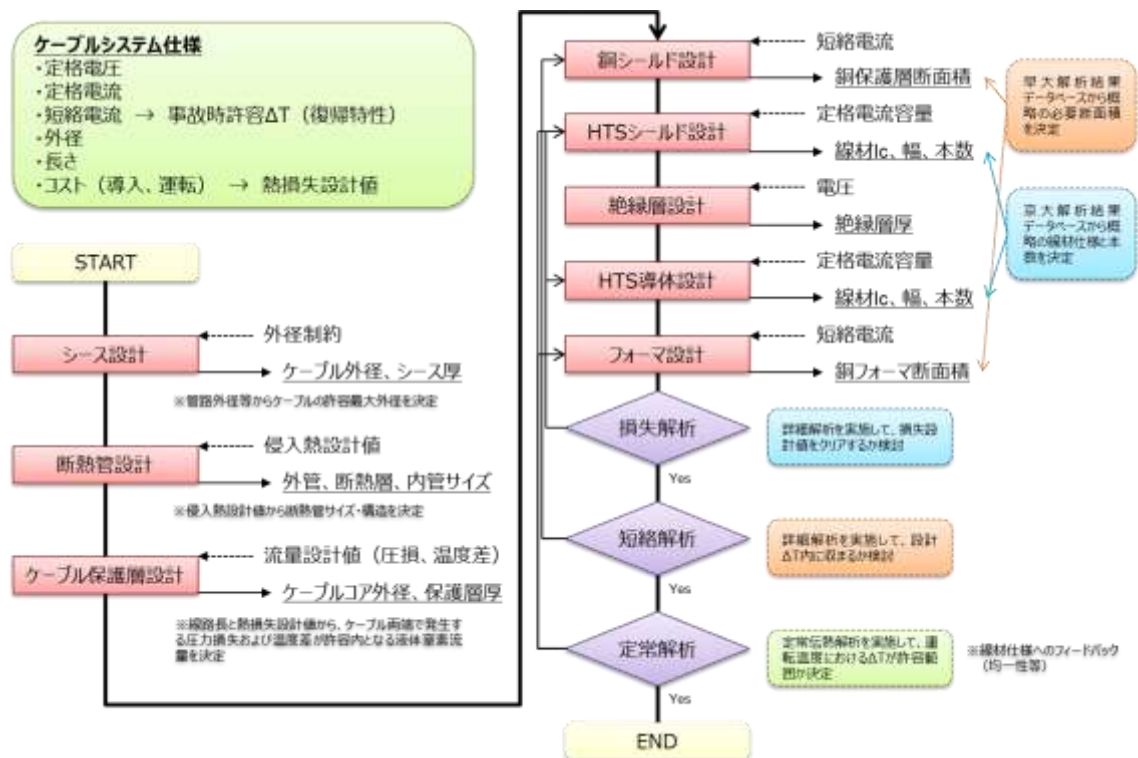


図 2.2.2-16 三心一括型超電導ケーブルの構造



図 2.2.2-17 三心一括型超電導ケーブルの設計ポイント

表 2.2.2-6 各項目の対策及び最適化方針

項目	対策方針
低損失化設計	<ul style="list-style-type: none"> ・ <u>損失を下げなければならない場合</u> 線材 I_c の向上による I_{op} / I_c 抑制 線材端部 J_c 低下の低減 (磁束侵入、I_c 向上) 線材幅縮小 (多層の場合) ・ <u>寸法に余裕が出た場合</u> 層数増加 → I_c 増加 → I_{op} / I_c 抑制
耐短絡電流設計	<ul style="list-style-type: none"> ・ <u>ケーブル全体の温度上昇をさらに下げた設計を行う場合</u> 銅保護層 (フォーマ、銅シールド、線材保護層) 断面積を増やす ・ <u>HTS 層 (高温超電導層) の温度上昇のみを下げる場合</u> 銅フォーマ及び銅シールドと線材銅めっきとの割合を変える (銅フォーマ及び銅シールドの銅断面積のみを大きくする) 線材の保護層に高抵抗材料を適用する (短絡電流が流れた際に銅フォーマと銅シールドへの素早い電流転流が期待でき、HTS 層 (高温超電導層) の温度上昇のみを下げる事が可能)
定常伝熱設計	<p>線材 I_c の均一性の改善</p> <p>(I_c の局所欠陥の大きさと分布範囲によってホットスポットの発生及び熱暴走に至るかが決る)</p>

<低損失化の設計指針>

Y系超電導線材を用いた超電導電力ケーブルの交流損失特性は、臨界電流の大きさとばらつき、線材幅、幅方向 J_c 分布（特に線材端での J_c の低下）といった線材特性と、層数、線材間ギャップ幅、線材本数（線材幅・ギャップ幅・層数と関連し独立には決まらない）、スパイラルピッチといったケーブル構造によって決定される。

本プロジェクトにおいて得られた知見から、交流損失低減という視点からのケーブル設計指針（多層導体）をまとめると以下ようになる。

- ・ 線材の臨界電流が向上した場合、ケーブル臨界電流は変えず層数（すなわち線材本数）を低減するよりも、層数（線材本数）は変えずケーブル臨界電流を上げて負荷率を下げるのが交流損失低減に効果的である。
- ・ 現実に起こり得る程度の線材臨界電流のばらつきが交流損失に与える影響は小さい。
- ・ 線材幅縮小が交流損失低減に効果的で、線材間ギャップの影響は単層導体等の場合に比べて小さい。
- ・ 線材端部における J_c の低下に交流損失は鈍感である。
- ・ ただし、線材端で同程度の幅で J_c が低下している場合、線材幅が小さいほど線材 I_c を低下させるので、その結果、電流負荷率が增大すると交流損失は増大する。
- ・ 線材間ギャップ幅は、均流化ピッチに対して周長と線材数でほぼ決まる。
- ・ 上記は、導体層についての指針であるが、シールド層も基本的には考え方は同じである。

上記指針に沿った推奨数値例（4層導体、フォーマ径 20 mm 程度の場合）

- ・ 線材幅：2 mm 程度
 - ・ 線材幅端部 J_c 低下の範囲：0.2～0.3 mm 程度以下
 - ・ 線材間ギャップ：均流化ピッチに対して周長と線材数で決まる値
- なお、ここで、線材幅端部での J_c 低下範囲の推奨値として 0.2～0.3 mm 程度以下という数値を掲げたが、この値は、本プロジェクトにおける平成 23 年度までの磁気ナイフ法による測定で、実現可能であることが確かめられている値である。

<耐過電流の設計指針>

Y系超電導線材を用いた超電導電力ケーブルの耐過電流解析のポイントを下記にまとめる。

●解析方法

- ・ 電流分布解析と熱解析の連成
- ・ 電流分布解析は3次元有限要素法（ ϕ 法）と回路解析法の連成、熱解析は3次元有限要素法
- ・ インダクタンスは集中定数として回路方程式に代入

●モデル化

- ・ 超電導特性はn値モデルを採用
- ・ 層間の熱のやり取りを無視
 - ※2secの短絡では殆ど熱の伝わりがないため
 - ※解析モデルの簡略化と解析時間の短縮のため

●メッシュ分割

- ・ 3次元有限要素法のメッシュ分割は6面体メッシュを採用
- ・ 解析モデルの規模によって適宜にメッシュサイズを調整

●境界条件

- ・ ケーブル端部は等電位面、シールド層は閉ループで両端電圧をゼロ
- ・ ケーブル最外層の表面が液体窒素に接触

●物性値

- ・ I_c 、n値は実測値を採用（実測できない場合は素線特性を採用）
- ・ 導体（フォーマ、銅シールド、線材安定化層）の抵抗率は実測値を反映
- ・ 絶縁層（PPLP®）の熱容量、熱伝導率は液体窒素浸漬冷却状態の実測値を反映
- ・ 液体窒素は非線形熱伝達特性を考慮
- ・ 物性値の温度依存性を考慮、データの出典は超伝導・低温工学ハンドブック
 - ※ただし、n値と絶縁層（PPLP®）の熱容量、熱伝導率は一定値

上記指針に沿った推奨数値例（短絡電流 31.5kA、2sec）

- ・ 銅めっき（両面合計）：30-51 mm-t 程度
- ・ 銅フォーマ断面積：140 mm² 程度
- ・ 銅シールド断面積：100 mm² 程度
- ・ 耐電磁力：線材剥離耐力：20 kPa 程度以上

<定常運転時熱的安定性の設計指針>

Y 系超電導線材を用いた超電導電力ケーブルの定常時熱的安定性解析のポイントを下記にまとめる。

●解析方法

- ・ 電流分布解析と熱解析の連成
- ・ 電流分布解析は回路解析法、熱解析は 3 次元有限要素法
- ・ インダクタンスは集中定数として回路方程式に代入

●モデル化

- ・ 超電導特性は n 値モデルを採用
- ・ 素線間の熱のやり取りの有無を考慮
- ・ 定常時の交流損失を負荷率の関数として考慮

●メッシュ分割

- ・ 3 次元有限要素法のメッシュ分割は 6 面体メッシュを採用
- ・ 解析モデルの規模によって適宜にメッシュサイズを調整

●境界条件

- ・ ケーブル端部は等電位面、シールド層は閉ループで両端電圧をゼロ
- ・ ケーブル最外層の表面が液体窒素に接触

●物性値

- ・ I_c 、n 値はパラメータ化
- ・ 導体（フォーマ、銅シールド、線材安定化層）の抵抗率は実測値を反映
- ・ 絶縁層（PPLP®）の熱容量、熱伝導率は液体窒素浸漬冷却状態の実測値を反映
- ・ 液体窒素は非線形熱伝達特性を考慮
- ・ 物性値の温度依存性を考慮、データの出典は超伝導・低温工学ハンドブック
※ただし、n 値と絶縁層（PPLP®）の熱容量、熱伝導率は一定値

上記指針に沿った推奨数値例（短絡電流 31.5kA、2sec）

- ・ 局所 I_c 欠陥：10mm 以下
 - 長尺線材の I_c 測定で観測される低 n 値特性は、局所 I_c 欠陥が原因
 - I_c 欠陥の程度が大きく、長いほど健全な線材に転流しやすくなる
 - 欠陥長がケーブル全長の 1%以下では、 $I_c=0$ A の欠陥でも殆ど転流が生じない
 - 欠陥部全体の発熱は欠陥長が 1～5%において最大となる
 - 素線間の熱伝導がある場合：発熱が健全素線に伝わり、最大温度上昇は 2K 以下
 - 素線間の熱伝導がない場合：ホットスポットが発生、10 mm 長以下の欠陥であれば熱暴走の問題はない

引用論文リスト

- (1) NEDO 事業原簿、「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」
- (2) JEC-3401 「OF ケーブルの高電圧試験法」 (2006)
- (3) N. Amemiya, R. Nishino, K. Takeuchi, M. Nii, T. Nakamura, M. Yagi, and T. Okuma, “Numerical Simulation on Fault Current Condition in 66 kV Class RE-123 Superconducting Cable”, *Physica C* vol.470 (2010) 1580-1583.
- (4) X. Wang, A. Ishiyama, M. Ohya, N. Fujiwara, “Over-Current Characteristics of 66-kV RE123 HTS Power Cable”, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.* vol.21 (2011) 1013-1016.
- (5) Xudong Wang, Atsushi Ishiyama, Masayoshi Ohya, Osamu Maruyama, Takeshi Ohkuma, “Overcurrent tests and numerical simulations on a 66-kV-class RE123 high-temperature superconducting model cable”, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.* vol.22 (2012).
- (6) X. Wang, A. Ishiyama, M. Ohya, O. Maruyama, T. Ohkuma, “Numerical analyses of the electromagnetic force acting on high-temperature superconducting power cables due to fault current, “Numerical analyses of the electromagnetic force acting on high-temperature superconducting power cables due to fault current”, *Superconductor Science and Technology* vol.25 (2012) 054018.

2.2.3 275 kV 高電圧ケーブル化技術の開発

高電圧ケーブルは 275 kV/3 kA_{rms} を送電可能とする終端部と中間接続部を有する単相ケーブルであり、後半 2 ヶ年間で 30 m ケーブルの検証試験を計画している。高電圧ケーブルに使用する Y 系超電導線材の構造とケーブルの構造を図 2.2.3-1 に示す。Y 系超電導線材は、ハステロイ™ 基板上に IBAD 法等により中間層を、MOD 法によって超電導層(YB_{1.5}C₃O_y 組成)を形成し、その上に DC スパッタリング法で Ag 安定化層を形成する。その後、銅めっき等を施し、ケーブル用 Y 系超電導線材を作製する。高電圧ケーブルは、フォーマ、超電導層、電気絶縁層、シールド層、保護層から構成される超電導ケーブルコアを、2 重構造のステンレス製コルゲート管に収納し、ケーブルコアと管の隙間を流れる液体窒素で冷却される。このケーブル開発状況について以下に述べていく。

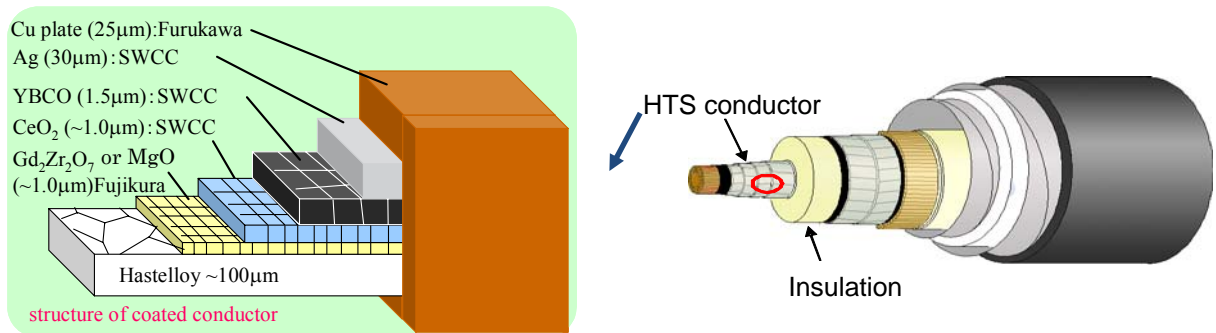


図 2.2.3-1 275 kV 高電圧ケーブルの構造と使用する超電導線材

2.2.3-1 高電圧絶縁・低誘電体損失技術（古河電気工業、名古屋大学）

(1) 研究開発目標

超電導ケーブルによる高密度・大容量・低損失送電の実現に向けて、世界各国において実証試験が進められている。この超電導電力ケーブル開発での重要技術課題の一つとして、電気絶縁技術がある。超電導電力ケーブルの電気絶縁構造は、高電圧導体上に積層・巻回された絶縁テープに液体窒素が含浸された複合絶縁系である。この絶縁テープについては、液体窒素中における複合的な材料による電気的特性、機械特性を把握する必要がある。超電導ケーブル、低温機器、高電圧設備に使用実績のある材料を選択し、誘電特性、破壊特性、機械特性を取得している。特に、誘電特性においては 275 kV 超電導ケーブルの損失の主要因となる可能性があり、3 kA_{rms} の交流損失と 275 kV の誘電体損失合わせて 0.8 W/m-相以下とすることを目標とした。

(2) 研究内容 1 – 絶縁材料の選定 –

高温超電導ケーブルの電気絶縁材料としては、半合成紙（クラフト紙とポリプロピレンフィルム（PP）のラミネート紙）が使われており、この半合成紙としては、本プロジェクト開始時点では PPLP®-A（A 紙）が用いられてきた。しかしながら、A 紙はクラフト紙の比率が高いために誘電体損失が大きくなる問題がある。そこで、A 紙に加えて新たに 3 種類の絶縁紙を評価した。この選定基準は、大量に入手可能で超電導ケーブル、低温機器、高電圧設備に使用実績のあるものとした。PPLP®-C（B 紙）は PP の比率を A 紙の 40 % から 60 % にしている。次に、極低温電線の絶縁紙として実績のある Tyvek® にカレンダー処理を施したもの（C 紙）、さらに変圧器で実績のある絶縁紙としてノーメックス紙に、電気特性をあげるためにマイカ（雲母）を混入させて高圧の電気機器への応用をめざしたタイプ 418（D 紙）を候補とした。ここで、A 紙は仕様厚み 125 μm のもの、B 紙は仕様厚み 120 μm のものを使用した。

機械試験は、以下のように実施した。まず、幅 25 mm に絶縁材料を切断し、その両端を固定端部間 75 mm で固定し、室温と液体窒素に浸漬した状態（浸漬時間 5 分以上）でそれぞれ引張試験（引張り速度 10 mm/min）を実施し、破断強度を測定した。長手方向と幅方向で測定した結果、液体窒素中の方が殆どの場合で強度が高くなっており、液体窒素下での使用に関しての問題はない。

次に、絶縁厚 4 mm、長さ 2 m の絶縁モデルケーブルを作製して、比誘電率 ϵ と誘電正接 $\tan\delta$ 測定した。これらの試験結果を表 2.2.3-1 に示す。この試験結果から、導体遮蔽外径を 27 mm として、絶縁厚 25 mm とした場合の 275 kV（対地電圧 160 kV）課電時の誘電体損失も併せて示した。D 紙は、誘電体損失に影響する $\tan\delta$ が大きく、ケーブル開発目標である損失 0.8 W/m-相を達成できない。また、A 紙を使用するとケーブルの全損失 0.8 W/m-相以下を達成するのに、交流損失分のマージンが小さくなり、目標達成が難しい。C 紙（Tyvek®）を使用すると、誘電体損失が 0.06 W/m-相と見込まれ、目標レベルの 1/10 の低損失である。一方、B 紙では誘電体損失がやや高く、交流損失のマージンが少なくなる。しかしながら、このレベルの交流損失低減は可能と判断した。

この結果、絶縁材料候補として、B 紙と C 紙に絞り込んだ。

表 2.2.3-1 絶縁材料の誘電特性と見込まれる誘電体損失

Sample	ϵ	$\tan\delta$ [%]	誘電体損失 W/m 導体遮蔽径 27 mm 絶縁厚 25 mm で試算
A 紙	1.9	0.077	0.62
B 紙	1.9	0.057~0.061	0.46~0.49
C 紙	1.8	0.008	0.06
D 紙	2.2	0.22	2.03

次に B、C 紙を用いて、破壊特性を調査した。φ20 mm の長さ 400 mm の金属ロッド上に絶縁厚 1 mm の絶縁モデルケーブルを作製し、0.3 MPa(絶対圧)に加圧した液体窒素下にて課電試験を実施した。この時の絶縁モデルケーブルの仕様を表 2.2.3-2 に、その外観を図 2.2.3-2 に示す。

表 2.2.3-2 絶縁モデルケーブル仕様

構造	仕様
電極	φ20 mm、400 mm 長の銅棒
内部半導電層	カーボン紙 2 枚、1/2 ラップ巻き
電気絶縁層	1/3 ラップ Gap 巻き。絶縁 1 mm 厚 (B 紙 9 枚、C 紙 11 枚)
外部半導電層	カーボン紙 2 枚、1/2 ラップ巻き



図 2.2.3-2 絶縁モデルケーブルの外観 (上が C 紙、下が B 紙)

図 2.2.3-3 は B 紙と C 紙の AC (商用周波耐電圧) 破壊試験を示しており、電圧は 1 分毎に 1 kV 上げるステップとした。図 2.2.3-4 は PPLP®-C と Tyvek®の雷インパルス (Imp) 破壊試験を示しており、Imp 電圧は、設定電圧で 3 回行なった後に、3 kV ずつ電圧を上げるステップとした。図 2.2.3-3、図 2.2.3-4 より、AC, Imp 試験ともに、B 紙の耐電圧特性の方が C 紙よりも良いことが確認された。このため、C 紙で設計すると、絶縁厚が厚くなり、コンパクト性を失ってしまう。一方、誘電特性においては、表 2.2.3-1 で示したように C 紙の方が一桁程度小さくできる。今回、使用した C 紙はカレンダー加工を施して、厚みを均一化したがる、密度差があり、特に絶縁厚が厚くなればなるほど、皺が入りやすいという問題点が見つかった。275 kV ケーブルは基幹線路として高信頼性を必要とするため、今回の研究では B 紙に絞り込んで、体積効果や長期特性のデータを取得することにした。

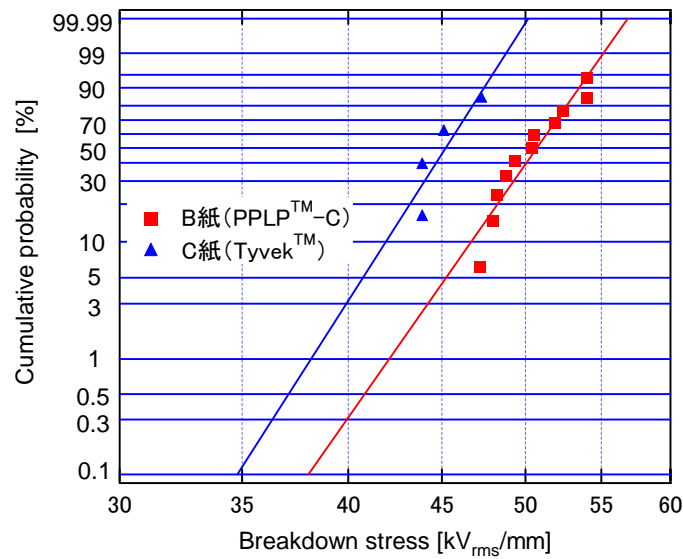


図 2.2.3-3 AC 破壊試験結果のワイブルプロット

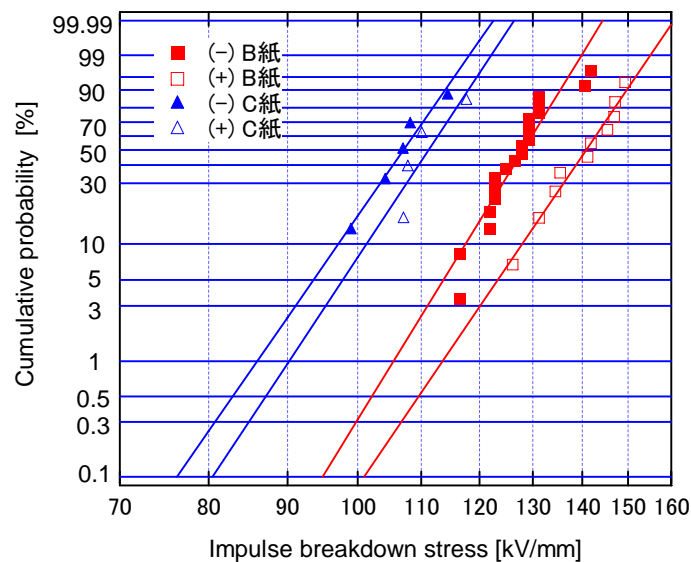


図 2.2.3-4 Imp 破壊試験結果のワイブルプロット

(3) 研究内容 2 一部分放電特性一

超電導ケーブルで用いられている液体窒素／積層テープ複合絶縁系に局所的な部分放電 (PD: Partial Discharge) が長期間発生すると絶縁耐力の劣化を引き起こし、最終的には絶縁破壊に至る危険性があると認められている。そこで、超電導電力ケーブル用の電気絶縁材料を用いた液体窒素／積層テープ複合絶縁系の部分放電計測を行い、実用的・合理的な絶縁設計に資する部分放電開始特性の取得を試みた。

A 紙 (PPLP®-A) は 500 m の超電導ケーブル実証試験¹⁾にも使用されており、多数の部分放電データの蓄積がある。今回選定した B 紙 (PPLP®-C) が A 紙と比較して、どのような部分放電特性を持っているのかを調査した。

供試電極系の構造を図 2.2.3-5 に示す。供試電極系は、エポキシモールドを施した高電圧平板電極と接地平板電極との間に PP 積層テープを挟み、バットギャップを模擬した直径 5 mm の円孔を設けた平行平板電極モデルである。実験では、積層テープの種類、枚数、バットギャップ数、及び高電圧電極径を変化させた。A 紙のデータは文献等で公表されているデータ²⁾を使用した。

PD 検出時点の印加電圧実効値を積層テープ中の電界値に換算したものを部分放電開始電界 (PDIE: PD Inception Electric field strength) と定義した。各実験条件において PDIE を 20 回測定し、この PDIE をワイブル分布により統計的に処理し、統計的電界体積 (SSLV: Statistical Stressed Liquid Volume) を算出した。SSLV は絶縁材料の誘電率の違いから電界が集中する部分において、その微小ユニットの局所電界での重み付けを考慮した有効長全体の電界体積である³⁾。B 紙 (PPLP[®]-C) の 50 %PD 開始電界 (PDIE50) の SSLV 依存性を A 紙 (PPLP[®]-A) とともに図 2.2.3-6 に示す。同図より、A 紙、B 紙ともに、SSLV の増加とともに絶縁上の弱点 (液体窒素中のマイクロバブル等) が増加するため、PDIE50 は減少した後、ほぼ一定になることが分かる。PDIE50 の一定値 (下限値) は A 紙で 15.4 kV/mm、B 紙で 21.6 kV/mm であり、B 紙の方が A 紙よりも約 40 %高いことが分かる。これは、PP 割合の高いことによる効果と考えられる。また、ケーブル構造では、SSLV は大きくなるため、同図のほぼ一定値の部分に相当する。このことから、ケーブルの絶縁厚が 1 mm でも 30 mm でも、PDIE 値は、ほぼ同じ値を持つことが期待される。

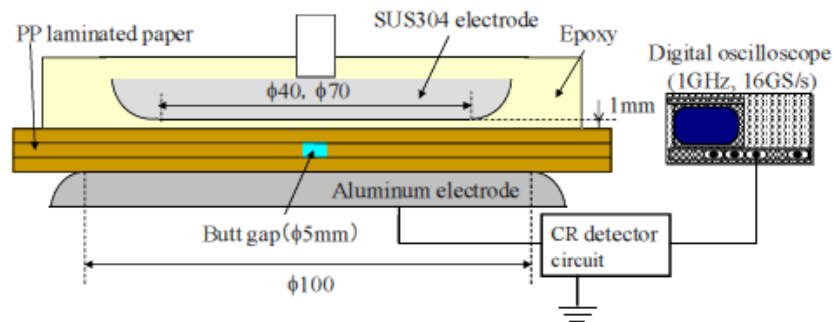


図 2.2.3-5 供試電極系

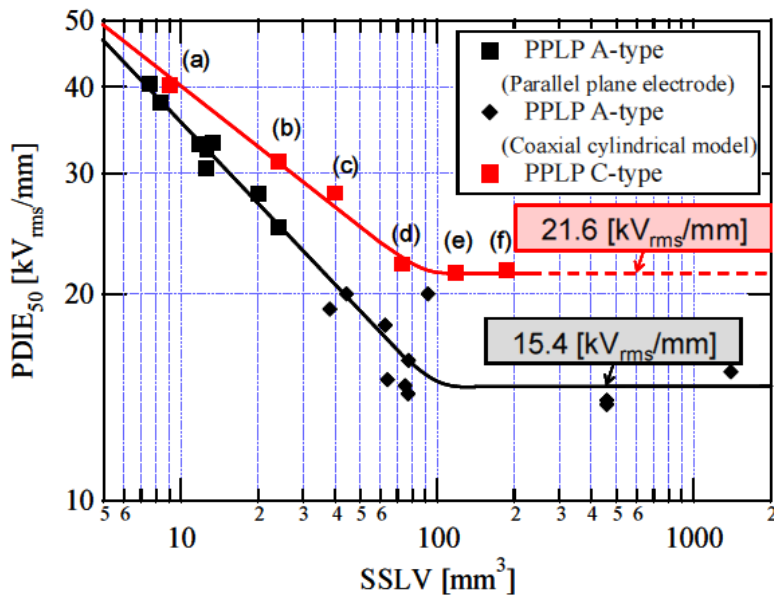


図 2.2.3-6 A 紙、B 紙の PDIE50-SSLV 特性

表 2.2.3-2 の 1 mm 絶縁モデルケーブルの PDIE を測定した。電圧は 1 kV/min のステップで上げ、約 5 pC の部分放電信号をトリガーにした。その図 2.2.3-7 にそのワイブルプロットを示す。同図より PDIE50 は 26.0 kV/mm、0.1 %の累積確率は 21.0 kV/mm となり、21 kV/mm を暫定の設計ストレスとしていた。

図 2.2.3-8 では部分放電とノイズの分別方法の見直しにより、PDIE50 は 26.0 kV/mm のままだが、0.1 %の累積確率が上がり、21.0 kV/mm から 22.0 kV/mm になった。部分放電信号は図 2.2.3-9 に示すように、波形のピークで発生している。

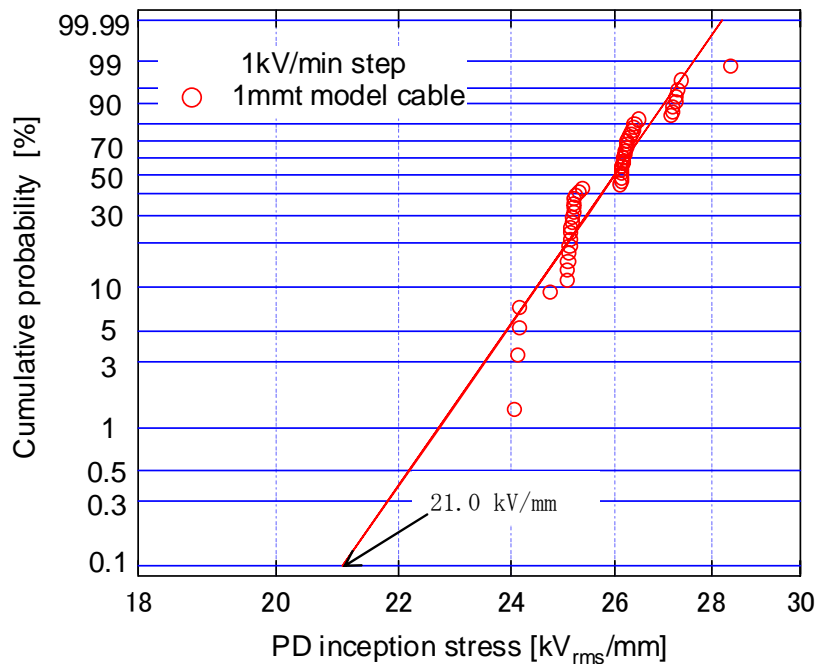


図 2.2.3-7 B 紙を使った絶縁モデルケーブルの PDIE のワイブルプロット

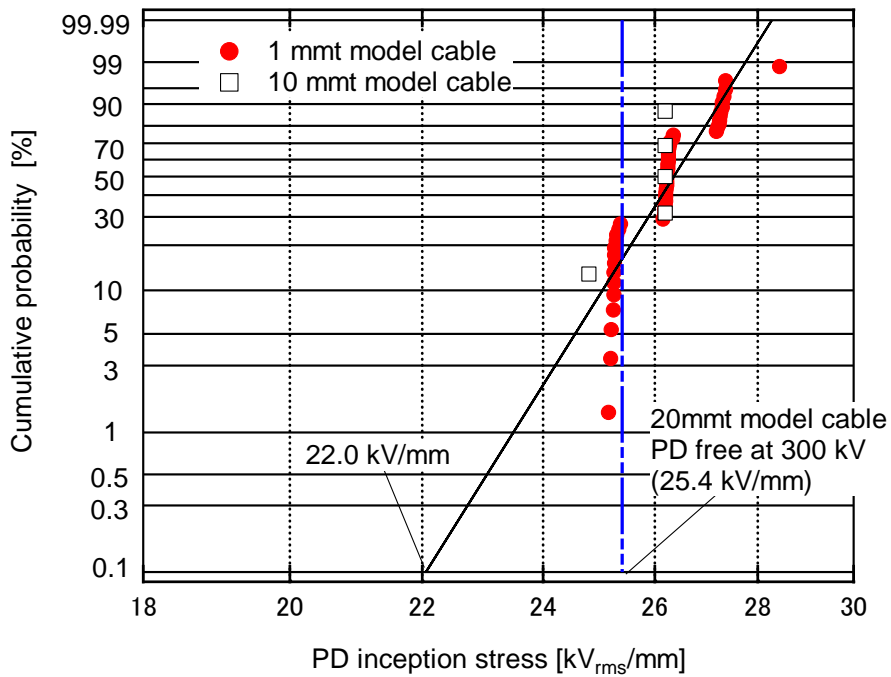


図 2.2.3-8 部分放電検出の見直し後のデータ B紙を使った絶縁モデルケーブル (1 mm、10 mm、20 mm) の PDIE のワイブルプロット

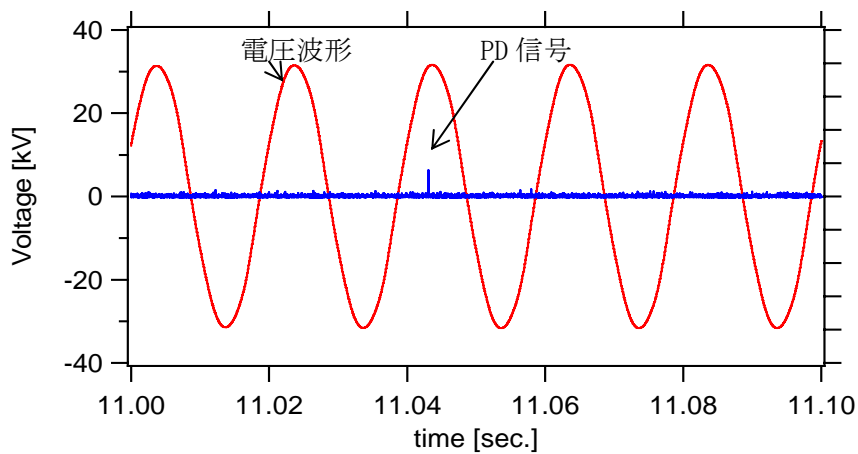


図 2.2.3-9 B紙の PDIE の発生状況

次に、表 2.2.3-3 の 10 mm 絶縁モデルケーブルの PDIE を測定した。図 2.2.3-10 の容器に 5 m 長のケーブルを入れ、液体窒素への浸漬は 1 日以上とし、0.3 MPa(絶対圧)の圧力で 30 分以上維持した後、部分放電(PD)試験を開始した。この試験では、5 m 長のケーブルの中央に遮蔽のスリットを入れ、スリット両側のケーブルを同調させることで、部分放電測定を行った。この時の部分放電の検出感度はパルスジェネレータにより 30 pC であった。課電時の部分放電の様子を図 2.2.3-11 に示す。185 kV から 190 kV の電圧を上昇する過程で 50-100 pC の信号を検出し、190 kV で 1000-2000 pC の部分放電信号が連続で検出された。この条件での PD 開始電圧

を 190 kV とし、電圧値を徐々に下げて、PD 消滅電圧を確認した後、電圧をゼロまで落とした。このサイクルを 5 回繰り返したところ、1 回目の PD 開始電圧が 180 kV (24.8 kV/mm)、2-5 回目が 190 kV (26.2 kV/mm) であり、PD 消滅電圧は全て 160 kV であった。この結果、1 mm と 10 mm の絶縁モデルケーブルの PDIE は図 2.2.3-8 に示すように、殆ど変化がなかった。

同様に表 2.2.3-3 に示した 20 mm の絶縁モデルケーブルについても測定したところ、1-4 回目までは 300 kV(25.4 kV/mm) で PD が観測されず、5 回目の 297 kV(25.2 kV/mm) で PD が観測され、引き続きの 6 回目では 310 kV(26.3 kV/mm) で観測されなかった。この結果、1 mm、10 mm、20 mm のケーブルで PDIE 値は殆ど変わっていない。つまり、絶縁厚の体積効果は、PDIE とは関係なく、図 2.2.3-8 のワイブルプロットで示したように、0.1 % の累積確率 22.0 kV/mm を PD フリーの設計値とした。

表 2.2.3-3 10 mm,20 mm 絶縁モデルケーブルの仕様

構造	仕様	10mm ケーブル 外径 [mm]	20mm ケーブル 外径 [mm]
銅フォーマ (高電圧)	325 mm ² 銅撚り線	21.7	21.7
半導電層	カーボン紙	24.2	24.2
絶縁層	PPLP®-C	44.2	64.2
半導電層	カーボン紙	44.9	64.9
遮蔽 (接地)	平編み銅線		



図 2.2.3-10 課電試験容器

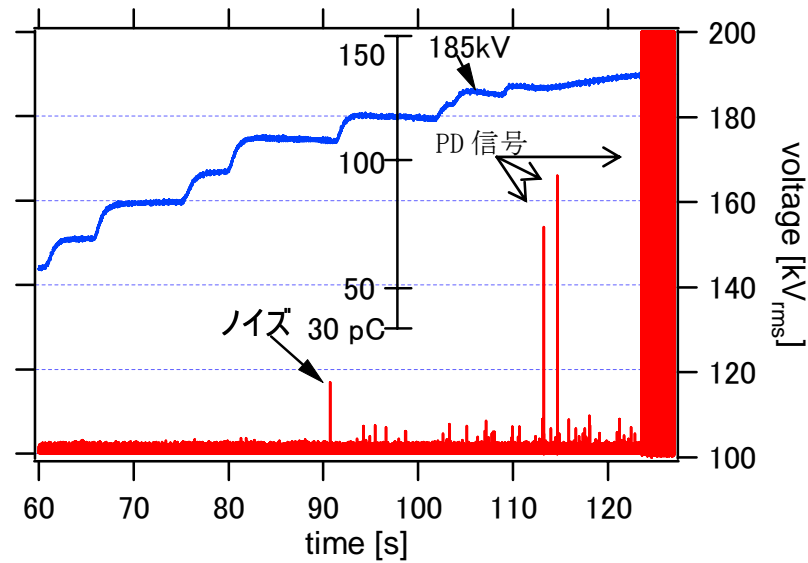


図 2.2.3-11 10 mm 絶縁モデルケーブルの PDIE の発生状況

なお、超電導ケーブルの冷却・運転環境として、最低保証圧力 $P=0.3$ MPa（絶対圧）、温度 $T=65\sim 77$ K のサブクール液体窒素が想定されているが、過去の研究においては、サブクール液体窒素の広範な圧力・温度領域における体系的な絶縁データは調査されていない。そこで、 $P=0.1\sim 0.3$ MPa（絶対圧）、 $T=65\sim 77$ K のサブクール液体窒素について、PDIE の圧力・温度依存性を体系的に取得した。図 2.2.3-12 に温度をパラメータとした PDIE の圧力依存性、図 2.2.3-13 に圧力をパラメータとした PDIE の温度依存性をそれぞれ示す。両図より、本実験の範囲内において、PDIE は圧力上昇とともに増大・飽和し、温度低下とともに直線的に増大する傾向にあることがわかる。特に、 $P=0.3$ MPa、 $T=65$ K の PDIE (35.0 kV_{rms}/mm) は、 $P=0.1$ MPa、 $T=77$ K の PDIE (24.5 kV_{rms}/mm) の 1.43 倍に達することを見出した。サブクール液体窒素中における PDIE の増大要因として、圧力依存性については液体窒素中のマイクロバブルの縮小、温度依存性については液体窒素の密度上昇が考えられる。上述の PDIE 増大分は、絶縁厚さの低減または絶縁裕度として、高温超電導ケーブルの実用的・合理的絶縁設計に反映できるものと考えられる。

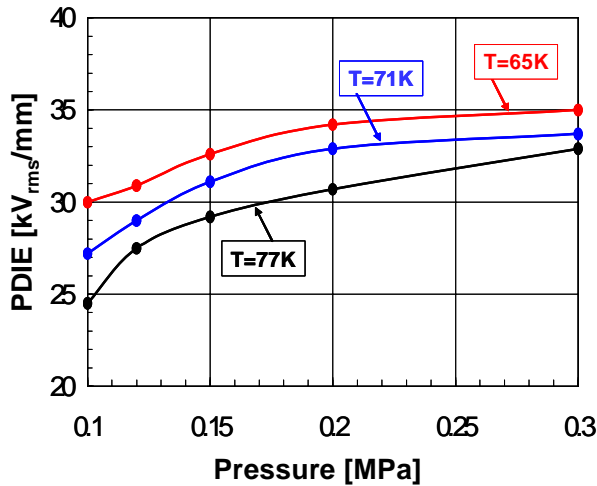


図 2.2.3-12 サブクール液体窒素中の PDIE の圧力依存性

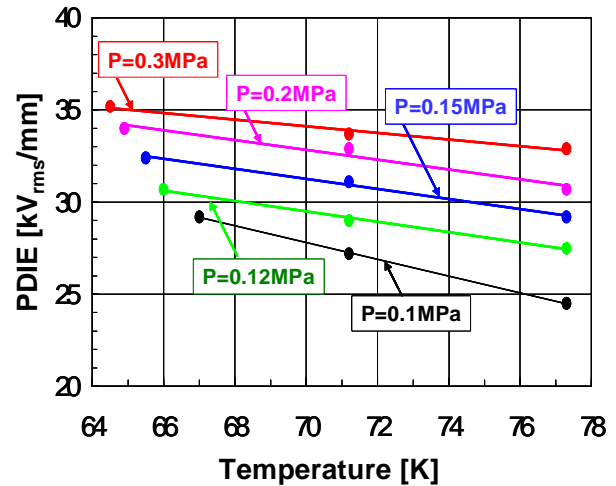


図 2.2.3-13 サブクール液体窒素中の PDIE の温度依存性

(4) 研究内容 3 – Imp 破壊特性 –

表 2.2.3-3 の 10 mm 絶縁モデルケーブルの雷インパルス(Imp)試験を実施した。雷インパルス電圧の昇圧は 25 kV-3 回のステップとした。正極性で 750 kV(755 kV-3 回をクリア)の耐電圧を確認後、負極性で試験を行い、746 kV で試料有効部での破壊を確認した。電界値で換算すると正極性では 104.3 kV/mm 以上、負極性では 103.1 kV/mm となった。この値を 1 mm 絶縁モデルケーブルと比較したのが、図 2.2.3-14 である。この結果より、10 mm 絶縁モデルケーブルの破壊値は 1 mm のそれと比較して低下傾向にある。10 mm 絶縁モデルケーブルの破壊データが 1 mm 絶縁モデルケーブルと同様のバラツキ (3 σ) を持つとして、83 kV/mm を設計ストレスとした。このストレスを使って、22 mm 絶縁モデルケーブルを作製し、275 kV の雷インパルス試験電圧 1155 kV をクリアして、設計ストレスの妥当性を確認した。

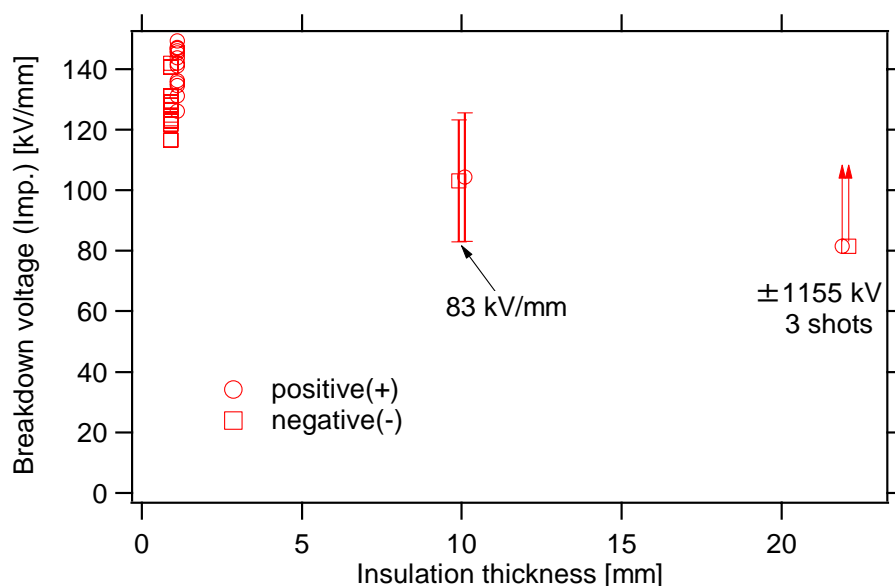


図 2.2.3-14 22 mm 絶縁モデルケーブルと 10 mm 絶縁モデルケーブルと 1 mm 絶縁モデルケーブルの Imp 破壊特性

(5) 研究内容 4 -AC 破壊と部分放電の長期特性-

A 紙については、絶縁厚 1 mm の絶縁モデルケーブルにおいて、1,000 時間までの破壊特性が取得されており、破壊の寿命指数 $n=49$ が見いだされている⁴⁾。B 紙においても図 2.2.3-15 (左) に示すように 100 時間までで取得し、寿命指数 $n=50$ を得た。図中では B 紙の絶縁強度が A 紙と比較して低く見えるが、これは圧力条件の違いによるもので、同条件で測定した場合の破壊強度は同等である。B 紙は A 紙と材料構成が殆ど変わらないことから、A 紙と同様の破壊の寿命指数 49 前後が推定され、その推定どおり、結果は 50 となった。一方、A 紙の部分放電の長期特性は、シートサンプルにおいて、100 前後の寿命指数が公表されている⁵⁾。B 紙の絶縁モデルケーブルについては、図 2.2.3-15 (右) のように、760 h までのデータを取得して、 $n=80$ を確認した。

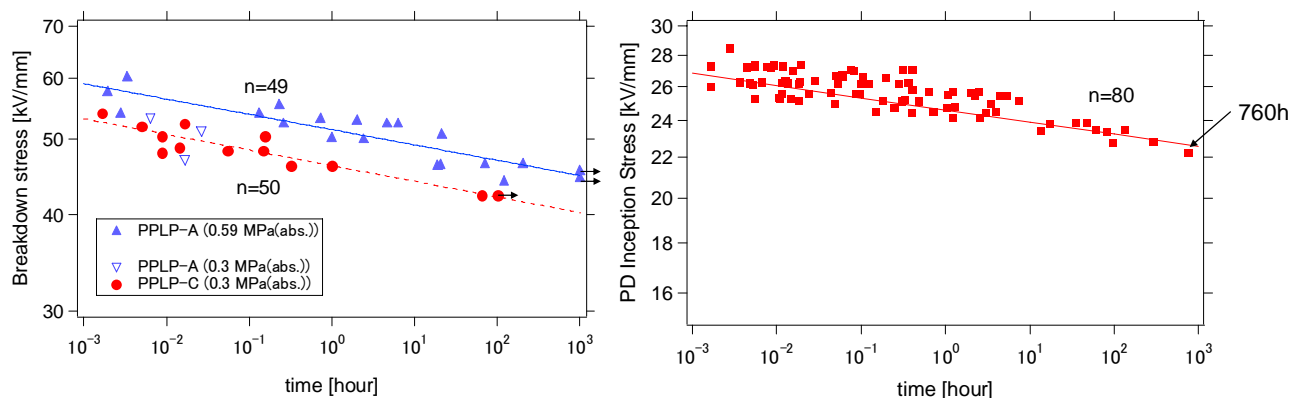


図 2.2.3-15 B 紙絶縁モデルケーブルの破壊 V-t 特性 (左)、PDIE の V-特性 (右)

(6) 研究内容 5 –ケーブルの絶縁設計–

試験条件については、Imp 試験が 1155 kV-3 回、AC 試験が 300 kV-10 分で部分放電フリーとしていた。

Imp の設計電界は 10 mm 絶縁モデルの結果、103.1 kV/mm(746 kV 破壊)から 1 mm 絶縁モデルの 3σをとって、83 kV/mm とした。一方、AC の設計電界は図 2.2.3-7 のワイブルの結果から 0.1%の発生確率として 21.0 kV/mm であり、この値を設計ストレスとした。絶縁厚 t は式 (2.2.3-1) から算出する。

$$t = r \times (\exp(V/Er) - 1) \quad (2.2.3-1)$$

ここで、r は導体遮蔽外半径、V は試験電圧、E は設計電界である。

2.2.3-2 の交流損失低減技術及び 2.2.3-4 の耐過電流ケーブル設計技術から導体遮蔽外半径は 13.5 mm としており、この数値を代入すると、絶縁厚は Imp 設計で 24.5 mm、AC 設計で 25.5 mm となる。そのため、25.5 mm を絶縁厚とした。

この時のケーブル設計を表 2.2.3-4 に示す。絶縁厚 25.5 mm のケーブルに、現在まで得られている誘電特性の値を使用すると、誘電体損失は 0.46 W/m-相となり、全損失 0.8 W/m-相との差の交流損失のマージンはやや少ない。一方、誘電特性を減らして、さらに設計電界への裕度をもたせて、絶縁厚を 28 mm にした場合、誘電体損失は 0.43 W/m-相となり、交流損失のマージンは大きくなる。

表 2.2.3-4 275 kV 超電導ケーブルの設計

構成		絶縁紙：B 紙 (PPLP [®] -C)		
設計絶縁厚		24.5 mm (IMP 設計)	25.5 mm (PD フリー設計)	28 mm (誘電体損失小)
フォーマ外径		21.7 mm	21.7 mm	21.7 mm
導体遮蔽外径		27.0 mm	27.0 mm	27.0 mm
絶縁外径		76.0 mm	78.0 mm	83.0 mm
コア全体外径		85.0 mm	87.0 mm	91.0 mm
断熱内管	内径	95 mm	95 mm	95 mm
	外径	105 mm	105 mm	105 mm
断熱外管	内径	127 mm	127 mm	127 mm
	外径	141 mm	141 mm	141 mm
防食層		150 mm	150 mm	150 mm
誘電体損失(275 kV)		0.47 W/m	0.46 W/m	0.43 W/m
交流損失のマージン		0.33 W/m	0.34 W/m	0.37 W/m

次に、図 2.2.3-16 の設計フローを用いて、表 2.2.3-4 の設計の見直しを行った。まず、短絡の熱収支の結果、63 kA_{rms}-0.6 sec で超電導に劣化はなかったものの、温度上昇が 70 K と大きく、復帰に要する時間が長いため、⑨の銅フォーマの箇所、フォーマの断面積を上げ、さらに内側から冷やすことが可能な中空銅より線を検討した。断面積 400 mm²を入力し導体遮蔽外半径は、約 16.5-18 mm とした。

次に、⑤にフィードバックし、⑥で高温超電導シールド (HTS シールド) の損失を見積もり、⑦の絶縁層では前述したように部分放電のノイズと信号の判定条件を見直して、部分放電フリーのストレス 22 kV/mm を得た。一方で試験電圧は、275 kV システムの異常電圧、異常継続時間を 310 kV、1.43 秒の現象を試験時間 10 分と考えて、寿命指数 n 値を考慮して、AC300 kV、10 分を試験条件としていた。しかし、国際規格 (IEC) では n 値の概念がなく、異常電圧 310 kV でも部分放電を発生させないとの設計に改めた。以上より、試験電圧 AC310 kV-10 分で部分放電フリー (AC 設計)、Imp1155 kV-3 回とし (Imp 設計)、設計ストレスを部分放電フリーで 22 kV/mm、雷インパルス を 83 kV/mm とし、絶縁厚を再設計した。その結果、AC、Imp 設計で、それぞれの必要絶縁厚は 22 mm, 21.5 mm となり、安全サイドの 22 mm を採用した。



図 2.2.3-16 275 kV 超電導ケーブルの設計フロー

絶縁厚 22 mm は表 2.2.3-4 の設計よりも薄く、静電容量があがるため、誘電体損失は大きくなる。誘電体損失を評価した結果、0.6 W/m-相となり、その分だけ、交流損失のマージンは小さくなった。設計フローの⑥と⑧で交流損失を評価した結果、導体遮蔽外径が大きくなった分だけ、使用できる超電導線材が増えて、⑧の高温超電導導体 (HTS 導体) の交流損失は減り、72 K を運転温度にすれば、3 kA_{rms} で 0.2 W/m-相が見込めることが分かった (詳細は後述の図 2.2.3-35)。一方、短絡・熱収支設計では、⑨のフォーマの断面積が上がった分だけ、63 kA_{rms}-0.6 sec 時の上昇温度が抑制され、さらに、中空の液体窒素流路を持つことで、温度復帰が早くなった (詳細は後述の図 2.2.3-80)。

以上より、短絡時の裕度が良くなり、交流損失も運転温度で目標を達成することから、本設計を採用することにした。設計結果を表 2.2.3-5 に示す。

表 2.2.3-5 275 kV 超電導ケーブルの設計 (見直し後)

構成		絶縁紙 : B 紙 (PPLP [®] -C)	備考
設計絶縁厚		22 mm (PD フリー設計)	(Imp 設計だと 21.5 mm)
フォーマ外径		30.6 mm (内径 14 mm)	400 mm ²
導体遮蔽外径		33 – 36 mm	35.4 (外半径 17.7)
絶縁外径		77 – 80 mm	79.4 (外半径 39.7)
コア全体外径		88 – 91 mm	90.0
断熱内管	内径	100	
	外径	110	
断熱外管	内径	127	
	外径	141	
防食層		150	
誘電体損失(275 kV)		0.60 W/m-相	
交流損失のマージン		0.20 W/m-相	

図 2.2.3-15 の設計フローに基づいて、全ての要求項目に満足するケーブル設計ができたが、誘電体損失が交流損失の 3 倍となっており、最適化が今後の課題として残る。本研究での絶縁紙は現在、大量に入手でき、実績のあるものとしたが、この前提を取り去って、C 紙 (Tyvek[®]) の性能安定化を試みた。2.2.3-2 にその検討結果を示す。

(7) 成果

275 kV で使用する絶縁材料を選定した。C 紙 (Tyvek®) を使用すると、誘電体損失が 0.06 W/m-相と見込まれ、目標レベルの 1/10 の低損失である。しかし、現在入手可能な C 紙は密度や厚さにムラがあるため、絶縁が厚くなる 275 kV ケーブルでは、巻き皺が生じやすく、信頼性に不安がある。そのため、今後の適用可能性はあるものの、今回は、従来材料 (A 紙 PPLP®-A) に近い B 紙 (PPLP®-C) を採用した。要求性能を全て満たすように設計フローを見直した結果、誘電体損失は 0.6 W/m-相と高くなったものの、交流損失は 0.2 W/m-相になる見込みが得られて、全体を 0.8 W/m-相以下にすることができる。

B 紙は従来材料と比較して、ポリプロピレン(PP)の比率を 40%から 60%に上げているが、これにより部分放電開始特性は 40%も改善した。部分放電開始特性はシートだけではなく、1 mm,10 mm,20 mm 絶縁厚のモデルケーブルでも同様の特性が得られている。

B 紙の AC 長期特性は、現在までのところ、A 紙と同等の結果を得ており、寿命指数は部分放電フリーで 80、破壊で 50 を得た。

B 紙の Imp 特性は、絶縁厚 10 mm のモデルケーブルで 746 kV の破壊データを得ており、絶縁厚 22 mm のモデルケーブルでは 1155 kV 以上のデータを得た。

今回得られた B 紙のデータを基に、部分放電フリー設計と Imp 耐電圧設計を行ったところ、設計絶縁厚は 22 mm となった。このケーブルの誘電体損失は 0.6 W/m-相となるが、交流損失の低減により、目標の 0.8 W/m-相以下の損失は達成可能である。

引用論文リスト

- (1) S. Mukoyama, S. Maruyama, M. Yagi, N. Ishii, H. Kimura, H. Suzuki, M. Ichikawa, T. Takahashi, T. Okamoto, A. Kimura and K. Yasuda, "Demonstration and verification tests of a 500 m HTS cable in the super-ACE project", *Physica C* 426-431 (2005) 1365-1373
- (2) N. Hayakawa, R. Yamaguchi, H. Kojima, F. Endo and H. Okubo, "Partial Discharge Inception Strength in a Full-scale HTS Cable Based on LN₂/Polypropylen Laminated Paper Insulation", 16th IEEE International Conference on Dielectric Liquids, pp. 353-356, 2008
- (3) N. Hayakawa, T. Kobayashi, M. Hazeyama, T. Takahashi, K. Yasuda and H. Okubo, "Partial Discharge Inception Characteristics of LN₂/PP Laminated Paper Composite Insulation System for High Temperature Superconducting Cable", *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 12, No.1, pp. 166-174 (2005)
- (4) M. Yagi, S. Mukoyama, S. Tanaka, S. Honjo, M. Shimodate and Y. Takahashi,

“V-t characteristics of liquid nitrogen impregnated insulation for HTS cable”,
in Proc. 13 the Annual Conference of Power & Energy Society, IEE Japan,
No.423(2002) (in Japanese)

- (5) H. Okubo, M. Hazeyama, N. Hayakawa, S. Honjo, and T. Masuda, “V-t characteristics of Partial Discharge Inception in Liquid Nitrogen/PPLP Composite Insulation System for HTS Cable”, IEEE Trans, Dielect. Elect Insulation, Vol.9, No.6, pp. 945-951 (2002)

2.2.3-2 超電導電力ケーブル電気絶縁特性の調査（名古屋大学）

(1) 研究開発目標

275 kV レベルの高電圧超電導ケーブルの絶縁設計においては、高電圧に対する絶縁耐力の高信頼度化と誘電体損失の低減を両立させる必要がある。PPLP®-C を用いた現在の 275 kV 超電導ケーブルの絶縁設計においては、誘電体損失が交流損失の 3 倍に達しており、次世代の高電圧／低損失超電導ケーブルの開発に向けて、誘電体損失の大幅な低減対策が必要である。

平成 24 年度は PPLP®-C に代わる新しい絶縁材料として Tyvek®/PE 合成紙に着目し、その部分放電開始特性と誘電特性を調査することにより、高電圧超電導ケーブルへの適用可能性を評価した。Tyvek®/PE は Tyvek®（ポリエチレン不織布）にポリエチレンシートを熱融着した合成紙であり、ポーラス構造の Tyvek®の絶縁材料としての安定性向上を目的としたものである。

(2) 研究内容 1 ー新絶縁紙の検討結果ー

PPLP®-C、Tyvek®及び Tyvek®/PE のケーブルサンプル（内径：20.4 mm、絶縁厚さ：1 mm、有効長：100 mm）を温度 $T = 77$ K、圧力 $P = 0.1 \sim 0.3$ MPa（絶対圧）の液体窒素中に浸漬した。供試サンプル数は PPLP®-C：4、Tyvek®：10、Tyvek®/PE：4 である。各サンプルに交流高電圧（60 Hz）を印加し、ワイブル統計解析によって部分放電開始電界（0.1 %PDIE）を算出した。また、各サンプルに 300 V/mm の電界を印加し、比誘電率（ ϵ_r ）及び誘電正接（ $\tan\delta$ ）を測定した。

図 2.2.3-17(a)及び(b)に各絶縁材料の 0.1 %PDIE 及び相対標準偏差 σ_0 をそれぞれ示す。図 2.2.3-17 (a)より、 $P = 0.3$ MPa における Tyvek®/PE の 0.1 %PDIE は 25.5 kV_{rms}/mm であり、Tyvek®よりも約 15 %高く、PPLP®-C と同等であることがわかる。さらに図 2.2.3-17 (b)より、Tyvek®/PE の 0.1 %PDIE のばらつきは Tyvek®よりも小さいことがわかる。また、図 2.2.3-18 に各絶縁材料の比誘電率 ϵ_r 及び誘電正接 $\tan\delta$ （PPLP®-C の値に対する相対比）を示す。同図から、Tyvek®/PE の $\epsilon_r \times \tan\delta$ の値は Tyvek と同等であり、PPLP®-C の 20 %と低いことがわかる。これらの結果から、高電圧超電導ケーブルの絶縁材料として Tyvek®/PE を適用した場合、Tyvek®/PE の 0.1 %PDIE が PPLP®-C と同等であることから同一絶縁設計（絶縁厚さ）とすれば、誘電体損失が PPLP®-C を適用した場合の 20 %に低減されることを期待することができる。

次に、Tyvek®/PE を 275 kV 超電導ケーブルの絶縁材料として適用した場合の部分放電開始特性と損失特性を試算し、PPLP®-C を用いた従来の 275 kV 超電導ケーブルと比較した。超電導ケーブルの寸法は従来通り（超電導導体外半径 $a=17.7$ mm、絶縁厚さ $t=22.0$ mm、絶縁層外半径 $b=39.7$ mm）とし、表 2.2.3-6 の絶縁材料データを用いた。同表において、0.1%PDIE は図 2.2.3-17 における

P=0.3 MPa の値であり、比誘電率 ϵ_r 及び誘電正接 $\tan\delta$ は PPLP[®]-C の実績値と図 2.2.3-18 における相対比を用いた。

試算結果を図 2.2.3-19 に示す。同図では、PPLP[®]-C と Tyvek[®]/PE との複合絶縁方式（電位分担の観点から、高誘電率の PPLP[®]-C を内側に配置）の評価を含めて、横軸を PPLP[®]-C 層の外半径 c とした ($c=a$:All Tyvek[®], $c=b$:All PPLP[®]-C)。同図より、0.1%PDIV は $c=19.7\text{mm}$ (PPLP[®]-C 厚さ $c-a=2\text{mm}$ 、Tyvek[®]/PE 厚さ $b-c=20\text{mm}$) において最大値 (399.7 kV) を持つが、いずれの複合割合においても試験電圧 (310 kV) を上回っている。一方、誘電体損失は PPLP[®]-C 層の外半径が小さい (Tyvek[®]/PE 層の割合が高い) 程小さくなり、All Tyvek[®]/PE の誘電体損失 (0.125 W/m・相) は、All PPLP[®]-C の誘電体損失 (0.60 W/m・相) の 21% に低減することが分かる。これは、交流損失 (0.20 W/m・相) を含めた全損失が 41% (0.80 W/m・相→0.325 W/m・相) に低減することを意味している。

以上のことから、275 kV レベルの高電圧超電導ケーブルの絶縁材料としての Tyvek[®]/PE 絶縁紙の適用可能性が示された。

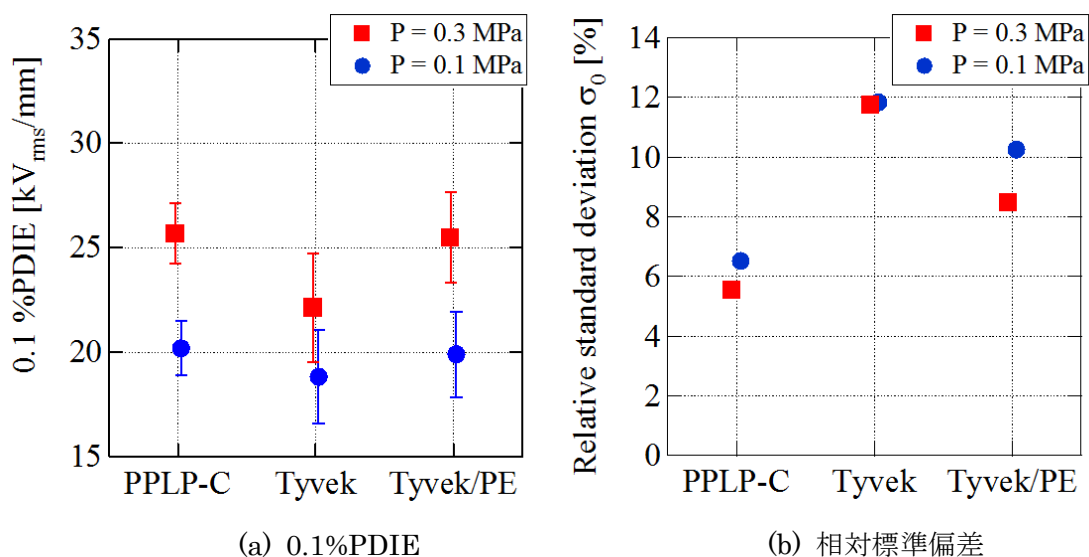


図 2.2.3-17 各種絶縁材料の部分放電開始特性

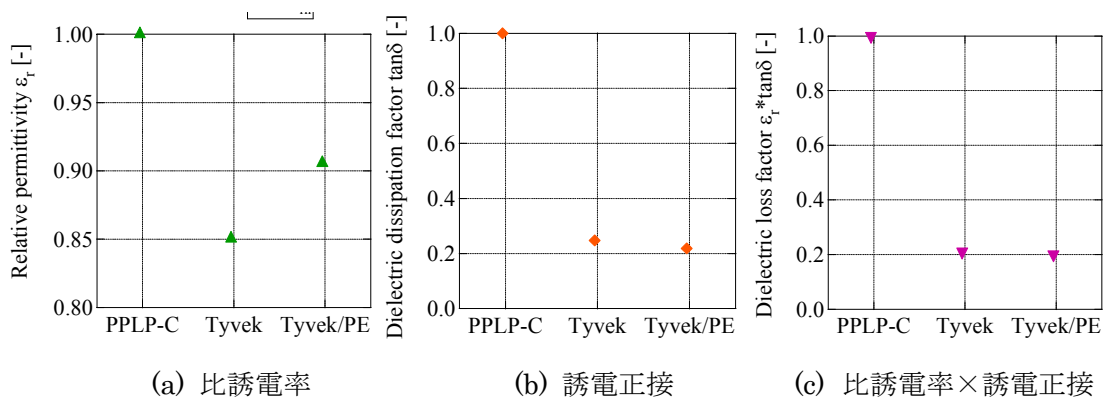


図 2.2.3-18 各種絶縁材料の誘電特性

表 2.2.3-6 275kV 超電導ケーブルの絶縁材料データ

	PPLP-C	Tyvek/PE
0.1%PDIE	25.7 kV/rms	25.5 kV/rms
ϵ_r	1.90	0.00058
$\tan\delta$	1.73	0.00013

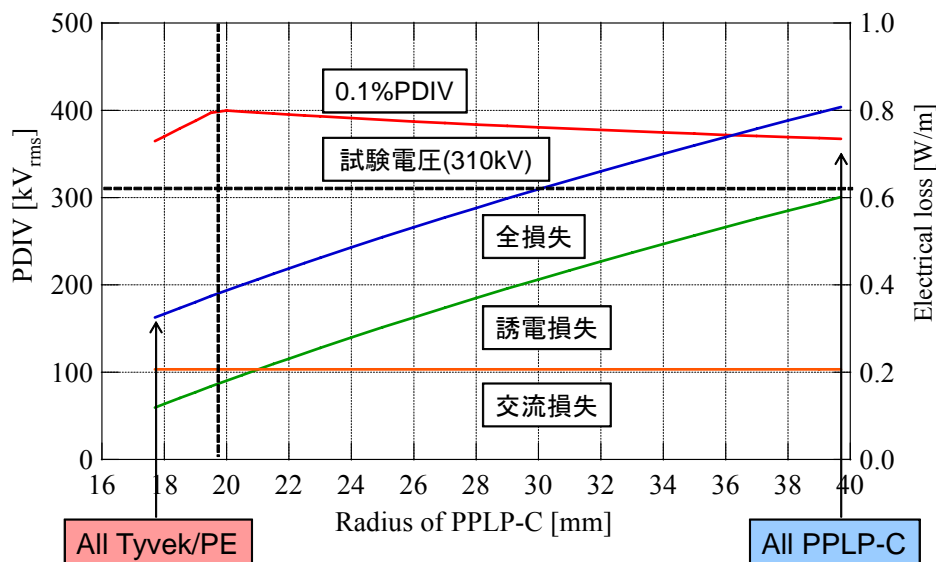


図 2.2.3-19 275kV 超電導ケーブルの部分放電開始特性および損失特性

(3) 成果

本研究では、275kV 高電圧超電導ケーブルの高絶縁性能と低誘電体損失の両立・最適化に向けた新しい絶縁材料として、Tyvek®/PE 合成紙の適用可能性を調査した。その結果、以下の知見を得た。

- ・ Tyvek®/PE 合成紙の部分放電開始電界は、PPLP®-C と同等である。
- ・ Tyvek®/PE 合成紙を 275kV 超電導ケーブルに適用した場合の誘電体損失は、PPLP®-C を用いた従来の 275kV 超電導ケーブルの 21%に低減することを示した。これは、交流損失を含めた全損失が 41%に低減することを意味する。

2.2.3-3 交流損失低減技術（古河電気工業、京都大学）

(1) 研究開発目標

3 kA_{rms} / 275 kV 級高電圧ケーブルの開発において、交流損失の低減が大きな技術課題となっている。Y 系超電導テープ線材の超電導層は非常に薄く断面アスペクト比が非常に大きいので、その交流損失特性は著しい異方性を示す。すなわち、線材面に平行な交流磁界変動に対する交流損失は大変小さく、線材面に垂直な交流磁界変動に対する交流損失は大きくなる。一般的には磁界は線材面に平行な成分と垂直な成分を持つが、Y 系超電導テープ線材においては、交流損失は実質的には垂直磁界変動成分に支配され、その低減が交流損失低減の鍵である。

275 kV・3 kA_{rms} で 0.8 W/m・相の損失以下（侵入熱を除く）とすること、150 mmφ以下のケーブル外径が目標として掲げられており、超電導導体の低交流損失化がより一層重要となっている。2.2.3-1 項より誘電体損失が 0.4～0.5 W/m・相が見込まれることから（設計見直しにより 0.6 W/m・相）、3 kA_{rms} の交流損失として、0.3 W/m・相以下（設計見直しにより 0.2 W/m・相以下）を目標とした。

(2) 研究内容 1 ー交流損失低減（その 1）ー

275 kV 用の 2 層超電導導体を作製した。その仕様を表 2.2.3-7 に示す。

表 2.2.3-7 作製した超電導導体の仕様

構造	仕様
超電導線材	ロット番号 SWM-0010 Hastelloy/Gd ₂ Zr ₂ O ₇ /CeO ₂ /YBCO/Ag=100/1/1/1.5/10 μm
幅, I _c	4.5 mm, 249-330 A/cm-w
超電導導体	2 層 銅撚り線中空フォーマ 250 mm ² 1-layer 内径φ30.0 -500 mm (S)ピッチ 2.25 mm 幅 36本 (2227.1 A) 2-layer 内径φ30.7 +500 mm (Z)ピッチ 2.25 mm 幅 38本 (2319.8 A)
長さ, 合計 I _c	1 m, 4547 A

極力、超電導線材の I_c 値を揃えたが、使用した線材は 112.1 A～148.8 A であり、10 mm 換算にすると、249 A～331 A/cm-w とかなり大きい。さらに、レーザ加工は光ファイバレーザを用いており、条件が最適化されていないこともあって、劣化率も 9%前後とやや大きい。導体の仕上がりを図 2.2.3-20 に示す。

この導体の I_c の温度依存性を図 2.2.3-21 に示す。同図で 77.3 K での I_c は 4612 A であり、導体作製前の線材の I_c 合計 4547 A から殆ど変化していない。

交流損失の測定結果 (77.3 K) を図 2.2.3-22 に示す。0.0904 W/m-相@1 kA_{rms} の結果は、前プロジェクトの実績である。一方、今回作製した導体は、この実績に対して、約 1/9 にまで損失が小さくなっている。この理由として、 I_c の向上 (約 2 倍)、径が大きくなる (φ20→30mm) ことによる経験磁場の減少、超電導導体の層数の減少 (3 層から 2 層) による経験磁場の減少、が理由として考えられる。図 2.2.3-22 中の実線は Norris のストリップモデルの計算式(2.2.3-2)から算出された交流損失である。今回の導体は 2.25 mm 幅の超電導線材が 74 枚から構成されており、1 枚あたり 61.5 A の I_c となる。Norris のストリップモデル²⁾は、1 枚の線材が通電により自分自身で発生する交流磁界のみで交流損失を表す解析式であり、線材同士が互いに磁場的に影響を与えないときの損失を示している。

$$Q_{NS} = \frac{N \cdot I_c^2 \cdot \mu_0}{\pi} \left\{ \left(1 - \frac{I_t}{I_c}\right) \ln \left(1 - \frac{I_t}{I_c}\right) + \left(1 + \frac{I_t}{I_c}\right) \ln \left(1 + \frac{I_t}{I_c}\right) - \left(\frac{I_t}{I_c}\right)^2 \right\} \quad (2.2.3-2)$$

ここで、 Q_{NS} [J/m/cycle]、 N は線材の本数、 I_t は通電電流のピークを表している。

実際の超電導導体では、各線材が発生する磁場が他の線材に影響を与えるので、このモデルとは一致しない。単層構造であれば、隣り合った線材同士が発生磁場により、端部での縦磁界がキャンセルされるので、交流損失は Norris のストリップモデルよりも小さくなる。2 層導体であれば、1 層目の交流損失は単層導体と同様に損失は小さくなるが、2 層目の損失は、1 層目の導体の発生磁場の影響を受けるため、Norris のストリップモデルよりも大きくなる。結果として、今回の 2 層導体の交流損失は Norris のストリップモデルよりは若干高い値となっている。将来的には 2 層導体でも Norris のストリップモデルよりも小さくすることが目標であり、Norris のストリップモデルとの比較は、交流損失の指標としては有用である。

次に、交流損失の温度依存性を図 2.2.3-23、図 2.2.3-24 に示す。図 2.2.3-24 のように I_c で規格化すると温度依存性は殆ど見えなくなっている。74.0 K で I_c は 6100 A であり、3 kA_{rms} での交流損失は 0.8 W/m-相 ($I_t/I_c=0.70$)、72.0 K で I_c は 7047 A であり、3 kA_{rms} での交流損失は 0.49 W/m-相 ($I_t/I_c=0.60$) であった。この交流損失の値は、Norris のストリップモデルよりも 1.3 倍程度高く、この比率を使えば、目標の 0.3 W/m-相以下にするには I_c を上げれば到達も可能 ($I_c=9$ kA (約 68 K) で 3 kA_{rms} の交流損失は 0.27 W/m-相) である。

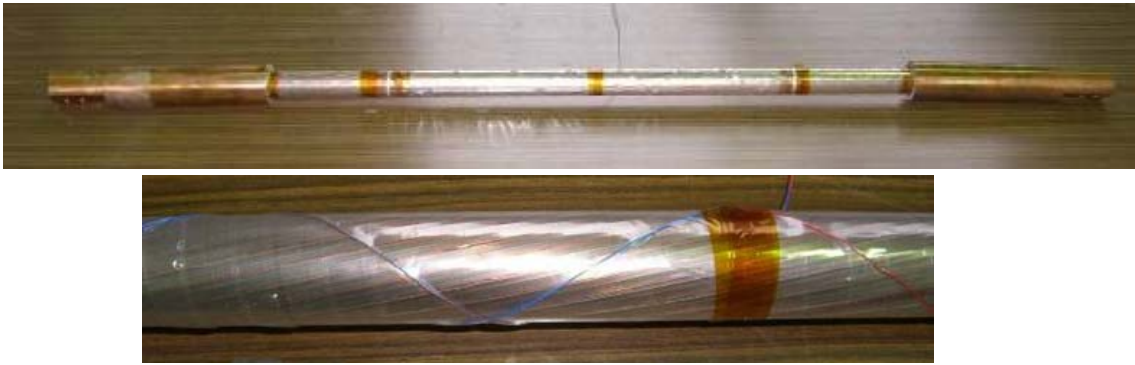


図 2.2.3-20 作製した超電導導体

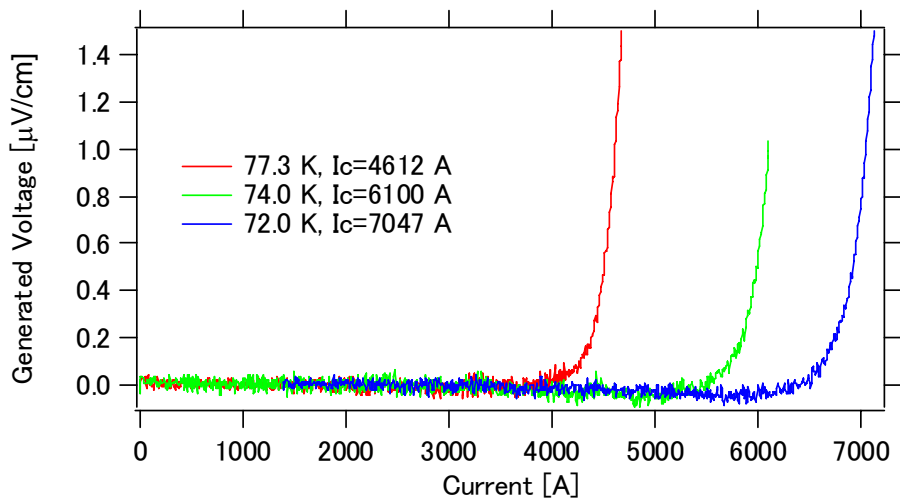


図 2.2.3-21 作製した超電導体の I_c の温度依存性

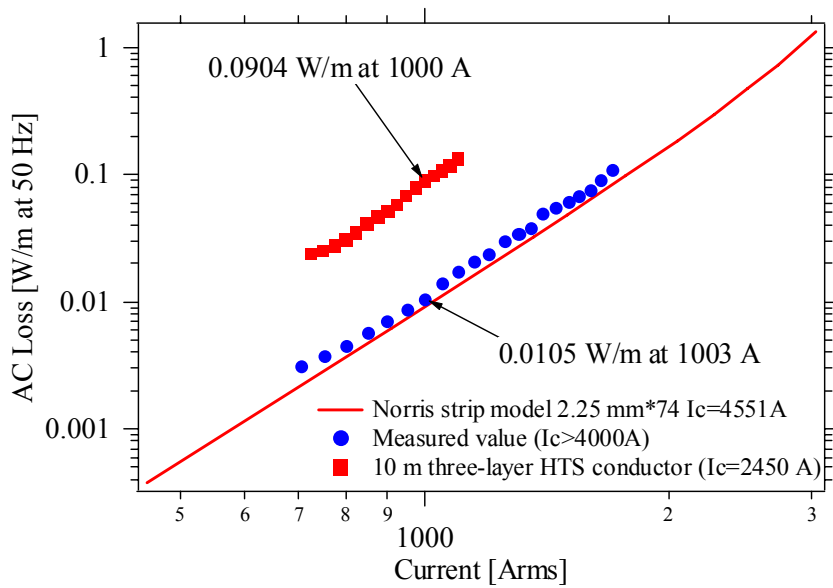


図 2.2.3-22 交流損失測定結果 前プロジェクトの導体と比較

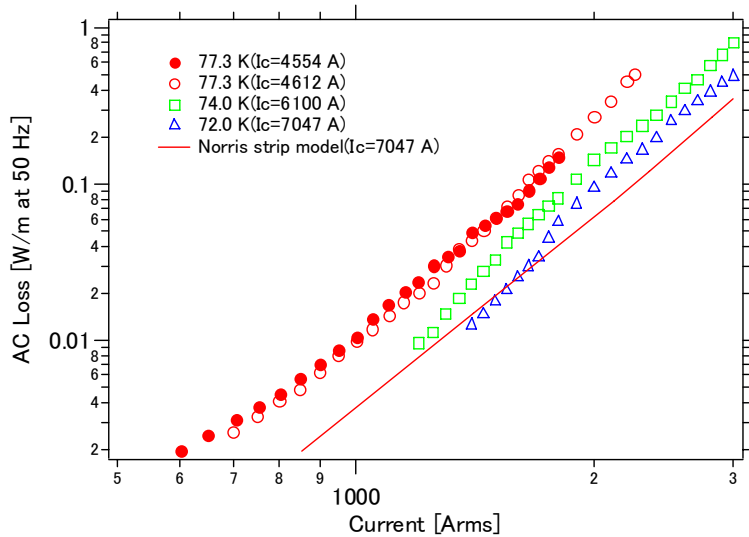


図 2.2.3-23 作製した 2 層導体の交流損失

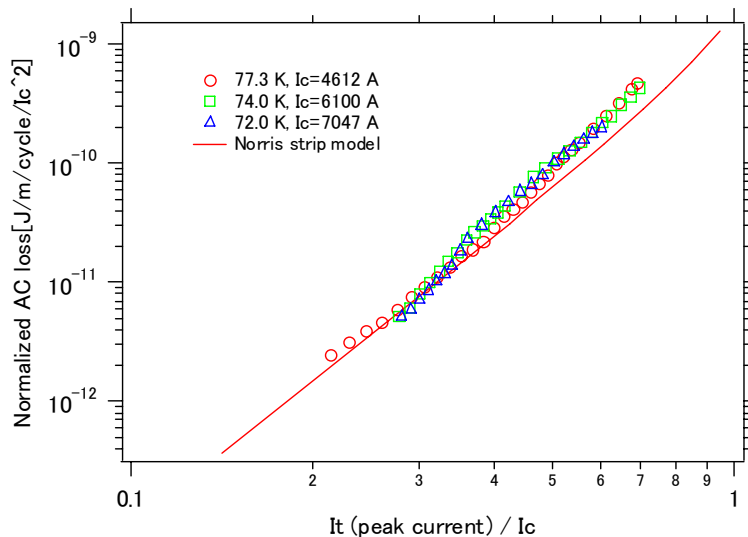


図 2.2.3-24 I_c で規格化した交流損失

(3) 研究内容 2 – 交流損失低減 (その 2) –

提供された超電導線材の幅は 4.5 mm であるが、 CeO_2 を付けた後に、10 mm 幅の基板を機械スリッタで切断しており、この切断により、マイクロラックが生じ、YBCO の成膜の妨げとなる。また、TFA-MOD 法は、線材の幅方向両端の J_c (臨界電流密度) が低くなることが分かっている。そこで、両端の J_c を図 2.2.3-25 のように仮定して、肩のスロープ sh をパラメータにして、数値計算を実施した。両端 J_c の特性は、交流損失に大きく影響を与えると考えられる。

まず、第 1 の交流損失低減手法として、多層導体の層間を離すことで、損失の主要因となる外層の経験磁場を減らすことを考えた。具体的な構造とその結果を表 2.2.3-8 に示す。線材は 5 mm 幅を想定したため、図 2.2.3-25 の J_c 分布のパラメータは、sh=0.8, w=5 を使用した。表 2.2.3-8 の構造図を見ると、5-a 導体と 5-b 導体

の線材使用量は同じで、2層目の構造は同じである。1層目の構造が異なっており、5-bは1層目の内径を小さくすることで、1層目と2層目の層間距離が伸びている。層間を離すと、発生磁場の波打ちは小さくなって円周に近づき、1層目が発生する磁場は、2層目へあまり影響を与えなくなる（垂直磁場が減少する）と考えて、損失は小さくなると思った。しかし、実際は2層目を通電することによる自己磁場により発生磁場は波打ちし、1層目の発生磁場と重ね合わせると、たまたま、強め合うところも出る。これは、1層目と2層目の線材配置に起因するものであり、数値計算の結果、表 2.2.3-8 に示すとおり、層間を離すことによる交流損失の低減効果は殆ど見られなかった。層間距離を開くことは、ケーブルのコンパクト性を失うことになるので、層間距離は 5-a のように従来のままとした。

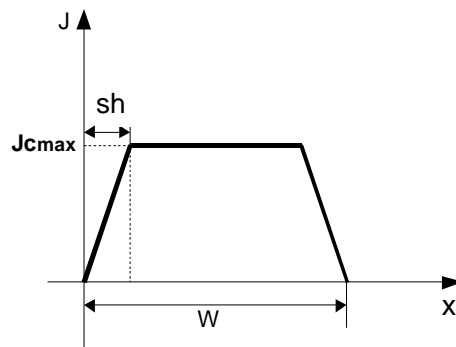
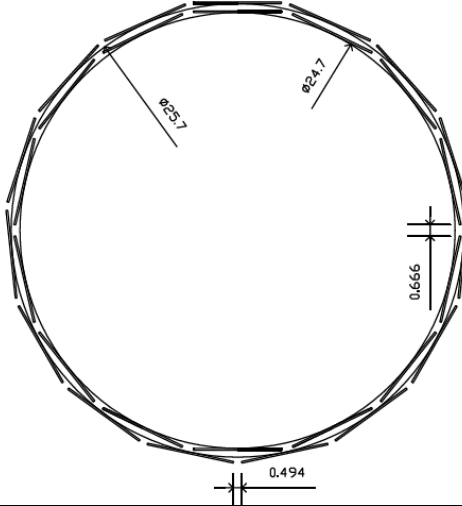
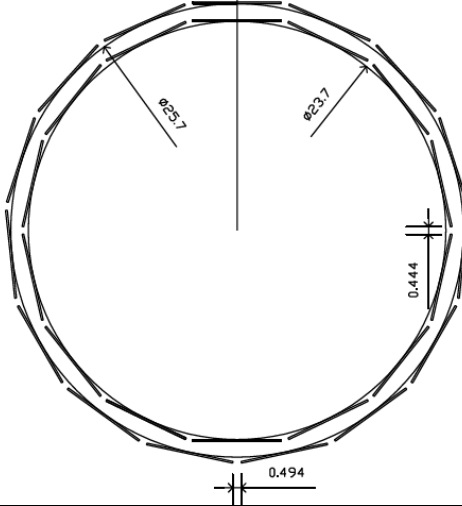


図 2.2.3-25 線材の幅方向 J_c 分布

表 2.2.3-8 層間距離を変えた導体の損失比較

	5-a	5-b
Structure		
Spec.	線材幅 5 mm (1 layer/2 layer=14/15)、 1 層目内径 24.7 2 層目内径 25.7 導体外径 26.9 mm、層間距離小	5 mm (1 layer/2 layer=14/15) 1 層目内径 23.7(5-a より層間が広い) 2 層目内径 25.7 層間距離大 (5-a との比較)
Loss	1 層目の損失 3.963E-01 W/m-相 2 層目の損失 6.980E-01 W/m-相 1.095 W/m-相 @3kA _{rms} ($I_c = 7.308$ kA)	1 層目の損失 3.847E-01 W/m-相 2 層目の損失 7.202E-01 W/m-相 1.105 W/m-相 @3 kA _{rms} ($I_c = 7.308$ kA)




次に、第 2 の交流損失低減手法として、線材端部の J_c 劣化部をレーザーで落とすことで、交流損失低減を考えた。両端 0.5 mm を落として 4 mm 幅の線材、両端 1 mm を落として、3 mm 幅の線材を加工した。数値計算では、図 2.2.3-25 のスロープ長 sh をパラメータとして、5 mm 幅の未処理の線材 ($w=5$ mm) ではスロープ長 sh を 0.8 mm、3 mm、4 mm 幅の線材($w=4$)ではレーザー加工による熱影響部とスロープ長 sh に分けられると考えた。レーザー加工前後の I_c から熱影響部は 4 mm 幅線材で 0.375 mm、3mm 幅線材で 0.1 mm とし、この熱影響部では、 I_c は零と仮定した。これは、線材幅 w が狭くなっていることと同意であり、4 mm 幅の線材、3 mm 幅の線材の w はそれぞれ、3.3 mm、2.8 mm となる。さらに、スロープ長 sh はどちらも 0.1 mm とした。細線化で使用したレーザーは「超電導応用基盤技術開発 (第 II 期)」プロジェクトで実績のある YAG レーザとし、これらの超電導線材を使って、表 2.2.3-9 に示す 3 つの導体を作製した。

使用した線材の分布を図 2.2.3-26 と 2.2.3-27 に示す。図 2.2.3-26 はロッド番号 0076 の線材分布である。使用箇所は 10.5-55.5 m であり、長手方向には均等な分布である。図 2.2.3-27 はロッド番号 0071 の線材分布である。使用箇所は 13~70.5

m であり、長手方向には均等な分布である。

図 2.2.3-28 に 3 つの導体の交流損失の比較を示した。5 mm 幅の未処理の線材は、端部の J_c 低下が大きいため、低電流領域の交流損失が大きい。4 mm 幅の線材は端部 J_c の低い部分を取り除き、さらにレーザによる熱影響で、 J_c 分布が一様になったと考えられ、Norris のストリップモデルに近い結果を得た。しかし、レーザによる熱影響部が大きいため、線材間ギャップを小さくした効果は顕著に見られなかった。一方、3 mm 幅の線材は、端部 J_c の低い部分を取り除き、レーザによる劣化も小さいことから、線材間ギャップが小さくしたことによる垂直磁場のキャンセルの効果が見られている。3 kA_{rms} の交流損失は、0.297 W/m-相 ($I_{op}/I_c = 0.50$)、0.235 W/m-相 ($I_{op}/I_c = 0.46$) と目標値である 0.3 W/m-相以下を達成した。

表 2.2.3-9 3 本の超電導導体仕様

導体名	5-C	4-C	3-C
線材幅	5 mm	4 mm	3 mm
導体構造			
導体仕様	1 層目内径 23.7 mm 14 本 400 mm ピッチ 2 層目内径 24.5 mm 14 本 -250 mm ピッチ、 導体外径 25.5 mm	1 層目内径 23.7 mm 18 本 400 mm ピッチ 2 層目内径 24.5 mm 18 本 -250 mm ピッチ 導体外径 25.5 mm	1 層目内径 23.7 mm 23 本 400 mm ピッチ 2 層目内径 24.5 mm 23 本 -250 mm ピッチ 導体外径 25.5 mm
使用した線材のロッド番号と I_c	0068,0078 140 - 160 A (280 - 320 A /m-w)	0076(10.5-55.5 m) 150-160 A (300-320 A /m-w)	0071(13-70.5 m) 150 -165 A (300 -330 A/m-w)
3kA _{rms} の交流損失	1.56 W/m ($I_{op}/I_c = 0.76$)	0.421 W/m ($I_{op}/I_c = 0.51$)	0.297 W/m($I_{op}/I_c = 0.50$) 0.235 W/m($I_{op}/I_c = 0.46$)

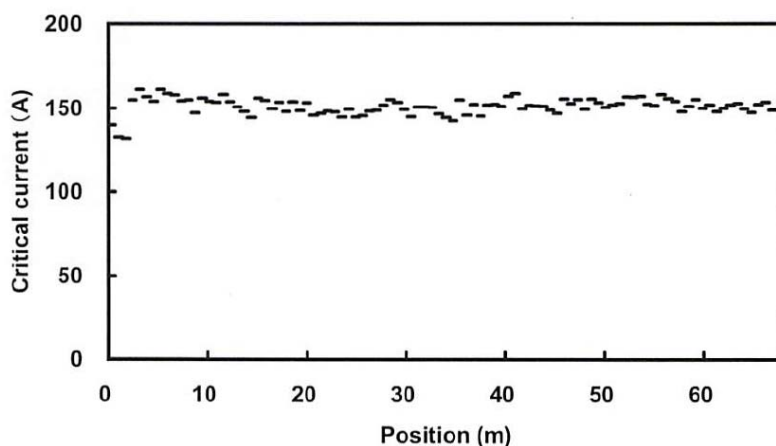


図 2.2.3-26 4-C で使用した線材(ロッド番号 0076)の長手方向分布

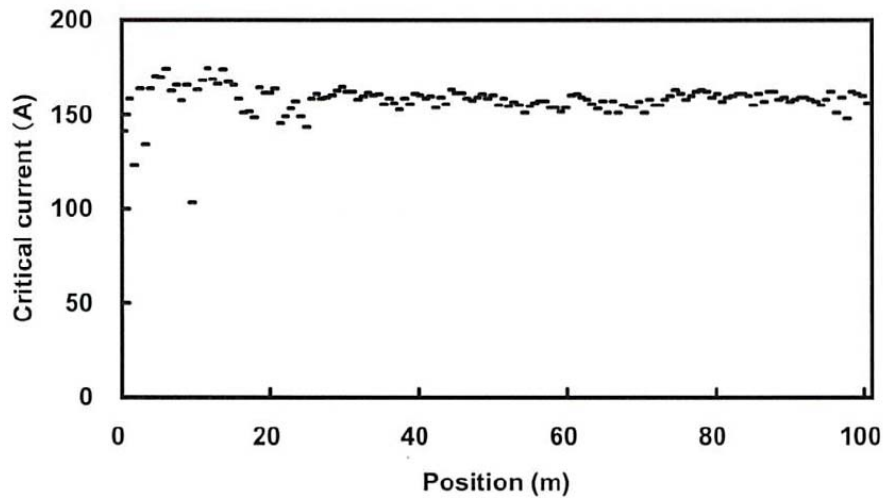


図 2.2.3-27 3-C で使用した線材(ロッド番号 0071)の長手方向分布

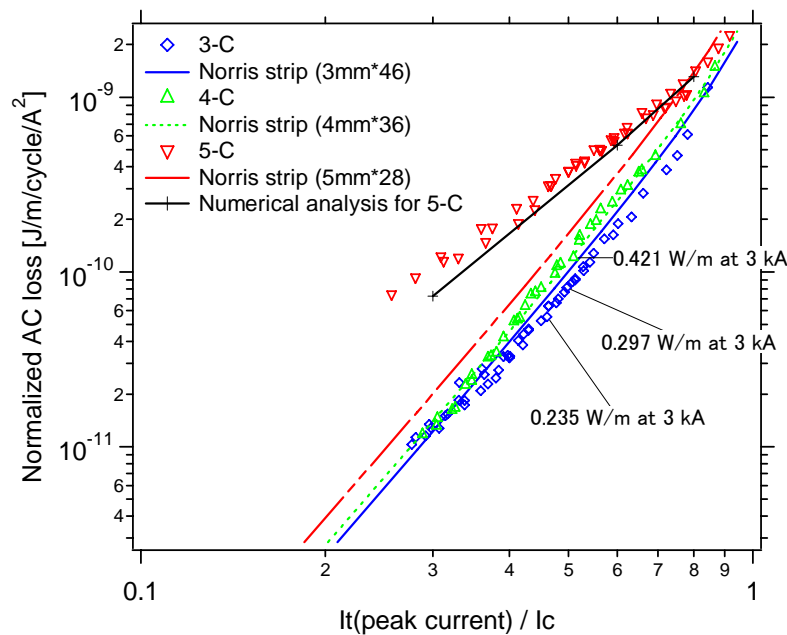


図 2.2.3-28 3つの導体の規格化した超電導の交流損失

3-C の臨界電流の特性を図 2.2.3-29 に示す。77.3 K で I_c が 4700 A であったが、3 mm 幅線材 1 本当たり 102 A であり、5 mm 幅に換算すると 170 A である。元々の未処理の線材の I_c が 150-165 A であり、 J_c の低い端部を除いたことを考えると、妥当な結果である。

図 2.2.3-30, 図 2.2.3-31 に交流損失の結果を示す。Norris のストリップモデルよりも明らかに損失の低減が見られ、線材間ギャップを小さくすることによる、垂直磁場のキャンセル効果が見られている。3 kA_{rms} の交流損失は、0.297 W/m-相 ($I_{op}/I_c=0.50$)、0.235 W/m-相 ($I_{op}/I_c=0.46$)と目標値である 0.3 W/m-相以下を達成した。

また、解析では、レーザによる熱影響部 (0.1 mm) 及び端部の J_c (図 2.2.3-18 線材の幅方向 J_c 分布で $s=0.1$ mm) の改善を考慮したところ、今回の実験結果とほぼ良い一致をみせた。

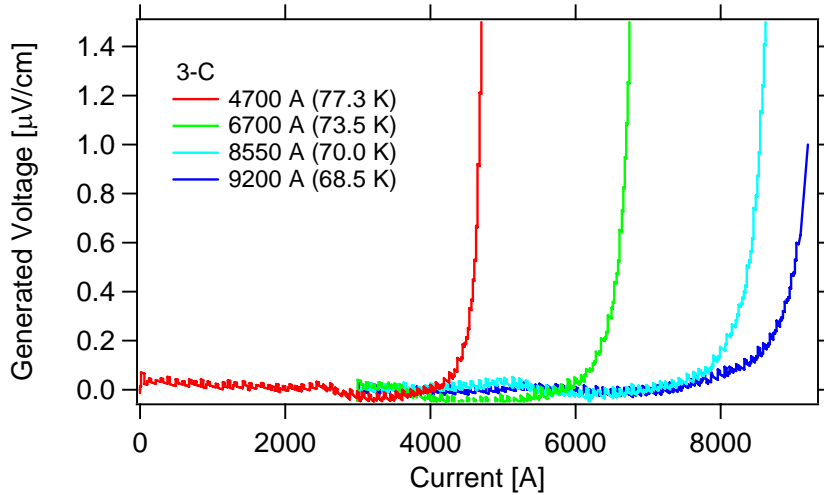


図 2.2.3-29 3-C の V-I 特性

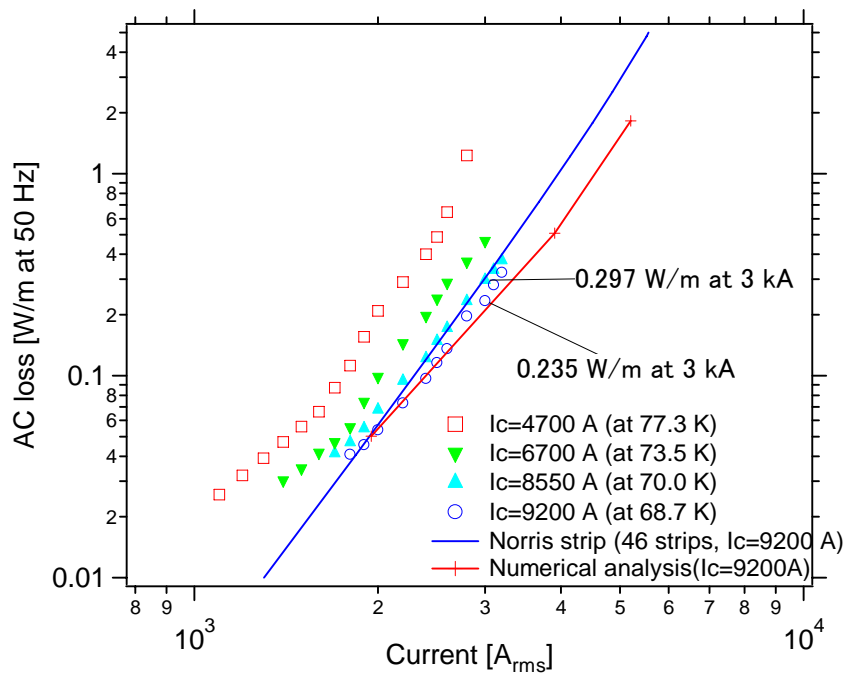


図 2.2.3-30 3-C の交流損失結果

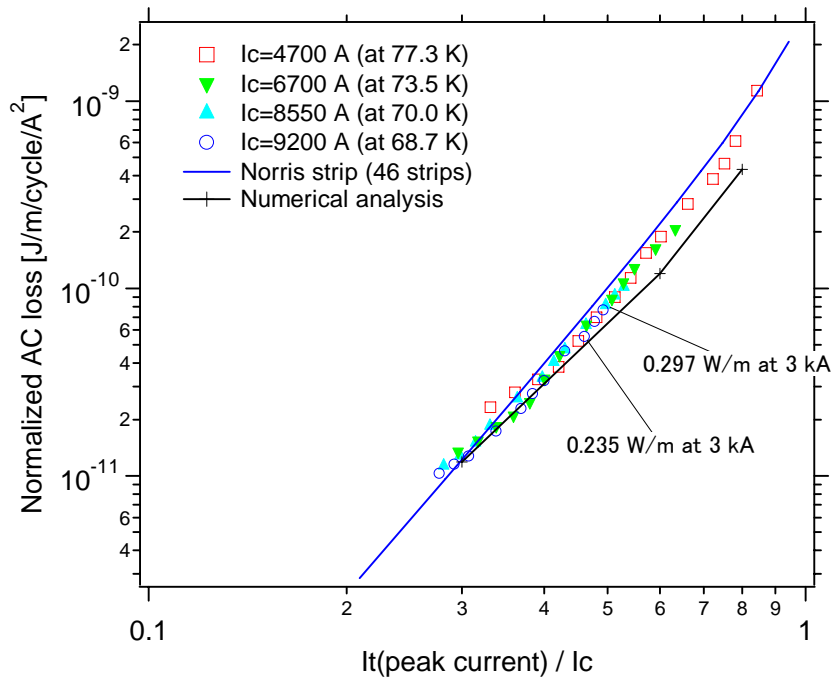


図 2.2.3-31 3-C の I_c で規格化された交流損失結果

(4) 研究内容 3 —機械曲げ特性—

325 mm²の銅撚り線に超電導線を巻き付け、絶縁厚 26 mm にして、275 kV 級のケーブルコアを作製してケーブル曲げ試験を実施した(図 2.2.3-32)。曲げ直径を変えて曲げ履歴を与えた後に、 I_c 測定を行い劣化率の調査と、2 m 曲げ後にケーブルコアを解体して絶縁紙の状況を確認した。その結果、曲げ直径 2.5 m まで超電導性能の低下がないことを確認して、さらに 2 m 曲げまで絶縁紙への変形(破れ、皺)が無いことが確認できた。275 kV の超電導ケーブルコアとして、曲げ特性としては製造上問題ないことが確認できた。

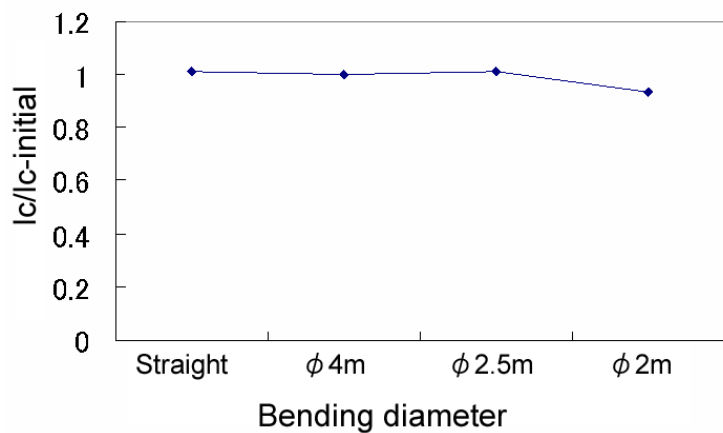


図 2.2.3-32 機械曲げ試験

(5) 研究内容 4 - 交流損失低減 (その 3) -

平成 23、24 年度は、設計の見直し後に、導体のフォーマを太くしたことから、使用できる超電導線の数量が多くなった。1 層目に 31 本、2 層目に 30 本、合計で 61 本となり、3-C 導体の 46 本より 15 本多くなっている。このときの交流損失を図 2.2.3-33 に示す。臨界電流は 73.7 K で 9020 A となっており、そのときの交流損失は 0.124 W/m-相と 3-C の 0.235 W/m-相よりも約半分になっている。

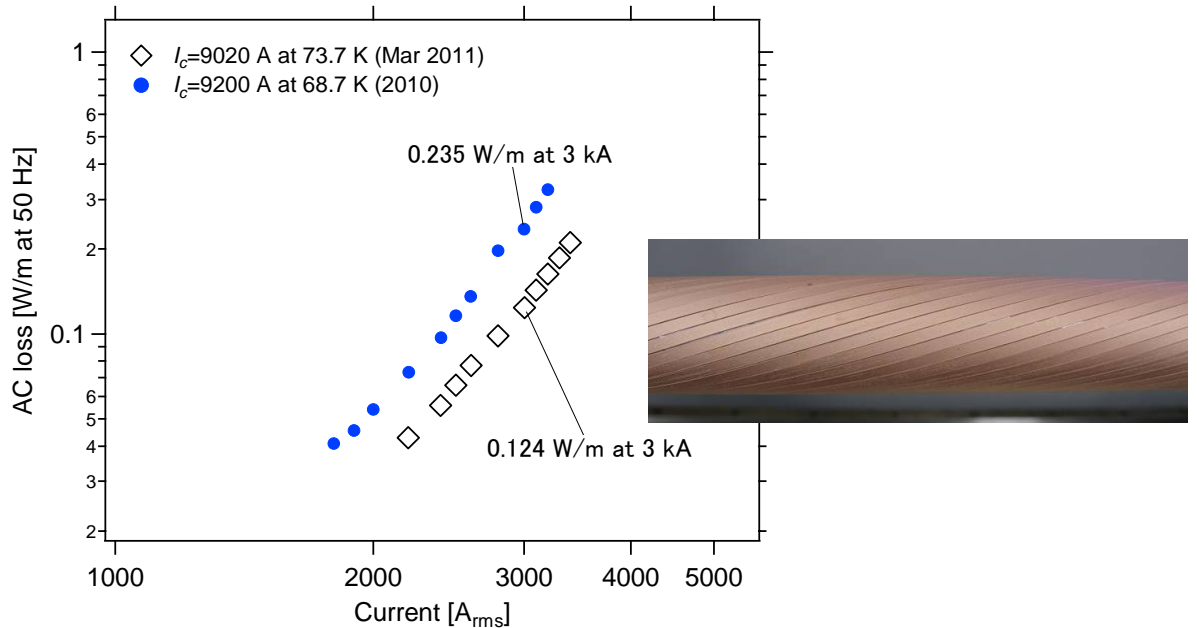


図 2.2.3-33 設計見直し前後の導体の交流損失 (菱形が設計見直し後)

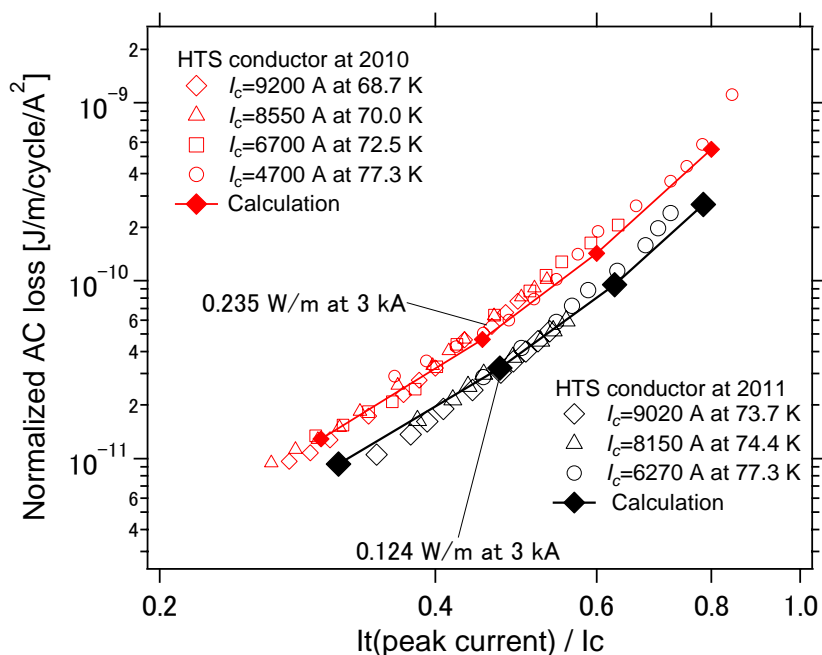


図 2.2.3-34 図 2.2.3-33 を I_c で規格化した交流損失 (菱形が設計見直し後)

図 2.2.3-34 で示すように、 I_c で規格化すると、明らかな損失低減が見られる。また、数値計算とも良い一致を示している。数値解析条件を表 2.2.3-10 に示す。なお、線材の幅は、両端に銅めっきが付くことにより、3 mm から 3.15 mm としている。銅めっき部には超電導性能を持たないが、Dead edge という概念を入れ、レーザーによる熱影響を受けた部分も超電導性能を失っているとした。超電導導体を使用した線材には両側に各 0.16 mm の Dead edge を設けた。

図 2.2.3-35 に数値解析結果を示す。通常、シールドの損失は導体の 1/3 から 1/4 と見積もれるが、シールド層の J_c 分布の肩を 0.50 mm と見積もったため、シールドの損失は大きくなっている。数値解析の結果、3 kA_{rms} の導体とシールドの損失は 0.2 W/m-相と見積もることができ、誘電体損失 0.6 W/m-相と合わせて、目標の 0.8 W/m-相の達成できる設計を得た。

表 2.2.3-10 数値計算の条件

項目	導体層	シールド層
線材幅	3.15 mm	5.00 mm
線材本数	61	46
J_c 分布の肩	0.10 mm	0.50 mm
Dead edge	0.16 mm	0.00 mm
臨界電流 A	9020 A	11212 A
通電電流 kA _{rms}	2, 3, 4, 5	2, 3, 4, 5

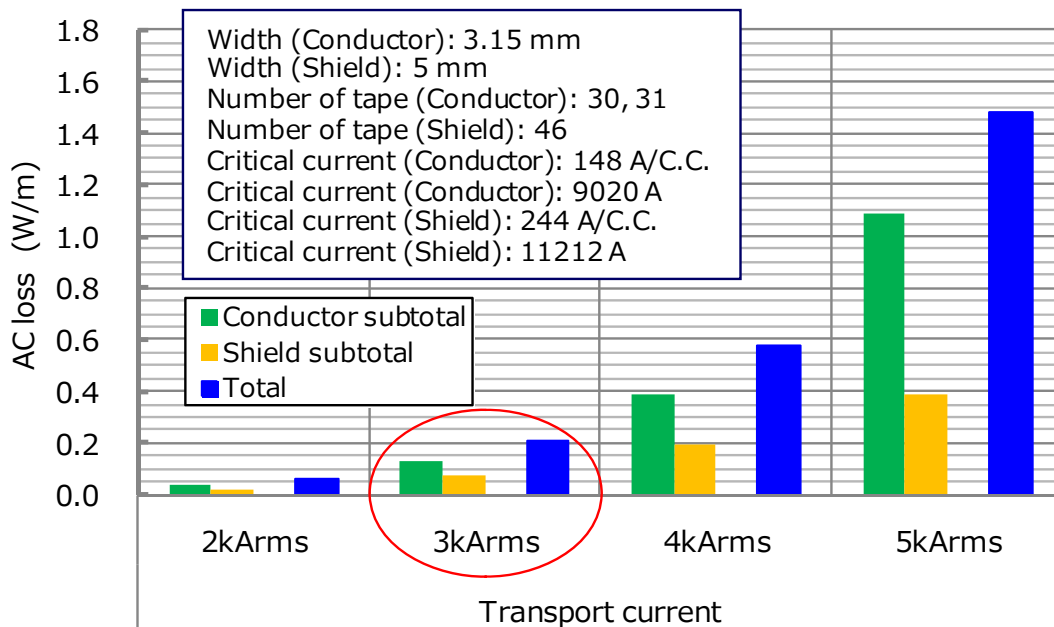
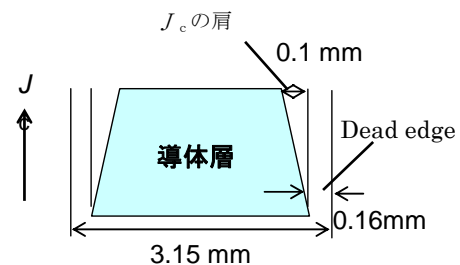


図 2.2.3-35 設計見直し後の超電導ケーブルの交流損失数値解析結果

(6) 成果

線材幅端部の特性劣化部をレーザで落とすことで、交流損失低減を考えた。5 mm 幅の超電導線材の両端 1 mm をレーザで切断し、3 mm 幅の線材を使って、導体を作製した結果、3 kA_{rms} 通電での交流損失は、0.297 W/m-相 ($I_{op}/I_c=0.50$)、0.235 W/m-相 ($I_{op}/I_c=0.46$)と目標値である 0.3 W/m-相以下を達成した。Ⅲ2.2.3 に記載されている通り、本設計における誘電損失値は 0.46W/m-相なので、ケーブル損失 (交流損失(導体層)、誘電体損失)は 0.70 W/m-相となり、中間目標である 0.8 W/m-相以下を達成した。

曲げ直径 2.5 m まで曲げ試験を行い、超電導性能の低下と絶縁紙への変形(破れ、皺)がないこと分かり、275 kV 超電導ケーブルの曲げに対する機械的な課題がないことを確認した。

平成 23、24 年度は、設計の見直しにより、フォーマ径が太くなった場合を想定して、3 mm 幅の線材を使って、導体を作製した結果、3 kA_{rms} の交流損失は、0.124 W/m-相 ($I_{op}/I_c=0.47$)となり、数値解析結果ともよい一致を示した。数値解析では 5 mm 幅の線材を使用したシールドの交流損失も見積もっており、その結果、導体とシールドを合わせて、0.2 W/m-相となり、誘電体損失 0.6 W/m-相と合わせて、目標の 0.8 W/m-相以下を達成できる設計である。

引用論文リスト

- (1) M. Yagi, S. Mukoyama, N. Amemiya, S. Nagaya, S. Kashima and Y. Shiohara, “Development of a 10 m long 1 kA 66/77 kV YBCO HTS cable with low AC loss and a joint with low electric resistance”, Supercond. Sci. and Tech. Vol.22 (2009) 085003
- (2) Norris W T 1970 J. Phys. D: Appl. phys. 3 489-507

2.2.3-4 交流損失の解析と評価（京都大学）

(1) 研究開発目標

平成 23、24 年度は、理想的な超電導導体（線材の幅方向 J_c 分布、長手方向 I_c 、素線間ギャップ、層構造）を解析結果から導く。また、線材可撓性も考慮した高電圧ケーブル導体の交流損失解析を行い、併せて磁気ナイフ法により線材の幅方向 J_c 分布を評価する。

また、シールド付ケーブルの交流損失を液体窒素蒸発法により測定し、その適用性を検討する。

(2) 研究内容 1 –システム検証用ケーブル設計に向けた高電圧ケーブルの交流損失解析–

システム検証用の高電圧ケーブルの設計に向けて、さまざまな線材で構成されたケーブルの交流損失解析を行った。導体層については、線材幅は 3.15 mm に固定し、シールド層については、5 mm 幅線材と 7 mm 幅線材の使用を想定した場合の損失解析結果を表 2.2.3-11 に示す。なお、表中の sh は幅方向 J_c の肩の領域を示す（図 2.2.3-25 参照）。同表より、シールド層にはやや幅の広い 7 mm 幅線材を用いた方が交流損失を低減できた。これは、シールド層は単層であり、その交流損失は自己磁界に支配的されるため、線材幅を大きくしギャップ数を少なくした方が交流損失を低減できたためであり、さらに線材幅端部 J_c の減少分だけ、全体の I_c が有利になるためと考えられる。

表 2.2.3-11 数値解析結果（シールド層の線材幅をパラメータにした）

	導体	シールド	導体 I_c (A)	シールド I_c (A)		Loss (W/m) at 2 kA	Loss at 3 kA	Loss at 4 kA	Loss at 5 kA
①	3.15mm × 61mm (sh 0.10mm) 2層	5.0mm × 46mm (sh 0.10mm) 1層	9,020	11,212	導体	0.0379	0.131	0.387	1.09
					シールド	0.0060	0.015	0.042	0.09
					合計	0.0439	0.146	0.429	1.18
②	3.15mm × 61mm (sh 0.10mm) 2層	7.0mm × 34mm (sh 0.10mm) 1層	9,020	12,707	導体	0.0379	0.131	0.387	1.09
					シールド	0.0045	0.011	0.025	0.06
					合計	0.0424	0.143	0.411	1.15

導体層 2 層・シールド層 1 層を基本構成としたが、臨界電流の小さな線材を用いた導体層 4 層・シールド層 2 層から構成されるケーブルの解析も行った。その結果を表 2.2.3-12 に示す。解析した範囲では、臨界電流の小さい線材で層数が大きいケーブルを構成しても全体の交流損失はあまり変わらない。また、線材幅方向の端部 J_c が損失に大きく寄与するが、多層化すればその寄与度は小さくなる。

表 2.2.3-12 数値解析結果 低 I_c 線材で導体層 4 層・シールド 2 層にした

	導体	シールド	導体 I_c (A)	シールド I_c (A)		Loss (W/m) At 2 kA	Loss at 3 kA	Loss at 4 kA	Loss at 5 kA
③	3.15mm × 61mm (sh 0.10mm) 2層	5.0mm × 46mm (sh 0.80mm) 1層	9,020	10,465	導体	0.0379	0.131	0.387	1.09
					シールド	0.0374	0.135	0.348	0.74
					合計	0.0753	0.267	0.734	1.83
④	3.15mm × 118mm (sh 0.27mm) 4層	7.0mm × 91mm (sh 0.80mm) 2層	6,442	8,190	導体	0.0451	0.220	0.943	-
					シールド	0.0131	0.047	0.135	-
					合計	0.0582	0.267	1.080	-

検証用ケーブルの解析結果を表 2.2.3-13 に示す。実際のケーブルでは①-③の解析よりも使用する線材数が減っている。線材幅方向の端部 J_c の肩 (sh) は後述する線材幅方向の J_c 分布値から、導体 0.1、シールド 0.5 mm とした。また、線材が軟らかく、導体に完全に沿うことが可能な線材の可撓性を考慮した場合を⑥とした。表 2.2.3-13 中の I_c 値は 72 K で十分到達可能な数値で、3 kA の解析値も 0.205 W/m-相が期待される。一方、線材可撓性を考慮しても交流損失低減効果はないことが分かった。可撓性の効果は高電圧ケーブル程度の大きな径ですでに 3 mm に細線化されている十分円形に近い形状では効果がない。

実際に基板が薄く可撓性のある超電導線材を集合化して、交流損失を評価した。この超電導部は MOCVD 法で作製されている。その結果、数値解析結果と同様に、可撓性の効果による交流損失低減は見られなかった。

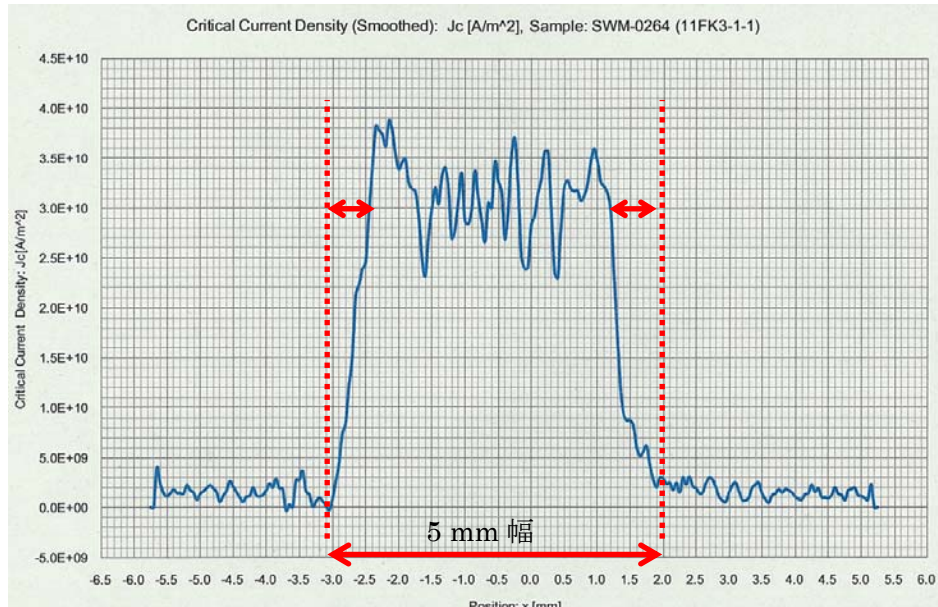
表 2.2.3-13 数値解析結果 検証用ケーブルの解析結果⑤と線材可撓性を考慮した解析結果⑥

	導体	シールド	導体 I_c (A)	シールド I_c (A)		Loss (W/m) At 2 kA	Loss at 3 kA	Loss at 4 kA	Loss at 5 kA
⑤	3.15mm × 60mm (sh 0.10mm) 2層	5.0mm × 43mm (sh 0.50mm) 1層	8,872	10,481	導体	0.0436	0.152	0.449	1.20
					シールド	0.0156	0.053	0.126	0.26
					合計	0.0592	0.205	0.575	1.45
⑥ 可撓性	3.15mm × 60mm (sh 0.10mm) 2層	5.0mm × 43mm (sh 0.50mm) 1層	8,872	10,481	導体	0.0433	0.152	0.449	1.20
					シールド	0.0156	0.053	0.126	0.26
					合計	0.0589	0.205	0.575	1.45

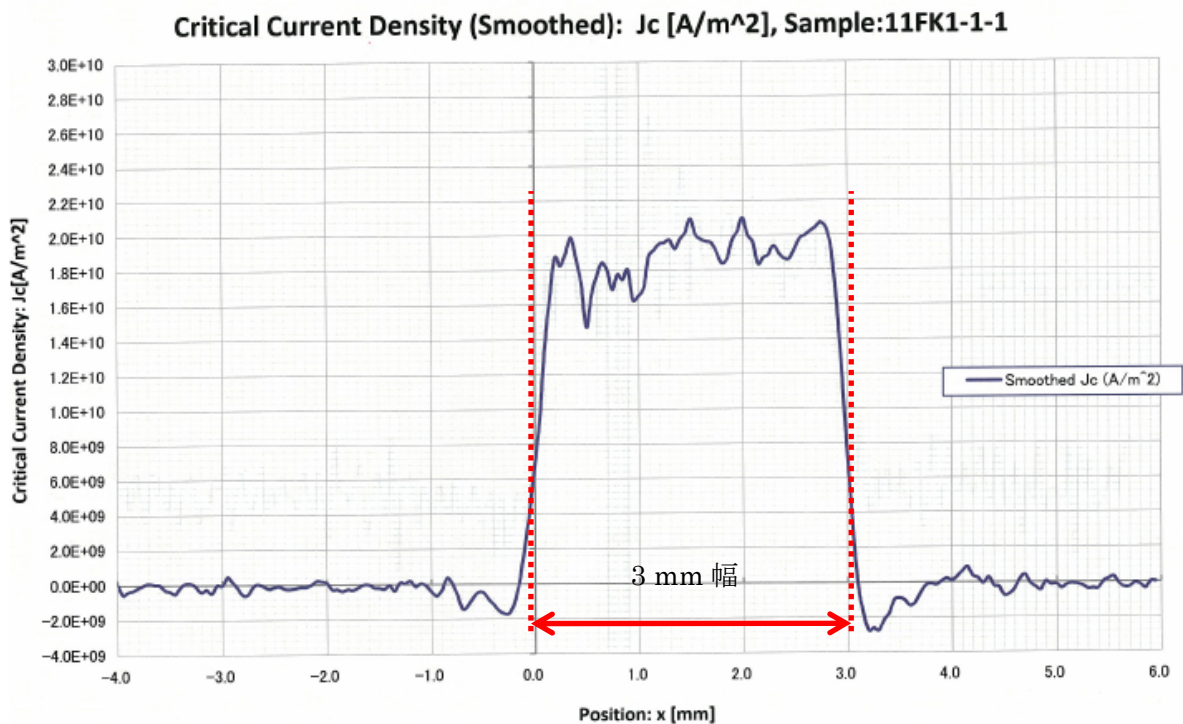
(3) 研究内容 2 ー線材幅方向の J_c 分布ー

システム検証用ケーブル製作に向けて、各種線材の幅方向 J_c 分布を磁気ナイフ

法により測定した。結果を図 2.2.3-36 に示す。図 2.2.3-36 (a)ではシールドに使用した 5 mm 幅の超電導線で、 J_c の肩は 0.5-0.8 mm と読める。一方、図 2.2.3-36 (b)は導体に使用した 3 mm 幅の超電導線で、0.1-0.3 mm と読める。



(a)シールドに使用した 5 mm 幅線材



(b) 導体に使用した 3 mm 幅線材

図 2.2.3-36 磁気ナイフ法による線材幅方向 J_c 分布の測定結果

(4) 研究内容3 –スパイラル構造を考慮した電磁界解析モデルによる交流損失解析–

図 2.2.3-37-1 に示すようなケーブルのスパイラル構造を考慮した電磁界解析モデルにより、2 層導体の交流損失を計算した。線材幅方向 J_c 分布、線材間ギャップ、スパイラルピッチ等を変えて解析を行った。結果の一例として、線材軸方向に沿った交流損失分布を図 2.2.3-37-2 に示す。図 2.2.3-37-2 (a) は内層の線材の交流損失、図 2.2.3-37-2 (b) は外層の線材の交流損失である。線材長手方向に亘って、交流損失が変化しているのは、内層と外層ではスパイラルピッチが異なり、内層の線材と外層の線材の相対的位置関係が長手方向で変化しているためである¹⁾。

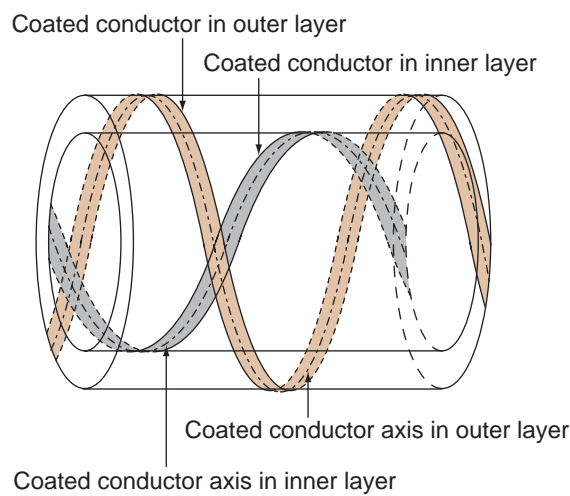
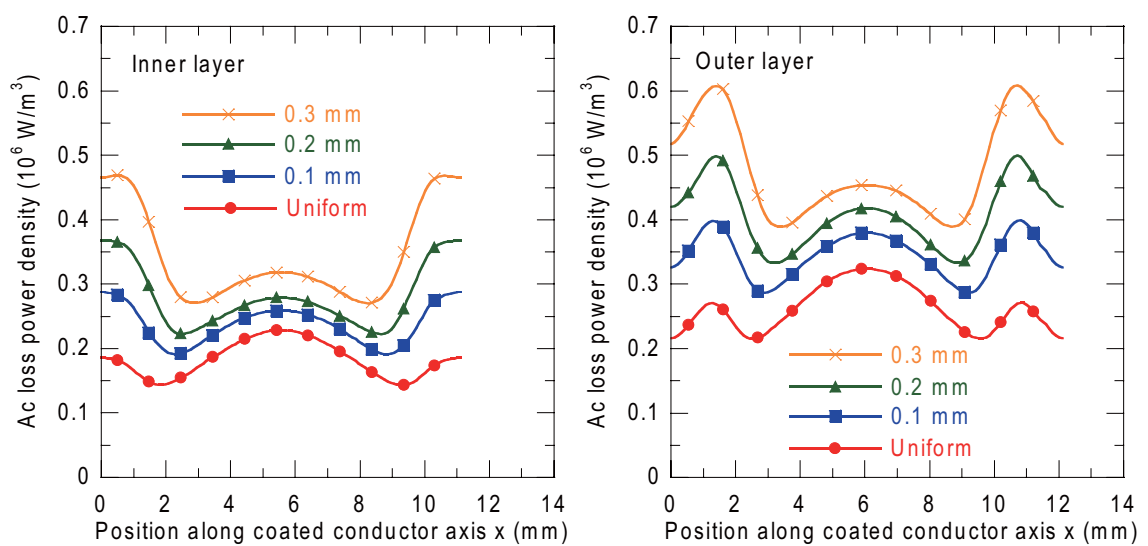


図 2.2.3-37-1 超電導ケーブルのスパイラル構造 (2 層ケーブルの場合)



(a)内層

(b)外層

図 2.2.3-37-2 2 層導体の長手方向交流損失分布

(5) 研究内容 4 –液体窒素蒸発法によるシールド付ケーブルの交流損失測定–

短尺のシールド付ケーブルの交流損失測定は、長尺ケーブルのように循環する液体窒素の流量、入口・出口温度から評価することはできず、また、電圧タップの取り付け方に依存した電氣的測定法の確度についても議論の余地が残っている。そこで、短尺のシールド付ケーブルの交流損失を液体窒素の蒸発量から決定する交流損失測定法の開発を行った。

図 2.2.3-38-1 に示すように、長さ 1 m 程度の試料ケーブルを液体窒素バスに浸漬し、そのうちの 0.5 m 程度の区間を蒸発窒素捕集容器で覆う。なお、捕集容器の下部には開口部があり液体窒素バスから液体窒素が流入するようになっている。この状態で試料ケーブルに交流を通电した際に交流損失によって蒸発する窒素を捕集し、質量流量計でその量を測定することにより、蒸発した窒素の量と窒素の蒸発潜熱から交流損失を求める。ケーブルには較正用の抵抗ヒータが取り付けられており、抵抗ヒータに通電した際のヒータへの電気入力と蒸発した窒素の流量から測定装置の較正を行うことができる。図 2.2.3-38-2 に単層導体と単層シールドから構成される試料ケーブルの交流損失測定結果を示す。0.1 W/m 以下の交流損失まで測定できていることがわかる。

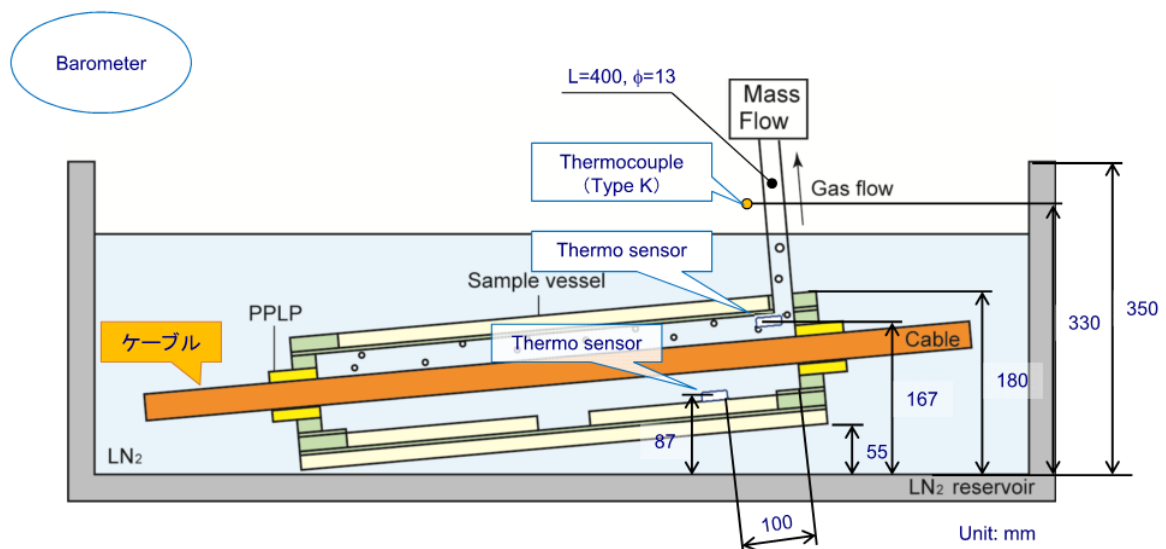


図 2.2.3-38-1 液体窒素蒸発法による交流損失測定

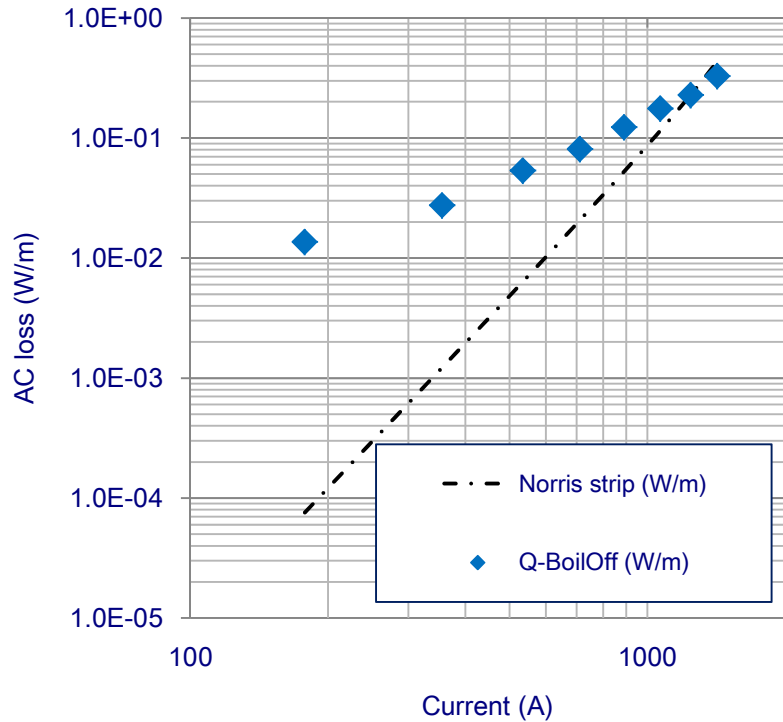


図 2.2.3-38-2 液体窒素蒸発法により測定したシールド層付ケーブルの交流損失

(6) 研究内容 5 —新絶縁紙を用いたケーブルの交流損失解析—

2.2.3-2 で検討した新絶縁紙 (Tyvek®/PE) は、PPLP®-C と同等の性能があり、設計ストレスが 9%良くなると仮定した場合のケーブル構造について検討した。例えば、図 2.2.3-8 のワイブルプロットから設計値ストレス 22 kV/mm を導出したが、24 kV/mm を使用すれば、絶縁厚を薄くすることができる。一方、絶縁を薄くすることは静電容量が上昇し、誘電体損失を上げてしまうので、PPLP®-C を使用した場合には、必ずしも有効ではない。しかし、誘電体損失が PPLP®-C の 1/5 になる Tyvek®/PE ならば、ケーブル構造に有利に働く。そこで、表 2.2.3-13-1 に諸元を示したようなケーブルの交流損失解析を行った。新絶縁材料を用いたケーブルの損失は、新絶縁材料の特性と表 2.2.3-13-1 に示した構造で決まる誘電体損失と超電導ケーブル (超電導導体と超電導シールド) の交流損失の和で与えられる。誘電体損失は 0.6 W/m-相の 1/5 の 0.12 W/m-相が期待され、3 kA_{rms} の交流損失は図 2.2.3-39 で示したように 0.094 W/m-相となり、合わせると 0.21 W/m-相となり、今回の目標の 0.8 W/m-相から大きく損失を下げる事が可能である。

表 2.2.3-13-1 新絶縁材料を用いたケーブルの諸元

絶縁耐力 9%向上		
PD フリー電界ストレス 24 kV/mm		
項目	設計仕様	外径(mm)
中空銅フォーマ		38.7
外径調整紙		40.7
1層目超電導	3.15 mm×37 (Sh0.10 mm)	41.3
2層目超電導	3.15 mm×37 (Sh0.10 mm)	41.9
絶縁紙	Tyvek®/PE	78.1
超電導シールド	7.0 mm×34 (Sh0.27 mm)	78.7

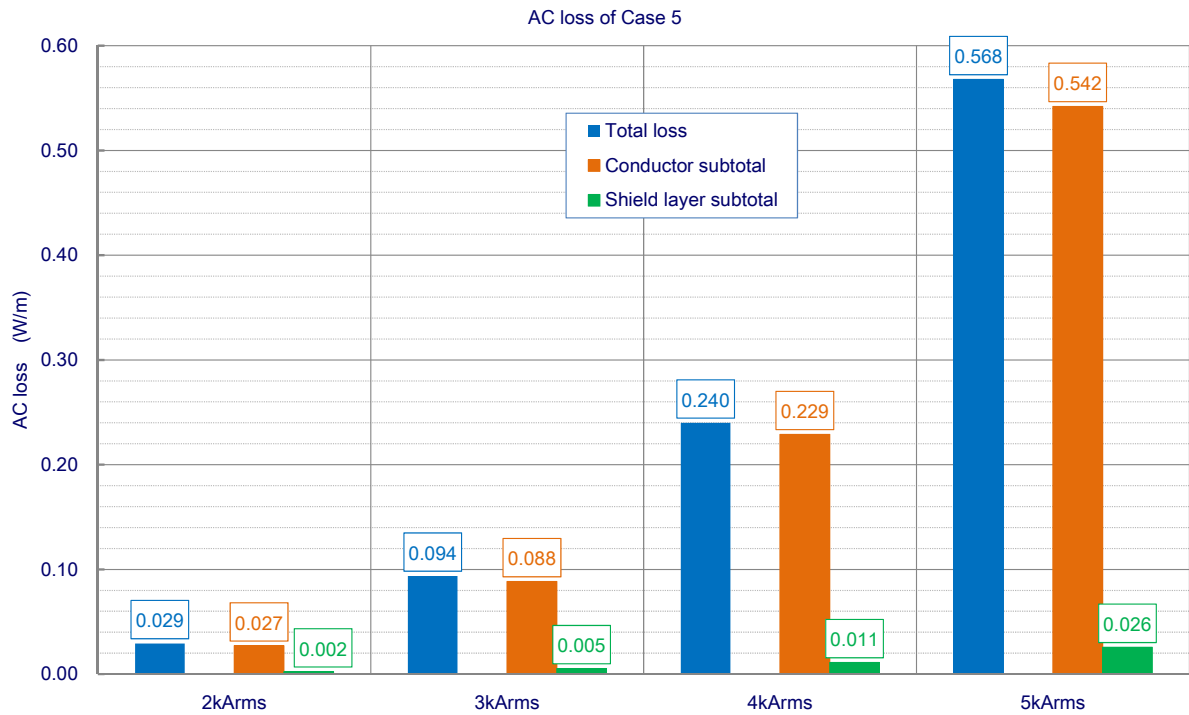


図 2.2.3-39 新絶縁材料を用いたケーブルの交流損失解析値

(7) 成果

平成 23、24 年度は、線材の幅方向 J_c 分布、臨界電流、線材幅を変えてシールド層を含めたケーブル交流損失の解析を行った。そのほかの諸元を与えての解析も併せ、以下のようなことが分かった。

- ・ 線材幅方向の J_c 分布の肩を小さくすることが交流損失低減に有効である。
- ・ 解析した範囲では、臨界電流の小さい線材で層数が大きいケーブルを構成しても全体の損失はあまり変わらない。
- ・ 単層シールド層にはやや幅の広い線材を用いた方が交流損失を低減できた。
- ・ 線材の可撓性を利用して、導体に沿うように這わせても交流損失低減には殆ど寄与しない。

検証用に用いる線材の幅方向 J_c 分布を磁気ナイフ法により測定した。

液体窒素蒸発法によるケーブル交流損失測定の見通しが得られた。この方法で、0.1 W/m-相以下のシールド層付ケーブルの交流損失を評価できる。

新絶縁材料を使用して、ケーブル設計を行うと、275 kV-3 kA_{rms} で 0.21 W/m-相の損失になり、今回の目標値 0.8 W/m-相からさらに大きく損失削減できる可能性を示した。

引用論文リスト

- (1) K. Takeuchi, N. Amemiya, T. Nakamura, O. Maruyama, and T. Ohkuma, "Model for Electromagnetic Field Analysis of Superconducting Power Transmission Cable Comprising Spiraled Coated", Supercond. Sci. and Tech. Vol.24 (2011) 085014

2.2.3-5 定常通電の伝熱特性検討（早稲田大学、古河電気工業）

(1) 研究開発目的

275 kV 高電圧ケーブルは、単心で管路内に布設するケーブル構造が考えられており、ケーブルコアは冷却性向上のため、銅フォーマを従来の丸撚り形状から中空にすることも検討されている。275 kV という高電圧により、絶縁体の誘電体損失が大きくなり、さらに、3 kA_{rms} の通電により、超電導導体層と超電導シールド層で交流損失が発生する。ケーブルの絶縁厚は、275 kV の耐電圧特性を持たせるために、厚くなり、その結果、伝熱特性が悪くなるので、定常運転に影響を与える可能性がある。よって、275 kV 高電圧ケーブルでは、交流損失と誘電体損失による発熱を考慮した定常通電の伝熱特性評価が重要である。そこで、275 kV 高電圧ケーブルの交流損失と誘電体損失を想定した伝熱特性評価を行い、適切な銅フォーマの形状について検討するために、銅フォーマが中空と丸撚り形状のモデルケーブルを 2 本作製して、ほぼ定常状態となるまでの伝熱特性試験を実施するとともに、有限要素法を用いてモデルケーブル内の伝熱特性について数値解析を行い、実験結果と比較して数値解析の妥当性を確認する。

(2) 研究内容 1 一定常伝熱特性試験一

銅フォーマが中空 A と丸撚り B のモデルケーブルを 2 本作製し、交流損失と誘電体損失を模擬するヒータをモデルケーブル内に配置した。図 2.2.3-40 にモデルケーブル A、B の写真を示す。

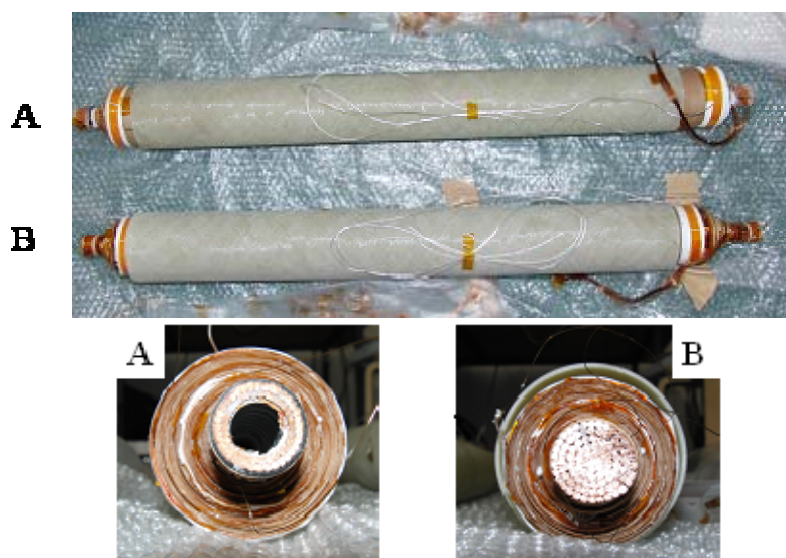


図 2.2.3-40 中空 A と丸撚り B のモデルケーブル

モデルケーブル A の寸法及びヒータと白金抵抗温度計の配置図を図 2.2.3-41 に示す。モデルケーブル A の中空部は直径 18 mm である。モデルケーブル B の寸法及びヒータと温度計の配置は、銅フォーマの形状が丸撚りであることを除いて A

と同様にした。

モデルケーブル A、B は、超電導導体層・絶縁層中央・超電導シールド層にヒータを配置して、交流損失と誘電体損失を模擬した。275 kV 高電圧ケーブルのプロジェク設計目標値である 0.8 W/m-相を基に、交流損失と誘電体損失はそれぞれ 0.3 W/m-相と 0.5 W/m-相に設定し、ヒータの出力は超電導導体層で 0.15 W/m-相、絶縁層中央で 0.5 W/m-相、超電導シールド層で 0.15 W/m-相となるように実験を行った。モデルケーブル A、B は、全長約 1 m のケーブル中央に 12 個の白金抵抗温度計 (T1-T6、T11-T16) を配置して温度測定を行なった。なお、T1 と T11、T2 と T12、T3 と T13、T4 と T14、T5 と T15、T6 と T16 はそれぞれケーブル中心から同距離に設置した。実験は、77.3 K の液体窒素を 0.03-0.05 MPaG のヘリウム加圧した冷却条件で行った。測定は、ヒータに通電し、温度計の出力が定常状態に落ち着くまで温度観測を行なった。なお、外部から実験装置への熱侵入により液体窒素の温度が上昇するため、モデルケーブルのすぐ外にも温度計を配置し、ケーブル内の温度からケーブル外部の熱侵入の影響を除去した。

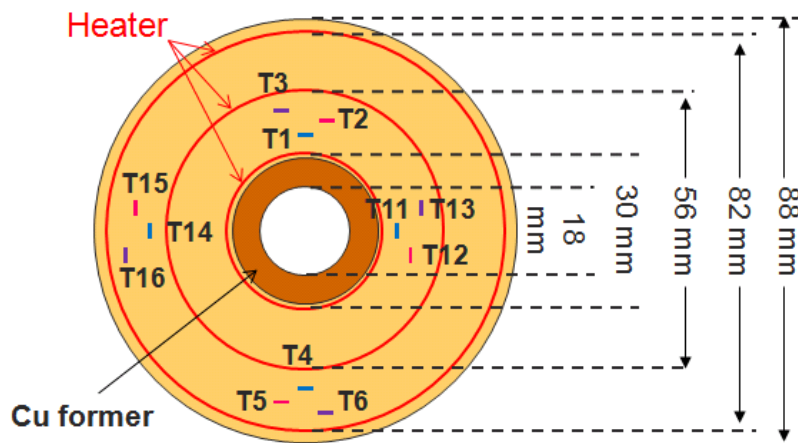


図 2.2.3-41 モデルケーブル A の寸法、ヒータと白金抵抗温度計の配置図

(3) 研究内容 2 – 伝熱特性の数値解析 –

伝熱特性の数値解析は 3 次元有限要素法を用いてモデル化し、式(1)、(2) より定式化した。熱容量、熱伝導率等の各物性値の温度依存性や非線形性を考慮して、各時間ステップにおけるケーブル内の温度分布を計算している。境界条件はケーブル最外層の絶縁層 (PPLP®) の表面が液体窒素に触れているとして、液体窒素の熱伝達特性 (図 2.2.3-42 参照¹⁾) を考慮した。PPLP®は液体窒素が浸漬した状態であるため、熱物性値の熱伝導率 k_{pplp} と熱容量 C_{pplp} は既存するデータがなく、本解析ではパラメータとして推定した。式(2.2.3-3)の C は熱容量、 k は熱伝導率、 T は温度、 Q_j は電流分布解析から求まるジュール発熱、 Q_q は液体窒素の冷却項である。式(2.2.3-4)の h は液体窒素への熱伝達係数、 T_s はモデルケーブル表面の温度、 T_b は液体窒素の温度である。なお、実験は液体窒素が潤沢にある装置内にモデル

ケーブルを設置して行い、液体窒素の温度変化はほとんどないため、解析では T_b を一定とした。

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_j \quad (2.2.3-3)$$

$$Q_q = h(T_s - T_b) \quad (2.2.3-4)$$

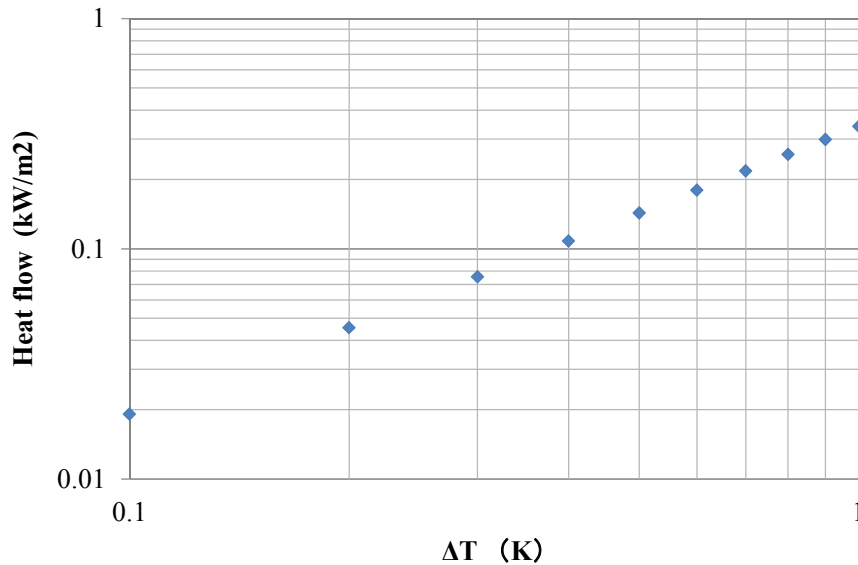


図 2.2.3-42 液体窒素の熱伝達特性

(4) 研究内容 3 ー実験結果との比較ー

ヒータから交流損失と誘電体損失を模擬する発熱を投入し、ほぼ定常状態になるまでモデルケーブル A、B 内の温度分布を測定した。モデルケーブル A について、定常時におけるケーブル断面の半径方向の温度分布の実験結果と解析結果を図 2.2.3-43 に、同様にモデルケーブル B の結果を図 2.2.3-44 に示す。またモデルケーブル A について、定常状態になるまでの温度分布の実験結果と解析結果を図 2.2.3-45 に、同様にモデルケーブル B の結果を図 2.2.3-46 に示す。図 2.2.3-43、2.2.3-44 の横軸はケーブル中心から半径方向への距離で、縦軸は初期温度からの温度上昇である。図 2.2.3-45、2.2.3-46 の横軸は時間で、縦軸は初期温度からの温度上昇である。実験における超電導導体層、絶縁層中央、超電導シールド層のヒータ出力はそれぞれ約 0.15 W/m、0.48 W/m、0.14 W/m であった。図 2.2.3-43、2.2.3-44 の LN₂ は液体窒素領域を表す。図 2.2.3-43 のモデルケーブル A は中空部である 0-0.009 m までも液体窒素領域である。図 2.2.3-45 の解析において、PPLP®の熱伝導率 k_{pplp} は 0.14 W/mK、熱容量 C_{pplp} は 0.8×10^6 J/m³K を用いた。図 2.2.3-29 の解析において、PPLP®の熱伝導率 k_{pplp} は 0.23 W/mK、熱容量 C_{pplp} は 0.5×10^6 J/m³K を用いた。

図 2.2.3-43 より、モデルケーブル A は絶縁層中央のヒータ (0.48 W/m) 付近で最も温度上昇が大きく、その両側は一定の傾きで低下していく。これは、中空部及びケーブル外部の両方から冷却されているためである。また、絶縁層中央のヒータより両側の温度分布は非対称になっており、ケーブル外側の温度が低い。これは、中空部よりもケーブル外部の冷却面積が広いためである。図 2.2.3-44 より、モデルケーブル B はケーブル中心に近いほど温度が高い傾向にある。これは、ケーブル外部のみから冷却されているためである。図 2.2.3-43、2.2.3-44 の解析結果は実験結果とよく一致しており、モデルケーブル A の最大温度上昇は 0.3 K 以下、モデルケーブル B は 0.4 K 以下と推定される。

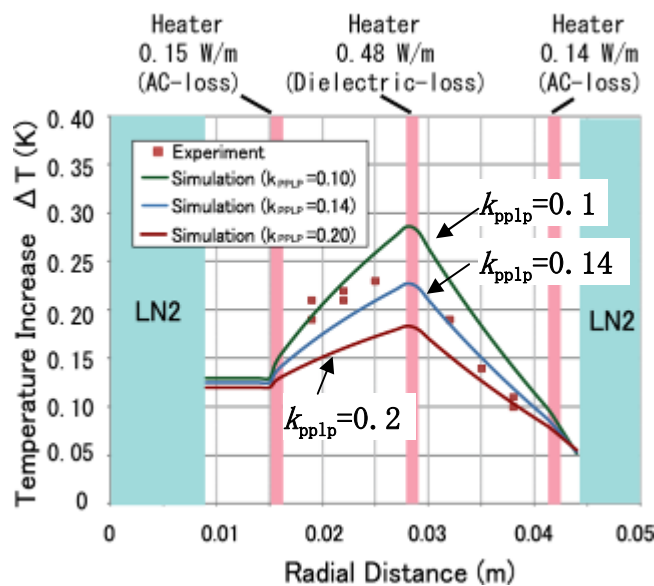


図 2.2.3-43 モデルケーブル A の半径方向の温度分布

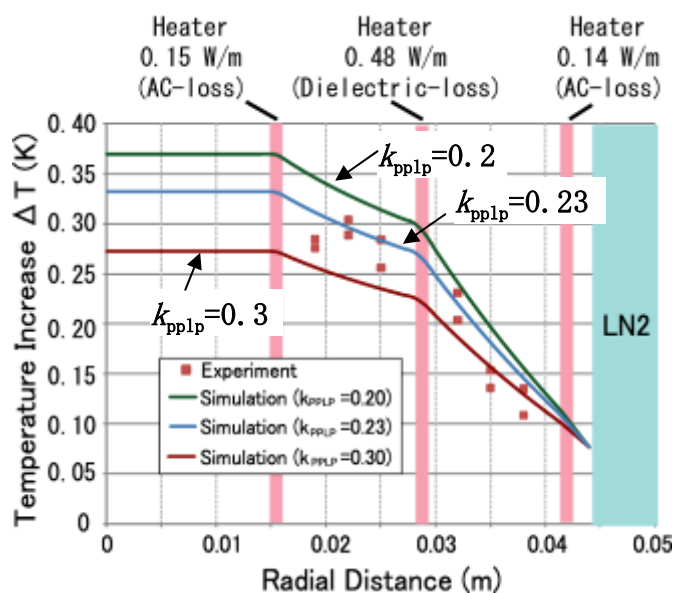


図 2.2.3-44 モデルケーブル B の半径方向の温度分布

図 2.2.3-45、2.2.3-46 より、両モデルケーブルはヒータ投入開始 (0 sec) からとも 6000 sec 程度でほぼ定常状態になった。解析結果は実験結果とよく一致しており、ケーブル内部の過渡的な熱特性の再現を確認した。また解析結果より、液体窒素浸漬状態の PPLP®の熱伝導率 k_{pplp} は 0.1-0.3 W/mK、熱容量 C_{pplp} は 0.5×10^6 - 0.8×10^6 J/m³K と推定でき、この物性値は世界的にも報告例がなく、超電導ケーブルの熱特性評価において非常に重要なデータである。本結果は Physica C にて論文発表を行った²⁾。

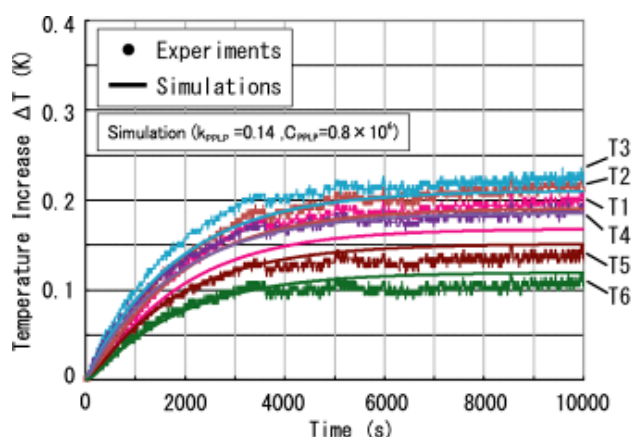


図 2.2.3-45 モデルケーブル A の温度がほぼ定常状態となるまでの時間変化

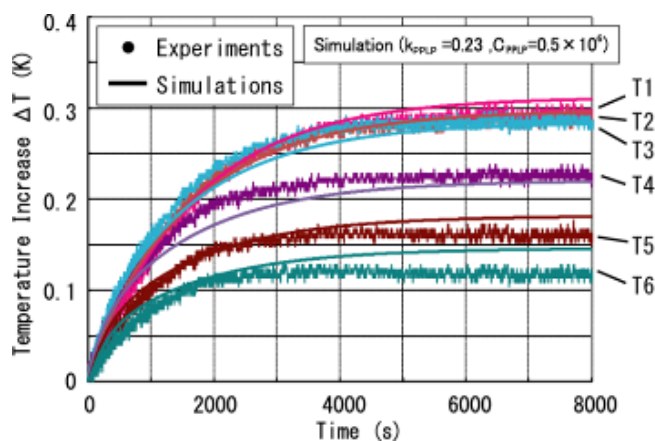


図 2.2.3-46 モデルケーブル B の温度がほぼ定常状態となるまでの時間変化

(5) 研究内容 4 —新絶縁紙を用いたケーブルの熱収支の定常伝熱特性の実験と解析評価—

H23、24 年度は、2.2.3-2 で検討した新絶縁紙である Tyvek®/PE 合成絶縁紙を用いたケーブル設計に関する熱収支の実験と解析評価した。Tyvek®/PE 合成絶縁紙を用いた中空銅フォーマのモデルケーブルを作製し、交流損失と誘電体損失を模擬

するヒータをモデルケーブル内に配置した。図 2.2.3-47 にモデルケーブルの写真を示す。モデルケーブルの寸法及びヒータと白金抵抗温度計の配置図を図 2.2.3-48 に示す。中空部は直径 18 mm である。超電導導体層・絶縁層中央・超電導シールド層にヒータを配置して、交流損失と誘電体損失を模擬した。275 kV 高電圧ケーブルのプロジェクト設計目標値である 0.8 W/m-相を基に、交流損失と誘電体損失はそれぞれ 0.3 W/m-相と 0.5 W/m-相に設定し、ヒータの出力は超電導導体層で 0.15 W/m-相、絶縁層中央で 0.5 W/m-相、超電導シールド層で 0.15 W/m-相となるように実験を行った。モデルケーブルは、全長約 1 m のケーブル中央に 12 個の白金抵抗温度計 (T1-T6、T11-T16) を配置して温度測定を行った。なお、T1 と T11、T2 と T12、T3 と T13、T4 と T14、T5 と T15、T6 と T16 はそれぞれケーブル中心から同距離に設置した。実験は、77.3 K の液体窒素を約 0.05 MPa の加圧した冷却条件で行った。測定は、ヒータに通電し、温度計の出力が定常に落ち着くまで温度観測を行った。なお、外部から実験装置への熱侵入により液体窒素の温度が上昇するため、モデルケーブルのすぐ外にも温度計を配置し、ケーブル内の温度からケーブル外部の熱侵入の影響を除去した。

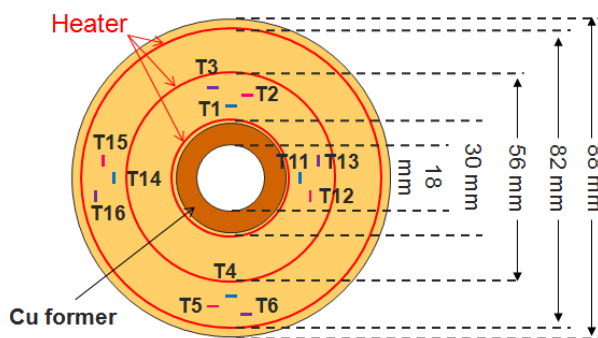
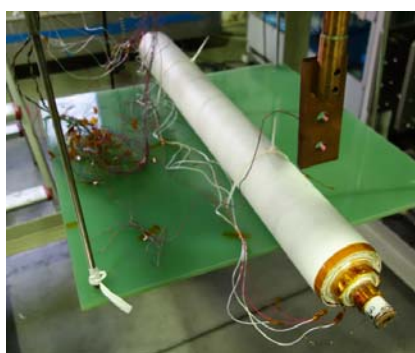


図 2.2.3-47 モデルケーブルの写真

図 2.2.3-48 モデルケーブルの寸法と温度計配置

定常時におけるケーブル断面の半径方向の温度分布の実験結果と解析結果を図 2.2.3-49 に示す。横軸はケーブル中心から半径方向への距離で、縦軸は初期温度からの温度上昇である。プロットは実験結果で、四角プロットが Tyvek®/PE 合成絶縁紙、丸プロットが PPLP®-C 絶縁紙の結果である。実線は解析結果である。定常状態に至るまでの温度分布の実験結果を図 2.2.3-50 に示す。横軸は時間で、縦軸は初期温度からの温度上昇である。実験における超電導導体層、絶縁層中央、超電導シールド層のヒータ出力はそれぞれ約 0.15 W/m、0.51 W/m、0.15 W/m であった。図中 LN2 は液体窒素領域を表す。解析パラメータとして、液体窒素浸漬状態の Tyvek®/PE 合成絶縁紙の熱伝導率 k は 0.1-0.3 W/mK、熱容量は 1.5×10^6 J/m³K を用いた。

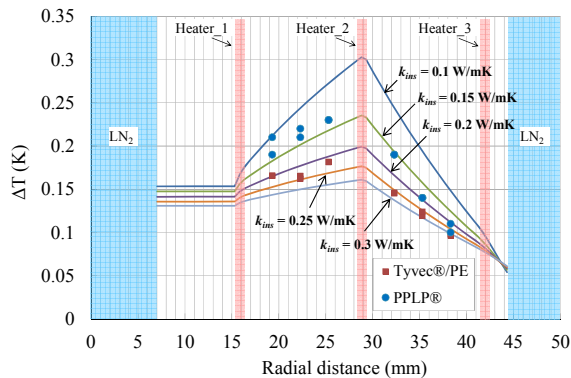


図 2.2.3-49 半径方向の温度分布

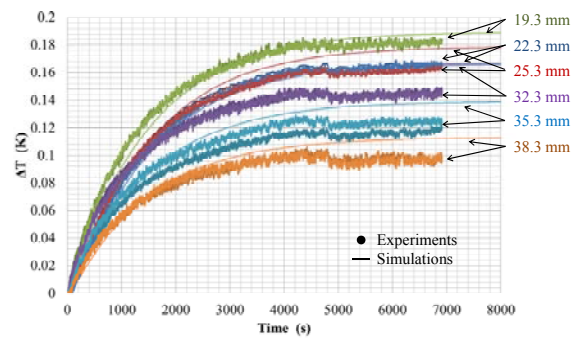


図 2.2.3-50 定常までの温度分布

Tyvek®/PE 合成絶縁紙を用いたモデルケーブルの定常時の温度上昇は 0.2 K 以下であるのに対して、PPLP®-C 絶縁紙は 0.05 K 程度高くなっている。実験と解析結果から予想される Tyvek®/PE 合成絶縁紙の液体窒素浸漬冷却時の熱伝導率は 0.2-0.3 W/mK 程度である。なお、中空型モデルケーブル A の PPLP®-C 絶縁紙は 0.1-0.2 W/mK 程度である。

(6) 成果

中空 A と丸撚り B の銅フォーマで構成されたモデルケーブルの定常通電における伝熱特性を十分に確認した。両モデルケーブルの伝熱特性に大きな差がなく、丸撚りの銅フォーマによるケーブル構造を選択した場合でも、定常運転時における伝熱特性に問題はなく、実現可能であることが確認された。

実測及び解析から液体窒素浸漬状態の絶縁層の熱特性は、PPLP®-C が約 0.1-0.2 W/mK、Tyvek®/PE 合成紙が約 0.2-0.3 W/mK であった。

引用論文リスト

- (1) 「超伝導・低温工学ハンドブック」 p1065 図 2-57 液体窒素の沸騰熱伝達曲線
- (2) S. Sato, X. Wang, H. Ueda, A. Ishiyama, M. Yagi, S. Mukoyama, T. Saitoh, Y. Aoki, N. Fujiwara, “Computer simulation of fault current characteristics in 275 kV class YBCO power cable”, Physica C: Superconductivity, vol. 470, pp. 1572–1575 (2010)

2.2.3-6 耐過電流ケーブル設計技術（古河電気工業、早稲田大学）

(1) 研究開発目標

275 kV 級高電圧超電導ケーブルは、単心で管路内に布設するケーブル構造が考えられており、ケーブルコアは図 2.2.3-51 のようにケーブル中心から銅フォーマ、超電導導体層、絶縁層、超電導シールド層、銅シールド層で構成されている。超電導導体層と超電導シールド層には、それぞれ複数の Y 系超電導線材が並列に接続されており、それらの複合導体には最大で $63 \text{ kA}_{\text{rms}}$ 、 0.6 sec の突発的な短絡事故電流が流入する恐れがある。それゆえ、突発的な短絡事故電流による温度上昇が線材の劣化・焼損を引き起こさないように、超電導保護層としての銅安定化層、銅フォーマや銅シールド層を適切に設計することが必要となる。

本研究の目標は、275 kV 系統で考えられる最悪の事故ケース $63 \text{ kA}_{\text{rms}}$ - 0.6 sec の過電流に対しても超電導が耐性を示す超電導ケーブルを開発することである。

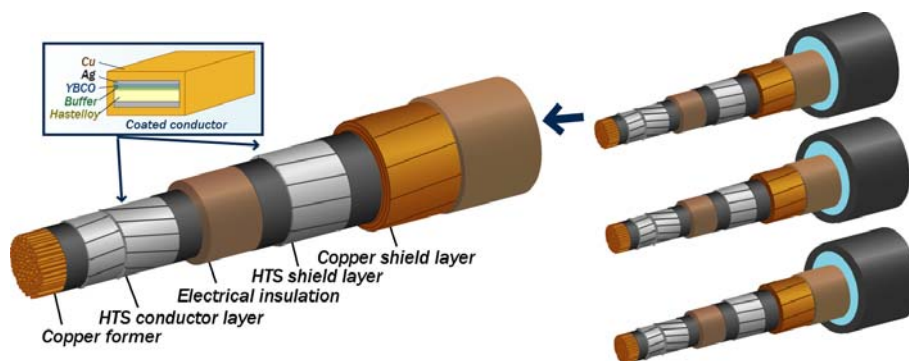


図 2.2.3-51 275 kV 級高電圧超電導ケーブル

(2) 研究成果 1 ー超電導線材への耐過電流対策ー

超電導線材の銅めっき厚と銅シールド層の断面積をパラメータとして、275 kV 級高電圧超電導ケーブルで想定される最大の短絡事故電流 $63 \text{ kA}_{\text{rms}}$ 、 0.6 sec 通電した際のケーブル内の温度上昇について解析評価した。銅めっき厚と銅シールド層の断面積の解析設定値を表 2.2.3-14 に示す。解析対象のケーブル構造は、銅めっき厚と銅シールド層の断面積を除いて、図 2.2.3-51 で示した超電導モデルケーブルと同様にした。銅フォーマと超電導導体 1, 2 層目の温度上昇と銅めっき厚の関係を図 2.2.3-52 に、銅シールド層が 240 mm^2 及び 310 mm^2 での超電導シールド層の温度上昇と銅めっき厚の関係を図 2.2.3-53 に示す。図 2.2.3-52 の解析結果より、銅めっき厚の増加に伴い、超電導導体 1, 2 層目の温度上昇は増加し、一方銅フォーマの温度上昇は緩やかに低下した。この原因として、銅めっき厚の増加により超電導導体層の常電導抵抗が減少し、全過電流のうち超電導導体層に流れる電流が増加したためである。一方、超電導導体層

に流れる電流が増加することで銅フォーマに流れる電流は減少し、銅フォーマの熱容量が大きいことから温度変化しにくいこともあり、温度上昇は緩やかに低下した。図 2.2.3-53 の解析結果より、銅めっき厚の増加に伴い、超電導シールド層の温度上昇は高温超電導層と同様に増加した。この原因は超電導層の原因と同じである。また図 2.2.3-53 の解析結果より、銅シールド層の断面積を 310 mm² から 240 mm² に減らしたことで、超電導シールド層の温度上昇は各銅めっき厚とも約 15 K 増加した。これは、銅シールド層を減らしたことにより、超電導シールド層に流れる電流の増加を引き起こしたものである。なお、銅シールド層の断面積の変化は銅フォーマと超電導層の温度上昇には殆ど影響がなかった。図 2.2.3-52, 図 2.2.3-53 の解析結果から今回の銅めっき厚と銅シールド層断面積の設定範囲において、熱的な要因による超電導特性の劣化が引き起こされる可能性は極めて低く、275 kV 級高電圧超電導ケーブルで想定される最大の短絡事故電流 63 kA_{rms}, 0.6 sec の熱的ダメージから超電導ケーブルを保護できるといえる。一方、超電導ケーブルの作製コストの低減を考えた場合には、できる限り保護としての銅層を減らすことが重要となる。よって、今回の解析結果は、銅めっき厚と銅シールド層断面積を減らした構造も短絡事故から 275 kV 級高電圧超電導ケーブルを保護できる可能性があることを示唆している。

表 2.2.3-14 線材の銅めっき厚と銅シールド層の断面積

	Structure
Copper plating	thickness 12.5, 25, 32.5, 50, 75 μm
Copper shield layer	cross-sectional area 240, 310 mm ² (2, 3 layers)

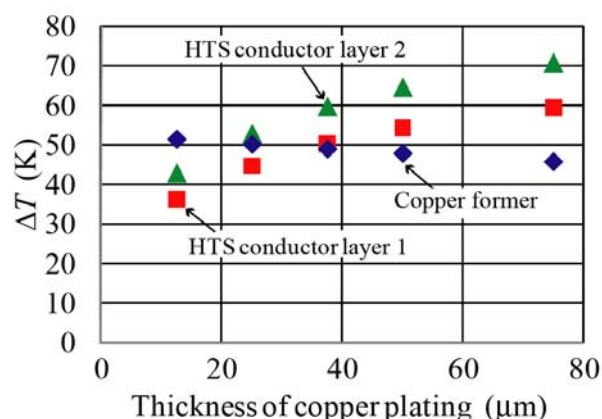


図 2.2.3-52 銅フォーマと超電導層 1, 2 層目の温度上昇と銅めっき厚の関係

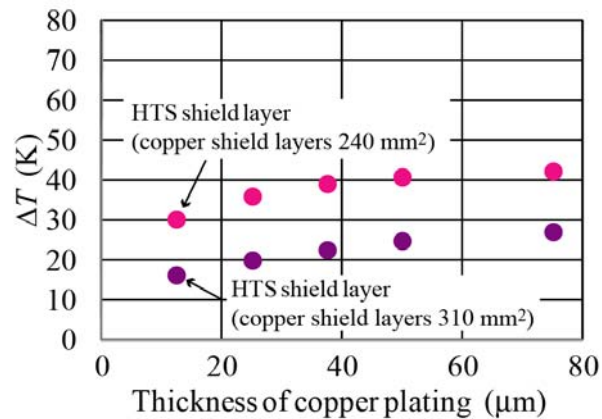


図 2.2.3-53 超電導シールド層の温度上昇と銅めっき厚の関係

(3) 研究成果 2 ー過電流時の分流ー

275 kV 級高電圧超電導ケーブルの開発では、63 kA_{rms}、0.6 sec の耐短絡電流特性が要求される。今回はその耐短絡電流特性の検証として、2 m 級超電導モデルケーブルを用いて過電流通電試験を行った。モデルケーブルの諸元を表 2.2.3-15 に示す。モデルケーブルは 2 本とも同じ構造である。銅フォーマは銅断面積 325 mm² の撚り線構造となっている。超電導導体層は 2 層構成でトータル I_c が約 700 A である。超電導導体層と超電導シールド層の間の絶縁層はポリプロピレンラミネート紙 (PPLP®) で構成し、25 mm 厚である。超電導シールド層は 1 層構成でトータル I_c が約 1,300 A である。銅シールド層は 3 層構成で、銅断面積が約 310 mm² となっている。超電導線材は 5 mm 幅で、安定化層として銀層はスパッタリングされて厚みは 15 μm と銅層はめっき加工されており、めっき厚は 25 μm である。試験で使用した超電導線のめっきの様子を図 2.2.3-54 に示す。端部での膨らみが無くなり、表面も綺麗に仕上がっている。

試験回路は 2 本のモデルケーブルの導体層 (銅フォーマ、超電導導体層) を電源と直列接続し、シールド層 (超電導シールド層、銅シールド層) は両モデルケーブルの端部を短絡接続して、導体層からの誘導でシールド電流が流れるように構成した。過電流通電によるケーブル内の温度上昇を測定するため、ケーブル長手方向の中央部に白金抵抗温度計 (Platinum thermometer) を設置した。実験は液体窒素浸漬冷却 (初期温度 77.3 K) で行い、過電流として約 10, 20, 30, 40, 63 kA_{rms} を通電した。

表 2.2.3-15 275 kV 級超電導モデルケーブルの諸元

	仕様	外径 (mm)
銅撚り線フォーマ	325 mm ²	21.7
超電導導体層 (2 層)	28 tapes	26.9
絶縁層 (PPLP®-C)	厚み:25 μm	79
超電導シールド層 (1 層)	42 tapes	80
銅シールド層(3 層)	310 mm ²	85
保護層	絶縁紙	90

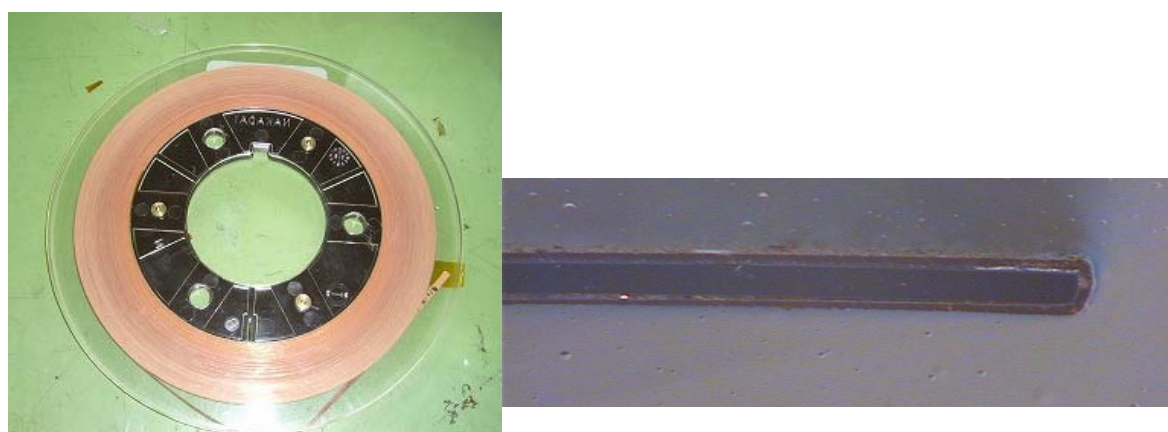


図 2.2.3-54 銅めっき仕上げ後の超電導線材

次に、銅フォーマ、超電導導体 1, 2 層目、超電導シールド層の初期温度 (77.3 K) からの温度上昇 (ΔT) について、63 kA_{rms} 通電時の通電時間との関係を図 2.2.3-55 に、また 10, 20, 30, 40, 63 kA_{rms} の 0.6 sec 通電時の過電流値との関係を図 2.2.3-38 に示す。図 2.2.3-55, 2.2.3-56 のプロットは実験値で、実線が解析値である。図 2.2.3-55 の実験結果より、275 kV 級高電圧超電導ケーブルで想定される最大の短絡事故電流 63 kA_{rms}, 0.6 sec を通電した際に、銅フォーマは約 53 K、超電導導体 1 層目は約 30 K、超電導導体 2 層目は約 42 K、超電導シールド層は約 15 K の温度上昇となった。図 2.2.3-56 の解析結果は、時間推移に伴う各層の温度上昇が 0.3 sec まで実験とよく一致している。0.6 sec では実験と解析に差が出ているが、実験での温度計には時間遅れがあるため、測定誤差が生じていると考えられる。また、解析のモデル構成が完全に実験の構成を再現できていないことも原因と考えられる。図 2.2.3-56 の実験結果において、過電流値の増加に伴い、各層の温度も急激に上昇している。特に銅フォーマの温度上昇は、63 kA_{rms} 通電時には超電導導体層と同程度もしくはそれ以上になっている。以上より、熱的な解析結果は、実験結果と定性的によく一致している。

40 kA_{rms} 通電時の各層の電流分布の実験結果を図 2.2.3-57 に、解析結果を図 2.2.3-58 に示す。図 2.2.3-57 の実験結果よりシールド電流は通電開始直後から

殆ど減衰がなく、遮蔽率は約 91%である。通電開始から 0.3 sec 付近における各層の電流分布は、銅フォーマのピーク値が約 55 kA、高温超電導層が約 3.1 kA、超電導シールド層が約 3.6 kA、銅シールド層が約 47.5 kA である。図 2.2.3-58 の解析結果も実験結果と同様にシールド電流は通電開始直後から殆ど減衰がなく、遮蔽率は約 97%である。通電開始から 0.3 sec 付近における各層の電流分布は実験結果とよく一致しており、各層の電流位相差もほぼ再現できている。

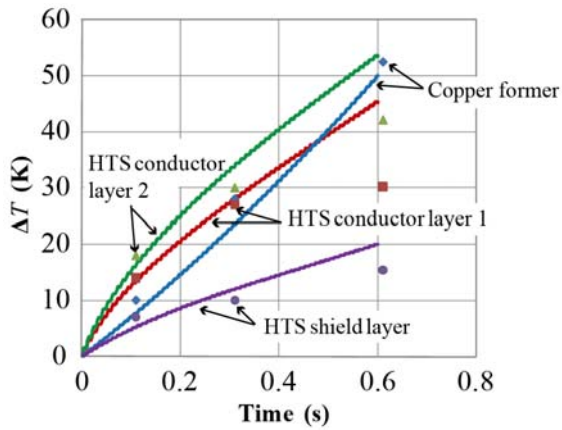


図 2.2.3-55 63 kArms 通電時の温度上昇

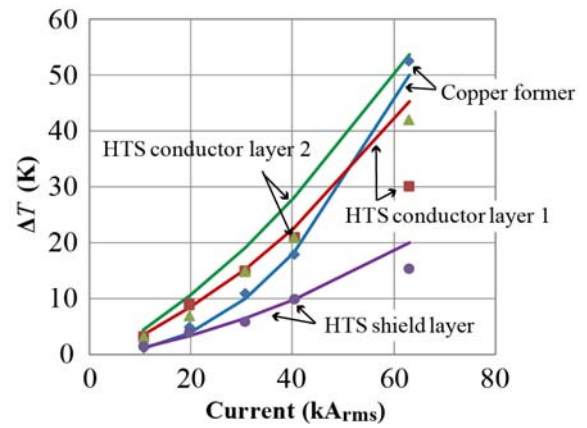


図 2.2.3-56 過電流値と温度上昇の関係

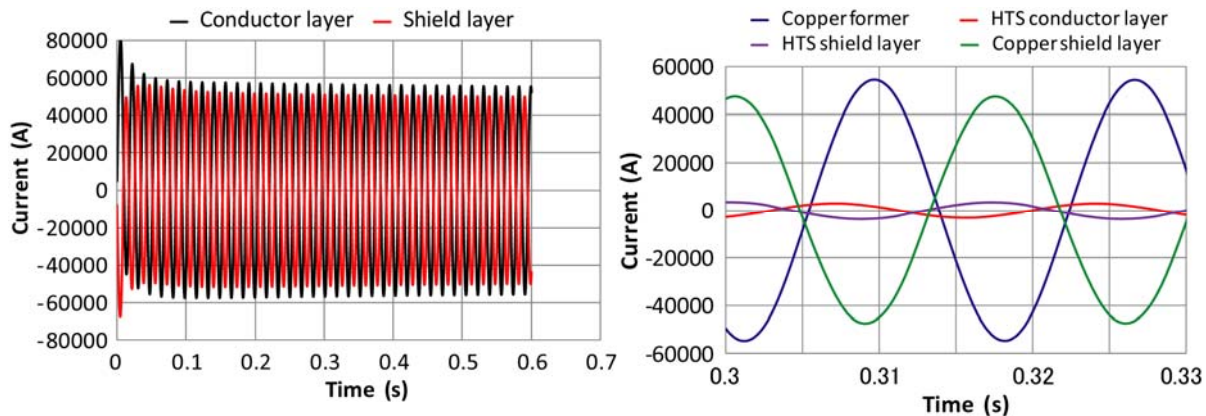


図 2.2.3-57 40 kArms 通電時の電流分布の実験結果

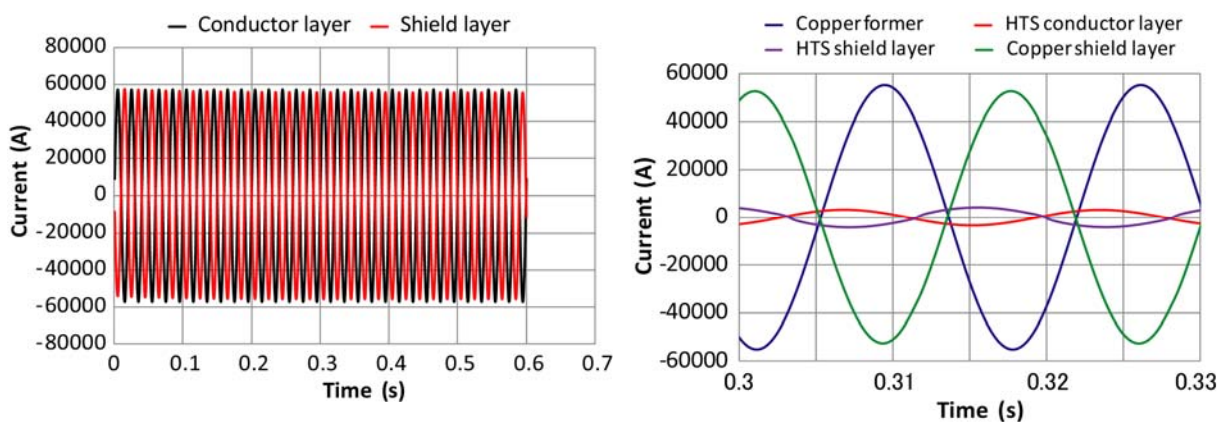


図 2.2.3-58 40 kArms 通電時の電流分布の解析結果

(4) 研究成果 3 – 超電導ケーブルへの耐過電流対策 –

超電導線の I_c が 300 A/cm-w(@77 K,s.f.) の場合で、短絡前後の健全性を評価した。超電導線材は 5 mm 幅で、超電導の I_c が高いため、安定化層として銀層の厚みは 30 μm と厚くしており、銅層はめっき加工されており、めっき厚が 25 μm である。試験回路は 2 本のモデルケーブルの導体層（銅フォーマ、超電導導体層）を電源と直列接続し、シールド層（超電導シールド層、銅シールド層）は両モデルケーブルの端部を短絡接続して、導体層からの誘導でシールド電流が流れるように構成した。ケーブルの仕様を表 2.2.3-16 に示す。超電導導体、シールドを図 2.2.3-59 に、供試体を図 2.2.3-60 に示す。作製後の導体とシールドの I_c を測定したところ、それぞれ、4370 A と 6340 A であり、表 2.2.3-16 で示した超電導線材単線の I_c 合計値と変わらず、作製・取り付けに伴う I_c 低下は見られなかった。

図 2.2.3-61～64 までに 63 kArms -0.05, 0.1, 0.3, 0.6 sec の試験波形を示す。最初のピーク値で直流成分を重畳して 120 kA にしたが、シールド電流もそれに誘導されて、遮蔽率は 92 % であり、設計通りであった。図 2.2.3-65,66 には過電流後の温度上昇を示している。63 kArms -0.05, 0.1 sec では最高到達温度

は 90 K 以下に抑えられている。一方、63 kA_{rms} -0.3、0.6 sec では温度上昇は大きく、0.6 sec では約 70 K の温度上昇が見られ、復帰するのに 2 時間を要した。63 kA_{rms} -0.6 sec の過電流試験後に図 2.2.3-67 の直流電源を使用し、超電導の I_c を測定した。その VI 特性図を図 2.2.3-68 に示しているが、 I_c は試験前後で全く変わらず、過電流試験への耐性を確認した。

表 2.2.3-16 275kV-3kA 仕様の超電導モデルケーブル

超電導線材	5 mm 幅 Ag 安定化層 30 μm、銅めっき 25 μm I_c 140-160 A(@77 K,s.f.) (280-320 A/cm-w 相当)	
構成	仕様	外径(mm)
銅フォーマ	325 mm ² 銅撚り線	21.7
超電導導体	2 層 28 本 $I_c=4200$ A (単線の合計)	26.8
半導電層	カーボン紙	27.0
絶縁体	PPLP®-C 厚さ 24 mm	75.0
半導電層	カーボン紙	75.3
超電導シールド	1 層 43 本 $I_c=6450$ A (単線の合計)	75.8
銅シールド層	3 層 310 mm ²	82.2
保護層	絶縁紙	84.0



図 2.2.3-59 超電導導体 (上)、超電導シールド (下)

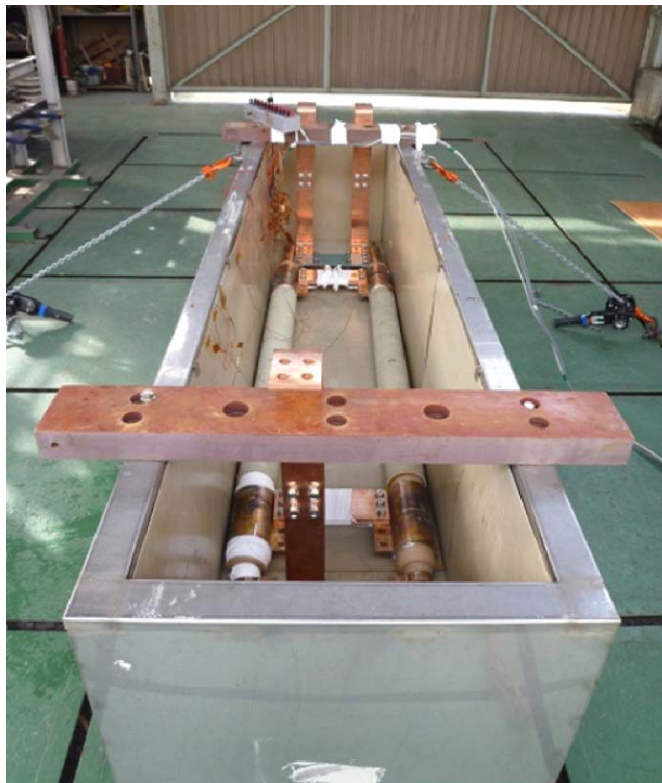


図 2.2.3-60 過電流試験の供試体

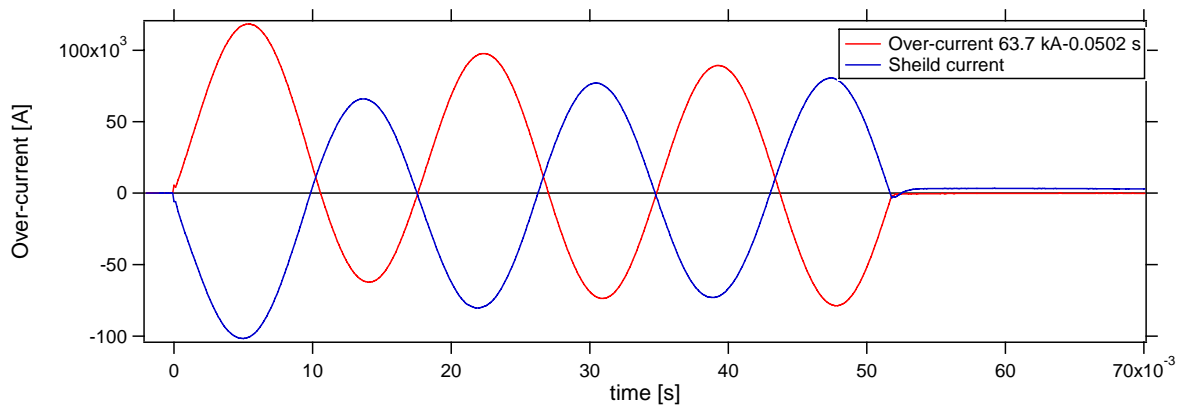


図 2.2.3-61 63 kA_{rms} -0.05 sec の試験波形

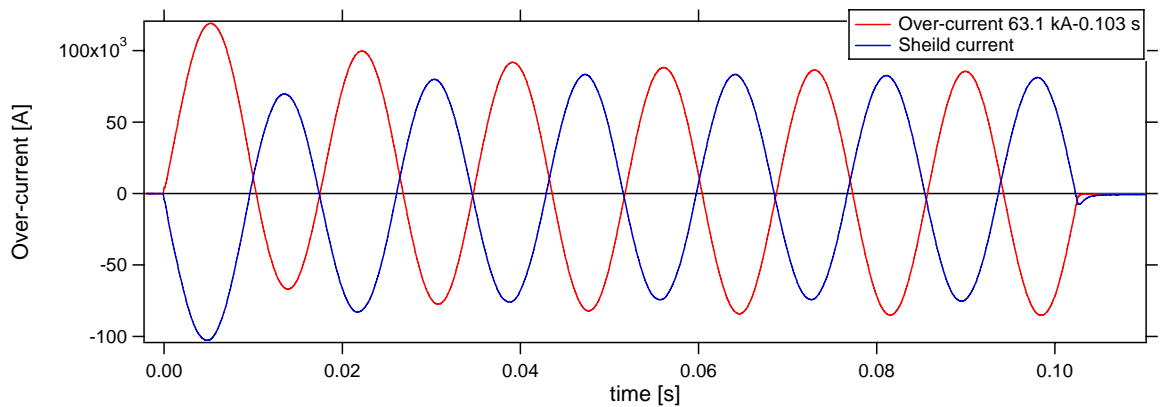


図 2.2.3-62 63 kA_{rms} -0.1 sec の試験波形

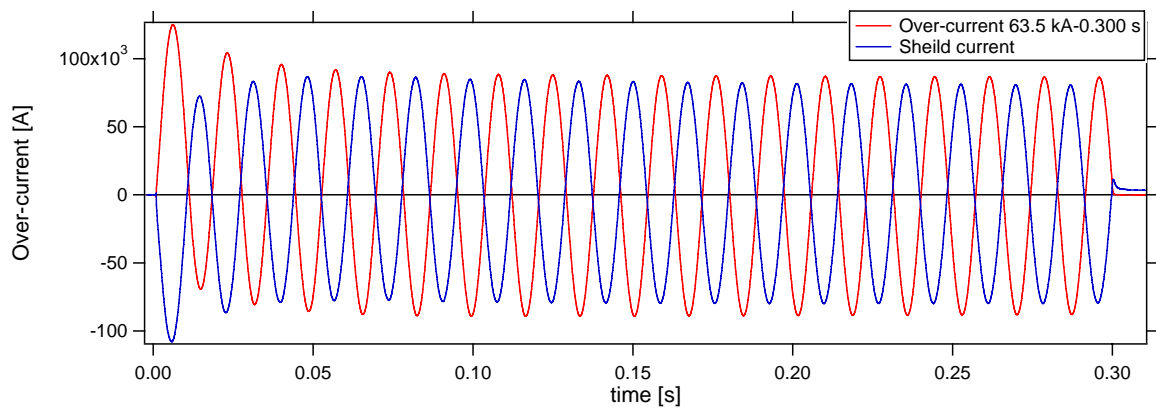


図 2.2.3-63 63 kA_{rms}-0.3 sec の試験波形

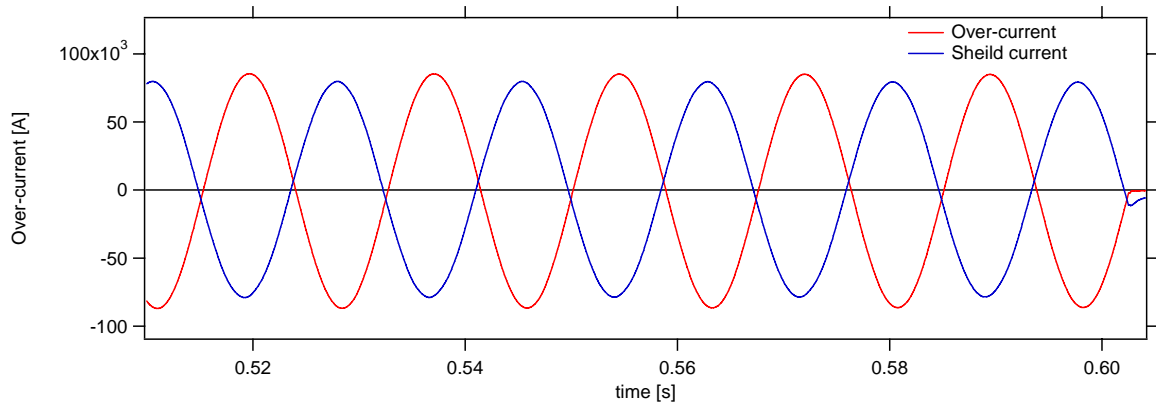
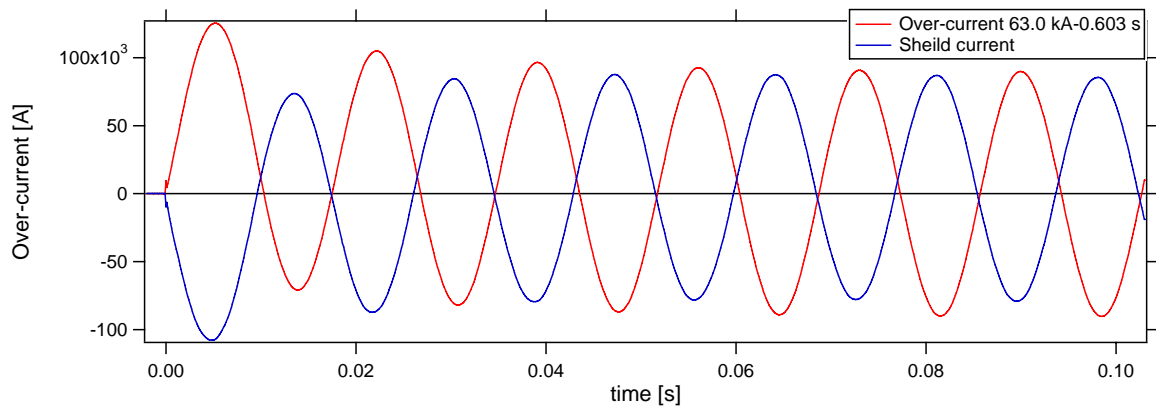


図 2.2.3-64 63 kA_{rms}-0.6 sec の試験波形
0-0.1 sec (上)、0.5-0.6 sec (下)

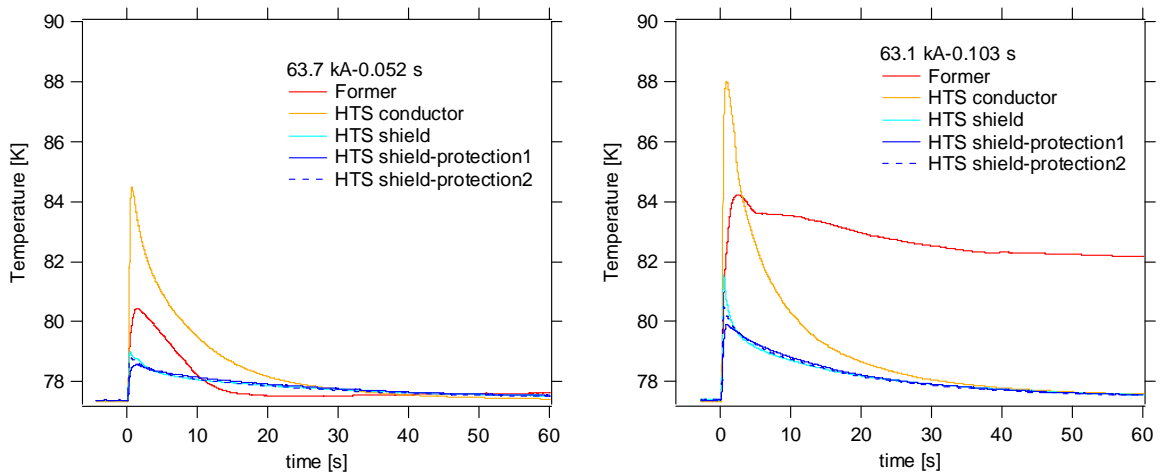


図 2.2.3-65 63 kA_{rms} 時の温度上昇、0.05 sec 時 (左)、0.1 sec 時 (右)

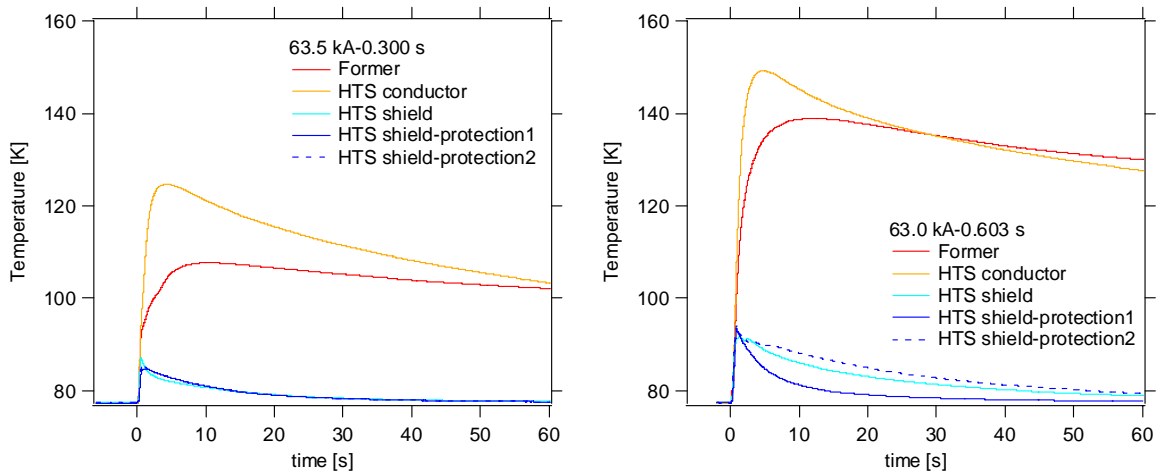


図 2.2.3-66 63 kA_{rms} 時の温度上昇、0.3 sec 時 (左)、0.6 sec 時 (右)



図 2.2.3-67 直流電源による I_c 測定

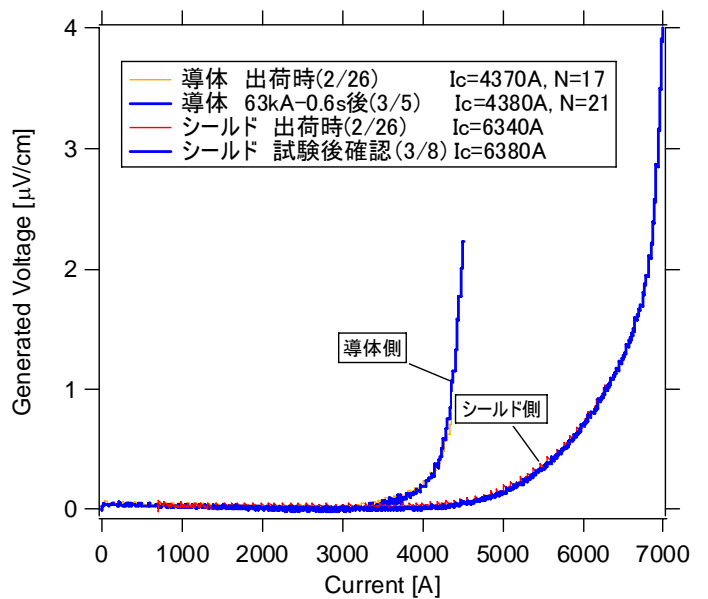


図 2.2.3-68 試験前後の I_c

(5) 研究成果4 ー超電導ケーブルへの耐過電流対策のフィードバックー

丸撚り形状の銅フォーマ（銅断面 325 mm^2 ）を用いたケーブル構造について設計最適化を行い、定常時と事故時の通電・伝熱特性について実験と解析により評価・検証を行ってきた。しかし、瞬時復帰（事故時 0.1 sec まで高温超電導層の温度上昇が線材の臨界温度以下）等の観点から事故時の温度上昇をより低く抑える必要がある。そこで、平成 24 年度は表 2.2.3-17 に示す中空形状の銅フォーマ（断面積 400 mm^2 ）を用いたケーブル構造について、事故時の通電・伝熱特性を解析し、温度上昇の低減について評価・検討した。

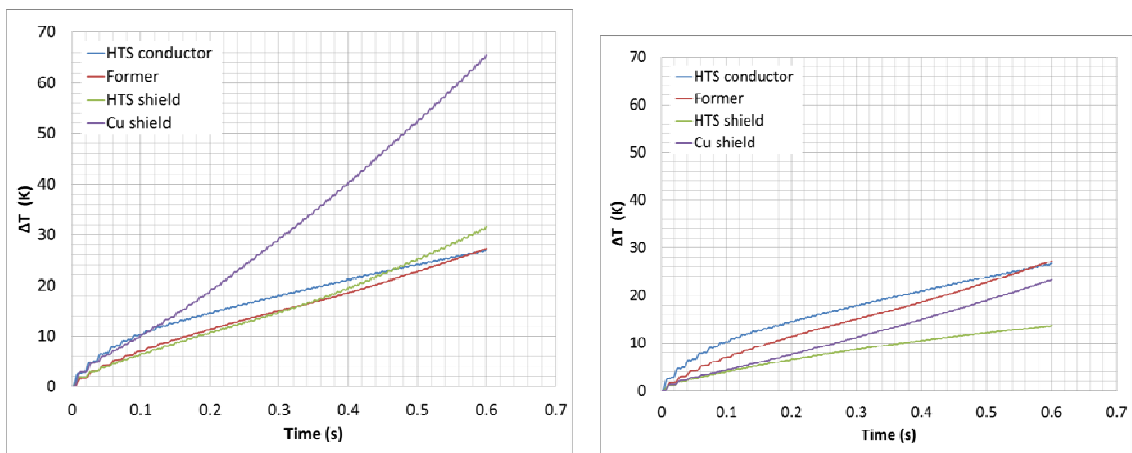
表 2.2.3-17 275 kV 級超電導モデルケーブルの諸元

	Outer diameter (mm)
Hollowcopper former	30.6 (Cross-sectional area 400 mm^2)
HTS conductor layer	33.8 (2 layers, 3-mm-wide, 61 tapes)
Electrical insulation (PPLP®)	78.9 (Thickness 22mm)
HTS shield layer	79.3(1 layer, 5-mm-wide, 44 tapes)
Copper shield layer	85.2 (4 layers, Cross-sectional area 210, 310 mm^2) 実験は 210 mm^2 で実施した。
Insulation paper	86.6

表 2.2.3-17 のモデルケーブルは、中空銅フォーマの銅断面積が 400 mm^2 で、中空直径が 14 mm である。高温超電導導体層 (HTS conductor layer) は 2 層構成で 61 本の 3 mm 幅 REBCO 線材がスパイラル状に並列接続されている。高温超電導導体層と高温超電導シールド層 (HTS shield layer) の間の絶縁層 (Electrical insulation) はポリプロピレンラミネート紙 (PPLP®) で構成し、 22 mm 厚である。高温超電導シールド層は 1 層構成で 44 本の 5 mm 幅 REBCO 線材がスパイラル状に並列接続されている。銅シールド層は 2 または 3 層構成で銅断面積が約 210 または 310 mm^2 となっている。線材は安定化層の銀層が約 $15 \mu\text{m}$ 厚、銅めっき層が約 $25 \mu\text{m}$ 厚で線材上下面に加工されている。

事故電流 $63 \text{ kA}_{\text{rms}}$ 、 0.6 sec 、直流減衰時定数を 90 msec とし、表 2.2.3-17 のケーブル構造について事故時の通電・伝熱解析を行った。解析モデルは開発してきた 3 次元有限要素法と回路モデルに基づき、ケーブル長を 2 m とし事故時の温度上昇を評価した。高温超電導導体層と高温超電導シールド層の I_c はそれぞれ約 5850 A と約 6900 A とし、初期温度は 77 K とした。銅シールド層の銅断面積が 210 mm^2 と 310 mm^2 における各層の温度上昇を図 2.2.3-69 に示す。同図より、高温超電導導体層は銅シールド層 (Copper shield layer) の銅断面積によらず 0.05 sec で約 7 K 、 0.1 sec で約 10 K 、 0.6 sec で約 27 K の温度上

昇である。高温超電導シールド層は、銅シールド層の銅断面積が 210mm^2 の場合において 0.05 sec で約 4 K 、 0.1 sec で約 6 K 、 0.6 sec で約 32 K 、銅シールド層の銅断面積が 310 mm^2 の場合において 0.05 sec で約 3 K 、 0.1 sec で約 4 K 、 0.6 sec で約 14 K の温度上昇である。よって、 0.1 sec における高温超電導層の温度上昇を臨界温度以下に抑えることが可能であり、中空銅フォーマ（Hollowcopper former）を用いたモデルケーブルの有効性が確認できた。本結果を基に、中空銅フォーマ 400 mm^2 と銅シールド層 210 mm^2 の 2 m 級モデルケーブル（中間接続部を含む）を作製し、事故電流 63kA_{rms} を 0.05 sec 、 0.1 sec 、 0.3 sec 、 0.6 sec のそれぞれについて過電流通電試験を行った。



(a) 銅シールド層の銅断面積が 210mm^2 (b) 銅シールド層の銅断面積が 310mm^2

図 2.2.3-69 事故時の各層の温度上昇

高温超電導導体層と高温超電導シールド層の I_c はそれぞれ約 4066 A と約 4500 A であり、導体の接続部、中間接続部図 2.2.3-70 に示す。試験は液体窒素浸漬冷却 (77 K) で実施し、中間接続部中央の銅フォーマ、高温超電導導体 1,2 層の接続部付近と接続部中央、高温超電導シールド層の接続部付近と接続部中央、銅シールド層の温度上昇の実験結果を図 2.2.3-71 に示す。同図より、銅フォーマは約 20 K 、高温超電導導体層の接続部付近と接続部中央は約 17 K と 15 K 、高温超電導シールド層の接続部付近と接続部中央は約 13 K と 1 K 、銅シールド層は約 13 K の温度上昇となった。また 0.1 sec での高温超電導層の温度上昇は超電導特性の臨界温度以下であり、瞬時復帰が可能であると考えられる。



図 2.2.3-70 耐過電流試験に供試した中間接続部。(a)導体接続部、(b)補強絶縁上に設定したシールド接続部

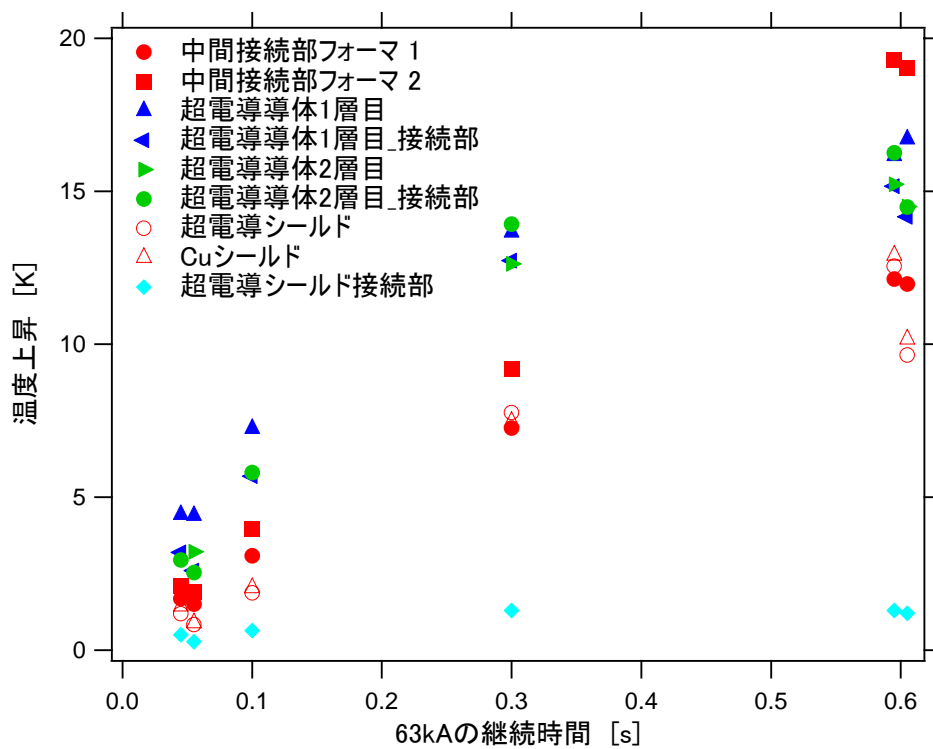


図 2.2.3-71 63 kA_{rms} 通電の継続時間と温度上昇

また、図 2.2.3-72 に過電流波形を示す。遮蔽率は約 80%と低くなっているが、中間接続部の影響と考えられる。回路中の中間接続部長の占める割合が多く、中間接続部では、補強絶縁上に超電導シールドを設けるため、導体-シールド間の磁氣的結合が弱くなったためである。図 2.2.3-73 に 63 kA_{rms}-0.6 sec 後の温度復帰特性を示す。温度復帰は 10 分以内に行われ、325 mm² の丸撚り導体を用いた場合の 2 時間より早い復帰を確認した。

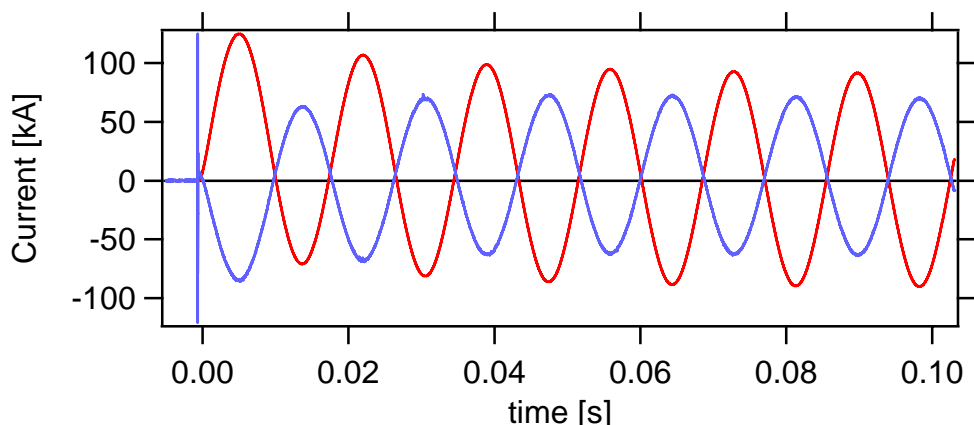


図 2.2.3-72 63 kA_{rms} 過電流波形

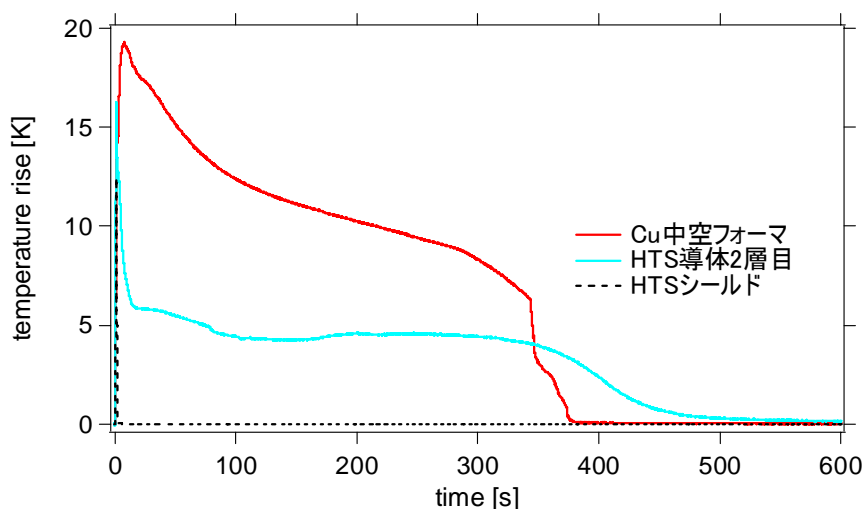


図 2.2.3-73 63 kA_{rms}-0.6 sec 後の温度復帰

システム検証 30 m 長ケーブルの短絡電流時の挙動について解析した。事故電流 63 kA_{rms}、0.6 sec、直流減衰時定数を 90 msec とし、表 2.2.3-17 のケーブル構造について事故時の通電・伝熱解析を行った。解析モデルは開発してきた 3 次元有限要素法と回路モデルに基づき、ケーブル長を 30 m とし事故時の温度上昇を評価した。高温超電導導体層と高温超電導シールド層の I_c はそれぞれ約 11500 A と約 12500 A とし、初期温度は 77 K とした。各層の温度上昇を図 2.2.3-74 に示す。同図より、各層の最高温度上昇は銅フォームが約 28 K、高温超電導導体層が約 38 K、高温超電導シールド層が約 21 K、銅シールド層が約 32 K である。0.1sec では高

温超電導導体層と高温超電導シールド層はそれぞれ約 13 K と約 6 K の温度上昇である。

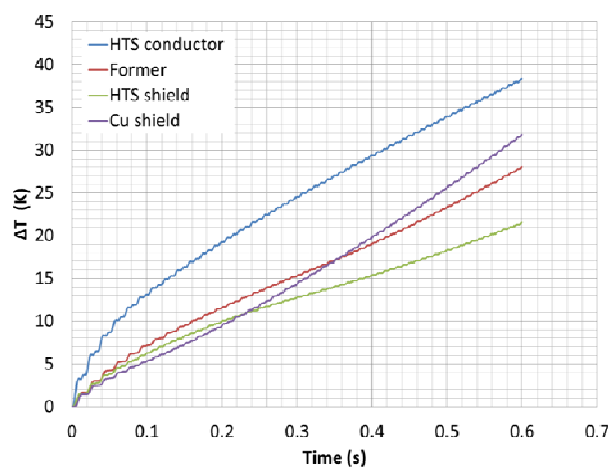
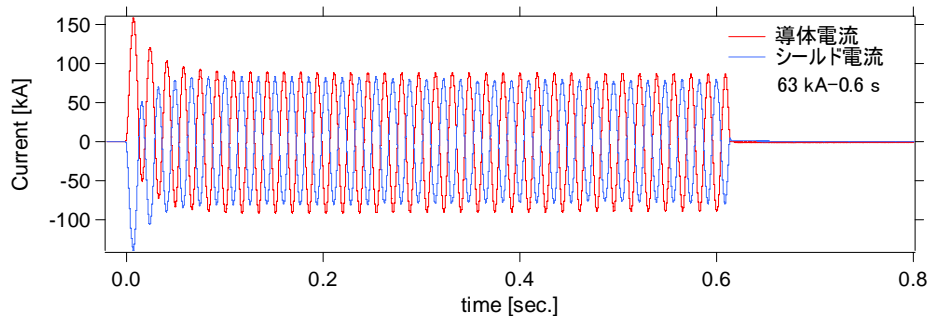


図 2.2.3-74 63 kA_{rms} 通電時の各層の温度上昇(30 m モデル)

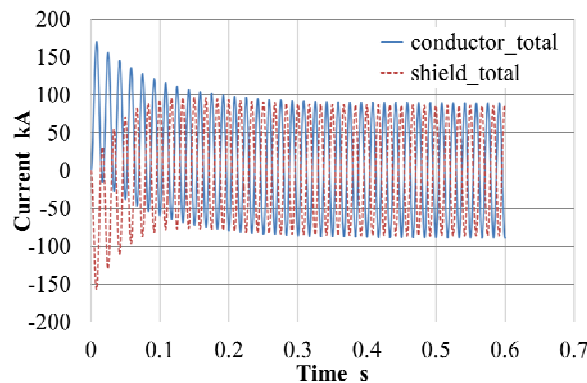
(6) 研究成果5 —新絶縁紙を用いた場合の過電流特性—

平成 23、24 年度は 2.2.3-2 で検討した新絶縁紙である Tyvek®/PE 合成絶縁紙を用いたケーブル設計に関する過電流特性の実験と解析結果を評価した。

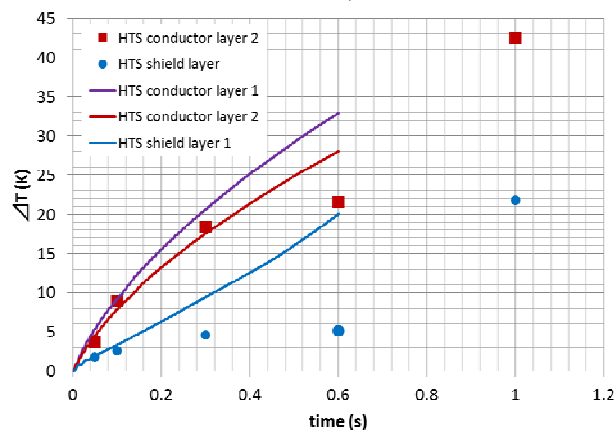
事故電流 63 kA_{RMS}、0.6 sec、直流減衰時定数を 90 msec として、表 2 のケーブル構造について事故時の通電・伝熱解析を行った。高温超電導導体層と高温超電導シールド層の I_c はともに約 6000 A とし、初期温度は 77 K とした。シールド電流の実験結果と解析結果、超電導各層の温度上昇を図 2.2.3-74-1 に示す。



(a) 試験結果



(b) 解析結果



(c) 超電導各層の温度上昇

図 2.2.3-74-1 新絶縁紙を使用した超電導ケーブルの過電流試験および解析結果

過電流通電終了直前の 0.6 sec において、実験結果のシールド電流は短絡電流（導体電流）の約 90%であり、解析結果は約 96%であった。超電導導体層の温度上昇は、実験で約 22 K、解析で約 28 K であった。また超電導シールド層の温度上昇は、実験で約 5 K、解析で約 20 K であった。導体層の温度上昇は実験と解析でよく一致しているが、シールド層に関して少し異なっている。誤差の要因として、端末部分の抵抗性と誘導性の影響を解析モデルで考慮していないことや計測誤差等が考えられる。

(7) 成果

超電導モデルケーブルを用いて過電流通電試験を行い、超電導モデルケーブル内の温度上昇と電流分布について数値シミュレーションの結果と比較検討を行なった。解析結果は実験結果と一致しており、開発した計算機シミュレータの妥当性を確認できた。

実験で使用した超電導導体には銅撚り線 325 mm²の丸撚り導体、超電導シールドには銅編組線 310 mm²を使って、事故電流による過電流保護としたところ、最悪の事故ケース 63 kA_{rms}-0.6 sec の過電流に対しても耐性を示し、中間目標を達成した。

丸撚りと中空銅フォーマを用いて、定常時の交流損失と誘電体損失を模擬した熱特性の実験と解析から、ともに温度上昇は 1 K 未満であった。ほぼ定常状態での丸撚りと中空の最大温度の差は約 0.1 K であった。

H23、24 年度は 63 kA_{rms}-0.6 sec 時の温度上昇を抑えるために、中空銅フォーマ 400 mm²の通電・伝熱特性を解析し、試験結果と比較した。その結果、0.1 sec までは超電導特性の臨界温度以下であり、瞬時復帰が可能である。また、0.6 sec の温度上昇は実験で 20 K、解析で導体 27 K、シールド 32 K であり、丸撚り導体の 325 mm²の 70 K と比較して、抑えることができた。復帰特性も 2 時間から 10 分以内に改善された。また、事故時では、絶縁紙の種類・厚み・熱伝導率の影響は少なく、ほぼケーブル導体の熱容量が支配的である。

2.2.3-7 中間・終端接続技術（古河電気工業）

(1) 研究開発目標

275 kV高電圧ケーブルのシステム検証を行うためには、超電導電力ケーブルの両端に課通電用の終端接続部として気中終端接続部、ケーブル接続部には中間接続部が必要である。

275 kV高電圧ケーブルの中間接続部としては、局所的な発熱と絶縁の問題、 I_c 値の高い線材の接続技術と接続抵抗の把握が重要である。275 kV終端接続部としては、ケーブルの試験を実施するために、ケーブルと同等の性能を持つ必要がある。実施計画で述べられている研究開発目標は、以下の通りである。

- ・（中間接続部）高 I_c 線材の接続抵抗評価、電界解析のための解析モデルの作成、中間接続部の設計と試作、さらに課電試験を通して中間接続部の設計を確立する。
- ・（終端接続部）室温から低温部への温度勾配、電界分布を担うブッシングの開発、ケーブル絶縁の開発のために、試験末端を用いた交流課電試験、インパルス課電試験、部分放電試験を実施する。この試験基準として、国内規格、国際規格、さらには過去の超電導ケーブル試験を参考にする。また、終端部を構成する部品に関して単品試験を行う。これらのデータを蓄積して、システム検証用さらに実機としての終端接続部設計を行う。

(2) 研究内容(1) —超電導線材の接続—

高 I_c の銅めっきY系超電導線材（5mm幅で I_c : 150 A (300 A/cm-w) @77 K,s.f.) を2本用意して、図2.2.3-75 に示すように銅めっき超電導線表面を合わせるようにスプライス接続した。接続長は100 mmであり、この時の接続抵抗測定の結果を表2.2.3-18に示す。この表に示すように47～73 nΩの低抵抗接続ができることを確認した。

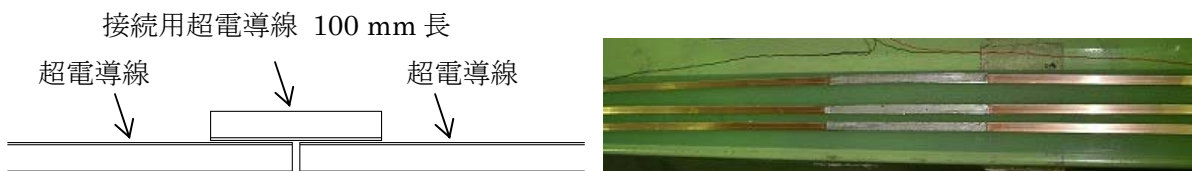


図2.2.3-75 5 mm幅Y系超電導線の接続

表2.2.3-18 5 mm幅Y系超電導線の単線の接続抵抗

	接続抵抗 [nΩ]
Joint 1	59
Joint 2	47
Joint 3	68
Joint 4	62
Joint 5	73

実際の超電導線材はスパイラルで巻き付けられているため、そのスパイラルに合わせて1本ずつ接続することは難しく、図 2.2.3-76 のように接続用線材を並べて、層全体で接続する⁽⁴⁾。接続部全体の概略図を図 2.2.3-77 に示す。この図に示すように超電導導体の各層の接続長は 100 mm (シールドは 120 mm) としている。熱が拡散するように各層の接続部は重ならないようにしている。この設計に基づいて、実際の超電導ケーブルの導体接続を試みた。超電導線材は 5 mm 幅を 14 本使用した超電導導体を使用した。(図 2.2.3-54)。接続した結果、接続抵抗は 3.6 nΩ であり、単線の抵抗 14 本分の合成とほぼ同等である (50 nΩ が 14 本とすれば、合成抵抗は 3.6 nΩ である)。

接続抵抗がこのように低い場合、接続部の温度上昇は、他の部位と比較して、約 0.1 K 未満に抑えられることが解析結果から推定されている。そのため、局所的な発熱による絶縁性能の低下の可能性は極めて低いと考えられる。



図2.2.3-76 スパイラルに巻き付けられた場合の超電導線材の接続

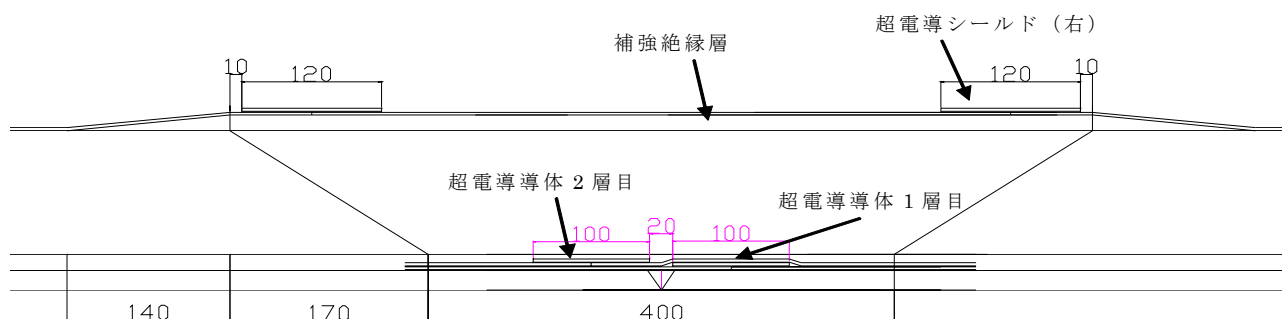


図2.2.3-77 超電導ケーブルの接続図



図2.2.3-78 超電導ケーブル接続の組立（接続抵抗は3.6 nΩ）

(3) 研究内容(2)－中間接続部の設計－

図 2.2.3-77 に考えている中間接続部を示したが、補強絶縁部は現地による施工で行うため、その部位の破壊ストレス評価が必要である。通常、工場で作製したケーブルよりも設計電界は劣ると考えられ、この評価用として、2つの中間接続部を設計した。2つの接続とは、図 2.2.3-79 の補強絶縁部の貫通破壊用、図 2.2.3-80 の沿面の破壊用である。これらの図には電界解析結果も示しており、等電位線の間隔が狭いほど電界のストレスは大きい。図 2.2.3-55 では、スロープの電界よりも補強絶縁の電界ストレスが大きいため、補強絶縁で壊れると考えられる。また、図 2.2.3-56 では補強絶縁部が厚いため、スロープの電界の方が大きくなり、スロープ部で壊れると考えられる。このように、中間接続部を実際に作製し、破壊特性を取得した。その結果、想定したとおりの破壊データを得て、図 2.2.3-78 では雷インパルス 700 kV（半径方向電界 47.5 kV/mm）をクリアし、750 kV(50.9 kV/mm)で破壊した。その結果、クリア値に対して、裕度を与え、補強絶縁部の半径方向の設計ストレスを 40 kV/mm とした。図 2.2.3-79 では、650 kV（沿層方向電界 3.3 kV/mm）でクリアし、700 kV（3.5 kV/mm）で沿層方向に破壊した。その結果、クリア値に対して、裕度をみて沿層方向の設計ストレスを 3 kV/mm とした。さらに雷インパルスの試験電圧値 1155 kV に対して、裕度をみた 1260 kV を設定して、補強絶縁部の構造を設計した。この設計に基づいた中間接続部を作製、AC310 kV 部分放電フリーと Imp1155 kV の耐インパルス特性を確認した。

平成 23、24 年度は、その後に 3 回の熱サイクルを受けても問題ないことを確認した。

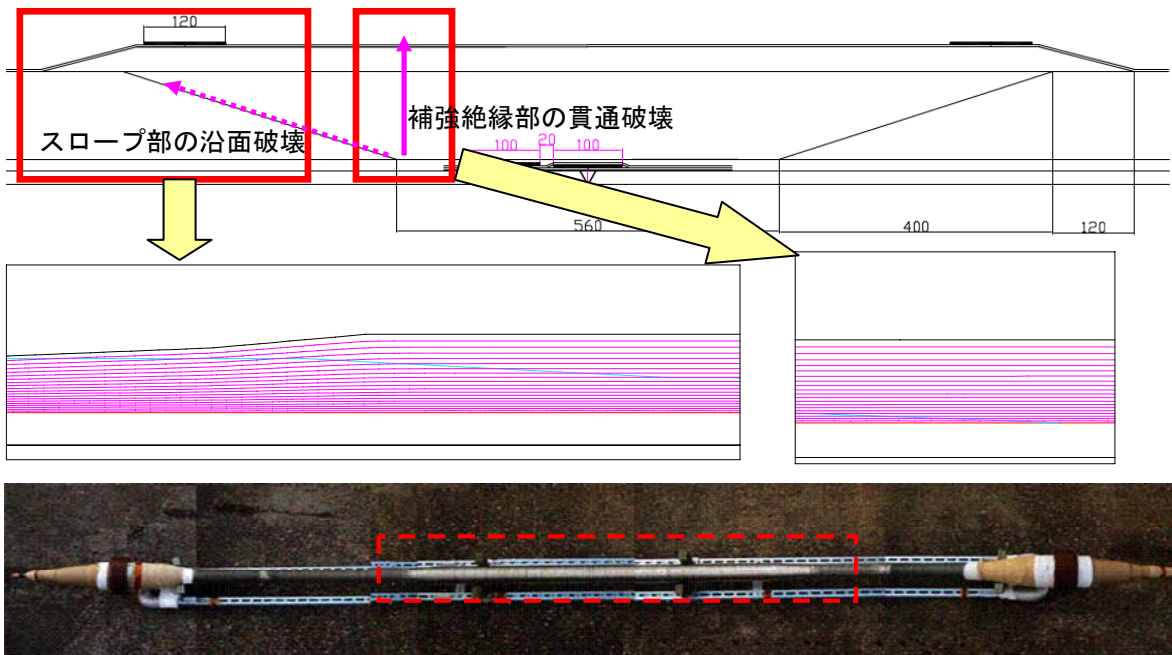


図2.2.3-79 補強絶縁部の破壊用の中間接続部

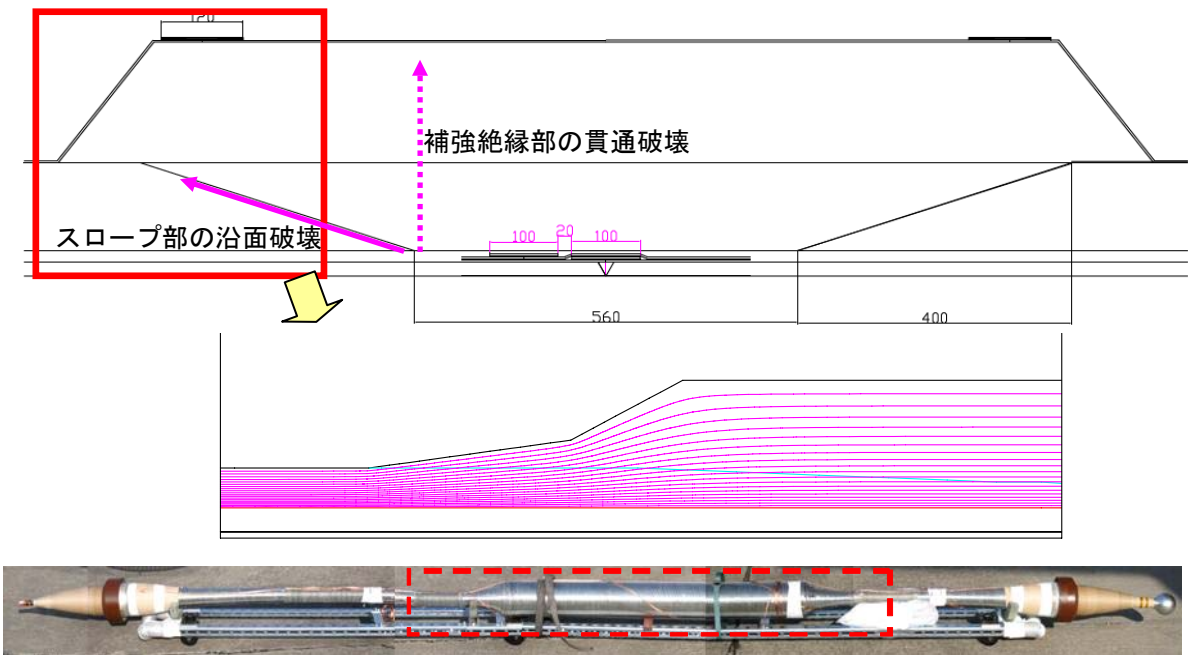


図2.2.3-80 スロープ部の破壊用の中間接続部

(4) 研究内容(3) — 終端接続部用の作製と評価 —

気中終端部の中で、電流を室温部から低温部への温度勾配部で低熱侵入を実現するための電流リード設計を行った。導体側の熱侵入は両端末で120 W、3 kAの通電（接続抵抗を入れて）でのジュール熱は700 W、一方、シールド側の熱侵入は両端末で460 W、3 kAのシールド電流（接続抵抗を入れて）でのジュール熱は310 Wで設計した。この電流リード設計結果を用いて、電気絶縁を担うブッシングの設計を行った。

この気中終端接続部に要求される電気特性は、構造に近いOFケーブルの試験電圧である。気中終端部の仕様耐電圧はAC400 kVで部分放電フリー、Imp1260 kVで破壊しない構造で終端接続部の設計・作製を行った。ブッシング単体での初期試験では、誘電特性・気中での100 kVの部分放電試験を行い、設計通りの特性を得た（図2.2.3-57）。また、液体窒素と常温の熱サイクル試験、絶縁ガスSF₆中での180 kVの部分放電試験、気密試験にそれぞれ、合格し、想定通りのブッシングの作製に成功した。このブッシングを図2.2.3-82に示す終端部に組み込んで、終端接続部を完成し、275 kV超電導ケーブルのシステム検証のために使用した。20 mm絶縁厚ケーブルとともに試験を実施し、ACでは325 kV-10分間までの性能を確認し、1155 kVの耐インパルス特性を確認した。

平成23・24年度は、ブッシングを長期で使用し、3回以上の熱サイクルを経験させたが、AC310 kV部分放電フリーと1155 kVの耐インパルス特性の維持を確認した。図2.2.3-83はブッシングの誘電特性の変遷を示している。静電容量が変化すれば、電界を緩和する機能が失われることを意味しており、誘電正接(tanδ)が悪化すれば、絶縁部に水分の混入が懸念されるが、そのような傾向は観られておらず、基準値内に収まっている。

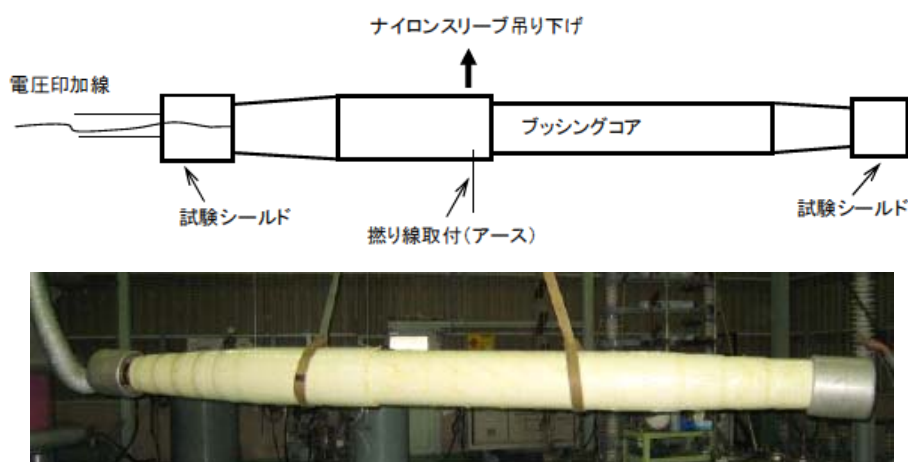


図2.2.3-81 ブッシングの単体試験

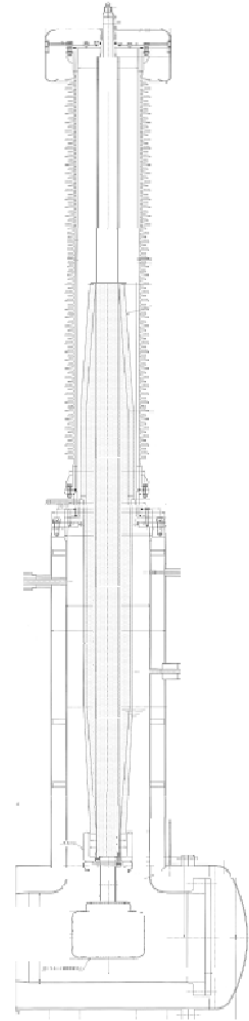


図 2.2.3-82 終端接続部

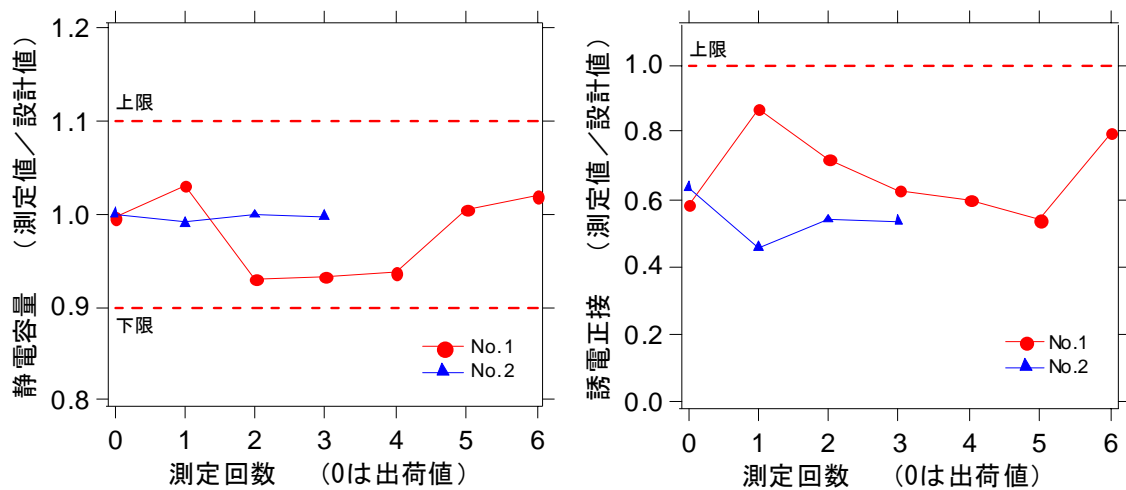


図 2.2.3-83 終端部の誘電特性の変遷 (測定回数は誘電及び熱サイクルの履歴を示している)

(5) 成果

高 I_c 超電導線の接続を実施し、低抵抗な超電導接続が可能であることを確認した。また、実際のケーブルに中間接続部を組み立てて、 $3.6 \text{ n}\Omega$ という低抵抗の接続を確認した。数値計算によると、このときの温度上昇は 0.1 K 未満であり、定常運転に問題ないことが示唆された。

2 通りの中間接続部に対して破壊モデルを設計・製作し、破壊試験を実施し、補強絶縁部の径方向ストレス 40 kV/mm 、沿層方向ストレス 3 kV/mm の結果を得た。雷インパルス 1260 kV を想定して中間接続部を設計・作製した。

平成 23、24 年度は、3 回の熱サイクルを経た後も $AC310 \text{ kV}$ の部分放電フリーと 1155 kV の耐インパルス特性を確認した。

室温から低温部への温度勾配、電界分布を担うブッシングを開発した。気中終端部の仕様耐電圧は $AC400 \text{ kV}$ で部分放電フリー、 $\text{Imp}1260 \text{ kV}$ で破壊しない構造とした。初期試験は当初の設計通りであり、ブッシングを気中終端に組み込み、 275 kV 超電導ケーブルのシステム検証のために使用した。

平成 23、24 年度は、ブッシングを長期に使用して、3 回以上の熱サイクルを経た後も、ブッシングの誘電特性に変化はなく、 $AC310 \text{ kV}$ の部分放電フリーと 1155 kV の耐インパルス特性を維持することを確認した。

引用論文リスト

- (1) M. Yagi, S. Mukoyama, N. Amemiya, S. Nagaya, S. Kashima and Y. Shiohara, “Development of a 10 m long 1 kA 66/77 kV YBCO HTS cable with low AC loss and a joint with low electric resistance”, Supercond. Sci. and Tech. Vol.22 (2009) 085003

2.2.4 275 kV 高電圧ケーブルシステム検証

275 kV 高電圧ケーブルシステムの検証として、両端に終端接続部と中間接続部を有する検証用 275 kV/単心/3 kA_{rms}、30 m 長の設計を行う必要がある。試験の実施にあたってはまず、試験条件の検討を行い、次に耐久性を評価できる課通電試験計画書を作成する。次に、システム検証試験向けの 30 m 長の超電導電力ケーブル及び長期課通電試験に必要な、冷却システムの設計・製造及び終端接続部の製造を行う。

検証試験では、システム検証向けの 30 m 長超電導電力ケーブルの初期特性（損失、侵入熱、圧力損失、耐電圧等）を取得し、中間目標で設定された長期課通電試験を行い、試験後に初期特性を再度確認し、絶縁設計の妥当性を確認する。これまでのプロジェクトの成果を踏まえ、Y 系超電導線材を用いた超電導電力ケーブル設計指針を示す。

2.2.4-1 システム開発（古河電気工業）

(1) 研究開発目標

平成 22 年度までに 275 kV 高電圧ケーブルシステムの試験条件の検討を行い、耐久性を評価できる課通電試験計画書を作成する。平成 23、24 年度は、システム検証試験向けの 30 m 長の超電導電力ケーブル及び冷却システム、終端接続部を製造し、システム検証向けの 30 m 長超電導電力ケーブルの初期特性（損失、侵入熱、圧力損失、耐電圧等）を取得し、中間目標で設定された長期課通電試験を行い、試験後に初期特性を再度確認し、絶縁設計の妥当性を確認する。

(2) 研究内容 1 ー試験電圧の決定ー

AC（交流）における絶縁破壊メカニズムは、①絶縁紙間あるいはバットギャップで部分放電が開始される（部分放電開始電圧）、②バットギャップでの部分放電の連続発生と進展、③バットギャップでの部分放電の進展と増大、絶縁紙の劣化、④絶縁破壊、と考えられている¹⁾。①と④の間には約 2 倍に近い電界値の違いがあり、①を基に設計しておけば、長期においても絶縁破壊は起きる危険はない。Imp（インパルス）における絶縁破壊メカニズムは、①インパルス部分放電の発生、②絶縁体全体への部分放電の進展、③絶縁破壊、である。

275 kV の絶縁試験電圧の考え方としては、現有の XLPE ケーブル及び OF ケーブルの試験電圧と整合をとる必要がある。国内規格であれば、JEC-3401-2006（OF ケーブル）、JEC-3408（XLPE ケーブル）、国際規格であれば IEC60141-1-1993（OF ケーブル）、IEC62067-2006（XLPE を含むプラスチックケーブル）がある。また、過去・現在の国内での超電導ケーブル試験とも整合を取る必要がある。試験としては、全て 66/77 kV の同一の電圧階級であり、東電-住友 100 m ケーブル、

過去の NEDO プロジェクトである Super-ACE500 m ケーブル、現在 NEDO プロジェクトで進めている「Bi ケーブル実証プロジェクト」300 m ケーブルがある。

ここでは、Super-ACE の場合と同じように JEC-3408 を基調にして、設計を進めた。試験法は「開発試験」、「形式試験」、「受入試験」の 3 種類に区別される。開発試験は開発品の設計・製造施工方法が実用可能であることを実証するために行うもので、現在は開発試験の段階である。形式試験は設計・製造及び施工方法の認定試験、受入試験は出荷製品の製造・品質の確認である。

275 kV 超電導ケーブルは開発段階であることから開発試験を規定する。開発試験には以下の 3 つの試験がある。

- ①長期課通電試験---所定の商用周波電圧に耐える寿命を有すること。試験条件として、V-t 特性の n 乗則を用いて、ケーブルの最高電圧と使用期間に相当する試験電圧と試験期間で確認する。
 - ②雷インパルス試験---長期課通電試験を終了した試料から供試して、系統に発生する雷インパルス過電圧に耐えること。
 - ③商用周波数耐電圧試験---長期課通電試験を終了した試料から供試して、系統上で発生する異常電圧（過電圧）に耐えること。例えば、負荷遮断時の電圧上昇や一線地絡時の健全相電圧上昇等がある。超高压送電線では有効接地系（直接接地系）を採用して異常電圧を抑制している。
- ①～③の試験条件について、その詳細をみていく。
- ①の長期課通電試験では、以下とする。

$$V_{ac}=(E_0/\sqrt{3})\times K1 \quad (2.2.3-5)$$

ここで、 E_0 : 最高電圧 300 kV、 $K1$: 劣化係数 = (使用年数 30 年 / 試験期間) $(1/n)$ 、 n : 寿命指数

寿命指数を $n=15$ (XLPE ケーブル)、 $n=30$ (OF ケーブル) に加えて、 $n=50$ (超電導ケーブルの破壊)、 $n=80$ (超電導ケーブルの PDIE) を取得し、それぞれの寿命指数で考えると試験電圧は表 2.2.4-1 のようになる。長期試験は運転電圧を模擬しているので、PD(部分放電)が発生しない領域の $n=80$ を使用すべきだが、安全をみて、 $n=50$ を使うことにした。その結果、試験期間を 1 ヶ月または 3 ヶ月とした場合、200 kV となる。

表 2.2.4-1 長期課通電試験の試験電圧 カッコ内は計算値

試験期間	1 ヶ月	3 ヶ月	6 ヶ月
n=15	260 kV (257)	240 (238)	230 (228)
n=30	220 (211)	210 (204)	200 (199)
n=50	200 (195)	200 (191)	190 (188)
n=80	190 (187)	190 (184)	190 (183)

②の雷インパルス試験では、以下とする。

$$V_{imp}=LIWV \times K1 \times K2 \quad (2.2.3-6)$$

ここで、LIWV：機器の耐電圧（1050 kV）、K1：裕度 1.1、K2：温度係数 1、超電導ケーブルは考慮しない。よって、試験電圧は 1155 kV とする。

③の商用周波耐電圧では以下とする。

$$\begin{aligned} \text{異常電圧} &= \text{ケーブル最高電圧} \times \text{負荷遮断時の電圧上昇倍率 (継続時間 1.43 秒)} \\ &= 300 \text{ kV} \times 1.79 / \sqrt{3} = 310 \text{ kV} \end{aligned} \quad (2.2.3-7)$$

1.43 秒の短時間現象を、10 分の試験として時間係数を乗じて、さらに裕度を乗じて試験電圧とする。

$$V_{ac} = \text{異常電圧} \times (1.43 / \text{試験時間(10 分)})^{(1/n)} \times \text{裕度(1.1)} \quad (2.2.3-8)$$

寿命指数 $n=15$ のとき試験電圧値 270 kV、 $n=30$ で 290 kV、 $n=50$ で 300 kV となる。

試験電圧として、(2.2.3-8) 式の適用を考えていたが、本プロジェクトの中で、(2.2.3-7)式の異常電圧 310 kV で部分放電を発生させないとの考えが分かりやすいとして、見直しを行った。

以上より、試験電圧を表 2.2.4-2 にまとめた。

表 2.2.4-2 開発試験の試験条件

試験名称	試験条件	判定
長期課通電試験	200 kV-1 ヶ月 or 3 ヶ月	部分放電フリー
雷インパルス試験	1155 kV-正負 3 ショット	絶縁破壊しないこと。
商用周波耐電圧試験	310 kV-10 min	絶縁破壊しないこと。ただし、長期課通電前では部分放電フリー
(参考試験 IEC62067) 商用周波耐電圧試験 2	400 kV-30 min	規定しないが絶縁破壊しないことが望ましい

他の規格を表 2.2.4-3、表 2.2.4-4 に示す。国際規格においては type test が開発試験に相当し、耐電圧試験 400 kV-30 min が最も高い電圧であり、表 2.2.4-2 に参考試験として追加した。なお、JEC-3408 の形式試験に 525 kV-1 h という試験があるが、これは形式試験であり今回の適用外であること、寿命指数 n を 15 と設定

していること、温度係数 1.2 が掛け合わされていること等、これらを考慮して今回の試験からは除外した。

表 2.2.4-3 国内規格による 275 kV の試験条件

試験項目	OF ケーブル JEC-3401-2006		XLPE ケーブル JEC-3408-1998	
	長期課通電試験 (開発)	200 kV	0.5 年 寿命指数 n=30	230 kV
雷インパルス (開発、形式)	1260 kV 1155 kV(高温)	正負 3 回 LIWV1050 kV	1455 kV 1155 kV(高温)	正負 3 回 LIWV1050 kV
商用周波耐電圧 (開発)	330 kV	10 分 n=30	275 kV	10 分 n=15
商用周波耐電圧 (形式)	350 kV	3 時間 n=30	525 kV	1 時間 n=15
出荷耐電圧 (受入)	330 kV	10 分 n=30	300 kV	10 分 n=15
誘電正接特性試験 (開発、形式)	159 kV 318 kV	誘電正接に判定値有り		

表 2.2.4-4 国際規格による 275 kV($U_0=160$ kV)試験条件

T: type tests, S: sample tests, R: routine tests

試験項目	OF ケーブル IEC60141-1-1993		XLPE ケーブル他 IEC62067-2006-03	
	High Voltage test	(T)375 kV, $1.73 \times U_0 + 100$ (R)275 kV	24 h 15 min	(R,T)400 kV $2.5 \times U_0$
Partial discharge			(R,T)240 kV $1.5 \times U_0$	280 kV-10sec 後に 240 kV
Heating cycle test			(T)320 kV $2.0 \times U_0$	8 h(heating)-16 h (cooling) $\times 20$
Impulse voltage test	(T)1050 kV		(S,T,P) 1050 kV	10 positive, 10 negative
Voltage test after Impulse			(S,T) 320 kV	15 min

(3) 研究内容 2 –試験計画書の作成–

最終設計の超電導ケーブルは 0.8 W/m -相($3 \text{ kA}_{\text{rms}}$)の損失である。この損失値は Super-ACE で実施した 500 m 長の交流損失値 1.3 W/m -相($1 \text{ kA}_{\text{rms}}$)よりも小さい値である。さらに、断熱管の外部浸入熱が Super-ACE での実績値 (1 W/m) と同等であれば、 500 m 長冷却システムの考えがそのまま踏襲でき、数 km の長尺冷却が可能である。

試験の手順は以下のように考えた。

① 30 m ケーブルを作製後、数 m の作製余長を使って初期課電・通電試験を行う。課電試験は雷インパルス試験、部分放電試験を行い、設計通りの絶縁性能を有しているか確認する。また、これとは別に通電試験を行い、設計通りの I_c を有しているか確認する。

② 長期課通電試験の電圧条件は 3 ヶ月、1 ヶ月の場合、 200 kV の連続課電とする。通電条件は $3 \text{ kA}_{\text{rms}}$ とし、実線路における負荷変動を考慮して 8 時間オン/16 時間オフの 1 日 1 回のサイクル試験とした。長期課通電試験条件の試験構成を図 2.2.4-1 に示す。布設は曲げ半径 5 m の U 字形状とし、中間接続部は長期課通電後の試験に供試するため終端部側に配置する。通電回路は XLPE ケーブル(通電用 CV)を使用するが、 $3 \text{ kA}_{\text{rms}}$ を通電するには XLPE ケーブル 1 本では十分ではなく、3 本使用する。言い換えれば、本プロジェクトで作製した Y 系超電導ケーブルは、従来の XLP ケーブルの 3 倍の容量を通電出来ることを示している。冷却回路としては、CE (Cold Evaporator) から供給される窒素を減圧冷却して貯めたりザーバタンクを用意する。 30 m の超電導ケーブルを循環する窒素は、このリザーバタンクを通して冷却される。

③ 長期課通電試験前後には、誘電特性を測定し、設計通りの低誘電体損失が維持されているか確認する。また、 I_c と交流損失を測定し、設計通りの低損失が達成されているか確認する。

④ 試験終了後には、中間接続部端部で切断し、中間接続部とケーブルに雷インパルス試験、耐電圧試験を行い、30 年を模擬した長期課通電後もその性能を維持していることを確認する。さらに、解体時に接続抵抗を確認する。

以上の 275 kV システム検証試験のスケジュールを表 2.2.4-5 に、試験項目と判定条件を表 2.2.4-6 にまとめた。表 2.2.4-6 には、実施結果も併せて記した。なお、本試験は、熱サイクルを含む長期試験を引き続き行う継続研究の実施が決まっております。上記④のような解体を伴う試験は継続研究のなかで行う。

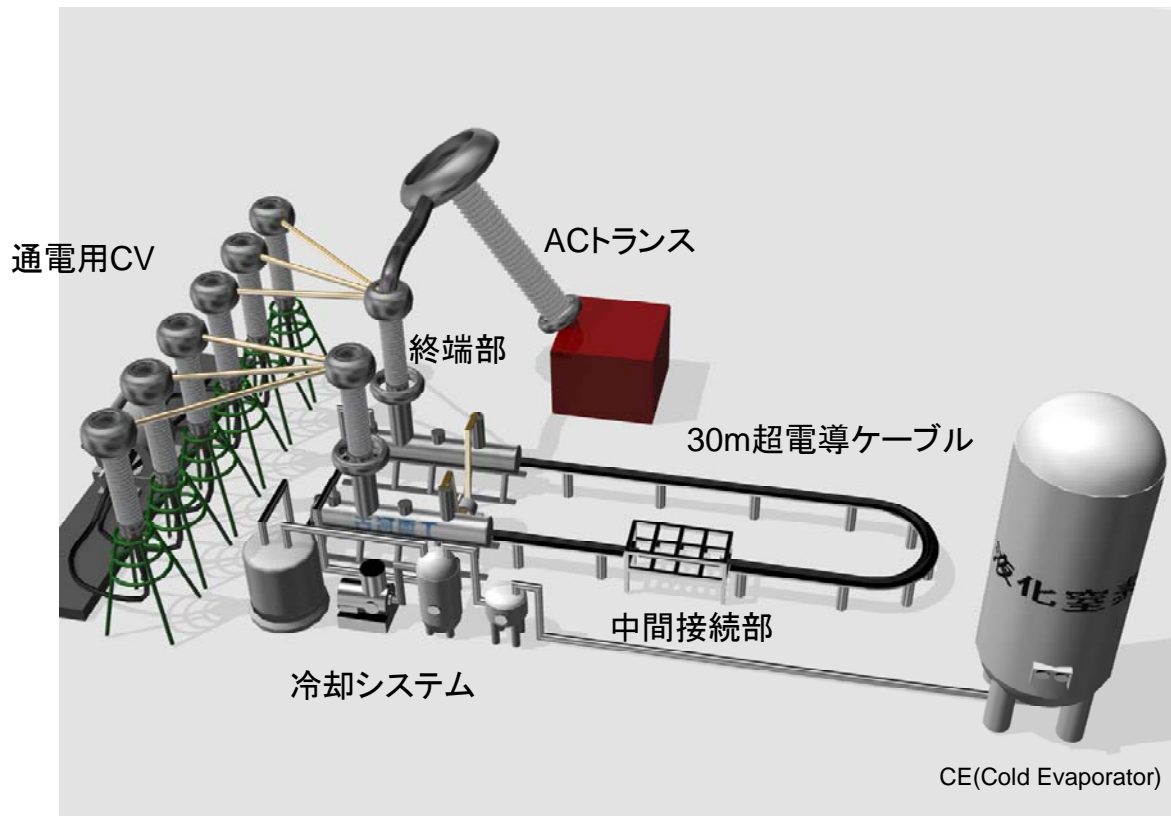


図 2.2.4-1 長期課通電試験の試験回路図

表 2.2.4-5 275 kV システム検証試験の試験スケジュール

	H23				H24			
	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q
①30m 275kV-3kA超電導ケーブル作製			■					
②275kV-3kA終端接続部の作製	■							
③試験設備の設営(課電、通電、冷却)	■							
④超電導ケーブルの初期課電・通電試験 (雷インパルス、商用周波数耐電圧、臨界電流)					■			
⑤中間接続部の組み立て						■		
⑥開発試験(長期課通電、雷インパルス、商用周波数耐電圧、誘電特性試験)							■	
⑦残存性能試験								■

表 2.2.4-6 275 kV システム検証試験の試験項目と判定

試験項目	試験条件	判定	部位	結果
ケーブル I_c (初期)	直流通電による VI	使用した線材の I_c 合計値と同等	余長	良
部分放電特性 (初期)	課電電圧のステップ昇圧	310 kV 部分放電フリー	余長	良
商用周波耐電圧試験 (初期)	400 kV-30 min	絶縁破壊しないこと	余長	良
雷インパルス試験 (初期)	1155 kV-正負 3 ショット	絶縁破壊しないこと	余長	良
ケーブル I_c	直流通電による VI	使用した線材の I_c 合計値と同等	30 m	良
通電による交流損失	カロリメトリック法 (一定の液体窒素循環による上流と下流の温度差)	設計通り (目安: 0.3 W/m 未満)	30 m	良 0.22 W/m
誘電特性	課電時のシェーリングブリッジ /カロリメトリック法	設計通り (目安: 0.5 W/m)	30 m	良 0.44 W/m
部分放電特性	課電電圧のステップ昇圧	310 kV 部分放電フリー	30 m	良
長期課通電試験	200 kV-1 ヶ月 or 3 ヶ月 3 kA _{rms} -8 時間オン/16 時間オフ	絶縁破壊しないこと	30 m	良
ケーブル I_c	直流通電による VI	初期と同等	30 m	良
通電による交流損失	カロリメトリック法	初期と同等	30 m	良
誘電特性	課電時のシェーリングブリッジ /カロリメトリック法	設計通り (目安: 0.5 W/m)	30 m	良 0.44 W/m
部分放電特性	課電電圧のステップ昇圧	310 kV 部分放電フリー	30 m	良
雷インパルス試験	1155 kV-正負 3 ショット	絶縁破壊しないこと	抜取	継続研究
商用周波耐電圧試験	310 kV-10 min	310 kV 部分放電フリー	抜取	継続研究
商用周波耐電圧試験 2	400 kV-30 min	絶縁破壊しないこと	抜取	継続研究
解体	絶縁紙外観、ブッシング等	破れ、皺、放電痕のないこと	抜取	継続研究
接続部の接続抵抗	直流通電による VI	設計通り	抜取	継続研究

(4) 研究内容 3 –システム検証向けケーブルの作製と余長の性能評価–

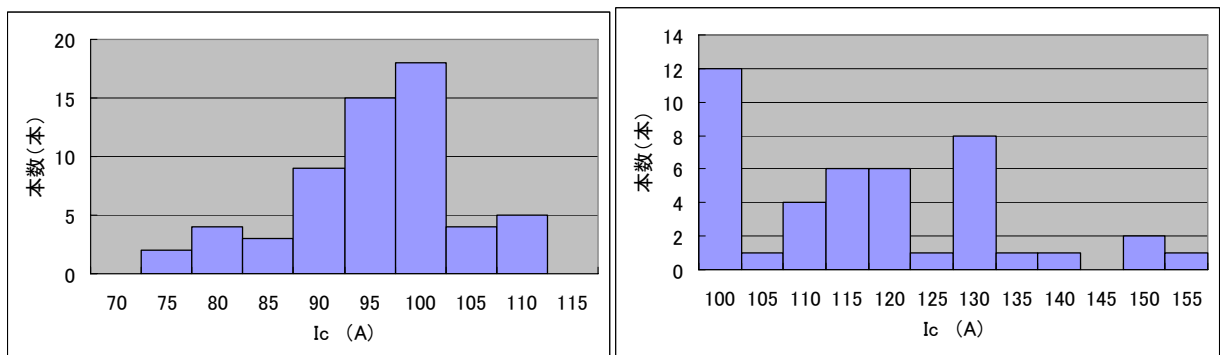
平成 23、24 年度は、システム検証試験向けのケーブルの作製を行った。ケーブル試作では、製造工程毎に I_c 劣化のないこと、曲げによる絶縁紙の皺、破れ等の異常がないことを確認しながら行った。試作の結果、使用する超電導線材そのものに長手方向の歪みやズレさらに線材幅のバラツキがあることが判明し、使用する本数を調整することにした。最終的なケーブル仕様を表 2.2.4-7 に示す。高温超電導導体には 2 層導体で 60 本、高温超電導シールドは単層で 43 本使用する。

表 2.2.4-7 検証用超電導ケーブルの仕様

構成	外径 mm	仕様
①防食層	150	PE シース
②断熱外管	内径	SUS コルゲート
	外径	
③断熱内管	内径	SUS コルゲート
	外径	
④コア外径	90	保護紙
⑤銅シールド	88.0	210 mm ²
⑥高温超電導シールド	81.0	5 mm-43 本
⑦絶縁層	79.4	22 mm 厚
⑧高温超電導導体	35.4	3 mm-60 本
⑨フォーム	30.6	400 mm ²



製造にあたっては、使用した超電導線材は単長で 50 m 以上のものを使用し、全ての超電導線材に対して、全長 I_c を測定した。ここで、 I_c は線材の長手方向に局所的な劣化部があるので、10 μ V の発生電圧時の電流とした。 I_c の度数分布を図 2.2.4-2 に示す。



(a) 導体用で 3 mm 幅線材

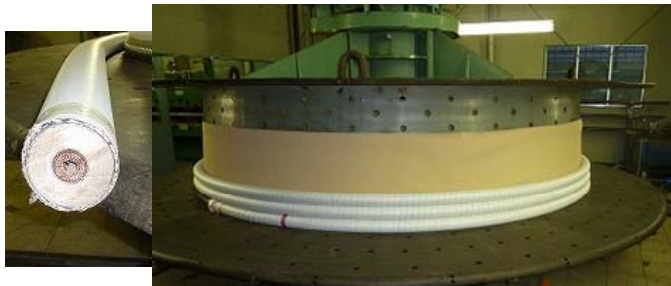
(b) シールド用で 5 mm 幅線材

図 2.2.4-2 使用した Y 系超電導線材の I_c 分布

導体用の 3 mm 幅の超電導線材では 75 A 以上 (平均 97 A)、シールド用の 5 mm

幅の超電導線材では 100 A 以上(平均 117 A)の超電導線材を使用した。導体側はバラツキが小さいが、シールド側は 100-105 A の線材がもっとも多く、バラツキに偏りが見られた。シールドに使用した線材には長手方向に局所的な劣化があり、それが I_c の決定要因となっている。

作製した 50 m 弱の超電導コアのうち、30 m をシステム検証用に使用し、残りの約 20 m は、臨界電流試験、曲げ試験、構造検査、耐電圧試験、過電流試験、交流損失試験に供試した。図 2.2.4-3(a)では 50 m 弱の超電導コアを、図 2.2.4-3(b)では 30 m 分に断熱管を取り付け、図 2.2.4-3(c)で PE シースを取り付けた。



(a) 超電導コア



(b) 断熱管



(c) 50 m 長ケーブル

図 2.2.4-3 検証用超電導ケーブルの作製

約 20 m の試験サンプルの結果については以下のとおりである。

I_c の測定結果を図 2.2.4-4 に示す。大気圧の液体窒素浸漬条件で、導体側が 6440 A、シールド側が 5880 A であり、使用した線材の平均値に本数を乗じた期待値 5820 A (線材 1 本当たり平均 97 A 以上 60 本) と 5031 A (線材 1 本当たり平均 117A 以上 43 本) をそれぞれ上回っており、製造を通しての劣化はなかった。シールド側の方は、超電導からノーマル(常伝導)状態への転移がゆっくりと行われているが、これは、超電導線材の長手方向に I_c の局所劣化が含まれていることを示唆している。曲げ試験による絶縁体の切れや皺はなく、構造試験では設計どおりの製作を確認した。耐電圧試験では設計どおりの耐電圧、絶縁特性を確認した。なお、耐電圧試験は、大気圧窒素浸漬という液体窒素圧力浸漬より厳しい条件で行われた。

AC310 kV-10min で部分放電フリー、400 kV クリア、誘電体損失 0.6 W/m を確認した。雷インパルスは 0.3 MPa(絶対圧)の加圧下で 1155 kV を正負 3 回クリアした。

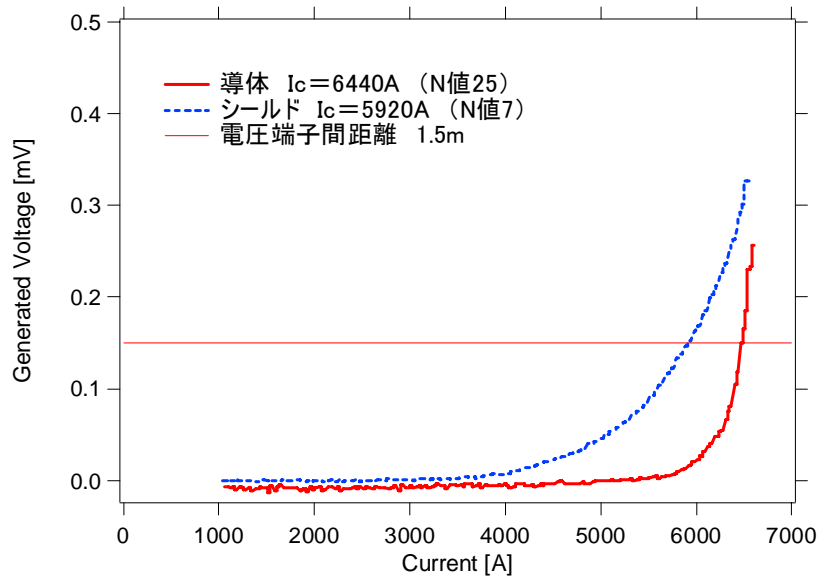


図 2.2.4-4 製造余長の V - I 特性

超電導導体の交流損失の結果を図 2.2.4-5 に示す。72 K で I_c は 8750 A で、このときの 3 kA_{rms} の交流損失は 0.152 W/m であった。表 2.2-3.13 の数値解析の結果では I_c を 8872 A としているが、交流損失の値はよく一致した。

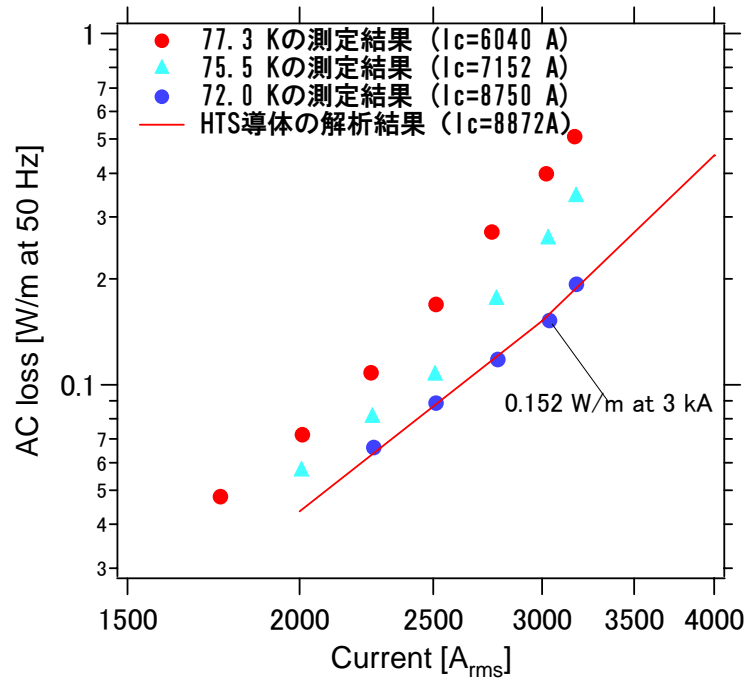


図 2.2.4-5 製造余長の高温超電導導体の交流損失

さらに、耐過電流試験では、図 2.2.4-6 に示すように 63 kA-0.6 sec での温度上昇も超電導部で 20 K 前後であり、試験前後で I_c 低下なく、復帰も 10 分以内に行われた。

以上より、設計どおりの性能を全てにわたり、満たしていることを確認した。

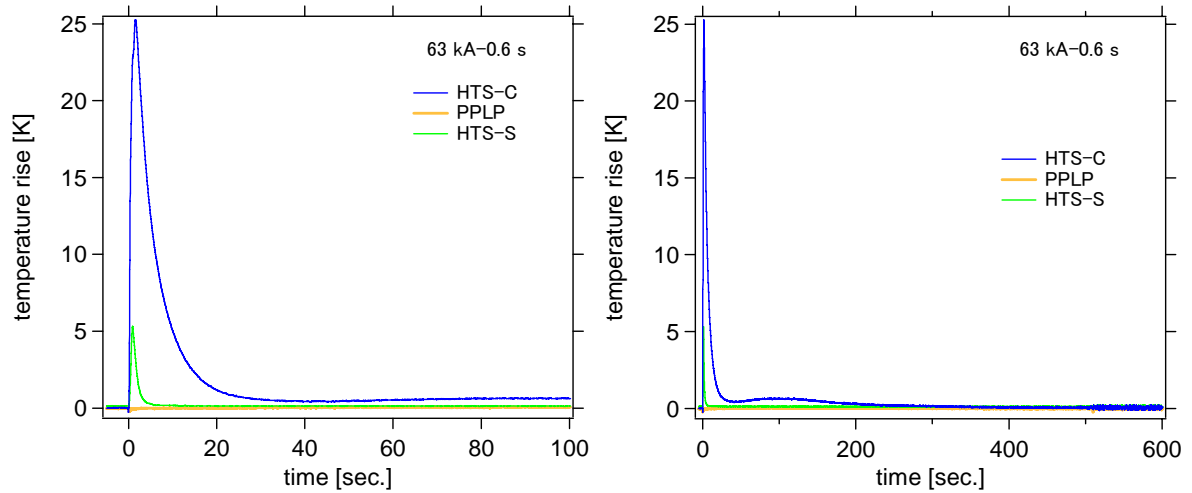


図 2.2.4-6 製造余長に 63kA-0.6sec を適用した時の温度上昇（左）と復帰特性（右）

(5) 研究内容 4 –システム検証向けケーブルシステムの組立–

平成 23、24 年度は、システム検証試験向けのケーブルシステムの作製・組立を行った。30 m の超電導ケーブルは中間接続部を予め作製しておき、さらに終端部では超電導導体と超電導シールドの端子付け、及び絶縁処理を行い、図 2.2.4-7 に示す架台にケーブルを取り付けて試験場所へ出荷した。架台への取り付けでは、ケーブルの曲げ直径を 3 m とした。

試験場所は中国遼寧省の瀋陽市にある瀋陽古河電纜とした。超電導技術は、エネルギー需要が急速に立ち上がる東アジアにおいても注目されている技術であり、その中で中国での試験の実施は、日本の技術の国際的な発信として、さらには、超電導技術の国際化の進展に役立つものと考えて計画した。



図 2.2.4-7 検証用超電導ケーブルの出荷（千葉 市原市）

輸送経路は千葉から横浜まで陸送し、横浜港から中国の大連港まで船便を使用し、大連から瀋陽まで輸送し、受け入れた（図 2.2.4-8）。輸送中は架台に加速度計をつけて管理したが、3 G を超えることはなく輸送後の外観は正常であった。



図 2.2.8-8 検証用超電導ケーブルの受入（中国 遼寧省瀋陽市）

試験場所を整備後、電圧を課電するのに用いる課電トランス、3 kA_{rms} の通電で使用する 2500 mm² の XLPE ケーブルを予め用意し、次に、超電導終端容器（図 2.2.4-9（左））を設置し、運搬した超電導ケーブルを接続した（図 2.2.4-9（右））。



図 2.2.4-9 終端容器の設置（左）、ケーブルと終端容器の接続（右）

冷却システムも設置され、そのフロー図を図 2.2.4-10 に示す。超電導ケーブルを冷却する液体窒素は閉ループを構成し、サブクーラの熱交換器を通して冷やされる。この冷却能力は 77 K で 3 kW 以上である。サブクーラ内の液体窒素は排気ポンプで減圧され、飽和蒸気圧を下げることで冷却される。サブクーラの液体窒素は排気ポンプで吸い出されることになるので消費され、消費分は液体窒素タンク（CE: Cold Evaporator）から補給される。

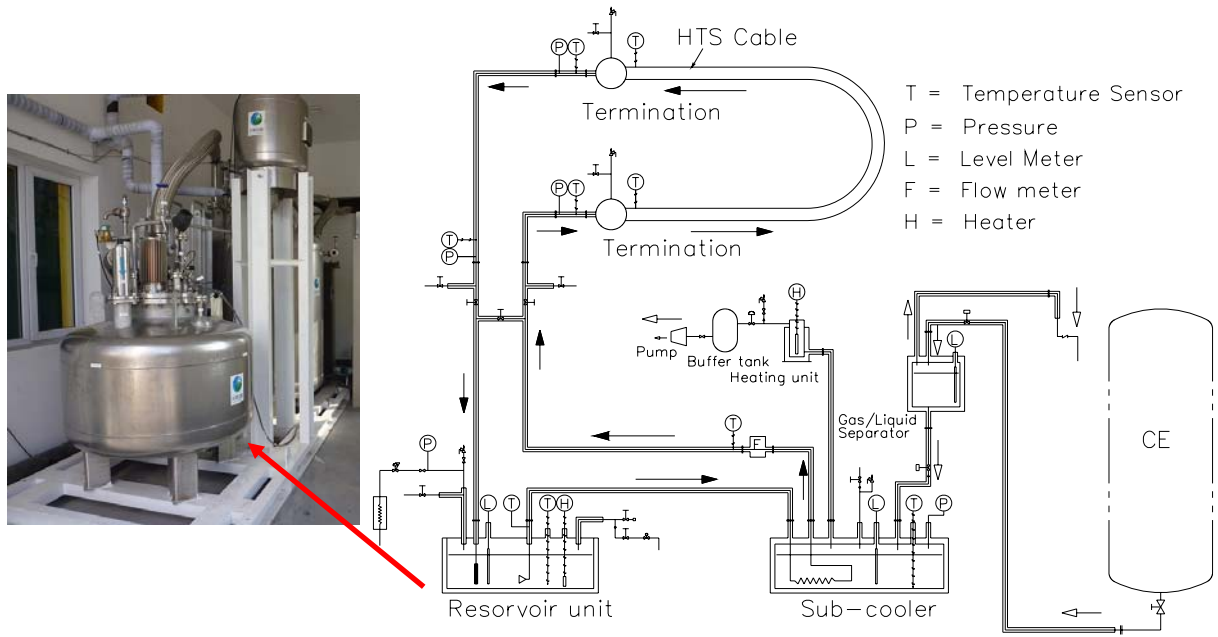


図 2.2.4-10 冷却システム

図 2.2.4-11 に 30 m ケーブルのレイアウトを示す。超電導ケーブルは U ベンドされており、片側の終端接続部では 3 本の XLPE ケーブルと接続している。これは、今回の超電導ケーブルが 3 倍の電流輸送が出来ることを示している。

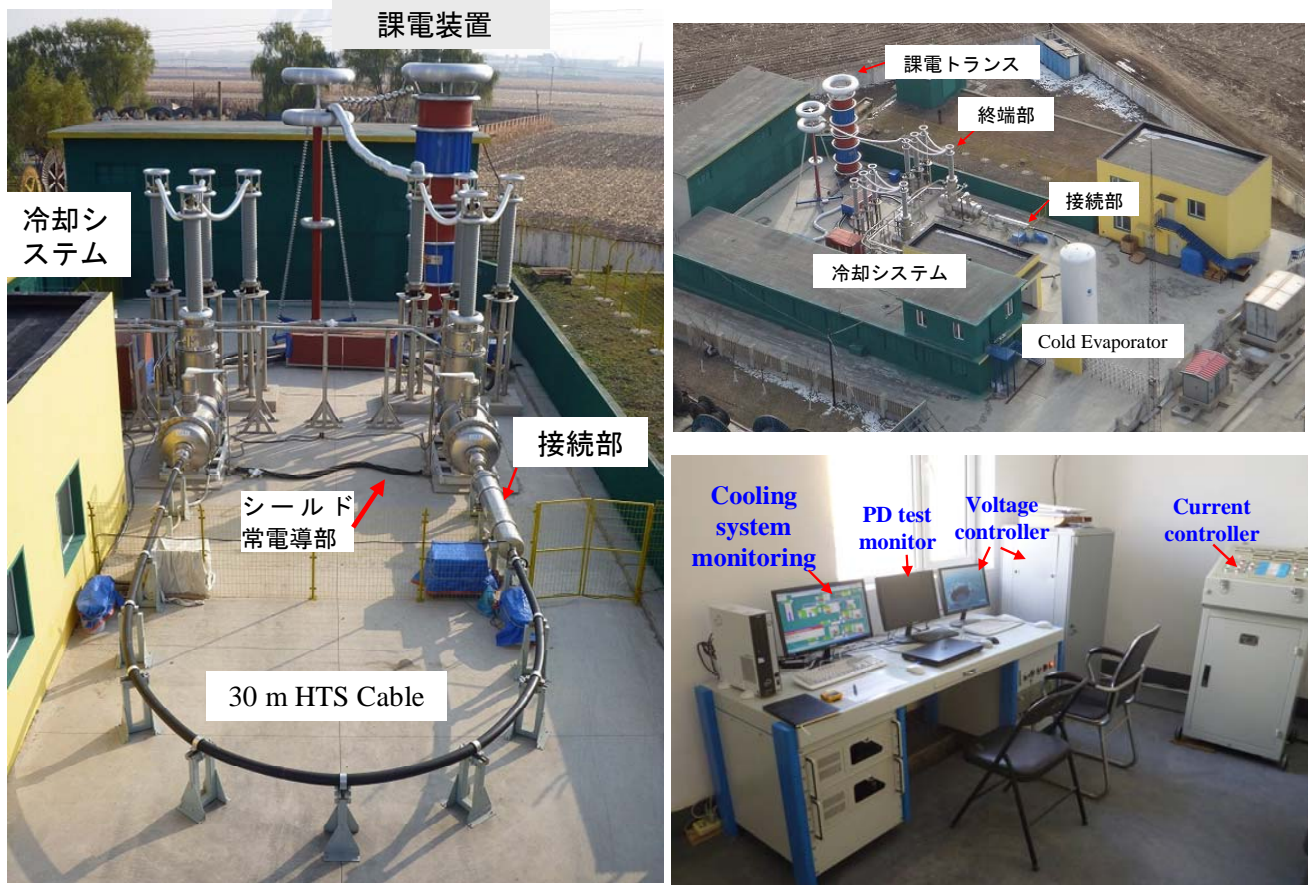


図 2.2.4-11 検証用超電導ケーブルのレイアウト

液体窒素浸漬による冷却後、導体とシールドの I_c を中間接続部込みで測定した。その結果、図 2.2.4-12 に示すように 77.3 K で導体は 6800 A、シールドは 7000 A であり、輸送後及び組立後にも性能低下は生じていない。

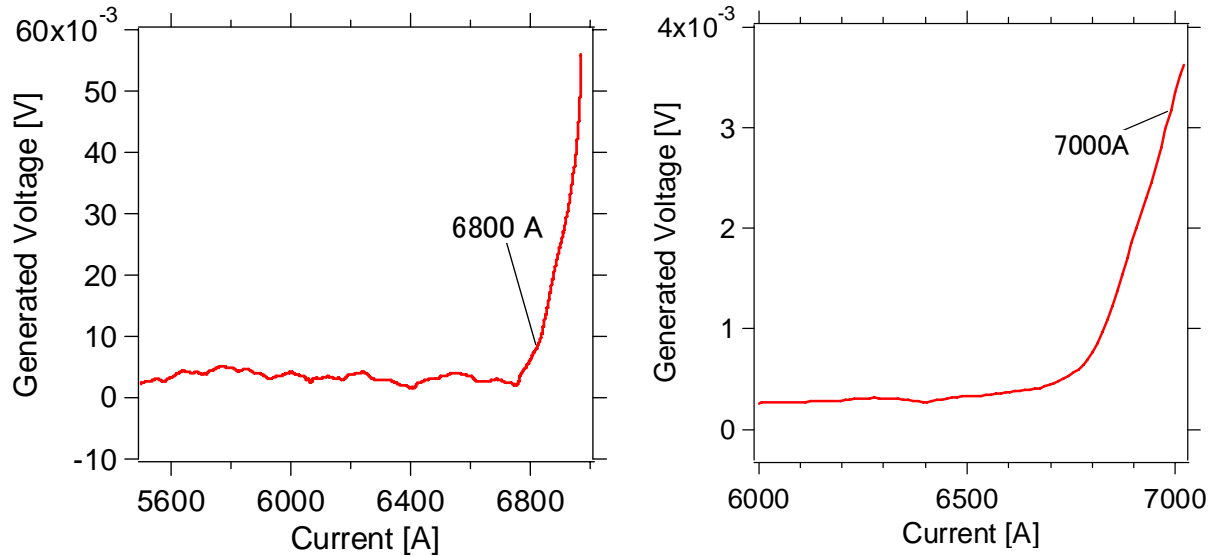


図 2.2.4-12 検証用超電導ケーブルの V - I 特性(77.3 K)

圧力損失は 28 L/min の液体窒素循環量で、200 Pa/m であった。交流通電波形を図 2.2.4-13 に示す。同図よりシールド電流の振幅は導体の 75 % の 2250 A であった。シールド回路のシールド常伝導部には、導体との磁氣的結合がなく、その影響で振幅は低くなっている。

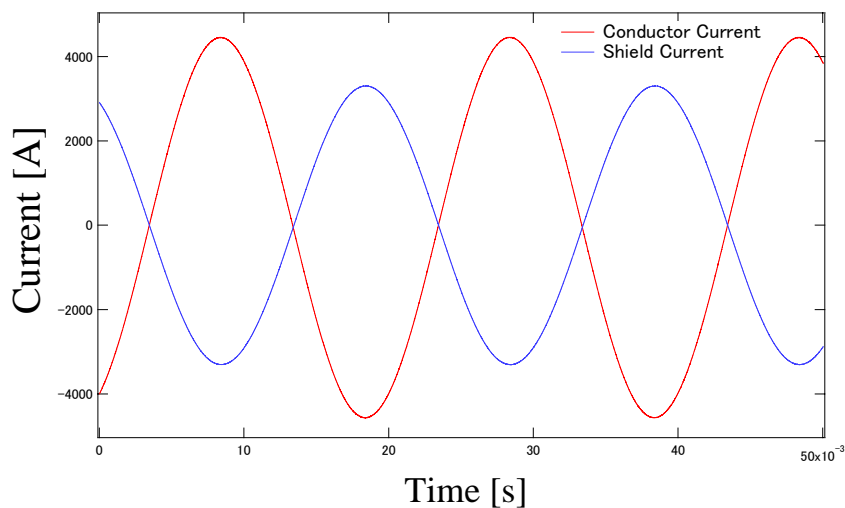


図 2.2.4-13 3 kA_{rms} 時の交流波形

誘電体損失 (200 kV 課電) と侵入熱は、超電導ケーブルの断熱管内に設置した上流と下流の温度が定常状態になった段階での温度差と LN2 の流量値から導出した。200 kV 課電時 (通電なし) での誘電体損失と侵入熱は 2.3 W/m となり、無負荷時では断熱管の侵入熱が得られ 1.6 W/m となった。その結果、200 kV 課電時の誘

電体損失は 0.7 W/m-相となるが、誘電体損失は課電電圧の 2 乗に比例するので、通常運転時 160 kV ならば、誘電体損失は 0.44 W/m-相となる。この値は、設計の 0.6 W/m-相より 25 %小さくなっており、これはサブクール窒素循環による絶縁状態の改善と考えられる。また、終端容器の出入り口と超電導ケーブルの断熱管内に設置した温度計の差から、終端容器の熱侵入値が得られ、無負荷時には、両端末ともほぼ同じで、400 W であった。終端容器の熱侵入と導体・シールド端子の熱侵入は分離する事が出来ないが、単独の終端容器の熱侵入は 120 W であったため、端子からの熱侵入は 280 W となる。この値は、ほぼ設計通りの値である。

同様に交流損失は、3 kA_{rms} 通電時（課電なし）でカロリメトリックから導出され、出入り口の平均温度 72 K で、3 kA_{rms} の交流損失値は 0.19 W/m-相であった。しかし、シールドは 2.25 kA_{rms} の電流であり、3 kA_{rms} になったとすれば、図 2.2.4-14 の数値解析の結果から 0.03 W/m-相増加し、全体で 0.22 W/m-相となる。誘電体損失 0.44 W/m-相と合わせると、誘電体損失と交流損失は 0.66 W/m-相となり、目標の 0.8 W/m-相以下を達成した。

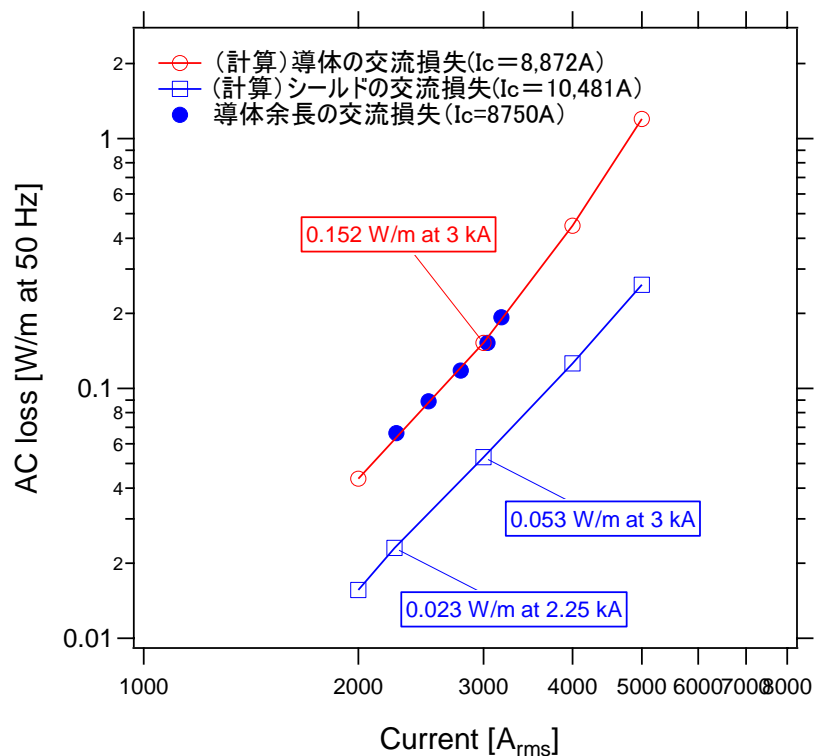


図 2.2.4-14 交流損失の数値解析結果（表 2.2.3-13 より）

(6) 研究内容 5 –システム検証向けケーブルの長期課通電試験–

長期課通電試験の課電条件は、275 kV システムの線間最大電圧 300 kV を対地電圧に換算して(300 kV/√3)、さらに 30 年の加速劣化を考慮して 200 kV・1 ヶ月に設定した。2012 年 11 月より長期課通電試験を開始し、12 月に終了した。課通電試験履歴の一部を図 2.2.4-15 に示す。

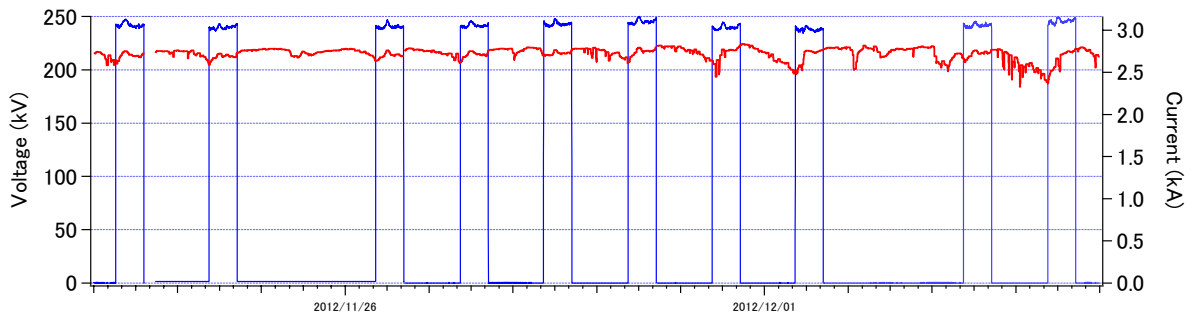


図 2.2.4-15 課電履歴

長期課通電後に図 2.2.4-16 に示すように、設計電圧である 310 kV・10 分間の課電をしたところ部分放電フリーであり、30 年の加速劣化試験後も、初期性能を持ち続けており、さらに I_6 低下もないことを確認して試験を完了した。



図 2.2.4-16 長期課通電試験後の 310 kV・10 分の課電

(7) 成果

275 kV ケーブルシステム検証用の試験条件を検討・整理し、その案をまとめた。長期課通電試験としては 200 kV・1 ヶ月または 3 ヶ月、雷インパルス試験としては 1155 kV 正負 3 ショット、耐電圧試験としては 310 kV・10 分間とした。また、両端に終端接続部と中間接続部を有する検証用 275 kV/単心/3 kA_{rms}、30 m 長の

システム検証試験の試験項目と判定条件をまとめ、耐久性を評価できる課通電試験計画書を作成した。

検証試験用の 30 m ケーブル作製中の余長で、臨界電流 (I_c)、交流損失、耐電圧、耐過電流、誘電体損失を確かめて、設計どおりの性能を確認した。

検証試験用の 30 m ケーブルは、中間接続部を組立後、中国瀋陽市にある瀋陽古河電纜まで輸送され、終端部・冷却システムを含む全体のシステムは完成された。

初期特性 (I_c 、交流損失、誘電体損失、熱侵入) のデータを取得し、77.3 K の導体 I_c は 6800 A、シールド I_c は 7000 A で、72 K 時の 3 kA_{rms} の交流損失は 0.22 W/m-相であった。断熱管の熱侵入は 1.6 W/m-相、誘電体損失は 0.44 W/m-相であり、交流損失と誘電体損失を合わせて 0.66 W/m-相であり、目標の 0.8 W/m-相以下を達成した。

30 年の運転を模擬した 200 kV-1 ヶ月の課通電試験を行い、試験後に 310 kV-10 分間で部分放電フリーを確認し、設計の妥当性を確認した。

引用論文リスト

- (1) 早川他 「超電導電力機器における電気絶縁技術研究の現状と展望」 電学論 B, Vol. 126 (2006)

2.2.4-2 設計指針の検討（古河電気工業、京都大学、早稲田大学、名古屋大学）

(1) 研究開発目標

プロジェクトの成果を踏まえて、Y系超電導線材を用いた超電導ケーブル設計指針を示す。

(2) 研究内容 1 –システム検証の結果を受けての設計指針検討–

設計指針を図 2.2.4-17 に示す。まず、ユーザの要求仕様により、定格電圧・定格電流、短絡電流条件、外径、長さが与えられる。次に目標性能として、侵入熱、交流損失、誘電体損失を下げて、現用ケーブルに対してのメリットを示し、コストも現用ケーブルと競争力があることを示す必要がある。仕様が決まったら、①シース設計、②断熱管設計と進む。システム検証結果より、断熱管の侵入熱が 1.6 W/m² 相と、最も主要な損失となり、今後の大きな課題となる。

③コア外径では、断熱管との必要かつ十分な隙間を取らないと、液体窒素の圧力ドロップが大きくなる。④の保護層では必要曲げ直径から、内部の超電導線を傷つけないようにする。システム検証結果では曲げ直径 2.5 m でも問題ないことを確認している。

設計手順	設計留意事項	システム検証結果
①シース設計	ケーブル外径	φ150
②断熱管設計	断熱外管・内管 SIの材質・層数、スペーサ	侵入熱: 1.6W/m ² (低侵入熱 は今後も開発要)
③コア外径		φ90
④保護層	機械特性	曲げ直径2.5mで劣化なし
⑤銅シールド	材質、短絡条件 ($I_s=63kA$, $t=0.6s$)、復帰時間、断面積 = $\alpha \times I_s \times \sqrt{t}$	材質: 銅 $\alpha=4$ (当初 6)
⑥HTSシールド	層数、線材幅、本数、 I_c $I_c @ 77K > \text{電流(rms)} / 0.67-0.5$ 低交流損 → 線材間ギャップ、 J_c 分布	1層、5mmw・43本、 $I_c @ 77K / \text{電流(rms)} = 0.43$
⑦絶縁層	絶縁材料の設計ストレス、長期性能、低誘電損、熱伝導特性、機械特性 (曲げによるシワ・破れ)、試験電圧	試験条件はIEC62067, JEC-3408Iに準拠した。 誘電損@160kV=0.44W/m
⑧HTS導体	層数、線材幅、本数、 I_c $I_c @ 77K > \text{電流(rms)} / 0.67-0.5$ 低交流損 → 線材間ギャップ、 J_c 分布	2層、3mmw・60本、 $I_c @ 77K > \text{電流(rms)} = 0.44$ 交流損@3kA=0.2W/m
⑨銅フォーマ	材質、中空or丸撚り、短絡条件 ($I_s=63kA$, $t=0.6s$)、復帰時間、断面積 = $\alpha \times I_s \times \sqrt{t}$	材質: 銅 $\alpha=8$ (当初 6) 中空構造、 63.5kA-0.6sで劣化なし。

仕様
・定格電圧
・定格電流
- I_{op}/I_c
・短絡電流
-温度上昇
-復帰時間
・外径
・長さ
・目標損失
-侵入熱
-交流損失
-誘電損失
・コスト

図 2.2.4-17 ケーブル設計指針

⑤銅シールドと⑨銅フォーマはその断面積が重要で、短絡条件と復帰時間の関係式から決定される。⑥HTSシールド（高温超電導シールド）と⑧HTS導体（高温超電導導体）で使用する超電導線材は、短絡電流の温度上昇を防ぐため、適切な銅

めっきの厚みを設定する必要がある。今回の設計では片面で $25\ \mu\text{m}$ とした。また、交流損失の低減のために、線材幅方向の J_c 分布が重要であり、 J_c の肩の劣化部分を小さくする必要がある。また、線材の I_c が向上するならば、負荷率 (I_{op}/I_c) を下げることで交流損失低減につながる。⑦絶縁層では、材料として、十分な耐電圧性能、機械性能に加えて、低誘電体損失、長期性能、良好な熱伝導特性が要求される。

今回のシステム検証では、侵入熱 $1.6\ \text{W/m}$ -相、誘電体損失が $0.44\ \text{W/m}$ -相、交流損失が $0.22\ \text{W/m}$ -相であり、侵入熱が主要な損失となっている。そのため、侵入熱を小さくする必要がある、その方法として、真空断熱層の空間を大きくするか、ケーブル外径を小さくして外部表面積を小さくすることである。どちらの場合も③コア外径を小さくする必要がある。コア外径を小さくするには、絶縁厚を薄くする必要がある、設計ストレスデータの充実が不可欠である。例えば、雷インパルス設計ストレス値は、絶縁厚 $1\ \text{mm}$ のデータのバラツキを利用しており、絶縁厚 $10\ \text{mm}$ 、 $20\ \text{mm}$ のデータがさらに必要である。さらに、PDIE の設計ストレス値は、ワイブルプロットの 0.1% の累積確率から導出したが、 $23\text{-}24\ \text{kV/mm}$ に閾値があるようにも見える。以上のように設計ストレスを見直すことで、絶縁厚を薄くすることが出来る。一方で、絶縁厚を薄くすることは、静電容量を上げてしまうので、誘電体損失は上がってしまい、侵入熱と誘電体損失はトレードオフの関係になり、最適構造を探すことになる。しかし、PPLP®に代わる新材料 Tyvek®/PE を用いれば、誘電体損失も下げることができ、設計の自由度も出てくる。例えば、設計の銅フォーマ断面積を上げて、中空部分を増やすことも可能であり、銅フォーマの外径が大きくなれば、超電導導体用の線材も増えて、交流損失をさらに下げることができる。

(3) 成果

設計フローに設計留意事項とシステム検証結果をフィードバックして、設計指針を作成した。

2.2.4-3 成果のまとめ

- ・ $3\ \text{kA}_{\text{rms}}$ での交流損失評価を実施した。レーザ細線化による交流損失低減に成功し、世界最小となる $0.124\ \text{W/m}$ -相を確認した。
- ・ ケーブルフォーマや銅保護層の断面積の最適化、ならびに線材の銅めっき層の最適化により過電流通電 ($63\ \text{kA}\cdot 0.6\ \text{sec}$) の耐性を確認した。なお、ケーブルの過電流における耐久性を設計するにあたり、線材開発/線材特性の把握における線材単体の過電流に対する知見が寄与している。
- ・ 複数材料の電気特性を評価して、 $275\ \text{kV}$ の絶縁材料として PPLP®-C を選定した。さらに、 $1\ \text{mm}$ 厚と $10\ \text{mm}$ 厚と $20\ \text{mm}$ 厚の絶縁ケーブルによる AC 課電試験 (部分放電試験)、 $1\ \text{mm}$ 厚と $10\ \text{mm}$ 厚と $22\ \text{mm}$ 厚の絶縁ケーブルの Imp

試験を実施し、そのデータを取得した。

- ケーブルモデルを試作して、曲げ試験を実施して、曲げ径 $>2500\text{ mm}\phi$ で絶縁特性上、超電導特性上 (I_c) 劣化等の問題がないことを確認した。
- ケーブル評価用として、 275 kV 級気中端末の製作と試験を実施した。3回以上の熱サイクルを行い、 $AC310\text{ kV}$ 部分放電フリーで $Imp1155\text{ kV}$ に耐えている。
- 中間接続部については、電界計算を実施して構造設計を行なった。さらに、超電導-超電導接続部を作製し、 $3.6\text{ n}\Omega$ の低抵抗を確認した。
- 中間接続部の補強絶縁の半径方向ストレスと沿面方向ストレスを取得し、中間接続部を設計・組み立てた。この中間接続部も3回以上の熱サイクルを行い、 $AC310\text{ kV}$ 部分放電フリーで $Imp1155\text{ kV}$ に耐えた。
- 275 kV 級超電導ケーブルの設計検討として、これまで得られた電気絶縁データを基にした設計電界、交流損失や短絡対策による導体サイズ等を考慮した。さらに、 275 kV 級超電導ケーブルの試験電圧に関する検討を行った結果、絶縁厚は 22 mm となり、誘電体損失は $0.6\text{ W/m}\cdot\text{相}$ となる。 3 kA_{rms} の交流損失は導体とシールドを合わせて、 $0.2\text{ W/m}\cdot\text{相}$ との解析結果を得て、これにより、ケーブル損失 (交流損失、誘電体損失) は $0.80\text{ W/m}\cdot\text{相}$ となる。なお、設計に際し、線材開発/線材特性の把握による知見が一部寄与している。
- 検証試験用の 30 m 長超電導ケーブル試験に対する試験計画の提案を行った。
- 平成 23 年度より 275 kV 級、 3 kA_{rms} の 30 m 長超電導ケーブルシステムの設計、製造を行い、平成 24 年度に長期試験を含めたフィールド試験を実施した。このフィールド試験においては、超電導ケーブルの初期性能特性の評価、長期課通電試験の実施を行った。これまで蓄積してきた設計データ、要素技術を用いることで、ケーブルの健全性を確保して、成功裡にすべての試験を完了した。
- 検証試験では、 3 kA_{rms} の交流損失は $0.22\text{ W/m}\cdot\text{相}$ 、運転電圧 160 kV の誘電体損失は $0.44\text{ W/m}\cdot\text{相}$ であり、合計 $0.66\text{ W/m}\cdot\text{相}$ で目標の $0.8\text{ W/m}\cdot\text{相}$ 以下を確認した。
- 検証試験では、長期課通電試験を行い、30年相当の絶縁試験後に設計どおりの性能 $310\text{ kV}\cdot 10\text{ 分}$ の試験で部分放電フリーであり、設計の妥当性を確認した。なお、今後、熱サイクルに伴う、熱伸縮と超電導性能に与える影響を検証するため、継続研究にて、評価を続ける予定である。

2.2.5 超電導電力ケーブル対応線材開発

2.2.5-1 大電流ケーブル用線材の安定製造技術の開発（住友電気工業, ISTEK）

(1) 研究開発目標

大電流超電導ケーブルシステムへの適用をめざして、結晶粒配向金属基板(配向金属基板)を用いた超電導線材を安定に作製可能な技術を確立する。作製する超電導線材は、結晶粒配向金属基板、RF スパッタリング法により基板上に作製した中間層(CeO_2 、YSZ、 CeO_2 の三層)、レーザ蒸着法(PLD 法)により中間層上に作製した超電導層($\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$)、そして銀安定化層と銅保護層から構成される。銀安定化層成膜後、ケーブルの仕様に合わせて、2 mm 幅もしくは 4 mm 幅に機械スリッタにより細線加工を施す。

表 2.2.5-1 に大電流超電導モデルケーブルの目標性能を示す。この目標値を満たす超電導ケーブルを開発するためには、素材として十分な I_c を持ち、かつ大量の超電導線材が要素開発及び製造に必要である。また、特に達成レベルが高度な損失目標を達成するためには線材自体が強い磁性を持たないことが重要であり、従来の Ni 基合金系磁性基板は適用できない。そこで、まず低磁性結晶粒配向金属基板上と Ni 基合金系磁性基板上で得た、高 I_c 、長尺線材作製技術を統合することにより低磁性結晶粒配向金属基板上、高 I_c 超電導線材作製技術開発を行い、その後に基板の幅広化 (1 cm 幅→3 cm 幅)と長尺線材作製プロセスの最適化によるスループットの向上を行うことにより、高い I_c を持つ Y 系超電導線材を大量に製造する技術開発を行い、大電流超電導モデルケーブル用線材を安定的に製造することのできるプロセスの確立を行った。また、PLD 装置を更新することにより超電導層の歩留りを向上させ、さらなる製造能力の向上を図った。開発内容を以下に示す。

- ・低磁性結晶粒配向金属基板を用いた高 I_c 線材の開発
- ・中間層の幅広化成膜、安定製造技術開発
- ・超電導層の幅広化成膜、安定製造技術開発
- ・PLD 装置更新による超電導層成膜プロセスの歩留り向上

目標とするケーブル開発用線材の提供量は、1 cm 幅で平成 20 年度は総長 1 km レベル、平成 21 年度は総長 3 km レベル、平成 22 年度は総長 4 km レベルである。

(2) 低磁性配向金属基板を用いた高 I_c 線材の要素技術開発

開発に際して、Ni 基合金系磁性基板と低磁性結晶粒配向金属基板の I_c 値の差は大きく、後者の I_c を大幅に向上させる必要があった。図 2.2.5-1 に基板による I_c の超電導層厚依存性を示す。Ni 基合金系磁性基板上超電導線材(◆プロット)と低磁性結晶粒配向金属基板上超電導線材 (●プロット) の I_c 値の差は大きく、低磁性配向金属基板を用いた超電導線材の I_c 値は Ni 基合金系磁性基板の約半分の値であった。

表 2.2.5-1 大電流超電導ケーブルの仕様と達成目標

容量	5 kA-66 kV、3 相
損失	2.1 W /m-相@5 kA 以下
サイズ	15 m 長、150 mmφ管路に収納可能

ケーブル用線材の超電導層の設定膜厚を $2\ \mu\text{m}$ とした場合、低磁性配向金属基板を用いた超電導線材の I_c 値は $150\ \text{A/cm-w}(@77\ \text{K,s.f.})$ が見込まれ、 J_e に換算すると $9\ \text{kA/cm}^2$ となり、平成 20 年度の目標値である、 $J_e = 11\ \text{kA/cm}^2$ に満たない値となる (本項での J_e は $20\ \mu\text{m}$ の銅保護層まで成膜した際の総線材厚み $170\ \mu\text{m}$ で計算した値とする)。そこで、この I_c 値の差の原因を究明し、低磁性配向金属基板上での I_c 向上を試みた。

中間層以降の製法は、Ni 基合金系磁性基板、低磁性結晶粒配向金属基板とも同一であるので基板の比較を行った結果、Ni 基合金系磁性基板表面に比べ、低磁性結晶粒配向金属基板表面は多くの欠陥が確認された。また、この欠陥は中間層及び超電導層成膜後にも確認されたことより、この欠陥が超電導電流の流れを阻害し、結果として低磁性結晶粒配向金属基板上超電導層の I_c 値が低下していることが予想された。そこで、基板表面の平滑化を図った結果、表面の欠陥はほぼ解消した。改善後の基板を用いて I_c 値の膜厚依存性を調査した結果、図 2.2.5-1 中の改善後に示すように、低磁性配向金属基板においても Ni 基合金系磁性基板と同等の I_c 値が得られた。また、短尺線材において GdBCO 超電導膜厚が $2\ \mu\text{m}$ 時の I_c 値は最大で $380\ \text{A/cm-w}(@77\ \text{K,s.f.})(J_e = 22\ \text{kA/cm}^2)$ を示し、ケーブル用線材として十分な I_c 値が得られることが確認された。

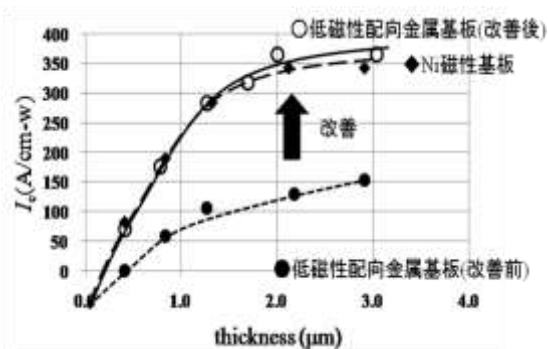


図 2.2.5-1 基板による I_c の超電導膜厚依存性

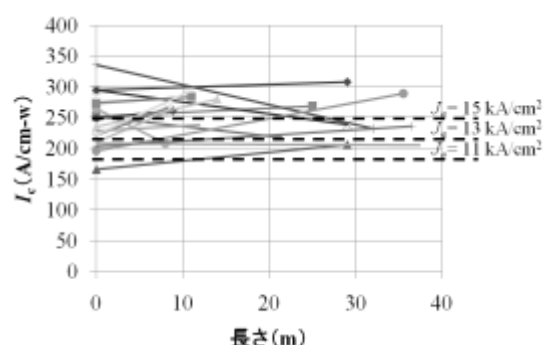


図 2.2.5-2 作製した線材の長さ及び I_c

次に、開発した技術を基に低磁性結晶粒配向金属基板を用いた長尺 Y 系超電導線材の作製を行った。作製した線材の長さ及び I_c 値を図 2.2.5-2 に示す。作製された線材は長手方向に I_c 値の差が生じているが高い J_e 値を有することが確認された。また、平成 22 年度の目標である、 $J_e = 15\ \text{kA/cm}^2(@77\ \text{K,s.f.})$ - $20\ \text{m}$ を超える線材の作製に成功したことも確認でき、 $1\ \text{cm}$ 幅の低磁性結晶粒配向金属基板を用いた

ケーブル用超電導線材の作製要素技術開発に成功した。この結果を基に、平成 20 年度の製造目標である 1 cm 幅で総長 1 km を製造し、ケーブル用線材として供給した。

(3) 中間層の幅広化 (3 cm 幅プロセス)

3 cm 幅の低磁性結晶粒配向金属基板を用いることにより線材スループットの向上を試みた。幅広化にあたり、まず中間層作製工程の 3 cm 幅化を行った。中間層は CeO₂、YSZ、CeO₂ の 3 層からなっており、RF スパッタリング法により作製している。作製した 3 cm 幅中間層の最表層 CeO₂ 層の面内方向の結晶粒配向性($\Delta\phi$)、表面粗さ(Ra)、CeO₂(200) 結晶粒配向度の幅方向分布を図 2.2.5-3 に示す。 $\Delta\phi$ 、Ra、CeO₂(200)配向度ともに幅方向に分布はなく、均一な特性であった。次に 3 cm 幅中間層を 1 cm 幅に分割し、同条件で超電導層を成膜することにより、中間層による幅方向の I_c 特性を調査した。その結果、1 cm 幅-3 本の I_c 値の差は 10% 以内であり、 I_c 特性においても大きな幅方向の特性差が確認されず、3 cm 幅において均一な特性を持つ中間層が作製されたことを確認した。

次にケーブル用線材の安定製造技術を確立するため、3 cm 幅中間層の長尺線材作製技術開発に着手した。30 m 長の第一 CeO₂ 中間層を作製し、その長手方向の特性を評価したところ、CeO₂(200) 結晶粒配向性の長手方向の分布に図 2.2.5-4 のような長さとともに低下する結果が認められた。十分な特性を持つ超電導線材を作製するためには第一 CeO₂ 層の CeO₂(200) 結晶粒配向性は 90 % 以上が必要である。そこで第一 CeO₂ 層の CeO₂(200) 結晶粒配向性の安定化を成膜時毎、成膜時間による雰囲気、成膜温度条件の変化と CeO₂(200)配向性の相関を調査した結果、成膜温度と強い相関があることがわかり、温度の安定化を図った。その結果、図 2.2.5-5 に示すように長手に亘り、均一な CeO₂(200) 結晶粒配向性を持つ 100 m 級の 3 cm 幅長尺の中間層が得られた。また、抜き出し検査により、 $\Delta\phi$ 、Ra、CeO₂(200) 結晶粒配向度の幅方向特性が均一であることも確認でき、3 cm 幅、100 m 級中間層の安定製造技術確立を確認した。

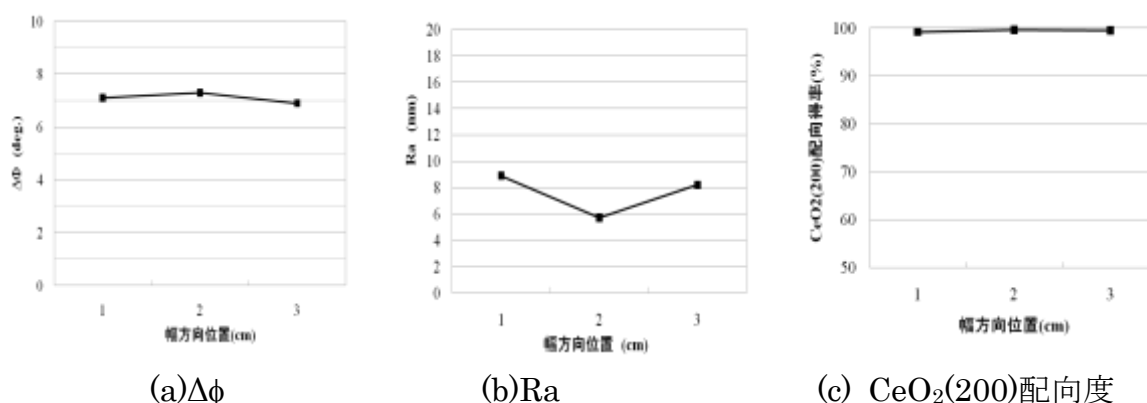


図 2.2.5-3 3 cm 幅中間層の幅方向特性分布

(4) 超電導層の幅広化 (3 cm 幅プロセス)

3 cm 幅中間層の作製技術確立後、超電導層作製工程の 3 cm の幅広化を実施した。3 cm 幅中間層上に $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ を成膜し、その幅方向 I_c 値を評価したところ、図 2.2.5-6 に示すように基板の中央 2 cm で従来の I_c 値 ($I_{c0} = 200 \sim 250 \text{ A/cm-w} @ 77 \text{ K, s.f.}$) が得られた。これにより超電導層作製工程のスループットが実質 2 倍となった。次にさらなるスループット向上を行うために、幅方向端部の低 I_c 原因の調査・解決を試みた。調査の結果、幅方向端部は成膜時の温度が低いため、 I_c 値が低下していることが判明した。そこで、PLD の成膜ヒータを 3 cm 幅全域に亘り、温度均一が得られるヒータに更新した。新ヒータで成膜した結果を図 2.2.5-7 に示すが、狙い通り幅方向端部の I_c 値が改善していることが確認できた。本技術開発結果を基に、平成 21 年度目標である、1 cm 幅で総長 3 km の超電導線材を 3 cm 幅プロセスにて製造した。本工程において作製した 2 mm 幅長尺線材の I_c 値分布の典型例を図 2.2.5-8 に示す。また、作製した超電導線材の I_c 値度数分布を図 2.2.5-9 に示す。 $I_c = 200 \text{ A/cm-w} @ 77 \text{ K, s.f.}$ 以上の Y 系超電導線材の歩留りは図 2.2.5-8 より 68 % と算出された。大電流ケーブル開発用に適用可能な長さを有する Y 系超電導線材を安定に製造できるプロセスを確立した。

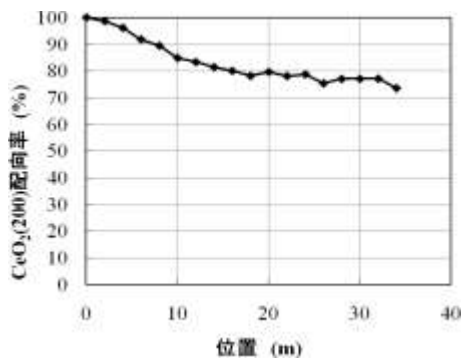


図 2.2.5-4 第一 CeO_2 層の $\text{CeO}_2(200)$ 結晶粒配向性 (改善前)

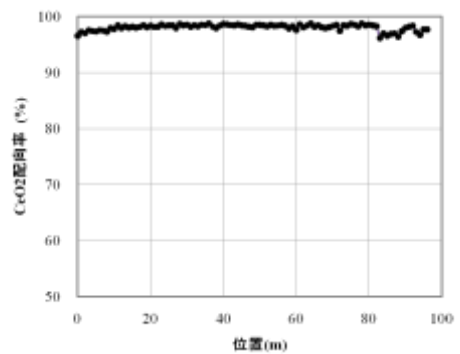


図 2.2.5-5 第一 CeO_2 層の $\text{CeO}_2(200)$ 結晶粒配向性 (改善後)

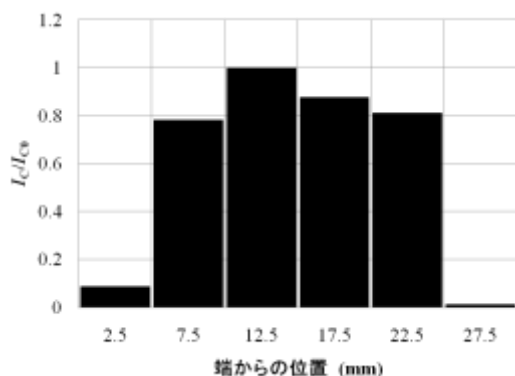


図 2.2.5-6 3 cm 幅超電導層の I_c 値分布 (改善前)

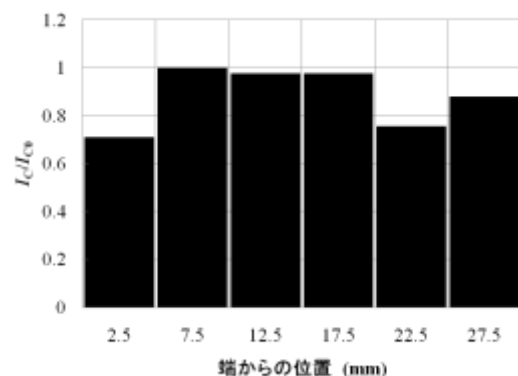


図 2.2.5-7 3 cm 幅超電導層の I_c 値分布 (改善後)

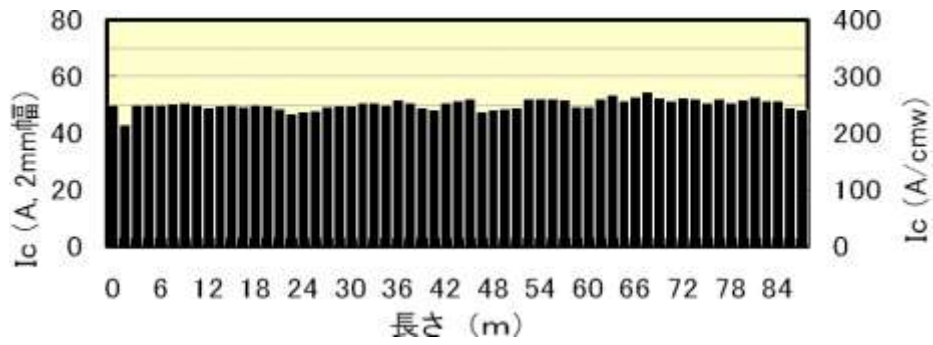


図 2.2.5-8 3 cm 幅プロセスにて作製した 2 mm 幅長尺線材の I_c 値分布の典型例

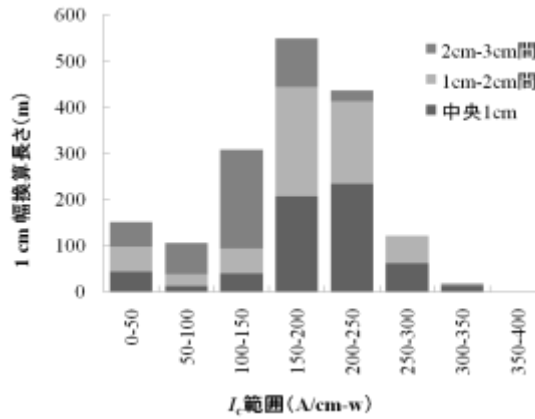
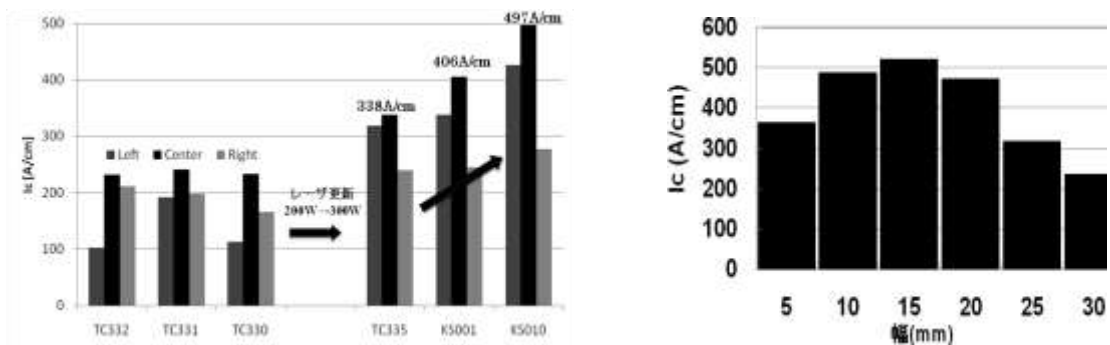


図 2.2.5-9 作製した線材の I_c 値の度数分布

(5) PLD 用新レーザ導入による安定製造技術開発

ケーブル開発用線材の供給を確実にし、ケーブル開発の促進を図るには線材の製造能力を向上させることが重要となる。このために、超電導層形成プロセスにおいて、従来の 1.5 倍(200 W → 300 W)の高出力を有する PLD 用エキシマレーザを新規導入した。図 2.2.5-11 に、新レーザを使用して成膜した 3 cm 幅線材の幅方向 I_c 分布を示す。新レーザによるレーザ出力向上とプルームサイズの増大により、超電導層の単位膜厚当たりの成膜速度が旧レーザに比べ 1.75 倍に向上し、より短い成膜時間で線材全体の I_c 値が向上する結果が得られた。

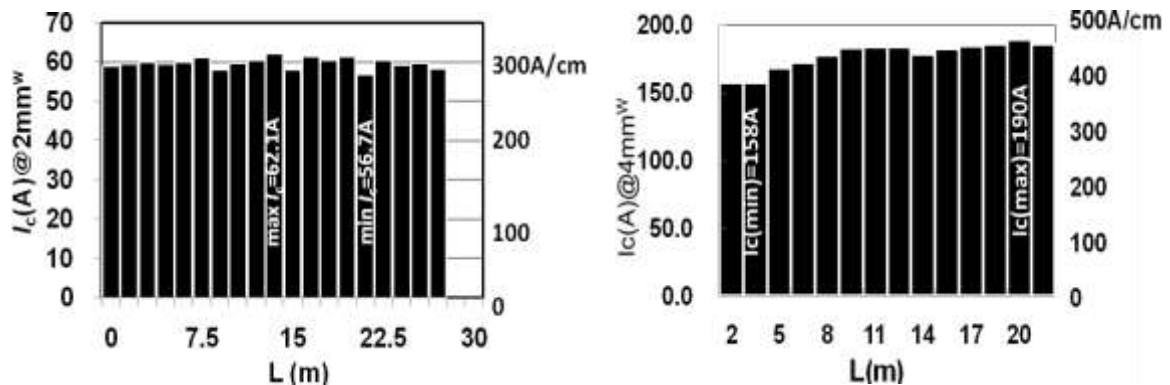


(a) 30 mm 幅線材の I_c 向上の推移

(b) 30 mm 幅線材の高 I_c 分布

図 2.2.5-10 レーザ更新による I_c の向上

図 2.2.5-10(a)中の各線材の膜厚は、新レーザ導入前 (TC330、TC331、TC332) が $2 \mu\text{m}$ 、新レーザ導入後 (TC335、KS001、KS010)) が $2.8 \mu\text{m}$ である。また、成膜速度が向上したことにより、基板が受ける熱履歴が低下し、歩留り低下の原因であった膜の剥離も抑制され、線材の歩留りが向上した。さらに、新レーザによるレーザエネルギーの安定性向上と、ヒータ周辺の温度分布の改善により、幅方向の I_c 分布も改善され、図 2.2.5-10(b)に示すように線材中央部で $500 \text{ A/cm-w}(@77 \text{ K,s.f.})$ 以上の I_c 値を得た。従って、膜厚増加による I_c 値向上と線材幅方向の I_c 値分布改善により、ケーブル開発用線材として提供できる線材量の増加が見込める結果が得られ、図 2.2.5-11 に示すように細線加工後の 2 mm 幅線材と 4 mm 幅線材の I_c 特性も大幅に向上した。、さらに、超電導線材の月当たりの製造量は 3 cm 幅化により 1 cm 幅で最大総長 1 km の製造量が向上し、平成 22 年度の 1 cm 幅で 4 km が製造可能となったことが確認できた。以上より、 I_c 特性と歩留りの向上及び成膜速度の高速化を実現し、総長 4.2 km のケーブル開発用線材を製造した。



(a) 2 mm 幅線材 ($J_e = 16.7 \text{ kA/cm}^2$ - 28 m) (b) 4 mm 幅線材 ($J_e = 23 \text{ kA/cm}^2$ - 21 m)

図 2.2.5-11 高 I_c 値を有する細幅線材 (レーザ更新後)

(6) 平成 22 年度までの成果

大電流・低交流損失ケーブルに適用するための低磁性クラッドタイプの結晶粒配向金属基板-PLD 線材作製技術開発を実施し、ケーブル化に必要な性能及び製造速度等を満足する Y 系超電導線材製造の要素技術を確立した。本技術を基にして、中間目標である $J_e = 15 \text{ kA/cm}^2(@77\text{K,s.f.})(2 \text{ mm}$ 幅 $\times 20 \text{ m}$ 以上)の製造技術レベル達成を確認するために、 $J_e = 17 \text{ kA/cm}^2(@77\text{K,s.f.})(2 \text{ mm}$ 幅線材 $\times 28 \text{ m}$ 、 J_e は $20 \mu\text{m}$ 厚の Cu めっきを含む線材厚さ $170 \mu\text{m}$ で算出) の特性を有する線材を作製・実証した。なお、線材提供実績は総長で、平成 20 年度： 1.1 km 、平成 21 年度： 3.2 km 、平成 22 年度： 4.2 km である。

(7) 大電流ケーブルシステム検証用線材の安定作製

平成 23 年度から平成 24 年度にかけて、 66 kV 大電流ケーブルシステム検証の

ために提供する低磁性クラッドタイプ結晶粒配向金属基板-PLD 線材の製造を実施した。提供する線材の仕様は、表 2.2.5-2 及び次のように決定した。

- 1) 線材幅は、2 mm 幅及び 4 mm 幅とする。2 mm 幅線材は、ケーブル導体最外層に使用する。
- 2) 導体最外層に使用する 2 mm 幅線材は、細線化加工にレーザスリットを適用する。4 mm 幅線材は、機械スリットを可とする。
- 3) 線材の I_c 値は、ケーブルを構成する各層について、表 2.2.5-2 の値以上とする。
n 値は、20 以上を目標とし、15 以下の線材は使用しない。 I_c 値検査は通電測定(電圧端子間 1.8 m 長)とする。
- 4) 線材外観(特にエッジ部)に異常の認められるものは使用しない。
- 5) 安定化層厚みは、表裏とも 20 μm 厚とする。

これらの仕様決定に際しては、2.1.1 に記載の 66 kV 大電流ケーブル化技術開発の成果のうち、ケーブル各層の交流損失への寄与度及び線材幅・端部 J_c 値低下領域が交流損失に与える影響等を、また平成 22 年度までの安定製造技術及び結晶粒配向金属基板-PLD 線材の低交流損失線材作製技術開発(2.4.3)の進展を考慮した。その結果、通電試験用コアに使用する線材の仕様は I_c 値：285～370 A/cm-w(@77K,s.f.) (J_c 17～22 A/cm²) と、当初の目標より高 I_c 線材となった。

表 2.2.5-2 大電流ケーブルシステム検証線材の仕様

使用位置	幅 (mm)	単長 (m)	本数 一心分	I_c 下限		n 値
				(A)	(A/cm-w)	
導体	1 層	4	18	15	132	目標 \geq 20 下限 15
	2 層	4	18	15	139	
	3 層	4	19	15	146	
	4 層	2	21	27	74	
シールド	1 層	4	19	24	132	下限 15
	2 層	4	18	26	114	

高 I_c 線材を効率よく製造するため、また東日本大震災に伴った基板調達遅延の影響抑制のため、線材製造工程を検討し、工程途中で次の特性検査による良好品の選別を実施した。

- 1) 3 cm 幅で中間層形成後、全長の X 線回折測定により配向率分布をチェック。
また、端末切出し試料に対して超電導層を成膜し、超電導特性のチェックを実施。
- 2) 超電導層・銀安定化層形成、酸素中アニール後、一旦機械スリットで 1 cm 幅線材 3 本にスリットし、誘導法 I_c 測定で線材全長の I_c 値を確認。
上記 2) の検査では、良好品の中でも特に高 I_c 値の線材は、高 I_c 値が要求される

導体最外層に適用するため 2 mm 幅線材へのレーザスリットによる細線化加工へ進め、それ以外の良品は 4 mm 幅に細線化加工した。4 mm 幅への加工では線材量確保のため、レーザスリットだけでなくスループットが格段に大きい機械スリットを併用した。各スリット法で細線化加工した線材の端部 J_c 値低下領域評価結果については、2.4.3-2 (7) (配向基板—PLD 線材の細線加工技術開発) に記載した。また、3 cm 幅線材の両端各 5 mm の領域は、幅方向の I_c 分布不均一のために高 I_c 線材を効率よく確保することが難しかった (特に開発初期段階) ため、以降の工程へは進めていない。なお、東日本大震災等に伴う基板調達遅延の影響を抑制ため、誘導法 I_c 値測定の一部及びレーザスリット加工は、ISTEC で実施した。なお、レーザスリットにより約 8600m 長の切断を行い、4mm 幅線材の一部及び 2mm 幅線材に加工した。

細線加工後、線材の周囲に銅めっきを施して外周に銅保護層を形成した線材について、出荷検査として次の検査を行った。これらの検査項目・検査方法は、大電流ケーブル化技術開発の結果をフィードバックして決定したものである。

- 1) 通電法 I_c 値測定 (n 値測定を含む。測定間隔 1.5 m、電圧端子間 1.8 m で全長を検査)。
- 2) 外観検査 (全長検査)。
- 3) 誘導法 I_c 測定 (全長検査。特に微小な I_c 値低下領域をチェック)。
- 4) 幅・厚み測定 (線材両端検査。参考値)。
- 5) 安定化層厚み測定 (線材片端検査。参考値)。

これらの検査で仕様を満たした線材を、検査データとともに、システム検証用大電流ケーブルの製造工程へ提供した。大電流ケーブルシステム検証のために提供した線材の I_c 値度数分布を図 2.2.5-12 に示す。なお、課電試験コア用にも超電導線材を提供し、合わせて提供線材総量は、2 mm 幅線材 1.7 km、4 mm 幅線材 5.2 km となった。

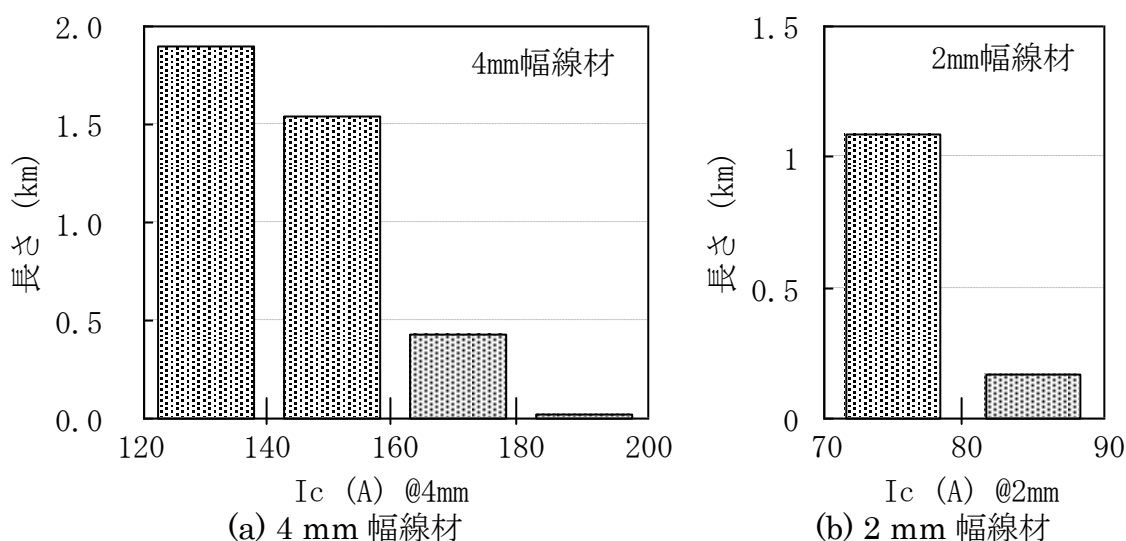


図 2.2.5-12 大電流ケーブルシステム検証用提供線材の I_c 値度数分布

大電流ケーブルシステム検証用線材製造における、各工程への基板投入長と最終供給長を図 2.2.5-13 に、不良の要因別割合を図 2.2.5-14 に示す。図 2.2.5-13 では、工程途中で線材幅が変わるため、図の縦軸は 4 mm 幅換算長としている。工程途中検査及び出荷検査の時点で、線材取捨選択によって次工程の投入量が減少している。歩留りを低下させた工程・要因の内訳は、次のとおりであった。

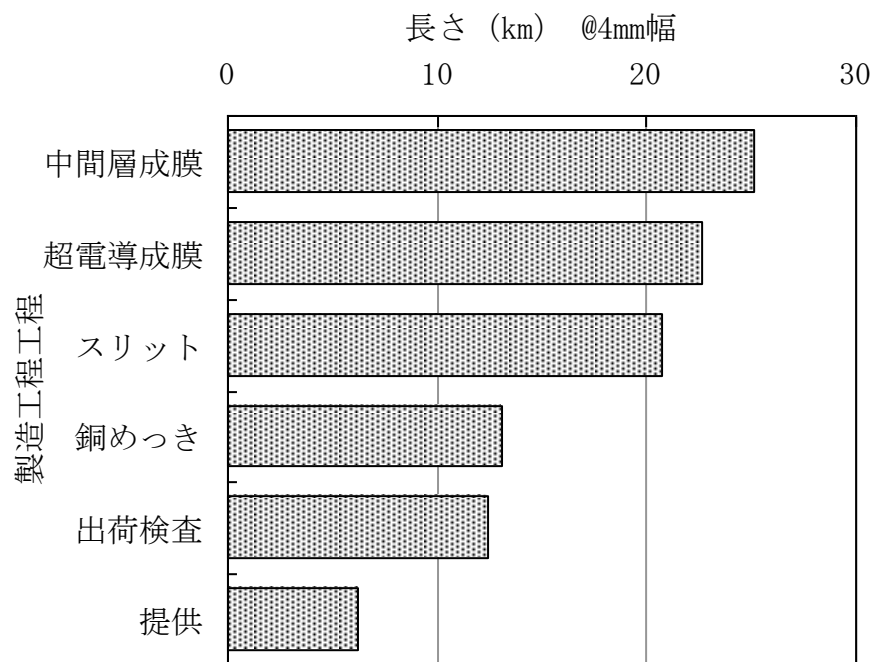


図 2.2.5-13 各工程投入長

- 1) 成膜：中間層 12 %、超電導層 9 %
- 2) めっき：2 %
- 3) 検査： I_c 検査 13 %、外観検査 16 %
- 4) 工程要因：幅端 5 mm 分 26 %、細線化加工ロス 21 %

このうち、4)工程要因のロスは、2.4.5-3 (1)で後述するように大幅に抑制できる見通しを得ている。

(8) ケーブル用線材のレーザー切断技術の開発

ISTEC ではレーザー切断技術の開発を進めているが、中間目標達成段階での UV レーザによる線材切断加工には、点状ビームの YAG の 3 倍高調波レーザ (波長 355 nm、Q スイッチ周波数 10 kHz、5 W 出力) を用いていた。しかしながら点状ビームによる切断では、線材搬送速度の揺らぎ等によって切断ムラが生じるためレーザー照射後に線材を分離する作業が必要であり、切断速度は 7.2 m/h が最大であるという技術課題があった。そこで、搬送速度の揺らぎが生じた場合にも切断が可能ないように線材長手方向に長軸のある楕円形ビームの UV レーザ (波長 355 nm、Q ス

イッチ周波数 30 kHz, 10 W 出力) を導入したことによって、完全切断が可能となった。変圧器用の線材切断の場合には、安定化銀側からスクライビング加工を施す必要があるため通常ハステロイ™ 基板側からレーザを入射し、バリを基板側に発生させ、銀面(超電導層側)にバリがでないことが求められたが、超電導ケーブルに供する線材は、銅めっきを施す必要があり、レーザ切断面における剥き出しの超電導層に対して銅めっきが上手くつかず、線材エッジ部にて銅めっきの剥がれが散見された。そこで、安定化銀層側からレーザを照射することによって超電導層側に人為的に切断時の熔融物によるバリを発生させて剥き出しの超電導層が覆われるようにした方が銅めっき時の剥がれが抑えられることが判明した。また上述のレーザを導入したことによって切断速度は最大 54 m/h まで向上できた。さらにレーザ照射のみで完全切断されるため、切断後の線材を巻き取るための工夫として、主リールに巻きバネの応力を用いて従属して動く副リールを有する W リールを考案した。大電流ケーブル化技術開発用に提供した線材の多くは W リールを使用して切断したが、後に同軸上に 2 つのリールが独立に動き個別に応力も印加できる W モーターリールへと改良を重ね、切断時に線材にストレスが掛かりにくい切断が可能となった。

(9) 大電流用線材の安定製造技術の開発の成果

本プロジェクト前半には、低磁性クラッドタイプ結晶粒配向金属基板・PLD 線材作製技術開発を実施し、3 cm 幅プロセスの導入や I_c 値向上等により、ケーブル化に必要な性能及び製造速度等を満足する Y 系超電導線材製造の要素技術を確立・実証した。平成 23 年度から平成 24 年度には、これらの要素技術を基に、主に大電流ケーブルシステム検証用線材を製造した。

ケーブルシステム検証用線材の製造に際しては、大電流ケーブル化技術開発の結果をフィードバックして、加工・検査も含めた工程の検討を行い、ケーブル用線材の製造工程を確立した。短尺検証用線材も含めた J_c 値: 15~20 kA/cm²(@77K,s.f.) 以上の線材の製造量は、1 cm 幅換算の総長で平成 23 年度が 1.8 km、平成 24 年度が 1.6 km であった。

2.2.5-2 基板・中間層テープの開発（フジクラ, ISTE C）

(1) 研究開発目標

交流電力機器に Y 系超電導線材を適用する際問題となるのは、アスペクト比の非常に大きなテープ状線材に対して垂直方向にかかる磁界成分変動に伴う交流損失が無視できなくなることである。超電導電力ケーブルの場合はこれを回避するために円筒状に線材を敷き詰める構造となるが、その際の成形性の問題から幅の狭い線材の開発が求められている。2 次元構造の Y 系超電導線材においては、隣接する結晶の粒界で生じる弱結合の分布によって有効な通電断面積が決まってしまうため、パーコレーション的に不利な配置になる確率を低減するためにはできるだけ結晶粒径が小さいことが望ましい。IBAD 法中間層テープ（中間層基板）は、結晶粒が無配向の金属テープを基板とした IBAD 低温成膜（非エピタキシャル成長）した結晶粒配向中間層の結晶粒径が非常に小さいため、超電導膜における粒径も小さくなる傾向がある。これまでに開発してきた基板・中間層テープの長尺製造技術を有効活用し、2 mm 幅の幅狭線材においても 20 m 長において $J_e = 15 \text{ kA/cm}^2$ (@77 K, s.f.) の通電特性を実現し得る基板・中間層テープの安定で高速な製造技術を検討する。プロトタイプケーブル用線材の基板として結晶粒配向度 16 度以下の特性を有する IBAD 中間層基板を平成 20 年度～22 年度で合計 20 km 長の提供を行い、ケーブル要素技術開発に資する。平成 23 年度はケーブル要素技術開発及び 30m 高電圧ケーブルシステム検証に資するための IBAD 中間層基板を 6km 長供給する。なお、東日本大震災及び夏季節電対策の影響によるケーブル用線材製造・提供の遅延抑制のために、ISTEC が IBAD 中間層基板及び線材の供給を一部担当する。

(2) 中間層テープ（中間層基板）の提供

「超電導応用基盤技術開発（第 II 期）」プロジェクトでフジクラ及び ISTE C が開発を進めてきた大型 IBAD 装置には、世界最大のアシストイオンソースが設置されており、結晶粒配向度が 16 度以下の IBAD-Gd₂Zr₂O₇ (以下 IBAD-GZO) 中間層基板を連続的に 100 m 以上のオーダで製造することが可能である。平成 20 年度～22 年度にプロジェクトより課せられた IBAD-GZO 中間層基板の供給計画は表 2.2.5-3 のとおりである。

表 2.2.5-3 中間層基板供給計画

年度	計画	
	条長(m/月)	総長(m/年度)
20 年度	1125	7875
21 年度	750	7500
22 年度	900	10800

平成 20 年度～21 年度にフジクラがプロジェクト内の他機関に対して提供した IBAD-GZO 中間層基板の供給実績を表 2.2.5-4 に示す。

表 2.2.5-4 平成 20 年度～21 年度 中間層基板提供実績

年度	実績		
	条長 (m/月)	総長 (m/年度)	期間
20 年度	1126.6	7886	9 月～3 月
21 年度	832.0	8319.8	6 月～3 月
22 年度	900 (予定)	10800 (予定)	4 月～3 月

平成 20 年度は 3 月末時点で、7886 m を提供し、平成 21 年度は 8319.8 m を提供した。月毎の提供量は必ずしも一定ではないが、各年度の計画に対して年度内に全量を提供済みである。平成 20～23 年度における 5 mm 幅換算値の中間層基板の供給計画及び供給実績は表 2.2.5-5 の通りである。

表 2.2.5-5 中間層基板供給計画及び実績

年度	種類	目標提供長[m]	提供線材長[m]
20	GZO	20,000	7,886
21	GZO		8,320
22	GZO		12,728
23	MgO	6,000	6,851
合計		26,000	35,784

平成 23 年度からは、高速成膜が可能な IBAD-MgO 層を成膜した中間層基板についても提供した。平成 23 年度末までの中間層基板の総提供量は 35.8 km である。なお、平成 23 年度においては、東日本大震災及び夏季節電対策の影響によるケーブル用線材製造の遅延抑制のために、ISTEC が IBAD 中間層基板の供給を一部担当した。

(3) 中間層高速堆積方法検討

IBAD-GZO 中間層は、結晶粒配向度を 16 度以下にするために、1 μm 厚程度まで膜を成長させる必要がある。そのため、IBAD-GZO 層の製造速度は 5~7 m/h が上限であった。中間層の提供を円滑に行うためには製造速度のさらなる高速化が不可欠となる。

図 2.2.5-14 に示した連続巻き取り式イオンビームアシスト蒸着(IBAD)装置は、中央部分が薄膜を堆積させる真空チャンバであり、チャンバ内部には 110×15 cm^2 の世界最大のアシストイオンソースが設置されている。装置両脇には、送り出し・巻き取りリールが配置されており、連続的にテープ基材が真空チャンバに供給され、数 100 m の長さを有する基材上に IBAD 層を成膜することが可能となっている。



図 2.2.5-14 連続巻き取り式イオンビームアシスト蒸着装置

本装置を用いて IBAD 法により極めて薄い膜厚で結晶粒高配向度の中間層を形成可能な MgO 層（以下 IBAD-MgO）の導入を検討した。IBAD-MgO は、金属基板上に金属元素の拡散を防止するため 100 nm 厚の Al_2O_3 膜と、その上にベッド層として形成した 20 nm の Y_2O_3 膜上に形成される。図 2.2.5-15 はベッド層形成後に図 2.2.5-12 の装置で毎時 1,000 m で成膜した IBAD-MgO 層断面の透過電子顕微鏡(TEM)写真である。ベッド層の上に厚さ 5~10 nm 程度の IBAD-MgO 層が形成され、さらにその上に結晶粒が配向した CeO_2 結晶粒が連続的に成長している様子が観察された。

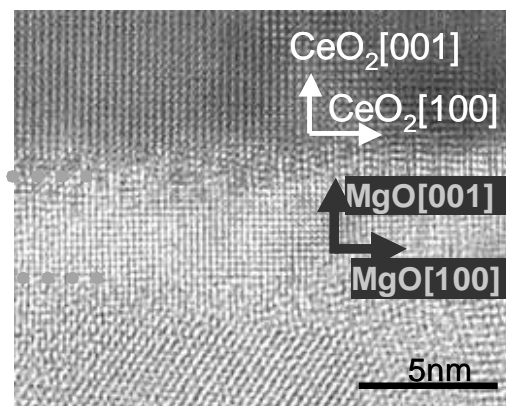


図 2.2.5-15 IBAD-MgO 層の透過電子顕微鏡観察結果

そこで、IBAD-MgO 層上に IBAD-GZO 層と同程度厚さの CeO 層を形成後に、厚さ $1 \mu\text{m}$ の超電導層を形成した。得られた線材の I_c 値の長手方向の分布を図 2.2.5-16 に示す。

77 K,s.f.において直接通電により線材を 700 mm 間隔の電圧端子間距離で I - V 特性を測定し、 $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ に到達した電流値を I_c 値とした。170 m 超の長さを有する線材において、全長にわたって亘って $300 \text{ A}/\text{cm-w}(@77\text{K,s.f.})$ 以上の I_c 値を実現している。 I_c 値の平均値は $340 \text{ A}/\text{cm-w}(@77\text{K,s.f.})$ であり、標準偏差は 6.1 A であった。また、IBAD-MgO 中間層を使用した線材は $J_c = 2.2 \text{ MA}/\text{cm}^2(@77\text{K,s.f.})$ の性能を有し、 J_c 値に換算すると $18.5 \text{ kA}/\text{cm}^2(@77\text{K,s.f.})$ の通電特性を実現し得ることが確認された。 $(J_c$ 値は $25 \mu\text{m}$ の Cu めっき層、 $1.5 \mu\text{m}$ の超電導層を含む線材厚さ $183.5 \mu\text{m}$ で算出)

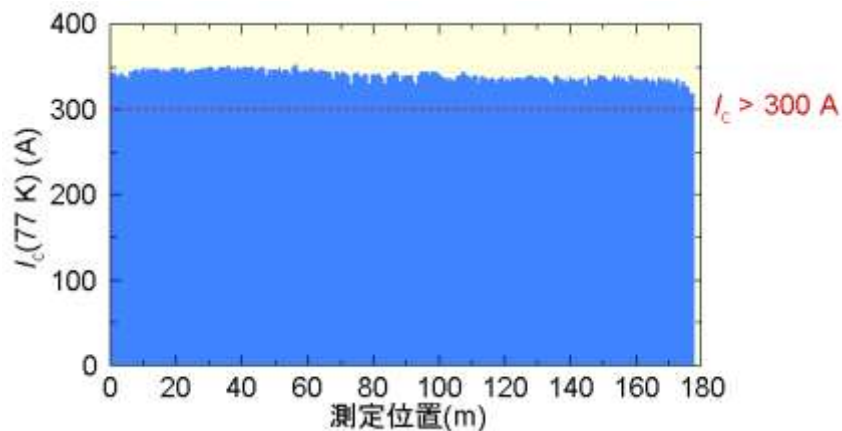


図 2.2.5-16 IBAD-MgO 層、PLD-CeO₂ 層上に形成された超電導層の I_c 値の長手方向分布

図 2.2.5-17 に IBAD-GZO 層上に CeO₂ 層を形成後、厚さ $1 \mu\text{m}$ の超電導層を形成した線材の I_c 値の長手方向分布を示す。

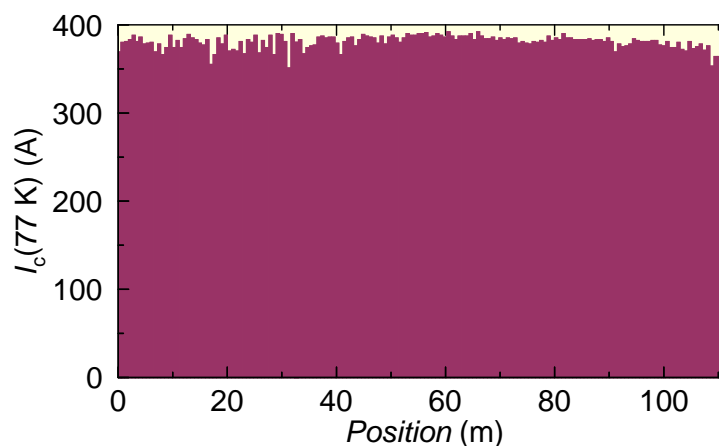


図 2.2.5-17 IBAD-GZO 層、PLD-CeO₂ 層上に形成された超電導層の I_c 値の長手方向分布

100 m 超の長さを有する線材において、 I_c 値の平均値は 380 A/cm-w(@77 K,s.f.) であり、標準偏差は 7.3 A であった。このことから IBAD-GZO 層と比較して 100 倍以上の高速で成膜された IBAD-MgO 層は、IBAD-GZO に代わって長尺の Y 系超電導線材製造に十分使用可能であることが確認され、平成 23 年度には総長 6.9km の IBAD-MgO 中間層基板を提供した。

(4) まとめ

平成 20 年 9 月より本プロジェクト内での中間層基板の提供を開始した。平成 20 年 9 月から平成 22 年度末までに提供した 5 mm 幅の IBAD-GZO 基板の総量は、計画 20 km に対して実績は約 29 km であった。また、平成 23 年度からは高速成膜が可能な IBAD-MgO 層を成膜した中間層基板について、計画 6 km に対し 6.9 km を提供した。

100 m 長の IBAD-GZO 中間層を使用した線材において 380 A/cm-w(@77 K,s.f.) の I_c 値を、170 m 長の IBAD-MgO 中間層を使用した線材は 300 A/cm-w(@77 K,s.f.) 以上の I_c 値を実現しており、 $J_e = 15 \text{ kA/cm}^2$ (@77K,s.f.)以上の通電特性を実現し得る基板・中間層テープの安定製造技術を開発した。

2.2.5-3 MOD プロセスによる高電圧ケーブル用超電導線材の開発（昭和電線ケーブルシステム）

(1) 研究開発目標

超電導電力ケーブルで使用される超電導線材は、交流損失低減の見地から将来的には幅 2 mm の細線化が求められている。このため、線材の幅方向に存在する欠陥や膜厚の不均一性の存在は臨界電流特性の低下を招き、好ましくない。従って、線材長手方向の均一性とともな幅方向の均一性を向上させることが重要となる。

本プロジェクトでは、以下の検討を行うことにより TFA-MOD 法による長尺安定製造技術の確立を図る。

- (i) 仮焼膜の膜厚分布の調査
- (ii) 長手方向の特性分布向上の検討
- (iii) 長尺 Y 系超電導線材の安定製造の検討

(2) 仮焼膜の膜厚分布の調査

三弗化酢酸塩(TFA)を原料とする有機酸塩熱分解法(TFA-MOD 法)で作製した幅 5.0 mm の線材において、幅方向の膜厚分布を測定した。フジクラより供給された IBAD-Gd₂Zr₂O₇(GZO)中間層付ハステロイ™ 金属基板上に、高周波スパッタリング法により CeO₂ 中間層を成膜した。この CeO₂ 中間層の表面に TFA-MOD 法で超電導層となる仮焼膜を作製した。基板表面に原料溶液を塗布する手法は一般にディップコーティングと呼ばれるものであり、溶液溜りに基板を浸漬し、基板を引き上げる速度と溶液の粘性が良い粘度のバランスで膜厚をコントロールするものである。本検討に使用した試料は、実際に供給用の線材を作製する Reel-to-Reel(RTR)式仮焼炉で作製したものであり、12 回の塗布で 1.5 μm の膜厚を塗布するように溶液粘度を調整したものである。図 2.2.5-18 に仮焼炉の全景を示す。また、RTR 式塗布・仮焼炉において、塗布速度 5 m/h 及び 10 m/h にて溶液塗布を行った試料、バッチ式炉において、塗布速度 10 m/h で溶液塗布を行った試料各々について本焼後の超電導膜厚分布の測定を行った。



図 2.2.5-18 Reel-to-Reel 式連続塗布塗布仮焼炉の全景

仮焼膜を本焼した後、5 mm 幅の線材を幅方向に 3 分割し、その試料片の超電導層を硝酸に溶かしてプラズマ発光質量分析(ICP)により元素の質量分析を行った。求めた各元素の質量と、理論密度、試料の面積から膜厚を換算した結果を図 2.2.5-19 に示す。本焼後の試料において、線材の引き上げ速度が 5 m/h において、幅方向に均一に超電層が形成されており、基板の引き上げ速度がさらに速い 10 m/h やバッチ炉を使用した塗布では端部と中央部の膜厚のバラツキが大きくなることを示しており、5 m/h の塗布速度で塗布・仮焼を行った、本焼後の超電導膜の幅方向の膜厚は $\pm 4.8\%$ 以内に入り、本焼後の超電導膜厚の分布を $\pm 10\%$ 以内に収める目標を達成した。

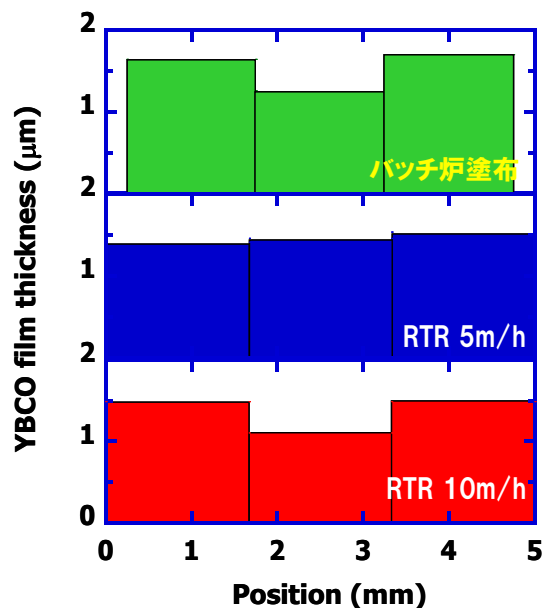


図 2.2.5-19 各塗布速度で作製した本焼後の Y 系超電導膜の幅方向の膜厚分布

(3) 長手方向の特性分布向上の検討

TFA-MOD 法による長尺線材に使用する CeO_2 中間層の作製方法として、昭和電線ケーブルシステムは高周波スパッタリングプロセスを選択した。装置の導入コストが低コストで済み、自動インピーダンス整合器を併用することで長時間の無人運転が可能なこと、非常に平滑な表面を形成できること等が主な理由である。高周波スパッタリングによる CeO_2 中間層成膜に関する研究は日が浅く、Y 系超電導線材の長手方向の特性分布を向上させる研究開発において重要なテーマであると考えられる。成膜条件の最適化を行った結果、図 2.2.5-20 に示すように 130 m 単長で全長に亘って $\Delta\phi=5$ 度の均一な結晶粒二軸配向性を示し、均一な CeO_2 中間層を作製できることが判った。図 2.2.5-21 に平成 21 年度に提供用線材に使用する目的で成膜した CeO_2 中間層(単長：80~100 m)の結晶粒二軸配向度を使用した IBAD-GZO 層の結晶粒二軸配向度に対してプロットした結果を示す。結果より、ケーブル用素線としての超電導層の性能を得るために必要な CeO_2 層の $\Delta\phi$ (5 度以上)を得るためには、IBAD-GZO 層の $\Delta\phi$ は 16 度以上であることが必要であることが判明した。

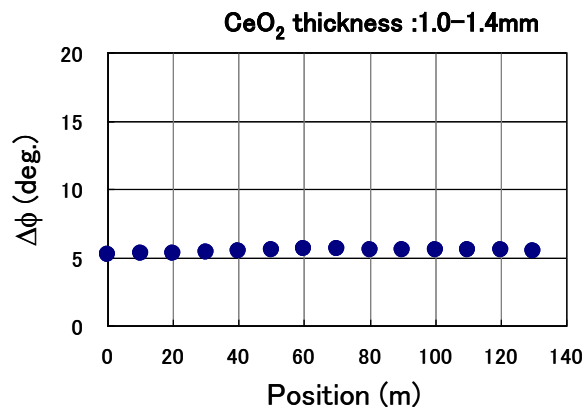


図 2.2.5-20 130 m 長で作製した CeO_2 中間層の結晶粒二軸配向度の分布

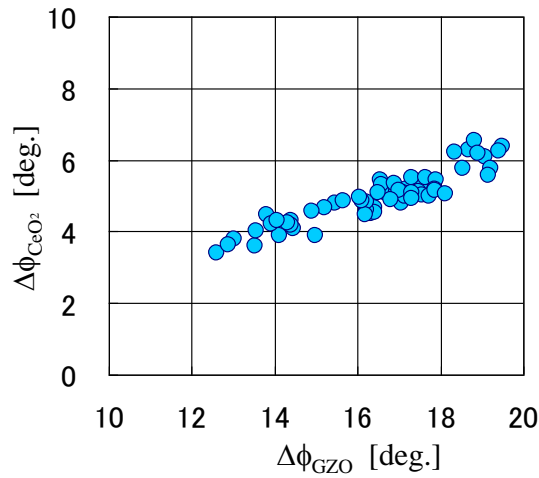


図 2.2.5-21 提供線材の両端から採取した CeO₂ 中間層における結晶粒二軸配向度と IBAD-GZO 層の結晶粒二軸配向度の関係

図2.2.5-22に100 m単長で作製した線材の I_c 値の長手方向の均一性を示す。全長に亘り1 cm幅換算で300 A/cm-w(@77 K,s.f.)を超える I_c 値を示しているが、所々 I_c 値が低下した箇所が散見される。全体では±10 %の範囲に I_c 値は分布している。局所的に低下している箇所は、中間層の欠陥や傷、仮焼膜の作製工程において付着した異物に起因するケースが多いため、仮焼工程について改善を実施し、さらなる均一性の向上を図った。

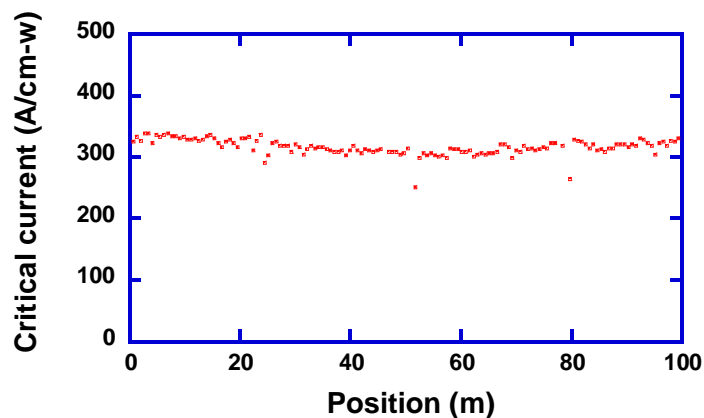


図2.2.5-22 長さ100 mで作製した線材の I_c 分布

図 2.2.5-23 に示すように、これまで樹脂製チューブを用いた方式により、原料溶液の塗布を行なっていたが、樹脂製チューブを用いていたことにより発生していた異物の混入を防止するため、ISTEC より技術移管を受け、原料溶液の塗布方式をガイド方式とした。その際、溶液粘度及び濃度を一定に保持することによる、線材長手方向の均一性向上を図るため、溶液溜めを水冷して温度制御を行い、液温を一定に保つ機構を追加した。

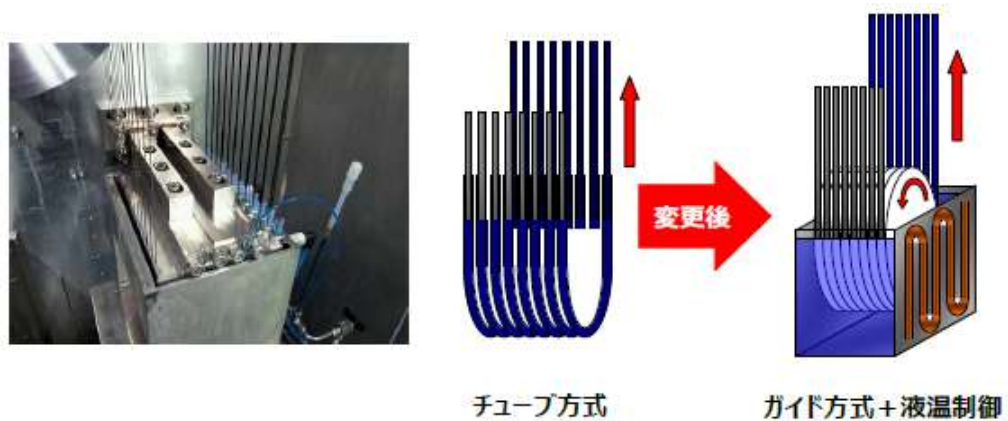


図 2.2.5-23 原料溶液塗布方式改善の概略

本改善後に作製した線材の I_c 値分布を図 2.2.5-24 示す。本改善により、図 2.2.5-22 に存在していた数ヶ所の低下が無くなり、均一性の高い (I_c 値バラツキ $\pm 15\%$ 以内) 線材を得ることが可能となった。

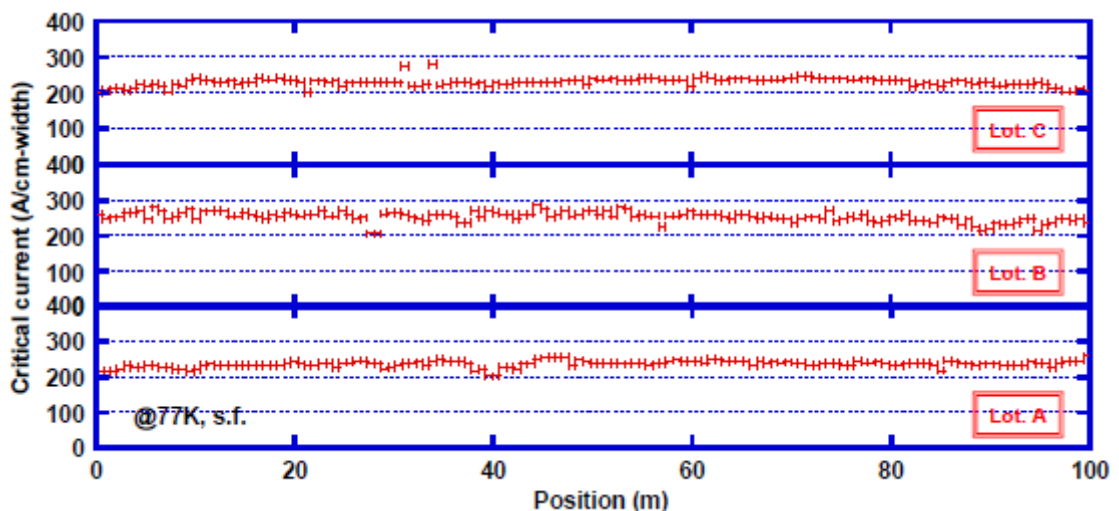


図 2.2.5-24 仮焼工程改善後の 100 m 長 Y 系超電導線材の I_c 分布

(4) 長尺Y系超電導線材の安定製造の検討

高電圧用ケーブルに使用する超電導線材は、将来の低コスト化が見込まれるTFA-MOD法にバッチ式本焼プロセスを適用した作製方法で製造した。このY系超電導線材は、超電導線材の性能を表す臨界電流値と線材長さの積（以下 $I_c \times L$ ）で当時世界第3位の155,000 Amの特性を示した実績がある。平成20年度～22年度にプロジェクト内で予定するIBAD-MOD超電導線材の供給計画は表2.2.5-6のとおりである。

表2.2.5-6 平成20年度～23年度の超電導線材供給計画

	試験項目	線材仕様		
		I_{cAv} (A)	単長(m)	総長(m)
平成20 年度	新しいレーザ加工の評価1	>75	10	100
	新しいレーザ加工の評価2	>75	10	100
	試験用線材（早大）	>75	4	4
	試験用線材（早大）	>75	4	4
	導体の作製(電圧用)	>75	30	150
	導体の作新製(電圧用)	>75	30	450
	導体の作製(交流損失評価用)	>75	60	600
	導体の作製(電流通電用)	>75	60	600
	導体の作製(長尺用)	>75	100	1,000
平成21 年度	低交流損失導体の作製・評価1	>100	>10	600
	低交流損失導体の作製・評価2	>100	>10	600
	低交流損失導体の作製・評価3	>100	>10	600
	機械特性評価	>100	>10	1,000
	中間接続評価1	>100	>10	300
	中間接続評価2	>100	>10	300
	過電流試験評価	>100	>10	600
平成22 年度	30 m 導体作製検証	>100	>33/66	3,000
	30 m シールド作製	>100	66	3,000
平成23 年度	ケーブルシステム検証用	>100	66	6,000

表2.2.5-7 平成20年度～23年度の超電導線材供給実績

	試験項目	提供実績		
		$I_{cAv}(A)$	提供線材の長さ	総長(m)
平成 20 年度	新しいレーザ加工の評価 1	>103	80 m+20 m	100
	新しいレーザ加工の評価 2	>100	30 m×2 本+75m	135
	試験用線材 (早大)	>104	4	4
	試験用線材 (早大)	>104	4	4
	導体の作製(電圧用)	>139	30 m×3 本他	150
	導体の作製(電圧用)	>109	110 m×1 本他	472
	導体の作製(交流損失評価用)	>117	123×2 本 134×2 本他	636
	導体の作製(電流通電用)	>117	133 m×2 本他	635
	導体の作製(長尺用)	>120	123 m×3 本、124 m×1 本他	1,056
平成 21 年度	低交流損失導体の作製・評価 1	>117	100.8 m×1 本他	615
	低交流損失導体の作製・評価 2	>123	78.4 m×1 本、 67.2 m×1 本他	672
	低交流損失導体の作製・評価 3	>105	44.8 m×4 本他	610
	機械特性評価	>103	89 m×2 本他	1,153
	中間接続評価 1	>110	100.8 m×1 本他	347
	中間接続評価 2	>100	67.2 m×1 本他	312
	過電流試験評価	>109	78.4 m×2 本他	660
平成 22 年度	30 m 導体作製検証及び ケーブルシステム検証用	>100A	—	6,180
平成 23 年度	ケーブルシステム検証用 短尺導体評価用	>100A	—	2,600 600

表 2.2.5-7 は供給実績である。5 mm 幅線材を用いて総長で平成 20 年度 3,192 m、平成 21 年度 4,369 m、平成 22 年度 6,180 m 高電圧ケーブルプロジェクトへ提供した。また、平成 23 年度には、ケーブルシステム検証用として 2600m、短尺導体評価用として 600m を提供した。ただし、東日本大震災及び夏季節電対策の影響によるケーブル用線材製造の遅延抑制のために、ISTEC が IBAD 上への CeO₂ 成膜及び超電導線材の供給を一部担当した。

(5) 結果

平成 20 年度より高電圧超電導ケーブル対応線材安定製造技術開発プロジェクトに対し 5 mm 幅の超電導線材 16,341 m を供給した。これまでに製造したケーブル用の線材に関し、単長を 30 m とした場合の歩留り計算の結果を表 2.2.5-8 に示す。

表 2.2.5-8 製造線材の歩留り

	H20 年度	H21 年度	H22 年度	H23 年度	
製造量(m)	3,570	6,887	8,542	5,950	
有効長(m)	3,192	4,369	6,180	3,885	2,600
歩留り (%)	—	63.4	72.3	65.3	43.7
単長 (m)	—	30			50

* 平成 20 年度は多種試験用のため、歩留りは対象外とする。

歩留りについて、平成 20～22 年度において、試作用ケーブルの長さが 30 m であることから、単長を 30 m として整理し、平成 23 年度については、ケーブルシステム検証に必要な条長が 50 m であったため、単長を 50 m とした。また、H23 年度については、ISTEC からの提供分も含んでいる。平成 20～22 年度においては、IBAD-GZO を中間層とした基板を用いており、仮焼工程を改善した平成 22 年度では、歩留りの向上が認められ、3 年間における歩留りは 72%であった。平成 23 年度においては、ISTEC とともに IBAD-MgO 中間層基板を用いた単長 50m 以上の超電導線材を計画通り提供した。

以上の通り、高電圧ケーブルプロジェクトへの供給の目標を達成した。

(6) 成果のまとめ

- ・仮焼膜を塗布する工程における線材の引き上げ速度を変えた試料で仮焼膜の膜厚分布を調査した結果、線材の両端部の膜厚が厚くなる傾向が認められた。線材の引き上げ速度を 5 m/h に設定すると幅方向の膜厚分布は±4.8 %となり、目標を達成することが分かった。
- ・長手方向の特性分布の均一性向上については、本プロジェクトにおいて適用した高周波スパッタ法による CeO₂ 中間層成膜の結果が鍵となっており、その結果、100 m 級で全長にわたり亘り均一な結晶粒二軸配向膜が得られ、1 cm 幅換算で 300 A/cm·w(@77 K,s.f.)の通電特性が得られることを確認した。加えて、長手方向への特性分布の均一性向上として、超電導層の成膜工程の改善も含まれており、原料溶液塗布方法及び仮焼プロセスにも起因することも確認した。
- ・高電圧超電導ケーブルに使用する Y 系超電導線材提供については、線材供給

総長 6.5 km（平成 20～22 年度）の計画に対し、6 km(10 mm 幅換算)を供給し、歩留り 72%を達成した。さらに平成 23 年度においては、単長 50m 以上のケーブルシステム検証用線材を 1.3 km、短尺導体評価用を 0.3 km 程(10 mm 幅換算)を提供し、目標を達成した。

(7) 実用化の見通し

超電導ケーブルシステムの実用化に向けコスト低減のため、さらなる長尺化、高 I_c 化、歩留り向上について開発を進めていく必要がある一方、線材自体の低コスト化、細線化に対する耐加工性の向上についても開発を進めていく必要があると考えられる。今後については、現状、線材コスト低減に最も必要な歩留り向上について、検討を継続し、本プロジェクトで得られた技術を 100%活用できるようにしていきたい。

2.2.5-4 微細構造解析 (JFCC)

(1) 実施目的

超電導電力ケーブル研究開発のケーブルシステム検証に必要な Y 系超電導線材について、透過型電子顕微鏡(TEM)等を用いて詳細にその微細構造解析を行う。これらの結果を線材製造プロセスにフィードバックし、超電導電力ケーブル対応 Y 系超電導線材の安定製造技術開発支援を行う。

(2) 実施内容

超電導ケーブル対応線材安定製造技術開発における、安定化銅成膜プロセス開発を支援するため、有機酸塩熱分解(MOD)法により作製された Y 系超電導線材(5 mm 幅に分割切断)に銅めっきを施したサンプルの断面を、走査型電子顕微鏡(SEM)観察及び TEM 観察を行った。観察を行った領域は、磁気光学(MO)法により超電導特性が健全と判断された領域と、めっき銅の上にハンダ付けし、超電導特性が劣化していると判断された領域である。サンプルはハステロイ™基板上に $\text{CeO}_2/\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ (GZO)中間層を形成し、MOD 法により $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (YBCO)層を成膜し、スパッタリング法により安定化 Ag 層を形成した後、銅めっきを施したものである。このように作製された線材の断面観察試料調製は集束イオンビーム(FIB)法を用いた。図 2.2.5-25(a)に健全と判断された領域の Cu/Ag/YBCO/ CeO_2 /GZO/ハステロイ™の断面 SEM 像、(b)に劣化と判断された領域の断面 SEM 像を示す。両方の部位で Cu めっき層と Ag 層は密着していることがわかる。MO により健全と判断された領域の YBCO 層内部にいくつか空隙が観察されるものの、YBCO/ CeO_2 /GZO の積層構造は保たれている。これに対し、ハンダ付け後に劣化と判断された領域では Ag 層と超電導層の間に大きな隙間が形成され、Ag 層直下に層状のコントラストが観察でき、本来 YBCO 層が存在した領域上に球状の物質が形成されている。

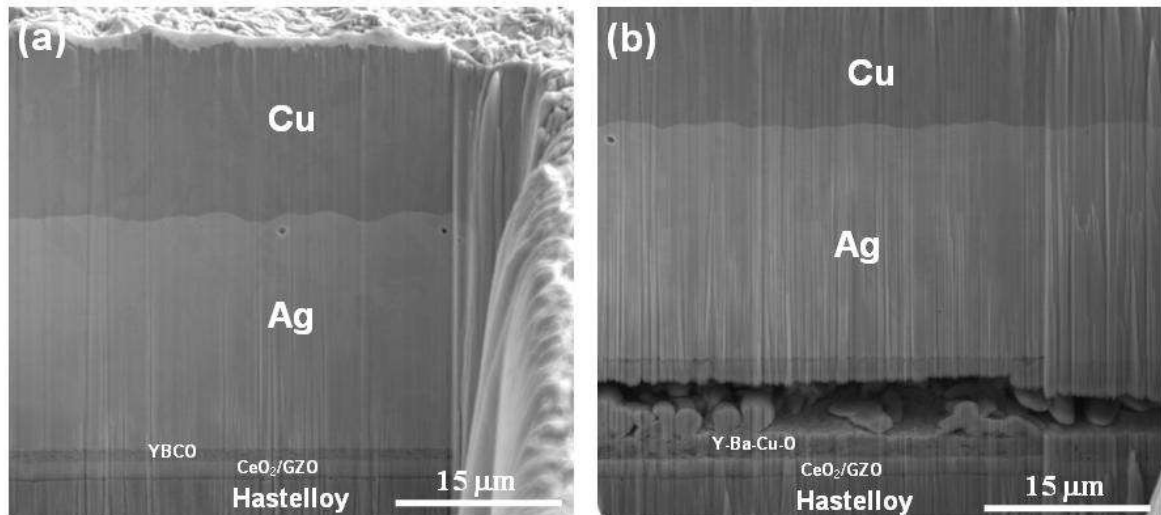


図 2.2.5-25 (a)MO により健全と判断された領域の Cu/Ag/YBCO/CeO₂/GZO /ハステロイ™の断面 SEM 像
 (b)MO により劣化と判断された領域の断面 SEM 像

さらに、図 2.2.5-26(a)~(j)に劣化と判断された領域の Ag、Y、Ba、Cu、Ce、Gd、Zr、Cr、Ni、O の EDS 元素マッピング結果及び(k)にマッピング領域の SEM 断面像を示す。Ag 層直下及び、本来超電導層であったところの上部に、基板材料のハステロイ™成分である(i)Ni、(h)Cr、(j)Mo が強いコントラストで現れており、何らかの熱によりハステロイ™成分が安定化 Ag 層と超電導層の間に堆積したと考えられる。このサンプルで、安定化 Ag 層直下の領域を TEM 観察した。図 2.2.5-27 に安定化 Ag 層直下の断面 TEM 像を示す。Ag 層直下には積層構造が観察される。その積層構造から得られた電子回折図形及び回折リングの指数を図 2.2.5-28 に示す。積層構造は主に、Ag、Ni を含むハステロイ™成分から構成されていることが判明した。

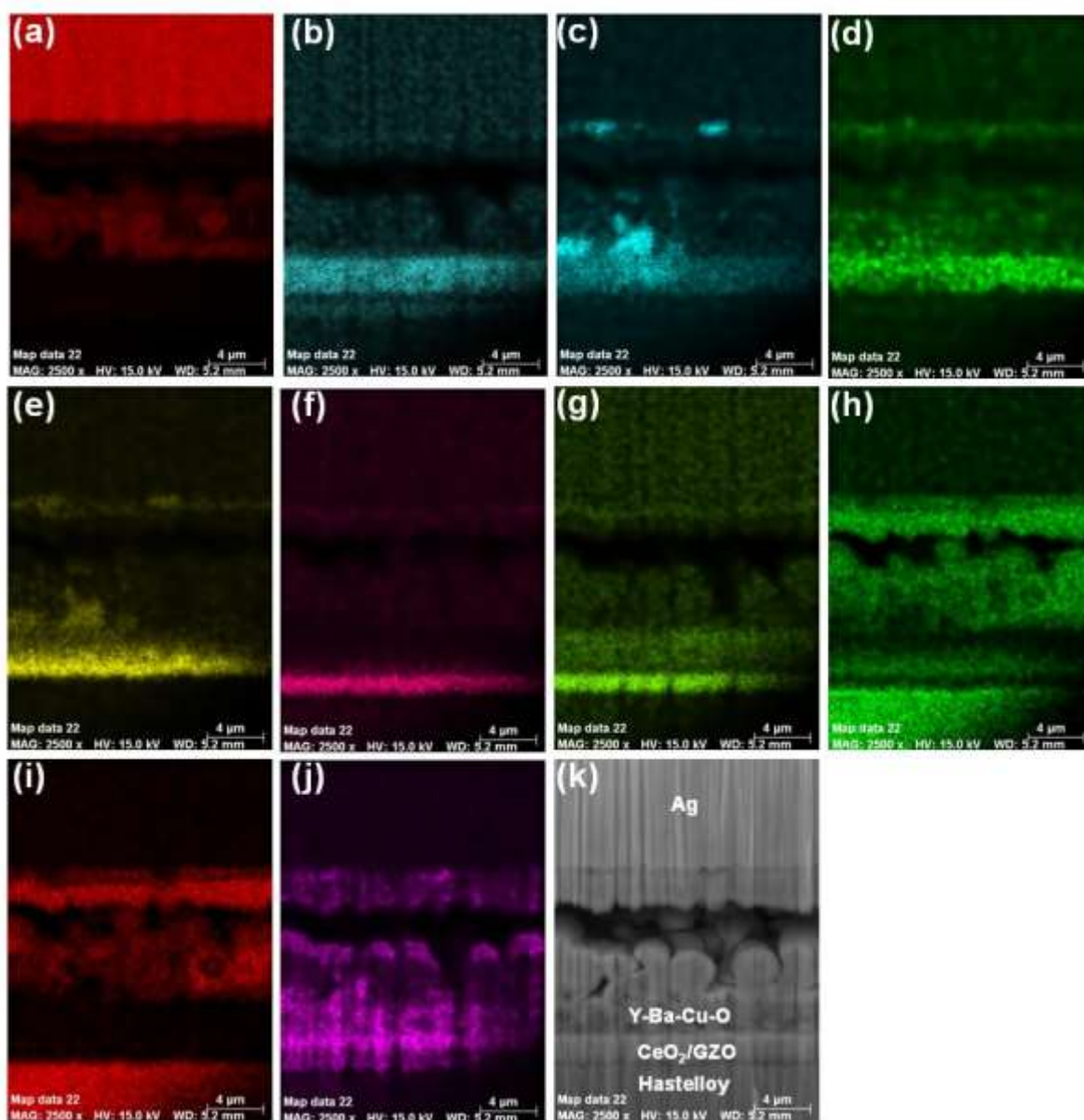


図 2.2.5-26 MOにより劣化と判断された領域の EDS 元素マッピング結果
 (a)Ag、(b) Y、(c) Ba、(d) Cu、(e) Ce、(f) Gd、(g) Zr、(h) Cr、(i) Ni、
 (j) O 及び、(k) マッピング領域の SEM 断面像

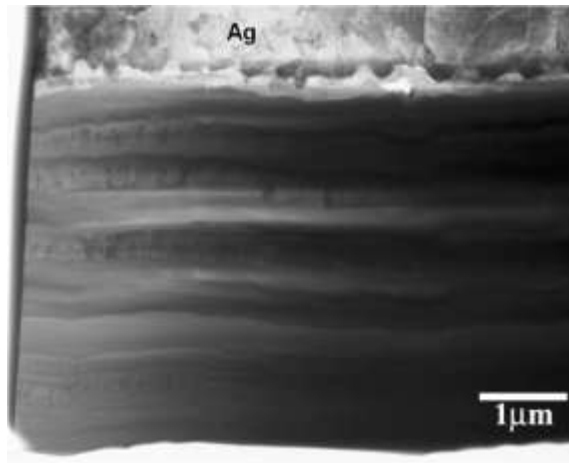


図 2.2.5-27 MOにより劣化と判断された領域の安定化 Ag 層直下の断面 TEM 像

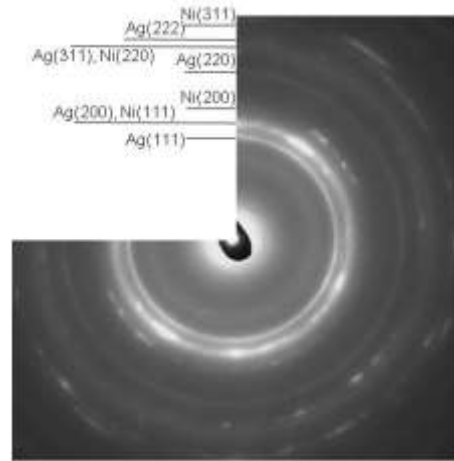


図 2.2.5-28 図 2.2.3-23 で示した積層構造から得られた電子回折図形および回折リングの指数

次に、超電導ケーブル用に線材を分割するプロセス開発を支援するため、種々の線材切断手法とめっき手順を変えたサンプル切断面を SEM 観察した。観察したサンプルは、①スリッタ切断後、銅めっきしたサンプル、②銅めっき後にレーザ切断を行い、その後、再び銅めっきしたサンプル、③銅めっき後にレーザ切断したサンプル 3 つである。図 2.2.5-29(a)~(c)に①~③の切断面の断面 SEM 像を示し、(a')~(c')に拡大 SEM 像を示す。①のサンプルでは超電導層及び中間層 (CeO₂/GZO) に亀裂 (図 2.2.5-29(a')に矢印で示す) が入っている。③のサンプルでは、切断加工面からおよそ 50 μm 内側に超電導層/中間層界面に亀裂 (図 2.2.5-29(c)及び(c')に矢印で示す) が入っている。②のサンプルでは切断加工面からおよそ 10 μm 程度まで超電導層に空隙が観察されるのみである。以上のような SEM 観察から、分割加工後の線材組織を詳細に解析することができ、これらの結果と分割後の I_c 値の変化を比較することにより、超電導電力ケーブル対応線材安定製造のための切断プロセス開発、めっきプロセス開発を支援した。

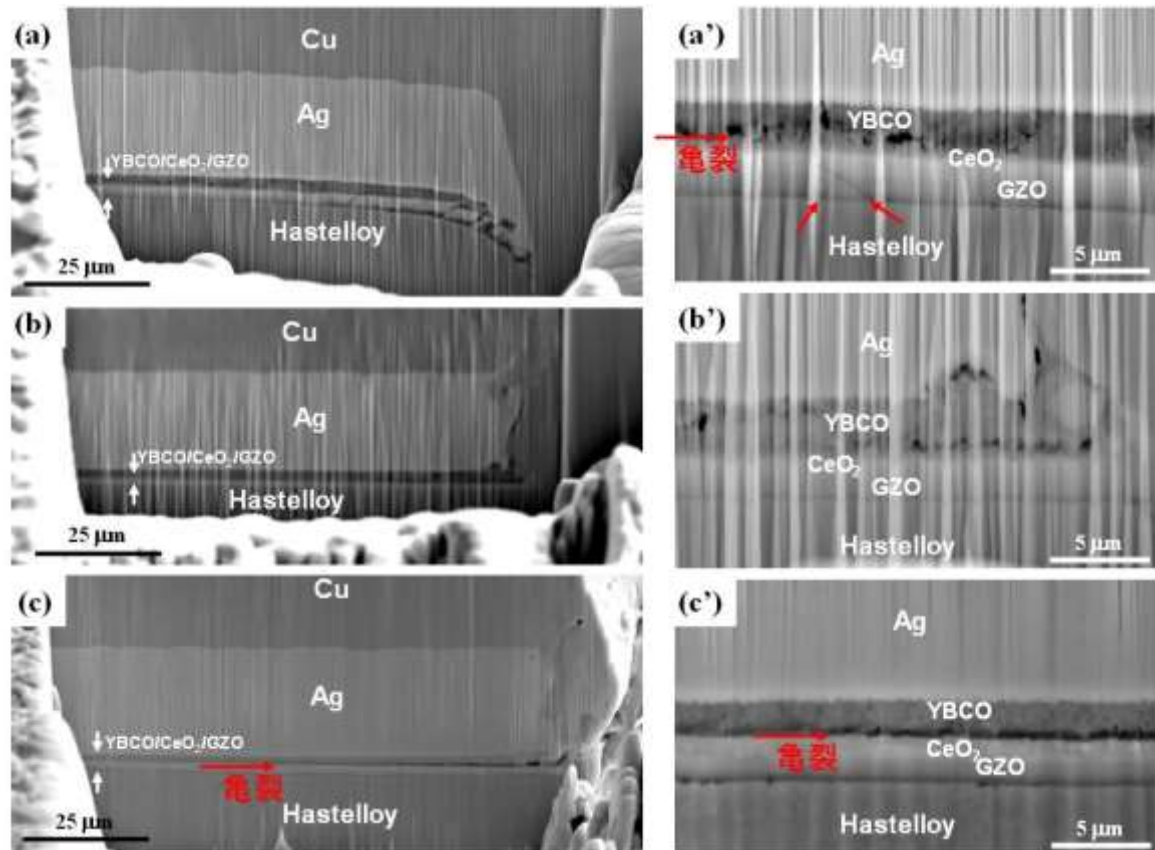


図 2.2.5-29 分割加工及び銅めっきを施した線材切断面の断面 SEM 像
 (a)スリッタ切断後、銅めっきしたサンプル
 (b)銅めっき後にレーザ切断を行い、再度銅めっきしたサンプル
 (c)銅めっき後にレーザ切断したサンプル
 (a')~(c')は(a)~(c)の拡大 SEM 像

(3) 成果のまとめ

銅めっき後のサンプルを SEM 断面観察したところ、Cu/Ag は非常によい密着を示しており、超電導特性が健全な領域で YBCO/CeO₂/GZO の積層構造は保たれていた。銅めっきを行い、銅上にハンダ付けを施した後、超電導特性が劣化していた領域を調査したところ、基板材料の HastelloyTM 成分が安定化 Ag 層と超電導層の間に堆積していることが判明した。また、超電導ケーブル用に線材を分割するプロセス開発を支援するため、種々の線材切断手法とめっき手順を変えたサンプル切断面を SEM 観察し、それぞれのプロセスにおける切断面近傍の超電導層及び中間層の組織変化を示すことができた。また、これらの組織観察と分割後の線材の I_c 値の変化を比較することにより、超電導電力ケーブル対応線材安定製造のための切断プロセス開発、めっきプロセス開発を支援した。

2.2.5-5 IBAD-PLD 線材の安定製造技術開発 (ISTEC)

(1) 開発目的

200 A/cm-w(@77 K,s.f.)級 IBAD/PLD 線材による電力ケーブルシステム成立性を確認するため、Y 系超電導線材の安定製造技術開発を行い、IBAD-MgO/PLD-GdBCO 線材による超電導導体を作製・評価する。平成 23、24 年度は極低交流損失ケーブル導体評価用に 300A/cm-w(@77 K,s.f.)級の超電導線材を作製・提供する。

(2) 200 A/cm-w 級 IBAD/PLD 線材

超電導線材の作製工程は、ハステロイ™ 基板を機械研磨にて表面平滑性を向上させ、1 cm-w に加工する。この基板の上に Ion Beam Sputtering-Gd₂Zr₂O₇/IBAD-MgO/RF Sputtering-LaMnO₃/PLD-CeO₂ の各層を蒸着する。この上に PLD 法にて GdBCO 超電導層、DC スパッタ法にて Ag 安定化層を形成する。作製した超電導線材の特性結果を図 2.2.5-30、31、32 に示す。図 2.2.5-30 はホール素子式長尺線材 I_c 評価装置 (連続ホール素子法) による測定結果であり、80 m-300 A/cm-w(@77 K,s.f.)、90 m-200 A/cm-w(@77 K,s.f.)の特性を有していることが分かる。また図 2.2.5-31 は超電導線材を 60 cm 間隔で I - V 特性 (閾値 1 μ V/cm) を評価し、 I_c 特性と線材長の関係を示したものであり、この結果からも 80 m-300 A/cm-w(@77 K,s.f.)、90 m-200 A/cm-w(@77 K,s.f.)の特性を有していることが分かり、図 2.2.5-30 と図 2.2.5-31 の結果が一致している。次に、図 2.2.5-32 は作製した線材をレーザーで 1 mm-w に 10 分割し、 I - V 特性 (閾値 1 μ V/cm) を測定し、幅方向における均一性を評価した結果である。レーザーによる損失は、加工前 ($I_c = 346$ A/cm-w(@77 K,s.f.)) と加工後 ($I_c = 315$ A/cm-w(@77 K,s.f.)) から約 9%、1 回の加工による損失は約 1%であり、幅方向の線材特性は、両端 1 mm-w に線材特性の低値が確認された。

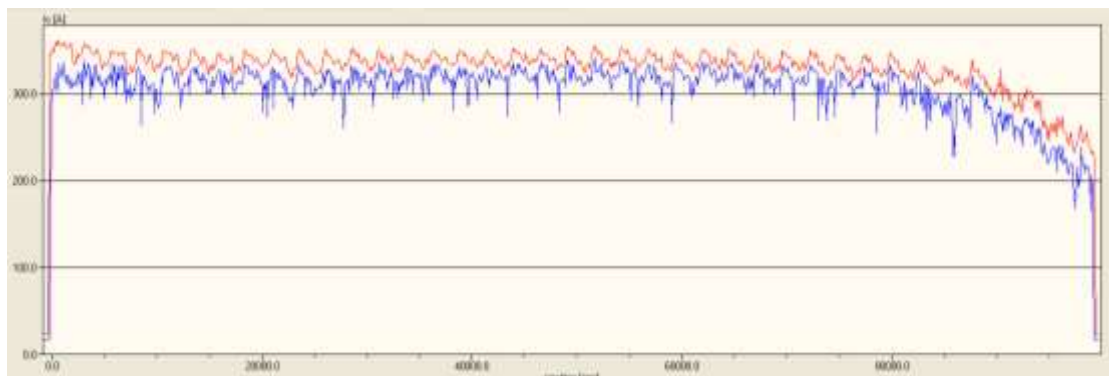


図 2.2.5-30 100 m 級 GdBCO 超電導線材の I_c 値の連続ホール素子法による測定結果

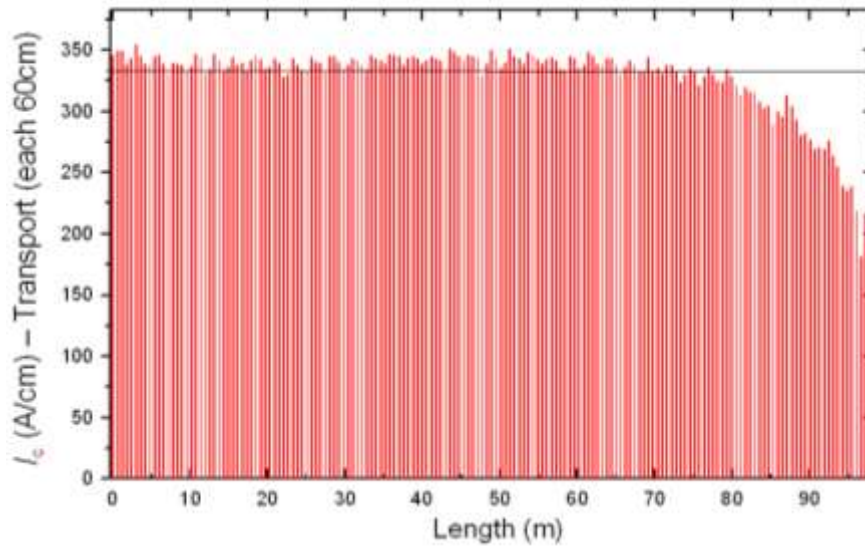


図 2.2.5-31 100 m 級 GdBCO 超電導線材の I_c 特性

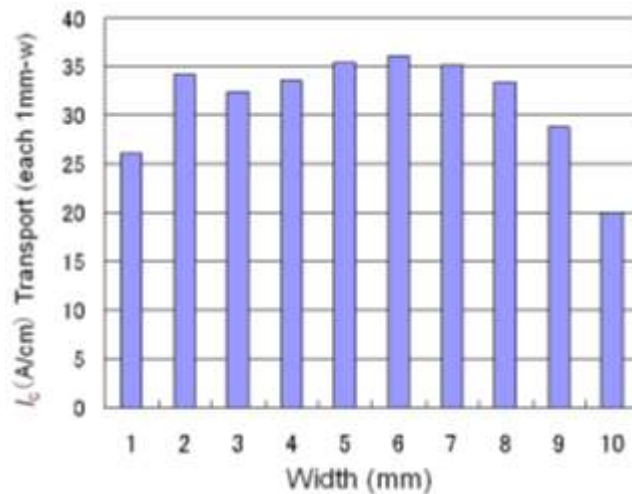


図 2.2.5-32 10 分割 1 mm-w の I_c 特性

(3) 1 m 級導体

2.2.5-5 (2)項で示した超電導線材を用いて、導体を作製した。 I_c 特性が低い両端 1 mm をレーザーで切断し、2 mm-w の線材 4 本を作製した後、電解めっきによる銅安定化層を形成した。2 mm-w の超電導線材を 50 cm の電圧端子間隔で I - V 特性（閾値 $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ ）の評価を行った。 I_c 特性と線材長の間を図 2.2.5-33 に示す。線材の一部に劣化が確認されるものの、概ね $40 \text{ A}/2 \text{ mm-w} (@77 \text{ K,s.f.})$ の I_c 特性を示している。これらの線材を用いて 2 層導体を作製した。表 2.2.5-9 に 2 層導体の仕様、図 2.2.5-43 に作製した導体、図 2.2.5-35、36 に導体の特性を示す。作製した 2 層導体は $2,750 \text{ A} (@77 \text{ K,s.f.})$ の特性を有し、交流損失 $0.0258 \text{ W/m}@1 \text{ kA}_{\text{rms}}$ （負荷率 0.51）を示した。

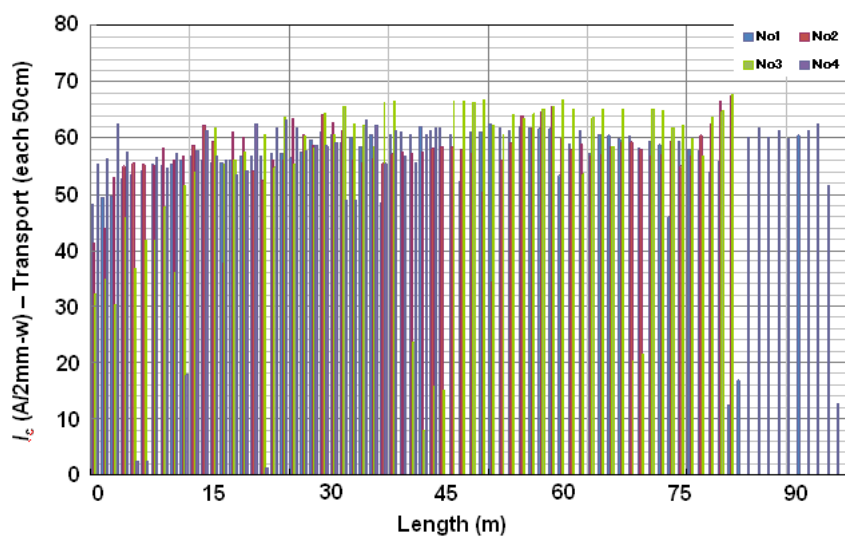


図 2.2.5-33 100 m 級 2 mm-w 線材の I_c 特性

表 2.2.5-9 2 層導体の仕様

項目	内径 (1 層目)	導体層数	線材幅	線材本数 (内層/外層)	$I_c@77\text{ K}$
2 層導体	18.0 mm	20	2 mm	25/25	2750 A



図 2.2.5-34 作製した 2 層導体

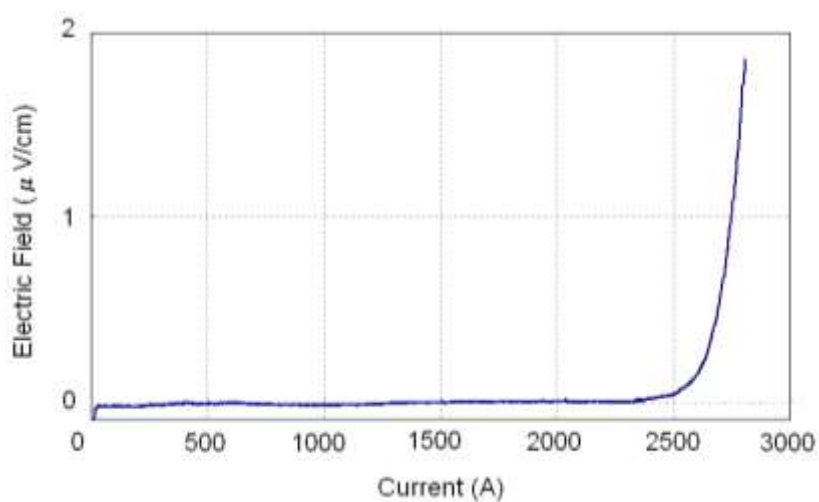


図 2.2.5-35 2 層導体の I - V 特性

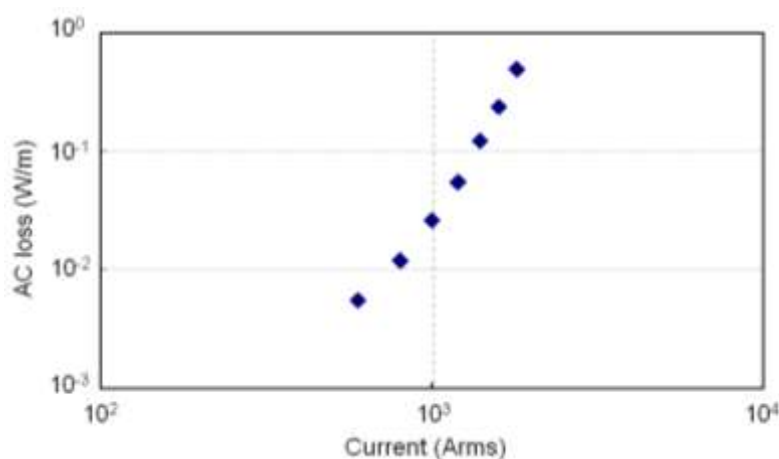


図 2.2.5-36 2層導体の交流損失

(4) 300 A/cm-w 級 IBAD/PLD 線材

平成 23 年度以降に極低交流損失のケーブル導体評価用として作製した IBAD/PLD 線材の特性結果を図 2.2.5-37 に示す。図 2.2.5-37 は超電導線材を 60 cm の電圧端子間隔で I - V 特性 (閾値 $1 \mu\text{V}/\text{cm}$) を評価したものであり、この結果より 35 m-600 A/cm-w(@77 K,s.f.)、50m-550A/cm-w(@77 K,s.f.)の特性を有していることが分かる。作製したこれらの線材をレーザーで 2 mm-w に分割したが、切断前の I_c 値 600 A/cm-w に対し 2 mm 幅切断後の I_c 値は約 115 A/2mm-w(@77 K,s.f.)と、レーザーによる I_c 値の損失は約 5%であった。この超電導線材を用いて導体作製し、III.2.2.1 で示した通り $0.6\text{W}/\text{m}@5\text{kA}_{\text{rms}}$ の低交流損失を確認した。

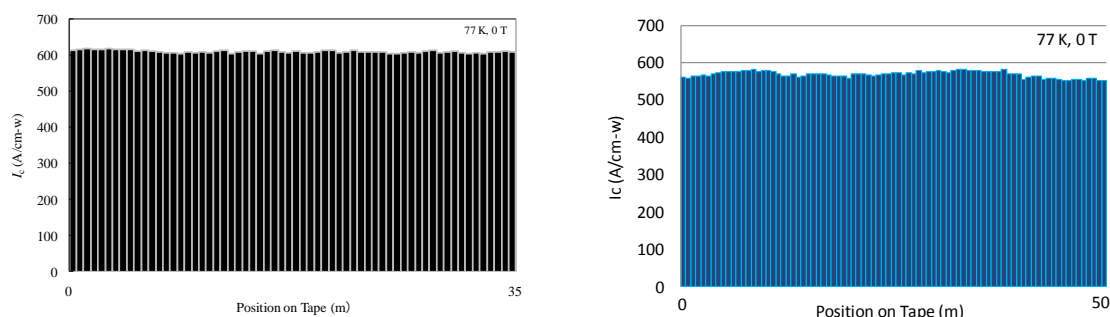


図 2.2.5-37 35 m 級及び 50m 級 GdBCO 超電導線材の I_c 特性

(5) まとめ

- ・ IBAD-MgO/PLD-GdBCO 線材を作製し、90 m-200 A/cm-w(@77 K,s.f.)の特性を持った線材開発を行った。
- ・ 超電導ケーブルの要素技術である細線化加工技術を用いて線材加工し、40 A/2 mm-w(@77 K,s.f.)線材を作製した。
- ・ 上記加工線材 2 mm 幅 50 本を用いて 2 層構造を持った超電導導体を作製し、

$I_c=2750$ A(@77 K,s.f.)の特性を得た。

- 導体の交流損失として、 0.0258 W/m@1 kA_{rms} (負荷率 0.51) を得た。
- 平成 23、24 年度は極低交流損失ケーブル導体評価用に 500 A/cm 幅級の超電導線材を作製・提供した。作製したケーブル導体にて、Ⅲ.2.2.1 に記載の通り 0.6 W/m@5kA_{rms} の低交流損失を確認した。

2.2.5-6 線材の評価技術の開発 (ISTEC)

(1) 実施目的

Y系超電導線材を用いた電力ケーブルが所用の性能を達成するためには、線材の安定的な製造技術の確立とともに、線材の性能を的確に把握する評価技術が重要である。テープ状の超電導線材を電力ケーブルへ組み込む前段階において、超電導線材の臨界電流性能、幅方向の電流均一性評価、機械的欠陥評価、欠陥除去等の評価技術を開発する必要がある。また、こうした評価技術は、産業用としての見通しを得るために、効率的かつ効果的に行われる必要がある。こうした線材の評価技術の開発を行う。

超電導線材を連続ホール素子法、長尺線材 I_c 評価装置等の装置での評価を行い、評価パラメータによる効率的、効果的な評価について検証を行う。平成 23 年度は開発された評価技術を用いて、主にケーブルシステム検証に使用される線材に対して各種評価を行い、それらの効率・効果を検証する。

(2) 超電導線材評価装置

「超電導応用基盤技術研究開発(第 II 期)」プロジェクトで開発された超電導線材評価装置を用いて線材評価を行い、評価パラメータによる効率的、効果的な評価について検証を行った。評価装置を下記に示し、特長を記す。

- (i)連続抵抗法 I_c 測定装置 (Reel to Reel- $I-V$ 特性：直接通電法)
- (ii)連続ホール素子法
- (iii)MOI 線材評価装置 (磁気光学法)
- (iv)SQUID 評価装置 (超電導量子干渉素子法)
- (v)連続線材 X 線評価装置 (X 解回折)

(i) 連続長尺 I_c 評価測定装置 (Reel to Reel- $I-V$ 特性：直接通電法)

直接的に長尺線材の I_c 値を 4 端子法を用いて測定する。通常の 4 端子法では、ハンダ付け等で 4 端子を接続し、通電によって発生する電圧を測定した。しかし、この方法では、長尺線材を測定するのに時間を要するとともに非破壊検査ではない。そこで、端子を線材に押し付けることによって測定を行い、評価速度を上げた。線材は 1 cm 幅 500 m 長まで連続して測定することができ、1 回の測定長は、10 cm ~ 1 m まで可変することができる。線材評価速度は、10 m/h ~ 50 m/h である。評価装置図を図 2.2.5-38 に示す。この装置を用いて 100 m 級線材を単長 60 cm ほどの電圧端子間距離で測定した結果を図 2.2.5-39 に示す。評価時に測定温度は液体窒素 77 K に浸漬して行った。

Y系超電導線材の機器応用には、磁場中での臨界電流特性 I_c 値も重要な特性である。超電導ケーブルでは磁場中の影響は小さいが、変圧器 0.02 [T]、SMES 11 [T]

程度の磁場中の I_c 特性を知る必要がある。本装置は、77 K で 0.1~0.5 [T] まで磁場を線材に対して垂直に発生させることができ、Y 系超電導線材の磁場中の I_c 特性を評価することができる。図 2.2.5-40 に 30 m 長の磁場中における I_c 特性測定結果を示す。磁場を 0, 0.1, 0.3, 0.5 [T] まで変化させ、単長 60 cm ごとの電圧端子間距離で測定した結果であり、超電導線材の磁場中の I_c 特性が評価できた。



図 2.2.5-38 連続抵抗法 I_c 値測定装置

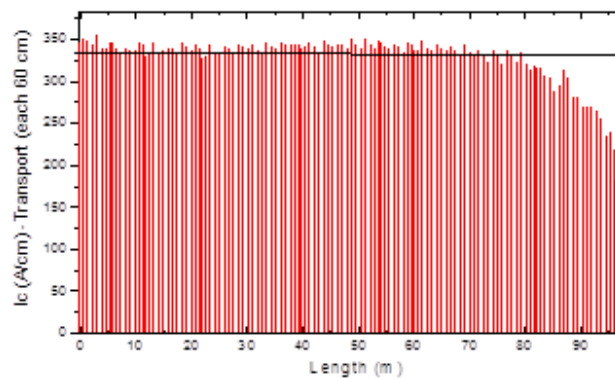


図 2.2.5-39 100 m 長線材の連続抵抗法 I_c 値測定装置による評価結果

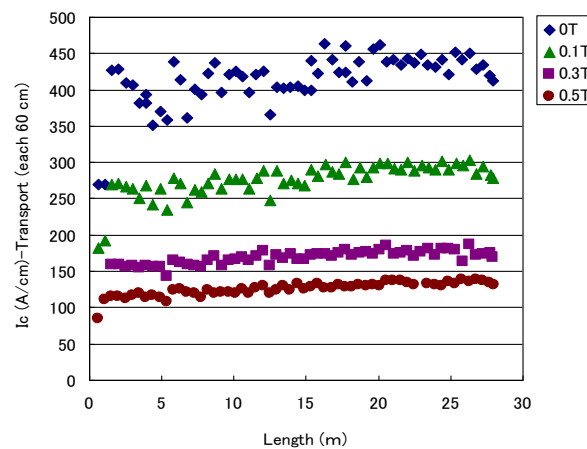


図 2.2.5-40 連続抵抗法 I_c 値測定装置による 30 m 長線材の垂直磁場中 (0~0.5 [T]) の I_c 特性評価結果

(ii) Reel to Reel-連続ホール素子法による線材特性評価

Reel to Reel-連続ホール素子法は対象物（超電導線材）に外部磁場を印加させ超電導線材中に超電導電流を誘起し、誘起された電流の作る磁場の大きさと分布をホール素子アレーで観測する方法である。電流を導入する方法を必要としないため、電極の必要がなく試料の損傷が殆どないことが特徴である。試料を一定の速度で搬送しながら測定でき、長尺線材を比較的短時間に連続的に測定ができる。測定可能線材長は1 km、測定速度は270 m/h、サブクール液体窒素を使用して66K、外部磁場は3 Tまで可能であり、低磁場では、ホール素子法が、高磁場では誘導法による測定となる。図 2.2.5-41 に Reel to Reel-連続ホール素子法装置の概略図を示す。図 2.2.5-42 に温度依存性と磁場依存性の測定結果を示す。温度依存性は、77.6 K～66.8 K まで液体窒素をサブクール状態まで冷却し、Y 系超電導線材の温度依存性を Reel to Reel で評価し、磁場依存性は、0～0.16 T まで磁場を変化させ線材の磁場依存性を Reel to Reel で評価した。誘導法による評価は、実際の電流を印加する I_c 値測定よりも低い電界領域での測定となる。

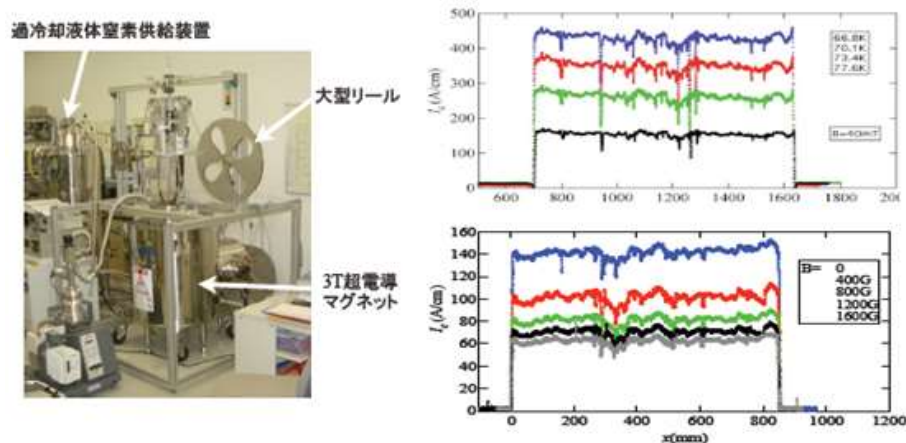


図 2.2.5-41 Reel to Reel-連続ホール素子法装置の概略図

図 2.2.5-42 温度依存性（上）
磁場依存性（下）

(iii) Reel to Reel-MOI 装置による線材特性評価（磁気光学法）

Reel to Reel-MOI 装置の外観を図 2.2.5-43 に示す。測定速度は1.5～2.0 m/h と低いものの、CCD 分解能は1 μm と高いため、欠陥位置の同定や加工線材の評価に用いられる。図 2.2.5-44 に5 mm 幅 MOD 線材の測定結果を示す。白い箇所が線材特性の低い箇所または、特性劣化している箇所を示している。



図 2.2.5-43 Reel to Reel-MOI 装置の外観写真

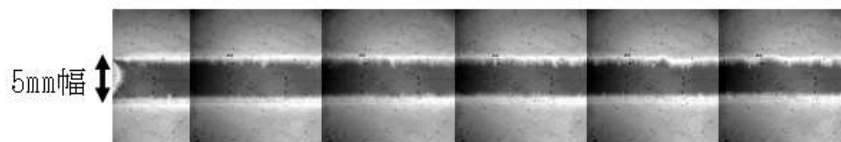


図 2.2.5-44 Reel to Reel-MOI 評価装置による 5 mm 幅線材の評価結果

(iv) Reel to Reel-SQUID を用いた高温超電導線材検査装置

超電導線材の剥離や欠損等を高温超電導-SQUID を用いて検査する。図 2.2.5-45 に装置概略図と装置内部の写真を示す。超電導線材は、Reel to Reel で搬送しながら 2 台の冷凍機に接続された冷却ステージと液体窒素で冷却された補助冷却機構によって熱接触で冷却（伝導冷却）される。誘導コイルにより超電導線材に誘導電流が流れ、超電導層内に欠陥がある場合、この誘導電流は欠陥を迂回して流れる。そのときそこに生じる垂直磁場成分の傾きを SQUID で検出する。また渦電流法非破壊検査装置用高感度センサとして、グラジオメータを用い磁気シールドの無いシステムであり、最大計測速度は 80 m/h、500 m 長の線材を測定できる。図 2.2.5-46 に 5 mm 幅線材を測定した結果を示す。

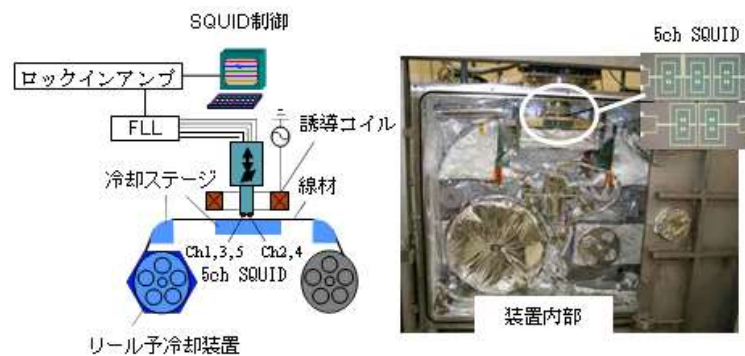


図 2.2.5-45 高温超電導-SQUID を用いた高温超電導線材検査装置

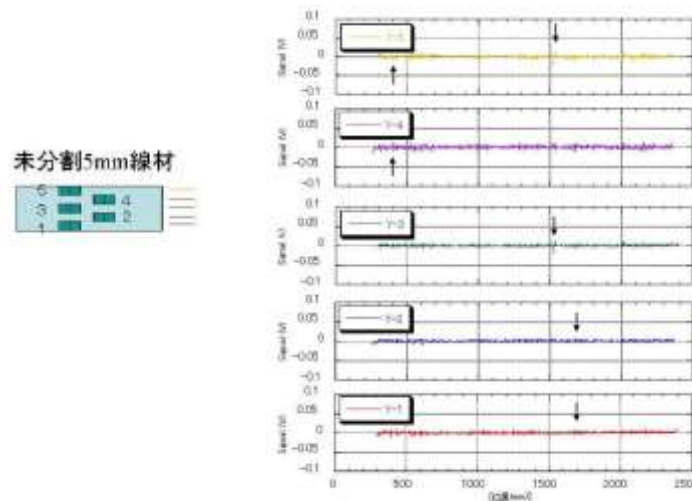


図 2.2.5-46 高温超電導-SQUID による 5 mm 幅線材を測定した結果

(v) Reel to Reel-X 線回折評価装置

線材作製において、基板の上に成膜される多結晶膜の結晶粒面内配向度が優れているものほど、特性が高い。薄膜積層構造である Y 系超電導線材は、各層の結晶粒面内配向度を良くし、超電導層の結晶粒面内配向度の向上をめざし、開発した。その評価として、X 線回折が用いられる。従来の X 線回折では、短尺の線材しか評

価できず、線材一様（長手・幅）の結晶粒面内配向度を評価できなかつた。本装置は一定の間隔で超電導線材の結晶粒面内配向度を評価・確認でき、線材の均一化が図れる。図 2.2.5-47 に装置図を示し、図 2.2.5-48 に 200 m 長線材の中間層 (CeO₂) を 5 m 間隔について、結晶粒面内配向度を評価した結果を示す。この結果から、長手方向に一様な結晶粒面内配向を有していることが分かる。1 箇所測定に有する時間は 2 分、測定間隔は 10 cm～数 m、線材搬送速度は 0.5 m/sec、自動で測定することが可能である。

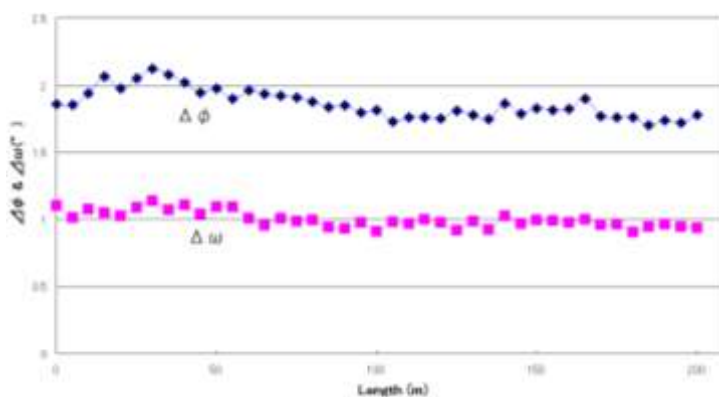


図 2.2.5-47 Reel to Reel-X 線回折装置 図 2.2.5-48 200 m 長の中間層 (CeO₂) の面内結晶粒配向評価結果 (5 m 間隔)

(3) 評価装置の比較

ケーブル用 Y 系超電導線材の特性を評価する装置について、性能を比較した。評価装置の分解能と測定速度の関係について、図 2.2.5-49 に示す。測定速度が遅く、分解能が小さい Reel to Reel-MOI は詳細な観察を行うことに向いている。Reel to Reel-SQUID は、測定速度は速いが分解能が小さく、 I_c 特性を評価することができない。Reel to Reel- $I-V$ 測定装置は、測定速度が速く、直接通電法により $I-V$ 特性を得、 I_c 特性を評価できるが、通電することで線材へダメージを与える可能性がある。Reel to Reel 連続ホール素子法は、非破壊に I_c 特性を見積もることができ、測定速度も速い。また、1 km 長まで連続して評価することができ、分解能が 1 mm 前後のため、異常部位を特定し易く、他の評価装置による 2 次検査に入り易い。このことから、効率よく評価する装置としては、Reel to Reel 連続ホール素子法が有効と思われる。

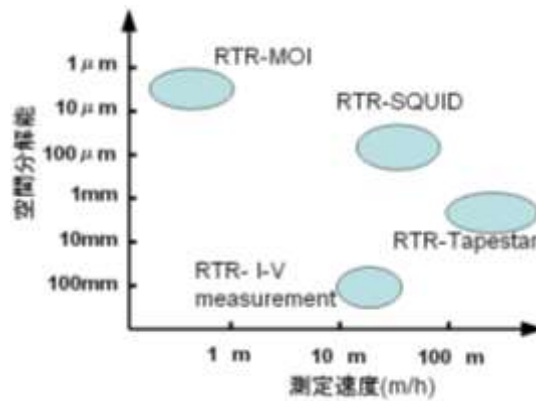


図 2.2.5-49 分解能と測定評価速度の関係

(4) ケーブルシステム検証用線材の評価

平成 23 年度は、これまでに開発された評価技術を用いて主にケーブルシステム検証に使用される線材に対して各種評価を行い、それらの効率・効果を検証した。

作製された線材は図 2.2.5-50,51 のように連続抵抗法 I_c 値測定装置及び連続ホール素子法にて超電導ケーブル用として要求される I_c 値を有しているか評価されるが、超電導ケーブル用線材は交流損失低減のために細線化されるので、高電圧ケーブルシステム検証用の 50 m 級ケーブルを製造するにあたり、細線化された線材の全数・全長を連続抵抗法 I_c 値測定装置で評価するのは困難である。また、線材全長の $I-V$ 特性を一括で測定して I_c を算出する方法では局所的な欠陥の評価はできない。一方、連続ホール素子法は長尺線材の I_c 値評価を簡易的に実施することができ、また長手方向の分解能が高いことから局所欠陥の発見も可能だが、臨界電流の臨界条件 (閾値) を $1 \mu V/cm$ とした厳密な I_c 値は評価することはできず、また、線幅が 5 mm 以下の場合には装置の寸法仕様外のため精度は大きく落ちてしまう。そこで、高電圧ケーブルに使用される 3 mm 幅に細線化された 50 m 以上の線材について、線材全長一括 I_c 値測定と連続ホール素子法を組み合わせた評価を行った。図 2.2.5-52,53 は 72 m の高電圧ケーブル用 3 mm 幅の TFA-MOD 製の線材の全長 I_c 値一括測定の結果及び連続ホール素子法による評価結果を示す。図 2.2.5-52 が示す通り、線材全長一括 I_c 測定では約 100 A/3 mm-w(@77K, s.f.)級の通電特性を確認できたが、図 2.2.5-53 中の①52 m、②57 m 付近に数 mm ほど局所的に I_c 値が低下している箇所が含まれていることが分かった。以上のように、全長 I_c 値一括測定と連続ホール素子法を組み合わせることにより、ケーブル用長尺線材の I_c 値を効率的にかつ効果的に評価できることが分かった。

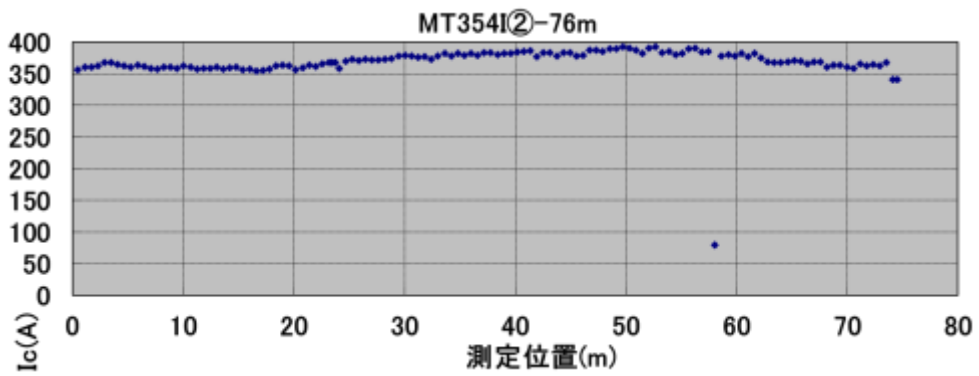


図 2.2.5-50 連続抵抗法 I_c 値測定装置による評価結果（細線化前-10 mm 幅）

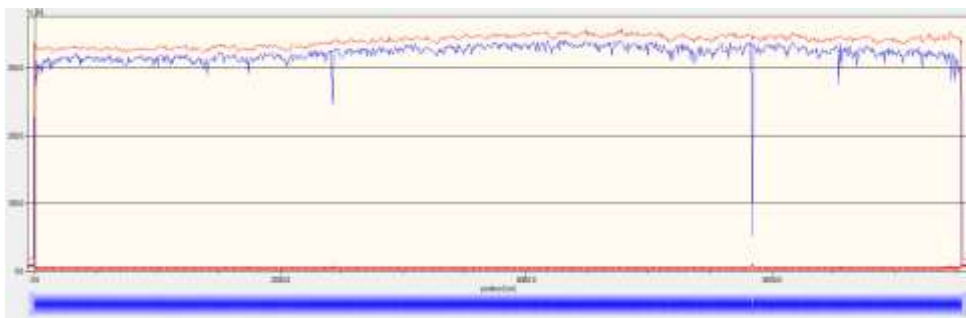


図 2.2.5-51 連続ホール素子法による I_c 値の評価結果（細線化前-10 mm 幅）

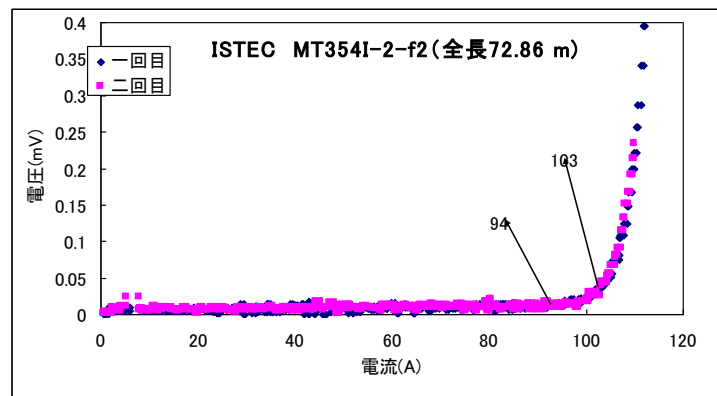


図 2.2.5-52 全長一括 I_c 値評価結果（細線化後-3 mm 幅）

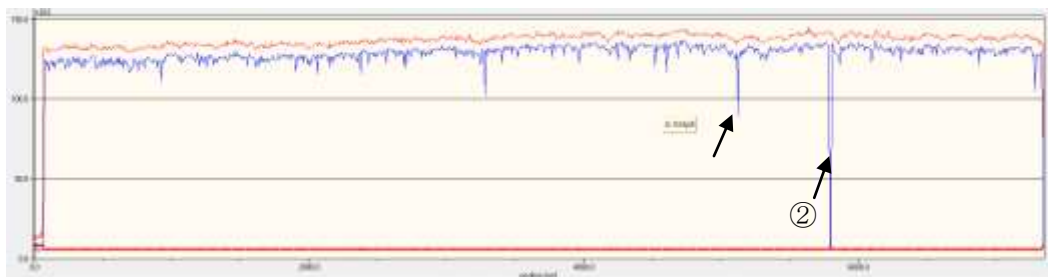


図 2.2.5-53 連続ホール素子法による I_c 値の評価結果（細線化後-3 mm 幅）

(5) まとめ

超電導電力ケーブル用線材評価装置として、本プロジェクトにて使用されている評価装置の性能を確認した。それぞれの特徴を活かした適材適所の評価運用を行うことで、効率的に評価できる。線材特性を効率的・簡易に評価するには、Reel to Reel 連続ホール素子法が優れているが、 I_c 特性は見積もられたものあり、真値が必要な場合には、Reel to Reel- $I-V$ 特性評価装置である。劣化・剥離等を効率的に確認するには、Reel to Reel-SQUID 装置であり、細かく評価するには Reel to Reel-MOI 評価装置である。平成 23 年度は高電圧ケーブルシステム検証に使用される線材に対して、これらの評価技術を組み合わせることで、効率・効果的な評価が可能であることを検証した。

2.2.5-7 成果のまとめ

大電流・低交流損失ケーブルに適用するための低磁性クラッドタイプの結晶粒配向金属基板-PLD 線材作製技術開発を実施し、ケーブル化に必要な性能及び製造速度等を満足する Y 系超電導線材製造の要素技術を確立した。本技術を基にして、中間目標である $J_e = 15 \text{ kA/cm}^2$ (@77 K,s.f.)(2 mm 幅×20 m 以上)の製造技術レベル達成を確認するために、 $J_e = 17 \text{ kA/cm}^2$ (@77 K,s.f.)の特性を有する Y 系超電導線材を作製・実証した。なお、線材提供実績については、平成 20～22 年度において総長 8 km の計画に対し実績は 8.5 km であり中間目標を達成した。また、平成 23～24 年度にはケーブルシステム検証用および短尺評価用のより高 J_e 線材を製造し、 J_e 値が $15 \sim 20 \text{ kA/cm}^2$ (@77 K,s.f.)以上の線材提供量は、総長 2 km の計画に対し実績は 3.4 km であり最終目標を達成した。本ケーブルシステム検証用線材の製造に際しては、大電流ケーブル化技術開発の結果をフィードバックして、加工・検査も含めた工程の検討を行い、ケーブル用線材の製造工程を確立した。なお、東日本大震災等に伴う基板調達遅延の影響を抑制ため、評価及び細線化加工の一部は超電導機器用線材の技術開発を担当する実施者 (ISTEC) にて実施した。

中間層付き基板テープの開発においては、高電圧ケーブル化技術開発用として 5 mm 幅 IBAD-GZO 基板を、計画 20 km に対して約 29 km を製造・提供した。また、平成 23 年度からは高速成膜が可能な IBAD-MgO 層を成膜した中間層基板について、計画 6 km に対し 6.9 km を提供した。なお、平成 23 年度においては、東日本大震災及び夏季節電対策の影響によるケーブル用線材製造の遅延抑制のために、超電導機器用線材の技術開発を担当する実施者 (ISTEC) が IBAD 中間層基板の供給を一部担当した。

高電圧ケーブル化技術開発用として TFA-MOD 法により作製された Y 系超電導線材の提供量については、線材供給総長 6.5 km (平成 20～22 年度) の計

画に対し、6.8 km(10 mm 幅換算)を供給し、歩留り 72%を達成した。さらに平成 23 年度においては、ケーブル用線材製造の遅延抑制のため超電導機器用線材の技術開発を担当する実施者 (ISTEC) とともに計画通り IBAD-MgO 中間層基板を用いた単長 50m 以上のケーブルシステム検証用線材を 1.3 km、短尺導体評価用を 0.3 km 程提供した。また、有機酸塩溶液塗布時の線材引き上げ速度を 5 m/h に設定すると幅方向の膜厚分布は $\pm 4.8\%$ となり、超電導膜厚の分布を $\pm 10\%$ 以内に収める目標を達成した。長手方向の特性分布の向上については、100 m 級で全長に亘り均一な結晶粒二軸配向膜が得られ、1 cm 幅換算で 300 A/cm-w(@77 K,s.f.)の I_c 値の特性が得られることを確認した。

微細構造解析においては、線材の加工技術の影響を評価し、加工工程・技術に貢献した。また、TFA-MOD 法により作製された超電導線材の断面観察を行い、超電導層の微細構造及び中間層の状態を確認及び劣化箇所の組成分析を実施した。

IBAD/PLD 線材の安定製造技術の開発において、平成 20～22 年度では IBAD-MgO/PLD-GdBCO 線材を作製し、90 m \cdot 200 A/cm-w (@77 K,s.f.)の I_c 値特性を持った Y 系超電導線材開発を行ない、超電導ケーブルの要素技術である細線化技術を用いて線材を切断加工し、 I_c 値が 40 A/2 mm-w(@77 K,s.f.)線材を作製した。上記加工線材 2 mm 幅 50 本を用いて 2 層構造を持った超電導導体を作製し、 $I_c=2750$ A (@77 K,s.f.)の特性を得た。また、導体の交流損失として 0.0258 W/m@1 kA_{rms} (負荷率 0.51) を得た。平成 23 年度以降については、極低交流損失ケーブル導体評価用に 500 A/cm 幅級の超電導線材を作製・提供した。作製したケーブル導体にて 0.6 W/m@5kA_{rms} の低交流損失を確認した。

線材評価装置については、本プロジェクトにて使用されている評価装置の性能を確認した。それぞれの特徴を活かした適材適所の評価運用を行うことで、効率的に評価できることを確認した。線材特性を効率的・簡易に評価するには、Reel to Reel 連続ホール素子法が優れているが、 I_c 特性は見積られたものあり、真値が必要な場合には、Reel to Reel- I - V 特性評価装置である。劣化・剥離等を効率的に確認するには、Reel to Reel-SQUID 装置であり、細かく評価するには Reel to Reel-MOI 評価装置である。平成 23 年度は高電圧ケーブルシステム検証に使用される線材に対して、これらの評価技術を組み合わせることで、効率・効果的な評価が可能であることを検証した。

2.2.6 超電導電力ケーブルの熱収支に関する評価研究

2.2.6-1 スラッシュ窒素の研究（前川製作所）

(1) 研究開発目的

平成 20 年の本プロジェクト開始時点では高温超電導ケーブルの冷却システムの冷媒には、超電導性能や絶縁特性等を考慮し、サブクール状態の液体窒素が用いられている。サブクール窒素は、ケーブルを冷却するに従い温度が上昇していくが、固体と液体の二相流であるスラッシュ窒素では固体が存在する限り、その温度は融解温度である 63 K という、サブクール窒素より低温かつ一定に維持される。さらに、冷媒の熱容量が増大するため、超電導ケーブルの温度はサブクール窒素に比べ上昇が抑えられ熱的に安定である。このことはケーブル性能の向上にも寄与できると考えている。

本研究では、高温超電導ケーブルの冷媒として、スラッシュ窒素の冷却特性を評価するため、システムの検討、固相率（流体中の固体の質量割合）制御方法の研究、連続生成方法の研究を実施したので以下に報告する。

(2) システムの検討

スラッシュ窒素流体とは、液体窒素中に微細な固体窒素粒子が分散したスラリー状の固液二相流体であり、サブクール窒素冷却と比較し以下のような長所を有する。

- ・融解潜熱分及び温度低下に伴う顕熱分だけ冷却に利用できる熱容量が液体窒素より大きい。

- ・一成分系での固体窒素融解の効果により、固体が融解するまで一定温度を維持することが可能。

- ・上記 2 点により冷却温度がサブクール窒素冷却と比べ低く保持することが可能。

また、壁面と流体間の熱伝達（冷却）を示す無次元数としてヌッセルト(Nu)数がある。固液二相流体では見かけ粘度が増大するためレイノルズ(Re)数が低下し、その結果、熱伝達が低下すると思われた。しかし、これまでの液体窒素冷却とスラッシュ窒素冷却の管内冷却試験を比較してもヌッセルト数は同等であったり。ヌッセルト数が低下しない原因としては、固体窒素の融解潜熱が寄与しているためと考えられる。これらのことからスラッシュ窒素はサブクール窒素よりも低温かつ冷却性能も優れた特性を有しているといえる。

平成 23、24 年度は、平成 12 年度から実施された Super-Ace 等の研究で得られたスラッシュ窒素の物性値や見かけ粘度、管摩擦係数、及び、後述する固相率制御方法の研究成果を基に、表 2.2.6-1 のように超電導ケーブルを想定し、表 2.2.6-2 の条件でスラッシュ窒素冷却とサブクール窒素冷却の比較を行い、スラッシュ窒素の有用性を明らかとした。図 2.2.6-1 に流量を 30 L/min としたシミュレーション

結果を示す。スラッシュ窒素は固体が存在する限り流体温度は一定を保ち、全長にわたってケーブル温度が低く保たれることが分かる。図 2.2.6-2 にスラッシュ窒素冷却とサブクール窒素冷却のケーブル出口温度を同じとした場合のシミュレーション結果を示す。この場合、スラッシュ窒素の循環流量はサブクール窒素に比べて 20 %程減少でき、ケーブルサイズの小型化が可能であることを見出した。

サブクール窒素冷却における主要な構成機器は、冷凍機、循環ポンプとサブクール窒素を貯留するリザーバタンクである。スラッシュ窒素冷却ではこれらに付加して固体窒素を生成する生成装置、生成装置に付属する冷凍機、一定の固相率でケーブル管内にスラッシュ窒素を供給・評価するための濃度計が必要となる。連続的かつ微細な固体窒素を生成する生成装置と生成した固体窒素の固相率の計測方法については後述のように研究開発を実施してきた。

平成 23、24 年度は、これらの研究結果を基に、表 2.2.6-1 及び表 2.2.6-2 に示す条件を基にスラッシュ窒素冷却システムの試設計を行った（図 2.2.6-3）。試設計において、冷凍機の効率（COP）は下記の式で求めた。

$$\text{COP} = \text{冷却温度} / (\text{常温} - \text{冷却温度})$$

ここで冷却温度はサブクール窒素では 65.00 K、スラッシュ窒素冷却では 63.38 K、常温は 300 K である。スラッシュ窒素生成装置の効率は、後述する実験結果（図 2.2.6-6）から掻き取り速度 100 rpm 時の冷凍機動力と固体窒素生成量を基に冷凍機効率の 2/3 の 0.054 とした。窒素循環ポンプの効率はこれまでの研究の実績から 0.5 とした。この試設計結果を表 2.2.6-3 に示す。

ケース 1

- ・スラッシュ窒素の密度、見かけ粘度が上昇するため圧力損失は 0.22 MPa 増大し、その結果、ポンプ動力が増大する。
- ・スラッシュ窒素冷却では温度上昇が少ない分だけ窒素の顕熱分の冷却動力は小さくなるが、固体窒素の生成に要する動力が必要となるため全動力は 12%程増大する。

ケース 2

- ・スラッシュ窒素冷却では流量の減少に合わせ流速が減少するが、固体窒素が沈殿することがないように、表 2.2.6-2 に示すように最低流速を 0.3 m/sec とした。その結果、計算上は流路断面積が減少するため圧力損失が増加し、ポンプ動力は最も大きくなった。
- ・窒素流量が 22 %（質量流量は 20.6%）減少させることができるためケース 1 よりもスラッシュ窒素の場合の動力は 2%程低下したが、サブクール窒素に比べると依然 10%程度大きい動力となった。

スラッシュ窒素の特性を活かした適応場所についても検討を実施した。検討例として、発電機端から昇圧トランスに至るケーブルの冷却が想定される。ここは距離が短いものの電流変化も大きく、超電導化しても大電流のため端部発熱の冷却負担の大きい場所であると考えられる。スラッシュ窒素冷却ではケーブル温度がサブク

ール窒素冷却よりも低く、かつ一定に保たれるため交流損失やケーブル負荷率 (I_{op}/I_c) が低く抑えられることが期待でき、スラッシュ窒素冷却に適した場所と考えられる。

表 2.2.6-1 超電導ケーブルモデル仕様

ケーブル長さ	5,000 m	ケーブル外径	85 mm	断熱管内径	95 mm
誘電損失	0.5 W/m	交流損失	0.3 W/m	侵入熱	2.0 W/m

(サブクール窒素冷却時の圧力損失=100 Pa/m)

表 2.2.6-2 シミュレーション条件

	条件名	液体窒素	スラッシュ窒素
入口条件	流速	0.35 m/sec	0.3 m/sec 以上
	圧力	1.1 MPa 以下	
	温度	65 K	窒素融解温度
	固相率	—	20%
出口条件	圧力	0.3 MPa 以上	
	温度	窒素飽和温度未満	

表 2.2.6-3 試設計結果

		冷媒名	サブクール 液体窒素	スラッシュ 窒素(ケース1)	スラッシュ 窒素(ケース2)
計算条件	流量[L/min]		30.00	30.00	23.27
	初期質量固相率[-]		—	0.20	
	ケーブル入口温度[K]		65.00	63.38	63.39
	ケーブル入口圧力[MPa]		0.84	1.06	1.10
	ケーブル出口温度[K]		81.10	76.55	81.10
	ケーブル出口圧力[MPa]			0.30	
計算結果	液体窒素除熱量[kW]		14.00	11.73	12.2.6
	固体窒素生成熱量[kW]		—	2.27	1.76
	冷凍機所要動力[kW]		168.74	146.02	152.26
	スラッシュ窒素生成所要動力[kW]		—	42.40	32.88
	ポンプ所要動力[kW]		0.54	0.75	0.80
	全動力[kW]		169.28	189.17	185.94

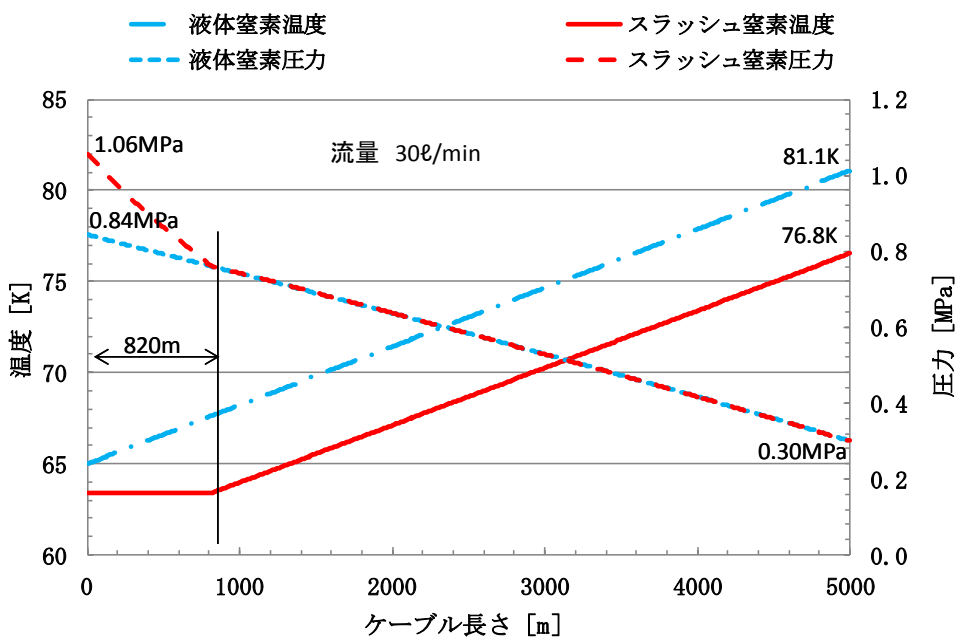


図 2.2.6-1 流量 30 L/min の場合のケーブル冷却シミュレーション結果

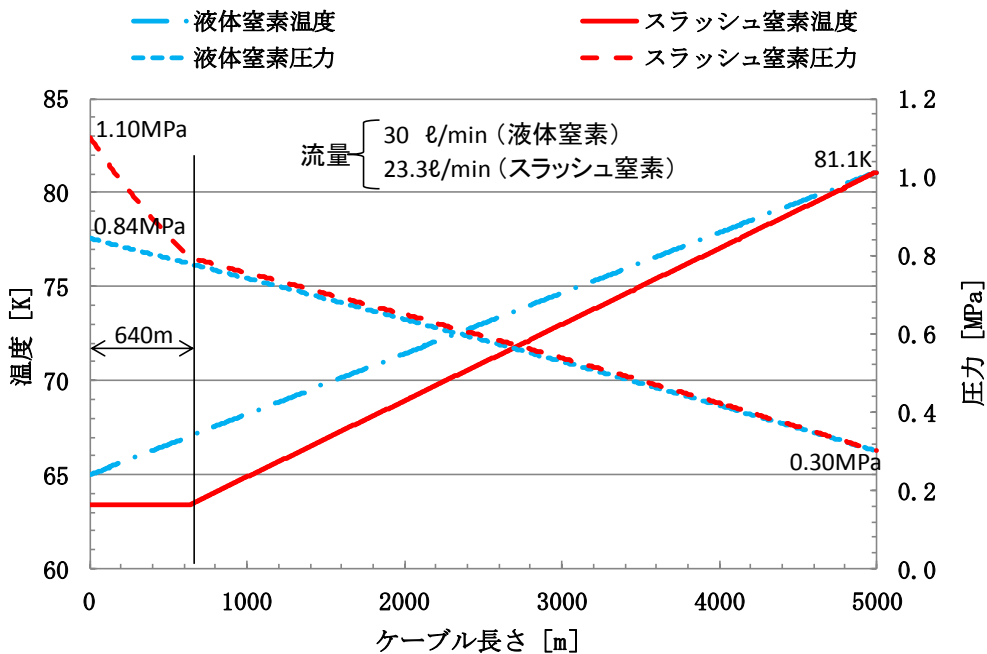


図 2.2.6-2 流量を変えた場合のケーブル冷却シミュレーション結果

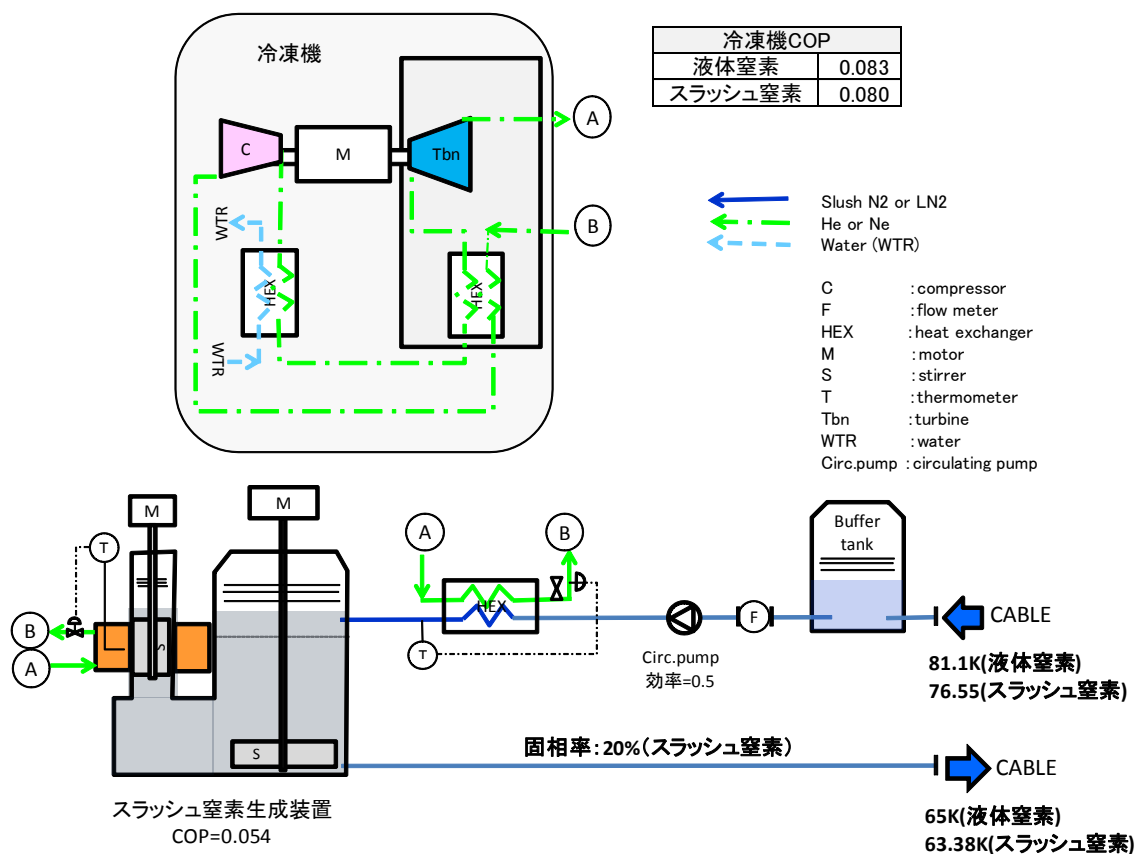


図 2.2.6-3 冷却システム試設計フロー

(3) 固相率制御方法の研究

平成 20 年の本プロジェクト開始時点の高温超電導ケーブルの冷却では、冷媒にサブクール窒素を用いているが、超電導ケーブルの入口のサブクール窒素温度を所定範囲内で制御することでケーブルの必要とする熱容量を安定的に供給している²⁾。スラッシュ窒素の場合には、サブクール窒素の温度に代わり、ケーブル入口の固相率を一定に制御することで常に一定の熱容量をケーブルに供給する。そこで、固相率の制御はスラッシュ窒素冷却の実用化に欠かせない技術であり、本研究では、固相率一定の状態ですラッシュ窒素を冷却部に供給するための制御方法の研究を行った。

固相率を制御するには、①固体窒素とサブクール窒素を混合しスラッシュ状態とした後ヒータにより固相率を調節する方法、②固相率の高いタンクを別途設けサブクール窒素と混合し固相率を調節する方法、③固体窒素生成装置で固体生成量を調節する方法等が考えられる。これらの得失を検討した結果、本研究では③の生成装置で固体生成量を調節する方式を採用し、生成装置としては冷凍機の運転方法を変えることで生成量を調節でき、かつスラッシュ水素の生成方法³⁾としても実績のある掻き取り方式を採用した。

本研究で開発したスラッシュ窒素生成装置の概略図を図 2.2.6-4 に、外観写真を図 2.2.6-5 にそれぞれ示す。本生成装置では、冷凍機を用いて液体窒素を冷却面に固化させ、固化した窒素を掻き取り羽根で剥離することでスラッシュ窒素を生成する方法を用いている。生成装置は、スラッシュ窒素及びサブクール窒素を貯槽する液体窒素槽、2 台の GM 冷凍機、掻き取り羽根、羽根を駆動するモータから構成されている。モータの回転数を変更して掻き取り速度を調整する。

掻き取り速度を変更して生成装置の生成量を確認した。生成量は、スラッシュ窒素が生成される際の熱量を測定し、融解潜熱を用いて算出した。掻き取り速度を変更した場合におけるスラッシュ窒素の生成熱量と冷凍機冷凍能力の関係を図 2.2.6-6 に、算出した生成量を図 2.2.6-7 にそれぞれ示す。解析の結果図 2.2.6-6 に示すように、掻き取り速度 17 rpm の場合には冷凍機冷凍能力 160 W の内、125 W の冷熱量をスラッシュ窒素の生成熱量として利用できることが分かった。さらに、掻き取り速度 17 rpm の場合にはスラッシュ窒素の生成量が約 5 g/sec であることが分かった (図 2.2.6-7)。また、掻き取り速度を増加させると生成量が減少しており、掻き取り速度を用いて生成量の制御が可能であることを確認した。

スラッシュ窒素を用いて超電導ケーブルをより効率的に冷却するためには、ケーブル内における均一な二相流状態(分散二相流)の保持が重要であり、これを実現するためには μm オーダーの微細で均一な粒子径を有する固体窒素を生成する必要がある。そこで、分散二相流状態の保持を可能とする最適な粒子径を定性的に理解するために数値シミュレーションを用いた評価研究を行った。シミュレーション結果を図 2.2.6-8 に示す。本結果は、配管内径 $\phi 14\text{ mm}$ 、配管長さ 300 mm の中に流速 0.2 m/sec にて粒径 1.4 mm、100 μm 、50 μm の球状粒子をそれぞれ流し、搬送開始 1 秒後における粒子の分散の様子を表しており、図中の点は固体粒子を表現している。シミュレーションの結果より、100 μm 程度まで固体窒素粒子の微細化を行えば、現状の高温超電導ケーブルに用いられているサブクール窒素の流速 (0.2~0.3 m/sec) でも管内において固体窒素が沈殿しない見通しを得た。

さらに、生成装置にて生成した固体粒子をテレセントリックレンズ及び高速カメラを用いて撮影し、投影面積を求めて粒子径を算出した。図 2.2.6-9 に掻き取り速度 100 rpm において観測された代表的な粒子の写真を示す。また、図 2.2.6-10、図 2.2.6-11 に掻き取り速度 17 rpm と 100 rpm での粒子径のヒストグラムをそれぞれ示す。本測定では 250 個以上の粒子の投影面積から粒子径を求めた。測定の結果より、掻き取り速度 100 rpm において中央値 119 μm の粒子が生成され、数値シミュレーションから得た目標をほぼ満足することが分かった。さらに、掻き取り速度 100 rpm の場合は、17 rpm に比べて粒径のピークが鋭くなっており、平均粒径が小さくなるとともに、より均一な粒径の生成がなされていることが分かった。

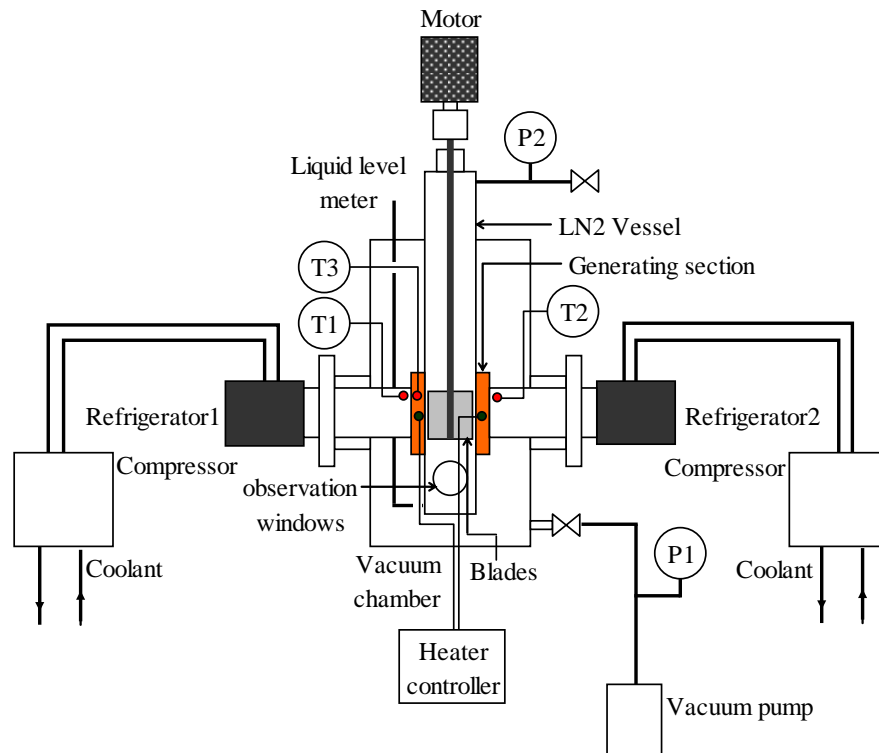


図 2.2.6-4 スラッシュ窒素生成装置の概略



図 2.2.6-5 スラッシュ窒素生成装置の写真

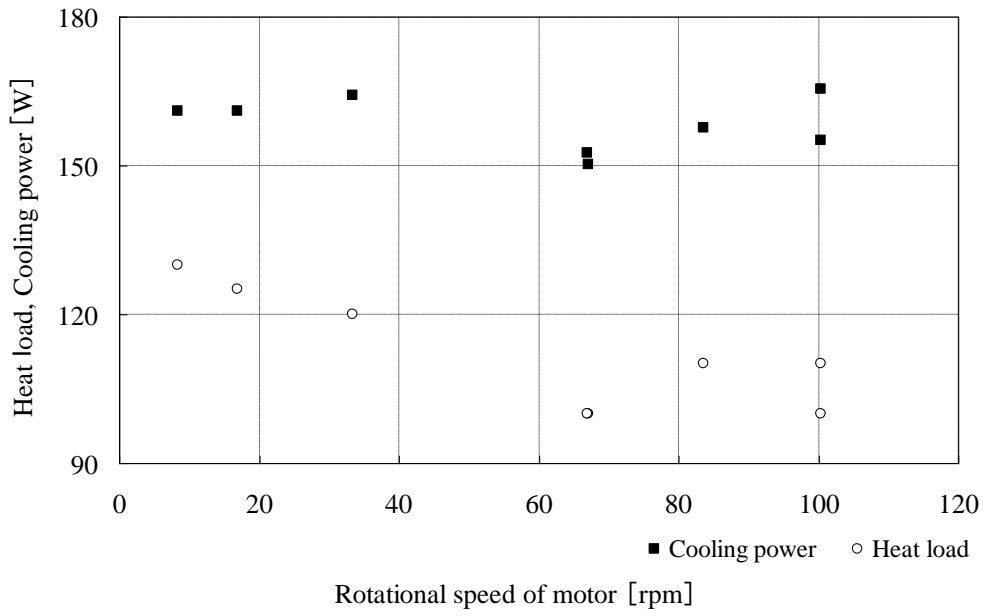


図 2.2.6-6 掻き取り速度と生成熱量

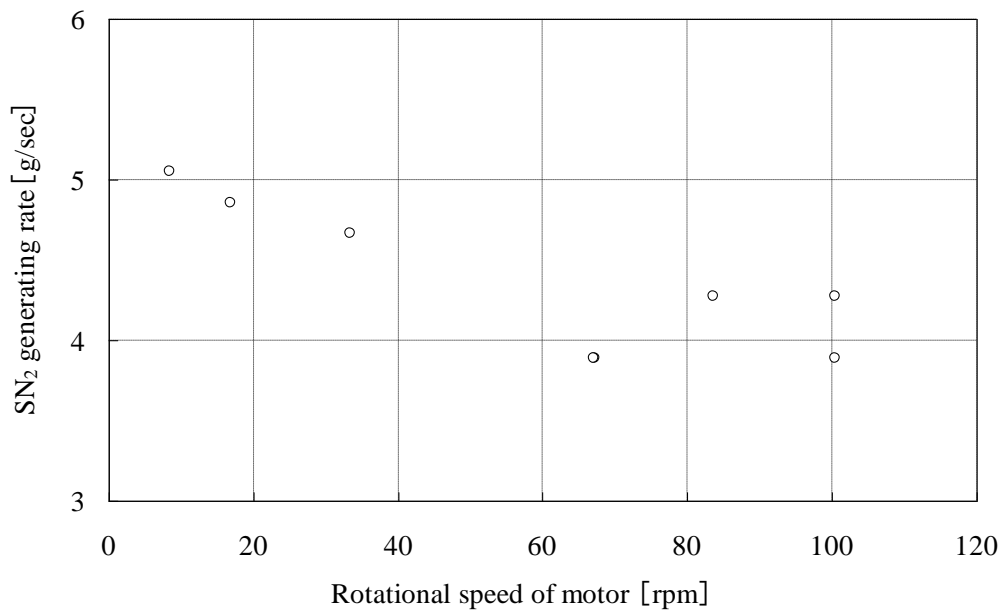


図 2.2.6-7 掻き取り速度と生成量



(a) 粒子径 50 [μm]



(b) 粒子径 100 [μm]



(c) 粒子径 1.4 [mm]

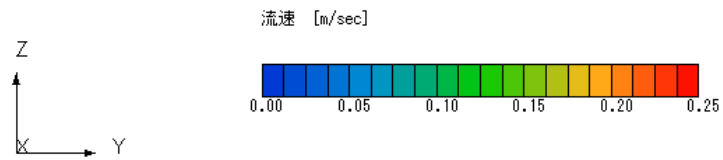


図 2.2.6-8 固体窒素粒子径変更による管内搬送数値シミュレーションの結果

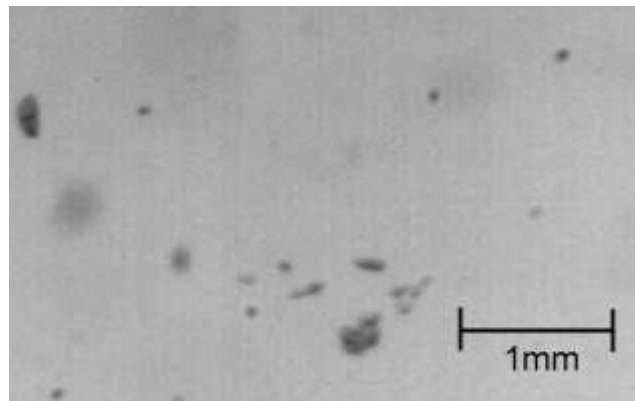


図 2.2.6-9 掻き取り速度 100 rpm における代表的な粒子

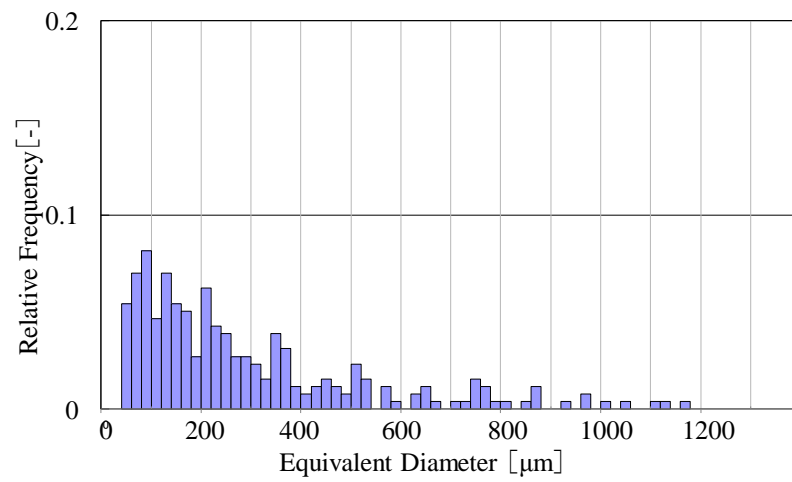


図 2.2.6-10 掻き取り速度 17 rpm における固体窒素粒子径のヒストグラム

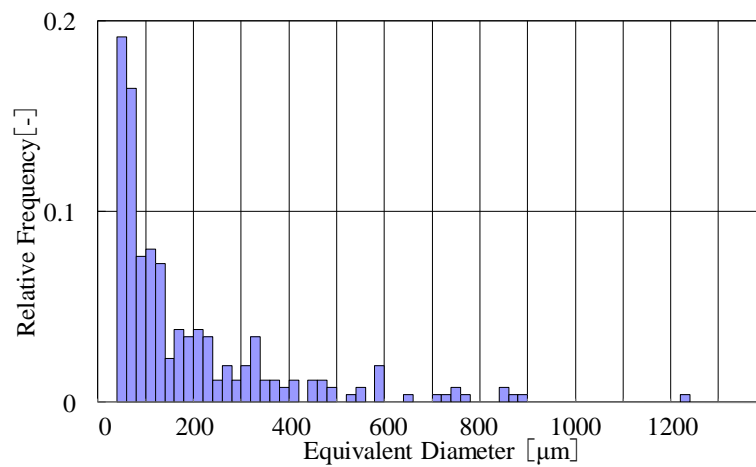


図 2.2.6-11 掻き取り速度 100 rpm における固体窒素粒子径のヒストグラム

(4) 連続生成方法の研究

スラッシュ窒素を実際の高温超電導ケーブル冷却システムに用いる場合、スラッシュ窒素を連続的に生成、搬送し、ケーブル冷却に利用するための運転研究による最適化が必要となる。そこで、スラッシュ窒素を連続的に生成する生成装置が必要となる。固体窒素の生成には低温ガス（ヘリウム等）を用いたバブリング法やエジェクタ法、真空引きで三重点に到達させ固体を生成する FREEZE THAW 法があるが、前者は窒素中に溶け込んだガスの分離に課題があり後者は連続的な生成ができない。そこで、2.2.6-1 (3)項に記した伝熱面に固体を生成しそれを剥離させて生成する固体窒素生成法を開発した。

スラッシュ窒素の冷却特性を評価するため、スラッシュ窒素生成装置を組み込んだ搬送装置を製作した。搬送装置の概略図を図 2.2.6-12 に、装置外観写真を図 2.2.6-13 にそれぞれ示す。本装置は、液体窒素を貯槽する液体窒素タンク、連続的にスラッシュ窒素を生成する生成装置、ヒータ及び温度計を設置したヒータユニットから構成した。ヒータユニットは全長約 4 m の二重管で、外管は真空断熱とした。温度計は図 2.2.6-12 に示す 6 箇所の内管中央部に取り付けた。内管の外周部には全長にパイプ式のヒータを設置した。液体窒素タンク内のサブクール状態の液体窒素を生成装置にヘリウムガスを用いて圧送し、生成装置でスラッシュ窒素を生成してスラッシュ窒素を常に混合させながらヒータユニットに送液し、ヒータユニットにて所定負荷を印加して流体の温度を測定した。

なお、今回は試験の都合上スラッシュ窒素の圧送にヘリウムガスを用いたが、ヘリウムガスは液体窒素中に溶解するため実用上使用できないことが明らかとなっている⁴⁾。

ヒータユニット出口での流量約 4.0 L/min、ヒータ負荷約 100 W での試験結果を図 2.2.6-14 に示す。本結果より、ヒータユニットの入口から距離 0.5 m までの流体の温度が、ほぼスラッシュ窒素の温度 63.1 K であり、さらに温度上昇が殆どないことから、生成装置にてスラッシュ窒素を連続的に生成しながらヒータユニットに搬送することができた。

さらに、スラッシュ窒素の固体と液体の比重比を模擬した水とフェノール樹脂の混合流体を用いてコリオリ式質量流量計の流量測定精度の確認を行った。その結果、コリオリ式質量流量計は液体に固体が混合した場合でも十分に流量測定可能であることが分かった。

上記検証後、長時間の冷却特性を確認するため前述の搬送装置を基にスラッシュ窒素循環試験装置の設計、製作を行い（図 2.2.6-15、2.2.6-16）、超電導ケーブルを模擬した評価用トランスファチューブを用いて加熱試験を行った。その結果、スラッシュ窒素が存在すれば流体温度は一定温度を保つことを確認し、温度が一定となる距離は固体窒素の質量濃度（固相率）に比例することを確認した（図 2.2.6-17）。

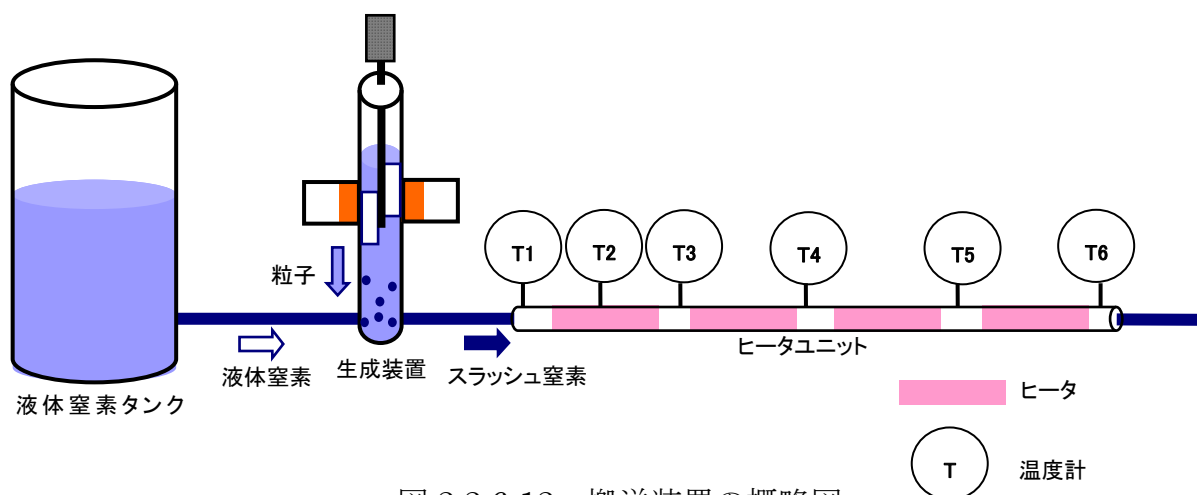


図 2.2.6-12 搬送装置の概略図

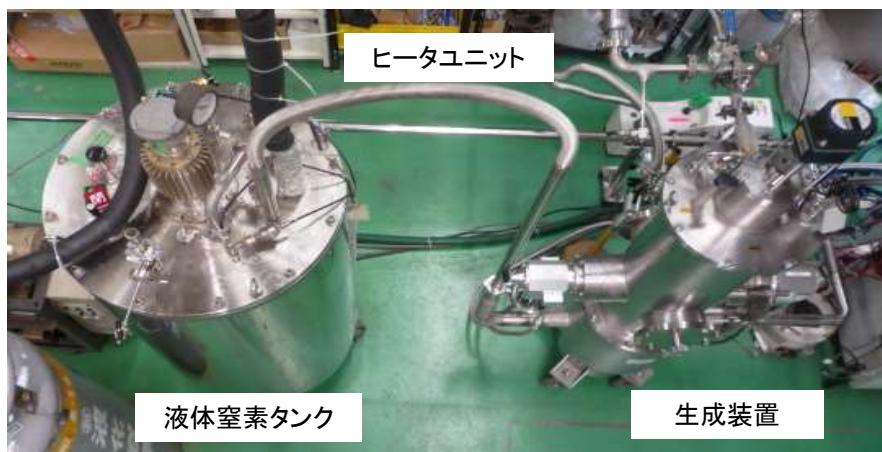


図 2.2.6-13 搬送装置の写真

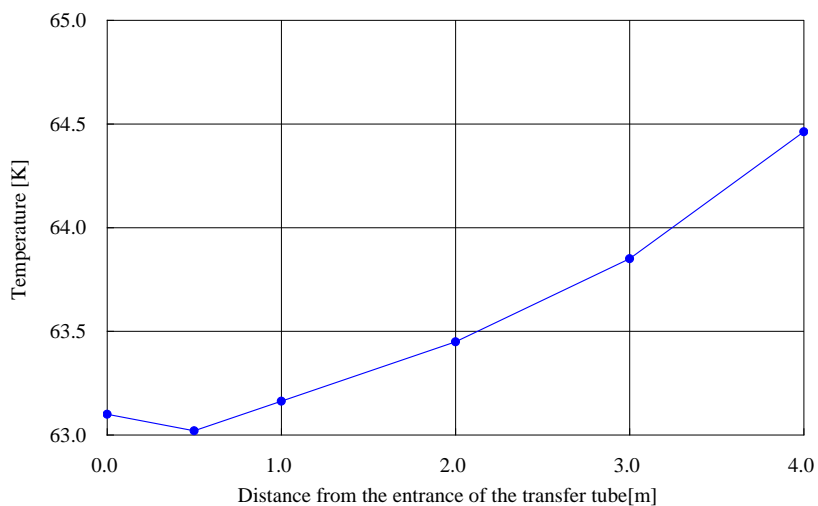


図 2.2.6-14 冷却評価試験結果

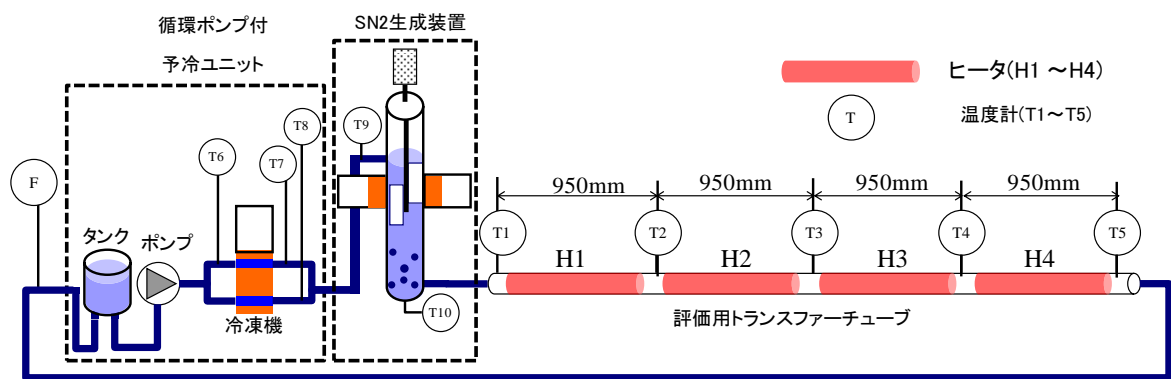


図 2.2.6-15 スラッシュ窒素循環試験装置フロー

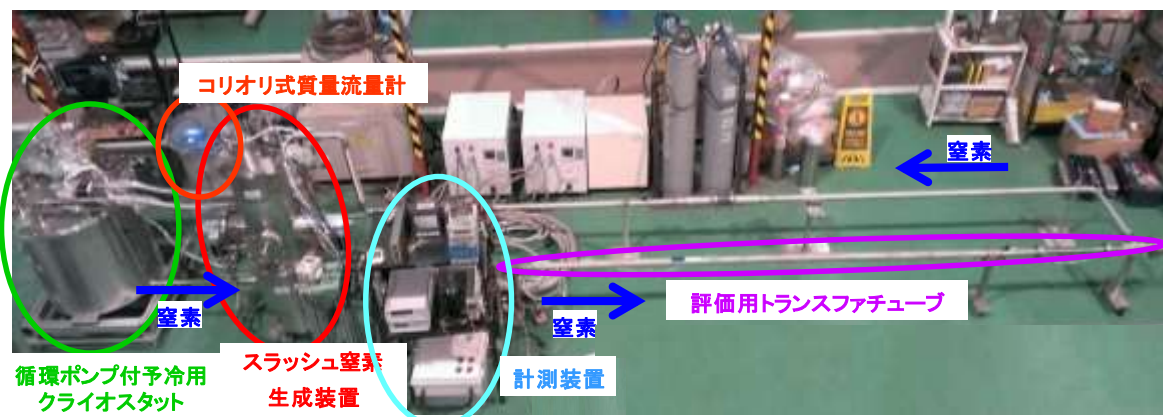


図 2.2.6-16 スラッシュ窒素循環試験装置写真

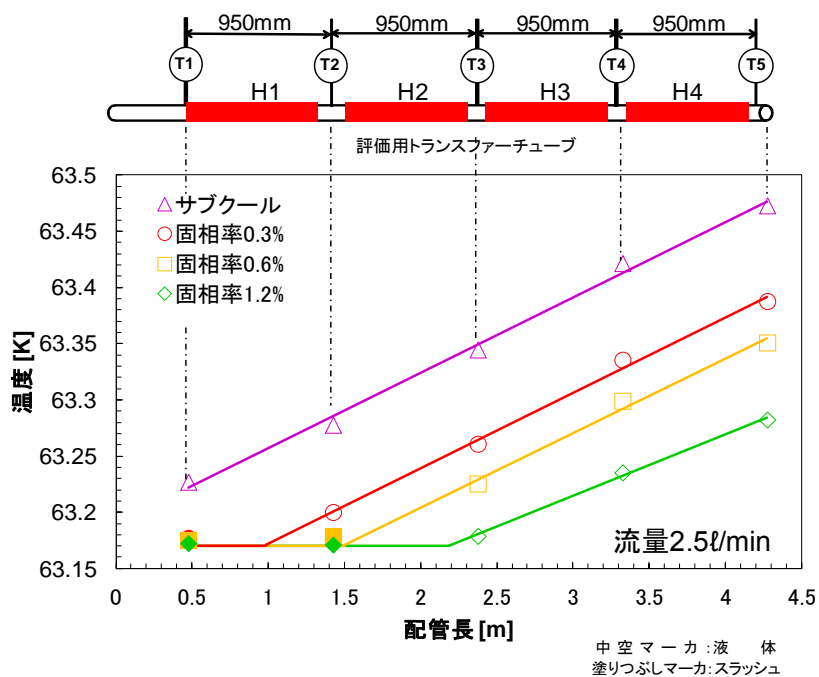


図 2.2.6-17 スラッシュ窒素循環試験結果

(5) 結論

高温超電導ケーブル用冷媒としてのスラッシュ窒素の冷却特性を評価するため、システムの検討、固相率制御方法の研究、連続生成方法の研究を実施した。

システムの検討については、スラッシュ窒素の冷却システムでは微細な固体窒素を連続的に生成する生成装置、生成装置に付属する冷凍機、一定の固相率でケーブルにスラッシュ窒素を評価・供給するための濃度計が必要となることが分かった。さらに、スラッシュ窒素の適応場所として、発電機端から昇圧トランスに至る部分及びケーブル端末等が想定されることが分かった。超電導ケーブル冷却を模擬したシミュレーションによりサブクール窒素冷却とスラッシュ窒素冷却を比較し、スラッシュ窒素冷却では同一流量であればケーブル温度を低く保つことができ、ケーブル出口温度を同一とすれば窒素循環量を削減できることを明らかとした。

固相率制御方法の研究では、開発したスラッシュ窒素生成装置にて固体の生成量及び粒子径の制御が可能ながことが分かった。最大約 5 g/sec の固体の生成、及び平均粒子径 100 μm 程度の粒子生成ができる生成装置を開発した。

連続生成方法の研究では、スラッシュ窒素を連続的に生成しながら、スラッシュ窒素の温度 63.2 K で流体を搬送し、その特性の確認を行った。さらにスラッシュ窒素循環試験装置を用いて、スラッシュ窒素が存在すれば流体温度を一定に保てることを明らかにした。

(6) 成果のまとめ

高温超電導ケーブルの冷媒として、スラッシュ窒素の冷却特性を評価するため、システムの検討、固相率制御方法の研究、連続生成方法の研究を実施した。

スラッシュ窒素の冷却システムでは、ケーブル温度が液体窒素冷却よりも低く保たれることや交流損失やケーブル負荷率 (I_{op}/I_c) が低く抑えられることが期待できる。試験結果とそれに基づくシミュレーションによりスラッシュ窒素冷却の特徴を明確にした。そこで、適用場所として発電機端から昇圧トランスに至る部分及びケーブル端末等が想定される。スラッシュ窒素を高温超電導ケーブル冷却システムに用いる場合、スラッシュ窒素を連続的に生成、搬送し、ケーブル冷却に利用するための運転研究による最適化が必要となる。そこで、本研究ではスラッシュ窒素の生成装置を開発し、平均 100 μm 程度の粒子を連続的に生成、搬送できることを確認した。

スラッシュ窒素を連続的に生成しながら、スラッシュ窒素の温度 63.2 K で二相流体を搬送し、その特性の確認を行った。その結果、固相率の増大と流体温度が一定に保たれる距離が比例することを明らかにした。

引用論文リスト

- 1) 池内他、“スラッシュ窒素の管内熱伝達特性に関する基礎研究”、
低温工学 42 巻、4 号、2007
- 2) H.Yumura、et.al、 SEI TECHNICAL REVIEW、 No.64 (2007)
- 3) D.E.Daney、 V.D.Arp、 R.O.Voth、“HYDROGEN SLUSH PRODUCTION
WITH A LARGE AUGER”、 ADVANCES IN CRYOGENIC ENGINEERING、
Vol.35、 pp.1767-1776 (1990)
- 4) NEDO 委託事業、平成 16 年度委託業務成果報告書、「交流超電導電力機器基盤
技術研究開発」超電導送電ケーブル基盤技術の研究開発、ケーブル用長尺冷却
技術の研究開発、長尺断熱管の冷却特性向上の研究、古河電気工業株式会社委
託分、p21-p27 (2005 年 3 月)

2.2.6-2 超電導電力機器の冷却に関する調査研究 (ISTEC)

(1) 実施目的

超電導電力機器に用いる冷却設備の最新動向について調査を行い、超電導電力ケーブル等に要求される冷却設備の仕様について検討する。また、冷却設備に要求される法的制度について調査及び提言のための分析を行う。(要求される冷却設備の仕様については、平成 23 年度以降に行うシステム検証用及び普及・導入時の整備対象とする。)

(2) 法的規制に関して

超電導機器を運用するにあたり関連規制として 2 つ挙げられる。(i)電気事業法と(ii)高圧ガス保安法である。電気事業法では、開発途中である超電導電力設備に関する規制はない。そのため、実証段階では、電気事業法内の類する規制に則り運用することとなる。また液体窒素による冷却システムを使用するため、高圧ガス保安法に則ることとなる。高圧ガス保安法では、「電気事業法第二条第一項第十六号の電気工作物(政令で定めるものに限る)内における高圧ガス」は適用しないと規定しているが、準拠する必要はある。電気事業法で超電導電力機器に関する明確な規定がないため、実系統導入・運用するためには、位置付けを明確にする必要がある。そのためには、超電導電力機器のデータ・情報等を多く集め、有識者による法整備が必要となる。

電気事業法や高圧ガス保安法の他に、下記のような規制がある。規制には、国、都道府県、市町村による規制があり、騒音・振動規制法や建築基準法等は、設置地域により様々で様ではない。道路法や道路交通法は、機器や機材のサイズや重量等運搬に関する制約を受ける。安全面では、労働安全衛生法、消防法等の規制を受ける。超電導機器に付属する設備を含め、的確な対応・許可・届出が必要となる。

- ・ 電気事業法 (施行規則含む)
- ・ 電力設備に関する技術基準を定める省令 EMF (1 m の高さ 3 kV/m 以下)
- ・ 高圧ガス保安法 冷凍保安規則 (第 1 種製造設備) 冷凍則 一般則
- ・ 消防法
- ・ 労働安全衛生法
- ・ 騒音、振動規制法 設置・居住地域で決まる
- ・ 建築基準法
- ・ 道路交通法
- ・ 道路法
- ・ 環境保健基準 (EMF) 100 μT

地上 1 m にて地中ケーブル : 2.7 μT 架空線 : 1.5~9.2 μT

(3) 冷却設備の最新動向

高温超電導機器の実用化に向けて、冷凍機による冷却技術の開発が望まれている。これまでの冷凍機として、GM 冷凍機、パルス管冷凍機、スターリング冷凍機、タービン式ブレイトン冷凍機等がある^{1,2)}。しかし、超電導機器に適用できる冷凍機は少なく、MRI 用冷凍機、実験機器用冷凍機等の特定機器に対して製造されてきた。超電導機器としては、ケーブル、変圧器、SMES、モータ、限流器、発電機等があり、それらの必要な冷却能力と現在の冷凍機能力を図 2.2.6-18 に示す。超電導機器に必要な冷凍能力は図 2.2.6-18 に示す領域と考えられており、本図に記載されている冷凍機で得られる温度領域は 3 K~100 K までであり、超電導機器を冷却するには十分な温度領域を網羅している。1 kW 以下の冷凍能力で冷却可能な超電導機器には、GM 冷凍機、パルス管冷凍機、スターリング冷凍機があり、冷却方法は冷却対象物を直接冷却する、または冷媒を通して冷却する。一方で、10 kW 以上の冷凍機としてタービン式ブレイトン冷凍機があり、冷凍機側で冷却された作動ガス冷媒 (He、Ne) を用いて、冷却対象物の冷媒 (液体窒素) を冷却する方式である。しかし、図 2.2.6-12 で示すように、超電導機器に必要とされる冷却能力では、現状の冷凍機能力では不足または過大であり、超電導機器に必要な冷凍能力を持った冷凍機の開発が必要であり、コスト面、運用面、信頼面、システム面等を考慮しての開発が望まれる。1 kW 以下の冷凍方式での大容量化は難しく、開発には至っていないが、タービン式ブレイトン冷凍機では、2 kW 級の開発を行っており、今後の開発動向に注目される。

超電導機器を冷却するには、1 台で行う必要はなく、設置場所、コスト、運用、信頼性、効率、等様々なことを考慮して冷却システムとして設計する必要がある。1 kW 級以下の冷凍機では、メリットを維持し、効率を向上させた大容量化が望まれる。

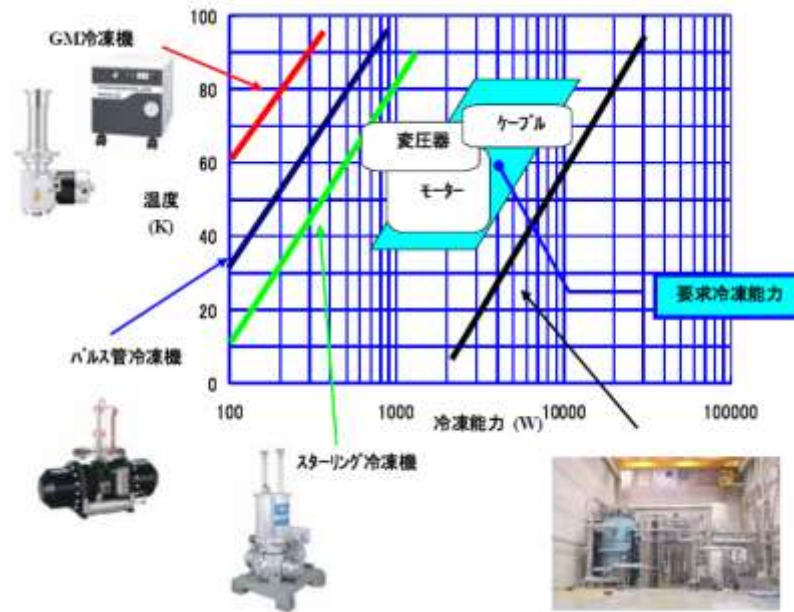


図 2.2.6-18 冷凍機の冷凍能力

(4) 超電導ケーブルの冷却設備の仕様

超電導電力ケーブルを冷却する方法には 2 つの方法がある。直接冷却と間接冷却である。前者は、冷却対象物（超電導ケーブル等）を冷却する冷媒（液体窒素）を直接冷凍機で冷却する。特徴として、①熱交換が 1 回で済み、熱効率が良い、②冷凍機の出力調整により、冷媒の温度制御に対する応答性が良い、③圧力損失が大きい、等がある。後者は、冷却対象物（超電導ケーブル等）を冷却する冷媒（液体窒素）を冷却する冷媒（Ne）を冷凍機側の冷媒で冷却する。特徴として、①圧力損失が小さい、長距離輸送に向いている、②熱交換が 2 回あり、熱効率が低い、③冷却に対する応答性は低い、④故障時、設備の切り離しが可能等がある。

既存の地中送電ケーブルで採用されている冷却方式は後者であり、強制風冷、強制水冷が主である。ここで水冷冷却について記述する。水冷方式は、冷却対象物（ケーブル）の近郊に水冷管路を布設し、空気及びトラフを通じて冷却対象物を冷却する。冷媒である水は、数百 m～数 km を循環している（途中で圧力損失により流速が低下するため、ブースターポンプを有する場合がある）。冷媒は冷凍機及び冷却塔で冷却され、貯水槽（送水用）に蓄えられ、送水ポンプにて循環され、貯水層（帰路用）に戻り、再び冷凍機等で冷却される。この方法では、貯水槽を有するため、冷凍機が故障しても短時間の冷却装置運転が可能である。

過去の超電導ケーブル開発（Super-GM 500 m ケーブル、東電 - 住友 100 m ケーブル）における冷却方法について記す。冷却方式は、直接冷却であり、冷媒である液体窒素（液体窒素）を冷凍機にてサブクール状態にし、循環ポンプにて循環・冷却している。このとき使用されたのは、スターリング冷凍機（1 kW 級）である。Super-ACE 500 m ケーブルでは、スターリング冷凍機 6 台（1 kW 級）をケーブル冷却用 4 台、終端部冷却用 2 台として使用した。

本プロジェクトでは、66 kV-5 kA 大電流・低損失ケーブル技術開発においては、ケーブル損失 2.1 W/m-相（計 6.3 W/m）としている。室温からの熱侵入は理想的には 1 W/m を想定しており、計 7.3 W/m と見積られる。5 km 間隔で冷却設備を設置では、36.5 kW の冷却能力を有する設備が必要となる。1 km 間隔で 7.3 kW であり、500 m 間隔で 3.7 kW の冷却能力が必要となる。275 kV-3 kA 高電圧・低誘電損失ケーブル技術開発においては、ケーブル損失 0.8 W/m-相（計 2.4 W/m）としている。室温から侵入熱は 1 W/m-相が見込まれ、計 5.4 W/m と見込まれる。1 km 間隔で冷却設備を設置する場合 5.4 kW、500 m で 2.7 kW の冷却能力が必要となる。長距離ほど高い冷却能力が必要である。冷凍機故障のリスク及びメンテナンス等を考慮すると複数台の設置がのぞまれるが、コスト、設置箇所、運用面、信頼性、圧力損失、流量、流速等を考慮して冷凍機能力及び設置台数を設計することが必要である。表 2.2.6-4 は、冷却装置の能力を比較したものである³⁾。スターリング冷凍機は超電導ケーブルとして実績がある。騒音・メンテナンス面で難があるが、他と比較して COP が高い。パルス管冷凍機は次世代として期待され、開発が進められている。メンテナンスの必要は殆どないが、低容量・低 COP のため難がある。また、大型冷凍機であるタービン式ブレイトン冷凍機の小型化の開発も行われているが、低 COP、また圧縮機のセパレーターのメンテナンス等、難がある。超電導機器においては、必要冷凍能力に応じた冷凍機を採用するが、COP・メンテナンス・装置サイズ等の技術開発向上が望まれる。

表 2.2.6-4 冷凍機の仕様と能力

項目	スターリング 冷凍機	スターリング パルス管	GM パルス管	ブレイトンサイクル	ブレイトンサイ クル(応用基盤)
冷凍容量 (kW)	1 kW (77 K) 低温での容量低下:大	0.3及び1kW(77 K) 低温での容量低下:大	1 kW/65 K 低温での容量低下:大	10 kW 以上 低温での容量低下:小	2.7 kW (70 K)
メンテナンス 間隔	6000～8000 時間 メンテ所要期間 1ヶ月	長寿命	長寿命	10000 時間以上 メンテ所要期間 1ヶ月	30,000 時間
COP (運転効率)	0.067@77 K (1 kW)	0.38@77 K(10 W)	0.36@77 K (850 W)	0.06@77 K	0.044@70 K
ケーブル 用実績	有	無	無	無	無
現状レベル	カタログ品	評価中	開発中	実用化	開発・ 評価中
騒音	80 dB/台	50～60 dB/台	50～60 dB/台	88 dB/台	
設置スペース (5～10kW)	9 m ² /kW (*1)	4 m ² /kW	2 m ² /kW	8 m ² /kW	
課題	騒音・保守対策 大容量化が必要	信頼性、熱交換器 大容量化	信頼性、圧縮機、 大容量化	騒音、少容量化、 保守対策	運転効率、 信頼性 保守対策

(5) 超電導ケーブルの冷却特性に関する評価

数百 m 以上の送電ケーブルを想定した冷却システムの設計を最適化する上で、ケーブル内部の高温超電導体を液体窒素流体により安定かつ効率的に超電導状態に維持する冷却技術が必要である。実際のケーブルシステムはケーブルコアが断熱管の中心に対し偏心している構造（偏心構造）や断熱管がスパイラル・コルゲート管であるように 3 次元的な複雑形状を有する等、その内部を液体窒素が流れるため複雑な熱流動場を形成しており、長距離ケーブルの冷却特性を評価する場合、これらの熱流動・伝熱現象を把握する必要がある。そのため、275 kV 高電圧ケーブル設計を参考に、以下のケースにおける超電導ケーブルの冷却特性を評価するとともに、冷却に必要となる冷凍機的能力・循環用ポンプの仕様を検討した。

- a. 超電導ケーブルの各種構造が定常時における冷却特性に与える影響について（偏心構造及びスパイラル・コルゲート管の影響）
- b. 端末からの熱侵入がケーブルに及ぼす影響
- c. 過電流通電後の冷却復帰特性

a-1 定常時の超電導ケーブル冷却特性 -ストレート管、ケーブルコア偏心無し-

超電導ケーブルの実運用上では断熱管はコルゲート管を使用し、ケーブルコアの位置は偏心される設計を想定しているが、これらの構造の影響を除いたケーブルの基本的な冷却特性を把握するため、まず、断熱管をストレート管、ケーブルコアは断熱管の中心に位置する構造とした解析モデルを採用した。なお、275 kV 高電圧ケーブル設計を参考とした諸元は表 2.2.6-5 に示す通りである。

表 2.2.6-5 ケーブル設計諸元(275 kV 高電圧ケーブル設計を参考)

仕 様		径 (mm)
内側流路	液体窒素流路	14
銅フォーマ	銅撚り線中空フォーマ 400mm ²	30.6
HTS 導体層	2 層 Y 系超電導線材	34
電気絶縁層	PPLP® 22 mm 厚	79.4
HTS シールド層	1 層 Y 系超電導線材	80
銅シールド層	3 層 銅テープ 310 mm ²	85
外側流路	液体窒素流路	98.5

i 簡易モデルによる数値シミュレーションの妥当性評価

i-1 計算モデル及び条件

数値シミュレーションによる計算モデルの妥当性を評価するため、図 2.2.6-19-1 の通りケーブル構造を簡略化したモデルにて、理論計算⁴⁾により算出した温度分布・圧力勾配と数値計算 Simple 法（有限体積法）を用いた数値シミュレーションにより計算した値を比較・評価した。以下に計算モデル及び条件を示す。

- ・シールド層、銅フォーマの熱伝導特性及び液体窒素との熱伝達特性については、等価熱抵抗とした。
- ・発熱については、断熱管外部からの侵入熱 1 W/m に加え、超電導導体層(HTS 導体層)、電気絶縁層及び超電導シールド層(HTS シールド層)は、一体かつ一様発熱(0.8 W/m)
- ・液体窒素流路(内部流路、外部流路)は、ストレート管 (凸凹は無し)
- ・液体窒素流量 20 [L/min]、入口温度 65K

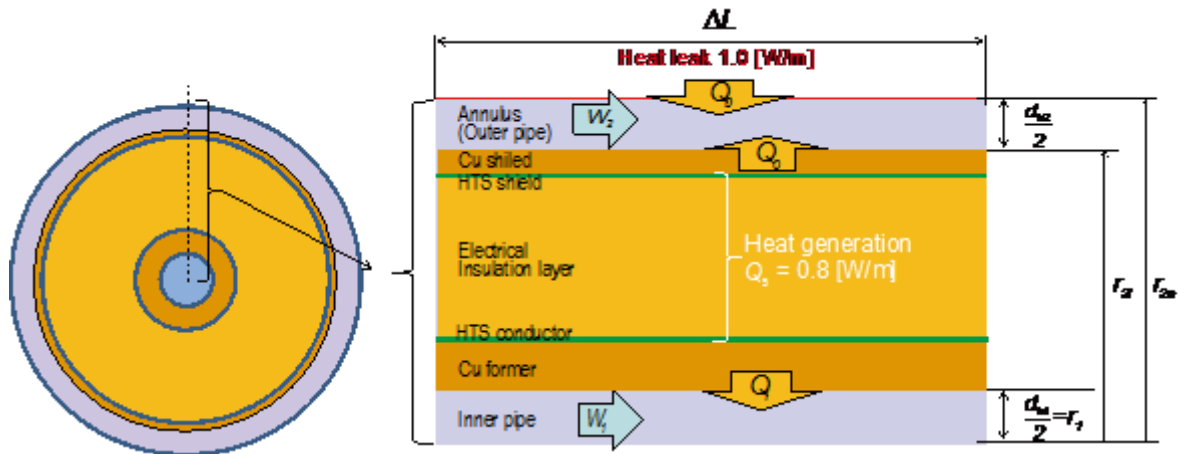


図 2.2.6-19-1 ケーブル構造を簡略化した解析モデル (偏心なし+ストレート管)

数値シミュレーションにおいては、以下のナビエ・ストークス方程式(式 2.2.6-1)と移流熱拡散方程式、熱伝導方程式を連成させることで、ケーブル内の温度分布及び圧力勾配を算出した。なお、乱流のモデリングについては $k-\epsilon$ モデルを使用した。

$$\frac{\partial(\rho u_j)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_i} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] + f_g \quad (2.2.6-1)$$

続いて、圧力損失及び温度分布に関する理論計算方法を以下に示す。

i-2 理論計算式による圧力損失の計算方法

ケーブル断熱管内に流れる液体窒素の総流量 W は、内側流路と外側流路に $W = W_1 + W_2$ (内側流量: W_1 、外側流量: W_2) の通り配分される。ここで、単位長さあたりの内外流路の圧力勾配 ($\Delta P / \Delta L$) が等しくなるとした場合、 $\Delta P / \Delta L$ は DarcyWeisbach 式⁵⁾により式(2.2.6-2)の通り与えられる。

$$\frac{\Delta p}{\Delta L} = f_1 \times \frac{2}{d_{h1}} \times \frac{1}{2} \rho v_1^2 = f_2 \times \frac{2}{d_{h2}} \times \frac{1}{2} \rho v_2^2 \quad (2.2.6-2)$$

f : 管摩擦係数、 v : 流速、 ρ : 液体窒素密度、 d_h : 水力等価直径を示す。(変数・定数の下付き数字 1,2 は、1:内側流路、2:外側流路を示す。) f はレイノルズ数の関数

である無次元数であり、環状内乱流のレイノルズ数を適用した Prandtl-karrman の式⁶⁾を用いて算出した。なお内側流路におけるレイノルズ数は式 $\rho v d_h / \mu$ (μ :液体窒素粘性)により与えられるが、環状外側流路におけるレイノルズ数は内側流路と外側流路の外半径の比 Φ を用いて、式 $\rho v d_h \Phi / \mu$ により与えられる⁷⁾。 W_1, W_2 について式(2.2.6-3,4)の通り算出される。

$$W_1 = A_1 v_1 = \pi r_1^2 v_1 = \frac{C}{1+C} W, \quad W_2 = A_2 v_2 = \pi (r_{2o}^2 - r_{2i}^2) v_2 = \frac{1}{1+C} W \quad (2.2.6-3)$$

$$C^2 = \frac{f_2 d_{h1} A_1^2}{f_1 d_{h2} A_2^2} \quad (2.2.6-4)$$

A :流路断面積、 r は図 2.2.6-19-1 に示す通りである。以上の通り、各流路への流量比を算出することで流速を算出でき、 $\Delta P / \Delta L$ を求めることができる。

i-3 理論計算式による温度勾配の計算方法

液体窒素の単位長さあたりの温度上昇 $\Delta T / \Delta L$ は、エネルギー保存則により式(2.2.6-5)の通り示すことが可能である。

$$\frac{\Delta T_1}{\Delta L} = \frac{Q_i}{\rho C_p W_1}, \quad \frac{\Delta T_2}{\Delta L} = \frac{Q_o + Q_b}{\rho C_p W_2} \quad (2.2.6-5)$$

C_p : 液体窒素の比熱、 Q_b : 断熱管からの侵入熱、 Q_i, Q_o : ケーブルコアから内外流路への伝熱量 (図 2.2.6-19-1 参照)。ケーブルコア内での発熱量 Q_s は内側流路と外側流路に向けて Q_i, Q_o に配分されて伝わる。ここで、 Q_i, Q_o は式(2.2.6-6,7)の通り求めることができる。

$$Q_i = \frac{Q_s}{r_{2i}^2 - r_1^2} \left(r_1 - \frac{r_{2i}^2 - r_1^2}{2 \ln(r_{2i} / r_1)} \right) + \frac{2\pi k (T_{si} - T_{so})}{\ln(r_{2i} / r_1)} = 2\pi K_1 (T_1 - T_{si}) \quad (2.2.6-6)$$

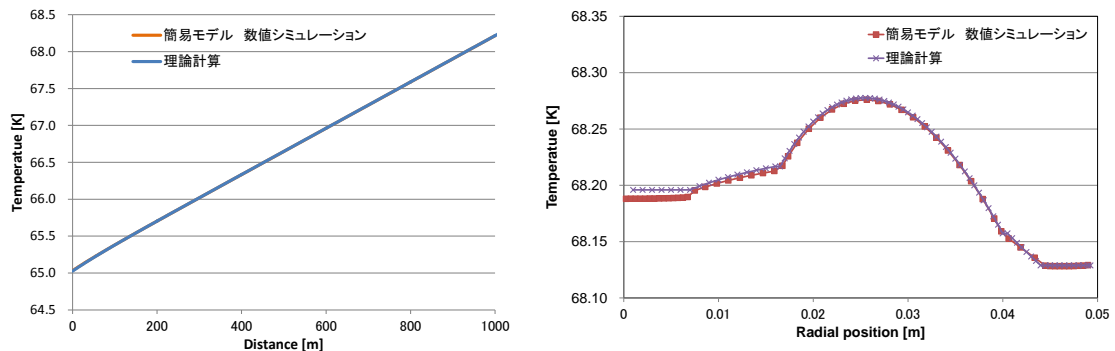
$$Q_o = \frac{Q_s}{r_{2i}^2 - r_1^2} \left(r_{2i} - \frac{r_{2i}^2 - r_1^2}{2 \ln(r_{2i} / r_1)} \right) + \frac{2\pi k (T_{si} - T_{so})}{\ln(r_{2i} / r_1)} = 2\pi K_2 (T_{so} - T_2) \quad (2.2.6-7)$$

(K_1, K_2 : 内外流路における液体窒素とケーブルコア間の熱伝達係数の等価熱抵抗、 k : HTS 導体層・電気絶縁層・HTS シールド層の合成熱伝導率)

内外流路における液体窒素とケーブルコア間の熱伝達係数は、内側流路では平滑円環の経験式である Petukov の式⁸⁾から、外側流路では環状流路内の乱流の経験式である Dalle-Donne の式⁸⁾から、各流路のレイノルズ数・プラントル数を用いて与えられるヌセルト数により算出した。求めた熱伝達係数と各層の熱抵抗により熱流束 $Q_{i,o}$ を求め、 $\Delta T_{1,2} / \Delta L$ を算出した。

i-4 理論計算と数値シミュレーションの比較結果

上述の理論計算により求めた圧力損失及び温度勾配の結果と Simple 法を用いた数値シミュレーションにより求めた結果を比較したところ、圧力勾配については理論計算値が 59.6 Pa/m であったのに対し、数値シミュレーションでは 58.5 Pa/m とほぼ一致していた。また、温度勾配については図 2.2.6-19-2 に示すように、その差は 1% 以下であり、数値シミュレーションの計算モデルの妥当性を確認できた。



(a) ケーブル長手方向温度分布

(b) 1000m 地点での半径方向温度分布

図 2.2.6-19-2 理論計算と数値シミュレーションの結果の比較

ii ケーブル構造を詳細化したモデルによる評価

ii-1 計算モデル及び条件

ケーブルの層構造及び交流損失等のケーブル内からの発熱については簡略化せずに図 2.2.6-20 の通り詳細にモデル化し、Simple 法を用いた数値シミュレーションにより計算した。

- ・ 2次元軸対称モデル 軸方向熱伝導を考慮
- ・ 電気絶縁紙等のケーブルを構成している層構造を簡略化せず、詳細にモデル化
- ・ 発熱は電気絶縁層 0.6 W/m 、超電導導体層 0.13 W/m 、超電導シールド層 0.07 W/m とした。(発熱密度は一様とする)
- ・ 外側流路はストレート管 (凸凹は無し)
- ・ 入口部に助走区間(1 m)を設け各流路圧力損失に応じた流量配分を求める
- ・ 流量 20 [L/min] 、入口温度 65 K

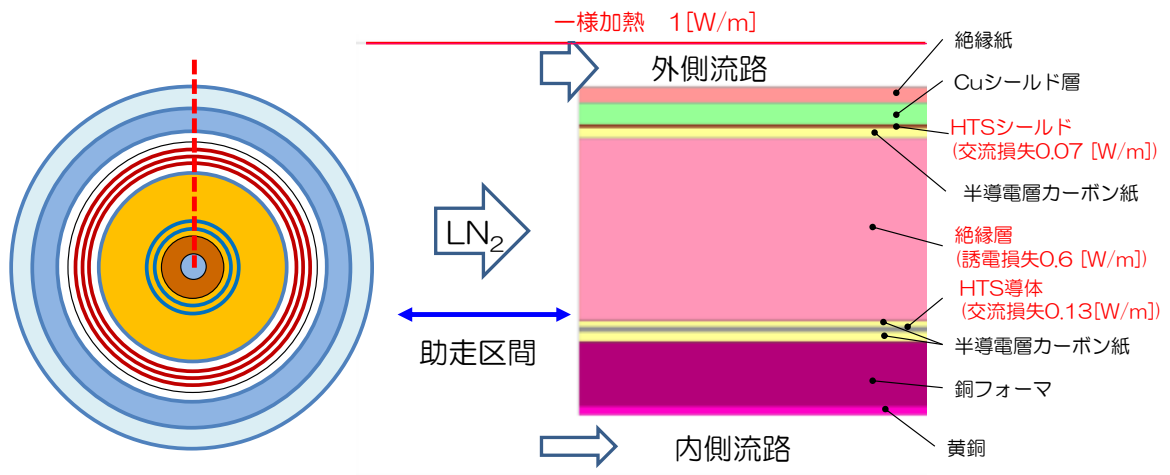
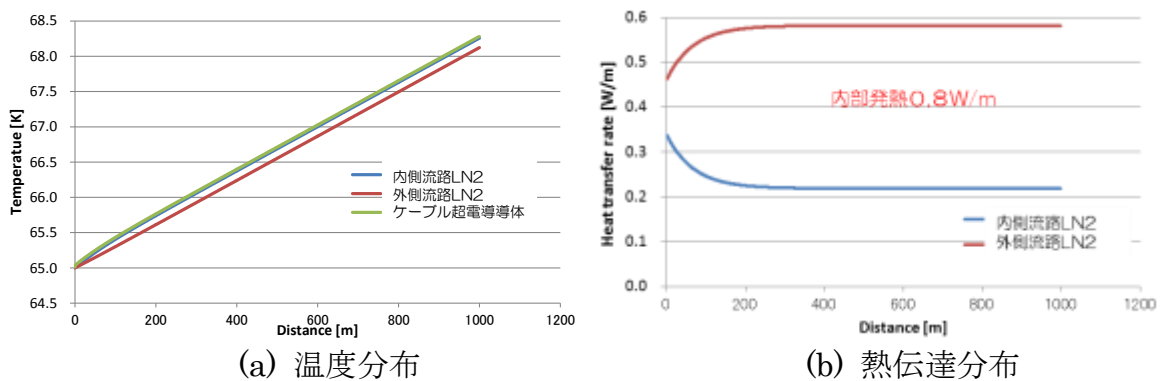


図 2.2.6-20 解析モデル (偏心なし+ストレート管)

ii-2. 解析結果

内側流路と外側流路の液体窒素の流量配分比率は 13 : 87 であった。長手方向の温度分布及び半径方向への熱伝達量の分布について図 2.2.6-21-1 (a),(b)に示す。図 2.2.6-21-1 (a)より、ケーブルの温度上昇は 1000 m で約 3 K の温度上昇が見込まれる。また、図 2.2.6-21-1 (b)より、ケーブルの内部発熱 0.8W/m のうち、内側流路に約 0.2 W/m、外側流路に約 0.6 W/m の熱が流れていることが分かる。図 2.2.6-21-2にケーブルコア中心を基準とした半径方向に対する温度変化の分布を示す。熱抵抗が高く、厚みのある電気絶縁層にて温度が最も上昇しているが、一番温度が低い外側の液体窒素流路に対しても 0.2 K の温度差が生じる程度であり、図 2.2.6-21-1 (a)のように 1000 m 級の超電導ケーブルの運用を考えた場合の長手方向の温度勾配が 3 K であるのに対して十分小さいため、ケーブルを構成している材料の熱伝導率が半径方向の温度分布に対し与える影響は小さいことが分かる。また、圧力損失は 20 L/min にて約 60 Pa/m であるため、1000 m の冷却には 60 kPa の圧力損失が生じることが分かった。



(a) 温度分布

(b) 熱伝達分布

図 2.2.6-21-1 ケーブル長手方向 冷却特性

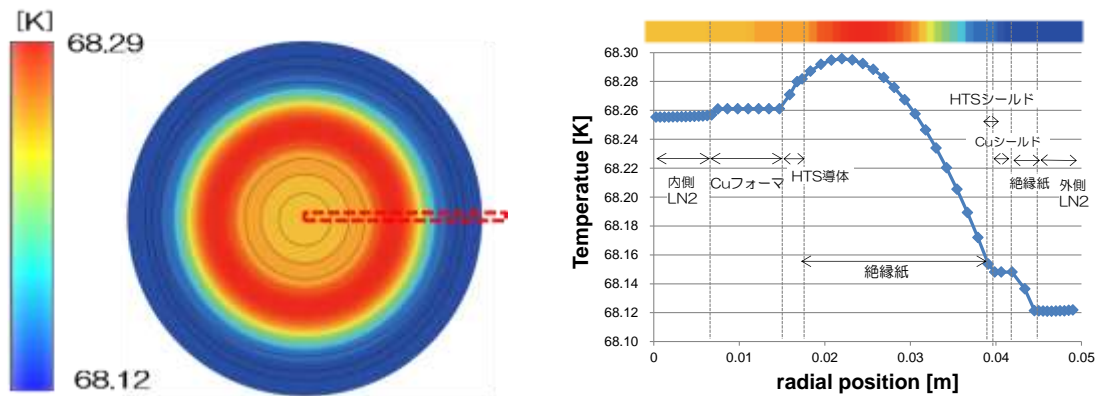


図 2.2.6-21-2 1000m 地点での半径方向温度分布 (左図 コンター、右図 温度分布)

a-2 定常時の超電導ケーブル冷却特性 -ストレート管、ケーブルコア偏心あり-

i. 計算モデル及び条件

ケーブルコアを断熱管下部に偏心することが、ケーブルコア内の半径方向温度分布と圧力損失に与える影響を評価した。モデル概念図を図 2.2.6-22 に示す。計算条件は下記の通りとした。

- 3次元モデル 軸方向熱伝導を考慮
- 電気絶縁紙等のケーブルを構成している各層を簡略化せず、詳細にモデル化
- 発熱は電気絶縁層 0.6 W/m、HTS 導体層 0.13 W/m、HTS シールド層 0.07 W/m (層内にて均一に発熱)
- 外側流路はストレート管 (凸凹は無し)
- 流量 20 [L/min] 内外流路への流量配分比率については偏心していない時と同様 (助走区間は無し)
- 定常領域における各特性を評価

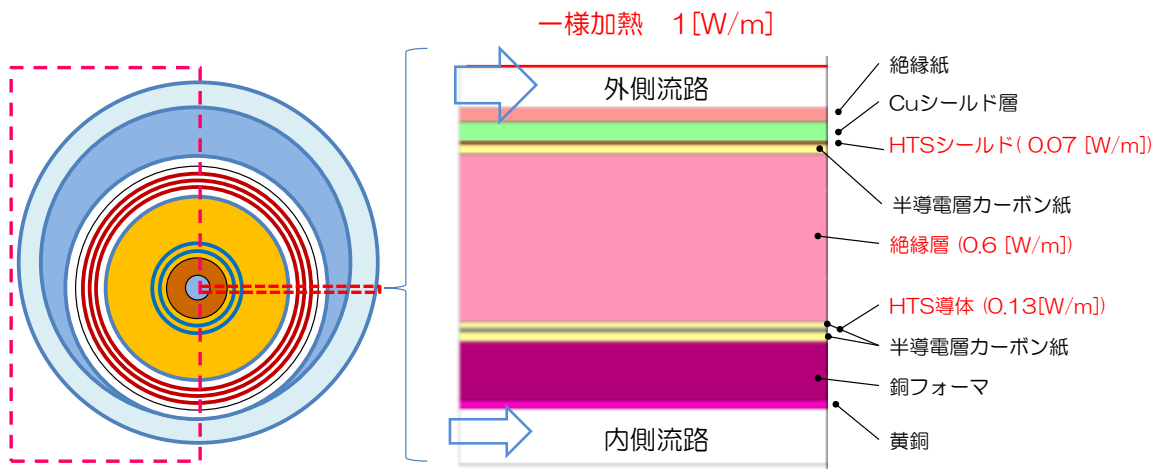


図 2.2.6-22 解析モデル (偏心あり+ストレート管)

ii. 解析結果

外側流路の圧力損失について、流量を固定した条件で偏心の有無を比較すると、偏心していない場合の圧力勾配 60 Pa/m に対し、偏心した場合は 40 Pa/m と低減した。これは図 2.2.6-23 に示す通り、ケーブルコアの偏心により外側流路が①のように拡大する箇所と②のように縮小する箇所が生じるが、①の流路拡大による圧力損失低減の効果が②の流路を縮小するために損失が増大する効果よりも大きいためと考えられる。

図 2.2.6-24-1 にケーブルコア中心を基準とした半径方向に対する温度変化の分布を示す。偏心側(180 deg)の外側流路における液体窒素温度は、偏心逆側(0 deg)に対して約 0.15 K 高いが、Cu シールド層より内側の HTS シールド層および HTS 導体層を含むケーブル内温度は偏心の有無によらずほぼ均一となっている。これは、ケーブル断面内の熱流束ベクトル計算結果を示す図 2.2.6-24-2 の③が示すとおり、液体窒素が流れづらい 180 deg 側では液体窒素からの伝熱による冷却は伝わりづらいが、液体窒素がよく流れる①の 0 deg 側からの冷却が熱伝導率の高い Cu シールド層を介してケーブル周方向に対し伝わり、温度分布を均一化する役割を果たしているためであることが分かった。

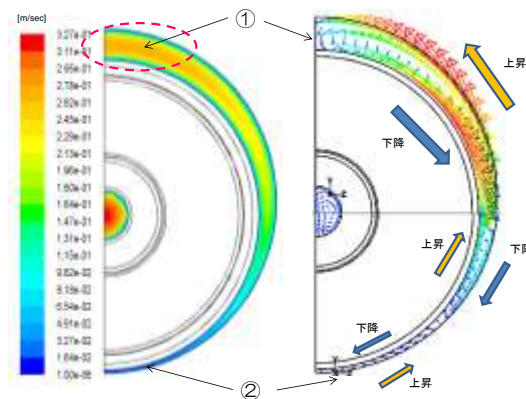


図 2.2.6-23 ケーブル断面内 液体窒素特性 (左図 流速分布、右図 流速ベクトル)

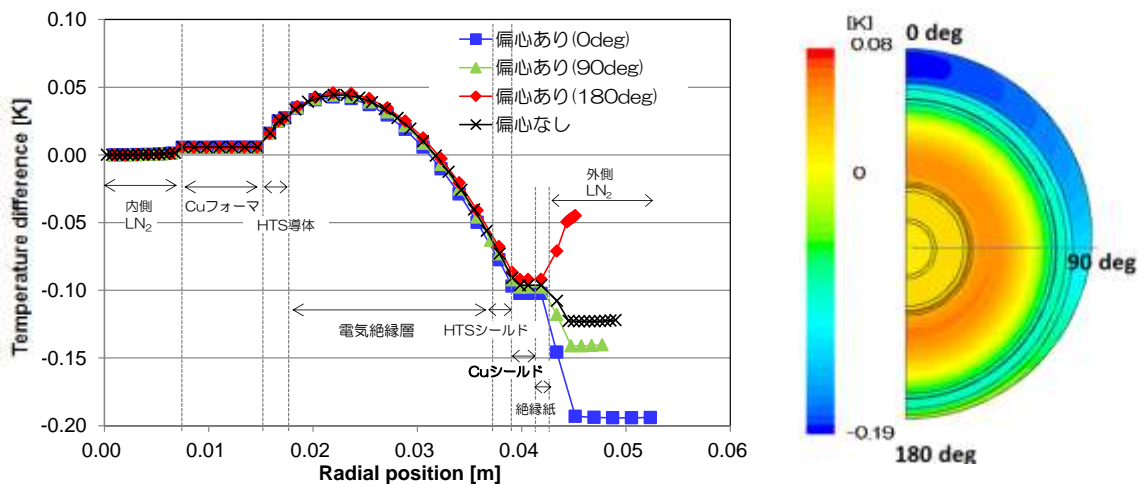


図 2.2.6-24-1 コア偏心時の半径方向温度分布 (右図 温度分布、左図 コンター)

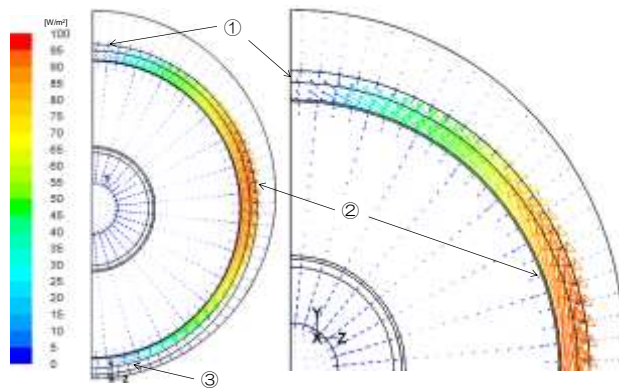


図 2.2.6-24-2 ケーブル断面内 熱流束ベクトル図

a-3 定常時の超電導ケーブル冷却特性 -コルゲート管、ケーブルコア偏心無し-

i. 計算モデル及び条件

断熱管にスパイラル・コルゲート管を使用した場合の温度分布と圧力損失について解析した。モデル概念図を図 2.2.6-25 に示す。計算条件は下記の通りとした。

- 3次元モデル 軸方向熱伝導を考慮
- 電気絶縁紙等のケーブルを構成している各層を簡略化せず、詳細にモデル化
- 発熱は電気絶縁層 0.6 W/m、HTS 導体層 0.13 W/m、HTS シールド層 0.07 W/m (層内にて一様に発熱)
- 外側流路はコルゲート管 (凸凹あり)
- 内外流路の圧力損失は等しい
- 流量 20 [L/min] 定常領域における各特性を評価

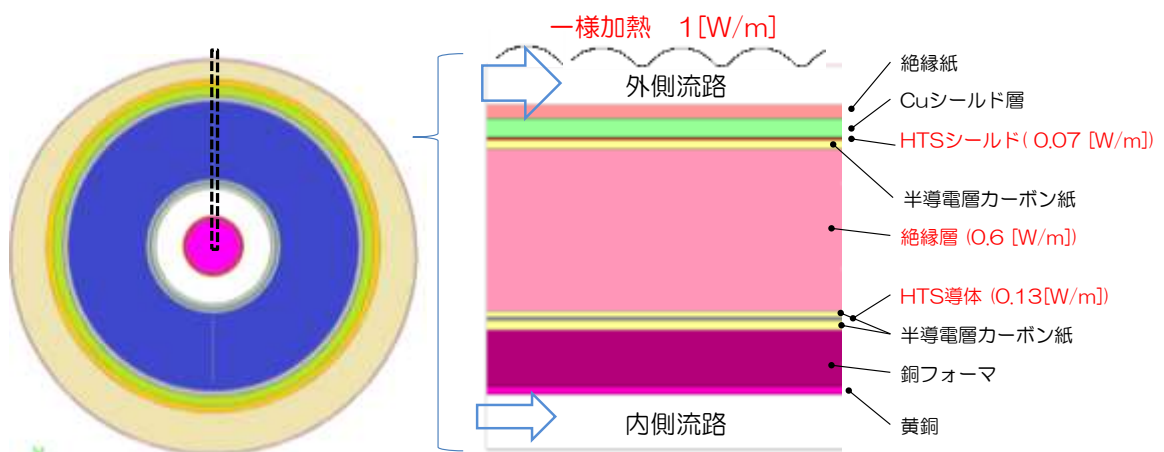
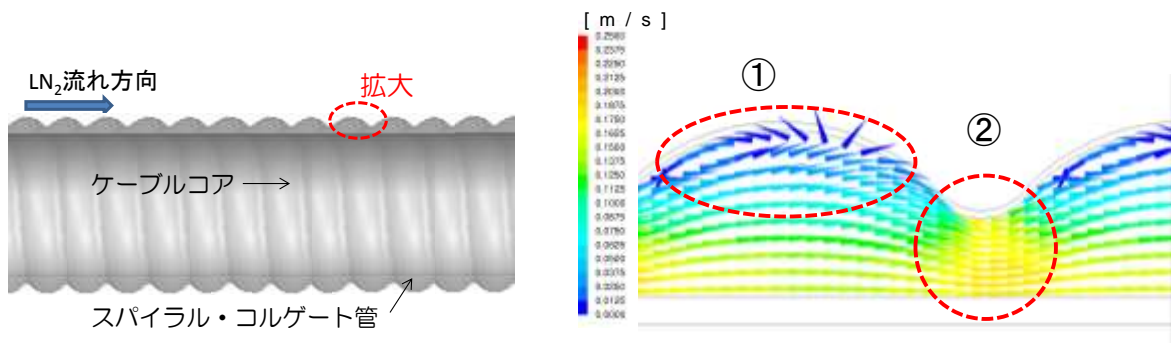


図 2.2.6-25 解析モデル (偏心なし+コルゲート管)

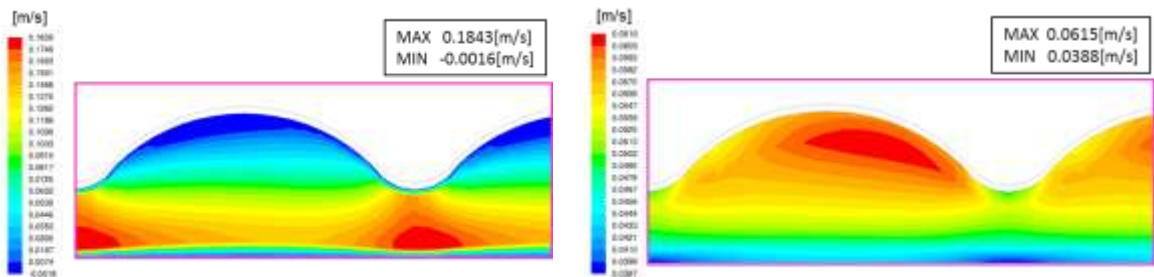
ii. 解析結果

図 2.2.6-26-1 にスパイラル・コルゲート管内の液体窒素の流速ベクトル図を示す。コルゲート管内の凸部①にて一部逆流（淀み）が見られるとともに、凹部②において流れの圧縮・拡大が確認された。ケーブル内の液体窒素の圧力分布を確認したところ、この凹部における液体窒素流れの収縮・拡大により圧力損失及びスパイラル構造における流路距離増加による圧力損失も生じていることから、スパイラル・コルゲート管の使用することにより、ストレート管を使用した場合と比較して大きな圧力損失が生じる可能性が高いことが分かった。また、ケーブル内の周方向温度分布は、図 2.2.6-26-2(a)に示すようにスパイラル構造の旋回流により、周方向の液体窒素温度は均一化されるため、偏心時に確認されたような銅シールド層における熱の流れは殆ど確認できなかった。ただし、ストレート管を使用した場合の流量比率が内側：外側＝13%：87%であるのに対し、スパイラル・コルゲート管の使用時は外側流路の圧力勾配の増加することで内側への流量比率が大きくなり、流量比率が内側：外側＝22.5%：77.5%となる。そのため、図 2.2.6.26-3 に示す通りケーブル断面半径方向における温度分布については、スパイラル・コルゲート管の使用時はストレート管使用時と比較して、HTS 導体層の温度が低く、HTS シールド層の温度が高めになる傾向となるが、ケーブル内の温度差は両者とも 0.2 K 以下であり、1000 m 長手方向の温度勾配に対して十分小さいため、断熱管形状がケーブル温度特性に与える影響は小さいと考えられる。



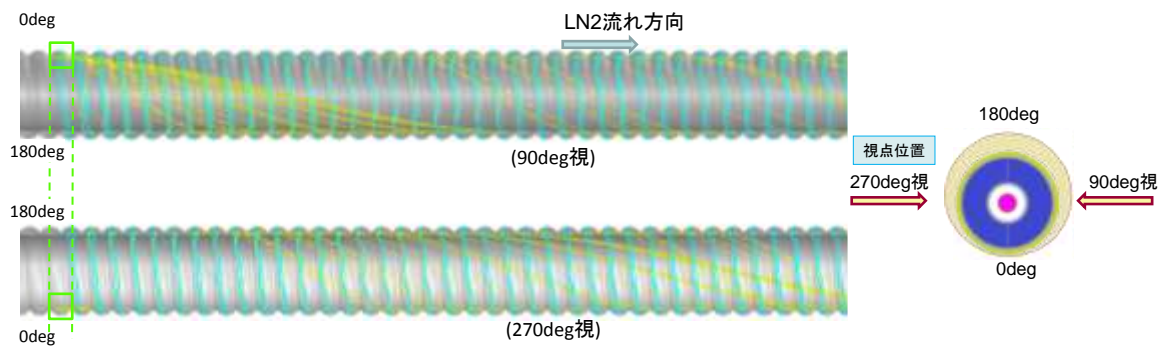
(a) 概念図

(b) 流速ベクトル



(c) 軸方向流速

(d) 周方向流速



(e) 液体窒素の流線図

図 2.2.6-26-1 スパイラル・コルゲート管使用時における液体窒素の流体特性
(ケーブル長手方向)

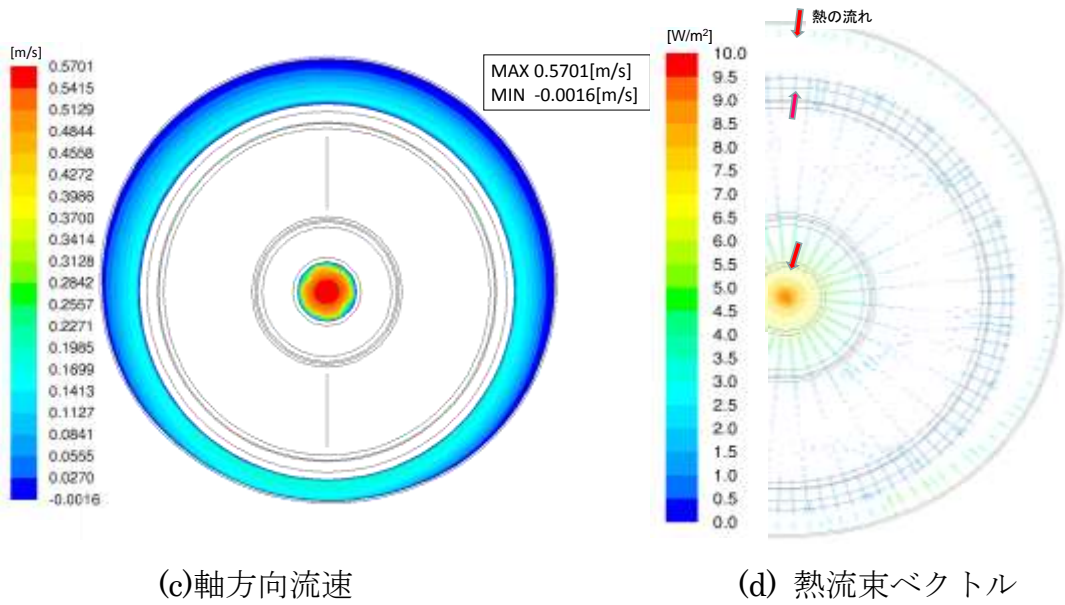
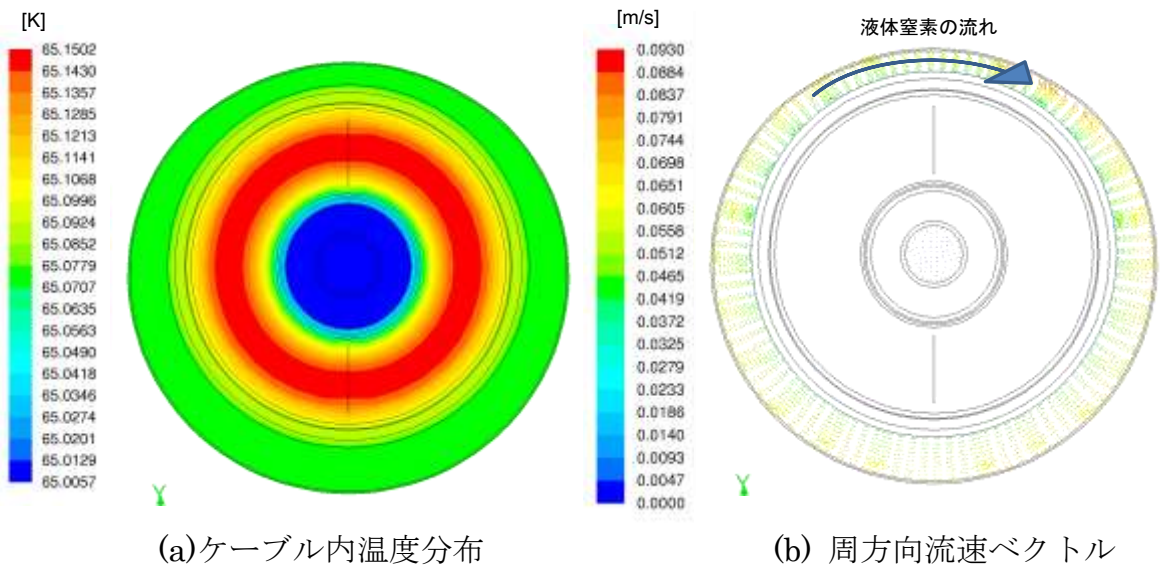


図 2.2.6-26-2 スパイラル・コルゲート管使用時 液体窒素の流体特性 (断面内)

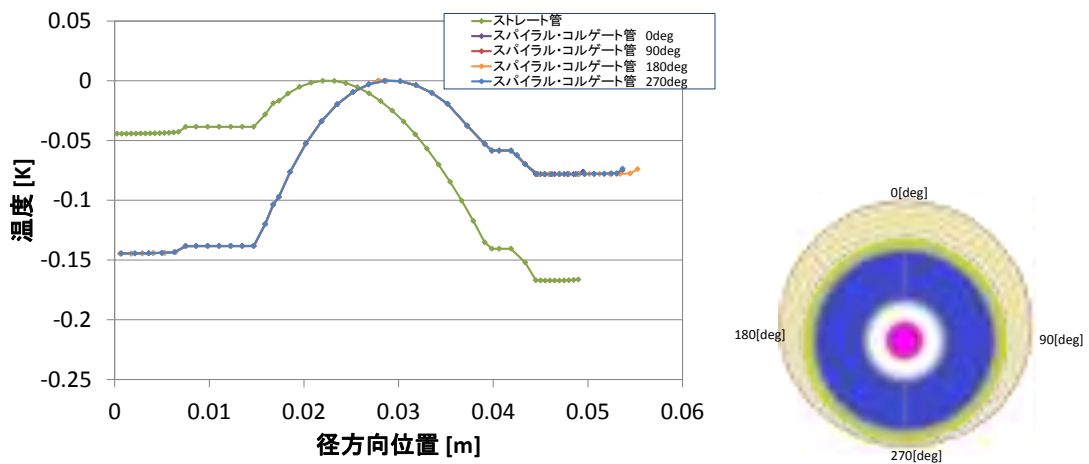


図 2.2.6.26-3 スパイラル・コルゲート管とストレート管使用時のケーブル半径方向温度分布の比較

a-4 定常時の超電導ケーブル冷却特性（コルゲート管、ケーブルコア偏心あり）

スパイラル・コルゲート管を使用した場合にて、圧力損失を偏心の有無にて比較すると、偏心していない場合の圧力勾配が 180 Pa/m であったのに対し、偏心した場合は 140 Pa/m であり、本章 a-2.ii で示した場合と同様に偏心することで圧力損失が低減することを確認した。また、ケーブル断面内半径方向の温度分布については、周方向への旋回流の影響で外側流路内の液体窒素温度は均一化され、偏心時に確認されたような銅シールド層における熱の移動は殆ど確認できなかった。

a-5 冷凍機的能力・循環用ポンプの仕様検討

275 kV 高電圧ケーブル設計を参考に、実設計に近いスパイラル・コルゲート管、偏心構造とした設計にて長距離ケーブルの冷却に必要な冷凍機的能力・循環用ポンプの仕様を検討した。液体窒素の流量 20 L/min、運転温度をケーブル入口 65 K-出口 77 K とした条件にて、ストレート管を使用した場合は図 2.2.6-20 に示す通り $\Delta T = 3 \text{ K/km}$ であり、スパイラル・コルゲート管を使用した場合も図 2.2.6.26-3 に示す通りケーブル内の温度分布は殆ど影響を受けないと想定されることから、ケーブル入口 65 K-出口 77 K とした条件での送電可能長は約 4 km となる。また、侵入熱 1.0 W/m、内部発熱 0.8 W/m の条件にて、4 km 分の発熱を冷却するのに必要となる冷凍機的能力は 7.2 kW となる。また、圧力損失については本章 a-4 に記載の通り $\Delta P = 140 \text{ Pa/m}$ であることから 4 km の圧送に要する循環用ポンプ圧力は 560 kPa となる。

a-6 定常時の超電導ケーブル冷却特性（まとめ）

簡易モデルによる理論計算結果と数値シミュレーション結果を比較したところ、良い一致を示しており、数値シミュレーションの計算モデルの妥当性を確認した。

断熱管をストレート管とし、ケーブルの層構造等を詳細にモデル化した場合の数値シミュレーションより、半径方向の温度変化は 0.2 K 以内と均一であり、ケーブルコアを構成している各層の熱伝導率の影響は小さいことが分かった。また、ケーブル 1000 m を液体窒素にて冷却するのに約 3 K の温度上昇および 60 kPa の圧力損失が発生することが分かった。

ストレート管を使用した条件でケーブルコアが偏心した場合、液体窒素が流れづらいコア偏心側に、偏心逆側における液体窒素の冷却が銅シールド層を介してケーブル周方向に伝わることで温度が均一化されるため、ケーブル断面内半径方向の温度分布に与える影響は小さい。また、偏心逆側の流路が拡大することで、圧力損失は低減することが分かった。スパイラル・コルゲート管を使用した場合、圧力損失特性については凸凹の流路縮小・拡大及びスパイラル構造における流路距離増加によ

り大きく増加する恐れがあることが分かった。また、温度特性については、スパイラル構造による周方向への旋回流により液体窒素温度が均一化されるため、ケーブル内周方向の温度分布にあたる影響は小さいが、外側流路の圧力勾配の増加により内側流路の流量比率が大きくなるため、ケーブル断面半径方向の温度分布はストレート管使用時と比較して内側流路側が低くなる傾向が確認された。なお、実設計に近いスパイラル・コルゲート管を使用しケーブルコアを偏心させた設計にて、液体窒素の流量 20 L/min、ケーブル入口 65 K-出口 77 K とした条件では $\Delta T = 3$ K/km であることから送電可能長は 4 km となり、侵入熱 1.0 W/m、内部発熱 0.8W/m の条件で必要となる冷凍機の能力は 7.2 kW、必要となる循環用ポンプ圧力は、 $\Delta P = 140$ Pa であることから 560 kPa となる。

b. 端末からの侵入熱の影響

外部からケーブルへ侵入する熱については、1 W/m の熱がコルゲート管外側より侵入するものとして解析を実施してきたが、ケーブル終端部の銅フォーマ及び銅シールドに生じるジュール発熱が外部侵入熱としては支配的である可能性がある。そこで 2 次元軸対称モデルを用いて、モデル両端の銅フォーマ部分に外部侵入熱相当の熱量を与えた条件での数値シミュレーションを実施し、本章 a-ii における解析結果との比較を通じて、ケーブル終端部から侵入する熱がケーブル内部の温度分布に与える影響を評価した。

i. 計算モデル及び条件

超電導ケーブル端末構造については、HTS シールド層の接続処理等により複雑な形状をしているが、本計算では導体接続部における発熱及び侵入熱による影響を調査するため、下記のモデルを作成し、液体窒素と導体接続部の間の熱伝達について、自然対流とした場合、熱伝導のみとした場合、強制対流とした場合の 3 ケースについて解析を行った。

- ① 接続端子より上流側(気中終端接続部に向かう電流リード側)は無視する
- ② 2次元軸対称モデルとする
- ③ 各流路への流量配分は理論計算で用いた比率とする
流量 20 [L/min]、内側流路：外側流路 = 13%：87%
- ④ 接続端子部は同軸二重円筒として簡略化する
接続端子で発生するジュール発熱と外部からの侵入熱の総量を Q_E とする
- ⑤ 銅フォーマ(外面)一端末容器内液体窒素間には間に電気絶縁層(20.8 mm)があることを考慮して断熱とする
- ⑥ 端末容器への放熱(Q_{L1})を考慮
- ⑦ 内側流路への放熱(Q_{L2} 、ケーブル端から約 2 m)を考慮

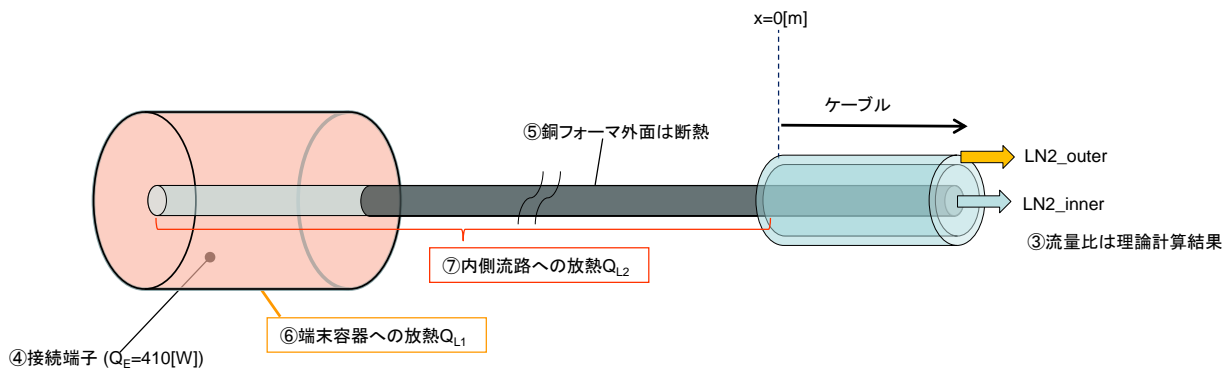


図 2.2.6-27 端末容器内の接続端子部モデル

ii. 解析結果

表 2.2.6-5 にケーブル端末容器内における熱伝達条件が内外流路への放熱量及びケーブル温度に与える影響について示す。内側・外側に流れる流量比率は固定された条件のため、内側の熱伝達率は各条件においても一定である。従って、接続端子部の外側と容器内液体窒素の熱伝達の大きさにより内外流路への放熱量の比率が決定される。表 2.2.6-5 に示す通り、いずれのケースについても接続端子部における熱は接続端子部の外側及び内側流路の液体窒素に大半が放熱されることが分かる。外側との熱伝達が高い自然対流モデルにおいては、内：外の放熱量の割合が約 1：3 程度になるが、内側流路の液体窒素流量は外側流路に対して小さいため内側流路の温度上昇は大きく、図 2.2.6-28(b) に示すように 0 m 地点にて内側・外側流路の温度はそれぞれ 1.6 K、0.6 K ほど上昇し、その先約 200 m 程度で均一化される。外側流路との熱伝達を熱伝導のみとした場合、図 2.2.2-28(c) に示すように内側流路に大半の熱が流れ、0 m 地点での内側・外側流路の温度はそれぞれ 5.5 K、0.02 K ほど上昇し、その先約 350 m 程度で均一化される。また、外側流路との熱伝達を強制対流熱伝達とした場合、外側流路を流れる液体窒素の流速が非常に遅くなり熱伝達係数が小さくなるため、内側流路に大半の熱が流れ、図 2.2.2-28(d) に示すように内側・外側流路の温度はそれぞれ 5.4 K、0.03 K ほど上昇する。

本解析では交流損失の温度依存性は考慮していないが、内側流路の温度上昇は HTS 導体層の温度上昇につながり、HTS 導体 I_c を低下させるため交流損失の増加が懸念される。しかし、現状の高電圧ケーブル設計を参考とした場合、Ⅲ.2.2.3 (5) の図 2.2.3-34 が示す通り 73 K にて約 0.13 W/m の交流損失が測定されているため、端末容器内に流入する液体窒素の温度を 65 K とした場合、内側流路 0 m 付近の温度は最大 70.5 K 程度となるので交流損失の温度依存性の影響は小さいと考えられるが、端末容器内に流入する液体窒素の温度が高い場合は交流損失に与える影響が大きくなるため、内側窒素流路の温度上昇を抑える必要がある。内側流路の温度上昇を抑えるには以下が挙げられる。

- ・外側流路径を固定し、内側流路径を拡大する。内側の流量が増え、温度上昇を抑制できる。また、流速の低下により内側の熱伝達特性が低くなり、内側への放熱

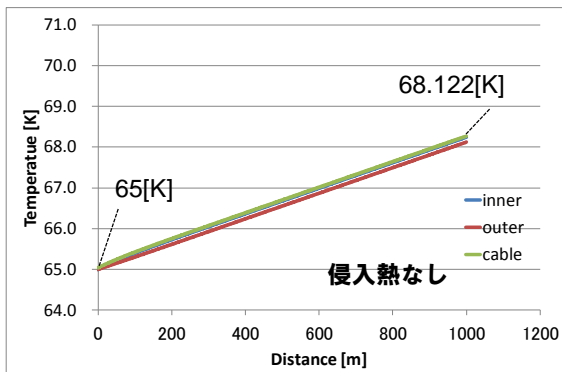
量も減少する。ただし、外側流路を固定し内側流路を拡大するには、ケーブルコアの各層厚みを低減する必要がある。

- ・内側流路径を固定し、外側流路径を小さくする。内側流路の流量が増え冷却容量が増すが、流速の増加により熱伝達特性も高くなり内側への放熱量も増加するため、既に内側への放熱比率が十分に高い場合以外は注意が必要である。また、内外流路の総断面積が小さくなるので圧力損失も増加してしまう。

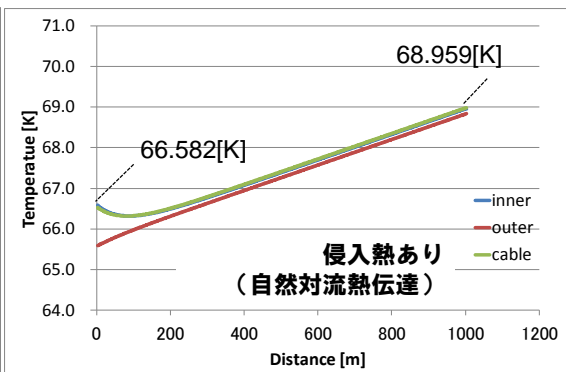
なお、外側・内側の温度差を短い距離で均一化するためには、内外側流路間の熱伝導率を高くする（ケーブルコアの熱伝導率を高くする）ことが有効と思われる。

表 2.2.6-5 ケーブル端末容器内における熱伝達特性が
内外流路への放熱量及びケーブル温度に与える影響

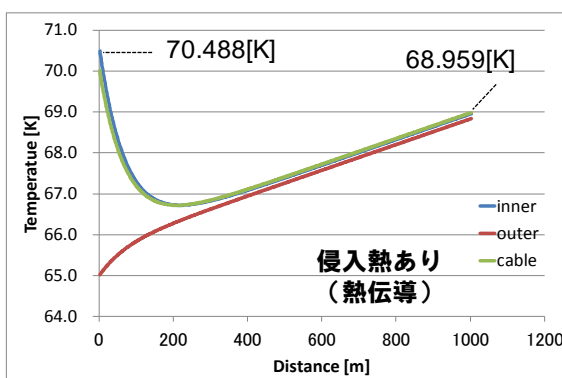
接続端子部 外面放熱モデル	端末容器への 放熱量 Q_{L1} [W]	内側流路への 放熱量 Q_{L2} [W]	銅フォーマ からの侵入熱 Q_0 [W]	内側流路 端部 温度[K]	外側流路 端部 温度[K]	銅フォーマ 端部 温度[K]	端子温度 T_e [K]
(1)自然対流	294.070	115.916	0.014	66.582	65.586	66.583	70.119
(2)熱伝導	9.471	400.413	0.116	70.488	65.019	70.436	83.007
(3)強制対流	17.126	392.760	0.114	70.384	65.034	70.332	82.660
侵入熱なし				65	65	65	



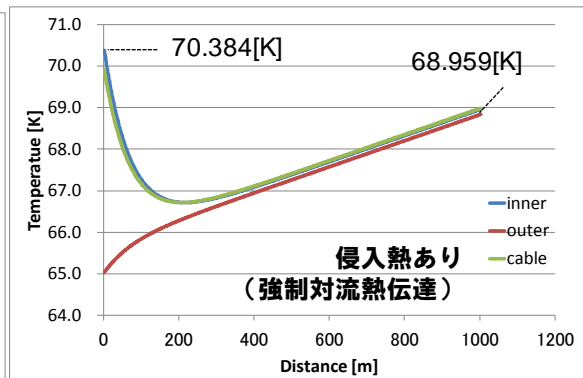
(a) 端末からの熱侵入無し



(b) 自然対流熱伝達



(c) 熱伝導



(d) 強制対流熱伝達

図 2.2.6-28 ケーブル端末容器内における熱伝達特性がケーブル長手方向の温度分布に与える影響

c. 過電流通電後の復帰特性

超電導ケーブルシステムの実用化にあたり、その課題の 1 つとして系統事故による過電流通電時のケーブル内温度特性の把握が挙げられる。過電流通電により温度が上昇したケーブルシステムに対して、液体窒素冷却によって通常運用時における温度までの冷却に要する時間を把握することが、事故対応の上で重要となる。そこで、本章 a-1.ii で述べた 2 次元軸対称モデルを用いて、高電圧ケーブル設計における過電流通電時(63 kA・0.6 sec)を想定した発熱量分布を初期条件とした非定常熱流動解析を実施し、過電流通電後のケーブルシステム内部の冷却特性について解析するとともに、ケーブル復帰に要する時間と冷凍機の冷却能力の関係について検討した。

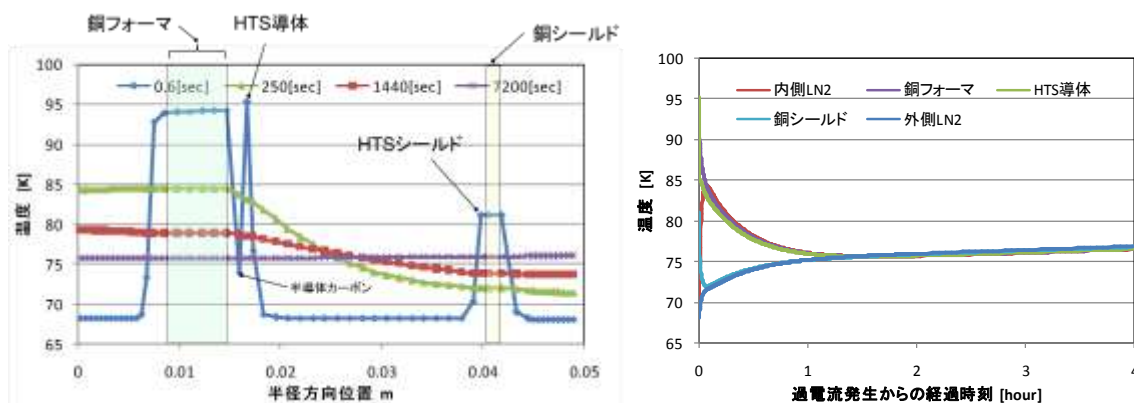
- ・ 窒素循環無し：ポンプ停止を想定したことを想定（流量 0 [L/min]時）
- ・ 窒素循環あり：流量 20 [L/min]時

i. 計算モデル及び条件

本章 a-2.ii の計算モデルを使用する。内外流路への流量比率は本章 a-1.ii における理論計算値（内側流路：外側流路 = 13%：87%）とする。また、過電流通電事故発生後はケーブル内部での発熱（交流損失及び誘電損失）はないものとし、外部侵入熱(1 W/m)のみを与えた。なお、液体窒素の相変化は考慮しない。

ii. 解析結果（液体窒素循環無しの場合）

図 2.2.6-29 に液体窒素送り出し口から十分に離れた地点(1000 m)での温度変化を示す。図 2.2.26-29(a)に示すように過電流通電により通電箇所（銅フォーマ、HTS 導体、HTS シールド、銅シールド）の温度が局所的に上昇するが、過電流通電から 250 秒後には熱伝導率が低い電気絶縁層を隔てた内側（内側流路－HTS 導体）と外側（HTS シールド－外側流路）での温度がそれぞれ均一化される。続いて、温度が高いケーブル内側から温度が低い外側に熱が移動していき、約 1 時間程度でケーブル全体の温度が均一化される。このことから、ケーブル内温度が均一化するまでの時間は熱伝導率の低い電気絶縁層に影響受けることが分かる。なお、図 2.2.6-29(b)に示すように、ケーブル内温度は約 1 時間後に 77 K 以下となるが、外部侵入熱の影響で約 4 時間後には 77 K を超えてしまう。



(a) 半径方向温度分布の時間変化 (b)各部の温度の時間変化
 図 2.2.6-29 過電流通電後の復帰特性 (液体窒素の循環冷却無し)

iii. 解析結果 (液体窒素循環ありの場合)

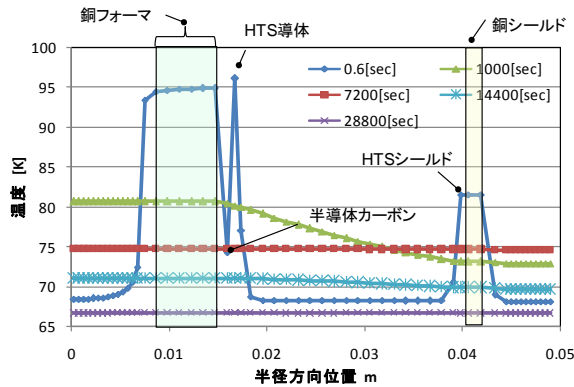
図 2.2.6-30 に液体窒素送り出し口から十分に離れた地点(1000 m)での温度変化、図 2.2.6-31 に内側・外側流路の液体窒素の長手方向における温度変化を示す。本設計において、ケーブル内の温度変化は以下の通り変化していく。

- ① 本章 c-ii. 解析結果 (液体窒素循環無し) と同様、図 2.2.6-30 (a)に示すように過電流通電により温度が局所的に上昇し、電気絶縁層を隔てた内外でケーブル内の温度が均一化される。
- ② 温度が高い内側から外側に熱が移動していき、図 2.2.6-30 (b)に示すように約 1 時間程度でケーブル全体の温度が均一化される。(外側の温度は上昇、内側の温度は低下)
- ③ 温度の低い液体窒素が循環してくることで、ケーブル内温度が低下する。図 2.2.6-31 に示すとおり、送り出し口(0 m)から近い地点では短い時間で冷たい液体窒素が伝わっていることが分かる。なお、長手方向に対する液体窒素の流速は外側流路より内側流路の方が速いが、本設計では液体窒素とケーブルとの熱伝達が十分に大きく、送り出された冷たい液体窒素は過電流通電により温度上昇したケーブルに温められやすいため、流量の多い外側流路の冷却の方が早く遠方に伝わっている。
- ④ 外側流路からの温度の低い液体窒素の熱伝導によりケーブル内部側が冷却され、温度が均一化されていく。

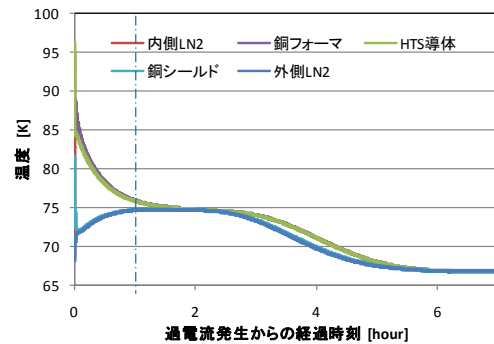
以上の通り、液体窒素の循環により過電流通電前の温度への復帰特性に影響を与えるものとして考えられるのは以下の通りである。

- ・ ②における均一化されたケーブルの温度：
 単位長さあたりのケーブルコア内構造物の比熱に依存する (比熱が大きい電気絶縁紙等の影響が大きい)

- ③における液体窒素が遠方まで伝わるまでの時間の短縮：
液体窒素の流量を上げる。(熱伝達が十分に良い時は液体窒素の流速には影響を受けず、液体窒素の流量(単位時間あたりの冷却能力)が重要)
- ②、④におけるケーブル内の温度均一時間の短縮：
電気絶縁層の熱伝導率を高くする(Ⅲ2.2.3-5(6)に記載の通り PPLP®より熱伝導率の高い Tyvek®/PE 合成絶縁紙の適用等が考えられる)

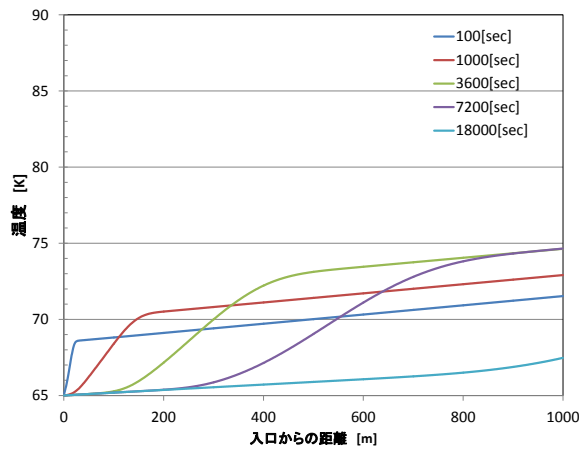


(a) 半径方向温度分布の時間変化

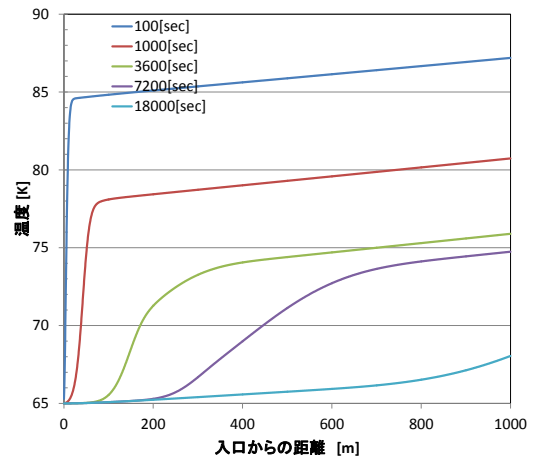


(b) 各部の温度の時間変化

図 2.2.6-30 1000 m における過電流通電後の復帰特性
(流量 20 L/min の時)



(a) 外側流路の LN₂ 温度



(b) 内側流路の LN₂ 温度

図 2.2.6-31 ケーブル長手方向 液体窒素温度分布の時間変化
(流量 20 L/min の時)

(6) まとめ

超電導ケーブルの冷却に関して、対応が必要と思われる関連法的規制を調査した。導入・布設時は、該当する法的規制を管理する関係箇所と協議・確認・許可・申請を的確に行う必要がある。また、冷凍機の能力を確認し、超電導機器に必要な冷凍能力を確認した。

超電導ケーブルの冷却特性に関する評価を行い、長距離ケーブルを布設する際に必要となる冷凍機の能力・循環用ポンプの仕様を検討した。また、定常時におけるケーブル終端部から侵入する熱がケーブル内部の温度分布に与える影響及び過電流通電後のケーブル冷却特性に関する評価を行い、超電導ケーブルの復帰特性と冷凍機の冷却能力との関係について検討を行った。

引用論文リスト

- (1) ISTECC 超電導 Web21 2008 年 6 号 「冷凍機技術開発の進展」 P.3-P14
- (2) ISTECC 超電導 Web21 2009 年 6 号 「冷凍・冷凍技術の現状」 P.3-P13
- (3) NEDO 委託事業、平成 21 年度中間評価分科会、「高温超電導ケーブル実証プロジェクト事業原簿」、冷却システムの設計検討 p116-p125 (2009 年 11 月)
- (4) O.Maruyama et al., “Numerical analysis of heat transfer and fluid characteristics in long distance HTS cable”, accepted for publication in Physica procedia.
- (5) Nakayama Y, Boucher RF. Introduction to fluid mechanics. Arnold; 1999.
- (6) R.Byron Bird , Warren E.Stewart, Transport Phenomena Second Edition, WILEY, 2002, P. 182.
- (7) JSME, JSME Mechanical Engineer' s Handbook, JSME, 1988, A5-76.
- (8) JSME, JSME Data Book:Heat Transfer 5th Edition, JSME, Tokyo, 2009, p.45-46.

2.3 超電導変圧器の研究開発

超電導変圧器は、II-2.1.3節で述べた計画内容に基づき、①Y系超電導線材による低交流損失で大電流容量の巻線技術開発、②冷却システム技術開発、③限流機能付加変圧器技術開発、④それらの成果を反映して66 kV/6.9 kV-2 MVA級超電導変圧器モデルの試作と特性検証を行った。これらにより高効率でコンパクトな配電用の66 kV/6.9 kV 20 MVA級超電導変圧器の実現に資する重要な技術の開発に取り組んだ(表 2.3.1-1)。また、併せて変圧器巻線技術、限流機能付加技術、2 MVA級超電導変圧器モデル検証等の技術開発に必要なY系超電導線材(5 mm幅3分割以上、 $I_c=50 \text{ A}/5 \text{ mm-w} @65 \text{ K}$ 、0.01 T)の安定製造技術の開発を進めた。

表 2.3.1-1 超電導変圧器モデルと実用超電導変圧器の諸元

	2 MVA 級超電導変圧器モデル	20 MVA 級超電導変圧器 (実用器)
容量、相数、周波数	2 MVA、3φ、60 Hz	20 MVA、3φ、60 Hz
電圧	66 kV/6.9 kV	66 kV/6.9 kV
電流	17.5 A/167.4 A	175 A/1,674 A
%インピーダンス	4.5 % (2 MVA 基準)	15 % (20 MVA 基準)
冷却	サブクール液体窒素 (66 K)	サブクール液体窒素 (66 K)

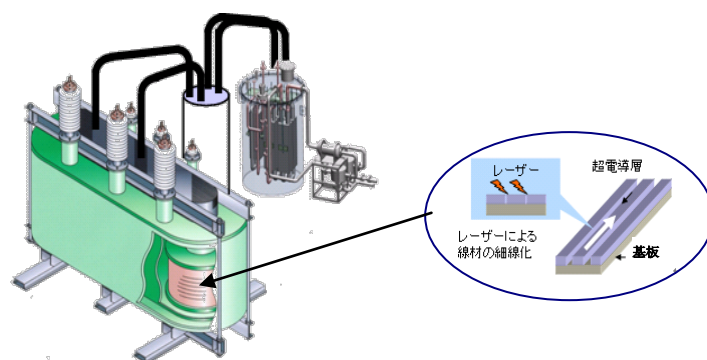


図 2.3.1-1 2 MVA 級超電導変圧器モデルの概念図

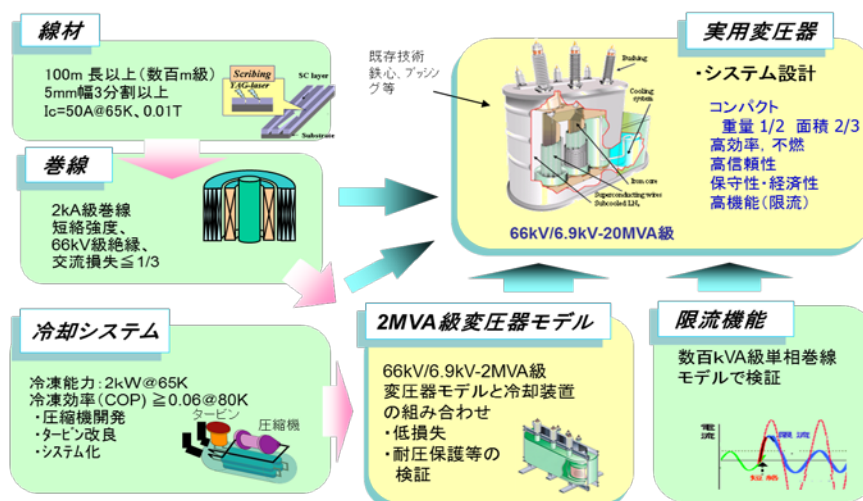


図 2.3.1-2 超電導変圧器技術開発の体系

2 MVA 級超電導変圧器モデルと 20 MVA 級実用超電導変圧器の諸元を表 2.3.1-1 に、2 MVA 級超電導変圧器モデルの概念図を図 2.3.1-1 に示す。20 MVA 級変圧器の技術を見通すには、耐電圧や機器構成に必要なブッシング、鉄心等は 20 MVA 相当とし、電流に起因する巻線構成等は、20 MVA 級と等価にするために、巻線のターン数及び超電導導体の多層並列構造は実機と同等とし、巻線の並列導体数を極力低減することが必要である。それらを考慮して最低容量は 2 MVA とした。超電導変圧器技術開発の体系を図 2.3.1-2 に、超電導変圧器技術開発のスケジュールを図 2.3.1-3 に示す。

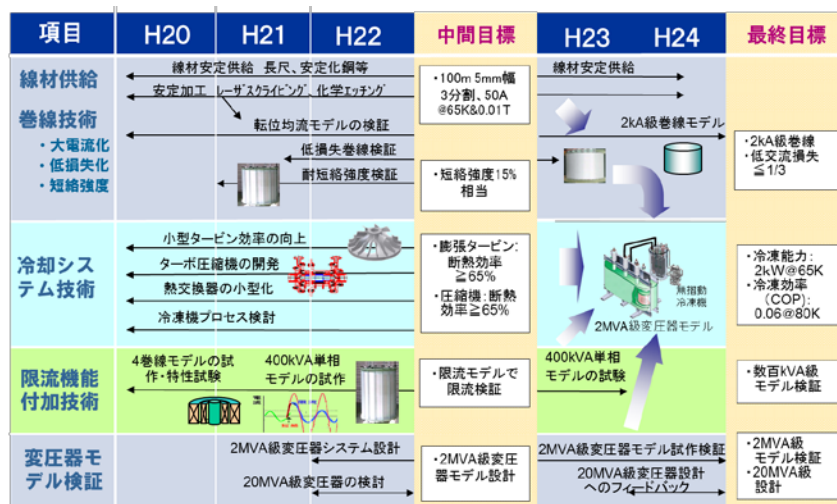


図 2.3.1-3 超電導変圧器技術開発のスケジュール

※ 開発計画の変更

また、プロジェクト遂行中に当初計画から次の 2 項目を変更した。しかし、両変更は基本計画及び開発費には影響していない。①IBAD-MgO 中間層基板適用による線材工程を平成 23 年度まで延期した。これは、IBAD-MgO 中間層基板の MgO 層は薄く（膜厚は従来の GZO 層の約 1/100）でも結晶粒は高面内配向であり、中間層製造速度の向上（約 100 倍）により線材コスト低減が図れるとともに、細線化や巻線技術の検証も良好であることによる（2.3.1-4、2.3.1-6 参照）。②数百 kVA 級限流モデル製作を平成 23 年度から平成 22 年度に前倒した。これは、4 巻線限流モデル変圧器の限流機能試験が良好であり、同限流モデル製作が見極められるとともに、この実証により、2 MVA 級変圧器モデルや実用変圧器へのよりの確な限流機能技術の反映が可能になったことによる（2.3.3-1～2.3.3-3 節参照）。

2.3.1 超電導変圧器巻線技術開発

20 MVA 級超電導変圧器の実現には、従来の線材では困難であった大電流化、低損失化が課題となる。これら解決には、細線化した Y 系超電導線材を積層し、大電流化した導体による巻線製作技術が必要となる。また、同構造の巻線が系統や変圧器の故障により発生する短絡電流に対しても、変圧器を健全に維持できる強度を

有する構造とする必要がある。

そのため、前 NEDO 事業の「超電導応用基盤技術開発（第Ⅱ期）」プロジェクトにおける検証の結果より、以下の開発を行った。① 多層並列転位構造を最適化し、2 kA が通電可能な巻線モデルを開発した。② 細線化線材により、無加工線を使用した場合に対し損失が 1/3 以下となる 100 m 級巻線モデルを開発した。③ 短絡電流（20 MVA 級変圧器%インピーダンス 15 %相当）により、巻線が劣化しない巻線モデルを開発した。

本プロジェクトにおける中間目標は、短絡電流（20 MVA 級変圧器%インピーダンス 15 %相当）により巻線が劣化しないことの検証とし、最終目標は、2 kA 通電可能な大電流巻線技術の確立及び交流損失 1/3 以下（対細線化しない線材）でかつ線材長が 100 m 級の巻線モデルを製作し検証することとした。なお、巻線関連技術の明確化のため、2 MVA 級変圧器モデルの試作・検証及び 20 MVA 級実用変圧器の設計をめざしたステップ毎の技術開発フロー図を図 2.3.1-4 に示す。

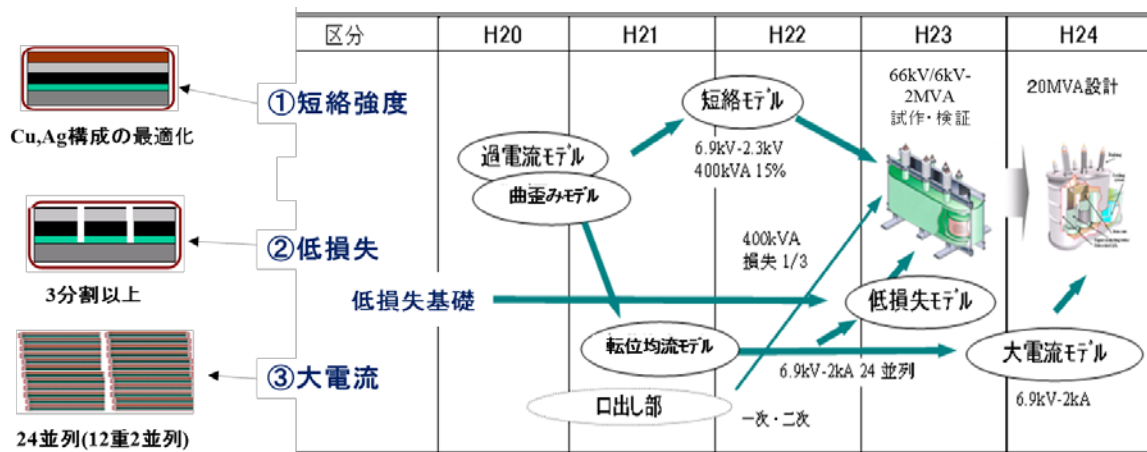


図 2.3.1-4 超電導変圧器の巻線技術開発フロー

2.3.1-1 超電導変圧器巻線の大電流化技術開発（九州電力、富士電機）

超電導変圧器の二次巻線に必要な 2 kA 級の大電流通電に向け、まず、多層化に伴う安定化材付線材曲げ特性と過電流特性を確認した。線材を多層並列導体（12 重 2 並列）とし、素線を転位することでインダクタンスを合せ、各素線電流を均一化する転位均流化の変圧器二次巻線モデル（12 重 2 並列の転位均流巻線モデル）及び二次巻線口出し部モデルを設計・製作し、大電流巻線構成技術を確認した。これらの要素技術の成果を踏まえ、変圧器の磁界分布を模擬した鉄心付大電流巻線モデルを設計、製作、評価を行った。

(1) 曲げ特性の検証

超電導変圧器用巻線に適用する多層転位並列導体用の転位に必要な曲げ特性について、2 種類の間層線材（IBAD-GZO 中間層基板、IBAD-MgO 中間層基板の

線材、2.3.4-1(5)節参照)の転位長 L を変化 (134~198 mm) させた巻線モデル (内径 ϕ 350、1重ね2並列巻線)を試作し、臨界電流 I_c 特性を試験した。その転位長 L の定義と巻線モデルを図 2.3.1-5 に、試験結果を図 2.3.1-6 に示す。同図から最短長 134 mm の転位長 L において、両種の間層を使用した超電導線材の転位曲げ試験による I_c 値の低下がなく、健全であることを確認した。

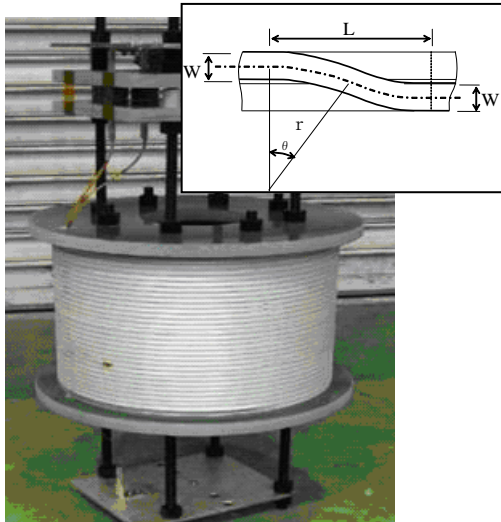


図 2.3.1-5 転位長の定義と曲げ特性試験巻線モデル

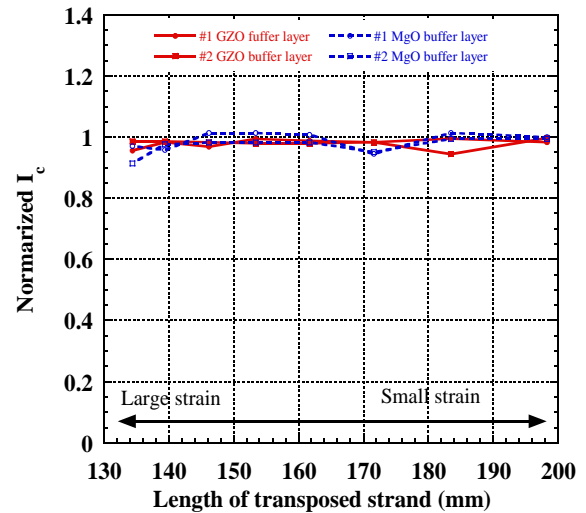


図 2.3.1-6 転位長による曲げ試験結果 (IBAD-GZO 中間層基板及び IBAD-MgO 中間層基板の線材)

(2) 三重ね巻線モデルの検証

超電導変圧器巻線用に必要な多層転位並列導体の構成の基礎検証として、保護層の銅付きの線材(素線)3枚で構成した導体を適用した三重ね巻線モデル(内径 ϕ 250 mm、12ターン、巻線長 9.4 m)を試作(図 2.3.1-7)し、過電流試験による各素線の分流及び曲げ歪み特性を試験・評価した。試験温度は 66 K とし、直流 I - V 測定、交流通電、直流 I - V 測定の繰返しの順で実施した。過電流の第1波は 1,395 A(465 A/素線)として、巻線モデル両端電圧、巻線温度及び超電導線と保護層の銅の電流を測定した。

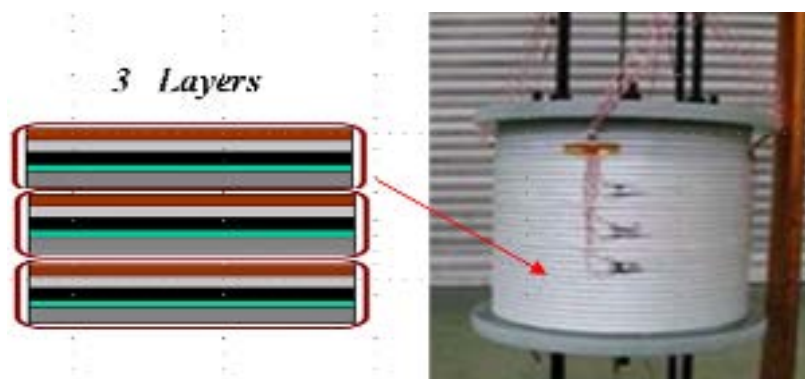


図 2.3.1-7 三重ね Y 系超電導線材による巻線モデル(ϕ 250 mm)

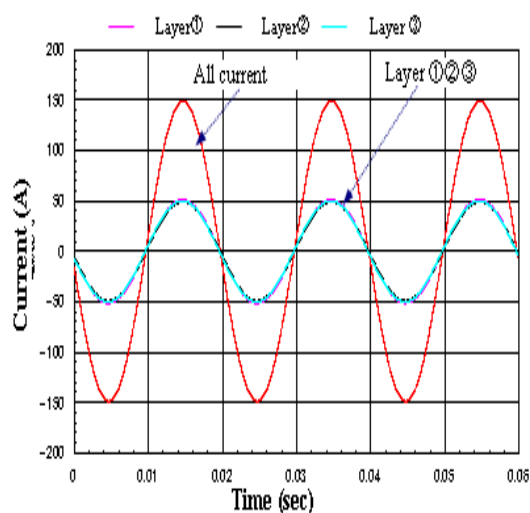


図 2.3.1-8 三重ね巻線の分流特性試験結果（定格電流以下）

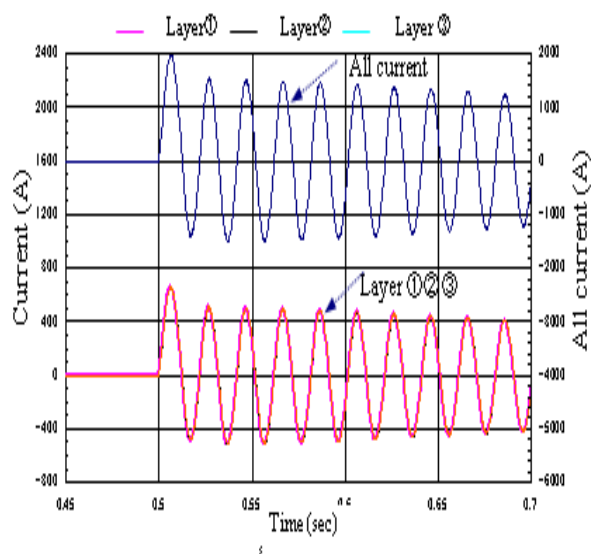


図 2.3.1-9 三重ね巻線の過電流特性試験結果

その結果のうち、三重ね巻線の定格電流以下での通電時の分流特性を図 2.3.1-8 に示す。同図から各素線の電流は均一であり、各巻線に均一に分流しており、転位が有効であることが分かる。また、三重ね巻線の過電流試験結果を図 2.3.1-9 に示すが、過電流に対しても、各巻線の転位が有効で、各素線に均一に分流していることが分かる。また、過電流試験の銅部と超電導部（GdBCO の高温超電導部）の電流特性を図 2.3.1-10 に示す。同図から超電導部の常電導転移により電流が銅部に移動していることが確認できる。さらに、三重ね巻線モデルの規格化したエネルギー特性（IBAD-MgO 中間層基板線材と IBAD-GZO 中間層基板線材の I_c 値を IBAD-GZO 中間層基板を基準として規格化）を図 2.3.1-11 に示す。同図から、IBAD-MgO 中間層基板線材と IBAD-GZO 中間層基板線材の特性は殆ど同等であり、ともに短絡時の線材当たりのエネルギーは 410 J/m（短絡電流が 0.2 sec 間通電による巻線の素線に印加するエネルギー）の 2 倍以上のエネルギーまで劣化は見られなく、健全であることが分かる。

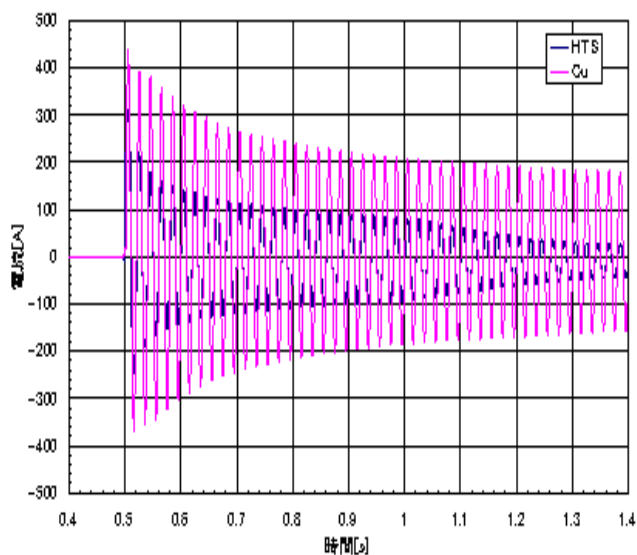


図 2.3.1-10 三重ね巻線モデルの過電流試験結果(IBAD-MgO 中間層基板線材)

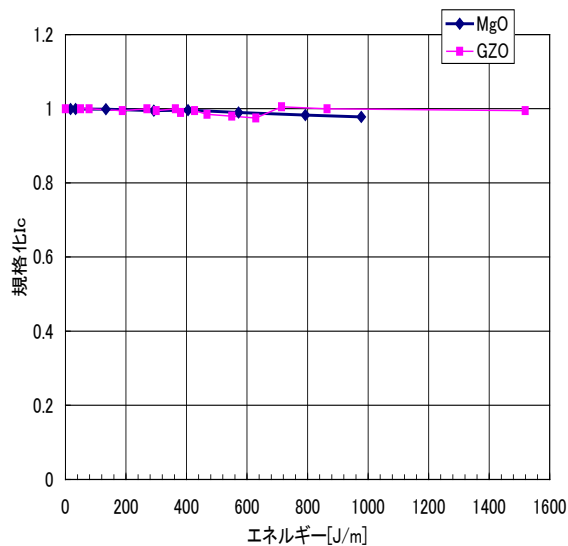
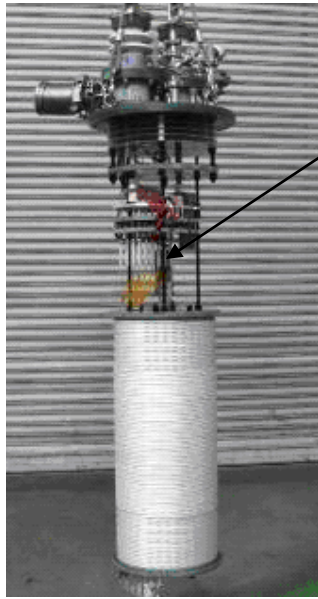


図 2.3.1-11 三重ね巻線モデルの規格化したエネルギー特性 (IBAD-GZO と IBAD-MgO 中間層基板線材)

(3) 転位均流巻線モデルの検証

変圧器二次巻線の素線の転位によってインダクタンスを同等にして各素線電流を均一化する転位均流巻線モデル(内径 $\phi 350$ mm、12 重ね 2 並列導体、48 ターン)について、転位均流化のパラメータを最適化し、多層転位並列導体の構成法を確認した。その転位均流巻線モデルの諸元と外観を図 2.3.1-12 に示す。試験では巻線転位部電圧、両端電圧及び同一の転位長さを 2 箇所測定、8 種類の転位長さ $\times 2=16$ 箇所を測定した。液体窒素温度 (77 K) での 800 A 交流通電時の素線電流と全電流の波形を図 2.3.1-13 に、各素線電流分流率 ($[\text{素線電流}/\text{素線平均電流}] \times 100$) を図 2.3.1-14 に示す。同図から各素線の電流分流率のバラツキは最大で 14 %であり、変圧器用としては十分対応可能なことが確認できた。また、IBAD-MgO 基板線材と IBAD-GZO 基板線材の I_c 値を規格化して比較したが、ほぼ同等の特性であった。



線材	$I_c@77K$	100 A 以上
	安定化銅厚	0.1 mm
	55 m×24 本	1,320 m
巻線	φ350、12 重×2 並列	

図 2.3.1-12 転位均流巻線モデルの諸元と外観

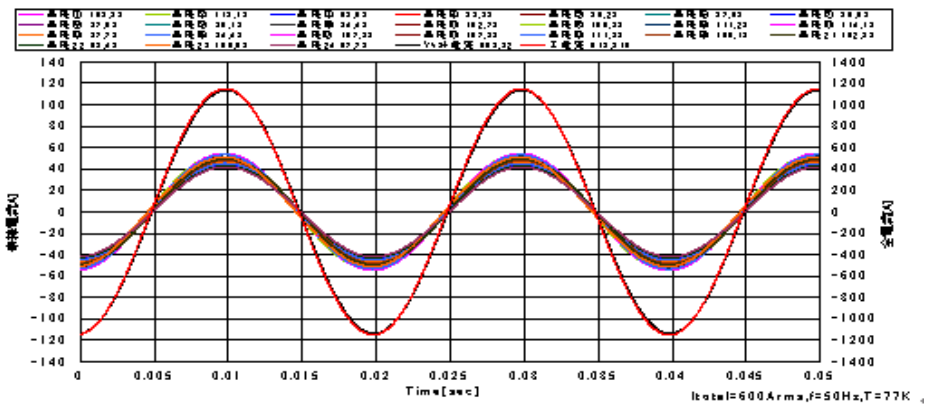


図 2.3.1-13 素線電流と全電流の波形

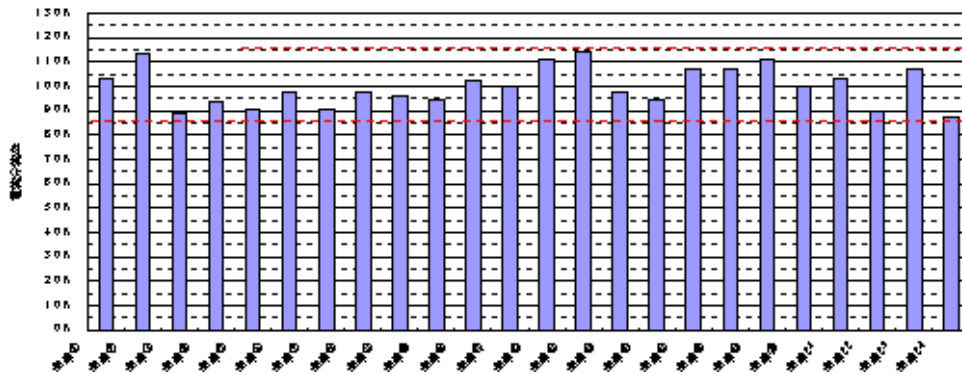


図 2.3.1-14 各素線の電流分流率

(4) 鉄心付大電流巻線モデルの検証

前項の転位均流巻線モデル（空心巻線モデル）は、鉄心を有さない空心状態で多並列導体における素線の電流分流を検証した。しかし、実際には変圧器は鉄心を有するため、巻線部の磁束分布が空心状態と異なる。そこで、平成 23 年度から変流器型の鉄心付大電流巻線モデルを製作し、多並列導体における素線の電流分流を検証した。また、20 MVA 級変圧器の二次巻線の電流は 1,674 A であり、これを上回る 2,000 A の通電容量を確保できるかを検証した。

鉄心付大電流巻線モデルの二次巻線は、20 MVA 級変圧器の二次巻線で想定している 24 並列導体と同じ構成とし、ヘリカル転位させて巻線した。このヘリカル転位とは、12 重 2 並列の導体構成とする際に、最内周と最外周において軸方向に素線の位置を入れ替えることを連続して行い、径方向の素線の位置を螺旋状に入れ替える方法である。変流器の構成は、一次巻線を 6 層、二次巻線を 1 層とした。図 2.3.1-15 に鉄心付大電流巻線モデルの諸元と外観を示す。

通電試験は一次側を短絡し、二次側に電圧を印加して行った。素線電流はシャント抵抗により測定した。二次側巻線電流(全電流)は最大 2,057 A の通電が可能であることを確認した。この時の素線電流と全電流の波形を図 2.3.1-16 に、各素線の電流分流率を図 2.3.1-17 に示す。各素線の電流分流率は最大 109.0 %、最小 90.1 % となり、±10 % 以内に収まった。これは図 2.3.1-18 に示すように空心巻線モデルより良好な結果となった。鉄心によって漏れ磁束量が減り、空心巻線モデルに比べ電流分流のバラツキが抑制されたものと考えられる。24 並列導体においてもヘリカル転位で巻線することにより、20 MVA 級変圧器の二次巻線の電流容量を確保できることを確認した。

		二次巻線	一次巻線
定格電流		2,000 A	167 A
導体構成		12 重 2 並列	2 重
巻線内径		φ 350 mm	φ 376 mm
巻線高さ		645 mm	649 mm
ターン数		48	576
転位		ヘリカル	3 箇所/層
最大磁界	垂直	0.11 T	0.04 T
	水平	0.24 T	0.21 T



図 2.3.1-15 鉄心付大電流巻線モデルの諸元と外観

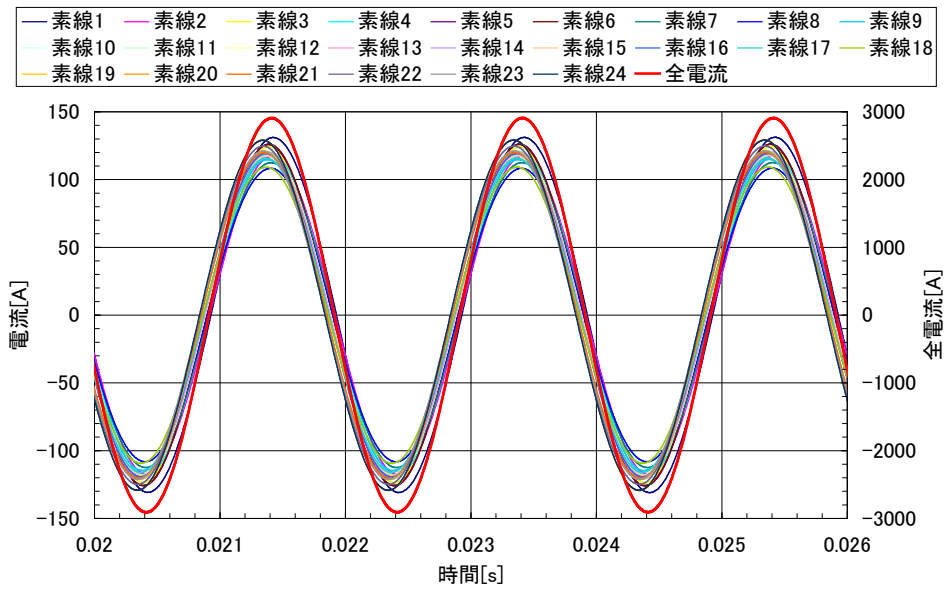


図 2.3.1-16 素線電流と全電流の波形 (AC 2,057 A)

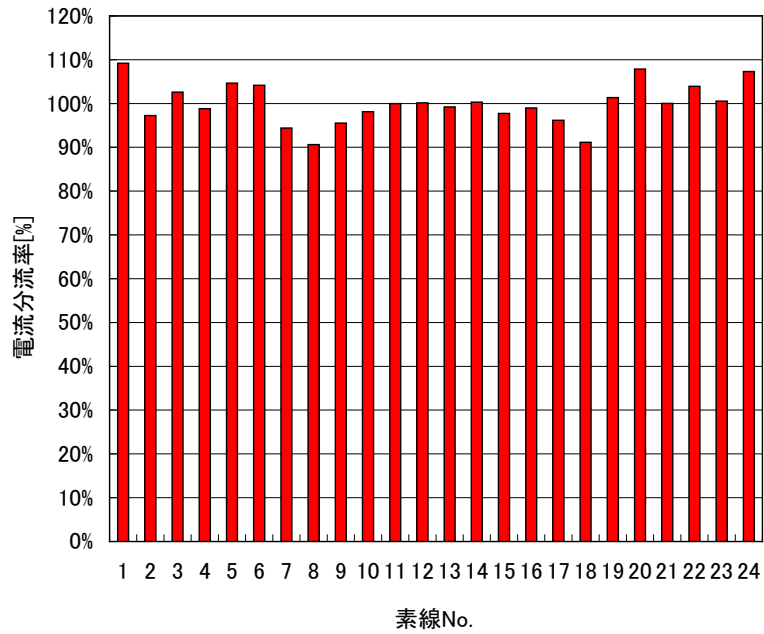


図 2.3.1-17 各素線の電流分流量(AC 2,057 A)

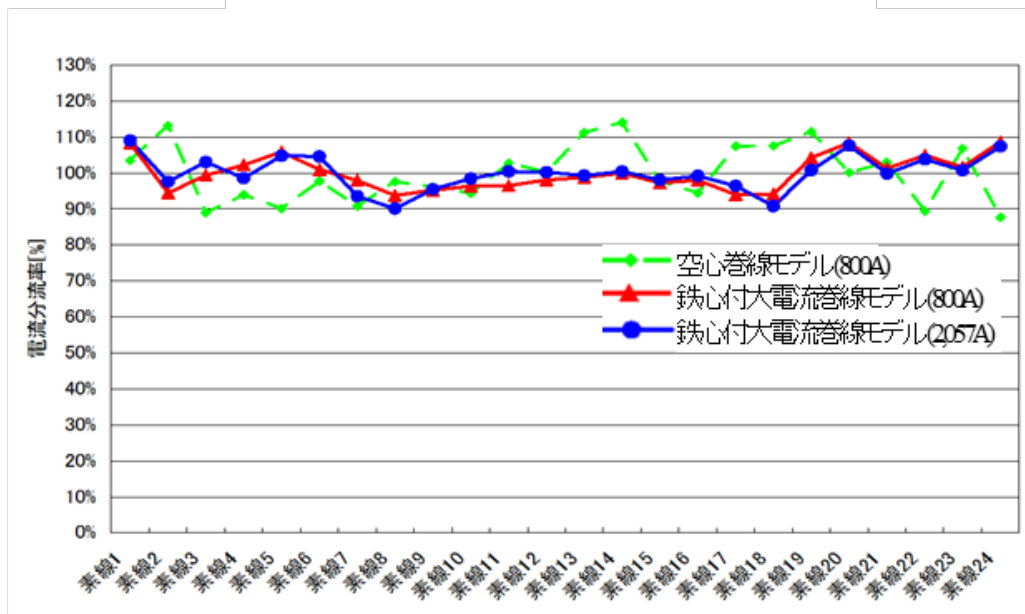


図 2.3.1-18 鉄心付大電流巻線モデルと空心巻線モデルの電流分流率の比較

2.3.1-2 超電導変圧器巻線の低損失化技術開発（九州電力、富士電機）

前 NEDO 事業の「超電導応用基盤技術開発（第Ⅱ期）」プロジェクトで得られた低損失化の技術成果を反映し、線材長が 100 m 級で交流損失 1/3 以下の細線化線材を用いて、変圧器用巻線モデルの交流損失が無加工線材に対して 1/3 以下となることを検証するため、鉄心を有し一次・二次巻線からなる低損失巻線モデルの基礎技術を検討した。また、変圧器巻線の低損失化は、細線化線材の巻線が主体であるが、長尺細線化技術開発と並行し、巻線の層間の接続部における口出し部の特性も確認した。さらに、IBAD-MgO 中間層基板線材の超電導変圧器用としての適用性についても、本節で総合的に評価した。これらの技術開発の成果を踏まえ、低損失巻線モデルを製作し、交流損失特性試験を行い、交流損失の低減効果（3 分割線材で無加工線材に対し 1/3 以下）を検証した。

(1) 細線化線材による巻線モデルの検証

超電導変圧器の交流損失の低減には線材の細線化が不可欠であり、加工による長尺 Y 系中間層線材（5 mm 幅）の 3 分割の細線化技術（線材単長は 100~300 m）を開発した。また、20 MVA（66/6.9 kV、175/1,674 A）の超電導変圧器は、系統事故時の過電流は定格電流の約 7 倍である。中間評価時点の設計では、変圧器巻線素線の短絡電流は 465 A である。ここで、素線が一定時間の事故電流に耐えるには、Y 系超電導線材の安定化銀層や銅層等の保護構造の最適化が必要である。そのため、今回、5 mm 幅線材を 3 分割した細線化線材による巻線の過電流特性を確認した。

細線化溝加工線材による巻線モデルの外観を図 2.3.1-19 に示す。巻線モデルは内

径 $\phi 250$ mm、12 ターン、素線数1、3 分割細線化溝加工線材(超電導線材の銀層側の
上に保護銅層を配置)の各フィラメントの臨界電流(9.9 m 長)は 33~55 A である。過電
流特性は、サブクール液体窒素温度(66 K)で、上記の短絡電流(交流)の通電時間
を変化させ試験した。細線化線材の過電流特性の通電エネルギーと規格化 I_c 値の関係を
図 2.3.1-20 に示す。100~200 J/m 間の規格化 I_c 値の低下は、冷媒のサブクール液体
窒素温度の上昇に伴う影響である。目標エネルギー(410 J/m:465 A を 0.2 秒間通電)
以内では、巻線 I_c 値の低下は殆ど観られないことから、耐過電流特性が確認できた。
また、巻線に通電した全電流と保護銅に流れた電流波形を図 2.3.1-21 に示す。過
電流通電時には、電流が保護銅へ速やかに転流していることが分かる。

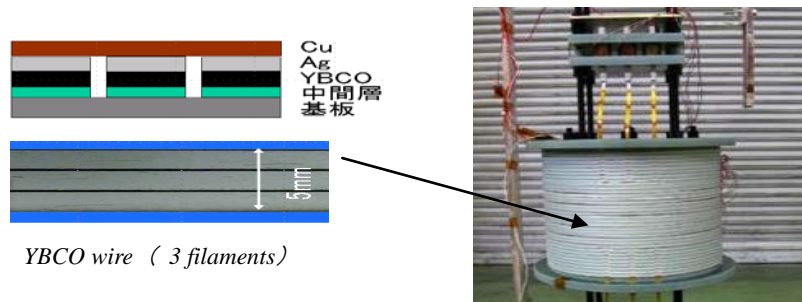


図 2.3.1-19 細線化線材による巻線モデルの外観

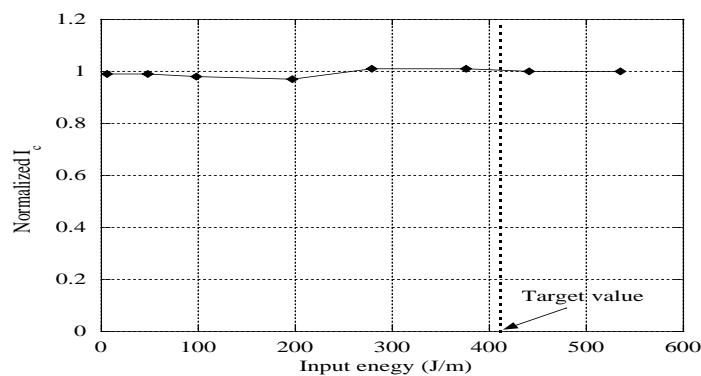


図 2.3.1-20 過電流試験での巻線モデルの規格化したエネルギー特性

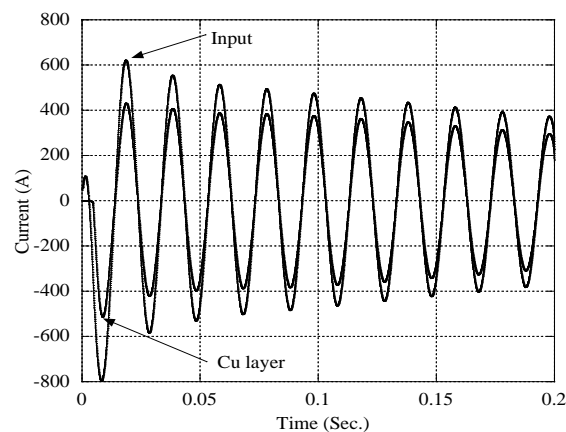


図 2.3.1-21 細線化線材による巻線モデルの電流分布

(2) 巻線口出し部モデルの検証

巻線口出し部モデルにおいて、一括と4分割の口出し部損失を比較し、両方における相違がないことを確認した。図 2.3.1-22 に一括と4分割型の口出し部モデル、図 2.3.1-23a に一括型口出し部の損失、図 2.3.1-23b に4分割型の口出し部の損失試験結果を示す。試験結果は殆ど同等の損失であった。これらの試験成果及び口出し部は製作面で加工し易い4分割型を適用することとした。

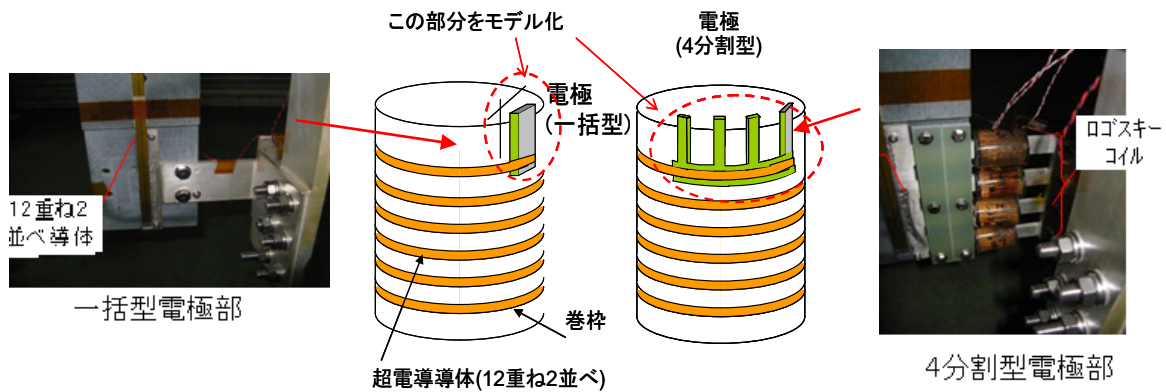


図 2.3.1-22 巻線口出し部の試験モデル

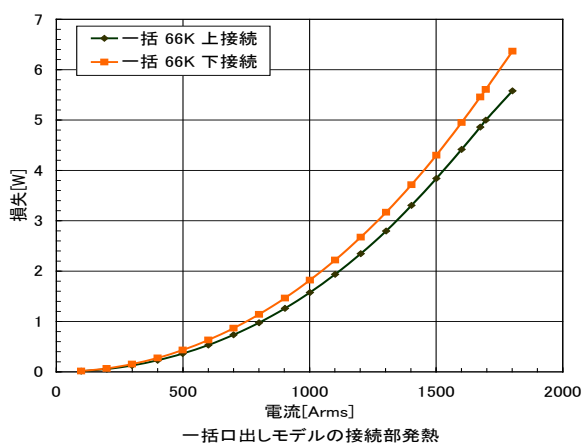


図 2.3.1-23a 一括型口出し部の損失

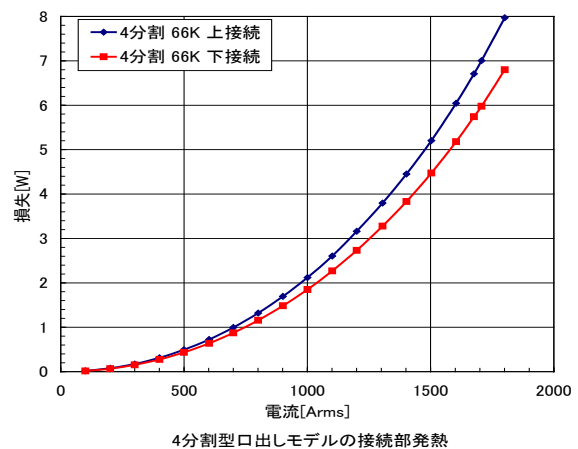


図 2.3.1-23b 4分割型口出し部の損失

(3) 低損失巻線モデルの検証

平成 23 年度から 5 mm 幅の Y 系超電導線材の超電導層を 3 分割にした 3 分割線材と、比較するための無加工線材を用い、鉄心を有し一次・二次巻線からなる低損失巻線モデルを製作し、線材長が 100 m 級で交流損失が 1/3 以下となることを検証する特性試験を行い、交流損失の低減効果を検証した。

20 MVA 級変圧器の発生する磁界相当をモデル化するために、巻線高さを小さくして Y 系超電導線材のテープ面に垂直方向に印加される磁界を大きくした。図 2.3.1-24 に低損失巻線モデルの諸元と外観を示す。

液体窒素温度 (66 K) において 50 Hz の交流電で上記特性試験を実施した。交流損失の測定はキャンセル法で行った。交流損失の解析は、Y 系超電導線の交流損失と磁束密度の関係を測定し、低損失巻線モデルの磁界解析結果と関連付けることで行った。図 2.3.1-25 に交流損失の電流依存性解析値と併せて示す。測定値と解析値はほぼ一致した。20 A_{peak} 以上の領域では無分割線材に対して 3 分割線材の損失が小さくなり、180 A_{peak} 程度で 1/3 に低減できることを確認した。

以上により、3 分割に細線加工した Y 系超電導線材を用いて変圧器巻線の交流損失が無加工線材に対し 1/3 に低減できることを確認した。

	一次巻線	二次巻線
巻線内径	φ 183.2 mm	φ 128 mm
巻線高さ	107 mm	107 mm
ターン数	400	400
線材長	257 m	191 m

注)3 分割線材巻線と無分割線材巻線は同一仕様



図 2.3.1-24 低損失巻線モデルの諸元と外観

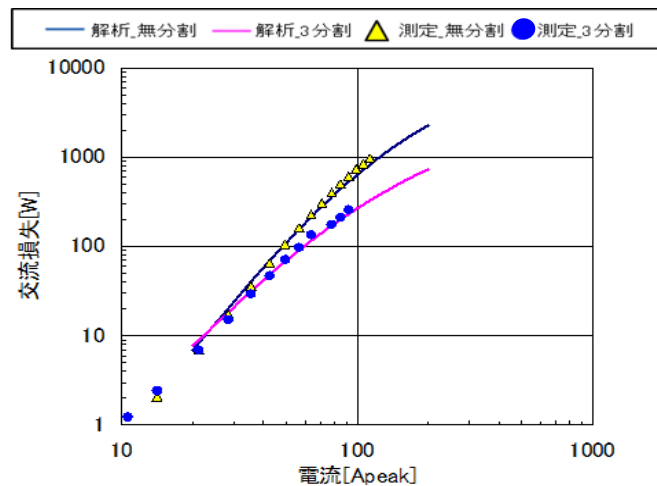


図 2.3.1-25 低損失巻線モデルの交流損失測定結果

2.3.1-3 超電導変圧器巻線の耐短絡強度技術開発 (九州電力)

多層転位並列導体を用いた変圧器巻線が、系統事故時等に発生する短絡電流 (20 MVA 級変圧器%インピーダンス 15%相当) による強大な電磁力対しても、劣化せずその機能を健全に維持できる強度を有する巻線構造を開発し、一次・二次巻線からなる鉄心付の短絡変圧器モデル (400 kVA 6.6/2.3 kV) を試作し、短絡電流試験で健全性を評価した。

(1) 短絡変圧器モデルの設計

配電用変電所に設置する電力用変圧器の%インピーダンスは 10 MVA 基準で 7.5 %である。そのため、66 kV/6.9 kV- 20 MVA 級変圧器の一次巻線の短絡電流は定格電流の約 6.7 倍の 1,166 A となり、素線（三重ね導体の一本分）の短絡電流は 389 A となる。今回の 400 kVA 短絡変圧器モデルは、実用 20 MVA 級変圧器の耐短絡特性を検証するため、導体の素線当たりの短絡電流は同等にした。400 kVA 短絡変圧器モデルと 20 MVA 級変圧器の仕様を表 2.3.1-2 に示す。Y 系超電導線材の構成は、ハステロイ™の金属基板上に中間層、超電導層及び銀の保護層による積層構造、線材サイズは 5 mm 幅×約 0.15 mm 厚である。0.3 mm 厚の銅は短絡電流通電時の保護層として、Y 系超電導線材の銀層側に配置した。今回使用した Y 系超電導線材の臨界電流 I_c は 110~170 A/5 mm-w(@77 K, s.f.) 程度である。巻枠寸法は、一次巻線が最小内径φ463 mm×高さ 629 mm、二次巻線が最小内径φ346 mm×高さ 662 mm である。二次巻線（三重ね導体）は電流均流化のために転位を行っている。

短絡試験検証のために、短絡変圧器モデルの二次側換算等価回路による回路方程式 2.3.1-1 と熱平衡式 2.3.1-2（巻線は断熱と仮定）の連立方程式により、短絡電流と温度変化の過渡解析を行った。

$$RI + L \frac{dI}{dt} = V_0 \sin(\omega t) \quad (\text{式 2.3.1-1})$$

$$\rho(T) \cdot \frac{l}{S} \cdot I(t, T)^2 = l \cdot S \cdot \gamma \cdot C_p(T) \frac{dT}{dt} \quad (\text{式 2.3.1-2})$$

ここで、R:巻線抵抗、L:巻線インダクタンス、ここで、 ρ :電気抵抗率、I:電流値、 C_p :比熱、l:導体長、S:導体面積、 γ :密度、T:温度、t:時間である。なお、解析条件は、①液体窒素への熱伝達なし、②電気抵抗への寄与は保護層の銅と銀のみで、超電導層とハステロイ™には通電なし、③熱容量への寄与は保護層の銅と銀及びハステロイ™のみとした。

保護層の銅厚 (0.1~0.3 mm) と銀厚 (5~50 μm) をパラメータにして解析した。

保護層の対定格電流倍率と到達温度への寄与は、銀厚より銅厚が大きいことが分かった。図 2.3.1-26 に、0.2 sec 後の短絡二次電流の対定格電流倍率と到達温度の保護層銅厚依存性の解析結果を示す。図 2.3.1-27 には保護層銅厚 0.3 mm、保護層銀厚 7 μm の場合の解析結果（短絡二次電流、温度）を示す。0.2 sec 後の短絡二次電流 (1,630 A_{peak}) は定格二次電流(246 A_{peak}=174 A)の 6.7 倍、温度上昇 12 K (初期温度 66 K) となった。

表 2.3.1-2. 400 kVA 短絡変圧器モデル及び実用変圧器の巻線諸元

項目	短絡変圧器モデル	実用変圧器
定格容量、相数	400 kVA-単相	20 MVA-三相
定格電圧(一次/二次)	6.9 kV/2.3 kV	66 kV/6.9 kV
定格電流(一次/二次)	58 A/174 A	175 A/1,673 A
%インピーダンス	15 % (400 kVA 基準)	15 % (20 MVA 基準)
短絡電流(一次/二次)	387 A/1,160 A	1,167 A/11,153 A
素線並列本数	1 本/8 本	3 本/24 本
素線当り短絡電流印加電圧 (一次/二次)	387 A/387 A	389 A/465 A

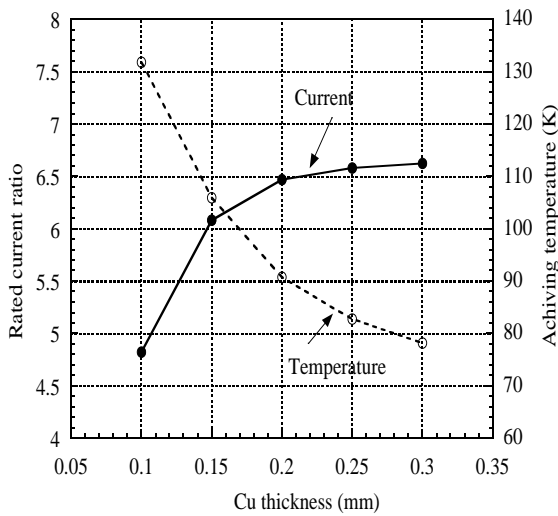


図 2.3.1-26 短絡二次電流の定格電流倍率解析結果

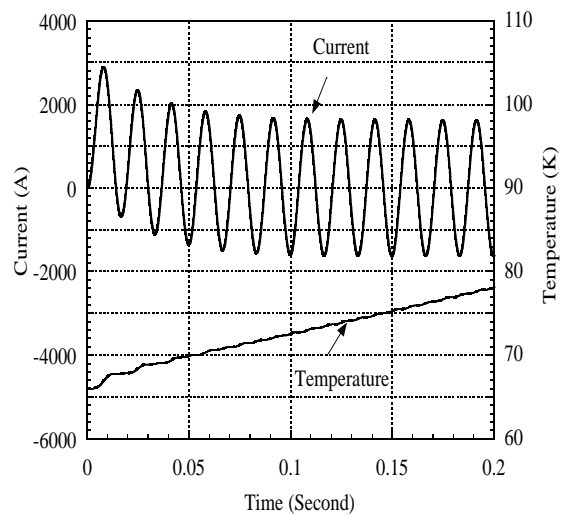


図 2.3.1-27 短絡二次電流と温度上昇と到達温度

短絡変圧器モデルは、外形寸法（鉄心、フレーム及びブッシング含む）は幅 1,200 mm×奥行 1,000 mm×高さ 2,300 mm、重量（液体窒素含む）は 2,000 kg である。サブクール液体窒素（66 K）における短絡変圧器モデルの受入試験結果は次のとおりである。① 短絡インピーダンス試験として、一次巻線を短絡し二次巻線に定格周波数・電圧を印加し定格二次電流を通電時の短絡インピーダンス電圧は 15.6 %（設計値 15.3 ± 7.5 %）となった。② 無負荷試験では、一次巻線を開放し、二次巻線に定格周波数の電圧を印加した無負荷損を測定し、無負荷損は 906 W で設計値 1,200 W 以下であることを確認した。③ 短時間交流耐電圧試験として、一次巻線に 16 kV、二次巻線に 10 kV の定格周波数の交流電圧を各々 1 分間印加し、健全かつ絶縁強度を有することを確認した。

(2) 短絡試験

短絡電流試験回路の概要は図 2.3.1-28 に示す。同モデル変圧器の巻線温度をサブクール液体窒素温度 (66 K) に設定し、一次側に 6.9 kV を印加後二次側の遮断器によって、0.2 sec 間の短絡試験を実施した。図 2.3.1-29 に短絡電流試験時の保冷容器の液面と圧力、図 2.3.1-30 に短絡二次電流波形と一次側電圧波形を示す。短絡一次電流の第 2 波 (JEC2200 による計測値) は $1,460 A_{peak}=1,040 A$ であり、定格電流の 6 倍程度、0.2 sec 後もほぼ同程度であり、短絡に伴い発電機電圧が低下 (15 %程度) していることを考慮すると、事前の解析値とほぼ同じ値である。試験後の巻線インピーダンス試験結果は、試験前は 15.36 %で、試験後は 15.34 %となり、JEC の短絡インピーダンス変化の判定基準 ($\pm 2 \%$ 以内) を満たしている。また、図 2.3.1-31 に短絡電流試験前後の巻線の電圧・電流特性を示す。試験前後でほぼ同一であり、巻線の健全性が確認できた。

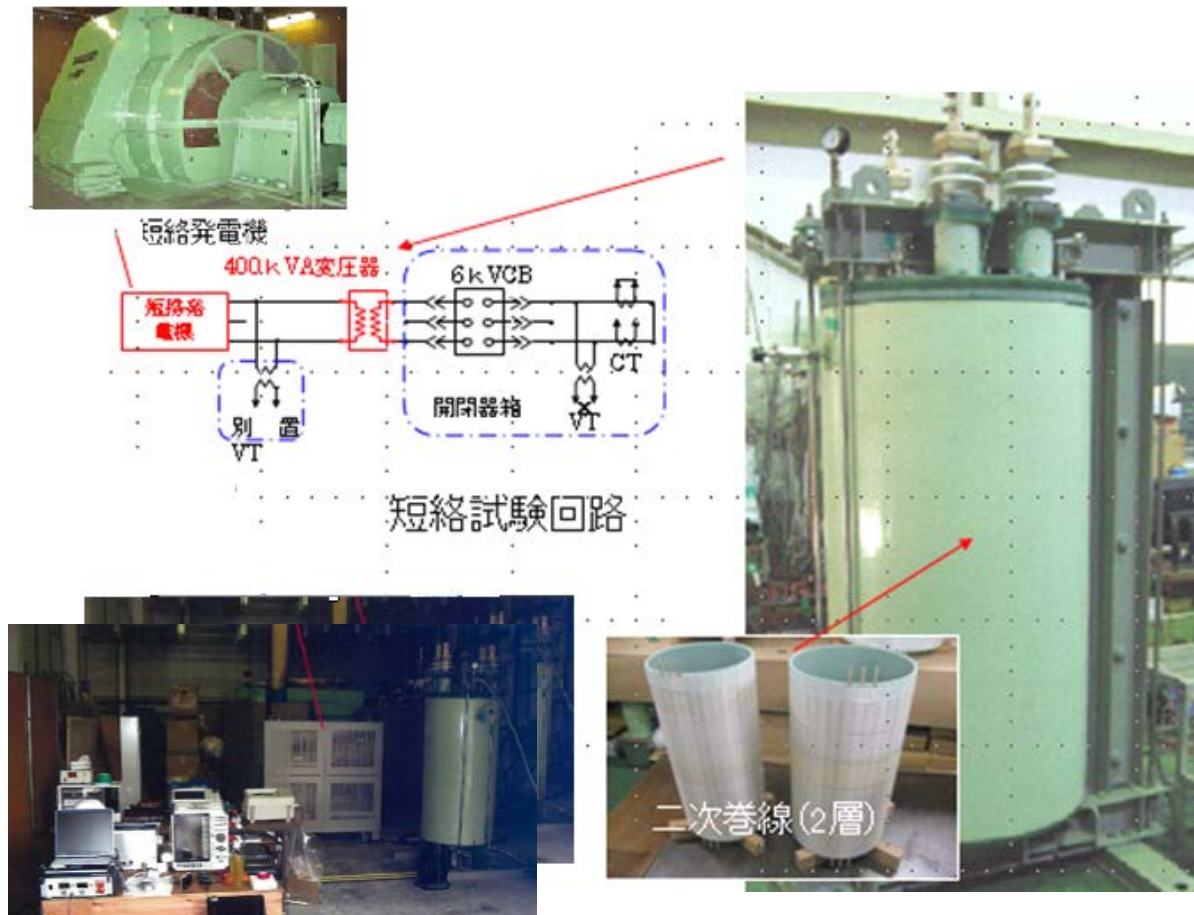


図 2.3.1-28 400 kVA 短絡変圧器モデルと試験回路

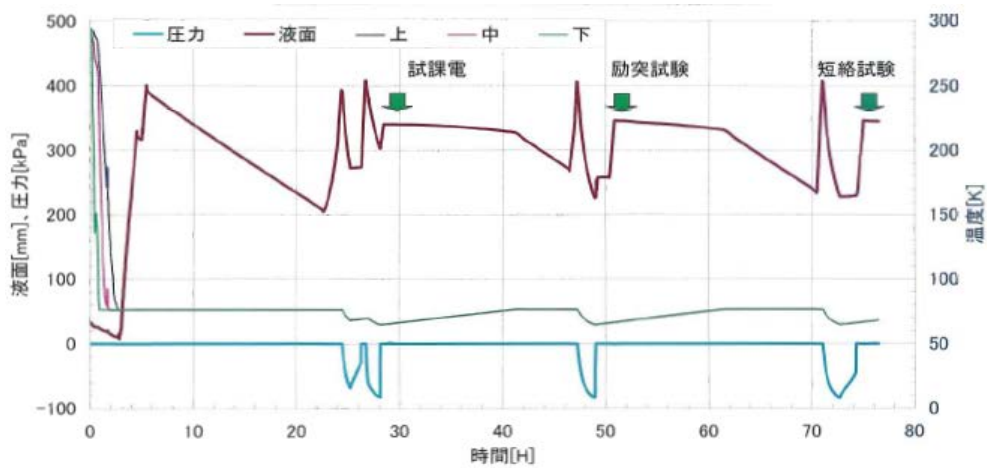


図 2.3.1-29 短絡電流試験時の保冷容器の液面、圧力、温度

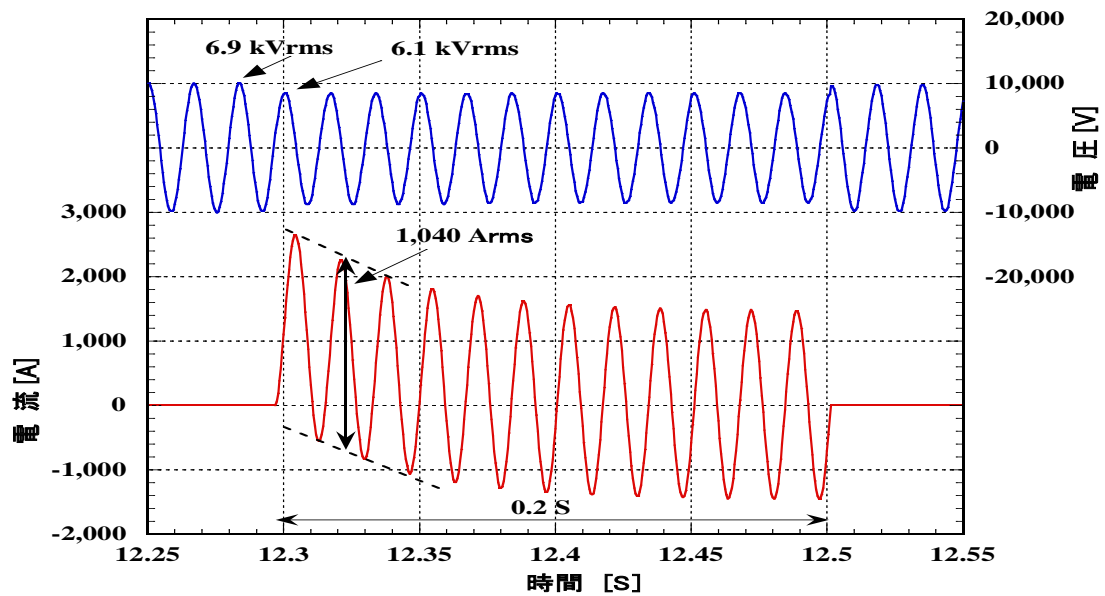
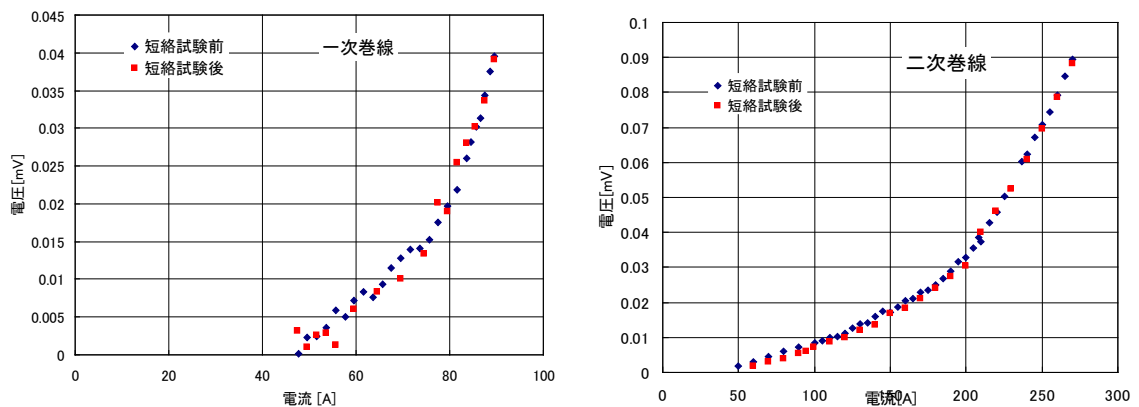


図 2.3.1-30 短絡試験時の電圧と電流波形



(a) 一次巻線

(b) 二次巻線

図 2.3.1-31 短絡電流試験前後の巻線の電圧・電流特性

2.3.1-4 変圧器の巻線構成技術及び最適転位技術の検討（九州大学、ISTEC）

低交流損失性・大電流容量導体及び巻線構成技術の検討では、細線化加工により低交流損失化を図った細線化 Y 系超電導線材を用いて線材素線レベルでの低交流損失性を維持したまま大電流容量導体・巻線（ソレノイド型）を構成する技術の確立を目標とした。

(1) 変圧器の巻線構成技術及び最適転位技術の検討

単層、多層の転位並列導体を用いた超電導巻線の交流損失、電流分流等の電磁特性について、低損失化の観点から変圧器巻線の構成法、最適転位巻線方法について理論及び実験の両面から検討した。

ここで、Y 系超電導線材・導体の大電流容量化及び低交流損失化において重要な概念を示す。Y 系超電導線材・導体の交流損失は線材・導体内に遮蔽電流（ループ電流）が流れると増大する。見方を変えると、線材間で均等に分流すれば、遮蔽電流が誘起されず交流損失が大電流容量導体化に伴って増大しないと言える。これを踏まえ、まず多層並列導体の転位均流化について検討した。

実器設計手法の確立をめざし、転位並列導体の電流分流特性を評価できる数値解析プログラムを作成し、変圧器巻線に相当する単層巻線の転位方法について明確にし、実験によって明らかにすべき課題を抽出し、巻線モデルを設計した。また、転位並列導体を多層に巻いた場合において、電流分流特性を均等にする普遍的転位法を数値解析により見出し、一部を実験的に検証した。例として、図 2.3.1-32 は 6 本並列導体を用いて最適層数（24 層）以上の層数を巻く場合に、電流分流を均等にするための転位パターンである。

20 MVA 級超電導変圧器の一次側で想定している 3 本並列導体については、Y 系超電導線材を用いて多層巻線を構成し、実験的に最適転位パターンの妥当性を検証した。図 2.3.1-33 は巻線中の超電導 3 本並列導体巻線を、図 2.3.1-34 は素線間電流分流の測定結果を示している。理論計算通りほぼ均等に流れていることが分かる。

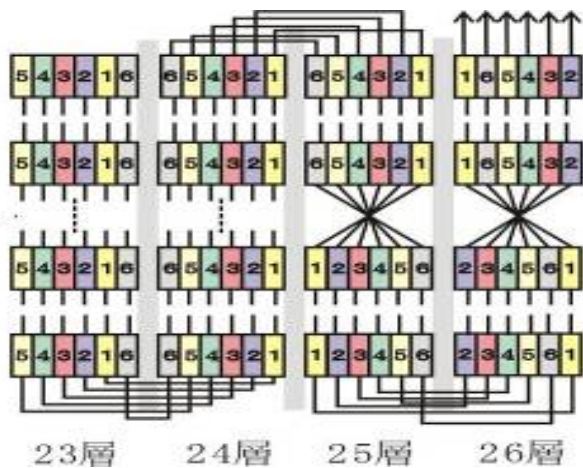


図 2.3.1-32 最適転位層数以上の層数における 6 本並列導体の層間・層内転位

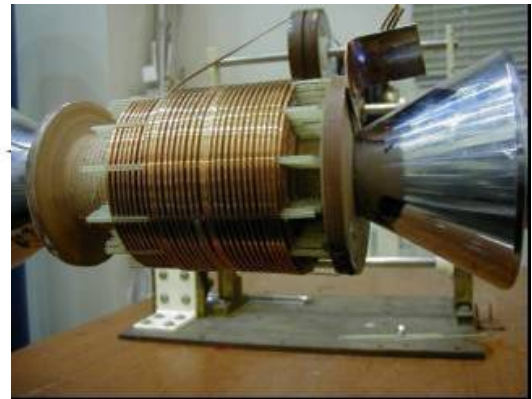


図 2.3.1-33 巻線中の超電導 3 本並列導体

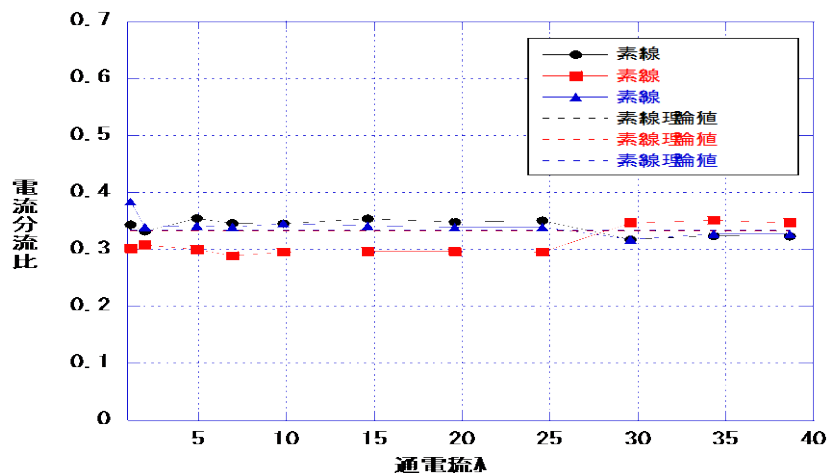


図 2.3.1-34 超電導 3 本並列導体巻線の各素線の電流分流測定結果

平成 23 年度から、6 本並列導体について同じ層内転位パターンを繰り返した場合の影響について検討した。層内転位は 5 (素線数-1) 回行っている。その転位パターンを図 2.3.1-35 に、その結果を図 2.3.1-36 に示す。同じパターンを繰り返すことで層数によって電流分流偏差が 1~2 割程度生じることが分かった。しかしながら、この程度であれば問題視するレベルではない。

20MVA 級超電導変圧器の巻線は、一次巻線 3 重 1 並列、8 層、二次巻線 12 重 2 並列、2 層の構成としている。一次巻線は前述の数値解析、実験により均等分流が検証された。二次巻線についても 12 重 2 並列を検証できる最少モデルである 6 本並列の結果を踏まえ、鉄心付大電流巻線モデルの設計、検証へ反映した。

以上のように転位並列導体の多層形状における電流分流特性を均等にする普遍的方法を見出し、一部を実験的に検証した。この成果は、III-2.3.5-2 節の 20 MVA 級超電導変圧器の設計へ反映した。

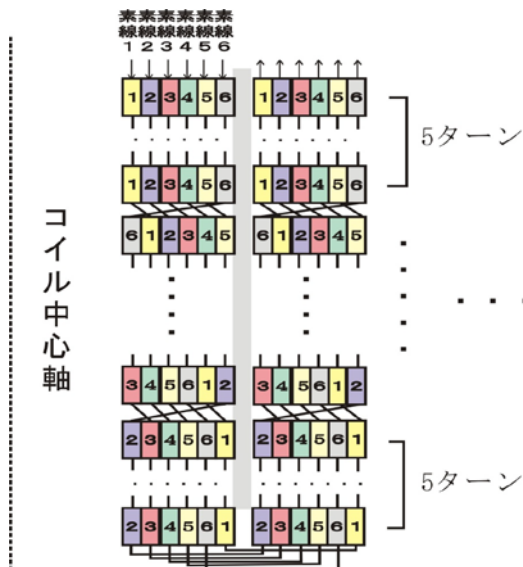


図 2.3.1-35 6本並列導体の場合の層内転位パターン

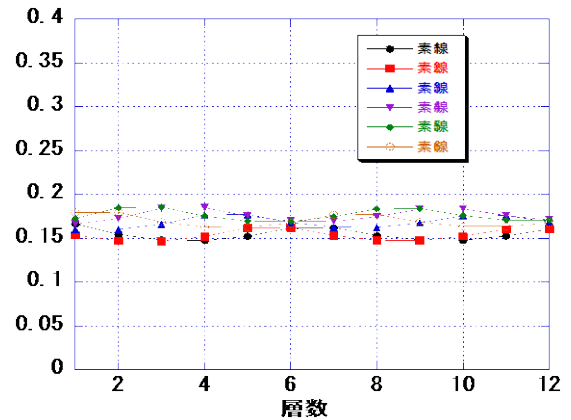


図 2.3.1-36 6本層内転位並列導体の電流分流の層数依存性

(2) 付加的交流損失の検討

並列導体構成に伴う付加的交流損失についても理論・実験の両面から検討を進めた。最初に、低損失化を図るための3分割線材が交流損失を増大させないことを検証するために、低損失巻線モデル(Ⅲ-2.3.1-2(3)項参照)を用い、交流損失の周波数特性を測定した。

次に、66 kV/6.9 kV-20 MVA 級超電導変圧器の二次電流と同じ 2 kA 通電可能な 24 本並列導体を二次巻線として持つ鉄心付大電流巻線モデル(Ⅲ-2.3.1-1(4)項参照)を用い、その交流損失も実測した。

a 低損失巻線モデルの交流損失の周波数特性

超電導変圧器の巻線の交流損失を低減するために Y 系超電導線材を細線加工している。この細線加工による交流損失の低減の効果は磁化ヒステリシス損失に対して有効である。一方、渦電流損失については明らかになっていない。そこで低損失巻線モデルを用い、交流損失の周波数特性を取得し、細線化による付加的損失の発生の有無を確認することにした。

液体窒素温度 (77 K) で交流損失測定を行った。図 2.3.1-37 に試験回路を示す。電源は九大のバイポーラ電源 (70 V_{peak}・100 A_{peak}) を用い、周波数を 30 Hz から 100 Hz の範囲に設定して実施した。

試験状況を図 2.3.1-38 に示す。電流と交流損失の関係を図 2.3.1-39 に示す。交流損失は周波数で規格化した。交流損失は電流の約 3 乗に比例し、かつ、周波数依存性は見られなかった。25.8 A 通電時の 1 サイクル当たりの交流損失と周波数の

関係を図 2.3.1-40 に示す。60 Hz 以下の周波数では交流損失はほぼ同一の値となり、付加的な損失が発生していないことが分かった。80 Hz 以上の周波数では交流損失が増加したが、50 Hz と 100 Hz を比較すると 3 % の増加量であり、変圧器としては全く問題ないレベルである。

以上により細線化線材が付加的交流損失を発生しないことを確認した。

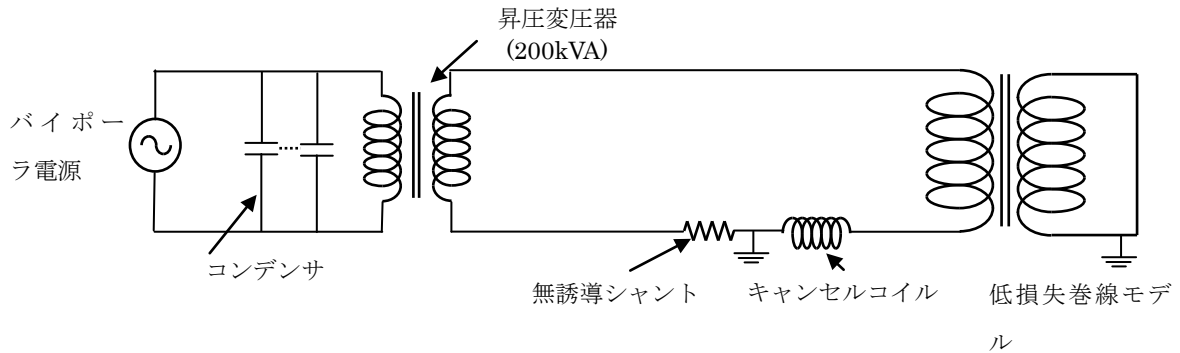


図 2.3.1-37 周波数特性試験回路

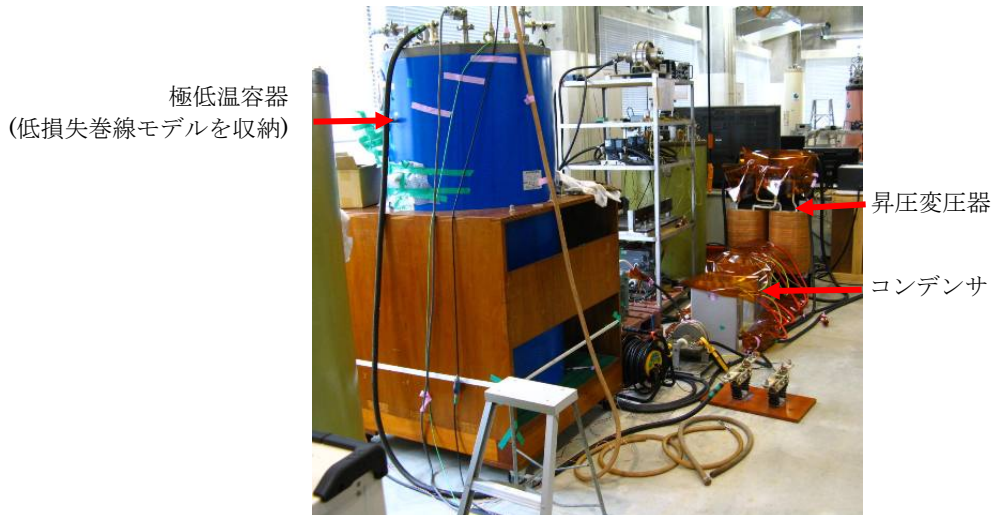


図 2.3.1-38 周波数特性試験状況

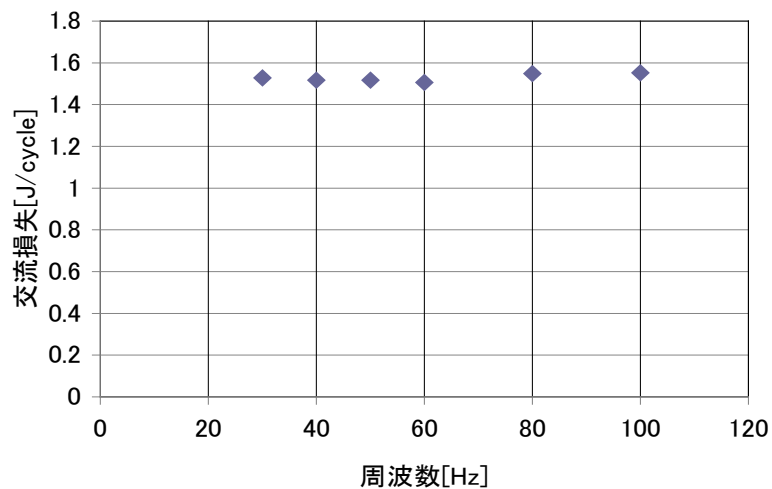


図 2.3.1-39 電流と交流損失の関係 (77K)

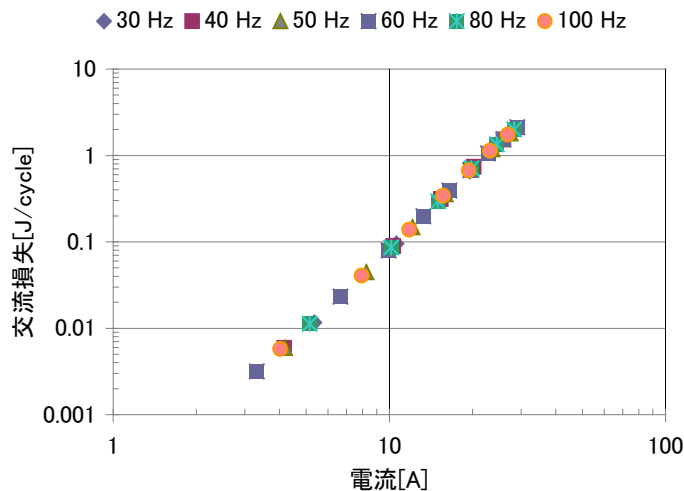


図 2.3.1-40 低損失巻線モデルの交流損失と周波数の関係(25.8 A, 77 K)

b 鉄心付大電流巻線モデルの交流損失

一次巻線を短絡・接地して、二次側より交流通電して、巻線の交流損失を電気的測定法により測定した。66 Kにおける交流損失測定結果を図 2.3.1-41 に示す。赤線は、短尺線材の交流損失を鞍型ピックアップコイルにより測定(Ⅲ-2.3.1-5 項参照)し、巻線内磁界分布の計算結果に基づき積算した解析値である。巻線の交流損失実測値は、線材の交流損失の積算値とよく一致している。これより、導体化に伴う付加的交流損失は誘起されていない、すなわち転位並列導体構成による大電流容量導体化に伴って交流損失は増大していないことが示された。

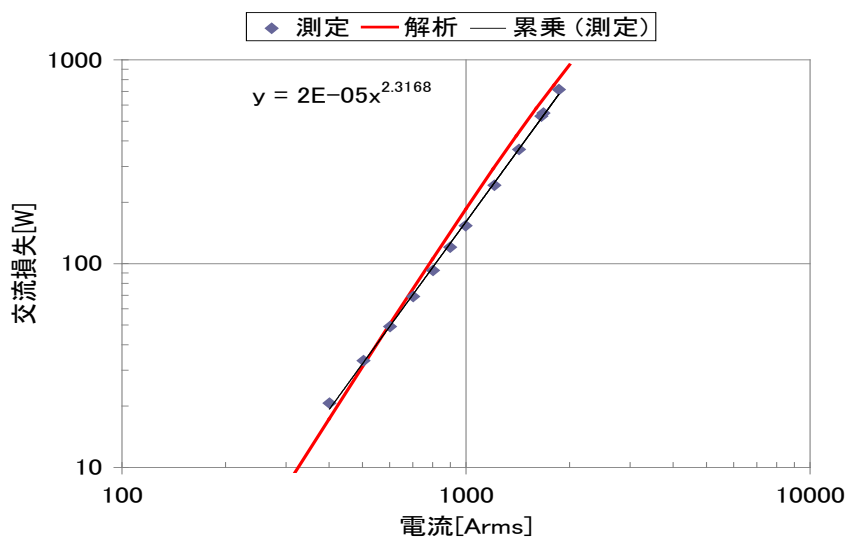


図 2.3.1-41 鉄心付大電流巻線モデルの交流損失測定結果(50 Hz)
(赤線は、線材の交流損失を短尺試料を用いて測定し、磁界分布に基づいて積算した解析値)

2.3.1-5 モデルコイル、変圧器設計のための交流損失データ取得、提供 (九州大学、ISTEC)

低損失巻線モデルの交流損失を解析するために、無分割、3分割線材の交流損失を図 2.3.1-42 に示す鞍型ピックアップコイルを用いて測定した。64 K における測定結果を図 2.3.1-43 に示す。線材の交流損失はスクライビングにより 1/3 に減少していることが分かる。

鉄心付大電流巻線モデルの交流損失を解析するために、一次巻線と二次巻線の導体構成を模擬して交流損失測定を行った。一次巻線の導体構成は 2 重ねであるが、20 MVA 級変圧器の一次巻線をも見通すため、交流損失測定試料を 3 重ねで製作して測定した。二次巻線の導体構成は 12 重 2 並列であり、20 MVA 級変圧器の二次巻線と同じであることから、交流損失測定試料も 12 重 2 並列で製作して測定した。測定結果を図 2.3.1-44 に示す。

巻線内の磁界分布を求め、短尺線材の交流損失の測定結果から見積もった交流損失解析値と各モデルの交流損失測定値はほぼ一致した(Ⅲ-2.3.1-2(3)項及びⅢ-2.3.1-4(2)項参照)。

これらの結果から、変圧器巻線の低損失化及び大電流化に資する交流損失特性評価が妥当であると判断できた。

以上により、Y 系超電導線材の変圧器形状巻線での低交流損失化技術は実証され、また線材の交流損失からの変圧器巻線交流損失の予測技術も確立できた。

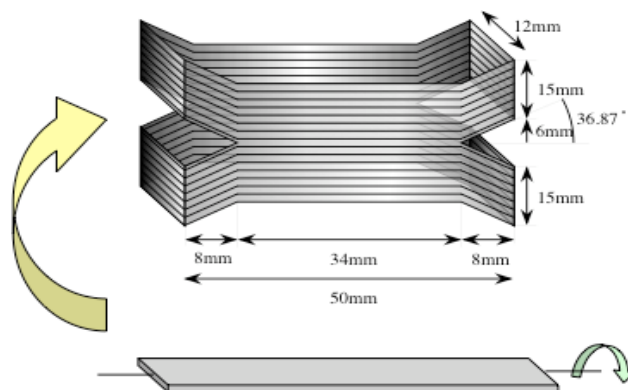


図 2.3.1-42 鞍型ピックアップコイル

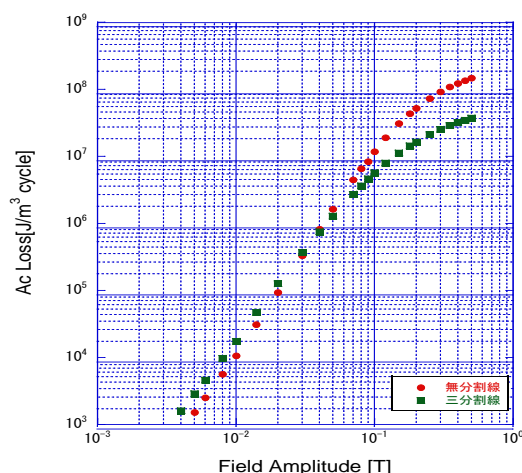


図 2.3.1-43 低損失巻線モデル用無分割線と 3 分割線の交流損失特性

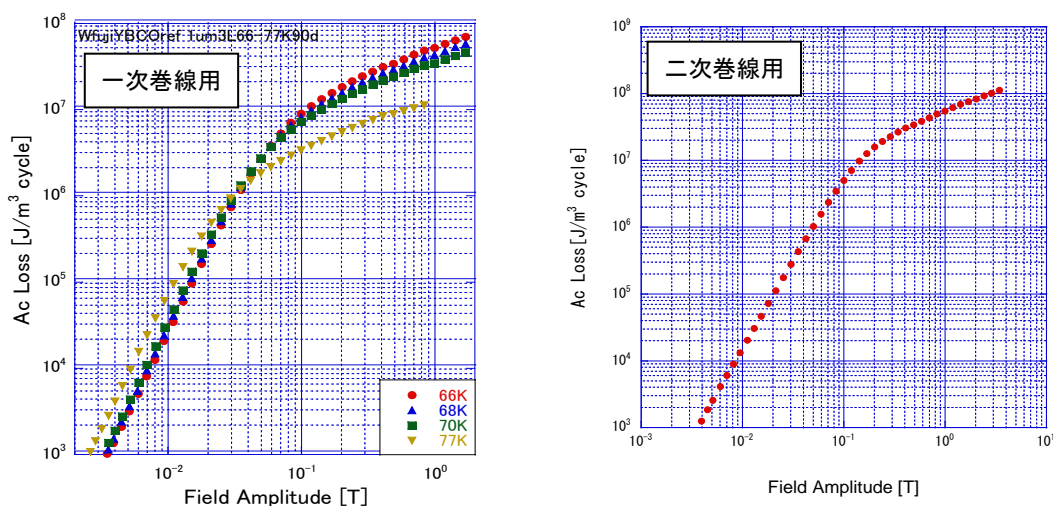


図 2.3.1-44 鉄心付大電流巻線モデル用線材の交流損失特性

2.3.1-6 MgO 中間層基板線材の超電導変圧器用線材としての適用性評価 (九州電力、九州大学、ISTEC)

IBAD-MgO 中間層基板の MgO 層は薄く（膜厚は従来の GZO 層の約 1 / 100）でも結晶粒は高配向であり、中間層製造速度の向上（約 100 倍）により線材コスト低減が図れる特長を有すことから、超電導変圧器用の巻線としての IBAD-MgO 中間層基板線材の適用性を、曲歪み特性、過電流特性、細線化線材の素線間抵抗の観点から、次の通り検証した。その結果は、

- ① 曲歪み特性として、IBAD-GZO 中間層基板線材と同様に、転位部を模擬した曲げ巻線モデルによる通電試験を実施した結果、 I_c 値劣化は無く良好であった（2.3.1-1(1)節参照）。
- ② 過電流特性として、IBAD-GZO 中間層基板線材と同様に、巻線モデルによる過電流通電試験を実施した結果、 I_c 値劣化は無く良好であった（2.3.1-1(2)節

参照)。

- ③ 細線化線材の素線間抵抗は $1 \text{ M}\Omega/\text{cm}$ (IBAD-GZO 中間層基板と同等) で良好であった (2.3.4-3(2)節参照)。

である。

これらの技術面及び線材コスト低減を考慮して、平成 22 年度に IBAD-MgO 中間層基板線材への変更を決定し、線材供給工程を平成 23 年度まで延期した。

2.3.1-7 まとめ

(1) 超電導変圧器巻線の大電流化技術開発

- ・大電流通電に向け、安定化銅付線材の単線と三重ね巻線モデルによる曲げ特性と過電流試験で短絡エネルギー (410 J/m) の 2 倍での健全性を確認した。
- ・多層並列導体(12 重 2 並列)の転位均流巻線モデル (空心巻線モデル) における各素線の電流分流のバラツキは最大で 14 % となり、変圧器用として対応可能であることを確認した。
- ・鉄心付大電流巻線モデルについて、二次巻線に 24 並列導体を用いてヘリカル転位で巻線し、20 MVA 級変圧器の二次巻線の電流容量である 2 kA 通電が可能であることを確認した。なお、鉄心付大電流巻線モデルの各素線の電流分流のバラツキは最大で 9.9 % であり、転位均流巻線モデル (空心巻線モデル) よりもバラツキが少ないことを確認した。

(2) 超電導変圧器巻線の低損失化技術開発

- ・細線化線材(5 mm 幅を 3 分割)を使用した巻線モデルの過電流試験で過電流に対する健全性を確認した。
- ・変圧器二次巻線の口出し部モデルで、接続部損失が保冷容器の熱侵入量等より十分低いこと、4 分割型方式は損失で一括型と同等だが製作性が有利であることを確認した。
- ・100 m 級 3 分割線材を用いた低損失巻線モデルにて変圧器巻線の交流損失を測定し、 $180 \text{ A}_{\text{peak}}$ 程度で無分割線材に対し 1/3 に低減できることを確認した。

(3) 超電導変圧器巻線の耐短絡強度技術開発

- ・短絡電流 (20 MVA 級変圧器%インピーダンス 15 %相当) による電磁力等に対して劣化しない巻線構造を考案して短絡変圧器モデルを製作した。その短絡電流試験で良好な耐短絡強度を確認した。

(4) 変圧器の巻線構成技術及び最適転位技術の検討

- ・細線化線材による多層の転位並列導体による巻線の電流分流等の電磁特性について、最適な巻線構成法や最適転位巻線方法を開発し、理論と実験にて確認した。また、転位並列導体構成による大電流容量導体化に伴って交流損失が増大しないことを確認した。

- (5) モデルコイル、変圧器設計のための交流損失データ取得、提供
- ・低損失巻線モデルや鉄心付大電流巻線モデルの交流損失を測定し、Y系超電導線材の交流損失から変圧器巻線交流損失を予測する技術を確立した。
- (6) MgO 中間層基板線材の超電導変圧器用線材としての適用性評価〈追加成果〉
- ・IBAD-MgO 中間層基板の MgO 層は薄く、中間層製造速度の向上（GZO 層の約 100 倍）により線材コスト低減が図れるため、変圧器用巻線としての適用性を、曲歪み・過電流特性及び線材素線間抵抗(1 M Ω /m 以上)の観点から実証し、良好な結果を得た。

2.3.2 冷却システム技術開発

冷却システムは、前 NEDO 事業の「超電導応用基盤技術開発（第Ⅱ期）」プロジェクトにて開発した小型膨張タービンの成果を活用して、Ⅱ-1.3.1-2 節の目標やⅡ-2.1.3-2 節に述べた計画内容に基づき、超電導変圧器用として、①小型膨張タービンの高効率化、②小型ターボ式圧縮機開発、③熱交換器の小型化、④冷凍機開発と冷却システム開発、⑤冷凍機と機器とのインターフェースの検討を進めた¹⁻²⁾。

中間目標は、小型膨張タービンの断熱効率 65 %以上、小型ターボ式圧縮機の断熱効率 65 %以上とし、本プロジェクト前半では小型膨張タービンと小型ターボ式圧縮機を中心に開発した。また、本プロジェクト後半では、最終目標は、65 K 運転時の冷凍機冷凍能力 2 kW 以上、80 K 運転時の冷凍機効率（COP）0.06 以上とし、図 2.3.2-2 に示すようにネオン冷凍機とサブクール液体窒素冷却装置及び 2 MVA 超電導変圧器と組み合わせて性能を実証した。

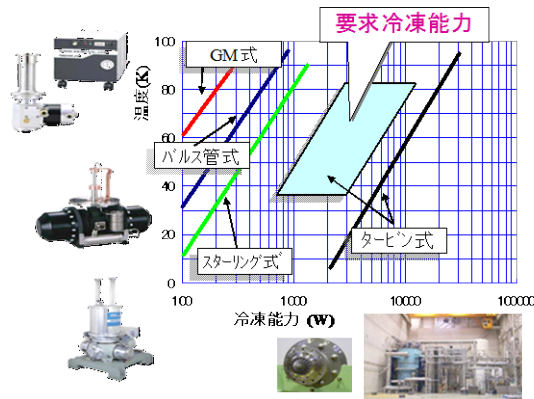


図 2.3.2-1 各方式の冷却システムと本開発システムの位置づけ

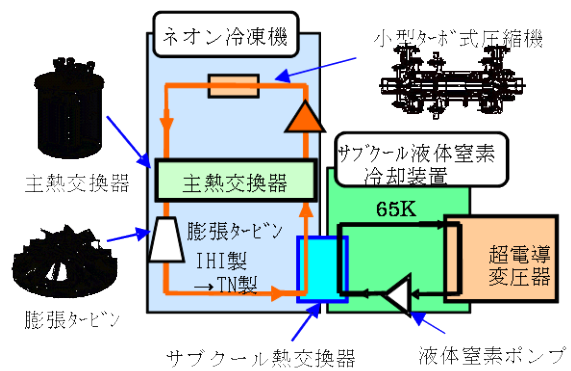


図 2.3.2-2 本開発冷却システムの構成（ネオン冷却システム）

	H20	H21	H22	中間目標	H23・H24	最終目標
膨張タービン		小型膨張タービン効率の向上		<ul style="list-style-type: none"> 膨張タービン: 断熱効率 $\geq 65\%$ 圧縮機: 断熱効率 $\geq 65\%$ 		冷凍能力: 2kW@65K 冷凍効率 (COP) : 0.06@80K
圧縮機		小型・高効率ターボ式圧縮機				
熱交換器		熱交換器の小型化				
システム化		小型・高効率システム設計				
					2MVA 変圧器とシステム検証	

図 2.3.2-3 超電導変圧器用冷却システムの技術開発フロー

2.3.2-1 小型膨張タービンの高効率化（大陽日酸）

冷凍機の低温部に配置される膨張タービンは冷凍機の性能を大きく左右するため高効率であると同時に、メンテナンスフリーが要求される。そのため、膨張タービンは非接触で摺動・磨耗がなく、高速回転での安定性に優れた 5 軸制御の磁気軸受を採用するとともに、膨張タービンで発生した動力を電力として回収できる発電機制動方式とした³⁻⁴⁾。

(1) 膨張タービンの設計・製作

膨張タービン形式は、小流量でも効率が高いラジアルタービンを採用した。冷凍機のプロセスシミュレーションから求めた膨張タービンの設計仕様を表 2.3.2-1 に示す。製作した膨張タービンのノズルとインペラを図 2.3.2-4 に示す。ノズルの羽根形状は直線翼、羽根の数は 15 とし、インペラは半径方向から流入し、軸方向に流出する 3 次元の混流型とした。インペラの羽根枚数や羽根形状はタービン効率に大きく影響するため、羽根形状が異なる数種類を検討した。ノズル材料は低温での機械的特性に優れた SUS304 とし、インペラの材質は軽量化と加工が容易なアルミ合金とした。性能評価試験でインペラの最適形状を決定した後は、耐久性を持たせるため比強度の高いチタン合金に改良した。

表 2.3.2-1 膨張タービン・ターボ圧縮機的设计仕様

	膨張タービン	ターボ圧縮機
回転数	1,250 rps	617 rps
入口圧力	1.0 MPa	0.5 MPa
出口圧力	0.5 MPa	1.0 MPa
入口温度	68 K	303 K
流量	1,200 Nm ³ /h	1,200 Nm ³ /h
インペラ外径	32 mm	155 mm

本プロジェクトで設計・製作した発電機制動磁気軸受式膨張タービンの構造を図 2.3.2-4 に示す。膨張タービンは入口と出口の配管を下側にしてコールドボックス（真空断熱）に垂直に取り付けられ、大口径フランジ部分でシールされている。常温部には磁気軸受と発電機が配置され、発電機の周囲は水冷構造となっている。膨張タービン本体はカートリッジ構造であり、コールドボックス内が真空状態でも膨張タービンのインペラ、ノズル及び軸受等の部品交換が可能である。同図に高速回転する膨張タービンロータの外観写真も示す。手前にタービンインペラをネジ止め固定し、中央にはアキシアル磁気軸受のスラストディスクが配置され、発電機のロータエレメントはスラストディスクの奥側に焼きばめ固定した。ロータの総重量は 1.87 kg になった。

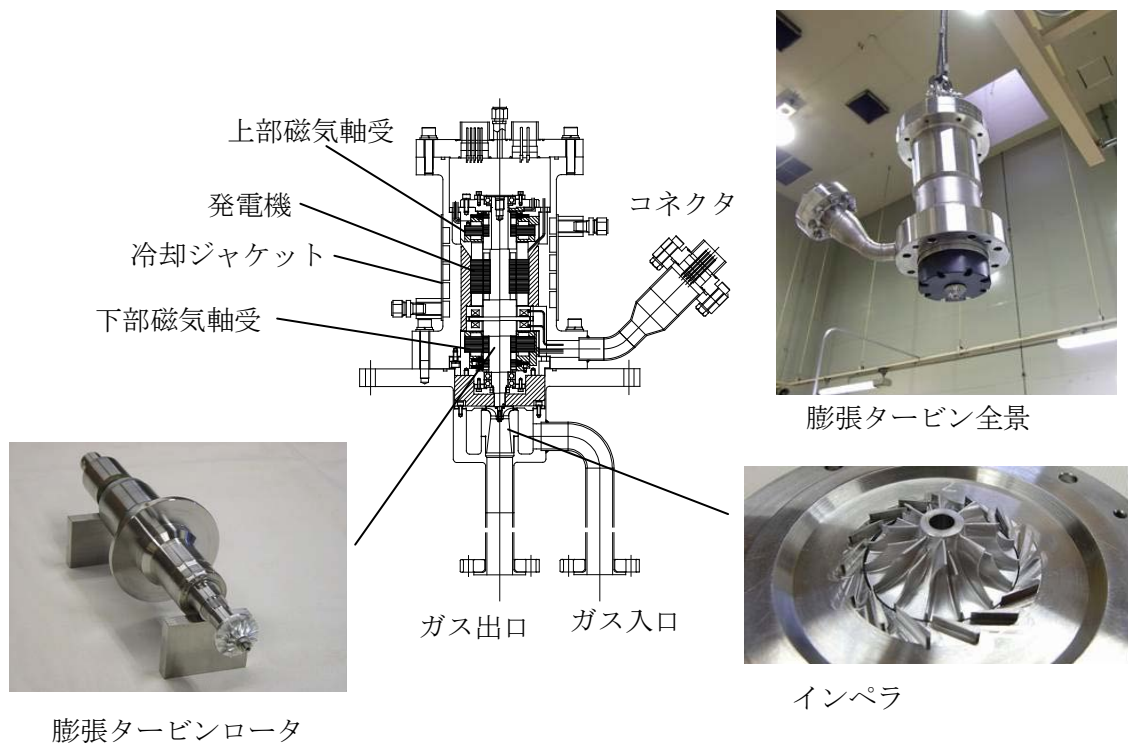


図 2.3.2-4 膨張タービン構成

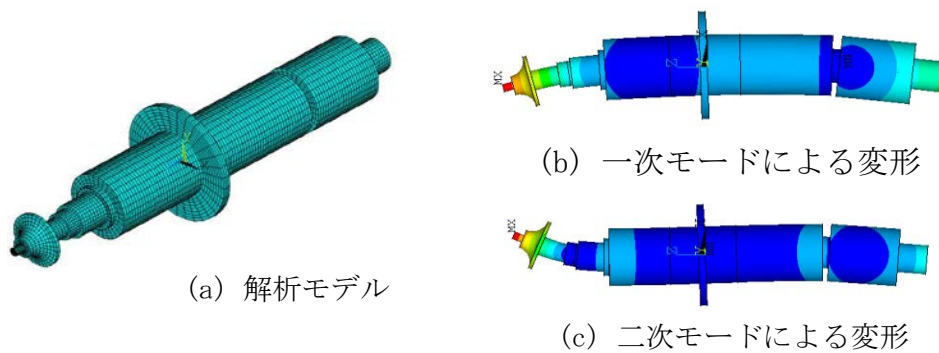


図 2.3.2-5 膨張タービンロータ固有振動解析

図 2.3.2-5 に有限要素法による膨張タービンロータの固有振動解析結果を示す。(a)は解析モデルのメッシュ図、(b)は一次の曲げ固有振動モード、(c)は二次の曲げ固有振動モードである。一次の曲げ固有振動数は 1,449 Hz、二次の曲げ固有振動数は 3,290 Hz であり、膨張タービンの回転数 1,250 rps から 15%以上離れていることを確認した。膨張タービンをネオン冷凍機に搭載する前に膨張タービン単独で高圧のネオンガス中で 1,300 rps まで回転させたが、磁気軸受で支持された膨張タービンロータの振動は小さく、安定に運転できることが確認できた。

(2) 膨張タービンの運転

膨張タービンをネオン冷凍機に搭載して磁気軸受の安定性を確認し、膨張タービンの流量や効率を測定した。膨張タービンの起動は、まず、磁気軸受を動作させて膨張タービンロータを非接触浮上させる。ネオン冷凍機の主圧縮機を起動した後、インバータにより膨張タービンの発電機を 1,200 rps までモータモードで駆動する。膨張タービンの入口圧力を上昇させると膨張タービンで発生した動力によってインバータの励磁周波数より膨張タービンロータの回転数が上昇し、モータは発電機として動作するようになる。膨張タービン入口圧力が定格に到達すると膨張タービンの回転数は 1,250 rps に近づく。なお、レシプロ圧縮機を使用していた中間評価段階までは前述したように圧縮機を無負荷状態で起動した後に膨張タービンを起動したが、ターボ圧縮機では無負荷状態での起動が困難なため、レシプロ圧縮機をターボ圧縮機変更後、膨張タービン起動後に圧縮機を起動する手順に変更した。

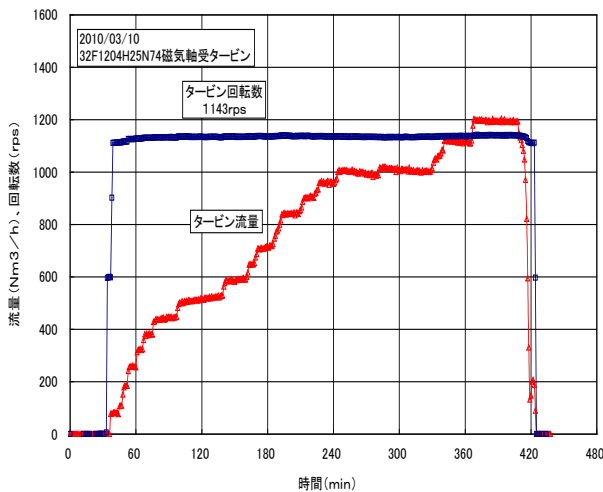


図 2.3.2-6 回転数と流量の変化

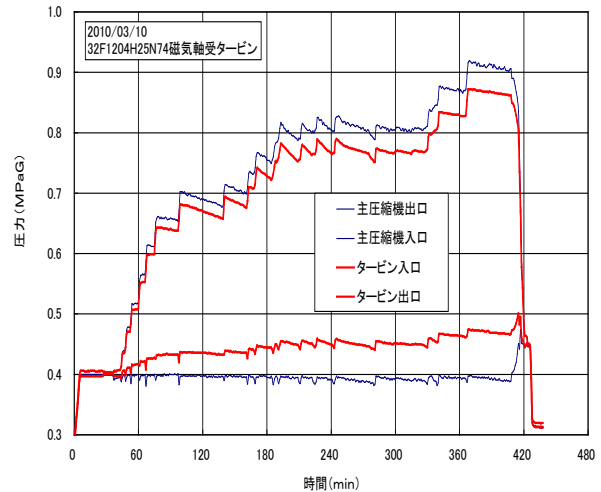


図 2.3.2-7 圧力変化

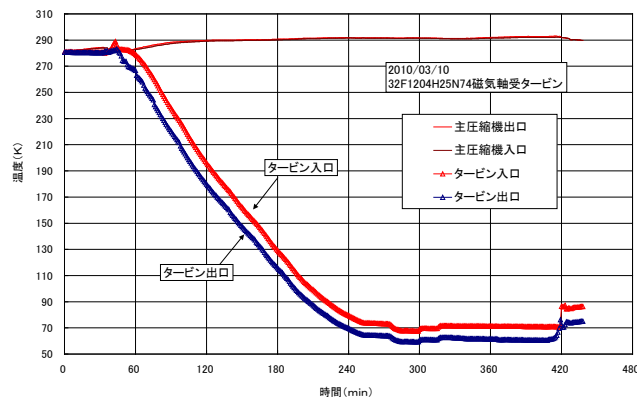


図 2.3.2-8 温度変化

図 2.3.2-6 に起動から停止までの膨張タービンの回転数(約 1,150 rps)と流量の変化を示す。膨張タービンが停止する前のデータは、膨張タービンが定格の入口圧力、温度に到達した時のデータであり、この時の膨張タービン流量は 1,200 Nm³/h で定格流量と一致している。図 2.3.2-7 と図 2.3.2-8 に主ターボ圧縮機と膨張タービンの圧力変化(ゲージ圧力、単位 MPaG)と温度変化を示す。膨張タービンの入口、出口温度は起動直後室温であるが、約 180 min 後には定格付近の 70 K まで温度降下した。

(3) 膨張タービンの性能

膨張タービンの断熱効率 η_T を式 2.3.2-1 に、理論断熱噴出速度 C_0 (膨張タービン入口から出口まで等エントロピ変化した時のガスの流速)を式 2.3.2-2 に示す。膨張タービンの効率に影響を与える重要なパラメータとして速度比 U/C_0 が一般に用いられる。ここで、 H_1 :膨張タービン入口エンタルピ、 H_2 :膨張タービン出口エンタルピ、 H_{2S} :断熱膨張(等エントロピ変化)した時の膨張タービン出口エンタルピ、 U :膨張タービンインペラの周速度である。

$$\text{断熱効率 } \eta_T = \frac{H_1 - H_2}{H_1 - H_{2S}} \quad (\text{式 2.3.2-1})$$

$$\text{理論断熱噴出速度 } C_0 = \sqrt{2(H_1 - H_{2S})} \quad (\text{式 2.3.2-2})$$

膨張タービンの性能に大きな影響を与える因子は多くが挙げられるが、このネオン冷凍機用膨張タービンではインペラ径が 32 mm と超小型であるため、インペラ羽根形状がタービン効率にどの程度の影響を与えるかに着目し、3種類のインペラを製作した。

図 2.3.2-9 に 3種類のインペラ形状を示す。図(a)は羽根枚数 12 枚のフルブレードインペラ 32F1204、図(b)は 16 枚のフルブレードインペラ 32F1604、図(c)は 8 枚はフルブレード、8 枚はスプリッタブレードの 32S1604 である。3種類とも外径 32 mm、羽根厚さは羽根の根本側が 0.5 mm、先端側が 0.3 mm、羽根出口の直径と羽根角度はすべて同じとしたが、32S1604 インペラの外径部の羽根高さは 2.2 mm と他のインペラよりも 0.3 mm だけ低くした。

図 2.3.2-10 にネオン冷凍機に搭載して試験したタービン効率の実測値を示す。3種類のインペラのタービン効率の最大値は 70 %以上で、スプリッタブレードの 32S1604(□)が他のインペラ(○、△)よりも効率はやや低めとなっている。32S1604 インペラの試験ではノズル羽根出口角度が 71 度のノズルリングと組み合わせ、羽根高さを他のインペラよりも 0.3 mm 低くしたことが、他のインペラよりも効率が低くなった原因と思われる。いずれにせよ、3種類とも目標のタービン効率 65 % を大きく上回ることができた。

膨張タービンの軸受に磁気軸受を採用した大きな理由は、膨張タービンの信頼性と耐久性の向上である。磁気軸受の膨張タービンは空気分離装置に搭載して長期間メンテナンス無しで連続運転した実績があり、ネオン冷凍機に搭載した小型の膨張タービンも同様の信頼性・耐久性が期待できる。中間評価段階では当該膨張タービンを組み込んだネオン冷凍機の 24 時間連続運転を 11 日間実施したところ、膨張タービンの回転数や軸受の振動には変化はなく、膨張タービンの効率も運転初期と同じであり、安定した運転が確認できた。さらに、最終的には 2 ヶ月間にわたり連続運転を実施し、問題がないことを確認できた。



図 2.3.2-9 供試インペラ (3 種類)

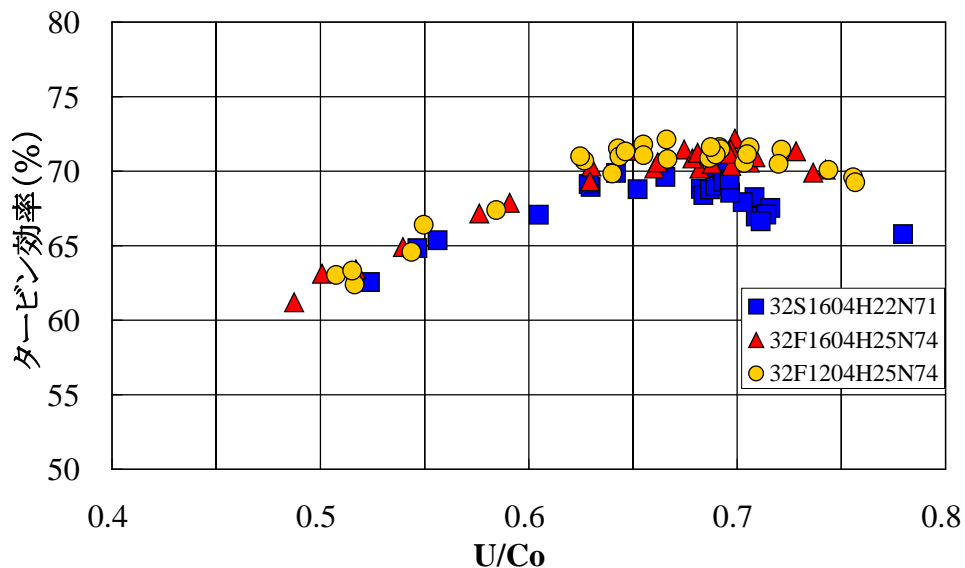


図 2.3.2-10 タービン効率の試験結果

2.3.2-2 小型ターボ式圧縮機開発（大陽日酸）

(1) 小型ターボ式圧縮機的设计

冷凍サイクルのプロセスシミュレーションから決定された小型ターボ式圧縮機（以下ターボ圧縮機）を設計した。ターボ圧縮機の圧力比は2であり、ターボ圧縮機の圧力比としてはそれほど大きな圧力比ではないが、流量が少ないため比速度が小さくなり、1段で圧縮するよりも2段で圧縮する方が効率的に有利となるため、2段圧縮のターボ圧縮機として設計した。ターボ圧縮機のインペラは図2.3.2-11に示すようにインペラ出口羽根の取り付け角を回転方向と逆向きに30度傾けたバックワードインペラとし、インペラの外側には羽根付ディフューザを配置した。一般に、インペラ出口羽根の取り付け角を半径方向としたラジアルインペラよりもバックワードインペラの方が、同じ圧力比を得るための回転数は高くなるが、インペラ出口の流速が小さくなって断熱効率が高くなり、作動範囲も広がる⁵⁾。インペラの羽根枚数は18枚、ディフューザは羽根枚数が15枚と8枚の2種類を用意した。図2.3.2-11に羽根枚数15枚のディフューザを示す。羽根の形状は15枚と8枚とで同じであるが、羽根枚数を変えることで羽根入口スロート幅（隣り合う羽根間の最少通路幅）が15枚は7.7 mm、8枚は20.6 mmとなり、入口スロートの面積（羽根枚数、スロート幅、羽根高さの積）は8枚の方が1.43倍大きくなっている。ターボ圧縮機ディフューザの入口スロート面積はターボ圧縮機の性能に対して非常に重要である⁶⁾。

ターボ圧縮機の構造を図2.3.2-11に示す。図の右側が1段側のターボ圧縮機、左側が2段側のターボ圧縮機である。中央部には60 kWの高周波モータがビルトインされており、インバータで駆動される。モータの左側にアキシヤル磁気軸受、その両側にラジアル磁気軸受が配置された構造となっている。ターボ圧縮機インペラの内側には磁気軸受が何らかの要因によって正常に動作できなくなった場合に備えて回転軸と軸受が接触するのを防ぐためにタッチダウン軸受と呼ばれる無潤滑のボールベアリングが設けてある。

また、高速回転による流体の摩擦損失とモータ損失（銅損失と鉄損失の和）による発熱を除去するために、モータの外側には水冷式の冷却ジャケットを設けた。

図2.3.2-12にターボ圧縮機ロータの固有振動モードの解析結果を示す。図の上段(a)は解析モデルのメッシュ図、中段(b)は一次の曲げモード、下段(c)は二次の曲げモードで、一次の固有振動数は706 Hz、二次の固有振動数は1,756 Hzで、ターボ圧縮機ロータの設計回転数617 rpsから14%以上離れていることを確認した。

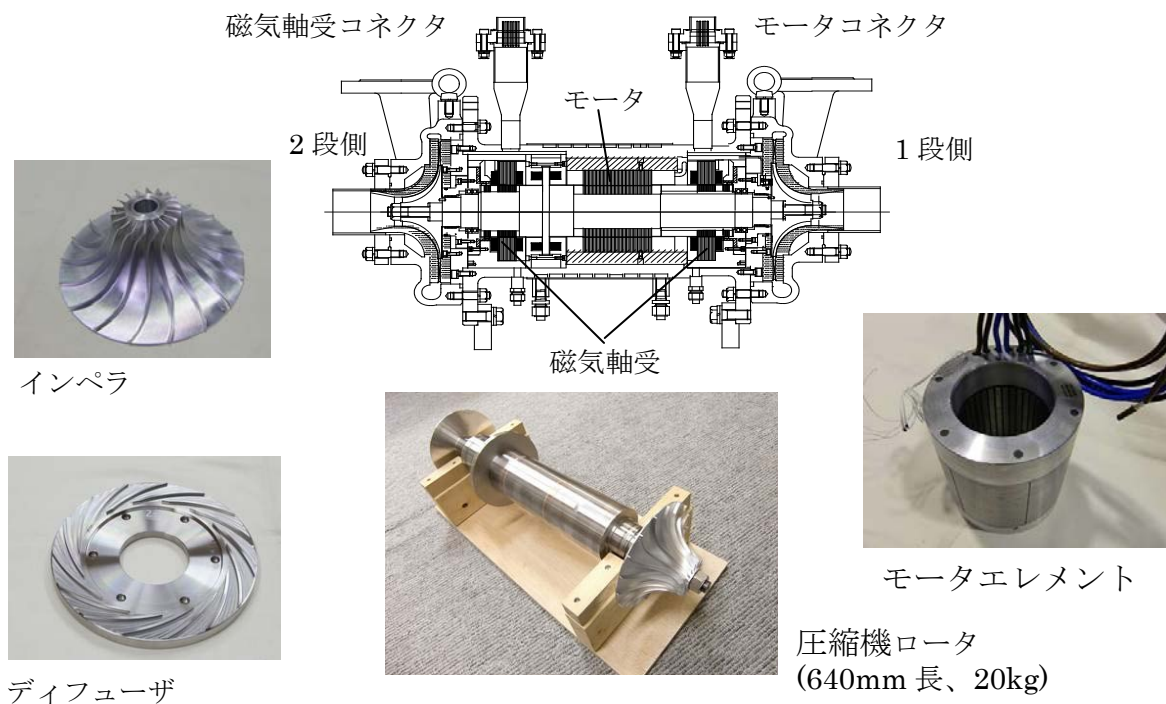


図 2.3.2-11 ターボ圧縮機の構造

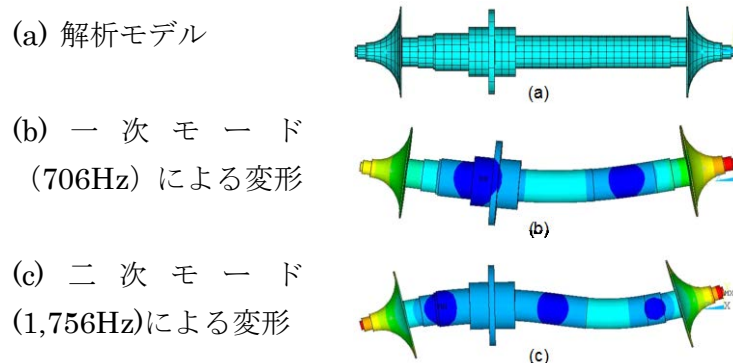


図 2.3.2-12 ターボ圧縮機ロータの固有振動モード

(2) ターボ圧縮機の運転

新開発したターボ圧縮機をネオンガス雰囲気中で運転するための試験設備の主要部を図 2.3.2-13 に示す。1 段目のターボ圧縮機で圧縮されたガスは約 100 °C まで温度上昇するため、水冷式のインタークーラで 30 °C まで冷却されて 2 段側のターボ圧縮機に入る。2 段目のターボ圧縮機出口のガスも同様に約 100 °C まで温度上昇するため、水冷式のアフタークーラで 30 °C まで冷却され、流量調整用のバルブで減圧された後、1 段目のターボ圧縮機に戻る。図には示していないが、1 段目のターボ圧縮機入口圧力が設計圧力の 0.5 MPa で一定となるようにガスの補充と回収のポートを設けている。

各段のターボ圧縮機の入口、出口配管には JIS B 8345 の「ターボ形ガス用ブロワ・圧縮機の閉回路による試験及び検査方法」で定められた位置に圧力計、温度計、

流量計等を設置して運転データを計測した。

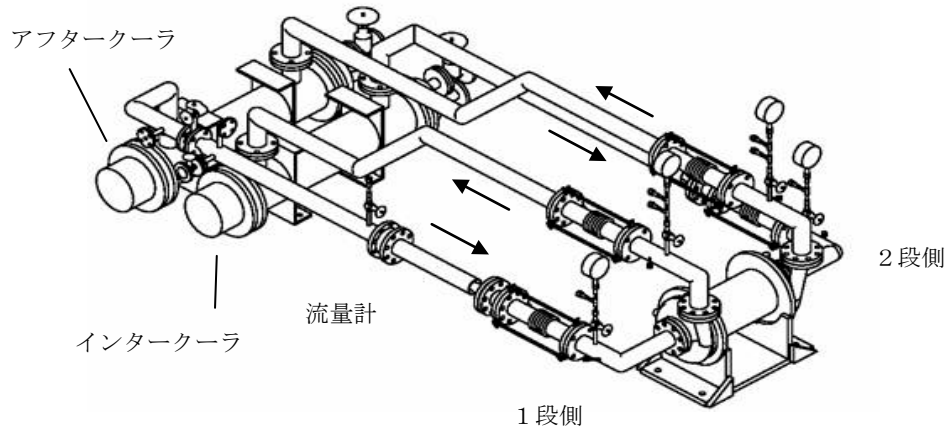


図 2.3.2-13 ターボ圧縮機試験設備

(3) ターボ圧縮機の性能試験

ターボ圧縮機の断熱効率 η_C も膨張タービンと同様な式で表される。

$$\eta_C = \frac{H_{2S} - H_1}{H_2 - H_1} \quad (\text{式 2.3.2-3})$$

$$\eta_C = \frac{T_{2S} - T_1}{T_2 - T_1} \quad (\text{式 2.3.2-4})$$

$$T_{2S} = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\left(\frac{\kappa-1}{\kappa} \right)} \quad (\text{式 2.3.2-5})$$

ここで、 H_1 :ターボ圧縮機入口エンタルピ、 H_2 :ターボ圧縮機出口エンタルピ、 H_{2S} :断熱圧縮（等エントロピ変化）した時のターボ圧縮機出口エンタルピ、 T_1 :ターボ圧縮機入口温度、 T_2 :ターボ圧縮機出口温度、 T_{2S} :断熱圧縮（等エントロピ変化）した時のターボ圧縮機出口温度、 P_1 :ターボ圧縮機入口圧力、 P_2 :圧縮機出口圧力、 κ :ガスの比熱比（ネオンガスの場合 $\kappa=1.668$ ）

膨張タービンの場合は入口と出口の温度が 70 K 以下という非常に低温度となるため、ネオンガスを理想気体として扱ると多少の誤差が生じるが、ターボ圧縮機の場合は動作温度が室温よりも高いため、理想気体として取り扱っても問題は無い。理想気体の場合はエンタルピの代わりに温度を用い、上記の式でターボ圧縮機の断熱効率を表現することができる。

a 窒素ガスでの等価性能試験

ターボ圧縮機を最初からネオンガスで実験すると、試験中の不具合による配管の取り外しやターボ圧縮機の一部を開放点検する度に高価で貴重なネオンガスを大

気中に放出することになる。そのため、ネオンガスで本格的に性能試験を実施する前の予備試験としてネオンガスと物性が近い窒素ガスでターボ圧縮機の性能試験を実施した。実際と異なるガスで試験する方法は前述した JIS B 8345 で詳細に規定されており、これに基づいて窒素ガスによるターボ圧縮機の等価性能試験を実施した。

ネオンガスでのターボ圧縮機の設計回転数は 617 rps であるが、これと等価な窒素ガスの運転回転数は 518 rps となる。ネオンガスの設計流量は 1,200 Nm³/h であるが、これと等価な窒素ガスの流量は 1,006 Nm³/h となる。

図 2.3.2-14 にターボ圧縮機の圧力比を示す。横軸はターボ圧縮機の標準状態(0℃、1 気圧)での流量であり、図の☆印が等価設計ポイント、すなわち、窒素ガスに換算したネオンガスでのターボ圧縮機の設計ポイントである。図中の○印が羽根枚数 8 枚のターボ圧縮機ディフューザでの試験結果であり、△印が羽根枚数 15 枚のターボ圧縮機ディフューザの試験結果である。一定回転数毎に図示した曲線は羽根枚数 8 枚のターボ圧縮機ディフューザの性能試験データからターボ圧縮機の相似則を用いて性能を予測したものである。図より等価設計ポイント(☆印)は 450 rps と 500 rps の中間の回転数域にあり、等価回転数 518 rps でターボ圧縮機を運転すればターボ圧縮機の圧力比は約 2.2 が得られ、等価設計ポイントの圧力比 2.0 を十分上回ることが分かった。

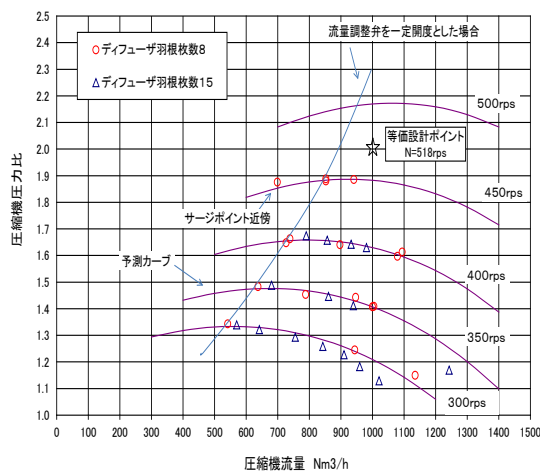


図 2.3.2-14 圧力比と圧縮機流量の関係 (流体：窒素)

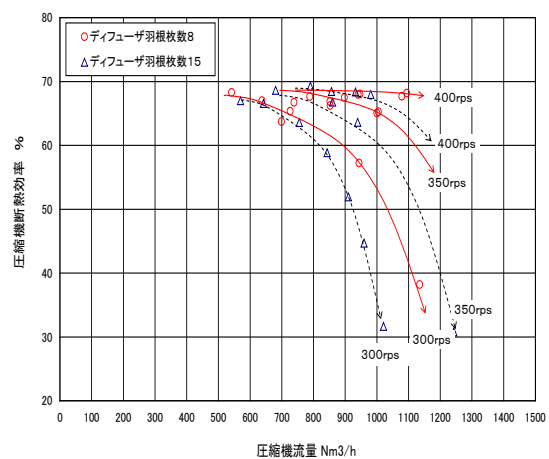


図 2.3.2-15 圧縮機効率と圧縮機流量の関係 (流体：窒素)

図 2.3.2-15 に窒素ガスでのターボ圧縮機の断熱効率を示す。図中の実線はディフューザ羽根枚数 8 枚の回転数ごとの傾向を示している。一方、破線はディフューザ羽根枚数 15 枚の傾向を示す。ディフューザ羽根枚数 8 枚の 450 rps データについてはデータ点数が少ないため傾向は図示していない。

羽根枚数 8 枚 (○印) と 15 枚(△印)のターボ圧縮機効率の傾向を比較すると最高効率はどちらも約 68 %程度を示しているが、ディフューザ羽根枚数が 8 枚より

も 15 枚の方が流量が多くなるにつれ効率の低下が大きく、ディフューザの羽根枚数による特性の違いが明らかになった。なお、中間評価時点では磁気軸受のチューニングとモータ発熱対策が十分でないため、ターボ圧縮機の回転数を 450 rps を上限として性能試験を実施した。ターボ圧縮機入口が 0.5 MPa よりも低い状態ではモータ発熱が小さいため、最大 550 rps までターボ圧縮機を運転して磁気軸受のチューニングを実施した。

b ネオンガスでの性能試験

窒素ガスでの等価試験によってターボ圧縮機の運転特性や試験データの再現性を十分検証することができたので、試験回路内の窒素ガスをネオンガスに置換してネオンガスによるターボ圧縮機の性能試験を実施した。

図 2.3.2-16 にネオンガスでのターボ圧縮機の圧力比を示す。ターボ圧縮機ディフューザ羽根枚数は 15 枚を使用した。図の 300~600 rps の一定回転数毎の曲線は窒素ガスの等価試験で述べたようにターボ圧縮機の相似則を用いて性能予測したものである。

また、図の破線は流量調整用のバルブの開度を一定に保持したままターボ圧縮機の回転数を変化させた時のターボ圧縮機の変化を示したものである。

窒素ガスとネオンガスでは比熱比が異なるため同じ回転数でもネオンガスの圧力比は小さくなる。したがってネオンガスでの性能試験は 350~450 rps の回転数域を重点的に実施した。なお、流量 780 Nm³/h の 1 点だけではあるが、500 rps での性能データも収集した。さらに、回転数 450 rps でターボ圧縮機の流量を減らしてターボ圧縮機がサージに突入する試験も実施した。図中にサージ近傍と矢印で付記したポイントからターボ圧縮機の流量を減らすとターボ圧縮機の入口、出口の圧力は大きく変動し騒音が発生するが、磁気軸受の制御は安定であった。

図 2.3.2-16 より、目標とする 1,200 Nm³/h での圧力比 2.0 は回転数が 550~600 rps の中間域にあることが分かる。磁気軸受のチューニングとモータ発熱対策が完了して回転数が設計の 617 rps まで回転できるようになれば、ターボ圧縮機の相似則よりターボ圧縮機の圧力比は目標値を十分上回ることが分かった。

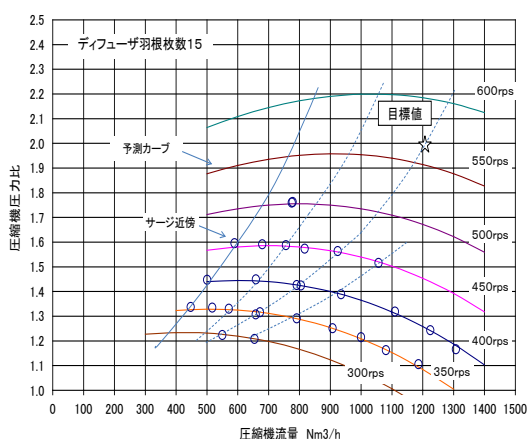


図 2.3.2-16 圧力比と圧縮機流量の関係 (流体：ネオンガス)

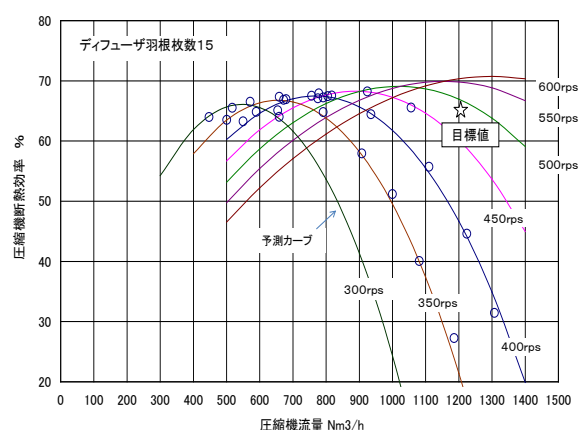


図 2.3.2-17 圧縮機効率と圧縮機流量の関係 (流体：ネオンガス)

ターボ圧縮機の断熱効率を図 2.3.2-17 に示す。図中の実線は 300~500 rps の実測効率とターボ圧縮機の相似則により予想される回転数ごとの効率カーブである。ターボ圧縮機効率は回転数が高くなるとピーク効率も高くなる傾向がある。図より 350~450 rps での回転数毎のピーク効率は約 66~68 % の範囲にあり、設計回転数より低い回転数域ではあるが、目標とする効率 65 % を超えることが確認でき、さらにターボ圧縮機流量 1,200 Nm³/h、圧力比 2.0 におけるターボ圧縮機効率も 65 % を超える計算結果となった。

中間評価年度の最終段階で、ボディの材質を現状のオーステナイトステンレス鋼 (SUS304) から熱伝導率が約 2.7 倍大きいクロムモリブデン鋼 (SCM440) に変更することでモータの巻線温度を 120 °C 以下に抑える対策を実施してターボ圧縮機のモータ温度上昇を抑制することに成功し、流量 1,200 Nm³/h で圧力比 2.0 以上、断熱効率 65 % 以上を達成した。

c ターボ圧縮機の改良

ターボ圧縮機の目標達成及び冷凍機性能向上を目的として、平成 23 年度以降に以下の改良を実施した。

- ① シュラウドクリアランス (インペラと固定壁の隙間量) の最適化
- ② 中間羽根インペラの採用

図 2.3.2-18 及び図 2.3.2-19 に改良後の試験結果を示す。改良後のターボ圧縮機は冷凍機に組み込まれ、冷凍機の運転評価とともに実施した。

図 2.3.2-18 は圧力比とターボ圧縮機流量の関係である。実際のネオンガスによる運転において、目標値である圧力比 2.0、ターボ圧縮機流量 1,200 Nm³/h は、当初計画した回転数 617 rps よりやや低い 575 rps の回転数で達成できた。これは後述するように圧縮機の効率が計画よりも高くなったためである。また、ターボ圧縮機を冷凍機に組み込んだ場合、冷凍機の運転温度が高くなるとターボ圧縮機流量が

減少し、ターボ圧縮機がサージ現象を引き起こす危険性があるが、冷凍機の運転温度 80 K においてもサージ等の問題は発生しないことを確認した。

図 2.3.2-19 はターボ圧縮機効率とターボ圧縮機流量の関係である。図の□印は改良前のデータ、△印は改良後のデータである。上記改良の結果、これまで得られていた 66~68 % の効率が約 70 % にまで向上したことを確認した。ターボ圧縮機の効率向上により冷凍機の投入動力の抑制に寄与することができた。

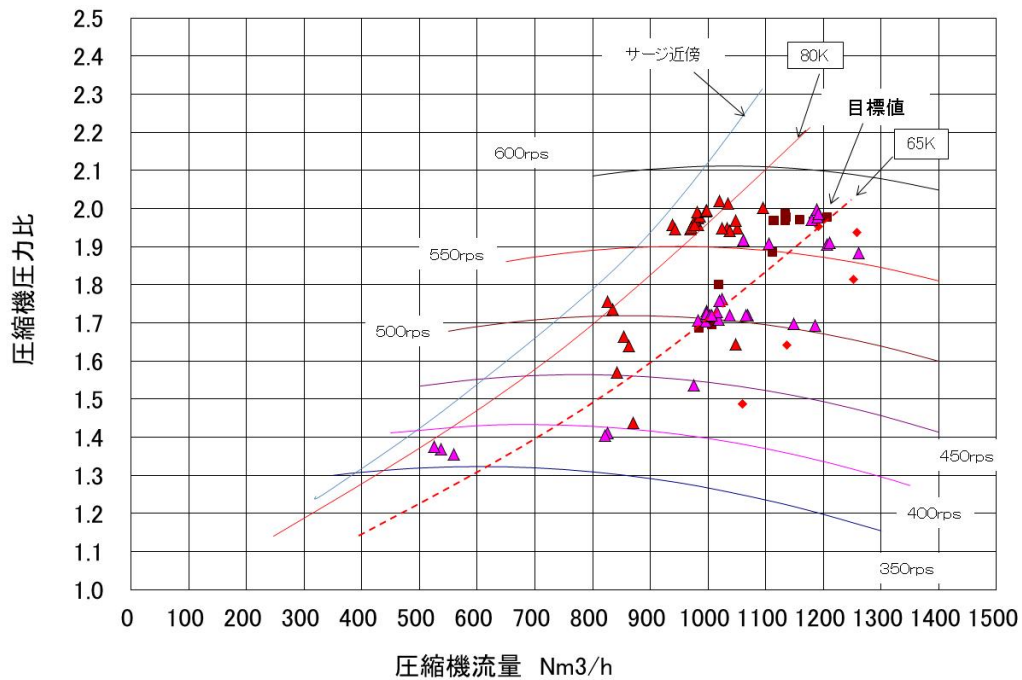


図 2.3.2-18 改良後の圧力比とターボ圧縮機流量の関係 (流体：ネオンガス)

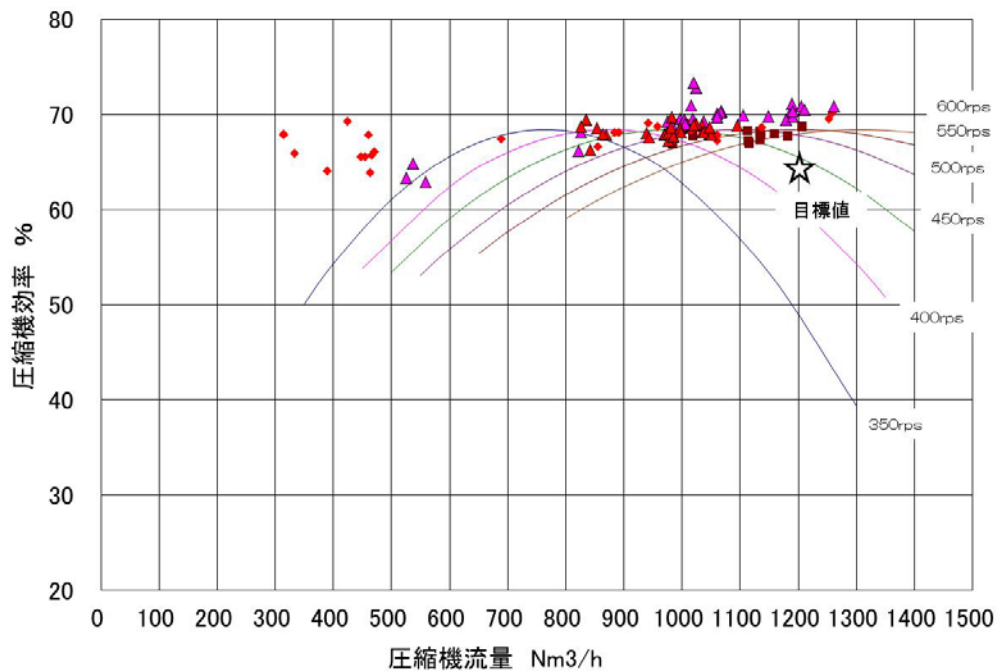


図 2.3.2-19 改良後のターボ圧縮機効率とターボ圧縮機流量の関係 (流体：ネオンガス)

(4) 低温圧縮試験

ターボ圧縮機の動力 L は式 2.3.2-6 に示すようにターボ圧縮機の入口温度 T_1 に比例するため、LNG 等の余剰冷熱が利用できる場合、ターボ圧縮機の入口温度を下げて低温圧縮することでネオン冷凍機の COP の向上が期待できる。例えば、ターボ圧縮機の入口を LNG と熱交換させて 300 K から 150 K に冷却するとターボ圧縮機の動力は 1/2、COP は 2 倍となる。

$$L = \frac{\dot{m}}{\eta} \frac{\kappa}{\kappa - 1} RT_1 \left\{ \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} - 1 \right\} \quad (\text{式 2.3.2-6})$$

ここで、 \dot{m} :質量流量、 η :断熱効率、 R :ガス定数、 κ :比熱比、 P_1 :入口圧力、 P_2 :出口圧力である。

圧縮機の入口が 150 K という低温で動作する数 kW クラスの小型ターボ圧縮機はヘリウム冷凍機等で開発された例はあるが、数十 kW クラスのターボ圧縮機は実例がない。そこで、今回開発したターボ圧縮機が低温で運転しても磁気軸受や高速モータが問題なく機能し、性能的にも期待できるレベルが見通せるかどうかを実際に低温試験で確認することとした。

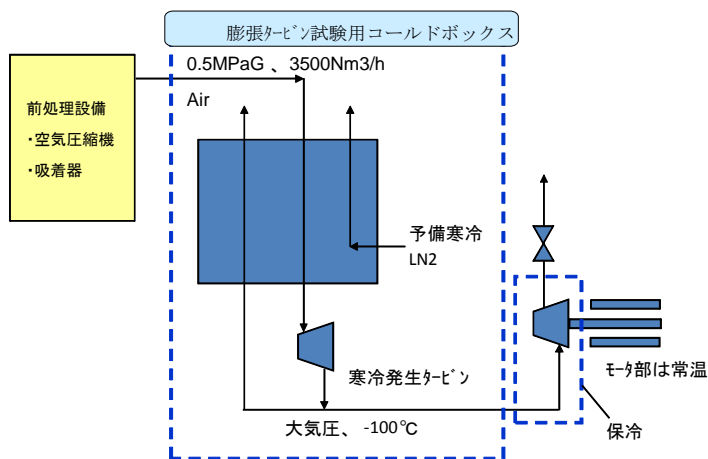


図 2.3.2-20 低温圧縮試験フロー



図 2.3.2-21 低温圧縮機

図 2.3.2-20 に低温圧縮試験フローを示す。ターボ圧縮機の 1 段側のインペラを羽根がないダミーディスクに交換して 2 段側のインペラを低温圧縮機として試験した。フロー図に示すように別置きの空気圧縮機と熱交換器、寒冷発生膨張タービンを用いて発生させた低温空気を低温圧縮機に導入した。図 2.3.2-21 に低温圧縮試験時の写真を示す。2 段側のターボ圧縮機ケーシングは霜で白くなっているが、

ターボ圧縮機の磁気軸受やモータは常温、もしくはそれよりも高い温度で動作し、開発したターボ圧縮機を低温圧縮機として運転することが可能であることを検証できた。

低温圧縮機の回転数を 550 rps、入口温度を-70 °Cと-100 °Cに保持した時のターボ圧縮機の流量と圧力比の関係を図 2.3.2-22 に示す。

低温圧縮機のメリットとして前述したようにターボ圧縮機の入口温度を下げるとターボ圧縮機の動力が小さくなるだけでなく、低温になるとガスの音速が小さくなるためインペラ周速度が同じ場合、得られる圧力比は大きくなる。図に示すようにターボ圧縮機入口温度 20 °Cの時の最大圧力比は 1.55 であるが、入口温度が-70 °Cで最大圧力比は 1.86、-100 °Cでは 2.05 に増加する。すなわち、常温圧縮では圧力比 2 を得るのに 2 段圧縮としたが、同じ回転数で低温圧縮すれば 1 段で圧力比 2 を得ることが実際の運転で確認された。

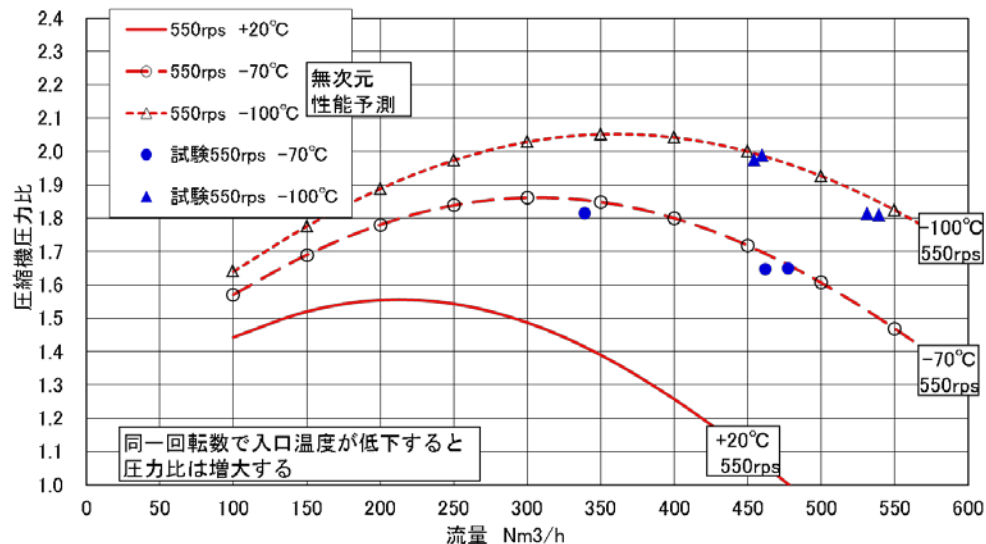


図 2.3.2-22 低温圧縮試験結果（ターボ圧縮機流量と圧力比の関係）

2.3.2-3 熱交換器の小型化（大陽日酸）

前 NEDO 事業の「超電導応用基盤技術開発（第Ⅱ期）」プロジェクトにて製作したプロトタイプ冷凍機では図 2.3.2-23 に示すようにプレートフィン型熱交換器が 5 ブロック組み込まれていた。それぞれの熱交換器ブロックは同一形状・寸法仕様であり、幅 290 mm×奥行 270 mm×高さ 1300 mm である。本研究の目的の一つは小型化の観点から所定の冷凍機性能を得る最低限の熱交換器の大きさを検討することである。COP や冷凍能力は、熱交換器の効率（伝熱面積即ち大きさ）、膨張タービン・ターボ圧縮機の断熱効率に大きく依存している。そこで、膨張タービン・ターボ圧縮機の断熱効率を現実的な値に設定することにより熱交換器のブロック数、すなわち大きさを見積ることとした。

平成 21 年度にはプロセスシミュレーションプログラム“gPROMS”にガス物性プログラム“REFPROP”を組み込み、熱交換器や配管の圧力損失を考慮した冷凍サイクルのプロセスシミュレータを用いて熱交換器のブロック数をパラメータとして冷凍機性能を見積もった。その結果を表 2.3.2-2 に掲げる。膨張タービン及びターボ圧縮機の断熱効率が 70 % になれば熱交換器は 3 ブロック、すなわちプロトタイプ冷凍機の 3/5 の大きさで冷凍能力 2.5 kW@65 K、COP 0.06@80 K という冷凍機性能が達成可能であることが分かった⁷⁾。



図 2.3.2-23 プレートフィン型熱交換器ブロック

表 2.3.2-2 熱交換器ブロック数と冷凍機性能予測

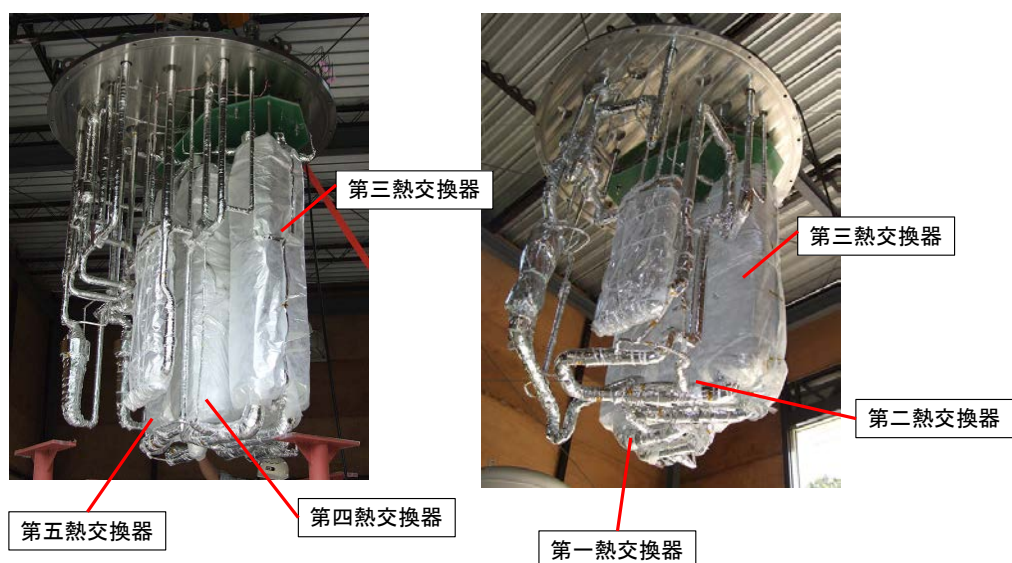
冷却温度 (K)	熱交換器ブロック数	COP (回生あり)	COP (回生なし)	冷凍能力 (kW)	熱交換器全体効率	膨張タービン・ターボ圧縮機断熱効率	膨張比	回生電力 (kW)
65	5	0.0453	0.0433	2.5	0.991	0.65	1.97	3.17
65	5	0.0538	0.0510	2.7	0.991	0.70	1.97	3.41
65	4	0.0526	0.0498	2.6	0.988	0.70	2.01	3.53
65	3	0.0497	0.0469	2.5	0.984	0.70	2.04	3.68
80	5	0.0589	0.0557	3.2	0.991	0.65	1.95	3.86
80	5	0.0698	0.0655	3.5	0.991	0.70	1.95	4.14
80	4	0.0695	0.0649	3.4	0.988	0.70	1.99	4.30
80	3	0.0672	0.0627	3.3	0.984	0.70	2.02	4.45

計算条件

ターボ圧縮機入口圧力: 455 kPa,ターボ圧縮機出口圧力 : 1,001 kPa,圧縮比 2.20,流量 0.3kg/sec,

膨張タービン、ターボ圧縮機の機械効率 0.8

平成 23 年度から熱交換器のブロック数を変更したプロセスシミュレーションの冷凍機性能予測結果を検証すべく、前述した 5 ブロック構成の熱交換器を 3 ブロックに改造した。図 2.3.2-24 (a)は改造前の 5 ブロック構成のコールドボックス内部の写真、同図(b)は第四と第五の熱交換器ブロックを除去して 3 ブロック構成としたコールドボックス内部の写真である。



(a)5 ブロック

(b)3 ブロック

図 2.3.2-24 熱交換器の 3 ブロック化

この3ブロック構成の熱交換器とレシプロ圧縮機を組み合わせた冷凍機の性能試験を行い、試験で得られた実際の熱交換器の効率、圧力損失、膨張タービン効率を用いて冷凍機の性能を評価した結果を表 2.3.2-3 に示す。試験に使用したレシプロ圧縮機の効率は高くないため、COP は圧縮機効率を 65 %と 70 %に仮定した。

表に示した結果より、新開発のターボ圧縮機の効率が 70 %を達成できれば3ブロックで COP 0.06@80 K を達成できることが分かった。ただし、この性能予測段階の効率は中間目標値の 65 %は達成できたものの、効率 70 %は確認されておらず、期待値であった。そこで、実証モデル冷凍機においてはさらなる性能向上を優先して4ブロックの熱交換器とした。

表 2.3.2-3 熱交換器 3 ブロックでの実験結果とモデル機冷凍機性能予測

運転温度 (K)	熱交換器 ブロック数 (個)	熱交換器 効率 (%)	膨張タービン 効率 (%)	ターボ圧縮 機 *1 効率 (%)	COP*2	冷凍能力 (kW)	膨張タービン 流量 (Nm ³ /h)
65	3	98.2	71.4	65	0.04	2.3	1,250
65	3	98.2	71.4	70	0.043	2.3	1,250
80	3	98.2	70.3	65	0.055	2.3	1,050
80	3	98.2	70.3	70	0.06	2.3	1,050

*1)仮定値, *2)計算値

2.3.2-4 冷凍機開発と冷却システム開発（大陽日酸）

(1) 冷凍プロセスの検討

冷凍機の効率向上のため、膨張タービンの膨張比とプロセス圧力の関係を調査・研究した。すなわち、冷凍効率(COP)とタービン膨張比の関係を膨張タービンの断熱効率、熱交換器の効率をパラメータとして計算した。その結果を図 2.3.2-25(a)、(b)に示す。計算条件は簡素化のために、冷凍機サイクルは単純ブレイトンサイクルで理想気体を冷媒とし、冷凍機内における圧力損失を無視している。また、COP は他の冷凍機との比較のため、80 K での値を計算している。結果から分かるように COP の数値は膨張比 2 近傍にて最大値を示している。さらにこの結果より、COP が 0.06 以上を達成するためには膨張タービン及び圧縮機の断熱効率が 70 %、熱交換器の効率が 99 %程度必要であることが分かる。次に、膨張比 2 を選んだ際に、65 K における冷凍能力 2.5 kW を達成するための必要流量を検討した。その結果を図 2.3.2-25 (c)、(d)に示す。65 K における冷凍能力と流量の関係を、膨張タービンと圧縮機の断熱効率及び熱交換器の効率をパラメータとして示した。計算の簡素化のため、冷媒は理想気体で冷凍機内の圧力損失は無視している。膨張タービン及

び圧縮機の断熱効率が 65 %、熱交換器効率が 99 %程度であれば、必要流量は 0.3 kg/sec となる。

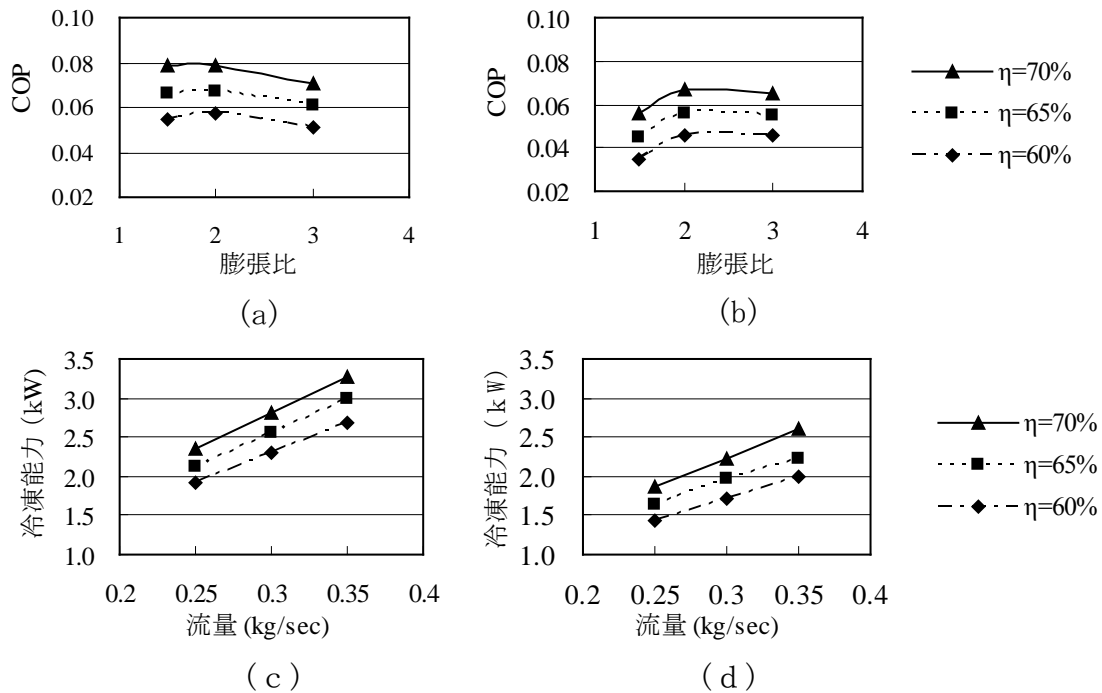


図 2.3.2-25 (a) 80 K 運転時の COP (熱交換器効率 99 %)
 (b) 80 K 運転時の COP (熱交換器効率 98 %)
 (c) 65 K 運転時の冷凍能力 (熱交換器効率 99 %)
 (d) 65 K 運転時の冷凍能力 (熱交換器効率 98 %)

ただし、冷媒：理想気体、 η ：膨張タービンと圧縮機の断熱効率

次にプロセス圧力の影響を検討した。理想気体では膨張比のみが冷凍機性能に影響するが、実在気体ではプロセス圧力が冷凍機性能に影響を与える。実在気体の物性プログラム”GASPAK”を計算プログラムに組み込み、ネオンガスを冷媒にした際の検討を行った。この検討では数種類のプロセス圧力と膨張比を設定し、さらに冷凍サイクルも単純ブレイトンサイクルを基本にいくつかの派生冷凍サイクルを考慮した。図 2.3.2-26 に検討した 6 つのサイクルを示す。(a)は基本となる単純ブレイトンサイクルであり、(b)は高圧側に熱負荷を配置したブレイトンサイクルである。(c)と(d)は二段膨張プロセスであり、特に(d)では中間圧力地点に熱交換器を配置したプロセスである。(e)と(f)は分流プロセスであるが、(e)は膨張後に分流したモデル、(f)は分流後に膨張させるモデルである。それぞれのプロセスに対して幾つかの膨張比・プロセス圧力の組み合わせを設定して 80 K における COP の計算を

実施した。今回の検討では、膨張タービンによる発生エネルギーは全て回収し、圧縮機動力に還元される条件で行っている。結果としてそれぞれのプロセスにおいて1.0 MPa/0.5 MPaのプロセス圧力での運転が他のプロセス圧力よりも高いCOPが得られた。COP最高効率は、同図(c)の二段膨張プロセスで得られているが、構造の簡略性を考慮し、実機では図2.3.2-26 (a)に示す単純ブレイトンサイクル、プロセス圧力1.0 MPa/0.5 MPaのプロセスとした。ただ、もう一つの可能性として同図 (b)に示す単純ブレイトンサイクルで高圧側に熱負荷を配置したモデルを挙げた。ネオン冷媒がサブクール液体窒素や高温超電導機器と熱交換する際に、ネオン冷媒が高圧であれば熱交換器内での圧力損失が少なくなるからである。

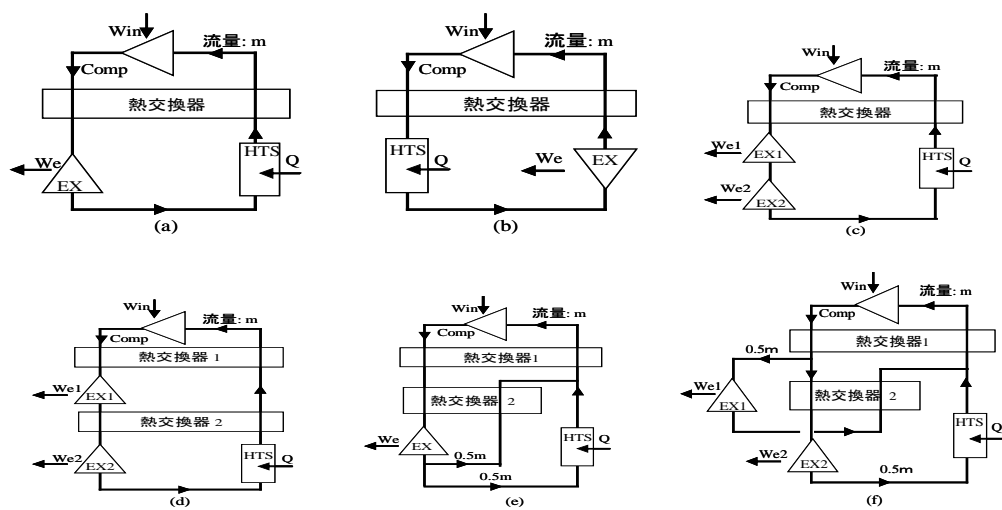


図 2.3.2-26 プロセス検討、(a)基本サイクル (単純ブレイトンサイクル)、(b)変形基本サイクル、(c)二段膨張プロセス、(d)中間熱交付き二段膨張、(e)膨張後分流プロセス、(f)分流後膨張プロセス、HTS: 高温超電導機器、EX: 膨張タービン、Comp: 圧縮機、Q: 冷凍能力、Win: 圧縮機入力、We: 回生エネルギー、m: 冷媒流量

(2) 冷凍サイクル

平成 23 年度から冷凍サイクルの検討を開始した。高温超電導電力機器の冷却システム設計では、冷凍機単体の性能が重要であることは当然であるが、冷却システム全体としてはサブクール液体窒素との熱交換の方法も冷却システムの効率を左右する重要な要素である。

高温超電導電力機器冷却システム的具体例として、ターボブレイトン冷凍機とスターリング冷凍機を利用した場合のサブクール液体窒素との熱交換の概略図を図 2.3.2-27 に示す。

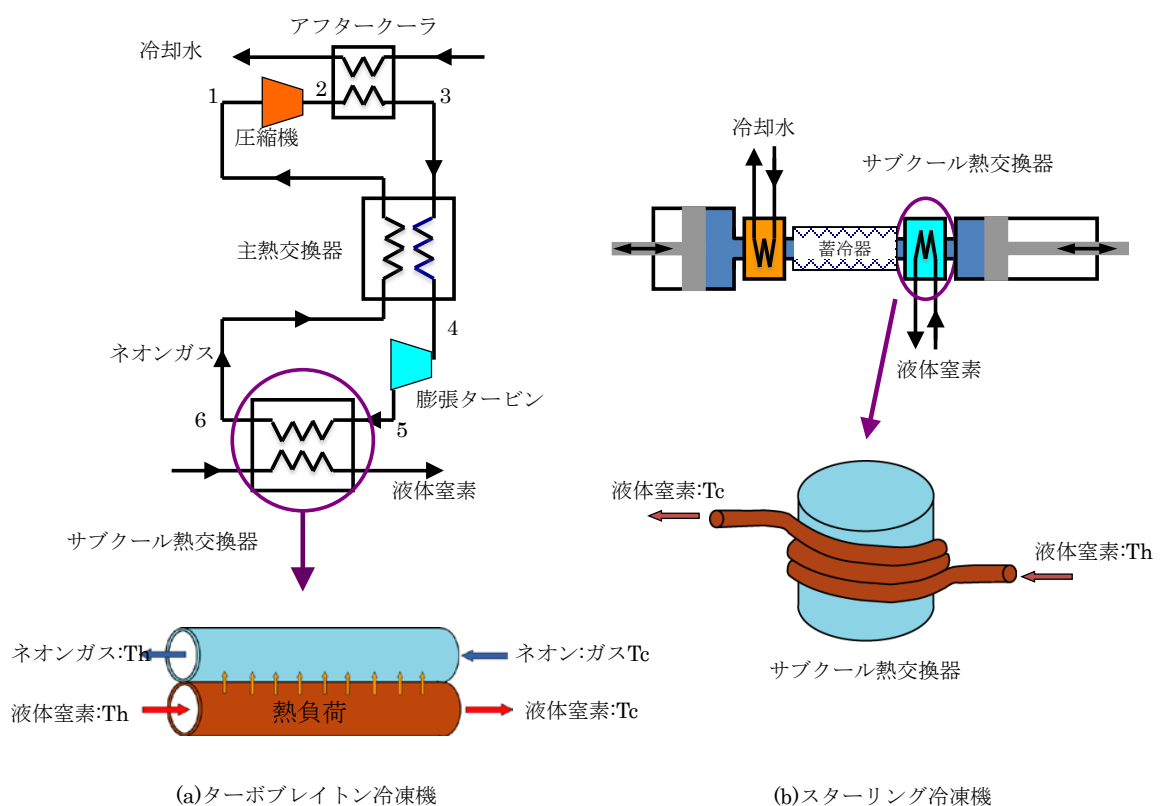


図 2.3.2-27 冷凍機の種類と液体窒素の冷却方法

冷却システムの役目は、高温超電導電力機器を冷却してサブクール熱交換器に戻ってきた温度 T_m のサブクール液体窒素を所定の温度 T_c まで冷却し、高温超電導電力機器へ再循環させることであり、サブクール液体窒素をより効率的に冷却することが求められる。

ターボブレイトン冷凍機の特徴は、サブクール液体窒素と熱伝達による熱交換を行うことにより、理論的（理想的）にはサブクール液体窒素の入口温度 T_m と同じ温度まで熱交換できることである。また、冷凍機の最低到達温度もサブクール液体窒素の冷却温度 T_c と等しくすることが可能である。つまり、冷凍機の作動ガスは、

Tc から Tm まで変化しながらサブクール液体窒素との熱交換を行うことができる。

一方、スターリング冷凍機では、コールドヘッドが等温膨張により吸熱を行うので、コールドヘッド温度は常に冷却温度 Tc となる。

ここで各冷凍機の理論的なサイクルにおける COP について整理する。各冷凍機の冷凍サイクルを T-S 線図で表したものを図 2.3.2-28 に示す。

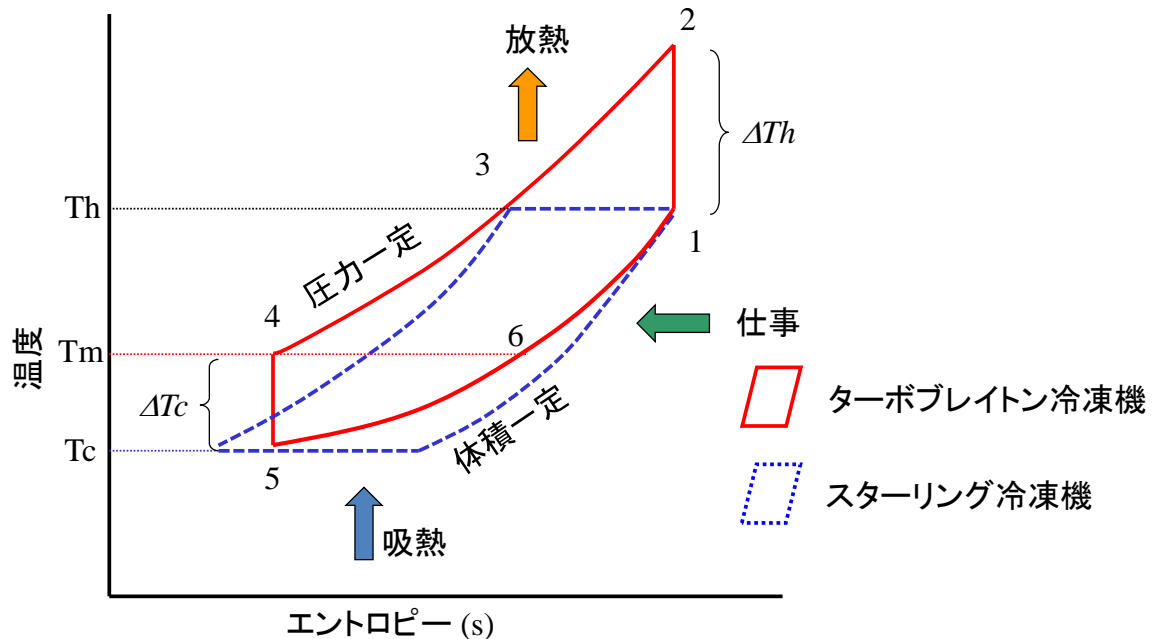


図 2.3.2-28 冷凍サイクル

ターボブレイトン冷凍機は常温のガスを 1 から 2 の状態まで (以下、各状態の番号は図 2.3.2-28 を参照) ターボ圧縮機で断熱圧縮する。アフタークーラで 3 の状態まで冷却され主熱交換器で 4 の状態まで定圧的に変化する。膨張タービンでの断熱膨張により 4 から 5 へ温度が降下し、5 から 6 への温度上昇 (定圧) によりサブクール液体窒素と熱交換を行う。一方、スターリング冷凍機では状態 1 から 3 の状態へ等温圧縮された作動ガスが内部の蓄冷材で温度 Tc まで定容的に冷やされ、等温膨張においてサブクール液体窒素との熱交換が行われる。

ここで作動ガスは理想気体とし、サブクール液体窒素と理想的な熱交換により、ブレイトン冷凍機の最低到達温度とスターリング冷凍機やコールドヘッドの温度を図 2.3.2-28 のように仮定した場合の冷却システムの COP を計算してみる。

ブレイトン冷凍機の冷凍能力(Qcb)と投入動力(Wb)は断熱仕事の関係から式 2.3.2-7 と式 2.3.2-8 が導かれる。

$$Q_{cb} = C_p \cdot \Delta T_c \quad (\text{式 2.3.2-7})$$

$$W_b = C_p \cdot \Delta T_h - C_p \cdot \Delta T_c \quad (\text{式 2.3.2-8})$$

Q_{cb} : 冷凍能力、 W_b : 投入動力、 C_p : 定圧比熱、

ΔT_c : 断熱膨張における温度降下

ΔT_h : 断熱圧縮における温度上昇

ここで、 ΔT_c と ΔT_h は断熱圧縮の関係から式 2.3.2-9 と式 2.3.2-10 となる。

$$\Delta T_c = T_c \left(\gamma^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right) \quad (\text{式 2.3.2-9})$$

$$\Delta T_h = T_h \left(\gamma^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right) \quad (\text{式 2.3.2-10})$$

T_c : 膨張タービン入口温度 ; T_h : ターボ圧縮機入口温度

γ : 圧力比 ; κ : 比熱比

したがって、ブレイトン冷凍機の理論的 COP(COP_b)は式 2.3.2-11 のとおりとなる。

$$COP_b = Q_{cb} / W_b = T_c / (T_h - T_c) \quad (\text{式 2.3.2-11})$$

一方、スターリング冷凍機の理論的 COP(COP_s)は式 2.3.2-12 で定義される。

$$COP_s = T_c / (T_h - T_c) \quad (\text{式 2.3.2-12})$$

ゆえに、

$$COP_b = COP_s \quad (\text{式 2.3.2-13})$$

よって式 2.3.2-13 のようにブレイトン冷凍機とスターリング冷凍機とで冷却システムの理論的な COP は同じとなる。

実際の冷却システムでは、冷凍機の構成要素やサブクール熱交換器の性能によりシステム全体の効率が左右される。

一般的にはスターリング冷凍機の COP がターボブレイトン冷凍機の COP より高いとされている。しかしながら高温超電導電力機器の冷却ではサブクール液体窒素を効率的に冷却することが重要となる。スターリング冷凍機では比較的小さなコールドヘッドの伝熱面で液体窒素を冷却するため、大容量の冷凍能力が要求される場合、十分な伝熱面積を確保することが困難となり、コールドヘッドの温度をサブクール液体窒素の出口温度 T_c よりもかなり低い温度まで冷却する必要がある。し

たがって、冷却システム全体の効率を低下させてしまう。当然、ターボブレイトン冷凍機においても、ここで示したようなサブクール液体窒素との温度差が小さい熱交換器を実現することが冷却システムの効率向上にとって非常に重要となる。

(3) サブクール熱交換器の開発

開発した高温超電導電力機器冷却システムは、ネオン冷凍機と高温超電導電力機器を冷却するサブクール液体窒素循環システムで構成される。図 2.3.2-29 に冷却システムの概略フローを示す。

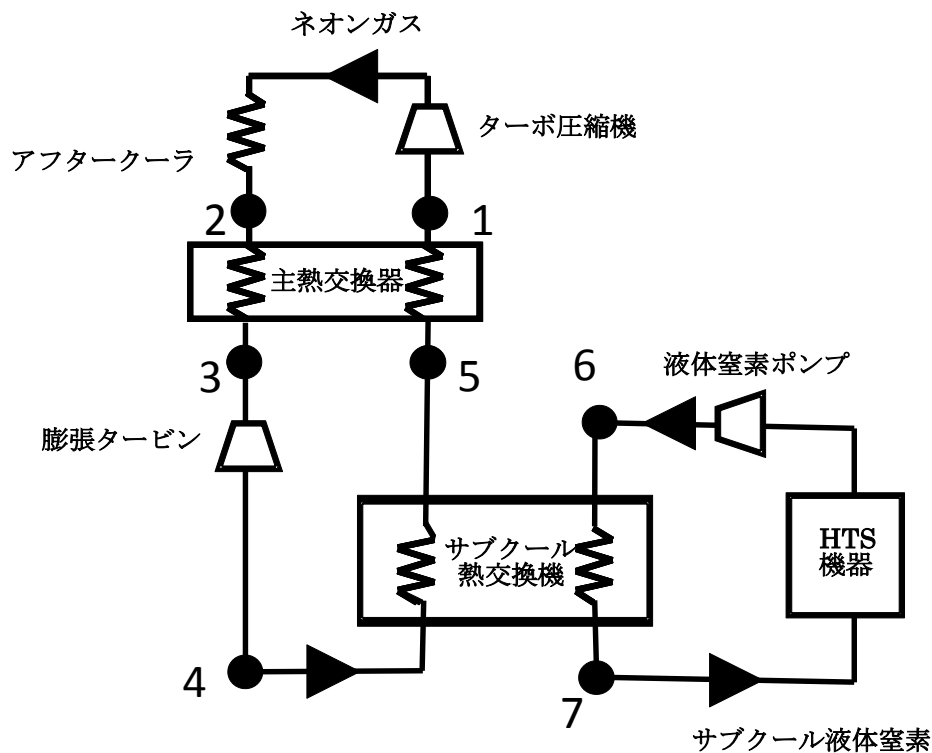


図 2.3.2-29 冷却システムの概略フロー

高温超電導電力機器との熱交換により昇温したサブクール液体窒素は、液体窒素ポンプでサブクール熱交換器に送られ、ネオン冷凍機の膨張タービンで発生した低温のネオンガスと熱交換することにより冷却される。しかし、この低温のネオンガスの温度は液体窒素の凝固温度 (63 K) よりも低いため、サブクール液体窒素を凝固させる可能性がある。

初めに冷却システムの設計仕様に基づき図 2.3.2-29 の 5、6、7 の温度を 69 K、70 K、67 K としてプロセスシミュレーション“gPROMS”で計算を行った。ここで、ネオン冷凍機等の諸条件は表 2.3.2-4 に示すとおりである。与えられた諸条件より計算した各部の圧力と温度を表 2.3.2-5 に示す。計算結果より膨張タービン出口温度 (サブクール熱交換器入口) が 61.2 K となり、窒素の凝固点である 63 K より

も低いいためサブクール液体窒素が熱交換器内で凝固し熱交換器が閉塞する可能性がある。そこで、サブクール熱交換器内で低温のネオンガスをリサイクルすることで熱交換器の閉塞を防止する新たな冷却プロセスを検討した。

表 2.3.2-4 計算条件

ネオンガス流量	0.3 kg/s
サブクール液体窒素流量	0.42 kg/s
膨張タービン断熱効率	70 %
主熱交換器効率	99 %
高压側ネオンガス圧力	1MPa (絶対圧)

表 2.3.2-5 冷却システムのシミュレーション結果

測定点	圧力 (kPa)	温度 (K)
1	500	297.7
2	1,000	300.0
3	980	72.7
4	540	61.2
5	520	69.0
6	101.3	70.0
7	101.3	67.0

新たな冷却プロセスでは図 2.3.2-30 に示すように、まずサブクール熱交換器の下部でネオンガス同士 (4,4b) を並流で熱交換させ、サブクール熱交換器の上部で凝固点以上となったネオンガス 1(4a,4c)とサブクール液体窒素(6)を熱交換させる。

図 2.3.2-30 のネオンガスのリサイクルフローを反映したプレートフィン熱交換器の形状及び流路構造を検討して製作したサブクール熱交換器の写真を図 2.3.2-31 に示す。⁸⁾

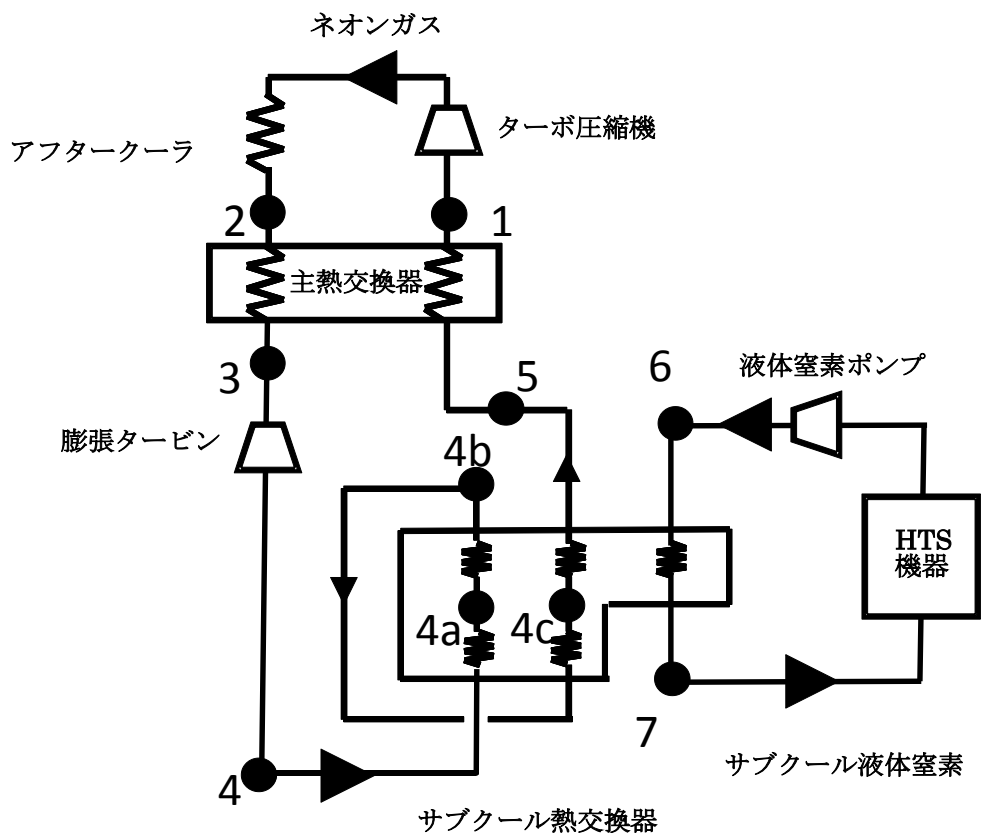


図 2.3.2-30 改良した冷却システムの概略フロー

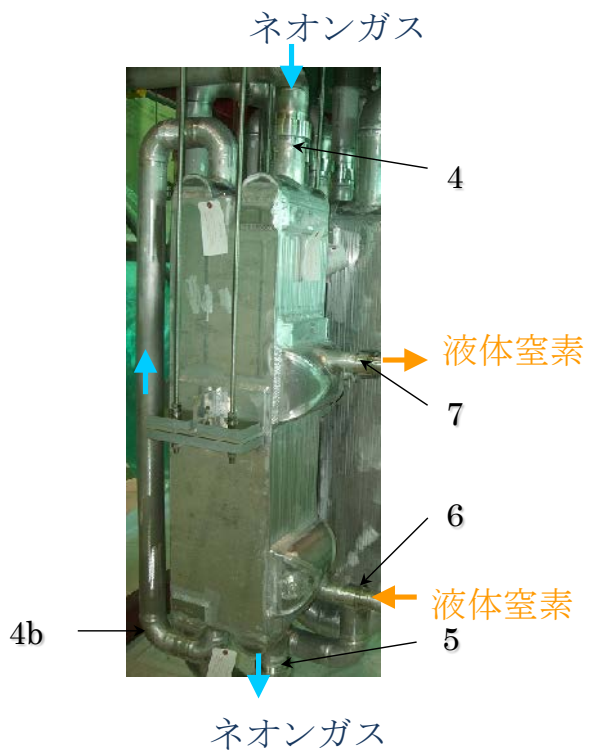


図 2.3.2-31 サブクール熱交換器 (写真)

まず、冷凍機の定格運転におけるサブクール熱交換器の設計検討を行い、液体窒素が凝固しないサブクール熱交換器の仕様を決定した。さらに、高温超電導電力機器の熱負荷が減少した場合等定格運転以外においても凝固の可能性がないか確認した。

プロセスシミュレーションソフト“gPROMS”を用いて、ネオン冷凍機の流量を変化させた際のサブクール熱交換器内部の温度分布を解析した結果を表 2.3.2-6 に示す。

解析条件としてネオンガスの流量は 0.3 kg/sec (定格条件)、0.275 kg/sec、0.25 kg/sec、0.225 kg/sec、0.2 kg/sec の 5 つの条件を実施した。また、初期条件として液体窒素流量 30 L/min、液体窒素出口温度 67 K、膨張タービン出口圧力 0.541 MPa とした。定格条件以外でのプロセス計算では、ターボ圧縮機及び膨張タービンの運転条件も定格と異なるため、各条件における効率や流量を過去の性能試験データからモデル化して解析に反映させた。

表 2.3.2-6 サブクール熱交換器のシミュレーション結果

ケース	ネオンガス 流量 (kg/sec)	冷凍能力 (kW)	温度 6 (K)	温度 7 (K)	温度 4 (K)	温度 4b (K)	温度 4a (K)	温度 4c (K)	温度 5 (K)
1	0.300	2.53	70.00	67.00	61.20	69.00	64.74	65.43	69.00
2	0.275	1.97	69.34	67.00	61.97	68.62	65.02	65.55	68.62
3	0.250	1.49	68.80	67.04	62.79	68.30	65.34	65.74	68.30
4	0.225	1.10	68.30	66.99	63.42	67.96	65.54	65.84	67.96
5	0.200	0.68	67.81	67.00	64.48	67.63	65.96	66.14	67.63

ケース 1 が冷凍機の定格運転の条件である。膨張タービン出口 4 で 61.2 K のネオンガスはサブクール熱交換器出口 4b で 69 K となっている。

4b のネオンガスは再びサブクール熱交換器へ入り、ネオンガス同士が並流で熱交換することによりサブクール熱交換器内部 4a、4c の温度が 64.74 K、65.43 K となり窒素の凝固点(63 K)より高い結果となった。液体窒素はこの凝固点よりも高い温度のネオンガスと熱交換するためサブクール液体窒素は凝固しない。

その他の条件においてもサブクール熱交換器内部の 4a、4c は液体窒素の凝固点を上回っていることが確認された。サブクール熱交換器の液体窒素入口 6 と液体窒素出口 7 の温度差はネオンガスの流量が減少するに従い小さくなる。これは液体窒素の流量を一定としているため熱負荷の減少とともに液体窒素入口温度 6 が降下するためである。逆に膨張タービン出口 4 は流量の低下とともに上昇する。これはターボ圧縮機の圧力比が減少するからである。

(4) ネオン冷凍機の性能評価試験

図 2.3.2-32 に試作したネオン冷凍機単体の性能評価試験の概略フローを示す。ターボ圧縮機には高周波モータが内蔵されており、インバータ制御によって任意の回転数に自由に変化させることができる。ターボ圧縮機回転数の変更により、ネオンガスの圧力比が変化し、膨張タービンの熱落差（入口と出口のエンタルピー差）が変化する。そこで、冷凍機の冷凍能力はターボ圧縮機の回転数を変えることで調整できるようにした。また、サブクール熱交換器にシートヒータを貼り付けてその電気入力で任意の熱負荷を充てるようにした。

冷凍機の性能評価試験では、ターボ圧縮機の回転数を一定に保持し、サブクール熱交換器出口のネオンガス温度が目標の冷凍機冷却温度（例えば 65 K）になるようにヒーター入力をフィードバック制御した。そして、主熱交換器及びサブクール熱交換器の温度分布が定常状態になった時のヒータ入力を冷凍機の冷凍能力として評価した。

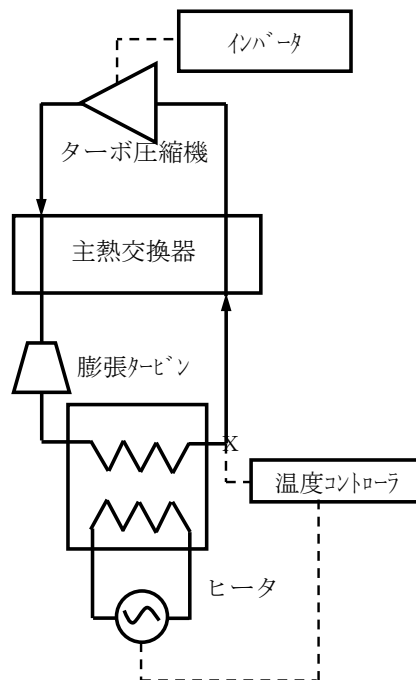


図 2.3.2-32 ネオン冷凍機単体の性能評価フロー

表 2.3.2-7 にネオン冷凍機単体の冷凍能力測定結果を示す。表に示した COP（インバータ入力）は、ターボ圧縮機のインバータ一次側に設置した電力計の電力値から膨張タービンのインバータ一次側に設置した電力計で測定した発電出力を差し引いた電力値と冷凍機のヒータ入力値（冷凍能力）から求めた COP であり、インバータやその附属機器の電力ロスも考慮したものである。

一方、COP(モータ入力) は前述した COP よりも大きな値となっているが、こ

これはターボ圧縮機のインバータとモータの間に設置した電力計にて測定したターボ圧縮機モータの入力電力と冷凍機のヒータ入力から計算した COP であり、インバータとインバータの出力波形を正弦波に変換するためのフィルタ回路のロスを除いたものである。

測定の結果、冷却温度 80 K での冷凍機の COP (インバータ入力) は 0.06、65 K での冷凍能力は 2.17 kW が得られ、最終目標である COP0.06@80 K、冷凍能力 2 kW@65 K を達成した。なお、冷却温度が高くなると冷凍機の冷凍能力は向上し、80 K で 2.83 kW となった。また、圧縮機の効率は 68 %であったが、タービン効率は 70 %を超える高い性能が得られた。⁹⁾

表 2.3.2-7 ネオン冷凍機単体の冷凍能力測定結果

冷却温度 (K)	80	65
COP (インバータ入力)	0.060	0.044
COP (モータ入力)	0.064	0.047
冷凍能力 (kW)	2.83	2.17
圧縮機効率 (%)	68.1	68.6
膨張タービン効率 (%)	72.9	70.3

(5) 熱負荷変動に対する制御特性

実際の高温度超電導電力機器では、その運転状況により熱負荷が変動する。冷却システムは高温超電導電力機器の熱負荷に対応して冷凍能力を調整し、サブクール液体窒素の温度を一定に保ち、高温超電導電力機器の超電導状態を維持する必要がある。

開発したネオン冷凍機では、前述したようにターボ圧縮機の回転数を変更することで冷凍機の冷凍能力を容易に調整することができる。ネオン冷凍機の性能評価試験でもターボ圧縮機の回転数と冷凍能力の関係はほぼ直線の関係となることが確認できた。

図 2.3.2-32 に示したネオン冷凍機単体の性能評価フローではサブクール熱交換器出口温度をヒータ入力のフィードバック制御に利用していたが、この出口温度をターボ圧縮機のインバータにフィードバックすることでターボ圧縮機の回転数制御に変更し、冷凍機の熱負荷が変動した際に自動的にターボ圧縮機の回転数が追従

して冷凍機の冷却温度が一定に保持されるように改造した。

図 2.3.2-33 にその容量制御フローを示す。熱負荷の変動パターンについては、実用高温超電導電力機器の熱負荷変動パターンが不確定なため、今回の制御特性の評価では、熱負荷のステップ変動におけるターボ圧縮機回転数、サブクール熱交換器出口のガス温度、膨張タービン出口温度の挙動を測定した。

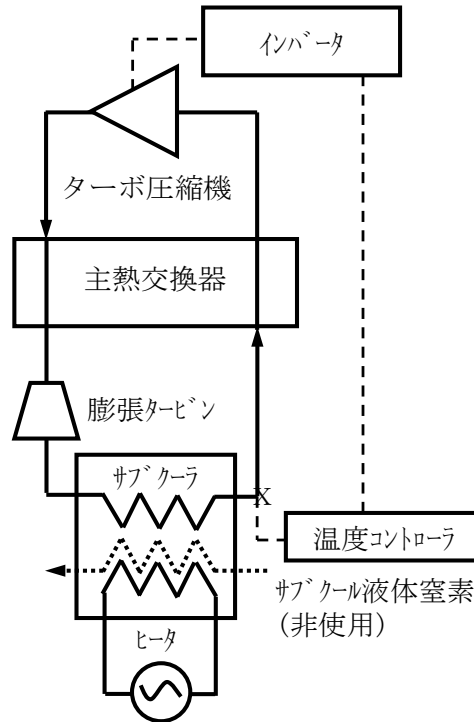


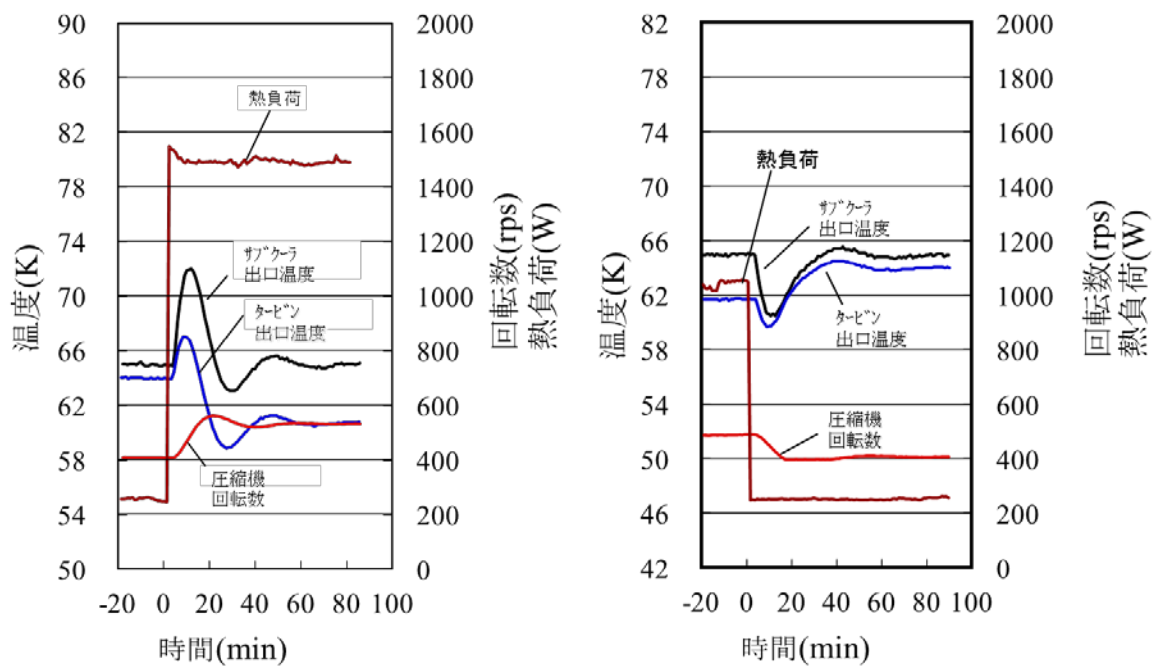
図 2.3.2-33 ネオン冷凍機容量制御フロー

熱負荷の変動パターンをステップ変動とした理由は、ターボ圧縮機回転数の応答特性の評価と回転数制御の PID 設定の調整を行うのに適しているためである。最終的には実際に冷却対象となる高温超電導電力機器の熱負荷変動のパターンに合わせて回転数制御の PID 設定を調整する必要がある。また、実際の高温超電導電力機器の冷却ではサブクール熱交換器出口の液体窒素温度を一定に保つ必要があるため、冷凍機の温度制御ポイントは、サブクール熱交換器出口の液体窒素温度とする方が望ましく、サブクール循環システムとの組み合わせ評価試験において実施することとした。

図 2.3.2-34(a)に冷凍機の熱負荷を 200 W から 1500 W に変化させた場合の制御特性を示す。熱負荷を 200 W で一定に保ち、冷却温度（温度計測地点はサブクール熱交換器の液体窒素出口。ただし、液体窒素未充填）を 65 K として、ターボ圧縮機の回転数が安定した状態から、熱負荷を 1500 W まで変化させている（時間 0 min）。熱負荷を増加させてから 5 min 後にサブクール熱交換器出口温度は 72 K まで上昇した。24 min には最も低い 63 K まで低下し、約 60 min でほぼ定常状態となった。これに対してターボ圧縮機の回転数は 20 min に 561 rps まで上昇した。

その後、35 min に 525 rps まで減少し、45 min に 530 rps で一定状態となった。図よりターボ圧縮機回転数が制御温度に追従して変化している様子が分かる。

また、同図(b)に冷凍機の熱負荷を 1000 W から 200 W へ変化させた場合の制御特性を示す。同図(a)と同様に冷却温度 65 K でターボ圧縮機回転数が安定した状態から操作を開始した。5 min にサブクール熱交換器の出口温度は 61 K まで低下し、40 min に 66 K と初期温度より 1 K 上昇したのち、60 min に 65 K で定常状態となった。ターボ圧縮機の回転数は 490 rps から単調に減少し、15 min で 400 rps で一定となった⁹⁻¹⁰⁾。



(a) 熱負荷ステップアップ
200 W→1500 W

(b) 熱負荷ステップダウン
1000 W→200 W

図 2.3.2-34 温度制御試験結果

(6) 超電導変圧器モデルとの組み合わせ冷却試験

図 2.3.2-35 に 2 MVA 級超電導変圧器モデルと冷却システムを組み合わせた冷却試験の配置図を示す。限られたスペースでのフィールドテストが可能ないように、ベーススキットの上に冷凍機をユニット化して配置した。中央のコールドボックスの中に主熱交換器が内蔵されており、コールドボックスの上部に膨張タービンが、ターボ圧縮機はコールドボックスの左側に設置されている。コールドボックスの右側に配置された循環ポンプによって液体窒素がコールドボックス内サブクール熱交換器に供給され、約 66 K まで冷却されたサブクール液体窒素を超電導変圧器に導入して変圧器巻線を冷却し、温度上昇した液体窒素は循環ポンプに戻る。試験結果については、III-2.3.5 節で述べる。

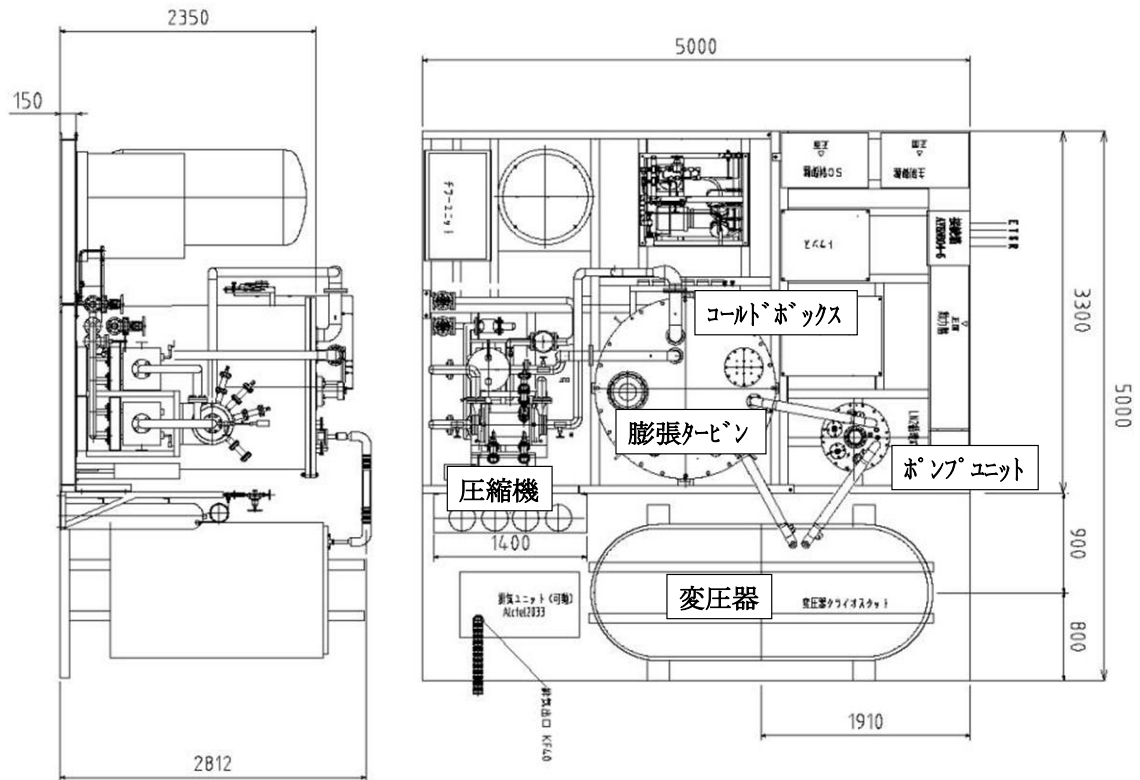


図 2.3.2-35 超電導変圧器モデルとの組み合わせ冷却試験配置図

超電導変圧器と組み合わせた冷却試験の前に、冷凍機とサブクール液体窒素循環装置を組み合わせたサブクール液体窒素の循環冷却試験を実施した。図 2.3.2-36 にネオン冷凍機とサブクール液体窒素循環装置と変圧器を模擬した模擬保冷容器（内容積：0.1742 m³）とを連結した。サブクール液体窒素の循環冷却試験のレイアウト写真を示す。この循環冷却試験で液体窒素をサブクール温度まで冷却し、安定した液体窒素の循環運転が確認できた。具体的には、冷凍機の冷却温度設定を 65 K とし、模擬保冷容器内に設置したヒータにより熱負荷を 200 W から 1500 W

までの範囲で段階的に変化させ、ターボ圧縮機回転数の追従性と冷却温度の変化を確認した。冷却温度の安定性は冷凍機出口のサブクール液体窒素温度で $\pm 1\text{ K}$ であった。また、図 2.3.2-37 に示すように平成 24 年 10 月 23 日から 12 月 20 日までの 59 日間連続運転を実施し、回転数自動制御による無人運転に問題がないことを確認した。連続運転の実施についてはシステムの安全性を考慮し表 2.3.2-8 に示すインターロックを設けた。

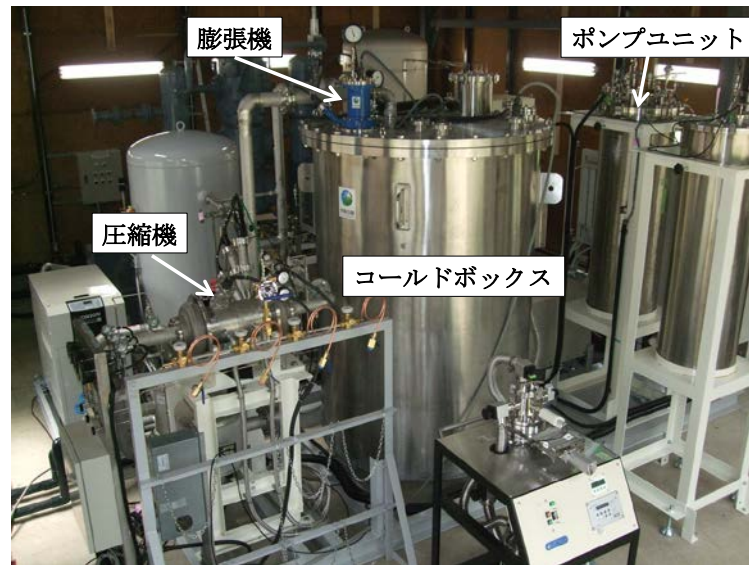


図 2.3.2-36 循環冷却試験配置図 (写真)

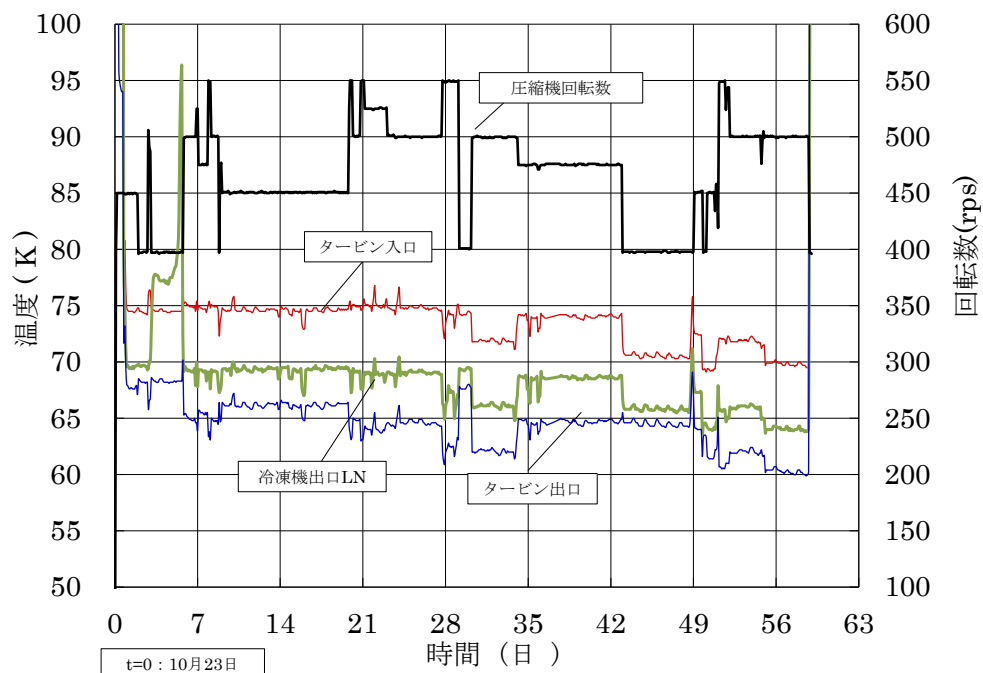


図 2.3.2-37 59 日連続運転

表 2.3.2-8 冷却システムのインターロック

項目	動作
冷凍機ネオンガス圧力異常	冷凍機及び 循環ポンプ停止
冷凍機ネオンガス温度異常	
モータ温度異常（膨張タービン・ターボ 圧縮機）	
電源電圧異常	
冷凍機出口液体窒素温度異常	循環ポンプ停止 （冷凍機は運転継続）
ポンプ容器液面異常	
ポンプ容器、変圧器 内圧異常	

(7) 冷凍機性能の将来像

冷却システムの設計に使用した冷凍プロセスシミュレータを利用し、冷却システム効率（COP）の将来見通しについて検討を行った。図 2.3.2-38 に予測結果を示す。予測ではシステム効率を左右する膨張タービンとターボ圧縮機の効率を 2 kW 級では 75 %、10 kW 級では 85 %まで向上できるものと考え、また運転温度は冷凍機として最も効率の高い運転となる 75 K を想定した。ただし、COP 予測値は配管や熱交換器の圧力損失の影響によって同じ冷凍能力でも幅が生じる。

図より、2 kW 級の COP は現状の 0.06（80 K）が 0.07～0.08 まで期待できる。さらに 10 kW 級の COP は 0.09～0.11 との結果を得た。

今回の予測結果を実現するため、今後も膨張タービン及びターボ圧縮機の効率向上策としてインペラやノズル形状、ターボ圧縮機ディフューザの最適化、永久磁石の同期モータの採用等の取り組みが必要となる。

COP予測値

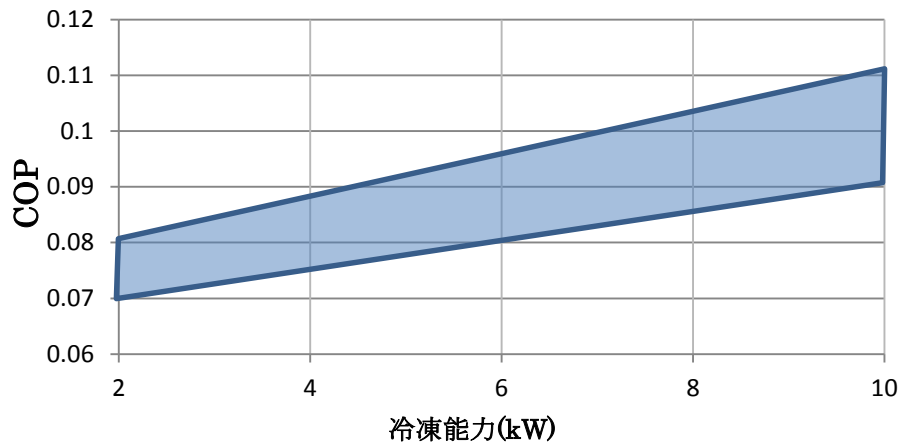


図 2.3.2-38 冷却システム効率の将来見通し

また、中間評価年度までの研究開発を基に実証試験用冷却システム（図 2.3.2-36）に組み込んだ冷凍機よりも大幅にコンパクト化し、設置面積を約半分の 3.6 m²とした 2 kW 級パッケージ型冷凍機（図 2.3.2-39）を製作した。なお、本プロジェクト終了後も冷凍機メーカーとして冷凍機のさらなる性能向上とコスト低減に努め、早期商品化を図る予定である。

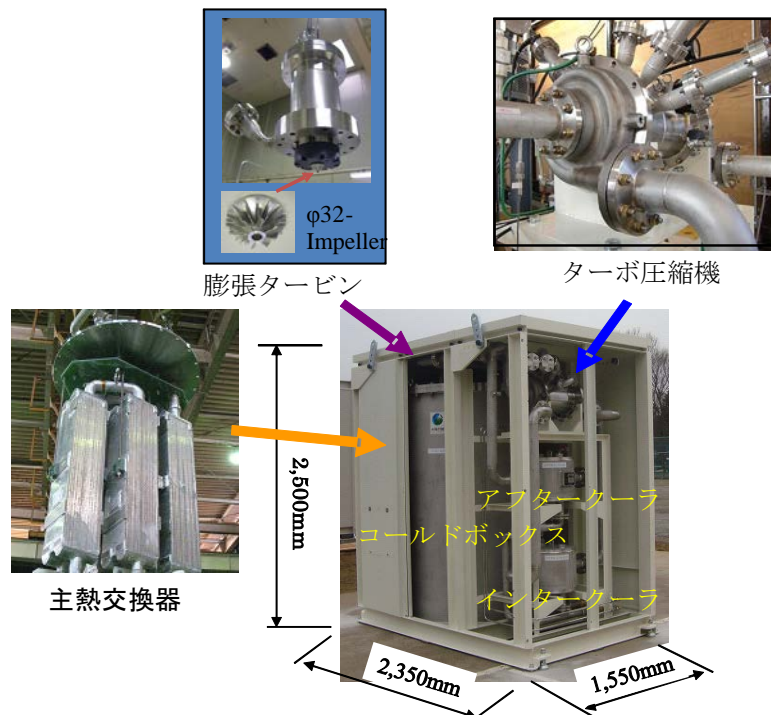


図 2.3.2-39 2 kW 級パッケージ型冷凍機

2.3.2-5 冷凍機と機器とのインターフェースの検討（九州大学、ISTEC）

冷凍機の冷媒であるネオンガスから変圧器巻線の冷媒であるサブクール液体窒素への冷熱のインターフェース（伝達方法）について、変圧器と冷却システムの組み合わせ構造の簡略化、熱交換の高効率化の観点から検討した。

高効率冷却システムとして、従来方式（変圧器とは別に冷凍機と液体窒素との熱交換器を置き、液体窒素を循環させる方式）とは異なり、新方式（変圧器の真空断熱の保冷容器内に冷凍機ヘッドを設置する方式）を考案した。この冷凍機ヘッドはタービン膨張式冷凍機の冷媒ガスをこの中に導き、液体窒素と熱交換をさせるラジエータ型熱交換器となる。

まず、この液体窒素との熱交換部について、一般の冷凍機（G-M 等）と本プロジェクトで開発した冷凍機を用いる場合の 2 通りについて、数値解析プログラムを作成し、開発した冷凍機で冷媒ガスを保冷容器内に移送する解析を行った。図 2.3.2-40 に、従来と本提案の冷却方式による超電導変圧器の断面図を、図 2.3.2-41 に両方式の温度分布を示す。新方式では温度上昇が少なく、熱交換が高効率なことを明確にした。

平成 23～24 年度は、さらに、ヘッドの形状を含め、この方式の冷却システムを実験的に検討してきた。開発したネオンガスを用いたブレイトンサイクルタービン膨張式冷凍機を九州大学設備のタービン膨張式ヘリウム冷凍機で代替し、模擬クライオスタット中で液体窒素と熱交換するシステムを設計、製作し、変圧器巻線を模擬したヒータ巻線と冷凍機ヘッドに相当するラジエータ型冷却パネルとの間のサブクール液体窒素を介した熱のやりとりの様相を観測してきた。図 2.3.2-42 に試験装置の外観、図 2.3.2-43 にラジエータ型冷却パネルと変圧器を模擬するためのヒータ巻線を示す。

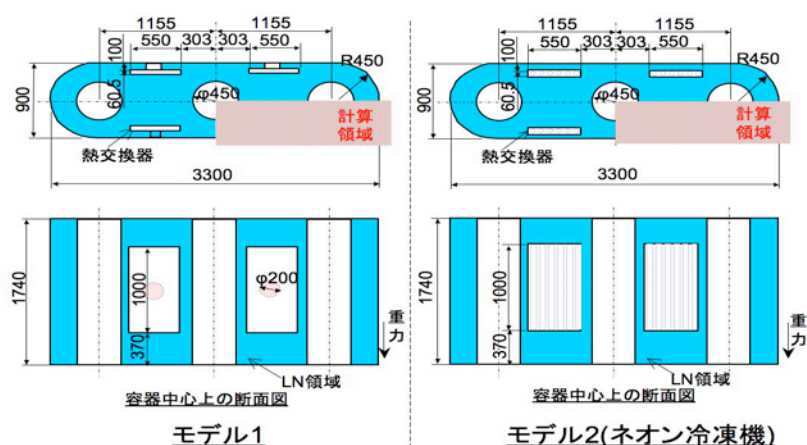


図 2.3.2-40 冷凍機ヘッドからの冷熱を用いる従来方式（左）と冷媒ガスをクライオスタット内に持ち込む新方式（右）の場合のクライオスタット内部構造

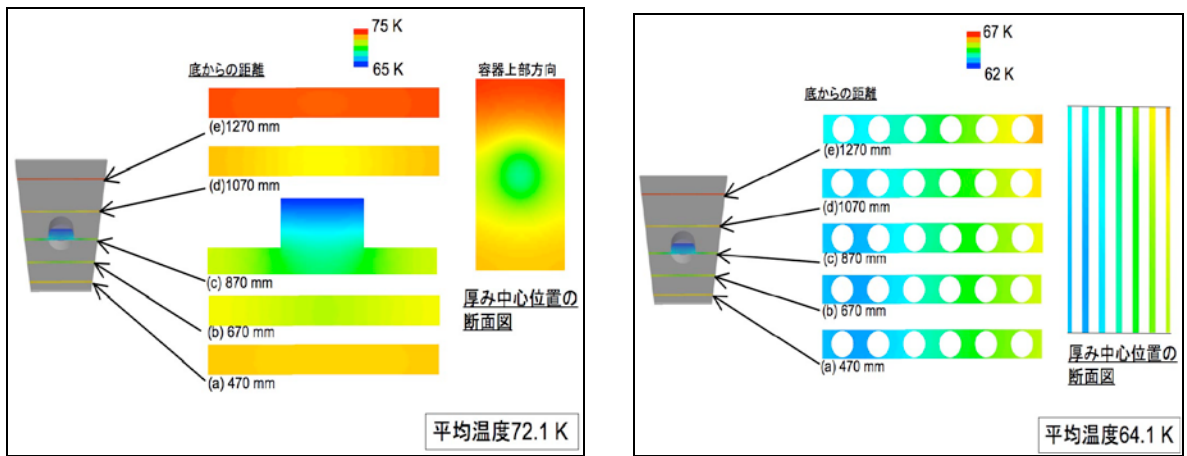


図 2.3.2-41 従来の冷却方式(左)と新提案の冷却方式 (右)を用いた場合のクライオスタット内温度分布の数解析結果



図 2.3.2-42 変圧器クライオスタット内で液体窒素と熱交換する冷却システムを模擬した装置の外観図

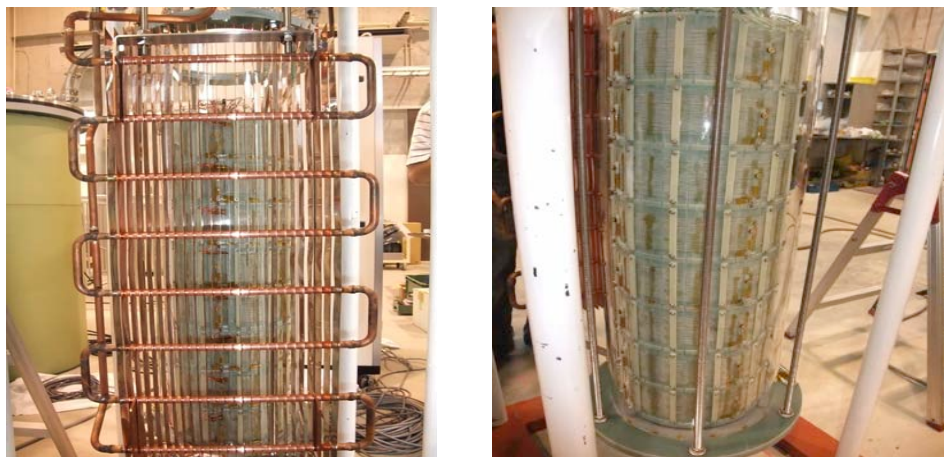


図 2.3.2-43 ラジエータ型冷却パネル (左) と巻線を模擬したヒータ巻線 (右)

図 2.3.2-44 には、64 K から 200 W の熱負荷をヒータにより与えた場合の初期温度上昇の様相を示す。しばらく放置すると温度上昇は止まり定常状態となった。その際、クライオスタット上層部では、図 2.3.2-45 に示すように液体窒素が対流しない停留層が形成され、それより下側では液体窒素が対流し、対流が起きている部分での上部と下部の温度差は数 K であった。図 2.3.2-46 は液面付近の温度分布を観測した結果である。表面は大気圧であり、液体窒素の大気圧における沸点 77.3 K に一致している。また、液面から 20 cm でほぼ液温度勾配がなくなっていることが分かる。

このように、サブクール液体窒素冷却による超電導変圧器実現のための貴重なデータが得られた。

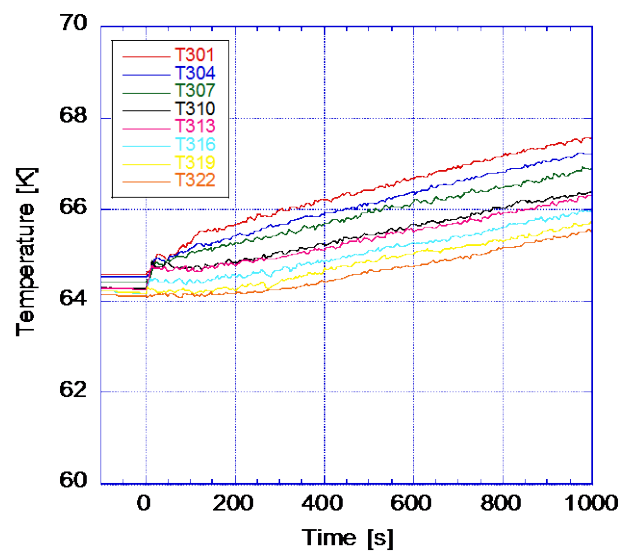


図 2.3.2-44 ヒータ加熱時の液温上昇の様相

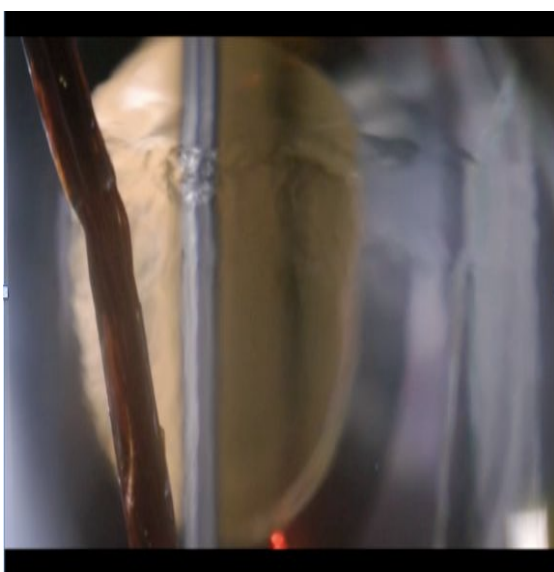


図 2.3.2-45 液面付近に形成された停留層

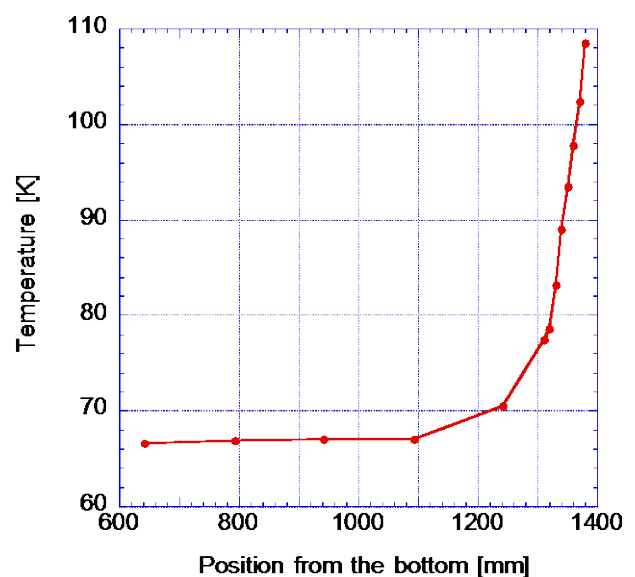


図 2.3.2-46 サブクール液体窒素液面付近の温度分布

2.3.2-6 まとめ

(1) 小型膨張タービンの高効率化

前 NEDO 事業の「超電導応用基盤技術開発（第Ⅱ期）」プロジェクトの無摺動小型膨張タービンの開発成果に基づき、効率向上、高度な信頼性及び長寿命化をめざして 5 軸制御の磁気軸受を適用した完全非接触の膨張タービンを開発し、3 種類の膨張タービンインペラを試作して試験にて、断熱効率 70 %以上(目標 65 %)を全て達成した。

(2) 小型ターボ式圧縮機開発

摺動部の無い小型ターボ圧縮機の開発のため、インペラ等の部品の構造・応力の解析を行い、5 軸制御磁気軸受を採用した小型ターボ式圧縮機を試作した。モータ温度上昇のため定格流量 (1,200 Nm³/h) の 75 % (900 Nm³/h) までの計測であるが、断熱効率 68 % (目標 65 %)を達成した。その後、中間羽根インペラの採用やシュラウドクリアランスの最適化により流量 1,200 Nm³/h 及び圧力比 2.0 の定格仕様値で、断熱効率は最終的に目標を上回る 70 %を達成し、冷凍機の COP 向上に貢献した。また、開発した小型ターボ圧縮機を用いて低温回転試験を行い、低温圧縮による COP のさらなる向上と低温でのターボ回転機の運転が問題ないことを確認した。

(3) 熱交換器の小型化

熱交換器の小型化を図るため、熱物性を考慮した冷凍サイクルのプロセスシミュレータを用いて熱交換器のブロック 3 個 (熱交換器寸法を 3/5 に縮小) で冷凍機の性能確保が可能である結果を得た (「超電導応用基盤技術開発 (第Ⅱ期)」プロジェクトでは 5 個で試験)。さらに「超電導応用基盤技術開発 (第Ⅱ期)」プロジェクトで試作した冷凍機を活用し、熱交換器ブロック数を 5 個から 3 個へ改造し、本プロジェクトで新規に製作した膨張タービンと組み合わせた熱交換器の性能評価試験により、前述した性能予測プログラムの妥当性を検証した。これらの取り組みにより、2 MVA 超電導変圧器用冷却システムの設計と性能予測が可能となった。

(4) 冷凍機開発と冷却システム開発

プロトタイプ冷凍機 (「超電導応用基盤技術開発 (第Ⅱ期)」プロジェクトで製作) に、今回開発の膨張タービンを組み込んだ試験にて、冷凍能力 2.4 kW(約 65 K)を確認した。また、開発中の小型ターボ式圧縮機を含むシミュレーションでは、小型ターボ式圧縮機の断熱効率は約 70 %で、COP は 0.06 以上(80 K)となった。本プロジェクトで製作した膨張タービンと小型ターボ式圧縮機を組み合わせたプロセスシミュレーションにより、ネオン冷凍機の COP が最大となるプロセス圧力比と運転圧力を見出すとともに、6 つの異なるサイクルの比較検討を行い、最適なプロセスを決定した。この小型ターボ式圧縮機のネオン冷凍機の単独性能試験では最終目標 (冷凍能力 2 kW@65 K、COP0.06@80 K 以上) に対して、冷凍能力 2.17

kW@65 K、COP0.06@80 K を達成した。また、サブクール液体窒素の循環冷却試験では冷却システムの負荷変動に対する良好な追従性を確認するとともに、59 日間の自動制御連続試験によって冷却システムの健全性と耐久性を検証した。

冷凍機 COP の将来見通しとして 2 kW 級で 0.07~0.08、10 kW 級で 0.09~0.11 との予測結果を得た。この予測数値達成のためには、膨張タービンやターボ圧縮機等の効率向上へのさらなる努力が必要である。

(5) 冷凍機と機器とのインターフェースの検討

冷凍機の冷媒（ネオンガス）から変圧器巻線の冷媒（サブクール液体窒素）への冷熱の伝達方法について、保冷容器内にコールドヘッドを設置した新方式のサブクール液体窒素冷却方式を考案し、熱伝達シミュレーションにて、従来方式（蓄冷式冷凍機によるサブクール液体窒素冷却）よりも高い熱交換効率を示した。

引用論文リスト

- (1) 平井、鈴木、他、“高温超電導機器用冷却システムの開発”、大陽日酸技報 No.27、2008 年、36-37
- (2) H.Hirai, et al., “Development of a turbine cryocooler for high temperature superconductor applications”, Physica C 469 Proceedings of 21th International Symposium on Superconductivity (2009) 1857-1861
- (3) 平井、弘川、他、“磁気軸受ネオン膨張タービンの開発”、大陽日酸技報 No.28、2009 年、1-5
- (4) H.Hirai, et al., “Development of a neon cryogenic turbo-expander with magnetic bearings,” Advances in Cryogenic Engineering 55, (2010) 895-902
- (5) 汎用機事業部第一設計部、“自動車用小形ターボチャージャの技術動向”、石川島播磨技報第 24 巻第 5 号、1984 年 9 月、354-359
- (6) 玉木、山口、相沢、“羽根付きディフューザの取付角が遠心圧縮機性能に及ぼす影響”、ターボ機械第 29 巻第 12 号、2001 年 12 月、8-14
- (7) S.Yoshida, et al., “New Design of Neon Refrigerator for HTS Power Machines”, Advances in Cryogenic Engineering 55, (2010) 1131-1138
- (8) S.Yoshida, et al., “Consideration of sub-cooled LN₂ circulation system HTS power equipment”, Advances in Cryogenic Engineering 57 (2012) 1649-1656
- (9) Hirai H., Yoshida S., Ozaki S., Hirokawa M., Iwamoto K., Nara N., Hayashi H., Okamoto H., Shiohara Y, “Development of neon refrigerator with LN sub-cooler for HTS power equipments”, Proceedings of the 24th International Cryogenic Engineering Conference (2012) 83-86
- (10) 尾崎信介、平井寛一、弘川昌樹、吉田茂、“ネオン冷凍機の熱負荷変動に対する制御特性（第 1 報）”、大陽日酸技報 No.31 (2012 年)

2.3.3 限流機能付加技術開発

超電導変圧器は限流機能を備えることにより自身の健全性を維持するとともに、電力系統の事故時の過大な事故電流を半波以内で抑制して事故の波及抑制も可能となる。電力系統の短絡容量対策にも貢献する。さらに、将来的に超電導電力ケーブルと超電導変圧器を連系して適用する場合にも限流機能は相互の導入促進に貢献すると考えられる。そのため、限流機能付加変圧器の技術を開発した。限流機能付加変圧器の基礎技術として、4巻線構造の小型超電導変圧器モデルによる特性検証、限流応答特性解明と限流効果による巻線保護の検討、熱伝導率等の熱的特性の評価、及び数百 kVA 級限流機能付加単相変圧器の設計・試作・限流特性試験を行った。

2.3.3-1 4巻線モデルによる特性検証（九州電力）

(1) 研究開発概要

平成 20 年度に限流機能付加変圧器の基礎技術の検証用として、一次側、二次側ともに主巻線と並列に接続された補助巻線を持つ 4 巻線構造の小型超電導変圧器モデルを試作した。ここで、本モデルは、通常の変圧器運転時には電流の大部分を主巻線に流し、事故時には主巻線が事故電流にてクエンチして、発生した主巻線の抵抗により補助巻線に分流させる構成とした。そのため主巻線は常電導抵抗が大きく、補助巻線は短絡電流相当の容量を持ち十分安定な Y 系超電導線材を適用した。次に、平成 21 年度に本巻線モデルを用いて突発短絡事故を模擬した試験を行い、主巻線における常電導領域の発生過程を観測するとともに、Y 系超電導線材の液体窒素温度における過大電流に対する基礎的な応答特性を定量的に検証・評価した。

(2) 超電導変圧器の設計と製作

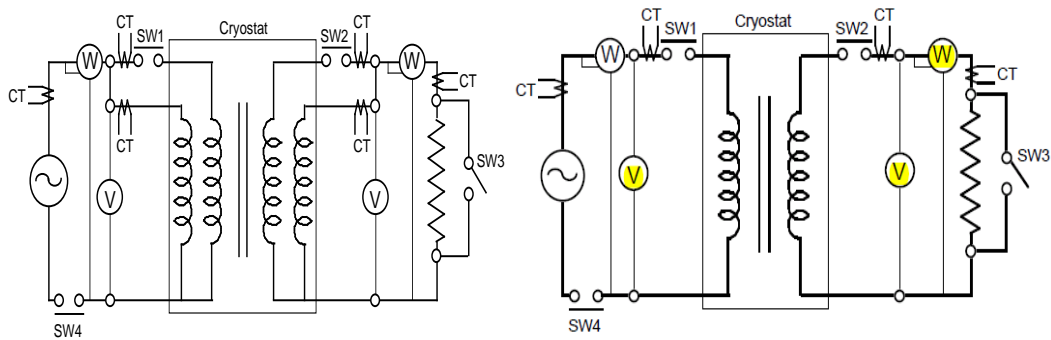
臨界電流を超える短絡過大電流によって発生する超電導巻線の常電導抵抗を一次、二次巻線それぞれ個別に観測するために、超電導変圧器は 4 巻線構造とした。4 巻線構造では、一次、二次巻線ともに主巻線と並列に補助巻線が配置される。変圧器の巻線構成と試験回路を図 2.3.3-1 に、概略設計図を図 2.3.3-2 に示す。いずれの巻線も円筒巻線で、6 層構造である。巻数比は 1 : 1 で、定格電圧は 400 V、容量は 10 kVA である。一次主巻線は 2 分割し、二次主巻線を内外から挟み込むサンドイッチ構造とした。主巻線の外側に一次補助巻線を配置し、主巻線の内側に二次補助巻線を配置した。設計は下記の挙動をめざしたものである。一次、二次巻線間の漏れリアクタンスは表 2.3.3-1 に示すように一次、二次主巻線間が最も小さく、通常運転時は主巻線同士に負荷電流の大部が流れる。表 2.3.3-2 は各巻線に使用した Y 系線材の臨界電流 I_c 値を示している。主巻線の I_c 値は補助巻線の I_c 値より小さく、突発短絡事故時には、いずれの巻線の電流も通常時と同じ比率で増えるが、まず主巻線が常電導に転移し、発生した常電導領域の抵抗により、短絡電流は補助

巻線に転流する。補助巻線間の漏れリアクタンスは主巻線間よりはるかに大きいため、補助巻線に流れる短絡電流は、この漏れリアクタンスによっても限流される。この短絡状態での変圧器の等価回路は図 2.3.3-3 のように単純化され、次式が成り立つ。すなわち、一次、二次側ともに主巻線、補助巻線の電流を観測すれば、一次、二次主巻線それぞれに発生した常電導抵抗を個別に求めることが可能となる。

$$R_1 I_1 = j\omega L_{\sigma 1'} I_1' \quad (\text{式 2.3.3-1})$$

$$R_2 I_2 = j\omega L_{\sigma 2'} I_2' \quad (\text{式 2.3.3-2})$$

ここで、 R は主巻線の常電導抵抗、 L は巻線間の漏れリアクタンス、添字の 1、2 は一次、二次主巻線を、 $1'$ 、 $2'$ は一次、二次補助巻線を表している。超電導変圧器諸元は、層数 6、ターン数 300 (=50 ターン×6 層)、電圧 393.6 V、電流 20 A、負荷 20 Ω 、1 ターン電圧は 1.3 V ($e = \sqrt{2}\pi B_s S_c f x$) である。



(a) 4巻線での試験時 (b) 2巻線での試験時(主巻線のみ)

図 2.3.3-1 4巻線構造超電導変圧器の巻線構成と試験回路

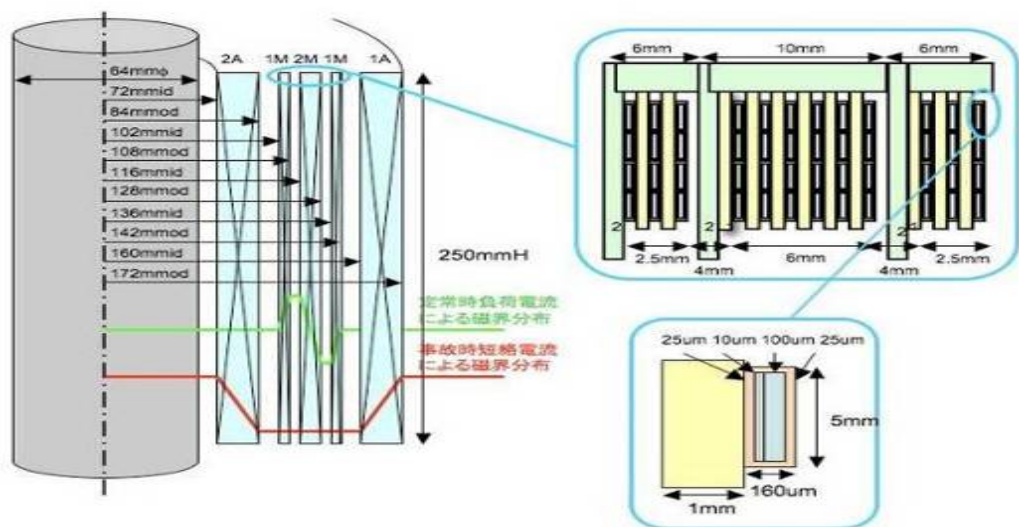


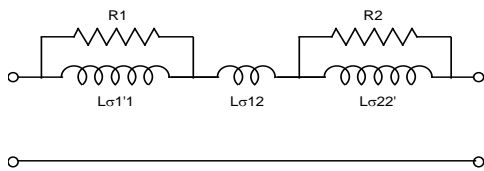
図 2.3.3-2 4巻線構造超電導変圧器の主要寸法

表 2.3.3-1 巻線間漏れリアクタンス

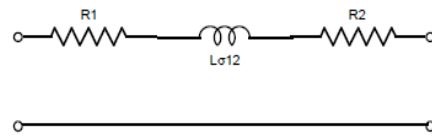
	設計値 (Ω)	実測値 (Ω)
主巻線間 (1M&2M)	0.299	0.266
補助巻線間 (1A&2A)	4.08	4.02
一次主&二次補助 (1M&2A)	0.94	0.78
一次補助&二次主 (1A&2M)	2.81	2.80

表 2.3.3-2 4巻線モデルに使用した Y 系線材の臨界電流 I_c 値

巻線	I_c 値	N 値	I_c 基準電圧	線材及び I_c 値の範囲
2A	78.7 A	20	0.29 mV	MOD 線材、SWM-0031 : 95~160 A
1M 内	25.2 A	23	0.19 mV	PLD 線材、F09-401c : 25~38 A
2M	43.2 A	30	0.46 mV	PLD 線材、F09-401a : 68~86 A
1M 外	23.3 A	29	0.27 mV	PLD 線材、F09-401b : 23~32 A
1A	43.0 A	4	0.73 mV	MOD 線材、SWM-0004 : 30~127 A



(a) 4巻線での試験時



(b) 2巻線での試験時(主巻線のみ)

図 2.3.3-3 4巻線構造超電導変圧器の短絡事故後の簡易等価回路



図 2.3.3-4 4巻線構造変圧器 (巻線、鉄心) の外観



図 2.3.3-5 4巻線構造変圧器 (保冷容器内部) と試験装置

同心円状に組み上げた 4巻線構造超電導変圧器 (巻線、鉄心) の外観を図 2.3.3-4 に示す。なお、巻線で囲まれた部分の鉄心断面は飽和磁束向上のために円形であり、脚とヨークの接合部は両方向からの珪素鋼板を交互に入れ込む構造となっている。図 2.3.3-5 には 4巻線構造超電導変圧器 (保冷容器内部) と試験装置の外観を示す。

77 Kにおいて観測した各巻線の I - V 特性から、一次主巻線の I_c 値は20 数 A/5mm-w @77K、s.f.で、二次主巻線の I_c 値は40 数 A/5mm-w@77K、s.f.で I_c 値がばらついた。また、補助巻線の I_c 値は二次側が78 A/5mm-w@77K、s.f.と主巻線の2倍以上であるが、一次側は40 数 A/5mm-w@77K、s.f.と当初計画より低かった。しかし、銀層が $30\ \mu\text{m}$ と厚いことにより高電界領域まで通電は可能であった。

(3) 通常運転時の変圧器特性試験結果

最初に二次側を開放して一次側から電圧を印加し、主巻線と補助巻線は並列に接続した無負荷損（鉄損）を測定した。鉄損の一次電圧依存性を図 2.3.3-6 に示す。定格電流 400 V に対する励磁電流は数 A、鉄損は 20 W 程度で、設計通りであった。

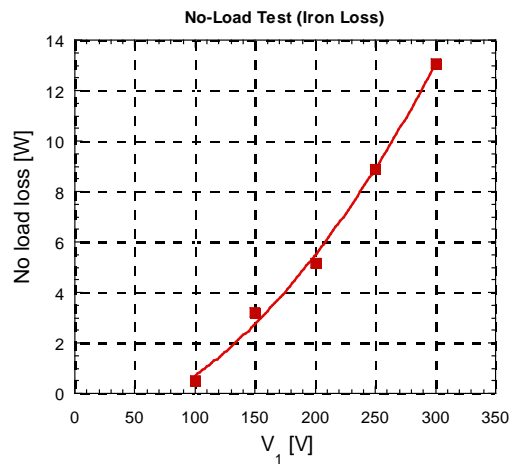


図 2.3.3-6 無負荷損（鉄損）の一次電圧依存性

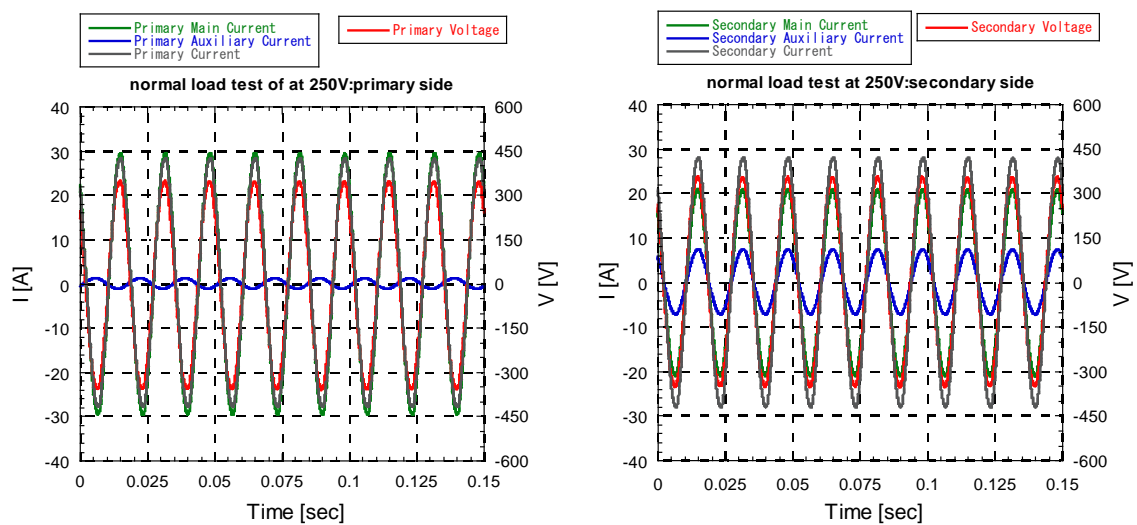


図 2.3.3-7 通常運転時の一次(左)、二次(右)の主・補助巻線電流及び全電流波形

次に、一次側、二次側ともに主巻線と補助巻線を並列に接続して、二次側に 11 W

の抵抗負荷を接続し、一次電圧を徐々に上げて、主巻線と補助巻線の電流分流比を観測した。この際の一次側、二次側の主巻線・補助巻線電流及び全電流の波形を図 2.3.3-7 に、また主巻線、補助巻線の電流分流比を図 2.3.3-8a に示す。

図 2.3.3-8a は、設計における電流分流比も示している。設計における電流分流比は、各巻線を無限ソレノイドコイルとして近似して計算したものであることを考慮すると、電流分流比はほぼ設計通りと言える。

次に、二次側を短絡して、負荷損、いわゆる銅損を測定した。無論、ここでは超電導巻線の交流損失である。測定の都合上、一次側、二次側それぞれにおいて、巻線は主巻線か補助巻線のどちらか一方のみを接続した。例として主巻線同士に通電した負荷損の測定結果を図 2.3.3-8b に示す。

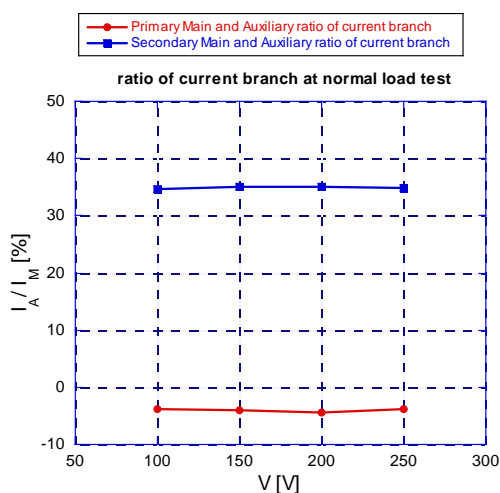


図 2.3.3-8a 通常運転時の一次側、二次側における主巻線、補助巻線の電流分流比の一次電圧依存性

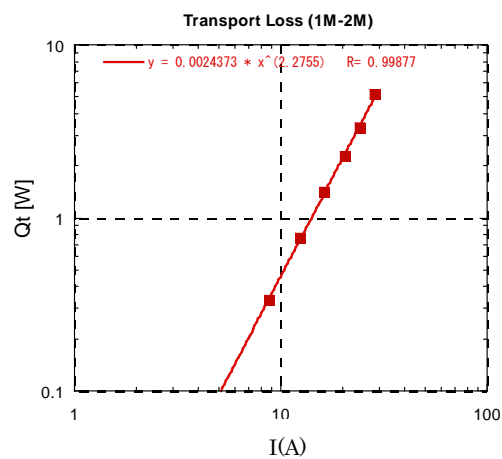


図 2.3.3-8b 主巻線同士に通電した負荷損（巻線の交流損失）

(4) 突発短絡試験結果

通常負荷運転時に二次側負荷を短絡することにより、突発短絡事故を模擬し、その際の各巻線（主巻線と計測用補助巻線の4巻線で実施）の電流波形を観測した。図 2.3.3-9 に一次側巻線、二次側巻線の電流波形を示す。

通常負荷運転時には主巻線に電流の大部分が流れ、負荷短絡と同時に主巻線が短絡過大電流により常電導転移して主巻線に抵抗が発生し、短絡電流の多くが補助巻線に転流していることが分かる。図 2.3.3-10 は、主巻線が常電導転移しない場合の電流波形の計算結果である。主巻線が常電導転移しない場合の短絡電流は 1,200 A にもなるのに対し、図 2.3.3-9 に示す実際の全短絡電流は 100 A 程度に限流されている。特に、図 2.3.3-9 の一次主巻線の電流は 40 A 程度であり、大幅に限流されていることが分かる。これは Y 系超電導変圧器における限流機能の世界初の確

認である。

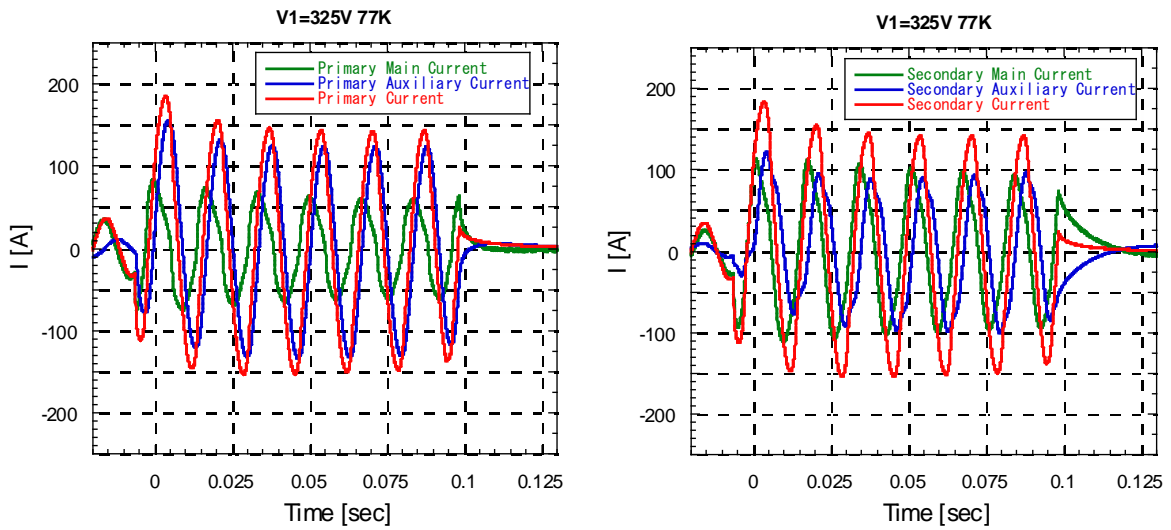


図 2.3.3-9 突発短絡時の一次巻線電流(左)、二次巻線(右)電流等の波形
(主巻線と計測用補助巻線の4巻線で実施)

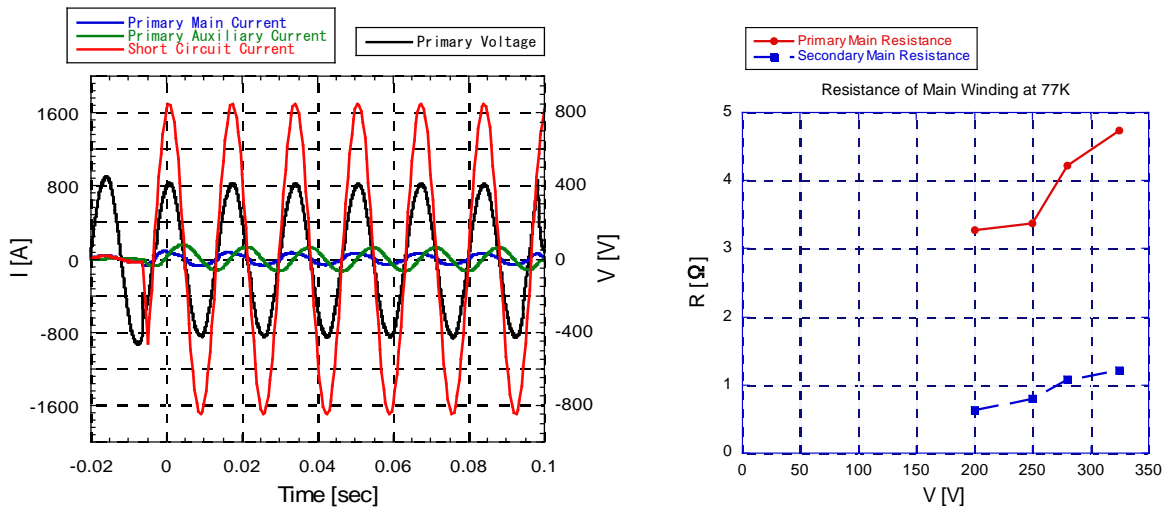


図 2.3.3-10 主巻線が常電導転移しないと仮定して計算した突発短絡時の一次側電流波形

図 2.3.3-11 観測した主巻線、補助巻線の電流値から図2.3.3-3に示す等価回路を用いて算出した一次、二次主巻線の短絡過大電流による常電導転移領域の抵抗値の一次電圧依存性

図 2.3.3-11 は、観測した主巻線、補助巻線の電流値から図 2.3.3-3 に示す等価回路を用いて算出した一次、二次主巻線の常電導領域の抵抗値である。一次、二次ともにほぼ一次電圧に比例して巻線抵抗が増加し、また I_c 値が小さい一次主巻線は

巻線抵抗が大きいことが分かる。

また、主巻線のみでの 2 巻線を実施した突発短絡時の巻線電流、短絡電流等の波形を図 2.3.3-12 に示す。同図の一次巻線の短絡電流 1,200 A は 40 A 程度に大幅に限流されていることが分かる。また、図 2.3.3-9 に示す 4 巻線（主巻線+補助巻線）で実施した場合とほぼ同等の成果となった。この結果により、実用機と同じ 2 巻線の超電導変圧器においても限流機能が実証できた。

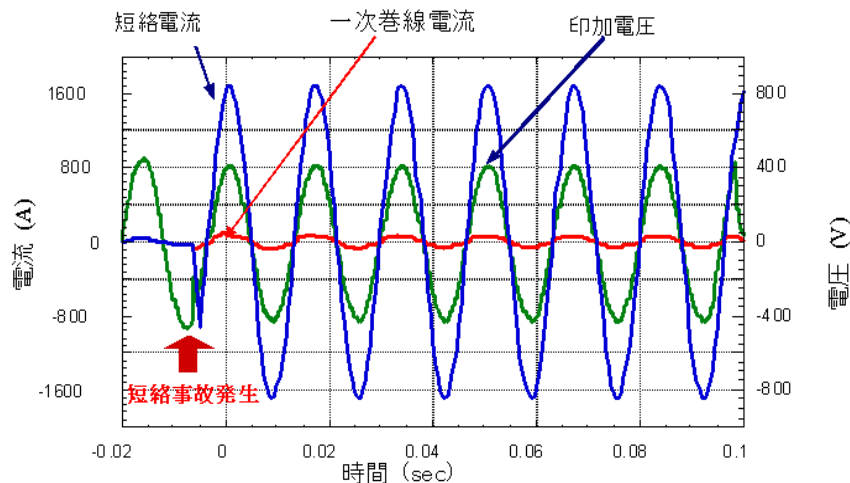


図 2.3.3-12 突発短絡時の巻線電流等の波形(主巻線のみでの 2 巻線を実施)

(5) 結果

Y 系超電導線材を用いて 4 巻線構造超電導変圧器を設計、製作し、変圧器として設計通りの通常負荷運転を確認した後、4 巻線と 2 巻線の 2 ケースの突発短絡試験を実施した。短絡電流波形等を観測し、両ケースとも短絡電流の数十分の一へ限流された良好な成果が得られ、世界で初めて Y 系超電導変圧器としての限流動作が確認できた。また、巻線における常電導領域の抵抗値の一次電圧依存性も測定した。巻線の常電導抵抗は一次、二次ともに一次電圧にほぼ比例して増加した。

2.3.3-2 限流応答特性解明と限流効果による巻線保護の検討及び熱伝導率等の熱的特性の評価（九州大学、岩手大学、ISTEC）

(1) 限流応答特性解明と限流効果による巻線保護の検討

a 研究開発概要

2.3.3-1 節に述べた 4 巻線構造変圧器モデルを用いて突発短絡事故を模擬した巻線モデルの特性試験等の各種の実験を行い、その結果等に基づき変圧器巻線の短絡電流に対する電氣的、熱的応答特性を記述しうる基礎方程式の導出について検討し、Y 系超電導線材の液体窒素温度における過電流に対する電氣的、熱的応答特性を理論及び実験の両面から明確にした。また、巻線保護に適した方法についても検討した。

b 実験及び解析

2.3.3-1 節に述べた 4 巻線構造変圧器の突発短絡実験に加えて、一次、二次主巻線のみでの突発短絡実験等も行い、短絡過大電流印加時の主巻線の応答特性についてさらに詳細に調べた。図 2.3.3-13a は、一次、二次主巻線における短絡過大電流による常電導転移領域の長さの一次電圧依存性である。高温超電導線材は熱伝導率、熱拡散率が小さいことを考慮し、常電導転移後の巻線温度が 77 K であると仮定して算出している。この常電導転移領域が巻線全長に対してどの程度の割合を占めるのかを、同じく巻線温度が 77 K であると仮定して算出したものを図 2.3.3-13b に示している。

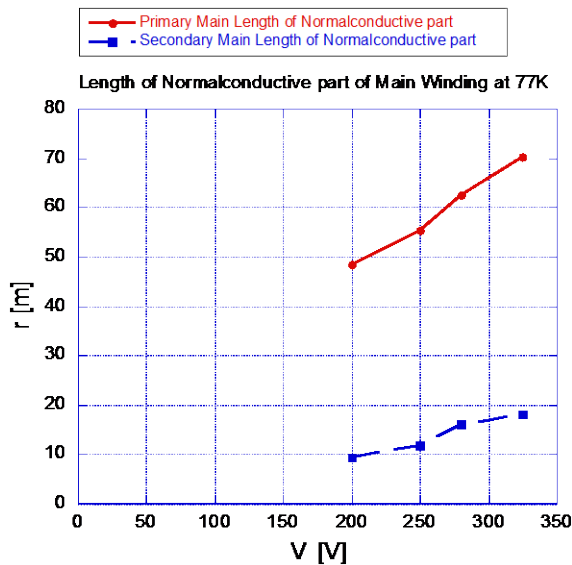


図 2.3.3-13a 常電導転移後の巻線温度が 77 K であると仮定して算出した主巻線における短絡過大電流により常電導転移した領域の長さの一次電圧依存性

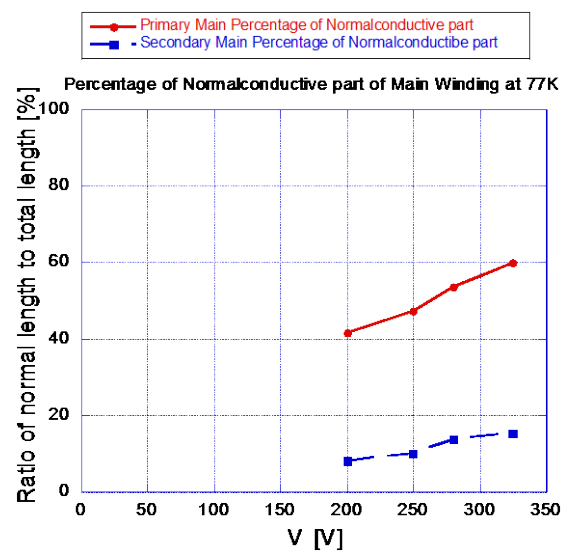


図 2.3.3-13b 主巻線において短絡過大電流により常電導転移した領域の巻線全長に対する割合の一次電圧依存性

巻線は I_c 値以上の過大電流印加にも拘わらず、巻線全長が常電導転移せず、全長に対する割合は十分の一（二次側）から数分の一（一次側）であることが分かる。この突発短絡事故を模擬しうる数値解析プログラムを構築した。図 2.3.3-14 に、一次電圧 250 V の場合の突発短絡時の主巻線電流波形の数値計算結果を実験値と比較して示す。数値解析は実験結果とよく一致した。この場合の一次巻線各部の温度上昇の数値計算結果を図 2.3.3-15 に示す。巻線全長に亘って、 I_c 値以上の電流が印加されているにも拘わらず常電導転移しているのは巻線の一部であることが分かる。

この限流に必要な超電導-常電導転移の条件について、印加する電圧について実験的に研究した。 I_c 値の他に、電界（超電導線材の長さあたりに印加される電圧）

の条件があることが分かり、約 5 V/m 以上の電界にすれば超電導から常電導に転移することが分かった。20 MVA 級超電導変圧器では約 25 V/m の電界であることからこの条件を満たすので、巻線の全長に亘って常電導に転移し、限流効果を発揮できると考えられる。

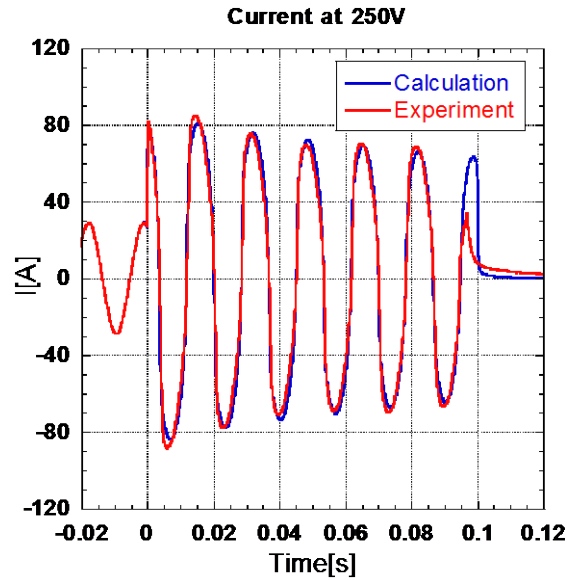


図 2.3.3-14 一次電圧 250 V の場合の突発短絡時の主巻線電流波形の数値計算結果と実験値との比較

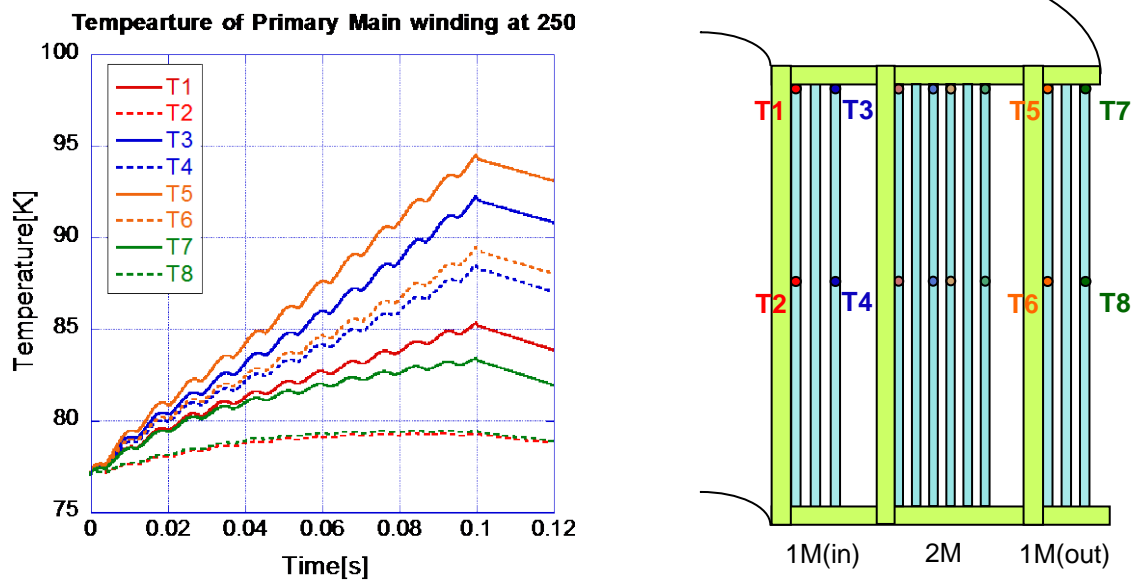


図 2.3.3-15 一次電圧 250 V の場合の突発短絡時の一次主巻線各部の温度の数値計算結果と一次主巻線の温度測定位置

c 成果

4 巻線構造変圧器の突発短絡実験に加えて、一次、二次主巻線のみ突発短絡実験等も行い、短絡過大電流印加時の主巻線の応答特性について、さらに詳細に調べた。この突発短絡事故を模擬できる数値解析プログラムを構築した。巻線全長に亘って、 I_c 値以上の電流が印加されても電界強度の条件によっては常電導転移しない場合もあるが、電界強度を加味することで巻線の限流特性を解析することが可能になった。

(2) 6.9 kV/2.3 kV-400 kVA 変圧器特性検討

10 kVA 4 巻線構造変圧器の試作、試験の結果を受け、平成 22 年度から線材に付加する安定化銅の厚さを 50 μm 、300 μm と変えた 2 種類の 6.9/2.3 kV-400 kVA 変圧器を設計、試作し、平成 23 年度には短絡発電機を用いて突発短絡試験を実施した。また、Y 系超電導線材の磁界印加角度依存性まで含めた臨界電流特性 $I_c(B, T, \theta)$ を考慮した数値解析プログラムを構築し、400 kVA 変圧器モデルの突発短絡試験を数値解析により模擬して、実験との比較を行った。その結果、いずれの変圧器でも、数値解析による短絡電流は振幅、位相ともに実験結果をほぼ忠実に再現し、数値解析プログラムの妥当性を検証した。

さらに、変圧器巻線の突発短絡過大電流に対する保護方法を明らかにすることをめざし、6.9 kV/2.3 kV-400 kVA 変圧器、66 kV/6.9 kV-2 MVA 変圧器について、数値解析により突発短絡事故を模擬し、短絡電流、巻線温度上昇等の導体構成、主に線材に付加する安定化銅の厚さ依存性を調べた。本項では、400 kVA 変圧器についての結果を示す。

解析に用いた変圧器の等価回路を図 2.3.3-16 に示す。L は一次、二次巻線間の漏れインダクタンス、r は磁束フロー抵抗を含む一次・二次巻線抵抗、Z は一次側に換算した負荷である。回路方程式、熱方程式は下記で表される。

$$L \frac{dI}{dt} + \int_0^{\ell_f} \rho_f(B(I), T) \frac{I - I_c(x)}{S} dx + \rho_n(T) \frac{\ell_n}{S} I = V_1 \quad (\text{式 2.3.3-3})$$

$$\rho_f(B, T) = \left(\frac{\lambda_{SC}}{\rho_{fSC}(B, T)} + \frac{\lambda_{Sta}}{\rho_{Sta}(T)} + \frac{\lambda_{Sub}}{\rho_{Sub}(T)} \right)^{-1} \quad (\text{式 2.3.3-4})$$

$$\rho_{fSC}(B, T) = \rho_{nSC}(T) \frac{B(I)}{B_{irr}(T)} \quad (\text{式 2.3.3-5})$$

$$B_{irr}(T) = B_{irr}(0) \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right] \quad (\text{式 2.3.3-6})$$

$$\rho_n(T) = \left(\frac{\lambda_{SC}}{\rho_{nSC}(T)} + \frac{\lambda_{Sta}}{\rho_{Sta}(T)} + \frac{\lambda_{Sub}}{\rho_{Sub}(T)} \right)^{-1} \quad (\text{式 2.3.3-7})$$

ここで、 ρ :電気抵抗率、 ℓ は超電導、磁束フロー、常電導の各領域長さ、 λ は体

積率、添字の f、n、SC、Sta、Sub は磁束フロー状態、常電導状態、超電導体、安定化材、基板を意味する。 B_{irr} は不可逆磁界である。実際の変圧器巻線では、図 2.3.3-17 に示すような磁界分布に応じて I_c 値が線材長手方向に変化する。よって、通電電流の大きさにより、超電導、磁束フロー、常電導の各領域は線材長手方向に交互に分布する。上式は、数値解析の概念を示すものであり、 l_f 、 l_n 等は仮想変数である。図 2.3.3-18 に実験、解析を行った 400 kVA 変圧器の構造と寸法、表 2.3.3-3 に諸元を示す。図 2.3.3-19 に突発短絡時の一次電流の観測波形と数値解析により求めた波形を比較して示している。

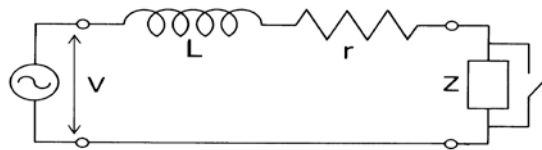


図 2.3.3-16 変圧器の突発短絡時の解析を行うための等価回路

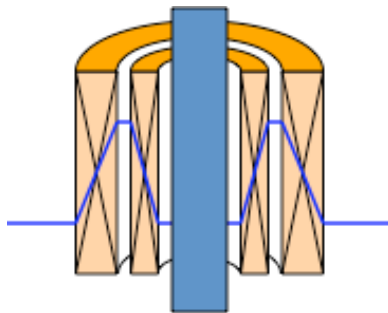


図 2.3.3-17 変圧器巻線における磁界分布

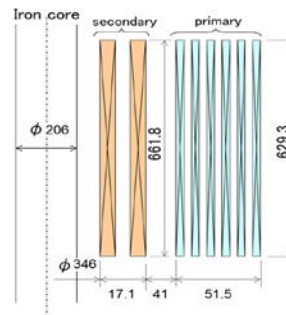


図 2.3.3-18 400kVA 変圧器の断面構図と寸法

表 2.3.3-3 400 kVA 変圧器の諸元

	限流モデル
相数	単相
定格容量	400 kVA
定格電圧	6.9 kV / 2.3 kV
定格電流	58 A / 174 A
%インピーダンス	10 % (400 kVA 基準)
ターン数	576 / 192
運転温度	66 K (サブクール液体窒素中)
巻線層数	6 / 2
線材並列数	1 / 3
超電導線材	Y 系超電導線材
幅	5 mm
銀層厚さ	18 μm
銅層厚さ	50 μm、300 μm

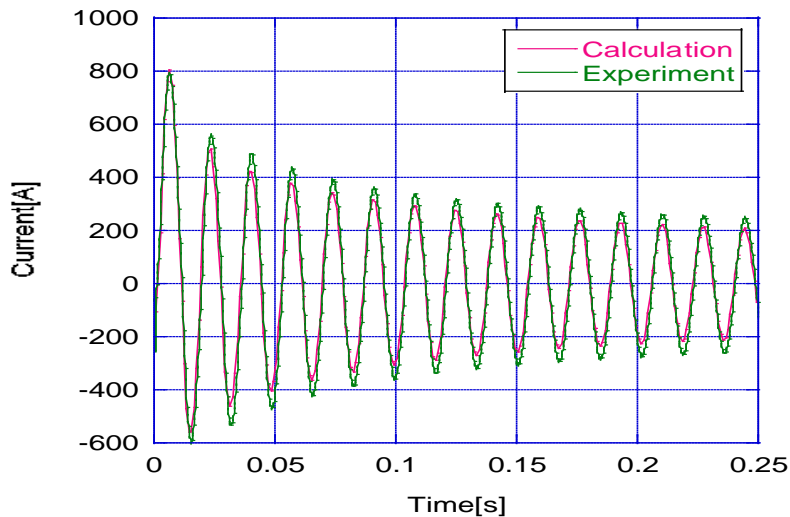


図 2.3.3-19 突発短絡試験時の電流波形の実験値と数値解析結果の比較

図 2.3.3-19 に示すように、実験との一致により数値解析の妥当性を検証したので、次に、図 2.3.3-20 に示すように、安定化材の厚さを変えて数値解析による検討を進めた。図 2.3.3-21 に、線材に付加する安定化銅の厚さを 10 μm 、50 μm 、100 μm 、300 μm にした場合の電流波形の計算結果を示す。また、図 2.3.3-22 に短絡 0.2 sec 後の短絡電流の安定化材厚さ依存性を示す。安定化材厚が 200 μm 超までは安定化材が厚くなるほど短絡電流は大きくなるが、それ以上では短絡電流は%インピーダンスにより制限される。すなわち、安定化材厚さがこれ以下で、変圧器は限流機能を発揮することになる。

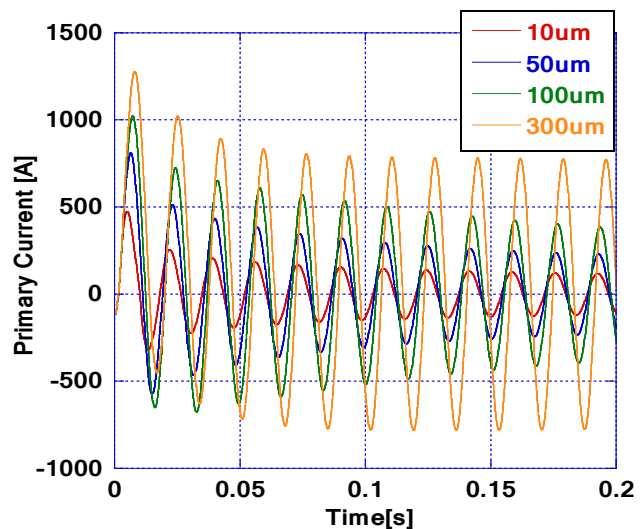
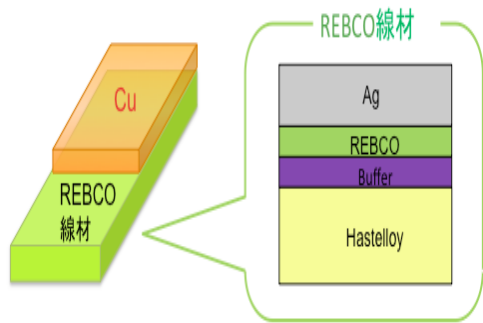


図 2.3.3-20 Y 系超電導線材の断面構造 図 2.3.3-21 線材に付加する安定化材の厚さが 10、50、100、300 μm の場合の突発短絡電流の数値解析結果

図 2.3.3-23 には、短絡 0.2 sec 後の巻線温度（最高、最低）の安定化材厚さ依存性を示している。安定化材が 60 μm で巻線温度が最高になることが分かる。その場合でも、最高温度は 170 K であり、事故電流の大きさ、事故検知、復帰時間等を総合的に勘案して安定化材厚を決定する必要があることが明らかになった。

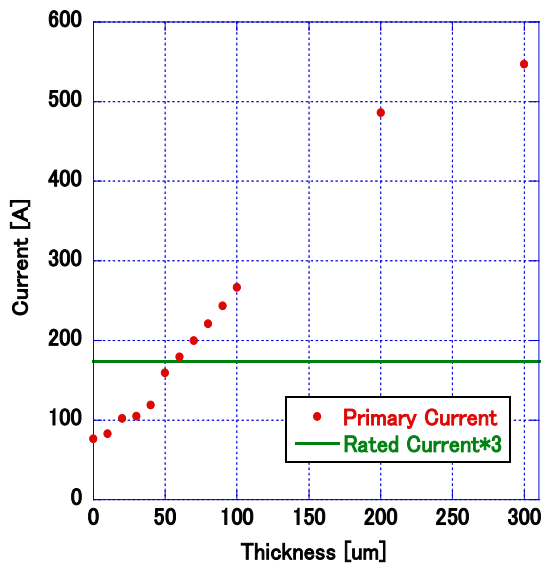


図 2.3.3-22 短絡 0.2 sec 後の短絡電流値の安定化材厚さ依存性

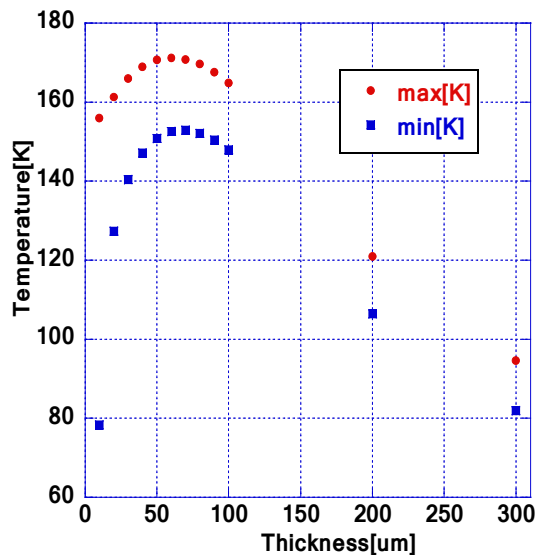


図 2.3.3-23 短絡 0.2 sec 後の巻線温度の安定化材厚さ依存性

(3) 20 MVA 級超電導変圧器に対する解析

66/6.9kV-20MVA 級超電導変圧器設計にあたっては、数値解析により突発短絡事故時の巻線挙動について考察した。想定した 20 MVA 級超電導変圧器の諸元を表 2.3.3-4 に示す。検討した一例として、線材に付加する銅線の厚さが 30 μm の場合の短絡電流の限流の様相、巻線温度上昇の様相を図 2.3.3-24、図 2.3.3-25 に示す。短絡 0.2 sec 後に、短絡電流は定格電流の 3 倍に限流され、巻線温度も室温以下に抑制されること確認した。

さらに、20 MVA 級超電導変圧器について、二次側にケーブルを接続した場合について解析した。設計上、二次側に接続したが、一次側に接続する場合も臨界電流を換算すれば同様である。二次側に 1 km のケーブルを接続した場合について解析した結果、短絡 0.2 sec 後に定格電流の 3 倍程度に限流できることを確認した。

表 2.3.3-4 20 MVA 級超電導変圧器の諸元

相数	三相
定格容量	20 MVA
定格電圧	66 kV / 6.9 kV
定格電流	175 A / 1,674 A
%インピーダンス	15 % (20 MVA 基準)
ターン数	1,033 (129×8) / 108 (54×2)
運転温度	66 K (サブクール液体窒素中)
巻線層数	8 / 2
線材並列数	3 / 24 (12×2)
超電導線材	Y 系超電導線材
幅	5 mm
銀層厚さ	18 μm
銅層厚さ	< 数百 μm

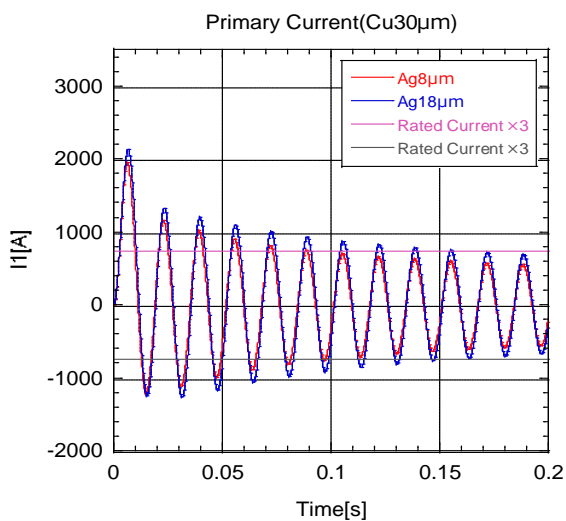


図 2.3.3-24 20 MVA 級超電導変圧器の短絡電流波形

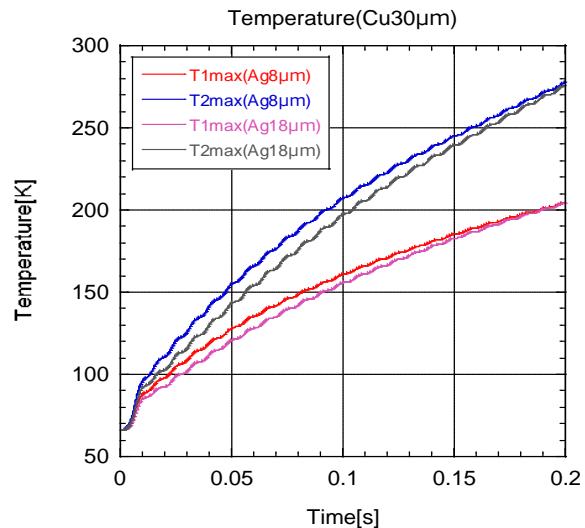


図 2.3.3-25 20 MVA 級超電導変圧器の巻線温度上昇

(4) 熱伝導率等の熱的特性の評価

a 研究開発目標

Y 系超電導線材は第 2 次世代超電導線材として大いに期待されており、変圧器や限流器等の実用機器応用においては臨界電流密度の向上や長尺化の他に、熱的安定性が重要となる。本研究では、機器設計において熱侵入及び熱放散の見積もりに不可欠な熱伝導率、比熱を中心に測定した。Y 系超電導線材の安定化層である Ag 層厚が異なる線材の熱伝導率及び電気抵抗率を評価した。また、安定化金属として Cu または CuNi 薄板を貼り付けた Y 系超電導線材の熱伝導率及び電気抵抗率、熱

緩和法による比熱を測定した。さらに、ストレインゲージ法による熱収縮測定と有限要素法を用いた線材熱収縮のシミュレーション解析を行った。

b 試験結果

Y系超電導線材はIBAD-PLD法により(株)フジクラで作製された。熱伝導率 $\kappa(T)$ は一般的な定常熱流法で測定した。電気抵抗率 $\rho(T)$ は直流四端子法で測定した。図2.3.3-26にAg層厚の異なる3つのY系超電導線材の熱伝導率の温度依存性 $\kappa(T)$ を示す。熱流はテープ面に平行に印加された。Ag層厚20 μm 、35 μm 及び55 μm のサンプルをそれぞれYCC-Ag20、YCC-Ag35及びYCC-Ag55と呼ぶ。YCC-Ag20の $\kappa(T)$ は300 Kから85 K付近まで温度の低下とともに単調に減少し、その後緩やかな増加に転じた。50 K以下で急激に増大し始め、その後20 K付近でピークを示した。YCC-Ag35及びYCC-Ag55の $\kappa(T)$ は、YCC-Ag20の $\kappa(T)$ とほぼ同様の振る舞いであった。 $\kappa(T)$ の絶対値はAg層厚の増加とともに増大した。図2.3.3-26の挿入図に100 Kにおける熱伝導率のAg層厚 t_{Ag} 依存性を示す。 $\kappa(T)$ のピーク温度はAg層厚の増加に伴い高温側に移動した。観測された $\kappa(T)$ のピークは、高純度金属の $\kappa(T)$ に見られる特徴的な振る舞いである。したがって、Y系超電導線材の長手方向の熱伝導は主にAg層が担っていると考えられる。

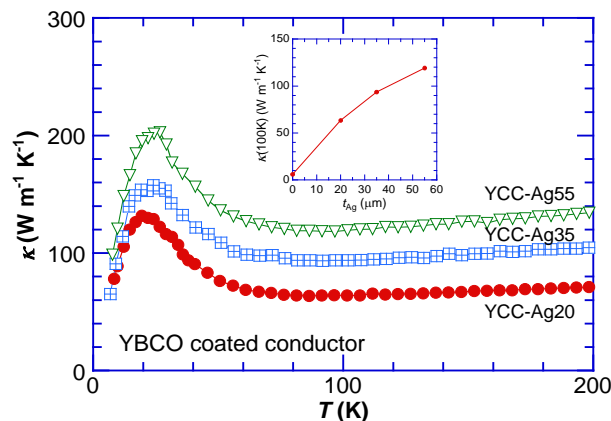


図 2.3.3-26 Y系超電導線材の熱伝導率の温度依存性。挿入図は100 Kにおける伝導率のAg層厚(t_{Ag})依存性

図2.3.3-27に安定化金属としてCu薄板を貼り付けたY系超電導線材(Cu-YBCO)の熱伝導率の温度依存性 $\kappa(T)$ を示す。Cuの厚さは0.1 mmと0.3 mmの2種類で、両者のY系超電導線材部分のAg層厚は10 μm で共通である。また、Cu薄板(厚さ0.1 mm)の $\kappa(T)$ も併せて示す。Cu-YBCOの $\kappa(T)$ は室温から80 K付近までは、ほぼ一定の値を示した。80 K以下になると $\kappa(T)$ は温度の低下とともに増加し始め、その後20 K付近で最大値を示した。Cuの厚さとともに $\kappa(T)$ の絶対値は増加しており、サンプルに与えた熱流は主にCu部分を流れていると考えられる。ただし、低温でCu-YBCOの $\kappa(T)$ がCu薄板の $\kappa(T)$ より大きくなっている等定量的な問題は残った。

図 2.3.3-28 に安定化金属 CuNi を貼り付けた Y 系超電導線材 (CuNi-YBCO) の熱伝導率の温度依存性 $\kappa(T)$ を示す。Ag 層厚がそれぞれ 10 μm 、20 μm 及び 30 μm の Y 系超電導線材に厚さ 0.3 mm の CuNi 薄板をそれぞれ貼り付けた。また、CuNi 薄板(厚さ 0.3 mm)の $\kappa(T)$ も併せて示す。CuNi-YBCO の $\kappa(T)$ は温度の減少とともに単調に減少し、30 K 付近でピーク構造を示した。Ag 層厚の増加とともに $\kappa(T)$ の絶対値は増加し、ピーク構造も明瞭になった。CuNi 薄板の $\kappa(T)$ は単調な温度依存性を示すことから、このピーク構造は Ag 層の寄与であると考えられる。

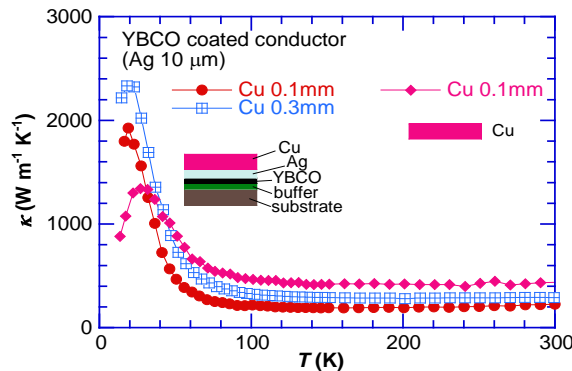


図 2.3.3-27 安定化金属 Cu の Y 系超電導線材 (Cu-YBCO) 及び 0.1 mm 厚 Cu の熱伝導率の温度依存性

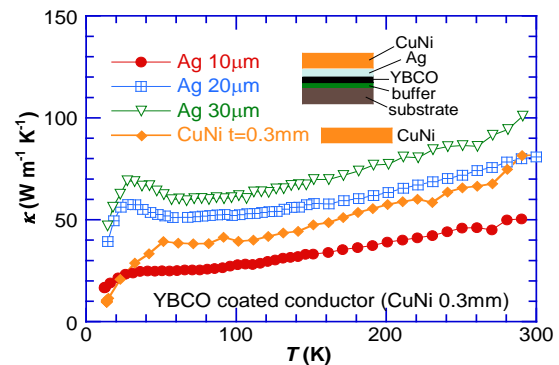


図 2.3.3-28 安定化金属 CuNi の Y 系超電導線材 (CuNi-YBCO) 及び 0.3 mm 厚 CuNi の熱伝導率の温度依存性

図 2.3.3-29 に Ag 層厚の異なる Y 系超電導線材の電気抵抗率の温度依存性 $\rho(T)$ を示す。Ag 層厚の増加とともに電気抵抗率は減少した。挿入図に Ag 層の電気抵抗率の温度依存性 $\rho^{\text{Ag-layer}}(T)$ を示す。 $\rho^{\text{Ag-layer}}(T)$ は以下のように見積もった。

$$\rho^{\text{Ag-layer}} = \rho^{\text{tape}} \times \left(\frac{t_{\text{Ag}}}{t_{\text{tape}}} \right) \quad (\text{式 2.3.3-8})$$

ここで、 ρ^{tape} は Y 系超電導線材の電気抵抗率、 t_{tape} は Y 系超電導線材の厚さである。全ての $\rho^{\text{Ag-layer}}(T)$ はほぼ同一線上にスケールされた。室温の $\rho^{\text{Ag-layer}}$ 値は 1.6-1.7 $\mu\Omega\text{cm}$ となり、報告されている Ag(純度 3 N 程度)の ρ とほぼ等しい。したがって、電流はほぼ Ag 層を流れていると考えて良い。図 2.3.3-30 に安定化金属 Cu または CuNi を貼り付けた Y 系超電導線材 (Cu-YBCO または CuNi-YBCO) の電気抵抗率の温度依存性 $\rho(T)$ を示す。Cu-YBCO の $\rho(T)$ は Cu の厚さの増加とともに低下していることから電流の殆どが Cu 部分を流れていると考えられる。一方、CuNi-YBCO の $\rho(T)$ は Ag 層厚の増加とともに減少している。したがって、電流は Ag 層を流れていると思われる。

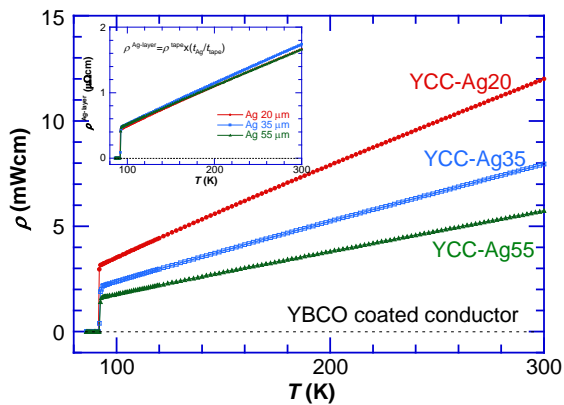


図 2.3.3-29 Y 系超電導線材の電気抵抗率の温度依存性

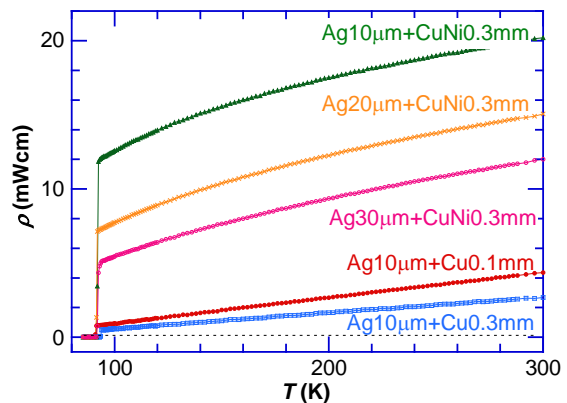


図 2.3.3-30 安定化金属 Cu、CuNi 付きの Y 系超電導線材の電気抵抗率の温度依存性

平成 22 年度に実施した Y 系超電導線材の比熱の測定結果を図 2.3.3-31 に示す。Y 系超電導線材の上に載せる Ag 層及び安定化 Cu 層の存在により、比熱 C ($Jg^{-1}K^{-1}$) の絶対値が僅かに異なることが分かる。

測定結果は複合材料である Y 系超電導線材の比熱であり、文献で報告のある金属の比熱の結果から加法則を用いて Y 系超電導線材の比熱が推定できるかどうかを検討した。ハステロイ™、Ag、Cu の密度はそれぞれ $8.89 g/cm^3$ 、 $10.49 g/cm^3$ 、 $8.96 g/cm^3$ であり、密度がほぼ等しく、超電導層の厚さ($\sim 1.5 \mu m$)、バッファ層 ($Gd_2Zr_2O_7$: $\sim 1 \mu m$, CeO_2 : $0.7 \mu m$) の厚さは他の層に比べて無視できると仮定する。比熱の加法則が成り立つと仮定すると、Y 系超電導線材の比熱はハステロイ™、Ag、Cu 各層の厚さの比例配分で求められる。

図 2.3.3-32 に YCC-Ag20 μm 試料の比熱の実測値とハステロイ™、Ag の比熱の文献値及び加法則で推定した比熱を示す。また図 2.3.3-33 に YCC-Ag10 μm -Cu300 μm 試料の比熱の実測値と各部材の比熱の文献値、及び加法則で推定した比熱を示す。文献値を用いて推定した比熱は、測定した線材の比熱と極めて良い一致を示した。図 2.3.3-34 に推定した比熱の温度依存性をまとめて示す。推定比熱の結果は図 2.3.3-31 の 3 つの試料の実測した比熱の絶対値の関係や温度依存性を含めて一致し、各層の厚さが正確に分かっていれば文献値を用いて Y 系超電導線材の比熱をかなり正確に推定できることが分かった。

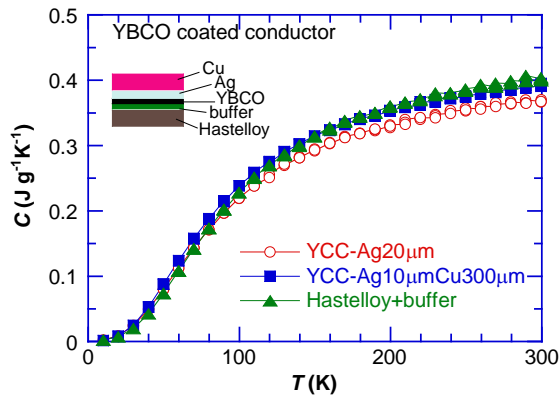


図 2.3.3-31 Y系超電導線材の比熱の温度依存性（実測値）

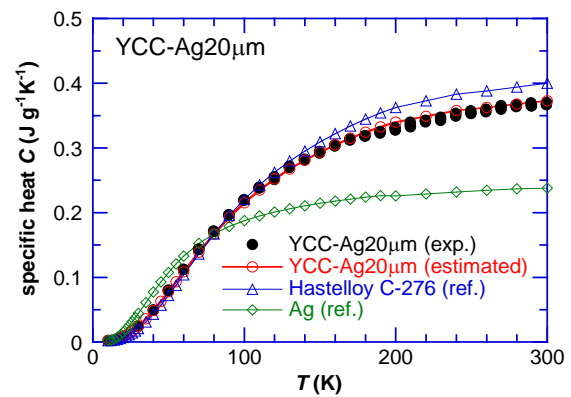


図 2.3.3-32 YCC-Ag20 μm 試料の比熱の実測値と推定値

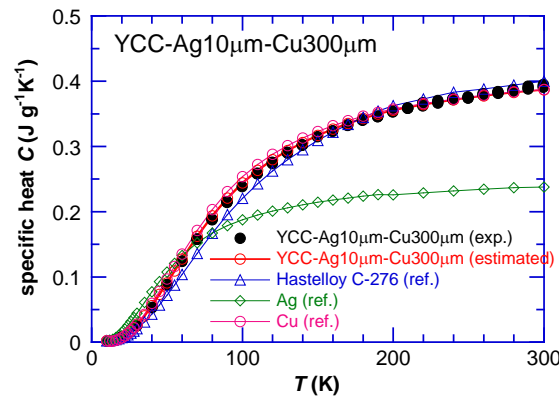


図 2.3.3-33 YCC-Ag10 μm-Cu 300 μm 試料の比熱の実測値と推定値

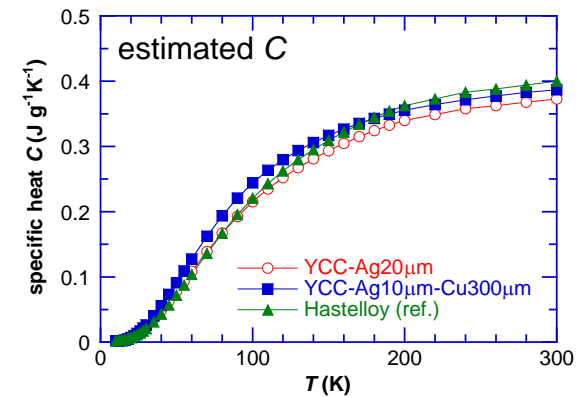


図 2.3.3-34 Y系超電導線材の比熱の推定値

平成 23～24 年度に実施した熱収縮の測定に用いた試料の諸元を表 2.3.3-5 に示す。試料 YCC-1、YCC-2、YCC-3 の比較から Ag 層の厚さの違いが熱収縮に与える影響を検討した。また、試料 YCC-7、YCC-8 から安定化金属(CuNi)が熱収縮に与える影響を安定化金属が無い場合(YCC-1、YCC-2)との比較から検討した。熱収縮はストレインゲージ(株)東京測器研究所 CFLA-1-350-11)の電気抵抗測定から求めた。

図 2.3.3-35 に Ag 層の厚さを変化させた試料 YCC-1、YCC-2、YCC-3 の 300 K を基準にした熱収縮 $dL/L(300\text{ K})$ の温度依存性を示す。以下の結果が実験的に明らかになった。

- ・測定面の違いにより、熱収縮 dL/L の大きさが異なる。
- ・Ag 層の厚さが増加すると Ag 側では Ag 単体の熱収縮に近づき、ハステロイ™ 側では単体のハステロイ™ よりも低温で縮みにくくなる。

定性的には Ag 側は熱収縮の小さいハステロイ™ に拘束されて縮みにくくなり、ハステロイ™ 側は熱収縮の大きな Ag 層に拘束されて縮み易くなるように見える。

図 2.3.3-36 に安定化金属層の厚さを変化させた試料 YCC-7、YCC-8 の熱収縮

dL/L の温度依存性を示す。以下の結果が実験的に明らかになった。

・ハステロイTM側、CuNi側とも、単体のハステロイTM、Cuとほぼ等しい熱収縮を示した。この結果の1つの解釈は、最も弱いAg層において剥離が生じている可能性があるということである。

測定結果を踏まえ有限要素法を用いて熱収縮における変形挙動の解析を行った。図 2.3.3-37 に試料 YCC-3 の場合の 20 K におけるハステロイTM側、Ag 側の熱収縮の温度依存性を示す（簡単のため直線近似した）。ハステロイTM側、Ag 側ともほぼ同じように変形し、測定面による熱収縮の違いは認められず、シミュレーションの結果は、図 2.3.3-35 に対応する結果を再現することは出来なかった。

図 2.3.3-38 に試料 YCC-7 の場合の 20 K における線材の長さ及び厚さ方向の変位量を示す。各層の熱収縮率の温度依存性を $150\text{ K} < T < 300\text{ K}$ 、 $50\text{ K} < T < 150\text{ K}$ 、 $20\text{ K} < T < 50\text{ K}$ の 3 つの温度領域で直線近似した。CuNi 側の熱収縮はほぼ Cu の推奨値に近いが、ハステロイTM側は明らかに単体のハステロイTMより縮みが大きく、図 2.3.3-34 の実験値を再現しない。300 K における Ag のヤング率を報告例から 3 桁小さくして計算したが、これによる変化は僅かであり実験値を再現することは出来なかった。

図 2.3.3-35 の実験結果は、「Ag 層の厚さが増加すると Ag 側では Ag 単体の熱収縮に近づき、ハステロイTM側では単体のハステロイTMよりも低温で縮みにくくなる」という結果である。この原因はハステロイTMと Ag 層の間 (CeO₂ 中間層や YBCO 層) で剥離が生じていることが原因ではないかと仮定して、中間層のヤング率を大幅に変化させて熱収縮を計算した。図 2.3.3-39 に中間層のヤング率を 1×10^{11} から 1×10^1 まで変化させた場合のハステロイTM側、Ag 側の熱収縮の解析結果を示す。現実的な中間層のヤング率の値である 1×10^{11} の場合は、図 2.3.3-39 の結果となるが、ヤング率が小さくなるにつれて Ag 側は熱収縮が大きくなり pure Ag に、ハステロイTM側は熱収縮が小さくなりハステロイTMの値に近づくことが分かる。

図 2.3.3-40 に試料 YCC-1, YCC-3 の中間層のヤング率に対する 20 K での熱収縮を示す。Ag 層厚 50 μm の試料 YCC-3 と同様に Ag 層厚 20 μm の試料 YCC-1 でも同じ傾向が確認できる。中間層のヤング率の正確な値は不明であるが、バルクの値と大きく異なる値を持つと仮定 (例えば、剥離が生じていると仮定) すれば、ある程度の実験結果の説明は可能である。しかし、Ag 層厚に依存して両サイドの熱収縮の値が変化することや、ハステロイTM側で Ag 層の厚さが増加するとともに、ハステロイTM単体の熱収縮よりも縮みにくくなることはシミュレーションからも明らかにできなかった。

表 2.3.3-5 熱収縮測定試料の諸元

試料 No.	試料	基板	Ag 層 (μm)	安定化金属
YCC-1	線材	Hastelloy (w=5mm, t=0.1mm)	20	無
YCC-2	線材	Hastelloy (w=5mm, t=0.1mm)	35	無
YCC-3	線材	Hastelloy (w=5mm, t=0.1mm)	50	無
YCC-7	線材	Hastelloy (w=5mm, t=0.1mm)	20	CuNi (t=0.3mm)
YCC-8	線材	Hastelloy (w=5mm, t=0.1mm)	30	CuNi (t=0.3mm)

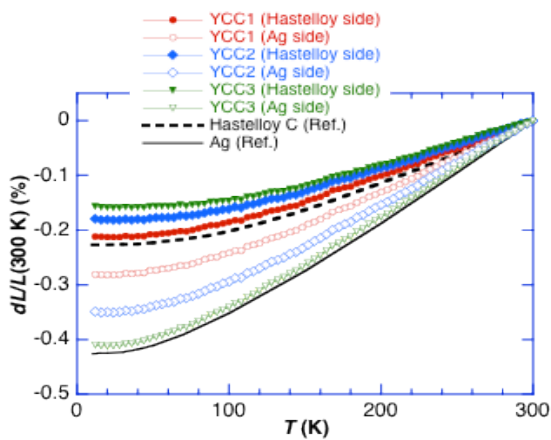


図 2.3.3-35 Ag 層の厚さを変化させた試料の熱の熱収縮の温度依存性

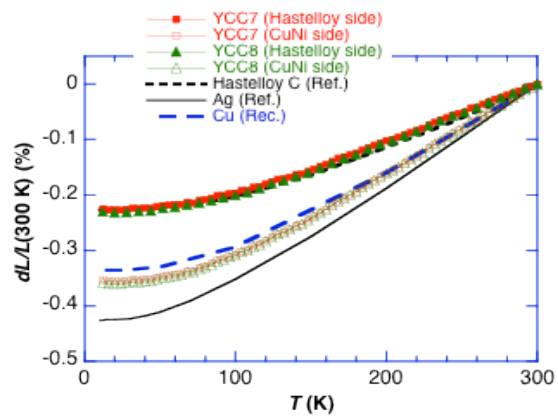


図 2.3.3-36 安定化金属層の厚さを変化させた試料の熱収縮の温度依存性

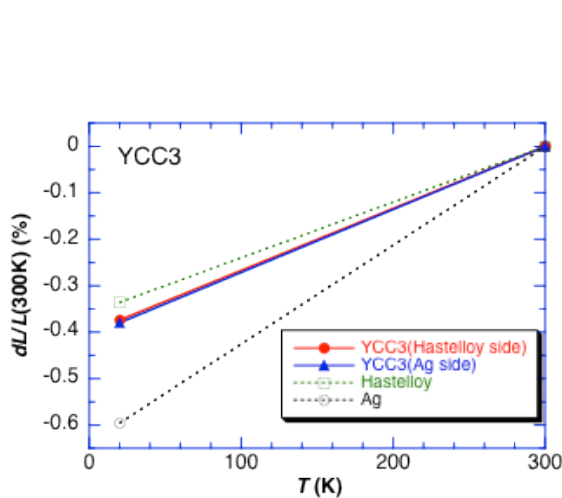


図 2.3.3-37 YCC3 におけるハステロイ™ と Ag 側の熱収縮の温度依存性 (解析結果)

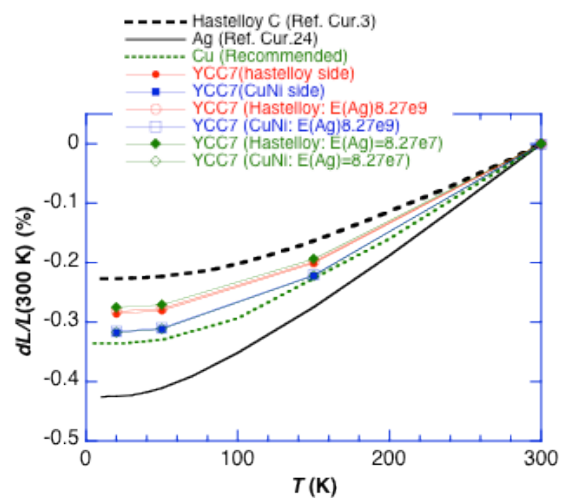


図 2.3.3-38 安定化金属層の厚さを変化させた試料の熱収縮の温度依存性 (解析結果)

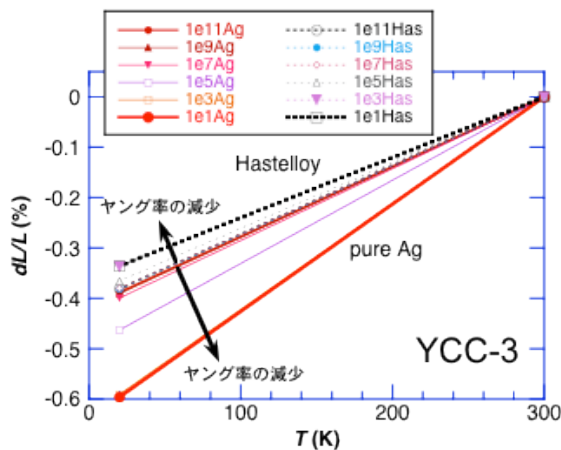


図 2.3.3-39 ハステロイTM と Ag の間の中間層のヤング率を変化させた場合のハステロイTM 側、Ag 側の熱収縮の解析結果

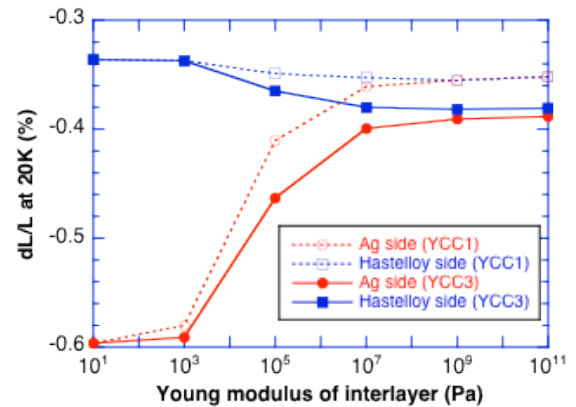


図 2.3.3-40 YCC-1, YCC-3 の中間層のヤング率に対する 20 K での熱収縮の解析結果

c 成果

本研究では、様々な Y 系超電導線材の熱伝導率、電気抵抗率、比熱、熱収縮の温度依存性の測定と解析を行った。各測定に対して以下のようにまとめることができる。

Ag 層厚と熱伝導率の関係から Y 系超電導線材の熱伝導は主に Ag 層が担っていることが分かった。また、ハステロイTM 基板と基板上に中間層を積層したサンプルの熱伝導率の比較から、中間層の熱伝導への寄与は線材の長手方向ではほぼ無視できる。安定化金属を貼り付けた Y 系超電導線材の熱伝導率を測定した結果、Cu 貼り付け試料の場合、熱流は熱伝導の良い Cu 部分を通る。一方、CuNi 貼り付け試料の場合、熱流は CuNi 部分ではなく、ほぼ Ag 層を流れていると考えられる。これら熱伝導率の結果は電気抵抗率の結果と矛盾しない。

様々な Y 系超電導線材の比熱の温度依存性を測定し、各部材の比熱の文献値を用いて推定した比熱と比較した結果、実測した比熱の絶対値の関係や温度依存性を含めて一致し、各層の厚さが正確に分かっていれば文献値を用いて超電導線材の比熱をかなり正確に推定できることが分かった。

様々な Y 系超電導線材の熱収縮の測定を行い、Ag 層厚依存性や安定化金属層厚依存性を検討した。有限要素法による解析を行ったが、本プロジェクト終了時点ではすべての実験結果を説明できるまでには至っていない。この原因は、ストレインゲージ法による熱収縮測定の限界厚（バルク状試料の熱収縮を測定するには 100 mm 以上の膜厚が必要）の存在があると思われ、測定手法の検討も課題として残った。一方で、熱収縮測定は積層間の剥離の検出方法として有

用な方法であることも示唆された。

この結果、5年間の様々なY系超電導線材の熱伝導率、電気抵抗率、比熱、熱収縮の温度依存性の測定と解析により、基礎物性値の蓄積が図られ、一部のデータは実際の限流機能付加変圧器の設計に活用した。

2.3.3-3 数百kVA級限流機能付加変圧器の試作（九州電力、富士電機、ISTEC）

上記の4巻線構造変圧器モデルの試験や解析の成果及び熱的特性の評価について総合評価を行い、4巻線構造の主巻線と補助巻線を複合した2巻線構成とし、過大電流による過渡特性が確認できる数百kVA級限流機能付加単相変圧器モデルに関して、励磁突流印加時や地絡事故時に巻線で発生する常電導抵抗及びこの常電導抵抗による限流特性、さらに変圧器で消費される総熱量を見積り、平成22年度に巻線と絶縁の健全性を確保しうる変圧器形態の設計・試作を行った。平成23年度では、400kVA限流機能付加変圧器モデルの限流機能を検証するために、 I_c 値を超える過電流試験（短絡試験）を行った。

(1) 数百kVA級限流機能付加変圧器モデルの設計

高電気抵抗（Cu、CuNi）保護層導体の巻線導体構成により、過電流通電後0.2secに定格電流の3倍以下となる設計を行い、変圧器モデルの実証試験を行った。表2.3.3-6に限流機能付加変圧器モデルの基本仕様を示す。表2.3.3-7に限流機能付加巻線の仕様を示す。

表 2.3.3-6 限流機能付加変圧器モデルの基本仕様

相数	単相
容量	400 kVA
電圧	6.9 kV / 2.3 kV
電流	58 A / 174 A
周波数	60 Hz
%インピーダンス	10 % (400 kVA 基準)
冷却	過冷却液体窒素浸漬冷却 (66 K)

表 2.3.3-7 限流機能付加巻線の仕様

	一次巻線	二次巻線
素線	Y系超電導線材 (5 mm 幅、保護層導体付)	Y系超電導線材 (5 mm 幅、保護層導体付)
導体構成	1 枚 (1 並列)	3 重ね (3 並列)
巻数	576 ターン (96 ターン×6 層)	192 ターン (96 ターン×2 層)
巻線個数	6	2
巻線長さ	931 m	729 m (243m×3 並列)

(2) 限流機能解析

図 2.3.3-41 には保護層 (CuNi0.3 mm)、銀層 (30 μm) の場合、400 kVA 限流機能付加変圧器モデルの二次短絡時の電流波形 (青)・電圧波形 (紫)・巻線温度上昇 (水) の解析結果を示す。限流機能により電流は短絡後 0.2 sec では電流 734 A_{peak}、定格電流の 3 倍程度となった。なお、電流波形 (赤)、巻線温度上昇 (橙) は限流機能なしの波形を示す。図 2.3.3-42 は、400 kVA 限流機能付加変圧器モデルの外形図を示す。

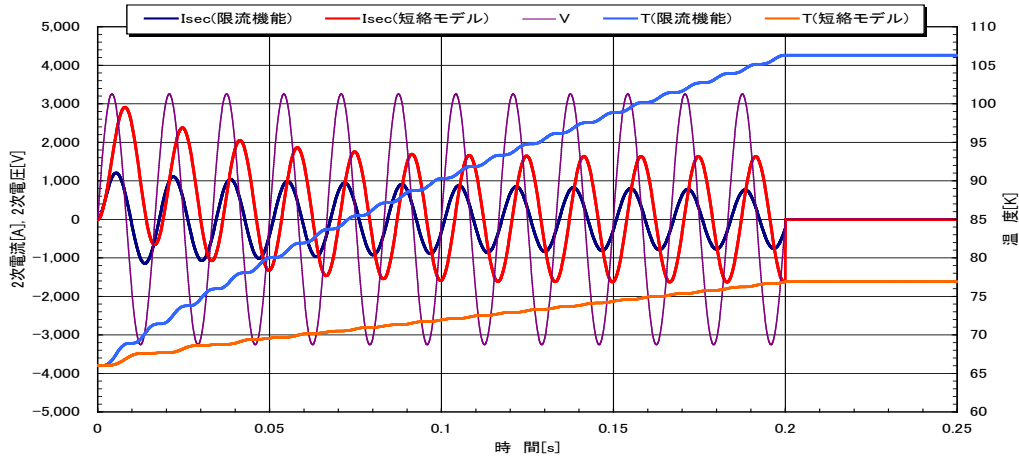


図 2.3.3-41 限流機能の解析波形

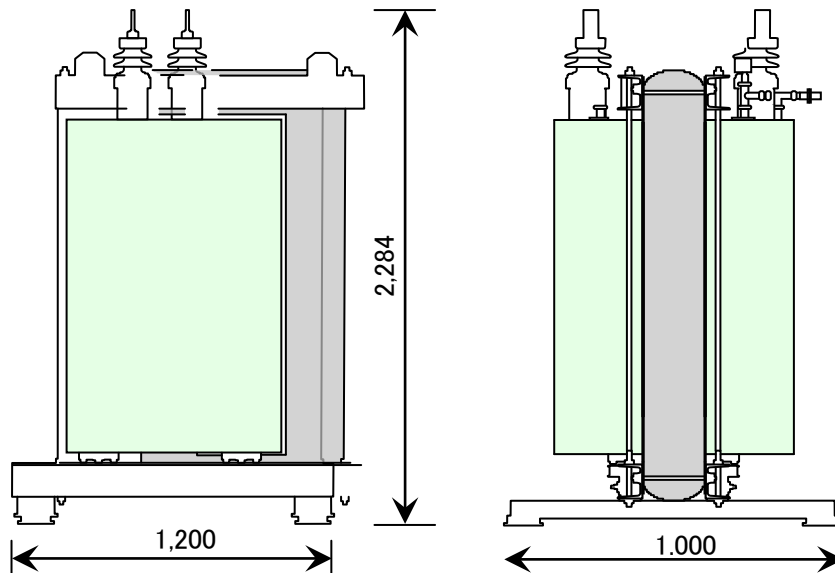


図 2.3.3-42 400 kVA 限流機能付加変圧器モデルの外形

(3) 保護層、銀層の設計

前述の解析では保護層に CuNi を用いた例を示したが、銀層の厚さを抑えるため

Cu を用いる検討を行った。

厚さ $50\ \mu\text{m}$ の銅線を Y 系超電導線材に並列配置した 400 kVA 限流機能付加変圧器モデルについて、短絡電流等の解析を行った。銀層と保護層 (Cu) の厚さと 0.2 sec 後の短絡電流、電気抵抗及び対定格電流倍率の関係を図 2.3.3-43 に示す。

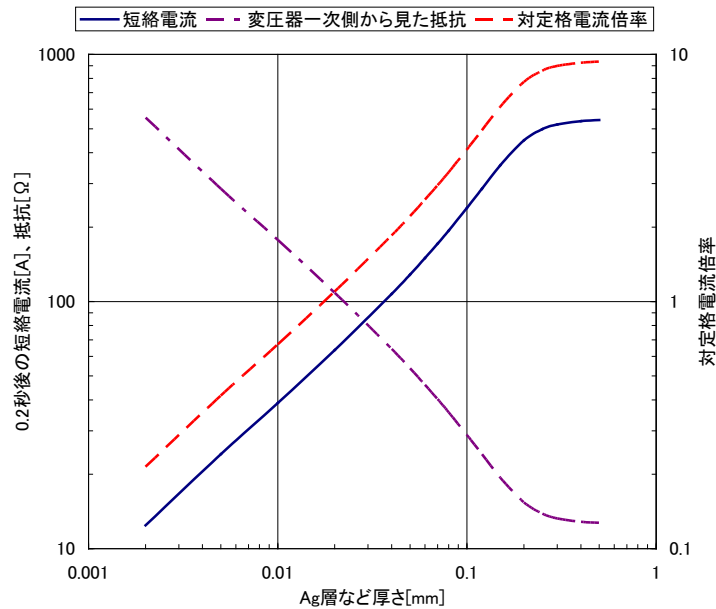


図 2.3.3-43 銀層厚さ等と短絡電流、抵抗、対定格電流倍率の関係

同図から銀層等の厚さが $68\ \mu\text{m}$ で対定格電流倍率が 3 倍になることが分かる。

したがって、400 kVA 限流機能付加変圧器モデルの線材は、銀層 $18\ \mu\text{m}$ 、保護層 (Cu) $50\ \mu\text{m}$ を合計して $68\ \mu\text{m}$ にした。

Y 系超電導線材の断面構成と保護層の配置 (保護層と Y 系超電導線材は並列に配置) を図 2.3.3-44 に示す。銅線と Y 系超電導線材の接続は巻線層毎にハンダ付けを行った。

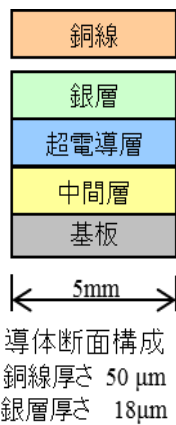


図 2.3.3-44 Y 系超電導線材の断面構成と保護層の配置

(4) 限流特性試験

a 400 kVA 限流機能付加変圧器モデル

(1)の設計に基づき試作した 400 kVA 限流機能付加変圧器モデルの外観、巻線構造を図 2.3.3-45 に示す。

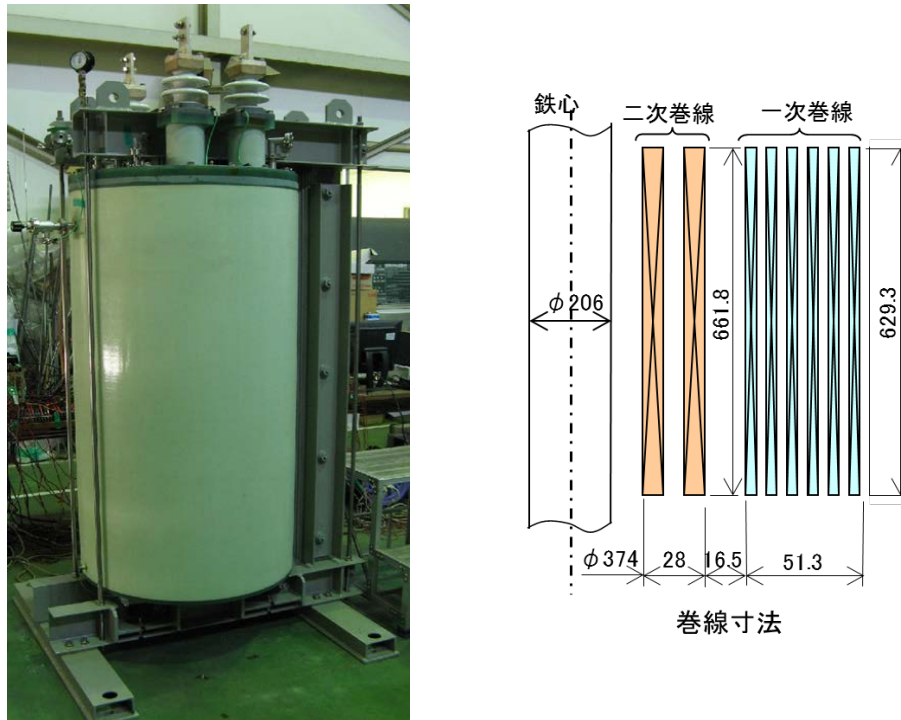


図 2.3.3-45 400 kVA 限流機能付加変圧器モデルの外観、巻線構造

b 限流特性試験方法

平成 23 年度に実施した試験回路とその写真を図 2.3.3-46 に示す。短絡発電機 (6.9 kV、200 MVA、60 Hz)、遮断器、投入位相調整器 1、400 kVA 限流機能付加変圧器モデル、投入位相調整器 2 から構成している。投入位相調整器 1 は、励磁突入電流を抑制するために、また、投入位相調整器 2 は、短絡電流に最大の直流分が重畳させるために設置している。保冷容器内は液体窒素をサブクール温度 66 K まで冷却し、試験時は封じ切りにした。



図 2.3.3-46 限流特性試験回路とその写真

c 限流特性試験結果

図 2.3.3-47 に一次電流、一次電圧の時間変化を示す。一次電流のうちドットが実測値、実線が解析値である。短絡直後の一次電流は定格電流 58 A の約 10 倍の 559 A であったが、0.25 sec 後には定格電流の 3 倍以下の 173.5 A (2.99 倍) まで限流されたことを確認した。また、実測値と解析値は良く一致しており、限流機能を付加する場合、限流特性を正確に設計することができる。

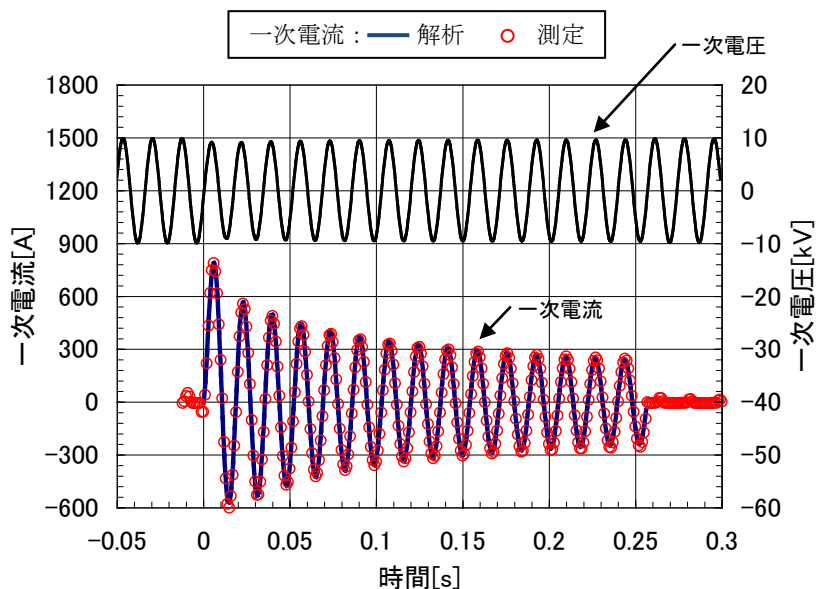


図 2.3.3-47 一次電流、一次電圧の時間変化

図 2.3.3-48 に短絡試験時の保冷容器内部圧力と一次電流の時間変化を示す。短絡直後から短絡遮断直後まで圧力が上昇し、最大値は 21 kPa だった。その後低下

している。短絡時は短絡電流による発熱で液体窒素が気化され圧力が上昇し、短絡遮断後は、窒素ガスが液体窒素により冷却され液化し、圧力が低下したものと考えられる。図 2.3.3-49 に保冷容器内部構造図を示す。

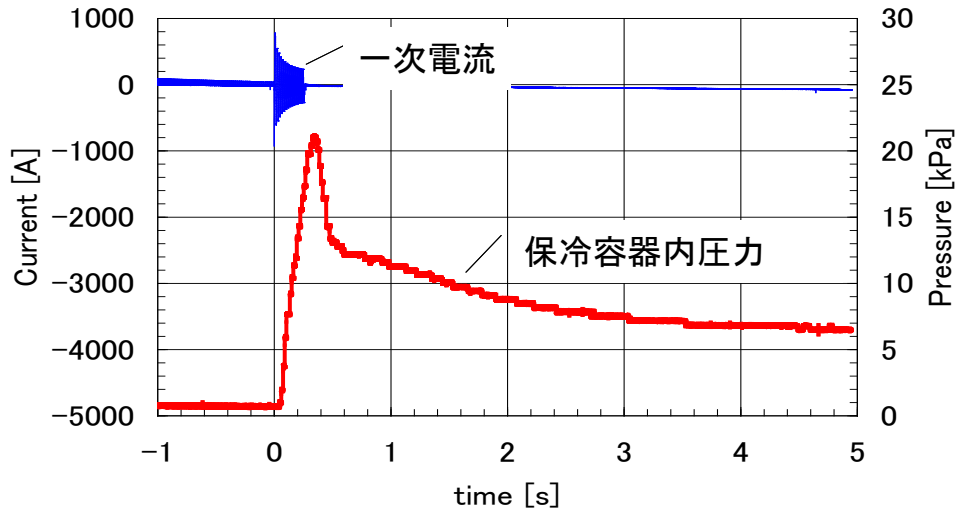


図 2.3.3-48 保冷容器内圧と一次電流の時間変化

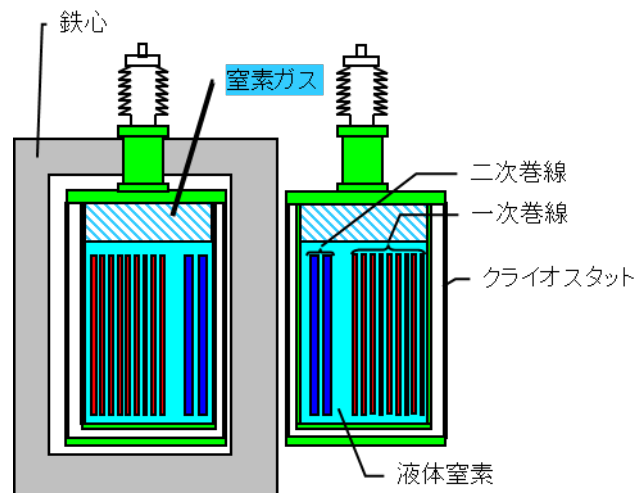


図 2.3.3-49 保冷容器内部構造図

d 短絡試験前後の巻線 I - V 特性試験

図 2.3.3-50 に一次巻線、図 2.3.3-51 に二次巻線の I - V 試験結果を示す。どちらも短絡試験前後で、ほぼ同じ値を示しており、限流特性（短絡）試験による超電導特性の劣化はないのと考えられる。

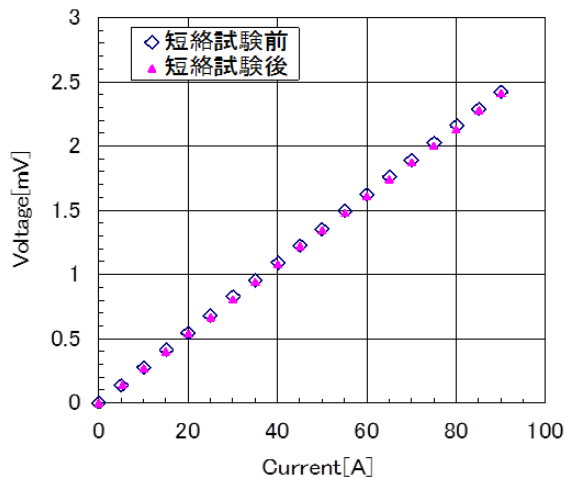


図 2.3.3-50 一次巻線 I - V 試験結果

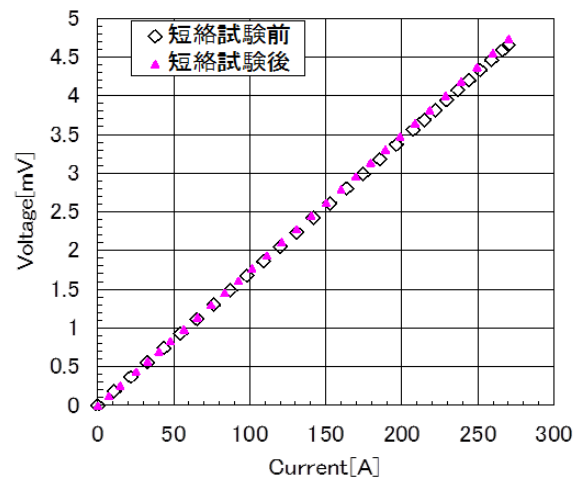


図 2.3.3-51 二次巻線 I - V 試験結果

(5) 短絡時の導体温度と発生抵抗解析結果

図 2.3.3-52 に短絡電流通電時における巻線温度時間変化の解析結果を示す。短絡から 0.25 sec 後においても巻線温度は 180 K 以下となった。超電導線の I_c 値劣化温度は 600 K 程度と言われており¹⁾、この巻線の超電導特性の劣化はないものと考えられる。

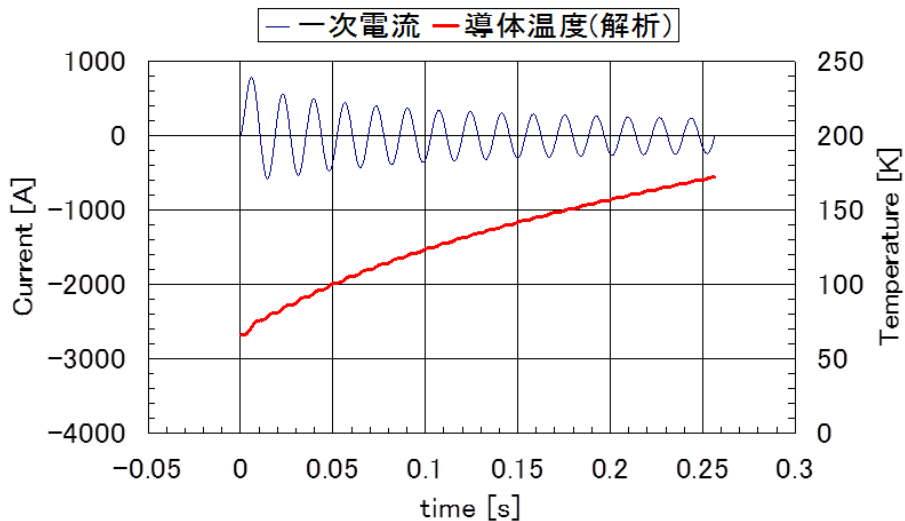


図 2.3.3-52 短絡電流通電時における巻線温度時間変化 (解析結果)

図 2.3.3-53 に短絡電流通電時における発生抵抗時間変化の解析結果を示す。短絡直後から徐々に抵抗が大きくなり、短絡終了直前 (0.25 sec 後) には 39.7Ω になった。短絡直後から線材の I_c を超えたため超電導がクエンチし、銀層や保護層に電流が流れ抵抗が発生し、巻線の温度が上昇し、徐々に抵抗が大きくなっている。

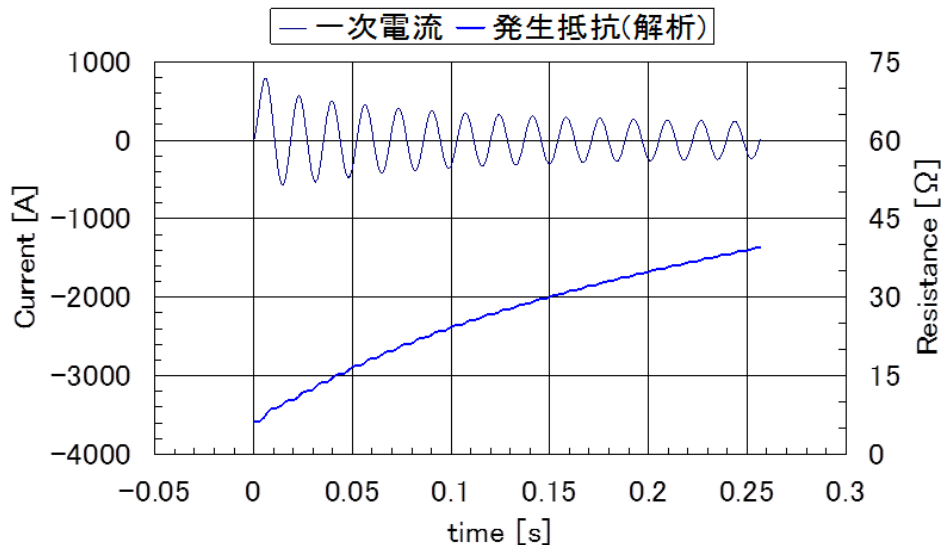


図 2.3.3-53 短絡電流通電時における発生抵抗の時間変化（解析結果）

(6) 限流機能動作後の復帰時間

限流機能を発揮すると、超電導線は超電導状態から常電導状態へ転移して抵抗を発生し発熱する。この発熱により、冷媒である液体窒素が気化して気泡を発生する。

また、限流機能を発揮する時は電力系統で短絡等の事故が発生した時であり、一旦変圧器を系統から切り離す運用を行う。事故箇所を特定するため、または事故原因を除去した後に再投入するが、それまでに限流機能を発揮した超電導変圧器が所定の温度に冷却されていることが必要条件になる。そこで、変圧器巻線を模擬したモデルコイルに短絡電流相当の電流を流して限流させ、冷却状況を確認する方法として液体窒素中の気泡挙動に着目した試験を実施した。

図 2.3.3-54 に試験状況を示す。Y 系超電導線に CuNi 線や Cu 線を重ねた導体で巻線したモデルコイルを用い、ガラス容器に収納してサブクール液体窒素中で I_c を超える過電流通電を行い、その時の気泡挙動を高速撮影カメラを用いて観察した。

図 2.3.3-55 は CuNi 線(厚さ 0.3 mm)を並列配置した試験コイルに短絡電流相当の電流（発生エネルギーに換算）を 0.3 sec 間通電して発泡させ、発泡消滅までの時間を測定した結果である。短絡時の発生エネルギーが大きいほど発泡消滅までの時間が長くなるものの、20 MVA 相当以上の発生エネルギーにおいても 10 sec 以内に消滅しており、配電線の再閉路時間 30 sec を考慮すると全く問題ない結果であった。

図 2.3.3-56 に発泡の様子を示す。12 ターンの試験コイル（Cu 線並列配置）に限流機能付加変圧器モデルの短絡電流相当（719 A_{peak}）を通電している。気泡発生量は極めて少なく、また、発生した気泡の移動量は最大で 5 mm 程度上昇し、その

後消滅した。気泡は短絡電流による発熱で発生し、サブクールの液体窒素（68 K）で冷却され消滅するものと考えられる。

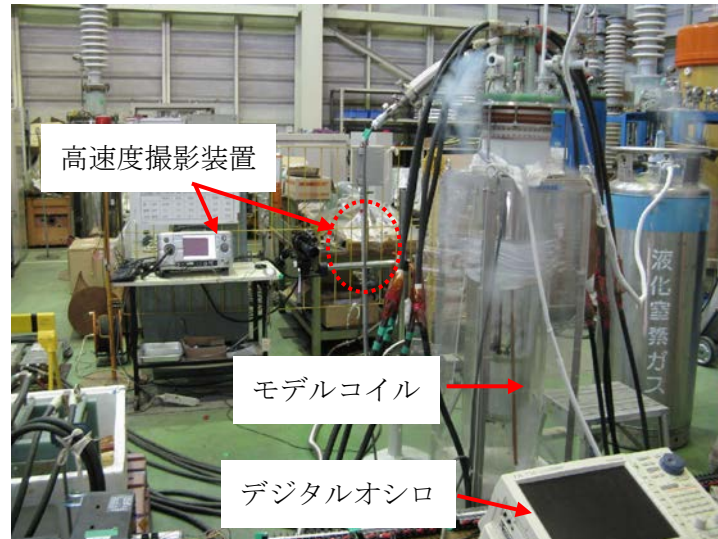


図 2.3.3-54 気泡挙動試験実施状況

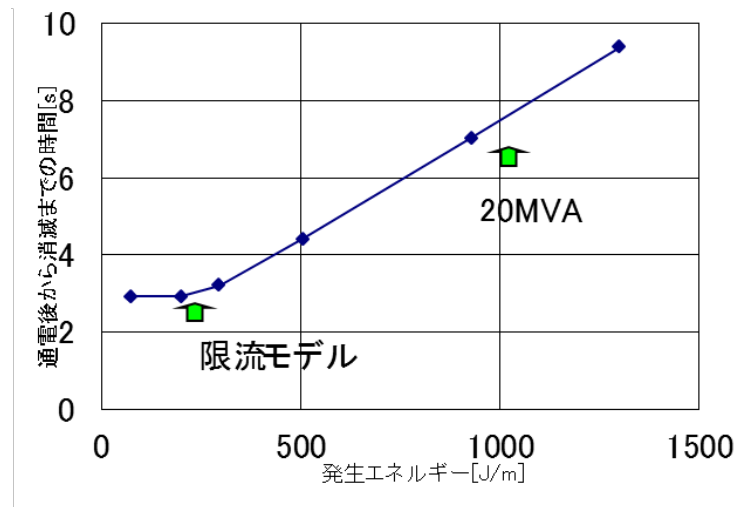


図 2.3.3-55 発生エネルギーと発泡消滅時間

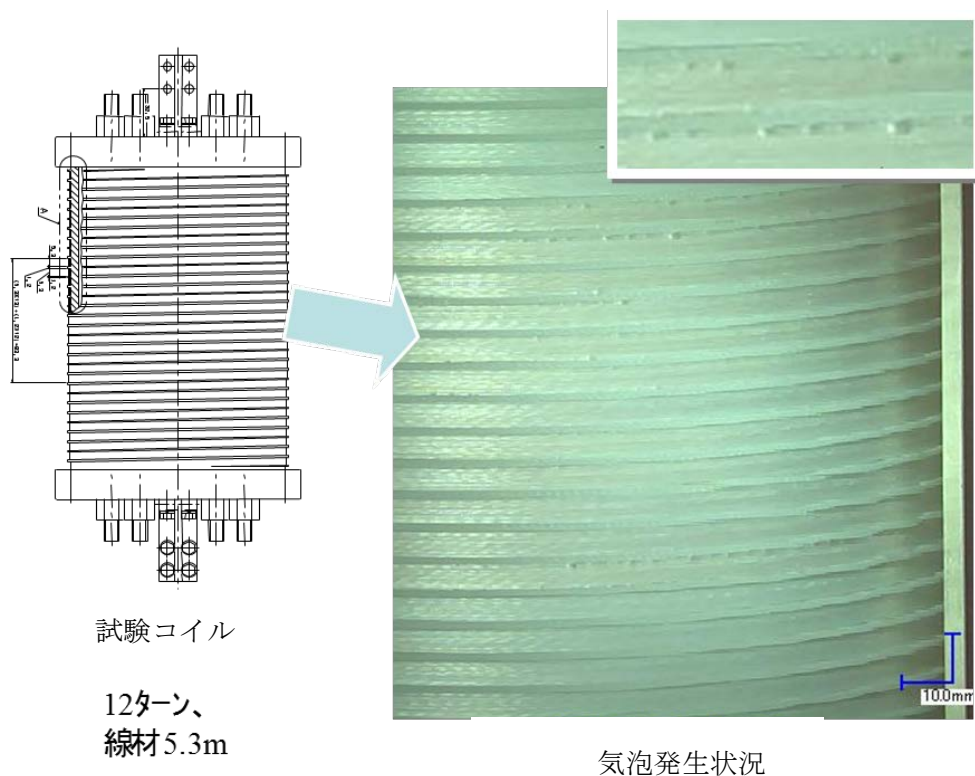


図 2.3.3-56 試験コイル形状と気泡発生状況

2.3.3-4 まとめ

(1) 4巻線モデルによる特性検証

限流機能付加変圧器の基礎技術の検証用として、一次側、二次側ともに主巻線と並列に接続された常電導抵抗を測定するための補助巻線を持つ4巻線構造の小型超電導変圧器モデルを試作した。本巻線モデルを用いて突発短絡事故を模擬した試験を行い、主巻線における常電導領域の発生過程を観測するとともに、Y系超電導線材の液体窒素温度における過大電流に対する基礎的な応答特性を定量的に検証・評価した。

(2) 限流応答特性解明と限流効果による巻線保護の検討及び熱伝導率等の熱的特性の評価

4巻線モデル、400 kVA 限流機能付加変圧器モデル等を用いて、変圧器巻線の短絡電流に対する電氣的、熱的応答特性について、理論及び実験の両面から解明し、限流機能を付加した20 MVA 級超電導変圧器の設計検討に反映した。

(3) 数百 kVA 級限流機能付加変圧器の試作

4巻線構造変圧器モデルの試験や解析の成果について総合評価を行い、数百 kVA 級限流機能付加単相変圧器モデルに関して、励磁突流印加時や地絡事故時に巻線で発生する常電導抵抗及びこの常電導抵抗による限流特性、さらに変圧器で消費され

る総熱量を見積り、巻線と絶縁の健全性を確保できる変圧器形態の巻線を設計し、400 kVA 限流機能付加単相変圧器モデルを試作し、限流特性試験を実施した。その結果、0.25 sec後に短絡電流を定格電流の3倍以下に抑制できることを確認した。

引用文献リスト

- (1) 佐藤、河野、王、植田、石山、鹿島、長屋、八木、向山、飯島、斉藤、塩原、「YBCO 超電導線材の過電流パルス通電による特性劣化試験」、第78回2008年度春季低温・超電導学会（2008）pp.65

2.3.4 超電導変圧器対応線材開発

超電導変圧器対応 Y 系超電導線材の安定製造技術開発は、II-2.1.3-4 節に述べたように、特に、交流損失の低減が重要である。本項では、Y 系超電導線材を適用する超電導変圧器の技術開発にあたり、IBAD-PLD（パルスレーザ蒸着法）線材及び IBAD-MOD（有機酸塩熱分解法）線材にて、超電導変圧器の技術開発に必要な 5 mm 幅 3 分割にて $I_c=50 \text{ A}/5\text{mm-w} @65 \text{ K}$ 、0.01 T で 100 m 以上に相当する線材を安定的に製造し提供する技術開発の成果について述べる。また、スクライビング溝加工前後の微細組織変化を詳細に解析し、加工条件等の適正化、及び線材の特性評価と巻線の交流損失見積り手法についての成果も述べる。なお、表 2.3.4-1 に超電導変圧器対応線材の安定製造技術開発フローを示す。

表 2.3.4-1 超電導変圧器対応線材の安定製造技術開発フロー

	H20	H21	H22	H23	H24
巻線技術開発	基礎試験モデル	短絡モデル	転位均流モデル 低損失モデル	2kA 級巻線モデル 2MVA 級変圧器モデル	
線材安定供給		PLD 線材 13 km, MOD 線材 1 km		MgO 基板線材 MgO 基板線材	
線材加工		細線化 30m 長		MgO 基板線材細線化	
線材プロジェクト			(100m 5mm 幅 3 分割以上、50A @65K&0.01T) 中間目標		5mm 幅 5 分割以上

2.3.4-1 超電導変圧器対応線材安定製造技術開発（フジクラ）

IBAD 中間層基板上にパルスレーザ蒸着法（PLD 法（図 2.3.4-1））により形成された超電導層は比較的欠陥が少なく安定して製造することが可能である。この技術を活用して、5 mm 幅、100 m 長以上の Y 系超電導線材に対して、3 分割のスクライビング細線溝加工後に所定の特性 ($I_c=50 \text{ A}/5\text{mm-w} @65 \text{ K}$ 、0.01 T) を得るこ



図 2.3.4-1 PLD 線材構造

とを可能とする特性均一な長尺線材の安定製造技術を開発するとともに、プロジェクト後期 2 ヶ年で開発する 2 MVA 級変圧器モデル用に使用する線材を供給した。また、Y 系超電導線材用の IBAD 中間層基板の安定製造技術を開発するとともに、有機酸塩熱分解法による超電導層成膜用の IBAD 中間層基板を供給した。

(1) 超電導線材の提供

IBAD法により形成した中間層上に、PLD法により超電導層を形成する手法により製造したY系超電導線材（以下IBAD-PLD線材）は、超電導線材の性能を表す臨界電流値と線材長さの積（以下 $I_c \times L$ ）で世界最高クラスの176.023 Amの線材製造した実績がある。平成20年度～24年度における5mm幅に加工後のIBAD-PLD線材の供給計画と実績は表2.3.4-2のとおりである。

表 2.3.4-2(a) 平成 20-21 年度超電導変圧器用線材の供給計画と実績

年度	適用巻線モデル	条長:m、()内は安定化材仕様	
		計画	実績
H20	安定化銅構造	55 m(0.1 mmt Cu), 100 m(0.1 mmt Cu)	56 m (0.1 mmt Cu), 117 m (0.1 mmt Cu)
	曲げ歪み	54 m (0.1 mmt Cu), 54m	54 m (0.1 mmt Cu), 59 m
	4 巻線限流	252 m (0.1 mmt Cu)	252 m (0.1 mmt Cu)
	2 次口出し接続	58 m (0.1 mmt Cu)	59 m (0.1 mmt Cu)
H21	短絡	1,170 m (0.3 mmt Cu)	1,825.1 m (0.3 mmt Cu)
	転位均流	1,320 m (0.1 mmt Cu)	1,320 m (0.1 mmt Cu)
	数百kVA級限流	120 m (0.3 mm CuNi)	120 m (0.3 mm CuNi)
	曲げ歪み	54 m	106.6 m (無し)

表 2.3.4-2(b) 平成 22-24 年度超電導変圧器用線材の供給計画と実績

年度	用途	分割 有無	線材幅 [mm]	計画	実績		規格 I_c [A]@77K、 s.f.
				総長[m]	線材単長 [m]	提供総長 [m]	
H22	限流付加	無	5	1,685	106-172	1,685	$100 < I_c < 130$
	磁界分布	3 分割	5	1,606	115-173	2,051	200<
	R&D 用線材	無	5	-	-	480	100<
H23	2MVA 変圧器	無	5	6,396	241.1-438	7,197.2	200<
	2MVA 変圧器	3 分割	5	3,792	78.8-152.3	4,847.2	200<
H24	大電流	無	5	2,886	55-146	3,323	200<
	その他実験用	無	5	-	63-94	994	200<
		3 分割	5	-	63-94	982	200<

IBAD-PLD 法で超電導層を形成後、その用途に応じて Ag の保護層厚さや材質や厚さの異なる安定化材を線材に形成することが必要となった。表 2.3.4-2 (a) は、平成 20 年度～21 年度の供給計画と実績である。安定化材の種類ごとに貼り合わせ方法を検討し、プロジェクトの要求を満たす線材を提供した。平成 22 年度からは、損失低減のために、IBAD-PLD 線材をスクライブ細線溝加工する 3 分割線材（以下分割線材）用の線材についても提供した。平成 21 年度までに供給していた線材では、安定化層と IBAD-PLD 線材をハンダで貼り合わせていたが、平成 22 年度以降の分割線材は安定化層もしくは分割線材に絶縁テープを巻いた後に、超電導線材と安定化層を添線し、さらに絶縁テープを巻く構造に変更したため、IBAD-PLD 線材と安定化層のハンダによる貼り合わせは実施していない。平成 22～24 年度の分割線材の供給計画と実績を表 2.3.4-2 (b) にまとめた。平成 20～24 年度に 5 mm 幅線材で 26 km を納入した。また、表 2.3.4-3 に平成 21 年度製造線材の歩留りの製品単長依存性を示す。本プロジェクト開始当初は単長 100 m の線材の歩留りは 46 % 程度であった。

表 2.3.4-3 平成 21 年度製造線材の歩留りの製品単長依存性

出荷	総長 m ※	安定化材	単長 30 m		単長 50 m		単長 100 m	
			本数	歩留り%	本数	歩留り%	本数	歩留り%
09/04	138	0.3 mmt Cu-Ni	4	87.0	2	72.4	0	0
09/05	740	0.3 mmt Cu	20	81.1	11	74.3	4	54.0
09/06	1,838	0.3 mmt Cu	33	53.9	17	46.2	7	38.1
09/07	266	0.3 mmt Cu-Ni	4	45.1	2	37.5	0	0
09/09	1,186	0.1 mmt Cu	34	86.0	18	75.9	8	67.4
	4,168		95	68.4	50	60.0	19	45.6

平成 23 年度に供給した線材のうち 2 MVA 級変圧器モデル用線材は本プロジェクトで最大量となる 12 km にも及んだため、2 MVA 級変圧器モデル用線材に特化した歩留りについて、以下のとおり加工前後で評価した。

2 MVA 級変圧器モデル用線材は、当社で成膜した 10 mm 幅の線材を ISTEK において 5 mm 幅に半裁した後に、使用される部位によって、さらに 3 分割線材とした。ISTEK で加工が終了した線材は、 I_c 測定後に特性を満たす線材のみ当社に返送され、当社において絶縁等を施し、再度 ISTEK に提供した。10 mm 幅線材の当社からの提供実績を表 2.3.4-4 に示す。

表 2.3.4-4 平成 23 年度の超電導変圧器用線材の提供実績（加工前）

線材幅[mm]	総製造長[m]	出荷長[m]	単長[m]	歩留[%]
10	12,218	9,694	105.2-729.5	79.3

10 mm 幅線材の歩留りは、当社より提供した線材の総長を、当社においてプロジェクト向けに作製した線材総長で除して求めた。プロジェクト向けに提供した線材は全て、当社内部目標値（磁化法により測定した 77K、s.f.での平均 I_c 値>300 A/cm-w かつ、最小 I_c 値>210 A/cm-w）を満たしている。

5mm 幅とした線材の提供実績を表 2.3.4-5 に示す。

表 2.3.4-5 平成 23 年度の超電導変圧器用線材の提供実績（加工後）

用途	線幅 [mm]	単長[m]	本数 [本]	加工総長 [m]	受入総長 [m]	累積歩留り [%]
2 MVA 級変圧器用 (分割なし)	5	241.1-438	24	7,891.8	7,197.2	72.2
2 MVA 級変圧器用 (3 分割線材)	5	78.8-152.3	50	10,806	4,847.2	35.5
出荷合計					12,044.4 m	

5 mm 幅線材の歩留りは、ISTEC での加工後に良品として当社に返送された線材総長を ISTEC で加工した線材の総長で除し、さらに表 1 に示した加工前線材の歩留りを乗じて累積歩留りとして求めた。加工後の 5 mm 幅線材で 12,044 m を年度内に提供した。分割なしの線材歩留りが 72.2 % に対して、3 分割後の線材歩留りは 35.5 % であった。

(2) 中間層基板の提供

IBAD-Gd₂Zr₂O₇(以下 IBAD-GZO)中間層は、成膜装置を大型化し大面積化することにより、結晶粒面内配向度が 16 度以下のテープを連続的に 100 m オーダで製造することが可能である。平成 20～22 年度のプロジェクト目標とした IBAD-GZO 中間層基板の供給計画と実績は表 2.3.4-6 のとおりである。

表 2.3.4-6 中間層基板の供給計画と実績（H20～H22）

年度	計画		実績	
	条長[m/月]	総長[m/年度]	条長[m/月]	総長[m/年度]
H20	187.5	1,312.5	187.8	1,314.3
H21	125	1,250.0	138.7	1,386.6
H22	150	1,800.0	176.8	2,121

平成 20 年度～21 年度に当社よりプロジェクト内の他機関に対して提供した IBAD-GZO 中間層基板の供給実績を図 2.3.4-2 に示す。棒グラフは月毎の提供量を示し、◆印は累計の出荷長を示している。

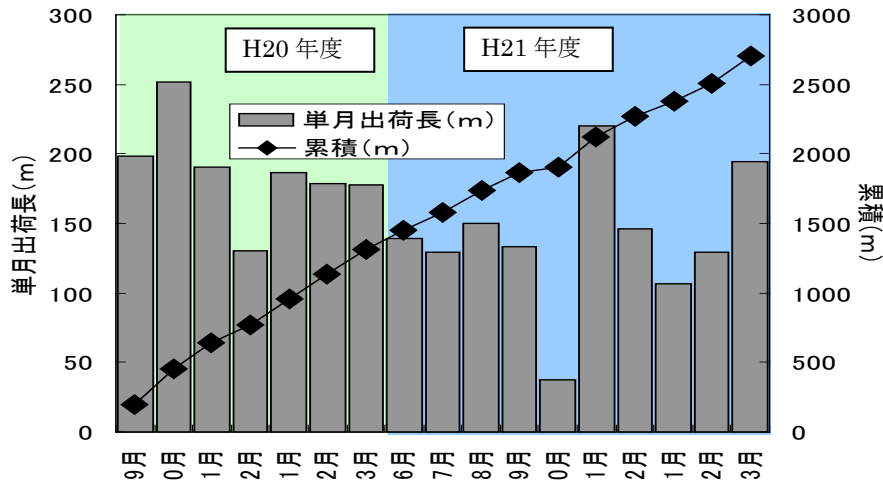


図 2.3.4-2 平成 20～21 年度の中間層基板の提供実績

平成 20 年度は、1,314.3 mを提供し、平成 21 年度は 1,386.6 mを提供した。月毎の提供量は必ずしも一定ではないが、各年度の計画に対して年度内に全量を提供済みである。平成 21 年度末までに提供した総長で約 2.7 km であった。

平成 20～23 年度の IBAD-GZO 及び IBAD-MgO 中間層基板の供給計画と実績をそれぞれ表 2.3.4-7 にまとめた。

平成 20～23 年度に提供した中間層基板の総長は約 6km であった。

表 2.3.4-7 (a) IBAD-GZO 中間層基板の供給計画と実績 (H20～H22)

年度	種類	目標提供長[m]	提供長[m]
H20	GZO	1,313	1,314
H21	GZO	1,250	1,387
H22	GZO	1,800	2,121

表 2.3.4-7 (b) IBAD-MgO 中間層基板の供給計画と実績 (H23)

年度	種類	目標提供長[m]	提供長[m]
H23	MgO	1,000	1,142

(3) 線材特性分布の均一化の検討

PLD法はY系超電導体のように多元系元素からなる薄膜の形成に適した方法であるが、当社では超電導線材の幅方向及び長手方向の特性を均質化するために、装置の構造を検討してきた。図2.3.4-3に当社で開発したホットウォール加熱式PLD装置の外観を示す。



図 2.3.4-3 ホットウォール加熱式
PLD 装置

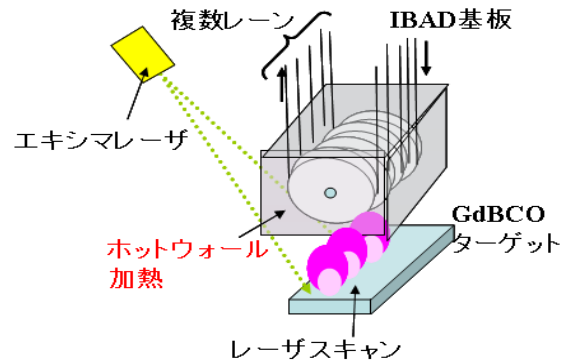


図 2.3.4-4 真空チャンバー内部図

装置中央部が薄膜を堆積させる真空チャンバであり、その両脇に、送り出し・巻き取りリールを配置してあることから連続的にテープ基材（IBAD 中間層基板）が真空チャンバに供給され、基材上に超電導層が形成される。真空チャンバ内を図 2.3.4-4 に模式的に示す。

ターゲット上に照射されたレーザー光により真空チャンバ内に放出された原料がホットウォールと呼ばれる炉内の IBAD 中間層基板上に堆積する。薄膜の成長面はホットウォールからの輻射熱により一定温度に保たれていることから、本装置により均質な超電導結晶薄膜の形成が期待される。そこで、本装置を用いて均一な超電導特性を有する Y 系超電導線材安定製造条件を検討した。

図2.3.4-5にIBAD-MgO中間層基板上に形成したホットウォール加熱式PLD装置で超電導層を形成した線材の I_c 値の長手方向分布を示す。77 K、s.f.において直接通電により線材を700 mm間隔でI-V特性を測定し、 $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ に到達した電流値を I_c 値とした。

170 m超の長さを有する線材において、全長に亘って $300 \text{ A}/\text{cm}\cdot\text{w}$ (@77 K、s.f.) 以上の I_c 値を実現している。 I_c 値の平均値は $340 \text{ A}/\text{cm}\cdot\text{w}$ (@77 K、s.f.) であり、標準偏差 6.1 A であり、長手方向に特性の均質な超電導線材が形成された。

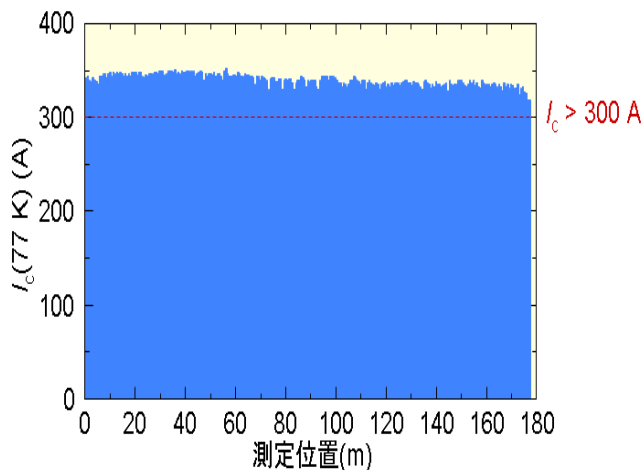


図 2.3.4-5 I_c 値の長手方向分布
(340 A)

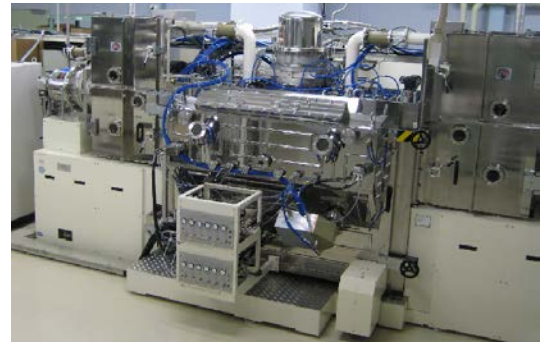


図 2.3.4-6 連続巻き取り式イオン
ビームアシスト蒸着装置

(4) 中間層高速堆積方法の検討

IBAD-GZO 中間層は、結晶粒面内配向度を 16 度以下にするために、1 μm 厚程度まで膜を成長させる必要がある。そのため、IBAD-GZO 中間層の製造速度は 5-7 m/h が上限であった。中間層基板の提供を円滑に行うためには製造速度のさらなる高速化が不可欠となる。

図 2.3.4-6 に示した連続巻き取り式イオンビームアシスト蒸着装置は、中央部分が薄膜を蒸着させる真空チャンバであり、チャンバ内部には 110×15 cm^2 の世界最大のアシストイオンソースが設置されている。装置両脇には、送り出し・巻き取りリールが配置されており、連続的にテープ基材が真空チャンバに供給され、数百 m の長さを有する基材上に IBAD 層を形成することが可能となっている。

本装置を用いて IBAD 法により極めて薄い膜厚で結晶粒が高配向化する中間層の形成が可能な MgO (以下 IBAD-MgO) 層の導入を検討した。IBAD-MgO 層は、金属基板からの金属元素の拡散を防止するため金属基板上に 100 nm 厚の Al_2O_3 膜と、その上にベッド層として形成した 20 nm の Y_2O_3 膜上に形成される。図 2.3.4-7 はベッド層形成後に図 2.3.4-6 の装置で毎時 1000 m で成膜した IBAD-MgO 層断面の透過型電子顕微鏡写真である。ベッド層の上に厚さ 5~10 nm 程度の IBAD-MgO 層が形成され、さらにその上に結晶粒が配向した CeO_2 が連続的に成長している様子が観察された。

MgO 層中の結晶粒二軸面内配向中間層は極めて薄いことから、X 線を使って直接配向度を測定することは事実上不可能である。そのため、IBAD-MgO 上に CeO_2 キャップ層を形成した基板の $\Delta\phi$ の長手方向分布を評価した結果を図 2.3.4-8 に示す。1000 m の全長で CeO_2 キャップ層の $\Delta\phi$ が 5 度以下を実現している。これは IBAD-GZO 層上に形成された CeO_2 キャップ層と同等の結晶粒の配向度である。

このことから IBAD-GZO 層と比較して 100 倍以上の高速で成膜された IBAD-MgO 層は、IBAD-GZO 層に代わって長尺の Y 系超電導線材製造に十分使用可能であることが分かり、平成 22 年度より IBAD-MgO 中間層基板を採用した超電導線材を提供した。

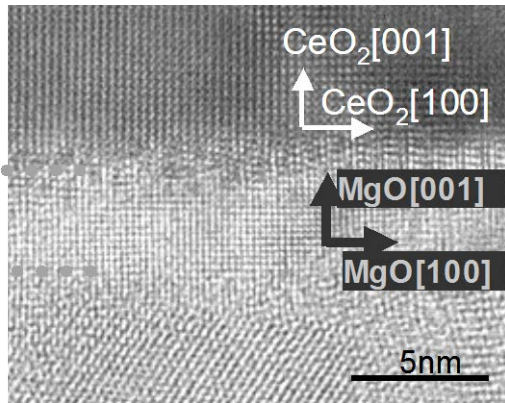


図 2.3.4-7 IBAD-MgO の透過電子顕微鏡観察結果

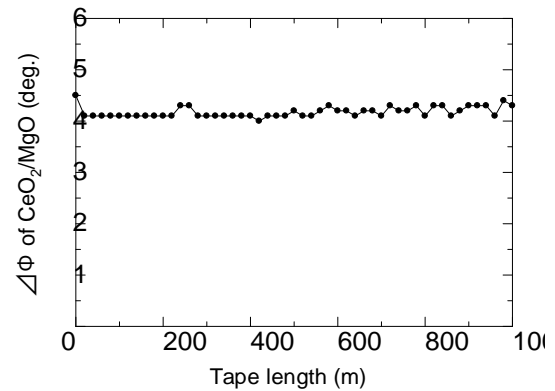


図 2.3.4-8 MgO の 2 軸配向中間層上に形成したキャップ層の $\Delta\phi$ の長手方向分布

(5) まとめ

平成 20 年度より超電導変圧器対応線材開発に対し、5 mm幅の超電導線材を 26km 供給した。

平成 21 年度に製造した線材に対して、製品単長を 30 m、50 m、100 m とした場合の歩留りのシミュレーションでは、製品単長が長くなるにつれて歩留りが低下した。これは、線材長手方向に不定期間隔で出現する不良箇所によるものであった。平成 22 年度以降は不良箇所の出現原因の探索を進め、不良要因に対策を実施したところ、無分割の 2MVA 級変圧器モデル用線材において単長 240m 超の線材でも歩留り 72% を達成した。

超電導特性の均質化検討では、高性能な長尺の Y 系超電導線材の製造方法である IBAD-PLD 法により製造した線材の長手方向の臨界電流特性を測定し、150 m を超える超電導線において 700 mm 間隔で測定した臨界電流特性は標準偏差が 5% 以下の均質な超電導線を得ることができた。また、線材幅方向の I_c 値分布特性を把握することにより、均質性を評価し、長手方向と同様に均質な超電導特性が得られるよう成膜条件の最適化等を実施した。さらに 300 m 級線材において実現するよう長尺化の研究開発を進めた。

中間層基板に関しては平成 20 年 9 月より 10 mm 幅の IBAD-GZO 中間層基板の供給を開始した。平成 20 年度は総長で 1,314 m を提供し、平成 21 年度は 1,387 m を提供した。月毎の提供量は必ずしも一定ではないが、各年度の計画に対して年度内に全量を提供済みである。平成 21 年度末までに提供した総長で約 2.7 km である。平成 22~23 年度に提供した IBAD-GZO 及び IBAD-MgO 中間層基板は 3,263

m であり、平成 20～24 年度に提供した中間層基板の総長は約 6 km であった。

平成 22 年度以降のプロジェクトへの量的な安定供給に貢献できる技術として IBAD-MgO 中間層基板の開発に着手し、IBAD-GZO と同等の性能を有する線材の開発に成功した。平成 21 年度に IBAD-MgO 中間層基板を超電導変圧器の研究開発の超電導変圧器対応線材開発、及び超電導電力ケーブルの研究開発事業の基板・中間層テープ研究開発で他機関に提供し、適応の可否を検討した。変圧器研究開発においては、当社で製造する超電導線材に IBAD-MgO 中間層基板を用いることに関して早い段階で関係機関の了解を得られたことから、平成 22 年度より IBAD-MgO 中間層基板を用いて製造した IBAD-PLD 超電導線材を供給した。また、ケーブル研究開発においては、平成 24 年度にケーブル用超電導線材の中間層基板として採用された。

2.3.4-2 超電導変圧器対応線材安定製造技術開発 (昭和電線ケーブルシステム、ISTEC)

有機酸塩熱分解法 (MOD 法) は将来の低コスト化が見込まれる線材作製方法として期待されるプロセスの一つである。長尺化に向けた開発は前 NEDO 事業の「超電導応用基盤技術開発(第 II 期)」プロジェクトからであり、他の気相成膜プロセスと比較してスタートの時期こそ遅かったものの高性能な線材の安定製造(歩留り向上)に成功した。この技術を活かして、5 mm 幅、100 m 長以上の Y 系超電導線材に対して、3 分割のスクライビング細線溝加工後に所定の特性 ($I_c = 50$ A/5mm-w @65 K, 0.01 T) を得ることを可能とする特性均一な長尺線材の安定製造技術を開発するとともに、超電導変圧器用線材を供給した。

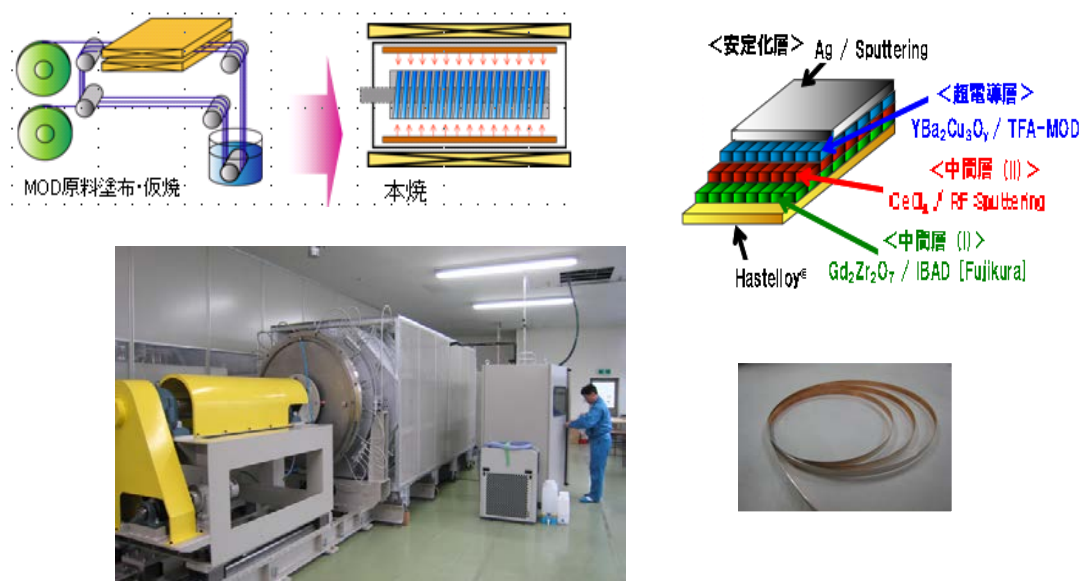


図 2.3.4-9 MOD 線材構造

(1) 超電導線材の提供

三弗化酢酸塩溶液 (TFA) を用いる有機酸塩熱分解法 (MOD法) は、TFA-MOD法と呼ばれる。中間層基板の表面に金属有機酸塩溶液を塗布した仮焼膜を一度形成し、仮焼膜を結晶化させる熱処理工程 (本焼) を経ることによって超電導薄膜を形成するプロセスである (MOD法 (図2.3.4-9))。本焼工程において使用する電気炉は、ISTECやアメリカンスパーコンダクター社で開発されたReel-to-Reel式の連続熱処理炉が一般に用いられているが、本プロジェクトでは量産性に優れる大型バッチ式熱処理炉を採用した。

バッチ式熱処理炉を使用した本焼プロセスは、全長100 m以上の線材を炉内のドラムに装填し、短時間で焼き上げる手法である。このため、Reel to Reel式熱処理炉に比べて短時間で線材を焼成することが可能であり、密閉された空間で反応させるため外部環境の擾乱を受け難いという特長がある。しかしこの特長は本焼中に投入された線材から一斉に発生する結晶成長を妨げるガスがReel to Reel式熱処理炉に比べて短時間で多量に発生し、しかも密閉空間であることから、そのガスの影響を低減することが難しくなる。このため、プロジェクトで使用する昭和電線が開発した大型バッチ式熱処理炉以外、100 m以上の線材作製に成功した例は存在しない。

下地に使う基板は、(株)フジクラよりIBAD法で作製した $Gd_2Zr_2O_7$ 中間層基板の供給を受け、RFスパッタリング蒸着法により CeO_2 中間層を昭和電線で形成したものを使用している。このY系超電導線材 (以下IBAD-MOD線材) は、超電導線材の性能を表す臨界電流値と線材長さの積 (以下 $I_c \times L$) で当時世界第3位の155,000 Amの線材製造した実績がある。平成20年度～22年度にプロジェクトで予定したIBAD-MOD線材の供給計画は表2.3.4-8のとおりである。

IBAD-MOD法で超電導層を形成後、その用途に応じてAgの保護層厚さや材質や厚さの異なる安定化材を線材に形成することが必要となった。表2.3.8に供給計画に対する実績も記載した。5 mm幅線材総長で平成20年度に593 m、平成21年度に417 mを供給した。スクライビング細線溝加工技術の検討のために561mを供給した。

平成21年度に製造した線材に対して、製品単長を30 m、50 m、100 mとした場合の歩留りを計算した結果を表2.3.4-9に示す。

表 2.3.4-8 超電導変圧器用線材の供給計画と実績

	適用モデル	条長 (m)、()内は安定化材仕様	
		計画	実績
20 年度	安定化銅構造	55 m (0.1 mmt Cu) 100 m (0.1 mmt Cu)	57 m (0.1 mmt Cu) 100 m (0.1 mmt Cu)
	曲げ歪み	54 m (無し) , 54 m (0.1 mmt Cu)	54 m (無し), 108 m (0.1 mmt Cu)
	4 巻線限流 (補助一次、二次)	188 m (幅:4.5 mm,無し) 79 m (無し)	188 m (無し) 86 m (無し)
21 年度	Edge wise	54 m (無し)	60 m
	転位均流	1,320 m (無し)	—
	一次コイル間接続	159 m, 168 m (無し)	357 m
	その他実験用	—	561 m
22 年度	磁界分布モデル	1,050 m, 1,050 m (無し)	—

表 2.3.4-9 平成 21 年度製造線材の歩留りの製品単長依存性計算結果

出荷日	総成膜長 m	安定化材	単長 30 m		単長 50 m		単長 100 m	
			本数	歩留り%	本数	歩留り%	本数	歩留り%
09/04/30	2,329	銀 15 μm	54	69.5	29	62.2	1	4.3
09/08/02	190	銀 30 μm	4	63.2	1	26.3	0	0
09/08/03	45	銀 30 μm	1	66.7	0	0	0	0
09/08/03	75	銀 30 μm	2	80.0	1	66.7	0	0
総計	2,639		61	69.3	31	58.7	1	3.8

平成 22 年度末に発生した東日本大震災及び夏季節電対策の影響により、線材製造技術開発遅延抑制のため、平成 23 年度においては、ISTEC の支援の下で開発を進めた。

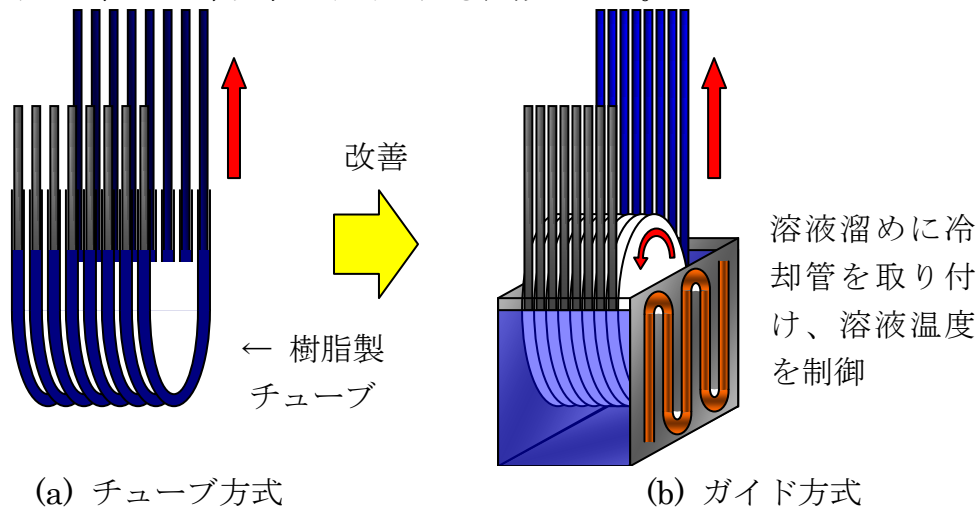
平成 22 年度より 3 分割スクライビング細線溝加工について検討を実施していたが、100 m 長に亘り 3 分割スクライビング細線溝加工を行うことは困難を極めた。その主な問題を下記に示す。

- (1) MOD 線材の製造工程のうち、原料溶液塗布・仮焼工程において、異物が混入し局所的な特性低下が発生。
- (2) 超電導層内のボイドにより、超電導層の強度が低下し、3 分割スクライビング細線溝加工の際、超電導層から剥離が発生。

上記の問題を解決するため、原料溶液塗布工程の見直し、仮焼時におけるボイド低減を目的とした仮焼パターンの最適化を実施した。

この対策を実施するまでは、図 2.3.4-10(a)に示したチューブ方式により、超電導原料溶液の塗布を実施していた。しかしながら、チューブ方式では、樹脂製のチューブの中に基板を通した状態で溶液塗布を行うため、基板移動・搬送時の摩擦・摩

耗により、チューブ内面を削り、異物混入が発生していた。この時生じる異物が仮焼膜表面に付着し、歩留りを大きく低下させていることが判明した。異物混入を回避するため、図 2.3.4-10(b)に示した ISTE C が実施している、ガイド方式による原料溶液塗布技術の移管を受けることとした。また、原料溶液の温度変化に伴う溶液粘度及び溶液濃度の経時変化により、線材長手方向における超電導層の膜厚に不均一性が生じていたことから、溶液温度を一定に保持するよう溶液溜めに冷却管を取り付け、溶液温度の制御を可能とした。本対策を実施するまでに生じていた異物の混入が無くなり、超電導膜厚の不均一性も低減された。

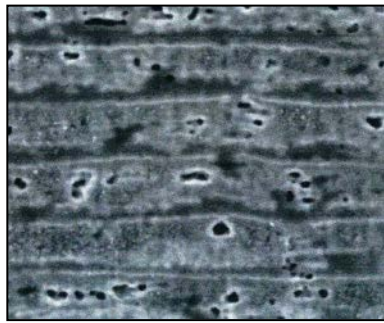


樹脂製のチューブの中に基板を通し溶液塗布。基板移動時の摩擦により、チューブ内面を削ってしまい、異物混入が発生

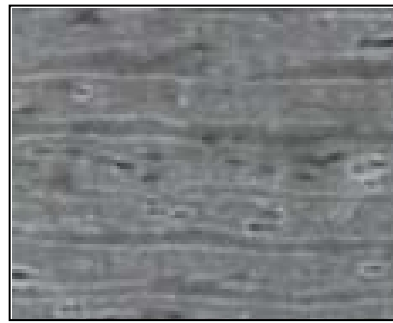
線材の移動に伴いガイドが回転するため、基板との摩擦が無く、異物混入が抑制される。

図 2.3.4-10 溶液塗布方法の変更及び液温制御

超電導層内に存在するボイドは、原料溶液塗布・仮焼工程で生じたボイドが原因であることが、本プロジェクト開始時点までの研究結果から明らかになっていた。本対策を実施するまでは、仮焼膜中に含まれるナフテン酸塩の分解に合わせた 500 °C を最高温度 (T_{max}) としていたが、トリフルオロ酢酸塩 (TFA) の分解に注目し、 T_{max} を 400 °C とし、低温化を図りボイドの低減を試みた。図 2.3.4-11 に改善前後の断面 SEM 写真を示す。同図から分かるように、 T_{max} の低温化によりボイドの低減が認められ、同時に仮焼膜の膜質についても改善された。



(a) 改善前 ($T_{\max}=500\text{ }^{\circ}\text{C}$)



(b) 改善後 ($T_{\max}=400\text{ }^{\circ}\text{C}$)

図 2.3.4-11 仮焼条件の最適化

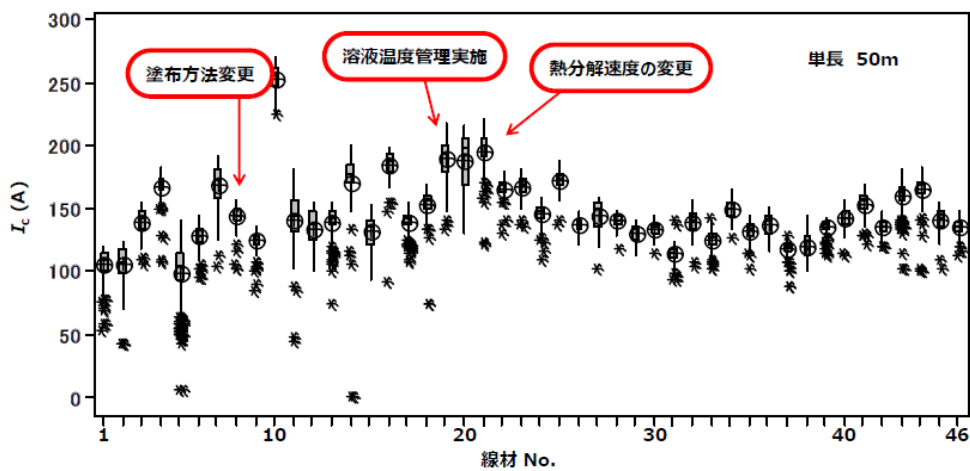


図 2.3.4-12 塗布・仮焼プロセスの改善と線材特性の変遷

図 2.3.4-12 に塗布・仮焼プロセスの改善と線材特性の変遷を示す。同図に示したように、仮焼工程の改善により均一性が向上し、ロット間に生じていた長尺特性の不均一性についても改善が認められた。平成 22～23 年度に製造した線材の歩留りについて、表 2.3.4-10 に示す。

表 2.3.4-10 各単長における製造歩留り

	製造量(m)	有効長(m)	歩留り(%)	
30m 単長	6,368	3,600	平成 22 年度	56.5
	5,050	3,600	平成 23 年度	71.3
50m 単長	6,368	1,200	平成 22 年度	18.8
	5,050	3,150	平成 23 年度	62.4
100m 単長	2,308	600	平成 23 年度	26.0

同表に示したように、仮焼工程の改善により、単長 30 及び 50m については製造歩留りの向上が見られたが、100m 単長については、高い歩留りを得ることが出来なかった。その理由として、特性向上及びコスト低減が見込まれる IBAD-MgO

中間層基板への転換を図ったが、IBAD-MgO 中間層基板に対する中間層成膜装置の立ち上がりが東日本大震災の影響により遅延したことがある。このため、IBAD-MgO 中間層基板上への CeO₂ 層の成膜条件について十分な検討ができず、歩留り低下の原因の一つとなった。しかし、その後の調査・検討により CeO₂ 層の成膜温度を低温化し、成膜雰囲気還元雰囲気から低酸素雰囲気とすることで CeO₂ (111) 配向粒が減少し、歩留りが向上した。

3 分割スクライビング細線溝加工可能な線材作製及び加工においては ISTECC より支援を得ることで開発を進めた。図 2.3.4-13 に 101 m 長 MOD 線材に対して 3 分割スクライビング細線溝加工を施した各フィラメントの I - V 曲線を示す。同図から分かるように、スクライビング細線溝加工後の各フィラメントは健全性を保持しており、線材自体の I_c 値については、 $I_c = 101 \text{ A}/5\text{mm-w}$ (@77K, s.f.) であった。65 K, 0.01 T 中の I_c 値については、下記に示す TFA-MOD 法 Y 系超電導線材の I_c スケーリング則より、196 A と算出された。

$$T=77\text{K (s.f.)} \Rightarrow T=@65\text{K (s.f.)} \quad I_c: \times 2$$

$$B_{\text{ex}}=0 \text{ T (@65K)} \Rightarrow B_{\text{ex}}=0.01\text{T (@65K)} \quad I_c: \times 0.97$$

$$I_c (@65\text{K}) = 101 \times 2 \times 0.97 = 196 \text{ A}/5\text{mm-w}$$

続いて、3 分割スクライビング細線溝加工を施した本線材の交流損失をホール素子法により測定したところ、図 2.3.4-14 に示す結果が得られた。図中青で示された部分は加工前、赤で示された部分は加工後である。3 分割スクライビング細線溝加工前後において、ヒステリシス損失が 1/3 となっていることから、加工の成功のみならず、ロス低減についても成功したことを示している。したがって、MOD 線材においても、スクライビング細線溝加工が可能であるとともに、その加工によるヒステリシス損失の低減が可能であることが示唆され、目標達成に至った。

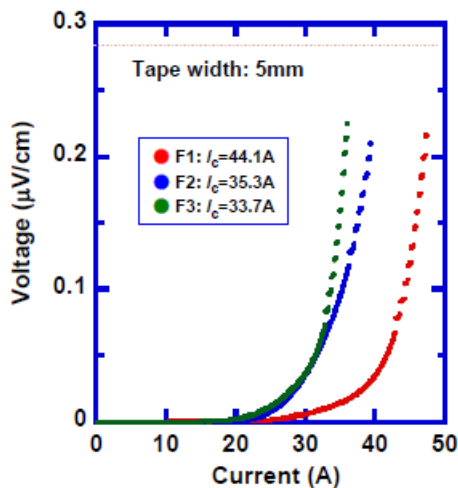


図 2.3.4-13 3 分割スクライビング加工を施した各フィラメントの I - V 曲線

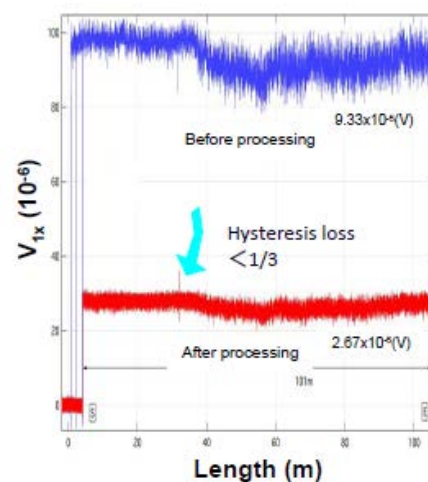


図 2.3.4-14 ホール素子法による 3 分割スクライビング加工線材の交流損失評価結果

(2) スパッタプロセスによる長尺中間層の検討

長尺線材に使用する CeO_2 中間層は、従来 ISTEK の Pulse Laser Deposition (PLD)装置を借用して作製していたが、本プロジェクトにおいて昭和電線に導入した高周波スパッタリング(RF-Sputtering)装置を用いて作製することとした。高周波スパッタリング装置を選択した理由は、① 装置導入時のコストが PLD 装置に比べて安価であること、② 長時間運転において自動インピーダンス整合器を使用することにより無人運転が可能となり、線材のコスト低減に対して有効であること、③ スパッタリングプロセスで成膜した膜の表面形状は粒子が細かく、非常に平滑な表面を形成できること、④ MOD 法で致命的となる結晶粒の欠落に伴うクレータ状の欠陥形成を抑制する効果が期待できること等である。図 2.3.4-15 に CeO_2 中間層の成膜に使用したマルチターン機構 Reel to Reel 式スパッタリング装置の外観を示す。高周波スパッタリング装置の初期検討として、 CeO_2 薄膜自己配向効果の確認を行った。



図 2.3.4-15 Reel-to-Reel 式連続高周波スパッタリング装置

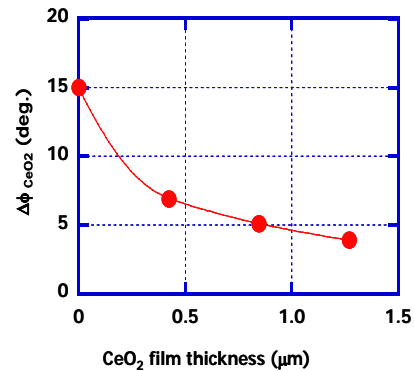


図 2.3.4-16 高周波スパッタリングで作製した CeO_2 中間層の自己配向効果

図 2.3.4-16 より、従来の PLD プロセスと同様に CeO_2 中間層の膜厚増加とともに二軸配向度が向上する自己配向効果が高周波スパッタプロセスでも生じていることが明らかになった。 CeO_2 中間層を $1 \mu\text{m}$ 程度成膜することにより、 CeO_2 中間層の二軸配向度 $\Delta\phi$ は 4 度以下が得られる。図 2.3.4-17 に (株) フジクラ殿より供給された IBAD-GZO 中間層基板の結晶粒二軸配向度と昭和電線の高周波スパッタリング装置で作製した CeO_2 中間層の結晶粒二軸配向度の関係を示す。

IBAD-GZO 中間層基板は、結晶粒二軸配向度 18 度以下のものが供給されており、スパッタリングプロセスにより 6 度以下の結晶粒二軸配向度を示す CeO_2 中間層基板を供給用線材として作製している。図 2.3.4-18 にこの CeO_2 中間層を使用した Y 系超電導線材の臨界電流値 I_c (cm 幅換算) の長手方向の分布を示す。全長にわたり I_c 値 $>200 \text{ A/cm-w} (@77\text{K, s.f.})$ の通電特性が得られ、局所的な I_c 値低下は膜の傷や付着物に起因することが分かっている。

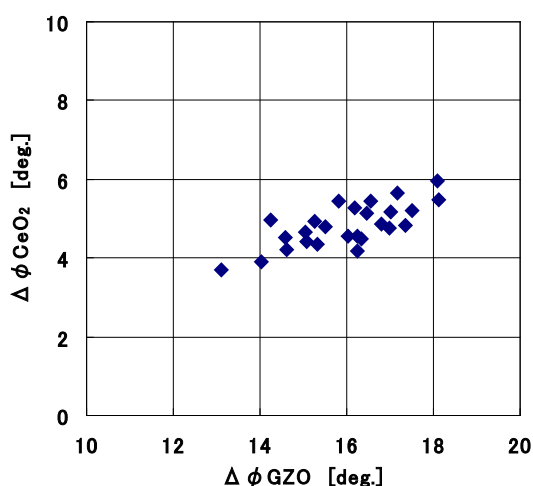


図 2.3.4-17 IBAD-GZO 中間層基板の二軸配向度

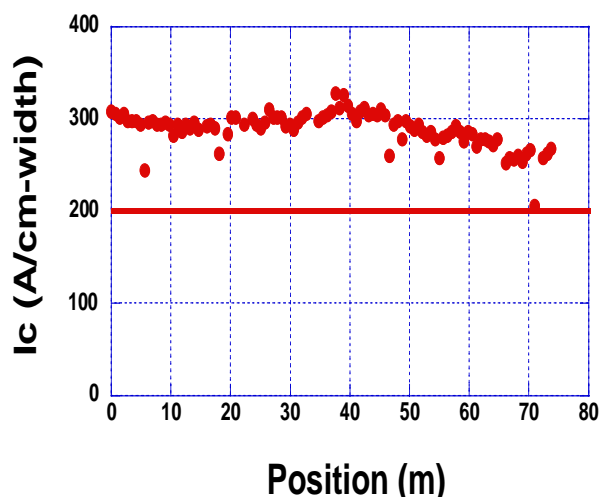


図 2.3.4-18 I_c の長手方向分布

(3) IBAD-MgO 中間層に対する検討

IBAD-GZO 中間層基板上に I_c 値 >200 A/cm-w の通電特性を持つ超電導層を TFA-MOD プロセスで形成するには $\Delta\phi$ が 6 度以下の結晶粒二軸配向性を持つ CeO_2 中間層が必要である。そのためには 18 度以下の IBAD-GZO 中間層基板の結晶粒二軸配向性が必須となるが、結晶粒二軸配向度で 16 度以下を得るためためには 1 μm 厚程度まで膜を成長させる必要があり、IBAD 中間層膜の製造速度を律速していた。平成 20 年頃に、IBAD 中間層の材料を GZO から MgO に変更することにより、薄い膜厚(高速成膜が可能)で GZO 並、あるいはそれ以上の結晶粒二軸配向性を得ることが判明した。IBAD-MgO 中間層への移行が急速に進んでおり、改めてスパッタプロセスによる CeO_2 中間層成膜条件の最適化を行う必要が生じた。このことから、IBAD-MgO 中間層の表面に LaMnO_3 (LMO) キャップ層を一層積層された基板の提供を受け、 CeO_2 中間層の成膜条件の検討を実施した。

IBAD-MgO 中間層基板上へ(200)配向した CeO_2 中間層を作製する成膜条件の最適化は中間層基板の製造ロットが変わると同一条件で成膜しても異なる表面形状を示し、成膜条件を絞ることは難航した。具体的な例を図 2.3.4-19 に示す。

同図右の写真に観える三角柱状の突起は (111)配向した CeO_2 の結晶粒である。(200)面の二軸配向度は、同図左の表面平滑性に優れるもので 2.7 度、左の突起が多いもので 3.7 度を示しているが、(111)配向した結晶が膜の表面に多く認められる試料では、その上層に超電導層を形成しても高い I_c 値を得ることができない。因みに左の写真の試料は I_c 値 $=240$ A/cm-w(@77K, s.f.)であるのに対し、右は I_c 値 $=0$ A/cm-w である。したがって、(111)配向した結晶粒の成長を抑制することが高特性の線材を得る必要条件となる。図 2.3.4-20 に 90 m 長の LMO キャップ層付きの IBAD-MgO 中間層基板に Reel to Reel 式のスパッタリング装置で連続成膜を

行った結果を示す。前端と後端で同等の表面平滑性が得られており、平成 24 年度においては本中間層基板を用いた 100 m 長基板において、 $I_c=250 \text{ A/cm-w}(@77\text{K, s.f.})$ 以上の値が得られている。図 2.3.4-21 に(111)配向した結晶粒周辺の TEM 観察写真の結果を示す。図中の 3 及び 4 の反射電子線回折像は、 CeO_2 層の(200) 配向と各結晶粒が二軸で方位が若干異なることが示された。 CeO_2 層の配向の乱れが小さくなるよう成膜条件を最適化した結果、成膜時の酸素濃度の増加が、(111)配向結晶粒の成長を抑制することが判明した。

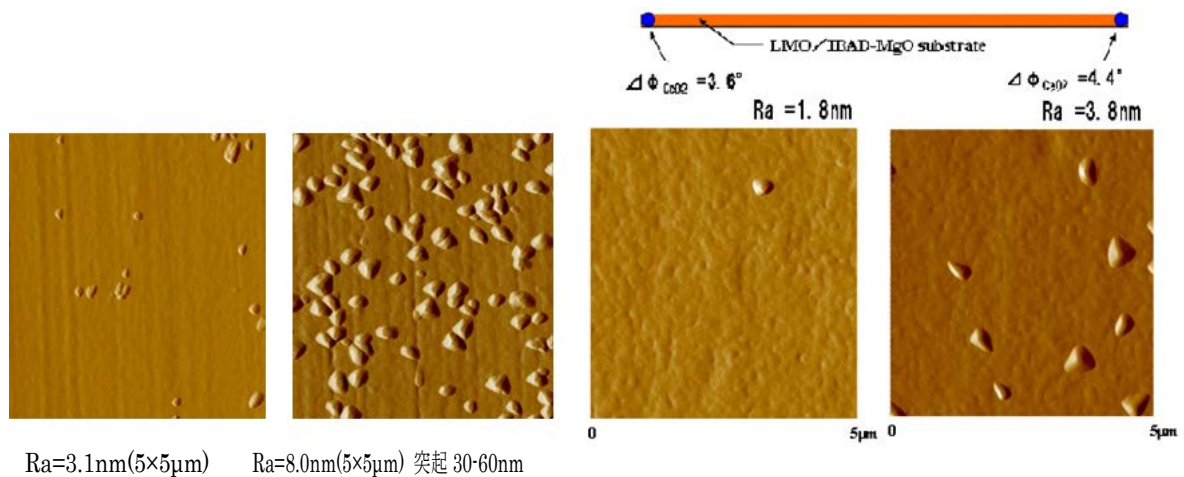


図 2.3.4-19 異なるロットの IBAD-MgO 中間層基板上に同一条件で作製した CeO_2 中間層の表面形状

図 2.3.4-20 IBAD-MgO 中間層基板上 (90 m) にスパッタリング法で作製した長尺 CeO_2 中間層

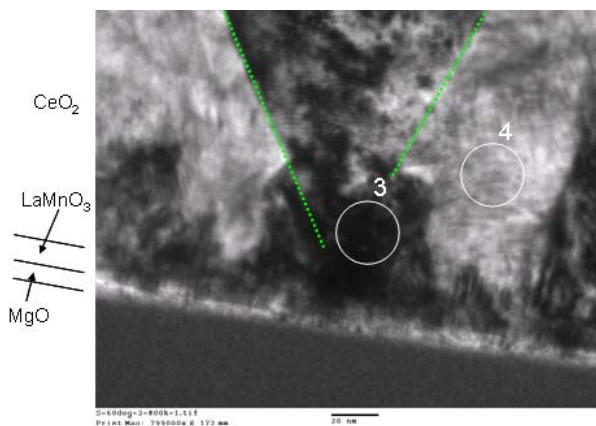


図 2.3.4-21 (111)配向した CeO_2 結晶粒の断面 TEM 写真

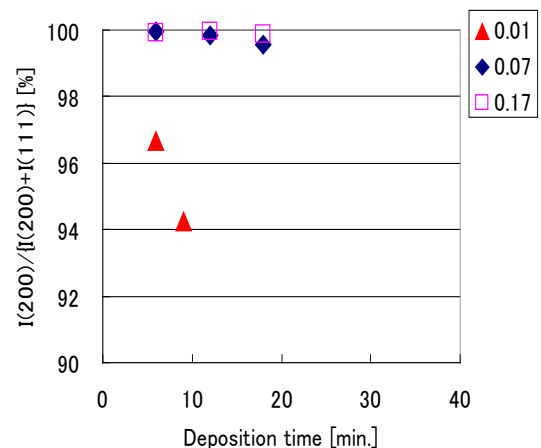


図 2.3.4-22 異なる酸素濃度で成膜した CeO_2 中間層の(200)面の配向率

図 2.3.4-22 に異なる酸素濃度で成膜した CeO_2 中間層薄膜の(111)面に対する(200)面の二軸配向率を成膜時間に対してプロットした結果を示す。酸素濃度を 0.01 %とした時は成膜時間の増加とともに (111)面の割合が増加するのに対し、他の条件では(111)配向の成長を抑制していることが分かる。

(4) まとめ

平成 20 年度より超電導変圧器対応線材開発に対し、5 mm 幅の Y 系超電導線材を総長で 1,571 m 供給した。

製品単長が長くなるにつれて、歩留りが低下している。これは、Y 系超電導線材長手方向に不定期間隔で出現する不良箇所起因するものである。これは、基板の傷等明らかな欠陥と認識されるもの以外に、中間層成膜時に付着した異物（剥離した CeO_2 の破片）を巻き込んだものや仮焼膜の作製において付着した異物に起因する物が多い。平成 22 年度はこれまでに明らかになった工程内で発生する欠陥の対策を行った。具体的には、超電導層成膜時の原料溶液塗布・仮焼工程の見直しとして、原料溶液塗布方法の変更及び仮焼時の T_{\max} の低温化を図った。これらの対策により、仮焼膜中に存在していた異物の抑制、ボイドの低減等により、仮焼膜の膜質が向上し、30～50 m 単長線材の歩留りが向上した。

3 分割スクライビング細線溝加工について、ISTEC の支援を受けることで、100 m 長における 3 分割スクライビング細線溝加工に成功した。

2.3.4-3 超電導変圧器対応安定製造技術線材の評価及び細線安定加工技術開発 (JFCC、ISTEC)

超電導変圧器で使用される線材は垂直磁場変動に起因した交流損失の低減のため、スクライビング細線溝加工による細線化が必須である。しかしながら、スクライビング細線溝加工を施すと、線材中の欠陥の大きさによっては細線化したフィラメントに通電できない場合も生じる。本項目では、レーザ照射と 2 段階エッチングにより、変圧器用として 300 m 長級の Y 系超電導線材で 5 mm 幅への切断及び 3 分割のスクライビング細線溝加工を安定して実施可能な技術を開発した（図 2.3.4-23）。また、切断及びスクライビング細線溝加工前後の線材の超電導特性を評価して、安定製造加工技術開発に資するとともに、変圧器対応 Y 系超電導線材安定製造技術開発にフィードバックすることにより幅方向及び長手方向の超電導特性の均一性向上に反映させた。

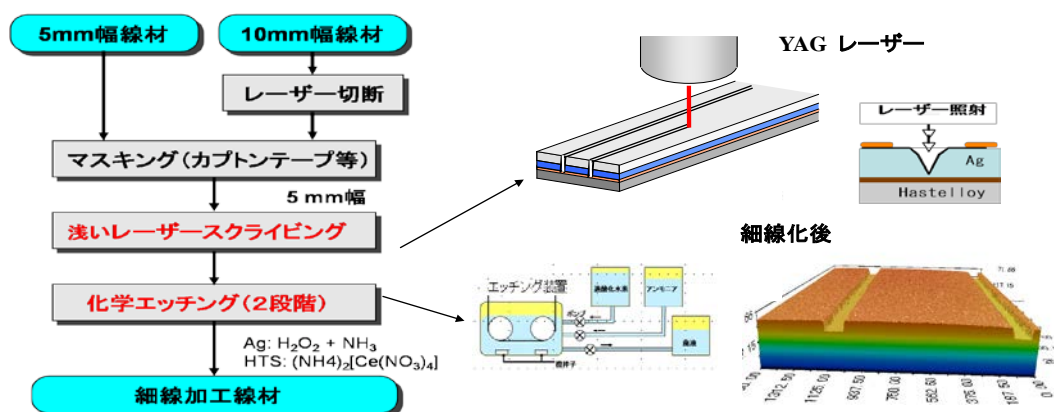


図 2.3.4-23 細線化のプロセスの概要

(1) 研究開発の経緯

2 MVA 級変圧器モデルの実証には、単長で最大約 300 m、総長約 10 km の 5 mm 幅の Y 系超電導線材の 3 分割スクライビング細線溝加工が必要となる。細線溝加工された Y 系超電導線材に対しては、65 K、0.01 T の磁場中で 50 A/5mm-w の I_c 値とともに、1 M Ω /cm 程度のフィラメント間絶縁抵抗が要求される。加工前の線材の I_c 値を 200 A/cm-w(@77K、s.f.) と仮定すると、許容される加工による I_c 値低下率は $50/(\alpha \sim 1.6)/100 = 0.3$ となる。ここで、 α は 65 K、0.01 T と 77 K、s.f. 条件における I_c 値の比率であり、加工後の I_c 値としてはフィラメントの最小 I_c 値の 3 倍を用いる。ISTEC では、前 NEDO 事業の「超電導応用基盤技術開発(第 II 期)」プロジェクトの中で、Nd:YAG レーザ (波長 355 nm) を用いた線材の切断技術、スクライビング細線溝加工技術を開発した。ここでは、レーザの照射パワーを上げることでより表面の安定化層からハステロイ™基板までの切断が可能であり、照射パワーを下げることでハステロイ™基板表面付近までのスクライビング細線溝加工ができる。しかしながら、本プロジェクト開始時のスクライビング細線溝加工実績としては、総長 70 m の 5 分割加工が行われたものの、単長では最大 4.5 m に留まっていた。また、高いフィラメント間電気抵抗を得るためには、レーザスクライビング後に溝中に残留した熔融金属のドロスを化学エッチングで除去することが有効であることが示唆されていたが、本プロジェクト開始前はバッチ式のエッチング処理の実績しかなく、またフィラメント間電気抵抗の再現性も悪い等、長尺線材に適用するためにはプロセス上の多くの課題があった。

本研究開発項目においては、最大単長約 300 m の線材に適用可能な安定した 5 mm 幅切断技術、3 分割スクライビング細線溝加工技術の確立をめざし、加工プロセス上の課題解決を試みた。この際、50 m 長 5 分割溝加工による交流損失の 1/5 低減を中間目標とする超電導機器用線材技術開発における細線加工技術開発と連携し、その成果を最大限利用することで研究開発を効率的に進めた。また、長尺化により必要となる可能性のあるスクライビング細線溝加工線材の補修技術、剥離防

止をねらいとした樹脂被覆技術についても超電導機器用線材技術開発における成果の適用検討を行った。

変圧器モデルで要求される細線溝加工長尺線材の性能を実現するためには、加工による特性劣化を抑制するとともに、超電導変圧器対応線材の長手方向及び幅方向の特性均一性の向上が必要となる。ここでは、超電導変圧器対応線材の加工前後の評価を各種の長尺線材評価装置を用いて行い、製造技術開発へのフィードバックを試みた。超電導変圧器対応線材としては、当初 IBAD-GZO 中間層を用いた PLD 線材及びMOD 線材の検討が行われたが、より低コスト化が期待できる IBAD-MgO 中間層への移行が検討され、本研究開発項目においても、スクライビング細線溝加工に対する適用性の検討を行った。

(2) 具体的成果

a 線材安定切断技術の開発

超電導変圧器は線材幅が 5 mm であることを前提として設計されている。しかし IBAD-PLD 線材は 10 mm 幅で作製されているため、欠陥や突起を発生させることなく安定的に 5 mm 幅に切断する技術を開発した。なお、IBAD-MOD 線材の 5 mm 幅分割加工については 2.3.4-2 節を参照されたい。

まず、銀層まで形成された IBAD-PLD 線材の切断に最適なレーザの選定を行った。比較を行ったのは、UV 波長領域 (355 nm) の Q スイッチ式 Nd:YAG レーザ及び IR 波長領域(1064 nm)のパルス式 Nd:YAG レーザである。それぞれのレーザ装置の特徴を表 2.3.4-11 にまとめた。

表 2.3.4-11 切断加工に用いたレーザの比較

レーザ波長	最大出力	パルス幅	周波数	励起光
355 nm	5 W(10 KHz)	< 50 nsec	1 – 50 kHz	LD (808 nm)
1064 nm	250 W	0.08–1.2 ms	500 Hz (Duty 15 %)	LD (808 nm)

どちらの方式でも切断による I_c 値の劣化は生じなかった。これらのレーザで切断した線材の断面を SEM 観察した結果を図 2.3.4-24 に示す。(a)は Q スイッチレーザ(355 nm)で切断した断面、(b)はパルスレーザ(1064 nm)で切断した断面である。レーザの入射は図の上側、すなわち銀安定化層からとした。図中で上、下とあるのは、10 mm 幅を 5 mm 幅に切断した際の上側部分と下側部分のことを示している。出力の大きなパルスレーザが切断に有利であると思われていたが、Q スイッチレーザでは断面が垂直に切り立っているのに対して、パルスレーザではレーザ入射方向から反対側に向かって傾斜 (テーパ) が掛かったような形状をしており、レーザ光が抜ける部分 (ハステロイTM側) では突起 (バリ) が発生している。このような突起が発生した原因は、パルスレーザのパルス幅が広いためハステロイTMが溶融し付着していること、及び繰り返し周波数が低いため付着したハステロイTMの

ドロスをレーザ光によって除去することができなかつたと考えられる。

変圧器対応線材では、切断後に様々な工程（銅安定化材料の貼付け、スクライビング時のマスキングテープの貼付け、絶縁テープの巻付け等）が想定されており、このような突起が発生していると銅テープのハンダ付けで片側が浮いてしまったり、マスク不良を生じさせてサイドのオーバーエッチが発生したり、絶縁テープに亀裂が入る等の支障をきたすおそれがあることから、切断に用いるレーザとしては Q スイッチレーザが好ましいという結論に至った。

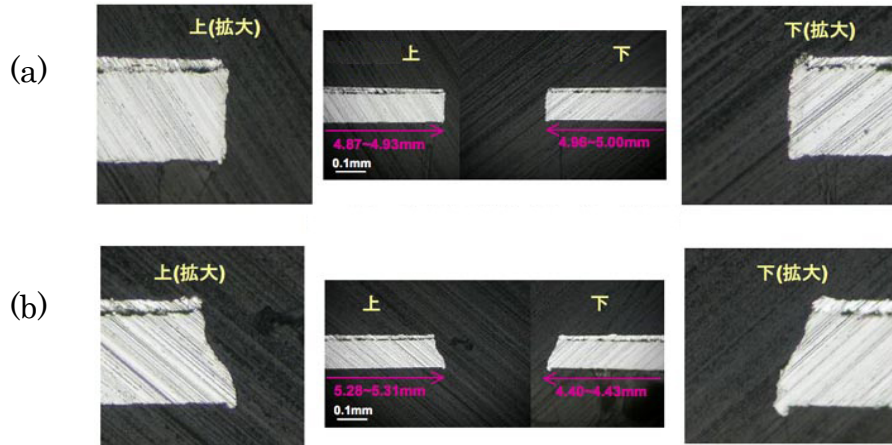


図 2.3.4-24 異なる方式のレーザ（表 2.3.4-7）による切断断面観察結果
 (a) 355 nm 波長の Q スイッチレーザ、 (b) 1064 nm 波長のパルスレーザ

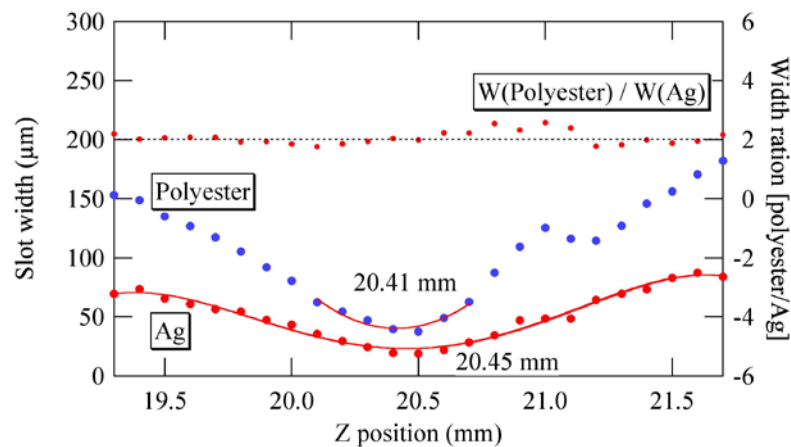


図 2.3.4-25 線材とレーザ光学系との距離 Z と切断幅との関係

上記のように、切断に Q スイッチレーザを用いる方が突起等の発生が少ないことが判明したので、次に、フォーカス位置の最適化を行った結果を図 2.3.4-25 に示す。今回使用した Q スイッチレーザは光学集光方式であるため、被切断線材とレーザ光学系との距離 (Z) によってビーム径が変化する。そこでビーム径と距離 Z との関係性を測定し、切断により除去される線材の量を可能な限り低減するための条件を検討した。ここで、ビーム径の大きさを測定するために線材の表面にポリエ

ステルテープを貼付し、テープ表面及び銀層に生じた切断幅をプロットしてある。ポリエステルと銀での切断幅の比はほぼ一定であり、ビーム径は相似形の変化をしていることが分かる。この結果より、 $Z=20.45$ mm の場合に最小幅 $19 \mu\text{m}$ となることが判明した。この条件はレーザービームが最も細く絞られてエネルギー密度が高くなる条件であることから、切断の高速化も期待される。切断の最適条件は $Z=20.45$ mm であることが判明した。

Q スイッチレーザー(表 2.3.4-11 中の 355 nm 波長のレーザー)での長尺線材の 5 mm 幅切断加工をより短時間で行うため、上記のレーザー切断の高速化の検討も行った。表 2.3.4-12 に $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7/\text{CeO}_2$ バッファ層上に成膜された 3 種類の線材 (TFA-MOD 線材、out-of-plume の PLD/IBAD 線材、in-plume の PLD/IBAD 線材) での線材切断結果を示す。この結果から、銀安定化層の膜厚で多少の違いはあっても切断速度をこれまでの 7.2 m/h から 25.2 m/h まで高められることが判明した。しかしながら、高速化により切断面にバリが発生する可能性も除外できないので、中間評価時点では、変圧器プロジェクトで使用される線材の安定的加工においてはそれまでと同じ 7.2 m/h の切断速度を維持し、切断速度の高速化は平成 21 年度後半に導入した出力の高い Q スイッチファイバーレーザー (波長 1064 nm、繰り返し周波数 50 - 100 kHz) を用いて 100 m/h 以上の高速切断をめざして検討を行った。

表 2.3.4-12 線材切断速度の高速化の検討結果

線材種類	Ag 厚 (μm)	線材搬送速度 (m/h)							
		7.2	10.8	14.4	18.0	21.6	25.2	28.8	32.4
TFA-MOD 線材	20	切断可能領域						切断不可領域	
PLD/IBAD 線材 (out-of-plume)	8	切断可能領域							切断不可領域
PLD/IBAD 線材 (in-plume)	10	切断可能領域						切断不可領域	

表 2.3.4-13 には、上述のようにバリ発生がない 7.2 m/h の条件で変圧器用提供線材の 5 mm 幅切断加工を行った実績を示す。中間評価時点までに総長で 5 km 以上の加工を行った。 5 mm 幅切断においては、線材受け入れ時及び切断加工後に必ず連続ホール素子法を用いた長手方向の I_c 値分布の評価を行うことを取り決め、表 2.3.4-13 に記したすべての線材で切断加工後に I_c 値の目立った劣化は発生しないことが確認した。

表 2.3.4-13 レーザによる線材切断実績

日付	製作	長さ	加工	日付	製作	長さ	加工	日付	製作	長さ	加工
2009.4.15	フジクラ	200m	2分割	2009.7.13	ISTEC	2.4	2分割	2010.1.28	ISTEC	2.5	5分割 (2mm幅)
2009.4.20	フジクラ	300m	2分割	2009.7.26	フジクラ	94	2分割	2010.2.2	ISTEC	2.5	5分割 (2mm幅)
2009.4.27	フジクラ	320	2分割	2009.7.28	フジクラ	251	2分割	2010.2.10	ISTEC	49.5	5分割 (2mm幅)
2009.4.30	フジクラ	230	2分割	2009.7.30	フジクラ	270	2分割	2010.3.4	ISTEC	100	2分割
2009.5.11	フジクラ	278	2分割	2009.8.6	ISTEC	11	2分割	2010.4.14	フジクラ	120	2分割
2009.5.25	フジクラ	250	2分割	2009.8.6	フジクラ	250	2分割	2010.4.15	フジクラ	125	2分割
2009.5.27	フジクラ	300	2分割	2009.8.10	ISTEC	100	両端 1mm 中央4分割	2010.5.28	フジクラ	51	2分割
2009.5.28	フジクラ	221	2分割	2009.8.24	フジクラ	300	2分割	2010.5.28	フジクラ	131	2分割
2009.5.29	フジクラ	120	2分割	2009.8.26	フジクラ	286	2分割	2010.5.31	フジクラ	56	2分割
2009.6.12	ISTEC	134	2分割	2009.9.16	フジクラ	300	2分割	2010.6.7	ISTEC	200	2分割
2009.6.29	ISTEC	2	2分割	2009.11.6	ISTEC	55	2分割				
2009.6.29	ISTEC	30	2分割	2009.11.19	ISTEC	40	2分割				
2009.7.1	フジクラ	15	2分割	2009.12.28	ISTEC	2	5分割				
2009.7.6	ISTEC	10	2分割	2010.1.6	ISTEC	50	2分割			合計	5258.9 m

b 線材安定スクライビング細線溝加工技術の開発

表 2.3.4-14 には、長尺線材のレーザスクライビング細線溝加工の技術課題と開発内容、プロジェクト開始時の状況と中間評価時点での到達点をまとめた。

表 2.3.4-14 細線加工の技術課題と進捗状況

技術課題	プロジェクト開始時	開発内容	中間評価時点
I_c 残留率の向上	31 - 52 %	プロセス改良 ・弱出力レーザー照射 ・2段階エッチング ・ドロス低減	短尺 3分割 10-15 % 5分割 16-25 %
絶縁確保	分布あり (1 Ω ~ 1 MΩ)	・溝幅低減 ・マスクテープ選定 ・洗浄工程の追加	1 MΩ/cm 以上 (30 m 3分割)
エッチング時間	30分/4.5 m (9 m/h)	2段階エッチングの改良	エッチング速度 46m/h
長尺エッチング	バッチ式 (最長 4.5 m)	線材加工装置開発 ・RTR マスク装置 ・RTR エッチング装置	長尺線材加工装置のプロトタイプを開発
長尺加工実績	最長 5 m	長尺加工装置の活用	120 m 3分割
剥離防止	高温アニール	被覆検討	I_c 劣化の少ないポリアミドイミド被覆を実現

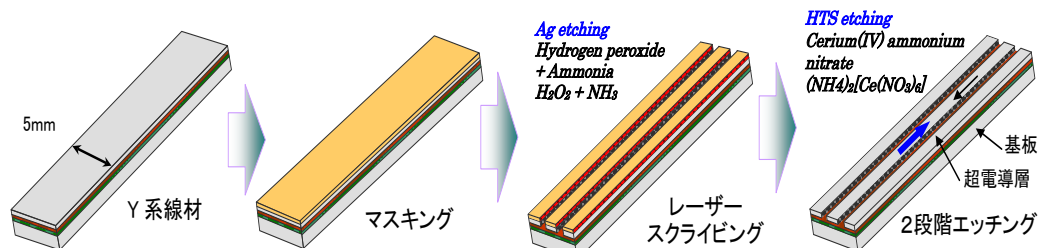


図 2.3.4-26 改良型レーザスクライビングプロセスの概要

本プロジェクト開始時には、レーザ照射によりハステロイ™ 基板表面に達する溝を形成していたが、熔融金属のドロスが溝に残留し、フィラメント間の電気絶縁が取れないという問題があった。フィラメント間の絶縁抵抗を確保するためには、硝酸セリウムアンモニウム溶液による化学エッチングでドロスとその周囲の超電導層を除去する必要があるが、エッチング時間が長くなると、オーバーエッチングのため I_c 値低下率が大きくなるという問題があった。超電導機器用線材技術開発における低交流損失線材作製技術開発（2.4.3 節）で詳細は述べるが、この問題を解決するため図 2.3.4-26 に示すようにプロセスを改良した。この改良プロセスでは、レーザ照射のパワーを絞り、銀安定化層の途中までスクライビングを行い、その後に過酸化水素とアンモニアの混合溶液で銀層を、硝酸セリウムアンモニウム溶液で超電導層を 2 段階でエッチングした。この方法により、ドロスの発生が抑制でき、溝幅の低減が可能になるとともに、化学エッチング時間を 1/5 程度に大幅に短縮できた。図 2.3.4-27 には、改良プロセスにより作製したフィラメント端部の断面 SEM 像を示す。超電導層のオーバーエッチングが 10 μm 以下に抑えられていることが分かった。

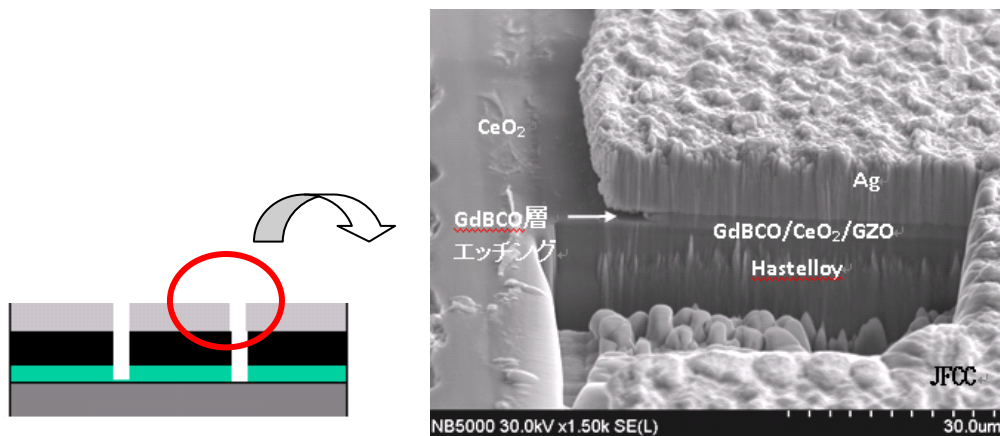


図 2.3.4-27 改良型プロセスで形成した溝周辺の断面 SEM 観察結果

エッチング加工は本プロジェクト開始前にはバッチ式で行われていたが、長尺線材の加工を安定にかつ高速に行うため、全プロセス工程の Reel to Reel 化を行った。図 2.3.4-28 には、開発したマスキングテープ貼合せ装置、エッチング装置の写真を示す。この Reel to Reel 式エッチング装置の導入により、銀層及び超電導層のエッチングをそれぞれ 40 m/h 以上の速度で行うことが可能になった。

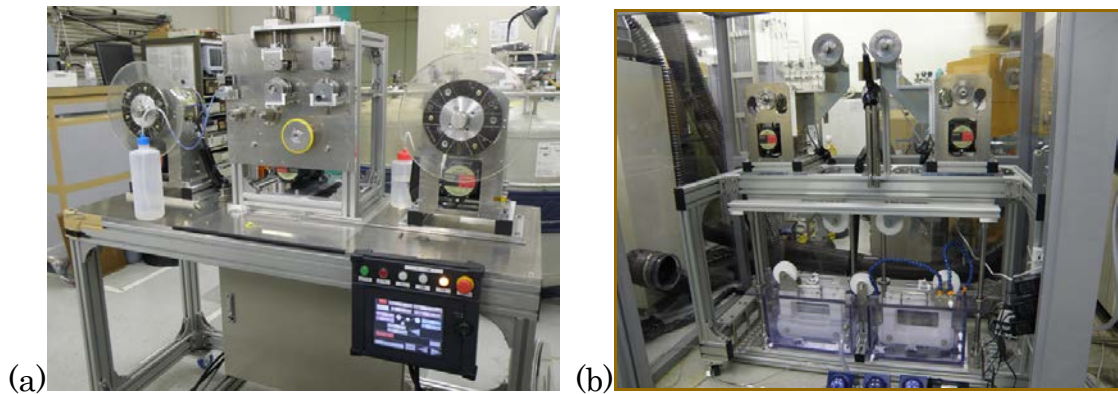


図 2.3.4-28 開発した(a)マスキングテープ貼合せ装置と(b)RTR エッチング装置

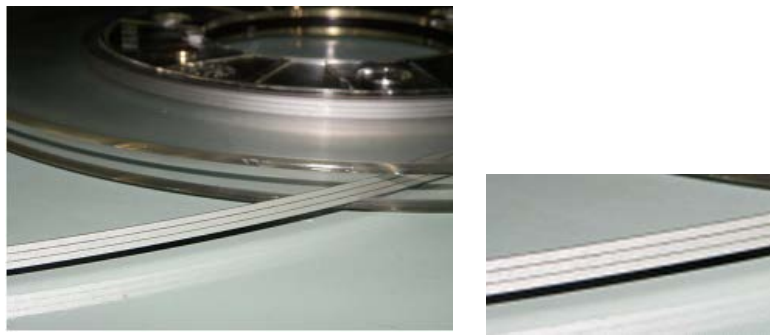


図 2.3.4-29 30 m 長 3 分割スクライビング溝加工線材の写真

長尺線材のスクライビング細線溝加工のもう一つの大きな課題は、エッチングのためのマスキングである。マスキングとしては、例えばフォトレジストのような樹脂を塗布乾燥し用いる方法もあるが、低コスト化の観点及びプロジェクト開始前の実績から接着剤付きテープによるマスキングを採用した。しかしながら、従来採用していた接着剤付きカプトンテープは 20 m 長までしか入手ができないため、新たな材料検討を行った。その結果、300 m 長まで対応可能なテープ素材として 12.5 μm 厚のポリエステル（ゴム系接着剤使用）と 12 μm 厚のポリプロピレン（アクリル系接着剤）を選択し、長尺線材加工の検討を行った。図 2.3.4-29、図 2.3.4-30 には、30 m 長の PLD GdBCO 線材（中間層は IBAD-GZO）に対する加工後の写真、加工前後の電流-電圧 (I - V) 特性をそれぞれ示す。マスキングテープとしては、ポリエステルを用いた。加工前の I_c 値 = 118 A/cm-w(@77 K, s.f.) に対し、加工後の 3 フィラメントの総 I_c 値は 101 A/cm-w(@77 K, s.f.) であり、その低下率は 14.7 % であった。加工による超電導層の断面積の低下率は 12.4 % と見積もられた。したがって、加工によるフィラメント I_c 値の劣化率は 2.3 % と低く抑えられていることが証明された。一方、機器応用の際に重要となる最小フィラメント I_c ($I_{c \text{ min}}$) 値の 3 倍の値は 89.4 A で、加工前の I_c 値に対する減少率は 24.3 % である。この値は、線材特性の均一化やフィラメント幅の均一化により改善可能と考えられるが、65 K、0.01 T での要求仕様である 50 A/5mm-w を十分満たしている。また、フィラメント間抵抗としては、いずれのフィラメント間も 100 k Ω 以上

の値を示し、1 cm 長さあたりに換算すると 300 MΩ という十分な絶縁特性が得られていることが分かった。

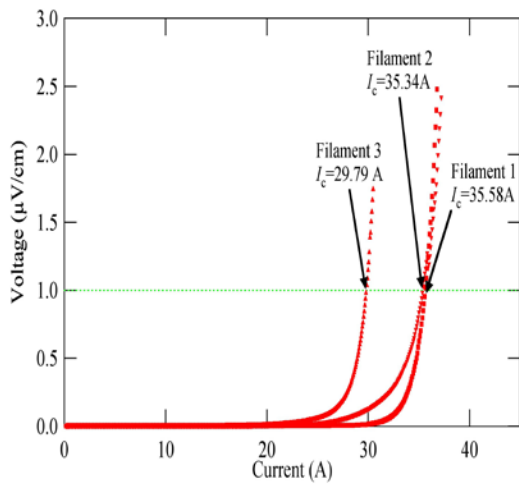


図 2.3.4-30 PLD GdBCO 線材の 3 分割後の各フィラメント I - V 曲線

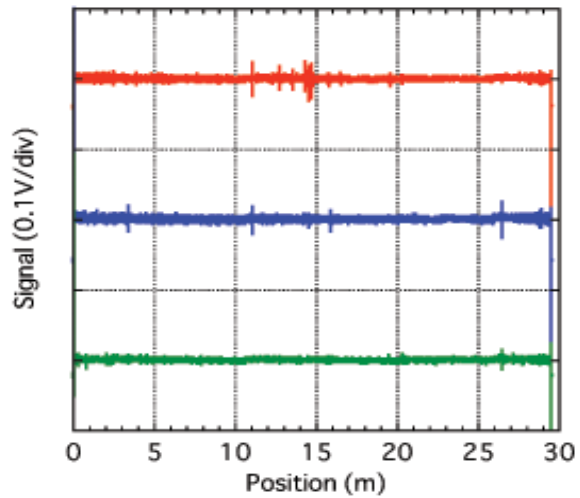
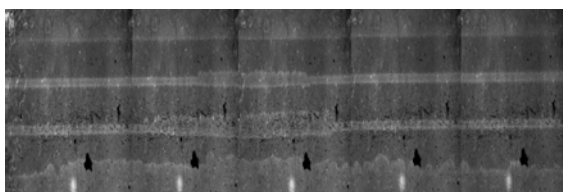


図 2.3.4-31 30 m 3 分割線材の SQUID グラジオメータによる評価結果

加工した 30 m 長線材に対し、Reel to Reel の SQUID 検査装置で欠陥評価を行った結果を図 2.3.4-31 に示す。最も I_c 値の低いフィラメント 3 に対しては、14.5 m の位置に欠陥に起因する連続的な信号が見られた。また、このフィラメント及び中心のフィラメント 2 に対して、11 m の位置に比較的シャープな信号が見られた。これらの信号位置に対して線材の磁気光学 (MO) 観察を行った結果を図 2.3.4-32 に示す。フィラメント 3 に見られた連続的な信号はハンドリングにより導入された部分的な剥離、またフィラメント 1 と 2 で見られた信号は、両者にまたがる局所的に超電導性が低下した欠陥に起因するものであることが分かった。

(a)



(b)

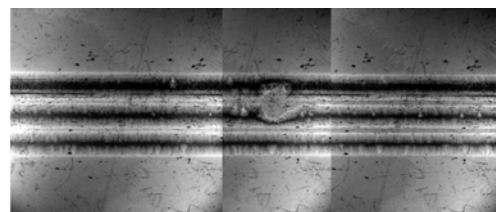


図 2.3.4-32 SQUID 検査装置で見つかった信号位置に対する MO 観察結果 (a) 14.5 m 付近、(b) 11 m 付近

Reel to Reel の SQUID 検査装置は、このようなフィラメントのマクロ欠陥に起因する信号を最高で 80 m/h の速度で検出することができ、加工技術へのフィードバックとともに、長尺加工線材の要補修箇所の検出に大いに役立った。スクライビング細線溝加工された本線材は、絶縁処理後に過電流試験に用いられ、過電流に対する耐性が実証された。

IBAD-MgO中間層は、IBAD-GZO中間層に比べはるかに薄い膜厚で高い結晶粒二軸配向度が得られるため、CeO₂自己配向キャップ層の厚さの薄化が可能で、高速製造も可能となり、極低コスト線材用の中間層として大いに期待された。一方、低コスト化のため中間層全体の厚さを低減することにより、ハステロイ™基板と超電導層との電気絶縁性の低下や金属基板を通してのフィラメント間電気絶縁抵抗の低下が懸念される。変圧器用線材としての適用性を評価するためIBAD-MgO中間層上のPLD-GdBCO線材に対し、銀安定化層とハステロイ™基板間の電気抵抗を評価した結果を図2.3.4-33に示すが、評価面積を広くした場合においても0.2⁻¹ MΩcm²の特性抵抗が得られている。この特性抵抗値を用いると、基板を介したフィラメント間抵抗は300 m長で60 Ω以上と見積もられ、変圧器応用に十分な値となる見通しが得られた。実際に3分割スクライビング細線溝加工を行った15 cm長の短尺線材の各フィラメントのI_c値とフィラメント間抵抗を表2.3.4-15にまとめる。フィラメント間抵抗は最小でも0.83 MΩであり、1 cm当たり12 MΩと十分高い絶縁抵抗が得られることが確認された。また、総I_c値低下率、I_{c min} × 3の低下率ともにIBAD-GZO中間層を用いた線材と同等の特性が得られることも確認された。

表2.3.4-16には、中間評価時点までに5 mm幅3分割のレーザスクライビング細線溝加工を行った長尺線材の実績をまとめる。十分高いフィラメントI_c値及びフィラメント間抵抗が得られる歩留りは約50%である。歩留り低下の主な原因としては、スクライビング溝への接着剤の残留によるエッチング不良で引き起こされるフィラメント間絶縁不良、マスキングテープ着脱や複数回のI_c測定の際のハンドリングミスによるフィラメントI_c値不良がある。表2.3.4-16に示した30 m長線材の加工の際にはゴム系接着剤付きのポリエステルテープを用いたが、ゴム系接着剤は完全な除去が難しく、後述する補修工程での線材I_c値劣化の原因となる可能性がある。

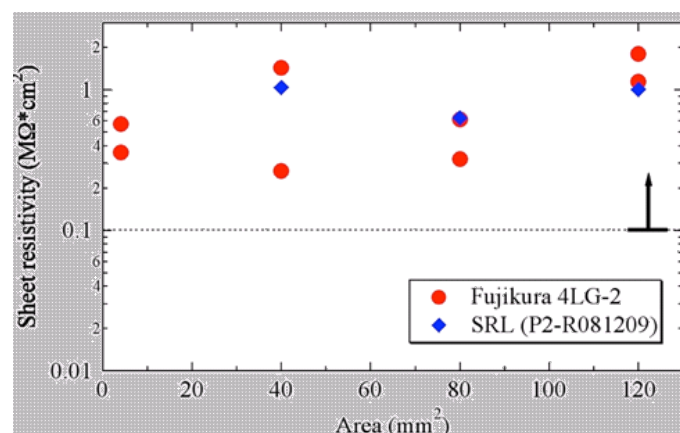


図 2.3.4-33 IBAD-MgO 中間層上線材の裏面抵抗

表 2.3.4-15 3分割スクライビング細線溝加工した 15 cm 長 IBAD-MgO PLD
線材の各フィラメントの I_c 及びフィラメント間抵抗

	フィラメント		溝		絶縁抵抗	
	幅	I_c		幅		
F1	1548 μ m	54A	F1~F2	219 μ m	F1~F2	0.83M Ω
F2	1450 μ m	50.5A	F2~F3	226 μ m	F2~F3	1.61M Ω
F3	1426 μ m	44A			F3~F1	2.06M Ω

表 2.3.4-16 長尺線材の 3 分割スクライビング細線溝加工実績

PET: ポリエステル, PP: ポリプロピレン

線材番号	長さ (m)	分割 数	I_c (A)					最小 I_c × 分割 数(A)	最小 I_c 残留率 (%)	加工後 I_c 残留率 (%)	フィラメント間 平均抵抗 (M Ω /cm)	マス ク材	判定
			加工前	F1	F2	F3	加工後 合計						
#1	30	3	118.1	29.8	35.3	35.6	100.7	89.4	76	85	294.7	PET	○
#2	19	3	128.0	35.7	45.5	30.9	112.1	92.7	72	88	0.0	PET	×
#3	29	3	127.8	10.0	26.2	13.0	49.2	30.0	23	38	0.0	PET	×
#4	15	3	140.0	39.8	44.3	41.0	125.1	119.4	85	89	5.0	PP	○
#5	30	3	154.6	30.7	41.8	53.3	125.8	92.1	60	81	1.9	PP	○
#6	30	3	175.1	33.1	72.7	61.9	167.7	99.3	57	96	0.0	PP	×
#7	19	3	135.5	42.8	35.6	30.5	108.9	91.6	68	80	0.1	PP	○
洗浄工程追加以降													
#8	120	3	105.0	17.7	33.6	18.2	69.5	53.1	51	66	1.0	PP	○
#9	120	3	149.6	15.4	8.3	3.7	27.4	11.1	7	18	0.8	PP	×
#10	110	3	→	27.7	49.3	51.6	128.6	83.1	56	86	0.8	PP	○

また、除去がより容易なアクリル系接着剤付きのポリプロピレンテープを用いても溝に接着剤が部分的に残留する可能性があるため、その洗浄クリーニングによる除去を検討した。この方法を取り入れてスクライビング細線溝加工を行った 120 m 長 PLD GdBCO 線材の加工前後の I - V 特性を図 2.3.4-34 に、フィラメント間電気抵抗等の値を表 2.3.4-16 に示す。

図 2.3.4-35 には、29 m 長の TFA-MOD 線材に対する 3 分割スクライビング細線溝加工前後の I - V 特性を示す。このように、開発したスクライビング細線溝加工技術は TFA-MOD 長尺線材に対しても適用できることが分かった。

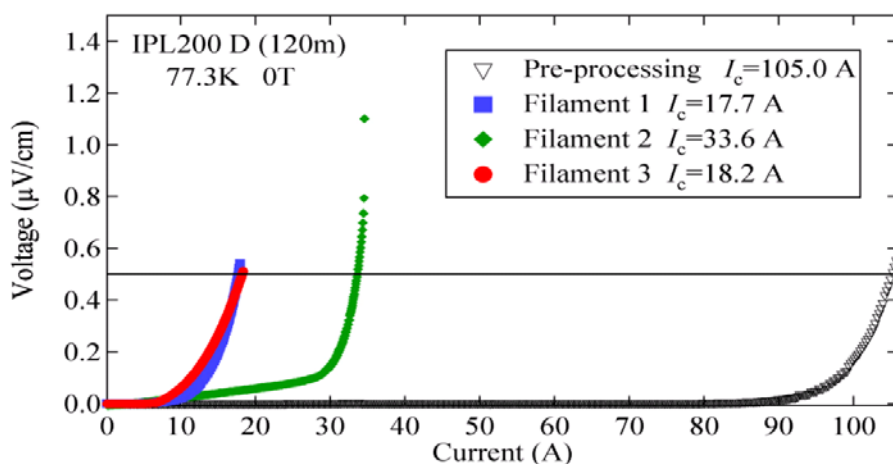


図 2.3.4-34 100 m 長の線材 3 分割

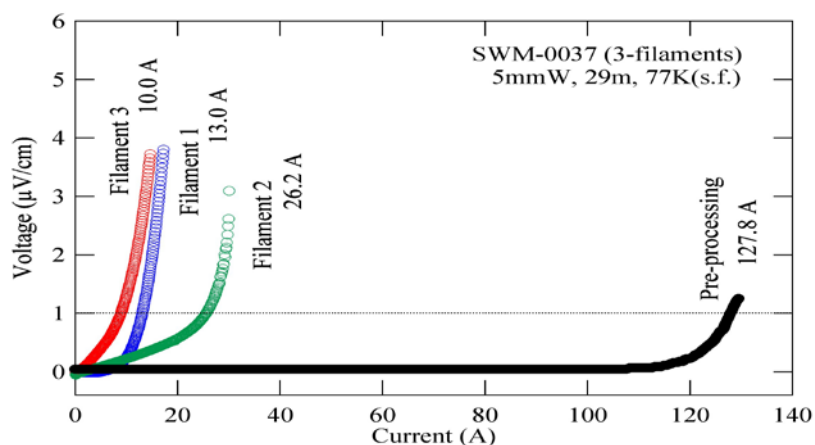


図 2.3.4-35 29 m 長の線材 3 分割

2 MVA 級変圧器モデルの一次巻線に用いられる 3 分割スクライビング細線溝加工線材の単長は 250-300 m であり、例えば加工後に I_c 値の局所的に低い欠陥箇所が見つかった場合、これを補修することで機器用線材の歩留りを向上させることが期待できる。前 NEDO 事業の「超電導応用基盤技術開発(第 II 期)」プロジェクトの中で、Y 系超電導線材に対する銀拡散法による接続・補修技術を開発した。補修の場合、線材の欠陥箇所に正常な線材パッチをそれぞれの銀安定化層を対向させるように置き、10-20 MPa の圧力を加えながら 400 °C 程度の温度で熱処理することにより電流の迂回路を作ることができる。銀安定化層の接触面での接続抵抗は 10-20 $n\Omega\text{cm}^2$ 程度であり、補修部での発熱は大きな問題とならない。図 2.3.4-36 には、短尺の 3 分割加工 GdBCO 線材に対する補修前後の I - V 特性の例を示すが、人工欠陥を導入したフィラメントに対して補修により I_c 値が回復していることが分かった。

レーザスクライビング細線溝加工を行った線材の各フィラメントは両端部がエッチングされ超電導層が露出されているため、剥離強度の低下や水分付着による劣化等の懸念がある。このような加工線材を樹脂で被覆し保護する研究開発を細

線加工技術開発の中で実施した。樹脂の材質としては、ハンダ付け等の熱に対する耐性、電気絶縁性、部分除去の容易さの観点からポリアミドイミドに絞り込んで検討を行った。図 2.3.4-36 には、短尺の 3 分割加工線材に対し、ポリアミドイミド樹脂を数回にわたり 15 μm 程度 250°C で焼き付けた後の表面写真も示す。また被覆前及び被覆後（電極部分の被覆除去工程後）の I - V 特性の変化を図 2.3.4-37 に示す。これより、 I_c 値の低下は 5 % 程度に抑えられることが分かった。

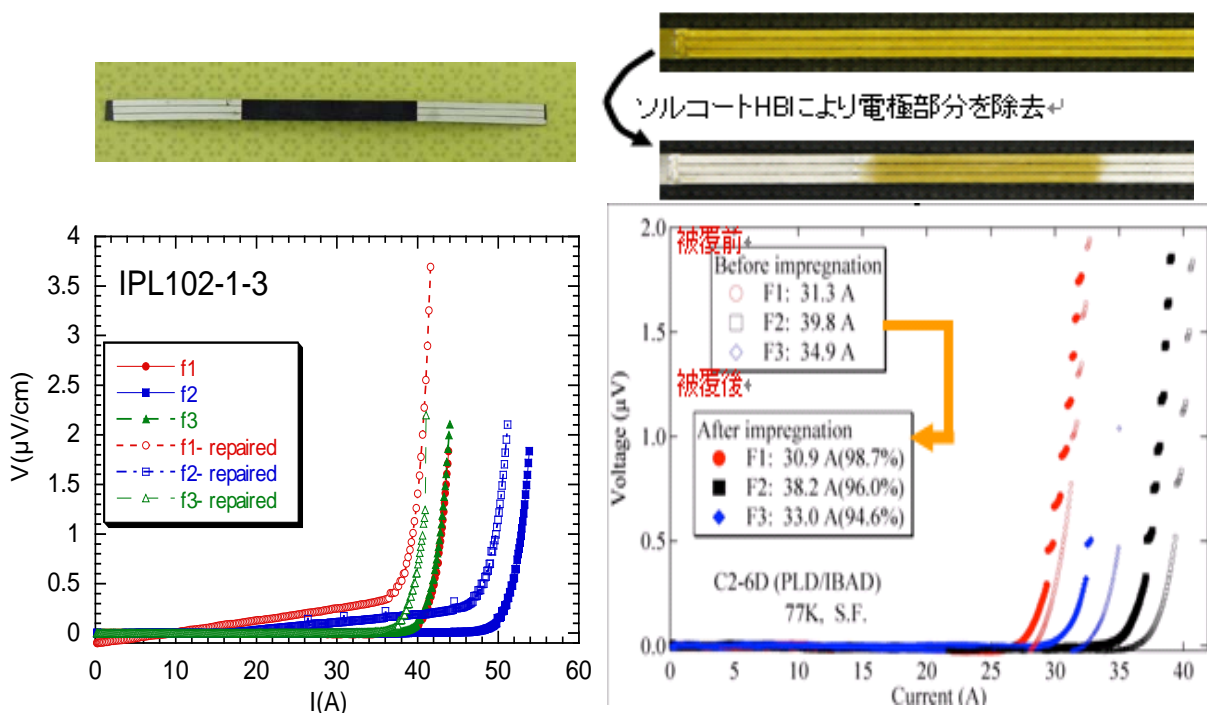


図 2.3.4-36 3分割スクライビング溝加工線材の補修前後の I - V 特性例

図 2.3.4-37 ポリアミドイミド被覆した線材の I - V 特性

c 安定製造技術線材の評価実績

変圧器用の安定製造技術長尺線材は全て連続ホール素子法による非接触の I_c 評価を行った。連続ホール素子法においては、 I_c 値の長手方向分布に加え、幅方向の均一性もある程度評価することができる。図 2.3.4-38 には、IBAD-PLD 線材について代表的な評価結果を示す。(a)は 10 mm 幅線材の片側 5 mm に I_c 値の低下した領域が断続的に見られる例であり、(b)はプロセス改良により 10 mm 幅全体での幅方向の均一性が改善された線材の例である。また、安定製造技術長尺線材の欠陥分布を評価しプロセスにフィードバックするために MO 観察の評価も行った。

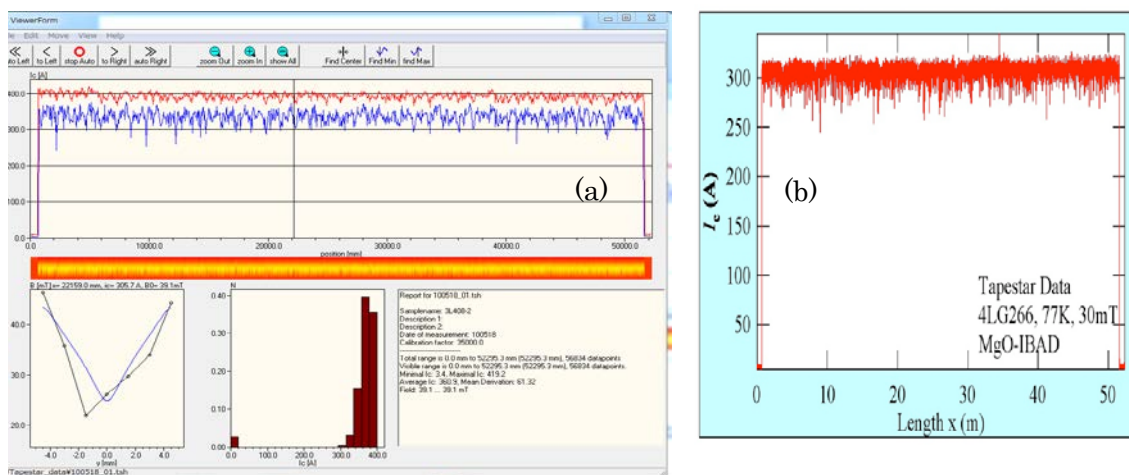


図 2.3.4-38 ホール素子法による I_c の非接触評価例

d スクライビング細線溝加工線材の長尺化と安定供給

上述したように、スクライビング細線溝加工線材の安定製造方法としてレーザー照射と2段階エッチングの組み合わせ(図 2.3.4-26)が有効であることが判明したので、次にこのプロセスを300長級の長尺線材に適用し、加工速度及び歩留りを向上させるための改良を行った。

図 2.3.4-26 の加工方法を長尺線材に適用した場合の歩留りを表 2.3.4-17 に示す。

表 2.3.4-17 初期のレーザスクライビング法による長尺線材加工の歩留り

Deposition method	Kind of IBAD layer	Total length [m]	Successful length [m]	Yield rate [%]
PLD	GZO	75.9	75.9	100
PLD	MgO	128.5	32.5	25.3
MOD	GZO	47.9	18.9	39.5
Summation		252.3	127.3	50.5

この表から総長約250mの加工における歩留りが約50%と非常に低いことが分かった。これを解決する方法として、レーザ光源のビーム形状の変更及び洗浄工程の追加を行った。

表 2.3.4-17 のように歩留りを低下させている一つの原因として、レーザ照射後のマスク材料の残渣が影響していることが分かった。図 2.3.4-39 にレーザ照射後の溝部の様子の光学顕微鏡写真(a)及びエッチングによって溝形成が終了した後のSEM写真(b)を示す。上述したようにマスク材料としては、アクリル系の粘着剤を用いているが、アシストガスで吹き飛ばしながらのレーザ照射だけでは接着強度の高い粘着剤を完全に吹き飛ばすことができないことを示している。そのため、粘着剤の残った部分はエッチングできずに(b)のように超電導層が島状に残留してしま

ってフィラメント間抵抗を低下させ、そのため歩留りが下がってしまった。そこで、レーザー照射後に洗浄工程を加えた結果が(c)(d)である。このように洗浄によって超電導層の残留を減少させることに成功した。

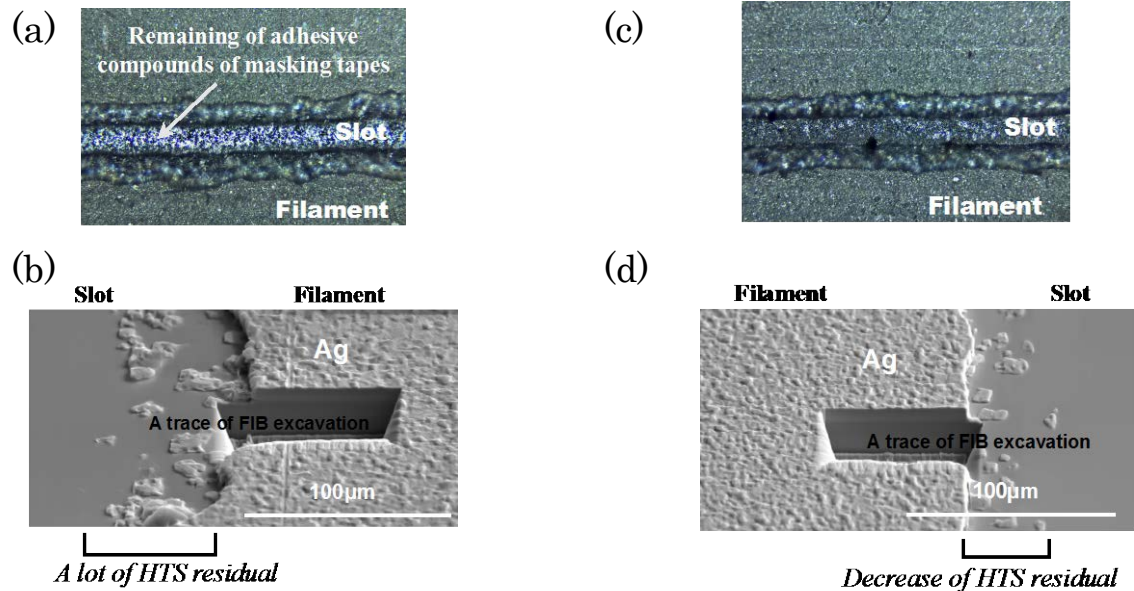


図 2.3.4-39 洗浄工程追加による溝内の超電導残留物の減少

我々が用いている UV 波長域のレーザーは、YAG レーザの基本波(1,064 nm)を 3 倍高調波に変換して紫外領域のビームを取り出している。そのため、YAG レーザの非常に強いガウシアン成分を反映してビーム中央部の出力が高く、点状のスポットとなっている。これではわずかな線材搬送の揺らぎ等でスポット中心が幅方向にずれたり、搬送速度の微妙な変化によって照射されていない箇所が発生してしまう。そこで、途中の光学系にシリンドリカルレンズを挿入して、線材の長手方向にビームを引き延ばした楕円形状ビームを用いることとした。図 2.3.4-40 にその概念図を示す。

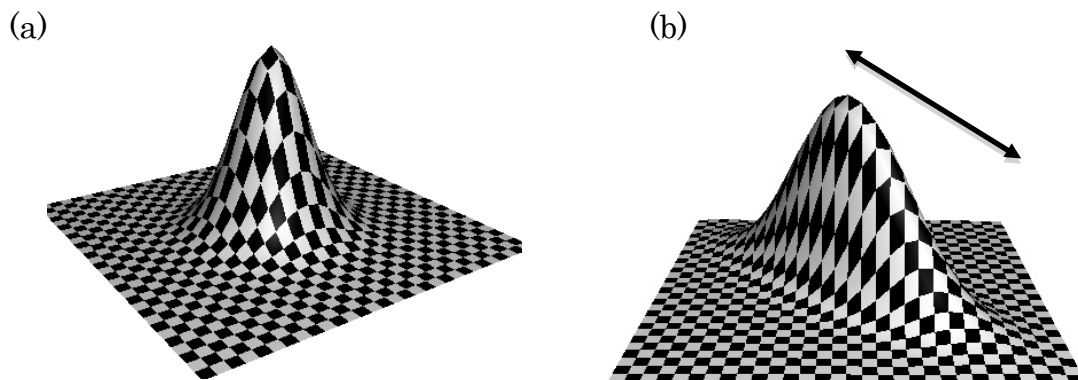
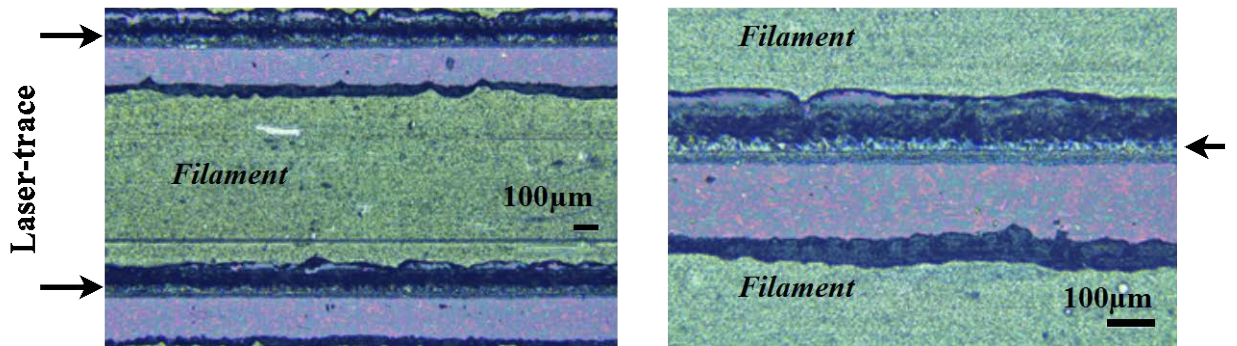


図 2.3.4-40 レーザスクライビング光源を点状(a)から楕円形(b)に変更。ここで(b)の矢印は線材の長手方向を表している

(a) 点状レーザー光源によるスクライビング溝



(b) 楕円形レーザー光源によるスクライビング溝

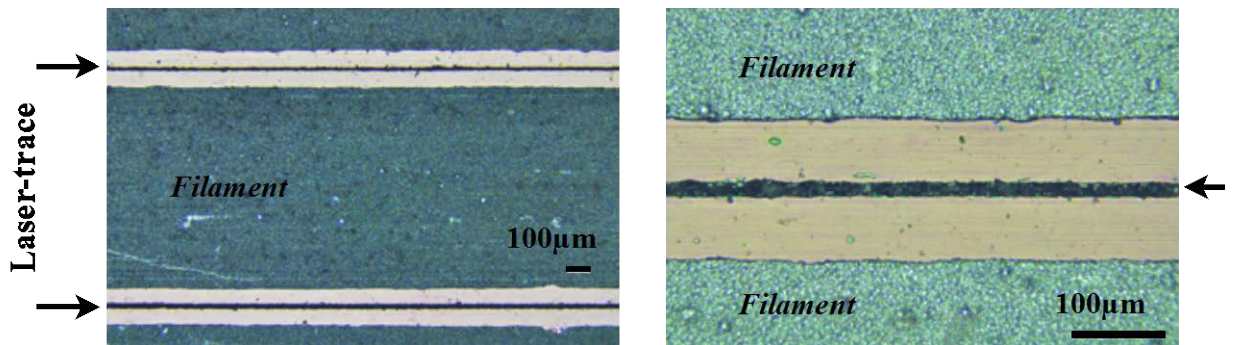


図 2.3.4-41 レーザ光源の違いによるスクライビング溝の品質差

図 2.3.4-41 から明らかなように、楕円形状ビームを用いることによってレーザービームの中心が溝の中心に位置し、さらに溝とフィラメントの境界部分が直線的になっていることが分かる。このように、スクライビング細線溝加工の品質向上に楕円形状ビームが有効であることが分かった。楕円形状ビームはスクライブだけでなく、線材の切断速度の向上にも役立っている。中間評価段階で最大 7.2 m/h であった切断速度は、27~54 m/h まで向上した。また、レーザー照射速度も 54 m/h から 180 m/h へと向上した。

これらの改良点を加えた結果、表 2.3.4-18 に示すとおり、総長 13,000 m 以上の加工を行って加工に成功した線長が 9,000 m 以上であり、歩留りが 50 % から 67 % まで向上できた。そのため、2 MVA 級変圧器モデルを始め、本プロジェクトで必要な全てのスクライビング細線溝加工線材を供給することができた。

表 2.3.4-18 楕円形状レーザービームと洗浄工程導入後の長尺線材加工の歩留り

モデル 番号	変圧器の要求仕様				加工結果		
	フィラメント 数	最小 I_c [A]	AC-loss	フィラメント間抵抗 [M Ω cm]	分割加工 総長 [m]	仕様を満足し た長さ [m]	歩留り (%)
1	3	30	< 1/3	> 0.1	3097.4	2203.4	71.1
2	3	35	< 1/3	> 0.1	9634.9	6147.9	63.8
3	5	15	< 1/5	> 0.1	995.0	848.5	85.2
Sum					13727.3	9199.8	67.0

次に TFA-MOD 線材の分割加工結果について述べる。図 2.3.4-42 に 3 分割加工された 101 m 長の TFA-MOD 線材の I - V 特性を示す。(a)は各フィラメントの I - V 特性で、 $0.1 \mu\text{V}/\text{cm}$ (@77K、s.f.)の臨界条件で 44.1 A、35.3 A、33.7 A の I_c 値となっている。フィラメント間の抵抗は $0.1 \text{ M}\Omega\text{cm}$ を超えていることから、念のためフィラメント間に超電導電流が流れていないことを確認したのが(b)である。フィラメント 1-2 間及びフィラメント 2-3 間での I - V 特性は低い電流からオーミックとなっており、確かに各フィラメントは電氣的に分離していることが分かる。

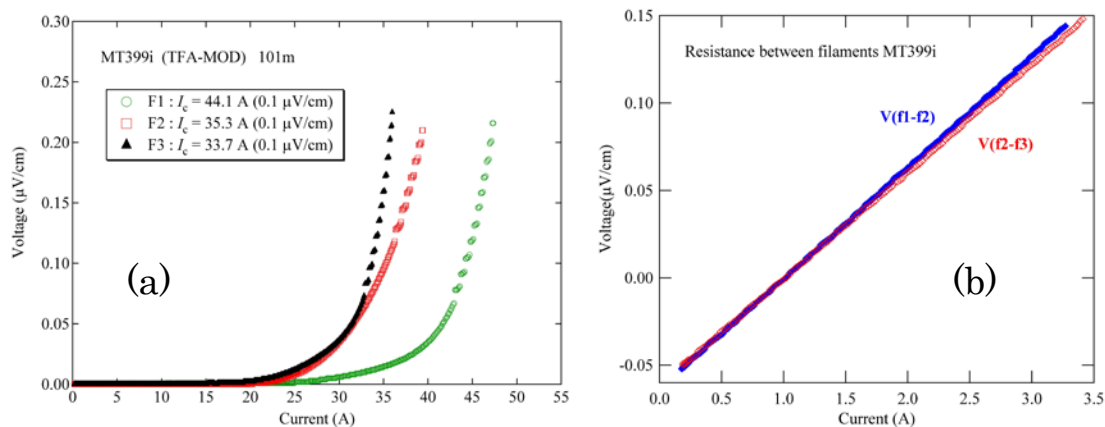


図 2.3.4-42 3 分割された 5 mm 幅 101 m の TFA-MOD 線材の I - V 特性
(a) 各フィラメントの I - V 特性 (b) フィラメント間の I - V 特性

図 2.3.4-42 に示された TFA-MOD 線材の加工前後の磁化ヒステリシス損失の変化を測定した結果を図 2.3.4-43 に示す。ここで縦軸の V_{ix} とはピックアップコイル法で測定した交流磁化率の複素成分 χ'' を測定した結果であり、 χ'' がヒステリシス損失に比例するため、 V_{ix} の変化は磁化ヒステリシス損失の変化を表している。図 2.3.4-43 から、分割加工によって全長に亘って磁化ヒステリシス損失が $1/3$ に低減されていることが分かる。

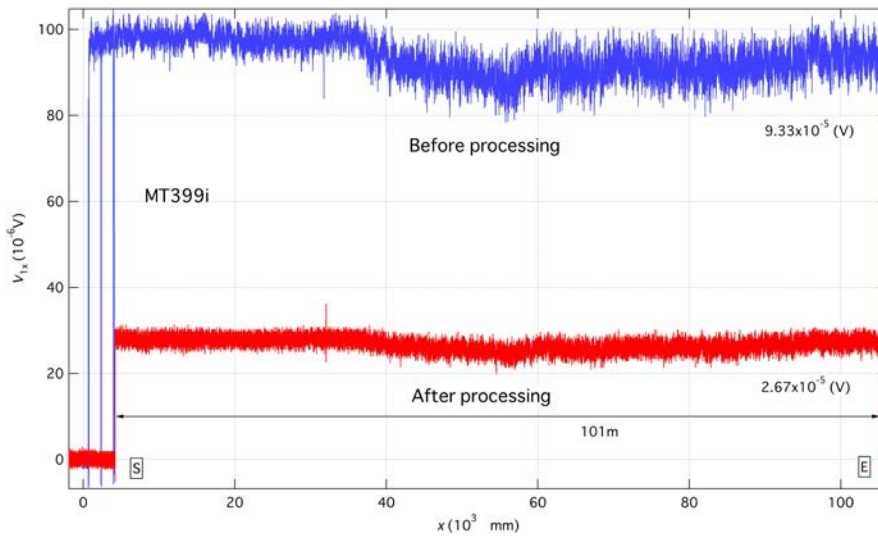
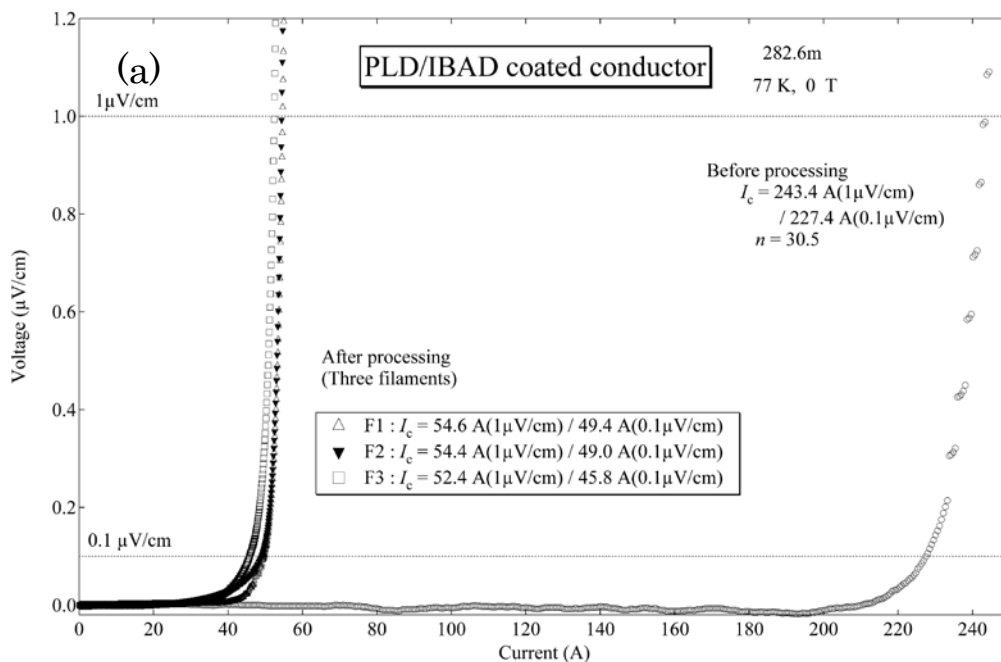


図 2.3.4-43 3分割加工前後の TFA-MOD 線材の磁化ヒステリシス損失の変化

また、レーザスクライビング法によって分割加工された全長は 282.6 m の PLD 長尺線材の I - V 曲線の測定例を図 2.3.4-44 に示す。測定は ISTEK で開発した無誘導巻き End to End 治具を用いて行った。線長が長い場合には電流値が I_c 値を超えた場合の発生電圧が高くなるので、通常の $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ だけでなく $0.1 \mu\text{V}/\text{cm}$ の閾値も採用している。同図(a)に示すとおり、 $0.1 \mu\text{V}/\text{cm}$ で比較すると加工前が 227.4 A であったものが 3 分割加工によって 49.4、49.0、45.8 A の 3 本に分割されていることが分かる。溝の面積低下分を引き算した、加工の劣化分を算出すると 11.6 % となり、 I_c 値の低下を低く抑えることに成功した。また、同図(b)に示すとおり細線加工によって n 値は殆ど変化しておらず、加工劣化が少ないことが分かる。フィラメント間抵抗のデータも含め、分割線材の諸元を表 2.3.4-19 にまとめた。



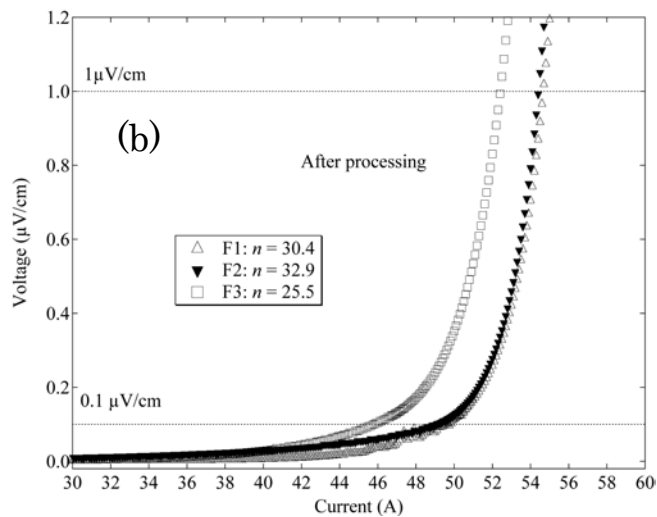


図 2.3.4-44 3分割加工した線材の I - V 曲線の測定例
 (a) 3分割加工前後の I - V 特性 (b) I - V 特性の n 値評価

表 2.3.4-19 3分割加工した線材の諸データ

Length	282.6 m	Number of filaments	3	-
Average width of slot	250 μm	Area reduction rate (*1)	25.0 %	
Average resistance between filaments	11.8 Ω	Average resistance per 1cm	0.3 MΩcm	
Before scribing: I_c^0 @0.1μV/cm	227.4 A	Before scribing: n value	30.5	-
Filament 1: I_c^{F1} @0.1μV/cm	49.4 A	n value of Filament 1	30.4	-
Filament 2: I_c^{F2} @0.1μV/cm	49.0 A	n value of Filament 2	32.9	-
Filament 3: I_c^{F3} @0.1μV/cm	45.7 A	n value of Filament 3	25.5	-
Sum of filaments- I_c	144.1 A	Reduction rate of I_c (*2)	36.6 %	
$I_c^{\min} \times 3$	137.1 A	Reduction rate of I_c^{\min}	39.7 %	
Reduction rate by scribing process (*2-*1)			11.6 %	

この線材の磁化ヒステリシス損失の長さ依存性を ISTECC で開発したピックアップコイル法で測定した結果を図 2.3.4-45 に示す。加工前後で磁化ヒステリシス損失が 3 分の 1 以下に減少していることが分かる。また同時に、加工による深刻な欠陥が発生しなかったことも見て取れる。

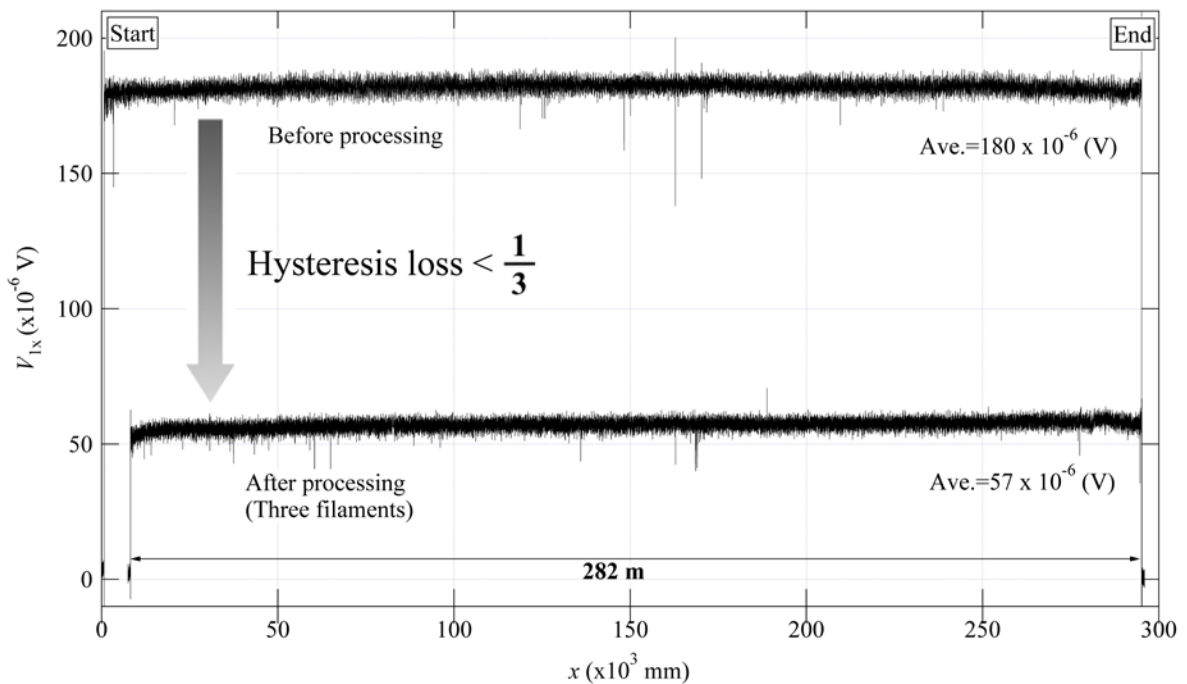
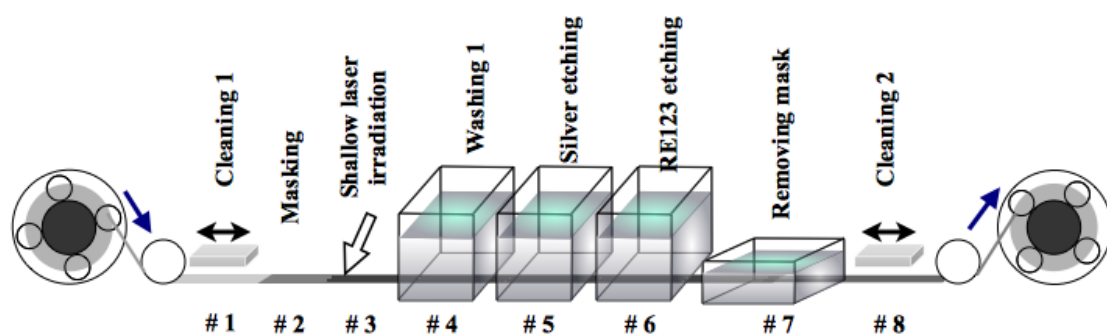


図 2.3.4-45 3分割加工による磁化ヒステリシス損失の減少

ここまで述べた改良後のスクライビング細線溝加工プロセスを図 2.3.4-46 に示す。線材受け入れ後のクリーニング、マスクテープの連続貼付け、レーザ照射、照射後の洗浄、銀層のエッチング、超電導層のエッチング、マスキングテープの除去、そして最後のクリーニングという流れとなっている。このプロセスによって、長尺の分割線材を安定して製造できるようになった。また、加工した線材例を図 2.3.4-47 に示す。



〔 Cleaning 1 : wiping by acetone, Washing 1 : interfacial active agent + ultra sonic
 Removing mask : in the Fluorinert, Cleaning 2 : wiping by acetone 〕

図 2.3.4-46 長尺の分割線材安定加工の最終的なプロセス

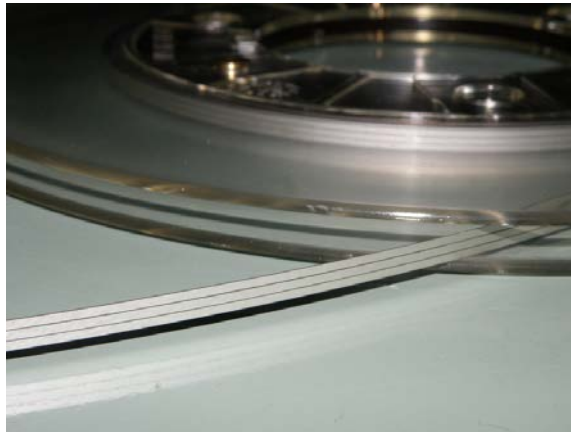


図 2.3.4-47 分割された線材例

ここで、加工長が 300 m 未満となっているのは、現在市販で入手できるマスキングテープの最大長が 300 m であるからであり、プロセス自体に加工長を制限するものはない。(500m~1,000m 程度は効能と想定) 実際、300 m 長の 2 本の線材にレーザ照射した後に、2 本の線材を溶接で全長 600 m として 2 段階エッチングを実施したが、両者とも変圧器の仕様を満たす分割線材となった実績がある。

(3) まとめ

線材切断技術については、UV波長領域 (355 nm) のQスイッチ式Nd:YAGレーザに楕円形状ビームを導入することで、バリの無い切断を最低でも27-54 m/hの速度で安定して行う技術を確認した。また、レーザスクライビングは中間評価段階で定まった基本のレーザ照射と2段階エッチングをさらに改良し、楕円形状ビーム、洗浄工程の導入によって長尺線材加工の歩留りを出荷ベースで50%から67%まで高めた。それにより、過電流評価用線材、エッジワイズ評価用線材(H20-21)、接合補修評価用線材(H21-22)、磁界分布モデル用線材(H22)、2 MVA級変圧器モデル用線材(H23)、転位均流検証モデル用線材、低損失巻線モデル用線材、大電流巻線モデル用線材 (H23-24) と切断線材11,303 m、分割加工線材8,068.7 mを変圧器の巻線グループに供給できた。分割加工を行う手法は、どの行程も最低100 m/h以上の加工速度を有しており、十分に工業的なプロセスとなりうると考えている。線材開発においてレーザスクライビング技術を用いた5 mm幅で5分割及び10分割加工した100 m長以上の細線化線材作製に成功しており、さらにはエッチングレススクライビング技術開発を行った。将来的には5 mm幅20分割以上の線材作製が可能となり、さらなる低交流損失線材を供給できるようになると考えられる。

2.3.4-4 線材特性評価と温度スケーリング則による巻線の交流損失見積り手法検討 (九州大学、ISTEC)

モデルコイル用線材の交流損失特性を鞍型ピックアップコイルを用いて評価し、低交流損失コイル化技術開発を支援するとともに、温度スケーリング則手法により機器巻線の交流損失を簡略に推定する手法の確立をめざした。PLD 法及び MOD 法で作製された Y 系超電導線材について、細線溝加工線材のフィラメント間抵抗、臨界電流(I_c)、磁化及び交流損失特性を測定し、温度スケーリング則の適用性を明らかにした。さらに、交流損失に対する臨界電流の磁界印加角度依存性及び Y 系超電導線材の積層数依存性についても検討した。

(1) IBAD-PLD 線材についての検討結果

ここでは、IBAD-PLD 法により作製された GZO を中間層とする Y 系超電導線材の結果を示す。測定は短尺 6 cm 長試料を 3 枚重ねて行った。図 2.3.4-48 は 35 K から 77 K において測定した磁化曲線、図 2.3.4-49 は、測定した磁化曲線から求めた I_c - B 特性の温度依存性である。

また、 B_b 以上の磁界に対し、ピンカモデルとして Irie-Yamafuji モデルを仮定し、 I_c の磁界依存性を $I_c = \alpha B^\gamma$ と表した際の γ の温度依存性を調べてみるとほぼ一定であった。そこで、図 2.3.4-49 に示す I_c - B カーブを縦軸、横軸ともに I_{c0} で規格化してみた。図 2.3.4-50 に示すように、規格化した I_c - B カーブは温度に依らず一致して、 I_c 値が温度でスケーリングされることが分かる。

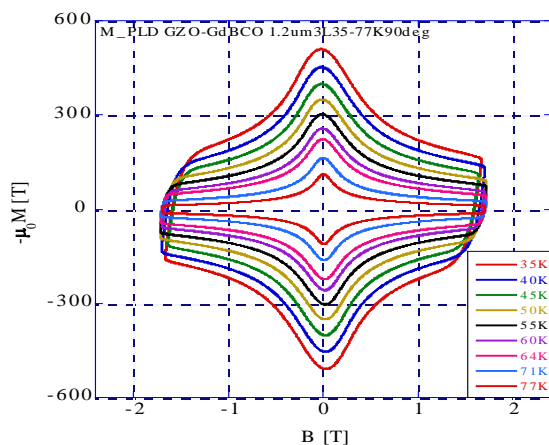


図 2.3.4-48 測定した GZO 中間層を持つ Y 系超電導線材の磁化曲線

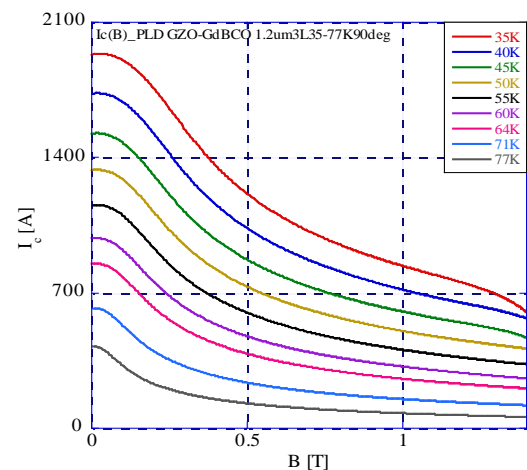


図 2.3.4-49 磁化曲線から求めた I_c - B 特性の温度依存性

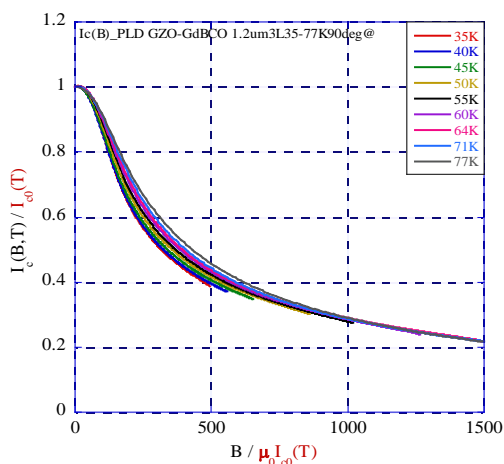


図 2.3.4-50 図 2.3.4-47 の規格化 I_c - B カーブ

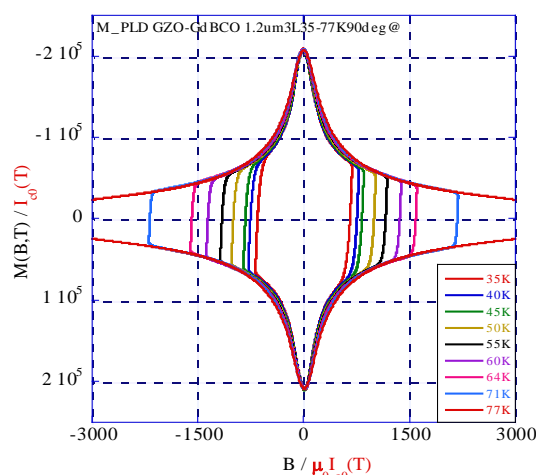


図 2.3.4-51 I_{c0} で規格化した磁化曲線

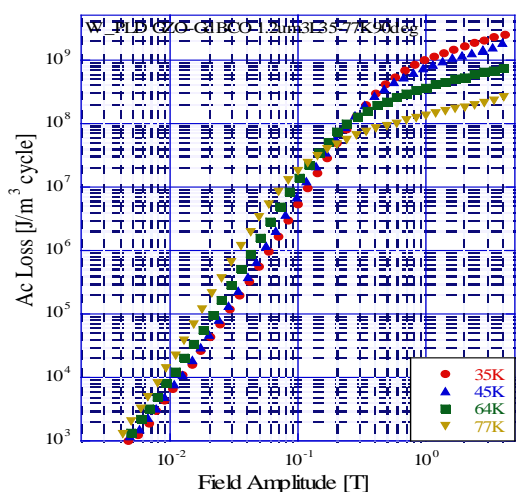


図 2.3.4-52 Y系超電導線材の交流損失測定値

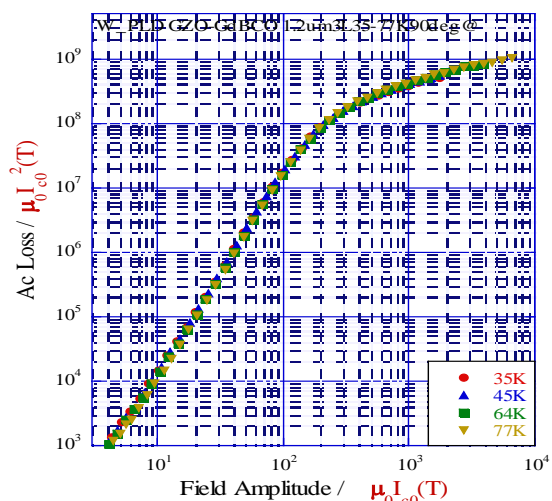


図 2.3.4-53 規格化した交流損失

I_c - B 特性は磁化曲線から求めたものであるから、無論、磁化曲線も I_{c0} で規格化すると図 2.3.4-51 に示すように温度に依らず一致して、温度でスケールされる。さらに、磁化曲線の囲む面積が交流損失に相当するから、図 2.3.4-52 に示す各温度で測定した交流損失は、磁界振幅を I_{c0} 、交流損失を I_{c0} の二乗で規格化することにより、図 2.3.4-53 に示すように一本のマスター曲線に乗り、温度でスケールされる。

ここで示した Y系超電導線材を含め、中間層が異なる数種の線材についても I_c - B 特性、交流損失の温度スケール則が成立することを確認し、変圧器設計指針の一部を構築した。

2.3.5 2 MVA 級超電導変圧器モデル検証

66 kV/6.9 kV-20 MVA 級配電用超電導変圧器（以下、20 MVA 級変圧器）の実現には、巻線技術（低損失技術、大電流技術等）や冷却システム技術等の要素技術を総合的に組み合わせた実機を製作し、実用化時の要求仕様に基づいた課通電試験による検証を行う必要がある。そのため、Ⅱ-1.3.1-5 節に示す技術開発目標及びⅡ-2.1.3-5 節に示す技術開発内容に基づき、開発を進めた。66 kV /6.9 kV-2 MVA 級超電導変圧器モデル（以下、2 MVA 級変圧器モデル）は巻線技術開発等の要素技術の段階的な成果を反映して設計検討を行い、その課通電試験の基本計画書も作成した。2 MVA 級変圧器モデルの詳細設計及び製作を行い、冷却システムと組み合わせて性能試験を行った。また、この成果を 20 MVA 級変圧器の設計にフィードバックした。

2.3.5-1 2 MVA 級超電導変圧器モデルの設計検討（九州電力、富士電機）

配電用変電所用の 20 MVA 級変圧器の実現に向けて、前 NEDO 事業の「超電導応用基盤技術開発（第Ⅱ期）」（平成 15~19 年度）プロジェクトにおける絶縁設計の成果を活用し、変圧器モデルを設計・製作し、冷却システムと組み合わせて検証した。また、超電導変圧器の特性や製作技術を見通すために、実機と同一電圧で実機相当の巻線構成としている。変圧器モデルの容量は、これを実現できる最低容量の 2 MVA とした。開発項目は以下の 3 項目とした。① 要素技術（巻線、保冷容器、冷却システム等）を組み合わせて 2 MVA 級変圧器モデルを設計・製作する。② 交流損失低減や耐電圧性等を考慮した試験条件の設定を行い、2 MVA 級変圧器モデルの課通電試験を実施する。③ 2 MVA 級変圧器モデルの特性を検証する。

(1) 2 MVA 級変圧器モデルの設計、製作

a 変圧器本体の設計、製作

実機変圧器を見通す技術を早期に効率的かつ経済的に開発するため、以下の方針で 2 MVA 級変圧器モデルの設計検討を行った。

- ① 損失低減技術は一般変圧器の設計技術も加えて検討する。
- ② 定格 66 kV の耐電圧（350 kV インパルス、140 kV 交流過電圧）や機器構成に起因する技術（変圧器のブッシング、鉄心、巻線径・巻線構成等）は極力実機相当とする。
- ③ 電流に起因する変圧器巻線技術等は多層並列導体や転位均流巻線技術を適用する。
- ④ 前述の要素技術開発での成果を 2 MVA 級変圧器モデルに反映する。
- ⑤ 極力鉄損の低減を図れるように鉄心は内鉄形で室温空間に配置し、巻線は絶縁面から一層毎に GFRP（Glass Fiber Reinforced Plastics）巻枠を使用する円筒巻線とする。

⑥2 MVA 級変圧器モデルの交流損失低減や耐電圧特性等を検証・評価できる課
通電試験の計画を検討する。

二次巻線の導体は、20 MVA 級（24 本並列）との転位技術の等価性のため 8 本
並列とした。なお、一次巻線の導体の並列数は 1 本、また、定格電流は一次 17.5 A：
二次 167 A である。

単純に 20 MVA 級から 2 MVA 級に電流容量を下げると、2 MVA 級変圧器モデ
ルの%インピーダンス（巻線抵抗と漏れインダクタンスのベクトル和）は 2 MVA
基準で 1.5 %となる。この時の短絡電流は 20 MVA 級と同一であり、一次側短絡電
流は 1,167 A となり、超電導線 1 本で耐えられる範囲を超えてしまう。2 MVA 級
では短絡試験を行わないが、超電導線 1 本当たりの短絡電流を 20 MVA 級と等価
にすることが望ましいと考えた。20 MVA 級の一次側の短絡電流は 1 本当たり 389
A であるので、これと等価にするため 2 MVA 級の%インピーダンスを 2 MVA 基準
で 4.5 %とした。20 MVA 級と同等の巻線寸法に配慮し、2 MVA 級の%インピーダ
ンスを上げること検討した。%インピーダンスを上げるためには、後述する
2.3.5-2 節の式 2.3.5-3 から分かるように、 α 間距離（一次、二次巻線間距離）を大
きくすることや磁束通路数を減らすことである。検討の結果、磁束通路数を 1 にし
て、細かい調整は α 間距離で行うことで 4.5 %に設定が可能になることが判明した。
表 2.3.5-1 に 2 MVA 級変圧器モデルと 20 MVA 級変圧器の主な仕様を、図 2.3.5-1
に 2 MVA 級変圧器モデルの巻線配置を、図 2.3.5-2 に線材の I_c 値とロードライン
を示す。2 MVA 級変圧器モデルでは、フィラメント分割線材の適用を想定したた
め 20 MVA 級変圧器で使用した特性より低くしている。また、負荷率が低くなっ
ているが、これは 2 MVA 級変圧器モデルとして最適化したものではなく、20 MVA
級変圧器の巻線体格に準じたことや短絡電流を合わせたことに起因している。

表 2.3.5-1 2 MVA 級変圧器モデル及び 20 MVA 級変圧器の仕様

諸元	2 MVA 級変圧器モデル	20 MVA 級変圧器
相数、結線	3 ϕ 、Y-Y	3 ϕ 、Y-Y
定格電圧	66 kV/6.9 kV	66 kV/6.9 kV
定格電流	17.5 A/167.4 A	175 A/1674 A
%インピーダンス	4.5 % (2 MVA 基準)	15 % (20 MVA 基準)
巻線層数	8 層/2 層	8 層/2 層 (二次巻線は一次巻線の内外に配置)
ターン数	1033 (129.1 \times 8 層)/108(54 \times 2 層)	1033 (129.1 \times 8 層)/108(54 \times 2 層)
V/N	36.9	36.9
導体構成	1 本/8 並列(4 重 2 並)	3 並列(3 重)/24 並列(12 重 2 並)
線材断面寸法	5.3 mm \times 0.25 mm (0.1 mm 安定化銅と絶縁込)	5.3 mm \times 0.25 mm (0.1 mm 安定化銅と絶縁込)
線材長	9.6 km/1.5 km(合計 11.1km)	19.3 km/16.3 km(合計 35.6 km)

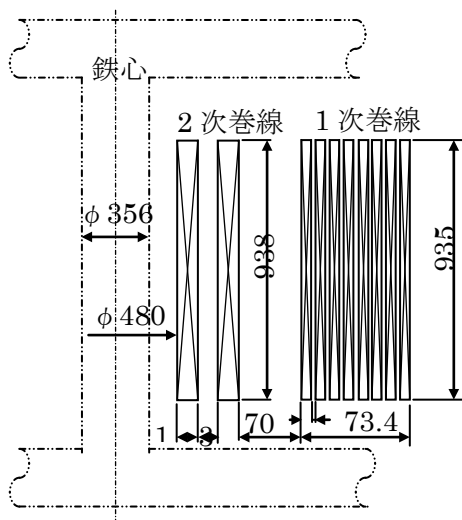


図 2.3.5-1 2 MVA 級変圧器モデルの巻線配置

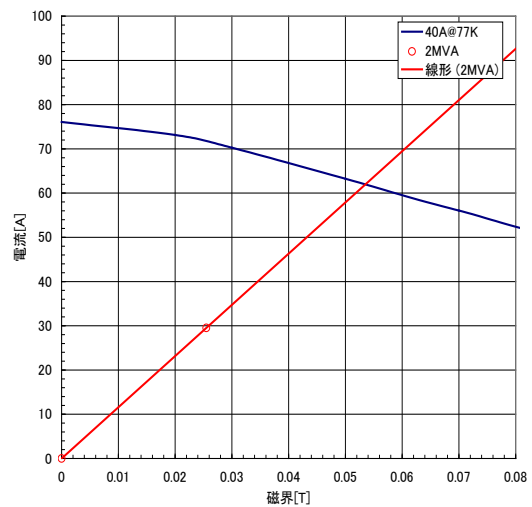


図 2.3.5-2 Y 系超電導線材の I_c 値とロードライン

この巻線仕様に基づき磁界解析を行った。その結果の磁束線図を図 2.3.5-3 に、磁界分布を図 2.3.5-4 に示す。方法や条件は 2.3.5-2 節と同一のため本節では省略する。図 2.3.5-5 に短絡電流解析結果を示す。短絡電流は 3,592 A で、超電導線 1 本当たりでは 449 A になった。温度は短絡後 0.2 sec で 173 K となった。これらは 20 MVA 級変圧器の結果 (2.3.5-2 節) とほぼ一致した。

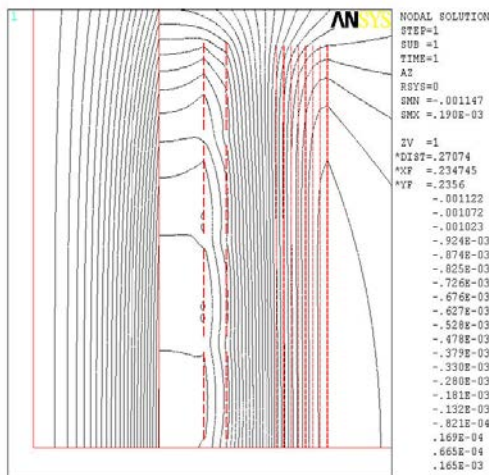


図 2.3.5-3 磁束線図

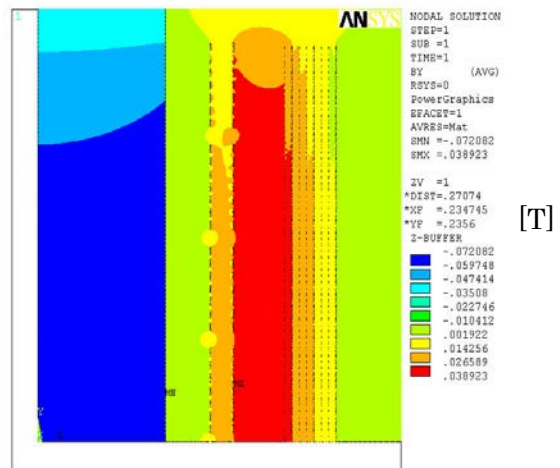


図 2.3.5-4 磁界分布

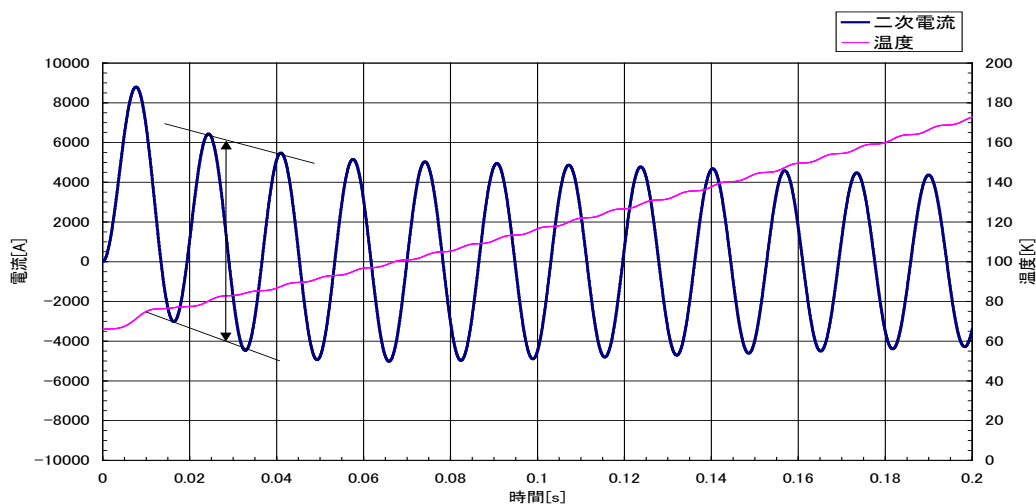


図 2.3.5-5 2 MVA 級変圧器モデルの二次巻線短絡電流と温度
(%インピーダンス : 4.5 %)

Ⅲ-2.3.3-3 節で述べた数百 kVA 級限流機能付加超電導変圧器の検証結果を踏まえ、2 MVA 級変圧器モデル及び 20 MVA 級変圧器への限流機能付加について、平成 23 年度に検討した。

その結果、20 MVA 基準において、通常時の%インピーダンスは 10 %、短絡事故時(短絡後 0.2 sec)の%インピーダンスは、短絡電流を定格電流の 3 倍以下に限流できる 33 %に設計した。

同様の考え方から 2 MVA 級変圧器モデルでも短絡電流を等価にするため、2 MVA 基準で 3 %とした。限流機能が無い 2 MVA 級変圧器モデルと同様に、線材 1 本あたりの短絡電流を 20 MVA 級変圧器と同等にするために、磁束通路数を 1 とし、 α 間距離を調整して設計検討を行った。表 2.3.5-2 に限流機能を付加した 2 MVA 級変圧器モデルと 20 MVA 級変圧器の仕様を、図 2.3.5-6 に 2 MVA 級変圧器モデルの巻線配置を、図 2.3.5-7 に線材の I_c 値とロードラインを示す。

この巻線仕様に基づき磁界解析を行った。その結果の磁束線図を図 2.3.5-8 に、磁界分布を図 2.3.5-9 に示す。また、短絡電流解析結果を図 2.3.5-10 に示す。短絡電流は 0.2 sec 後には定格電流の 3 倍以下になり、限流機能が有効に働いていることが分かる。

表 2.3.5-2 2 MVA 級変圧器モデル及び 20 MVA 級変圧器の仕様
(限流機能付加)

諸元	2 MVA 級変圧器モデル	20 MVA 級変圧器 (実用器)
相数、結線	3φ、Y-Y	3φ、Y-Y
定格電圧	66 kV/6.9 kV	66 kV/6.9 kV
定格電流	17.5 A/167.4 A	175 A/1,674 A
%インピーダンス	3 % (2 MVA 基準)	10 % (20 MVA 基準)
巻線層数	8 層/2 層	8 層/2 層 (二次巻線は一次巻線の内外に配置)
ターン数	918 (114.8×8 層)/96(48×2 層)	918 (114.8×8 層)/96(48×2 層)
V/N	41.5	41.5
導体構成	1 本/8 並列(4 重 2 並)	3 並列(3 重)/24 並列(12 重 2 並)
線材断面寸法	5.3 mm×0.35 mm (0.1 mm 安定化銅と絶縁込)	5.3 mm×0.35 mm (0.1 mm 安定化銅と絶縁込)
線材長	6.3 km/3.8 km(合計 10.1 km)	18.0 km/15.1 km(合計 33.1 km)

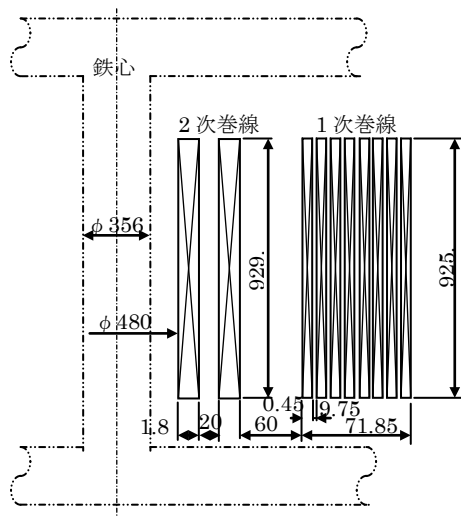


図 2.3.5-6 2 MVA 級変圧器モデルの巻線配置(限流機能付加)

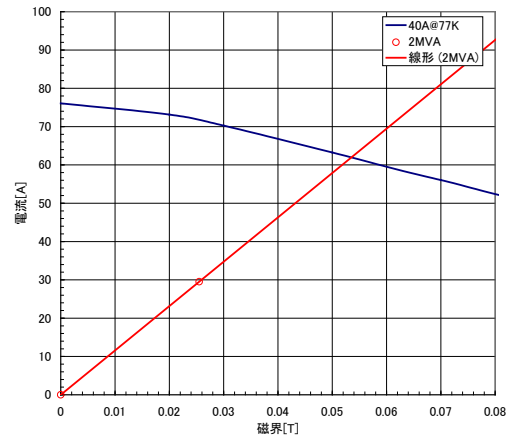


図 2.3.5-7 Y 系超電導線材の I_c 値とロードライン

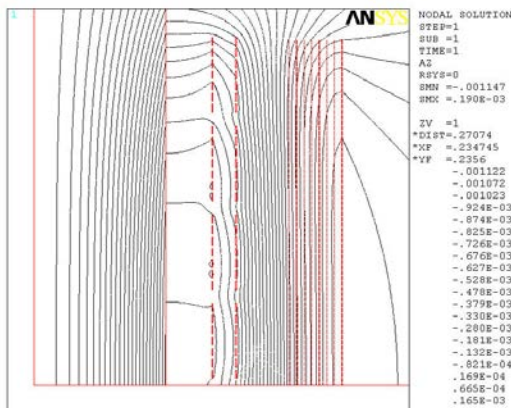


図 2.3.5-8 2 MVA 級変圧器モデルの磁束線図(限流機能付加)

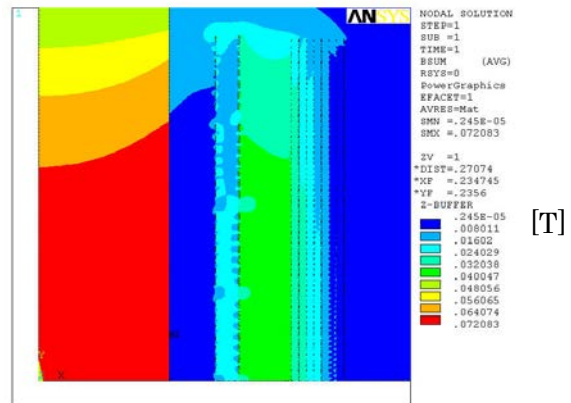


図 2.3.5-9 2 MVA 級変圧器モデルの磁界分布(限流機能付加)

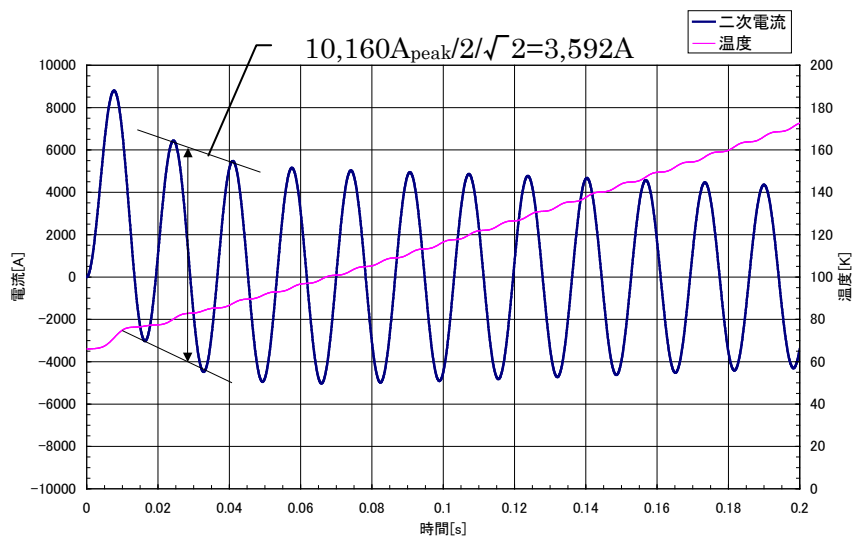


図 2.3.5-10 2 MVA 級変圧器モデルの二次巻線短絡電流と温度
(限流機能付加、%インピーダンス : 3 %)

20 MVA 級変圧器について、限流機能を付加しない場合と比較すると、Y 系超電導導線材の使用量が 7 % 少なく、コスト的に有利であることや、超電導変圧器を高機能化して常電導変圧器と差別化を図ることが可能である。このため、2 MVA 級変圧器モデルは限流機能を付加することにし、%インピーダンスを 3 % に設定した。

表 2.3.5-2 の仕様に基づき、巻線寸法の最適化や、ブッシング・電流リード、保冷容器等を考慮した詳細設計を行い、変圧器を製作した。Ⅲ-2.3.1-1 節で述べた大電流化技術開発の成果を反映し、二次巻線を 4 重 2 並導体及びヘリカル転位で構成した。Ⅲ-2.3.1-2 節で述べた低損失化技術開発の成果を反映し、二次巻線用線材に 3 分割した細線化線材を適用した。2.3.1-3 節で述べた耐短絡強度技術開発及び、Ⅲ-2.3.3 節で述べた限流機能付加技術開発の成果を反映し、巻棒に溝を掘り、その溝に Y 系線材を配置する巻線方法や、Y 系超電導線に金属線を並列配置する導体構造を適用した。図 2.3.5-11 に外形図を、図 2.3.5-12 に製作過程の写真を示す。

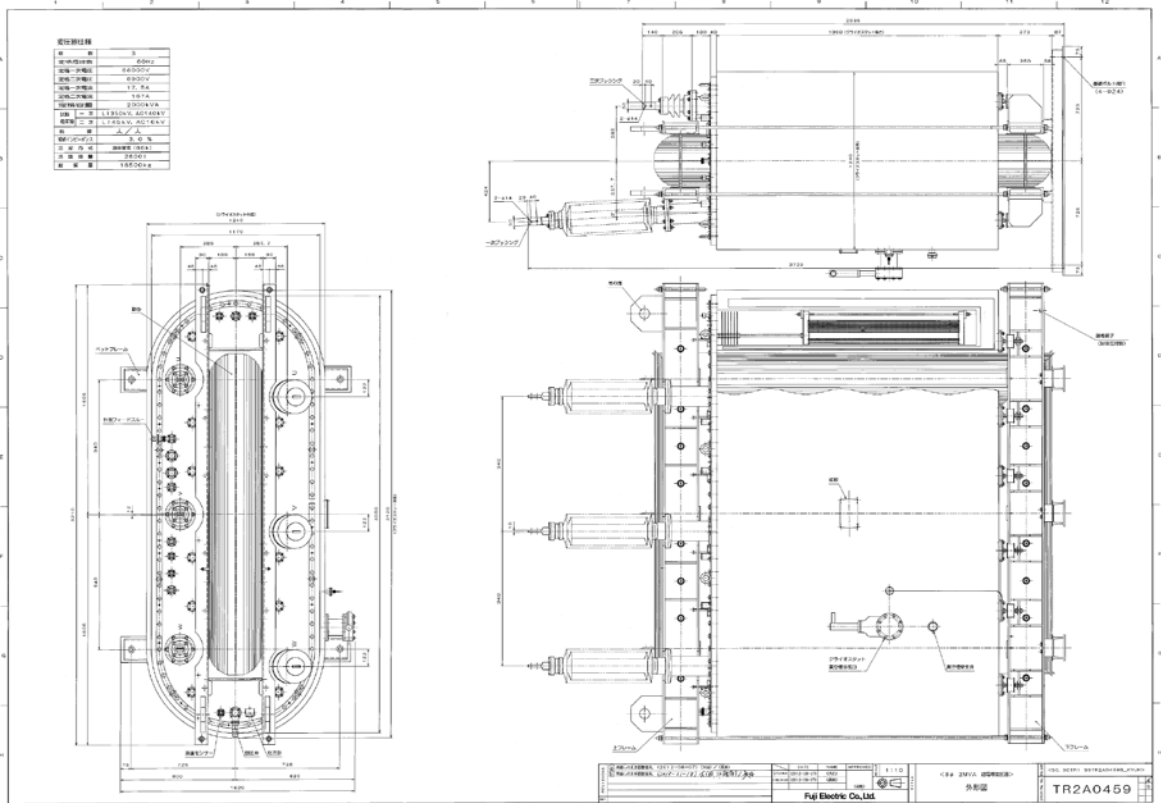
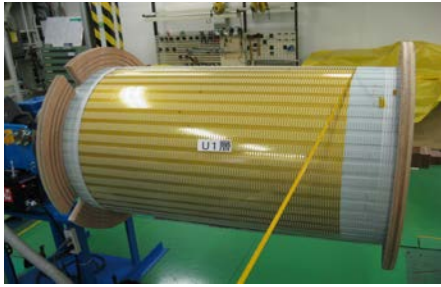
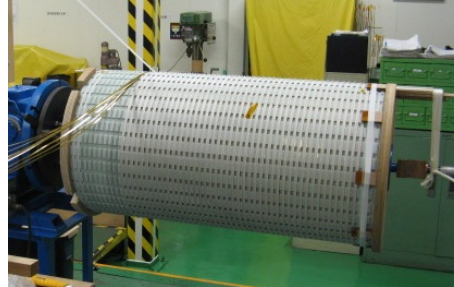


図 2.3.5-11 2 MVA 級変圧器モデル外形図



一次巻線



二次巻線



巻線組立作業



巻線組立完了



中身組立完了



保冷容器収納作業



鉄心(常温配置)



2 MVA 級変圧器モデル完成

図 2.3.5-12 2 MVA 級変圧器モデルの製作過程

(b) 保冷容器の設計、製作

平成 24 年度に 2 MVA 級変圧器モデル本体の設計を基に変圧器用保冷容器の検討を行った。

この保冷容器には超電導変圧器巻線を収納するため、大型かつ非磁性でなければならない。そこで保冷容器の材質として GFRP を選定し、容器容量 10 m³ 級の大型非磁性の保冷容器の設計・製作を行った。

この保冷容器の保冷性能目標値は、既存の小型保冷容器相当の外部熱侵入が 20 W/m² 以下とした。

本保冷容器外槽部のサイズは、長さ 1,240 mm×幅 3,120 mm×高さ 1,960 mm である。形状は、直線部と R620 の曲線部を有するレーストラックである。三相の超電導巻線を液体窒素槽に挿入でき、鉄心を外部(室温部)に設置できるように真空層を有した中空パイプ(外径 468 mm、内径 398 mm) を中心間距離 940 mm とり 3 本設けている。また、液体窒素槽となる内槽部のサイズは、長さ 960 mm×幅 2,840 mm×高さ 1,805 mm である。三相の超電導巻線を外部から設置できるように開放容器としている。そのため、本保冷容器の上部にトップフランジを取り付けられる構造とした。図 2.3.5-13 にその保冷容器の図面を示す。

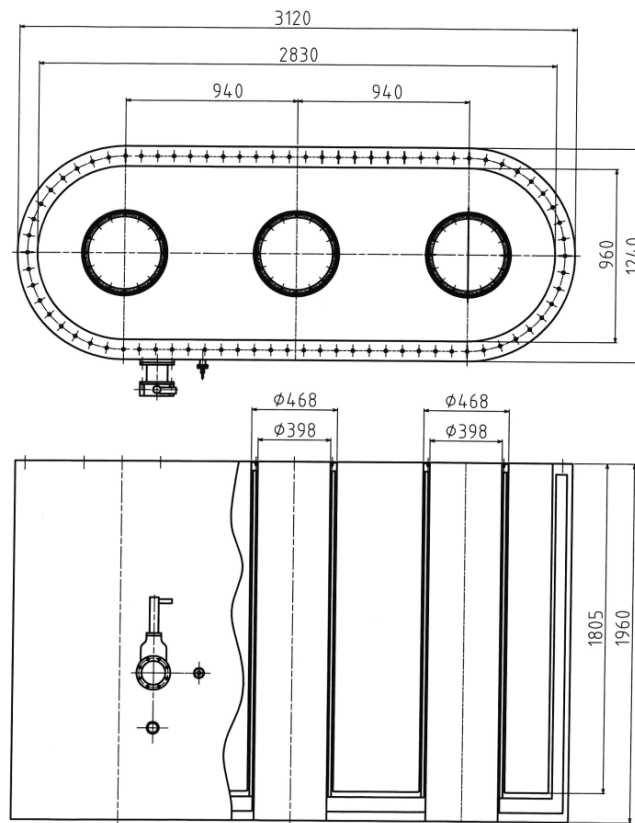


図 2.3.5-13 2 MVA 級変圧器モデル用保冷容器 (単位:mm)

図 2.3.5-13 には示していないが、保冷容器の真空層には、真空により内槽・外槽が潰れないようにφ100 mm のサポートパイプを配置し、内槽の真空層側にはス

ステンレス箔でシールドを設置した。シールドは渦電流を低減するために、内槽側面、中空パイプ 3 本及び底面の各々を 2 分割、計 10 分割し、各々が接触しないようにカプトンテープを介して重ね合わせた。また、各シールドにはアース線を取り付け、発生した渦電流を逃がすようにした。さらに、ステンレス箔シールドの上には、輻射(放射)による侵入熱を抑制するために内槽全体をスーパーインシュレーションによる断熱施工をした。

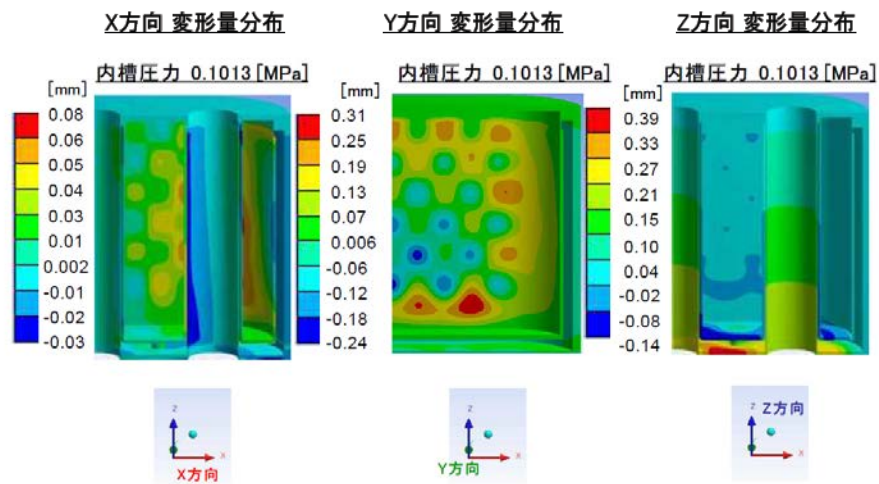
設計した保冷容器について、表 2.3.5-3 に示す条件で変形量及びミーゼス応力のシミュレーションを行った。図 2.3.5-14 にそのシミュレーション結果を示す。

保冷容器が常温状態（液体窒素がない状態）の場合、真空断熱による変形量は最大 0.39 mm であり、内部に設置する超電導巻線等に接触しないことを確認した。またミーゼス応力においても最大で 25 MPa であり、素材の GFRP を破壊しない応力であることを確認した。また、保冷容器に規定量液体窒素を投入した条件で変形量の計算を行った。その結果、熱収縮による最大変形量は 4.95 mm であり、超電導巻線等の収納物と接触しないことを確認した。

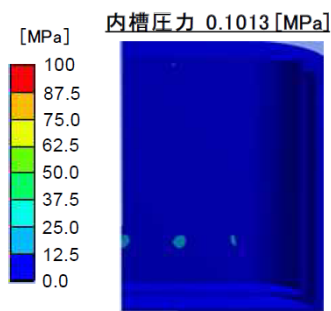
表 2.3.5-3 応力及び変形量計算の条件

温度境界	<ul style="list-style-type: none"> ・ 保冷容器外表面、窒素天面 300 K ・ 保冷容器内槽面、窒素底面 65 K ・ 対称境界面は断熱（温度勾配 0）
GFRP 材料	<ul style="list-style-type: none"> ・ ヤング率 : 30 GPa ・ ポアソン比 : 0.19 ・ 線膨張係数 : $1.12 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$
荷重条件	<ul style="list-style-type: none"> ・ 外表面圧 : 0.1013 MPa（大気圧） ・ 内槽圧 : 0.1013 MPa（大気圧） ・ 液体窒素の水頭圧：液密度 860 kg/m³ ・ 液体窒素液面高さ：1,655 mm(トップフランジ下面から液面まで 150mm)
拘束条件	<ul style="list-style-type: none"> ・ 保冷容器下部 外周ライン

(a)



(b)



(c)

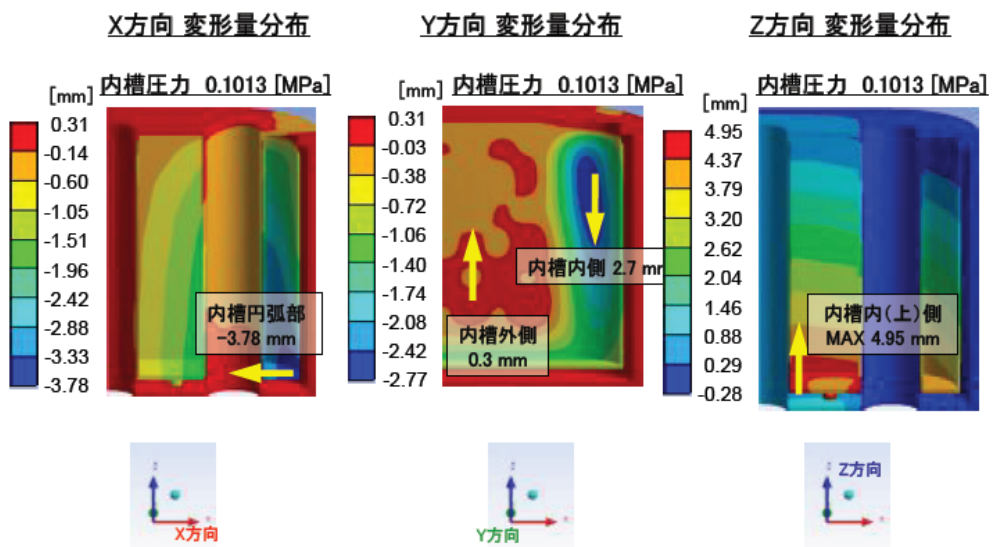


図 2.3.5-14 シミュレーションによる変形量及びミーゼス応力の結果
(a)常温常圧における変形量, (b)常温常圧によるミーゼス応力
(c)液体窒素投入条件での変形量

また、設計した保冷容器の侵入熱の計算を行った。計算条件を表 2.3.5-4 に、その結果を表 2.3.5-5 に示す。

表 2.3.5-4 侵入熱の計算条件

項 目	計 算 条 件
トップフランジ下面から液体窒素液面までの距離	150 mm (液面高さ 1655mm)
外気温	300 K
液体窒素温度	65 K
保冷容器の寸法	図 2.3.5-14 参照

表 2.3.5-5 各所からの侵入熱の計算

各部からの侵入熱	侵入熱(W)
i) ① 内槽上部側面及び円弧部の伝導伝熱	72
② 内槽上部円筒部 (3 本) の伝導伝熱	53
ii) 真空層に設置されたサポートからの伝導伝熱	63
iii) 真空層を横切る輻射熱	14
iv) 保冷容器気相部の熱伝達	62
v) トップフランジからの輻射熱	46
合 計	310

保冷容器の表面積はトップフランジ(t=40)を含めて 29.14 m² であるので、単位面積当たりの侵入熱は 10.64 W/m² となる。目標値 20 W/ m² よりも十分小さいことを確認した。

このシミュレーション結果を基に設計、製作した保冷容器の製作途中（シールド施工時）の写真を図 2.3.5-15 に、完成時の写真を図 2.3.5-16 に示す。



図 2.3.5-15 保冷容器（シールド施工時） 図 2.3.5-16 保冷容器（完成時）

(2) 2 MVA 級変圧器モデル試験の検討

2 MVA 級変圧器モデルの試験は、中間評価時に作成した課通電試験の基本計画を基に平成 24 年度に詳細検討を行った。試験は、JEC2200-1995 変圧器に準拠し変圧器基本性能、絶縁性能、熱的性能について行うこととした。また、超電導変圧器特有の試験として直流 *I-V* 特性試験、熱侵入量測定等を実施した。課通電試験計画書を表 2.3.5-6 に示す。なお、中間評価時から追加した項目は下線を付けた 4 項目

である。

表 2.3.5-6 2 MVA 級変圧器モデルの課通電試験計画書

試験項目		概 要
変圧器 基本性能 試験	巻線抵抗 (常温)	一次及び二次巻線に直流通電により電流電圧特性を測定し、巻線の健全性を確認する。
	直流 I - V 特性	巻線を液体窒素に含浸した状態で、一次及び二次巻線に直流通電により電流電圧特性を測定し、巻線の超電導特性を確認する。
	変圧比	一次側に電圧を印加し、一次及び二次側の端子電圧から変圧比を測定する。
	短絡インピーダンス及び負荷損	短絡インピーダンス：一次側を短絡し、二次側に低電圧の定格周波数・定格電流を通電し、二次側端子電圧から測定。 負荷損：一次側を短絡し、二次側に定格電流まで通電し、キャンセル法で負荷損を測定する。
	無負荷損及び無負荷電流	一次側を開放し、二次側に定格電圧を印加し無負荷損と無負荷電流を測定する。
絶縁性能 試験	絶縁抵抗測定	絶縁抵抗計で一次及び二次のアース間、1次～二次間の絶縁抵抗値を測定する。
	短時間交流耐電圧 (誘導/加圧)	誘導試験：一次側を開放し、鉄心、フレーム等を接地し、二次側に 22 kV (定格周波数の 2 倍) を 1 分間印加する。 加圧試験：鉄心、フレーム等を接地し、二次側には 140 kV 及び二次側に 22 kV を 1 分間印加する。
	雷インパルス	二次巻線、鉄心、フレーム等を接地し、一次側からインパルス電圧 (全波、350 kV _{peak}) を印加する。
熱的性能 試験	熱侵入量	無電圧、77K に冷却した変圧器の液面変化を測定し、その変化量から算出する。
	保冷容器、巻線初期冷却特性	保冷容器、巻線の初期冷却 (室温⇒77K) 時間を測定する。
	冷凍機停止時の特性	無電圧、冷媒温度 66 K の状態にある変圧器において、冷凍機運転停止時に 70 K に上昇するまでの時間を測定する。
	冷凍機初期冷却特性	冷凍機常温起動時 (室温⇒77 K) の特性を測定する。 液体窒素初期冷却時 (77 K⇒66 K) の特性を測定する。
	冷却システム 冷凍能力	圧縮機回転数一定で入力電力及び冷凍能力を測定する。
	定格通電時冷却特性	冷却装置を定格運転する。冷媒温度が定格状態後に一次巻線を短絡し、二次巻線に電圧を印加し、一次巻線に規定電流を通電する。その状態で冷媒温度の安定性を測定する。

(3) 2 MVA 級変圧器モデル試験の個別結果

富士電機（株）千葉工場において、2 MVA 級変圧器モデルと冷却システムを接続し、前述の試験を実施した。図 2.3.5-17 にその外観写真を示す。



図 2.3.5-17 2MVA 級変圧器モデル、冷却システム外観写真

a. 巻線抵抗（常温）

直流電圧降下法により、全巻線の抵抗を測定し、巻線が正しく接続されていることを確認した。測定回路を図 2.3.5-18 に示す。

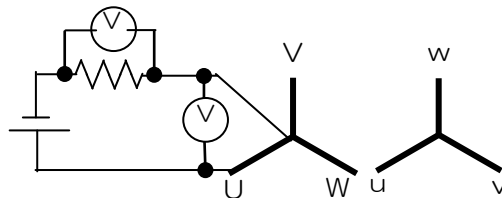


図 2.3.5-18 巻線抵抗測定回路

測定の結果、ほぼ計算値（一次巻線：234.4 Ω 、二次巻線：2.212 Ω ）どおりであり、巻線が正しく接続されていることを確認した。

b. 直流 I - V 特性

巻線を液体窒素に含浸した状態（77 K）で、一次及び二次巻線に直流通電により電流電圧を測定し、巻線の超電導特性を確認した。測定回路を図 2.3.5-19 に示す。

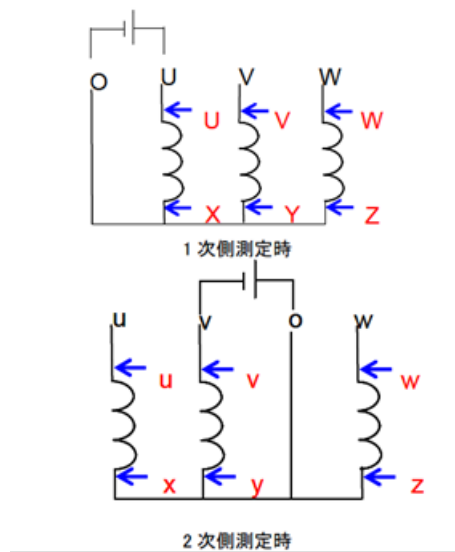


図 2.3.5-19 直流 I - V 特性試験回路

一例として、一次 U 相巻線、二次 u 相巻線の測定結果を図 2.3.5-20 に示すが、他の相の結果も同様のものであった。一次巻線、二次巻線ともに定格電流（一次：約 25 A、二次：約 260 A）を目標に試験を実施した。いずれの巻線も目標電流まで電流電圧特性は線形を示し、また、閾値に対しても十分に裕度があった。この結果から、一次、二次巻線とも定格電流まで超電導特性が維持できることが確認できた。試験温度が 77 Kであることを考慮すると、定格温度 66 K においては十分な性能（77 K の 1.5 倍程度）があるものと考えられる。

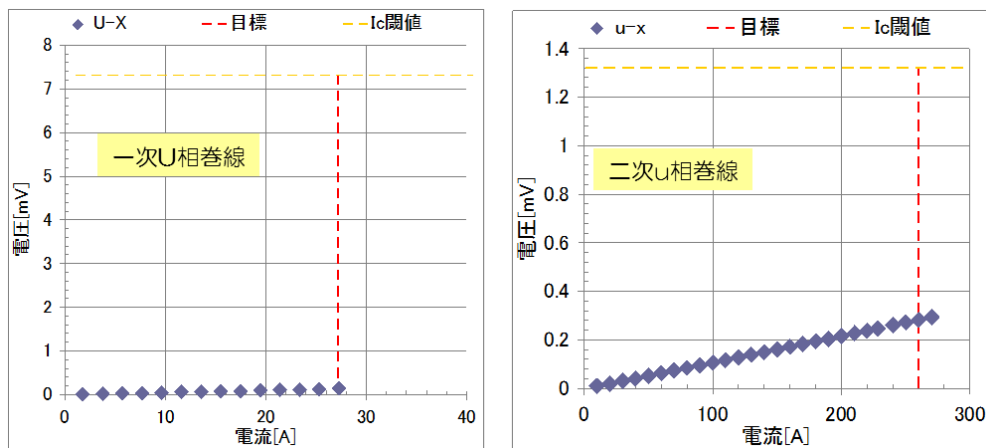


図 2.3.5-20 一次 U 相、二次 u 相 I - V 特性試験結果

c. 変圧比

変圧比測定器を用いて、ブリッジ法により変圧比を測定した。測定時の冷媒温度は 68 K だった。試験回路を図 2.3.5-21 に示す。

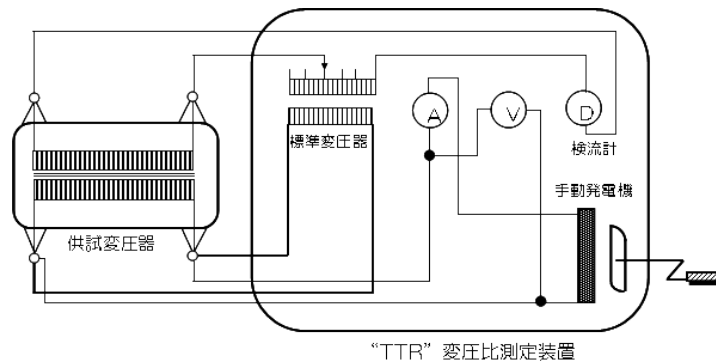


図 2.3.5-21 変圧比測定回路

JEC-2200-1995 変圧器の判定基準は仕様に対し $\pm 0.5\%$ 以内である。表 2.3.5-7 に測定結果を示す。変圧比の仕様は 9.5652 で、いずれの相も判定基準を満足した。

表 2.3.5-7 変圧比測定結果

測定対象	U-V/u-v	V-W/v-w	W-U/w-u
変圧比	9.559	9.562	9.552
銘板比	-0.06%	-0.03%	-0.14%

d. 短絡インピーダンス

一次側を短絡、二次側に定格電流 (167 A) を通電し、二次側端子電圧を測定した。試験時の冷媒温度は 68 K だった。測定回路を図 2.3.5-22 に示す。

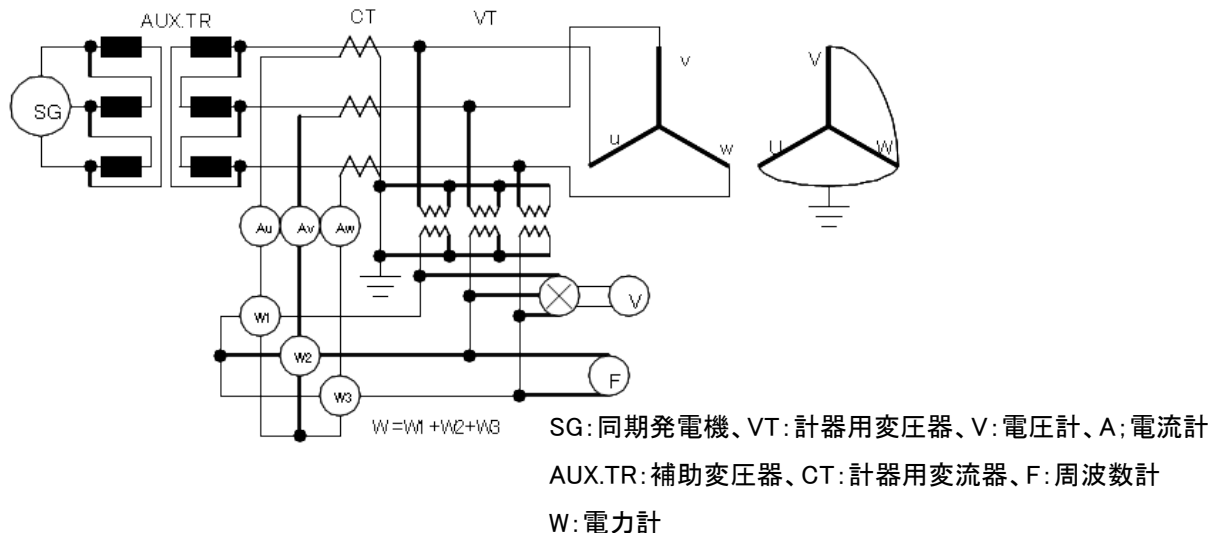


図 2.3.5-22 短絡インピーダンス測定回路

JEC-2200-1995 変圧器の判定基準は仕様に対し $\pm 7.5\%$ 以内である。短絡インピーダンスの仕様は 3% であり、二次端子電圧の測定結果は 206.24 V だった。 $\%Z$ に変

換すると、

$$\%Z=206.24 \text{ V}/6900 \text{ V} \times 100=2.99 \%$$

となり、判定基準を満足した。

e. 負荷損

一次側の2線を短絡、対応する二次側の2線に定格電流（167 A）を通電し、キャンセル法により負荷損を測定した。これを異なる2線についても測定し、合計値の1/2を負荷損とした。測定時の冷媒温度は66 Kだった。測定回路を図 2.3.5-23 に示す。

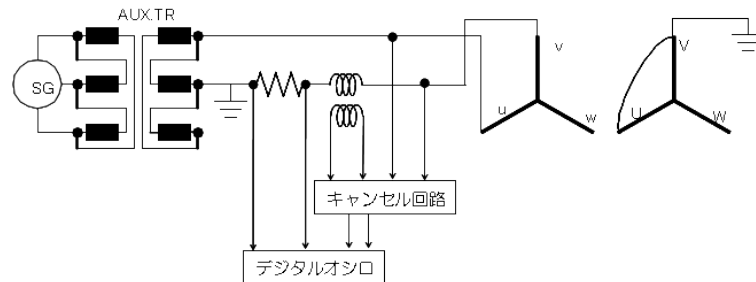


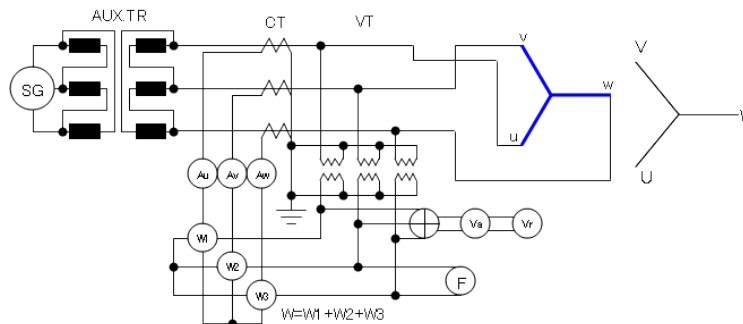
図 2.3.5.23 負荷損測定回路（U-V 相測定時）

JEC-2200-1995 変圧器では負荷損の判定基準を保証値+15 %以内と規定している。これは、負荷損が大きい油入変圧器を念頭に置いたものである。超電導変圧器は非常に小さいためこの判定基準を採用せず、記録のみとした。

測定結果は、26.9 W であった。計算値 32 W とほぼ同じであった。

f. 無負荷損、無負荷電流

一次側を解放、二次側に定格電圧 6.9 kV を印加し、無負荷損と無負荷電流を測定した。試験時の冷媒温度は 66 K だった。試験回路を図 2.3.5-24 に示す。



SG:同期発電機、VT:計器用変圧器、V:電圧計、A;電流計

AUX.TR:補助変圧器、CT:計器用変流器、F:周波数計

W:電力計

図 2.3.5-24 無負荷損、無負荷電流測定回路

JEC-2200-1995 変圧器の判定基準は、
 無負荷損：仕様に対し+10 %以下
 無負荷電流：仕様に対し+30 %以下
 である。測定結果は、
 無負荷損：7.92 kW（仕様：8 kW に対し、-1 %）
 無負荷電流：0.875 %（仕様：1.59 %に対し、-45 %）
 となり、判定基準を満足した。

g. 絶縁抵抗

一次側及び二次側の各巻線を一括し、1000 V メガーにより絶縁抵抗を測定した。試験時の冷媒温度は 68 K あった。

測定結果は、一次～二次・接地間、二次～一次・接地間、一次～二次間のいずれも 2000 MΩ 以上あり正常であった。

h. 短時間交流耐電圧（加圧試験）

電圧を印加しない巻線、鉄心、フレーム、締結ボルト等を接地し、被試験巻線に所定の電圧を 1 分間連続して印加し、巻線間、巻線対地間の短時間交流耐電圧性能を試験した。試験電圧は、一次巻線が 140 kV、二次巻線が 16 kV の単相交流電圧である。周波数は 50 Hz、試験時の冷媒温度は 66 K であった。例として一次巻線の試験回路を図 2.3.5-25 に示す。

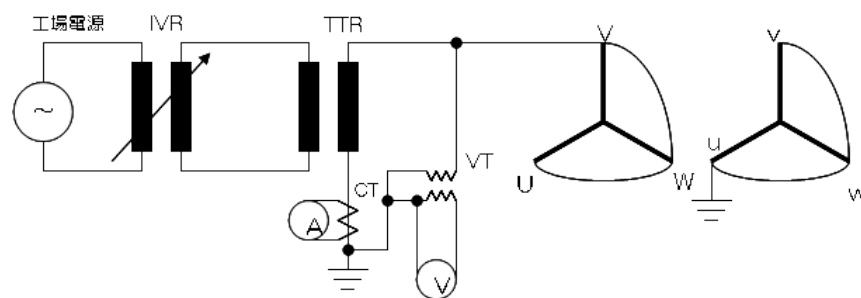


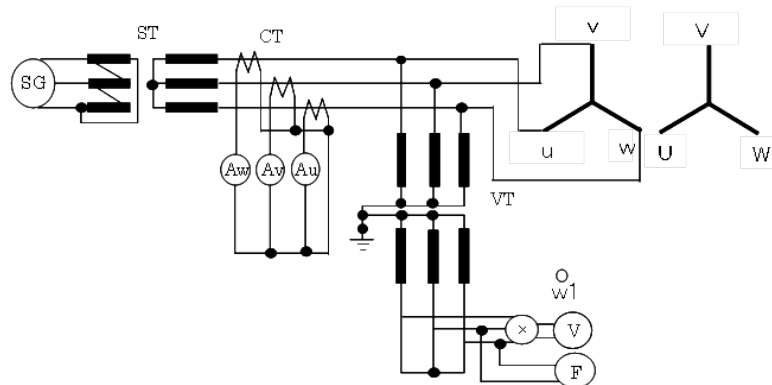
図 2.3.5-25 一次巻線の短時間交流耐電圧試験回路(加圧試験)

JEC-2200-1995 変圧器の判定基準は、絶縁破壊しないことである。試験結果は、一次、二次巻線とも絶縁破壊は見受けられず判定基準を満足した。

i. 短時間交流耐電圧（誘導試験）

一次巻線を開放し、鉄心、フレーム、締結ボルト等を接地して、二次側巻線に定格電圧の 2 倍の三相交流電圧（138 kV）を 1 分間連続して印加し、巻線内部の短

時間交流耐電圧性能を試験した。試験周波数は 120 Hz、試験時の冷媒温度は 66 K であった。試験回路を図 2.3.5-26 に示す。



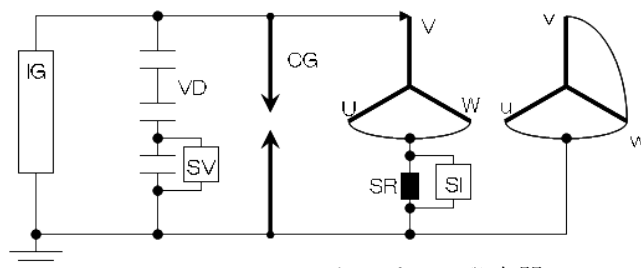
SG:同期発電機、PT:計器用変圧器、V:電圧計、A:電流計
CT:計器用変流器、F:周波数計、W:電力計

図 2.3.5-26 一次巻線の短時間交流耐電圧試験回路(誘導試験)

JEC-2200-1995 変圧器の判定基準は、絶縁破壊しないことである。試験結果は、絶縁破壊は見受けられず判定基準を満足した。

j. インパルス耐電圧試験

電圧を印加しない試験巻線、鉄心、フレーム、締結ボルト等を接地して、被試験巻線にインパルス電圧を印加した。試験電圧は全波が 350 kV で裁断波が 385 kV である。試験時の冷媒温度は 66 K であった。試験回路を図 2.3.5-27 に示す。



IG:インパルス発生器、CG:裁断ギャップ、
VD:分圧器、SR:シャント抵抗、R:接地抵抗、
SV:電圧波形観測用シンクロ、
SI:電流波形観測用シンクロ

図 2.3.5-27 一次巻線の雷インパルス耐電圧試験回路

判定基準は JEC-3031 静止誘導器インパルス耐電圧試験規格に基づき、低減電圧 (全波試験電圧の 1/2) 印加時の電圧、電流波形と全波電圧の電圧電流波形が相似であることをとした。

U 相の試験結果を図 2.3.5-28 に示す。

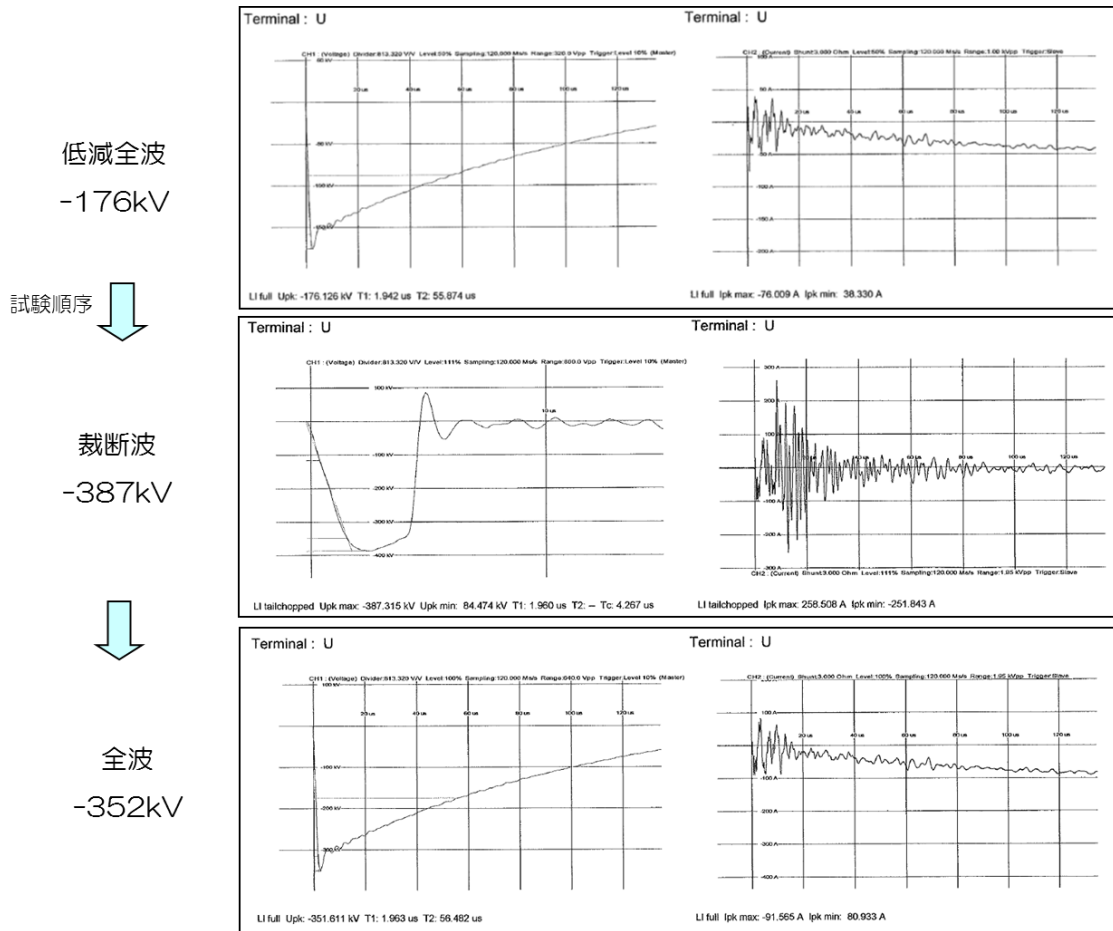


図 2.3.5-28 U相インパルス耐電圧試験結果

図 2.3.5-28 に示すように低減全波と全波の電圧、電流波形は相似であり、判定基準を満足した。その他の相についても同様の結果が得られた。

k. 熱侵入量

無電圧、冷媒温度 77 K の状態（冷却システムは停止）の変圧器において、液面低下量から熱侵入量を算定した。液面計は 16 インチを用いた。液面計が 1 hour で 1 % 変化したときの侵入熱量は、363.8 W となる。この値は、保冷容器底面積 (2.01 m²)、液体窒素密度 (804.2 kg/m³)、液体窒素潜熱 (199.1 kJ/kg) から算出した。図 2.3.5-29 に算定結果を示す。

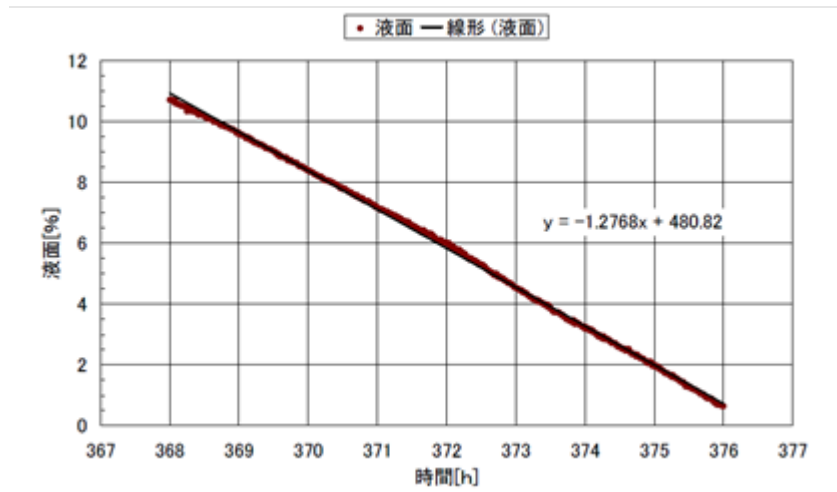


図 2.3.5-29 熱侵入量算定結果

算定結果から、液面の 1 hour 当たりの傾きは、-1.2768 %となり、熱侵入量は、464 Wであった。解析値 447 W（保冷容器:310 W、電流リード部:137 W）とほぼ同等であった。

1. 保冷容器、巻線の初期冷却特性

巻線を収納した保冷容器において、液体窒素の定格液面まで注液する時間を測定した。図 2.3.5-30 に保冷容器に収納前の巻線の写真を示す。写真には、定格液面の位置、巻線の温度を測定した位置 (T1、T2、T3) を記載している。また、図 2.3.5-31 に測定結果を示す。

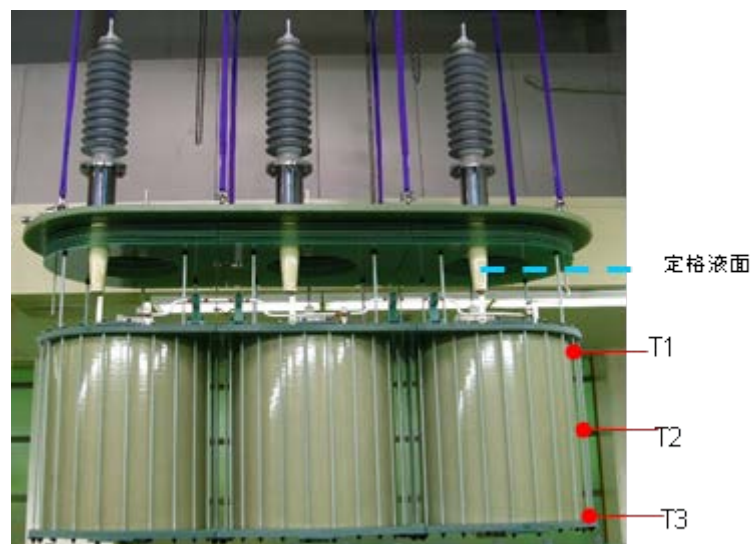


図 2.3.5-30 保冷容器収納前の巻線写真

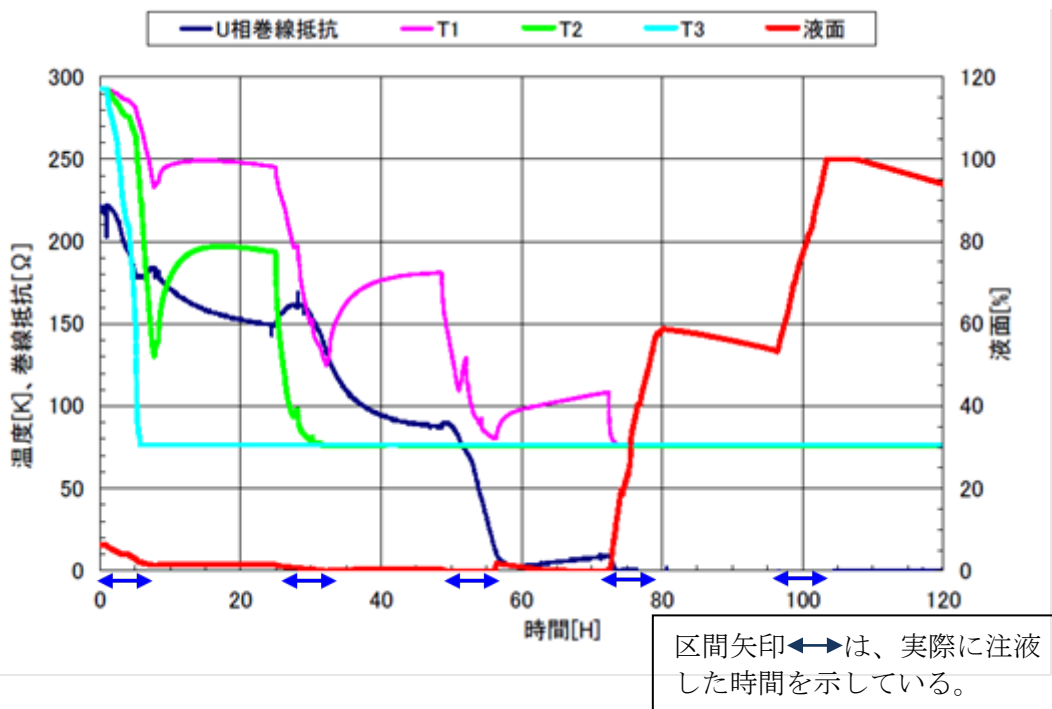


図 2.3.5-31 保冷容器、巻線の初期冷却特性

定格液面までの貯液量は 2800 L であるが、実際の注液量は 4450 L であった。また、定格液面まで注液するための時間は、正味 39 hour であった。

m. 冷凍機停止時の特性

無電圧、冷媒温度 66 K にある 2 MVA 級変圧器モデルにおいて、冷凍機運転停止時に 70 K に上昇するまでの時間を測定した。図 2.3.5-32 に測定結果を示す。液面、巻線温度の測定位置は保冷容器、巻線の初期冷却特性と同じである。

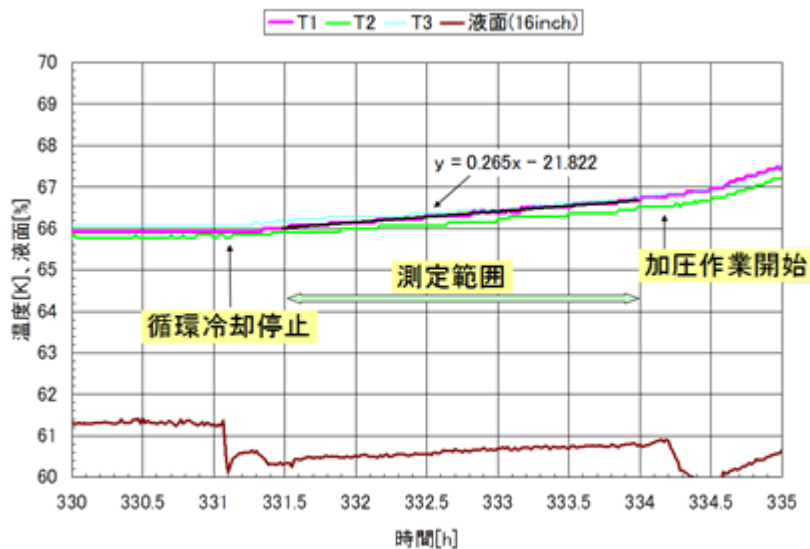


図 2.3.5-32 冷凍機停止時の特性

測定の結果、冷凍機停止時の温度上昇は 0.265 K/h であった。70 K まで温度上昇する時間は 7.6 hour と推定される。本試験では巻線の発熱が無い状態で実施したため変圧器が実際に運用されている状態とは異なるが、冷凍機が停止状態になったとしても、直ちに液体窒素温度が上昇して運転を停止する事態には至らないと考えられる。

n. 初期冷却特性

冷却システムの運転フローを図 2.3.5-33 に示す。2 MVA 級変圧器モデルの冷却では、サブクール液体窒素による冷却を開始するために、①2 MVA 級変圧器モデル（容器）及び循環窒素ポンプへの液体窒素注入、②冷凍機のクールダウン、③飽和液体窒素のクールダウンが必要となる。循環ポンプユニットで冷凍機に送られた液体窒素は、冷凍機のサブクーラにて低温のネオンと熱交換し、2 MVA 級変圧器モデルの下部へと供給される。変圧器で熱負荷により温度上昇した液体窒素は、2 MVA 級変圧器モデルの上部から内圧により循環ポンプユニットへと戻される。循環ポンプユニットは大気圧保持され、圧力変動により減圧状態となった場合は外部から窒素ガスが供給される。ここでは、初期冷却特性として冷凍機のクールダウン結果及び液体窒素のクールダウン結果について示す。

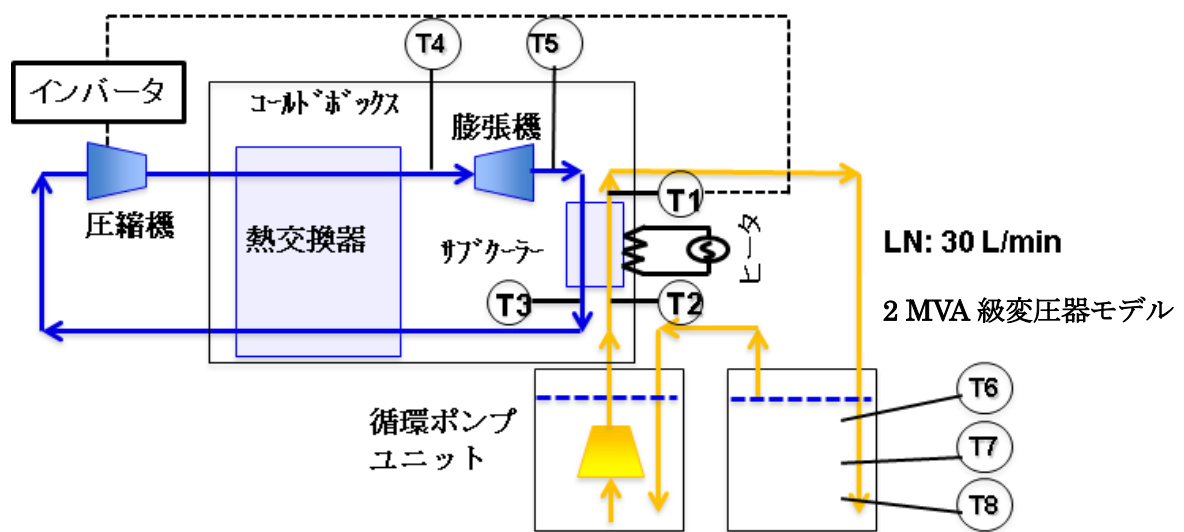


図 2.3.5-33 冷却システム運転フロー

図 2.3.5-34a に冷凍機のクールダウン結果を示す。クールダウン開始時のサブクーラ出口ネオン温度 (T3) が 150 K となっている。これは、冷凍機の試運転に伴うものである。膨張タービンとターボ圧縮機を起動すると徐々にタービン入口温度 (T4) 及びタービン出口温度 (T5) が降下を開始し、約 180 min でサブクーラ出口ネオン温度 (T3) が 80 K に到達した。その後は液体窒素の冷却に備えるためサブクーラに内蔵の加熱ヒーターを使用し温度一定にて継続運転した。

図 2.3.5-34b に液体窒素のクールダウン結果を示す。超電導変圧器及び循環ポンプユニットには飽和状態(約 77 K)で約 3 m³の液体窒素が充填されている。2 MVA 級変圧器モデルの運転では、冷凍機で発生する低温のネオンガスと液体窒素を熱交換させ、所定の温度まで液体窒素を冷却しサブクール状態とする必要がある。

冷凍機を 77 K まで冷却した状態で、液体窒素の循環ポンプを起動すると液体窒素の冷却が開始される。冷凍機で冷却された液体窒素は 2 MVA 級変圧器モデルの下部へと送られるため、冷却に伴い変圧器下部、中間部、上部の順で温度降下が進んでいることが確認できた。一方、77 K から 70 K までの冷却では液体窒素の体積が約 4 %減少するため、冷却中に変圧器内部の液面が温度降下に伴い低下する。冷却開始後 120 min から 240 min までの間は温度降下が見られないが、これは液面低下を補うため飽和液体窒素を補給したためである。

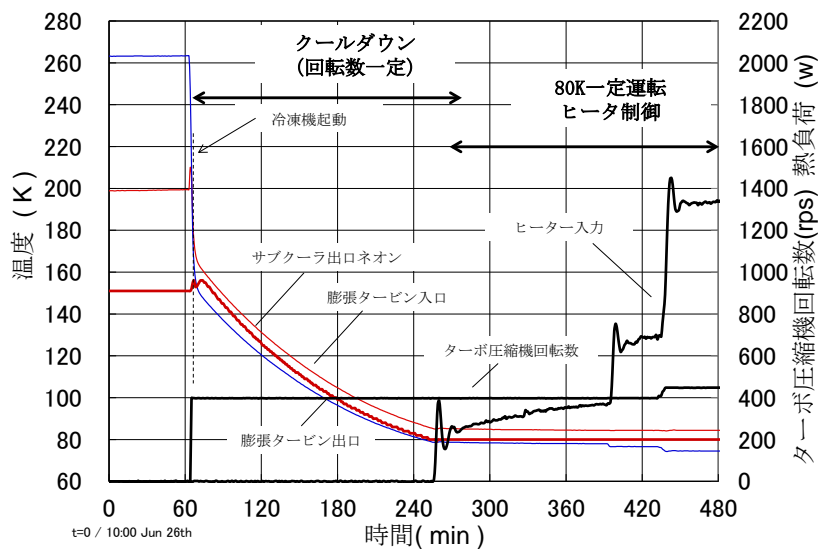


図 2.3.5-34a 冷凍機の初期冷却運転結果

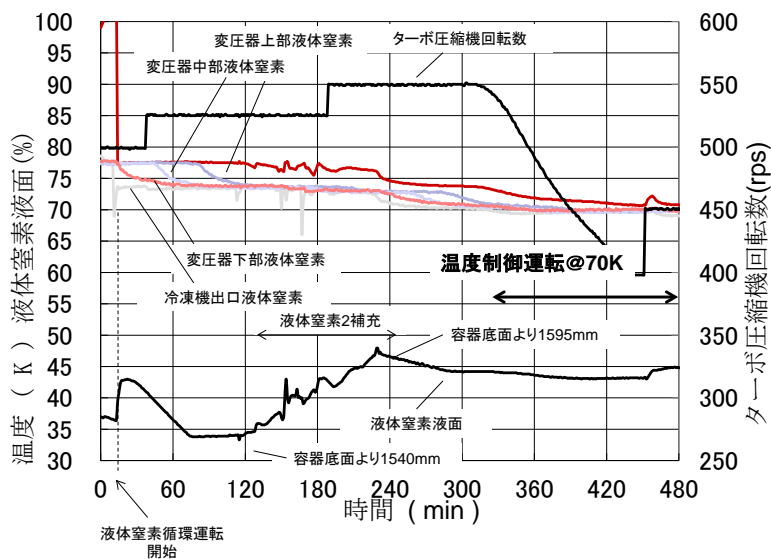


図 2.3.5-34b 液体窒素クールダウン結果

冷却開始後 360 min 後には変圧器下部の温度 (T8) が 70 K に到達したため、ターボ圧縮機の回転数をサブクーラ出口 LN 温度 (T3) が 70 K で一定となるよう自動制御運転に切り替えた。この温度制御運転により圧縮機の回転数が徐々に減少し、冷却開始後 420 min 後には変圧器全体が 70 K でほぼ均一な状態となった。これにより、超電導変圧器の運転に必要な冷却及び液体窒素の循環冷却が安定的に実施できることが実証された。

o. 冷却システム冷凍能力

表 2.3.5-8 に冷凍能力測定結果を示す。冷却システムの冷凍能力を測定するには、既知の熱負荷を与える必要があるが、2 MVA 級変圧器モデルと冷凍機を接続した状態では変圧器や循環ポンプユニットでの侵入熱の影響により正確な測定は困難である。そこで、2 MVA 級変圧器モデルと接続した状態と同じ温度条件での冷凍機単体での冷凍能力を測定した (試験 No.2 及び No.3)

一般的に冷凍機の冷凍能力は冷却温度に依存する。ターボブレイトン冷凍機ではサブクーラ出口ネオン温度に依存するため、超電導変圧器と接続し、液体窒素を所定の 66 K で供給した際のサブクーラ出口ネオンの温度 (T3) を基準に冷凍能力を測定した。試験 No.1 は 2 MVA 級変圧器モデルの無負荷 (停止) 状態での結果である。試験 No.2 は No.1 と同じ状態での冷凍能力を測定した結果である。この結果より冷却システム全体の侵入熱 (保冷容器侵入熱、トランスファーチューブ侵入熱、循環ポンプユニット侵入熱及び循環ポンプ発熱量の合計) は約 800 W という結果が得られた。一方、No.1 と同じ状態での最大の冷凍能力 (試験 No.3) では 2600 W という結果が得られ、プロジェクト最終目標である冷凍能力 2 kW の冷凍機を実現することができた。またこの時の冷凍機入力 は 54.1 kW であり、運転温度 66.9 K で冷凍効率 (COP) は 0.0481 となった。

表 2.3.5-8 冷凍能力測定結果

	サブクーラ出口 LN T1(K)	サブクーラ入口 LN T2(K)	サブクーラ出口 ネオン T3(K)	圧縮機 回転数(rps)	冷凍機入力 (kW)	ヒータ入力 (W)
1	66.1	67.0	66.8	426	22.4	—
2	—	—	66.8	426	22.5	791
3	—	—	66.9	565	54.1	2600

p. 定格通電時冷却特性

図 2.3.5-35 に定格通電時の冷却特性結果を示す。本試験は液体窒素の温度を 67 K に冷却した後に実施した。冷凍機は温度制御運転を行った。圧縮機の回転数は液体窒素の温度を一定に保つために減少傾向となり、最低回転数である 400 rps まで減少した。なお、330 min 付近において圧縮機回転数が増加しているが、これは液体窒素温度の設定を 67 K から 66 K へ変更したためである。2 MVA 級変圧器モデルの通電時においても液体窒素の温度は安定し、変圧器の超電導状態を安定して維

持することが可能であることが実証された。

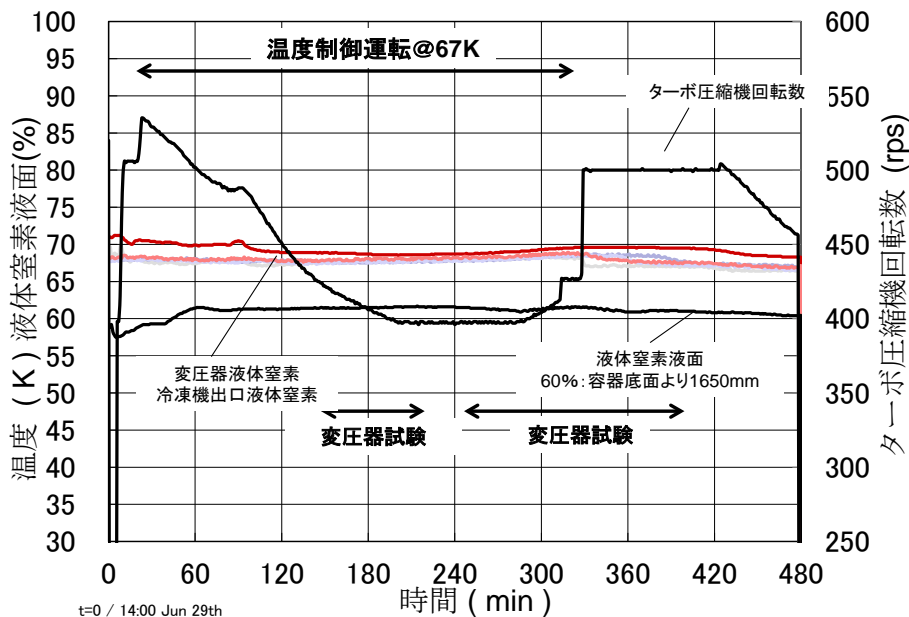


図 2.3.5-35 定格通電時の冷却特性結果

(4) 2 MVA 級変圧器モデル試験結果の総括

表 2.3.5-9 に 2 MVA 級変圧器モデル試験結果の総括を示す。いずれも判定基準を満足することを確認した。

表 2.3.5-9 2 MVA 級変圧器モデル試験結果の総括

項目	判定基準	結果
直流I-V	260A (定格電流×1.1)	270A
変圧比	9.5652 (仕様値) ±0.5%	9.559 (U-V) 9.562 (V-W) 9.552 (W-U)
%インピーダンス	3% (仕様値) ±7.5%	2.99%
無負荷損	8kW (仕様値) +15%以下	7.92kW
負荷損	32W (計算値)	26.9W
短時間交流耐電圧	140kV (50Hz) 1分間印加に耐えること	絶縁破壊無し
雷インパルス耐電圧	全波-350kV、裁断波-385kVに耐えること	絶縁破壊無し
熱侵入量	447W (計算値)	464W

2.3.5-2 20 MVA 級超電導変圧器の設計検討（九州電力）

(1) 超電導変圧器の設計

20 MVA 級変圧器の設計は、次のとおり設計検討を進めた。① 定格 66 kV の耐電圧や機器構成に起因する技術、電流に起因する巻線構成、冷却システム技術は 2 MVA 級変圧器モデルの設計結果（実証後）と III-2.3.1 節で得られた要素技術の開発成果を反映した。② 損失低減技術に関しては、一般変圧器の設計技術も導入した。③ 鉄損を低減するため鉄心は内鉄形とし室温空間に配置し、巻線は絶縁面から一層毎に GFRP 巻枠を使用する円筒巻線とした。④ 設計検討の結果に基づき、超電導変圧器の特長であるコンパクト性、高効率性等の既存機器に対する技術的な優位性をまとめた。

20 MVA 級変圧器の基本仕様を後述の表 2.3.5-10 に示す。変圧器巻線の線材の I_c 値は 100 A～150 A/5mm·w(@77 K, s.f.)として、一次巻線は 3 本並列、二次巻線は 24 本並列とした。設計に当たっては、1 ターン電圧 (V/N) をパラメータにして超電導変圧器の高さ寸法、重量等を計算した。%インピーダンス（巻線抵抗と漏れリアクタンスのベクトル和）は 15 %とした。この計算式は巻線抵抗が無視できるほど小さいので式 2.3.5-1 で与えられる。ここで、P:一脚当たりの変圧器容量、 α :一次・二次巻線間隔、 d_1, d_2 :一次及び二次巻線の幅、f:周波数、 l_m :一次及び二次巻線長さの算術平均長、q:漏れ磁束通路数、V/N:1 ターン当たりの電圧、h:巻線高さ、k:磁束通路高さ(巻線高さ)に対する補正係数 ($k \doteq 1 - (\alpha + d_1 + d_2) / (\pi h)$)である。

$$\% \text{インピーダンス} = 0.395 \frac{Pl_m [\alpha + (d_1 + d_2) / 3] 2f}{q (V/N)^2 \cdot h/k 100} \quad (\text{式 2.3.5-1})$$

また、1 ターン電圧 V/N は式 2.3.5-2 で、%インピーダンスは式 2.3.5-3 で与えられる。ここで、B:鉄心の磁束密度、S:鉄心断面積である。式 2.3.5-1 に式 2.3.5-2 を代入し求め、P、f、k 等のほぼ一定とみなせる係数はまとめて K とした。

$$V/N = 4.44 fBS \quad (\text{式 2.3.5-2})$$

$$\% \text{インピーダンス} = K \frac{l_m (\alpha + (d_1 + d_2) / 3)}{qB^2 S^2 h} \quad (\text{式 2.3.5-3})$$

α 間距離は、前 NEDO 事業の「超電導応用基盤技術開発（第Ⅱ期）」プロジェクトの成果から 50 mm、鉄心の磁束密度は 1.5 T とし、一次巻線の層数を 8 層、二次巻線を 2 層としたときの巻線配置図を図 2.3.5-36 に示す。図 2.3.5-37 に、鉄心重量、巻線高さ及び線材長の V/N 依存性を示す。鉄心重量は 25 V/N 付近で最も小さくなる。これに対し、巻線高さと線材長は 1 ターン電圧 V/N と逆比例の関係になる。

鉄心を室温配置にすると電気絶縁材料の低温容器（一般的に GFRP）が必要となる。これを経済的に製造できる高さは約 2 m である。液体窒素の変温層と窒素ガス空間は約 0.5 m の高さになる。この結果からは 40 V/N 付近の場合のみ、経済的に製造できる範囲となる。また、巻線高さを低くするには、式 2.3.5-3 から α 間を小さくすることが有効であるが絶縁上から限界がある。

そのため、磁束通路数を 2 に増やす検討を行い、巻線高さや鉄心重量を低減することが可能となった。磁束通路数 2 での鉄心重量、巻線高さ及び線材長の比較を図 2.3.5-38 に示す。巻線高さは二次巻線数 2 層の方が小さいこと、鉄心重量と線材長は二次巻線数による影響は殆どないことから二次巻線を 2 層とした。また、一次巻線は 8 層、V/N は巻線高さが 1,000 mm 以下となる 1 ターン電圧を 35~40 V/N とした。

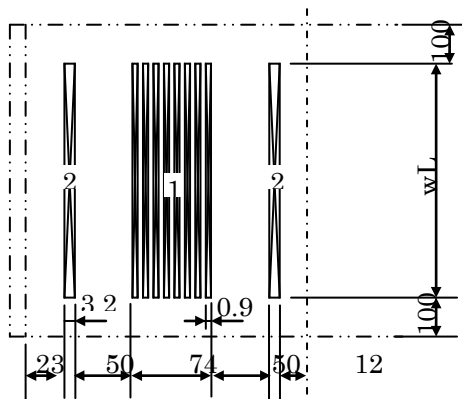


図 2.3.5-36 巻線配置図(磁束通路数 2、一次巻線 8 層、二次巻線 2 層)

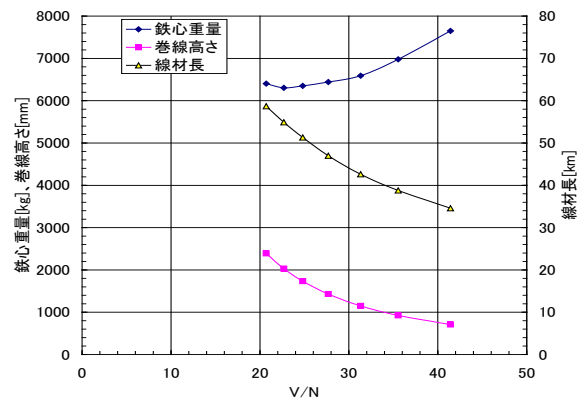
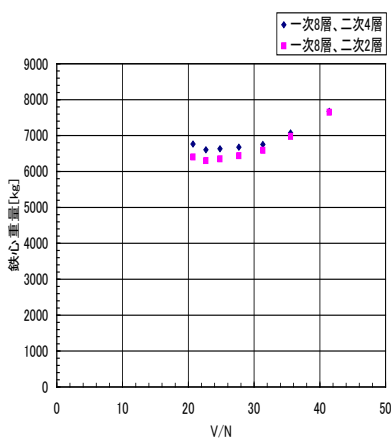
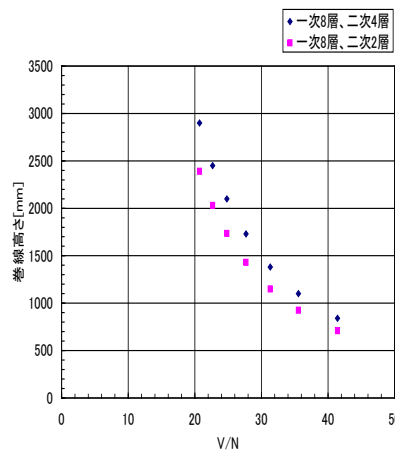


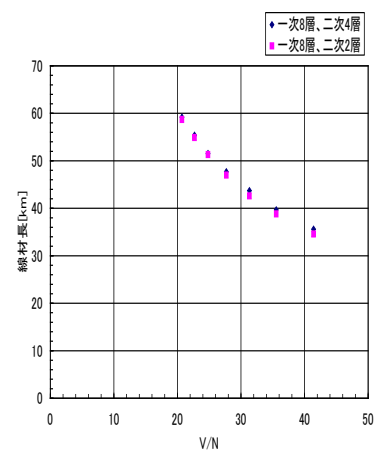
図 2.3.5-37 鉄心重量、巻線高さ及び線材長の V/N 依存性



(a) 鉄心重量比較



(b) 巻線高さ比較



(c) 線材長比較

図 2.3.5-38 一次巻線を 8 層、二次巻線を 2 層と 4 層とした比較

次に、巻線仕様を決めて磁界解析を行った。二次巻線の電流は 1,674 A（ピーク電流は 2,367 A_{peak}）で、線材垂直方向の磁界を 0.1 T とし 66 K での線材 I_c 値から素線 24 本の並列導体となる。24 本並列導体を 2 並べ 12 重ねで構成し、素線の電流分流を均等にする転位を行った。11 箇所の転位部（1 層当たり 129.1 ターン）にて各々の素線が全ての半径方向位置を経験するようにした。これらを基に、20 MVA 級変圧器の基本設計を行った。図 2.3.5-39 に巻線配置図を示す。この仕様を基に磁界解析を行った。図 2.3.5-40 に Y 系超電導線材の I_c とロードラインを、図 2.3.5-41a に磁束線図を、図 2.3.5-41b に磁界分布を示す。

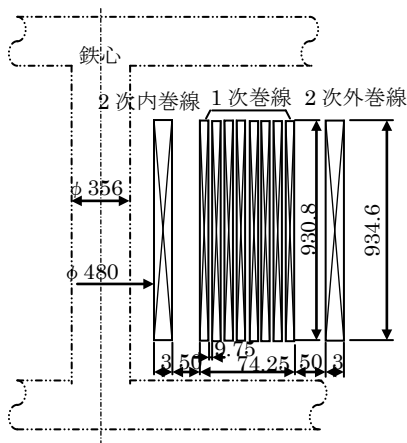


図 2.3.5-39 20 MVA 級変圧器の巻線配置

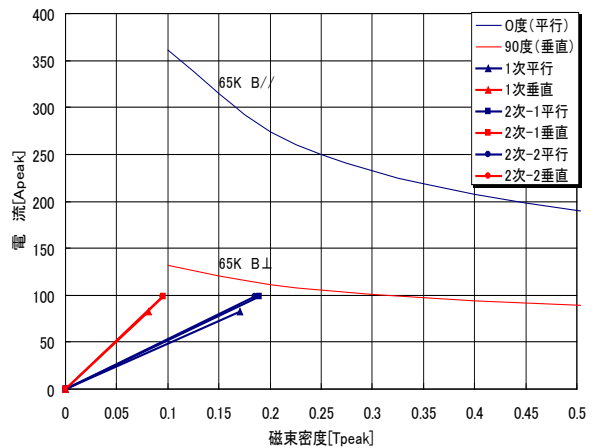


図3.1-6 Y系20MVA-HTS変圧器のロードライン (w=5mm, I_c=100A at 77.3K相当)

図 2.3.5-40 Y 系超電導線材 I_c 値とロードライン

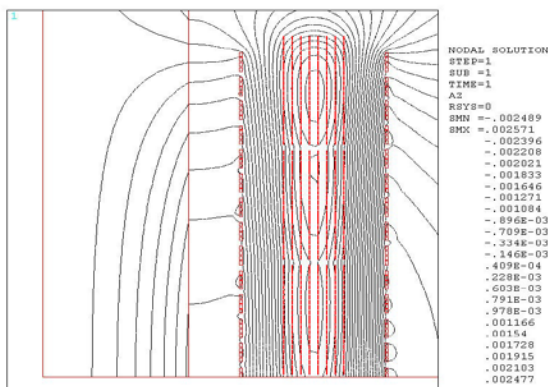


図 2.3.5-41a 磁束線図

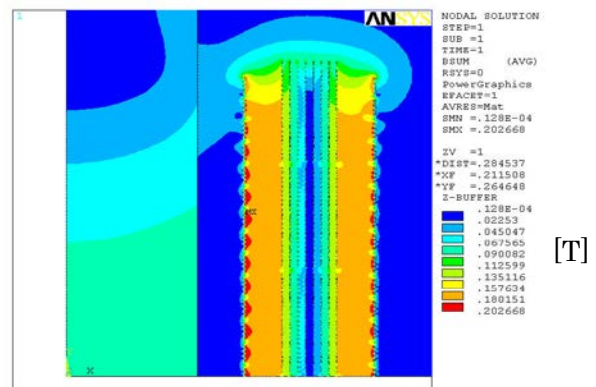


図 2.3.5-41b 磁界分布

さらに、巻線仕様に基づいて短絡時の短絡電流解析を行った。図 2.3.5-42 に、2 巻線変圧器の二次側に換算した等価回路図を示す。a は変圧比（66,000/6,900=9.565）である。このうち、R は一次巻線抵抗 R1 と二次巻線抵抗 R2 を計算により求めて分離可能であるが、L は分離不可能である。

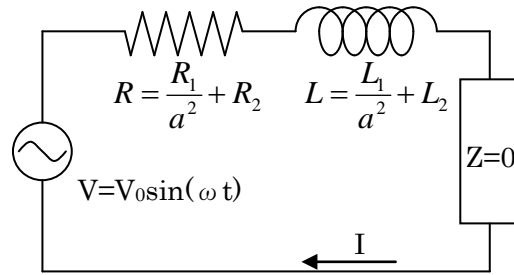


図 2.3.5-42 二次側換算等価回路

L は、%インピーダンス=%リアクタンスとして、

$$L = \frac{V \times \%インピーダンス}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot I} = \frac{6,900 \times 0.15}{2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot 1,673} = 1.641 \times 10^{-3} \quad [H]$$

ここで、V:二次側印加電圧、I:二次側電流であり、その他の記号は前述した式 2.3.5-1 から式 2.3.5-3 と同じである。図 2.3.5-42 に示す回路の回路方程式を解いて、電流 I を求めると、

$$I = \frac{V_0}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \times \left\{ \sin(\omega \cdot t + \phi) - e^{-\frac{R}{L}t} \cdot \sin \phi \right\}, \quad \phi = \tan^{-1} \left(\frac{R}{\omega L} \right) \quad (\text{式 2.3.5-4})$$

となる。ここで、V₀:二次側印加電圧波高値 (9,758 [V] (=6,900×√2))、R:導体抵抗、φ:定常状態時の電圧と電流の位相角等である。

一方、巻線を断熱と仮定したときの熱平衡式は式 2.3.5-5 となる。

$$\rho(T) \cdot \frac{l}{S} \cdot I(t, T)^2 = l \cdot S \cdot \gamma \cdot C_p(T) \frac{dT}{dt} \quad (\text{式 2.3.5-5})$$

ここで、ρ(T):電気抵抗率(温度依存性を考慮)、l:導体長さ、S:導体断面積、γ:密度、C_p(T):比熱(温度依存性を考慮)等である。ここでいう断熱とは、超電導導体と液体窒素の熱交換を考慮しないという意味である。短絡電流を求める場合において、短絡電流継続時間が 0.2 sec という短時間内では熱交換の寄与は極めて小さいと考え簡略化したものである。

式 2.3.5-4 と式 2.3.5-5 を連立させて解くことにより、電流値と温度を求めることができる。解析は次の条件で実施した。① 超電導線の構成材(基板、中間層、超電導層、銀層、安定化材)の温度は一樣とする。② 液体窒素への熱伝達は考慮しない。③ 投入位相は 0°(電圧 0 V)とし最も厳しい条件とする。④ 電気抵抗に寄与する構成材は安定化材と銀層とし、超電導層と基板には電流が流れないこととする。⑤ 熱容量に寄与する構成材は、安定化材、銀層、基板(t=0.1 mm)とする。⑥ 短絡継続時間は、配電システムで実際に設定されている 0.2 sec とする。

20 MVA 級変圧器の短絡解析結果を図 2.3.5-43 に示す。二次側換算の定格短絡電流(単純換算値)は、 $1,674 \text{ A}/0.15 = 11,160 \text{ A}$ となり、超電導線 1 本あたり 465 A/枚 となり、波高値で $658 \text{ A}_{\text{peak}}$ に相当する。具体的には、短絡電流 $11,160 \text{ A}$ 、最大到達温度 194.7 K 、第 1 波波高値 $7,587 \text{ A}_{\text{peak}}$ 、第 12 波波高値 $14,159 \text{ A}_{\text{peak}}$ 、対定格電流倍率 5.98 倍、一次巻線単位長さ当りのエネルギー 287 J/m 、二次巻線単位長さ当りのエネルギー 410 J/m 、一次二次平均単位長さ当りのエネルギー 343 J/m となった。

また、本解析で得られた温度上昇は 195 K であった。超電導線の I_c の劣化温度は 600 K 程度なので、 I_c 値劣化の可能性は殆どないと考えられる。

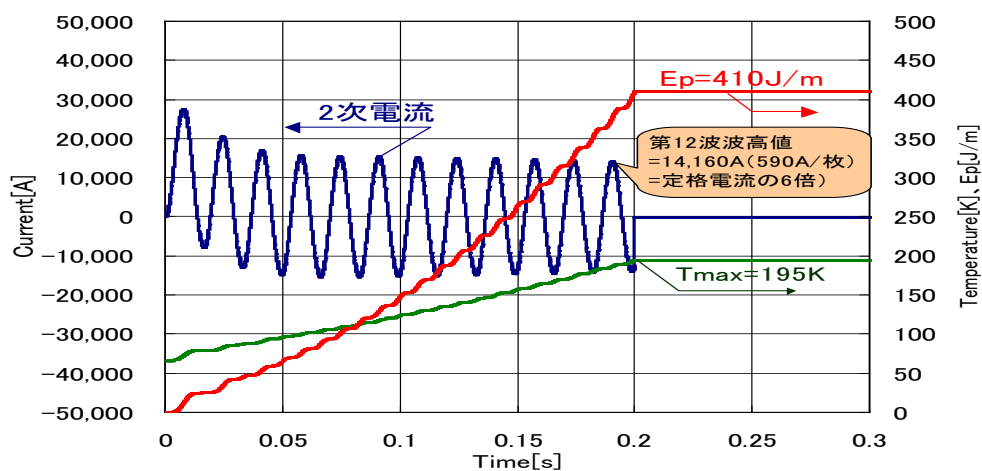


図 2.3.5-43 短絡電流解析結果(二次側電流、温度、単位長の発生エネルギー)

平成 24 年度に 2 MVA 級変圧器モデルと同様に限流機能を付加した 20 MVA 級変圧器の設計検討を行った。限流機能を付加しない場合の基本仕様を踏襲し、限流機能を効果的に発生させるために%インピーダンスは 10% にした。%インピーダンスの調整は、主として V/N と巻線高さで行った。図 2.3.5-44 に巻線配置を、図 2.3.5-45 に Y 系超電導線材の I_c 値とロードラインを、図 2.3.5-46a に磁束線図を、図 2.3.5-46b に磁界分布を示す。%インピーダンスを下げるために巻線高さを調整したため、 15% の変圧器より高くなった。Y 系超電導線材の I_c 値とロードラインから線材の負荷率は約 80% になった。

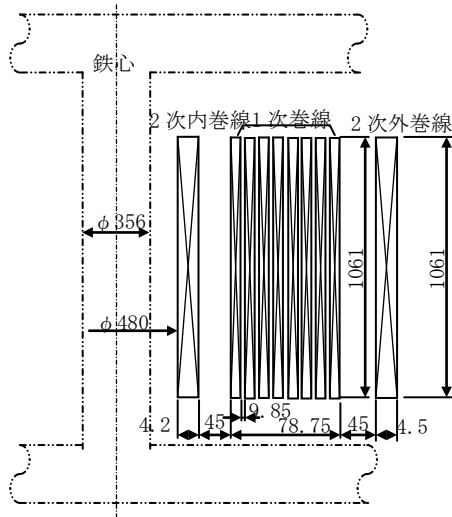


図 2.3.5-44 20 MVA 級変圧器の巻線配置

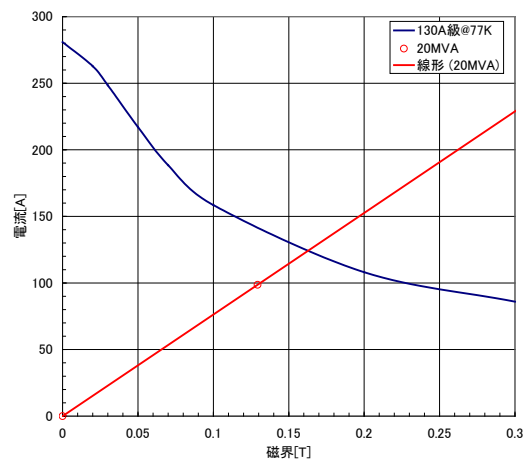


図 2.3.5-45 Y系超電導線材 I_c 値とロードライン

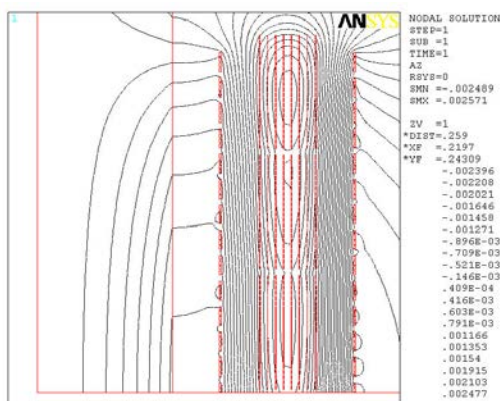


図 2.3.5-46a 磁束線図

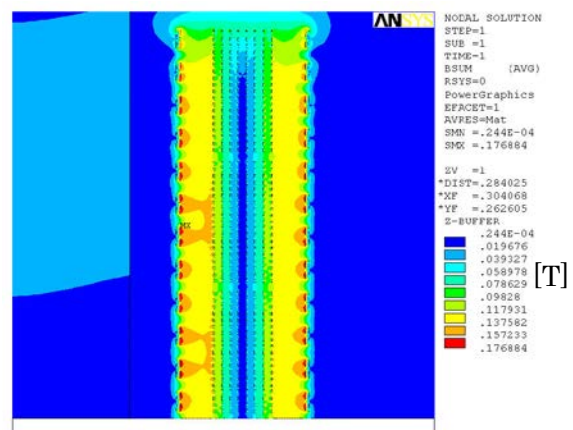


図 2.3.5-46b 磁界分布

限流機能を発揮するためには、 I_c 値を超える過電流時において適切な抵抗を発生させる必要がある。そこで、Y系超電導線材に高抵抗の金属線として厚さ 0.2 mm の CuNi 線を並列配置することにした。発生抵抗の微妙な調整は、Y系超電導線材の銀層の厚さを調整して行うことにした。解析手法は限流機能が無い場合と同じであるため、ここでは省略する。最初に銀層の厚さをパラメータにして、Y系超電導線材の温度と%インピーダンスの傾向分析を行った。図 2.3.5-47 に解析結果を示す。CuNi の厚さが 0.2 mm の場合、0.2 sec 後の%インピーダンスが約 33 %となるのは銀層の厚さを 12 μm とした時であることが分かった。この条件における詳細な短絡電流解析を行い、その結果を図 2.3.5-48 に示す。0.2 sec 後の二次巻線の電流値は 4,803 A で定格電流の約 2.9 倍になった。目標である定格電流の 3 倍以下に限流することが可能になることが分かった。この時の%インピーダンスは 20 MVA 基準で 36 %であり、超電導線の温度は 245 K となった。

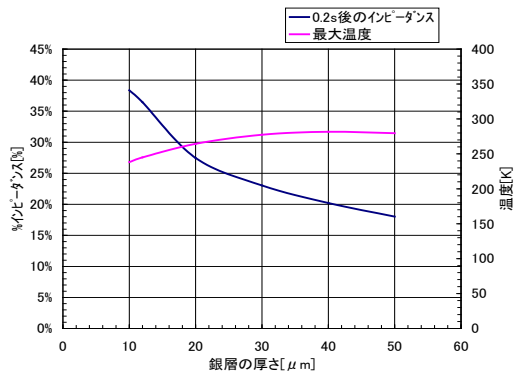


図 2.3.5-47 短絡後 0.2 sec 後における%インピーダンスと Y 系線材最大温度 (CuNi0.2 mm 厚)

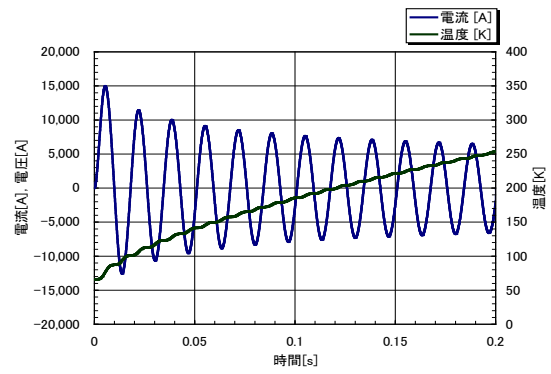


図 2.3.5-48 短絡電流解析結果(二次巻線、CuNi0.2 mm、銀層 12 μm)

以上の検討結果を基に、限流機能を付加した 20 MVA 級変圧器の詳細設計を行った。図 2.3.5-49 に三面図を、図 2.3.5-50 に立体図を示す。

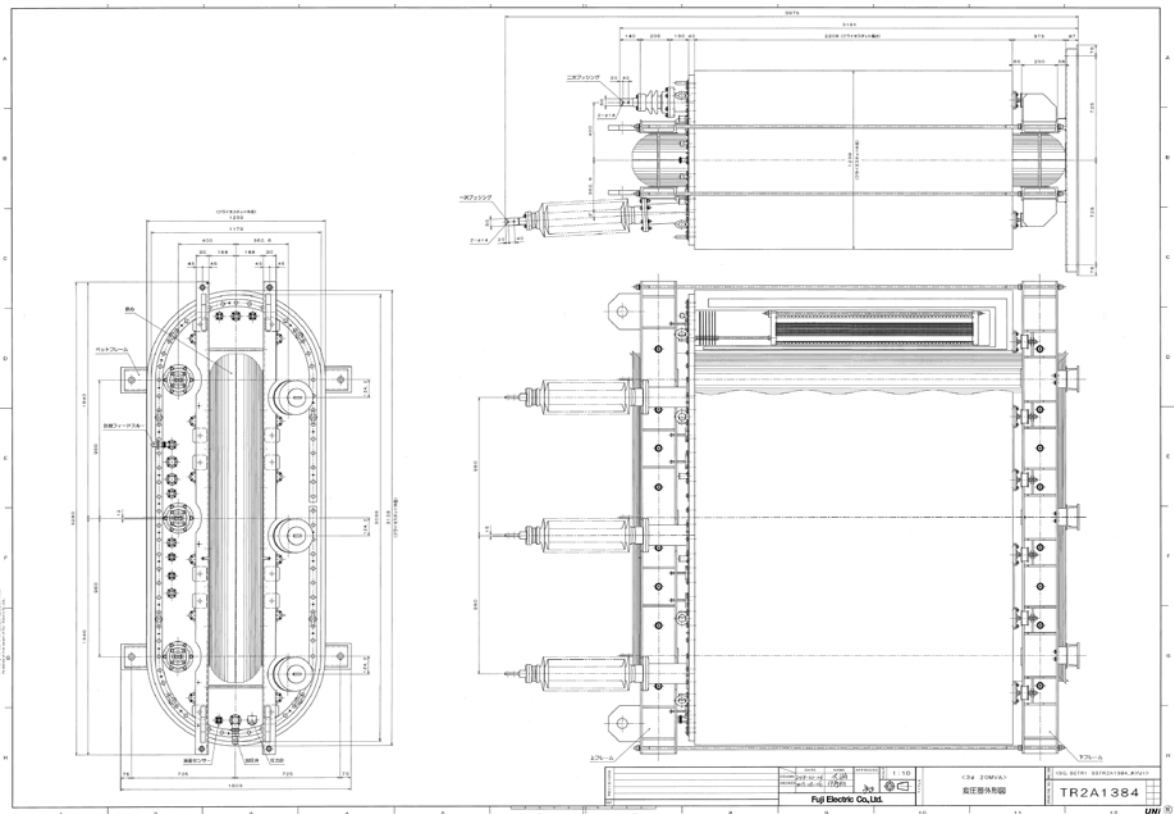


図 2.3.5-49 20 MVA 級変圧器の三面図

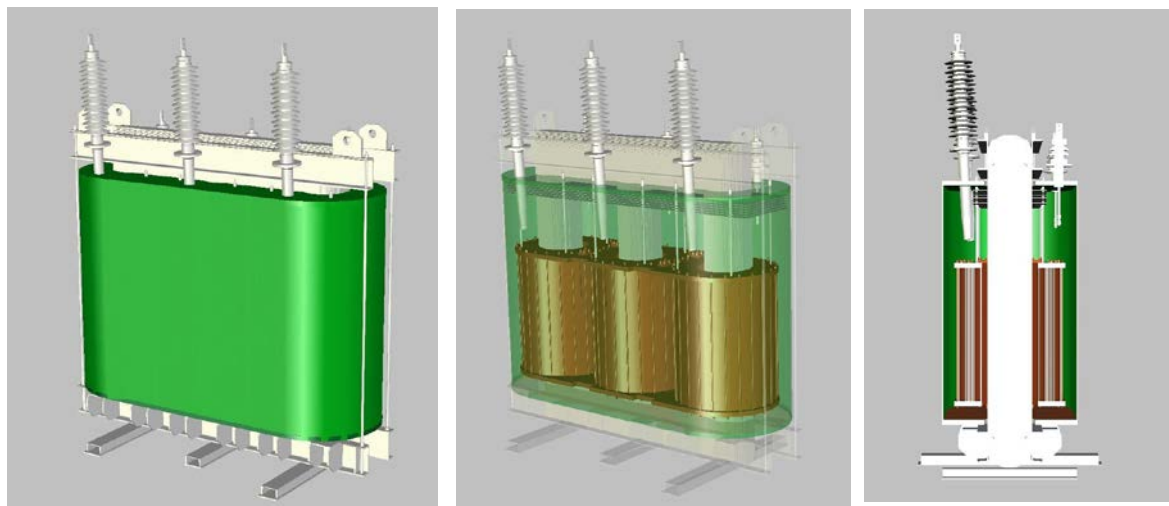


図 2.3.5-50 20 MVA 級変圧器の立体図

ここで、製作した 2 MVA 級変圧器モデルと設計検討した 20 MVA 級変圧器の寸法比較を図 2.3.5-51 に示す。2 MVA 級変圧器モデルの設計指針である、定格 66 kV の耐電圧や電流に起因する巻線構成等を 20 MVA 級変圧器と極力同じにすることを前提として設計した結果、2 MVA 級変圧器モデルと 20 MVA 級変圧器の寸法はほぼ同一になった。したがって、変圧器本体の製作について、2 MVA 級変圧器モデルの製作実績により、20 MVA 級変圧器の製作を見通せるレベルに到達したと言

える。

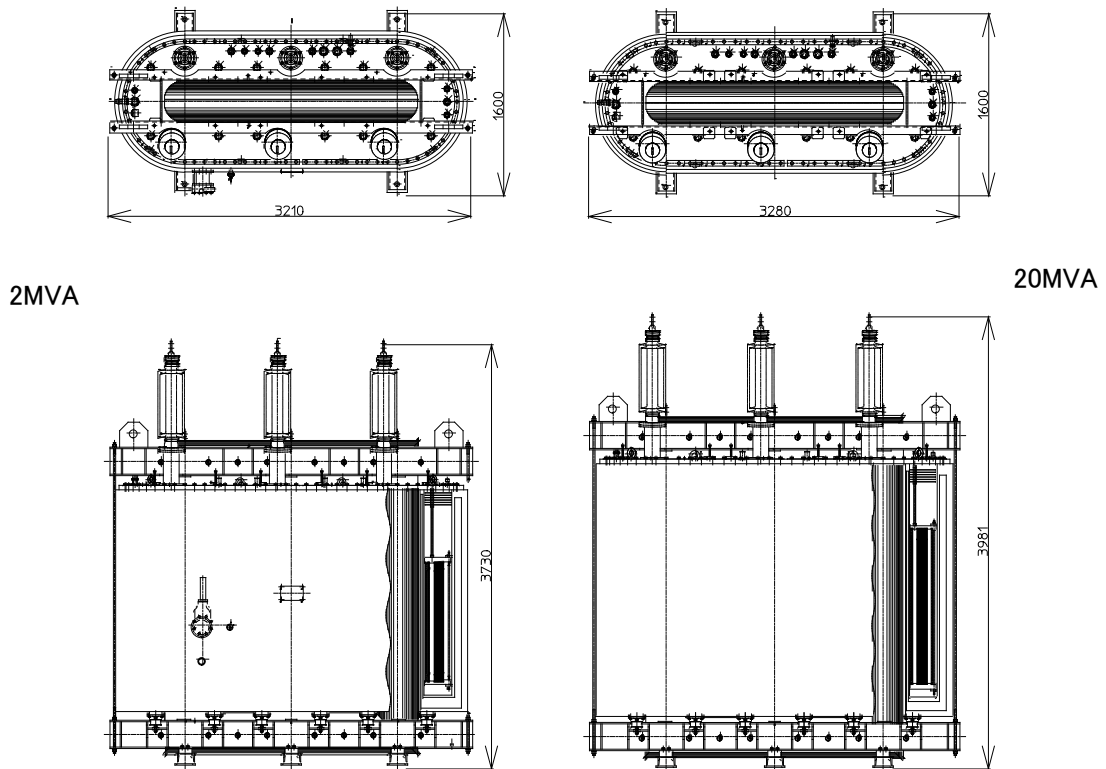


図 2.3.5-51 2 MVA 級変圧器モデルと 20 MVA 級変圧器の寸法比較

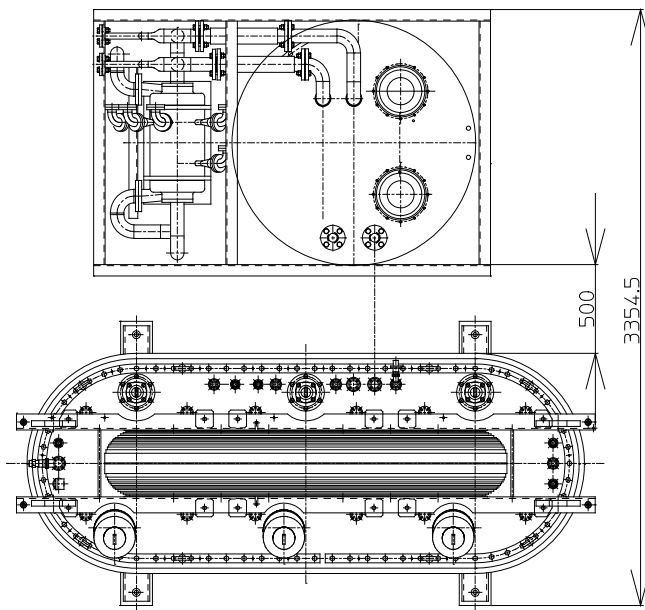
(2) 20 MVA 級超電導変圧器の特性検討

20 MVA 級変圧器の設計検討から、既存油入変圧器に対する軽量性、高効率性等の特性について検討した。2 MVA 級変圧器モデルの試験結果から、保冷容器やブッシング及び冷却システムの特性を反映した。線材は 5 mm 幅 10 分割を適用し、 I_c 値は 150 A@66 K、0.1 T、冷凍機は容量:3 kW、COP:0.06 としている。その検討結果を表 2.3.5-10 に、20 MVA 級変圧器の配置図(a)と外形図(b)を図 2.3.5-52 に示す。

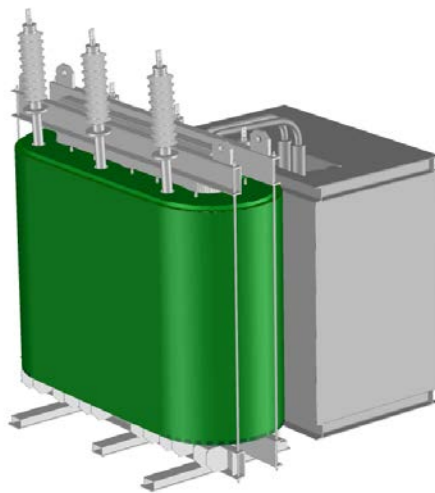
検討の結果、損失面では、20 MVA 級変圧器は保冷容器や電流リード等の熱侵入があるものの、既存変圧器の銅損に対して 20 MVA 級変圧器の交流損失が小さくなり、さらに 20 MVA 級変圧器は鉄損を低減する設計ができることから、冷却動力を考慮しても油入変圧器の 46 % ($\leq 1/2$) となった。また、冷却システムを含めたとしても、重量及び設置面積は油入変圧器の 50 % 程度となった。

表 2.3.5-10 20 MVA 級変圧器と既存油入変圧器の特性比較

	20 MVA 級変圧器	油入変圧器
線材	Y 系超電導線材	Cu
冷却システム	サブクール液体窒素 (巻線)	油冷却
損失	46 % ($\leq 1/2$)	100 %
銅損/交流損失	31 % (交流損失)	91 % (銅損)
鉄損	7 %	9 %
熱侵入	8 % (保冷容器・電流リフト)	—
効率	99.7 %	99.4 %
重量(冷却システム含む)	50 % ($\approx 1/2$)	100 %
設置面積(冷却システム含む)	51 % ($\approx 1/2$)	100 %



(a) 配置図



(b) 外形図

図 2.3.5-52 20 MVA 級変圧器

2.3.5-3 まとめ

(1) 2 MVA 級超電導変圧器モデルの設計検討

- 2 MVA 級変圧器モデルは 20 MVA 級変圧器の実用機との相関性（耐電圧や機器構成に起因する技術（変圧器のブッシング、鉄心、巻線構成等）は極力実機相当とした）を反映して、巻線技術や限流機能試験の成果を基に設計検討を行った。
- 巻線構成における線材並列数は一次 1 本：二次 8 本とし、%インピーダンスは限流機能を考慮して 2 MVA 基準で 3 %とし、磁界解析や短絡電流解析から巻線構成や CuNi 厚さ 0.2 mm 等とした。
- 同変圧器モデルの交流損失低減や耐電圧特性等を検証する課通電試験は JEC2200-1995 変圧器に準拠し策定した。
- 容器容量 10 m³ 級の大型非磁性保冷容器を設計・製作し、既存の小型容器相当（20 W/m² 以下）の保冷性能を有していることを確認した。
- 同変圧器モデルの設計検討に基づき巻線製作、変圧器組立を行い、変圧器巻線性能試験を実施した上で、冷却システムと組み合わせて超電導変圧器システムを構成した。
- 課電通電試験の基本計画を充実させた試験計画書に基づき試験、評価を行い、性能が設計どおりであることを確認した。また、冷却システムについても超電導変圧器の運転に必要な性能を有していることを確認した。

(2) 20 MVA 級超電導変圧器の設計検討

- 既存油入変圧器を基に超電導変圧器の特長であるコンパクト性、高効率性等から巻線構成を主体に検討を進め、2 MVA 級変圧器モデルの設計、単体及び冷却システムとの組み合わせ試験、評価に加え、大電流巻線モデル等の検証、検討結果を踏まえ、平成 22 年度に行った 20 MVA 級変圧器の設計にフィードバックした。
- 設計結果を既存油入変圧器と比較すると、損失は冷却動力を考慮しても油入変圧器の 46 % (1/2 以下) で、鉄心の低減等から変圧器（冷却システムを含む）の重量及び設置面積は 50 % 程度となる結果を得た。

2.4 超電導電力機器用線材の技術開発

2.4.1 線材特性の把握

(ISTEC、住友電気工業、九州大学、早稲田大学、京都大学、JFCC)

2.4.1-1 IBAD 基板-PLD/MOD 線材の経時・経年変化

(1) 275 kV ケーブルにおける線材特性変化

各超電導電力機器の実用化に向けて必要となる線材特性変化要因及び限界の把握を行うにあたり、プロジェクト前半では、275 kV 高電圧超電導ケーブルに必要な線材で、スクライビング等の複雑な線材加工が無い線材の特性変化を調査した。

・経時特性変化

中間目標に掲げられている 275 kV 高電圧超電導ケーブルについて、ケーブル製作担当である古河電気工業(株) より作製・運転・事故・保守環境において線材が受ける負荷の種類と大きさに関する情報を収集し、劣化の可能性のある原因の抽出及び調査条件設定を行った。図 2.4.1-1 に、275 kV 高電圧超電導ケーブルの作製から運転までの流れと、その際に線材が受ける負荷の種類を示す。この環境条件から抽出した、経年劣化の原因となる負荷として、運転時及び事故時の電流（通電、過電流）による劣化、ケーブル製作・布設時及び保守時における機械的（機械歪み、熱サイクル(=熱歪み)）劣化、ケーブル製作時の加熱（絶縁紙乾燥時の真空加熱）劣化、線材保管時の湿度による劣化を調査対象とした。これを表 2.4.1-1 に示す。

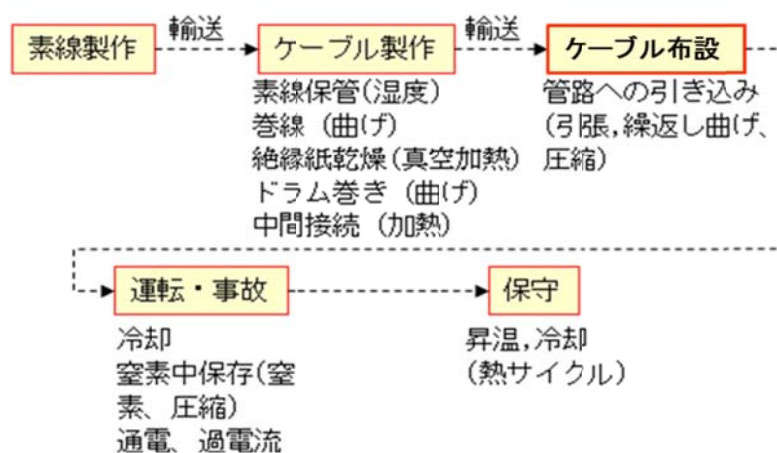


図 2.4.1-1 275 kV 高電圧超電導ケーブルの製作・布設・運転・保守工程の概要

表 2.4.1-1 275 kV 高電圧超電導ケーブルの環境条件から抽出した経年劣化の原因と検討パラメータ

環境	原因	劣化の可能性	ケーブルでの条件	検討方法
製作	湿度	保管時の湿度	最大40℃-RH100%	湿度劣化試験
	湿度	絶縁紙の真空加熱乾燥	真空100℃-24h	真空加熱試験
		中間接続時のハンダ加熱	230℃-20分以内	加熱試験
	機械	巻線時の曲げ	最大0.39% (フォーマ径20~30mmφ)	曲げ試験
		ドラム巻き時の歪	0.1%の両曲げ、8回、引張り、圧縮曲げ	繰返し曲げ試験
コルゲート管による圧縮		絶縁紙に9mmφの円筒で16kgfの圧縮	圧縮試験	
保守	熱サイクル	室温-液体窒素温度の熱サイクル	熱サイクル試験	
運転	電流	通電	I_c の50%以下	連続通電試験
事故		過電流	63 kA _{rms} - 0.6 sec	過電流試験

以下、この表にしたがって試験を実施した結果を以下にまとめる。

・電流による劣化調査

電流による劣化に関しては、高磁場用コイルでフープ力が加わる機器を除き、 I_c 値以下であれば長期間に亘る連続通電試験でも劣化したという報告はない。電流による劣化の報告があるのは、全て I_c 値以上の過電流を印加した場合である¹⁾。これらの劣化は、安定化層を流れる電流による発熱に起因した熱歪みや酸素脱離による焼損、変形、剥離等が原因と考えられているが、未だ明らかにはなっていない。また、過電流で劣化する場合、多くの線材では 500 K 以上までの温度上昇があることが確認されている。極短時間で大電流を流した際には、エレクトロマイグレーションやローレンツ力により劣化したという報告もあるが、超電導ケーブルで想定されている条件は、これらが原因で劣化する条件とはかけ離れて小さいことから、その影響は考慮しないこととする。

ここで、電流による劣化の可能性を整理するために、過電流印加時の電流分流通状態の模式図を図 2.4.1-2 に示す。また、これまでの報告例と本研究の実験結果を基に、印加電流の大きさ及び電流印加時間と線材劣化の関係を推定し、図 2.4.1-3 に模式図として表した。線材の I_c 値以下である領域(A)では、電流は超電導層にのみ流れるが、電流を増加させて I_c 値以上の領域(B)に入ると、超電導層に抵抗が発生するため電流は抵抗に応じて超電導層と安定化層で分流し始め、抵抗のある層を電流が流れることにより発熱する。さらに電流を増加させると超電導層の抵抗が上昇し、ついに電流は安定化層のみに流れる様になって領域(C)に入る。領域(C)に入っても発熱による温度上昇後の温度が比較的低温であれば劣化は生じないと考えられる。さらに電流を増加させると発熱による安定化層の抵抗増加と相俟って発熱

量は加速的に増加し、500 Kを超えるような大きな発熱が起こったことで領域(D)に入り、線材が劣化するものと推定している。ここで、事故電流のような短時間の電流印加の条件では、発熱量が限られているため温度上昇にも限界があり、比較的大電流の印加にも耐えると考えられる。なお、ここで示した概念は、本研究開発で実施した実験結果から推定したものであり、(B)、(C)及び(D)の領域広さと境界位置は、短時間電流印加では線材の構造と I_c 値に依存し、長時間の電流印加では冷却効率にも依存するものと考えられる。

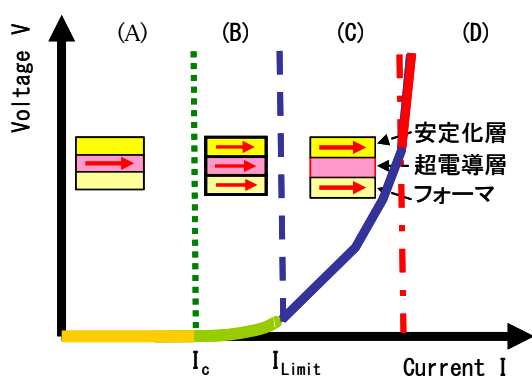


図 2.4.1-2 過電流印加時の電流分流通態の模式図

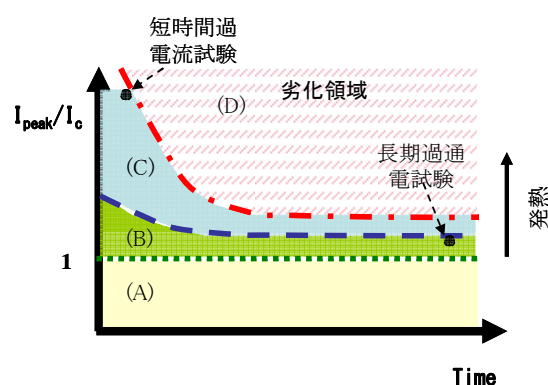


図 2.4.1-3 印加電流及び電流印加時間と線材劣化の関係の推定

・長期連続過通電試験

液体窒素中で長期に亘る連続通電により、劣化が生じないことを確かめるため、電流負荷条件を限界まで厳しくして、長期連続過通電試験を行った。試料は、IBAD-MOD 線材(2.5 mm-w)を用いた。ここで、欠陥が存在して電流が不均一に流れる試料においても連続通電による劣化が生じないことを確かめるために、欠陥が多数存在しており I_c 値分布が 40 %程度ばらついている試料を意識的に使い、液体窒素中で 50 Hz の交流（過電流）を連続通電した。試験に用いた試料の連続ホール素子法 (Tapestar™) による I_c 値分布と磁気光学顕微鏡 (MO) 観察結果を図 2.4.1-4(a)及び(b)に示す。最大電流値は、 $I_c = 44 \text{ A/cm-w} (@77 \text{ K, s.f.})$ に対して、220 A/cm-w (ピーク電流値; 本実験条件での限界電流値 I_{Limit}) を印加した。発熱量 J は、 $J = I^2 R$ (I : 電流、 R : 導体の抵抗) で記述される。 I_c 値が低い本実験試料では発熱量が少ないため大きな I_{Limit}/I_c を印加できたが、 I_c 値が大きく大電流を通電する試料では、大きな I_{Limit}/I_c を印加することはできないと考えられる。また、領域(A)及び(B)の範囲 (I_{Limit} 以下) において超電導層に電流が流れていることを確認するため、 I_{Limit} 前後における入力電流 I と出力電圧 V の関係を調べ、 I_{Limit} 以上の $I-V$ 曲線から安定化層の抵抗値 R を求め、常電導状態における超電導層の抵抗成分を計算し、さらに安定化層と超電導層が並列回路を形成しているとして電流の分流量を

見積もったところ、領域(A) 及び(B)においては、大半の電流が超電導層を流れていることが確かめられた²⁾。これを図 2.4.1-5 (a)及び(b)に示す。この条件で連続過通電試験を実施し、適宜 I_c 値測定を行うことで経時変化の評価を行った。その結果を図 2.4.1-6 に示す。

図 2.4.1-6 より、1000 時間を超える長期連続交流過通電試験でも $I-V$ 曲線に何ら変化がないことが分かる。このことから、線材に多少の欠陥がある場合でも、印加最大電流値が I_{Limit} 以下であれば劣化は生じないと考えられる。また、一般に、液体窒素温度(77 K)以下の低温では、化学反応が生じることは考えにくく、かつ、ケーブル使用条件での運転電流は、 I_c 値の 50 %以下程度になるように設計されていること等から、通常の運転時に劣化が生じる可能性は著しく低いと言える。

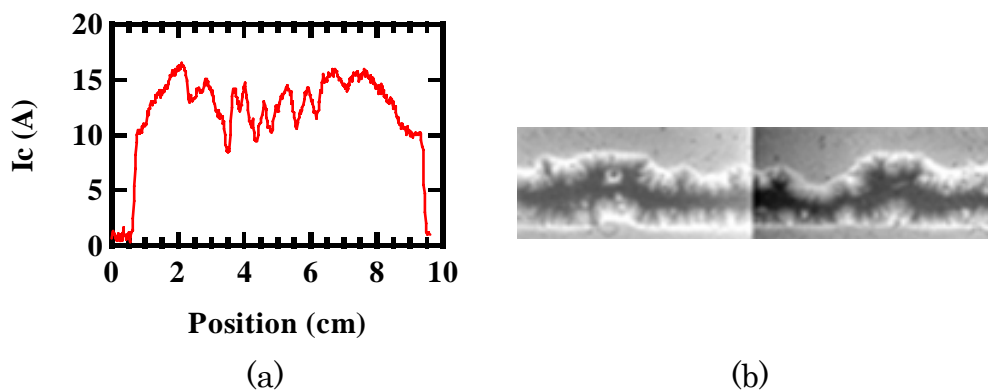


図 2.4.1-4 長期連続過通電試験に使用した線材
(a) 連続ホール素子法による I_c 値分布(2.5 mm-w)、(b) 4~5 cm 部の MO 観察像

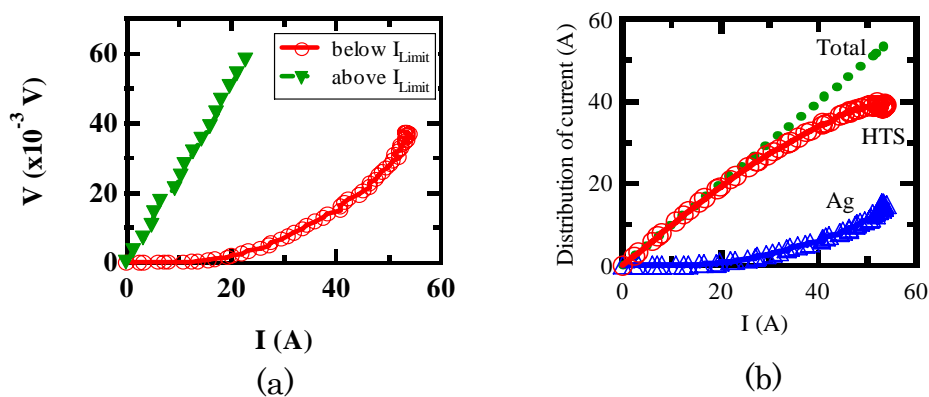


図 2.4.1-5 連続過通電試験時の電流分流状態
(a) I_{Limit} 前後での抵抗発生状態
(b) I_{Limit} 以下における Ag と超電導層の電流分流

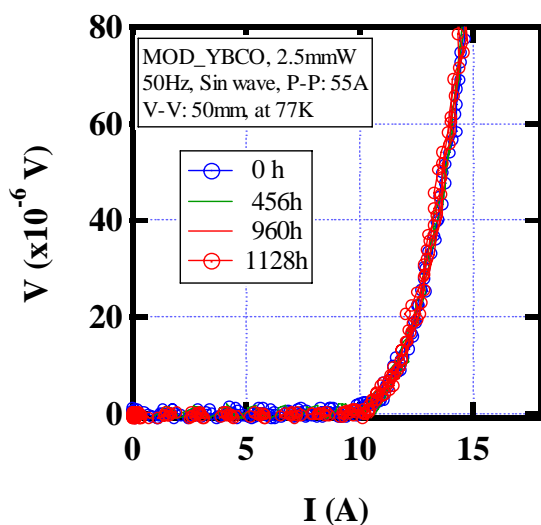


図 2.4.1-6 長期連続過通電試験による I - V 曲線の経時変化

・事故電流による特性変化に関する検討(安定化銅厚みの効果)

超電導線材を電力機器に応用した場合、短絡電流が流入する恐れがあり、この短絡電流により超電導線材の温度が急上昇し、特性劣化する可能性がある。そのため特性劣化や焼損しない限界の温度を設計における指標・基準の一つとして考える必要がある。その基準を考慮した上で安定化層を含めた線材構成要素の最適化が不可欠となる。そこで、超電導線材の特性劣化を調査するために GM 冷凍機伝導冷却条件下で、方形波状過電流パルスを 1sec 間通電し、突発的な短絡電流を模擬した特性劣化試験を行った。同時に特性劣化要因を特定することをめざし、新しく開発した熱応力解析プログラムを用いて、方形波状過電流パルス通電による熱応力を解析した。なお、事故電流に対する劣化試験は早稲田大学において実施した。

4 本 (Sample24-28) の IBAD(MgO)基板-MOD 線材を用いて特性劣化試験を行った。Sample24-28 の劣化開始温度を図 2.4.1-7、劣化開始時の過電流値を図 2.4.1-8 に示す。Sample24、25 がハンダ付けによる Cu 複合化線材 (Cu 厚 $100 \mu\text{m}$)、Sample26 が Cu 無し線材、Sample27 と Sample28 が Cu めっき線材 (Cu 厚 $50 \mu\text{m}$) である。図 2.4.1-7 及び図 2.4.1-8 より、Cu 複合化を施すと安定化層の抵抗値が小さくなる分、Cu 層無しの線材よりも高い電流値に耐えられる。しかし、劣化開始温度は 3 種類の線材はどれも 500 K 前後で有意差は見られなかった。これらの結果から、Cu の厚みを増すことで過電流領域における線材の抵抗値が下がることにより、より大きな過電流を印加することができ、過電流に対する裕度を増加させられることが分かった。また、劣化開始温度に差異がないことから、過電流による劣化は、温度上昇により層状構造を有する Y 系超電導線材の各層間に発生する熱応力が関与していることが示唆された。

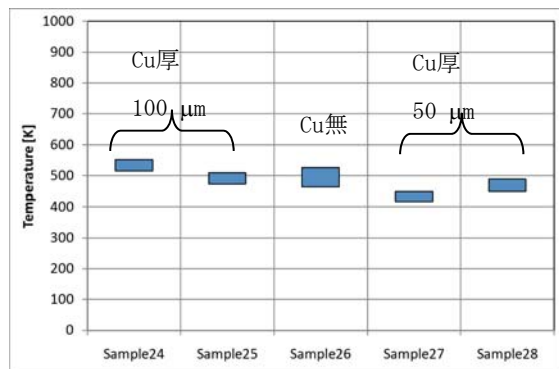


図 2.4.1-7 劣化開始温度

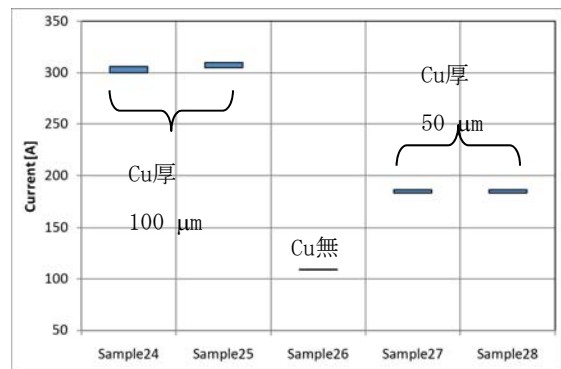


図 2.4.1-8 劣化開始電流

さらに、特性劣化の原因解明のために、劣化した線材について MO 観察や SEM/TEM の評価を行った。劣化原因として考えられる熱応力については、有限要素法を用いた解析評価も行い、熱膨張係数の異なる層状線材が温度上昇することで発生する熱応力が劣化の主因であることを示す結果を得た。

・過電流試験（事故電流による劣化限界）

事故電流による劣化限界とケーブル使用条件に対する裕度を調べるために、短時間交流過電流試験を実施した。試験自体は早稲田大学で行い、ISTEC は試験前後の特性分布の評価等を行った。印加電流条件は、高電圧ケーブルの耐事故電流に対する基準(63 kA_{rms}・0.6 sec) より、素線 1 本あたりに想定される過電流パターンをシミュレーションした結果に基づいて決定した。図 2.4.1-9 に、素線 1 本あたりに想定される過電流パターン（計算結果）を示す。過電流試験は、この過電流パターンの電流減衰率を変えずに、ピーク電流値を少しずつ大きくすることで、その限界値を求めた。試験線材には、高電圧ケーブル用線材である Cu めっき付 IBAD(MgO)-MOD 線材 ($I_c = 160 \text{ A}/5 \text{ mm-w} (@77\text{K}, \text{s.f.})$) を用い、液体窒素浸漬冷却で試験を実施した。図 2.4.1-10 に過電流試験の結果例を示す。図より、 I_c 値が 160 A/5 mm-w に対して、610 A/5 mm-w までは劣化せずに 640 A/5 mm-w で劣化が始まっており、 I_c 値に対して約 3.8 倍、想定される最大事故電流 412 A/5 mm に対し約 1.48 倍の裕度があることが確認できた。

また、繰返しの過電流に対して劣化が生じるかどうかを確かめるため、劣化限界値(610 A/5 mm-w)以下の電流値で繰返し過電流試験を行った。電流は 500 A/5 mm-w (想定される最大事故電流 412 A/5 mm-w に対し約 1.2 倍)、回数は年 1 回で事故が起こり、30 年間使用することを想定して、30 回に設定した。この結果を図 2.4.1-11 に示す。図より、劣化限界値以下の電流値であれば、繰返し過電流印加による劣化はないと考えられる。

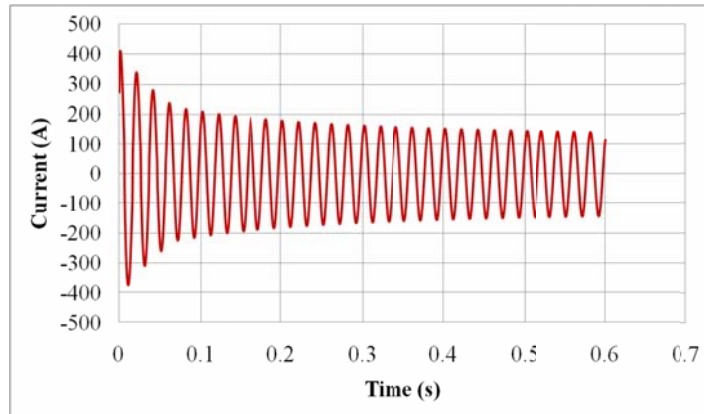


図 2.4.1-9 素線 1 本あたりに流れる過電流パターン

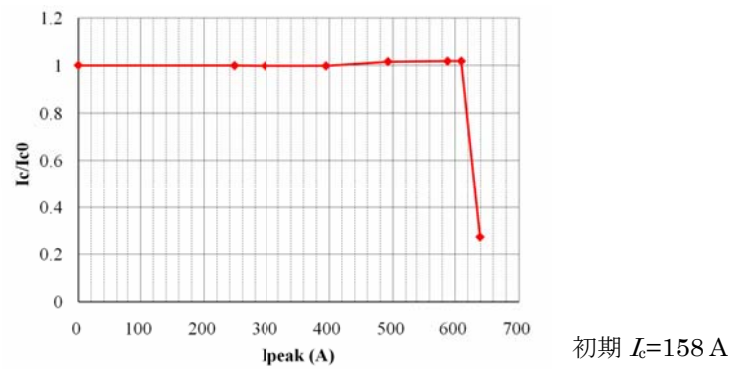


図 2.4.1-10 交流過電流による I_c 劣化

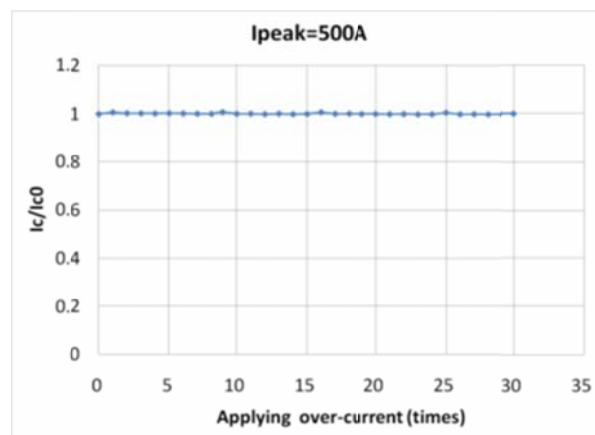


図 2.4.1-11 繰返し過電流の影響

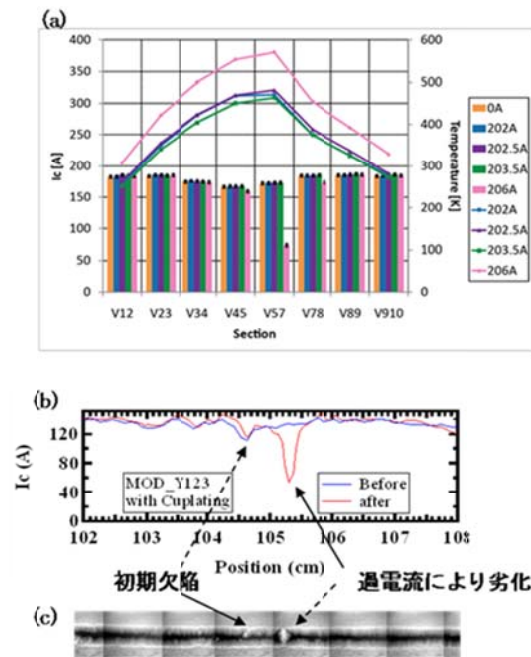


図 2.4.1-12 過電流による劣化

- (a) 過電流による I_c 変化と温度上昇
- (b) 連続ホール素子法による I_c 分布の変化
- (c) 劣化後の MO 観察像

・電流による劣化機構の推定

過電流による劣化の機構を調べるため、線材に約 1 cm 毎に複数個の電圧端子を装着し、場所毎の温度上昇と I_c 値変化を測定した。試験は、1 sec のパルス電流値を少しずつ増加させて 77 K で実施した。試験には Cu めっき付き IBAD(MgO)-MOD 線材 (5 mm-w) を用いた。この結果を図 2.4.1-12 に示す。試料には、初期の I_c 値低下箇所が存在したが、劣化は欠陥箇所とは少し離れた箇所で長手方向に垂直な欠陥として観測された。この原因として、500 K 近くまでの温度上昇により剥離あるいは屈曲が生じ、線材にクラックが生成したことが想定されたため、JFCC において微細組織観察を実施したところ、剥離は見られないことが判明した。そこで、熱膨張係数の異なる積層材料において、発熱により片面が膨張して屈曲し、その歪みによりクラックが生成して劣化したものと推測している。

<電流による劣化のまとめ>

表 2.4.1-2 に、電流による劣化に関する検討結果を整理した。長期連続過通電試験及び短時間過電流試験より、図 2.4.1-2 で示した領域(B)以下の電流値で劣化することは考えにくく、劣化は、事故電流のような大電流が安定化層に流れ、線材が発熱することで発生する。劣化のメカニズムとしては、熱膨張係数差による線材の屈

曲が主因として考えられている。実際に、配向基板上線材の過電流試験では、線材の屈曲が観察されている。ここで、温度上昇による劣化が主因とすれば、劣化に対する裕度を大きくしたい場合には、安定化層を厚くする等で対処可能であると考えられる。これらは、ケーブルの設計に織り込まれ、過電流が流れた際に、温度が一定以上に上昇しない条件で設計されている。

表 2.4.1-2 電流による劣化のまとめ

劣化の可能性	劣化限界	劣化機構(推定)	対策
通電	I_c 以下で劣化なし	なし	不要
過電流	想定過電流に対し裕度約1.5倍	温度上昇による屈曲等	裕度増加 →安定化層厚み増加、素線 I_c 増加、線材本数

・応力・歪みによる劣化調査

ハステロイ™基板を用いた線材の応力・歪みによる劣化に関するこれまでの報告としては、引張、曲げ、圧縮試験等が報告されており、引張では700 MPa以上、0.4~0.7%の歪み、曲げでも0.4~0.7%程度の曲げ引張歪みで劣化することが報告されている^{3,4)}。圧縮試験では、100 MPa以上印加しても劣化しないと報告されている⁵⁾。

ここで、引張と曲げの違いは、引張が応力・歪みが均一に印加されるのに対し、曲げは線材厚み中央の応力中立線からの距離で応力・歪みに分布を持つということであり、線材の厚みが均一であり欠陥を含んでいなければ、本質的には同じ意味を持つと言える。また、ハステロイ™の降伏応力（弾性変形から塑性変形に変わる限界値）と I_c 値の可逆限界値がほぼ一致することから、基板材料の強度が劣化限界を決めていると言える。さらに、本プロジェクトにおけるY系超電導線材では、基板に高強度化強加工を施したハステロイ™が用いられ、その降伏応力は1 GPa（0.5%歪み）以上と高い。

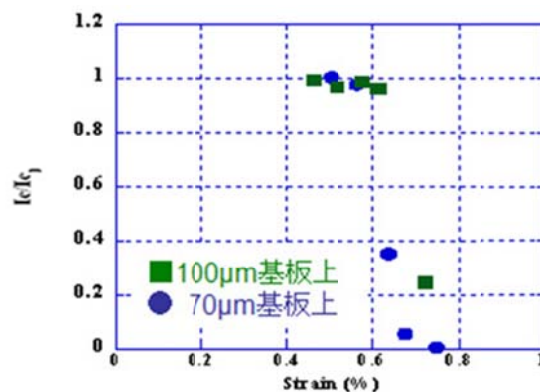


図 2.4.1-13 室温引張試験結果例

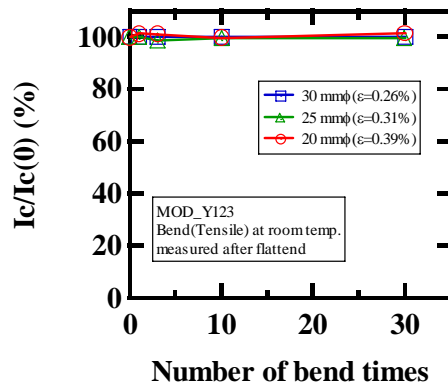


図 2.4.1-14 繰返し曲げ試験結果例

・室温引張試験

ケーブルに供する IBAD 線材に対し室温で引張試験を行い、歪み量を少しずつ上昇させて I_c 値の変化を調べた結果を図 2.4.1-13 に示す。ハステロイ™ 基板を用いた Y 系超電導線材は、歪みとして 0.5~0.6 %程度までは可逆であり、限界歪みを超えると、 I_c 値が戻らず劣化した。ケーブル応用では、Cu フォーマに線材を巻きつけた際に最大歪みが発生するが、最も大きい箇所でも 0.39 %以下（高電圧ケーブルの場合）であり、線材が均一であれば劣化する可能性は低い。

・繰返し曲げ試験

室温で引張曲げと圧縮曲げを交互に繰返す曲げ歪みを加えた場合も同様に調査した。図 2.4.1-14 に、IBAD(MgO)-MOD 線材（5 mm-w）をケーブル適用条件である 20 mmφ（0.39 %歪み）~30 mmφ（0.26 %歪み）に曲げ履歴を与えた後、フラットに戻して I_c 値測定を実施し、その回数依存性を測定した結果を示すが、30 回までは I_c 値の低下は観られなかった。一方、0.4 %の曲げ歪みを 10000 回加えても、 I_c 値の変化はなく、 I_c 値の低下が観られたのは、引張歪み換算の限界値（線材により異なるが 0.4%~0.6%程度）を超えた場合のみであり、歪み限界以内では数万回の繰返し曲げによる劣化は生じないことが報告されている⁶⁾。

・熱サイクル試験

製作・布設・保守時等に室温と液体窒素温度間で冷却と昇温が行われる。Y 系超電導線材は、熱膨張係数が異なる材料が積層された構造を有しているため、その熱膨張係数差で層間に歪みが誘起される。この歪み（熱歪み）により試料が劣化することがないかを確認するため、熱サイクル試験を実施した。試験は線材を液体窒素に浸漬冷却した後、ドライヤーで加熱して室温に戻し、その熱サイクル回数と I_c 値変化を調べた。一例として、図 2.4.1-15 (a)及び(b)に IBAD-MOD 線材（5 mm-w）

の熱サイクル試験の結果を示す。図より、250回の熱サイクルを繰り返しても、連続ホール素子法 (Tapestar™) による I_c 値分布にも通電法による $I-V$ 曲線にも試験前後で何ら変化は観られなかった。さらに別の試料においては、IBAD(MgO)-PLD線材及びMOD線材ともに1000回の熱サイクル試験を実施しても劣化が生じないことを確認した。劣化しない理由は、ハステロイ™基板とYBCO層間の熱歪み量は室温-液体窒素 (77 K) 間において0.05%程度 (限界歪み量以内) と小さいためであり、線材が均一であれば劣化することはないと考えられる。

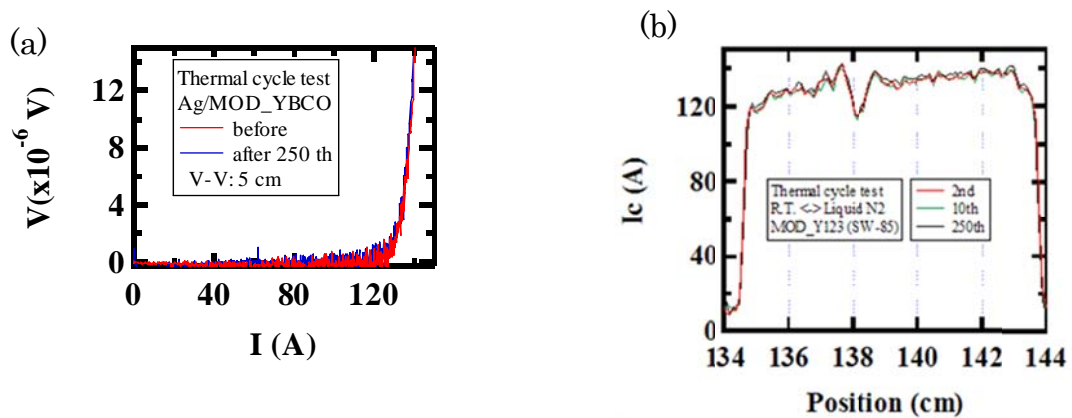


図 2.4.1-15 熱サイクル試験前後の変化 (IBAD-MOD 線材)
(a) 連続ホール素子法による I_c 値分布、(b) $I-V$ 曲線

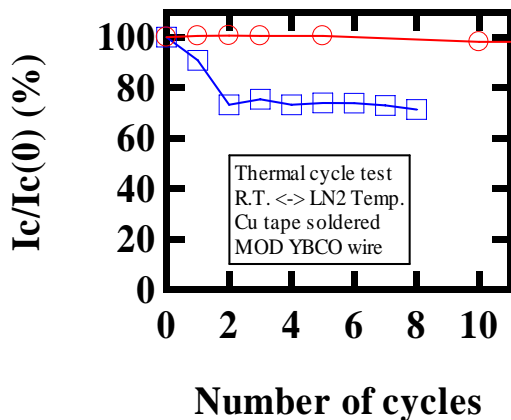


図 2.4.1-16 室温-液体窒素間熱サイクル試験結果例

高電圧ケーブル用線材は、当初 0.1 mm 厚 Cu テープをハンダで貼り付けることで行っていたが、ごくまれに、均一にハンダ付けされていない箇所で熱サイクル試験により部分剥離を起こして劣化することがあった。図 2.4.1-16 に、熱サイクル試験で劣化したケースを示す。この評価結果をケーブル開発担当者に示し、改良策としてめっきへの変更を提言した。ケーブル開発担当者は、耐候性や幅の制御性等別の観点からも変更する必要を感じており、安定化層の付け方をハンダ付けから、め

つきに変更した。このような不均一性による剥離が生じている場合は、数回の熱サイクル試験でも I_c 値低下が検知できる。

<応力歪みによる劣化のまとめ>

表 2.4.1-3 に、応力歪みによる劣化に関して整理した。応力・歪みの限界値は、基板材料に依存し、本プロジェクトで用いているハステロイ™基板の場合は、限界歪みが 0.5 %以上と高いため、最大歪み（引張歪み換算）を過大に見積っても 0.4 %以下であるケーブル応用に際しては、線材の組織や寸法が均一であれば劣化する可能性は低い。圧縮に関しても試験を実施し、20 MPa の圧縮でもケーブル用素線が劣化しないことを確認した。

表 2.4.1-3 応力歪みによる劣化のまとめ

劣化の可能	劣化限界	劣化機構(推定)	ケーブルでの対策
曲げ引張歪	0.5%以上	クラック	不要
圧縮応力	20MPa以上	組織破壊	不要
繰返し歪	歪限界以内では 回数依存なし	なし	不要
熱サイクル	回数依存なし	なし	不要

・温度による劣化調査

Y 系超電導材料を構成している $REBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ 結晶は、酸素の不定比性を有し、加熱することで酸素が離脱して特性変化を示すことが良く知られている⁷⁾。一般的には、300℃以上で、酸素の離脱が明確に現れてくる。高電圧ケーブルでは、絶縁紙の乾燥(真空中、100℃・24 時間)とハンダ付けによるケーブルの中間接続(230℃・20 分以内)において加熱処理が行われる。しかし、この低温度での加熱による特性変化を調べた報告はあまりない。そこで、高電圧ケーブルに用いる IBAD-MOD 線材(5 mm-w)の加熱試験を実施した。

・真空下加熱試験

図 2.4.1-17 に、真空下加熱試験結果例を示す。加熱条件は、真空中、100℃・100 時間までとした。また、裕度を調べるため、150℃・100 時間及び 30 mmφの曲げを印加した状態で加熱した前後の I_c 値変化を調べた。その結果、5 %以上の I_c 値低下が観られた試料はなかった。これより、絶縁紙乾燥時に特性劣化する可能性はほぼ無いと言える。

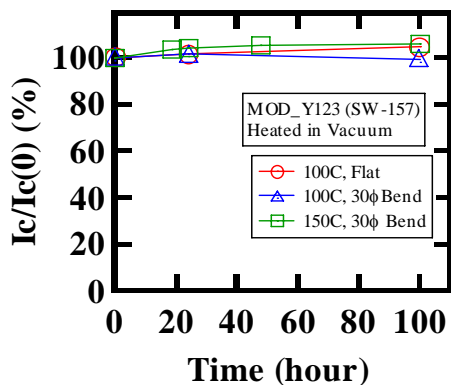


図 2.4.1-17 真空下加熱試験結果例

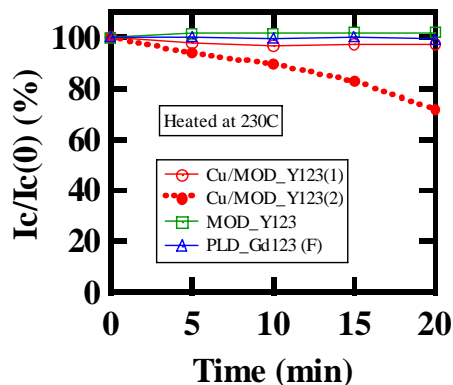


図 2.4.1-18 ハンダ付け温度(230°C)での加熱試験結果例

・ハンダ付け温度での加熱試験

ハンダ流し込み温度(230 °C)での経時変化を調べた。通常用いられる共晶ハンダの融点は 180 °C 程度であり、実際の作業温度は 20~50 °C 程度高い温度に設定される。試験は、試料の中心 2 cm を上下から加熱板で挟みこみ、5 分加熱する毎に I_c 値測定を行った。その結果を、図 2.4.1-18 に示す。一部の試料を除き、この条件で劣化することはなかった。一部の試料で I_c 値が低下した理由は、作製プロセス過程で欠陥が導入されたためと判明したため、該当プロセスの改善により欠陥発生を抑制することが可能である。

<温度による劣化のまとめ>

表 2.4.1-4 に、温度による劣化のまとめを記載した。高電圧ケーブル作製時の加熱で劣化する可能性は低いと言える。

表 2.4.1-4 温度による劣化のまとめ

ケーブル作製上の工程	劣化限界	劣化機構(推定)	ケーブルでの対策
絶縁紙の真空加熱乾燥	150°C-100時間までは劣化5%以内	酸素抜け	不要
中間接続時のハンダ加熱	230°C-20分で線材不良の場合に5%以上劣化する試料あり	酸素抜け	不要

・湿度による劣化調査

Y系超電導粉末や焼結体は、水や空気中の水蒸気により劣化することが良く知られている⁸⁾。Y系超電導線材は、CuやAgの安定化層で表面が覆われているため、劣化する可能性は低いと見られていたが、予備試験により、現状の線材では、水分により僅かではあるが経時変化することが判明した。ここで、ケーブル製作から機器製作までの間の保管がどの程度の期間可能なのかの調査を行った。考えうる最大の湿度条件として40℃で相対湿度が100%（雨が降っている真夏に剥き出しで工場に保管した環境、水蒸気分圧: 67 hPa）を想定し、その条件における劣化時間を推定する方法を考案した。

・湿度下加熱試験

試験は、電気炉内に短尺線材を設置して、67 hPaに固定した水蒸気分圧とし、85℃、115℃、150℃及び180℃に試料加熱し、 I_c 値の経時変化を測定した。図2.4.1-19に、IBAD(MgO)-PLD線材を各温度で湿度下加熱試験した時の処理時間による I_c 値の低下率をプロットした結果を示す。図より、ばらつきはあるものの、温度が高いほど劣化速度が速く、温度と相関があることが明らかとなった。

・劣化時間の推定

次に図2.4.1-19の結果から、各処理温度において I_c 値が5%低下する速度 R を求め、 $\ln R$ vs $1/T$ でアレニウスプロットすると、直線に乗ることが確かめられた。これを図2.4.1-20に示す。ここで、40℃における劣化機構が85℃～180℃と同一であることを仮定し、最小2乗法で直線回帰・外挿して40℃における劣化速度を求めたところ、IBAD-PLD線材の場合、67 hPaの水蒸気分圧（40℃-相対湿度100%条件）で I_c 値が5%劣化するには10年以上かかると推測された。実際には、1年以内に製作が終了するであろうことを考えると、無視しても良いくらい劣化が遅いことが確かめられた。

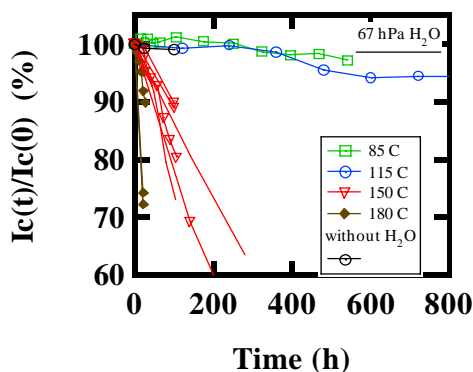


図 2.4.1-19 湿度下加熱試験結果例

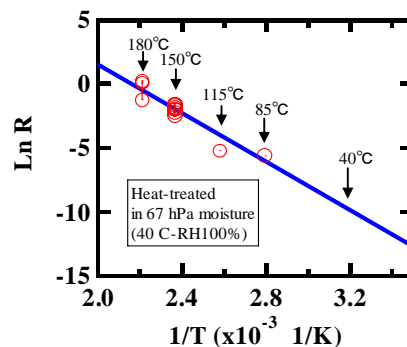


図 2.4.1-20 常温高湿度下での劣化時間の推定結果例

・湿度劣化試験試料の微細組織観察

JFCC では、実用線材の各種環境負荷後の微細組織を透過型電子顕微鏡(TEM)により詳細に解析し、劣化機構とともにこれを抑制する手法の提案を支援した。本報告では、この内、IBAD-PLD 線材について、実使用環境を模擬した湿度劣化試験を行い、劣化した組織を走査型電子顕微鏡(SEM) 及び TEM により詳細に解析した結果を報告する。観察領域は、レーザ加工切断面側であり、MO 観察結果からも超電導特性が劣化していると判断された領域である。図 2.4.1-21 に、湿度劣化試験後におけるレーザ切断側の SEM 断面写真を示す。切断面からおおよそ 50 μm 程度(太線矢印で示す)まで GdBCO 層が変質している。さらに、変質した組織の詳細な組織観察を行うため、TEM を用いた。図 2.4.1-22 に図 2.4.1-21 の太線で示す領域近傍の TEM 像と TEM 像中の A、B 領域の電子回折図形を(a)、(b)に示す。湿度劣化試験により変質した領域は多結晶になっていることが判明した。(形成された多結晶については、今回の観察から全て特定できていないが、 BaCO_3 、 CuO 、 Gd_2O_3 等が形成されていると考えられる。) B の領域では c 軸配向結晶を保っている。耐久試験により、この領域では中間層の CeO_2 層、 $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 層及びハステロイ™ 基板の構造は変化していない。以上のように湿度劣化試験後の線材の組織観察から、超電導特性が劣化した原因の一つを特定することができた。

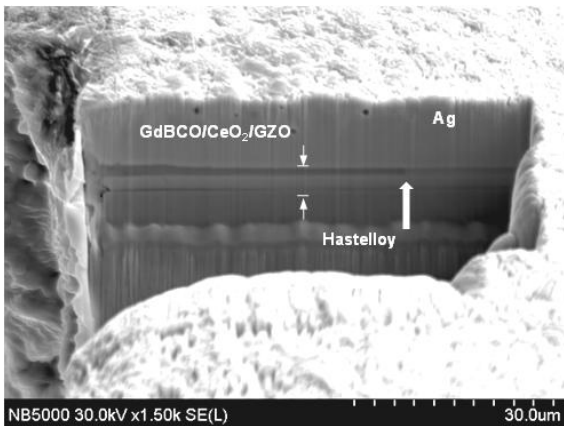


図 2.4.1-21 湿度劣化試験後のレーザ切断側の SEM 断面写真

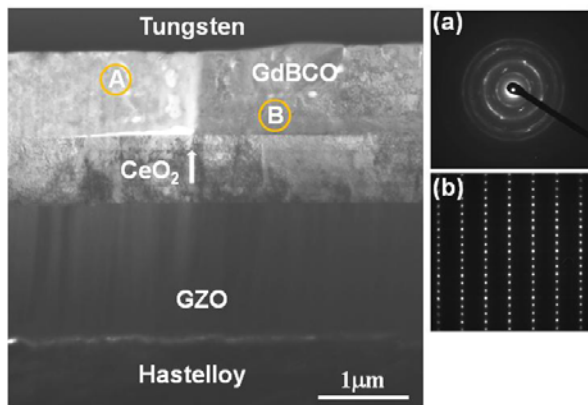


図 2.4.1-22 図 2.4.1-21 の太線領域近傍の TEM 像及び電子回折像(a)A 領域、(b)B 領域

・劣化機構の推定

水蒸気による線材の劣化機構を調べるにあたり、連続ホール素子法 (Tapestar™) による長手方向 I_c 値の分布測定、MO 観察による超電導の均一性評価、表面 SEM 観察を行うとともに、JFCC により劣化箇所の断面 SEM 観察及び TEM による構造評価を実施した。前述したように、Ag 安定化層を付加した後に線材幅を要求値に合わせるためにレーザ切断した試料に関しては、劣化は切断面から生じている様

子が検出された。これは、切断により、Ag で覆われずに YBCO 超電導層が露出したために劣化しやすい箇所となったものと考えられる。一方、未切断試料及び Ag 安定化層の上に Cu をめっきした試料においては、試料の所々に点状の劣化部が広がった様子が MO 観察により観られた。これを図 2.4.1-23 に示す。ここで、表面観察より、Ag 安定化層にはピンホールや低密度に観える箇所が観察されたことから、切断面のみならず、これらの欠陥からも水蒸気が侵入し、劣化が生じる機構を推定した。前述した劣化時間の推定において、通常の線材であれば、常温高湿度下においても長時間の保持が可能であることを示したが、外気に露出する箇所（欠陥等）を完全になくすことにより、さらに耐湿性が向上するものと考えられる。

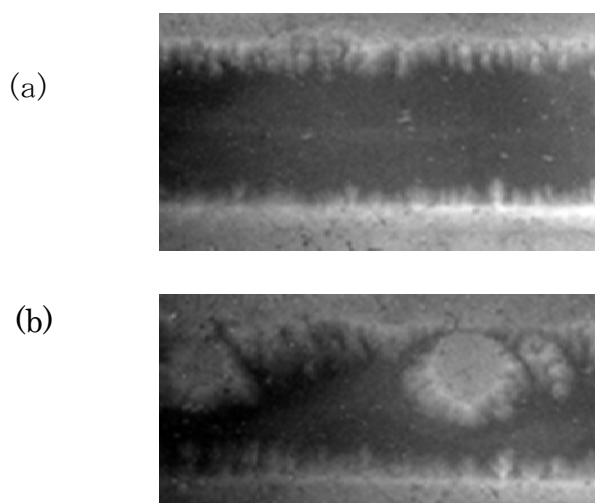


図 2.4.1-23 湿度劣化前後の MO 観察像
(IBAD-MOD 線材)

(a) 劣化前 (b) 湿度劣化後 (150 °C-220 h 後)

<湿度による劣化のまとめ>

表 2.4.1-5 に、湿度による劣化のまとめを示す。ここで、高温における劣化速度を調べることで、常温での劣化速度を推定する方法を考案した。また、PLD 線材では常温高湿度下で線材を保管しても1年以内に5%以上劣化する可能性は低いことが確認できた。ただし、加工方法（めっき、切断）や製作方法により、劣化しやすい線材も存在するため、品質管理を徹底する必要がある。また、高湿度下で保管しない等の配慮が必要と考えられる。

表 2.4.1-5 湿度による劣化のまとめ

劣化の可能性	劣化限界	劣化機構(推定)	ケーブルでの対策
保管時の湿度	5%劣化するのに、最大40°C-相対湿度100%で9年以上(ただし劣化速度が速い線もある)	安定化層のポア・粒界などを通して浸透した水蒸気と超電導相・不純物相との化学反応	通常は不要

表 2.4.1-6 に、ケーブル作製・運転・保守・事故環境条件と線材の劣化限界値の対比を示す。これより、ケーブル作製から運転の条件では、全て限界値以内であり、十分な裕度があることが確かめられた。ここで、基本的な判定には、材料の不均一性や偶発的な欠陥が原因とみなされるデータは取り除いているが、1回でも不良を示した測定結果が出た場合は、念のため例外ありと但し書きをした。

表 2.4.1-6 ケーブル環境条件と線材の劣化限界値の対比

原因	劣化の可能性	ケーブルでの条件	ケーブル用線材の判定、劣化限界値
電流	通電	I_c の50%以下	I_c 以下で劣化なし
	過電流	素線1本あたり最大412 A・0.6 sec	問題なし。 I_c に対して3.8倍、想定過電流に対して1.5倍の裕度
機械	熱サイクル	室温-液体窒素温度の熱サイクル, 30回	問題なし (例外あり)
	歪	最大0.39% (20 mm ϕ)	問題なし、歪0.5%以上 (例外あり)
	繰返し歪	0.1%の曲げ、8回、引張り、圧縮曲げ	歪限界以内では無し
	圧縮	2 MPa	問題なし、20 MPa以上
温度	真空加熱乾燥	真空中、100 °C・24 h	問題なし。150 °C・100時間までは I_c 劣化5%以内
	ハンダ加熱	230 °C・20分以内	通常は問題なし (一部例外あり)
湿度	保管時の湿度	最大40 °C・RH100%、数ヶ月以上	一例として9年以上 (例外あり)

・ 275 kV 高電圧ケーブル用線材の耐久性試験条件

上述の検討に基づいて、ケーブル製作・運転環境から導き出された要求条件とそれら各々の劣化機構から、耐久性試験項目及び試験条件の概要を表 2.4.1-7 に示す。試験項目には線材構造変更時に確認試験を実施する必要がある項目を抽出した。

表 2.4.1-7 275 kV 高電圧ケーブル用線材の耐久性試験条件

大項目	試験項目案	試験方法	判定方法
電流	過電流試験	想定最大過電流値412 A・0.6 sec (63 kV・0.6 sに対応する1本あたりの電流値) から数A毎に電流を増加させ、 I_c が5 %以上低下する電流値を計測	想定過電流値に対する裕度が1.2倍以上あること
歪	繰返し熱サイクル試験	室温一液体窒素のサイクル3回で I_c 測定	試験前後の I_c 低下が5 %以内
	限界歪確認試験	20mm φに曲げ履歴を加えた後、フラットに戻して I_c 測定し、前後の I_c 低下が5 %以内(別途、曲げ歪- I_c 曲線取得) あるいは、Goldaker方式等で引張方向の歪 vs I_c 測定を行い、20 mm φまでの可逆歪と I_c 低下率を測定するとともに可逆限界値を測定する。	20mm φでの I_c 低下率が5 %以内でかつ可逆であること
加熱	ハンダ温度加熱試験	大気中、230 °C・20分間加熱した前後の I_c 測定	試験後の I_c 低下が5 %以内
湿度	湿度劣化試験	40 °C・RH100 %相当の加湿環境下において、150 °C・10時間の熱処理を行った前後の I_c 測定	試験後の I_c 低下が5 %以内

(2) 電力機器用耐環境性評価

プロジェクト後半（平成 23、24 年度）では、変圧器を主な対象とし、作製・運転・事故・保守それぞれの環境への耐性評価を実施した。それぞれの環境で生じる負荷としては、前項で記述した電力ケーブルの場合とほぼ同等であったため、電力ケーブル応用との差異は、フィラメント分割加工を必要とすることにより、剥離が起りやすいことが主である。そこで、剥離強度の向上と、フィラメント化加工した線材の耐環境性の評価を行い、本プロジェクトの最終目標である各種機器の耐環境性評価とした。

・線材剥離現象の解析及び剥離強度改善技術検討

線材の製作工程あるいはコイル化時等において、線材が剥離し劣化してしまうという課題が生じていた。この課題を解決するため、種々の線材について、剥離強度（スタッドプル法）と剥離面の組織（EPMA 観察等）を検討した結果、剥離強度及び剥離の起源をいくつかのパターンに整理することができた。これを図 2.4.1-24 に示す。ここで、Y 系線材の剥離には、必ず強度の弱い剥離起点が存在すること、また、起点で生じた剥離は最終的には RE123 層内の内部破壊として連続的に現れること、剥離起点（＝強度が弱い箇所）が大きい場合は剥離強度が低下すること等が判明した。ここで、20 MPa 以下の低強度を示すケースは、MOD 法により GZO ベッド層を作製した場合によく観られた。この場合、剥離界面には基板近傍（GZO-ハステロイ™）での破壊が観られ、GZO 層の密度が低いことが低剥離強度の原因

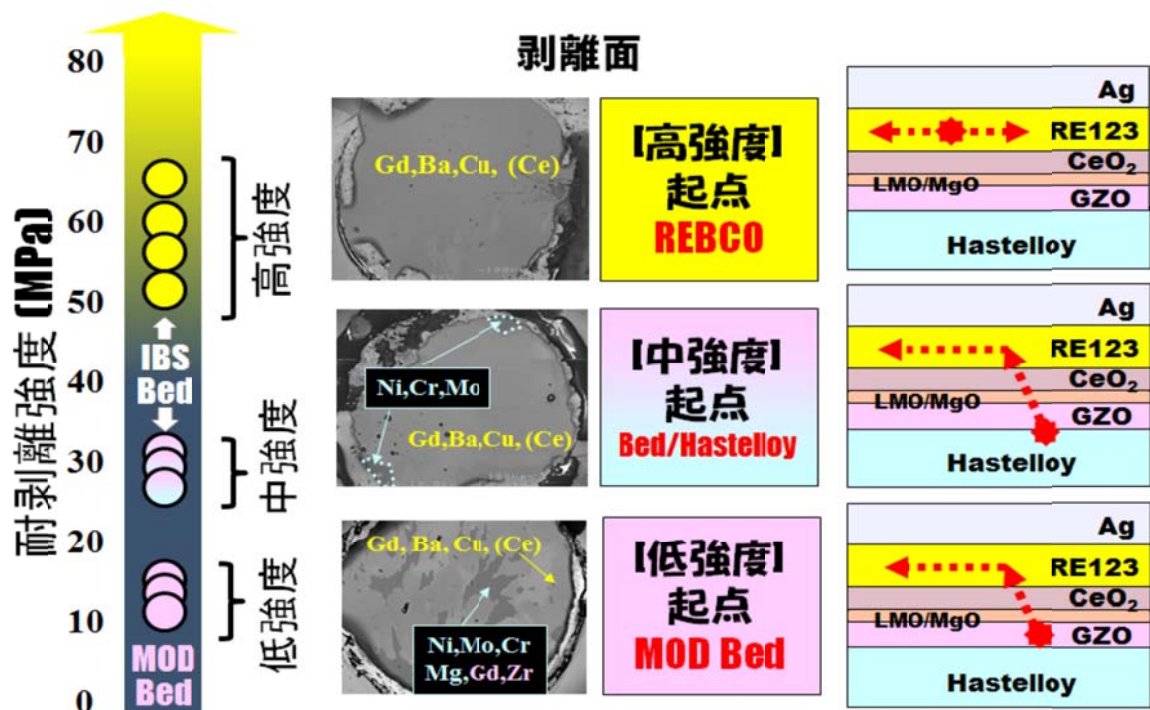


図 2.4.1-24 剥離現象の解析（起点種と剥離強度の関係）

ではないかと予測された。そこで、MOD-ベッド層を作製する際の成膜条件を検討することで、剥離強度の改善を試みた。

図 2.4.1-25 に、MOD ベッド層の成膜熱処理条件と、その上に積層した中間層のうち、 CeO_2 成膜時の加熱温度を変化させた時の剥離強度の変化を測定した結果を示す。結晶粒配向度の観点から CeO_2 の最適成膜温度である 650°C を中心に成膜温度を変化させたが、これによる顕著な剥離強度変化は観られなかった。しかしながら、ベッド層の成膜温度によっては有意な変化が観られ、GZO ベッド層の成膜温度を上昇させるとともに剥離強度が向上する傾向にあることが判明した。当初、GZO ベッド層の成膜温度を高くすると結晶化が進み I_c 値が低下することが懸念されたため、GZO ベッド層の成膜温度は 500°C という低温で設定されていたが、本検討を通して、実際には 650°C を上限として I_c 値の大幅な低下が生じないことが明らかになった。これらより、 600°C で GZO ベッド層の成膜温度することにより、低強度での線材剥離は改善可能となることが明らかとなった。

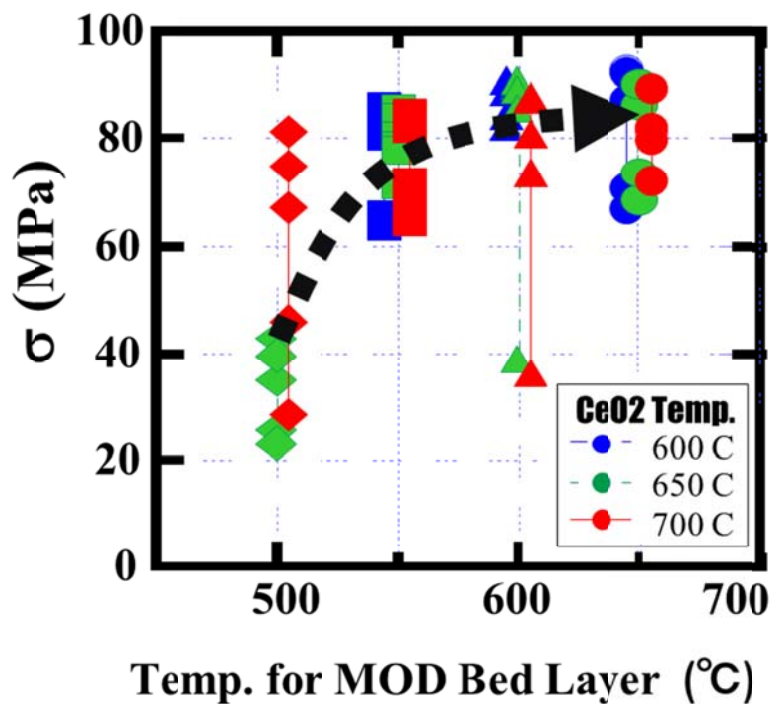


図 2.4.1-25 GdBCO 線材の剥離強度の CeO_2 成膜温度及び MOD ベッド層の成膜熱処理温度依存性

しかしながら、図 2.4.1-25 の 600 °C 条件にも観られるように、20-50 MPa の領域で剥離強度が弱い箇所が存在することがある。こういった箇所には、基板近傍に 100 μm 前後の弱強度部が存在していた。この起源を調べるため、まず初めに、金属基板の洗浄工程が何らかの影響を与えていると考え、洗浄条件を変更しなから剥離強度を試験した。しかしながら、基板洗浄は剥離強度に大きな影響はしなかった。次に、同じ PLD 法ではあるが、レーザーパワーの異なる成膜装置で成膜した Gd 系線材の剥離強度を比較（総厚みは同程度）したところ、図 2.4.1-26(a)に示すように、小型のレーザーで多数回成膜した線材の剥離強度（長時間成膜条件）は低い強度が出現する確率が高かったのに対し、パワーの大きいレーザーにて少数回成膜した線材の剥離強度は、ほぼ 60 MPa 以上と非常に安定して高い強度を示す線材を作製することが可能となった。強度が 60 MPa 以上を示す線材の破壊は、ほぼ RE123 層内での破壊であり、Y 系線材の剥離強度は、本質的には 60 MPa 以上と高く、強度が低くなってしまうのは、弱い剥離強度の欠陥箇所が存在するからであり、その欠陥を除去することで、非常に高い剥離強度を示す線材を安定に製造することが可能であることを示すことができた。また、図 2.4.1-26(b)に測定データをワイブルプロットし、破壊確率の評価を行った。これより、短時間成膜条件で作製した線材は、剥離に対し高い信頼性を有していることが確かめられた。

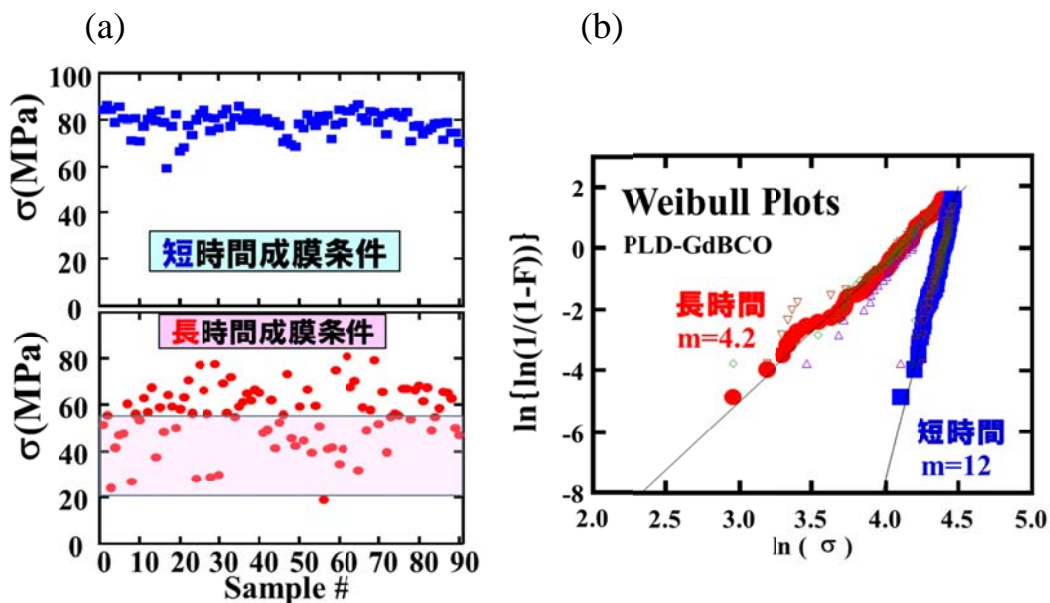


図 2.4.1-26 成膜速度の異なる装置により作製された、同程度の膜厚を有する PLD-GdBCO 線材（短時間成膜：上、長時間成膜：下）の(a)剥離強度評価結果及び(b)ワイブルプロット

・スクライブ線材の剥離強度

変圧器の特殊性として、レーザスクライブ処理によるスクライブ加工を施した線材の剥離強度評価を行った。ここで、5 mm-w の Y 系線材（PLD 法による Gd 系線材）を 2 種の方法により 10 分割フィラメント化スクライブ加工を行った。一つ目は、3 分割線にて多くの実績を有する手法、①「YAG レーザ+エッチング処理」である。しかしながら、この方法で 10 分割処理/5 mm-w した線材の剥離強度は、33~61 MPa であった。ここで、スクライブした溝部は強度に影響しないとして、有効面積換算した強度は、44~82 MPa となった。この線材のスクライブ無しの強度は、60~90 MPa であり、細線化処理により何らかの劣化が生じていることが示唆された。そこで、断面 SEM 観察を行った結果(図 2.4.1-27 参照) レーザ加工端部において RE123 層のオーバーエッチングが生じており、有効断面積が表面観察から得られた面積より小さいことが確認され、剥離強度低下の原因となったと考えられた。このため、エッチング処理を行わない②「エキシマレーザ」を用いたフィラメント化スクライブ加工を行った結果、面積換算後の剥離強度は、62~93 MPa とほぼ素線の剥離強度と一致していた。また、断面観察においても劣化は観られず、エキシマレーザによるフィラメント化スクライブ加工により強度低下のないスクライブ線材が作製可能であることが確認できた。

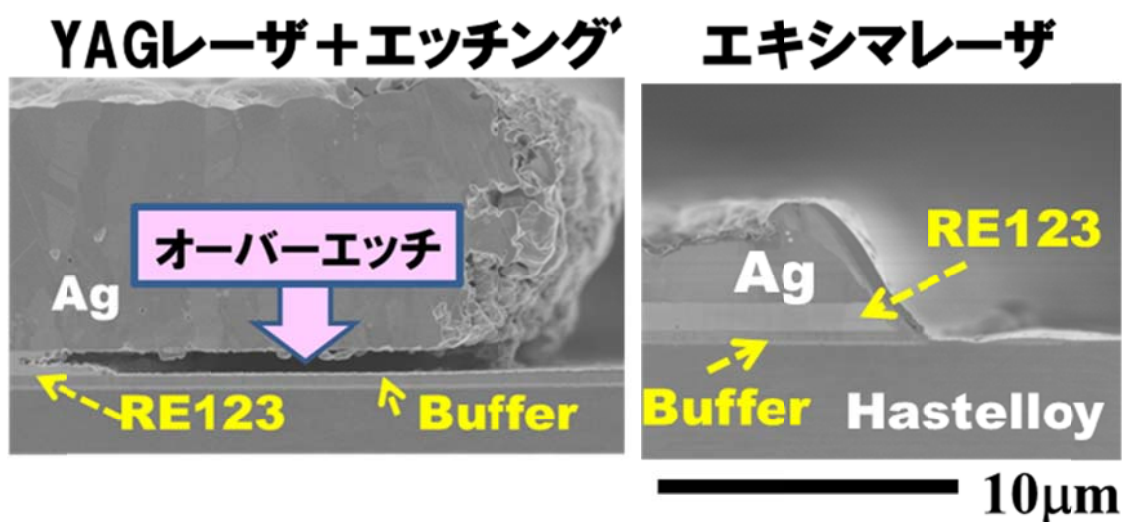


図 2.4.1-27 スクライブ加工した Y 系線材の断面組織

・スクライブ線材の耐久性評価

変圧器用線材では、レーザスクライブ処理によりフィラメント化スクライブ加工を施すことで加工溝に対して REBCO が露出し、耐湿性が劣化する可能性が懸念された。これを検証するため、10 mm-w の Gd 系線材 (IBAD-PLD_Gd123) を 2 mm 及び 5 mm-w にレーザスクライブ法にてスクライブ加工処理した線材及びスクライブ加工なしの線材について、図 2.4.1-19 及び 20 に示した方法と同様の評価条件 (40 °C-RH100%条件) で耐湿性試験を実施した。

得られた結果を図 2.4.1-28 に示す。分割加工線材でも、加工無しの線材とほぼ同等の劣化速度を示しており、25 °C環境で 67 hPa に固定した水蒸気雰囲気湿度という加速条件においても 5%の劣化に 10 年以上かかると推算される。これは、分割加工線材も十分な耐環境性を有していることを示している。PLD 法で作製した Gd 系線材の場合、レーザスクライブ処理の有無により劣化速度は大きく変わらず、耐環境性も十分であることが明らかとなった。

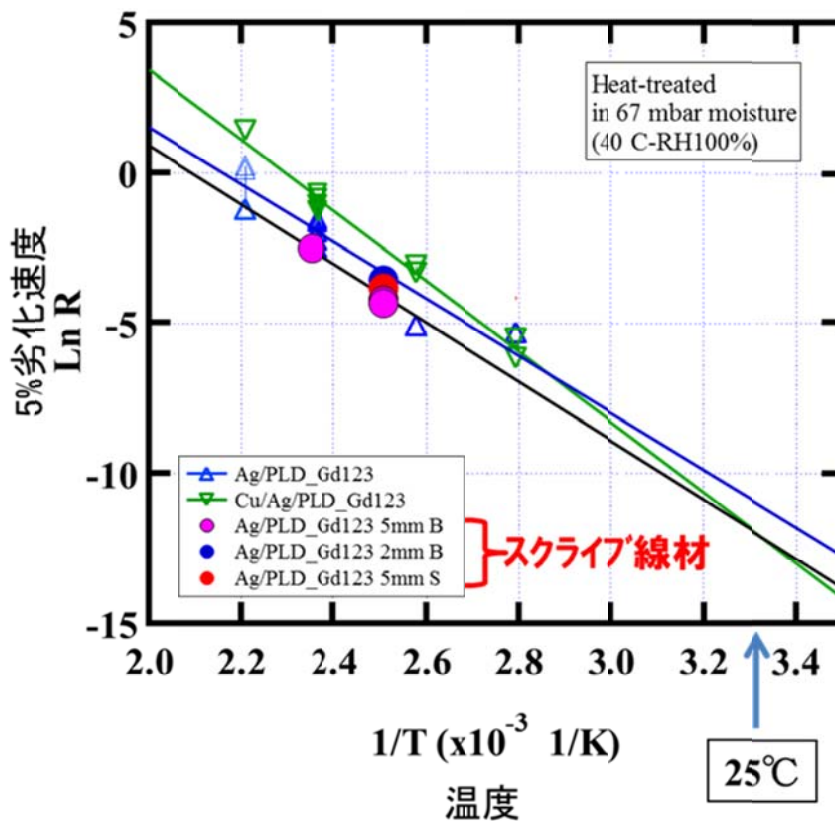


図 2.4.1-28 スクライブ有り及び無し線材の耐湿性試験結果

2.4.1-2 配向基板-PLD 線材の経時・経年変化

プロジェクト前半では、結晶粒配向基板-PLD 線材に対して経時経年変化特性を把握する目的で、66 kV 大電流ケーブルの製造環境及び運転環境の把握を行い、想定された環境に対応した結晶粒配向基板-PLD 線材の試験方法の調査を行った。表 2.4.1-8 に 66 kV 大電流ケーブル用線材の保存・環境条件の典型例を示す。

表 2.4.1-8 66 kV 大電流ケーブル用線材の保存・環境条件

環境	項目	条件
線材保存	温度	室温
	湿度	40 ~100 %
	保存期間	1 年間
	I_c 測定	熱サイクル (常温~77 K)
	線材巻替	曲げ径 100 mm
ケーブル製造	温度	室温 (-10 °C~50 °C程度)
	湿度	40 ~100 %
	曲げ	直径 45~50 mm
	巻き線時曲げ	直径 45 mm 相当 (引張り張力 1 kgf)
	断熱管真空引き	真空、最大 100 °C - 10 日間程度
	側圧	最大 15 kg/m 程度
敷設	温度	室温 ~ 65 K
	長期線材歪み	最大 0.3 % (引張り)
運転	熱サイクル	室温-液体窒素温度
	圧力	0.2~1 MPaG (液体窒素加圧)
	過電流	31.5 kA-2 sec

上記内容を基にすると、線材レベルにおいて結晶粒配向基板-PLD 線材の経時経年変化を評価するための基本的な超電導特性試験内容は、主に以下の 4 項目にまとめられる。

- 1) 湿度、温度、真空による超電導特性 (T_c , J_c , I_c 等)
- 2) I_c の熱サイクル特性 (液体窒素温度~100 °C)
- 3) I_c の歪み依存性 (圧縮歪み : 0.15 %、引張歪み : 0.3 %、大電流ケーブル用 Cu フォーマに Y 系線材をらせん状に巻きつけた際のスパイラル曲げによる捻り方向の歪みから換算した)
- 4) I_c の過電流特性

経時経年変化特性評価に用いた結晶粒配向基板-PLD 線材の諸元の典型例を表 2.4.1-9 に示す。本線材を用いて、上記 4 項目に対応する環境下での経時経年変化特性評価を行い、経時経年変化主要因となる環境影響を調査した。

表 2.4.1-9 結晶粒配向基板-PLD 線材の諸元と特性

構成	材料	作製プロセス	諸元
配向基板	クラッド基板	クラッド加工 配向化熱処理	厚さ 120 μm 幅 30 mm
中間層	CeO ₂ (第一中間層)	RF スパッタ法	膜厚 100 nm
	YSZ (第二中間層)		膜厚 200 nm
	CeO ₂ (第三中間層)		膜厚 70 nm
超電導層	GdBCO	PLD 法	膜厚 2~3 μm
保護層	Ag	DC スパッタ法	膜厚 2~8 μm
細径加工	Ag 被覆までの線材	機械式スリット	30 mm-w→2 mm-w /4 mm-w
安定化層	Cu	電界めっき法	10、20 μm
臨界電流 I_c (@77 K,s.f.)		I_{c2} (2 mm-w 線材の I_c 値) = 36~45 A I_{c4} (4 mm-w 線材の I_c 値) = 80~100 A	

まず、 I_c 値の湿度、温度、真空による特性調査を実施した結果を、図 2.4.1-29 及び 30(a),(b)に示す。真空下の加熱による I_c 特性は、3 種の条件 (100 °C、150 °C、100 °Cで 30 mm ϕ 曲げ) のいずれにおいても特性変化は無かった。一方、湿度下 (67 hPa の H₂O) の加熱による I_c 特性調査では、室温から 80 °C までは 600 時間経過後においても著しい I_c 値の変化はなかったが、115 °C 以上の温度条件では温度の増加とともに時間経過に伴って I_c 値の低下が観測された。また、IBAD 線材と同様に劣化速度をアレニウスプロットして 40 °C-相対湿度 100 %において 5 %劣化する時間を見積もったところ約 9 年かかると見積もられた (図 2.4.1-19, 20 参照)。

しかしながら、今回 I_c 値低下が観測された条件は、表 2.4.1-8 に示す線材の保存・環境条件を大きく超えており、ケーブル用線材の想定された湿度、温度、真空下においては、経時経年変化は生じないと考えられる。

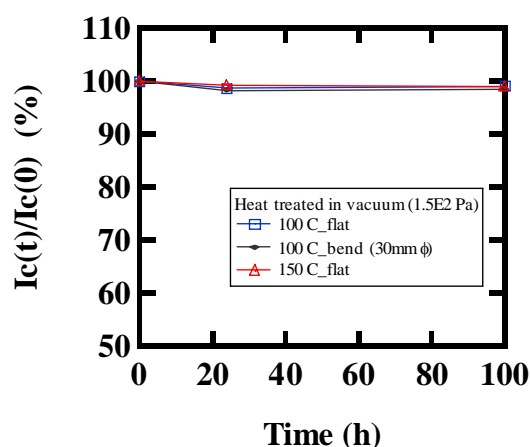


図 2.4.1-29 真空下の加熱による I_c 値特性変化

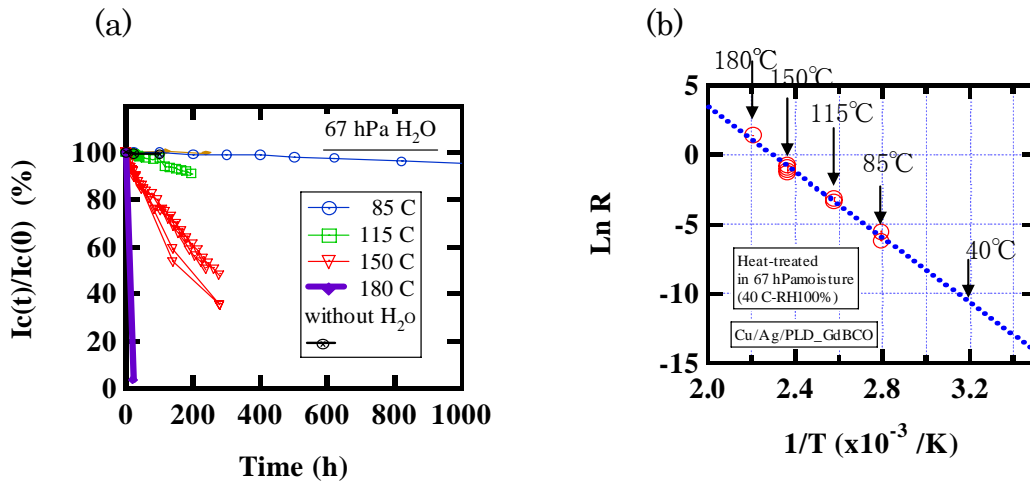
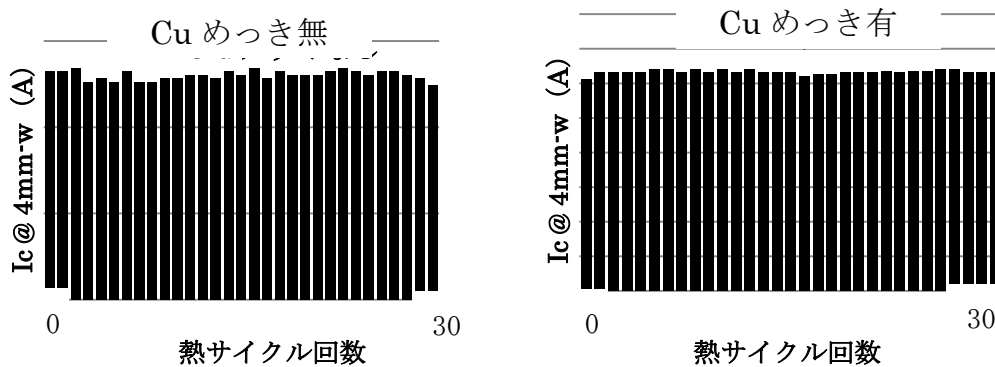


図 2.4.1-30 I_c 値の湿度及び温度による変化

(a) 湿度下の加熱による I_c 値特性

(b) 常温高湿度下での劣化時間の推定

次に、線材 I_c 値の熱サイクル特性について調査した。試験は、線材保存及び運転条件を模擬して、室温と液体窒素温度の間を多数回の熱サイクル履歴を印加させながら I_c 値の変化を調査した。試験結果を図 2.4.1-31 に示すが、30 回までの熱サイクル試験では、 I_c 値の変化は無く、また安定化 Cu の有無に対する影響も無かった。運転開始時以降は、室温から液体窒素温度までの熱サイクルはケーブルメンテナンス時の昇温に対応するが、ケーブル布設後の運転開始以降の熱サイクルは 30 回より少ないと考えられることから、本試験結果により結晶粒配向基板-PLD 線材の基本的な熱サイクル耐性が確認された。



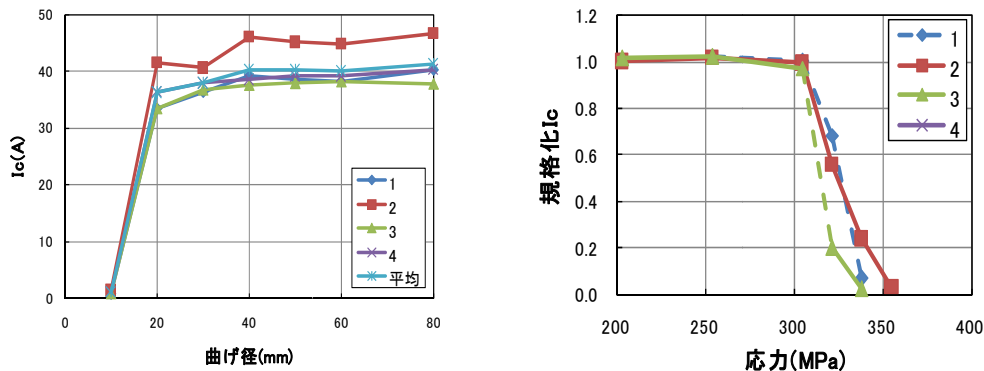
(a) 安定化 Cu 無の線材

(b) 安定化 Cu 有の線材

図 2.4.1-31 I_c 値の熱サイクル特性 (室温～液体窒素温度)

I_c 値の歪み依存性は複数の評価法により実施した。まず基本的な線材の I_c -機械的特性は、室温で線材長手方向に曲げ歪み及び引張り応力を印加し、その後 I_c 値を測定する手順で、これらの歪み及び応力を増加させ I_c 値が低下する領域まで試験を実施した (図 2.4.1-32)。これらより曲げ強度限界は 20 mm ϕ 、引張り強度限界は 300 MPa であることを把握するとともに、実際のケーブル製造条件に比較し

て線材単体としては十分な裕度を有していることが確認された。また、スパイラル曲げ歪み特性については、大電流ケーブル構造を模擬したフォーマ径（16 mm ϕ ）を用いてピッチ（線材が一回りする距離）を変化させ、 I_c 値が低下し始める最小スパイラルピッチが 100 mm であることを把握した（2.2.2-1 参照）。ケーブル製造ではこれら限界値レベルで製造することは考えられず、一定の裕度を維持することで経時経年変化に備える必要がある。



(a) I_c 値の単純曲げ歪み特性 (b) I_c 値の単純引っ張り特性

図 2.4.1-32 I_c 値の機械的特性

I_c 値の過電流特性は、31.5 kA、2 sec の過電流がケーブル導体に流れた場合に対応した評価が必要となる。本評価では、超電導線材 1 本に流れる電流波形を解析で求め、線材に印加する交流電流のピーク値を徐々に大きくし、 I_c 値劣化が開始する I_{peak} を調査した。さらに、この I_{peak} 未満で最大 30 回までの繰り返し過電流を流して I_c 値の低下が無いことを確認した（2.2.2-3 参照）。これらの試験では、安定化 Cu の厚みを 10 μm 及び 20 μm の 2 水準で行った。その結果、想定される最大事故電流に対し 1.5 倍以上の裕度を持ち、 I_{peak} 未満での劣化は無いことが明らかになった。

一方、磁気ナイフ法（京都大学）やホール素子顕微鏡法（九州大学）を用いた線材の特性分布評価や電磁気挙動評価も実施した。さらに、切断加工の影響も明らかにし、ケーブル耐久試験条件として試験項目や試験条件を決定するための基礎データを得た。これらを図 2.4.1-33 及び図 2.4.1-34 に示す。

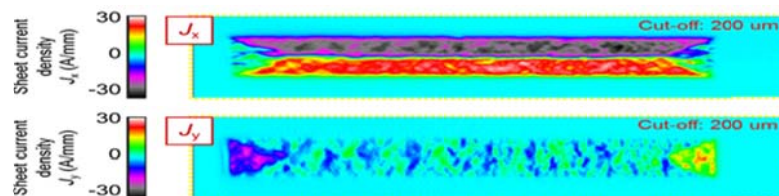
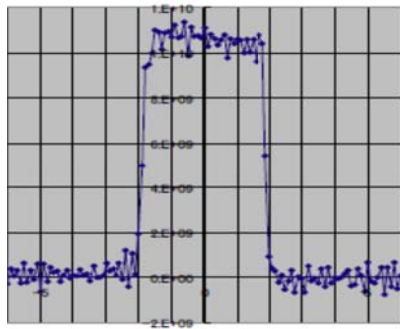
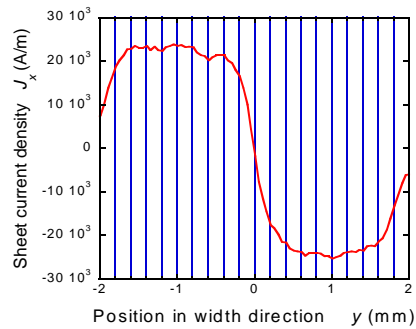


図 2.4.1-33 ホール素子顕微鏡法による電磁気特性分布評価



(a) 磁気ナイフ法



(b) ホール素子顕微鏡法

図 2.4.1-34 切断加工を施した細径線材の I_c 値分布特性

•66 kV 大電流ケーブル用線材の耐久性試験条件

上述の検討に基づいて、ケーブル製作・運転環境から導き出された要求条件とそれら各々の劣化機構から、耐久性試験項目及び試験条件の概要を表 2.4.1-10 に示す。線材構造を変更した際には、確認試験を実施する必要がある項目を抽出した。ここで、試験項目は、一連の試験結果から、線材の偶発的な欠陥由来の劣化を含む何らかの劣化を検出できた項目を取り上げた。ただし、本質的なところで、試験で検知している要因が重なっていることも考えられる。

表 2.4.1-10 66 kV 大電流ケーブル用線材の耐久性試験条件案

大項目	試験項目名	試験方法	判定方法
電流	過電流試験	想定最大過電流値320 A・2 sec (想定過電流31.5 kV・2 secに対応する1本あたりの電流値) から数A毎に電流を増加させ、 I_c が5%以上低下する電流値を計測	想定過電流値に対する裕度が1.2倍以上あること
屈	過渡し熱サイクル試験	差温一液体窒素のサイクル3回で I_c 測定	1回目と3回目で変化がないこと。(試験後の I_c 低下が5%以内)
	限界歪確認試験	20mmφに曲げ履歴を加えた後、フラットに戻して I_c 測定し、前後の I_c 低下が5%以内(別途、曲げ歪- I_c 曲線取得)あるいは、Goldaker方式等で引張方向の歪 vs I_c 測定を行い、20 mmφまでの可逆歪と I_c 低下率を測定するとともに可逆限界値を測定する。	20mmφでの I_c 低下率が5%以内でかつ可逆であること
加熱	ハンダ付け温度加熱試験	大気中、230℃・20分間加熱した前後の I_c 測定	試験後の I_c 低下が5%以内
湿度	湿度劣化試験	40℃・RH100%相当の加湿環境下において、150℃・10時間の熱処理を行った前後の I_c 測定	試験後の I_c 低下が5%以内

2.4.1-3 電磁気挙動の経時変化

プロジェクト後半では、局所特性評価技術を長尺多心線に適用し、熱履歴や機械的ストレスによる剥離現象のメカニズムの解明とその影響の把握に取り組むとともに、長尺線材についても評価を行い、剥離の起点や J_c 値分布の原因となる欠陥の空間周期や統計性に関する知見を得た。

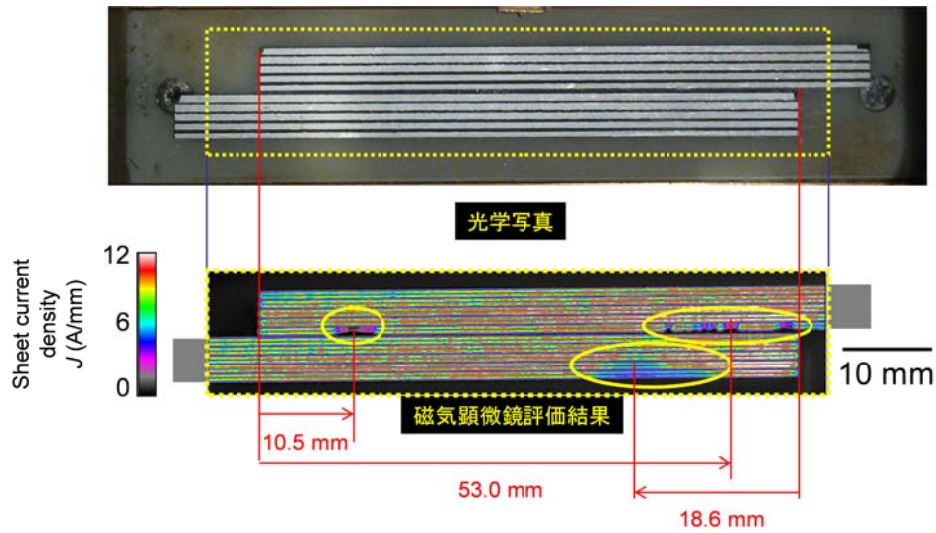


図 2.4.1-35 電流密度分布より特性劣化部の検出

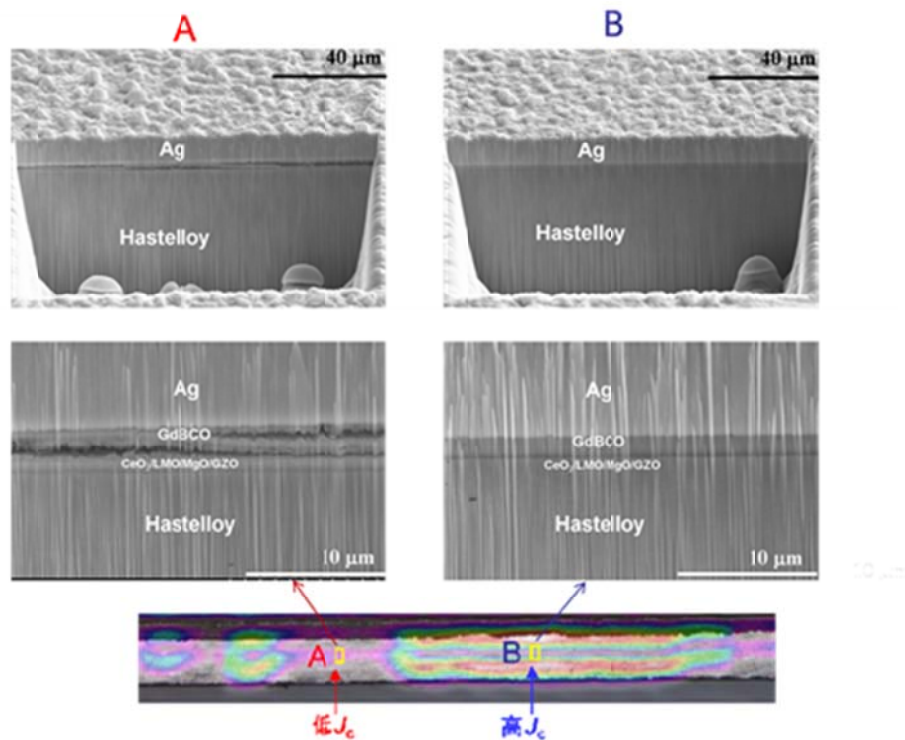


図 2.4.1-36 特性劣化部に対し高解像度断面 SEM 観察によって組織との対応を確認

2.4.1-4 組織観察

実用線材の環境負荷後の微細組織を透過型電子顕微鏡(TEM)により詳細に解析し、劣化機構とともに、これを抑制する手法の提案を支援することを目的とした。本節では、PLD-GdBa₂Cu₃O_y(Gd123)線材について、超電導ケーブル実使用環境を模擬した水蒸気雰囲気における耐久試験を行い、劣化した組織を走査型電子顕微鏡(SEM)及びTEMにより詳細に解析した。観察領域は、レーザ加工切断面側であり、MOの測定からも超電導特性が劣化していると判断された領域である。図2.4.1-37に、耐久試験後におけるレーザ切断側のSEM断面写真を示す。切断面からおおよそ50µm程度(太線矢印で示す)までGd123層が変質している。さらに、変質した箇所の詳細な組織観察を行うため、TEMを用いた。図2.4.1-38に図2.4.1-37の太線矢印で示す領域近傍のTEM像とTEM像のA、B領域の電子回折図形を(a)、(b)に示す。これらの観察結果から耐久試験により変質した領域は多結晶になっていることが判明した(形成された多結晶については、BaCO₃、CuO、Gd₂O₃酸化物等が形成されていると考えられる)。Bの領域ではc軸配向結晶を保持している。耐久試験により、この領域では中間層のCeO₂層、Gd₂Zr₂O₇層及び基板ハステロイ™の構造は変化していない。以上のように耐久試験後の線材の組織観察から、超電導特性が劣化した原因を特定することができた。

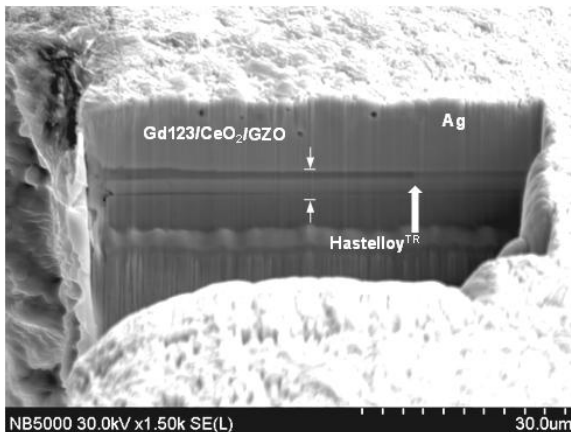


図 2.4.1-37 耐久試験後におけるレーザ切断側のSEM断面写真

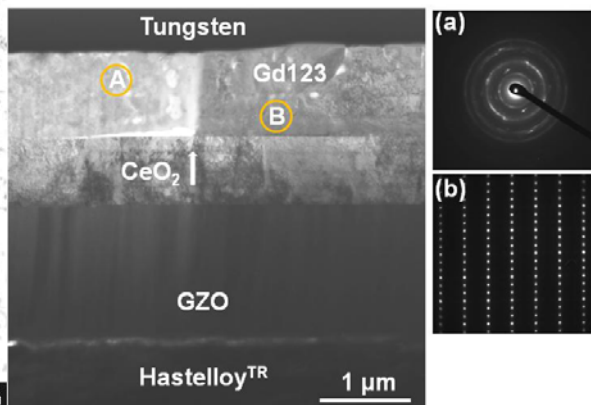


図 2.4.1-38 図 2.4.1-37の太線で示す領域近傍のTEM像、(a)A領域の電子回折図形、(b)B領域の電子回折図形

次に、MOD ベッド層の焼成条件を適正化することにより線材の耐剥離強度を改善した理由について、組織観察から明らかにした結果について述べる。図2.4.1-39にハステロイ™上に形成されたGd123/CeO₂/LaMnO₃/MgO/MOD-Gd-Zr-O(GZO)層の断面TEM像を示す。Gd123層はPLD法により形成した。図2.4.1-39(a)はMOD-GZO ベッド層を600℃で焼成し、(b)は500℃で焼成した。図2.4.1-39(a)のMOD-GZO層は緻密であるが、(b)ではMOD-GZO層に連続した隙間が観察される。さらに、図2.4.1-40に、MOD-GZO層の焼成温度(a)600℃及び(b)500℃

の高分解能 TEM 像を示す。GZO 層はともに、およそ 10 nm 径の結晶粒子から構成されている。両サンプルともに GZO 層とハステロイTM基板の間に基板金属成分の酸化層が形成されている。図 2.4.1-40(b)の高分解能 TEM 像からも MOD-GZO 層内部に隙間が形成されていることが分かる。以上のような組織観察から、600 °C で焼成した MOD-GZO ベッド層は、500 °C で焼成した MOD-GZO ベッド層よりも耐剥離特性が向上している理由を明らかにすることができた。

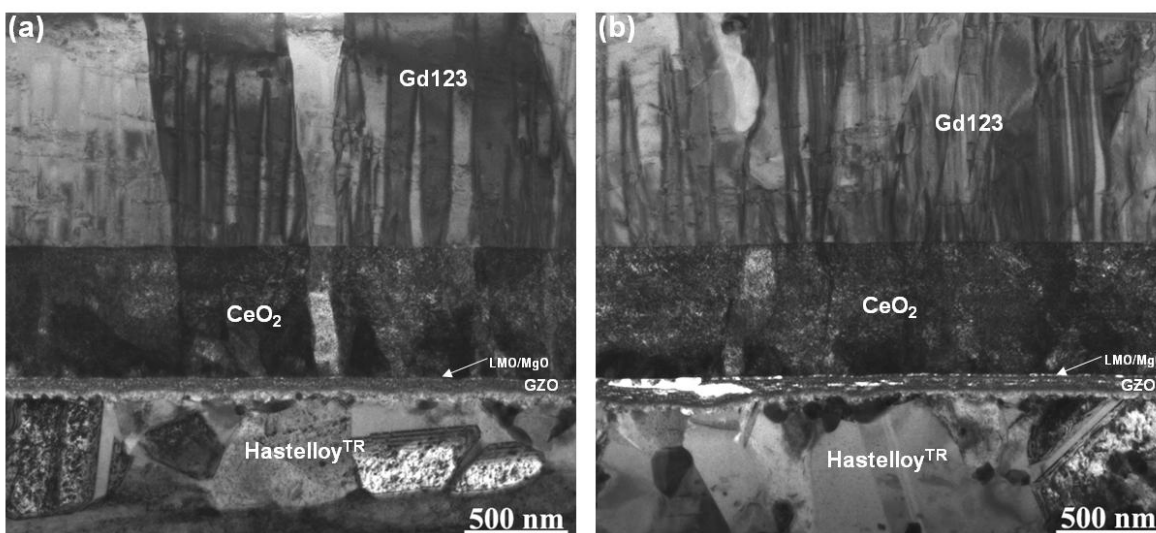


図 2.4.1-39 Gd123/CeO₂/LaMnO₃/MgO/MOD-GZO/ハステロイTMの断面 TEM 像。MOD-GZO 層を(a)600 °C で焼成、(b)500 °C で焼成

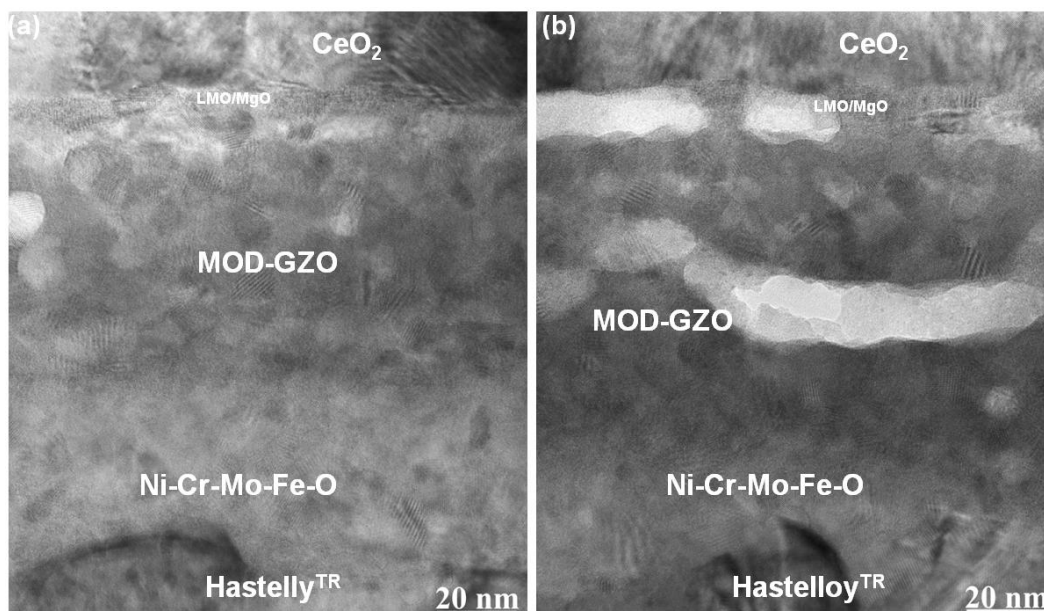


図 2.4.1-40 MOD-GZO の高分解能 TEM 像。(a)600 °C 焼成、(b)500 °C 焼成

引用論文リスト

- (1) A. Ishiyama, Y. Nishio, H. Ueda, N. Kashima, M. Mori, T. Watanabe, S. Nagaya, M. Yagi, S. Mukoyama, T. Machi, Y. Shiohara, “Degradation Characteristics of YBCO-Coated Conductors Subjected to Overcurrent Pulse” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol.19, No.3 (2009) 3483-3486
- (2) N. Sakai, K. Nakao, Y. Hato, X. Wang, A. Ishiyama, T. Kato, M. Yagi, Y. Aoki, S. Lee, N. Chikumoto, Y. Ichikawa, N. Fujiwara, K. Tanabe, ” Understanding of deterioration phenomenon for RE123 coated conductors” *Abstracts of CSJ Conference*, spring, No. 1A-p05 (2010) 15
- (3) N. Cheggour, J. W. Ekin, Y.-Y. Xie, V. Selvamanickam, C. L. H. Thieme, D. T. Verebelyi, “Enhancement of the irreversible axial-strain limit of Y-Ba-Cu-O-coated conductors with the addition of a Cu layer” *Appl. Phys. Lett.* 87 (2005) 212505
- (4) Y. Sutoh, K. Kakimoto, N. Kaneko, Y. Iijima, T. Saitoh, “Mechanical bending property of YBCO coated conductor by IBAD/PLD” *Physica C* 426-431 (2005) 933-937
- (5) N. Cheggour, J. W. Ekin, C. L. H. Thieme, Y.-Y. Xie, ” Effect of Fatigue Under Transverse Compressive Stress on Slit Y-Ba-Cu-O Coated Conductors” *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 17 (2007) 3063-3066
- (6) S. Bamba, Y. Tanaka, T. Ando, H. Ueda, A. Ishiyama, Y. Yamada, Y. Shiohara, “Fatigue tests of YBCO coated conductors” *J. Phys. Conf. Ser.* 97 (2008) 012170
- (7) M. Klaser, J. Kaiser, F. Stock, G. Muller-Vogt, A. Erb, “Comparative study of oxygen diffusion in rare earth REBa₂Cu₃O_{7-d} single crystals (RE=Y, Er, Dy) with different impurity levels” *Physica C* 306 (1998) 188-198
- (8) J-P. Zhou, J.T. McDevitt, “Reaction of the oxygen-deficient YBa₂Cu₃O₆ phase with water” *Solid State Comm.* 86 (1993) 11-14

2.4.2 磁場中高臨界電流(I_c)線材作製技術開発

(ISTEC、中部電力、古河電気工業、JFCC、昭和電線ケーブルシステム、名古屋大学、九州大学、九州工業大学、新潟大学、上智大学、物材機構、核融合研究所、大阪大学、理化学研究所、東京工業大学、ロスアラモス米国立研究所)

2.4.2-1 人工ピン止め点導入関連技術開発

(1) PLD 法による磁場中特性改善技術開発

前 NEDO 事業の「超電導応用基盤技術研究開発 (第Ⅱ期)」プロジェクトで特性向上技術開発において得られた磁場中特性の開発成果を表 2.4.2-1 に示す。ここでは、IBAD-GZO 中間層付き基板上において BZO 人工ピン止め点の導入を行ない、磁場中 I_c 値として 30 A/cm-w(@77 K, 3 T) という高特性を長さ 60 m で実証した。

この結果を本プロジェクトの目標と比較した場合、磁場中 I_c 値向上技術と IBAD-MgO 中間層付き基板導入を含めた極低コストとの両立が課題となる。

表 2.4.2-1 超電導応用基盤技術研究開発 (第Ⅱ期) プロジェクトでの磁場中特性向上技術の成果

IBAD 種類	GZO 基板
人工ピン止め点種類	BZO
長さ	60 m
I_c @77 K	300 A/cm-w@s.f.
	30 A/cm-w@3 T

表 2.4.2-2 磁場中 I_c 値向上&極低コスト両立のアプローチ

	メリット	デメリット
人工ピン止め点なし	MgO 基板導入により、極低コストクリアの見込み	磁場中 I_c 値低下率が比較的大きい
BZO 人工ピン止め点導入	GZO 基板上で 30 A/cm-w@77 K, 3 T クリアの実績	自己磁場中 I_c 値低下により極低コストクリアが困難

表 2.4.2-2 は磁場中 I_c 値向上&極低コスト両立実現のアプローチとして人工ピン止め点無しと BZO 人工ピン止め点導入の比較である。極低コスト化を単独で考えた場合、BZO 人工ピン止め点導入での実現が困難となる一方、人工ピン止め点の導入無しにおいても厚膜化による磁場中特性向上が見込めることが明らかになった((a-4)磁場中線材評価 i)参照)。そこで、中間目標に対しては、IBAD-MgO 中間層付き基板上において極低コスト技術開発と兼ねることが可能な人工ピン止め点の導入無しでの高 J_c 化、厚膜高 I_c 化により目標達成をめざすこととした。

その際、厚膜化は単純に自己磁場中での I_c 値の向上だけではなく、要素ピン力の増大も見込めることから、磁場中特性向上には有効であると考えられる((a-4)参

照)。図 2.4.2-1 には、短尺試料における膜厚と磁場中での I_c 値減衰率を示す。同図から、自己磁場中の I_c 値に対する 3 T 磁場中での I_c 値の比率が厚膜化とともに向上していることがわかる。

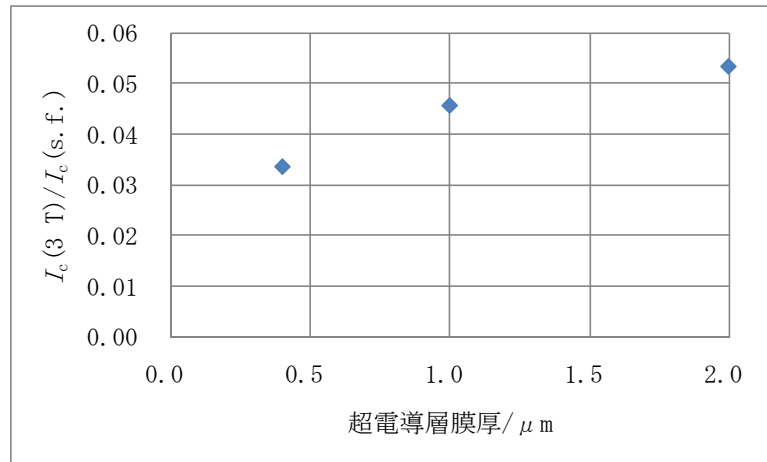


図 2.4.2-1 磁場中 I_c 値の膜厚依存性

図 2.4.2-2 には、IBAD-MgO 中間層付き基板を用いた 41 m 長線材における磁場依存性の結果を示した。本線材の I_c 値は、32 A/cm-w(@77 K, 3 T)を示し、IBAD-GZO 中間層付き基板上での結果と同等の磁場中特性を得ることができた。しかしながら、本線材においては技術コストが、5.0 円/Am であり、高速化、高 J_c 化が必要である。低コスト化については 2.4.5(3)(a-2)PLD 法による超電導層作

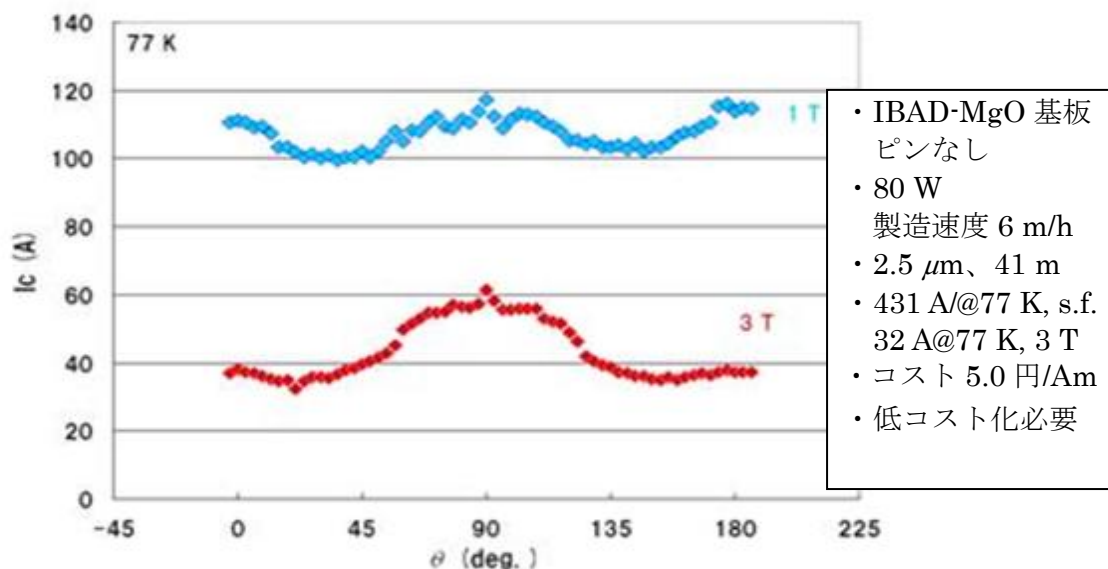


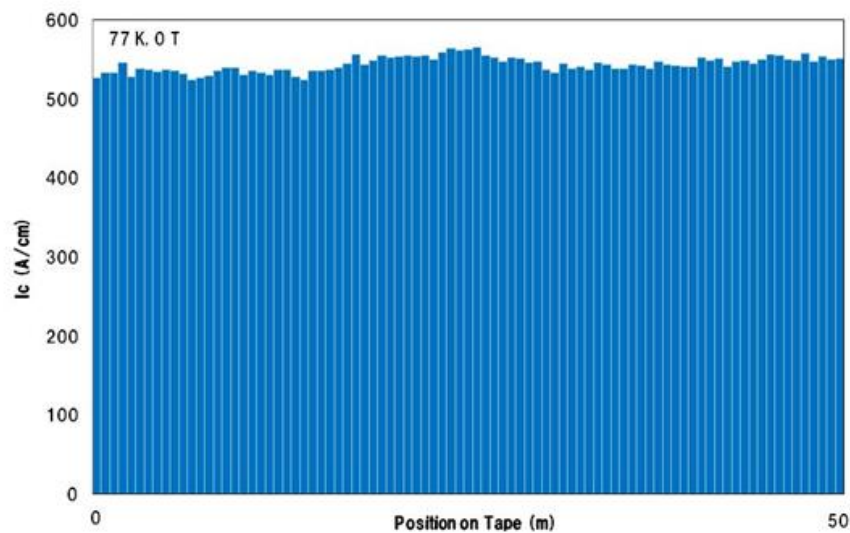
図 2.4.2-2 IBAD-MgO 基板導入による厚膜線材の磁場中特性

製コスト削減技術開発で報告する。磁場中 I_c 向上&極低コスト両立には、膜厚超電導層(1 μm 以上)で高速化等による超電導層作製コストの低減が必要である。そこで、レーザエネルギー密度向上、高成膜温度、及び T-S 間(ターゲット-基板間)距離調整等により高 J_c 条件における高速成膜を実施し、膜厚 1.5 μm の超電導層を

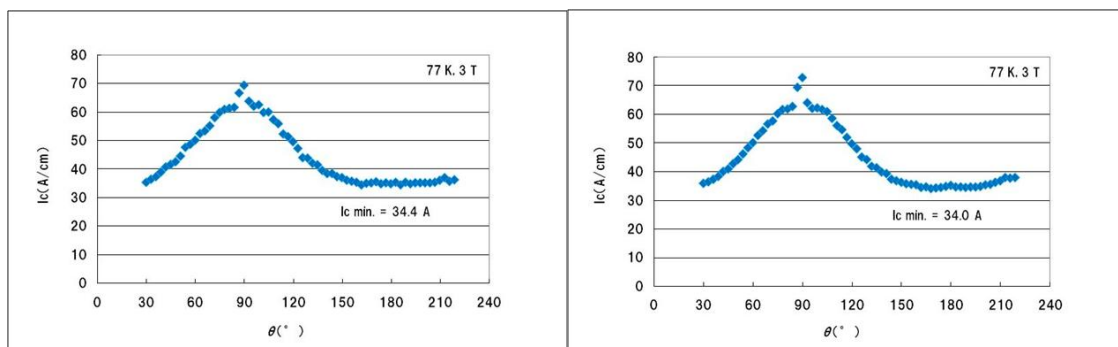
有する線材を作製した。代表的な結果を表 2.4.2-3 にまとめる。また、同線材から切り出した、短尺線材の 77 K, 3 T 条件における磁場中 I_c 値評価の結果を図 2.4.2-3 に示す。

表 2.4.2-3 超電導層作製コスト削減技術開発結果

IBAD 種類	MgO 基板
人工ピン止め点導入有無	なし
超電導層膜厚	1.5 μm
長さ	51 m
$I_c @ 77 \text{ K}, \text{s.f.}$	min524 A/cm-w(標準偏差 1.77 %)
コスト	2.9 円/Am



(a) 長尺測定結果



(b) スタート端

530 A@77 K, s.f.

(c) エンド端

545 A@77 K, s.f.

図 2.4.2-3 電力貯蔵システム向け磁場中 I_c - θ ($\cong 77\text{K}, 3\text{T}$)特性評価結果

SMES 対応の中間目標値である I_c 値@77 K, 3 T は連続 I_c 値測定装置での評価が

困難であることから、図 2.4.2-3 で示した評価結果に基づいて得られる I_c 値@77 K, s.f.と I_c 値@77 K, 3 T の比を用いて、長手方向の値@77 K, s.f.分布から求めた最低 I_c 値に同比を掛けることで全長での最低値 $I_{c,min}$ (@77 K, 3 T)を求めた。長手方向の I_c 値@77 K, s.f.分布から求めた I_c 値は、524 A/cm-w であり、図 2.4.2-3 から求めた比は、0.624 であることから I_c 値@77 K, 3 T の最低値($I_{c,min}$)を 32.7 A/cm-w(@77 K, 3 T)とした。この結果から SMES 対応の中間目標値である磁場中 I_c 条件(30 A/cm-w@77 K, 3 T)を達成したことになる。

図 2.4.2-4 には、同線材の 77 K,0.02 T 条件における特性評価の結果を示す。連続 I_c 値測定装置を用い、電圧端子間距離が 0.7 m 間隔で測定したものである。その結果、最低値が 492 A/cm-w であり、65 K では I_c 値がさらに増加するのは明らかであることから、変圧器対応の中間目標値である磁場中 I_c 条件(300 A/cm-w@65 K,0.02 T)を達成したと言える。

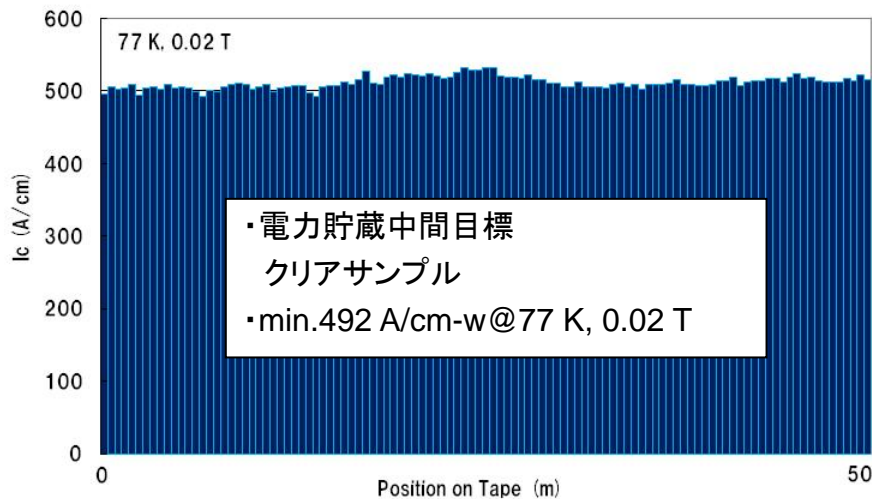


図 2.4.2-4 変圧器向け磁場中 I_c 特性評価結果

表 2.4.2-4 には中間目標と中間評価時点での成果をまとめた。何れの成果も中間目標を上回っている。以上のことから人工ピン止め点導入無しで、超電導層膜厚 1 μm 以上での超電導層作製コスト低減技術開発の結果、磁場中高臨界電流(I_c)の中間目標を達成した。

表 2.4.2-4 中間目標及び最終目標と中間評価時点の成果まとめ

		中間目標	成果	最終目標
磁場中 I_c	I_c @77 K, 3 T	30 A/cm-w	32.7 A/cm-w	50 A/cm-w
	I_c @65 K,0.02 T	300 A/cm-w	>492 A/cm-w	400 A/cm-w@0.1 T
長さ		50 m	51 m	200 m(SMES), 100 m(変圧器)

表 2.4.2-4 では、最終目標と中間評価時点の成果との比較も行った。最終目標実現には、さらに高い磁場中 I_c 特性と長尺化が求められた。特に SMES 向け磁場中 I_c 値の最終目標である 50 A/cm-w(@77 K, 3 T) は中間目標値を大きく上回る目標値である。

そこで、最終目標である 400 A/cm-w(@65 K, 0.1 T-100 m) (以下、「変圧器最終目標」と呼ぶ)、及び 50 A/cm-w(@77 K, 3 T-200 m) (以下、「SMES 最終目標」と呼ぶ) をめざすため、それぞれの特性目標を満たす線材に関して人工ピン止め点導入無しが適切か、それとも人工ピン止め点導入ありが適切かを見極めを行った。人工ピン止め点材料の選定のため、広く用いられている BaZrO₃(BZO) を含む BaMO₃(M=metal : BMO) を超電導層中に導入して、磁場中特性 (@77 K, 3 T) を測定した結果を図 2.4.2-5 に示す。図は 3 T という高磁場での結果ではあるが、BaHfO₃ (BHO) が特に厚膜で圧倒的に高い特性を示すことを発見し、BHO を非常に有用な人工ピン止め点材料として見出した¹⁾。このため、ここでの人工ピン止め点導入材料の検討には BHO を用いた。

(右記図面非公開部)

表 2.4.2-5 には、超電導層の膜厚が同膜厚(=2 μm)である人工ピン止め点導入無し及び人工ピン止め点導入あり短尺試料における I_c 値減衰率を示す。人工ピン止め点導入無し線材の 77 K、s.f.における I_c 値を 1 とし、その I_c 値からの減衰率($I_c/I_{c@}$ 人工ピン止め点導入無し s.f.)を人工ピン止め点導入無し、ありそれぞれにおいて算出した。この結果により、変圧器最終目標($I_c@0.1$ T)達成には人工ピン止め点導入無しが、SMES 最終目標($I_c@3$ T)達成には人工ピン止め点導入ありが有利であることが分かった。

表 2.4.2-5 人工ピン止め点導入有無の短尺試料における I_c 値減衰率

磁場	人工ピン止め点導入なし	人工ピン止め点導入あり
s.f.	1	0.923
0.02T	0.971	0.881
0.1T	0.664	0.582
0.5T	0.263	0.306
3T	0.0528	0.0969

まず、変圧器最終目標についての結果を示す。前述の理由より変圧器最終目標用として人工ピン止め点導入で長尺線材を作製した。変圧器最終目標値である I_c 値@65 K、0.1 T は連続 I_c 値測定装置での評価が困難である。そこで、長手方向の I_c 値@77 K、0.1 T 分布から得られた $I_{c,min}$ 値に、短尺評価から得られた $I_{c,min}@77$ K、0.1 T と $I_{c,min}@65$ K、0.1 T との比を乗して長手方向の $I_{c,min}@65$ K、0.1 T を求めた。

図 2.4.2.5 には、長手方向の $I_c@77$ K、0.1 T ($B//c$) 分布を示す。これより、長手方向の $I_{c,min}$ 値は 285 A/cm-w であった。ここで、図 2.4.2-Y に示すように、短尺評価によって得られた $I_{c,min}@77$ K、0.1 T と $I_{c,min}@65$ K、0.1 T との比は 2.64 であった。よって、この線材の $I_{c,min}@65$ K、0.1 T を 752 A/cm-w(@65 K、0.1 T)とした。以上より、変圧器最終目標値である 400 A(<752 A)/cm-w(@65 K、0.1 T-100 m(<158 m))を達成したことになる。

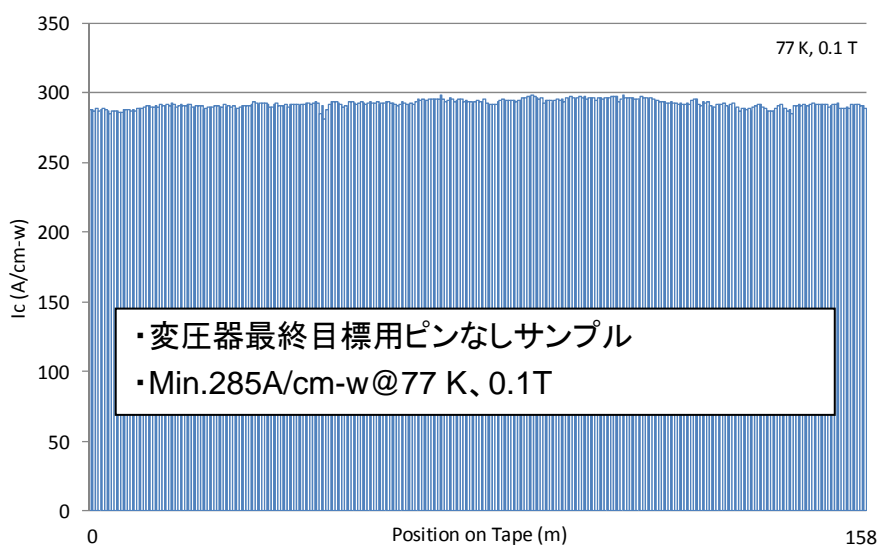
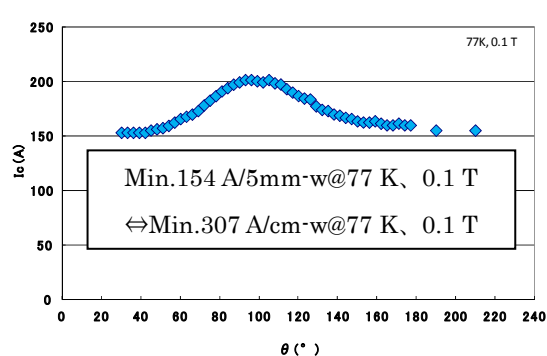
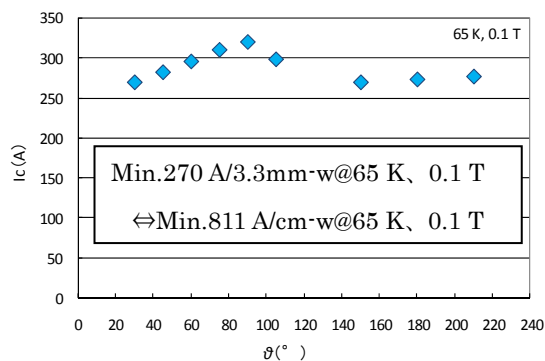


図 2.4.2-6 変圧器向け磁場中 I_c 特性評価結果 (最終結果)



(a) 77 K、0.1 T 条件における短尺 I_c - θ 特性評価結果 (5 mm-w)



(b) 65 K、0.1 T 条件における短尺 I_c - θ 特性評価結果 (3.3 mm-w)

図 2.4.2-7 77 K、0.1 T 及び 65 K、0.1 T 条件における短尺 I_c - θ 特性評価結果

次に、SMES 最終目標についての結果を示す。前述の理由により SMES 最終目標用として人工ピン止め点導入条件で長尺線材を作製した。また、図 2.4.2-5 の結果より、導入するピン材料は BHO とし、人工ピン止め点導入条件では均一な線材を得ることが難しいとされていることから、10 m 長線材を作製し、磁場特性の均一性を評価した。図 2.4.2-8 には 10 m 長の BHO 人工ピン止め点入り REBCO 線材の 77 K、各磁場における I_c -B- θ 特性の分布を示す。

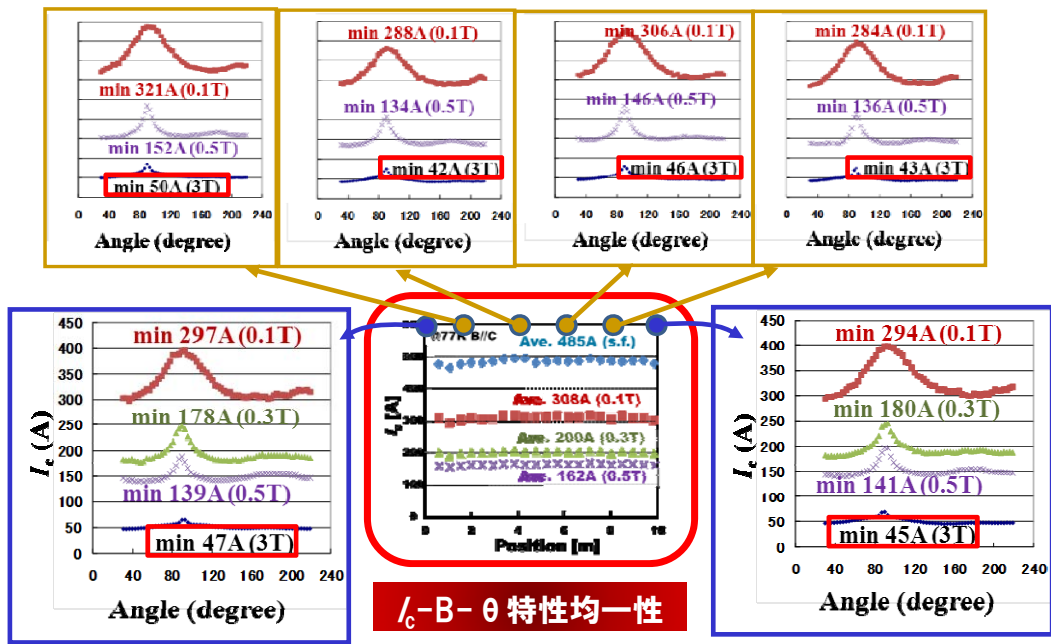
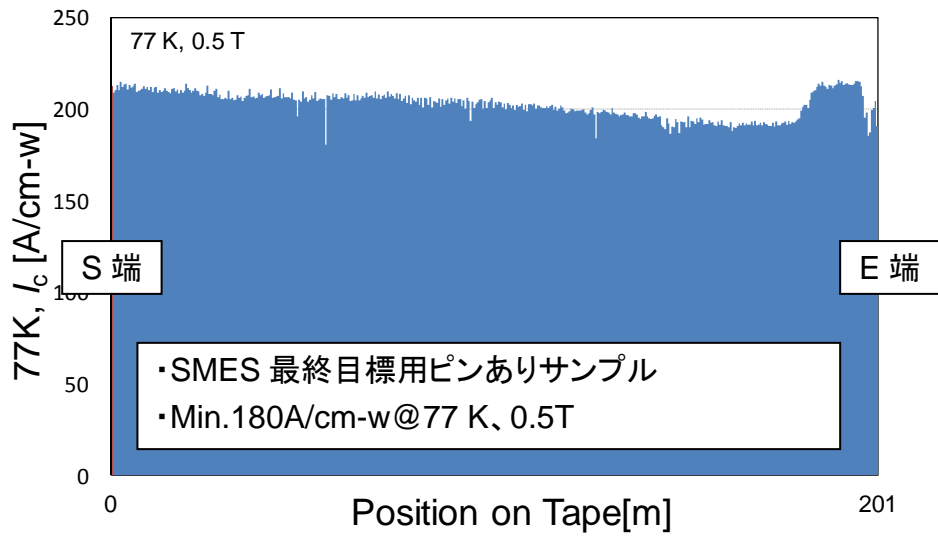


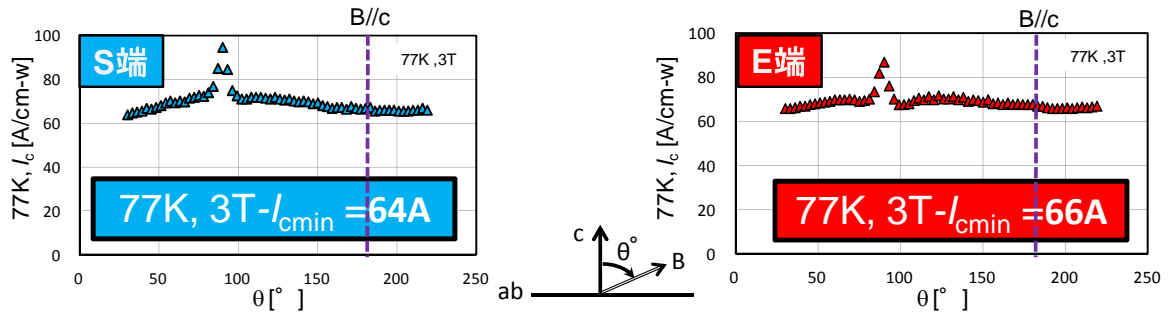
図 2.4.2-8 BHO 入り線材の長尺均一性評価結果

図から分かるように、線材の全長に亘り、磁場によらず均一な I_c -B- θ 特性が得られた。この結果から、BHO 人工ピン止め点導入長尺線材作製により最終目標を達成する見通しが得られたと判断し、200 m 長線材を作製した。ここで、SMES 最終目標値である I_c 値(@77K、3 T)は、変圧器の場合と同様、連続 I_c 値測定装置での評価が困難である。そこで、長手方向の I_c 値(@77 K、0.5 T)分布から得られた $I_{c,min}$ 値に、短尺評価から得られた $I_{c,min}$ 値(@77 K、0.5 T)と $I_{c,min}$ 値(@77 K、3 T)との比を乗じて長手方向の $I_{c,min}$ 値(@77 K、3 T)を求めた。

図 2.4.2-9 には、長手方向の I_c - θ 値(@77 K、0.5 T)分布を示す。これより、長手方向の $I_{c,min}$ 値は 180 A/cm-w であった。一方、短尺評価によって得られた $I_{c,min}$ 値(@77 K、0.5 T)と $I_{c,min}$ 値(@77 K、3 T)との比は 0.306 であった。よって、 $I_{c,min}$ 値(@65 K、0.1 T)を 55.0 A/cm-w(@77 K、3 T)とした。以上より、SMES 最終目標値である 50 A(<55.0 A)/cm-w(@77 K、3 T-200 m(<201 m))を達成したことになる。



(a) 連続 I_c 値測定結果



(b) S 端

208A/cm-w@77 K、0.5 T 最低値

(c) E 端

186A/cm-w@77 K、0.5T 最低値

図 2.4.2-9 SMES 向け磁場中 I_c 特性評価結果 (最終結果)

また、この線材の均一性を評価するため、Reel to Reel-SHPM (走査型ホール素子顕微鏡) を用いて J_c 特性 (@77 K, s.f.) の分布を全長及び全幅で測定した。得られた J_c 値の面内分布、長手方向分布、有効幅分布をそれぞれ図 2.4.2-10(a), (b), (c) に示す。SHPM を用いることで、長手方向のみならず幅方向の欠陥も検出することができるので、超電導線材に存在する欠陥を二次元的に検出することができる。この結果により、図 2.4.2-9a に示す連続 I_c 値測定では認識できなかった長手方向の細かい傷が全長に亘って多く存在することが明らかとなった。線材の有効幅は平均で 9.74/10 mm と非常に高く、殆どの部分を有効に利用できうると考えられる。将来の実用化に向けては、さらなる特性向上とともに、細線化加工の適用も必要と考えられるため、本評価で検出されたような欠陥を抑制し、より均一な線材とする技術開発が望まれる。

表 2.4.2-6 には最終目標及び最終結果についてまとめた。いずれの成果も最終目標を上回っている。以上のことから、変圧器最終目標に対しては人工ピン止め点導入無し超電導層を用いた膜厚 1 μm 以上の超電導層作製コストさく低減技術開発の結果、目標値を大幅に更新する成果が得られた。SMES 目標に対しては新型人工ピン止め点で BHO 材料を用いた結果、目標値を達成することができた。

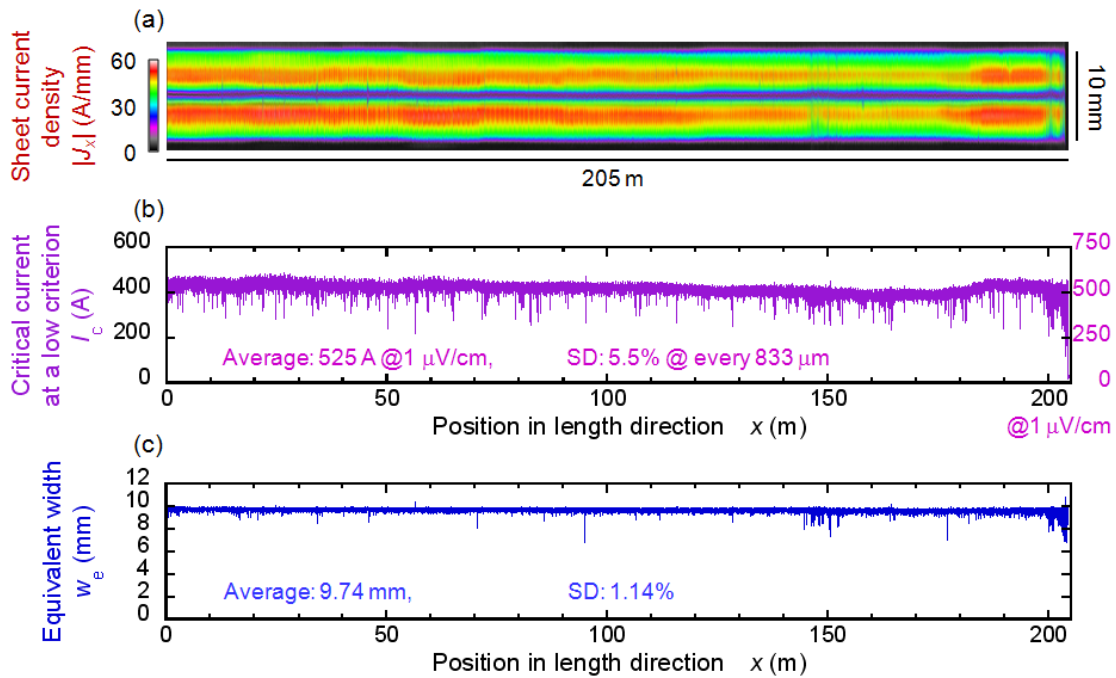


図 2.4.2-10 RTR-SHPM 法により測定した、BHO 人工ピン止め点導入 PLD 線材の(a) J_c 特性の面内分布、(b)全幅 I_c 特性分布、(c)有効線幅分布

表 2.4.2-6 磁場中特性の最終目標と最終結果のまとめ

		最終目標	最終結果
磁場中 I_c	$I_c@77\text{ K}, 3\text{ T (SMES)}$	50 A/cm-w	55.4A/cm-w
	$I_c@65\text{ K}, 0.1\text{ T (変圧器)}$	400 A/cm-w	752 A/cm-w
長さ		200 m(SMES), 100 m(変圧器)	201 m(SMES), 158 m(変圧器)

(2) PLD 法における人工ピン止め点導入による磁場中特性改善技術開発

金属基板を用いた RE 系超電導線材の磁場中特性の改善には、各種ピンニング特性の理解が重要である。ハステロイ™テープ上に IBAD(Ion Beam Assisted Deposition)法で MgO 中間層を作製した IBAD-MgO 基板上に PLD 法で Y 系薄膜を作製し、評価を行ったところ、 J_c 値の磁場印加角度依存性において、磁場が Y 系超電導相結晶構造の c 軸（テープ面に垂直方向）に平行($B//c$)の時に大きな J_c 値のピークを確認した。IBAD 基板上の Y 系薄膜におけるピン止め点に関しては様々な報告があり、未解明の部分が多い。本研究では、c 軸方向における J_c 値のピークの原因を解明するため、Y 系超電導線材の膜厚を変化させ、微細構造観察、超電導特性について比較検討を行った。

図 2.4.2-11 に、IBAD-MgO 基板上に作製した Y 系超電導線材の 77 K、1~7 T における $J_c(B//a,b)$ ($\theta = 90$ 度) 値で規格化した J_c 値の磁場印加角度依存性を示す。本研究の Y 系超電導線材において、 $B//c$ ($\theta = 0$ 度) のとき、非常に大きな J_c 値のピークが確認される。この結果より、YBCO 薄膜には、他のグループが報告した超電導薄膜と比較し、高密度ならせん転位や Y_2O_3 ナノ粒子等のピン止め点が導入されており、 $B//c$ の J_c 値を向上させていると考えられる。膜厚の異なる Y 系超電導線材における J_c 値の磁場印加角度依存性を確認したところ、膜厚が増加することで、 $B//c$ における J_c 値のピークが大きくなっていることが分かり、膜厚増加に伴い c 軸相関ピン止め点が増加していると考えられる。

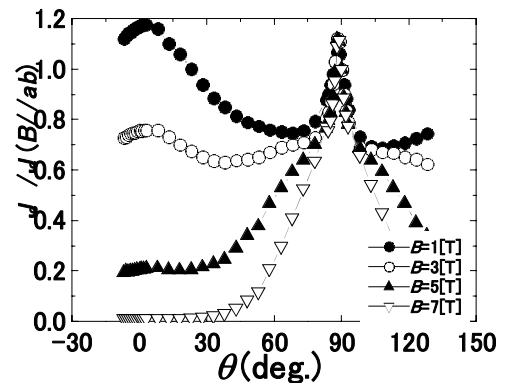


図 2.4.2-11 Y 系超電導線材における規格化 J_c 値の磁場印加角度依存性

この c 軸相関ピン止め点の種類を明らかにするために断面 TEM 像による観察を行った。その結果を、図 2.4.2-12 に示す c 軸方向に成長している欠陥を白い矢印で示す。この欠陥は、刃状転位やらせん転位と考えられる。断面 TEM 像より、薄膜内部から生じている欠陥が観られた。よって、膜厚が増加することでこれらの欠陥が増加し、c 軸相関ピン止め点として働いていると考えられる。薄膜内部からの欠陥の増加は、膜厚が増加することで、中間層と Y 系超電導層材料の結晶格子ミスフィットによる歪みが大きくなり、それを緩和するために刃状転位が増加したと考えられる。これらの新たな人工ピン止め点の生成機構を理解することにより、RE 系超電導線材の磁場中高性能化に反映させた。

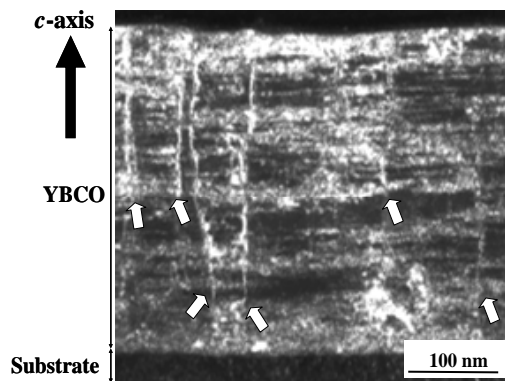


図 2.4.2-12 Y 系超電導線材の断面

(3) MOD 法におけるピン止め点導入による磁場中特性改善技術開発

PLD 法による超電導層成膜の場合、ターゲットに ZrO_2 , YSZ 等を添加することによって超電導層中に微細な $BaZrO_3$ (BZO) ロッドを導入し、磁束のピン止め点として有効に作用させ磁場中 I_c 特性を改善する手法が開発されている。MOD 法によるピン止め点導入については、「超電導応用基盤技術研究開発 (第 II 期)」プロジェクトにおいて (Y/Sm)BCO の混晶材料中に人工ピン止め点を微細分散させることにより、磁場中の I_c 値向上及び I_c 値の角度依存性が小さくなることを報告している。本プロジェクトでは超電導応用基盤技術研究開発 (第 II 期) プロジェクトで開発した TFA-MOD による Y/RE 混晶材料の組成最適化や人工ピン止め点の最適材料、添加量を検討することにより、磁場中特性を改善することを目的とした。また、今回のプロジェクトでは昭和電線と共同で研究開発を実施し、ISTEC で MOD 原料の開発、仮焼・本焼の基礎技術を主に検討し、本焼技術については超電導応用基盤技術研究開発 (第 II 期) プロジェクトでバッチタイプの本焼炉を開発し、500 m-300 A/cm-w(@77K, s.f.) 級の長尺 Y 系超電導線材作製可能な技術を有する昭和電線が Y(RE) 混晶材料の本焼技術開発を主とした長尺化技術の検討を担当することとした。

図 2.4.2-13 に Y 系超電導線材の Y 成分の一部を Gd, Sm 置換及び人工ピン止め点として Zr を導入した線材の I_c - B - θ 測定結果を示す。図より Y を一部 Sm, Gd に置換及び Zr ピン止め点を導入することにより磁場中の J_c 値が向上し、特に Y を一部 Gd に置換し Zr を添加した材料では YBCO と比較すると $J_{c, \min}$ 値が 3 倍以上に上昇している。

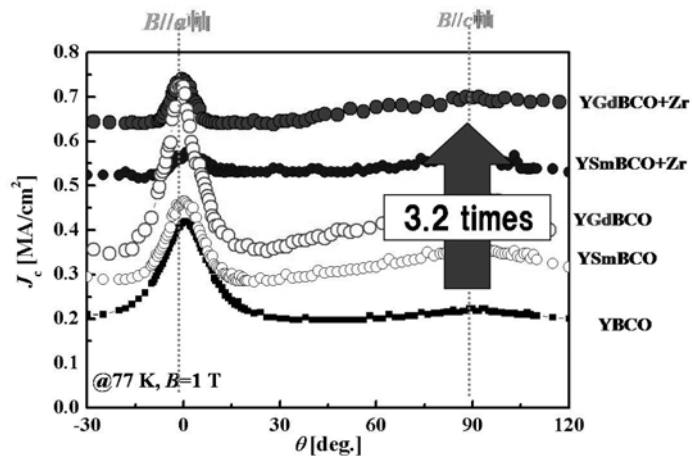


図 2.4.2-13 Y系超電導線材の I_c - B - θ 測定結果

磁場中特性の向上は Y を一部 Gd に置換したことによる I_c 値向上の効果と Zr を導入することによって生成した人工ピン止め点として働いたものと考えられる。

Zr を人工ピン止め点として導入した Y(Gd)BCO 膜の断面 TEM 観察した結果を図 2.4.2-14 に示す。観察の結果から Y(Gd)BCO 中に導入した Zr は Ba と反応して数十 nm 程度の BZO の微細な粒子を形成し、膜中に均一に分散していることが分かっている。このことから、膜中に分散した BZO が人工ピン止め点として働き、磁場中の特性を向上させたと考えられる。また、BZO ピン止め点は仮焼膜を本焼し、超電導層が成長し始める前に生成することが分かっている。従来報告されている PLD 法による BZO ピン止め点の場合には、柱状のナノロッドとして導入されているという報告が多数行われているが、TFA-MOD 法の場合には均一な組成に分散されて、あらかじめ積層されたアモルファス状の仮焼膜から Ba と Zr が反応して、BZO が生成し、微細分散する。PLD の場合には超電導層と BZO 層を同時に積層させながら成膜していくことによって形成する BZO が柱状に成長し、ピン止め点となることから、TFA-MOD 法と PLD 法によって形成される人工ピン止め点の形状が異なると考えられる。

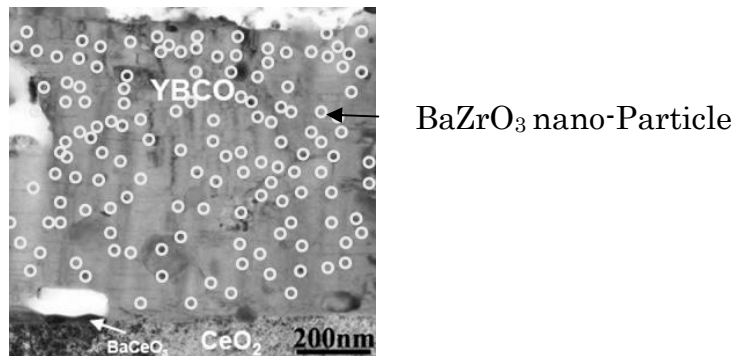


図 2.4.2-14 BZO 人工ピン止め点導入 Y(Gd)BCO 線材の断面 TEM 観察結果

Y(Gd)BCO + 4.6 mol%Zr 膜を高 I_c 化の観点から検討した結果、760 A/cm-w (@77 K, s.f.) と非常に高い I_c 値を得ており、図 2.4.2-15 に示す厚膜試料の 77 K 及び 65 K の磁場中 I_c 値測定結果より、0.5 T, 65 K 及び 77 K, 3 T の I_c 値がそれぞれ 610 A/cm-w、34 A/cm-w と得られている。PLD 法の場合と異なる結晶成長様式のために、ピン止め点導入により自己磁場から高磁場まで、 I_c 特性を低下させることが無いことから、低磁場、高磁場、何れの目標も BZO 人工ピン止め点導入により達成をめざすこととした。

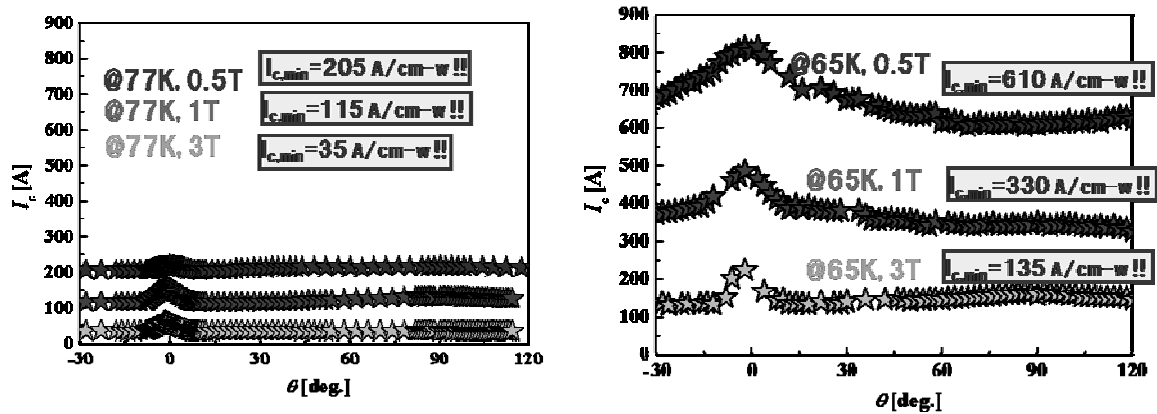


図 2.4.2-15 BZO ピン止め点を導入した Y 系超電導線材の I_c 値の角度依存性 (YGdBCO+4.6 mol %Zr)($I_c = 760$ A/cm-w(@77 K, s.f.))

長尺化については Y(Gd)BCO + 4.6mol%Zr 原料を用いて検討を行った。仮焼膜の長尺化は Dip コーティングによる塗布と仮焼を連続的に行う Reel to Reel プロセスを用いた。Reel to Reel 仮焼によって成膜した 15 m 線材を焼成した結果、約 12 m 区間の I_c 特性は約 300 A/cm-w(@77K, s.f.、膜厚 1.5 μ m、 J_c 値 : 約 2 MA/cm²) を示した(図 2.4.2-16)。端部の磁場特性評価を行った結果 77 K, 3 T 中の磁場中 $I_{c, min}$ 値は 14 A/cm-w(@77 K, s.f. の $I_c = 360$ A/cm-w)であった。

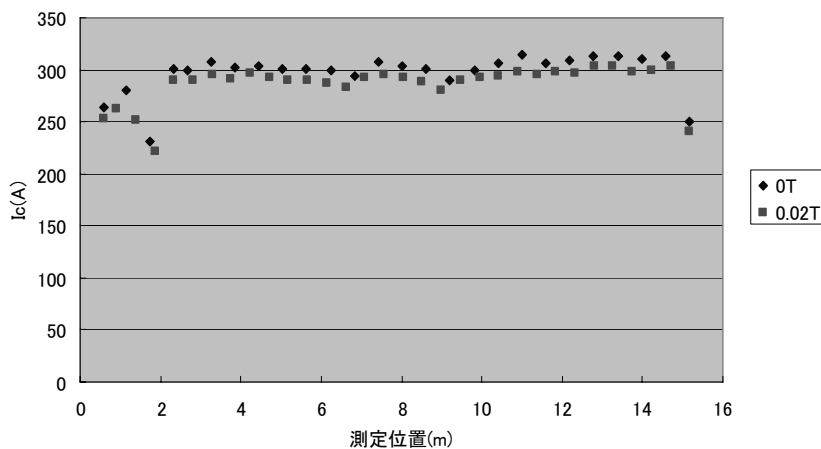


図 2.4.2-16 15 m 線材の I_c 値分布(Y(Gd)BCO + 4.6 mol %Zr : 膜厚約 1.5 μm) (I_c 値測定の間隔 60 cm)

また、長尺本焼の検討としてバッチ型電気炉による焼成の検討を進め、約 10 m おきに仮焼膜を配置して作製した 50 m 模擬線材による焼成条件の検討の結果、262~322 A/cm-w(@77K,s.f.)の I_c 値が得られた。MOD による Y(Gd)BCO + Zr 線材の長尺化は極低コスト目標である 5 m/h 相当の Reel to Reel 仮焼 (by ISTECH) と 10 m/h のバッチ本焼 (by 昭和電線) の組み合わせで行うこととした。また、バッチ焼成した膜の磁場中 I_c 値測定結果を表 2.4.2-7 に示す。表より 65 K, 0.1 T の I_c 特性は約 450 A/cm-w と変圧器用線材の磁場中特性の中間目標値 300 A/cm-w (@65 K, 0.02 T) は平成 22 年度までの特性でクリア可能であると考えられたが、77 K, 3 T の I_c 値は 12 A/cm-w であった。これは SMES 用線材の中間目標 30 A/cm-w (@77 K, 3 T) に対して低い値であった。

一方、極低コスト条件を満たす速度で Reel to Reel 本焼した YBCO 膜の I_c 特性の場所依存性から 50 m 長で 77 K, 0.02 T の I_c 値が 247 A/cm-w が得られた (図 2.4.2-17)。YBCO 膜の 65 K, 0.02 T の I_c 特性は、77 K, 0.02 T の約 1.8 倍程度であるので、この線材の 65 K, 0.02 T の $I_{c,min}$ は約 450 A/cm-w であり変圧器用線材の磁場中特性の中間目標値 300 A/cm-w (@65 K, 0.02 T) はクリアされた。

以上の結果から、SMES 用線材の中間目標 30 A/cm-w (@77 K, 3 T) に対して特性向上が課題であることが分かった。

表 2.4.2-7 バッチ 焼成した Y 系超電導線材の I_c 値の磁場及び温度依存性 (Y(Gd)BCO+4.6 mol%Zr)(膜厚約 1.5 μm 、仮焼 : Reel to Reel@ISTEC, 本焼 : バッチ炉@昭和電線)

	I_c (A/cm-w)		
	77 K, s. f.	77 K, 3 T	65 K, 0.1 T
バッチ 焼成試料	322	12	448
中間目標	300	30	300 (65 K, 0.02 T)

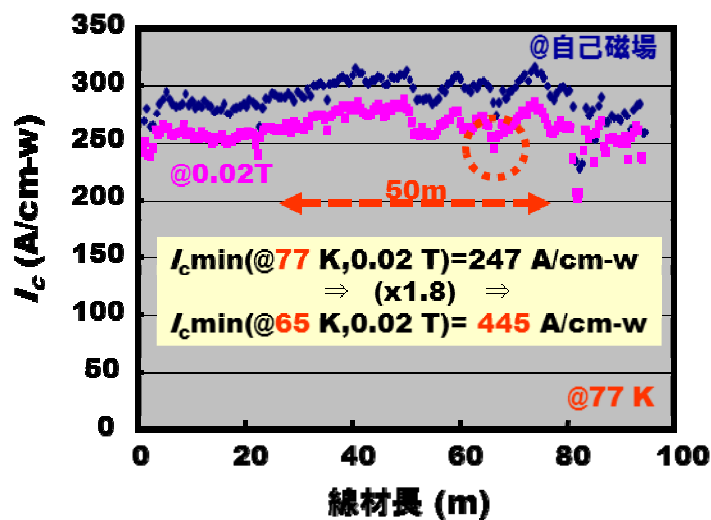


図 2.4.2-17 Reel to Reel 本焼した長尺 YBCO 膜の I_c 特性の均一性評価結果

さらなる磁場中特性改善方法としては BZO ピン止め点導入量の増加による特性向上を検討し、図 2.4.2-18 に示す Y(Gd)BCO + Zr 膜(Zr 添加量 0~13.8 mol%)の I_c - B - θ 測定結果より Zr 量を増加することにより $I_{c,min}$ 値が上昇した。また、Zr 量の増加によって超電導層中に微細分散した BZO 結晶粒は粗大化することなく数が増加することが TEM 観察結果より確認された。

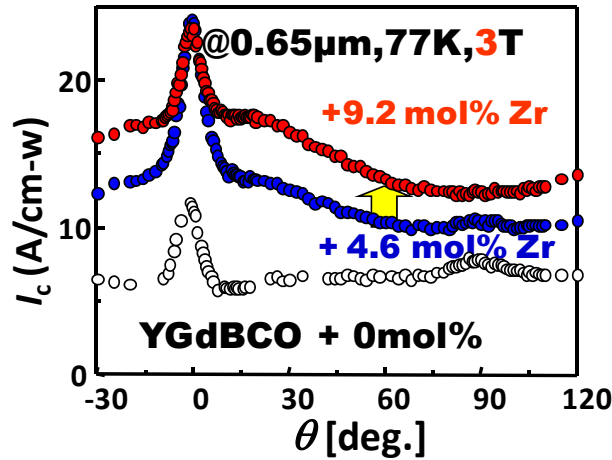


図 2.4.2-18 Y(Gd)BCO + Zr 膜の Zr 添加量と磁場中 J_c 角度依存性の関係

しかしながら Zr 添加量増加に伴って生成する BZO 量が増加することから、(YGd): Ba: Cu = 1: 1.5: 3 の TFA-MOD 原料に添加した Zr 量が 13.8 mol%Zr を超えると J_c 値が 3 MA/cm² 以下となった(図 2.4.2-19: ■)。Zr を (YGd): Ba: Cu = 1: 1.5: 3 組成の原料に添加していく場合、BZO 結晶粒の形成により超電導層形成に必要な Ba が不足すると考えられる。これによって超電導層の組成ずれが起き、それに伴って超電導特性が低下すると考えられる。Zr 添加量によって BZO 形成時に消費される Ba 量を補正した原料で成膜した結果(図 2.4.2-19 : ●)、 J_c 値の低下は生じなくなり、Zr 添加量 27.6 mol%Zr まで 3 MA/cm² の J_c 値が得られることが分かった。

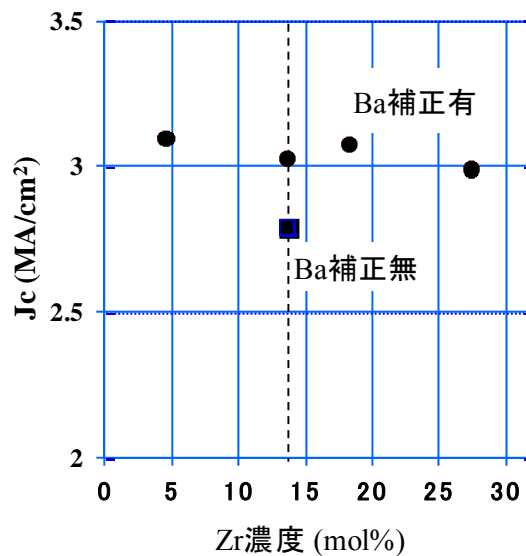


図 2.4.2-19 Y(Gd)BCO に添加した Zr 濃度と J_c 値の関係(77 K, s.f.)

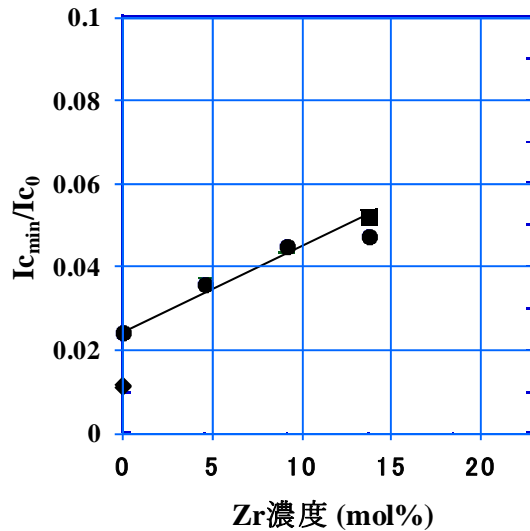


図 2.4.2-20 Y(Gd)BCO に添加した Zr 量と $I_{c,min}(77\text{ K}, 3\text{ T})/I_{c0}(77\text{ K}, \text{s.f.})$ の関係(●:Y(Gd)BCO(Ba 補正無), ■:Y(Gd)BCO(Ba 補正有), ◆:YBCO)

磁場中特性についても Ba 補正により 13.8 mol%Zr までは Zr 添加量の増加に伴い $I_{c,min}$ 値(@77 K, 3 T)/ I_c (@77 K, s.f.) の変化率が小さくなっていくことを確認した(図 2.4.2-16)。Reel to Reel 仮焼で成膜した 1.1 μm 厚の膜(Y(Gd)BCO, Zr 13.8 mol%添加)で 3 T, 77 K の $I_{c,min}$ 値は 15 A/cm-w 得られており、約 2 μm で 30 A/cm-w の $I_{c,min}$ 値を得ることが可能であると考えられた。仮焼・本焼ともに Reel to Reel により 2 μm 厚の 50 m 長 Y(Gd)BCO+ Zr 10 mol%線材を作製したところ、両端の $I_{c,min}$ 値は 23 A/cm-w @77 K, 3 T であり、短尺検討に比べて、かなり低い特性に留まった。この原因は、Reel to Reel により作製された仮焼膜は余剰フッ素を含んでおり、これが Reel to Reel 本焼に伴う高速昇温時には十分分解されず、ピン止め点となる BZO の生成を遅らせて高温になる結果、BZO 粒子が粗大になってピン止め効果を損なうためと考えられた。

Reel to Reel 仮焼膜を Reel to Reel 本焼で焼成して高特性を得るためには、余剰フッ素を本焼前に除去することが必要と考えられたため、仮焼後、本焼前に処理を行う中間焼成という熱処理工程を考案し、効果と条件を検討した。熱処理温度、時間を最適化した結果、短尺検討においても図 2.4.2-21 に示すように、中間焼成無しと比べて大きく磁場中特性が向上した。これらの微細組織を TEM により分析したところ、中間焼成無し(図 2.4.2-22(b)) に比べて中間焼成を施した試料(図 2.4.2-22(a)) は微細な BZO 粒子が膜中に均一に分散していた。この微細な BZO 粒子が有効なピン止め点として作用した結果、磁場中特性が改善したものと考えられ、中間焼成は非常に有用であることが明らかになった。

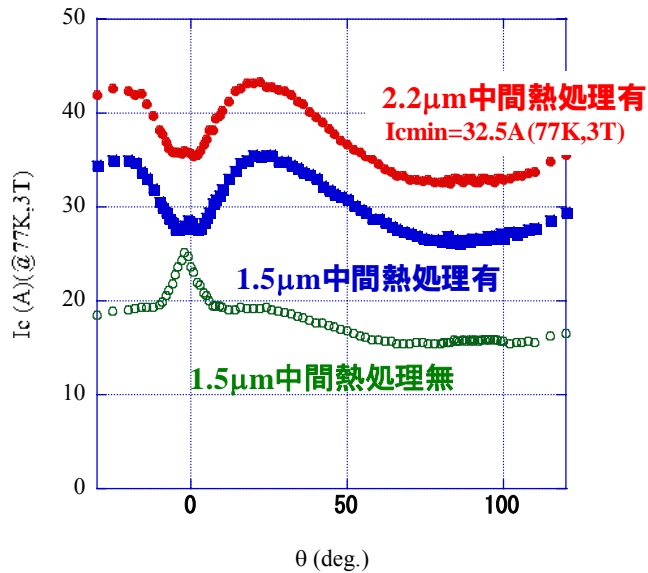


図 2.4.2-21 Reel to Reel 方式で作製した仮焼膜を本焼成した REBCO+BZO の 77K,3T における磁場印加角度依存性に対する中間熱処理の影響

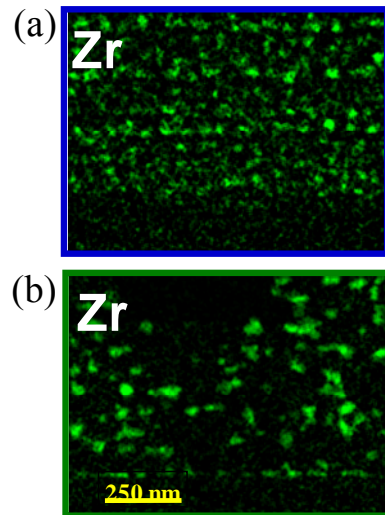


図 2.4.2-22 中間熱処理有り(a)と中間熱処理無し(b)で焼成した REBCO+BZO の断面 TEM (Zr の EDS マッピング) 像

中間評価以降、長尺プロセスとして Reel to Reel 本焼とバッチ本焼において中間焼成の適用を検討した結果、Reel to Reel 本焼においては、高磁場での特性向上は十分ではなく、バッチ本焼において非常に効果的であった。また、変圧器目標について、ピン無しの Reel to Reel 焼成 YBCO 線材 (1.5 μm 厚、 $I_c@77\text{K}, \text{sf} = 392\text{A}/\text{cm}\cdot\text{w}$) の 65K、0.1T の $I_{c,\text{min}}$ は 734.5 A/cm-w (図 2.4.2-23 参照) であったため、ピン無しでの目標達成も十分可能と考えられた。そこで、SMES 目標については、ピン入り REBCO 線材をバッチ本焼により作製することで達成をめざし、Reel to Reel 本焼においてはピン無し YBCO 線材で変圧器目標の達成をめざした。

平成 23 年度以降、最終目標を達成する変圧器用線材として、2.4.3-1(5)に詳述する厚膜化技術や 2.4.5-1(3)に詳述する高速化・高 J_c 化技術等を併せて長尺線材の作製を行った。Reel to Reel 仮焼の後、Reel to Reel 炉により中間焼成を行い、Reel to Reel 本焼することで 2.3 μm 厚の YBCO 長尺線材を作製した。得られた 100 m 長線材の $I_{c,\text{min}}$ 値は 570.8 A/cm-w(@77 K, s.f.)であり、図 2.4.2-24 に示す I_c 値分布から分かるように、非常に均一性の高い高特性線材が得られた。図 2.4.2-D より、YBCO 膜の 65 K、0.1 T の I_c 特性は 77 K, s.f.の約 1.9 倍程度と見積もられるのでこの線材の 65 K、0.1 T の I_c 最小値は 1000 A/cm-w を超える。変圧器用線材の磁場中特性の最終目標値 400 A/cm-w(@65 K, 0.1 T)を大きく上回る成果が得られた。

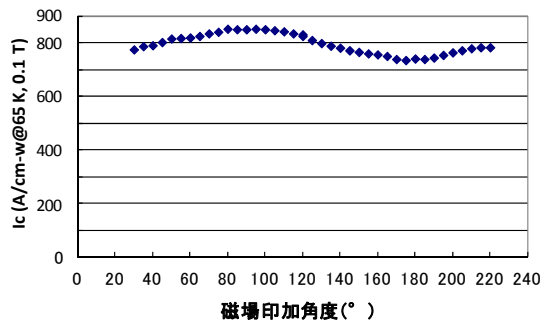


図 2.4.2-23 1.5 μm 厚 YBCO 線材 (5mm 幅) の 65 K、0.1T における I_c - $B\theta$ 特性

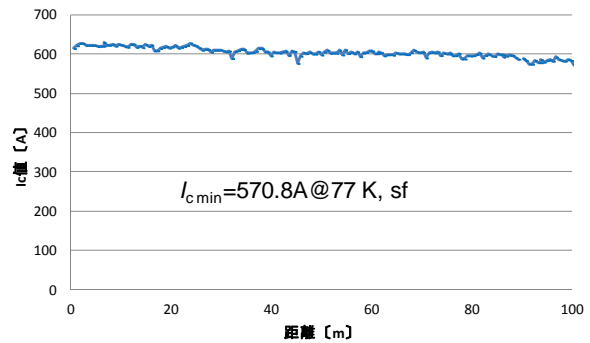


図 2.4.2-24 2.3 μm 厚 100 m 長 YBCO 線材の I_c 値分布

SMES 最終目標値に対しての技術開発としては、高 I_c 化をめざした厚膜線材の作製技術を開発した。特に厚膜において、端部の局所的な膜厚不均一に起因するクラック発生を防止する手段として Dip コーティングによる Reel to Reel 連続プロセスにおいて幅方向の膜厚を均一化することを検討した。その結果、塗布均一化技術を適応した膜は、従来の膜厚分布と比較して、線材の端部に観られた局所的な膜厚不均一が抑えられており、これによりクラックのない 3 μm の膜厚の Y(Gd)BCO + 10 mol%Zr 添加膜が作製できた(図 2.4.2-25)。これを用いて短尺検討により焼成した試料は、77 K、3 T の $I_{c,min}$ 値が 67 A/cm-w という高い特性を示した。この長尺厚膜仮焼膜は、バッチ焼成により本焼成した。詳細は次項 2.4.2-1(4)を参照されたい。

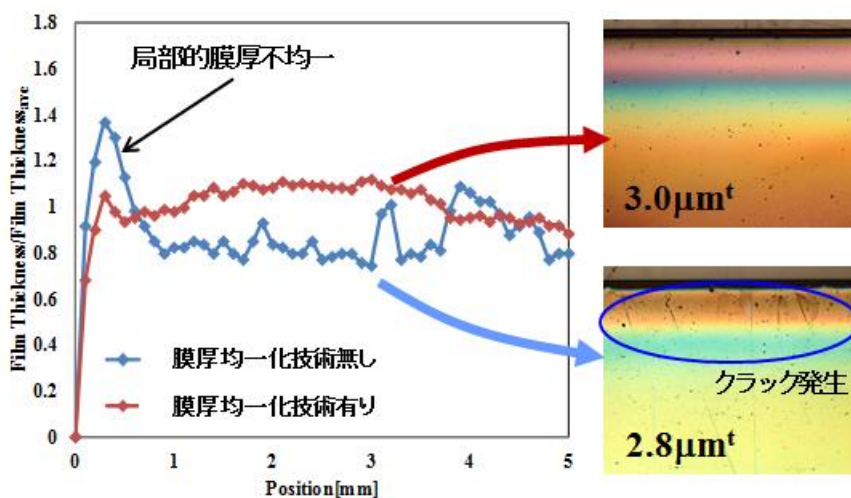


図 2.4.2-25 Reel to Reel 連続プロセスへの塗布均一化技術の適応による厚膜化

(4) バッチ炉を用いた MOD 法による磁場中特性改善技術開発

RE 混晶系材料と異相人工ピン止め点の導入を適用することにより、磁場中特性の向上技術を確認することを目的とし、ISTEC より移管を受けた異相人工ピン止め点の導入技術を昭和電線におけるバッチ式本焼プロセスに適用して長尺 Y 系超電導線材の作製を行った。

バッチ式本焼プロセスは、Y 系超電導線材の結晶化反応の過程で発生する HF ガスを効率良く炉外に排出するため、50 Torr の減圧雰囲気で行った。このため、結晶の成長速度が速くなり、特に混晶系の材料では成長速度の制御が重要となる。ISTEC より技術移管された 5.0 mol% Zr を加えた人工ピン止め点導入用仮焼膜を使用し、焼成条件の最適化を実施し、図 2.4.2-26 に示す破線で囲んだ領域において J_c 値(@77K,s.f.) > 2.0 MA/cm² の特性が得られることが判明した。

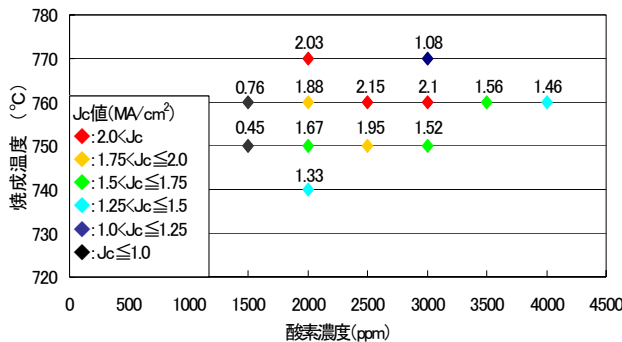


図 2.4.2-26 減圧焼成(50 Torr)における温度と酸素濃度の最適領域

において I_c 値 > 250 A/cm-w (@77K,s.f.) の特性が得られた。この結果、バッチ式本焼プロセスにより RE 混晶系+人工ピン止め点導入線材の長尺化が可能であることが示唆された。磁場特性の角度依存性を評価した結果、65 K、0.1 T で $I_{c,min} = 448$ A/cm-w、77 K、3 T で $I_{c,min} = 12$ A/cm-w を示した。

平成 22 年度までに明らかになった焼成温度と酸素濃度の組み合わせを基本とし、スパッタ-CeO₂/IBAD-MgO 上に形成した短尺仮焼膜試料をダミー線に接続した 50 m 長模擬線材によるパッチワーク試験を実施、本焼条件の検討を行った。その結果、50 m の模擬線材に各所に仕込んだ試料全て

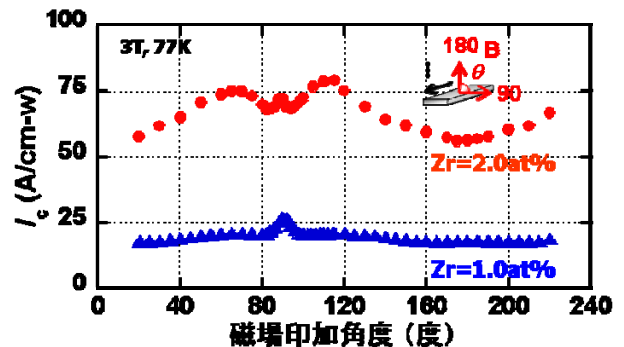


図 2.4.2-27 磁場印加時の特性に及ぼす Zr 添加量の違い

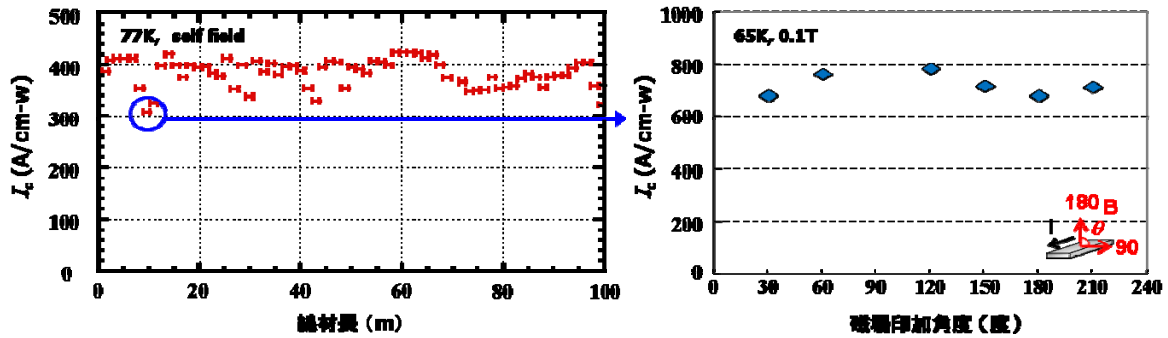


図 2.4.2-28 変圧器用最終目標達成に向け作製した長尺線材の評価結果

平成 23 年度以降、さらなる磁場特性の向上をめざし、人工ピン止め点の原料となる Zr の添加量を 5 mol% から 10 mol% への増量を試みた。図 2.4.2-18 に示すように、短尺試料において SMES 用線材に設定された目標値を超える $I_{c,min} = 56 \text{ A/cm-w}$ (@77 K, 3 T) を得ることができた。さらに Zr の添加量を 15 mol% としたが、超電導層内の非超電導相が過剰になる等の理由から、 $I_{c,min}$ 値 が低下することが判明した。この結果から、Zr の添加量は 10 mol% とした。

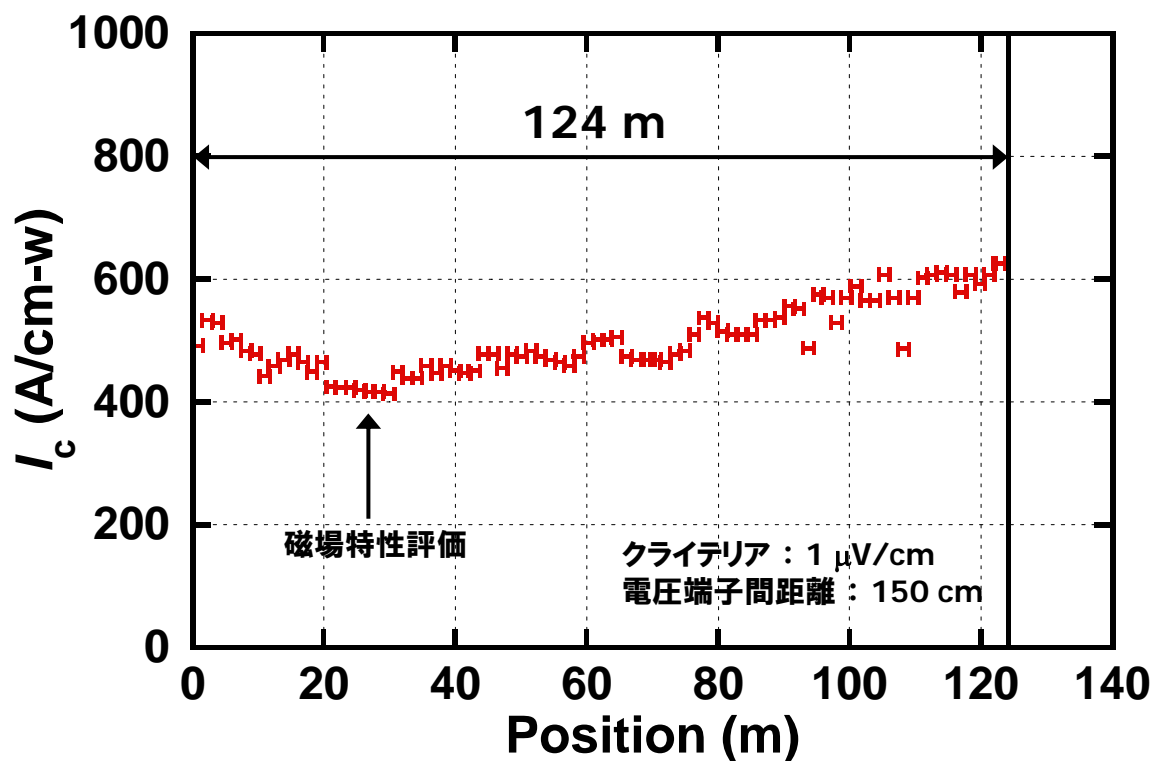
人工ピン止め点非導入型長尺線材において、作製プロセスの最適化に伴い、長尺特性が向上し、磁場中特性についても向上が認められた。最終的には、自己磁場中での I_c 値は 300 A/cm-w を優に超えるものとなった。変圧器用線材としての目標である 100 m 長、 $I_c > 400 \text{ A/cm-w}$ (65 K, 0.1 T) について、作製した 100 m 長線材の特性は、図 2.4.2-28 に示すように 100 m 全長にわたって 300 A/cm-w (77 K, s.f.) 以上の I_c 値を示しており、本線材 100 m 中で最も特性の低い箇所において、 $I_{c,min} = 681 \text{ A/cm-w}$ (65 K, 0.1 T) を有していることから、この線材をもって変圧器用線材の目標達成とする。

次に、SMES 用線材の目標である 200 m 長、 $I_c > 50 \text{ A/cm-w}$ (@77 K, 3 T) の達成をめざし、バッチ式本焼プロセスにて本焼条件の最適化を行った。3 T, 77 K という環境下で 50 A/cm-w 以上の I_c 値を得るため、磁場中での高 J_c 化と超電導層の厚膜化の両面から本焼条件の最適化を試みた。磁場中での高 J_c 化については、ISTEC で開発された「中間熱処理プロセス」を採用し、最適化を行った。これにより、中間目標にあたる 50 m 長、 $I_c > 30 \text{ A/cm-w}$ (@77 K, 3 T) を達成することができた。ここで用いた線材の超電導層の厚さは $1.5 \mu\text{m}$ であり、 J_c 値は 0.2 MA/cm^2 (@77 K, 3 T) であった。

この結果から、最終目標達成に向け、超電導層厚を $2.5 \mu\text{m}$ とし、本焼条件の最適化を進めた。図 2.4.2-29 に 124 m 長線材の特性評価結果について示す。図 2.4.2-29(a) は連続通電 I_c 測定法により測定した、全長の I_c 特性 (A/cm-w @77 K, s.f.) である。600 A/cm-w を超える高い特性が得られている部分もあるが、400 A/cm-w 程度の特性しか得られていない部分もあり、自己磁場における特性のバラツキは大きい。図 2.4.2-29(b) は、この線材の高特性部である両端部分と、24 m 付近の低特性部から短尺試料を切り出して I_c -B- θ 特性 (A/cm-w @77 K, 3 T) を評価した結果で

あり、全ての試験片において、 I_c min が 50A 以上の最終目標特性をクリアする値を示した。本技術を用いて 200m 長の長尺線材作製を行うことで、最終目標を達成できると考えられ、本技術開発により最終目標達成に技術的見通しが得られた。

(a)



(b)

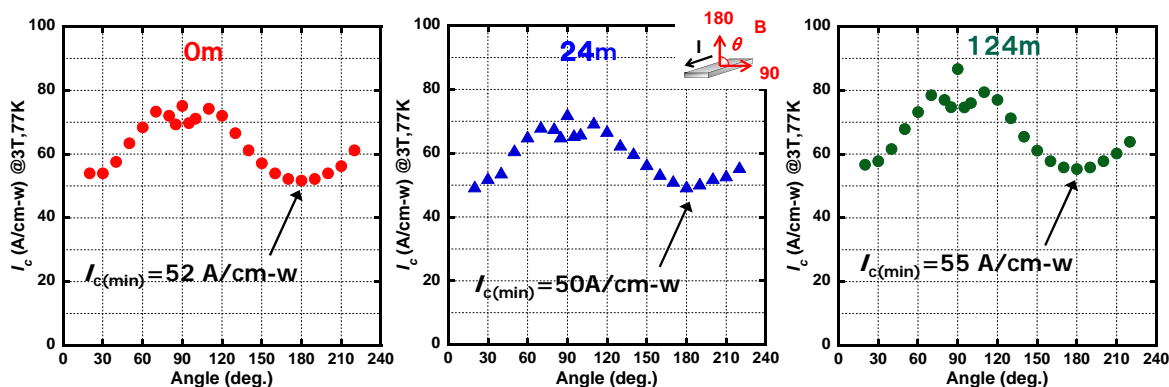


図 2.4.2-29 124 m 長 MOD-REBCO+BZO 線材の全長特性分布(77 K, s.f.) (a)及び両端部・低特性部(24 m)における I_c 特性の磁場印可角度依存性(77 K, 3 T)(b)

(5) MOD 法における各種ピン導入法の比較研究

SMES あるいは変圧器応用に対応できる Y 系高性能超電導線材を得るには磁場中特性の向上が必要である。ここでは、MOD 法を用いたピン止め点導入による YBCO 膜の磁束ピン止め挙動及び組織への影響を調査し、高 J_c 線材作製技術開発への知見を得る。

Y 及び Ba の三フッ化酢酸塩と Cu-ナフテン酸塩を金属モル比 1:2:3 とした原料溶液に、アセチルアセトナート-スズ塩を溶解あるいは酸化スズを分散させた 2 種類の出発溶液を準備し、 LaAlO_3 単結晶基板の上に塗布し、 400°C で仮焼した後、 760°C で結晶化熱処理した。四端子法により電流特性を評価し、TEM により微細組織を観察した。

アセチルアセトナート-スズ塩添加 YBCO 膜では、結晶粒径約 30 nm のピン止め点が膜中に分散して析出（晶出）し、図 2.4.2-30 に tin-salt で表記するように J_c 値の磁場強度依存性が低減した。組織観察において、回折像より析出粒子は BaSnO_3 であること及び膜中の空隙減少が認められたことから、磁束ピン止め点の効果と膜の高密度化が J_c 値向上の要因と考えられる。空隙減少の理由は、 BaSnO_3 生成により YBCO 相結晶生成時の Ba 濃度が低減し、Ba-deficient 試料と同等の効果が現れたと考えられる。

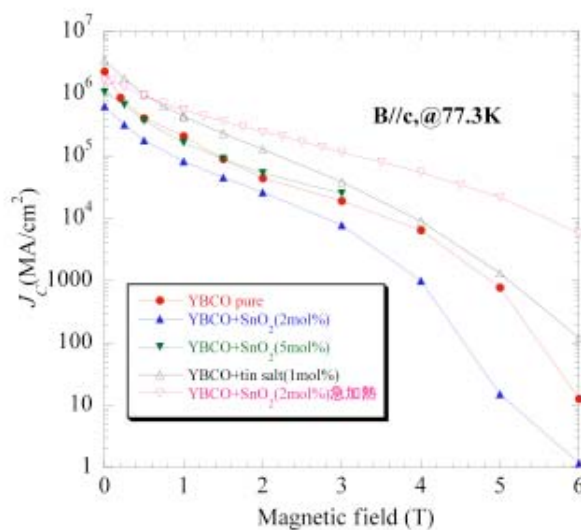


図 2.4.2-30 J_c 値の磁場強度依存性

酸化スズ添加 YBCO 膜では、 SnO_2 とされる約 $30\text{-}50\text{ nm}$ の粒子が析出したが、一部で偏析が観られた。 J_c 値の磁場強度依存性が低減し、析出粒子のピン止め効果が認められた。一方、酸化スズ添加により a 軸粒が生成し自己磁場 J_c 値が低下した。結晶化時の温度勾配の適正化により、a 軸配向粒生成が抑えられ、自己磁場 J_c 値の向上及び図 2.4.2-31 に示す広い磁場印加角度における J_c 特性改善が実現され

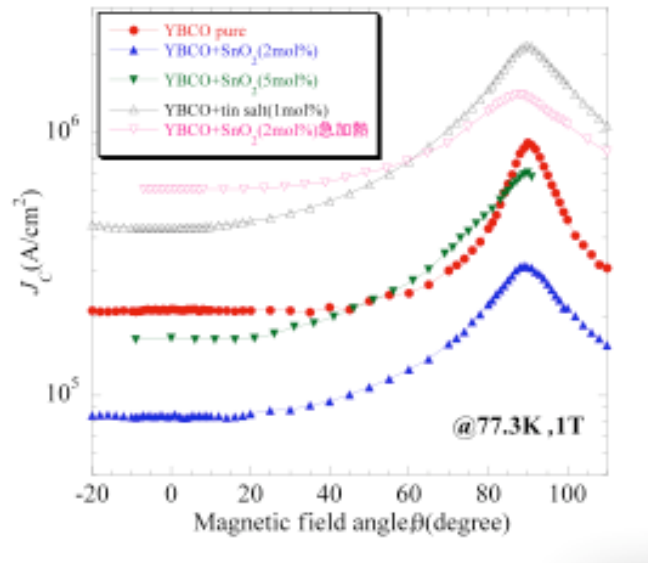


図 2.4.2-31 J_c 値の磁場角度依存性

た。

MOD 法において、ピン止め点の均質分散にはピン止め原料塩を出発溶液に溶解させて成膜する手法が効果的である。一方、ナノ粒子を出発溶液に分散させる手法もピン止め点導入法として有効であり、偏析抑制が特性向上の課題と示唆される。これらの知見は Y 系長尺超電導線材の開発においても有用である。

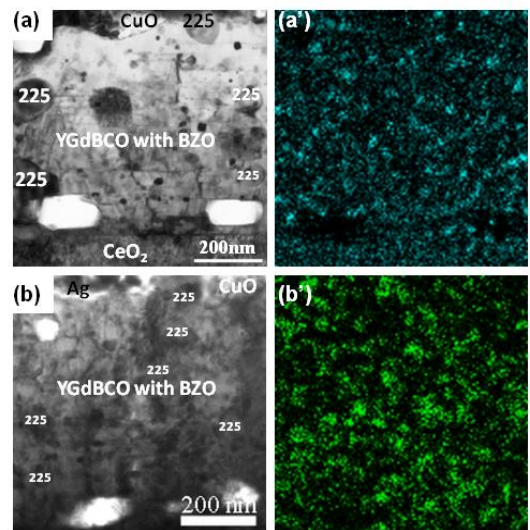


図 2.4.2-32 BZO ナノ粒子を分散した YGdBCO 断面 TEM 像
(a) A サンプル、(b) B サンプル
Zr 元素マッピング像
(a') A サンプル、(b') B サンプル

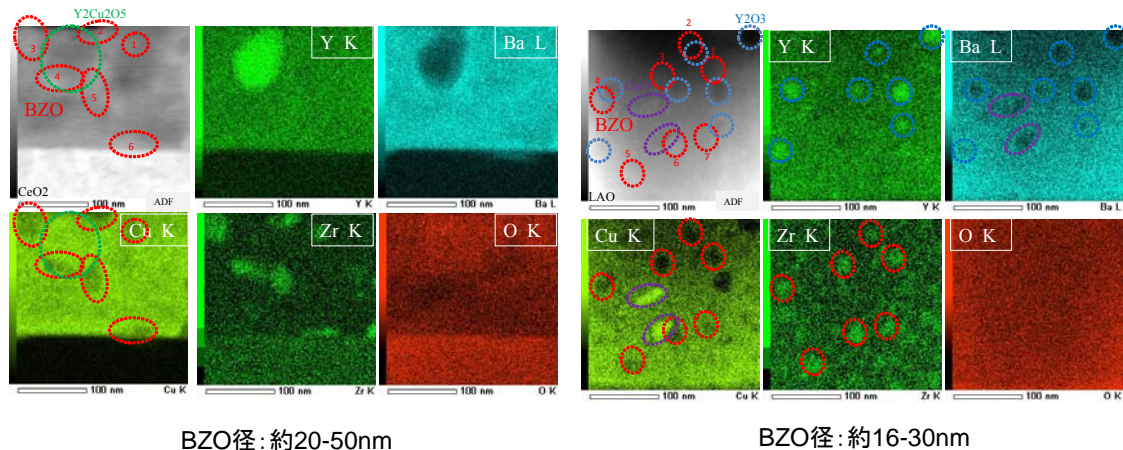


図 2.4.2-33 透過型電子顕微鏡による膜中の元素分布観察

次に、平成 23 年度以降の成果として、BZO ナノ粒子が分散した MOD- $Y_xGd_{1-x}Ba_2Cu_3O_y$ (Y(Gd)BCO)線材について、その微細構造について述べる。観察した試料は、MOD 溶液に Zr を(A)4.6 mol%導入した線材、(B) 9.2 mol%導入した線材である。図 2.4.2-32 (a)、(b)に(A) 及び(B)の線材の断面 TEM 像、(a')、(b')にそれぞれの線材の Zr 元素マップを示す。両線材とも超電導層は c 軸配向結晶となっているが、空隙や 100~200 nm 径程度の $Y_2Cu_2O_5$ が存在している。さら、線材ともに BZO 粒子が超電導層全体に分布し、その粒径はおよそ 20 nm 程度である。また、Zr の添加量を 2 倍にした場合、磁場中での超電導特性が向上しており、TEM 観察の結果から、BZO 粒子の数がほぼ倍になっていることが分かった。以上の結果から、MOD 溶液への Zr 塩添加量を変えることで、ナノ粒子の分布状態を制御することができた。本項で開発した手法により MOD 超電導層の高磁場中での I_c 値が向上し、さらに、磁場角度依存性が低減されていることが分かっている。本項で述べた微細組織観察の結果は、磁場中高臨界電流線材の設計において重要な指針となる結果であった。

また、高磁場中での電流特性向上には、微細なピン止め点を多数導入することが有効と考えられる。そこで、MOD法によりYBCO膜中にBZOピン止め点を導入する際のBZOを微細化するプロセスを検討した。

YBCOの結晶化温度より低温でBZOの核生成を促すことを目的として、YBCOの結晶化温度より低温の600°Cで温度保持を行う熱処理を導入した。温度保持を180分行った試料の組織観察の結果、図2.4.2-33(右図)に示すようにBZOが膜中に約16~30 nmの粒径で分散し、従来プロセス(同図左)の粒径約20~50 nmに比べて温度保持の導入によりBZOが微細化することが明らかとなった。また、いずれの試料も1 mol%でZr塩を添加していることから、温度保持を導入した試料ではBZOの数密度が増大していることが推察される。これらの試料の磁場中での J_c 値測定結果を図2.4.2-34に示す。従来のプロセスでBZOを添加した試料に比べて、温度保持プ

プロセスを導入した試料の J_c 値が大きく向上している。このことから、膜中に析出したBZO粒子は有効なピン止め点として機能することが示され、低温での温度保持プロセスがBZO粒子の微細化及び高密度化に有効であることが明らかとなった。

BZO ピン止め点を導入した YBCO 薄膜の生成機構を調査し、熱処理プロセス適正化により組織改善及び特性向上が達成された。本知見は、磁場中特性改善に有効なピン止め点の導入プロセスであると判断される。一方で、厚膜での本手法の有効性の検証が今後の課題として挙げられる。

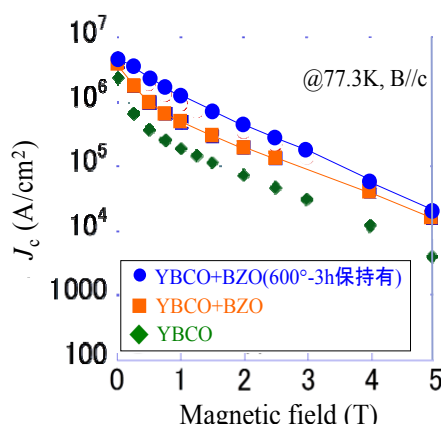


図 2.4.2-34 YBCO 膜の磁場中 J_c 値測定結果

(6) MOCVD 法における希土類元素の一部置換による磁場中特性改善技術開発

MOCVD 法による希土類元素の一部置換による超電導層の高品質化について検討を行った。具体的には、Y 系超電導線材の構成元素である Y、Ba、Cu のうちの Y について、一部を希土類元素(Gd)で置換し、いわゆる混晶系とすることでの高品質化を試みた。なお、本検討では、PLD-CeO₂/IBAD-GZO/ハステロイ™を中間層付基板として使用した。

はじめに、Y に対する Gd の置換量の最適化を行った。Gd の置換量をパラメータとして実験を行った結果、MOCVD 装置では、Y のうち 30 %程度を Gd で置換することで、比較的高い I_c 値が得られることが分かった。

次に、上記で得られた混晶比において、超電導層の厚膜化による高 I_c 化の検討を行った。MOCVD 法により膜厚 1.5 μm の混晶系超電導層を成膜し、 I_c 値を測定した。結果の一例を図 2.4.2-35 に示す。温度 77 K、自己磁場中で $I_c = 390$ A/cm-w ($J_c = 2.7$ MA/cm²) という高い通電特性を実現することに成功した。

これら混晶系の特徴として、通常の Y 系超電導線材では厚膜化時に問題となる a 軸成長結晶粒の生成が抑制されることが、X 線回折及び SEM による表面観察の結果から確認された。磁場中特性の改善には、まずは自己磁場での I_c 値を向上させることが重要であり、今回、混晶系線材により、a 軸生成が抑制され、 J_c 値の劣化を生じることなく、厚膜化が実現でき、比較的高い I_c 値が得られたことから、磁場中特性改善につながる重要な技術的知見が得られたと考えた。

本線材の磁場中特性の評価結果を図 2.4.2-36 に示す。なお、温度は 77 K、磁場印加方位はテープ面に垂直である。最大 8 T までの磁場を印加し、8 T で、ほぼ I_c 値は 0 A となった。なお、磁場 3 T における I_c 値は 20 A/cm-w であった。

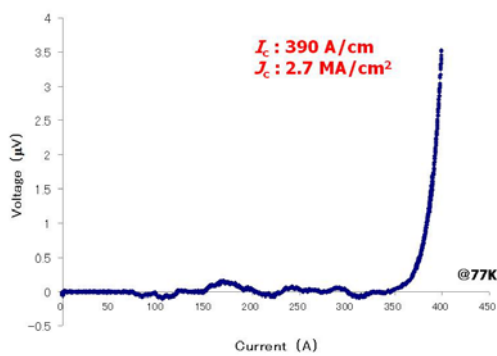


図 2.4.2-35 Y(Gd)BCO 線材の I - V 特性

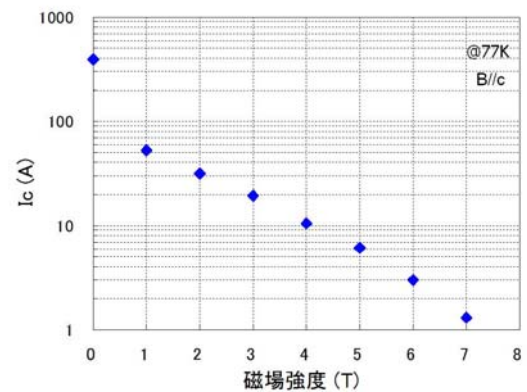


図 2.4.2-36 Y(Gd)BCO 線材の磁場特性

(7) MOCVD 法における Zr 添加による磁場中特性改善技術開発

Y のうち 30 % 程度を Gd で置換した Y(Gd)BCO 線材に Zr を添加し、超電導層中に BaZrO₃ 等の有効なピン止め点を導入することにより、MOCVD 法により作製する超電導線材の磁場中特性の改善を試みた。

はじめに、Zr 添加量の検討を行った。Zr 添加量を 1~3 mol% として Ba, Cu 量、成膜条件を調整し、最も高い I_c 値が得られる条件を探索した。無添加の場合と Zr を添加した場合の超電導層厚 0.9 μm での 77 K, s.f. での I_c 値は、Zr 添加量の増加につれて減少している。しかし、3 T の磁場における $I_{c,\text{min}}$ 値の比較では、図 2.4.2-37 に示すように、Zr 添加量 1~2 mol% において最も良い値 (~18 A/cm-w) を示すという知見が得られた。この結果は、PLD 法による超電導層では、より Zr 添加量の多い側に I_c 値のピークがあるという点で異なるが、MOCVD 法による線材においても Zr 添加により何らかのピン止め効果が得られるということを示唆している。図 2.4.2-38 に Zr 添加量 1 mol% 試料の TEM 像を示す。

この結果を基に、Zr 添加量 1~2 mol% での超電導層の厚膜化を進め、Zr 添加量 1 mol%、超電導層厚 1.4 μm において、3 T での $I_{c,\text{min}}$ 値 21 A/cm-w が得られた (図 2.4.2-39)。

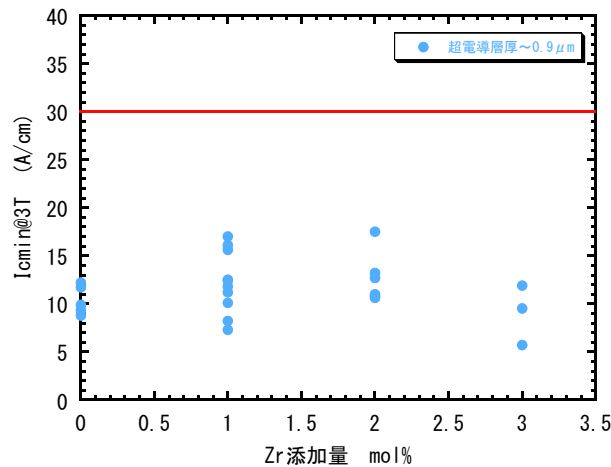


図 2.4.2-37 $I_{c,\text{min}}$ 値の Zr 添加量(mol%)依存性 (@77 K, 3 T 超電導層厚 0.9 μm)

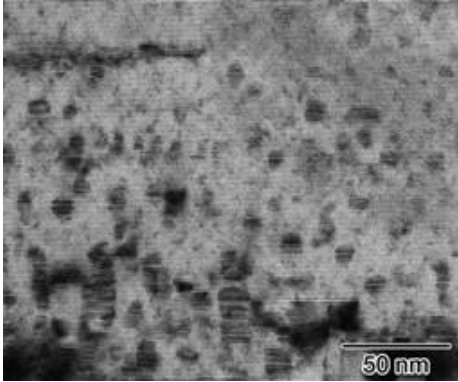


図 2.4.2-38 Zr 添加量 1 mol% 試料の TEM 像

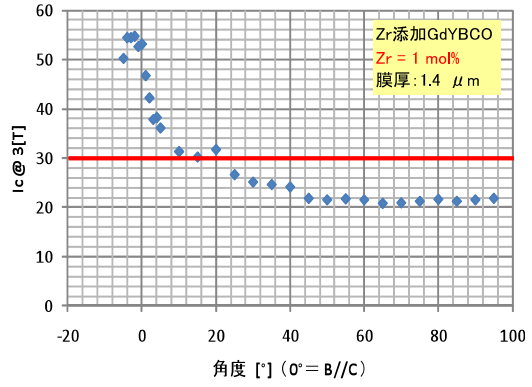


図 2.4.2-39 Zr 添加量 1 mol% 材における磁場 3 T での I_c 値の磁場印加角度依存性

(8) PLD 法及び MOD 法におけるピン止め点導入線材の微細組織観察

高磁場における臨界電流を向上させるため、超電導層に人工ピン止め点としてナノ粒子を分散させている。本項では PLD¹⁻³⁾ 及び MOD 法^{4,5)} それぞれの手法により長尺超電導層中に形成されたナノ粒子の形状、組成、分布等の微細構造について述べる。PLD 法により BaZrO₃(BZO) ナノロッドが形成された長尺 GdBa₂Cu₃O_y (GdBCO) 線材の TEM 断面写真を図 2.4.2-20 (a) に示し、①、②、③ 領域を拡大した写真を図 2.4.2-40 (b)-(d) に示す。GdBCO 層内部の黒い線状のコントラストは GdBCO 結晶層内のらせん転位であり、BZO ナノロッドは淡い線状のコントラストで現れている。BZO ナノロッドはおよそ 5 nm 径であり、CeO₂ キャップ層直上から。表面領域に均一に存在していることが分かる。以上の結果から、GdBCO 層に、人工ピン止め点として有効に作用する BZO ナノロッドを分散させることが可能であることを示すことができた。

次に、BZO ナノ粒子が分散した MOD-Y_xGd_{1-x}Ba₂Cu₃O_y (Y(Gd)BCO) 線材について、その微細構造について述べる。観察した試料は、MOD 溶液に Zr を (A) 4.6 mol% 導入した線材、(B) 9.2 mol% 導入した線材である。図 2.4.2-41 (a)、(b) に (A) 及び (B) のサンプルの断面 TEM 像、(a')、(b') それぞれの線材の Zr 元素マップを示す。両線材とも超電導層は c 軸配向多結晶構造となっているが、空隙や 100~200 nm 径程度の Y₂Cu₂O₅ 相の結晶粒子が存在している。さらに、線材ともに BZO 粒子が超電導層全体に分布し、その粒径はおよそ 20 nm 程度である。また、Zr の添加量を増やすことで磁場中での超電導特性が向上しており、TEM 観察の結果から、Zr 量に対応して BZO 粒子の数がほぼ倍になっていることが分かった。以上の結果

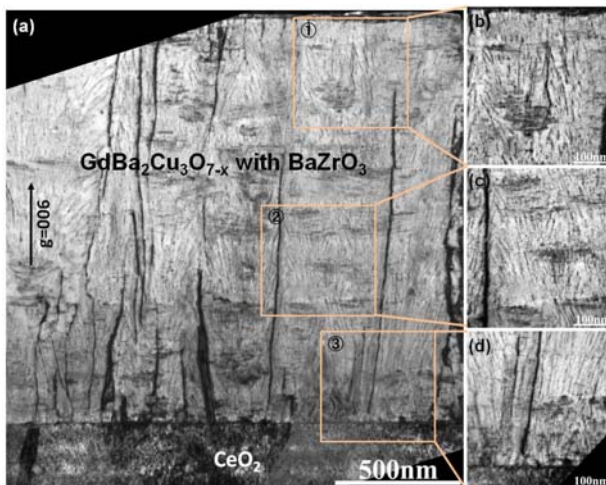


図 2.4.2-40 (a) BZO ナノロッド添加長尺 GdBCO 線材の断面 TEM 写真。(b)-(d) は (a) の領域①-③の拡大写真

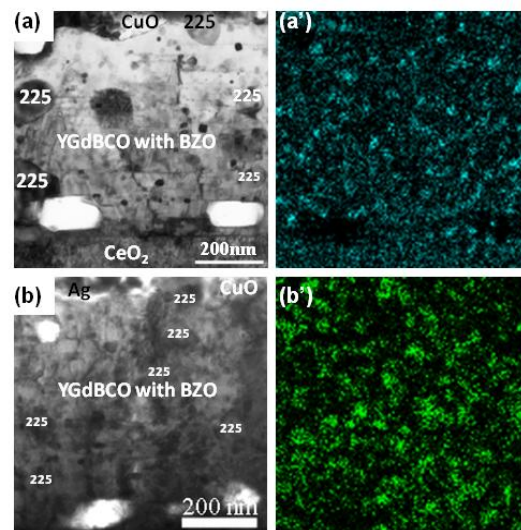


図 2.4.2-41 BZO ナノ粒子を分散した YGdBCO 断面 TEM 像 (a) A サンプル、(b) B サンプル Zr 元素マッピング像 (a') A サンプル、(b') B サンプル

から、MOD 溶液への Zr 添加量を変えることで、少なくとも超電導層の成膜条件の範囲内では、添加量に従って粒径の変化は少ないが、分布(粒子間隔)状態に大きく影響を及ぼす知見を得た。本項で示した PLD 超電導層及び MOD 超電導層では、高磁場中での I_c 値が向上し、さらに、磁場角度依存性が低減されていることが分かっている。本項で述べた微細組織観察の結果は、本プロジェクトにおける磁場中高臨界電流線材の設計において重要な指針となった。

平成 23 年度以降の成果として、PLD 法により形成された超電導体に BaHfO₃ (BHO) ナノロッドが導入されると、BaZrO₃ (BZO)、BaSnO₃ (BSO) ナノロッドが導入された超電導体と比較し、高磁場中で高い I_c 値が得られることが分かった^{1,2)}。そこで、その原因を解明するため、BHO、BZO、BSO ナノロッドが導入された GdBa₂Cu₃O_y (Gd123) 超電導層の組織をそれぞれ TEM 観察した。図 2.4.2-42(a)~(c)に BHO、BZO、BSO ナノロッドが形成された Gd123 層の断面 TEM 像を示す。BHO、BZO、BSO ナノロッドの平均径は、それぞれ 4.5 nm、5.6 nm、9.4 nm であり、ロッドの長さについても BHO<BZO<BSO の順であることが分かった。さらに、基板直上 (CeO₂ 層直上) から Gd123 層内表面まで連続的な観察を可能にした TEM 平面観察から、それぞれのナノロッドの分布と、基板垂直方向に対するナノロッドの傾斜具合を調べた。その結果、CeO₂ 層直上では、ナノロッドは基板垂直方向によく揃っているが、Gd123 層表面では、基板垂直方向から傾斜したナノロッドの割合が増加する傾向があった。BHO ナノロッドは他のナノロッドよりもロッド径が小さく、ロッド長も短いことから、Gd123 層中にナノ粒子的に分布し、ランダム方向に作用する人工ピン止め点としての役割を果たすと考えられる。したがって、Gd123 層内部に形成された BHO ナノロッドの形状と分布が、高磁場において I_c 値の磁場印加角度依存性を小さくし、Gd123 層の膜厚が増加しても J_c 値の低下が極めて小さい要因であると考えられる³⁾。

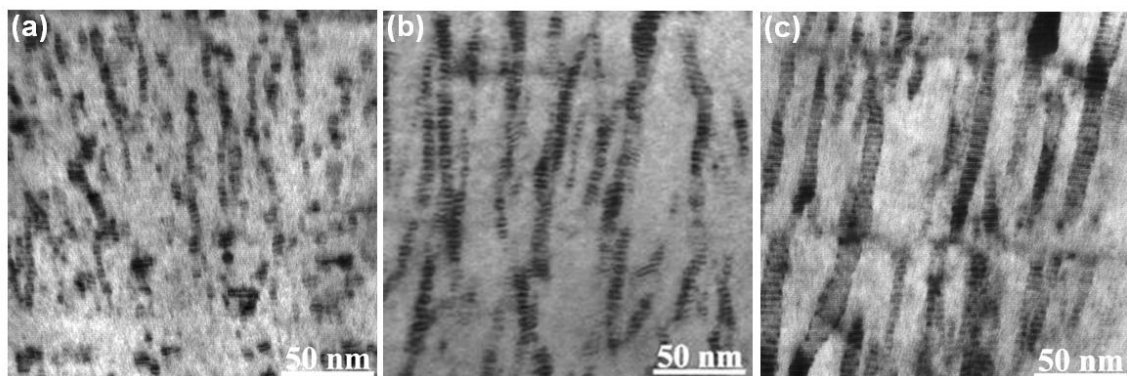


図 2.4.2-42 PLD-Gd123 層に導入された(a)BHO、(b)BZO、(c)BSO ナノロッドの断面 TEM 像

二段階本焼成により形成された MOD- $Y_xGd_{1-x}Ba_2Cu_3O_y$ (YGd123)層の断面 TEM 観察について述べる。図 2.4.2-43 に、BZO ナノ粒子が分散した MOD-YGd123 層の断面 TEM 像を示す。二段階本焼成を行った YGd123 層は、従来の焼成を行った YGd123 層と比べ緻密であった。また、平均直径 20 nm の BZO ナノ粒子が分布している。図 2.4.2-44 に図 2.4.2-43 の波線枠領域に対応する Zr 元素マップを示す。Zr 元素マップから、BZO ナノ粒子は YGd123 層全体にほぼ均一に分布していることが分かる³⁾。TEM 断面観察から、二段階本焼成の有効性を示すことができた。以上のような組織観察により、磁場中高臨界電流線材の設計に重要な指針を与えることができた。

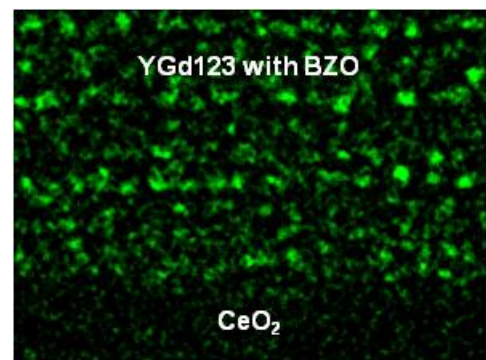
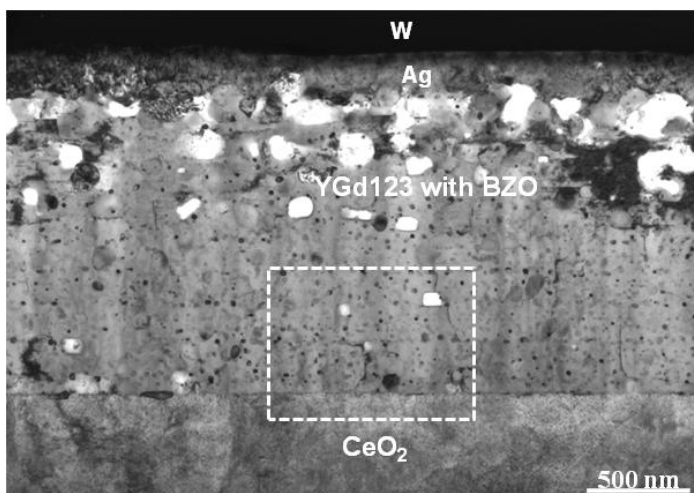


図 2.4.2-43 二段階本焼成により形成された MOD-YGd123 層の断面 TEM 像

図 2.4.2-44 図 2.4.2-23 の波線枠領域に対応する Zr 元素マップ

(9) ピン止め点形状の三次元解析

超電導体中の磁束の運動を抑制するためには、ピン止め点の導入が有効である。例えば、Y系超電導体に結晶構造が類似の BaZrO_3 (BZO) を導入することにより、母相(超電導相)の結晶性の乱れを抑制しつつ、人工ピン止め点としての析出物を効果的に導入する技術が確立されている⁵⁾。高温超電導体の一種である $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (GdBCO) 結晶は、磁場中の I_c 値が高く、試料作製時の成膜温度の低温化が可能であるとともに、成膜速度も速いことから、第二世代超電導線材として期待されている材料である。BZO を分散させた GdBCO は磁場中において等方的な I_c 特性を示す⁵⁾が、この詳細は明らかにされていない。そこで、本プロジェクトの中間目標(30 A/cm-w@77 K, 3 T)を達成するための微細組織評価として、析出物の立体的なナノ構造解析を電子線トモグラフィ(TEM-CT)法により試み、ピン止め点の形態・分散と磁場中 I_c 特性の相関を解明することを目的とした。

解析には PLD- CeO_2 /IBAD- $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ /ハステロイTM上に成膜した GdBCO + BZO⁵⁾及び PLD- CeO_2 /IBAD-MgO/IBS- $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ /ハステロイTM上に成膜した GdBCO + BHO¹⁾を用いた。集束イオンビーム法により、厚みが 100 nm-150 nm の板状ならびに直径が約 100 nm の針状の TEM 試料を作製した。連続傾斜像の取得には Tecnai-F20(加速電圧 200 kV)、三次元像の再構築には代数的反復法、可視化や定量解析には Avizo Fire 6.3 及び Amira 5.4 を使用した^{7), 8)}。

BZO の三次元再構築像(図 2.4.2-45)からは、ナノロッド状の BZO 析出物の分散状態のみならず、GdBCO の成長方向($[001]_{\text{GdBCO}}$)に対する偏角を求めることも可能である(図 2.4.2-46)。偏角の最小値が約 1 度、最大値が約 65 度であり、広い角度分布を有していることが判明した。また、BZO ナノロッドの数密度は $2.45 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ であり、体積率が 1.93 vol %、濃度は 4.51 mol % と算出された。

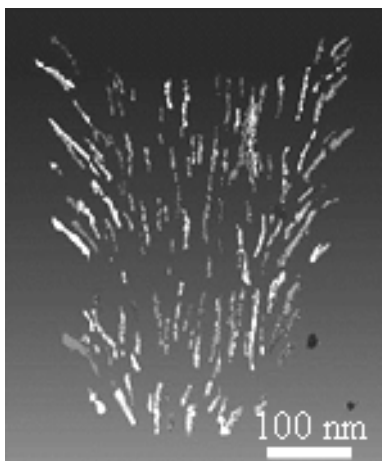


図 2.4.2-45 BZO 析出物の三次元再構築像

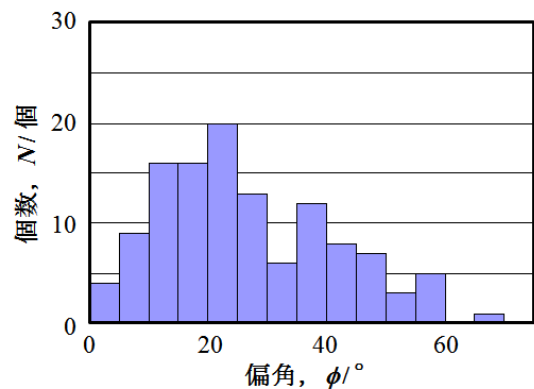


図 2.4.2-46 ロッド状 BZO 析出物の偏角分布

次に、平成 23 年度以降の成果として、 CeO_2 キャップ層表面近傍における BHO の三次元再構築像(図 2.4.2-47)及び厚膜表面近傍における BHO の三次元再構築像(図 2.4.2-48)から、BHO 析出物の偏角を求めた(図 2.4.2-49)。これらから、60 度以下の偏角を有するナノロッド状 BHO と 60 度以上の偏角を有する板状 BHO が存在することが判明した。また、 CeO_2 キャップ層表面と GdBCO 層内表面近傍における BHO の体積率はそれぞれ 3.4 vol % 及び 3.3 vol % と同程度であることを確認した。

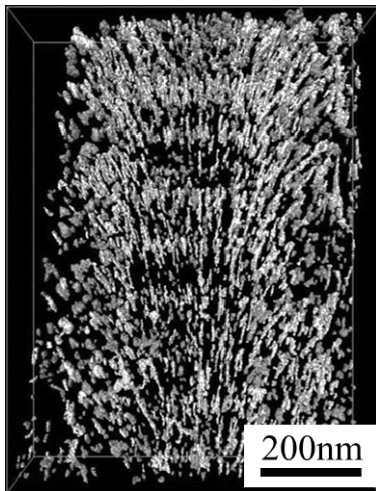


図 2.4.2-47 CeO_2 キャップ層表面近傍における BHO 析出物の三次元再構築像

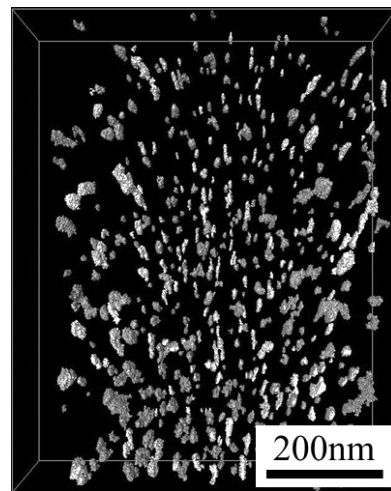


図 2.4.2-48 GdBCO 層内表面近傍における BHO 析出物の三次元再構築像

三次元解析の結果、様々な方向に成長したナノロッド状の人工ピン止め点を分散させることが I_c 値の印加磁場角度依存性を低減させ、磁場中 I_c 特性の改善に有効であることが判明した。また、BHO 結晶を析出させた GdBCO の磁場中 J_c 値が約 $3 \mu\text{m}$ の膜厚まで低下しない理由として、厚膜中の BHO 結晶が均一な体積率で分散していることが考えられる。以上より、本プロジェクトの目標を達成するための材料設計指針を得ることができた。

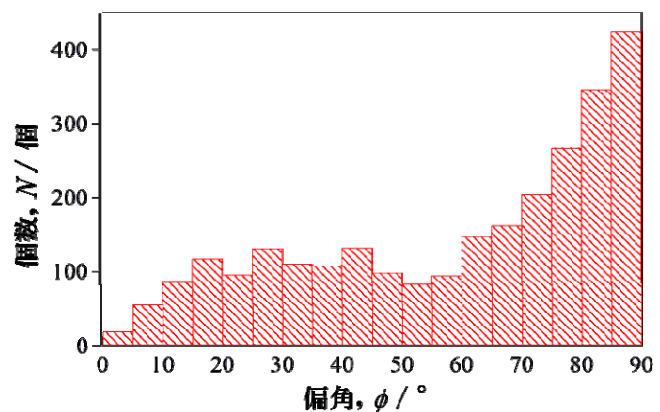


図 2.4.2-49 BHO 析出物の偏角分布

(10) ピン止め点特性に関する研究

目標とする磁場中の臨界電流(I_c)値を大きくすることに有効なのは超電導層の厚みを増すことであるが、これは単に電流が流れる領域の断面積を大きくするだけの効果ではない。すなわち、熱擾乱を受けて磁束がピン止め点から外れることにより臨界電流密度が低下するという磁束クリープを防ぐ上からも重要なポイントである。前 NEDO 事業の「超電導応用基盤技術研究開発 (第Ⅱ期)」プロジェクトまでの研究において PLD 線材の厚さを増すことによって、微細組織の乱れによる臨界電流密度(J_c)の低下はあっても、それを上回って高磁場特性を向上させることができることが明らかとなった。図 2.4.2-50 は 1 T(c 軸方向印加外部磁場)における超電導電流密度の時間緩和のしにくさを表す見掛けのピンポテンシャル U_0^* の磁場依存性で、超電導層が厚くなるにつれて高磁場特性が改善されている。また、図 2.4.2-51 に示されるように臨界電流密度が 0 となる c 軸方向の不可逆磁場(B_{irr})も同様に改善されるが、いずれの結果からも超電導層を厚くすることで磁束がピン止め点から外れにくくなっていることが検証された。したがって、超電導層の厚膜化が有効であるという指針を示すことができ、それに基づいて超電導層の劣化無しに超電導層を厚くする技術が開発された。これにより I_c 値の中間目標値をクリアできる見通しが立ち、実際にこうした方針で I_c 値の中間目標値(77.3 K、3 T において $I_{c,min}$ 値が 30 A/cm²)を超えた線材が作製された。

(注)なお、かつて米国を中心として、超電導層厚を厚くした場合に臨界電流密度が低下する事実が磁束ピン止めの次元性によってもたらされる不可避なものであるという考え方が広がったが、磁束ピン止め点の相関距離と厚みの関係からそうした考えが正しくないことを理論的に明確にし、 I_c 値の中間目標値の達成が可能であることを世界で初めて示した。実際に、微細組織観察により臨界電流密度の低下は超電導層の劣化によるものであることが判明し、そうした組織の改良により厚膜化によっても臨界電流密度が劣化しない線材が作製できるようになった。この事実及び理論は今後の線材特性向上に非常に重要な発見と成り得る。

一方、 I_c 値の最終目標値は中間目標値を大きく上回ることから、平成 23 年度以降は、こうした上質な超電導層の厚膜化だけでなく、本質的な臨界電流密度の改善が必要になってきた。その実現にピン止め点の導入が有効であるかどうかの評価が重要で、それを実証する研究を実施した。図 2.4.2-52 はスパイラル状に広がったナノロッド形状の人工ピン止め点を導入した場合の PLD 線材の 77.3 K 及び 80 K における臨界電流密度の磁場印加角度依存性で、極めて異方性が少ない良好な特性となっている。一方、図 2.4.2-53 はナノ粒子形状の人工ピン止め点を導入した場合の MOD 線材の 77.3 K における磁場角度依存性で、ピン止め点の導入により臨界電流密度の値が増加することに加えて異方性も改善している。

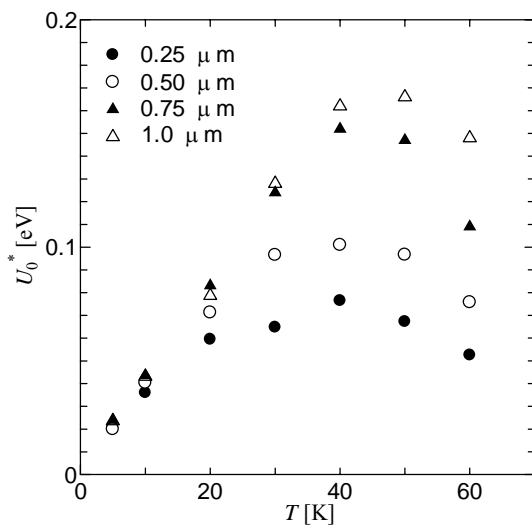


図 2.4.2-50 PLD 法による線材の 1 T における見掛けのピンポテンシャルの温度依存性

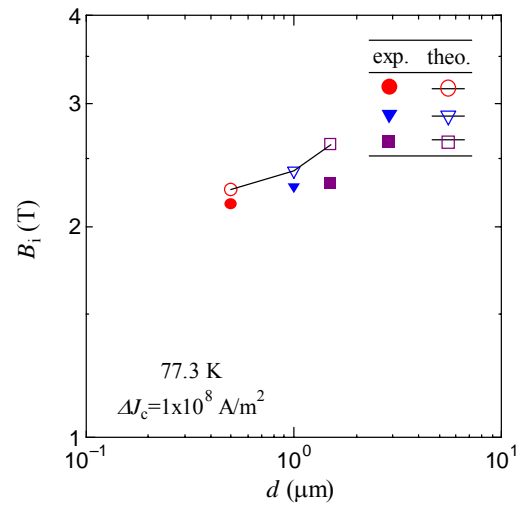


図 2.4.2-51 PLD 法による線材の 77.3 K における不可逆磁場の超電導層厚依存性

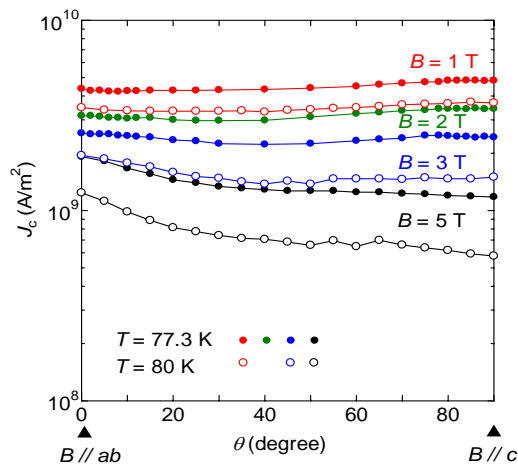


図 2.4.2-52 ナノロッドを導入した PLD 線材の J_c 値の磁場印加角度依存性

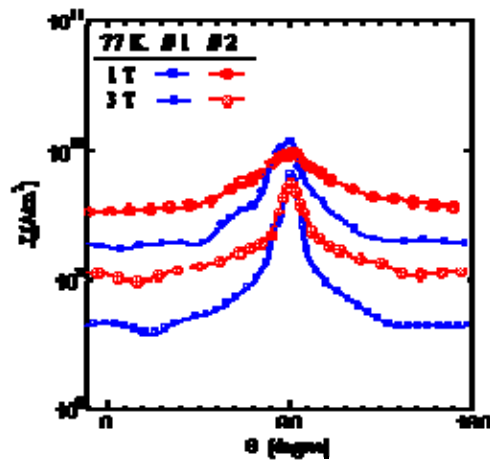


図 2.4.2-53 ナノ粒子導入の前(#1)と後(#2)の J_c 値の磁場印加角度依存性の変化

これらのピン止め点のピン止め特性について、電顕による観察から得られたピン止め点のサイズ（直径等）、数密度等の情報を基に理論的に評価した結果、世界で初めて磁場角度異方性を含めて臨界電流密度の実験結果を定量的に説明することができ、ピン止め点導入の有効性を実証した。特に、本プロジェクトにおいて新しく見つかったスパイラル状に広がったナノロッド形状の人工ピン止め点が磁場角度異方性をなくす上で、極めて有効であることも明らかとなった。したがって、こうした解析手法を用いて最終目標を達成するのに有効な人工ピン止め点構造の設計が可能となり、製造プロセスへのフィードバックを通して本プロジェクトの最終目標の達成に繋がった。

ピン止め点として添加する物質の違いによる高磁場特性の違いを調べた結果、図 2.4.2-54 のように BaHfO_3 が最も優れた特性を示すことが明らかになった。ただし、磁場特性に大きな違いはなく、こうした磁場特性の変化は単にピン止め力の変化だけでは説明がつかない。そこで上部臨界磁場 B_{c2} 値を測定したところ、ピン止め点の導入量の増大に伴って B_{c2} 値が大幅に向上することが明らかとなった。さらに、 B_{c2} 値はナノ・ロッド状ピン止め点の表面積の増加とともに単調に増加していることから、ナノ・ロッドと超電導母相の界面による電子散乱のためにコヒーレンス長が短くなり、 B_{c2} 値が増加していると結論つけられる。

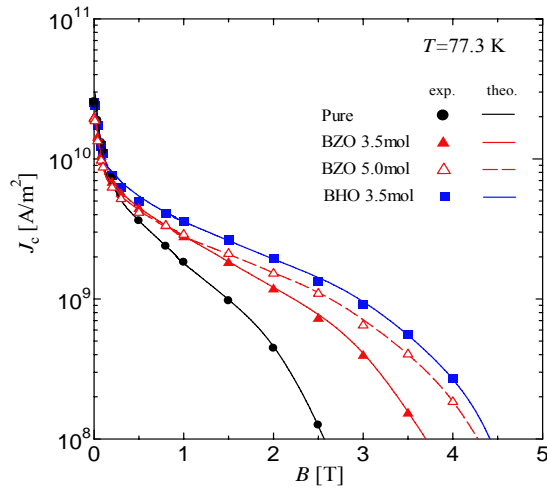


図 2.4.2-54 磁化法による人工ピン止め点添加 GdBCO コート線材の臨界電流密度(77.3 K、 c 軸方向磁場)。

こうした BaHfO_3 添加による磁場特性の変化は測定した B_{c2} の値とナノ・ロッドのサイズ、間隔等から計算したピン止め力を用いて理論的に求めることができる。図 2.4.2-55 は無添加の場合と BaHfO_3 を 3.5 mol% 添加した場合のピン止め力密度の実験結果 (シンボル) と理論結果 (実線) を比較したもので、十分な一致が得られていることが示される。なお、中央の太い実線は、 B_{c2} 値の増加がなく、ピン止め力のみで改善される特性の予想を示したもので、高磁場特性の改善に B_{c2} 値の改善が大きく影響することが理解される。

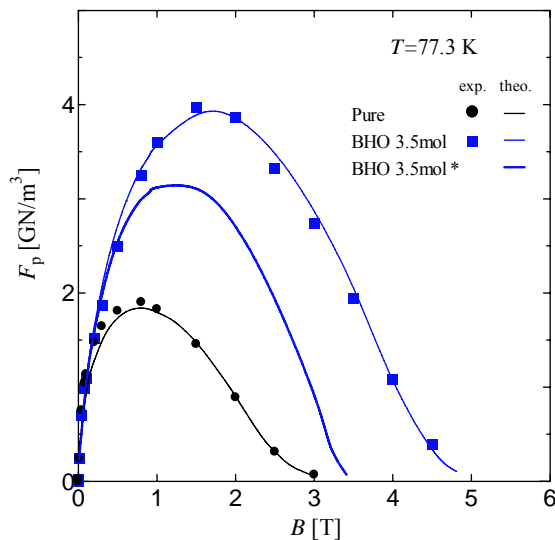


図 2.4.2-55 77.3 K における無添加(●) 及び BHO 3.5 mol% 添加試料(■) についての c 軸方向磁場中でのピン止め力密度。中央の太い実線は上部臨界磁場がない場合の特性の理論予想。

以上より、ピン止め点のサイズ、間隔等のパラメータが決まれば、ピン止め力や上部臨界磁場(B_{c2})が決定でき、さらにその形状や粒子の向きを制御することにより、磁場角度に対する異方性にも対処することが可能であることが明らかとなった。その上で、使用する温度、磁場の下で最適な特性となるよう、超電導層の厚さを制御することが重要である。

(11) ナノロッド導入の効果

IBAD 中間層付き基板を用いた超電導線材において早急に解決すべき課題として、磁場中の J_c 特性向上に関する問題があげられる。本プロジェクト以前にも Gd123 や Y123 超電導層へ BaZrO₃(BZO) 結晶のナノロッド等の人工ピン止め点の導入が行われており、これによって磁場中 J_c 値の向上が実現している。しかし最終目標である 50 A/cm-w(@77 K, 3 T-200 m)や 400 A/cm-w(@65 K, 0.1 T-100 m)の達成には、より効率的な人工ピン止め点の開発が重要である。ここでは、特性向上に効果的とみられている、人工ピン止め点による不可逆磁場特性とピン止め特性に関して、微細組織の観点から得られた知見について述べる。

図 2.4.2-56 は開発された BZO 結晶のナノロッドや BaSnO₃(BSO) 結晶のナノロッド等の各種人工ピン止め点による不可逆磁場特性を示したものである。ナノロッドを導入していない YBCO 薄膜に比べて 4%BSO や 4%BZO 結晶のナノロッドを導入した YBCO 薄膜の不可逆磁場(B_{irr})が増大していることが分る。しかしながら BZO 結晶のナノロッドを導入すると T_c が若干低下していることが観測されており、この点に関しては BSO 結晶のナノロッドが優れている。図 2.4.2-57 は各種結晶の

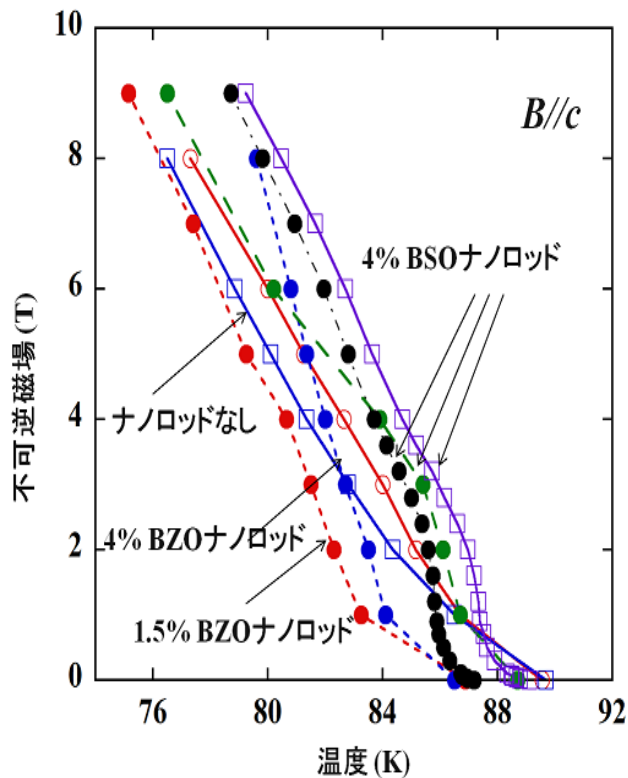
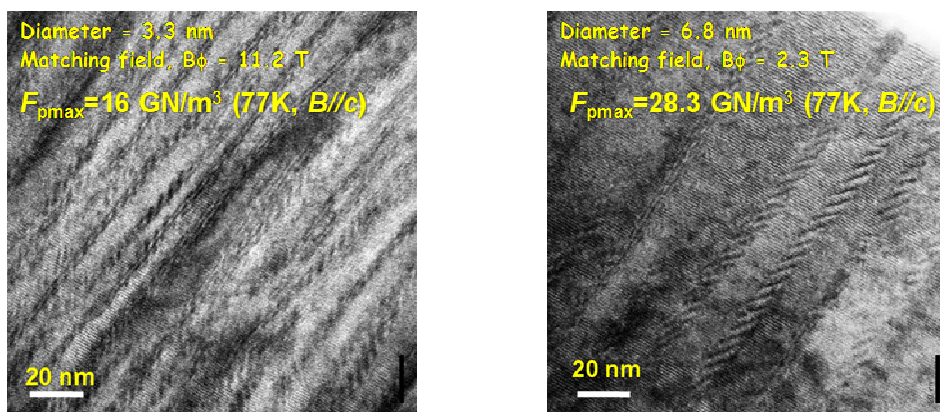


図 2.4.2-56 各種人工ピン止め点による不可逆磁場 (B_{irr}) 曲線。BZO は BaZrO₃、BSO は BaSnO₃ を意味する。4%BSO や 4%BZO の導入により不可逆磁場は増大



(a) (b)

図 2.4.2-57 各種人工ピン止め点の断面 TEM 写真。
(a)BZO ナノロッド、(b)BSO ナノロッド。

ナノロッドの断面 TEM 写真を示す。これから BZO 結晶のナノロッドは細く密度が高いが、BSO 結晶のナノロッドは太く、その密度は低い。一方、BSO 結晶のナノロッドが示す巨視的ピン止め力($F_p = B \times J_c$)は 77 K、 B/c において 28 GN/m^3 を超え、BZO 結晶のナノロッドが示す 16 GN/m^3 を凌駕している。また、最近の米国ロスアラモス国立研究所が開発した Ba_2YNbO_y 結晶のナノロッドは、さらにナノロッド径が太く巨視的ピン止め力も極めて高いことが報告されている。以上の結果から、77 K や 65 K の磁場中 J_c 値をさらに向上させ、本プロジェクトの最終目標を達成するためには T_c 値を低下させず J_c 値向上の期待できる径の太いナノロッドの導入が今後必要であると予想された。

一方、現在では人工ピン止め点は BaZrO_3 、 BaSnO_3 及び BaHfO_3 等の結晶のナノロッド状のものが主流となっている。しかしナノロッドのピン止め力は確かに強いが、ひとたび熱的に量子化磁束のキックが発生した場合、キックにはエネルギー障壁がないため自由に動き、最終的に量子化磁束がローレンツ力の方向に動いてしまう。このような素過程が多重に発生すると大きなエネルギー散逸、すなわち電圧発生となり、結果として J_c 値を低下させてしまう。したがってナノロッドを効果的な人工ピン止め点として使用するためにはキックの運動を止める対策が必要である。そこで引き続いて、IBAD 中間層付き基板上に YBCO 薄膜を形成し、 BaSnO_3 結晶のナノロッドと同時に Y_2O_3 結晶のナノ粒子を人工ピン止め点として導入することでキックの運動を止め、磁場中 J_c 特性を向上させる研究を実施した。

この研究においては、金属基板として次に示す構成の IBAD 中間層付き基板テープを用いた($\text{CeO}_2/\text{LMO}/\text{IBAD}-\text{MgO}/\text{GZO}/\text{ハステロイ}^{\text{TM}}$)。YBCO 薄膜の作製には PLD 法を使用し、人工ピン止め点として BaSnO_3 (BSO) 結晶のナノロッド及び Y_2O_3 結晶のナノ粒子を用いた。この手法をここでは、人工ピン止め点のダブルドーピングと呼ぶ。BSO 結晶のナノロッド導入には BSO-YBCO 混合ターゲット

を、また Y_2O_3 結晶のナノ粒子導入は純 YBCO ターゲットに Y_2O_3 結晶の小片を貼り付けた Surface Modified ターゲットを用いた。得られた試料に関しては X 線回折(XRD)による結晶粒配向性の評価、透過型電子顕微鏡(TEM)による断面観察、及び四端子法による超電導特性の評価を行った。

図 2.4.2-58 に IBAD 中間層付き基板上的 YBCO 薄膜の断面 SEM 写真を示す。YBCO の膜厚は 300 nm 程度である。XRD による評価の結果、全ての試料で良好な結晶粒配向性が確認された。これより、YBCO 結晶層中に 2 種類の異なる材料の人工ピン止め点のダブルドーピングによっても結晶粒配向性に大きな影響はないものと判断された。

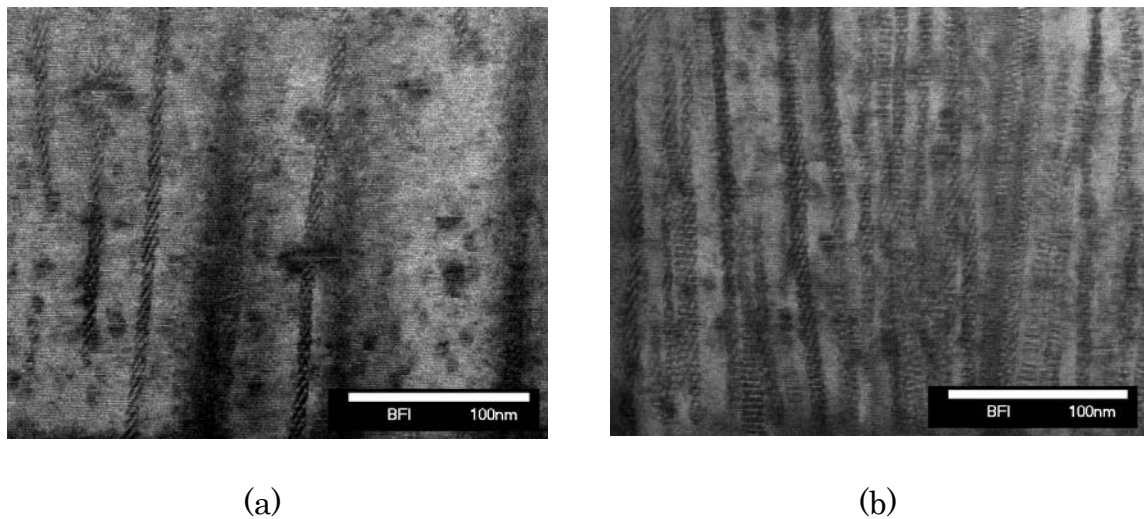


図 2.4.2-58 各種試料の断面 TEM 写真 (a) YBCO+2wt%BSO+0.691A% Y_2O_3 、
(b) YBCO+2wt%BSO+2.41A% Y_2O_3

J_c 特性については印加磁場が $B//c$ の方向で 40~77 K の温度領域で測定を行った。その結果、77 K においてはダブルドーピングによって特性が向上し、最大巨視的ピン止め力 $F_{pmax} \sim 14 \text{ GN/m}^3$ が得られた。これは BSO のみのドーピング (2wt%, $F_{pmax} = 8.8 \text{ GN/m}^3$) に比べて大幅な向上となった。また J_c 値の磁場印加角度依存性においても顕著な効果が観測され、単独ドーピングに比べて約 2 倍の向上と異方性の低減が得られた。これらの結果は、熱的に発生した量子化磁束のキंक、あるいは磁場を傾けたときに発生するキंकの運動を Y_2O_3 結晶のナノ粒子が効果的にピン止めすることで結果的に生じる量子化磁束のローレンツ力方向への移動を抑制したためであると考えられる。よってプロジェクト終了後、ピン止め力の強いナノロッドの開発とともに、ナノ粒子を同時に導入したダブルドーピングの技術についても有望な技術として研究を進めていく必要があると考えられる。

(12)人工ピン止め点導入効果の研究

a. 四端子法による人工ピン止め点導入効果の研究

四端子法により、各種製法により作製された線材の磁場中電流輸送特性を調べ、基板表面研磨による均一性の向上は低磁場特性の改善に有効であることを示した。同時に、高磁場特性(不可逆磁場)改善のためには、人工ピン止め点導入が必要であることを明らかとした。図 2.4.2-59 に、テープ面に垂直な磁場中における J_c 特性を示す⁹⁾。中間評価時点の成膜プロセスでは、IBAD-GZO,IBAD-MgO と同等の品質を有しており、得られる線材の超電導特性もほぼ同様の磁場強度、磁場印加角度依存性を有していた。人工ピン止め点導入により、自己磁場(s.f.)中での J_c 値はやや低下するが、77 K では 3 T 以上の外部磁場において J_c 値改善効果が顕著となる。図 2.4.2-60 に示す J_c 値の角度依存性から明らかとなっており、 ZrO_2 による人工ピン止め点導入試料では c 軸方向の相関ピンが有効に作用することが分かった¹⁰⁾。

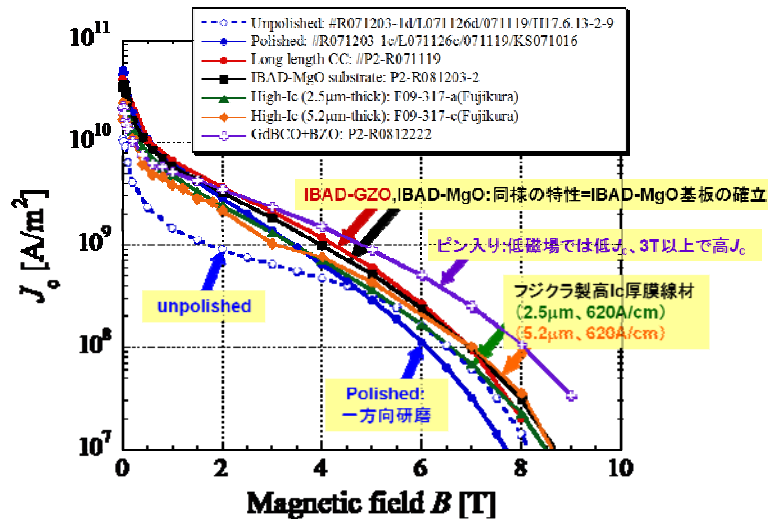


図 2.4.2-59 各種材料の高磁場特性の比較

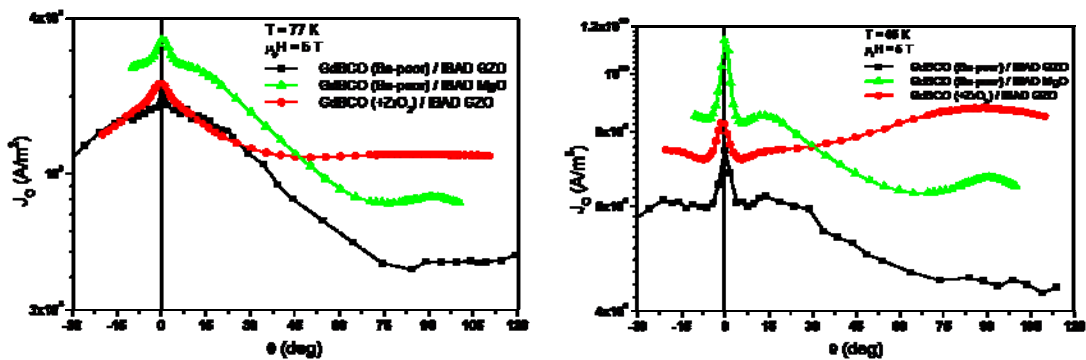


図 2.4.2-60 人工ピン止め点導入による J_c 値の磁場印加角度依存性の改善

さらに、PLD 法その他、MOD 法並びに CVD 法との比較を図 2.4.2-61 に示す。いずれの手法においても人工ピン止め点の導入によって、高磁場特性が改善することが分かった^{11,12)}。これらの知見は長尺線材の磁場特性を向上させて本プロジェクトの目標達成のために極めて有用である。導体への応用を検討する際に有用と思われる。

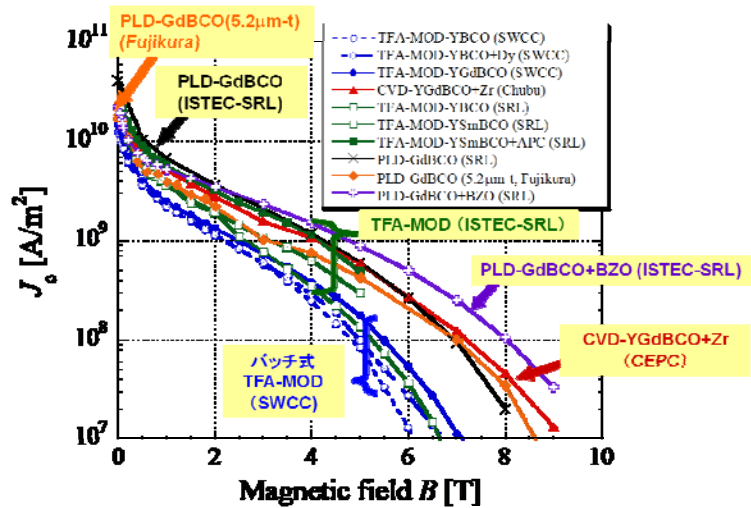


図 2.4.2-61 各種製法による Y 系超電導線材の人工ピン止め点導入による磁場中 J_c 特性改善の比較

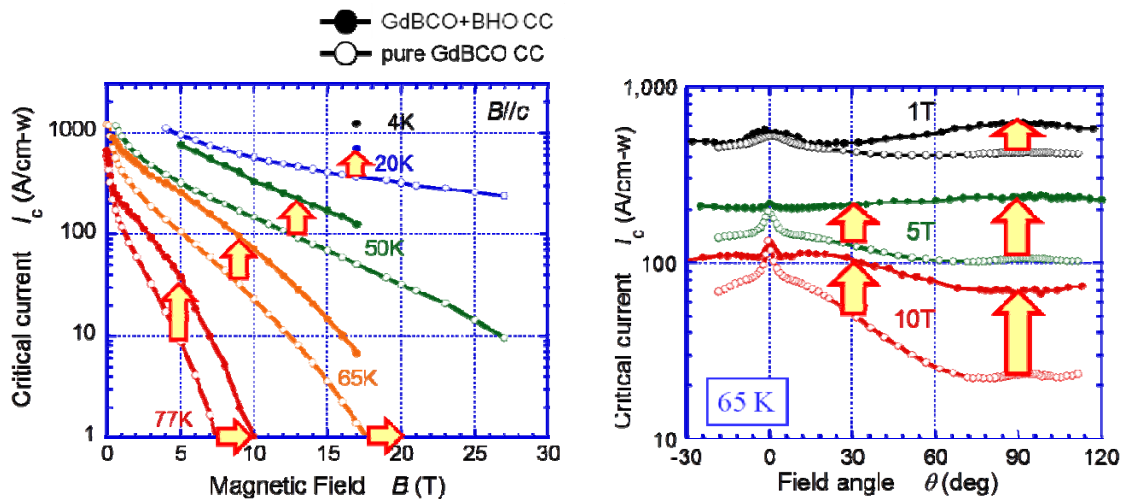


図 2.4.2-62 BHO 人工ピン止め点導入試料の臨界電流特性。(a) I_c - B - T 特性、(b) I_c の角度依存性

平成 23~24 年度は、人工ピン止め点の導入効果について定量的に評価するとともに、測定が困難となる、高性能線材の高 J_c 値領域における J_c 値評価法として磁気モーメントベクトルを用いた角度依存性手法を提出し、広い温度・磁場強度、磁場印加角度領域における精度の高いデータを得た。

図 2.4.2-62 に BHO を添加した PLD-GdBCO 線材の磁場中性能向上の様子を示す。不可逆磁界(B_{irr})の増大とともに、印加磁界角度に対する異方性も改善されていることが分かった。

ランダムピン媒質中における磁束ピン止めに対する理論的考察によって、高温超電導体の電界-電流密度 (E - J) 特性は、ローレンツ力によってデピニングした磁束線クラスタのパーコレーション転移として表現でき、またその温度、磁場依存性も巨視的ピン力密度のスケール則を用いて記述できることを報告した¹³⁾。本モデルによって、限られた実測結果よりスケールパラメータを決定することで、温度、磁場の条件で複雑に変化する高温超電導線材の E - J 特性を広範な動作条件下に亘って解析的に記述することが可能とな

った。図 2.4.2-63 に、BHO 人工ピン止め点を導入した PLD-GdBCO 線材における J_c - B - T 特性の解析結果と実測値との比較を示す。実線はパーコレーション転移モデルによる解析値、マーカーは測定結果を示す。

本モデリングの重要な利点は、実測が困難な、例えば超高磁界領域の特性も外挿によって推定可能であると同時に、電流輸送性能の柔軟な比較検討が可能になる点が挙げられる。外部磁場をパラメータとして、 J_c 値の温度依存性をプロットした結果を図

2.4.2-64 に示す。同図(a)は人工ピン止め点を導入しない PLD-GdBCO 線材、同図(b)は BHO を添加した PLD-GdBCO 線材の結果を示す。ピン止め点の導入によって、実用可能な温度、磁場領域が拡大することが分かる。同様の解析は、後述するように、線材の磁場下の実用性能をコストとして検討する際にも本質的に重要となる。

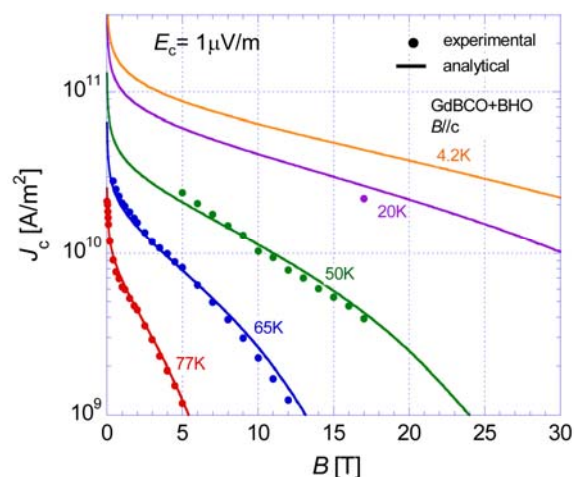


図 2.4.2-63 BHO 人工ピン導入試料の J_c - B - T 特性。パーコレーション転移モデル(実線)と実測値(マーカー)との比較。

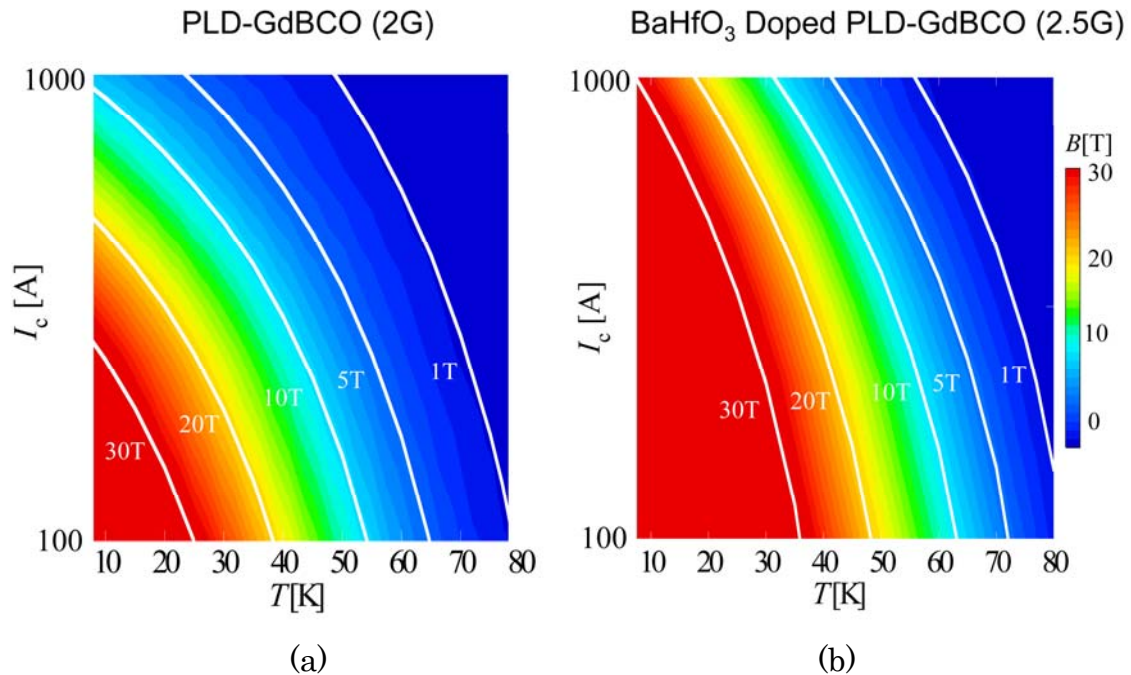


図 2.4.2-64 BHO 人工ピン止め点の導入の有無による、PLD-GdBCO 線材の磁場中電流輸送性能の比較。1 cm 幅あたりの電流値を示す。(a) 600 A/cm-w 級 pure GdBCO 線材、(b)600 A/cm-w 級 BHO 添加 GdBCO 線材。両者の 77 K 自己磁場中の J_c はほぼ 600 A/cm-w 程度で同等の値を有する。

b. 磁気モーメントベクトル計測による J_c の角度依存性評価

臨界電流密度 J_c 値の角度依存性は、希土類系高温超電導線材の磁束ピンニング等の基礎特性評価並びにマグネットに代表される応用の両面において重要となる。しかしながら、磁束ピン止め点導入による磁場中性能の向上にともなって、特に低温域において J_c 値は大きく増大し、 J_c 値の測定法として一般に用いられている四端子法では、測定が極めて困難となる。そこで本研究では、四端子法との相補的な測定法として、磁気モーメントのベクトル測定による J_c 値の磁場印加角度依存性評価法を提案した。

前節で述べた BHO を添加した PLD-GdBCO 線材の低温度領域の磁界印加角度依存性を評価した結果を図 2.4.2-65 に示す。4.2 K において、膜面に平行 ($\theta=0$) に 1 T の外部磁

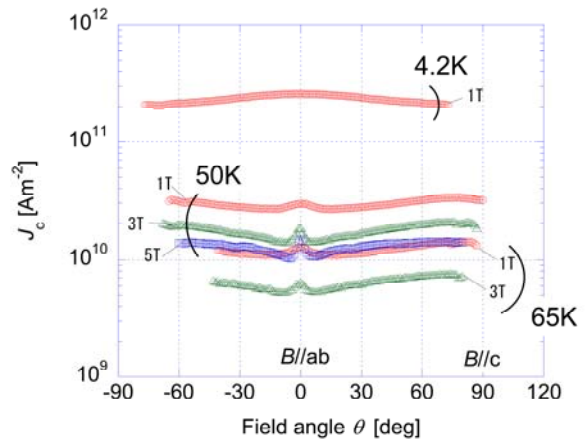


図 2.4.2-65 磁気モーメントベクトル計測より評価した BHO 添加 PLD-GdBCO 線材の J_c -磁場印加角度依存性

界を印加した際の J_c 値は 26 MA/cm^2 に達しており、この値は $8,320 \text{ A/cm-w}$ の J_c 値に対応する。

(13) 低温高磁場特性改善技術開発

低温強磁場の臨界電流密度特性改善のため、MOD 法及び PLD 法により作製した線材の臨界電流密度特性を低温・強磁場までの広い温度・磁場範囲で詳細に測定し、その磁束ピンニング特性について議論を行った。結果として、低温強磁場領域における最適化手法の確立のため、人工ピン止め点導入法等の技術手法を提案することを目標とした。

MOD-(Y, Gd)Ba₂Cu₃O_y(YGdBCO)テープに人工ピン止め点として Zr を導入した試料で 77.3 K 近傍の温度領域で J_c 値の向上が起こることが分かっているが、不可逆磁場と J_c 値の磁場・温度・印加磁場角度依存性を詳細に測定した結果、Zr 添加より強いランダムピン止め点が導入されていることが分かった。すなわち、人工ピン止め点導入前から存在していた弱い c 軸相関ピン止め点と強いランダムピン止め点が共存している J_c 特性を決めている点で、高い J_c 特性を示す低温合成法 (LTG 法) によって作製した SmBCO 膜と類似している。さらに、 B_{c2} 値の異方性を調べた結果、MOD-YGdBCO テープは LTG-SmBCO と比べ、若干のアンダードープ状態にあることが、高磁場 J_c が他のプロセス試料と比べて劣る原因であると推察される。

平成 22 年度までに報告されているように、人工ピン止め点としての Zr 添加は、PLD 法の場合には c 軸に揃ったナノロッドが、MOD の場合にはランダムに分散したナノ粒子が形成される。これらはいずれも磁場中の J_c 特性を向上させるが、等方的に効果があるランダムピン止め点と c 軸方向にのみ効果のあるナノロッドの違いを調べた。図 2.4.2-66 に MOD 法、PLD 法、CVD 法によって作製したテープ線材の 20 K における J_c 特性を示す。図中の凡例には、77.3 K, 3 T で、磁場印加角度が $B//c$ の J_c 値と膜厚を記載した。膜厚の違いを考慮する必要があるが、ナノサイズのランダムピン止め点の導入により 77.3 K における J_c 特性は向上するが、低温の J_c 値の磁場依存性は殆ど同じとなる。一方で、ナノロッド導入試料では磁

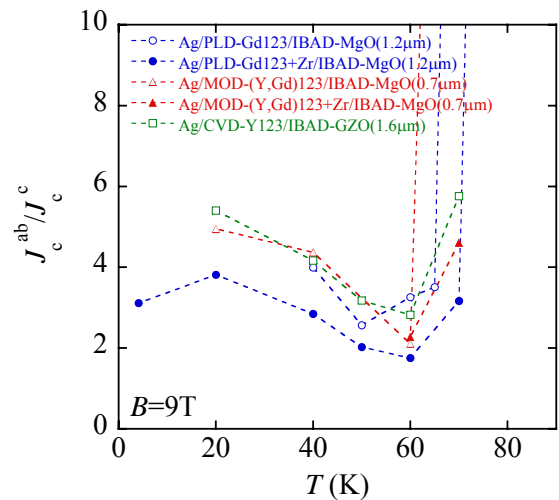
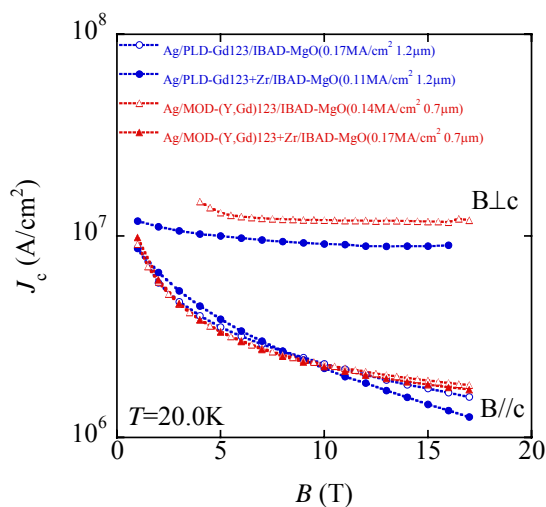


図 2.4.2-66 20K における J_c - B 特性

図 2.4.2-67 9T における J_c 値の異方性

場依存性が他と比べて大きくなっていることが分かる。これは、不可逆磁場とマッチング磁場が近い高温領域では、不可逆磁場向上の効果によって高磁場特性の向上が観られているが、低温ではc軸相関ピンがマッチング磁場を超えた高磁場で急激に効果を下げること示唆している。図 2.4.2-67 に、磁場印加角度が $B//c$ と $B\perp c$ に対する J_c 値の比をその異方性として示す。温度の低下に伴い J_c 値の異方性は一旦減少し最小となった後、さらに低温ではまた増加する。この結果はプロセスに関係なく起こるが、その原因は $B\perp c$ と $B//c$ で Intrinsic Pinning と Extrinsic Pinning がそれぞれ主体的に働くためと認識されている¹⁴⁾。試料間の比較をすると、c軸相関ピンであるナノロッドの導入により低温における異方性も低下している。この傾向は少なくとも 17T の高磁場でも定性的に同様である。したがって、高温で顕著である c 軸相関ピン導入による磁場中 J_c 値向上の効果は、低温高磁場領域ではその効果が著しく減少するものの、ゼロではないことを示唆している。したがってナノロッド導入は、低温でもある程度の効果が見込まれると結論できる。

図 2.4.2-68 に、3 T における J_c 値の温度依存性を示す。比較のため、 J_c 値は 77.3 K の値で規格化した。77.3 K, 3 T の J_c 値は不可逆磁場の影響を受けているので、これで規格化した J_c 値の温度依存性は、定性的に高温領域の J_c 値が小さいほどその温度依存性が大きくなる傾向となる。図 3 の結果はおおむねその傾向を示しているが、人工ピン止め点の導入によって、さらに温度依存性が変化している。したがって、低温高磁場領域の J_c 特性を、77.3 K, 3 T の J_c 値を低温強磁場特性の目安とするプロジェクト目標の設定が十分でないことを示唆している。

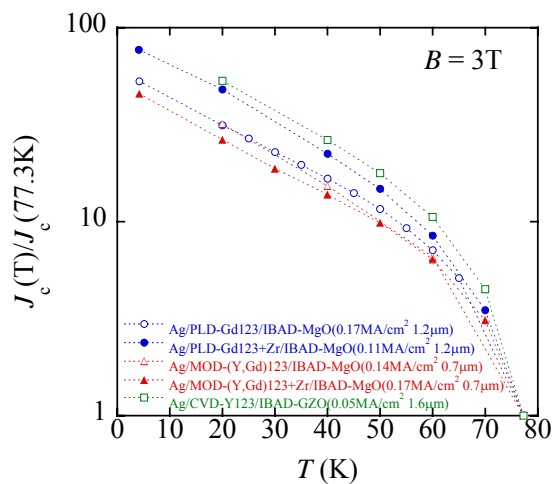


図 2.4.2-68 77.3K の値で規格化した J_c の温度依存性 (括弧内は 77.3K, 3T の J_c 値と膜厚)

次に平成 23 年度以降の成果として PLD 法 GdBCO 超電導層に対する、種々のナノロッド導入効果について示す。図 2.4.2-69 は、77.3 K における J_c 値の磁場依存性である。BaZrO₃(BZO), BaHfO₃(BHO), BaSnO₃(BSO)の濃度が異なっているが、これはすべて各結晶のナノロッドの最適組成と呼ばれる値である。図から分かるように、液体窒素温度においては、ナノロッド導入により $B//c$ の磁場中 J_c 値が大幅に向上しており、中でも BHO 導入が最も効果的であることを示している。さらに、BHO は膜厚が異なる 1 μ m と 3 μ m の試料でも特性が殆ど変わっていない。すなわち、厚膜化による J_c 値の低下が観られていないことが見て取れる。次に 40 K の低温における J_c の磁場依存性を示す。40 K, 磁場印加角度が $B//c$ において、

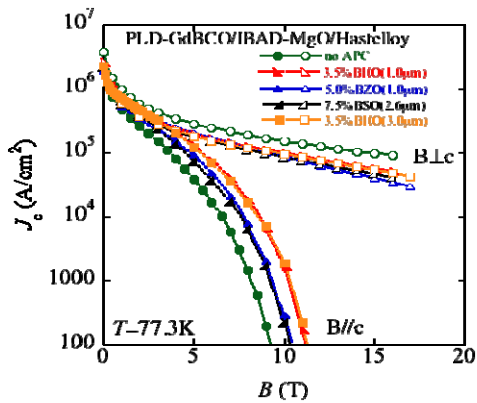


図 2.4.2-69 77.3K における J_c - B 特性

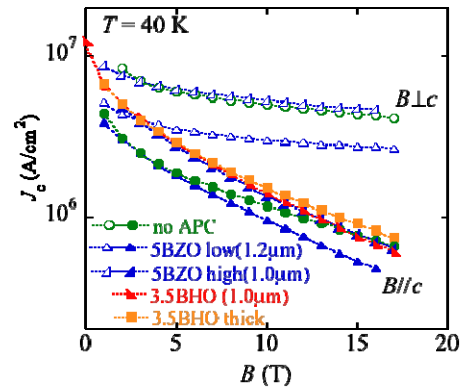


図 2.4.2-70 40K における J_c - B 特性

BZO(low)試料を除くナノロッド導入試料は、低磁場領域では高い J_c 値を示すが、高磁場では殆ど変わらなくなった。磁場依存性に着目すると、ナノロッドを導入していない試料よりも導入試料の方が、磁場依存性が大きくなっている。このように、ナノロッドの導入試料で、低温高磁場領域の J_c 値の磁場依存性が大きくなる現象は、SuperPower 社の REBCO テープでも報告されており、ナノロッド特有の現象と考えられる。この現象の理解のため、20 K における $B//c$ の J_c 値の磁場依存性を両対数プロットした結果を図 2.4.2-71 に示す。ナノロッド導入無し試料では、広い磁場範囲で傾きが-0.56 の直線となっている。しかし、ナノロッド導入試料は直

線とはならず、低磁場では傾きが-0.5よりも小さくなるが、高磁場では大きくなる傾向を示している。今回測定した試料におけるナノロッドのマッチング磁場(B_ϕ)は3-5T程度と見積もられている。したがって、磁束線とナノロッドの密度が等しくなるマッチン磁場以下では、線形和に近い小さな磁場依存性となり、それ以上では大きくなっていることが示唆される。大まかには、マッチング磁場以上では、ナノロッドに直接ピン止めされない磁束が出現し、これらの磁束が磁束間相互作用によってピン止めされていることで、より大きな磁場依存性を示すと理解できる。実際に、 c 軸相関ピン止め点とランダムピン止め点の共存モデルを用いてこの磁場依存性を良く説明できることから、低温強磁場の J_c 特性を向上するためには、ナノロッドの密度を増加することにより、マッチング磁場をあげることが効果的であると考えられる¹⁵⁾。図 2.4.2-72 は、高温から低温における J_c 値の角度依存性である。ナノロッド導入試料では、すべての温度で $\theta=0^\circ(B//c)$ 方向に大きなピークが見られているが、低温ではピークが相対的に小さくなっていることが分かる。この結果も、 c 軸相関ピン止め点とランダムピン止め点共存モデルによると、相関ピン止め点の効果が不可逆磁場に反比例して減少するため、不可逆磁場の高い低温では、その効果が小さくなると理解することができる¹⁵⁾。

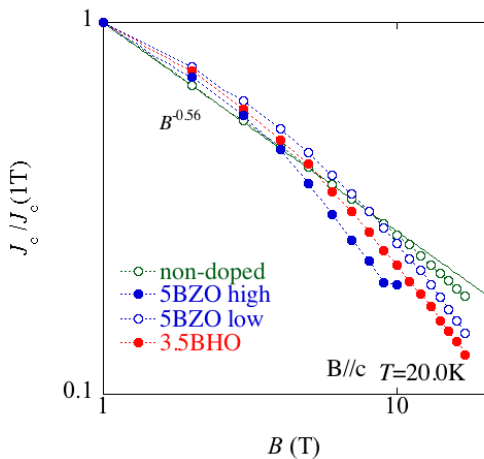


図 2.4.2-71 20K, $B//c$ における J_c - B 特性の両対数プロット

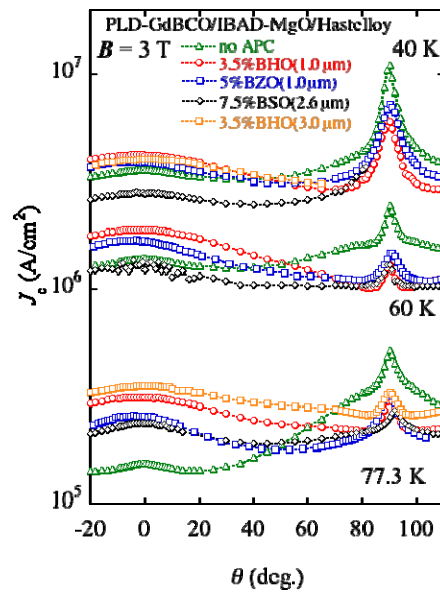


図 2.4.2-72 各温度における J_c 値の印加角度依存性プロット

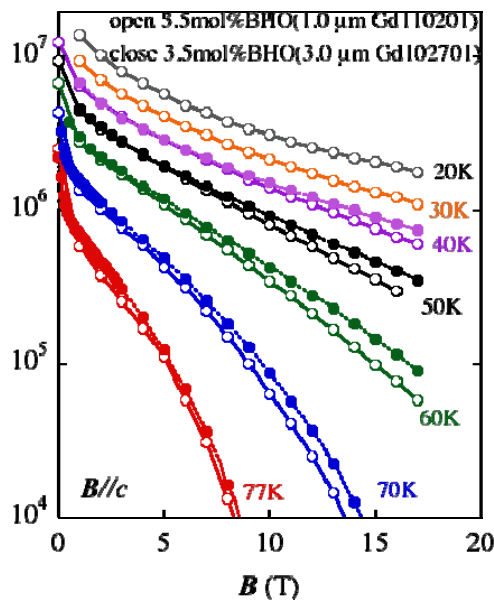


図 2.4.2-73 膜厚の異なる試料の J_c 値の磁場依存性の比較

次に膜厚の影響を考えるために、BHO ナノロッド導入試料の異なる温度における J_c 値の磁場依存性を図 2.4.2-73 に示す。77.3 K から 40 K の広い温度に亘って、厚膜試料(3 μm)と薄膜試料(1 μm)の J_c 値がほぼ等しく、高磁場では厚膜試料の方が高い J_c 特性を示していることが分かる。この結果は、従来厚膜化により J_c 値の低下が観られていたが、BHO 人工ピン止め点導入によって、膜厚が大きくなっても高い J_c 特性が低下しないことを示している。

以上の結果から、特に低温強磁場特性の向上には、適切なナノロッド（今の所 BHO が最も効果が高い）を高い濃度で導入し、GdBCO マトリックスの超電導特性を落とさないようにプロセス改善を行うことが効果的と考えられる。特に高い工学的臨界電流密度 J_c 値の達成のためには、厚膜化も重要となる。したがって、厚膜化による J_c 値劣化が殆ど無い BHO を高濃度に導入し厚膜化することが、現時点で最も良い特性が得られると考えられる。

(14) 低温強磁場中での電流電圧特性

Y系超電導線材は、高磁場中での通電特性に優れ、SMESのように電力機器の中でも磁場中での大電流運転が求められる分野で期待されている。磁場中で効率的に大電流を通電するためには、超電導線材を冷却し、線材の臨界電流を上げて使用する必要がある。たとえば極低温である4.2 Kにおいては、高磁場中であっても極めて大きな臨界電流が期待できる。そこで、本研究では高磁場、低温化での大電流通電を考慮して液体He中にY系超電導線材を浸漬し、4.2 Kに冷却した状態で高磁場中(18 T)での I_c - B 特性を取得することを目的とした。

極低温である4.2 Kにおいては非常に大きな臨界電流密度となり、フラックスフローが発生し始めると、一気に発熱・焼損する危険性が高い。そこで、測定線材は安定化層としてCuめっきを施したY系超電導線材を用いた。Y系超電導線材は、77 K, s.f.中で臨界電流500~600 A/cm-w級のものであり、Cuめっき厚さを0,10,20,30,50,100 μm と複数のもを用意し、Cuめっき厚さによる通電特性への影響も評価した。

測定は、試料搭載のFRP部と電極が一体となった試料ホルダーに線材試料をハンダ付けで接続・固定し、液体窒素中77 K, s.f.で I_c 値を測定した後、液体He(4.2 K)に浸漬し、高磁場(~18 T)中で電流を掃引して I_c 値を測定した。この測定は、線材のc軸が磁場に垂直な場合と平行な場合の両方向で行った。

Cuめっき厚みを変えた試料で I_c 値を測定した結果を $B \perp c$ について図2.4.2-74に、 $B \parallel c$ について図2.4.2-75にそれぞれ示す。500~600 A/cm-w級の線材で磁場18 T、 $B \perp c$ にて I_c 値が2000~3000 A/cm-w、 $B \parallel c$ にて500~1000 A/cm-wを通電できることを確認した。 I_c 値は77 K, s.f.に対して、4.2 K、18 Tでは、 $B \perp c$ で4.5~7.5倍、 $B \parallel c$ で1~2倍となった。 $B \parallel c$ はほぼ予想通りであったが、 $B \perp c$ については想定した値よりも低かった。原因として、熱収縮による影響が考えられ、基板の熱応力を計算すると、約700 MPaと大きく、試料保持構造で発生する熱応力によって I_c 値が制限されたと推定される。また、Cuめっき厚さと I_c 値の関係について明確

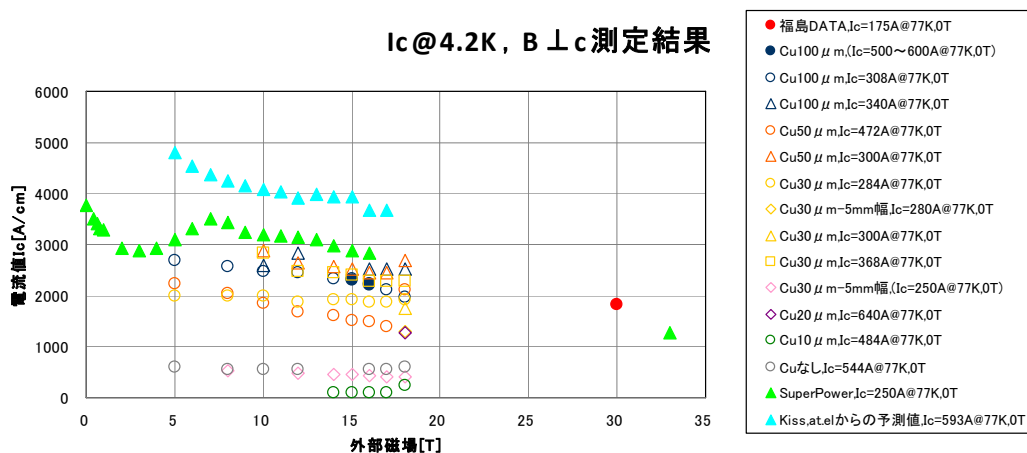


図 2.4.2-74 Cuめっき線材の4.2 Kでの I_c - B 特性($B \perp c$)

※ グラフ凡例の I_c 値で()付きは尺取や他部位での I_c 値

Ic@4.2K, B//c 測定結果

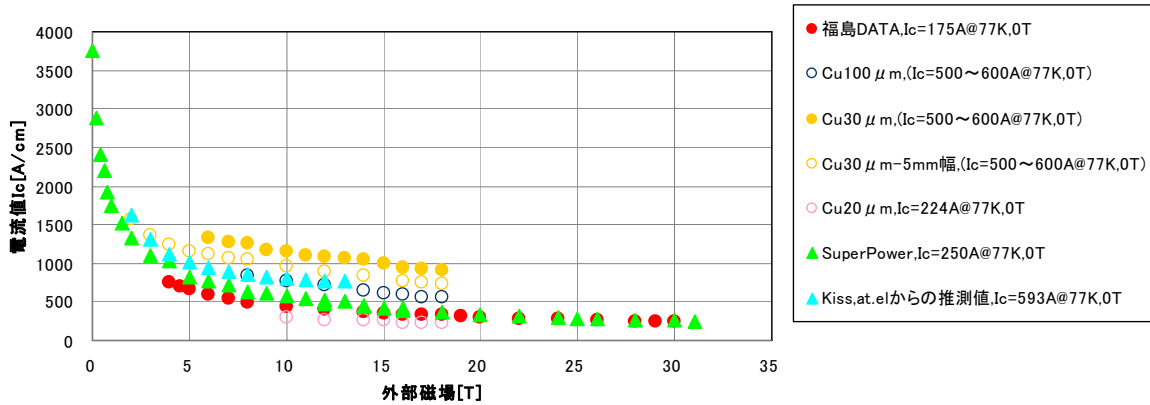


図 2.4.2-75 Cu めっき線材の 4.2 K での I_c -B 特性(B//c)

※ グラフ凡例の I_c 値で () 付きは四端子連続測定や他部位での I_c 値

な傾向はなかった。Cu めっき厚さを考慮した I - V 曲線を計算すると、電界 $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ の領域では殆ど差がなく、ほぼ超電導線材の性能に依ることが分かった。これから Cu めっき厚による I_c 値への影響は軽微であり、さらに高い電界レベルで温度抑制の効果を発揮すると考えられる。

以上をまとめると、ここでは $500\sim 600 \text{ A}/\text{cm-w}$ 級@77 K, s.f.の線材で、磁場 18 T、 $B \perp c$ にて I_c 値として $2000\sim 3000 \text{ A}/\text{cm-w}$ @4.2 K を通電できることを確認した。ただし、冷却時の熱収縮を改善することにより、さらに通電できる可能性がある。また、Cu めっき厚さは、 I_c 値に殆ど影響を及ぼさないことを確認した。これらの知見は Y 系超電導線材の低温強磁場領域での応用を検討する際に極めて有用である。

(15) 直流磁場下の通電特性

超電導機器において Y 系超電導線材・導体は直流磁場の下、機械的応力と変動磁場に同時に晒される。このような磁場下で通電中(同時掃引)の線材・導体の全損失を評価する。これらのデータにより、コイル設計に利用できるデータを得るとともに、線材製造技術へのフィードバックに資することを目的とする。

直流強磁場下での同時掃引時の損失を評価するために、直流強磁場に変動磁場を重畳して、変動電流を流した状態での Y 系超電導線材の全交流損失を評価する。

直流強磁場下での同時掃引時の損失を評価するために、直流強磁場に変動磁場を重畳して、変動電流を流した状態での Y 系超電導線材の全交流損失を評価する。

直流強磁場下での同時掃引時の全交流損失を電氣的に測定する装置を作製した。装置の概略図等を図 2.4.2-76 に示す。伝導冷却型超電導マグネットの常温ボア内に、液体窒素溜の容器を設置し、その中にスプリット型銅コイルを配置する。スプリット型銅コイル中心に Y 系超電導線材の試料線材を配置して、直流強磁場と変動磁場を重畳した外部磁場を印加する。本装置によっては実際のコイル応用での電磁条件は装置の制約上カバーできないが、解析モデルを用いることにより、予測す

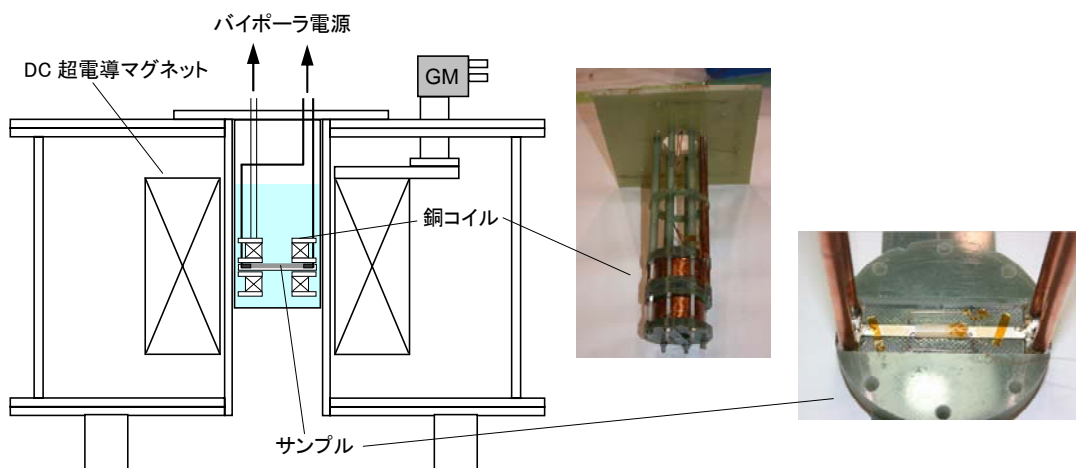


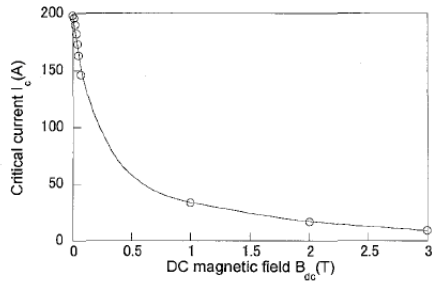
図 2.4.2-76 測定装置の概要

ることが可能である。

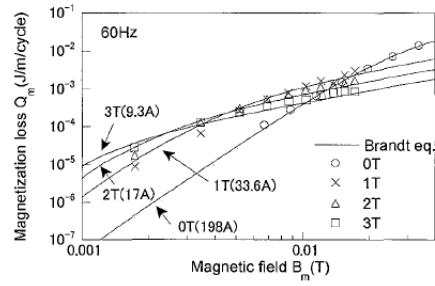
測定結果を図2.4.2-77に示す。同時掃引の測定に先立ち、直流磁場のみを印加して線材試料の臨界電流測定を行った。図には、既に我々の有する解析モデルによる数値解析結果を比較して示してある。測定結果と数値解析は良く一致しており、測定結果の妥当性が示されていると考えられる。

直流強磁場下での変動磁場・変動電流（同時掃引）の交流損失を測定した。また、測定結果と数値解析結果を比較して検証を行った。その結果、両者は概ね良く一致した。したがって、中間評価時の

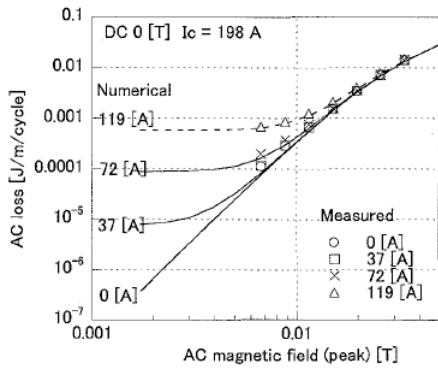
測定システムではカバーできない範囲の測定条件でも、数値解析により交流損失を予測できると考えられる。



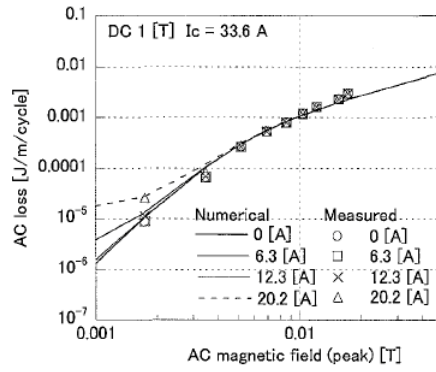
(a) 臨界電流特性



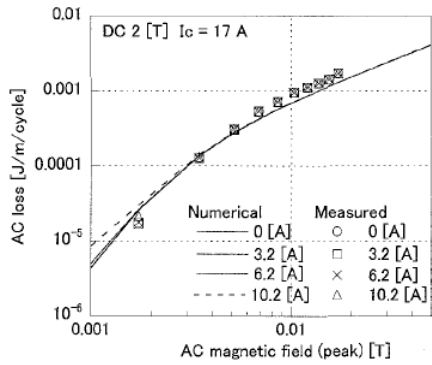
(b) 無通電の磁化損失



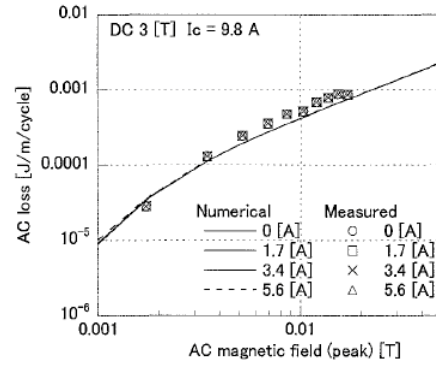
(c) DC ; 0 T での全損失



(d) DC ; 1 T での全損失



(e) DC ; 2 T での全損失



(f) DC ; 3 T での全損失

図 2.4.2-77 (a)臨界電流値の磁場依存性、(b)無通電時の磁化損失、(c-f)各直流磁場下での全損失

(16) 繰り返し応力印加による特性劣化

Y系超電導線材・導体及びコイルには電磁力によるフープ応力が働き、また繰り返し変動磁場にともないこのフープ応力も繰り返しになる。本研究では、フープ応力(繰り返し応力を含む)に対するY系超電導線材、導体、コイルの変動磁場損失、許容電流値への影響を評価した。その際、フープ応力は線材にとって引張り応力になることから、具体的には長さ約15 cmの直線状短尺試料に最大50,000回の繰り返し引張り応力を印加する試験を実施した。使用した試料ホルダーと試験機を図2.4.2-78、79に示す。

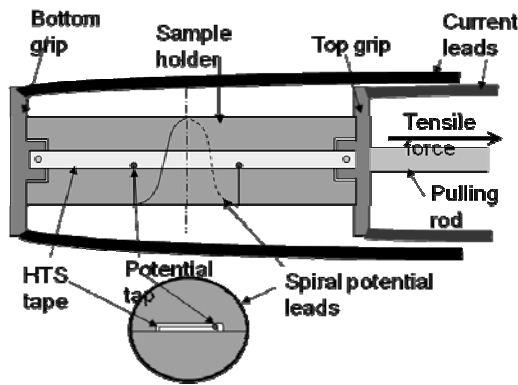


図 2.4.2-78 サンプルホルダー

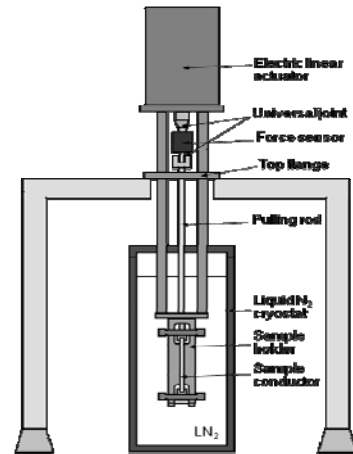


図 2.4.2-79 試験機

用いた超電導線材は、長さ15 cm、幅2.5 mmのGdBCOテープ線材である。この線材を用いた試験結果を図2.4.2-47に示す。図2.4.2-80は線材への引張り応力を増加させた際の I_c 値劣化である。図より応力663 MPaは可逆領域であり、そこまでプロットしてある線材は可逆領域での零から663 MPaまでの繰り返し荷重試験に用いた。また応力824 MPaまで印加すると I_c 値は初期の85%程度まで低下し、不可逆領域に入る。そこまでプロットしてある線材は不可逆領域でのゼロから824 MPaまでの繰り返し荷重試験に用いた。

応力負荷繰り返し試験の結果、可逆領域の応力である663 MPaの負荷では50,000回繰り返しても I_c 値劣化は観られなかった。一方、不可逆領域の応力である824 MPa負荷の繰り返しでは I_c 値劣化が進行し、繰り返し回数3,000回で初期の6割近くまで低下した。これらの知見は長尺線材の機器応用を検討する上で極めて有用である。

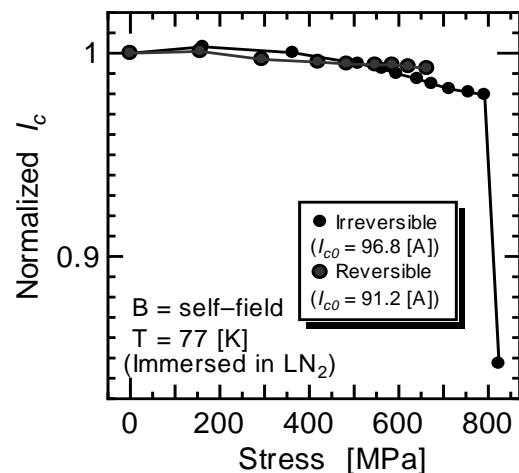


図 2.4.2-80 応力による I_c 値劣化

(17) 大電流用導体の検討

高温超電導(HTS)線材を SMES 等の大型マグネットに応用する場合、方向性の一つとして大電流容量の導体を用いることが考えられる。大電流容量の導体を構成する場合、線材間の電流分布を均一にするとともに、交流損失を低減するため、線材間に転位を施すことが重要である。本研究では線材間に転位を入れた導体試作を行って特性を調べ、Y 系超電導線材の大電流導体への適用可能性について検証を行った。

Y 系超電導線材に転位を施す方法として、ドイツのカールスルーエ工科大学では ROEBEL 型導体が開発されている¹⁶⁾。この導体では、テープ線材を切り欠いてジグザグ形状に加工し、それらを順次撚り合わせていくことで転位構造を実現するため、線材の半分近くが捨てられることになる。これに対して、本研究では、線材をエッジワイズ方向に緩く蛇行させることによって類似構造の導体を構成することを考えた。TFA-MOD 法による Y 系超電導線材(5 mm 幅)20 枚を用いて各 1.3 m 長の単純積層導体 1 本と ROEBEL 型導体 2 本(線材の転位長は 600 mm、及び、1300 mm)を製作し、液体窒素中で通電試験を行った。単純積層構造の導体については、臨界電流は 2050 A であったが、ROEBEL 型導体のうち 1 本の線材のピッチ長が 600 mm のものについては、臨界電流が 1520 A 程度に低下した結果となり、単純積層導体に比べて約 7 割となった。導体の臨界電流が低下した理由としては、転位を導入した線材(20 枚中 8 枚)についてエッジワイズ方向の歪みが 0.4 %と大きかったことが原因として考えられる。線材のピッチ長が 1300 mm のもの(最大曲げ歪みは 0.2 %)については、臨界電流は 1830 A であり、1 割程度の低下であった。また、導体に曲げ加工を行って液体窒素中で臨界電流を測定し、劣化の度合いを調べたところ、線材部にかかるフラットワイズ方向の最大の曲げ歪みで 0.4 %程度までについては、殆ど劣化が見られなかった。

Y 系超電導線材を用いて大電流容量の ROEBEL 型導体を構成するために、線材間を緩く蛇行させることによって転位構造を導入する方法を提案した。エッジワイズ方向の曲げ歪みが 0.2 %では劣化は 10 %程度であり、こうした導体を構成できることが実証できた。より短い転位長を実現するためには、線材の機械強度の増加が望まれる。ひとつの方策として、線材の周囲に銅の被覆材を施すことが有効であると考える。これらの知見は将来 Y 系超電導線材の大電流導体への応用を検討する際に有用と思われる。

2.4.2-2 高不可逆磁場材料の開発

(1) 新規高不可逆磁場材料の開発

本項の開発では、これまでの線材作製に用いられてきた Y 系銅酸化物超電導材料に比べ、より高い臨界温度やより小さな異方性を持つ材料を開発することにより、本質的により高い不可逆磁場を持つ材料を実現し、磁場中高 I_c 線材の作製裕度の向上に資することをめざした。また、ピン止め機構及び磁束ダイナミクスの理解に基づき、小さな磁場角度依存性を実現する新規異相人工ピン止め点材料やその導入方法の開発も行った。

変圧器、SMES 等のパワー機器応用においては、不可逆磁場(B_{irr})の大きさ及び磁場印加角度依存性が重要なパラメータとなってくる。Y 系を含む銅酸化物系超電導材料は、その結晶構造や電子状態に起因し、大きな電磁氣的異方性を持つため、 B_{irr} は上部臨界磁場に比べかなり低い。この B_{irr} の値及び磁場印加角度依存性は電磁氣的異方性の大きさ及びピン止め点の種類に大きく依存することが知られている。そこで、本項目では、まず、磁場中特性の向上及び I_c 値の磁場印加角度依存性の低減化を目的として、in-plume PLD 法で成膜した GdBCO 線材の 77 K における I_c 値の磁場強度及び磁場印加角度依存性の把握及び成膜条件の影響について検討した。また、高いピン止め点導入効果が期待される BaZrO₃(BZO)、BaSnO₃(BSO) 添加効果についても検討を行った。

図 2.4.2-81 に線速 30 m/h で 2 回成膜を行った線材について、磁場を線材テープ面垂直方向に対して $\theta = 45$ 度、90 度($B//ab$)、 $\theta = 180$ 度($B//c$)に印加した時の I_c 値の磁場依存性を示す。この線材の 77 K, s.f. 中の I_c 値は 475 A/cm-w であった。図より低磁場では磁場の印加方向による差が殆どないことが分かる。この原因を調べるために、 I_c 値の磁場印加角度依存性を詳細に調べたところ、図 2.4.2-82 に示すように、 $\theta = 90 \pm 20$ 度方向に大きなピークが生じ、それが低磁場での磁場印加角度依存性の低減化に寄与していることが分かった。このようなピーク構造は従来の PLD 法線材では報告されておらず、in-plume PLD 法で製造した線材に特有なものであると考えられる。

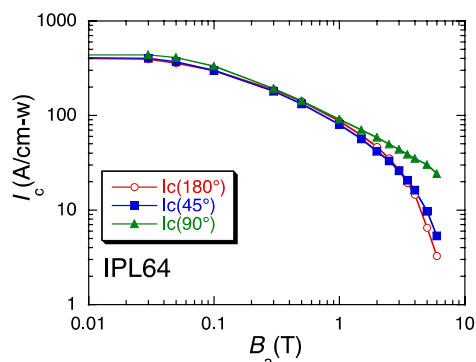


図 2.4.2-81 in-plume PLD 法で製造した GdBCO 線材の I_c - B 特性

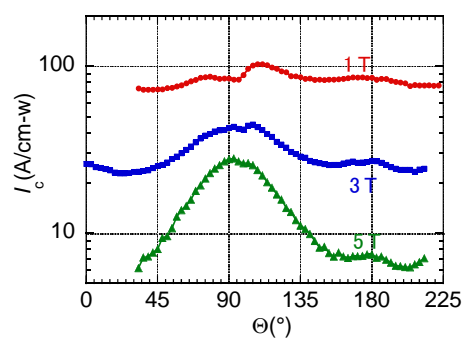


図 2.4.2-82 in-plume PLD 法で製造した GdBCO 線材の I_c 値の磁場印加角度依存性

ピークの生じる起源について明らかにするために、ピークが観察される試料とされない試料の断面 TEM 観察を行った。その結果を図 2.4.2-83 に示すが、ピークが観察される試料においては、ab 面方向に高密度の積層欠陥が観察される。また詳細な分析結果を 2.4.2(b-1) ii) に記載するが、積層欠陥の起源は 123 超電導結晶構造 (斜方晶) 中のダブル Cu-O 鎖であることが明らかとなっている。この 124 相中に構成されているようなダブル Cu-O 鎖が生成する機構について現在調査中であるが、その密度が Reel to Reel 成膜の線速と相関がみられることから、プルーム中の原料濃度変動が関係している可能性が高い。

この試料について、out-of-plume による線材との比較を図 2.4.2-84 に示すが、図(a)より in-plume 法による線材の不可逆磁場は標準的な PLD 試料に比べ高い値を有しており、本ピン止め点が高磁場特性の向上に有効であることが分かる。本線材はまた、同図(b)に示すとおり、より低温度領域においても優れた J_c 特性を維持していることが明らかとなった。

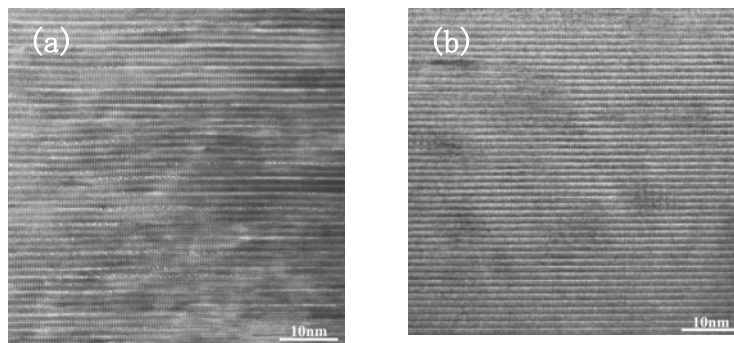


図 2.4.2-83 (a)サイドピークが観られる試料と(b)観られない試料の断面 TEM 写真

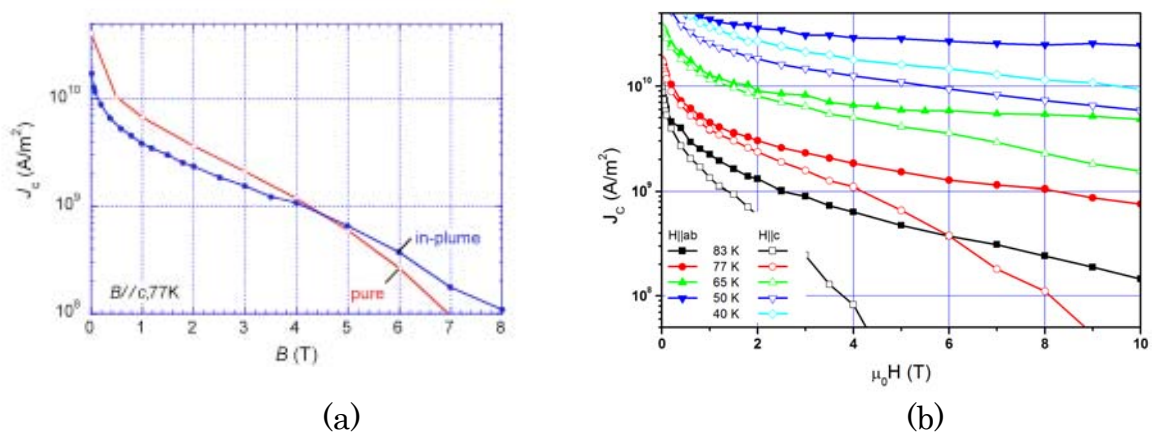


図 2.4.2-84 in-plume 法及び out-of-plume 法による人工ピン無し PLD 線材の磁場中臨界電流特性の比較。(a)77 K、垂直磁場における標準 PLD 試料との比較。(b)広い温度領域を含む垂直磁場、平行磁場中の特性。● : in-plume 法、○ : out-of-plume 法。

次に、in-plume PLD 法における、BaZrO₃(BZO)、BaSnO₃(BSO)添加効果を述べる。PLD 法で RE123 を成膜する際に、ターゲットに BZO や BSO、ZrO₂、SnO₂等を混入すると、超電導層内にナノロッド状の BZO や BSO が導入され、磁場中 I_c 値特性が向上することが前 NEDO 事業の「超電導応用基盤技術研究開発 (第 II 期)」プロジェクトにおいて、見い出されている。そこで、in-plume PLD 法においても同様の効果が得られるかについて検討を行った。

図 2.4.2-85 に 5 mol%BZO 添加した時の I_c 値の磁場印加角度依存性の変化を示す。成膜速度は 20 m/h(40 m/h×2 パス)であり、膜厚は約 1.7 μm であった。BZO 添加により全般的に I_c 値が低下してしまっており、特に、 $B_a//ab(\theta=90^\circ)$ の低下の度合いが大きい。また、1 T と比較して 3 T の方が低下の度合いが小さくなっている。この I_c 値が低下した原因については、図 2.4.2-86 に示す様に、in-plume PLD 法をはじめとして、PLD 法全般に Reel to Reel 成膜において、BZO 添加により T_c 値が大きく低下することが原因と考えられる。

しかしながら、図 2.4.2-87 に示すように、BZO 添加により、 B_{irr} の向上が観られており、また、 I_c 値の磁場依存性においても、3 T 以上の高磁場では、BZO 添加による向上が観られており、BZO ナノロッドは高磁場においては有効なピン止め点として働くことが明らかとなった。

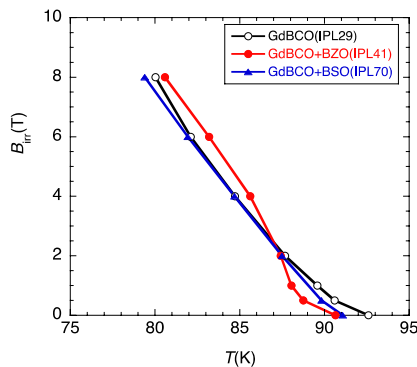


図 2.4.2-85 In-plume PLD 法で成膜した Gd123 における BZO 添加効果

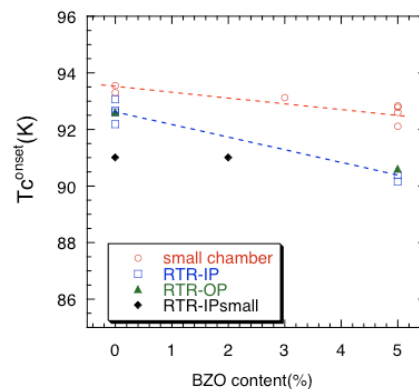


図 2.4.2-86 各種製法における Gd123 線材の T_c 値と BZO 添加量の関係

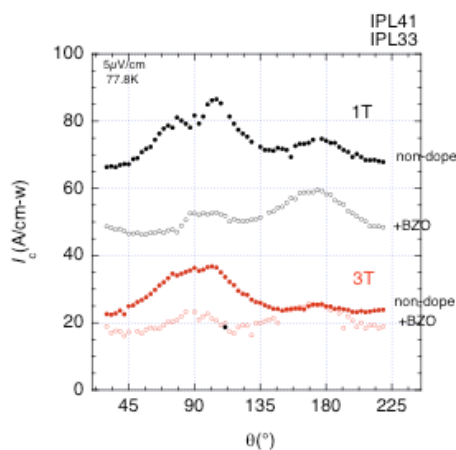


図 2.4.2-87 In-plume PLD 法で製造した GdBCO 線材の不可逆磁場曲線と BZO、BSO 添加効果

(2) in-plume PLD 膜の微細組織観察

本研究項目は新規人工ピン止め点を導入した線材等について、微細構造解析からその開発を支援することを目的としている。本項では in-plume PLD 法により成膜された長尺 $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (GdBCO) 線材に導入された高密度な欠陥及び人工ピン止め点について述べる。線速 60 m/h で成膜された試料において、GdBCO の 006 回折を用いて撮影 ($g=006$ の回折条件) した GdBCO 層の断面 TEM 暗視野像を図 2.4.2-88 に示す。この条件では、GdBCO 層のらせん転位と積層欠陥のコントラストが明瞭に観察することができる。らせん転位が CeO_2 層直上から GdBCO 層表面まで観察され、さらに CeO_2 界面と平行に高密度な積層欠陥が形成されていることが分かる。この積層欠陥について原子の配列を明らかにするため、収差補正レンズを搭載した走査透過型電子顕微鏡 (SEM) による環状暗視野 (HAADF) 像を撮影した。HAADF 像では原子番号に依存したコントラスト (Z コントラスト) 像を得ることができる。図 2.4.2-89 に GdBCO 層の HAADF 像を示し、さらに、Gd、Ba、Cu 位置を示す。積層欠陥はダブル Cu-O 鎖であることが分かる。この GdBCO 層は高磁場における $J_c \cdot B \cdot \theta$ を測定すると、 $ab//B$ の磁場侵入付近で非対称な J_c 値のサブピークが現れる。このサブピークが現れる要因の一つとして、ダブル Cu-O 鎖に依る積層欠陥が関係していると考えられる。

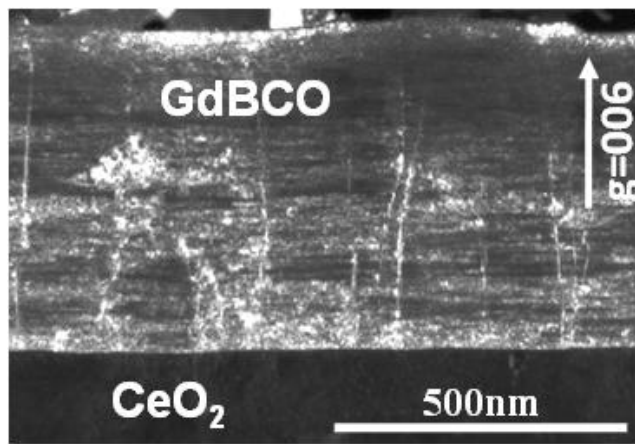


図 2.4.2-88 GdBCO の $g=006$ 条件における GdBCO 層の暗視野像

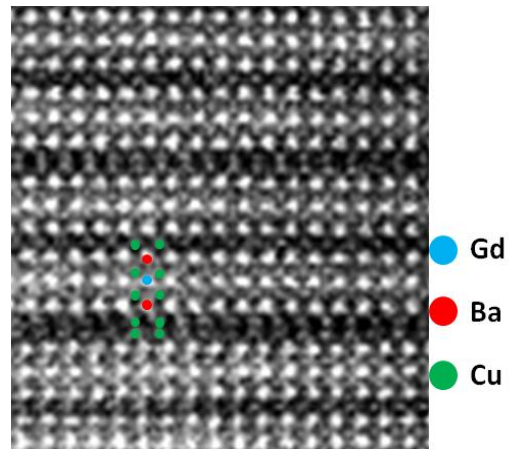


図 2.4.2-89 GdBCO 層の HAADF 像

次に、in-plume PLD 法により超電導層内部にナノロッドが形成された試料について述べる。図 2.4.2-90 に BaSnO_3 (BSO) ナノロッドが形成された GdBCO 層の断面 TEM 像を示す。GdBCO 層内部の暗い線状のコントラストは GdBCO のらせん転位であり、BZO ナノロッドは淡い線状のコントラストで現れている。BZO 結晶のナノロッドはおよそ 5 nm 径であり、 CeO_2 層直上から、表面領域に亘り均一に存在していることが分かる。また、in-plume PLD 法では BaZrO_3 (BZO) 結晶のナノロッド (およそ 5 nm 径) も同様に GdBCO 層の全域に亘り均一に分布させること

が可能であることを TEM 観察から確認している。以上のように人工ピン止め点として有効である BSO、BZO 結晶のナノロッドが in-plume PLD 法でも形成可能であることを示すことができた。

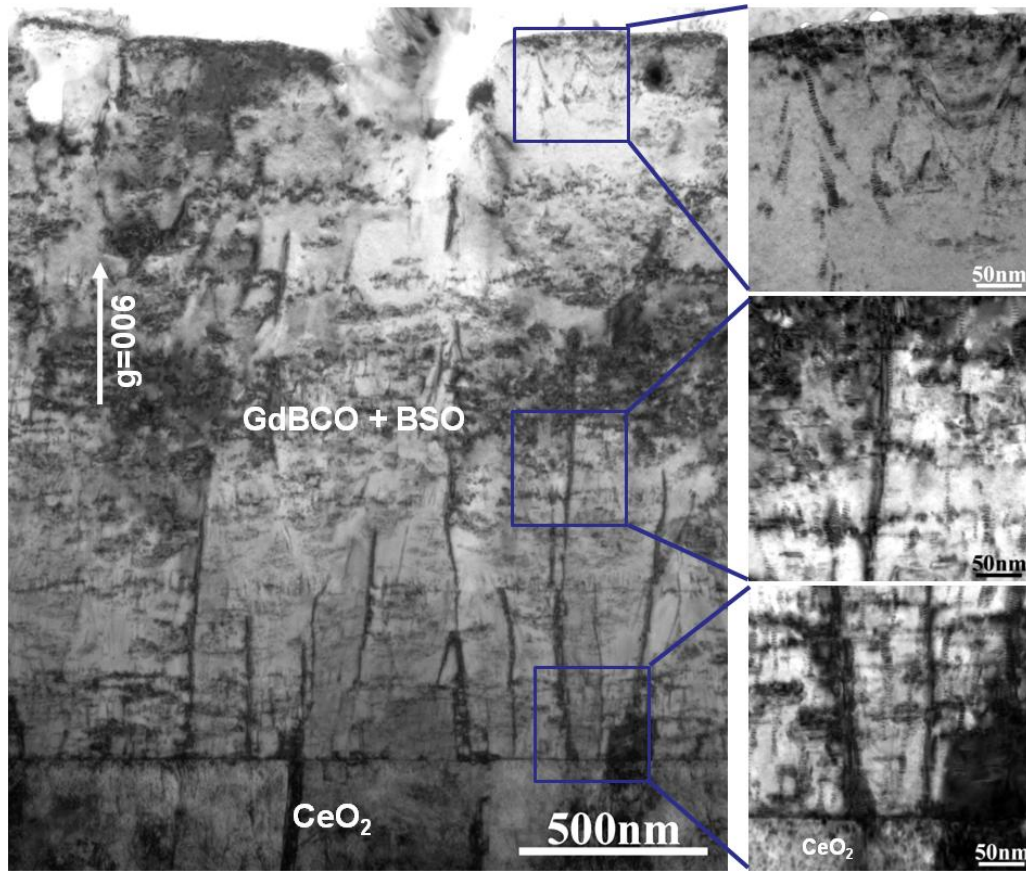


図 2.4.2-90 BaSnO₃(BSO) 結晶のナノロッドが形成された GdBCO 層の断面 TEM 像

(3) 量子線照射を用いた高不可逆磁場材料の開発

量子線照射は、作製工程によらず、照射条件を変化させることで超電導体内のピン止め点の形状・密度を制御できる利点がある。その中でも特に重イオン照射によってできる円柱状欠陥は、PLD法での成膜において、ターゲットにBaZrO₃(BZO)を添加することによって導入されるナノロッド状の析出相と同様の形状をしていることから、BZOによるピン止め効果の原理検証に有効な手段である。そこで、本研究では、重イオン照射を用い、ロッド状欠陥によるピン止めの基礎特性の把握及び最適条件の検討を行った¹⁷⁾。

図 2.4.2-91 に PLD-Y 系超電導線材に対して、450 MeV Xe イオンを 7.5×10^{11} ions/cm² (マッチング磁場: $B_{\Phi} = 15$ T)、c 軸に平行に照射した時の 77 K、1 T 及び 3 T における J_c 値の磁場角度依存性の変化を一例として示す。ここで、磁場を線材テープ表面に平行に印加した時を $\theta = 0$ 度と定義した。照射方向 ($\theta = 0$ 度及び 180 度) の J_c 値が大きく上昇し、導入された円柱状欠陥が強いピン止め点となっていることが分かる。一方、 $\theta = 90$ 度の J_c 値の減少が観られた。

未照射試料における $\theta = 90$ 度 ($B_a \parallel ab$) の J_c 値のピークについては、一般には銅酸化物超電導体特有の層状構造による intrinsic pinning あるいは積層欠陥等によるピン止めが起源といわれている。重イオン照射により異方性や積層欠陥の数は変化していないと考えられることから、 $\theta = 90$ 度の J_c 値のピークの減少の起源について、直交する c 軸相関ピンの導入によって、ab 面方向のピン止めの二次元性が弱まる等で実効的なピンポテンシャルが減少したことが考えられる。

また、図 2.4.2-91 (b) にそれぞれの磁場における照射前の $\theta = 90$ 度の J_c 値で規格化したプロットを示すが、 $\theta = 90$ 度のピークは磁場とともにシャープになるのに対し、照射試料で観られる $\theta = 0$ 度ピークの幅は 1 T と 3 T では殆ど変化していないことが分かる。この $\theta = 0$ 度ピークの広がりから、円柱状欠陥によるピン止めの有効角度 (trapping angle: θ_r) は約 45 度と見積もられる。この値は Doyle ら¹⁸⁾ による単結晶基板上に PLD 成膜した Y 系超電導薄膜における結果 ($\theta_r \sim 50$ 度 (1 T、 $T/T_c = 0.86$)) と良い一致をみている。一方、Paulius ら¹⁹⁾ は Y 系単結晶を用いた測定で、 θ_r は温度及び磁場によって変化し、85 K では 1 T で $\theta_r \sim 75$ 度、4 T で $\theta_r \sim 24$ 度と報告している。この違いの原因としては、単結晶と比較して薄膜や金属基板上線材では、らせん転位等の既存の欠陥の影響等があるためと考えられる。

次に、欠陥密度と J_c - B 特性の関係について議論した。図 2.4.2-92 は照射フルエンスが 2.5×10^{11} ($B_{\Phi} = 5$ T) と 7.5×10^{11} ions/cm² ($B_{\Phi} = 15$ T) 及び未照射試料の 77 K における J_c - B 特性の比較である。なお、 J_c 値は照射前の 0.01 T の J_c 値で規格化した。照射量とともに J_c 値は増加し、また、磁場依存性も小さくなることが分かる。特に、高磁場領域での J_c 値の増加が大きく、ロッド状の欠陥の導入は不可逆磁場の向上に有効であることを意味する。

一方、ロッド状欠陥の有効磁場 B^* を低磁場の $J_c \propto B^a$ からずれが生じる磁場で定

義すると、フルエンスが 2.5×10^{11} ions/cm² のとき 1.1 T、 7.5×10^{11} ions/cm² のとき 2.4 T となり、照射量から見積もられるマッチング磁場より小さく、約 1/5 となっている。このことは、導入された欠陥の 20% ぐらいしか、磁束ピン止めとして寄与していないことを示唆している。このことは、重イオン照射で導入される欠陥分布はランダムな分布を持つ一方、磁束線は磁束線同士の反発力により、できるだけ三角格子を組もうとするため、必ずしもすべての欠陥がピン止めに使われるとは限らないことを考えると定性的に理解できる。

以上のことから、ナノロッド状欠陥は不可逆磁場の向上に有効であること、また有効磁場角度範囲は約 45 度と比較的大きいこと等が明らかとなった。これらの知見は長尺線材の磁場特性向上のためにナノロッド状人工ピン止め点の導入が検討されていることを考慮すると、極めて重要である。

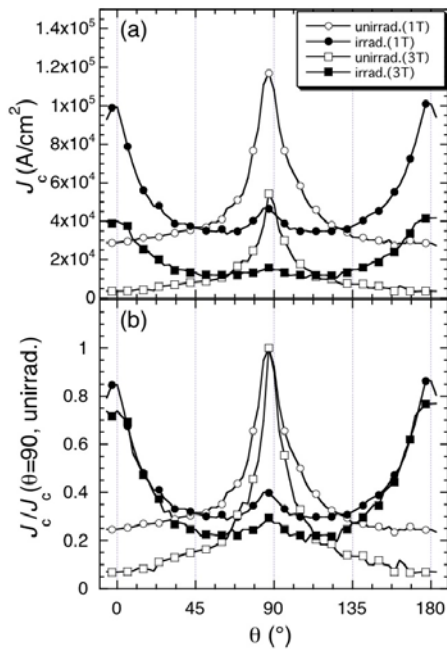


図 2.4.2-91 (a)Xe イオン照射(フルエンス： 7.5×10^{11} ions/cm²)前後の Y 系超電導線材の 1 T 及び 3 T、77 K における J_c 値の磁場角度依存性 (b) J_c 値を未照射試料の $J_c(B, 90 \text{ 度})$ 値で規格化したプロット。

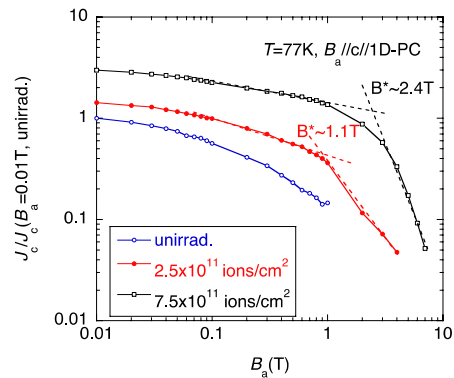


図 2.4.2-92 Xe イオン照射による Y 系超電導線材の 77 K における J_c - B 特性の変化。なお、磁場は c 軸方向に平行に印加した。

(4) 不可逆磁場に対するキャリア濃度の影響

高不可逆磁場材料の開発として、試料に添加物を加えることにより、異方性制御、磁場中 J_c 値の向上、不可逆磁場 B_{irr} の上昇をめざすこととした。良質の単結晶試料を作製し、その物性を評価することにより、線材にフィードバックすることを目的としている。本項では Y 系単結晶に炭酸を添加した場合、及び Gd 系単結晶に Ca を添加した場合についての結果を述べる。同時に、本質的に高い T_c 値を持つ材料開発を目的として格子の不安定性に注目し、格子歪みのない Y124 系単結晶の動的構造評価を行った。

Y 系銅酸化物では Cu-O 鎖が炭酸基と置換する。Cu-O 鎖の酸素はキャリア濃度と関連しており、また、炭素置換により c 軸長が減少することから、この置換により異方性・キャリアドーピング制御が同時に行われる可能性がある。さらに、一般的に炭酸は銅酸化物を作る際の原料の一部であるため、特に低温合成手法で結晶内に入ることが予想され、線材特性に影響を与えうると考えられる。炭酸置換 Y 系銅酸化物単結晶の物性評価を行った²⁰⁾。

実験の結果より炭酸濃度(図 2.4.2-93 中 x)が上昇すると酸素キャリア濃度がアンダードーピング状態になることが分かった(図 2.4.2-93 上図)。同じキャリア濃度の J_c 値を測定してみると($T=77$ K)、炭酸置換により磁場中の J_c 値が減少していることが分かる(図 2.4.2-93 下図)。したがって炭酸を含まない条件下で線材を作製することが望まれることが判明した。

一方、 B_{irr} を上昇させるためには、系の酸素キャリア濃度をオーバードープにすることが良いと考えられる。そこで、Gd 系銅酸化物の Gd(3 価)サイトを Ca(2 価)で置換した Ca 置換 Gd 系銅酸化物単結晶を育成し、キャリア濃度制御を試みた。2%Ca 添加により B_{irr} が 5 T から 6 T 付近に上昇しているのが判明した。このことから、少量の Ca 添加により線材特性を向上させられる可能性が示唆される。

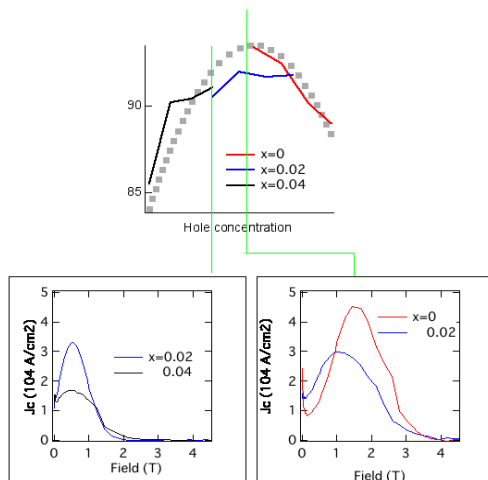


図 2.4.2-93

上図; c 軸抵抗から求められた炭酸置換 Y 系単結晶のキャリア濃度依存性。

下図: 上図同一キャリア濃度(上図中緑線)における異なる炭酸濃度を持つ Y 系超電導単結晶の J_c 値

(5) 四端子法による不可逆磁場の評価

四端子法により、低温強磁場領域を含む広い条件下における電流輸送特性について信頼性の高いデータを得るとともに、各種材料特性の比較を行うことにより、本プロジェクトで開発した GdBCO 線材は他の材料を凌駕する高不可逆磁場特性を有することを示した。図 2.4.2-94 に人工ピン止め点は導入せずに化学量論比組成で得られた PLD-GdBCO 線材の特性、及び前プロジェクトで得られた PLD-YBCO 線材の測定結果を示す。また、参考のために他の材料の特性を併せて示した²¹⁻²³⁾。また、図 2.4.2-95 にはマグネット応用等で重要となる強磁場中での磁場印加角度依存性の特性を示す^{24,25)}。低温度領域においては、実用的な強磁場中において、フラットな依存性を示すことが分かった。

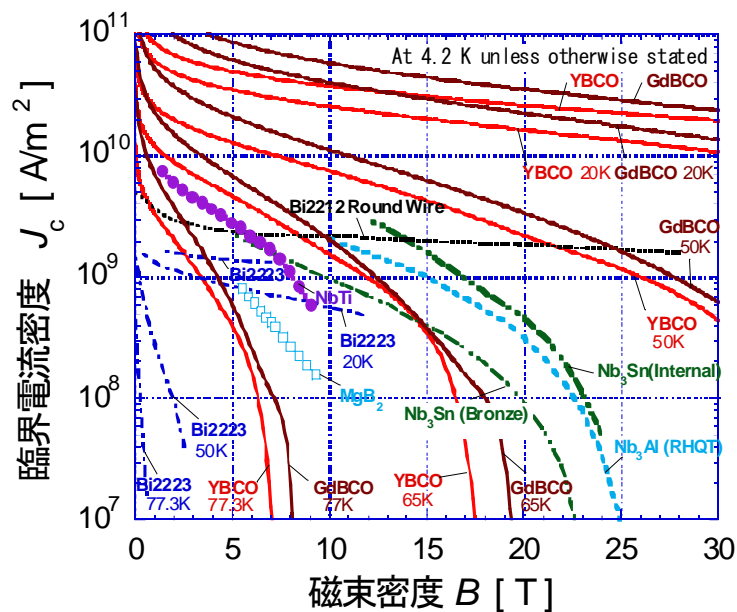


図 2.4.2-94 各種材料の高磁場特性の比較¹⁵⁻¹⁷⁾

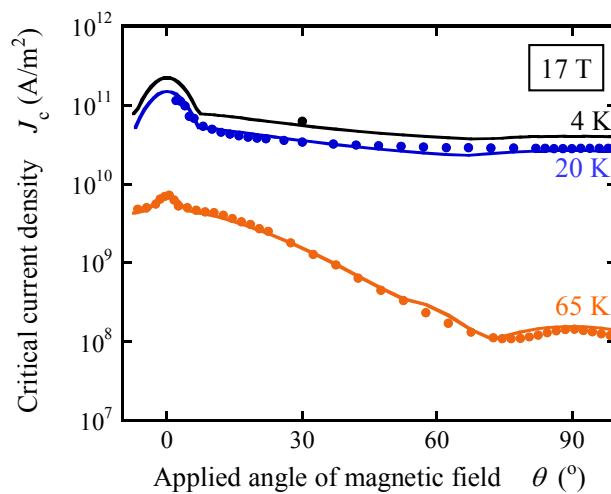


図 2.4.2-95 強磁場中での J_c 値の角度依存性^{18, 19)}

(6) パルス強磁場を用いた高不可逆磁場材料の評価

本プロジェクトにおける、ロスアラモス米国立研究所(以下 LANL)と ISTEK の共同研究は 2008 年 6 月から開始され、LANL の 65 T マグネットを用いて ISTEK において作製された試料の磁場中特性を高磁場まで実際に測定し、Y 系超電導線材の磁場中特性の理解とさらなる高不可逆磁場材料化への指針を得ることを目標とした。ISTEC から LANL への試料提供と研究者の派遣、情報交換等を行い、以下の成果を得た。

図 2.4.2-96 に 65 T のパルスマグネットと DC マグネットを用いて測定した。各温度における MOD-YBCO 線材の電気抵抗の磁場依存性を示す。各マグネットによって電気抵抗挙動に差異は観られず、良く一致したことから、パルスマグネットを用いた本測定方法は DC マグネットを用いた場合と同等に扱うことが可能であることが明らかになった。そこで、パルスマグネットを用いて MOD 法により作製された通常の YBCO 線材、YGdBCO に BZO を微細分散させた高磁場特性線材の 2 種類の試料の不可逆磁場(H_{irr})を測定した。その結果、図 2.4.2-97 に示すように、どちらの試料も、全温度領域において $H//c$ の場合に最も低く、 $H//ab$ の場合に最も高い不可逆磁場を示した^{26,27}。BZO を導入した試料は $H//ab$ では通常の YBCO 線材とほぼ同等の特性であったが、 $H//c$ と 45 度の条件では不可逆磁場の向上を示した^{26,27}。これは、20 nm 程度の BZO 粒子が微細分散した試料においては、BZO ナノ粒子が磁束のピン止め点として高磁場まで有効に作用していることを示唆している。この結果から、さらなる不可逆磁場特性の改善には、BZO 粒子のようなナノ粒子のサイズ・分布を最適化することが有効であることが分かった。

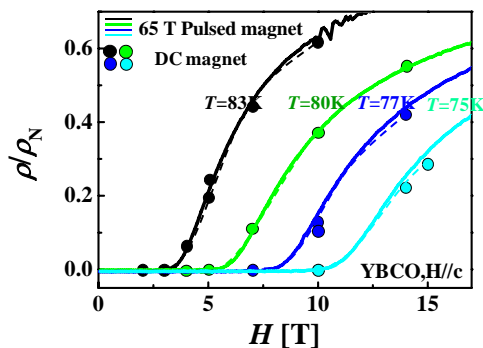


図 2.4.2-96 MOD-YBCO 線材の電気抵抗の磁場依存性

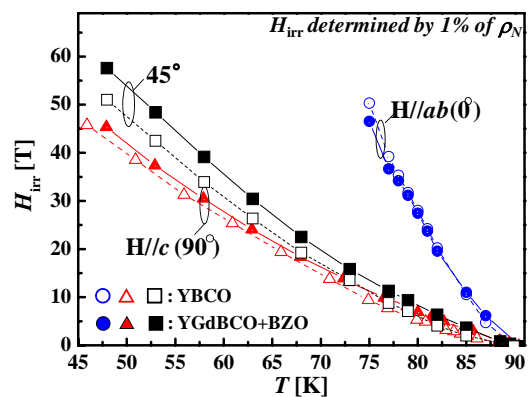


図 2.4.2-97 異なる磁場印加角度及び温度における MOD 線材の不可逆磁場特性

(7) 鉄系超電導体の合成

2008年2月に発見された鉄ニクタイト系高温超電導体²⁸⁾は銅系に次いで高い臨界温度値($T_c \sim 55$ K)を有することから、発見当初から、その物理に対する興味のみならず応用材料としても注目を集めている。

銅系酸化物高温超電導体はその発見以来25年以上を経過し、Y系超電導体を中心に本プロジェクトを含め世界各国でその応用研究が盛んに行われている。しかしその物理的本質については、依然として完全には解明されておらず、新しく発見された鉄ニクタイト系超電導体は、Y系超電導体を含む銅系酸化物高温超電導体と、高い臨界温度を持つこと以外にも、ともに層状構造を持つこと、反強磁性相と隣接していること、非超電導相にキャリアを導入することによって超電導性が表れること等、偶然とは思われない共通性を有している。したがってこれら二つの系を詳細に比較することにより、高温超電導体の本質が解明できるのではないかという期待が持たれている。一方で、銅系酸化物高温超電導体の母相が絶縁体であるのに対し鉄系超電導体の母相が金属的であること、銅系酸化物高温超電導体の超電導対称性がd波であるのに対し鉄系超電導体においてはs波であるらしいこと等、いくつかの興味ある相違点もある。それらの相違点を調べることにより、Y系超電導体に残されているいくつかの課題を克服するためのヒントが得られる可能性がある。

そこで本研究では鉄系超電導体の応用的観点から見たポテンシャルの把握のため、上部臨界磁場及び臨界電流特性の評価を行った。

鉄系超電導体は $REFeAsO$ ($RE = La, Ce, Pr, Nd$ 等)(通称 Fe1111)、 BFe_2As_2 ($B = Ba, Sr$)(通称 Fe122)、 $AFeAs$ ($A = Li, Na$)(通称 Fe111)、 α -FeSe の4種類に分類され、Fe1111において最も高い T_c 値、 $T_c \sim 55$ Kが報告されており²⁹⁾、Fe122においても、比較的高い38 Kが得られている³⁰⁾。経済性の観点からいえば、液体窒素冷却が可能な $T_c >> 65$ Kが望ましいが、冷凍機冷却が許容できる超電導磁石等に

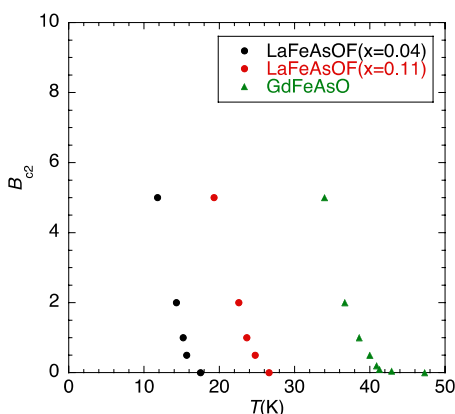


図 2.4.2-98 $LaFeAsO_{1-x}F_x$ ($x = 0.04, 0.11$) と $GdFeAsO_{1-x}$ 単結晶の B_{c2} の温度依存性。

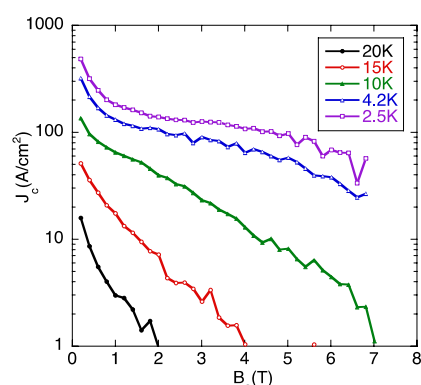


図 2.4.2-99 $LaFeAsO_{1-x}F_x$ ($x = 0.11$) の $J_c - B$ 特性

用いる分には十分高い T_c 値であるといえる。

そこで、まず、 REFeAsO (RE: Gd, La) の多結晶試料の合成を行い、 B_{c2} の測定を行った。図 2.4.2-98 に $\text{LaFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$ と GdFeAsO_{1-x} 多結晶体の B_{c2} をまとめる。 $\text{LaFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$ ($x = 0.04$ 、 0.11) は封管法、 GdFeAsO_{1-x} は高圧合成法 (5 GPa) によって合成を行った。いずれの試料も下凸のカーブを示し、 $-dB_{c2}/dT \sim 1.2 \text{ T/K}$ と大きな値を示し、非常に大きな $B_{c2}(0)$ を持つことを示唆する。また図 2.4.2-99 に $\text{LaFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$ ($x = 0.11$) の J_c - B 曲線を示すが、 J_c 値が大変小さく、粒間結合が非常に弱いことを表している。また、 GdFeAsO_{1-x} はほぼ可逆な磁化曲線を示し、 $J_c \sim 0$ であった。 GdFeAsO_{1-x} においては、Fe-As 系の析出相が高い分率で存在しており、それらが粒界結合を阻害しているためと考えられる。

一方、図 2.4.2-100 に $\text{Ba}(\text{Fe}, \text{Co})_2\text{As}_2$ 単結晶の J_c - B 特性を示すが、比較的高い J_c 値を示している。

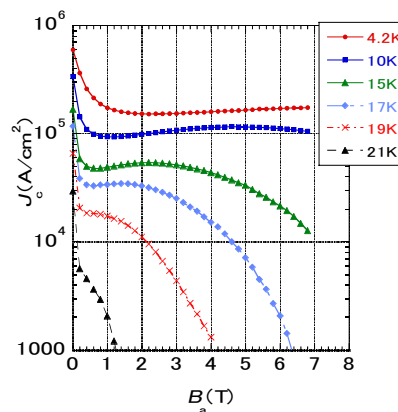


図 2.4.2-100 $\text{Ba}(\text{Fe}, \text{Co})_2\text{As}_2$ 単結晶の J_c - B 特性。

したがって、線材化のためには、今後、 FeAs 等の不純物相の粒界への析出を抑える合成ルートの開発による粒間 J_c 値の向上が必要であり、その技術的ブレークスルー無しには、現状の鉄系超電導材料においては低温での不可逆磁場は高いものの、その T_c 値や線材作製に要するコストの面から Y 系超電導材料を凌ぐ線材用材料にはなり得ないと考えられる。一方、鉄系超電導体群では多くの元素の組み合わせが可能と考えられ、高 T_c 値を有する新物質系において応用に適した材料が発見される可能性がある。これを含めた新超電導材料の探索研究は、平成 21 年度末からスタートした内閣府の FIRST プログラムで行われている。

(8) 鉄系超電導体の粒界特性

2008年2月に東工大・細野グループにより発見された新しい高温超電導体群である鉄系超電導材料は、現状では T_c 値が最高でも 55 K 程度であるが、低温での上部臨界磁場が 100 T を超えるとともに、異方性が小さい等、線材应用到に好ましい性質を有している。結晶粒界の性質も線材应用到にとって非常に重要である。Y 系超電導材料では、隣接する結晶粒の傾角が数度以上で J_c 値の急激な低下が起こるため、高い結晶粒面内配向度を有する中間層上に薄膜エピタキシャル成長により超電導層を形成することが必須であり、高コストとなるとともに線材の形状が制約される。逆に、結晶粒間の配向を厳密に取る必要がない高温超電導材料であれば、線材应用到にとって非常に有利となる。したがって、Y 系超電導材料と鉄系超電導材料における粒界特性を比較検討することは、Y 系超電導材料の高度化のための方策を考える上からも重要である。

鉄系超電導材料の結晶粒界の性質を調べるため、(La,Sr)(Al,Ta)O₃(LSAT) バイクリスタル基板上(傾角 30 度)に Nd:YAG レーザを用いた PLD 法により、厚さ約 250 nm の Ba(Fe,Co)₂As₂ エピタキシャル薄膜を作製した。薄膜は 22.6 K の $T_{c, onset}$ と 1.1 K の非常に狭い転移幅を示し、また 3 K での粒内 J_c 値は 2-10 MA/cm² を有し、結晶粒の性質を調べるのに十分な品質を持っていると考えられる。³¹⁾ バイクリスタル基板の結晶粒界を横断する方向に幅 10 μm、長さ 300 μm のマイクロブリッジをイオンミリング法で作製した。

図 2.4.2-101 には、10 K における電流-電圧(I - V)特性を示すが、典型的な RSJ(Resistively Shunted Junction)特性となっており、また 0.9 mT という弱磁場の印加で超電導電流は 95 %以上減少することから、結晶粒界は典型的なジョセフソン接合になっていることが分かる。図 2.4.2-102 には、このマイクロブリッジの J_c 及び $I_c R_N$ 積(R_N は接合抵抗)の温度依存性を示す。 J_c 値は図中に示した粒内 J_c 値の約 1/20 であるが、これは同じ傾角のバイクリスタル基板上の Y 系超電導薄膜で報告されている値 1/500³²⁾ に比べ減少率としては小さい。また、接合抵抗は金属的

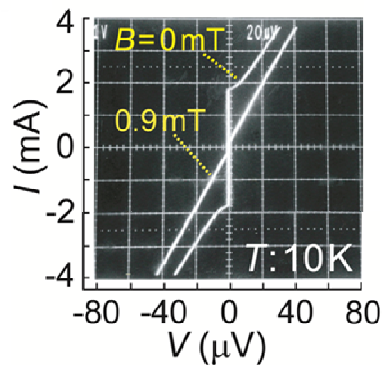


図 2.4.2-101 傾角 30 度のバイクリスタル基板上に形成した Ba(Fe,Co)₂As₂ 薄膜マイクロブリッジの 10 K における I - V 特性

な温度変化を示すとともに、規格化した抵抗 AR_N (A は接合面積) は Y 系バイクリスタル接合に比べ 1 桁以上小さい。Y 系超電導材料は、 d 波対称性を持つとともに母物質が反強磁性絶縁体であることから、結晶粒界は超電導-絶縁体-超電導(SIS)接合的な特性を示す。

一方、鉄系超電導材料は拡張 s 波の対称性を持ち、母物質が金属あるいは半金属であることから、超電導-常電導-超電導(SNS)的な振る舞いを示すものと考えられる。粒界が、より低傾角での特性を注意深く調べる必要はあるが、鉄系超電導材料においても、粒界弱結合の問題は存在し、線材応用のためには結晶をある程度揃えて作る必要があることが分かった。したがって、現状の鉄系超電導材料は、低温での不可逆磁場は高いものの、その T_c 値や線材作製に要するコストの面から Y 系超電導材料を凌ぐ線材用材料にはなり得ないと考えられる。一方、鉄系超電導体群には多くの元素の組み合わせが可能と考えられる。これを含めた新超電導材料の探索研究に加えて線材化研究に関しては、今後は平成 21 年度末からスタートした内閣府の FIRST プログラムで行われている。

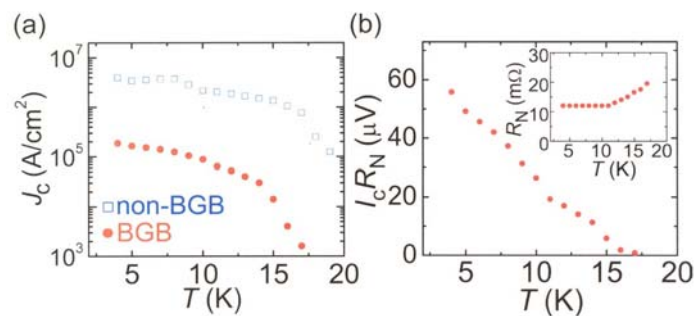


図 2.4.2-102 鉄系超電導体バイクリスタル接合(傾角 30 度)の J_c 、 $I_c R_N$ 、 R_N の温度依存性

引用論文リスト

- (1) H. Tobita, K. Notoh, K. Higashikawa, M. Inoue, T. Kiss, T. Kato, T. Hirayama, M. Yoshizumi, T. Izumi, Y. Shiohara, "Fabrication of BaHfO₃ doped Gd₁Ba₂Cu₃O_{7-δ} coated conductors with the high I_c of 85 A=cm-w under 3 T at liquid nitrogen temperature (77 K)" Supercond. Sci. Technol., Vol.25 (2012) 062002.
- (2) D. Yokoe, T. Kato, H. Tobita, A. Ibi, M. Yoshizumi, T. Izumi, T. Hirayama, Y. Shiohara "Transmission electron microscopy study of GdBa₂Cu₃O_{7-x} containing nano-sized BaMO₃ (M: Hf, Zr, Sn) rods fabricated by pulsed laser deposition" J. Mater. Sci., Vol.48 Issue 1 (2013)125-131.
- (3) T. Kato, H. Sasaki, Y. Gotoh, Y. Sasaki, T. Hirayama, K. Takahashi, M. Konishi, H. Kobayashi, A. Ibi, T. Muroga, S. Miyata, T. Watanabe, Y. Yamada, T. Izumi, Y. Shiohara, "Nanostructural characterization of Y123 and Gd123 with BaZrO₃ rods fabricated by pulsed-laser deposition", Phys. C, 445-448 , (2006) 628-632.
- (4) T. Kato, M. Miura, M. Yoshizumi, Y. Yamada, T. Izumi, T. Hirayama and Y. Shiohara, "Transmission Electron Microscopy Study of A Y_{1-x}Sm_xBa₂Cu₃O_y Coated Conductor Containing BaZrO₃ Particles", J. Electro. Microscopy (2010) in press.
- (5) T. Kato, R. Yoshida, Y. Takahashi, M. Yoshizumi, T. Izumi, T. Hirayama, Y. Shiohara, "Transmission Electron Microscopy Study of Y_xGd_{1-x}Ba₂Cu₃O_y Layers with BaZrO₃ Particles Fabricated by Metal Organic Deposition"AMTC Letter, Vol.3 (2012) 248-249
- (6) A. Ibi, S. Miyata, R. Kuriki, H. Kobayashi, H. Fukushima, A. Kinoshita, T. Kato, T. Hirayama, Y. Yamada, Y. Shiohara, "Development of long REBCO coated conductors with artificial pinning centers by using MPMT-PLD method", Physica C Vol. 468 (2008) 1514-1517.
- (7) 金子賢治、馬場則男、陣内浩司、 "電子線トモグラフィ法その1：原理"、顕微鏡 第45巻 (2010) 37-41.
- (8) 金子賢治、馬場則男、陣内浩司、 "電子線トモグラフィ法その2：課題と応用例"、顕微鏡 第45巻 (2010) 109-113
- (9) R. Fuger, M. Inoue, K. Higashikawa, T. Kiss, M. Namba, S. Awaji, K. Watanabe, A. Ibi, H. Fukushima, Y. Yamada, T. Izumi, "Evaluation of current transport properties of Gd₁Ba₂Cu₃O_{7-δ} coated conductors over a wide range of temperature and external magnetic fields", European Superconductivity News Forum (ESNF), Issue 11 (2010) ST145.

- (10) M. Inoue, R. Fuger, K. Higashikawa, T. Kiss, M. Namba, S. Awaji, K. Watanabe, A. Ibi, S. Miyata, Y. Yamada, T. Izumi, "Current transport property in GdBCO coated conductor with artificial pinning centers in a wide range of temperature, magnetic field up to 27 T, and field angle", *Physica C* in press.
- (11) M. Inoue, T. Kiss, K. Motoyama, S. Awaji, K. Watanabe, M. Yoshizumi, Y. Yamada, T. Izumi, Y. Shiohara, "Critical current property in YBCO coated conductor fabricated by improved TFA-MOD process", *Physica C* Vol. 469, (2009) 1443-1445.
- (12) M. Miura, T. Kato, M. Yoshizumi, Y. Yamada, T. Izumi, T. Hirayama, Y. Shiohara, "Magnetic field dependence of critical current and microstructure in TFA-MOD $Y_{1-x}Sm_xBa_2Cu_3O_y$ with nanoparticles for coated conductors", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* Vol. 19 (2009) 3275-3278.
- (13) K. Yamafuji, T. Kiss, *Physica C*, **290** (1997) 9-22.
- (14) 淡路ら, "CVD-YBCO コート線材に対する J_c の低温異方性", 2009 年度秋期 第 70 回応用物理学関係連合講演会 9p-R-15.
- (15) S. Awaji *et al.*, *J. Appl. Phys.*, 111(2012) 013914.
- (16) Goldacker *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 17(2007)3398-3401.
- (17) 筑本 知子, 中島 一雄, 宇敷 洋, 寺井 隆幸, "Y 系テープ線材への高エネルギー重イオン照射によるピン止め中心導入と臨界電流密度特性", *低温工学* vol.44 (2009) p523.
- (18) R.A. Doyle, W.S. Seow, J.D. Johnson, A.M. Campbell, P. Berghuis, R.E. Somekh, J.E. Evetts, G. Wirth, J. Wiesner, "Effect of columnar defects on the elastic behavior of vortices in $YBa_2Cu_3O_{7-d}$ thin films", *Phys. Rev. B.* **51** (1995) 12763-12770.
- (19) L.M. Paulius J.A. Fendrich, W.-K. Kwok, A.E. Koshelev, V. M. Vinokur, G.W. Crabtree, B.G. Glagola, "Effect of 1-GeV uranium ion irradiation on vortex pinning in single crystals of hte high-temperature superconductor $YBa_2Cu_3O_{7-d}$ ", *Phys. Rev. B.* **56** (1997) 913-924.
- (20) H. Uchiyama, N. Matsukura, and N. Chikumoto, "Carbonate effects in single-crystalline $YBa_2Cu_3O_{7-d}$ ", *Phys. Rev. B* (2010) 81 060511(R).
- (21) 木須隆暢, NEDO 「技術戦略マップ 2009」超電導技術分野 参考資料 2 <http://www.nedo.go.jp/roadmap/2009/ene2.pdf>.
- (22) M. Inoue, T. Kiss, D. Mitsui, T. Nakamura, T. Fujiwara, S. Awaji, K. Watanabe, A. Ibi, S. Miyata, Y. Yamada, Y. Shiohara, "Current transport properties of 200 A-200 m-class IBAD YBCO coated conductor over wide range of magnetic field and temperature", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* , Vol. 17 (2007) 3207-3210.

- (23) R. Fuger, M. Inoue, K. Higashikawa, T. Kiss, M. Namba, S. Awaji, K. Watanabe, A. Ibi, H. Fukushima, Y. Yamada, T. Izumi, “Evaluation of current transport properties of $\text{Gd}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ coated conductors over a wide range of temperature and external magnetic fields”, European Superconductivity News Forum (ESNF), Issue 11 (2010) ST145.
- (24) K. Higashikawa, T. Kiss, M. Inoue, K. Imamura, T. Nakamura, S. Awaji, K. Watanabe, H. Fukushima, Y. Yamada, Y. Shiohara, “Coupled Analysis Method for High-Field Magnet Coil Using Coated Conductor Based on J-E Characteristics as a Function of Temperature, Magnetic Field Vector and Mechanical Strain”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 19, no. 3 (2009) pp. 1621-1625.
- (25) K. Higashikawa, T. Kiss, M. Inoue, S. Awaji, K. Watanabe, H. Fukushima, Y. Yamada, Y. Shiohara, “Significant Reduction in Volume, Stored Energy and Magnetization Loss of High-Field Magnet Coil Based on the Improvement of Critical Current Characteristics in GdBCO Coated Conductor”, Physica C, vol. 469 (2009) pp. 1776-1780.
- (26) M. Miura, S. A. Baily, B. Maiorov, L. Civale, J. O. Willis, K. Marken, T. Izumi, K. Tanabe and Y. Shiohara, “Vortex liquid-glass transition up to 60 T in nanoengineered coated conductors grown by metal organic deposition”, Applied Physics Letter **96** (2010) 072506.
- (27) M. Miura et al., “Vortex Liquid-glass Transition Up to 60 T in Nano-engineered Coated Conductors”, Magnet Science & Technology (National High Magnetic Field Laboratory 2009 Annual reports, USA), chapter **2**, P35-36.
- (28) Y. Kamihara, T. Watanabe, M. Hirano, and H. Hosono, “Iron-Based Layered Superconductor $\text{La}[\text{O}_{1-x}\text{F}_x]\text{FeAs}$ ($x = 0.05-0.12$) with $T_c = 26$ K”, J. Am. Chem. Soc. **130**, 3296 (2008).
- (29) Z. A. Ren, et al., “Superconductivity at 55 K in Iron-Based F-Doped Layered Quaternary Compound $\text{Sm}[\text{O}_{1-x}\text{F}_x]\text{FeAs}$ ”, Chin. Phys. Lett. **25** (2008) 2215.
- (30) M. Rotter, M. Tegel, D. Johrendt, “Superconductivity at 38 K in the Iron Arsenide $(\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x)\text{Fe}_2\text{As}_2$ ”, Phys. Rev. Lett. **101** (2008) 107006.
- (31) T. Katase, Y. Ishimaru, A. Tsukamoto, H. Hiramatsu, T. Kamiya, K. Tanabe, and H. Hosono, “Josephson junction in cobalt-doped BaFe_2As_2 epitaxial thin films on $(\text{La},\text{Sr})(\text{Al},\text{Ta})\text{O}_3$ bicrystal substrates”, Appl. Phys. Lett. **96**, 142507 (2010).
- (32) H. Hilgenkamp and J. Mannhart, “Grain boundaries in high- T_c superconductors”, Rev. Mod. Phys. **74**, 485 (2002).

2.4.3 低交流損失線材作製技術開発 (ISTEC、住友電気工業、フジクラ、九州大学、九州工業大学、京都大学、鹿児島大学、産業技術総合研究所、JFCC)

2.4.3-1 均一線材作製技術開発

(1) IBAD 基板の均一性向上技術開発

本項では、高製造速度が実現可能な IBAD-MgO 中間層付き基板の均一性向上技術開発における成果をまとめる。本プロジェクト開始時点では、40 m 級の長尺 IBAD-MgO 基板の作製に成功したところであり、高速化・高配向化・長尺化の開発が急ピッチで進められている状況であった。中間層の均一性については、長手方向、幅方向、ミクロ、マクロともに情報が不足しており、本テーマでは課題の把握から始めてその解決までを、他テーマの開発進展と並行して行った。目標としては、本プロジェクトの最終目標を達成できる中間層付き基板の開発であり、超電導層の成膜、加工の結果と併せて目標を達成するものである。

まず、幅方向については、本プロジェクトで装置導入した Reel to Reel 式高速 XRD 評価装置を用いて PLD-CeO₂/スパッタ-LaMnO₃(LMO)/IBAD-MgO/スパッタ-GZO/ハステロイ™ 構造の中間層付き基板の結晶粒面内配向度の幅方向分布を測定したところ、図 2.4.3-1 に示すように、線材幅 10 mm に対して、両端の X 線がテープ外にかかってしまう測定不良領域を除いて CeO₂ 厚に依らずほぼ均一な結晶粒面内配向性を示した。これにより、面内配向不良部は多くても両端 100 μm 以下の領域であることが分かった。TEM 観察によって詳細を確認したところ、研磨・テープ搬送走行により端部が丸くなるダレが数十 μm 程度あり、中間層は結晶粒の面内配向を保っているものの、c 軸が基板と垂直方向を維持しているため、ダレに伴い c 軸が傾いていることが分かった。この領域は結晶粒の配向は良いものの、c 軸が傾いた状態であるため超電導電流が欠陥部を迂回できず、 I_c 特性向上には寄与し難い領域になっていると理解される。プロジェクト目標の細線化は最終目標でめざす線材幅が約 500 μm であるため、これによる影響は少なく、幅方向の結晶粒配向性に関しては問題ないレベルの成果が得られた。

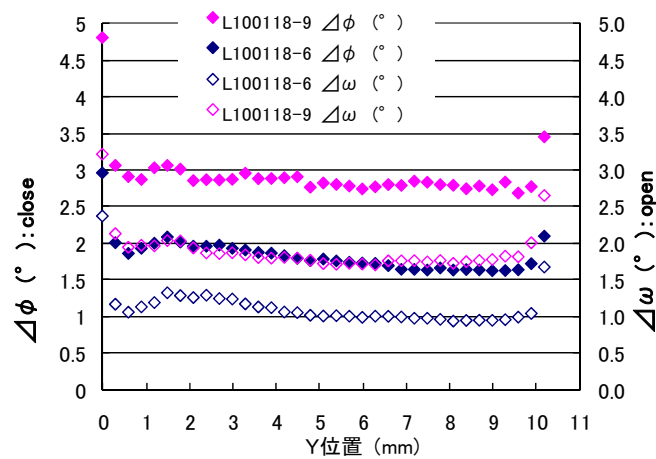


図 2.4.3-1 PLD-CeO₂/Sputter-LMO/IBAD-MgO/Sputter-GZO/ハステロイ™ 中間層付き基板の結晶粒面内配向度の幅方向分布

一方、長手方向については、線材作製条件によりばらつきがあり、長時間の安定性に問題がある条件では、後端で結晶粒配向性が劣化することがあった。各プロセスで求めた長時間安定な条件を用いて成膜することにより、200 m 線材の前端で 3.17 度、後端で 3.07 度とほぼ同等の結果を得た。この線材の長手方向の位置による面内配向依存性を同じく Reel to Reel 式高速 XRD 評価装置を用いて調べた所、図 2.4.3-2 に示すように 200 m 長線材においても大きなばらつきのない線材を得ることができた。

中間層付き基板の均一性が及ぼす超電導特性への影響について考えると、特に細線化時の問題としては、様々な原因で生じる欠陥の存在が挙げられる。そこで、金属基板の圧延痕や傷、各工程で発生する汚れや傷のサイズ、頻度、超電導特性への影響を

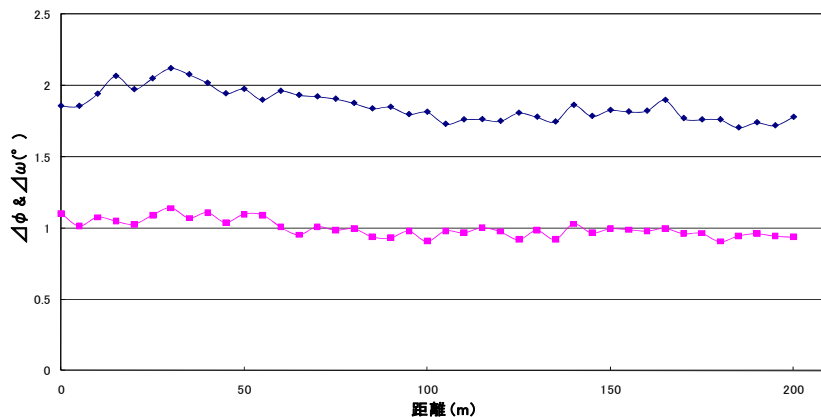


図 2.4.3-2 PLD-CeO₂/スパッタ-LMO/IBAD-MgO/スパッタ-GZO/ハステロイ™ 構造の 200 m 長 中間層付き基板の結晶粒の面内配向度の長尺位置依存性

把握するため、100 m 長線材の作製にあたり、工程毎に走査型レーザ観察装置を用いてレーザ反射率の変化を測定することで欠陥を検出、これを 100 m 全長において実施し、超電導層成膜後に SQUID 検査装置、連続ホール素子法等を用いて測定した超電導特性の分布と比較した。

検出された金属基板表面の欠陥は各層の成膜後にも引き継がれ、成膜される毎にゴミ等の付着物を巻き込むこと等から、数が増加し、特に CeO_2 の成膜時に顕著に増加した。この欠陥の分布と SQUID、連続ホール素子法の結果とを対応させると、 CeO_2 表面の欠陥数が多い部分で SQUID により剥離が検出され、剥離領域が広い場合に I_c 特性の劣化まで影響が出ていることがわかった。この剥離は 10 mm-w 時点では I_c 特性その他に大きな影響を及ぼさないが、細線化加工時に大きな問題となる。加工後にこの剥離部分を起点として線材が剥離し、拡張する要因となる。 CeO_2 成膜前後で欠陥数が大きく増加することから、欠陥を抑制するため、10 m 線材を用いて様々な条件で成膜を行い、成膜前後の欠陥分布を比較した。一例として図 2.4.3-3 に PLD- CeO_2 成膜時のレーザパルス周波数による CeO_2 表面の欠陥数変化を示す。図から、周波数の増加に伴い欠陥数が増加すること、特に通常条件からの増加により急激に増加していることが分かった。周波数増加による高速成膜は均一性の低下を引き起こすため、高速化については別の手立てを講じなければならない。ターゲット上のレーザエネルギー密度と欠陥数の関係については、エネルギー密度増加によって顕著な欠陥数の増加は見られなかった。コスト削減をめざした高速化には、エネルギー密度の増加が有効であることが分かった。

Y 系超電導線材は多層構造を有しているため、その成膜プロセスは多数の工程を経て、それに伴う付着物発生が欠陥となる。そこで、 CeO_2 成膜前後で付着物を拭き取ることにより欠陥発生を抑制する手法を試みた。 LaMnO_3 (LMO)成膜直後には 10 m 長の基板に 255 個の欠陥が検出されたが、アセトンを用いて洗浄することによりその

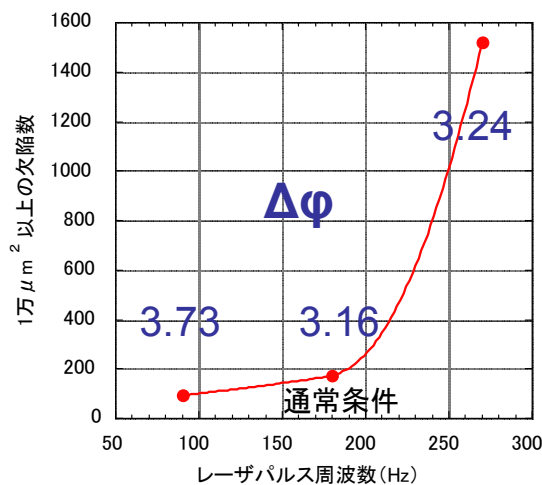


図 2.4.3-3 PLD- CeO_2 成膜時のレーザパルス周波数と欠陥数との関係

数が 68 個まで減少した。この欠陥数は金属基板表面の欠陥数とほぼ一致しており、CeO₂成膜までの段階では欠陥数を増加させないことが明らかになった。

洗浄による CeO₂成膜後の欠陥数を比較したところ、洗浄無しのものでは 171 個、洗浄した場合には 105 個と顕著な改善効果が見られた。また、この時 CeO₂の結晶粒面内配向も 3.73 度(洗浄無し)から 3.04 度(洗浄有り)に向上した。一方、CeO₂成膜後に洗浄した場合は、欠陥数、結晶粒面内配向度ともに大きな変化は見られなかった。CeO₂成膜までの欠陥は主に付着物のような突起であるのに対し、CeO₂成膜後の欠陥は凹みであるため、洗浄の影響が小さかったものと理解される。LMO までの成膜は非常に薄いために、付着物を固定する効果が殆ど無いため、拭き取りの効果が大きい。CeO₂は比較的厚いために、付着物の上から成膜された際にテープ搬送時の曲げ伸ばしによって応力集中が発生しやすく、そのために成膜中に剥がれ落ちて凹んだ欠陥になると推測される。一方で、CeO₂成膜時に付着する異物は、CeO₂の配向度等に影響を与えないが、超電導層の結晶成長には悪影響を与えるため、清浄な表面をできるだけ広い場所で得るには、CeO₂成膜後の洗浄も均一性の向上に有効である。

上記の評価結果と、次項以降に記述する超電導層の成膜結果、加工の結果から、中間評価時点での中間層構造においては中間層付き基板の均一性は十分確保できたと判断した。しかしながら、高均一線材の最終目標を達成する線材構造は、コスト目標も同時に満足するものであるべきというコスト面の要求から、並行して開発が進められていた、改良型線材構造を有する低コスト線材の均一性についても平成 23 年度に同様に評価した。低コスト線材への中間層の構造変化は、研磨コストを抑えるために高速で研磨するとともに、ベッド層として Y₂O₃層を IBAD-MgO 層の直下に挿入することで IBAD-MgO 層の結晶粒を高配向化し、PLD-CeO₂層の薄肉化を実現したことである(2.4.5-1(1)項参照)。均一性向上を同時に満足するため、積層数の増加と粗い研磨に対応して、要所で線材の洗浄を行いながら成膜した。図 2.4.3-4 に、改良型中間層構造を有する 200 m 長基板の面内及び面外配向の長手方向分布(a)と幅方向分布(b)を示す。長手方向分布については、図 2.4.3-2 と比較すると、自己配向機構(アシストビーム等の照射なく、単に成膜・結晶成長により膜厚増加に伴い結晶粒が配向する機構)により結晶粒配向度を改善する CeO₂層の厚みが約 500 nm から 250 nm 程度に半減しているにも拘わらず、同程度以上の結晶粒配向度を 200 m 全長に亘って保持している。幅方向分布についても同様に、結晶粒配向度の絶対値、ばらつきともに、Y₂O₃無し構造以上の状態を実現した。また、この線材構造変化に際しては、線材のフィラメント化加工のため中間層が担う絶縁性能も十分であることを確認した。

CeO₂成膜時には多くの付着物も発生し、基板に付着するため、超電導層成膜前にも洗浄することにより均一性向上が期待できる。CeO₂成膜後の洗浄効果調査のため、超電導層を成膜して I_c特性の分布を比較した。2 m 長の洗浄有りと洗浄無しの同ロット中間層(CeO₂)付き基板に、PLD 法により超電導層を成膜して TapeStar™、通電

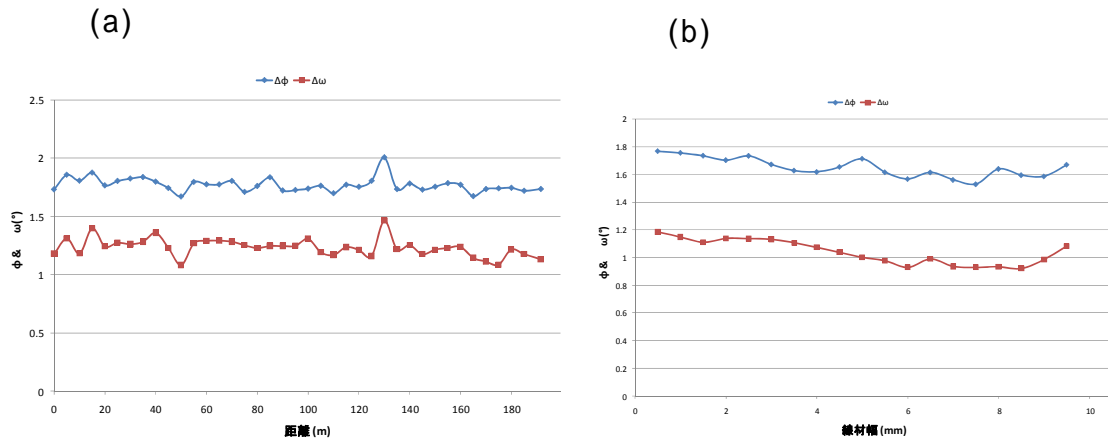


図 2.4.3-4 低コスト中間層構造の 200m 長線材の面内 () 及び面外 () 配向の長手方向分布(a)と幅方向分布(b)

により I_c 値分布を評価した。図 2.4.3-5(a)に洗浄無し基板上の I_c 値分布 (TapeStar™、通電) を、図 2.4.3-5(b)に洗浄有り基板上の I_c 値分布 (TapeStar™、通電) をそれぞれ示す。洗浄により、 I_c 値分布のムラが小さくなり、均一性が向上していることが分かる。CeO₂ 成膜後の洗浄も効果的であることが明らかになった。

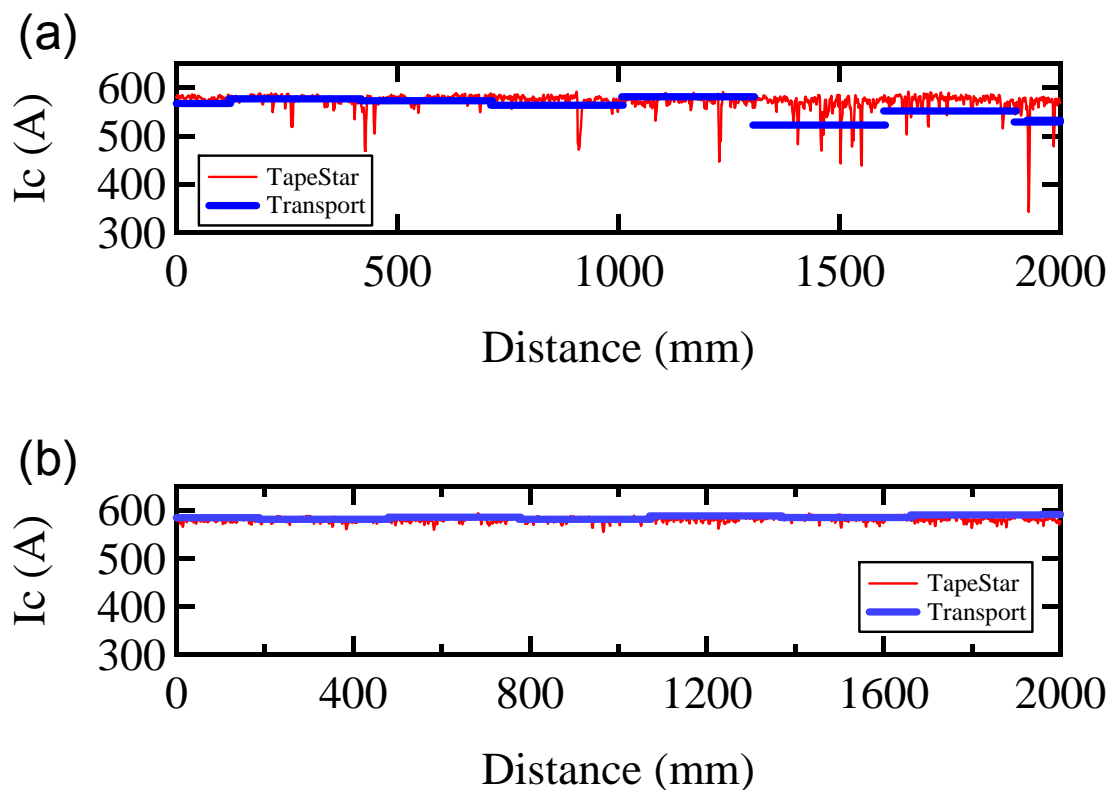


図 2.4.3-5 PLD-CeO₂ 成膜後の洗浄無し基板(a)、洗浄有り基板(b)上に成膜された PLD-GdBCO の I_c 値分布 (TapeStar™、通電により測定)

(2) IBAD 基板の均一性向上技術開発

IBAD 基板上に形成した MOD-YBCO 超電導層とその下地である中間層のそれぞれの結晶粒配向機構や、それらの配向性が超電導特性に与える影響について知見を得ることを目的とした。具体的には、EBSP(Electron Back Scatter Diffraction Pattern)法を用いて結晶粒配向微細組織観察を行い、これらの配向機構について試料表面における中央部と端部を比較した。また、面内配向度の異なる試料を用いて試料断面の配向組織をそれぞれ観察し評価を行った。

図 2.4.3-6 に示すように、MOD-YBCO 薄膜は特に中央部表面に凹凸が見られ、中央部の粒径の方がやや大きくなっていた。一方、下地の CeO_2 薄膜は YBCO 薄膜のような凹凸は見られず、中央部と端部の表面組織の差異はなかった。 CeO_2 薄膜は PLD 法によって成膜されたものである。これらの違いをより詳しく比較するため、EBSP 法による微細組織観察を行った。図 2.4.3-7 に中央部、端部における MOD-YBCO 薄膜の粒界傾角マップを示す。赤い色が強いほど YBCO 結晶粒が(001)配向をしていることを示している。また黒い線は 15 度以上の傾角をもった結晶粒界を表しており、中央部はそのような粒界が少なく、端部において顕著であった。このことから、中央部に比べて端部において局所的な J_c 値の低下が起こる可能性があることが分かった。このような組織の違いを探るため、さらに下地である IBAD 基板上的 CeO_2 薄膜についても EBSP による観察を行った。図 2.4.3-8 は中央部と端部に相当する CeO_2 薄膜の粒界傾角マップである。図からも分かるように PLD 法によって形成された下地の CeO_2 層は極めて均質であることがわかった。このことから、端部と中央部の YBCO 膜の差異は、超電導層成長中に生じたものであると考えた。

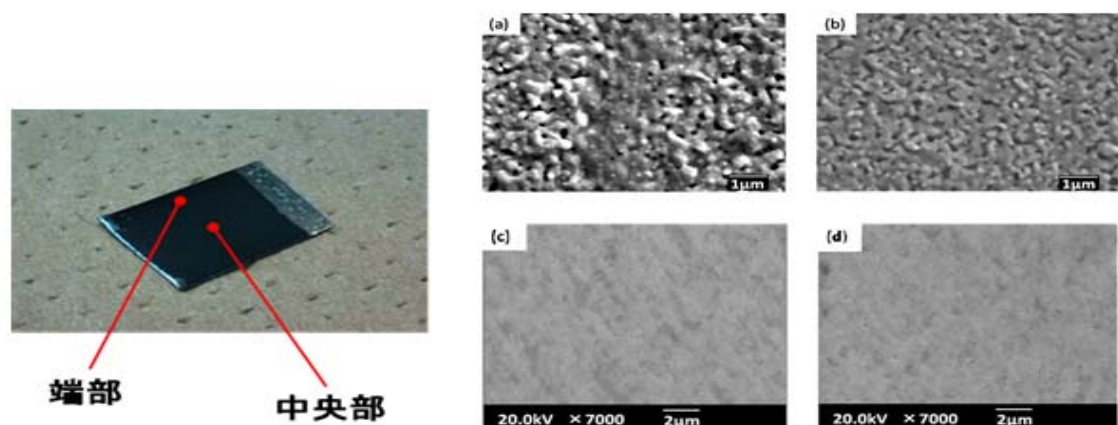


図 2.4.3-6 IBAD 基板上的 MOD-YBCO 薄膜の外観写真と SEM 写真
(a)中央部の MOD-YBCO 薄膜表面 (b) 端部の MOD-YBCO 薄膜表面
(c)下地である中央部の CeO_2 薄膜表面 (d)下地である端部の CeO_2 薄膜表面

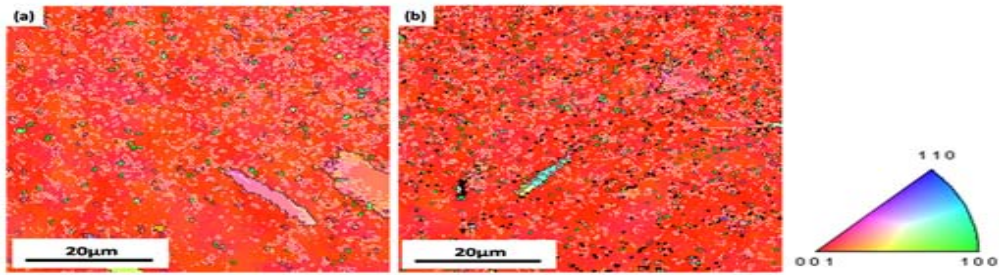


図 2.4.3-7 EBSP による MOD-YBCO 薄膜の粒界傾角マップ。赤い色は結晶粒が (001) 配向していることを示す。また黒い線は 15 度以上の傾角の粒界を表す。(a) 中央部、(b) 端部。

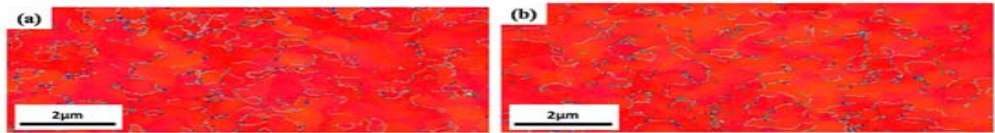


図 2.4.3-8 EBSP による IBAD 基板上的の CeO₂ 薄膜の粒界傾角マップ。
(a) 中央部、(b) 端部

(3) PLD 線材の均一性向上技術開発

PLD 法¹⁻⁵⁾を用いた長尺 RE(レアアース (希土類元素))系超電導線材の長手方向の I_c 値の均一性を向上させるためには、長さ方向の I_c 特性分布、不均一性を調べ、製造因子(成膜条件)との相関を把握し、これを改善するための成膜方法・条件の最適化を行う必要がある。図 2.4.3-9~12 は、主に PLD 法による RE 系超電導層の成膜方法に起因した長尺 GdBCO 超電導線材(基板構造: PLD-CeO₂/LMO/IBAD-MgO/GZO/ハステロイ™)の I_c 値の不均一性の例を示したものである。

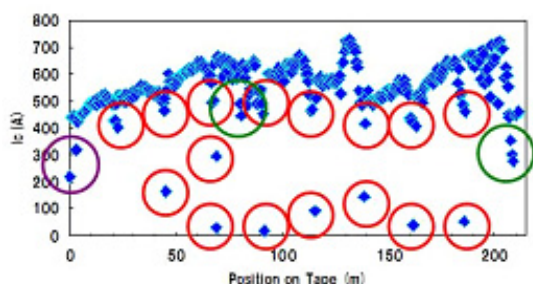


図 2.4.3-9 PLD 装置レーザ停止による I_c 値の不均一性

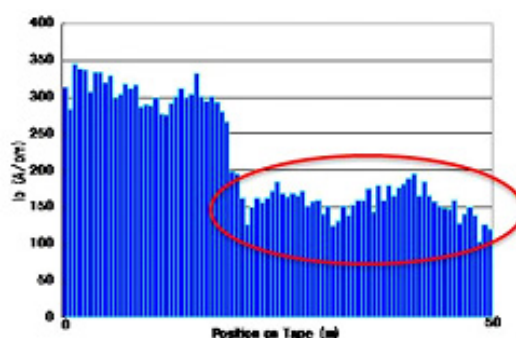


図 2.4.3-10 成膜条件の経時変化による I_c 値の不均一性

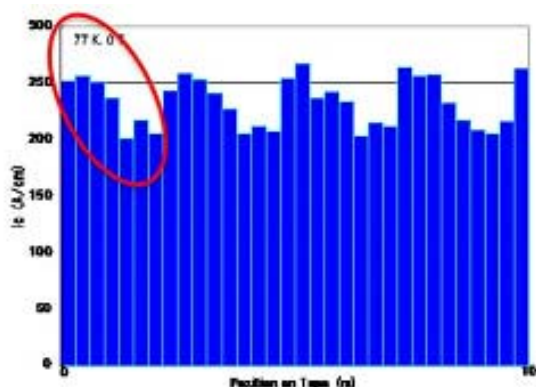


図 2.4.3-11 レーザプルームの周期的な変化に相関する I_c 値の不均一性

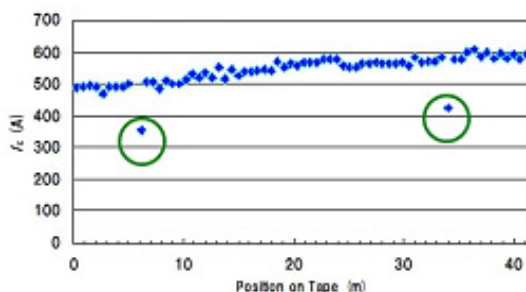


図 2.4.3-12 超電導層及び基板に存在する欠陥による I_c 値の不均一性

図 2.4.3-9 では、主に超電導層成膜の際にレーザが停止したことによる I_c 値の低下が不均一性の原因である。レーザ停止と同時に基板加熱用ヒータが OFF になるため、成膜条件のずれが生じたことが考えられる。また、再度その位置から成膜を行う際も、Reel to Reel による成膜のため再開位置に誤差が生じ、その結果最適成膜条件からのずれが起こる。レーザの安定性や装置システムを改善することでこの種の不均一性は解消された。

図 2.4.3-10 は、経時変化による成膜条件のずれが原因で起こる I_c 値低下の例を示したものである。レーザの状態が不安定である場合、短時間でレーザ発振エネルギーが

低下する現象が起き、超電導層の特性が低下する。また、光学系のミラー・レンズに経年劣化があると、ある時間経過に伴ってミラーの反射率・レンズの透過率が著しく低下する現象が起こる。さらに、基板の上に成膜されなかった酸化物がヒータの均熱板に大量に付着している状態では、均熱板と基板の接触が不十分となり、短時間で成膜温度低下を引き起こしたり、付着した酸化物によって基板の上に成膜された膜が汚染されたりする原因ともなる。これらの要因によって、図 2.4.3-10 のような、 I_c 値の不均一性が起こったと考えた。レーザ、光学系のミラー・レンズ及びヒータ均熱板の状態を改善することによって、均一性向上が可能となった。

図 2.4.3-11 は、成膜時のプルーム(アブレーションプラズマ)の周期的な変化に対応した I_c 値分布を示したものである。長尺 RE 系超電導層の成膜には比較的長時間の成膜時間が必要なため、成膜用ターゲットの表面形状の変化には注意を要する。可能なかぎりターゲット表面全体に均等にレーザビームが照射されるように制御しなければ、ターゲット表面凹凸が生じ、プルームの傾き・周期的な揺れの原因となる。その結果、図 2.4.3-11 のようなプルームの揺れに対応した周期的な I_c 値分布となり均一性を低下させてしまう。プルームの傾き・揺れを低減するようなターゲットの動き、また、多少の傾きや揺れに影響をされないように基板の送り速度を向上する等の改善を行うことで均一性は向上した。

図 2.4.3-12 は、長尺 GdBCO 超電導線材の I_c 値分布の中で局所的に低 I_c 値部が存在する状態を示したものである。これは、PLD 法による RE 系超電導層の成膜に要因する場合と、各種中間層及び金属基板に存在する欠陥が要因となっている場合とが考えられる。そのため両方の原因をつきとめ解決する必要があるが、中間評価時点ではまず各種中間層及び金属基板の欠陥の有無・解消を中心にして研究を進めた。図 2.4.3-13 は、局所的な I_c 値低下部の MO(Magneto-Optical;磁気光学像)観察したものである。図のように、 I_c 値低下部には欠陥が存在することが分かる。また、中央に存在する長さ方向に沿った線状の部分、金属基板であるハステロイ™ 上にある欠陥

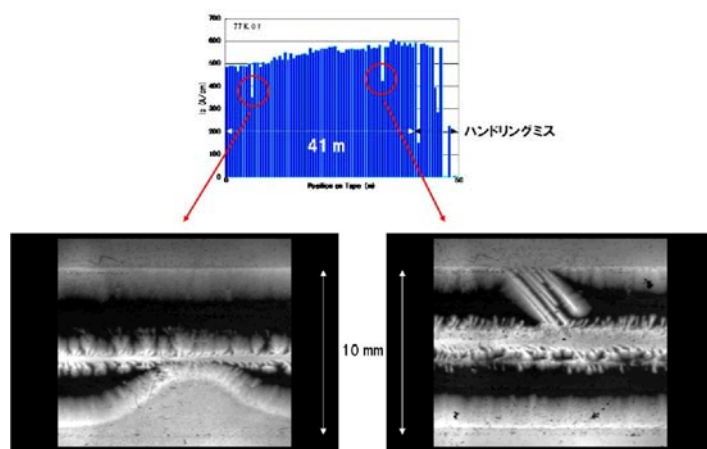


図 2.4.3-13 局所的な I_c 値低下部の MO 観察結果

であることが分かっている。このように、超電導層だけでなく、各種中間層・基板も含めた欠陥の原因・改善を行うことで均一性は向上した。

図 2.4.3-9～13 のような不均一性の原因となる課題を改善した結果、図 2.4.3-14～15 のような長手方向の I_c 値分布の標準偏差が 2 %以下となる均一性の高い線材を製作することが可能となった。図 2.4.3-14 及び図 2.4.3-15 の線材は、それぞれ技術コストが 2.9 円/Am、2.65 円/Am と見積もられ、極低技術コストの条件も同時に満足している。

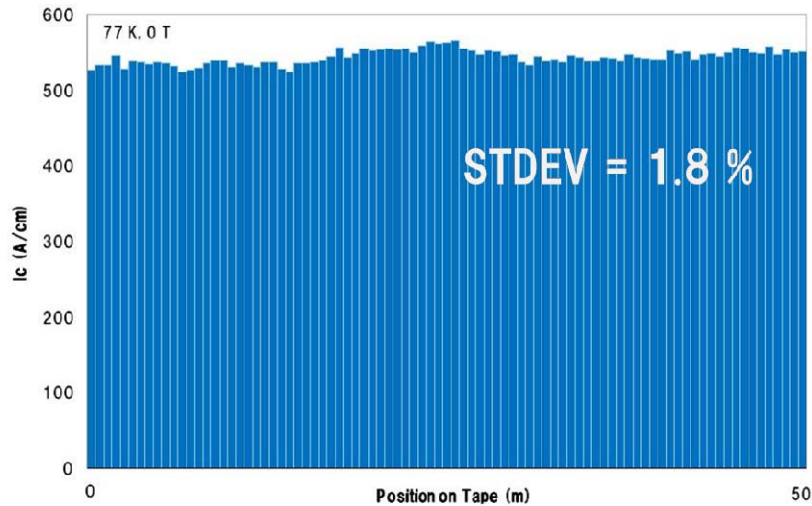


図 2.4.3-14 50 m 長 GdBCO 超電導線材の長手方向 I_c 値分布

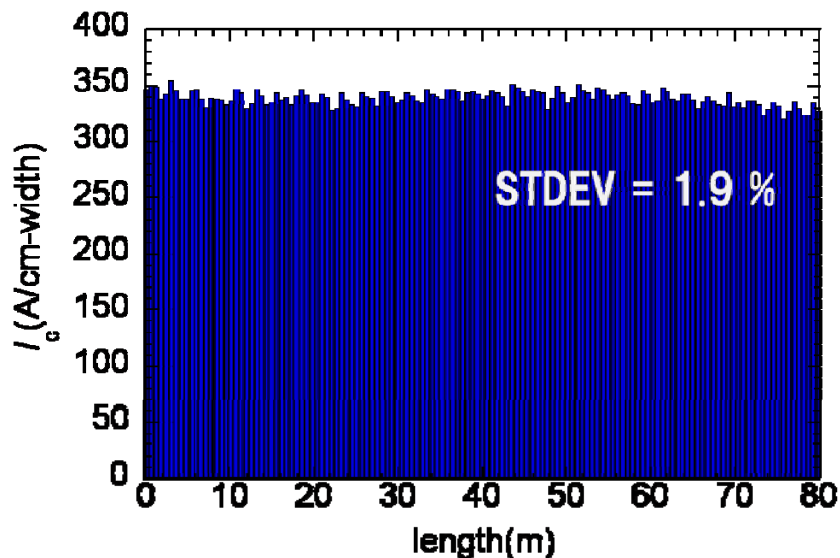


図 2.4.3-15 80 m 長 GdBCO 超電導線材の長手方向 I_c 値分布

他方、超電導線材の幅方向の I_c 値の均一性は、裁断・細線化等が交流損失低減の観点から要求される超電導変圧器対応線材や超電導ケーブル対応線材等に使用する際には非常に重要な要素となる。図 2.4.3-16 は、PLD 法で作製した短尺(～20

cm)GdBCO 超電導線材を長手方向にスクライビングした際の幅方向の I_c 値分布である。

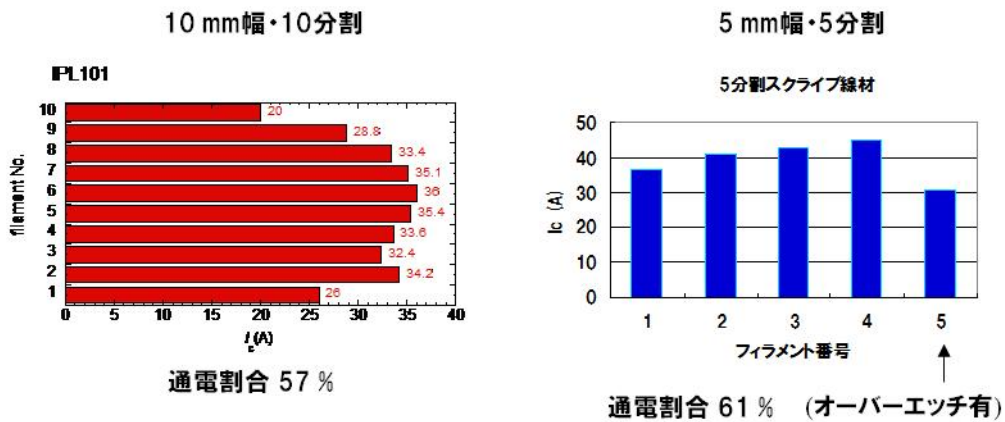


図 2.4.3-16 PLD 法で作製した GdBCO 短尺(～20 cm)超電導線材の幅方向 I_c 値分布

図 2.4.3-16 の左は、10 mm-w・10 分割、右は 5 mm-w・5 分割の結果である。ここで、最小 I_c 値を分割数乗じ、元の I_c 値で除したものを通電割合と定義する。図 2.4.3-16 の右図中にあるように、一部スクライビング時のオーバーエッチ部があるため、正確な値ではないが、通電割合は、幅 1 mm の加工の場合、約 60 %程度であることが分かる。この通電割合は、現状の 10 mm-w PLD 線材のテープ端の約 1 mm 以内の領域の J_c 値が低下していることに起因すると考えられる。左図中において、幅 2 mm に加工したと想定した場合の通電割合は 75 %程度となる。

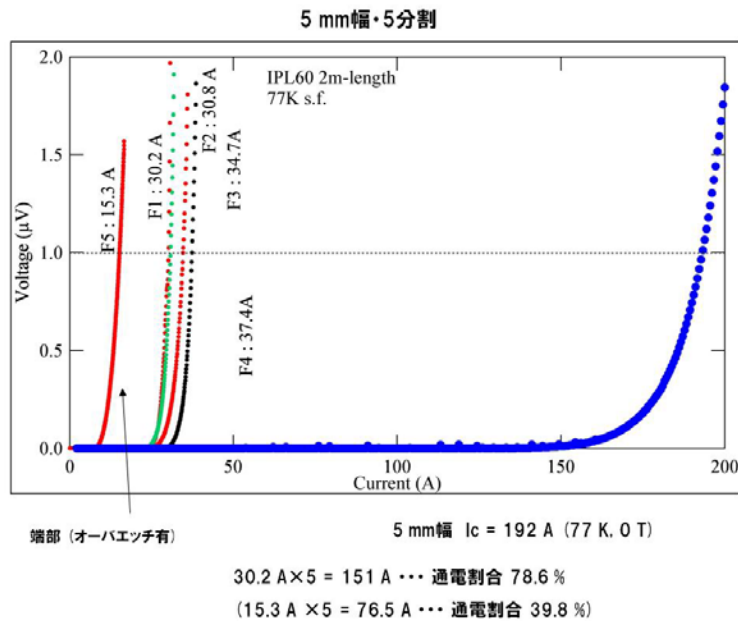


図 2.4.3-17 PLD 法で作製した 2 m 長 GdBCO 超電導線材の 5 分割加工後の I_c 値分布

図 2.4.3-17 は、2 m 長の GdBCO 超電導線材の 5 mm-w・5 分割加工後の I_c 値分布の結果である。この線材にもオーバーエッチ部が存在するため正確な値ではないが、全体での通電割合は約 40 % である。ただし、線材幅端部の 1 mm を除けば約 80 % と高い値が実現されている。図 2.4.3-18 は、50 m の GdBCO 超電導線材の 5 mm-w・5 分割加工後の I_c 値分布(a)と帯磁率を用いた交流損失の測定結果(b)である。加工前の線材の I_c 値はそれほど高くないが、中間目標である 50 m の長尺に対しても、通電割合 42 %、各フィラメントの I_c 値が 8.0-11.9 A/5 mm-w という比較的高い均一性が得られた。また、この線材の交流損失は帯磁率を用いた測定で、全長で 1/5 以下に低減していた。交流損失の評価としては、この線材で作製したコイルを用いて交流通電を実施し、各フィラメントの電流値がほぼ同じであり、フィラメント間の絶縁が確保できていることと、分割加工数に相当する交流損失低減が実現できていることを確認した。

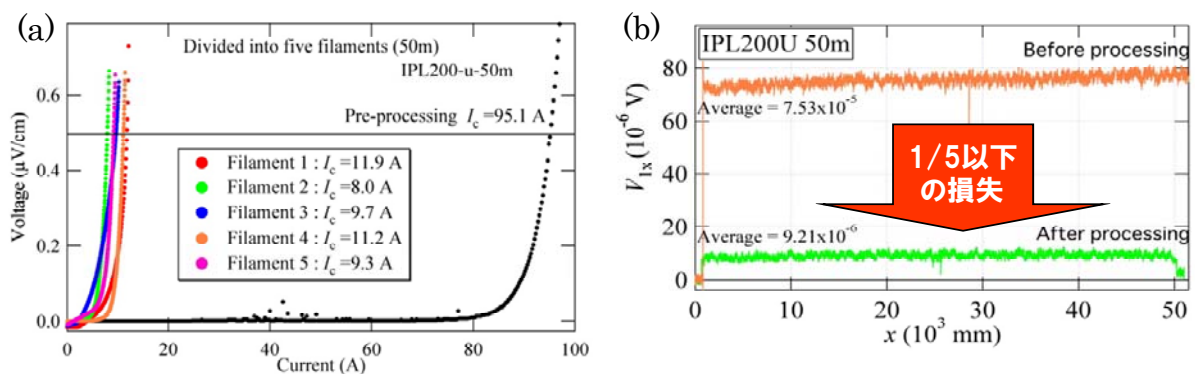


図 2.4.3-18 50m 長の PLD-GdBCO 超電導線材の 5mm-w 5 分割加工による(a)各フィラメントの I_c 値分布と(b)帯磁率による分割前後の交流損失比較

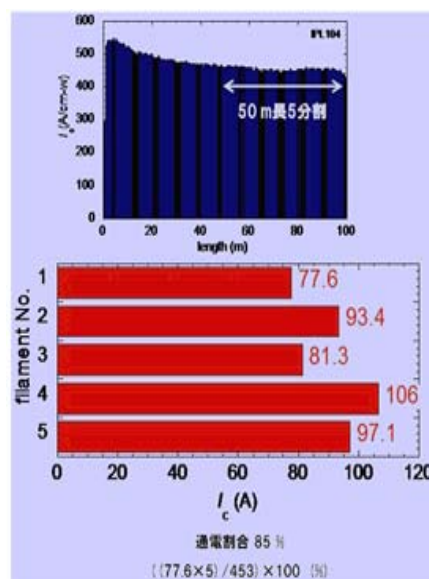


図 2.4.3-19 2 mm-w に切断した 50 m 長 GdBCO 線材の幅方向 I_c 値分布

図 2.4.3-19 は、10 mm-w・50 m 長線材を 2 mm-w・50 m×5 本に切断した線材の End to End の I_c 値(幅方向 I_c 値分布)を示している。最小 I_c 値の 5 倍は 388 A であり、2 mm-w で 77 K、自己磁場(s.f.)中で 300 A/cm-w の I_c 値を持つ 50 m 長線材という中間目標値は達成された。元の 10 mm-w の I_c 値 453 A/cm-w に対し通電割合は 85 % であることが分かる。このように、幅方向の I_c 値分布は、2 mm-w の場合、長手方向の I_c 値分布均一性の向上の影響も相俟って、50 m 長においても 85 % 程度にまで向上した。

平成 23-24 年度は、均一性向上のために金属基板及び中間層成膜後の表面の洗浄工程を行った上で超電導層の成膜を試みた。超電導層での均一性向上は、in-plume 法で成膜し、基板とターゲットの間隔を近づけることで、ターゲット表面のクラックや異物、消耗によるターゲットの形状変化から起こるプルームの傾き変化の影響を抑制することと、成膜時の線材の搬送速度を高速化することにより、成膜環境のムラを分散して均一化することにより図った。これらの条件最適化を行った結果、図 2.4.3-20 のような非常に均一な I_c 値分布を持つ GdBCO 線材を作製することが可能となった。なお、この線材の作製技術コストは 1.59 円/Am であり、極低技術コストの最終目標値を満たしている。

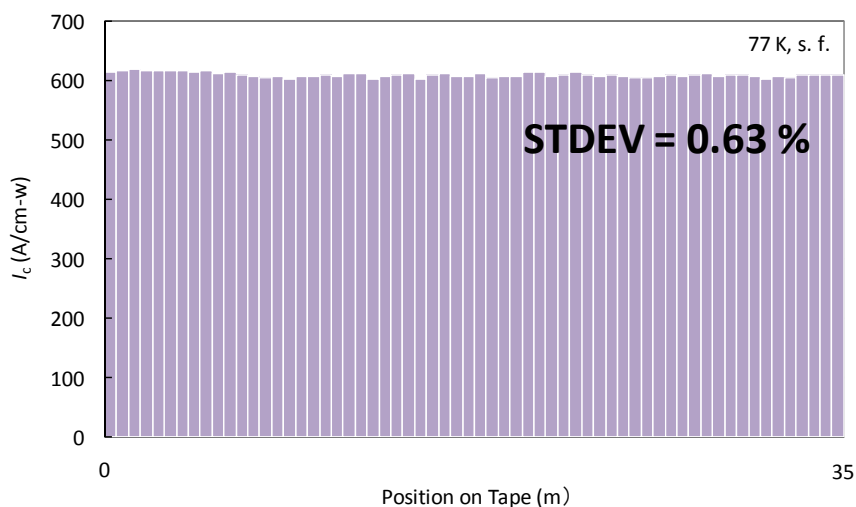


図 2.4.3-20 35 m 長 GdBCO 超電導線材の長手方向 I_c 値分布 (77 K, s. f.)

図 2.4.3-21 は、Reel to Reel の走査型ホールプローブ顕微鏡 (RTR-SHPM) 測定による図 2.4.3-20 の面内の J_c 値分布を示したものである。この図は、10 mm-w 線材を 5 mm-w×2 本に切断した後測定を行い、元の 10 mm-w の状態を再現するために加工されたものである。そのため、測定原理上電流が流れない線材の長手方向の中心部分が 2 箇所存在する。この線材の有効幅は 9.76 mm、 J_c 値の標準偏差(STDEV)は、0.68~0.97 % と従来の線材と比較して非常に均一な線材であることがわかる。

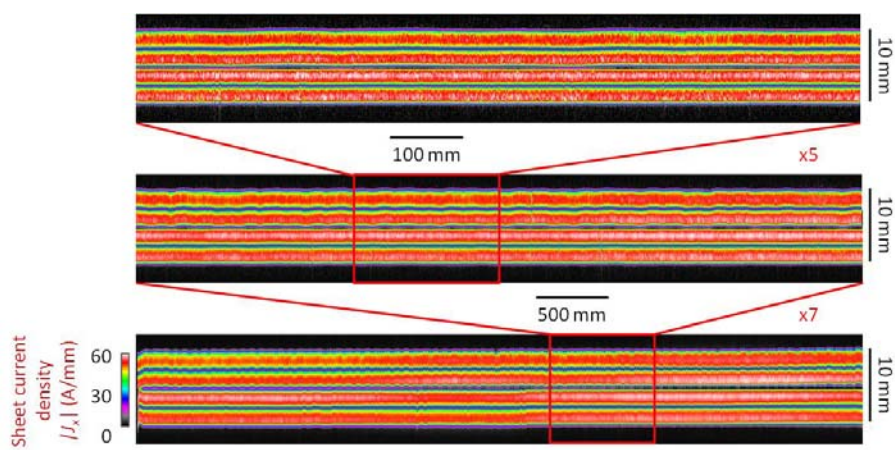


図 2.4.3-21 35 m 長 GdBCO 超電導線材の面内 J_c 値分布 (Reel to Reel-SHPM 測定)

さらに、超電導変圧器対応線材の最終目標値である 5 mm-w・10 分割・100 m・交流損失 1/10 の線材を作製するために、まず、図 2.4.3-22 の 10 mm-w の線材を作製した。この線材の作製技術コストも 1.78 円/Am と、極低技術コストの最終目標値を満たしている。

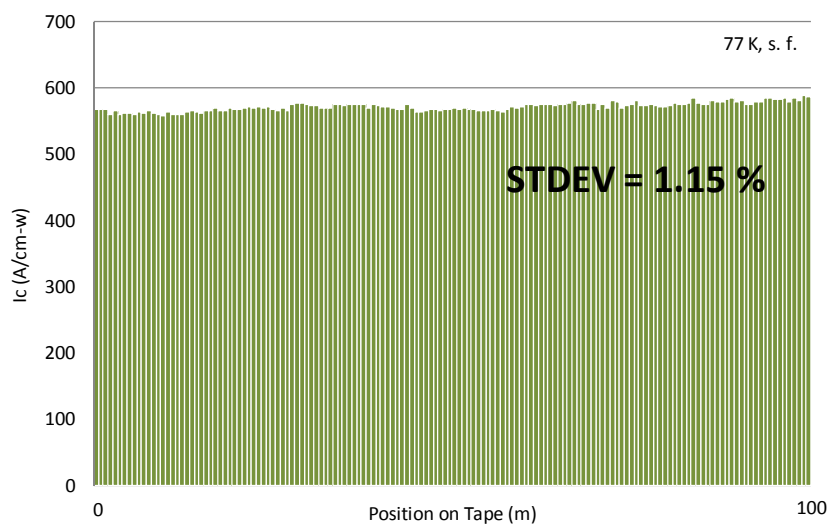


図 2.4.3-22 100 m 長 GdBCO 超電導線材の長手方向 I_c 値分布 (77 K, s.f.)

この線材を 5 mm-w に切断し、その後、10 分割にスクライビング加工した線材の帯磁率による交流損失を測定した結果が、図 2.4.3-23 である。

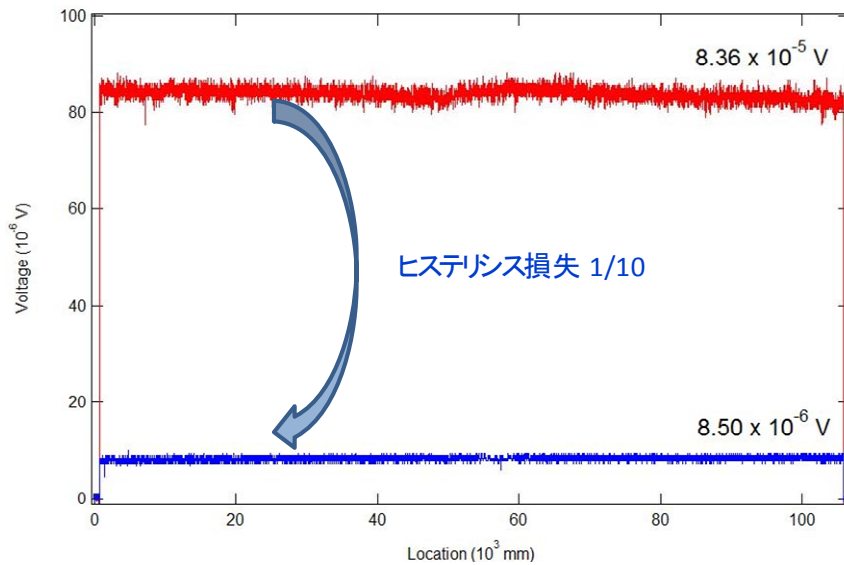


図 2.4.3-23 5 mm-w ・ 10 分割 ・ 100 m 長 GdBCO 超電導線材の帯磁率による 10 分割前後の交流損失比較

図 2.4.3-23 から、磁化ヒステリシス損失が約 1/10 に低下していることが分かる。これにより、5 mm-w ・ 10 分割 ・ 100 m ・ 交流損失 1/10 の最終目標値は達成された。

また、超電導ケーブル対応線材である 2 mm-w ・ 500 A/cm-w ・ 200 m の線材を作製するために、まず、図 2.4.3-24 の 10 mm-w の線材を作製した。200 m 全長に亘って均一な長手方向 I_c 値分布を持っていることが分かる。この線材の長手方向の通電 I_c 値分布測定は行わなかったため、作製技術コストの計算は行っていないが、大きく特性が低下している場所が無いことから、2 円/Am という極低技術コストの最終目標値も満たしていると予想される。

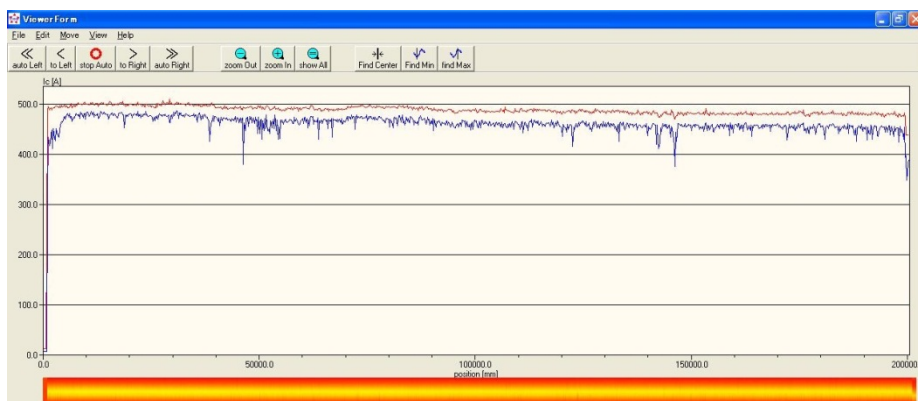


図 2.4.3-24 200 m 長 GdBCO 超電導線材の長手方向 I_c 値分布 (ホール素子測定)

この 10 mm 線材を 2 mm-w に分割後、無誘導巻きコイル状にして End to End の I_c 値測定を行った結果が図 2.4.3-25 の I - V 曲線である。

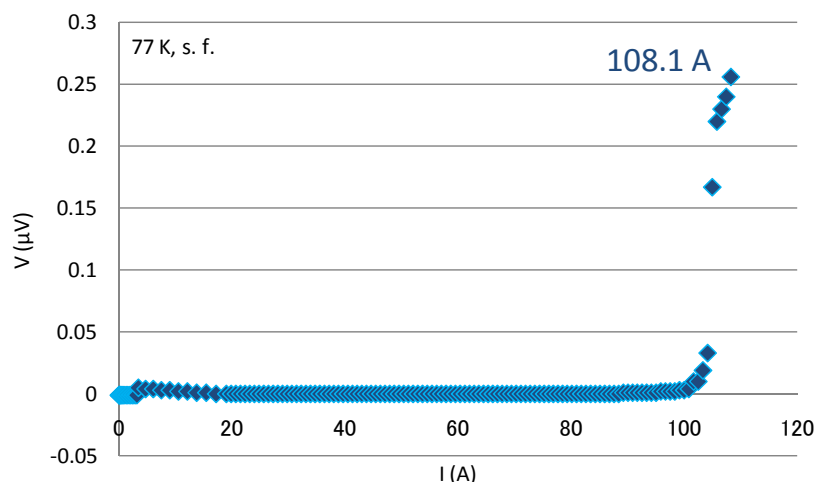


図 2.4.3-25 2 mm-w · 200 m 長 GdBCO 線材の End-to-End I - V 特性(77 K, s. f.)

測定時における線材の焼損を防ぐため、電界基準値を $0.1 \mu\text{V}/\text{cm}$ にして測定を行った。図 2.4.3-25 から、2 mm-w での $I_c > 100 \text{ A} \cdot 200 \text{ m}$ 長の GdBCO 線材であることが分かる。上述してきたように、現在の PLD-GdBCO 超電導線材は非常に均一な I_c 値分布を有しているため、この 2 mm-w 線材の結果を 10 mm-w 線材に換算すると、 $I_c > 500 \text{ A}/\text{cm-w} \cdot 200 \text{ m}$ 長に相当することになり、最終目標値は達成された。

(4) PLD線材の均一性向上技術開発②

PLD法はY系超電導体のように多元系からなる薄膜の形成に適した方法であるが、超電導線材の幅方向及び長手方向の特性を均質化するために、装置の構造を検討してきた。図2.4.3-26にはホットウォール加熱式PLD装置の外観を示す。



図2.4.3-26 ホットウォール加熱式PLD装置

装置中央部が薄膜を成膜させる真空チャンバであり、その両脇に、送り出し・巻き

取りリールを配置してあることから連続的にテープ基材（IBAD 層等中間層付き金属基板）が真空チャンバに供給され、基材上に超電導層が形成される。真空チャンバ内を図 2.4.3-27 に模式的に示す。

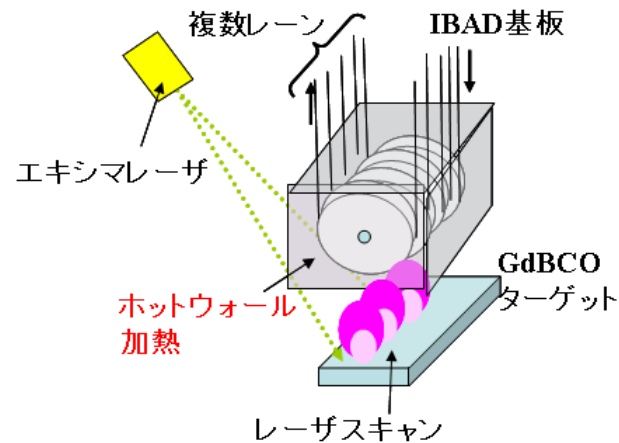


図2.4.3-27 真空チャンバ内模式図

ターゲット上に照射されたレーザー光により真空チャンバ内に放出された原料がホットウォールと呼ばれる炉内の基材（IBAD基板）上に成膜する。薄膜の成長面はホットウォールチャンバの熱容量及び輻射熱により一定温度に保たれていることから、本装置により均質な超電導結晶薄膜の形成が期待される。そこで、本装置を用いて均一な超電導特性を有する線材製造条件を検討した。

図2.4.3-28にIBAD-MgO基板上に形成したホットウォール加熱式PLD装置で超電導層を形成した線材の I_c 値の線材長手方向分布を示す。77 K,s.f.において直接通電により線材を700 mm間隔の電圧端子間距離で I - V 特性を測定し、 $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ に到達した電流値を I_c 値とした。

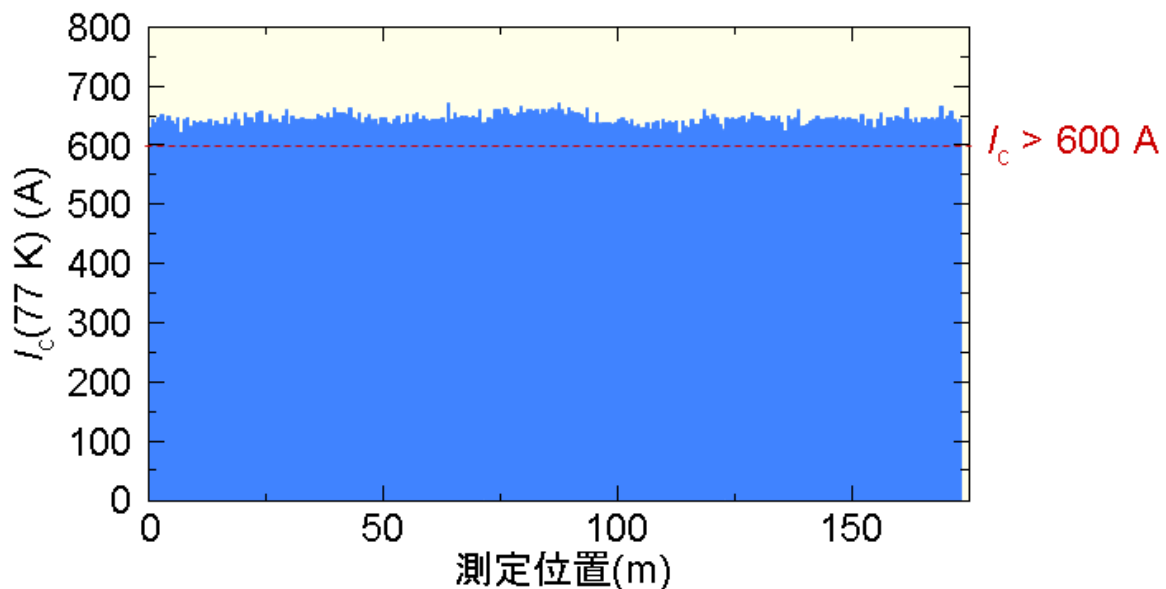


図 2.4.3-28 高 I_c 値線材の I_c 値の長手方向分布

150 m 超の長さを有する線材において全長に亘って 600 A/cm-w(@77 K,s.f.)以上の I_c 値を実現している。標準偏差は 8.7 A/cm-w であり、高 I_c 値の線材においても長手方向に均質な超電導特性を得ることができた。

図 2.4.3-29 には 10 mm-w 線材の幅方向の I_c 値分布を示すが、端の 1 mm の領域を除いて高い均一性が得られた。

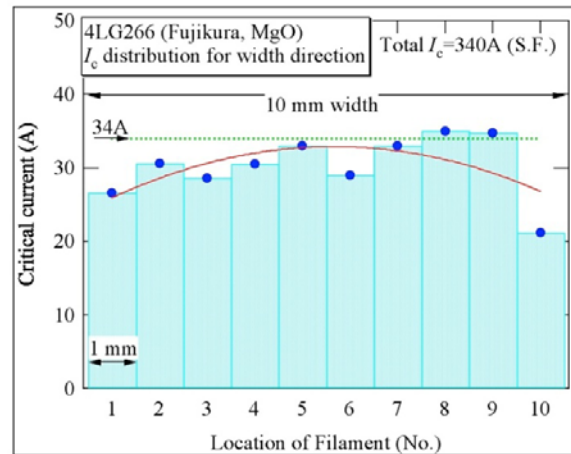


図 2.4.3-29 線材幅方向の I_c 値分布

このように、高性能な長尺の Y 系超電導線材の製造方法である IBAD-PLD 法により製造した線材の長手方向の I_c 特性を測定し、150 m 長を超える超電導線材において 700 mm 間隔の電圧端子間距離で測定した I_c 特性は標準偏差が 5 %以下の均質な超電導線材を得ることができた。

(5) MOD 線材の均一性向上技術開発

MOD 法による Y 系超電導線材は低コストで作製が可能なことからケーブル、変圧器、SMES 等の将来の電力機器への適用が期待されている。これらの応用を実現するには、長尺の線材が必要であり、また、運転時の交流損失を低減するために作製後に幅方向に分割加工されて使用されることから、長手方向、幅方向に亘って均一な特性を有していることが重要である。そこで、本項では Y 系 MOD 超電導線材の均一性向上技術開発を行った。

ここで、本プロジェクトにおける中間目標は以下の通りである。

- ・ ケーブル用 : 2 mm-w $I_c = 300$ A/cm-w(@77 K,s.f.), 50 m
 - ・ 変圧器用 : 5 mm-w 5 分割線材 ; 分割無し線材に比べて交流損失 1/5
- (内部目標として、5 mm-w 5 分割線材は $I_c = 200$ A/cm-w(@77 K,s.f.), 50 m を設定)

まず、長手方向及び幅方向での均一性を向上させるために、局所的な特性の低下要因を除去する必要がある。作製した線材の局所的な I_c 特性低下部を調査し、線材作製方法の改良を行った。その後、幅方向の I_c 特性の均一性について調査を行い、線材作

製時の幅方向端部の I_c 特性が低いことを確認し、その原因が線材作製時の幅方向端部の膜厚分布の不均一が原因であると考え、幅方向膜厚分布均一化のための改良を行った。それらの結果を踏まえて 20 m 長及び 50 m 長 Y 系 MOD 超電導線材を作製し、作製後の線材を 2 mm-w に切断して幅方向 I_c 値分布の調査及び 5 mm-w×5 分割に切断加工を行い、幅方向 I_c 値分布の調査及び分割前後で交流損失の比較を行った。

Y 系 MOD 超電導線材の作製工程の中で Y、Ba、Cu の有機酸塩を混合した溶液を IBAD-MgO 基板に塗布する方式として Dip-coating 方式を適用しているが、リール回転方式で作製した線材では長手方向で I_c 特性が局所的に低下している部分(図 2.4.3-30)があり、その部分を調査した結果、リールに付着した濃化液体が基板に付着することにより、仮焼熱処理時において焼損発生の原因になることを確認した(図 2.4.3-31)。

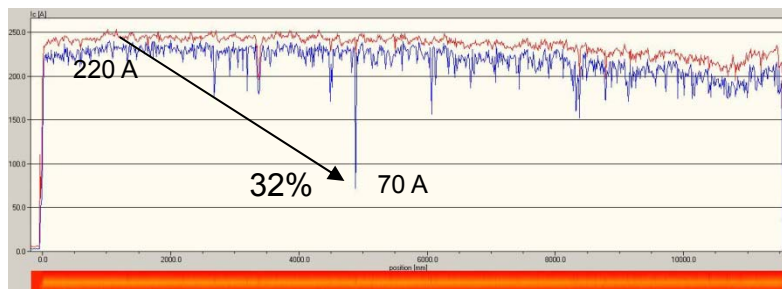


図 2.4.3-30 局所的な I_c 値低下部を有する長尺線材の I_c 値分布例

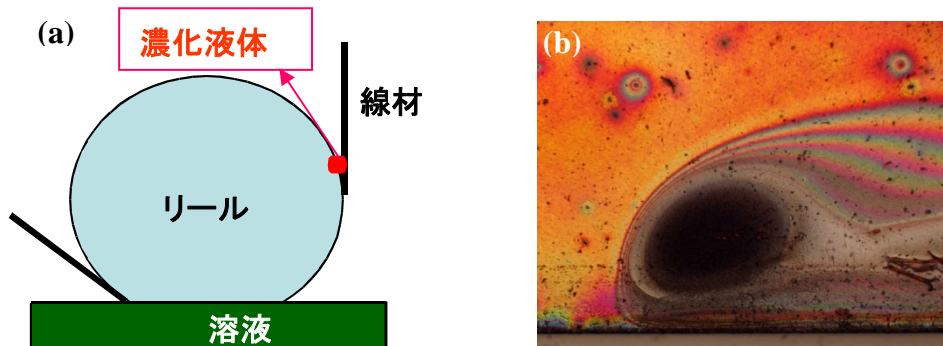


図 2.4.3-31 リール回転方式における濃化液体発生状況(a)及び同部の焼損状況(b)

この濃化液体の基板への付着を抑制するために、基板と塗布部が接触しないような塗布方式として、チューブ塗布方式へと改善した(図 2.4.3-32)。これにより、線材が溶液から出る際に接触部がないことから溶液が溜まることが防げると考えた。このような改善を行い、作製した線材の長手方向 I_c 値分布を調査した結果を図 2.4.3-33 に示す。この結果から、チューブ塗布方式の採用により、局所的な I_c 値低下部の発生が低減できることを確認した。

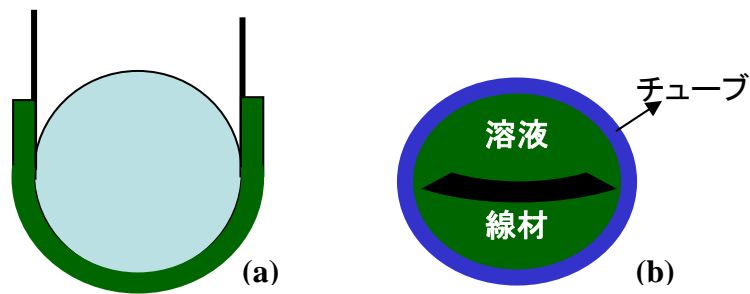


図 2.4.3-32 チューブ塗布方式の模式図。側面(a)及び上方(b)からのイメージ図

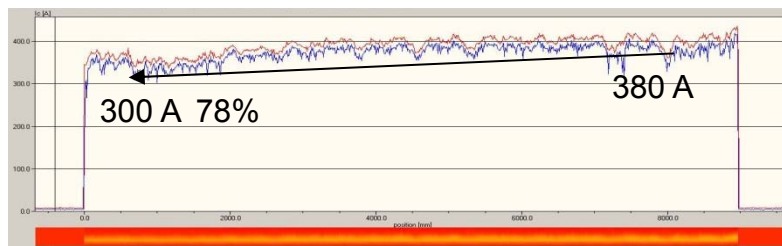


図 2.4.3-33 チューブ塗布方式により作製した線材の I_c 特性分布

次にチューブ塗布方式を適用して作製した Y 系 MOD 超電導線材の幅方向の I_c 値分布及び膜厚分布を調査した結果、幅方向 I_c 値分布及び膜厚分布が不均一であった。この結果から、幅方向 I_c 値分布が不均一である原因は、幅方向膜厚分布が不均一であるため、部分的に厚膜となった部分でクラックが焼成時に発生しやすいとともに、部分的に厚い／薄い部分では結晶成長条件が最適では無く J_c が低いということに因るものと考えられた。そこで、膜厚分布を制御するため、IBAD-MgO 基板に塗布される溶液量が基板とチューブの距離に依存することをチューブと基板の距離を変化させた時の幅方向の膜厚分布の調査によって確認した。チューブサイズを変化させた場合の幅方向膜厚分布の調査結果を図 2.4.3-34 に示す。この結果から、基板端部とチューブ内壁の距離が小さく、基板塗布面とチューブ内壁の距離は大きいほうが膜厚均一化を図るために有効であることが分かった。

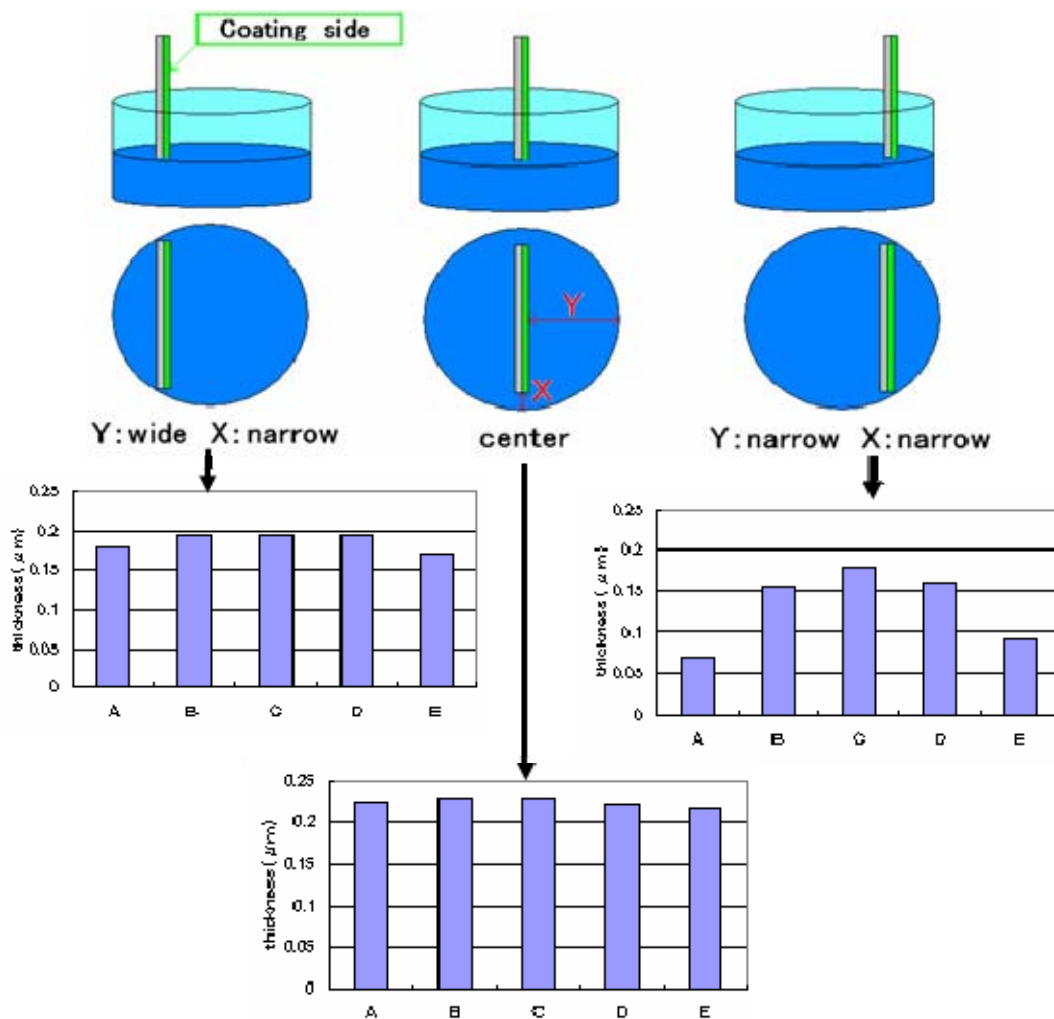


図 2.4.3-34 基板とチューブ内壁距離による膜厚分布の関係

上記の知見に基づいて作製した 10 mm-w の 20 m 長 Y 系 MOD 超電導線材を 2 mm-w に切断して、幅方向の I_c 値分布を調査した結果を図 2.4.3-35 に示す。この結果、2 mm-w に切断した線材の 5 本中 4 本で $I_c = 55 \text{ A} / 2 \text{ mm-w} (@77\text{K, s.f.})$ が得られた。位置 5 に該当する線材幅端部では、 I_c 特性の低下が観られたが、原因が、線材作製時にリールの顎に線材が接触することによる変形であったため、接触を防ぐ対策を施した。これらの知見の基、50 m 長線材を作製し、2 mm-w に切り出し長手方向の I_c 特性分布を調査した結果を図 2.4.3-36 に示す。本試料の End to End の I_c 値を評価した結果、79.4 A/2 mm-w が得られ、中間目標である 300 A/cm-w を超える 397 A/cm-w を確認した。

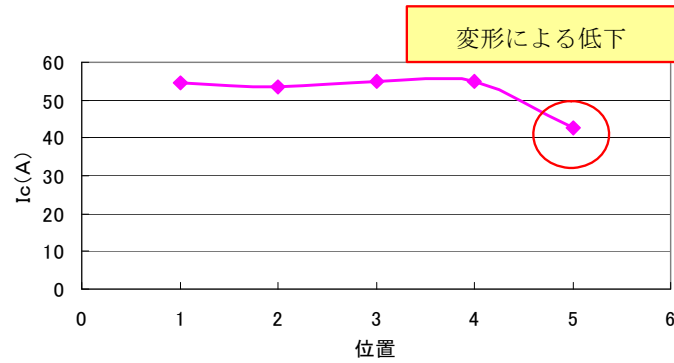


図 2.4.3-35 20 m 長 Y 系 MOD 超電導線材の 2 mm-w 毎の幅方向 I_c 値分布

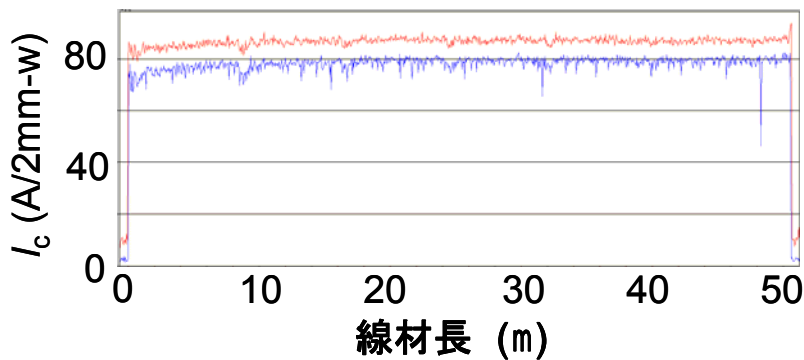


図 2.4.3-36 MOD 法により作製した 50 m 長線材から切り出した 2 mm-w 線材の長手方向の I_c 値分布

また、同様の条件で作製した 20 m 長 MOD 線材を 5 mm-w×5 分割にスクライビングした後に、スクライビング前と比較した結果、交流損失の主たる成分である磁化ヒステリシス損失は 1/5 以下に低下し、スクライビングによりヒステリシス損失が低減できることを確認した。帯磁率による交流損失測定結果を図 2.4.3-37 に示す。図 2.4.3-37 の評価は局所的な損失の評価ではあるが、フィラメント間の電気抵抗は十分高かった。

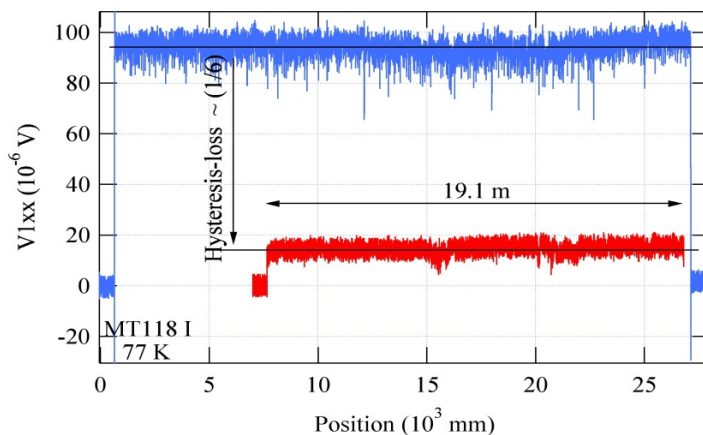


図 2.4.3-37 5 mm-w×5 分割×20 m Y 系 MOD 超電導線材の分割前後での帯磁率による交流損失比較

本プロジェクトの最終目標達成のためには、さらなる高 I_c 化、長尺化、幅・長手方向の均一性向上が必要である。そこで平成 23 年度からは以下の技術開発を進めた。

まず超電導原料溶液塗布前の基板洗浄を強化するとともに、仮焼工程の後に中間熱処理工程を加える工程改善を実施した。磁場中特性の向上のみならず、中間熱処理により均一性が向上した。これは、余剰フッ素を事前に除去することで高速昇温・高速成長条件の適用が可能となり、組成ムラの抑制や結晶粒の微細化が実現できたものと考えた。これらの改善により基板起因の欠陥・ポアの発生を抑制して 200 m 長の均一な MOD 線材の作製に成功した(図 2.4.3-38)。 さらに 50 m 長の線材を作製して、5 mm-w×5 分割にスクライビングしたところ、各フィラメントの I_c 値が均一な 5 分割線材の作製に成功し、分割前後における帯磁率評価による交流損失が 1/5 以下に低減することを確認した(図 2.4.3-39)。この線材をコイル化して均流測定を実施したところフィラメント間の均流が確認され交流損失が低減することを確認した。

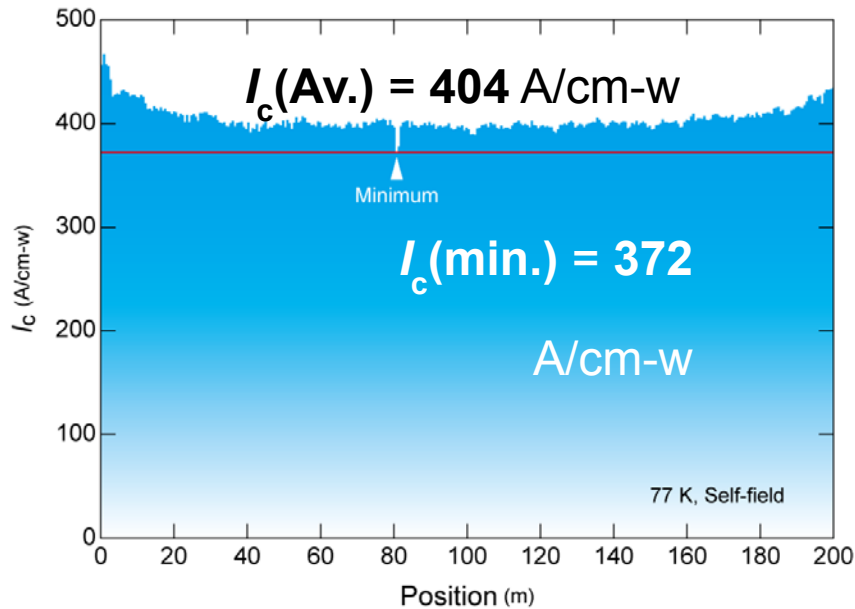


図 2.4.3-38 200m 長 Y 系 MOD 線材の長手方向 I_c 値分布

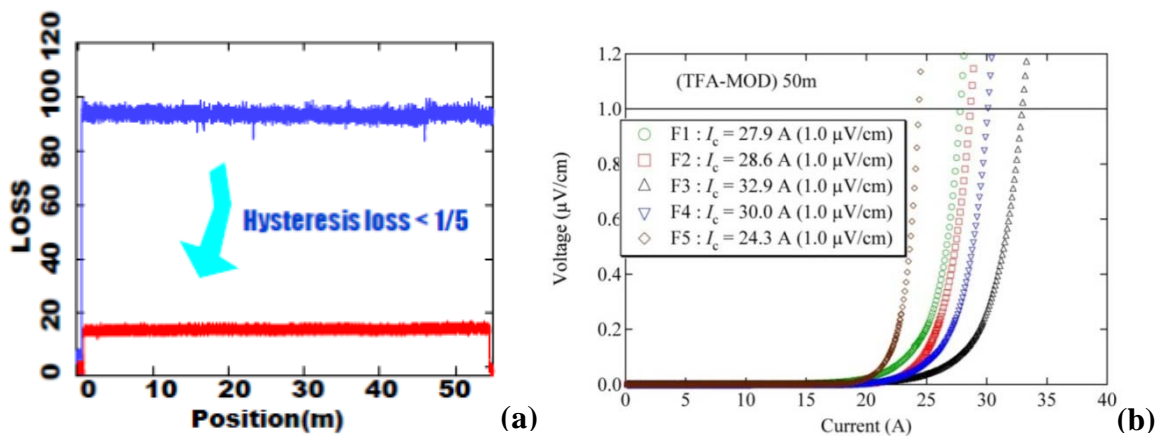


図 2.4.3-39 5 mm-w×5 分割×50 m 長 Y 系 MOD 超電導線材の分割前後での (a)帯磁率による交流損失比較と (b)5 分割加工後の I_c 値分布

次に高 I_c 化のために厚膜化を実施したが $2.8 \mu\text{m}$ 厚の仮焼膜においてクラックが発生した(図 2.4.3-42 挿入図)。クラックの起点は基板端部の局所的厚膜部(図 2.4.3-42 青線の 0.3 mm 付近)と考えられたので、この局所的厚膜部を改善するために超電導原料溶液塗布工程を以下のように改善した。基板と塗布チューブ壁面の距離によって膜厚分布が変化することが分かったので、この知見に基づき図 2.4.3-40 のように 2 種類の塗布チューブ径を交互に使用する新塗布工程により基板端部の局所的厚膜部を抑制して幅方向の膜厚分布を改善できると考えた(図 2.4.3-41)。

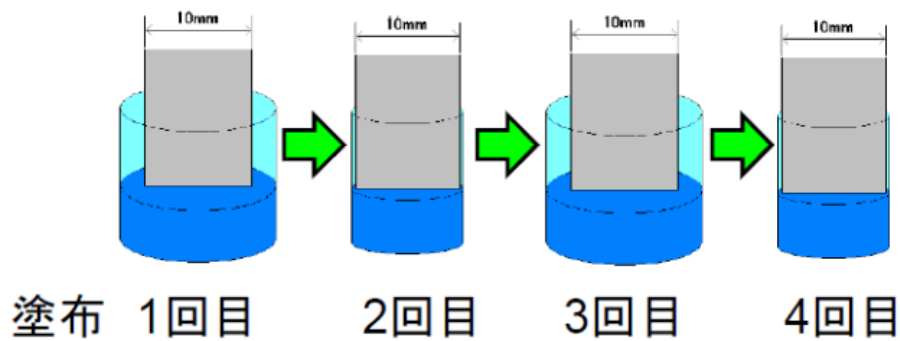


図 2.4.3-40 新塗布工程模式図

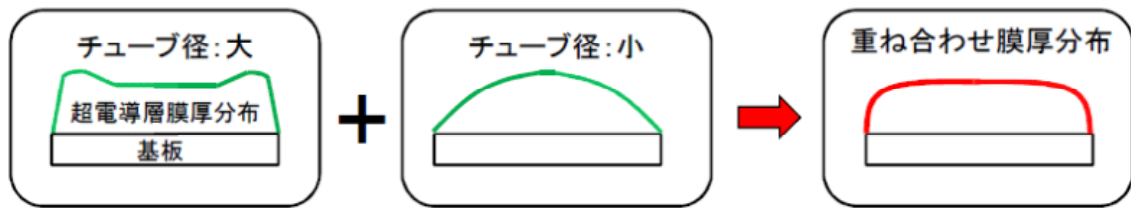


図 2.4.3-41 膜厚改善案

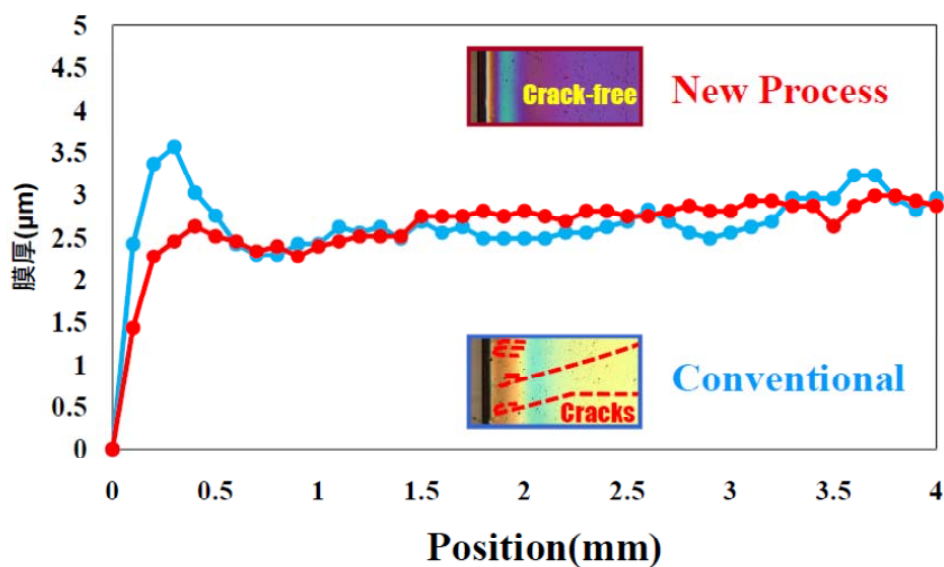


図 2.4.3-42 新・旧塗布工程の仮焼膜の膜厚分布

そこで実際に新塗布工程を実施した結果、基板端部の局所的厚膜部を抑制することができ、クラック無しに $2.8\mu\text{m}$ 厚の仮焼膜作製に成功した(図 2.4.3-42)。

上記の技術・手法を用いることにより高 I_c 値かつ均一な長尺線材の作製に成功し(図 2.4.3-43)、本プロジェクトの最終目標を達成可能な線材作製技術の開発に成功した。

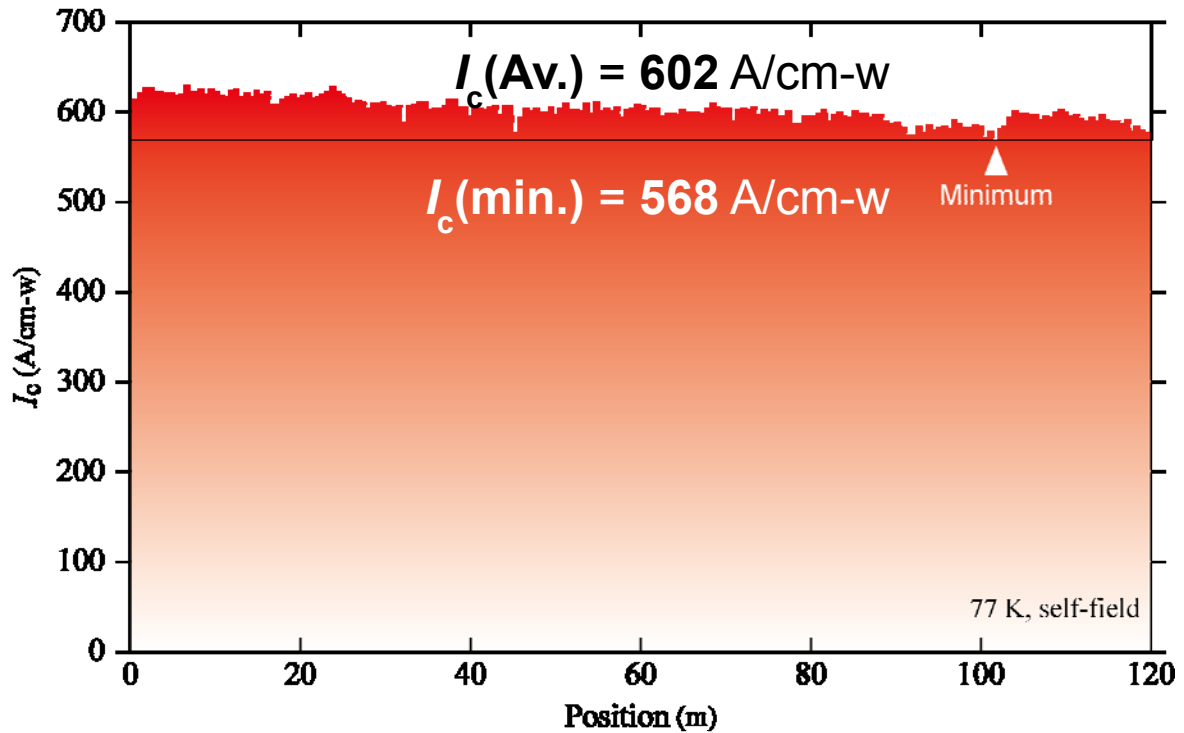


図 2.4.3-43 120m 長 Y 系 MOD 線材の長手方向 I_c 値分布

開発した線材作製技術を用いて本プロジェクト目標であるケーブル用線材 200 m と変圧器用線材 100 m を作製し、それぞれ 2 mm-w 切断加工と 5 mm-w × 10 分割加工を実施した。

開発した線材作製技術を用いてケーブル用線材・変圧器用線材をそれぞれ作製した。長さは目標に対して未達ではあるが、ケーブル用線材は 4 mm 幅 × 80 m 長で本プロジェクト目標値を超える $I_c > 200 \text{ A}$ の特性を有しており(図 2.4.3-44)、変圧器用線材においても、まず、5 mm 幅 × 10 分割 × 3 m 長でヒステリシス損失が分割前後で 1/10 に低減したことを確認した後に、5mm 幅 × 100m 長線材に対してエッチングレス・スクライビング法により 10 分割加工を実施し、交流損失評価を行った。図 2.4.3-45 に示す通り、後端の無分割部分に比べて前端 100m 領域の交流損失が約 1/10 に低減したことが確認できる。この結果により、5 mm-w ・ 10 分割 ・ 100 m ・ 交流損失 1/10 の最終目標値は達成された。

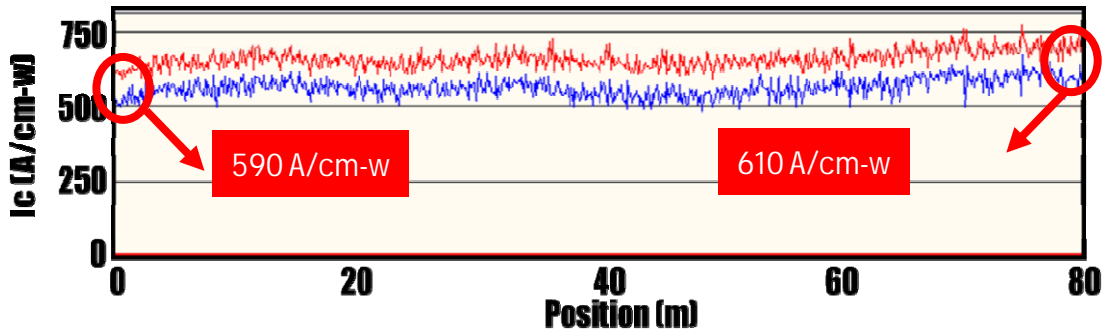


図 2.4.3-44 4 mm 幅×80 m 長 Y 系 MOD 線材の長手方向 I_c 値分布

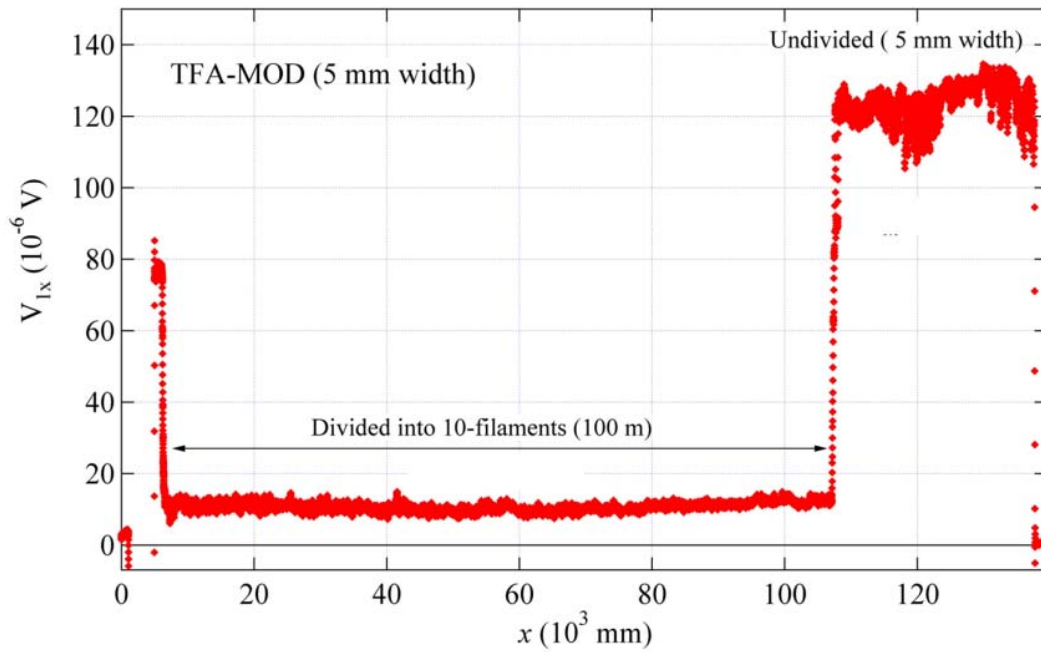


図 2.4.3-45 5 mm 幅×10 分割×100m 長 Y 系 MOD 超電導線材の分割有無でのヒステリシス損失比較

(6) 配向基板—PLD 線材の均一性向上技術開発

結晶粒配向金属基板 PLD 線材に関する均一性の向上には、中間層表面の平坦性及び結晶粒の配向度の均一性の向上、また中間層形成条件の安定性が求められる。中間層は RF スパッタで成膜し、 $\text{CeO}_2/\text{YSZ}/\text{CeO}_2$ の三層構造を有しており、中間層形成条件の安定化は成膜時のプラズマ、雰囲気、温度等の安定性向上により行った。30 mm-w の結晶粒配向クラッド基板の上に成膜した CeO_2 や YSZ 層のピーク強度比 $I(200)/[I(200)+I(111)]$ の評価から、線材幅 30 mm、約 80 m の全長に亘って 92 % 以上の強度比を維持し、均一な結晶性と結晶粒の配向度が得られることを確認した(図 2.4.3-46)。

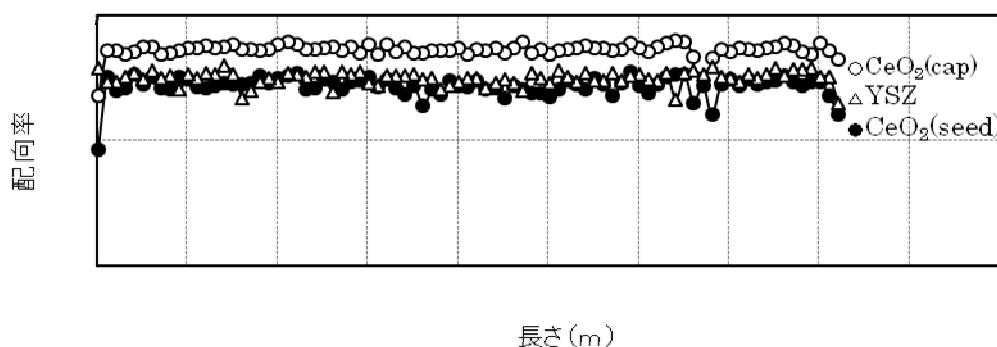


図 2.4.3-46 中間層 $\text{CeO}_2/\text{YSZ}/\text{CeO}_2$ の長手方向の結晶粒配向度分布

PLD 法による超電導層形成に関しては、中間層と同様に成膜条件の安定性(温度、雰囲気、プルーム)の向上を図ることで均一化を達成するとともに、大型レーザの導入により I_c 特性の向上を図った。大型レーザを使用して成膜した 30 mm-w 線材の幅方向 I_c 値分布から、従来の 1.5 倍のレーザ出力(300 W)とプルームサイズが増大したことで一層成膜当たりの膜厚が増加し、線材全体の I_c 値が向上した結果が得られた。また、大型レーザによるレーザエネルギーの安定性向上とヒータ周辺の温度分布の改善により幅方向 I_c 値分布も改善され、30 mm 線材の全領域で 200 A/cm-w 以上の I_c 値、中央部で最大 500 A/cm-w 級の I_c 値を得た(図 2.4.3-47)。

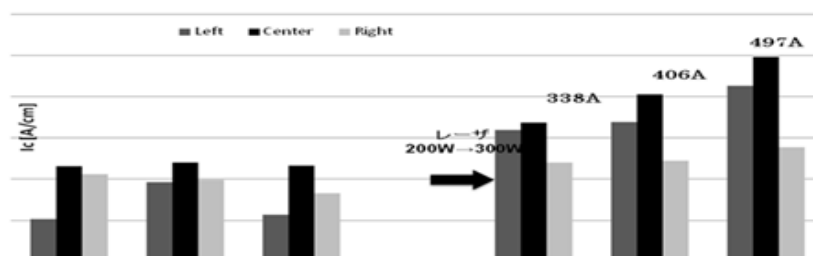


図 2.4.3-47 30 mm-w 線材の I_c 値分布の向上推移

図 2.4.3-48 に 300 W レーザで作製した 30 mm-w 線材を 4 mm-w に機械的スリットした場合の 15 m 長線材の I_c 値分布の代表例を示す。15 m 長の 4 mm-w 線材では最大 $I_c = 178 \sim 190$ A/4 mm-w ($I_c = 445 \sim 475$ A/cm-w) の I_c 特性が得られた。一方、図 2.4.3-49 に 200 W レーザで作製した 2 mm-w 線材の I_c 特性の代表例を示す。中間目標値である 2 mm-w -300 A/cm-w (60 A/2 mm-w)-長さ 50 m に対し、2 mm-w -285 ~ 310 A/cm-w (57 ~ 62 A/2 mm-w)-長さ 28 m が得られた。2 mm-w 線材においても 300 W レーザで作製した高 I_c 特性を有す 30 mm-w 線材を機械的スリット加工することで、H22 年度中の中間目標値の達成が見込まれた。これら特性均一線材作製技術開発においては、中間層及び PLD 超電導層の成膜プロセス条件と XRD 評価装置による結晶性評価及び SEM・AFM 観察から得られる各層の最表面組織の関係を調査し、最適な成膜プロセスの開発を実施した。

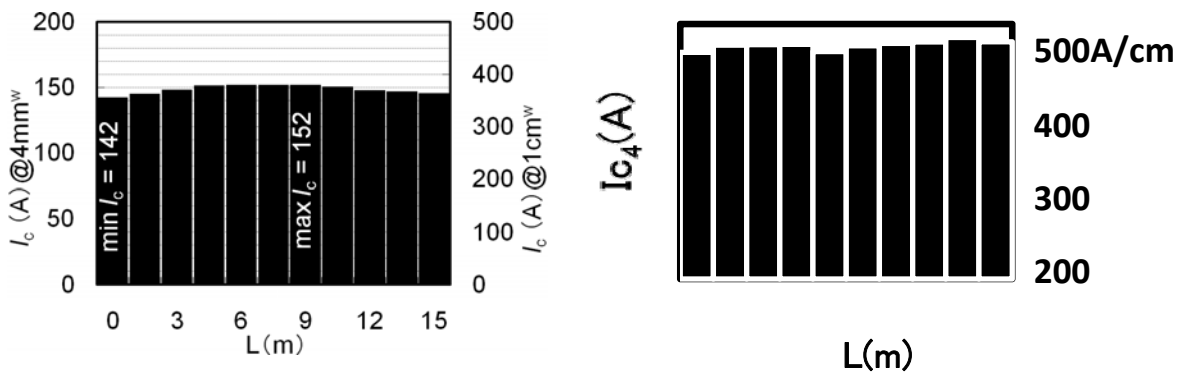


図 2.4.3-48 4 mm-w 線材の I_c 値分布

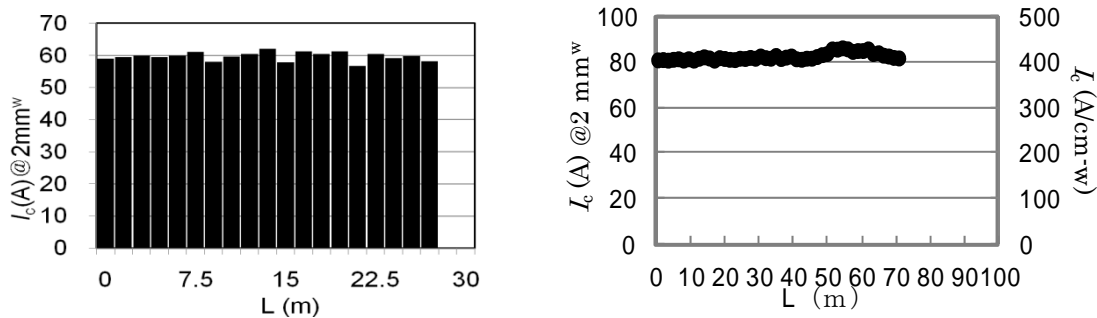


図 2.4.3-49 2 mm-w 線材の I_c 値分布 (30 m 長級) 図 2.4.3-50 2 mm-w 線材の I_c 値分布 (70 m 長級)

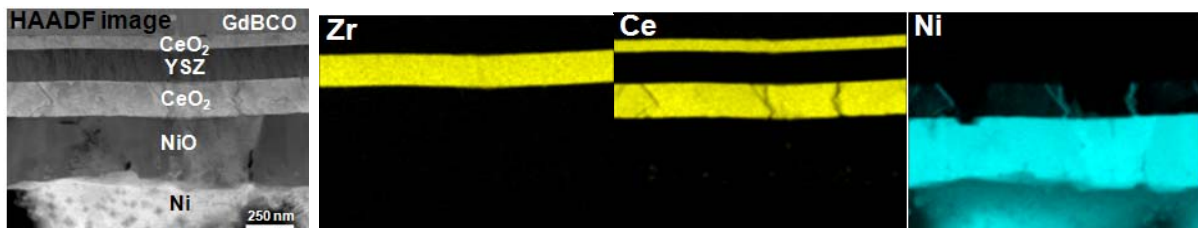
本研究開発の実施により、30 m 長級の線材において高 I_c 値かつ長手方向に均一な特性を有する結晶粒配向金属基板-PLD 線材の作製技術を開発し、66 kV 大電流ケーブル用線材の安定製造に反映させた。また、30 m 長級の線材作製技術を 100 m 長級へスケールアップすることにより、中間目標である 2 mm-w - $I_c = 300$ A/cm-w-50 m に対し、2 mm-w - $I_c = 400$ A/cm-w-72 m を達成した (図 2.4.3-50)。また、この線材の技術コストは 3.0 円/Am (基板 0.23 円/Am、中間層 0.68 円/Am、超電導層 1.91 円/Am、安定化層 0.18 円/Am) である。

平成 23~24 年度は、平成 22 年度までに開発した技術を基に、最終目標である 2 mm-w $\cdot I_c = 500$ A/cm-w(@77K,s.f.)-200 m 長の長尺線材に向けた線材作製を行った。中間目標からのさらなる高 I_c 化及び特性均一化のための開発項目として、結晶粒配向性が向上した結晶粒配向基板の使用、中間層の最適化、PLD プロセスにおける成膜温度均一化による超電導層特性の幅方向均一性向上、高 I_c 化のための PLD プロセス最適化が挙げられる。

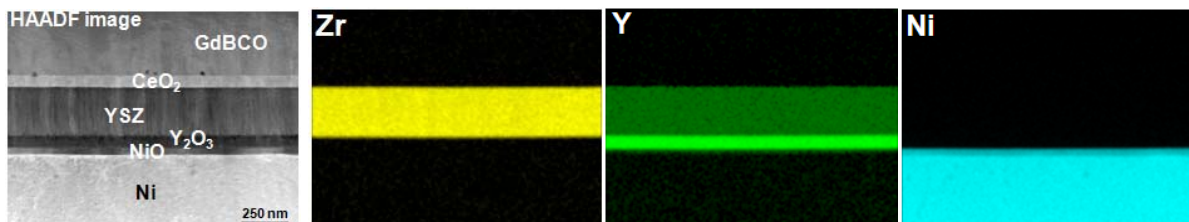
中間層については、JFCC にて線材断面の微細組織を STEM 及び EDX 元素マッピングによる検討を行った。図 2.4.3-51(a)に、EDS 元素マッピング結果とマッピング領域の High-angle Annular Dark Field (HAADF) 像を示す。基板上部から中間層、超電導層を観察した結果、基板表面に Ni の酸化物が生成され、Ni の酸化物の厚みが一定でないため中間層表面が波打ち状となっていた。これは、超電導層下部の電流の阻害要因になると考えられるため、Ni の酸化を抑制する必要があることが示唆された。また、CeO₂ seed 層にはクラックが発生し、基板元素が拡散していることが明らかとなった。クラック発生の一因の一つとして、Ni の酸化物によって形成された基板の凹凸による応力が考えられ、基板表面の酸化抑制方法を検討した。

基板表面の酸化抑制方法として、seed 層の材料を酸素原子の拡散係数の大きい CeO₂ から酸素拡散係数が小さく格子定数の近い Y₂O₃ に変更する方法を採用した。図 2.4.3-51(b)に、Y₂O₃ seed 層を用いた超電導線材の EDS 元素マッピング結果とマッピング領域の HAADF 像を示す。Y₂O₃ seed 層を用いた結果、酸化物の生成が抑制され、中間層の波打ちは観られず、Y₂O₃ seed 層にはクラックの発生も解消した。

結晶粒配向性の向上した基板 ($\Delta\phi = 4.8\sim 4.5$ 度、従来の基板は $\Delta\phi = 5.5\sim 6.0$ 度) 上で、Y₂O₃ の結晶粒配向化条件の確立を行った結果、 $\Delta\phi = 5.6$ 度と、CeO₂ seed 層と同じ配向性を持つ Y₂O₃ の seed 層の作製条件を確立した。CeO₂ seed 層と Y₂O₃ の



(a) CeO₂ seed 層線材



(b) Y₂O₃ seed 層線材

図 2.4.3-51 CeO₂ seed 層線材(a)と Y₂O₃ seed 層線材(b)の HAADF 像と EDS 元素マッピング

seed 層上に YSZ / CeO₂ 層を形成し、超電導層を 2.5 μm 成膜して I_c 値を比較した結果、Y₂O₃ seed 層を用いた超電導層の方が高 I_c 値であることが分かった。以上より、クラッドタイプ結晶粒配向基板には Y₂O₃ seed 層の方が適当であることが明らかとなり、結晶粒配向基板-PLD 線材に最適な中間層構造を開発した。

高 I_c 化のための PLD プロセス最適化については、開発した中間層上においてターゲット上でのレーザエネルギーの制御技術、多層・厚膜化技術及び多層化での温度制御技術の向上を行った。

以上の技術開発を組み合わせ製造した超電導線材の、幅方向の I_c 特性分布を図 2.4.3-52 に示す。3 cm-w の全領域で 500 A/cm-w 級の I_c 特性を持つ線材の作製技術を確立した。また、得られた幅方向 I_c 特性均一性向上技術を長尺線材製造条件へ反映させることで、最終目標である $I_c = 500$ A/cm-w、200 m 長級（ただし、10 mm-w）の線材作製技術を確立した（図 2.4.3-53）。今後の課題は、長尺細線加工において J_c 特性劣化の少ないレーザ加工技術を適用することである。

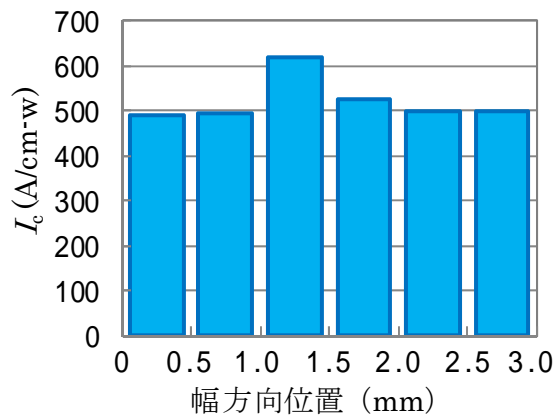


図 2.4.3-52 I_c 特性の 3 cm-w 方向分布

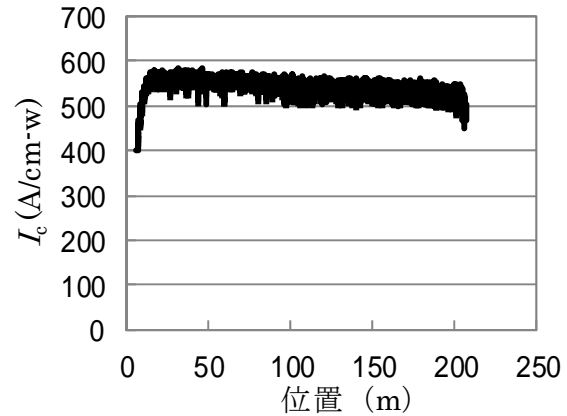


図 2.4.3-53 200 m 級超電導層の I_c 特性

(7) 線材特性分布評価

a. PLD 線材のマイクロ特性分布評価

局所的な損失発生箇所を低温レーザー顕微法によって特定し、プロセスとの関係を明らかにすることによって、均一性の向上に貢献した。また、損失分布と細線加工時の J_c - B 特性との関係を調べることによって、均一性の向上が中、低磁場中での J_c 向上に有効であることを示した。図 2.4.3-54 (a) に均一性改善プロセスによる線材の自己磁場における局所損失分布、同図(b)に従来プロセスでの分布、同図(c)にそれぞれの線材の J_c - B 特性を示す^(6, 7)。

また、素線のマルチフィラメント加工並びに細線化加工において重要となるテープ線材内の J_c 値の面内分布評価手法として、磁気顕微法を基に非接触かつ非破壊に J_c 値分布を定量的に評価可能な手法を開発した。1 cm-w の PLD-GdBCO 線材並びに機械加工によって 4 mm-w の線材に加工した細線化試料の線幅方向の J_c 値分布を評価した結果を、それぞれ図 2.4.3-55 (a)、(b)に示す。いずれの場合も、方形波状の均一な J_c 値を線材幅方向に亘って得られていることが分かる。線材の左右で反転しているのは、磁気遮蔽電流が反転していることを意味しており、測定原理に依る。本評価は、加工プロセス前後の信頼性の検証に加え、細線化した素線を用いて集合導体を形成する際の設計指針に有益な知見を提供した。

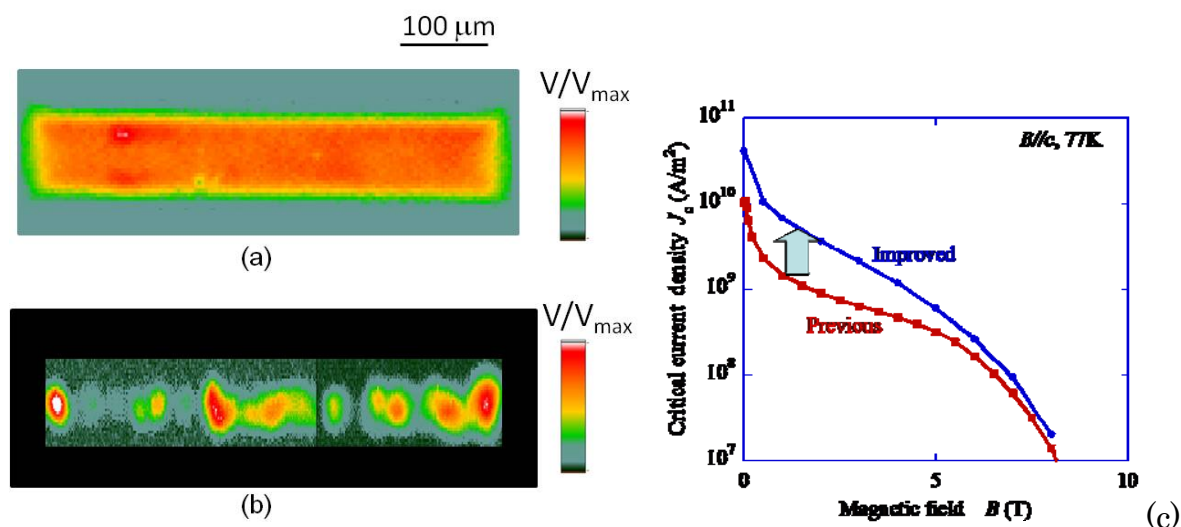


図 2.4.3-54 局所均一性の改善と J_c 値の向上：レーザー顕微法による局所損失の可視化

- (a)改善プロセス、(b)従来プロセス、
(c)それぞれの線材における J_c - B 特性

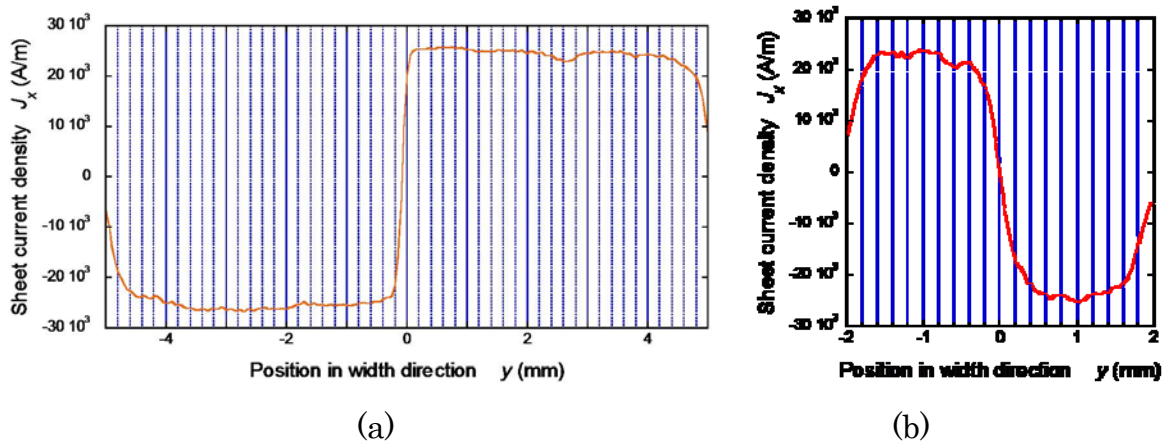


図 2.4.3-55 磁気顕微法を用い外部磁場より評価した線材内の幅方向 J_c 値分布
 (a) 1 cm-w PLD-GdBCO 線材(105 mT の外部磁場中)、
 (b) 4 mm-w 加工線材の J_c 値分布

b. 最適細線加工プロセスの開発支援と長尺細線加工線材の検証

平成 23～24 年度は、各種細線加工法による線材端部の劣化領域を、磁気顕微法を用いて定量的に評価し、最適加工のための条件を明らかにするとともに、本手法を用いて加工された長尺細線の評価を実施し、その健全性と再現性とを検証することによって、ケーブル導体用低損失素線の開発に大きく貢献した。走査型磁気顕微法によって可能となる線材の長手方向のみならず幅方向の I_c 値分布の情報を基に、線材の電磁氣的有効幅という概念を初めて提出し、加工線材の材料指標としての有用性を実証した。図 2.4.3-56 に各種加工プロセスによる 2 mm-w 加工線材の有効線幅の評価結果を示す。レーザーカットは機械スリットに比べ端部での劣化が少なく、また、レーザーを基板側より入射した際に最も良好な切断が可能であることを明らかとした。

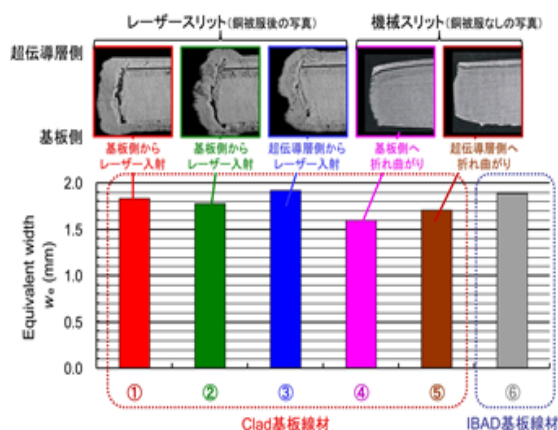


図 2.4.3-56 各種加工法による 2 mm-w 加工線材の端部拡大図と磁気顕微法によって評価した有効線幅。 の加工法が最適であることが分かる⁸⁾。

さらに、レーザ加工プロセスを長尺線材に適用した結果、短尺線材と同等の性能を維持できることを、図 2.4.3-57 に示す長尺線材の磁気顕微評価の結果より検証した。

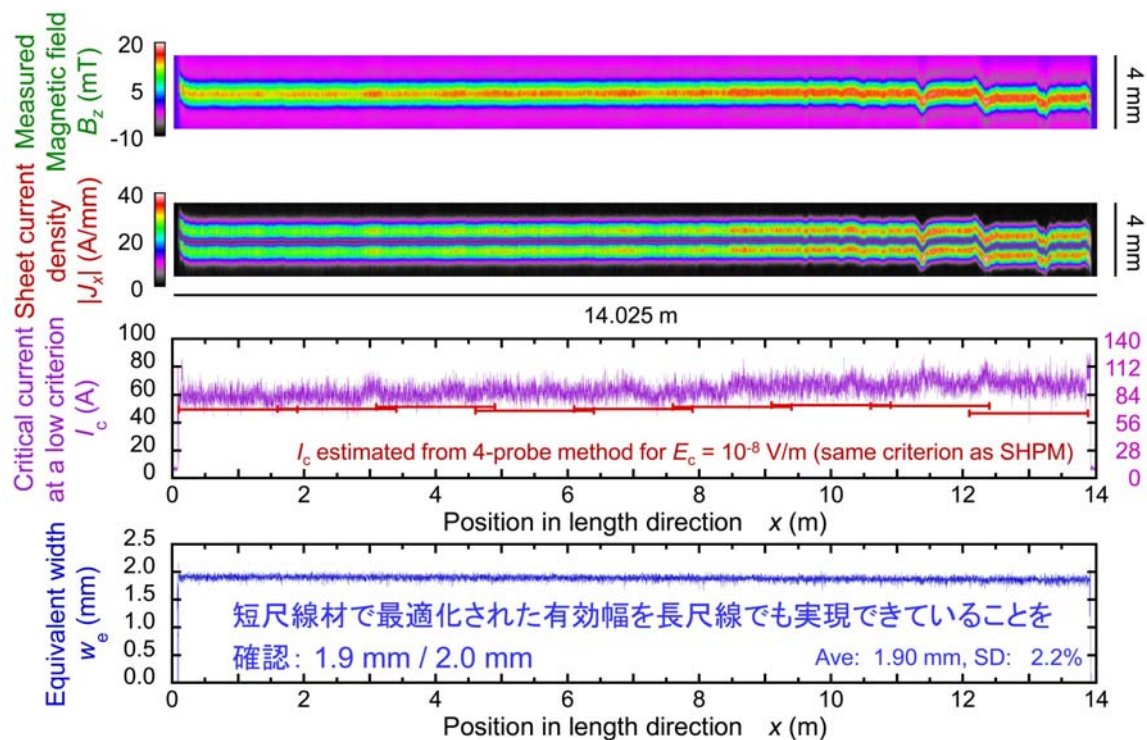


図 2.4.3-57 最適レーザ加工プロセスによる 2 mm-w 細線化 14 m 長線材評価結果

(8) 線材特性分布評価

本項では、世界に先駆けて本研究開発において見出した REBCO 超電導線材特有のユニークな電磁現象について報告する。本現象は、めざしている電気機器に要求される電流・磁場変動運転時の低交流損失化のみならず、加速器等直流運転機器の磁化低減(磁化による発生磁場の乱れ抑制)にも大きく貢献する。

図 2.4.3-58 に、IBAD-PLD 法により ISTEK において作製された GZO 中間層を持つ GdBCO 線材の磁化曲線を示している。図(a)は 35 K において ab 面内に対する磁場印加角度を 90 度(c 軸方向)から 10 度まで 5 度刻みで変えた際の磁化曲線である。従来の臨界状態モデルに従えば、磁化曲線はほぼ上下左右対称であるが、観測した磁化は、外部磁場を正負の磁場ピークから減らし始めた直後にゼロ付近を通る軌跡を描いた後、通常の J_c 値に比例する軌跡に戻っている。また、外部磁場がゼロを横切る時、すなわち外部磁場の方向が変わる時、磁化が大きく減少していることが分かる。さらに、印加角度 10 度では磁化曲線が膨らんでいない。図 2.4.3-58(b)は対応する交流損失の測定値である。交流損失は従来理論では垂直磁場： $\theta = 90$ 度の値に対し $\sin\theta$ で減少するのに対し $\theta = 10$ 度, 15 度では測定値は二桁以上も減っている。この傾向は磁場が高いほど、温度が低いほど、 θ が小さいほど顕著になった。図 2.4.3-59(a),(b),(c),(d)は 77 K、64 K において 1 T、2 T のバイアス磁場を印加し $\theta = 15$ 度で測定した磁化曲線と交流損失である。77 K、バイアス磁場が 2 T の場合、磁場振幅 0.5 T まで磁化曲線は膨らまず、交流損失も従来理論の予測値より 2 桁以上も小さいことが分かる。また、図 2.4.3-60(a), (b)には 35 K ではあるが θ が 15 度と 60 度の場合のバイアス磁場中の磁化曲線と交流損失の測定結果を示している。 $\theta = 60$ 度でも温度が下

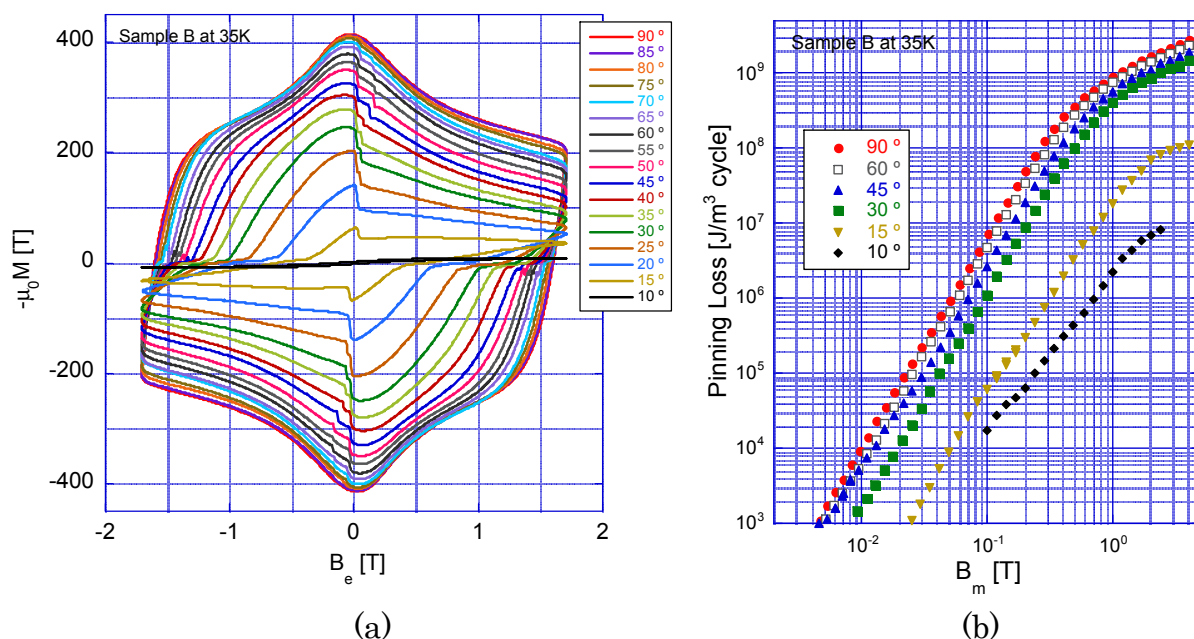
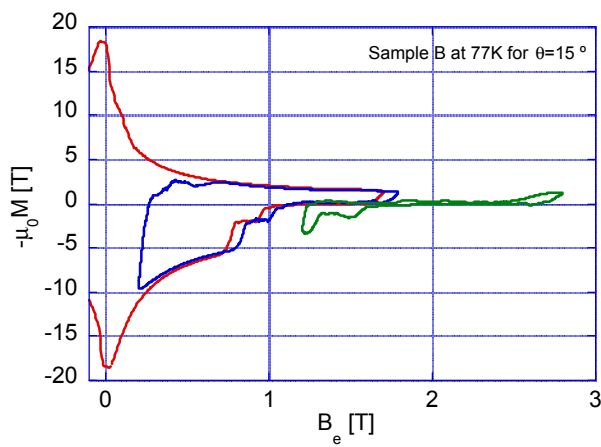
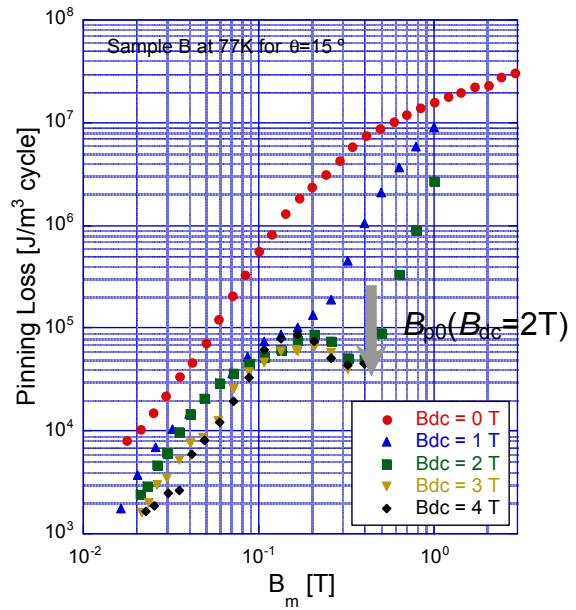


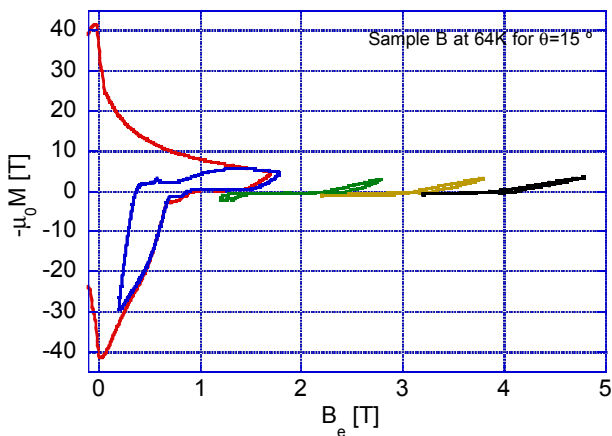
図 2.4.3-58 IBAD-PLD 法により作製した GZO 中間層を持つ GdBCO 線 35 K における(a)磁化曲線と(b)交流損失の磁場振幅依存性



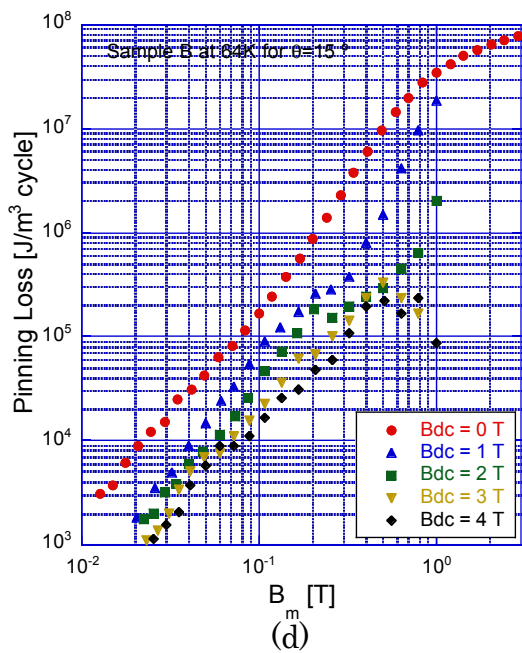
(a)



(b)



(c)



(d)

図 2.4.3-59 IBAD-PLD 法により作製した GZO 中間層を持つ GdBCO 線材のバイアス磁場中、(a)(b)77 K、(c)(d)64 K における磁化曲線と交流損失 ($\theta = 15$ 度)

げ、磁場を高くするとこの小磁化・低交流損失現象は発現している。

本研究では、この現象が REBCO 超電導薄膜に特有の現象であること、また結晶粒面内配向度 $\Delta\phi$ が小さい、すなわち結晶粒の配向性が良い線材ほど、この現象が顕著であることを確認した。この現象の発現機構については、詳細な臨界電流の磁場 B 、温度 T 、磁界印加角度 依存性、さらに線材周囲のポインティングベクトル測定による磁束進入方向の同定、交流損失の測定等、多角的に検討を進めた。

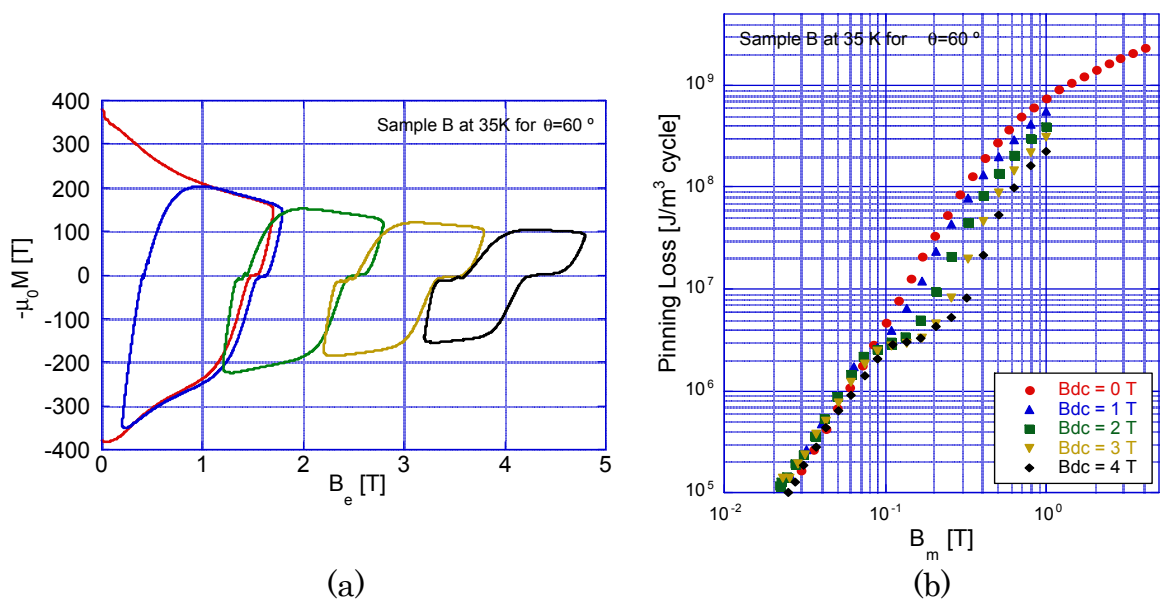


図 2.4.3-60 IBAD-PLD 法により作製した GZO 中間層を持つ GdBCO 線材の 35 K、バイアス磁場中における(a)磁化曲線と(b)交流損失

一例として、図 2.4.3-61 に線材周囲の磁束変化量の観測結果を示す。図 2.4.3-61(a) が 0 T バイアス磁界中で新現象が発現していない場合、図 2.4.3-61(b) が 4 T バイアス磁界中で新現象が発現している場合である。いずれにおいても、外部磁界は矢印の方向（テープ面に対し 15° ）に印加している。これより、新現象が発現する場合には、磁束がテープ面に平行に侵入していることがわかる。この結果は、我々が提唱している発現機構、すなわち、系の自由エネルギーが低くなるようにテープ面に平行に磁束が侵入する、これにより交流損失が減少する、というモデルを支持している。

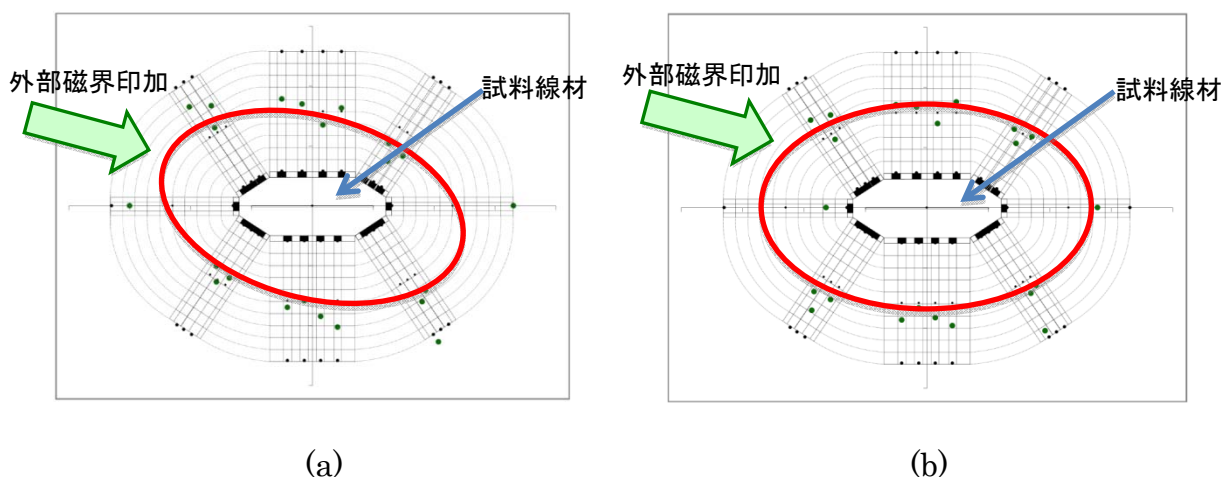


図 2.4.3-61 (a) 0 T バイアス磁界、(b) 4 T バイアス磁界中において観測された線材周囲の磁束変化量。緑色シンボルが測定値。赤実線は測定値のフィッティングライン。

(9) 線材特性分布評価

IBAD-MgO を用いた CeO_2 中間層の上に PLD 法により Gd123 超電導層を積層した高 I_c 特性の線材の幅方向の J_c 値分布を磁気ナイフ法で測定した(図 2.4.3-62)。幅方向にみて中央付近に、スパイク状の J_c 値低下部分が観られる。同じ部分の線材の MO 観察(図 2.4.3-63)において、長手方向に線上に劣化部分が観測され、磁気ナイフ法で測定した J_c 値分布が低下している部分と対応している。これは、超電導層積層前の基板・中間層に存在したスクラッチ状の不良・欠陥部の影響と考えられる。

また、線材の長手方向の I_c 特性分布は必ずしも均一ではない。線材長手方向の I_c 特性のばらつきの標準偏差 σ が異なる線材で小コイルを巻いたときの総発熱と最大電界を理論的に求めた(図 2.4.3-64~65)。その結果、線材の I_c 特性のばらつきは、ホットスポット形成等に関する最大電界に特に大きな影響を与えることが分かった。

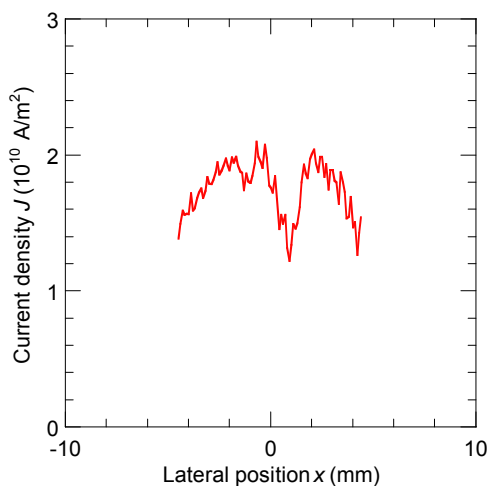


図 2.4.3-62 幅方向 J_c 値分布

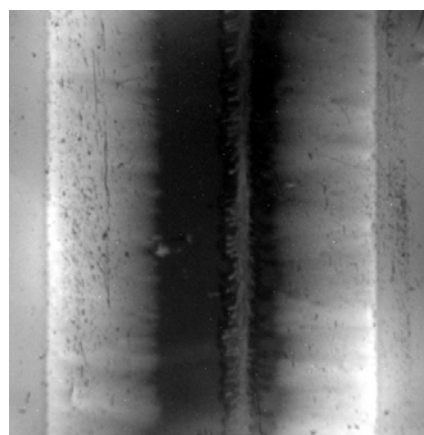


図 2.4.3-63 線材の MO 観察結果

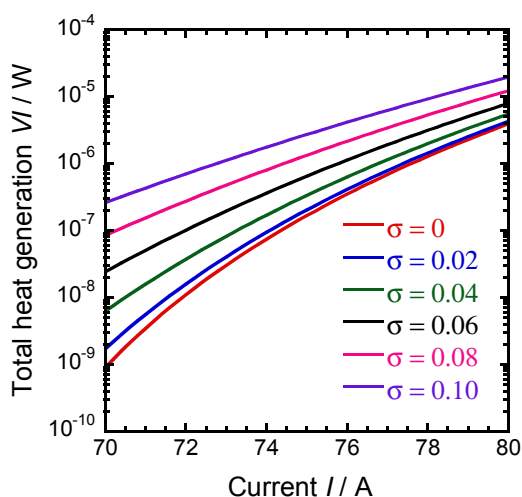


図 2.4.3-64 I_c 特性のばらつきとコイル総発熱

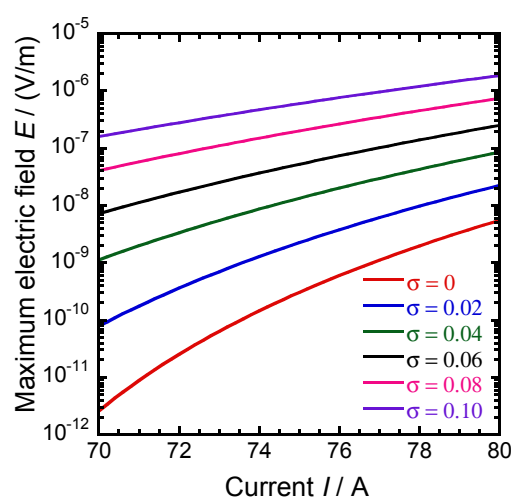


図 2.4.3-65 I_c 特性のばらつきとコイル内の最大電界

(10) 組織観察

透過型電子顕微鏡(TEM)観察から、線材の長手方向及び幅方向の均一性を損なう原因を示し、これらを改善することにより交流損失低減に耐えうる線材作製技術開発を支援することを目的とする。本節では、長尺 PLD 線材の長手方向の超電導特性改善を示すため、高 I_c 値領域と低 I_c 値領域の TEM 断面観察を行い、それらの微細組織の違いから、低 I_c 値領域となった原因を解明し、プロセスを改善することにより長手方向の均一化に貢献した結果について述べる。図 2.4.3-66 に高 I_c 値領域の PLD-GdBa₂Cu₃O_y(Gd123)層の断面 TEM 像を示し、TEM 像の A 及び B 領域からの電子回折図形を(a)、(b)に示す。高 I_c 値領域では、Gd123 層は、殆ど c 軸配向結晶により構成されている。しかしながら、A で示す Gd123 結晶は、基板に垂直な方向に対し c 軸が傾斜した結晶である。高 I_c 値領域でも Gd123 層表層に、このような結晶粒の配向が乱れた結晶がいくつか観察されるが、集束イオンビーム(FIB)・走査電子顕微鏡(SEM)デュアルビームシステムによる 3 次元解析⁹⁾から、結晶粒の配向が乱れた結晶は超電導層の 1 %未満であることが分かっている。これに対し低 I_c 値領域(図 2.4.3-67)では、超電導層の大部分が a 軸配向結晶粒で構成されている。 a 軸配向結晶粒は基板温度が低下した場合に、発生することが知られていることから、低 I_c 値領域は成膜時の温度低下が原因であると考えた。そのため、TEM による微細組織観察から、長尺線材への長手方向の均一化のためには、成膜温度の管理が極めて重要であることを示すことができ、長尺線材プロセス開発に貢献した。

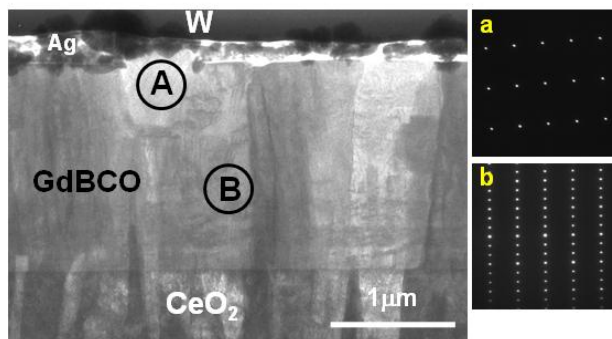


図 2.4.3-66 高 I_c 値領域の PLD-Gd123 層の断面 TEM 像
(a)TEM 像 A 領域
(b)TEM 像 B 領域の電子回折図形

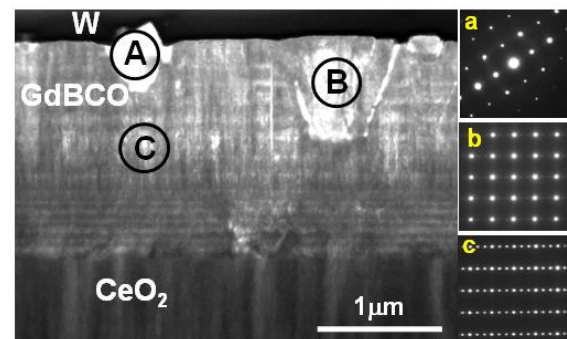


図 2.4.3-67 低 I_c 値領域の PLD-Gd123 層の断面 TEM 像
(a)TEM 像 A 領域、(b)TEM 像 B 領域、(c)TEM 像 C 領域の電子回折図形

線材の長手方向及び幅方向に均一な超電導特性を有する線材を作製するためには、局所的な欠陥を取り除くことが重要である。これまでの線材では、超電導層表面に介在物が分布していることを確認している。図 2.4.3-68 は PLD-Gd123 層表面に存在する介在物の断面 TEM 像である。図 2.4.3-69 に図 2.4.3-68 波線枠領域の EDS 元素マッピング結果を示す。介在物は楕円状の粒子であり、その下部に CeO₂ 層が確認でき

るが、Gd123層については、わずかに確認できるのみである。そのため、PLD-Gd123層の成膜前に介在物がCeO₂層表面に付着したと考えられる。さらに、EDS分析から、介在物は基板である Hastelloy™ 成分を含んでいることが分かる。PLD長尺線材の作製には、Reel to Reelテープ搬送システムを用いて、 Hastelloy™ 基板上に中間層及び超電導層を形成する。図2.4.3-68で示すような介在物は基板搬送中に基板の一部が削られ、CeO₂層表面に付着したと考えられる。これらの介在物を除去するため、中間層成膜前及び超電導層成膜前に拭き取り工程を取り入れ、均一な超電導層特性を有する線材作製に成功した。以上のような介在物を同定することにより、超電導線材均質化のためのプロセス開発を支援した。

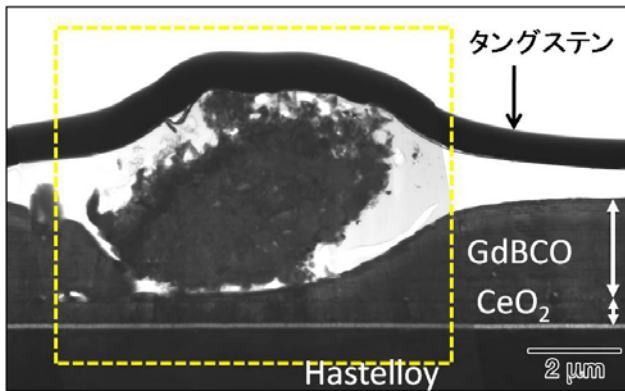


図 2.4.3-68 PLD-Gd123層表面に存在する介在物の断面TEM像

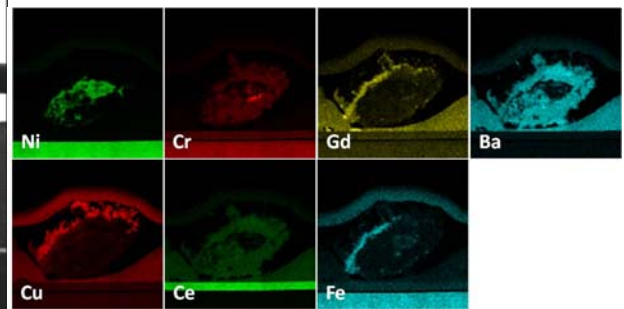


図 2.4.3-69 図 2.4.3-68 波線枠領域のEDS元素マッピング結果

2.4.3-2 細線加工技術開発

(1) IBAD 基板—PLD/MOD 線材の細線加工技術開発①

前 NEDO 事業の「超電導応用基盤技術開発(第 II 期)」プロジェクトで基礎が築かれたレーザスクライビング細線化溝加工手法(レーザ照射と化学エッチングを組み合わせた方法)について詳細な検討を行った結果、表 2.4.3-1 のような技術課題が存在することがわかった。項目分けした課題について、それぞれの具体的な問題点と発生原因の考察を示す。

表 2.4.3-1 細線加工技術開発における主な技術課題

技術課題項目	具体的問題	課題の発生原因の考察
フィラメント間電気絶縁の安定化	抵抗が 1 Ω から 1 MΩ まで幅広く分布し、再現性に乏しかった	レーザで溶かされたハステロイが固まりドロスとなって電気絶縁不良を起こした
溝幅の減少と制御	超電導層に 300-500 μm のオーバーエッチが発生	硝酸系エッチング液に対して、超電導層のエッチングレートが銀層よりも高い
化学エッチングの短縮	エッチングはバッチ式で 1 回のエッチング時間が 30 分以上	
剥離対策	加工後の熱サイクルで剥離が頻発	線材の経時変化、剥離の起点、機械強度等が不明だった
長尺線材対応プロセス開発	エッチング方式の問題	バッチ式では処理できる線材長は 4.5 m と短い
マスクテープ選定	実績のあるカプトン粘着テープは 50 m 長を超えるものが市販されていない	カプトンテープに替わる粘着テープの探索が必要
溝内の残留物除去	ドロス及びエッチング成分の残留が発生した	ドロス発生防止や残留物除去の研究が必要
レーザ照射の位置精度	レーザ照射の設定位置ずれは 10 μm 以上、巻き返し後は 100 μm のずれが生じた	1 ライン毎のレーザ照射のため巻き返しによる機械的位置ずれが生じた

レーザスクライビング細線加工手法でめざすマルチフィラメント線材の模式図を図 2.4.3-70 に示す。安定化銀層及び超電導層までが細線化され、バッファ層(中間層)やハステロイ™ 基板はそのまま残った構造となり、フィラメント間電気絶縁を確保しながら 5 mm-w を維持した構造となっている。ここでは簡単のため、3 分割線材を模した図を示した。

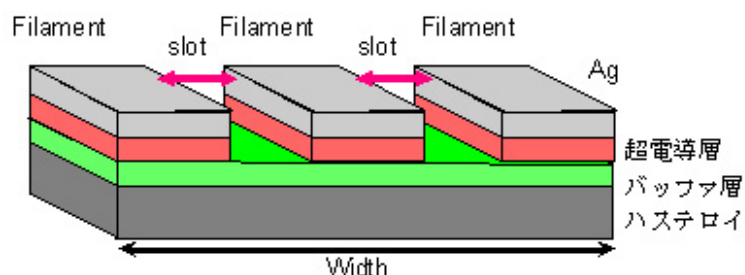


図 2.4.3-70 マルチフィラメント線材の構造の模式図

従来の加工プロセスにおけるフィラメント間の電気絶縁不良の原因を探るため、エッチング後の溝付近の三次元観察を行った結果を図 2.4.3-71 に示す。レーザ照射後に、銀層より 30 μm も飛び出るようなドロスが発生していることが分かる。ドロスは Hasteloy™ が熔融凝固したものであり、フィラメント間電気絶縁を確保するためには、ドロスの周辺を数百 μm に亘ってエッチングしなければならないため、フィラメント間隔を低減することは困難である。

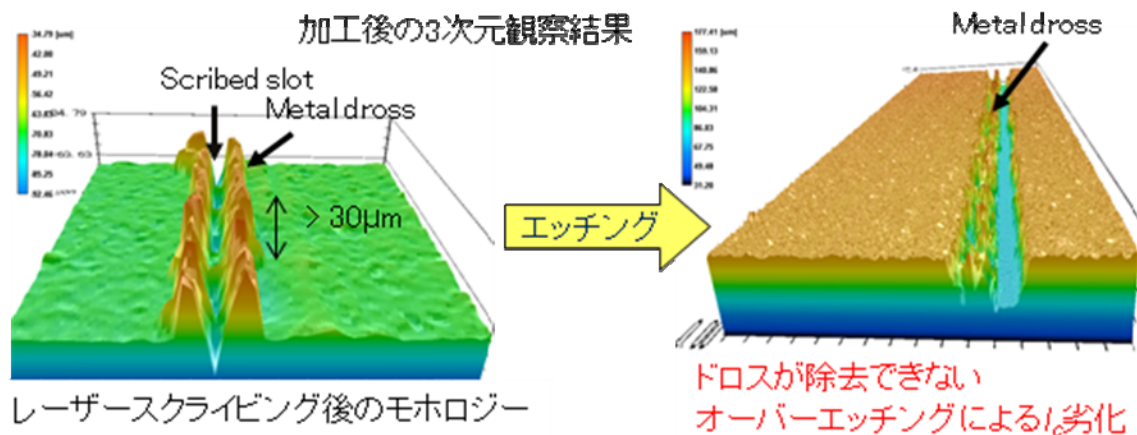


図 2.4.3-71 従来のレーザスクライビング細線化溝加工手法による溝の三次元像観察結果

またエッチング液として用いた硝酸セリウムアンモニウムに対するエッチングレートは銀よりも超電導層の方が高いため、レーザ照射で形成された溝幅よりも超電導層の溝幅は 200~500 μm もオーバーエッチされてしまうという問題もあった。

エッチングに関しても、バッチ式であったため処理できる最大長が 5 m 未満と短く、長尺線材への適用は困難な状態であった。またエッチングのマスク材として用いていた粘着性カプトンテープは、最大長 50 m であり、最終目標で必要な単長 100 m 以上という分割線材へのマスク形成は不可能であった。

・ 改良型加工プロセスの開発

ドロス発生を低減するために、マスクテープと銀層だけに照射されるようにレーザの出力を抑えた。次にエッチング速度を高めつつオーバーエッチを抑えることができるように銀層と超電導層を異なるエッチング液で処理する方法を検討した。特に、超電導層にダメージを与えずに銀層だけをエッチングできるエッチング液として過酸化水素水（濃度 35 wt%）とアンモニア水（濃度 28~30 wt%）を混合した溶液を選択した。図 2.4.3-72 には開発した改良型プロセスのフローを示す。

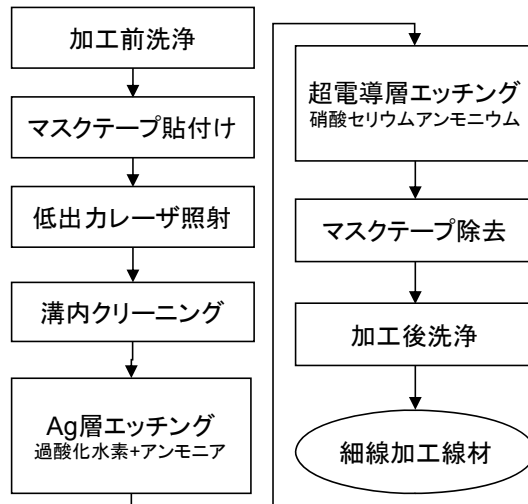


図 2.4.3-72 改良型レーザスクライビング細線加工手法のフローチャート

図 2.3.4-72 での低出力レーザー照射は、紫外線領域で最大 5 W の出力を有する Q スイッチ型のレーザー装置を用いた。改良されたレーザスクライビング細線化溝加工手法を用いて作製した細線化試料の三次元観察及び光学顕微鏡観察を行った結果を図 2.4.3-73～74 に示す。従来型のレーザスクライビングの場合(図 2.4.3-71)と比較して、ドロスの発生が抑えられ、溝の断面が長方形に近い形になっているのがわかる。

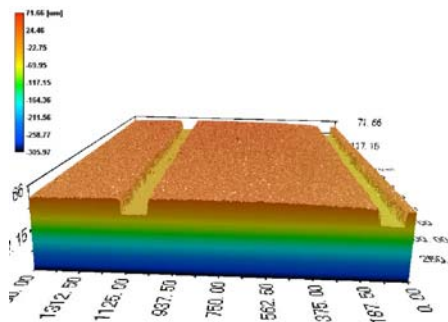


図 2.4.3-73 改良型レーザスクライビング細線化溝加工手法による溝の三次元観察像

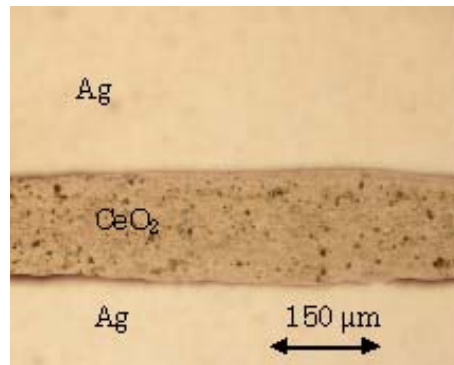


図 2.4.3-74 改良型レーザスクライビング細線化溝加工手法による溝の光学顕微鏡像

ドロスの発生が抑えられ、平坦な溝が形成されるようになったので、溝幅の制御も可能となった。図 2.4.3-75 には、レーザ照射出力と線材の搬送速度だけを変え、他の条件を一定にして溝幅分布を測定した結果を示す。レーザ照射出力(横軸)が増加するほどグラフ中の数値(溝幅)が大きくなり、線材の搬送速度(縦軸)が遅い領域では、線材が切断されてしまう領域(黒色)がある。逆に搬送速度が速く照射出力が低い領域(茶色)ではマスクテープを貫通できずにスクライビングできないことを表している。水色で囲った領域では溝幅の変化がなだらかである。照射出力や搬送速度の微妙なずれが生じた場合でも、この領域に制御すれば安定な溝幅を長尺線材において確保できることがわかった。

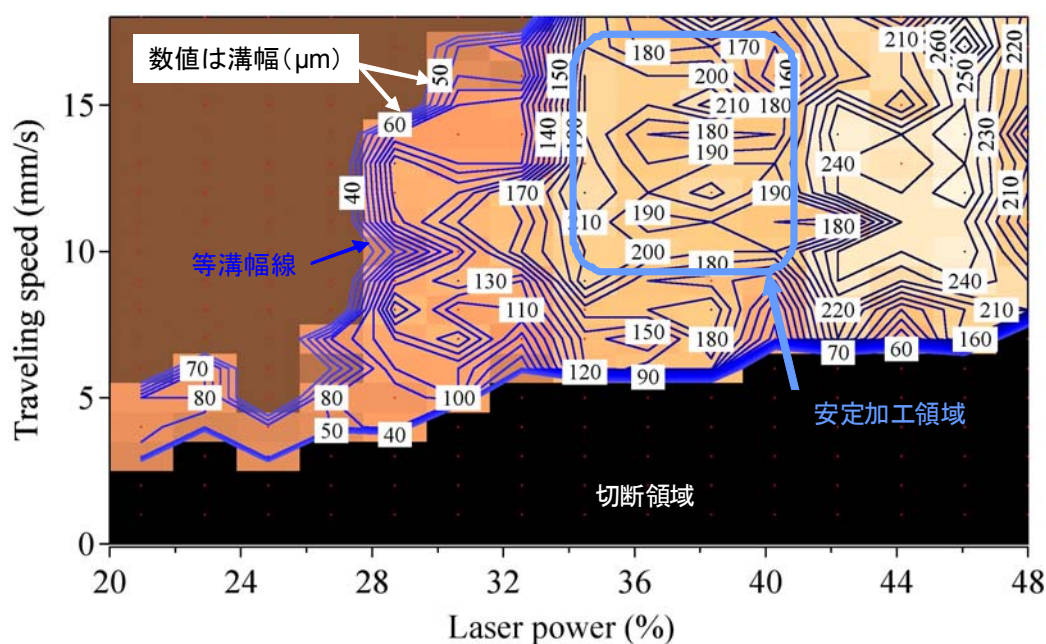


図 2.4.3-75 レーザ照射出力と線材搬送速度の変化による溝幅の制御

上で述べたようにプロジェクト開始時のレーザスクライビング細線加工手法における様々な技術課題の解決が見込めたので、次のステップとして、長尺線材加工用の装置開発を行った。開発したのはマスクテープを Reel to Reel で連続して貼付けられる装置(図 2.4.3-76)とエッチングを Reel to Reel で連続に行える装置(図 2.4.3-77)である。図 2.4.3-77 に示した Reel to Reel エッチング装置は、銀層と超電導層で若干構成が異なっている。銀層のエッチング液として過酸化水素水(H_2O_2)とアンモニア水(NH_3)の混合溶液を用いるが、過酸化水素は分解しやすいので、図中で左側にあるエッチング槽で直接混合する方式を用いている。超電導層のエッチングは従来と同じ硝酸セリウムアンモニウム水を用い、図 2.3.4-77 の左側エッチング槽に満たして行った。どちらのエッチングもリンスは水の吹付けによってクリーニングした。

搬送された線材がリンス槽から出て来る際に、圧縮した空気を表裏面の両方に吹付け、溝中に水分が残留しないようになっている。

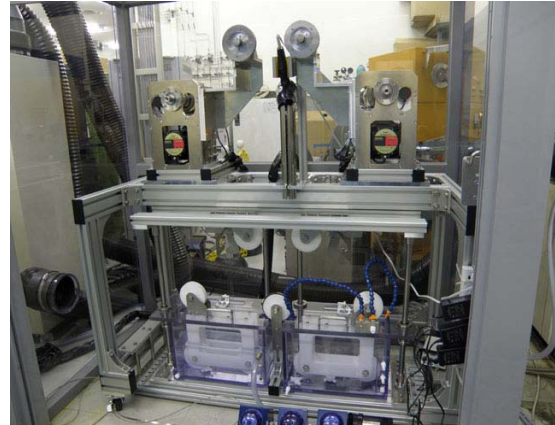


図 2.4.3-76 Reel to Reel マスクテープ 貼り合わせ機の外観 図 2.4.3-77 Reel to Reel エッチング 貼り合わせ機の外観

開発したこれらの長尺線材加工用の装置を用いて、まず 5 mm-w 30 m 長の線材の 3 分割加工を行った。ここで用いたマスクテープはゴム系粘着材を使用したポリエステルテープであった。加工前後の End to End の I_c 特性の変化を図 2.4.3-78 に示した。加工前の I_c 値は $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ の基準で $118.1 \text{ A}/5 \text{ mm-w} (@77\text{K}, \text{s.f.})$ で、加工後は各フィラメントの I_c 値 (@77K, s.f.) が 35.6 A 、 35.3 A 、 29.8 A となった。これらを合計した総 I_c 値は 101 A であり低下率は 14.7% となるが、レーザスクライビングによる断面積減少率は 12.4% であったので、加工によって低下した I_c 特性の割合は 2.3% と非常に低い値を得ることができた。

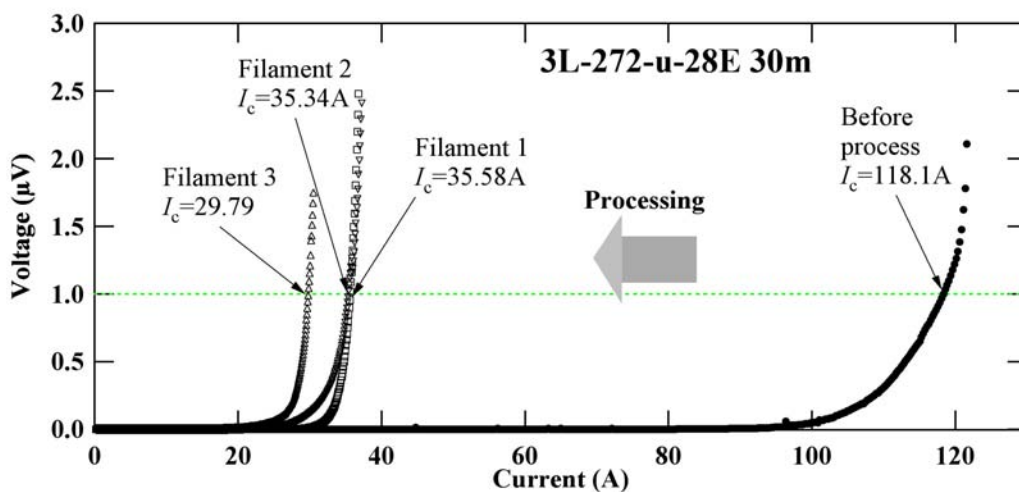


図 2.4.3-78 ポリエステルテープを用いた 5 mm-w 30 m 3 分割加工前後の I_c 値

交流電流印加時に均流条件が満たされる電流は最も低い I_c 値のフィラメントで規定される。したがって、[全フィラメント中で最低の I_c 値×分割数]が実効的な I_c 値ということになるので、 $29.79 \times 3 = 89.4$ A が実効的な I_c 値である。理想的に均一な線材を均一な線幅/ダメージ幅で加工した場合、この実行 I_c 値は、前述のフィラメント I_c の合計と一致する。フィラメント間抵抗は 30 m 長で 100 k Ω を超えており、1 cm あたり 100 M Ω であったので、内部目標値(1 cm あたり 0.1 M Ω 以上)をはるかに超えることができた。

次に、中間目標である 5 mm-w 5 分割 50 m 線材の加工を行った結果を図 2.4.3-79 に示す。加工前の I_c 値は 95.1 A/5 mm-w(@77K,s.f.)であったものが、5 分割加工によって表 2.4.3-2 に示す I_c 値のフィラメントに分割された。ここでマスクテープにはゴム系よりも除去が容易なアクリル系粘着材を使用したポリプロピレンテープを用いた。また線長が長くなり、短尺での I_c 値の定義である 1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ では線材の焼失の危険性があるため、定義を 0.5 $\mu\text{V}/\text{cm}$ に引き下げて、 I_c 値算出にとっては通常よりも厳しい条件とした。フィラメント間抵抗は 1 cm あたり 0.5 M Ω を超えており、0.1 M Ωcm 以上という要求を満たしていた。平均の溝幅は約 350 μm であったので、面積減少率は 30 %であった。各フィラメントの I_c 値の合計は 50.1 A(@77K,s.f.)となり、 I_c 値の低下率は 47.4 %であるので、加工による劣化は約 17 %であった。劣化率を下げるためには、さらなるプロセスの改良が必要である。交流応用上の実効的 I_c 値は 40 A となった。

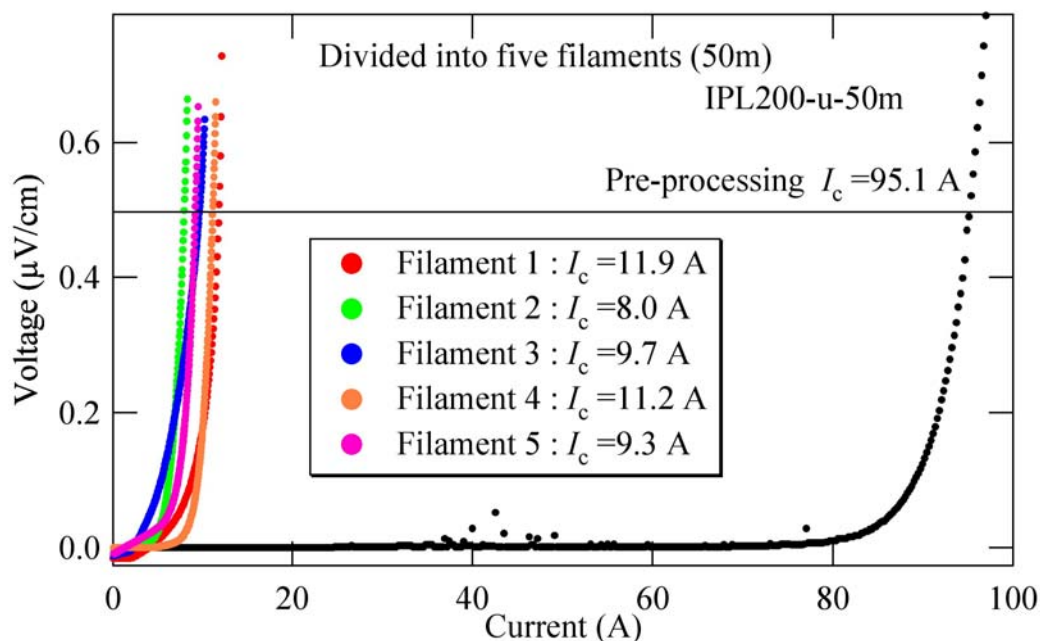


図 2.4.3-79 5 mm-w 50 m 5 分割加工前後の I - V 特性

表 2.4.3-2 5 mm-w 5 分割 50 m 細線加工の結果

Filament	I_c (A)	Between	R (Ω)	R^s (Ω/cm)
#1	11.9	F1-F2	101	505,000
#2	8.0	F2-F3	178	890,000
#3	9.7	F3-F4	134	670,000
#4	11.2	F4-F5	120	600,000
#5	9.3	F5-F1	105	525,000

中間目標は 50 m 長 5 mm-w 線材の 5 分割加工により、分割加工無しの線材と比較して、交流損失が 1/5 に低減されることを実証することである。素線レベルでの交流損失を把握するために、Reel to Reel 帯磁率の測定を加工前後で行った結果を図 2.4.3-80 に示す。交流磁化率の複素成分(位相成分)は交流損失の最も大きな成分である磁化ヒステリシス損失に比例するため、素線レベルでの損失の相対評価をすることが可能である。

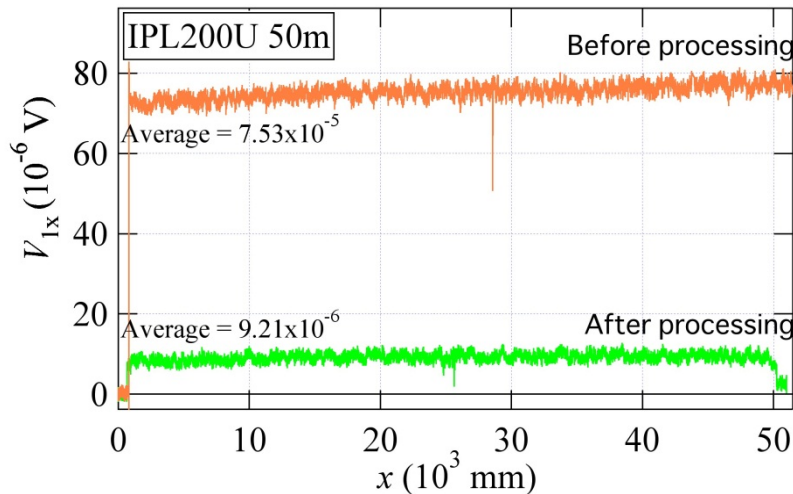


図 2.4.3-80 ヒステリシス損失に比例する帯磁率の分割による変化

この結果は帯磁率が約 8 分の 1 に減少したことを示している。5 分割溝加工であるので、ヒステリシス損失は理想的には 5 分の 1 になるはずであるが、これは I_c 値に比例する量であるので、溝加工前の帯磁率が面積減少率 30 % の割合で減少したと考えると、ヒステリシス損失は約 6 分の 1 となる。すなわち、素線レベルで帯磁率を用いた結果からは、5 分割溝加工によって損失が 5 分の 1 以下に減少したと考えてもよい。その後コイルへの加工を行い、相互インダクタンスのアンバランスの影響からフィラメント分流状態及び分流状態の周波数依存性を評価した。その結果、5 本のフィラメントに ± 10 % 以内のばらつきでほぼ均一な超電導電流が流れていることが確認されるとともに、図 2.4.3-81 に示すように、分流状態の周波数依存性が観測されず、結合損失がないことが実証された。

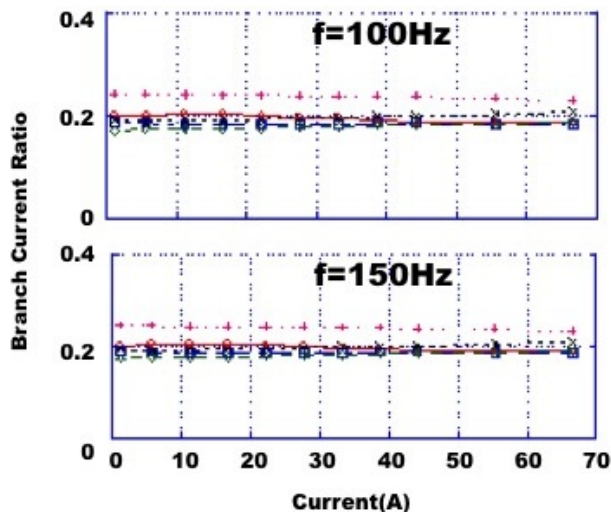


図 2.4.3-81 フィラメント間分流配置での周波数依存性

一方、現行のレーザスクライビング細線化溝加工手法では、エッチング用マスク材料として粘着性プラスチックテープを用いているため、粘着材を含んだマスクテープの厚さは $50 \mu\text{m}$ 以上となり、レーザ照射によるプラスチック基材の縮小を考えると長尺で安定的な溝幅としては $100 \mu\text{m}$ が最小幅とならざるをえない。最終目標である 5 mm-w 10 分割 100 m のマルチフィラメント線材を作製するためには、溝幅 $50 \mu\text{m}$ 以下を長尺に亘って安定的に加工できる手法を開発するという技術課題を克服しなければならない。粘着性マスクテープを使用しない方法であれば 5 mm-w 10 分割溝加工は可能であると予想された。その原理検証のため、超音波援用スピンドルを用いた機械加工によって 10 分割溝加工を試みた。加工した長さは約 15 cm である。用いたブレードの刃厚は $97 \mu\text{m}$ であったので、面積減少率は 17.5% の分割加工となった。加工前の I_c 値は $137 \text{ A}/5 \text{ mm-w} (@77\text{K, s.f.})$ であったので、 I_c 値の低下率は 46% で最小 I_c 値での低下率は 53% であった。最適条件出しを行ったわけではないが、加工による低下率は 28% と高いが、原理的には溝幅を細くして 10 分割に到達することは可能であると考えられるが、機械加工では、微細構造観察でロールケーキ状の欠陥が入ることが判明しており、またブレードの摩耗や破損という事態が生じる (2.4.3-2(7)参照) 可能性がある。したがって機械加工法による長尺対応の装置を開発するのはかなり難易度が高くレーザスクライビング法に注力すべきであると判断した。

H23 年度以降は、 5 mm-w 10 分割線材の最終目標を達成するために、加工品質と加工速度の向上、溝幅の低減という技術課題の克服を図った。まず加工品質の向上について述べる。線材は長手方向に加工することから、点状のレーザ光源ではなく長手方向へ楕円形にビーム形状の伸びた光源を用いる方が線材搬送の速度や z 位置の少々の揺らぎによっても影響を受けにくくなり、切断及びレーザスクライビング加工のいず

れにおいても加工品質が高まることが判明した。そこで YAG レーザの基本波の 3 倍高調波（波長 355nm）を長時間安定に発生できる 10 W、30 kHz の Q スイッチ UV レーザ（パルス幅 34 ns、ビーム品質 $M^2 < 1.2$ ）を光源として用い、光学系にシリンドリカルレンズを導入して線材搬送方向に長軸のある楕円形ビームを加工に用いた。その結果、点状ビームで見られたレーザ照射不良箇所が存在しなくなり、溝とフィラメント間の折れ曲がりもなくなって、場所による溝幅の分布が少なくなったため、歩留り向上に繋がった。この結果は、ただちに変圧器用分割線材作製に適用され、図 2.4.3-72 のフローチャートに示すように洗浄、クリーニング工程を追加したことと合わせ歩留りを 50%から 67%にまで向上することに貢献した。それについては変圧器対応細線安定加工技術開発の項(2.3.4-3)を参照されたい。

次に加工速度の向上について述べる。数百 m に亘って大量の線材を加工するためには、加工速度の向上が重要で、加工が製造工程全体を律速しないためには、少なくとも線材作製速度と同様にする必要がある。まず線材切断速度であるが、上記の楕円形レーザビームの導入によって、これまで 7.2 m/h であった切断速度を 27 m/h まで向上できた。さらに切断速度を高めるべく、アシストガスの噴射圧力を検討した。図 2.4.3-82 は、異なる Q スイッチ周波数における切断速度のガス圧依存性を示している。これは線材裏側（ハステロイ側）からレーザを入射した場合である。

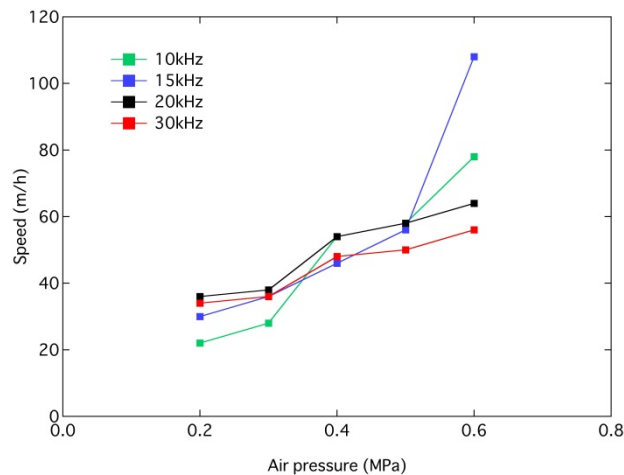


図 2.4.3-82 異なる Q スイッチ周波数における切断速度のガス圧依存性

アシストガスとしては圧縮空気を用いており、この噴射圧力を 0.2 から 0.6 MPa まで変化させて切断速度を測定した結果、どの Q スイッチ周波数においてもガス圧の増加とともに切断速度が増加することが分かった。とりわけ 15 kHz では 100 m/h 以上の切断速度が得られることが分かった。しかしながら、Q スイッチ周波数が低くなると、パルス 1 回あたりのエネルギー総量が増加するため切断面にバリが発生したり、 I_L 値の低下を引き起す等の問題が生じ易いので、通常の目的では 30 kHz での切断とする方がよい。そのため、切断速度は 27~54 m/h とした。

レーザスクライビング法におけるレーザ照射速度は、楕円形ビームの導入によって

これまでの 54 m/h から 180 m/h へと向上することに成功した。

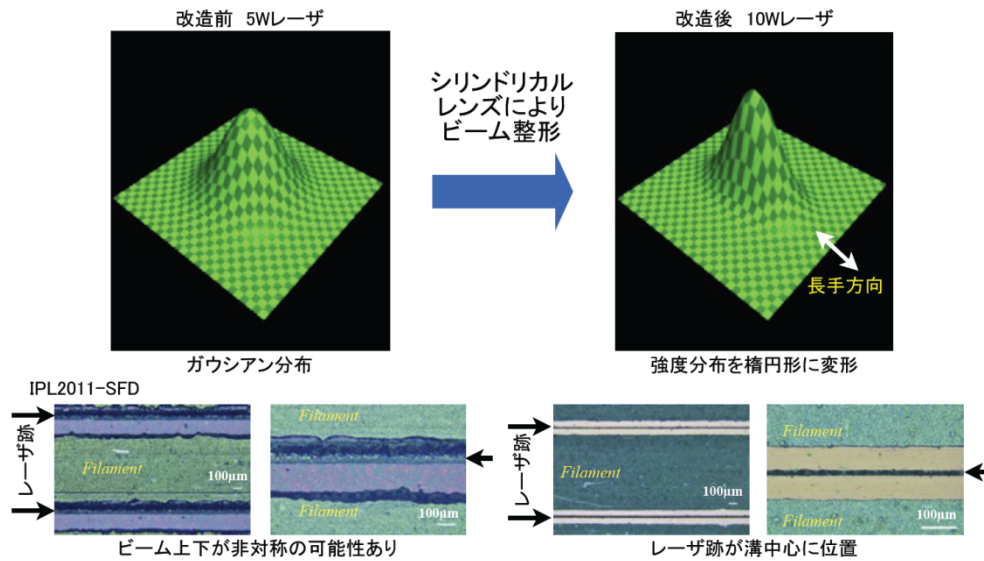


図 2.4.3-83 楕円形ビームの導入効果

エッチング速度を向上させるために、図 2.4.3-77 の Reel to Reel エッチング装置を改良してエッチング槽の長さを縦長にした装置を開発した。図 2.4.3-84 に装置の模式図及び写真を示す。

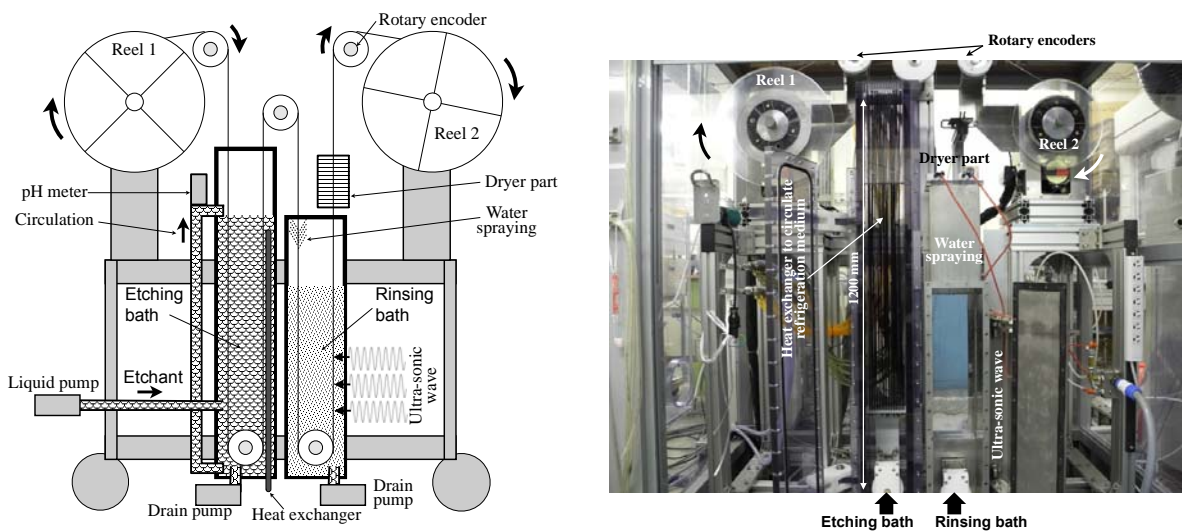


図 2.4.3-84 エッチング速度向上のため開発した縦型エッチング装置

エッチング槽を鉛直方向に延ばすことによって設置面積が同じで、エッチング可能距離を約 6 倍まで延ばすことに成功した。特に Ag エッチングでは過酸化水素水とアンモニア水の混合液を使用しているために、均一な混合をするための工夫が必要であった。以前の装置 (図 2.4.3-77) では、エッチング槽下にマグネットスターラを設置して攪拌子による混合を行っていたが、大型化したため、エッチング槽底部から上部まで混合液を循環させて均一な混合を行った。この循環ラインに pH 検出子及び温度

計において、エッチング液の混合比と温度の制御に用いた。またエッチングする銀量が多くなるため、溶解時の発熱を取り去るための熱交換器を導入する必要があった。熱交換器を金属製にしてしまうとエッチング液で溶かされてしまうため、銅パイプにポリプロピレン被覆を施し、さらにテフロン製の熱収縮チューブで保護したパイプを開発して、これで熱交換を行った。数百 m での線材加工においては、熱交換器に流す不凍液の温度を $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 程度にすることでエッチング液の温度を $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 程度に保つことができた。改良されたエッチング装置を用いることで、これまで 26 m/h であったエッチング速度が 144 m/h に向上した。また後述する溝幅低減のためのエッチング時間の最短化によって最終的にはエッチング速度を 288 m/h まで向上できた。

$5\text{mm-w}10$ 分割加工を成功させるには、溝幅を低減しなければならない。変圧器用の 10 km を超える長さの細線加工の経験から、長尺線材加工での溝幅は $140\text{ }\mu\text{m}$ まで減少させるのが限界であった。これは図 2.4.3-75 に示した安定加工領域の最も狭い溝幅が $140\text{ }\mu\text{m}$ であったこととも対応している。しかし $100\text{ }\mu\text{m}$ を超える溝幅では、10本の溝が必要な10分割加工では、 5 mm 中 1 mm 以上の超電導層を除去することになり、臨界電流を著しく引き下げてしまう。そこで、改めて溝幅を低減するための検討を行った。検討した項目は3つで、マスク方法、エッチング時間短縮及びレーザー照射条件である。

長尺加工で実績のあるマスク材料は粘着剤まで含めた厚さが約 $50\text{ }\mu\text{m}$ のポリプロピレンテープ（耐熱温度 $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）である。楕円形ビームレーザーの短軸方向は約 $20\text{ }\mu\text{m}$ であるので、 $100\text{ }\mu\text{m}$ を超える溝幅はマスク材料の熱収縮と厚さ過多による可能性が考えられた。そこで、耐熱温度が約 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ のポリイミドテープを用いて、 10 、 $50\text{ }\mu\text{m}$ 厚とテープ厚さを変えて加工を試みた。素材による溝幅変化は見られず、約 $10\text{ }\mu\text{m}$ 厚のテープ厚さでは、場所による不均一が生じるとともに、エッチング液でポリイミドが分解してしまう場合があった。結論として、マスク材料による溝幅低減は困難と判断し、さらなる技術開発を中止した。

エッチング時間の短縮については、フィラメント間抵抗が 0.1 M cm を確保できる最低のエッチング時間を調べて最短エッチング時間での加工を行うこと等により、エッチング時の線速を 144 m/h から 288 m/h まで上げることができた。しかしながら、エッチング時間を短縮した条件での加工溝幅も約 $140\text{ }\mu\text{m}$ であり、溝幅の抑制には繋がらなかった。

レーザー照射条件の最適化においては、レーザー出力を低下させるとマスク材料に傷がつけられないので、レーザー出力を下げることはできなかった。 Q スイッチ周波数はこれまで装置の最高周波数 30 kHz であったが、周波数低下の場合、1パルスあたりのエネルギー総量が増加して、溝幅はかえって増加した。アシストガス関連として、ガス圧を高めると若干溝幅が減少する傾向が観られた。そこで、レーザーによるマスク材料の効率的な切削が有効かもしれないと考えて、アシストガスノズルと線材試料間の距離をこれまでの $800\text{ }\mu\text{m}$ から $500\text{ }\mu\text{m}$ に縮めたところ、溝幅を $70\text{-}80\text{ }\mu\text{m}$ に低減することに成功した。これ以下に縮めると、線材接続部や搬送系の揺らぎによって線材

表面にノズルが当たってしまう可能性があるので、 $500\ \mu\text{m}$ よりも縮めることはできなかった。ちなみに、マスク材料の厚さが $50\ \mu\text{m}$ で、銀層の厚さが約 $10\ \mu\text{m}$ であるので、理論的には $60\ \mu\text{m}$ がエッチングで処理する場合の溝幅の最小値であるので、これに肉薄するところまで条件が最適化されたと考えている。

加工品質と加工速度の向上、溝幅の低減という課題が克服されたので、この技術を使って $5\ \text{mm-w}10$ 分割加工を行った細線化線材写真を図 2.4.3-84 に示す。使用した線材は、PLD 法で作製された Gd123 線材である。

線材の加工前後の磁化ヒステリシス損失の低減の様子を図 2.4.3-85 に示した。Tapestar™ 搬送系を用いたピックアップコイル法による交流磁化率の測定より求めた磁化ヒステリシス損失の変化である。加工によって、ヒステリシス損失が全線に亘って約 10 分の 1 に低減されていることが分かる。これまでのレーザスクライビングに関する成果を表 2.4.3-3 にまとめた。

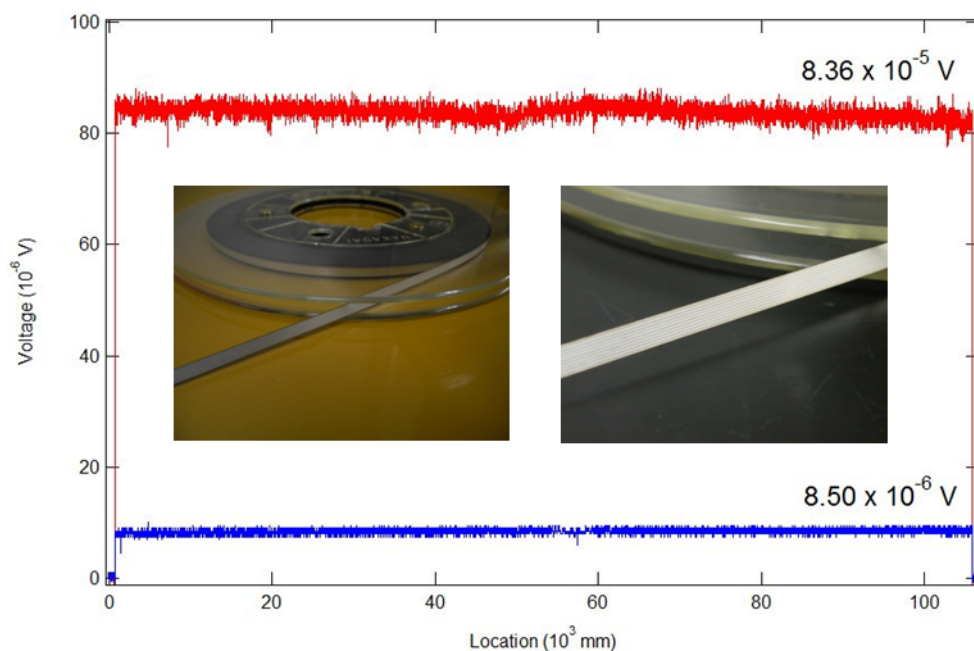


図 2.4.3-85 $5\ \text{mm-w}10$ 分割加工で 1/10 にヒステリシス損失が低減した様子

表2.4.3-3 レーザスクライビング加工の成果のまとめ

最大長 (m)	フィラメント数	溝幅最小値 (μm)	歩留り (%)	加工速度 (m/h)
~300 m (3分割の場合)	10 (損失1/10) (105 m, 123 m)	70~80 μm	出荷ベース 67 % 加工ベース >70 %	レーザ照射 180 m/h エッチング > 280 m/h

(2) IBAD 基板—PLD/MOD 線材の細線加工技術開発②

マイクロホール素子を用いた顕微鏡システムを構築し、実用レベルの大電流印加時のテープ線材内の電流分布を評価し^{10,11)}、変圧器作製に用いられる 5 mm-w 5 分割スクライビング線材の欠陥位置を同定することによって、スクライビング技術の確立に貢献した。

本手法がまた、交流印加時のマルチフィラメント線材や、欠陥部位における電磁現象の観測手法として優れたポテンシャルを有することを明らかとし、その空間分解能は、本プロジェクトの最終目標である 5 mm-w 10 分割線材に十分適用可能なレベルにあることを、モデル線材を用いて実証した。図 2.4.3-91 に、欠陥やブリッジングを模擬したマルチフィラメントモデル線材に 2 Hz の正弦波電流を印加した際の評価結果を示す。印加電流に同期して各座標位置での自己磁場信号を取得し、位相遅れをパラメータとして再構築することによって、各瞬時ににおける自己磁場の二次元像を得る。この結果より、ビオ・サバル則の逆変換によって、電流分布の時間変化を得ることができる。また、ファラデーの法則より、各瞬時ににおける誘導電界の空間分布を評価することが可能である。さらに、電流分布と電界分布が得られたことから、両者の積によって各瞬時ににおける損失の分布を得ることが可能となる¹²⁻¹⁴⁾。すなわち、本評価法によって、超電導線材の交流損失分布の時間依存を詳細に把握することが可能となり、交流印加時の低交流損失化を実現する最適な素線構造や、欠陥部位またその補修箇所等複雑な構造を有する部位における電磁現象の解明が可能となった。

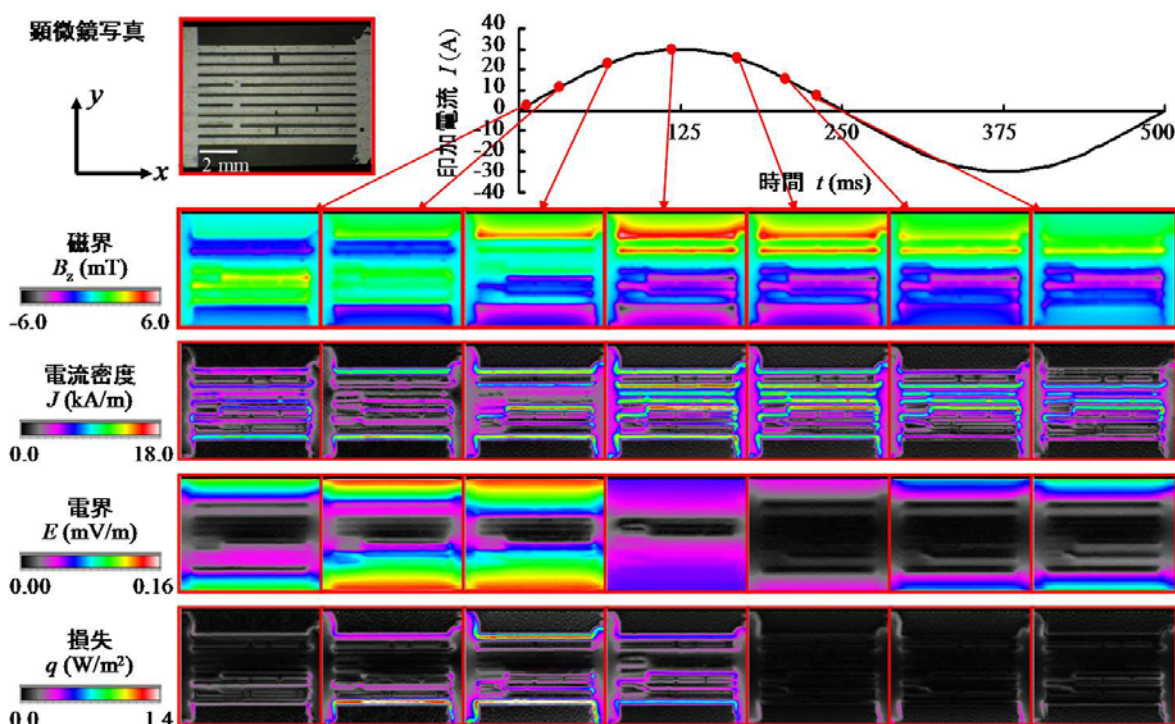


図 2.4.3-91 走査型ホール素子磁気顕微鏡による 5 mm-w 10 分割マルチフィラメントモデル試料への交流印加時の電磁特性の可視化¹³⁾

平成 23-24 年度は、中間評価までに原理検証を行った走査型ホール素子磁気顕微鏡を Reel to Reel 式システムに展開することで、最終目標である長尺の 5 mm-w10 分割線材の連続評価を実現し、各フィラメントの I_c 値分布を非破壊非接触に計測可能であることを実証した。

図 2.4.3-92 に Reel to Reel 式磁気顕微システム¹⁵⁾を用いて線長 14.4 m のマルチフィラメント線材を評価した結果を示す。5 mm-w 線材に対し 10 本のフィラメントを形成しており、各フィラメントの線幅は 500 μm 以下であることから、通常の四端子法による I_c 値評価は極めて困難である。長尺マルチフィラメント線の二次元的 I_c 値分布を計測した例は世界で初めてであり、非破壊非接触の連続計測技術の確立は大きなブレークスルーと言える。各フィラメントの I_c 値分布を観ると、試料幅方向端部に位置するフィラメント 1 に局所的低 I_c 値部位が点在することが分かる。一方、フィラメント 2~10 については顕著な欠陥は観られず、比較的均一な I_c 値分布を有しており、スクライビング後も各フィラメントの健全性を維持できていることが分かる。また、全体的に左側の方が I_c 値が高い値を有する。これは、スクライビング前のテープ自身の I_c 値の分布に起因していることを示唆している。

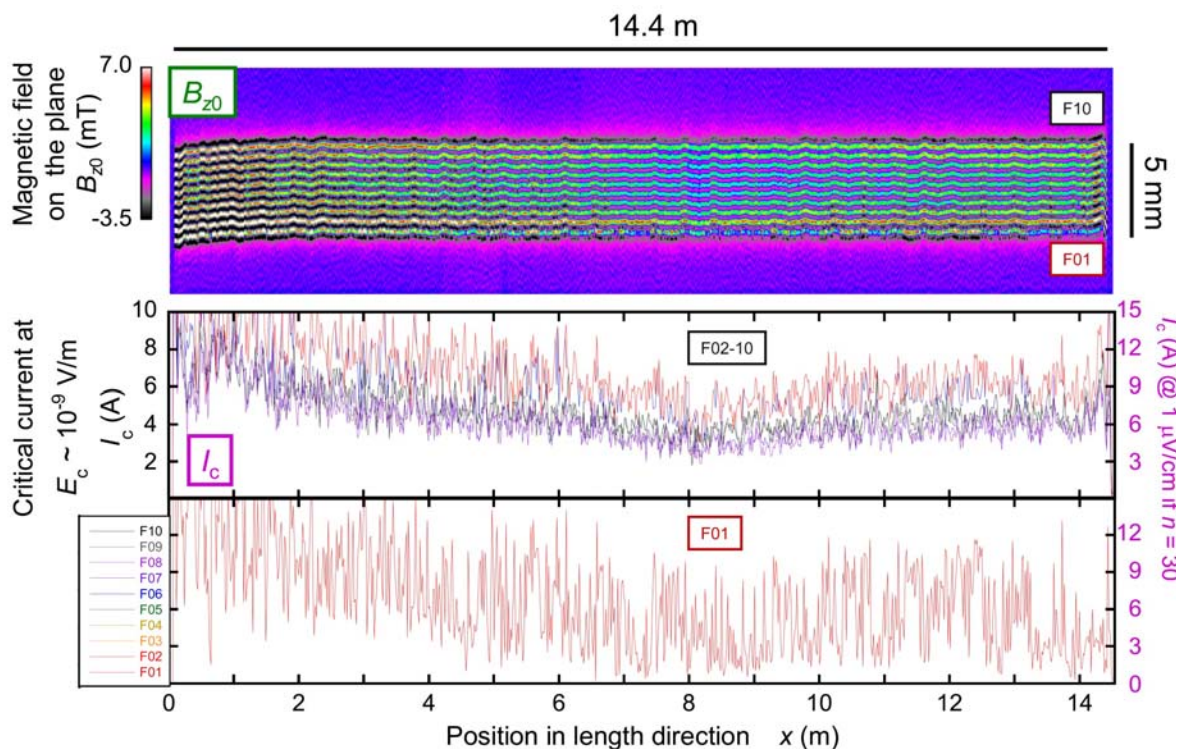


図 2.4.3-92 Reel to Reel 式走査型磁気顕微システムを用いた 5 mm-w 10 分割線材の評価結果

(3) IBAD 基板—PLD/MOD 線材の細線加工技術開発③

本項の研究開発では、低交流損失化をめざして作製されたスクライビング Y 系超電導線材における各フィラメント電流の均流特性を、非接触で精度良く評価できる手法を確立すること、並びにこの手法を用いて長尺線材の健全性の評価や低交流損失線材製造プロセスへのフィードバックを図ることを目的としている。本項の研究において、交流通電時の線材の電流分布特性は、図 2.4.3-93 に示すような直径 $40\ \mu\text{m}$ の極細銅線で巻線された極小サイズのピックアップコイル群を用いて非接触で測定する。

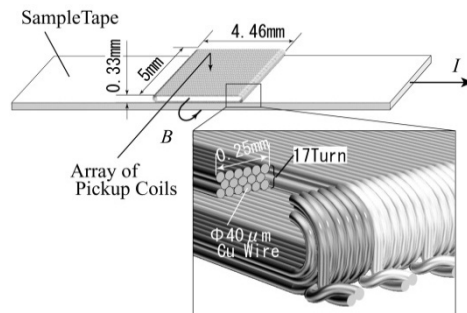


図 2.4.3-93 ピックアップコイル群の概観

細線化溝加工技術開発の中間目標である $5\ \text{mm-w}5$ 分割のスクライビング Y 系超電導線材に対し、その線材の均流特性の評価が十分に行えるように、本電流分布測定法の測定精度の向上を図った。そのために、まずピックアップコイル群の製作精度の改善や実体顕微鏡を利用した試料線材への設置精度の改善を行った。さらに、電流分布を算出する際の数値計算プログラムの改良並びに高速化等も行った。測定精度は、 $1.1\ \text{mm-w}$ の Cu テープ線材を水平方向に 5 本並べた模擬スクライビング細線化溝加工試験導体を用いて評価した。また、 $1\ \text{mm-w}$ の GdBCO 線材 5 本を用いた試験導体に対しても本測定法を適用した。

5 本の Cu テープ線材から成る試験導体を用いて測定精度を評価した結果、各 Cu フィラメントの電流は 5 % 以内の誤差で測定できることを確認できた。また、5 本の GdBCO 線材を用いた試験導体での測定結果から、GdBCO 線材のフィラメント電流も 10 % 以内の誤差で測定できるレベルに到達した。

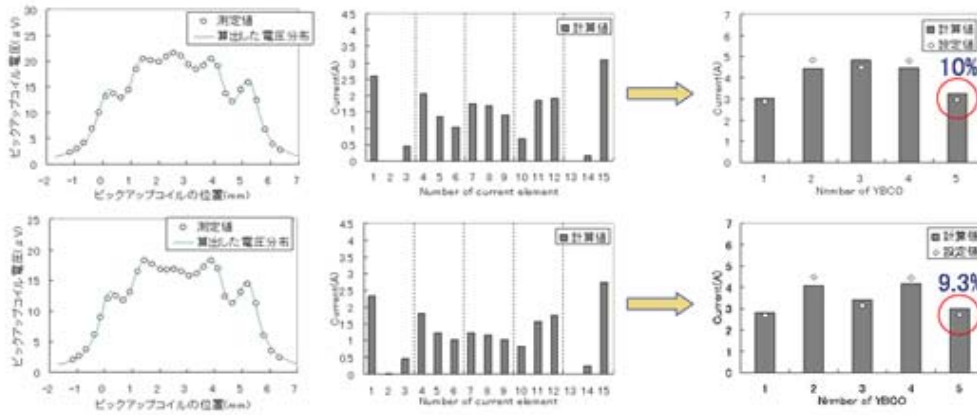
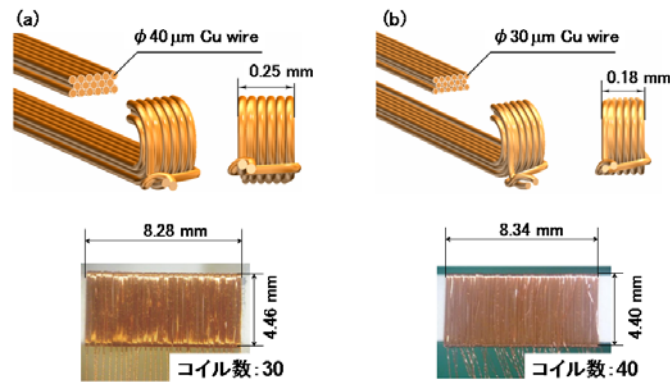


図 2.4.3-94 5 分割スクライビング Y 系超電導線材の
各フィラメント電流測定精度の評価例

本測定法における電流測定精度は、5 mm-w5 分割スクライビング Y 系超電導線材の均流特性を評価できるレベルに到達した。

平成 23～24 年度は、開発されたスクライビング加工線材を用いてターン間距離の異なる試験コイルを作製し、本測定法を適用してフィラメント電流を測定した。その結果、ピックアップコイル群での測定磁場分布から求めた電流分布が、理論的に求めた電流分布と比較的よく一致することを確認でき、コイル形状でのフィラメント間電流分流特性評価における本測定法の有用性を示すことができた。また、スクライビング細線化溝加工線材のフィラメント I_c 値にばらつきがあった場合のフィラメント間分流特性の電流振幅依存性についても調べた。短尺直線形状の試料線材に対して臨界電流近傍まで通電した結果、測定された電流分布は試料線材の各フィラメントの臨界電流特性を考慮した電気回路モデルによって説明できることを示すことができた。さらに、長尺のスクライビング加工 Y 系超電導線材をコイル形状に巻線したときの電流算出精度についても検討した。試料線材として 5 mm-w 5 分割 GdBCO 線材を用い、外部磁場中での電流分布測定を行った。その結果、試料線材の自己磁場に対する外部磁場の影響が 10 %程度の場合においても、ピックアップコイル群の測定電圧から試料コイルの磁場による余分な電圧成分をソフトウェア的にキャンセルすることにより、測定誤差 10%程度以内で測定できることが分かった。これにより、コイル形状に巻線された長尺の 5 mm-w 5 分割 GdBCO 線材での測定の目処が得られた。

また、平成 23～24 年度は、細線加工技術開発の最終目標である 5 mm-w 10 分割スクライピングの Y 系超電導線材に対し、ピックアップコイルの使用線材径を図 2.4.3-95 に示すように 40 μm から 30 μm に変えてコイルを小型化して測定空間分解能を向上させ、かつコイル群の校正精度のさらなる改善を図ることで、必要とされる測定精度の達成をめざした。0.5 mm-w GdBCO 線材 10 本から成るスクライビン



(a) 40 μm 線径コイル、(b) 30 μm 線径コイル

図 2.4.3-95 ピックアップコイル巻線の細線化

グ細線化溝加工模擬線材で本測定法の測定精度を評価した結果、測定誤差 10%以内の目標値には達しなかったが、ピックアップコイル群の小型化等により測定誤差 20%程度以内の測定レベルにほぼ到達できた。測定精度を目標値まで上げるためには、ピックアップコイル群を構成する個々のコイルと試料線材間の距離をより正確に把握した上でピックアップコイル群の校正を行うことが必要であると考えられる。

本測定法はロゴスキーコイルを用いた電流測定法と比較して簡便に行えるメリットがあり、低交流損失化のためにさらなる細線化が行われたとき、このメリットも助長される。また、本測定法は 2 MVA 級変圧器等の交流用超電導電力機器の電流分布特性の評価へもピックアップコイル群の取り付け場所の選定や取り付け方法の工夫等により適用可能である。

(4) IBAD 基板—PLD/MOD 線材の細線加工技術開発④

切断・裁断加工により低交流損失線材を開発する際、線材が実際の超電導機器に使用される状況を踏まえて切断・裁断加工の指針を明らかにする必要がある。そこで、本研究開発では、電力ケーブルの低損失化をめざした線材切断加工技術開発の指針を理論的に明らかにすることを目的として研究開発を行った。まず電力ケーブル導体の交流損失を理論的に求めてその機構を解明し、次にその結果を基に電力ケーブルに用いられる線材の切断技術開発の指針について考察した。

電力ケーブルは、多数の線材を円筒フォーマの周囲に並列して多層に螺旋巻きに配置された複雑な構造をもつが、ここでは簡単のため、図 2.4.3-96 に示したような、螺旋巻を無視した多角形状の単層の電力ケーブル導体について考察した¹⁶⁻¹⁹⁾。この導体の交流電流損失について理論解析を行った結果、交流損失機構として「ギャップ効果」と「多角形状効果」があることを明らかにした^{17,19)}。「ギャップ効果」とは隣り合う線材エッジ間のギャップで交流損失を生ずる効果で、ギャップ幅が小さくギャップ数(すなわち線材数)が少ない方が低損失となる。一方「多角形状効果」は、多角形状の導体形状が真円からずれることで損失が増大する効果である。細線化した多数の線材を用いれば「多角形状効果」は抑えられて低損失となるが、同時にギャップ数が大きくなって「ギャップ効果」により損失は増大するので、これら二つの効果のトレードオフを考慮しつつ最適な細線化を行う必要がある。

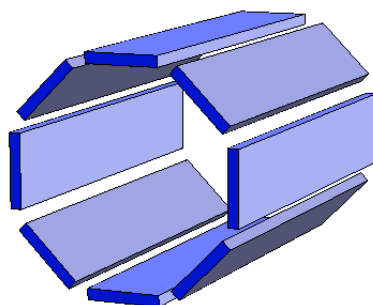


図 2.4.3-96 多角形状の単層電力ケーブル導体

単層電力ケーブル導体の交流損失の解析結果から示唆される、切断加工技術開発の指針は次のようになる。

- 電力ケーブルの低損失化のためには、線材エッジ間のギャップ幅を小さくする必要があります。線材エッジ付近の I_c 特性(幅あたりの I_c 値)の劣化は等価的にギャップ幅の増大をもたらすので、エッジ付近の I_c 特性の劣化を防ぐ必要がある。

- 多角形状の電力ケーブルの低損失化のためには、ギャップ幅に限界がなければ、線材の細線化により多角形効果を抑制することが有効である。
- ただし、ケーブルの柔軟性の確保や線材エッジの I_c 特性劣化等の要因によりギャップ幅に下限が存在する場合、過剰な細線化はケーブル径の増大や I_c 特性の減少といった問題を引き起こすことがある。

これらの指針は、 I_c 特性の劣化を抑えつつ線材幅を減少させる切断・裁断加工技術開発の基本的な方向性を示すものである。過剰な細線化は上述した問題(ギャップ効果)を生じる場合があるので、線材幅は必ずしも細ければ良いわけではなく最適値が存在することを示唆している^{13,15)}。つまり、線材幅はその最適値を目標に細くすれば十分で、むしろ切断加工による I_c 特性の劣化を防ぐことに注力すべきである。線材幅の最適値が実施計画書にある 2~5 mm 程度であることは、本研究開発の単層電力ケーブル導体の解析からも確認された¹⁵⁾。

ただし、線材幅の最適値は電力ケーブルの詳細設計に依存するので、上述の単層電力ケーブル導体の考察では不十分である。より現実に近い多層電力ケーブル導体の交流損失について理論解析を行い、線材幅の最適値を明らかにする等線材切断加工技術開発の定量的指針を得る必要がある。すでに 2 層の場合の解析モデルを考案しているが、これを一般化してさらに多層の場合の理論解析を行うことが可能と考えられる。本研究開発は解析的理論を基にしており、この手法による超電導電力機器及び線材に関する研究開発は世界中でも稀少であるという特徴を持つ。解析的理論は、交流損失特性等の物理的機構の解明や導体構造の系統的最適化に極めて有効である。

(5) IBAD 基板-PLD 線材の細線加工技術開発⑤

i) レーザ切断加工線材の幅方向特性分布評価

線材幅方向の J_c 値分布は、超電導ケーブルの交流損失特性に大きく影響を与え得る。特に、超電導ケーブルでは交流損失低減のために 10 mm ないしそれ以上の幅の線材を 5 mm~2 mm 幅程度まで切断・裁断加工が可能だが、この切断・裁断加工後の状態で線材端部の J_c 値の低下が超電導ケーブルの交流損失に特に大きな影響を与える。

10 mm-w IBAD 基板-PLD 線材を、レーザで 5 mm-w に切断・裁断加工した線材の幅方向 J_c 値分布を磁気ナイフ法により測定した結果を図 2.4.3-97 に示す。線材端部の J_c 値が低下している領域は 0.3~0.5 mm 程度である。この程度の端部での J_c 値特性低下領域は、様々な製法の Y 系超電導線材において観測される未切断線材端部での J_c 特性低下領域と同程度であり、このレーザによる切断加工技術が線材端部を大きく劣化させることがないことを示した。すなわち、レーザによる切断・裁断加工技術がケーブル用線材の細線化に適用できる可能性を示せた。

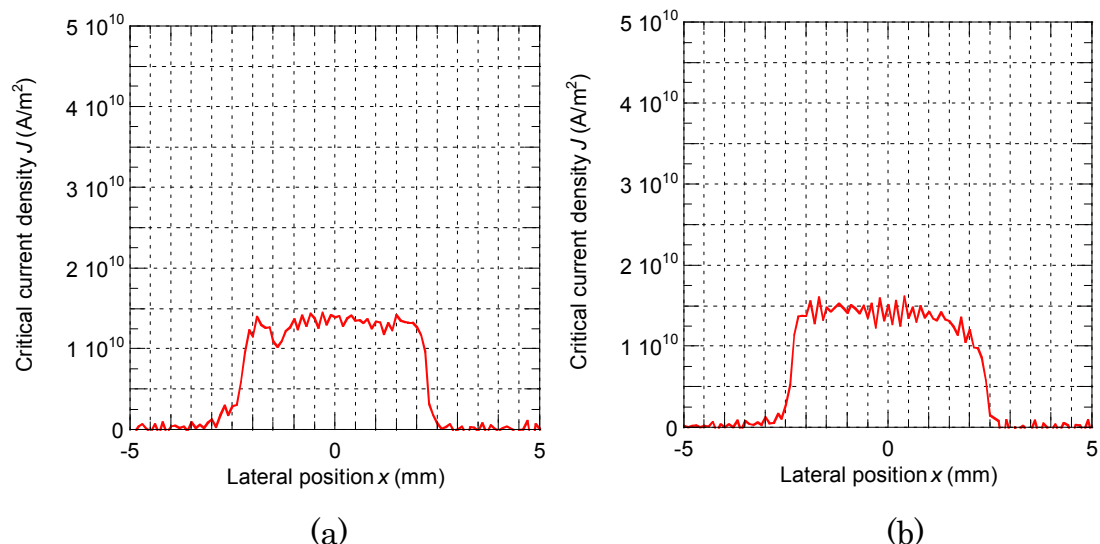


図 2.4.3-97 10 mm-w IBAD 基板-PLD 線材をレーザにより 5 mm-w に切断・裁断加工した線材の幅方向 J_c 値分布((a)の右端、(b)の左端が切断端)

ii) 機械式切断・裁断加工線材の幅方向特性分布評価

線材幅方向の J_c 値分布は、超電導ケーブルの交流損失特性に大きく影響を与え得る。大電流ケーブルでは交流損失の低減が大きな課題であり、そのため、もっとも細かい場合で 2 mm の細線化も検討されている。また、大電流ケーブルに使用される結晶粒配向金属-PLD 線材は、幅広で成膜したのち、機械スリッタによる機械加工で切断・裁断を行う。そのため、機械スリッタによる切断・裁断加工時の線材幅端部での J_c 値低下を評価する必要がある。

機械スリッタによる切断・裁断加工の際には、機械スリッタの刃の間隔や切断・裁断方向によって加工後の J_c 特性に影響が出る。機械スリッタの刃の間隔を微調整し切

断・裁断方向を最適にして、結晶粒配向金属—PLD 線材を 4 mm、2 mm 幅に切断・裁断加工した線材の幅方向 J_c 値分布を磁気ナイフ法により測定した。その結果を図 2.4.3-98 に示す。加工前の線材が幅広線材であるので、4 mm-w 細線、2 mm-w 細線いずれにおいても、両端部とも機械スリッタによる切断・裁断端である。図 2.4.3-98 から、線材幅端部の J_c 値が低下している領域は 0.3 mm 程度であり、刃や切断・裁断方向の調整を適切に行えば機械スリッタによる細線加工技術が線材幅端部を大きく劣化させることがないことを示した。すなわち、この機械スリッタによる切断・裁断加工技術がケーブル用線材の細線化に適用できる可能性を示せた。

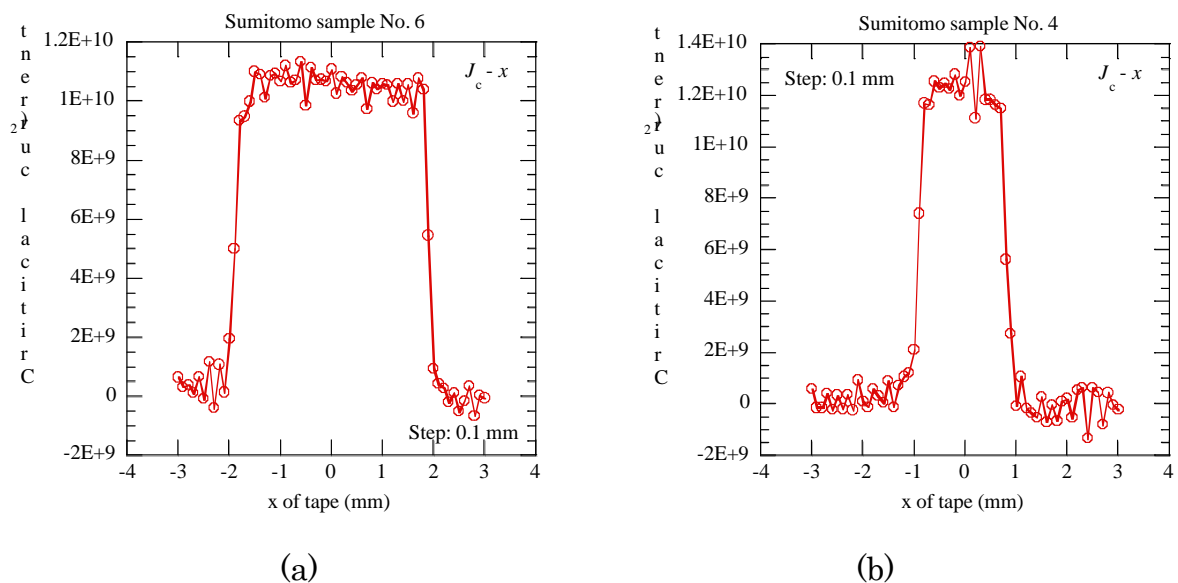


図 2.4.3-98 結晶粒配向金属—PLD 線材を 4 mm、2 mm に細線化した線材の幅方向 J_c 値分布((a)4 mm-w 細線、(b)2 mm-w 細線)

(6) 細線評価技術開発

・長尺細線加工線材評価技術

平成 20～22 年度は、長尺線材 5 mm-w 5 分割スクライビングの技術開発を支援する評価技術の開発を行った。基本的な評価として線材加工の前後に下記の評価手段を整備した。

- 加工前： 1) End to End の I_c 値測定
2) ホールセンサアレイによる Reel to Reel 測定
3) 四端子法による Reel to Reel 測定
加工後： 4) 分割線間毎 End to End の I_c 値測定
5) 分割線間の電気絶縁性測定

1)、4)、5)では線材全体を液体窒素中に浸漬して測定を行った。特に大電流を流す 1)と 4)の測定用として、長尺線材を途中で折り返して重ねて巻くことのできる簡易無誘導巻きリールを考案した。2)と 3)は測定したい部分を浸漬冷却して、線材を順次送りながら全長に亘り Reel to Reel 測定を行った。2)では高速測定(200 m/h 以上)が可能である。また、センサアレイの信号を適当な仮定を基にシミュレーションしたカーブとフィッティングすることで、幅方向の均一性を評価する手法を開発した。この手法により分割前に、分割後フィラメント線材がどの程度均一な I_c 値を有するかを予測できるようになった。

さらに、詳細な欠陥評価のために下記の評価手段を整備あるいは独自開発した。

- 6) 誘導法（交流磁化率）の Reel to Reel 測定；2)の設備を利用
- 7) MO(磁気光学像)観察法による Reel to Reel 測定
- 8) SQUID センサアレイ渦電流法による Reel to Reel 測定
- 9) レーザ走査形状計測による Reel to Reel 測定
- 10) 表面反射光計測による Reel to Reel 測定；9)の設備を利用

これらはいずれも Reel to Reel で線材全長に亘って検査ができ、しかも非破壊の検査技術である。よって適宜一貫プロセスの途中で検査することができ、それぞれのプロセスにおける問題点を抽出し、改善策を講じる重要な手がかりを得ることができた。また、それぞれ原理の違いを考慮して結果検討を行うことで欠陥の識別判定が可能となる。

6)は、2)の設備に軽微な変更を加えて行える評価である。ホールセンサの代わりにピックアップコイルを使用し、交流磁化率測定を行い磁化ヒステリシス損失の相対的变化を評価する。外部磁場の印加に超電導マグネットを使用できるため強磁場中での測定も可能である。また、分割後の線材に適用することで、分割フィラメントのおお

よその I_c 値及び分割不良部分の有無が評価できる。(図 2.4.3-99 参照)ただし、フィラメント毎の寄与を分離して計測することはできない。

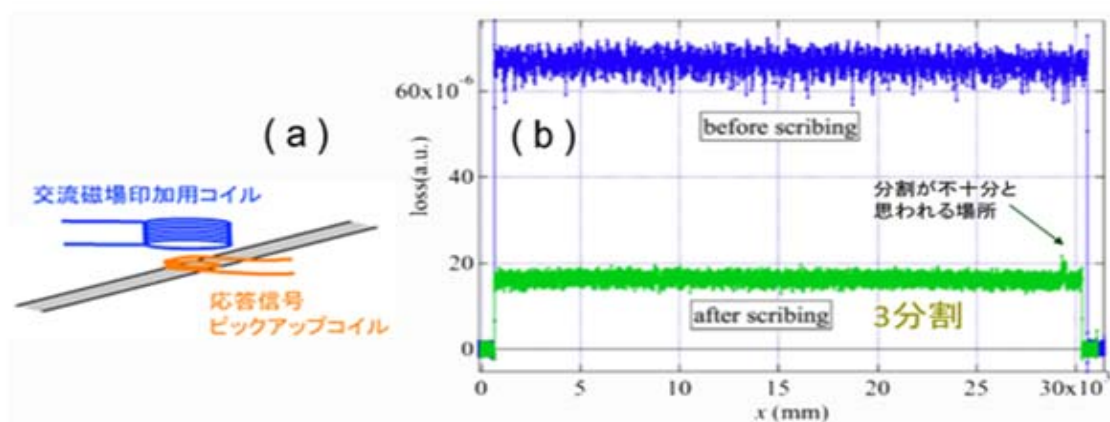


図 2.4.3-99 交流磁化率測定による分割前後線材の測定例

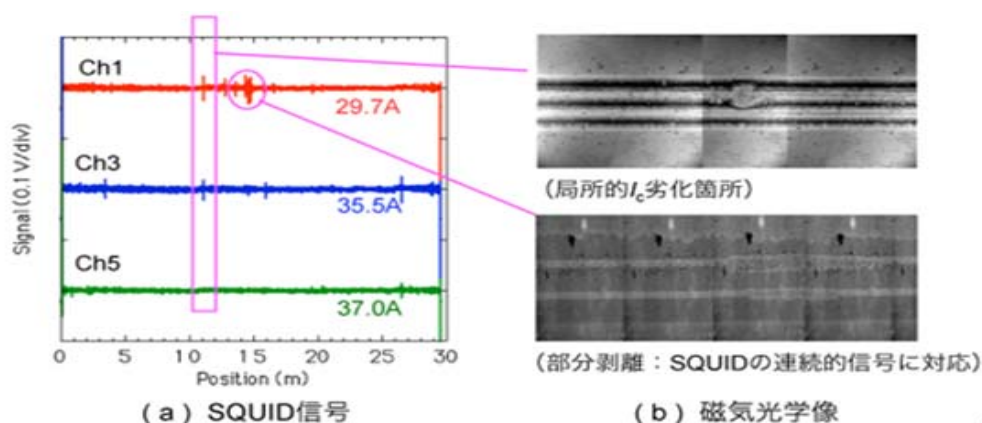


図 2.4.3-100 (a)SQUID センサ及び(b)MO(磁気光学像)観察を用いた 5 mm-w3 分割線材の評価例。

7)では MO(磁気光学像)観察法によって欠陥部分を高い空間分解能で観察した。測定速度は遅いが、欠陥種類を識別するには極めて有効な手段である。8)では高温超電導 SQUID グラジオメータアレイによって線材中の欠陥の有無を高速で検査した。アレイは線材の幅方向に並べられており、どのフィラメントに欠陥があるのかを識別することができる。測定速度は、線材の冷却機構等装置上の改良により 80 m/h の高速を実現した。図 2.4.3-100 に 5 mm-w 3 分割線材に対する測定例を示す。SQUID センサアレイによる高速チェックで検出した不良箇所を MO 観察法で詳しく調べたところ局所的な劣化部や部分剥離による不良であることが判明した。これまでのデータ蓄積から SQUID センサの信号形状からでも、ある程度の欠陥種類の識別も可能になった。

9)は線材表面にレーザを走査させて段差や形状を計測するものである。形状を検査することで分割不良や剥離によるフィラメントの浮き(図 2.4.3-101)を検知することができた。高さ分解能は3 μm 程度である。

10)ではレーザの反射率の変化を調べた。さらに小さな凹凸の有無の調査に有効な情報が得られた。例えば、ハステロイTM 基板上的の傷や洗浄不良を検出した。また各層の成膜毎にチェックすることで個々の成膜プロセスで生じている問題点を抽出した。



図 2.4.3-101 レーザ走査段差計測の原理 (a)、及び 5 mm-w 5 分割線の評価例 (b)幅方向断面、(c)段差マッピング)。

これら新たに開発した検査手法はそれぞれの原理に応じて得られる情報が違う。それらを認識した上で相補的に用いることが極めて有効である。図 2.4.3-102 は欠陥の違いによる MO 観察、SQUID センサアレイ、レーザ形状検査の有用性についてまとめた表である。それぞれ得られる信号は超電導層への磁束侵入、超電導層の不均一性、表面形状と違っている。中間層剥離、安定化層剥離、超電導層内部欠陥の場合、信号の出方は検査手法の原理によって違ってくる。複数の検査手法で得られた結果を比較検討することで、どのような欠陥であるかがより確からしく類推することができた。

MO観察 超電導層 (磁束の侵入)	○	×	◎	速度遅い 欠陥種類識別：明瞭
SQUID センサアレイ 超電導層 (不均一性)	◎	△	◎	高速測定 欠陥種類識別：不明瞭
レーザ形状検査 表面形状	◎	◎	×	高速測定 超電導層を見ていない

図 2.4.3-102 欠陥の違いによる MO 観察、SQUID センサアレイ、レーザ形状検査の有用性。

以上述べてきた複数の検査手法を相補的に活用することで、効率的な不良箇所調査ができる体制が整備できた。これら開発した長尺線材評価技術は、分割加工プロセスだけでなく、その前の線材作製プロセス全般に亘って改善支援に役立てられており(2.4.3(3)(a-1))項目参照)、プロセス改善に大きく貢献した。

一方、SQUID 磁気センサを用いた渦電流法による非破壊検査は、交流渦電流が材料深部に侵入する低周波領域においても高い感度を持つという特徴がある。したがって、加工線材素線(フィラメント)だけではなく、線材の多層構造からなるケーブルや変圧器用コイル等の、巻線時等の後加工で生じる内部の大きな欠陥も外部から検出できる可能性がある。例えば、高電圧ケーブルの場合、内部導体とシールド層の間の絶縁層は約 25 mm 程度の厚さを持っている。このようなシールド及び厚い絶縁層の下にある多層導体中の欠陥検出をねらいとし、図 2.4.3-103 に示すような、ベースライン長(2つの磁場検出コイル間の距離)の長い高温 SQUID グラジオメータセンサを平成 20 年度の追加予算及びその継続研究で開発した。これらのセンサを用い、アルミ多層試験体中の 38 mm の深さにあるスリット状欠陥が検出可能であることを明らかにした。一方、ケーブルのような細線化された並列多層導体では一様導体に比べ渦電流は流れにくくなるが、このような場合にも、励磁コイルの形状等を工夫することで内部の断線等が検出できる可能性を、有限要素法を用いた磁場解析により明らかにした。

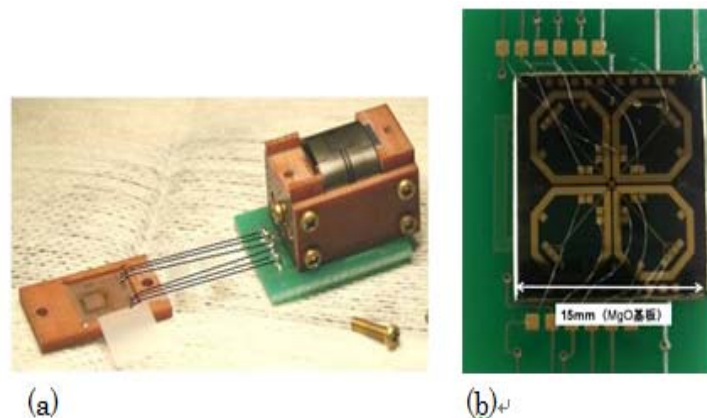


図 2.4.3-103 多層導体検査用に開発したベースライン長の長い SQUID センサ
(a)Y 系超電導線材を検出コイルに用いた同軸型センサ、
(b)平面型 2 軸グラジオメータ

平成 23～24 年度は、評価技術のさらなる高度化並びに開発した評価技術相互の違いを認識した効率的な支援体制の構築を行った。

まず、長尺線材 5 mm-w 10 分割スクライビング細線化技術開発を支援する評価技術開発のため、同一基板上に 10 チャンネルの SQUID グラジオメータアレイを作製した。図 2.4.3-104 に SQUID グラジオメータアレイの光学顕微鏡写真及びそのクライオスタットに装着した写真を示す。5 分割線の場合と同様に、チップ表面の極近傍で分割線材を移動させて、励磁コイルによって誘起される線材表面の電流分布の乱れから異常箇所を調査する。1 チップ内に磁束雑音が $3.2\sim 8.0 \mu\Phi_0/\text{Hz}^{1/2}$ (white noise) の 10 チャンネルのグラジオメータアレイを作製した。グラジオメータを密に並べるために隣り合うグラジオメータの干渉が懸念されたが高々 10% 程度であり、実用化には問題はないと判断された。5 mm-w 10 分割線材の SQUID 非破壊検査装置開発の目処が立った。

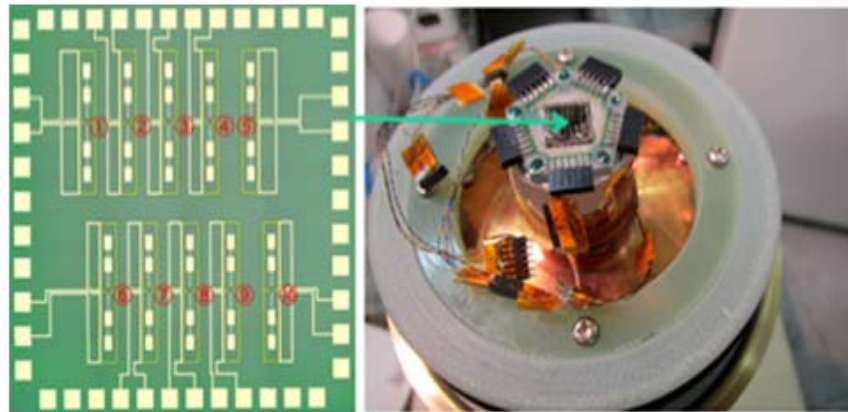


図 2.4.3-104 10 チャンネル SQUID グラジオメータアレイの光学顕微鏡写真及びチップを装着したクライオスタットの写真。

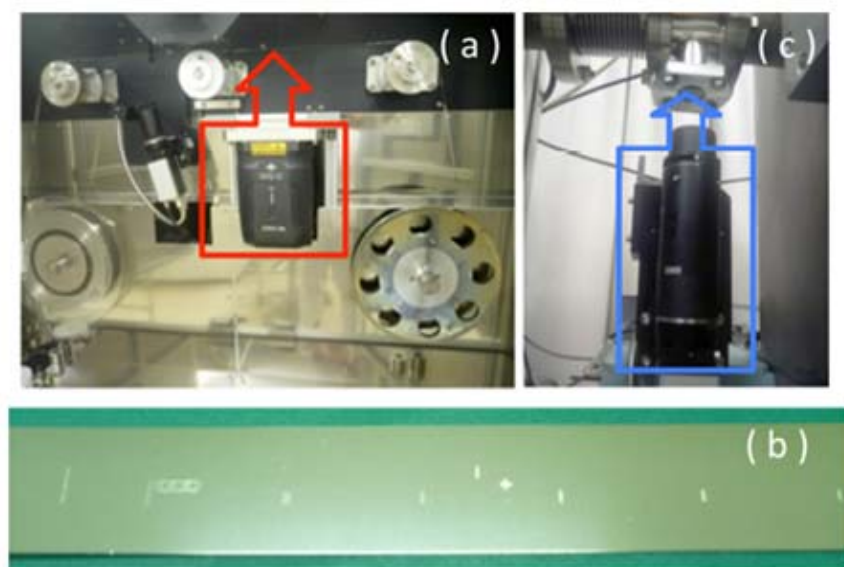


図 2.4.3-105 レーザ形状検査装置に装着したマーキング機構 (a)、マーキングされた線材の基材裏面(b)、及び MO 観察装置とホールセンサアレイ装置に装着したマーク読み取り機構 (c)。

本研究開発期間中に数種の Reel to Reel 非破壊検査装置を開発したが、上述のとおり、異なる手法による結果の相互比較が有効であり、かつ重要である。一方で、長尺線材の評価の場合、特定の欠陥位置を複数の検査装置で調査したくても、その欠陥位置を捜す作業が厄介な問題点であった。そこで別の検査装置で欠陥位置を正しく迅速に捜せるようにマーキング機構並びに読み取り機構を付加した。マーキング機構は室温環境において比較的高速で線材を検査できるレーザ形状検査に装着した (図 2.4.3-105 (a))。線材の基材裏面にレーザ光で座標並びにアルファベット等を書込む (b)。読み取り機構 (c) は MO 観察装置とホールセンサアレイ装置に付けた。これにより、調べたい特定箇所を迅速に特定し、測定を行うことができるようになり、複数検査装置によるデータ収集・結果の相互比較が格段と効率的に行えるようになった。

(7) 配向基板-PLD 線材の細線加工技術開発

低交流損失ケーブルに適応した細線化加工技術として、結晶粒配向金属基板-PLD 線材を 2 mm-w または 4 mm-w に機械スリッタで切断・裁断加工する技術の開発を実施した。結晶粒配向金属基板-PLD 線材は、10~30 mm-w プロセスで作製された超電導層上に銀保護層を DC スパッタで形成し酸素中で熱処理を行った後、機械スリッタにより 10 mm-w から 2 mm-w または 4 mm-w に機械加工する。その後、電気めっき法によって 10~20 μm 厚さの銅を被覆する。2 mm-w に加工したときの I_c 値維持率(幅あたり I_c 値維持率)90%以上を目標に、加工条件の適正化を行った。

線材作製プロセスを進める中で、切断・裁断加工された線材幅端部での微小な変形が原因で、Cu 安定化層形成後の線材で安定化層の剥離が発生する現象が明らかとなった。機械スリッタによる切断・裁断加工では、固い金属テープを再現性良く加工する方式として、矩形刃による機械スリットを採用しており、刃の構造、刃間の隙間、張力、線速等が重要な条件となる。これらの切断・裁断加工条件の適正化を実施した結果、図 2.4.3-106 に示すように、適正な切断・裁断エッジ形状が得られ、 I_c 値維持率は図 2.4.3-107 に示すように、90%以上を確立した。さらに、刃の磨耗を含めてこの条件を維持管理して行くことで、長尺線材の安定した切断・裁断加工が可能となった。



図 2.4.3-106 適正化後の切断エッジ形状と機械スリット模式図

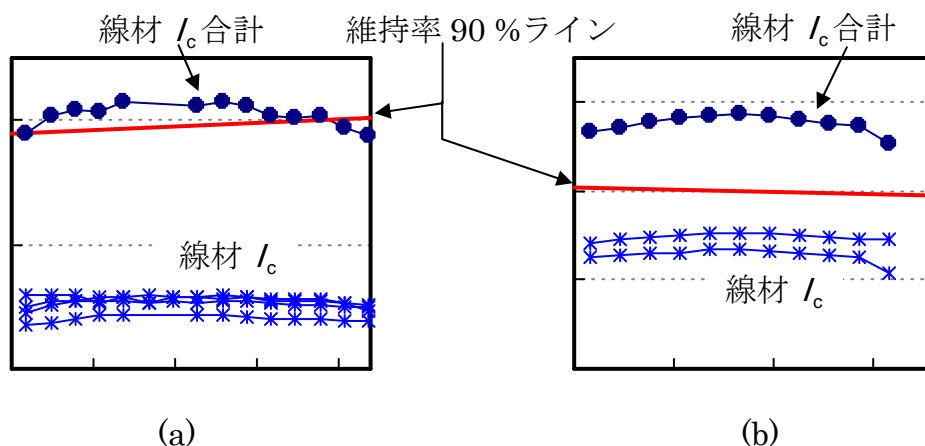


図 2.4.3-107 切断加工線材の I_c 値分布 (a)2 mm-w 線材 (b)4 mm-w 線材

開発した細線・裁断加工技術を使用して、平成 23-24 年度には長尺線材作製を実施するとともに、ISTEC で開発されたレーザ加工による細線化加工技術を結晶粒配向金属基板-PLD 線材に適用し、ケーブル損失に影響する線材幅端部の劣化領域を比較した。これらの技術を適用した長尺線材作製においては、連続通電 I_c 値測定により全長の I_c 値分布を評価し、細線化による劣化が十分小さいことを確認した。

図 2.4.3-108 にレーザ加工と機械加工により 2 mm-w に細線加工した線材の幅方向 J_c 値分布を九州大学のホール素子顕微鏡法により比較した結果を示す。図の縦軸「Equivalent width」は、台形電流分布を仮定して、測定データの繰返しフィッティングすることにより求めた J_c の半値幅である。線材幅端部の劣化領域幅は、レーザ加工では 0.1~0.2 mm、機械加工では 0.3~0.4 mm とレーザ加工の方が I_c 値劣化領域は少ないという結果を得た。図 2.4.3-109 は、線材 1 本からレーザ加工と機械加工により 2 mm-w に細線加工した線材の、通電 I_c 値分布を比較したものである(図中、
、
プロット)。図中の灰色の線は細線加工前 10 mm-w での誘導法 I_c 測定結果を示している。誘導法により加工前の線材 I_c 値は比較的均一な分布であることが確認できる。一方、加工後はその方法による I_c 値の差が確認でき、機械スリッタ加工はレーザ加工に対して約 80%から 90%の I_c 値であった。この値は図 2.4.3-58 より得られた結果とほぼ一致しており、図 2.4.3-109 の加工後の I_c 値の差は加工方法による線材幅端部へのダメージ差によるものであると考へた。

以上の結果よりレーザ加工では線材幅端部劣化が小さいため、より I_c 値を維持した細線化加工が可能であり、加工後の線材幅が細い際には有用であることが分かった。一方、機械加工はレーザ加工に比べ線材幅端部劣化は大きい製造速度が格段に大きく、線材幅が広い、もしくは線材幅端部劣化の影響が少ない用途には量産・コストの観点から有用である。

以上の結果よりレーザ加工では線材幅端部劣化が小さいため、より I_c 値を維持した細線化加工が可能であり、加工後の線材幅が細い際には有用であることが分かった。一方、機械加工はレーザ加工に比べ線材幅端部劣化は大きい製造速度が格段に大きく、線材幅が広い、もしくは線材幅端部劣化の影響が少ない用途には量産・コストの観点から有用である。

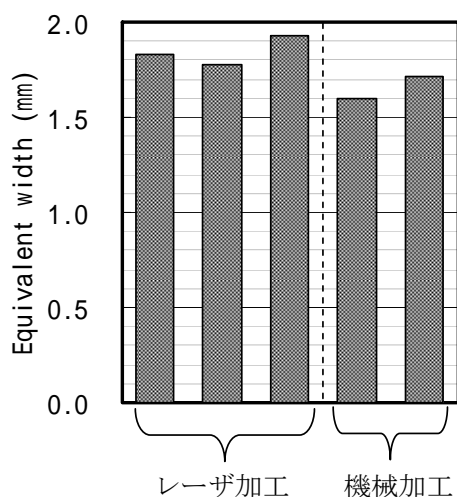


図 2.4.3-108 2 mm-w 細線加工線材の幅方向の J_c 値分布 (九州大学・ホール素子顕微鏡法)。縦軸は、フィッティングで求めた半値幅相当値。

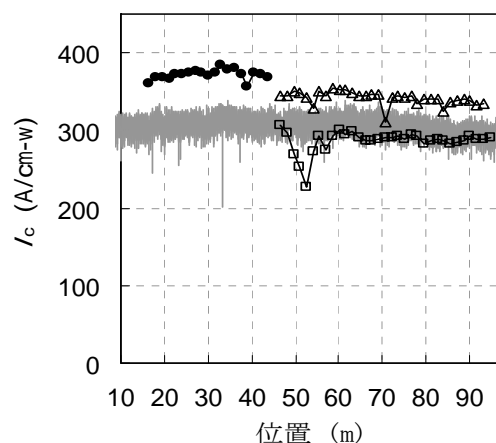


図 2.4.3-109 2 mm-w 細線加工線材の長手方向の I_c 値分布。レーザ加工線材 (●) と機械加工線材 (□)。灰色線は細線化前 (1 cm-w) での誘導法による I_c 値評価結果。

(8) 組織観察

切断・裁断加工及びスクライビング細線化加工を行った線材について、切断・裁断面の微細組織変化(変質層の有無、ポアの発生)等を詳細に解析し、これらの結果を細線化プロセスにフィードバックし、加工条件等の適正化支援を目的とする。本節では、長尺線材の切断加工の最適化を支援した結果について述べる。図 2.4.3-110 に超音波切断を行った切断面端面及び切断面から 100 μm 内部の組織を示す断面 SEM 写真を示す。この切断を行った加工条件は、ブレード粒度が#600(粒度 20~30 μm)、超音波振幅幅が 6 μm である。また、サンプルの断面出しには集束イオンビーム(FIB)法を採用した。加工面端面はハステロイTM、超電導層、中間層とロールケーキ状に折れ曲がっていることがわかる。切断加工面から 100 μm 内部では Ag/Gd123/CeO₂/GZO/ハステロイTM の積層構造が保たれていることが分かり、超電導特性は健全であると考えられる。次に図 2.4.3-111 でブレード粒度#2500 により切断・裁断した切断・裁断加工面端面の断面 SEM 像を示す。図 2.4.3-110 で示すようなハステロイTM の巻き込みは無いが、超電導層及び中間層の破壊は加工端面からおおよそ 30 μm 内部まで観察され、銀層の剥離は 50 μm 程度まで確認できる。これらの結果を踏まえ、超音波ポリッシュカットによる切断を行った。この条件で切断した端面の断面 SEM 像を図 2.4.3-112 に示す。この条件では、切断端面近傍でも Y123/CeO₂/GZO の積層構造が保たれており、切断面も極めてシャープである。以上のように、線材切断・裁断加工後 SEM による微細組織観察を行い、その観察結果から切断・裁断加工条件を適正化することに貢献した。

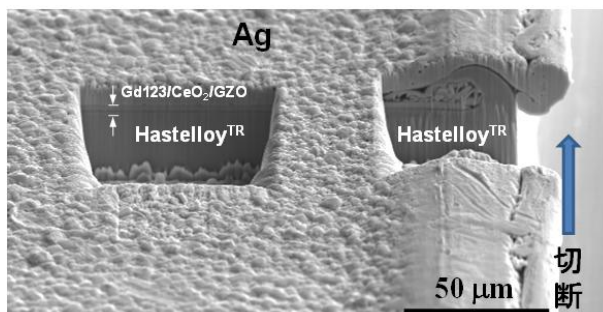


図 2.4.3-110 超音波機械切断・裁断加工面の断面 SEM 像、ブレード;粒度#600

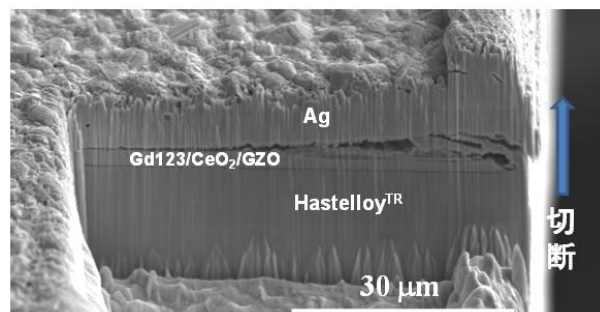


図 2.4.3-111 超音波機械切断・裁断加工面の断面 SEM 像、ブレード;粒度#2500

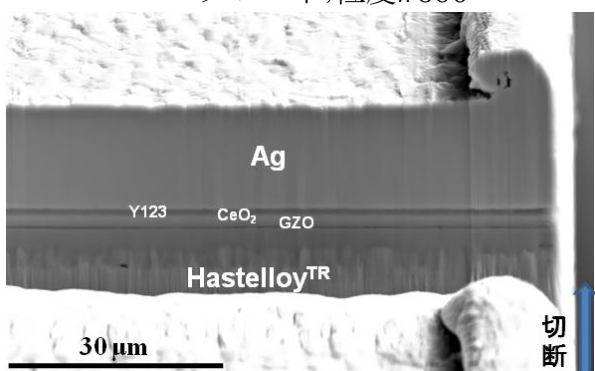


図 2.4.3-112 超音波ポリッシュカットにより切断した端面の断面 SEM 像

次に、平成 23-24 年度に、スクライビング細線化溝加工を行った加工面について、SEM 断面観察を行った結果を述べる。中間層として $\text{CeO}_2/\text{LaMnO}_3/\text{MgO}/\text{Gd}\cdot\text{Zr}\cdot\text{O}$ 層を有するハステロイ™ 基板上に、PLD 法もしくは、MOD 法により超電導層を形成した。さらに、安定化層として Ag 層を堆積させた線材についてスクライビング細線化溝加工を行った。スクライビング細線化溝加工後の線材表面にポリイミドを電着した。図 2.4.3-113 にスクライビング溝加工を行った加工面の断面 SEM 像を示す。図 2.4.3-113(a)は、PLD-Gd123 線材をレーザー照射による溝加工と化学エッチングを行った試料で、図 2.4.3-113(b)は、MOD-Y123 線材をレーザー照射による溝加工と化学エッチングを併せて行った試料、図 2.4.3-113(c)は、レーザー照射領域を楕円形状に変化させて PLD-Gd123 線材をエッチングレス・スクライビング加工した試料である。図 2.4.3-113(a)及び(b)では化学エッチングにより溝加工領域から数 $\mu\text{m}\sim 10\ \mu\text{m}$ 程度の超電導層が溶解浸食されている。超電導層が溶解浸食された領域にはどちらのサンプルもポリイミドが入り込んでいる。また、図 2.4.3-113(a)及び(b)では、溝加工領域にキャップ層の CeO_2 層は残っている。これらに比べて、図 2.4.3-113(c)では、加工溝端の領域でも超電導層である Gd123 層は構造を維持している。また、EDS 分析から、図 2.4.3-113(c)の加工条件では、加工溝領域の CeO_2 層も除かれていることが分かった。以上のようにスクライビング溝加工後に SEM による断面組織観察を行い、その観察結果からエッチングレス・スクライビング加工条件の妥当性を示すことができ、線材の細線化プロセス開発を支援した。

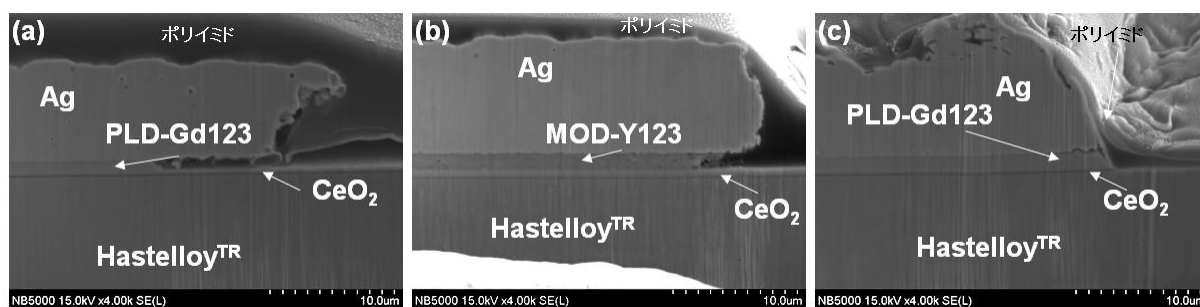


図 2.4.3-113 スクライビング溝加工を行った加工面の断面 SEM 像。(a)PLD-Gd123 線材をレーザー照射による溝加工と、その後、化学エッチング、(b)MOD-Y123 線材をレーザー照射による溝加工と、その後、化学エッチング、(c)レーザー照射領域を楕円形状に変化させて PLD-Gd123 線材をエッチングレス・スクライビング溝加工

引用論文リスト

- (1) Y. Iijima, K. Kakimoto, Y. Sutoh, S. Ajimura, and T. Saito, "Development of long Y-123 coated conductors by ion-beam-assisted deposition and the pulsed-laser-deposition method", *Supercond. Sci. Technol.* Vol. 17 (2004) 264-268.
- (2) N. Chikumoto, S. Lee, K. Nakao, K. Tanabe, "Development of inside-plume PLD process for the fabrication of large $I_c(B)$ REBCO tapes", *Physica C* Vol. 469 (2009) 1303-1306.
- (3) S. Lee, N. Chikumoto, T. Yokoyama, T. Machi, K. Nakao, and K. Tanabe, "Development of In-Plume Pulsed Laser Deposition of High- I_c GdBCO Films for Coated Conductors", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* Vol. 19 No. 3 (2009) 3192-3195.
- (4) A. Ibi, H. Fukushima, R. Kuriki, S. Miyata, K. Takahashi, H. Kobayashi, M. Konishi, T. Watanabe, Y. Yamada, Y. Shiohara, "Development of long YBCO coated conductors by IBAD-PLD method", *Physica C* Vol. 445-448 (2006) 525-528.
- (5) A. Ibi, H. Fukushima, Y. Yamada, S. Miyata, R. Kuriki, K. Takahashi and Y. Shiohara, "Development of long GdBCO coated conductor using the IBAD/MPMT-PLD method", *Supercond. Sci. Technol.* Vol. 19 (2006) 1229-1232.
- (6) 木須隆暢, "超伝導体中の電流分布・量子化磁束ダイナミクスの可視化技術", *応用物理*, Vol. 79 No. 1 (2010) 38-42.
- (7) A. M. Matsekh, M. Inoue, T. Kiss, A. Ibi, S. Miyata, Y. Yamada, T. Izumi, "Improvement of spatial homogeneity in GdBCO/IBAD-MgO coated conductor", *Physica C*, in press.
- (8) K. Higashikawa, K. Katahira, K. Okumura, K. Shiohara, M. Inoue, T. Kiss, Y. Shingai, M. Konishi, K. Ohmatsu, M. Yoshizumi, T. Izumi, H. Okamoto: "Lateral Distribution of Critical Current Density in Coated Conductors Slit by Different Cutting Methods", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, in press.
- (9) T. Kato, R. Yoshida, N. Chikumoto, S. Lee, K. Tanabe, T. Izumi, T. Hirayama, Y. Shiohara "Microstructural characterization of $GdBa_2Cu_3O_y$ superconductive layer fabricated by in-plume pulsed laser deposition" *Physica C*, Vol.471 (2011) 1012-1016.
- (10) M. Inoue, K. Abiru, Y. Honda, T. Kiss, Y. Iijima, K. Kakimoto, T. Saitoh, K. Nakao, Y. Shiohara, "Observation of current distribution in high- T_c superconducting tape using scanning Hall-probe microscope", *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, Vol. 19 No. 3 (2009) 2847-2850.
- (11) K. Abiru, Y. Honda, M. Inoue, T. Kiss, Y. Iijima, K. Kakimoto, T. Saitoh, K.

- Nakao, Y. Shiohara, "Visualization of non-uniform current flow in coated conductors by scanning Hall-probe magnetic microscopy", *Physica C*, Vol. 469 (2009) 1450-1453.
- (12) 木須隆暢, "超伝導体中の電流分布・量子化磁束ダイナミクスの可視化技術", *応用物理*, Vol. 79 No. 1 (2010) 38-42.
- (13) K. Higashikawa, Y. Honda, M. Inoue, M. Iwakuma, T. Kiss, K. Nakao, Y. Yamada, T. Izumi, "Spatially-resolved measurement on time-dependent electromagnetic behavior in alternating current carrying coated conductor", *Physica C*, Vol. 470 (2010) 1280-1283.
- (14) K. Higashikawa, K. Shiohara, M. Inoue, T. Kiss, T. Machi, N. Chikumoto, S. Lee, K. Tanabe, T. Izumi, H. Okamoto: "Noncontact Characterization of In-plane Distribution of Critical Current Density in Multifilamentary Coated Conductor", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 22 (2012) 9500704_1-4.
- (15) K. Higashikawa, K. Shiohara, Y. Komaki, K. Okumura, K. Imamura, M. Inoue, T. Kiss, Y. Iijima, T. Saitoh, T. Machi, M. Yoshizumi, T. Izumi, H. Okamoto: "High-speed scanning Hall-probe microscopy for two-dimensional characterization of local critical current density in long-length coated conductor", *Physics Procedia*, Vol. 27 (2012) 228-231.
- (16) Y. Mawatari and K. Kajikawa, "Hysteretic ac loss of polygonally arranged superconducting strips carrying ac transport current", *Appl. Phys. Lett.* Vol. 92, No. 1 (2008) 012504.
- (17) A.P. Malozemoff, G. Snitchler, and Y. Mawatari, "Tape-Width Dependence of AC Losses in HTS Cables", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* Vol. 19, No. 3 (2009) 3115-3118.
- (18) Y. Mawatari, "Field distributions in curved superconducting tapes conforming to a cylinder carrying transport currents", *Phys. Rev. B* Vol. 80, No. 18 (2009) 184508.
- (19) Y. Mawatari, A.P. Malozemoff, T. Izumi, K. Tanabe, N. Fujiwara, and Y. Shiohara, "Hysteretic ac losses in power transmission cables with superconducting tapes: effect of tape shape", *Supercond. Sci. and Tech.* Vol.23 No.2 (2010) 025031.

2.4.4 高強度・高工業的臨界電流密度(J_c)線材作製技術開発

(ISTEC、住友電気工業、古河電気工業、JFCC、東北大学、中部大学)

2.4.4-1 高強度金属基板対応線材作製技術開発

(1) PLD/MOD 線材対応高強度基板・中間層作製技術開発

本項では、高強度薄肉線材（薄肉は高 J_c 化に有効）の開発にあたり、薄肉基板とそれを用いた中間層作製技術の開発成果をまとめる。

ハステロイ™を用いたY系超電導線材の薄肉・高強度化には、まず金属基板の冷間圧延における強加工が必要となる。これに伴い、残留応力により線材の幅方向・厚さ方向ともに形状の直線性が低下するため、成膜時に線材幅端部が成膜装置リールと接触して端部の部分的な歪みや剥離等を生じる恐れがある。また、基板の薄肉化により成膜時の基板表面の温度が変化し、成膜条件に影響を与える可能性もある。また、成膜時の高温処理により引張り強度が低下すると予想されるため、これらのバランスを取ることが重要である。

図 2.4.4-1 に従来基板と強加工を施した薄肉基板の応力-歪み曲線を示す。薄肉基板において、強加工を施すことにより安定化層分を考慮して 1 GPa の強度目標が達成しうる強度が得られた。次に、基板に最も高温のプロセスである PLD による超電導層成膜環境と同じ熱履歴を経験させて基板強度の変化を調べた結果を図 2.4.4-2 に示す。成膜環境経験により、1 割強の強度の低下が確認された。このことから、成膜時には高温暴露・経験時間の短縮、すなわち成膜時間短縮と低温度成膜の適用を考慮する必要があると考えられる。中間層成膜時においても、成膜前のオリジナル基板からの強度低下をできるだけ抑えるため、上記の問題に注意しつつ、最適条件において成膜を行ったところ、PLD-CeO₂ (500 nm) /スパッタ-LMO /IBAD-MgO/スパッタ-GZO 構造において、 $\Delta\phi_{\text{CeO}_2} = 3.7$ 度と 70 μm 厚基板におい

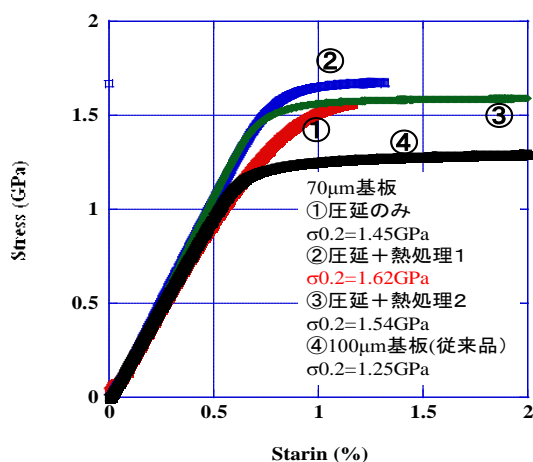


図 2.4.4-1 各種ハステロイ™テープの応力-歪み曲線

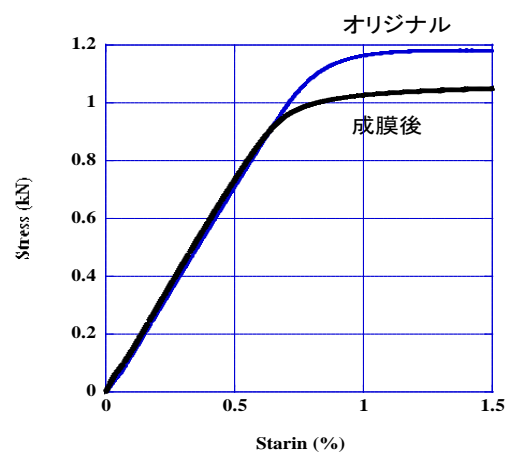


図 2.4.4-2 金属基板と PLD 成膜後線材の応力-歪み曲線

でも 100 μm 厚基板と同等の良好な結晶粒配向性を得た。

1GPaという強度目標値と、50 kA/cm²(@77K,s.f.) あるいは 500 A/cm-w (@77K,s.f.)という特性目標を勘案し、金属基板厚みとしては 80 μm 、各プロセスにおいて張力や成膜温度の調整を行い、この中間層構造を有する基板を長尺化し、50 m長の前後において $\Delta\phi_{\text{CeO}_2} = 3.7\sim 3.8$ 度の良好な結晶粒の面内配向を有する中間層付き基板の作製に成功した。このような基板を用いて超電導層の成膜を行い、 I_c 値が目標とした 1 GPaの応力で低下するかどうか評価した。線材は、実際には室温ではなく低温で使用されるため、液体窒素温度での引っ張り試験を行い、試験前後の I_c 特性変化を調べた。80 μm 厚の基板で成膜したPLD-REBCO線材に 30 μm 厚の安定化層を付けた時の 1 GPaに相当する 1.1 kNの負荷を液体窒素温度で印加し、試験前後の I_c 特性を調べた結果を表 2.4.4-1 に示す。表から、試験により特性の劣化は確認されず、線材利用環境下において、目標値を達成した。

表 2.4.4-1 80 μm 厚高強度線材の引っ張り試験前後の I_c 比較

	試験前 I_c (A@77 K, s.f.)	試験後 I_c (A@77 K, s.f.)
試料 1	437	432
試料 2	440	437

表 2.4.4-2 100 μm 厚高強度線材の引っ張り試験前後の I_c 比較

	試験前 I_c (A@77 K, s.f.)	試験後 I_c (A@77 K, s.f.)
試料 1	537	533
試料 2	526	512

最終目標の達成に向けては、強度に関する目標値は中間目標と同じであるため、基板中間層の開発としては、特性の目標値をクリアするための超電導層の厚膜化に対応することと、長尺化をめざした均一性の向上が開発課題となる。

超電導層の厚膜化への対応は、成膜時間すなわち加熱時間の長時間化に耐える拡散バリア層厚みとすることとなるが、中間層の厚みを増すことにより、技術コストが上昇するとともに、成膜時に発生する異物粒子の巻き込み等の欠陥や表面粗さの増大も引き起こすため、厚みの最適化が必要となる。これについては、2.4.5-1(1)で検討し、最適化した膜厚である 55 nm厚のGZOが薄肉基板においても最適かどうかを、超電導層を成膜して確認し、良好な特性が得られることが確認されたため、これを長尺化した。裕度を持たせるため、金属基板の厚みを増やし、100 μm 厚の基板を用いて 250mの長尺PLD-GdBCO線材を作製し、500A/cm-w@77 K, s.f.を超える I_c 特性を得た (2.4.4-1(3)参照)。強度試験はこの線材を用い、100 μm 厚の基板に 30 μm 厚の安定化層を考慮して1GPaに相当する 1.3 kNの応力を液体窒素中で与え、引っ張り試験前後の I_c 変化を調べた。試験結果は表 2.4.4-2 に示す通りであり、 I_c の低下が 5%を超える有意な特性劣化は見られなかった。この結果から、本研究開発により作製した 100 μm 厚の基板を用いた 200 m長線材は、特性・強度の最終目標を達成した。

(2) MOCVD 線材対応高強度基板・中間層作製技術開発

SMES 用コイルでは強磁場中での大電流通電時のフープ応力に耐え得るために、機械強度の高い線材が要求されるため、本項では MOCVD 法に対応した高強度基板・中間層の開発を試みた。

まず、基板材料としてハステロイ™を用いて、厚さの異なる基板において、1 GPa の強度を持つ基板の加工プロセスの開発を進めた。加工プロセスにおける冷間加工度と強度との比較を行い、冷間加工度の制御により図 2.4.4-3 に示すように 75、100 μm 厚の基板において、室温での 0.2 %耐力が 1.6 GPa 以上の結果を得た。

こうした高強度基板は圧延工程等が従来と異なる条件で作製されるため、この上の中間層、超電導層の作製条件にも影響を与える懸念がある。そこで、1 GPa を超える強度を持つ高強度基板上への中間層と MOCVD-YBCO 層成膜を検討した。その結果、高強度基板上でも従来基板と同等の成長条件が適用でき、 $I_c = 240 \text{ A/cm-w} (@77 \text{ K, s.f.})$ 、 $J_c = 2.4 \text{ MA/cm}^2$ を得た。

これらの成果を基に、長尺基板加工プロセスの安定・高度化を図った。圧延条件の適正化を進めることにより、表 2.4.4-3 に示すように、室温での 0.2 %耐力 = 1.6 GPa を有する 250 m 長の基板を安定して得られるようになった。表に記載した 10 条における 0.2 %耐力の標準偏差は 2 MPa 程度である。また、77 K においては、室温より 10 % 以上高い 0.2 %耐力を示すことを確認した。

さらに、薄化 IBAD 中間層において、中間層の成膜条件の適正化を行い、高強度基板上の MOCVD-(Y,Gd)BCO 層において $I_c = 330 \text{ A/cm-w} (@77 \text{ K, s.f.})$ 、 $J_c = 4.1 \text{ MA/cm}^2$ を得た。また、基板や中間層の結合性・剥離に関しては、中間層の薄化にともなう剥離等の生じない成膜条件の検討を行った。

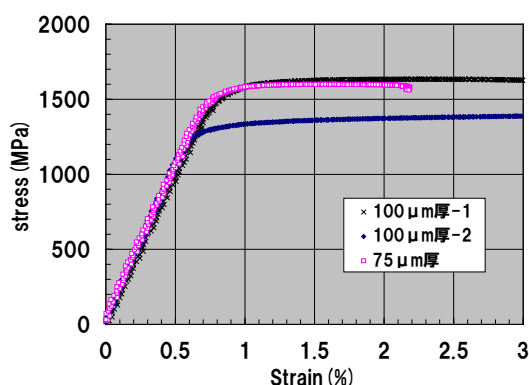


図 2.4.4-3 各種ハステロイ™材の常温での応力-歪み曲線

表 2.4.4-3 長尺高強度基板の 0.2 %耐力

基板 Lot.	0.2% 耐力 (MPa) 室温	
	0 m 位置	250 m 位置
基板 A-1	1626	1625
基板 A-2	1621	1621
基板 A-3	1624	1621
基板 A-4	1620	1619
基板 B-1	1608	1614
基板 B-2	1617	1611
基板 B-3	1599	1610
基板 B-4	1599	1614
基板 B-5	1599	1619
基板 B-6	1608	1606

次に薄肉化（75 μm ）した高強度基板を用いて、中間目標特性の線材作製を試みた。線材の引張試験結果を図 2.4.4-4 に示す。室温での 0.2%耐力は 1GPa 以上であることを確認した。

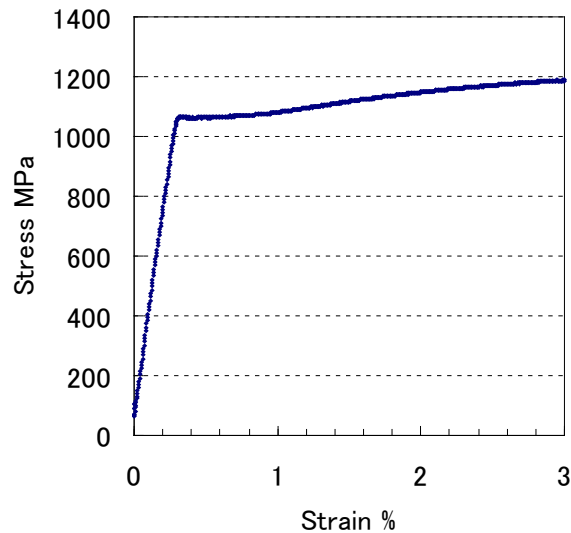


図 2.4.4-4 室温での線材の応力-歪み曲線

全長尺取 I_c 測定の結果を図 2.4.4-5 に示す。100m長で $I_c = 371 \text{ A/cm-w}$ 、 $J_e = 35 \text{ kA/cm}^2$ を達成した。以上により、77K、s.f.で、 $I_c > 300 \text{ A/cm-w}$ 、 $J_e > 30 \text{ kA/cm}^2$ 、1GPa、の中間目標を達成した。

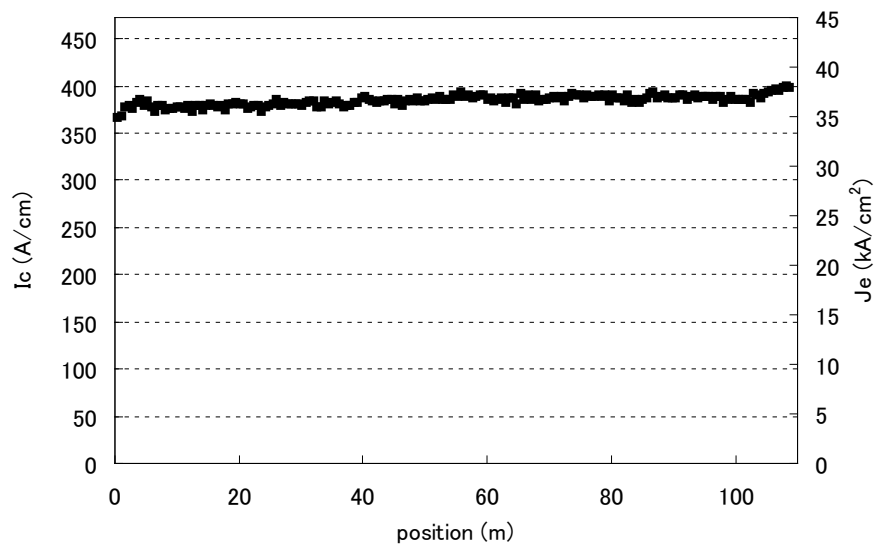


図 2.4.4-5 100m線材の I_c 及び J_e 分布

(3) PLD 法による高強度線材作製技術開発

本項では、(1)PLD/MOD 対応高強度基板・中間層作製技術開発において開発された中間層付き基板に PLD 法により超電導層を成膜して高強度線材を製造する技術開発の成果をまとめる。

PLD法による成膜では、基板が短時間ではあるが 800 °C以上の高温に晒されるため、成膜により金属基板が焼鈍されて強度が低下する。また、薄肉基板の場合には厚みに伴う基板の熱容量の減少と熱輸送距離の減少により、テープ表面の温度が上昇しやすく、通常基板とは成膜条件が異なることが考えられる。これらの課題を解決するため、特に温度に着目して、最適成膜条件を検討した。この際、焼鈍効果につながる成膜温度・時間を抑えるため、成膜回数の抑制も行った。成膜後は通電により I_c 特性を評価し、常温での引張り試験の後、再度 I_c 値測定を実施して I_c 特性の維持限界強度を調べた。

様々なパラメータを調整した結果、極低コスト条件を満足する 15 m/h で 400 A/cm-w(@77 K、s.f.)以上の特性を得ることができたので、この線材を用いて機械強度の評価を行った。図 2.4.4-6 に、PLD法により成膜された高強度 70 μm 厚ハステロイ™基板を用いたGdBCO線材の応力-歪み曲線を示す。通常基板と高強度薄肉基板を比較すると、安定化層厚みを 30 μm と想定した場合には 1 GPa近傍で降伏していることが分かる。これは成膜前の金属基板強度からの比較では 1 割程度低下しており、成膜による焼鈍効果が出たものと考えられる。

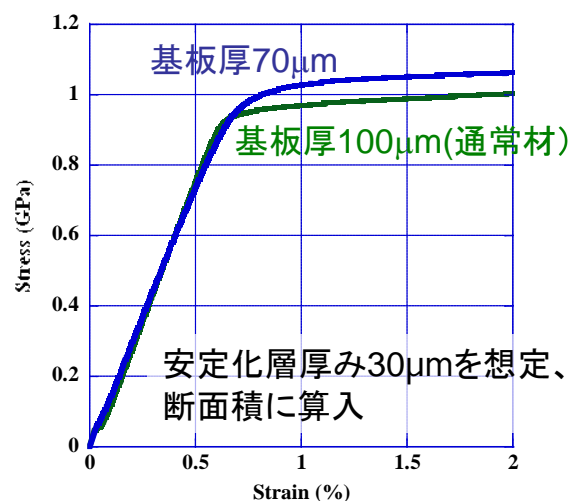


図 2.4.4-6 厚みの異なる基板を用いて PLD により成膜した線材の応力-歪み曲線

図 2.4.4-7 は薄肉基板と従来基板の引張り試験による I_c 値の可逆限界応力である。応力は安定化層 30 μm として算出しており、わずかに 1 GPaを下回る 0.9 GPaで I_c 値が低下している。そこで強度としては 1 割程度の上昇を期待できるため、同様に

強加工を施した 80 μm 厚の基板を用いて長尺線材の作製を行った。図 2.4.4-8 に 80 μm 厚基板を用いて作製したPLD-GdBCO線材の I_c 値分布図を示す。ここで、この線材は製造速度 30 m/hで作製されており、技術コストは 2.27 円/Amと極低技術コスト条件を満足している。

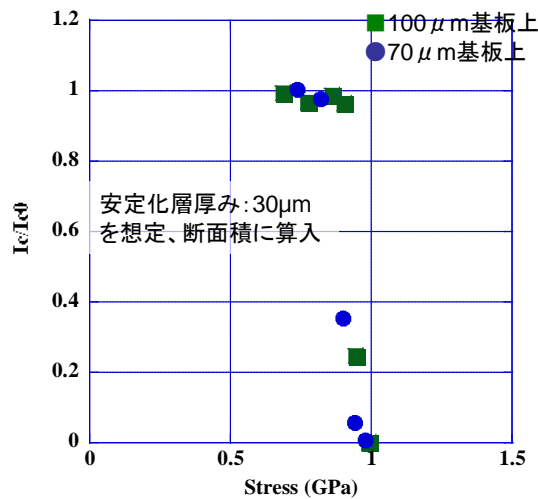


図 2.4.4-7 厚みの異なる金属基板を用いてPLD成膜した線材の引張り応力による I_c 値変化

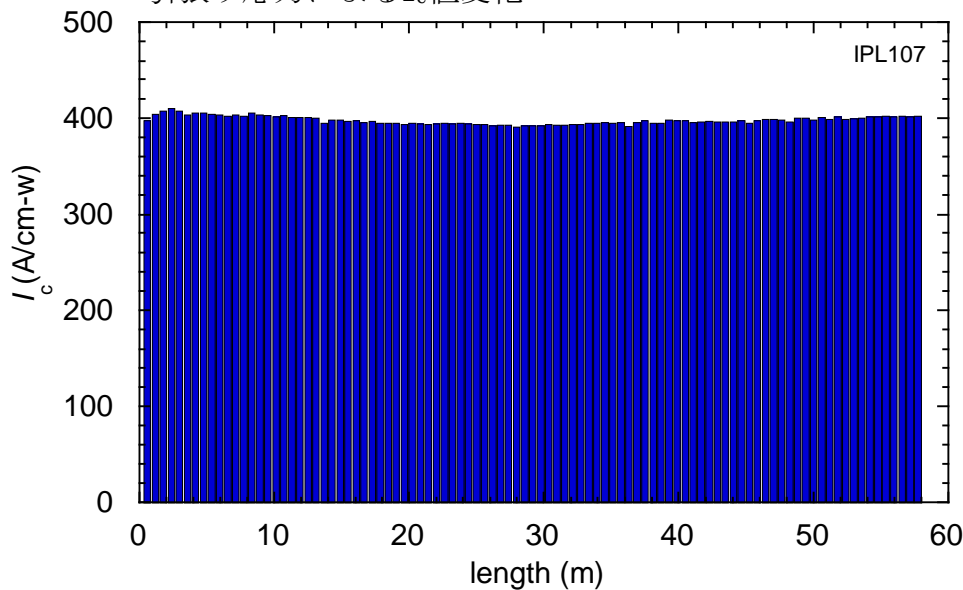


図 2.4.4-8 80 μm 厚基板を用いて作製したPLD-GdBCO線材の I_c 値分布

この線材を用いて強度評価を行った結果は、表 2.4.4-1 に示したとおりであり、前項(1)で記述したように、目標値をクリアした。よって、中間目標を本線材により達成した。

最終目標に関しては、強度目標値は同じであるため、特性向上と長尺化が課題であった。特性向上は、通常厚膜化を伴うため、成膜時間すなわち加熱時間の長時間

化により焼鈍され、強度の低下を引き起こす恐れがある。このため、高速成膜化と高 J_c 化による成膜時間の抑制が主な開発課題となる。これらの課題は低コスト化における課題と一致するため、詳細は2.4.5-1(2)を参照されたい。低コスト化で開発された技術を高強度基板へ適用し、100 μm 厚の基板を用いて250 m長尺線材の作製を行った。図2.4.4-9はこれにより作製されたPLD-GdBCO線材の I_c 分布である。70 m付近に1点、約430 A/cm-w@77 K, s.f.の低い特性の箇所があるが、それ以外は全て520 A/cm-w@77 K, s.f.を超える高い特性を示した。この線材から200 mを取り出し、End-to-End I_c 特性を評価したとすると、520A以下の電圧発生はこの特性低下箇所に限られる。そこでこの部分のI-V曲線から求められる発生電圧からEnd-to-End I_c を計算すると、500 A/cm-w@77 K, s.f.を超える結果となった。強度目標に対しては、本線材を用いて引っ張り試験を行った結果、前項(1)内、表2.4.4-2に示した通り、目標である1 GPaの応力で有意な I_c 劣化が無いことを確認した。これにより、200 m長-500 A/cm-w@77 K,s.f.-1 GPaの最終目標を達成した。

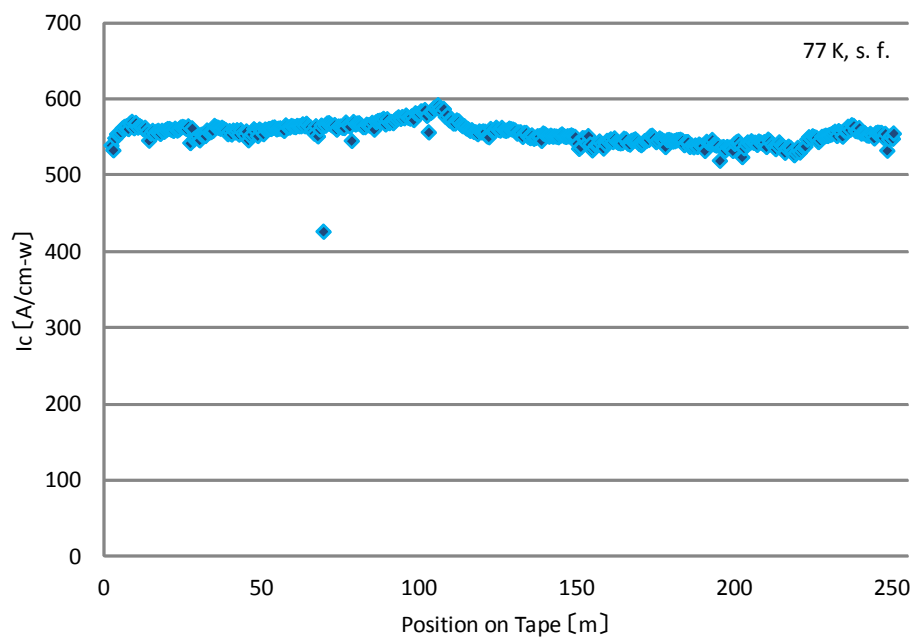


図 2.4.4-9 100 μm 厚高強度基板を用いて作製されたPLD-GdBCO長尺線材の77 K, 自己磁場における I_c 分布

(4) MOD 法による高強度線材作製技術開発

本項では、高強度薄肉線材の開発にあたり、中間層付き薄肉基板を用いた MOD 法による高強度線材作製技術の開発成果をまとめる。

PLD 法による成膜条件と比較すると、MOD 成膜の環境はやや低温で長時間熱処理されることになる。この場合にも、加熱による焼鈍効果を抑制するため短時間で成膜する必要があることと、金属基板厚さが変化した場合にテープ表面の温度が変化して成膜条件が変化する可能性があることを考慮に入れておく必要がある。成膜の技術コスト低減のため、別項にて MOD 成膜の高速化技術開発を行っているが、これと並行して開発が進められた本項目では、まずは薄肉基板における成膜条件の最適化を行った。技術コストとしては 3 円/Am には未達のプロセス条件であった。

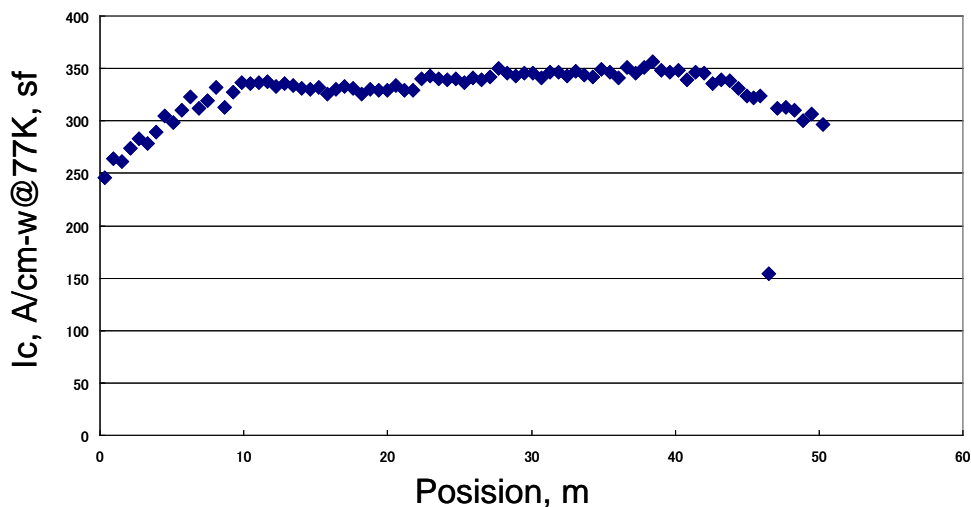


図 2.4.4-10 70 μm 厚基板を用いて作製した 50 m長MOD-YBCO線材の I_c 値分布

図 2.4.4-10 から、MOD線材はほぼ 300 A/cm-w(@77 K,s.f.)を超える高い I_c 値を得ており、薄肉基板を用いてのMOD法による高強度線材の作製見通しを得たといえる。本結果は技術コスト目標を満足するものではないが、技術コスト目標を満足させる技術開発を別項目で行っており、プロジェクト終了後、その成果を今回の結果と合わせ、適用することで、この技術コストに関する課題を解決する。上記の線材を用いて、強度試験をPLD線材と同様に行った。図 2.4.4-11 に 70 μm 基板のMOD成膜前後の応力-歪み曲線を示す。図から、PLD線材同様に成膜処理による焼鈍効果で強度が低下していることが分かる。また、成膜による強度低下はPLDの場合とほぼ同程度であった。

図 2.4.4-12 に薄肉基板と従来基板を用いて作製したMOD-YBCO線材の引張り応力による I_c 値の変化を示す。応力は安定化層 30 μm として算出しており、この場合もわずかに 1 GPaを下回る 0.9 GPa強で I_c 値が低下した。

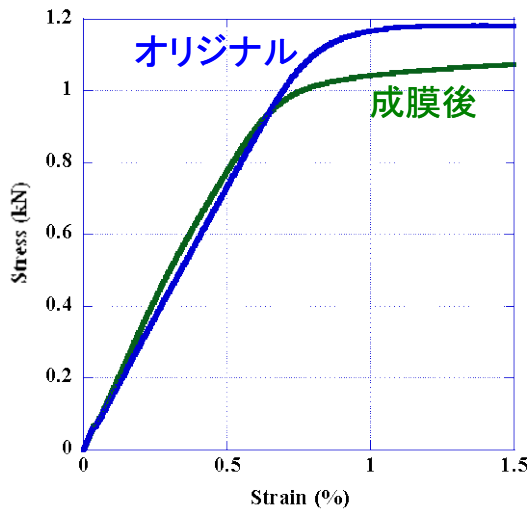


図 2.4.4-11 70 μm 厚基板（図中オリジナル）を用いて作製されたMOD-YBCO線材の応力-歪み曲線

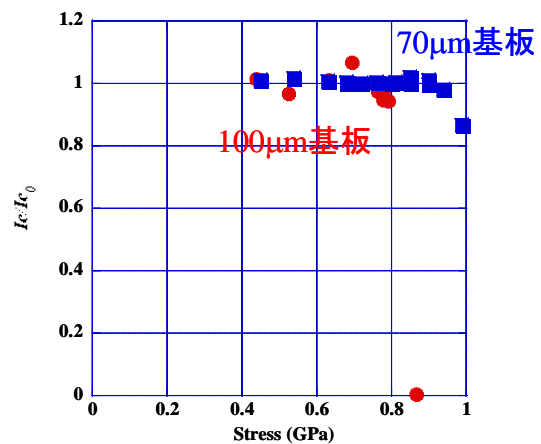


図 2.4.4-12 厚みの異なる金属基板を用いてMOD法により成膜した線材の引張り応力による I_c 値変化

(5) 高強度線材特性評価

PLD法による磁場中特性改善技術開発

本研究では、作製した長尺線材の機械的応力下の超電導特性の理解と実証を目的とし、大口径モデルコイルによるフープ試験及び、短尺試料の引張り歪み試験を実施した。

図 2.4.4-13 に 77.3K及び 4.2Kにおける I_c の引張り歪み依存性と同時測定した応力-歪み特性を示す。測定した試料は、PLD法で作製したGdBCO線材を 2mm-w にカットしたものである。安定化層として 10 μm のAgをつけてある。応力-歪み特性は 77.3Kと 4.2Kでほぼ同等となり、得られたヤング率は 204-212GPaとなり、室温の値ともほぼ同じである。一方で I_c 値の歪み依存性は、77.3K、s.f. と比べ、4.2Kの低温では小さくなり、不可逆歪みも向上していることが分かった。これまでの報告では、磁場の印加によって I_c 値の歪み依存性は大きくなるが、温度低下では逆に小さくなる。4.2K, 18Tは不可逆磁場よりも十分小さい磁場と考えることができるので、温度低下の効果が大きく寄与することで、 I_c 値の歪み依存性が減少していると考えられる。

次に、直径 280mm ϕ の単層コイルに対してフープ試験を行った。用いた試料は引張り試験を行った試料と同じPLD-GdBCOテープで 5mm-wである。液体窒素で

浸漬冷却してコイルの I_c 値を測定した結果、77K、s.f.で $I_c = 204 \text{ A/5 mm-w}$ 、 $n = 38$ となり、短尺の I_c 値とほぼ同じであることが分かった。このコイルを室温ボア $360\text{mm}\phi$ の大口径超電導マグネットに挿入して試験を実施した。図 2.4.4-14 に、コイル表面に取り付けた歪みゲージで測定した歪みと、通電電流から計算した電磁力の関係を示す。横軸のフープ力はコイルの半径 R 、線材全断面積から求めた電流密度 J 、線材位置での磁束密度 B の積である BJR によって求めた。図 2.4.4-14 から、コイル変形は最大印加電磁力である 1300 MPa近傍までほぼ線形に変形し、数回の通電に対してその挙動は可逆であることが分かった。この傾きから計算したコイルの見かけ上のヤング率は約 200 GPaとなり、短尺試料で得られた結果と良い一致を示すことが分かった。次に同時測定した電流-電圧特性を図 2.4.4-15 に示す。図に示した電圧コイルの電極を含む両端電圧のため、電極の抵抗が乗っている。またコイルのインダクタンスによるコイル電圧も現れている。

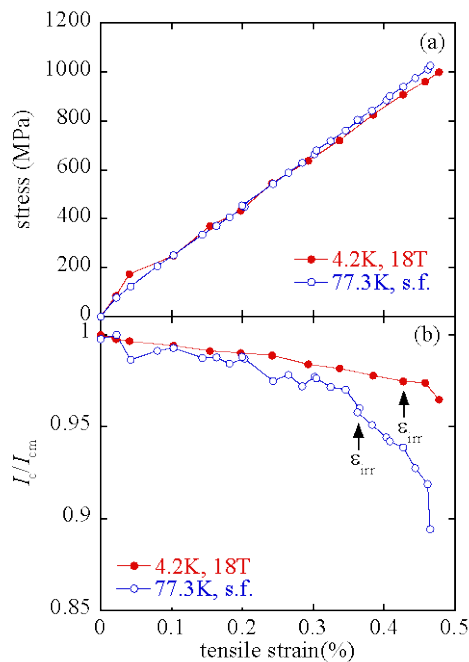


図 2.4.4-13 PLD-GdBCO テープに対する(a)応力-歪み特性と(b) I_c 値の歪み依存性

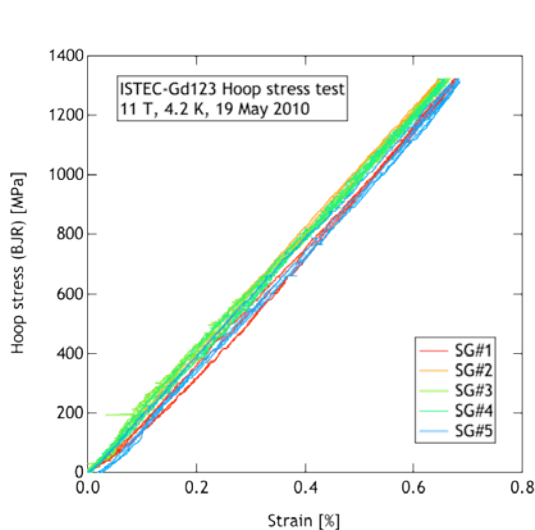


図 2.4.4-14 PLD-GdBCO コイルにおける電磁応力-歪み特性

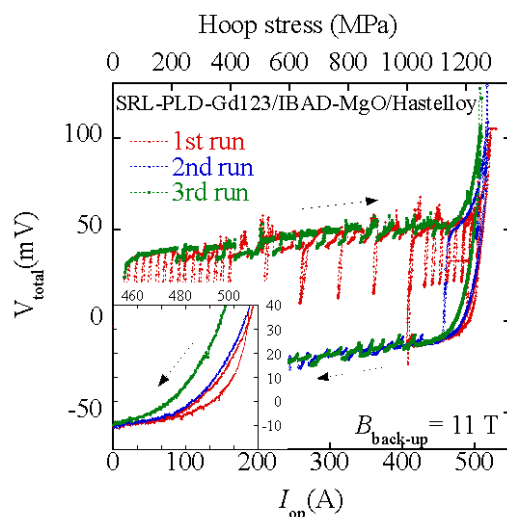


図 2.4.4-15 PLD-GdBCO コイルの電流-電圧特性

図 2.4.4-15 から約 480A 近傍からコイルの超電導-常電導転移に伴う電圧発生が観られている。挿入図は電流減少時における転移近傍の電流-電圧特性の詳細図である。数回の通電による電圧発生が起こる電流が減少していることから、電磁力によって超電導特性が不可逆に劣化していることが分かる。図 2.4.4-13 に示したように、4.2K における不可逆歪みは約 0.43% であり、フープ試験では不可逆歪みよりも大きい約 0.7% 程度の歪みが線材に誘起されていることから、電磁力による超電導線材の劣化が起こったものと考えられる。その他に、いくつかのコイル試験の結果、以下の点が明らかになった。

- ① コイルにラップジョイントを入れた場合、ジョイント部の剪断応力限界 2-3 MPa によってコイルの耐電磁力特性が決まる。このため、ジョイント部を製作する場合には、その部分の機械的補強をする必要がある。
- ② 表面の超電導層側に電極の端部が来るような巻線状態では、電極端部の超電導層劣化により、さらに低いフープ応力でコイルが劣化する。このため、コイル巻線をしたときの電極構造には、超電導層を機械的に保護する仕組みが必要である。

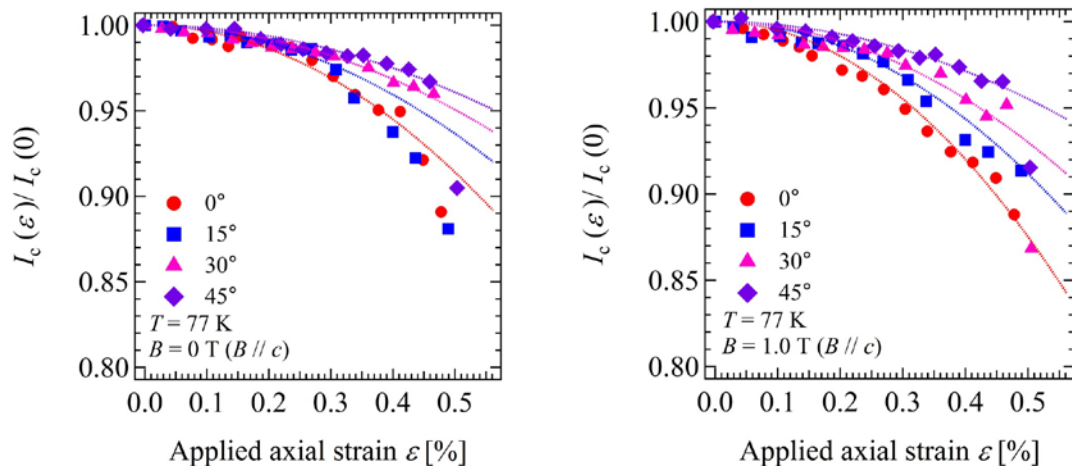


図 2.4.4-16 面内長手方向に対する各歪み印加角度 ϕ に対する臨界電流の歪み

これらの歪み依存性の起源は十分に明らかになっていないが、希土類系の場合には、 a 軸方向と b 軸方向における外部歪みに対する超電導特性の応答が異なっていることが重要と考えられている。このため、本研究では臨界電流の歪み依存性に対する結晶方位の影響について詳細に評価した。歪みを印加する方向を変化させるため、 $1\text{cm}\cdot\text{w}$ のテープの長手方向を $\phi=0^\circ$ として、 $\phi=15^\circ$ 、 $\phi=30^\circ$ 、 $\phi=45^\circ$ となるよう試料を切り出し、歪み依存性を測定した。ここで、 $\phi=0^\circ$ は $[100]/[010]$ に、 $\phi=45^\circ$ は $[110]$ に相当する。試料切り出しは、レーザーによって行った。図 2.4.4-16 に各 ϕ の値に対する臨界電流の歪み依存性を示す。自己磁場下、 1T の何れにおいても臨界電流の歪み依存性は $\phi=0^\circ$ から 45° に向かって小さくなっていることが分かる。一般的に REBCO テープ線材の歪み依存性は、次に示す”べき乗則”で記述されることが多い。

$$\frac{I_c(\varepsilon)}{I_c(\varepsilon_{\max})} = 1 - a(\varepsilon - \varepsilon_{\max})^u \quad (1)$$

ここで、 ε_{\max} は I_c 値が最大となる歪みを表し、 a と u はスケーリングパラメータで、 a を I_c が歪みに対して変化する量として、以後「歪み感受性」と呼ぶ。本研究でもこの式を用いて、実験結果をフィッティングした。ただし、REBCO コート線材の場合、 $u \sim 2$ という値が提案されているため、 $u = 2$ とし、 $\varepsilon_{\max} = 0\%$ と仮定した。図 2.4.4-16 中の実線がフィッティング結果であり、概ね良い一致をすることが分かる。この歪み感受性 a の磁場依存性を図 2.4.4-17 に示す。歪み感受性は、磁場の増加に伴って大きくなるが、その増加率は ϕ が 0° から 45° に向かって減少し、 $\phi=45^\circ$ では磁場に殆ど依存しなくなることが分かった。したがって、結晶方位が $[110]$ では、歪み依存性が小さくなることとなる。この結果は、 a 軸、 b

軸方向それぞれの歪み感受性と、幾何学的な各軸に対する歪み成分を考慮することで良く記述できることが詳細な解析によって明らかとなった。結論としては、a軸とb軸方向の歪み感受性の符号が反対となっているため、歪みのわずかな両軸成分の違いが、複雑な歪み感受性となって現れることが理解できた。したがって、面内結晶粒配向性や配向結晶軸方向を制御することができれば、歪みの影響を極めて小さくすることが可能であることが分かった。

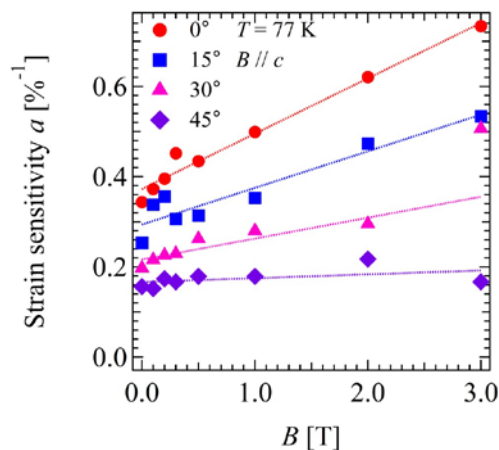


図 2.4.4-17 歪み印加角度 ϕ に対する感受性 a の磁場依存性

(6) 長尺線材の機械特性

ここでは各機関の長尺化が可能となった線材についてGoldacker試験機にて曲げ特性を詳細に調べた¹⁾。機器の製作工程では、種々の曲げが加わるため、この特性は機器設計上有益である。表 2.4.4-3 に測定した各社線材の仕様を、図 2.4.4-18 に 77 Kでの曲げ特性結果を示す。F-PLD (フジクラ製線材) を除き、圧縮、引張り側ともに徐々に特性が低下していく。引張り側では 0.4~0.5 %で急激に劣化するが、S-PLD (住友製線材) では 0.8 %まで劣化が起こっていない。本線材のみ柔らかいNi系結晶粒配向金属基板を使っており、その違いによるのかもしれない。圧縮側ではF-PLDの線が 0.8 %まで劣化しない特異な特性を示した。この理由は、まだ詳細は検討を要すが、線材の作製工程の熱処理、配向結晶の構造等が影響しているかもしれない。超電導変圧器ではコイル曲げ直径 514 mm (歪み 0.01 %) や 2 GJ級SMESではコイル曲げ直径 2 m (歪み 0.002 %) が考えられているが、図の結果からこれらの歪みに対して、各社線材とも劣化は問題ないと言える。

また、交流応用のために ISTEK でレーザ法により 5、10 分割された線材 (フジクラ製) の曲げ歪み特性を調べた (図 2.4.4-19)。いずれも分割無しの通常の線材と同様 0.5 %引張歪みまで劣化がなく、機器応用に使えることが分かった。

表 2.4.4-3 各機関の線材と特性

	開発機関	超電導層 (製法)	構造	線材Ic 線幅
F-PLD	フジクラ	GdBCO (PLD)	Hastelloy I-BAD MgO	174A 5mm
I-PLD	ISTEC	GdBCO (PLD)	Hastelloy I-BAD MgO	273A 5mm
K-MOD	昭和電線	YBCO (TFA-MOD)	Hastelloy I-BAD GZO	164A 5mm
S-PLD	住友電工	GdBCO (PLD)	クラッド基板	257A 4mm
C-CVD	中部電力	Gd-YBCO (MO-CVD)	Hastelloy I-BAD MgO	309A 10mm

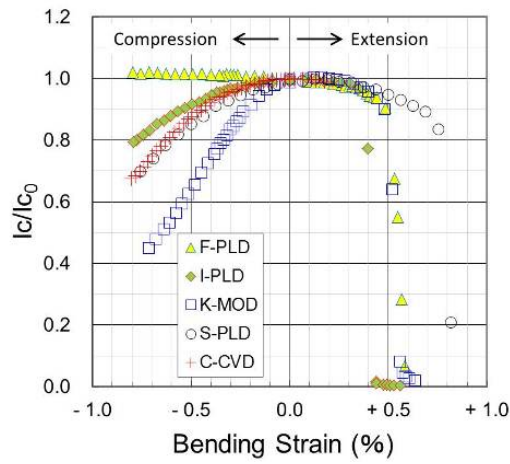


図 2.4.4-18 各線材の曲げひずみ特性

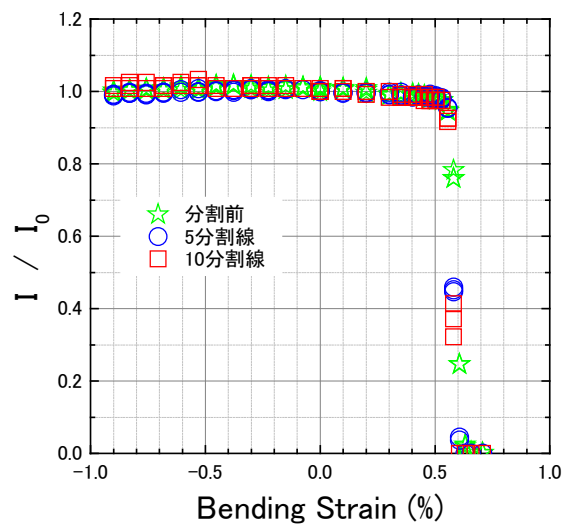


図 2.4.4-19 分割線材の曲げ特性(77 K)

(7) コイル形状での伝熱挙動

ここでは本プロジェクトで長尺化された線材によるコイルの特性を把握し、機器応用上への課題注出、冷却を含んだ設計へのフィードバックを目的に研究した。

ISTEC製の50~200 m級のGdBCO線材でレーストラック状コイル(図 2.4.4-20。円形部内径8 cm、外径16cm、直線部長さ15 cm、厚み1.2 cm (5 mm-w線材二つ分))を作製した。線材の I_c 値 (@77K, s.f.)は、5 mm-wで192 Aと高特性である。コイルはエポキシ樹脂の塗り込み含浸法で作製した。図 2.4.4-21は、50 K(冷凍機冷却)でのコイル発生電圧特性である。1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ 基準に相当する電圧(20mV)より一桁以上低い電圧レベル(0.01 $\mu\text{V}/\text{cm}$ 以下)でコイルの実測発生電圧(◆)と線材の $I-V$ 特性から求めた解析計算値(○)が良く一致した。つまり、コイル作製や冷却による特性劣化が低電界まで生じていないことになる。

磁場中 I_c 特性の改善が著しい人工ピン止め点導入線材とピン止め点無線材によるコイルの発熱特性を解析により比較した(図 2.4.4-22)。ここではBaZrO₃ピン止め点入り線材の特性を用い、コイル全発熱量が0.1 Wになる条件下での30 Kでの通電時の発熱分布を解析により求めた。ピン止め点入りコイルは、ピン止め点無しの場合より通電電流が高く、発生磁場も高くなる(無1.42 T、有1.78 T)。他方、ピン止め点入りコイルでは内層部、中央に近い所が発熱しやすく(下図)、ピン止め点無しコイルでは高発熱部は周辺部に移動する(上図)。これは、定性的には、ピン入り線材に比べて、ピン無し線材ではテープ面に垂直磁場のかかる部分(上図コイル中央)では I_c が低く発熱しやすいためである。よって、実際のシステムの設計では、用いる線材に応じて冷却箇所も最適化していく必要があることがわかった。



図 2.4.4-20 レーストラック型コイル

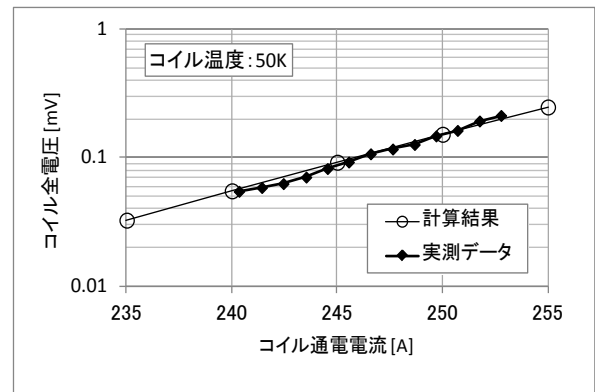


図 2.4.4-21 上記コイルの $I-V$ 特性

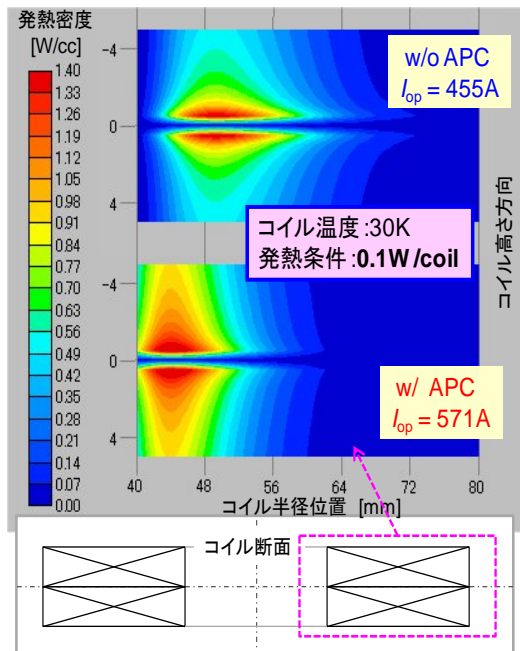
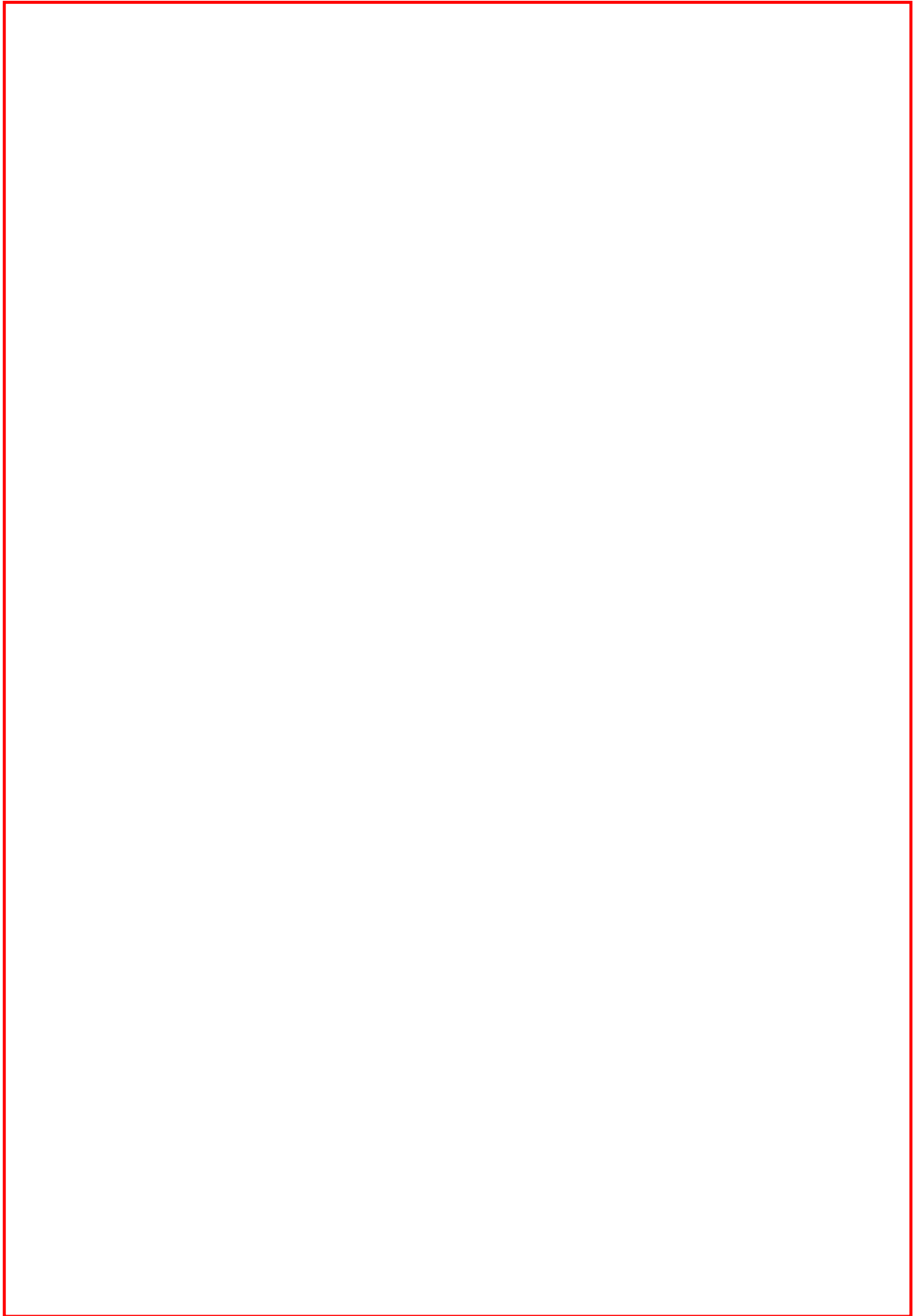


図 2.4.4-22 人工ピン無し (上) 入り (下) コイルの発熱密度

(8) モータ形状における耐応力性評価



2.4.4-2 高臨界電流化技術開発

(1) 高臨界電流化対応基板・中間層作製技術開発

本項では、高工業的臨界電流密度 (J_c) 線材の開発にあたり、高臨界電流化技術開発の一環としてそれに対応した基板・中間層作製技術の開発成果をまとめる。

高臨界電流化には高臨界電流密度化と厚膜化の2通りの技術開発方策があるが、対応する中間層付き金属基板の技術開発方策は結晶粒の高配向化により高臨界電流密度化を促すことと、厚膜化に伴う成膜時間の長時間化に対応した中間層の開発、そして高均一化により I_c 特性の劣化部発生を抑制すること、の3つが考えられる。このうち、高均一化により I_c 特性の劣化部発生を抑制するテーマについては2.4.4-1(1)IBAD基板の均一性向上技術開発の項を参照されたい。結晶粒の高配向化による高臨界電流密度化については、中間層全体として CeO_2 層の結晶粒面内配向度の向上をめざすことになる。 CeO_2 層の結晶粒面内配向度と I_c 特性の関係をPLD-GdBCO線材を用いて調べた結果を図2.4.4-26に示す。図から、薄膜試料においては $\Delta\phi = 6$ 度の中間層を用いても約 6 MA/cm^2 (@77 K, s.f.) の非常に高い J_c 値が得られており、下地の結晶粒配向度による影響が小さい。一方、厚膜試料は下地となる中間層の配向度に敏感であるが、 $\Delta\phi \sim 4$ 度からはその影響が殆ど無くなることから、中間層の結晶粒配向度としては4度程度以上に向上しても高臨界電流化への貢献は殆ど期待できない。結論として、中間層構造としては CeO_2 層の結晶粒面内配向度を4度程度にできるような CeO_2 層の厚さと、それを技術コストとして満足する作製条件を探索することになる。これについては2.4.5 低コスト・歩留り向上技術開発の項を参照されたい。

厚膜化による高 I_c 化に対応する中間層の課題としては、拡散バリア機能の強化が挙げられる。単純に厚膜化すると成膜時間は膜厚に比例して長くなり、基板が長時間高温に晒される。中間層付き基板は長時間加熱により膨れが発生し、最終的には図2.4.4-27に示すようなMgO層-GZO層間での剥離となるが、この時、剥離部分にはNi元素(金属基板ハステロイTMの主タル合金元素)が拡散していることがEDSにより確認された。

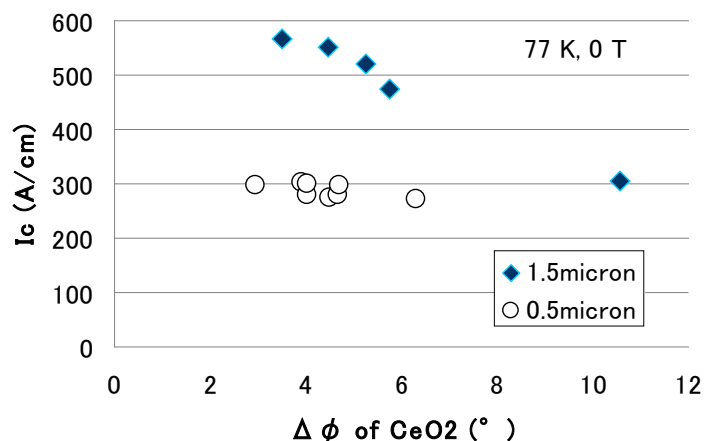


図 2.4.4-26 PLD-GdBCO 線材の I_c 特性の $\Delta\phi$ 依存性

これを防ぐには、超電導層の厚さに対応して拡散防止層厚さを増やす必要がある。拡散防止層の厚さ増加は製造速度の低下とそれに伴うコスト高を引き起こすが、MODベッド層の成膜においてはマルチターン化処理により、殆ど技術コストを上げることなく膜厚を上げることが可能である。

全ての層において、必要最低限の厚さにすることにより成膜時間を短縮して技術コストを削減することが求められているため、超電導層の高 I_c 化に対応した中間層を作製する場合には、超電導層の成膜時間に応じた拡散防止層膜厚を選んで成膜する必要がある。

平成 23 年度には、超電導層の成膜速度向上技術開発の進展と厚膜での高 J_c 化技術開発の進展により、高 I_c 値を得るために必要な成膜時間、すなわち加熱時間の短縮が図られた。最終的に技術コスト目標と超電導層の特性目標が両立できる構造として、拡散防止層膜厚であるGZO層の厚みをプロジェクト開始時に比べて半分の約 55nmとした中間層付き基板を用いて、PLD、MOD両方のReel to Reel成膜によって 600 A/cm-w(@77 K, s.f.)を超える短尺 I_c 値を得た。最終目標を満足するにあたり、十分な裕度を持つ特性が得られたことから、中間層成膜技術開発としては目標を達成したと判断し、超電導層の成膜に中間層付き基板を作製して供した。

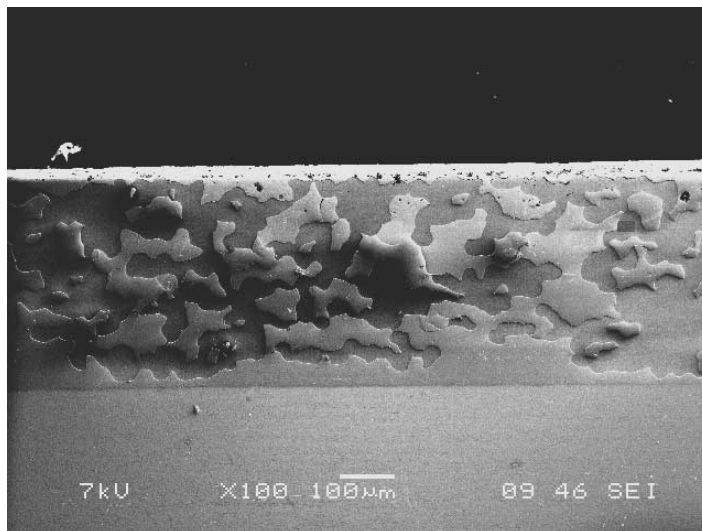


図 2.4.4-27 中間層付き基板の熱処理による剥離部

(2) PLD 法による高臨界電流線材作製技術開発

本項では、高臨界電流線材の開発にあたり、PLD 法を用いた超電導層作製技術の開発成果をまとめる。

高臨界電流化には、前述のとおり超電導層の高臨界電流密度化、厚膜化、臨界電流劣化部の抑制、の3つのアプローチがある。臨界電流劣化部の抑制については、2.4.3-1 (3)PLD線材の均一性向上技術開発の項を参照されたい。残る高臨界電流密度化と厚膜化についてであるが、PLD法による成膜では、通常、厚さを上げるにつれて臨界電流密度が低下し、膜厚の増加に伴う I_c 特性の向上が得られない。これは厚さが上がるにつれて超電導層の表面が黒体化し、輻射率が上がるために表面温度が低下してa軸配向粒子の発生を引き起こすことが主な原因である。これを抑えるためには厚さが上がるに従って成膜温度を上げる手法が有効であることが分かっている。また、厚さを上げるには通常、成膜時間が長時間化するため、一方で技術コストの上昇を招くという問題もある。これに対しては2.4.5 低コスト・歩留向上技術開発の項で詳述するのでそちらを参照されたい。

高 J_e 化のため、薄肉金属基板を用いるにあたり、ターゲット組成、ロット間差を抑えるための検討に加えてターゲット-基板間距離等の各種パラメータの最適化を試みた上で、50 m長を超える長さの薄肉基板を用いて線材作製を行った。図2.4.4-28に長尺線材の I_c 値分布を示す。

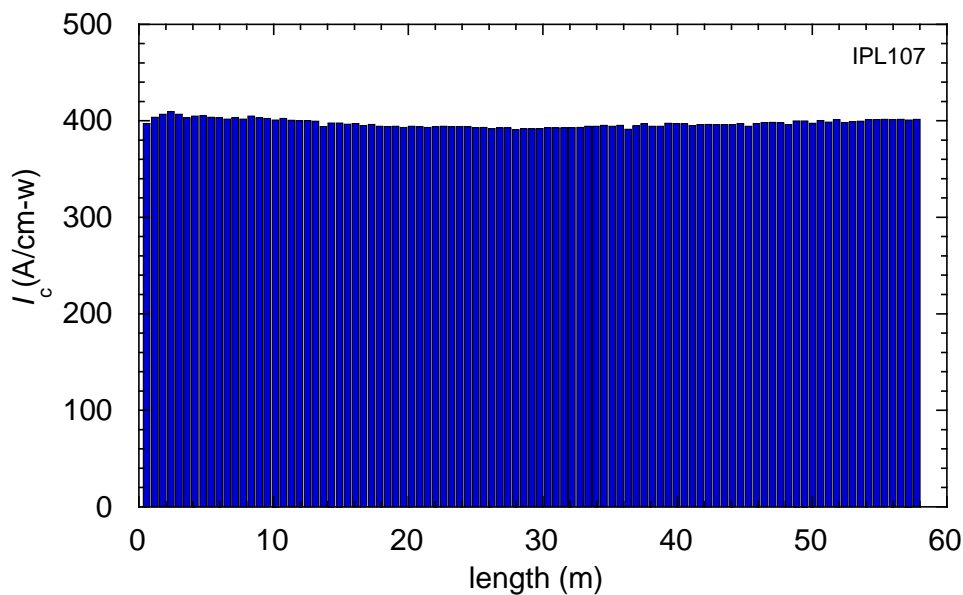


図 2.4.4-28 80 μm 厚基板を用いて作製されたPLD-GdBCO線材の I_c 値分布図

この 57.2 m線材は $I_c(\text{min}) = 391 \text{ A/cm-w}(@77 \text{ K, s.f.})$ であり、その J_e 値は安定化層 30 μm 厚とした場合でも全長にわたって 30 $\text{kA/cm}^2(@77 \text{ K, s.f.})$ を超えており、中間目標を達成した。この線材の超電導層厚さは 1.2 μm であり、超電導層の成膜時における線速は 30 m/hであった。

最終目標である 50 $\text{kA/cm}^2(@77 \text{ K, s.f.})$ を達成するために必要となる 500

A/cm-w (@77 K, s.f.)を 200 m全長に亘って、超電導層厚さ 1.2 μm で実現するのは難しい。そこで、厚膜化が必要となるが、コスト面の要請からも、必要最低限の膜厚とするため、低コスト化技術開発で開発した高速成膜技術と、薄肉金属基板上への成膜技術等を統合して 70 μm 厚金属基板を用い、200 m級長尺線材の作製を行った。図 2.4.4-29 にこの線材の I_c 値分布を示す。600 A/cm-w(@77 K, s.f.)前後の値が全長に亘って得られ、 $I_c(\text{min})$ 値は 538.6 A/cm-w(@77 K, s.f.)であった。その J_e 値は安定化層を 30 μm 厚とした場合でも全長に亘って 50 kA/cm²(@77 K, s.f.)を超えており、最終目標を達成した。この線材の超電導層厚さは 2.4 μm であり、超電導層の成膜時における線速は 20 m/h (60 m/hで 3 回成膜) であった。中間目標達成時と比べると、倍の膜厚を成膜するのに 1.5 倍の成膜時間増に抑制していることが分かる。これは高速成膜技術開発の成果であり、詳細については 2.4.5-1 (2)を参照されたい。

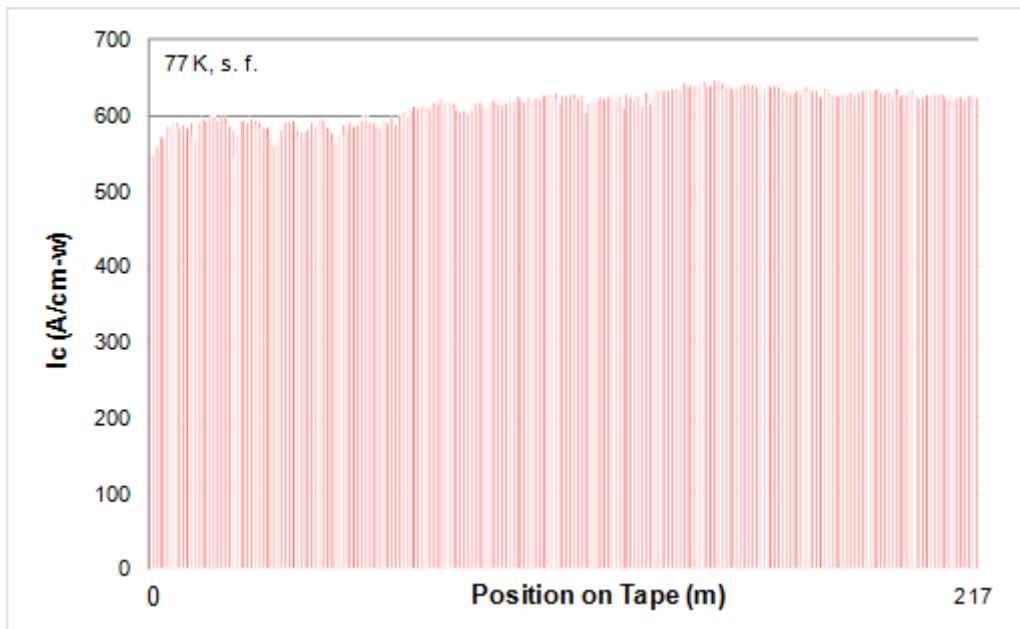


図 2.4.4-29 70 μm 厚基板を用いて作製された 217 m長PLD-GdBCO線材の I_c 値分布図

(3) MOD 法による高臨界電流線材作製技術開発

本項では、高臨界電流線材の開発にあたり、MOD 法を用いた超電導層作製技術の開発成果をまとめる。

高臨界電流化には、前述のとおり超電導層の高臨界電流密度化、厚膜化、臨界電流劣化部の抑制、の3つのアプローチがある。臨界電流劣化部の抑制については、2.4.3-1(5)MOD線材の均一性向上技術開発の項を参照されたい。残る高臨界電流密度化と厚膜化についてであるが、MOD法による成膜では、原料開発による J_c 値向上を検討し、RE種を一部YからSmやGdに代えることにより J_c 特性を向上させることに成功した。これを厚膜化、長尺化することを考えると、Reel to Reel成膜においては線材の幅端部に厚膜部分が発生しやすく、この部分でクラックが発生するため、厚膜化の障害となっている。また、厚膜化時の J_c 値低下の抑制は、焼成時間の長時間化による未反応粒子の粗大化や膜上部でのa軸配向結晶粒及びランダム核発生を抑制することが主な課題である。さらに塗布・仮焼工程における一層あたりの膜厚調整やReel to Reel成膜における J_c 値低下についても検討した。

図 2.4.4-30 にREを一部YからGdに代えた原料溶液を用いた短尺MOD線材の I_c 特性の厚さ依存性を示す。ここで、フッ化物を含む前駆体仮焼膜から酸化物REBCO結晶を得るために水蒸気との反応を用いるが、この反応の副生成物であるHFガスの除去がREBCO成長速度を規定するため、REBCO成長速度に影響を及ぼす要因の一つである焼成雰囲気中の水蒸気分圧を変化させた場合の影響も調査した。焼成雰囲気が低水蒸気分圧の試料では、厚膜化するに従って I_c 特性の伸びが止まっているのに対して、焼成雰囲気を高水蒸気分圧雰囲気にし、成長速度を上げる

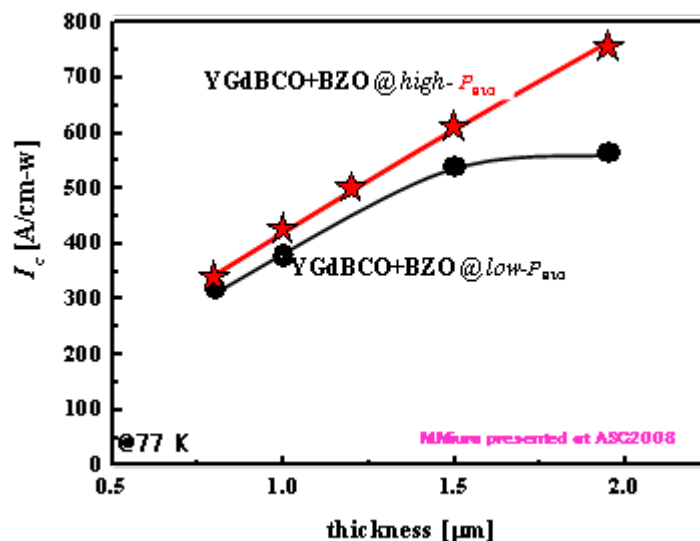


図 2.4.4-30 MOD-YGdBCO+BZO 線材の I_c 特性の膜厚依存性

ことにより、 I_c 特性の劣化を抑制して、厚膜においてもほぼ均一な J_c 特性が得られている³⁾ことが分かる。これらの試料の微細組織を観察した結果、低水蒸気分圧雰囲気下では、厚膜化時には膜上部の結晶粒が粗大化しているとともに、 $Y_2Cu_2O_5$ 、 CuO (未反応物) 粒子の分布も膜厚方向で変化しており、基板側から表面の方向に対して下部から上部に行くに従い、量も増えていた。低成長速度条件においては、低Ba環境下においても成長界面遠方からBaの供給が行われるため、膜上部においてBaが足りなくなっているとともに、上部の未反応粒子は前駆体の状態で長時間保持されるために粗大化する。このことから、厚膜時には高成長速度条件の適用により、未反応物の高温粗大化と組成ずれを防ぐことができ、高い J_c 特性、ひいては高い I_c 特性の実現が可能となった。結果として、 $1.9\ \mu\text{m}$ の厚さで $760\ \text{A/cm-w}(@77\ \text{K,s.f.})$ を得た。

中間目標の I_c 値を満足するには $1.5\ \mu\text{m}$ 程度というクラック発生限界を超える必要は無いが、コスト目標と同時に特性目標を達成するため、高成長速度条件が必要であった。これまでに、 $100\ \mu\text{m}$ 厚金属基板を用いて高成長速度条件下で高 J_c 長尺線材の作製を行った結果、図 2.4.4-31 に示す I_c 値分布を有する線材が得られ、全長に亘って $432\ \text{A/cm-w}(@77\ \text{K,s.f.})$ 以上の I_c 特性を示した。安定化層 $30\ \mu\text{m}$ 厚とした場合、この線材の J_c 値は全長で $33.2\ \text{kA/cm}^2(@77\ \text{K,s.f.})$ となり、中間目標を技術コストと同時に達成した。

最終目標を達成するには、金属基板と安定化層の厚さを考慮して、最低 $500\ \text{A/cm-w}(@77\ \text{K,s.f.})$ の特性が必要となる。このため、 $2\ \mu\text{m}$ 程度の超電導層膜厚が必要であり、膜厚分布の抑制によるクラック抑制と、先に挙げた現象による高速結晶成長条件での焼成をクリアする必要がある。膜厚分布の抑制については、詳細は 2.4.3-1(5)を参照されたい。溶液塗布時のチューブ径のコントロール等により線材幅端部での膜厚増加が小さいMOD膜が得られるようになり、この技術の適用により従来の $1.5\ \mu\text{m}$ 程度というクラック発生限界を超えることが可能になった。

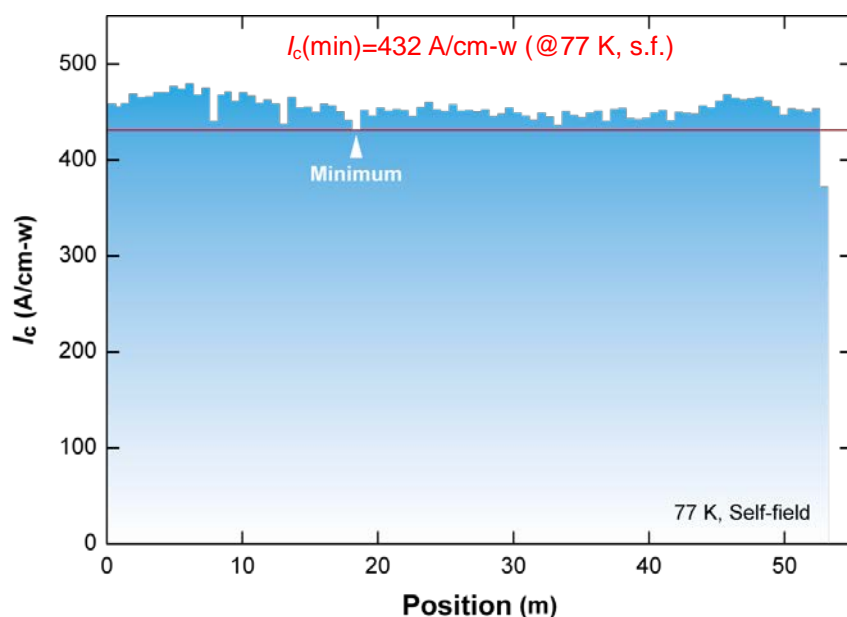


図 2.4.4-31 100 μm 厚金属基板を用いて作製した 55 m長MOD-YBCO線材の I_c 値分布図

開発した技術を統合することにより、70 μm 厚金属基板を用いて 2 μm 厚の超電導層をReel to Reel方式で成膜し、7.4 m長の線材を作製した。無誘導巻きにより全長の I_c 値(End-to-End)を評価し、530 A/cm-w(@77 K,s.f.)の特性を得た。これは、最終目標の J_e 値を満足しており、長さは不足しているものの、技術的には最終目標達成の見通しを得たと言える。

(4) 結晶粒配向基板—PLD 線材による高臨界電流線材作製技術開発

本項では、高臨界電流線材の開発にあたり、結晶粒配向基板を基板として用いた超電導線材作製技術の開発成果をまとめる。開発目標は、以下のとおり。

- ・ 中間目標： $J_e=30\text{kA/cm}^2$ (@77 K,s.f.)-50m
- ・ 最終目標： $J_e=50\text{kA/cm}^2$ (@77 K,s.f.)-200m

図 2.4.4-32 に、中間目標達成に対して試作を行った線材の、 J_e 値の長手方向分布を示す。 $J_e=31\text{kA/cm}^2$ (@77 K,s.f.)、93m長の線材作製技術確立を確認し、中間目標を達成した。

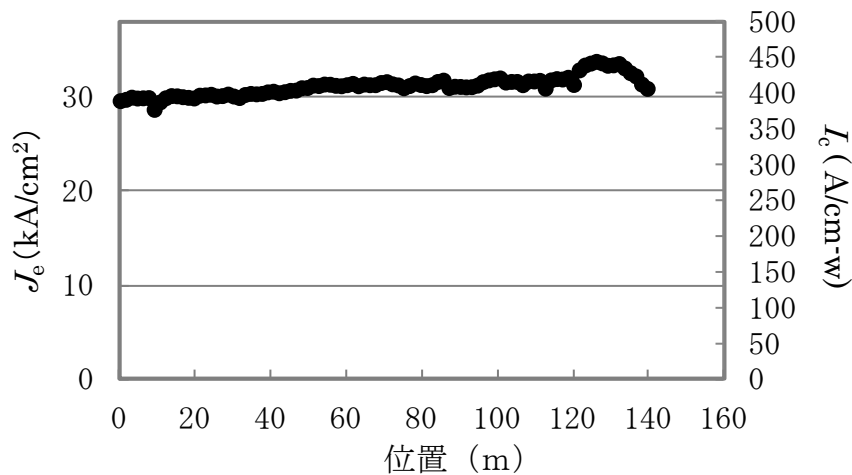


図 2.4.4-32 超電導線材の J_c 値(@77 K,s.f.)の長手方向分布

結晶粒配向金属基板-PLD線材において、高 J_c 線材をめざして、高 I_c 長尺線材を達成するために、両面結晶粒配向金属基板を用いた中間層及び超電導層の両面成膜プロセスの検討を行った。基板の開発は片面基板 ($\Delta\phi=5.5$ 度) と遜色ない性能レベル (両面ともに $\Delta\phi=5.8$ 度) まで到達した。しかしながら応用として想定している交流ケーブルへの応用検討にて、交流ケーブルへ両面超電導線材を適用すると、多層構造で均流化の解がなく、偏流が発生するため不適であることが判明し、中間層～超電導プロセス開発は中止した。

超電導電力ケーブルへの適用性について偏流等の課題が明らかになった両面線材に替えて、結晶粒配向金属基板の薄肉化技術開発を行った。70 μm 厚、200mの長尺薄肉基板を開発し、 $\Delta\phi=5.6$ 度と、従来基板と同等の性能を有していることを確認した。しかしながら、中間層の結晶粒配向化最適温度付近で基板表面が変質することが判明したため中間層の製造条件が確立できなかった。そのため、目標とする I_c 値(@77 K,s.f.)が 400 A/cm-wから 650 A/cm-wと大きくなるが、薄肉基板の超電導線材への適用に代え従来の基板結晶粒配向性向上による高 I_c 化に方針を変更した。

2.4.3-1(6)にて実施した、基板の結晶粒配向性改善 ($\Delta\phi = 4.8$ 度)、中間層改善、及び超電導成膜プロセスの改善により、 $I_c = 682$ A/cm-w(@77 K,s.f.)、 $J_c = 52$ kA/cm² を短尺で達成した (図 2.4.4-33)。この結果を基に 200m級の長尺試作を実施したが、図 2.4.4-34 に示すように、 $J_c = 38$ kA/cm²(@77 K,s.f.)が得られた。

今後は、短尺作製条件の長尺線材作製条件への適用及び長尺での安定性改善が課題である。

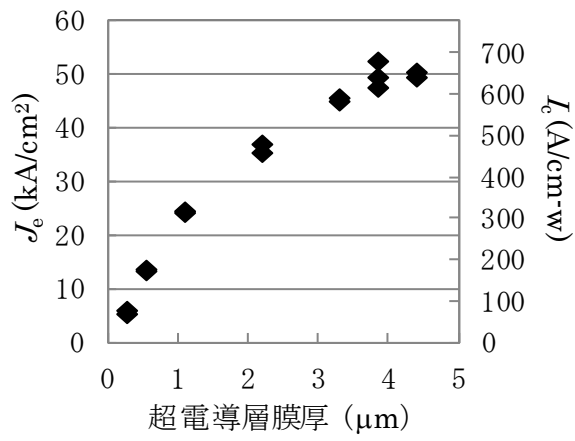


図 2.4.4-33 J_c 値(@77 K,s.f.)の超電導層膜厚依存性

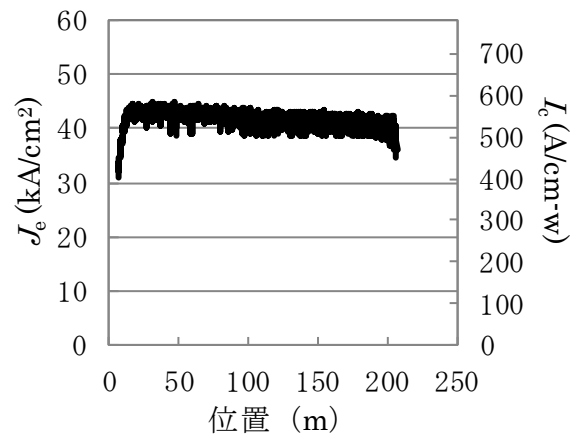


図 2.4.4-34 200 m級線材の J_c 特性 (@77 K,s.f.)

(5) 高臨界電流線材特性評価

H23-H24年度は、線材の動作領域に応じた実用性能向上を明らかとするため、磁場下の通電特性を解析的に表し、温度磁場面上の J_c マップを作成した。さらに、高 J_c 線材の具体的な機器適用時の性能向上の例として、マグネット巻線における線材性能の影響を検討した。

我々はこれまでに、高温超伝導体の電界-電流密度 (E - J) 特性が、臨界電流密度の統計分布を考慮したパーコレーション転移モデル⁴⁾により良く記述できること、また E - J 特性の温度、磁場依存性も巨視的ピン力密度の温度スケール則及び転移磁場の温度依存性をもとに表せることを報告してきた。本手法を用いて、PLD-GdBCO線材におけるBH0人工ピンの有無による $I_c(B, T)$ 特性を解析的に求めた結果を、図2.4.4-35に示す⁵⁾。両者の線材の77K、自己磁場中における I_c はいずれも600 A/cm程度であるが、BH0人工ピン導入によって磁場中 I_c は大きく向上することが分かる。

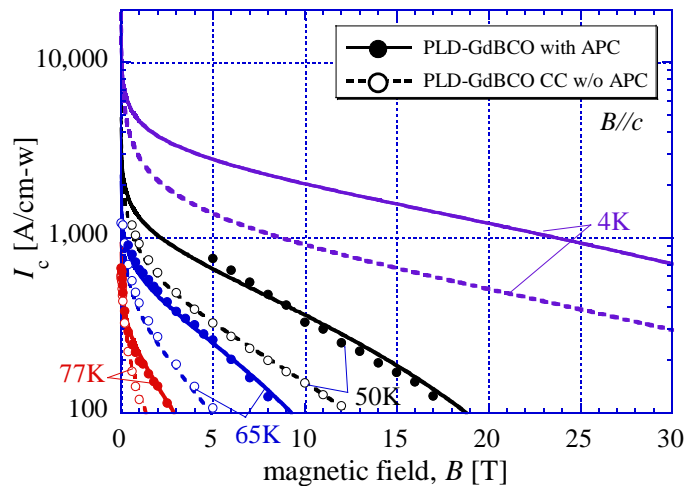


図 2.4.4-35 人工ピンの有無による PLD-GdBCO 線材の I_c - B - T 特性の比較
実線並びに破線は人工ピンの有無による解析式の結果、マーカーは実測データを示す。

希土類系高温超伝導線材の性能は、一般的に1cm幅の線材の77K、自己磁場での臨界電流 I_c 値をもとに表されており、線材の単位長、単位アンペア当りの技術コスト「円A⁻¹m⁻¹」も77K、自己磁場での I_c 値をベースとしている。しかしながら、実際の応用機器では、その対象によって、広い温度、磁場領域にわたって線材の使用条件が変化する事から、線材の技術コストの概念も、動作条件における線材性能が考慮されなければならない。上述したとおり、 $I_c(B, T)$ 特性を解析的に記述することによって、技術コストも以下のような温度、磁場の関数として求められる。

$$C_t(B, T) = \frac{C_p}{I_{op}(B, T)} = \frac{C_p}{\alpha I_c(B, T)}$$

ここで、 I_{op} は運転電流、 α は負荷率を表している。線材の普及導入時の大量生産を想定し、単位長当りの線材製造コスト C_p を 1,200 [円/m] と仮定し、負荷率 α を 100 [%] とした場合の技術コスト C_t の評価結果を図 2.4.4-36 に示す。このような技術コストの可視化は、希土類系高温超伝導線材の磁場中特性向上に伴う技術コストの低減効果を表す指針として有効であるばかりでなく、冷熱発生、動作磁場、運転電流等、総合的に考慮した機器の設計においても有用である。

更に両者の線材の性能をもとに、サブクール窒素温度でのマグネットの実現可能性について検討した結果を図 2.4.4-37 に示す。人工ピンの導入によって、必要線材長は約半分に減少でき、5 T を超えるマグネットを 65 K の温度で実現できるポテンシャルを有していることが分かる。

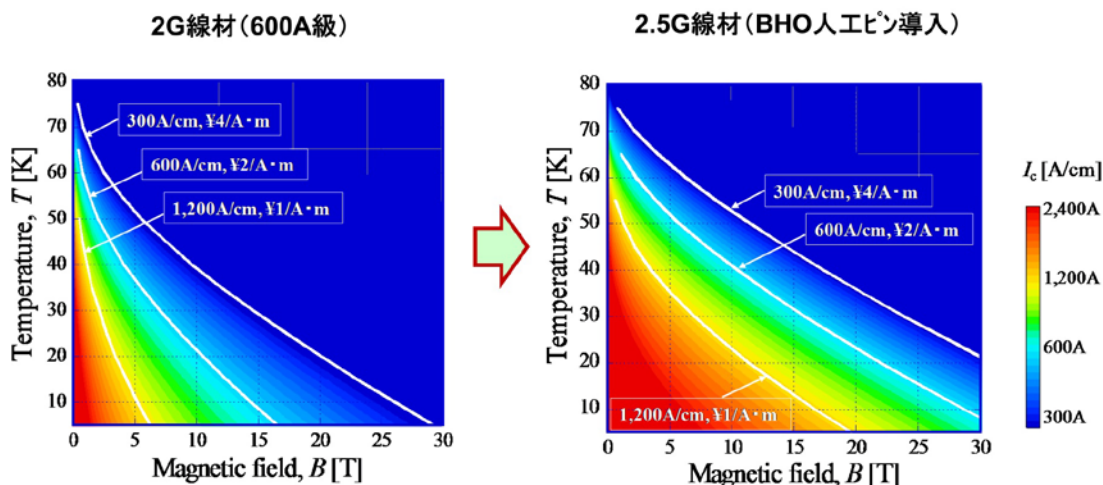


図 2.4.4-36 BHP 人工ピン導入による PLD-GdBCO 線材の磁場中性能の向上と技術コストの検討

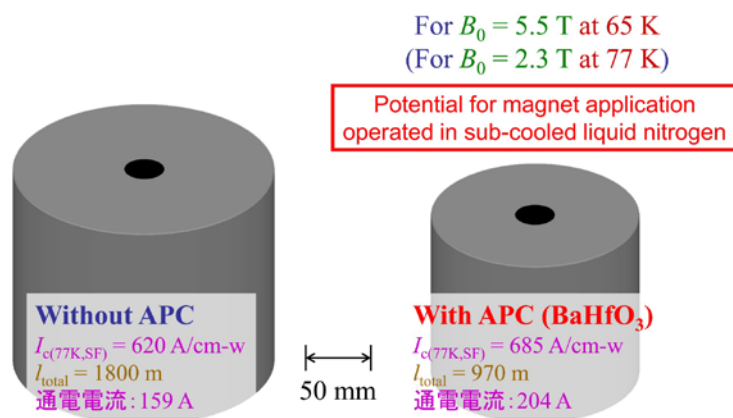


図 2.4.4-37 上述した線材性能をもとにマグネットに適用した場合の比較検討

(6) 組織観察

高強度・高工業的臨界電流密度(J_c)線材開発のため、薄肉基板を用いて、超電導線材を製造する必要がある。本節では、70 μm 厚の HastelloyTM に $\text{CeO}_2/\text{LaMnO}_3$ (LMO)/ $\text{MgO}/\text{Gd-Zr-O}$ (GZO)中間層を形成した基板を用いて、インプルームPLD法¹⁾により $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (Gd123)超電導層を形成した試料について、TEMによる微細構造観察を行った結果について述べる。

図 2.4.4-38 に、70 μm 厚の HastelloyTM 薄肉基板上に形成された Gd123/ CeO_2 /LMO/ MgO/GZO 層の断面TEM像とTEM像中のA及びB領域から得られた電子回折図形を(a) 及び(b)に示す。Gd123層及び CeO_2 層はそれぞれ、1.3 μm 厚、0.6 μm 厚であり、極めて良好な 001 配向をしている。Gd123層の表層に一部突起物(矢印で示す)が観察されるが、殆どのGd123層は c 軸配向結晶により構成されていることがTEM観察から判明した。これまで、100 μm 厚の HastelloyTM 基板上へインプルームPLD法により成膜されたGd123層の組織を多数観察してきたが、それらの組織と同様な組織が形成されていることが分かった。

以上のように、70 μm 厚の薄肉基板上へも、従来の 100 μm 厚の HastelloyTM 基板上への中間層、超電導層の成膜と同様な条件で、同様な中間層・超電導組織が形成することが可能であることをTEM観察から証明することができた。

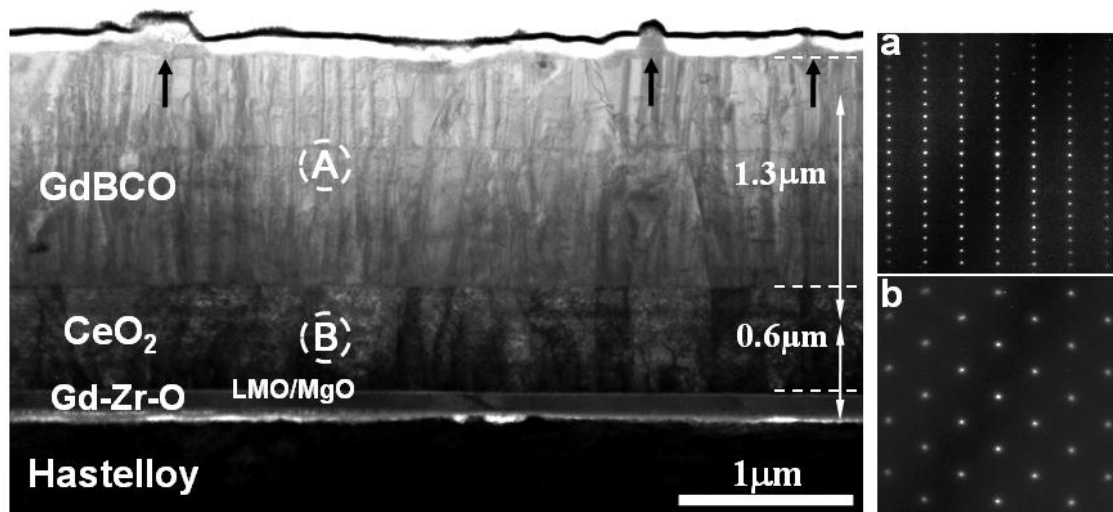


図 2.4.4-38 70 μm 厚の HastelloyTM 薄肉基板上に形成された Gd123/ CeO_2 /LMO/ MgO/GZO 層の断面TEM像とTEM像中のA及びB領域から得られた電子回折図形。(a) Gd123層の電子回折図形、(b) CeO_2 層の電子回折図形

次に、異なる 2 種類の中間層が形成された結晶粒配向金属基板上にPLD法により形成されたGd123線材について、TEMを用いて行った微細構造解析結果を述べる。結晶粒配向金属基板上に形成された中間層は $\text{CeO}_2/\text{YSZ}/\text{CeO}_2$ 中間層と $\text{CeO}_2/\text{YSZ}/\text{Y}_2\text{O}_3$ 中間層の 2 種類である。金属基板にNi基合金結晶粒配向金属基板を用いた。

図 2.4.4-39(a)にNi基合金結晶粒配向金属基板上に形成されたGd123/CeO₂/YSZ/CeO₂層、(b)に同結晶粒配向金属基板上に形成されたGd123/CeO₂/YSZ/Y₂O₃層の断面TEM像を示す。図 2.4.4-39 (a)に示すGd123層の*c*軸配向結晶の厚さはおよそ 1.8 μmであり、Gd123直下のCeO₂層、YSZ層、Ni上のCeO₂層の厚さは、それぞれ 60 nm、160 nm、160 nmである。Gd123層の殆どの領域は*c*軸配向結晶であるが、表面には基板垂直方向に対し、*c*軸が傾斜したGd123結晶が幾つか存在する。その他、Gd123層には*a*軸配向結晶も観察された。また、図 2.4.4-39 (a)で示すように、CeO₂層とNi基合金結晶粒配向金属基板の間に 500 nm程度のNiO層が形成され、さらにNiO層とNi基合金結晶粒配向金属基板の間に、500 nm~1 μm程度の空隙が幾つか形成されていた。同図(b)に示すGd123層の*c*軸配向結晶の厚さはおよそ 2.7 μmであり、CeO₂層、YSZ層及びY₂O₃層の厚さは、それぞれ 60 nm、220 nm及び 60 nmである。この試料もGd123層の殆どの領域は*c*軸配向結晶であるが、幾つか*a*軸配向結晶が存在し、他に基板垂直方向に対し、*c*軸が傾斜したGd123結晶も幾つか観察された。また、同図 (b)で示す試料においてもY₂O₃とNi基合金結晶粒配向金属基板の間にNiO層及び空隙が観察されるが、同図 (a)に示す試料と比較し、NiO層の厚さが 1/10 程度で、空隙の大きさも小さい。両試料ともに、中間層及びGd123超電導層の成膜時にNi基合金結晶粒配向金属基板が酸化されることによりNiO層が形成され、同時にNiOとNi基合金結晶粒配向金属基板の間に空隙が形成されたと考えられる。そのため、Y₂O₃層はCeO₂層と比較し、試料表面からの基板への酸素拡散障壁の役割を担っていることが分かる。結晶粒配向金属基板と中間層の間に大きな空隙がある場合、線材の機械強度が低下し、結晶粒配向金属基板と中間層の間で剥離が発生することが十分考えられる。そのため、このような空隙の形成を抑えることが必要である。これらの観察結果から、CeO₂層に比べ、Y₂O₃層の方が、中間層形成及びGdBCO超電導層の成膜時のNi基合金結晶粒配向金属基板への酸素拡散を抑制していることが証明できた。以上の結果は、結晶粒配向金属基板を用いた線材にY₂O₃中間層を採用することにより、高*J_c*線材製造の有効性を示すことができた。

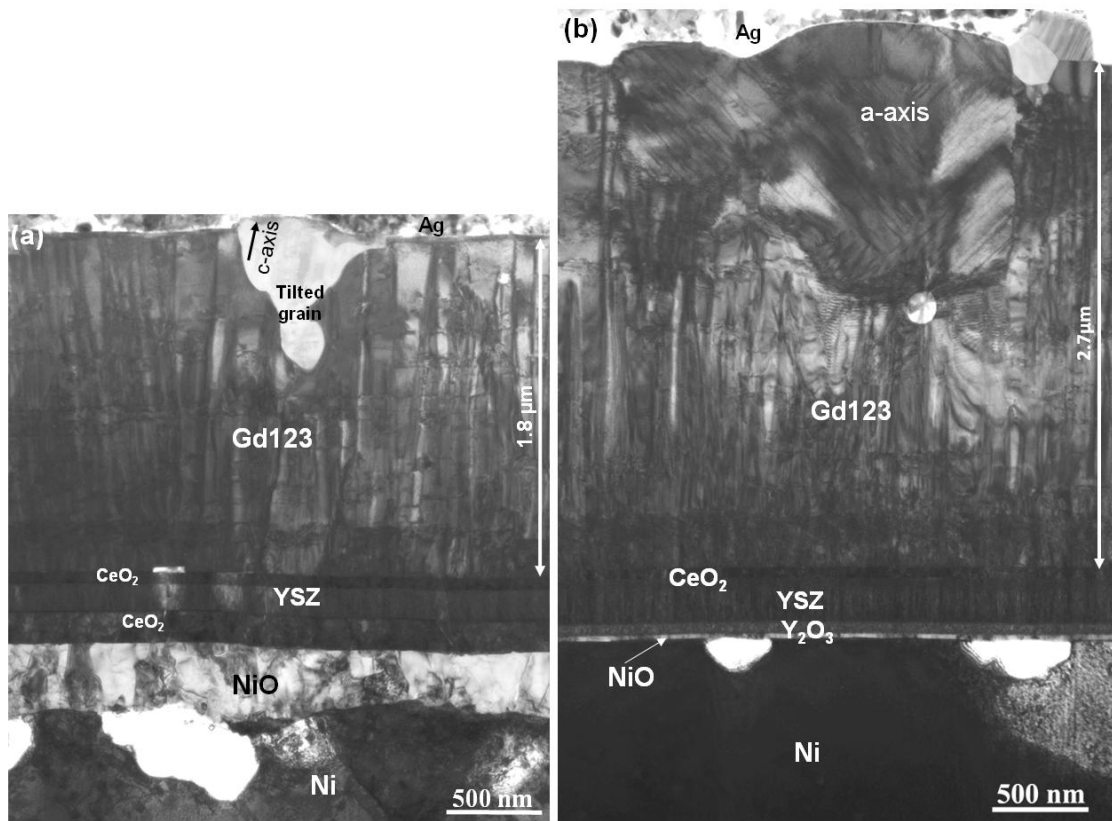


図 2.4.4-39 (a)Gd123/CeO₂/YSZ/CeO₂/NiO/Ni結晶粒配向金属基板のTEM像、
 (b) Gd123/CeO₂/YSZ /Y₂O₃/NiO/Ni結晶粒配向金属基板のTEM像

引用論文リスト

- (1) 山田雄一, 山田 穰, 大熊 武, “RE123 線材の曲げひずみ特性“, 低温工学 vol.45 (2010) p246.
- (2) D. M. Feldmann, T. G. Holesinger, R. Feenstra, C. Cantoni, W. Zhang, M. Rupich, X. Li, J. H. Durrell, A. Gurevich and D. C. Larbalestier, “Mechanisms for enhanced supercurrent across meandered grain boundaries in high-temperature superconductors”, J. Appl. Phys., 102 (2007) 083912.
- (3) M. Miura, T. Kato, M. Yoshizumi, Y. Yamada, T. Izumi, Y. Shiohara, T. Hirayama, “Enhancement of Flux Pinning in $Y_{1-x}Sm_xBa_{1.5}Cu_3O_y$ Coated Conductors with Nanoparticles” Appl. Phys. Exp. Vol.1 No.5 (2008) 51701
- (4) K. Yamafuji, T. Kiss, Physica C, **290** (1997) 9-22
- (5) M. Inoue *et al*, IEEE Trans. on Appl. Supercond., **23** (2013) 8002304

2.4.5 低コスト・歩留向上技術開発

(ISTEC、九州大学、東北大学、名古屋大学、JFCC、住友電気工業、古河電気工業、フジクラ、昭和電線ケーブルシステム)

2.4.5-1 低コスト対応高速・高 I_c 化技術開発

(1) 中間層作製コスト削減技術開発

本項では、プロジェクト開始直前に開発した、低コスト化が期待できる IBAD-MgO を用いた中間層付き金属基板の低コスト化技術開発における成果をまとめる。本プロジェクト開始時点では、40 m 級の長尺 IBAD-MgO 基板の作製に成功したところであり、高速化・高配向化・長尺化の開発が急ピッチで進められている状況であった。この段階では、技術コストに対して 3 円/Am を装置の大型化等に依って実現できる見通しを得ることができていたが、本プロジェクトではこれを進めて実証することを中間目標に、2 円/Am の実証を最終目標とした。

プロジェクト開始時点での基板研磨及び各中間層の構造と製造速度、目標値とその時の単価を表 2.4.5-1 に示す。

表 2.4.5-1 中間層付き基板の構造と製造速度のプロジェクト開始時と中間目標値

名称	プロセス	プロジェクト開始時		中間目標		
		厚み (nm)	製造速度 (m/h)	厚み (nm)	製造速度 (m/h)	単価 (円/m)
キャップ層	PLD-CeO ₂	500	4.8	300	30	193
バッファ層	Sputter-LMO	18	30	10	50	34
IBAD 層	IBAD-MgO	5	24	5	22.5	77
ベッド層	Sputter-Y ₂ O ₃	N/A		14	200	12
	Sputter-GZO	110	20	55	40	60
	MOD-GZO	N/A		100	10	60
研磨	機械/電解		5/20 2,000 円/m		120/-	63/-

中間目標を達成するための基板中間層における目標値についてであるが、中間層に必要とされる機能は、超電導層が十分な特性を発揮できるような、必要最低限の結晶粒配向度と金属基板からの元素拡散を抑制する拡散バリア及び超電導層と基板との絶縁である。結晶粒配向度については、キャップ層での配向度と I_c 特性との関係から、 $\Delta\phi_{\text{CeO}_2} < 5$ 度が満足すべき指標となる。拡散バリア機能については、各層の厚みと超電導層の成膜温度及び成膜時間に依存するため、必要膜厚を決定することは難しく、厚膜化時にも超電導特性の劣化がないことが目標となる。絶縁機能についても、単純に必要な膜厚を決定することは難しいため、これらについては開発の進捗に応じて評価・成膜へのフィードバックを行うこととした。目標である技

術コストの低減に関しては、中間層付き基板の各工程単価の中では研磨の単価とキャップ層の単価が突出して高いため、これらの単価低減が主眼となる。

キャップ層の単価低減には、その製造速度の向上が必要となるが、製造速度の向上を装置の大型化なしにめざすには、成膜時間の短縮、つまり必要膜厚の低減が必要となる。キャップ層の結晶粒配向度は PLD 法により作製し、自己配向効果を発揮させることにより向上するため、下地の結晶粒配向度を上げることで、必要膜厚を下げるのが可能で、成膜時間の短縮とそれに伴う製造速度の向上が図られる。IBAD-MgO 層の結晶粒配向度は 10 度以下も期待できるという報告¹⁾もあることから、IBAD-MgO 層の結晶粒高配向化によりキャップ層の必要膜厚の低減を行った。また、装置のマルチターン化改造により、成膜エリアの拡大とそれに伴う高速化を行い、さらにレーザの高周波数利用やエネルギー密度上昇等により高速化を行った。

研磨単価の低減については、研磨速度の高速化が必要となるが、研磨時間短縮により基板平坦性の劣化を伴う。IBAD-MgO 層の結晶粒配向度に大きな影響を与える平坦性は、 $R_a < 2 \text{ nm}$ が必要という報告²⁾もあり、研磨単価の低減には、平坦性の確保が課題となる。そこで、低い平坦性の金属基板を用いて MOD 法により平坦性を向上させるプロセス³⁾の導入を検討した。MOD 法は平坦性の向上に加えて欠陥修復機能も期待できるため、ベッド層の成膜手法として有望である。

IBAD-MgO 層においては、平成 20 年度に導入した大型 IBAD 装置を用いることにより 120 m/h への高速化を行うのに加えて、結晶粒配向度を向上させることによりキャップ層の膜厚低減に貢献することを目標とした。

結果として、IBAD-MgO 層については、大型装置を用いた成膜により、製造速度 200 m/h でキャップ層厚み 380 nm において $\Delta\phi_{\text{CeO}_2} < 4$ 度と十分な結晶粒配向度を有する基板の作製に成功した。長尺線材作製においても、図 2.4.5-1 に示すようにパッチ線材において 50 m 長に亘って $\Delta\phi_{\text{CeO}_2} \leq 4.4 \pm 0.2$ 度と、良好且つほぼ一定の結晶粒配向度を実現した。

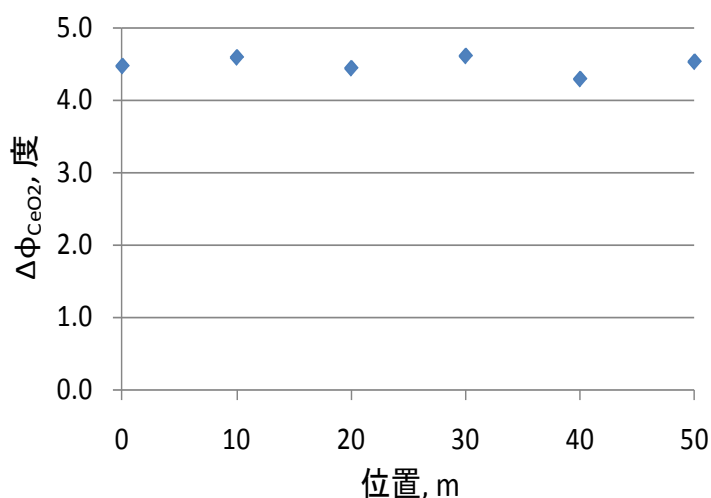


図 2.4.5-1 200 m/h で成膜した 50 m パッチ IBAD-MgO 基板の CeO_2 層成膜後の結晶粒面内配向度分布

次に、MgO 層の結晶粒高配向化であるが、MgO 層表面の平坦性、特に長周期の平坦性が大きく影響していることが分かってきた。アシストイオンビーム強度を上げて長時間方向に最適条件をずらすことにより、平坦性の悪化開始が遅れ、それに伴い MgO 層の結晶粒高配向化が実現できた。図 2.4.5-2 にキャップ層厚みと結晶粒面内配向度の関係を示す。結晶粒高配向 MgO 基板を用いることにより、従来と同等のキャップ層厚み 500 nm 成膜した線材の結晶粒配向度は約 3 度になっており、長尺においても劣化なく結晶粒高配向を実現できた。この結晶粒配向度は、5 度以下の配向を得るために必要なキャップ層厚みを 200~300 nm にほぼ半減させることができるものであり、中間目標達成の条件をクリアしたと言える。

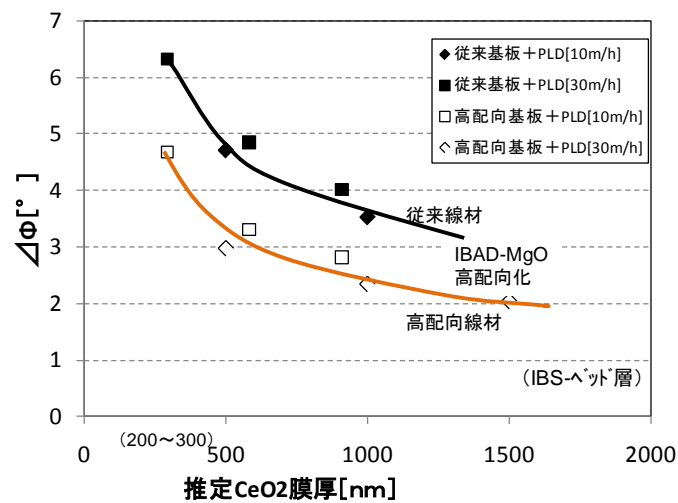


図 2.4.5-2 PLD-CeO₂成膜条件によるキャップ層厚みと結晶粒面内配向度の関係

平成 23 年度からは、IBAD-MgO 層の下地のベッド層材料として用いていた GZO の上に、製造速度 200 m/h で膜厚 14 nm 程度の薄い Y₂O₃ を挿入する効果について検討を行った。Y₂O₃ 層を挿入することにより、IBAD-MgO 成膜時のアシストイオンビーム強度を上げて MgO 層の結晶粒高配向化が可能であることが分かり、GZO 層上の MgO 層の結晶粒配向度は 10~12 度程度であるのに対し、Y₂O₃ 層上のそれは 7 度程度まで改善した。強アシストイオンビーム条件では、より少ない粒子のみが生き残るため、高配向化を促す一方、下地のアモルファス層がイオンビームによりエネルギーを受けて結晶化し、低配向化させる一因となる。下地層である GZO 層、Y₂O₃ 層にイオンビームを照射して、結晶化のし易さを比較したところ、Y₂O₃ 層の方が結晶化し難いことが判った。図 2.4.5-3 にキャップ層厚みと結晶粒面内 (Δφ)、面外 (Δω) 配向度の関係における Y₂O₃ ベッド層挿入の効果を示す。面内、面外ともにキャップ層厚みが増加するとともに配向が進んでいくが、Y₂O₃ 挿入により必要な CeO₂ 結晶粒配向度に到達する膜厚が低減できることが分かる。これにより 5 度以下の配向を得るために必要なキャップ層厚みを 70 nm 程度まで低減できるようになった。

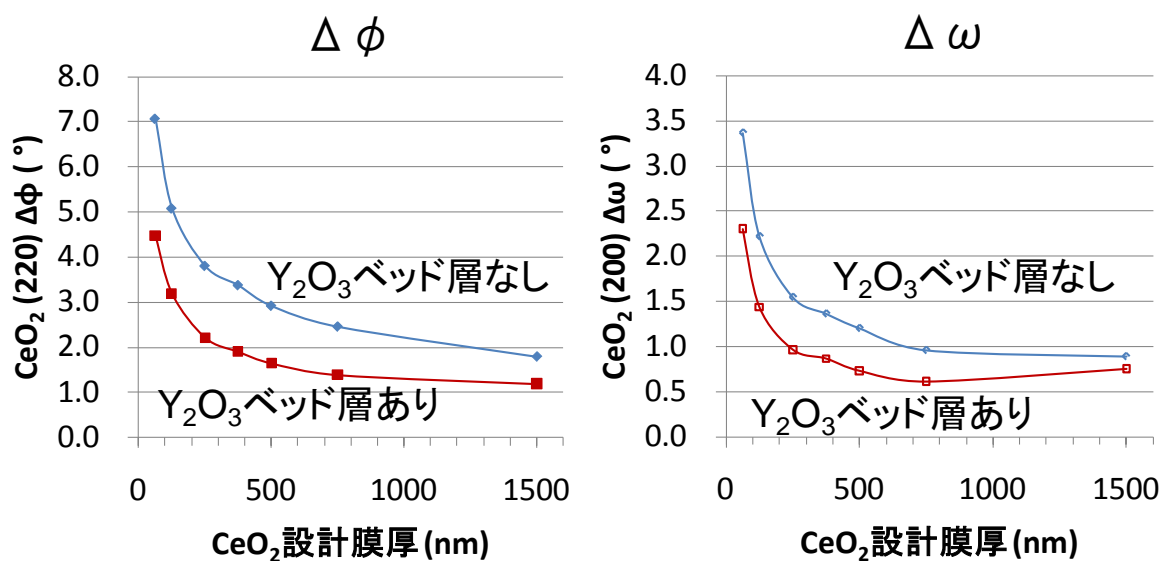


図 2.4.5-3 キャップ層厚みと結晶粒面内 ($\Delta\phi$)、面外 ($\Delta\omega$) 配向度の関係における Y_2O_3 ベッド層挿入の効果

また、キャップ層においては、製造装置における基板搬送機構をマルチターン化に改造を行い、成膜面積の増加により 4.8 m/h から 10 m/h までの高速化を行った。平成 23 年度からは、前述した MgO 層の高配向化により必要膜厚を半減するとともに、 CeO_2 成膜時のレーザ照射条件(周波数、エネルギー密度)を適正化することにより高速化を図り、30 m/h の目標値をクリアした。この構造の基板を用いて超電導層を成膜したところ、 5 MA/cm^2 以上の J_c 値を 77 K, s.f. で得ることができ、キャップ層を薄くしても拡散バリア機能に問題がないことを確認した。

研磨単価の低減をめざした MOD プロセスの導入においては、イオンビームスパッタ(IBS)を用いて IBAD- MgO のベッド層として実績のある GZO、NiW 基板上での MOD 法による中間層形成実績のある CZO を材料として選択し、成膜を試みたところ、図 2.4.5-4 に示すように、塗布回数が増えるに従い、平坦性が向上する結果が得られた。平坦性は塗布回数と塗布溶液の収縮率を用いて $R_n = R_0(\text{収縮率})^n$ の関係式で表す³⁾ことができ、収縮率 89% での値は実験結果と良く一致した。

平坦性が約 2 nm になった膜を用いて IBAD- MgO の成膜を行い配向度の評価を行ったところ、十分な配向度が得られなかったため、JFCC にて TEM による微細組織を観察した結果、IBS により成膜したものと比較して、XRD では捉えられないレベルではあるが、結晶化が進んでおり、その上の MgO 層の結晶粒配向性も乱れていることが明らかになった(図 2.4.5-5)。

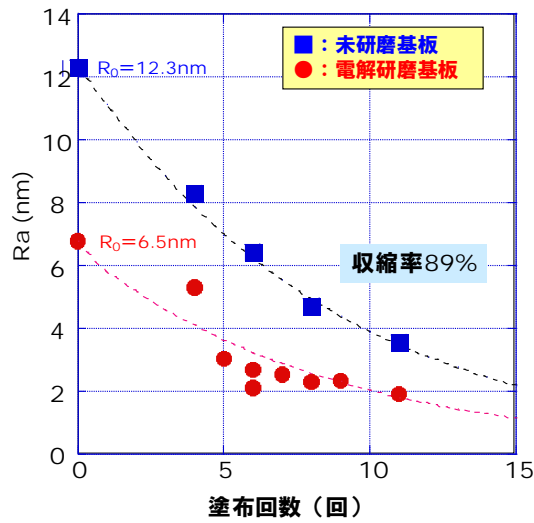


図 2.4.5-4 MOD ベッド層の表面平坦性(R_a)に対する塗布回数依存性

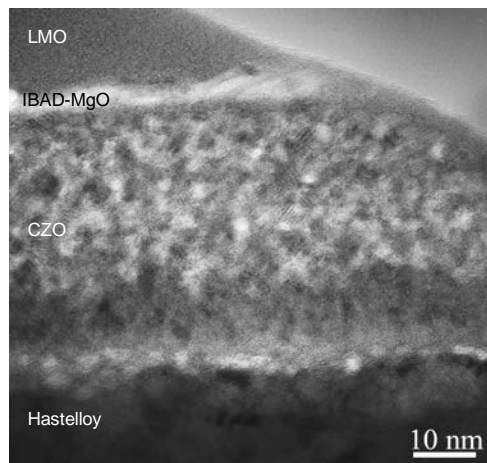


図 2.4.5-5 MOD ベッド層(CZO)上に成膜した IBAD-MgO 層の断面 TEM 像

そこで、結晶化度の抑制のため、焼成温度の低温化を指向して焼成条件を変更し、酸素中で焼成を行うことにより、焼成温度の低温化を行った。これにより $R_a < 2$ nm の良好な平坦性とキャップ層の結晶粒配向度約 4 度(キャップ層厚み 500 nm)を長尺線材においても得ることができた(図 2.4.5-6)。この時、製造速度は 10 m/h であり、目標値をクリアしたが、これを用いて得られた中間層の結晶粒配向度がスパッタ法で作製されたベッド層上のそれに比べて 2 度ほど大きかった。

ベッド層は IBAD 層に対する核生成層としての機能と拡散バリア機能を主に担うため、スパッタから MOD への成膜プロセスの変更は、拡散バリア機能と絶縁及び剥離についての評価に影響する可能性がある。平成 23 年度に実施した、超電導層成膜による拡散バリア機能評価の結果、1 μ m までの成膜においては、 T_c 値及び J_c 特性の劣化は確認されず、良好な特性が得られた。絶縁特性の評価も、必要な面

抵抗をクリアした。しかしながら、剥離試験を行った結果、剥離強度が従来の構造に比べて6割程度に低下した。高い剥離強度を示す線材においては剥離面が超電導層であるのに対し、この構造の基板では、部分的にキャップ層の下から剥離している場所があった。剥離強度の問題とともに、結晶粒配向度の問題のために最終目標を満足する I_c 特性を得るための必要膜厚が大きくなること等から、最終目標達成をめざすベッド層の第一候補としてはスパッタ法による膜を用いることとした。このうち、剥離の課題についてはその後、2.4.1-1(2)に記載したように、原因究明・プロセス改善により解決されている。

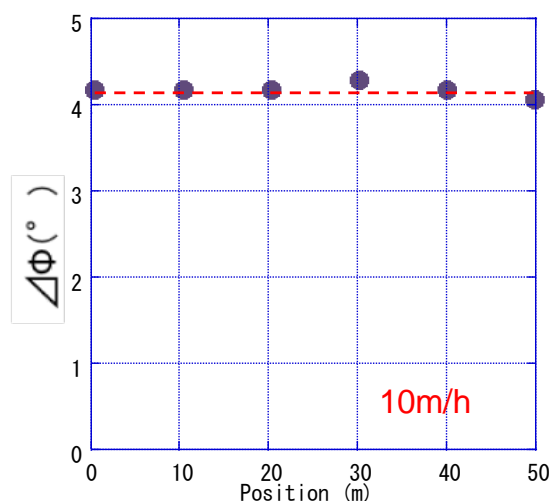


図 2.4.5-6 MOD ベッド層を用いた中間層付き 50 m 長線材のキャップ層結晶粒配向度

平成 23 年度以降、スパッタによる GZO ベッド層については膜厚裕度の再検討を行い、従来の膜厚 110 nm から 55 nm まで低減を行い、 I_c 値、剥離強度ともに問題ないことを確認した。これは、均一性・平坦性の向上により欠陥が減少したことによるものと考えられる。これにより製造速度を平成 22 年度までの 20 m/h から 40 m/h へと向上させ、単価を低減することができた。

バッファ層においては、線速を向上させるため、ヒータ出力を上げて成膜を行ったところ、膜厚 10 nm 以下で、結晶粒配向度を維持して 50 m/h での成膜に成功した。しかしながら、長尺線材における配向度の安定性が若干低い傾向が見てとれたため、LMO 膜厚の均一性に問題があるのではないかと考え、出力を上げて 10 nm の膜厚を確保することで問題を解決し、目標値をクリアした。

以上により、それぞれに必要な目標はクリアしたが、最終的には全てを一体化する必要がある。これまでに、各プロセスの開発後の条件適用を進めた結果、MOD ベッド層については最終的にコスト面でのメリットは期待されるものの安価研磨基板上での結晶粒高配向 IBAD 条件の探索とそれに伴うキャップ層製造速度の向上に課題が残るため、スパッタによる GZO ベッド層膜厚低減と Y_2O_3 ベ

ッド層の挿入による CeO_2 膜厚低減を組み合わせる方が有利と判断した。図 2.4.5-7 に CeO_2 キャップ層まで積層した 200 m 級長尺中間層付き基板の結晶粒配向度分布を示す。これにより最終目標である技術コスト 2 円/Am が達成可能な 200 m 級長尺中間層付き基板を作製することができた。

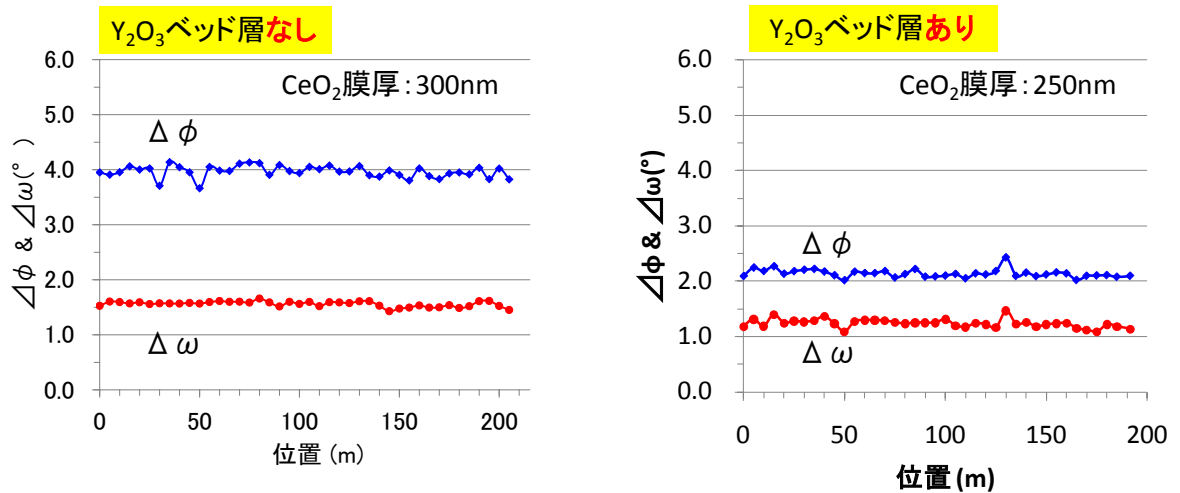


図 2.4.5-7 CeO_2 キャップ層まで積層した 200 m 級長尺中間層付き基板の結晶粒配向度分布

要素技術として確立に伴い、超電導線材としての特性確認を行った。図 2.4.5-8 に超電導層、及び Ag 層まで積層した超電導線材の I_c 値分布を示す。200 m 級の試作を行う中で得られた良好部 88 m 長の I_c 値分布であるが、最小 558 A/cm-w (@ 77 K, s.f.) の高い特性を得た。この時の技術コストは 1.78 円/Am であり、最終目標の 2 円/Am を達成した。

<線材構造> *基板・中間層単価
439 円/m (研磨~CeO₂)

工程	プロセス	線速-単価 (m/h-円/m)
Ag	スパッタ	70
超電導	PLD	30- 362
CeO ₂	PLD	30- 193
LMO	スパッタ	50- 34
MgO	IBAD	22.5- 77
Y ₂ O ₃	IBS	200- 12
GZO	IBS	40- 60
研磨	機械	120- 63
基板材料費		120
合計:円/m		991 (1.78 円/Am)

*(参考) 中間目標達成時: 2.36円/Am, $I_c=459.6A/cm$

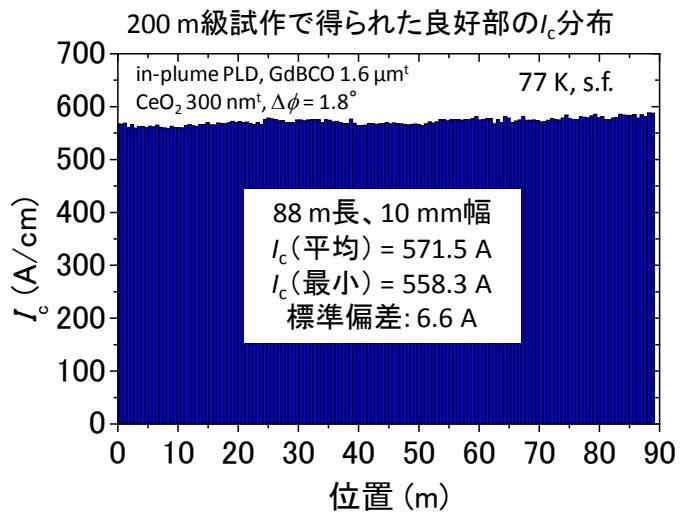


図 2.4.5-8 超電導層及び Ag 層まで積層した超電導線材の I_c 値分布

(2) PLD 法における超電導層作製コスト削減技術開発

PLD 法^{4~8)}を用いた RE(レアアース)系超電導層形成技術では、極低コスト化が見込める IBAD-MgO 基板(PLD-CeO₂/LMO/IBAD-MgO/GZO/ハステロイ™)等を用いて、マルチターン、マルチプルームによる蒸着面積向上、レーザパワーの増加による高速化、超電導層における a 軸配向粒や不純物相の削減、原材料収率向上、及び結晶粒配向度の向上を行い、これに適したレーザ、ターゲット、超電導膜材料、組成等の成膜条件の検討を行った。これらにより、中間目標時点では 3 円/Am 以下、最終目標としては 2 円/Am 以下の極低技術コスト化が可能な高速製造・高 J_c 化技術の開発をめざした。

図 2.4.5-9 は、プロジェクト開始当初に作製した約 40 m 長 GdBCO 線材の長手方向の I_c 値分布を示したものである。この GdBCO 線材の技術コストは 5.0 円/Am(製造速度 6 m/h (30 m/h×5 回成膜), End to End $I_c = 431$ A/cm-w(@77 K,s.f.), GdBCO 膜厚 2.5 μ m)であり、中間目標の 3 円/Am にも達していない。技術コスト 3 円/Am を達成するためには、REBCO 層の製造速度に対して、図 2.4.5-10 のような I_c 値を満たす必要がある。例えば、速度を 10 m/h 以上に上げ、500 A/cm-w(@77 K,s.f.)以上の I_c 値が必要となる。

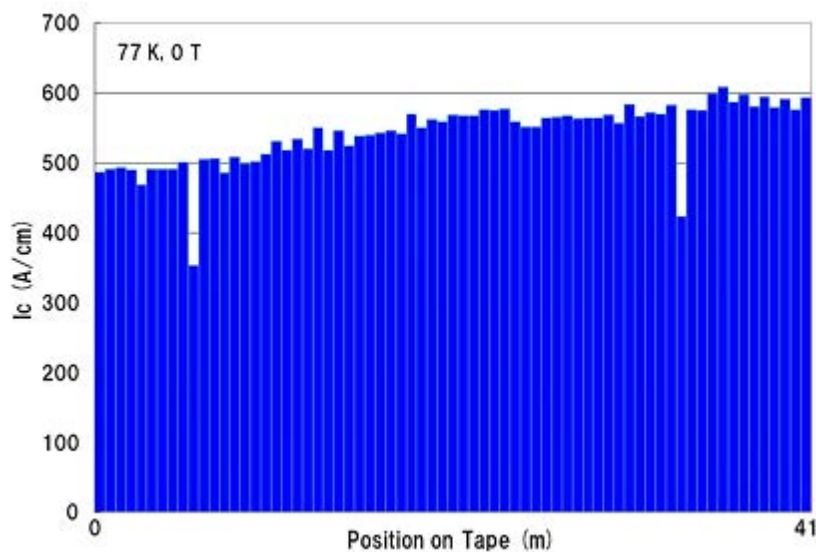


図 2.4.5-9 約 40 m 長 GdBCO 線材の長手方向 I_c 値分布

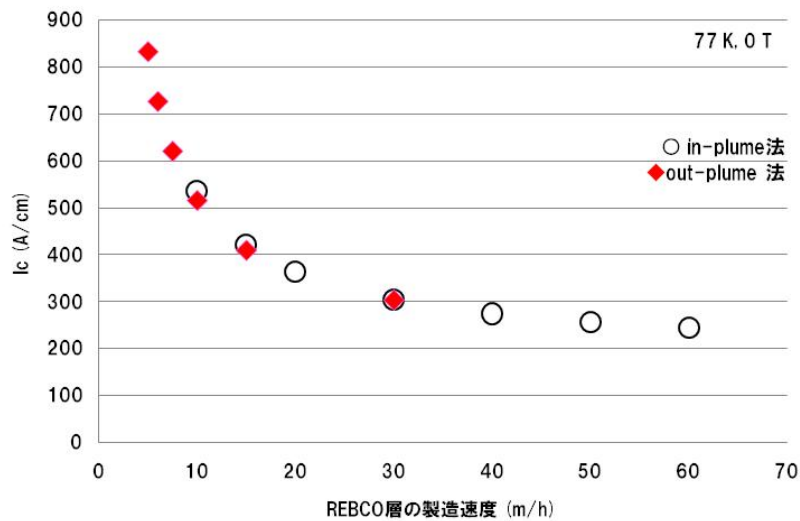


図 2.4.5-10 3 円/Am を満たすために必要な I_c 値と線材作製速度

さらに、最終目標値である、技術コスト 2 円/Am を達成するには、PLD 法超電導層のみの技術コストは 1 円/Am 未満が必要となる。この時の製造条件としては、例えば、典型例としては、以下のようなになる。

- in-plume 法^{5,6)} PLD (成膜時に基板をプルーム(アブレーションプラズマ)中を通すように成膜する方法)では、製造速度 20 m/h、 $I_c = 552$ A/cm-w、 $J_c = 2.3$ MA/cm²(@77 K, s.f.)
- out-of-plume 法 PLD (成膜時に基板をプルーム外を通すように成膜する方法)では、製造速度 10 m/h、 $I_c = 830$ A/cm-w、 $J_c = 3.4$ MA/cm²(@77 K, s.f.)

もちろん、より高速化が可能になれば、必要な I_c 値も小さくてすむ。例えば、

- in-plume 法 PLD では、製造速度 30 m/h、 $I_c = 510$ A/cm-w、 $J_c = 2.3$ MA/cm²(@77 K, s.f.)
- out-of-plume 法 PLD では、製造速度 15 m/h、 $I_c = 600$ A/cm-w、 $J_c = 6$ MA/cm²(@77 K, s.f.)

で、1 円/Am 未満の超電導層の技術コストが達成できる。

1 円/Am 未満の超電導層の技術コスト達成のために、in-plume 法、out-of-plume 法と併せてさらに高速化、高 I_c 値化の検討を進めた。高 I_c 値及び高 J_c 値化のためには、成膜条件のより詳細な最適化、RE 系超電導層の膜厚増加に対する J_c 値の低下の要因の特定・解決等基礎的検討も必要である。以上のとおり、in-plume 法 PLD、out-of-plume 法 PLD の高速化、高 I_c 値化に重点をおいた研究開発を進めることで、最終目標達成をめざした。

• PLD 高速化技術開発

コスト低減には製造速度の向上が有効である。そのため、Reel to Reel で成膜する際の長尺基板の搬送速度の向上を試みた。基板の搬送速度向上に対して十分な成

膜温度を維持するためには、ヒータ均熱板のスケールアップ及びヒータのパワーアップが必要となる。また、成膜領域前の段階で、基板にある程度の温度上昇を持たずために補助的なヒータを加えることも有効である。基板の搬送速度を上げるだけでは1回の成膜で蒸着する超電導層の体積は逆に減少してしまうので、成膜ターゲットに入射する発振レーザーエネルギー及びレーザー繰り返し周波数を増加させて蒸着量を増加させる必要がある。また、Reel to Reelでの成膜の際、基板を成膜領域に対して複数回巻き回すマルチターン方式を採用しているが、このターン数の増加も1回の成膜での蒸着量が増加するので高速化には有効である。このような方法を用いることで、基板搬送速度はプロジェクト開始時点の30 m/hから60 m/h、レーザーパワー(発振レーザーエネルギー×レーザー繰り返し周波数)は、約90 W (500 mJ×177 Hz)から約200 W (650 mJ×300 Hz)、マルチターン数も4ターンから5ターンに増加させての成膜が可能となった。その結果、40 m/hで $I_c = 283 \text{ A/cm-w}(@77 \text{ K,s.f.})$ (膜厚 $0.9 \mu\text{m}$)、技術コストは2.89 円/Am、また、30 m/h (60 m/hの2回成膜)で $I_c = 339 \text{ A/cm-w}$ (膜厚 $1.0 \mu\text{m}$)、技術コスト2.65 円/Amという短尺試料の結果が得られた。

さらに、in-plume法を用いることで高蒸着量・高収率が得られる。その結果、蒸着量は通常のPLD法の2倍、材料収率は約1.6倍(47%)に増加させることが可能となった。ただし、プルームの中に基板を通して成膜させるので、成膜用ターゲットの組成と蒸着された膜の組成にずれが生じ、膜の超電導特性を低下させてしまう可能性があるため、成膜用ターゲットの組成を適正化させる必要がある。その結果、種々の組成を検討したが、中間評価時点では $\text{GdBa}_{1.8}\text{Cu}_3\text{O}_x$ のターゲット組成が最適であるとの結果が得られた。図2.4.5-11は、このような方法を用いて作製した極低コスト50 m長GdBCO線材の長手方向 I_c 値分布を示したものである。その結果、レーザーパワー195 W、T-S(ターゲット—基板)間距離60 mm、製造速度15 m/h、膜厚 $2.2 \mu\text{m}$ の条件で2.9 円/Amの技術コストを得、中間目標を達成した。

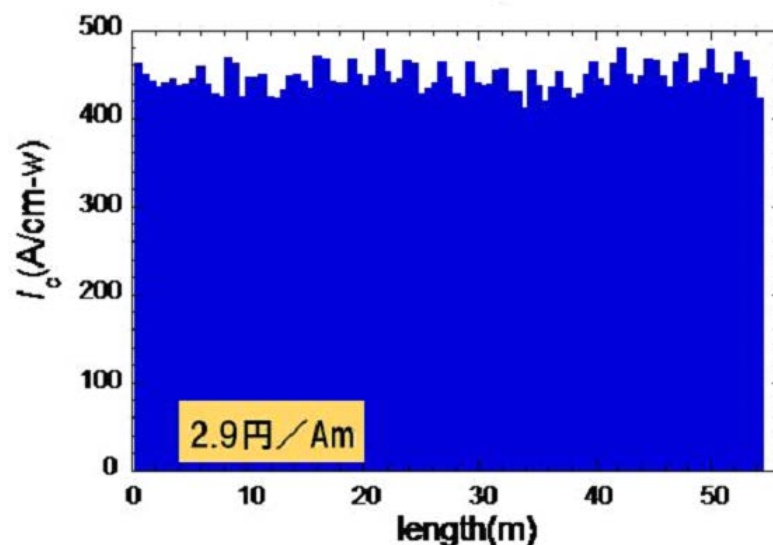


図 2.4.5-11 極低コスト 50 m 長 GdBCO 線材の長手方向 I_c 値分布

平成 23 年度からは、最終目標値に向けて、成膜条件の最適化による成膜速度の向上と、成膜領域の拡大による、同一成膜時間での基板搬送速度と材料収率の向上を進めた。各検討実施内容と技術コストへの影響は、以下の通りである。

- ・マルチターン数の増加(5 ターン→6 ターン)

ターン数を増加することで、1 回の成膜での蒸着量を増加することができるため、同一膜厚に対して製造速度の高速化が可能となる。

- ・発振レーザーエネルギーの増加(650 mJ → ~750 mJ)

発振レーザーエネルギーの増加、すなわち、成膜用ターゲット上へ照射されるレーザーエネルギー密度の増加は、瞬間的な蒸着量の増加につながるため、製造速度の高速化に有効である。

- ・成膜チャンバー内の酸素分圧の増加 (450 mTorr → ~800 mTorr)

成膜チャンバー内の酸素分圧を増加することで、プルームの広がり防いで基板へ到達させることができるため、製造速度の高速化及び材料収率の向上が可能となる。

- ・ヒータ均熱板の構造を改良による基板送り速度の向上(60 m/h → 80 m/h)

成膜速度の向上と特性向上等により必要最低膜厚が減少した場合に、製造速度を上げて装置の低コスト化ができる。また、厚膜化時には成膜温度を上昇させることで J_c の低下を抑制することができるが、1 回の成膜中に成膜温度を変化させることは難しい。これにより厚膜化時には高速で複数回のプロセスに分けることで成膜温度を変えながらの成膜が可能になる。

平成 22 年度までの in-plume 法 PLD では、製造速度が 40 m/h で $0.9 \mu\text{m}$ 、30 m/h で $1.0 \mu\text{m}$ 、15 m/h で $2.2 \mu\text{m}$ という蒸着量であったが、これらの技術開発の結果、60 m/h で $0.8 \mu\text{m}$ 、30 m/h で $1.6 \mu\text{m}$ 、15 m/h で $2.4 \mu\text{m}$ となり、約 1.6 倍の製造速度を達成することができた。また、材料収率も、47 %から 60 %(約 1.2 倍)に向上した。

- ・PLD 高 J_c 化技術開発

極低コスト化へのもう一つのアプローチとして、比較的薄膜の高 J_c 層を積層することで高 I_c 値化を行う方法が考えられる。高 J_c 層は out-of-plume 法^{4,5)}の方が得やすい。その中で、成膜条件の最適化(高成膜温度(850~900 °C)、高レーザーエネルギー密度化(3 J/cm²~)、T-S 間距離の微調整等、成膜用ターゲットの組成適正化(GdBa_{1.9}Cu₃O_x)を行った。この結果、IBAD-MgO 基板上での短尺試料で、 $I_c = 325 \text{ A/cm-w}$ (@77 K, s.f.), $J_c = 6.5 \text{ MA/cm}^2$ (膜厚 $0.5 \mu\text{m}$)、製造速度 30 m/h, 技術コスト 2.79 円/Am や、 $I_c = 518 \text{ A/cm-w}$ (@77 K, s. f.), $J_c = 5.1 \text{ MA/cm}^2$ (膜厚 $1.0 \mu\text{m}$)、製造速度 15 m/h, 技術コスト 2.36 円/Am の作製が可能となった。図 2.4.5-12 は、このような方法を用いて作製された極低コスト 50 m 長 GdBCO 線材の長手方向の I_c 値分布を示したものである。この時、レーザーパワー 106 W、T-S 間距離 97 mm、製造速度 10 m/h、膜厚 $1.5 \mu\text{m}$ であり、技術コストとして 2.9 円/Am を得た。こ

これは中間目標の技術コスト 3 円/Am を達成し、長さも 50 m をクリアした。

また、上記のような成膜条件の最適化に加えてレーザーパワーの増加(約 210 W (700 mJ×300 Hz))を試みることで、比較的高 J_c (約 4.5 MA/cm²)で長尺(20 m)高 I_c 値の GdBCO 線材の作製も可能である。

上述のように、技術コスト 3 円/Am の RE 系超電導線材の作製は可能となり、これらの基本技術を磁場中高 I_c 線材作製技術、低損失線材作製技術、及び高強度高 J_c 線材作製技術の開発へ展開した。

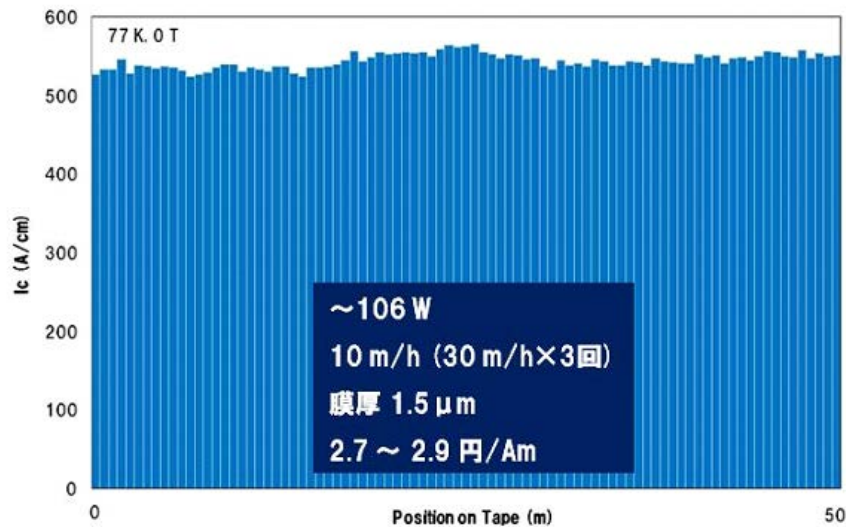


図 2.4.5-12 極低コスト 50 m 長 GdBCO 線材の長手方向 I_c 値分布

in-plume 法 PLD は、out-of-plume 法 PLD と比較して、成膜レートが高い(過飽和度が高い)、T-S 間距離が短いため、膜の組成ずれが起き易い等の要因から、高 J_c 層を得ることが難しかった。

従来の両者の J_c 値を比較すると、

out-of-plume 法 PLD

$I_c = 325$ A/cm-w (@77 K, s.f.), $J_c = 6.5$ MA/cm² (膜厚 0.5 μm)

$I_c = 518$ A/cm-w (@77 K, s.f.), $J_c = 5.1$ MA/cm² (膜厚 1.0 μm)

in-plume 法 PLD

$I_c = 283$ A/cm-w (@77 K, s.f.), $J_c = 3.1$ MA/cm² (膜厚 0.9 μm)

であった。

平成 23~24 年度は、上述したような、最終目標を達成するためのさらなる高速化技術(成膜レートの向上)と高 J_c 層の作製を両立させるために、改めて成膜条件の最適化(成膜温度及び多層成膜に対する成膜温度勾配、T-S 間距離、マルチプルームスキャン幅等)を行った。その結果、

in-plume 法 PLD

$I_c = 253$ A/cm-w (@77 K, s.f.), $J_c = 5.6$ MA/cm² (膜厚 0.45 μm)

$I_c = 384 \text{ A/cm-w (@77 K, s.f.)}$, $J_c = 4.2 \text{ MA/cm}^2$ (膜厚 $0.9 \mu\text{m}$)

となり、中間評価までの in-plume 法 PLD の約 1.35 倍の高 J_c 層が得られた。

out-of-plume 法 PLD の J_c 値と比較すると、in-plume 法 PLD の J_c 値はまだ低いものの、製造速度が 2 倍以上速いため、極低技術コスト化には、in-plume 法 PLD を用いた方が有利であると判断した。

最終成果

上述した高速化技術・高 J_c 化技術を用いて、長尺 GdBCO 線材の製造を行った(図 2.4.5-13)。

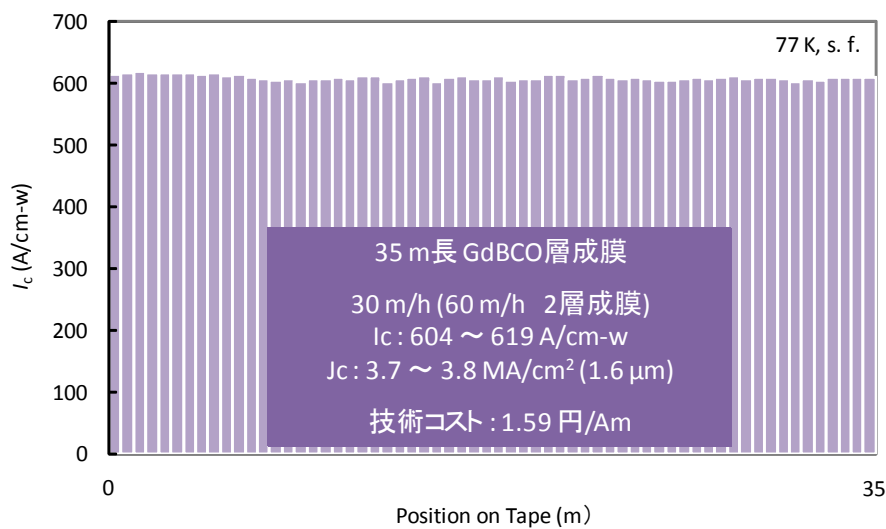


図 2.4.5-13 極低コスト 35 m 長 GdBCO 線材の長手方向 I_c 値分布

図 2.4.5-13 の 35 m 長 GdBCO 超電導層は、レーザーパワー~210 W(~700 mJ×300 Hz)、酸素分圧 800 mTorr、T-S 間距離 70 mm、製造速度 30 m/h(60 m/h×2 回成膜)、膜厚 $1.6 \mu\text{m}$ の条件で製造した。その結果、 $I_c = 604 \sim 619 \text{ A/cm-w (@77 K, s.f.)}$ 、 $J_c = 3.7 \sim 3.8 \text{ MA/cm}^2$ 、材料収率 60%、線材の技術コスト 1.59 円/Am (超電導層のみの技術コスト 0.60 円/Am) という値が得られ、最終目標を達成することができた。

また、さらに長尺化を試みた結果、図 2.4.5-14 (90 m 長 GdBCO 線材)、図 2.4.5-15 (200 m 長 GdBCO 線材) のような、より長尺の線材も技術コスト 1 円台/Am で作製することができ、最終目標条件を満たした。

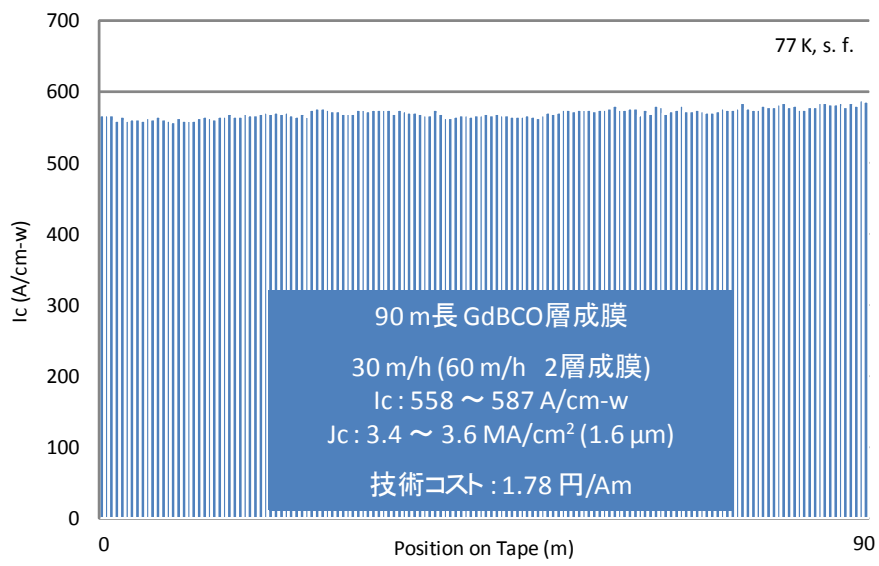


図 2.4.5-14 極低コスト 90 m 長 GdBCO 線材の長手方向 I_c 値分布

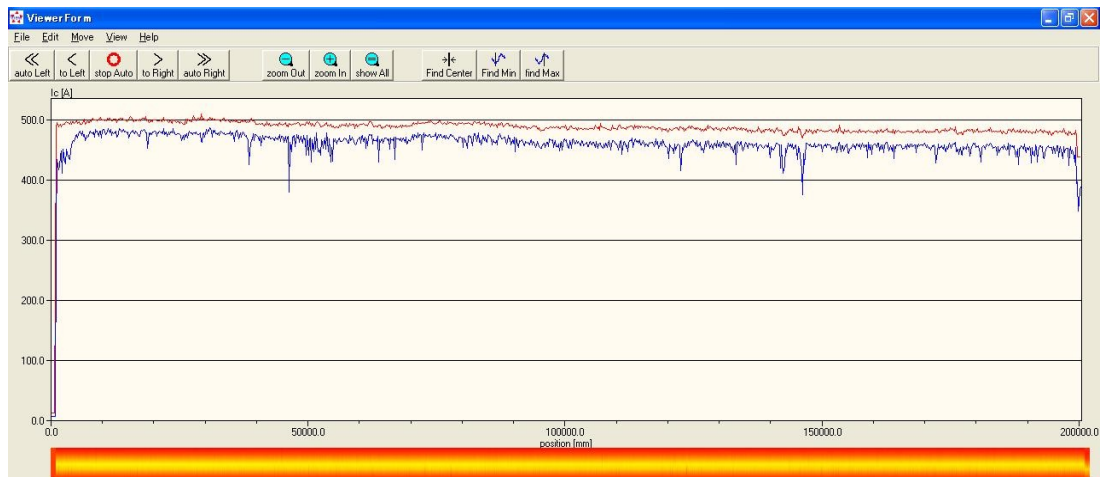


図 2.4.5-15 200 m 長 GdBCO 線材の長手方向 I_c 値分布(ホール素子測定)

(3) 結晶粒配向基板－PLD 線材のコスト低減技術開発

住友電工では、平成 23 年度から平成 24 年度に、クラッドタイプ結晶粒配向基板－PLD 線材のコスト低減技術開発を実施した。クラッドタイプ結晶粒配向基板の特徴として、元々幅広かつ均質な結晶粒配向基板であることがあげられる。この特徴を活かす技術開発として、3 cm-w 基板により実質的な製造速度を向上させたプロセスにおいて、中間層配向向上による高 J_c 化及び超電導成膜条件最適化による I_c 値向上・均一化を実施した。表 2.4.5-2 に、中間目標コスト 3.0 円/Am 及び最終目標コスト 2.0 円/Am に対応して試算した、特性値・プロセスパラメータの指標を示す。

なお、高 I_c 化のために検討した両面成膜プロセスについては、ケーブル応用での解析検討の結果、交流ケーブルに使用した場合に両面を流れる電流を均流化できないことが判明した。したがって現状では実質的にコスト低減効果が小さいため開発を中断し、高 J_c 均一化開発に注力した。

表 2.4.5-2 中間目標・最終目標コスト対応のパラメータ試算

項目	製造速度 (m/h)		厚み (μm)		I_c (A) @3 cm-w		コスト (円/m)		コスト (円/Am)	
	中間目標	最終目標	中間目標	最終目標	中間目標	最終目標	中間目標	最終目標	中間目標	最終目標
基板 (3cm)	—	—	-	-	1200	1500	270	270	0.23	0.18
第一中間層	7	10	0.17	0.10			265	184	0.22	0.12
第二中間層	8	10	0.25	0.25			420	376	0.35	0.25
第三中間層	12.5	12.5	0.07	0.07			146	146	0.12	0.10
超電導層	3	4	2.8	2.5			2286	1583	1.91	1.17
安定化層	—	—	10	30			210	210	0.18	0.14
コスト合計							3597	2970	3.00	1.96

I_c 値向上・均一化は、2.4.3-1(6)に記載したように (図 2.4.3-38)、3 cm-w で $I_c = 1600$ A (@77 K, s.f.) を確認した。このときの超電導層厚みは 4 μm で製造速度は 2.2 m/h で、コストは 2.7 円/Am となる。さらに高 J_c 化が期待できる高配向中間層が作製可能となっており、これを使用することで、最終目標コストに対応する薄膜・高速での 1500 A (@3 cm-w) 線材の作製の見通しが得られた。

(4) IBAD 基板-MOD 法における超電導層作製コスト低減技術開発

MOD 法による超電導層作製コスト低減技術開発として、ISTEC と SWCC が共同で線材技術コスト 2 円/Am 以下の実証をめざして開発を実施した。MOD 法による長尺超電導層作製プロセスとしては、長さに制限の少ない Reel to Reel 方式と高速処理が期待できる Batch 方式があるが、仮焼プロセスは ISTEC、SWCC ともに Reel to Reel 方式、本焼プロセスについては ISTEC では Reel to Reel 方式、SWCC では Batch 方式を採用することとした。

ISTEC での Reel to Reel 方式による仮焼、本焼プロセスによる検討を以下に述べる。前 NEDO 事業の「超電導応用基盤技術研究開発 (第 II 期)」プロジェクトにおいて、ISTEC で得られた成果を表 2.4.5-3 に示す。

表 2.4.5-3 「超電導応用基盤技術研究開発 (第 II 期)」プロジェクトでの成果
(Reel to Reel 式本焼)

線材長 (m)	膜厚 (μm)	プロセス製造速度 (m/h)		I_c 特性 (A/cm-w)
		仮焼(Reel to Reel)	本焼(Reel to Reel)	
56	1.2	1.8	1.2	250

中間評価の技術コスト目標である 3 円/Am 以下を満足する線材構造として、IBAD-MgO 基板(50 m)を用い、超電導層の仕様は I_c : 350 A/cm-w(@77 K, s.f.)、膜厚: 1.5 μm 、塗布・仮焼プロセス製造速度: 5 m/h、本焼プロセス製造速度: 5 m/h とする条件を選択した。この構造で技術コストを計算した結果、2.87 円/Am (基板: 0.52 円/Am、中間層: 0.85 円/Am、超電導層: 1.31 円/Am、安定化層: 0.19 円/Am) を得たため、これを中間目標とした。中間目標を満足する線材を作製するためには、製造プロセスの高速化、線材の高特性化を推し進める必要がある。塗布・仮焼プロセス高速化の検討にあたって、安定したプロセスと再現性を実現するために、原料溶液には、「超電導応用基盤技術研究開発 (第 II 期)」プロジェクトで開発した Cu-オクチル酸塩を用いた溶液を使用した。

Reel to Reel 方式シングルレーン仮焼炉により 2 m/h の製造速度で 11 m 長線材作製を行った結果、図 2.4.5-16 に示すように、線材の途中で突発的に I_c 特性劣化を示す箇所が多数存在する問題が明らかになった。Reel to Reel 方式の仮焼炉を用いて、再現実験を試みた結果、塗布部に問題があることを確認した。塗布部は、図 2.4.5-17 に示すようにドラム式になっている。塗布時には、ドラムと線材間に原料溶液が溜まり濃化され、この濃化液体が溢れ出る際、線材の幅端部に濃化液体が塗布される。また、ドラム表面には原料溶液が固化した固形物が形成され、これが線材の幅端部に付着する。これらが焼成されることで仮焼膜に図 2.4.5-18 に示すような焼損が発生し、 I_c 特性の劣化を引き起こすことが判明した。

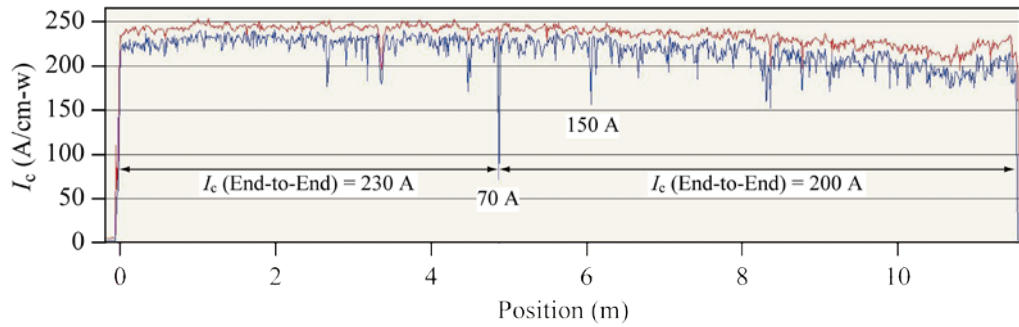


図 2.4.5-16 Reel to Reel 式 TFA-MOD 法による 11 m 長線材の I_c 値分布

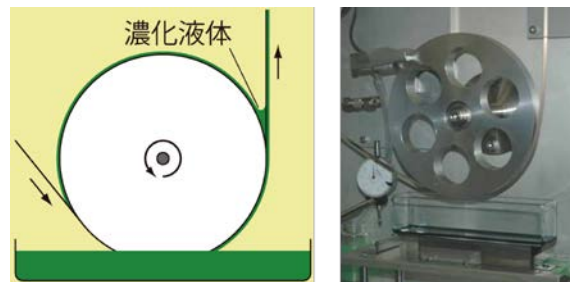


図 2.4.5-17 ドラム式塗布部

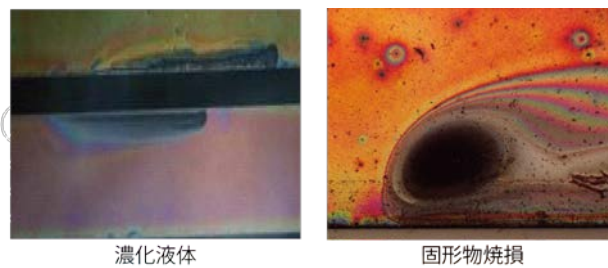


図 2.4.5-18 仮焼時における濃化液体と固形物焼損

そこで、塗布部をドラム式から図 2.4.5-19 に示すようなチューブ式に変更し、濃化液体の溢れ出し及び固形物の形成を防止する処置を行った。

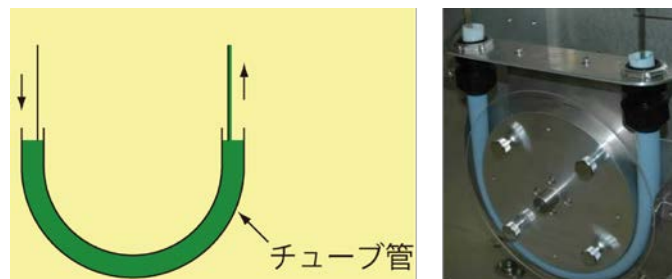


図 2.4.5-19 チューブ式塗布部

チューブ式塗布部の効果を確認するため、チューブ式塗布部を装着した Reel to Reel 方式シングル炉を用いて 2 m/h の製造速度で 20 m 長線材作製を行った。図 2.4.5-20 にこの線材の I_c 値分布を示す。ドラム式塗布部の場合に観られたような焼損は見られず、突発的な著しい I_c 特性劣化を示す箇所は消失し、チューブ式塗布部の有効性が明らかになった。

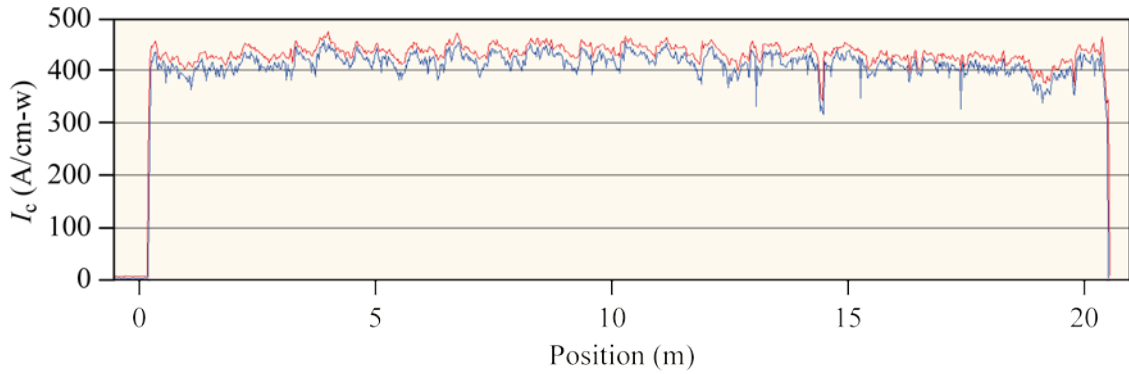


図 2.4.5-20 Reel to Reel 方式 TFA-MOD 法による 20 m 長線材の I_c 値分布

チューブ式塗布部を Reel to Reel 方式マルチ仮焼炉に適用し塗布・仮焼プロセスの高速化を図った。仮焼プロセスの高速化において、仮焼時における単位時間あたりの発生水蒸気量の増大が予想される。「超電導応用基盤技術研究開発（第Ⅱ期）」プロジェクトの成果から得られた知見より、仮焼時に低温度領域で試料が湿潤雰囲気と晒されると特性が著しく劣化することが分かっている。炉内に滞留した水蒸気が特性を劣化させることがないように、Reel to Reel 方式マルチ仮焼炉においては、ガス流通を良好に行うために図 2.4.5-21 に示すような縦吹き構造を採用した。

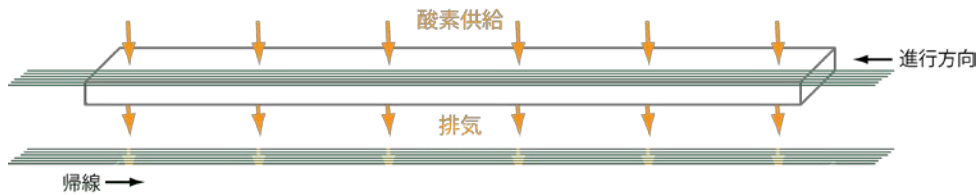


図 2.4.5-21 Reel to Reel 方式マルチ仮焼炉模式図

続いて、本焼プロセスの高速化を図るために YBCO 結晶成長速度向上の検討を行った。TFA-MOD 法では、式(1)により、YBCO の結晶成長速度は規定される⁽⁹⁾。

$$R = A \sqrt{\frac{u \cdot P(\text{H}_2\text{O})}{P_t}} \quad (1)$$

R : 成長速度, A : 定数, u : ガス流速, $P(\text{H}_2\text{O})$: 水蒸気分圧, P_t : 全圧

これにより、結晶成長速度増加には、ガス流速(u)の増加、全圧(P_t)の低下が有効であることが分かる。Reel to Reel 方式本焼炉の配管径の見直し、ポンプ増強等の装置改造により、表 2.4.5-4 に示すような Reel to Reel 方式本焼炉の性能向上を行った。

表 2.4.5-4 Reel to Reel 方式本焼炉の能力増強

	流量(L/min)	到達圧力(kPa)
従来	70	24.0
処置後	150	6.7

Reel to Reel 方式プロセスの高速化及び長尺安定性を確認するために、Reel to Reel 方式仮焼プロセスの製造速度が 5 m/h、Reel to Reel 方式本焼プロセスの製造速度が 2.5 m/h の条件で、100 m 級線材の作製を行った。この Reel to Reel 方式本焼炉において、焼成には炉の半分しか用いておらず、全面用いた場合に換算すると、製造速度は中間目標値である 5 m/h に相当する。この線材の I_c 値分布を図 2.4.5-22 に示す。全体に亘って特性が維持されており、Reel to Reel 方式の高速化及び長尺安定性の実現が確認できた。

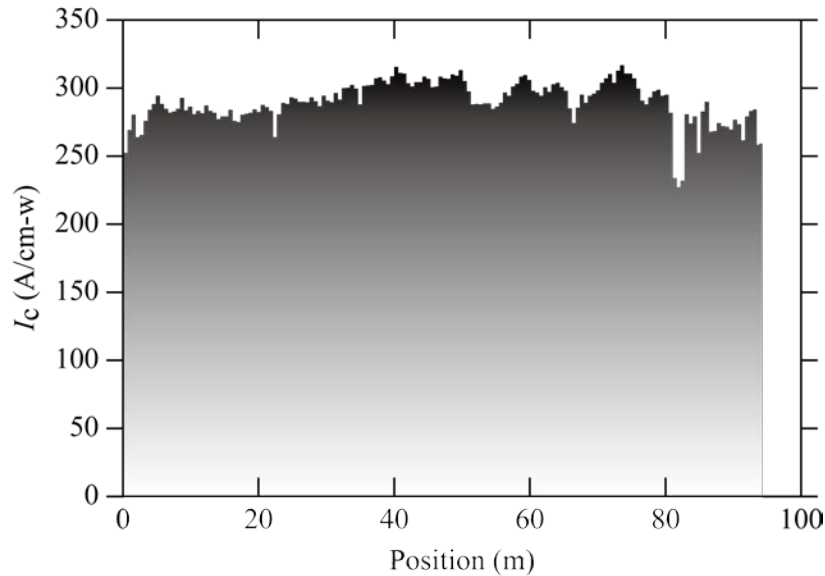


図 2.4.5-22 Reel to Reel 方式 TFA-MOD 法による 100 m 級線材の I_c 値分布

上記の様々な技術開発の成果を受けて Reel to Reel 方式仮焼プロセスで 5 m/h、Reel to Reel 方式本焼プロセスが 2.5 m/h(5 m/h 相当)の製造速度で超電導層が 1.5 μm 厚の 50 m 級線材を作製した。図 2.4.5-23 に、得られた線材の I_c 値分布を示す。3 箇所ほど I_c 特性が劣化している箇所が見られるが、その他は中間目標を見越した 350 A/cm-w を超える高い特性が実現されている。この線材の特性劣化部と正常部の断面 TEM 観察の結果を図 2.4.5-24 に示す。特性劣化部は、中間層の結晶粒配向性が悪く、 I_c 特性劣化の原因は中間層の異常に起因することが示唆される。中間層成膜時に洗浄工程を追加することにより、異常を抑制した中間層付き基板を用いて 200 m 長線材を作製した。得られた線材の I_c 値分布を図 2.4.5-25 に示す。この時、Reel to Reel 方式仮焼プロセス 5 m/h、Reel to Reel 方式本焼プロセス 15 m/h(30 m/h 相当)、MOD-YBCO 超電導層 1.5 μm であり、技術コスト 2.21 円/Am が得られ中間目標を達成した。

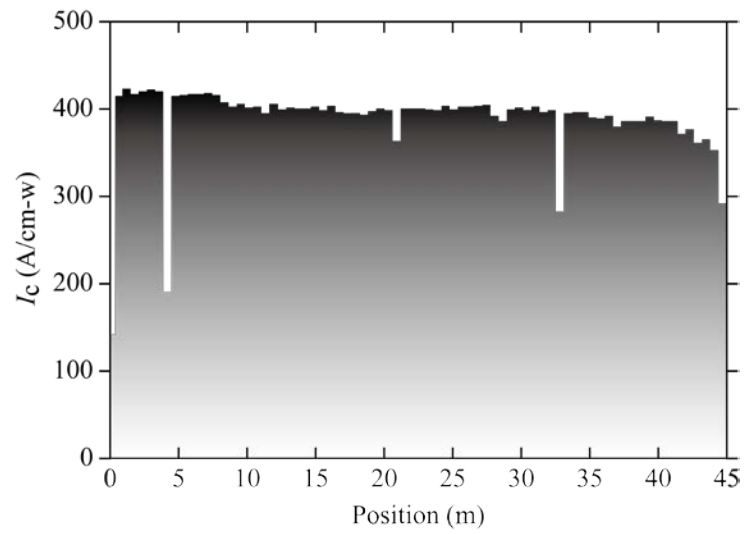


図 2.4.5-23 Reel to Reel 方式 TFA-MOD 法による 50 m 級線材の I_c 値分布

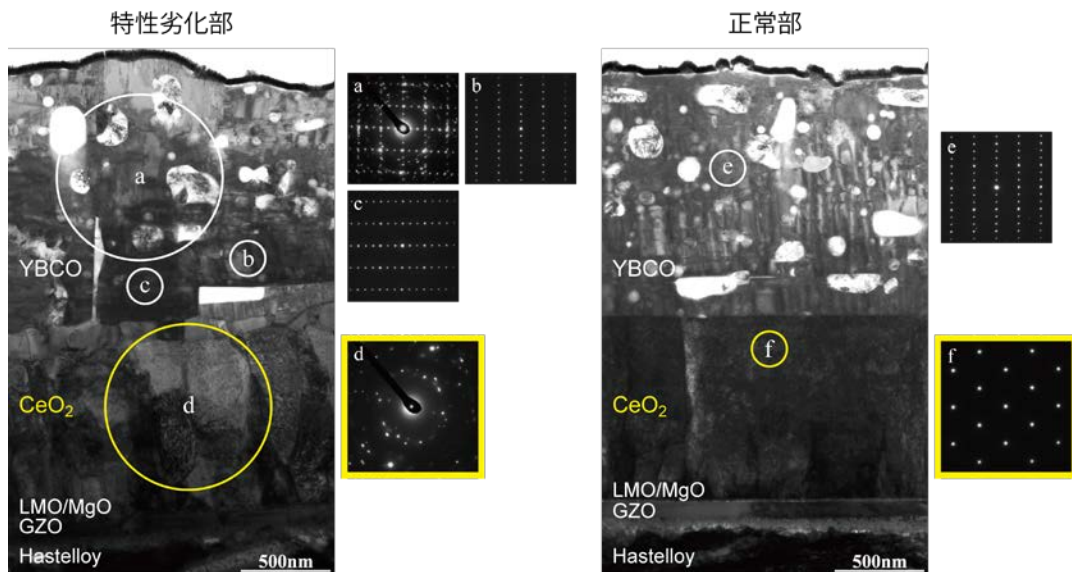


図 2.4.5-24 Reel to Reel 方式 TFA-MOD 法による 50 m 級線材の断面 TEM 像

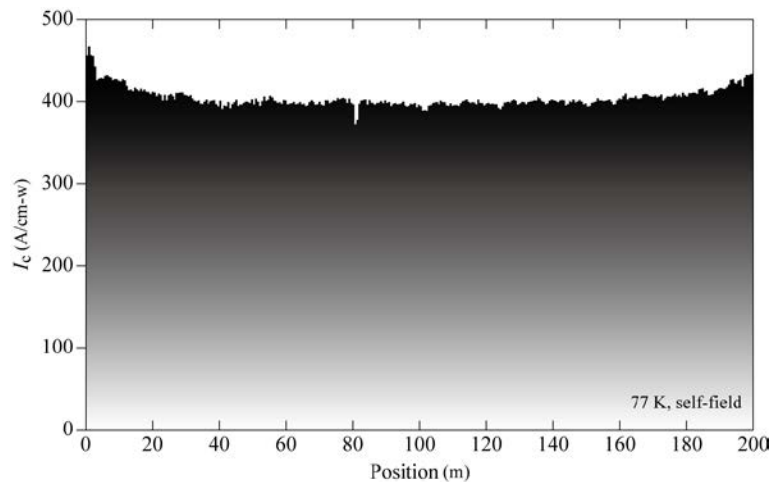


図 2.4.5-25 Reel to Reel 方式 TFA-MOD 法による 200 m 長線材の I_c 値分布

次に、SWCC における、Reel to Reel 方式仮焼プロセス、Batch 方式本焼プロセスによる検討を述べる。「超電導応用基盤技術研究開発 (第 II 期)」プロジェクトにおいて、SWCC で得られた成果を表 2.4.5-5 に示す。

表 2.4.5-5 超電導応用基盤技術研究開発プロジェクト(第 II 期)での成果
(Batch 方式本焼)

線材長 (m)	膜厚 (μm)	プロセス製造速度 (m/h)		I_c 特性 (A/cm-w)
		仮焼(Reel to Reel)	本焼(Batch)	
500 (IBAD-GZO)	1.5	5	11	300

中間目標の技術コスト目標である 3 円/Am 以下を満足する線材構造として、IBAD-MgO 基板(50 m)を用い、超電導層の仕様は I_c : 300 A/cm-w(@77K,s.f.)、膜厚: 1.5 μm 、塗布・仮焼プロセス製造速度: 5 m/h、本焼プロセス製造速度: 10 m/h とする構造を選択、技術コスト計算によりこの構造で 2.98 円/Am (基板: 0.60 円/Am、中間層: 0.99 円/Am、超電導層: 1.16 円/Am、安定化層: 0.23 円/Am)を得たためこれを中間目標とした。線材長、製造速度及び特性は、既に中間目標を満足しているが、用いた基板が IBAD-GZO であるため IBAD-MgO 基板の適用が課題となる。また、磁場特性の向上を併せて期待し、(Y/Gd 系 + ピン止め点材料)原料溶液の適用を図った¹⁰⁾。

図 2.4.5-26 に Batch 方式本焼炉による IBAD-MgO 基板を用いた 50 m 長(Patch)線材作製の結果を示す。仮焼膜は Reel to Reel 方式マルチ仮焼炉で作製した。 I_c 特性は、最大値で 321 A/cm-w(@77K,s.f.)を示し、IBAD-MgO 基板を用いても Batch 方式本焼炉で焼成可能であることが確認できた。また、 I_c 特性の最小値は 261 A/cm-w(@77K,s.f.)であったが、Reel to Reel 方式マルチ仮焼炉での(Y/Gd 系 + ピン止め点材料)原料溶液の仮焼プロセス条件最適化により、さらなる特性向上が期

待できる。

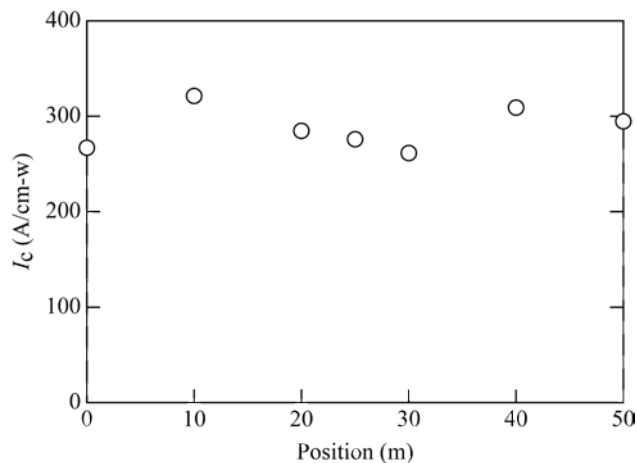


図 2.4.5-26 Batch 方式本焼炉による 50 m 長(Patch)線材の I_c 値分布

中間目標達成の後、最終目標である線材技術コスト 2 円/Am を実証するため、MOD 法における超電導層作製コスト低減に関する技術開発を進めた。MOD 法による長尺超電導層作製においては、マルチターン方式 Reel to Reel による塗布・仮焼及び本焼プロセスを採用し、塗布方式はディップコート法とした。また、原料溶液については引き続き Y-TFA、Ba-TFA、及び Cu-オクチル酸を用いた溶液を使用した。中間評価までの成果を表 2.4.5-6 に示す。

表 2.4.5-6 中間評価までの成果 (Reel to Reel 方式)

線材長	膜厚	製造速度		I_c 値
		仮焼	本焼	
200 m	1.5 μm	5 m/h	15 m/h(30 m/h 相当)	372 A/cm-w

技術コスト 2 円/Am を達成する線材構造として、イオンビームスパッタ法 $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 層、イオンビームスパッタ法 Y_2O_3 層、IBAD 法 MgO 層、スパッタ法 LaMnO_3 層、PLD 法 CeO_2 層から構成される中間層付き基板を用い、YBCO 超電導層の仕様は、低損失線材作製技術開発及び高強度高 J_c 線材作製技術開発への展開を考えて $I_c = 550 \text{ A/cm-w} (@77 \text{ K, s.f.})$ 、膜厚 2.0 μm 以上とした。この構造で Reel to Reel 方式塗布・仮焼プロセス 5 m/h、Reel to Reel 方式本焼プロセス 10 m/h で YBCO 超電導層を製造した場合、技術コスト 1.75 円/Am(ハステロイTM 基板: 0.22 円/Am、中間層: 0.77 円/Am、超電導層: 0.63 円/Am、安定化層: 0.13 円/Am)が得られるためこれを最終目標とした。最終目標達成には、 I_c 値の向上すなわち YBCO 超電導層の厚膜化が課題であった。

ディップコート法による塗布では、線材幅端部近傍で超電導層幅方向膜厚分布が不均一となる。塗布部のチューブ径は、この幅方向膜厚分布の形状に多大な影響を与える。図 2.4.5-27 (a) にチューブ径と超電導層幅方向膜厚分布との関係を示す。チューブ径(大)を用いた場合、線材幅端部近傍は大きく盛り上がり厚膜化においてクラックの原因となる。一方、チューブ径(小)を用いた場合、線材幅端部近傍の盛り上がりは解消されるが、逆に線材幅端部の膜厚が薄くなり I_c 値低下が懸念される。そこで両者を組み合わせることにより幅方向膜厚分布の均一性向上を試みた。図 2.4.5-27 (b) にマルチコートにおいてチューブ径(大)のみとチューブ径(大)とチューブ径(小)を交互に用いた場合の超電導層幅方向膜厚分布を示す。チューブ径(大)と(小)を交互に用いることにより明らかに幅方向膜厚分布の均一性が向上しており、本技術によりクラック発生を抑えて $2.0 \mu\text{m}$ 以上の超電導層膜厚を得ることが可能となった。

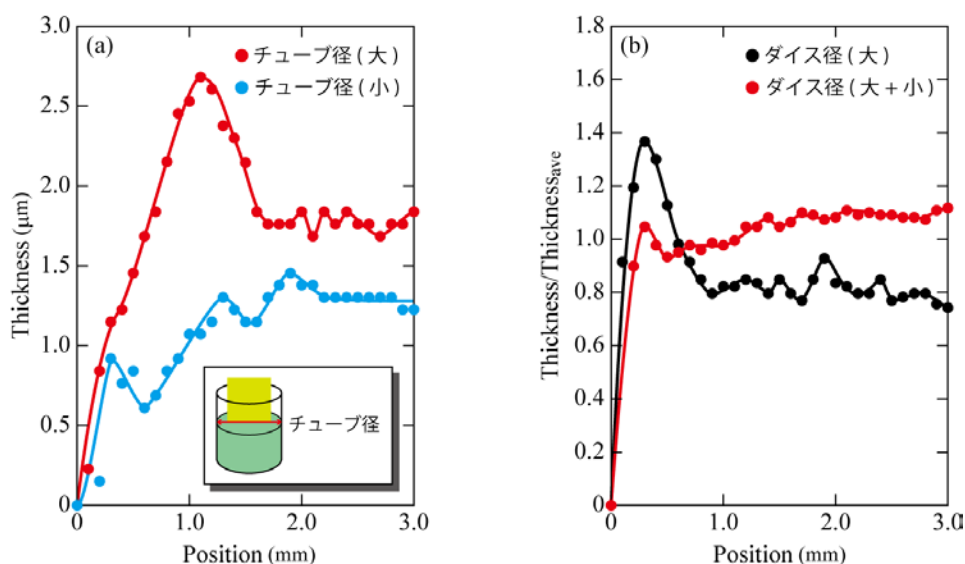


図 2.4.5-27 線材幅方向の膜厚分布

上記の技術開発の成果を受けて Reel to Reel 方式仮焼プロセス 5 m/h、Reel to Reel 方式本焼プロセス 5 m/h(10 m/h 相当)の製造速度で YBCO 超電導層 $2.3 \mu\text{m}$ の 30 m 長線材を作製した。図 2.4.5-28 に、得られた線材の I_c 値分布を示す。最終目標である $550 \text{ A/cm-w}(@77\text{K,s.f.})$ を超える $I_c(\text{min}) = 605 \text{ A/cm-w}(@77\text{K,s.f.})$ が得られ、技術コスト 1.59 円/Am で最終目標を達成した。

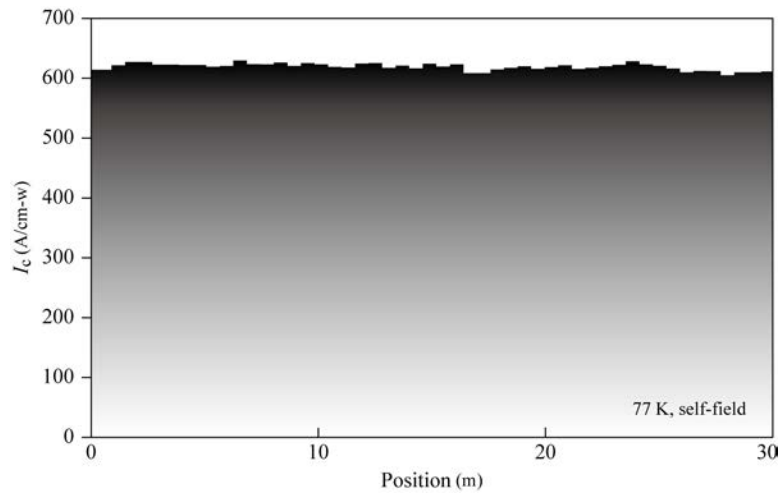


図 2.4.5-28 Reel to Reel 方式 TFA-MOD 法による 30 m 長線材の J_c 値分布

さらなる技術コスト低減のため、長尺線材プロセス開発と同時並行して、原料溶液の開発を行った。原料開発の主な狙いは、一回あたり塗布厚みを上げることと、クラックが発生する臨界膜厚の引き上げである。一回あたり塗布厚みを上げることにより、仮焼プロセスの塗布・成膜回数が減って同じ製造速度での製造膜厚が上がり、高 J_c 化されることで技術コストの低減に繋がる。限界塗布速度の向上や、クラックが発生する臨界膜厚の増加も、高特性化と技術コスト低減に有効である。

原料溶液においては、Cu 塩に加えて Y 塩もフッ素フリー化した Y-レブリン酸塩を原料として用いた溶液を開発し、図 2.4.5-29 に示すように 1 回塗布膜厚について $0.4 \mu\text{m}/1$ 回塗布まで $2 \text{ MA}/\text{cm}^2$ 以上の J_c 特性を維持した厚膜化に成功した。これは、Reel to Reel 方式マルチ仮焼炉に適用することで $10 \text{ m}/\text{h}$ の仮焼プロセス製造速度が期待できる。また、Reel to Reel 方式本焼炉に関して、図 2.4.5-30 に示すように、製造速度 $5 \text{ m}/\text{h}$ ($10 \text{ m}/\text{h}$ 相当)まで特性を維持したまま $1.5 \mu\text{m}$ 厚の超電導層を焼成可能な結果が得られており、さらにレーン数の増加による焼成時間増加により、さらなる製造速度の高速化が期待できる。

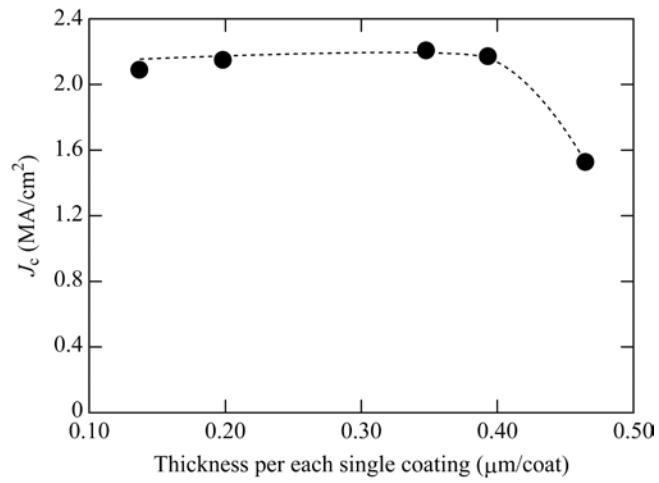


図 2.4.5-29 1 回塗布膜厚と特性との関係

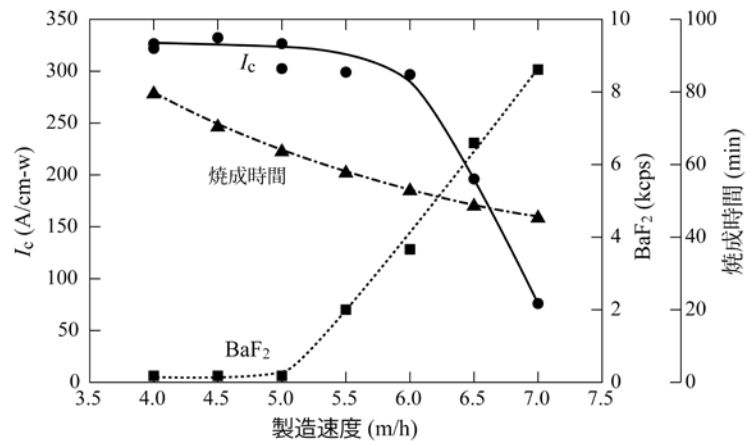


図 2.4.5-30 Reel to Reel 方式本焼炉における製造速度と特性との関係

さらなる厚膜化及び特性向上のため、仮焼中の発生ガス量低減を意図し、フッ素フリーY塩に含まれる炭素原子数をY-レブリン酸塩の15から9に減少させたY-プロピオン酸塩を用いた原料溶液を開発した。この溶液をディップコート法により中間層付き金属基板上に塗布し、仮焼・本焼して原料溶液のポテンシャルを評価した。塗布速度により一回当たり塗布膜厚を変えて成膜した結果、表2.4.5-7に示すように、塗布速度5 m/h、1回塗布膜厚0.49 μm /1回塗布で2.7 MA/cm²、塗布速度10 m/h、1回塗布膜厚0.77 μm /1回塗布で1.8 MA/cm²の J_c 特性が得られた。また、791A/cm-w(@77K,s.f.)の値はMOD法で報告されたことのない高い値であり、本原料溶液が高い特性を与えるポテンシャルを持つことを示している。これらの条件を、Reel to Reel方式マルチ仮焼炉に適用することでそれぞれ10 m/h及び40 m/hの仮焼プロセス製造速度が期待できる。本溶液の適用により、技術コストの低減とともに製造量の増加も可能となる。

表 2.4.5-7 Y-プロピオン酸を用いた原料溶液の短尺試料による結果

塗布速度	塗布回数	膜厚	特性
5 m/h	6	2.91 μm (0.49 $\mu\text{m}/\text{coat}$)	791 A/cm-w (2.7 MA/cm ²)
10 m/h	3	2.30 μm (0.77 $\mu\text{m}/\text{coat}$)	405 A/cm-w (1.8 MA/cm ²)

(5) レーザ CVD 法による作製コスト削減技術開発①

Y系超電導線材の低コスト化には、超電導層の高速成膜プロセスの開発が必要である。Y系超電導膜は、熱 CVD 法やレーザアブレーション法により気相成膜されているが、成膜速度が低いことが問題である。一方、本研究グループでは、大面積・高出力のアシストレーザを CVD 法に導入することによって、種々の酸化物膜を熱 CVD 法より数十から数百倍の速度で高速成膜し、結晶配向を制御してきた⁽¹¹⁾。

本研究開発では、レーザ CVD 法による c 軸配向した Y 系超電導膜の高速合成を行った。Y 系超電導膜の組成、結晶粒配向及び成膜速度等に及ぼす成膜条件の影響を精査し、レーザ CVD 法の Y 系超電導層形成への適用性を検討することにより、極低コスト線材に必要な高特性・高速成膜技術への原理検証を行った。

・レーザ CVD 法による多結晶 Al_2O_3 基板上への Y 系超電導膜の合成

レーザには、Nd: YAG レーザ (波長: 1064 nm; 連続発振) を用いた。有機金属錯体の固体原料 ($\text{Y}(\text{dpm})_3$ 、 $\text{Ba}(\text{dpm}/\text{tmod})_2$ 及び $\text{Cu}(\text{dpm})_2$) をそれぞれ 468~493 K, 595~623 K, 523~533 K で気化させ、Ar ガスを用いて炉内に搬送し、 O_2 ガスと反応させて Y 系超電導膜を合成した。基板には多結晶 Al_2O_3 を用い、673~873 K で予熱した。

レーザ出力 130 W、基板予熱温度 873 K、炉内圧力 1.0 kPa、Ba 原料気化温度 600 K、Cu 原料気化温度 528 K において、Y 原料気化温度を変化させた。いずれの Y 原料気化温度でも、c 軸配向した Y 系超電導膜が得られた。463 K では、 Y_2O_3 相の回折ピークがわずかに認められたが、Y 系超電導膜のほぼ単相膜が得られた。Y 原料気化温度 473 K で合成した Y 系超電導膜は、粒径が数 μm の平坦な結晶と緻密な断面組織からなっており、成膜速度は 100 $\mu\text{m}/\text{h}$ であった。表面及び断面形態は、空气中 823 K で 12 h の熱処理後も殆ど変化しなかった。後熱処理を施した Y 系超電導膜は、30 K 程度の低温ながらも超電導転移を示した。

・レーザ CVD 法による単結晶 (100) MgO , (100) LaAlO_3 , (100) SrTiO_3 基板上への Y 系超電導膜の合成

上記研究で最適化した合成条件を基に、(100) MgO , (100) LaAlO_3 , (100) SrTiO_3 単結晶基板上に Y 系超電導膜を合成した。成膜温度 975 K 以下では a 軸配向した Y 系超電導膜が得られ、1000 K 以上で c 軸配向した Y 系超電導膜の単相膜が得られた。Y 系超電導膜は、二軸配向成長を示した (面内半値幅 $\Delta\phi: 1.0\sim 1.4$ 度)。成膜速度は、58~101 $\mu\text{m}/\text{h}$ であった。酸素雰囲気中で後熱処理した Y 系超電導膜は、 $T_c = 89\sim 90$ K 近傍で超電導転移を示した。単結晶基板と Y 系超電導膜の格子整合性が高いほど、膜の面外及び面内の結晶性が向上した。

・レーザ CVD 法による IBAD 線材上への高 J_c Y 系超電導膜の作製

本手法の Y 系超電導層形成への適用性を検討するために、PLD-CeO₂/LaMnO₃/IBAD-MgO/Gd₂Zr₂O₇/ハステロイ™線材 (IBAD 線材) 上に Y 系超電導膜を合成した。成膜温度 828 K で合成した Y 系超電導膜は、二軸配向成長を示した (面内半価幅 3.8 度)。得られた膜は、緻密な断面と微細な長方形の粒子からなる表面をしており、成膜速度は最大 80 μm/h であった。酸素雰囲気中で後熱処理した Y 系超電導膜は、 $T_c = 90$ K 近傍で超電導転移を示し、 $J_c = 0.4$ MA/cm² (@77 K, s.f.) の超電導特性を示した。

Y 系超電導膜の組成を精緻に制御するため、液体を原料とするレーザ CVD 装置を開発した (図 2.4.5-31)。液体原料として、Y(dpm)₃、Ba(dpm/tmod)₂ 及び Cu(dpm)₂ をテトラヒドロフラン (THF) 溶液中に各モル比で混合したものを用い、気化器中で 653 K で気化させて成膜を行った。図 2.4.5-32 に、Y 系超電導膜の組成と I_c の関係を示す。低 Ba/Y 域 (Ba-deficient area) では、 c 軸配向 Y 系超電導膜が得られた。この組成域では、CuYO₂ 相の生成もしばしば認められた。これらの膜の中には、中程度の I_c 値 (13–21 A (@77K, s.f.)) を示す膜があった。高 Ba/Y 域 (Ba, Cu-rich area) では、いずれの膜も高い I_c を示さなかった。Ba/Y ~ 2 域 (Ba-deficient, Cu-rich area) では、 c 軸配向 Y 系超電導単相膜が生成し、 a, c 軸共配向膜も生成したが、高い I_c 結晶 (45–50 A (@77K, s.f.)); 図中 ●) を示す Y 系超電導膜が得られた。

図 2.4.5-33 に、組成を最適化 (Y:Ba:Cu = 1:1.6:3.1) して作製した Y 系超電導膜の TEM 像と $I-V$ 特性を示す。Y 系超電導膜は二軸配向しており、わずかに BaCuO₂ の第二相が認められた。このときの超電導特性は、 $I_c = 60$ A (@77K, s.f.) であり、 $J_c = 2.7$ MA/cm² (@77 K, s.f.) の優れた超電導特性を示した。TEM 暗視野像から、Y 系超電導膜内に基板鉛直方向にらせん転位、基板水平方向に積層欠陥が存在していることが明らかになった。

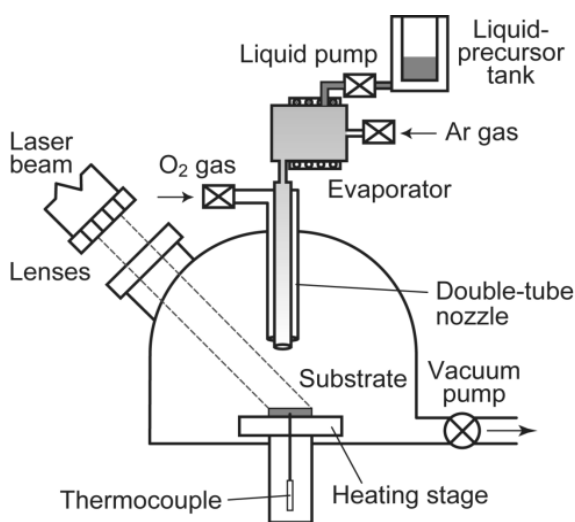


図 2.4.5-31 レーザ CVD 装置の概略図。

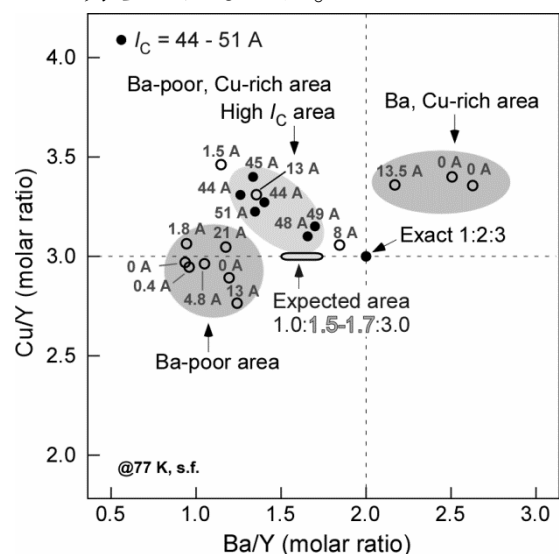


図 2.4.5-32 Y 系超電導膜の組成と I_c の関係。

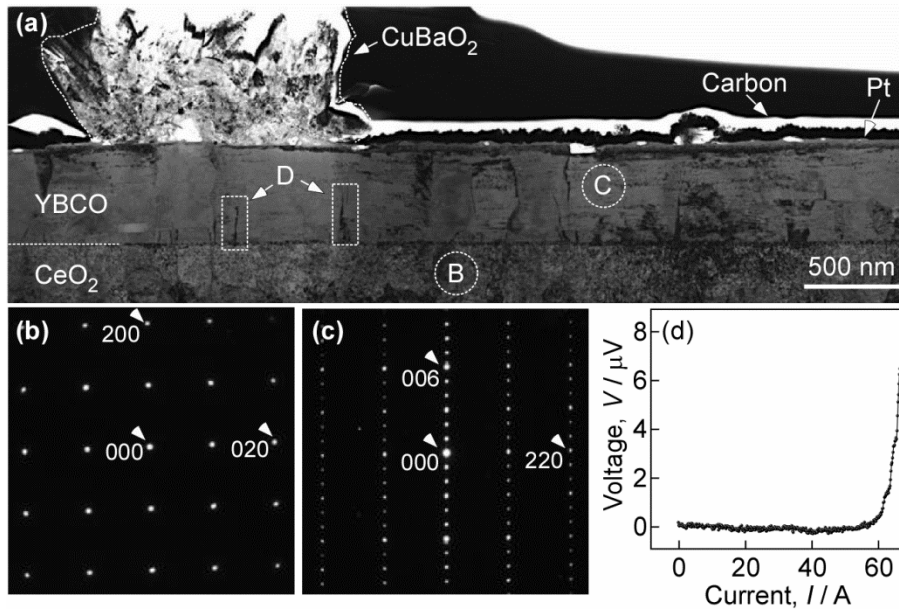


図 2.4.5-33. 組成を最適化 (Y:Ba:Cu = 1:1.6:3.1) して作製した Y 系超電導膜の TEM 観察結果 (a~c) と I - V 特性 (d)。

表 2.4.5-8 レーザ CVD を用いて作製した CeO_2 及び Y 系超電導膜

基板	配向	T_{dep} (K)	$\Delta\omega$ (度)	$\Delta\phi$ (度)	T_c (K)	J_c^{**} (MA/cm ²)	R_{dep} (μm/h)
CeO₂ 膜							
多結晶 Al ₂ O ₃	a 軸	792-924	-	-			43
r-cut Al ₂ O ₃	二軸	1122	0.9	0.8			12
(100) SrTiO ₃	二軸	1119	0.5	0.5			15
IBAD 線材	二軸	741	3.2	6			4
IBAD 線材*	二軸	1040	4.3	9.0			5
Y 系超電導膜							
多結晶 Al ₂ O ₃	c 軸	1123	-	-	30	-	60
(100) MgO	二軸	1044	0.6	1.4	89	-	60
(100) LaAlO ₃	二軸	1066	0.6	1.1	90	-	90
(100) SrTiO ₃	二軸	1027	0.5	1.0	90	-	86
PLD-CeO ₂ /IBAD	二軸	817	2.0	3.8	90	0.4	80
PLD-CeO ₂ /IBAD*	二軸	1021	1.8	3.2	90	2.7	11
LCVD-CeO ₂ /IBAD*	二軸	988	2.6	8.0	90	0.6	7

*: 液体原料を用いて作製; **: @77 K, s.f.

・まとめ

レーザー CVD 法を用いて各種基板上に種々の条件で Y 系超電導膜を作製した (表 2.4.5-8)。単結晶 (100) MgO 及び IBAD 線材上では、二軸配向した Y 系超電導膜が得られた。後熱処理を施した Y 系超電導膜は、 $T_c = 85-90$ K 近傍で超電導転移を示した。成膜速度は最大 $101 \mu\text{m/h}$ に達し、既存の CVD 法^{12,13)} と比べて 4-1000 倍の製造速度が見込める。さらに、Y 系超電導膜の組成最適化により、優れた高超電導特性 ($J_c = 2.7 \text{ MA/cm}^2$ (@77 K, s.f.)) を示す Y 系超電導膜の作製に成功した。

さらに、レーザー CVD を用いて、 CeO_2 膜及び Y 系超電導膜を連続合成した試料の作製 ($J_c = 0.6 \text{ MA/cm}^2$ (@77 K, s.f.)) を実証した。 CeO_2 バッファ層は、現在は PLD 法を用いて作製しているが、この CeO_2 バッファ層をレーザー CVD を用いて合成することにより、Y 系超電導層との連続成膜プロセスが実現でき、線材作製プロセスへの適用性が高まる。すでに $J_c = 2.7 \text{ MA/cm}^2$ (@77 K, s.f.) の高超電導特性膜の合成に成功していることから、 CeO_2 膜の表面形態の最適化により、より優れた超電導特性を示す Y 系超電導膜の合成ができる。

以上の結果から、レーザー CVD 法の Y 系超電導線材における極低コスト線材に必要な超電導層高速成膜技術開発により、最終目標 (2 円未満/Am の低コスト化) 達成を見通すことができた。

(6) レーザ CVD 法による作製コスト削減技術開発②

線材プロセスへの適用性を検証するため、Reel-to-Reel (RTR) 機構を用いた搬送基板上への連続成膜を行った。装置図を図 2.4.5-34 に、成膜条件を表 2.4.5-9 に示す。用いた基板は MgO ベースの IBAD 基板である (構造: $\text{CeO}_2/\text{LaMnO}_3/\text{IBAD-MgO}/\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ /ハステロイTM)。その結果、 1 MA/cm^2 の高い J_c 特性を維持しながら、最高で $97 \mu\text{m/h}$ の成膜速度を達成した⁽¹⁴⁾。この成膜速度は、CVD 法はもちろん、PLD 法、共蒸着法等も含め、線材プロセスとしてこれまで報告されたどの方法よりも高い値であり、 $1 \mu\text{m}$ 厚の YBCO 膜を成膜するのに必要な時間が 40 sec 弱という速度に相当する。またこのとき、成膜速度は成膜チャンバーへ導入される原料供給量に比例して増大しており (図 2.4.5-35)、その比例関係は上記の成膜速度の最高値が達成される条件まで依然として保たれていることから、さらに原料供給量を増大させることによって、より高い成膜速度の達成が可能であると考えられた。以上のことから、本方法は Y 系超電導線材プロセスに適用が可能であり、なおかつ高い電流特性を維持しつつ線材プロセスの製造速度を大きく向上させる可能性をもつことが証明されたと言える。線材の製造速度としては成膜領域の大面积化が必要となるが、CVD 法としては古河-SuperPower 社において、すでに実績があり、また本方法の特徴である IR レーザに関しても、もともと直径約 60 mm 程度にデフォーカスして使用されているため、レンズ等光学系の調整により広域照

射が容易に対応できる。したがって、大面積化に関しても、今のところ大きな課題は見当たらない。

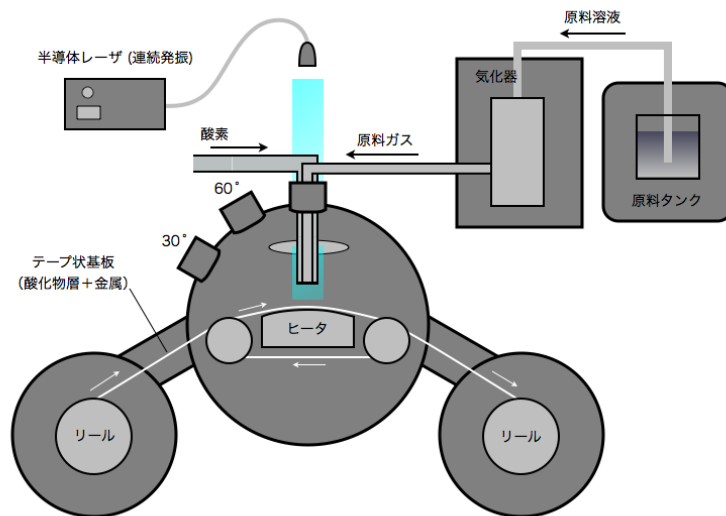


図 2.4.5-34 RTR-IRL-MOCVD 装置の基本概念図

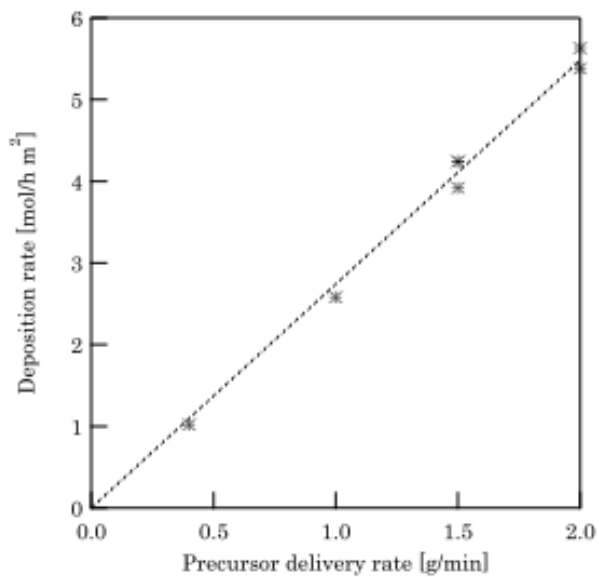


図 2.4.5-35 原料供給量と成膜レートの関係。

表 2.4.5-9 RTR-IRL-MOCVD 装置を用いた YBCO 薄膜の成膜条件

原料	Y(dpm) ₃ , Ba(dpm) ₂ , Cu(dpm) ₂
溶媒	tetrahydrofuran
原料組成	1.0:2.0:3.0
モル濃度 (total)	0.18 mol/L
原料供給量	0.2 ~ 2.0 g/min
溶媒流量	0.2 ~ 1.2 g/min
原料気化温度	280°C
輸送経路温度	285°C
ノズル=基板距離	60 mm
ヒータ設定温度	700°C
レーザーパワー	200 - 460 W
スポット径	約 60 mm
プロセス圧	0.67 kPa
搬送速度	1.2 ~ 8.0 m/h
成膜領域	3 cm x シングルレーン

dpm = dipivaloylmethane

表 2.4.5-10 原料供給量 2.0 g/min の条件で作製した試料の評価結果 (レーザーパワー 420 W、搬送速度 8.0 m/h)。成膜レートは、ICP 分析により得られたカチオン種 (Y, Ba 及び Cu) の合計モル数としての堆積速度。膜厚は ICP の測定結果を用いて理想密度より求められる推定膜厚。*a* 軸率は、X 線回折測定により得られた法線方向の (200) 反射と (005) 反射のピーク強度の比として求めたもの。

<i>a</i> 軸率; $I_{200}/(I_{200} + I_{005})$	0.4%
カチオン種の堆積速度 (total)	5.6 mol/m ² /h
膜組成 (Y:Ba:Cu)	1.00:1.97:3.27
推定膜厚	0.36 μm
成膜レート	97 μm/h
臨界電流 I_c	37 A
臨界電流密度 J_c	1.0 x 10 ⁶ A/cm ²

(7) 低コスト線材の電流特性評価

これまで記載した通り、種々の低コスト線材の開発、特にプロセスの改良等を行っているが、実際に使う際の電流特性の把握が今後の応用上重要である。このため、本章では高速成膜が可能となる in-plume 法による低コスト PLD-GdBCO 線材について、磁場中電流輸送特性並びに磁束ピン止め特性について詳細な測定を行った¹⁵⁾。図 2.4.5-36(a)に示すとおり、in-plume 法による線材の不可逆磁界は標準的な PLD 試料に比べ高い値を有しており、磁束ピン止め点が導入されていることが分かる。本線材はまた、同図(b)に示すとおり、より低温域においても優れた J_c 特性を維持していることが明らかとなった。

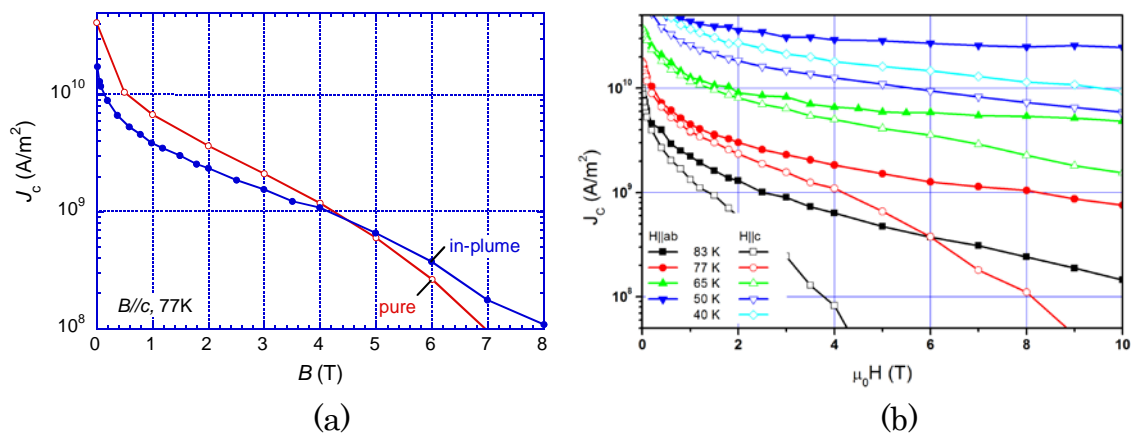


図 2.4.5-36 in-plume 法 PLD 線材の磁場中臨界電流特性 (a)77 K、垂直磁界における標準 PLD 試料との比較 (b)広い温度域を含む垂直磁界、平行磁界中の特性

この in-plume 法による低コスト PLD-GdBCO 線材のピン止め特性に関する特性をより詳細に調べるため、磁場印加角度依存性について評価を行った。図 2.4.5-37 に示すとおり、低磁界中において J_c 値の角度依存性は、非対称な特性を有し、かつヒストリー効果が現れており、得られる J_c 値は試料内の磁束分布とローレンツ力の印加方向による。このことから、比較的高温、低磁場の領域においては、バックグラウンドの高密度欠陥に伴う磁束ピン止めによって支配されていることが分かる。一方、図 2.4.5-38(a)に示すように、低温の高磁場領域に移るに従って、角度依存性の非対称は弱められ Ginzburg-Landau パラメータの異方性に起因すると考えられる標準的な試料と同様の振る舞いを示す。加えて、ab 面に平行な磁界中で、急峻な J_c 値のピークとともに n 値の低下が観測されており、Intrinsic ピンニングによる量子化磁束線のダイナミクスが大きく変化を示唆している。ab 面に平行な磁場中での n 値の低下は、実用上も重要な振る舞いであることから、電界依存性を考慮した考察が必要である。図 2.4.5-38(b)に示すとおり、平行磁界中では E - J 特性そのものが単純なパワー則から乖離することを示しており、低電界領域の n 値は増大することから、前述した通電法による見かけ上の n 値の低下は、必ずし

も低電界中におけるクリープの増大を意味してはいない。

以上、高速成膜が可能な in-plume 法 PLD 線材では磁場中で高い不可逆磁場が得られ、より高磁場で高 J_c 値が見込まれることが示唆された。

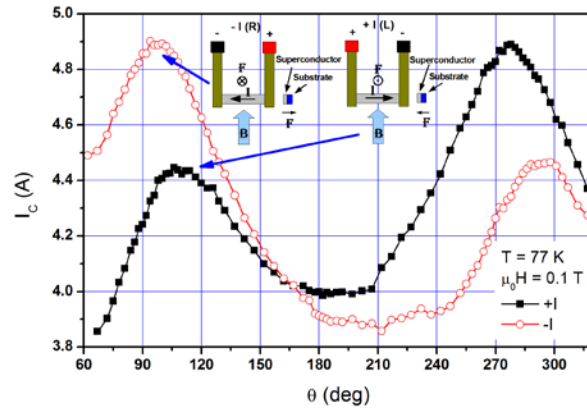


図 2.4.5-37 J_c 値の磁場印加角度依存性に見られるヒストリー効果

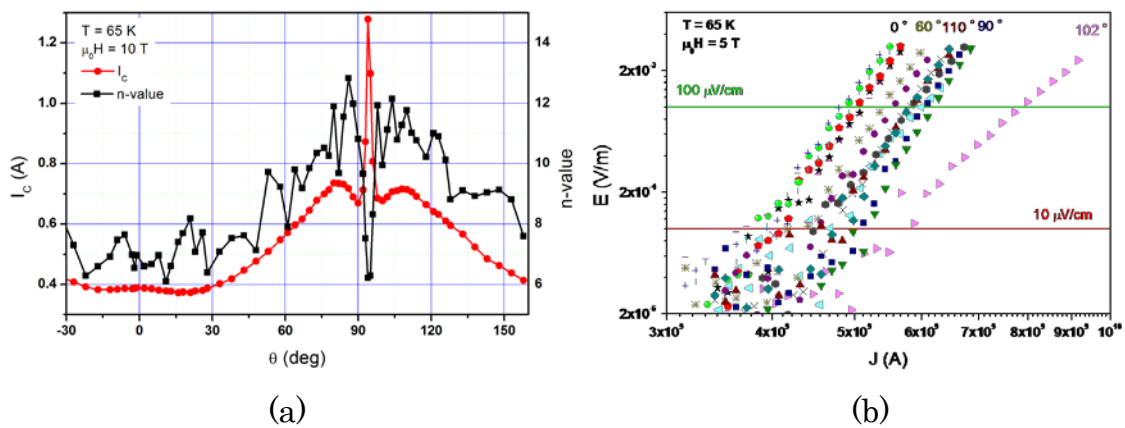


図 2.4.5-38 高磁場平行磁界下における Intrinsic ピンニングの影響

(8) 組織観察

超電導線材作製プロセスの改善及びその低コスト化を達成するには、超電導層、中間層、基板の組織（結晶粒配向、欠陥構造、第2層の有無、各層の界面構造）を詳細に解析することが重要である。本節では、MOD ベッド層の TEM による組織観察から、ベッド層成膜プロセスを改善した例について述べる。

図 2.4.5-39 に MOD 法により HastelloyTM 上に成膜された $\text{Ce}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ (CZO) ベッド層の断面 TEM 写真を示す。CZO 層に格子縞が多数観察されることから、微結晶により構成されていることが分かった。HastelloyTM 研磨によるコストを低減させるため、ベッド層を形成することにより、極力基板凹凸を小さくすることが重要な役割である。そのためには、ベッド層はアモルファスライクな構造であることが望ましい。そこで、この TEM 観察結果を受け、MOD ベッド層の焼成温度を低下させ、さらに大気雰囲気中で焼成することにより、より平坦な MOD ベッド層を形成することができた。このように改善されたベッド層上に IBAD-MgO 層、 LaMnO_3 層、さらに CeO_2 層を形成すると CeO_2 層の $\Delta\phi$ が 2.5 度という高二軸配向 CeO_2 層の形成に成功した。以上のように、MOD ベッド層の TEM による組織観察から、MOD ベッド層の成膜プロセス条件の最適化に貢献した。

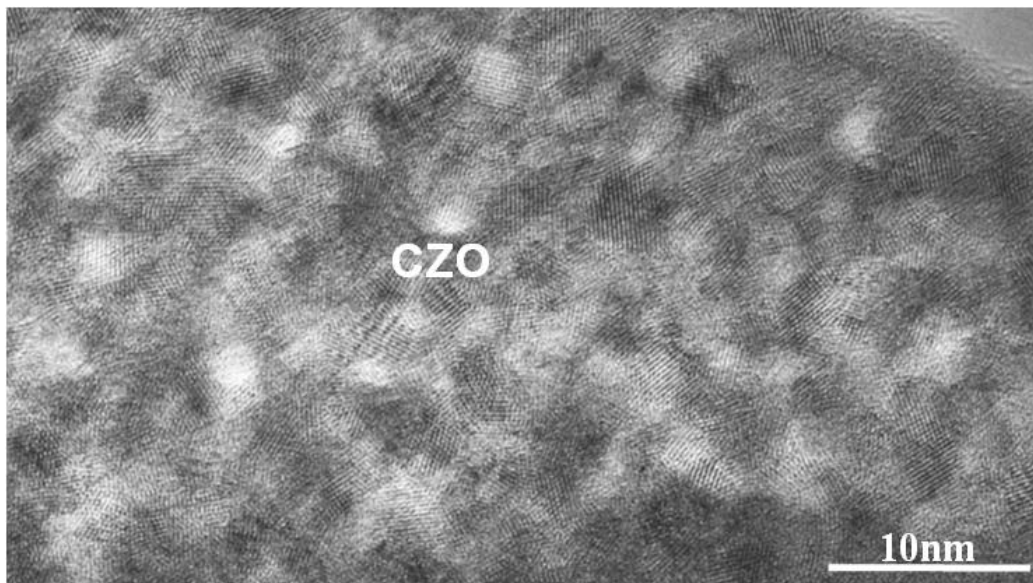


図 2.4.5-39 MOD 法により HastelloyTM 上に成膜された CZO ベッド層の断面 TEM 像

線材作製の低コスト化及び歩留り向上を目的として MOD 法による超電導層成膜技術が開発されている。MOD 原料溶液の Ba 仕込み組成の違いにより、臨界電流密度 (J_c) が変わることが知られている。具体的には、Ba-deficient 組成 (Y:Ba:Cu=1:1.5:3) で最も高い J_c 値が得られ、化学量論比組成 (Y:Ba:Cu=1:2:3)、Ba-rich 組成 (Y:Ba:Cu=1:2.2:3) と Ba の仕込み量が増加するほど J_c 値が低下する。 J_c 値低下の原因を明らかにするべく、化学量論比組成試料に関して詳細な解析を実施した結果を報告する。

図 2.4.5-40 に化学量論組成試料の代表的な表面及び断面 SEM 像を示す。(a) に示す正常表面領域に対し、(b)は CeO_2 層が基板成分と反応している領域、(c)は CeO_2 層が持ち上げられている領域である。(a)~(c)に示した構造は J_c 特性の良い Ba-deficient 試料においても多数観察されたことから、 J_c 特性低下の直接原因ではないと考える。一方、(d)は Y123 層内に黒破線及び黒矢印で示す亀裂が形成された領域であり、この構造は化学量論組成試料表面全体の 1 割程度の領域で観察された特徴的な構造であり、Ba-deficient 組成試料では観察されなかったことから、 J_c 特性低下の一因である可能性が高いと考えられる。

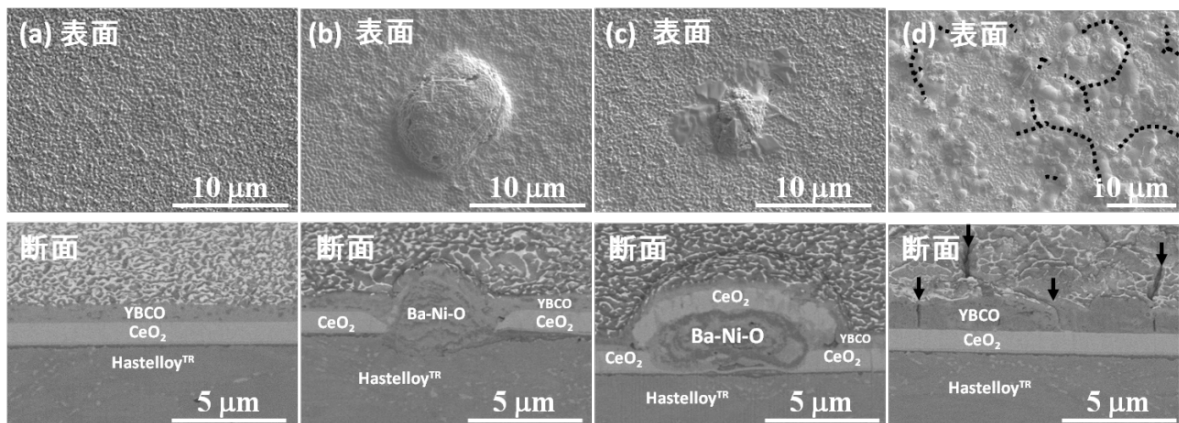


図 2.4.5-40 化学量論組成試料の表面及び断面 SEM 像。(a)正常表面領域、(b) CeO_2 層が基板成分と反応している領域、(c) CeO_2 層が持ち上げられている領域、(d)Y123 層内に亀裂が形成された領域の表面及び断面 SEM 像。

この亀裂の分布を把握するため、FIB-SEM を用いた三次元構築を行った。亀裂周辺領域において、横幅 $18.5\mu\text{m}$ 、奥行 $5.8\mu\text{m}$ の領域を FIB によるスライス加工幅 20nm とし 290 枚の SEM 像を取得した。図 2.4.5-41(a)に代表的な断面 SEM 像を示す。赤矢印で示す箇所に亀裂が確認できる。取得した SEM 像から三次元構築した結果を図 2.4.5-41(b)に示す。亀裂は赤色で示している。これより、亀裂はある起点を中心に Y123 層内に放射状に広がっていることが分かり、表面 SEM 観察から確認できる亀裂のサイズよりも広範囲に影響を与えていると推察される。

亀裂周辺の結晶構造を把握するため、TEM による解析を実施した。図 2.4.5-42 に亀裂周辺の断面 TEM 像を示し、TEM 像内に示す各破線領域から取得した制限視野電子回折図形を i 及び ii に示す。TEM 像中央付近に亀裂が存在しているが、亀裂周辺では Y123 結晶が分解されていることが分かる。以上の結果から、化学量論組成試料においては、局所的に Ba-rich 組成となった領域が形成され、Y123 結晶の分解及び亀裂の進展が発生し、 J_c 値低下の原因となっていると考えられる。

以上の観察結果は、MOD 法における最適な仕込み組成の検討と焼成時の反応速度制御が重要であることを示す結果であり、低コスト化・歩留向上技術開発の設計指針を示すことができた。

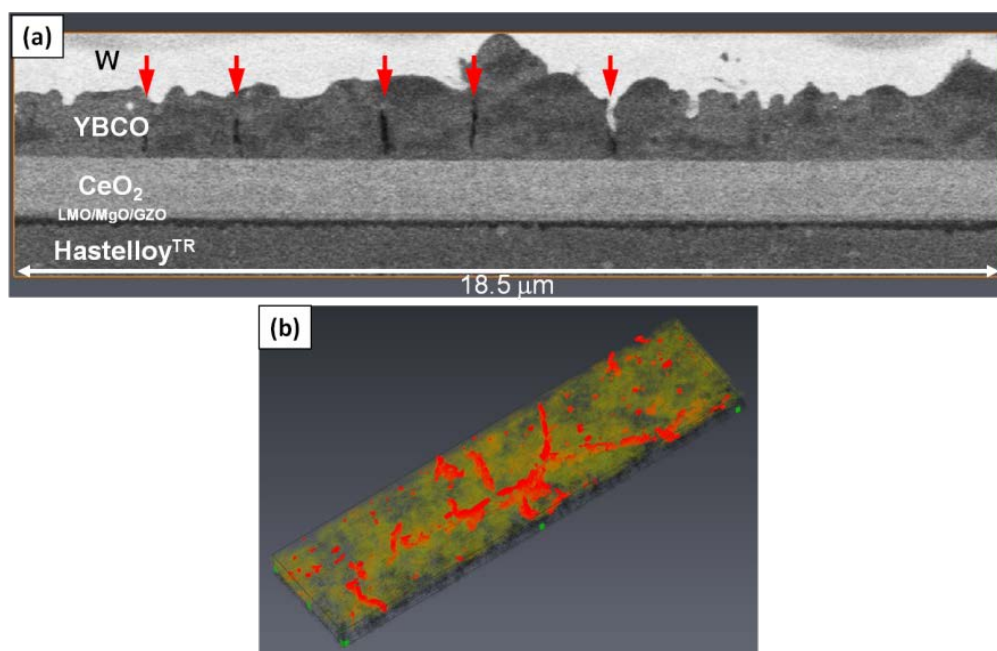


図 2.4.5-41 亀裂周辺の(a)代表的な断面 SEM 像及び(b)三次元構築結果。

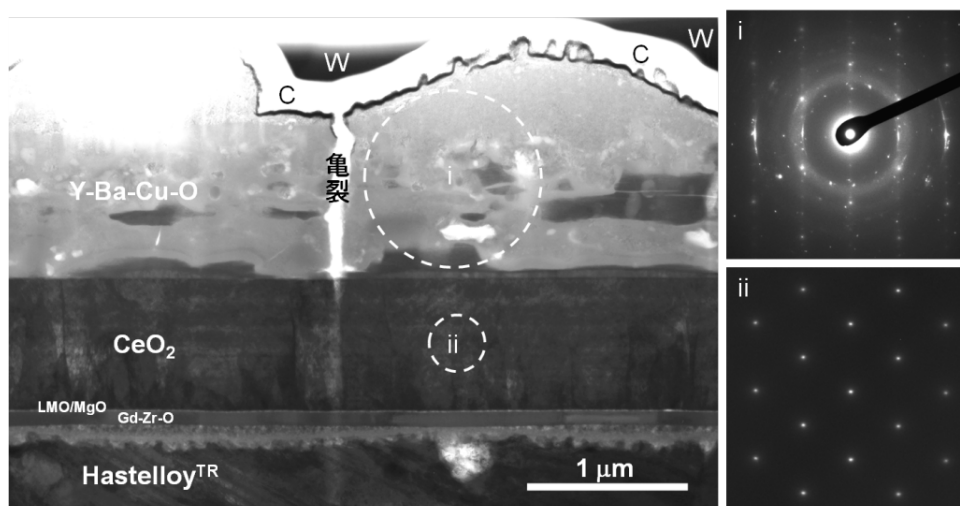


図 2.4.5-42 亀裂周辺の断面 TEM 像。i 及び ii は TEM 像に示す破線領域に対応する制限視野電子回折図形

(9) YAG レーザ法による作製コスト低減技術開発

YAG レーザとは、YAG(Yttrium Aluminum Garnet:Y₃Al₅O₁₂)結晶を励起媒質として発振させる固体レーザーである。YAG 結晶は安価であり寿命も長いため、エキシマレーザーと比較して装置コストが 1/10 以下である。また有毒ガスを利用する必要もなく、電力のみで稼働できるので装置も小型であり、チューブ交換等の大がかりなメンテナンスも必要としないため、ランニングコストも圧倒的に低い。従って、YAG-PLD 法は PLD 線材の大幅なコストダウンのポテンシャルを有するプロセスである。

そこで本研究では、YAG レーザによる実用線材の低コスト化を目的とし、実用条件に近い磁場中での J_c 値の向上をめざした。YAG レーザを用いて単結晶基板上への GdBCO 薄膜の作製及び人工ピン止め点の導入を行い、磁場中特性を改善した。人工ピン止め点材料には、エキシマレーザーを用いた予備実験から得られた人工ピン止め点として有望である BaHfO₃ 及び BaSnO₃ の混晶材料である Ba(Hf,Sn)O₃(BHSO)を新たに用いた。磁場中 J_c 特性が $B//c$ 軸方向で $J_c=0.1$ MA/cm² (@77K,s.f.) に向上した。特に磁場中における J_c 値の磁場印加角度依存性に改善がみられた。図 2.4.5-43 に 250 Pa で成膜した 2.6 vol.% 添加薄膜の 1 T、3 T、5 T における J_c 値の磁場印加角度依存性を示す。例えば、1 T において、 c 軸方向から 60°程度まで緩やかに低下し、80°にかけて大きく低下し、 ab 面平行方向でピークを持ち、再び J_c 値が上昇するという結果が得られた。すなわち、新たに BHSO が c 軸相関ピン止め点として機能しているだけでなく、60°付近まで有効なピン止め点として働いたことが分かる。この結果は、非常に応用上重要であり、幅広い角度での J_c 特性改善が期待されるとともに、YAG レーザ PLD 法が実用線材の製造プロセスとして有望であることを示しており、YAG レーザ PLD 法によるコスト低減技術の実用化に見通しを得た。

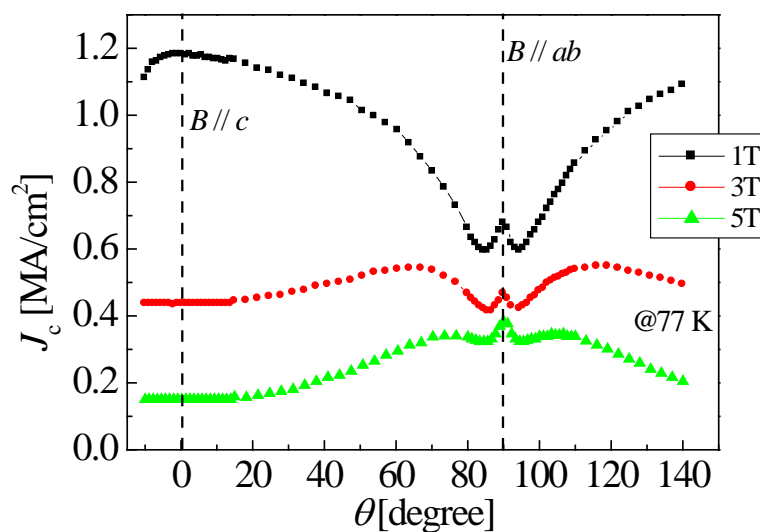


図 2.4.5-43 YAG レーザ法を用いた人工ピン止め点導入 GdBCO 膜の磁場印加角度依存性

2.4.5-2 接続・補修技術開発

(1) 銀拡散接合法による接続・補修技術開発

本開発では、線材の接続技術及び欠陥等により低特性となった箇所健全な線材を貼り合わせて補修する技術を開発し、長尺線材及び加工線材の歩留り向上をめざした。特に、今回、Gd系超電導線材とその分割線材の接合・補修技術を開発し、また、接合・補修部における電流分布も検討して、十分な高い I_c 値の流れる接合・補修技術を開発し、線材の歩留り向上に寄与できる結果を得た。

・低コスト基板線材の銀拡散接合条件最適化

接続・補修技術としては、これまで線材の接続方法として実績があり、低抵抗接続が可能なAg安定化層を利用した拡散接合法を主として検討を行った^{16,17)}。プロジェクト開始時においては、従来基板(PLD-CeO₂/IBAD-GZO/ハステロイ™)を用いたY系超電導線材について接続技術はほぼ確立していたため、その知見を基にして、低コスト基板であるIBAD-MgO上Gd系超電導線材について条件検討を行った。その結果、Y系超電導線材とほぼ同じ条件で低抵抗接続が得られることを確認した。図2.4.5-44にY系超電導線材とGd系超電導線材における接合抵抗をまとめる。Y系超電導線材においては、線材製造法に依らず、接合抵抗が5~10 nΩcm²であったのに対し、Gd系超電導線材では15~25 nΩcm²と高くなる傾向にあることが明らかとなった。なお、ハンダ接着法による接続では、接続部抵抗がY系は25 nΩcm²、Gd系は37 nΩcm²と銀拡散法よりも10 nΩcm²以上高い値となり、本方法が低抵抗接続を得る上で有効であることが確認された。

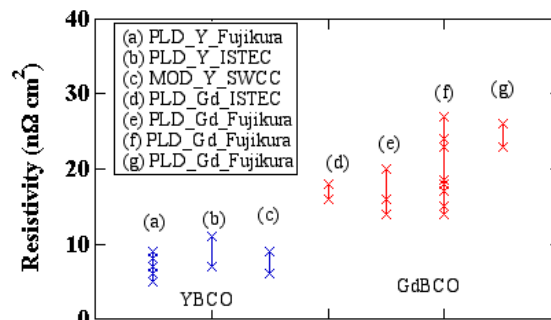


図 2.4.5-44 Y系超電導線材とGd系超電導線材における銀拡散接合による接合抵抗の比較

・長尺線材対応接合技術の開発

本プロジェクトの中間目標である50 m及び最終目標である200 m級線材の接続・補修に対応するため、長尺線材対応接合装置の開発を行った。装置の外観を図2.4.5-45に示す。銀拡散接合法において低抵抗接続を再現よく得るため熱処理時の抑え圧力を一定に制御する機構を設けている。図2.4.5-44の(a)と(e)は抑え治具に

て固定する方法、それ以外は本装置を用いた方法で接続したものであるが、従来法とほぼ同様の抵抗値が得られている。



図 2.4.5-45 長尺線材対応接合装置の外観写真

分割加工線材補修技術の開発

変圧器用線材においては、フィラメント化加工等により特性の不均一性が顕在化し易く、低特性となった箇所には健全な線材を貼り合わせて補修する技術が必須である。本プロジェクトにおいては、超電導変圧器の研究開発において 5 mm-w 3 分割線材の安定供給、超電導電流機器用線材技術開発においては、中間目標において 5 mm-w 5 分割、最終目標において 5 mm-w 10 分割のフィラメント化溝加工が課題となっており、これらに対応した補修技術開発が必須である。

そこで、平成 20 年度においては、5 mm-w 3 分割線材補修技術最適化検討、平成 21～22 年度前半には 5 mm-w 3 分割線材補修の長尺対応技術開発及び 5 mm-w 5 分割線材補修技術最適化検討を行った。また、剥離を含めた強度の把握のため、曲げ延ばし試験を行った。

図 2.4.5-46 に PLD-Gd 線材 5 mm-w 3 分割線材の補修前後の $I-V$ 特性の比較の 1 例を示す。f1 と f2 について、 I_c 値測定後に化学エッチング法により超電導層を 2 mm 長に亘って除去して分断した後、銀拡散接合法により修復を行った。補修後、 I_c 特性はほぼ回復していることが分かる。また修復部の抵抗は約 40～60 nΩcm²(接続部一か所あたり約 20～30 nΩcm²)と非分割線材とほぼ同様の値が得られており、また、補修前後でフィラメント間抵抗が維持され、短絡が起きていないことが確認された。長尺線材については、10 m 級線材の補修実績が 10 回以上あり、歩留りは 5 割以上であった。この歩留りが低い原因としては、銀表面の清浄化不足やフィラメント加工に用いるマスク材の糊の残留等による接合不良、熱処理による銀層/超電導層あるいは超電導層/CeO₂ 層間の剥離等があげられる。前者については、清浄化方法の見直しによりほぼ解決されるものと考えられた。また、後者においては、接合形成後の酸素アニール処理時に主に生じるため、熱処理時の線材のそり防止等により対策を行った。

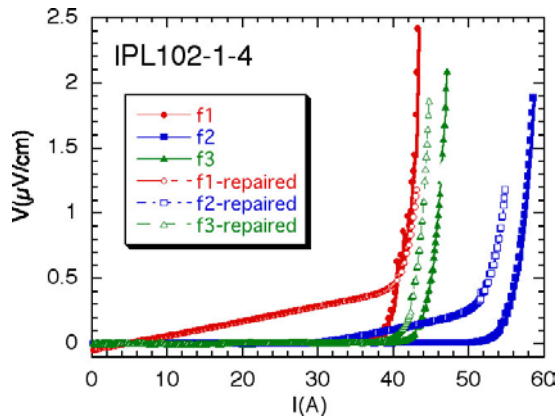


図 2.4.5-46 PLD-Gd 線材 5 mm-w 3 分割線材の補修前後の $I-V$ 特性の比較
 I_c 値測定後、f1 と f2 に欠陥を導入し、銀拡散接合により補修

接合部の強度の把握のため、5 mm-w 3 分割線材について 90 mmφの曲げ延ばし試験を行った。結果の一例を図 2.4.5-47 に示す。90 mmφの曲げ延ばし 1 回では接合部での I_c 値の低下及び剥離は観られなかったものの、複数回の曲げ延ばし及び室温・液体窒素温度の昇降温により接合部で剥離を生じる例もあった。

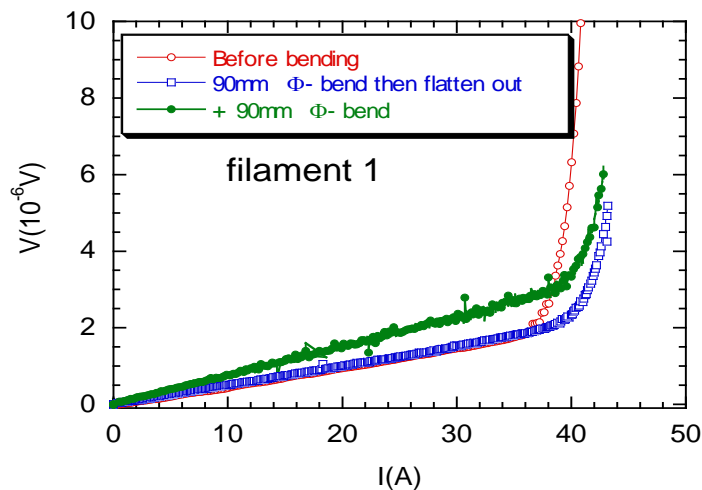


図 2.4.5-47 PLD-Gd 線材 5 mm-w 3 分割線材の 90 mmφ曲げ試験における $I-V$ 特性の変化

次に、5 mm-w 5 分割の補修例について、図 2.4.5-48 に示す。ここでは PLD-Y 系の線材を用い、#3 と #5 にダイヤモンドブレードにより傷を導入後、補修を行った。右図に補修後の $I-V$ 特性を示すが、補修後 I_c 値が回復していることが分かる。また、補修部抵抗は約 $22 \Omega\text{cm}^2$ (接続部一ヶ所当り約 $11 \text{ n}\Omega\text{cm}^2$) と非分割線材と同様の値となっており、また補修前後でフィラメント間抵抗が維持され、短絡がないことが確認された。

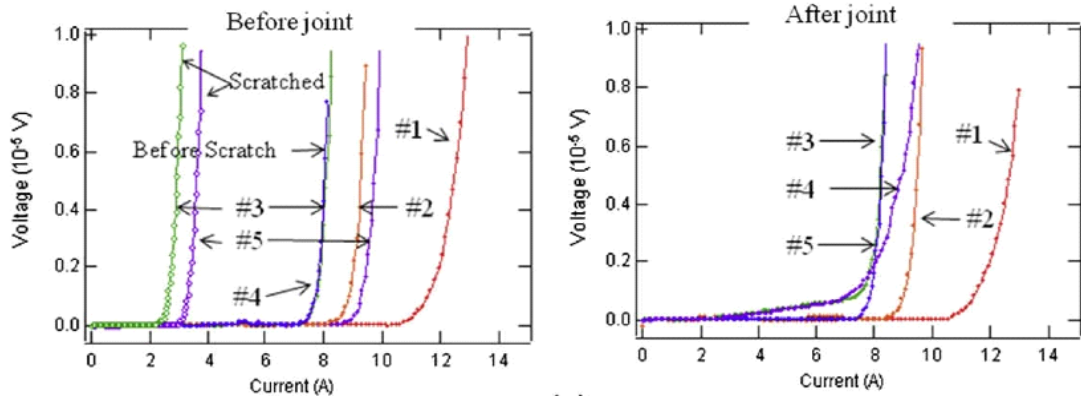


図 2.4.5-48 PLD-Y 系超電導線材 5 mm-w 5 分割線材の補修例。フィラメント #3 と #5 に欠陥を導入後、銀拡散接合法にて補修

また、接続・補修の交流損失に及ぼす影響を調べるために、5 mm-w 5 分割線材を接続・補修した試料としていない試料との交流特性の比較を行い(図 2.4.5-49)、接続・補修による交流損失の増加がないことが確認された¹⁸⁾。

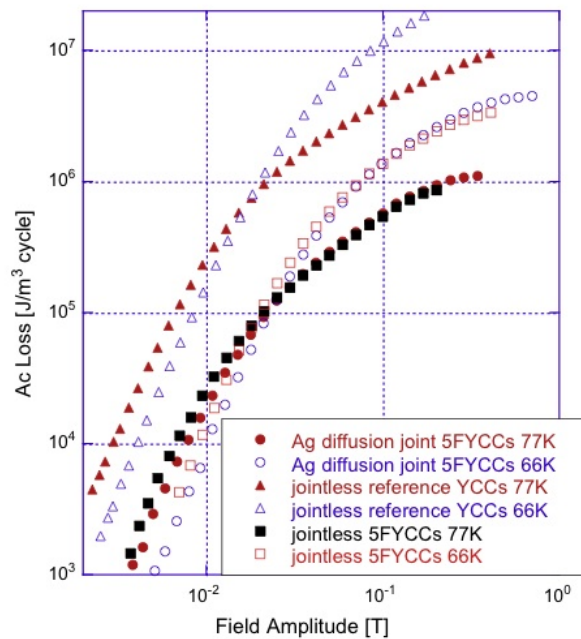


図 2.4.5-49 接続・補修の交流損失に及ぼす影響

接合・補修部の特性把握

本研究では、RE 系超電導線材の接続部における電磁現象の把握を目的に、走査型ホール素子顕微鏡を用いて電流分布を評価した。測定対象となる試料の写真を図 2.4.5-50 に示す。同試料は 5 mm-w と 2 mm-w の GdBCO 線材で構成されており、両線材間は銀拡散接合法により接続されている。同試料に通電した際の自己磁界分布を測定し、得られた自己磁界分布に対して Biot-Savart 則の逆問題を解くことにより、同試料内の電流分布を 2 次元シート電流密度分布として評価した。

図 2.4.5-50 GdBCO 線材を用いた接合試料の写真

測定温度約 80 K、通電電流 25 A の条件下で得られたシート電流密度分布を図 2.4.5-51 に示す。なお、同分布は両線材の電流分布の重ね合わせに対応する。基本的には電流が試料形状の縁に集中して流れる分布が得られている。一方、 $y = \pm 1.0$ mm の幅方向位置に若干の起伏が見られることに注意を要する。

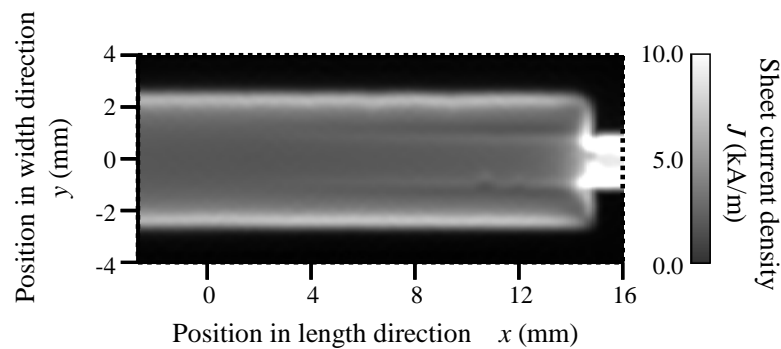


図 2.4.5-51 走査型ホール素子顕微鏡によって得られたシート電流密度分布

実は、本試料のように幅の異なる線材を用いた場合、その起伏の大きさが両線材の電流分担割合に応じて変化することが予め行った数値解析により分かっている。具体的には、図 2.4.5-52 に示すように、幅の狭い線材の電流分担が増加するほど、得られるシート電流密度分布の起伏が大きくなる。

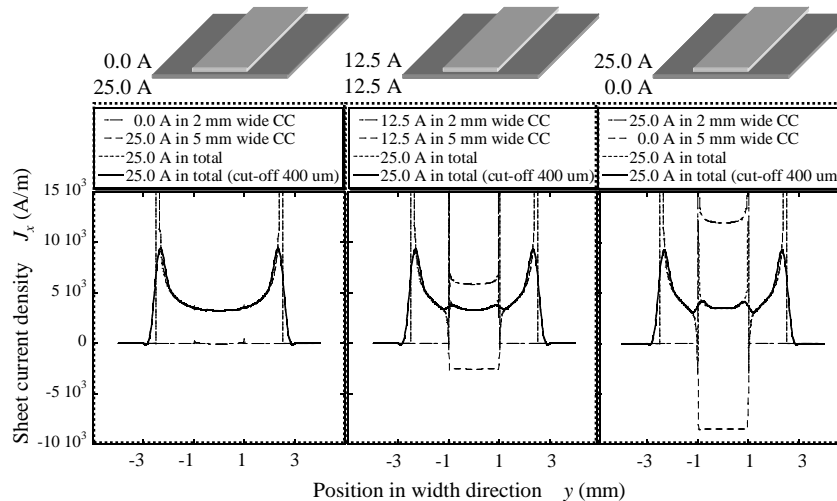


図 2.4.5-52 電流分担割合評価の原理

ここで、図 2.4.5-53 に示した実験結果に着目すると、両線材の接合部では長手方向(x 方向)に進むに従って、上記起伏が徐々に大きくなっていることが分かる。以上から、5 mm-w 線材から 2 mm-w 線材へ電流の移り変わりは、図 2.4.5-53 に示すように、接合部のほぼ全長を通じて行われていることが明らかとなり、均一性に優れた接合が実現されていると結論付けられる。

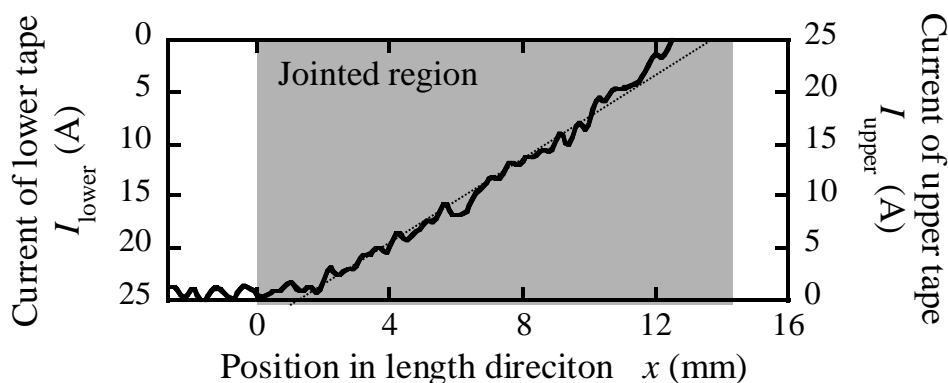


図 2.4.5-53 5 mm-w 線材から 2 mm-w 線材への電流の遷移

(2) 加圧接合法による接続・補修技術開発

SMES あるいは変圧器応用の線材には、線材接合・補修技術開発が重要である。その接続技術の中で、これまでの Y 系超電導線材の加圧接合^{17,19)}を基に、接合抵抗への圧力因子の影響を考察し、低抵抗接続を得て、今後の長尺線材及び加工線材の歩留り向上に寄与した。

圧力設定が正確な重錘式加圧炉に YBCO 及び GdBCO 超電導線材の安定化層 (Ag) を対向させて設置し、酸素中加圧熱処理による Ag の拡散及び変形を利用した接合技術開発を行った。四端子法により接合抵抗を測定し、電子顕微鏡により断面組織を観察した。

接合体の界面抵抗は、接合圧力に対して図 2.4.5-54 のような依存性を示した。接合抵抗と接合圧力の関係に及ぼす要因を解析し、圧力増加に伴う Ag の接合面の密着性・拡散接合度の向上、及びそれとは逆の効果として、基板の凹凸や圧力下での Ag の不均一変形等に起因して圧力増加に伴い YBCO/中間層の劣化が起こり得ること、これらの要因により接合抵抗が決定されることを指摘した。これら知見を基に、試料の平滑性向上、治具の精密化、均質接合面積拡大を図った結果、いずれの圧力でも抵抗値が改善され、10 MPa で約 $6.5 \text{ n}\Omega\text{cm}^2$ の接合抵抗値を得た。一方、GdBCO 超電導線材では、治具改善や熱処理温度適正化により $35 \text{ n}\Omega\text{cm}^2$ 程度に改善されたが、YBCO 超電導線材より高い接合抵抗値を示した。EPMA による組成分析による原因調査から、接合前のテープ試料において Ag 層中への Gd の拡散が観察された。

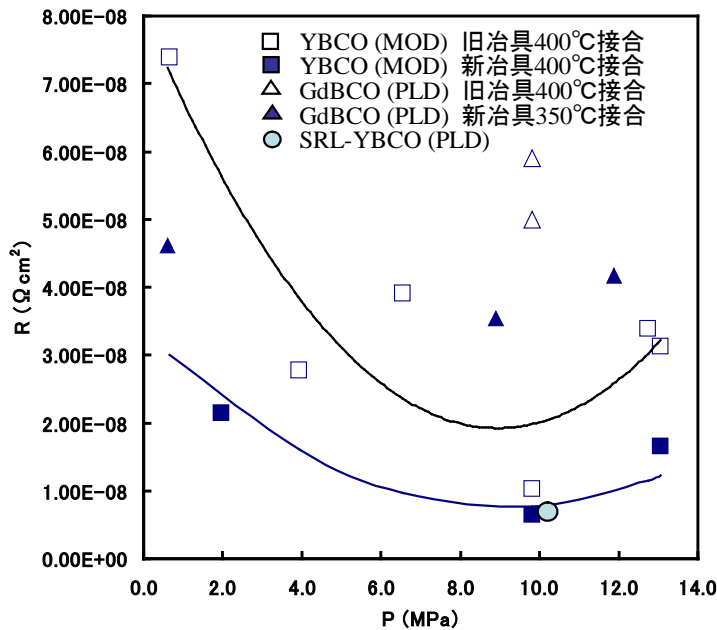


図 2.4.5-54 テープ接合体の接合圧力と接合抵抗

以上、安定化層を利用した加圧接合法による条件適正化により、接合体の低抵抗化が図れることが示されたが、GdのAg層への拡散によりGdBCO層の膜質劣化の結果も得られ、このことが界面性状や抵抗に影響を与えていることも考えられる。よって、GdのAg層への拡散を抑制していけば、GdBCO超電導線材においても一層の低抵抗化が実現できるものと推察された。また、MOD法等により超電導層上に超電導原料塗布膜や仮焼膜を重ねて作製し、対向させ熱処理することで超電導層が配向成長すれば、超電導接合が実現できる可能性があるものと考えられた。

例えば、図 2.4.5-55 に示した超電導層上に原料塗布膜を重ねて作製し熱処理した予備実験からは、表面までYBCO層が成長していることが認められた。

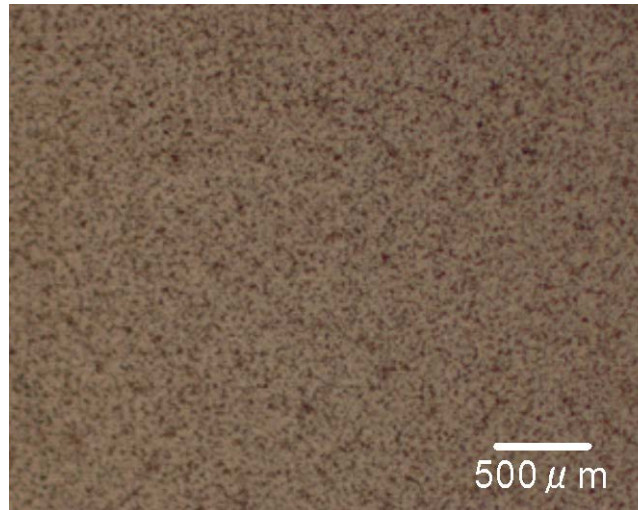


図 2.4.5-55 超電導層上に原料塗布膜を重ねて熱処理した YBCO 膜の光学顕微鏡による表面組織

(3) 極薄金属界面を用いた接合・補修技術開発

ここでは、従来の Ag 拡散接合技術において、より低抵抗を得るために、接合温度の低温化と Ag 層の極薄化、接合圧力の均一化を検討した。その結果、接続抵抗の低抵抗化が期待できる結果を得た。

RE 系超電導線材における接合は線材安定化銀層の面同士を張り合わせて、加圧接合熱処理を行う手法が一般的である。超電導線材の接続には、発熱を抑えるために接合抵抗(R_j)の低減が求められる。RE 系超電導線材は高温で熱処理を行うと、超電導体における酸素の脱離によって超電導特性の低下や相転移が起き、大きな抵抗が接合部近辺で生じやすい。このため、できるだけ低温で接合熱処理(酸素中)を行うことが望ましい。

そのため、本研究では接合温度を低温化し、その際の銀安定化層の表面形態の変化及び接合時の圧力分布の改良を行い、接合抵抗(R_j)の低減を行った。

図 2.4.5-56 に 650°C の低温で接合した Gd 系超電導線材の表面 SEM 像を示す。用いた試料は銀安定化層を 10 μm 厚及び表面研磨により 1 μm 厚に極薄化した Gd 系短尺線材である。図 2.4.5-56 左図より、10 μm 厚の Ag 厚みの場合、Ag 結晶は大きな粒子に変化しており、銀は再結晶化が進んでいると考えられる。一方、図 2.4.5-56 右図は、1 μm 厚の Ag 厚みの場合であるが、矢印で示した箇所で極薄化した銀安定化層の下に Gd 系超電導層が観察された。すなわち、極薄の Ag 安定化層の接続では、再結晶化、蒸発等により、Gd 系超電導層が現れ、超電導層同士を反応接合させることができる可能性がある。

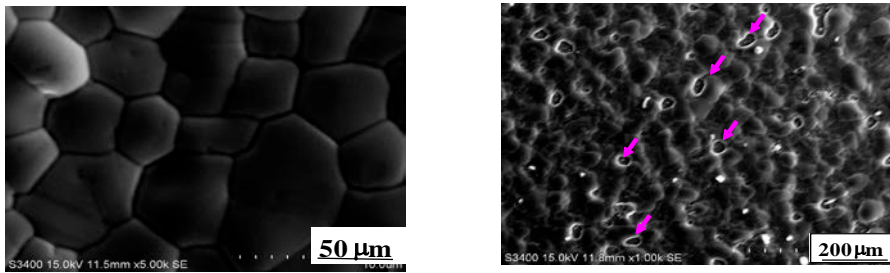


図 2.4.5-56 650°Cで熱処理後 10 μm 厚及び 1 μm 厚の Ag 安定化層の表面形状

さらに、接合実験に用いた接合用治具の圧力分布の不均一性を改善した。従来の二点接合治具を用いた際の圧力分布を図2.4.5-57に示す。二点接合治具のみで圧力をかけた場合、圧力分布に非常にムラがある。これに対して、三点圧力接合治具及びセラミックス板を使用した改善を行った。接合時に治具と試料の平坦性、圧力均一性が増し、ほぼ全体に均一に圧力がかかっていることが分かった。これにより、接合力が大きく改善される可能性が示された。

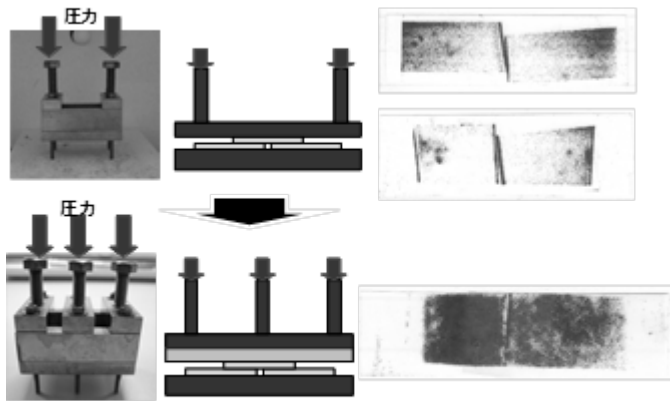


図 2.4.5-57 簡易型圧力治具における接合界面の圧力分布

さらに銀安定化層の平坦性、極薄膜化、接合加工時の圧力分布均一化技術の構築や熱処理条件適正化等により、現状の金属-金属接合から、超電導—超電導接合へと展開していくことが期待される。

2.4.5-3 安定製造技術開発

(1) 安定製造技術開発① (住友電気工業)

住友電工では、PLD 線材を用いて、本プロジェクト終了後に想定されている実用化技術開発時に必要な線材を念頭に置き、平成 23 年度から平成 24 年度に 3cm-w 結晶粒配向基板-PLD 線材の安定製造技術の開発を行った。基準とした線材特性は、低損失線材開発及び高 J_e 線材開発における中間目標値である次の特性である。

- ・低損失線材：2 mm 幅 - $I_c = 300 \text{ A/cm-w}$ (@77K,s.f.)- 50 m 長
- ・高 J_e 線材： $J_e = 30 \text{ kA/cm}^2$ (@77K,s.f.) ($I_c = 390 \text{ A/cm-w}$ 相当) - 50m 長

高 J_e 線材については線材幅の仕様は含まれていないが、ケーブルに使用することを念頭に、2 mm~4 mm-w 線材での開発とした。結晶粒配向基板-PLD 線材の安定製造にとっての課題は、一つは PLD 成膜時間とともに I_c 値が低下していくこと、もう一つは局所的な I_c 値低下部分の存在であった。前者については、ケーブル用線材製造のデータもフィードバックし、PLD 成膜でのターゲットの掘れによるブルーム形状の変動やレーザ入射窓の汚れによるレーザ強度の変動の影響を抑制するために、多パス成膜の条件の検討を実施した。後者に対しては、基板表面の汚れや傷等の欠陥の改善を図るとともに、細線化前後の誘導法 I_c 値測定データ等から欠陥の発生工程調査を実施した。また、低損失線材開発・高 J_e 線材開発による高 I_c 化条件、レーザスリットによる端部劣化の少ない細線化加工等も製造条件に反映させた。その結果、図 2.4.5-58 のように、成膜時間による I_c 値低下減少は

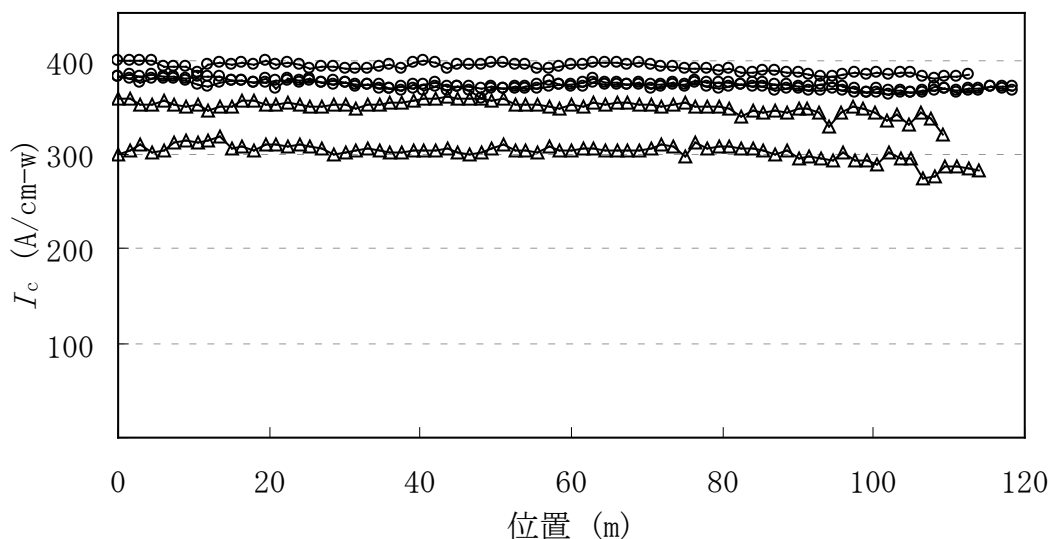


図 2.4.5-58 線材 1 ロットの 30 mm-w 線材から作製した 4 mm-w 線材 (Δ) と 2 mm-w 線材 (\circ) の長さ方向 I_c 値分布例

改善され、局所的 I_c 値低下も減少した。

図の線材を含め、複数本の線材を作製して歩留りを評価した結果を、表 2.4.5-11

に示す。作製した線材の量は、追加予算により線材製造量増を図り、50m 単長線材 36 本及び 100m 単長線材 6 本(いずれも 1 cm-w 換算値)を作製した。表 2.4.5-11 には、参考値としてプロジェクト後半に作製したロットの歩留りも示した。

表 2.4.5-11 結晶粒配向基板-PLD 線材の歩留り集計

実施計画		実施結果					
単長 (m)	本数※	仕様		線材量		歩留り	
		目的	線材幅	本数※	総長※(m)	全ロット	最新ロット
50	30	低損失	2 mm	6	310	39%	47%
		高 J_e	4 mm	30	1770	8%	13%
100	5	低損失	2 mm	2	300	20%	40%
		高 J_e	4 mm	4	600	7%	13%

※線材の本数・総長は、1 cm-w 換算の値

さらに、3 cm-w 線材での幅方向の I_c 値均一化開発も実施し、中間層の均一化・平坦化、PLD 成膜温度の均一化及び PLD 成膜時プルーム形状(レーザ集光サイズ)の調整により、3 cm-w 全域で 400 A/cm-w(@77K,s.f.)以上の I_c 値を確認しており、不良線材の発生を低減できる可能性を確認した。これにより、歩留りはさらに 25 % 程度向上する可能性が得られた。

また、今回の開発では、細線化前後の誘導法 I_c 値測定データの取得のため、更に細線加工装置軸数の制約上、細線化加工工程を 2 段階 (3 cm-w → 1 cm-w → 2/4 mm-w) で実施したため、各段階で加工ロスが発生した。これを 1 段階で 2/4 mm-w に加工する工程とすることで、加工ロスは 20 % から 7 % に低減できる見込みである。上記の幅方向の I_c 値均一化と合わせ、例えば低損失線材仕様に対して、歩留りは最大 85 % 程度に改善すると試算している。

以上のように、3 cm-w 結晶粒配向基板-PLD 線材による、ケーブル用 2 mm-w・4 mm-w 線材の安定製造技術開発を実施し、最終的に歩留り(低損失線材の中間目標仕様) 47 % を確認し、さらに工程最適化と幅方向 I_c 値均一化により、歩留り改善の見通しを得た。今後、実用化に向けた長尺線材安定製造技術においては、局所的な I_c 値低下箇所のさらなる低減も課題である。

(2) 安定製造技術開発② (古河電気工業)

MOCVD 線材を用いて、「超電導電力ケーブル実用化技術開発用線材」を念頭においた安定製造技術の開発を試みた。

平成 23 年度では、10 mm-w・50 m 長の線材をレーザ切断法により 5mm-w 5 分割し、全長尺取 J_e 値測定を行った。その結果を図 2.4.5-59 に示す。幅両外側に位置する No.1 と No.5 については J_e 値が低く、ばらつきが大きい。No.2~4 については長手方向で安定して $J_e=30 \text{ kA/cm}^2$ (@77K, s.f.) 前後の特性が得られた。このことから幅両外側は切断前の特性不安定の影響を受けているものの、それ以外は切断による影響はほぼ無いことが確認された。

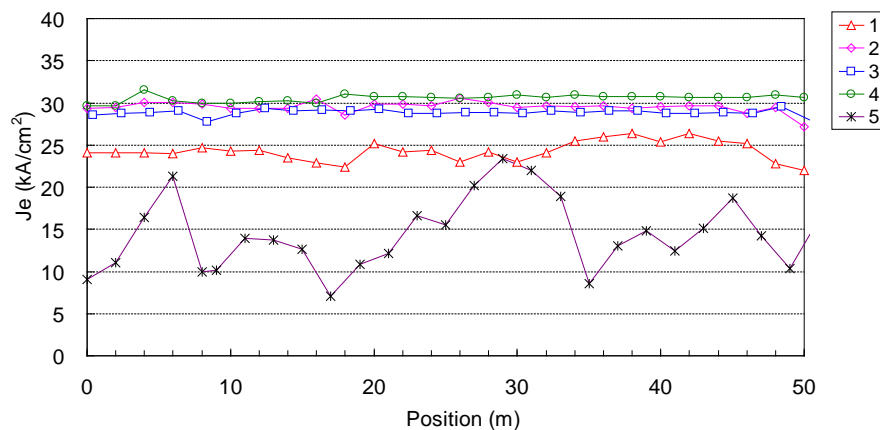


図 2.4.5-59 5 分割線材の J_e 特性

平成 24 年度では、 $J_e=30 \text{ kA/cm}^2$ の特性を有する MOCVD 線材の安定製造に向けて、歩留り低下の要因の把握とその解消を試みた。歩留り低下要因は主に MOCVD における原料供給異常や温度制御異常等の設備トラブルによる局所不良であり、未然防止を目的としたメンテナンス方法や異常発生時の確実な検出方法等の設備管理技術を確立することにより解消した。

追加予算により、50m 単長線材を 11 本、100m 単長線材を 5 本、を作製し、安定製造についての評価を行った。評価結果を図 2.4.5-60 に示す。製造初期に多く作製した 50m 長は特性が安定せず低 J_e 値線材が多いが、主に製造後期に作製した 100m 長では歩留りが改善した。さらに $J_e > 30 \text{ kA/cm}^2$ の 100m 長線材を 5 分割 (2mm-w) し End to End で J_e 値を測定した結果、 $J_e > 20 \text{ kA/cm}^2$ で 2 本、 $J_e > 30 \text{ kA/cm}^2$ で 3 本得られた。その他のサンプルでの J_e 値低下の原因として、線材の取り扱い時のミスが考えられる。

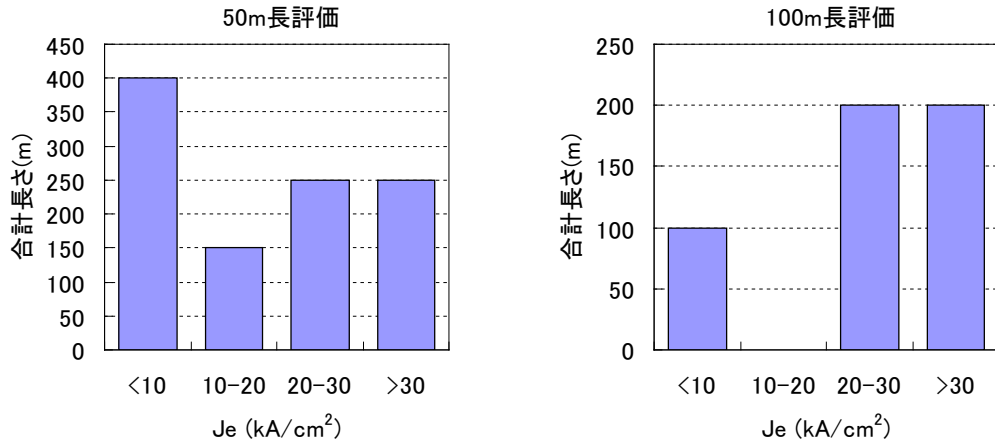


図 2.4.5-60 安定製造評価の結果

線材使用の際に発生の可能性のある劣化に関し、基板厚さの違いと銅安定化層の有無の影響を評価するため、50,75,85,100 μm のハステロイTM基板を用いて銅安定化層あり／なしの MOCVD 線材を作製し、これらについて、室温－液体窒素浸漬の熱サイクル付与（5回）時の I_c 変化を測定した。図 2.4.5-61 に示すとおり、基板厚さ及び銅安定化層の有無に関わらず熱サイクルによる I_c 低下は認められなかった。

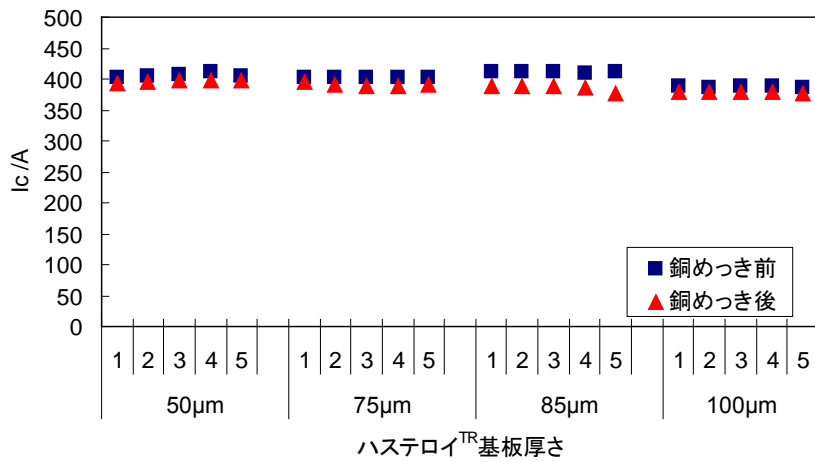


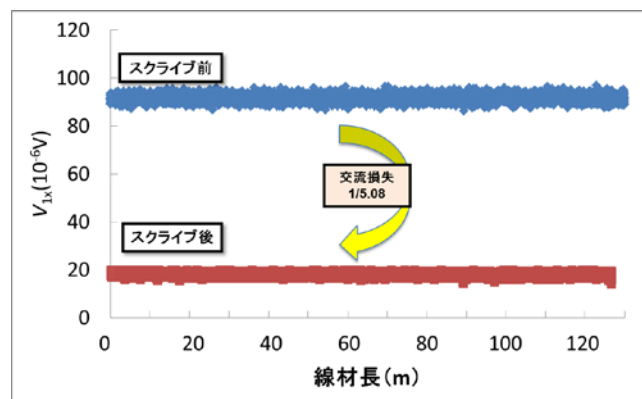
図 2.4.5-61 熱サイクル I_c 試験

(3) 安定製造技術③ (フジクラ)

a. 低損失線材作製技術

IBAD-PLD 法により製造した線材を 5m-w にスリットした後に、スクライブにより 5 分割化した。平成 23 年度及び平成 24 年度において総長 1,320m の超電導線材をスクライブし、スクライブ前後の交流損失を測定した。スクライブ後の交流損失が目標値である 1/5(5 分割線材で無分割線材比で 1/5)に低減した線材の測定結果を図 2.4.5-62 に示す。

(a)



(b)

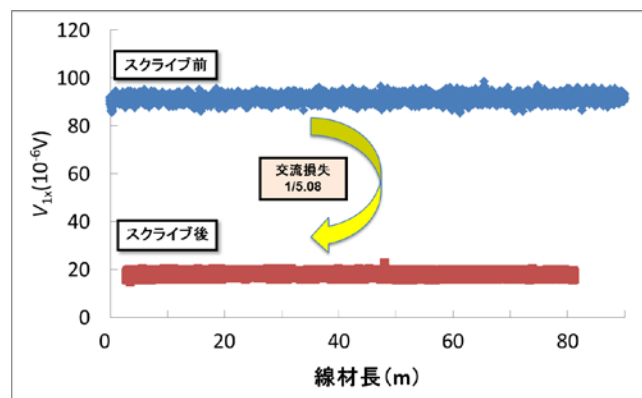


図 2.4.5-62 5 分割線材の交流損失測定結果

(a) 単長 129m 線材、(b) 単長 82m 線材

合計で 211m の良品が得られた。上記線材を含む 5 分割線材の歩留りを表 2.4.5-12 にまとめた。

表 2.4.5-12 5 分割線材歩留りまとめ

	線材総長 (m)	良品本数(本)	良品長(m)	歩留(%)	備考
2011年度	137	2	100	73.0	線材当社製 加工担当SRL殿
2012年度	1,143	3	150	13.1	線材当社製 加工担当当社

歩留りは、交流損失が低減した線材から得られる 50m 単長の線材量を分子として、加工した線材の総長を分母として求めた。2012 年度当初は良品を得られない状態であったが、年度の後半に線材の見直しを実施し、良品を得られる状態となった。見直し実施後に限ると歩留りは 22.8%であった。

b. 磁場中高 I_c 線材

当社にて製造した線材の I_c -B-T 特性を図 2.4.5-63 に示す。

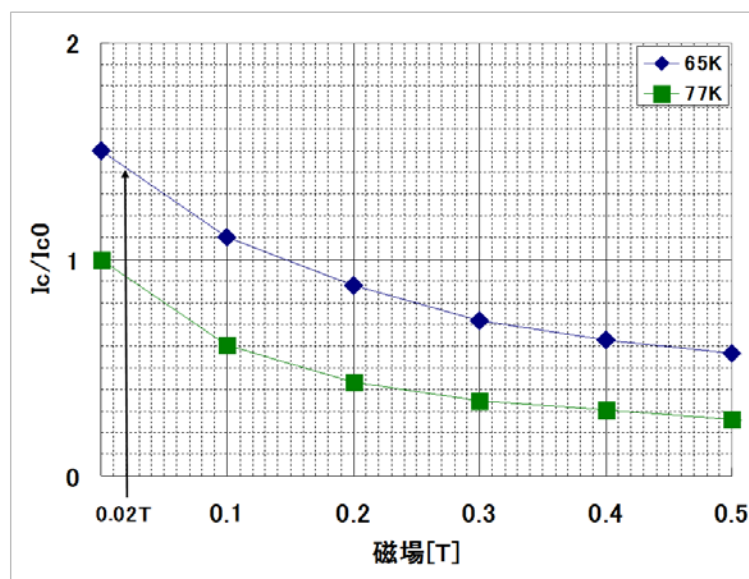


図 2.4.5-63 I_c -B-T 特性

図 2.4.5-63 から 65K,0.02T における I_c 値は 77K,s.f.の I_c 値の 1.4 倍程度であることが分かる。そのため、65K,0.02T において 300A/cm-w 以上の I_c 値を満たすためには、77K,s.f.で I_c 値が 205A/cm-w 以上である必要がある。平成 24 年度に出荷した線材のうち、3,511m について I_c 値が 205A/cm 以上の箇所が連続して単長 (50m、100m) に相当する長さ亘り存在する線材を良品と判定し、歩留りを評価した結果を表 2.4.5-13 にまとめた。

表 2.4.5-13 磁場中高 I_c 線材の歩留り

仮想単長(m)	線材総長(m)	良品本数(本)	良品長(m)	歩留(%)
50	3,511	62	3,100	88.3
100	3,511	31	3,100	88.3

磁場中高 I_c 線材の歩留りは、88.3%であった。

(4) 安定製造技術開発④ (昭和電線ケーブルシステム)

(1) 研究開発目標

MOD 線材を用いて、極低コスト線材の安定製造技術開発を行う。

- (i) 技術コスト 3 円/Am 以下のプロセス条件で 50 m 長線材を安定して作製するプロセスの確立を図る。
- (ii) (i) で確立した塗布方法、仮焼条件、膜厚分布均一化技術を組み合わせ、技術コスト 3 円/Am 以下のプロセス条件での製造歩留り向上・安定製造技術の開発を行う。100m 単長線材を 10 本以上製造し、機器設計に資する線材特性基準データ取得のための安定製造技術を確立する。さらに、500m バッチ炉の改造を行うことで、より低コストをめざした技術開発を行う。

(2) 研究内容

技術コスト 3 円/Am を満たす条件を表 2.4.5-14 に示す。

表 2.4.5-14 技術コスト 3 円/Am を満たす条件

項目	条件	課題
塗布・仮焼速度	10 m/h	10 mm-w での塗布・仮焼工程への変更
本焼速度	10 m/h	厚膜化に伴うガス流速の最適化
膜厚	1.5 μm	線材幅方向の膜厚均一化
I_c	> 300 A/cm	ボイドの低減等の仮焼膜質の改善
基板	IBAD-MgO	MgO 上 CeO ₂ 膜の条件確立

表に示した課題を克服するため、仮焼膜の膜質向上を図るべく、ISTEC より技術移管を受け、原料溶液を従来のナフテン酸銅溶液からオクチル酸銅溶液への転換を実施した。図 2.4.5-64 に示すように、仮焼膜層間に存在する酸化物層及び仮焼膜内のボイド低減が可能となった。さらに、原料溶液塗布の際、塗布用ダイスを用いることで、幅方向の膜厚分布の改善に成功した。図 2.4.5-65 に示すように、各超電導膜厚において、線材幅方向に対して膜厚誤差が $\pm 10\%$ 以内であることが判る。また、図 2.4.5-66 に示すように、今回の改善により膜厚 2 μm の線材が作製可能となり、高 I_c 化の検討が可能となった。ここで、超電導層の厚膜化に伴い本焼中に発生する HF ガスが増加することから、炉内のガス置換効率を向上させる目的で、500m バッチ炉の改造を行った。図 2.4.5-67 に 500m バッチ炉改造後に作製した代表的な 100 m 級線材の I_c 値分布を示す。 I_c 値は全長に亘って高い特性を示し、End to End I_c 値は、308 A/cm-w(@77K,s.f.)であり、技術コスト 3 円/Am を満たすものとなった。その後、100 m 級線材を繰返し製造を行ったところ、100m 長にお

る歩留りは 55 % となり、本プロセスにおける歩留り向上が今後の課題として残った。歩留り向上の施策として、バッチ式焼成の厚膜化に伴う、ガス流速、炉内圧力等の本焼条件の最適化が考えられた。

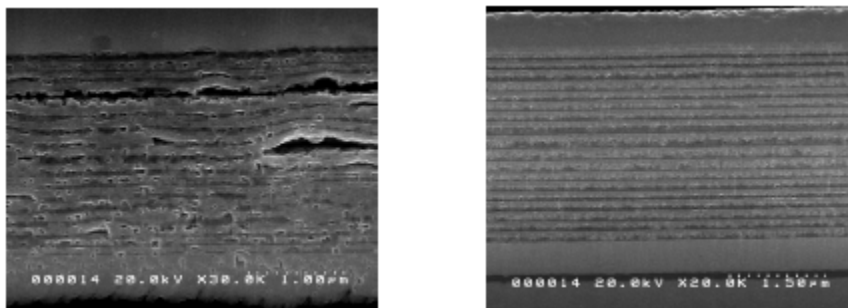


図 2.4.5-64 各溶液で作製した仮焼膜の断面 SEM 写真
左：ナフテン酸銅溶液、右：オクチル酸銅溶液

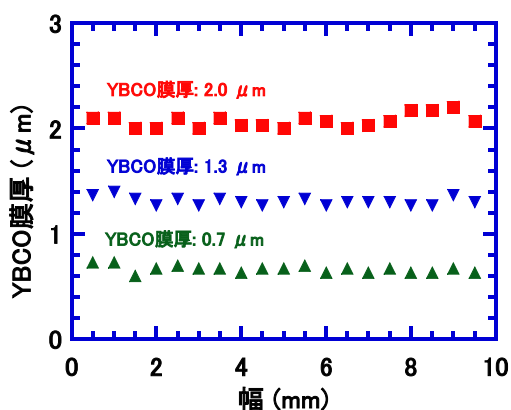


図 2.4.5-65 YBCO 層の線材幅方向の膜厚分布

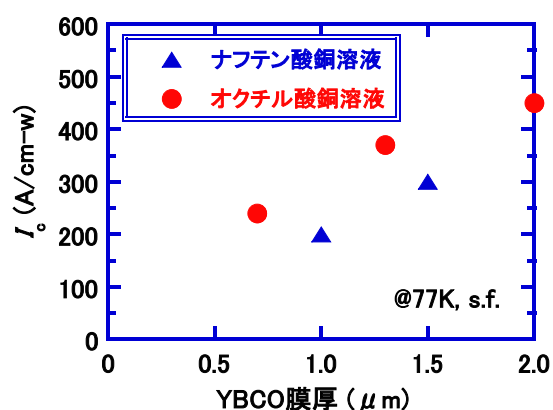


図 2.4.5-66 各溶液で作製した I_c 値の膜厚依存性

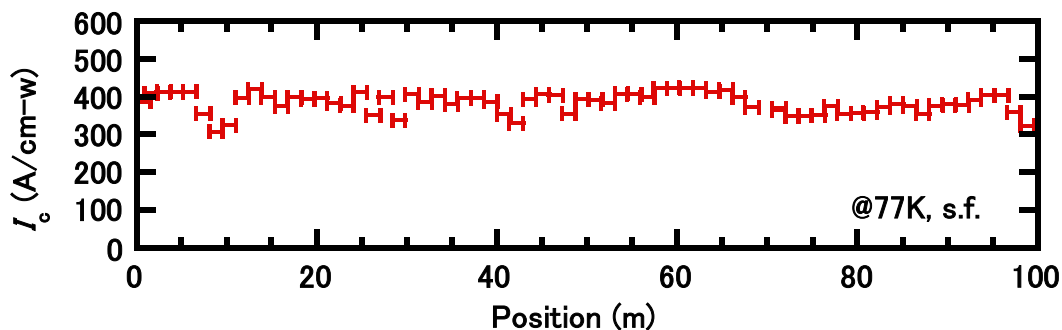


図 2.4.5-67 代表的な 100 m 長線材の連続 I_c 値測定結果

引用論文リスト

- (1) V. Matias, B. J. Gibbons, J. Hanisch, R. J. A. Steenwelle, P. Dowden, J. Rowley, J. Y. Coulter, D. Peterson, “Experiments Using Continuous Fabrication of IBAD-MgO Based Coated Conductors”, IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol.17 No.2 (2007) 3263-3265
- (2) S. Kreiskott, P. N. Arendt, L. E. Bronisz, S. R. Foltyn, V. Matias, “Continuous electropolishing of Hastelloy substrates for ion-beam assisted deposition of MgO”, Supercond. Sci. Technol. Vol.16 No.5 (2003) 613-616
- (3) P. G. Clem, “All solution deposited coated conductor program”, Presentaion at DOE annual peer review 2007
- (4) Y. Iijima, K. Kakimoto, Y. Sutoh, S. Ajimura, and T. Saito, “Development of long Y-123 coated conductors by ion-beam-assisted deposition and the pulsed-laser-deposition method”, Supercond. Sci. Technol. Vol. 17 (2004) 264-268.
- (5) N. Chikumoto, S. Lee, K. Nakao, K. Tanabe, “Development of inside-plume PLD process for the fabrication of large $I_c(B)$ REBCO tapes”, Physica C Vol. 469 (2009) 1303-1306.
- (6) S. Lee, N. Chikumoto, T. Yokoyama, T. Machi, K. Nakao, and K. Tanabe, “Development of In-Plume Pulsed Laser Deposition of High- I_c GdBCO Films for Coated Conductors”, IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol. 19 No. 3 (2009) 3192-3195.
- (7) A. Ibi, H. Fukushima, R. Kuriki, S. Miyata, K. Takahashi, H. Kobayashi, M. Konishi, T. Watanabe, Y. Yamada, Y. Shiohara, “Development of long YBCO coated conductors by IBAD-PLD method”, Physica C Vol. 445-448 (2006) 525-528.
- (8) A. Ibi, H. Fukushima, Y. Yamada, S. Miyata, R. Kuriki, K. Takahashi and Y Shiohara, “Development of long GdBCO coated conductor using the IBAD/MPMT-PLD method”, Supercond. Sci. Technol. Vol. 19 (2006) 1229-1232
- (9) T. Honjo, Y. Nakamura, R. Teranishi, Y. Tokunaga, H. Fuji, J. Shibata, S. Asada, T. Izumi, Y. Shiohara, Y. Iijima, T. Saitoh, A. Kaneko, K. Murata, “Fabrication and growth mechanism of YBCO coated conductors by TFA-MOD process”, Physica C Vol.392-396 (2003) 873-881
- (10) M. Miura, T. Kato, M. Yoshizumi, Y. Yamada, T. Izumi, Y. Shiohara, T.

- Hirayama, "Enhancement of flux pinning in $Y_{1-x}Sm_xBa_{1.5}Cu_3O_y$ coated conductors with nanoparticles", *Appl. Phys. Express* 1 (2008) 051701
- (11) T. Goto, T. Kimura, "High-speed oxide coating by laser chemical vapor deposition and their nano-structure", *Thin Solid Films* 515 (2006) 46-52.
- (12) S. Oda, H. Zama, S. Yamamoto, "Superconductivity and surface morphology of YBCO thin films prepared by metalorganic chemical vapor deposition", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 5 (1998) 1801-1804
- (13) V. Selvamanickam et al., "Progress in Performance Improvement and New Research Areas for Cost Reduction of 2G HTS Wires" *IEEE T. Appl. Supercond.* Vol. 21 No. 3 (2011) 3049-3054
- (14) S. Miyata, K. Matsuse, A. Ibi, T. Izumi, Y. Shiohara, and T. Goto, *Supercond. Sci. Technol.* 26, 045020 (2013).
- (15) R. Fuger, T. Kiss, M. Inoue, N. Chikumoto, S. Lee, Y. Yamada, T. Izumi, "Current transport properties of $Gd_1Ba_2Cu_3O_{7-8}$ coated conductor deposited by the in-plume PLD reel-to-reel technique", Extended abstract of International Workshop on Coated Conductors for Applications, CCA2009, (2009) D1-P27
- (16) J. Kato, N. Sakai, S. Miyata, M. Konishi, Y. Yamada, N. Chikumoto, K. Nakao, T. Izumi, Y. Shiohara, "Optimization of the diffusion joint process for the Ag layers of YBCO coated conductors" *Physica C* 463-465 (2007) 747-750
- (17) J. Kato, N. Sakai, S. Miyata, A. Ibi, Y. Sutoh, Y. Yamada, N. Chikumoto, K. Nakao, T. Izumi, Y. Shiohara, "Diffusion joint using silver layer of YBCO coated conductors for applications", *Physica C: Superconductivity*, Vol. 468, No.15-20, 15 (2008) 1571-1574
- (18) S. Yamasaki, M. Iwakuma, K. Funaki, J. Kato, T. Chikumoto, K. Tanabe, K. Nakao, T. Izumi, Y. Yamada, Y. Shiohara, T. Saito, "Transport and AC loss properties of the repaired multifilamentary REBCO superconducting tapes" *Physica C: Superconductivity*, in Press.
- (19) T. Maebatake, Y. Miyanaga, K. Yuuki, H. Kai, N. Mori, K. Yamada, R. Teranishi, M. Mukaida, N. Chikumoto, N. Sakai, M. Miura, M. Yoshizumi, Y. Yamada, T. Izumi, "Effects of joining conditions on the structures and properties of joints of REBCO coated conductors", *Physica C* (2009) in press

2.5 超電導電力機器の適用技術標準化

「イットリウム系超電導電力機器技術開発」の事業では、超電導電力機器の中で最も導入時期が早いと考えられる超電導電力ケーブル、超電導電力貯蔵システム、超電導変圧器に絞って研究開発が進められ、かつそれらの応用に特化した超電導線材の開発が行われた。また、超電導技術の国際標準化を積極的に推進してきたわが国にとって、これら開発と並行して超電導電力機器の国際標準化をめざすことは産業競争力強化の観点からも重要である。

そこで、本事業では、超電導線材やこれを適用した超電導電力ケーブル等超電導電力機器に関する標準化に必要な技術動向や標準化ニーズ動向の調査を実施し、国際標準化合意醸成を図りつつ、国際的な規范文書原案につながる規格素案の作成をめざした。これによって、超電導電力機器の早期実用化、市場導入の円滑化、グローバル市場の拡大が促進されるものと考えられる。

超電導関連標準化については、IEC/TC90（超電導）において、超電導関連用語、超電導線材等の試験方法、電流リード試験方法に関する国際規格化が行なわれている。また、超電導線材通則の規格化、機械的特性試験方法の規格化が進行中である。この中で、本事業では、超電導線材、超電導電力ケーブル、SMES 及び超電導変圧器に関する標準化の検討を行っており、これらの超電導関連標準化の状況を図 2.5-1 に示す。

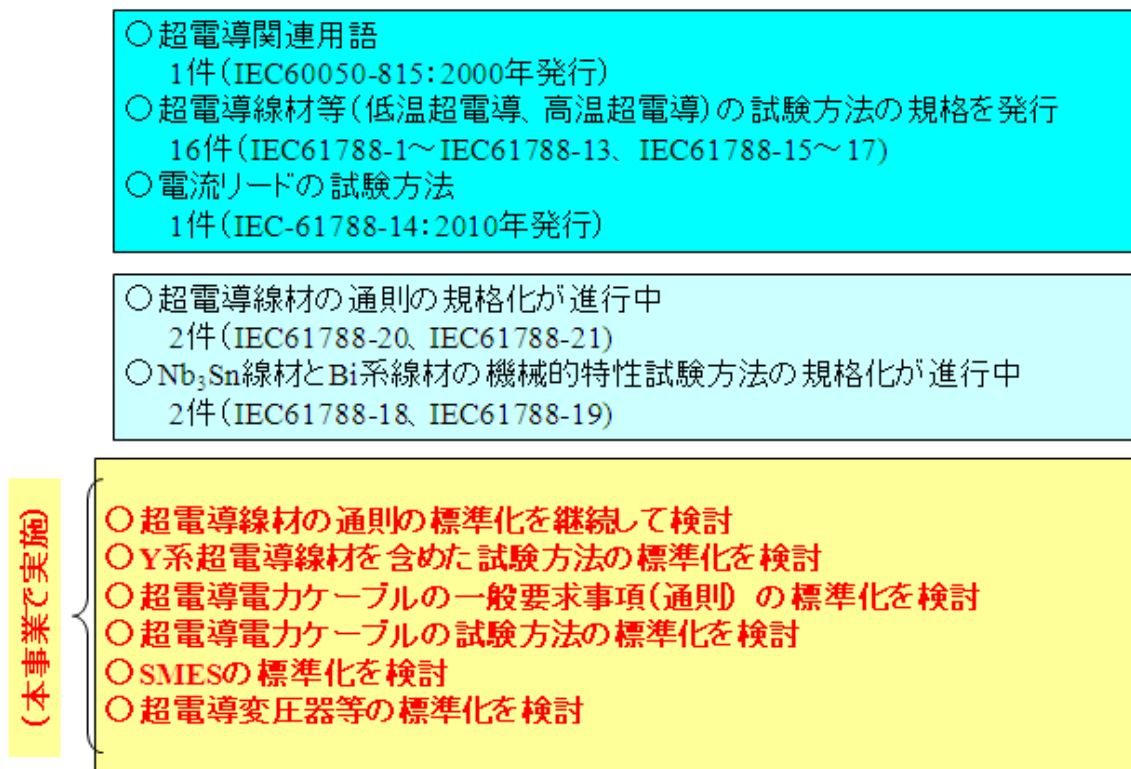


図 2.5-1 超電導関連標準化の状況

超電導機器に関して、標準化対象製品と開発状況、標準化ニーズ、本事業で対象とした標準化の状況及び国際規格の進捗状況を図 2.5-2 に示す。

標準化対象製品	海外の開発状況	国内の開発状況	標準化ニーズ (緊急性)	本事業 での対 象	国際規 格の進 捗状況	関連機関
超電導線材	◎	◎	◎	○	●○	IEC/TC90 (試験方法で発行)
超電導電力ケーブル	◎	◎	◎	○	○	CIGRE TF→CIGRE WG →IEC/TC90+IEC/TC20 →J ahTF
SMES	○	◎	○	○	○	IEC/TC90, IEC/TC21, IEC/TC22
超電導変圧器	○	◎	○	○	○	IEC/TC90, IEC/TC14
超電導限流器	◎	△	△	△		IEC/TC90, IEC/TC17
超電導回転機	◎	△	△	△		IEC/TC90, IEC/TC2
電流リード	○	○	○		●	IEC/TC90, IEC/TC9 (IEC61788-14で発行)
超電導センサー	◎	◎	○		○	IEC/TC90, IEC/TC1, IEC/TC47
	◎ ↑ ○ 活発 △	◎ ↑ ○ 活発 △	◎ ↑ ○ 高い △	○:標準化 △:調査	●:発行 ○:素案	

図 2.5-2 超電導機器の国際規格化の対象及び国際規格の進捗状況

国際標準を作成する場合、国内技術集約から国際規格発行さらに普及という段階を経るが、その流れを図 2.5-1 に示す。本事業では、平成 20 年度～24 年度の 5 年間、調査・国内外技術集約、規格素案作成、国際合意醸成までを超電導電力機器の適用技術標準化として行った。その次の段階では、国際標準化戦略、規格原案作成を行うが、これについては、平成 22 年度～24 年度の 3 年間は超電導線材及び超電導電力ケーブルに関する国際標準開発事業の中で超電導規格開発委員会活動を通じて進めて来た。さらに、その次の段階では、IEC/TC90 規格の審議、IEC 国際規格発行を行うが、この活動は IEC/TC90 (超電導) で並行して行うこととした。この後、各国で国内規格が作成され、普及、市場拡大期を迎える。

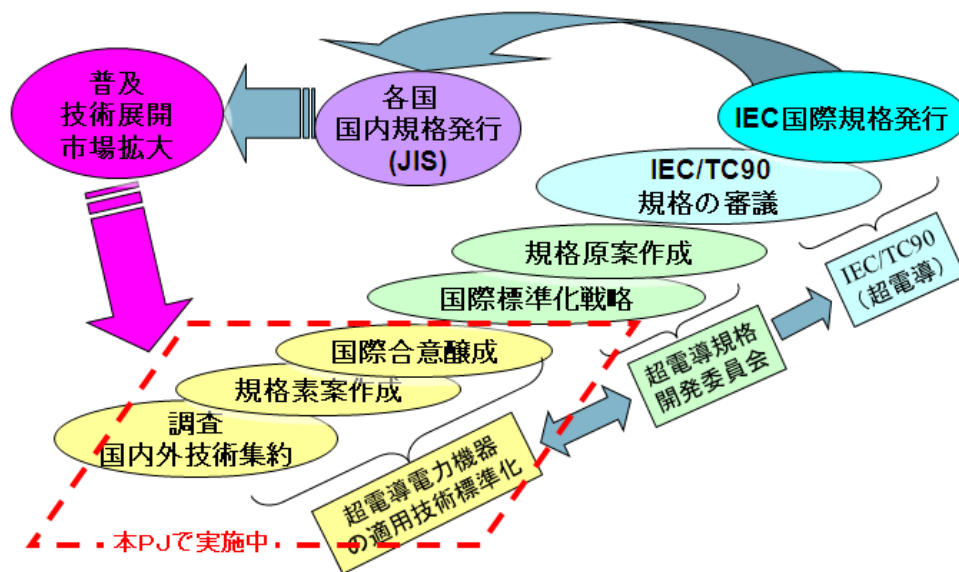


図 2.5-3 超電導電力機器関連の国際標準化（国内技術集約～国際規格発行～普及まで）

以下に超電導線材、超電導電力ケーブル及び超電導電力機器における標準化の成果について報告する。

2.5.1 超電導線材関連技術標準化 (ISTEC、住友電気工業、フジクラ、中部電力、昭和電線ケーブルシステム、古河電気工業、九州大学、東北大学)

本プロジェクトの前期3ヶ年においては、超電導線材の一般要求事項（通則）の作成を目標として、超電導線材の通電特性並びに機械的電磁気特性の試験方法を調査するとともに、Y系超電導線材並びに実用超電導線材の特徴を整理し、規格素案をまとめた。また、この規格素案作成に並行して、米国、欧州、アジア等の現地調査や国際専門家討論会を通じて情報集約並びに国際合意状況の把握を行った。

後期2ヶ年においては、超電導線材の通則及びY系超電導線材の臨界電流測定に関する規格素案を作成した。また、Y系超電導線材の短尺臨界電流測定方法に関する国内ラウンドロビテスト(RRT)を行い、IEC/TC90のWGに技術情報を提供し、国際規格提案に貢献した。

2.5.1-1 超電導線材の通電特性並びに機械的電磁気特性の試験方法の調査

前期3ヶ年

高温超電導線材の通電特性と機械的電磁気特性の試験方法の調査を目的として、九州大学及び東北大学との共同研究等を実施した。その結果、超電導線材の臨界電流試験に係わる電界基準及び電圧端子間距離に関して、線材特性が均一である場合、現行規格の電界基準（ $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ 及び $0.1 \mu\text{V}/\text{cm}$ ）並びに電圧端子距離（30 mmから

100 mm) は妥当であることが分かった。一方、線材の長手方向に亘って局在的な欠陥の分散で不均一の場合には、局在的な欠陥に基づく電圧発生があるにも係わらず電圧端子間距離で平均化されることを考慮した検討が必要と考えられる。また、超電導線材の機械的電磁気特性の試験方法については、応力-歪み特性、 I_c 値の歪み依存性及び n 値の歪み依存性を調査し、統計的なデータ解析を実施した。

(1) 臨界電流試験法についての検討

中間評価時点では、超電導線材の臨界電流の決定にあたっては四端子法が主要な測定法であり、 $10\ \mu\text{V}/\text{m}$ と $100\ \mu\text{V}/\text{m}$ の電界基準あるいは $10^{-14}\ \Omega\text{m}$ と $10^{-13}\ \Omega\text{m}$ の抵抗率基準のいずれかが金属系超電導線材に適用されている (Bi系超電導線材では $100\ \mu\text{V}/\text{m}$ と $500\ \mu\text{V}/\text{m}$ の電界基準あるいは $2\times 10^{-13}\ \Omega\text{m}$ と $10^{-12}\ \Omega\text{m}$ の抵抗率基準)。しかしながら、過去の超電導電力機器の標準化に関するパネル討論会において、Y系超電導線材については金属系超電導線材と違って n 値が低く、電界基準を $20\ \mu\text{V}/\text{m}$ 程度にすべきではないかという意見が提出された。中間評価後、磁界下での臨界電流測定等を含めて、様々な修正要求が出されることが想定されるため、そうした修正の必要性等についての検討が求められるであろう。

そうした背景から、Y系超電導線材の場合に出された見直し提案の妥当性を検討するにあたり、上記の $20\ \mu\text{V}/\text{m}$ という電界基準値が金属系超電導線材の試験で用いられる二つの電界基準値の間にあることから、 $10\ \mu\text{V}/\text{m}$ と $100\ \mu\text{V}/\text{m}$ の電界基準を用いた測定を実行し、電界基準値を変更することの影響を考察した。

試料は幅 $10\ \text{mm}$ 、超電導層厚さ $1.0\ \mu\text{m}$ の IBAD/PLD 法 Y系超電導線材で、測定では長さ $160\ \text{mm}$ の線材を用い、電流端子間距離 $124\ \text{mm}$ 、電圧端子間距離 $104\ \text{mm}$ 、電流端子部の長さ $18\ \text{mm}$ の構造とした。これを液体窒素に浸漬し、電流を通电しながら発生する電圧を測定した。

得られた電流-電界特性を図 2.5.1-1 に示す。この結果、臨界電流値は $10\ \mu\text{V}/\text{m}$ の電界基準を用いた場合に $132\ \text{A}$ 、 $100\ \mu\text{V}/\text{m}$ を用いた場合に $139\ \text{A}$ となる。したがって、両者の違いは 5.2% である。なお、パネル討論会で提案された電界基準は $20\ \mu\text{V}/\text{m}$ であるが、この定義を用いても臨界電流値は $134\ \text{A}$ で、大きな違いはない。本測定試料の n 値は $10\text{--}100\ \mu\text{V}/\text{m}$ の電界域で 42 と大きいからである。

以上のように n 値が 42 の試料の場合、電界基準の値によって得られる臨界電流値の違いはほんのわずかでしかなく、現行の金属系超電導線の二つの基準の違いによっても、最大で 5.2% 程度である。すなわち、この二つの値の間の任意の基準で測定した結果について、これを矩形分布とみなしても対応する相対的標準偏差は 1.5% でしかなく、同一条件の試験法で目標とするラウンドロビン試験の目標 COV の 5% よりもはるかに小さい。なお、長尺の線材の場合に使用条件と合わせるためにさらに低い電界基準を用いることになったとしても、図 2.5.1-1 に見られるようにさらに n 値が増加するため、現行の電界基準で得られる臨界電流値と大きく違わないと判断される。

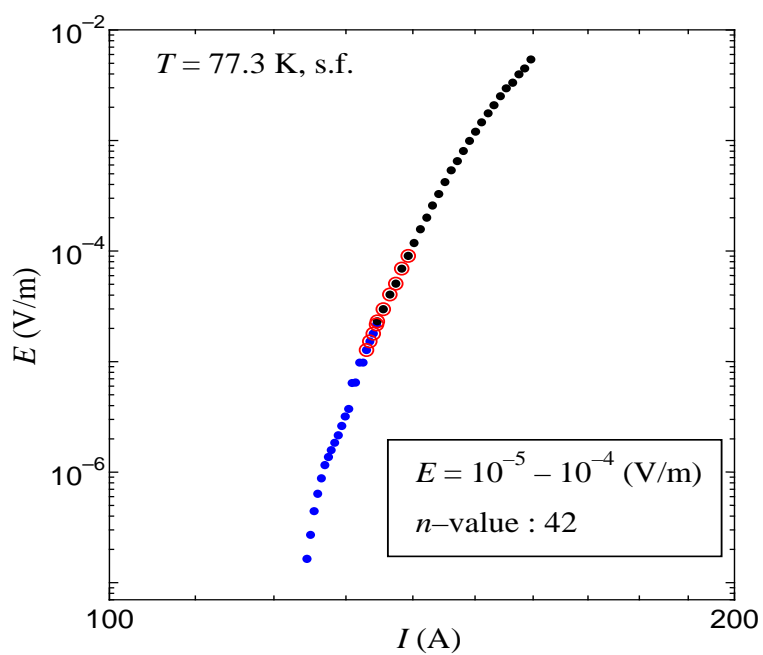


図 2.5.1-1 IBAD/PLD 法 Y 系超電導線材の電流(I)-電界(E)特性
(77 K、自己磁界中)

したがって、Y系超電導線材の場合、別の手法による線材についての調査を必要とするが、電界基準の違いは性能評価において大きな問題ではない可能性が高く、その場合は金属系超電導線材に対して用いられている電界基準で十分である。Y系超電導線材の臨界電流の試験法の標準化をめざすにあたってこの電界基準の変更の必然性はなく、むしろ金属系超電導線材との競合を想定した場合、同一の基準とすることが望ましい。n値の違いによってある程度の違いはありうるが、今後、n値を必要な試験項目としておけば、製作者と使用者の間で大きな齟齬をきたす問題もないと考えられる。

ところで、臨界電流試験で用いられている四端子法では、直接計測は電圧 (V) であり、電界値は空間均一性を仮定した値である点に注意が必要である。Y系超電導線材では、結晶粒界や欠陥により局所的な臨界電流値の不均一性の影響を受ける。したがって、臨界電流値の定義を与える電界基準の議論においては、対象とする試料内の不均一性を支配する空間周波数と、電圧端子間距離を考慮した議論が不可欠である。Y系超電導線材の実用化にあたっては、試料内の長周期なマクロ欠陥等 extrinsic な因子の影響とともに、ピン止め機構や熱擾乱・磁束フラックスクリープ現象等による E - J 特性そのものに対する intrinsic な因子の影響について、さらに検討していく必要がある。前者の影響は特に、長尺線材の全長試験において、後者は磁場中角度依存性や、直流応用を想定した超低電界領域での損失を把握する上において重要になると考えられる。

(2) 機械的電磁気特性試験方法についての検討

超電導線材を超電導電力機器に適用する場合の引張り、曲げ、捻り等の単一あるいは複合的な機械的応力・歪み環境における超電導線材の電磁気特性の試験方法を調査した。

表 2.5.1-1 に示す Bi2223 テープ線材 Type S 及び Type ST を試料とした。各線材は 25 m あり、本年度試験では端部より 1 m の部分から試験片を切り出した。試験片長は 40 mm、試験片数は Type S について 4 片 Type ST について 5 片である。

表 2.5.1-1 Bi2223 線材諸元

	Type S	Type ST
Width [mm]	2.6±0.3	2.7±0.4
Thickness [mm]	0.19±0.03	0.32±0.04
Critical current (I_c) [A] @77 K, s.f.	~70	~70
Lamination	--	Cu-alloy (50 μ m)× 2
Sample length [mm]	40	40
Number of samples	4	5

装置は片桐らによって開発された強磁場極低温応力効果測定装置^[1]を基にして、報告者らによって開発された^[2]。本装置の特徴を下記に挙げる。

超電導マグネットのボア中（直径 52 mm）で、試料に引張り応力を印加しながら臨界電流を測定できる。応力は室温で負荷ロッドの引張り力をロードセルによって測定する。また、試料の伸びは、電流端子間距離をクリップゲージで計測しており、変位を初期長さで除することで歪みの値を得る。試料長 40 mm のうち、電流端子長を除いた有効試料長は約 20 mm である。電圧端子間距離は 10 mm である。

クリップゲージ（歪みゲージ式変換機）の磁場、温度の影響を実験的に較正するための機構を有している。実験毎に較正を行うため、信頼性の高い歪みの値を得られる。本研究では液体窒素温度でのデータが必要との考えから、本装置の試料部分を液体窒素デュワに浸漬した。試料に応力を印加し、一定歪みを保持した状態で、200 A/10 V の定電流源によって 3.3 A/s の掃引速度で電流を線形に供給し、試料に発生する電圧を測定した。

Type S 及び Type ST の臨界電流(I_c)の歪み依存性、 n 値の歪み依存性及び応力-歪み特性を、図 2.5.1-2 に示す。Type S, ST ともに I_c 値の歪み依存性は、ほぼ線形に緩やかに低下している。Type S は 0.4 %, Type ST は 0.6 % 歪みで破断した。 I_c 値の歪み依存性が観測されなかった理由は、破断箇所が電圧端子間の外、電極近傍であったためである。電極近傍に応力が集中して機械的に劣化することはコイルでもしばしば観測されるため、コイル設計の際は注意する必要がある。

対数表示した電流-電界曲線の $100 \mu\text{V/m}$ 近傍の傾きから求めた n 値は、S 及び ST ともに約 20 であり、破断直前まで大きな変化は観られなかった。本研究では装置の制約から電圧端子間距離が 10 mm であるために、 $10 \mu\text{V/m}$ 以下の低電界領域の n 値が評価できなかった。低電界領域の n 値が評価できればフィラメントクラックに起因する n 値低下の情報が得られると考えられる。

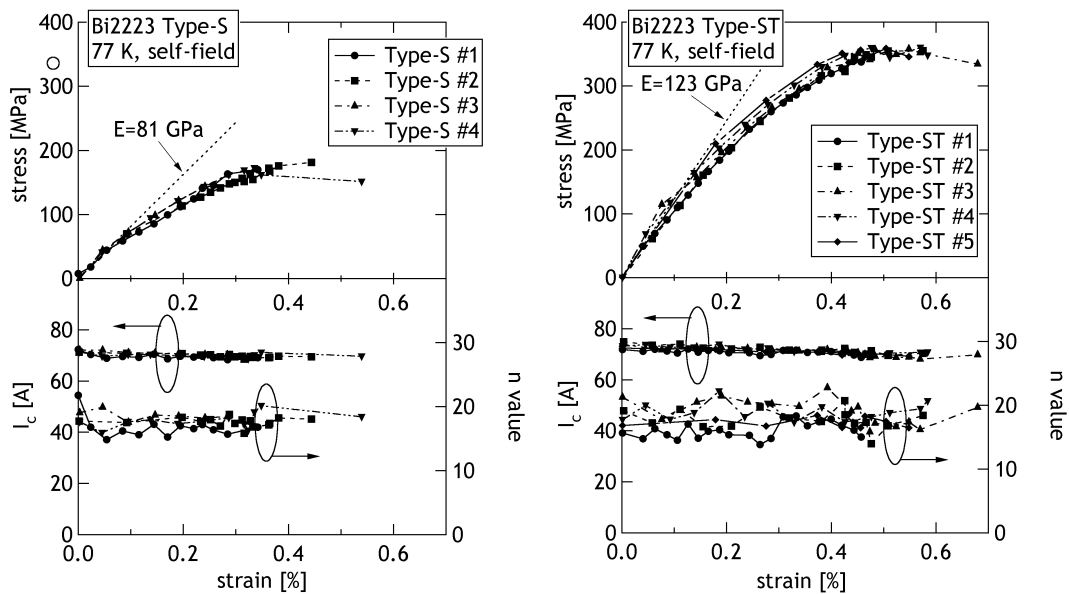


図 2.5.1-2 Type-S(左)及び Type-ST(右)について、応力-歪み特性、 I_c の歪み依存性、 n 値の歪み依存性

応力-歪み曲線からは、低歪み側の勾配よりヤング率が求められ、Type S, ST それぞれ 81 GPa, 123 GPa となる。しかし、Ag 合金マトリクスは低歪みで降伏してしまうために、0.05~0.1 %以上は塑性域であり、ヤング率は意味を持たない。材料の強度の指標として用いられる 0.2 %耐力も、Bi 系超電導線材の場合はそのような大きな歪みでは用いられないので、意味が無い。そこで、0.2 %歪みに対応する塑性流動応力を比較すると、Type S が 120 MPa であるのに対して Type ST は 200 MPa と 1.7 倍に向上している。破断応力もそれぞれ 180 MPa, 360 MPa であり、Cu 合金によるラミネーションの効果が顕著であることが分かった。

Type S #4 と ST #3 がそれぞれ他の試料に比べて大きな歪みまで到達しているが、これは断線直前に完全に降伏してしまったためである。このことは応力-歪み曲線において歪みが増加していても応力が不変か、むしろ低下していることから明らかである。Type-S及びSTの測定値に基づき、零歪みにおける I_c 値[A]及び n 値について単一箇所における測定の不確かさ解析を行った。計算過程はType-Sのみについて示し、表 2.5.1-2 に結果をまとめた。

ここで、Type-S は
 単一箇所における試験数 $n=4$
 単一箇所における平均値 x

$$x(I_c) = (72.16 + 71.24 + 71.96 + 71.31) / n = 71.67 \text{ [A]}$$

$$x(n) = (21.72 + 17.71 + 19.92 + 17.84) / n = 19.02 \text{ [-]}$$

である。また、平均値の実験標準偏差 $s(x)$ は

$$s(x) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

$$s(I_c) = \sqrt{\frac{(72.16 - 71.67)^2 + (71.24 - 71.67)^2 + (71.96 - 71.67)^2 + (71.31 - 71.67)^2}{4-1}}$$

$$= 0.4614$$

$$s(n) = \sqrt{\frac{(21.72 - 19.02)^2 + (17.71 - 19.02)^2 + (19.02 - 19.02)^2 + (17.64 - 19.02)^2}{4-1}}$$

$$= 1.9070$$

である。標準不確かさ $u(x)$ は

$$u = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad , \quad u(I_c) = \frac{s(I_c)}{\sqrt{n}} = 0.2307 \quad , \quad u(n) = \frac{s(n)}{\sqrt{n}} = 0.9535$$

とした。

表 2.5.1-2 データ解析結果一覧

	Type-S	Type-ST
単一箇所における試験数 n	4	5
単一箇所における測定値	$I_c=72.16, 71.24, 71.96, 71.31$ [A] $n=21.72, 17.71, 19.02, 17.64$	$I_c=71.72, 74.82, 73.75, 73.12, 72.35$ [A] $n=15.63, 19.13, 21.24, 17.73, 16.83$
単一箇所における平均値 \bar{x}	$I_{c,average}=71.67$ [A] $n_{average}=19.02$	$I_{c,average}=73.15$ [A] $n_{average}=18.11$
平均値の実験標準偏差 $s(x)$	$s(I_c)=0.4614$ $s(n)=1.9070$	$s(I_c)=1.2078$ $s(n)=2.1662$
標準不確かさ $u(x)$	$u(I_c)=0.2307$ $u(n)=0.9535$	$u(I_c)=0.5401$ $u(n)=0.9688$

これらの知見を Y 系超電導線材にも適用して検討していく必要がある。

後期 2 ヶ年

高温超電導線材の機器応用に際しては、均一な特性を有する長尺線材の開発とともに、機器設計の基礎データとして臨界電流密度 J_c 値の角度依存性の把握が重要となる。しかしながら、テープ状の超電導線材内の二次元面に点在する微小欠陥を、長尺に亘って高い空間分解能で高感度に検出することは極めて困難であり、局所不均一性の発生メカニズムの解明はおろか、そのための観測手法すら十分に確立されていない。また、 J_c 値の角度依存性評価においては、一般に用いられている四端子通電法では、線材性能の向上とともに大きな試験電流の印加を必要とし、特に低温下における測定時の発熱や試料焼損の問題が顕在化している。そこで、本事業では、長尺テープ線材の臨界電流評価法並びに高性能線材の磁場中 J_c 値の磁場印加角度依存性評価法について九州大学との共同研究を実施した。

(3)長尺線材の J_c 値分布評価技術

長尺線材に対する J_c 値評価手法としては、四端子法による通電試験や TapeStar™ といった評価技術が広く用いられている。一方、前者では空間分解能が電圧端子間距離で制限されること、また後者でも線材幅方向の情報を得ることが困難なことから、長尺線材の信頼性向上のために効果的となる局所的な低特性部の検出や、その統計性の把握は不十分な状況となっている。実用レベルの長尺線に適用可能な、高速かつ高感度・高分解能の評価手法の確立は、高温超電導線材の開発、実用化のために喫緊の課題となっている。

本研究では、磁化した超電導線材の磁束分布より面内の磁化電流を非接触・非破壊にて評価可能な走査型ホール素子顕微法を基に、km級の長尺線材の測定が可能なリール式評価装置を開発し、実用的な評価速度で連続移動するテープ面内の二次元臨界電流密度 (J_c) の分布を、高い空間分解能で計測することに世界で初めて成功した。例えば、幅方向に 40 μm 、長手方向に 1,000 μm の分解能で 36 m/h、幅方向に 20 μm 、長手方向に 800 μm の分解能で 3.6 m/h の評価速度を実証した。また、本手法の特徴である幅方向の電流分布の情報を基に、線材の電磁気的な有効幅という新しい性能指標を定義し、長尺線材の材料パラメータとしての有用性を明らかにした。本評価法は、本事業内でも電力ケーブル用素線の評価に適用されている。

(4)磁化測定を用いた J_c 値の磁場中角度依存性評価法

本研究では、四端子法と相補的な測定法として、磁化の角度依存性を用いた J_c 値の磁場印加角度依存性評価について検討した。

通常の磁化測定法においては、外部磁界と平行な磁気モーメント成分 m_L の測定が行われる。一方、Y系線材の様なテープ形状試料では、試料の回転に伴って、磁気モーメント m の長手方向への投影成分も変化することから、 m_L のみによって m の振幅の変化を精度良く捉えることは困難である。本研究では、 m_L に加え、横方

向成分 m_T も同時に測定し、 m をベクトルとして観測し、さらに m の角度依存性より臨界電流モデルを用いて J_c の角度依存性の評価を行った。

磁化測定による結果では、磁化の緩和から見積もられる電界基準は 10^{-8} V/m 程度であり、四端子法による電界基準に比べ約 4 桁小さい。四端子法により $I-V$ 特性を評価したところ、同一電界基準における四端子法の外挿値と磁化測定の結果は定量的に良い一致を示した。すなわち、磁化法は、電界基準を考慮することで四端子法と相補的に適用することが可能であり、特に、線材性能の向上とともに、通電試験が困難となる低温の高 I_c 領域において、その有用性は極めて大きいことを示した。

2.5.1-2 超電導線材の電力機器側からの要求事項の検討

超電導線材は、各種超電導電力機器並びに超電導マグネットに適用される。したがって、各用途分野からの要請に適合する用語の定義及び試験方法の整備が必要である。ここでは、各種超電導電力機器並びに超電導マグネットからの要件特性項目を調査・抽出するとともに、超電導線材関連規格の素案作成に反映した。

具体的には、次の技術資料に基づく調査を実施し、表 2.5.1-3 の結果を得た。

- ・超電導応用基盤技術研究開発－標準化調査、平成 20 年 3 月
- ・平成 16 年新発電システム等調査研究（超電導電力機器技術基盤の標準化に関する調査研究）、平成 17 年 3 月
- ・電気学会技術報告書 第 946 号－超電導電力機器の仕様と特性－、2003 年 11 月

表 2.5.1-3 超電導電力機器側からの超電導線材の試験項目要件調査

電力機器名	機器システム性能項目 (機器仕様)	機器・コイル製作側への要求項目	超電導線への試験項目要件
超電導電力ケーブル	(交流超電導電力ケーブルの場合)	寸法設計 ケーブル断面構成寸法 ケーブル最大外寸法 ケーブル条長 中間・終端接続寸法	寸法設計 超電導線最外寸法 超電導線条長
	(同軸型ケーブル)		
	相数		
	周波数		
	定格電圧		
	交流耐電圧	電磁気設計	電磁気設計
	インパルス耐電圧	ケーブル心数	超電導線臨界温度
	短絡・地絡電流	ケーブル定常・過負荷電流密度	超電導線臨界電流
	布設条件における静電容量	公称電圧	超電導線の臨界電流温度依存性
	耐圧構造及び耐圧力	定常最高電圧	超電導線の過負荷電流特性
ケーブルの断面構成の詳細	超電導線/常電導線接続抵抗	超電導線の長期通電特性	

	電気絶縁厚さ、最大電位傾角	出荷耐電圧	
	運転条件における最大定格電流	シールド臨界電流	
	運転温度における有効抵抗	熱設計	熱設計
	布設条件におけるインダクタンス	定常・過負荷運転温度範囲	超電導線交流損失温度依存性
	冷媒温度	定常（交流損失）・過負荷熱損失	超電導線移直上抵抗
		断熱方式	超電導線熱（収縮・比熱）特性
			超電導線の比熱・熱伝導率
		機械設計	機械設計
		ケーブル曲げ特性	超電導線応力／歪み特性
		ケーブル引張強度	超電導線引張強度
		ケーブル冷却重量	超電導線の疲労・繰返曲げ特性
		ケーブル冷却特性	超電導線の単位重量
		冷凍機保守間隔・保守時間	超電導線の熱サイクル特性
SMES	（100 MW 級 SMES の場合）	寸法設計	寸法設計
	（成形撚線）	コイル形状・寸法	超電導線最外寸法
	（テープ積層集合導体）	SMES デバイス最外寸法	超電導線条長
	定格交流電圧	電磁気設計	電磁気設計
	定格交流電流	定格直流電圧	超電導線の I_c - B - T 特性
	定格周波数	定格直流電流	超電導線の総電流密度
	相数、線数	定格貯蔵容量	
	運転温度	利用可能容量	
	導入・設置場所	最大磁界	
	冷却方式		
		熱設計	熱設計
	変換装置定格	動作時間	超電導線交流損失
	直流遮断機定格	最大許容温度	MQE
	保護装置定格		安定性
	クエンチ検出定格	機械設計	機械設計
	真空断熱容器定格	最大圧力	超電導線応力／歪み特性
	冷却装置定格	コイル冷却重量	超電導線引張強度
	監視制御装置定格	コイル冷却特性	超電導線の疲労・繰返曲げ特性
		冷凍機保守間隔・保守時間	超電導線の単位重量
		超電導線の熱サイクル特性	
超電導変圧器	（2 MW 級超電導変圧器の場合）	寸法設計	寸法設計

	(スライプテープ積層集合導体)	コイル最外寸法	超電導線最外寸法
		変圧器最外寸法	超電導線条長
	設置場所	電磁気設計	電磁気設計
	相数	定格一次/二次電圧	超電導線臨界温度
	定格容量	定格一次/二次電流	超電導線臨界電流
	定格電圧	ターン間、層間電圧	
	定格周波数		
	冷媒温度上昇	熱設計	熱設計
	系統短絡容量	負荷損失	超電導線交流損失
	短絡%インピーダンス	無負荷損失	
	負荷損・無負荷損		
	定格力率	機械設計	機械設計
	騒音	定格冷媒温度	超電導線応力/歪み特性
	重量	定格冷媒圧力	超電導線引張強度
		コイル冷却重量	超電導線の疲労・繰返曲げ特性
		コイル冷却特性	超電導線の単位重量
		冷凍機保守間隔・保守時間	超電導線の熱サイクル特性
超電導限流器	(SN 転移型及び整流器型の場合)	寸法設計	寸法設計
	(テープ積層集合導体)	限流素子最外寸法	超電導線最外寸法
		限流器最外寸法	超電導線条長
	定格電圧	電磁気設計	電磁気設計
	定格電流	超電導状態転移温度	超電導線臨界温度
	商用周波数耐電圧	定常定格電流	超電導線臨界電流
	雷インパルス	限流時電流電圧	超電導転移直上抵抗
	開閉インパルス耐電圧	超電導転移直上抵抗	
	定格周波数		
	効率	熱設計	熱設計
	限流動作・不動作責務	超電導転移直上抵抗	超電導転移直上抵抗
	限流電流	冷却保持時間	超電導線の常電導伝搬速度
	限流時間	定格冷媒温度	超電導線熱特性
	限流動作回数	許容温度条件	
	定常・最終限流インピーダンス		
	限流動作開始電流	機械設計	機械設計
	過渡回復電圧	騒音・耐震	超電導線応力/歪み特性
	短時間耐電流	定格冷媒圧力	超電導線引張強度
		初期冷凍時間	超電導線の疲労・繰返曲げ特性
		冷凍機復帰時間	超電導線の単位重量
		コイル冷却重量	超電導線の熱サイクル特性
		コイル冷却特性	
	冷凍機保守間隔・保守時間		

超電導回転機	(超電導発電機、電動機等)	寸法設計	超電導線寸法
	(成形撚線、テープ積層集合導体)	電磁気設計	超電導線 I_c -T特性
		界磁コイル設計	超電導線の総電流密度
	動作電流	電機子コイル設計	超電導線の磁界中最大電流変化率
	動作電圧	熱設計	超電導線の交流損失特性
	運転温度	機械設計	超電導線の単位重量
超電導直流器	(高磁界マグネット、NMR、MRI、加速器等)	寸法設計	超電導線寸法
	(丸線、平角線、テープ、成形撚線)	電磁気設計	超電導線 I_c -B-T特性
		ソレノイドコイル設計	超電導線応力/歪み特性
	動作電流	パンケーキコイル設計	超電導線引張強度
	動作磁界	熱設計	超電導線の疲労・繰返曲げ特性
	運転温度	機械設計	超電導線の単位重量
		含浸コイル設計	

上記の検討結果を後述する超電導線材の通則素案へ反映させた。具体的な項目としては、不可逆磁界評価試験、 n 値評価試験、臨界電流分布評価試験、工業的臨界電流密度評価試験、フラックスジャンプ評価試験、交流損失評価試験、形態検査、超電導線材固有寸法評価（丸線、平角線、テープ）試験、引張・圧縮・曲げ試験、可撓性試験、超電導線材固有剥離試験、疲労試験、摩耗試験、耐溶剤試験、超電導線材固有耐冷媒試験、ハンダ付け試験、融着性試験、電気抵抗試験、残留抵抗比試験、接続抵抗試験、絶縁破壊試験、熱的パラメータ試験、熱サイクル試験及び熱衝撃試験をあげた。しかし、臨界電流試験における電界基準の選定、高温超電導線材の磁界中特性試験、蒸発法による交流損失試験、可逆歪み特性試験、過電流特性試験、最小クエンチエネルギー（MQE）試験、クエンチ伝搬試験及び超電導線材の信頼性に関する寿命試験並びに加速試験に関しては、本プロジェクト終了後、高温超電導線材及び各超電導機器の技術進展を調査し反映していくことが必要である。

2.5.1-3 超電導線材の規格素案の作成

2008年のIEC/TC90 ドイツ・ベルリン会議において、超電導線材関連のアドホックグループ設置の基本合意が得られ、超電導線材の国際標準化に向けた検討を行っている。IEC/TC90 アドホックグループ 3 の国内外のメンバー(ad-hoc3)からのコメントを反映させ、超電導線材の規格通則素案を作成した。

(1) 国内外からのコメントに対する検討

スコープにおいて、超電導線材のうち、低温超電導線材はすでに商品化済であるため高温超電導線材に限定してはどうか（ドイツ）に関して、低温超電導線材と高

温超電導線材を網羅した超電導線材として合意醸成に努め以下の合意が得られた。超電導素線の英語訳 strand か monolithic strand に関して、strand が選定されることとなった。

出荷表示 (Shipping label) には、一般に製品を識別するためのラベル (Label) とその製品の性能等の技術情報 (Technical reports) の表記がある。ラベルに関しては、現行規格及び実態調査を反映し、簡潔な表記にした。例えば、製品名または製品コード、超電導線材の長さ、超電導線材の重さ、出荷日及び製造者名を製品に表記することにした。技術情報に関しては、当事者間で協議事項とし、随意とした。Label 表記に関して、米国からこのままの表記では vendor 仕様を利用者に押しつけることが危惧される旨の意見が寄せられ、Label 項目から臨界電流及び絶縁層の 2 項を削除した一般的な表示項目に変更した対案やその根拠を提示することによって米国の合意醸成に努め、後述する超電導線材の規格通則素案を作成した。

米国から超電導に関する幅広い用語説明 (lexicon) に関して、購入仕様の交渉に有用と思われる反面、超電導線材の構造の制限、革新的製品の市場導入制限、規定されていないより良い製品の制限、自由な超電導製品利用に対する一義的な IEC 規格の拘束等が危惧されるとの指摘がなされた。この指摘に対して、現行 Draft 並びに附属書について超電導に関する現行規格を前提とした引用、工業製品として要求されるべき事項の峻別、工業製品としての新規試験項目の推奨等の視点で精査した対案を提示して合意醸成に努め、後述する超電導線材の規格通則素案に反映した。超電導線材の一般的特徴、超電導特性、超電導線材の構成と形態及び工業材料としての一般的特性試験はいずれも参考事項とした。

米国から、このままアドホックグループ 3 を発展させるよりも、用語説明 (lexicon) の有用性もあるので WG1 (超電導関連用語) に検討依頼するような方向転換を期待するとの提案がなされたが、WG1 における高温超電導体に係わる用語追加等メンテナンスの進捗状況を説明するとともに、「超電導関連用語」と「超電導線材通則」の違いを丁寧に説明し、「超電導線材通則」に対する理解を求めの方針を進めた。

ドイツからの「超電導線材通則」提案の取り下げ動議並びに米国からの現行 Draft の見直し提案を重く受け止め、「超電導線材通則」の提案者であり、かつ幹事国である日本としては、ドイツ及び米国 (L.Cooley) に対して誠意を持って対応し、標準化に係わるいろいろな危惧を払拭することに努めるべきとの確認がなされた。

(2) 超電導線材の規格通則素案の概要

国内外からのコメントを反映して超電導線材の規格通則素案を作成した。その概要を表 2.5.1-4 に示す。

表 2.5.1-4 「超電導線材の通則」の規格素案の概要

目次	概要
1.序文	
2.適用範囲	超電導線材の一般的共通事項について規定、集合導体、編組導体、より線導体は含まれない
3.引用規格	関連する国際規格のリストを記載
4.用語	IEC 61788 と IEC 60050-815 及び ISO 6892 で与えられるもの
5.定義	附属書 A の中で概説された特性を規定
5.1 超電導に関する特性	<ul style="list-style-type: none"> i) 臨界温度; ii) 臨界磁場; iii) 臨界電流; iv) 安定化; v) 交流損失; vi) 機械的・電磁気学的特性; それらの詳細な記述は附属書 B
5.2 超電導線材の構成	<ul style="list-style-type: none"> i) 線材を構築する部材 <ul style="list-style-type: none"> a. 超電導体; b. マトリックス; c. 安定化材料; d. 補強材 e. 高抵抗材料 f. 絶縁材料 ii) 線材の断面形状 iii) SC 線の応用 それらの項目別の記述は附属書 C
5.3 工業原料としての一般的な特性	項目別の記述は附属書 D
6.出荷書類	
6.1 表示	<ul style="list-style-type: none"> i) 超電導線材の名称あるいはコード名 ii) 超電導線材の長さ iii) 超電導線材の重量 iv) 出荷の日付 v) 製造者名
6.2 技術報告書	上述した 5 節の項目が商取引に必要な時、それらの項目の試験報告書を含めることが可能

<p>附属書 A (参考)</p> <p>超電導線材の一般的な特徴</p> <p>A.1 超電導線材の特性</p> <p>A.2 超電導線材の工学的観点</p>	<p>以下の項目毎に超電導線材の特徴を説明</p> <p>i) 臨界温度;</p> <p>ii) 臨界磁場及び不可逆磁場</p> <p>iii) 臨界電流及び n 値</p> <p>iv) 安定化;</p> <p>v) 交流損失;</p> <p>vi) 機械的・電磁気的特性</p> <p>i) 線材の構成材料</p> <p>a. 超電導材料:</p> <p>b. マトリクス材:</p> <p>c. 安定化材料</p> <p>d. 補強材:</p> <p>ii) 線材の構造</p> <p>iii) 応用別の超電導線材の分類:</p> <p>iv) 統計特徴:</p>
<p>附属書 B (参考)</p> <p>超電導に関連する特性</p>	<p>以下の特性の測定原理、試験方法、その標準規格について記載</p> <p>(1)臨界温度</p> <p>(2)臨界磁場及び不可磁場</p> <p>(3)臨界電流及び n 値</p> <p>(4)安定化</p> <p>(5)交流損失</p> <p>(6)機械的・電磁気的特性</p> <p>(7)信頼度</p>
<p>附属書 C (参考)</p> <p>超電導線材の構成</p>	<p>要素材料、断面形状、応用に分類して記載</p> <p>C.1 線材の構成要素 (超電導材料: 金属系、Bi 系、レアアース系、補足材料: マトリクス材、安定化材、補強材、高抵抗材、絶縁材)</p> <p>C.2 線材の断面形状 (丸、矩形、膜) に分類</p> <p>C.3 超電導線材の応用 (直流、交流、パルス)</p>
<p>附属書 D (参考)</p> <p>工業原料としての一般的</p>	<p>以下の項目について測定原理と測定方法と標準規格について記載</p>

な特性	<p>(1)検査 表面検査</p> <p>(2)形態 直径、ツイストピッチ、幅と厚さ、銅(銀)比、基板と安定化材の厚さ</p> <p>(3)機械的特性 引張特性、圧縮特性、曲げ特性、可撓性、剥がれ試験、摩擦抵抗、疲労特性</p> <p>(4) 化学的性質 溶解性、冷却耐性、ハンダ性、付着性</p> <p>(5)電気特性 電気抵抗、残留抵抗、接触抵抗、絶縁破壊、均一性試験</p> <p>(6)熱的特性 比熱、熱伝導率、熱膨張、熱衝撃、熱サイクル</p> <p>(7)信頼性 表面検査、全長抵抗の均一性検査</p>
-----	---

その後、平成 22 年 8 月に米国の Washington DC で開催されたパネル討論会における議論の末、本来の International Standard の精神は共通化した知識・技術を open にして市場を活性化させることであり、この精神の基で統一的かつ open な standard が望まれるという点が理解され、改めて関係する国が集まって議論することが約束された。平成 22 年 10 月に米国の Seattle で IEC/TC90 会議が開催される直前に Berkely でこの議論が行なわれ、アドホックグループ 3 がまとめた超電導線材の通則が見直され、大筋で合意が得られたことは劇的であるといえる。このとき、これまであまり問題とされていなかった超電導用語の不備が指摘されたが、そうしたことも意識の高まりを如実に示すものであるといえる。そしてこの流れを受け、Seattle での IEC/TC90 会議では超電導線材の通則の作成が賛成多数で NP(New Work Item Proposal)として採択され WG13 の設置が承認された。その後、一年半の審議の過程の中で、米国の Berkeley での会議の際に出された提案により、従来の通則を一般的な分類と特性の試験法の二本立てとした実用超電導線材の通則として検討されており、最初の CD が発行された。

(3)国内における検討

上記の国際 WG13 の活動に対応して、超電導線材小委員会において国内における意見のとりまとめを行った。主にラベル、実用超電導線材の範囲、超電導線材の特性、Reference test method の拡張等について検討を行うとともに、原案中の用

語について、委員が分担して用語の英文解説を作成した。実用超電導線材の通則については、平成 23 年度作成した規格素案に用語の定義等を加えて平成 24 年度版規格素案（表 2.5.1-5）及び（表 2.5.1-6）を作成し、IEC/TC90 の WG13 に情報を提供した。

(4)西安会議以降

平成 24 年 8 月に中国西安において IEC/TC90 WG13 の会議「実用超電導線材の通則」が開催された。

- ・ IEC 61788-20 (categories of SC wires) Ed.1 及び IEC 61788-21 (test methods) Ed.1 に関して各国からのコメントと、それを基に修正したドラフトが紹介された。
- ・本標準の考え方の基礎について、学術的な記述を抑えて、より工学的及び商取引に有用な記述にすることが求められ、現在の CD を、第 2CD として再構成することになった。
- ・CDV の提出を 1 年遅らせて 2014 年 4 月にすることが提案され、TC90 の本会議において承認された。

平成 24 年 10 月に米国オレゴン国際会議場において IEC/TC90 WG13 の会議「実用超電導線材の通則」が開催され、次のような審議が行われた。

- ・本会議にコンビナーにより第 2 次 CD が説明され、それを基に討議が行われた。
- ・文章“Discussion of Lexicon and Technical Report”を基に本 CD との関連について検討された。技術報告書としての取り扱いが難しいこと、用語集とは目的が異なることが明確にされた。
- ・原則として国際標準の本文は normative な内容で構成されるべきであり、従って必要ではあるが informative な記述は annex(informative)に付託されることになった。本第 2 次 CD もこのような原則に基づいて再構成することになった。

(5)修正案の作成

国際 WG13 及び国内での検討結果を踏まえて、CD の修正案 61788-20 wire CD2 (Jan 2, 2013)が作成され、国内委員及び国際 TC90-WG13 委員に 1 月中旬に書類が送付され、3 月初旬をめどに意見集約が行なわれた。

表 2.5.1-5 「超電導線材の通則」の規格素案の概要
超電導 Part 1：実用超電導線材 一般的特性とガイダンス

目次	概要
序文	
適用範囲	超電導線材の一般的事項について規定。単芯線、多芯線、複合線、多層テープ、コート導体を対象。集合導体は含まれない。

引用規格	IEC 60050-815 (超電導用語)
品質保証	
4. 用語と定義 4.1 バッファ層 4.2 キャップ層 4.3 金属系超電導体 4.4 マグネシウムホウ素超電導体 4.5 ビスマス系酸化物超電導体 4.6 希土類系酸化物超電導体 4.7 絶縁破壊	IEC 60050-815 の定義に加え左記を定義
5. 一般 5.1 超電導材料 5.2 構成材料 5.2.1 マトリクス材料 5.2.2 安定化材 5.2.3 補強材 5.2.4 絶縁	超電導線材は、超電導材料と付加的な機能材料からなる。超電導材料と機能材料の役割について説明
6. 実用超電導線材の分類 6.1 Nb-Ti グループ 6.2 Nb ₃ Sn グループ 6.3 MgB ₂ グループ 6.4 BSCCO グループ 6.5 REBCO グループ	実用超電導線材を左記の 5 グループに分類し、線材の構造を記載し、超電導体、マトリクス、安定化材、補強材、絶縁等の材料について記載
7. 出荷書類	出荷製品に明示すべき情報について記載 超電導線材のラベル (ノルマティブ) 出荷製品に添付するラベルには次を含むこと ・「超電導体」そして/または超電導体の名称 そして/または商標のような製品情報 ・製造者 ・生産国 ・ロット番号、シリアル番号等のトレーサビリティを保証する情報 技術報告書 (インフォーマティブ) 商取引において必要な場合、Part 2 の 6 項に

	ある試験報告書そして／または製造情報
--	--------------------

表 2.5.1-6 「超電導線材の通則」の規格素案の概要
超電導 Part 2：実用超電導線材の試験方法 一般とガイダンス

目次	概要
序文	
適用範囲	実用超電導線材に関連した試験方法、試験方法の原理、用語と定義、特性、工学的概念等について扱う。
引用規格	関連する国際規格のリストを記載
用語と定義 不可逆性磁場 電流不安定性	IEC 60050-815 の定義に加え左記を定義
4. 一般	商業的な材料として応用される低温超電導、高温超電導からなる実用超電導線材の定義について世界的なコンセンサスを得ることが重要
5. 特性 5.1 臨界温度 5.2 臨界磁場と不可逆磁場 5.3 臨界電流と n 値 5.4 安定性 5.5 交流損失 5.6 歪み依存超電導特性 5.7 特性の均一性	超電導線材が使用されるときに生じる現象に関連して特性について説明
6. 測定と試験の分類 (ノルマティブ)	次の二つに分類 a) 超電導線材の運転に関連した性能 例え ば運転温度までの冷却中、連続運転中、故障 対応中 b) 工学的な性能 例え ば製造中と装置設置 中 重要な試験法は、次章の参照試験方法(RTM) として確立されてきた

<p>7. 参照試験方法(RTM)</p> <p>7.1 超電導線材の運転に関連した性能</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 臨界電流 ・ 交流損失 ・ 臨界温度 <p>7.2 工学的な性能</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ マトリクス比 ・ 残留抵抗比 ・ 機械的特性 	<p>左記の試験方法を使用することとして定めており、対応する IEC 規格について記載</p>
--	---

2.5.1-4 超電導線材の試験方法の規格素案の作成

2008 年の IEC/TC90 ドイツ・ベルリン会議において、超電導線材関連のアドホックグループ設置の基本合意が得られ、超電導線材の試験方法についても国際標準化に向けた検討を行った。

超電導線材の試験方法としては、寸法試験、機械的特性試験、化学的特性試験、電磁気的特性試験、熱的特性試験及び信頼性試験に大別した。表 2.5.1-7 に超電導線材の試験方法の規格素案の概要を示す。

表 2.5.1-7 「超電導線材の試験方法」の規格素案の概要

目次	概要
まえがき	
序文	共通する試験方法を規格化の対象
1.適用範囲	高次に加工する超電導導体及び／または超電導機器に用いる超電導線材の試験方法について規定
2.引用規格	引用規格リストを記載
3.用語及び定義	主な用語及び定義は、IEC 60050-815 による。
4.一般要求事項	全ての試験は、個々の試験方法に規定された条件の範囲で実施、試験環境、試験準備作業等
5.外観検査	たば巻き、ドラム巻き、ボビン巻きまたはリール巻きの状態で実施
6.寸法検査	一般寸法試験法、ツイストピッチ長試験法、テープ状超電導線材の寸法試験法等について記述

7.機械的特性試験	室温引張試験、圧縮試験、曲げ試験、可撓性試験、剥離試験等について記載
8.化学的特性試験	耐溶剤試験、耐冷媒試験、ハンダ付け性能試験、融着性試験等について記載
9.電磁気的特性試験	臨界温度試験、臨界磁界試験、不可逆磁界試験、室温電気抵抗試験、残留抵抗比試験、臨界電流試験、n 値試験について記載
10.熱的特性試験	比熱測定試験、熱伝導率測定試験、熱膨張率測定試験、熱サイクル試験、熱衝撃試験について記載
11.信頼性試験	長手方向の故障間隔評価、渦流探傷試験、疲労試験について記載
附属書 A (参考)	n 値試験方法について説明
附属書 B (参考)	不可逆磁界試験方法について説明

今後の国際合意醸成の状況を反映し、試験方法は見直していくことになる。特に臨界電流試験における電界基準の選定、高温超電導線材の磁界中特性試験、蒸発法による交流損失試験、可逆歪み特性試験、過電流特性試験、最小クエンチエネルギー (MQE) 試験、クエンチ伝搬試験、超電導線材の信頼性に関する寿命試験並びに加速試験等に関しては、さらに技術情報を収集する必要がある。

高温超電導線材の臨界電流試験に関して、臨界電流基準の見直し及び臨界電流の磁界依存性の系統的な調査も必要である。また Y 系超電導線材の臨界電流試験に係わる電界基準及び電圧端子間距離に関して、これまでの考察から次の知見が得られている。

- ① Y 系超電導線材の長手方向に亘って材料特性が均一である場合、現行規格の電界基準 ($1 \mu\text{V}/\text{cm}$ 及び $0.1 \mu\text{V}/\text{cm}$) 並びに電圧端子距離 (30 mm から 100 mm) は妥当である。
- ② ただし、外部磁界を印加する場合、測定空間や計測器の精度の制約がある。
- ③ Y系超電導線材の長手方向に亘って局在的な欠陥が分散する等材料特性が不均一である場合、局在的な欠陥に基づく電圧発生があるにもかかわらず電圧端子間距離で平均化されて顕在化しない恐れがある。したがって、このような場合、現行規格に準拠した試験方法と連続ホール素子法 (Tapestar™)、磁気工学イメージング(MOI)等による非破壊全長検査の併用が肝要である。
- ④ Y 系超電導線材の長手方向に亘って局在的な欠陥が分散する等、材料特性が不均一である場合、健全な線材を用いた補修が可能である。その場合、線材の臨界電流試験に際し接触部面積 (接続長さ) に依存する抵抗に起因する電圧発生があることを考慮する必要がある。

2.5.1-5 Y系短尺超電導線材臨界電流試験法に関する規格素案の作成

ビスマス系(Bi)線材の臨界電流測定法については、すでに国際規格(IEC 61788-3)が発行されているため、これに沿った形で、Y系線材の臨界電流測定法に関する規格素案を作成した。Bi系線材とY系線材はともに酸化物高温超電導体を用いた線材であり、共通する点も多いが、一方で、Bi系線材が銀シース線材であるのに対して、Y系線材が金属基板上にY系超電導体薄膜を成長させた積層構造材であること等、相違点もある。

Bi系超電導線材の臨界電流試験方法(IEC 61788-3)をベースにY系超電導線材の臨界電流試験方法の規格化を検討した。この検討結果を表2.5.1-8に示す。

IEC 61788-3においては、臨界電流の測定法としては四端子法に限定している。この点は当規格素案においても踏襲した。またIEC 61788-3においては、臨界電流値を定義するための基準として、電界と抵抗値の二通りを採用しているが、下記のアンケート調査の結果からも、実際には電界を基準とする場合が殆どであるので、電界を基準とする方式のみを採用した。さらに、IEC 61788-3においては、磁場中の測定や、幅広い温度範囲での測定を想定しているが、当規格素案においては、液体窒素中の自己磁場中の測定に限定することとした。この点については、平成25年度以降、実際に国際規格案を作成する段階で議論が必要である。

IEC 61788-3においては、測定値の不確かさの取り扱いについては触れていないが、プロジェクト終了後作成されるIEC規格には不確かさの記述が必須である。そのために、Y系超電導短尺線材臨界電流測定法に関する試験所間比較を行った。ただし、時間的その他の制約のために参加機関は当プロジェクトに参画しているグループに限った。また使用する線材もPLD法によって作製したGdBCO線材のみとした。そのため、今回の試験所間比較はあくまで予備的なものである。試験所間比較を行うにあたっては事前に各グループに測定法についてのアンケート調査を行った。試験所間比較を実施した後、その結果について、不確かさの統計的な解析を行った。その詳細については別項に示す通りである。ただし、その結果は当規格素案には、まだ反映されていない。来年度以降国際的な試験所間比較を行った上で、その結果を踏まえて、不確かさに関する記述を含む最終的な規格素案が作成されるべきものとする。

表 2.5.1-8 Y系超電導線材の臨界電流試験方法の規格化検討

ページ	節	パラグラフ	IEC 61788-3 の内容	Y系超電導線材規格に焼き直す際の問題点	検討結果
6	1	2	$I_c < 500A, n > 5$	適当か	このまま
6	1	2	liquid He	必要か	不要
8	5	2	current transfer correction	どうするか	実験または数値解析
9	6.1	4	When a conductive material is used ……	ホルダーに導体を使うことがあるか	不要
9	7.2	2	total cross-sectional area	どうするか	抵抗値を読取基準とする方式は不要
9	7.2	3	shall be soldered	ハンダ付け以外の方法は？	ハンダ付けに限らない、押付けでも可
10	7.2	7	L3 shall be larger when current transfer voltage cannot be neglected.	具体的には？	とりあえずこのまま
10	7.2	9	90 ± 9	数字の根拠は？	不確かさと関連して検討
10	7.2	10	$\pm 7, \pm 3$	数字の根拠は？	不確かさと関連して検討
11	8	5	30s	数字の根拠は？長過ぎないか	測定精度との兼ね合い、今後の課題
12	9.2	2	To convert the pressure observed ……	液体窒素の場合も圧力で温度を測定する？	今後の課題
12	9.4	1	if it allows additional determinations of critical current with a precision of 2%.	意味？	不確かさと関連して検討
12	10.1	1	the total cross-sectional area S	適当か	不要
12	10.1	3	When it is difficult to measure ……	どういう状況が想定されているか	二つの基準電圧で I_c を定義する方式は維持、読取基準の値については今後検討

2.5.1-6 Y系短尺線材の四端子法による臨界電流測定の実験所間比較結果

(1)はじめに

本試験所間比較には NEDO 事業である「リチウム系超電導電力機器技術開発」(本プロジェクト)に参加している 10 の研究グループが参加した。事前に各グループで通常採用している測定法についてアンケートを行った。アンケート結果を表 2.5.1-9 に示す。

表 2.5.1-9 アンケート結果

	Lab 1	Lab 2	Lab 3	Lab 4	Lab 5	Lab 6	Lab 7	Lab 8	Lab 9	Lab 10	
最大電流(A)	1800	900	800	500	4500	2400	320	200	500	200	
電流源	菊水PVD10-600x3台	TAKASAGO FX010-900	BX40-400x2台	アジレント6681A	IDX IPP-1015003	高砂H010-2400	高砂ZX-1600LAx2台(UX010-200-200A)	高砂GP08-200R	高砂GP08-500R	高砂GP08-200R	
電流値決定法	シャント抵抗使用	シャント抵抗使用	シャント抵抗使用	シャント抵抗使用	シャント抵抗使用	シャント抵抗使用	シャント抵抗使用	シャント抵抗使用	シャント抵抗使用	シャント抵抗使用	
電圧計	Keithley 2182	Keithley 2182	Keithley 2182A	Keithley2001	HP 34401A	横河TYPE3086X-Y RECORDER	Keithley 2182A Keithley 2001	Agilent 34970A	Keithley2000	Agilent 34420A Keithley 2182	
sampling rate	可変	12~18	120	設定による	10	アナログ測定	10	0.7	1	100	
電流掃引方法	ステップ状	連続	連続	ステップ状	連続	連続	ステップ状	連続	ステップ状	ステップ状	
電流掃引速度(A/s)	可変	10~20	20-40	7.5	2~15	16	2	0.3	1	1点2~3秒	
電流端子	Au foil を介してCuブロックで押し付け	平編銅線をインジウムはんだ	半田、機械式圧着	錫メッキ銅板に線材をハンダ付け	半田	半田	半田	In foil を介して押し付け	Bi系超電導線を半田付け	In foil を介して押し付け	
電圧端子	スプリングプローブ	平編銅線をインジウムはんだ	半田、機械式固定ピン	ハンダ付け	半田	半田	半田	銅テープに押し付け	ワニ口クリップ	半田	
同一試料測定回数	2~3	3	2~3	1~3	2	1	2~3	1	1	4回ノ点	
通常の電界基準	0.1~1V/cm	1V/cm	1V/cm	1V/cm	1V/cm	1V/cm	1V/cm	1V/cm	1V/cm	1V/cm	
可能な最小電界基準	0.001V/cm	0.1V/cm	0.001V/cm	0.1V/cm	電圧端子間距離による	0.1V/cm	0.1V/cm	0.1V/cm	1V/cm	0.3V/cm	0.2V/cm
可能な最大電界基準	100V/cm	10V/cm	100V/cm	1V/cm	sampleによる	不明	10V/cm	1mV/cm	3V/cm	1mV/cm	
n値の測定	YES	YES	YES	□□	□□	□□	YES	YES	YES	YES	

採用されている測定方法が様々であったので、本試験所間比較においては常圧下の液体窒素に浸漬した四端子法のみを指定し、電極形成法及び電流掃引法等についてはそれぞれの試験所における通常の方法で行うように依頼した。ただし、電界基準についてはすべての試験所で $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ が採用されていた。

使用した試料は、ISTEC において PLD 法により作製した線材である。試料幅は 10 mm 幅線材を 3 等分したもの。長さは 18 cm とした。臨界電流値は 160A~180A 程度であった。

試験所間比較は第 1 及び第 2 シリーズとして行った。第 1 シリーズでは、Lab1(ISTEC1)において、電極押し付け方式によって、まず臨界電流を測定し、裸の状態に戻した試料を各グループに送付し、電極の形成方法を含め、それぞれの方式で測定した。この方式では Lab1 以外の 9 グループはそれぞれ異なる試料を測定することになった。各グループにおいて 3 試料を測定した。

第 2 シリーズでは Lab1 において試料をしかるべき治具に固定し、電流及び電圧

端子から十分な長さのリード線が伸びている状態の試料を他の 9 グループ内で巡回させ、各グループにおいては電極部分については変更を行わず、リード線と測定器の接続のみを行って測定を実施、原状に復した試料を次の機関に送付することとした。これによって、いわゆるラウンドロビンテストを実現した。第 2 シリーズでは各グループ間の測定装置及び測定手順のみの比較を行うこととした。試料は複数個用意し、スタート箇所を別々にして巡回した。

さらに、同一試験所における repeatability（続けて測定した時の再現性）と reproducibility（測定日等を変えた場合の再現性）を調べるために、Lab1 において、一日に 3 回続けて測定することを数日続ける試験を行った。これを第 0 シリーズと呼ぶことにした。

(2)第 0 シリーズの結果

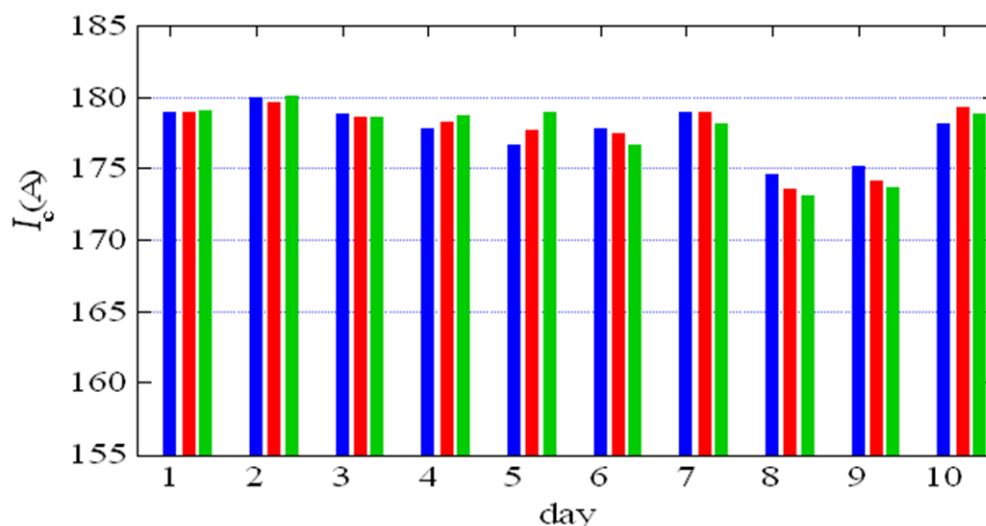


図 2.5.1-3 Lab1 における repeatability と reproducibility を調べるための測定。1 日のうちの 3 回の測定は液体窒素中に浸漬したまま続けて行い、その後室温にて翌日まで保管した。(試料 3-18)

結果の一例を図 2.5.1-3 に示す。日毎のばらつきには当日の気圧の変動の影響が考えられたのでインターネット上 (<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>) で公開されている気象庁の記録により測定当日の東京地方の平均気圧を調べ、液体窒素の沸点に換算して補正した。

図 2.5.1-3 の結果から 1 日のうちの測定結果のばらつきより、(たとえ測定日の気圧の違いを補正したとしても) 日毎のばらつきの方が大きいことは、ほぼ自明であるが、それをより定量的に解析するために分散分析の手法を適用した。測定値には繰り返しによるばらつきと、測定日の違いによるばらつきがともに存在していた。ここで、繰り返しによるばらつきと測定日によるばらつきは互いに無関係であると

仮定した。

表 2.5.1-10 に、図 2.5.1-3 に示したデータに関する分散分析表を示す。ただし、気圧変動分は補正してある。ここで、 $n=3$ は測定の繰り返し回数、 $a=10$ は測定した日数である。この結果から、繰り返しのばらつきの分散は 0.36、日毎のばらつきの分散は $(12.01-0.36)/3=3.88$ と推定された。したがって、繰り返しのばらつきの標準偏差は $\sigma_{repeat}=0.6(A)$ 、日毎のばらつきの標準偏差は $\sigma_{day}=1.97(A)$ と推定された。全体の平均値が 177.65 A なので、これらは相対的にはそれぞれ 0.34%、1.1% にあたる。

(3)第 2 シリーズの結果

図 2.5.1-4 に第 2 シリーズに用いた試料ホルダーを示す。試験所間比較参加者には試料ホルダー内部には手を加えないように要請した。測定は液体窒素に浸漬したまま続けて 3 回行うものとした。

第 2 シリーズの測定結果の一例を図 2.5.1-5 に示す。この試料については 8 グループのデータが得られた。図 2.5.1-5 に示したのは前に述べた測定日の気圧の変化の効果を補正した後の値である。

表 2.5.1-11 に、図 2.5.1-5 に示したデータに関する分散分析表を示す。ここで、 $n=3$ は測定の繰り返し回数、 $a=8$ は試験所の数である。この結果から、繰り返しのばらつきの分散は 0.07、試験所間のばらつきの分散は $(17.07-0.07)/3=5.67$ と推定された。従って、繰り返しのばらつきの標準偏差は $\sigma_{repeat}=0.26(A)$ 、試験所間のばらつきの標準偏差は $\sigma_{Lab}=2.38(A)$ と推定された。全体の平均値が 166.84A なので、これらは相対的にはそれぞれ 0.16%、1.4% にあたる。

表 2.5.1-10 気圧変動分を補正したデータに関する分散分析表

要因	S(変動)	f(自由度)	V(分散)	分散の期待値
測定日(d)	$S_d = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (\bar{I}_i - \bar{I})^2$ = 108.10	$f_d = a - 1 = 9$	$V_d = S_d / f_d$ = 12.01	$\sigma_{repeat}^2(I_{ij}) + n \cdot \sigma_{day}^2(I_{ij})$ = $\sigma_{repeat}^2(I_{ij}) + 3 \cdot \sigma_{day}^2(I_{ij})$
繰り返し(e)	$S_e = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (I_{ij} - \bar{I}_i)^2$ = 7.23	$f_e = a(n - 1) = 20$	$V_e = S_e / f_e$ = 0.36	$\sigma_{repeat}^2(I_{ij})$
総和	$S_e = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (I_{ij} - \bar{I})^2$ = 115.33	$f_e = an - 1 = 29$		

表 2.5.1-11 図 2.5.1-5 に示したラウンドロビンテストに関する分散分析表

要因	S(変動)	f(自由度)	V(分散)	分散の期待値
試験所(L)	$S_L = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (\bar{I}_i - \bar{I})^2$ = 119.51	$f_L = a - 1 = 7$	$V_L = S_L / f_L$ = 17.07	$\sigma_{\text{repeat}}^2(I_{ij}) + n \cdot \sigma_{\text{Lab}}^2(I_{ij})$ = $\sigma_{\text{repeat}}^2(I_{ij}) + 3 \cdot \sigma_{\text{Lab}}^2(I_{ij})$
繰返し(e)	$S_e = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (I_{ij} - \bar{I}_i)^2$ = 1.10	$f_e = a(n - 1) = 16$	$V_e = S_e / f_e$ = 0.07	$\sigma_{\text{repeat}}^2(I_{ij})$
総和	$S_c = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (I_{ij} - \bar{I})^2$ = 120.61	$f_c = an - 1 = 23$		

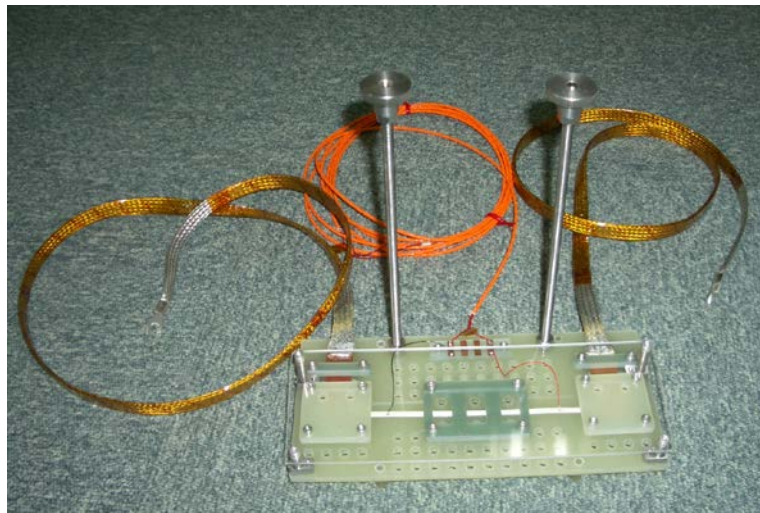


図 2.5.1-4 第 2 シリーズに用いた試料ホルダー

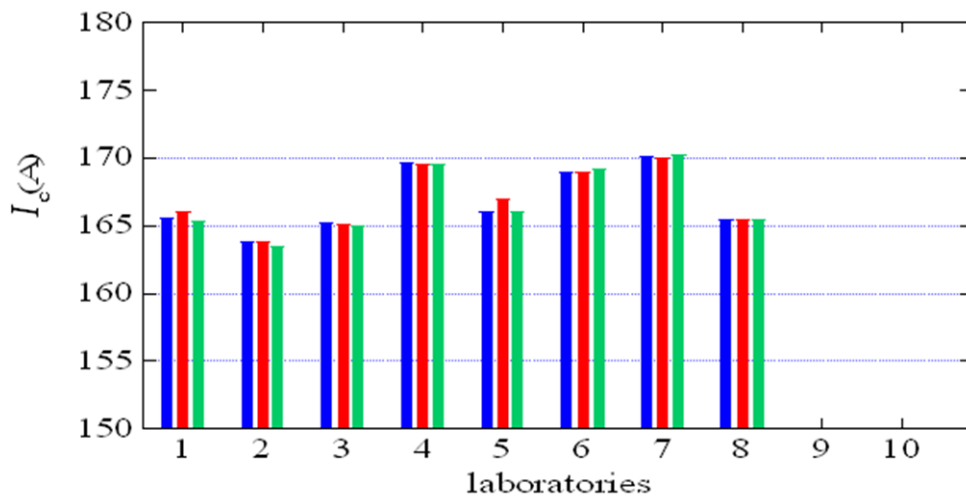


図 2.5.1-5 試料 B-2a についてのラウンドロビンテストの結果

試験所間のばらつきの相対的標準偏差は 1.4% と推定されたが、この推定値の不確かさはどの程度であろうか。試験所毎の偏りは標準偏差 σ の正規分布にしたがって分布していると仮定した。さらに図 2.5.1-5 に示した 8 個の測定値はその正規分布からランダムにサンプリングした独立な測定値であると仮定した。8 個の測定値から計算される実験標準偏差の二乗に自由度（今の場合 $8-1=7$ ）を乗じて σ^2 で除した量は自由度 7 の χ^2 分布に従うことが知られている。このことから逆に σ の値を推定することができる。この手法で σ の値を推定すると 90%の信頼係数で $1.0 < \sigma < 2.6$ と求めることができた。以上の推論から導かれることは、試験所間の偏りはあるかもしれないが、それによる不確かさはせいぜい 2.6% 程度ということである。

(4)まとめ

- ・ 10 グループの参加を得て、Y 系短尺線材の臨界電流測定の実験所間比較を行った。
- ・ 測定は液体窒素中の四端子法、電界基準は $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ とした。
- ・ Lab1 における繰り返し測定に伴うばらつきは 0.34%であった。
- ・ Lab1 における日毎のばらつきは気圧の変動を補正した後、1% 程度であった。
- ・ 試験所間の偏りは 1.4% 程度、最大でも 2.6% 程度と推定される。
- ・ 以上、可能なかぎりの解析を行ったが、今回の試験所間比較が完全なものとは考えられない。それは使用した試料が 1 種類のみであったこと、参加機関が NEDO プロジェクト内に限られたこと、測定数が少ないこと等、不十分な点が多いからである。近い将来、より本格的な国際的試験所間比較が行われることが望ましい。その際、試験所間比較の計画の段階及び測定結果の解析に際して、本試験所間比較が参考になれば幸いである。

2.5.1-7 試験方法の技術調査

(1)Y 系超電導線材の剥離試験方法

Y系超電導線材の性能が向上し、特に磁場中の特性が良好なことからマグネット応用の開発が進められている。しかしながら、すでに実用線材となっているBi系超電導線材とは同じテープ状の構造であるにも関わらず、Y系超電導線材では、積層構造部における剥離による性能の大幅低下が報告されてきた。これは、冷却時における金属基板材料と酸化物超電導層のさらには巻棒との熱収縮差や磁場中における電磁力（フープ力）によって、超電導線材に線材の厚さ方向の引張り力を受けることによる超電導層の破壊や剥離であり、Y系超電導線材の応用において非常に危惧されている。このため、Y系超電導線材の積層構造における耐剥離力の評価が喫緊の課題となり、各機関において様々な評価方法が提案され、報告されている^[3]。

a.JIS 規格

一般的材料に関して JISK-6854 に接着剤の剥離試験方法が規定されている。これは、剥離試験対象膜の一方をつかむ必要があるため、一般的な Y 系超電導線材

に適用することは困難であり、(2)以降に示す方法が提案されている。

b.垂直剥離試験法

基板と同様な材料を線材の両面にハンダ付けし、インストロンタイプの引張試験機にて厚さ方向に引張り、引張り強さから剥離強度を評価する^[4]。

c.スタッドプル法

スタッドピンと呼ばれる対象物に接触する部分の断面積が大きくなったピンを接着剤にて接着、線材自体もバックングプレートに接着し、ピンを引張る。(2)とほぼ同じであるが、専用装置を用いるため、試料準備が比較的容易になる^[5]。

d.線材端部劈開剥離

ハンダで接着した治具を、線材の中心から離れた位置に力を加えることにより、接合面を端部から開く試験方法^[6]。

e.ピール法

角度をもって曲がった治具にサンプルを貼りつけ、最初は手で剥離させ、その後機械的に剥離した部分を垂直方向に引張ることにより剥離強度を評価する^[7]。

f.Modified Edge Lift test(MELT)法

低温での残留応力が分かっているエポキシを線材に塗布、硬化し、冷却する過程をCCDカメラによって撮影し、剥離した温度から剥離時の界面エネルギーを評価する^[8]。

g.Double-cantilever-beam(DCB 試験)法

き裂面に垂直な方向の剥離であるモードIの層間破壊靱性評価方法で、あらかじめ最も剥離強度の弱い界面にき裂を入れ、線材の両面から引張ることにより、端部から開くように厚さ方向に力を加え、破壊じん性を評価する^[9]。

h.Four-point bend (4PB) 法

あらかじめ、き裂を入れた線材の両面にハステロイTMを貼りつけ、荷重を加える点の間に、き裂部分を配置するように4点曲げ試験に設置する。曲げとともにモードIだけでなく、線材長手方向に平行なモードIIのせん断応力も発生する^[10]。*

平成24年度は、福岡で開催されたICEC 24・ICMC 2012及び米国ポートランドで開催されたASC2012において、Y系超電導線材の剥離試験方法に関する調査を行った。発表の中で剥離試験方法について触れていたのは4件あったが、いずれも上記のb.垂直剥離試験法またはc.スタッドプル法によるものであった。

参考文献リスト

[1]K. Katagiri et al., Adv. Cryog. Eng. 36(1990)69

[2]西島他：第79回2008年度秋季低温工学超電導学会

[3]菅野未知央：「REBCO線材のひずみ効果」,低温工学 46(2011) 220-232

[4]戸坂泰造他：「コイル化に向けたイトリウム系線材の剥離特性評価」,第83回秋季低温工学・超電導学会講演概要集(2010) 9

[5]鈴木龍次他：「RE123線材の剥離強度評価」,第85回秋季低温工学・超電導学会

講演概要集(2011) 168

- [6]柳澤吉紀他:「YBCO 線材における劈開(へきかい)力に対する顕著なぜい弱性」, 第 83 回秋季低温工学・超電導学会講演概要集(2010) 247
- [7]Y. Zhang et al. : “Adhesion Strength Study of IBAD –MOCVD-based 2G HTS Wires Using a Peel Test”, ISS2011 WT-12
- [8]K. Suzuki et al. : “Evaluation of delamination properties of coated conductors by means of MELT method using epoxy resin”, Physica C 470 (2010) 1342-1345
- [9]N. Miyazato et al. : “Mode I type delamination fracture toughness of YBCO coated conductor with additional Cu layer”, Physica C (2010)
- [10]坂井直道他:「RE123 系線材の特性把握(1) 過電流劣化と線材剥離に関する検討,第 82 回春季低温工学・超電導学会講演概要集(2010) 15

2.5.2 超電導電力ケーブル関連技術標準化 (ISTEC、住友電気工業、古河電気工業、フジクラ、昭和電線ケーブルシステム)

本プロジェクト前期 3 ヶ年においては、既存規格及び超電導電力ケーブル関連技術動向を調査し、超電導電力ケーブルの規格素案を作成した。また、国際大電力システム会議 (CIGRE) 等との連携により国際専門家討論会を通じて情報集約並びに国際合意状況の把握を行った。

後期 2 ヶ年においては、Y 系を含む超電導線材等を適用した超電導電力ケーブル並びにその試験方法の規格素案を作成した。また、CIGRE のガイドラインの検討を行い、CIGRE に情報提供した。これらの結果、ジョイントアドホックタスクフォース(J ahTF)が設置されることになり、国際合意を背景に超電導電力ケーブルの IEC 国際規格提案をめざした活動が行われることになった。これらの活動を通じて超電導電力ケーブルの IEC 国際規格化に向けた活動に貢献した。

2.5.2-1 超電導電力ケーブルシステム等の環境安全面についての検討

超電導電力ケーブルシステム等の導入による、経済側面、環境及び安全側面について効果を評価することになるが、システムの設計仕様に基づく原材料の調達に始まり、製造、流通、使用並びに処分の過程までのライフサイクルを考慮した検討を行う必要がある。ここでは、超電導電力ケーブルシステム等の導入効果のガイドラインを検討することとし、それを策定するにあたり ISO/IEC ガイドに基づく次の JIS を参照した。

JISZ8051:2004(ISO/IEC GUIDE 51:1999):安全側面－規格への導入指針

JISQ0064:1998(ISO GUIDE 64:1997):製品規格に環境側面を導入するための指針

(1)環境側面

超電導電力ケーブルシステムは、運転時の送電損失を軽減することができるので、

それに係わる発電のための原料や発電プロセスに係わるコストの低減に寄与することができる。その結果、CO₂排出量の削減にも効果があると考えられる。超電導電力ケーブルシステムにおいては、すでにIEC/TC20では現行の常電導電力ケーブルシステムについて“Environmental statement specific”として技術報告書を発行している。また、CIGREの超電導ケーブルに関する前フェーズWG (Working Group)の報告書においても“Environmental aspect”が調査された経緯が報告されている等、関係者の大きな関心事である。したがって、今後CIGREにおけるTF (Task Force)及びWGの活動に資するためにも、わが国として国際性のある包括的な情報提供が求められることが想定された。

超電導電力ケーブルシステムに係わる廃棄コストには、超電導電力ケーブルシステムのすべての原材料調達、製造プロセス、布設、運用、廃棄において、ガス、水等の放出物、法規制物質を伴わない製品設計、廃棄物の処理の経済的負担の軽減、省エネルギープロセスの継続的な技術開発等を通じてCO₂排出量削減等環境改善への寄与を包括することが望まれた。

また、超電導電力ケーブル及び関連機器において法規制された物質の有無、製造プロセスで使用する溶剤及び補助材料中の法規制物質の有無、製造プロセスにおける処分製品中の法規制物質の有無は超電導電力ケーブル製造者の責任の基ですべてが把握されなければならない。したがって、最終製品である超電導電力ケーブル並びに関連機器に法規制物質が含まれるか否かは、製品に明確にその存在形態並びに適切な処理方法を表記しなければならないであろう。ここに、法規制物質とは、欧州連合加盟国に適用される法令「電気電子機器に含まれる特定物質の使用制限に関する指令 2002/95/EC (施行予定 2003年2月13日) : Restriction of the use of Certain Hazardous Substances in Electrical and Electric Equipment」略称RoHS (ローズ) 指令またはRoHS基準に規定された次の6種類の特定化学物質を指す。すなわち、鉛、水銀、六価クロム、ポリ臭化ビフェニール(PBB)またはポリ臭化ジフェニールエーテル(PBDE)は0.1 wt%(1000 ppm)以下、カドミウムは0.01 wt%(100 ppm)以下とする。

(2)安全側面

安全側面は、超電導電力ケーブルシステム等の企画、設計、開発、製造プロセス、布設、流通及び廃却のすべてのライフサイクルを考慮して、人、財産、環境またはこれらの組み合わせに及ぼすハザード(危害の潜在的な源)の特定並びにリスク(危害の程度)の見積・低減の方策を講じなくてはならない。すなわち、超電導電力ケーブルシステム等の安全は、特定されたハザードが許容可能なリスクレベル内に維持されていなければならない。したがって、すべての超電導電力ケーブルシステムには許容可能なリスクレベルが決定されていることが望ましい。

超電導電力ケーブルシステム等では、JIS Z 8051に準拠する特定されるハザードとして極低温液体冷媒、気化冷媒ガス、低温露出部、漏れ磁束、クエンチ時の蓄

積エネルギー放出、関連電気機器等があり、個々の機器におけるリスクレベルを見積り、決定した結果を規格に記載することが必要である。具体的には、極低温液体冷媒が溢れた場合の凍傷、気化冷媒ガスに伴う酸素欠乏水準、漏れ磁界と 5 ガウスライン、一般電気取扱則の遵守等を挙げることができる。また、これらに関連する地域固有の法規制（電気事業法、高圧ガス保安法、等）にも配慮しなければならない。

2.5.2-2 超電導電力ケーブルシステムの技術調査

超電導電力ケーブルの規格素案作成のための技術調査として、国内外の超電導電力ケーブル開発状況及び超電導電力ケーブル試験項目を調査した。

(1)超電導電力ケーブル関連プロジェクトの調査

超電導電力ケーブル関連プロジェクト実態調査を実施し、その結果を表 2.5.2-1～表 2.5.2-5 に示した。すでに終了した超電導電力ケーブルプロジェクトは 20 件で、その中で交流超電導電力ケーブルは 19 件、直流超電導電力ケーブルは 1 件である。また、進行中及び計画中超電導電力ケーブルプロジェクトは 14 件で、その内で交流超電導電力ケーブルは 11 件、直流超電導電力ケーブルは 3 件 (IEECAS、1.3 kV、10.0 kA、380 m：中部大学、±10 kV、>2 kA、200 m、Bi2223：Cheju island Project、80 kV) である。

a 日本

国内においては、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託事業である、高温超電導ケーブル実証プロジェクトが 2007 年～2013 年度の予定で実施されている。このプロジェクトは、住友電工、東京電力、前川製作所が実施しており、その目的は、66 kV/200 MVA の高温超電導ケーブルを東京電力・旭変電所において、実系統に接続した形態で長期試験を行い、超電導ケーブルの信頼性、安定性を評価しようとするものである。ケーブルは、Bi2223 線材を用いた三相一括ケーブルであり、2009 年には、30m 長の短尺ケーブル、端末、ジョイントと組み合わせた事前検証試験を住友電工内の工場に建設し、評価試験を実施し、電気性能、機械性能等所定の性能を満足していることが確認された。また、定格電圧課電の 30 年相当の課電にあたる対地 51 kV、電流 2 kA（8 時間 ON、16 時間 OFF）の 1 ヶ月間の長期試験に成功した。

2011 年には、旭変電所に 200～300 m の超電導ケーブルの布設を行い、2012 年からは、ケーブルと冷却システムとを組合わせた事前の検証試験を行い、ケーブル、冷却システムが良好な性能を持っていることが検証された。これらの事前の検証試験の後、2012 年 10 月 29 日に、実系統に接続され、実証運転が開始された。運転開始後 3 ヶ月経過時点では、安定に運転されている。今後、実証運転は 2014 年 2 月まで継続される予定である。

また、第 2 世代線材である Y 系超電導線材を用いたケーブル開発も行われている

る。これは、本プロジェクトの中で、Y系超電導線材を用い、超電導電力ケーブルの実用化に目途をつけることを目的として2008年よりスタートし、2012年度に終了した。この中で、大電流の送電を可能とする66kV/5kA級超電導ケーブルの開発が、住友電工を中心としたグループで行われた。また、古河電工を中心としたグループでは275kV/3kA高電圧ケーブルの技術開発（低損失(交流損失及び誘電体損失)化、高電圧絶縁技術、大電流技術、長期信頼性、中間／終端接続部等）が行われた。

大電流ケーブルの開発では、ケーブル構造は三心一括型で、定格電圧66kV、定格電流5kAである。交流損失の目標値は従来ケーブルの1/3（冷却システムの効率込み）を想定した2W/m-相@5kAに設定されたが、それを下回る1.5W/m-相@5kAが達成されている。このケーブルの長期性能を実証するために、15m長のケーブルが製造され、住友電工の工場にて試験が実施された。長期試験では、30年の運転時間を想定し、定格電圧の約1.3倍に相当する51kV（対地電圧）が1ヶ月間課電された。また同時に、定格電流5kAを8時間ON/16時間OFFが繰り返された。試験は、異常なく良好に実施され、その長期性能が検証された。

古河電工では、275kVの高電圧ケーブルの開発を進める中で重要な技術課題である超電導ケーブルの高電圧化とその275kV気中終端接続部及び中間接続部の開発が行われた。設計に必要な基礎技術は、交流損失試験、耐電圧試験、部分放電試験、過電流試験等で蓄積され、その技術に基づいて、長期課通電試験用の30m超電導ケーブルの設計・製造が行われた。ケーブル絶縁厚については、試験で得た絶縁体の設計ストレスとIEC、JEC、他の超電導ケーブル試験に基づいた試験条件で決定された。また、63kA-0.6secの過電流に耐え、送電に伴う誘電体損失と交流損失を合わせて275kV-3kAで0.8W/m-相以下になるように設計されている。これらの設計に基づいて、30m超電導ケーブルが製造され、同ケーブルと終端接続部、中間接続部を中国の瀋陽古河に建設し、1ヶ月間の長期課通電試験が実施された。長期試験は、30年の運転時間を想定し、定格電圧の約1.3倍に相当する200kV（対地電圧）を1ヶ月間課電された。また同時に、定格電流3kAを8時間ON/16時間OFFを繰り返された。試験は、異常なく良好に行われ、その長期性能が検証された。本プロジェクト終了後も自社内で長期信頼性試験等を継続して実施する計画である。

表 2.5.2-1 高温超電導電力ケーブルプロジェクトの調査（日本）

日本										
Project		Members	Utility	Fund	Budget	Cable			Period	Etc.
1	TEPCO	SEI	TEPCO	Private	20M\$	66kV-1000A,100m	CD	3-in-One Bi2223	2001- 2002	—
2	Super-ACE	Super-GM (Furukawa, CRIEPI)		METI/ NEDO		77kV-1000A,500m	CD	Single x 1 Bi2223	2004- 2005	

3	NEDO	SEI		METI/ NEDO		66kV-5kA,15m 2.1W/m-phase @5kA	CD	3-in-One YBCO	2008- 2012	Finished
4	NEDO	Furukawa		METI/ NEDO		275kV-3kA,30m 0.8W/m-phase @3kA	CD	One-in-One YBCO	2008- 2012	Finished
5	Yokoha ma	SEI	TEPCO, Mayeka wa	METI/ NEDO	27M\$	66kV-200MVA, 240m	CD	3-in-One Bi2223	2007- 2013	Started
6		Chubu U, SEI	Chubu U	MEXT /Japan		10kV-3kA,DC,20m	CD	One-in-One Bi2223	2005- 2009	Current only
7	DC-SCP T	Chubu U, SEI	Chubu U	MEXT/ Japan		±10kV->2kA,DC, 200m	CD	Bipolar, One-in-One Bi2223	2010- 2013	Started

b アジア

韓国では、2010年までに2つの大きなプロジェクトを行ってきた。KERIのDAPAS programとKEPCOのGENIプロジェクトである。DAPAS programでは、100m長の154kV超電導ケーブルの開発が行われ、KEPRIの試験場で試験が行われた。GENIプロジェクトは、22.9kV 500mケーブルが、ソウル近郊のIcheon変電所に布設され、2011年9月より運転を開始され、信頼性、安定性の実験が行われ、現在、系統への影響がないかが確認されている。その後、2011年より新しいプロジェクトとして済州島プロジェクトがスタートした。これはDAPASの成功を引き継いで、AC154kVケーブルとDC80kVケーブルである。2011～2016年の計画で、予算は20MUS\$/yであり、totalで80MUS\$である。DCケーブルのプロジェクトでは、DC 80kV、500m長さのケーブルが開発される予定で、TresAmigasプロジェクト受注のための実証試験となる。

中国では、中国科学院電工研究所が中心となって、長さ360m、定格電流10kAの高温超電導直流電力ケーブルの開発・製造・運用を行っている。2010年末には、中国河南省にあるHenan Zhongfu Industry Co., Ltdの工場内に高温超電導直流電力ケーブルを布設し、同工場の変電所内の整流器からアルミニウム電解炉を結ぶブスバー用途として使用される予定である。

表 2.5.2-2 高温超電導電力ケーブルプロジェクトの調査 (韓国)

韓国										
Project	Members	Utility	Fund	Budget	Cable			Period	Etc.	
8	DAPAS1	LS cable, KERI,KIMM	KEPCO	Korean Ministry of S&T		22.9kV-1250A , 30m	CD	3-in-One Bi2223	2001- 2004 2004.5 -12	
9	DAPAS2	LS Cable, KERI,AMSC	KEPCO	Korea Gov		22.9kV-1250A -50MVA, 100m	CD	3-in-One Bi2223	2005- 2007	

10	DAPAS3	LS Cable, KERI, AMSC	KEPCO	Korea Gov		154kV-1GVA, 100m	CD	3-phase, YBCO	2008-2011	Gochang Test Center
11	KEPRI LS cable	KEPRI, AMSC, KBSI, LS cable etc.	KEPCO	KEPRI Korea Gov.	2.4M\$	22.9kV-1250A, 100m	CD	3-in-One Bi2223	2007-	Testing
12	KEPRI SEI cable	KEPRI,SEI, KERI,KBSI, etc	KEPCO	KEPRI Korea Gov.		22.9kV-1250A, 100m	CD	3-in-One Bi2223	2006-	Operation method training
13	GENI	LS Cable, AMSC	Seoul, Korea			22.9kV-50MV A, 430m	CD	3-phase, YBCO	2009-	Operating
14		LS cable	Cheju	KEPRI, Korea Gov.		AC 154kV	CD	1-phase YBCO	2011-2016	Planning
15		LS cable	Cheju	KEPRI, Korea Gov.		DC 80 kV	CD	YBCO	2011-2016	Planning

表 2.5.2-3 高温超電導電力ケーブルプロジェクトの調査 (中国)

中国										
Project		Members	Utility	Fund	Budget	Cable			Period	Etc.
16	Yunnan	Innopower, InnoST, Shanghai Cable	Yunnan Electric	China S&T, Beijing City, Yunnan Pro.	5M\$	35kV-2000A, 33.5m	WD	Single x 3 Bi2223	2004.4 -	
17	Lánzhōu	IEE/CAS, Changtong Power Cable Company AMSC		China S&T	1.2M\$	10.5kV-1500A, 75m	WD	Single x 3 Bi2223	2004-	
18	China EPRI	China EPRI	Beijing, China			110kV-3000A, 1000m	CD	YBCO	2011-2015	Planning
19		IEECAS	China			1.3kV-10.0kA, DC, 380m	WD		2006-2010	Operating

c 欧州

ドイツの Ampa-City プロジェクトは、2013 年にエッセン市の二つの変電所を長さ 1 キロメートルの交流超電導ケーブルで接続するものである。採用される超電導ケーブルは、10 kV, 40 MVA の三相同軸型高温超電導ケーブルである。このケーブル構造は、中心部を液体窒素が流れる中空フォーマに高温超電導線、絶縁材料 PPLP を巻きつけた三相同軸構造であり、その上に銅撚り線の遮蔽層を有している。このケーブルを真空絶縁層のある二重コルゲート管に収めることで熱的に外部と絶縁し、ケーブルとコルゲート管の隙間に 77 K 以下のサブクール液体窒素を流して冷却する。三相同軸型高温超電導ケーブルは、コンパクトで他の超電導ケーブル

より超電導材料の使用量が少なく、液体窒素の流路をケーブル内に確保できることに加え、三相同軸であるため、均衡電流の場合には遮蔽層に電流は流れず、ケーブル外部には磁場が発生しない特性がある。また、高温超電導ケーブルを布設する場合には、従来の同容量の地中ケーブルに比べて、ケーブル本数を削減し、布設を簡易化し、熱の影響を受けやすい場所にも布設することができるため、高温超電導ケーブルを用いることは、都市部の電力系統を魅力的なものとする結論づけている。なお、ケーブル製造は Nexans が行い、使用される Bi 線材は住友電工が供給することになっている。

ロシアでは電力会社「FGC UES」等が直流超電導ケーブルプロジェクトを実施している。直流超電導ケーブルを系統連系に用いることで、短絡電流を抑えながら電力グリッドの容量増加を行うことが可能である。計画では、2015年にサンクトペテルブルク市内の二つの変電所を、長さ 2.5 km の直流超電導ケーブルで結び電力グリッドで試験を行うことを計画している。将来的には、直流ケーブルを用いたグリッドを提案している。

表 2.5.2-4 高温超電導電力ケーブルプロジェクトの調査 (欧州)

欧州										
Project	Members	Utility	Fund	Budget	Cable			Period	Etc.	
20	Copenhagen	NKT, NST		Denmark DOE		30kV-2000A, 30m	W D	Single x 3 Bi2223	2001-2003	
21	Super 3C	Nexans, Bruker (EHTS)	Spain, Labein lab.	European Union	5.2M Euros	10kV-1000A, 30m	CD	One phase YBCO/MOD	2004-2008	
22		Nexans	Hannover, Denmark			138kV, 1.8kA, 30m	CD	One-phase, YBCO	2007	
23	Amsterdam	NKT, Plaxair, Ultra	Nuon	TBD		50kV-250MVA, 6000m	CD	Triaxial YBCO	2009-2014	Planning
24		Nexans	Spain			20kV-1kA, 30m	CD	One-phase, YBCO	2008-2013	
25		VNIKP, Nexans, SEI	Moscow, RU			20kV-50MVA, 200m	CD	Single x 3 Bi2223		
26	Edesa	Nexans,	Spain Barcelona			25kV-3.2kA, 30m,	CD	One-phase, Bi2223		
27	Ampa-City	Nexans	German			10 kV/40 MVA 1km	CD	Traxial Bi2223	2013	Plannig

d 米国

LIPA プロジェクトは米国エネルギー省(DOE)がサポートするプロジェクトで、ロングアイランド電力当局 (LIPA) の系統の Holbrook 変電所の架空送電線の一部を超電導ケーブルに置き換え、超電導ケーブルのグリッドへの影響や信頼性を検

証するものである。このケーブルは、世界最長となる 600 m 長で、138 kV 2400 A の容量をもち、AMSC 社製の Bi 系線材を用いて、Nexans 社が製造した。超電導ケーブルは、2008 年春より運転が開始されて 2 年間の運転が行われた。LIPA プロジェクトは、現在次のフェーズに移り、LIPA2 として、第 2 世代超電導線 (2G 超電導線材) を用いたケーブルの試験が計画された。この計画では、2G 線材を用いた超電導ケーブルの開発に加えて、実フィールドでの中間接続、修繕可能な断熱管の開発、熱収縮を考慮したケーブル構造、新規冷凍機の開発が進められている。これまでの発表では、2012 年中期より実系統運転がスタートすることが発表されているが、現時点で接続に関する報告はなされていない。

Hydra プロジェクトは、DHS (Department of Homeland and Security) から資金援助を受けたプロジェクトで、限流機能付き超電導ケーブルを New York 州マンハッタンの変電所間連系に布設する。定格は、13.8 kV/4 kA/170 m であり、AMSC 社製の Y 系線材で三相同軸型超電導ケーブルを開発する予定である。プロジェクトは 2008 年にスタート。2014 年に ConEdison 社のネットワークでの運転開始をめざしている。

表 2.5.2-5 高温超電導電力ケーブルプロジェクトの調査 (米国)

米国										
Project		Members	Utility	Fund	Budget	Cable			Period	Etc.
28	Southwire	Southwire		DOE		12.5kV-1250A, 30m	CD	Single x 3 Bi2223	2000-	
29	Detroit	Pirelli, AMSC	Detroit Edison	DOE		24kV-2400A, 120m	W D	Single x 3 Bi2223	2001	Failed
30	Albany	SuperPower SEI, Linde	National Grid	DOE、 NYSERDA	26M\$	34.5kV-800A, 350m	CD	3-in-One B2223, YBCO	2006- 2009	Finished
31	Ohio	Ultera	AEP Columbus	DOE		13.2kV-3000A, 200m	CD	Triaxial Bi2223	2006-	Sep. On Grid
32	LIPA 1	AMSC, Nexans, AirLiquide	Long Island Power Authority	DOE	46.9M\$	138kV-2400A, 600m	CD	Single x 3 Bi2223	2008-	Apr. 08 On grid
33	LIPA 2A	AMSC, Nexans, AirLiquide	LIPA	DOE	18M\$ +7.6M\$	138kV-2400A, 600+am One phase will be replaced with intermediate joint Bi2223 → YBCO	CD	Single x 1 YBCO Single x 2	2008-	Started

								Bi2223		
34	Hydra	AMSC, Southwire	Con- Edison	DHS	39.3M\$	13.8kV-4000A, 170m	CD	Triaxial YBCO	2007- 2014	Started
35	Entergy	Southwire, NKT	Entergy, US New Orleas	DOE	26.6M\$	13.8kV-48MVA, 1760m	CD	Triaxial YBCO	2007- 2011	Abort
36	Tres Amigas, Super Station	AMSC	Clovis, New Nexico, US	Tres Amigas, LLC		±200kV-12.5kA, 22.5 sq. miles,5GW, DC		Bipolar YBCO		Abort

(2)直流送電システム関連の技術調査

CIGRE SC B1 WGのガイドラインでは、すべてのケーブルシステム（単心、三心、三心撚りケーブル）が対象とされている。既存のケーブルには交流送電ケーブルシステムと直流送電ケーブルシステムがあるため、超電導電力ケーブルについても交流超電導電力ケーブルと直流超電導電力ケーブルを対象にした調査が必要と想定されるため、直流送電の実態調査を実施した^[1]。その調査結果を表 2.5.2-6 に示す。

表 2.5.2-6 主な直流送電

Project	Members	Utility	Cable/Overhead trans.			Period	Etc.
	ASEA/ Sweden	スウェーデン Gotland 島	10-20MW			1954	世界初
北本連系	古河電工 住友電工 フジクラ 日立電線	電源開発	600MW	±250kV	167km	1979	日本初
	ABB	スウェーデン Hellsjon	3MW	±10kV		1997	VSC 適用 世界初
インガ・シャバ	ASEA/ Sweden	コンゴ	600MW	±500kV	1700km	1985	最長架空
紀伊水道直流連系	古河電工 住友電工 日立電線 フジクラ	電源開発 関西電力 四国電力	1.4GW	±500kV 2800A	100km	2000	当時 世界最大 容量
Trans Bay	CETS, USA	Pittsburg-San Francisco	400MW	200kV	59-miles	2006- 2008	VSC 適用
ノルネッド	ABB	ノルウェー オランダ	700MW		580km	-2008	最長海底
CAPRIVI LINK INTER- CONNECTOR	ABB	ナミビア		±350kV	970km	2009	VSC 適用
NIMSCAN	State Grid DC Project Constructio n Co. Ltd.	シャンジャバ Xiangjiaba -上海	6.4GW	±800kV 4kA	2071km	2010-2011	
イタイプ	ASEA/	ブラジル	6.3GW	±600kV	800km	2012	最高容量

	Sweden, ASEA/Brazil, PROMON, FURNAS, CEPEL						
--	--	--	--	--	--	--	--

IEC/TC22 (パワーエレクトロニクス) から引き継いだ IEC SC22F において、1970 年以降“高電圧直流送電(HVDC)”が扱われている。1995 年以降、“Power Electronics For Electrical Transmission and Distribution Systems”に改名して活動、活動範囲は直流送電 HVDC、静止形無効電力補償装置 SVC 及びサイリスタ制御直列コンデンサ TCSC である。活動が活発な国は、中国、ドイツ、日本、ロシア、スウェーデン、英国等である。P-メンバーは 13 ヶ国。これまでの成果、IS4 件、TS1 件、TR2 件、PAS5 件。

－IEC60633：HVDCMに関する用語；バルブ、変換器の動作状態、HVDC 構成、変換所機器、制御方法等。→2008 年改訂済み。将来 IEC60050IEVPart55 に TC1 と協調し組み込む予定。

－IEC60700-1：HVDC 用サイリスタバルブの電気試験。IEEEstd857 との協調必要。

－IEC607001：メンテナンス（保守）関連

－IEC61803：交直変換所の損失の求め方についての規格

－IEC61954：SVC (TCR 及び TSC) 用サイリスタバルブの電気試験の規格 → 改正中

－IEC60919: Part1；定常特性 (TR)、Part2；開閉動作や事故時の過渡特性 (TR)、Part3；交流系統との相互作用や高調波共振等を考慮したダイナミック特性 (TS) →改正中、審議中

－IECPAS61975-2004：HVDC 設備のシステム試験のガイド→IS 規格移行検討中

－IECPAS62001-2004：HVDC 変換所の交流フィルタの仕様作製及び設計評価のためのガイド

－IECPAS62344-2007：HVDC 用設置電極の設計ガイド

－IECPAS62543-2008: VSC 変換器を使用した HVDC システムの全般を網羅したガイド

－IECPAS62544-2008：HVDC におけるアクティブフィルタのガイド

－IEC62501：自励 HVDC 用バルブの電気試験 WG 作業中

－他 TC/SC との連携：TC115 (100kV を越える高電圧直流送電システム)、TC28 (絶縁協調)、TC33 (電力用コンデンサ)

－超電導直流ケーブル関連資料として、次の論文が 1 件抽出された。

露木和彦、鷺田 栄、丹田 修、増田孝人、加藤幸一、中島武憲、向山晋一：超電導直流ケーブルの電気絶縁に関する研究、低温工学、Vol.35、No.7(2000)、(b p350-p365)

(3)超電導電力ケーブル試験項目調査

交流超電導電力ケーブルの試験項目に関して、IEC、JEC 及び、AEIC 規格等を基に、CV ケーブル、OF ケーブル及び POF ケーブル関連規格項目との対比検討を実施した。形式試験、受入試験及び竣工試験の各試験項目の対比結果を表 2.5.2-7～表 2.5.2-9 に示し、試験方法素案の見直しに反映した。

直流送電システムについても試験方法調査を実施し²⁾、その結果を表 2.5.2-10 及び表 2.5.2-11 に示す。

表 2.5.2-7 形式試験項目

番号	試験項目	従来ケーブル試験項目			超電導ケーブル試験項目案				備考	コメント
		形式			形式					
		CV	OF	POF	出荷相当品		全長			
			室	低	室	低				
1	外観点検	○	○	○			●			
2	構造試験	◎	○	○	●					
3	絶縁抵抗試験	○	○	○			●	●		
	シース絶縁抵抗試験	○	○				●		室温全長試験追記	必要なし
4	静電容量試験	○	○	○	●	●	●	●		
5	出荷耐電圧試験	○	◎			●		●	12と同じ	
6	直流耐電圧試験又はスパーク試験	○	○				●			
7	導体抵抗試験	○	○	○			●			
8	誘電正接試験		○	○		●		●	室温時は水分の影響大 低温での値に意味あり	
9	誘電正接温度特性試験	◎	◎	○					温度変化小さく不要	
10	ガス試験		○						OF特有	
11	長期課通電試験	◎							不要・開発試験	・OF開発試験、CV規定なし ・必要
12	商用周波数耐電圧試験	◎	◎	○		●			部分放電の確認を行う	
13	雷インパルス耐電圧試験	◎	◎	○		●				必要
14	半導電層試験	△							CV特有	
15,16	シース又は防食層試験	◎	◎						CVでの材料試験、不要	
17	部分放電試験	◎							不要でよいか？	
18	絶縁体試験	○△							CV特有	
19	耐火試験	△							CV特有	
20	水密試験	△							CV特有	
21	ブーリングアイ試験	○	○	○			●		ブーリング単体試験	
22	曲げ試験	◎	◎	○	●					必要なし
23	側圧試験			○					不要でよいか	必要
24	絶縁油試験		○	○					OF/POF特有	
25	油圧試験		○						代替	
26	商用周波破壊試験	○	○	○					納入者明示事項	
27	雷インパルス破壊試験	○	○	○						
28	防食層雷インパルス破壊試験	○	○							
29	極度曲げ試験		○	○						
30	捻り曲げ試験	○	○							
31-44	その他									
101	定格電流試験					●		●	追記	必要なし
	臨界電流試験								明示事項	
102	交流損失試験								明示事項	必要なし
103	断熱性能試験								明示事項	必要なし
104	過負荷試験								開発試験	
105	短絡電流試験								開発試験	
106	圧力損失試験							●	明示事項	必要なし
107	布設模擬試験								開発試験	
108	気密試験				●		●			必要
109	耐圧力試験				●		●			必要
110	ケーブルインダクタンス試験								協議事項	
111	サーマルサイクル試験								開発試験	
112	圧力サイクル試験								協議事項	
113	低温老化・変形試験								協議事項	
114	漏れ磁界測定								協議事項	
115	熱収縮試験								開発試験	

○JEC等国内規格のみ規定されているもの、◎国内、海外規格に規定されているもの
△海外規格にのみ規定されているもの、●超電導ケーブル試験項目案
OF、CVケーブルの海外規格は、IEC、POFの海外規格はAEIC

表 2.5.2-8 受入試験項目

番号	試験項目	従来ケーブル試験項目			超電導ケーブルの試験項目案				備考	コメント
		受入			受入					
		CV	OF	POF	出荷ケーブルから切		全長			
			室	低	室	低				
1	外観点検	○	○	○			●			
2	構造試験	◎	◎	◎	●					
3	絶縁抵抗試験	○	○	○			●			
	シース絶縁抵抗試験	○	○						形式でよい	必要なし
4	静電容量試験	◎	◎	○			●		5と同時測定	
5	出荷耐電圧試験	◎	◎	◎		●			部分放電の確認を行う	
6	直流耐電圧試験又はスパーク試験	○	○				●			
7	導体抵抗試験	◎	◎	◎			●			
8	誘電正接試験		◎	◎			●		5と同時測定	
9	誘電正接温度特性試験			○					温度変化小さく不要	
10	ガス試験		○						OF特有	
11	商用周波数耐電圧試験			◎					不要(5で実施)	
12	雷インパルス耐電圧試験			◎					不要(5で実施)型式で確認	
13	部分放電試験	◎							5で測定	必要
14	絶縁体試験	○							CV特有	
15	プーリングアイ試験		○	○			●		単体試験	
16	曲げ試験			◎					不要よいか?	必要なし
17	非金属シースの電気試験	△							CV特有	
18	導体検査	△							?	
19	絶縁体のホットセット	△							CV特有	
20	防食層試験		△						?	
21	機械試験		△	△					?	
22	シース厚測定			△						
23	合成紙剥がれ試験								?	
101	臨界電流試験					●			初期特性把握 導体、シールド測定	必要なし
102	交流損失試験					●			初期特性把握	必要なし
103	断熱性能試験					●			初期特性把握	必要なし
104	過負荷試験								協議事項	
105	短絡電流試験								協議事項	
106	圧力損失試験								不要	必要なし
107	布設模擬試験								協議事項	
108	気密試験						●			必要
109	耐圧力試験						●			必要
110	ケーブルインダクタンス試験								協議事項	
111	サーマルサイクル試験								協議事項	
112	圧力サイクル試験								協議事項	
113	低温老化・変形試験								不要	
114	漏れ磁界測定								協議事項	
115	熱収縮試験								協議事項	
116	シールド電流測定									必要なし
117	真空リーク試験						●			必要なし

○JEC等国内規格のみ規定されているもの、◎国内、海外規格に規定されているもの
 △海外規格にのみ規定されているもの、●超電導ケーブル試験項目案
 OF、CVケーブルの海外規格は、IEC、POFの海外規格はAEIC

表 2.5.2-9 竣工試験項目

番号	試験項目	従来ケーブル試験項目			超電導ケーブル試験項目案		備考	コメント	
		竣工			竣工				
		CV	OF	POF	全長				
			室	低					
従来ケーブル試験項目	1	導体抵抗試験	○	○	○	●			
	2	絶縁抵抗試験	○	○	○	●			
	3	シース絶縁抵抗試験	○	○	○	●			
	4	静電容量試験	○	○	○		●		
	5	誘電正接試験	○	○	○		●		
	6	耐電圧試験	◎	◎	◎		●		
	7	油流抵抗試験		○	○			106で代用	
	8	ガス定数試験		○	○			OF特有	
	9	絶縁油分析		○	○			OF特有	
	10	もれ電流試験	○					不要	必要なし
	11	部分放電試験	○					協議事項	
	12	防食層試験		○				協議事項	
	13	警報回路動作試験		○				不要	
	14	シース耐圧力試験	△						108で代用
超電導ケーブル特有の試験項目	101	臨界電流試験					●		
	102	交流損失試験					●	測定難、不要	
	103	断熱性能試験					●		
	104	過負荷試験						不要	
	105	短絡電流試験						不要	
	106	圧力損失試験					●		
	107	布設模擬試験						不要	
	108	気密試験					●		
	109	耐圧力試験						不要	
	110	ケーブルインダクタンス試験						不要	
	111	サーマルサイクル試験						不要	
	112	圧力サイクル試験						不要	
	113	低温老化・変形試験						不要	
114	漏れ磁界測定						不要		
115	熱収縮試験						不要		
116	シールド電流測定						協議事項		
117	真空リーク試験					●			

○JEC等国内規格のみ規定されているもの、◎国内、海外規格に規定されているもの
 △海外規格にのみ規定されているもの、●超電導ケーブル試験項目案
 OF、CVケーブルの海外規格は、IEC、POFの海外規格はAEIC

表 2.5.2-10 中間試験項目

試験項目		
枠試験	外観検査	
	直流導体抵抗試験	
	静電容量試験	
	絶縁抵抗試験	
	ガス試験	
	絶縁体直流電圧試験	
	防食層商用周波耐電圧試験	
試料試験	構造試験	
	曲げ試験	
	直流長時間耐電圧	
	極性反転耐電圧	
	直流重畳開閉インパルス耐電圧	
	開閉インパルス耐電圧	
	雷インパルス耐電圧	
	誘電正接温度電圧特性	
	防食層	防食層雷インパルス耐電圧
		引張試験
		加熱老化
		耐油性
		加熱変形
	絶縁油	絶縁油粘度試験
		絶縁油商用中は絶縁破壊試験
絶縁油防食試験		
油圧試験		

表 2.5.2-11 完成試験項目

試 験 項 目		
枠試験	外観検査	
	直流導体抵抗試験	
	静電容量試験	
	絶縁抵抗試験	
	ガス試験	
	絶縁体直流耐電圧試験	
	油流抵抗試験	
	光ファイバ	光ファイバユニット接続部損失
		接続部防食層直流耐電圧
		光ファイバユニット通光特性
		ステンレス管溶接部外観
		光ファイバユニット損失 (温度センサ以外)
		温度センサ機能 (温度センサのみ)
埋設位置検知線	直流導体抵抗試験	
	接続部外観検査	
	接続部耐電圧試験	
試料試験	構造試験	

2.5.2-3 超電導電力ケーブル関連国際標準化の状況調査

(1)各国固有の冷凍関連法令

超電導電力ケーブルに係わる我が国の高圧ガス保安法及び冷凍保安規則の扱いは、実証試験段階が続く限り実用実績を監督官庁に提示することができないため、当面冷凍システム個別に特認扱いを受けて対応せざるを得ない。我が国固有の地域的阻害事項とも考えられるため、国際標準化の観点から、実用実績を蓄積し、最終的には特認扱いを越えて無人システムをめざすというシナリオを策定することが必要と考えられる。

(2)国際標準化の進め方

a. CIGRE SC WG B1 31 の立上げ及び課題

2008年から1年間活動した CIGRE SC B1 TF は、2009年9月22日～24日にポーランドのボスナンで開催された CIGRE SC B1 の定例会議において、2008年から立ち上がった超電導ケーブルの TF B1 31 の報告が、Convener の Lindsay 氏

からなされた。付託事項 (TOR) として、電圧階級の範囲、冷却に関して、短絡条件下の検討等いくつかの修正がされた。また、電圧が 10~145 kV であるために、8 番目として、275 kV まで展望して視野に入れることを追加した。提出された TF B1 31 の Technical report は承認され、WG 移行も異議なく承認された。

CIGRE SC WG B1 31 の活動は、2009 年 9 月から 2012 年 8 月まで 3 年間の予定で行われた。CIGRE SC WG B1 31 には、カナダ、フランス、ドイツ、韓国、イタリア、オランダ、スペイン、日本、アメリカの 9 ヶ国が参加した (後にインドも参加)。

CIGRE SC WG B1 31 の委員募集が、原則 1 ヶ国 1 名、2009 年 12 月 20 日で行われた。日本から住友電工増田孝人氏、古河電工向山晋一氏の両氏を推薦した。結果として、委員として増田氏、オブザーバとして向山氏の参加がそれぞれ承認された。CIGRE SC WG B1 31 の課題として、次の 8 項が採択された。

(i) 対象は高温超電導 (HTS) のみとし、低温超電導 (LTS) は含めない。電圧階級は 10~145 kV とする。

(ii) 極低温冷却機器は SC WG B1 31 の対象範囲外であるので、本 WG でも対象外とする。ただし、運転仕様、信頼性、要求機能は取り扱うことにする。

(iii) 現存の HTS プロジェクトの詳細実績を調査する。

(iv) 運転条件下並びに短絡条件下でのケーブル、接続部、付属品を含む高温超電導ケーブルシステムを検討対象とする。

(v) ガイドラインは、すべて既存のケーブルシステム (単心、三心、三心撚りケーブル) を対象とする。

(vi) ガイドラインは、高温超電導ケーブルシステムに適用される圧力パイプや圧力容器の設計や運転に係わる試験要求事項を含める。

(vii) 高温超電導ケーブルシステムの推奨試験項目として以下を扱う。形式試験/長期認定試験、工場試験、竣工試験。

(viii) 275 kV まで展望として視野に入れる。

2009 年で終了した CIGRE SC D1 (コンビーナ: 大久保仁教授、名古屋大学) は、2009 年 9 月後続で CIGRE SC D1 を提案し、承認された。後続 CIGRE SC D1 は、期限を 2009 年から 2014 年までとし、目的を超電導に係わる共通技術 (絶縁材料、構造材料、冷凍設備) とする。したがって、後続 CIGRE SC D1 と CIGRE SC WG B1 31 との連携が肝要である。

b. CIGRE SC WG B1 31 (超電導ケーブル試験法) 活動状況

平成 24 年度は、6 月に東京にて最終の集合ミーティングが開催された。その後、6/27 に電話会議が実施され、ガイドラインを記述したレコメンデーションが完成し、8 月の CIGRE パリ大会にて報告がなされた。以下にレコメンデーションの概要を示す。

(i) Introduction

背景や用語の定義等の説明。1.4 節では、future work として、本 WG で協議さ

れた今後の課題について記されており、出荷時の全長課電試験、断熱管の長期特性、さらなる高電圧化向け(～275kV)の試験方法、PQ (Pre-Qualification) テストについて記載されている。特に PQ テストについては、日本からの意見が反映され、今後の CIGRE or IEC で協議されるべきとしている。

(ii) Tests for Engineering Information

合否を判定するものではないが、ケーブルシステムに必要な情報として、交流損失、断熱管の侵入熱、静電容量やインダクタンス、事故電流通過時の特性の説明を記述。

(iii) Type test (日本担当)

・ケーブルと機器とを組み合わせた Assembly 試験は、①曲げ試験、②耐圧力試験、③ロードサイクル試験、④AC 課電、⑤雷インパルス試験、⑥PD 試験、の順番に行う。なお、超電導導体の臨界電流測定は、①の曲げ試験後に行う。

・曲げ試験については、ケーブルコアのみを曲げる場合は、断熱管を模擬した管に入れて曲げることを追記。

・耐圧力試験については、各国の法律あるいは基準に従うこととし、共通となる試験条件は設けず。

・③④⑤⑥の試験電圧、試験時間については、基本的に IEC60502, IEC60840 の条件にならう。AC 耐圧試験においては、試験電圧は $2.5U_0$ に統一。また、PD 試験の感度においても、これまでの規格通り 5pC となった。

・なお、三相同軸ケーブルについては、相間に電圧を印加するので、試験電圧を $\sqrt{3}$ 倍する。

・ケーブルのみの type test としては、曲げ試験を実施する。

・機器の type test としては、機器を構成する部品の耐電圧試験を行う。

(iv) Factory test (韓国担当)

・試験項目としては、①ケーブルへの AC 課電試験、②機器への AC 課電試験、③臨界電流測定、④真空リーク試験、⑤耐圧力試験を行う。

・①②③は、各国の現状での試験内容を反映させ、切り出しサンプルで試験を行うこととしている。全長試験については、今後の課題である。

・④⑤については全長行うが、試験条件については、各国の法律、基準に従うものとした。

(v) After laying test (ドイツ担当)

・試験項目としては、①真空リーク試験、②耐圧力試験、③臨界電流測定、④課電試験である。

・④については、各国の経験を基に、AC 課電、DC 課電、低周波課電、soak 試験(24 時間定格課電) から選ぶこととした。

(vi) 付録

臨界電流測定方法の詳細な記述と、超電導ケーブルに特有な冷媒あるいは冷却システムの特徴とその取扱いについて記載。

c. 国内における検討

本プロジェクトで設置された超電導電力ケーブル小委員会において、超電導電力ケーブルの試験法に関する CIGRE のガイドラインについて検討し、CIGRE に情報提供を行った。

d. ジョイント・アドホック・タスク・フォース(J ahTF)の立上げ及び経過

CIGRE パリ大会直前に行われた TC90 西安会議で、CIGRE B1.31 のリエゾンから CIGRE 活動について報告され、この中で TC90 として、TC20 の中に J ahTF(ジョイント・アドホック・タスク・フォース)を作る提案をすることを提案して認められた。これを受けて TC20 の東京総会では、超電導ケーブルについては、J ahTF 設置の提案が IEC/TC90 国際幹事(佐藤氏)より付議された。CIGRE SC B1 議長(Mr. Pierre Argaut)もこの総会にゲストとして参加しており、TC20、TC90 及び数人のボランティアとの J ahTF 設置が総会の場で決議された。なお、本件は電力ケーブルとしての規格化をめざすため、TC20 主導で規格化が進められる旨の報告があった。

2.5.2-4 超電導電力ケーブルの規格素案の作成

超電導電力ケーブルシステムの定義の再確認として、交流超電導電力ケーブル及び直流超電導電力ケーブルに係わる総括的な通則について、超電導ケーブルシステム定義、規格体系、一般要求事項並びに各記述項目の過不足を明らかにし、超電導電力ケーブルシステムの定義をつぎのように確認した。

超電導電力ケーブルシステムは、変電所間及びまたは変換所間を結ぶ連系線路のうち、超電導に係わる交流超電導送電線路及びまたは直流超電導送電線路並びに超電導状態を維持・制御する関連機器システムと定義する。なお、超電導電力ケーブルシステムには構内利用及び特高・高圧配電線を含めるものとするが、発電機並びに調相設備、変圧器、遮断器、断路器、避雷器、フィルタ、接地電極、コンデンサ等現行の送変電関連機器は含めないものとする。

ここで、交流超電導送電線路は、単数または複数の交流超電導電力ケーブル、中間接続及び終端接続(厳密には終端接続のヘッドまで)で構成する。また、直流超電導送電線路は、単数または複数の直流超電導電力ケーブル、中間接続及び終端接続(厳密には終端接続のヘッドまで)で構成する。さらに、超電導状態を維持・制御する関連機器システムは、断熱管路、冷媒、冷凍機、冷媒循環等冷却システム及び監視システムで構成される。

超電導電力ケーブルシステムに係わる国際規格体系案を表 2.5.2-12 に示す。当面、超電導電力ケーブルシステムに係わる国際標準化は、国際的な技術動向と標準化ニーズ動向に鑑みて、超電導電力ケーブルシステム通則及び交流超電導電力ケーブルの試験方法に注力することとした。当面国際規格化の対象とする項目を太字で示した。

表 2.5.2-12 超電導電力ケーブルシステムに係わる規格体系

超電導電力ケーブルシステム通則	交流超電導送電線路	交流超電導電力ケーブル	用語、性能、試験
		中間接続	(交流超電導送電線路関連機器)
		終端接続	
		冷却システム	用語、性能、試験
	監視システム		
	直流超電導送電線路	直流超電導電力ケーブル	用語、性能、試験
		中間接続	(直流超電導送電線路関連機器)
		終端接続	
冷却システム		用語、性能、試験	
監視システム			

前期3ヶ年においては、上記固有事項の調査結果を反映し超電導電力ケーブル通則を作成した。その概要を表 2.5.2-13 に示す。超電導電力ケーブルとしては、交流超電導電力ケーブル及び直流超電導電力ケーブルを適用範囲とした。ただし、CIGRE SC WG B1 31 のガイドラインが交流超電導電力ケーブルにあることも加味することにした。

表 2.5.2-13 「超電導電力ケーブルシステムの通則」の規格素案の概要

目次	概要
まえがき	
序文	
1.適用範囲	電力システムに超電導電力ケーブルを適用するための超電導電力ケーブルシステムに対する一般要求事項について規定
2.引用規格	関連する国際規格のリストを記載
3.用語及び定義	主な用語の定義は、IEC 60050-815:2000 によるほか、次を定める 超電導電力ケーブルシステム、超電導電力ケーブル、交流超電導電力ケーブル、直流超電導電力ケーブル、低温絶縁超電導電力ケーブル、室温絶縁超電導電力ケーブル、単心超電導電力ケーブル、三心超電導電力ケーブル、三相同軸超電導電力ケ

	<p>ケーブル一本のフォーマの周りに、これと同心的かつ層状に三相の導体を組み合わせたケーブル、中間接続（箱）、終端接続（箱）、冷媒循環装置、交流送電、直流送電：HVDC、静止形無効電力補償装置：SVC、サイリスタ制御直列コンデンサ：TCSC</p>
4.使用条件	
5.システム構成	<p>電力システムの構成要素となる超電導電力ケーブルシステムは、超電導電力ケーブル、中間接続、終端接続等から構成する付属機器及び冷媒循環装置から構成</p>
6.性能	<p>電力ケーブルシステムの性能は、つぎによる他 IEC60502-2(2005)、IEC60840(2004)及び IEC62067-ED1.1(2006)に準拠</p>
6.1 交流超電導電力ケーブルの性能	<p>次の性能項目を明示</p> <ul style="list-style-type: none"> (1) 定格電圧(kV) (2) 交流耐電圧(kV) (3) インパルス耐電圧(kV) (4) 短絡・地絡電流、短時間耐電流 (kAs) (5) 布設条件における静電容量 (μF) (6) 管路の耐圧構造及び耐圧力(Pa) (7) ケーブルの断面構成の詳細 (9) 電気絶縁厚さ(mm)、最大電位傾度 (E_0/mm) (10) 定格電流(A) (11) 運転温度における超電導電力ケーブルの有効抵抗(Ω/km) (12) 布設条件におけるインダクタンス(H/km-相) (13) 冷媒温度(K)
6.2 直流超電導電力ケーブルシステムの性能	<p>直流超電導電力ケーブルシステムを構成する直流超電導電力ケーブルに係わる性能明示項目については、受渡当事者間の協議</p>
6.3 その他付属機器の性能	<p>電力ケーブルシステムにおけるその他付属機器の性能は、IEC6050-2(2005)、IEC60840(2004)及び IEC62067-ED1.1(2006)に準拠</p>
7.試験	<p>超電導電力ケーブルシステムの試験の種類は、</p>

7.1 試験の種類	IEC60840(2004)及び IEC62067 に準拠 形式試験 (Type test)、受入試験 (Sample test)、 竣工試験 (After laying test) について記載 試験項目は、形式試験、受入試験及び竣工試験に ついて、設定 交流超電導電力ケーブルシステム固有の試験項 目を現行電力ケーブルシステムの試験項目の対 比を附属書 C (参考) に記載 交流超電導電力ケーブルシステム試験方法は別 途規定、直流超電導電力ケーブルシステムの試験 方法は当事者間で協議
7.2 試験項目	
7.3 試験方法	
8.表示	各要素製品の表記及び信頼性に係わる表記 要素製品に対する表記、包装の対する表記 (名称 または超電導線の分類、寸法、長さ、重さ、代 表的特性、製造年月日、製造者名) 輸送及び規定環境条件に耐える巻付け、当事者間 で決めたドラム、超電導電力ケーブルの外観等代 表的特性が簡易的に確認できること等を記載
8.1 一般的共通事項	
8.2 要素製品の表記事項	
8.3 要素製品の信頼性	
9.付帯事項	
附属書 A (参考)	超電導電力ケーブルシステムの基本構成概念
附属書 B (参考)	超電導電力ケーブルの構成概念 (a) 常温絶縁超電導電力ケーブル概念構成図 (b) 低温絶縁超電導電力ケーブル構成概念図 (b)-1 単心超電導電力ケーブル (b)-2 三心超電導電力ケーブル (b)-3 三相同軸超電導電力ケーブル
附属書 C (参考)	交流超電導電力ケーブルシステムの試験項目 形式試験 (Type test)、受入試験 (Sample test)、 竣工試験 (After laying test) について詳細な試 験項目について記述
附属書 D (参考)	直流超電導電力ケーブルシステムの試験項目 中間試験項目と完成試験項目について記載
参考文献	

平成 23 年度は、平成 22 年度に作成した規格素案について、CIGRE B1 31 WG

における超電導ケーブル試験法の検討状況等新しい情報を取り入れ、規格素案の見直しを行った。主な修正点を次に示す。

- (1) 3章「用語及び定義」において、CIGREにて検討されている用語の追加
- (2) 6章「性能」において、性能として取り扱う項目の精査
- (3) 附属書Cの交流超電導電力ケーブルシステムの試験項目において、CIGREで検討している試験項目の欄を追加。

平成24年度は、平成23年度版規格素案について見直しを行った。主な修正点は次のとおりである。平成24年度版規格素案の概要を表2.5.2-14に示す。

- (1) 3章「用語及び定義」において、CIGREにて検討されている用語及び定義の見直し
- (2) 附属書A（参考） 超電導電力ケーブルシステムの基本構成概念の見直し

表 2.5.2-14 「超電導電力ケーブルシステムの一般要求事項」の平成24年度版規格素案の概要

目次	概要
まえがき	
序文	
1.適用範囲	電力システムに超電導電力ケーブルを適用するための超電導電力ケーブルシステムに対する一般要求事項について規定
2.引用規格	関連する国際規格のリストを記載
3.用語及び定義	<p>主な用語の定義は、IEC 60050-815:2000によるほか、次による</p> <p>交流損失、Bi系高温超電導体、竣工試験、ケーブルコア、低温絶縁超電導ケーブル、臨界電流、臨界温度、冷凍機、寒剤、冷却システム、クライオスタット・断熱管・断熱層、工場試験、形式試験、受入試験、高温超電導体、高温超電導ケーブル、ジョイント（中間接続部）、低温超電導体、単心超電導ケーブル、監視制御システム、端末（終端接続部）、三心一括型超電導ケーブル、三相同軸超電導ケーブル、Um、U0、Up-p、常温絶縁ケーブル、架橋ポリエチレン、Y系線材</p>
4.使用条件	

<p>5.システム構成</p> <p>5.1 システム一般</p> <p>5.2 超電導電力ケーブル</p> <p>5.3 超電導電力ケーブルシステムの付属機器</p> <p>5.4 超電導電力ケーブルシステムの冷媒循環装置</p>	<p>電力システムの構成要素となる超電導電力ケーブルシステムは、超電導電力ケーブル、中間接続、終端接続等から構成する付属機器及び冷媒循環装置から構成</p> <p>超電導電力ケーブルは、フォーマ、超電導導体層、電気絶縁層、超電導遮へい層、保護層、冷媒流路、断熱管及び防食層から構成</p> <p>超電導電力ケーブル同士を接続する中間接続及び超電導電力ケーブルを室温部の電力ケーブルに接続する終端接続から構成</p> <p>超電導電力ケーブル、中間接続及び終端接続の低温部を超電導状態に維持するために、これらの部位に常に冷媒を循環</p>
<p>6.性能</p> <p>6.1 交流超電導電力ケーブルの性能</p> <p>6.2 直流超電導電力ケーブルシステムの性能</p> <p>6.3 その他付属機器の性能</p>	<p>次の性能項目を明示</p> <p>(1) 定格電圧(kV)</p> <p>(2) 交流耐電圧(kV)</p> <p>(3) インパルス耐電圧(kV)</p> <p>(4) 定格電流(A)</p> <p>直流超電導電力ケーブルシステムを構成する直流超電導電力ケーブルに係わる性能明示項目については、受渡当事者間の協議</p> <p>電力ケーブルシステムにおけるその他付属機器の性能は、IEC60502-2(2005)、IEC60840 Ed4.0(2011)及び IEC62067 Ed1.1(2006)に準拠</p>
<p>7.試験</p> <p>7.1 試験の種類</p> <p>7.2 試験項目</p>	<p>超電導電力ケーブルシステムの試験の種類は、IEC60840Ed4.0(2011)及び IEC62067Ed1.1(2006)に準拠</p> <p>(1) 通常試験 (Routine tests)</p> <p>(2) サンプル試験 (Sample tests)</p> <p>(3) 形式試験 (Type tests)</p> <p>(4) PQ 試験 (Prequalification tests)</p> <p>(5) 竣工試験 (Tests after installation)</p> <p>(6) 適合性試験 (Compatibility tests)</p> <p>試験項目は、通常試験、サンプル試験、形式試</p>

7.3 試験方法 7.3.1 交流超電導電力ケーブルシステム 7.3.2 直流超電導電力ケーブルシステム	<p>験、PQ 試験、竣工試験及び適合性試験について、設定</p> <p>交流超電導電力ケーブルシステム試験方法は別途規定</p> <p>直流超電導電力ケーブルシステムの試験方法は当事者間で協議</p>
8.表示 8.1 一般的共通事項 8.2 要素製品の表記事項	<p>各要素製品の表記及び信頼性に係わる表記</p> <p>(1) 要素製品に対する表記</p> <p>要素製品には、個別規格に規定する事項について表示</p> <p>(2) 包装に対する表記</p> <p>個別製品包装の表面に、消えない方法で表示</p> <p>a)名称または超電導線の分類、b)寸法、c)長さ、d)重さ、e)代表的特性、f)製造年月日、g)製造者名</p>
8.3 要素製品の信頼性	<p>超電導電力ケーブル本体の信頼性を確保するため、次の取扱い</p> <p>(1) 超電導電力ケーブルを、輸送及び規定環境条件に耐える巻付け</p> <p>(2) 超電導電力ケーブルの巻付け整備は、当事者間で決めたドラム</p> <p>(3) 超電導電力ケーブルの外観等代表的特性が簡易的に確認できること</p>
9.付帯事項	
附属書 A (参考)	超電導電力ケーブルシステムの基本構成概念
附属書 B (参考)	<p>超電導電力ケーブルの構成概念</p> <p>(a) 常温絶縁超電導電力ケーブル概念構成図</p> <p>(b) 低温絶縁超電導電力ケーブル構成概念図</p> <p>(b)-1 単心超電導電力ケーブル</p> <p>(b)-2 三心超電導電力ケーブル</p> <p>(b)-3 三相同軸超電導電力ケーブル</p>
附属書 C (参考)	交流超電導電力ケーブルの試験項目

2.5.2-5 超電導電力ケーブル試験方法の規格素案の作成

交流超電導電力ケーブルと現行の常電導電力ケーブルとの大きな操作上の相違

点は、現行電力ケーブルよりも約 150 °C以上低い温度で操作されること、超電導固有の材料に依存する臨界温度、臨界電流値があること等を挙げることができる。したがって、初期導入・運用機関並びに初期操作関係技術者を対象とした視点で検討した。まず、一般的な技術課題は、交流超電導電力ケーブルが、どの程度信頼性がある、それをどのように定量的に試験し、規格にどのように反映するかである。信頼性試験に関する一般的な事項を調査し、交流超電導電力ケーブルにおける信頼性試験事例の情報収集、これらの試験方法規格素案への反映について検討を進めることにした。

また、CIGRE SC WG B1 31 のガイドラインが交流超電導電力ケーブルにあることから、交流超電導電力ケーブル試験方法に注力した。前期 3 ヶ年においては、交流超電導電力ケーブル試験方法に関して、Super-ACEでの検討結果、平成 12 年度交流超電導電力機器基板技術研究開発プロジェクトでの検討結果^[3]及びAEICのPOFケーブルの試験項目内容^[4]をまとめ、超電導電力ケーブルの試験方法の規格素案を作成した。その概要を表 2.5.2-15 に示す。

表 2.5.2-15 「交流超電導電力ケーブルの試験方法」の規格素案の概要

目次	概要
まえがき	
序文	
1.適用範囲	酸化物系超電導線材を適用した交流超電導電力ケーブルであって、低温電気絶縁を施した単心、三心または三相同軸型ケーブル構造を有し、かつ液体窒素循環装置に適合するケーブルに適用
2.引用規格	関連する国際規格のリストを記載
3.用語	主な用語の定義は、IEC 60055-1:2005 及び IEC 60050-815:2000 によるほか、次による公称電圧、ケーブル及びその付属機器が通常動作する電圧、最高インパルス耐電圧、ケーブル及びその付属機器に印加できる最高の電圧、定格電圧、最大許容電圧、地絡継続時間、定格値、概略値、測定値、接続、端末、臨界電流、運転温度、環境温度、最大許容張力を記載

4.一般要求事項	
4.1 一般試験条件	環境温度、周波数試験電圧の周波数及び波形、雷インパルス試験電圧の波形、開閉インパルス試験電圧の波形、試験電圧と定格電圧の関係について記載
4.2 超電導固有試験条件	試験温度及び圧力、試験ケーブル長について記載
5.試験	
5.1 試験の種類	形式試験 (Type test)、受入試験 (Sample test)、
5.2 試験対象	竣工試験 (After laying test) について記載 超電導電力ケーブルであって、超電導電力システムを構成する中間接続、終端接続及び冷媒循環装置を含まない
5.3 試験項目	形式試験 (Type test)、受入試験 (Sample test)、竣工試験 (After laying test) の詳細な試験項目について記述
5.4 超電導固有試験方法	超電導固有の試験方法は、附属書 A による
6.性能	
6.1 基本性能明示事項	交流超電導電力ケーブルの表に示す性能事項を明示しなければならない
6.2 固有性能明示事項	ルートプロフィール (ケーブル高低差、冷却区間長、ケーブル単長等)、ケーブル布設条件 (管路、洞道等) 等を加味しなければならない
6.3 交流超電導電力ケーブル性能事例	性能事例を附属書 B に示す
附属書 A (規定)	交流超電導電力ケーブルの固有試験方法 出荷耐電圧試験、商用周波数耐電圧試験、雷インパルス耐電圧試験、部分放電試験、臨界電流試験、交流損失試験、断熱性能試験、保護層の耐電圧試験について規定
附属書 B (参考)	交流超電導電力ケーブルの性能事例

形式 (Type) 試験項目 (表 2.5.2-7)、受入試験項目 (表 2.5.2-8)、竣工試験項目 (表 2.5.2-9) はすでに示したとおりであるが、中間接続、端末、安全弁、真空排気設備等附属部品・関連設備の試験項目は、本プロジェクト終了後の検討項目とす

る。

平成 23 年度は、平成 22 年度に作成した規格素案について、CIGRE SC WG B1 31 における超電導ケーブル試験法の検討状況等新しい情報を取り入れ、規格素案の見直しを行った。主な修正点を次に示す。

- (1) 4 章「一般試験条件」において、試験電圧表を追加。
- (2) 5 章「試験」において 5.3.1 形式試験、5.3.2 受入試験、5.3.3 竣工試験の試験項目表に CIGRE での項目が分かるように列を追加。
- (3) 6 章「性能」において

6.1 基本性能より基本諸元の方が適していると考え、それに変更。

- (4) 付属書 B として CIGRE にて検討されている試験項目のうち、形式試験の試験内容を追記。

平成 24 年度は、平成 23 年度版規格素案について見直しを行った。主な修正点は次のとおりである。

付属書 C を見直し、実証ケーブル、Y 系ケーブル（大電流ケーブル、高電圧ケーブル）の試験例を追加

平成 24 年度版規格素案の概要を表 2.5.2-16 に示す。

表 2.5.2-16 「交流超電導電力ケーブルの試験方法」の規格素案の概要

目次	概要
まえがき	
序文	
1.適用範囲	酸化物系超電導線材を適用した交流超電導電力ケーブルであって、低温電気絶縁を施した単心、三心または三相同軸型ケーブル構造を有し、かつ液体窒素循環装置に適合するケーブルの試験方法について適用
2.引用規格	関連する国際規格のリストを記載
3.用語 3.1 公称電圧 3.2 最高インパルス耐電圧 3.3 定格電圧 3.4 最大許容電圧 3.5 地絡継続時間 3.6 定格値 3.7 概略値 3.8 測定値 3.9 接続	主な用語の定義は、IEC 60055-1:2005 及び IEC 60050-815:2000 によるほか、左記による

<p>3.10 端末 3.11 臨界電流 3.12 運転温度 3.13 環境温度 3.14 最大許容張力</p>	
<p>4.一般要求事項 4.1 一般試験条件 4.1.1 環境温度 4.1.2 周波数試験電圧の周波数及び波形 4.1.3 雷インパルス試験電圧の波形 4.1.4 開閉インパルス試験電圧の波形 4.1.5 試験電圧と定格電圧の関係 4.2 超電導固有試験条件 4.2.1 試験温度及び圧力 4.2.2 試験ケーブル長</p>	<p>一般試験条件は、IEC60840 並びに IEC62067 に準拠し、左記の通り。</p> <p>超電導電力ケーブルの試験温度及び圧力を選定する 試験に供する完成品または中間品のケーブル長は、試験者の試験に先立つ選定、当事者間の協議によって選定する</p>
<p>5.試験 5.1 試験の種類 5.2 試験対象 5.3 試験項目 5.4 超電導固有試験方法</p>	<p>(1) PQ 試験(Prequalification tests) (2) 形式試験(Type tests) (3) 工場出荷試験 (4) 竣工試験(Tests after installation)</p> <p>超電導電力ケーブルであって、超電導電力システムを構成する中間接続、終端接続及び冷媒循環装置を含まない</p> <p>形式試験 (Type test)、受入試験 (Routine test, Sample test)、竣工試験 (After laying test) の詳細な試験項目について記述</p> <p>超電導固有の試験方法は、附属書 A による CIGRE WG B1 31 で議論されている超電導ケーブル試験法の中で、形式試験の内容を附属書 B に示す</p>

6.性能	
6.1 基本諸元明示事項	交流超電導電力ケーブルの諸元について、表に示す事項を明示しなければならない
6.2 固有性能明示事項	ルートプロフィール（ケーブル高低差、冷却区間長、ケーブル単長等）等を加味しなければならない
6.3 交流超電導電力ケーブル性能事例	交流超電導電力ケーブル性能事例を附属書 C に示す。
附属書 A (規定)	交流超電導電力ケーブルの固有試験方法 出荷耐電圧試験、商用周波数耐電圧試験、雷インパルス耐電圧試験、部分放電試験、臨界電流試験、交流損失試験、断熱性能試験、保護層の耐電圧試験について規定
附属書 B (参考)	CIGRE で検討した形式試験の内容 適用範囲、形式試験要領、ケーブルシステムの形式試験の試験方法
附属書 C (参考)	交流超電導電力ケーブルの試験事例

参考文献リスト

- [1]田辺茂ほか：直流システム関連規格の状況、平成 21 年電気学会産業応用部門大会シンポジウム S10、2009 年 9 月 2 日
- [2]小山茂ほか：紀伊水道横断 DC±500kV 海底 OF ケーブル、フジクラ技報、第 98 号、pp28-37、2000 年 4 月
- [3]平成 12 年度 委託業務成果報告書 交流超電導電力機器基盤技術研究開発 トータルシステム等の研究 導入効果等の調査 平成 12 年度成果報告書 平成 13 年 3 月
- [4] Specification for impregnated paper and laminated paper polypropylene insulated cable high-pressure pipe-type (5th edition), Association of Edison Illuminating Companies (AEIC) 600 North 18th Street, Post Office Box 2641 Birmingham, Alabama 35291-0992, May 1990, AEIC-CS2-90

2.5.3 超電導電力機器関連技術標準化 (ISTEC、中部電力、古河電気工業、九州電力、フジクラ、昭和電線ケーブルシステム)

前期 3 ヶ年においては SMES、超電導変圧器等の機器仕様並びにこれらの試験方法の標準化の基礎となるデータ等を調査するとともに、技術動向並びに標準化ニーズ調査も実施した。これらの結果を基に SMES 及び超電導変圧器の規格骨子案を作成した。

後期2ヶ年においては、Y系を含む超電導線材等を適用した超電導変圧器、SMESの機器仕様並びにこれらの試験方法の標準化素案を作成した。また、超電導限流器等超電導電力機器の標準化を進めていく上で他機関との連携が必要との議論がなされた。そうした中でIEC/TC90とCIGRE D1との間でリエゾン関係を結ぶことになり、国際合意醸成活動を行った。さらに、冷却システムの安全性、運用性を考慮した規制緩和に向け、過去の超電導電力ケーブルに関する提案資料の調査を行い、また、関係機関へのヒアリング等により最新の動向調査を行い、規制緩和に向けた提案資料を作成した。

2.5.3-1 SMES導入に係わる固有事項の調査

(1)SMES導入に関する国内外の情勢

国際エネルギー機構（International Energy Agency, IEA）は、2050年までにCO₂排出量を半減させるシナリオ（BLUE Mapシナリオ）として、再生可能エネルギー源を積極的に導入する場合に不可欠と考えられる電力貯蔵設備の拡充に着目し、本プロジェクト開始時点では、100 GWの設備能力を2050年までに500 GWまで増加させる数値目標を設定している。この目標達成のためには、現行の主力揚水発電に加え電池、CAES（圧縮空気エネルギー貯蔵）、SMES等の得失分析調査が必要としている。超電導エネルギー貯蔵研究会（RASMES）は、平成20年12月IEAのこの活動・要請に応じたWGを発足し、平成21年4月に報告書をIEAに提出した。

IEAが想定する2050年迄に最大305 GWの必要貯蔵設備に主力揚水発電に加え電池、CAES、SMES等の貯蔵設備を想定しており、これらのうちSMESにはその優れた性能から今後の貯蔵装置として期待されている。

国内のSMES開発は、国家プロジェクトとして多目的用途SMESから用途を系統安定化・負荷変動補償の電力系統制御用に絞り、平成3年度から進められてきており、現在は4期目のY系超電導線材を用いたコイル開発が取り組まれている。この背景には、従来の金属系SMESでは系統制御用途のSMESであっても貯蔵エネルギーが500 kWh(1.8GJ)クラスの容量を実現するためには電力貯蔵部である超電導コイルやそれを保冷するクライオスタットが大型となるため、Y系超電導線材の特長である高磁場での高い通電特性と電磁力にも耐えうる高強度を活かしたコイル開発により、コンパクトで低コストなSMESを実現することが狙いにある。また、最近活発に検討されている再生可能エネルギーの電力系統への大量導入の将来シナリオにおいて、電力の需給調整力として、従来、火力発電の果たしてきた役割を担う調整能力が必要との議論がある。これに対し、繰り返しの電力の入出力を行っても電力貯蔵部が劣化せず、応答性も速いSMESが火力発電に代わって機能することで、CO₂削減にも寄与することが期待されている。

再生可能エネルギーの導入は、陸上風力を年間4800万kW、洋上風力を2300万kW、太陽光発電3000万kW、太陽熱発電2000万kW、地熱発電10万kWの

増設を見込んでいる。2008年の欧州委員会では、風力イニシャティブ、貯蔵イニシャティブ、電力系統イニシャティブ等の戦略計画が提示されている。これに呼応して、我が国の「Cool Earth—エネルギー革新技術計画」2009年8月では、高性能電力貯蔵に関して日欧で蓄電分野の安全性と寿命に関する評価・試験方法について連携していくことが合意されている。再生可能エネルギーの導入候補のうち、図2.5.3-1に示すように出力の不随変動対策（出力安定化）が特に不可欠な風力発電の年間7100万kWに対応可能な出力100-200MW級SMESとして、表2.5.3-1に示すような3つの用途モデルが提示されている。

IEAの風力発電時間8時間/日、稼働率50%、稼働期間42年間として必要貯蔵容量の再調査により、2050年までに全世界で必要とする貯蔵設備が最大305GWになる。一方、現行の貯蔵設備で賄えるのは100GWに過ぎないことを考慮すると、RASMESが提示したSMESは、有力な技術候補になるものと期待される^[1]。

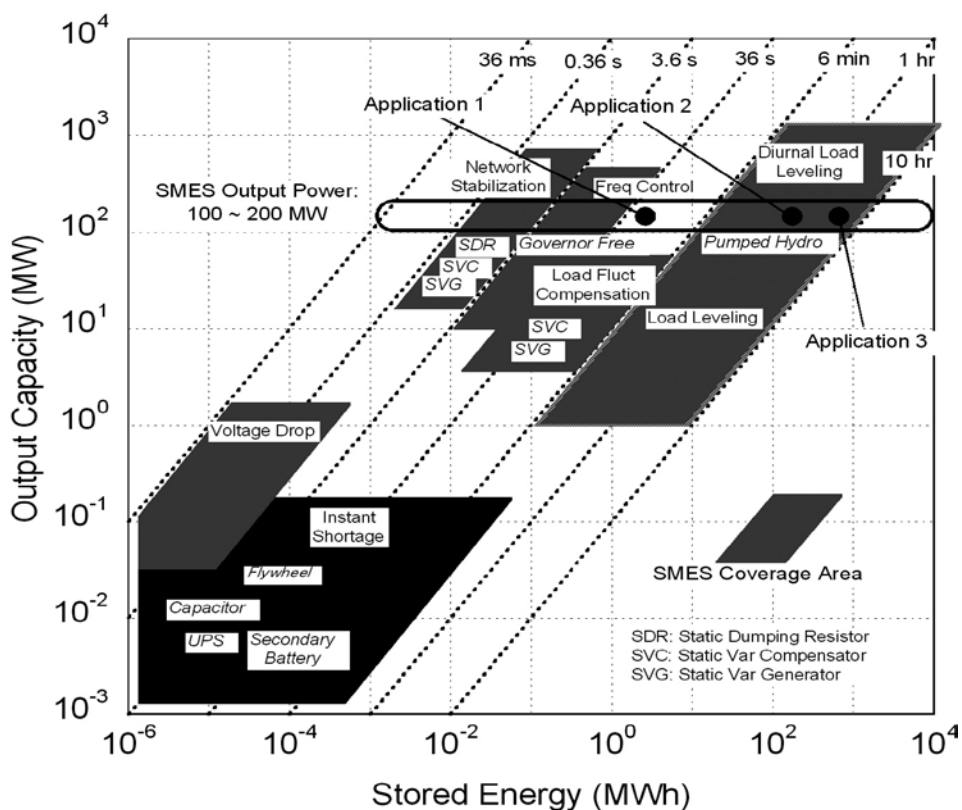


図 2.5.3-1 代表的な SMES システムの入出力と貯蔵容量の関係

表 2.5.3-1 各用途 SMES の概要

	用途 1	用途 2	用途 3
目的	周波数調整・負荷変動補償・発電変動補償：分単位補償	負荷平準化：ピークカット効果	日負荷平準化：揚水代替
出力、MW	100～200	100～200	100～200
補償時間	100 sec	30 min～1 hr	5～10 hr
使用可能貯蔵エネルギー、MWh(GJ)	3～6 (10～20)	50～200 (180～720)	500～2000 (1800～7200)
備考	対応技術ほぼ完成	技術展開可能	技術課題大

(2)超電導エネルギー貯蔵研究会 (RASMES) の報告書の調査

SMES 装置 1 基当たりの設備容量を技術的に可能とされる 100-200 MW に設定し、導入対象を①分単位補償（風力対応等周波数調整、負荷変動補償、発電変動補償）、②30 分-1 時間負荷変動補償及び③5-10 時間補償（日負荷平準化）の 3 パターンとして提案されている。大型超電導コイル技術の実績として①の対象に対応する蓄積エネルギーとして 1-数 10 GJ のシステムを達成ことは可能であるが、SMES コイルの実績としては 5-20 MJ の水準であることから、導入対象の規模に依存するが小容量のコイルを 10 個程度並列ユニット化するシステムモデルを提案した。

SMES システムの経済性に関しては、現行の超電導コイルの価格実績並びに国プロによるコスト低減予測を参考に、現行の¥10 M/kWh(3.6MJ)を 1/100 にするためには SMES システムが複数個設置できることで¥100 k/kWh(3.6MJ)が達成できるとの試算が行なわれている。さらに、SMES システムの経済性を競合機と比較するためには、ライフサイクルコストで比較することの必要性を指摘されている。この観点から評価すれば、SMES の年間コストは NaS 電池や揚水発電よりも有利であるとの試算が行なわれている。

(3)「リチウム系超電導電力機器技術開発」における SMES 開発について

IEA 向け RASMES の報告書は、プロジェクトにおける SMES が掲げる技術的方向性（20 MJ→200 MJ→2 GJ）に合致するものであると同時に、将来の SMES 技術の適用対象を再生可能エネルギー源用電力貯蔵設備と明確化されている点で大きく評価し、SMES 技術の展開の一選択肢として考えられる。SMES はその電力貯蔵の原理から、大容量の電力貯蔵には必ずしも有利ではなく、短時間に大出力が可能な瞬時電圧低下補償、系統安定化用途や、数 sec～分周期の充放電の繰り返し

しが求められる負荷変動補償、周波数調整用途に適した電力機器として期待されている。RASMES の報告書は、SMES の開発初期にめざした揚水発電代替の時間オーダーの GWh(3.6TJ)級電力貯蔵の可能性について、競合技術となる NaS 電池との比較結果が提示されており、性能面だけでなくコストでも十分競合すると結論付けられている。SMES 開発が直ちに GWh 級の大容量化に向かうとは考えにくい、少なくとも将来の再生可能エネルギー大量導入により必要となる需給調整機能を有した電力機器として、現在、国家プロジェクトで開発ターゲットとしている出力 100 MW/10 sec、最大使貯蔵エネルギー 2 GJ(500 kWh)級 SMES の早期実現が期待されることは言うまでもない。

(4)高圧ガス保安法等地域法令

SMES は、電気事業法における電気工作物の適用を受ける・受けないに係わらず、その冷凍に関しては現行法において高圧ガス保安法の適用を受けるため、冷凍機に係わる規制緩和の取り組みを行った経緯がある。

高圧ガス保安法も個別の機器容量によって単機容量規制かシステム総容量規制かを適用地域自治体毎に精査することが肝要である。また、この方式を国際標準にどのように展開するか、あるいはさらなる法令緩和を必要とするかは、今後の諸外国の法令調査の結果によって判断することが肝要である。

2.5.3-2 SMES 関連規格骨子案・標準化素案の作成

2008 年の IEC/TC90 ドイツ・ベルリン会議によると、超電導電力ケーブルを除く SMES 等超電導電力機器の国際標準化ニーズが急速に進展する可能性は低いと判断された。かかる状況に鑑みて、前期 3 ヶ年においては前項の調査結果等及び関連 IEC 規格を参考にして、SMES 規格骨子案を作成した。その目次を表 2.5.3-2 に示す。本規格骨子案では、SMES システム通則と SMES の試験方法を融合し、SMES システム通則事項を一般要求事項に集約した。また、SMES の試験方法を新試験方法とした。さらに付帯事項として、環境側面（企画、設計、製造、設置、廃棄）及び安全側面（冷媒、発生ガス）を記載することを検討した。

表 2.5.3-2 「SMES の通則」の規格骨子案の目次

超電導磁気エネルギー貯蔵装置に対する一般要求事項 General requirements for superconducting magnetic energy storage system
目次
まえがき
序文
1. 適用範囲

2. 引用規定
3. 用語
4. 一般要求事項 4. 1 使用条件 4. 2 定格 4. 3 性能 4. 4 構成 4. 5 試験 4. 6 表示（銘板に記載すべき事項）
5. 試験方法 5. 1 SMES システム試験方法 5. 2 SMES デバイス試験方法
6. 付帯事項 6. 1 環境側面 （企画、設計、製造、設置、廃棄、省エネルギー効果、CO ₂ 排出量削減効果） 6. 2 安全側面 （冷媒、発生ガス）
附属書 A（参考）代表的 SMES システムの入出力と貯蔵容量
附属書 B（参考）SMES の基本的要素の概念構成
附属書 C（参考）SMES システムの試験項目
附属書 D（規定）SMES デバイスの試験項目
附属書 E（参考）SMES の仕様事例
引用文献

後期 2 ヶ年においては、平成 22 年度に作成した SMES 規格骨子案を見直し、平成 23 年度版標準化素案を作成した。主な見直し内容は次の通りである。

- ・引用規格について、JEC 等国内規格を該当する IEC 規格に修正
- ・用語及び定義の記述内容の一部を見直し
- ・附属書記載内容の一部見直し

また、平成 24 年度は、平成 23 年度版標準化素案について、次の追記、修正を行い、平成 24 年度版標準化素案を作成した。その目次を表 2.5.3-3 に示す。

- ・附属書 E に、SMES の概念図並びに機器仕様の一例として、これまで国プロで検討されてきた 2GJ 級周波数調整・負荷変動補償用途 SMES の一例を追記
- ・附属書 C,D を試験項目でなく試験方法の記述に修正。これに伴い、表中の目的を試験方法に修正。
- ・その他、フォントの統一や誤記を修正。

表 2.5.3-3 平成 24 年度版「SMES の通則」の標準化素案の目次

超電導磁気エネルギー貯蔵装置に対する一般要求事項 General requirements for superconducting magnetic energy storage system
目次
まえがき
序文
1. 適用範囲
2. 引用規定
3. 用語及び定義
4. 原理
5. 特性試験項目
6. 特性試験方法
7. 報告
8. 付帯事項
附属書 A (参考) 代表的 SMES システムの入出力と貯蔵容量
附属書 B (参考) 超電導磁気エネルギー貯蔵装置の基本的要素の概念構成
附属書 C (参考) SMES システムの推奨試験方法
附属書 D (規定) SMES デバイスの試験方法
附属書 E (参考) 超電導磁気エネルギー貯蔵装置の概念図及び仕様例
引用文献

2.5.3-3 超電導変圧器関連規格骨子案・標準化素案の検討

SMES と同様に超電導変圧器の国際標準化ニーズも急速に進展する可能性は低いと予想されていることから、前期 3 ヶ年においては、前項の SMES 等の調査結果等及び関連規格 (IEC60076-1 (変圧器一般)、JEC2200 (1995) (変圧器)) を参考にして、超電導変圧器の規格骨子案を作成した。超電導変圧器の規格骨子案の目次を表 2.5.3-4 に示す。

本規格骨子案では、超電導変圧器通則的事項を一般要求事項とし、超電導変圧器固有試験方法を現行変圧器試験方法と超電導変圧器試験方法とで構成した。照合並びに注文の際の指定事項及び開発試験を附属書 (参考) に記載した。また、試験方法は、一般的試験方法は現行規格の引用記述とし、超電導変圧器固有の試験方法を **normative** (ノルマティブ: 規定) として詳述する方針とした。さらに、注意事項を付帯事項に集約し、環境側面 (企画、設計、製造、設置、廃棄) 及び安全側面 (冷媒、発生ガス) に記載することを検討した。

表 2.5.3-4 「超電導変圧器の通則」の規格骨子案の目次

超電導変圧器に対する一般要求事項及び試験方法
General requirements for superconducting transformers and their test methods
目次
まえがき
序文
1. 適用範囲
2. 引用規定
3. 用語
4. 一般要求事項
4. 1 使用状態
4. 2 定格
4. 3 構造
4. 4 裕度
4. 5 試験
4. 6 表示（銘板に記載すべき事項）
5. 試験方法
5. 1 一般試験方法（IEC60076-1（変圧器一般）及びJEC2200(1995)（変圧器）の引用）
5. 2 超電導変圧器固有の試験方法
6. 付帯事項
6. 1 環境側面 （企画、設計、製造、設置、廃棄、省エネルギー効果、CO ₂ 排出量削減効果）
6. 2 安全側面 （冷媒、発生ガス、騒音）
附属書 A（規定） 箇条 1 から箇条 6 までの追加規定事項
附属書 B（参考） 変圧器の照合並びに注文の際の指定事項
附属書 C（参考） 超電導変圧器の開発試験
附属書 D（参考） 単相 1 MVA 高温超電導変圧器の製作仕様事例－Bi 系
附属書 E（参考） 単相 2 MVA 高温超電導モデル変圧器の製作仕様事例－Bi 系
附属書 F（参考） 66kV/6.9kV-2MVA(20MVA)高温超電導モデル変圧器の製作仕様事例－RE 系
引用文献

後期 2 ヶ年においては、平成 22 年度に作成した超電導変圧器規格骨子案を見直し平成 23 年度版標準化素案を作成した。主な見直し内容は次の通りである。

- ・引用規格について、JEC 等国内規格を該当する IEC 規格に修正

- ・附属書 B~F は、規格としては不要なので削除
- ・安全について、付帯事項ではなく 7 項に入れた

また、平成 24 年度は、平成 23 年度版標準化素案を基に見直しを行った。

最先端の超電導技術を適用した超電導変圧器は、巻線技術や冷却システム等、超電導変圧器固有の技術が必要であり、また、超電導変圧器に係わる製造者の経験、ノウハウの蓄積、付属構成部品を含めた信頼性の実証、総合的経済性の追求等諸問題の解決も必要である。したがって、超電導変圧器の一般要求事項及び試験方法を規格化することは、電力流通設備の技術と相俟って効率的な変電技術進展の一助となり、工業的に極めて有効であると考えた。このため、変圧器関連規格である IEC60076、JEC2200 及び超電導電力機器として規格検討が進んでいる電力ケーブルを参考にして、超電導変圧器の標準化素案を検討した。超電導変圧器の標準化素案の目次を表 2.5.3-5 に示す。本標準化素案では、IEC60076 に準拠した構成とし、超電導固有の要求事項及び試験項目を追記した。特に、試験項目及び超電導固有試験方法について、本プロジェクトで実施した超電導変圧器研究開発の「2MVA 級超電導変圧器モデル検証」の試験計画及び結果を反映した。

表 2.5.3-5 平成 24 年度版「超電導変圧器の通則」の標準化素案の目次

電力変圧器—第 XX 章：超電導変圧器
Power transformers-Part XX: Superconducting Power Transformers
目次 まえがき 序文
1 適用範囲
2 引用規格
3 用語及び定義
4 構成
5 使用条件
6 定格及び一般要求事項
7 タップ
8 接続
9 温度上昇
10 絶縁
11 短絡強度
12 表示
13 安全、環境及びその他の要求事項
14 裕度
15 試験
16 付帯事項
附属書 A (参考) 超電導変圧器概念図
附属書 B (参考) 超電導変圧器の照合並びに注文の際の指定事項
附属書 C (規定) 超電導変圧器の超電導固有の試験方法
参考文献

2.5.3-4 超電導電力関連機器の標準化ロードマップと国際合意醸成活動

図 2.5.3-2 に超電導電力関連機器の標準化ロードマップを示す。実用超電導線材に関してはすでに通則が NP として取り上げられており、電力ケーブルについても IEC/TC90 と IEC/TC20 のリエゾン関係の下に規格化に向けた活動が進んでいる。

後述するように、限流器と回転機の実用化が具体的になりつつあり、電力ケーブルに続く電力関連機器として規格化を進める活動が必要であると考えられる。SMES に関しては関連する従来機器が存在しないが、限流器、回転機及び変圧器に関しては IEC の下に TC が設置され、活動を行っており、リエゾン関係を取りつつ規格化活動を進めて行く必要がある。従って、図 2.5.3-2 に示すロードマップはこれら委員会とのリエゾン関係をも含めた国際的な合意醸成が順調に進んだ場合を想定している。

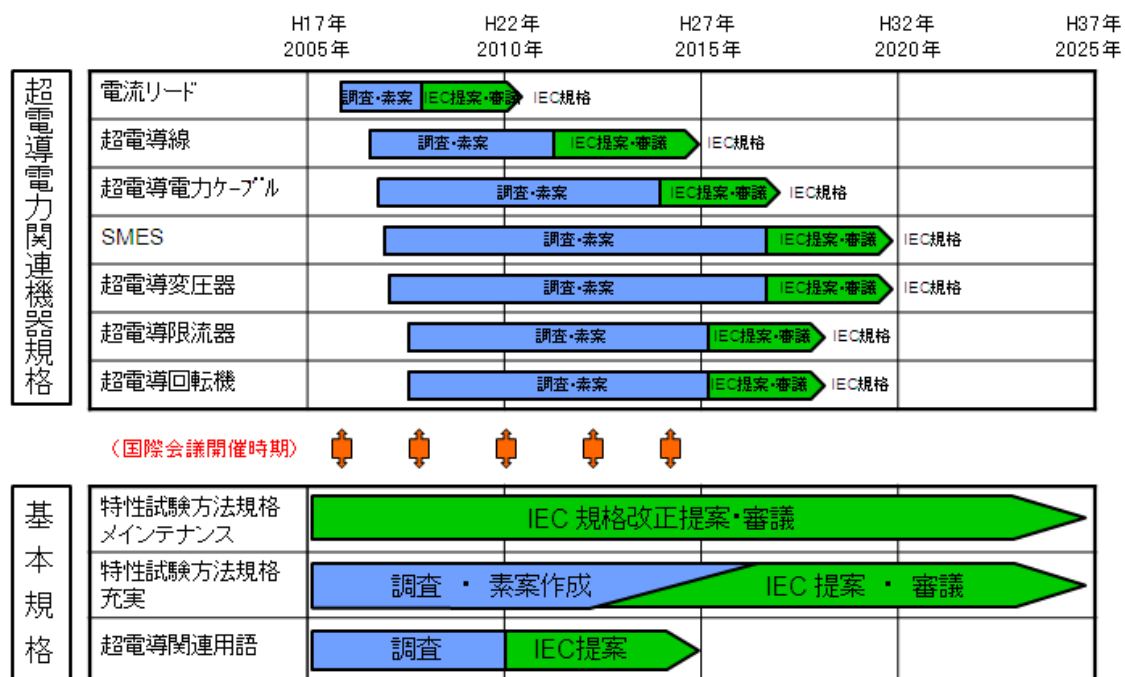


図 2.5.3-2 超電導電力関連機器の標準化ロードマップ

国際標準化を進めていくためには、関係する国、国際機関との連携を図り、国際的な合意を醸成していくことが重要である。こうした中で、IEC/TC90、国際大電力システム会議（CIGRE）と連携し、国際合意の醸成活動を行った。8月に西安で開催された IEC/TC90 会議での提案を基に IEC/TC90 と CIGRE SC D1（材料と新技術の研究委員会）との間でリエゾン関係が結ばれることになった。今後は材料、絶縁及び冷却技術分野における高温超電導電力機器の共通事項について連携して活動していくことになった。

2.5.3-5 安全・環境面に関する規制調査及び規制緩和提案

超電導電力機器は、電気事業法における電気工作物の適用を受ける・受けないに係わらず、その冷凍に関しては現行法において高圧ガス保安法の適用を受けるため、冷凍機に関わる規制緩和の取り組みを行った経緯がある。また、低温機器に関連する組織においても、今後の超電導機器の実用化、導入をめざして、安全を考慮した高圧ガス保安法の在り方について検討が進められている。それらの動向を踏まえつつ、高圧ガス保安法の精査が必要であり、また、超電導電力機器の国際標準を展開する上で、諸外国の法令調査が必要不可欠となる。

そこで、超電導電力機器小委員会は今後実用化、導入される超電導電力機器システムに係わる冷凍システム関連規則について国内外の関係機関の調査を行った。

国内においては、(公財)関西経済連合会、(公社)低温工学・超電導学会、NEDOプロジェクトにおける活動調査、さらに高圧ガス保安協会との面談を行った。

海外の高圧ガス保安に関する調査では、極低温機器を必要とし、実際に極低温機器を設置・利用している高エネルギー物理研究機関である欧州原子核研究機構(CERN^[2])と米国フェルミ加速器研究所(FNAL^[3])の極低温機器に関連する安全規則について調査した。また、現在建設が進められているITER機関の高圧ガス保安についても調査を行った^{[4][5][6][7][8][9][10]}。

欧米では、我が国のように高圧ガス安全のための技術基準が法規に明記されているのではなく、メーカーの責任の基にISO、DIN、ASME等の技術コードに従って機器を設計、製作している。また、CERNやFNALでは各々の機関で安全基準が決められている。なお、以下のURLから安全基準を参照することができる。

ITERでは、我が国に設置するものではないので、我が国の高圧ガス保安法に準拠する要求はなく、また、欧州の圧力規格(Pressure Equipment Directive: PED)やASME等の規格に準拠することも要求されていないが、ASME条項を参照して超電導コイルの設計ガイドラインが作成されている。ITERの超電導導体や超電導コイルの製作については、ITER建設の主体となる国際事業体である「ITER機構」が提示する構造仕様に従って、製作及び検査を行うことが定められている。国内では、ITERの国内誘致を想定して超電導コイル構造規格の検討がされ、2008年10月に「核融合設備規格超電導マグネット構造規格2008年版」として発行されている。この規格は、超電導コイル構造体とその支持構造物に適用し、材料、構造設計、溶接、非破壊検査等に関するものとなっている。一方、日本の核融合炉用構造規格作成の活動が契機となりASMEでもASME B&PV CodeのSection III Division 4として核融合規格を新設するため、ASME Sub-Group on Fusion Energy Devicesが発足し、核融合のデモ炉の建設規格作成を目的とする活動を開始している。

国内の動きとしては、(公財)関西経済連合会産業・科学技術委員会が「次世代環境技術の普及に関する要望」(2008年12月)として、将来の実用化に向けた施策の中で、ヘリウムやネオンといった不活性ガスを用いた冷凍機に対する高圧ガス保安法並びに冷凍則によって、既存のフルオロカーボン冷凍機に比べて厳格な管理

が必要とされ、これが超電導ケーブルの実用化・普及促進に対して大きな問題点になっており、現行法の見直しを要望するという提案をしている。

また、前NEDO事業の「超電導電力ネットワーク制御技術開発（平成16～19年度）」プロジェクトにおいて法令対応WGが、SMESの実系統への導入に際して電気事業法、高圧ガス保安法・冷凍則等の関係法令対応の簡素化と規制緩和に向けた検討を行った^[11]。関西経済連合会の提案と同様に、不活性ガスを用いた冷凍機に対する高圧ガス保安法並びに冷凍則の規制緩和の必要があると結論している。

（公社）低温工学・超電導学会でも、環境・安全委員会が2011年度より超電導機器に関連する冷凍機等の分野に関連する法規制における課題抽出、改善の提案をするべく調査活動を開始している。当面は超電導電力ケーブルや冷凍機等を対象とした規制緩和の提言をまとめるよう活動が行われている^{[12][13][14]}。

高温超電導線材が実用に供され、直近の超電導電力ケーブルの導入を初めとして限流器、SMES、変圧器等超電導電力機器の実用化が世界規模で進められようとしている。それに伴い、ネオン、窒素等不活性ガス冷凍機の利用や高圧ガス安全を確保しつつ、超電導電力機器をスムーズに導入できるような体制を作ることが重要である。以上の観点から、我が国の高圧ガス保安法における課題を抽出し、国際的視野の点からもより合理的なものにしていくことが、超電導電力機器の導入とそれに伴う標準化活動にとって必要不可欠である。

規制緩和提案

国内における（公社）低温工学・超電導学会等超電導電力機器に関連する組織等の高圧ガス保安法への取り組み状況調査や高圧ガス保安協会との面談、並びに国外の低温機器を取り扱っている研究機関における安全・保安の調査に則り、以下のような高圧ガス保安に関して合理化案を提案する。

- ・冷凍保安規則で定義される不活性ガスは、二酸化炭素、フルオロカーボン、ヘリウムの3種類であるが、ネオン、アルゴン等の不活性ガスも含めるようにし、超電導機器に用いる冷凍機の高効率化、大型化、低コスト化開発を促進する。
- ・ヘリウム、ネオン等の不活性ガスを用いた冷凍機の冷凍能力判定基準に関して、フルオロカーボンと同様の判定基準が適用できるようにする。
- ・不活性ガスを用いる全種類の圧縮機で冷凍能力算出方式を見直し、圧縮入力1.2kWを1冷凍トンと定義する。
- ・ヘリウム、ネオン等の不活性ガスを用いる冷凍機の1日1回以上の目視による設備点検義務を適用除外し、万が一の際には迅速な対処ができる体制を確立し、かつ安全性を十分確保することによって、遠隔監視による日常点検の基で装置を稼働できるようにする。

2.5.3-6 限流器・回転器等超電導電力機器の技術調査

国内外で開発が進んでいる超電導限流器及び超電導回転機等を取り上げ、これら

超電導電力機器の標準化を目的として技術調査を実施した。

(1)超電導限流器

a. 用語

①超電導限流器 superconducting fault current limiter

限流器は、落雷等に伴う電力系統内の短絡事故時に発生する過大な事故電流を抑制する装置であり、超電導限流器は従来の非超電導タイプと比較して、次の2つの特長を有する。

- ・平常時の送電損失が非常に小さい。(従来タイプの1/10以下)
- ・事故時の限流動作が素早い。(事故電流によるクエンチ現象を利用して瞬時に動作)

②限流機能付き超電導電力機器 superconducting power equipment with functional current limiting

前項①の超電導機器は単体で存在するものであるが、近年は超電導変圧器や超電導ケーブルに限流機能が付加されたタイプも研究開発されている。これは、超電導電力機器(変圧器、ケーブル)自体の機能を維持しながら、機器構成を大幅に変更することなく限流機能を有するものである。

b. 分類

①超電導限流器

- －SN転移型(抵抗型、鉄心飽和型)
- －整流器型(超電導コイル型)

c. 技術の現状

①SN転移型

1980年代後半、金属系超電導線材(NbTi線材)の製造に併せ、超電導限流器の開発が始まった。その後、酸化物超電導線材(Bi系、Y系線材)が製造され始めると、国内外で高温超電導限流器の研究が進められるようになった。

②整流器型

上述のSN転移型における酸化物超電導線材(Bi系超電導線材)の製造に併せ、国内外で高温超電導限流器の研究が進められるようになった。

③各国の開発状況

2010年1月時点における各国の開発状況を表2.5.3-6及び表2.5.3-7に示す。超電導限流器は単体、変圧器組込型、ケーブル組込型の3つの形態で研究が進められていることが分かる。超電導限流器の開発については、実用化に向けた取組みが各国で実施されているが、全体的に見ればまだ研究途上にあり、その技術動向を今後も見守っていく必要がある。

中国のプロジェクトではBi系超電導線材の限流器単体型で実運用中である。名古屋大学では、2MVAの超電導限流変圧器を製作し、限流動作試験及び超電導復帰試験を実施中である。また「リットリウム系超電導電力機器技術開発」(本プロジェクト)では、四巻線構造のモデル変圧器を使った試験で限流機能の現象確認を

行い、400kVA 限流機能付き変圧器の製作機能評価が終了した。なお、SuperPower からの情報によると、同社も参画している DOE のスマートグリッド関係の研究において、Waukesha Electric Systems が限流機能付超電導変圧器を開発中とのことであり、その動向が注目される。

表 2.5.3-6 国内外の超電導限流器開発状況

プロジェクト	国	容量(kVA)	電圧(kV)	電流(A)	型式	線材	系統連系	開発期間	その他
Y系電力機器	日本	20,000	66		抵抗型	Y系		2008-2012	変圧器組込型
応用基盤	日本		6.6	1,000	抵抗型	NiCrY(Gd)系	○	2005-2008	
名古屋大学	日本	2,000	22	52.5	抵抗型	YBCO/Cu Bi2223Ag		2009-	変圧器組込型
DOE AMSC	米国	2,000	115	2,000	抵抗型	Y系(AMSC)	○	2007-2013	
DOE SuperPower	米国		138		抵抗型	Y系	○	2009-	
DOE Zenergy Power	米国		13.8	800	鉄心飽和型	Y系	○	2008-2011	最終目標 56MVA, 138kV, 800A
CESI	伊	15,000	9.5	200	抵抗型	1G,2G	○	2008-2011	
CURL10	独	10,000	10	600	バルク型	Bi2212	○	1999-2007	
ECCOFLOW	EU		138級			Y系	○	2009-	Nexans他15社
DAPAS	韓国	8,300	22.9	630	SN/Siハイブリッド型	Y系(AMSC)	○	2001-2010	最終目標 154kV, 4,000A
KEPCO	韓国		22.9	630/3,000	SN/Siハイブリッド型	Y系(AMSC)	○	2009-2013	
InnoPower	中国	90,000	35	1,200	鉄心飽和型	Bi系	○	-2008	実運用中
InnoPower	中国		220	1,200	鉄心飽和型		○	2009-	

青字:進行中 黒字:終了 赤字:新規or計画中

表 2.5.3-7 国内外の限流機能組込型超電導ケーブル開発状況

プロジェクト	国	電圧 kV	電流 A	容量 MVA	長さ m	形態	線材	系統連系	試験年	その他
LIPA2 (DOE)	米国 Long Island, NY	138	2400	574	600	単心×3	Y	○	未公表	1相中間接続部有 LIPA1の張替
Hydra (DHS)	米国 NY	13.8	4000	96	300	tri-axial	Y	○	2010	3m, 25mテスト実施中
KEPCO	韓国	22.9	1260	50	500	三心	Y	○	2010	KEPCO/LS Cable Soul 近郊 Ichcon substation
			3780	150		三心	Y	○	2013	

青字:進行中 黒字:終了 赤字:新規or計画中

(2)超電導回転機

a. 用語

①超電導回転機 superconducting rotating machine

回転動作が電磁誘導作用に基づく超電導装置。

②超電導単極発電機 superconducting homopolar generator

機械的回転力をスリップリングとブラシを介して直流電力に変換する超電導機械。直流発電機ともいう。

③超電導同期発電機 superconducting synchronous generator

機械的な回転速度が系統の周波数に正確に比例するような交流電気力に変換する超電導機械。交流発電機ともいう。

④超電導同期調相機 superconducting synchronous condenser

機械的負荷のない状態で系統の周波数と正確に比例するように回転する超電導機械。

⑤超電導フライホイール superconducting flywheel

超電導コイルまたは超電導バルクを利用して回転子に機械的(回転)エネルギーとして蓄え、この機械的(回転)エネルギーを電気エネルギーに変換して放出する機械。

⑥超電導電動機 superconducting motor

電力を機械的動力に変換する超電導機械。

b. 分類

[超電導回転機]

①発電機

- 超電導単極発電機
- 超電導同期発電機
- 超電導同期調相機

②調相機

- 超電導同期調相機、超電導同期電動機
- 超電導フライホイール

③電動機

- アキシアルギャップ型・ラディアルギャップ型超電導モータ
- 超電導同期モータ
- 籠型回転子誘導超電導モータ

c. 技術の現状

① 発電機

初期の超電導発電機は、単極発電機（直流発電機）が主流であった。その後、運転特性、効率、制御性、高圧化に優れた同期発電機（交流発電機）が開発の主流が移行した。我が国における低温超電導同期発電機の開発の歴史は、図 2.5.3-3 に示すように 1970 年代に遡ることができる。また、1980 年代後半からスタートした

Super-GM における 70 MVA の低温超電導同期発電機は、実系統連系試験まで実施した点で世界最高の技術水準にある。

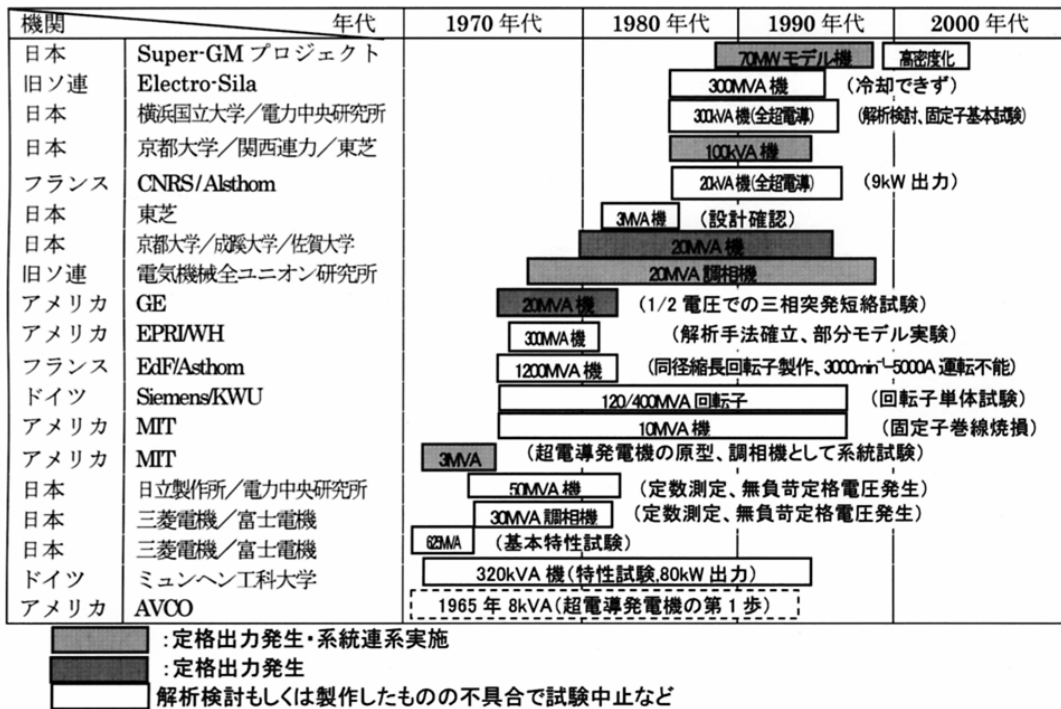


図 2.5.3-3 低温超電導発電機の開発の歴史⁽¹⁵⁾

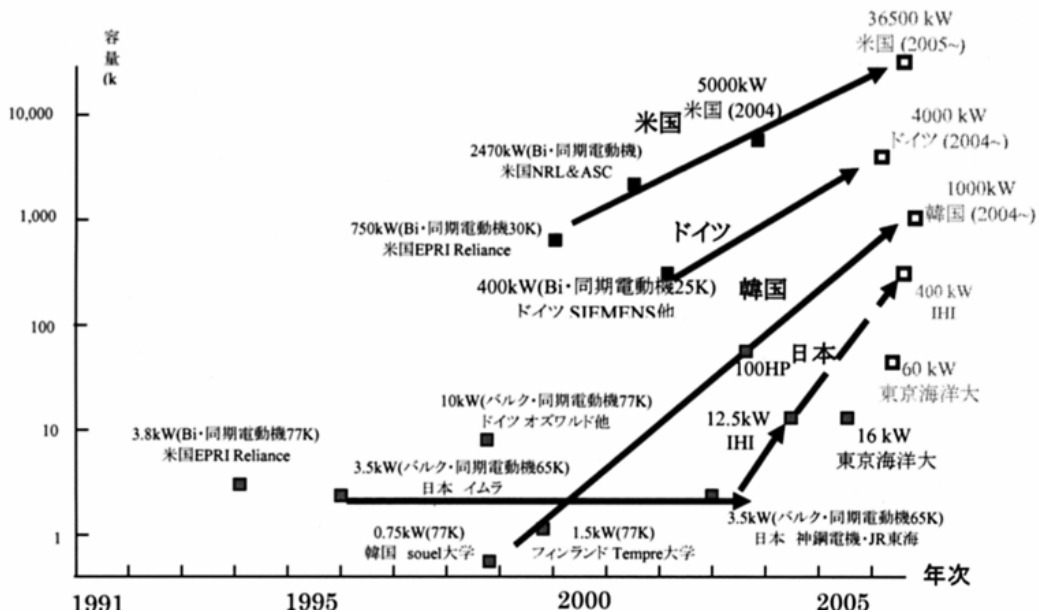


図 2.5.3-4 高温超電導回転機の開発状況⁽¹⁵⁾

一方、高温超電導体の技術開発にともない、図 2.5.3-4 に示すように 1990 年代後半から世界的に高温超電導バルク材を適用した同期電動機の研究開発が活発化しているものの、高温超電導体が発電機に適用された事例は現在のところない。しかし、英国の Convertteam 社（後に GE に買収・吸収）は、8 MW、12 rpm の超電導同期発電機を第 3 世代風力発電のナセルに搭載する計画を 2005 年に立案し、2010 年製造開始、2013 年運転開始を目標に掲げ技術開発を進めるとしている。

②調相機

超電導調相機の技術開発は、超電導発電機の開発とほぼ同時期に開始されている。まず、低温超電導線を適用した 30 MVA 級の超電導調相機が 1980 年代初頭に開発されている。その後、Bi 系超電導線材を適用した同期電動機が開発され、調相機としての動作確認がなされた。米国の AMSC 社では 4 MVAR の超電導ダイナミック同期コンデンサ (SuperVAR) の商品化に続き、4 MVAR の超電導ダイナミック同期コンデンサを開発している。

一方、フライホイール方式による瞬低補償等超電導調相機に超電導軸受を適用する技術開発が、我が国で精力的に実施された^[16]。平成 12 年度から平成 16 年度にラジアル型超電導バルク軸受を適用した 100 kWh 級をめざした 5 kWh 級のフライホイール実証試験が、また平成 17 年度～平成 19 年度に超電導コイルスラストを適用した 50 kWh 級をめざしたフライホイールのパイロットシステム試験が実施された。

③電動機

高温超電導材料の技術開発の進展に合わせて、図 2.5.3-4 に示すように 1990 年代後半から超電導電動機の技術開発がなされている。まず超電導バルクを適用したバルク同期電動機が、2000 年代になって Bi 系超電導線材を適用した同期電動機の技術開発がなされている。我が国では、2008 年に Bi 系超電導線材を用いた 400 kW 級のアキシシャルギャップ型超電導モータが、2006 年に Y 系超電導線材を適用した 15 kW の同期電動機が開発されている。

米国の AMSC 社による Bi 系超電導線材を適用した 36.5 MW の船舶用電動機、ドイツのシーメンス社の Bi 系超電導線材を適用した 4 MW 同期電動機、韓国の 1 MW 級の超電導同期電動機、また日本の川崎重工業の 1 MW 級船舶用電動機がそれぞれ開発されている。

d 今後の見通し

超電導発電機に関して、Y 系超電導線材を用いた同期発電機の技術動向を見守る必要がある。超電導調相機に関して、Y 系超電導線材を用いた同期調相機及び超電導軸受けを適用したフライホイールの技術動向並びにこれらの実系統における実証実績を見守る必要がある。超電導電動機に関して、Y 系超電導線材を用いた同期電動機の技術動向を見守る必要がある。

参考文献リスト

[1]超電導エネルギー貯蔵研究会技術委員会：超電導エネルギー貯蔵研究会 平成

20 年度研究報告書、平成 21 年 6 月

- [2]CERN : <https://www.cern.ch/safety - rules>
- [3]FNAL : <http://esh.fnal.gov/xms/FESHM>
- [4]Magnet structural design criteria, Part I: Main structural components and welds, ITER_D_2FMHHS v1.3
- [5]Magnet structural design criteria, Part II: Magnet windings (radial plates and conductors) with high and low voltage insulation and epoxy filler, ITER_D_2ES43V v1.2
- [6]Magnet structural design criteria, Part III: Bolts, keys, supports and special components, ITER_D_2FKTTG v1.2
- [7]Magnet structural design criteria, Part IV: Cryogenic piping, ITER_D_2FDCA3 v1.3
- [8]中曾根祐司 他、日本機械学会核融合炉用超電導マグネット構造規格の概要、M&M2010 材料力学カンファレンス、2010 年 10 月
- [9]中曾根祐司 他、日本機械学会核融合炉用超電導マグネット構造規格-国際熱核融合
- [10]実験炉 ITER 建設をめざして-、高温学会誌、第 35 巻、第 6 号 (2009 年 11 月)
- [11]SMES 関連法令対応に関する検討結果について (平成 20 年 2 月)
- [12]林和彦、「超電導ケーブルシステムの法規制」、第 5 回冷凍部会例会/環境・安全委員会合同ワーキング資料、2012 年 12 月 7 日
- [13]平井寛一、「超電導機器冷却システムの法規制」、第 5 回冷凍部会例会/環境・安全委員会合同ワーキング資料、2012 年 12 月 7 日
- [14]神谷祥二、「環境・安全委員会の活動について」第 5 回冷凍部会例会/環境・安全委員会合同ワーキング資料、2012 年 12 月 7 日
- [15]NEDO 委託「超電導技術を利用した風力発電機の実用化可能性調査」平成 18 年度成果報告書、平成 19 年 3 月、(財) 国際超電導産業技術研究センター
- [16]NEDO 委託「超電導フライホイールシステムの開発」平成 17 年度～平成 19 年度成果報告書、平成 20 年 5 月、東海旅客鉄道株式会社

2.5.4 超電導電力機器技術の動向調査

超電導線材の試験方法及び超電導電力機器に係わる技術動向及び標準化ニーズ等を国際会議に参加して調査した。

前期 3 ヶ年

(1)ASC2008 (米国イリノイ州シカゴ)

2008 年 8 月 17 日より 22 日まで 2008 Applied Superconductivity Conference (ASC2008)が米国シカゴ市の Hyatt Regency Chicago において開催された。本会

議における発表は、Electronics, Large Scale, Materials の3部門に分類されており、超電導線材の技術動向、超電導電力機器の技術動向及び標準化ニーズについて調査した。

(2)EUCAS2009 (独、ドレスデン)

2009年9月13日から9月17日に開催された第9回欧州応用超電導会議(EUCAS2009)にて報告のあった超電導線材と超電導電力機器について報告する。

第9回EUCASにおいて発表された超電導電力機器のプロジェクトについて表2.5.4-1にまとめる。電力ケーブルについては、日本、アメリカでの開発が進むとともに、オランダ、スペインやロシア等ヨーロッパでの開発が再び始められた。限流器については、ヨーロッパと中国でGrid接続へ進んでいる。モータ、発電機については、実規模のデモ機が完成間近である。

表 2.5.4-1 超電導電力機器技術動向調査結果

対象	プロジェクト	開発者	進捗状況
ケーブル	Ohio Bixby	Southwire, AEP (Dept. of Energy)	13.2 kV-3000 A-200 m 2006.8.6 スイッチオン後、継続して Grid に接続中
ケーブル	Entergy New Orleans	Southwire (Dept. of Energy)	13.8 kV-60 MVA-1700 m 230kV ケーブルに代わる solution として計画中
ケーブル	NY Hydra	AMSC, Southwire, ConEdison, (Dept. of Homeland Security)	13.8 kV-4000 A-200 m 短絡電流を 25 %減少させ、変圧器の共有を可能とする目的で計画中。25 m サンプルで原理検証
ケーブル	横浜	SEI, 東電, マエカワ	66 kV-200 MVA-~300 m 30 m 検証用ケーブル評価試験中
ケーブル	M-PACC	SEI, 古河, ISTEK	66 kV-5000 A-15 m, 275 kV-3000 A-30 m 開発中
ケーブル	中部大学	中部大学	20 kV(DC)-2000 A-200 m 布設完了
ケーブル	Amsterdam	NKT, Ultera, Alliander	50 kV-250 MVA-6,000 m 原理検証(2009-2011)、順調に行けば 2013-2014 に布設
ケーブル	BNI IKP	BNI IKP	20kV-2000 A-200 m 2009.10 月、評価開始
ケーブル	ENDESA	Nexans	25 kV-3200 A-30 m 進行中
ケーブル	POSE ² IDON	Nexans	600 V-10 kV(DC)

			船舶用 DC ケーブル
ケーブル	中国	不明	北京の 110 kV 級ケーブル等 2 件立案中
限流器	Vattenfall	Nexans	12 kV-800 A-4100 A(50ms) 2009.10 月に Grid 接続予定
限流器	UK/ASL	Nexans	12 kV-100 A-460 A(10s) 2009.10 月に Grid 接続予定
限流器	Puji	Innopower	35 kV-1500 A 2008.1 月から運転中
限流器		Siemens	138 kV-1200 A 2012 に三相分完成予定
限流器		産総研	500 V-200 A 10 cm × 30 cm の大面積基板
変圧器		名古屋大	2 MVA-22 kV/6.6 kV 評価中
モータ		川崎重工	1 MW(30 K), トルク : 150 kNm 開発中
モータ		Siemens	4 MW@120rpm, トルク : 320kNm Rotor 試験中
発電機	EU Framework 6	Convertteam	1.7 MW-5.25 kV-28 pole@214 rpm Hirschaid の水力発電所に導入予定

(3)IEC/TC90-VAMAS/SWTA16 合同会議（日本、つくば）

2009年11月5日に開催された IEC/TC90-VAMAS/SWTA16 合同会議にてヨーロッパを主にした超電導電力機器関連プロジェクト関連の技術動向調査を行った。以下に SMES、超電導電力ケーブル、限流器及び回転機について表 2.5.4-2、表 2.5.4-3、表 2.5.4-4 及び表 2.5.4-5 にそれぞれまとめて示す。

表 2.5.4-2 SMES 関連プロジェクト

中心企業	国	時期	データ	適用材料	応用
FZ Karlsruhe	Germany	1997	320 kVA, 203 kJ	NbTi	Flicker compensation
AMSC	USA		2 MW, 2.6 MJ	NbTi	Grid stabilization
FZ Karlsruhe	Germany	2004	25 MW, 237 kJ	NbTi	Power Modulator
Chubu	Japan	2004	1 MVA, 1 MJ	Bi 2212	Voltage quality
Chubu	Japan	2005	10 MVA, 21 MJ	NbTi	Voltage quality

KERI	Korea	2005	750 kVA, 3 MJ	NbTi	Grid quality
Chubu	Japan	2007	1 MVA, 19 MJ	NbTi	Load compensation
CAS	China	2007	0.5 MVA, 1 MJ	Bi 2223	-
CNRS	France	2008	800 kJ	Bi 2212	Military application
KERI	Korea	2009	1 MJ	Bi 2223	-
Chubu	Japan	2012	2 MJ (20K)	YBCO	Grid stabilization

表 2.5.4-3 交流超電導ケーブル関連プロジェクト

企業名	設置場所, 国, 時期	絶縁	データ	適用材料
Furukawa	Yokosuka, JP, 2004	CD	77 kV, 1 kA, 500 m, 1-ph.	Bi 2233
Innopower	Yunnan, CN, 2004	WD	35 kV, 2 kA, 33 m, 3-ph.	Bi 2223
Sumitomo	Albany, US, 2006	CD	34.5 kV, 800 A, 350 m, 3-ph.	Bi 2223
Ultera	Columbus, US, 2006	Triax	13.2 kV, 3 kA, 200 m, 3-ph.	Bi 2223
Sumitomo	Gochang, KR, 2006	CD	22.9 kV, 1.25 kA, 100 m, 3-ph.	Bi 2223
LS Cable	Gochang, KR, 2007	CD	22.9 kV, 1.26 kA, 100 m, 3-ph.	Bi 2223
Sumitomo	Albany, US, 2007	CD	34.5 kV, 800 A, 30 m, 3-ph.	YBCO
Nexans	Hannover, D, 2007	CD	138 kV, 1.8 kA, 30 m, 1-ph.	YBCO
Nexans	Long Island, US, 2008	CD	138 kV, 1.8 kA, 600 m, 3-ph.	Bi 2223
Nexans	Spain, 2008	CD	10 kV 1 kA, 30 m, 1-ph	YBCO
Ultera	New York, US, 2010	Triax	13.8 kV, 4 kA, 240 m, 3-ph.	YBCO
Ultera	New Orleans, US, 2011	Triax	13.8 kV, 2.5 kA, 1700 m, 3-ph.	to be defined
Ultera	Amsterdam, NL, -	Triax	50 kV, 2.9 kA, 6000 m, 3-ph.	YBCO
Nexans	Long Island, US, -	CD	138 kV, 2.4 kA, 600 m, 1-ph.	YBCO
LS Cable	Gochang, KR, 2011	CD	154 kV, 1 GVA, 100 m, 3-ph.	YBCO
LS Cable	Seoul, KR	CD	22.9 kV, 50 MVA, 500 m, 3-ph.	YBCO
Sumitomo	Yokohama, JP, 2013	CD	66 kV, 200 MVA, 200 m, 3-ph.	Bi 2223
Sumitomo	TEPCO, JP	CD	66 kV, 5 kA	to be defined
Furukawa	TEPCO, JP	CD	275 kV, 3 kA	Bi 2223
Sumitomo	Chubu U., JP, 2010	CD	10 kV, 3 kA DC, 20 m, 200 m	Bi 2223
VNIIEP	Moscow, RU	CD	20 kV, 200 m	Bi 2223
Nexans	Spain	CD	10 kV, 3,2 kA, 30 m, 1 ph.	Bi 2223

表 2.5.4-4 限流器関連プロジェクト

中心企業	国/試験時期	タイプ	データ/対地電圧	相数	適用材料
ACCEL/NexansSC	Germany / '04	Resistive	12 kV, 600 A	3-ph.	Bi 2212 bulk
CAS	China / '05	Diode bridge	10.5 kV, 1.5 kA	3-ph.	Bi 2223 tape
CESI RICERCA	Italy / '05	Resistive	3.2 kV, 220 A	3-ph.	Bi 2223 tape
CESI RICERCA	Italy / '05	Resistive	0.6 kV, 270 A	1-ph.	MgB2 wire
Siemens / AMSC	D / USA / '07	Resistive	7.5 kV, 300 A	1-ph.	YBCO tape
LSIS	Korea / '07	Hybrid	24 kV, 630A	3-ph.	YBCO tape
Hyundai / AMSC	Korea / '07	Resistive	13.2 kV, 630 A	1-ph.	YBCO tape
KEPRI	Korea / '07	Res.-hybrid	22.9 kV, 630 A	3-ph.	Bi 2212 bulk
Innopower	China / 2008	DC biased iron core	35 kV, 90 MVA	3-ph.	Bi 2223 tape
Toshiba	J / 2008	Resistive	6.6 kV, 72 A	3-ph.	YBCO tape
Nexans SC	D / 2009	Resistive	12 kV, 100 A	3-ph.	Bi 2212 bulk
Zenergy Power	USA / 2009	DC biased iron core	12 kV, 1.2 kA	3-ph.	Bi 2223 tape
Zenergy Power	USA / 2009	DC biased iron core	15 kV, 1.2 kA	3-ph.	Bi 2223 tape
Nexans SC	D / 2009	Resistive	12 kV, 800 A	3-ph.	Bi 2212 bulk
Nexans SC	D / 2011	Resistive	12 kV, 800 A	3-ph.	YBCO tape
Innopower	China / 2010	DC biased iron core	220 kV, 300 MVA	3-ph.	Bi 2223 tape
ERSE	I / 2010	Resistive	9 kV, 250 A	3-ph.	Bi 2223 tape
ERSE	I / 2010	Resistive	9 kV, 1 kA	3-ph.	YBCO tape
KEPRI	Korea / 2010	Resistive	22.9 kV, 3 kA	3-ph.	YBCO tape
AMSC / Siemens	USA / D / 2012	Resistive	115 kV, 1.2 kA	3-ph.	YBCO tape
Rolls Royce	UK / -	Resistive	11.5 kV, 400 A	3-ph.	MgB2 wire

表 2.5.4-5 高温超電導回転機関連プロジェクト

企業/国	回転機の容量	時期
AMSC (US)	5 MW demo-motor	2004
	8 MVA, 12 MVA synchronous condenser	2005/2006 (Field test)
	40 MVA generator design study	2006
	36 MW ship propulsion motor	2008
	8 MW wind generator design study	2010
GE (US)	100 MVA utility generator	2006 (discontinued)
	5 MVA homopolar induction motor	2008
LEI (US)	5 MVA high speed generator	2006
Reliance Electric (US)	10.5 MVA generator design study	2008
IHI Marine, SEI (JP)	365 kW ship propulsion motor	2007
	2.5MW ship propulsion motor	2010
Doosan, KERI (Korea)	1 MVA demo-generator	2007
	5 MW motor (homopolar)	2010
Siemens (Germany)	400 kW demo-motor	2001
	4 MVA industrial generator	2005 (Field test)
	4 MW ship propulsion motor	2010
Converteam (UK)	200 kW demonstrator	2006
	1.25 MVA hydro-generator	2010
	500 kW demo-generator	2008
	8 MW wind generator design study	2010

後期 2 ヶ年

(4)超電導電力機器の研究開発報告の動向及び技術動向

a. 超電導電力機器の研究開発報告の動向

超電導電力機器の研究開発状況は、2010 年の応用超電導会議（ASC2010）での M. Noe（Karlsruhe Institute of Technology）による基調講演にあるように、この 10 年間でかなり発表件数が増えており、さらに ASC2012 会議では SMES、回転機、限流器での発表申込件数が伸びており、電力ケーブルその他の機器で実用化に向けた開発研究が活発になってきている。ASC2012 ではアジア、EU、米国以外のこれまでになかった国からの発表申し込みがあり、超電導電力機器開発研究の裾野が広がってきているように思える。とりわけ超電導限流器の発表申込件数は 91 件と大幅な増加を示しており、その中で韓国が群を抜いているものの、アジア、米国、EU、ロシア等で広範囲に研究されており、超電導電力ケーブルの開発と相俟って、実用化への要望が強いものと考えられる。

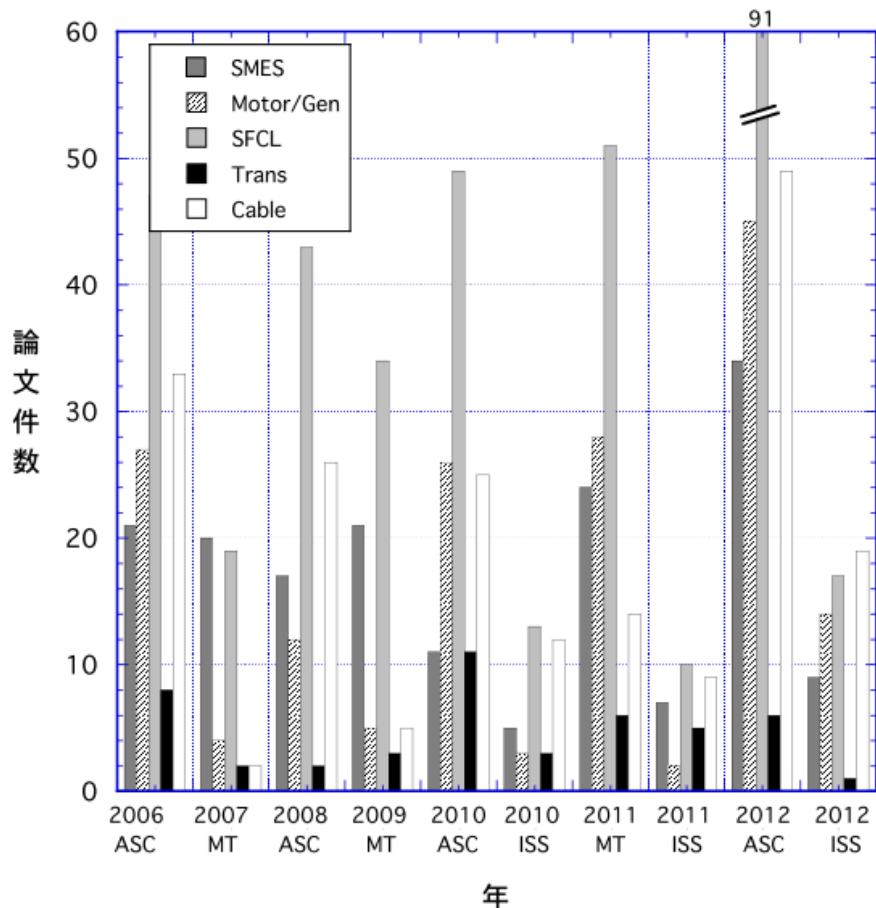


図 2.5.4-1 超電導電力機器に関する国際会議での発表件数（2011 年 MT 以降は発表申込件数）

図 2.5.4-1 に国際会議での超電導電力機器に関する論文発表件数の推移を示す。2011 年 MT-22 及び ASC2012 に関しては発表申込件数であり、キャンセルがある

ので必ずしも最終論文件数を示すものではないが、開発研究活動の活発な状況を示すものと考えても良いであろう。

表 2.5.4-6 に国別の ASC 2010 の発表論文件数と MT-22 及び ASC2012 の発表申込件数を示す。限流器の申込件数が大幅に増えていること、また回転機の発表件数も増えており、風力発電用超電導発電機の開発研究が活発になってきている。ASC2012 では、これまで発表のなかった国からの超電導電力機器に関する研究報告があったことに特徴がある。

表 2.5.4-6 ASC2010 における発表論文件数と MT-22, ASC2012 の発表申込件数

		総数	日本	韓国	中国	米	EU	露	他
ASC2010	SMES	11	2	4	2		2	1	
	変圧器	11	4	1		1	2		3
	限流器	49	3	26	3	3	8	2	4
	回転機	26	7	1	7	4	7		
MT-22 ^{注)}	SMES	24	3	4	15		1		1
	変圧器	6	1	2	1		2		
	限流器	51	2	32	6		3		8
	回転機	28	5	7	8		4		4
ASC2012	SMES	34	7	10	9	3	3		2
	変圧器	6	1				4		1
	限流器	91	5	39	16	4	14		13
	回転機	45	6	10	12	4	10		3

注) MT-22、ASC2012 は発表申込件数

b. SMES

国内外における SMES 開発動向を表 2.5.4-7 に示す。

海外の開発動向について、米国では米国企業の 1~3 MJ(0.3~0.9kWh)級の金属系 SMES が瞬低用等に一部導入された実績があり、最近、スマートグリッド対応で競合技術であるバッテリーとエネルギー蓄積容量やコスト面でも競合し得る非常に高磁界の SMES の開発が米国で検討されている。SMES は重量当たりの貯蔵密度や出力が、競合技術に比べて高いことを活かし、電気飛行機等の移動体の電力貯蔵装置としての検討も行われている状況である。

韓国、中国、インド、欧州等においても SMES の研究開発が実施されてきてお

り、現在の主流は高温超電導導体を用いた開発がなされている。韓国では国家プロジェクトにおいて 2.5MJ 級の SMES が開発中である。Y 系線材のみでなく、Bi2223 線材を用いた SMES コイルの設計が行われており、比較評価が行われた。そこでは、日本が設計した結果と同様に、Y 系線材を用いてパンケーキ型コイルをトロイド配置する方式が検討されている。SMES コイルの伝導冷却システムの開発においては、伝導冷却温度は 20 K が想定されているが、評価結果、低い熱伝導によりコイルにおいて温度差が大きくなり、冷却効果が十分でなく、冷却構造を検討中の段階である。インドにおいては、金属系 SMES により加速器研究センターの電源安定化をめざした開発が行われており、0.6MJ のコイルが作製されている。

フランスにおいても軍事目的に電磁推進用として SMES の開発が行われており、これまでに Bi2212 線材を用いて 0.8MJ 級のコイル製作評価が実施されたが、今後 Y 系線材を用いた SMES 開発が予定されている。

国内では、2004 年からの国家プロジェクトにおいて、SMES の電力系統制御システムとしての機能検証をめざした開発が行われ、NbTi コイルを用いた 1 万 kW 級（貯蔵エネルギー 20 MJ 級）SMES が実際に製作され、負荷の変動による電力系統への影響を低減させる機能や発電機が停止する等の外乱により電力系統が不安定となることを防ぐ機能が、SMES を栃木県日光市の実系統に連系した試験により検証された。さらに、2008 年からスタートした本プロジェクトで、Y 系 SMES コイルシステムの特徴である線材強度を活かした高強度高フープ応力コイル構成技術と伝導冷却システムの構成技術の確立を図り、プロジェクト後半には伝導冷却 SMES コイルとして特性評価を行い、将来の 2 GJ 級電力系統制御用大容量 SMES 開発へ向けた Y 系線材を用いたコイルの限界性能を把握することを目的とした開発を展開した。高強度高フープ応力コイル開発では、Y 系超電導線材によるコイル巻線と FRP のコイル側板や枠材で構成した小型パンケーキコイルにおいて、Y 系超電導線材強度の 2 倍に当たる 2,000 MPa 級のフープ力が作用するような、磁場中のコイル通電試験を行っても特性低下は認められず、世界最高強度の電磁力に耐えるコイル構造であることを実証しており、本プロジェクト終了後は、コイル性能に線材構造・構成が及ぼす影響を把握しコイル構造の最適化を図ることとしている。また、大型コイル冷却に向けて十分な熱伝達を得るため、ガス冷媒配管を一部活用した冷却システムを製作し、13 kV の絶縁性能を有した高熱伝導冷却システムの開発に成功している。

加えて、SMES は瞬間に大電力の出し入れが可能で貯蔵効率も高いことから、瞬低補償用に最適な電力機器である。工場を一括で瞬低補償できる大出力が可能なシステムを実現するため、高圧機器と浸漬冷却超電導コイルとして高電圧化を図った固体絶縁コイルを組み合わせ、待機時の損失を低減できる常時商用給電方式を採用するとともに、瞬低発生時の電力系統からの切替時間を 1/2 サイクルとした世界最大規模の出力 5～10 MVA、補償時間 1sec の瞬低補償システムが開発されている。インバータやモータ等の多様な負荷が混在した国内の最新鋭液晶 TV 工場内にて、

平成 15 年 7 月より 5 MVA 機のフィールド試験、平成 17 年 10 月からは 10 MVA 機のフィールド試験が実施された。10 MVA 機の諸元を表 2.5.4-8 に示す。出力 10 MVA、貯蔵エネルギー 20 MJ 級の金属系超電導体のコイルを用いた SMES が同じ場所で実運用されている。フィールド試験期間を含め、これまでに 40 回以上の瞬低補償動作が確認されている。さらに、研究施設や半導体工場へも瞬低補償用 SMES の導入は進められており、現時点で国内に 3 基の商用 SMES が稼働している。商用 SMES の主な諸元を表 2.5.4-9 にまとめる。

表 2.5.4-7 国内外における SMES 開発動向

国内外における SMES 開発動向

国名	プロジェクト名(商品名)	設置場所	蓄積エネルギー	定格出力	コイル構造	線材種	期間 (実系統運転)	運転温度	冷却方式
米国	マイクロ SMES		2.7MJ	1.7MVA	ソレノイド	NbTi		4K	液体ヘリウム浸漬冷却
米国	系統安定化 SMES	Tacoma 変電所	30MJ	8MW	ソレノイド	NbTi	1982-1984 (1983/11-1984/3)	4K	液体ヘリウム浸漬冷却
米国	超高磁場(30T) SMES		3.4MJ	20kW		Y系	2010?~	4K	
フランス			0.8MJ		ダブルパンケーキ積層	Bi2212	2004-2007	20K	冷凍機伝導冷却
フランス						Y系	2008-2011	-	-
韓国			3MJ	750kVA	ソレノイド	NbTi	1999/7-2003/12	4K	液体ヘリウム浸漬冷却
韓国			0.6MJ	450kW		Bi2223	2004-2007	-	-
韓国			2.5MJ			Bi2223orY系		20K	伝導冷却
インド		Kolkata サイクロロンセンター	0.6MJ	0.1MW	ソレノイド	NbTi		4K	液体ヘリウム浸漬冷却
中国			1MJ						
日本	中部電力プロジェクト	名古屋市緑区	1MJ	1MW	ソレノイド積層	Bi2212	2004-2006	4K	液体ヘリウム間接冷却
日本	中部電力プロジェクト	三重県亀山市	7MJ	5MW	マルチポールソレノイド配	NbTi	(2003/7~2006/5)	4K	液体ヘリウム浸漬冷却
日本	中部電力プロジェクト	三重県亀山市	20MJ	10MW	マルチポールソレノイド配	NbTi	(2005/10~2007/8)	4K	液体ヘリウム浸漬冷却
日本	中部電力プロジェクト	三重県亀山市	20MJ	10MW	マルチポールソレノイド配	NbTi	(2007/7~)	4K	液体ヘリウム浸漬冷却
日本	九州電力プロジェクト	福岡市西区	3.6MJ	1MW	6コイルのトロイダル配置	NbTi	1994-2001 (1998/3-2001)	4K	液体ヘリウム浸漬冷却
日本	超電導電力ネットワーク制御技術開発	栃木県日光市	20MJ	1MW	マルチポールソレノイド配置	NbTi	2004/6~2008/3 (2007/8~12)	4K	液体ヘリウム浸漬冷却

表 2.5.4-8 10MVA-SMES フィールド試験機的主要諸元 (金属系超電導)

コイル形式	マルチポールソレノイドコイル
コイル寸法	0.69(ID)×0.94(OD)×1.53(H) m
コイル個数	4
定格電流	1380 A
定格電圧	6600 V
インダクタンス	21.3 H
蓄積エネルギー	20.3 MJ
最大経験磁場	4.4 T
冷却方式	液体ヘリウム浸漬冷却

表 2.5.4-9 商用 SMES の主要諸元 (金属系超電導)

	#1	#2	#3
定格出力と補償時間	10MVA/1sec.	4MVA/0.5sec 2MVA/1sec.	10MVA/1sec.
定格入出力電圧 (AC)	3φ-6600V, 60 Hz	3φ-6600V, 50 Hz	3φ-6600V, 60 Hz
切替時間	1/4 周期 +α	1/4 周期+α	1/4 周期+α
コイル構成	4 極コイル配置	2 極コイル配置	4 極コイル配置
定格電流	1400 A	1400 A	1400 A
定格電圧	DC 6 kV	DC 4 kV	DC 6 kV
インダクタンス	21.1 H	5.6 H	21.1 H
蓄積エネルギー	20.7 MJ	5.5 MJ	20.7 MJ
最大経験磁場	4.4 T	4.1 T	4.4 T
冷却方式	液体ヘリウム 浸漬冷却	液体ヘリウム浸 漬冷却	液体ヘリウム浸漬冷 却

c. 超電導変圧器

超電導変圧器は世界各国で基礎技術が開発されてきたが、交流損失低減、絶縁技術や冷却効率向上等の技術開発がなかなか進展せず、殆どの開発プロジェクトが実用化実証試験まで至っていない状況である。

国内においては、NEDO 事業である「イットリウム系超電導電力機器技術開発」(本プロジェクト)で、第二世代線材である Y 系線材を用いた 20 MVA 級超電導変圧器の成立性を見通すため、「超電導変圧器巻線技術開発」、「冷却システム技術開発」、「限流機能付加技術開発」、「超電導変圧器対応線材開発」、「2MVA 級超電導変圧器モデル検証」の技術開発を九州電力(株)、太陽日酸(株)、(株)フジクラ、昭和電線(株)、富士電機(株)、(一財)JFCC、(公財)ISTEC が連携し 2008 年～2012 年に単相 400 kVA(6.9 kV/2.3 kV, 66 K)限流機能付加変圧器による限流機能検証や三相 2 MVA (66/6.9 kV, 66 K) 超電導変圧器の検証を実施した。

国外においては、米国、ドイツ、ニュージーランド、ロシアがともに Y 系線材を使った超電導変圧器を開発中であり、限流機能付変圧器の開発にも取り組んでいる。以下に、海外の主なプロジェクトの概要(■:開発中)を示すとともに、国内外の開発状況を図 2.5.4-2 及び表 2.5.4-10 に示す。

【米国】

□ DOE(SPI)プロジェクト

Waukesha のグループは、Bi-2212 線材により 1998 年に単相 1 MVA (13.8 kV/6.9 kV, 25 K)、Bi-2223 線材により 2003 年に三相 5 /10 MVA (24.9 kV/4.2 kV, 25 K)を開発した。しかし、三相 5 /10 MVA は、試験中に巻線の絶縁破壊のため開発が中止となった。

■ DOE(Irvine Smart Grid Demonstration)プロジェクト

2009 年に、Y 系超電導線材による三相 28 MVA (70.5 kV/12.5 kV, 70 K)の開発計画が発表された。2011 年より研究開発がスタートしたこのプロジェクトは、Waukesha のグループがカリフォルニア州 Irvine の SCE 社の変電所に限流器と組み合わせたシステムを設置する Smart Grid 実証プロジェクトである。

【欧州】

□ ABB プロジェクト

Bi-2223 線材により 1997 年に三相 630 kVA (18.7 kV/420 V, 77 K)を開発し、1 年間実系統試験を実施した。その後、立案された三相 10 MVA 開発プロジェクトは中止された。

□ Siemens プロジェクト

鉄道車両用として、Bi-2223 線材により 2001 年に単相 100 kVA (5.5 kV/1.1 kV, 77 K)、さらに 2006 年に単相 1 MVA (25 kV/1.4 kV, 66 K)を開発し高周波運転時の課題を明らかにした。

■ KIT プロジェクト

2012 年から 2015 年までに ABB と 1 MVA 限流機能付超電導変圧器を開発し、常電導転移時の線材や冷却、交流損失等を検証する。

【韓国】

□ DAPAS プロジェクト

2011 年までの超電導電力機器の商業化をめざし、2001 年から DAPAS (Dream of Advanced Power system by Applied Superconductivity technologies) プログラムを開始した。Bi-2223 線材により、2004 年に単相 1 MVA (22.9 kV/6.6 kV, 66K) を開発した。パンケーキ巻線を採用し、高圧-低圧-高圧-高圧-低圧-高圧の巻線配置を採る。冷却は変圧器直付けの GM-冷凍機による過冷却液体窒素冷却であり、77 K における無負荷試験、絶縁耐力試験等が行われた。

【中国】

□ TBEA プロジェクト

TBEA (Tebian Electric Apparatus Company) は、超電導変圧器開発を 2001 年に開始した。Bi-2223 線材により 2005 年に三相 630 kVA (10.5 kV/0.4 kV, 77 K) を開発し、超電導ケーブル等と Baiyin 変電所に設置し、2011 年 2 月から実系統試験を開始した。

【ニュージーランド】

■ TRST プロジェクト

政府系の 100%出資の IRL 及び HTS110 社により、YBCO Roebel Cable 導体を使用した 1MVA 限流機能付超電導変圧器(11kV/0.4kV)を 2013 年までに開発する。

【ロシア】

■ ROSATOM プロジェクト

ROSATOM 社を中心に、超電導産業を開拓するため、2011 年から 2015 年にかけて限流器、エネルギー貯蔵、モータ、発電機の超電導機器を開発する一環として、10 MVA (10kV/0.4kV)超電導変圧器を開発する。

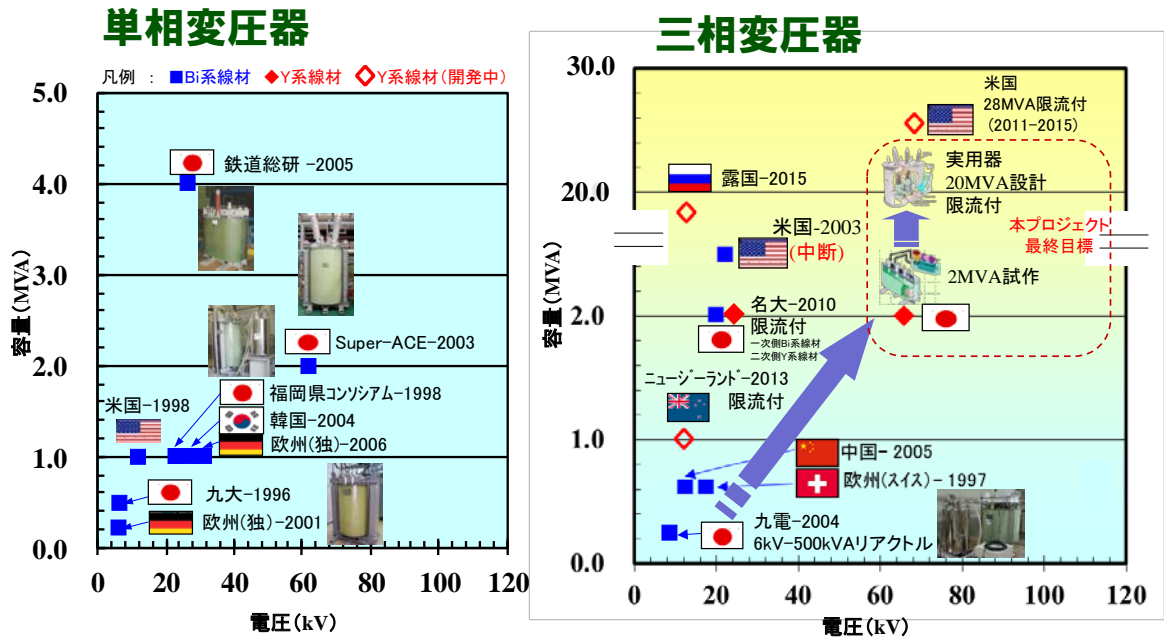


図 2.5.4-2 国内外における超電導変圧器の開発状況

表 2.5.4-10 国内外における超電導変圧器の開発状況

国名	プロジェクト名	用途	定格電圧	構造	容量*	温度	線材種	時期
日本	九大	電力	6.6/3.3kV	単相	500kVA	77K	Bi-2223	～1996
〃	福岡県コンソシアム	電力	22/6.9kV	単相	1MVA	77K	Bi-2223	～1998
〃	Super-ACE	電力	66/6.9kV	単相	2MVA	66K	Bi-2223	～2003
〃	鉄道総研	鉄道	25/1.2/0.4kV	単相	4MVA	66K	Bi-2223	～2005
〃	名大	電力	22/6.6kV	三相	2MVA	77K	Bi-2223 YBCO	～2010
〃	M-PACC	電力	66/6.9kV	三相	2MVA	66K	YBCO	～2012
米国	SPI	電力	13.8/6.9kV	単相	1MVA	25K	Bi-2212	～1998
〃	SPI	電力	24.9/4.2kV	三相	5/10MVA	25K	Bi-2223	～2003
〃	SPE	電力	70.5/12.5kV	三相	28MVA	70K	YBCO	～2015
欧州	ABB	電力	18.7/0.4kV	三相	630kVA	77K	Bi-2223	～1997
〃	Siemens	鉄道	5.5/1.1kV	単相	100kVA	77K	Bi-2223	～2001
〃	Siemens	鉄道	25/1.4kV	単相	1MVA	66K	Bi-2223	～2006
〃	KIT	電力	-	-	1MVA	-	YBCO	～2015
韓国	DAPAS	電力	22.9/6.6kV	単相	1MVA	66K	Bi-2223	～2004
中国	TBEA	電力	10.5/0.4kV	三相	630kVA	77K	Bi-2223	～2005

NZ	TRST	電力	11/0.4kV	三相	<u>1MVA</u>	70K	YBCO (Roebel)	~2013
露国	ROSATOM	電力	10/0.4kV	三相	10MVA	-	YBCO	~2015

* 下線付き容量は、限流機能付変圧器を示す

d. 超電導限流器

超電導限流器は、各種限流方式の基礎的検証、実器レベルのフィールド試験、電力システム導入効果等、多様な研究開発が進められている。超電導限流器に関する一つの技術動向として、超電導限流変圧器や超電導限流ケーブル等、限流機能を具備した超電導電力機器の研究開発が挙げられる。ここでは、現在進捗中の超電導限流器の技術動向について述べる。

【ヨーロッパ】

ドイツを中心として、10~20kV級の抵抗発生型限流器の開発・フィールド試験が活発に行われている。

・ECCOFLOW：超電導限流器の商用化を目的として、導入形態の異なる2種類の実証試験が計画されている（図2.5.4-3）。同一仕様（24 kV、1005 A）の抵抗発生型限流器を母線連系（スペイン・ENDESA、16.5 kV、1000 A）、変圧器フィーダ（スロバキア・VSE、24 kV、1005 A）に導入することをめざして、すでにY系導体を用いたコンポーネントを12個直列したモジュールが製作されている。

・RSE-A2A：イタリアでは、Bi2223導体を用いた抵抗発生型限流器（9 kV、3.4 MVA）が開発され、変圧器フィーダへの導入を目的とした同国初の実フィールド試験が行われており、容量の増大（9 kV、15.6 MVA）をめざしている。

・Ampacity：ドイツ・Essenにおいて、Y系導体を用いた抵抗発生型限流器（12 kV、2300 A）を開発し、超電導ケーブル（10 kV、2300 A、40 MVA、1 km）との連系によるフィールド試験が計画されている。

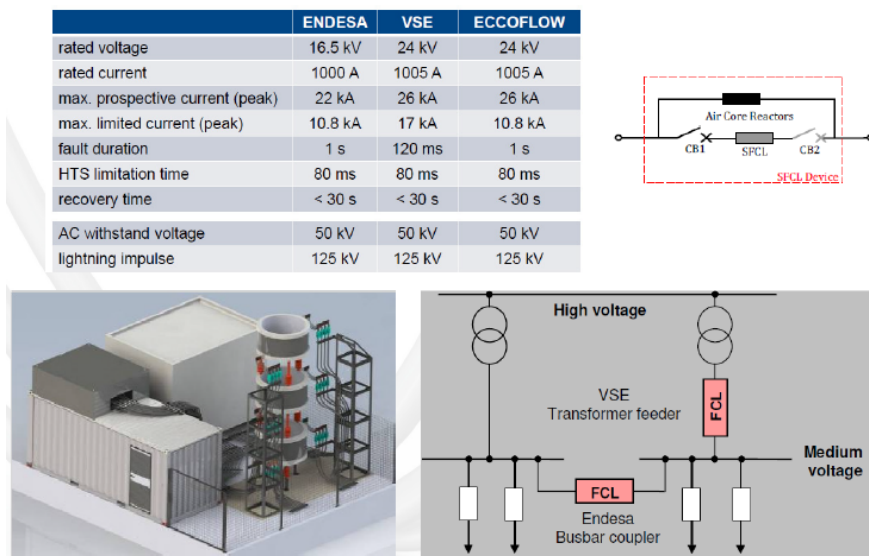


図 2.5.4-3 ECCOFLOW プロジェクト

・iSFCL：ドイツ・Bruker 社とフランス・Schneider 社による磁気遮蔽型の超電導限流器（10 kV、15 MVA）が開発され、故障除去後の超電導状態への自己復帰（Self-recovery under current load）をめざした実験が行われている。

【アメリカ】

SuperLimiter プロジェクトの中止以降、超電導限流器単体としての開発は中断している。超電導ケーブルプロジェクトである Hydra（13.8 kV、4000 A、96 MVA、170 m）及び LIPA-II（138 kV、2400 A、574 MVA、600 m）において、超電導限流ケーブルの開発が行われており、限流試験が実施されている（図 2.5.4-4）。また、DOE Smart Grid SFCL Transformer Demonstration プロジェクトにおいて、超電導限流変圧器（70.5/12.47 kV、132/1296 A、28 MVA）の開発が行われている。なお、2012 年 12 月 5 日付のプレスリリースによれば、AMSC と Nexans が北米市場向けに最大定格電圧 36 kV の超電導限流器を導入するとのことである。

【中国】

可飽和リアクトル型超電導限流器の開発とフィールド試験が特徴的である。220 kV/300 MVA 器が試験運用中であり、さらに 500 kV/1.6-3.2 kA 器が設計されている。一方、抵抗発生型限流器も開発されており、10 kV/400 A 器のフィールド試験、220 kV/1.5-2.5 kA 器の設計等が行われている。

【韓国】

Icheon 変電所の 22.9 kV フィーダの保護用として、抵抗発生型限流器が商用運転されている。また、Jeju Island において 154 kV/2 kA 系統への導入が計画され、さらに将来的には 345 kV 器の開発が期待されている。なお、韓国では、特に分散電源を含む電力システムへの超電導限流器の導入効果に関する研究発表が多く行われている。

【日本】

「交流超電導電力機器基盤技術研究開発」(Super-ACE) プロジェクト、「超電導応用基盤技術研究開発」プロジェクト以降、大型の超電導限流器開発プロジェクトは行われていないが、本プロジェクトで限流機能付変圧器を開発した。現在、NEDO「高

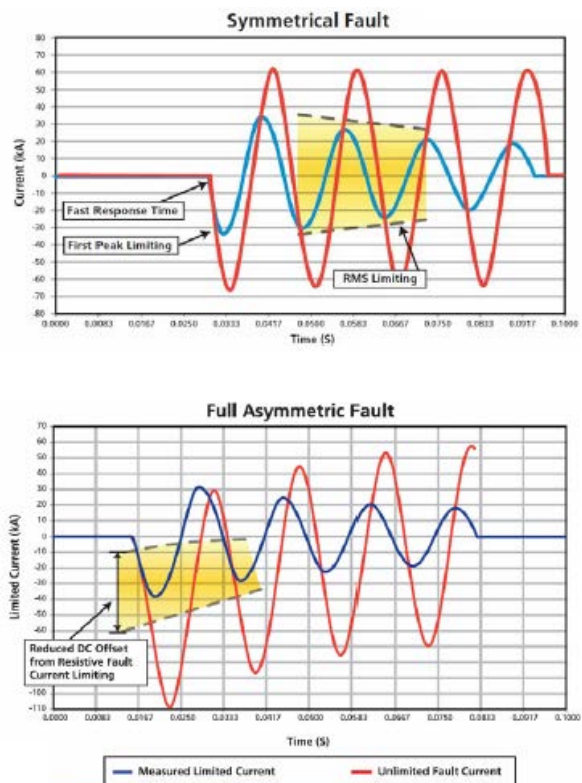


図 2.5.4.-4 Hydra プロジェクトの限流試験

「超電導電力機器の適用拡大と標準化に資するケーススタディ」の超電導限流器分科会において、超電導の特徴を活かすことで全体としてメリットが得られる利用方法や電力システムの構成を検討し、その中で実用化を促進するうえで詳細な検討を行う重要性が高いと判断されるものをケーススタディの候補として抽出する作業が行われている。

また、超電導限流器に平常時の潮流制御機能を複合・多機能化した超電導電力機器として、超電導限流／潮流制御装置（Superconducting Power Flow Controller and Fault Current Limiter: SPFCL）が提案されている。これは、潮流制御機能と限流機能にはインピーダンス制御という共通点があることに着目したものであり、故障時のみに機能限定されていた超電導限流器が平常時にも機能を発揮することができ、次世代の電力機器・システムにおける超電導技術の新しい適用形態となることが期待されている（図 2.5.4-5）。SPFCL のインピーダンス制御構造として、タップ切換付き超電導変圧器とサイリスタ制御コンデンサから構成される SPFCL が提案され、誘導性／容量性の任意インピーダンスによる平常時の潮流制御効果、故障時における臨界電流以上の大電流通電に伴う SPFCL の発生抵抗による限流効果がモデルシステムにおいて、それぞれ検証されるとともに、両者が協調可能であることが報告されている。

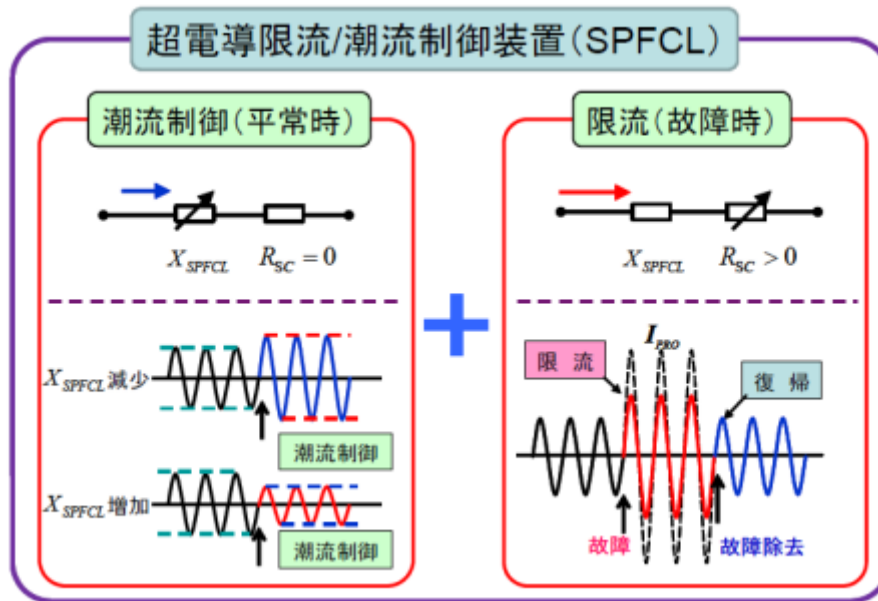


図 2.5.4-5 超電導限流／潮流制御装置（SPFCL）のコンセプト

2.5.5 パネル討論会の結果

超電導電力機器関連国際標準化の国際合意醸成の一環として、第 6 回パネル討論会（ISS2008 と併催）並びに第 7 回パネル討論会（EUCAS2009 と併催）を開催し

た。さらに、第 8 回パネル討論会 (ASC2010 と併催)、第 9 回パネル討論会 (ISS2011 と併催)、第 10 回パネル討論会 (ASC2012 と併催) を開催した。

(1) 第 6 回パネル討論会 (ISS2008 と併催)

2008 年 10 月 27 日につくば国際会議場にて ISS2008 との併催の形で第 6 回パネル討論会を開催した。本討論会の目的は、超電導関連技術の国際標準化の理解深化と必要性の討論である。参加者は 49 名、参加国は 6 カ国であった。

a. 報告内容

松下委員長から超電導関連の国際標準化への理解深化のために、“Standardization in IEC/TC90 for Superconductivity”と題した報告がなされた。長村光造氏 (応用科学研究所) から超電導関連パネル討論会実施状況と IEC/TC90 における標準化活動レビューがなされた。Dr. David Larbalestier 氏 (Florida State University, USA) から、“HTS wire development and measurement methods in ASC”に関する話題提供がなされた。また、中尾公一氏 (SRL/ISTEC) から“Measurement methods of Y-system coated conductors”に関する報告がなされた。大崎博之氏 (東京大学) から“HTS power cable technology and measurement methods”に関する話題提供がなされた。佐藤謙一氏 (住友電工) からは“How to international-standardize SC power cable”に関する報告がなされた。最後に Dr. Paul N. Barnes 氏 (Air Force Laboratory, USA) から“SC machines related measurement methods”に関する話題提供がなされた。

b. 標準化に関する討論

上記の報告及び話題に対して次の討論がなされた。

b-1 超電導線材の国際標準化

国際規格化に際し、目下開発中の線材もあり、標準化対象を明確にする必要がある。開発中の線材を対象にした微視的試験方法、特性の均一性試験方法等は、均一性を前提とする実用超電導線材に対して工業的試験方法として、どの程度簡略化できるかの見極めが必要である。長尺の実用超電導線材における臨界電流 I_c 値及び工学的臨界電流密度 (オーバオール J_c) J_c 値に関しては、IEC60050-815 のメンテナンス時に定義の見直しが必要である。実用超電導線材における特性保証は、低温超電導線材で実施されているプロセス保証が究極の姿である。

b-2 超電導電力ケーブル

国際大電力システム会議 CIGRE と IEC とはリエゾン関係にないため、国際標準化には周到的配慮が必要である。超電導電力システムには超電導線材、超電導ケーブル、中間接続、冷凍システム、終端接続等多くの構成要素について、システム設計側との密接な連携と話し合いの基でニーズを包括した規格化が肝要である。冷凍システムは不可欠であることから、信頼性試験及び保安項目の記述に配慮が必要である。

b-3 その他の超電導機器

超電導機器には多くの個別パラメータがあるが、超電導機器に共通するパラメータと機器固有のパラメータの峻別が必要である。工学的臨界電流密度（オーバオール J_c ） J_c や絶縁に関して、超電導線材レベルと機器レベルで異なった定義になることを明確にする必要がある。高温超電導線材を適用する機器においては、クエンチの検出方法と試験方法との整合性が必要である。

b-4 超電導電力機器関連の国際規格化

超電導電力機器の導入の動機はライフサイクルコストに大きく依存するため、個々の機器における規格化には、なんらかの配慮が肝要である。超電導電力機器の国際規格化には、研究者、機器技術者及びユーザの密接な協力関係が必要である。超電導電力機器関連の国際規格化のタイミングから判断し、超電導線材及び超電導電力ケーブルの国際標準化の着手判断は妥当である。

(2) 第7回パネル討論会（EUCAS2009と併催）

2009年9月15日にドイツのドレスデン工科大学にてEUCAS2009との併催の形で第7回パネル討論会を開催した。本討論会の目的は、過去の6回のパネル討論会の成果のレビュー、超電導電力ケーブルの現在のR&D活動のレビュー（CIGREの活動含む）と標準化の早期実現への準備の議論、及び超電導線材の現在のR&D活動のレビューと標準化の早期実現への準備の議論である。参加者は18名、参加国は8ヶ国であった。標準化に関する討論内容は次の通りである。

①超電導電力ケーブルの国際標準化

Pre-standard 活動をするCIGREにおいて新しいワーキング・グループを作ることが合意される予定で、今後、試験方法等について検討が行われ、3年くらい後にIECに勧告が出される見通しであることが紹介された。ケーブルについて従来の標準を主体とするか、新しい標準とするかについて質問があった。今後、TC90から超電導ケーブルについての特殊性がある事項の情報をTC20に提供し、この件について詰めていくこととした。

②超電導線材の国際標準化

scopeの定義の中で超電導線材を”monolithic strand”としていることについて異議が提出された。会議での議論の結果、定義を”single strand”とすることについて異論はなかった。Labelにnormative informationとして何を載せるかについて、特にcontract titleの中に材料名（材質名）を記載することについて意見交換を行った。代表的な意見は「取引の当事者は材料についてはよく承知しているのでcontract番号等、当事者間で了解できる内容に留めればよい。」であった。しかしstock yard (stock room)に数種の超電導製品が置かれていることを想定すると、当事者が現場作業員に指示する時点では、作業者に“材料名”、“重量”、“長さ”を具体的に指示したほうが作業が容易になることが想定される。他の材料、例えば銅線、アルミニウム線等におけるLabelの調査は参考になると考えられる。企業からの専

門家にさらに調査と意見の提出を依頼することになった。

ドイツの参加者より、高温超電導線材と低温超電導線材を分け、低温超電導線材についてはすでに当事者間に **de facto** 的な線材仕様が決められているので、新しく **standard** を作る必要性はないという意見が提出された。これに対して、本来の **International Standard** の精神は共通化した知識・技術を **open** にして市場を活性化させることである。将来的に新しく市場に参入する者にとり、高温超電導線材と低温超電導線材を分けることよりも、統一的なしかも **open** な **standard** のほうが理解しやすく、扱い易いという意見も出された。なお、現状において、Nb-Ti インゴット、MRI 等の原材料、製品は国際的な一部企業が独占しているため、IEC/TC90 で **International Standard** を作成することは不可能である。

工業製品である超電導線材を議論する委員会に企業からの委員を加えるべきとのドイツからの意見に基づき、新しいメンバーを追加したアドホック・グループ 3 メンバー構成にするため、最初のメンバーに追加を行った新しいメンバー案を紹介した。会議でさらにアメリカ、ドイツにメンバーとしての参加を要請したところ、Fleshler 氏から Cooley 氏と相談してみるとの発言を得た。今後、新しいメンバーを加えたアドホック・グループ 3 で議論していくこととなった。

(3) 第 8 回パネル討論会

応用超電導会議(Applied Superconductivity Conference)が開催される前日の 8 月 1 日(日)の午後 4 時から会場となる米国のワシントン DC の Omi Sheroheim ホテルにおいて超電導技術の国際標準化に関する第 8 回パネル討論会が開催された。会議の前日であるにもかかわらず、日本、米国、中国、スイス、ロシアの 5 カ国から計 18 名の参加者があった。

松下委員長から過去の 7 回のパネル討論会の経緯の報告を含めたオープニングの後、前回のパネル討論会で最大の懸案事項となった、IEC/TC90 のアドホックグループ 3 で検討された「超電導線材の通則」(General Requirement) についての案が長村氏(応用科学研究所)から報告された。とくに前回の討論会で指摘された”Label”等の案をできるだけ受け入れられるように平易に説明した後、光ケーブルの例を示して国際標準化が市場拡大に必要不可欠であることを説き、通則の承認を訴えた。これを受けて、前回の討論会以降、保守的と見られる立場をとっていた米国側を代表して Cooley 氏(Fermi Laboratory)が米国の考え方を説明した。その後、かなりの時間をかけて日本側と米国側の意見交換が続いたが、そうした標準化の実行が重要なことや個々の項目の必要性については大体の理解が得られた。そして、”stability”に代表されるように、目的等によって大きく変わるものの取り扱いをどうするかといった、具体的な内容に係わる検討の必要性が指摘されたことに加えて、”General Requirement”という用語の適正さが問題となった。すなわち、requirement という用語が強すぎて、これが少なからず米国側に違和感を与えてい

たようで、日本側の説明を受けて、単なる”General Characteristics”ではないかという意見が出された。今後、この用語の件を含めて全体的な枠組みを検討することが決まったが、長村委員から米国側に対してアドホックグループ 3 へ委員の派遣を行うように要請があり、快諾された。これによって、「超電導線材の通則」の標準化に向けたステップが大きく進むことになった。

その後、佐藤国際幹事（住友電工）から IEC の活動状況が報告され、当時、電流リードを含めて 15 の規格が発行されていることと、標準化作業が進んでいる規格並びに規格化が提案されているものの紹介があった。また、当時 CIGRE（国際大電力システム会議）で検討中の超電導電力ケーブルを取り巻く状況についても報告があった。

続いて新富教授（日大）から日本における超電導電力応用の紹介があった。当時、（財）国際超電導産業技術研究センターを中心に行われていた NEDO 事業における超電導電力応用の個々の進行状況や、それ以外の中部大学における直流超電導ケーブル、船舶推進用超電導モータ、超電導モータを搭載した自動車等の紹介がされた。そして、各種の超電導電力機器についての今後の規格化のスケジュール案が紹介され、参加者に大筋の方向性を示すことができた。

なお、後日、米国側から超電導線材について、もっと詳細に議論したい旨の提案があり、その後、積極的な展開が進められた。

(4) 第 9 回パネル討論会（ISS2011 と併催）

2011 年度の第 24 回国際超電導シンポジウムが開催中の 10 月 25 日(火)の 19 時から、シンポジウム会場の船堀タワーホールの 303 号室で超電導技術の国際標準化に関する第 9 回パネル討論会が開催された。まだポスターセッションが行われていた時間帯であるにも係わらず、日本、米国、中国、韓国、ドイツ、スペインの 6 国から計 37 名の参加者があった。

松下委員長が過去の 8 回のパネル討論会の経緯の報告を含めてオープニングを行った後、前回のパネル討論会で最大の懸案事項となった、IEC/TC90 の WG13 で検討された「実用超電導線材の通則」(General and Guidance) についての案が長村氏（応用科学研究所）から報告された。とくに 2011 年 7 月に米国で開催された同グループ会合での検討を受けて「分類」と「特性の試験法」と二分割構成とすることとそれぞれの中身について説明があり、「分類」における必須事項である出荷のときのラベル付けの内容や、試験すべき特性項目について議論された。また、その後の議論を実りあるものにするため、専門家の議論への参加が長村氏から要請された。次いで、増田氏（住友電工）から CIGRE の B1.31 作業グループにおける超電導電力ケーブルの審議状況と同じく CIGRE の D1.38 作業グループにおける超電導電力機器の審議状況について説明があった。その後の議論で、超電導直流ケーブルが対象に含まれない理由についての質問やケーブルの負荷試験に電圧の試験

はあるが温度上昇試験が含まれていないことの指摘等があった。

その後、各国の超電導電力機器応用についての紹介が行われた。まず、Selvamanickam氏（米国、Houston大）からは米国における線材の製造に関する現状が報告された。これによれば出荷している線材量が急速に増加していることや当時、特性改善のために人工ピンを導入する研究が進んでいること等が示された。Noe教授（ドイツ、Karlsruhe工科大学）からは自身が委員長を務めているCIGREのD1.38作業グループの活動の報告がなされたが、とくに活動が盛んな限流器についての紹介があった。Xiao氏（中国科学技術院）は最近、上海交通大学で開発が行われているY系コート線材や以前からあるBi系テープ線材、金属系実用線材の開発の状況を説明し、新しいMgB₂線材や鉄系超電導体の線材化研究の紹介もした。Park氏（韓国、昌原大）はこれまでの韓国の超電導電力機器開発の国家プロジェクトの流れを説明し、今後の済州での国家プロジェクトの中で開発を行う各種超電導電力機器の目標値等を明らかにした。以上の各国からの現状紹介を受けて全体討論を行った。この中で、次の標準化の対象となる可能性が最も高いと期待される限流器についてCIGREのD1.38で議論されているにも係わらず、IEC/TC90の中にはそうした動きが全くない現状から、限流器の標準化の議論をするにあたってIEC/TC90が本当にふさわしい機関かどうかという疑問が出された。しかし、超電導に関するものであればIEC/TC90が取り扱うのが筋であり、したがって、この分野でのIEC/TC90とCIGREの協力関係を早急に模索していく必要性が認識された。

最後にアドホックグループ4の大久保ラポーター（産総研）から世界の超電導センサの現状についての紹介と今後の活動スケジュールについての報告があり、用語がいろいろとあって、その統一が容易ではないケースがあること等が紹介された。

(5) 第10回パネル討論会（ASC2012と併催）

超電導国際規格に関する第10回パネル討論会が、2012年応用超電導会議（ASC2012）が開催された米国Portland市のOregon Convention Centerにおいて10月10日夕方6時より開催された。米国、スイス、イタリア、ドイツ、中国、韓国、英国、オランダ、日本から40名の参加があった。我が国からは、佐藤謙一IEC/TC90国際幹事、藤上純国際幹事補、松下照男国内技術委員会委員長他17名が参加した。今回の討論会では、今後の製品規格を想定し、商用導体や各国での超電導応用に関する活動状況報告が主題であった。

まず、藤上幹事補から8月20～22日に西安で開催されたIEC/TC90国際会議の経過報告があった（Web21 10月号参照）。

続いて、応用科学研究所長村光造特別研究員より、現在規格化が進められている実用超電導線の通則（ガイドライン）の説明がされた。商用導体の定義、LTS、HTSの形状等が紹介され、“General Characteristics and Guidance”に関するCommittee Draftの概要が説明された。

古河電工向山晋一氏から超電導電力ケーブル試験法に関する TC90 の活動、CIGRE WG B1.31 とのリエゾン関係、活動状況等が説明された。CIGRE WG B1.31 により試験法に関するガイドラインが 2013 年中にまとめられる予定であり、それを基に、TC90/TC20 でケーブル試験法のガイドラインの規格化が進められる。

A. Ballarino 氏が CERN における HTS 電流リードの運転状況と超電導ケーブル開発について報告した。LHC 用に 13 kA、6 kA、0.6 kA の Bi2223 電流リードが 1074 個設置され、2010 年から運転されてきており、順調に使用されている。CERN の実績は、電流リードの規格化に大いに貢献している。また、給電用の直流 HTS ケーブル（総電流値 150 kA）の開発状況が説明された。

“Inter. Benchmarking of the strain measurement facilities available in USA, Europe, and Asia”と題して、コロラド大学 N. Cheggour 氏が報告した。 I_c 、 n 値、 e_{irr} のベンチマーク試験用に Nb₃Sn 導体が Twente 大学と ITER に数 km 保管され、Round Robin Test 用に準備されている。

Karlsruhe 工科大学 M. Noe 氏より電力用高温超電導機器の試験方法に関する CIGRE WG D1.38 の活動状況が報告された。2014 年までにレポートが出される予定であり、今後の超電導電力機器の規格化活動に活用される。なお、名古屋大学早川直樹教授はこのワーキンググループの幹事を務めている。

ASC2012 でこれまでに活動がなかったような国からの研究発表が見られたように、今後地球環境を考えた超電導電力応用が世界各国で進められるのではないかという印象を持ったが、それとともに超電導電力機器規格化の活動が重要になると思われる。

2.5.6 成果のまとめ

超電導電力機器の適用技術標準化においては、5 ヶ年のプロジェクト終了までに、「超電導線並びにその試験方法の IEC 国際規格提案に資すること」、「超電導電力ケーブル並びにその試験方法の IEC 国際規格提案に資すること」、及び「超電導変圧器、SMES 等の機器仕様並びにこれらの試験方法の標準化素案の作成等」を最終目標としていた。このため、前期 3 ヶ年においては、超電導線材と超電導電力ケーブルでは IEC 国際規格の提案に必要な規格素案の作成と国際標準化合意の醸成を目標に定め、また変圧器や SMES 等の超電導電力機器では機器仕様並びにこれらの試験方法の標準化の基礎となるデータ等の体系化を目標とし、これらを達成するために技術調査研究を行ってきた。その結果、個々に設定されたすべての中間目標について達成した。後期 2 ヶ年においては、超電導線材と超電導電力ケーブルについては規格素案を作成し、国際合意を背景に IEC 国際規格提案に資することを目標に定めた。また、変圧器や SMES 等の超電導電力機器について標準化素案を作成することと冷却システムの安全性、運用性を考慮した規制緩和に向けた提案資料の作成、国際標準化合意の醸成を目標とした。活動の結果、すべての最終目標

を達成した。個々の実施項目に対する目標達成の状況は次の通りである。

超電導線材技術標準化については、前期 3 ヶ年においては、Y 系を含む超電導線材を実用超電導線材とした超電導線材並びにその試験方法の規格素案を作成した。また国際会議等を通じて日本提案の国際規格に対して国際合意の醸成を図り、中間目標を達成した。後期 2 ヶ年においては、超電導線材の通則及び Y 系超電導線材の臨界電流測定に関する規格素案を作成した。また、Y 系超電導線材の短尺臨界電流測定方法に関する国内ラウンドロビンテスト(RRT)を行い、IEC/TC90 の WG に技術情報を提供し、国際規格提案に貢献し最終目標を達成した。

超電導電力ケーブル技術標準化については、前期 3 ヶ年においては、Y 系を含む超電導線材等を適用した超電導電力ケーブル並びにその試験方法の規格素案の概要を作成した。また、国際大電力システム会議 CIGRE 及び TC20 (従来の電力ケーブル) との連携を図り、IEC 国際標準化合意の醸成を行っており、中間目標を達成した。後期 2 ヶ年においては、Y 系を含む超電導線材等を適用した超電導電力ケーブル並びにその試験方法の規格素案を作成した。また、CIGRE のガイドラインの検討を行い、CIGRE に情報提供した。これらの結果、ジョイントアドホックタスクフォース(J ahTF)が設置されることになり、国際合意を背景に超電導電力ケーブルの IEC 国際規格提案をめざした活動が行われることになった。これらの活動を通じて超電導電力ケーブルの IEC 国際規格化に向けた活動に貢献し、最終目標を達成した。

超電導電力機器関連技術標準化については、前期 3 ヶ年においては、Y 系を含む超電導線材等を適用した超電導変圧器、SMES 等の機器仕様並びにこれらの試験方法の標準化の基礎となるデータ等の体系化を行っており、中間目標を達成した。後期 2 ヶ年においては、これらの成果をベースとした標準化素案を作成した。また、他機関との連携が必要との議論がなされた中で IEC/TC90 と CIGRE D1 との間でリエゾン関係を結ぶことになり、国際合意醸成活動を行った。さらに、冷却システムの規制緩和に向けた提案資料を作成した。以上の活動を通じて最終目標を達成した。

今後の進め方としては次の通りである。超電導線材技術標準化については、超電導線材の通則について、平成 25 年度に CD2 が発行され、平成 26 年に CDV 提案が行われ、それらを通して IEC 国際規格化をめざした活動が行われる。また、Y 系線材の臨界電流測定に関する国際 RRT が行われ、IEC 国際規格化が進められる。超電導電力ケーブル技術標準化については、ジョイントアドホックタスクフォース(J ahTF)が設置され、国際規格提案をめざした活動が行われる。超電導電力機器関連技術標準化については、IEC/TC90 と CIGRE D1 のリエゾンにより超電導電力機器の共通事項について連携した活動が行われる。規制緩和に向けては、他機関と連携した活動を行うことが重要である。

IV. 実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて

1. 実用化に向けての見通し及び取り組みについて

1.1 超電導電力貯蔵システム (SMES) の実用化の見通し

1.1.1 実用化の見通し

SMES は、NaS 電池、リチウム(Li)イオン電池等の 2 次電池やコンデンサ等の電力貯蔵装置に比べ電力貯蔵効率がよく、短時間に大電力の出し入れが可能という特長がある。また、SMES はコイルで電力を貯蔵することから、コイル容量や通電電流により、エネルギー貯蔵量に自由度が高く、必要なエネルギー量だけ貯蔵することが可能である。さらに、繰り返しの充放電では、電池の場合、その回数に制約があり、頻度の多い場合、電池本体の交換が必要となるが、SMES の場合、貯蔵部のコイルは数万から数十万回の充放電が可能である。このことから SMES は、繰り返しの変動が発生する分散型電源や自然エネルギーの変動電力を補償する用途、数秒の出力時間でよいが、大出力が必要な電力ネットワークの系統安定化の用途に最適な電力貯蔵装置である。主な電力貯蔵装置の比較を表 1.1.1-1 に示す。比較して明らかのように、電池は繰り返しの用途には向かないが単位容積当たりのエネルギー貯蔵量が大きいため、比較的長い時間の貯蔵に適した技術であり、SMES やフライホイールなどの貯蔵技術は逆に短時間で繰り返しの充放電を頻繁に要求される用途に適した技術であることが分かる。また、出力あたりのコストを比較すれば、大出力が可能な SMES が最も安価なシステムとなるポテンシャルを持っていると言える。

表 1.1.1-1 各種電力貯蔵技術の比較

種類	Ni水素	Liイオン	NaS	超電導 フライホイール	電気二重層 キャパシタ	SMES
コスト (万円/kW)	△ 10	△ 20	△ 24	◎ 7	◎ 5	◎ 2~6
寿命 (サイクル数)	△ 5~7年 2000回	△ 6~10年 3500回	○ 15年 4500回	◎ 20年以上 制限なし	○ 15年 10万回以上	◎ 20年以上 制限なし
大容量化	△ ~MW級	△ 1MW級 まで	○ MW級 以上	○ 単体MW 並列化要	◎ 10MW級	◎ 10MW 以上
充電状態の 計測・監視	△	△	△	◎	◎	◎
安全性	○	△	△	○	○	○
温度管理の 必要性	○ 無	○ 無	△ (≥300°C)	△ 冷却要	○ 無	△ 冷却要
エネルギー密度 (Wh/L)	40~100	200~300	144	66	0.04	金属系:0.1 Y系:1 YOROI:6

低コスト高信頼性の SMES システム技術開発が達成された場合は、電力自由化の進展や電力コストの抑制の面から、低コストかつ送電線運用容量の大幅アップが期待される箇所への適用が想定される。また、風力等の再生可能エネルギーや分散型電源の系統連系点での補償装置としての適用も期待される。

本プロジェクト開始前までの技術調査により、SMES システムが実用化できた場合、初期コスト、ライフサイクルコストともに十分な経済性をもちうることが判明している。

本プロジェクト終了時までの成果に基づき、実用化のイメージを想定すると、今後、本プロジェクトでの酸化物系超電導線材の適用も含めたパイロットシステムの製作、検証、システム技術確立を踏まえることができれば、これまでの SMES プロジェクト（「超電導電力貯蔵システム技術開発」「超電導電力ネットワーク制御技術開発」）の成果である金属系 SMES を用いて産業応用が実現している瞬低補償用途から市場への導入が考えられる。

なお、金属系超電導線材を用いた出力 10 MW の瞬低補償用 SMES は、液晶テレビ工場に設置され現在も稼働しており、フィールド試験期間を含めこれまでに 30 回以上の瞬時電圧低下を補償する実績を上げ、最先端の製造現場で多大な貢献をしている。さらに、液晶テレビ工場だけでなく、研究施設や半導体工場への SMES の設置が進められている。

負荷変動補償用では、需要家側での個別ニーズに合わせた仕様、性能、機能により需要家側の利便が十分大きくなる場合、他と同様に市場参入が行われると考えられる。例えば、新幹線による変動補償を SMES で行うことを想定した場合は、新幹線用変電所 30 カ所に出力 30 MW の SMES を配置するとして、90 万 kW の市場が推定される。

系統安定化用途では、電力系統の安定度面からの運用制約により送電容量が抑えられている箇所では、その対策に膨大な設備投資が必要とされ電力コストの増大要因となる。そのため、SMES を設置することにより低コストで送電線運用容量の大幅アップが期待される箇所への市場参入が行えると考えられる。

系統安定化及び負荷変動補償・周波数調整用の SMES システムそれぞれの用途で導入コストを上回る便益が得られる見通しが先の SMES プロジェクトの成果として得られている。また、これを実現するコスト低減技術の中心であるコイル系や大容量電力変換システム、ランニングコストに影響を与える極低温冷凍機の信頼性向上については、要素技術確立の見通しが得られている。加えて、先の SMES プロジェクトにおいて 10 MVA/20 MJ 級 SMES システムを製作し、電力系統との連系試験実施したことで、SMES システムとしての技術を検証することができている。これらの成果とともに、貯蔵部を、Y 系超電導線材を用いた高磁界コンパクトコイル化することで、一層の低コスト化を実現することが実用化には不可欠である。さらに、実規模級のパイロットプラントを開発し、総合的に実フィールドでの実証を行なった後、長期的な信頼性に関する評価・改良を進めて市場への導入を図

る。その後、さらにコストダウンを進め、普及拡大をめざす。

超電導技術の応用は、電力分野では発電機、送電ケーブル、変圧器、限流器が、医療関連分野では MRI や NMR、また、産業分野では磁気分離、電動機、加速器や核融合に代表される各種高磁場利用が考えられている。本事業で開発される SMES システム技術は、特に、現時点の超電導技術の実用化に立ちはだかる大きな要因であるコストパフォーマンスの問題を大幅に改善することに貢献できるものである。超電導技術を応用する場合、その大半はコイルを用いるため、本プロジェクトによる高磁界コンパクトな Y 系超電導コイル開発や伝導冷却技術などが与える波及効果は極めて大きい。また、本プロジェクトにより開発される SMES は、電力分野においてコスト面で成り立つ初の実用超電導機器となると考えられ、超電導技術の広範な産業応用に大きく貢献が期待される。

また、系統制御技術としての要求よりは、小さな規模で済む産業応用への波及分野としては、電気エネルギーに高い品質と信頼性を要求するハイテク産業における瞬低対策技術として、広汎な導入・普及が期待される。

今回の開発により、ヘリウム温度領域を越えた 20 K 付近で利用可能な超電導コイル応用における線材設計の高度化のほか、市場拡大による超電導線材の低廉化が期待でき、他の超電導技術応用分野での経済性向上の可能性が高まってくる。加えて、将来の超電導応用機器としての要求性能と期待される市場が明確化されたことにより、これに必要な線材開発が一層活発化して行くものと考えられる。

1.1.2 実用化の効果

CO₂削減効果については、II.3.4.3 項において、SMES、ケーブル、変圧器毎に試算している。ここでは、太陽光や風力発電などの再生可能エネルギーが電力系統に大量導入されることを想定した場合に、想定される電源構成比の変化に伴い電力貯蔵技術の必要性が高まることを仮定し、その条件下でのCO₂削減量の試算、及び SMES、NaS電池、鉛蓄電池とのコスト比較を行った。

1.1.2-1 再生エネルギー導入によるCO₂削減効果

再生可能エネルギー大量導入時には、低負荷時に発電が需要を上回ることで発生する余剰電力対策の他に、太陽光発電の出力変動を緩和するための LFC (Load Frequency Control : 負荷周波数制御) 調整力が必要となる。通常、LFC 調整力としては火力発電が用いられるが、その場合、部分負荷で稼動する必要があるため発電効率が低下する (図 1.1.2-1)。

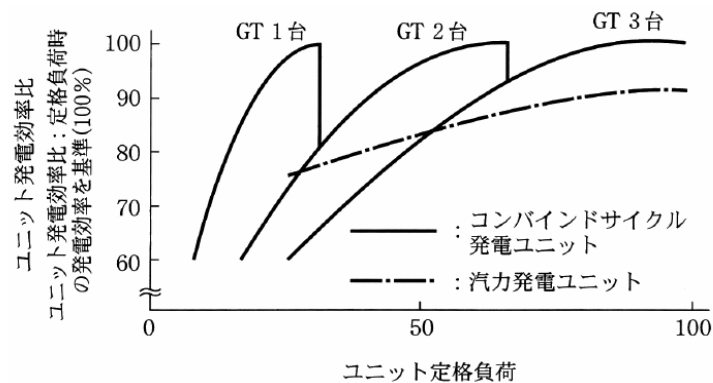


図 1.1.2-1 ガスタービンの総合発電効率特性の例

出典)「ガスタービン技術」(財)エネルギー総合工学研究所

一方、LFC対策用の電力貯蔵装置を導入した場合、火力発電を定格運転することが可能となり、火力発電の効率が向上し、その分のCO₂削減効果が見込める。「長期エネルギー需給見通し(見直し)」から、2030年における発電種別毎の、設備容量、発電電力量及び設備利用率は表 1.1.2-1 のとおりである。

表 1.1.2-1 2030年における発電設備容量、発電量、設備利用率

発電種別	発電設備 (万 kW)	発電量 (億 kWh)	設備利用率
水力	5,077	889	15 %
一般	2,302	834	32 %
揚水	2,775	54	2 %
火力	12,090	3,080	22 %
石炭	3,003	1,346	39 %
LNG	4,881	1,371	25 %
石油等	4,206	363	8 %
原子力	6,315	4,695	65 %
地熱	120	75	55 %
再生可能エネルギー	5,975	907	13 %
合計	29,577	9,646	29 %

出典)発電設備及び発電量は「長期エネルギー需給見通し(再計算)」より。

この表から、発電設備容量に設備利用率を乗じ、2030年における平均的な火力発電所の容量を求めると 2,698 万 kW となる。

ここで、再生可能発電エネルギー導入量の 10 %、30 %、50 %が必要であると仮定した場合の LFC 調整量は表 1.1.2-2 の通りになる。

表 1.1.2-2 再生可能エネルギー導入による LFC 調整必要量

再生可能エネルギー導入量 (万 kW)	5,975		
LFC 調整力として必要な割合 (%)	10	30	50
LFC 調整力の必要量 (万 kW)	598	1,793	2,988

表 1.1.2-2 で算出した LFC 調整力を全て火力発電で担うこととし、その際の負荷を 80 % とすると、火力発電の運転構成は表 1.1.2-3 のようになる。

表 1.1.2-3 火力発電の構成 (LFC 用電力貯蔵装置の設置なし)

LFC 割合	項目	定格運転 (万 kW)	80 % 運転 (万 kW)	合計 (万 kW)	不足 LFC (万 kW)
10 % ケース	必要火力設備	308	2,988	3,296	0
	火力出力合計	308	2,390	2,698	
30 % ケース	必要火力設備	0	3,373	3,373	1,118
	火力出力合計	0	2,698	2,698	
50 % ケース	必要火力設備	0	3,373	3,373	2,313
	火力出力合計	0	2,698	2,698	

ここで、火力発電を負荷率 80 % で稼動した場合の定格運転からの効率低下を 5 %、火力発電の CO₂ 排出量原単位を 0.69 kg-CO₂/kWh、表 1.1.2-1 から火力発電所の設備利用率を 22 % とし、火力発電の CO₂ 排出量を求めると表 1.1.2-4 の通りとなる。

本検討では火力発電からの CO₂ 削減を検討しているため、CO₂ 排出量原単位は火力発電の値である 0.69 kg-CO₂/kWh を用いた。なお、発電設備全体としては 0.34 kg-CO₂/kWh となる。

表 1.1.2-4 LFC 用電力貯蔵装置を設置しない場合の火力発電からの CO₂ 排出量

項目	10 % ケース (百万 tCO ₂)	30 % ケース (百万 tCO ₂)	50 % ケース (百万 tCO ₂)
CO ₂ 排出量	38.1	38.3	38.3

一方、LFC 調整力を電力貯蔵装置で賄い、稼動する火力発電を定格運転とした場合、火力発電の運転は表 1.1.2-5 のようになる。

表 1.1.2-5 火力発電の構成 (LFC 用電力貯蔵装置を設置)

LFC 割合	項目	定格運転 (万 kW)	80 % 運転 (万 kW)	火力合計 (万 kW)	LFC 不足量 (万 kW)
全ケース	必要火力設備	2,698	0	2,698	0
	火力出力合計	2,698	0	2,698	

表 1.1.2-5 から、前述のケースと同様に火力発電所からのCO₂排出量を求めると、一律 36.4 百万 t CO₂となる。

よって、LFC用電力貯蔵装置を導入することによって、部分負荷で稼動する火力発電設備が削減されることで得られるCO₂削減効果は表 1.1.2-6 のとおりとなる。

表 1.1.2-6 LFC調整用電力貯蔵装置によるCO₂削減効果

項目	10 %ケース (百万tCO ₂)	30 %ケース (百万tCO ₂)	50 %ケース (百万tCO ₂)
CO ₂ 排出量 (電力貯蔵装置なし)	38.1	38.3	38.3
CO ₂ 排出量 (電力貯蔵装置設置)	36.4	36.4	36.4
CO ₂ 削減効果	1.7	1.9	1.9

1.1.2-2 LFC 用電力貯蔵装置の導入コスト比較

(1)で算出した電力貯蔵装置によるCO₂削減効果についてSMESと競合する他の電力貯蔵技術に対してライフサイクル 30 年間に於けるコストを比較した結果を図 1.1.2-2, 図 1.1.2-3, 図 1.1.2-4 に示す。

なお、コスト算定的前提条件は下記の通り。

- ・貯蔵容量を 2 MJ、20 MJ、200 MJ、2 GJ、20 GJ 及び出力を 10 MW、100 MW、1,000 MW とし、常時充放電を繰り返す LFC 的な運転を想定
- ・ライフサイクルを 30 年とし、NaS 電池（寿命 15 年）は途中一度設備更新を行う。
- ・SMES のランニングコストは、冷凍機動力による電力消費を考慮
- ・NaS 電池のランニングコストは、充放電ロスによる電力消費を考慮し、その場合は毎日負荷平準化運転を行うこととし、その充放電ロスをカウント

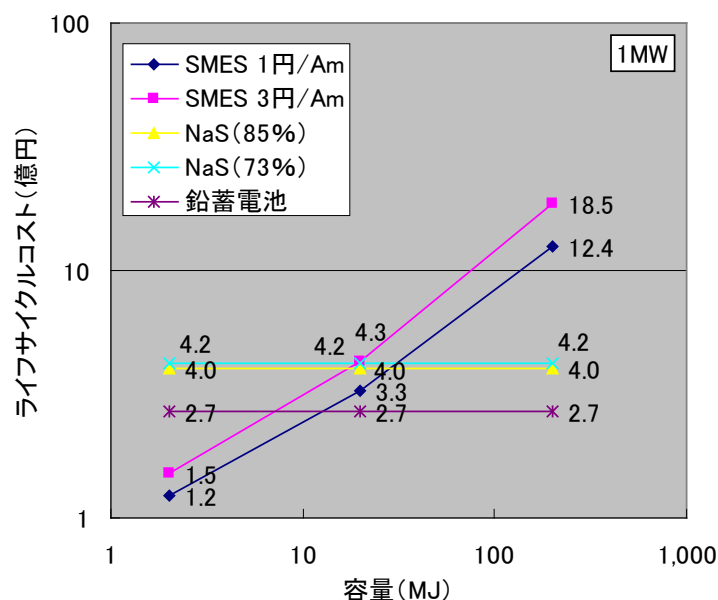


図 1.1.2-2 LFC 用電力貯蔵装置のライフサイクルコスト (1 MW 級)

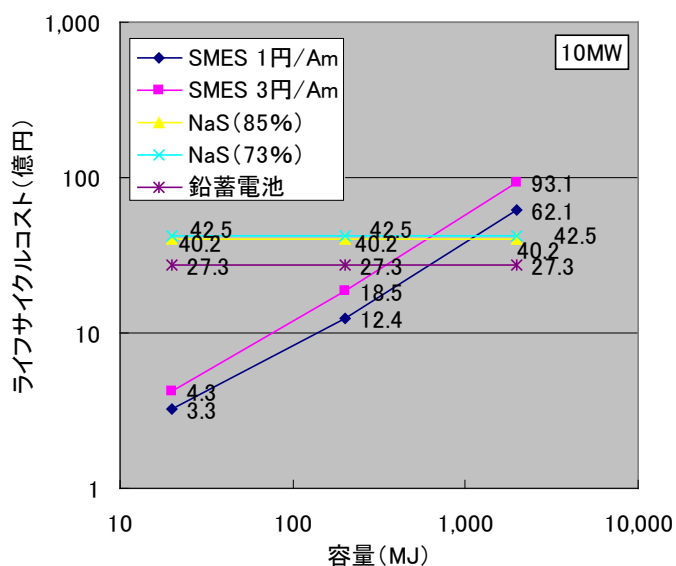


図 1.1.2-3 LFC 用電力貯蔵装置のライフサイクルコスト (10 MW 級)

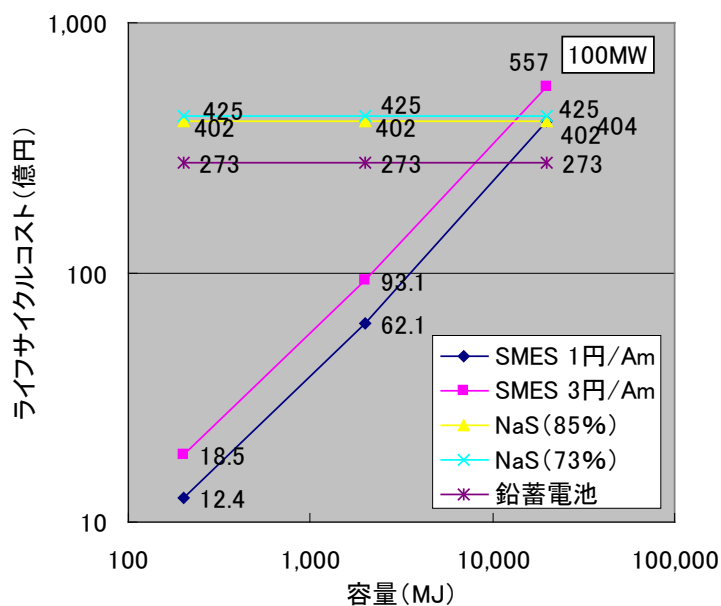


図 1.1.2-4 LFC 用電力貯蔵装置のライフサイクルコスト (100 MW 級)

比較した結果、NaS 電池及び鉛蓄電池に対して SMES は貯蔵容量の関数でコストが変化するが、1 MW 級の場合は 20 MJ (5.6 kWh)、10 MW 級の場合は約 1 GJ、100 MW 級では 20 GJ 程度で SMES のライフサイクルコストが NaS 電池を上回る。これらは時間容量にするとそれぞれ 0.33 分、約 1.6 分、3.3 分に相当するため、概ね現状のコスト見込みでは SMES が競争力を持つ時間容量は数分程度までと解釈することができる。LFC 調整力としての必要時間容量について確かな基準はないが、概ね数分から 10 分程度と考えると、LFC 調整力として SMES の出力が大きくなるに従って競争力を有すると判断できるが、より一層の貯蔵容量ベース

でのコスト低減技術開発を図ることが必要である。LFC 調整力に求められる仕様自体が短時間側にシフトすることも考えられ、SMES は他の貯蔵技術に比べ、応答性に優れていることから、低コスト化が進むことで競合技術との差別化が図られ、SMES 適用領域が明確となると考えられる。

1.1.2-3 本プロジェクトの開発成果を踏まえた競合技術とのコスト比較

本プロジェクトの成果として、Y系線材を用いたコイルにより高磁場・コンパクト化が実現できる見通しが立ち、特に、コイル構造で電磁力を受け持つというブレークスルーにより、一段とコンパクトなコイルシステムが実現できる見通しが得られた。これにより、初期コストが大幅に低減できることとなり、競合技術として挙げられる電気二重層キャパシタと比較すると、縦軸に変換器等を含まない貯蔵部の初期コスト、横軸に貯蔵容量とした図 1.1.2-5 に示すとおり、100MJ 以上の大容量域において SMES の優位性があると言える。しかしながら、最近の技術進展によりリチウムイオン電池の大容量化が進んでおり、同図の産業向けリチウムイオン電池と比較した場合は、1GJ を超えた大容量域でなければ SMES の初期コストとしての優位性が認められない結果となっている。

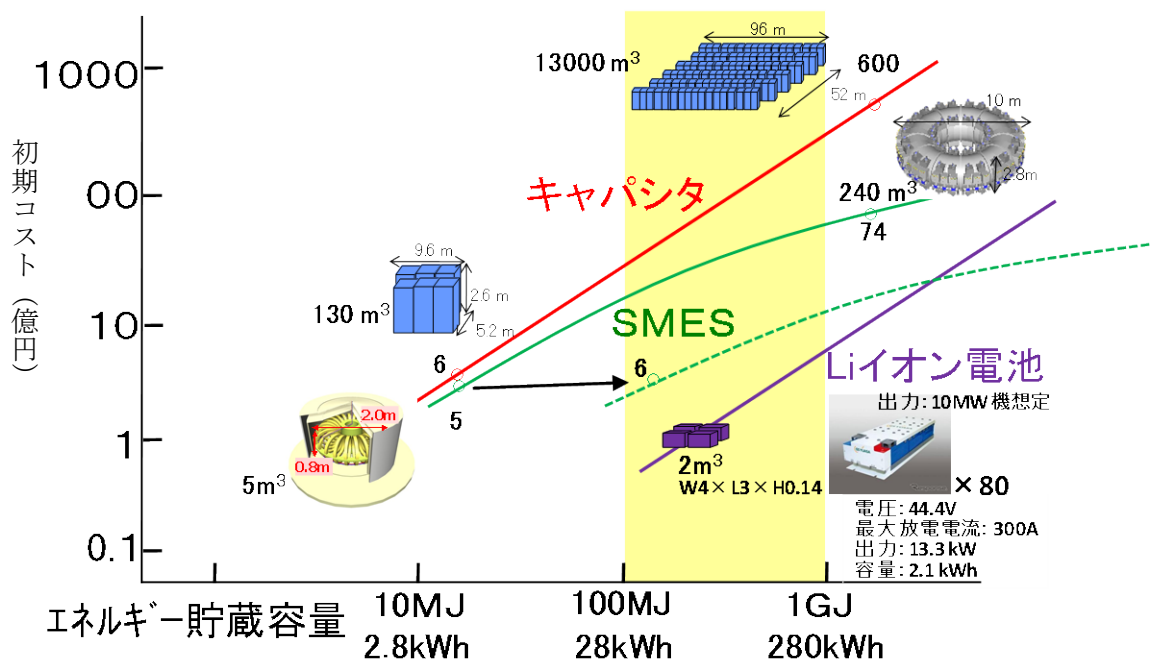


図 1.1.2-5 SMES、電気二重層キャパシタ、Li イオン電池の初期コスト比較

劣化による貯蔵部の取り替えを想定したライフサイクルコストとして比較しても、SMES の冷凍機動力分のコストアップもあり、リチウムイオン電池を 30 年間使用して取替を 2 回経験すると仮定した場合であっても、図 1.1.2-6 に示す通り、市場が期待されるエネルギー貯蔵容量 100MJ から 1GJ におけるバンドでの SMES

の優位性は認められない結果となった。

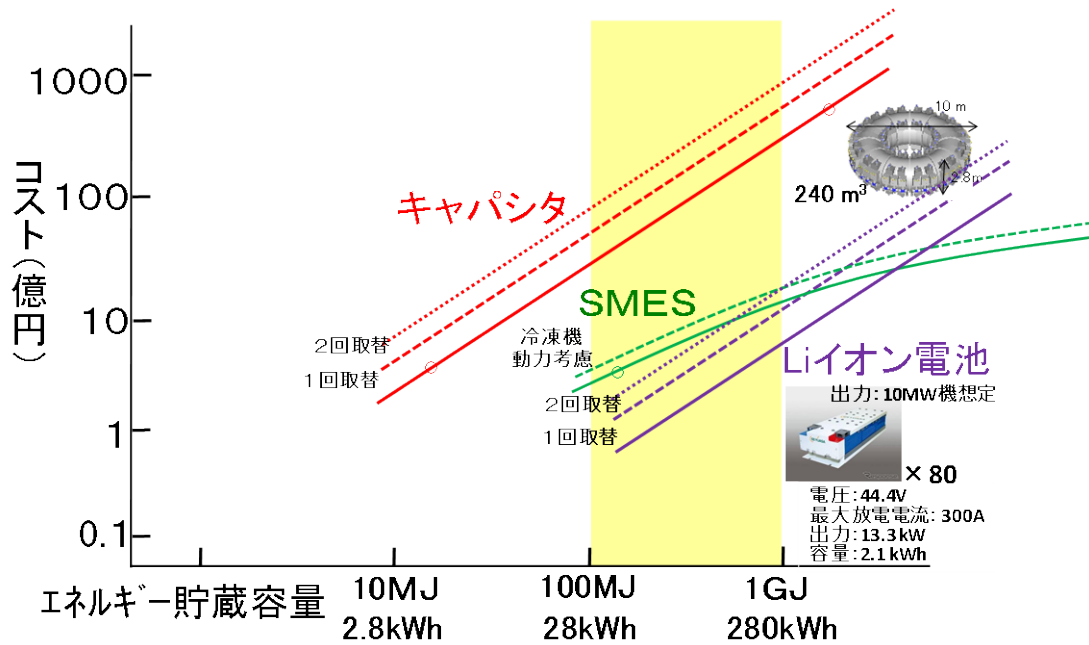


図 1.1.2-6 ライフサイクルコストの比較

ここで、SMES の大きなアドバンテージである繰り返しの充放電においても能力の低下がないことを活かした使い方を前提とした比較をすると、図 1.1.2-7 に示すように、10 万回程度の繰り返し充放電を想定した場合は、十分リチウムイオン電池と SMES が競合しえる技術となることが確認された。これにより、将来、想定されたコストで線材供給等が実施されれば、再生可能エネルギーの電力系統連系における安定化装置や電車の回生エネルギー対策として、リチウムイオン電池に代わり SMES がその市場を席巻することが期待できる。

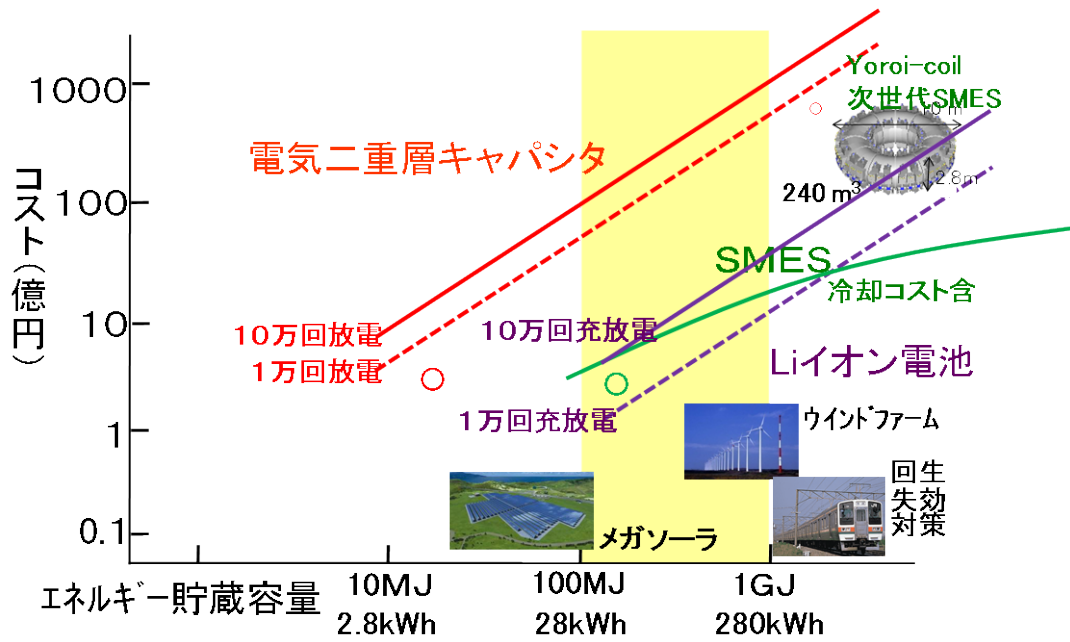


図 1.1.2-7 繰り返し充放電を想定した貯蔵部のコスト比較

1.2 超電導電力ケーブルの実用化の見通し

1.2.1 超電導電力ケーブルの適用検討

1.2.1-1 送電分野における現状と課題

昨今、地球温暖化防止対策におけるCO₂排出量の削減は、喫緊の課題となっている。また、「Cool Earth-エネルギー革新技术計画」の中で、重点的に取り組むべきエネルギー革新技术「21」に「超電導高効率送電」がエネルギー供給側技術で効率向上をめざす発電・送電部門に位置づけられている。この超電導高効率送電の技術概要には「高温超電導材料を送電ケーブルに活用することにより、現行の5%程度の送電ロスがこの技術を適用する区間で1/3程度に削減することが可能である」と紹介されている。

このように超電導電力ケーブルを早期に実用化することにより、電気抵抗による送電損失を極小化できるゆえ、送電ロスの少ない電力の輸送が実現することで、運転コストが低減できるとともに、多量のCO₂削減効果が可能となり、CO₂の低減と資源の有効活用を達成し、無駄の少ないエネルギーの利用に資することが期待されている。

また、超電導電力ケーブルは、従来の電力ケーブルと比較して導体部分のエネルギー密度が非常に高く、また低損失なことから、冷却に必要なスペースを考慮してもケーブル収容断面積を小さくすることが可能となる。つまり従来の電力ケーブルは、都市部において洞道と呼ばれる直径約2~3mのトンネルに布設されている。これが超電導電力ケーブルに置換わると、管路と呼ばれる地中埋設された内径150mmの管に布設することができ、新たな収容設備(洞道、管路)の建設を行うことなく、既設設備を有効利用することによって、コンパクトな設置が可能となる。よって地中設備形成の建設コストの大幅な削減、コストダウンにもつながることが期待できる。

一方、既設の電力ケーブルのうち、OF(Oil Filled)ケーブルやPOF(Pipe-type Oil Filled)ケーブルは布設後約40年が経過しているものも多く、老朽化に伴う漏油の問題が生じており、経年ケーブルから順次取替が必要となってきている。また、一般家庭等の電化率の向上による電力需要の増加に対応すべく設備の増強の必要性があり、電力流通設備の地中化率(図1.2.1-1)が年々増加しているが、将来に亘り従来の電力ケーブルによる新たな送電設備を地下に設けるには莫大なコストと地下埋設のスペースが必要となる。さらには、電力需要の増加、高信頼度の系統構成の構築により、火力発電所の増強等のリプレースによる熱効率の向上や稼働率の向上に伴って、電力流通設備の新增設や超高压送電線の冷却設備の建設等の電力流通設備に対する増容量対策が必然となってきている。

このような状況の中、超電導電力ケーブル技術は、上記のすべての課題を解決

できる革新技术であり、次世代の電力送電網の構築においても重要な技術と位置づけられる。

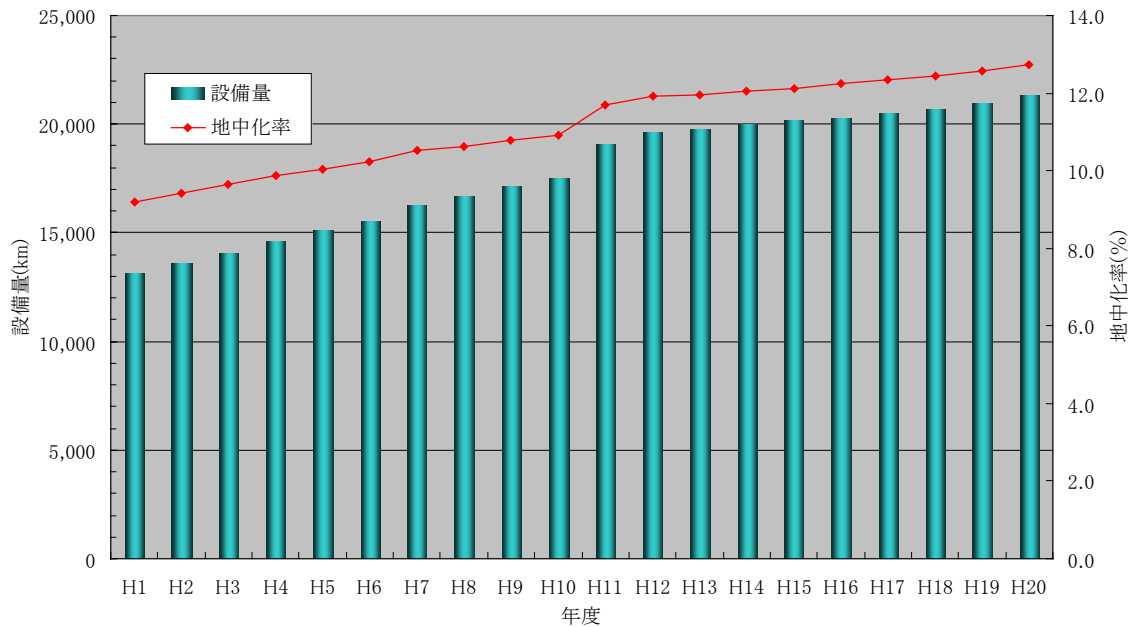


図 1.2.1-1 地中送電設備量の推移

1.2.1-2 66 kV 大電流・低交流損失の超電導ケーブルの適用

(1) 背景

配電用変電所への供給や変電所間の連系等、都市部の連系用電力ネットワークの主流は、154 kV や 66 kV 系統となっている。この 154 kV や 66 kV 系統は、特に夏場や冬場の電力需要がピークに達する時期には過負荷となり、設備の稼働としてはギリギリの運用をしている箇所もある。また、都市部における設備の形態は非常に過密化しており、新たな設備の増設は不可能に近く、既存の 154 kV または 66 kV 系統の増容量化を行うことは容易ではない。66 kV/5 kA の大電流ケーブルは 500 MVA 級の容量をもち、従来のケーブルでは、154 kV 級の OF ケーブル、POF ケーブルの容量に匹敵する。このクラスのケーブルは、国内では既に設置導入後 30~40 年経過したものが多く、さらに近年、経年化による順次リプレースの必要性のある系統も少なくはなく、CV(Cross linked polyethylene Vinyl sheathed)ケーブルで対応する場合には既設管路の活用による送電容量の制約から既存の経年ケーブル等の増容量は出来ず、増容量対策を行うには新たな管路設備(洞道)が必要となってくる。

(2) 過負荷の 66 kV または 154 kV 系統設備への適用

都市部の配電用変電所への供給や変電所間の連系（都市部連系系統）等、154 kV や 66 kV 系統となっている過負荷設備に 66 kV 大電流・低交流損失の超電導ケーブルを適用すると、課題なる過負荷が解決でき、新增設を行うことなく増容量化に対応できるうえに既設管路の活用が可能で、大幅なコストダウンとCO₂削減が可能となる。（図 1.2.1-2 参照）

(3) 経年化した 66 kV または 154 kV 系統設備への適用

経年化した既存の 66 kV または 154 kV の都市部連系系統（CV ケーブル、OF・POF ケーブル等）の代替としての 66 kV 超電導ケーブルを適用すると、既設管路へそのまま CV ケーブルにリプレースする場合の送電容量の制約が解消でき増容量対策が可能となるとともに、増容量対策による新たな設備の必要性がなくなりコスト削減が可能となる。

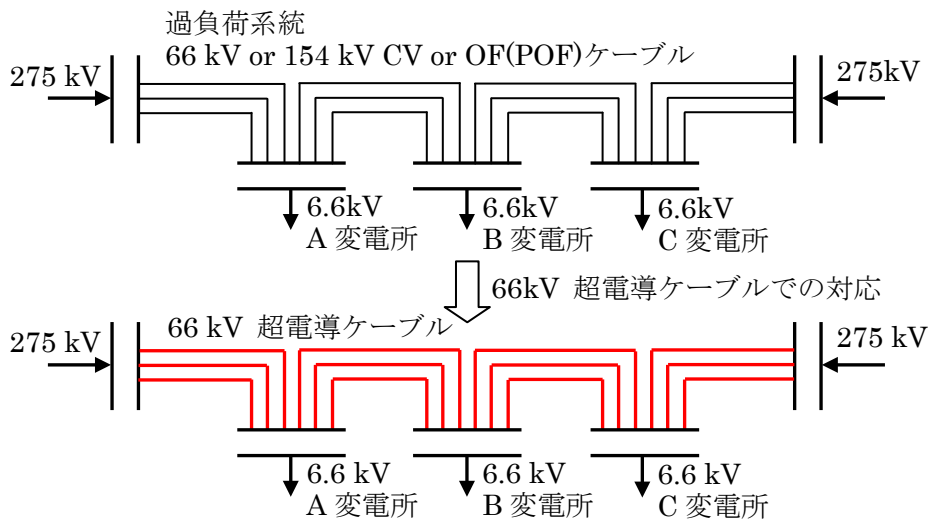


図 1.2.1-2 66 kV or 154 kV 過負荷系統への超電導ケーブルの適用例

1.2.1-3 275 kV 高電圧絶縁・低誘電損失ケーブルの適用

(1) 背景

電源から都市部へ電力を供給する流通設備（電力系統）は、架空送電線と地中送電ケーブルで構成され、特に都市部においては地中送電ケーブルが用いられている。このような設備構成の中、超電導ケーブルの最も有効な適用例は、275 kV の地中送電ケーブルで構成される基幹系の電力送電網への導入である。

電力需要の増加、高信頼度の系統構成に伴い、275 kV 系統の増強が不可欠となってくる中、これを既存の 275 kV 現用ケーブルで構築するとなると新たな布設管路（洞道、管路）の建設が必要となり莫大なコストがかかってしまう。特に都市部においては地下空間に公共インフラが集中しており、新たな収容設備を建設することが非常に困難になっている。（図 1.2.1-3 参照）

さらには電圧 275 kV 超電導ケーブルの適用から系統両端の既存設備、遮断機や断路器、変圧器等の主要機器の使用電圧が超電導ケーブルと同じ 275 kV なので大幅な機器の改修の必要性がなくなってくる。また、275 kV/3 kA の高電圧ケーブルは、送電容量が 1500 MVA と架空送電線並みで、従来の CV ケーブルの 3 倍の大容量送電が可能である。そのため、新規地中送電の建設にあたり、ケーブル本数を 1/3 にすることができ、さらに管路、洞道の地下設備のコンパクト化も可能となることから大幅なコストダウンが期待できる。

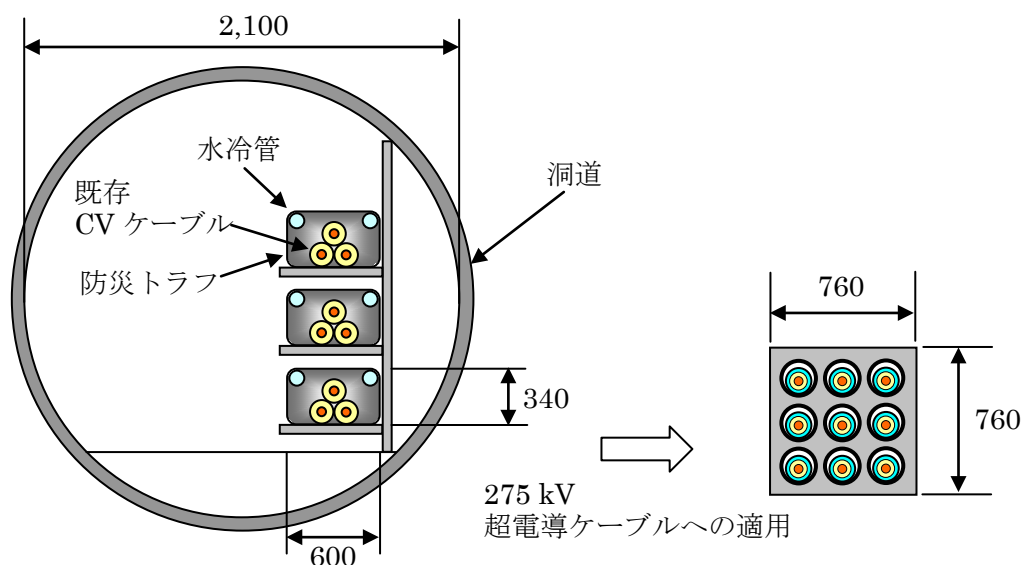


図 1.2.1-3 275 kV 現用ケーブルと超電導ケーブルの布設サイズ例の比較

(2) 都心導入系統への適用例

具体的な適用例としては、防災トラフ内間接水冷システムが導入されている設備で冷却システムの稼働率が高い系統での適用が挙げられる。特にその中でも、高効率な発電所から超高圧変電所間の都心導入系統で年間を通して平均して過負荷に近い大電流が流れ、かつ冷却システムの稼働率が高い系統への超電導ケーブルの適用が考えられる。(図 1.2.1-4 参照)

(3) 連系系統への適用例

都市部における 275 kV 超高圧変電所間の連系、特に防災トラフ内間接水冷システムが導入されている設備で冷却システムの稼働率が高い系統(冷却システムを稼働しないと要求される送電容量が確保出来ない系統)への適用が考えられる。また、275 kV 超高圧変電所間の連系用系統で超高圧線路が多回線布設され、他の系統からの熱の影響を直接受けるような線路で、他線路の影響が送電容量の制約となってしまう系統への適用も有効と考えられる。

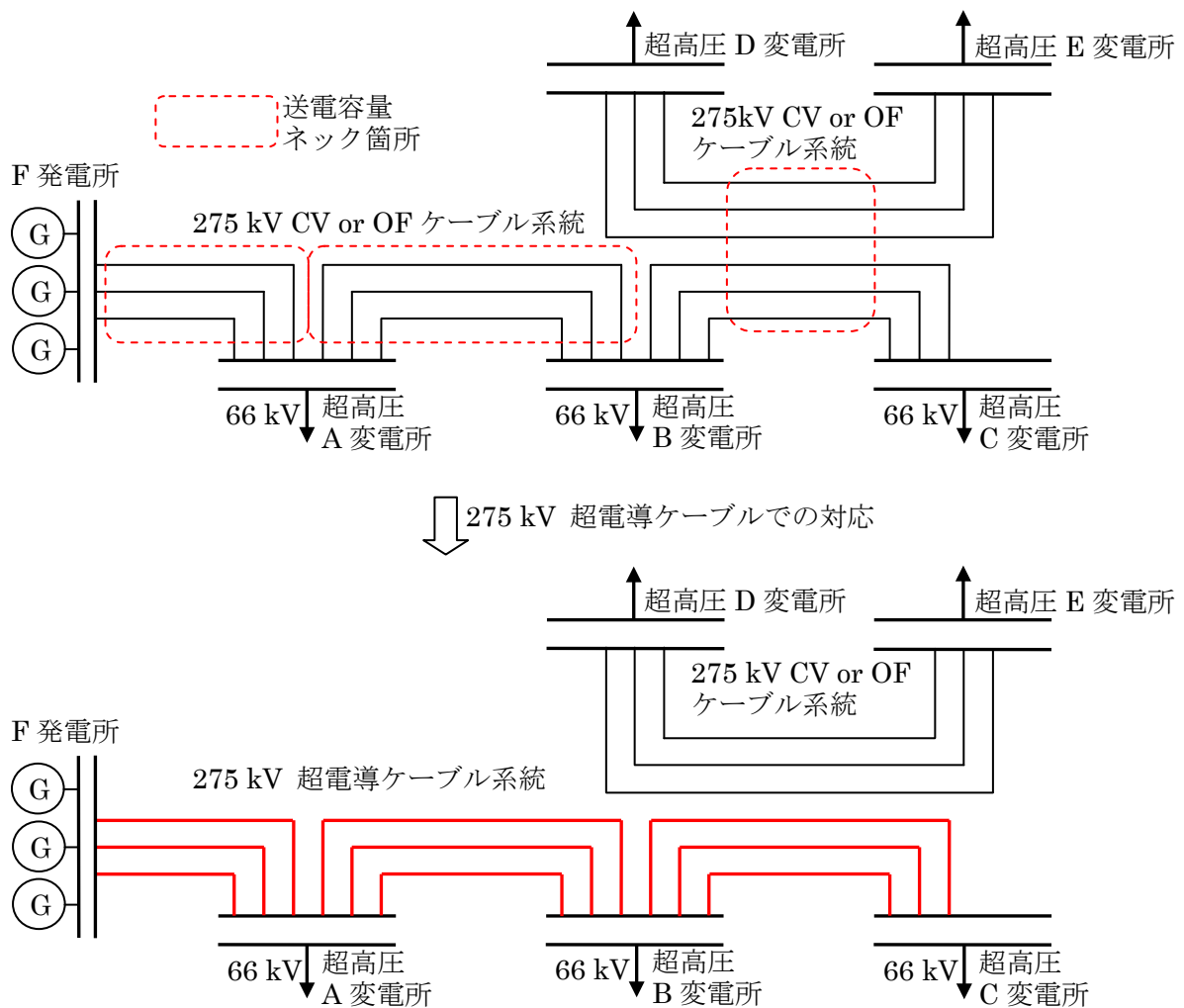


図 1.2.1-4 275 kV 系統(電源系統、都心導入系統)への超電導ケーブルの適用例

1.2.2 超電導電力ケーブルの適用効果

1.2.2-1 CO₂削減効果

超電導ケーブル導入による地球環境対策としてのCO₂量削減の効果が期待できる。超電導ケーブル導入量(国内)をベースにCO₂削減量を計算すると、表 1.2.2-1 &2 のように試算される。2030 年の省エネ効果は 279 GWh/年となり、CO₂削減効果は 95 千t-CO₂/年になると推計した。公開データによると 2009 年度の 1 世帯あたりの電力消費量は、年間で約 3,400 kWh(出典:「原子力・エネルギー」図面集 2012)であることから、省エネ効果は、およそ 8 万世帯が 1 年間に消費する電力量が期待できる。

なお、この推定は国内の 66 kV 以上のケーブルへの適用を考えた場合であり、全世界的で考えれば、数十倍～数百倍の効果が期待できる。

表 1.2.2-1 予想される超電導ケーブルの導入量

	超電導ケーブル線路 (累積) (km 回線)
2020 年	190
2025 年	400
2030 年	650

表 1.2.2-2 予想される省エネ量・CO₂削減量

年	A	B	C		
	超電導化による 損失低減量 kW/km(Lf=1.0)	累積 導入 量 km	損失 率(Lf)	1年間の低減電力量 $A \times B \times C(24 \times 365)$ GWh/年	1年間の CO ₂ 削減量 千 t-CO ₂ /年
2020 年	70	190	0.7	82	28
2025 年	70	400	0.7	172	58
2030 年	70	650	0.7	279	95

(注)常電導ケーブルの損失量は 100 kW/km、超電導ケーブルの損失量は 30 kW/km@2020 年以降と考え、その差が表中 A の損失低減量にあたる。2020 年以降の CO₂ 排出原単位は、電気事業連合会による目標 0.34 kg-CO₂/kWh を適用した。なお、超電導ケーブルの実用化に伴う省エネ量、CO₂ 削減量については「高温超電導電力応用機器の市場調査研究報告書 (平成 19 年 2 月 ISTEK)」の試算結果を参照している。

1.2.2-2 コストの削減効果 (非公開部)

(非公開)

(非公開)

1.2.3 実施者による実用化の見通し

1.2.3-1 大電流・低交流損失ケーブル化技術の開発（住友電工）

(1) 実用化の可能性と適用効果

2011年の東日本大震災以来、日本の電力をとりまく環境は大きく変わり、2013年2月時点で稼働している原子力発電所は大飯原発の3、4号機の2機だけであり、残りの原子力発電所の再稼働もすぐには行われぬ見込みである。一方、政府は太陽電池や風力発電等再生可能エネルギーの利用を促進していく方針であるが、電力需要に対する割合はまだ小さく、また発電所立上に立地選択や建設に時間がかかる水力発電所を増やすことは難しいと考えられ、当面は火力発電の増強により対応されていくものと予想される。

このような環境の中、都市部近郊に設けられた火力発電所からの送電網を増強することは今後必要になると予想される。都市内に大電力を導入する際には、現状技術では275 kV系の都内導入系統を拡充する事になるが、新たな洞道（最低でも内径2.1 m）の建設が必要となる。しかしながら、特に大都市部においては地下空間に他の公共インフラ等が集中しており、新たな洞道を建設することが非常に困難になっている。これに対して超電導ケーブル技術を適用すると、150 mmの既設管路に収容可能な66 kV超電導ケーブルで構築可能となり、建設コストの大幅な低減、工事期間の短縮が期待できる。

一方、既設の電力ケーブルのうちOFケーブルやPOFケーブルは布設後40年

を経過しているものも多く、漏油問題等が生じている。アルミ被 OF ケーブルの寿命は 50 年程度と見積もられており、経年ケーブルから順次取替が必要となっている。特に大容量の POF ケーブルについては、2016 年頃から取替が本格化すると想定されている。

この経年化した 154 kV 及び 275 kV の POF ケーブルの取替策として、CV ケーブルでの代替が検討されているが、CV ケーブルは POF ケーブルに比べて容量が小さいため、CV ケーブルを用いる場合には回線数を増加させる必要がある。この場合、既存洞道が回線増に対応可能かどうか等様々な課題をクリアする必要がある。大容量送電が可能な超電導ケーブルを活用すれば、既設 POF ケーブルと同容量の電力を、回線数を増やすことなく送電できる可能性がある。

上記の他、発電所の発電端等の大電流が流れる部分には、内部水冷ケーブルや IPB（相分離母線）等が用いられている。これらは大容量であるために既存 CV ケーブルでの置き換えが困難で、コンパクトで大容量送電が可能な超電導ケーブルを適用すれば、レイアウトの縮小による建設費の低減、送電損失の低減が期待できる。

(2) 実用化の課題

本プロジェクトにおける技術開発により、大電流・低損失型高温超電導ケーブルの特性評価を行いケーブルとして、電氣的、機械的、熱的に安定に課通電できることを実証した。

並行して実施されている Bi 系超電導線材を用いた「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」では、実システムでの運転性能や信頼性の実証、運転技術や保守・メンテナンスといった、電力機器に求められる運用技術の確立をめざして、実システムでの運転が実施されている。

本研究を通じて、Y 系超電導線材を用いた超電導ケーブルの大電流・低損失化への Bi 系超電導ケーブルに対する優位性を証明したが、実用化するためには、今後、Bi 系超電導ケーブルと同様に実システムでの長期信頼性・安定性を実証していく必要があると考える。

また、並行して超電導線材の高性能化・低価格化による超電導ケーブルコストの削減とともに、冷却システム系の高効率化・低コスト化の開発が不可欠である。超電導ケーブルシステムの将来コスト試算では、超電導ケーブルコストの低減に加え、外部侵入熱の低減や冷却システムの高効率化による COP(Coefficient of performance)の向上と冷凍機単機容量の大型化も含めたトータルとしての冷却システムのコストダウンが進展することを前提としている。超電導ケーブル実用化時のコストダウン効果を実現させるためにも、冷却システムの高効率化・低コスト化の研究開発が必要である。

さらに、実適用を考えた場合、超電導ケーブルの付属品（ジョイント、端末）や冷却システムは、実際の適用場所に合わせた機器のサイズや、組立工法を開発していく必要がある。

(3) 実用化までのシナリオ

高温超電導ケーブルシステムの実用化に向けては、以下のような展開が考えられる。

上記の技術課題の開発や、高効率化・低コスト化が実現した後、超電導ケーブルシステムの実システム導入が開始されることになると考えられるが、電力システムの信頼性維持の観点からも、導入初期は比較的短距離（100 m 程度）で、運転実績確認を取りやすい。例えば水力発電所の引き出し線等から試験的に導入が進むものとする。

その結果、実システムでの導入・運用実績を積むことができ、超電導ケーブルにより最も大きな効果が得られる基幹系ケーブルシステムへの導入が開始されるものと考えられる。

(4) 今後の展開

1.2.3-1(3)の実用化のシナリオを勘案し、発電機引き出し線への適用に向けた技術課題の開発に注力する。発電所用超電導ケーブルでは、これまでの数倍の電流容量が必要になり、実規模レベルでの実証を行っていく必要がある。発電機引き出し線の開発に引き続き、基幹システムへの適用に向けた開発に取り組んでいく。

これらの開発は、最初は実証プロジェクトで実システムでの実績のある Bi 系超電導線材を用いて行うことになると考えられるが、並行して開発が行われた Y 系超電導線材の性能向上、低コスト化の進行度合いを考慮して、Y 系超電導線材への適用もできるように、ケーブルや機器の構成や設計を考慮していく。また、これらの開発を進める中で、Y 系超電導ケーブルの実システムでの信頼性・安定性を検証する必要があると考えられ、今後も電力会社と協調して進めていきたい。

なお、超電導ケーブルに必要な大容量、高効率の冷凍機が必要であるが、現在、実証プロジェクト等で行われている大容量冷凍機の開発も引き続き行われていくことを望むもので、冷凍機メーカーと協業して開発を進めていきたい。

このように、実用化のための開発を進めていくが、メーカーだけでは負担が大きく、今後も政府に開発の補助をお願いしたいと考える。

(5) 事業化規模

経済産業省及び NEDO が作成したロードマップによると、2015 年頃からその実用化が始まると期待されており、それ以降の高温超電導ケーブルの市場規模は表 1.2.3-1 のように試算されている（「高温超電導電力応用機器の市場調査研究報告書」ISTEC、H19 年より）。この試算は 1989 年～2005 年までの「66kV 以上の地中電力ケーブルの回線延長」から推定した今後のケーブル導入量の約 10 %が超電導ケーブルに置き換わったと仮定した場合の予測である。2020 年以降は、40～50 km/年の超電導ケーブルが導入されると仮定しており、約 100 億円/年の市場規模

と考えられる。

また、海外でもその市場は見込まれるが、単純に発電容量の日本との比で考えると、海外での市場は日本の約 20 倍と考えられる。

表 1.2.3-1 予想される超電導ケーブルの市場規模

	超電導ケーブル線路 (累積) (km・回線)	金額 (億円)
2015 年	30	60
2020 年	190	380
2025 年	400	800
2030 年	650	1300

超電導ケーブルのコストは 200 千円/m と仮定

(6) 波及効果

1.2.3-1 (5)で説明したように、諸外国においても超電導ケーブルの市場が考えられる。米国においては老朽化した送電ネットワークの近代化をめざしたスマートグリッド構想が進行中で、超電導ケーブル技術もこの対策の一環として取り上げられている。また欧州では、環境問題から架空送電線の代替、再生エネルギー増加により各国間の連系線、揚水発電所での引き出し線等、超電導ケーブルの適用の可能性が考えられる。また、中国でも電力需要の増大に伴う送電線増強に対する超電導ケーブルの適用の可能性が検討されている。このように、海外での超電導ケーブル適用に関して展開し、その波及効果が期待できる。

また、再生可能エネルギーである太陽光発電や風力発電等は、その導入量が増加しており、メガソーラ、ウィンドファームから最寄りの送電線までを接続する連系線に、コンパクトで低損失な超電導ケーブルの適用が考えられる。

産業応用としては、鉄道用の電線等は、低電圧で大電流の直流にて送電されており、超電導ケーブルの適用にて、再生エネルギーの利用高効の向上、低損失化の可能性があると検討されている。また、大容量データセンター内での直流配電システムに、超電導ケーブルの適用について検討された例がある。このように、産業応用での直流送電に対しても、波及効果があるものと考えられる。

1.2.3-2 大電流・低交流損失ケーブル化技術の開発（フジクラ）

(1) 実用化の可能性と適用効果

大電流・低交流損失ケーブル化技術を開発するに当たっての最大のキーテクノロジーは導体化技術である。本プロジェクトでは、高 $I_c = 500 \text{ A/cm-w} (@77\text{K, s.f.})$ 級線材（IBAD-PLD線材）を用いた 66 kV / 三心一括 / 5 kA_{rms}、10 m級ケーブル 1 相分を作製し、終端接続部・冷却システムを有する試験設備を製作し、高 I_c 線材による交流通電特性を検証した。成果として、液体窒素温度が実用的な 77Kにおいて目標の大電流、低損失を実現できる見通しが得られた。これは、実線路での冷却システムの温度条件を現実的なものとした。

超電導ケーブルと既に開発実績のある極低温ケーブルとの相違は、導体・シールド層が常電導より線から超電導線材に置き換わったことにあり、電氣的絶縁構造は基本的に同じである。したがって、終端接続部と中間接続部を含めたシステムの設計、製作及び課電試験はクリアできると考えている。

この大電流・低交流損失ケーブルの想定される最初の適用先として、交流ケーブルとしては、まず、発電所の引き出し線（発電機～変圧器間：～100 m）で内部水冷ケーブルやGILの大電流（～12 kA_{rms}）ケーブルの代替や経年化した既設大容量ケーブル（OF、POF）の代替があげられる。前者では、超電導ケーブルを適用することで、布設ルートの制約がなくなり発電所設計の自由度が増すとともに、コンパクト化による建設コストの削減、低損失化による常時発熱量の低減効果が見込めるとされている。後者ではCVケーブルでの代替に比べ既設洞道の活用により建設コストを大幅に削減可能となる。

一方、直流ケーブルとしては、大電流用として鉄道き電補助線（例：DC1500 V、12 kA 用）への適用があげられる。適用効果としては、電圧降下の低減による変電所数の削減、き電区間延長による回生効率の向上、変電所間の負荷平準化等が期待されている。

(2) 実用化の課題

これらの実用化に向けた超電導ケーブルシステムの課題としては、まず、今回は通電実証（非課電）であったので、今後、課電に関する試験、評価を行う。この際、より施工性の優れた端末構造の開発と大電流化に対応した小型超電導ケーブル端末の開発も行い、長期信頼性の評価を行うことになる。合わせて、線路システムへの侵入熱の低減として端末とケーブル断熱管の性能向上が必要となる。これらの課題に先立って、ケーブルシステムとしての熱機械特性を把握する。その一部は 2013 年度の継続研究でフジクラ佐倉事業所内で実施する。

次に冷却システムの課題としては、高効率化、低コスト化及びメンテナンスフリー化の開発が要望される。さらに、超電導電力機器の普及には法規制緩和も必要となると考えられる。工場試験、系統実証及び実用化適用のどの段階でも電気事業用の場合を除き、高圧ガス保安法による規制を受け、実用化に向けての大きな制約の

一つになっている。現在の高圧ガス保安法に基づく保安責任者の常駐規制の緩和も是非必要である。

(3) 実用化までのシナリオ

Y系超電導ケーブルの本格導入までには次のようなステップが考えられる。

- ① Bi系超電導ケーブルでこれまで実施されてきた実証プロジェクトに準じた実システムでの運転特性評価を行い、設計・布設・運用・保守・監視等のケーブルシステム全体としての長期安全性・信頼性の検証を行う。
- ② 本プロジェクトでは高 $I_c=500$ A/cm-w級線材を供試し、その機能が十分に発揮されたと考えられるが、さらにY系超電導線材の優位性を高めた線材の高性能化、低価格化を図るとともに、冷却システムの大規模化、高効率化を含めたトータルシステムとしてのコストダウンを図る。
- ③ 中間接続部と終端接続部の付属品は現用 CV ケーブル線路に比べかなり大がかりなものとなっており、実用化にあたっては、コンパクト化と施工性の簡易化を図ることが必要である。
- ④ 超電導ケーブルの本格導入前には、まず交流用ケーブルとしては短距離・大容量の発電所引き出し線への導入、また、直流用ケーブルとしては鉄道用き電補助線として一部区間に導入することにより実績を積み設計へのフィードバック等を図る。
- ⑤ 次に、既設 OF、POF ケーブル線路代替として導入を図り、実績を積んだ後基幹システムへの適用と進む。

(4) 今後の展開

まず、終端接続部を含めたケーブルシステムとしての熱機械特性の把握が基本となる。液体窒素温度～常温間の熱サイクルによる超電導ケーブルへの影響調査を一部 2013 年度継続研究で実施する計画である（実施場所：フジクラ佐倉事業所内）。並行して、上記課題のよりコンパクトな終端接続部と中間接続部の開発、課電も含めた長期信頼性の評価も進める必要がある。

また、1.2.3-2 (1)項の適用先の発電所の引き出し線では、現状技術レベル（5 kA_{rms}）よりもさらに大電流（10 kA_{rms}～15 kA_{rms}）化したケーブルが必要となる。現状技術をそのまま適用すれば線材の必要本数（層数）は 2~3 倍となり多層構造となるため、電氣的、機械的問題がないかの検証が必要であり、本プロジェクトで採用した高 $I_c=500$ A/cm-w級を超える線材の開発とこれを用いた新規な導体・ケーブル構造の開発も必要となろう。

(5) 事業化規模

NEDO 平成 24 年度成果報告書「高温超電導電力機器の適用拡大と標準化に資するケーススタディ」の 3.3 項「高温超電導ケーブル適用ケースの市場規模推計」か

ら引用して述べる。今回開発した大電流・低交流損失ケーブルの想定される適用先として上記(1)項で述べた発電所引き出し線の代替と経年化した既設大容量ケーブル (OF、POF) の代替のケースについて、その市場への導入量規模を表 1.2.3-2、表 1.2.3-3 に示す。

① 発電所引き出し線の導入量規模

国内市場の導入量規模推計を下式により行っている。

$$\text{市場規模 (国内)} = \text{発電所数 (196+1454)} \times \text{耐用年数換算 (1/30)} \times \text{代替率 (2.5 \%)} \\ \times \text{1 箇所あたり適用長 (100 m)}$$

注) 耐用年数：30 年と想定。

代替率：2.5 %と想定。

1 箇所あたり適用長：コスト分析前提数値 (100 m)。

火力・水力発電所数(データ出所：電気事業便覧(電気事業用))：

平成 21 年度 火力発電所 196 箇所、水力発電所 1454 箇所

2020、2030 年の将来市場規模は、UN, National Accounts Main Aggregates Database より、日本の実質成長率 (91-10 年度平均 0.79 %) で外挿して算出した。

また、海外市場の導入量規模推計を下式により行っている。

$$\text{市場規模 (世界)} = \text{日本の発電所数 (196+1454)} \times \text{耐用年数換算 (1/30)} \times \\ \text{代替率 (2.5 \%)} \times \text{1 箇所あたり適用長 (100m)} \times \\ \text{(世界の発電量 / 日本の発電量(18.8))}$$

海外は IEA の Key World Statistics によると、世界の総発電量は 20181 TWh (2008 年データ、揚水及び中国を除く)、日本は 1075 TWh (2008 年データ) であり、日本の 18.8 倍とした。2020、2030 年の将来市場規模は、UN, National Accounts Main Aggregates Database より、世界の实質成長率 (91-10 年度平均 2.6 %) で外挿して算出した。表 1.2.3-2 に示されるようにこの導入量規模は小さいが、大電流・大容量のため CV ケーブルでの代替は困難であるので、超電導ケーブルの最大の特長であるコンパクトで大電流・低交流損失を生かせる線路として早期実現が期待されている。

表 1.2.3-2 発電所引き出し線 (発電機一昇圧変圧器) の導入量規模

	2020 年	2030 年
国内 (km/年)	0.1	0.1
海外 (km/年)	2.6	3.3

② 都市内送電（ケーブル代替）の導入量規模

国内市場の導入量規模推計を下式により行っている。

市場規模（国内）＝地中電線路こう長（14000 km）×耐用年数換算（1/30）×代替率（2.5 %）

注）比耐用年数：30年と想定。

代替率：2015年時2.5 %。

地中電線路こう長：14000 km（データ出所：電気事業便覧(平成21年度の一般電気事業者分)）

※同評価書では、2020、2030年の代替率は段階的に増加。

2030年の将来市場規模は、UN, National Accounts Main Aggregates Databaseより、日本の実質成長率（91-10年度平均0.79 %）で外挿して算出した。

また、海外市場の導入量規模推計を下式により行っている。

市場規模（世界）＝地中電線路こう長（14000 km）×（世界の発電量／日本の発電量(18.8)）×耐用年数換算（1/30）×（都市人口／人口(10%））×代替率（2.5 %）

ここで、都市地区の人口割合は、UN, Demographic Yearbook system, Demographic Yearbook 2009-2010より10 %としている。2030年の将来市場規模は、UN, National Accounts Main Aggregates Databaseより、世界の实質成長率（91-10年度平均2.6 %）で外挿して算出した。

表 1.2.3-3 都市内送電（ケーブル代替）の導入量規模

	2020年	2030年
国内 (km/年)	11.7	12.6
海外 (km/年)	21.9	28.4

(6)波及効果

本プロジェクトで開発したY系導体技術の波及効果として、鉄道用き電補助線への導入が検討されている。鉄道用き電補助線を超電導ケーブルに代替することにより利用可能な電流値を増やし、過密エリアでの輸送能力の向上が図れる。また、電圧降下の低減による変電所数の削減、き電区間延長による回生効率の向上及び変電所間の負荷平準化が可能となる。

また、Y系超電導線材は、Bi系線材と比較して磁場中高臨界電流特性・高機械強度・低交流損失の優位性を生かして、電力以外の産業応用分野への適用可能領域も拡大して行き波及効果が大きいものと考えている。

1.2.3-3 高電圧絶縁・低誘電損失ケーブル化技術の開発(古河電工)

(1) 実用化の可能性と適用効果

本プロジェクトにおいて、1.5 GW の送電容量に相当する 275 kV・3 kA の高電圧超電導ケーブルの開発を実施した。この開発において、275 kV・3 kA の電圧、電流を達成したばかりか、電力ケーブルとして要求される開発試験、形式試験、出荷試験、竣工試験を意識した試験を実施して、電力ケーブルとしての実用化への製品開発だけでなく、品質面についての課題抽出と課題解決への取り組みができています。さらに、このプロジェクトの中では、超電導ケーブルだけでなく、電力ケーブルシステムを構成する中間接続部と気中終端接続部の開発を行い、上記送電容量及び試験電流・電圧で大容量・低損失の送電と健全な電気絶縁性能を確認することができました。特に中間接続部の完成は、300 m から 500 m クラスのケーブルをつないで、km 級の長さのケーブル亘長とすることができることから、実際の市場からの必要性に応えることができる。

本プロジェクトにおける長期試験のケーブル長は 30 m と実用ケーブルに比べて極めて短いものであったが、このケーブル自身、数百 m を製造する製造ラインで作ったものであり、数百 m を作る工場の工程管理、品質管理での製作である。それゆえに、当社においては、実用化時期の数百 m 級のケーブル製造については、大きな課題がないことを検証している。さらに、「交流超電導電力機器基盤技術研究開発」プロジェクトの中で、今回の開発と同じ単心超電導ケーブルで 500 m 長のケーブルの冷却・課通電試験を実施しており、長さに関する問題は少ないものと考えている。

本プロジェクトで開発した高電圧超電導ケーブルは、老朽化した大容量 POF ケーブルや管路気中ケーブル (GIL) の代替ケーブルとして適用することができる。さらに、最近、都市部等、景観上他の理由から架空送電線の建設の困難な地域について、ケーブルの地中化を考えた場合、管路布設が可能でケーブルコストを低減できる高電圧超電導ケーブルの適用の可能性がある。

(2) 実用化の課題

超電導ケーブルの実用化においては、超電導ケーブル及び冷却システムの長期信頼性が重要になる。さらに、普及のためにはコスト低減が重要である。特に、超電導ケーブルは、銅を導体とした常電導ケーブルとの比較となり、超電導線、ケーブル製作費、冷却システム等のコスト低減が必須である。

(3) 実用化までのシナリオ

本プロジェクトで開発した高電圧超電導ケーブルについては技術的な課題をクリアできているが、事業化には、超えなければならないステップがある。このケーブルが適用される電力系統は、基幹系統であり、基幹系統での事故はその事故波及

範囲が 66kV 級のケーブルに比べて、広範囲であり、また社会的な影響も大きい。それゆえに、次のステップとしては、実運用における長期の信頼性の検証と、信頼度の向上が開発テーマになると考える。具体的には、1～2 km 級の試験線路を構築して、実際に 275 kV の電圧で送電を 1～2 年程度送ることが必要と考える。また、ケーブルの保守も実用化には重要であり、これらも次の信頼性試験の中で、検証することが必要である。

(4) 今後の展開

本プロジェクトの 275 kV 超電導ケーブルの試験は、中国瀋陽市にて実施した。これにより、ケーブル試験結果及び効果等を海外に向けて広く発信できており、事業化シナリオとして、海外ユーザを取り込んだ海外実証の可能性があると考えられる。瀋陽での試験は継続し、ヒートサイクルによる超電導、絶縁性能の長期性能を評価する予定であり、海外に向けての技術発信も継続していく。

(5) 事業化規模

275 kV 超電導ケーブルの導入見込みについては、超電導ケーブルの導入が 2020 年から始まると考えると次の導入形態が想定される。

- ①初期段階：超高压 OF ケーブル、POF ケーブル、GIL ケーブルの寿命引換えでその一部が置換わる。(2020 年～)
- ②充実段階：寿命のきた OF ケーブル、POF ケーブル、GIL ケーブル、CV ケーブルの一部が、超電導ケーブルに置換わる。(2025 年～)
- ③ 拡大段階：超高压架空線の一部が置換わる。(2030 年～)

電気事業連合会が調査した「電力統計情報 施設の送電設備」をもとに、超電導ケーブルが代替可能な対象ケーブルは、次の仮定をすると表 1.2.3-4 のようになる。
 ・ケーブルの引き換え需要は、40 年で全てのケーブルが新規に置き換わるとして、年間導入量＝総設備量÷40 年とした。

(文献：「2030 年までの経済・エネルギー展望—財政再建時代の成長シナリオ—」
 電力中央研究所報告：Y04015 (2005 年 4 月))

- ・設備増量のうち超電導化率を 10 % と超電導ケーブルの導入量を仮定する。10 % は、導入の候補となる都市部の人口数が全国土の人口の 10 % にあたることから使用した。

表 1.2.3-4 275 kV 超電導ケーブルの導入量検討

		地中送電線		架空送電線	
送電階級	kV	187～275	500 以上	187～275	500 以上
ケーブル設備延長	km	1,492	177	25,015	13,715
引換期間	年	40		40	40
年度引換量 (トータル)	km	41.7		625.4	342.9

275 kV 超電導電力ケーブルの導入は、地中送電線に対しては、2020 年を初年度として 4 km/年 (41.7 km の 10%) の導入で、2030 年には累積伸延長で約 44 km となる。架空送電線に対しては 2025 年度から導入が始まり、初年度 97 km/年 (635.4 km と 342.9 km の 10%) で、2030 年には約 485 km と推計した。なお、この数値は国内での需要予測であり、海外においてはこの十倍近い量があると予想している。これは、世界の発電電力量データは、IEA の Key World Energy Statistics によると、20,181 TWh (2008 年データ、揚水及び中国を除く) であり、日本の 1,075 TWh (2008 年データ) に比べて 18.8 倍である。

(6) 波及効果

超電導ケーブルの実用化に伴い、コストターゲットの明確な超電導電力機器向け超電導線等のコスト低減と性能の安定化が進むと思われる。特に Y 系超電導線材は強磁場でも超電導性能を維持することができるので、将来の超電導電力システム実現にとどまらず、医療分野、産業分野への機器への適用も拡大して、波及効果が大きいと考える。

1.2.3-4 スラッシュ窒素の研究 (前川製作所)

(1) スラッシュ窒素冷却技術の実用化の可能性と適用効果

スラッシュ窒素冷却はサブクール液体窒素冷却に比べ機器の温度をさらに下げることが可能であることから、臨界電流値の増大等、超電導体の性能を冷却の観点から向上させることが可能である。そのため少なくとも以下のような特定された分野では実用化の可能性のあるものと考えられる。

1) 超電導ケーブル端末部

端末部は最も熱負荷の大きい場所の一つであり、スラッシュ窒素冷却を行えば冷却媒体単位体積当たりの寒冷量を増加させることが可能であり端末部の小型化が期待できる。

2) 発電機-昇圧トランス間超電導ケーブル

距離が短くても大電流を流すことが求められる発電機端から昇圧用トランスまでの短区間での超電導ケーブル冷却への適用が考えられる。定常時のケーブル発熱量を超える潜熱量をシステムに供給し、ケーブル全長にスラッシュ窒素が存在する条件で運用すれば、本プロジェクトで確認された (図 2.2.6-17) ように、ケーブル温度は窒素融解温度である 63 K 付近で一定を保つことが可能となる。その結果、ケーブルの臨界電流値増大と熱的安定性向上が期待できる¹⁾。スラッシュ窒素搬送時の課題である搬送動力も、短距離であればサブクール窒素搬送時と大きな差が無くなる。

他に、スラッシュ窒素は電気絶縁性能が液体窒素と同等²⁾であることから、超電導変圧器等の静止機器への応用を考えることも可能である。

(2) 実用化の課題

本プロジェクトにおいて基礎的なスラッシュ窒素の生成方法、搬送特性、冷却特性を確認した。

今後の実用化に際しての課題は以下の3点である。

・固体窒素生成装置の最適化

スラッシュ窒素生成装置の効率の向上、及び、大型化した際の冷却部の最適形状や大きさの検討が必要である。本プロジェクトでのスラッシュ窒素生成試験では2.2.6-1(3)に示すように掻取動力を除いても冷却熱量の3/4程度の固体窒素しか生成されていない。このため継続研究を含め更なる効率の向上を行う必要がある。また、実用化に際しては本プロジェクトで製作した規模の10倍以上となる1kW級の生成装置が必要であることから、冷却部の形状や大きさに関しても更なる検討が必要である。

・長期運転時の信頼性

生成装置の掻取羽根、シャフト軸受け、熱交換器等は磨耗や繰り返し応力をうける。そのため、スラッシュ窒素生成装置の長期運転を行い、機械的信頼性の確認を行う。

・ケーブルの冷却特性の把握

超電導ケーブルのようなコルゲート構造で屈曲や立下がり上がりが多い配管中での冷却特性を把握する。

最初の2点は冷却単独での課題であるが、最後の1点は冷却対象となる超電導ケーブルでの冷却試験による確認が不可欠である。

(3) 実用化までのシナリオ

スラッシュ窒素冷却技術の実用化に向けて、以下を想定している。

- ① 上記の通り、本技術開発により、基礎的なスラッシュ窒素の生成方法、搬送特性、冷却特性を確認した。一方、課題として固体窒素生成装置の最適化、信頼性、ケーブルの冷却特性の把握が残されている。
- ② 固体窒素生成装置を最適化を行う。スラッシュ生成装置の効率の向上、及び大型化した際の冷却部の最適形状や大きさの検討を行う。
- ③ 2)を踏まえ、生成装置を長期運転した際の信頼性を検証する。求められる寿命にあわせ、生成機構、材料等を吟味して製作した生成装置の長期運転を実施し、運転による磨耗や寿命を検証及び評価する。
- ④ 上記2)と3)を達成することで、超電導ケーブル端末部、超電導変圧器等の静止機器等搬送を必要としない部位、機器へのスラッシュ窒素冷却システムの提供

が可能となる。

- ⑤ 短距離大電流用のケーブル冷却特性の把握及びシステム検証を行う。実システムに用いるケーブルと同等のコルゲート管において、水平部だけでなく屈曲や立下がり上がりが多い配管中の冷却、搬送特性を把握する。得られた結果を基に、短距離でも大電流を流す必要がある発電機－昇圧トランス間超電導ケーブルに提供する。

(4) 今後の展開

継続研究により生成装置の最適化の研究を行うとともに適用先についての情報の取得に努めていく。

(5) 事業化規模

基礎研究の段階であるため事業化規模を予測することは困難であるが、わが国独自の冷却技術として海外への事業化も検討していく。

(6)波及効果

海外から輸送される液体水素燃料の積み込み時の減容化が期待できる。水素の物性値は、大気圧の場合、液体水素の密度 (70.9^3 kg/m^3) が飽和温度から凝固点 (77.0^3 kg/m^3) に至ると約 9%の減容化ができ、これを固体 (87^3 kg/m^3) にすることで全体で 20 %程度の減容化が可能となる。固体の質量濃度 (固相率) が 20 %と仮定するとスラッシュ水素の容積は飽和温度の液体水素に比べて 10 %以上の減容化が可能となるため、プラントからタンカー積み込み時の搬送動力の削減が期待できる。またタンカー内でのフラッシュロスについても固体の融解潜熱 (58.04^4 kJ/kg) で吸収することも可能である。

引用論文リスト

- 1) 百足他、“スラッシュ窒素冷却下における高温超電導線材の過電流通電特性”、2009 年度春季低温工学・超電導学会、p.179 (2009)
- 2) 淵野他、“スラッシュ窒素の電気絶縁特性”、平成 21 年度電気学会全国大会講演論文集、5-133 (2009)
- 3) refprop ver.9.0
- 4) 低温工学協会 関西支部、海外低温工学研究会 訳、低温工学ハンドブック、p.542 (1982)

1.3 超電導変圧器の実用化の見通し

1.3.1 実用化の見通し

(1) 変圧器の市場規模

配電用変圧器の市場規模については、東日本大震災の発生により本プロジェクト開始時点に比べ国内市場に関する見通しが変わった。このため、震災以降の節電等による需要の落ち込みを踏まえ、新設需要は考慮せず更新需要のみとした。

「電力統計情報」から 66 kV または 77 kV の変電所出力(1989 年以前は最大電力)と変圧器出力 20 MVA から変圧器台数を算定すると設置台数は約 10,600 台となり、更新周期を平均 50 年と仮定すると更新台数は年平均約 210 台となる(図 1.3.1-1)。

しかしながら、震災以降の電力会社の経営状況を踏まえると、計画的更新からオーバーホールによる取替え時期の延伸やガス分析結果による不良変圧器のみの取替え等部分更新・修繕へ移行してしまう可能性もあり、電力用変圧器の将来市場は不透明な状況である。

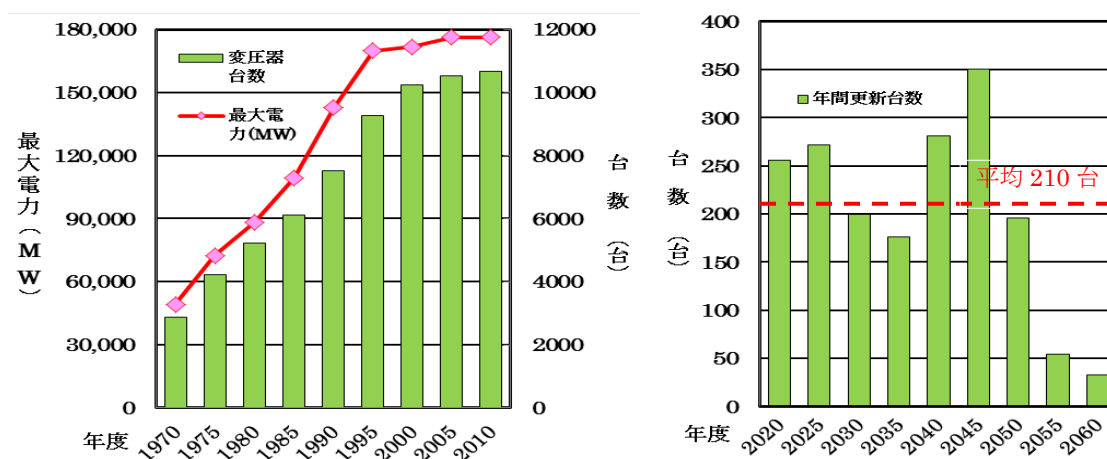


図 1.3.1-1 配電用変圧器の市場規模の想定

一方、電力用に産業用を加えた変圧器全体の市場規模は、経済産業省生産動態統計の静止電気機械器具・変圧器・非標準変圧器・油入変圧器(表 1.3.1-1)の H21～H23 実績をもとに想定すると、将来的に超電導変圧器が適用可能と考えられる 2.001 MVA 以上の油入変圧器は、年間 1,600 台以上、700 億円以上の生産実績がある。このうち、10 MVA 以上 100 MVA 未満の変圧器平均容量は、本プロジェクトの開発対象である 20 MVA 級と同等の 23 MVA で、年間約 500 台、300 億円程度の生産実績があり、油入変圧器から超電導変圧器へと移行すれば相当の市場規模が見込める。

表 1.3.1-1 油入変圧器の市場規模の想定

	数量(台)			容量(MVA)			平均容量(MVA/台)	金額(百万円)		
	H21	H22	H23	H21	H22	H23		H21	H22	H23
2,001MVA以上 10MVA未満	1,050	973	1,087	4,551	4,278	4,940	4	13,163	11,932	13,836
10MVA以上 100MVA未満	656	562	480	15,374	12,488	11,617	23	34,402	30,738	29,268
100MVA以上	155	104	73	52,968	38,755	23,065	346	51,220	38,148	27,042
計	1,861	1,639	1,640	72,893	55,521	39,622	—	98,785	80,818	70,146

(2) 変圧器の適用先と技術動向

変圧器の技術の動向として、電気学会技術報告（第 1023 号、2005 年）の「社会動向やニーズから見た配電用変圧器対応技術及び製品動向」を図 1.3.1-2 に示す。配電用変圧器は、社会的な要求を反映しつつ 100 年を経て発達してきており、低損失化、小型・軽量化、省スペース化が主流である。また、防災の観点から不燃・難燃化技術や高機能・複合一体化といった技術開発も活発であり、主に小容量ではモールド変圧器、大容量ではガス絶縁変圧器、不燃・難燃化技術では植物油、シリコン油変圧器等でニーズ対応しており、超電導変圧器の技術動向とも整合している。

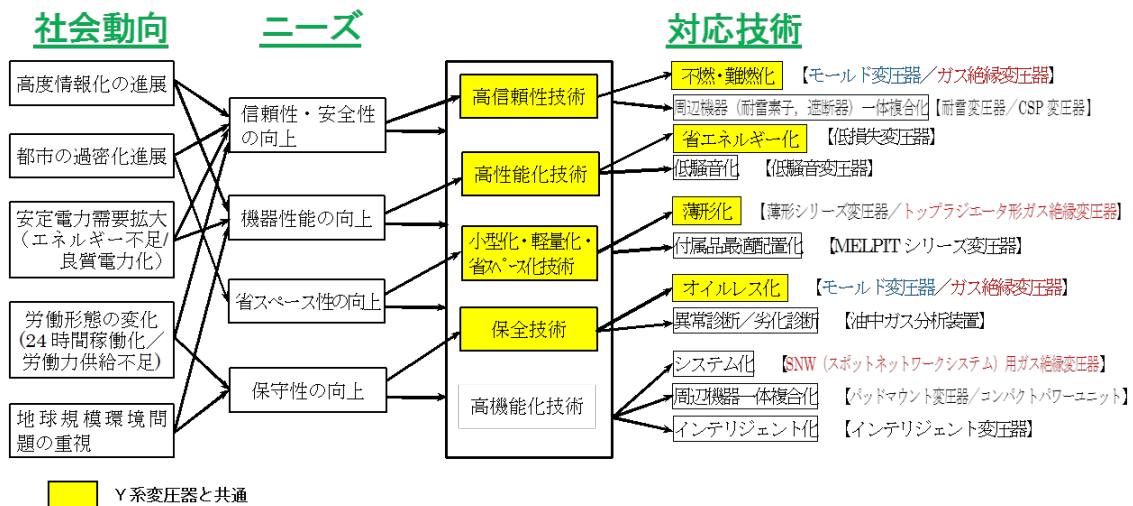


図 1.3.1-2 社会動向から見た配電用変圧器対応技術及び製品動向
(出典：電気学会技術報告第 1023 号 2005 年 6 月)

Y系超電導線材を変圧器に適用すると、その高電流密度や低損失特性から、巻線や鉄心の断面積を小さくでき、大幅な小型・軽量化が図れるとともに、冷媒は液体窒素であるため不燃となる（図 1.3.1-3）。それらの特長から、超電導変圧器は、電力需要増に伴う変圧器増の対応、変電所の新設対応に有利であり、超電導ケーブルとの共存（変電所容量増、限流機能）等の用途が考えられ、都心部を主とした変電所やビル等での早期実用化が期待されている（図 1.3.1-4）。

特に、超電導変圧器の特長である小型・高効率化（冷却装置の削減）から、地下式や屋内式変電所の容量増対応や保守面で有利となる。また、小型化しても容量増となることから、変電所（送電線含む）の新設回避や繰り延べに有利となる（図 1.3.1-5）。限流機能付加変圧器では、電力システムのループ運用や再生可能エネルギー等の分散電源の大量導入に伴う限流器運用に加え、超電導ケーブル適用時の送電容量と短絡容量対策に貢献でき高効率な電力供給システムとなる（図 1.3.1-6）。

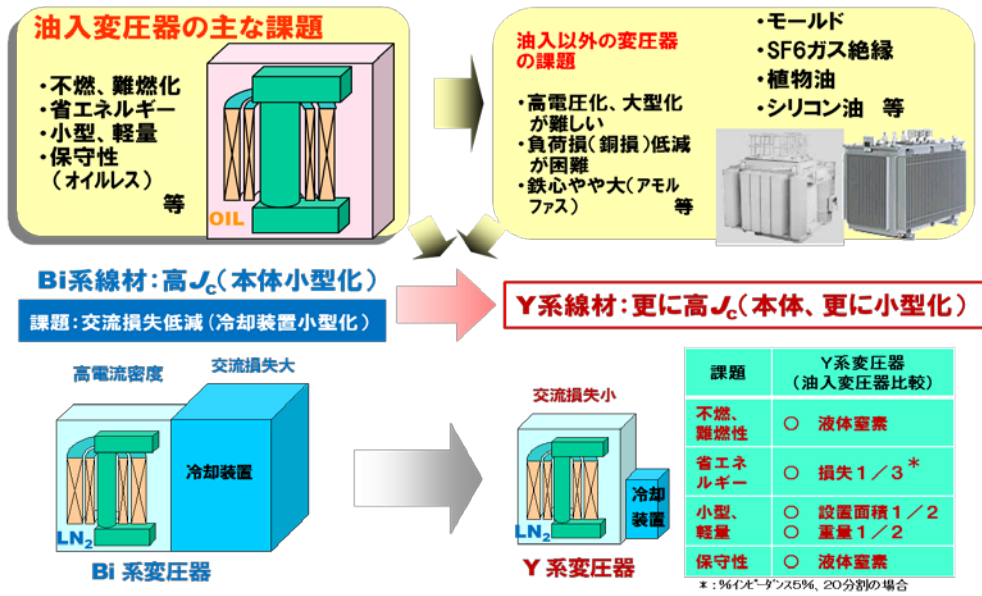


図 1.3.1-3 Y系超電導変圧器の特長

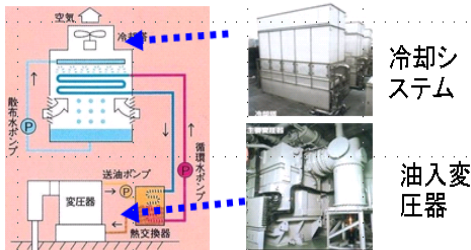


図 1.3.1-4 地下式変電所の既存変圧器例

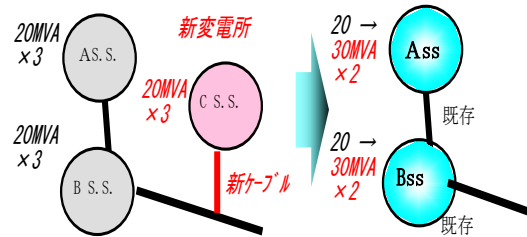


図 1.3.1-5 変電所（送電線含む）の新設回避や繰延べに有利な例

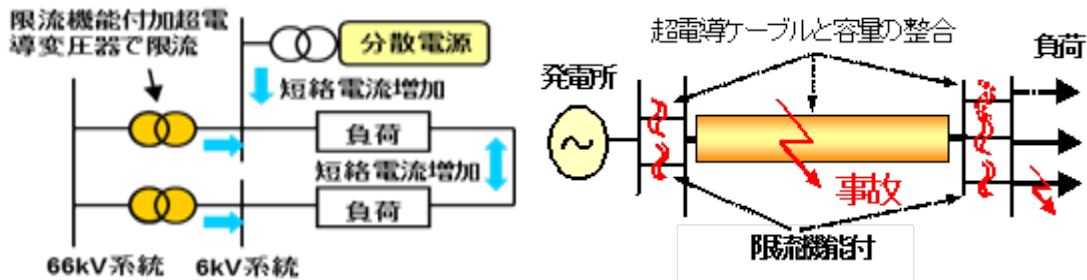


図 1.3.1-6 超電導限流機能変圧器の効果（同変圧器は限流器運用に加え、超電導ケーブル適用時の送電容量と短絡容量対策にも有効）

(3) 実用化に向けた課題

本プロジェクトで得た技術レベル・成果と実用化に向けた課題を表 1.3.1-2 に示す。本プロジェクトでは、2 MVA 級超電導変圧器モデルの試作、検証により 66/6.9 kV-20 MVA 級超電導変圧器の成立性を見通す大きな成果があった。しかし、実用化に向けてはさらなる技術開発が必要であり、要素技術開発毎の課題は以下のとおりとなる。

超電導変圧器用線材開発では、細線加工した Y 系超電導線材を用いて変圧器巻線の交流損失を低減できることは確認できた。今後 20 分割化技術の確立や線材の長手、幅方向の臨界電流等の性能の均一化や細線化に対応した高歩留りが確保できる安定製造技術開発が進めば、大幅な交流損失低減が可能となり超電導変圧器の効率向上が期待できる。また、既存変圧器と同等となるためには線材の高性能化、低コスト化が必要である。

冷却システム技術開発では、本プロジェクトで設定した最終目標である冷凍性能（冷凍機冷凍能力 2 kW@65 K、冷凍機効率 COP \geq 0.06@80 K）は達成できたが、冷凍機効率は既存変圧器との運用コストの差別化を図るために効率向上が必要であり、インペラ形状やノズル・ディフューザ形状の最適化、永久磁石（PM）モータや高効率インバータの採用等の技術開発や長期信頼性の検証が必要である。

巻線技術開発では、大電流化、低損失化、耐短絡強度等の変圧器用巻線モデルで求められる技術は確立できたが、高価な GFRP(Glass Fiber Reinforced Plastics) 製巻枠を数十枚使った円筒巻線では低コストは難しい。パンケーキ型の円盤巻線構成を適用すれば部品点数が削減できコスト低減が可能と考えられるが、低損失化のための電流分流抑制や電磁力支持等の技術開発が必要である。

限流機能付加技術開発では、400 kVA 単相変圧器の巻線モデルにより、過大電流を定格電流の 3 倍以下に抑制する限流機能の検証はできたが、三相変圧器・分割線材での検証、系統連系時の系統安定化効果の検証、ケーブルと変圧器との協調検討等が必要である。

超電導変圧器システムでは、2 MVA 級超電導変圧器モデルを試作し、課通電試験による性能検証を完了したが、今後は、大容量化して電力系統に連系し、実負荷による長期の実証試験を行い、冷却システムを含めた信頼性を検証することが必要である。また、既存の電力用変圧器の代替機となるためには、限流機能や周辺機器との協調対策を含めた電圧調整機能の検討が必要である。

表 1.3.1-2 超電導変圧器の実用化に向けた課題

技術開発項目	技術レベル・成果	実用化に向けた課題
線材技術	<ul style="list-style-type: none"> ・ 5 mm幅3分割、Ic50 A@65 K&0.01 T,100 m級線材 ・ 線材安定製造、細線化 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 線材の高性能化、低コスト化 ・ 20分割化技術の確立による低損失化 ・ 線材性能の均一化、安定製造
冷却システム技術	<ul style="list-style-type: none"> ・ 保守性に優れ、小型で高効率な圧縮機（断熱効率$\geq 65\%$）及び高効率膨張機（同効率$\geq 65\%$） ・ システム性能（2 kW@65 K、COP≥ 0.06@80 K） 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 長期信頼性検証 ・ 冷凍効率向上 ・ メンテナンスフリー化（循環装置等）
巻線技術	<ul style="list-style-type: none"> ・ 2 kA級巻線 ・ 3分割線材による低損失巻線 ・ 耐短絡強度巻線（20 MVA級変圧器%Z15 %相当） 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 巻線の低コスト化 -多並列円盤巻線均流化技術
限流機能付加技術	<ul style="list-style-type: none"> ・ 400 kVA単相変圧器モデル検証（過大電流を定格電流の3倍以下に限流） 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 大容量化（三相20 MVA級、分割線） ・ システム系検証（関連保護装置等との協調） ・ システム適用モデル検証（ケーブルとの組み合わせ等）
2 MVA級システム技術	<ul style="list-style-type: none"> ・ 66/6.9 kV-2 MVA級超電導変圧器モデルの検証 ・ 20 MVA級超電導変圧器の設計 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 大容量化（20 MVA級） ・ システム系検証、長期信頼性 ・ 電圧調整機能（周辺機器との協調対策含む） ・ 保冷容器の低コスト化、信頼性向上

(4) 実用化までのシナリオ

本プロジェクトで超電導変圧器技術開発の基盤技術は確立できたため、今後は、実用化技術開発及び実証試験を踏まえ実用化することとなる。

実用化を図るためには、長期信頼性の確保やコスト低減等多くの課題があるが、短期間での技術開発が難しいものもあり、段階的かつ優先順位をもとに効率的に技術開発を進め、一つずつ課題を克服しながら実用化に向けて取り組んでいくことが望ましい。

超電導変圧器の実用化に向けた課題を変圧器用途別（表 1.3.1-3）で見ると、産業用の受電用変圧器の課題が最も少なく低コスト化と長期信頼性のみで、本プロジェクトの技術開発の延長で対応可能であり、早期の実用化が見込める。一方、電力用は、長期信頼性の検証に加え電圧調整機能の開発等の課題もあり、産業用の超電導変圧器技術開発後に実用化に取り組むステップが効果的と考えられる。

表 1.3.1-3 超電導変圧器の実用化に向けた課題（変圧器用途別）

用途	仕様例	主なニーズ箇所	課題							計	
			市場	低コスト化	コンパクト化	長期信頼性	電圧調整	系統連係	高電圧大容量		
電力用	配電用変圧器	66/6kV 20MVA	地下式又は都市部変電所		●		●	●	●		4●
	系統用変圧器	220/66kV 300MVA	地下式又は都市部変電所		●		●	●	●		5●
	昇圧用変圧器(大型)	22/220kV 300MVA	地下発電所		●		●		●		4●
	昇圧用変圧器(小型)	0.69/33kV 3VA	風力用		●	●	●		●		4●
	直流変換用変圧器	500/250kV、872MVA	—	●	●		●		●		5●
産業用・輸送用	受電用変圧器	66/6kV 10MVA	地下、高負荷率変電所		●		●				2●
	大電流用変圧器	33/1.2 100MVA	—	●	●		●			●	4●
	半導体電力変換装置用変圧器	33/1.2 100MVA	—	●	●		●			●	4●
	電鉄用(き電用)変圧器	66/6kV 10MVA	都市部		●		●				2●
	車両用変圧器	25/1.2kV 4MVA	新幹線用		●	●	●				3●

具体的には、超電導機器共通の冷却システムや線材の技術開発が先行して進展すると考えられるため、超電導変圧器の実用化のシナリオ（図 1.3.1-7）としては、これらを見極め、取込み、早期の実用化が見込める産業用変圧器の技術開発を進めることし、産業用変圧器が実用化に入った段階で電圧調整機能の開発等 20 MVA 級電力用変圧器の技術開発、その後に高電圧・大容量の系統用変圧器の技術開発に取り組み、実用化を進めることになる。

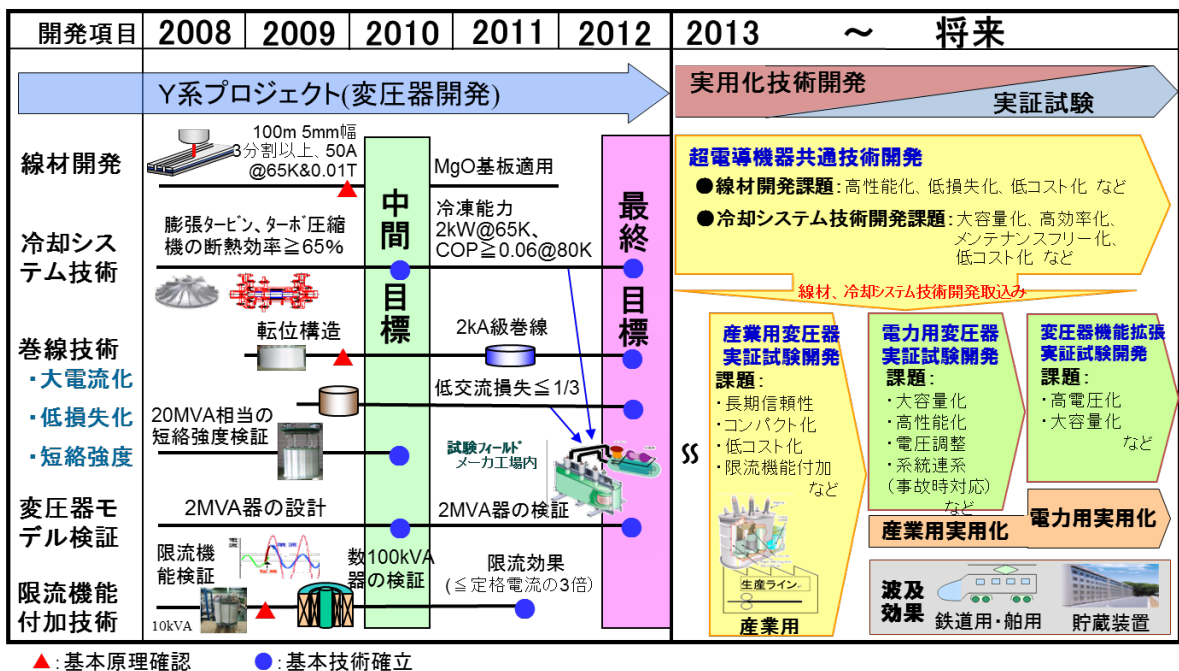


図 1.3.1-7 超電導変圧器の実用化までのシナリオ

1.3.2 実用化の効果

(1) 省エネ及び CO₂削減効果

省エネルギー量は、既存変圧器と高温超電導変圧器との損失量の差から求め、それに CO₂ 排出係数を乗じて CO₂ 削減量を求めた。

具体的には、省エネ量は油入変圧器と Y 系変圧器のそれぞれの効率 (99.4 %、99.8 %)、設備利用率 (50 %)、超電導変圧器の予想普及台数から試算した。なお、変圧器の予想普及台数は、電事連の 2011 年版電力統計情報をもとに変圧器台数を算出し、産業用変圧器は 2020 年からガス絶縁変圧器市場規模の年 10 % 普及、配電用変圧器は 2025 年から既存変圧器 2 % を毎年置換 (50 年周期更新)、系統用変圧器は 2030 年から既存変圧器 2 % を毎年置換 (50 年周期更新) で算定し、CO₂ 排出係数は、電気事業連合会による排出原単位目標及び資源エネルギー庁の見解に基づき、2020 年 0.33 kg-CO₂/kWh を適用した。最小ケースは産業用及び配電用変圧器を対象、最大ケースは最小ケース+系統用変圧器を対象として試算した。

それらの超電導変圧器による省エネ効果及び CO₂ 削減効果を表 1.3.2-1 に示す。本試算によると、2030 年までに損失を 30~36 MW 低減することにより、省エネ効果は 2.7~5.9 億 kWh/年、CO₂ 削減量は約 88~281 kt/年となる。

表 1.3.2-1 超電導変圧器による省エネ及び CO₂ 削減効果

		2020年	2030年	2040年	2050年
損失低減量 (MW)	最小	0.1	30.5	80.7	130.7
	最大	0.1	36.5	146.7	256.7
省エネ効果 (億kwh/年)	最小	0.01	2.7	7.1	11.4
	最大	0.01	5.9	19.9	33.9
CO ₂ 削減効果 (kt/年)	最小	0.3	88.2	233.3	377.8
	最大	0.3	281.9	890.7	1497.7

(2) 超電導変圧器の経済性 (非公開部)

超電導変圧器の経済性の評価として、機器購入費である初期コストと運転・保守時の損失等の運用コストを合せた総合コストを算定し、油入変圧器と比較した。初期コストは、今後のさらなる開発を想定した Y 系超電導線材技術、冷却システム技術をもとに Y 系超電導変圧器のコストを算定した。主な諸元は次のとおりである。

(非公開)

(非公開)

(3) 超電導変圧器の波及効果

超電導変圧器は、超電導ケーブルや限流器と複合して適用することにより、将来的に増大するリプレース需要や大容量電力輸送に貢献するとともに、さらには、太陽光等の再生可能エネルギーの導入拡大や米国や韓国で検討されているスマート

グリッド等へ適用も考えられる。また、超電導機器の適用により、電力系統運用への貢献や、低炭素化社会構築及び経済性等での貢献も期待される。

一方、変圧器は、電力用はもとより、産業用や輸送用等、殆どの電力機器へ、系統電圧の変換や侵入雷の絶縁対策等から適用されている。図 1.3.2-2 に超電導変圧器の各種設備への適用例を、図 1.3.2-3 に超電導変圧器の各分野展開時の適用技術の相関を示す。これらの超電導変圧器は、用途により設備利用率の向上や超電導化による小型・高効率及び不燃等の高性能化への貢献、並びに低炭素社会への貢献が期待される。

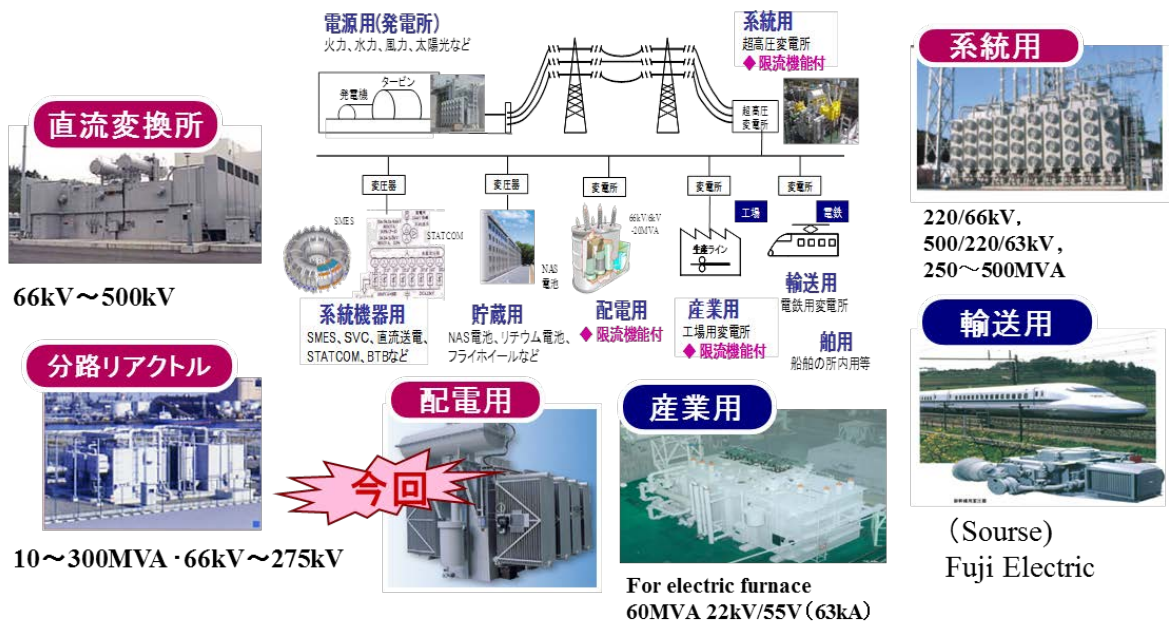


図 1.3.2-2 超電導変圧器の各種設備への適用例

分野		2005	2010	2020	~	
電力分野	<ul style="list-style-type: none"> 配電用変圧器 (再生可能エネルギー用) 系統用変圧器 限流機能変圧器 	巻線、冷却等の要素技術開発 2MVA変圧器システム開発		容量拡大、低コスト化 信頼性検証	段階的に 実用化 高電圧化、大容量化 信頼性検証、低コスト化	
		産業分野	工場・ビル等用の変圧器	容量拡大、低コスト化 信頼性検証、実用化検討	小規模から 実用化	
		輸送分野	車載用、船用の変圧器		耐振動対策、低コスト化 信頼性検証、実用化検討	小規模から 実用化

図 1.3.2-3 超電導変圧器各分野展開時の適用技術の相関

超電導変圧器の冷却システムについても、超電導ケーブルを始めとする超電導電力機器開発プロジェクトが世界的に活発化している。このため、大陽日酸では 2 MVA 級超電導変圧器モデル用に開発した 2 kW 級冷凍機 (図 1.3.2-4) を世界に先駆けて商品化し、2013 年度から販売を開始した。さらに、2013 年度には冷凍能力

の大容量化及び高効率化・小型化に取り組んでいく予定である。また、電力用に加え産業用や科学分野でも貢献できると考えられる。図 1.3.2-5 に超電導変圧器用冷却システム技術の適用拡大例を、図 1.3.2-6 に既存の石油ガス・希ガスの極低温蒸留分離装置及びスペースチャンバーコールドパネル冷媒供給装置を示す。冷却システムを含め超電導変圧器の周辺技術の適用拡大も期待される。



図 1.3.2-4 2 kW 級冷凍機

分野	2005	2010	2020	～
電力分野 ・配電用変圧器 ・系統用変圧器 ・超電導ケーブル等	冷却の要素技術、2MVA変圧器	容量拡大、低コスト化、信頼性	大容量化	段階的に 実用化
産業分野 ・LNGの液化(BOGの液化回収など) ・石油ガス・希ガスの極低温蒸留分離		大容量化、低コスト化、高効率化 信頼性検証、蒸留プロセスとの融合		小規模から 実用化
科学分野 スペースチャンバー コールドパネル		大容量化、低コスト化 信頼性検証、低温度化		実用化

図 1.3.2-5 超電導変圧器用冷却システム技術の適用拡大例

- ・ LNGの液化冷熱源の提供
- ・ 分散型（小型）極低温蒸留装置における高効率な冷熱源の提供



石油ガス・希ガスの極低温蒸留分離装置

- ・ 液体窒素循環の代替。低温度化と循環サイクルによる省エネ化



スペースチャンバーコールドパネル冷媒供給

図 1.3.2-6 石油ガス・希ガスの極低温蒸留分離装置及びスペースチャンバーコールドパネル冷媒供給装置

1.3.3 次期開発に向けて

(1) 適用分野の優先順位見直し

本プロジェクトは、既存の油入変圧器に比べ小型・軽量、不燃性、低ロス化等でメリットがある電力用 20 MVA 超電導変圧器の実用化をめざした技術開発を進めてきたが、東日本大震災以降の電力需要の伸び悩みや既存変圧器の更新時期の繰り延べにより電力用変圧器の将来市場は不透明である。

一方、都市部の地下等で新設・更新される変圧器は、火災予防、コンパクト、環境性等が求められることから、ガス絶縁変圧器や植物油・シリコン油変圧器等が適用されているが、同じ特長を持つ超電導変圧器はさらに省エネで保守性にも優れている。

ガス絶縁変圧器の導入状況を図 1.3.3-1 に示す。電力用以外の納入先をみると、集合施設（ビル、地下街、展示場、空港等）の受電用、電鉄各施設の受電用、油流出の回避が不可欠な上下水道施設の受電用等納入先も豊富である。また、産業用の受電用変圧器は、実用化に向けた課題が少なく、その内容も低コスト化と長期信頼性のため、今回の技術開発の延長で対応可能であり、早期の実用化が見込める。

このため、今後の超電導変圧器の開発は電力用に限定せず、ガス絶縁変圧器相当のニーズが見込める市場をターゲットとした産業用の超電導変圧器開発を先行するとともに、コスト低減、海外の電力市場への展開等を考慮し限流機能付きとすることが効果的である。

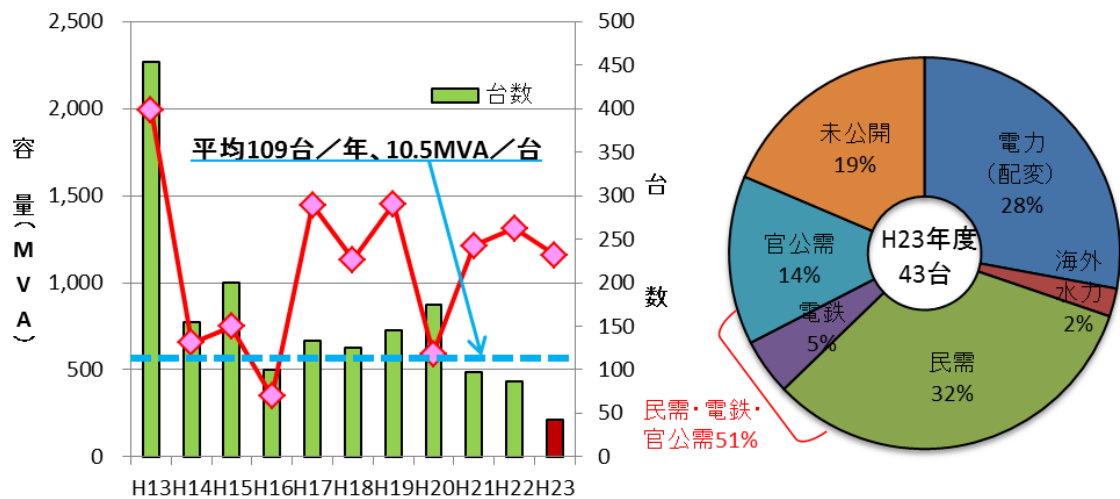


図 1.3.3-1 ガス絶縁変圧器の市場規模の想定（電気日日新聞 8 月 28 日号より）

(2) ガス絶縁変圧器の特長とメリット

油入変圧器(OIT)及びガス絶縁変圧器(GIT)と開閉装置(GIS)とのレイアウト例を図 1.3.3-2 に示す。ガス絶縁変圧器はコンサベータが不要となることから変圧器室の高さが低くできる。このため、その不燃性等から防火用設備が不要となり同一室内にガス絶縁変圧器と開閉装置が設置でき、変電所レイアウトのコンパクト化と自

由度が増し、変電所敷地や建物等の縮小化に伴う大幅な建設コストの削減が可能である。これらのメリットは、超電導変圧器も同様であり、超電導変圧器はさらに省エネ効果が期待される。

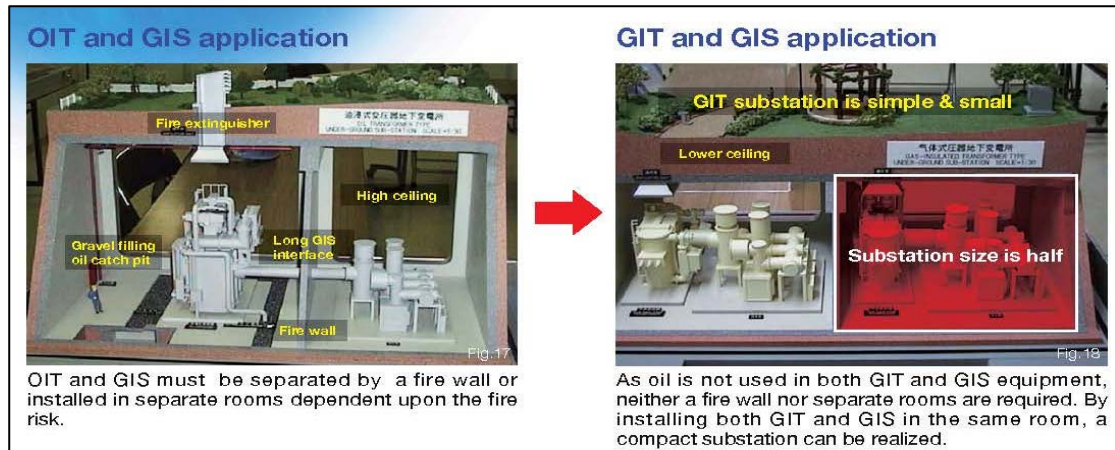


図 1.3.3-2 変圧器と開閉装置のレイアウト例
(株東芝 Gas Insulated パンフレットより)

(3) 経済性



(非公開)

(4) 次期技術開発テーマの検討

上記を踏まえると次期開発テーマとしては、「数 MVA 級限流機能付加変圧器での限流機能検証」と「10 MVA 級限流機能付加超電導変圧器信頼性検証」が考えられる（図 1.3.3-4）。

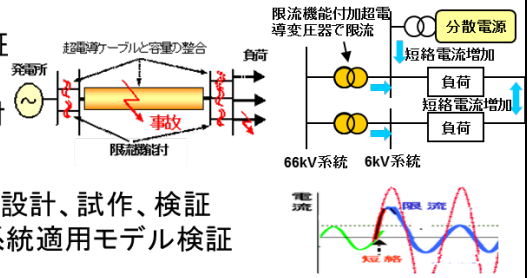
「数 MVA 級限流機能付加変圧器での限流機能検証」は、本プロジェクトにおいて 400 kVA 単相変圧器モデルで過大電流を定格電流の 3 倍以下に限流することは確認できたものの、三相変圧器・分割線材での検証、系統連系時の系統安定化効果の検証（電圧調整機能要否を含む）、ケーブルと変圧器との協調検討等の要素技術開発レベルでの課題が残っており、数 MVA 級限流機能付加変圧器設計、試作、検証及びケーブルと変圧器を組み合わせた系統適用モデル検証を行うものである。

「10 MVA 級限流機能付加超電導変圧器信頼性検証」は、本プロジェクトでの要素技術開発により超電導変圧器システムとしての成立性が確認できたので実用化技術開発フェーズに進み、長期信頼性、系統連系検証、コスト低減、高効率、コンパクト化等の課題に対して 10 MVA 級限流機能付加超電導変圧器の設計、試作、検証を行うものである。

テーマ1: 数MVA級限流機能付加変圧器での限流機能検証

課題

- 三相変圧器・分割線材での検証
- 系統安定化効果検証
- ケーブルと変圧器との協調検討



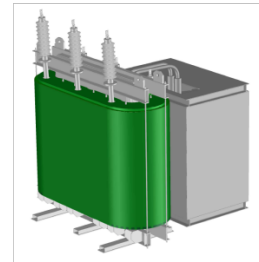
実施内容

- 数MVA級限流機能付加変圧器設計、試作、検証
- ケーブルと変圧器を組合せた系統適用モデル検証

テーマ2: 10MVA級限流機能付加超電導変圧器信頼性検証

課題

- 長期信頼性
- コスト低減
- 系統連係検証
- 高効率、コンパクト化



実施内容

- 10MVA級限流機能付加超電導変圧器設計、試作、検証

図 1.3.3-4 次期技術開発テーマ

1.4 超電導電力機器用線材の実用化の見通し

超電導電力機器用線材の技術開発を中心的に実施している(公財)国際超電導産業技術研究センター (ISTEC) は、自ら研究員及び研究設備・資機材を保有しており、過去 20 年以上に亘り超電導の研究開発にあたり、単独あるいは共同研究体を組織し、広い範囲にわたり多くの成果を挙げている。それぞれの共同研究体においては、研究の遂行のみでなく、研究体の中枢として研究方針・内容などの策定を行い、自身の成果を挙げるのみではなく、マネジメント機能も発揮し、共同研究体としての成果も出してきた。本テーマであるY系超電導線材の開発に関しては、全てのテーマに関して中間目標として設定されている実証試験時に必要とされる線材レベル及び最終目標として導入・普及時(2020 年頃想定)に必要な仕様を満足させる線材レベル達成に主体的に取り組み、世界最高水準の成果を挙げた。ここでは、低コスト化や経時・経年変化及び剥離現象の把握と対策等の線材作製プロセスの重要基盤技術の開発はもとより、機器応用に必要な磁場特性向上や特性均一化と細線化、フィラメント化の複合化による低交流損失線材開発及び高強度で高 J_c 線材の開発などの開発中の各電力機器から求められる個別仕様を満足する線材の開発を精力的に遂行してきた。また、実用化促進を目的として、中間目標達成のために開発した線材作製技術を線材メーカーへ移管した。

今後は、当財団が公益法人であることから、自らが実用化・事業化主体にはなれないものの、エンドユーザをはじめとする多くの会員企業との連携により実用化・事業化に繋げていきたいと考えている。また、イットリウム系超電導機器が他の競合機器に対して絶対的な優位性を確保するための、より高いレベルの線材(第三世代線材)を実現するための技術開発を継続し、その技術を線材メーカーへ移管することで実用化に貢献する。また、一方で、エンドユーザを含めた委員会等を組織し運営することや、学協会等を通じた普及啓蒙活動を通して、超電導市場の開拓、拡大に努める考えである。その際、機器を含めた分析・評価等の活動を通し上記活動を加速させることにより実用化を促進させたいと考えている。

Y系超電導線材の実用化・事業化を担うことになる線材メーカーの実用化見通しは以下の通りである。

住友電気工業(株)は、クラッド型結晶粒配向金属基板上のPLD成膜線材において、高 I_c 開発と安定製造技術開発により、低コスト量産技術を確立して市場への販売を開始し、高温超電導線材をニーズに応じて提供していく意向である。応用展開については、高機能低コストY系長尺超電導線材の段階的開発状況に応じて、ケーブル開発や超電導モータ等の応用開拓や実証にも注力していきたいとしている。超電導技術の進展には線材の開発と並行して応用の開発を進めることが重要との視点に立って、これまで積極的に、主としてBi系超電導線材ではあるが、線材応用のプロ

プロジェクトに参画してきている。超電導ケーブルのデモンストレーションでは主要なものとして(株)東京電力との共同研究の電力中央研究所横須賀研究所のフィールドで実施した 100 mケーブル実証プロジェクト(66 kV、1000 A)、米国DOE、NYSERDAのスポンサーシップによりNY州Albany市において 7000 時間に亘って 7 万所帯に電力を供給した 350 mケーブル実線路(一部 30mはY系超電導ケーブル)デモンストレーション(34.5 kV、800 A)、韓国電力・電力研究院(KEPRI)に納入した 100 mケーブルのデモンストレーション(22.9 kV、1250 A)があげられる。いずれのデモンストレーションも成功裡に終了し、超電導ケーブルシステムの製作技術、布設技術、運転技術が実用レベルに至っていることを実証してきた。また、船用超電導モータ、超電導自動車用モータ、MRI用マグネットなど多岐に亘る超電導応用プロジェクトを進めている。なお、現在開発が進められている超電導ケーブルプロジェクトのうち、1 件は住友電気工業(株)が(株)東京電力と共同で実施中のNEDOプロジェクト高温超電導実証ケーブルプロジェクトである。これは横浜の旭変電所構内に約 300 m長のBi系超電導線材を使用した三相交流ケーブル (66 kV、3 kA) を布設して実負荷試験を行なうものであり、平成 23 年に運転を開始している。住友電気工業(株)としては、超電導線材のリーディングカンパニーとして、多様なユーザーニーズ、応用ニーズに対する品揃えを用意することが必要と考えている。高い特性と低コストのポテンシャルを秘めたY系超電導線材について、高機能低コスト長尺線材の安定製造技術の確立を行いたいと考えている。低磁性高強度の特性を有すクラッド型結晶粒配向金属基板線材により、高 I_c 線材開発と安定製造技術開発を基にして、国家プロジェクトへ参画しながら電力応用機器(電力ケーブル、限流器等)や民生超電導機器(マグネット、モータ等)への実証を行い、中長期的には、低コスト量産技術を確立して市場への販売を開始し、高温超電導線材をニーズに応じて提供できるメーカーの位置を構築していきたいとのことである。

古河電気工業(株)では、本委託業務成果と古河電気工業(株)が保有する超電導線材加工、電力ケーブル製造等の量産化技術を融合し、製造技術を高めるとともに量産体制を確立し、市場の需要に対応していきたいと考えている。市場としては、高温超電導線材の「Y系電力機器開発プロジェクト」で行ってきた電力ケーブル等の電力機器応用に加え、さらには発電機、モータ等の応用も考えられている。これらは大幅な省エネルギー化・CO₂削減が期待され、エネルギー・環境問題への切札的技術とも言われ、幅広い応用が考えられている。その市場については、全世界的に 2015 年以降、本格的に市場が立ち上がり、2020 年以降、大きなビジネスになるものと期待している。そこで、その市場の要求に応えるために、本プロジェクト成果をベースにした古河電工グループが保有する製造技術のレベルアップを進めていきたいと考えている。また、古河電工グループの量産化技術を取り込むことで、高温超電導線材の事業化時期を早めて、ケーブル及び機器の開発への貢献をしていきたいと考えている。

超電導電力ケーブル用線材の事業化については、以下のように考えている。国内

では、2020年からの超高圧OFケーブル、POFケーブルの寿命引き換えタイミングで、その一部の置き換えから始まると考えられる。超電導電力ケーブルに対応して、電力ケーブル用線材の開発・製造を行っていきたいと考えている。また、海外においては国内より市場も大きく、ケーブル・線材で進出を図りたいと考えている。さらに、各種機器応用に向けた超電導線材の外販を進めていく予定であり、プロジェクトの成果である超電導線材における磁場中の高 I_c 化技術、高強度化技術、高 J_c 化技術及び安定製造技術をさらに適用して、より優れたコイル等の応用機器用線材を供給したいと考えている。

Y系超電導線材の本格的な実用化・事業化は、①1km級の長尺かつ数円/Amの低コスト線材製造技術の確立、②Y系超電導線材を用いた機器への信頼性確立や実証の段階を経て、市場が展開すると予想しており、2020年頃には数万nkm/年級の生産能力をもち、世界へ供給したいと考えている。

(株)フジクラでは、Y系超電導線材作製のキーテクノロジーといえる結晶粒配向中間層作製技術であるIBAD法を開発し、その後、長尺線材化・高性能化・低コスト化の可能性を鑑み、IBAD/PLD法を選択し、研究開発を進めてきた。「超電導応用基盤技術研究開発(第Ⅱ期)」プロジェクトが始まった平成15年においては、まだ数十m、 I_c 値で数十A/cm-w(@77 K,s.f.)の線材がようやくできたころであった。平成19年度末のプロジェクト終了時において I_c 値で350 A/cm-w(@77 K,s.f.)、線材単長で502mを得るに至った。この時点においては、まだ300Aを超える特性の超電導線材は年間数本しか製作することができなかったが、本プロジェクトにおいて、歩留り改善、長さ方向の均質性改善に取り組んだ結果、100~300m長の超電導線材に対して70%を超える歩留りで製造できる目処が立つようになった。さらに長さ方向の臨界電流分布では平成19年においては20~30%程度のばらつきであったが、標準偏差で3%以下に出来る見通しも得られるようになった。既に平成20年にはプロジェクトで活用した超電導線製造装置の一部について自社設備として購入し、事業化のための足がかりとして平成21年度よりY系超電導線材の販売も開始し、機器応用を検討している研究機関等へ提供・販売している。今後、機器試作、モデル機器等に進展することで超電導機器への活用が拡大していくものと考えている。提供価格は未だ「超電導応用基盤技術研究開発(第Ⅱ期)」プロジェクトでの技術コストである12円/Amを大きく上回っているが、今後、さらなる特性改善、超電導原料等の作製コスト削減等によりコスト低減にも注力し、より安価な超電導線材の供給ができるよう努力を継続し、2015年に5円/Amを下回るコストを実現することで、事業規模のさらなる拡大をめざしている。

現時点において本プロジェクトで実施している電力機器以外の実用化をめざした国のプロジェクトや民間のプロジェクトに対して線材の販売や共同研究形態による実用化のための機器開発に関与している。国のプロジェクトでは科学技術振興機構(JST)が推進しているイノベーション創出事業(S-イノベ)における機器開発

用の Y 系超電導線材の販売を始めた。S-イノベでは超電導機器として 5 つの課題について推進されているが、このうちいくつかのテーマについては超電導線材の販売や引き合いを頂いている。また東北大学での高磁場マグネットに Y 系超電導線材を適用するための検討に参画している。さらに、これ以外に自らの資金により超電導機器を開発する内外の企業等にも超電導線材の販売や共同研究として実施している。これらにより Y 系超電導機器の早期実現・実証を行い、Y 系超電導機器の実用化及び超電導事業の確立をめざしている。

昭和電線ケーブルシステム(株)においては、線材開発で先行する Bi 系超電導線材による機器検証を進めながら市場の掘り起こしが行われ、Y 系超電導線材に転換することによって機器の性能向上を推進しながら実用化が進んでいくと考えている。置き換えの対象となる応用機器は、医療・分析機器の分野では MRI や NMR、産業・輸送・電力の分野では単結晶引上げ装置、リニアモーターカー、大型モータ、電力ケーブル、車載用を含めた変圧器等が見込まれるとしている。このうち、電力ケーブルや変圧器などは次世代送電網の発展とともに実用化が図られ、特に海外を中心とした市場が形成されると考えている。現在、中国、韓国においてもケーブルを中心としたプロジェクトが複数立ち上がっており、中国は国内で使用するケーブルシステムとして、韓国としては輸出用システムとして開発が始まっている。また、これまで超長距離送電でなければコストメリットが出ないと言われてきた直流送電についても、近年直流給電に対する取り組みがデータセンター、構内配電の分野で活発化し、流れが変わって来ている。昭和電線ケーブルシステム(株)では、これまで開発を行ってきた安価な MOD 法による Y 系超電導線材の供給会社としての事業を行うことを考えており、今後、これまで開発に用いていた設備を自社設備とし、2013 年度には、年産約 10 km 体制をめざしている。また、本プロジェクト内において、中間層(IBAD 層)付基板の供給を受けてきたが、事業化に向け、自社による基板製造技術についても確立を図っており、基板製造技術確立の際には、製造装置の増強を視野に入れた量産体制を構築していくことを考えている。

線材供給に加え、Y 系超電導線材の応用についても検討を開始しており、その応用として、送電ケーブルや母線、バスダクトなどを視野に入れており、それに伴い、電流供給を行うための端末の開発も自社開発を開始しており、こちらにおいても市場参入を図っていく方針である。

例として、送電ケーブルでの市場展開に関しては、国内において Y 系超電導線材を使用したシステム構築を行い、海外での実証試験・導入が最も好ましいと考えており、本プロジェクトにおいて、送電ケーブル用線材として線材供給を行うことで、必要な技術課題を克服しており、その技術を事業化に繋げるため、生産量を増加する必要がある。上述のように、2013 年度には、年産約 10 km、2014 年度には、年産約 20 km、2015 年度には、設備増強を踏まえ、年産約 50 km をめざしている。それら生産量増に加え、線材性能の高特性化や製造コストの低減等により、さらなる低コスト化についても検討を継続していく。

また、市場展開に必要な特許等知的財産権問題に関しては、現在、中国国内の特許調査を実施しているところであり、中国での超電導開発や市場性についても随時調査を行っていく予定である。

加えて、昭和電線ケーブルシステム(株)は線材供給のみならず、超電導電流リード、超電導送電ケーブル、超電導母線等を超電導線材の実用化に向けたキーパーツとして捉えている。特に、超電導電流リードはあらゆる超電導応用機器に少なくとも1対使用される部品であり、超電導機器ビジネスの拡大とともに電流リードビジネスも拡大する。過去17年に亘りBi系酸化物超電導電流リードを製造・販売してきた実績がある。しかし、現状の電流リードにはBi系酸化物超電導焼結体を用いているため、大電流容量を必要とする加速器や核融合炉用に使用するBi系酸化物超電導電流リードは大容量化が非常に困難であった。これに対し、Y系超電導線材を使用した電流リードでは、線材の本数を調節することにより所望の通電容量を実現することが可能となり、通電容量に対して大きな自由度を持つことが特長である。また、～20Tの高磁場中での使用を想定した電流リードはBi系酸化物電流リードと比較すると外部磁場の影響を受けにくく、外部磁場に起因する特性低下を見込んだ容量設計が容易になること等、そのメリットは大きい。さらには、人工ピン止め点を導入した磁場特性に優れるY系超電導線材を適用することにより、これまで不可能であった高磁場用機器及び大型機器向け大容量電流リードの製品化が可能となり、市場の拡大をめざすことができる。

さらに、平成21年4月22日に鉱工業技術研究組合法を技術研究組合法に改正する法案が可決・成立し、新たな研究開発パートナーシップ制度(技術研究組合制度)が創設され、研究開発から事業化まで一貫して行い、研究成果をビジネスにつなげることが容易・可能となった。この制度を積極的に活用し、(株)フジクラ、昭和電線ケーブルシステム(株)、及び(公財)国際超電導産業技術研究センターは、産業用超電導線材・機器技術研究組合(iSTERA)を、平成21年9月24日に設立し、超電導技術を利用した次世代の産業用機器及び当該機器に用いる線材の研究開発を実施し、一般超電導機器の実用化・事業化をめざして、関連技術を保有する線材メーカーと研究機関が協同し、機器の要素技術及び線材作製技術の開発を進めている。超電導技術を巡る我が国の国際競争力の強化とともに、高性能MR I・医療用加速器、リニアモーターカー、高効率産業用モータ等の実現を通じ新市場の創出がめざしている。

以上の通り、本「Y系超電導電力機器技術開発」プロジェクトを最先端の技術・人的資産・設備・ノウハウを備えた上述の機関の参画により遂行することで超電導電力機器の実用化展開が大いに見込まれるものである。

下表には、線材メーカーの実用化へのイメージとして、販売開始イメージ等をまとめた。

表 1.4-1 線材メーカ各社の実用化イメージと課題

	住友電工	古河電工	フジクラ	昭和電線
販売開始のイメージ	<ul style="list-style-type: none"> • FY2013～2015 開発 • FY2016～30km/y (研究開発用,プロト用) • FY2018～1000 km/y (各種用途へ) 	<ul style="list-style-type: none"> • サンプル提供から行い、市場のニーズにあうところ (性能、量、時期) の線材供給体制を検討。 	<ul style="list-style-type: none"> • 既に小規模販売 • FY2013～10km/y (生産規模を拡大) 	<ul style="list-style-type: none"> • FY2013～10km/y • FY2014～20km/y • FY2014～50km/y
販売分野	<ul style="list-style-type: none"> • 既に小規模に販売 • FY2013～10km/y (生産規模を拡大) 	<ul style="list-style-type: none"> • 送電ケーブル。 • コイル等の応用機器 	<ul style="list-style-type: none"> • 送電ケーブル • 回転機 • 高磁場発生用マグネット 	<ul style="list-style-type: none"> • 送電ケーブル • 電流リード • 母線 • 回転機系機器
実用化への課題 (近未来)	<ul style="list-style-type: none"> • 長尺線材特性の局所低下部解消。 • 機器形状における機械的特性の把握。 • 市場の要請と熟成。 	<ul style="list-style-type: none"> • 更なる安定した線材特性の獲得に向けた量産技術の向上。 	<ul style="list-style-type: none"> • 信頼性の確保。 • 量産時均一性の確保。 • 製造歩留り向上。 • コスト低減。 	<ul style="list-style-type: none"> • 高性能線材の量産化に伴うコスト低減(原料費、歩留向上等) • 基板製造技術の確立及び装置増強
実用化への課題 (将来)	<ul style="list-style-type: none"> • 長単長化 (1km 級) と品質安定化の両立。 • 量産プロセス確立した上でのコスト低減。 • 品質面の長期信頼性特性の把握。 	<ul style="list-style-type: none"> • 線材の更なる低コスト化。 	<ul style="list-style-type: none"> • 現用常電導機器、金属超電導機器に対して優位性を持つことができる線材性能やコストの低減化 	<ul style="list-style-type: none"> • 低コスト化 • 生産量増 • 更なる高性能化

2. 今後の展開

2.1 超電導電力ケーブル

2.1.1 実用化の課題

超電導ケーブルを実用化するためには、超電導ケーブル及び冷却システムの長期信頼性の検証が重要であるとともに実系統と連系し、負荷変動等に対する長期信頼性・安定性を実証していく必要がある。さらに普及のためには、これと並行して超電導ケーブルの高性能化・コスト低減とともに冷却システム系の高効率化・低コスト化の開発が不可欠である。また、冷却負荷を低減させるためにも断熱管路・端末等における外部侵入熱の低減や端末部・接続部のコンパクト化、冷却システムの高効率・大容量化等、ケーブルシステムとしての高性能・高効率化が必要となってくる。

2.1.2 実用化までのシナリオ

超電導ケーブルの実用化に向けては、上記課題に記載したように、超電導ケーブルと冷却システムを組み合わせたシステム検証として、電力系統等と連系し、ケーブルシステムとしての長期信頼性・安定性の実証を行うことが重要である。

電力系統への導入に際しては、信頼性・保守性等が重要視されることから、まずは低電圧階級の系統、数百 m 級の短尺ケーブルにより発電所構内等において、長期信頼性・安定性、運用・保守等を実証し実系統での導入・運用実績を積むことが必要である。

地中ケーブル等 km 級ケーブルへの実用化に対しては、断熱管路・端末等からの侵入熱低減化・コンパクト化はもとより長尺冷却システムに対する信頼性・安定性の検証が不可欠であり、冷却システムの大容量化・高効率化と併せた検討が必要である。

2.1.3 今後の展開

電力系統への適用には信頼性が特に重要視されることから、まずは工場内等のフィールドにて実績を積むことが不可欠であり、本プロジェクトの 2013 年度継続研究として下記のように引き続き検証試験等を実施する計画である。

66 kV 大電流ケーブル化技術の開発においては、フジクラ佐倉事業所内にて、ケーブルシステムとしての熱機械特性等を把握するために検証試験を実施する予定であり、275 kV 高電圧ケーブル化技術の開発においては、瀋陽古河電纜(中国)内にて、熱サイクルに伴う熱伸縮と超電導性能に与える影響等を検証するため、評価を続ける予定である。

2.2 超電導変圧器

2.2.1 実用化の課題

本プロジェクトで超電導変圧器の要素技術の基盤技術は確立できたため、今後は、実用化技術開発及び実証試験を踏まえ実用化することとなる。実用化を図るためには、長期信頼性の確保やコスト低減等多くの課題があるが、短期間での技術開発が難しいものもあり、段階的かつ優先順位をもとに効率的に技術開発を進め、一つずつ課題を克服しながら実用化に向けて取り組んでいくことが望ましい。

産業用の受電用変圧器については、低コスト化や長期信頼性といった本プロジェクトの技術開発の延長で対応可能な課題を解決することで早期の実用化が見込める。一方、電力用は、長期信頼性の検証に加え電圧調整機能の開発等の課題もあり、産業用の超電導変圧器技術開発後に実用化に取り組むステップが効果的と考えられる。

具体的には、巻線に定格電流を長期間通電し、長期通電や外気温等の環境変化等により、巻線、冷却システムが劣化や異常を来さないことを確認することをめざした巻線、冷却システムの長期信頼性検証試験、さらには、実負荷を模擬した負荷相当の電流を巻線に供給し、巻線、冷却システムがこの変動に対してどの程度の耐性・適応性を有するかを検証することをめざした負荷変動に対する耐性、適応性の検証が今後の開発課題となる。

2.2.2 実用化までのシナリオ

超電導機器共通の冷却システムや線材の技術開発が先行して進展すると考えられるため、これらの技術開発動向を見極め、取込み、早期の実用化が見込める産業用変圧器の技術開発を進めることし、産業用変圧器が実用化に入った段階で電圧調整機能の開発等 20 MVA 級配電用変圧器の技術開発、その後に高電圧・大容量の系統用変圧器の技術開発に取り組み、実用化を進めることになる。

2.2.3 今後の展開

実用化に向けた最初の取り組みとして、長期信頼性の検証等を行うことを目的に本プロジェクトで試作した2 MVA級超電導変圧器モデルを九州大学へ移設した。九州大学では、これを活用し、巻線に定格電流を長期間通電させる「巻線、冷却システムの長期信頼性の検証」、実負荷を模擬した電流を巻線に通電させる「負荷変動に対する耐性、適応性の検証」等を計画している。

超電導ケーブルを始めとする超電導電力機器開発プロジェクトが世界的に活発化しており、2 MVA級超電導変圧器モデル用に開発した2 kW級冷凍機を世界に先駆けて商品化することは、超電導電力機器の実用化を推し進めるうえで大きな意義があることから、2013年度には冷凍能力の大容量化および高効率化・小型化に取り組んでいく予定である。

2.3 Y系超電導線材

Y系超電導線材の実用化・事業化に関して、線材メーカ各社の取り組みを各社毎にまとめた。

2.3.1 住友電工

住友電工では、「大電流超電導ケーブル技術開発／機器用線材製作・開発」に係る継続研究（1年間）において、ケーブル製造工程とケーブル課通電・ヒートサイクルが線材に与える影響を評価するとともに、高温超電導機器の導入促進のため、幅広線材の特性向上と均一化を図り、その超電導限流器への適用をめざした線材基礎特性評価を行う。その後、長尺線材特性の局所低下部の解消、機器形状における機械的特性の把握等の課題解決を図り、2016年頃を目途に販売へつなげる。中長期的には、長単長化（1km級）と品質安定化の両立とともに量産プロセスを確立し、コスト低減や長期信頼性特性の把握を通して量産化へ繋げる。応用のターゲットは、ケーブル、限流器及びモータ等である。

2.3.2 古河電工

古河電工では、安定した線材特性の獲得に向けた量産技術の向上を経て、市場のニーズにあうところから提供、販売へつなげる。中長期的には長尺低コスト化、信頼性を確立し、2020年には大量供給可能な能力実現をめざす。応用のターゲットは、ケーブル及び発電機、モータ等である。

2.3.3 フジクラ

フジクラでは、「リチウム系超電導電力機器技術開発事業」に係る継続研究（1年間）として高 I_c -IBAD-PLD線材の電力ケーブル適用に関する研究を実施し、本プロジェクト成果の早期実用化を図る。近未来的には、信頼性、量産時均一性の確保による製造歩留り向上とコスト低減を図り、既に販売を開始している線材事業において2015年には5円/Amの低コスト化を実現し、規模拡大をめざす。中長期的には、さらなる線材能力の向上とともに低コスト化により現用常電導機器、金属超電導機器に対して優位性を確立する。応用のターゲットは、ケーブル、回転機に加え高磁場発生用磁石等である。

2.3.4 昭和電線ケーブルシステム

昭和電線では、「磁場中高臨界電流線材の長尺安定製造技術開発」に係る継続研究（1年間）において人工ピン止め点導入型線材の安定製造技術の確立と酸化物超電導電流リード設計に資する線材特性基準データの取得することで、成果の事業への展開を図る。並行して、高性能線材の量産化にともなうコスト低減、基板製造技術の確立及び装置増強により、プロジェクト終了後できるだけ早い時期に販売を開始し、2015年には年産50kmを実現する。中長期的にはさらなる高性能化、低コスト化とともに生産能力を増強し、量産化につなげる。応用のターゲットは、ケーブル、電流リード及び回転機等である。

2.4 標準化事業の今後の積極的展開

本プロジェクト活動を通して、国際規格素案の作成及び国際規格化をめざした国際合意醸成を行ってきており、IEC/TC90（超電導）やIEC/TC20（電力ケーブル）等の機関に情報を提供してきた。今後は、これらの成果を受けて、IEC/TC90 や IEC/TC20 において、国際規格化をめざした活動が継続して行われる。

超電導線材技術標準化については、超電導線材の通則について、本プロジェクトで作成した素案を基にIEC/TC90 から国際規格提案が行われNP（新業務項目提案）が承認されWG（ワーキンググループ）13 が設置された。今後は、IEC/TC90 において、平成25年度にCD2（委員会原案の第2版）の発行、平成26年にCDV（投票用委員会原案）の提案が行われ、それらを通してIEC国際規格化をめざした活動が行われる。また、Y系線材の短尺臨界電流測定に関して本プロジェクトで行われた国内RRT（ラウンドロビンテスト）の結果が平成24年8月のIEC/TC90 西安会議(@中国)においてIEC/TC90 のWG3 から紹介、議論されており、Y系線材の国際RRTを行うことが確認されている。これらの活動を通して国際規格化が進められる。

超電導電力ケーブル技術標準化については、本プロジェクト内でCIGRE（国際大電力システム会議）のガイドラインの検討を行い、その結果を受けたレコメンデーションが発行されている。今後は、IEC/TC90、IEC/TC20 に数人のボランティアが加わったジョイントアドホックタスクフォース(J ahTF)が設置され、超電導電力ケーブルとしての国際規格提案をめざしIEC/TC20 主導で活動が行われる。

超電導電力機器関連技術標準化については、IEC/TC90 とCIGRE D1（材料と新技術の研究委員会）との間でリエゾン関係が結ばれることになり、今後は、材料、絶縁及び冷却技術分野における高温超電導電力機器の共通事項について連携して活動していくことになった。今後は、本プロジェクトで行った技術動向調査、標準化ニーズ調査を基に、IEC/TC90 とCIGRE D1 のリエゾンにおいて、国際規格化をめざした活動が行われる。

超電導分野の国際標準化活動は、これまでは基盤的規格である超電導材料の試験方法規格を我が国が提案し成立させてきたが、今後は、超電導関連産業競争力、超電導関連市場創成拡大の観点から、本プロジェクトで得られた成果を基に高温超電導技術に関連した製品規格の標準化をめざすことにシフトしていく必要がある。

また、超電導デバイス分野についても研究開発と標準化とを一体的に推進していくとともに、超電導エレクトロニクス素子等に関して国際標準化をめざして調査研究を継続していく。

平成20・03・25産局第5号
平成20年4月1日

エネルギーイノベーションプログラム基本計画

1. 目的

資源に乏しい我が国が、将来にわたり持続的発展を達成するためには、革新的なエネルギー技術の開発、導入・普及によって、各国に先んじて次世代型のエネルギー利用社会の構築に取り組んでいくことが不可欠である。他方、エネルギー技術開発は、長期間を要するとともに大規模投資を伴う一方で将来の不確実性が大きいことから、民間企業が持続的な取組を行うことは必ずしも容易ではない。このため、政府が長期を見据えた将来の技術進展の方向性を示し、官民双方がこの方向性を共有することで、将来の不確実性に対する懸念が緩和され、官民において長期にわたり軸のぶれない取組の実施が可能となる。以下に5つの政策の柱毎に目的を示す。

1-1. 総合エネルギー効率の向上

1970年代以来、官民をあげて省エネルギーに取り組み、産業構造の転換や新たな製造技術の導入、民生機器の効率改善等により世界最高水準の省エネルギーを達成している。今後、「新・国家エネルギー戦略」に掲げる、2030年までにGDPあたりのエネルギー利用効率を約30%向上を実現していくためには、産業部門はもとより、全部門において、総合エネルギー効率の向上に資する技術開発とその成果の導入を促進する。

1-2. 運輸部門の燃料多様化

ほぼ100%を石油に依存する運輸部門は、我が国エネルギー需給構造上、最も脆弱性が高く、その需給構造の次世代化は、将来に向けた早急な対策が不可欠な課題となっている。

「新・国家エネルギー戦略」に掲げる目標（2030年に向け、運輸部門の石油依存度が80%程度となることを目指す）の実現のためにも、官民が中長期的な展望・方向性を共有しつつ、技術開発と関連施策を推進する。

1-3. 新エネルギー等の開発・導入促進

太陽光、風力、バイオマスなどの新エネルギーは、エネルギー源の多様化や地球温暖化対策の観点から重要である。しかし、現時点では経済性や出力安定性といった普及へ向けての課題が存在する。

そのため、これらの課題解決に向けた技術開発の推進及び新エネルギーの導入促進のための関連施策の実施により、更なる新エネルギーの普及を推進する。

1-4. 原子力等利用の推進とその大前提となる安全の確保

原子力発電は供給安定性に優れ、運用時にCO₂を排出しないクリーンなエネルギー源である。安全確保を大前提に核燃料サイクルを含む原子力発電を着実に推進する。

1-5. 化石燃料の安定供給確保と有効かつクリーンな利用

化石燃料資源の大宗を輸入に依存する我が国にとって、その安定供給の確保は国家安全保障に直結する課題である。このため、石油・天然ガス等の安定供給確保を目指し、我が国企業による資源国における資源開発等に対する支援等の施策を進めるとともに、その有効かつクリーンな利用を図る。

2. 政策的位置付け

エネルギー基本計画（2007年3月閣議決定）

重点的に研究開発のための施策を講ずべきエネルギーに関する技術及びその施策として、

1. 総合エネルギー効率の向上に資する技術
2. 原子力利用の推進とその大前提となる安全の確保に資する技術
3. 運輸部門のエネルギー多様化に資する技術
4. 新エネルギーに関する技術
5. 化石燃料の安定供給確保と有効かつクリーンな利用に資する技術

以上が位置づけられている。

新・国家エネルギー戦略（2006年5月）

世界最先端のエネルギー需給構造の実現を図るため

1. 省エネルギーフロントランナー計画
2. 運輸エネルギーの次世代化計画
3. 新エネルギーイノベーション計画
4. 原子力立国計画

以上の計画が位置づけられている。また、資源外交、エネルギー環境協力の総合的な強化を図るため、「総合資源確保戦略」が位置づけられている。

第3期科学技術基本計画（2006年3月閣議決定）

国の存立にとって基盤的であり国として取り組むことが不可欠な研究開発課題を重視して研究開発を推進する「推進4分野」であるエネルギー分野、分野別推進戦略（2006年3月総合科学技術会議）における「推進4分野」であるエネルギー分野に位置付けられている。

経済成長戦略大綱（2006年7月財政・経済一体改革会議）

資源・エネルギー政策の戦略的展開として

1. 省エネルギーフロントランナー計画
2. 次世代自動車・燃料イニシアティブ等による運輸エネルギー次世代化
3. 新エネルギーイノベーション計画
4. 原子力立国計画
5. 資源外交、環境・エネルギー協力等の総合的な強化

以上が位置づけられている。

京都議定書目標達成計画（2005年4月閣議決定）

「京都議定書の約束を達成するとともに、更に「脱温暖化社会」に向けて長期的・継続的な排出削減を進めるには、究極的には化石燃料への依存を減らすことが必要である。環境と経済の両立を図りつつ、これらの目標を達成するため、省エネルギー、未利用エネルギーの利用等の技術革新を加速し、効率的な機器や先進的なシステムの普及を図り、世界をリードする環境立国を目指す。」とされている。

3. 達成目標

3-1. 総合エネルギー効率の向上

転換部門における「エネルギー転換効率向上」、産業部門における「製造プロセス向上」、民生・運輸部門における「省エネルギー」などにより、エネルギー消費効率を2030年度までに少なくとも30%改善することを目指す。

3-2. 運輸部門の燃料多様化

バイオマス由来燃料、GTL、BTL、CTLなどの新燃料、電気自動車や燃料電池自動車などの導入により、現在ほぼ100%の運輸部門の石油依存度を2030年までに80%程度とすることを目指す。

3-3. 新エネルギー等の開発・導入促進

太陽光、風力、バイオマスなどの新エネルギーの技術開発や燃料電池など革新的なエネルギー高度利用を促進することにより、新エネルギー等の自立的な普及を目指すことで、エネルギー源の多様化及び地球温暖化対策に貢献する。

3-4. 原子力等利用の推進とその大前提となる安全の確保

2030年以降においても、発電電力量に占める比率を30～40%程度以上とすることを目指すため、高速増殖炉サイクルの早期実用化、既設軽水炉代替へ対応する次世代軽水炉の開発、軽水炉技術を前提とした核燃料サイクルの確立、放射性廃棄物対策などの技術開発を推進する。

3-5. 化石燃料の安定供給確保と有効かつクリーンな利用

石油・天然ガスの化石燃料の安定供給確保を目指し、資源獲得能力の強化に資する先端的な技術開発を推進するとともに、環境負荷低減のために化石燃料の効率的かつクリーンな利用を促進するための技術開発・導入を目指す。

4．研究開発内容

4 - . 総合エネルギー効率の向上

4 - - . 共通

(1) エネルギー使用合理化技術戦略的開発(運営費交付金)

概要

省エネルギー技術開発の実効性を高めるために、シーズ技術の発掘から実用化に至るまで、民間団体等から幅広く公募を行い、需要側の課題を克服し得る省エネルギー技術開発を戦略的に行う。

技術目標及び達成時期

中長期的視点に立った省エネルギー技術戦略を構築し、技術開発の相互連携によりシナジー効果が発揮され技術開発が促進されるよう、超燃焼システム技術、時空を超えたエネルギー利用技術、省エネ型情報生活空間創生技術、先進交通社会確立技術、次世代省エネデバイス技術の技術群に重点化して、省エネルギー技術戦略に沿った技術開発を戦略的に推進する。

研究開発時期

2003年度～2010年度

(2) エネルギー使用合理化産業技術研究助成事業(運営費交付金)

概要

産業界や社会のニーズに応える省エネルギー技術のシーズの発掘とその育成、並びに、省エネルギー技術に関する次世代の研究リーダーの育成を図る。この目的のため、産業界からの期待が高い技術領域・課題を提示した上で、大学や独立行政法人の研究者等から研究開発テーマを募集する。厳正な外部評価によって省エネルギー効果があり且つ独創的・革新的なテーマを選定し、研究者代表者個人を特定して助成金を交付する。

技術的目標及び達成時期

独創性のある研究者等を助成すると共に、中間評価ゲート方式が醸成する競争的環境の下で企業との連携を強化させることにより、10～15年後の実用化が有望な革新的省エネルギー技術の研究開発を促進する。本事業では革新的省エネルギー技術の実用化への第1歩となる特許について、助成期間終了後の出願比率を100%とすることを目標とするとともに、省エネルギー技術に関する次世代の研究リーダーの育成を図る。

研究開発期間

2000年度～

(3) 研究開発型中小企業挑戦支援事業(スタートアップ支援事業)

概要

省エネルギー対策に資する中小企業の優れた技術シーズ、ビジネスアイデアの事業化による創業・新事業展開を促進するため、実用化研究開発に要する経費(原材料費、直接人件費、機械装置費、知的財産取得費等)の一部を補助するとともに、補助事業を行う中小・ベンチャー企業等に対して中小企業基盤整備機構によるビジネスプランの具体化・実用化に向けたコンサルティング等を一体的に実施

する。

技術的目標及び達成時期

中小企業の技術開発を推進し、産業におけるエネルギー使用合理化技術の利用を図り、もって、中小企業の振興と経営の安定を促進する。

補助事業期間終了後2年後の採択企業の研究開発成果の事業化率50%を目標とするとともに、省エネルギー技術開発の高度化を戦略的に推進する。

研究開発期間

2004年度～

(4) 地域イノベーション創出エネルギー研究開発

概要

地域において新産業の創出に貢献し得るような最先端の技術シーズを基に、企業、公設試、大学等の研究開発資源を最適に組み合わせて形成された共同研究体が行うエネルギー使用の合理化並びに非化石エネルギーの開発及び利用に寄与する実用化研究開発の実施。

技術的目標及び達成時期

研究開発終了後3年後における成果の事業化達成率30%以上を目標とする。

研究開発期間

2008年度～2012年度

(5) イノベーション実用化補助事業(運営費交付金)(4 - - 参照)

(6) 非化石エネルギー産業技術研究助成事業(運営費交付金)(4 - - 参照)

4 - - . 超燃焼システム技術

(1) 環境調和型製鉄プロセス技術開発(運営費交付金)(再掲)

概要

高炉ガスからの効率的な二酸化炭素分離と中低温排熱の有効活用及び水素を炭素(コークス)の一部代替として鉄鉱石を還元する革新的製鉄プロセスの開発を行う。

技術的目標及び達成時期

最終的な技術開発目標として製鉄プロセスにおけるCO₂排出量を30%削減することを目指し、2050年までに実用化する。

研究開発期間

2008年度～2017年度

(2) 革新的ガラス溶融プロセス技術開発(運営費交付金)

概要

プラズマ等による高温を利用し瞬時にガラス原料をガラス化することにより、極めて効率的にガラスを気中で溶融(インフライトメルティング法)し省エネに資する革新的ガラス溶融プロセス技術を開発する。

技術的目標及び達成時期

2012年度までに、インフライトメルティング法により原料を溶解する技術、

カレットをガラス原料として利用するため高効率で加熱する技術、カレット融液とインフライトメルティング法による原料融液とを高速で混合する技術を開発する。

研究開発期間

2008年度～2012年度

(3) 革新的マイクロ反応場利用部材技術開発(運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、マイクロリアクター、ナノ空孔などの精密反応場を利用し、反応分子の自由な運動を活性種レベルで制御した革新的な化学反応プロセスと新機能材料創成技術の確立を目指す。さらに、マイクロリアクターとナノ空孔反応場の組み合わせ、各反応場とマイクロ波等のエネルギー供給手段との組み合わせにより協奏的反応場を構成し、さらなる高効率生産等を可能にする基盤技術を開発する。これらの技術の確立により、反応システムの小型化、多段プロセスの簡略化等を通じた化学産業の製造工程等の省エネルギー化を図る。

技術的目標及び達成時期

2010年度までに、マイクロリアクター技術、ナノ空孔技術を軸とし、これらに更にマイクロ波、超臨界流体等のエネルギー供給手段を組み合わせた協奏的反応場を構成することにより、これまでにない革新的な化学反応プロセスを確立し、新機能材料創成技術を実現する。さらに、これらの技術を用いて高性能・高機能電子材料、医薬中間体などの部材を開発する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(4) 植物機能を活用した高度モノ作り基盤技術開発

i) 植物利用エネルギー使用合理化工業原料生産技術開発(運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、現在の化学工業プロセスに代わる、植物の有する有用物質生産能を活用した省エネルギー・低環境負荷型の工業原料生産プロセスへの変換を促進する。具体的には、工業原料の生産に関わる重要な物質生産プロセスに関する代謝系をゲノム情報に基づき解析するとともに、有用物質生産制御に必要な一連の代謝遺伝子群の発現を統一的に制御する技術の開発を行う。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、工業原料として有望なバイオマスとしてイソプレノイド、油脂などの有用物質生産に関わる代謝経路とその調節メカニズム及び生産物質の蓄積・移動に係るメカニズムの解析を行い、関連遺伝子情報を整備するとともに、統括的発現制御技術を開発する。

研究開発期間

2002年度～2009年度

(5) 鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化基盤研究開発(運営費交付金)

概要

プラント、構造物や自動車等の革新的な高効率化、省エネルギー化、長寿命化、安全・安心化を図るため、最新の科学的知見を導入し、鉄鋼材料及び鋼構造体を超高機能化する基盤的研究開発を行う。具体的には、高強度鋼、高機能鋼の実用化拡大の基盤となる(1)高級鋼厚板(高強度鋼、極低温用鋼、耐熱鋼)溶接部の信頼性・寿命を大幅に向上する溶接施工技術(高密度・清浄熱源溶接技術)及びクリープ破壊、金属組織制御技術を基本とする溶接材料技術(クリープ破壊及び水素破壊の機構解明等を踏まえた)の開発、(2)部材の軽量化を図るために強度、加工性等の最適機能傾斜を付与する機械部品鍛造技術(駆動部材の信頼性確保のための耐疲労破壊特性の向上を踏まえた)の開発を行う。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、高級鋼厚板(高強度鋼・極低温用鋼・耐熱鋼)の溶接を予熱・後熱なしに可能とする溶接技術と材料技術を開発するとともに、傾斜機能部材の鍛造技術を開発する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(6) 高機能チタン合金創製プロセス技術開発プロジェクト

概要

大量の電力を必要とする従来のバッチ処理方式のチタン製錬法(クロール法)を、エネルギー効率の高い連続処理方式へ転換する抜本的なプロセス改善のための技術を開発する。また、併せて、成形性の高いチタン合金設計技術及び成形プロセス技術を開発する。

技術目標及び達成時期

2008年度までに省エネ型チタン新製錬プロセスの基盤技術を開発し、2010年までに実用化を目指す。また、本製錬技術により得られるチタンをベースとして、加工性、強度等をさらに向上させた合金設計・成形プロセス技術を確立する。

研究開発期間

2005年度～2008年度

(7) 革新的分離膜技術の開発

概要

河川水等の浄水工程における、微量の有害物質、微生物等の除去に係る水処理技術のうち、分離膜方式による高効率(省エネ)な分離技術を開発する。

技術目標及び達成時期

2013年度末までに、現行の分離膜に比較して単位処理水量当たり50%のエネルギー削減を図る技術を確立する。

研究開発期間

2008年度～2012年度

(8) 微生物機能を活用した環境調和型製造基盤技術開発

i) 微生物機能を活用した高度製造基盤技術開発 (運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、省エネルギーかつ環境負荷が少ないといった特徴を有する微生物機能を活用した有用物質の革新的な生産プロセス (モノ作り) の技術を構築するため、産業用途に必要な機能既知遺伝子で構成されたゲノムを持ち、物質生産性向上につながる性能を備えた高性能宿主細胞の創製や、微生物反応の多様化・高機能化技術を開発するとともに、バイオマスを原料として有用物質を体系的かつ効率的に生産する (バイオリファイナリー) ための基盤技術を開発する。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、物質生産性向上につながる性能を備えた高性能宿主細胞を創製するとともに、バイオプロセスの実用化適用範囲の拡大のための微生物反応の多様化・高機能化技術の開発を行う。バイオリファイナリー技術については、バイオマスを高効率で糖化し、糖から高効率で各種化成品の基幹物質を生産するバイオプロセス体系を構築する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

ii) 微生物群のデザイン化による高効率型環境バイオ処理技術開発 (運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、従来エネルギー多消費・廃棄物多排出型であった廃水・廃棄物処理において、微生物群の構成及び配置等を人為的に制御 (デザイン化) することで、その処理効率を大幅に向上させ、省エネルギーで廃棄物も少ない高効率型廃水、廃棄物処理の基盤技術を確立する。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、特定有用微生物群を人為的に安定導入・維持もしくは人為的に空間配置・優先化させる等のデザイン化技術を開発し、従来の廃水、廃棄物処理に比べより高効率で省エネルギーな処理技術を開発するとともに、実用化に資するための実証可能なテストプラント規模にて評価する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(9) 省エネルギー型化学技術創成研究開発補助事業

概要

化学産業はそれ自身が裾野の広い産業というだけでなく、自動車、IT機器等の川下製品の部材として産業界・国民生活の様々な分野に深く関連している。従って化学業界において、省エネポテンシャルの大きい有望な技術シーズがありながら民間だけでは十分な研究開発投資が行われていない技術について、戦略的な研究開発支援を実施することにより、化学産業のみならず、各種最終製品、他産業においてエネルギー効率の改善を促進する。

技術的目標及び達成時期

2007年度までに、化学分野の生産プロセスや、製品等に関する環境に配慮した省エネルギー技術の革新に向けて、国内・国際市場の創出・拡大も見据えつつ、将来の発展が有望な技術に関する研究開発を行うことにより、化学産業のみならず、我が国の省エネルギー対策に一層寄与する。

研究開発期間

2004年度～2010年度

(10) 高効率酸化触媒を用いた環境調和型化学プロセス技術開発プロジェクト

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、N-オキシ系触媒等の炭素ラジカル創生触媒を化学反応プロセスに適用し、製造工程の短縮や製造効率の向上を図ることで、温暖化効果ガスの排出抑制や省エネルギー効果など総合的なプロセスコストを低減させるため要素技術の開発を行う。

技術的目標及び達成時期

2008年度までにカルボン酸、アルコール、ケトンなどの含酸素化合物製造プロセスに対し、N-オキシ系触媒を適用していくため、現状の触媒活性・選択性の向上、触媒の安定性・寿命の改善、触媒分離プロセスの効率化等を開発する。

研究開発期間

2005年度～2008年度

(11) エネルギー使用合理化繊維関連次世代技術開発

概要

製造エネルギーの低減を図ることができる革新的な繊維製品製造技術の開発や、使用することでエネルギー消費の低減が可能となる新たな繊維製品を開発。

技術的目標及び達成時期

2009年度までに、以下の開発を行う。

炭素繊維製造エネルギー低減技術の研究開発

廃棄衣料のリサイクル技術及び高付加価値商品の開発

排水処理における余剰汚泥の減容化技術開発

次世代資材用繊維の開発

ポリエチレンテレフタレート製造エネルギー低減技術の開発

VOC含有廃棄物の溶剤回収及び再利用処理技術の開発

研究開発期間

2005年度～2009年度

(12) 無曝気・省エネルギー型次世代水資源循環技術の開発（運営費交付金）

概要

所用動力が少なく、汚泥発生も少ない嫌気性処理の利点と、良好な水質が得られる好気性処理の利点の双方の特長を生かし、かつ双方の欠点を克服した、省エネルギー性に優れた廃水処理技術を開発する。

技術目標及び達成時期

2008年度までに、既存技術で廃水処理を行った際に発生する汚泥量の70%削減を実現し、廃水処理に要するエネルギーの70%削減を実現する廃水処理システムを開発する。

研究開発期間

2006年度～2008年度

(13) 高効率ガスタービン実用化技術開発

概要

省エネルギー及びCO₂削減の観点から電力産業用高効率ガスタービンの実用化を目指し、大容量機(25万kW程度(コンバインド出力40万kW))の高効率化(52%～56%)のために1700級ガスタービンの実用化に必要な先端要素技術を適用した各要素モジュールの検証等を実施する。また、小中容量機(10万kW程度)の高効率化(45%～51%)のために有望とされている高湿分空気利用ガスタービンの実用化に必要な多段軸流圧縮機、多缶燃焼器等の開発を行うとともにシステムの信頼性等の検証を行う。

技術的目標及び達成時期

1700級ガスタービン実用化技術開発：先端要素技術を活用した燃焼器、タービン、圧縮機等各モジュールの検証等を行い、送電端熱効率56%以上の達成が可能なことを確認する。

高湿分空気利用ガスタービン実用化技術開発：2011年までに軸流圧縮機の3.5%(空気重量比)吸気噴霧冷却技術、低NO_x燃焼技術(運用負荷帯で10ppm以下)等を開発すると共に、実機に近い条件での要素機器の信頼性・耐久性を確認する。

研究開発期間

2008年度～2011年度

(14) エネルギー使用合理化高効率パルプ工程技術開発(運営費交付金)

概要

紙パルプ産業では、環境に関する自主行動計画に基づき、2010年度までに製品当たり化石エネルギー原単位を1990年度比13%削減し、CO₂排出原単位を10%削減することを目指し、紙パルプ工程における省エネルギー対策を着実に進めているものの、より一層の省エネルギー対策を進めるためには、技術開発によるブレークスルーが必要となっている。紙パルプ産業は、エネルギー多消費型産業のひとつであり、紙パルプ工程での省エネルギー対策は波及効果が大いことから、紙パルプ工程におけるエネルギー使用合理化に資する技術開発を提案公募により実施する。

技術的目標及び達成時期

京都議定書の第1約束期間中、又は、第2約束期間中を目途として実用化に至るような技術開発を行うことで、京都議定書の第1約束期間の目標を着実に達成するとともに、現在、検討が行われている第2約束期間に向けた省エネルギー対策の更なる深化を進めていく。

研究開発期間

2005年度～2010年度

- (15) 発電プラント用超高純度金属材料開発(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (16) 先進超々臨界圧火力発電実用化要素技術開発(4 - - 参照)
- (17) 噴流床石炭ガス化発電プラント開発(4 - - 参照)
- (18) 石油精製高度機能融合技術開発(4 - - 参照)

4 - - . 時空を超えたエネルギー利用技術

- (1) カーボンナノチューブキャパシタ開発プロジェクト(運営費交付金)

概要

従来の活性炭電極では不可能な高出力かつ高エネルギー密度の電気二重層キャパシタを実現するため、高度に配向した長尺の単層カーボンナノチューブの大量合成技術を開発するとともに、これを用いたキャパシタ電極の開発を行う。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、単層カーボンナノチューブの高度配向技術及び大量生産技術を確立するとともに、キャパシタ製造技術を確立することで、20Wh/Kgの高エネルギー密度と耐久性を有する電気二重層キャパシタを開発する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

- (2) イットリウム系超電導電力機器技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (3) 高温超電導電力ケーブル実証プロジェクト(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (4) 固体酸化物形燃料電池実用化戦略的技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (5) 燃料電池先端科学研究(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (6) 新利用形態燃料電池技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (7) 固体酸化物形燃料電池システム要素技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (9) 水素貯蔵材料先端基礎研究事業(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (8) 水素製造・輸送・貯蔵システム等技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (10) 固体酸化物形燃料電池実証研究(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (11) 風力発電電力系統安定化等技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (12) 大規模電力供給用太陽光発電系統安定化等実証事業(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (13) 次世代蓄電システム実用化戦略的技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)

4 - - . 省エネ型情報生活空間創生技術

- (1) グリーンITプロジェクト(運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、IT化の進展により、ネットワークを流れるデータ量が大幅に増加する中で、IT機器による消費電力量の大幅な増大に対応し、環境調和型IT社会の構築を図るため、個別のデバイスや機器に加え、ネットワーク全体での革新的な省エネルギー技術の開発を行う。

技術的目標及び達成時期

2012年度までに、IT機器・システムのエネルギー消費効率を2倍に向上させる基盤技術を開発する。

研究開発期間

2008年度～2012年度

(2) 次世代高効率ネットワークデバイス技術開発(運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、ネットワークで伝送されるデータ量の爆発的増加に伴い、関連機器の消費エネルギーが増大している中で、ネットワーク全体の消費電力量を抑制することが喫緊の課題であり、消費エネルギーの低減に大きく貢献するルータ・スイッチの高速化のための研究開発を実施するとともに、機器そのものの消費エネルギーを低減するための研究開発を実施する。

技術的目標及び達成時期

2011年度までに、1チャンネルあたり40Gbps超の通信速度に対応するトラフィック計測・分析・管理技術や40Gbpsのインターフェース、さらなる通信速度向上(100Gbps超)を実現するハードウェア技術、SFQ(単一磁束量子)スイッチに関する実現を可能とするための基盤技術を開発する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(3) 次世代大型低消費電力ディスプレイ基盤技術開発(運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、次世代の大型液晶及び大型プラズマディスプレイに関する低消費電力ディスプレイを実現するための研究開発を行う。

技術的目標及び達成時期

2011年度までに、液晶に関しては、高効率バックライト、革新的なTFTアレイプロセス技術・製造装置及び低消費電力型の画像処理エンジン等に係る技術を確立する。また、プラズマディスプレイに関しては、超低電圧駆動等に係る技術を確立する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(4) 有機発光機構を用いた高効率照明の開発(運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、蛍光灯に代わる高効率照明として有機EL発光機構を用いるための技術開発課題(発光効率、演色性、面均一性、生産コスト)等を明らかにし、それをブレークスルーしうる技術シーズを抽出する。

技術目標及び達成時期

2009年までに現在一般に普及している蛍光灯照明に代わる高効率照明としての必要スペックを達成するとともに、次世代照明として同じく期待されているLEDとの差別化要素を技術的に達成し、大面積/高スループット/低コストで量産するプロセス技術を開発する。また、現在蛍光灯の間接・拡散照明が用いられている照明機器を代替する有機EL照明を実用的なコストで製造できる技術を確立する。

研究開発期間

2007年度～2009年度

(5) マルチセラミックス膜新断熱材料の開発(運営費交付金)

概要

住宅やビルなどの冷暖房における大幅な省エネを実現する画期的な断熱性能を示す壁および窓材料を、セラミックスのナノ多孔体構造やナノ羽毛状構造およびセラミックス・ポリマー複合化構造などからなるマルチセラミックス膜アセンブリ技術によって開発する。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、熱貫流率(熱の伝わりやすさ)が $0.3\text{ W/m}^2\text{K}$ 以下、壁厚さ10mm程度の超断熱壁材料および熱貫流率が $0.4\text{ W/m}^2\text{K}$ 以下、光(可視光)透過率が65%以上(Low-Eガラス使用)、ヘイズ率が1%以下の超断熱窓材料を実現する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(6) 超フレキシブルディスプレイ部材技術開発(運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から、製造工程等の省エネルギー化を実現するために行う。従来、表示デバイスの製造には、真空蒸着と高温下での焼成と、それに伴う排ガス排水処理が必須であった。これを、ロールtoロール方式に代替することで常圧、常温下での製造を実現し、フレキシブルな薄型ディスプレイを効率よく製造する。そのために、有機TFT材料およびコンタクトプリント技術等を開発する。

技術的目標及び達成時期

2009年度までに、実用化に向けた実証のための巻き取り方式ディスプレイのプロトタイプを試作する。またフレキシブルデバイス材料開発に貢献する部材ならびに薄膜複合化技術を開発し、これらをパネル化するための実用化技術を確立する。

研究開発期間

2006年度～2009年度

(7) 低損失オプティカル新機能部材技術開発(運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、近接場光の原

理・効果を応用した低損失オプティカル新機能部材技術を開発し、実用化の目処を得ることを目的とする。動作原理に近接場光を用いるオプティカル新機能部材は、従来の材料特性のみに依存した光学部品では不可能な機能・性能を発揮し、液晶プロジェクター・液晶ディスプレイなど情報家電の省エネルギー、高性能・高信頼化を図る上でのキーデバイスとなることが期待できる。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、共通基盤技術として、ナノ構造部材の設計・作製・評価技術を開発するとともに、ナノ構造部材に発現する近接場光の機能を動作原理とする低損失オプティカル新機能部材を検討し機能を確認する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(8) 高環境創造高効率住宅用VOCセンサ等技術開発(運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、住宅における換気負荷を最小化することによって省エネルギーを達成するため、VOCセンサ及びモニタリング併用型換気システム等を開発する。

技術目標及び達成時期

2008年度までに、VOCに対して高選択性・高感度性・即応性を有するVOCセンサ及びVOCセンサを用いたモニタリング併用型換気システム等を開発する。

研究開発期間

2005年度～2008年度

(9) 革新的構造材料を用いた新構造システム建築物研究開発

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、我が国鉄鋼業の約50%を占める建設市場において、建築物のメインフレームに高強度鋼を用いることで、鉄鋼部材の軽量化(リデュース)とそれに伴う輸送効率の向上、高強度化、非溶接化に伴う部材のリユース促進、製造・施工の省エネ・省力化等を図る。

同時に、柔剛混合構造(高強度鋼とダンパーの組み合わせ)技術の確立、関連法規への対応等により、震度7にも耐えうる新構造システム建築物の建設が可能となり、我が国で大きなリスクである大規模地震災害から国民を守り、安心安全社会の実現に寄与する。

技術目標及び達成時期

2013年度までに、最大規模の地震(震度7)に対しても倒壊・損壊しない建築物を高強度鋼(800N/mm²級鋼材)とダンパーの組み合わせによる柔剛混合構造により実現を図るものであり、国土交通省や民間企業と連携してこの建築物のメインフレームに必要な高強度鋼部材、接合法等の開発を行う。主な研究開発目標は以下の通りである。

・震度7弾性新構造システム開発

- ・高強度部材の製造技術開発
- ・超高強度接合部品開発
- ・高強度部材の接合技術開発

研究開発期間

2006年度～2008年度

(10) 次世代光波制御材料・素子化技術(運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、ガラス材料に関する精密モールド技術を確立し、機能性の高い光波制御素子を低コストで生産できるプロセス技術を開発することで部材の小型化・高機能化を図りつつ、省エネを実現する。

技術目標及び達成時期

2010年度までにサブ波長レベルの微細構造をガラス表面にモールド成形する技術を実現し、実装可能な具体的なデバイスを作製する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

4 - - . 先進交通社会確立技術

(1) エネルギーITS(運営費交付金)

概要

平成19年5月の「次世代自動車・燃料イニシアティブ」に基づき、運輸部門のエネルギー消費効率改善のため、自動運転・隊列走行技術、高度交通流制御技術等の省エネルギーに資するITS技術の開発を行う。

技術的目標及び達成時期

2012年度までにプローブ情報を利用した信号制御機能の実用化を図るとともに、2020年代に実用化が見通せる運転制御、隊列走行の基盤技術の確立を目指す。

研究開発期間

2008年度～2012年度

(2) 革新的次世代低公害車総合技術開発(運営費交付金)

概要

大気環境・地球温暖化・エネルギー問題の同時解決に向けて、次世代の低公害車の技術開発を実施する。

特に、都市間の輸送に用いられる「都市間トラック・バス」を中心とした分野における要素技術の開発を自動車技術・燃料技術の両面から実施していく。

技術目標及び達成時期

平成20年度において、都市間の輸送に用いられる「都市間バス・トラック」を中心とした分野における次世代低公害車の要素技術を確立する。具体的には、以下のとおり。

- ・燃費向上率

貨物車 現行基準値に対して10%

乗用車 2015年基準値に対して20%

・排出ガス

貨物車 NOx：ディーゼル重量車のポスト新長期（挑戦目標）規制値

PM：ディーゼル重量車のポスト新長期規制値

乗用車 NOx：ガソリン車のポスト新長期規制値

PM：ガソリン車のポスト新長期規制値

研究開発時期

2004年度～2008年度

(3) サステナブルハイパーコンポジット技術の開発（運営費交付金）

概要

炭素繊維複合材料は、軽量、高強度等の優れた特性を有している。従来の熱硬化性樹脂を用いた炭素繊維複合材料では成形性・加工性に乏しくリサイクルが困難であったため、熱可塑性樹脂を用いた炭素繊維複合材料（CFRP）の開発を行う。

技術目標及び達成時期

2012年度までに、炭素繊維と熱可塑性樹脂との中間基材を開発し、熱可塑性CFRP加工技術を開発する。

研究開発時期

2008年度～2012年度

(4) 次世代構造部材創製・加工技術開発（次世代航空機用）

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、航空機、高速車両等の輸送機器への先進材料の本格導入を加速させるため、先進複合材料及び先進金属材料について部材開発、設計試作及び評価を実施することで、軽量化によりエネルギー使用効率を大幅に向上させる革新的な構造部材の創製・加工技術の開発を行う。

技術目標及び達成時期

2012年度までに、複合材の構造健全性診断技術、チタン合金の創製・加工技術を確立するとともに、航空機用エンジンへの適用を目指し、耐熱・耐衝撃性に優れた複合材料を開発する。

研究開発期間

2003年度～2012年度

(5) 環境適応型小型航空機用エンジン研究開発（運営費交付金）

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、エネルギー使用効率を大幅に向上し、環境対策にも優れた次世代の小型航空機用エンジンの開発にとって重要な要素技術の研究開発を行う。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、エネルギー使用効率を大幅に向上する構造設計技術、騒音、NOx等の環境負荷対応に優れた環境対策技術、インテグレーション技術、高バイパス比化等の高性能化技術といった要素技術の研究開発・実証を行う。

研究開発期間

2003年度～2010年度

(6) 省エネ用炭素繊維複合材技術開発

概要

航空機、自動車、鉄道、船舶等の輸送機械等における炭素繊維複合材の適用範囲を拡大し、省エネルギーの促進を図るため、先進的な炭素繊維複合材成形技術や、耐雷対策の低コスト化技術等の研究開発・実証を行う。

技術目標及び達成時期

2013年度までに、従来の方法に比べ低コストであり、曲率の大きな部位の成形も行うことができるVaRTM(バータム)法等の炭素繊維複合材成形技術や、炭素繊維複合材を用いた製品の耐雷性能を低コストで確保する技術の研究開発・実証を行う。

研究開発期間

2008年度～2013年度

(7) 燃料電池システム等実証研究(4 - - 参照)

4 - - . 次世代省エネデバイス技術

(1) パワーエレクトロニクスインバータ基盤技術開発(運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、省エネルギーを進めるために、シリコンよりも材料特性に優れたワイドギャップ半導体デバイスを用いた高効率インバータ等の実用パワーエレクトロニクス機器システムの基盤技術の開発を行う。

技術目標及び達成時期

2008年度までに、ワイドギャップ半導体デバイスを用いた高効率インバータ等の実用パワーエレクトロニクス技術を開発する。

研究開発期間

2006年度～2008年度

(2) ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発 - うち窒化物系化合物半導体基板・エピタキシャル成長技術の開発(運営費交付金)

概要

窒化物系化合物半導体は日本が強みを有し、パワーデバイス、高周波デバイス、発光デバイス等、今後のIT社会を支えとなることを期待されている分野である。しかし、既存のバルク単結晶基板成長技術やエピタキシャル成長技術では、従来の半導体では実現できない領域で動作可能なハイパワー、超高効率デバイス性能を十分に引き出すには至っていない。

これを突破するため、大学あるいは研究所を拠点に材料メーカー、デバイスメーカー、装置メーカー等が相互連携して、窒化物半導体の結晶欠陥低減技術やナノ構造作製技術等の革新を図り、これらデバイスの飛躍的な性能向上と消費電力削減の実現を図る。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、次世代窒化物系半導体デバイスを実現する以下結晶作製技術を開発する。

- ・ 基板技術（GaN、AlNバルク結晶作製技術）
 - 口径2～4インチで高品質エピ成膜を可能とする低コストの単結晶基板作製技術の確立。
- ・ エピ技術（エピタキシャル成膜及び計測評価技術）
 - 低欠陥高品質エピ層を実現する成膜技術及び膜成長過程を計測評価する技術の確立。
 - 高出力かつ高安定動作可能なエピ層の実現
 - 高耐圧超高速な新しいデバイス構造の開発

研究開発期間

2007年度～2011年度

(3) 次世代低消費電力半導体基盤技術開発(MIRAI)(運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、IT化の進展、IT利活用の高度化を支え、あらゆる機器に組み込まれている半導体の低消費電力化を図るため、テクノロジーノード(微細化レベル)45nm以細の次世代低消費電力半導体を実現するため、微細加工の基盤技術やマスク(半導体素子製造過程で用いる原板)の低コスト化・製造時間短縮に必要な基盤技術の開発等を行う。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、マスク設計・描画・検査の各工程に共通的なマスクデータ処理技術、繰り返しパターンやパターン重要度を利用した描画・検査高速化技術等の基本的な開発及びEUVLマスク基盤技術として、許容欠陥の指標明確化、ブランクスの位相欠陥検査技術の確立等を完了する。

研究開発期間

2001年度～2010年度

(4) 半導体アプリケーションチッププロジェクト(運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、IT化の進展、IT利活用の高度化を支え、あらゆる機器に組み込まれている半導体の低消費電力化を図るため、情報通信機器、特に、情報家電の低消費電力化を実現できる半導体アプリケーションチップ技術の開発を行う。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、情報家電の低消費電力化を実現できるアプリケーション

チップ技術を開発する。

研究開発期間

2003年度～2009年度

(5) 次世代高度部材開発評価基盤の開発 (CASMAT2) (運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。半導体産業分野で、集積回路の消費電力低減に必要な配線形成用各種材料等の開発のネックとなっているナノレベルでの材料間の相互影響を評価可能な統合部材開発支援ツールを開発する。これにより、集積回路の種類やデザインルールに応じて、配線形成用各種材料とプロセスの最適な組み合わせの提案技術(統合的材料ソリューション提案技術)を確立する。

技術的目標及び達成時期

2008年度までに、半導体材料開発に貢献する材料評価基盤を構築するとともに、上記の統合的材料ソリューション提案技術を確立する。また、本プロジェクトを通して得られた基礎データ等については、プロジェクト実施期間中にデータを体系的に整理し、幅広く社会に提供を図る。

研究開発期間

2006年度～2008年度

(6) 次世代プロセスフレンドリー設計技術開発 (運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、IT化の進展、IT利活用の高度化を支え、あらゆる機器に組み込まれている半導体の低消費電力化を図るため、テクノロジーノード45nm以降の半導体に対応するSoC(System on Chip)設計技術を開発する。具体的には、テクノロジーノード45nm以細の半導体の共通設計基盤技術開発として、DFM(Design For Manufacturing)基盤技術を中核とした設計及び製造の全体最適を確保する全く新しいSoC製造フローを開発する。

技術目標及び達成時期

テクノロジーノード45nm以細のSoC開発において製造性を考慮した共通設計基盤技術を確立し、システムLSIデバイスの省エネルギーを実現するとともに、設計生産性を従来予想に比べ2倍にすることを目標とする。

研究開発期間

2006年度～2010年度

4 - - . その他

(1) 希少金属等高効率回収システム開発

概要

小型電子・電気機器にはベースメタルや、金、銀等の貴金属の他、インジウム、ニッケル等の希少金属等を含有している。現状では、これらの機器が廃棄された後は、非常に高温で処理する乾式製錬技術を用いてリサイクル・処理されている

ため、多大なエネルギーを消費するばかりか、回収可能な金属が銅、金、銀等に限定されており、その他の希少金属等は回収できずに廃棄処分されている。このため、湿式製錬技術を活用した高効率な最適技術の開発等を通じて、回収工程の省エネルギー及び希少金属等の回収率向上を図る。

技術目標及び達成時期

- ・ 従来方法（乾式製錬）で処理する場合に比べて、大幅な省エネルギーの実現（省エネルギー効果：原油換算で約78万kl/年削減）
- ・ 廃小型電子・電気機器、廃超硬工具等中に含まれる希少金属等の回収率の向上（インジウム0% 90%、ニッケル50% 95%、コバルト0% 95%、タンタル0% 80%、タングステン90% 95%、レアアース0% 80%）

研究開発期間

2007年度～2010年度

（2）次世代構造部材創製・加工技術開発（次世代衛星基盤）

概要

国際商業市場における我が国衛星メーカーの競争力を強化するべく、次世代の衛星技術として期待されている、準天頂衛星システム（移動中の利用者等に対し、米国が運用するGPSとの補完による高精度な位置情報等の提供を可能にする新システム）の構築に不可欠な基盤技術（産業競争力強化にも直結する衛星の軽量化、長寿命化に関する技術等）の開発を行う。本プロジェクトの一部については、他部門と比較して需要増加の割合が高い運輸部門のエネルギー消費を抑制すべく、航空機、自動車、高速車両等の輸送機器の軽量化・効率化にも資する複合材料製造設計のための基盤技術を確立するためのものであり、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

静止軌道と一定の角度をなす傾斜軌道に複数の衛星を配置し、見かけ上、常に天頂付近に最低1つの衛星を位置させるシステム。

技術的目標及び達成時期

2010年度までに、準天頂衛星システムの構築に不可欠な基盤技術（産業競争力強化にも直結する衛星の軽量化、長寿命化に関する技術等）の開発を行う。

研究開発期間

2003年度～2010年度

（3）高効率重金属処理剤研究開発

概要

重金属等によって汚染された土壌、飛灰、ばいじん、排水・廃液等を安全かつ経済的に処理する技術開発として、少量の使用で重金属等を安定的かつ効率的に捕捉できる複合金属汚染土壌のオンサイト処理に適した高性能の無機系重金属等処理剤及び自然環境への負荷が少ない新規有機系処理剤を開発する。

技術的目標及び達成時期

2008年度までに、飛灰における金属選択性が高く安価な重金属等処理・回収剤及び排水中における亜鉛や6価セレンなどを処理できる重金属等処理剤を開発する。

研究開発期間

2003年度～2008年度

4 - . 運輸部門の燃料多様化

4 - - . 共通

- (1) イノベーション実用化補助事業(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (2) 非化石エネルギー産業技術研究助成事業(運営費交付金)(4 - - 参照)

4 - - . バイオマス由来燃料

- (1) 新エネルギー技術研究開発(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (2) E3地域流通スタンダードモデル(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (3) バイオマス等未活用エネルギー実証事業(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (4) バイオマスエネルギー地域システム化実験事業(運営費交付金)(4 - - 参照)

4 - - . G T L等の合成液体燃料

- (1) 革新的次世代低公害車総合技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (2) 天然ガス未普及地域供給基盤確立実証試験(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (3) 天然ガスの液体燃料化(G T L)技術実証研究(運営費交付金)(4 - - 参照)

4 - - . 燃料電池自動車および水素関連技術

- (1) 固体高分子形燃料電池実用化戦略的技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (2) 燃料電池先端科学研究(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (3) 新利用形態燃料電池技術開発(運営費交付金)(4 - 参照)
- (4) 水素製造・輸送・貯蔵システム等技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (5) 水素貯蔵材料先端基盤研究事業(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (6) 水素社会構築共通基盤整備事業(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (7) 燃料電池システム等実証研究(4 - - 参照)

4 - - . 電気自動車

- (1) 次世代蓄電システム実用化戦略的技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)

4 - . 新エネルギー等の開発・導入促進

4 - - . 共通

- (1) 新エネルギー技術研究開発(運営費交付金)

概要

新エネルギーの自立的普及に向けて、太陽光、風力、バイオマスなど新エネルギー分野でのイノベーションを促進すべく、高効率かつ低コストを目指した先進的技術開発を実施する。具体的には以下の研究開発を実施する。

- A. 革新的な太陽電池の開発を実施する研究拠点を形成し、海外との研究協力等を行いながら、超長期の視野に立って、飛躍的な性能向上を目指した太陽光発電技術の開発を推進する。(革新型太陽電池国際研究拠点整備事業)
- B. 中長期的に、より一層の高効率化と低コスト化を目指して、革新的な材料、構造等を採用した太陽光発電技術の開発を推進する。(太陽光発電システム未来技術研究開発)

- C．2020年の目標発電コスト14円/kWhおよび太陽光発電システムの大幅な効率向上を実現すべく、未来技術研究開発などで得られた要素技術開発の成果の内、実用化が期待できる太陽電池作製に係る技術について課題を設定し早期実用化を助成する。(太陽光発電システム実用化促進技術開発)
- D．電力供給源としての太陽光発電の信頼性を確立し、今後の太陽光発電システムの円滑な普及促進を図るため、太陽光発電システムの大量普及時に不可欠な性能評価技術やリサイクル・リユース技術等システムの共通基盤技術に係る研究等を実施する。(太陽光発電システム共通基盤技術研究開発)
- E．PVシステムの普及拡大のため、「集中連系型太陽光発電システム実証研究」の設備を有効利用しながら、認証制度にも資する複数台連系に係わる試験方法を確立する。(単独運転検出装置の複数台連系試験技術開発研究)
- F．風力発電技術の国際的な動向を把握しつつ、我が国の複雑地形における風力発電利用上の各種課題を克服するための基礎から応用までの技術について研究開発を行う。具体的には我が国の厳しい風特性を反映した風特性モデルの確立及び高々度風況観測を簡便に行うためのリモートセンシング技術の精度検証・評価を行う。
- また、全国規模での落雷電流計測、落雷様相観測による雷特性の把握、落雷特性・落雷保護対策と被害実態との相関把握、上記を踏まえた効果的な落雷保護対策の検討及び実機規模での実雷による保護対策検証等を実施し、高精度落雷リスクマップを作成するとともに、風力発電設備へのより効果的な落雷等に対する対策を策定する。(次世代風力発電技術研究開発事業)
- G．我が国特有の海上特性や気象・海象条件を把握し、これらの自然条件に適した洋上風況観測法や風力発電システムに関する技術開発とその実証を行なうと共に、環境影響評価システム手法を確立する。(洋上風力発電技術研究開発)
- H．バイオマスのエネルギー利用の促進を図るためには、発生地域が分散し、形状・性状が多種多様にわたるバイオマス資源を利用しやすい形態の有用エネルギーへ効率的に転換できる技術を開発する。(バイオマスエネルギー等高効率転換技術開発)
- I．世界的にもベンチャー企業による太陽光発電、新型風力発電、燃料電池、バイオ燃料分野におけるイノベーション活動が活発化していることを踏まえ、詳細目標設定・多段階選抜形の米国SBI R制度を参考に特定のキーテクノロジーに対するベンチャーのチャレンジを強力に支援する。(新エネルギーベンチャー技術革新事業)

技術目標及び達成時期

- A．2050年までに「変換効率が40%超」かつ「発電コストが汎用電力料金並み(7円/kWh)」の太陽電池を実用化することを目指した研究開発の中で、変換効率40%超の実現に向けた技術の基礎・探索研究段階と位置づけて研究開発を実施する。
- B．2020年頃に業務用電力料金並の発電コスト(14円/kWh、モジュール製造原価として75円/W程度)、2030年頃に火力発電の発電コスト(7円/kWh、モジュール製造原価として50円/W程度)の実現に向けた中・長期的な技術開発を行う。

- C. 2015年に向けて市場競争力を備えた本格生産・商用化を目指す。
- D. 2020年度の技術開発目標である発電コスト14円/kWhを目指し、中期的な視点での太陽光発電の普及拡大に資する。
- E. 2009年度末までに、電力系統側が受け入れ可能な、導入台数の制限のない能動型単独運転検出装置の試験方法を確立する。
- F. 2012年度までに、風力発電の基礎から応用までの技術について、国際的な動向を把握しつつ、我が国特有の気象・地形に起因する各種問題(風車耐久性等)を克服するための研究開発を行って、我が国の風車産業の振興に資するとともに、IEA RD&D WINDなどの最先端の国際的風力発電共同研究に研究成果を反映させる。
また、2012年度までに、高精度落雷リスクマップを作成するとともに、風力発電設備へのより効果的な落雷等に対する対策を策定する。
- G. 2013年度までに、我が国の海象・気象条件に適した、洋上風況観測システム、洋上風力発電システム及び環境影響評価の手法等の技術を確立する。
- H. 2004年度より、バイオマスエネルギー転換プロセスにおける各工程のボトルネックを抽出し、2008年度までに開発が完了するよう、それぞれのボトルネックをブレイクスルーする要素技術開発を提案公募方式により実施する。更に、2005年度より2009年度まで、バイオマスのエネルギー転換・利用技術等の分野において2030年の普及を目指した新規な革新的技術を開発するための先導技術研究開発を提案公募方式により実施する。
- I. 潜在的なオプションの顕在化や関連産業分野の技術開発による技術革新により、新エネルギー導入促進技術オプションの多様化と経済性の向上に寄与する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(2) 新エネルギー技術フィールドテスト事業(運営費交付金)

概要

2010年度の新エネルギー導入目標達成に向け、新技術を活用した太陽光発電及び太陽熱利用システムの有効性の検証、バイオマス熱利用システムの性能・経済性等の検証、風車立地に必要な高所の風況データの収集・解析など総合的な新エネルギーフィールドテストを実施する。具体的には以下のフィールドテストを実施する。

- A. 新技術を活用した太陽光発電システム等を設置し、出力特性等の情報収集及び分析を行うことで、その有効性を確認するとともに、ガイドラインの策定等により広く情報発信を行う。(太陽光発電新技術等フィールドテスト事業)
- B. 新利用形態の太陽熱利用システムや未利用分野においてシステムを設置し、出力特性等の情報収集及び分析を行うことで、その有効性を確認するとともに、ガイドラインの策定等により広く情報発信を行う。(太陽熱高度利用システムフィールドテスト事業)
- C. 広く薄く賦存するバイオマスを、民間企業や研究機関等において研究開発が終了段階をむかえた高効率に熱利用できるシステムを設置し、設置場所の熱需要に合わせたフィールドテストを実施することにより、実運転におけるバイオマス熱

利用転換システムとしての課題抽出、解決を行い、早期実用化を図り、バイオマスエネルギーの導入促進を行う。(地域バイオマス熱利用フィールドテスト事業)

- D. 風力発電の導入目標(2010年度300万kW)を達成するため、共同研究事業者と大型風車の導入普及に必要な高所の風況データの収集・解析・評価を行い、公開する。(風力発電フィールドテスト事業)

技術目標及び達成時期

- A. 設置システムについて、2007年度に策定したガイドラインを2009年度、2012年度及び2015年度に見直し改訂する。
- B. 設置システムについて、2007年度に策定したガイドラインを2009年度に改訂する。また、2012年度及び2015年度に見直し改訂する。
- C. 一定レベルまで確立されたバイオマス熱利用技術について、性能や経済性等の状況・データを収集・分析し、熱利用システムの有効性を実証するとともに、これらの結果を公表することで汎用性の高い熱利用システムの確立し、2010年度のバイオマス熱利用の導入目標(308万KL)達成を目指す
- D. 2010年度までに、高所の風況データの解析・評価を行い、導入普及に有用な資料の取りまとめを行い、これらの結果を風力発電事業者、研究機関や風力発電事業を計画している各種団体等に公開することにより、風力発電導入の素地を形成し、風力発電の導入を拡大する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(3) イノベーション実用化補助金(運営費交付金)

概要

科学技術基本計画における戦略的技術領域・課題にかかる技術課題等で石油代替エネルギーの製造・生成・利用に資する実用化開発を行う民間企業に対し助成支援する。

技術目標及び達成時期

助成事業終了後3年以上を経過した時点で25%の実用化達成率。加えて、知的資産経営の方針に対する審査時の評価を通じて、「技術等の知的資産を活かす経営の下で収益拡大を図る(技術を経営、収益につなげる)」意識を普及させる。

研究開発期間

2000年度～

(4) 非化石エネルギー産業技術研究助成事業(運営費交付金)

概要

産業界や社会のニーズに応える石油代替技術のシーズの発掘とその育成、並びに、石油代替技術に関する次世代の研究リーダーの育成を図る。この目的のため、産業界からの期待が高い技術領域・課題を提示した上で、大学や独立行政法人の若手研究者等から研究開発テーマを募集する。厳正な外部評価によって石油代替効果があり且つ独創的・革新的なテーマを選定し、研究者代表者個人を特定して助成金を交付する。

技術目標及び達成時期

独創性のある若手研究者等を助成すると共に、中間評価ゲート方式が醸成する競争的環境の下で企業との連携を強化させることにより、10～15年後の実用化が有望な革新的石油代替技術の研究開発を促進する。本事業では革新的石油代替技術の実用化への第1歩となる特許について、助成期間終了後の出願比率を100%とすることを目標とするとともに、石油代替技術に関する次世代の研究リーダーの育成を図る。

研究開発期間

2000年度～

4 - - . 太陽・風力

(1) 太陽光発電無線送受電技術の研究開発

概要

新たな電力供給方式として地上において様々な用途への応用が見込まれ、また、長期的には将来の新エネルギーシステムとして期待される宇宙太陽光発電システムの中核的技術として応用可能な太陽光発電無線送受電技術を確立するため、安全性等を確保しつつ、太陽エネルギーを効率良く伝送するための要素技術等について研究開発を行う。

技術目標及び達成時期

2010年度までに高効率半導体増幅回路の開発、複数フェーズドアレイパネルの統合による精密ビーム制御技術の開発、高効率受電整流回路の開発を目指すことにより、無線送受電技術の高効率化を図る。

研究開発期間

2008年度～2010年度

4 - - . 電力系統制御・電力貯蔵

(1) 次世代蓄電システム実用化戦略的技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)

(2) 風力発電電力系統安定化等技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)

(3) 大規模電力供給用太陽光発電系統安定化等実証事業(運営費交付金)(4 - - 参照)

4 - - . バイオマス・廃棄物・地熱等

(1) E3地域流通スタンダードモデル創成事業(運営費交付金)

概要

離島(全域)におけるエタノール3%混合ガソリン(E3)の製造から給油までの大規模なフィールドテストを通じ、E3利用に関する社会システムモデルの構築と一般社会へ適用する際の技術課題の抽出を行う。

技術目標及び達成時期

2010年の「京都議定書目標達成計画」の導入目標(50万kl)に資するため、2009年度にE3利用の社会モデルを構築し、2011年度までにその検証を行う。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(2) バイオマス等未活用エネルギー実証事業(運営費交付金)

概要

地域に賦存する未活用の資源であるバイオマスをエネルギーとして有効活用するため、溶融ガス化等熱化学的変換技術による燃料化システムやメタンガス等生物化学的変換技術による燃料化システム等の実証試験事業、事業可能性調査等を実施し、利用ノウハウ等を蓄積、本格的なバイオマス等エネルギーの導入を推進する。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、バイオマス等の種別やエネルギー変換手法、更には地域特性を加味した一連のエネルギー転換システム毎のフィージビリティスタディや試験設備の設置により、バイオマス等の運搬・収集、エネルギー転換及びエネルギー利用に係るデータの収集、分析、評価を実施し、その結果をフィードバックすることによって本格的なバイオマス等エネルギーの導入を目指す。

研究開発期間

2001年度～2009年度

(3) バイオマスエネルギー地域システム化実験事業(運営費交付金)

概要

バイオマスエネルギーの資源収集・運搬、転換、残渣処理、利用までの一連の利活用システムについての、各要素の連携の最適化を図るための実証を実施することによって、地域特性に適合した地域主導によるバイオマスの地産地消・地域循環型の先導的モデルシステムを構築することによりバイオマスエネルギーの導入を促進する。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、国内バイオマス資源の安定的かつ経済的な供給システム、最適なエネルギー転換技術、エネルギー転換後に発生する残渣の処理等の一連の地産地消型エネルギー転換システムについて、ノウハウ蓄積、課題抽出及びその対策方法の策定、技術確立を行う。また、ここで確立されたバイオマスエネルギーシステムは他地域への波及を先導する事例となることを目標とする。

研究開発期間

2005年度～2009年度

4 - - . 燃料電池

(1) 固体高分子形燃料電池実用化戦略的技術開発(運営費交付金)

概要

自動車用、家庭・業務用等に利用される固体高分子形燃料電池(PEFC)の実用化・普及に向け、要素技術、システム化技術及び次世代技術等の開発を行うとともに、共通的な課題解決に向けた研究開発の体制の構築を図る。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、固体高分子形燃料電池の経済性・耐久性の向上や高性能

化のための技術開発を行い、燃料電池の普及段階へ向けて必要な基本的技術を確立する。

研究開発期間

2005年度～2009年度

(2) 燃料電池先端科学研究(運営費交付金)

概要

燃料電池の基本的反応メカニズムについての根本的な理解を深めるために、高度な科学的知見を要する現象解析及びそのための研究体制の整備を行い、現状の技術開発における壁を打破するための知見を蓄積する。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、燃料電池内における反応機構を電気化学(電極触媒反応、イオン移動、分子移動等)及び材料化学(溶解・腐食反応、錯形成反応、ラジカル反応、固相内拡散等)の観点から解明する。また、燃料電池新技術の性能を適切に評価・実証するための基本システムを構築する。

研究開発期間

2005年度～2009年度

(3) 新利用形態燃料電池技術開発(運営費交付金)

概要

ユビキタス社会に対応する燃料電池の実用化・普及拡大を図るため、小型可搬電源となり得る小出力燃料電池等の安全性確保等を目的とする基準・標準化研究開発及び燃料電池の用途開拓のための技術開発を行う。

技術目標及び達成時期

2010年までに、燃料電池の新利用形態、使用環境の拡がり等を考慮した高出力特性等の性能特性向上によって必要となる燃料容器等の周辺機器を含めたシステムの安全・環境基準の設定・標準化、規制緩和に資する試験データの取得、試験方法の開発及びこれらの規格・標準化に準じた新利用携帯用燃料電池技術を開発する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(4) 高耐久性メンブレン型LPガス改質装置の開発(運営費交付金)

概要

高耐久性の水素透過型メンブレン(膜)を開発し、家庭用LPガス供給システムから高純度の水素を供給可能な高効率LPガス改質装置を開発する。

技術目標及び達成時期

2008年度までに、家庭用LPガス供給システムから燃料電池へ高純度の水素を供給する高効率かつ低コストでコンパクトなメンブレン型LPガス改質装置を開発する。

研究開発期間

2006年度～2008年度

(5) 固体酸化物形燃料電池システム要素技術開発(運営費交付金)

概要

固体酸化物形燃料電池(SOFC)は発電効率が高く、分散型電源として期待されるが、実用化・普及のためには耐久性・信頼性向上、低コスト化等の課題を解決することが必要であり、材料開発や劣化要因解明など基盤的な要素技術の研究を行う。

技術目標及び達成時期

2012年度までに、耐久性・信頼性の向上のための劣化要因解明等の基礎研究、低コスト化のための材料等や高出力セルスタックの開発、起動停止対応等の実用性向上のための技術開発を実施する。

研究開発期間

2008年度～2012年度

(6) セラミックリアクター開発(運営費交付金)

概要

電気化学的に物質やエネルギーを高効率で変換する次世代型セラミックリアクターの実現のため、低温作動と急速作動停止を可能とする材料の開発とマイクロセルの集積構造化技術等の開発を行う。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、新電解質材料の適用や電極反応の高効率化等による、低温作動時(650以下)での出力性能を向上させる材料技術と共に、マイクロセルの集積構造化や精緻なインターフェース構築のための製造プロセス技術を開発。そして、これらの技術を統合することにより、次世代型セラミックリアクターとしてのプロトタイプモジュール実証(出力性能2kW/部等)を行う。

研究開発期間

2005年度～2009年度

(7) 水素製造・輸送・貯蔵システム等技術開発(運営費交付金)

概要

水素の製造・輸送・貯蔵等に係る機器やシステムについて、性能・信頼性・耐久性の向上や低コスト化を目指す水素利用技術の研究開発を行い、水素社会の実現に必要な基盤技術の確立を図る。

技術目標及び達成時期

2012年度までに、水素製造・貯蔵・輸送・充填に関する機器やシステムの信頼性・耐久性向上、低コスト化、性能向上等実用化検証や要素技術開発、及び当該技術を飛躍的に進展させることができる革新的技術開発や調査研究などを行い、その成果を産業界に提供することにより、水素エネルギー初期導入間近の関連機器製造・普及技術として完成させ、水素社会の真の実現に必要な基盤技術の確立を図る。

研究開発期間

2008年度～2012年度

(8) 水素貯蔵材料先端基盤研究事業(運営費交付金)

概要

世界トップ水準の優れた研究者を中核に、国内外の研究機関・企業のバーチャルな連携の下、高圧水素貯蔵に比べよりコンパクトかつ効率的な水素貯蔵を可能とする水素貯蔵材料の性能向上に必要な条件等を明らかにすることにより、燃料電池自動車の航続距離の飛躍的向上を図る。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、水素貯蔵材料の基本原則、さらには水素貯蔵能力の革新的向上に必要な条件を明らかにすることにより、水素をより安全・簡便・効率的かつ低コストに輸送・貯蔵するための技術基盤を確立する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(9) 水素先端科学基礎研究事業(運営費交付金)

概要

水素の輸送や貯蔵に必須な材料に関し、水素脆化等の基本原則の解明及び対策の検討を中心とした高度な科学的知見を要する先端的研究を、国内外の研究者を結集し行うことにより、水素をより安全・簡便に利用するための技術基盤を確立する。

技術目標及び達成時期

2012年度までに、水素脆化、水素トライボロジーの基本原則の解明及び対策の検討等を行い、水素をより安全・簡便に利用するための技術指針を産業界に提供する。

研究開発期間

2006年度～2012年度

(10) 水素社会構築共通基盤整備事業(運営費交付金)

概要

燃料電池の導入・普及に資する基盤整備のため、製品性能の試験・評価手法及び国内外の基準・標準の確立を図る。

技術目標及び達成時期

2009年度を目途に、安全性等に係るデータを取得し、そのデータを基に試験・評価手法の確立、国際標準の確立、規制の再点検を三位一体で進める。

研究開発期間

2005年度～2009年度

(11) 固体酸化物形燃料電池実証研究(運営費交付金)

概要

発電効率が高く、分散型電源として期待される固体酸化物形燃料電池(SOFC)の研究開発・実用化の促進のため、耐久性を始めとしたデータの取得・課題

抽出等のための実証を実施する。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、SOFCシステムの実証試験を数十～数百台規模で実施し、蓄積が不足している耐久性を始めとした実証データの取得・課題抽出等を行い、SOFC技術開発等へのフィードバックを行う。

研究開発期間

2007年度～2010年度

(12) 定置用燃料電池大規模実証事業(運営費交付金)

概要

定置用燃料電池コージェネレーションシステムの実用化開発を支援するため、量産技術の確立と実用段階に必要なデータ収集を行う大規模実証を実施する。

技術目標及び達成時期

2008年度までに、定置用燃料電池を大規模かつ広域的に設置し、実使用条件下における耐久性等の運転データを取得・分析、コストダウンに向けた課題抽出を行い、製品改良へのフィードバックを行う。

研究開発期間

2005年度～2008年度

(13) 燃料電池システム等実証研究

概要

実条件に近い中での燃料電池自動車等の実証走行や、高圧水素貯蔵システム、多角的な燃料供給システムの検証を進め、水素エネルギー社会における水素利用の課題等を抽出するとともに、燃料電池・水素に対する国民的理解の醸成を図る。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、実使用条件下における技術的課題を抽出するとともに、環境特性、エネルギー総合効率、安全性、耐久性等に関する基準・標準に資するデータを取得し、燃料電池自動車、水素ステーションの研究開発等へのフィードバックを行う。

研究開発期間

2006年度～2010年度

4 - . 原子力等利用の推進とその大前提となる安全の確保

4 - - . 軽水炉・軽水炉核燃料サイクル

< 新型軽水炉 >

(1) 次世代軽水炉等技術開発

概要

2030年前後に見込まれる大規模な代替炉建設需要に対応するため、安全性・経済性、信頼性等に優れ、世界標準を獲得し得る次世代軽水炉の技術開発を行う

技術目標及び達成時期

2010年度までに、次世代軽水炉の実現に必要な要素技術開発等及びプ

ラント概念の成立性について見通しを得るための概念設計検討を行う。

研究開発期間

2008年度～2010年度（見直し）

< プルサーマルの推進 >

(2) 全炉心混合酸化物燃料原子炉施設技術開発

概要

プルサーマルが当面のプルトニウム利用策として期待されていることを踏まえ、既存の軽水炉に比べ約3倍のプルトニウムを装荷することができる全炉心混合酸化物燃料原子炉に必要な技術開発を行う。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、原子炉の開発に必要な設計、解析、試験等を行い、全炉心混合酸化物燃料原子炉技術を確立する。

研究開発期間

1996年度～2011年度

< 軽水炉サイクルから高速増殖炉サイクルへの円滑な移行のための技術開発 >

(3) 高速炉再処理回収ウラン等除染技術開発

概要

FBR実証炉及び関連サイクル施設の早期実現を図るため、文部科学省と連携し、「高速増殖炉サイクル実用化研究開発」を推進する。そのなかで、次世代再処理工場から発生する高線量回収ウラン等を既存軽水炉燃料製造施設で取扱可能とする、次世代再処理工場と調和可能な回収ウラン等の除染技術について、調査・基礎試験等を行い、商業的に利用可能な除染技術候補の検討等を実施する。選定された技術については、プロセス試験等を実施する。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、回収ウラン等の除染プロセスの候補技術の洗い出し及び候補プロセス技術の基礎試験を終了し、次世代再処理技術との適合性の検証を行い、プロセス試験を実施すべき除染プロセス技術を選定する。

また、2015年までに、選定した除染プロセス技術について工学化規模でのプロセス試験を行い、商業的に利用可能な転換前高除染技術としての実効性を検証する。

研究開発期間

2007年度～2015年度

< ウラン濃縮技術の高度化 >

(4) 遠心法ウラン濃縮技術開発

概要

我が国におけるウラン濃縮技術や生産能力の維持・向上のため、世界最高水準の性能を有するなど国際的に比肩し得る経済性と性能を有する新型遠心分離機を開発する。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、国際役務価格\$100/kg SWU相当を目指して、現在実用化している金属胴遠心分離機の約5倍という高い分離性能や同遠心分離器を上回る寿命など国際的に比肩し得る技術レベルを有する新型遠心分離機の開発を目指すとともに、最終仕様の新型遠心分離機を多数台用いたカスケード試験の実施により商用プラントとしての信頼性を確立し、運転要領の策定を行う。

研究開発期間

2002年度～2009年度

< 回収ウラン >

(5) 回収ウラン利用技術開発

概要

六ヶ所再処理工場で回収される回収ウランを再濃縮し、再び軽水炉で利用するため、濃縮施設等既存施設への影響等を把握し、転換プロセスを中心とした回収ウラン利用技術を開発する。併せて劣化ウラン酸化固形化についても検討を行う。

技術目標及び達成時期

2012年頃までに、劣化ウランの取扱・管理の容易さや貯蔵効率を向上させるための劣化ウラン酸化固形化（再転換を含む）技術の研究開発を行い、同技術に係る基礎プロセスを確立する。2015年度頃までに、再処理により回収される回収ウランの濃縮が可能な商用遠心分離機の設計を確定する。

研究開発期間

2008年度～2015年度

< 共通基盤技術開発 >

(6) 革新的実用原子力技術開発費

概要

原子力発電及び核燃料サイクルに関する革新的かつ基盤的技術であって実用化につながる研究開発テーマを競争的環境の下で広く提案公募方式により募集し、将来の原子力技術の発展及び技術の多様化につながる研究開発を行う。

なお、実施に当たっては、研究開発の特性に応じて既存技術分野、基盤技術分野、国際協力技術分野の3分野を設け事業を実施する。

技術目標及び達成時期

2012年まで、既存技術分野、基盤技術分野、国際協力技術分野において個別テーマ毎に研究開発を実施する。

なお、既存技術分野は2008年度で終了となる。

研究開発期間

2000年～2010年（見直し）

4 - - . 高速増殖炉（FBR）サイクル

(1) 発電用新型炉等技術開発

概要

FBR実証炉及び関連サイクル施設の早期実現を図るため、文部科学省と連携し、「高速増殖炉サイクル実用化研究開発」を推進する。具体的には、実証炉に必

要な要素技術のうち、設計・建設段階において必要となる実プラント技術として、格納容器設計技術、耐震性評価技術、高温材料設計技術、保守技術の試験等を実施する。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、実証炉の概念設計へ反映しうる設計基準データ等の技術的根拠を得る。

研究開発期間

2007年度～2010年度

(2) 高速炉再処理回収ウラン等除染技術開発(4 - - 参照)

4 - - . 放射性廃棄物処理処分

(1) 地層処分技術開発

概要

) 地層処分共通技術開発

高レベル放射性廃棄物等の地層処分における共通的技术として、今後段階的に進められる処分地選定の際に重要となる地質等調査技術の高度化開発を行う。

) 高レベル放射性廃棄物関連処分技術開発

高レベル放射性廃棄物処分に係る基盤技術として、人工バリア等の長期性能評価技術、処分場操業の際のオーバーパック溶接や搬送・定置等の遠隔操作技術の開発を行う。

) TRU廃棄物処分関連技術開発

TRU廃棄物の地層処分に係る基盤技術として、高レベル放射性廃棄物との併置処分の可能性も念頭に、TRU廃棄物に固有に含まれる核種の閉じ込め技術や人工バリア等の長期性能評価技術の開発を行う。

技術目標及び達成時期

) 地層処分共通技術開発

2011年度までに、処分地選定の初期段階で必要となる地上からの調査技術のうち、特に沿岸域の環境や高精度での地下水評価等に係る調査評価技術の高度化・確証を行う。

) 高レベル放射性廃棄物関連処分技術開発

2011年度までに、人工バリア等の長期性能評価技術や遠隔操作等の工学技術について高度化を図り、幅広い地質環境に対応可能な技術選択肢と成立性を提示する。

) TRU廃棄物処分関連技術開発

2011年度までに、TRU廃棄物に固有に含まれるヨウ素129や炭素14の閉じ込め、高アルカリ環境下での人工バリアの性能評価等に関し、幅広い地質環境に対応可能なデータ・モデルの整備と技術選択肢の提示を行う。

研究開発期間

1998年度～2011年度

(2) 管理型処分技術開発

）地下空洞型処分施設性能確認試験

概要

T R U廃棄物や発電所廃棄物等の余裕深度処分において検討されている「地下空洞型処分施設」の成立性確認のため、実規模大の空洞を利用した総合的な確認試験を行う。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、実規模大の空洞内にコンクリートピット等からなる地下空洞型処分施設を構築し、施工性や初期性能の総合的な確認を行う。

研究開発期間

2006年度～2011年

(3) 放射性廃棄物共通技術開発

概要

）放射性廃棄物重要基礎技術研究調査

放射性廃棄物処分に係る国内外の最新知見の収集・分析、重要かつ基礎的な課題の抽出並びに研究を実施し、長期に及ぶ処分事業等を支える技術基盤の拡充を図る。

）放射性核種生物圏移行評価高度化調査

放射性廃棄物処分の安全評価に共通的な基盤情報として、生物圏における核種移行プロセスを評価するため、日本の風土を反映した核種移行パラメータ・モデルを整備する。

技術目標及び達成時期

）放射性廃棄物重要基礎技術研究調査

2011年度までに、放射性廃棄物処分に共通的な重要基礎技術として、地質環境の長期安定性評価、人工バリアや岩盤の長期挙動評価等に係る知見を整備する。

）放射性核種生物圏移行評価高度化調査

2011年度までに、沿岸域の環境も含めたわが国表層環境への適用とT R U廃棄物に固有の核種等を考慮した、生物圏核種移行のモデルとデータベースを構築する。

研究開発期間

2001年度～2011年度

4 - - . 原子力利用推進に資する電力系統技術

(1) イットリウム系超電導電力機器技術開発(運営費交付金)

概要

世界的にも我が国が最先端の技術力を有する次世代高温超電導線材を活用し、経済社会の基盤となる電力の安定的かつ効率的な供給システムを実現するため、系統を適正に制御し、電力供給を安定化させるための技術及び発電電力を無駄なく輸送するための高効率な送電技術の確立を目指す。

技術目標及び達成時期

2012年度までに、イットリウム系超電導線材を用いたS M E S、電力ケー

ブル、変圧器実現のための重要な技術開発を行い、各機器の成立性を実証する。

研究開発期間

2008年度～2012年度

(2) 高温超電導ケーブル実証プロジェクト(運営費交付金)

概要

革新的な超電導送電技術を確立するため、工業生産プロセスで実用化レベルに達している高温超電導線材を活用し、実用化のための実証試験及び評価を行う。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、200MVA級の中間接続部を有した三心一括型高温超電導ケーブルを、冷却装置や保護装置などの付帯設備とともに66KV実系統に接続して、12ヶ月以上の長期連系試験を行うことによって総合的な安全性や信頼性を実証する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

4 - - . その他電力供給安定化技術

(1) 風力発電電力系統安定化等技術開発(運営費交付金)

概要

大規模風力発電所等の普及拡大時において懸念される周波数変動等系統上の問題対策として、蓄電システムの併設による出力安定化技術を開発し、実態に応じたシステム稼働データの抽出や当該システムの有効性の検証を行う。

技術目標及び達成時期

長期実証運転を強いられた大容量システムの耐久性や信頼性を評価するため解体分析調査を行うことにより、当該技術の有効性を検証するとともに、そのシステムを確立する。

研究開発期間

2003年度～2008年度

(2) 大規模電力供給用太陽光発電系統安定化等実証事業(運営費交付金)

概要

大規模太陽光発電を電力系統に連系した場合に課題となる系統安定化対策やピーク対策のための技術等を開発するとともに、その有効性を実証する。

また、国内外の先進的な次世代技術の価格性能を比較することを通じて技術開発を加速する。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、下記の実証研究を行い、その有効性を確認する。

(イ) 蓄電池等を組み合わせた出力変動抑制システムの有効性。

(ロ) 発電出力のピーク制御(午後のピーク帯へのシフト)の有効性。

(ハ) 大型インバータによる高調波抑制システムの有効性。

(ニ) 国内外メーカーの太陽電池モジュールの特性比較を行い、性能、経済性等を比較・検証。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(3) 次世代蓄電システム実用化戦略的技術開発(運営費交付金)

概要

蓄電池技術は、新エネルギーの出力安定化や燃料電池自動車(FCEV)・ハイブリッド自動車(HEV)・電気自動車(EV)等の高効率次世代自動車に共通する重要なコア技術である。そこで、高性能蓄電システムに係る要素技術開発、新材料開発及び基盤技術の開発を行う。

A．系統連系円滑化蓄電システム技術開発

B．次世代自動車用高性能蓄電システム技術開発

技術目標及び達成時期

A．2010年度末において、寿命10年、コスト4万円/kWh、1MW規模のシステムおよび要素技術の確立と2030年において寿命20年、コスト1.5万円/kWh、20～30MW規模の蓄電システムを見通せる技術開発。また、新エネルギー対応の充放電パターン等、基礎データの整備、大型化に伴う安全性や寿命等の評価手法の確立。

B．2011年度末において、電池開発では、0.3kWhモジュールを作製し、重量エネルギー密度100Wh/kg、出力密度2000W/kg、寿命10年、コスト4万円/kWhを達成すること(条件:3kWhの組電池、100万台生産ベース)。電池構成材料及び電池反応制御技術の開発では重量エネルギー密度200Wh/kg、出力密度2500W/kg、コスト3万円/kWhを小型単電池で達成すること(上記と同条件)。また、電池周辺機器開発では、格段の高性能化、コンパクト化、低コスト化を達成すること。さらに、重量エネルギー密度500Wh/kgを見通せる新規概念・構造の蓄電池基礎開発の他、劣化・寿命診断法、安全性評価などの各種試験法等の開発およびそれら共通基盤技術の基準・標準化。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(4) 発電プラント用超高純度金属材料の開発(運営費交付金)

概要

従来の金属材料と比べ耐食性、耐久性、加工性などの飛躍的な向上が期待できる超高純度金属材料の発電プラント部材としての実用化を目指し、低コスト・量産化製造プロセス、及び加工・溶接技術等の開発を行い、部材としての実用特性の評価・検証を行う。

また、実用化に向けたフィージビリティ調査を行い経済性の評価等を実施するとともに、材料特性に関するデータベースの整備及びそれに必要な試験研究を行う。

技術目標及び達成時

2009年までに、不純物総量100ppm未満、溶解量数100kg以上の低コスト・量産化技術製造技術を開発するとともに、製造された超高純度材料が発電プラントの各種機器に適用でき、本材料の持つ優れた特性を長期に亘って

発揮できることを確認する。

研究開発期間

2005年度～2009年度

4 - . 化石燃料の安定供給確保と有効かつクリーンな利用

4 - - . 石油・天然ガス・石炭の探鉱・開発・生産技術

(1) 石油・天然ガス開発・利用促進型大型ノ特別研究(運営費交付金)

概要

石油及び可燃性天然ガス資源の開発に係る技術の振興を図る観点から、大水深、複雑な地層といった悪条件化が進む石油・天然ガスの探鉱・開発技術、利用拡大が見込まれる天然ガス田の開発促進に資する天然ガス有効利用技術等について、短期間で実用化が期待され、民間ニーズに直結した研究開発を提案公募により実施する。

技術目標及び達成時期

2012年度までに、我が国の石油・天然ガスの探鉱・開発技術力の向上、及び天然ガスの利用の促進に向けた天然ガスの有効利用技術の開発を行う。

研究開発期間

2001年度～2012年度

(2) 石炭生産技術開発(クリーン・コール・テクノロジーの研究開発の一部)

概要

石油代替エネルギーである石炭の安定供給を図るため、低品位炭の有効利用、石炭生産性の向上のための研究開発等を行う。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、インドネシアにおいて低品位炭の有効利用を図ることを目標に、低品位炭の発熱量を高め、自然発火性を抑制する低品位炭改質技術を確立する。

研究開発期間

2001年度～2009年度

(3) 石油精製物質等簡易有害性評価手法開発(運営費交付金)

概要

石油の生産及び流通の合理化を図る観点から、石油製品等に含まれる化学物質によるリスクを把握し、必要な対策を適切に行うことを可能とするため、*in vitro*培養系技術等の活用により遺伝子組換え細胞等を用いた*in vitro*系簡易有害性予測手法、また、トキシコゲノミクスを活用した短期動物試験結果と相関する遺伝子発現データセットを開発する。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、遺伝子導入技術、幹細胞分化誘導技術、生物発光技術等を適用した培養細胞を用いて、試験期間1ヶ月程度、発がん性、催奇形性及び免疫毒性を予測評価できる試験手法を開発し、また、遺伝子発現解析技術を短期動物試験に適用し、28日間反復投与試験結果と相関する遺伝子発現データセット

を完成させる。また、標準的な試験プロトコルを策定する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(4) 石油資源遠隔探知技術の研究開発

概要

我が国が開発・運用する多様な地球観測センサ(ASTER、PALSAR等)の地球観測データを用いて、石油・天然ガス等の安定供給確保のため、資源開発・探査、環境観測等に有効なデータの処理解析手法の研究開発を行う。また、地球観測データのような大容量のデータを容易に扱えるシステムの研究開発を実施することで資源開発・探査、環境観測を含む多様な分野でのリモートセンシングの利用拡大を図る。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、資源開発・探査、環境観測等の分野における地球観測データ処理・解析技術の向上及び地球観測データの利用の拡大を図る。

研究開発期間

1981年度～2010年度

(5) ハイパースペクトルセンサ等の研究開発(運営費交付金)

概要

資源開発に有効な岩石・鉱物や地質構造解析の高次元解析を可能とするハイパースペクトルセンサの開発を行うとともに、軌道上におけるデータ取得の実証を行い、センサ技術の確立を行う。

技術目標及び達成時期

2011年度までにスペクトル分解能200バンド前後のハイパースペクトルセンサを開発し、地表面のスペクトル情報を取得して資源開発に有効なセンサ技術の実証を行う。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(6) 次世代合成開口レーダ等の研究開発

概要

石油の生産及び流通の合理化を図る観点から行うものであり、石油及び可燃性天然ガス資源等の開発に資するため、資源探査能力を格段に向上した合成開口レーダである次世代合成開口レーダ(PALSAR)の健全性評価やセンサを維持することにより、取得される画像データを用いた石油・天然ガス資源の遠隔探知を行う技術を確立する。

技術目標及び達成時期

PALSARの開発、健全性の評価・維持を実施することにより、2010年度までに、レーダ技術の高度化(アンテナ指向の電子制御化、分解能の向上、多偏波観測等)を図る。

研究開発期間

1993年度～2010年度

(7) 極軌道プラットフォーム搭載用資源探査観測システムの研究開発

概要

石油の生産及び流通の合理化を図る観点から行うものであり、石油及び可燃性天然ガス資源等の開発に資するため、資源探査能力を格段に向上した光学センサである資源探査用将来型センサ(ASTER)の健全性評価やセンサを維持することにより、取得される画像データを用いた石油・天然ガス資源の遠隔探知を行う技術を確立する。

技術目標及び達成時期

ASTERの開発、健全性の評価・維持を実施することにより、2010年度までに、センサ技術の高度化(ポインティング機能の追加、分解能の向上、熱センサの搭載等)を図る。

研究開発期間

1987年度～2010年度

4 - - . 石油・天然ガスの有効利用技術

(1) 石油燃料次世代環境対策技術開発

概要

バイオマス燃料から製造した石油製品が自動車排出ガスに及ぼす影響、新たな自動車燃焼技術(自着火燃焼(着火までに燃料と空気を十分に混合し、その混合気体を点火プラグの使用なしで圧縮することにより着火させる燃焼法でNOx排出低減、熱効率が高い等の利点がある))に適応した燃料に関する技術開発を実施する。

また、建設機械、発電機等のオフロードエンジンの排ガスによる環境負荷低減や石油燃焼機器の効率的な利用を進めるための技術開発を実施する。

技術目標及び達成時期

バイオマス燃料の利用時における、燃料と自動車エンジン技術の両面の影響評価を進め、技術的課題を解決し、運輸部門における燃料多様化を目指す。

また、オフロードエンジンの規制は欧米が先行していることから、2012年頃、欧米において規制強化が予定されている排ガス規制に対応した技術を確立し、我が国における規制強化に対応可能な燃焼技術を実現することを目指す。

研究開発期間

2002年度～2011年度

(2) 石油精製高度機能融合技術開発

概要

石油精製業を中心とする石油コンビナート全体の横断的かつ高度な運営機能の融合を図り、単独企業のみでは達成困難なコンビナート域内の省資源、省エネルギーの向上を進めるため、異業種異企業間における限りある貴重なエネルギー資源の利用効率の高い生産技術に関し技術の開発・実証を行う。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、我が国における他のコンビナートへの波及効果を含め、CO₂排出量を63万トン/年削減可能とする技術を確立する。

研究開発期間

2006年度～2009年度

(3) 将来型燃料高度利用技術開発

概要

省エネ、二酸化炭素削減効果が見込まれる燃料電池自動車の燃料である高純度(99.99%以上)水素を安定的かつ経済的に供給することは重要である。石油は、その長所として豊富な水素供給余力と安価な水素製造技術及び全国に展開した災害に強いガソリンスタンドを保有している。これら石油の長所を活かした水素供給システムの確立により、水素社会の早期実現に貢献するものである。本事業では、製油所からの高純度水素供給技術開発とガソリンスタンドを拠点とする高純度水素製造技術開発を行う。

技術目標及び達成時期

コスト低減のため製油所におけるナフサから高効率(80%以上)な高純度水素製造を可能とする新たな技術を開発する。また、供給地のガソリンスタンドにおいて有機ハイドライドから高純度の水素を高効率(80%)に取り出すための水素発生装置を開発する。また、脱硫後の灯油硫黄分を検出限界以下の10ppb以下とする脱硫剤の開発を行うとともに、貴金属使用量を2-3wt%から0.5wt%以下まで低減しても、従来と同等の高い性能が維持できる改質触媒を開発する。さらに、膜分離型反応器を用いた99.99%高純度水素の製造効率を80%、4万時間の耐久性が期待できる水素製造システムを開発する。

研究開発期間

2008年度～2010年度

(4) 革新的次世代石油精製等技術開発

概要

原油価格の高騰・高止まりや原油の重質化と製品需要構造変化等の石油を巡る大きな環境変化のなか、連産品である石油製品を今後とも長期的に安定化かつ効率的に供給するためには、製油所の更なる高度化に向けた技術の開発実用化が必要である。このため、非在来型原油を含めた重質油を原料として、製油所におけるボトムレス化、余剰となる分解留分の高付加価値等のためのプロセスや触媒技術等の開発を行う。また、次世代の技術シーズ創出のため、これまでの技術とは異なる発想により我が国唯一の革新的な新規触媒研究、新規膜分技術研究、新規製造プロセス研究等を産官学の連携等により実施する。

技術目標及び達成時期

2011年度までに重質油対応型高過酷度接触流動分解技術(HS-FCC)については、3千BD規模(商業レベルの1/10規模)の実証研究を通じ、プロピレン収率20%以上(既存技術4%程度)、将来不足が予想される高オクタン価ガソリン基材(RON98(既存技術92程度))の製造を可能とする技術を確立する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(5) 次世代高信頼性ガスセンサー技術開発

概要

一酸化炭素中毒やガス漏れなどのガス事故を限りなくゼロに近づけるため、センサー素子のナノレベルでのメカニズム解析及び開発設計を行い、コードレスで高信頼性を有する次世代高信頼性ガスセンサー（COセンサー・メタンセンサー）を開発する。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、最先端のナノテクノロジーおよびMEMS技術を導入し、電池駆動で5年以上の長寿命、高信頼性（数百PPM以下の故障率）、低コストなCOとメタンのセンサを開発する。

研究開発期間

2008年度～2011年度

(6) 天然ガス未普及地域供給基盤確立実証試験（運営費交付金）

概要

天然ガスの供給手段が存在せず（パイプラインはもとよりサテライト供給でも採算が合わないため）石油等の燃料に依存している地方都市部の中小規模の天然ガス需要に対し、天然ガスハイドレートを利用した、新たな輸送技術を確認する。

技術目標及び達成時期

従来のLNGチェーンによる供給に係る投資コストに対し、そのコストを約1/4に低減する事が可能な天然ガスハイドレート（NGH）供給システムを2008年度までに確立する。

研究開発期間

2006年度～2008年度

(7) 天然ガスの液体燃料化（GTL）技術実証研究（運営費交付金）

概要

硫黄等を含まず排出ガスがクリーン、着火性が高いという特徴を有することから石油系燃料代替として期待されるGTLについて、天然ガス中に含まれるCO₂を除去せず、原料として積極的に活用することから、従来利用が困難であったCO₂を多く含むガス田からの天然ガスが利用可能、CO₂除去装置が不要であることによる生産設備コストの低減が可能、といった強みを有する我が国独自のGTL製造技術の確立を図る。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、実証プラントによる運転研究（500バレル/日）を行い、商業規模でのGTL製造技術を確認する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

- (8) 高耐久性メンブレン型 L P ガス改質装置の開発 (運営費交付金) (4 - - 参照)
- (9) 石油・天然ガス開発・利用促進型大型 / 特別研究 (運営費交付金) (4 - - 参照)
- (1 0) 高効率ガスタービン実用化技術開発 (4 - - 参照)

4 - - . オイルサンド等非在来化石資源の利用技術

(1) メタンハイドレート開発促進委託費

概要

日本周辺海域に相当量の賦存が見込まれ、国産のクリーンなエネルギー資源として有望なメタンハイドレートを利用可能とするため、資源量評価手法、生産手法及び環境影響評価手法等の確立のための技術開発を行う。

技術目標及び達成時期

2 0 1 6 年度までに、商業的産出のための技術を整備することを目指し、日本周辺海域におけるメタンハイドレートの賦存状況と特性の明確化、有望賦存海域からのメタンハイドレート資源フィールドの選択及び現場産出試験等による生産手法の確立等を推進する。

研究開発期間

2 0 0 1 年度 ~ 2 0 1 6 年度

(2) 革新的次世代石油精製等技術開発 (4 - - 参照)

4 - - . 石炭クリーン利用技術

(1) 革新的ゼロエミッション石炭火力発電プロジェクト

概要

石炭の高効率な利用を図るために、

- ・ 酸素吹きによる石炭ガス化発電 (I G F C) の開発実証
- ・ 化学吸収法による C O 2 の分離・回収技術の実証
- ・ C O 2 を輸送するための船舶の設計
- ・ C O 2 を貯留するための発生源近傍における貯留ポテンシャルやコストの評価
- ・ 石炭ガス化から CCS まで一貫したトータルシステムの設計等を行う。

技術目標及び達成時期

石炭ガス化については、2 0 0 9 年度までに、パイロットプラントにおいて、高圧の石炭ガスから C O 2 の分離・回収技術の確立及びガス化炉の信頼性向上へ向けて、3 炭種以上の適応炭種拡大試験を実施する。また、C C S については、2 0 1 6 年度頃から C O 2 地中貯留の実証試験に着手する。

研究開発期間

2 0 0 7 年度 ~ 2 0 1 2 年度

(2) 国際革新的ゼロエミッション石炭火力発電プロジェクト補助金

概要

石炭火力発電から排出されるCO₂の削減技術について諸外国との実証普及事業等を実施し、当該技術の普及基盤を整備することにより、エネルギー供給に対する環境上の制約を取り除き、もって我が国エネルギー需給構造の安定化を図る。

技術目標及び達成時期

石炭ガス化技術等実証普及事業では、ゼロエミッション型石炭火力発電の実証プロジェクト(Future Genプロジェクト)への参画を通じた石炭ガス化・発電技術、CO₂分離回収技術、CO₂輸送貯留技術等に関する情報収集や関連する技術調査の実施等により、我が国におけるゼロエミッション型石炭火力発電の実用化開発に資する技術・知見を得る。また、将来のCO₂の地中貯留に際しては、国民の正しい理解が不可欠であり、これを念頭においたゼロエミッション型石炭火力発電に係る普及啓蒙活動を積極的に実施する。

酸素燃焼国際共同実証事業では、既存の微粉炭火力発電の改造による酸素燃焼方式のゼロエミッション型石炭火力発電プラントの実用化を目標とするものであり、既存のプラントの改造により対応可能であること、酸素燃焼を行うことにより、燃焼ガスからCO₂を分離する装置が不要であることから、比較的低コストで極めて大きなCO₂削減効果が期待できる。

研究開発期間

2007年度～2016年度

(3) 先進超々臨界圧火力発電実用化要素技術開発費補助金

概要

従来の超々臨界圧火力発電(USC)は、蒸気温度の最高温度は630程度が限界で、送電端熱効率も42～43%が原理的限界といわれてきた。しかしながら、近年の材料技術の進歩により、700以上の蒸気温度を達成できる可能性が見えてきたことから、これらの材料を活用した先進超々臨界圧火力発電技術(A-USC)の開発を行うものである。A-USCは、蒸気温度700級で46%、750級で48%の高い送電端熱効率の達成が可能な技術であり、2020年以降増大する経年石炭火力発電のリプレイス需要に対応するため、早急に技術開発を進める必要がある。そのため、ボイラーメーカー、タービンメーカー及び材料メーカーが共同でA-USCの技術開発に取り組む。

技術目標及び達成時期

平成22年度までにシステム基本設計を完了し、シミュレーションにより送電端熱効率46%～48%の達成が可能なことを確認する。平成24年度までにボイラー、タービン部材等が700以上の蒸気温度に耐えられるかどうかを試作、評価し、経済性を含めたシステム成立性への見通しを得る。平成27年～平成28年度に実缶試験、回転試験を実施し、蒸気温度700以上の条件下でボイラー、タービンの信頼性を確認する。また、ボイラー、タービン部材について3万～7万時間の長期信頼性試験を実施し材料特性を検証する。

研究開発期間

2008年度～2016年度

(4) 石炭利用技術開発(一部、運営費交付金)(クリーン・コール・テクノロジーの

研究開発の一部)

概要

環境適合的な石炭利用の拡大を図るため、石炭ガス化、無灰化技術による転換効率向上に資する技術や石炭からの水素製造技術等、クリーン・コール・テクノロジーの開発を行う。

技術目標及び達成時期

2008年度までに、

- ・ 石炭から合成ガスや軽質オイルを併産する高効率な石炭部分水素化プロセス技術を20t/日のパイロットプラント規模で確立する(石炭部分水素化熱分解技術の開発)

2009年度までに、

- ・ 化学原料等に利用可能な合成用ガスを石炭乾留ガスから無触媒で製造する技術をパイロットプラントで確立する(無触媒石炭乾留ガス改質技術開発)

2011年度までに、

- ・ 石炭利用プロセスにおいて、環境分析技術の高精度化、環境影響成分の挙動解析のためのモデルの構築等により、環境への影響低減手法を開発する(戦略的炭化ガス化・燃焼技術開発)

研究開発期間

1995年度～2008年度(2008年度見直し)

- ・ 戦略的炭化ガス化・燃焼技術開発 2007年度～2011年度
- ・ 無触媒石炭乾留ガス改質技術開発 2006年度～2009年度
- ・ 石炭部分水素化熱分解技術 2003年度～2008年度

(5) 噴流床石炭ガス化発電プラント開発費補助金

概要

供給安定性に優れた石炭の高効率かつ低環境負荷での利用を図るため、石炭をガス化して燃料とし、コンバインドサイクル(ガスタービンと蒸気タービンの組合せ)を駆動する高効率発電技術(石炭ガス化複合発電技術(IGCC: Integrated coal Gasification Combined Cycle)の実証試験を行う。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、25万kWの実証機を用いた実証試験により、熱効率40.5%(送電端、高位発熱量ベース)を目指す。この目標は50万kWの商用機における熱効率46～48%に相当する。本技術は実証試験終了後の2010年度より商用化が可能である。

研究開発期間

1999年度～2009年度

(6) 環境調和型製鉄プロセス技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)

4 - - . その他共通

(1) イノベーション実用化補助事業(運営費交付金)(4 - - 参照)

- (2) 非化石エネルギー産業技術研究助成事業 (運営費交付金)(4 - - 参照)
- (3) 固体高分子形燃料電池実用化戦略的技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (4) 燃料電池先端科学研究 (運営費交付金)(4 - - 参照)
- (5) 新利用形態燃料電池技術開発 (運営費交付金)(4 - - 参照)
- (6) 高耐久メンブレン型 L P ガス改質装置の開発(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (7) 固体酸化物形燃料電池システム要素技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (8) 水素製造・輸送・貯蔵システム等技術開発 (運営費交付金)(4 - - 参照)
- (9) 水素貯蔵材料先端基礎研究事業 (運営費交付金)(4 - - 参照)
- (10) 水素社会構築共通基盤整備事業 (運営費交付金)(4 - - 参照)
- (11) 水素先端科学基礎研究事業 (運営費交付金)(4 - - 参照)
- (12) 固体酸化物形燃料電池実証研究 (運営費交付金)(4 - - 参照)
- (13) 定置用燃料電池大規模実証事業 (運営費交付金)(4 - - 参照)
- (14) 燃料電池システム等実証研究 (4 - - 参照)

5．政策目標の実現に向けた環境整備（成果の実用化、導入普及に向けた取組）

5 - ．総合エネルギー効率の向上

- 事業者単位の規制体系の導入
- 住宅・建築物に係る省エネルギー対策の強化
- セクター別ベンチマークアプローチの導入と初期需要創出（高効率機器の導入補助等）
- トップランナー基準の対象機器の拡充等
- アジアにおける省エネルギー対策の推進を通じた我が国の国際競争力の向上
- 国民の省エネルギー意識の高まりに向けた取組

5 - ．運輸部門の燃料多様化

- 公共的車両への積極的導入
- 燃費基準の策定・改定
- アジアにおける新エネルギー協力
- 国際標準化による国際競争力向上

5 - ．新エネルギー等の開発・導入促進

- 事業者支援補助金等による初期需要創出
- 新エネルギーベンチャービジネスに対する支援の拡大
- 新エネルギー産業構造の形成
- 電気事業制度・ガス事業制度の在り方の検討

5 - ．原子力利用の推進とその大前提となる安全の確保

- 電力自由化環境下での原子力発電の新・増設の実現
- 資源確保戦略の展開
- 次世代を支える人材育成
- 中小型炉の海外市場への展開、我が国原子力産業の国際展開支援
- 原子力発電拡大と核不拡散の両立に向けた国際的枠組み作りへの積極的関与
- 国と地域の信頼強化

5 - ．化石燃料の安定供給確保と有効かつクリーンな利用

- 資源国等との総合的な関係強化（研究開発の推進・協力、人材育成・技術移転、経済関係強化など）
- 化石燃料のクリーンな利用の開拓

6．研究開発の実施に当たっての留意事項

事業の全部又は一部について独立行政法人の運営費交付金による実施されるもの（事業名に（運営費交付金）と記載したもの）は、中期目標、中期計画等に基づき、運営費交付金の総額の範囲内で当該独立行政法人の裁量によって実施されるものである。

また、事業名に（採択テーマ）と記載された事業は、提案公募事業により採択されたテーマを記載したものであり、その採択や評価等は、提案公募事業の実施機関の責任の下、実施されるものである。

7. 改訂履歴

- (1) 平成16年7月7日付け、省エネルギー技術開発プログラム基本計画、新エネルギー技術開発プログラム基本計画、燃料技術開発プログラム基本計画、電力技術開発プログラム基本計画、原子力技術開発プログラム基本計画制定。固体高分子形燃料電池/水素エネルギー利用プログラム基本計画(平成16・02・03産局第6号)は、新エネルギー技術開発プログラム基本計画に統合することとし、廃止。
- (2) 平成17年3月31日付け制定。省エネルギー技術開発プログラム基本計画(平成16・06・04産局第8号)、新エネルギー技術開発プログラム基本計画(平成16・06・04産局第10号)、燃料技術開発プログラム基本計画(平成16・06・04産局第12号)、電力技術開発プログラム基本計画(平成16・06・04産局第11号)、原子力技術開発プログラム基本計画(平成16・06・04産局第13号)は、廃止。
- (3) 平成18年3月31日付け制定。省エネルギー技術開発プログラム基本計画(平成17・03・25産局第14号)、新エネルギー技術開発プログラム基本計画(平成17・03・25産局第9号)、燃料技術開発プログラム基本計画(平成17・03・25産局第17号)、電力技術開発プログラム基本計画(平成17・03・25産局第12号)、原子力技術開発プログラム基本計画(平成17・03・25産局第13号)は、廃止。また、次世代低公害車技術開発プログラム基本計画(平成17・03・29産局第2号)は、省エネルギー技術開発プログラム基本計画及び燃料技術開発プログラム基本計画に統合することとし、廃止。
- (4) 平成19年4月2日付け制定。省エネルギー技術開発プログラム基本計画(平成17・03・31産局第19号)、新エネルギー技術開発プログラム基本計画(平成18・03・31産局第15号)、燃料技術開発プログラム基本計画(平成18・03・31産局第18号)、電力技術開発プログラム基本計画(平成18・03・31産局第17号)、原子力技術開発プログラム基本計画(平成18・03・31産局第16号)は、廃止。
- (5) 平成20年4月1日付け、エネルギーイノベーションプログラム基本計画制定。省エネルギー技術開発プログラム基本計画(平成19・03・26産局第1号)、新エネルギー技術開発プログラム基本計画(平成19・03・20産局第4号)、燃料技術開発プログラム基本計画(平成19・03・19産局第7号)、電力技術開発プログラム基本計画(平成19・03・16産局第3号)、原子力技術開発プログラム基本計画(平成19・03・23産局第2号)は、本プログラム基本計画に統合することとし、廃止。

イノベーションプログラムについて

平成20年5月16日
経 済 産 業 省
研 究 開 発 課

イノベーションプログラムについて

20年度一般会計 502億円(507億円)
特別会計 1,484億円(1,622億円)

1. 「イノベーションプログラム」の中での体系的推進 (Inside Management & Accountability)

経済産業省の全ての研究開発プロジェクトは、政策目標毎に7つの「イノベーションプログラム」の下で体系的に推進。

各プログラムの中で、政策目標に向けたプロジェクトの位置付けと目標の明確化、市場化に必要な関連施策(規制改革、標準化等)との一体化を図り、イノベーション実現に向け各プロジェクトを効果的に推進。

2. 「技術戦略マップ」に基づく戦略的企画立案 (Outside Communication & Networking)

先端産業技術動向を把握し、国が取り組むべき技術課題とイノベーションの道筋を明確化するため、産学官で協働するロードマッピング手法を導入(『技術戦略マップ 2005 / 2006 / 2007 / 2008』)。

研究開発プロジェクトの選定に当たっては、イノベーションプログラムにおける政策目標を基に技術戦略マップに位置付けられた重要技術課題を抽出し戦略的に企画立案。

平成20年度 イノベーションプログラム(IPG)予算総額

平成20年度予算額 (平成19年度予算額)
1,986億円 (2,129億円)

IT IPG

ITコア技術の革新	114億円
省エネ革新	67億円
情報爆発への対応	41億円
情報システムの安全性等	50億円
小計	272億円

ナノテク・部材 IPG

ナノテク加速化領域	36億円
情報通信領域	31億円
ライフサイエンス領域	19億円
エネルギー・資源・環境領域	60億円
材料・部材領域	32億円
共通	6億円
小計	184億円

ロボット・新機械 IPG

ロボット関連技術開発	24億円
MEMS・分析機器	22億円
小計	46億円

健康安心 IPG

創薬・診断技術開発	96億円
診断・治療機器・再生医療等の技術開発	30億円
小計	126億円

エネルギー IPG

総合エネルギー効率の向上	817億円
運輸部門の燃料多様化	358億円
新エネルギー等の開発・導入促進	488億円
原子力等利用の推進とその大前提となる安全の確保	258億円
化石燃料の安定供給確保と有効かつクリーンな利用	554億円
小計	1,447億円 ²

環境安心 IPG

地球温暖化防止新技術	42億円
3R	13億円
環境調和産業バイオ	56億円
化学物質総合評価	16億円
小計	127億円

航空機・宇宙産業 IPG

航空機産業の基盤技術力の維持・向上	163億円
宇宙産業の国際競争力強化	69億円
小計	232億円 ³

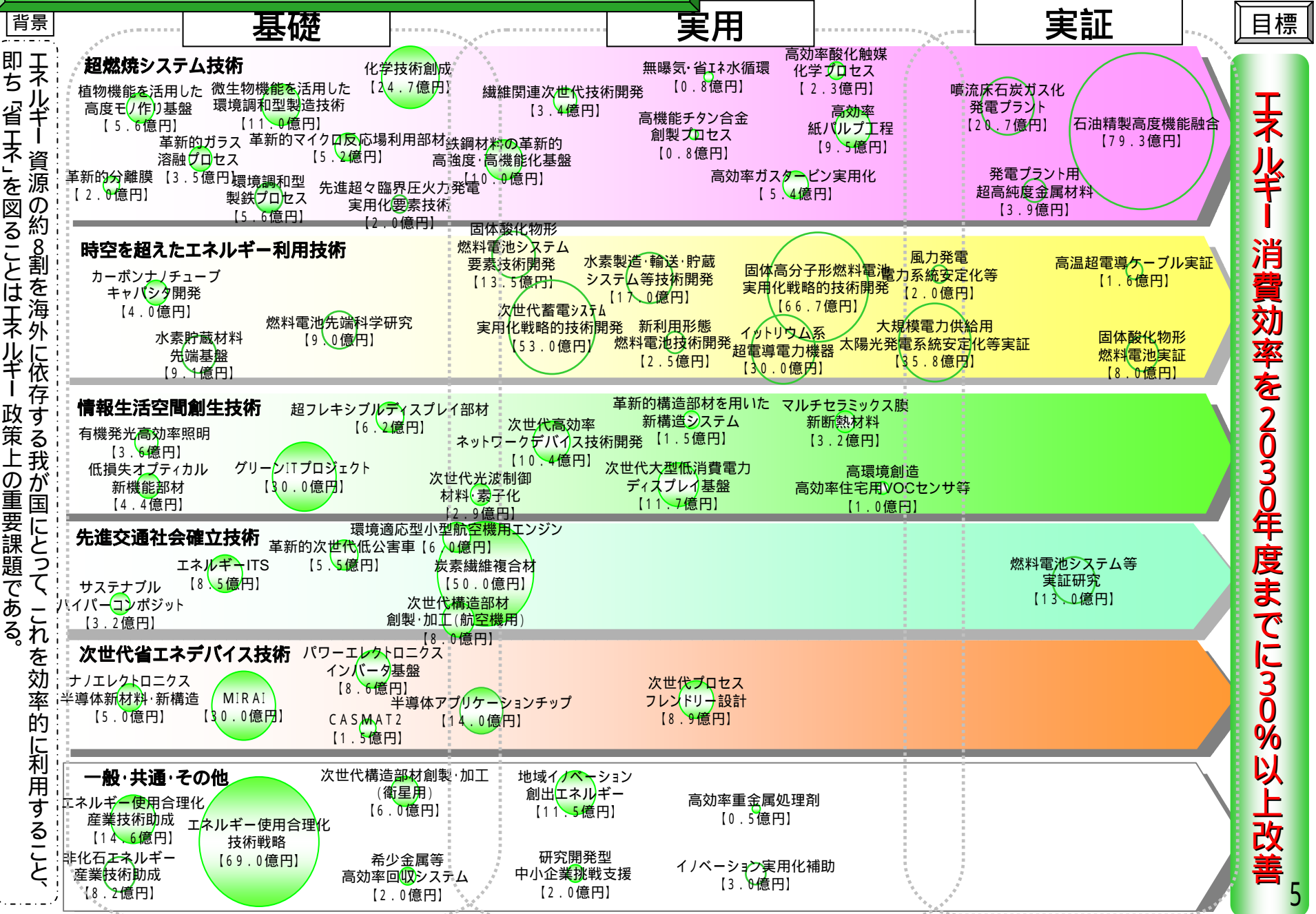
1: 各イノベーションプログラムにおけるプロジェクトの重複を排除した額

2: 各サブプログラムで重複があるため小計と一致しない

3: 一部、財投出資(50億円)、関連予算(8億円)を含む

4. エネルギーイノベーションプログラム 総合エネルギー効率の向上

【20年度予算額 817億円】
基礎、実用、実証の区分内は、任意に配置。



4. エネルギーイノベーションプログラム 原子力等利用の推進とその大前提となる安全の確保

【20年度予算額 258億円】
基礎、実用、実証の区分内は、任意に配置。

背景

地球温暖化対策やエネルギー安全保障の観点から、核燃料サイクルを含む原子力発電を推進する国際的な動きが急激に進展している。

基礎・基盤研究

実証・実用化開発

目的

軽水炉・軽水炉核燃料サイクル

回収ウラン利用技術開発
【1億円】

革新的実用原子力技術開発
【8億円】

次世代軽水炉等技術開発
【12.5億円】

遠心法ウラン濃縮
技術開発
【11億円】

全炉心混合酸化物燃料技術開発
【30億円】

高速増殖炉(FBR)サイクル

高速炉再処理回収ウラン等
除染技術開発
【6億円】

発電用新型炉等技術開発
【43.7億円】

放射性廃棄物処理処分

放射性廃棄物共通技術開発
【6.4億円】

地層処分技術調査等
【36.8億円】

管理型処分技術開発
【5.4億円】

その他・共通

イットリウム系
超電導電力機器技術開発
【30億円】

高温超電導ケーブル
実証プロジェクト
【1.6億円】

その他電力供給安定化技術

次世代蓄電システム実用化
戦略的技術開発
【53.0億円】

大規模電力供給用太陽光発電
系統安定化等実証
【35.8億円】

発電プラント用超高純度
金属材料の開発
【3.9億円】

風力発電
電力系統安定化等
【2.0億円】

2030年以降においても、発電電力量に占める原子力発電の比率を30〜40%以上とする

イノベーションプログラム俯瞰図

(案)

平成20年3月5日
経済産業省
研究開発課

4. エネルギーイノベーションプログラム (2) 省エネルギー

[20年度予算740億円 (19年度648億円)]

背景

エネルギー資源の約8割を海外に依存する我が国にとってこれを効率的に利用すること、即ち「省エネ」を図ることはエネルギー政策上の重要課題

基礎

実用

実証

目的

超燃焼システム技術

植物機能を活用した高度モノ作り
【6億円】

省エネ化学技術創成
【25億円】

微生物機能を活用した環境調和型製造技術
【11億円】

革新的ガラス溶融プロセス
【4億円】

革新的マイクロ反応場利用部材技術開発
【5億円】

革新的分離膜 先進超々臨界圧火力発電実用化要素技術開発
【2億円】

環境調和型製鉄プロセス
【5.6億円】

時空を超えたエネルギー利用技術

固体酸化物形燃料電池システム要素技術開発
【14億円】

固体高分子形燃料電池実用化戦略的技術開発
【67億円】

高温超電導ケーブル実証プロジェクト
【2億円】

燃料電池先端科学研究委託費
【9億円】

新利用形態燃料電池技術開発
【3億円】

燃料電池システム等実証研究
【13億円】

次世代蓄電システム実用化戦略的技術開発
【29億円】

リチウム系超電導電力機器技術開発
【30億円】

固体酸化物形燃料電池実証研究
【8億円】

情報生活空間創生技

超フレキシブルディスプレイ部材技術開発
【6億円】

マルチセラミックス膜新断熱材料
【3億円】

高効率住宅用VOCセンサ
【1億円】

有機発光高効率照明
【4億円】

革新的構造部材を用いた新構造システム
【1.5億円】

鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化
【10億円】

次世代光波制御材料・素子化技術
【3億円】

低損失光学部材技術
【4億円】

先進交通社会確立技術

革新的次世代低公害車
【6億円】

環境適応型小型航空機用エンジン
【6億円】

炭素繊維複合材成型技術開発
【35億円】

エネルギーITS
【9億円】

炭素繊維複合材耐雷技術開発
【15億円】

サステナブルハイブリッド技術次世代航空機用構造部材創製等
【3億円】

【8億円】

次世代省エネデバイス技術

次世代高度部材開発評価基盤
【2億円】

次世代高効率ネットワークデバイス技術開発
【10億円】

グリーンITプロジェクト
【30億円】

ナノエレクトロニクス半導体新材料等
【5億円】

次世代低消費電力半導体基板技術開発
【30億円】

次世代プロセスフレンドリー設計技術開発
【9億円】

カーボンナノチューブキャパシタ開発
【4億円】

パワーエレクトロニクスインバータ基盤技術開発
【9億円】

次世代大型低消費電力デバイス基盤技術開発
【12億円】

地域イノベーション創出エネルギー
【2億円】

一般・共通・その他

エネルギー使用合理化技術戦略
【6億円】

次世代衛星基盤技術開発
【12億円】

高効率重金属処理剤
【0.5億円】

非化石エネルギー産業技術助成
【8億円】

エネルギー使用合理化産技助成
【15億円】

研究開発型中小企業挑戦支援
【2億円】

エネルギー使用合理化産技助成
【2億円】

イノベーション実用化補助事業
【3億円】

エネルギー消費効率30%以上改善

4. エネルギーイノベーションプログラム(3) 原子力・電力

【20年度予算199億円(19年度146億円)】

背景

地球温暖化対策やエネルギー安全保障の観点から原子力発電を評価する気運が高まり、欧州、国際原子力エネルギーパートナーシップ構想の提唱(采国)等、核燃料サイクルを含む原子力発電を推進する動きが急激に進展

基礎・基盤研究

実証・実用化開発

目的

軽水炉・軽水炉核燃料サイクル

回収ウラン利用技術開発
【1億円】

革新的実用原子力技術開発
【8億円】

次世代軽水炉等技術開発
【13億円】

遠心法ウラン濃縮
技術開発
【11億円】

全炉心混合酸化物燃料技術開発
【30億円】

高速増殖炉(FBR)サイクル

高速炉再処理回収ウラン等
除染技術開発
【6億円】

発電用新型炉等技術開発
【44億円】

放射性廃棄物処理処分

放射性廃棄物共通技術開発
【6億円】

地層処分技術調査等
【37億円】

管理型処分技術開発
【5億円】

その他・共通

イットリウム系
超電導電力機器技術開発
【30億円】

高温超電導ケーブル実証
【2億円】

発電電力量に占める原子力発電の比率を30〜40%以上

(エネルギーイノベーションプログラム)

「イットリウム系超電導電力機器技術開発」基本計画

新エネルギー技術開発部

1. 研究開発の目的・目標・内容

(1) 研究開発の目的

資源に乏しい我が国が、将来にわたり持続的発展を達成するため、革新的なエネルギー技術の開発、導入・普及によって、各国に先んじて次世代型のエネルギー利用社会の構築に取り組んでいくことを目的とした「エネルギーイノベーションプログラム」の一環として本研究開発を実施する。

経済社会の基盤となる電力の安定的かつ効率的な供給システムを実現するため、システムを適正に制御し、電力供給を安定化させるための技術及び発電電力を無駄なく輸送するための高効率な送電技術の確立を目指す。そのため、世界的にも我が国が最先端の技術力を有する超電導技術を活用して、コンパクトで大容量の電力供給が期待できるイットリウムに代表されるレアアース系酸化物高温超電導線材（以下「イットリウム系超電導線材」という）を用いた超電導電力機器の開発を目指す。特に、超電導電力貯蔵システム（SME S）、超電導電力ケーブル及び超電導変圧器の実用化に向けた技術を開発し、産業利用の早期実現を図ることは、経済社会を支える重要なエネルギーである電力の一層の安定的かつ効率的な供給システムを実現することに大きく貢献する。

本プロジェクトの研究対象機器は、第3期科学技術基本計画のエネルギー分野の重点科学技術「送電技術」、「電力系統制御技術」、「電力貯蔵技術」に位置付けられており、さらに、超電導技術分野の技術マップ（平成19年4月制定）のエネルギー・電力分野機器開発にも位置づけられている。

本プロジェクトは、「超電導応用基盤技術開発（第Ⅱ期）」（平成15年度～19年度）及び「超電導電力ネットワーク制御技術開発」（平成16年度～19年度）によって得られた開発成果を踏まえて、実用レベルに達したイットリウム系超電導線材を用い、次世代電力機器としてのSME S、超電導電力ケーブル及び超電導変圧器の実用化に目途をつけることを目的とする。

(2) 研究開発の目標

①超電導電力貯蔵システム（SME S）の研究開発

平成22年度までに、2GJ級SME Sの開発を見通す高磁界かつコンパクトなコイル設計技術の開発並びにメンテナンスを容易とするコイルの伝導冷却技術開発を行う。

平成24年度までにSME S対応線材の安定作製技術開発及び2MJ級モデルコイルシステムを用いたSME Sの動作試験を行い、高磁界コンパクトSME Sの実用化に目途をつける。

②超電導電力ケーブルの研究開発

平成22年度までに、電力ケーブルの大電流・低交流損失ケーブル化技術、高電圧絶縁・低誘電損失ケーブル化技術に関する要素技術の開発を完了する。

平成24年度までにケーブル対応線材の安定作製技術開発及び66kV大電流ケーブルシステム、275kV高電圧ケーブルシステムの課通電特性や送電損失等の実用性を検証し、実用化に

目途をつける。

③超電導変圧器の研究開発

平成22年度までに、超電導変圧器用の低損失化技術、大電流巻線技術及び限流機能の開発を行い、66kV/6.9kV-2MVA級変圧器の設計を完了する。

平成24年度までに、2MVA級超電導変圧器モデルを試作・評価し、低損失（従来線材対比の交流損失1/3以下）、大電流（2kA級）で、保護のための限流機能（過大電流を定格電流の3倍以下に抑制）を有する66/6kV 20MVA級超電導変圧器システムの成立性を実証する。

④超電導電力機器適用技術の標準化

超電導電力機器の早期市場導入や実用化を円滑に進めるために共通基盤となる標準化を進める。平成24年度までに、超電導線材及びその試験方法並びに超電導電力ケーブル及びその試験方法について、国際規格提案を行う。また、イットリウム系超電導線材等を適用した変圧器、SMES等の機器及びこれらの試験方法の標準化素案を作成する。

なお、目標（最終目標・中間目標）の詳細は別紙の研究開発計画に記載する。

（3）研究開発内容

上記目標を達成するために、以下の研究開発項目について、別紙の研究開発計画に基づき研究開発を実施する。

〔委託事業〕

①超電導電力貯蔵システム（SMES）の研究開発

- （i）2GJ級高磁界・大電流コンパクトコイル構成技術開発
- （ii）高効率コイル伝導冷却技術開発
- （iii）SMES対応線材開発
- （iv）高磁界コンパクトSMESシステムモデル検証

②超電導電力ケーブルの研究開発

- （i）大電流・低交流損失ケーブル化技術の開発
- （ii）高電圧絶縁・低誘電損失ケーブル化技術の開発
- （iii）超電導電力ケーブル対応線材開発
- （iv）66kV大電流ケーブルシステム検証
- （v）275kV高電圧ケーブルシステム検証

③超電導変圧器の研究開発

- （i）超電導変圧器巻線技術開発
- （ii）冷却システム技術開発
- （iii）限流機能付加技術開発
- （iv）超電導変圧器対応の線材開発
- （v）2MVA級超電導変圧器モデル検証

④超電導電力機器の適用技術標準化

- （i）超電導線材関連技術標準化
- （ii）超電導電力ケーブル関連技術標準化
- （iii）その他超電導電力機器関連技術標準化等

2. 研究開発の実施方式

（1）研究開発の実施体制

本研究開発は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下、「NEDO 技術開発機構」という。）が、単独ないし複数の原則、本邦の企業、研究組合、公益法人等の研究機関（原則、国内に研究開発拠点を有していること。ただし、国外企業の特別な研究開発能力、研究施設等の活用あるいは国際標準獲得の観点からの国外企業との連携が必要な場合はこの限りではない。）から公募によって研究開発実施者を選定の後、委託して実施する。

研究開発に参加する各研究開発グループの有する研究開発ポテンシャルの最大限の活用により効率的な研究開発の推進を図る観点から、財団法人国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所 所長 塩原 融氏をプロジェクトリーダーとし、中部電力株式会社 電力技術研究所 研究主査 長屋 重夫氏、財団法人国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所 電力機器研究開発部 部長 藤原 昇氏、九州電力株式会社 総合研究所 電力貯蔵技術グループグループ長 林 秀美氏および財団法人国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所 線材研究開発部 部長 和泉 輝郎氏をサブプロジェクトリーダーとして効果的な研究開発を実施する。

（2）研究開発の運営管理

研究開発全体の管理・執行に責任を有する NEDO 技術開発機構は、経済産業省及びプロジェクトリーダーと密接な関係を維持しつつ、プログラムの目的及び目標並びに本研究開発の目的及び目標に照らして適切な運営管理を実施する。具体的には、必要に応じて設置される技術検討委員会等における外部有識者の意見を運営管理に反映させるほか、四半期に一回程度プロジェクトリーダー等を通じてプロジェクトの進捗について報告を受けること等を行う。

3. 研究開発の実施期間

本研究開発の期間は、平成20年度から平成24年度までの5年間とする。

4. 評価に関する事項

NEDO 技術開発機構は、技術的及び政策的観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義並びに将来の産業への波及効果等について、外部有識者による研究開発の中間評価を平成22年度、事後評価を平成25年度に実施する。また、中間評価結果を踏まえて必要に応じプロジェクトの加速・縮小・中止等見直しを迅速に行う。なお、評価の時期については、当該研究開発に係る技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗動向等に応じて、前倒しする等、適宜見直すものとする。

5. その他の重要事項

（1）研究開発成果の取り扱い

①共通基盤技術の形成に資する成果の普及

得られた研究開発成果のうち、下記共通基盤技術に係る研究開発成果については、NEDO 技術開発機構、実施者とも普及に努めるものとする。

a) 標準への提案、取得

- ・超電導線材関連技術の国際標準提案
- ・超電導電力ケーブル等の超電導電力機器適用技術の国際標準提案

②知的財産権の帰属

委託研究開発の成果に関わる知的財産権については、「独立行政法人新エネルギー・産業技術

総合開発機構新エネルギー・産業技術業務方法書」第25条の規定等に基づき、原則として、すべて受託先に帰属させることとする。

(2) 基本計画の変更

NEDO 技術開発機構は、研究開発内容の妥当性を確保するため、社会・経済的状況、国内外の研究開発動向、政策動向、プログラム基本計画の変更、評価結果、研究開発費の確保状況、当該研究開発の進捗状況等を総合的に勘案し、達成目標、実施期間、研究開発体制等、基本計画の見直しを弾力的に行うものとする。

(3) プロジェクト根拠法

本プロジェクトは、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法 第15条第1項第1号イに基づき実施する。

(4) その他

超電導関連の他プロジェクト（高温超電導ケーブル実証プロジェクト等）と必要な関係を図るものとする。

6. 基本計画の改定履歴

(1) 平成20年3月、制定。

(2) 平成20年7月、イノベーションプログラム基本計画の制定により、「(1) 研究開発の目的」の記載を改訂。

(3) 平成21年3月、PL、サブPLの氏名を追記して改訂。

(別紙) 研究開発計画

研究開発項目① 「超電導電力貯蔵システム (SME S) の研究開発」

SME Sは、高速な充放電特性や高い繰り返し耐久性を持ち、高出力化や大容量化に優れた電力貯蔵装置である。今後、ますます大規模電源の遠隔化が予想されるが、有効電力・無効電力の同時補償により、有効な長距離大容量送電システムの安定化対策が可能なSME Sは、中間開閉所の設置や送電ルートの複数化等による従来の対策に替わる電力系統安定化装置として期待されている。

このため、「超電導応用基盤技術開発 (第Ⅱ期)」(平成15年度～19年度)及び「超電導電力ネットワーク制御技術開発」(平成16年度～19年度)によって得られた開発成果を踏まえて、実用レベルに達したイットリウム系超電導線材を用い、従来の金属系超電導線材を用いたSME Sコイルでは実現不可能であった2GJ級大容量SME Sコイルを可能とする高磁界・コンパクトコイル構成技術の開発を行う。また、並行してメンテナンスが容易で、イットリウム系超電導線材の性能向上が期待できる温度領域での高効率な伝導冷却技術を開発する。さらに最終目標として、この成果を活かした高磁界トロイドコイルシステムを開発し、モデルコイルシステムでの検証を実施することにより高磁界コンパクトSME S実用化に目途を付ける。

また、SME Sの性能向上とともに導入促進に資する線材開発を行う。

(1) 2GJ級高磁界・コンパクトコイル構成技術開発

(i) 研究開発の必要性

2GJ級大容量SME Sコイル実現のためには、従来の金属系SME Sでは達成できなかったレベルの貯蔵エネルギー密度の向上が課題となり、磁場中特性に優れるイットリウム系超電導線材によるコイルを用いた高磁界化による貯蔵エネルギー高密度化が必要となる。この高磁界コイルの実現には、コイル通電時に発生する通電電流と最大経験磁場、コイル径の積として加わる強力な電磁力(フープ応力)の繰返しに耐えるコイル構成を開発することが不可欠である。

(ii) 研究開発の具体的な内容

- ・ 従来の金属系SME Sコイルの許容可能なフープ応力(300MPa程度)の2倍の応力(600MPa)を連続して繰返し加えても使用可能な高強度コイルを開発する。
- ・ SME Sシステムとして必要な通電電流を実現させる積層複合導体を用いたコイル構成技術の開発を行う。

(iii) 達成目標

最終目標 (平成22年度中)

- ・ フープ応力600MPa以上、通電電流2kA以上のSME Sコイル構成技術を開発する。

(2) 高効率コイル伝導冷却技術開発

(i) 研究開発の必要性

SME Sの安定した動作には、コイルの熱安定性が不可欠であり、従来の金属系SME Sで用いられてきた4K温度領域に比べコイルの比熱が高くなる20K以上の温度領域での適用が可能となれば、その安定性が飛躍的に向上する。また、イットリウム系超電導線材は、低温になるに従い飛躍的に磁場中臨界電流特性が向上し、20K近傍の温度領域では、10Tの磁場中でもその特性低下が実用上の問題とならなくなる。しかし、この温度領域では熱伝導率が小さいため、高効率な熱伝導冷却技術が必要である。同時に、伝熱性能とトレードオフの関係になる電気絶縁

性能においても高い絶縁性能を有したコイル構造の開発を要する。

(ii) 研究開発の具体的な内容

- ・ 20～40K 付近の温度領域における伝導冷却を可能とするコイル構造を開発するとともに、高熱伝導性能とトレードオフの関係になる電気絶縁性能においても、高い性能を有したコイル構造を開発する。
- ・ 上記で試作したコイルがSME Sの運転条件から予想される発生熱を伝導冷却により冷却可能であることを検証するとともに、必要な絶縁性能を有することを検証する。

(iii) 達成目標

最終目標（平成22年度中）

- ・ 20～40K 付近の温度領域における伝導冷却を可能とするコイル伝導冷却技術を開発する。
- ・ 2kV以上の電気絶縁性能を有する高熱伝導コイル構造を開発する。

(3) SME S対応線材開発

(i) 研究開発の必要性

SME S用高磁界コンパクトコイル構成のためには、積層複合導体・SME S本体の構造を含めた機器サイドの開発だけでなく、磁場中臨界電流特性の向上に代表される課題の解決を図ることが重要である。また、導入促進には安定した線材製造技術の確立とともにより安価な製造方法の確立が求められる。

(ii) 研究開発の具体的な内容

(a) 線材特性把握

経年劣化・耐久性評価等

(b) 高磁場中高臨界電流 (I_c) 線材作製技術

ピン導入技術開発

磁場中高特性材料開発

(c) 高強度線材製作技術

薄肉基盤高強度化技術開発

(d) 低コスト・歩留向上技術開発

高速製造技術開発

量産化プロセス適正化技術開発

線材接続技術開発

(iii) 達成目標

中間目標（平成22年度中）

- ・ モデルコイル試作に必要な下記仕様に相当する線材の安定製造技術を確立する。

仕様例： $I_c=20A/cm$ 幅@77K&3T で強度 1GPa を有する 100m に相当する線材

- ・ 実用化技術開発に必要な下記仕様に相当する線材の作製技術を開発する。

仕様例： $I_c=30A/cm$ 幅@77K&3T で強度 1GPa を有する 50m に相当する線材

最終目標（平成24年度中）

- ・ 普及導入時（2020年頃）に必要と想定される下記仕様に相当する線材の作製技術を開発するとともに実用化技術開発に必要な線材を安定に作製可能な技術（再現性を確認）を確立する。

仕様例： $I_c=50A/cm$ 幅@77K&3T で強度 1GPa を有する 200m 以上に相当する線材

(4) 高磁界コンパクトSME Sシステムモデル検証

(i) 研究開発の必要性

2 G J 級電力系統制御用SME Sシステムの実用化を実現するためには、高磁場で利用できコンパクトで熱安定性に優れたコイル構造の開発や、そのコイルを高い信頼性で利用可能な冷却技術開発に加え、SME Sシステムとしての信頼性向上を図ることが必要不可欠である。SME Sは電力機器として、超電導コイルへの繰返し充放電が要求され、繰返し運転において十分な信頼性、耐久性を有していることが求められる。既に、SME Sの系統制御機能については金属系超電導コイルを用いた20MJ級SME Sシステムの実系統連系試験により確認されており、その試験で2万回以上の繰返し試験を実施している。イットリウム系超電導コイルを用いたSME Sシステムにおいても同等の性能を有することを検証することが不可欠である。特に、この繰返し運転により発生する損失を低減するためのコイル配置の最適化や運転条件の最適化、SME S電源から動作時に発生するノイズ等の影響を受けないような保護システムの開発を図る必要がある。

(ii) 研究開発の具体的な内容

- ・ 電力系統制御用SME Sとして、電力変換器や冷凍機等に保護・監視システムを組み合わせたシステムコーディネーションを行い、前記(1)2GJ級高磁界・コンパクトコイル構成技術開発、及び(2)高効率コイル伝導冷却技術開発の成果を踏まえつつ、2GJ級SME Sコイルに必要な仕様を試験用にモデル化した試験システム的设计・製作を行う。
- ・ 金属系SME Sを用いた20MJ級SME Sシステム実系統連系試験で経験した負荷変動パターンを模擬した繰返し充放電試験などの基本性能評価によってSME Sコイルシステムとしての適用性を検証する。

(iii) 達成目標

中間目標 (平成22年度中)

- ・ 2GJ級SME Sコイル基本システム構成の最適化並びに高磁界コンパクト・高効率伝導冷却コイルを用いた評価用試験モデル的设计を完了する。
- ・ SME Sシステムとしての適用性を検証評価する試験計画を作成する。

最終目標 (平成24年度中)

- ・ 2MJ級評価用試験モデルを用いて、適用性検証評価試験計画に基づいてSME S動作検証を行うとともに、電力系統制御SME Sの運転を想定した2万回以上の繰返し充放電による性能検証を実施する。

研究開発項目② 「超電導電力ケーブルの研究開発」

超電導電力ケーブルはコンパクトな形状で大容量送電を可能とし、既設管路を有効活用した送電容量の増大が可能である。今後、都市部の電力需要増大への対策や老朽化した設備のリプレース対策として地中ケーブルへの適用が期待されている。また、超電導電力ケーブルは既存の導体ケーブルに比較し、送電ロスを低減することが可能であることから、省エネルギー、地球温暖化対策に貢献できることも期待されている。

このため、「超電導応用基盤技術開発（第Ⅱ期）」（平成15年度～平成19年度）によって得られたイットリウム系超電導線材作製技術開発、機器要素技術開発などの成果を活用し、コンパクトで大容量送電を可能とする超電導電力ケーブルについて、大電流導体化技術、冷却技術を含めた高電圧絶縁技術、低損失化技術、中間接続や終端接続等の大容量接続技術、機械的特性向上技術等の技術開発を行う。さらに最終目標として、この成果を活かした超電導電力ケーブルシステムを開発し検証することによって、高効率な超電導電力ケーブルによる送電技術に目途を付ける。

また、電力ケーブルの性能向上とともに導入促進に資する超電導線材開発を行う。

（1）大電流・低交流損失ケーブル化技術の開発

（i）研究開発の必要性

イットリウム系超電導線材はビスマス系超電導線材に比べ交流損失を低減することが可能であるが、そのためには線材を細線化する必要がある。一方、ケーブルの通電電流を5kAに大電流化する場合、多層導体を形成する必要がある。このように細線化線材を多層に集合した構造は未だ実現されておらず、ケーブルとして導体化時の線材特性への影響、多層導体構造での低交流損失設計及び実証、超電導ケーブルの機械的強度特性検証等を行う必要がある。併せて大電流適用に対応した超電導ー常電導接続部の構造設計の検証と電流リード部の開発を行う必要がある。

また、三心一括ケーブルとする場合には、機械特性（引張り、曲げ）、熱収縮応力下でのケーブル変形の影響、短絡電流通過時の電磁力によるケーブルコアへの影響等が懸念されるため、それらの検証・評価を行う必要がある。

（ii）研究開発の具体的な内容

（a）大電流・低交流損失技術の基礎特性評価

大電流ケーブルに使用する超電導線材の多層導体化時の交流損失を含めた電気的特性の基礎データを取得し、コンパクトで低損失なケーブル設計技術を確立する。

- ・素線及びケーブル導体の交流損失の測定・評価
- ・ケーブル導体の曲げ、引張り特性の評価
- ・コンパクトで低損失なケーブル設計

（b）大容量接続技術の開発

- ・超電導ー常電導接続部の構造設計検証
- ・5kA級電流リードの開発

（c）三心一括ケーブル導体の検証

- ・三心一括ケーブル導体の試作・評価
- ・短絡電流通過時のケーブル性能への影響検証

（iii）達成目標

最終目標（平成22年度中）

大電流ケーブル導体等の特性試験によって、コンパクトで低損失なケーブル設計技術及び大容量接続技術等を確立する。

- ・ ケーブル損失（交流損失） 2 W/m-相@5kA 以下
- ・ 短絡試験（31.5kA, 2sec 相当）でケーブルの性能に劣化が無いこと
- ・ 5kA 連続通電※を行いケーブル導体、超電導・常電導接続部、電流リードに異常がないこと
※ケーブルの熱平衡が得られるまで連続通電を行う

（2）高電圧絶縁・低誘電損失ケーブル化技術の開発

（i）研究開発の必要性

66kV 級超電導電力ケーブルに比べて 275kV 級高電圧超電導電力ケーブルは、高電圧に対する絶縁技術が要求される。このため、電氣的絶縁性能を確保しつつケーブルをコンパクト化する技術、誘電損失を低減しつつ液体窒素による導体冷却を適切に行う技術等を確立したうえで高電圧絶縁・低誘電損失ケーブル化技術の技術開発を行う必要がある。

（ii）研究開発の具体的な内容

（a）高電圧絶縁・低誘電損失技術の基礎特性評価

超電導電力ケーブルに使用する電氣絶縁材料の電氣的基礎特性、絶縁厚さと誘電損失の関係など基礎データを取得し、コンパクトで低損失なケーブル設計の基礎特性を確立する。

- ・ 絶縁材料の基礎特性評価
- ・ 誘電損失の評価

（b）大径ケーブルの熱収支特性評価

常時及び事故時の発熱・冷却に関する熱収支検討を行い、ケーブルの最適設計手法を確立し、短絡電流通過時でも熱的に破壊しないことを確認する。

- ・ 通常通電時の熱特性把握
- ・ 事故時の熱特性把握

（c）高電圧接続技術の開発

中間及び終端の接続部を開発し、交流電圧及びインパルスに対して十分な性能を有することを確認する。

- ・ 耐電圧試験（交流耐電圧試験条件、インパルス耐電圧試験条件）計画書の作成
- ・ 中間接続部の開発及び耐電圧試験で異常がないこと
- ・ 終端接続部の開発及び耐電圧試験で異常がないこと

（iii）達成目標

最終目標（平成 22 年度中）

高電圧ケーブル導体等の特性試験によって、コンパクトで低損失なケーブル設計技術及び高電圧接続技術等を確立する。

- ・ ケーブル損失（交流損失、誘電損失） 0.8 W/m-相@3kA 以下
- ・ 短絡試験（63kA, 0.6sec 相当）でケーブル性能に劣化が無いこと
- ・ 275kV 連続課電※を行いケーブル導体、超電導・常電導接続部、電流リードに異常がないこと
※ケーブルの熱平衡が得られるまで連続課電を行う

（3）超電導電力ケーブル対応線材開発

（i）研究開発の必要性

大電流及び高電圧電力ケーブルを実現するためには、損失低減やコンパクト化などの課題があり導体・ケーブルの構造を含めた機器サイドの開発だけでなく線材の詳細な特性を把握し性能向上を図ることが重要である。また、導入促進には安定した作製技術の確立とともに安価な線材作製方法の確立が求められる。

(ii) 研究開発の具体的な内容

(a)線材特性把握

- ・経年劣化・耐久性評価等

(b)低損失線材作製技術

- ・特性均一線材作製技術開発
- ・細線化加工技術開発

(c) 工業的な臨界電流密度(J_e)向上技術

- ・高 I_c ・薄肉基板高強度線材作製技術開発

(d)低コスト・歩留向上技術

- ・高速製造技術開発
- ・量産化プロセス適正技術開発

(iii) 達成目標

中間目標 (平成22年度中)

- ・ケーブル耐久試験適正条件の決定
- ・ケーブルシステム検証に必要な下記仕様例に相当する線材を安定に作製可能な技術を確立する。

仕様例： $J_e=15\text{kA/cm}^2$ (2mm幅×20m) に相当する線材

- ・実用化技術開発に必要な下記仕様例に相当する線材の作製技術を開発する。

仕様例： $J_e=30\text{kA/cm}^2$ (2mm幅×50m以上) に相当する線材

最終目標 (平成24年度中)

- ・普及導入時 (2020年頃) に必要と想定される下記仕様例に相当する線材の作製技術を開発するとともに実用化技術開発に必要な線材を安定に作製可能な技術 (再現性を確認) を確立する。

仕様例： $J_e=50\text{kA/cm}^2$ (2mm幅×200m以上) に相当する線材

(4) 66kV 大電流ケーブルシステム検証

(i) 研究開発の必要性

66kV 大電流ケーブルの実用性を検証するためには、大電流通電技術、交流損失低減技術、誘電損失低減技術の開発成果を活かしたケーブルを開発し、実用化時の要求仕様に基づいた課通電試験を行う必要がある。

(ii) 研究開発の具体的な内容

前記、(1) 大電流・低交流損失ケーブル化技術の開発及び(2) 高電圧絶縁・低誘電損失ケーブル化技術の開発の成果を踏まえつつ、検証用超電導ケーブルシステム的设计・製作を行い、課通電試験によってケーブル性能を検証する。

- ・両端に終端接続部を有する 66kV/三心一括/5kA,15m 長の超電導ケーブルシステムを開発する。
- ・66kV 大電流ケーブル実用化時の耐久性を評価できる試験条件を設定し、開発したケーブルの課通電試験を実施する。

(iii) 達成目標

中間目標（平成22年度中）

- ・両端に終端接続部を有する検証用 66kV/三心一括/5kA,15m 長の超電導ケーブルシステムのシステム設計を完了する。
- ・耐久性を評価できる課通電試験計画書を作成する。

最終目標（平成24年度中）

- ・下記性能を有する 66kV/三心一括/5kA,15m 長の超電導ケーブルを作製する。
 - －ケーブル外径；内径 150mmφの管路に収納できること
 - －ケーブル損失（交流損失、誘電損失）；2.1 W/ m-相@ 5kA 以下
 - －中間目標で得られた課通電試験の設定条件下における課通電試験を実施し、試験計画書の性能を満足することを検証する。

(5) 275kV 高電圧ケーブルシステム検証

(i) 研究開発の必要性

275kV 高電圧ケーブルの実用性を検証するためには、高電圧絶縁技術、誘電損失低減化技術、大電流通電技術、交流損失低減技術の開発成果を活かしたケーブルを開発し、実用化時の要求仕様に基づいた課通電試験を行う必要がある。

(ii) 研究開発の具体的な内容

前記、(1) 大電流・低交流損失ケーブル化技術の開発、及び(2) 高電圧絶縁・低誘電損失ケーブル化技術の開発の成果を踏まえつつ、検証用超電導ケーブルシステムの設計・製作を行い、課通電試験によってケーブル性能を検証する。

- ・両端に終端接続部と中間接続部を有する 275kV/単心/3kA,30m 長の超電導ケーブルシステムを開発する。
- ・275kV 高電圧ケーブル実用化時の耐久性を評価できる試験条件を設定し、開発したケーブルの課通電試験を実施する。

(iii) 達成目標

中間目標（平成22年度中）

- ・両端に終端接続部と中間接続部を有する検証用 275kV/単心/3kA,30m 長の超電導ケーブルシステムのシステム設計を完了する。
- ・耐久性を評価できる課通電試験計画書を作成する。

最終目標（平成24年度中）

- ・下記性能を有する 275kV/単心/3kA,30m 長の超電導ケーブルを作製する。
 - －ケーブル外径；150mm 以下
 - －ケーブル損失（交流損失、誘電損失）；0.8W/ m-相@3kA 以下
 - －中間目標で得られた課通電試験の設定条件下における課通電試験を実施し、試験計画書の性能を満足することを検証する。

研究開発項目③ 「超電導変圧器の研究開発」

超電導変圧器は従来の変圧器に比べ、高効率でコンパクト化が可能であり、絶縁に油を用いないため、不燃で環境負荷が小さいことを特長とする。今後、都市部を主体とした電力需要増加に伴う変圧器容量対策や変電所の新設対策及び経年劣化に伴う変圧器のリプレース対策に貢献すると考えられている。また、大容量送電を可能とする超電導電力ケーブルとの組み合わせにより、より高効率な電力供給システムが可能となる技術として期待されている。

このため、「超電導応用基盤技術開発（第Ⅱ期）」（平成15年度～平成19年度）におけるイットリウム系超電導線材作製技術開発、機器要素技術開発などの成果を活用し、コンパクトで高効率な超電導変圧器に必要な巻線技術、高電圧絶縁技術等の技術開発を行う。さらに最終目標として、超電導変圧器を開発し、検証することによって、高効率な変電技術に目途をつける。

また、変圧器の性能向上とともに導入促進に資する線材開発を行う。

（1）超電導変圧器巻線技術開発

（i）研究開発の必要性

20MVA 級超電導変圧器の実現のためには、従来の金属系超電導線材やビスマス系超電導線材では達成できなかった大電流化、低損失化が課題となる。これら課題の解決には、細線化したイットリウム系超電導線材を積層し、大電流化した導体による巻線コイル製作技術が必要となる。また同時に、同構造のコイルが系統や変圧器の故障により発生する短絡電流に対しても、変圧器を健全に維持できる強度を有する構造とする必要がある。

（ii）研究開発の具体的な内容

超電導応用基盤技術開発（第Ⅱ期）における検証の結果より、以下の開発を行う。

- ・多層並列転位構造を最適化し、2kA が通電可能な巻線コイルを開発する。
- ・細線化線材により、無加工線を使用した場合に対し損失が 1/3 以下となる 100m 級巻線コイルを開発する。
- ・短絡電流（20MVA 級変圧器%インピーダンス 15%相当）により、巻線が劣化しない巻線コイルを開発する。

（iii）達成目標

中間目標（平成22年度中）

- ・2kA 級の通電特性を検証する。
- ・短絡電流（20MVA 級変圧器%インピーダンス 15%相当）により、巻線が劣化しないことを検証する。

最終目標（平成24年度中）

- ・100m 級巻線コイルにて、交流損失が 1/3 以下（対細線化しない線材）となることを検証する。

（2）冷却システム技術開発

（i）研究開発の必要性

過去最大規模の超電導変圧器を高効率かつコンパクトな姿で実現するには、超電導巻線を低温に維持する保冷容器は変圧器に対して過大とまらない範囲で従来より大きいものが必要であり、また冷却システムは保守性能を高めて高効率化する必要があるため、新たな開発が必要である。なお、保冷容器及び冷却システムの一部は、超電導変圧器システム全体が従来にない大きさの

ため、設計技術についても開発する必要がある。

(ii) 研究開発の具体的な内容

- ・超電導変圧器に適用可能な大型非磁性保冷容器を開発する。
- ・高効率で保守性能に優れた高効率冷却装置を開発する。
- ・保冷容器と冷却装置からなる冷却システムは後述の超電導変圧器モデルと組み合わせて性能を検証する。

(iii) 達成目標

中間目標（平成22年度中）

- ・保守性能の高いコンパクトな冷却システム用の高効率圧縮機（断熱効率 $\geq 65\%$ ）及び高効率膨張機（断熱効率 $\geq 65\%$ ）を検証する。

最終目標（平成24年度中）

- ・三相非磁性で容器容量 10m^3 級の大型非磁性保冷容器を開発し、保冷性能（既存の小型容器相当の $20\text{W}/\text{m}^2$ 以下）を試験にて検証する。
- ・試作した冷却システムの試験にて冷凍性能（冷凍機冷凍能力 $2\text{kW}@65\text{K}$ 、冷凍機効率 $\text{COP} \geq 0.06@80\text{K}$ ）を検証する。

(3) 限流機能付加技術開発

(i) 研究開発の必要性

超電導変圧器は限流機能を備えることにより自身の健全性を維持するとともに、電力系統の事故時の過大な事故電流を瞬時に抑制して事故の波及抑制ができ、電力系統の短絡容量対策にも貢献する。さらに、将来的に超電導電力ケーブルと超電導変圧器を連系して適用する場合にも限流機能は相互の導入促進に貢献すると考えられる。

(ii) 研究開発の具体的な内容

- ・限流技術の基礎試験を行い、限流機能付加変圧器の設計手法を確立する。
- ・数100kVA級変圧器単相巻線モデルを試作し、限流特性を検証する。

(iii) 達成目標

中間目標（平成22年度中）

- ・限流機能付加変圧器の設計手法を確立する。

最終目標（平成24年度中）

- ・数 100kVA 級単相変圧器の巻線モデルにより、過大電流の限流機能（過大電流を定格電流の3倍以下に抑制）を検証する。

(4) 超電導変圧器対応線材開発

(i) 研究開発の必要性

20MVA 級超電導変圧器を実現するため、交流損失低減に代表される課題の解決のために超電導変圧器構造を含めた機器サイドの開発とともに線材の詳細な特性把握に加えてさらなる性能向上が不可欠である。また、導入促進には安定した線材製造技術の確立とともに安価な製造方法の確立が求められる。

(ii) 研究開発の具体的な内容

- ・経年劣化・耐久性の現状把握
- ・低損失線材作製技術

- ・ 磁場中高 I_c 線材作製技術
- ・ 低コスト・歩留向上技術

(iii) 達成目標

中間目標（平成22年度中）

- ・ 変圧器モデル検証に必要な下記仕様例に相当する線材を安定に作製できる技術を確立する。

仕様例：5mm幅3分割にて $I_c=50A@65K\&0.01T$ ，100m以上に相当する線材

- ・ 実用化技術開発に必要な下記仕様例に相当する線材の作製技術を開発する。

仕様例：5mm幅5分割にて $I_c=100A@65K\&0.02T$ ，50m以上に相当する線材

最終目標（平成24年度中）

- ・ 普及導入時（2020年頃）に必要なと想定される下記仕様例に相当する線材の作製技術を開発するとともに実用化技術開発に必要な線材を安定に作製できる技術（再現性を確認）を確立する。

仕様例：5mm幅10分割にて $I_c=100A@65K\&0.1T$ ，100m以上に相当する線材

(5) 2MVA級超電導変圧器モデル検証

(i) 研究開発の必要性

配電用変圧器（66kV/6.9kV-20MVA級）の実現には、巻線技術（低損失技術、大電流技術等）や冷却システム技術等の要素技術を総合的に組み合わせた実機を作成し、実用化時の要求使用に基づいた課通電試験による検証を行う必要がある。

(ii) 研究開発の具体的な内容

20MVA級変圧器を検証可能な66kV/6.9kV-2MVA級モデルを開発し、前記、(1)変圧器巻線技術開発及び(2)冷却システム技術開発の成果を踏まえつつ、検証用変圧器システムの設計・試作を行い、課通電試験によって性能を検証する。

- ・ 要素技術（巻線、保冷容器、冷却システム等）を組合せて66kV/6.9kV-2MVA級超電導変圧器モデルを開発する。
- ・ 交流損失低減や耐電圧性を考慮した試験条件の設定を行い、開発した変圧器モデルの課通電試験を実施する。
- ・ 66kV/6.9kV-2MVA級超電導変圧器モデルの特性を検証する。

(iii) 達成目標

中間目標（平成22年度中）

- ・ 66kV/6.9kV-2MVA級超電導変圧器モデルのシステム設計を完了する。
- ・ 交流損失低減や耐電圧性を考慮した課通電試験計画書を作成する。

最終目標（平成24年度中）

- ・ 66kV/2MVA級超電導変圧器モデルを試作し、中間目標で得られた設定条件における課通電試験を実施し、試験計画書の性能を満足することを検証する。

研究開発項目④ 「超電導電力機器の適用技術標準化」

超電導電力機器にとって共通の基盤となる超電導線関連技術並びに超電導電力ケーブル等の超電導電力機器適用技術の標準化等を行う。

(1) 超電導線関連技術標準化

(i) 研究開発の必要性

超電導電力機器の開発の促進と高効率化のため、種々の超電導電力機器に共通の超電導線関連技術並びに超電導電力機器固有の超電導線関連技術の標準化研究は必要である。

(ii) 研究開発の具体的な内容

イットリウム系超電導線と実用超電導線材との特質を対比調査するとともに、過去に実施された超電導線関連技術標準化の研究成果と一体化し、国際標準化に資する情報の集約並びに国際標準化を提案する。

(iii) 達成目標

中間目標（平成22年度中）

イットリウム系を含む超電導線材並びにその試験方法の規格素案を作成するとともに、国際合意の醸成（アドホック設置活動）を行う。

最終目標（平成24年度中）

超電導線材並びにその試験方法の規格素案について、国際規格提案を行う。

(2) 超電導電力ケーブル関連技術の標準化

(i) 研究開発の必要性

イットリウム系を含め、高温超電導線を適用した超電導電力ケーブルの実証試験が国内外で多数実施されている。特に、我が国の超電導電力ケーブル技術は世界をリードしている。超電導電力ケーブルの開発の促進と国際競争力の確保のため超電導電力ケーブル関連技術の標準化研究は必要である。

(ii) 研究開発の具体的な内容

イットリウム系超電導線を含む超電導線を適用した超電導電力ケーブル技術を調査するとともに、過去に実施された超電導電力ケーブル関連技術標準化の研究成果との融合を図り、国際標準化に資する情報として整理するとともに国際標準化を提案する。

(iii) 達成目標

中間目標（平成22年度中）

イットリウム系を含む超電導線を適用した超電導電力ケーブル並びにその試験方法の規格素案を作成するとともに他TC（既存ケーブル）との国際合意の醸成（アドホック設置活動）を行う。

最終目標（平成24年度中）

超電導電力ケーブル並びにその試験方法の規格素案について、国際規格提案を行う。

(3) その他超電導電力機器関連技術の標準化等

(i) 研究開発の必要性

電力に対するニーズの多様化に伴い電力機器も多様化している。かかる状況にかんがみ、電力の安定供給のみならず、電力品質に対する技術対応が重要になっている。したがって、超電導電力ケーブルのみならず電力品質等に有効な超電導電力機器技術やシステム化技術の標準化研究は

必要である。

(ii) 研究開発の具体的な内容

超電導変圧器、SME Sなどの超電導電力機器を対象に、その電力品質や制御に関連する技術調査を実施し、国内外における諸標準化に資する。また、冷却設備の安全性、運用性を考慮した法規制の在り方を研究する。

(iii) 達成目標

中間目標（平成22年度中）

イットリウム系を含む超電導線等を適用した超電導変圧器、SME S等の機器仕様並びにこれらの試験方法の標準化の基礎となるデータ等の体系化を行う。

最終目標（平成24年度中）

- ・イットリウム系超電導線材等を適用した超電導変圧器、SME S等の機器仕様並びにこれらの試験方法の標準化素案を作成するとともに、国際合意の醸成（アドホック設置活動）を行う。
- ・冷却システムの安全性、運用性を考慮した規制緩和に向けた提案資料を作成する。

P07014

P08016

(エネルギーイノベーションプログラム・ナノテク・部材イノベーションプログラム)
「超電導技術研究開発」基本計画

省エネルギー部

1. 研究開発の目的・目標・内容

(1) 研究開発の目的

資源に乏しい我が国が、将来にわたり持続的発展を達成するため、革新的なエネルギー技術の開発、導入・普及によって、各国に先んじて次世代型のエネルギー利用社会の構築に取り組んでいくことを目的とした「エネルギーイノベーションプログラム」、及び、情報通信、ライフサイエンス、環境、エネルギーなど、あらゆる分野に対して高度化あるいは不連続な革新（ジャンプアップ）をもたらすナノテクノロジー及び革新的部材技術を確立するとともに、その実用化や市場化を促進することで、我が国産業の国際競争力の維持・強化や解決困難な社会的課題の克服等を可能とすることを目的とした「ナノテク・部材イノベーションプログラム」、の一環として本プロジェクトを実施する。

エネルギー資源の約8割を海外に依存する我が国は、近年増加している世界のエネルギー需給動向の変動によって社会・経済が大きな影響を受けるため、エネルギー利用効率化の促進が求められている。また、地球環境問題への対策の観点から省エネルギーや環境負荷低減に配慮したエネルギー利用が求められている。このような状況においては、十分な安全確保を前提に、需要に見合った信頼性の高い安定で効率的なエネルギー供給システムを構築することが重要である。そこで本研究開発では、高機能部材である超電導線材を利用し、送電損失を大幅に低減することが可能な高温超電導ケーブルシステム及び超電導電力機器を開発することにより、経済社会を支える重要なエネルギーである電力の一層の安定的かつ効率的な供給システムの実現に資することを目的とする。

(2) 研究開発の目標

本研究開発は、電力供給信頼度の向上、電力分野におけるCO₂削減、新エネルギー導入に対する電力系統の安定化等に貢献することを目標とする。なお、個々の研究開発項目の目標は別紙「研究開発計画」に定める。

(3) 研究開発の内容

上記目標を達成するために、以下の研究開発項目について、別紙の研究開発計画に基づき研究開発を実施する。

[委託事業(平成19～22年度)、共同研究事業(NEDO負担率2/3、平成23～25年度)]

① 高温超電導ケーブル実証プロジェクト

[委託事業]

② イットリウム系超電導電力機器技術開発

2. 研究開発の実施方式

(1) 研究開発の実施体制

本研究開発は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下、「NEDO」という。）が、単独ないし複数の原則本邦の企業、大学等の研究機関(原則、国内に研究開発拠点を有していること。ただし、国外企業の特別な研究開発能力、研究施設等の活用あるいは国際標準獲得の観点からの国外企業との連携が必要な場合はこの限りではない)から公募によって研究開発実施者を選定し実施する。

NEDOは、研究開発に参加する各研究開発グループの有する研究開発ポテンシャルを検討し、これを最大限活用することにより効率的な研究開発を図る観点から、委託先決定後に必要に応じて研究開発責任者(プロジェクトリーダー)を指名し、その下に効果的な研究を実施する。なお、本研究開発ではプロジェクトリーダーは研究開発項目毎に指名し、別紙研究開発計画に記載する。

(2) 研究開発の運営管理

研究開発全体の管理・執行に責任を有するNEDOは、経済産業省及び研究開発実施者と密接な関係を維持しつつ、プログラムの目的及び目標、並びに本研究開発の目的及び目標に照らして適切な運営管理を実施する。具体的には、必要に応じて外部有識者による技術検討委員会を設置し、開発内容について審議し、その意見を運営管理に反映させる他、プロジェクトリーダーを指名しているプロジェクトは、四半期に一回程度プロジェクトリーダー等を通じてプロジェクトの進捗について報告を受けること等を行う。

3. 研究開発の実施期間

本研究開発の実施期間は研究開発項目ごとに以下のとおりとする。

① 高温超電導ケーブル実証プロジェクト

本研究開発の期間は、平成19年度から平成25年度までの7年間とする。

② イットリウム系超電導電力機器技術開発

本研究開発の期間は、平成20年度から平成24年度までの5年間とする。

4. 評価に関する事項

NEDOは、技術的及び政策的観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義並びに将来の産業への波及効果等について、外部有識者による研究開発の中間評価及び事後評価を実施する。なお、中間評価結果を踏まえ必要に応じてプロジェクトの加速・縮小・中止等の見直しを迅速に行う。評価の時期については、当該研究開発に係る技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗状況等に応じて、前倒しする等、適宜見直すものとする。なお、評価の実施時期や方法は、研究開発項目毎に別紙研究開発計画に記載する。

5. その他重要事項

(1) 研究開発成果の取扱いについて

①成果の普及

本研究開発で得られた研究成果についてはNEDO、委託先とも普及に努めるものとする。

②知的基盤整備事業又は標準化等との連携

得られた研究開発の成果については、知的基盤整備又は標準化等との連携を図るためデータベースへのデータ提供、標準案の提案等を積極的に行う。

③知的財産権の帰属

本研究開発で得られた研究開発の成果に関わる知的財産権については、「独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構新エネルギー・産業技術業務方法書」第25条の規定等に基づき、原則として、すべて委託先に帰属させることとする。

(2) 基本計画の変更

NEDOは、研究開発内容の妥当性を確保するため、社会・経済的状況、内外の研究開発動向、政策動向、プログラム基本計画の変更、評価結果、研究開発費の確保状況、当該研究開発の進捗状況等を総合的に勘案し、達成目標、実施期間、研究開発体制等、基本計画の見直しを弾力的に行うものとする。

(3) 根拠法

① 高温超電導ケーブル実証プロジェクト

「独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法第十五条第1項第一号イ」

② イットリウム系超電導電力機器技術開発

「独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法第十五条第1項第一号イ」及び

「独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法第十五条第1項第九号」

6. 基本計画の改訂履歴

(1) 平成22年3月、2事業（高温超電導ケーブル実証プロジェクト、イットリウム系超電導電力機器技術開発）を統合して新たに制定。

(2) 平成23年1月、平成23年度より、研究開発項目①「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」の共同研究事業（NEDO 負担率2/3）への変更及び加速による研究内容を追加する変更。また、研究開発項目②「イットリウム系超電導電力機器技術開発」について、中間評価を踏まえ開発項目（イ）の内容縮小並びに開発項目（ロ）の実施内容追加、開発項目（二）の追加による改訂。

(3) 平成23年7月、根拠法を変更。

(4) 平成24年3月 研究開発項目①「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」の実施期間を延長。

(5) 平成25年3月、根拠法を変更。

(6) 研究開発項目①「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」のプロジェクトリーダーを変更。

(別紙) [研究開発計画]

研究開発項目①「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」

[研究開発の目的]

高温超電導ケーブルは、超電導技術分野技術戦略マップのエネルギー・電力分野機器開発のうち「環境・エネルギー調和型社会の構築」、「送変配電」、「電力ケーブル」および、第3期科学技術基本計画のエネルギー分野の重点科学技術「電力供給システム」、「送電技術」に位置付けられている。本研究開発項目では、この高温超電導ケーブルを社会の重要なインフラである電力供給システムに適用するために、「交流超電導電力機器基盤技術研究開発」(平成12年度～16年度)によって得られた高温超電導ケーブルの開発成果などを踏まえ、高温超電導ケーブルや冷却技術などを統合する高温超電導ケーブルシステムを構築する。また、超電導ケーブル単体だけではなく、線路建設、運転、保守を含めたトータルシステムの信頼性を実証するために、実システムに連系した実証試験を実施する。このことによって、超電導ケーブルのトータルシステムとしての総合的な信頼性を実証するとともに、革新的な高効率送電技術の開発・検証を行うことを目的とする。

これにより、安定的かつ高効率な電力供給に資する技術開発を行うとともに、超電導ケーブルの初期市場形成と新規産業の創出に資する。

[研究開発の目標]

平成21年度までに、高温超電導ケーブルシステムの重要要素(ケーブル、中間接続部、冷却システム等)に関して、実システムに適用し得る所定の性能、機能を有し、送電システムが構築できることをモデルシステムによって検証した上で、平成25年度までに、200MVA級の中間接続部を有する三心一括型高温超電導ケーブルを、冷却装置や保護装置などの付帯設備とともに66kV実システムに接続して12ヶ月以上の長期連系試験を行うことによって総合的な安全性や信頼性を実証する。

超電導ケーブルを実用に供する上での運転技術の指針や課題等を明らかにして、高効率送電技術の開発・検証を行うとともに、高圧ガス保安法の規制緩和や国際標準化の提案を行う。

[研究開発の内容]

上記目標を達成するために、以下の研究開発項目について実施する。

- (イ) 高温超電導ケーブルの総合的な信頼性研究
 - (i) 高温超電導ケーブルの重要要素技術の検証
 - (ii) トータルシステム等の開発
 - (iii) 送電システム運転技術の開発
 - (iv) 実システムにおける総合的な信頼性の実証

- (ロ) 超電導ケーブルの適用技術標準化の研究

(イ)「高温超電導ケーブルの総合的な信頼性研究」

高温超電導ケーブルを社会の重要なインフラである電力供給システムに適用するためには、高温超電導ケーブル単体のさらなる低損失化や低コスト化を図るだけでなく、線路建設、運用、保守を含めたトータルシステムとしての総合的な信頼性を確立することが要求される。そのためには、実系統に連系した実負荷での実証試験は不可欠であり、高温超電導ケーブルシステムの安全性や信頼性の知見を得るための総合的な信頼性研究が必要である。

(i) 高温超電導ケーブルの重要要素技術の検証

1. 研究開発の必要性

実系統連系試験に適用する高温超電導ケーブルシステムの重要要素（ケーブル、中間接続部、冷却システム等）に関して、実系統に適用し得る所定の性能、機能を有し送電システムが構築できることを模擬システムにより事前に検証する必要がある。

2. 研究開発の具体的な内容

66kV、200MVA 級 3 心一括型高温超電導ケーブル等の重要要素技術が、実系統連系試験に適用可能であることを検証する。

3. 達成目標（平成 21 年度中）

重要要素技術が、実系統連系に適用し得る次の性能、機能を有することを模擬システムにて検証する。

- ・ 交流損失：1W/m/1 相（3 心一括型高温超電導ケーブル（66kV、2kA）、150mm φ 管路収容）
- ・ 短絡電流：31.5kA・2 秒の短絡電流
- ・ 中間接続部の導体接続損失：2kA 通電相当で $1\mu\Omega$ / 相以下

(ii) トータルシステム等の開発

1. 研究開発の必要性

高温超電導ケーブルシステムが、市場に導入されるためには、線路建設、運転監視、運用・保守方法などのトータルシステムとしての技術を確立する必要がある。

2. 研究開発の具体的な内容

高温超電導ケーブルシステムの線路建設、運転監視、運用・保守方法等のトータルシステムとしてのシステム基本設計の確立および高効率な冷却システムの開発を行うとともに、実運用を行う際の安全性や信頼性、経済性、環境面の評価を行う。

3. 達成目標

中間目標（平成21年度中）

高温超電導ケーブルシステムの線路建設、運転監視、運用・保守等を検討し、トータルシステム構築要領を作成する。

最終目標（平成23年度中）

高温超電導ケーブルシステムの線路建設、運転監視、運用・保守方法等のトータルシステムとしてのシステム基本指針を作成する。また、既存ケーブルの送電損失に比べて1/2以下の高効率送電システムの設計技術を確立する。

(iii) 送電システム運転技術の開発

1. 研究開発の必要性

送電システムの負荷や電流の変動などの系統変化や系統事故などに対応した平常時運用や事故時運用、および高温超電導送電システムの一部設備の障害時における復旧方法などの高温超電導ケーブルシステムの運転技術が、既存送電システムの運転と整合のとれた運用ができることは重要であり、そのための運転技術を開発することは必要である。

2. 研究開発の具体的な内容

高温超電導ケーブルを用いた送電システムが、負荷や電圧の変動などの系統変化や系統事故などに対応した系統運用において、自動的に追従した運転（冷却含む）や、送電システムの一部設備の障害時における復旧方法など送電システムの運転技術を開発する。また、その運転技術を実系統連系試験において検証する。

3. 達成目標

中間目標（平成21年度中）

高温超電導ケーブルの運転技術が、既存送電システムの運転技術と整合するための課題を整理する。

最終目標（平成25年度中）

既存送電システムの運転技術と整合のとれた平常時/事故時および障害復旧時等の高温超電導送電システムの運転技術指針を作成する。

(iv) 実系統における総合的な信頼性の実証

1. 研究開発の必要性

高温超電導ケーブルを社会の重要なインフラである電力供給システムに適用するためには、実系統に連系した実負荷での実証試験は不可欠であり、トータルシステムとしての安全性や信頼性の知見を得るための研究が必要である。

2. 研究開発の具体的な内容

実系統連系試験のためのサイト選定や試験方法などの基本事項を検討する。その上で、実証試験の目的に沿った高温超電導ケーブルシステムの構築を行い、中間接続部を有する高温超電導ケーブルを実系統に連系して、12ヶ月以上の長期試験により総合的な信頼性の検証を行う。

このことによって、高温超電導ケーブルのトータルシステムとしての安全性や信頼性を実証す

る。

3. 達成目標

中間目標（平成21年度中）

実系統連系試験サイトを決定するとともに、実系統連系試験基本計画書を作成する。

最終目標（平成25年度中）

実系統に連系した12ヶ月以上の長期試験による総合的な信頼性の評価指針を作成する。

高温超電導ケーブルは次の要求仕様を達成するものとする。

- ・送電容量：200MVA 級（66kV、3心一括型高温超電導ケーブル、150mmφ管路収容可能）
- ・交流損失：1W/m/1相（3心一括型高温超電導ケーブル（66kV、3kA）、150mmφ管路収容）
- ・短絡電流：31.5kA-2秒の短絡電流に対応
- ・中間接続部の導体接続損失：3kA 通電相当で1μΩ/相以下

(ロ)「超電導ケーブルの適用技術標準化の研究」

1. 研究開発の必要性

超電導ケーブルは、効率的なエネルギー供給システムになくってはならないものであり、エネルギーの高効率な輸送だけでなく、系統安定化にも大きな効果が期待される。その早期の市場導入や実用化を円滑に進めるためには、冷却設備における規制緩和や運転管理などを考慮した既存電力ネットワークとの整合を取るための適用技術を標準化することが必要である。

2. 研究開発の具体的な内容

超電導ケーブルを適用する電力ネットワークの形態や規模などから、超電導ケーブルの適用技術の評価するとともに、冷却設備の安全性、運用性を考慮した法規制のあり方を研究する。

また、実証試験を通じて、運転管理や評価・計測技術等の超電導送電システムの国際規格化を進めるために、標準化項目を整理して必要なデータ収集を行い、適用技術標準化の研究を行う。

3. 達成目標

中間目標（平成21年度中）

- ・超電導ケーブルの適用技術の評価項目や冷却設備の法規制あり方の概要を取りまとめるとともに、超電導送電システムの国際規格化を進めるための標準化項目を作成する。

最終目標（平成25年度中）

- ・電力ネットワークの形態や規模に応じた構成、機能、経済性、環境面などの適用技術や導入効果を評価して超電導ケーブルの導入シナリオを定める。
- ・冷却設備における規制緩和に向けた技術基準を研究し、規制緩和の提案資料を作成する。
- ・超電導送電システムの運転管理や評価・計測法等の国際規格化を進めるため PAS（公開仕様書）または TS（技術仕様書）案を作成する。

[研究開発の実施方法]

(1) 研究開発の実施体制研究開発に参加する研究開発グループの有する研究開発ポテンシャルの最大限の活用により効率的な研究開発の推進を図る観点から、NEDO は東京電力株式会社 技術統括部 技術開発センター 超電導技術グループマネージャー 本庄 昇一を研究開発責任者（プロジェクトリーダー）とし、その下に研究者を可能な限り結集して効果的な研究開発を実施する。

[評価に関する事項]

NEDO は、技術的及び政策的観点から、研究開発の意義、目的達成度、成果の技術的意義ならびに将来の産業への波及効果等について、外部有識者による研究開発の中間評価を平成 21 年度、事後評価を平成 26 年度に実施する。また、中間評価結果を踏まえて必要に応じプロジェクトの加速・縮小・中止等見直しを迅速に行う。なお、評価の時期については、当該研究開発に係る技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗動向等に応じて、前倒しする等、適宜見直すものとする。

[その他の重要事項]

(1) 研究開発成果の取り扱い

① 共通基盤技術の形成に資する成果の普及

得られた研究開発成果のうち、下記共通基盤技術に係る研究開発成果については、NEDO、実施者とも普及に努めるものとする。

a) 実系統への適用技術の確立

- ・ 超電導送電システムの総合的な信頼性技術
- ・ 高効率超電導送電システムの運転技術

② 標準化等との連携

得られた研究開発成果については、知的基盤整備または標準化等との連携を図るため、データベースへのデータ提供、標準情報（TR）制度への提案等を積極的に行う。

特に、冷却設備の規制緩和に関しては積極的に提案を行う。

(2) その他

- ・ 高圧ガス保安法の緩和を提案するために委員会を設置する。

研究開発項目②「イットリウム系超電導電力機器技術開発」

[研究開発の目的]

経済社会の基盤となる電力の安定的かつ効率的な供給システムを実現するため、システムを適正に制御し、電力供給を安定化させるための技術及び発電電力を無駄なく輸送するための高効率な送電技術の確立を目指す。そのため、世界的にも我が国が最先端の技術力を有する超電導技術を活用して、コンパクトで大容量の電力供給が期待できるイットリウムに代表されるレアアース系酸化物高温超電導線材（以下「イットリウム系超電導線材」という）を用いた超電導電力機器の開発を目指す。特に、超電導電力貯蔵システム（SME S）、超電導電力ケーブル及び超電導変圧器の実用化に向けた技術を開発し、産業利用の早期実現を図ることにより、経済社会を支える重要なエネルギーである電力の一層の安定的かつ効率的な供給システム実現に資することを目的とする。

なお、本プロジェクトは、「超電導応用基盤技術開発（第Ⅱ期）」（平成15年度～19年度）及び「超電導電力ネットワーク制御技術開発」（平成16年度～19年度）によって得られた開発成果を踏まえて、実用レベルに達したイットリウム系超電導線材を用いて開発を行う。また、本プロジェクトの研究対象機器は、第3期科学技術基本計画のエネルギー分野の重点科学技術「送電技術」、「電力系統制御技術」、「電力貯蔵技術」に位置付けられており、さらに、超電導技術分野の技術マップ（平成19年4月制定）のエネルギー・電力分野機器開発にも位置づけられている。

[研究開発の目標]

(イ) 超電導電力貯蔵システム（SME S）の研究開発

平成22年度までに、2GJ級SME Sの開発を見通す高磁界かつコンパクトなコイル設計技術の開発並びにメンテナンスを容易とするコイルの伝導冷却技術開発を行う。

平成24年度までに2GJ級SME Sに必要となるイットリウム系超電導線材及びコイルの構造を評価し、高磁界コンパクトSME Sコイルシステム化技術のための重要な要素技術開発に向けた課題を抽出し、解決策を提案することで、2GJ級SME Sの開発が可能であることを証明する。

(ロ) 超電導電力ケーブルの研究開発

平成22年度までに、電力ケーブルの大電流・低交流損失ケーブル化技術、高電圧絶縁・低誘電損失ケーブル化技術に関する要素技術の開発を完了する。

平成24年度までにケーブル対応線材の安定作製技術開発及び66kV大電流ケーブルシステム、275kV高電圧ケーブルシステムの課通電特性や送電損失等の実用性を検証し、各々のケーブルシステムの実用可能性を証明する。

(ハ) 超電導変圧器の研究開発

平成22年度までに、超電導変圧器用の低損失化技術、大電流巻線技術及び限流機能の開発を行い、66kV/6.9kV-2MVA級変圧器の設計を完了する。

平成24年度までに、2MVA級超電導変圧器モデルを試作・評価し、低損失（従来線材対比の交流損失1/3以下）、大電流（2kA級）で、保護のための限流機能（過大電流を定格電流の3倍以下に抑制）を有する66/6kV 20MVA級超電導変圧器システムの成立性を実証する。

(ニ) 超電導電力機器用線材の技術開発

平成22年度までに、電力機器応用の長期信頼性試験等を実施する実用化技術開発の際に必要な性能及び製造速度等を満足させるイットリウム系超電導線材作製技術の開発を実施する。

平成24年度までに、同線材の線材長及び臨界電流等の再現性確認による安定製造技術開発を

行う。さらに、2020年頃を想定した超電導電力機器の導入・普及の際のコストを含めた必要条件に耐え得る線材の作製技術を開発する。

(ホ) 超電導電力機器の適用技術標準化

超電導電力機器の早期市場導入や実用化を円滑に進めるために共通基盤となる標準化を進める。

平成24年度までに、超電導線材及びその試験方法並びに超電導電力ケーブル及びその試験方法について、国際標準化に資する規格素案を作成する。また、イットリウム系超電導線材等を適用した変圧器等の機器及びこれらの試験方法の規格素案を作成する。

[研究開発の内容]

上記目標を達成するために、以下の研究開発項目について実施する。

[委託事業]

(イ) 超電導電力貯蔵システム (SMES) の研究開発

- (i) 2GJ 級高磁界・大電流コンパクトコイル構成技術開発
- (ii) 高効率コイル伝導冷却技術開発
- (iii) SMES 対応線材開発
- (iv) 高信頼性・高耐久性 SMES コイル要素技術開発

(ロ) 超電導電力ケーブルの研究開発

- (i) 大電流・低交流損失ケーブル化技術の開発
- (ii) 高電圧絶縁・低誘電損失ケーブル化技術の開発
- (iii) 超電導電力ケーブル対応線材開発
- (iv) 66kV 大電流ケーブルシステム検証
- (v) 275kV 高電圧ケーブルシステム検証

(ハ) 超電導変圧器の研究開発

- (i) 超電導変圧器巻線技術開発
- (ii) 冷却システム技術開発
- (iii) 限流機能付加技術開発
- (iv) 超電導変圧器対応の線材開発
- (v) 2MVA 級超電導変圧器モデル検証

(ニ) 超電導電力機器用線材の技術開発

- (i) 線材特性の把握
- (ii) 磁場中高 I_c 線材作製技術開発
- (iii) 低損失線材作製技術開発
- (iv) 高強度・高 J_e 線材作製技術開発
- (v) 低コスト・歩留向上技術開発

(ホ) 超電導電力機器の適用技術標準化

- (i) 超電導線材関連技術標準化
- (ii) 超電導電力ケーブル関連技術標準化
- (iii) その他超電導電力機器関連技術標準化等

(イ)「超電導電力貯蔵システム（SME S）の研究開発」

SME Sは、高速な充放電特性や高い繰り返し耐久性を持ち、高出力化や大容量化に優れた電力貯蔵装置である。今後、ますます大規模電源の遠隔化が予想されるが、有効電力・無効電力の同時補償により、有効な長距離大容量送電システムの安定化対策が可能なSME Sは、中間開閉所の設置や送電ルートの複数化等による従来の対策に替わる電力系統安定化装置として期待されている。

このため、「超電導応用基盤技術開発（第Ⅱ期）」（平成 15 年度～19 年度）及び「超電導電力ネットワーク制御技術開発」（平成 16 年度～19 年度）によって得られた開発成果を踏まえて、実用レベルに達したイットリウム系超電導線材を用い、従来の金属系超電導線材を用いたSME Sコイルでは実現不可能であった2GJ級大容量SME Sコイルを可能とする高磁界・コンパクトコイルの構成のための重要な要素技術の開発を行い、同コイル巻線に必要な線材及びコイル構造を評価し、信頼性・耐久性を向上させることで高磁界コンパクトSME Sの実用化を目指す。また、並行してメンテナンスが容易で、イットリウム系超電導線材の性能向上が期待できる温度領域での高効率な伝導冷却技術を開発する。また、SME Sの性能向上とともに導入促進に資する線材開発を行う。

(i) 2GJ級高磁界・コンパクトコイル構成技術開発

1. 研究開発の必要性

2GJ級大容量SME Sコイル実現のためには、従来の金属系SME Sでは達成できなかったレベルの貯蔵エネルギー密度の向上が課題となり、磁場中特性に優れるイットリウム系超電導線材によるコイルを用いた高磁界化による貯蔵エネルギー高密度化が必要となる。この高磁界コイルの実現には、コイル通電時に発生する通電電流と最大経験磁場、コイル径の積として加わる強力な電磁力（フープ応力）の繰り返しに耐えるコイル構成を開発することが不可欠である。

2. 研究開発の具体的な内容

- ・ 従来の金属系SME Sコイルの許容可能なフープ応力(300MPa程度)の2倍の応力(600MPa)を連続して繰り返し加えても使用可能な高強度コイルを開発する。
- ・ SME Sシステムとして必要な通電電流を実現させる積層複合導体を用いたコイル構成技術の開発を行う。

3. 達成目標

最終目標（平成22年度中）

- ・ フープ応力 600MPa 以上、通電電流 2kA 以上のSME Sコイル構成技術を開発する。

(ii) 高効率コイル伝導冷却技術開発

1. 研究開発の必要性

SME Sの安定した動作には、コイルの熱安定性が不可欠であり、従来の金属系SME Sで用いられてきた4K温度領域に比べコイルの比熱が高くなる20K以上の温度領域での適用が可能となれば、その安定性が飛躍的に向上する。また、イットリウム系超電導線材は、低温になるに従い飛躍的に磁場中臨界電流特性が向上し、20K近傍の温度領域では、10Tの磁場中でもその特性低下が実用上の問題とならなくなる。しかし、この温度領域では熱伝導率が小さいため、高効率な熱伝導冷却技術が必要である。同時に、伝熱性能とトレードオフの関係になる電気絶縁性能においても高い絶縁性能を有したコイル構造の開発を要する。

2. 研究開発の具体的な内容

- ・ 20～40K 付近の温度領域における伝導冷却を可能とするコイル構造を開発するとともに、高熱伝導性能とトレードオフの関係になる電気絶縁性能においても、高い性能を有したコイル構造を開発する。
- ・ 上記で試作したコイルがSME Sの運転条件から予想される発生熱を伝導冷却により冷却可能であることを検証するとともに、必要な絶縁性能を有することを検証する。

3. 達成目標

最終目標（平成22年度中）

- ・ 20～40K 付近の温度領域における伝導冷却を可能とするコイル伝導冷却技術を開発する。
- ・ 2kV 以上の電気絶縁性能を有する高熱伝導コイル構造を開発する。

(iii) SME S 対応線材開発

1. 研究開発の必要性

SME S用高磁界コンパクトコイル構成のためには、積層複合導体・SME S本体の構造を含めた機器サイドの開発に必要な安定した線材製造技術の確立が求められる。

2. 研究開発の具体的な内容

(a) 線材安定製造・歩留り向上技術

3. 達成目標

中間目標（平成22年度中）

- ・ モデルコイル試作に必要な下記仕様に相当する線材の安定製造技術を確立する。
仕様：Ic=20A/cm 幅@77K&3T で強度 1GPa を有する 100m に相当する線材

(iv) 高信頼性・高耐久性SME S コイル要素技術開発

1. 研究開発の必要性

2G J 級電力系統制御用SME Sシステムの実用化を実現するためには、高磁場で利用できコンパクトで熱安定性に優れたコイル構造の開発や、そのコイルを高い信頼性で利用可能な冷却技術開発に加え、SME Sシステムとしての信頼性向上を図ることが必要不可欠である。SME Sは電力機器として、超電導コイルへの繰返し充放電が要求され、繰返し運転において十分な信頼性、耐久性を有していることが求められる。既に、SME Sの系統制御機能については金属系超電導コイルを用いた20MJ級SME Sシステムの実系統連系試験により確認されており、その試験で2万回以上の繰返し試験を実施している。リチウム系超電導コイルを用いたSME Sシステムにおいても同等の性能を有することを検証することが不可欠である。そのためには、SME Sシステムの要素コイルについて、SME S運転条件におけるコイルの限界性能を把握し、SME Sコイルシステムとしての信頼性・耐久性を向上させる必要がある。

2. 研究開発の具体的な内容

・ 電力系統制御用SME Sとして、前記(i) 2G J 級高磁界・コンパクトコイル構成技術開発、及び(ii) 高効率コイル伝導冷却技術開発の成果を踏まえつつ、SME S実運転条件を模擬した試験システムにより、コイル線材及びコイル構造を評価し、コイル限界性能を把握することでSME Sコイルシステムとしての信頼性・耐久性向上技術を確立する。また、クエンチ検出・保護も考慮し、実運転に耐えうるコイル要素技術の開発に向けて課題を抽出し、解決策を提案する。

3. 達成目標

中間目標（平成22年度中）

- ・2GJ級SME Sコイル基本システム構成の最適化並びに高磁界コンパクト・高効率伝導冷却コイルを用いた評価用試験モデルの設計を完了する。
- ・SME Sシステムとしての適用性を検証評価する試験計画を作成する。

最終目標（平成24年度中）

- ・実運転条件におけるコイル線材及びコイル構造を評価することで、2万回繰返し充放電試験と同等レベルの信頼性・耐久性を持つコイル要素技術開発に向けて課題を抽出し、解決策を提案する。

(ロ)「超電導電力ケーブルの研究開発」

超電導電力ケーブルはコンパクトな形状で大容量送電を可能とし、既設管路を有効活用した送電容量の増大が可能である。今後、都市部の電力需要増大への対策や老朽化した設備のリプレース対策として地中ケーブルへの適用が期待されている。また、超電導電力ケーブルは既存の導体ケーブルに比較し、送電ロスを低減することが可能であることから、省エネルギー、地球温暖化対策に貢献できることも期待されている。

このため、「超電導応用基盤技術開発（第Ⅱ期）」（平成15年度～平成19年度）によって得られたイットリウム系超電導線材作製技術開発、機器要素技術開発などの成果を活用し、コンパクトで大容量送電を可能とする超電導電力ケーブルについて、大電流導体化技術、冷却技術を含めた高電圧絶縁技術、低損失化技術、中間接続や終端接続等の大容量接続技術、機械的特性向上技術等の技術開発を行う。さらに最終目標として、この成果を活かした超電導電力ケーブルシステムを開発し検証することによって、高効率な超電導電力ケーブルによる送電技術に目途を付ける。

また、電力ケーブルの性能向上とともに導入促進に資する超電導線材開発を行う。

(i) 大電流・低交流損失ケーブル化技術の開発

1. 研究開発の必要性

イットリウム系超電導線材はビスマス系超電導線材に比べ交流損失を低減することが可能であるが、そのためには線材を細線化する必要がある。一方、ケーブルの通電電流を5kAに大電流化する場合、多層導体を形成する必要がある。このように細線化線材を多層に集合した構造は未だ実現されておらず、ケーブルとして導体化時の線材特性への影響、多層導体構造での低交流損失設計及び実証、超電導ケーブルの機械的強度特性検証等を行う必要がある。併せて大電流適用に対応した超電導-常電導接続部の構造設計の検証と電流リード部の開発を行う必要がある。

また、三心一括ケーブルとする場合には、機械特性（引張り、曲げ）、熱収縮応力下でのケーブル変形の影響、短絡電流通過時の電磁力によるケーブルコアへの影響等が懸念されるため、それらの検証・評価を行う必要がある。

2. 研究開発の具体的な内容

(a)大電流・低交流損失技術の基礎特性評価

大電流ケーブルに使用する超電導線材の多層導体化時の交流損失を含めた電気的特性の基礎データを取得し、コンパクトで低損失なケーブル設計技術を確立する。

- ・素線及びケーブル導体の交流損失の測定・評価

- ・ケーブル導体の曲げ、引張り特性の評価
- ・コンパクトで低損失なケーブル設計

(b)大容量接続技術の開発

- ・超電導-常電導接続部の構造設計検証
- ・5kA 級電流リードの開発

(c)三心一括ケーブル導体の検証

- ・三心一括ケーブル導体の試作・評価
- ・短絡電流通過時のケーブル性能への影響検証

3. 達成目標

中間目標（平成22年度中）

大電流ケーブル導体等の特性試験によって、コンパクトで低損失なケーブル設計技術及び大容量接続技術等を確立する。

- ・ケーブル損失（交流損失） 2 W/m-相@5kA 以下
- ・短絡試験（31.5kA, 2sec 相当）でケーブルの性能に劣化が無いこと
- ・5kA 連続通電※を行いケーブル導体、超電導-常電導接続部、電流リードに異常がないこと

※ケーブルの熱平衡が得られるまで連続通電を行う

最終目標（平成24年度中）

中間接続部を有する大電流ケーブルコアを作成し、課電および機械強度特性の評価を行い、中間接続部の要素技術を確立する。また実用化に向けて、更なる交流損失の低減に向けたケーブル構造を検討し設計する。

(ii) 高電圧絶縁・低誘電損失ケーブル化技術の開発

1. 研究開発の必要性

66kV 級超電導電力ケーブルに比べて 275kV 級高電圧超電導電力ケーブルは、高電圧に対する絶縁技術が要求される。このため、電氣的絶縁性能を確保しつつケーブルをコンパクト化する技術、誘電損失を低減しつつ液体窒素による導体冷却を適切に行う技術等を確立したうえで高電圧絶縁・低誘電損失ケーブル化技術の技術開発を行う必要がある。

2. 研究開発の具体的な内容

(a) 高電圧絶縁・低誘電損失技術の基礎特性評価

超電導電力ケーブルに使用する電気絶縁材料の電氣的基礎特性、絶縁厚さと誘電損失の関係など基礎データを取得し、コンパクトで低損失なケーブル設計の基礎特性を確立する。

- ・絶縁材料の基礎特性評価
- ・誘電損失の評価

(b)大径ケーブルの熱収支特性評価

常時及び事故時の発熱・冷却に関する熱収支検討を行い、ケーブルの最適設計手法を確立し、短絡電流通過時でも熱的に破壊しないことを確認する。

- ・通常通電時の熱特性把握
- ・事故時の熱特性把握

(c)高電圧接続技術の開発

中間及び終端の接続部を開発し、交流電圧及びインパルスに対して十分な性能を有することを確認する。

- ・耐電圧試験（交流耐電圧試験条件、インパルス耐電圧試験条件）計画書の作成
- ・中間接続部の開発及び耐電圧試験で異常がないこと
- ・終端接続部の開発及び耐電圧試験で異常がないこと

(d)ケーブル性能評価

中間目標で得られた技術を用いて、275kV 高電圧ケーブルシステム検証用ケーブルと同仕様の短尺ケーブルコアモデルを製作し、上記(a)～(c)の性能を確認する。

3. 達成目標

中間目標（平成22年度中）

高電圧ケーブル導体等の特性試験によって、コンパクトで低損失なケーブル設計技術及び大電圧接続技術等を確立する。

- ・ケーブル損失（交流損失、誘電損失） 0.8 W/m-相@3kA 以下
- ・短絡試験（63kA, 0.6sec 相当）でケーブル性能に劣化が無いこと
- ・275kV 連続課電※を行いケーブル導体、超電導-常電導接続部、電流リードに異常がないこと

※ケーブルの熱平衡が得られるまで連続課電を行う。

最終目標（平成24年度中）

- ・中間目標で得られた技術を用いて、短尺ケーブルコアモデルを作製し、その性能について評価・検討し、各種コア構造のシステム設計の妥当性を検証することによって、275kV 高電圧ケーブルシステムに反映する。

(iii) 超電導電力ケーブル対応線材開発

1. 研究開発の必要性

大電流及び高電圧電力ケーブルを実現するためには、損失低減やコンパクト化などの課題に対する導体・ケーブルの構造を含めた機器サイドの開発に必要な線材を安定して作製する技術の確立が求められる。

2. 研究開発の具体的な内容

(a)線材安定製造・歩留向上技術

(b)システム検証用線材の安定作製、加工、評価

3. 達成目標

中間目標（平成22年度中）

- ・ケーブルシステム検証に必要な下記仕様に相当する線材を安定に作製可能な技術を確立する。

仕様：Je=15kA/cm²（2mm 幅×20m）に相当する線材

最終目標（平成24年度中）

上記仕様に相当するシステム検証用線材の安定作製、加工、評価、を確実に実施する。

(iv) 66kV 大電流ケーブルシステム検証

1. 研究開発の必要性

66kV 大電流ケーブルの実用性を検証するためには、大電流通電技術、交流損失低減技術、誘

電損失低減技術の開発成果を活かしたケーブルを開発し、実用化時の要求仕様に基づいた課通電試験を行う必要がある。

2. 研究開発の具体的な内容

前記、(i) 大電流・低交流損失ケーブル化技術の開発及び(ii) 高電圧絶縁・低誘電損失ケーブル化技術の開発の成果を踏まえつつ、検証用超電導ケーブルシステムの設計・製作を行い、課通電試験によってケーブル性能を検証する。

- ・両端に終端接続部を有する 66kV/三心一括/5kA,15m 長の超電導ケーブルシステムを開発する。
- ・66kV 大電流ケーブル実用化時の耐久性を評価できる試験条件を設定し、開発したケーブルの課通電試験を実施する。

3. 達成目標

中間目標（平成22年度中）

- ・両端に終端接続部を有する検証用 66kV/三心一括/5kA,15m 長の超電導ケーブルシステムのシステム設計を完了する。
- ・耐久性を評価できる課通電試験計画書を作成する。

最終目標（平成24年度中）

- ・下記性能を有する 66kV/三心一括/5kA,15m 長の超電導ケーブルを作製する。
 - －ケーブル外径；内径 150mm φ の管路に収納できること
 - －ケーブル損失（交流損失、誘電損失）；2.1 W/m・相@ 5kA 以下
 - －中間目標で得られた課通電試験の設定条件下における課通電試験を実施し、試験計画書の性能を満足することを検証する。

(v) 275kV 高電圧ケーブルシステム検証

1. 研究開発の必要性

275kV 高電圧ケーブルの実用性を検証するためには、高電圧絶縁技術、誘電損失低減化技術、大電流通電技術、交流損失低減技術の開発成果を活かしたケーブルを開発し、実用化時の要求仕様に基づいた課通電試験を行う必要がある。

2. 研究開発の具体的な内容

前記、(i) 大電流・低交流損失ケーブル化技術の開発、及び(ii) 高電圧絶縁・低誘電損失ケーブル化技術の開発の成果および短尺ケーブルコアモデルにおける成果を踏まえつつ、検証用超電導ケーブルシステムの設計・製作を行い、課通電試験によってケーブル性能を検証する。

- ・両端に終端接続部と中間接続部を有する 275kV/単心/3kA,30m 長の超電導ケーブルシステムを開発する。
- ・275kV 高電圧ケーブル実用化時の耐久性を評価できる試験条件を設定し、開発したケーブルの課通電試験を実施する。

3. 達成目標

中間目標（平成22年度中）

- ・両端に終端接続部と中間接続部を有する検証用 275kV/単心/3kA,30m 長の超電導ケーブルシステムのシステム設計（各種コア構造を含む）を完了する。
- ・耐久性を評価できる課通電試験計画書を作成する。

最終目標（平成24年度中）

- ・下記性能を有する 275kV/単心/3kA,30m 長の超電導ケーブルを作製する。
 - －ケーブル外径；150mmφ 以下
 - －ケーブル損失（交流損失、誘電損失）；0.8W/ m・相@3kA 以下
 - －中間目標で得られた課通電試験の設定条件下における課通電試験を実施し、試験計画書の性能を満足することを検証する。

(ハ)「超電導変圧器の研究開発」

超電導変圧器は従来の変圧器に比べ、高効率でコンパクト化が可能であり、絶縁に油を用いないため、不燃で環境負荷が小さいことを特長とする。今後、都市部を主体とした電力需要増加に伴う変圧器容量対策や変電所の新設対策及び経年劣化に伴う変圧器のリプレース対策に貢献すると考えられている。また、大容量送電を可能とする超電導電力ケーブルとの組み合わせにより、より高効率な電力供給システムが可能となる技術として期待されている。

このため、「超電導応用基盤技術開発（第Ⅱ期）」（平成15年度～平成19年度）におけるイットリウム系超電導線材作製技術開発、機器要素技術開発などの成果を活用し、コンパクトで高効率な超電導変圧器に必要な巻線技術、高電圧絶縁技術等の技術開発を行う。さらに最終目標として、超電導変圧器を開発し、検証することによって、高効率な変電技術に目途をつける。

また、変圧器の性能向上とともに導入促進に資する線材開発を行う。

(イ) 超電導変圧器巻線技術開発

1. 研究開発の必要性

20MVA 級超電導変圧器の実現のためには、従来の金属系超電導線材やビスマス系超電導線材では達成できなかった大電流化、低損失化が課題となる。これら課題の解決には、細線化したイットリウム系超電導線材を積層し、大電流化した導体による巻線コイル製作技術が必要となる。また同時に、同構造のコイルが系統や変圧器の故障により発生する短絡電流に対しても、変圧器を健全に維持できる強度を有する構造とする必要がある。

2. 研究開発の具体的な内容

超電導応用基盤技術開発（第Ⅱ期）における検証の結果より、以下の開発を行う。

- ・多層並列転位構造を最適化し、2kA が通電可能な巻線コイルを開発する。
- ・細線化線材により、無加工線を使用した場合に対し損失が 1/3 以下となる 100m 級巻線コイルを開発する。
- ・短絡電流（20MVA 級変圧器%インピーダンス 15%相当）により、巻線が劣化しない巻線コイルを開発する。

3. 達成目標

中間目標（平成22年度中）

- ・2kA 級の超電導通電特性を検証する。
- ・短絡電流（20MVA 級変圧器%インピーダンス 15%相当）により、巻線が劣化しないことを検証する。

最終目標（平成24年度中）

- ・2MVA 級超電導変圧器モデル検証のため、大電流モデルを設計・製作し、通電試験の実施、解析等により大電流巻線技術を確立する。
- ・100m 級巻線コイルにて、交流損失が 1/3 以下（対細線化しない線材）となることを検証する。

証する。

(ii) 冷却システム技術開発

1. 研究開発の必要性

過去最大規模の超電導変圧器を高効率かつコンパクトな姿で実現するには、超電導巻線を低温に維持する保冷容器は変圧器に対して過大とならない範囲で従来より大きいものが必要であり、また冷却システムは保守性能を高めて高効率化する必要があるため、新たな開発が必要である。

なお、保冷容器及び冷却システムの一部は、超電導変圧器システム全体が従来にない大きさのため、設計技術についても開発する必要がある。

2. 研究開発の具体的な内容

- ・ 超電導変圧器に適用可能な大型非磁性保冷容器を開発する。
- ・ 高効率で保守性能に優れた高効率冷却装置を開発する。
- ・ 保冷容器と冷却装置からなる冷却システムは後述の超電導変圧器モデルと組み合わせて性能を検証する。

3. 達成目標

中間目標（平成22年度中）

- ・ 保守性能の高いコンパクトな冷却システム用の高効率圧縮機（断熱効率 $\geq 65\%$ ）及び高効率膨張機（断熱効率 $\geq 65\%$ ）を検証する。

最終目標（平成24年度中）

- ・ 三相非磁性で容器容量 10m³級の大型非磁性保冷容器を開発し、保冷性能（既存の小型容器相当の 20W/m² 以下）を試験にて検証する。
- ・ 試作した冷却システムの試験にて冷凍性能（冷凍機冷凍能力 2kW@65K、冷凍機効率 COP $\geq 0.06@80K$ ）を検証する。

(iii) 限流機能付加技術開発

1. 研究開発の必要性

超電導変圧器は限流機能を備えることにより自身の健全性を維持するとともに、電力系統の事故時の過大な事故電流を瞬時に抑制して事故の波及抑制ができ、電力系統の短絡容量対策にも貢献する。さらに、将来的に超電導電力ケーブルと超電導変圧器を連系して適用する場合にも限流機能は相互の導入促進に貢献すると考えられる。

2. 研究開発の具体的な内容

- ・ 限流技術の基礎試験を行い、限流機能付加変圧器の設計手法を確立する。
- ・ 数百 kVA 級変圧器単相巻線モデルを試作し、限流特性を検証する。

3. 達成目標

中間目標（平成22年度中）

- ・ 限流機能付加変圧器の設計手法を確立する。

最終目標（平成24年度中）

- ・ 数百 kVA 級単相変圧器の巻線モデルにより、過大電流の限流機能（過大電流を定格電流の3倍以下に抑制）を検証する。

(iv) 超電導変圧器対応線材開発

1. 研究開発の必要性

20MVA 級超電導変圧器を実現するためには、交流損失低減に代表される課題の解決のために超電導変圧器構造を含めた機器サイドの開発を進めるとともに、安定した線材製造技術の確立が求められる。

2. 研究開発の具体的な内容

(a)線材安定製造技術・歩留り向上技術

(b)システム検証用線材の安定作製、加工、評価

3. 達成目標

中間目標（平成22年度中）

- ・変圧器モデル検証に必要な下記仕様に相当する線材を安定に作製できる技術を確立する。

仕様：5mm 幅 3 分割にて $I_c=50A@65K\&0.01T$ 、100m 以上に相当する線材

最終目標（平成24年度中）

- ・上記仕様に相当するシステム検証用線材の安定作製、加工、評価を確実に実施する。

(v) 2MVA 級超電導変圧器モデル検証

1. 研究開発の必要性

配電用変圧器（66kV/6.9kV-20MVA 級）の実現には、巻線技術（低損失技術、大電流技術等）や冷却システム技術等の要素技術を総合的に組み合わせた実機を作成し、実用化時の要求使用に基づいた課通電試験による検証を行う必要がある。

2. 研究開発の具体的な内容

20MVA 級変圧器を検証可能な 66kV/6.9kV-2MVA 級モデルを開発し、前記、(i) 変圧器巻線技術開発及び (ii) 冷却システム技術開発の成果を踏まえつつ、検証用変圧器システムの設計・試作を行い、課通電試験によって性能を検証する。

- ・要素技術（巻線、保冷容器、冷却システム等）を組合せて 66kV/6.9kV-2MVA 級超電導変圧器モデルを開発する。
- ・交流損失低減や耐電圧性を考慮した試験条件の設定を行い、開発した変圧器モデルの課通電試験を実施する。
- ・66kV/6.9kV-2MVA 級超電導変圧器モデルの特性を検証する。

3. 達成目標

中間目標（平成22年度中）

- ・66kV/6.9kV-2MVA 級超電導変圧器モデルのシステム設計を完了する。
- ・交流損失低減や耐電圧性を考慮した課通電試験計画書を作成する。

最終目標（平成24年度中）

- ・66kV/2MVA 級超電導変圧器モデルを試作し、中間目標で得られた設定条件における課通電試験を実施し、試験計画書の性能を満足することを検証する。

(ニ)「超電導電力機器用線材の技術開発」

リットリウム系超電導電力機器開発に不可欠な超電導線材の開発は、超電導電力機器開発に並行して進めることが、将来の実用化に向けて重要かつ効率的と言える。臨界電流等の超電導特性、

交流損失、機械強度等の評価、イットリウム系超電導線材の微細構造解析、伝熱解析等の評価結果等を線材作製技術開発にフィードバックし、よりの確で効率的な線材開発を図る。また将来の実用化に向けて、磁場中臨界電流特性や線材機械強度の向上、工業的臨界電流密度 (J_e) の向上、交流損失低減技術開発と密接に関係する線材特性の均一性向上等の更なる線材性能の向上を目的とした開発を行う。

本事業に引き続いて想定されている電力機器応用の長期信頼性試験等を実施する実用化技術開発の際に必要な性能及び製造速度等を満足させるイットリウム系超電導線材作製技術の開発を前期3ヵ年で実施し、その安定製造技術開発を後期2ヵ年で実施する。さらには、2020年頃を想定した電力機器の導入・普及の際のコストを含めた必要条件に耐え得る線材の作製技術の開発を目的とする。

(i) 線材特性の把握

1. 研究開発の必要性

イットリウム系超電導線材の実用化には更なる基礎特性の向上とともに機器の仕様に即した線材開発が必要である。これまでは長さや特性の向上を中心に開発が行われてきたが、ユーザー側からは同時に保存、機器化及び使用環境での耐久性に関する系統的な情報が要求される。

2. 研究開発の具体的な内容

保存環境(湿度、温度等)、機器化及び運転環境を模擬した様々な環境下(真空中、液体窒素中、曲げ、引っ張り等)に線材を保存し、臨界温度(T_c)や臨界電流(I_c)等の特性の経時・経年変化を評価する。必要に応じてX線回折による構成相の確認とともに微細組織観察を実施し、劣化機構とこれを抑制する手法の提案を目指す。

3. 達成目標

中間目標(平成22年度中)

- ・電力ケーブル耐久試験適正条件を決定する。

最終目標(平成24年度中)

- ・各種機器環境に対する耐久性を評価する。

(ii) 磁場中高臨界電流(I_c)線材作製技術開発

1. 研究開発の必要性

イットリウム系超電導線材の実用化には更なる基礎特性の向上とともに各機器の特殊仕様に即した線材開発が必要である。SMESや変圧器などの磁場中応用に対しては、それぞれの運転温度・磁場中での特性向上技術開発が必要である。

2. 研究開発の具体的な内容

高磁場中($\sim 10T$)での応用となるSMES及び比較的低磁場($\sim 0.1T$)ながら垂直磁場成分が関与するソレノイドコイルが想定されている超電導変圧器等の応用を想定し、磁場中特性の向上技術を開発する。

- ・人工ピン止め点導入関連技術を開発する。
- ・高不可逆磁場材料を開発する。

3. 達成目標

中間目標(平成22年度中)

実用化技術開発時(本プロジェクト終了後)に必要な下記仕様に相当する線材の作製技術を開

発する。

- ・ Ic=30A/cm 幅@77K,3T-50m
- ・ Ic=300A/cm 幅@65K,0.02T-50m (5mm 幅-5 分割時に Ic=100A に相当)

最終目標 (平成 24 年度中)

導入普及時(2020 年頃)に必要と想定される下記仕様に相当する線材の作製技術を開発する。

- ・ Ic=50A/cm 幅@77K,3T-200m
- ・ Ic=400A/cm 幅@65K,0.1T-100m (5mm 幅-10 分割時に Ic=100A に相当)

(iii) 低交流損失線材作製技術開発

1. 研究開発の必要性

イットリウム系超電導線材の実用化には更なる基礎特性の向上とともに各機器の特殊仕様に即した線材開発が必要である。ケーブルや変圧器などの交流応用に対しては、線材としても、それぞれの用途に適応した交流損失低減技術開発が必要である。超電導電力ケーブルでは、真円断面形状からのずれや線材間ギャップ数・間隔等の制御、超電導変圧器では、コイル形状における垂直磁場成分の変動に伴う交流損失低減のためのフィラメント化が必要であり、均一な線材とともに加工技術の開発が必要となる。

2. 研究開発の具体的な内容

交流応用が想定されている超電導電力ケーブル、超電導変圧器から求められる線材として交流損失の低減化技術を開発する。

- ・ 均一線材作製技術を開発する。
- ・ 細線加工技術を開発する。

3. 達成目標

中間目標 (平成 22 年度中)

実用化技術開発時 (本プロジェクト終了後)に必要な下記仕様に相当する線材の作製技術を開発する。

- ・ 2mm 幅-Ic=300A/cm 幅-50m
- ・ 5mm 幅 5 分割-50m—分割無しに比べて交流損失 1/5

最終目標 (平成 24 年度中)

導入普及時(2020 年頃)に必要と想定される下記仕様に相当する線材の作製技術を開発する。

- ・ 2~4 mm 幅以下-Ic=500A/cm 幅-200m
- ・ 5mm 幅 10 分割-100m—分割無しに比べて交流損失 1/10

(iv) 高強度・高工業的臨界電流密度 (Je) 線材作製技術開発

1. 研究開発の必要性

イットリウム系超電導線材の実用化には更なる基礎特性の向上とともに各機器の特殊仕様に即した線材開発が必要である。SMES やケーブルなどの応用に対しては、それぞれの用途に適応した高強度化及び高 Je 化技術開発が必要である。SMES 応用においては、強磁場下での強いフープ力が想定され、ケーブル応用では冷却時収縮長の裕度を内部構造で確保しにくく冷却時の応力が想定されるとともにコンパクト化、低損失化の観点から高 Je 線材の開発が必要である。

2. 研究開発の具体的な内容

強磁場中での応用に対し高強度が必要な SMES、高強度とともに高 Je 特性が求められる超電導電力ケーブルから求められる線材として高強度・高 Je 線材の作製技術を開発する。

- ・高強度金属基板対応線材作製技術を開発する。
- ・高臨界電流 (I_c) 化技術を開発する。

3. 達成目標

中間目標 (平成 22 年度中)

実用化技術開発時 (本プロジェクト終了後) に必要な下記仕様に相当する線材の作製技術を開発する。

- ・ $I_c=300A/cm$ 幅-1GPa-50m
- ・ $Je=30kA/cm^2-50m$

最終目標 (平成 24 年度中)

導入普及時(2020 年頃)に必要と想定される下記仕様に相当する線材の作製技術を開発する。

- ・ $I_c=500A/cm$ 幅-1GPa-200m
- ・ $Je=50kA/cm^2-200m$

(v) 低コスト・歩留向上技術開発

1. 研究開発の必要性

超電導線材の実用化には基礎特性の向上とともに、上述の機器に適応した特殊仕様を満たす技術開発が必要であるが、全ての機器に対する必要条件として、更なるコストの低減と量産化に繋がる安定製造技術開発が必要である。

2. 研究開発の具体的な内容

本事業に引き続いて想定されている電力機器応用の長期信頼性試験等を実施する実用化技術開発及び超電導電力機器の導入普及が本格的となる 2020 年を見据え、その時に必要とされる低コストかつ安定なイットリウム系超電導線材の製造プロセス技術を開発する。

- ・実用化技術開発用線材の安定製造・歩留向上技術を開発する。
- ・低コスト対応高速・高 I_c 化技術を開発する。
- ・接続および補修技術を開発する。

3. 達成目標

中間目標 (平成 22 年度中)

- ・技術コスト 3 円/Am を実証する。

最終目標 (平成 24 年度中)

- ・中間目標技術を安定に作製可能な技術を開発する。(線材長及び臨界電流等の再現性を確認)
- ・技術コスト 2 円/Am を実証する。

(ホ) 「超電導電力機器の適用技術標準化」

超電導電力機器にとって共通の基盤となる超電導線関連技術並びに超電導電力ケーブル等の超電導電力機器適用技術の標準化等を行う。

(i) 超電導線関連技術標準化

1. 研究開発の必要性

超電導電力機器の開発の促進と高効率化のため、種々の超電導電力機器に共通の超電導線関連技術並びに超電導電力機器固有の超電導線関連技術の標準化研究は必要である。

2. 研究開発の具体的な内容

イットリウム系超電導線と実用超電導線材との特質を対比調査するとともに、過去に実施された超電導線関連技術標準化の研究成果と一体化し、国際標準化に資する情報の集約並びに国際標準規格の素案作成を行う。

3. 達成目標

中間目標（平成22年度中）

イットリウム系を含む超電導線材並びにその試験方法の規格素案を作成するとともに、国際合意の醸成（アドホック設置活動）を行う。

最終目標（平成24年度中）

国際規格提案を目指して超電導線材並びにその試験方法の規格素案を作成する。

(ii) 超電導電力ケーブル関連技術の標準化

1. 研究開発の必要性

イットリウム系を含め、高温超電導線を適用した超電導電力ケーブルの実証試験が国内外で多数実施されている。特に、我が国の超電導電力ケーブル技術は世界をリードしている。

超電導電力ケーブルの開発の促進と国際競争力の確保のため超電導電力ケーブル関連技術の標準化研究は必要である。

2. 研究開発の具体的な内容

イットリウム系超電導線を含む超電導線を適用した超電導電力ケーブル技術を調査するとともに、過去に実施された超電導電力ケーブル関連技術標準化の研究成果との融合を図り、

国際標準化に資する情報を整理し、国際標準規格の素案を作成する。

3. 達成目標

中間目標（平成22年度中）

イットリウム系を含む超電導線を適用した超電導電力ケーブル並びにその試験方法の規格素案を作成するとともに、IEC/TC90（超電導技術を扱う国際電気標準会議の技術委員会）、及びIEC/TC20（既存電力ケーブルを扱う国際電気標準会議の技術委員会）等と連携して国際合意の醸成（アドホック設置活動）を行う。

最終目標（平成24年度中）

国際規格提案を目指して、超電導電力ケーブル並びにその試験方法の規格素案を作成する。

(iii) その他超電導電力機器関連技術の標準化等

1. 研究開発の必要性

電力に対するニーズの多様化に伴い電力機器も多様化している。かかる状況にかんがみ、電力の安定供給のみならず、電力品質に対する技術対応が重要になっている。したがって、超電導電力ケーブルのみならず電力品質等に有効な超電導電力機器技術やシステム化技術の標準化研究は必要である。

2. 研究開発の具体的な内容

超電導変圧器、SME Sなどの超電導電力機器を対象に、その電力品質や制御に関連する技術調査を実施し、国内外における諸標準化に資する。また、冷却設備の安全性、運用性を考慮した法

規制の在り方を研究する。

3. 達成目標

中間目標（平成22年度中）

イットリウム系を含む超電導線等を適用した超電導変圧器、SME S等の機器仕様並びにこれらの試験方法の標準化の基礎となるデータ等の体系化を行う。

最終目標（平成24年度中）

- ・イットリウム系超電導線材等を適用した超電導変圧器、SME S等の機器仕様並びにこれらの試験方法の標準化素案を作成するとともに、国際合意の醸成（アドホック設置活動）を行う。
- ・冷却システムの安全性、運用性を考慮した規制緩和に向けた提案資料を作成する。

[研究開発の実施方法]

(1) 研究開発の実施体制

研究開発に参加する各研究開発グループの有する研究開発ポテンシャルの最大限の活用により効率的な研究開発の推進を図る観点から、財団法人国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所 所長 塩原 融氏をプロジェクトリーダーとし、中部電力株式会社 電力技術研究所 研究主査 長屋 重夫氏、財団法人国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所 電力機器研究開発部長 大熊 武氏、九州電力株式会社 総合研究所 電力貯蔵技術グループ グループ長 林 秀美氏および財団法人国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所 線材研究開発部長 和泉 輝郎氏をサブプロジェクトリーダーとして効果的な研究開発を実施する。

[評価に関する事項]

NEDO は、技術的及び政策的観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義並びに将来の産業への波及効果等について、外部有識者による研究開発の中間評価を平成22年度、事後評価を平成25年度に実施する。また、中間評価結果を踏まえて必要に応じプロジェクトの加速・縮小・中止等見直しを迅速に行う。なお、評価の時期については、当該研究開発に係る技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗動向等に応じて、前倒しする等、適宜見直すものとする。

[その他の重要事項]

(1) 共通基盤技術の形成に資する成果の普及

得られた研究開発成果のうち、下記共通基盤技術に係る研究開発成果については、NEDO、実施者とも普及に努めるものとする。

【標準への提案、取得】

- ・超電導線材関連技術の国際標準提案
- ・超電導電力ケーブル等の超電導電力機器適用技術の国際標準提案

超電導技術分野

超電導技術は、電気抵抗がゼロであるという特徴的な性質により電流が流れる際のエネルギー・ロスを抑えることができることや、磁石からでる磁力線を超電導物質が跳ね返す性質（マイスナー効果）、超電導物質内部に侵入した磁力線を捕捉してしまう性質（ピンニング効果）等の様々な特長を有している。1986年に「高温超電導物質」と呼ばれる酸化物系超電導物質が発見されたことをきっかけに、科学技術の大幅な加速進展のみならず、エネルギー・電力分野を始め、産業・輸送分野、診断・医療分野、情報・通信分野等の幅広い分野において、超電導技術の応用に関する期待が世界中で高まり広く研究に取り組まれてきたが、工業化を図るために不可欠な技術が近年出そろい始めており、超電導材料を用いた様々な機器の開発・実証・実用化が現実のものとなりつつある。その一方では、新しい超電導物質の発見や超電導現象の理論解明によるブレークスルーへの試みも続けられており、「常温超電導物質」の発見という人類の夢に向けた試みも絶えてはいない。【参考資料1：超電導の性質と将来性】 【参考資料2：超電導物質の探索】

また、京都議定書発効に伴う温暖化緩和策の一環としての省エネルギー技術の開発・導入や各種資源の枯渇・高騰等も喫緊の課題となっており、「クールアースーエネルギー革新技術計画」の技術テーマにも選定される等、超電導技術を早期に実用化することによって、環境負荷の低減と資源の有効な利用という2つの目的を効率的かつ実効的に達成し、多様な分野におけるエネルギーの効率的利用に資すること等が強く期待されている。

これらの状況を踏まえ、かつての「夢の超電導技術」から「21世紀のキーテクノロジー」と呼ばれるまでに進化を遂げつつある超電導技術について、諸々の社会ニーズに対応していくことを念頭に中長期的な観点と早期実用化の観点から技術戦略マップを作成した。

なお、2020年頃迄を目途に実現が期待される社会の姿についてのイメージを得るため、【参考資料3：社会に役立つ超電導技術 2020年の社会像】を示した。

超電導技術分野の技術戦略マップ

I. 導入シナリオ

(1) 超電導技術分野の目標と将来実現する社会像

研究開発の戦略的な推進については、様々な社会ニーズと研究開発目標との関係を明らかにした上で、効率的な研究開発体制を構築することが重要である。特に、超電導技術応用機器の開発に際しては、全ての機器開発の共通基盤技術である超電導材料の開発（線材化・バルク化・デバイス化）と機器適用周辺技術開発（冷凍・冷却技術）とを同時並行的に進め、要求仕様を相互にフィードバックさせながら、各種応用機器を実現するためのタイムリーな技術開発を進めていくことが必要不可欠である。

超電導技術分野は、その将来的な優位性の高さから、日米欧での熾烈な技術開発競争がなされているところであり、また、韓国、中国も積極的な技術開発を行っている等、海外の動向も無視できない状況にある。（【参考資料4：世界のY系超電導線材開発状況】【参考資料5：SFQ技術の国際評価】等）。しかし、研究開発を推進した結果として国際的な競争力を発生させ得るに足る研究成果が得られたとしても、実用化・事業化が行われなければ何の役にも立たない。研究開発の初期段階から将来の事業化を想定した企業が参画すること等により、スムーズな事業化につながる方策を講じていくことが重要である。

欧米においては、技術的に未成熟な段階から幾つものベンチャー企業が起業し、超電導技術産業に係る市場を創出するべくチャレンジを繰り返してきた。我が国においては、官民のリソースの選択と集中を行うことによりここまで研究開発を進めてきたところであるが、21世紀における良好な環境の維持と我が国経済の持続的成長とを両立させていくためには、超電導技術産業市場の早期創出と自律的な発展の開始に向けた導入普及促進策等の推進や、規制緩和、標準化等を通じた新たな市場競争ルールの導入といった関連施策を行うことにより、民間企業が市場競争の中で自ら効率的な事業展開を図っていくための戦略的な体制作りと研究開発とを一体的に推進することが必要である。

前述のように、近い将来において超電導技術を適用した機器の実現が期待される分野は、①エネルギー・電力分野（電力ケーブル、限流器、変圧器、発電機、フライホイール、SMES（超電導電力貯蔵装置）等）、②産業・輸送分野（船用モータ、磁気浮上式鉄道用マグネット、半導体引上装置、磁気分離装置等）、③診断・医療分野（MRI、NMR、MCG（心磁計）、MEG（脳磁計）、質量分析器等）、④情報・通信分野（ルータ・スイッチ、SFQコンピュータ、バンドパスフィルタ、ADコンバータ等）の4分野に大きく分けることができる。分野によって求められる社会ニーズ等には異なる部分があるが、共通基盤技術が成長しつつあることにより、戦略的な機器開発・導入を図るべき時期が到来していることについては一様である。そこで、4分野それぞれにお

ける代表的かつ戦略的な機器について、開発・導入に係る想定シナリオを時系列で示すこととした。

(2) 関連施策の取組

我が国経済が将来にわたって更なる発展を遂げていくためには、先導的効果を狙った高度に進んだ機器の開発投入や、全ての活動の基礎となるエネルギーについて将来顕在化することが懸念される資源制約等を総合的に考慮した、効率的なアプローチを図っていくことが重要である。また、そのためには、①研究開発の戦略的な推進が不可欠であるとともに、②国際的な競争力を有する研究成果の実用化・事業化の推進、③導入普及促進策、関連産業連携策、規制緩和、標準化等の関連施策と研究開発との一体的な推進が必要である。

[規制・制度改革]

- ・超電導技術の実用化を促進するため、高圧ガス保安法、電気事業法などの規制について導入促進のための規制緩和を図る必要がある。

[基準・標準化]

- ・超電導機器の導入に向けて、研究開発と並行して標準化の検討を進めることが重要なテーマについて、各分野の導入シナリオに示した。(2006年版策定時から)
- ・超電導関係の国際標準化のための取組及び具体的進展状況について理解を容易にするため、【参考資料6：超電導標準化マップ】を示した。(2007年版策定時から)

[広報・啓発]

- ・例年春に行われている「超電導技術動向報告会」や、2007年から冬に開催されることになった「超電導 EXPO」等の展示会を通じて、超電導技術及び超電導市場の最近の動向について広く周知する機会の増加を図る。

(3) 改訂のポイント

- エネルギー・電力分野及び産業・輸送分野を中心に、最新動向を踏まえた改訂を行った。特にエネルギー・電力分野及び産業・輸送分野については、2030年までの技術開発及び実用化のシナリオを追加した。
- エネルギー・電力分野、産業・輸送分野、診断・医療分野、及び情報・通信分野における技術開発及び実用化のシナリオについて、最近の研究開発の進展状況に伴う見直しを行った。
- エネルギー・電力分野において、今後の次世代電力システムへの展開の可能性も視野に入れ、従来のエネルギー貯蔵、送配電、発電用の機器を統合する「システムインテグレート」という領域を追加した。
- エネルギー・電力分野の関連施策にCO₂の25%削減目標(2020年)を加えるとともに、スペースの関係から一部の施策を削除した。
- エネルギー・電力分野等における海外での取組について、米国、欧州、アジアにおける最新の研究開発プロジェクト等を追記した。

Ⅱ. 技術マップ

(1) 技術マップ

超電導技術は、導入シナリオで示した 4 つの分野において、効率的かつ各々の導入目的に合致した研究開発を行うための技術指標を明確化する必要があるとの観点から技術をカテゴライズした。また、これらと同時並行的に進めていく必要がある共通基盤技術についても、素材・部品を供給するという観点から技術をカテゴライズした。

具体的には、それぞれ以下に示すような考え方に基づく分類を行っている。

① エネルギー・電力分野

エネルギー・電力分野の技術を、発電（創る）技術、送変配電（送る）技術、エネルギー貯蔵（貯める）技術の3つに大別し、これを大分類とした。また、それぞれの技術の利用形態に応じて開発すべき機器が異なるため、これを中分類とした。その上で、利用形態に応じた機器を開発するためにマイルストーンを置いて取り組んでいくことが必要と考えられる主要な技術課題（大電流化、低損失化等）について、小分類とした。

② 産業・輸送分野

産業・輸送分野の技術を、磁場応用（造る）技術、計測機器（測る）技術、回転機（動かす）技術、変圧器（変える）技術の4つに大別し、これを大分類とした。また、それぞれの技術の利用形態に応じて開発すべき機器が異なるため、これを中分類とした。その上で、利用形態に応じた機器を開発するためにマイルストーンを置いて取り組んでいくことが必要と考えられる主要な技術課題（小型軽量化、高磁場化、大容量化等）について、小分類とした。

③ 診断・医療分野

診断・医療分野の技術を、マグネット応用（視る）技術、加速器応用（治す）技術、高周波デバイス応用（測る）技術、SQUID応用（診る）技術の4つに大別し、これを大分類とした。また、それぞれの技術の利用形態に応じて開発すべき機器が異なるため、これを中分類とした。その上で、利用形態に応じた機器を開発するためにマイルストーンを置いて取り組んでいくことが必要と考えられる主要な技術課題（磁場安定化技術、高感度化等）について、小分類とした。

④ 情報・通信分野

情報・通信分野の技術を、コンピュータ・ネットワーク機器（判断する）技術、無線アクセス系機器（飛ばす）技術、計測機器（測る）技術の3つに大別し、これを大分類とした。また、それぞれの技術の利用形態に応じて開発すべき機器が異なるため、これを中分類とした。その上で、利用形態に応じた機器を開発するためにマイルストーンを置いて取り組んでいくことが必要と考えられる主要な技術課題（処理能力／ラック向上、低コスト化等）について、小分類とした。

⑤ 共通基盤技術

共通基盤技術は、超電導材料の開発（線材化・バルク化・デバイス化）及び機器適用周辺技術開発（冷凍・冷却技術）から構成されることから、これを大分類とした。超電導材料の開発については、それぞれを実現する製造方法やそれを加工する方法により技術的アプローチも異なると考えられるため、これを中分類とした。また、同じ製造方法でも物質により性質等が異なってくることから超電導物質別の小分類、同じ加工方法でも実現すべき形状により性質等が異なってくることから加工の要素技術別の小分類とした。

冷凍・冷却技術については、適用される対象の機器等により要求性能が大きく変わることから、これを中分類とした。また、同じ機器でも使用される超電導物質によって要求される冷却能力等が大きく異なってくることから、冷却能力・冷却手法別の小分類とした。

（２）重要技術の考え方

技術マップにおいて抽出された各技術項目はいずれも不可欠であり、官民の一体的取組みや民間の主体的な取組み等による積極的な開発が望まれるが、以下の観点から評価されるものを重要技術と位置づけ、技術マップ中に色分けして示した。

- ① 2020年頃迄を目途に、産業及び技術のブレークスルーを生み出す可能性のある技術
- ② 超電導技術による実現の可能性が高く、コスト・性能等の面で競争優位性を生み出す可能性のある技術
- ③ これらの機器を実現するために不可欠な共通基盤技術

（３）改訂のポイント

- エネルギー・電力分野、産業・輸送分野を中心に、最新動向を踏まえた改訂を行った。
- エネルギー・電力分野の電力ケーブルの技術小分類について、超電導ケーブルを実用化するために低コスト化が重要な課題であることから、「低コスト化」を重要技術に位置づけた。
- 産業・輸送分野の「廃水磁気分離装置」について、工業廃水や自然界に放出される排水の浄化・処理だけでなく、原料や廃棄物からの異物・有価物の磁気分離等の応用も有望と考えられることから、より広い用語として「排水・資源循環磁気分離装置」に修正した。また、「非接触磁気軸受回転機」を、より分かりやすく直接的な名称である「スピンコーター」に修正した。
- 産業・輸送分野の「車載用モータ」の技術小分類（小型軽量化、高速回転、効率向上）について、専門家の助言を得て、より適切な技術課題（小型軽量化、可変速駆動に対して高効率、高トルク密度化）に修正した。
- 産業・輸送分野の輸送用機器の技術中分類に、今後実用化が期待される「鉄道用直流き電」を新たに追加した。
- 診断・医療分野のマグネット応用の技術中分類に、今後実用化が期待される「細胞・

タンパク磁気分離」を新たに追加した。

Ⅲ. 技術ロードマップ

(1) 技術ロードマップ

技術マップに示された各技術課題のうち、重要技術として選定されたものについて、2020年頃迄を目途に、中長期的視点から各技術課題に必要と考えられるマイルストーンを配し、4つの技術分野及び共通基盤技術のそれぞれにおけるロードマップとして示した。

(2) 改訂のポイント

- エネルギー・電力分野、産業・輸送分野、共通基盤技術を中心に、全分野の技術ロードマップについて、最新の動向を踏まえた多くの改訂を行った。
- 特にエネルギー・電力分野、産業・輸送分野については、従来の2020年までのロードマップを2030年まで延長した。
- エネルギー・電力分野の電力ケーブルについては、技術マップの技術小分類において「低コスト化」を重要技術に位置づけたことを受けて、対応する項目・記述を技術ロードマップに追加した。
- 共通基盤技術－線材のBi2223の大電流化について、最新の状況に合わせて数値を改訂するとともに、量産ベースの数値であることを明記した。
- 共通基盤技術－線材のY(RE)系のコストについては、技術コストからプライスマドを含む値であることを確認した。
- 共通基盤技術－バルクの技術ロードマップについて、最新の状況を踏まえて、過年度のローリングにおいて今後の課題とされてきた全面的な見直し・改訂を行った。

Ⅳ. その他の改訂のポイント

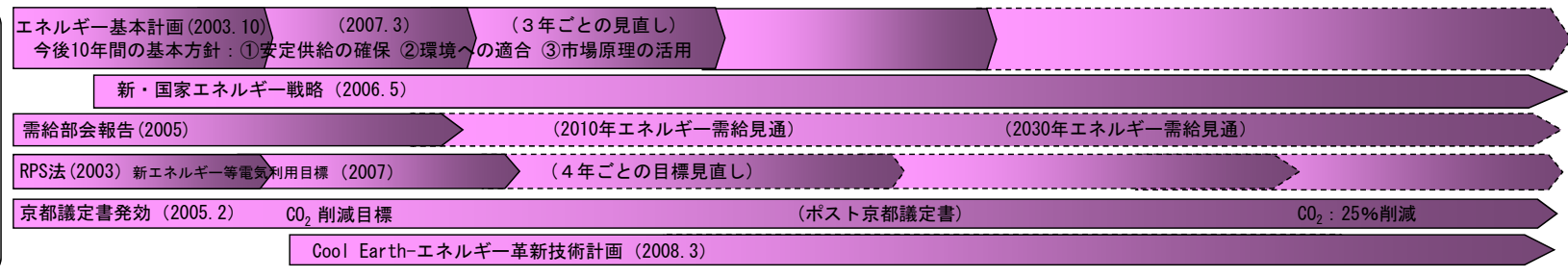
○ 特許の出願動向

- 超電導技術に関する特許出願動向について、【参考資料7：超電導技術に関する国際特許出願動向】を新たに追加した。
- 日本、中国、韓国の超電導関連の国際特許出願件数とその世界に占める割合は、2000年代前半から後半にかけて大きく増加している。一方、米国、欧州は前半から後半にかけて減少している。ただし直近の動きを見ると、日本は2005年（国際出願件数）、2007年（世界に占める割合）をピークに減少傾向にある一方で、米国は2008年に国際出願件数を大きく増加させている。
- 世界平均と比べた場合の超電導分野への力の入れ方を示す超電導特化度は、日本が最も高く、かつ2000年代前半から後半にかけて上昇している。韓国も2000年代後半から、超電導分野に力を入れている。

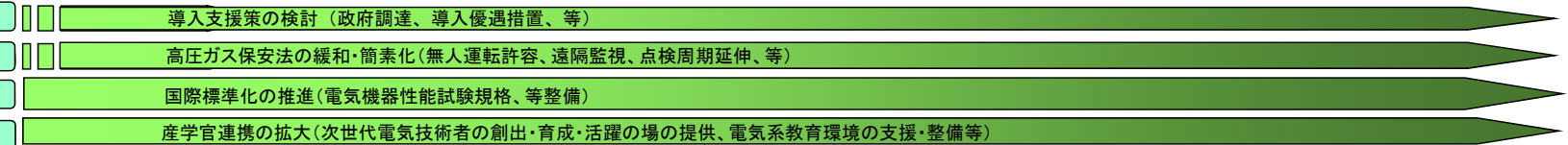
超電導技術分野の導入シナリオ（エネルギー・電力分野）（1/4）

関連施策

エネルギー・電力
関連政策

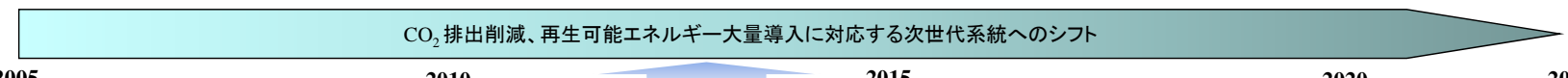


環境整備

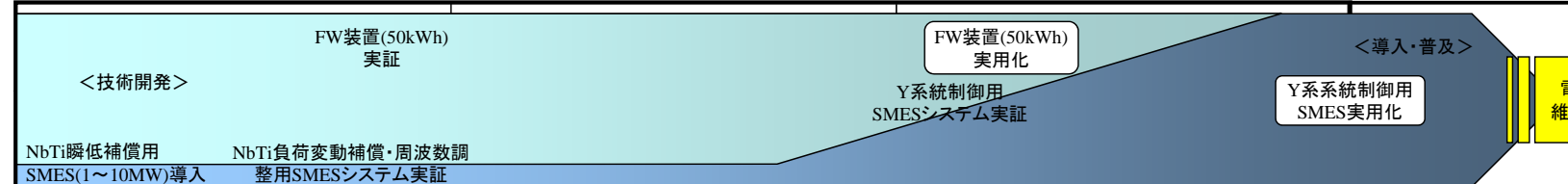


技術開発

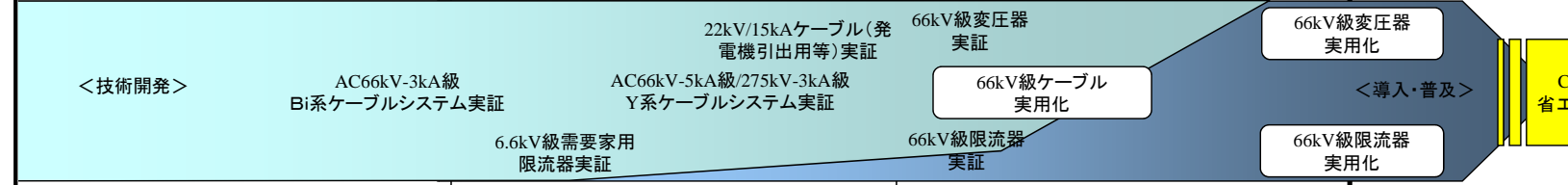
システムインテ
グレート



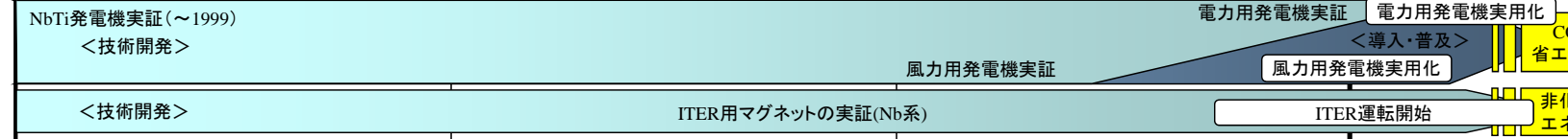
エネルギー
貯蔵



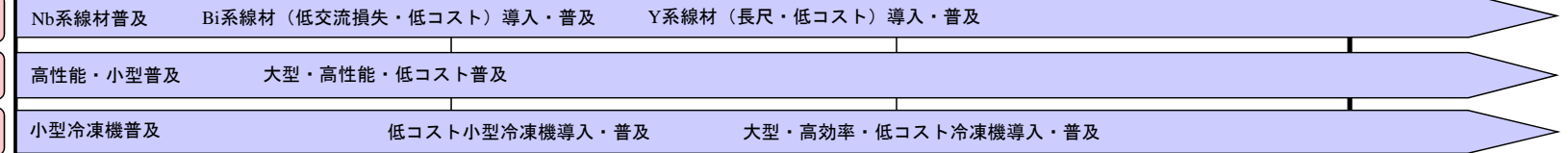
送変配電



発電



共通基盤技術



海外での
取り組み

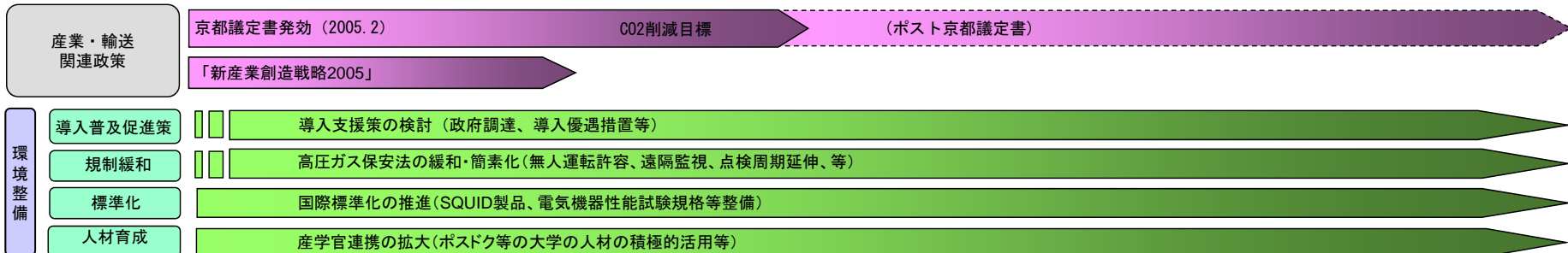
米国
欧州
中国
韓国



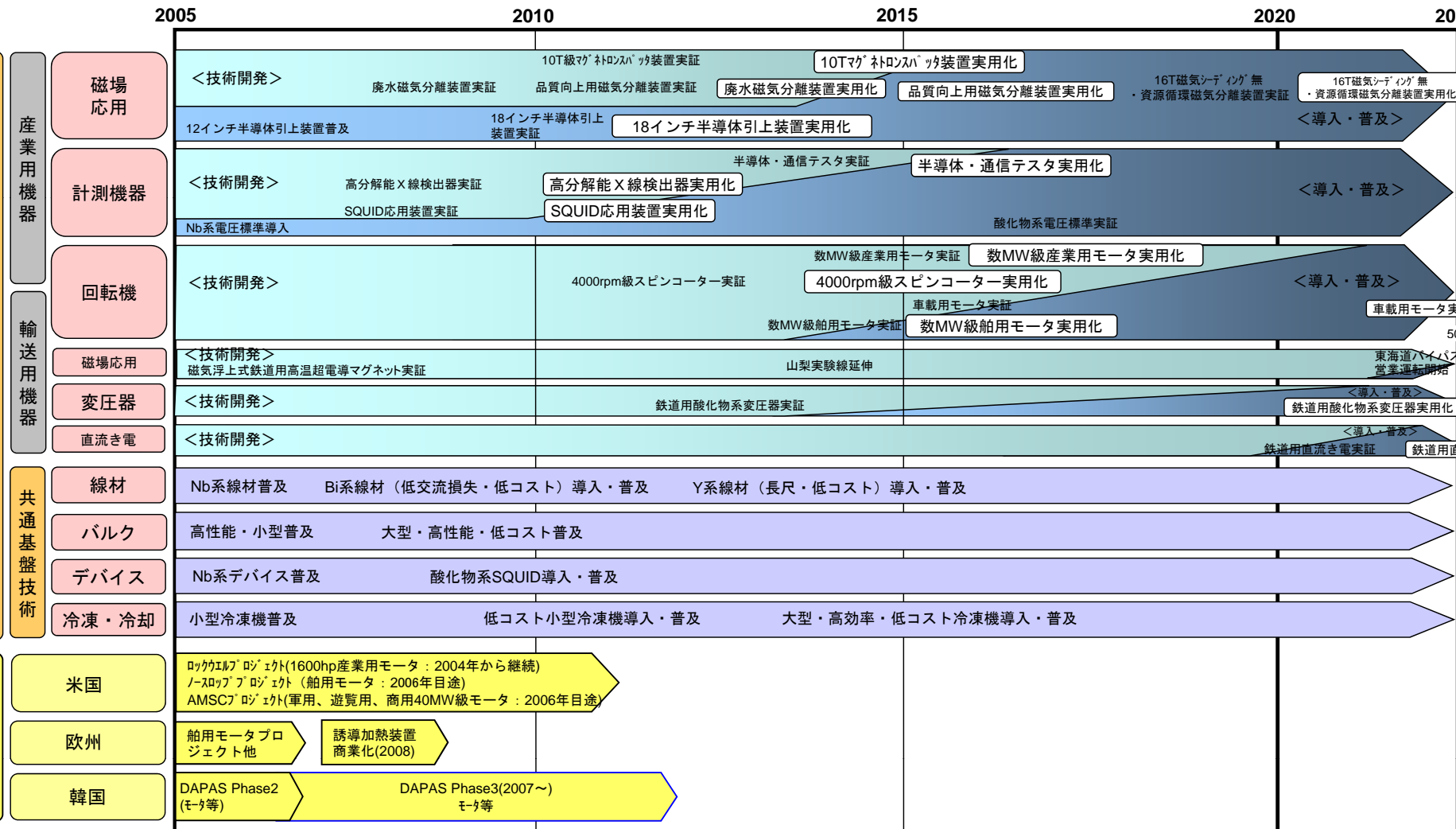
環境・エネルギー調和型社会の構築
多様化する電源ニーズに対応する高信頼かつ高品質電力の供給・運用

超電導技術分野の導入シナリオ（産業・輸送分野）（2/4）

関連政策



技術開発



世界をリードする高度産業基盤構築

小型・軽量化、高速化、高度生産性等を通じた高度産業基盤の実現

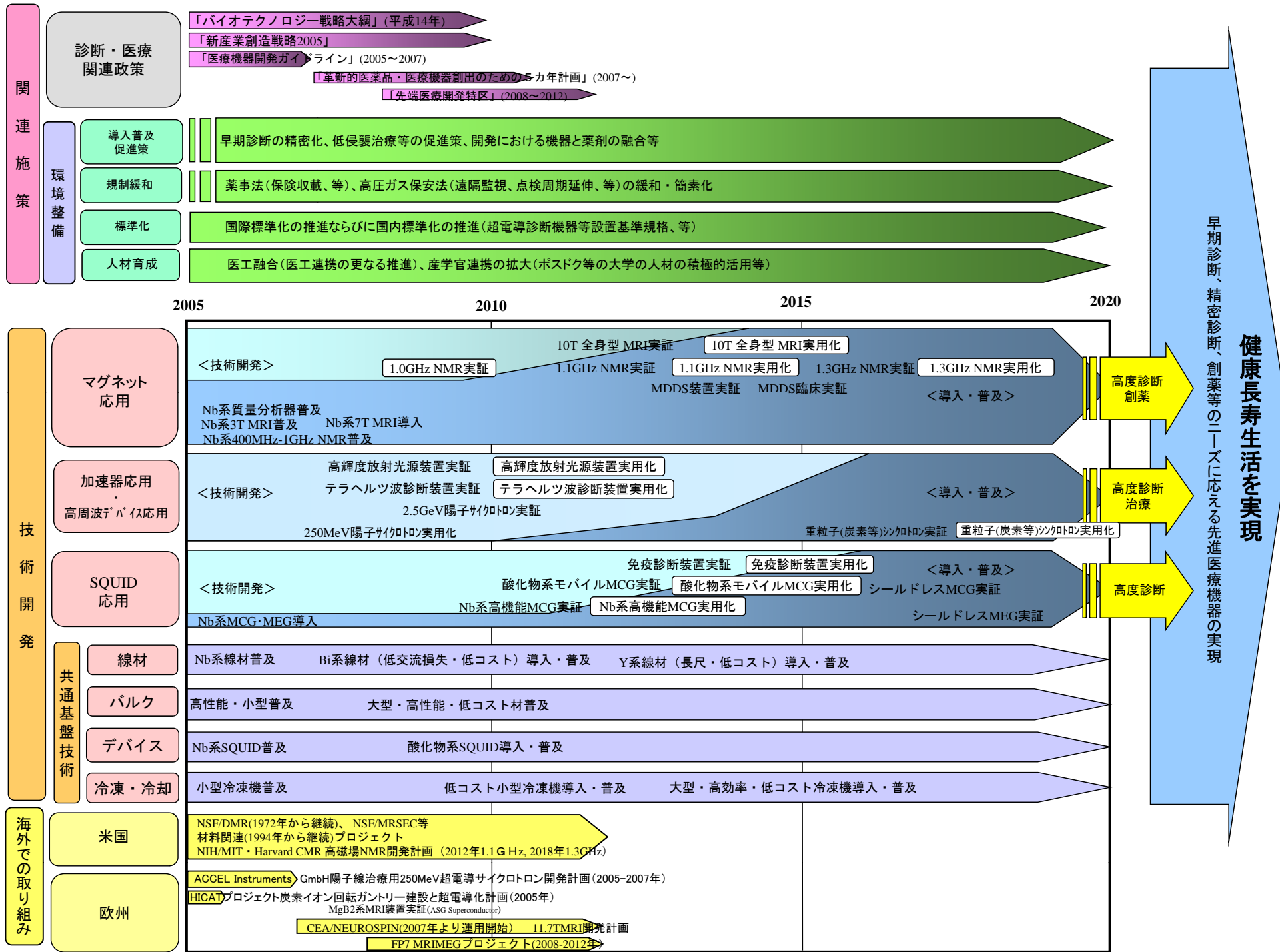
高度生産性 小型化

高度生産性 高信頼性

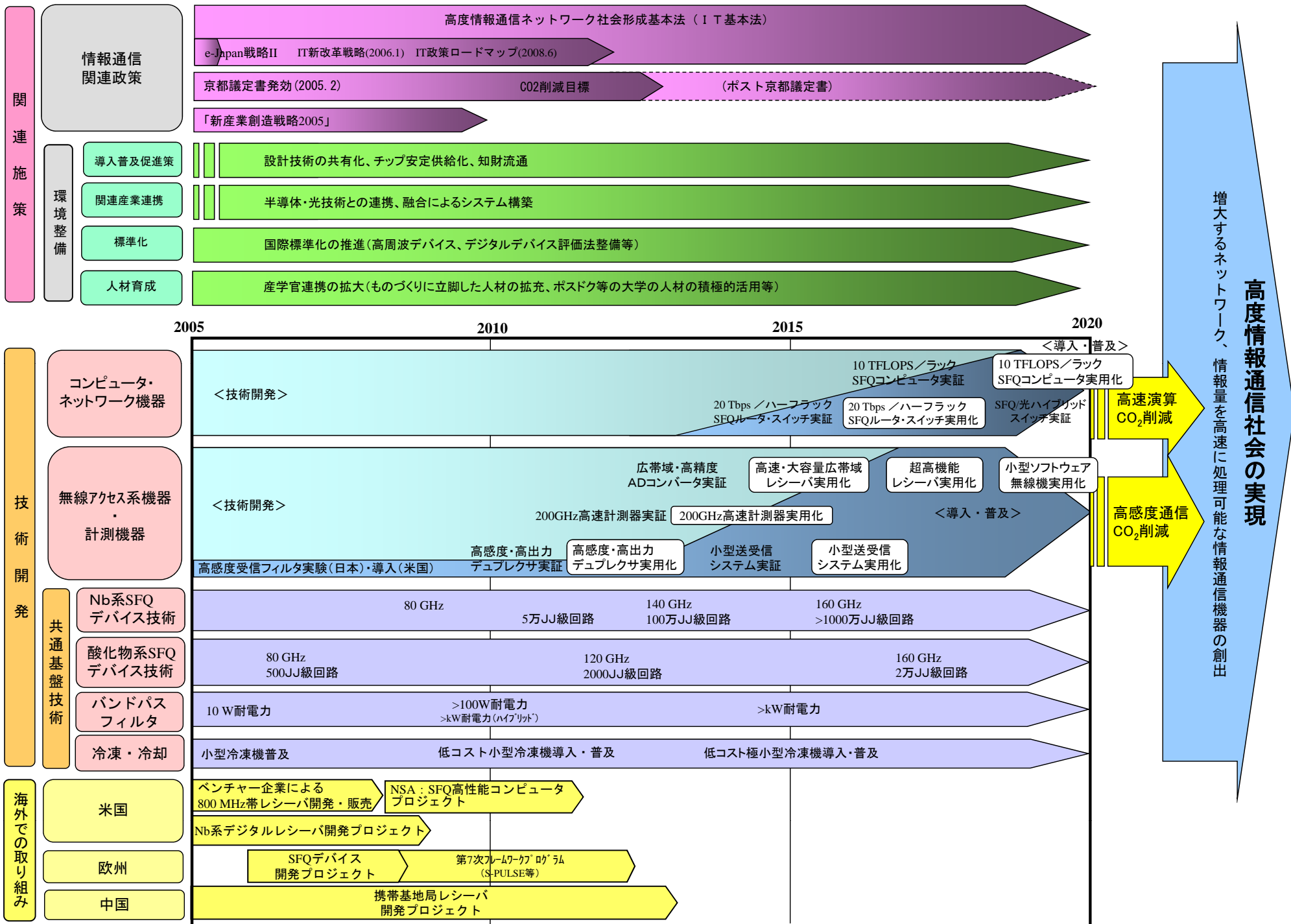
小型化 軽量化 CO₂削減

小型化 軽量化 CO₂削減

超電導技術分野の導入シナリオ（診断・医療分野） (3/4)



超電導技術分野の導入シナリオ（情報・通信分野）（4/4）



超電導技術分野の技術マップ(エネルギー・電力分野)

(1/5)

ニーズ	シーズ			
	技術大分類	技術中分類	技術番号	技術小分類
環境・エネルギー調和型社会の構築	エネルギー貯蔵	SMES	101	・低コストシステム化 ・大容量化 ・コイルの高性能化 ・高信頼性化 ・耐高電圧化
		フライホイール	102	・大容量化 ・低損失化 ・総コスト低減
	送変配電	限流器 (SN転移型)	103	・高電圧化 ・大電流化 ・常電導転移時高抵抗化 ・高速超電導復帰機構
		電力ケーブル	104	・長尺化 ・高電圧化 ・大電流化 ・低損失化 (AC) ・短絡対策 (AC) ・低コスト化
		電力用変圧器	105	・不燃化、コンパクト化 ・Sub-cool LN2技術 ・高電圧化 ・大容量化 ・低コスト化
		同期調相機	106	発電機と共通
	発電	発電機	107	・大容量化 ・低コスト、コンパクト化
		核融合用マグネット	108	・磁場中高特性化 ・大電流高強度化技術 ・低損失化 ・耐放射線化

 重要技術

超電導技術分野の技術マップ(産業・輸送分野)

(2/5)

ニーズ	シーズ					
	技術大分類	技術中分類	技術番号	技術小分類		
世界をリードする高度産業基盤構築	産業用機器	磁場応用	半導体引上装置	201	・ウエハ大口径化	
			鉄鋼圧延装置	202	・配列構造均一化	
			磁性材料調質装置	203	・配列構造均一化	
			排水・資源循環磁気分離装置	204	・高磁場化(磁気シーディング無)	
			粒子加速器	205	・高磁場化 ・磁場均一化	
			マグネトロンスパッタ装置	206	・高磁場化 ・大面積化	
			磁気シールド	207	・高臨界温度化 ・低コスト化	
		計測機器	半導体・通信テスタ (サンプラ)		208	・広帯域化 ・多チャンネル化 ・低コスト化(モジュールコスト) ・冷却技術
			電圧標準	交流	209	・出力周波数向上 ・高温動作化 ・高精度化
				直流	210	・高温動作化 ・高電圧化 ・低コスト化 ・低周波数利用技術
			X線検出器 (EDX)		211	・エネルギー分解能向上 ・計数率向上 ・小型化、低コスト化
			宇宙線検出器		212	・高感度化 ・小型化
			ミキサ		213	・低ノイズ化 ・高周波化
			ポロメータ		214	・エネルギー分解能向上 ・低コスト化
	SQUID 応用装置	構造物検査	215	・小型化、自動化 ・高機能化 ・測定高速化		
		食品・工業製品検査	216	・磁気シールド簡易化 ・異物検出限界向上 ・低コスト化		
		半導体検査	217	・空間分解能向上 ・測定高速化 ・低コスト化		
		鉱物探査	218	・探査深度 ・環境ノイズ除去技術 ・小型化		
	回転機	スピンドーター *		219	・高速回転化 ・高載荷力化	
		産業用モータ *		220	・高速回転、大容量化 ・小型軽量化 ・効率向上 ・低速回転、大容量化	
	輸送用機器	回転機	船用モータ *		221	・低速回転、大容量化 ・小型軽量化 ・効率向上 ・高速回転、大容量化
			車載用モータ *		222	・小型軽量化 ・可変速駆動に対して高効率 ・高トルク密度化
		磁場応用	磁気浮上式鉄道用マグネット		223	・信頼性向上、低コスト化
		変圧器	鉄道用変圧器 *		224	・大容量化 ・低損失化 ・小型軽量化
		直流き電	鉄道用直流き電		225	・システム化 ・省エネ

* 印は、「エネルギー・電力分野」の機器と関連する技術であり、環境・エネルギー調和型社会の構築にとっても重要である。

 重要技術

超電導技術分野の技術マップ(診断・医療分野)

(3/5)

ニーズ	シーズ			
	技術大分類	技術中分類	技術番号	技術小分類
健康長寿生活の実現	マグネット 応用	MRI	301	・大口径、短軸化 ・高磁場化 ・線材高特特性化 ・磁場安定化技術
		NMR	302	・超高磁場化 ・磁場安定化技術
		質量分析器	303	・高磁場化 ・高均一化
		MDDS (磁気誘導薬物配送)	304	・高磁場化 ・高磁気勾配化 ・小型・軽量化 ・低消費電力化 ・ナノ磁性粒子薬剤開発
		磁気誘導カテーテル	305	・高磁場化 ・高磁気勾配化
		細胞・タンパク磁気分離	306	・小型化 ・短時間励減磁
	加速器 応用	高輝度放射光源 (アンジュレータ・ ウイグラー)	307	・高輝度化 ・磁石ギャップ長可変技術
		テラヘルツ波 診断装置(光源)	308	・高機能化
		医療用粒子線 加速器	309	・高機能化 ・コンパクト化
	高周波 デバイス応用	MRI/NMR (高周波プローブ)	310	・高感度化 ・低損失化
		質量分析器 (イオン検出器)	311	・分解能向上 ・測定時間短縮 ・高機能化
		テラヘルツ波 診断装置(検出器)	312	・高機能化
	SQUID 応用	SQUID 免疫診断装置	313	・システム高感度化 ・高機能化(多検体処理) ・操作性向上 ・低コスト化
		MCG (心磁計)	314	・高感度化 ・磁気シールド簡易化 ・高機能システム化
		神経磁気診断装置 (MEG(脳磁計)、脊髄・末 梢神経磁場計測装置)	315	・磁気シールド簡易化 ・多チャンネル化 ・高機能化 ・低コスト化
		超低磁場NMR/MRI	316	・複合化 ・新機能化 ・分解能向上

 重要技術

超電導技術分野の技術マップ(情報・通信分野)

(4/5)

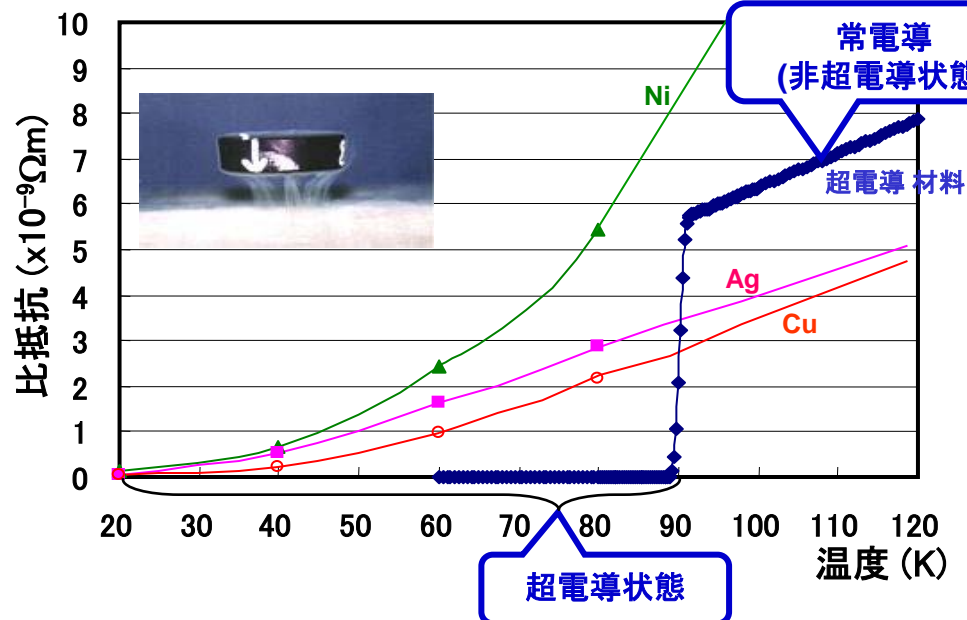
ニーズ	シーズ			
	技術大分類	技術中分類	技術番号	技術小分類
高度情報通信社会の構築	コンピュータ・ネットワーク機器	SFQルータ・スイッチ	401	<ul style="list-style-type: none"> ・大容量化 ・方式、アーキテクチャ ・ラック当たりスループット向上 ・低コスト化
		SFQコンピュータ、サーバ	402	<ul style="list-style-type: none"> ・SFQプロセッサの大規模化 ・高速超電導メモリ大容量化 ・処理能力/ラック向上 ・低消費電力化 ・アーキテクチャ
		量子コンピュータ	403	<ul style="list-style-type: none"> ・回路規模(対応量子ビット数)拡大 ・回路消費電力低減 ・高速化
	無線アクセス系機器	高精度・広帯域ADコンバータ(無線用)	404	<ul style="list-style-type: none"> ・方式 ・帯域・ビット精度向上 ・低コスト化 ・モジュール小型化
		受信フィルタ	405	<ul style="list-style-type: none"> ・高機能化 ・小型化 ・モジュール低コスト化 ・周波数調整技術
		送信フィルタ	406	<ul style="list-style-type: none"> ・耐電力特性向上 ・高調波歪み低減 ・送受信複合化 ・低コスト化
		衛星用通信機器(フィルタ、マルチプレクサ)	407	<ul style="list-style-type: none"> ・小型化、軽量化 ・高信頼化 ・高機能化 ・送受信複合化 ・冷却技術
		超電導アンテナ	408	<ul style="list-style-type: none"> ・指向性、効率向上 ・アレイ化 ・冷却技術 ・環境ノイズ影響低減技術
	計測機器	広帯域ADコンバータ(計測用)	409	<ul style="list-style-type: none"> ・帯域、ビット精度向上 ・モジュール小型化、低コスト化
		高速計測機器(サンブラ)	410	<ul style="list-style-type: none"> ・方式(入力、被測定対象) ・広帯域化 ・小型化、低コスト化 ・高感度化

 重要技術

超電導技術分野の技術マップ(共通基盤技術) (5/5)

技術大分類	技術中分類	技術番号	技術小分類
超電導線材技術	加工熱処理法技術 (含ブロンズ法技術)	501	・NbTi
			・Nb ₃ Sn
			・その他(Nb ₃ Al等)
	パウダーインチューブ法技術	502	・Bi2212
			・Bi2223
			・MgB ₂
			・その他
	薄膜線材技術	503	・Y(RE)系
			・その他
	導体化技術	504	・歪特性改善技術
・素線接続技術			
コイル化技術	505	・巻線技術	
		・絶縁技術	
		・コイル保護技術	
超電導バルク技術	溶融凝固バルク技術	506	・RE123系
			・Bi2212系
			・その他
	焼結バルク技術	507	・RE123系
・Bi系			
その他			・その他
超電導デバイス技術	デジタルデバイス技術	508	・Nb集積回路プロセス技術
			・NbN集積回路プロセス技術
			・酸化物集積回路プロセス技術
			・Nb系SFQデバイス
			・NbN系SFQデバイス
			・酸化物系SFQデバイス
			・入出インターフェイス技術
	・低温実装技術		
	SQUID応用技術	509	・Nbプロセス技術
			・酸化物プロセス技術
			・Nb系SQUID
			・酸化物系SQUID
	高周波デバイス技術	510	・実装技術
・MgB ₂ 薄膜技術			
・RE123系薄膜技術			
・バンドパスフィルタ			
・アンテナ			
冷凍・冷却技術	パワー機器用冷凍機技術	511	・4K冷凍機
			・20K～50K冷凍機
			・65K冷凍機
	デバイス機器用冷凍機技術	512	・4K冷凍機(1～3W)
			・4K冷凍機(0.1～0.5W)
			・50K、70K冷凍機
	大容量冷却技術	513	・LNG冷熱利用技術
			・サブクール冷却技術
			・LH ₂ 冷熱利用技術
	伝導冷却技術	514	・高効率冷却技術
			・薄肉断熱技術
	クライオスタット技術	515	・封止化技術
			・低熱侵入化
	電流リード技術	516	・機械的強度
			・耐高電圧化
			・大電流化

重要技術

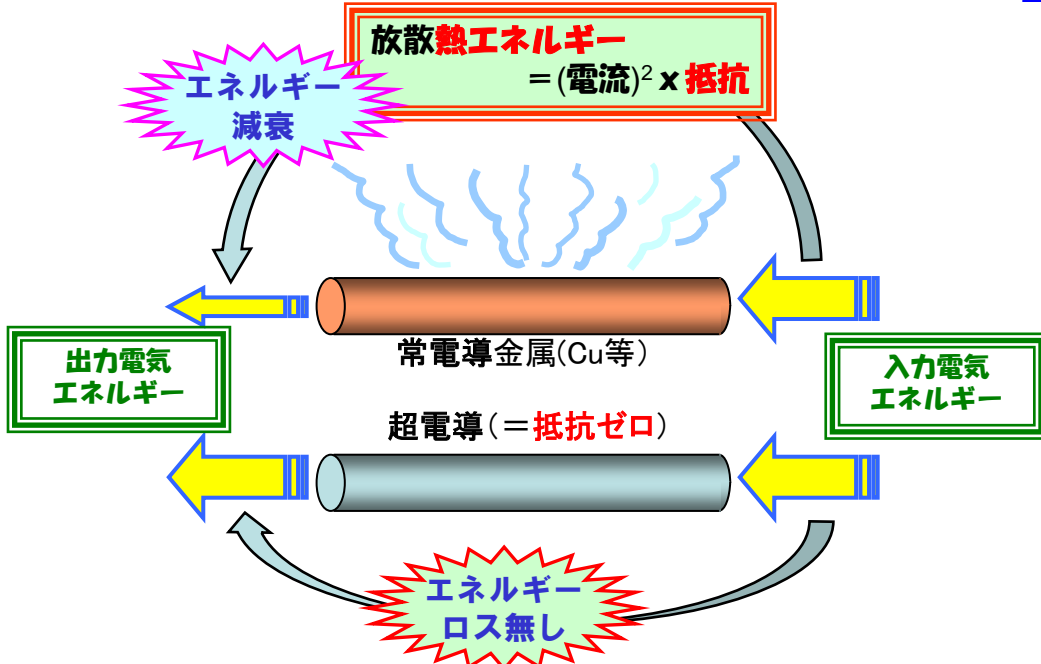
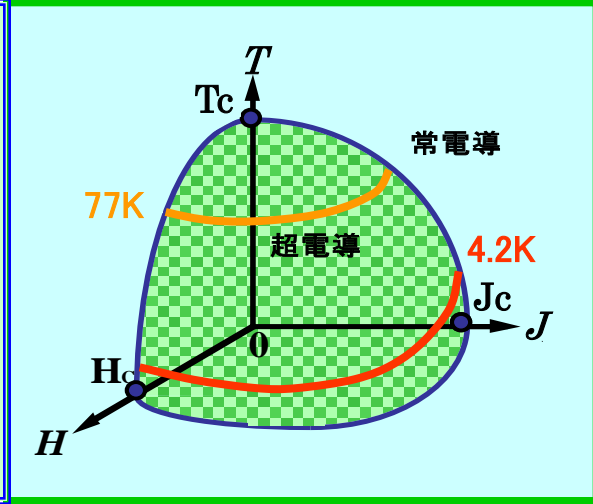


3つの臨界値

臨界温度 (T_c)
超電導を示す温度の上限

臨界電流 (J_c)
超電導を維持できる電流の上限

臨界磁場 (H_c)
超電導を維持できる磁場の上限



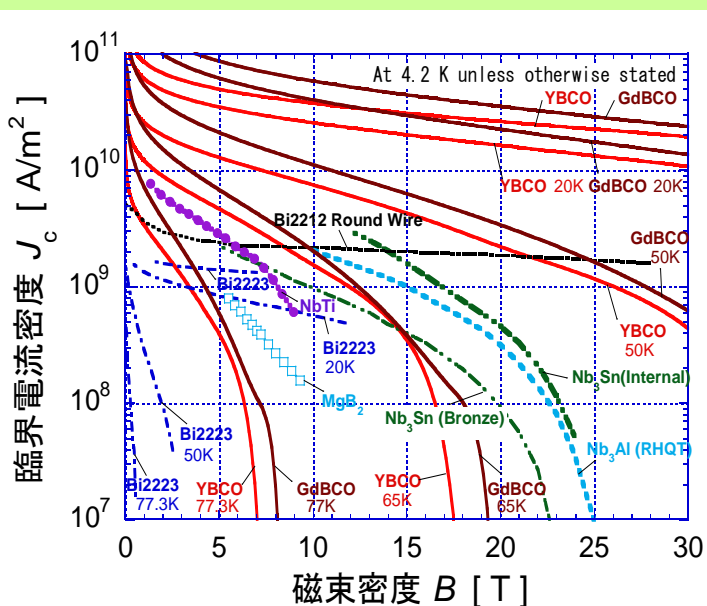
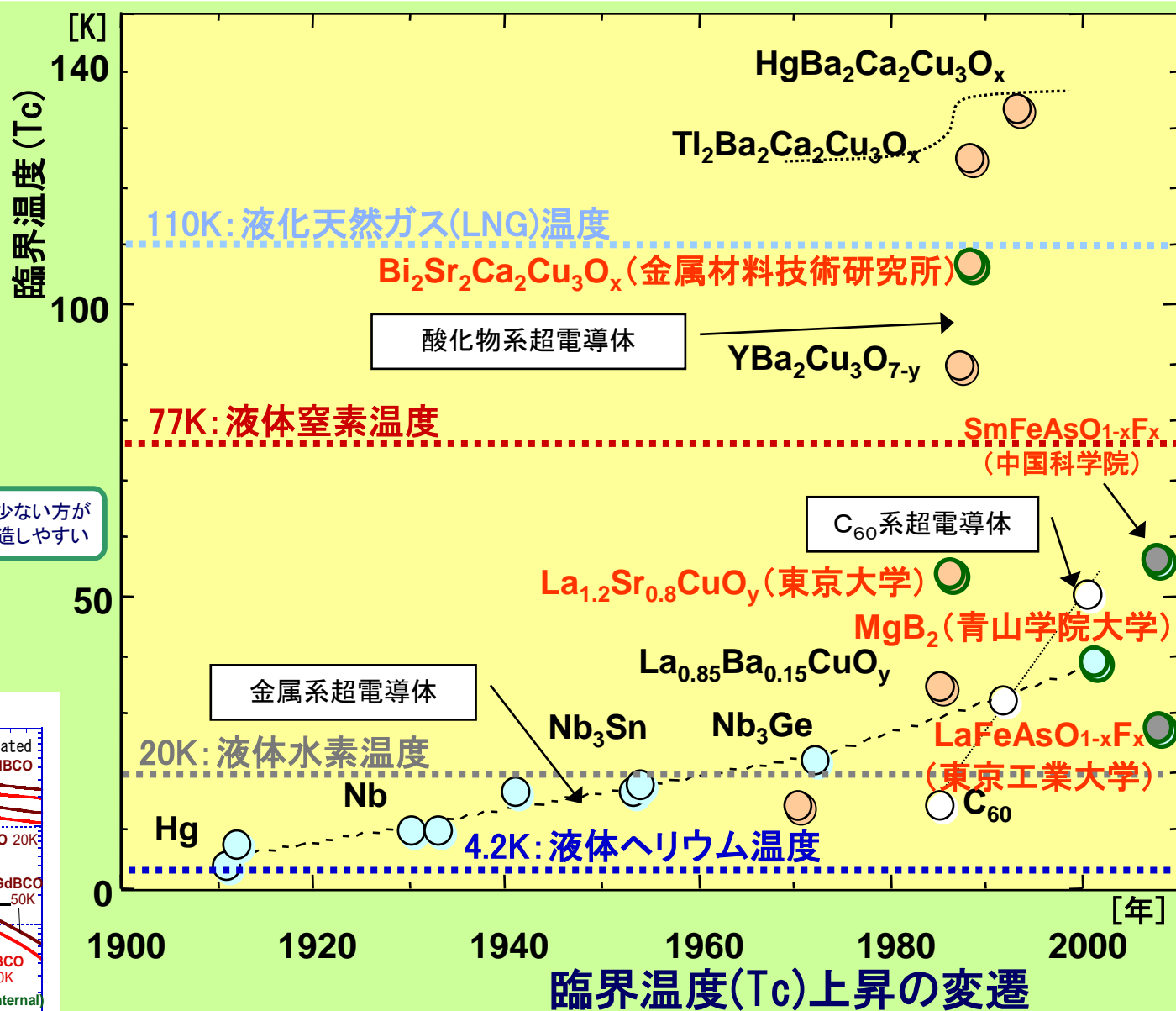
超電導の4条件 (田中の基準)

以下の4条件を全てクリアして、初めて超電導体と認定される。
(東京大学の田中昭二教授が1987年に提唱した客観的条件)

- ➡ 結晶構造およびその物質の何が超電導体であるのか
- ➡ マイスナー効果を示すか
- ➡ 電気抵抗が転移点付近で急激に消失するか
- ➡ 実験結果に十分再現性があるか

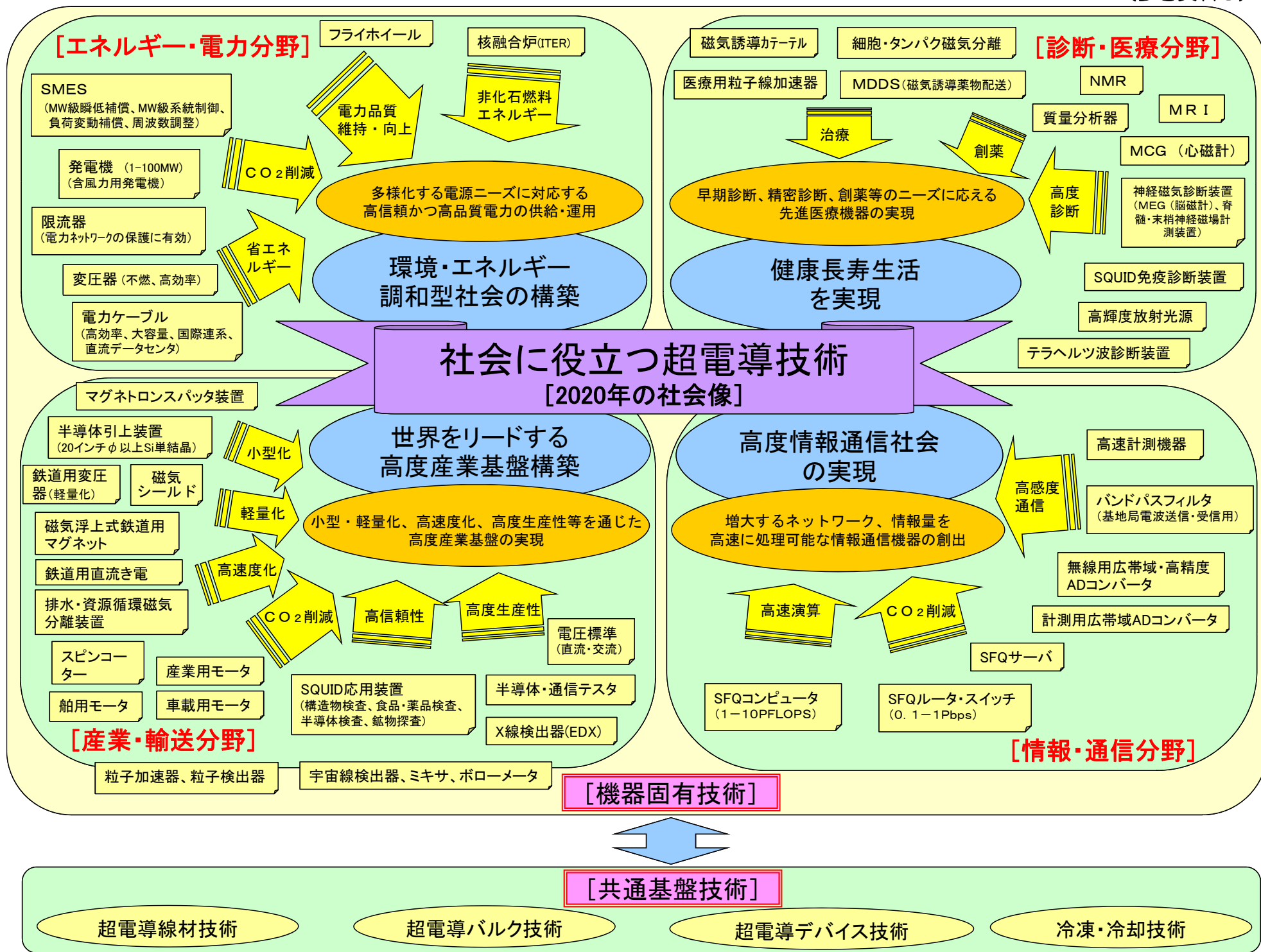
系 (代表物質)	元素数	T _c
Hg系 (HgBa ₂ Ca ₂ Cu ₃ O _x)	5	>110
Tl系 (Tl ₂ Ba ₂ Ca ₂ Cu ₃ O _x)	5	
Bi系 (Bi ₂ Sr ₂ Ca ₂ Cu ₃ O _x)	5	>77
Y系 (YBa ₂ Cu ₃ O _{7-y})	4	
Fe系 (SmFeAsO _{1-x} F _x)	5	>20
La系 (La _{0.9} Sr _{0.1}) ₂ CuO _y)	4	
MgB ₂ (MgB ₂)	2	
Nb系 (Nb ₃ Sn, NbTi)	2	>4.2

元素数が少ない方が
比較的製造しやすい

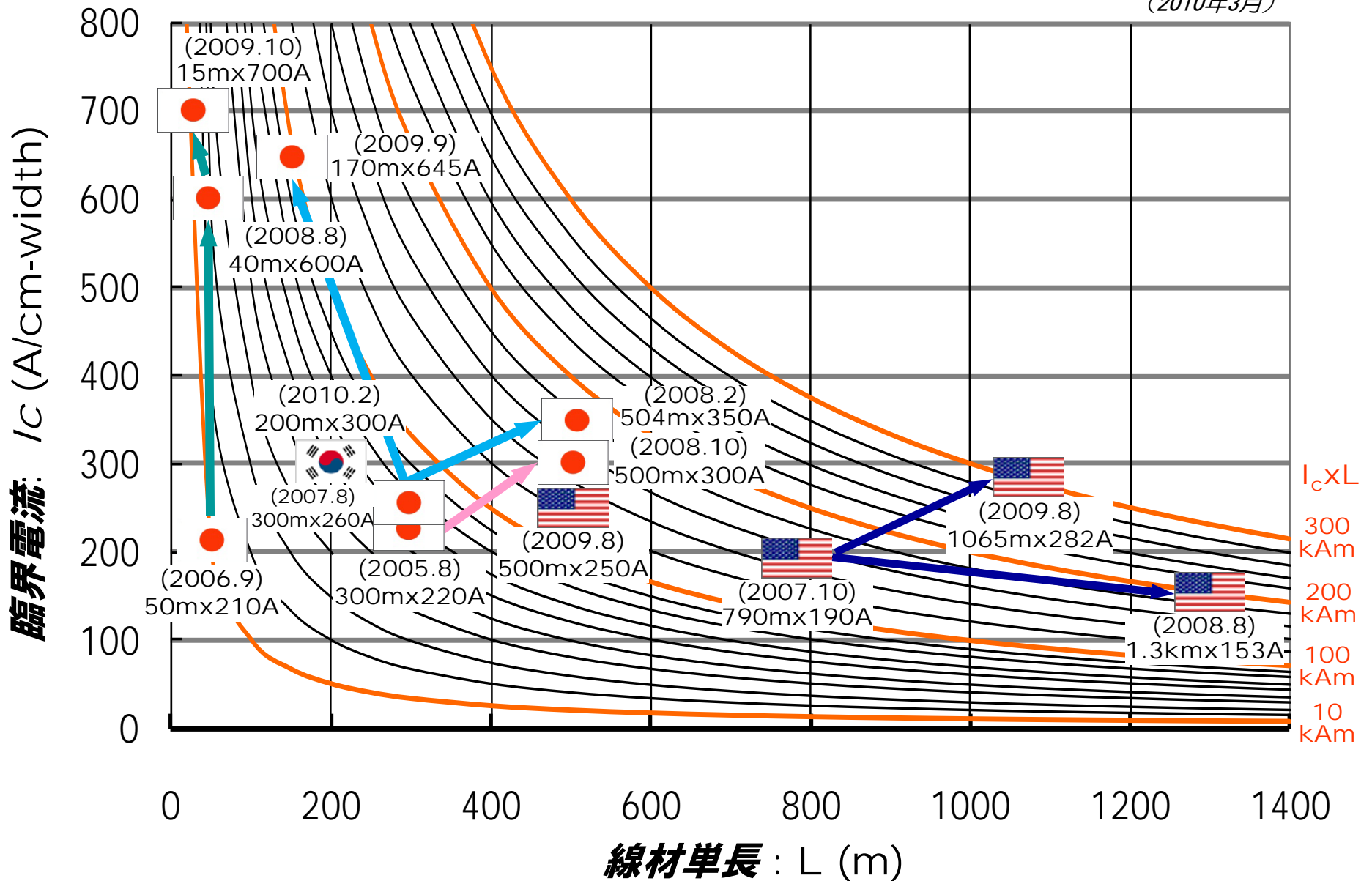


各種超電導線材の臨界電流密度
(九州大学 木須教授 作成)

(参考資料2: 超電導物質の探索)



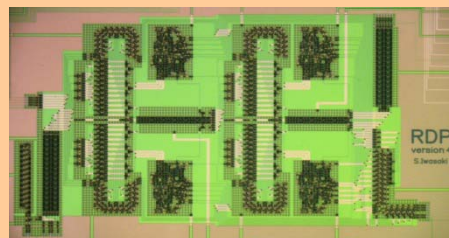
(2010年3月)



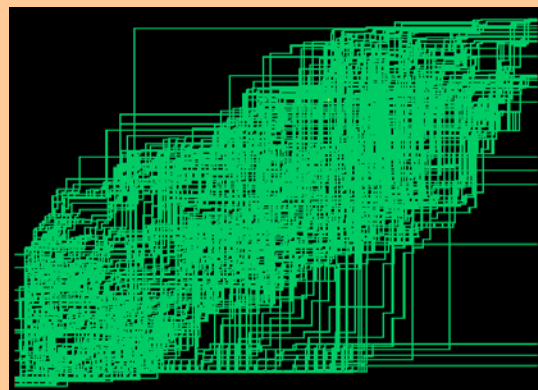
参考資料4：世界のY系超電導線材開発状況

(参考資料5：SFQ技術の国際評価)

名古屋大学がSRL標準プロセスで作製した11,000接合からなる20GHz動作再構成可能なデータパスを持つプロセッサ
(高性能計算機のアクセラレータとして使用) (2008.8)



超電導工学研究所及び名古屋大学が作製した自動配線ツールでレイアウトした大規模SFQ回路(16x16 switch circuit) (2005.3)



名古屋大学がSRL-ADPで作製した90GHz動作2x2 SW (2008.10)

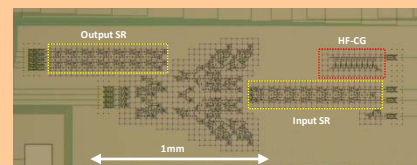


TABLE E-1. REASONS TO DEVELOP SUPERCONDUCTIVE COMPUTER TECHNOLOGY

Technological	Financial
NSA's computing needs are outstripping conventional technology.	Market forces alone will not drive private industry to develop SC technology.
RSFQ technology is an excellent candidate for higher-performance computing capability.	The federal government will be the primary end user of SC computer technology.
RSFQ technology has a clear and viable roadmap.	Other federal government missions will benefit from advances in SC technology.

TABLE E-2. RSFQ SUMMARY

Technical Advantages	Technical Challenges
The most advanced alternative technology.	Providing high-speed and low-latency memory.
Combines high speed with low power.	Architecting systems that can tolerate significant memory access latencies.
Ready for aggressive investment.	Providing very high data rate communications between room temperature technology and cooled RSFQ.

TABLE E-3. DIGITAL RSFQ TECHNOLOGY'S CURRENT STATE OF THE INDUSTRY

Country	Entity	Status
	ISTEC/SRL	<ul style="list-style-type: none"> Joint government/industry center, probably doing the most advanced work in digital RSFQ anywhere in the world today. Responsible for the Earth Simulator system.
	HYPRES	<ul style="list-style-type: none"> Private company focused entirely on SC digital electronics. Has operated the only full-service commercial foundry in the U.S. since 1983.
	Northrop Grumman	<ul style="list-style-type: none"> Had the most advanced foundry and associated design capability until suspended last year. Still has a strong cadre of experts in the field.
	Stony Brook U, UC Berkeley, JPL	<ul style="list-style-type: none"> Currently conducting academic research.
	Chalmers U of Technology	<ul style="list-style-type: none"> Currently conducting academic research.
	NSA, NIST	<ul style="list-style-type: none"> Have resident expertise.

RSFQ技術の評価 ※米ではSFQをRSFQと呼称する
(米NSA「超電導技術評価」報告書(2005.8)より抜粋)



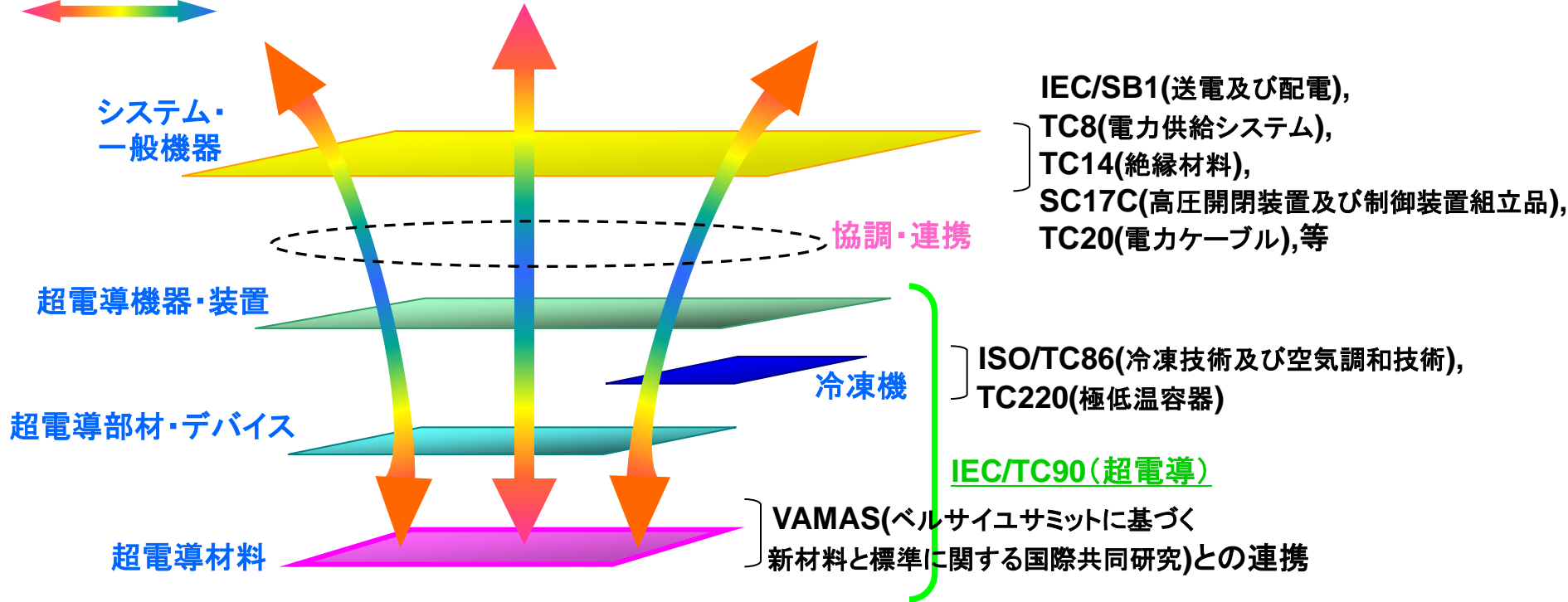
SUPERCONDUCTING TECHNOLOGY ASSESSMENT



National Security Agency
Office of Corporate Assessments
AUGUST 2005

(参考資料6:超電導標準化マップ)

活発 将来活動



	臨 界 電 流	残 留 抵 抗 比	機 械 強 度	表 面 抵 抗	臨 界 温 度	交 流 損 失	捕 捉 磁 場	
済								Nb-Ti
								Nb ₃ Sn
		検討						酸化物
							未定	MgB ₂

規格化進捗状況

※ 1性能ごとの規格ではないため、規格数と項目数は一致していない。

電流リードの特性
(1新規格案検討)
[2010年制定見込]

超電導材料の
性能試験方法
(13規格+改正)

事前評価書(案)

	作成日	平成20年1月17日
1. 事業名称	イットリウム系超電導電力機器技術開発	
2. 推進部署名	新エネルギー技術開発部	
3. 事業概要	<p>(1) 概要：今後電力機器は、系統安定化や送電損失を飛躍的に低減させることによって、エネルギー資源の有効利用及び地球環境問題に貢献することが要求される。</p> <p>本プロジェクトでは、これらの要求に応えることのできる世界的にも最先端の技術力を有する超電導技術を活用して、コンパクトで大容量の電力供給が期待できるイットリウム系超電導線材を用いた超電導電力機器として、電力ケーブル、変圧器並びに超電導電力貯蔵装置（SME S）の実用化に向けた重要な技術開発を行う。</p> <p>(2) 事業規模：総事業費 150億円（委託）</p> <p>(3) 事業期間：平成20年度～24年度（5年間）</p>	
4. 評価の検討状況	<p>(1) 業の位置付け・必要性</p> <p>[事業の位置づけ]</p> <p>経済社会の基盤となる電力の安定的かつ効率的なエネルギー供給システムを実現するため、瞬時電圧低下や需要変動時等においても、系統を適正に制御し、電力供給を安定化させるための技術及び発電電力を無駄なく輸送するための高効率な送電技術の確立を目指す。また、系統に分散型電源が大量に導入された場合でも、系統電圧を適正に維持し、安定した電力供給を実現するための系統制御技術の確立を目指す「電力技術開発プログラム」の一環として、世界的にも最先端の技術力を有する超電導技術を活用して、コンパクトで大容量の電力供給が期待できるイットリウム系超電導線材を用いた超電導電力機器として、電力ケーブル、電力用変圧器ならびに超電導電力貯蔵装置（SME S）の実用化に向けた技術開発を行う。</p> <p>それぞれは、超電導技術分野の技術マップ（平成19年4月制定）において、エネルギー・電力分野機器開発のうち「電力ケーブル」、「電力用変圧器」、「SME S」に位置付けられる。また、第3期科学技術基本計画（平成18年4月制定）において、エネルギー分野における「送電技術」、「電力系統制御技術」、「電力貯蔵技術」に位置付けられている。</p> <p>[事業の必要性]</p> <p>我が国は、経済活動の大半が大都市に集中しており、大都市での電力供給支障事故は日本全体の経済活動に大きな影響を及ぼすことになる。また、大都市での電源立地が困難な状況において、益々遠距離化する電源立地点からの長距離送電の安定性の確保を図ることも重要な課題となっている。</p> <p>2020年頃には、高度経済成長期から40年、50年経過した設備のリプレース需要が増大すると想定されており、大都市での電力ケーブルや電力用変圧器のリプレース需要及び長距離・大容量送電に合わせて、事故や災害に強く、電力需要の増大や新エネルギー導入による系統影響にも柔軟に対応できる電力の安定的かつ効率的なエネルギー供給システムの実現が求められている。このような状況を踏まえて、送電損失を飛躍的に低減できる超電導技術を活用して、低損失で安定した電力輸送ができる大容量でコンパクトな超電導電力機器を開発することは極めて重要である。しかし、これらの技術開発は未経験の技術を開発・統合するというリスクの伴ったものであるために民間企業等だけでの実施は困難であり、NEDO技術開発機構が主体となって実施する必要性が高い。</p> <p>さらに、送電損失を飛躍的に低減させる技術であり、エネルギー資源の有効利用及び地球環境問題に貢献できるとともに、世界的にも我が国が最先端の技術力を有する技術であり、米国・欧州等との間での国際協力及び貢献が期待できる。</p>	

(2) 研究開発目標の妥当性

超電導技術分野ロードマップにおいて、2020年にはイットリウム系超電導線材を用いた電力ケーブル、電力用変圧器ならびに超電導電力貯蔵装置（SME S）の実用化が想定されている。これに向けて各機器に関して重要な技術開発を行い、これらの超電導電力機器を実際に検証してみることで、システムを適正に制御し、電力供給を安定化させるための技術及び発電電力を無駄なく輸送するための高効率な電力輸送技術を確立することを目指す。この実現のために、本プロジェクトでは以下を達成する技術開発を行う。なお、具体的な数値目標については、基本計画策定までに技術委員会等で議論して制定するものとする。

[研究開発目標]

①電力ケーブル

高電圧型ケーブルは、275kV/単相/3kA 30m（中間接続部有）を製作し、高電圧設計・製造技術の検証を行う。大電流型ケーブルは、66kV/三相/5kA 15mを製作し、大電流設計・製造技術の検証を行い、長期課通電性能試験（6ヶ月）を通じて超電導電力ケーブルの実用性検証を行う。

②電力用変圧器

66/6kV 20MVA 級配変用変圧器の実用化を見通す66/6kV 2MVA 級変圧器を製作し、低交流損失線材を用いた小型・高効率化設計の検証および事故電流に対する限流機能の検証を行う。

③SME S

長距離送電の系統安定化用2GJ級SME Sの実用化を見通す20MJ級機を構成する2MJ級要素コイルを製作し、SME Sとしての動作検証および伝導冷却の検証を行う。

④標準化活動

ケーブル、変圧器、SME Sの技術開発を通じて、各超電導機器の国際標準化を進めるための標準化項目を明確化するとともに、必要なデータ収集を行い、国際的な規范文書原案の策定・作成を行う。

上記の研究開発は、技術マップ「超電導技術分野ロードマップ 電力ケーブル、電力用変圧器、SME S」に記載されている2020年度の実用化に向けた設定であり妥当である。

(3) 研究開発マネジメント

公募により実施体制を決定し、効率的かつ効果的に研究の推進を図るためPLを設置する。本事業開始後3年目に中間評価を行い、その結果を踏まえて必要に応じて事業全体について見直しを行う。

特に、並行して実施する「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」と定期的なPL会議等を通じて密接な連携を行い、両事業が効率的、効果的に進むよう努める。

また、外部有識者からなる超電導技術委員会に専門的知見の提供・助言を求め、適宜計画の調整を図る。

事後評価については平成25年度に外部有識者からなる委員会にて実施する。上記のようにマネジメントの計画は明確であり妥当と判断する。

(4) 研究開発成果

本事業の研究開発成果である、電力系統を構成する超電導電力機器としての、電力ケーブル、電力用変圧器並びに超電導電力貯蔵装置（SME S）は、社会インフラ設備としての耐久性を含めた長期信頼性の検証に期間を要するため、2020年の実用化のためには現段階から研究開発を開始する必要がある。また、これらの超電導電力機器による省エネルギー効果はCO₂ 2,747kton/年削減(2030年見込み)が期待できる。

超電導電力機器のシステム運用で重要な冷却技術の研究開発成果は産業分野で利用される冷却機器の信頼性等の向上に広く適用されることが期待できる。

上記の成果が期待されることから本プロジェクトを実施することは妥当と判断する。

(5) 実用化・事業化の見通し

2020年の実用化時期には電力ケーブルや電力用変圧器のリプレース需要や長距離送電等による系統安定化対策需要が想定されており、本事業で開発する電力ケーブル、電力用変圧器並びに超電導電力貯蔵装置（SME S）の実用化に向けた重要な技術成果によって、実用化に向けた進展が期待できる。さらに、社会インフラ設備として適用するための長期信頼性検証が必要であるため、実用化技術開発を行うことによって信頼性や経済性等を改善する技術開発が加速され「超電導技術分野ロードマップ」で示されている2020年頃の実現性が更に高まることが期待できるので、本プロジェクトを実施する意義は大きい。

(6) その他特記事項

平成19年12月から平成20年3月まで、「超電導分野における技術開発状況に関する調査」を実施する。この中で、主に海外の超電導電力機器の開発状況調査を行い、超電導電力機器を実用化するための技術課題を調査する。本調査の成果は、本事業の基本計画策定等に反映させる予定。

5. 総合評価

本事業は、系統安定化や送電損失を飛躍的に低減させるイットリウム系超電導線材を用いた超電導電力機器の開発であり、エネルギー資源の有効利用及び地球環境問題への対応という社会的背景、電力供給システムの安定化や送電損失の低減といった公共性並びに国の政策に合致し、また、産業界で未経験の技術を開発・統合するという開発リスクも大きいことから、NEDO技術開発機構の事業として実施するのが適切と判断する。

「イットリウム系超電導電力機器技術開発 基本計画（案）」に対するパブリックコメント募集の結果について

平成19年3月26日
 NEDO技術開発機構
 新エネルギー技術開発部

NEDO POST 3において標記基本計画（案）に対するパブリックコメントの募集を行いました結果をご報告いたします。
 みなさまからのご協力を頂き、ありがとうございました。

1. パブリックコメント募集期間

平成19年2月26日～平成19年3月3日

2. パブリックコメント投稿数＜有効のもの＞

計1件

3. パブリックコメントの内容とそれに対する考え方

ご意見の概要	ご意見に対する考え方	基本計画・技術開発課題への反映
<p>全体について</p> <p>[意見1](1件) 今回の提示案には機器仕様に応じた線材開発が示されており、そちらにシフトする危険性を感じられますので、あくまでも、機器を開発するという目的をずらさないようにしていただきたい。</p>	<p>[考え方と対応]</p> <p>基本計画には超電導電力機器の製作に必要な線材開発を含めていますが、プロジェクトの目的は超電導電力機器の技術開発であり、NEDOに設置する技術委員会や中間評価などを通じて、超電導電力機器技術開発という目的がずれないように、目標達成に向けたマネジメントを行っていきます。</p>	<p>[反映の有無と反映内容]</p> <p>特になし。</p>

「リットリウム系超電導電力機器技術開発」(中間評価)
評価コメント及び評点票(案)

嶋田分科会長	東京工業大学 原子炉工学研究所	教授
森分科会長代理	東京理科大学 理工学部	教授
喜多委員	静岡大学 創造科学技術研究部	教授
佐藤委員	大同大学 工学部	教授
下山委員	東京大学 大学院工学研究科	准教授
三浦委員	首都大学東京 大学院理工学研究科	准教授
室山委員	(株)NTTファシリティーズ総合研究所	部長

1. プロジェクト全体に関する評価結果

1. 1 総論

1) 総合評価

地球環境保護の推進、再生可能エネルギーによる発電装置の大量導入、省エネルギーの推進、電力系統の安定化の必要性など社会的要請が強い超電導電力機器開発において、線材の開発から電力機器の開発まで総合的に取り組んでおり、超電導線材特性の性能向上、低コスト化を進めながら、その実績を基に応用機器開発へと迅速に展開し、現在までに開発されている技術の多くが世界的にもトップレベルなものであることは、高く評価できる。

また、その製造プロセスや歩留まりなどにも立ち入って開発をメーカーと協力して行い、線材の評価方法など、必要な技術が同時進行しており、全体開発プロジェクトのバランスがとれている。

但し今後は、これまでのように検討課題全てを等価に推進するのではなく、より効果的な、産業として日本が世界をリードできる礎となる課題を抽出し、それを重点的に推進すべきと考える。

一方、実用化の観点からは、2020年頃に始まる大規模な電力設備の更新時期をイットリウム系超電導電力機器が実用化されるチャンスと捉え、それに向けた現実的な開発を行っていることは理解できるが、単なる機器のリプレースになってしまっている。今後、超電導技術がさらに飛躍するためには、超電導技術が無ければ成り立たないという強いニーズを開拓しなければならないが、この技術は、日本だけで完結すべきものではなく、世界、特に直流送電とスマートグリッドの効果の大きい諸国に寄与が大きい。ただ、こうしたプロジェクトを本プロジェクトだけで対応するのは限界があるため、他の超電導技術開発プロジェクトと連携して進めることが望まれる。

〈肯定的意見〉

- 目標設定の明確さ、プロジェクト推進状況、現時点での成果などからみて、非常によくマネジメントされ、中間目標をほぼ満足できる成果が上がっていると判断できる。特に線材の劣化挙動を系統的に評価し、ケーブル耐久試験適正条件を明確化した点は、今回開発対象の全装置へ適用可能であり、装置実用化に向けた重要な成果のひとつとして特筆すべきと考える。
- 期待されながらなかなか実用化の難しかった超伝導の電力システム利用について確実に進捗が見られる。開発体制も、実用化をにらんだ地に足のついたものとなっている。特に、実用化のための期限を明確にさだめ、これから逆算する形で開発を進めているやり方は、これまでの NEDO プロジェクトとは一線を画すものとなっている。
- イットリウム系超電導材を導入するに必要な開発を、先回りして行っている。その製造プロセスや歩留まりなどにも立ち入って開発をメーカーと協力

して行っている。線材の評価方法など、必要な技術が同時進行（共進化）していると言える。全体開発プロジェクトのバランスがとれている。

- 線材の開発から電力機器の開発まで総合的に取り組んでいる点、組織的な取り組みを高く評価します。
- 中間目標に対して大半の項目で達成もしくは年度内に達成可能であることを感じさせる成果を挙げており、順調に進捗していることがうかがえた。また、現在までに達成されている各数値・性能・技術の多くが世界的にもトップレベルなものであることを認めた。
- 超電導線材特性の性能向上、低コスト化を進めながら、その実績を基に応用機器開発へと迅速に展開し、中間目標値の達成および達成見込みがついていること、また全ての応用機器で世界トップレベルの性能が獲られていることは高く評価でき、またこのことから本プロジェクトが極めて順調に進んでいると判断できる。特に、SMES においては実用機がイメージできる具体的な性能評価が着実に進んできている点、超電導ケーブルにおいては基本諸特性をクリアし、変圧器においては限流機機能による高機能化がなされている点、また線材開発においては量産化を視野に入れた高性能化低コスト化を加速している点などが大きく評価できる。
- 機器の要請に応じた線材開発に関して目標の I_c と線材長の中間目標値を達成していることは地道な努力の賜物であり十分に評価できる。また変圧器、SMES も十分とは言えないがそれなりの成果がでている点は評価できる。本プロジェクトは我が国の超伝導の工学応用に関する中心的な位置を占めており、その実用化の可否がこの分野にとって非常に大きな意味を持つ。その意味で着実な成果が達成されており、今後さらに目標に向かって努力して頂きたい。

〈問題点・改善すべき点〉

- この技術は、日本だけで完結すべきものではなく、世界、特に直流送電とスマートグリッドの効果の大きい諸国に寄与が大きい。日本からこのようなインフラ市場に貢献することは、今後の日本の産業の進むべき道と考える。その意味で、日本の送電システムのリプレースはあくまで第一ステップであってその次の段階を含めた戦略的視点がやや不足しているように思える。
- 開発の出口に魅力が無いのが問題だ。企業家が飛びつくほどの魅力あるものになっていない。イノベーションは、死の谷を越える際の向こう側の目標がありきたりなものでは、駄目である。それが無ければ成り立たないというような強いニーズを開拓しなければならないが、本プロジェクトは、実機の市場を開拓するのではなく、拓くのを「待っている」と言った感じである。

- 目標設定に対して順調な進捗状況ではあるが、多くの機器が既存の機器の置き換えを重要な応用分野と捉えているが（まずの目標としては妥当ではあるが）、多少物足りないと感じる。超電導技術でしか実現できない市場が無いのか、更なる市場開拓についてもう少し検討を続けてもらいたい。国外の市場開拓についても積極的に検討すべきである。
- 線材の交流ロスの低減に関して、レーザースクライビング法による分割線材を試みているが、各セグメントの I c の劣化が大きいのが気がかりである。また、SMES や変圧器用の線材に関してさらに低損失化が求められると思うが、この方法以外に損失を低減する手法についても新たに考案して頂きたい。また十分な線材長が得られない場合のジョイント方法に関して今後検討して頂きたい。さらに線材、機器両者の作製コストの低減が今後期待されている。
- 2020 年頃に始まる大規模な電力設備の更新時期をイットリウム系超電導電力機器が実用化されるチャンスと捉え、それに向けた現実的な開発を行っていることは理解できます。しかし、それ故、単なる機器のリプレースになってしまっており、超電導電力機器としての魅力に欠ける開発仕様となっている。今回の現実的な目標に加え、その先の超電導電力機器が本来目指すべき大きな夢を明示すべきではないでしょうか。
- 中間目標、最終目標数値・性能は本プロジェクト開始時に設定されたものであるが、これらが達成されたところで、即、超電導電力機器開発に結び付くものは少ない。これまでの 2 年半のように検討課題全てを等価に推進するのではなく、より効果的な、産業として日本が世界をリードできる礎となる課題を抽出し、それを重点的に推進すべきと考える。

〈その他の意見〉

- ・ 数多くの目標数値に縛られたプロジェクトであるため、それら達成に向けての堅実な研究開発を積み重ねざるを得ないことは理解できる。しかし、これは大きなブレークスルーの発見を妨げるものではなく、目標の枠を超えた突出した成果も追究してほしい。
- ・ NEDO のプロジェクト全体に言えることだが、実施者のイノベーション革命に対する本気度が低く、例えば世界記録を出すための研究に終わっている。
- ・ ケーブル、変圧器、SMES の 3 点セットでなくても、単体で十分に機能するように実用化して頂きたい。そうすれば導入可能性は国内だけでなく海外にも広がる可能性が大きい。
- ・ まずは交流を意識した開発となっているが、ヨーロッパ、ロシア、米国、中国、アフリカ、中東、アジアなど、いずれの国も電力貿易は視野に含まれている。その際の次世代の高電圧直流送電のための技術開発はどの程度

必要となるのか。また、前回のプロジェクトで挙げられた課題(電流の振動等)はどの程度解決したのか。このような点がより明確になるべきである。

2) 今後に対する提言

海外の動向も十分認識した上で世界のトップレベルの機器開発が達成されるよう研究開発を進めて欲しい。広く社会に開発成果を広めるためには、製品化、実機化が必要で、普及するためのチームを設置して、開発の方向など出口イメージの協議を進めるべきである。

また、遠未来の産業応用に向けて、日本が永くリードし続けられるような高度な技術集積が必要で、ニーズが高く、かつ超電導産業の根幹を担う研究課題に対して、研究費を集中させていくべきである。今後、超電導機器の優位性が発揮でき、超電導でしかできない適用先の調査研究を充実し、研究開発課題・市場規模を明確化してほしい。

さらに、インフラの海外進出はこれまで限られた成功例しかないが、超電導は世界に誇れる技術なので是非とも海外市場で成功したい。2020年目標を達成してからの売り込みでは韓国や中国に先を越される懸念が強く、海外市場調査や売り込みのタイミングや技術要件などマーケティングを視野に入れるべきである。

〈今後に対する提言〉

- ・ 遠未来の産業応用に向けて、日本が永くリードし続けられるような技術を残したい。そのためにも高度な技術集積が必要で、ニーズが高く、かつ超電導産業の根幹を担う研究課題に対して、研究費を偏らせていくべきである。これには、線材性能、線材生産技術が該当すると思われる。機器開発についてはニーズが不透明なものも含まれており、また線材性能の変化によって設計仕様等が変わるものが多い。課題の一部については縮小または中断が検討されるべきである。
- ・ 現在の開発ペースを維持しながら、他国の動向も十分認識した上で世界のトップレベルの機器開発が達成されるよう研究開発を進めて欲しい。大型の機器開発については、研究予算を追加して、小型機器と平行して、もう少し加速して開発を進めてもいいのではないかと思われる。また、これまで種々のデバイス開発においてすばらしい性能を持ちながら、実用化には至らなかったケースが過去に多く見られる。最終目標の機器性能が達成され、実用機が完成した際に、本当にユーザーが使ってくれるのかどうか、今後更なる市場調査（例えば、ユーザーの意識調査など）が必要と思われる。さらに、高温超電導機器の信頼性については未知の部分が多いので、今後十分な信頼性の確保を機器メーカーと十分協力して進めて欲しい。
- ・ 多くの開発研究の失敗は、研究成果を実機、商品化する企画能力の低さから来ている。日本企業の中央研究所はここで失敗しているが、中央研究所を NEDO が 肩代わりしている図である。広く社会に開発成果を広める

ためには、製品化、実機化が必要で、普及するためのチーム（営業チームのような）を設置して、開発の方向など出口イメージの協議に参加するべきである。イノベーションは新規な市場を開拓、または古い市場を壊さなければならない。NEDO が既存の大手会社へ開発委託するところに、すでにこの矛盾が表れている。大手会社は古い市場にしがみついているのでイノベーションの主役にならない方がよい。

- ・ 限られた期間内に達成すべき現実的な目標に加え、本プロジェクトの先にある超電導電力機器が本来目指すべき大きな目標を分けて明示して頂きたい。少なくとも将来目指すべき方向性を参考意見・目標でもよいので明示願いたい。
- ・ 機器に使用する線材の特性を使用温度、磁場で整理して見てほしい。最終的にはそれらの特性と機器とのマッチングや線材の歩留まりを含めた作製コストとを精査して使用線材の選定を行う必要がある。
- ・ 国内送電線網のリプレースという具体的な目標と時期が設定されており、それから逆算した開発スケジュールが立てられている点は大変足が地についている印象である。しかしその反面、本技術が最も必要とされるアジア発展地域への売り込みがあまり視野に入っていない様に思われる。2020 年目標を達成してからの売り込みでは韓国や中国に先をこされる懸念が強い。海外市場調査や売り込みのタイミングや技術要件などマーケティングを視野に入れるべきである。
- ・ 変圧器やケーブルなどの当面の適用先として、既存設備の更改需要を見込んでおり堅実な実用化開発が行われていると考えられるが、超電導機器の優位性を発揮するためにも、超電導でしかできない、という適用先の検討も忘れずに進めてほしい。

〈その他の意見〉

- ・ 線材、機器開発においては性能の向上とともに信頼性の獲得が不可欠である。トップデータの更新と同時に、生産技術の質の向上も図られるべきで、その実態や課題については正直に公開されることが望ましく、構成メンバー外からアイデアや意見を募ることも有効と考える。
- ・ 標準化は好ましい試みだが、製品化、普及してこそ意味がある。それを目的化して何になるのか。標準化をビジネスにどう結び付けるか、国益になるのかが分かっていない。超電導技術は、世界1になっている。諸外国の興味は薄くなっておりその反映で日本も興味を失いつつある。
- ・ インフラの海外進出はこれまで限られた成功例しかないが、超電導は世界に誇れる技術なので是非とも海外市場で成功したい。送電系統インフラは今後の世界に不可欠な技術であり、銅資源の有限性を考えると日本の主力国際商品となりうる潜在性がある。世界市場への売り込みを念頭においた

戦略的な取組みが望まれる。

1. 2 各論

1) 事業の位置付け・必要性について

エネルギーイノベーションの一分野の技術として超電導利用は大きな期待があるが、技術的には、多くの課題があり、研究開発リスクも高く、民間活動のみでの実施よりも効率的に成果が得られていること、さらに共通基盤的な技術開発が進められているなど、NEDOの事業として妥当な内容である。

また、早期に実用機器を開発することにより、世界における当分野の技術先導性を確保し、「ものづくり」につなげるため、本事業の目的は妥当と考える。

一方、世界が必要とするエネルギー技術の超電導技術でトップである日本がその責任を果たす意味でも海外展開の検討が必要である。再生可能エネルギーとのグローバルなネットワーク化なども夢物語では無く、ITER（国際熱核融合実験炉）などのような国際協力を視野に入れて、本事業の波及効果の検討・調査を引き続き充実して進めてほしい。

〈肯定的意見〉

- いままでに日本が世界をリードしてきた HTS の特性向上の歴史を踏まえ、その実用化においては特にエネルギーと環境という視点で考えると NEDO が推進してしかるべきと思う。しかしながら実用化を必ず行う、という強い信念をもった取り組みが今後、必要とされる。その際、内需拡大のみならず、新幹線やリニアのように世界各国に技術輸出することを真剣に考え、その戦力を練って頂きたい。
- エネルギーイノベーションの一分野の技術としては着実な進歩を示している。また、民間活動のみでの実施よりも効率的に成果が得られていること、さらに共通基盤的な技術開発が進められているなど、NEDO の事業として妥当な内容である。ここまで長くやってきた下地があってであるが、この程度の予算で、予算並みには十分成果が上がっていると言える。
- 超電導利用は古くから大きな期待がありながら進展に時間がかかった。リスクも大きい課題であるので、国家的な支援が不可欠である。よって NEDO 事業として妥当である。
- エネルギー問題の解決や、ものづくり分野の強化の観点からも NEDO 事業として十分妥当である。
- 既存の電力機器のリプレースを目指すという具体的な開発目標、スケジュールは妥当である。
- 地球環境保護の推進、再生可能エネルギーによる発電装置の大量導入、省エネルギーの推進、電力系統の安定化の必要性など社会的要請が強いことおよび技術的には、多くの課題があり、研究開発リスクも高いことから、民間のみでの技術開発は困難が多いと考えられる。そのため NEDO の事業として行うことが妥当なプロジェクトと考える。

内外で活発に技術開発が進められており、本技術開発は熾烈な開発競争下にあると考えられる。また、早期に実用機器を開発することにより、世界における当分野の技術先導性を確保し、「ものづくり」につなげるため、本事業の目的は妥当と考える。

〈問題点・改善すべき点〉

- 実用化のめどが立つ前にユーザーである電力会社との間で導入に関する細部にわたるきちんとしたコンセンサスを形成しておく必要がある。現在立ち遅れている風力発電のようなことの無いようにして頂きたい。
- 実用化が見えてきた。電気事業者も開発に参加しているため、国内市場における問題は詳細に把握されている。しかし海外市場への売り込みには、さらに詳細な市場調査が必要である。早期にどのような技術開発課題が必要かを調査する体制が望まれる。
- 今後大型超電導応用機器開発が進められていくが、予算規模が他国と比べて妥当かどうか十分検討すべきである。
- イットリウム系超電導線の開発の現状に大きく依存した超電導電力機器の開発になっている感がある。もう少し電力機器側から超電導線材への要求仕様が強く出されることを希望する。
- 高温超電導技術開発は、基盤技術開発から応用技術開発に変化しつつあり、徐々に共通的な研究課題から機器個別のものにシフトしている。個別の課題においては公開が適当でないノウハウの蓄積も多く、民間企業や電力会社それぞれが主体となって取り組むべきと考える。その意味で NEDO 事業として実施する妥当性は今後薄まる。また、NEDO 事業の課題設定や数値目標は事業開始前には妥当なものであったと思われるが、国際的な情勢や競合技術の動向は刻々と変化しており、それらに合わせた目標の修正、課題の絞り込みを行う柔軟な対応が必要である。
- 世界が必要なエネルギー技術である超電導技術、日本がトップで、その責任が果たせていない。日本がリードしなくてどこがやるのだ、と言うくらいの気概が無い。海外展開を全然考えていない。海外政府にも参画させるべきである。

〈その他の意見〉

- ・ 超電導にしかできない、画期的なシナリオ、例えば北沢先生が提案された再生可能エネルギーとのグローバルなネットワーク化なども夢物語では無くなってきている。ITER などのような国際協力を視野に入れ、是非検討して頂きたい。
- ・ 海外の研究機関にも門戸を開き、ITER のような国際プロジェクトにするべきである。

- **NEDO** の超電導事業については用いる超電導物質を限定したものばかりで、なかでも **Y** 系に巨額の研究費が長期にわたって投下されてきた。超電導技術開発では超電導物質に依存しない共通的な要素が多い。特に日本の超電導技術の優位性を高めるためには、**Y** 系より量産性、歩留まり、応用実績にはるかに優れる **Bi** 系線材をケーブル実証以外の課題にも積極的に取り込んでいくことを考えるべきである。

2) 研究開発マネジメントについて

社会的要請やこれまでの技術開発経緯を踏まえ、研究開発目標を設定しているとともに、電力送配電設備の更改時期を踏まえた着実な需要を見据え、技術開発スケジュールを策定している。さらに研究開発の到達度についてはコストを含めた指標を導入し、実用化への到達度を定量化している。また、従来の線材開発に絞ったサイエンスよりの開発体制から、一歩進めて製品化の出口を見据えて標準化やロス低減、高密度化など技術開発がなされており、産・学・官の協力体制がしかれ、PLの強いリーダーシップのもと適切にマネジメントが実施されている。

一方、この3年間の研究費配分をみると、課題ごと、年度ごとのメリハリがなく、重点的に研究開発すべき項目には予算的な措置を強化するなど、もっとダイナミックな予算配分を行っても良い。

さらに、国際的な情勢や競合技術の動向は、刻々と変化しており、今後、それらに合わせた目標の修正・課題の絞り込みを行う柔軟な対応が必要である。

〈肯定的意見〉

- 社会的要請やこれまでの技術開発経緯を踏まえ、研究開発目標を設定しているとともに、電力送配電設備の更改時期を踏まえた着実な需要を見据え、技術開発スケジュールを策定している。さらに研究開発の到達度についてはコストを含めた指標を導入し、実用化への到達度を定量化している点など、本研究開発マネジメントは全般にわたり妥当と考える。また、当技術分野におけるトップクラスの研究者、技術者により共同研究体を構成して、互いに連携しながら技術開発を進めるとともに、成果適用先と考えられる電力会社とも連携がなされている点から、研究開発体制も妥当であると思われる。
- 世界全体の技術動向や市場動向を十分考慮して極めて具体的な目標設定がなされ、目標をクリアする戦略と適切な研究開発実施体制を構築している点は高く評価できる。
- 開発目標、計画、体制いずれも明確になっており、概ね妥当である。
- 従来の線材開発に絞ったサイエンスよりの開発体制から、製品化の出口を見据えて標準化やロス低減、高密度化など製品開発のマネジメントがなされている。そのために産・学・官の協力体制がしかれまたPLのリーダーシップもよく機能したと思われる。
- 本事業の開始前に検討されたことを考えると、目標は適切に設定されており、基盤技術構築の範囲では、チーム構成は妥当であったと考える。
- 研究開発マネジメントに関してはPLの強いリーダーシップのもと、適切に実施されていると見受けられる。なお当初の設計、目標に必ずしもとらわれず、今後関連した情勢変化への対応を的確に行ってほしい。

〈問題点・改善すべき点〉

- 本事業は、それまでの線材中心の開発から一步進めて機器開発に乗り出しているが、実用規模の機器開発さらに産業応用への意志が薄く、技術の進歩までで留まることが懸念される。また、この3年間の研究費配分をみると、課題ごと、年度ごとのメリハリがなく戦略が感じられない。今後、研究費配分、さらにチーム構成も見直し、整理されることが適当である。
- これまでの指摘で繰り返すよう、海外市場のマーケティングに基づきどのような課題の克服が必要か、どのような特性の製品が必要かを調査できる体制が必要である。
- 個々の応用機器間での情報交換に関して、さらに密に連携していくことが、実用化を進める上で今後有効となると思われる。
- 過去の成果と現状及び今後の方向性が必ずしも明確ではない。現状の世界最高性能のイットリウム系超電導線材に依存し過ぎた開発目標になっている。社会情勢の変化を先取りした開発計画も提示して欲しい。
- 細かく評価しすぎである。もっと大まかに自由にやってもらったら、かえって開発費の有効利用になる。

〈その他の意見〉

- ・ 他国の開発進捗状況に応じて、重点的に研究開発すべき項目には予算的な措置を強化すべきである。
- ・ 開発の出口戦略が日本しか市場を考えてないので、今や、中国・インドの電力の需要の伸びをみるとすべて陳腐である。
- ・ 本事業の最終目標は、実用機器開発のためのいくつかの重要な課題を解決し性能を検証するものであるが、緊急性、重要度はそれぞれにかなり異なる。日本の超電導技術の優位性の確立、超電導応用のエネルギーインフラ参入の効果の実証に向けては、各課題の個別目標の優先度を明らかにして、数値の見直しや取捨が行われるべきである。
- ・ 本事業の各年度における研究費をみると、合計額はほぼ同一であり、各研究開発項目の使用額も大きな増減はない。研究開発の進捗により、もっとダイナミックな予算配分を行っても良いように思われる。
- ・ あまりにそつがなく、うまくまとまりすぎ、意外性が無く、おもしろくないのが印象だ。逆に目標が小ぶりで、開発の評価がうまくゆきすぎている。

3) 研究開発成果について

世界初、世界最高の特性が各要素技術において達成され、すべての研究開発中間目標について達成済または今年度内達成見込みであり、順調に進捗していると評価できる。また、達成された中間目標の成果は最終目標に十分繋がるものであることから、最終目標の達成可能性はかなり高いと判断できる。

しかし、線材の量産化・歩留まり改善と低コスト化の実現と、剥離の課題解決が最も肝要であり、これらが達成できないと機器開発は空転する。

また、中間レベルであることから特許数が少ないことは仕方ないが、特許マップを作成し、重点分野の抽出など特許戦略についてももう少し明確にすべきである。主要技術については周辺、関連特許を合わせて海外出願するなどにより、実用機器製造時における我が国の技術優位性を確保する必要がある。

さらに、成果の普及に関して、折角開発された技術を埋もらせることのないよう、一般への超電導技術の啓蒙活動をもう少し強化すべきであり、またシームレスに技術移管が民間になされるようなシステムを構築して頂きたい。

〈肯定的意見〉

- すべての研究開発中間目標について達成済または今年度内達成見込みであり、順調に進捗していると評価できる。また、世界トップ、世界初の成果も多数あり、研究開発成果は大である。さらに最終目標達成に向けた課題も明確で、それらの課題の解決、最終目標達成は大いに期待できる。
- 研究成果は当初の計画通りに行っているようである。
- 設定したすべての中間目標を達成あるいは達成見込みがついていると判断できる。また、達成した中間目標のレベルは世界最高あるいはトップレベルの性能であることは高く評価できる。また、達成された中間目標の成果は最終目標に十分繋がるものであることから、最終目標の達成可能性はかなり高いと判断できる。
- 成果は全て中間目標をクリアしており、概ね満足できレベルである。
- 世界初、世界最高の特性が各要素技術において達成されており、十分に評価できる。
- 2020年のリプレース目標に対しては目標を十分にクリアしていると判断できる。予算に対しては確実に成果が出されていると考える。
- 中間目標は既に概ね達成されており、未達成の課題も近未来の達成が可能な状況にあることを認めた。成果の多くは世界最高水準のものである。

〈問題点・改善すべき点〉

- 特許出願は国内、国外に対して戦略的に行われている模様であるが、今後一層積極的に出願を進める必要があると思われる。その際、主要技術については周辺、関連特許を合わせて出願するなどにより、実用機器製造時に

おける我が国の技術優位性を確保する必要がある。

- 論文は遅くてもよいが特許などは、論文より先に出さねばならないが少ないと思う。受託会社間で、牽制しているのか少ない。また国内特許は国策的このような開発では意味が無いので海外出願をもっとするべきである。その成果が 2 年後はどう評されるかここで世界情勢も見て変更すべきである。
- 特許出願は国内、国外に対して戦略的に行われている模様であるが、今後一層積極的に出願を進める必要があると思われる。その際、主要技術については周辺、関連特許を合わせて出願するなどにより、実用機器製造時における我が国の技術優位性を確保する必要がある。
- 本技術の日本の先導性を考えると、もっとプロジェクトを大規模化して広範な製品開発を視野に入れてもよいと思われる。
- 特許出願は国内、国外に対して戦略的に行われている模様であるが、今後一層積極的に出願を進める必要があると思われる。その際、主要技術については周辺、関連特許を合わせて出願するなどにより、実用機器製造時における我が国の技術優位性を確保する必要がある。
- 中間目標自体にインパクトの大きいものが無く、本事業の成果は特に興味を持つ関係者のなかに限定的に知られている。また、技術課題が多い割には特許出願が少ないのも心配であり、積極的な特許出願の戦略指導があつて良いと思われる。最終目標の達成の見通しについても、現技術の延長線上で考えて大半は可能であると思われる。しかし、線材の量産化・歩留まり改善と低コスト化の実現と、剥離の課題解決が最も肝要であり、これらが達成できないと機器開発は空転する。
- 成果そのものは満足すべき水準であるが、新規市場の開拓、現状の電力機器のリプレース製品になり得るか否かは不明確。単に機器の大きさ・重量減少、コストが既存品と同等ではリプレースのリスクを取り難い。新たな機能の付加が必要不可欠であり、その観点が欠如している。

〈その他の意見〉

- ・ それらの成果の普及に関して、シームレスに技術移管が民間になされるようなシステムを構築して頂きたい。(折角開発された技術を埋もらせることのないようにお願いします。)
- ・ 世界最高水準の成果が多いことを認めるが、他国での取り組みが無い分野も多く、また現成果や最終目標値と実用機器開発のレベルが、実機スケールとこれに伴う線材使用量の観点から大きく乖離している。現構想では世界を圧倒的にリードし、また社会にインパクトを与える成果は期待しにくいので、一部の課題の目標を変更して突出した成果の創出も目指してほしい。

- 特許についての戦略を考え直すべきである。
- 線長についてはなお機器への適用には不足しているものの徒に長さを競うよりも製造の信頼性や検査方法の開発に力を注いでいる点は正しい方向と思われる。ただし現状から必要な線長、例えば **km** オーダーの線材がいつ実現するかの見通しがあまり明確ではなかった印象である。

4) 実用化、事業化の見通しについて

実用化に向け産業技術として適用の可能性、適用までの解決すべき課題と解決の指針は明確にされている。本プロジェクト後半には重電機器メーカーの参画が予定されていることから、本プロジェクトの成果の実用化可能性は期待できる。高温超電導を応用した機器が実用化されれば、地球環境に及ぼす効果は極めて大といえ、技術的、社会的波及効果は大きい。

一方、実用化、事業化を達成するには、一層のコスト低減に対する開発が必要である。特に既存設備の更改を行うためには、コスト、信頼性などについての既存技術との競争が激烈であることは容易に推察されるため、超電導の応用が圧倒的に有利なストーリーが描かれているべきである。

これが無ければ成り立たないといった強いニーズ、競合技術との比較検討、波及効果等について、コストや信頼性も含めて今後更なる市場調査が必要である。

〈肯定的意見〉

- 大まかな実用化から事業化のシナリオの見通しはあるが、後半戦はさらに詳細な検討（特にユーザーとのコンセンサスが重要）が必要になる。
- 実用化に向け、本プロジェクト終了後のシナリオ、および、実用化に向け線材メーカーの役割分担が明確化されている。さらに、本プロジェクト後半には、重電機器メーカーの参画が予定されていることから、本プロジェクトの成果の実用化可能性は大いに期待できる。
高温超電導を応用した機器が実用化されれば、地球環境に及ぼす効果は極めて大といえ、技術的、社会的波及効果は大きい。また、新規の超電導産業を興す効果も期待でき、経済的波及効果も大である。さらに、論文等の外部発表件数から見て、多数の若手研究者、技術者の育成が促進されていると考えられ、当技術の広がりは今後の実用化に向けた大きな推進力になると考える。
- 2020年のリプレースという目標がほぼ見えており、特に変圧器については産業技術としての実用化が明確になっている。線材開発、ケーブル開発、機器開発のいずれも実用化へ向けた課題が確実に克服されつつあるといえる。コスト評価もよく検討されている。
- 実用化にキーとなる技術課題を明確に抽出し、課題解決のアプローチも十分になされている。コストに関する検討も進められている。
- 産業技術として適用の可能性、適用までの解決すべき課題と解決の指針は明確にされている。但しシーズサイドからの見方である。成果は市場やユーザーのニーズに対応した方向性のものである。構成チームの範囲では研究開発や人材育成等が促進されており、多くの学会報告などもその舞台として利用されている。

- 実用化の可能性は概ね明確になっている。

〈問題点・改善すべき点〉

- 電力関連の機器開発に限らず、超電導応用では超電導でしかできない技術、超電導に置き換えることによって大きく効率・性能が上がる技術、がターゲットになるが、後者の場合にはメンテナンスや価格面での不利と競合技術の進捗が直接超電導に転換するニーズに影響する。本事業で扱われているのは後者の課題ばかりであるので、超電導の応用が圧倒的に有利なストーリーが描かれているべきである。確かに有利な面については良く分析されているが、不利な面についてもよく解析し総合的に超電導化の利点を評価し、事業内容の見直しが行われるべきであろう。
- 得られた成果は、高い性能を持つ実用機の開発が可能であることを示したが、本当にユーザーが使ってくれるのかどうか、コストや信頼性も含めて今後更なる市場調査が必要と思われる。
- 開発・実用化と産業用機器としての普及は全く次元が異なる。ユーザーニーズ、競合技術との比較検討、波及効果等について更に検討が必要不可欠である。
- 国内の交流送電ケーブルの置換用としてはほぼ見通しがついていると思われる。しかし海外に売り込む際にどのような点をメリットとして強調するのが次の問題であり、それにより開発課題も次々と現れると思われる。国際送電網と直流高圧送電は世界的な趨勢であり、本格化すれば銅価格の高騰が予想される。超電導はそのギャップを埋めるだけの潜在力があるためである。
- コストについては、十分考慮した研究開発が進められているが、実用化、事業化を達成するには、一層のコスト低減に対する開発が必要と思われる。特に既存設備の更改を行うためには、コスト、信頼性などについての既存技術との競争が激烈であることは容易に推察されるため、この課題を克服するための一層の努力が望まれる。
- 実機として系統での運用を前提に、委託研究機関を選ぶべきであった。開発には協力してもそれを採用するかどうかは、疑問である。電力会社はこの技術開発リスクの義務を負わなければいけない。

〈その他の意見〉

- ・ 遠未来においての本格的な電力関連の機器普及を目指しているのですが、事業化までのシナリオが明確にし辛いのは仕方ないが、参画している電力会社は自社の将来展望と併せて、具体的な導入計画や実機サイズへのスケールアップの予定を示し、本事業の位置付けをより明確にすべきと思われる。また、電力の質を良くする、という超電導機器接続による測りにくい効果

についても解析し、理想的な電力系統の未来像と効果的な超電導機器導入のシナリオが明示されるのが望ましい。

- もっと、これが無ければ成り立たないといった、強いニーズ、ユーザーが必要です。
- コスト、効率、サイズなど実用化した場合のイメージを示している。かえって夢が無くなる。

2. 個別テーマに関する評価結果

2. 1 超電導電力貯蔵システム (SMES) の研究開発

1) 研究開発成果について

2GJ 級高磁界大電流コンパクトコイル開発、高効率伝導冷却技術、システム開発や線材開発など設定した中間目標を達成し、実用化目標に向け順調に進んでおり、他のエネルギー貯蔵機器とのコスト比較についても十分な検討がなされている。また、フープ応力耐性と伝導冷却イットリウム系コイル外径は世界最高であり、新たなクエンチ保護法も世界に先駆けて開発されているなど、成果の意義も大きい。

しかし、今のところ、プロトタイプのコイルを製作し強度や通電特性を評価している段階であり、実際に大型のコイル試作まで行わないと、磁場中での繰り返し通電の課題や接続部の構成の最適方法などはっきりできない。さらに、ジョイント部の問題、線材の剥離、線材を分割した際の特性評価が必要であり、線材で長物ができずに継ぎ接ぎになる場合に関して、早急に見直しを含めた機器設計を行う必要がある。

また、系統安定化のための機器として、電池など他選択肢とのコスト競争力が強調されているが、応答特性や NAS (ナトリウム・硫黄電池) と比較しての維持エネルギーの小ささや安定性など、SMES のメリットの強調が必要である。

〈肯定的意見〉

- 中間目標はすべての項目について達成済みか本年度中に達成見込みであり、良好な結果である。また、フープ応力耐性と伝導冷却 Y 系コイル外径は世界最高であり、新たなクエンチ保護法も世界に先駆けて開発されているなど、成果の意義も大きい。最終目標達成に向けたアプローチが示されており、達成可能性は高いと判断される。
- 2GJ 級高磁界大電流コンパクトコイル開発、高効率伝熱冷却技術、システム開発や線材開発など設定した中間目標を達成している (達成見込み) と判断できる。達成した成果は世界最高性能であり、実用化目標に向け順調に進んでいる。他のエネルギー貯蔵機器とのコスト比較についても十分な検討がなされている。
- 数値目標を十分クリアしており、成果は概ね満足できる。
- SMES のための線材開発では、単なる電流密度や線長だけでなく力学的強度が必要とされるが、十分にこの点はクリアできていると認められる。
- SMES 開発は汎用的な超電導コイル作製の技術の向上を伴う点では評価できる。また、中間目標をクリアできる進捗ではある。

〈問題点・改善すべき点〉

- 今回の開発目標と産業用に普及する機器との仕様の差異が不明確である。

したがって、今回の開発目標の難易度が不明確である。最終目標と本プロジェクトでの開発目標との差異を明確にし、本プロジェクトの目標のレベルを明示して頂きたい。

- 本プロジェクトにおける研究費、開発稼働の割に、特許出願件数は少ないように感じられる。重要技術について、一層の権利化を進める必要がある。
- SMES としての開発と考えると目標が低いと言える。新線材の適用研究と位置付けると言うことか。
- 線材が新しいところだけが、目新しい研究だ。線材がうまくいかなければ、この研究は無駄になる
- 今のところ、プロトタイプのコイルを製作し強度や通電特性を評価している段階であり、事業終了までには繰り返し試験を予定しているだけで、最終目標の 2GJ 級の開発を見通す成果とはかなりかけ離れている。実際に大型のコイル試作まで行わないと、磁場中での繰り返し通電の課題や接続部の構成の最適方法などはっきりできない。よって中間期までに一定の成果を得た本事業では、今後大幅に縮小または中断しても、遠い将来の 2 GJ 級 SMES 開発を遅延させるものではない。
- 中間目標がやや未達成（実験的に）。特にジョイント部の問題、線材の剥離、線材を分割した際の特性評価に関して。線材で長物ができずに継ぎ接ぎになる場合に関して、早急に見直しを含めた機器設計を行う必要がある。
- 系統安定化のための機器として、電池など他選択肢とのコスト競争力が強調されているが、応答特性や NAS と比較しての維持エネルギーの小ささや安定性などで SMES のメリットの強調が必要と思われる。

〈その他の意見〉

- ・ 瞬低用 SMES は技術としては Nb-Ti 製コイルを用いたシステムで実現しており、その高温超電導化も 10 MJ 級の小規模 SMES として検討されている。しかし、競合技術の能力や超電導方式でなければならぬニーズ、さらには高温超伝導化によるデメリットについて冷静に検討されるべきと考える。
- ・ SMES はエネルギー貯蔵技術のなかで、有望で、日本が一番必要として、また、技術の一番進んでいる領域だ。もっと実機に向けた開発を進められないものか？
- ・ コスト競争力以外の他手段とのメリット・デメリット比較表があると分かりやすいと思われる。
- ・ 研究発表・講演は十分であるが、特許、論文、新聞発表、展示会への出展など極端に少なく、成果の公表が不十分と思われます。仲間内での発表会が多すぎる感じを受けます。ナショプロであるので、成果の公表にもっと注力願います。

2) 実用化、事業化の見通しに関する評価及び今後の提言

SMES に対する市場ニーズは種々存在すると考えられることから、十分な低コスト化が図られれば実用化可能であり、一層のコスト低減技術の開発強化が必要である。

電池、フライホイールと競合する容量では超電導瞬低対策装置の市場化は無理であり、更なる市場ニーズ調査を進めるべきである。コスト面に優れていても熱維持の必要な NAS や、応答性に優れていても大型化に限度のあるキャパシタに比べると、SMES には規模の経済性が期待され、その点を活かせる大型化 SMES の開発（都心での大規模な電力平準化装置等）も視野に入れるべきである。

〈肯定的意見〉

- SMES の開発成果は、CO₂ 削減に大きく貢献するとともに、他の分野への応用も期待できることから、波及効果は大きいと考えられる。
- 系統安定化のための 4 GJ オーダーの SMES の実用化はほぼ見極めが付いていると認められる。
- 最終的な実用機までのシナリオが明確に設定されており、コスト分析により最終目標性能で、他のエネルギー貯蔵機器と比べて十分な競争力があることは高く評価できる。
- 実用化技術の見極め手法、波及効果については概ね評価できる。
- 超電導だけが可能な領域を求めるとそれは SMES だ。それは大規模な電力平準化装置を都心に成立させることだ。
- SMES の競合機器に対してメリット、デメリットを大まかには把握されているが、もう少し細部に関して比較評価して頂きたい。

〈問題点・改善すべき点〉

- 更なる市場ニーズ調査を進めるべきである。例えば系統安定化としては何台、瞬停対策用としては何台の需要が見込めるのかなど、電力、産業用について幅広い需要の調査が必要と思われる。
- 基幹系統安定化用 2GJ-SMES という開発目標を決定した経緯が不明確である為、今回の開発目標をクリアしても、それで実用化するか否か、また普及するか否か不明確である。最終目標と本プロジェクトでの開発目標を区別して明示して頂きたい。ユーザーニーズ、競合技術との比較について更に検討が必要である。
- 本事業での成果の範囲では、実用化が議論できるレベルに至らない。むしろ SMES 用途に限定せず、Y 系線材を用いたコイル化要素技術を変圧器開発と共同して高める方向に進めた方が、後々に生きる汎用性の高い成果をもたらすと思われる。

- SMES に対する市場ニーズは種々存在すると考えられることから、十分な低コスト化が図られれば、実用化可能であると考えられる。一層のコスト低減技術の開発強化が必要である。
- コスト面に優れていても熱維持の必要な NAS や、応答性に優れていても大型化に限度のあるキャパシタに比べると、SMES には規模の経済性が期待できるであろう。その点を活かせる大型化 SMES の開発も視野に入れるべきである。
- 電池、フライホイールと競合する容量では超電導瞬低対策装置の市場化は無理である。イノベーションは代替え需要では進まない。新規市場を開拓しなければいけない。

〈その他の意見〉

- ・ ISTEK の成果と受託先の成果の区別が不明確。大きい意味では NEDO の成果=ISTEK の成果でしょうが、実施先・中部電力の成果なのか更にその先のメーカーの成果なのか、もう少し明確にして頂きたい。また多くの大学が参画していますが、大学がどのように、どの程度寄与しているかが全く不明である。各大学の寄与を明確にして頂きたい。
- ・ 日本では重要性が低いものの、ネットワークが大規模化しているにもかかわらず送電インフラ投資が十分とはえない欧米ではスマートグリッドは特に注目されている。SMES はまず、このような小規模地域エネルギーネットワークの安定化オプションとして市場を見いだせよう。
- ・ 海外の特に中国・インドのニーズはすごい。連携して開発できると開発資金も得られてよい。
- ・ SMES の設計、開発はコイル化技術の成熟後に別のプロジェクトもしくは電力会社の自社事業として行われるのが適当である。

2. 2 超電導電力ケーブルの研究開発

1) 研究開発成果について

大電流ケーブル、高電圧ケーブルともに設定した中間目標を達成しており、成果は世界トップレベルである。大電流ケーブルは RABiTS-PLD（配向金属基板—パルスレーザ蒸着）と高電圧ケーブルは IBAD-MOD（イオンビームアシスト蒸着—有機金属熱分解）の同時開発や検査方法の開発など数値に表しにくい課題についても目標を達成するなど、高く評価できる。

先行しているビスマス系線材では数百 m 級のケーブル実証試験が世界各地で行われているのに対し、本事業では短尺の 15 m 級試験にしかすぎない。しかし、さらなる大容量ケーブル開発に向け、重要な要素技術となる大電流化、高電圧化、コンパクト化、低交流損失などの点で世界最高性能の技術開発を行っており、今後は、温度変動に伴う輸送特性変化など、 T_c （転移温度）が運転温度に近いイットリウム系導体特有の課題を調査し、ケーブル運転条件の適正範囲を明らかにするような展開が望まれる。

〈肯定的意見〉

- 大電流ケーブル、高電圧ケーブルともに設定した中間目標を達成している（達成見込み）と判断できる。達成した成果は世界トップレベルであり、その成果は高く評価できる。信頼性試験やシステム検証や熱解析など実用化目標に向け順調に進んでいる。
- 短絡電流の試験など良くやっていると言える。
- IBAD-PLD と MOD の同時開発や検査方法の開発など数値に表しにくい課題についても、成果は目標を達成していると認められる。成果は、国内市場のみならず海外市場にも進出可能と考えられる。
- 数値目標をクリアしており、概ね満足できる。
- 中間目標はすべて本年度中に達成済みまたは達成見込みであり、着実に成果が上がっている。また、達成された成果は世界最高レベルであり、意義は大きい。
- Y 系線材を用いたケーブル試作に向けての研究開発は国内唯一のものであり、注目されるものである。

〈問題点・改善すべき点〉

- 線材の剥離の問題を重視すべき。ケーブルにおいても繰り返し応力を受ける可能性あり。
Bi 系との比較がなされているが、もう少し細部に関して比較評価した表を作成してもらいたい。
- 経済性なら、すでに、ビスマス線材でもよい、この研究は市場が狭い、将来性の無い一回だけの需要かもしれないと危惧する。

- エネルギー問題への関心が高まる状況にあっては、超電導ケーブルは貢献する意味合いが大きい。既存のケーブルの置き換えも重要ではあるが、CO₂削減や省エネルギーの観点から、もう少し、一般への啓蒙普及活動が望まれる。
- やや国内のリプレースが前面に出てきすぎた観がある。海外では長距離送電への期待が大きいことから、超電導ケーブルの貢献の可能性を強調すべきと考える。
- 論文が少ない。
- 既に、Bi系線材では数百m級のケーブル実証試験が世界各地で行われており、Y系線材についても長尺ケーブルの試験や試作が進められている。本事業の15m級の試験では大電力、低交流損失の点で世界最高の性能であるが、設計と仕様をややかえただけの対応であり、先行事業と比べて新規成果としての魅力に乏しい。むしろ、温度変動に伴う輸送特性変化などTcが運転温度に近いY系導体特有の課題を調査し、ケーブル運転条件の適正範囲を明らかにするような展開が望ましい。

〈その他の意見〉

- ・ 絶縁物の評価はどうなっているのか
- ・ 低交流損失化の点でY系線材の優位性が最終的に証明できるかどうか重要である。Bi系線材のケーブルの場合、交流損失の点で不利とされるが、通電量に対して電流容量が大きい設計にすればそれが解決される。ちなみにBi系線材の電流容量は500 A/cm程度であり、ここで試作されるY系線材(320 A/cm)よりも大きい。Tcの点でも不利なY系線材がケーブルとして使われるようになるには、高電流密度化など、Bi系線材を圧倒的に凌ぐ設計が必要であるが、その狙いはこの事業には見えていない。

2) 実用化、事業化の見通しに関する評価及び今後の提言

66kV 大電流ケーブルおよび 275kV 高電圧ケーブルともに既存ケーブルの増強や老朽ケーブルの更改などの需要を明確にするとともに、既存管路設備に設置可能なコンパクト化を十分考慮した開発を行っている。限られた地下スペースで、大容量送電を行うには、超電導ケーブルが有効であり、超電導ケーブルの需要は東京など大都市に経済的に成り立つと考えられるので、実用化が期待される。

一方、引っ張り、曲げ以外の強度面で不安があるイットリウム系線材だけに、接合部の耐久性の評価が長尺ケーブル開発には重要である。今後、通電量変動、温度変動に対するケーブルの耐久性、液体窒素中での絶縁物の経年変化など調べるのが望ましい。

また、本技術の市場は広く海外に広がるべきものであり、海外市場をにらんだ開発課題を明確にする必要がある。たとえば、直流送電ケーブルは原理的には交流送電ケーブルよりも単純であるが、より高電圧が要求されるので、直ちに対応ができるよう戦略的な体制を作るべきである。

〈肯定的意見〉

- 2020 年の日本の送電系統のリプレースという予定に沿って実用化の見極めができています。
- 66kV ケーブルに的を絞った開発になっており、技術的な見極め、事業化シナリオは概ね満足できる。
- 概ね明確化されているが、コスト評価に甘さがある。Bi 系との優位性をきちんと見極める必要がある。
- 66kV 大電流ケーブルおよび 275kV 高電圧ケーブルともに既存ケーブルの増強や老朽ケーブルの更改などの需要を明確にするとともに、既存管路設備に設置可能なコンパクト化を十分考慮した開発を行っており、大いに実用化が期待される。
- 中間目標で達成された性能は、大きく実用化への見通しを広げるものである。また、エネルギーを取り巻く環境を考慮すると、本成果は社会に与える影響が極めて高いと考えられる。
- 超電導ケーブルの需要は、東京など大都市に経済的に成り立つ。狭い地下洞道に設置可能なケーブルは超電導だけだからである。それをイットリウムにすることで世界記録を作るという成果は上がっている。
- 電力の規格としては、ニーズに対応したものである。また超電導ケーブルとしては東京の大電力網補強の唯一の方法として期待されている。

〈問題点・改善すべき点〉

- 実用化の目途は本事業の終了を待たなくても、各所で行われているプロジ

ェクトで既に立てられている。わずか 15 m のケーブル開発であるので、短期に製造し前倒しで評価試験を終え、大電力対応、低交流損失特性の成果を早く挙げ、次のステップ（新規プロジェクト）に進むかどうかを検討すべきである。

- ケーブル製造技術において、さらなるコスト低減が可能かどうか検討する必要がある。
- 本技術の市場は広く海外に広がるべきものである。その点、海外市場をにらんだ開発課題を明確にする必要がある。たとえば、直流送電ケーブルは原理的には交流送電ケーブルよりも単純であるが、より高電圧が要求される。対応が直ちにできるよう戦略的な体制を作るべきである。
- 東京・大阪・シカゴなどすでに地中線がいつぱいな大都市にはいいがアジア、アフリカの過疎地帯では採用されそうにない。
- ユーザーニーズを把握しているか否か若干不安が残る。従来の管路に入るだけのメリットで果たしてリプレース需要があるだろうか。さらに、従来技術との比較検討、ユーザーニーズの正確な把握に努めて頂きたい。

〈その他の意見〉

- ・ 液体窒素中での絶縁物の経年変化について、電線メーカーは自信を持って商品として出せるのだろうかと思っている。
- ・ 引っ張り、曲げ以外の強度面で不安がある Y 系線材だけに、接合部の耐久性の評価が長尺ケーブル開発には重要である。例えば NEDO で実施している Bi 系ケーブルの実証試験の終了後に Y 系ケーブルで置き換える可能性も視野に入れて、通電量変動、温度変動に対するケーブルの耐久性が調べられるのが望ましい。
- ・ 適用分野として、送電ケーブルだけでなく、データセンター用や輸送用など直流送電を行う分野への適用性も高いと思われる。これらの分野への適用をにらんだ開発を進め、波及効果を高めていただきたい。

2. 3 超電導変圧器の研究開発

1) 研究開発成果について

電流分担を均等化できる巻線技術や限流機能付き変圧器の見通しなど世界初の成果が含まれ、設定した中間目標を達成していると判断できる。コイル素線間の電流分担の均等化の成果は評価できるとともに、特に従来品の単なる置き換えではなく、限流効果等の付加価値・波及効果にまで言及している点は、高性能化という観点からも評価できる。

しかし、変圧器の性能は既に十分高く、超電導化によるメリットとして重量1/2、面積2/3というコンパクトネスを前面に押し出すのみではリプレース需要は難しいため、変電所新設の繰延べ効果や限流機能付加に伴う短絡容量対策代替効果等についても、さらに論理的に説明していく必要がある。

また、既存変圧器とのコスト比較や特性比較等でのメリットについて、引き続き検討を充実させ、できるだけ早期に条件を整理し、超電導変圧器の優位性を更にアピールする必要がある。

〈肯定的意見〉

- 巻線技術、冷却システムなど設定した中間目標を達成している（達成見込み）と判断できる。特に限流器機能を付加した点は、高性能化という観点から高く評価できる。また、達成した成果は世界トップレベルである。
- 超電導トランスに限流機能を抱き合わせたことは良い。イノベーションはそのようなことで進む気がする。
- 交流損の低減を基本とした線材開発を中心に、既存機器と十分にコスト競争力を持つ機器開発について、ほぼ目標が見えている。
- 中間目標に対する達成度はいずれも達成済あるいは今年度中に達成見込みであり、電流分担を均等化できる巻線技術や限流機能付き変圧器の見通しなど、世界初の成果が含まれ、意義も大きい。また、最終目標に対する課題、見通しは明確であり、今後も着実な進捗が見込まれることから達成可能性は高い。
- 超電導変圧器は従来品の単なる置き換えではなく、限流効果等の付加価値・波及効果にまで言及している点が高く評価できる。
- 中間目標は概ね既に達成されている。限流機構を取り入れたことは技術的に評価できる。
- 限流効果は大きく評価できる。

〈問題点・改善すべき点〉

- 多数の成果があがっている割に、特許出願が少ないと思われる。実用化時の技術優位性を確保するためにも、一層積極的な出願を推進すべきと考える。

- 有用な成果が多いがその割に出願数が少ないと思われる。戦略的な特許出願が必要。
- 変圧器の超電導化は特殊な領域から始まると思うが、一般トランスの代替え需要と言っている。そんなことは絶対に起こらない。トランスの鉄芯が発熱するのを防げないものか
- 変圧器は非常に完成度の高い成熟機器なので、重量 1/2、面積 2/3、高効率ではリプレース需要は難しいと思われます。限流効果、不燃、下位系統の機器設計が格段に楽になる等の超電導化することによる付加価値、波及効果に、もっと積極的に言及して頂きたい。やはり、査読論文が少ない。大学の貢献度が不明確。
- 中間目標以後の 2 年間の課題はかなりヘビーで、例えば 2 MVA 器の検証には 11 km の導体が必要である。一方、低交流損失化が超電導変圧器の唯一の課題であり、細線化線材の開発が鍵を握っているがこれはケーブルと共通したものである。また巻線技術は SMES と共通する部分が多い。このほか線材接合の問題も同様である。2 MVA 器の検証の前にこれらについて予めクリアしておく必要がある。よって 2 MVA 器開発を事業期間内に行うことはかなり困難と考えられ、仮に形ができたとしても性能や耐久性には不安が残る。
- 誰にどのように売り込むかの市場戦略が明確ではない。コンパクトネスのみでは安価な製品に負ける危険がある。
- 線材のセグメント化の問題に関連して交流損失の問題は残る。

〈その他の意見〉

- ・ 変圧器の性能は既に十分高く、超電導化によるメリットはダウンサイジング以外にほとんど無い。電力会社が超電導化することに本当に魅力を感じているのか、超電導以外の技術者の冷静な意見を聞きたい。
- ・ 導入のメリットをもう少し詳しく説明されたい。

2) 実用化、事業化の見通しに関する評価及び今後の提言

超電導変圧器は、既存の油入変圧器の更改需要があり、不燃化、省エネ、小型軽量化などのニーズに応えられる可能性が大きい。実用化に向けた明確な課題設定とモデル検証を通じた効果的なアプローチがなされ、実用的なスケールの変圧器に対する適当な課題の抽出、検討項目の選定も行われている。

一方、限流効果、不燃、下位系統の機器設計が格段に楽になる等の超電導化による付加価値、波及効果にもっと積極的に言及するなど、超電導変圧器の実用化によるユーザーメリットを明確にし、ニーズを掘り起こす必要がある。

また、既存技術も極めて高いレベルにあるため、コンパクトネスだけでなく、高信頼性をアピールできるようにすべきと考える。

〈肯定的意見〉

- 実用的なスケールの変圧器に対する適当な課題の抽出、検討項目の選定が行われている。
- 産業技術の一選択肢としては見極めができている。事業化も、需要側からみれば一つの魅力ある選択肢として映るであろうレベルに達している。
- 実用化に向けた明確な課題設定とモデル検証を通じた効果的なアプローチがなされていると判断できる。
- 超電導変圧器は、既存の油入変圧器の更改需要があり、不燃化、省エネ、小型軽量化などのニーズに応えられる可能性が大きく、実用化の可能性は高い。
- 実用化に必要な要素技術の抽出・確認は適切であり、概ね満足できる。
- 事業化に関してはケーブル、SME Sとセットでなくても単体で十分機能するように考慮していただきたい。そうすれば海外ですぐにでも必要などころがあるはずであり、またそれを探すマーケティングも必要となる。

〈問題点・改善すべき点〉

- 特殊なニーズを掘り起こしてそこに開発委託するべき。
- 限流の効果が分かったが、それがどのようなイノベーションにつながるかの説明がないが残念だ。
- コンパクトネスだけでなく、高信頼性をアピールできるようにすべきと考える。コンパクト性(=高市場効率性)+高信頼性では本製品は世界にきわめて広い市場を持つ。既存技術の効率も極めて高いレベルにあるため、その上でなおメリットをアピールするには船舶や既存建物などへの応用可能性をもっとアピールすべきである。
- 実用化に当たっては、運用経費を含めた低コスト化が重要であり、既存設備に対する優位性を確保するためにも、一層の低コスト化に向けた技術開発の強化が望まれる。

- 最終的に、20MVA 実用機が完成した際に、どの程度の価格と信頼性なら本当にユーザーが使ってくれるのかどうか、市場調査を通してユーザーの要求度を明確にしていく必要があると思われる。
- 実用器規模は 20 MVA であり、このスケールをはるかに下回る試作器(2 MVA)における評価が行われても本格的な事業化に向けての検証課題は山積する。また、現行技術との効率面の優位性がわずかであることから、導入コスト、運転コストの見積もりが超電導化のメリットを明確にするために重要である。これらを総合し事業化までのシナリオを電力会社が本事業終了時に描けるかがポイントとなる。

〈その他の意見〉

- ・ そもそもユーザーニーズにマッチしているか否かではなく、超電導変圧器の実用化によるユーザーメリットを明確にし、ニーズを掘り起こす必要があるのではないのでしょうか。限流効果、不燃、下位系統の機器設計が格段に楽になる等の超電導化することによる付加価値、波及効果に、もっと積極的に言及して頂きたい。査読論文が少ない。
- ・ 別の項でも述べたが、超電導変圧器を通すことによる電力改質の効果が訴えられれば、効率改善以上の導入の動機となる。総合的な電力設備として変圧器の超電導化の効果が調査されるべきである。
- ・ 本プロジェクトは世界を先導する位置づけであるため、世界の市場の製品の要件を海外コンサルタントなど活用してあぶり出し、官民を挙げて世界市場への参入への取り組み体制を構築すべきと考える。

2. 4 超電導機器用線材の研究開発

1) 研究開発成果について

線材開発は各機器の基盤的技術であり、各機器の実用化に重要な位置づけを担っている。必要な線材特性の抽出と検査の実行、また磁場中特性、低交流損失や低コスト化など設定した中間目標を達成している。特に、磁場中での世界トップレベルの性能、更なる低コスト化の達成、さらにケーブル製作・運転条件における具体的な環境性能課題の抽出を行い、その試験項目を明確化するとともに劣化が無いことを確認した点は実用化を進める上で高く評価できる。

さらに、線材用途ごとの技術課題の棲み分けは好ましい戦略であり、長さ、量産性を強化し、日本がイットリウム系線材をリードできる素地を作ってほしい。

一方、線材は機器開発と異なり多くのノウハウや科学的技術を押し込められるもので、一度優位性を確保し発展を続け始めれば他国の技術の追従は容易でないので、本事業では研究予算の配分増によって重点的にこれを推進することが望ましい。

また、線長のチャンピオンデータを追うよりも電流密度や信頼性をあげることで結果的に低コスト化を実現するという方針に誤りはないものの、機器開発や送電線への実装という点で、本機器用線材の研究開発は、SMES、変圧器及びケーブル開発と引き続き密接に連携し、これまでややアピール力に欠ける点を解消することが望まれる。また、線材の早期の実用化・事業化を進めることも望まれる。

〈肯定的意見〉

- 線材の開発目標を超電導電力機器の開発仕様から見直し、その数値目標をクリアしており、十分満足できるレベルである。
- 中間目標は概ねクリアできると思われる。また最終目標もクリアできる技術レベルを獲得しつつある。線材用途ごとの技術課題の棲み分けは好ましい戦略であり、長さ、量産性を強化し、日本がY系線材をリードできる素地を作ってほしい。
- 中間ではあるが、イットリウム材の悪評判に対して、かなりの成果が上がっている、全体に卒なくやっている印象。それだけに、日本の時代遅れとなったシーズ・プッシュ型開発の典型的例と言われるのが成果か。線材開発で開発したレーザアブレーション技術、基板平坦化技術など、他の分野にも波及する可能性がある。
- 必要な線材特性の抽出と検査の実行、また磁場中特性、低交流損失や低コスト化など設定した中間目標を達成している（達成見込み）と判断できる。特に、磁場中での世界トップレベルの性能、更なる低コスト化の達成、さらにケーブル製作・運転条件における具体的な環境性能課題の抽出を行い、

その試験項目を明確化にするとともに劣化が無いことを確認した点は実用化を進める上で高く評価できる。

- 中間目標を達成した I_c 値、線材長は評価できる。
- SMES や変圧器、送電ケーブルなどの機器開発の基本となるのが線材開発であることはいうまでもない。ここでは IBAD-PLD と MOD の同時開発や検査方法の開発など数値に表しにくい課題についても、成果は目標を達成していると認められる。成果は、国内市場のみならず海外市場にも進出可能と考えられる。
- 線材開発は各機器の基盤的技術であり、各機器の実用化に重要な位置づけを担っている。この線材開発の中間目標はいずれも達成済あるいは今年度内に達成見込みである。また、世界に先駆けた成果や実用化に重要な技術が達成されており、意義も大きい。特に、耐久性試験条件の決定は、今後の各機器の実用化開発に極めて重要な技術であり、特筆すべきと考える。

〈問題点・改善すべき点〉

- 交流損失低下に向けた対策が急務である。特に分割による I_c 劣化の問題とそれに付随する交流損失の増加の懸念。また、剥離対策も非常に重要な課題である。
- 開発目標はクリアしているが、そもそも電力機器側からの要求仕様が低く過ぎるということはありませんか？電力機器側からの要求仕様と開発目標の関係を、もう少し明確にして頂きたい。
- 線長のチャンピオンデータを追うよりも電流密度や信頼性をあげることで結果的に低コスト化を実現するという方針に誤りはないものの、世界にアピールする際は機器開発や送電線への実装という点でややアピール力に欠ける点は否めない。早期の機器応用と製品化が望まれる。
- 現状の歩留まりを向上させるためや、更なる高性能化を進める上での具体的な戦略を明確に設定する必要がある。
- 担当幹事会社の主導で電線メーカーの開発と特許問題は起きないのか。特許がこの程度しかないと言うことは、換言すれば電線メーカーは将来市場性が無いと思っている。メーカー独自の特許室で費用が捻出できないのか。プロジェクト費に特許費用も入っているはず。
- 線材は機器開発と異なり多くのノウハウや科学的な技術を押し込められるもので、一度優位性を確保し発展を続け始めれば、他国の技術の追従は容易でない。本事業では研究予算の配分増によって重点的にこれを推進することが望ましい。また、線材が十分に高い電流値で使える条件(温度、磁場)を評価、公表することにより、本事業以外のユーザーの関心を惹くことも、用途拡大に重要である。

〈その他の意見〉

- ・ 類似した技術をもとにY系線材化が世界で展開されている。日本の技術が突出できる革新的な線材構成・微細組織形成の創製にも大いに期待したい。
- ・ 素材型プロジェクトは出口が大切だ。世界記録をいくつ作って、ギネスブックに載せるのが目的かと言われてしまう。世間が評価するのは、社会がそれでどれだけ役に立ったかである。単に産業や製造メーカーのために開発しているのではない。

2) 実用化、事業化の見通しに関する評価及び今後の提言

様々な超電導応用機器を実用化する上で、個々機器の要求に応じた具体的かつ明確な線材開発の目標設定がなされ、成果が着実に上がっていると同時に、各線材メーカーにおける戦略と結び付けられており、実用化が大いに期待できる。イットリウム系線材実用化は、ビスマス系線材が不得意な高温磁場発生応用、低交流損失応用の点で強く期待されている。

一方、線材の低コスト化は機器実用化に対して極めて大きな意味を持つので、プロセスの改善以外にも、引き続き材料工学的な観点から性能向上に取り組むことが重要である。高性能線材の開発とともに、生産速度、高歩留まり化も並行しての開発検討の強化が望まれる。

なお、臨界電流特性の改善による実用可能な条件の拡大とともに、信頼性の獲得、生産性の向上が急務である。特に信頼性に関わる剥離問題の解決はイットリウム系線材普及の命運を握っており、温度や電磁力が変化する運転時においても支障がないことが保証できるデータの提示が望まれる。

〈肯定的意見〉

- 各機器の基盤技術として、成果が着実に上がっていると同時に、各線材メーカーにおける戦略と結び付けられており、実用化が大いに期待できる。
- 素晴らしいイットリウム系高温超電導線材に期待できる成果がでていますが、コストが問題だ。歩留まりなども考慮している点も評価できる。
- 交流損失の低減対策など実用化に必要な技術開発がなされており、概ね満足できるレベルである。
- Y系線材実用化は、Bi系線材が不得意な高温磁場発生応用、低交流損失応用の点で強く期待されている。
- 変圧器用線材およびSMES用線材はほぼ実用化が見えていると思われる。
- 大まかな導入シナリオはできているが、以下の点に留意されたい。
歩留まりを含めた線材コストの見積もりと今後のコスト予想これに関してはLCAも今後は考慮されたい。
ユーザーのニーズを再度確認されたい。導入の確固としたコンセンサスが得られなければならない。また得られるような目標改善を順次実施して頂きたい。
- 様々な超電導応用機器を実用化する上で、個々機器の要求に応じた具体的かつ明確な線材開発の目標設定がなされている。線材の高性能化は、薄膜技術のレベルアップや高い技術を持った人材の育成にも貢献している。

〈問題点・改善すべき点〉

- 板状の線材を5~10分割して交流損失を低減させていますが、工数が増加

するのと材料の損出が気になります。素人考えで恐縮ですが、細い丸芯線に成長させる等、他の細線化手法はないのでしょうか。現状の成果は世界トップレベルであり、高く評価しますが、もし、他の全く違うアプローチが考案されると完全に後発になってしまいます。他のアプローチにも注意を払って下さい。

- 送電ケーブルでは都市内での実用化は見えているものの、世界的にアピールできる海外市場における長距離送電にはまだ道のりが必要である。
- 臨界電流特性の改善による実用可能な条件の拡大とともに、信頼性の獲得、生産性の向上が急務である。特に信頼性に関わる剥離問題の解決はY系線材普及の命運を握っており、温度や電磁力が変化する運転時においても支障がないことが保証できるデータの提示が望まれる。これについては線材表面の組織制御も重要な要素である。また、コストダウンの目標は多数の生産実績に対して課されるべきものであり、特別な1バッチの製造で目標を達成することの意義は小さい。この点では工程の減少（例えば中間層数を減らす）も検討課題となる。
- 線材の各目標を達しても実用は開かれない。それで、ニーズ・プル型の開発とドッキングするべきである。

〈その他の意見〉

- ・ 本研究の成果を実機・市場に投入する手段を考えよう。投資家は、商品化などの市場が評価してくれるような成果が無いと動いてくれない。
- ・ 実用化に向けては一層の低コスト化が必要と考えられることから、現在、米国に先行を許している長尺化についても、一層の開発検討の強化が望まれる。
- ・ 線材の低コスト化は機器実用化に対して極めて大きな意味を持つので、プロセスの改善以外にも、材料工学的な観点から性能向上に取り組むことも重要であるのでこの分野の強化も重要と思われる。
- ・ 本事業のなかで各種機器開発目標の制約になっているのは線材の生産量であることは明らかである。突出した高性能線材の開発とともに、生産速度、高歩留まり化も並行して実現されたい。

2. 5 超電導電力機器の適用技術標準化

1) 研究開発成果について

超電導技術は日本が先導的であるため日本発の標準化が強く望まれる中、国際合意形成のための素案作成、意見交換などを着実にやり、世界主要各国と着実に調整を進め成果を上げている点は評価できる。特に、日本が標準化のイニシアチブを取れる体制作りの経過は評価できる。

一方、標準化にあたっては各国・各地域のレベルの違いによって認識が異なり、現時点での集約が困難であることが予想される。完全な標準化に至らなくても、重要な項目を抽出し部分的に標準化手法の確立を図るといった柔軟性も必要である。

また、長期にわたって継続しなければならないので、長期間携わって頂けそうな大学の若い先生方をもっと活用すべきである。

〈肯定的意見〉

- 電力関連機器評価の標準化などは時期尚早の感がするが、日本が標準化のイニシアチブを取れる体制作りの経過は評価できる。特に、各国の標準化の意識を高める積極的な活動も評価できる。
- 今から標準化を取り込んだことは評価できる。まだ、商品化されていない。されないかもしれない SMES や超電導変圧器も含めて議論しておくことと先手必勝と言うことで良い。
- 国際合意形成のための素案、意見交換などが着実に行われている。中間目標はいずれも今年度内達成見込みであり、順調に進捗していると考えられる。
- 超電導線や超電導ケーブルの技術標準化に関して通則素案実現に向け設定した中間目標を達成している（達成見込み）と判断できる。特に、世界主要各国と着実に調整を進めており成果を上げている点は高く評価できる。
- 開発と同時に技術標準化に組織的に取り組んでいる点を高く評価します。
- 導入シナリオを強力にフォローするような標準化戦略が必要。特に今後技術輸出が非常に大きなテーマとなってくる。これを踏まえ早急にイニシアチブを取れるような戦略を練って頂きたい。
- 超電導技術は日本が先導的であるため、日本発の標準化が強く望まれる。

〈問題点・改善すべき点〉

- 標準化にあたっては各国・各地域のレベルの違いによって認識が異なり、現時点での集約が困難であることは十分に予想できる。完全な標準化に至らなくても、重要な項目を抽出し、部分的に標準化手法の確立を図るといった柔軟性も必要と思われる。
- 相手があることで、うまくいくかどうか。経済効果は、そのまた先のこと

で、見通しが無い。長期にわたって継続しなければならないので本プロジェクトで終わってはならない。

- 標準化に長期間携わって頂けそうな大学の若い先生方をもっと活用すべき。

〈その他の意見〉

- ・ 仕分け人に、一番になる必要があるのかと言われて答えられない人がいましたが、標準化を日本主導とする必要があるのかと問われて答えられますか。
- ・ 他国から安価な製品が市場に参入し、デファクトスタンダードになってしまふことのないよう、標準化を急ぎたい。そのためには、製品化とのタイムラグが最小になることが望ましい。

2) 実用化の見通しに関する評価及び今後の提言

超電導技術は日本が世界を先導する開発分野であり、超電導線材、超電導ケーブルについて国際標準化に必要な素案を作成し各国と密接に連携し、交渉は順調に進んでいる。この時期に国際規格化や標準整備に着手することは適切である。

国際交渉はタフな仕事であり、簡単に進捗するものではないが、技術的に先行し世界をリードすることは、日本がリーダーシップをとるために重要と考える。今後とも積極的に開発成果をアピールし、標準化へ向けて努力を強化していただきたい。

〈肯定的意見〉

- 交渉は順調に進んでいるという印象である。
- 国際標準化に向けた努力がなされており、活動状況は概ね満足できる。
- 超電導技術は日本が世界を先導する珍しい開発分野である。世界もそれを認めている。その証拠に欧米は日本に勝てないので開発をやめようとしているのでまさに好機である。過去の金属系超電導線材の国際標準化も見直すべきである。
- 超電導線材、超電導ケーブルについて国際標準化に必要な素案を作成し各国と密接に連携し合意実現を進めており、国際規格化が実現する見通しが高いと判断できる。
- 部分的に留まる可能性はあるものの、この時期に国際規格化や標準整備に着手することは適切である。

〈問題点・改善すべき点〉

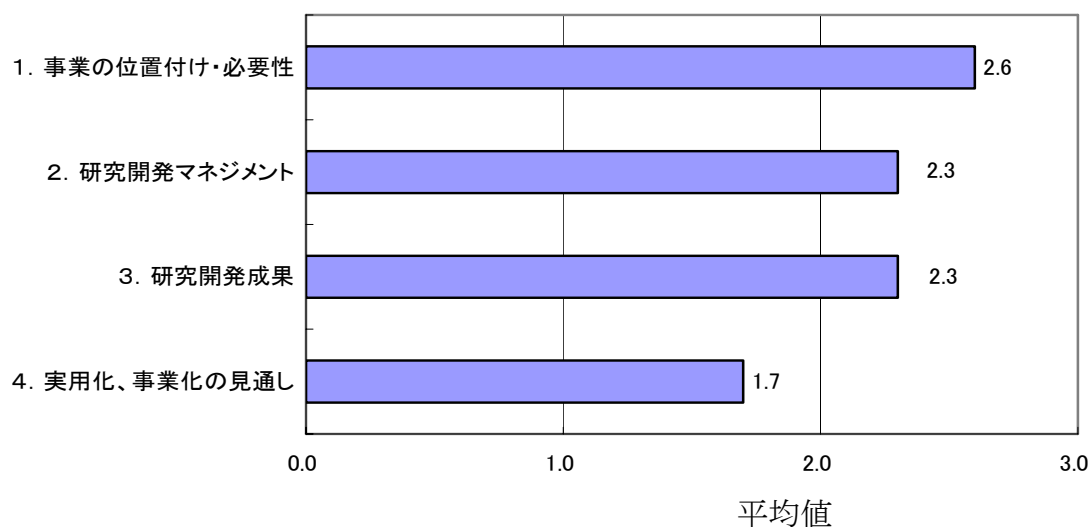
- 欧米がやめると日本もやる気が無くなってしまった、ということの無いようにしてほしい。
- 若い先生方の活用を御一考願います。

〈その他の意見〉

- ・ 各国の事情があり、簡単に進捗するとは思えないが、技術的に先行し、世界をリードすることが重要と考える。今後とも積極的に開発成果をアピールし、標準化へ向けて努力を強化していただきたい。
- ・ 一般向けの広報が必要である。標準化が成功したとして、波及効果はどの程度あるのか
- ・ 国際交渉はタフな仕事であるが、日本がリーダーシップをとるために成果を上げてほしい。

3. 評点結果

3. 1 プロジェクト全体



評価項目	平均値	素点 (注)							
		A	A	A	B	C	A	A	
1. 事業の位置付け・必要性について	2.6	A	A	A	B	C	A	A	
2. 研究開発マネジメントについて	2.3	A	A	A	C	B	B	B	
3. 研究開発成果について	2.3	A	B	A	B	C	A	B	
4. 実用化、事業化の見通しについて	1.7	B	B	A	C	D	A	C	

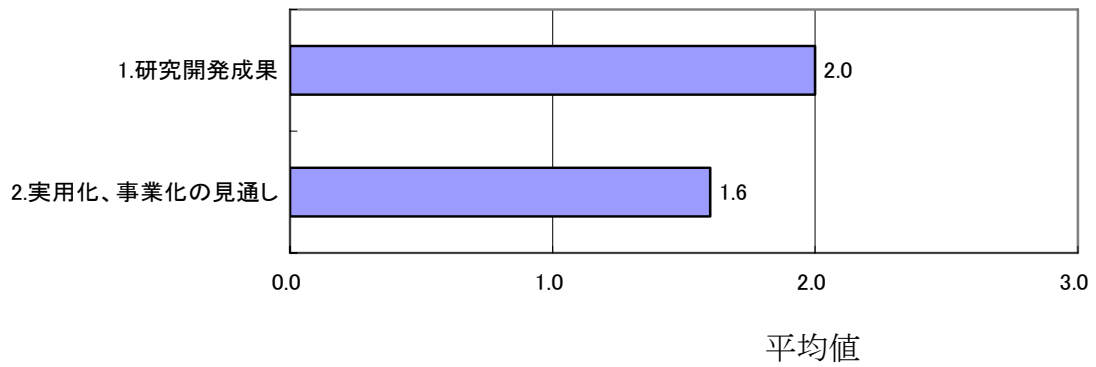
(注) A=3, B=2, C=1, D=0 として事務局が数値に換算し、平均値を算出。

〈判定基準〉

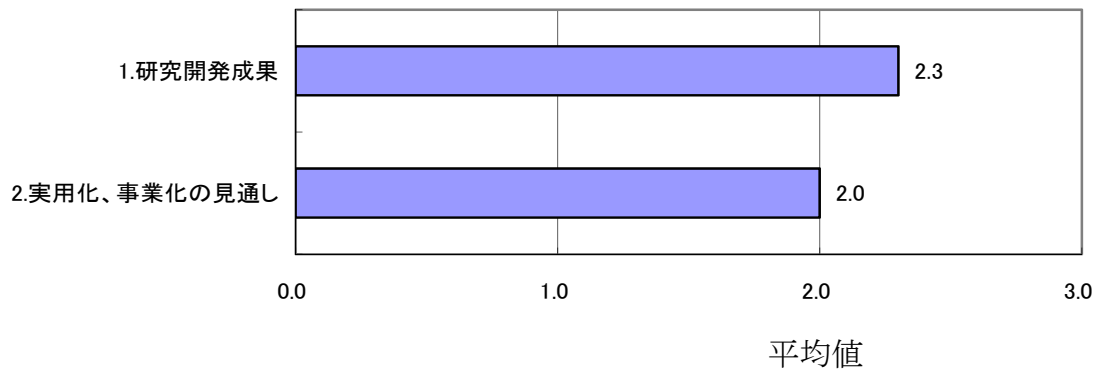
1. 事業の位置付け・必要性について	3. 研究開発成果について
・非常に重要 →A	・非常によい →A
・重要 →B	・よい →B
・概ね妥当 →C	・概ね妥当 →C
・妥当性がない、又は失われた →D	・妥当とはいえない →D
2. 研究開発マネジメントについて	4. 実用化、事業化の見通しについて
・非常によい →A	・明確 →A
・よい →B	・妥当 →B
・概ね適切 →C	・概ね妥当であるが、課題あり →C
・適切とはいえない →D	・見通しが不明 →D

3. 2 個別テーマ

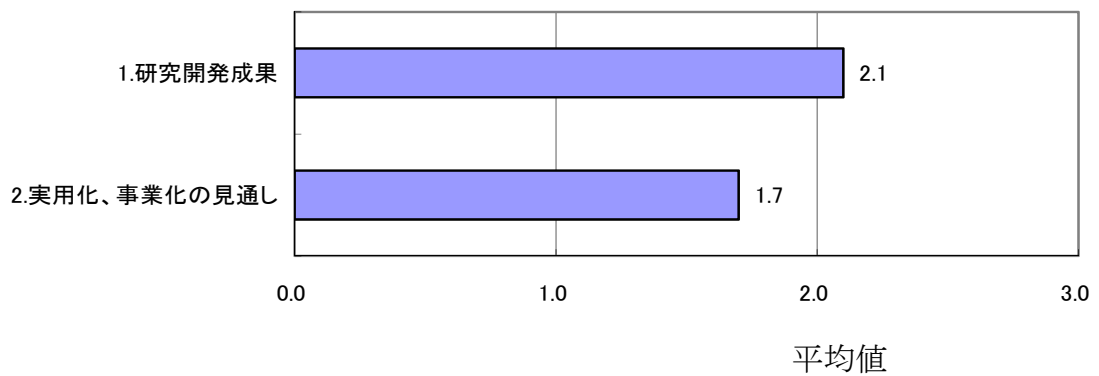
3. 2. 1 超電導電力貯蔵システム（SMES）の研究開発



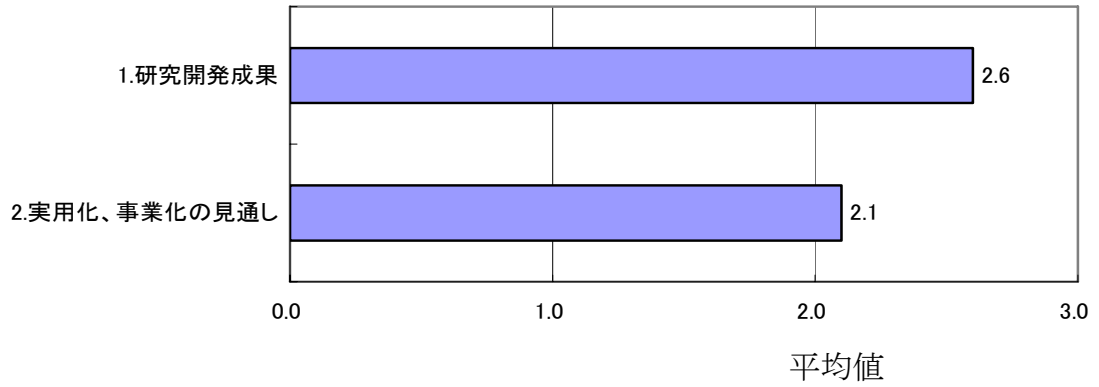
3. 2. 2 超電導電力ケーブルの研究開発



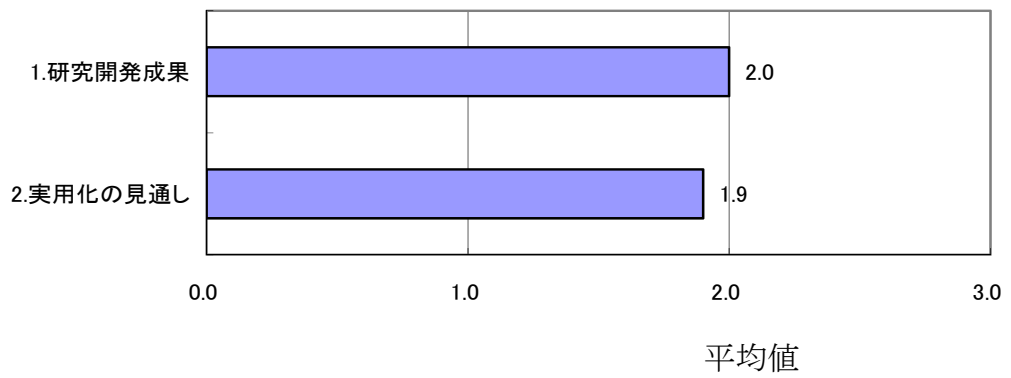
3. 2. 3 超電導変圧器の研究開発



3. 2. 4 超電導機器用線材の研究開発



3. 2. 5 超電導電力機器の適用技術標準化



個別テーマ名と評価項目	平均値	素点 (注)							
超電導電力貯蔵システム (SME S) の研究開発									
1. 研究開発成果について	2.0	A	B	A	C	C	A	C	
2. 実用化、事業化の見通しについて	1.6	A	B	B	D	C	B	C	
超電導電力ケーブルの研究開発									
1. 研究開発成果について	2.3	A	A	A	C	C	A	B	
2. 実用化、事業化の見通しについて	2.0	A	B	B	B	C	B	B	
超電導変圧器の研究開発									
1. 研究開発成果について	2.1	B	B	A	B	C	A	B	
2. 実用化、事業化の見通しについて	1.7	B	B	B	C	C	A	C	
超電導機器用線材の研究開発									
1. 研究開発成果について	2.6	A	A	A	B	B	A	B	
2. 実用化、事業化の見通しについて	2.1	A	B	A	B	C	B	B	
超電導電力機器の適用技術標準化									
1. 研究開発成果について	2.0	A	B	B	B	B	B	C	
2. 実用化の見通しについて	1.9	A	B	B	B	C	B	C	

(注) A=3, B=2, C=1, D=0 として事務局が数値に換算し、平均値を算出。

〈判定基準〉

1. 研究開発成果について	2. 実用化、事業化の見通しについて
・非常によい	→A ・明確 →A
・よい	→B ・妥当 →B
・概ね適切	→C ・概ね妥当であるが、課題あり →C
・適切とはいえない	→D ・見通しが不明 →D

特許論文リスト

年度別の特許、論文、外部発表の件数

	特許			論文			研究発表・講演	受賞実績	その他外部発表(プレス・展)
	国内	外国(パ リルー ト)	PCT出願	査読有	その他	投稿中			
H20年度	7	0	0	23	2	13	70	1	6
H21年度	27	0	2	53	15		241	2	8
H22年度	14	1	4	42	4		203	3	6
H23年度	23	2	7	29	1		181	3	14
H24年度	30	0	3	18	8		224	0	23
合計	101	3	16	165	30	13	919	9	57

【特許】

1 超電導電力貯蔵システム(SMES)の研究開発

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PCT	出願日	状態	名称
1	中部電力(株)	2009-082925	国内	2009/3/30	出願	ダブルパンケーキコイル
2	中部電力(株)	2009-170229	国内	2009/7/21	出願	コイル装置、保護装置及び誘導電圧抑制方法
3	中部電力(株) 古河電気工業(株)	2009-193951	国内	2009/8/25	出願	超電導線材及びその製造方法
4	中部電力(株) 大学共同利用機関法人 自然科学研究機構	2009-241397	国内	2009/10/20	出願	自励振動式ヒートパイプ が組み込まれた超電導マグネット
5	古河電気工業(株)	2011-118549	国内	2011/5/27	出願	超電導薄膜用基材の製造方法
6	古河電気工業(株) 中部電力(株)	2011-118549	国内	2011/6/28	出願	超電導線の製造方法
7	古河電気工業(株)	2011-118549	国内	2011/7/11	出願	超電導薄膜及び超電導薄膜の製造方法
8	古河電気工業(株)	2011-118549	国内	2011/7/25	出願	超電導薄膜用基材、超電導薄膜及び超電導薄膜の製造方法
9	中部電力(株) 東北大学	2012-70050	国内	2012/3/26	出願	超電導パンケーキコイル
10	中部電力(株)	2012-088672	国内	2012/4/9	出願	超電導コイルの伝導冷却板及び超電導コイル装置
11	中部電力(株)	2012-088673	国内	2012/4/9	出願	超電導コイル装置及びその製造方法
12	中部電力(株)	2012-088674	国内	2012/4/9	出願	超電導コイル装置
13	中部電力(株)	2012-117340	国内	2012/5/23	出願	超電導線材の絶縁被覆構
14	中部電力(株)	2012-121184	国内	2012/5/28	出願	超電導コイル装置
15	中部電力(株)	2012-127180	国内	2012/6/4	No9の 優先	超電導パンケーキコイル
16	中部電力(株)	2013-036083	国内	2013/2/26	No9の 優先	超電導パンケーキコイル
17	中部電力(株)	2013-001767	国内	13/2/29	出願	超電導コイル及びその製造方法
18	中部電力(株) 早稲田大学	出願準備中	国内			

2 超電導電力ケーブルの研究開発

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PCT	出願日	状態	名称
1	住友電気工業(株) (公財)国際超電導産業技術研究センター	2009-031951	国内	2009/2/13	審査請求済	超電導線材及びそれを用いた超電導ケーブル
2	住友電気工業(株) (公財)国際超電導産業技術研究センター	2009-057870	国内	2009/3/11	登録	薄膜超電導線材及び超電導ケーブル導体
3	(公財)国際超電導産業技術研究センター 昭和電線ケーブルシステム(株)	2009-087670	国内	2009/3/31	出願	酸化物超電導線材とその製造方法及びそれに用いる基板の製造装置
4	住友電気工業(株) (公財)国際超電導産業技術研究センター	2009-112894	国内	2009/5/7	審査請求済	超電導ケーブルの端末構造

5	住友電気工業株式会社(公財)国際超電導産業技術研究センター	2009-138632	国内	2009/6/9	出願	超電導ケーブルの端末構造
6	住友電気工業株式会社(公財)国際超電導産業技術研究センター	2009-138633	国内	2009/6/9	審査請求済	超電導ケーブルの中間接続構造
7	住友電気工業株式会社(公財)国際超電導産業技術研究センター	2009-146883	国内	2009/6/19	審査請求済	超電導ケーブル
8	住友電気工業株式会社(公財)国際超電導産業技術研究センター	2009-228401	国内	2009/9/30	審査請求済	超電導ケーブル
9	住友電気工業株式会社(公財)国際超電導産業技術研究センター	PCT/JP 2009/070302	PCT	2009/12/3	出願	薄膜超電導線材及び超電導ケーブル導体
10	住友電気工業株式会社(公財)国際超電導産業技術研究センター	PCT/JP 2009/070302	PCT	2009/12/3	出願	薄膜超電導線材及び超電導ケーブル導体
11	古河電気工業株式会社(公財)国際超電導産業技術研究センター	2010-022909	国内	2010/2/4	審査請求済	極低温ケーブルの終端接続部
12	昭和電線ケーブルシステム株式会社(公財)国際超電導産業技術研究センター	2010-031359	国内	2010/2/16	審査請求済	酸化超電導線材製造方法及び製造装置
13	昭和電線ケーブルシステム株式会社(公財)国際超電導産業技術研究センター	2010-031360	国内	2010/2/16	審査請求済	酸化超電導線材製造方法及び製造装置
14	古河電気工業株式会社(公財)国際超電導産業技術研究センター	2010-108277	国内	2010/5/10	国内優先	超電導ケーブル
15	古河電気工業株式会社(公財)国際超電導産業技術研究センター	2011-014657	国内	2011/1/27	出願	超電導ケーブルの終端接続部
16	古河電気工業株式会社(公財)国際超電導産業技術研究センター	PCT/JP 2011/051860	PCT	2011/1/31	出願	極低温ケーブルの終端接続部
17	古河電気工業株式会社(公財)国際超電導産業技術研究センター	2012-514780	国内	2011/5/9	出願	超電導ケーブル
18	古河電気工業株式会社(公財)国際超電導産業技術研究センター	PCT/JP2011/060 630	PCT	2011/5/9	出願	超電導ケーブル
19	住友電気工業株式会社(公財)国際超電導産業技術研究センター	2011-128716	国内	2011/6/8	出願	超電導線材、および超電導ケーブル
20	古河電気工業株式会社(公財)国際超電導産業技術研究センター	2012-554836	国内	2012/1/26	出願	超電導ケーブルの終端接続部
21	古河電気工業株式会社(公財)国際超電導産業技術研究センター	PCT/JP2012/051 656	PCT	2012/1/26	出願	超電導ケーブルの終端接続部
22	古河電気工業株式会社(公財)国際超電導産業技術研究センター	2012-554837	国内	2012/1/26	出願	超電導ケーブルの接続構造及びその布設方法並びに超電導ケーブルの接続構造の真空引き方法
23	古河電気工業株式会社(公財)国際超電導産業技術研究センター	PCT/JP2012/051 660	PCT	2012/1/26	出願	超電導ケーブルの接続構造及びその布設方法並びに超電導ケーブルの接続構造の真空引き方法
24	古河電気工業株式会社(公財)国際超電導産業技術研究センター	2012-556898	国内	2012/2/7	出願	超電導ケーブル線路

25	古河電気工業株 (公財)国際超電導産 業技術研究センター	PCT/JP2012/052 738	PCT	2012/2/7	出願	超電導ケーブル線路
26	古河電気工業株 (公財)国際超電導産 業技術研究センター	2012-095482	国内	2012/4/19	出願	超電導ケーブルの中間接 続部
27	古河電気工業株 (公財)国際超電導産 業技術研究センター	2012-123861	国内	2012/5/31	出願	超電導ケーブルのフォー マの接続構造及び接続方 法
28	古河電気工業株 (公財)国際超電導産 業技術研究センター	PCT/JP2013/581 812	PCT	2013/1/29	出願	超電導ケーブルのフォー マの接続構造及び接続方 法

3 超電導変圧器の研究開発

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PCT	出願日	状態	名称
1	大陽日酸(株)	2009-262896	国内	2009/11/18	出願	極低温冷凍装置及びその 運転方法
2	九州電力(株) 富士電機(株)	2011-266859	国内	2011/12/6	出願	超電導コイルおよび超電 導変圧器
3	九州電力(株) 富士電機(株)	2011-281523	国内	2011/12/22	出願	電力用誘導機器の超電導 コイル
4	九州電力(株) 富士電機(株)	2011-281524	国内	2011/12/22	出願	電力用誘導機器の超電導 コイル
5	富士電機(株)	2012-197386	国内	2012/9/7	出願	超電導機器の昇温方法お よび昇温装置
6	富士電機(株)	2012-225336	国内	2012/10/10	出願	超電導コイルの交流損失 測定方法
7	富士電機(株)	2012-250391	国内	2012/11/14	出願	薄膜超電導線材および超 電導コイル
8	富士電機(株)	2013-021476	国内	2013/1/23	出願	超電導コイル
9	富士電機(株)	2013-019360	国内	2013/2/4	出願	超電導コイルの交流損失 測定方法および交流測定
10	富士電機(株)	出願準備中	国内	—		超電導変圧器の交流損失 測定法
11	大陽日酸(株)	2012-092709	国内	2012/4/13	出願	高温超電導機器の冷却装 置及びその運転方法

4 超電導機器用線材の技術開発

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PCT	出願日	状態	名称
1	住友電気工業株 (公財)国際超電導産 業技術研究センター	2009-001836	国内	2009/1/7	登録	薄膜超電導線材の製造方 法および薄膜超電導線材
2	住友電気工業株 (公財)国際超電導産 業技術研究センター	2009-015628	国内	2009/1/27	登録	超電導線材および超電導 線材の製造方法
3	住友電気工業株 (公財)国際超電導産 業技術研究センター	2009-060989	国内	2009/3/13	審査 請求 済	超電導線材および超電導 線材の製造方法
4	住友電気工業株 (公財)国際超電導産 業技術研究センター	2009-152128	国内	2009/6/26	審査 請求 済	超電導線材

5	住友電気工業株式会社 (公財)国際超電導産業技術研究センター	2009-163507	国内	2009/7/10	審査請求済	超電導線材の製造方法および超電導線材の接続方法
6	昭和電線ケーブルシステム株式会社 (公財)国際超電導産業技術研究センター	2009-249173	国内	2009/10/29	審査請求済	希土類系酸化物超電導線材及びその製造方法
7	昭和電線ケーブルシステム株式会社 (公財)国際超電導産業技術研究センター	2009-249172	国内	2009/10/29	審査請求済	希土類系酸化物超電導線材
8	(公財)国際超電導産業技術研究センター 株式会社フジクラ 昭和電線ケーブルシステム株式会社	2009-250785	国内	2009/10/30	審査請求済	低交流損失マルチフィラメント型超電導線材及びその製造方法
9	(公財)国際超電導産業技術研究センター 株式会社フジクラ 古河電気工業株式会社 株式会社東芝	2009-250488	国内	2009/10/30	審査請求済	酸化物超電導導体用基材及びその製造方法と酸化物超電導体及びその製造方法
10	昭和電線ケーブルシステム株式会社 (公財)国際超電導産業技術研究センター	2009-266450	国内	2009/11/24	審査請求済	希土類系酸化物超電導線材の製造方法
11	住友電気工業株式会社 (公財)国際超電導産業技術研究センター	2009-266406	国内	2009/11/24	拒絶 →分割出願	薄膜超電導線材用金属基材、その製造方法および薄膜超電導線材の製造方法
12	住友電気工業株式会社 (公財)国際超電導産業技術研究センター	2009-266441	国内	2009/11/24	審査請求済	超電導薄膜線材の製造方法
13	住友電気工業株式会社 (公財)国際超電導産業技術研究センター	2012-239024	国内	2009/11/24	分割出願	薄膜超電導線材用金属基材、その製造方法および薄膜超電導線材の製造方法
14	住友電気工業株式会社 (公財)国際超電導産業技術研究センター	2010-013847	国内	2010/1/26	登録	薄膜超電導線材
15	住友電気工業株式会社 (公財)国際超電導産業技術研究センター	2010-018863	国内	2010/1/29	登録	薄膜超電導線材とその製造方法
16	昭和電線ケーブルシステム株式会社 (公財)国際超電導産業技術研究センター	2010-029119	国内	2010/2/12	審査請求済	酸化物超電導線材及び酸化物超電導線材の製造方法
17	昭和電線ケーブルシステム株式会社 (公財)国際超電導産業技術研究センター	2010-030475	国内	2010/2/15	審査請求済	酸化物超電導線材
18	(公財)国際超電導産業技術研究センター 富士通株式会社 株式会社日立製作所	2010-041757	国内	2010/2/26	審査請求済	磁束トランス及び同軸立体型グラジオメータ
19	(公財)国際超電導産業技術研究センター	12/777.686	US	2010/5/11	出願	希土類系酸化物超電導線材及びその製造方法
20	昭和電線ケーブルシステム株式会社 (公財)国際超電導産業技術研究センター	2010-142804	国内	2010/6/23	出願	テープ状酸化物超電導線材の製造方法及び熱処理装置
21	昭和電線ケーブルシステム株式会社 (公財)国際超電導産業技術研究センター	2010-168255	国内	2010/7/27	出願	テープ状酸化物超電導体及びその製造方法

22	九州大学 九州工業大学 (公財)国際超電導産業技術研究センター	2010-172400	国内	2010/7/30	出願	臨界電流密度の磁場角度依存性に優れた超電導体
23	九州大学 (公財)国際超電導産業技術研究センター	2010-176685	国内	2010/8/5	出願	RE1Ba2Cu3O7-z超電導体
24	昭和電線ケーブルシステム株式会社 (公財)国際超電導産業技術研究センター	2010-179504	国内	2010/8/10	出願	Re系酸化物超電導線材及びその製造方法
25	昭和電線ケーブルシステム株式会社 (公財)国際超電導産業技術研究センター	2010-241271	国内	2010/10/27	出願	酸化物超電導線材およびその製造方法
26	(公財)国際超電導産業技術研究センター 株式会社フジクラ	PCT/JP2012/069326	PCT	2010/10/29	出願	低交流損失マルチフィラメント型超電導線材及びその製造方法
27	(公財)国際超電導産業技術研究センター 株式会社フジクラ 古河電気工業株式会社	PCT/JP2010/069320	PCT	2010/10/29	出願	酸化物超電導体用基材及びその製造方法と酸化物超電導体及びその製造方法
28	昭和電線ケーブルシステム株式会社 (公財)国際超電導産業技術研究センター	2011-022115	国内	2011/2/3	出願	テープ状酸化物超電導線材の製造方法及び熱処理装置
29	昭和電線ケーブルシステム株式会社 (公財)国際超電導産業技術研究センター	2011-022116	国内	2011/2/3	出願	テープ状酸化物超電導線材の製造方法及び熱処理装置
30	昭和電線ケーブルシステム株式会社 (公財)国際超電導産業技術研究センター	PCT/JP/2011/000774	PCT	2011/2/10	出願	酸化物超電導線材及び酸化物超電導線材の製造方法
31	住友電気工業株式会社 (公財)国際超電導産業技術研究センター	2011-027044	国内	2011/2/10	出願	超電導線材の加工方法
32	住友電気工業株式会社 (公財)国際超電導産業技術研究センター	2011-027056	国内	2011/2/10	出願	酸化物超電導線材
33	住友電気工業株式会社 (公財)国際超電導産業技術研究センター	2011-027078	国内	2011/2/10	出願	酸化物超電導膜の製造方法
34	昭和電線ケーブルシステム株式会社 (公財)国際超電導産業技術研究センター	2011-042951	国内	2011/2/28	出願	超電導線材の製造方法
35	住友電気工業株式会社 (公財)国際超電導産業技術研究センター	2011-090904	国内	2011/4/15	出願	酸化物超電導薄膜線材の製造方法
36	住友電気工業株式会社 (公財)国際超電導産業技術研究センター	2011-111186	国内	2011/5/18	出願	酸化物超電導薄膜線材およびその製造方法
37	九州大学 (公財)国際超電導産業技術研究センター	13/111.063	US	2011/5/19	出願	臨界電流密度の磁場角度依存性に優れた超電導体
38	九州大学 (公財)国際超電導産業技術研究センター	13/154.684	US	2011/6/7	出願	RE1Ba2Cu3O7-z超電導体
39	住友電気工業株式会社 (公財)国際超電導産業技術研究センター	2011-144678	国内	2011/6/29	出願	酸化物超電導薄膜線材の製造方法

40	住友電気工業株式会社 (公財)国際超電導産業技術研究センター	2011-144688	国内	2011/6/29	審査請求済	酸化物超電導薄膜線材の製造方法
41	株式会社フジクラ (公財)国際超電導産業技術研究センター	2011-146025	国内	2011/6/30	出願	RE123系超電導線材およびその製造方法
42	昭和電線ケーブルシステム株式会社 (公財)国際超電導産業技術研究センター	2011-156821	国内	2011/7/15	出願	テープ状酸化物超電導線材の製造方法及び熱処理装置
43	昭和電線ケーブルシステム株式会社 (公財)国際超電導産業技術研究センター	2011-184095	国内	2011/8/25	出願	テープ状RE系酸化物超電導線材の製造方法
44	昭和電線ケーブルシステム株式会社 (公財)国際超電導産業技術研究センター	2011-189685	国内	2011/8/31	出願	酸化物超電導線材の製造方法及び製造装置
45	住友電気工業株式会社 京都大学 (公財)国際超電導産業技術研究センター	2011-225350	国内	2011/10/12	出願	超電導線材の特性検査方法及び超電導線材の特性検査装置
46	昭和電線ケーブルシステム株式会社 (公財)国際超電導産業技術研究センター	PCT/JP2011/005988	PCT	2011/10/26	出願	酸化物超電導線材およびその製造方法
47	昭和電線ケーブルシステム株式会社 (公財)国際超電導産業技術研究センター	PCT/JP2012/000651	PCT	2012/2/1	出願	テープ状酸化物超電導線材の製造方法及び熱処理装置
48	昭和電線ケーブルシステム株式会社 (公財)国際超電導産業技術研究センター	PCT/JP2012/000652	PCT	2012/2/1	出願	テープ状酸化物超電導線材の製造方法及び熱処理装置
49	株式会社フジクラ (公財)国際超電導産業技術研究センター	2012-071827	国内	2012/3/27	出願	レーザー蒸着装置およびレーザー蒸着方法
50	古河電気工業株式会社 (公財)国際超電導産業技術研究センター	2012-105013	国内	2012/5/2	出願	超電導線材の接続構造及び超電導線材の接続方法
51	古河電気工業株式会社 (公財)国際超電導産業技術研究センター	2012-105014	国内	2012/5/2	出願	超電導線材の接続構造及び超電導線材の接続方法、超電導線材の端末構造及び超電導線材の端末
52	九州大学 (公財)国際超電導産業技術研究センター 住友電気工業株式会社 富士電機株式会社	2012-109760	国内	2012/5/11	出願	超電導回転機
53	株式会社フジクラ (公財)国際超電導産業技術研究センター	PCT/JP2012/6/29	PCT	2012/6/29	出願	RE123系超電導線材およびその製造方法
54	昭和電線ケーブルシステム株式会社 (公財)国際超電導産業技術研究センター	2012-167107	国内	2012/7/27	出願	テープ状RE系酸化物超電導線材の製造方法
55	古河電気工業株式会社 (公財)国際超電導産業技術研究センター	2012-166743	国内	2012/7/27	出願	超電導線の製造方法及び製造装置
56	昭和電線ケーブルシステム株式会社 古河電気工業株式会社 (公財)国際超電導産業技術研究センター	2012-217813	国内	2012/9/28	出願	超電導線の製造方法及び製造装置

57	昭和電線ケーブルシステム 株 (公財)国際超電導産 業技術研究センター	2012-223145	国内	2012/10/12	出願	テープ状酸化物超電導線 材の製造方法
58	住友電気工業株 (公財)国際超電導産 業技術研究センター	2012-239024	国内	2012/10/30	出願	薄膜超電導線材用金属基 材、その製造方法および 薄膜超電導線材の製造方
59	株フジクラ (公財)国際超電導産 業技術研究センター	2012-288718	国内	2012/12/28	出願	RE123系超電導線材および その製造方法
60	住友電気工業株 (公財)国際超電導産 業技術研究センター	2013-020645	国内	2013/2/5	出願	超電導線材の臨界電流測 定装置および臨界電流測 定方法
61	古河電気工業株 (公財)国際超電導産 業技術研究センター	PCT/JP2013/052 734	PCT	2013/2/6	出願	超電導線材の接続構造及 び超電導線材の接続方法
62	(公財)国際超電導産 業技術研究センター 昭和電線ケーブルシステム 株	2013-039810	国内	2013/2/28	出願	酸化物超電導体用組成 物、酸化物超電導線材及 び酸化物超電導線材の製 造方法
63	(公財)国際超電導産 業技術研究センター 株フジクラ 昭和電線ケーブルシステム 株 古河電気工業株	出願準備中	国内			

【論文発表】

プロジェクト全般

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名 ページ番号	査読	発表年
1	Yuh Shiohara	ISTEC	Current status and future prospects of Japanese national project on coated conductor development and its applications	PHYSICA C 468 1498-1503	有	2008
2	Yuh Shiohara	ISTEC	Present status and future prospect of coated conductor development and its application in Japan	SUPERCOND SCI TECH 21	有	2008
3	藤原 昇	ISTEC	超電導電力機器の技術動向	生産と電気 1月号	無	2009
4	Shinya Hasuo	ISTEC	Recent activities at ISTEC	European Superconductivity News Forum 10 1-25	無	2009
5	Yuh Shiohara	ISTEC	Japanese efforts on coated conductor processing and its power applications: New 5 year project for materials and power applications of coated conductors (M-PACC)	PHYSICA C 469 863-867	有	2009
6	Noboru Fujiwara et al.	ISTEC他	Development of YBCO Power Devices in Japan	p h y s i c a C	有	投稿中

1 超電導電力貯蔵システム(SMES)の研究開発

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名 ページ番号	査読	発表年
1	平野 直樹	中部電力	超電導電力機器への新型超電導材料の期待	MATERIAL STAGE 第9巻 第8号 p52-54	無	2009
2	平野 直樹	中部電力	超電導電力貯蔵システム(SMES)	冷凍 第84巻 第986号 p48-53	無	2009
3	F. Matsutani et al.	九州工業大 学他	Superconducting layer thickness of relaxation properties of persistent current in high magnetic field in YBCO-coated conductor	PHYSICA C 469 1122-1125	有	2009

2 超電導電力ケーブルの研究開発

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名 ページ番号	査読	発表年
1	A. Ishiyama et al.	早稲田大学 他	Over-current characteristics of superconducting model cable using YBCO coated conductors	PHYSICA C 468 2041-2045	有	2008
2	A. Ishiyama et al.	早稲田大学 他	Transient stability characteristics of a 1-m single-layer YBCO	IEEE T APPL SUPERCON 18 1228-1231	有	2008
3	M. Yagi et al.	古河電気工 業 他	Development of YBCOHTS cable with low AC loss	PHYSICA C 468 2037-2040	有	2008

4	S. Hanyu et al.	フジクラ	IBAD-MgO buffer layers for coated conductors in the large-scale system	Physica C: Superconductivity Volume 469, Issues 15-20	無	2009
5	S. Hanyu et al.	フジクラ	Progress in Scale-Up of RE-123 Coated Conductors With of 300 A/cm by IBAD/PLD	IEEE Transactions on Applied Superconductivity , vol. 9, Issue 3	無	2009
6	S. Hanyu et al.	フジクラ	Fabrication of km-length IBAD-MgO substrates at a production rate of km h	Superconductor Science and Technology Volume 23, Number 1	有	2009
7	T. Nagaishi et al.	住友電気工業	Development of REBCO coated conductors on textured metallic substrates	Physica C 469 1311-1315	有	2009
8	向山 晋一他	古河電気工業 他	イットリウム系超電導電力ケーブルの開発	古河電工時報123号	無	2009
9	向山晋一	古河電気工業	鉄系超電導材料の応用の可能性 高温超電導ケーブルの開発	月刊 マテリアルステージ 第9巻 第8号 P.55 ~P.57	無	2009
10	N. Amemiya et al.	京都大学他	Transport losses in polygonal assemblies of coated conductors with textured-metal	PHYSICA C 469 1427-1431	有	2009
11	A. Ishiyama et al.	早稲田大学他	Degradation Characteristics of YBCO-Coated Conductors Subjected to Overcurrent Pulse	IEEE T APPL SUPERCON 19 3483-3486	有	2009
12	S. Mukoyama et al.	古河電気工業 他	Development of (RE)BCO cables for HTS power transmission lines	PHYSICA C 469 1688-1692	有	2009
13	X. Wang et al.	早稲田大学他	Over-current characteristics of YBCO superconducting cable	PHYSICA C 469 1717-1721	有	2009
14	X. Wang et al.	早稲田大学他	Over-Current Characteristics of a 20-m-Long YBCO Model	IEEE T APPL SUPERCON 1722-1726	有	2009
15	M. Yagi et al.	古河電気工業 他	Development of a 10 m long 1 kA 66/77 kV YBCO HTS cable with low AC loss and a joint with low electrical resistance	SUPERCOND SCI TECH 22	有	2009
16	M. Yagi et al.	古河電気工業 他	Development of 1 m HTS conductor using YBCO on textured metal	PHYSICA C 469 1693-1696	有	2009
17	X. Wang et al.	早稲田大他	Numerical Simulation on Fault Condition in 66 kV Class RE-123 Superconducting Cable	p h y s i c a C	有	2009
18	H. Kono et al.	早稲田大他	Degradation Characteristics of YBCO coated conductores due to fault-current in power cable	p h y s i c a C	有	2009
19	S. Sato et al.	早稲田大他	Computer Simulation of fault current characteristics in 275 kV class YBCO power Cable	p h y s i c a C	有	2009

20	K. Hayashiet al.	住友電気工業	Development of GdBCO Coated Conductor on 30mm Wide Clad-Type Textured Metal	CCA	有	2009
21	S. Mukoyama et al.	古河電気工業 他	Conceptual design of 275 kV class High-TC superconducting cable	PHYSICA C	有	2009
22	Amemiya, N	京都大学他	Transport losses in polygonal assemblies of coated conductors with textured-metal	PHYSICA C 469 1427-1431	有	2009
23	Amemiya, N	京都大学他	Ac losses in two-layer superconducting power transmission cables consisting of coated conductors with a magnetic substrate	SUPERCOND SCI TECH 23	有	2010
24	Fujiwara, N	ISTEC他	Development of YBCO power devices in Japan	PHYSICA C 470 980-985	有	2010
25	Kono, H	早稲田大学他	Degradation characteristics of YBCO coated conductors due to fault-current in power cable	PHYSICA C 470 1334-1337	有	2010
26	Li, QA	早稲田大学他	AC loss characteristics of superconducting power transmission cables: gap effect and $I(c)$ distribution	SUPERCOND SCI TECH 23	有	2010
27	Minamino, T	住友電気工業他	Design and evaluation of 66 kV class RE-123 superconducting cable	PHYSICA C 470 1576-1579	有	2010
28	Mukoyama, S	古河電気工業他	Conceptual design of 275 kV class high- T_c superconducting cable	PHYSICA C 470 1563-1566	有	2010
29	Sato, S	早稲田大学他	Computer simulation of fault current characteristics in 275 kV class YBCO power cable	PHYSICA C 470 1572-1575	有	2010
30	Wang, X	早稲田大学他	Numerical simulation on fault current condition in 66 kV class RE-123 superconducting cable	PHYSICA C 470 1580-1583	有	2010
31	Wang, XD	早稲田大学他	Thermal Characteristics of 275 kV/3 kA Class YBCO Power Cable	IEEE T APPL SUPERCON 20 1264-1267	有	2010
32	Amemiya, N et al.	京都大学他	Ac loss reduction of multilayer superconducting power transmission cables by using narrow coated conductors	SUPERCOND SCI TECH 24	有	2011
33	Amemiya, N et al.	京都大学他	Effects of Lateral-Tailoring of Coated Conductor for Ac Loss Reduction of Superconducting Power Transmission Cables	IEEE T APPL SUPERCON 21 943-946	有	2011

34	Amemiya, N et al.	京都大学他	Lateral critical current density distributions degraded near edges of coated conductors through cutting processes and their influence on ac loss characteristics of power transmission	PHYSICA C 471 990-994	有	2011
35	Ishiyama, A et al.	早稲田大学他	Over-Current Characteristics of 275-kV Class YBCO Power Cable	IEEE T APPL SUPERCON 21 1017-1020	有	2011
36	Ishiyama, A et al.	早稲田大学他	Current Margin Against the Fault Current in REBCO Coated Conductors	IEEE T APPL SUPERCON 21 3033-3036	有	2011
37	Ishiyama, A et al.	早稲田大学他	Degradation of YBCO Coated Conductors Due to an Over-Current	IEEE T APPL SUPERCON 21 3025-3028	有	2011
38	Li, Q et al.	早稲田大学他	Effects of Unevenly Distributed Critical Currents and Damaged Coated Conductors to AC Losses of Superconducting Power Transmission Cables	IEEE T APPL SUPERCON 21 953-956	有	2011
39	Mukoyama, S	古河電気工業他	Model Cable Tests for a 275 kV 3 kA HTS Power Cable	IEEE T APPL SUPERCON 21 976-979	有	2011
40	Ohya, M	住友電気工業他	Design and Evaluation of 66 kV Class HTS Power Cable Using REBCO	IEEE T APPL SUPERCON 21 1009-1012	有	2011
41	Ohya, M	住友電気工業他	Design and evaluation of 66 kV-class HTS power cable using REBCO	PHYSICA C 471 1279-1282	有	2011
42	Takeuchi, K	京都大学他	Model for electromagnetic field analysis of superconducting power transmission cable comprising spiraled coated conductors	SUPERCOND SCI TECH 24	有	2011
43	Wang, XD	京都大学他	Over-Current Characteristics of 66-kV RE123 HTS Power	IEEE T APPL SUPERCON 21 1013-1016	有	2011
44	Yagi, M	古河電気工業他	Progress of 275 kV-3 kA YBCO HTS cable	PHYSICA C 471 1274-1278	有	2011
45	Xudong Wang et al.	早稲田大学他	Current margin of 275	IEEE Transactions	有	2012
46	Xudong Wang et al.	早稲田大学他	Current margin of 66 kV class HTS power cable against fault current	IEEE Transactions on Applied Superconductivity 22	有	2012
47	Xudong Wang et al.	早稲田大学他	Overcurrent tests and numerical simulations on a 66-kV-class RE123 high-temperature superconducting model cable	IEEE Transactions on Applied Superconductivity 22	有	2012
48	F. Sumiyoshi et al.	九州大学他	Improved Poynting's Vector Method: AC Loss Measurement of HTS Tapes Formed into a Short Straight or a Solenoidal Coi	Physics Procedia 36	無	2012

49	Takuya Hayashi et al.	九州大学他	AC Loss Properties of Laser-Scribed Multi-Filamentary GdBCO Coated Conductors with Artificial Pinning Centres	Physics Procedia 36 1522-1527	無	2012
50	N. Amemiya et al.	京都大学他	Ac loss analyses of superconducting power transmission cables considering their three-dimensional	Physica C		投稿中

3 超電導変圧器の研究開発

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名 ページ番号	査読	発表年
1	H. Okamoto et al.	九州電力他	AC loss properties in YBCO model coils for loss reduction	PHYSICA C 468 1731-1733	有	2008
2	吉田 茂	大陽日酸	読者の広場Q&A「超伝導電力機器にはどのような冷却機が必要でしょう」	超電導Web21（発行：財ISTEC）12月号	無	2008
3	Y. Kamioka et al.	大陽日酸(株)	Development of Turbine Cryocooler for High Temperature Superconductor Applications	21th International Symposium on Superconductivity	有	2008
4	平井 寛一他	大陽日酸(株)	高温超電導機器冷却システムの開発	大陽日酸技報27	無	2008
5	M. Iwakuma et al.	九州大学他	Development of REBCO superconducting power transformers in Japan	PHYSICA C 469 1726-1732	有	2009
6	H. Okamoto et al.	九州電力 他	Development of 1 kA class HTS coil for superconducting power transformers	PHYSICA C 469 1733-1735	有	2009
7	H. Hirai et al.	大陽日酸 他	Development of a turbine cryocooler for high temperature superconductor applications	PHYSICA C 469 1857-1861	有	2009
8	K. Kakimoto et al.	フジクラ	Increase of production rate of RE-123 film by PLD system with the hot-wall type heating	Physica C: Superconductivity Volume 469, Issues 15-20	無	2009
9	H. Kutami et al.	フジクラ	Progress in research and development on long length coated conductors in Fujiikura	Physica C: Superconductivity Volume 469, Issues 15-20	無	2009
10	H. Okamoto et al.	九州電力 他	Development of 1kA class HTS coil for superconducting power transformers	Physica C, 469, 15	有	2009
11	K. Kakimoto et al.	フジクラ	High-speed deposition of high-quality RE123 films by PLD system with hot-wall heating	Superconductor Science and Technology Volume 23, Number 1	有	2009
12	平井 寛一他	大陽日酸	磁気軸受ネオン膨張タービンの開発	大陽日酸技報28	無	2009
13	吉田 茂	大陽日酸	超電導機器の冷凍・冷却技術の進展	超電導Web21（発行：財ISTEC）H21年6月号	無	2009
14	吉田 茂	大陽日酸	高温超電導電力機器用冷凍機の実用化を目指して	低温工学協会 九州・西日本支部 レポート 2009	無	2009

15	吉田 茂	大陽日酸	極低温の冷却設備-超電導変圧器用冷却設備	日本冷凍空調学会誌「冷凍」	無	2009
16	林 秀美他	九州電力	超電導変圧器及び小型タービン式冷却装置の開発について	日本冷凍空調学会会誌「冷凍」12月号	無	2009
17	H.Hirai et al.	大陽日酸(株)他	Development of a turbine cryocooler for high temperature superconductor applications	PHYSICA C 469 1857-1861	有	2009
18	林秀美他	九州電力	超電導変圧器の早期実用化を目指して	超電導・低温技術 Report, vol.4	無	2010
19	奈良 範久	大陽日酸	超電導電力機器の冷凍・冷却技術の進展	超電導Web21 (発行: 財ISTEC) H22年6月号	無	2010
20	平井 寛一	大陽日酸	高温超電導機器冷却システムの開発	低温工学協会 九州・西日本支部 レポート 2010	無	2010
21	M. Iwakuma et al.	九州大学他		ASC	有	2010
22	Naito, T et al.	岩手大学他	Thermal conductivity of YBCO coated conductors fabricated by IBAD-PLD method	SUPERCOND SCI TECH 23	有	2010
23	H.Hirai et al.	大陽日酸(株)他	Development of a Neon Cryogenic Turbo-expander with Magnetic Bearings	Advances in Cryogenic Engineering vol.55	有	2010
24	S.Yoshida et al.	大陽日酸(株)他	New Design of Neon Refrigerator for HTS Power Machines	Advances in Cryogenic Engineering vol.55	有	2010
25	平井 寛一他	大陽日酸(株)他	磁気軸受式小型ターボ圧縮機の開発	大陽日酸技報29	無	2010
26	Okamoto, H et al.	九州電力	Over-current characteristics of model coil using Y-based multi-filament wire for superconducting power	PHYSICA 471 1379-1380	有	2011
27	Tomioka, A et al.	九州大学他	AC over-current test results of YBCO conductor for YBCO power transformer with fault current limiting function	PHYSICA C 471 1367-1373	有	2011
28	Tomioka, A et al.	九州大学他	The short-circuit test results of 6.9 kV/2.3 kV 400 kVA-class YBCO model transformer	PHYSICA C 471 1374-1378	有	2011
29	A.Tomioka et al.	富士電機(株)他	The short-circuit test results of 6.9kV/2.3kV 400kVA-Class YBCO Model Transformer with Faluit current Limitting Function	PHYSICA C	有	2011(投稿中)
30	M. Igarashi et al.	(株)フジクラ他	Advanced development of IBAD/PLD coated conductors at Fujikura	E U C A S 2011	有	2011(投稿中)
31	H.Hirai et al.	大陽日酸(株)他	Development of a neon turbo-compressor with active magnetic bearings	Proceedings of 23th International Cryogenic Engineering Conference	有	2011(投稿中)

32	S.Yoshida et al.	大陽日酸(株)他	Development of neon refrigerator for HTS power machines	Proceedings of 23th International Cryogenic Engineering Conference	有	2011(投稿中)
33	池上俊輔他	大陽日酸(株)他	磁気軸受式小型ターボ圧縮機の開発	大陽日酸技報 29	無	2011
34	M. Iwakuma et al.	九州大学他	Development of a REBCO superconducting transformer with current limiting	IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol. 21, No. 3, pp. 1405-1408	有	2011
35	林秀美他	九州電力	超伝導変圧器の開発	高温超伝導現象と用途開発最前線	無	2012
36	H. Hirai et al.	大陽日酸(株)他	Development of a neon turbo-compressor with active magnetic bearings	Advances in Cryogenic Engineering vol. 57	有	2012 (投稿中)
37	S.Yoshida et al.	大陽日酸(株)他	Development of neon refrigerator for HTS power machines	Advances in Cryogenic Engineering vol. 57	有	2012 (投稿中)
38	T Tsutsumi et al.	九州大学他	Development of REBCO Superconducting Transformers with Current Limiting Function	Physics Procedia 36 1115-1120	無	2012
39	K Kumano et al.	九州大学他	Theoretical Study on Ac Loss Properties of REBCO Superconducting Two-Strand Parallel Conductors Exposed to a Non-Uniform Magnetic Field	Physics Procedia 36 1109-1114	無	2012
40	A. Tomioka et al.	九州大学他	The short-circuit test results of 6.9 kV/2.3 kV 400 kVA-class YBCO model transformer with fault current limiting function	to be published in Phusica C		2012 (投稿中)
41	M. Iwakuma et al.	九州大学他	Development of REBCO Superconducting Transformers with Current Limiting Function	Physics Procedia Vol. 36, pp. 1115-1120	有	2012
42	M. Iwakuma et al.	九州大学他	Theoretical Study on Ac Loss Properties of REBCO Superconducting Two-Strand Parallel Conductors Exposed to a Non-Uniform Magnetic Field	Physics Procedia Vol. 36, pp. 1109-1114	有	2012
43	M. Iwakuma et al.	九州大学他	The short-circuit test results of 6.9 kV/2.3 kV 400 kVA-class YBCO model transformer with fault current limiting function	to be published in Phusica C	有	2012

4 超電導機器用線材の技術開発

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名 ページ番号	査読	発表年
----	-----	----	------	---------------	----	-----

1	A. Ibi et al.	ISTEC他	Development of long REBCO coated conductors with artificial pinning centers by using MPMT-PLD method	PHYSICA C 468 1514-1517	有	2008
2	T. Izumi et al.	ISTEC他	Research and development of reel-to-reel TFA-MOD process for coated conductors	PHYSICA C 468 1527-1530	有	2008
3	J. Kato et al.	九州大学他	Diffusion joint using silver layer of YBCO coated conductors for applications	PHYSICA C 468 1571-1574	有	2008
4	S. Kawabata et al.	鹿児島大学他	Measurement of AC current distributions in HTS tapes	PHYSICA C 468 1734-1738	有	2008
5	J. Matsuda et al.	ISTEC他	Effect of Ba/Y ratio in starting solution on microstructure evolution of YBCO films deposited by advanced TFA-MOD process	PHYSICA C 468 997-1005	有	2008
6	J. Matsuda et al.	ISTEC他	Microstructure evolution of YBCO films deposited by advanced TFA-MOD process	PHYSICA C 468 1017-1023	有	2008
7	J. Matsuda et al.	ISTEC他	Transmission electron microscopic studies on growth mechanism of YBa ₂ Cu ₃ O _{7-y} films formed by advanced trifluoroacetates metalorganic deposition process	J MATER RES 23 3353-3362	有	2008
8	A. Mitani et al.	九州大学他	Effect of fabrication conditions on crystalline of SmBCO films fabricated by TFA-MOD method	PHYSICA C 468 1546-1549	有	2008
9	M. Miura et al.	ISTEC他	Enhancement of flux pinning in Y _{1-x} Sm _x Ba _{1.5} Cu ₃ O _y coated conductors with nanoparticles	APPL PHYS EXPRESS 1	有	2008
10	M. Miura et al.	ISTEC他	Introduction of pinning center to enhance I-c under magnetic fields in REBCO coated conductors fabricated by advanced TFA-MOD	PHYSICA C 468 1643-1646	有	2008
11	A. Nakai et al.	ISTEC他	YBCO growth on textured NiW substrates by TFA-MOD method	PHYSICA C 468 1534-1536	有	2008
12	Y. Sutoh et al.	フジクラ他	Formation of CeO ₂ buffer layer using multi-plume PLD	PHYSICA C 468 1594-1596	有	2008
13	K. Suzuki et al.	ISTEC他	Development of scribing process of coated conductors for reduction of AC losses	PHYSICA C 468 1579-1582	有	2008
14	K. Tada et al.	九州大学他	Growth process of Ba-poor YBCO film fabricated by TFA-MOD process	PHYSICA C 468 1554-1558	有	2008

15	J. Yoshida et al.	九州大学他	Effect of calcination conditions on microstructures and J(c) of YBCO films fabricated by TFA-MOD	PHYSICA C 468 1550-1553	有	2008
16	M. Yoshizumi et al.	ISTEC他	Crystal growth of YBCO coated conductors by TFA-MOD method	PHYSICA C 468 1531-1533	有	2008
17	Tsunehiro Hato et al.	ISTEC	NDE of coated-conductor using HTS SQUID array	p h y s i c a C 469 1630-1633	有	2009
18	Noriko Chikumoto et al.	ISTEC	Development of inside-plume PLD process for the fabrication of large Ic(B) REBCO tapes	p h y s i c a C 469 1303-1306	有	2009
19	町 敬人	ISTEC	Nd _{1+x} Ba ₂ Cu ₃ O _{7+δ} 単結晶試料のピン止め特性の向	低温工学 44 594-59	有	2009
20	F. Matsutani et al.	九州工業大他	Superconducting Layer Thickness Dependence of Relaxation properties of Persistent Current in High Magnetic Field in YBCO-Coated	Physica C 469 1122-1125	有	2009
21	K. Abiru et al.	九州大学他	Visualization of non-uniform current flow in coated conductors by scanning Hall-probe magnetic microscopy	PHYSICA C 469 1450-1453	有	2009
22	K. Higashikawa et al.	九州大学他	Coupled Analysis Method for High-Field Magnet Coil Using Coated Conductor Based on J-E Characteristics as a Function of Temperature, Magnetic Field Vector and	IEEE T APPL SUPERCON 19 1621-1625	有	2009
23	K. Higashikawa et al.	九州大学他	Significant reduction in volume, stored energy and magnetization loss of high-field magnet coil based on the improvement of critical current characteristics in GdBCO coated	PHYSICA C 469 1776-1780	有	2009
24	H. Ichikawa et al.	ISTEC他	High speed production of YBCO precursor films by advanced TFA-MOD	PHYSICA C 469 1329-1331	有	2009
25	M. Inoue et al.	九州大学他	Observation of Current Distribution in High-T _c Superconducting Tape Using Scanning Hall-Probe Microscope	IEEE T APPL SUPERCON 19 2847-2850	有	2009
26	M. Inoue et al.	九州大学他	Critical current property in YBCO coated conductor fabricated by improved TFA-MOD	PHYSICA C 1443-1445	有	2009
27	T. Izumi et al.	ISTEC他	Present status and strategy of reel-to-reel TFA-MOD process for coated conductors	PHYSICA C 469 1322-1325	有	2009
28	T. Izumi et al.	ISTEC他	Development of TFA-MOD Process for Coated Conductors in Japan	IEEE T APPL SUPERCON 19 3119-3122	有	2009

29	M. Miura et al.	ISTEC他	Rare Earth Substitution Effects and Magnetic Field Dependence of Critical Current in $Y_{1-x}RE_xBa_2Cu_3O_{7-y}$ Coated Conductors with Nanoparticles (RE = Sm, Gd)	APPL PHYS EXPRESS 2	有	2009
30	M. Miura et al.	ISTEC他	Magnetic Field Dependence of Critical Current and Microstructure in TFA-MOD $Y_{1-x}Sm_xBa_2Cu_3O_{7-y}$ With Nanoparticles for Coated Conductors	IEEE T APPL SUPERCON 19 3275-3278	有	2009
31	Miura, M	ISTEC他	Development of multi-turn reel-to-reel crystallization large furnace for high production rate of $YBa_2Cu_3O_{7-y}$ coated conductors derived from TFA-MOD process	PHYSICA C 469 1336-1340	有	2009
32	Y. Miyanaga et al.	九州大学他	Effects of Sn-doping on J(C)-B properties and crystalline structure for YBCO films by advanced TFA-MOD method	PHYSICA C 469 1418-1421	有	2009
33	K. Nakaoka et al.	ISTEC他	Investigation on starting solution of TFA-MOD process for high-speed production of YBCO coated	PHYSICA C 469 1326-1328	有	2009
34	K. Osamura et al.	京都大学他	Reversible strain limit of critical currents and universality of intrinsic strain effect for REBCO-coated conductors	SUPERCOND SCI TECH 22	有	2009
35	M. Sugimoto et al.	九州大学他	Electrodeposition of textured nickel on nickel alloy Hastelloy	PHYSICA C 469 1371-1373	有	2009
36	Y. Sutoh et al.	ISTEC他	Fabrication of high I-c film for GdBCO coated conductor by continuous in-plume PLD	PHYSICA C 469 1307-1310	有	2009
37	T. Takao et al.	上智大学他	Degradation Due to Bending Fatigue Strain in YBCO Coated Conductors	IEEE T APPL SUPERCON 19 2988-2990	有	2009
38	R. Teranishi et al.	九州大学他	Crystal Growth of Ba Concentration Controlled YBCO Films by TFA-MOD Process	IEEE T APPL SUPERCON 19 3200-3203	有	2009
39	R. Teranishi et al.	九州大学他	J(C) properties and microstructures of YBCO films fabricated by low temperature calcination in TFA-MOD method	PHYSICA C 469 1332-1335	有	2009
40	R. Teranishi et al.	九州大学他	Dependence of microstructures on growth rate in YBCO films by TFA-MOD method	PHYSICA C 469 1349-1352	有	2009

41	R. Teranishi et al.	九州大学他	High-J(c) YBCO films using precursors with barium concentration gradient in film thickness by TFA-MOD process	PHYSICA C 469 1345-1348	有	2009
42	Y. Yamada et al.	ISTEC他	Long IBAD-MgO and PLD coated conductor	PHYSICA C 469 1298-1302	有	2009
43	Y. Yamada et al.	ISTEC他	Development of Long Length IBAD-MgO and PLD Coated Conductors	IEEE T APPL SUPERCON 19 3236-3239	有	2009
44	M. Yoshizumi et al.	ISTEC他	High production rate of IBAD-MgO buffered substrate	PHYSICA C 469 1361-1363	有	2009
45	宮田 成紀他	ISTEC	人工ピン導入GdBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} 超電導薄膜における磁場中I _c の増加的膜厚依存	低温工学	有	2009
46	筑本 知子他	ISTEC他	Y系テープ線材への高エネルギー重イオン照射によるピン止め中心導入と臨界電流密度特性	低温工学 44 523-528	有	2009
47	M. Iwakuma et al.	九州大学他	Unique behaviour of RE1Ba2Cu3O7-δ superconducting tapes producing drastic reduction of pinning loss	Superconductor Science and Technology Vol.23 075009-1-12	有	2010
48	F. Matsutani et al.	九州工業大他	Influence of Nano-particles on FluxPinning Properties in TFA-MOD Processed YGdBCO Coated	Physica C	有	2010
49	S. Awaji	東北大	Flux pinning properties of TFA-MOD (Y, Gd)Ba ₂ Cu ₃ O _x tapes with BaZrO ₃ nanoparticles	Superconductor Science and Technology 23 014006-1-5	有	2010
50	Koichi Nakaoka他	ISTEC	Relationship Between Crystallization Process and Superconducting Properties of YBCO Films by TFA-MOD Method using Staring Solutions with Various	p h y s i c a C 470 1242-1245	有	2010
51	Teruo Izumi et al.	ISTEC	R&D of Coated Conductors for Power Applications in Japan	p h y s i c a C 470 967-970	有	2010
52	Seiji Adachi et al.	ISTEC	Improved reproducible fabrication process of HTS-SQUIDS with ramp-edge Josephson junctions and multilayer structures	p h y s i c a C	有	2010
53	M. Kitani et al.	九州工業大他	Influence of nanoparticles on critical current properties in TFA-MOD processed YGdBCO coated conductor	EUCAS	有	2010
54	Y. Mawatari	産総研	Field distribution in bent superconducting tapes conforming to a cylinder with transport currets	Physical Review B	有	2010

55	T.Katase et al.	東工大他	Josephson junction in C-doped BaFe ₂ As ₂ epitaxial film on (La, Sr) (Al, Ta)O ₃	Applid Physics Letters	有	2010
56	T.Katase et al.	東工大他	Josephson junction with Fe-based superconductor C-doped BaFe ₂ As ₂ epitaxial film	ASC	有	2010
57	Kenji Kaneko et al.	九州大学他	3D analysis of pinning centers gives isotropic superconductivity in GdBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ}	Nature	有	2010
58	T.Yamaguchiet et al.	住友電気工業	DEVELOPMENT OF BUFFER LAYER ON 30mm WIDE TEXTURD METAL SUBSTRATES FOR REBCO COATED CONDUCTORS	p h y s i c a C	有	2010
59	Y.Shingaiet et al.	住友電気工業	Development of REBa ₂ Cu ₃ O _x superconducting layers on 30mm wide clad-type textured metal	p h y s i c a C	有	2010
60	Higashikawa, K et al.	九州大学他	Spatially-resolved measurement on time-dependent electromagnetic behavior in alternating current carrying coated conductor	PHYSICA C 470 1280-1283	有	2010
61	Ichino, Y et al.	名古屋大学他	Film growth for coated conductor-oriented REBa ₂ Cu ₃ O _y films by means of excimer and Nd:YAG pulsed laser deposition	PHYSICA C 470 S1003-S1004	有	2010
62	Ichino, Y et al.	名古屋大学他	Potential of Nd:YAG pulsed laser deposition method for coated conductor production	PHYSICA C 470 1234-1237	有	2010
63	Inoue, M et al.	九州大学他	Current transport property in GdBCO coated conductor with artificial pinning centers in a wide range of temperature, magnetic field up to 27 T, and field angle	PHYSICA C 470 1292-1294	有	2010
64	Iwakuma, M et al.	九州大学他	Unique behaviour of REBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} superconducting tapes producing drastic reduction of pinning loss	SUPERCOND SCI TECH 23	有	2010
65	Kaneko, K et al.	九州大学他	Three-dimensional analysis of BaZrO ₃ pinning centers gives isotropic superconductivity in GdBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ}	J APPL PHYS 108	有	2010
66	Kato, T et al.	JFCC他	Transmission electron microscopy study of a Y _{1-x} Sm _x Ba ₂ Cu ₃ O _y -coated conductor containing BaZrO ₃ particles	J ELECTRON MICROSC 59 S101-S105	有	2010

67	Matsutani, F et al.	九州工業大学他	Influence of nanoparticles on flux pinning properties in TFA-MOD processed YGdBCO coated conductor	PHYSICA C 470 1411-1414	有	2010
68	Miura, M et al.	ISTEC	Formation mechanism of BaZrO ₃ nanoparticles in Y _{1-x} Sm _x Ba ₂ Cu ₃ O _{7-y} -coated conductors derived from trifluoroacetate metal-organic deposition	SUPERCOND SCI TECH 23	有	2010
69	Miura, M et al.	ISTEC	Increase of the production rate and crystal growth mode of GdBa ₂ Cu ₃ O _{7-y} -coated conductors using an in-plume growth technique for a reel-to-reel pulsed-laser deposition system	SUPERCOND SCI TECH 23	有	2010
70	Miura, M et al.	ISTEC	Vortex liquid-glass transition up to 60 T in nanoengineered coated conductors grown by metal organic	APPL PHYS LETT 96	有	2010
71	Mori, N et al.	九州大学他	In situ observation and simulation of growth process of faceted RE ₁₂₃ crystals	PHYSICA C 470 1266-1270	有	2010
72	Nakayama, Y et al.	九州大学他	Evaluation of geometrical effect on magnetization loss in GdBCO coated conductor	PHYSICA C 470 1313-1315	有	2010
73	Suzuki, H et al.	ISTEC	J(c) anisotropy for magnetic field angle in YBCO coated conductor on IBAD-MgO buffered metal tapes	PHYSICA C 470 1384-1387	有	2010
74	Teranishi, R et al.	九州大学他	Effects of tin-compounds addition on J(c) and microstructure for YBCO films	PHYSICA C 470 1246-1248	有	2010
75	Teranishi, R et al.	九州大学他	Dependence of crystallization time on microstructures and J _c properties of YBa ₂ Cu ₃ O _{7-y} films by TFA-MOD chemical solution process	MATER SCI ENG B- ADV 173 61-65	有	2010
76	Hato, T et al.	ISTEC	Non-Destructive Testing of Each Layer in GdBCO IBAD-PLD Coated Conductor by Using a High-Speed Scanning Laser Observation	IEEE T APPL SUPERCON 213381-3384	有	2011
77	Higashikawa, K et al.	九州大学他	Scanning Hall-probe microscopy system for two-dimensional imaging of critical current density in RE-123 coated conductors	PHYSICA C 4711036-1040	有	2011

78	Higashikawa, K et al.	九州大学他	Investigation of Three-Dimensional Current Distribution at Silver Diffusion Joint of RE-123 Coated Conductors Based on Magnetic Microscopy Combined With Finite Element	IEEE T APPL SUPERCON 21 3403-3407	有	2011
79	Ichino, Y et al.	名古屋大学他	Possibility of Nd:YAG-PLD Method for Fabricating REBCO Coated Conductors	IEEE T APPL SUPERCON 21 2949-2952	有	2011
80	Inoue, M et al.	九州大学他	In-Field Current Transport Properties of 600 A-Class GdBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} Coated Conductor Utilizing IBAD Template	IEEE T APPL SUPERCON 21 3206-3209	有	2011
81	Kato, T et al.	JFCC	Microstructural characterization of GdBa ₂ Cu ₃ O _y superconductive layer fabricated by in-plume pulsed laser deposition	PHYSICA C 471 1012-1016	有	2011
82	Kiuchi, M et al.	九州工業大学他	Field Angle Dependence of Critical Current Density in YGdBCO Coated Conductor	IEEE T APPL SUPERCON 21 3393-3397	有	2011
83	Miura, M et al.	ISTEC	Mixed pinning landscape in nanoparticle-introduced YGdBa ₂ Cu ₃ O _y films grown by metal organic deposition	PHYS REV B 83	有	2011
84	Miyata, S et al.	ISTEC	Surface roughness of MgO thin film and its critical thickness for optimal biaxial texturing by ion-beam-assisted deposition	J APPL PHYS 109	有	2011
85	Naito, T et al.	岩手大学他	Thermal Conductivity of YBCO Coated Conductors Reinforced by Metal	IEEE T APPL SUPERCON 21 3037-3040	有	2011
86	Sakai, N et al.	ISTEC	Delamination behavior of Gd123 coated conductor fabricated by	PHYSICA C 471 1075-1079	有	2011
87	Takahashi, Y et al.	ISTEC	Thickness dependence of I-c and J(c) of LTG-SmBCO coated-conductor on IBAD-MgO tapes	PHYSICA C 471 937-939	有	2011
88	Higashikawa, K et al.	九州大学他	Noncontact Characterization of In-Plane Distribution of Critical Current Density in Multifilamentary Coated Conductor	IEEE T APPL SUPERCON 22 39500704	有	2012
89	Higashikawa, K et al.	九州大学他	High-speed scanning Hall-probe microscopy for two-dimensional characterization of local critical current density in long-length coated conductor	Physics Procedia, Vol. 27, pp. 228-231	無	2012
90	Katayama, K et al.	ISTEC	AC loss reduction of TFA-MOD coated conductors in long length by laser scribing technique	PHYSICS PROC 27 208-211	有	2012

91	Matsushita, T et al.	九州工業大学他	Improvement of flux pinning performance at high magnetic fields in GdBa ₂ Cu ₃ O ₇ coated conductors with BHO nano-rods through enhancement of R-c ₂	SUPERCOND SCI TECH 25 125003	有	2012
92	Nakaoka, K et al.	ISTEC	High-rate fabrication of YBCO coated conductors using TFA-	PHYSICS PROC 27 196-199	有	2012
93	Shiohara, Y et al.	ISTEC	Overview of Materials and Power Applications of Coated Conductors Project	JPN J APPL PHYS 51	有	2012
94	Sugano, M et al.	ISTEC	The effect of the 2D internal strain state on the critical current in GdBCO coated	SUPERCOND SCI TECH 25	有	2012
95	Takagi, Y et al.	ISTEC	Development of high-I _c processing for low cost YBCO coated conductors by multi-turn reel-to-reel crystallization large furnace for TFA-MOD process	PHYSICS PROC 27 200-203	有	2012
96	Tobita, H et al.	ISTEC	Fabrication of BaHfO ₃ doped Gd ₁ Ba ₂ Cu ₃ O _{7-δ} coated conductors with the high I _c of 85 A/cm-w under 3 T at liquid nitrogen temperature (77 K)	SUPERCOND SCI TECH 25	有	2012
97	H. Oguro et al.	東北大学他	Strain Dependence of Superconducting Properties for GdBCO Coated Conductor in High Field Under	IEEE TAS 22 (2012) 6600504	有	2012
98	T. Suzuki et al.	東北大学他	Improvement of J _c for GdBCO Coated Conductors by Annealing Under Strain	IEEE TAS, 23 (2013) 8000104	有	2012
99	H. Oguro et al.	東北大学他	Relation Between the Crystal Axis and the Strain Dependence of Critical Current Under Tensile Strain for GdBCO Coated Conductors	IEEE TAS, 23 (2013) 8400304	有	2012
100	後藤 孝他	東北大学	傾斜機能材料の経緯と超電導テープへの応用	セラミックス第47巻12月号894-898	無	2012
101	F Sumiyoshi et al.	鹿児島大学他	Improved Poynting's Vector Method: AC Loss Measurement of HTS Tapes Formed into a Short Straight or a Solenoidal Coil	Physics Procedia, Vol. 36, pp. 1534-1539	有	2012
102	木須 隆暢	九州大学	高温超電導材料II—高温超電導体の臨界電流の特異性— (基礎講座)	TEION KOUGAKU (J. Cryo. Super. Soc. Jpn.), Vol. 47, No. 8, pp. 464-472	無	2012
103	Higashikawa, K et al.	九州大学他	Lateral Distribution of Critical Current Density in Coated Conductors Slit by Different Cutting	IEEE Trans. Appl. Supercond.		投稿中

104	M. Inoue et al.	九州大学他	Enhancement of in-field current transport properties in $GdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ coated conductor by $BaHfO_3$ doping	IEEE Trans. Appl. Supercond.		投稿中
105	T. Matsushita et al.	九州工業大学他	Flux pinning properties of BHOpinning centers at high magnetic fields in GdBCO coated	IEEE Trans. Appl. Supercond		投稿中
106	D Yokoe et al.	JFCC他	Transmission electron microscopy study of $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ containing nano-sized $BaMO_3$ (M: Hf, Zr, Sn) rods fabricated by pulsed laser deposition	J. Materials Science		投稿中

【学会発表】

プロジェクト全般

番号	発表者	所属	タイトル	発表日	発表先
1	塩原 融	ISTEC	超電導材料の進歩	2008/12/13	材料の微細組織と機能性研究会第200回記念公開シンポジウム
2	Noboru Fujiwara et al.	ISTEC他	Development of YBCO Power Devices in Japan	2009/11/2	(ISS2009)International Symposium on Superconductivity
3	Yuh Shiohara	ISTEC	Long Term Opportunities of HTS Coated Conductor Applications for Reduction of CO2 Emissions ② Future Prospects of R&D of in Japan	2010/2/9	ISIS-18(International Superconductivity Industry Summit)
4	Noboru Fujiwara	ISTEC	Development of YBCO Power DEVICES IN JAPAN	2010/2/10	ISIS-18(International Superconductivity Industry Summit)
5	Yuh Shiohara	ISTEC	Current Status and Future Prospects of High-Tc Superconductivity; Coated Conductors and Electric Power Applications	2011/8/23	1st Asia-Arab Sustainable Energy Forum
6	和泉 輝郎	ISTEC	イットリウム系高温超電導線材の開発と応用	2011/11/25	第63回白石記念講座 「低炭素化社会実現のための超伝導技術」 -超伝導線材化技術の発展-

1 超電導電力貯蔵システム(SMES)の研究開発

番号	発表者	所属	タイトル	発表日	発表先
1	大村弘輝他	名古屋大学他	極低温環境下における真空/固体複合絶縁系の基礎絶縁特性	2008/9/18	平成20年度電気学会東海支部連合大会
2	K.Kajikawa et al.	九州大学他	Numerical evaluation of AC loss properties in assembled superconductor strips exposed to perpendicular magnetic field	2008/10/27	21th International symposium on superconductivity(ISS2008)
3	M.Kanno et al.	京都大学他	Reversible strain effect on critical current at various temperatures in YBCO coated	2008/10/27	21th International symposium on superconductivity(ISS2008)
4	Y.Yoshida et al.	京都大学他	Change in fatigue properties and its relation to critical current for YBCO coated conductor with additional Cu layer	2008/10/27	21th International symposium on superconductivity(ISS2008)
5	菅野未知央他	京都大学他	Cu複合化YBCO線材の疲労サイクル負荷による破壊挙動と臨界電流の変化	2008/11/12	2008年度秋季低温工学・超電導学会
6	柁川一弘他	九州大学他	等間隔に配置したcoated conductorの垂直磁界損失特性	2008/11/12	2008年度秋季低温工学・超電導学会
7	柁川一弘他	九州大学他	積層した超電導ストリップの垂直磁界損失特性	2008/11/29	2008年秋季応用物理学学会学術講演会
8	早川直樹他	名古屋大学他	伝導冷却SMESコイルモデルの真空/固体複合絶縁系における電気絶縁特性	2009/3/17	平成21年度電気学会全国大会
9	青木 佳明他	早稲田大学	高温超電導線材の疲労特性評価試験装置	2009/5/13	2009年度春季低温工学・超電導学会
10	柁川一弘他	九州大学他	SMESの充放電動作を模擬したパンケーキコイル巻線の交流損失評価	2009/5/13	2009年度春季低温工学・超電導学会
11	植田 浩史他	早稲田大学他	コイル巻線化されたYBCO集合化導体の常電導伝播特性解析	2009/5/13	2009年度春季低温工学・超電導学会
12	井口 靖明他	鹿児島大学	YBCO積層導体の結合損失特性	2009/5/13	2009年度春季低温工学・超電導学会
13	菅野未知央他	京都大学他	Y系線材のIc-hずみ曲線におけるピークひずみと熱残留ひずみの関係	2009/5/13	2009年度春季低温工学・超電導学会
14	三戸 利行他	NIFS他	超電導コイルの高効率伝導冷却技術の開発	2009/5/13	2009年度春季低温工学・超電導学会
15	柁川 一弘他	九州大学他	トロイド配置したY系SMES用パンケーキコイルの交流損失評価	2009/6/12	2009年電気学会超電導応用電力機器研究会
16	植田 浩史他	早稲田大学他	SMES用冷凍機伝導冷却大電流YBCO超電導コイルの安定性と保護	2009/6/12	2009年電気学会超電導応用電力機器研究会
17	北條 正樹他	京都大学他	Fatigue behavior of YBCO coated conductor with Cu layer at 77K	2009/7/27	17th International Conference on Composite Materials
18	菅野未知央他	京都大学他	Y系線材の機械的特性 繰返し応力による疲労損傷と通電特性への影響	2009/9/13	2009年度東北・北海道支部/材料研究会/金研強磁場センター合同研究会
19	K.Shikimachi et al.	中部電力	Development of SMES Coil Using CVD-YBCO Tape Coated Conductor	2009/9/13	9th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 2009)
20	N.Kashima et al.	中部電力他	Study of GdBa ₂ Cu ₃ O _{7-x} and GdY _{1-x} Ba ₂ Cu ₃ O _{7-x} coated conductors by Metal Organic Chemical Vapor Deposition	2009/9/13	9th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 2009)
21	高橋 祐治他	九州工業大学他	CVD法によるYBCOコート線材の磁化緩和特性評価	2009/9/28	平成21年度電気関係学会九州支部連合大会
22	T.Mito et al.	NIFS他	Development of highly effective conduction cooling technology for a superconducting magnet	2009/10/18	21st International Conference on Magnet Technology
23	S.Awaji et al.	東北大学・金研他	Upgrading Design to a 24 T cryogenic-free superconducting magnet based on Low temperature and high magnetic field properties of the practical CVD processed coated	2009/10/18	21st International Conference on Magnet Technology
24	H.Ueda et al.	早稲田大学他	Stability and Protection of Coils Wound with YBCO Bundle Conductor	2009/10/18	21st International Conference on Magnet Technology
25	N.Fujiwara et al.	ISTEC他	DEVELOPMENT OF YBCO POWER DEVICES IN JAPAN	2009/11/2	22th International symposium on superconductivity(ISS2009)
26	M.Kanno et al.	京都大学 他	Unique strain effect in YBCO coated conductor under magnetic field	2009/11/2	22th International symposium on superconductivity(ISS2009)

27	Y.Kawai et al.	早稲田大学他	Determination of Stabilizer Thickness for YBCO Coated Conductors Based on Coil Protection	2009/11/3	22th International symposium on superconductivity(ISS2009)
28	M.Kasahara et al.	古河電気工業 他	Development of CeO ₂ /IBAD-GZO-based buffer layers for REBCO coated conductors	2009/11/3	22th International symposium on superconductivity(ISS2009)
29	H.Ueda et al.	早稲田大学他	FATIGUE TESTS YBCO COATED CONDUCTORS	2009/11/3	22th International symposium on superconductivity(ISS2009)
30	Y.Takahashi et al.	九州工業大学他	ESTIMATION OF MAGNETIC RELAXATION PROPERTY FOR CVD PROCESSED YBCO COATED CONDUCTORS	2009/11/3	22th International symposium on superconductivity(ISS2009)
31	K.Fukunaga et al.	JFCC他	DIRECT OBSERVATION OF MAGNETIC FLUXES PENETRATING INTO YBCO BY ELECTRON HOLOGRAPHY	2009/11/3	22th International symposium on superconductivity(ISS2009)
32	K.Kajikawa et al.	九州大学他	Numerical and theoretical evaluations of AC losses for single and infinite numbers of superconductor strips with direct and alternating transport currents in external AC magnetic field	2009/11/3	22th International symposium on superconductivity(ISS2009)
33	O.Tsukamoto et al.	横浜国立大学他	SMES Coil Development Using IBAD/CVD-YBCO Tape	2009/11/16	2009 KEPRI-EPRI Joint Superconductivity Conference
34	高橋 祐治他	九州工業大学他	CVD法によるYgBCO線材の超電導特性の超電導層厚依存性	2009/11/18	2009年度秋季低温工学・超電導学会
35	淡路 智他	東北大学他	RE123テープによる18T無冷媒超伝導マグネットのアップグレードデザイン	2009/11/18	2009年度秋季低温工学・超電導学会
36	菅野未知央他	京都大学他	4点曲げ試験法によるY系線材のI _c -ひずみの測定	2009/11/19	2009年度秋季低温工学・超電導学会
37	宮里 尚史他	京都大学他	銅複合化YBCO薄膜超伝導線材におけるYBCO/CeO ₂ 界面はく離の破壊力学的検討	2009/11/19	2009年度秋季低温工学・超電導学会
38	三戸 利行他	NIFS他	自動振動式ヒートパイプを用いた超伝導マグネットの高効率冷却技術の開発	2009/11/19	2009年度秋季低温工学・超電導学会
39	夏目 恭平他	総合研究大学院大学他	超伝導マグネット冷却用自動振動式ヒートパイプの低温動作特性	2009/11/19	2009年度秋季低温工学・超電導学会
40	植田 浩史他	早稲田大学	YBCO超電導コイルの安定性と保護	2009/11/19	2009年度秋季低温工学・超電導学会
41	青木 佳明他	早稲田大学	銅メッキYBCO超電導線材の疲労特性試験	2009/11/19	2009年度秋季低温工学・超電導学会
42	植田 浩史他	早稲田大学他	トロイダル配置されたY系SMESコイルの保護動作	2009/11/20	2009年度秋季低温工学・超電導学会
43	和泉 辰矢他	九州工業大学他	CVD法によるYgBCO線材の超伝導特性の超電導層厚依存性	2009/11/21	平成21年度応用物理学学会九州学術講演会
44	高橋 祐治他	九州工業大学他	CVD法によるYgBCO線材の磁化緩和特性の超伝導層厚依存性	2010/3/16	2010年春季応用物理学学会
45	桐原 裕紀他	鹿児島大学他	不均一の中でのYBCO積層導体の交流損失特性	2010/5/12	2010年度春季低温工学・超電導学会
46	三戸 利行他	NIFS他	超伝導マグネット組込型シート状自動振動式ヒートパイプの開発	2010/5/12	2010年度春季低温工学・超電導学会
47	兒玉 青樹他	九州大学他	CVD法により作製されたREBCO線材の電流輸送特性	2010/5/12	2010年度春季低温工学・超電導学会
48	高橋 祐治他	九州工業大学他	CVD法によるYgBCO線材の磁化緩和特性の超電導層厚依存性	2010/5/12	2010年度春季低温工学・超電導学会
49	鈴木 貴裕他	早稲田大学他	SMES用伝導冷却Y系超電導ケーブルコイルの通電・伝熱特性評価	2010/5/12	2010年度春季低温工学・超電導学会
50	夏目 恭平他	総合研究大学院大学他	自動振動式ヒートパイプにおける低温動作特性の設置方向依存性	2010/5/12	2010年度春季低温工学・超電導学会
51	石渡 洋志他	中部電力他	20Kスターリング型パルス管冷凍機開発を旨とした蓄冷材料の検討	2010/5/12	2010年度春季低温工学・超電導学会
52	室町 和輝他	早稲田大学	SMES用伝導冷却高温超電導コイルのクエンチ保護	2010/5/13	2010年度春季低温工学・超電導学会
53	宮里 尚史他	京都大学他	銅複合化YBCO薄膜超伝導線材のModel型はく離に対する破壊力学的検討	2010/5/21	第59期 日本材料学会学術講演会
54	式町 浩二他	中部電力他	多層巻CVD-YBCOコイルのフープ応力耐性評価	2010/6	東北大学金属材料研究所強磁場超伝導材料研究センター 平成21年度 年次報告
55	石原 亮輔他	東北大学他	MOCVD-YBCOコート線材のJ _c 特性	2010/6	東北大学金属材料研究所強磁場超伝導材料研究センター 平成21年度 年次報告
56	M.Hohjo et al.	京都大学他	Fatigue behavior of YBCO coated high-temperature superconductor with additional Cu layer at 77K	2010/6/6	10th International Fatigue congress
57	千葉 悠太他	東北大学他	ダブルパンケーキコイル用並列多層HTSテープ導体内の電流分布の一様化	2010/6/10	電気学会研究会 超電導応用電力機器研究会
58	井上 真彰他	名古屋大学他	伝導冷却SMESの超電導コイルモデルにおける電気絶縁性能	2010/6/10	電気学会研究会 超電導応用電力機器研究会
59	石山 敦士他	早稲田大学他	SMES用伝導冷却YBCO超電導コイルのクエンチ特性と保護	2010/6/10	電気学会研究会 超電導応用電力機器研究会
60	式町 浩二他	中部電力他	SMES用Y系コイル構成技術の開発	2010/6/10	電気学会研究会 超電導応用電力機器研究会
61	A.Ishiyama et al.	早稲田大学他	Strain and fatigue tests of YBCO coated conductor with copper stabilizer	2010/7/19	ICEC23-ICMC2010
62	K.Hamashima et al.	東北大学他	Analysis of Current Distribution in Multi-laminated HTS Tape Conductor for Double Pancake Coil of SMES	2010/8/1	Applied Superconductivity Conference 2010
63	M.Kanno et al.	京都大学他	Influence of thickness of superconducting layer on double peak behavior in strain effect on critical current under magnetic field for YBCO coated conductors	2010/8/1	Applied Superconductivity Conference 2010
64	Y.Aoki et al.	早稲田大学他	Quench Behavior and Protection in Cryocooler-cooled YBCO Pancake Coil for SMES	2010/8/1	Applied Superconductivity Conference 2010

65	K.Shikimachi et al.	中部電力他	Unit coil development for Y-SMES	2010/8/1	Applied Superconductivity Conference 2010
66	式町 浩二他	中部電力	Coated Conductor Based SMES	2010/10/28	Coated Conductor for Applications 2010
67	室町 和輝他	中部電力	SMES 用伝導冷却高温超電導コイルのクエンチ検出と保護	2010/12/2	2010 年秋季低温工学・超電導学会
68	鈴木 貴裕他	中部電力	SMES 用伝導冷却Y 系超電導モデルCu コイルの通電・伝熱特性評価実験	2010/12/2	2010 年秋季低温工学・超電導学会
69	石渡 洋志他	中部電力	20K スターリング型パルス管冷凍機の開発	2010/12/2	2010 年秋季低温工学・超電導学会
70	夏目 恭平他	中部電力	低温動作自励振動式ヒートパイプの開発-超電導マグネットへの応用可能性の	2010/12/2	2010 年秋季低温工学・超電導学会
71	三戸利行他	中部電力	両端冷却型自励振動式ヒートパイプの低温動作特性	2010/12/2	2010 年秋季低温工学・超電導学会
72	式町 浩二他	中部電力	SMES 用Y 系コイル開発	2010/12/2	2010 年秋季低温工学・超電導学会
73	玉田 勉他	中部電力	SMES における高効率冷却システムの開	2011/3/16	平成23 年電気学会全国大会
74	大西 秀明他	中部電力	SMES 用Y 系超電導コイルのクエンチ検出と保護	2011/3/16	平成23 年電気学会全国大会
75	井上 真彰他	中部電力	伝導冷却SMES コイルモデルの部分放電開始特性	2011/3/16	平成23 年電気学会全国大会
76	長屋 重夫	中部電力	超電導電力貯蔵装置(SMES)の開発現状と今後	2011/3/16	平成23 年電気学会全国大会
77	高橋 祐治他	中部電力	CVD 法によるYgBCO コート線材の臨界電流密度特性評価	2011/3/24	2011 年春季第58 回応用物理学関係連合講演会
78	平野 直樹他	中部電力	SMESコイル用高効率伝導冷却システムの開発	2011/5/18	2011年春季低温工学・超電導学会
79	高橋 利典他	中部電力	SMES用ダブルパンケーキコイル用並列多層HTSテープ導体内の電流分布の様	2011/5/18	2011年春季低温工学・超電導学会
80	大西 秀明他	中部電力	SMES応用を想定したYBCOコイルのクエンチ検出と保護	2011/5/18	2011年春季低温工学・超電導学会
81	夏目 恭平他	中部電力	低温動作自励振動式ヒートパイプの熱輸送特性-OHPの長さによる影響-	2011/5/18	2011年春季低温工学・超電導学会
82	笠原 正靖他	中部電力	ZrドープしたCVD法GdYBCO線材の磁場中特性	2011/5/18	2011年春季低温工学・超電導学会
83	菅野 未知央他	中部電力	Bending strain Bending strain axis for YBCO coated conductors with and without a Cu stabilizing	2011/6/3	Superconductor Science and Technology Science
84	石山 敦士他	早稲田大学他	SMES応用を想定したYBCOコイルのクエンチ検出と保護	2011/6/10	2011年電気学会超電導応用電力機器研究会
85	植田 浩史他	早稲田大学他	Quench Detection and Protection in Cryocooler-cooled YBCO Pancake Coil for SMES	2011/9/11	22nd International Conference on Magnet Technology
86	室町 和輝他	早稲田大学他	Quench Detection and Protection of YBCO Coil for SMES Application	2011/9/18	European Conference on Applied Superconductivity 2011
87	渡部 智則他	中部電力	Progress in Coated Conductor Development by Hot-Wall type MOCVD	2011/9/18	European Conference on Applied Superconductivity 2011
88	菅野 未知央他	中部電力	Reversible strain effect on critical current in GdBCO coated conductors with different crystal	2011/10/24	ISS2011
89	坂本 久樹	中部電力	Development of High-strength Coated Conductor	2011/10/24	ISS2011
90	植田 浩史他	早稲田大学他	YBCOコイルの安定性とクエンチ検出・保護	2011/10/27	日本磁気科学会磁場発生分科会/東北大学金属材料研究所強磁場センター 合同研究会
91	菅野 未知央他	中部電力他	Influence of crystal orientation of REBCO film on strain effect on critical current	2011/10/27	The 15th Japan-US Workshop on Advanced Superconductors
92	菅野 未知央他	中部電力他	REBCO線材のひずみ特性に及ぼす超伝導膜結晶方位の影響	2011/11/9	2011年度秋季低温工学・超電導学会
93	大西 秀明他	早稲田大学他	SMES用YBCO超電導コイルのクエンチ検出実験	2011/11/9	2011年度秋季低温工学・超電導学会
94	石山 敦士他	早稲田大学他	SMES用YBCO超電導コイルのクエンチ検出と保護に関する数値解析評価	2011/11/9	2011年度秋季低温工学・超電導学会
95	夏目 恭平他	中部電力他	低温動作振動式ヒートパイプの開発-熱輸送特性評価への半経験的モデルの適用-	2011/11/9	2011年度秋季低温工学・超電導学会
96	北條 正樹他	中部電力他	Effect of Fracture Mode on Interlaminar Fracture Toughness for Cu Laminated YBCO Coated Conductor	2011/12/5	MEM11, 6th Workshop of Mechanical-Electromagnetic Properties of Superconducting Materials
97	菅野 未知央他	中部電力他	2-dimensional internal strain measurement using synchrotron radiation for REBCO coated	2011/12/5	MEM11, 6th Workshop of Mechanical-Electromagnetic Properties of Superconducting Materials
98	長屋 重夫	中部電力	Y系線材のSMES応用	2012/1/11	電気学会電力・エネルギーフォーラム
99	玉田 勉他	中部電力他	SMES用コイルの高効率冷却システムの開発	2012/3/21	平成24年度電気学会全国大会
100	増井 裕太他	中部電力他	SMES用Y系超電導コイルのクエンチ検出方法の検討	2012/3/21	平成24年度電気学会全国大会
101	Takuya Ando et al.	ISTEC	Development of Y-SMES for electric power system control	2012/5/14	ICEC24-ICMC2012(International Cryogenic Engineering Conference 24-International Cryogenic Materials Conference 2012)
102	玉田 勉他	中部電力	The Development of Helium Circulation Cryocooling Technology for SMES coils	2012/5/17	24th International Cryogenic Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference 2012
103	渡部 智則他	中部電力	Element Technology Development of RE-123Coated Conductor Coils for 2 GJ class SMES	2012/5/17	24th International Cryogenic Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference 2012
104	増井 裕太他	中部電力	Quench Detection method for YBCO Coils	2012/5/17	24th International Cryogenic Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference 2012

105	谷江 裕一他	中部電力	Evaluation of Strength Properties and Fracture Morphology of Gd123 Coated Conductors by Pull Tests	2012/5/17	24th International Cryogenic Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference 2012
106	福永 啓一他	中部電力	Transmission electron microscopic observation of BaZrO in GdYBCO coated by MOCVD	2012/5/17	24th International Cryogenic Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference 2012
107	山本 寛他	中部電力	Development of High Capacity Stirling-type Pulse Tube Cryocooler System	2012/5/17	24th International Cryogenic Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference 2012
108	渡部 智則	中部電力	Highly Reliable and Durable Coil Development at Y-SMES Project in Japan	2012/6/6	CIGRE SC D1 WG38 Group meeting
109	Takuya Ando et al.	ISTEC	Development of Y-SMES for electric power system control	2012/10/7	ASC2012(Applied Superconductivity Conference)
110	大西 秀明他	中部電力	Quench Detection Method for Cryocooler- Cooled YBCO Pancake Coil for SMES	2012/10/9	Applied Superconductivity Conference 2012
111	琴寄 拓哉他	中部電力	Evaluation of Conduction Cooling Effect of Cryocooler-cooled HTS coils for SME	2012/10/9	Applied Superconductivity Conference 2012
112	玉田 勉他	中部電力	The Development of High Efficiency Conduction Cooling Technology for SMES coils	2012/10/9	Applied Superconductivity Conference 2012
113	渡部 智則他	中部電力	Development of High Capacity Strength Pancake Type Coil with Stress Controlling Structure by REBCO Coated Conductor	2012/10/9	Applied Superconductivity Conference 2012
114	谷江 裕一他	中部電力	RE123薄膜超伝導線材におけるはく離強度の試験評価面積依存度	2012/10/19	第53回日本学会材料工学連合講演会
115	長屋 重夫他	中部電力	パンケーキコイル高強度化のための新コイル構造 (1) - 新コイル構造の提	2012/11/7	2012年度秋季低温工学・超電導学
116	渡部 智則他	中部電力	パンケーキコイル高強度化のための新コイル構造 (2) - 検証実験 -	2012/11/7	2012年度秋季低温工学・超電導学
117	淡路 智他	東北大学他	パンケーキコイル高強度化のための新コイル構造 (3) - 応力/ひずみ解析	2012/11/7	2012年度秋季低温工学・超電導学
118	王 旭東他	早稲田大学他	パンケーキコイル高強度化のための新コイル構造 (4) - 3次元数値構造解析	2012/11/7	2012年度秋季低温工学・超電導学
119	増井 祐太他	早稲田大学他	SMES用伝導冷却YBCOコイルにおける常電導転移検出実験	2012/11/7	2012年度秋季低温工学・超電導学
120	増井 祐太他	早稲田大学他	SMES用YBCOコイルを想定した伝導冷却下での銅モデルコイルの伝熱特性評価	2012/11/7	2012年度秋季低温工学・超電導学
121	大西 秀明他	早稲田大学他	SMES応用を想定した伝導冷却YBCOモデルコイルの常電導転移検出実験 - バンドル導体の電流監視	2013/1/15	電気学会 超電導応用電力機器研究会
122	長屋 重夫他	中部電力	新規補強構造を用いた高強度パンケーキコイルの開発	2013/1/15	電気学会 超電導応用電力機器研究会
123	長屋 重夫	中部電力	Y系超電導コイル開発の現状と研究開発課題 「SMES応用」	2013/1/30	電気学会 電力・エネルギーフォーラム 「イットリウム系超電導コイル技術開発」
124	式町 浩二他	中部電力	多層巻Y系コイルのフープ応力耐性向上と線材補修技術の検証	2011/8月	東北大学金属材料研究所強磁場超伝導材料研究センター 平成22年度 年次報告
125	渡部 智則他	中部電力	Y系コイルの電磁応力評価検証	2012/8月	東北大学金属材料研究所強磁場超伝導材料研究センター 平成23年度 年次報告

2 超電導電力ケーブルの研究開発

番号	発表者	所属	タイトル	発表日	発表先
1	羽生智 et al.	フジクラ	大型IBAD装置による500m級長尺中間層の作製と高速化	2008/5/27	2008年度春季低温工学
2	T. Koizumi et al.	昭和電線ケーブルシステム	Development of the low cost YBCO coated conductor by TFA-MOD process using a batch-type furnace	2008/8/18	Applied Superconductivity Conference 2008
3	M.Yagi et al.	古河電気工業 他	Development of YBCO HTS cable with low AC loss and HTS joint with low electrical resistance	2008/8/19	2008 Applied Superconductivity Conference (ASC2008)
4	A. Kaneko et al.	昭和電線ケーブルシステム	Preparation of long TFA-MOD YBCO tapes on CeO2/CZO buffered cube textured Ni-based alloy tapes	2008/8/19	Applied Superconductivity Conference 2008
5	T. Nagaishi et al.	住友電気工業	Development of REBCO coated conductors on textured metal substrates	2008/10/28	(ISS2008)International Symposium on Superconductivity
6	H. Ota et al.	住友電気工業	Development of REBCO coated conductor on low magnetic substrate	2008/10/28	(ISS2008)International Symposium on Superconductivity
7	S.Mukoyama et al.	古河電気工業 他	Development of (RE)BCO cables for HTS power transmission lines	2008/10/28	第21回国際超電導シンポジウム
8	Y. Aoki et al.	昭和電線ケーブルシステム	Development of TFA-MOD Process for Long Length RE-123 Conductor in	2008/10/28	21st International Symposium on Superconductivity
9	A. Kaneko et al.	昭和電線ケーブルシステム	Development of YBCO coated conductors by TFA-MOD process on the MOD buffered layer.	2008/10/28	21st International Symposium on Superconductivity
10	T. Koizumi et al.	昭和電線ケーブルシステム	Development of long length YBCO superconducting tapes by TFA-MOD process using a batch-type furnace	2008/10/28	21st International Symposium on Superconductivity
11	S. Hanyu et al.	フジクラ	IBAD-MgO BUFFER LAYERS FOR COATED CONDUCTORS IN THE LARGE-SCALE	2008/10/28	ISS2008
12	M.Yagi et al.	古河電気工業 他	Development of 1 m HTS conductor using YBCO on textured metal substrate	2008/10/29	第21回国際超電導シンポジウム

13	羽生智 et al.	フジクラ	大型IBAD装置によるIBAD-MgOの検討	2008/11/2	2008年度秋季低温工学
14	八木 正史他	古河電気工業 他	イットリウム系超電導ケーブルとその中間接続部の開発	2008/11/12	2008年度秋季低温工学・超電導学会
15	小泉勉他	昭和電線ケーブルシステム	TFA-MOD法による低コストYBCO線材の開発(7) - 500m線材の開発 -	2008/11/12	第79回2008年秋季低温工学・超電導学会
16	Y. Iijima et al.	フジクラ	Development of IBAD process for RE-123 Coated Conductors	2008/12/2	MRS2008
17	S.Mukoyama et al.	古河電気工業 他	Current state of Yttrium-based Superconducting Power Cable in	2008/12/4	International Workshop on Coated Conductor for Applications (学会発表)
18	竹内 活徳他	京都大学他	次世代高温超伝導線材の可撓性を活かした円断面単層導体の通電損失の測定	2009/1/17	電気学会全国大会
19	藤原 昇他	ISTEC他	イットリウム系超電導ケーブルの開発	2009/3/17	電気学会全国大会
20	八木 正史他	古河電気工業 他	高温超電導ケーブル用絶縁材料の機械・電気特性評価	2009/3/19	平成21年電気学会全国大会
21	藤原 昇	ISTEC	Y系線材による機器開発-実証期を迎えた単結晶薄膜テープ技術-	2009/3/30	応用物理学学会関係連合講演会
22	大屋 正義他	住友電気工業 他	66kV級三心一括型薄膜高温超電導電力ケーブルの開発	2009/5/12	2010年度春季低温工学・超電導学会
23	八木 正史他	古河電気工業 他	275kV-3kA YBCO 高温超電導ケーブルの過電流試験	2009/5/12	2010年度春季低温工学・超電導学会
24	市川 裕士他	ISTEC他	液体窒素下における複合電気絶縁材料の特性について	2009/5/13	低温工学会
25	瓜生 季那他	早稲田大学他	275kV系統YBCO超電導ケーブル定常運転時の伝熱特性	2009/5/13	低温工学
26	王 旭東他	早稲田大学他	66kV系統YBCO超電導ケーブルの過電流通電特性解析	2009/5/13	低温工学
27	大屋 正義他	住友電気工業 他	66kV/3kA 級薄膜超電導ケーブルの交流損失特性	2009/5/13	低温工学
28	大屋 正義他	住友電気工業 他	66kV/3kA 級薄膜超電導ケーブルの交流損失特性	2009/5/13	2009年度春季低温工学・超電導学会
29	新海 優樹他	住友電気工業 他	クラッド基板上超電導薄膜の機械特性	2009/5/14	2009 年度春季低温工学・超電導学会
30	太田 肇他	住友電気工業 他	30mm超電導線材の開発	2009/5/15	2009 年度春季低温工学・超電導学会
31	小泉勉他	昭和電線ケーブルシステム	TFA-MOD法による低コストYBCO線材の開発(8) - TFA-MOD長尺テープ線材量産化の検討 -	2009/5/15	第80回2009年春季低温工学・超電導学会
32	羽生智他	フジクラ	大型アシストイオンビームを用いた長尺IBAD-MgO 線材の高速成膜	2009/5/15	2009年度春季低温工学
33	藤原 昇他	ISTEC他	イットリウム系超電導電力ケーブル開発の計画と進捗について	2009/6/11	超電導応用電力機器研究会
34	竹内 活徳他	京都大学他	イットリウム系超伝導ケーブルの低交流損失化に向けたアプローチ	2009/6/11	電気学会研究会 超電導応用電力機器研究会
35	王 旭東他	早稲田大学他	275kV級YBCO超電導電力ケーブルを想定して伝熱特性評価	2009/6/11	電気学会研究会 超電導応用電力機器研究会
36	飯島康裕他	フジクラ	イオンビーム照射による高効率組織制御	2009/6/24	未踏科学技術協会第72回ワークショップ
37	市川 裕士他	ISTEC他	高電圧超電導電力ケーブルの開発について	2009/8/18	電気学会 B部門
38	S. Hanyu et al.	フジクラ	Km-length IBAD-MgO fabricated at 1 km/h by a large scale IBAD system in fujikura	2009/9/11	M2S
39	Hiroshi Ichikawa et al.	ISTEC	Development of YBCO HTS cables	2009/9/13	(EUCAS2009)European Conference for Applied Superconductivity
40	Xudong Wang et al.	早稲田大学他	Numerical Simulation on Fault Condition in 66 kV YBCO Superconducting Power Cable	2009/9/13	(EUCAS2009)European Conference for Applied Superconductivity
41	Shunsuke Sato et al.	早稲田大学他	Thermal Characteristic of 275kV class YBCO Power Transmission Cable	2009/9/13	(EUCAS2009)European Conference for Applied Superconductivity
42	Masayoshi Ohya et al.	住友電気工業 他	AC loss characteristics of 66kV / 3kA class RE-123 superconducting cable	2009/9/13	(EUCAS2009)European Conference for Applied Superconductivity
43	M. Ohya et al.	住友電気工業 他	AC loss characteristics of RE-123 superconducting cable	2009/9/16	EUCAS2009 (9th European Conference on Applied Superconductivity)
44	Xudong Wang et al.	早稲田大学他	Thermal Characteristics of 275 kV/3kA class YBCO Power Cable	2009/10/18	(MT21)21th International Conference on Magnet Technology
45	Katsutoku Takeichi et al.	住友電気工業 他	AC Loss Reduction of Superconducting Power Transmission Cables Using Flexibility of Coated Conductors with Textured Metal	2009/10/18	(MT21)21th International Conference on Magnet Technology
46	M. Konishiet al.	住友電気工業	Critical current and mechanical property of coated conductors with Cu-stabilizing layers	2009/10/22	MT-21(21st International Conference on Magnet Technology)
47	Tadahiko Minamino et al.	住友電気工業他	Design and evaluation of 66kV class RE-123 superconducting cable	2009/11/2	(ISS2009)International Symposium on Superconductivity
48	X. Wang et al.	早稲田大他	Numerical Simulation on Fault Condition in 66 kV Class RE-123 Superconducting Cable	2009/11/2	(ISS2009)International Symposium on Superconductivity
49	H. Kono et al.	早稲田大他	Degradation Characteristics of YBCO coated conductors due to fault-current in power cable applications	2009/11/2	(ISS2009)International Symposium on Superconductivity
50	S. Sato et al.	早稲田大他	Computer Simulation of fault current characteristics in 275 kV class YBCO power Cable	2009/11/2	(ISS2009)International Symposium on Superconductivity
51	S. Mukoyama et al.	古河電気工業 他	Conceptual design of 275 kV class High-TC superconducting cable	2009/11/2	(ISS2009)International Symposium on Superconductivity
52	T. Minamino et al.	住友電気工業	Design and evaluation of 66kV class RE-123 superconducting cable	2009/11/3	ISS2009 (International Symposium on Superconductivity)

53	M.Kasahara et al.	古河電気工業 他	Development of CeO ₂ /IBAD-GZ ₂ O-based buffer layers for REBCO coated conductors	2009/11/3	(ISS2009) International Symposium on Superconductivity
54	T. Koizumi 他	昭和電線ケーブルシステム	Investigation of mass production of YBCO coated conductors using TFA-MOD process	2009/11/3	21st International Symposium on Superconductivity
55	S. Hanyu et al.	フジクラ	LONG-LENGTH IBAD-MgO BUFFER LAYERS FOR HIGH-PERFORMANCE RE123 COATED CONDUCTORS BY A LARGE ION BEAM	2009/11/3	ISS2009
56	新井 道夫 他	早稲田大他	YBCO超電導線材の過電流パルス通電による特性劣化試験	2009/11/18	低温工学秋季大会
57	瓜生 季邦 他	早稲田大他	66kV系統高温超電導ケーブルの過電流通電特性評価	2009/11/18	低温工学秋季大会
58	百足 弘史 他	早稲田大他	YBCO超電導線材の交流過電流通電特性	2009/11/18	低温工学秋季大会
59	王 旭東 他	早稲田大他	275kV 系統YBCO超電導ケーブルの過電流通電特性解析	2009/11/18	低温工学秋季大会
60	八木 正史 他	古河電気工業 他	275kV-3kA YBCO 高温超電導ケーブルの開発	2009/11/18	2009年度秋季低温工学・超電導学会
61	小泉勉 他	昭和電線ケーブルシステム	TFA-MOD法による低コストYBCO線材の開発 (9) -TFA-MODYBCO線材量産プロセスにおける歩留向上の検討-	2009/11/19	第81回2009年秋季低温工学・超電導学会
62	Noboru Fujiwara et al.	ISTEC 他	Development of REBCO HTS cables in Japan	2009/11/22	CCA2009(International Workshop on Coated Conductor for Application)
63	K.Hayashi et al.	住友電気工業	Development of GdBCO Coated Conductor on 30mm Wide Clad-Type Textured Metal Substrates	2009/11/23	CCA2009
64	Noboru Fujiwara et al.	ISTEC 他	Development of 66kV-5kA HTS cable using REBCO wires	2009/12/6	ACASC2009(Asian Conference on Applied Superconductivity and Cryogenics)
65	Hiroshi Ichikawa et al.	ISTEC 他	Development of 275kV-3kA HTS cable using REBCO wires	2009/12/6	ACASC2009(Asian Conference on Applied Superconductivity and Cryogenics)
66	M.Ohya et al.	住友電気工業 他	AC loss in HTS power cable using REBCO wires	2009/12/6	ACASC2009(Asian Conference on Applied Superconductivity and Cryogenics)
67	S. Hanyu et al.	フジクラ	HIGH PERFORMANCE 2G WIRE BY PRODUCTIVE IBAD/PLD SCHEME	2009/12/6	US-Japan Workshop2009
68	王 旭東 他	早稲田大他	275kV系統YBCO超電導ケーブルの過電流通電特性	2010/1/25	超電導応用電力機器研究会
69	向山 晋一 他	古河電気工業 他	275kV級高温超電導ケーブルの開発	2010/1/25	電気学会 超電導応用電力機器研究会
70	藤原 昇 他	ISTEC 他	275kV-3kA 高温超電導電力ケーブルの交流損失評価	2010/3/17	電気学会 全国大会
71	市川 裕士 他	ISTEC 他	275kV-3kA高温超電導電力ケーブル用絶縁材料の特性	2010/3/17	電気学会 全国大会
72	児島 健太郎 他	早稲田大他	YBCO超電導線材の交流過電流通電特性	2010/3/17	電気学会
73	金光 雅也 他	早稲田大他	YBCO超電導線材の過電流パルス通電による特性劣化評価	2010/3/17	電気学会全国大会
74	鶴飼 泰之 他	名古屋大学 他	高温超電導ケーブルにおける部分放電開始電界の絶縁材料依存性	2010/3/17	平成22年電気学会全国大会
75	大屋 正義 他	住友電気工業 他	66kV 級三心一括型薄膜高温超電導電力ケーブルの開発	2010/3/17	電気学会全国大会
76	八木 正史 他	古河電気工業 他	275kV-3kA YBCO高温超電導ケーブルの過電流試験	2010/4/7	第82回2010年度春季低温工学・超電導学会 講演概要集
77	M.Yagi et al.	古河電気工業 他	Development of 275kV-3kA YBCO HTS cable	2010/4/15	2010 Korea-Japan Superconductivity Workshop
78	王 旭東 他	早稲田大他	YBCO超電導線材の過電流パルス通電による特性劣化試験	2010/5/12	2010年度春季低温工学・超伝導学会
79	王 旭東 他	早稲田大他	66kV系統REBCO超電導モデルケーブルの過電流通電特性評価	2010/5/12	2010年度春季低温工学・超伝導学会
80	神谷 侑司 他	早稲田大他	275kV系統YBCO超電導ケーブルの過電流通電特性	2010/5/12	2010年度春季低温工学・超伝導学会
81	児島 健太郎 他	早稲田大他	REBCO超電導線材の交流過電流通電特性	2010/5/12	2010年度春季低温工学・超伝導学会
82	大屋 正義 他	住友電気工業 他	66kV 級三心一括型薄膜高温超電導電力ケーブルの開発	2010/5/12	2010年春季低温工学超伝導学会
83	新海 優樹 他	住友電気工業	大電流ケーブル用薄膜超電導線材の素線化プロセスの開発	2010/5/12	2010年度春季低温工学・超電導学会
84	阿比留 健志 他	住友電気工業	幅広PLDプロセスによる大電流ケーブル用GdBCO線材の開発	2010/5/12	2010年度春季低温工学・超電導学会
85	阿比留 健志 他	住友電気工業	幅広PLD プロセスによる大電流ケーブル用GdBCO 線材の開発	2010/5/13	2010 年度春期低温工学・超電導学会
86	小泉勉 他	昭和電線ケーブルシステム	TFA-MOD法による低コストYBCO線材の開発 (10) -TFA-MOD YBCO線材量産化の進捗-	2010/5/23	第82回2010年春季低温工学・超電導学会
87	藤原 昇 他	ISTEC 他	イットリウム系超電導電力ケーブル開発の進捗状況	2010/6/10	電気学会研究会 超電導応用電力機器研究会 (超電導応用ならびに材料関連技術)
88	王 旭東 他	早稲田大他	66kV系統REBCO超電導モデルケーブルの過電流通電特性	2010/6/10	超電導応用機器研究会
89	王 旭東 他	早稲田大他	REBCO超電導線材の交流過電流通電特性	2010/6/10	超電導応用機器研究会
90	A.Ishiyama et al.	早稲田大他	Degradation of YBCO coated conductors due to over-current	2010/7/19	ICEC23-ICMC2010
91	H.Momotari et al.	早稲田大他	Over-current Characteristics of YBCO coated conductors for Power Application	2010/7/19	ICEC23-ICMC2010

92	X.Wang et al.	早稲田大他	Over-current characteristics of 66 kV RE123 HTS power cable	2010/8/1	(ASC2010)Applied Superconductivity Conference
93	H.Momotari et al.	早稲田大他	Over-current characteristics of YBCO Coated Conductors	2010/8/1	(ASC2010)Applied Superconductivity Conference
94	M.Arai et al.	早稲田大他	Degradation of YBCO Coated Conductors due to over-current	2010/8/1	(ASC2010)Applied Superconductivity Conference
95	T.Uryu et al.	早稲田大他	Over-current characteristics of a 275kV class YBCO Power Cable	2010/8/1	(ASC2010)Applied Superconductivity Conference
96	M.Ohyaet al.	住友電気工業 他	Design and evaluation of 66kV class HTS power cable using REBCO wires	2010/8/2	(ASC2009)Applied Superconductivity Conference
97	八木 正史他	古河電気工業 他	275kV-3kA 高温超電導ケーブルの電気材料評価(その2)	2010/9/1	平成22年電気学会電力・エネルギー部門大会
98	八木 正史	古河電気工業	275kV-3kA高温超電導ケーブルの電気材料評価 その2	2010/9/2	電学B部門
99	大松一也他	住友電気工業	Fabrication of GdBaCuO coated conductors on clad-type textured metal substrates for HTS cables	2010/10/18	Materials Science and Technology 2010
100	大屋 正義他	住友電気工業他	Development of 66 KV/5 KA Class REBCO HTS Cable System	2010/10/27	2nd Japan-Korea Superconductivity JKSW)
101	本田貴裕他	住友電気工業	Crack free buffer layers on clad-type textured metal substrates	2010/10/27	The 2nd Japan-Korea Superconductivity Workshop 2010
102	八木 正史	古河電気工業	Progress of a 275kV-3kA YBCO HTS Cable	2010/10/28	CCA2010
103	大松一也	住友電気工業	Recent progress of PLD on clad-type textured metal substrate	2010/10/28	International Workshop on Coated Conductors for Applications (CCA2010)
104	新海優樹他	住友電気工業	Buffer layer characteristics on the low magnetic textured metal substrate	2010/10/28	International Workshop on Coated Conductors for Applications (CCA2010)
105	N.Amemiya et al.	京都大学	LUX PINNING PROPERTIES IN TFA-MOD PROCESSED YGdBCO COATED CONDUCTOR WITH NANOPARTICLES	2010/11/1	(ISS2010)International Symposium on Superconductivity
106	八木 正史	古河電気工業	Development of 275kV-3kA YBCO HTS Cable	2010/11/1	(ISS2010)International Symposium on Superconductivity
107	八木 正史	古河電気工業	Development of High-strength Coated Conductor for High-field Use	2010/11/1	(ISS2010)International Symposium on Superconductivity
108	大屋 正義他	住友電気工業他	Design and evaluation of 66 kV-class HTS power cable using REBCO wires	2010/11/1	(ISS2010)International Symposium on Superconductivity
109	阿比留健志他	住友電気工業	30 mm WIDE PROCESS OF GdBCO PLD/CLAD-TYPE TEXTURED METAL SUBSTRATES	2010/11/1	(ISS2010)International Symposium on Superconductivity
110	王 旭東他	早稲田大学	275kV系統YBCO超電導ケーブルの定常伝熱特性	2010/12/1	2010年度秋季低温工学・超電導学会
111	小西昌也他	住友電気工業	大電流ケーブル用薄膜超電導線材の開発	2010/12/1	2010 年度秋季低温工学・超電導学会
112	本田貴裕他	住友電気工業	クラッド配向金属基板上に成膜した中間層の高性能化	2010/12/1	2010 年度秋季低温工学・超電導学会
113	八木 正史	古河電気工業	275kV-3kA YBCO高温超電導ケーブルの交流損失低減	2010/12/2	秋季低温工学
114	大屋 正義他	住友電気工業他	66kV/5kA 級三心一括型薄膜高温超電導ケーブルの開発	2010/12/3	2010 年度秋季低温工学・超電導学会
115	大松 一也	住友電気工業	PLD法によるケーブル用Y系超電導線材の長尺開発	2010/12/8	電気材料技術懇談会
116	本田貴裕他	住友電気工業	PLD 法による薄膜高温超電導線材の開発	2010/12/10	第9 回低温工学・超電導若手合同講演会
117	大屋 正義他	住友電気工業他	66kV/5kA 級三心一括型薄膜高温超電導ケーブルの開発	2011/1/20	電気学会超電導応用電力機器研究会
118	山口高史他	住友電気工業	PLD 法による大電流ケーブル用GdBCO 薄膜線材の開発	2011/1/20	超電導応用電力機器研究会
119	大屋 正義他	住友電気工業他	66kV/5kA 級三心一括型薄膜高温超電導ケーブルの開発	2011/3/16	平成23 年電気学会全国大会
120	丸山 修他	ISTEC他	275 kV-3 kA YBCO超電導ケーブルの開	2011/3/18	電気学会全国大会
121	N.Amemiya	京都大学	Electromagnetic field analysis of superconductor based on T-	2011/4/11	第2回高温超伝導数値モデリングに関するワークショップ
122	野村	古河電気工業	275kV-3kA YBCO高温超電導ケーブルの設計と特性評価	2011/5/11	春季低温工学
123	王 旭東他	早稲田大学他	66kV系統REBCO超電導モデルケーブルの過電流通電試験と数値解析	2011/5/18	2011年度春季低温工学・超電導学会
124	王 旭東他	早稲田大学他	YBCO超電導線材の劣化特性と熱応力・歪み解析	2011/5/18	2012年度春季低温工学・超電導学会
125	琴寄 拓哉他	早稲田大学他	短絡事故に対する66kV系統GdBCO超電導ケーブルの電流裕度特性 -ケーブルの伝熱条件を模擬した超電導線材の耐過電流試験-	2011/5/18	2012年度春季低温工学・超電導学会

126	西野 竜平他	京都大学他	メカニカルスリットによる切断が薄膜線材の臨界電流密度分布に及ぼす影響	2011/5/18	2012年度春季低温工学・超電導学会
127	山田 穰他	ISTEC他	実用RE123線材のコイル化の検討	2011/5/18	2012年度春季低温工学・超電導学会
128	大屋正義他	住友電気工業他	66kV/5kA 級三心一括型薄膜高温超電導ケーブルの開発	2011/5/20	2011 年度春季低温工学・超電導学会
129	王 旭東他	早稲田大学他	66kV系統REBCO超電導モデルケーブルの過電流通電試験と数値解析	2011/6/10	電気学会超電導応用電力機器研究会
130	王 旭東他	早稲田大学他	275kV系統YBCO超電導ケーブルの電流裕度と経年劣化特性	2011/6/10	電気学会超電導応用電力機器研究会
131	大屋正義他	住友電気工業他	66kV/5kA 級三心一括型薄膜高温超電導ケーブルの開発	2011/6/10	電気学会超電導応用電力機器研究会
132	向山 晋一	古河電気工業	Development of 275kV-3kA HTS Power Cable	2011/6/20	Jicable 2011 oral
133	X. Wang et al.	早稲田大学他	Current Margin of 275 KV Class HTS Power Cable with Joint against Fault Current	2011/9/11	MT-22(22nd International Conference on Magnet Technology)
134	X. Wang et al.	早稲田大学他	Effects of thermal stress on degradation of YBCO coated conductors due to over-current	2011/9/11	MT-22(22nd International Conference on Magnet Technology)
135	X. Wang et al.	早稲田大学他	Overcurrent Tests and Numerical Simulations on a 66-kV-Class RE123 High-Temperature Superconducting Model Cable	2011/9/11	MT-22(22nd International Conference on Magnet Technology)
136	Osamu Maruyama et al.	ISTEC他	Current Margin of 66 kV Class HTS Power Cable against Fault Current	2011/9/18	Development of REBCO HTS power cables
137	新海優樹	住友電気工業	Production of GdBCO coated conductors for a 66 kV-5 kA HTS model cable	2011/9/20	Superconductivity Centennial Conference (EUCAS-ISEC-ICMC 2011)
138	大屋正義他	住友電気工業他	Design and evaluation of 66 kV-class "3-in-One" HTS cable using REBCO wires	2011/9/20	Superconductivity Centennial Conference (EUCAS-ISEC-ICMC 2011)
139	八木	古河電気工業	Development of 275 kV-3kA YBCO HTS Cable in Japan	2011/9/21	Eucas 2011 oral
140	八木	古河電気工業	世界最高電圧の275kV超電導ケーブルの開発	2011/10/5	オーム誌
141	井上 真彰他	名古屋大学他	275kV高温超電導ケーブルにおける誘電損失低減に関する検討	2011/10/24	(ISS2011)International Symposium on Superconductivity
142	Yuichi Yamada et al.	ISTEC他	BENDING STRAIN CHARACTERISTICS OF RE123 WIRES MADE BY VARIOUS PROCESSES 2	2011/10/24	(ISS2011)International Symposium on Superconductivity
143	N.Amamiya et al.	京都大学他	AC loss analyses of superconducting power transmission cables considering their three-dimensional	2011/10/24	(ISS2011)International Symposium on Superconductivity
144	Li.Quan et al.	京都大学他	AC loss reduction of outer-diameter-fixed superconducting power transmission cables using narrow coated conductors	2011/10/24	(ISS2011)International Symposium on Superconductivity
145	八木	古河電気工業	Design and Evaluation of 275kV-3kA HTS Power Cable	2011/10/25	ISS2011
146	坂本	古河電気工業	Development of High-strength Coated Conductor	2011/10/25	ISS2011
147	王 旭東他	早稲田大学他	過電流通電によるYBCO超電導線材の局所劣化に関する数値解析	2011/11/9	2011年度秋季低温工学・超電導学会
148	王 旭東他	早稲田大学他	中空フォーマを用いた275kV級YBCO超電導ケーブルの過電流通電特性解析	2011/11/9	2011年度秋季低温工学・超電導学会
149	王 旭東他	早稲田大学他	275kV級YBCO超電導ケーブルのケーブル間接続部における過電流通電特性	2011/11/9	2011年度秋季低温工学・超電導学会
150	Li.Quan et al.	京都大学他	AC loss reduction of outer diameter fixed superconducting power transmission cables using narrow 2 mm coated conductors	2011/11/9	2011年度秋季低温工学・超電導学会
151	藤	古河電気工業	275kV高温超電導ケーブルの絶縁材料の長期特性評価	2011/11/9	秋季低温工学
152	大屋正義他	住友電気工業他	Development of 66 kV class REBCO superconducting cable	2011/11/25	24th International Symposium on Superconductivity (ISS2011)
153	大松一也他	住友電気工業	Development of GdBCO coated conductor by Clad-PLD process	2011/11/25	24th International Symposium on Superconductivity (ISS2011)
154	Li.Quan et al.	京都大学他	AC Loss Characteristics of Multilayer Superconducting Power Transmission Cables Constructed with 2-mm Narrow Coated Conductors	2011/12/2	第10回低温工学・超伝導若手合同講演会
155	山口 高史他	住友電気工業	150m級PLD GdBCO線材の開発	2011/12/2	第10回低温工学・超伝導若手合同講演会
156	Yuichi Yamada et al.	ISTEC他	Bending Strain Characteristics of RE123 Superconductors	2011/12/5	(MEM11)6th Workshop of Mechanical-Electromagnetic Properties of Superconducting materials
157	大熊 武他	ISTEC他	275kV-3kA YBCO 超電導ケーブルの開発	2012/3/21	2012年電気学会全国大会
158	井上 真彰他	名古屋大学他	275kV高温超電導ケーブルにおける複合段絶縁による高電圧化と誘電損失低減の面立	2012/3/21	2012年電気学会全国大会
159	西町誠一郎	名古屋大学他	275kV高温超電導ケーブルにおける複合段絶縁による高電圧化と誘電損失低減の面立	2012/3/21	2012年電気学会全国大会
160	大松一也他	住友電気工業	Development of GdBCO Coated Conductor by Clad-PLD process for HTS Power Cable	2012/5/15	ICEC24-ICMC2012 (24th International Cryogenic Engineering Conference- International Cryogenic Materials Conference 2012)

161	小西昌也他	住友電気工業	Development of Coated Conductor Process for HTS Power Cable	2012/5/15	ICEC24-ICMC2012 (24th International Cryogenic Engineering Conference- International Cryogenic Materials Conference 2012)
162	仲村 直子他	前川製作所	Refrigeration Characteristics of Slush Nitrogen for High Temperature Superconducting	2012/9/11	12 th Cryogenics 2012
163	三誓 隆治	古河電気工業	275kV-3kA YBCO超電導ケーブルの開発	2012/9/12	平成24年電気学会 電力・エネルギー部門大会
164	丸山 修他	ISTEC	高温超電導電力ケーブル開発の現状と長距離冷却技術開発における伝熱・流体シミュレーションの役割	2012/10/3	CAE POWER 2012
165	Osamu Maruyama et al.	ISTEC	Development of 66 kV and 275 kV class REBCO HTS power cables	2012/10/7	ASC2012(Applied Superconductivity Conference)
166	N. Amemiya et al.	京都大学他	Application of LN2 boil-off method to ac loss measurement of superconducting cable consisting of coated conductors	2012/10/8	2012 Applied Superconductivity Conference (ASC 2012)
167	丸山 修他	ISTEC	長距離HTSケーブルにおける伝熱・流体特性の数値計算	2012/11/7	2012年度秋季低温工学・超電導学会研究発表会
168	中山 亮	古河電気工業	275kV-3kA超電導ケーブルの設計と検証試験	2012/11/7	2012年秋季低温工学
169	新海優樹他	住友電気工業	66 kV-5 kA級超電導モデルケーブル用線材の製造	2012/11/8	2012年度秋季低温工学・超電導学会
170	劉勁	古河電気工業	Design and Evaluation of a 275kV-3kA YBCO Superconducting Cable	2012/11/16	CCA2012
171	大松一也他	住友電気工業	Production of 6.5 km GdBCO Conductors for 66 kv-5 kA class HTS	2012/12/4	ISS2012 (25th International Symposium on Superconductivity)
172	八木 正史	古河電気工業	Design and Evaluation of 275kV-3kA HTS Power Cable	2012/12/5	25 th International Symposium on Superconductivity (ISS2012)
173	山口高史他	住友電気工業	1.5mモデルケーブル用GdBCO線材の製造	2012/12/7	第11回低温工学・超伝導若手合同講演会
174	八木 正史	古河電気工業	世界最高電圧の275kV-3kA高温超電導ケーブル開発	2013/2/25	古河電工時報
175	向山 晋一	古河電気工業	スマートグリッド分野における超電導技術の展開	2013/2/25	古河電工時報
176	X. Wang et al.	早稲田大学他	Numerical analyses of electromagnetic force acting on high-temperature superconducting power cables under fault condition		Seventh Japanese-Mediterranean and Central European Workshop
177	向山 晋一	古河電気工業	Status of 275 kV class REBCO superconducting cable development	2012/10/7-12	ASC2012
178	X. Wang et al.	早稲田大学	Experiments and Numerical Simulations on Local Degradation Characteristics of Coated Conductor	2012/10月	Applied Superconductivity Conference
179	X. Wang et al.	早稲田大学	Numerical Simulations on Electrothermal Characteristics of 66 kV REBCO Power Cable with Non-uniform Material Characteristics	2012/10月	Applied Superconductivity Conference
180	M. Iwakuma et al.	九州大学他	Development of REBCO Superconducting Transformers with a Current Limiting Function	2012/10月	2013 Applied Superconductivity Conf. (ASC2012)
181	M. Iwakuma et al.	九州大学他	Development of a 66kV-20MVA REBCO Superconducting Transformer with a Current Limiting Function	2012/10月	19th Conference on Electric Power Supply Industry
182	王旭東他	早稲田大学	YBCO線材の安定化層厚のばらつきと過電流通電による局所劣化との関係	2012/11月	2011年度秋季低温工学・超電導学会
183	王旭東他	早稲田大学	超電導特性の不均一分布を想定したYBCO超電導ケーブルの通電・伝熱特性	2012/11月	2011年度秋季低温工学・超電導学会
184	X. Wang et al.	早稲田大学	Current Margin against Fault Current for 275 kV/3 kA Class YBCO Model Cable with Cable Join	2012/5月	24th International Cryogenic Engineering Conference-International Cryogenic Materials Conference 2012
185	王旭東他	早稲田大学	中空フォーマを用いた275 kV級YBCO超電導ケーブルの過電流通電特性	2012/6月	電気学会超電導応用電力機器研究会
186	王旭東他	早稲田大学	過電流通電によるYBCO線材の局所劣化特性	2012/6月	電気学会超電導応用電力機器研究会
187	大松一也	住友電気工業	66 kV-5kA級 三心一括型ケーブル用GdBCO線材の開発	2013/3月	電気評論
188	大屋正義他	住友電気工業他	66kV級三心一括型薄膜高温超電導電力ケーブルの開発	2013/3月	平成25年電気学会全国大会

3 超電導変圧器の研究開発

番号	発表者	所属	タイトル	発表日	発表先
1	Y. Iijima	フジクラ	Advances in High-Tc Superconductivity Materials for	2008/7/8	WAC2008
2	S. Hanyu et al.	フジクラ	Progress in scale-up of RE-123 conductors with Ic of 300A/cm by IBAD/PLD process	2008/8/20	ASC2008
3	H. Kutami et al.	フジクラ	THE PROGRESS IN RESEARCH AND DEVELOPMENT OF LONG LENGTH COATED CONDUCTORS IN FUJIKURA	2008/10/28	ISS2008
4	M. Igarashi et al.	フジクラ	FABRICATION OF CeO2 AND GdBCO LAYERS WITH PLD TECHNIQUE AT EXTRAORDINARY HIGH RATE	2008/10/28	ISS2008
5	K. Kakimoto et al.	フジクラ	INCREASE OF PRODUCTION RATE OF RE123 FILM BY PLD SYSTEM WITH THE HOT WALL TYPE HEATING	2008/10/28	ISS2008

6	H. Okamoto他	九州電力他	Development of 1kA class HTS coil for superconducting power	2008/11/3	(ISS2008)International Symposium on Superconductivity
7	五十嵐光則他	フジクラ	PLD 法によるGdBCO 線材の高速成膜	2008/11/12	2008年度秋季低温工学
8	柿本一臣 他	フジクラ	ホットウォール加熱型PLD 装置によるGd123 厚膜化	2008/11/12	2008年度秋季低温工学
9	花田康 他	フジクラ	IBAD-MgO 上での中間層の作製	2008/11/12	2008年度秋季低温工学
10	中西達尚他	昭和電線ケーブルシステム	RF-Sputtering法によるRe-123系線材用CeO2中間層の開発	2008/11/12	第79回2008年秋季低温工学・超電導学会
11	兼子敦他	昭和電線ケーブルシステム	TFA-MOD法により作製したREBCO線材の磁場特性	2008/11/12	第79回2008年秋季低温工学・超電導学会
12	岡元 洋他	九州電力他	イットリウム系超電導変圧器の巻線技術開発	2009/5/13	2009年度春季低温工学・超電導学会
13	柿本一臣他	フジクラ	ホットウォール加熱式PLD 装置による高特性RE123 膜の高速成膜	2009/5/14	2009年度春季低温工学
14	須藤泰範他	フジクラ	IBAD 中間層構造における中間層高速成膜検討	2009/5/14	2009年度春季低温工学
15	五十嵐光則他	フジクラ	IBAD-MgO 基板を用いた長尺GdBCO 線材の開発	2009/5/15	2009年度春季低温工学
16	中西達尚他	昭和電線ケーブルシステム	RF-Sputtering法によるRe-123系線材用CeO2中間層の開発(2)	2009/5/15	第80回2009年春季低温工学・超電導学会
17	朽網寛他	フジクラ	Y系超電導線材の高性能化とスルーブット向上	2009/6/11	2009年度電気学会超電導応用器機研究会
18	S. Yoshida他	大陽日酸他	NEW DESIGN OF NEON REFRIGERATOR FOR HTS POWER MACHINES	2009/6/30	(CEC/ICMC)Cryogenic Engineering Conference/International Cryogenic Materials Conference
19	H. Hirai他	大陽日酸他	DEVELOPMENT OF A NEON CRYOGENIC TURBO-EXPANDER WITH MAGNETIC BEARINGS	2009/6/30	(CEC/ICMC)Cryogenic Engineering Conference/International Cryogenic Materials Conference
20	S. Yoshida et. al	大陽日酸(株)	New Design of Neon Refrigerator for HTS Power Machines	2009/7/1	Cryogenic Engineering Conference 2009
21	K. Kakimoto et. al	フジクラ	Preparation of RE123 film with large current capacity by hot-wall type PLD system	2009/9/11	M2S
22	飯島康裕他	フジクラ	IBAD法及びHotWall-PLD法によるY123線材の量産化開発	2009/9/14	低温工学会材料研究会東北支部
23	K. Kakimoto et. al	フジクラ	Remarkable progress in fabricating RE123 coated conductors by IBAD/PLD technique at Fujikura	2009/9/14	EUCAS2009
24	羽生智 他	フジクラ	Long-length IBAD-MgO buffer layers for high-performance RE123 coated conductors by a large scale IBAD system at fujikura	2009/9/16	EUCAS2009
25	乙成 貴明他	九州大学他	限流機能付きY系小型超電導変圧器の試作	2009/9/28	電気学会九州支部
26	高山 洗他	九州大学他	超電導並列導体をコイル状に巻いた際の電流分流通特性	2009/9/28	電気学会九州支部
27	洪田 寛他	九州大学他	超伝導二本転位並列導体の巻き乱れが付加的交流損失に及ぼす影響	2009/9/28	電気学会九州支部
28	Y. Iijima et al.	フジクラ	HIGH THROUGHPUT COATED CONDUCTOR PROCESSING BY LARGE-SCALE IBAD AND HOT-WALL PLD	2009/11/3	ISS2009
29	M. Igarashi et al.	フジクラ	HIGH - SPEED DEPOSITION OF RE123 FILM WITH LARGE CURRENT CAPACITY BY HOT-WALL TYPE PLD SYSTEM	2009/11/3	ISS2009
30	T. Nakanishi et al.	昭和電線ケーブルシステム	Development of CeO2buffer layer for coated conductors by RF-Sputtering	2009/11/3	21st International Symposium on Superconductivity
31	H. Okamoto他	九州電力他	Stabilizing layer characteristics of Y-based coated conductors for superconducting power transformers	2009/11/3	(ISS2009)International Symposium on Superconductivity
32	乙成 貴明他	九州大学他	限流機能付きY系小型超電導変圧器の設計・試作と特性評価(1)-設計・試作-	2009/11/18	2009年度秋季低温工学・超電導学会
33	緒方 俊之他	九州大学他	限流機能付きY系小型超電導変圧器の設計・試作と特性評価(2)-特性評価-	2009/11/18	2009年度秋季低温工学・超電導学会
34	高山 洗他	九州大学他	超電導並列導体をバンケーキコイルに巻いた際の電流分流通特性	2009/11/18	2009年度秋季低温工学・超電導学会
35	洪田 寛他	九州大学他	超電導二本転位並列導体の巻き乱れが付加的交流損失に及ぼす影響	2009/11/18	2009年度秋季低温工学・超電導学会
36	中西達尚他	昭和電線ケーブルシステム	RF-Sputtering法によるRe-123系線材用CeO2中間層の開発 (3) -IBAD-MgO基板上のCeO2中間層の成膜-	2009/11/18	第81回2009年秋季低温工学・超電導学会
37	柿本一臣他	フジクラ	IBAD-MgO 基板を用いたPLD 法によるRE123 線材作製	2009/11/19	2009年度秋季低温工学・超電導学会
38	岡元 洋他	九州電力他	イットリウム系超電導変圧器の巻線技術開発(2)-過電流と曲げ特性-	2009/11/19	2009年度秋季低温工学・超電導学会
39	中山 祐輔他	九州工業大学他	積層したGdBCOコート線材における磁化損失の評価	2009/11/19	2009年度秋季低温工学・超電導学会
40	乙成 貴明他	九州大学他	限流機能付きY系小型超電導変圧器の過大電流に対する応答特性の研究(2)-解析-	2010/1/13	平成22年電気学会全国大会
41	吉田 茂	大陽日酸	高温超電導変圧器用ブレイト冷凍機の開発	2010/3/2	超伝導科学技術研究会ワークショップ
42	高山 洗他	九州大学他	超電導並列導体をコイル状に巻いた際の電流分流通特性	2010/3/17	平成22年電気学会全国大会
43	緒方 俊之他	九州大学他	限流機能付きY系小型超電導変圧器の過大電流に対する応答特性の研究(1)設計・試作および特性評価	2010/3/17	平成22年電気学会全国大会
44	岡元 洋他	九州電力	超電導変圧器巻線技術開発	2010/3/19	電気学会全国大会

45	R. Kikutake et al.	フジクラ	High-performance 2G wire by IBAD/PLD process	2010/4/5	Korea-Japan Workshop2010
46	Y. Aoki	昭和電線ケーブルシステム	Development of Coated Conductor Using TFA-MOD Method	2010/4/15	2010韓日超電導ワークショップ
47	内藤 智之他	岩手大学他	YBCO薄膜線材の熱伝導率	2010/5/12	2010年春季低温工学・超電導学会
48	洪田 寛他	九州大学他	超伝導二本転位並列導体の巻き乱れによる付加的交流損失に関する検討	2010/5/12	2010年度春季低温工学・超電導学会
49	高山 洗他	九州大学他	YBCO超伝導並列導体をパンケーキコイルに巻いた際の電流分流通特性	2010/5/12	2010年度春季低温工学・超電導学会
50	緒方 俊之他	九州大学他	限流機能付きY系小型超電導変圧器の短絡電流に対する応答特性の研究(1)-実	2010/5/12	2010年度春季低温工学・超電導学会
51	乙成 貴明他	九州大学他	限流機能付きY系小型超電導変圧器の短絡電流に対する応答特性の研究(1)-数値解析-	2010/5/12	2010年度春季低温工学・超電導学会
52	岡元 洋他	九州電力他	イットリウム系超電導変圧器の巻線技術開発(3)-細線化線材の過電流特性-	2010/5/12	2010年度春季低温工学・超電導学会
53	五十嵐 光則他	フジクラ	RE123長尺線材の臨界電流特性と製造歩留まりの向上	2010/5/13	2010年度春季低温工学
54	岡元 洋	九州電力(株)他	イットリウム系超電導変圧器の限流機能付加技術開発-限流特性解析-	2010/5/18	2011年春季低温工学・超電導学会
55	中西達尚他	昭和電線ケーブルシステム	RF-Sputter法によるRe-123系線材用CeO2中間層の開発(4) 一量産検討とIBAD-MgO基板上の成膜検討-	2010/5/23	第82回2010年春季低温工学・超電導学会
56	林秀美他	九州電力	Y系超電導変圧器の巻線技術の開発	2010/6/12	電気学会超電導応用電力機器研究会
57	Nara N. 他	大陽日酸他	Development of neon refrigerator for HTS power machines	2010/7/21	International Cryogenic Engineering Conference 23
58	Hirai H. 他	大陽日酸他	Development of a neon turbo-compressor with active magnetic bearings	2010/7/21	International Cryogenic Engineering Conference 23
59	Yoshihiro Goshou 他	ISTEC他	Application of IBAD-MgO buffered coated conductors for HTS power transformers	2010/8/1	(ASC2010)Applied Superconductivity Conference
60	H.Fujishiro 他	岩手大学他	Thermal conductivity of YBCO coated conductors reinforced by metal tape	2010/8/1	(ASC2010)Applied Superconductivity Conference
61	岡元 洋	九州電力	超電導変圧器の巻線技術開発(2)-耐短絡特性-	2010/9/2	電気学会B部門大会
62	吉田 茂	大陽日酸(株)	高温超電導電力機器用ブレイトン冷凍機の開発	2010/9/30	(独)科学技術進行機構 戦略的イノベーション創出推進(超電導システム)冷却技術分科会
63	宇都浩史	九州大学他	酸化物超伝導並列導体をコイル状に巻いた際の電流分流通特性	2010/9/25	2010年秋電気関係学会九州連合大会
64	宇都浩史	九州大学他	コイル状酸化物超伝導並列導体の電流分流通特性	2010/9/	低温工学協会 2010年度若手セミナー・支部研究成果発表会
65	堤智章	九州大学他	REBCO超電導変圧器の過大電流に対する応答特性の研究	2010/9/	低温工学協会 2010年度若手セミナー・支部研究成果発表会
66	宇都浩史	九州大学他	酸化物超伝導並列導体をコイル状に巻いた際の電流分流通特性	2010/9/	平成22年度(第63回)電気関係学会九州支部連合大会
67	森脇大輔	九州大学他	超伝導二本転位並列導体の巻き乱れの影響による付加的交流損失に関する検討	2010/9/	平成22年度(第63回)電気関係学会九州支部連合大会
68	堤智章	九州大学他	REBCO超電導変圧器の過大電流に対する応答特性の研究	2010/9/	平成22年度(第63回)電気関係学会九州支部連合大会
69	Takaaki Otona	九州大学他	Sudden short circuit test of a 10kVA 4-winding REBCO superconducting transformer	2010/10/	The 2nd Japan-Korea Superconductivity Workshop 2010
70	Kou Takayama	九州大学他	Study on the current sharing properties of YBCO superconducting parallel conductors wound into pancake coil	2010/10/	The 2nd Japan-Korea Superconductivity Workshop 2010
71	Sousuke Nakam	九州大学他	AC loss of IBAD-PLD 5-filament REBCO coated conductor	2010/10/	The 2nd Japan-Korea Superconductivity Workshop 2010
72	J.Tanigawa et al	九州大学他	EVALUATION OF AC MAGNETIZATION LOSS IN STACKED GdBCO COATED CONDUCTORS	2010/11/1	(ISS2010)International Symposium on Superconductivity
73	A. Tomioka	九州大学他	AC over-current test results of YBCO conductor for power transformer with fault current	2010/11/	23rd International Symposium on Superconductivity (ISS2010)
74	A. Tomioka	九州大学他	The short-circuit test results of the 6.9kV/2.3kV 400kVA-class YBCO model transformer	2010/11/	23rd International Symposium on Superconductivity (ISS2010)
75	林秀美他	九州電力	Development of Coated Conductor based Superconducting Power Transformerの耐短絡特性-	2010/10/28	CCA2010
76	岡元 洋	九州電力	Over current characteristics of model coil using Y-based multi-filament wire for superconducting power transformers	2010/11/1	ISS2010
77	岡元 洋	九州電力	イットリウム系超電導変圧器の巻線技術開発(4)-均電流化と短絡電流特性-	2010/12/1	低温工学・超電導学会
78	谷川 潤弥他	九州大学他	積層した超電導GdBCOコート線材における交流損失の評価	2010/12/1	2010年度秋季低温工学・超電導学会
79	宇都 浩史他	九州大学他	多層コイルに巻いた酸化物超伝導並列導体の電流分流通特性の検討	2010/12/1	2010年度秋季低温工学・超電導学会
80	堤 智章他	九州大学他	REBCO超電導変圧器の過大電流に対する応答特性の検討	2010/12/1	2010年度秋季低温工学・超電導学会
81	森脇 大輔他	九州大学他	超伝導二本転位並列導体の巻き乱れの影響による付加的交流損失に関する検討	2010/12/1	2010年度秋季低温工学・超電導学会
82	岩熊成卓	九州大学他	変電システムと超伝導応用機器	2010/12/	応用物理学会(超伝導分科会 第42回研究会)
83	宇都浩史	九大他	多層コイルに巻いた酸化物超伝導並列導体の電流分流通特性の検討	2011/3/	平成23年電気学会全国大会

84	堤智章	九大他	REBCO超電導変圧器の過大電流に対する応答特性の検討	2011/3/	平成23年電気学会全国大会
85	森脇大輔	九大他	超伝導二本転位並列導体の巻き乱れの影響による付加的交流損失に関する検討	2011/3/	平成23年電気学会全国大会
86	岡元 洋他	九州電力(株)	超電導変圧器の限流機能付加技術	2011/3/18	平成23年電気学会全国大会
87	堤智章他	九州大学他	REBCO超電導変圧器の過大電流に対する応答特性の検討	2011/4月	低温工学 九州・西日本支部 2011年度総会および支部設立10周年記念講演会
88	友田慎一郎他	九州大学他	500kW REBCO半超電導同期モータの設計検討	2011/4月	低温工学 九州・西日本支部 2011年度総会および支部設立10周年記念講演会
89	森脇大輔他	九州大学他	超伝導二本転位並列導体の巻き乱れの修正モデルに関する検討	2011/5/18	低温工学 九州・西日本支部 2011年度総会および支部設立10周年記念講演会
90	宇都浩史他	九州大学他	多層コイルに巻いた酸化超伝導並列導体の電流分流通特性の検討	2011/5/18	低温工学 九州・西日本支部 2011年度総会および支部設立10周年記念講演会
91	内藤 智之他	岩手大学他	YBCO薄膜線材の比熱と熱拡散率	2011/5/18	2011年度春季低温工学・超電導学会
92	宇都 浩史他	九州大学他	パンケーキコイル状酸化超伝導並列導体の電流分流通特性の検討	2011/5/18	2011年度春季低温工学・超電導学会
93	堤智章他	九州大学他	REBCO超電導変圧器の過大電流に対する応答特性の検討	2011/5/18	2011年度春季低温工学・超電導学会
94	友田慎一郎他	九州大学他	500kW REBCO半超電導同期モータの設計検討	2011/5/18	2011年度春季低温工学・超電導学会
95	森脇大輔他	九州大学他	超伝導二本転位並列導体の付加的交流損失に関する検討	2011/5/18	2011年度春季低温工学・超電導学会
96	岡元 洋	九州電力	イットリウム系超電導変圧器の限流機能付加技術開発-限流特性解析-	2011/5/18	低温工学・超電導学会 (春季)
97	柿本 一臣	(株)フジクラ	IBAD/PLD法で作製するRE123長尺線材の品質向上	2011/5/20	2011年春季低温工学・超電導学会
98	S.Yoshida et al.	大陽日酸他	Consideration of sub-cooled LN2 circulation system for HTS power machines	2011/6/16	Cryogenic Engineering Conference
99	H. Hirai et al.	大陽日酸他	Neon turbo-Brayton cycle refrigerator for HTS power machines	2011/6/16	Cryogenic Engineering Conference
100	宇都 浩史他	九州大学他	多層ソレノイドコイルに巻かれた超電導並列導体の電流分流通特性	2011/7月	低温工学・超電導学会 九州・西日本支部 2011年度第3回日韓超電導ワークショップ
101	堤智章他	九州大学他	限流機能付きREBCO超電導変圧器の開発	2011/7月	低温工学・超電導学会 九州・西日本支部 2011年度第3回日韓超電導ワークショップ
102	森脇大輔他	九州大学他	均一磁界中の二本並列導体の付加的交流損失の検討	2011/7月	低温工学・超電導学会 九州・西日本支部 2011年度第3回日韓超電導ワークショップ
103	友田慎一郎他	九州大学他	500kW REBCO半超電導同期モータの設計検討	2011/7月	低温工学・超電導学会 九州・西日本支部 2011年度第3回日韓超電導ワークショップ
104	熊野圭恭他	九州大学他	不均一磁界中の二本並列導体の付加的交流損失の検討	2011/7月	低温工学・超電導学会 九州・西日本支部 2011年度第3回日韓超電導ワークショップ
105	澤田俊幸他	九州大学他	多層パンケーキコイルに巻かれた超電導並列導体の電流分流通特性	2011/7月	低温工学・超電導学会 九州・西日本支部 2011年度第3回日韓超電導ワークショップ
106	S.Yoshida et al.	大陽日酸	Development of Turbo-Brayton refrigerator for HTS Power Machines	2011/8/26	韓国電力 超電導ワークショップ
107	熊野圭恭他	九州大学他	不均一磁界中における超電導二本並列導体の巻き乱れの影響による付加的交流損失に関する検討	2011/9月	電気関係学会九州支部第64回連合大会
108	澤田俊幸他	九州大学他	多層パンケーキコイル状超電導並列導体の電流分流通特性	2011/9月	電気関係学会九州支部第64回連合大会
109	K. Kumano et al.	九州大学他	Specific heat and thermal diffusivity of YBCO coated	2011/9/18	Superconductivity Centennial Conference
110	T. Tsutsumi et al.	九州大学他	Development of REBCO superconducting transformers with current limiting function	2011/9/18	EUCAS-ISEC-ICMC2011
111	藤代博之	岩手大他	YBCO薄膜線材の比熱と熱拡散率	2011/9/18	Superconductivity Centennial Conference
112	五十嵐光則	(株)フジクラ	Advanced development of IBAD/PLD coated conductors at Fujikura	2011/9/20	EUCAS2011
113	K. Kumano	九大他	Theoretical study on ac loss properties of REBCO superconducting two-strand parallel conductors exposed to a non-uniform magnetic field	2011/9/	Superconductivity Centennial Conference EUCAS-ISEC-ICMC 2011
114	林 秀美	九州電力	Development of Superconducting Power Transformers	2011/10/24	ISS2011
115	富岡章	富士電機	The short-circuit test results of 6.9 KV/2.3KV400KVA-class YBCO model transformer with fault current limiting function	2011/10/24	ISS2011
116	岡元 洋	九州電力	Development of REBCO superconducting power transformer	2011/10/28	未踏科学技術協会第15回先進超伝導ワークショップ
117	菊竹亮	(株)フジクラ	Development of 800-m class RE123 coated conductors by IBAD/PLD	2011/10/28	第15回日米先進超伝導ワークショップ
118	A.Tomioka et al.	富士電機他	The short-circuit test results of 400KVA YBCO model transformer with fault current limiting	2011/10月	24th International Symposium on Superconductivity (ISS2011)
119	澤田俊幸他	九州大学他	パンケーキコイルに巻いた超電導並列導体の電流分流通特性	2011/11/9	2011年度秋季低温工学・超電導学会
120	熊野圭恭他	九州大学他	不均一磁界中における超電導二本並列導体の巻き乱れの影響による付加的交流損失に関する検討	2011/11/9	2011年度秋季低温工学・超電導学会
121	尾崎信介他	大陽日酸	ネオン冷凍の開発	2011/11/10	2011年度 秋季低温工学・超電導学会
122	富岡 章他	富士電機他	イットリウム系超電導変圧器の限流機能付加技術開発-モデル変圧器の短絡試験結果-	2011/11/10	2011年度秋季低温工学・超電導学会
123	鈴木 龍次	(株)フジクラ	RE123系線材の剥離強度評価	2011/11/11	2011年秋季低温工学・超電導学会
124	池上俊輔他	大陽日酸	高温超電導電力機器用サブクール液体窒素循環システム	2011/12/2	大陽日酸技報

125	岡元 洋	九州電力	Y系超伝導変圧器の開発について	2011/12/12	金属・セラミック超伝導応用電力機器合同シンポジウム
126	M. Iwakuma	九州大学	Development of HTS power devices	2012/1月	Kyushu University & Changwon National University Joint Workshop 2013 on Superconductivity
127	林 秀美	九州電力	超伝導変圧器の開発	2012/3月	高温超伝導現象と用途開発最前線
128	R. Sakagawa	九大他	The additional ac loss of two-strand parallel conductors in a non-uniform magnetic field	2012/5/	24th Int. Cryogenic Engineering Conf. and Int. Cryogenic Materials Conf. 2012 (ICEC24-ICMC2012)
129	T. Sawad	九大他	Study on the current sharing properties of superconducting parallel conductors wound into pancake coils	2012/5/	24th Int. Cryogenic Engineering Conf. and Int. Cryogenic Materials Conf. 2012 (ICEC24-ICMC2012)
130	M. Iwakuma	九大他	Development of HTS Power Transformer with a function of FCL	2012/5/	2012 Japan-Korea Workshop on Superconducting Technologies for Electric Power System
131	坊野敬昭他	富士電機	Coil winding technology development of Y-based HTS transformer-AC loss measurement results of the model	2012/5/16	ICEC-ICMC2012
132	林 秀美	九州電力	Development of REBCO Power Transformers	2012/5/17	ICEC24-ICMC2012
133	H.Hirai et al.	大陽日酸	Development of neon refrigerator with LN sub-cooler for HTS power equipments	2012/5/17	2012 International cryogenics engineering conference 24 (ICEC 24)
134	T. Naito et al.	岩手大他	Thermal dilatation and internal strain of YBCO coated conductor	2012/5/17	2012 International cryogenics engineering conference 24 (ICEC 24)
135	N.Nakamura	㈱フジクラ	Delamination strength of IBAD/PLD coated conductor	2012/5/17	ICEC24-ICMC2012
136	S.Yoshida	大陽日酸	Neon turbo-Brayton refrigerator for HTS power machines	2012/5/19	Japan-Korea Workshop on Superconducting Technologies for Electric Power System 2012
137	M. Daibo	㈱フジクラ	Fabrication and evaluation of Fujikura's RE-123 CC	2012/5/19	Japan-Korea Workshop on Superconducting Technologies for Electric Power System
138	岩熊成卓	九州大学	ビックアップコイルによる超伝導線材・導体の磁化・交流損失測定	2012/9/	2012年度低温工学・超伝導学会九州・西日本支部若手セミナー
139	片野坂祐太	九大他	6.9kV-400kVA REBCO超伝導変圧器の限流特性	2012/9/	2012年度低温工学・超伝導学会九州・西日本支部若手セミナー
140	坂川涼	九大他	2層にわたる超伝導2本転位並列導体の交流損失特性	2012/9/	2012年度低温工学・超伝導学会九州・西日本支部若手セミナー
141	福田幸弘	九大他	Y系超伝導変圧器の交流損失特性の評価	2012/9/	2012年度低温工学・超伝導学会九州・西日本支部若手セミナー
142	片野坂祐太	九大他	6.9kV-400kVA REBCO超伝導変圧器の限流特性	2012/9/	電気関係学会九州支部第65回連合大会
143	坂川涼	九大他	2層にわたる超伝導2本転位並列導体の交流損失特性	2012/9/	電気関係学会九州支部第65回連合大会
144	福田幸弘	九大他	Y系超伝導変圧器の交流損失特性の評価	2012/9/	電気関係学会九州支部第65回連合大会
145	M. Iwakuma	九大他	Development of REBCO Superconducting Transformers with a Current Limiting Function	2012/10/	2013 Applied Superconductivity Conf. (ASC2012)
146	M. Iwakuma	九大他	Development of a 66kV-20MVA REBCO Superconducting Transformer with a Current Limiting Function	2012/10/	19th Conference on Electric Power Supply Industry
147	澤田俊幸	九大他	酸化物超伝導並列導体をバンケーキコイル状に巻いた際の電流分流通特性	2012/11/	第86回低温工学・超伝導学会
148	片野坂祐太	九大他	6.9kV-400kVA REBCO超伝導変圧器の限流特性	2012/11/	第86回低温工学・超伝導学会
149	坂川涼	九大他	2層にわたる超伝導2本転位並列導体の交流損失特性	2012/11/	第86回低温工学・超伝導学会
150	福田幸弘	九大他	Y系超伝導変圧器の交流損失特性の評価	2012/11/	第86回低温工学・超伝導学会
151	M. Iwakuma	九大他	Development of a 66kV-20MVA REBCO Superconducting Transformer with a Current Limiting Function	2012/11/	International Conference on Coated Conductors for Applications 2012
152	内藤 智之他	岩手大学他	YBCO薄膜線材における熱収縮の安定化銀層厚依存性	2012/11/8	第86回2012年度低温工学・超伝導学会
153	内藤智之	岩手大他	YBCO薄膜線材における熱収縮の安定化銀層厚依存性	2012/12/3	ISS2012
154	尾崎信介他	大陽日酸	オン冷凍機の熱負荷変動に対する制御特性	2012/12/4	大陽日酸技報
155	林 秀美	九州電力	Development of REBCO Power Transformers	2012/12/5	ISS2012
156	岩熊成卓	九大他	限流機能を有する高温超伝導変圧器の開発	2012/12/	応用物理学会 超伝導分科会 第46回研究会

4 超伝導機器用線材の技術開発

番号	発表者	所属	タイトル	発表日	発表先
1	木内 勝他	九州工業大学他	GdBCO+ZrO ₂ コート線材の臨界電流密度の印加磁界角度依存性	2008/5/26	第78回低温工学・超伝導学会
2	松谷 文也他	九州工業大学他	YBCOコート線材における永久電流の緩和特性の超伝導膜厚依存性	2008/5/27	第78回低温工学・超伝導学会
3	姫木携造他	九州工業大学他	CVD法によるYBCO線材の臨界電流特性の超伝導膜厚依存性	2008/5/27	第78回低温工学・超伝導学会
4	姫木携造他	九州工業大学他	広い電界領域におけるCVD法によるYBCO線材の超伝導特性の超伝導膜厚依存性	2008/9/4	第69回応用物理学会
5	松谷 文也他	九州工業大学他	YBCOコート線材における永久電流の緩和特性の超伝導膜厚依存性	2008/9/4	第69回応用物理学会

6	Seiji Adachi et al.	ISTEC	Fabrication of HTS-SQUID with ramp-edge Josephson junctions comprising SmBCO sputtered films for superconducting electrodes	2008/10/27	(ISS2008)International Symposium on Superconductivity
7	Tsunehiro Hato et al.	ISTEC	NDE of coated-conductor using HTS SQUID array	2008/10/27	(ISS2008)International Symposium on Superconductivity
8	Noriko Chikumoto et al.	ISTEC	Development of inside-plume PLD process for the fabrication of large Ic(B) REBCO tapes	2008/10/27	(ISS2008)International Symposium on Superconductivity
9	F.Matsutani et al.	九州工業大学他	Superconducting Layer Thickness Dependence of Relaxation Properties of Persistent Current in High Magnetic Field in YBCO Coated Conductor	2008/10/28	21st Int. Symp. on Supercond.
10	K.Himeki et al.	九州工業大学他	Dependence of Superconducting Layer Thickness on Critical Current Density of IBAD/CVD Processed YBCO Coated Conductors	2008/10/28	21st Int. Symp. on Supercond.
11	H.Washimi et al.	ISTEC	Study on low resistance joining of YBCO coated conductor by Ag diffusion coupling	2008/10/29	(ISS2008)International Symposium on Superconductivity
12	筑本 知子他	ISTEC	In-plume PLD法による高Ic-GdBCO長尺線材の高速成膜	2008/11/12	第79回秋季低温工学・超電導学会
13	町 敬人他	ISTEC	レーザースクライビング法の改良による超電導線材の細線化	2008/11/12	第79回秋季低温工学・超電導学会
14	姫木携造他	九州工業大学他	CVD法によるYBCO線材の超電導特性の超電導層厚依存性(2)	2008/11/12	第79回低温工学・超電導学会
15	淡路 智	東北大学	MOD法によるZr添加RE123膜におけるJc及びBi特性	2008/11/12	2008年秋季低温工学・超電導学会
16	Noriko Chikumoto et al.	ISTEC	Development of high rate deposition technique for PLD-GdBCO Coated Conductors	2008/12/4	CCA2008
17	Yutaka Yamada et al.	ISTEC	Strategy Toward Low Cost Coated Conductor in IBAD-MgO and PLD	2008/12/4	(CCA2008) The Workshop on Coated Conductor for Application
18	Teruo Izumi et al.	ISTEC他	Efforts for Long Length Coated Conductors with High Performance by TFA-MOD Process in Japan	2008/12/4	(CCA2008) The Workshop on Coated Conductor for Application
19	Teruo Izumi et al.	ISTEC	Efforts for Lowering Cost of TFA-MOD Coated Conductors in Japan	2008/12/4	(CCA2008) The Workshop on Coated Conductor for Application
20	Koichi Nakao et al.	ISTEC	Nondestructive characterization of critical current distribution across the width of coated	2008/12/4	CCA2008
21	Masashi Miura et al.	ISTEC他	Isotropic magnetic field angular dependence of critical current of nanoparticles dispersed Y1-xRExBa2Cu3Oy coated conductors	2008/12/5	(CCA2008) The Workshop on Coated Conductor for Application
22	Hiroyuki Fukushima et al.	ISTEC他	Rapid Fabrication of IBAD-MgO and LaMnO3 layers for REBCO Coated Conductor	2008/12/5	(CCA2008) The Workshop on Coated Conductor for Application
23	Keiichi Tanabe et al.	ISTEC	Striation and diffusion joint for coated conductor	2008/12/6	(CCA2008)International Workshop on Coated Conductor for Applications
24	Hiroshi Ichikawa et al.	ISTEC他	Improvement of Production Rate by Modified TFA-MOD Starting Solution	2008/12/6	(CCA2008) The Workshop on Coated Conductor for Application
25	町 敬人	ISTEC	Progress of coated conductors	2009/1/16	金属学会材質研究会
26	安達 成司他	ISTEC	薄膜積層構造を有するHTS-SQUIDの作製とYBCO系長尺線材評価への応用	2009/1/29	電子情報通信学会 超伝導エレクトロニクス研究会
27	筑本 知子	ISTEC	鉄系高温超伝導体の材料物質としてみた物質	2009/3/11	未踏科学技術超伝導科学技術研究会第71回ワークショップ
28	波頭 経裕他	ISTEC	高温超電導SQUIDアレーを用いたY系テープ線材の高速欠陥評価	2009/3/30	応用物理学学術講演会
29	筑本 知子他	ISTEC	PLD-GdBCO線材の臨界電流及び磁束クランプ特性に対するBaZrO3添加効果	2009/3/30	2009年春季応用物理学学術講演会
30	淡路 智	東北大学	MOD法によるRE123テープ線材のJc特性	2009/4/1	2009年春季応用物理学学術講演会
31	筑本 知子他	ISTEC	In-plume PLD 法によるGdBCO長尺線材の高速成膜	2009/5/13	第80回春季低温工学・超電導学会
32	筑本 知子他	ISTEC他	PLD-Y123及びGd123線材のピン止め特性：重イオン照射欠陥とBaZrO3ナノロッドの比較	2009/5/13	第80回春季低温工学・超電導学会
33	町 敬人他	ISTEC	Y系超電導線材のマルチフィラメント化技術の進展	2009/5/13	低温工学
34	吉田 隆他	名古屋大学他	IBAD-MgO上に製膜したYBCO線材の微細構造と磁束ピンニング特性	2009/5/13	2009年度春季低温工学・超電導学会
35	一野 祐亮他	名古屋大学他	Nd:YAGパルスレーザ蒸着法を用いて作製したYBCO薄膜の超伝導特性	2009/5/13	2009年度春季低温工学・超電導学会
36	松谷 文也他	九州工業大学他	TFA-MOD法によるYgBCO線材の臨界電流特性におけるナノ粒子の影響	2009/5/13	低温工学・超電導学会
37	宮原 和矢他	鹿児島大学他	ピックアップコイル群による低損失加工されたHTS線材の電流分布測定	2009/5/13	2009年度春季低温工学・超電導学会
38	淡路 智	東北大学	MOD法RE123線材における強磁場下のn値の挙動	2009/5/13	2009年春季低温工学・超電導学会
39	鈴木 博之他	名古屋大学	YbBCOシード層を用いたIBAD-MgO上YBCO線材の超伝導特性	2009/5/14	春季低温工学・超電導学会
40	宮田 成紀他	ISTEC他	IBAD-MgO膜の表面ラフニング	2009/5/15	低温工学・超電導学会
41	高橋 保夫他	ISTEC他	MOD-RE2Zr2O7を用いたREBCO線材用低コスト基板平坦化技術の開発	2009/5/15	低温工学・超電導学会
42	畠山 英之他	ISTEC他	高速IBAD-MgO用LMOバッファ層の長尺化	2009/5/15	低温工学・超電導学会
43	吉積 正晃他	ISTEC	微細組織制御によるTFA-MOD線材の磁場中特性向上	2009/5/15	低温工学・超電導学会

44	Seiji Adachi et al.	ISTEC	Reproducible Fabrication Process of HTS-SQUIDs with Ramp-edge Josephson Junctions using Superconducting Electrodes of SmBCO and La-doped ErBCO	2009/6/16	(ISEC2009)International Superconductive Electronics Conference
45	Ryo Teranishi et al.	九州大学他	Film Growth of YBa2Cu3Oy Superconductors by Chemical Solution Processing	2009/6/16	The Third International Conference on the Science and Technology for Advanced Ceramics
46	Tsinehiro Hato et al.	ISTEC	High-speed detection of defects in coated conductors using HTS SQUID array	2009/6/17	(ISEC2009)International Superconductive Electronics Conference
47	宮原 和矢他	鹿児島大学他	ピックアップコイル群によるHTS線材内の電流分布測定	2009/8/20	2009年度低温工学協会九州・西日本支部若手セミナー研究成果発表会
48	Takato Machi et al.	ISTEC	Modified process for multifilamentary coated conductors	2009/9/7	(M2S-HTSC)Internatoinal Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity and High-Temperature Superconductors
49	町 敬人他	ISTEC	次世代高温超電導線材における加工と評価の基礎技術	2009/9/7	2009年秋季応用物理学関係連合講演会
50	Y. Ichino et al.	名古屋大学	Film growth for coated conductor-oriented REBa2Cu3Oy films by means of excimer and Nd:YAG pulsed laser deposition method	2009/9/7	(M2S-HTSC)Internatoinal Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity and High-Temperature Superconductors
51	波頭 経裕他	ISTEC	Y系高温超電導分割テープ線材の高速形状測定による欠陥検査	2009/9/8	応用物理学学術講演会
52	河野 丈治他	ISTEC	高温超電導SQUIDグラジオメーターを用いた多層導体の非破壊検査	2009/9/8	応用物理学学術講演会
53	坂井 直道他	ISTEC	銀拡散接合技術を用いたREBCO線材 (RE:Gd,Y)の接合に関する検討	2009/9/8	2009年秋季応用物理学関係連合講演会
54	筑本 知子他	ISTEC	インブルームPLD法で作製したGdBCO線材の臨界電流特性	2009/9/8	2009年秋季応用物理学関係連合講演会
55	安達 成司他	ISTEC	ランプエッジ接合SQUIDアレーにおける特性ばらつき低減	2009/9/8	第70回応用物理学学会学術講演会
56	松谷 文也他	九州工業大学他	TFA-MOD法によるY G d B C O線材の臨界電流特性におけるナノ粒子の影響	2009/9/8	2009年秋季第70回応用物理学学会学術講演会
57	高橋 祐治他	九州工業大学他	CVD法によるYBCOコート線材の磁化緩和特性評価	2009/9/8	2009年秋季第70回応用物理学学会学術講演会
58	井上 昌睦他	九州大学他	IBAD-MgO基板上に作製されたG d B C O線材のJcの温度、磁場、角度依存	2009/9/8	2009年秋季第70回応用物理学学会学術講演会
59	本田 貴裕他	九州大学他	走査型ホール素子磁気顕微鏡システムを用いた高温超伝導線材の交流電流分布の可視化	2009/9/8	2009年秋季第70回応用物理学学会学術講演会
60	一野 祐亮他	名古屋大学	Nd:YAGパルスレーザーを用いてIBAD-MgO基板上に作製したY123薄膜の超伝導	2009/9/8	2009年度秋季応用物理学学会学術講演会
61	鈴木 博之他	名古屋大学	IBAD-MgOテープ上に作製したYBCO線材の低温・高磁場における超伝導特性	2009/9/8	2009年秋季応用物理学学会・学術講演会
62	高橋 駿介他	名古屋大学	IBAD-MgO上PLD-SmBCO線材の磁場中超伝導特性	2009/9/8	第70回応用物理学学会学術講演会
63	宮長 裕二他	九州大学他	TFA-MOD法におけるSn化合物添加YBCO膜の高特性化	2009/9/11	2009年秋季第70回応用物理学学会学術講演会
64	杉本 雅文他	九州大学他	Ni鍍金の結晶粒制御の研究	2009/9/11	2009年秋季第70回応用物理学学会学術講演会
65	寺西 亮他	九州大学他	MOD-YBCO膜へのピンニングセンターの導入による高Jc化	2009/9/11	2009年秋季第70回応用物理学学会学術講演会
66	森 信幸他	九州大学他	REBCO超伝導薄膜線材の接合特性とその要因	2009/9/11	第70回応用物理学学会学術講演会
67	Noriko Chikumoto et al.	ISTEC	Complex pinning behavior of REBCO coated conductors in oblique fields	2009/9/12	The 12th international workshop on vortex matter in superconductors
68	Tsunehiro Hato et al.	ISTEC	Improvement of NDE system with HTS SQUID array for striated coated conductors	2009/9/13	(EUCAS2009)European Conference for Applied Superconductivity
69	Sergey Lee et al.	ISTEC	Up-scaling of in-plume pulsed laser deposition technique for reel-to-reel fabrication of GdBCO coated conductors	2009/9/13	(EUCAS2009)European Conference for Applied Superconductivity
70	Nobuyuki Mori et al.	九州大学他	Effects of uniaxial constant pressures on the joint properties of REBCO coated conductors	2009/9/13	(EUCAS2009)European Conference for Applied Superconductivity
71	Ryo Teranishi et al.	九州大学他	Doping of Tin-oxides for pinning into TFA-MOD YBCO films	2009/9/13	(EUCAS2009)European Conference for Applied Superconductivity
72	M.Kitani et al.	九州工業大学他	Influence of nanoparticles on critical current properties in TFA-MOD processed YGdBCO coated	2009/9/13	(EUCAS2009)European Conference for Applied Superconductivity
73	Y. Ichino et al.	名古屋大学	Critical current density in magnetic fields of REBCO films fabricated by P Nd:YAG pulsed laser	2009/9/13	(EUCAS2009)European Conference for Applied Superconductivity
74	Masateru Yoshizumi et al.	ISTEC他	Recent progress on R&D of TFA-MOD process in Japan	2009/9/14	(EUCAS2009)European Conference for Applied Superconductivity
75	Yutaka Yamada 他	ISTEC他	Progress of IBAD-MgO/PLD Coated Conductor at SRL	2009/9/14	(EUCAS2009)European Conference for Applied Superconductivity
76	Y.Mawatari et al.	産総研他	Alternating current losses in curved superconducting tapes conforming to a cylinder	2009/9/16	(EUCAS2009)European Conference for Applied Superconductivity
77	松谷 文也他	九州工業大学他	TFA-MOD法によるYGdBCO線材の臨界電流特性におけるナノ粒子の影響	2009/9/28	電気学会九州支部
78	中山 祐輔他	九州工業大学他	GdBCOコート線材における磁化損失の形状効果の影響	2009/9/28	電気学会九州支部
79	Yutaka Yamada et	ISTEC	Progress of IBAD-PLD Coated Conductor and HTS High Field Magnet	2009/10/20	(MT2009)International Conference on Magnet Technology

80	Yoshihiro Ishimaru et al.	ISTEC	High-Tc SQUID axial gradiometer with a flux-transformer fabricated on HTS tape	2009/11/2	(ISS2009) International Symposium on Superconductivity
81	Takato Machi et al.	ISTEC	LASER SCRIBING PROCESS AND CHARACTERIZATION FOR MULTI-FILAMENTARY COATED CONDUCTORS	2009/11/2	(ISS2009) International Symposium on Superconductivity
82	Masateru Yoshizumi et al.	ISTEC	Fabrication of high Jc REBCO coated conductors by TFA-MOD method*	2009/11/2	(ISS2009) International Symposium on Superconductivity
83	Koichi Nakaoka et al.	ISTEC	Relationship Between Crystallization Process and Superconducting Properties of YBCO Films by TFA-MOD Method using Starting Solutions with Various	2009/11/2	(ISS2009) International Symposium on Superconductivity
84	Yasunori Mawatari et al.	産総研他	AC losses of power transmission cables with bent superconducting tapes	2009/11/2	(ISS2009) International Symposium on Superconductivity
85	F.Matsutani et al.	九州工業大学他	Influence of nanoparticles on flux pinning properties in TFA-MOD processed YGdBCO coated conductor	2009/11/2	(ISS2009) International Symposium on Superconductivity
86	Y.Nakayama et al.	九州工業大学他	Evaluation of geometrical effect on magnetization loss in GdBCO coated conductors	2009/11/2	(ISS2009) International Symposium on Superconductivity
87	Y.Ichino et al.	名古屋大学	Potential of Nd:YAG Pulsed laser deposition method for coated conductor production	2009/11/2	(ISS2009) International Symposium on Superconductivity
88	鈴木 博之他	名古屋大学	Jc anisotropy for magnetic field angle in YBCO coated-conductor on IBAD-MgO buffer metal tapes	2009/11/2	(ISS2009) International Symposium on Superconductivity
89	吉田 隆他	名古屋大学	Strong c-axis correlated pinning by natural liner defects in REBCO coated conductors	2009/11/2	(ISS2009) International Symposium on Superconductivity
90	Y.Mawatari et al.	産総研他	Ac losses in power transmission cables with curved superconducting tapes	2009/11/2	(ISS2009) International Symposium on Superconductivity
91	Naomichi Sakai et al.	ISTEC	Study on Degradation Characteristic of REBCO Coated Conductor under Various Environmental Stresses	2009/11/3	(ISS2009) International Symposium on Superconductivity
92	Sergey Lee et al.	ISTEC	HIGH-RATE FABRICATION OF GdBCO AND GdBCO/BZO COATED CONDUCTORS BY UP-SCALED IN-PLUME PULSED LASER DEPOSITION TECHNIQUE	2009/11/3	(ISS2009) International Symposium on Superconductivity
93	筑本 知子他	ISTEC	Effect of processing condition on pinning properties of GdBCO tapes fabricated by in-plume PLD process	2009/11/3	(ISS2009) International Symposium on Superconductivity
94	Joji Kawano et al.	ISTEC	Non-destructive evaluation of multilayer conductor using an HTS SQUID gradiometer	2009/11/3	(ISS2009) International Symposium on Superconductivity
95	Keiichi Tanabe et al.	ISTEC	Progress in fabrication and characterization of multi-filamentary coated conductors	2009/11/3	(ISS2009) International Symposium on Superconductivity
96	Yasuo Takahashi et al.	ISTEC他	Planarization of metallic substrate using MOD oxide layer for highly in plane textured IBAD-MgO buffer	2009/11/3	(ISS2009) International Symposium on Superconductivity
97	Akira Ibi et al.	ISTEC	High Ic REBCO coated conductors with high production rate by using IBAD/MPMT-PLD method	2009/11/3	(ISS2009) International Symposium on Superconductivity
98	Masashi Miura et al.	ISTEC他	Irreversibility Line up to 65T in Nanoparticle Dispersed Y1-xGdxBa2Cu3Oy Coated Conductors Derived from the TFA-MOD Process	2009/11/3	(ISS2009) International Symposium on Superconductivity
99	Seiki Miyata et al.	ISTEC他	Characterization of Surface Roughness of Biaxially-Textured	2009/11/3	(ISS2009) International Symposium on Superconductivity
100	Hironobu Hirano et al.	ISTEC他	Improvement of Film Thickness Uniformity in TFA-MOD Coated Conductors	2009/11/3	(ISS2009) International Symposium on Superconductivity
101	Hideyuki Hatakeyama et al.	ISTEC他	Self-Epitaxy of PLD-CeO₂-Layer on IBAD-MgO and LMO Buffer layers	2009/11/3	(ISS2009) International Symposium on Superconductivity
102	Teruo Izumi et al.	ISTEC	R&D of Coated Conductors for Power Applications in Japan	2009/11/3	(ISS2009) International Symposium on Superconductivity
103	T.Yamaguchi 他	住友電気工業	DEVELOPMENT OF BUFFER LAYER ON 30mm WIDE TEXTURED METAL SUBSTRATES FOR REBCO COATED CONDUCTORS	2009/11/3	(ISS2009) International Symposium on Superconductivity
104	Y.Shingai 他	住友電気工業	Development of REBa2Cu3Ox superconducting layers on 30mm wide clad-type textured metal substrate	2009/11/3	(ISS2009) International Symposium on Superconductivity
105	Seiji Adachi et al.	ISTEC	Improved reproducible fabrication process of HTS-SQUIDs with ramp-edge Josephson junctions and multilayer structures	2009/11/4	(ISS2009) International Symposium on Superconductivity
106	T.Maebatake et al.	九州大学他	Effects of joining conditions on the structures and properties of joints of REBCO coated conductors	2009/11/4	(ISS2009) International Symposium on Superconductivity
107	M.Sugimoto et al.	九州大学他	Grain shape control studies of electrodeposited nickel on Hastelloy metal tape	2009/11/4	(ISS2009) International Symposium on Superconductivity
108	N.Mori et al.	九州大学他	In-situ observation and simulation of growth process of faceted RE123 crystals	2009/11/4	(ISS2009) International Symposium on Superconductivity

109	Ryo Teranishi et al.	九州大学他	Influence of tin-compounds addition on crystallinity and microstructure for YBCO films	2009/11/4	(ISS2009)International Symposium on Superconductivity
110	Yuji Miyanaga他	九州大学他	Enhancement of Jc Property of YBCO film with Sn compound addition by TFA-MOD method	2009/11/4	(ISS2009)International Symposium on Superconductivity
111	筑本 知子他	ISTEC	In-plume PLD法でreel-to-reel 成膜したGdBCO線材の磁場中Ic特性	2009/11/18	2009年度秋季低温工学・超電導学会
112	吉積 正晃他	ISTEC	微細組織制御によるTFA-MOD線材の磁場中特性の向上(2)~REBCO+BZO層の結晶成長メカニズム~	2009/11/18	2009年度秋季低温工学・超電導学会
113	三浦 正志他	ISTEC他	ナノ粒子分散TFA-MOD YGdBCO 線材の不可逆磁場特性	2009/11/18	2009年度秋季低温工学・超電導学会
114	宮田 成紀他	ISTEC他	REBa2Cu3O7-d線材用二軸配向基板の配向度を与えるIBAD-MgO層の表面ラフネスの影響	2009/11/18	2009年度秋季低温工学・超電導学会
115	松谷 文也他	九州工業大学他	TFA-MOD法YGdBCO線材の臨界電流特性に及ぼすナノ粒子の影響(2)-角度異存性の評価-	2009/11/18	2009年秋季低温工学超伝導学会
116	馬渡 康徳他	産総研他	電力ケーブルの交流損失における超電導テープ線材の形状効果	2009/11/18	2009年度秋季低温工学・超電導学会
117	宮原 和矢他	鹿児島大学他	ピックアップコイル群によるマルチフィラメントHTS線材の電流分布測定	2009/11/18	2009年度秋季低温工学・超電導学会
118	山田 雄一他	ISTEC他	RE123系線材の曲げひずみ特性	2009/11/19	2009年度秋季低温工学・超電導学会
119	杉本 雅文他	九州大学他	1. IBAD-MgO線材のフラットワイズ曲げ	2009/11/21	平成21年度応用物理学九州支部学術講演会
120	宮永 裕二他	九州大学他	TFA-MOD法におけるSn化合物添加によるYBCO膜の高特性化	2009/11/21	平成21年度応用物理学九州支部学術講演会
121	寺西 亮他	九州大学他	溶融法によるYBa2Cu3Oy超伝導膜の特性に及ぼす原料溶液高純度化の効果	2009/11/21	平成21年度応用物理学九州支部学術講演会
122	前島 徹他	九州大学他	REBCO超伝導薄膜線材の接合特性	2009/11/21	平成21年度応用物理学九州支部学術講演会
123	鯉田 貴也他	九州工業大学他	TFA-MOD法YGdBCO線材の臨界電流特性に及ぼすナノ粒子の影響	2009/11/21	応用物理学会平成21年度九州支部学術講演会
124	Takato Machi et al.	ISTEC	Multi-filamentary process for various coated conductors by laser scribing method	2009/11/22	(CCA2009)International Workshop on Coated Conductor for Applications
125	Keiichi Tanabe他	ISTEC	Nondestructive characterization techniquis for long-length coated conductors	2009/11/22	(CCA2009)International Workshop on Coated Conductor for Applications
126	Yasuo Takahashi et al.	ISTEC他	Improve of surface roughness of metallic substrate using MOD oxide layer for highly in plane textured IBAD-MgO buffer layer	2009/11/22	(CCA2009)International Workshop on Coated Conductor for Applications
127	Masashi Miura et al.	ISTEC他	Irreversibility Line up to 65T in Nanoparticle Dispersed TFA-MOD Y1-xGdxBa2Cu3Oy Coated Conductors	2009/11/22	CCA2009(International Workshop on Coated Conductor for Application)
128	Sergey Lee et al.	ISTEC	High-rate fabrication of GdBCO-based coated conductors by up-scaled in-plume pulsed laser	2009/11/22	(CCA2009)International Workshop on Coated Conductors for Applications
129	Y.Mawatar	産総研	Electromagnetic response of curved superconducting tapes conforming to a cylinder	2009/11/22	(CCA2009)International Workshop on Coated Conductors for Applications
130	Yuichi Yamada et	ISTEC	Strain characteristics on RE123 wires fabricated through IBAD-PLD	2009/12/7	(ACASC2009)Asian Conference on Applied Superconductivity and Cryogenics2009
131	山口 高史他	住友電気工	薄膜高温超電導線材の開発	2009/12/11	第8回低温工学・超伝導若手合同講演会の成果報
132	田辺 圭一	ISTEC	積層型高温SQUIDの開発と応用展開	2010/1/20	日本学術振興会超伝導エレクトロニクス第146委員会研究会
133	河野 丈治他	ISTEC	高温超電導SQUID グラジオメータを用いた多層導体の非破壊検査	2010/1/20	電子情報通信学会
134	Keiichi Tanabe	ISTEC	Recent developments of HTS electronic devices and systems in	2010/2/10	ISIS-18(International Superconductivity Industry Summit)
135	波頭 経裕他	ISTEC	積層型高温超電導SQUIDを用いた非破壊検査システム	2010/3/16	電子情報通信学会
136	塚本 晃他	ISTEC	高温超電導2軸平面型グラジオメータの作製と評価	2010/3/17	2010年春季応用物理学会
137	河野 丈治他	ISTEC	高温超電導SQUIDグラジオメータを用いた多層導体の非破壊検査(II)	2010/3/17	応用物理学関係連合講演会
138	町 敬人他	ISTEC	次世代高温超電導線材の細線加工と特性評価	2010/3/17	2010年春季第57回応用物理関係連合講演会
139	寺西 亮他	九州大学他	TFA-MOD法によるスズ化合物を添加したYBCO膜の高Ic化	2010/3/17	第57回応用物理学関係連合講演会
140	寺西 亮他	九州大学他	REBCO超伝導薄膜線材の接合特性	2010/3/17	第57回応用物理学関係連合講演会
141	鯉田 貴也他	九州工業大学他	TFA-MOD法YGdBCO線材の臨界電流特性に及ぼすナノ粒子の影響	2010/3/17	第57回応用物理学関係連合講演会
142	馬渡 康徳	産総研	垂直磁場中の超伝導薄膜円筒における磁束侵入	2010/3/17	2010年春季第57回応用物理学関係連合講演会
143	片瀬 貴義他	東工大他	鉄系超伝導体Co添加BaFe2As2エピタキシャル薄膜によるジョセフソン接合	2010/3/17	第57回応用物理学関係連合講演会
144	馬渡 康徳	産総研	垂直磁場中の超伝導薄膜円筒における磁束進入	2010/3/18	2010年度春季第57回応用物理学関係連合講演会
145	坂井 直道他	ISTEC他	RE123系線材の特性把握 (1) 過電流劣化と線材剥離に関する検討	2010/5/12	2010年度春季低温工学・超伝導学会
146	山田 雄一他	ISTEC他	RE123系線材の応力-ひずみ特性 (2) 線材製造プロセスと曲げひずみ特性	2010/5/12	2010年度春季低温工学・超電導学会
147	鯉田 貴也他	九州工業大学他	ナノ粒子を導入したTFA-MOD法YGdBCO線材における磁束ピンニング特性	2010/5/12	2010年春季低温工学・超電導学会
148	馬渡 康徳他	産総研他	二層超電導電力ケーブルにおける交流損失の解析的モデル	2010/5/12	2010年度春季低温工学・超電導学会
149	鯉田 貴也他	九州工業大学他	ナノ粒子を導入したTFA-MOD法YGdBCO線材における磁束ピンニング特性	2010/5/12	2010年春季低温工学・超電導学会

150	金光 雅也他	早稲田大学他	REBCO超電導線材の過電流パルス通電による特性劣化要因について	2010/5/12	2010年度春季低温工学・超電導学会
151	鯉田 貴也他	九州大学他	ナノ粒子を導入したTFA-MOD法YGdBCO線材における磁束ピンニング特性	2010/5/12	2010年春季低温工学・超電導学会
152	川畑 秋馬他	鹿児島大学他	ピックアップコイル群によるマルチフィラメントHTS模擬線材の電流分布測定	2010/5/12	2010年度秋季低温工学・超電導学会
153	本間 久雄他	ISTEC他	Cuメッキ実用RE123系線材とコイル化の検討	2010/5/13	2010年度春季低温工学・超電導学会
154	筑本 知子他	ISTEC他	In-plume PLD 法 GdBCO 線材の磁場中Ic特性と磁束ピン止め機構	2010/5/13	2010年度春季低温工学・超電導学会
155	吉積 正晃他	ISTEC	BaZrO3ナノ粒子の分布によるTFA-MOD線材の磁場中特性変化	2010/5/13	2010年度春季低温工学・超電導学会
156	昌山 英之他	ISTEC	IBAD-MgOの表面状態とCeO2キャップ層面内配向度の関係	2010/5/13	2010年度春季低温工学・超電導学会
157	宮田 成紀他	ISTEC他	IBAD-MgO二軸配向膜における配向度の膜厚依存性と表面粗さ-配向過程における臨界膜厚-	2010/5/13	2010年度春季低温工学・超電導学会
158	前島 徹他	九州大学他	希土類系超伝導薄膜線材の接合	2010/6/5	日本金属学会九州支部 日本鉄鋼協会九州支部平成22年度合同学術講演会
159	寺西 亮他	九州大学他	化学溶融法により作製したYBCO超伝導薄膜の電流特性高性能化	2010/6/5	日本金属学会九州支部 日本鉄鋼協会九州支部平成22年度合同学術講演会
160	K.Yamada et al.	九州大学他	GdBCO超電導体における人工ピンニングセンターの3次元電子線トモグラフィ法による定量解析	2010/6/5	H22年度日本金属学会九州支部学術講演会
161	町 敬人他	ISTEC他	超電導変圧器のためのY系線材の細線化加工	2010/6/11	電気学会研究会
162	Kenji Kaneko et al.	九州大学他	3D analysis of pinning centers in Superconductive GdBCO	2010/6/24	The 2nd International Symposium on Advanced Microscopy and Theoretical Calculations,AMTC2
163	Yuichi Yamada et al.	ISTEC他	Ic-bending strain characteristics of RE123 wires under various fabrication processes	2010/7/20	(ICEC-ICMC)International Cryogenic Engineering Conference -International Cryogenic Materials Conference
164	Akira Tsukamoto et al.	ISTEC	Fabrication of Integrated Two Axis High-Tc Planar Gradiometer	2010/8/1	(ASC2010)Applied Superconductivity Conference
165	Masateru Yoshizumi	ISTEC他	TFA-MOD derived coated conductors with high Ic property under magnetic fields	2010/8/1	(ASC2010)Applied Superconductivity Conference
166	Y.Mawatari et al.	産総研他	Analytical model of the ac losses in power cables with two layer superconducting tapes	2010/8/2	(ASC2010)Applied Superconductivity Conference
167	Sergey Lee et al.	ISTEC	Progress in fabrication of high-performance long length GdBCO coated conductors by in-plume pulsed laser deposition technique	2010/8/3	(ASC2010)Applied Superconductivity Conference
168	加藤 丈晴他	JFCC他	インパルスレーザー蒸着法により形成されたGdBa2Cu3Oy 超電導層の微細構造解析	2010/9/2	日本金属学会第147回大会
169	Akira Ibi	ISTEC他	Fabrication and Superconducting Properties in Magnetic Field of Long REBCO Coated Conductors with Artificial Pinning Centers by using IBAD/PLD Method	2010/9/3	CCA 2010
170	筑本 知子他	ISTEC他	Ba(Fe, Co)2As2単結晶の臨界電流特性	2010/9/14	2010年秋季第71回応用物理学会学術講演会
171	高橋 佑弥他	名古屋大学他	IBAD-MgO上に作製したLTG-SmBCO線材の厚膜化	2010/9/14	応用物理学会学術講演会
172	波頭 経裕他	ISTEC	テープ線材高品質化に向けた全長非破壊検査	2010/9/15	2010年秋季第71回応用物理学会学術講演会
173	坂井 直道他	ISTEC	RE123系テープ線材の層間密着性に関する検討	2010/9/16	2010年秋季第71回応用物理学会学術講演会
174	Kenji Kaneko et al.	九州大学他	3D analysis of pinning centers in Superconductive GdBa2Cu3O7-	2010/9/23	IMC-17・国際顕微鏡学会大7回大会
175	Kenji Kaneko et al.		3D analysis of pinning centers in Superconductive GdBa2Cu3O7-	2010/9/23	IMC-17・国際顕微鏡学会大7回大会
176	山田 和広他	九州大学他	MOD-YGdBCOにおけるBZOの電子線トモグラフィ法による3次元可視化	2010/9/25	日本金属学会 第147回大会
177	馬渡 康徳他	産総研他	横磁場中の超電導管状線材における交流損失	2010/9/27	2010年度秋季低温工学・超電導学会
178	Teruo Izumi	ISTEC	Challenges in Development of Coated Conductor in Japan	2010/10/1	(ISIS) International Superconductivity Industry Summit
179	Teruo Izumi et al.	ISTEC	Review on the National Superconductivity Projects in Japan	2010/10/27	(日韓Workshop) Japan-Korea Superconductivity Workshop 2010
180	Y.Mawatari et al.	産総研他	AC losses in superconducting tubular wires in transverse	2010/10/28	(CCA2010)International Workshop on Coated Conductors for Applications
181	Teruo Izumi et al.	ISTEC他	Pinning Control Processing in TFA-MOD Films	2010/10/28	(CCA 2010)International Workshop on Coated Conductors for Applications 2010
182	Takato Machi et al.	ISTEC	Reduction of ac-loss in coated conductors with multi-filamentary structure fabricated by improved laser scribing technique	2010/10/28	(CCA 2010)International Workshop on Coated Conductors for Applications 2010
183	T. Kato et al.	JFCC他	Transmission Electron Microscopy Study of YxGd1-xBa2Cu3Oy Coated Particles	2010/10/28	(CCA 2010)International Workshop on Coated Conductors for Applications 2010
184	S. Hanyu et al.	フジクラ	Long-length RE123 coated conductors by IBAD/PLD method in Fujikura	2010/10/28	(CCA 2010)International Workshop on Coated Conductors for Applications 2010
185	Y. Aoki et al.	昭和電線ケーブルシステム	Present status of batch type TFA-MOD process for coated conductors	2010/10/29	International Workshop on Coated Conductors for Applications

186	馬渡 康徳他	産総研他	Minimization of ac losses in power cables with two layers of superconducting tapes	2010/11/1	(ISS2010) International Symposium on Superconductivity
187	K.Yamada et al.	ISTEC	THICKNESS DEPENDENCE OF I_c AND J_c OF LTG-SmBCO COATED-CONDUCTOR ON IBAD-MgO TAPES	2010/11/1	(ISS2010) International Symposium on Superconductivity
188	.Koida et al.	九州工業大学他	FLUX PINNING PROPERTIES IN TFA-MOD PROCESSED YGdBCO COATED CONDUCTOR WITH NANOPARTICLES	2010/11/1	(ISS2010) International Symposium on Superconductivity
189	Y.Mawatari et al.	産総研他	Minimization of ac losses in power cables with two layers of superconducting tapes	2010/11/1	(ISS2010) International Symposium on Superconductivity
190	K.Yamada et al.	九州大学他	EVALUATION OF AC MAGNETIZATION LOSS IN STACKED GdBCO COATED CONDUCTORS	2010/11/1	(ISS2010) International Symposium on Superconductivity
191	Yuichi Yamada et al.		BENDING STRAIN CHARACTERISTICS OF RE123 WIRES MADE BY VARIOUS	2010/11/1	(ISS2010) International Symposium on Superconductivity
192	Noriko Chikumoto et al.	ISTEC	FLUX PINNING CHARACTERISTICS OF Ba(Fe _{1-x} Cox) ₂ As ₂	2010/11/1	(ISS2010) International Symposium on Superconductivity
193	Noriko Chikumoto et al.	ISTEC	IN-FIELD -I _c CHARACTERISTICS OF GdBCO COATED CONDUCTORS FABRICATED BY REEL-TO-REEL "IN-PLUME" PULSED LASER DEPOSITION TECHNIQUE	2010/11/1	(ISS2010) International Symposium on Superconductivity
194	Koichi Nakaoka	ISTEC	INVESTIGATION ON CRYSTAL GROWTH OF REB2Cu3Oy COATED CONDUCTORS DERIVED FROM TFA-MOD METHOD	2010/11/1	(ISS2010) International Symposium on Superconductivity
195	Takefumi Ito et al.	ISTEC	IMPROVEMENT OF IBAD-MgO TEXTURING FOR HIGH THROUGHPUT OF BUFFERED	2010/11/1	(ISS2010) International Symposium on Superconductivity
196	Naomichi Sakai et al.	ISTEC	Study on delamination behavior of RE123 coated conductor	2010/11/1	(ISS2010) International Symposium on Superconductivity
197	Akira Ibi et al.	ISTEC	Investigation of high J_c REBCO layers on IBAD templates by using	2010/11/1	(ISS2010) International Symposium on Superconductivity
198	Masateru Yoshizumi et al.	ISTEC	Recent progress in R&D of TFA-MOD coated conductors at ISTEC	2010/11/1	(ISS2010) International Symposium on Superconductivity
199	Teruo Izumi et al.	ISTEC	Efforts for Applicable Coated Conductors in Japan	2010/11/1	(ISS2010) International Symposium on Superconductivity
200	Hideyuki Hatakeyama et al.	ISTEC	EFFECT OF DEFECTS IN PLD-CeO ₂ LAYER ON SUPERCONDUCTING AND MECHANICAL PROPERTIES OF COATED	2010/11/1	(ISS2010) International Symposium on Superconductivity
201	Yasuo Takahashi et al.	ISTEC	Low cost RE-Zr-O nucleation layer by MOD process on Hastelloy tapes for the highly in-plane textured IBAD-MgO	2010/11/1	(ISS2010) International Symposium on Superconductivity
202	T. Kato et al.	JFCC他	TEM Observation of GdBa ₂ Cu ₃ O _y Coated Conductor fabricated by In-Plume Pulsed Laser Deposition	2010/11/1	(ISS2010) International Symposium on Superconductivity
203	K. Fukunaga,	JFCC他	Observation of Double Cu-O Chain in GdxY1-xBa2Cu7-y Using Scanning Transmission Electron Microscopy	2010/11/1	(ISS2010) International Symposium on Superconductivity
204	Y. Iijima et al.	フジクラ	DEVELOPMENT OF COATED CONDUCTORS BY IBAD-PLD APPROACH	2010/11/1	(ISS2010) International Symposium on Superconductivity
205	K. Kakimoto et al.	フジクラ	LONG RE123 COATED CONDUCTORS WITH HIGH CRITICAL CURRENT OVER 500 A/cm BY IBAD/PLD TECHNIQUE	2010/11/1	(ISS2010) International Symposium on Superconductivity
206	M. Daibo et al.	フジクラ	CHARACTERISTICS OF THE CRYO-COOLED PANCAKE COIL USING REBCO COATED CONDUCTOR	2010/11/1	(ISS2010) International Symposium on Superconductivity
207	Y. Aoki et al.	昭和電線ケーブルシステム他	Recent Status of Batch Type TFA-MOD Process for Coated Conductors at Showa Cable Systems	2010/11/2	(ISS2010) International Symposium on Superconductivity
208	T. Nakanishi et al.	昭和電線ケーブルシステム他	Development of CeO ₂ Buffer Layer for Coated Conductors by RF-	2010/11/2	(ISS2010) International Symposium on Superconductivity
209	T. Koizumi et al.	昭和電線ケーブルシステム他	Development of The Long YBCO Coated Conductor using TFA-MOD Process	2010/11/2	(ISS2010) International Symposium on Superconductivity
210	永山 隼人他	九州大学他	ナノ粒子を導入したTFA-MOD法YGdBCO線材の印加磁界角度による磁束ピンニング特性	2010/12/1	2010年度秋季低温工学・超電導学会
211	鯉田 貴也他	九州大学他	ナノ粒子を導入したTFA-MOD法YBCO線材の印加磁界角度による磁束ピンニング特性	2010/12/1	2010年度秋季低温工学・超電導学会
212	山田 雄一他	ISTEC他	RE123系線材の応力 - ひずみ特性 (3) 不可逆曲げひずみ特性	2010/12/1	2010年度秋季低温工学・超電導学会
213	中岡 晃一他	ISTEC	TFA-MOD法によるYBCO線材作製における結晶成長機構	2010/12/1	2010年度秋季低温工学・超電導学会
214	坂井 直道他	ISTEC	RE123線材の特性把握 (2) 各種環境ストレスに対する劣化限界の検討	2010/12/1	2010年度秋季低温工学・超電導学会
215	町 敬人他	ISTEC	Y系超電導線材のレーザースクライビング加工の歩留り向上	2010/12/1	2010年度秋季低温工学・超電導学会
216	筑本 知子他	ISTEC	In-plume PLD 法で作製したGdBCO線材の磁場中I _c 特性とBaSnO ₃ 添加効果	2010/12/1	2010年度秋季低温工学・超電導学会
217	西山 武志他	九州大学他	MOD法により作製されたYGdBCOにおけるBZOの電子線トモグラフィによる解析	2010/12/4	第52回日本顕微鏡会九州支部総会・学術講演会

218	和泉 輝郎	ISTEC	超伝導科学技術研究会ワークショップ「省エネ・低炭素社会を目指す取り組みと超伝導」ー電力応用に向けた超伝導材料開発の現状ー	2010/12/15	応用物理学会超伝導分科会第42回研究会、第76回超伝導科学技術研究会ワークショップ
219	中西達尚他	昭和電線ケーブルシステム他	RF-Sputtering法によるRe-123系線材用CeO2中間層の開発 (5) O基板上の成膜検討の進捗状況ー	2010/12/20	第83回2010年秋季低温工学・超電導学会
220	木村一成他	昭和電線ケーブルシステム他	人工ピン導入によるTFA-MOD法YGdBCO線材の磁場中特性向上	2010/12/20	第83回2010年秋季低温工学・超電導学会
221	加藤 丈晴他	JFCC他	FIB-SEM デュアルビーム装置を用いた積層材料の微細構造解析	2011/1/17	ナノ界面を用いるサイエンスとその解析に関する研究会
222	永水 隼人他	九州大学他	人工ピンを導入したTFA-MOD法YGdBCO線材の臨界電流密度特性	2011/3/24	2011年春季 第58回応用物理学関係連合講演会
223	木内 勝他	九州工業大学他	厚さの異なるGdBa2Cu301- コート線材の臨界電流密度の磁界角度依存性	2011/3/24	2011年春季 第58回応用物理学関係連合講演会
224	町 敬人他	ISTEC	Y系高温超電導線材のスクライピング加工の長尺化	2011/3/24	2011年春季 第58回応用物理学関係連合講演会
225	波頭 経裕他	ISTEC	テープ線材の全長非破壊検査による剥離の検討	2011/3/24	2011年春季 第58回応用物理学関係連合講演会
226	筑本 知子他	ISTEC	In-plume PLD法で作製したBaSnO3添加GdBCO線材のピン止め特性	2011/3/24	2011年春季 第58回応用物理学関係連合講演会
227	西山 武志他	九州大学他	YxGd1-xBa2Cu307-x中のBaZrO3の電子線トモグラフィによる解析	2011/3/25	日本金属学会第148回大会
228	福永啓一他	JFCC他	レーザー顕微鏡および透過電子顕微鏡を用いた超電導線材の複合評価	2011/5/16	日本顕微鏡学会 第67 回学術講演
229	吉田竜視他	JFCC他	PLD-GdBCO 線材の線材幅方向における微細構造比較	2011/5/16	日本顕微鏡学会 第67 回学術講演
230	中尾 公一他	ISTEC	Y系超電導線材のレーザースクライピング加工の長尺化	2011/5/18	2011年度春季低温工学・超電導学会
231	セルゲイ・リー他	ISTEC	In-plume PLD法で作製したBSO添加GdBCO線材のピン止め特性	2011/5/18	2011年度春季低温工学・超電導学会
232	山田 雄一他	ISTEC	RE123系線材の応力-ひずみ特性(4) 実用線材のひずみ特性	2011/5/18	2011年度春季低温工学・超電導学会
233	中岡 晃一他	ISTEC	TFA-MOD法によるBZOピン導入YGdBCO線材磁場中高Ic化技術の開発	2011/5/18	2011年度春季低温工学・超電導学会
234	永田広大他	鹿児島大学他	ピックアップコイル群によるマルチフィラメントGdBCO模擬線材の電流分布	2011/5/18	2011年度春季低温工学・超電導学会
235	林 卓矢他	九州大学他	REBCO超伝導テープ線材のピンニングロスに関する新現象	2011/5/18	2011年度春季低温工学・超電導学会
236	鯉田 貴也他	九州大学他	ナノロッドを導入したPLD法GdBCOコート線材の臨界電流特性に及ぼす超電導層膜厚の影響	2011/5/18	2011年度春季低温工学・超電導学会
237	永水隼人他	九州大学他	重イオンを照射したGdBCO線材における臨界電流密度の印加磁界角度依存性	2011/5/18	2011年度春季低温工学・超電導学会
238	和田純他	九州大学他	PLD法GdBCO線材の臨界電流密度の印加磁界角度依存性	2011/5/18	2011年度春季低温工学・超電導学会
239	町 敬人他	ISTEC	MOD-YBCO超電導長尺分割線材の低交流損失化	2011/5/18	2011年度春季低温工学・超電導学会
240	高橋佑弥他	名古屋大学他	IBAD-MgO上に作製したLTG-SmBCO線材の低温超伝導特性	2011/5/18	2011年度春季低温工学・超電導学会
241	久保 勇人他	名古屋大学他	Sm-rich層積層化によるSmBCO線材の磁場中Ic特性	2011/5/18	2011年度春季低温工学・超電導学会
242	K. Kaneko et al.	九州大学他	Application of Electron Tomography on Superconductors	2011/5/26	5th Congress of International Union of Microbeam Analysis Societies
243	K. Yamada et al.	九州大学他	Three-Dimensional Analysis by Electron Tomography of BaZrO ₃ Nanoparticles in Y _{1-x} Gd _x Ba ₂ Cu ₃ O _y Superconductor Films	2011/5/26	5th Congress of International Union of Microbeam Analysis Societies
244	横江大作他	JFCC他	インブルームPLD 法を用いたBaSnO3 ナノロッド導入GdBa2Cu30y 超電導層のTEM 観察	2011/6/30	第42 回 東海若手セラミスト懇話会 2011 年夏期セミナー
245	加藤丈晴他	JFCC他	イットリウム系超電導線材の電子顕微鏡による微細構造解析	2011/7/8	JFCC2011 年度 研究成果発表会
246	吉田竜視他	JFCC他	FIB-SEM デュアルビーム装置を用いた三次元解析技術	2011/7/8	JFCC2011 年度 研究成果発表会
247	高橋 保夫他	ISTEC	TFA-MOD法によるREBCO線材の開発	2011/7/18	2011年度第3回 日韓超電導ワークショップ
248	中尾 公一他	ISTEC	Y系高温超電導線材の細線加工の高速化と品質向上	2011/8/29	2011年秋季 第72回 応用物理学会学術講演会
249	鯉田 貴也他	九州大学他	ナノロッドを導入したPLD法GdBCOコート線材の臨界電流特性に及ぼす超電導層膜厚の影響	2011/8/29	2011年秋季 第72回 応用物理学会学術講演会
250	塚本 晃他	ISTEC	超電導テープ線材評価用高温超電導	2011/8/29	2011年秋季 第72回 応用物理学会学術講演会
251	西山 武志他	九州大学他	Y1-xGdxBa2Cu307-y中におけるBaZrO3の電子線トモグラフィによる解析	2011/9/6	日本顕微鏡学会 第27回分析電子顕微鏡討論会
252	加藤丈晴他	JFCC他	インブルームレーザー蒸着法により成膜されたGdBa2Cu30y 超電導層の微細構造解析	2011/9/7	日本セラミックス協会 第24 回秋季シンポジウム
253	Takato Machi et al.	ISTEC	Reduction of AC-loss by fabricating multi-filamentary structure on coated conductor	2011/9/18	EUCAS-ISEC-ICMC2011
254	K. Kaneko et al.	九州大学他	Three-dimensional nanoscale characterization of various pinning centers in GdBa2Cu307- -type	2011/9/18	EUCAS-ISEC-ICMC2011
255	Masateru Yoshizumi et al.	ISTEC	Improvement of in-field characteristics of TFA-MOD derived coated conductores	2011/9/18	EUCAS-ISEC-ICMC2011

256	Takuya Hayashi et al.	九州大学他	AC loss properties of laser-scribed multi-filamentary GdBCO coated conductors with artificial pinning centres	2011/9/18	EUCAS- ISEC- ICMC2011
257	F.Sumiyoshi et al.	鹿児島大他	Improved Poynting's Vector Method: AC Loss Vector Method: AC Loss Measurement of Measurement of	2011/9/18	EUCAS- ISEC- ICMC2011
258	吉田竜視	JFCC	FIB-SEM デュアルビーム装置を用いた三次元解析技術	2011/10/20	明日を拓くモノづくり新技術2011
259	Takeshi Nishiyama et al.	九州大学他	THEEE-DIMENSIONAL CHARACTERIZATION BY STEM-TOMOGRAOHY OF BZO IN YGdBCO	2011/10/24	(ISS2011)International Symposium on Superconductivity
260	Takato Machi et al.	ISTEC	Filamentarization of coated conductors by using modified laser scribing method	2011/10/24	(ISS2011)International Symposium on Superconductivity
261	Naomichi Sakai et al.	ISTEC	INFLUENCE OF DEFECT ON DELAMINATION OF RE123 COATED CONDUCTO	2011/10/24	(ISS2011)International Symposium on Superconductivity
262	Akira Ibi et al.	ISTEC	Development of high performance IBAD/PLD long REBCO coated	2011/10/24	(ISS2011)International Symposium on Superconductivity
263	Yuji Takagi et al.	ISTEC	Development of high performance IBAD/PLD long REBCO coated	2011/10/24	(ISS2011)International Symposium on Superconductivity
264	Yuji Takagi et al.	ISTEC	Development of high-Ic processing for low cost YBaCo coated conductor by a multi-turn reel-to-reel	2011/10/24	(ISS2011)International Symposium on Superconductivity
265	Takaya Koida et al.	九州大学他	Influence of superconducting layer thickness on critical current property in PLD processed GdBCO coated conductors with nanorods	2011/10/24	(ISS2011)International Symposium on Superconductivity
266	J. Wada et al.	九州工業大学他	Influence of Superconducting Layer Thickness on Critical Current Density Properties in GdBCO Coated Conductors Using Ni-clad Substrate	2011/10/24	(ISS2011)International Symposium on Superconductivity
267	Koichi Nakaoka et al.	ISTEC	High-rate fabrication of YBCO coated conductors using TFA-MOD method	2011/10/24	(ISS2011)International Symposium on Superconductivity
268	Hiroshi Tobita et al.	ISTEC	Improvement of in-fields Ic characteristics by BHO (=BaHfO3) doping into PLD-GdBCO coated conductors	2011/10/24	(ISS2011)International Symposium on Superconductivity
269	Kota Katayama et al.	ISTEC	AC loss reduction of TFA-MOD coated conductors in long length by laser scribing	2011/10/24	(ISS2011)International Symposium on Superconductivity
270	Yasuo Takahashi et al.	ISTEC	Preparation of BZO doped YdGBCO coated conductor with high in-field-Ic by TFA-MO	2011/10/24	(ISS2011)International Symposium on Superconductivity
271	T. Shibamoto et al.	名古屋大学他	CHARACTERISTICS OF YBa ₂ Cu ₃ O _{7-x} COATED CONDUCTORS PREPARED BY IN-PLUME PLD METHOD	2011/10/24	(ISS2011)International Symposium on Superconductivity
272	I. Ono et al.	名古屋大学他	HIGH-MATERIAL YIELD FABRICATION OF YBCO COATED CONDUCTORS BY MULTI-TURN Nd:YAG-PLD SYSTEM	2011/10/24	(ISS2011)International Symposium on Superconductivity
273	T. Kato et al.	JFCC他	Nanostructural Characterization of YxGd1-xBa2Cu3Oy layers with BaZrO3 particles Fabricated by Metal Organic deposition	2011/10/24	24rd International Symposium on Superconductivity (ISS2011)
274	K. Kimura et al.	昭和電線ケーブルシステム	Improvement of magnetic properties for long YdGBCO coated conductors using TFA-MOD process	2011/10/24	ISS2011
275	Masateru Yoshizumi et al.	ISTEC	Introduction of artificial pinning centers into RE123 coated conductors	2011/10/28	The 15th Japan-US Workshop on Advanced Superconductors
276	西山 武志他	九州大学他	Y1-xGdxBa2Cu3O7-y中におけるBaZrO3のトモグラフィによる解	2011/11/7	日本金属学会2011年秋期大会
277	加藤丈晴他	JFCC他	配向金属基板上的GdBa2Cu3Oy 線材のTEM観察	2011/11/7	(社) 日本金属学会2011年秋期 (第149 回) 大会
278	中岡 晃一他	ISTEC	TFA-MOD法によるBZOピン導入YGdBCO磁場中高Ic化線材の開発(2)	2011/11/9	2011年度秋季低温工学・超電導学会
279	山田 穰他	ISTEC	RE123系線材の応力-ひずみ特性(5) 実用線材のひずみ特性	2011/11/9	2011年度秋季低温工学・超電導学会
280	川鍋良平他	九州大学他	REBCO超電導テープ線材のピンニングロスに関する新現象(2)	2011/11/9	2011年度秋季低温工学・超電導学会
281	重森 正隆他	ISTEC	RE123系線材の剥離に対する欠陥の影響	2011/11/9	2011年度秋季低温工学・超電導学会
282	高橋 保夫他	ISTEC	マルチターン式Reel-to-Reelシステムを用いた高特性MOD-YBCO長尺線材の開発	2011/11/9	2011年度秋季低温工学・超電導学会
283	中尾 公一他	ISTEC	レーザースクライビング加工によるマルチフィラメント化プロセスの高速化	2011/11/9	2011年度秋季低温工学・超電導学会
284	衣斐 顕他	ISTEC	BaHfO3 導入によるPLD-GdBCO線材の磁場中Ic特性の向上	2011/11/9	2011年度秋季低温工学・超電導学会
285	木内勝他	九州工業大学他	RE系コート線材の縦磁界下での臨界電流密度依存性	2011/11/9	2011年度秋季低温工学・超電導学会
286	和田純他	九州工業大学他	配向クラッド基板PLD法GdBCO線材の臨界電流密度の印加磁界角度依存性	2011/11/9	2011年度秋季低温工学・超電導学会
287	木村 一成他	昭和電線ケーブルシステム	バッチ式プロセスを用いるTFA-MOD法YGdBCO線材の磁場中特性向上	2011/11/9	第85回2011年秋季低温工学・超電導学会
288	衣斐 顕他	ISTEC	PLD法 RE123テープ線材の臨界電流特性の異常な磁界角度依存性	2011/11/10	2012年度秋季低温工学・超電導学会
289	永水 隼人他	九州工業大学他	BHOピンを導入したPLD法GdBCO線材の臨界電流密度特性	2011/11/11	2013年度秋季低温工学・超電導学会

290	加藤丈晴	JFCC	FIB-SEM デュアルビーム装置を用いたインプラームPLD-GdBCO 超電導線材の3次元構造解析	2011/11/24	「製鋼における無機材料物質の分析法」フォーラム
291	田邊 賢次郎他	九州工業大学他	BZOピンを導入したPLD法GdBCO線材の臨界電流密度特	2011/11/26	平成23年度応用物理学九州支部学術講演会
292	西山 武志他	九州大学他	PLD-GdBa ₂ Cu ₃ O _{7-x} 中におけるBaHfO ₃ の3次元形態および分散状態の解析	2011/12/3	第53回日本顕微鏡学会九州支部総会・学術講演会
293	H.nagamizu	九州工業大学他	Flux Pinning Properties of BHO Pinning Centers in GdBCO Coated Conductors	2011/12/5	(MEM11)6th Workshop of Mechanical-Electromagnetic Properties of Superconducting materials
294	J. Wada	九州工業大学他	Influence of Y ₂ O ₃ Seed Layer on the Critical Current Density in GdBCO Coated Conductors with Ni-clad Substrate	2011/12/5	(MEM11)7th Workshop of Mechanical-Electromagnetic Properties of Superconducting materials
295	加藤丈晴	JFCC	FIB-SEM デュアルビーム装置を用いたGdBa ₂ Cu ₃ O ₇ 超電導線材の3次元構造解析	2011/12/16	平成23年度「マテリアル電子線トモグラフィ研究部会」
296	D. Yokoe et al.	JFCC他	Transmission Electron Microscopy study of GdBa ₂ Cu ₃ O _{7-x} Containing Nano-Sized BaMO ₃ (M:Hf, Zr, Sn) Rods Fabricated by Pulsed Laser	2012/1/19	International Symposium on Role of Electron Microscopy in Industry
297	T. Kato et al.	JFCC他	Nanostructural characterization of GdBa ₂ Cu ₃ O ₇ coated conductor fabricated by in-plume pulsed laser deposition	2012/3/4	第4回先進プラズマ科学と窒化物及びナノ材料への応用に関する国際シンポジウム ISPlasma2012
298	中尾 公一他	ISTEC	改良型レーザースクライピングによる分割数向上の試み	2012/3/15	2012年春季 第59回 応用物理学関係連合講演会
299	永水 隼人他	九州工業大学他	BHOピンを導入したPLD法GdBCO線材の磁束ピンニング特性	2012/3/15	2012年春季 第59回 応用物理学関係連合講演会
300	山田 和広他	九州大学他	PLD法により作製したGdBa ₂ Cu ₃ O ₇ 厚膜中におけるBaHfO ₃ の電子線トモグラフィ法による3次元解析	2012/3/15	2012年春季 第59回 応用物理学関係連合講演会
301	田邊賢次郎他	九州工業大学他	BHO ピンを導入したPLD 法GdBCO 線材の磁束ピンニング特性	2012/3/15	2012年春季 第59回 応用物理学関係連合講演会
302	和田純他	九州工業大学他	配向クラッド基板PLD法GdBCO線材の臨界電流密度に与えるY ₂ O ₃ 種層の影響	2012/3/15	2012年春季 第59回 応用物理学関係連合講演会
303	加藤丈晴他	JFCC他	二段階熱処理によるMOD 超電導層の微細構造解析	2012/3/28	日本金属学会2012 年春期 (150 回) 大会
304	T. Kato et al.	JFCC	Nanostructural Characterization of Y _x Gd _{1-x} Ba ₂ Cu ₃ O ₇ layers containing BaZrO ₃ particles Fabricated by Metal Organic deposition	2012/4/9	2012 MRS Spring Meeting
305	Takanobu Kiss	九州大学	Coated Conductors - 20 Year History, Status, and Prospects	2012/4/9	2012 MRS Spring Meeting
306	T. Kiss et al.	九州大学	Significant Enhancement of In-field Critical Current in GdBCO Coated Conductors by BaHfO ₃ Addition in Pulsed Laser Deposition	2012/4/9	2012 MRS Spring Meeting
307	T. Kiss et al.	九州大学	Coordinated Analysis of Current Limiting Obstacles in Sm ₁ Ba ₂ Cu ₃ O _{7-x} Coated Conductors by Hybrid Microscopy Techniques	2012/4/9	2012 MRS Spring Meeting
308	K. Higashikawa et al.	九州大学	Estimation of Local Current Transport Properties in Thin Film Superconductor Based on Scanning Hall-probe	2012/4/9	2012 MRS Spring Meeting
309	淡路 智	東北大学	Low Temperature Flux Pinning Properties of RE123 Coated Conductors with nanorod	2012/4/12	2012MRS
310	T. Kato et al.	JFCC	Transmission Electron Microscopy Study of Y _x Gd _{1-x} Ba ₂ Cu ₃ O ₇ Layers with BaZrO ₃ Particles Fabricated by Metal Organic Deposition	2012/5/9	The 3rd International Symposium on Advanced Microscopy and Theoretical Calculations (AMTC3)
311	Kota Katayama et al.	ISTEC	AC loss reduction of TFA-MOD coated conductors in long length by laser scribing	2012/5/14	ICEC24-ICMC2012(International Cryogenic Engineering Conference 24-International Cryogenic Materials Conference 2012)
312	Yuji Takagi et al.	ISTEC	Development of TFA-MOD derived YBCO coated conductors by multi-turn reel-to-reel system (2)	2012/5/14	ICEC24-ICMC2012(International Cryogenic Engineering Conference 24-International Cryogenic Materials Conference 2012)
313	Takahiro Taneda et al.	ISTEC	Grain/crystallite size dependence on self-epitaxy of buffer layer for coated conductors	2012/5/14	ICEC24-ICMC2012(International Cryogenic Engineering Conference 24-International Cryogenic Materials Conference 2012)
314	Machi Takato et al.	ISTEC	Filamentarization of coated conductors by modified laser scribing method	2012/5/14	ICEC24-ICMC2012(International Cryogenic Engineering Conference 24-International Cryogenic Materials Conference 2012)
315	Tomohiro Takagi et al.	ISTEC	The Effect of Artificial Pinning Centers on HTS Coil Characteristic	2012/5/14	ICEC24-ICMC2012(International Cryogenic Engineering Conference 24-International Cryogenic Materials Conference 2012)
316	K. Kimura et al.	昭和電線ケーブルシステム他	Improvement of magnetic field properties of YGdBCO coated conductor by TFA-MOD	2012/5/14	24th International Cryogenic Engineering Conference-International Cryogenic Materials Conference 2012
317	加藤丈晴他	JFCC	二段焼成によるMOD超電導層の微細構造解析	2012/5/14	日本顕微鏡学会 第68回学術講演会
318	横江大作他	JFCC	BaMO ₃ (M:Hf, Zr, Sn) ピン導入GdBa ₂ Cu ₃ O ₇ 層の微細構造解析	2012/5/14	日本顕微鏡学会 第68回学術講演会
319	T. Kato et al.	JFCC	Nanostructural Characterization of Y _x Gd _{1-x} Ba ₂ Cu ₃ O ₇ layers containing BaZrO ₃ particles Fabricated by TFA-MOD process	2012/5/14	International Cryogenic Engineering Conference 24-International Cryogenic Materials Conference 2012

320	K. Fukunaga et al.	JFCC	Transmission Electron Microscopic Observation of BaZrO in GdYBaCuO Coated by MOCVD	2012/5/14	International Cryogenic Engineering Conference 24- International Cryogenic Materials Conference 2012
321	J. Wada et al.	九州工業大学他	Influence of Y ₂ O ₃ seed layer on critical current density in GdBCO coated conductor with Ni-clad substrat	2012/5/14	ICEC24- ICMC2012
322	H. Nagamizu et al.	九州工業大学他	Flux pinning properties of BHO pinning centers in GdBCO coated conductors	2012/5/14	ICEC24- ICMC2012
323	西山武志	九州大学他	PLD-GdBa ₂ Cu ₃ O _{7-x} 厚膜中におけるBaHfO ₃ のSTEMトモグラフィ法による解析	2012/5/15	日本顕微鏡学会 第68回学術講演会
324	R. Teranishi et al	九州大学	Growth process of BaZrO ₃ doped YBCO films by MOD method using tri-fluoroacetates	2012/5/15	ICEC24- ICMC2012
325	T. Kiss et al	九州大学	Multi-scale, multi-physics characterization to realize high performance Gd ₁ Ba ₂ Cu ₃ O _{7-x} coated conductors	2012/5/15	ICEC24- ICMC2012
326	鈴木 匠	東北大学	Low Temperature Jc Property of RE123 Coated Conductors with Artificial Pinning Center	2012/5/16	2012ICEC- ICMS
327	N.Nakamura et al.	フジクラ	Delamination strength of IBAD/PLD coated conductor	2012/5/17	ICEC24- ICMC2012
328	作田大夢他	鹿児島大他	Improved Poynting 's Vector Method: Estimations of Electromagnetic Properties of HTS Tapes Simultaneously Exposed to AC Transport Currents and External Magnetic Fields	2012/5/17	The 24th International Cryogenic Engineering Conference and the International Cryogenic Materials Conference 2012
329	Masateru Yoshizumi	ISTEC	Recent progress of R&D coated conductors	2012/5/19	2012Japan-Korea Workshop
330	M. Daibo et al.	フジクラ	Fabrication and evaluation of Fujikura 's RE-123 CC	2012/5/19	Japan-Korea Workshop on Superconducting Technologies for Electric Power System
331	T. Kiss et al	九州大学	Characterization of HTS wire for power device application	2012/5/19	2012 Japan-Korea Workshop on Superconducting Technologies for Electric Power System
332	木須 隆暢	九州大学	第三世代線材への期待	2012/5/21	超電導技術動向報告会2012
333	加藤文晴	JFCC	RE123導体のミクロな組織の特徴	2012/5/31	電気学会「先進超電導材料の組織・組成と特性に関する調査専門員会」
334	西山武志	九州大学他	GdBa ₂ Cu ₃ O _{7-x} 厚膜中におけるBaHfO ₃ の電子線トモグラフィ法による解析	2012/6/9	日本金属学会・日本鉄鋼協会・軽金属学会九州支部共催平成24年度合同学術講演会
335	横江大作他	JFCC	BaMo ₃ (M: Hf, Zr, Sn)ナノロッド導入 GdBa ₂ Cu ₃ O _{7-x} 層の微細構造解析	2012/6/28	第44回東海若手セラミスト懇話会2012年夏期セミナー
336	加藤文晴他	JFCC	ナノ粒子が分散した超電導線材の電子顕微鏡による微細構造解析	2012/7/6	JFCC2012年度 研究成果発表会
337	T. Goto	東北大	Laser Chemical Vapor Deposition for Structural and Functional Applications	2012/7/20	Lecture at University of South Dakota
338	T. Nishiyama et al.	九州大学他	Three-dimensional characterization of BaZrO ₃ precipitates in Y _{1-x} Gd _x Ba ₂ Cu ₃ O _{7-y} prepared by TFA-MOD using STEM-tomography	2012/8/2	The 8th International Forum on Advanced Materials Science and Technology
339	T. Kiss et al	九州大学	Recent advancement and future prospects of coated conductor technologies	2012/8/9	The 2nd Korea Japan Superconducting Technologies for Electric Power System
340	M. Inoue et al	九州大学	In-field current transport properties in advanced GdBCO coated	2012/8/9	The 2nd Korea Japan Superconducting Technologies for Electric Power System
341	K. Higashikawa et al.	九州大学	Nondestructive Rtr characterization of long GdBCO coated conductor	2012/8/9	The 2nd Korea Japan Superconducting Technologies for Electric Power System
342	T. Goto et al.	東北大	High-Speed Deposition of Super-Conducting Film by Laser CVD for Rare-Metal Substitution	2012/8/27	12 nd International Symposium on Novel and Nano Materials (ISNNM-2012)
343	加藤文晴他	JFCC	BaZrO ₃ ナノ粒子導入Y _{1-x} Gd _x Ba ₂ Cu ₃ O _{7-y} 超電導層の微細構造解析	2012/8/31	電子顕微鏡解析技術フォーラム
344	西山武志	九州大学他	GdBa ₂ Cu ₃ O _{7-x} におけるBaHfO ₃ のSTEMトモグラフィ法による解析	2012/9/5	第28回分析電子顕微鏡討論会
345	町 敬人他	ISTEC	改良型レーザースクライビングによる分割数向上の試み	2012/9/11	2012年秋季 第73回応用物理学会学術講演会
346	坂井 直道他	ISTEC	RE123系線材の耐剥離性 - MODベッド線材の剥離強度と熱処理の関係-	2012/9/11	2012年秋季 第73回応用物理学会学術講演会
347	宮田 成紀他	ISTEC	IRレーザーアシストCVD法を用いたYBa ₂ Cu ₃ O _{7-x} 薄膜の高速成膜とその超電導特性の評価	2012/9/11	2012年秋季 第73回応用物理学会学術講演会
348	久保真人他	名古屋大学	微量のBaHfO ₃ を添加したYBa ₂ Cu ₃ O _{7-x} 薄膜の低磁場下における磁束ピンニング特性	2012/9/11	2012年秋季第73回応用物理学会学術講演会
349	木須 隆暢 他	九州大学	BaHfO ₃ 添加によるGdBCO線材の磁場中電流輸送特性の向上とマグネット応用へのインパクト	2012/9/11	第73回応用物理学会学術講演会
350	寺西 亮 他	九州大学	Ag安定化層を利用したGdBa ₂ Cu ₃ O _{7-y} テープ線材の接続抵抗の発生要因	2012/9/11	第73回応用物理学会学術講演会
351	永水隼人他	九州工業大学他	BHOピンを導入したPLD法GdBCO線材における磁界中の臨界電流密度の改善	2012/9/11	応用物理学会
352	諏訪友音	東北大学	GdBCO線材の臨界電流に与えるひずみ印加方向の影響	2012/9/12	2012応用物理学会秋期講演会, 口頭発表
353	淡路 智	東北大学	BaHfO ₃ 添加Gd123テープ線材におけるJ _c 特性	2012/9/12	2012応用物理学会秋期講演会, 口頭発表

354	西山武志	九州大学他	PLD-GdBa ₂ Cu ₃ O _{7-x} 中におけるBaHfO ₃ の電子線トモグラフィによる解析	2012/9/17	日本金属学会2012年秋期講演大会
355	加藤丈晴他	JFCC	二段焼成による有機酸塩塗布熱分解法により形成されたY _x Gd _{1-x} Ba ₂ Cu ₃ O ₇ 超電導層のTEM観察	2012/9/19	日本セラミックス協会第25回秋季シンポジウム
356	P. Zhao et al.	東北大学	Microstructure and electrical performances of YBa ₂ Cu ₃ O ₇ films on Hastelloy C276 tape by laser CVD using single liquid source	2012/9/19	日本セラミックス協会第25回秋季シンポジウム
357	Teruo Izumi	ISTEC	Recent Trend & New Future Prospect on R&D of Coated Conductors	2012/9/23	IUMRS-ICEM2012(International Union of Materials Research Societies-International Conference on Electronic Materials)
358	Takato Machi et al.	ISTEC	Filamentarization and characterization of coated conductors	2012/9/23	IUMRS-ICEM2012(International Union of Materials Research Societies-International Conference on Electronic Materials)
359	淡路 智	東北大学	Effect of Nanorods on Low Temperature J _c properties in GdBCO Coated Conductors	2012/9/27	2012 IUMRS
360	T. Kiss et al.	九州大学	Present status and future prospects of critical currents in Gd ₁ Ba ₂ Cu ₃ O ₇ coated conductors	2012/9/27	IUMRS-ICEM 2012
361	後藤 孝	東北大学	レーザーを用いた材料創製の新展開	2012/10/1	東北大学クロスオーバー
362	T. Koizumi	昭和電線ケーブルシステム	Recent status of development of MOD coated conductor in SWCC	2012/10/4	国際超電導産業サミット (ISIS-21)
363	Koichi Nakaoka et al.	ISTEC	Effect of solution composition on superconducting properties of YBCO derived from TFA-MOD process	2012/10/7	ASC2012(Applied Superconductivity Conference)
364	Masateru Yoshiuzumi et al.	ISTEC	Introduction of BaMO ₃ (M=Metal) nanorods into GdBCO coated conductors for high in-field I _c	2012/10/7	ASC2012(Applied Superconductivity Conference)
365	Takahiro Taneda et al.	ISTEC	Mechanism of self-epitaxy in buffer layer for coated conductors	2012/10/7	ASC2012(Applied Superconductivity Conference)
366	K. Kimura et al.	昭和電線ケーブルシステム他	Development of REBCO coated conductors by TFA-MOD method with high characteristic in magnetic field	2012/10/8	Applied Superconductivity Conference
367	小黒英俊	東北大学	Relation between crystal axis and strain dependence of critical current density under tensile strain for GdBCO coated conductor	2012/10/8	2012 ASC
368	鈴木匠	東北大学	Improvement of J _c for REBCO Coated Conductor by Annealing under Strain	2012/10/8	2012 ASC
369	T. Matsushita et al.	九州工業大学他	Flux pinning properties of BHO pinning centers at high magnetic fields in GdBCO coated conductor	2012/10/8	Appl. Supercond. Conf
370	K. Higashikawa et al.	九州大学	Lateral distribution of critical current density in coated conductors slit by different	2012/10/10	2012 Applied Superconductivity Conf. (ASC2012)
371	T. Kiss et al.	九州大学	Multi-scale and multi-physics analysis of REBa ₂ Cu ₃ O ₇ coated conductors	2012/10/10	2012 Applied Superconductivity Conf. (ASC2012)
372	K. Higashikawa et al.	九州大学	Reel-to-reel scanning Hall-probe microscopy for in-plane distribution of critical current density in long coated conductors	2012/10/10	2012 Applied Superconductivity Conf. (ASC2012)
373	M. Inoue et al.	九州大学	Enhancement of in-field current transport properties in GdBa ₂ Cu ₃ O ₇ coated conductor by BaHfO ₃ doping	2012/10/10	2012 Applied Superconductivity Conf. (ASC2012)
374	T. Kiss et al.	九州大学	Estimation of angular dependent J _c in coated conductors by magnetic moment vector measurements	2012/10/10	2012 Applied Superconductivity Conf. (ASC2012)
375	宮田 成紀他	ISTEC	IRレーザー-CVD法を用いた厚膜 YBa ₂ Cu ₃ O _{7-d} 試料の作製	2012/11/7	2012年度秋季低温工学・超電導学会研究発表会
376	坂井 直道他	ISTEC	PLD-GdBCO線材の耐剥離性とレーザースクライプ加工の影響に関する検討	2012/11/7	2012年度秋季低温工学・超電導学会研究発表会
377	広長 隆介他	昭和電線ケーブルシステム他	TFA-MOD法を用いたY系超電導線材の特性向上	2012/11/7	第86回2011年秋季低温工学・超電導学会
378	木村 一成他	昭和電線ケーブルシステム他	パッチ式プロセスを用いたTFA-MOD法 REBCO線材の磁場中特性向上	2012/11/7	第86回2011年秋季低温工学・超電導学会
379	平山斉他	鹿児島大他	ピックアップコイル群による5mm幅10分割マルチフィラメントHTS線材の電流分布測定	2012/11/7	2012年度秋季低温工学・超電導学会
380	和田純他	九州工業大学他	配向クラッド基板PLD法GdBCO線材の成膜速度が臨界電流密度に与える影響	2012/11/7	低温工学・超電導学会
381	永水隼人他	九州工業大学他	BHOピンを導入したPLD法GdBCO線材の臨界電流密度特性(2)	2012/11/7	低温工学・超電導学会
382	高木 智洋	ISTEC	イットリウム系レーズトラック型コイルの交流損失評価	2012/11/8	2012年度秋季低温工学・超電導学会研究発表会
383	町 敬人他	ISTEC	レーザースクライピング法による次世代線材のマルチフィラメント	2012/11/8	2012年度秋季低温工学・超電導学会研究発表会
384	東川 甲平 他	九州大学	長尺コート線材における臨界電流の幅方向分布の連続非接触計測	2012/11/11	第86回低温工学・超電導学会
385	Seiki Miyata et al.	ISTEC	YBCO Coated Conductor Fabrication by IR-Laser-Assisted Chemical vapor Deposition	2012/11/14	(CCA2012)International workshop on coated conductor for applications

386	Teruo Izumi	ISTEC	Improvement of In-field Performances in Coated Conductors by APC Introduction	2012/11/14	(CCA2012)Conference on Coated conductors for applications
387	Teruo Izumi	ISTEC	Overview of R&D on Coated Conductors and Applications in	2012/11/14	(CCA2012)Conference on Coated conductors for applications
388	Kouta Katayama et al.	ISTEC	Development of fabrication technique for low AC loss TFA-MOD coated conductors	2012/11/14	(CCA2012)Conference on Coated conductors for applications
389	T. Kato et al.	JFCC	Transmission Electron Microscopy Study of $Y_xGd_{1-x}Ba_2Cu_3O_y$ Coated Conductors Containing $BaZrO_3$ Particles	2012/11/14	International Conference on Coated Conductors for Applications (CCA2012)
390	T. Kiss et al.	九州大学	Improvement of in-field current carrying capability and spatial homogeneity in IBAD based coated conductors	2012/11/14	Int. Workshop on Coated Conductors for Applications (CCA2012)
391	T. Kiss et al.	九州大学	Noncontact reel-to-reel characterization of in-plane J_c distribution in slit and multifilamentary coated conductors	2012/11/14	Int. Workshop on Coated Conductors for Applications (CCA2012)
392	T. Matsushita et al.	九州工業大学他	Enhancement of flux pinning strength and upper critical field by BHO nano-rods in GdBCO coated	2012/11/14	Conf. on Coated Cond. For Appl.
393	伊藤暁彦	東北大	レーザー-CVDによる特異なナノ構造を持つセラミックスコーティング	2012/11/16	平成 24 年度テクニカルセンター職員研修
394	T. Goto	東北大	Development of Functional Ceramic Films by Laser Chemical Vapor Deposition	2012/11/29	Materials Science Week 2012
395	T. Kiss	九州大学	Recent advancement and future prospects of coated conductor technologies	2012/11/30	Summit of Materials Science (SMS2012)
396	横江大作他	JFCC	$BaMO_3$ (M: Hf, Zr, Sn) ナノロッドが導入された $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ 超電導層の微細構造解析	2012/12/1	平成24年度日本セラミックス協会東海支部学術研究発表会
397	福永啓一他	JFCC	レーザー顕微鏡および電子顕微鏡を用いたYBCO系超電導線材の複合評価	2012/12/1	平成24年度日本セラミックス協会東海支部学術研究発表会
398	T. Kato et al.	JFCC	Electron Holograph Study for Vortices Trapped in ab Plane of $GdBa_2Cu_3O_y$ Layer Containing $BaHfO_3$	2012/12/3	25rd International Symposium on Superconductivity (ISS2012)
399	Y. Sawano et al.	名古屋大学	Superconducting property of $BaHfO_3$ doped $SmBa_2Cu_3O_y$ films prepared by alternating-targets technique on IBAD-MgO	2012/12/3	25th International Symposium on Superconductivity 2012
400	H. Kubo et al.	名古屋大学	Improvement of flux pinning properties of $YBa_2Cu_3O_y$ thin films in low magnetic fields by introducing small amount of $BaHfO_3$	2012/12/3	25th International Symposium on Superconductivity 2012
401	T. Matsushita	九州工業大学他	Flux pinning mechanism of BHO nano-rods in GdBCO coated conductors	2012/12/3	ISS2012
402	J. Wada et al.	九州工業大学他	Influence of fabrication speed on critical current density in GdBCO coated conductor with Ni-clad substrate	2012/12/3	ISS2012
403	Tomohiro Takagi et al.	ISTEC	Experimental and Analytical Evaluation of the Loss of REBCO Coil in Alternating Current	2012/12/4	(ISS2012)International Symposium on Superconductivity
404	Naomichi Sakai et al.	ISTEC	INFLUENCE OF PROCESSING AND MACHINING CONDITIONS ON DELAMINATION OF RE123 COATED	2012/12/4	(ISS2012)International Symposium on Superconductivity
405	Takahiro Taneda et al.	ISTEC	MECHANISM OF SELF-EPITAXY IN BUFFER LAYERS FOR COATED CONDUCTORS	2012/12/4	(ISS2012)International Symposium on Superconductivity
406	Koichi Nakaoka et al.	ISTEC	Improvement of critical current property in YBCO coated conductors with high production rate using TFA-MOD method	2012/12/4	(ISS2012)International Symposium on Superconductivity
407	Tomo Yoshida	ISTEC	Fabrication of 10m-long $Gd_1Ba_2Cu_3O_{7-x} + BaHfO_3$ coated conductors with high I_c -B property and high uniformity by IBAD/PLD	2012/12/4	(ISS2012)International Symposium on Superconductivity
408	Yuji Takagi et al.	ISTEC	Effect of interim annealing on J_c property and crystal growth of TFA-MOD derived YBCO	2012/12/4	(ISS2012)International Symposium on Superconductivity
409	Tatsunori Nakamura et al.	ISTEC	DEVELOPMENT OF BZO DOPED YGdBCO THICK FILMS USING TFA-MOD PROCESS	2012/12/4	(ISS2012)International Symposium on Superconductivity
410	Masateru Yoshiuzumi et al.	ISTEC	Recent progress in development of TFA-MOD process for REBCO coated conductors with high properties	2012/12/4	(ISS2012)International Symposium on Superconductivity
411	Teruo Izumi	ISTEC	R&D Aiming at Absolutely Superior Coated Conductors	2012/12/4	(ISS2012)International Symposium on Superconductivity
412	R. Hironaga et al.	昭和電線ケーブルシステム他	Improvement of super-conducting characteristics of YBCO coated conductor using TFA-MOD method	2012/12/4	24 st International Symposium on Superconductivity
413	K. Kimura et al.	昭和電線ケーブルシステム他	Improvement of magnetic properties of YGdBCO coated conductors fabricated by TFA-MOD process	2012/12/4	24 st International Symposium on Superconductivity

414	T. Nishiyama et al.	九州大学他	Three-dimensional analysis of BaHfO ₃ precipitates in GdBa ₂ Cu ₃ O _y via scanning transmission electron tomography	2012/12/4	25th International Symposium on Superconductivity
415	K. Kaneko et al.	九州大学他	Three-dimensional characterization of artificial pinning centers in high temperature superconductors by three-dimensional electron	2012/12/4	25th International Symposium on Superconductivity
416	K. Higashikawa et al.	九州大学	Nondestructive reel-to-reel characterization system for in-plane 2D distribution of critical current density in long coated	2012/12/4	25th Int. Sympo. on Superconductivity (ISS2012)
417	T. Kiss et al.	九州大学	Magnetic moment in Gd _{1-x} Ba _{2-x} Cu ₃ O _{7-y} coated conductor under inclined external magnetic field	2012/12/4	25th Int. Sympo. on Superconductivity (ISS2012)
418	R. Teranishi et al.	九州大学	Microstructures and J _c properties in magnetic fields of YBCO films by TFA-MOD solutions with SnO ₂ nano particles	2012/12/4	25th Int. Sympo. on Superconductivity (ISS2012)
419	M. Inoue et al.	九州大学	In-field current transport property of high I _c Y _x Gd _{1-x} Ba ₂ Cu ₃ O _y coated conductors fabricated by TFA-MOD process	2012/12/4	25th Int. Sympo. on Superconductivity (ISS2012)
420	淡路 智	東北大学	J _c Properties of the Nanorod-introduced RE123 films on Metallic and Single-crystalline Substrates.	2012/12/5	ISS2012
421	T. Goto	東北大学	Development of Functional Ceramic Films by Laser Chemical Vapor Deposition	2012/12/7	北京技科大—東北大学 学術セミナー
422	P. Zhao et al.	東北大学	High-speed preparation of (100)-oriented CeO ₂ films on Hastelloy C276 tape by laser chemical vapor deposition using single liquid	2013/1/9	日本セラミックス協会第51回基礎科学討論会
423	M. Inoue et al.	九州大学	Enhancement of In-Field Current Transport Property in High Temperature Superconducting Tape	2013/1/11	2013 Int. Sympo. on Information Science and Electrical Engineering (ISEE2013)
424	K. Higashikawa et al.	九州大学	Impact of Performance Improvement of RE-123 Coated Conductor on Magnet Applications	2013/1/11	2013 Int. Sympo. on Information Science and Electrical Engineering (ISEE2013)
425	Teruo Izumi	ISTEC	Present Status and Future Prospect of R&D on Coated Conductors and Applications in Japan	2013/1/23	Electronic Materials and Applications 2013
426	D. Yokoe et al.	JFCC	Nanostructural Characterization of GdBa ₂ Cu ₃ O _y Containing Nano-Sized BaMO ₃ (M: Hf, Zr, Sn) Rods Fabricated by Pulsed Laser	2013/1/28	第5回先進プラズマ化学と窒化物及びナノ材料への応用に関する国際シンポジウム
427	諏訪友音	東北大学	Effect of applied strain direction on critical current of GdBCO coated conductor	2013/3/14	MEM13
428	吉田竜視他	JFCC	YBa ₂ Cu ₃ O _y 超電導層内部構造の三次元分布解析	2013/3/17	第38回セラミックスに関する顕微鏡写真展
429	町 敬人他	ISTEC	Y系線材のレーザースクライビング技術の進展	2013/3/27	2013年応用物理学学会春季学術講演会
430	加藤丈晴他	JFCC	電子線ホログラフィー観察によるBaHfO ₃ ナノロッド分散GdBa ₂ Cu ₃ O _y 超電導層にとらわれた磁束量子の挙動	2013/3/27	日本金属学会2013年春期 (152回) 大会
431	加藤丈晴他	JFCC	FIB-SEMデュアルビーム装置によるGdBa ₂ Cu ₃ O _y 超電導層の3次元観察	2013/3/27	第63回金属組織写真賞
432	木内勝他	九州工業大学他	BHOピンを導入したPLD法GdBCO線材における磁界中の臨界電流密度特性の改善	2013/3/27	応用物理学学会
433	羽生智	フジクラ	FABRICATION AND EVALUATION OF FUJIKURA'S GdBCO TAPE	2011/10月	ISS2011
434	菊竹亮	フジクラ	Development of 800-m class RE123 coated conductors by IBAD/PLD	2011/10月	第15回日米先進超伝導ワークショップ
435	鈴木 龍次	フジクラ	RE123系線材の剝離強度評価	2011/11月	2011年度秋季低温工学・超電導学会
436	林 卓矢他	九州大学他	REBCO超電導テープ線材の交流損失特性	2011/4月	低温工学 九州・西日本支部 2011年度総会および支部設立10周年記念講演会
437	西山武志他		Y _x Gd _{1-x} Ba ₂ Cu ₃ O _{7-y} 中におけるBaZrO ₃ の電子線トモグラフィによる解析	2011/4月	低温工学 九州・西日本支部 2011年度総会および支部設立10周年記念講演会
438	柿本 一臣	フジクラ	IBAD/PLD法で作製するRE123長尺線材の品質向上	2011/5月	2011年度春季低温工学
439	林 卓矢他	九州大学他	マルチフィラメント構造を持つREBCO超伝導テープ線材の交流損失特性	2011/7月	低温工学・超電導学会 九州・西日本支部 2011年度第3回日韓超電導ワークショップ
440	川鍋良平他	九州大学他	REBCO超伝導テープ線材の交流損失特性への温度スケールリング	2011/7月	低温工学・超電導学会 九州・西日本支部 2011年度第3回日韓超電導ワークショップ
441	川鍋良平他	九州大学他	スクライビングによる低損失化を目指したREBCO超伝導テープ線材の交流損失	2011/9月	電気関係学会九州支部第64回連合大会
442	五十嵐光則	フジクラ	Advanced development of IBAD/PLD coated conductors at Fujiikura	2011/9月	EUCAS2011
443	樋川 一好他	名古屋大学	IBAD-MgO基板上に作製したBaHfO ₃ 添加GdBa ₂ Cu ₃ O _y 薄膜の磁場中I _c 向上	2013/3月	2013年春季応用物理学学会学術講演会
444	東川 甲平 他	九州大学	RE-123線材における局所I _c の長手方向分布の評価とその空間スケール依存性に関する考察	2013/3月	平成24年電気学会全国大会

【受賞・褒賞】

番号	タイトル	受賞者	受賞日
1	日本金属学会材料プロセッシング部門 第18回奨励賞	三浦正志 (ISTEC)	2008/9/23
2	低温工学協会 2009年度 奨励賞	三浦正志 (ISTEC)	2009/5/14
3	電気学会優秀論文発表賞「Y系超電導線材の高性能化とスループット向上」	朽網寛 (株フジクラ)	2010/3/31
4	未踏科学技術協会 超伝導科学技術賞 特別賞	塩原融 (ISTEC)	2010/4/13
5	低温工学協会 優秀発表賞「66kV/3kA級薄膜超電導ケーブルの交流損失特性」	大屋正義 (住友電工)	2010/5/13
6	電気学会 電力エネルギー部門「研究・技術功労賞」	林秀美 (九州電力)	2010/9/2
7	第59回電気科学技術奨励賞「電力機器応用に向けた低	和泉輝郎他 (ISTEC)	2011/11/23
8	電気学会 学術振興賞進歩賞	九州電力	2011/5月
9	低温工学・超伝導関西若手奨励賞) 「150m級P	山口高史 (住友電気工業)	2011年

【成果の普及・プレス発表】

番号	タイトル	発表者	発表日	発表形態 発表先
1	北海道洞爺湖サミットの「環境ショーケース」に超電導ケーブルを	古河電気工業	2008/7/7-9	展示
2	ISS2008出展	ISTEC他	2008/10/28-29	展示
3	2008秋季低温工学超電導学会出展	住友電気工業他	2008/11/12-13	展示
4	高温超電導線材生産コスト半減、フジクラ、送電線など向け	フジクラ	2008/12/10	日経産業新聞他
5	エコプロダクツ2008出展	ISTEC他	2008/12/11-13	展示
6	イットリウム系超電導線供給体制構築	フジクラ	2009/2/17	日刊工業新聞
7	2009春季低温工学超電導学会出展	フジクラ他	2009/5/13-15	展示
8	エコメッセ千葉2009出展	古河電気工業	2009/9/6	展示
9	CEATEC JAPAN 2009	フジクラ	2009/10/6-10	展示
10	イットリウム系酸化物超電導線材 高磁場下での超電導電流を世界で初めて実証	ISTEC	2009/11/2	日刊工業新聞他
11	2009秋季低温工学超電導学会出展	大陽日酸他	2009/11/18-20	展示
12	エコプロダクツ2009出展	ISTEC他	2009/12/10-12	展示
13	イットリウム系低磁性配向基板線材で世界初の高速化、高性能化に成功	NEDO	2010/2/12	NEDOホームページ
14	イットリウム系超電導線材 開発用設備を増強 住友電工、製造能力1.5	住友電気工業	2010/3/30	日刊工業新聞
15	2010春季低温工学超電導学会出展	フジクラ他	2010/5/12-14	展示
16	グリーン発電&スマートグリッドフェア2010	フジクラ	2010/7/14-16	展示
17	第7回日本加速器学会年会出展	フジクラ	2010/8/4-6	展示
18	イットリウム系超電導変圧器の耐短絡強度、限流機能を検証	九州電力他	2010/8月	プレス発表
19	電気学会平成22年電力・エネルギー部門大会	九州電力	2010/9/1-3	展示
20	スマートグリッドEXPO	フジクラ	2011/2/29-3/2	展示
21	2011春季低温工学・超電導学会併	フジクラ	2011/5/18-20	展示
22	「世界最高電圧の275kv超電導ケーブルを開発」-火力発電所1基分の電力を超電導ケーブル1回線で送電可能-	古河電気工業	2011/6/21	プレス発表
23	未踏科学技術協会 第37回シンポジウム併	フジクラ	2011/6/24	展示
24	第8回日本加速器学会年回併設	フジクラ	2011/8/1-3	展示
25	CEATEC JAPAN 2011	フジクラ	2011/10/4-8	展示
26	ISS2011出展	ISTEC他	2011/10/24-25	展示
27	2011秋季低温工学・超電導学会併設	フジクラ	2011/11/9-11	展示
28	INCHEM TOKYO 2011	フジクラ	2011/11/16-18	展示
29	高温超電導電力機器用サブクール液体空素循環システム	大陽日酸	2011/11月	大陽日酸技報30
30	エコプロダクツ2011出展	ISTEC他	2011/12/15-17	展示
31	イットリウム系超電導変圧器の研究開発	富士電機	2012/1/10	富士時報2012年1月号
32	イットリウム系超電導変圧器における限流特性	富士電機	2012/1/10	富士時報2012年1月号

33	SMES用イットリウム系コイル技術開発の状況	長屋重夫他（中部電力）	2012/2月	電気計算（記事/総説）
34	超電導電力貯蔵技術の開発状況	長屋重夫他（中部電力）	2012/2月	OHM（記事/総説）
35	未踏科学技術協会 第38回シンポジウム併設	フジクラ	2012/4/17	展示
36	Hannover Messe 2012	フジクラ	2012/4/23-27	展示
37	ICE24-ICMC2012	フジクラ	2012/5/14-18	展示
38	超電導工学研究所「超電導テープ製造用の大型レーザーCVD装置を実用	後藤孝（東北大学）	2012/5月	Tech-On（記事/総説）
39	次世代超電導コイル開発に成功ー世界最高強度の電磁力に耐えるコイルの実現ー	中部電力	2012/5/14	日経新聞（中部版）他
40	世界初 超高压高温超電導ケーブルを製造～中国瀋陽市で長期課通電試験を実施します～	古河電気工業	2012/5/18	プレス発表
41	次世代超電導コイル開発	中部電力	2012/5/30	中部経済新聞
42	構造強化高強度コイル化手法（Yoroi Coil）の開発	長屋重夫（中部電力）	2012/8月	超伝導科学技術研究会会誌（記
43	CEATEC JAPAN 2012	フジクラ	2012/10/2-6	展示
44	2012秋季低温工学・超電導学会併設	フジクラ	2012/11/7-9	展示
45	ネオン冷凍機の熱負荷変動に対する制御特性（第1報）	大陽日酸	2012/11月	大陽日酸技報31
46	『超電導の「いま」』 - 超電導コイルの開発	渡部智則他（中部電力）	2012/11月	新電気（記事/総説）
47	次世代超電導コイルおよび液状樹脂を使った絶縁被覆技術	渡部智則他（中部電力）	2012/11月	月刊誌「生産と電気」（記事/総説）
48	ISS2012	ISTEC他	2012/12/3-5	展示
49	エコプロダクツ2012	ISTEC他	2012/12/13-15	展示
50	超電導電力貯蔵装置（SMES）の現状	渡部智則他（中部電力）	2012/12月	電気設備学会誌（記事/総説）
51	SMESの技術動向	長屋重夫他（中部電力）	2012/12月	日本エネルギー学会誌（記事/総説）
52	世界最高水準の高温超電導ケーブルを開発～30年相当の長期課通電で健全性も確認～	古河電気工業	2013/1/29	プレス発表
53	nano tech 2013	フジクラ	2013/1/30-2/1	展示
54	高強度超電導コイル（Yoroi-coil）の開発	中部電力	2013/1月	電気評論（記事/総説）
55	66 kV/6.9kV-2MVA級三相超電導変圧器	富士電機	2013/1月	富士時報2013年1月号
56	超電導電力貯蔵装置（SMES）次世代超電導コイル	渡部智則他（中部電力）	2013/1月	月刊「配管技術」（記事/総説）
57	超電導電力貯蔵技術の現状と今後の展望	渡部智則他（中部電力）	2013/1月	化学工学会誌（記事/総説）