

# 「リットリウム系超電導電力機器技術開発プロジェクト」

## 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 エネルギー対策推進部
-----	---------------------------------------

# 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（費用対効果）…………… 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 研究開発目標…………… II-1.1
    - 1.1.1 超電導電力貯蔵システム(SMES)の研究開発…………… II-1.4
    - 1.1.2 超電導電力ケーブル研究開発…………… II-1.9
    - 1.1.3 超電導変圧器の研究開発…………… II-1.16
    - 1.1.4 超電導電力機器用線材の技術開発…………… II-1.22
    - 1.1.5 超電導電力機器の適用技術標準化…………… II-1.29
- 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-2.8
    - 2.1.2 超電導電力ケーブル研究開発…………… II-2.16
    - 2.1.3 超電導変圧器の研究開発…………… II-2.30
    - 2.1.4 超電導電力機器用線材の技術開発…………… II-2.38
    - 2.1.5 超電導電力機器の適用技術標準化…………… II-2.55
  - 2.2 研究開発の実施体制…………… II-2.57
  - 2.3 研究の運営管理…………… II-2.62
  - 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-2.72
- 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-3.17
  - 3.4 プロジェクトとしての対応…………… II-3.27

#### III. 研究開発成果について

- 1. 事業全体の成果…………… III-1.1.1
  - 1.1 開発成果概要…………… III-1.1.1
    - 1.1.1 超電導電力貯蔵システム(SMES)の研究開発…………… III-1.1.1
    - 1.1.2 超電導電力ケーブル研究開発…………… III-1.2.1
    - 1.1.3 超電導変圧器の研究開発…………… III-1.3.1
    - 1.1.4 超電導電力機器用線材の技術開発…………… III-1.4.1
    - 1.1.5 超電導電力機器の適用技術標準化…………… III-1.5.1
- 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	2GJ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
2.2	超電導電力ケーブル研究開発	III-2.2.1
2.2.1	66kV大電流ケーブル化技術の開発	III-2.2.1
2.2.2	275kV高電圧ケーブル化技術の開発	III-2.2.51
2.2.3	超電導電力ケーブル対応線材安定製造技術開発	III-2.2.103
2.2.4	超電導電力ケーブルの熱収支に関する評価研究	III-2.2.136
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-2.3.18
2.3.3	限流機能付加技術開発	III-2.3.36
2.3.4	超電導変圧器対応線材安定製造技術開発	III-2.3.51
2.3.5	2MVA級超電導変圧器モデルの検証	III-2.3.76
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-2.4.28
2.4.3	低交流損失線材作製技術開発	III-2.4.82
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	III-2.4.132
2.4.5	低コスト・歩留向上技術開発	III-2.4.153
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-2.5.1
2.5.2	超電導電力ケーブル関連技術標準化	III-2.5.16
2.5.3	超電導電力機器関連技術標準化等	III-2.5.35
2.5.4	超電導電力機器技術の動向調査	III-2.5.46
2.5.5	パネル討論会の結果	III-2.5.58
2.5.6	成果のまとめと今後の予定	III-2.5.62

#### IV. 実用化、事業化の見通しについて

1.	実用化の見通し	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	添付資料 4.
・技術戦略マップ(分野別技術ロードマップ)	添付資料 5.
・事前評価関連資料	
・事前評価資料	添付資料 6.
・パブリックコメント募集の結果	添付資料 7.
・特許論文リスト	添付資料 8.





# 事業原簿概要

		最終更新日	平成22年8月10日																	
プログラム (又は施策)名	エネルギーイノベーションプログラム																			
プロジェクト名	イットリウム系超電導電力機器技術開発	プロジェクト番号	P08016																	
担当推進部/担当者	エネルギー対策推進部 担当者 酒井 清 (平成22年7月現在) 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)																			
0. 事業の概要	<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。</p> <p>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する。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や超電導線材の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う。</p>																			
I. 事業の位置付け・必要性について	<p>[事業の背景・目的・位置付け]</p> <p>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。</p> <p>[NEDOが関与する意義]</p> <p>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。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]</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。</p> <p>さらにCO<sub>2</sub>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。</p> <p>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CO<sub>2</sub>削減量] <span style="float: right;">単位: kt/年</span></p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <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	<p>① 超電導電力貯蔵システム(SMES)の研究開発          [中間目標]—SMES コイル構成技術を開発するとともに、2GJ 級 SMES コイル基本システム構成の最適化、並びに 2GJ 級を見通す 2MJ 級評価試験モデルの設計を完了する。また、モデル試作に必要な仕様を満足する線材の安定製造技術を確立する。          [最終目標]—この評価試験モデルを作製し、2 万回以上の繰り返し充放電による性能検証を行う。</p> <p>② 超電導電力ケーブルの研究開発          [中間目標]—高電圧電気絶縁技術開発、送電損失の低減に資する大電流低交流損失技術開発等を行い、モデルケーブルによる技術検証を行う。また、ケーブル対応線材の安定作製技術を確立する。          [最終目標]—大電流ケーブルシステム(66kV, 5kA)、および高電圧ケーブルシステム(275kV, 3kA)を作製し、送電損失低減(現行送電ケーブルの 1/2~1/3)を含めた性能検証を行う。</p> <p>③ 超電導変圧器の研究開発          [中間目標]—現行変圧器相当の短絡強度を有する巻線技術を開発するとともに、限流機能を検証し、2MVA 級変圧器モデルの設計を完了させる。また、変圧器対応線材の安定作製技術を確立する。          [最終目標]—2kA 級大電流化および現行の 1/3 以下の低損失化巻線技術を開発するとともに、数 100kVA 級単相モデルによる限流機能の検証、2MVA 級モデルによる性能検証を行う。</p> <p>④ 超電導電力機器用線材の技術開発          [中間目標]—開発対象機器([SMES][超電導電力ケーブル][超電導変圧器])の中間目標達成に向け(1)線材特性の把握(2)磁場中高 <math>I_c</math> 線材作製技術(3)低損失線材作製技術(4)高強度・高 <math>I_c</math> 線材作製技術(5)低コスト・歩留向上技術に関し、目標値を設定し達成する。          [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。</p> <p>⑤ 超電導電力機器の適用技術標準化          [中間目標]—超電導線、超電導電力ケーブルの一般事項、試験方法の規格素案を作成し、IEC 国際標準化合意の醸成等おこなう。          [最終目標]—超電導線、超電導電力ケーブル並びにその試験方法の規格素案に対して国際標準化の合意を確立し、IEC 国際規格提案に資する等実施する。</p>
-------	---

事業の計画内容	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	523	512	532	(500)	(500)	(2, 567)
	超電導電力ケーブルの研究開発	586	706	616	(598)	(597)	(3, 103)
	超電導変圧器の研究開発	631	608	606	(600)	(616)	(3, 061)
	超電導機器用線材の技術開発	1, 240	1, 159	1, 141	(1, 347)	(1, 322)	(6, 209)
	超電導電力機器の適用技術標準化	19	15	21	(15)	(15)	(85)

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) ( ) 内数字は未定	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)	2, 985	2, 831	2, 916	(3, 060)	(3, 050)	(14, 842)
	加速予算 (成果普及費を含む)	15	169				184
	総予算額	3, 000	3, 000	2, 916	(3, 060)	(3, 050)	(15, 026)

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 (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
	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) 総合研究所 電力貯蔵技術グループ 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 (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 (予定者) 和泉 輝郎 (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	(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、(財) ファインセラミックスセンター (JFCC)
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「新超電導および関連機能物質の探索と産業用超電導線材の応用」等が進められており、研究開発分野別の棲み分けがなされている。</p> <p>海外における研究開発動向では、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、今年度より ARPA-E プロジェクトの中で、Y 系超電導線材を用いた 3. 4MJ@4. 2kV/30T の SMES の開発が 3 年計画で開始したとの発表があった。さらに限流機能を持つ超電導変圧器開発プログラムを推進すると発表している。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スタートした。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続いており、日米欧三極で熾烈な開発競争が続いている。最近では、実用化を目指して、1km 級線材の長尺作製実績も SuperPower 社から報告され、また生産速度の高速化・更なる高特性化の観点で有望な成果がいくつか報告されている。</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>温室効果ガスを 2020 年までに 1990 年比 25%削減する目標達成に向け、我が国では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」が策定された。その中で、「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超電導送電は、多様な技術を多方面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。またアクションプランの方策推進の俯瞰図中での超電導送電技術は、2015 年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)の実施、確立を行うとしている。</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>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ている。それらとして、</p>	



<p>情勢変化への対応</p>	<p>(1) 低交流損失化のため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ている。</p> <p>(2) ケーブル開発用 Y 系超電導線材の製造能力の更なる向上のため、超電導薄膜を形成するための高品質・高出力エキシマレーザ発振装置を導入し、更なる特性向上、歩留まり向上、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 級変圧器開発を効率的に進める。</p>	
<p>評価に関する事項</p>	<p>事前評価</p>	<p>H 2 0 年度実施 担当部 新エネルギー技術開発部</p>
	<p>中間評価</p>	<p>H 2 2 年度 中間評価実施</p>
	<p>事後評価</p>	<p>H 2 5 年度 事後評価実施予定</p>
<p>Ⅲ. 研究開発成果について</p>	<p>① 超電導電力貯蔵システム(SMES)の研究開発</p> <p>(1) 2GJ 級高磁界・大電流コンパクトコイル構成技術開発では、多層巻コイルを作製し、600MPa を越えるフープ応力耐性を実証。また 4 束導体コイルを作製し、2.6kA 通電を実証し、中間目標は年度内達成見込み。</p> <p>(2) 高効率コイル伝導冷却技術開発では、模擬コイルにて伝導冷却システム検証試験を継続中であり、2kV 以上の電気絶縁性能を有する伝導冷却型コイル構造の設計も実施し、中間目標は年度内達成見込み。</p> <p>(3) SMES 対応線材安定製造技術開発では、フープ応力試験等のコイルに線材を提供して必要性能を把握し、特性向上、歩留向上を推進中であり、中間目標は年度内達成見込み。</p> <p>(4) 高磁界コンパクト SMES システムモデル検証では、2GJ 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。またクエンチ検出・コイル保護方法の検証などより試験計画立案に必要なコイル特性を取得中であり、中間目標は年度内達成見込み。</p> <p>② 超電導電力ケーブルの研究開発</p> <p>(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、ケーブル損失を 3W/m/相@4.5kA まで低減、短絡試験、接続試験で性能低下や異常無きことを確認し、中間目標は年度内達成見込み。</p> <p>(2) 高電圧絶縁・低誘電損失ケーブル化技術の開発では、ケーブル損失が 0.70W/m となり、中間目標達成。超電導-超電導接続部は数 nΩ の低抵抗を実現し、課電試験でも導体、接続部で異常無きことを確認し、さらに年度内に安全性を確認して中間目標達成見込み。</p> <p>(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、スラッシュ窒素の冷却特性を評価し、要求される冷却設備、仕様検討試験装置を作製し、中間目標を達成した。</p> <p>(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 <math>j_c=17\text{kA/cm}^2</math> の特性を有する線材を作製・実証し、中間目標を達成した。</p> <p>(5) 66kV 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、年度内に確定することで、中間目標達成見込み。</p> <p>(6) 275kV 高電圧ケーブルシステム検証では、275kV-3kA の試験条件の選定、長期課通電試験の計画書を作成し、中間目標を達成。また検証用ケーブルシステム設計では、設計の妥当性を確認し、中間目標は年度内達成見込み。</p> <p>③ 超電導変圧器の研究開発</p> <p>(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 並列導体による転位均流モデルによる転位法最適化等を確認。400kVA 短絡モデル変圧器を試作し短絡試験を実施。2kA 級の通電特性と巻線劣化や異常が無きことを検証し、中間目標を達成した。</p> <p>(2) 冷却システム技術開発では、小型膨張タービンで 70%の断熱効率を達成。小型ターボ式圧縮機でも断熱効率 65%を達成し、中間目標を達成した。</p> <p>(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。さらに 400kVA 限流機能付加モデル変圧器設計、試作を行い、中間目標を達成した。</p> <p>(4) 超電導変圧器対応線材安定製造技術開発では、5mm 幅 3 分割のレーザスクライビング加工技術を開発し、<math>I_c=40\text{A @}65\text{K.}0.01\text{T.}100\text{m}</math> 以上の線材安定製造技術を確立し、中間目標を達成した</p> <p>(5) 2MVA 級超電導変圧器モデル検証では、66kV/6.9kV-2MVA 級モデルの設計及び冷却システム系の検討を実施。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。</p>	

	<p>④ 超電導電力機器用線材の技術開発</p> <p>(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電流、機械応力、温度湿度等の影響を評価し、線材がケーブル使用時の負荷に対し十分大きな限界値を有していることが確認でき、中間目標を達成した。</p> <p>(2) 磁場中高 <math>J_c</math> 線材作製技術では、PLD 線材は、(a) 30A/cm-w @77K, 3T-50m の中間目標値を達成した。MOD 線材は、年度内達成見込み。(b) 300A/cm-w @65K, 0.02T-50m の中間目標値は、PLD、MOD 両線材ともに達成した。</p> <p>(3) 低損失線材作製技術では、(a) 2mm 幅-300A/cm-w-50m の中間目標に対し、PLD 線材が中間目標を達成。MOD 線材が、年度内達成見込み。(b) 5mm 幅-5 分割-50m-無分割に対し損失 1/5 の中間目標では、PLD、MOD 線材ともに年度内達成見込み。</p> <p>(4) 高強度・高 <math>J_c</math> 線材作製技術では、(a) 300A/cm-1GPa-50m (b) <math>J_c=30kA/cm^2-50m</math> の中間目標値に対し、0.95GPa、37m と未達ではあるが、200m-1.3GPa 基板作製中であり、年度内達成見込み。</p> <p>(5) 低コスト・歩留向上技術では、3 円/Am のプロセス技術実証を行い、PLD 線材では中間目標を達成した。MOD 線材では、現状未達なるも年度内達成見込み。</p> <p>⑤ 超電導電力機器の適用技術標準化</p> <p>(1) 超電導線関連技術標準化では、各国のコメントを反映し一般要求事項、試験方法の規格素案を作成し、中間目標を達成した。国際標準化合意の醸成は、年度内達成見込み。</p> <p>(2) 超電導電力ケーブル関連技術標準化では、システムの一般要求事項、試験方法の規格素案を作成し、中間目標を達成した。国際標準化合意の醸成は、年度内達成見込み。</p> <p>(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、これを基に規格素案作成を開始し、中間目標を達成した。</p>		
	<table border="1"> <tr> <td data-bbox="359 1064 598 1108">投稿論文</td> <td data-bbox="598 1064 1437 1108">[査読付き] 86 件、[その他] 19 件、[プレス等] 18 件</td> </tr> </table>	投稿論文	[査読付き] 86 件、[その他] 19 件、[プレス等] 18 件
投稿論文	[査読付き] 86 件、[その他] 19 件、[プレス等] 18 件		
	<table border="1"> <tr> <td data-bbox="359 1108 598 1153">特許（国内/海外）</td> <td data-bbox="598 1108 1437 1153">[出願済] 36/2 件、[登録済] 0/0 件、[実施] 0 件</td> </tr> </table>	特許（国内/海外）	[出願済] 36/2 件、[登録済] 0/0 件、[実施] 0 件
特許（国内/海外）	[出願済] 36/2 件、[登録済] 0/0 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>CO<sub>2</sub> 削減対策のひとつとして、送電ロスがほとんどない超電導高効率送電があげられる。電力の送電ロスは現在の技術をもって 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が、これが超電導電力ケーブルに置換されると、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、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>今後の電力需要や高経年変圧器などからの配電用変圧器の市場規模は、66kV又は 77kVの配電用変電所は約 4,300 箇所であり、各変電所は平均 2 バンクと仮定すると変圧器数は約 2 倍となる。変圧器の寿命を平均 40 年と仮定した変圧器の更新数（約 220 台/年）と、変電所増分容量の伸び率からの変圧器の新設（約 40 台/年）を合せて約 260 台/年と想定される。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、<b>超電導変圧器</b>は、電力需要増に伴う変圧器増の対応、変電所の新設対応が有利であり、超電導ケーブルと共存（変電所容量増、限流機能）した用途が考えられ、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。更には、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ている。</p> <p><b>Y系超電導線材</b>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>	
<p>VI. 基本計画に関する事項</p>	<p>策定期期</p>	<p>平成 20 年 3 月 制定</p>
	<p>変更履歴</p>	<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。 平成 21 年 3 月 PL、サブPLの氏名を追記して改訂。</p>

# プロジェクト用語集

[あ]

**アスペクト比**

一般に、ある幾何学的形状について代表的な二つの方向の寸法比。本報告書では線材では幅と厚みの比、コイルでは直径と長さの比として定義。

**圧着技術**

YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>(YBCO)単結晶は脆性材料でありデバイス応用の為にスライスした単結晶基板が脆いため、取り扱いの容易さ及び熱的・機械的強度を高めるため MgO などの補強材を高温で接合するための技術。

**アニール**

超電層の成膜後あるいは単結晶・多結晶作製後の熱処理。熱加工によって生じた応力(歪み)の除去の他、とくに酸化物超電導体の場合、大きな酸素不定比性を有するため、試料中の酸素濃度の制御のために行う重要な熱処理過程である。後者の目的の場合、酸素アニールと呼称される場合もある。

**アニール温度**

アニール時の熱処理温度のこと。

**アモルファス状態**

非晶質状態をいう。原子の並びに規則性を持たない状態。

**アンカーボルト**

構造部材(木材や鋼材)もしくは設備機器などを固定するために、コンクリートに埋め込んで使用するボルトのことを指す。アンカーボルトは、引張りやせん断に抵抗することによって、コンクリートに取り付けられた構造部材(木材や鋼材)もしくは設備機器が、分離・浮遊・移動・転倒することを防ぐ役割をもつ。

**安全弁**

ガスや蒸気などの配管や容器において爆発を防ぐための安全機構を有する弁。密閉した容器などで内圧が上がりそのまま圧力上昇すると内圧のため容器が破損する。このような爆発をさけるために安全弁が使用され、容器の内圧が上がり過ぎないようにする治具。

**安定化材**

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。

### 安定化層

超電導線材の通電の安定ならびに超電導層保護のために、超電導層の上に設けられた導体層。銀などの熱伝導の良い金属を用いる。

### 安定化銅

銅を用いた安定化層

### 安定性、安定性マージン

超電導線の動きによる摩擦熱などの外乱(熱擾乱)が原因となり、超電導線に常電導が生じその抵抗分によりジュール発熱した場合、冷却がその発熱量を上回り超電導状態に回復するか、もしくは常電導部が拡大しクエンチに至るかを判断する指標。冷媒の冷却特性や超電導線の物性値から安定性を設計する方法が提案されており、設計により許容しうる熱擾乱エネルギーを安定性マージンもしくはクエンチマージンと呼ぶ。

## [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。

### イオンミリング

Ar などのイオンの照射により薄膜表面の原子をはじき出すことにより、薄膜を削り取っていく加工法。

### 異方性

高温超電導体は層状構造を有し、 $\text{CuO}_2$  面内と、面間とで電子の動きやすさが大きく異なる。この違いを異方性という。異方性は不足ドーピングになるほど(絶縁体に近づくほど)大きくなる。

### 異方的典型物質

高温超電導体はすべて異方的であるが、なかでも  $\text{Bi2212}$  は異方性が大きい。従って、 $\text{Bi2212}$  は超電導現象における異方性の影響を調べるためには最適の物質と言える。

### インサート材料

液相拡散接合を行う際に線材同士の間には挿入する材料。一般に接合対象よりも、低い融点をもつ金属等を用いる。

## 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/cm<sup>3</sup>、融点 1520°C、沸点 3300°C。

## イットリウム系線材 (Y 系線材)

YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> (YBCO)あるいは Y のサイトを他の希土類元素で換えた RE<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>(RE:希土類元素)の超電導材料で作られた線材。一般的に、テープ状であり、超電導部分は薄膜形状になっており薄膜線材とも呼ばれている。

## インバータ

直流電力から交流電力を電氣的に生成する(逆変換する)電源回路、またはその回路を持つ電力変換装置。逆変換回路、逆変換装置などとも呼ばれる。Inverter。

## 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。インピーダンスにおいて、その実部(Re)をレジスタンス(resistance)または抵抗成分、虚部(Im)をリアクタンス(reactance)と呼ぶ。

## インペラ

ターボ冷凍機の圧縮機に使われる部品の一つ。高速で回転するように設計されている羽根車の一種。impeller。

## イントリンシックピンニング

YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> 結晶に存在する CuO 面(超電導電流が流れる箇所)でのピンニングで、非常にピンニング力が強い。このため、CuO 面に磁場が平行、垂直にかかったときに大きな異方性が生じる。

## [う]

## 受入試験

出荷製品が「形式試験供試品と同等の製造・品質管理状態であることを確認」するために行うもの。出荷試験と同義。ここで形式試験とは、ある形式製品の設計・製造および施工方法を「認定」するために行うものである。

## 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]

### エキシマレーザー

希ガスやハロゲンなどの混合ガスを用いてレーザー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/cm<sup>3</sup> 沸点：-195.79℃、蒸発潜熱：47 kcal/kg。液化空気の分留により工業的に大量に製造される。LN<sub>2</sub>とも記述される。

### 液体窒素循環ポンプ

超電導ケーブルシステム等へ、冷却された液体窒素を供給するためのポンプ。

### 液体窒素循環冷却

被冷却体を冷却する一手法。冷凍機などで冷却された液体窒素を循環ポンプにより被冷却体に圧送し、液体窒素と被冷却体で熱交換を行うことにより冷却を行う。熱交換により温度の上昇した液体窒素は再び冷凍機などに圧送され、その温度は再び低下する。この循環サイクル回路を形成することにより、冷媒は蒸発することなく閉ループ循環を続けることができ、液の補給が不要であるという特徴を有する。

### 液相プロセス

液相を介して超電導結晶を作製するプロセス。

### 液体ヘリウム

ヘリウムは標準沸点が 4.21K 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。

### エコキュート

ヒートポンプ技術を利用し空気の熱で湯を沸かすことができる電気給湯機のうち、冷媒として、フロンではなく二酸化炭素を使用している機種の種類総称。

### エッジワイズ

矩形の超電導導体をコイル化する場合に、短辺を巻き軸に向けて巻き線の中心軸と平行にし、長辺を半径方向と平行とする巻き方。単位長さあたりに多くの巻数を巻きつけることができる。



### 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。

### エッチング加工

Arなどのイオン照射により薄膜表面の原子をはじき出すことにより、薄膜を削り取っていく加工工程で、ランプエッジ接合の傾斜部の形成や、界面改質バリア形成のための下部超電導薄膜のイオン照射などの工程もこの加工の一種である

### エディー電流

電磁誘導により発生する渦電流。

### エネルギー分散 X 線分光法 (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy: EDS)

試料に電子線を照射した際、試料から発生した特性 X 線を直接半導体検出器で検出し、電気信号に変えて分光分析する手法。電子線照射した領域を構成する元素を識別することができる。

### 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。

### 塩害

塩じんによる汚損のため、がい管の商用周波フラッシュオーバ電圧が低下すること。塩分付着密度および海岸からの距離の 2 つの条件をもとに区分されている。

### [お]

### オイルフリー

広義にはヘリウム中に油がない状態を指すが、狭義にはヘリウムガス圧縮の際に潤滑油を用いないことをいう。液体ヘリウム温度(4K)ではヘリウム以外の物質はすべて固化してしまうが、従来のヘリウム冷凍システムは油潤滑式圧縮機を用いているためヘリウム中への油混入に非常に神経を使っている。従って潤滑油を用いない(オイルフリー)圧縮機の開発は永く進められていたがこれまでは信頼性、効率の点で油潤滑式に劣っていた。

### 応力-ひずみ効果

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。

### オクチル酸

$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$  で表せる。超電導層を合成するための前駆体溶液。従来は、TFA 塩による溶液を用いていたが、フッ素がないため昇温速度が上げられ高速化が可能。

### オフセット

一般的には基準となるある点からの相対的な位置のことである。ケーブル 3 心よりの状態と 3 心に相関距離を設けた状態の位置関係をさす。

### オーバーオール電流密度

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。

### オージェ電子分光 (AES)

オージェ電子分光は代表的な表面分析の一つで、固体の表面から数 nm の深さ領域に関する元素分析や深さ方向分析が可能。高真空中で固体試料表面に電子線を照射すると、原子の内殻電子が弾き出され、それによって生成した空軌道を外殻電子が補填する。このとき、外殻電子を放出する過程で発生した電子がオージェ電子。このオージェ電子の運動エネルギーは元素固有であるため、発生したオージェ電子の運動エネルギーを調べることで、表面数 nm 層の元素分析を行うことができる。検出可能な元素は H, He 以外の全て。Ar イオンエッチングを行うことで、ミクロンオーダーまでの深さ方向分析も可能となる。

### [か]

#### 碍子

電線とその支持物とのあいだを絶縁するために用いる冶具。

#### 回線

電力輸送を行う単位となる導体または導体系。例えば、三相交流では、3 つの導体を 1 回線という

#### 回線延長

回線ごとの起点から終点までの長さ合計

#### 開閉サージ

電源、開閉器、ケーブルおよ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。

#### 界面エネルギー

2 つの異なる相が接する境界面に存在する過剰のエネルギー。

## 開発試験

開発品の設計・製造および施工方法が、「実用可能であることを実証する」ために行うものである。

## 化学結合

分子や結晶を形成する原子またはイオン間の結合をいう。一般に結合の機構によって共有結合、イオン結合、金属結合等に分類するが、実際の化学結合はこれらに結合の混じり合いが多い。

## 化学蒸着法 (CVD 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。YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> 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。

## 化学プロセス

金属イオンおよび無機、有機化合物等の化学反応を用い、原子～分子レベルでの化学結合の形成や構造制御を行った前駆体を利用する合成プロセスをいう。

## 化学溶液法

→MOD 法

## 可逆限 (Reversible Limit)

臨界電流の応力・歪依存性において、試料に一旦応力・歪を印加したあと、荷重ゼロに戻し状態で、臨界電流が元の値に戻る限界の応力及び歪の値

## 架空線

主に空気を絶縁体とした送電線路で、雷撃により雷サージの発生する可能性のある線路。

## 拡散接合

拡散現象を利用した接合体の作製方法。ここでは、加圧熱処理時の固体拡散により接合体を得ている。

## 拡散バリア

Y系線材では、ハステロイ、RABiTSなどのNi基合金を基板に使っている。このNiが超電導層に拡散すると著しくT<sub>c</sub>、J<sub>c</sub>などの超電導特性を下げる。このため、超電導層と基板の間にNiの拡散を防止するYSZ、GZOなどの拡散バリア層を設けている。

## 核四重極共鳴

核スピンIの値が1以上の原子核は、核スピンに基づく双極子に加えて、四極子モーメン

トをもつ。この核四極子モーメントは原子核の位置における電場勾配と相互作用(電気四重極子相互作用と呼ぶ)して、核磁気共鳴の共鳴条件に変更を与え、共鳴線のシフトや分裂をもたらす。これを核四極子共鳴、または核四重極共鳴と呼ぶ。物質の電子状態、原子位置、構造に関する多くの知見を得ることができる。

## 革新プロセス

超電導線材要素技術の開発において、線材に関する研究課題の中に、長尺化プロセスと革新プロセスが揚げられている。前者は、イットリウム系を用い実用化を目指す長尺線材作製基盤技術の確立、後者は線材特性の向上を目指した新プロセスの開発を目指したもの。

## 化合物

2 種以上の元素の原子の化学結合によって生じた純粋物質。各元素の組成比は一般に定比例の法則にしたがう。

## かご型誘導モータ (squirrel-cage type induction motor)

既存機として最も汎用されているモータである。かご型回転子巻線は、ロータバーとエンドリングからなり、一次側固定子の作る回転磁界によって誘導される電流によってトルクが発生する。簡単な構造や大量生産向き、安価、保守の容易性など、産業応用で極めて重要なメリットを有している。

## 仮焼

粉末(原料粉末)の予備的な熱処理。MOD の前処理も含む。

## 過剰ドーピング状態

一般的に  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  等の酸化物超電導体においては、キャリア量の低い状態では反強磁性を示す絶縁体であり、キャリア量の増大とともに電気伝導性が現れ、超電導性を示すようになる。その臨界温度  $T_c$  ははじめキャリア量の増大とともに上昇するが、あるキャリア量において最高値となった後、逆に低下していく。この最高の  $T_c$  が得られるキャリア濃度を最適ドーピングとし、それよりキャリアが過剰な状態( $T_c$  がキャリア量とともに低下するキャリア濃度範囲)を過剰ドーピング状態(オーバー・ドーピング状態)と呼ぶ。

## 加速器

荷電粒子を加速する装置の総称である。原子核/素粒子の実験に用いられるほか癌治療などにも応用される。

## 過電圧

常規商用周波運転電圧を超えて発生する電圧。雷過電圧と開閉過電圧がある。

## 過渡安定度

電力系統において短絡故障などの大きい擾乱が発生した場合に、発電機が脱調せず送電を安定して継続できるか否かの安定性。

### 可とうシールド管

液体窒素中で編素線部にシールドを取り付ける必要がある、熱収縮によりシールド部分に機械力が働くことを考慮して伸縮構造を持つフレキ管をシールドとしたもの。

### 過渡回復電圧

回路に大きなインダクタンスが挿入された状態で故障電流を遮断した際に発生する過渡的な回路電圧。インピーダンスが大きい(電氣的距離が長い)ほど過渡安定度は低下する。

### 過負荷

定格量を超えた負荷。

### 過負荷運転(変圧器)

変圧器の定格容量以上の負荷送電を行なう運転の事。

### 過負荷電流

定格電流を超えた電流

### 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77Kから63Kの間となる。

### カルノー効率

熱機関における最大のエネルギー効率をカルノー効率といい、

$$\text{カルノー効率}\eta = (T_h - T_l) / T_h$$

ただし、 $T_h$ ：最高温度、 $T_l$ ：最低温度、で表される。カルノー効率は、作業物質が最高温度と最低温度間に等温膨張・断熱膨張・等温圧縮・断熱圧縮の四工程で一循環する(カルノーサイクル)時に、作業物質に無関係に最高温度と最低温度によって決まる。

### カロリメトリック法

冷媒中の試料に交流電流を流したり、変動磁界を印加したりして、冷媒の蒸発ガス量、液面降下、試料の温度上昇から損失を求める方法、最も一般的に用いられている方法である。

### 間接冷却

超電導コイルを液体ヘリウムや液体窒素等の冷媒に直接、接すること無く冷却する方法。超電導ケーブルでは、冷却システムにおいて冷媒がブラインと呼ばれる不凍液を冷却し、これを介して目的物を冷却する方式のこと。

## 環境側面

組織の事務活動や事業活動の執行に伴い環境に影響を及ぼす原因のこと。ISO14001 規格用語で定義されている。 **Environmental Aspect**。

## 管路

主に地中に埋設されて活用される、ケーブルを収容するための管状の部材。ケーブルの引き入れや引き抜きを容易にし、布設後は外傷防止の役目を果たす。

## [き]

### 擬ギャップ現象

高温超電導の不足ドープ領域で超電導転移温度よりかなり高い温度からスピンや、電荷の励起が抑えられていくように見える現象。スピン励起を見る磁気共鳴スペクトルや中性子非弾性散乱だけでなく、比熱、光電子分光、トンネル分光、電気抵抗、光学スペクトルなどで観測される。

### 基材（基板）

多層構造(基板、中間層、超電導層)からなる超電導線材において、基板は基本的な線材の強度保持を担う。また配向基板では、超電導相の結晶配向性も担う。更に配向基板以外においても作製プロセス上、その表面平坦性が中間層を介して超電導層の結晶配向性に影響するため、その臨界電流特性を左右する因子となる。

### 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)Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>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。

### 逆フラッシュオーバ

鉄塔または架空地線が雷撃を受け、鉄塔の電位が著しく上昇して、鉄塔から電力線へフラッシュオーバすること。

### キャップ層

バッファ層(中間層)の上に平坦性を持たせるために設けられるもの。

### キャリア注入

電気伝導がホールによって担われる場合、キャリア注入は一般に、構成するカチオンをより価数の低いもので置換する(例: 3 価のイットリウムイオンを 2 価のカルシウムイオンで置換)かアニオンである酸素を欠損させることにより行う。

### 強結合状態

粒界を通過する臨界電流密度が粒内と同程度である状態を示す。高温超電導体のコヒーレンス長は短いため、ナチュラルバリアーすら存在しない理想的な接合でなければ強結合状態にはなりにくい。

### 強加工

再結晶により結晶方位がそろった集合組織を作製するために、通常冷間圧延により 90%以上の強加工を施した後、熱処理を行う。

### 強制冷却方式

液体ヘリウムなどの冷媒を加圧して導体内に流し、冷却する方法。この方式の導体には冷媒を圧送できるような空隙を内包している。冷媒容器が不要で、ケーブル・イン・コンジット導体の場合は、コンジットの外周に電気絶縁を施すことができるため、耐電圧の確保が容易などの特長がある。

### 共晶(共融混合物)

2 成分以上を含む単一の液体から、ある温度以下で同時に晶出する 2 種以上の固相(結晶)の混合物。

### 極点図形測定

膜の面内における結晶配向性を評価する方法。試料面の水平軸および法線軸周りに試料ホルダを回転させながら X 線回折強度を測定し、それぞれの回転角について回折強度を等高線でプロットしたもの。

### 距離リレー

電圧および電流を入力量として、電圧と電流の比の関数が所定値以下となったとき動作するリレー。この比は、継電器のみるインピーダンスと呼ばれ、インピーダンスは送電線の距離の電氣的尺度であるので、距離継電器と呼ばれる。

### 銀安定化層

銀を用いた安定化層。超電導線材において超電導状態が維持できなくなった際の電流分流の役割を担う。また、超電導体そのものを機械的に保護する役目をもつ。

### 緊急動作試験

限流器としての緊急システムの動作確認試験を示すが、系統システムとの所掌を明確にする必要がある。ケーブルの場合は冷却システム監視に含めている。

### 銀シース Bi 系超電導電流リード

ビスマス酸化物は 2 次元性の強い薄片状の結晶構造を持ち、線材製造の圧延工程で銀の管の中で良く整列し、さらに薄片間に超電導電流を妨げる障壁ができ難いため早くから線材化が行われてきた。通常、銀の管の中に Bi 系超電導体が入られるため、銀シース線材と呼ばれ、この銀シース Bi 系超電導線材を用いて電流リードがつけられる。銀は熱伝導性も良いため、電流リードに用いられる際には微量の金を添加して熱伝導率を抑えるが、それでも線材に占める銀の比率が大きい場合、熱侵入量が大きくなる。

## 【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。

### クーパー対

超電導体中において、同符号の負電荷をもっているにも関わらず、格子振動などを媒介とした引力相互作用が電子間のクーロン反発相互作用を上まわったときに形成される電子対。

### クライオスタット

被冷却物(超電導コイルなど)を収納して、その重さと発生する力などを支持できる断熱支持構造を持った開放又は密閉構造の低温を保持する装置。超電導デバイスや回路を搭載し



た試作チップはクライオスタットの中に設置されて超電導状態になる温度まで冷却される。半導体の測定器はこのクライオスタットの外の室温環境に置かれるので、チップと測定器の間を高周波同軸ケーブルで接続して測定のための高周波信号を入出力しなければならない。

### 鞍型ピックアップコイル法

超電導線材の磁化損失測定に用いられるピックアップコイルの一種。線材面に平行な磁場に対する測定に用いられる。テープの一部分を囲む直方体面上にピックアップコイルを巻き、その面上での電界を測定することにより、マグネット磁界と合わせてポインティングベクトルを求めて、損失を算出する。

### クラック

ひび、微細割れのこと。ここでのクラックは結晶粒サイズ(ミクロンサイズ)のひびをいう。

### クラフト紙

木材チップに苛性ソーダを加え熱処理する「クラフト法」により製造されたパルプを原料とした洋紙のうち、強度を落とさないため漂白行程を行わない紙。OF ケーブルの主絶縁材料として通常は絶縁油を含浸して使用する電気絶縁強度の高い絶縁紙。超電導ケーブルにおいて液体窒素含浸条件下で使用しても高い絶縁強度を有する。

### 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、電圧が発せする状態を言う。

### [け]

### 蛍光利用 2次元温度分布測定システム (2D temperature distribution measurement system using cryogenic fluorescence)

極低温下でも温度依存性を有する蛍光材料を対象物に塗布し、その蛍光スペクトルの温度依存性を利用して非接触で温度測定を行うシステムであり、観測領域全面の2次元的な温度分布とその時間変化をリアルタイムでモニタすることができる。

### 軽故障

重故障には満たないが、想定し得る運転状況からの逸脱を検知して発信される故障情報。

### 系統事故

地絡事故、短絡事故、断線、またはそれらが複合したことにより、線路または機器が送電不能に陥ること。通常、事故区間が遮断され系統全体は保護される。

### 欠陥構造

理想的な結晶は、原子やイオンが3次元的に規則正しく並んだ構造を取るが、実在の結晶はそのような規則正しい構造のどこが狂った欠陥を必ず含んでいる。欠陥構造には、次元の小さなものから点欠陥、線欠陥(転位)、面欠陥(積層欠陥)がある。

### 結合損失

常電導物質およ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。

### 結晶成長機構

結晶を成長させること結晶成長というが、一般には単結晶を作製する場合に使われることが多い。例えば結晶性物質の融液を凝固点以下の温度にまで冷却する、あるいは蒸着法などでは気相から基板上に原子・分子を堆積させることにより結晶成長がおこる。これらの成長過程において結晶成長界面において原子・分子が結晶内に取り込まれていく機構を結晶成長機構といい、ファセット状界面の成長機構としては二次元的核形成、らせん転位等に起因した単分子層高さのステップが表面を移動する機構が考えられることが多い。固相多結晶体の再結晶も結晶成長ということもある。

### 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。YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>の面外配向度( $\Delta\omega$ )は、(005)または(006)面の X 線回折ロックンギ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 $\phi$ スキャンピークの半値全幅で評価する。

### ケーブル・イン・コンジット導体 (CIC 導体)

冷媒流路を内蔵した超電導撚線導体を、気密な管(コンジット)で覆ったケーブル。

### ケーブル系統充電電流補償

主として地中送電線として用いられるケーブル送電線は、単位長あたりの静電容量が架空送電線に比べて著しく大きいことから、ケーブル系統には大きい充電電流が流れ系統電圧が上昇し、系統運用上問題となる場合がある。このような場合、現状では、変電所に分路リアクトルを設置して、充電電流を抑制している

### ケーブルコア

超電導ケーブル断熱管内に挿入されるコア。主に、導体層、絶縁層、シールド層から構成される。

### ケーブルドラム

運搬及び保管のためケーブルを巻き取る装置。巻わく。

## ゲル前駆体

金属イオンが有機化合物や水酸基によりイオンのまたは化学的なネットワーク構造を形成し、さらに水などの溶媒をそのなかに含有した状態の前駆体をいう。

## 限界送電電力

送電線で送れる電力は、過渡安定度、定態安定度、電圧安定性、電圧降下などの諸制約により、熱容量以下となる場合がある。特に長距離送電線ではこの制約の影響が大きいいため、各種系統制御装置等により限界送電電力を向上させる必要がある。

## 顕微ラマン分光法

顕微ラマン分光法では、光学顕微鏡で拡大観察される物体の特定の局所にレーザ光を集光してラマンスペクトルの測定を行う。ラマン分光では、系にレーザー(単一波長)をあてた時の非弾性散乱成分を回折格子で分光し、強度を CCD で検出する。顕微鏡と組み合わせることで、 $\sim \mu\text{m}$  レベルの局所情報を位置情報とともに得ることが可能になる。

## 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。

## 限流時間

限流器にインピーダンスが発生し、限流動作を開始してから電流が遮断されるまでの時間

## 限流試験回路 (LC 共振型)

コンデンサなどにエネルギーを蓄え、インダクタンスと限流器の直列回路に放電する試験回路。

## 限流試験回路 (インバータ型)

コンデンサなどにエネルギーを蓄え、アンプで整形して電力を供給する試験回路。

## 限流試験回路 (系統直結型)

系統から変圧器を介して限流器に電力を供給する試験回路。

## 限流試験回路 (合成法)

大電流と高電圧を別個に供給する試験回路。

## 限流試験回路 (短絡発電機利用型)

短絡発電機から変圧器を介して限流器に電力を供給する試験回路。

### 限流電流

最終限流インピーダンスを呈することによって抑制される故障電流の交流成分の実効値。

### 限流電流最大値

限流器によって抑制される故障電流の最大値。

### 限流電流動作責務

限流器単体で定めるものと遮断器動作責務との強調を強く意識するものがある。

### 限流動作開始時間

故障発生後、限流動作を開始するまでの時間。

### 限流動作開始電流

限流器が動作開始する電流レベル。

[こ]

### 高圧ガス保安法

高圧ガスによる災害を防止するため、高圧ガスの製造、貯蔵、販売、輸入、移動、消費、廃棄等を規制するとともに、民間事業者及び高圧ガス保安協会による高圧ガスに関する自主的な活動を促進し、公共の安全を確保することを目的とする法律。

### 高圧合成法

原料を圧力媒体内に密閉して、GPa(ギガパスカル 10<sup>9</sup>Pa)のオーダーの高圧下で熱処理する合成手法。構成元素の陽イオンと陰イオンの圧縮率の違い、あるいは高密度相への転移により、常圧下では合成できない超電導物質を得ることが可能となる。

### 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。

### 光学伝導度スペクトル ( $\sigma(\omega)$ )

反射スペクトルを クラマース・クロニッヒ (K-K) 変換して得る。物質による光の吸収の強さに対応する物理量。

### 光学反射スペクトル

物質表面に色々な波長の光をあてた時の反射率を波長の関数として表わしたものを反射スペクトルという。使用波長領域は遠赤外、赤外から、可視、紫外領域に及ぶ。物質の電子状態や格子振動を知ることができる。

## 高強度化機構

材料の機械的強度を高めるために考えられるモデル。合金化、複合化等が考えられている。超電導線材は多層構造をなし、線材の強度保持は基板によりなされており、基板の材質の強化には合金化、コア材を用いた複合化が用いられている。

## 合金化

二種以上の金属元素を混合したものを合金という。金属元素のほかに炭素、珪素などの非金属元素を含むものもある。合金の組織には固溶体、共晶(共融混合物)、化合物(金属間化合物)あるいはそれらが共存するものなどがある。

## 格子対応度(格子整合度)

基板結晶と成長結晶の格子定数の差の大きさを示す度合いで $(a_{\text{sub}} - a_{\text{epi}})/a_{\text{epi}}$  で与えられる。ここで  $a_{\text{sub}}$  は基板結晶の格子定数、 $a_{\text{epi}}$  は成長する結晶の格子定数を取るのが一般的である。一般に格子対応度が小さいほど配向が取りやすく、また欠陥の少ない結晶が成長できる。

## 高磁界型低温レーザ顕微鏡 (HF-LTLSM)

定電流バイアスした超伝導試料表面に、集光したレーザビームを照射し局所的な温度変調を加え、電圧応答を観測する。レーザ照射位置からの情報を選択的に得ることが出来ることから、数ミクロンの分解能で線材内の損失分布の観測が可能となる。超伝導マグネットと組み合わせることによって高磁界下の観測に対応できる。

## 高周波同軸ケーブル

無線周波数(1KHz〜)帯で使用される同軸ケーブル。同軸ケーブルは1本の中心導体と、これを同心的にかこむ外部の円筒形の導体とを組み合わせたもので、高周波用の伝送線として用いられる。

## 更新需要

電力ケーブルなどにおいて、その寿命が近づいてきたことにより、新規ケーブルと代替する必要がある。その需要をさす。

## 高速フーリエ変換 (FFT)

離散フーリエ変換に関連する変換を高速に実行する一連の計算方法。

## 高調波

交流の電圧・電流で周波数が商用周波数の整数倍のものをいう。電力用によく用いられる6パルスの整流器やインバータがある場合、第5、第7高調波が発生する。高調波が超電導発電機に流れると内部に非同期回転磁界を生じるので回転子表面に渦電流を誘導する。超電導発電機は強力なダンパを有しているため、現用機に比べて耐量が高いと考えられる。

### 光電子分光

光(X線を含む)を吸収し、そのエネルギーを得て物質から放出された電子のエネルギー分布や角度分布を測定して、固体の電子状態に関する情報を得る手法。

### 交流損失

超電導体、超電導導体、又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。

### 故障モード

超電導ケーブル、冷却システムに発生する故障、トラブルの進展状況により分類した形態。

### 固相拡散機構

固体中での熱による原子の移動、拡散による反応機構をいう。

### 固体窒素

液体窒素を冷却すると $-209.86^{\circ}\text{C}$ (63.15K)で凝固し固体窒素となる。融解熱  $604\text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。

### 固溶体

異なる物質(元素)が互いに均一に溶け合った固相をいう。全組成域にわたって固溶体をつくる場合(完全固溶体、全律固溶体)と、限られた組成範囲でだけ固溶体をつくる場合がある。純物質の結晶構造が同じ場合には完全固溶体を形成しやすい。

### コールドヘッド

冷凍機の低温生成部。冷凍機において最も低温になる部分であり、冷却対象から熱を奪う部分。蓄冷器式冷凍機では、膨張シリンダの低温端部を指す。膨張タービン式冷凍機では冷却対象から熱を奪うために膨張タービン出口側に設置した熱交換器等の部品をコールドヘッドと呼ぶ。

### コールドウォール

基板台のみを加熱して反応室は冷却する方式。反応室全体を加熱する方式はホットウォール型と呼ぶ。

[さ]

### 最高使用電圧

運用時にケーブルにかけられる電圧の最大値。

### 最終限流インピーダンス

限流動作完了後に出現するインピーダンス。

### 細線加工

Y系線材は例えば 10mm の幅広のテープ形状である。これをロス低減のために、超電導層のみを分割したり、あるいは、ケーブルなどを作製しやすいように 2-3mm に分断する技術。主にレーザ加工が使われる。

### 再送電

短絡あるいは地絡事故が発生した際に、事故点を遮断した後に再び送電を開始すること。

### 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。

### サージインピーダンスローディング (SIL)

送電線内での無効電力の発生と消費がバランスする送電電力のこと。

### 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 (77K) で、融点(凝固点)は -210°C (63K)。サブクール液体窒素は 63K~77K の液体窒素のこと。

### サブクール液体窒素

液体窒素は沸点 77K、凝固点 63K である。たとえば、液体窒素の温度を 66K に設定すると、77K に比べて超電導線材の臨界電流は約 2 倍となり、絶縁破壊電圧も向上する。このため、変圧器の運転温度はサブクール液体窒素温度(66K)である。

### サブクール窒素冷却

減圧、冷凍機運転などによりサブクール状態まで液体窒素を冷却する事、またはその運転手法。

### サブチャンネル

強制冷却方式の導体において、ケーブル部とは別に設けた、冷媒を流すための流路。冷媒を強制的に流す際の圧力損失を低減する等の効果を持つ。

### 酸化物超電導材料

化合物超電導材料の中で、特に、酸素を構成元素とする材料。主に、結晶構造はペロブスカイト構造(金属イオン A、B と酸素イオンで構成され、 $ABO_3$  の組成を表す。)で、各サイトの金属イオンの置換により多様な変形が可能なもの。

### 産業用大型レーザー

実験室レベルで用いられるレーザー発信装置に比べ、出力が大きく長時間安定性にも優れている。そのため長尺線材をレーザー蒸着法により成膜する際に、全長にわたって安定した特性を持つ膜が成膜可能となる。

### 三次元的な配向組織

多結晶体において、各結晶粒の結晶方位がすべてそろった組織。

### 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。

### 酸素欠損量

Y系やRE系(RE:希土類元素)などの結晶構造では、BaO層に挟まれたCu-O鎖の酸素が欠損し易いことが知られている。このCu-O鎖の酸素原子は、酸素分圧や温度を変化させることで、可逆的に結合・解離が起こり、その結果、酸素欠損量 $\delta$ は約0~1まで変化する。この $\delta$ を用いて化学式では $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ あるいは $REBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ と記述される。

### 酸素不定比性

Y系やRE系(RE:希土類元素)などの結晶構造では、BaO層に挟まれたCu-O鎖の酸素が欠損し易いことが知られている。化学式で記述すると $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ あるいは $REBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ ( $0 \leq \delta \leq 1$ )となり、酸素のモル比率は6~7の範囲で変化し定比とならない。

### 三相同軸型

3つの導体が同軸上に形成されたもので、各導体間には電気絶縁層が介在する。この導体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。

### 残存性能

長期試験などを経験したケーブルが最終的に示す性能。初期との性能比較で、経年による劣化の有無を確認する。

### 残留磁束

物質が対象かつ周期的に磁化された状態にあるとき、磁化力がゼロとなる磁束密度。



[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。

### 磁気顕微鏡

SQUID や Hall 素子などの微小な磁気センサを用いて試料表面を走査し、磁束分布を像として得る顕微法を指す。量子化磁束挙動など直接的な磁束の測定に加え、電流印加時の自己磁界分布を観測することで、ビオサバールの逆変換により試料表面のシート電流密度ベクトルを得ることが出来る。

### 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。

### 磁気光学効果

磁場と光との相互作用によって生じる効果でファラデー効果と呼ばれている。磁場中では光の偏光面が回転するので、回転角の大きな物質を用いれば、磁束の存在を光の偏光領域として映像化することが可能となり、磁束観察に用いることができる。

### 磁気抵抗測定

磁場の関数としての電気抵抗の測定。

### 磁気分離

液体や気体などに分散している粒子を、磁気力を用いて分離あるいは浄化する技術。分離力である磁気力を外部から容易に制御できる、大量の希薄な溶液を短時間に処理できるなど優れた特徴を持つ。いっぽう、廃棄物を破砕し、磁性体である鉄などを電磁石により選別して非磁性の廃棄物と分離する方法を磁気分離と呼ぶことがある。

### 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、ゼロ磁界の部分の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。

### 軸方向磁場

超電導ケーブルの長手方向に発生する磁場。超電導層を形成する際に、超電導線材を芯材に対してスパイラル形状に巻付けるため、通電時に径方向だけでなく軸方向にも磁場が発

生する。

### シーケンス

機器を自動制御する際の、あらかじめ設定しておく動作の順序。

### 試験法

ケーブルなどの製品や部品の品質を確認するための試験の方法。

### 事故点

線路に発生した絶縁破壊点、もしくはその点を含む切り離し可能な線路区間。早期の事故復旧に関わるものは後者である。

### 事故電流

系統事故に伴って流れる異常電流。短絡電流と地絡電流に大別される。

### 自己配向

PLD 法やスパッタ法などにより  $\text{CeO}_2$ 、 $\text{MgO}$  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。

### 磁性基板

磁性を待つ線材基板。配向金属基板は通常磁性を持つ。低コスト線材として磁性基板線材として有望

### 次世代線材

ビスマス系線材を第一世代として、イットリウム系等の  $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  系超電導体を用いた線材を次世代という。ビスマス系超電導体は磁場中において特性の低下が大きいのに対し、 $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  系超電導体は磁場中でも良好な臨界電流密度特性を有することから磁場中応用に期待され、また銀シースを用いないことから低コスト化も期待されている。

### 磁束クリープ

磁束線がピン止め点に捕まった状態は準安定状態であり、真の平衡状態に向けての緩和、すなわち時間がたつと対数的な減衰が起こる。この時の磁束線の運動を磁束クリープ(フラックスクリープ)といい、熱揺動に起因する。バルク超電導体に捕捉された磁場も磁場捕捉直後は急激な減衰を示し、その後安定する。

### 磁束相図

超電導体中の磁束系は温度や磁場の値に応じていくつかの定性的に異なった熱力学的状態をとる。その様子を温度-磁場平面上に表したもの。現在まだ完全には確定していない。

### 磁束トラップ

超電導体の中の常伝導の部分あるいは比較的超電導性の弱い部分に磁束が閉じこめられてしまうことをいう。この磁束は超電導体にトラップされた部分がピン止めされて動けないため、この部分に定常的に磁束が存在しつづけるので、あたかも永久磁石がそこにあるかのように見える。この磁束が SFQ 回路に影響を与えると誤動作の原因になる。

### 磁束量子

超電導体又はその環を貫く磁束の最小磁束量。  $\Phi_0 = h/2e = 2.07 \times 10^{-15} (\text{Wb})$ 。ここで、 $h$  : プランクの定数、 $e$  : 電子の電荷。

### 実系統

実際に電力が送電されている電力系統

### 質量分析

試料の質量電荷比を求めるときに使用される分析法。高電圧をかけた真空中で試料をイオン化すると、静電力によって試料は装置内を飛行する。飛行しているイオンを電氣的・磁氣的な作用等により質量電荷比に応じて分離し、その後それぞれを検出することで、質量電荷比を横軸、検出強度を縦軸とするマススペクトルを得ることができる。

### 遮断失敗

遮断器が何らかの原因により遮断できなくなる現象。

### 周期加熱法 (Periodic heating method)

伝熱特性評価の一手法。定常熱流法に比べて微小なサイズ・領域での測定が可能であり、レーザフラッシュ法のようなパルス加熱法に比べて汎用性が高い。レーザ等を用いて加熱領域を限定することで分布特性評価も可能となる。通常、対象物の熱拡散率や熱浸透率の直接測定を行う手法であるが、容易に熱伝導率への換算が可能である。

### 重故障

超電導ケーブル運転に重大な影響を及ぼす異常を検知して発信される故障情報。

### 収束イオンビーム (Focused Ion Beam: FIB)

電子顕微鏡システムで、電子の代わりに加速電圧数十 keV に加速されたイオンを試料表面に走査しながら照射し、そのスパッタリング効果により試料をエッチングする加工技術。FIB 装置のイオン源には、通常、低融点(29.8°C)のガリウム(Ga)イオンを用いる。電子に比べ 10 万倍重い質量の粒子線となるため、デカナノ( $10^{-8}\text{m}$ )級の微細加工に用いられる。また、走査された Ga イオンが試料表面に衝突したときに出てくる二次電子を検出することにより、走査イオン顕微鏡(Scanning ion microscopy; SIM)像が得られ、試料形態及び組織の観察も可能である。

### 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。

### 重潮流

定格電力に近い電力の流れ。

### 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。

### 需給運用

時々刻々変動する需要に対し、常に供給力を確保して需要と供給力の均衡を図り、火力発電、原子力発電などの供給力を総合的に組み合わせて信頼性および経済性の高い運用を行う一連の業務。

### 出荷試験

→受入試験

### 主保護リレー

電力系統は何重にも組み合わせた保護継電器(リレー)によって保護されている。主保護継電器は、ある保護区間内に発生した事故に対し、一番目に動作するよう整定された保護継電器。

### 寿命指数

課電電圧に対する長期劣化特性を評価できる、ケーブル構造に依存する指標。CV ケーブルや OF ケーブルに代表される従来のケーブルの長期破壊特性は、課電電界(kV/mm)の n 乗と課電時間(H)の積が一定になる特徴がある。ここでの n が寿命指数と定義される。

### シュラウド

インペラ(羽根車)の羽根先端部。インペラの入口から出口にかけて羽根先端部を連ねた輪郭線のことをシュラウドラインと呼ぶ。一方、羽根根元部はハブと呼ばれる。

### 竣工試験

出荷試験に合格した製品が現地布設されるまでの間に、外傷や過度のわん曲などが原因で、設備が備えるべき性能を損なっていないか確認する試験。電気設備技術基準の解釈に基づいて行う電気試験も含む。

## 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。

## ジョイント

中間接続部。

## 常温絶縁タイプ

超電導ケーブルの構造で、冷媒で冷却される部分が導体部だけであり、その上に断熱層、次に電気絶縁層、遮蔽層が形成されるケーブル。電気絶縁層は断熱層の外側にあるので、常温に置かれている。

## 焼結(本焼)

仮焼を終えた粉末を用い金型等でプレス成形し、粉体の固相拡散、ネック部の成長、結晶粒界の移動などによって連結したバルク材料を得る熱処理。MOD法の $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ の結晶化処理も本焼という。

## 照射フルエンス

量子線において単位体積当たりを通過した荷電粒子の総数。

## 晶出(晶析、結晶化)

結晶性の物質を溶解している溶液(液相)から、核生成・成長過程を通して固相が生じる現象を晶出と呼ぶ。多くの場合、溶媒を蒸発させて濃縮したり、あるいは温度を下げて飽和溶解度よりも濃度を高くして結晶を固化させる。他の物質を加えて反応により溶解度の小さい結晶を結晶化させる場合もある。

## 蒸着

金属または非金属材料を高真空中で加熱等により蒸発させて、ガラス、水晶板、へき開した結晶、金属などの基板表面に薄膜として凝着させること。

## 冗長

機器の信頼性を高める方策のひとつ。冗長とは複数の機器を用意しておくことで、待機冗長と切り替え冗長がある。待機冗長は機器が故障した際に予備機を稼動し、この間に故障機を整備する方式。切り替え冗長は定期的に機器を切り替え停止機を整備しておく方式。

## 常電導状態

超電導状態に対して、電気抵抗がゼロでない通常の電気伝導の状態をいう。超電導体に臨界磁場より大きな磁場をかけたり、転移温度より高い温度にすると、電気抵抗はゼロでなくなり、常電導状態が出現する。

### 常電導シールド層

銅などの常電導材料を用いて超電導シールド層に対して並列に設けられる層。事故電流が流れた際のバイパス回路の役割を担う。

### 初期結晶粒

例えば  $\text{RE Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  結晶を一方向凝固法等により熔融凝固する際、凝固初期において存在している結晶粒を初期結晶粒と呼ぶ。

### 触媒能

触媒としての性能。

### 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。

### 人工粒界

決まった傾角を持ったバイクリスタル基板上に超電導薄膜を成長させると同じ傾角を持った超電導粒界が実現出来る。このようにして作られた粒界。但しミクロに見ると、基板の傾角と全く同じ粒界のみができるとは限らない。

### 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ニング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)がピンニング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ニング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ニング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。

## 進入雷

雷の被害のひとつで侵入雷とも呼ぶ。他に直撃雷、側撃雷、誘導雷等がある。

[す]

## スターリングパルス管

パルス管冷凍機のうち、常温部に設置する圧力波発信源としてスターリング冷凍機の圧縮用ピストンを用いる冷凍機。

## スターリング冷凍機

冷凍機の種類。空間の常温側端に断熱圧縮を行うピストン、中間に蓄熱器、他端の低温側に断熱膨張を行うピストンを有する。両端のピストンが位相をずらして駆動されることで冷凍サイクルを構成する。理論的な効率はいわゆるカルノーサイクルと等しく高効率であり、小型化が容易である。

## ストライプ

高温超電導体において、電荷やスピンの空間的に不均一に偏る現象のこと。電荷が縞状に偏り、縞には半分だけホールが存在し、縞方向にはホールは自由に動けるが、縞間の運動は阻害される、電荷の縞を挟むスピンの縞には電荷は存在しない。ホールの濃度が  $1/8$  のときに一部の系でホールとスピンの縞の秩序を示すことが中性子散乱等で観測されており、ほかの系や組成でも動的なストライプ揺らぎがあるともされる。

## ストレスコーン

高圧ケーブルの終端接続部において電界の集中を緩和させ、絶縁耐力を維持するために、遮へい層をコーン状にした部分。

## スパイラル管

螺旋状に成型した配管で、導体部分と配管内部の間に空隙があるため、He などの冷媒が自由に入出力できるという特徴がある。

## スパイラル成長(渦巻き成長)

結晶の表面の中心部から縁に向かって格子の段差が発生すると、段差の部分に原子が付着しやすくなり、扇子が開くように段差が移動して、表面と垂直な方向に渦巻き状に結晶が成長する。

## 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。

### スピコーティング

薄膜形成法の一つで、回転している基板の上に溶液原料を滴下し、遠心力で液相膜を形成する手法をいう。

### すべり (slip)

誘導モータの回転数を、同期回転数(一次側回転磁界の回転数)によって規格化した値である。誘導機の回転数を  $N$ 、同期回転数を  $N_s$  とすると、 $(N_s - N)/N_s$  と定義される。回転子が停止状態にある時はすべり 1、同期回転状態にあるときはすべり 0 となる。

### スマートグリッド

通信機能を持った人工知能搭載の電力系や制御機器等をネットワーク化することによって発電設備から末端の電力機器までを通信網で接続し、自動的に需給調整が可能な電力系統を構築することで電力の需給バランスを最適化する。再生可能エネルギーへの対応のためにスマートグリッドが用いられる要素も大きい。

### 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]

### 成長界面

ある結晶がその結晶と構造の異なる環境相(一般には気相あるいは液相であることが多い)から成長している時、その成長している結晶と環境相との境界を成長界面と呼ぶ。

### 整定値

保護リレーを動作させるためのしきい値。電圧、電流、抵抗、タイマー等の数値をリレーに設定する。

### 整定変更

電力系統構成の変更に伴って、リレー等の整定値を変更すること。

### 整流器型限流器

整流器ブリッジと超電導リアクトルを組合せ、事故時のみ必要なインピーダンスを発生させる限流器をいう。



### 接合界面

接合において、バリア層及びバリア層と下部超電導薄膜、上部超電導薄膜との境界付近の部分を指す。

### 接続抵抗

ケーブル超電導線材と中間接続部の縦添え超電導線材との接続は半田を使用している。その接続に伴う常電導抵抗を示す。

### 絶対圧力

絶対真空を基準に表した圧力のこと。絶対零圧力ともいう。

### 遷移金属酸化物

遷移金属元素(長周期表の 3A~7A,8,1B 中 d 殻が満たされていく元素)と酸素との化合物。電子-電子、電子-格子相互作用が強く、伝導性および磁性において興味深い性質をもつ。

### 線間短絡

3相のうち、任意の2相同士が短絡することをいう。

### 前駆物質(前駆体、先駆物質)

着目する生成物の前の段階にある一連の物質を指すが、一般には1つ前の段階の物質をさす。

### 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。

### 全損失

超電導線材に交流外部磁界を印加し交流通電したときに生じる損失

### 線路

電力分野では送電線・電信線などの導線とその支持施設のこと。

[そ]

### 走査型トンネル顕微鏡

トンネル効果を用いた顕微鏡。STM と呼ばれている。原子像や状態密度マップを得ることができ、磁束ピン止めセンターの候補である Nd/Ba の置換領域や種々の欠陥について形状、大きさおよび状態密度の違いを観察する。

### 双晶境界

REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> 系の単結晶およびそれに類する結晶配向性の高い試料では、結晶成長温度

よりも低い温度に正方晶と斜方晶の構造相転移が存在するために、冷却過程での応力緩和により双晶が生じる。a 軸と b 軸が入れ替わっている界面を双晶境界と呼び、磁束のピン止めセンターのひとつとなっている。

### 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。

### 素線

ケーブルを構成する個々の線の一つ。撚線、成形撚線、編組線などの超電導線や超電導ケーブルを構成する最小単位の超電導線。

### 素線絶縁銅撚り線

通常の銅撚り線に対して、素線(銅線)一本一本に絶縁を施したうえで撚った銅線のこと。

### ソノケニカル反応

超音波により溶液等の媒体の分子振動を促し、それにより生じる局部的な高温、高圧反応場での化学反応をいう。

### ソルボサーマル反応(水熱反応)

高温、高圧の溶媒中での溶解、分解、結晶化等の化学反応をいう。特に溶媒を水に絞った場合を水熱反応という。

### 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。

### ゾーンメルト法(浮融帯溶融法、FZ 法)

通常鉛直に保持した試料棒の一部を加熱して溶融部をつくり、その液相部を表面張力によって支えながら上あるいは下方に移動させることにより凝固・結晶成長させる手法。種結晶を用いるか、初めにくびれを作ってやることにより単結晶が得られやすい。RE Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7- $\delta$</sub>  結晶では成長初期における選択成長により単一結晶粒の成長も得られる。

[た]

### 耐圧特性

耐圧力特性。容器、ケーブルなどが、内部圧力に対して示す特性。

## 耐過電流特性：JEC (Japanese Electrotechnical Committee) 基準

電力送電ケーブルにおいては、下表に示すような過電流に対する耐性についての基準が定められている。

短絡・地絡の最大電流値 (JEC 基準)

Voltage Class	Permissible Current	Duration
275 kV	50.0 kA	0.07 - 0.3 s
110, 66/77 kV	31.5 kA	0.1 - 2.0 s
33 kV	25.0 kA	0.3 - 2.0 s

## 大傾角粒界

結晶粒界は、粒界での方位角の差から小傾角粒界と大傾角粒界に分けることができます。一般に大傾角粒界の場合は、多数の空孔が入り乱れた複雑構造をとるため、電子の散乱を受け易く、超電導体の場合、弱結合になりやすいといわれている。

## 帯磁率

磁化率。磁化  $M$  と磁場  $H$  との関係  $M=\chi H$  を表わす  $\chi$  をいう。常磁性体では  $10^{-3}$ - $10^{-6}$  程度の正の値、反磁性体では  $10^{-6}$  程度の負の値、超電導体の完全反磁性では  $-1/4\pi$  の値である。

## 体積拡散

固体内部の拡散。これに対し表面や粒界での拡散をそれぞれ表面拡散および粒界拡散と呼ぶ。これらの拡散過程の活性化エネルギーは、体積<粒界<表面の順である。大きな単結晶では表面や粒界は小さいので、表面拡散や粒界拡散は無視できるが、多結晶体では表面や粒界の面積が無視できなくなり、表面拡散速度や粒界拡散速度が全体の拡散速度に大きく寄与し、場合によっては、体積拡散をしのぐようにもなる。

## 対地定格電圧

接地式線路において、高压部と大地(アース)間の電圧を対地電圧、線路の定格送電時に印加される電圧を対地定格電圧という。

## 第2相 (常超電導相)

超電導特性を示す結晶(母相)の組成とは異なる組成の結晶部分(常電導相:非超電導相)を示す。Y系バルク体では  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  が母相で、これ以外の  $Y_2BaCuO_5$  相などを第2相と呼ぶ。結晶成長条件および組成を最適にすることで、こうした第2相を意識的に母相内に微細に析出させることができる。この第2相は液体窒素温度(77 K)で有効なピン止め点として働く。

## 第2相粒子分散制御

非超電導相である第2相(Y211相)を微細化し、超電導相である母相( $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ )の中に均一分散させることでピン止め効果を大きくし、臨界電流の増加等の超電導特性向上がな

される。

### 第一種超電導体

超電導体に外部から磁場を与えた場合、磁場の強さが臨界磁場  $H_c$  以下でマイスナー効果を示し、磁束が内部に侵入しない超電導体。臨界磁場に磁場が達すると磁束が侵入し、常電導状態へ1次転移する。Nb, V 以外の単体の超電導体はほとんどすべてこれに属する。

### 第二種超電導体

下部臨界磁場  $H_{c1}$  以下の磁場領域で、マイスナー状態となり、 $H_{c1}$  を超え、上部臨界磁場  $H_{c2}$  までの磁場領域では磁束が侵入し混合状態となる超電導体。実用超電導体において第二種超電導体は上部臨界磁場  $H_{c2}$  が非常に大きく、高磁場まで超電導と磁場が共存できる(超電導状態を保つ)。ただし、電流の作用であるローレンツ力が働いて量子化磁束の運動が起こると、電場が生じて電気抵抗が生じる。従って電気抵抗の発生を抑えるため、量子化磁束の運動を止めるピン止めの作用が必要である。合金や酸化物系超電導体は第2種超電導体である。

### 耐力

材料が耐えうる力のこと。材料試験の用語では、明確な降伏点をもたない非鉄金属材料で、ある一定の塑性ひずみを生じる応力をたとえば 0.2%耐力などとして、材料の特性を比較するのに用いる。

### たけのこ処理

タケノコの皮をはがすように超電導ケーブル終端を段々に処理していく方法。

### ターゲット機構

レーザ蒸着法等において、ターゲットはレーザ光等が照射された部分から蒸発する。その結果、ターゲット表面でその部分だけがえぐれ凹凸が生じやすい。ターゲット表面に大きな凹凸が生じると成膜条件が変化する等の悪影響が生じるため、長時間安定して均質な膜を成膜するためには、レーザ光がターゲット全面に平均してあたるように、ターゲットを回転・並進移動するためのターゲット機構が必要になる。

### 多元系材料、多元系酸化物、多元系固溶体

複数の元素から構成される材料、酸化物、固溶体という。

### 種結晶

単結晶を育成するときに、育成する結晶の方位を定めるために用いられる。引き上げ単結晶育成法にはバルク単結晶が用いられる。Y系超電導体のLPE成膜においても、MgO単結晶基板等の上に種結晶膜として $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ 結晶を気相法により成膜している。薄膜線材での中間層の最上層を種結晶層と呼ぶこともある。

### **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。

### **単一粒**

引き上げ単結晶において、X線ロックング曲線による評価で半値幅が $0.2^\circ$ 未満で、引き上げ結晶育成時に内部に取り込まれたフラックスインクルージョンを含まない領域。

### **単結晶**

任意の結晶軸に注目したとき、試料のどの部分においてもその向きが同一であるような結晶質固体をいう。現実の単結晶は不完全結晶であって部分部分で極わずかではあるが結晶軸の向きが変わっているのがふつうである。固体の物性には単結晶において典型的に現れるものが多いので物性の基礎的研究の試料として重要である。なお、人工的に単結晶を得る方法には、結晶引き上げ法、帯域熔融法、ヴェルヌーイ法などがある。

### **単心型**

超電導ケーブルの構造において、一つのケーブルコアが、一つの断熱管の中に収納されているもの。

### **タンデム式レーザー蒸着**

2つ以上のレーザー源を用い、光学系の操作によりレーザー源を切り替えることにより、同一の基板上に連続して成膜するレーザー蒸着法。ひとつのレーザー源で成膜中に他のレーザー源のメンテナンスが可能であるため、原理的には無限時間の連続成膜が可能となる。

### **断熱管**

ケーブル外部から液体窒素槽への熱侵入を防ぐ役割を担う。一般に、金属製の二重管の間にスーパーインシュレーションなどを用いた断熱層を設け、さらに高真空に保つことで熱侵入を低減する。

### **端末**

終端接続部と同意。

### **端末容器**

液体窒素を内蔵する容器と、液体窒素を内蔵した容器を真空断熱するために密封する構造を有した容器からなる2重容器のこと。

### **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。

## 短絡発電機

短絡事故を模擬した大電流を発生するための試験設備。

## 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。

## [ち]

## 窒素

分子量 28 の 2 原子分子。大気の 8 割を占め、空気中から分離採取される。沸点 77K、凝固点 63K であり、高温超電導体の冷却に広く用いられる。

## 窒素循環ポンプ

冷却に用いる液体窒素は冷凍機を出て超電導ケーブル内を通過して冷凍機に戻り、再び系内を循環する。このためのポンプを窒素循環ポンプと称する。脈動を防ぐため遠心式ポンプが用いられ、駆動のためのモータは熱侵入を低減するため長軸でポンプ本体と接続される。

## チャンバー

減圧、酸化性、還元性、不活性ガス等の雰囲気制御するための真空容器。チェンバーと呼ぶこともある。

## 中間接続部

電力送電線路として長尺のケーブルシステムでは製造面、輸送面よりケーブル長に制約がある場合が多くそこで数百mおきにケーブルを接続する必要がある。そのために必要となる超電導ケーブル同士をマンホール内にて接続するための機器。

## 中間層

基板と超電導層の間にあり、線材作製プロセスにおける加熱処理における基板と超電導層との反応を防ぐ役割を持つ。また中間層配向型線材においてはプロセス制御により中間層を配向させる。かつ中間層の結晶配向性、平坦性などはその上にある超電導層の結晶配向、超電導特性に大きく影響を与える。

### 中性子散乱

中性子が入射した時、物質を構成する原子核との相互作用や磁気を担う電子との磁氣的相互作用で散乱される(方向を変える)現象。本プロジェクトでは中性子のエネルギーが散乱によって変わる非弾性散乱の観測で高温超電導体のスピンの縞状の磁氣的構造を見出した。

### チューブ式塗布

ディップコートにおいて、原料溶液を満たした U 字型の形状をしたチューブ管内にテープを通過させるにより塗布を行う方法。

### 調相設備

無効電力の調整で送電線の力率を改善し受電側での電圧制御を行うための設備。

### 超電導エネルギー貯蔵

電流の流れているコイルには、電磁エネルギーが貯えられるが、このコイルを超電導線材でつくり、ジュール損失なしに大電力を貯蔵すること。

### 超電導ギャップ

超電導状態と常電導状態の自由エネルギー差(凝集エネルギー)に相当し、このエネルギー分超電導下では安定化する。エネルギー差は温度上昇とともに減少し、超電導転移温度でゼロになる。

### 超電導シールド層

導体層が発生する磁場を遮蔽するために、主に絶縁層の外側に超電導線材を用いて設けられる層。両端末で三相を短絡することにより、導体層に対して位相が反転した電流が誘導され、磁気遮蔽を可能とする。

### 超電導相関長

超電導電子の波動関数の空間的な広がり。超電導転移温度が高く、キャリア濃度の低い酸化物超電導体では従来の超電導体より相関長は短く、超電導揺らぎが大きいのが特徴である。

### 超電導体

ある条件の下で電気抵抗がゼロとなる物質。ある条件とは臨界温度、臨界磁場、臨界電流密度を超えない範囲を指す。超電導体は、完全導電性、完全反磁性(マイスナー効果)、磁束の量子化、ジョセフソン効果などの他に類を見ない特性を示すため、省エネルギー技術など様々な応用が期待されている。また、高温超電導は 25 K(ケルビン)は絶対温度の単位で、0K=-273°C)以上に臨界温度をもつ物質で、主に銅酸化物系材料である。

### 超電導対破壊

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。

### 超電導導体

ある条件の下で電気抵抗がゼロとなる物質。ある条件とは臨界温度、臨界磁場、臨界電流密度を超えない範囲を指す。超電導体は、完全導電性、完全反磁性(マイスナー効果)、磁束の量子化、ジョセフソン効果などの他に類を見ない特性を示すため、省エネルギー技術など様々な応用が期待されている。また、高温超電導は **25 K**(ケルビン)は絶対温度の単位で、 $0\text{K}=-273^{\circ}\text{C}$ )以上に臨界温度をもつ物質で、主に銅酸化物系材料である。

### 超電導薄膜限流素子

セラミックスなどの基板に製膜した超電導体を用いた限流素子。1枚の超電導膜からなるエレメントをさす場合と、エレメントを直並列に接続した集合体をさす場合と両方用いる。

### 潮流

送電線や変電所などの電力系統に流れる電力のこと。

### 直接冷却方式

冷却システムにおいて、冷媒が直接被冷却物を冷やす方式。

### 地絡事故

送電中の充電部とアース部が導通して起こる電気事故。一般に、短絡電流より電流値は小さい。

[つ]

### ツイスト線材

Bi2223 線材等において、超電導フィラメントに捻りが加えられている線材。

### ツイストピッチ

フィラメントまたは素線を導体軸の周りに捻る加工(ツイスト)が施された導体において、フィラメントまたは素線が初期の相対位置まで最初に戻る軸長。【JIS H 7005-1999】

### 通電損失

超電導線材に交流通電電流を流したときに発生する損失。

### 通電用 CT

電力機器に通電を実施する際に用いられる変流器。



[て]

### 定格電流

設計で定められた規定条件下で作動する機器、装置等の電流範囲。

### 抵抗率

電気抵抗率の略語。断面積  $S$  で長さ  $l$  の物体に長さ方向に電流を流した時の抵抗  $R$  は、 $R=(l/S) \rho$ となる。SI 単位系は $\Omega\text{m}$ である。

### 定常熱負荷

超電導コイルの定常運転時において発生する熱負荷。

### 定態(動態)安定度

電力系統が平衡運転状態(即ち平常時)にあって、送電線 1 回線停止などの極めて微小な擾乱が加わったときに動揺が収まり元の状態に戻るか、動揺が持続又は拡大するかの安定性。

### ディップ法 (ディップコーティング法)

MOD 法において有機金属塩溶液を基板に塗布する手法のひとつで、基板を溶液に浸すことにより塗布する方法。

### 鉄心

変圧器・電磁石など、コイルの中に入れて磁気回路として用いる鋼材。一次回路と二次回路を相互インダクタンスで結合する磁気回路として、通常は鉄が用いられる。変圧器の鉄心には鉄損が少なく、飽和磁束密度・透磁率の大きい材料が適しており、ケイ素鋼板が多く用いられ、特定の方向に磁化し易い方向性鋼板が採用されることも多い。また、特に損失の低減を図る目的でアモルファス磁性材料が用いられることもある。

### 電圧アンシラリ

電力系統の適正な運用に必要な様々な操作・調整を行うことをアンシラリ(付加的)サービスと呼んでいる。電圧アンシラリとは系統の電圧を適切に調整・維持するための様々な操作、調整のことである。

### 電圧安定性

電力系統の電圧は、発電機出力、電圧、運転力率、負荷の消費電力、力率および系統の構成形態や変圧器の電圧調整器、シャントリアクトルや電力用コンデンサなどの調相設備などの運転状態により決定される。電力系統に何らかのじょう乱があったときに、電圧が新たな平衡点に落ち着く系統の能力または関連した性質のこと。

### 電圧降下

電気回路に電流を流したとき、回路中に存在する電気抵抗の両端に電位差が生ずる現象のこと。

## 電圧タップ

電氣的四端子法により 2 点間の電位差を測定する際に使用する電位測定線。

## 転位導体

超電導素線を集合し大電流容量導体化する際に、絶縁された素線の位置を時計回りまたは反時計回りに順々に移動するよう撚り合わせることにより、素線間の相互インピーダンスを均一化し、パルス状電流または交流電流が流れても、素線間で均一に電流を流すことができる導体。従来の銅導体でも、変圧器巻線および電氣子巻線などの大電流容量導体に使用されている。

## 電解研磨

IBAD-MgO 基板では MgO が高配向するためには表面粗さ数 nm 以下が必要である。このために、市販の精密圧延の Hastelloy 基板を種々の酸溶液により 10nm レベルの表面厚さから、数 nm にしている。

## 電荷輸送特性

電氣抵抗や熱起電力(導体中に温度勾配がある時、電子状態の熱平衡からずれから生じる電場勾配)など電荷をもつ電子や正孔が物質中を移動する振舞い。

## 電氣化学反応

電極の電位を外部電源により制御し、反応場の酸化還元電位を任意に設定し、界面の化合物の電子の供与(還元)、や授与(酸化)を制御する反応をいう。

## 電氣的四端子法

試料に対して電流を流した際に、ある区間に発生する電位差を測定する方法。電流リードと電圧リードに別々の線を用いる方法。一般に、二端子法と四端子法があるが、低抵抗の資料の測定に際しては精度の高い四端子法が用いられる。

## 電子ビーム蒸着法

金属や酸化物等を真空中で電子ビームを照射することにより加熱蒸発させて、対向した基板上に堆積させ蒸着を行う手法。

## 電子顕微鏡

電子線を用いて試料の拡大像を得る装置。この中には試料を透過した電子を電子レンズを用いて結像する透過型(TEM)、試料表面で反射した電子を結像する反射型、集束電子線を試料表面上に走査して各走査点からの 2 次電子を用いて像をつくる走査電子顕微鏡(SEM)、加熱あるいはイオン照射によって試料から放出される電子を結像する表面放出型(電界イオン顕微鏡)などがある。また、入射した電子によって試料から放出される特性 X 線または試料による電子エネルギー損出スペクトルを用いて微小領域の元素分析を行うこともできる

## 電磁推進

電気推進のひとつ。ローレンツ力を用いているもののほか、電場と系の加速の方向が互いに異なるタイプの推進系などがある。

## 電子的阻止能

ある運動エネルギーを持つ荷電粒子が、物質中を進む時に飛跡に沿って単位長さ当たり失うエネルギー量が阻止能であり、電子的阻止能は荷電粒子と物質を構成する原子との電子的相互作用によって引き起こされる電子励起によるエネルギー損失である。

## 電子プローブマイクロ分析法 (EPMA)

固体試料表面に細く絞られた(ミクロンからサブミクロンの大きさ)電子線照射して、試料と電子線との相互作用により発生する特性 X 線を効率よく検出することにより、試料を構成している元素とその量を測定する方法。Electron Probe Micro Analyzer。

## 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。

## 伝導面間の結合

高温超電導体の  $\text{CuO}_2$  伝導層の面内の相関は非常に強いのに対して、面間は非常に弱い。しかし、Cu を少量 Zn(亜鉛)や Ni(ニッケル)に置換することによって、面内のキャリア閉じ込めが解けて、面間の相関が強められる現象が見い出された。

## 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—電圧応答における非局在性

通常は試料中のある場所における電流値はその場所における電場の値だけで決まる。しかし量子化磁束が存在すると巨視的に離れた場所における電場の値が影響を及ぼすこともあり得る。その時電流—電圧応答が非局所的であると表現する。

## 電流磁気特性(効果)

磁場中の電気抵抗や電圧電流依存性を全体として表現している言い方。

## 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。低熱侵入性に優れる酸化物超電導体等から成る。

### 電力動揺

電力系統に短絡事故などの擾乱が発生した後に、送電線に流れる潮流が変動したり、発電機の出力が変動すること。

### 電力ネットワーク

電力系統と同義語。

### 電力用超電導ケーブル

電氣的に絶縁した超電導体系(ケーブル導体)と、これを極低温に維持するための熱絶縁容器から構成されたケーブル。

[と]

### 銅安定化線材

薄膜線材はクエンチした場合そのままでは抵抗が大きくなるため焼損を起こしやすい。そのため銅層を線材につけてクエンチ時の抵抗を下げ安定性を増し、クエンチ時の焼損を防ぐ対策をした線材。

### 透過型電子顕微鏡 (Transmission Electron Microscopy: TEM)

試料を極めて薄くし、試料を透過してくる電子(透過電子)により結像する顕微鏡。観察対象を透かして観察することになるため、通常の方法解析で用いる場合は、試料厚を数100nm以下にする必要がある。高性能な透過型電子顕微鏡の場合、その空間分解能は0.2nm以下である。結晶欠陥、粒径、膜厚等を直接観察することができる。また、電子回折図形を撮影すると、結晶方位、結晶の同定を行うことができる。通常の方法解析用である加速電圧200keVの電子顕微鏡では、2Å程度の点分解能を有する。

### 導体接続金具

終端接続部において超電導導体に対して半田で電氣的に接続し、フォーマに対して圧縮することにより機械的および電氣的に接続するための金具。

### 導体接続スリーブ

両側ケーブルコア中心に位置する銅より線フォーマを機械的な圧縮力で接続するための部材。

### 導体接続損失

導体が中間接続部、終端接続部などで、常電導導体と接続される際に、接続部に電気抵抗

が発生するが、これに起因する損失。

### 洞道

地中に構築する暗きょ(トンネル)。床上あるいは棚上にケーブルを布設することになる。

### 銅比(銀比)

安定化材として銅・銀を用いた複合超電導線における銅・銀と超電導体との体積比(断面積比)。

### トラップ磁束

超電導体に磁場を与えたとき、内部に侵入した磁束のうち、磁場が取り除かれた後にも外部に排出されずに残っている磁束。第二種超電導体に侵入した量子化磁束は、析出物、格子欠陥、転位、粒界、不純物などのピニングセンタに捕捉されている。ピニング力が大きければ、磁場が取り除かれた後にも多くの磁束が外部に排出されずに残り、あたかも強磁性体のようにふるまいをする。

### ドラム式

ディップコートにおいて、テープを巻き付けた回転ドラムを原料溶液槽に浸漬し、テープを走行させることにより塗布を行う方法。テープの走行に伴いドラムが回転する。

### トリップ

事故電流を遮断するための遮断器開放動作。

### トリフルオロアセテート (TFA:Trifluoroacetate)

トリフルオロ酢酸( $\text{CH}_3\text{COOH}$ )。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

ドーナツ状を意味する「円環状の」という意味の形容詞。邦文中では名詞的に使われることもある

### 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。

### トロイド

平面上の閉曲線が同平面上の同曲線とは交わらない直線を軸に回転してできる曲面。また、それに囲まれた立体のこと。ドーナツ形状。

### トンネル分光

真空中で鋭い針状の金属チップの先を試料に近づけると、トンネル電流が流れる。そのトンネル電流を精密に制御することにより表面の電子状態を1オングストローム以上の水平分解能で観測できるようにした装置が走査型トンネル顕微鏡である。特に、走査型トンネル分光は超電導ギャップの空間依存性など電子状態を調べる研究でも大きな成果を上げている。

[な]

### ナノペースト

0.01 $\mu\text{m}$ 以下のナノ粒子からなる金属ペースト。(ナノペーストは商品名)金属は粒子サイズがナノレベルまで小さくなると、バルク状態とは全く異なる物理特性を示す。中でも特徴的であるのは、金属本来の融点よりもはるかに低い温度で、金属ナノ粒子が焼結するという現象である。

### ナノ粒子

ナノサイズの微細粒の呼称。ナノ(nano-)10<sup>-9</sup>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、強いピンニング作用があることが知られている。

[に]

### 二次元核成長

基板上に薄膜が成長する極初期の段階(核)の形が薄い板状となる成長様式。塊状の場合には三次元核成長という。

### 二重故障

機器の単一故障ではなく、同時に関連性の低い2箇所(以上)の機器で故障、トラブルが発生する事。

### 二次電池(2次電池)

蓄電池、充電式電池ともいい、充電を行うことにより電気を蓄えて電池として使用できる様になり、繰り返し使用することが出来る電池。

[ぬ]

[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。

#### 熱電対

異種金属の2接点間の温度差によって熱起電力が生じる現象(ゼーベック効果)を利用した温度センサ。

#### 熱電能

導電性の物質の両端に温度差をつけた時の1Kあたりの熱起電力。

#### 熱天秤重量測定 (TGA)

温度やガス雰囲気を経時と共に変えながら重量測定を行い、その経時変化からその物質の化学反応や相転位に関する知見を得る方法。YBCO系では、温度や酸素雰囲気によって酸素が可逆的に結合・解離することがTGAによって明らかにされた。

#### 熱物性値

熱伝導率、熱容量、熱収縮率等の温度依存性を有する物性値。

#### 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。

[の]

#### ノーマル電圧

超電導導体がクエンチして常電導状態に遷移することにより発生する電圧。超電導マグネットは、一定電流で運転中に常電導転移が発生すると巻線の一部に抵抗が発生し、時間の経過とともに常電導転移が拡大して抵抗が増大し巻線内部電圧が上昇する。このため、損傷を受けないよういち早くノーマル電圧を検出する必要がある。

## ノリス則

W.T. Norris が 1969 年頃、超電導線材の形状(楕円線材、Strip 線材)による通電損失の理論式を示した。これをノリス則という。楕円線材の場合、通電損失は電流の 3 乗に比例し、Strip 線材の場合は 4 乗に比例する。

## ノンツイスト線材

Bi2223 線材等において、超電導フィラメントに捻りが加えられていない線材。

[は]

## 配向銀テープ

銀を冷間圧延後、熱処理して再結晶させることにより、銀結晶粒の結晶方位を 3 次元的にそろえたテープ。

## バイクリスタル

結晶方位が異なる 2 つの単結晶がひとつの粒界面で接合しているもの。

## バイクリスタル粒界接合

結晶方位が異なる 2 つの単結晶を張り合わせた基板(バイクリスタル基板)上に、高温超電導薄膜をエピタキシャル成長させることにより得られる粒界接合。

## 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)を優先は移行させた組織を作ることができる。

## 配向性

超電導層、中間層等の結晶軸の揃い方の程度を配向性という。基板面に垂直な方向(膜厚方向、c 軸方向)への配向と、線材の長手方向の結晶の並びである面内配向(a,b 軸方向)の 2 つが超電導特性、線材特性に重要な因子となる。

## バイパス回路

信頼性の不確かな回路や実験的な回路等と並行に設置した回路で、前者を切り離した場合に運用し信頼度を確保するもの。CV ケーブルによる線路がこれに該当する。

## ハイブリッド超電導導体

異なる種類の線材を用いて構成される超電導導体。

## パイロクロア構造

硫化亜鉛タイプ構造(閃亜鉛構造)に関連の結晶構造で、 $A_2B_2X_{7-8}$  の組成をもつ多くの化合物  
プロジェクト用語集 44



物がパイロクロア構造をとる。 $\text{Cd}_2\text{Nb}_2\text{O}_{7-8}$ ,  $\text{Cd}_2\text{Ta}_2\text{O}_7$ ,  $\text{Ca}_2\text{Ta}_2\text{O}_{7-8}$  などの大きい 2 価の陽イオン(A)と小さい 5 価の陽イオン(B)とを含む多数の化合物および希土類元素のチタン酸塩の多くがパイロクロア構造を取る。

### 薄肉線材

Y 系超電導線のような積層型テープ線材において、基材の厚みが薄いもの。

### 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。

### バックアップ

信頼性から、ある機器が故障してもシステム的にその機能を支えてシステムの運転に支障が及ばないようにすること。該当する機器を複数用意しておく場合は冗長化と証する。

### バリア

ビスマス系多芯線材の交流損失低減のためには、ツイストと高垂直抵抗化の組合せが有効であることが知られている。ビスマス系超電導線材の場合、母材に銀、銀合金を用いる限り、この垂直抵抗を大きくできない。その解決策として、フィラメント間に高抵抗層を入れた線材の開発が進められている。このフィラメント間の高抵抗層をバリアと言う。

### バルク (bulk)

“かたまり”のことで、広義には、セラミックス等の焼結体も含まれるが、(LRE)Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-8</sub> 系材料の場合は、通常、一旦溶解させてから結晶成長させた、熔融成長体(melt-processed bulk)のことを示す。通常、REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-8</sub> 超電導相と第 2 相との複合材料となっており、RE-Ba-Cu-O 系バルク等と呼ばれる。

### パルス管 (パルスチューブ) 冷凍機

1961 年ギフォードとロングスワースによって考案された、低温部にステンレス管と蓄冷器を持つだけの簡単な冷凍機で、熱音響効果を利用するもの。低温部に可動部がないため、電流リードなどの他の機能との組み合わせが容易である。

### パルス磁石 (Pulsed magnet)

コンデンサバンクに蓄積された電荷を短時間の内に磁石コイルに流すことによって、瞬間的に高い磁場を得ることができる。簡単に 30 テスラ以上の高い磁場を得ることができる反面、金属試料の場合には渦電流による発熱があり、使用が限定される場合もある。超電導体試料の測定では、定常磁場では到達困難な非常に高い磁場での不可逆磁場の測定が可能である。

### バーンアウト信号

PID 制御コントローラで入力値の参照ができなくなった場合に、ある一定の制御を行なうため、外部へ出力する制御信号。例えば温度を一定に保持する制御を行なっている途中で、温度が参照できなくなった場合に、温度を下げるようなバーンアウト信号(制御信号)を出す。

### 半導体的面間伝導

高温超電導の不足ドーパと呼ばれる(最適値より)キャリア濃度の低い領域で、2次元  $\text{CuO}_2$  面内の電気抵抗は温度の低下と共に減少するのに対して、それに垂直な面間方向では温度低下と共に抵抗が増加する半導体的な振る舞いがみえる現象。

### 反応性抑制中間層

次世代線材において、超電導層と金属基板あるいは中間層との反応を抑制するために設ける中間層。

### 半割れ銅管

両側超電導ケーブルのシールド同士を接続する必要がある。中間接続部においては補強絶縁部を避けた形状でシールド超電導線材を積層し半田接続する必要があり予め両側を絞り込んだ形状でかつ上下半割れ構造とした銅管を示す。

[ひ]

### 引き止め治具

端末容器本体に直接3心ケーブルを引き止める為に絶縁材料である FRP の両端に SUS がついた治具を使用している。

### ピーク効果

臨界電流密度は通常、磁場の増加に従い単調に減少するはずであるのに対し、ある磁場でピークを持つという現象のことを示す。この効果は、各種超電導材料系において確認されており、磁場依存性の異なるピン止め機構が働くために生じる。これまでに様々な機構が提案されているが、 $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  系において代表的な機構としては、酸素欠損や元素置換などの格子欠陥によるものがある。

### 非磁性基板

磁性がない基板。ハステロイ基板が代表的で配向性はない。

### 微小ホール素子

有効面積の小さなホール素子。ホール素子は磁場を測定する為の一般的なセンサ。微小ホール素子を試料の近くに置くことにより、試料周辺の磁場の空間分布を測定することができる。試料全体の磁気モーメントを SQUID 等を用いて測定する方法と相補的。

### 微小結晶辺（マイクロファセット）

互いの結晶軸が傾いた2つの結晶粒が接触する時には化学的に粒界になりやすい面となりにくい面がある。従ってある傾角を持ったバイクリスタル基板上に超電導薄膜を成長させるとき、場合によっては薄膜中の粒界が基板の粒界に沿うのではなく、ジグザグに折れ曲がっていることもある。そのような場合それぞれの短い粒界を微小結晶辺と呼んでいる。

### ヒステリシス損失（ピンニング損失）

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。ピンニング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。

### ヒストリー効果

印加磁場の履歴により、 $I_c$  が変わる現象。通常は  $I_c$  は履歴によらず磁場の値のみで決まるはずであるが、その原因については、磁束のピン止めの変化によるものではないかと思われる。

### ビスマス線材

主に  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+\delta}$  を用いた超電導線材。超電導臨界温度は  $-163^\circ\text{C}$  ( $110\text{K}$ )。

### 歪ゲージ

機械的な寸法の微小な変化(ひずみ)を電気信号として検出するセンサで、材料や構造物の表面に接着してひずみを測定すれば、材料や構造物に加わった応力を推測することができる。

### 非対称 45 度粒界

結晶軸の傾きが45度の粒界で、粒界面に関して対称でないもの。狭い意味では一方の(100)面と他方の(110)面が接触している粒界。長い粒界が出来やすい。

### 非弾性 X 線散乱

物質に入射X線を当てて跳ね返った反射X線の非弾性散乱成分を測定する手法。この測定から電荷密度等の動的な揺らぎ(動的構造因子)を知ることができる。動的構造因子は運動量およびエネルギーに依存する物理量であるが、非弾性X線散乱ではこの両者を独立に測定できる。この手法により、例えば低エネルギー領域で格子振動の知見を得ることができる。

### ピックアップコイル

極細銅線で巻線した試料線材周辺の磁界検出用コイル。開発した極小ピックアップコイル

は、使用線径が数十  $\mu\text{m}$ 、磁束を拾うコイル面積は  $0.1\sim 0.2\text{ mm}^2$  程度のものである。

### 引張り応力

線材の長さ方向に引張り力を加えた場合に生ずる応力。

### ビードコーティング法

MOD 法において有機金属塩溶液を基板上に連続塗布するための手法の一つであり、溶液溜からキャピラリー効果により溶液を供給して塗布する。

### ヒートパイプ

小さな温度差で大きな熱量を輸送できる高性能な伝熱素子で、熱伝導性が高い材質の密閉容器と揮発性の液体(作動流体)とからなる。密閉容器に作動流体を封入し、容器の一方を加熱し、もう一方を冷却することで、作動流体の蒸発(潜熱の吸収)→作動流体の凝縮(潜熱の放出)のサイクルが発生し熱を移動する。

### 非破壊的層間剥離評価試験

線材の基板側からレーザを照射し、安定化層面から放射される赤外線(振幅と位相)を測定する周期加熱法(Periodic heating method)を用いた剥離評価試験である。剥離が存在すると、その剥離箇所では熱の伝わりが悪くなるため、赤外線の振幅が極めて小さくなり、位相は大きく遅れ、剥離が確認できる。

### 非平衡反応

化学反応速度等の差や準安定な化合物が選択的に生成する条件を制御し、化学平衡的には直接生成が遅いもしくは生成しにくい反応をおこなうことをいう。

### 標準化

ケーブルなどの製品や部品の品質、形状、寸法、施工手順、試験方法などを標準に従って統一すること。これに伴って効率化・合理化ができ、互換性も高まる。

### 比率差動継電器

保護区間に出入りする電流のベクトル差が予定値を超えた場合、かつ、差動回路部分の動作コイルの電流と抑制コイルの電流の比が予定値を超えた場合に動作する継電器。RDFR。前者の条件のみで動作するのは差動継電器 (DFR) という。差動、比率継電器は変圧器、発電機、母線の保護に用いられる。

### 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。

### ピンニング相関距離 (Pinning Correlation Length)

外部から磁界を変化させた場合に内部ではピンニングによる遮蔽電流が流れ、変化がある深さまでしか及ばないが、この変化が及ぶ深さを表す。この距離以上離れた 2 点間のピンニングは互いに独立とみることができる。

### ピンニング効果

第二種超電導体では、超電導体の中に量子化磁束が侵入した状態でも超電導状態を維持する。量子化磁束は欠陥(常電導部、臨界電流が低い部分、秩序パラメータが小さい部分)に固着され、磁束をピンで留めるような様子からこれらの欠陥を「ピン」、磁束を捕捉する状況を「ピンニング効果」と呼ぶ。ピンニング力とローレンツ力のバランスで、臨界電流値が決まる。

### ピンニング力

電磁力に抗し超電導体内の量子化磁束を捕捉する力。

### ピン・ポテンシャル (Pinning Potential: $U_0$ )

一緒に運動する磁束のグループである磁束バンドルが感じるピンニング・エネルギーの値で、ローレンツ力が働いていない状態での値。

[ふ]

### ファセット成長機構

原子的なスケールでみて平坦な結晶面はファセット(晶癖)面と呼ばれる。ファセット面が成長する機構としては、平坦な面上をステップが移動し 1 原子(分子)層ずつ成長していく機構が考えられており。その代表的な例の 1 つとしてらせん転位に起因するスパイラル成長機構があげられる。

### フィードバック制御

制御量(PV 値)が目標値(SV 値)になるよう、両者を比較を行いながら制御対象への操作量(MV 値)を変化させていく制御方法。

### フィラメント

複合超電導線を構成する非常に細くかつ長手方向に伸びた形状の超電導体(超電導材料)のこと。

### フィラメント間の結合

変動磁界下において、超電導フィラメント同時の間にマトリックスを介して遮蔽電流が還流する現象を結合といい、これにより生じるいわゆるジュール損失を結合損失と呼ぶ。

### フェランチ現象

大きな容量を持つ送電線線路の受電側で負荷を切り離したり、使われていなかった線路に負荷を繋いだりしたときに、線路のキャパシタンスに応じた充電電流が流れることが原因で、送電線路に電圧上昇が発生すること。

### フォノン

周期的に配列した固体原子の振動(格子振動)を量子化した概念。従来の超電導体は格子振動(フォノン)を媒介とした引力相互作用によって超電導電子対を形成している。高温超電導体では磁気的な相互作用が重要であるという立場で(特に日本では)研究が進められているが、ヨーロッパではフォノンに重きを置いた研究も多く、スピン、電荷の縞状構造の研究を契機として日本でもフォノンの重要性が見直されている。

### 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。

### 負荷状況

電力系統において、最大許容電力に対して、実際に使用されている電力の割合の状況

### 複合照射法 (IBAD: Ion Beam Assisted Deposition)

YSZ 等の材料を蒸着時に、基板に対してある特定の角度から Ar 等のイオンビームを同時に照射することにより、3 次元的に配向した結晶膜が得られる。このようにして配向した膜を得る手法を複合照射法 (IBAD 法) という。

### 複合絶縁方式

2 つ以上の絶縁体を併用した絶縁方式。

### 複合化

素材の組み合わせることを複合という。この複合化により、単一の材料より優れた特性をもつ複合材料を作りだすことができる。最も一般的な複合材料は、主体と成る素材(マトリックス、母材)の中に、他の微小形素材(分散材、強化材)を分散させたものである。

## 複素交流磁界法

試料に交流電流を与えた時試料周辺にできる交流磁場を位相の情報を含めて測定する方法。電流と位相のあった成分を実部、位相の 90 度ずれた成分を虚部と見なすことにより、複素数で表すことができる。試料中の電流分布が時間的に一定であれば(空間的には一様でなくても)虚部はあらわれないはずであるが、実際には観測される。

## 不足ドーピング状態

一般的に酸化物超電導体においては、キャリア量の低い状態では反強磁性を示す絶縁体であり、キャリア量の増大とともに電気伝導性が現れ、超電導性を示すようになる。その臨界温度  $T_c$  ははじめキャリア量の増大とともに上昇するが、あるキャリア量において最高値となった後、逆に低下していく。この最高の  $T_c$  が得られるキャリア濃度を最適ドーピングとし、それよりキャリアが少ない状態( $T_c$  がキャリア量とともに上昇するキャリア濃度範囲)を不足ドーピング状態(アンダー・ドーピング状態)と呼ぶ。

## ブッシング

端末容器を貫通する電流リードを通す通路をもち、容器から電流リードを絶縁するために用いる。

## 部分放電

電極間に電圧を加えたとき、その間の絶縁物中で部分的に発生する放電をいい、電極間を完全に橋絡する放電は含まない状態。

## フライホイール

エネルギーを回転体の回転(慣性)エネルギーの形態で貯蔵する装置。国内では臨界プラズマ実験装置 JT-60 のフライホイール発電機、電鉄用の電圧保持用、工場の負荷変動吸収用で採用されているほか、各種の電力品質改善用機械軸受式のフライホイールが商品化されている。また、軸受けに超電導バルク磁石による磁気軸受けを用いる研究が国内外で行われている。

## フラックスコレクタ (Flux collector)

コイルの中心に高透磁材料を入れたコイルシステムで、フラックスコレクタ部分に磁束を集中透過させる仕組み。このシステムの採用により液体窒素温度でも大きな電流を流すことができるようになった。

## 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。

## フラットワイズ

矩形の超電導導体をコイル化する場合に、長辺を巻き軸に向けて巻き線の中心軸と平行にし、短辺を半径方向と平行とする巻き方。巻き線時に超電導導体に加わる曲げひずみを小さく

くできる。

### 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。

### ブレイトンサイクル

断熱圧縮、等圧放熱、断熱膨張、等圧吸熱の四工程からなるサイクルである。圧縮比 2 程度で高効率の冷凍サイクルが組める。動作ガス(一般的にはヘリウム)の圧力を高める圧縮機、高圧ガスと低圧ガスの間で熱交換を行う熱交換器、高圧ガスを断熱膨張させて低圧低温のガスを生成する膨張機などで構成される冷凍機。大型の冷凍機に適す。

### ブロック層

高温超電導体は層状構造で、超電導を担う  $\text{CuO}_2$  面と、キャリアを供給する働きをするブロック層から成る。この脇役のブロック層を厚さを小さくしたり、不純物を添加することにより超電導転移温度を変えたり、臨界磁界、臨界電流密度を変えたりすることができる。

### 分割集合フォーマ

複数の銅線を撚り合わせた導体を扇形の断面形状を有するセグメントに圧縮成型し、複数のセグメントを一体化することで形成した円形フォーマ。

### 分光分析法

物質の分光的特性を利用して行う化学分析。狭義には発光分光分析あるいは炎光分光分析をさすことがあるが、一般には紫外可視分光分析、原子吸光分析、赤外分光分析、ラマン分光分析、さらにX線分光分析、核磁気共鳴分析、電子スピン共鳴分析、マイクロ波分析などを含めた総称。

### 分散型電源

需要地又はその近傍に普及しつつある比較的小規模な電源。太陽光発電、風力発電などの自然エネルギーを利用するもの、コジェネレーション発電のように熱・電気併給による総合エネルギー効率向上を図るもの、廃棄物発電などのように未利用エネルギーを活用するもの等がある。

### 分子軌道計算

シュレーディンガー方程式に基づき、結晶中に広がった電子の分子軌道を計算すること。



これにより結晶内の電子的な性質、原子間の結合の性質などが推定できる。

### 分路リアクトル

電力系統の電圧—無効電力制御のために接続あるいは開放される並列リアクトル。電圧が上昇する夜間などはこれが接続されて無効電力を吸い込み、電圧を低めるように働く。

[へ]

### ベッド層

IBAD-MgO 法では、MgO 層を配向させるために Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, GZO などの特殊なアモルファス状態の下地層が必要であることがわかっている。この層を MgO のためのベッド層と言う。

### ヘリウム

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 4.2K 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。

### 変圧器高圧側至近端事故

電力系統に関わる技術的検討において、想定事故解析は重要である。系統内のあらゆる場所で事故は発生する可能性があるが、発電機に対する影響や安定度などの検討をする上では、最過酷と思われる事故を想定することは必須である。変圧器高圧側至近端事故は、この意味から非常によく想定事故として使われるものである。発電機の電機子に生じる電圧を系統電圧にまで引き上げて連系する主変圧器の高圧側すなわち系統側に非常に近い地点で短絡事故が発生したと考えるものである。

### 変圧器の充電（ステップアップ）

電力系統中の変圧器は発電所出口端のものを除き、一次側（電源側）が高電圧、二次側（負荷側）が低電圧となっている。ステップアップは変圧器の 2 次側から充電を行なうこと。

### 変圧器容量

変圧器の定格電圧、定格電流により求められる量。相電圧の $\sqrt{3}$ 倍（線間電圧）と定格電流の積で求められる。

### 偏析

金属や合金中の不純物あるいは成分元素の分布が不均一になる現象。

### 編素線

可とう性（柔軟性）を必要とする電気用導体として、軟銅線、スズメッキ軟銅線およびその他の素線を集束（集めて束により合わせる）したものを編組し、成型したもの。

### 変電所バンク

変電所に設置された変圧器を指す。

[ほ]

### 方向凝固ロッド材

方向凝固法により作製した棒状試料の総称。

### 方向凝固法

ゾーンメルト法等を用いて試料内で方向性を持たせて凝固・成長させることにより、配向性が高く連続成長した棒状超電導体(線)を作製する方法。

### 包晶温度

ひとつの固相がある温度以上で別の固相と液相とに分解する(あるいは液相がそれと平衡する固相とある温度以下で反応して別の固相を生じる)反応を包晶反応と呼び、その温度を包晶温度と呼ぶ。例えば  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  超電導体はその包晶温度である約  $1010^\circ\text{C}$  以上では  $\text{Y}_2\text{BaCuO}_5$  相と液相に分解溶解する。

### 防水テープ

中間接続部は水没する可能性の高いマンホール内に設置されることが多い。そこで中間接続部外容器の外表面にはすぐれた絶縁性を保持すると共に、高い気密性が求められる。そのために使用する絶縁性を有するテープを示す。

### 膨張タービン

気体の圧力エネルギーや運動エネルギーを回転運動のエネルギーへ変え、機械的エネルギーに変換する流体機械をいう。膨張タービンを流れる気体は断熱膨張によって温度が降下する。

### 保護カバー

三相一括のジョイント接続部を一括で覆う上下半割れ形状の銅管で、ケーブルの熱収縮による窒素容器内での中間接続部の動きに対応し可動できる仕様となっている。

### 保護協調

異常発生時において、電力系統の電流や電圧をもとに故障区間を判別および除去し、事故の拡大防止や系統への波及を防止すること。

### 保護リレー

継電器の一種で、電流や電圧の急激な変化から電気回路を保護するための装置。

### 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<sup>TR</sup>装置(THEVA社商標)がある。

### 捕捉磁場

バルク超電導体は通常の永久磁石では得られない程の高い磁場を捕捉させることができる。磁場を捕捉させる方法としては、磁場中で冷却し超電導状態になったところで外部磁場を取り除く方法や静磁場やパルス磁場を使用温度(超電導状態になっている温度)で印加する方法などがある。また、捕捉磁場を向上させるためには、臨界電流密度  $J_c$  を高くし、バルクのサイズを大きくすることが有効である。また、低温にすると臨界電流密度  $J_c$  が向上するため、捕捉磁場も大きくなる。ちなみに、世界最高レベルの磁場強度を示す Nd-Fe-B 系永久磁石の磁場強度は約 0.5T であり、バルク超電導体では、条件を選べば 10T を超える磁場を捕捉させることも可能である。

### 母線

発電所や変電所で、電源から全電流を受け、外線に供給する幹線。 ブス。

### 母線連絡

ふたつ以上の母線を電氣的に連系可能にする線路、また連系すること。ブスタイ。

### 螢石型構造

ホタル石(CaF<sub>2</sub>)型構造は、無機化合物の代表的結晶構造のひとつ。Ca の層と F の層からなる面心立方格子である。高温超電導体の CuO<sub>2</sub> 面(ペロブスカイト型構造)の間に、このホタル石型構造がブロック層として取り込まれることがしばしばある。

### ホットウォール

反応室全体を加熱する方式。基板台のみを加熱して反応室は冷却する方式はコールドウォール型と呼ぶ。

### ボビン

超電導コイルを巻線する際の巻枠。

### ホモ・エピタキシャル成長

下地となる結晶と成長する結晶が同じ材質であるエピタキシャル成長。

### ホモロガスシリーズ

酸化物超電導体中で、2次元 CuO<sub>2</sub> 面の枚数が異なるのみで、他は同一の構造を有する超電導体系列。

[ま]

#### マイクロクラック

機械的な応力(歪)を線材に加えたとき超電導層に発生する微小なクラック。クラックは超電導層を横断するほどには大きくない。しかし、線材臨界電流値は応力(歪)を戻しても初期値を回復しない。

#### マイクログリッド

多くの配電系統は配電用変電所を介して送電系統に同期連系しているが、今後、分散電源が普及した場合には電力変換技術を応用して、各配電系統を他から電氣的に切り離し、それ自身が独立した電力系統であるようにして運転できる可能性がある。このようにして独立した電力系統として運転される配電系統をマイクログリッドと呼ぶ場合がある。

#### マイクロサンプリング法 (Microsampling)

FIB 装置内部でマニピュレータを挿入し、その先をタングステン蒸着等により FIB 加工した試料端部に接着する。その後、マニピュレータ駆動で試料を抽出し、タングステン蒸着等により抽出した試料を TEM 用の 3mm 径の支持体に固定する手法。

#### 埋設物

広義では、地中に埋設されているもの全てを示すが、それらは撤去可能や撤去困難なもの等さまざまである。本文中の既設埋設物とは、一般に実運用中の設備であり、撤去不可能かつ移設困難な設備を示している。

#### マイスナー効果

磁場中に超電導状態にある超電導体を置いたとき、磁場が完全に超電導体から排除される効果。超電導のもっとも基本的な性質で、超電導体の表面に超電導電流が流れ、それが作る磁場が内部でちょうど外部磁場を打ち消すためにこの現象が生じる。マイスナー・オクセンフェルト効果 (Meissner-Ochsenfeld effect)、あるいは完全反磁性 (Perfect diamagnetism、Superdiamagnetism)とも呼ばれる。

#### 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。

#### マクロクラック

機械的な応力(歪)を線材に加えたとき超電導層に発生するクラックで、超電導層を横断する程度に大きい。著しく線材臨界電流値が下がり、交流損失特性も、マイクロクラックや応力が加わらないときと大きくずれる。

## 曲げ歪

線材を曲げたときに超電導層に加わる歪。超電導層を内側に曲げたときは超電層に圧縮方向の歪が、外側に曲げたときは引張り方向の歪がかかる。

## マスキング

一般に薄膜のパタニングのためのエッチングに際して、エッチングされてはいけない部分をマスクすること。特に、Y系線材の溝加工による細線化のためのエッチングに先だち、超電導細線として残すべき部分のエッチングを防ぐためにあらかじめテープを貼付すること。

## マトリックス 123 相

RE Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>系の酸化物超電導材料は、半熔融状態から冷却、凝固するときに非超電導相で高温安定相である RE211 相粒子を REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>相内に取り込みながら成長する。このとき REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>相はマトリックス母相、非超電導相は第2相と区別される。

## マルチターン

Reel-to-Reel を用いた PLD による成膜を行う際、ガイドリールを用いて基板加熱ヒータに基板を複数回巻きまして成膜を行う手法。成膜レートと材料収率の向上を目的としている。

## 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。

## マルチプルーム・マルチターン-PLD 法 (MPMT-PLD 法)

PLD 法による成膜での高速化を実現するために、光学系のミラーをレーザ周波数と同期させてスキャンすることで、見かけ上複数のプルームを線材長手方向に発生させ、長手方向の成膜の均一化及び成膜領域の拡大を行い、さらに奥行き方向に対しても、基板加熱ヒータにガイドロールを用いて基板を複数回巻きまわすことで、成膜領域の拡大すなわち成膜レートの向上を行う PLD 法である。

## マルチ仮焼炉

Reel-to-Reel を用いた MOD 法による成膜工程の中の仮焼を行う際、ガイドリールを用いて基板を複数回巻きまして行う手法。製造速度の向上を図る。

マンドレル  
型、型枠、芯金。

[み]

#### 見掛けのピン・ポテンシャル (Apparent Pinning Potential)

超電導電流の対数緩和率の逆数に熱エネルギー  $k_B T$  ( $k_B$  はボルツマン定数) をかけた値でピン・ポテンシャル  $U_0$  と同じ次元をもつ。しかしながら、一般に  $U_0$  よりも小さく、温度が低いほど、またピンニングが強いほど違いが大きい。

#### 溝加工細線化技術

Y系線材の交流損失を低減するためには細線化する必要があるが、そのための手法のひとつ。幅広の基板を残したまま、超電導層に溝加工を施すことにより、実質的に超電導線の細線化を実現する技術。マスキングテープを貼付したのち、レーザ光照射により溝部分のテープのみを焼失させ、ついで化学エッチングを施すことにより、細線化を実現する。

[む]

#### 無効電力

電力系統の電圧・電流は交流であり相ごとに見た場合には瞬時電力が商用周波数の倍周波数で変化している。この瞬時電力は、平均的な流れの分と変化する部分とに分けることができるが、無効電力とは変化する部分のことであり、正味の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ない。このため無効電力と呼ばれている。

#### 無効電力補償装置

電力系統の無効電力が適正な値になるよう制御・調整する装置である。高圧送電系統では線路の抵抗分が小さいため、無効電力の過不足によって電圧が左右される。そのため無効電力(遅れ)が不足して電圧が低い箇所では無効電力を発生、逆に無効電力(遅れ)が過剰となって電圧が高くなっている箇所では無効電力を吸収することによって、電圧を調整する。具体的には分路リアクトルや並列コンデンサなどである。

[め]

#### メカノケミストリ

固体物質に摩砕、摩擦、延伸、圧縮などの機械的エネルギーを加えることによってひき起こされる構造、相転移、反応性、吸着性、触媒活性などの変化をいう。

#### メカノケミカル反応

固体物質の粉碎過程での摩擦、圧縮等の機械エネルギーにより局部的に生じる高いエネルギーを利用する結晶化反応、固溶反応、相転位反応等の化学反応をいう。

[も]

#### もらい事故

保護リレーによる保護区間外で短絡事故が起きた場合で、短絡事故電流が流れた直後も課通電のある場合の系統事故。

[や]

[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。

#### 有機金属化合物

アルキル基のような炭化水素基や一酸化炭素などが直接の金属—炭素結合によって、金属原子と結合した化合物をいう。

#### 有機酸塩

有機酸と金属イオンが結合してできた塩(化合物)。

#### 有機金属熱分解法 (MOD:Metallorganic Decomposition)

化学反応プロセスの一つで、分子レベルで有機化合物との複合体として、目的の化合物と類似の組成を有する前駆体構造を合成し、その熱分解過程を利用する無機材料の合成法をいう。

#### 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。

[よ]

#### 揚水発電

発電機の上部及び下部に池を設け、深夜その他の軽負荷時の供給余力を利用して下池の水を上池に揚水貯留し、ピーク負荷時その他の必要に応じてこの水を利用して発電する方式。電力系統の負荷率が低い場合、揚水発電を行うことにより、設備の有効利用ができるとともに、特に可変速型の揚水の場合、出力調整が容易であることから周波数制御に有効である。

## 要素試験

設備の開発にあたり、比較的少量のサンプル等を用いて要求される性能毎に試験を行うこと。

## ヨウ素滴定

酸化還元滴定の一手法で、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  試料の Cu の平均価数を求めることにより、酸素量を間接的に求める。試料を酸性溶液に過剰のヨウ化カリウムとともに溶解させ、遊離したヨウ素をチオ硫酸ナトリウム溶液で滴定することにより Cu の平均価数を求める。

## 溶媒・溶質

溶液または固溶体を構成する主な一つの成分をとくに溶媒といい、そのほかの成分を溶質という。気体または固体が液体に混ざって溶液をつくる場合にはその液体を溶媒といい、液体と液体とが溶液をつくる場合、あるいは固体と固体との混合によって固溶体がつくられる場合などには、多量に存在する方を溶媒とみなすことが多い。

## より線

複数本の素線から構成される撚り合わせた線の集まり、またはそのような線の集まりの組み合わせからなる超電導体。

## より線次数

より線において、素線をより合わせる回数。

[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、波形および電流が、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。

## ライフサイクルコスト

製品や構造物などの費用を、調達、製造、使用、廃棄の段階をトータルして考えたもの。生涯費用ともよばれる。

## らせん転位

原子または分子が規則正しく配列した結晶中に含まれる結晶欠陥。転位には刃状転位(エッ



ジ・ディスロケーション)と、螺旋転位(スクリュウ・ディスロケーション)と、これら2つが混合した混合転位が有る。

### ラマン散乱分光

物質に光を通すと、入射光と等しい周波数をもった強い弾性散乱と、入射光の周波数からわずかにずれた、きわめて弱い非弾性散乱光が散乱されてくる。この非弾性散乱光のうち、物質中を振動する原子やイオンによって散乱されるものをラマン光と呼ぶ。結晶によるラマン散乱は、光学フォノン、マグノンなどの素励起と入射光との相互作用によって生じるので、格子振動、スピン波などの情報が得られる。

[り]

### リーク

配管や機器のシール部や溶接部から何らかの不具合により冷媒(液体窒素)が漏れること。真空層の場合には真空リークと言う。

### リザーバタンク

液体窒素は系内への不純物侵入を防ぐため閉サイクルで用いられる。しかし窒素温度が 77 k から 63K まで変化すると液体の膨張・収縮が 7%程度生じる。この膨張・収縮変化を吸収するのがリザーバタンクと呼ばれる真空断熱容器である。さらにリザーバタンクを窒素圧力が最も低くなる窒素循環ポンプ吸入側に設置することで、その最低圧力を保持する圧力制御機能を持たせることで超電導ケーブル内での気泡の発生を防止し部分放電を防ぐ機能を付加している。

### 理想気体

完全気体とも呼ばれ、気体分子自身の体積、分子間力などの相互作用をともにゼロと考えた場合の気体。実際の気体は理想気体と異なり、実在気体と呼ばれるが、低圧で高温の状態では理想気体に近い振る舞いをする。理想気体では体積は圧力に反比例し、熱力学的温度に比例するという、気体の状態方程式(ボイル・シャルルの法則)が成立する。

### 粒界拡散

粒界での拡散。これに対し、固体内部の拡散や表面での拡散をそれぞれ体積拡散および表面拡散と呼ぶ。これらの拡散過程の活性化エネルギーは、体積<粒界<表面の順である。大きな単結晶では表面や粒界は小さいので、表面拡散や粒界拡散は無視できるが、多結晶体では表面や粒界の面積が無視できなくなり、表面拡散速度や粒界拡散速度が全体の拡散速度に大きく寄与し、場合によっては、体積拡散をしのぐようにもなる

### 粒界傾角

粒界で接する2つの結晶軸の成す角度のこと。ここでは人工粒界の単一の結晶辺での角度を指す。傾角はマクロには双晶の成す角度、ミクロには透過電子顕微鏡観察による原子像から求められる。

## 粒界構造

多結晶体において、結晶粒どうしの境界を粒界または結晶粒界とよぶ。また一つの結晶には点欠陥、線欠陥および面欠陥とさまざまな格子欠陥があるが、粒界は面欠陥の一種とみなすことができる。

## 粒界接合

高温酸化物超電導体の結晶粒界においては超電導性が弱くなっており、ある条件のもとでは粒界部分がジョセフソン接合として働く。粒界接合は結晶粒界を人為的に作製する接合であり、粒界の作製方法によってバイクリスタル接合、ステップエッジ接合などに分類される。

## 粒界伝導機構

ほとんどの場合実用材料は粒界を含んでいるので、粒界を通して超電導電流が流れる機構の解明が重要である。粒界の障壁が高い時には粒界を流れる電流はいわゆるジョセフソン電流と見なされる。

## 量子化磁束

混合状態で磁束量子  $\Phi_0$  の単位に量子化された磁束のこと。超電導電流が量子化磁束の中心の周りを渦状に流れることから、量子化磁束を渦糸(vortex)、混合状態を渦糸状態(vortex-state)ともいう。

## 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。

[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

対象となる物質から熱を奪い、それを水や空気などに移送する機械または装置の総称。対象物の温度を下げる働きをする。熱の輸送に使用される冷媒の種類、それを圧縮する方法、膨張により吸熱作用を発生させる工程などによっていくつかの冷凍方式に分類される。液体窒素温度冷却においては、スターリング方式、GM方式がよく用いられる。

### 冷凍機コールドヘッド

冷凍機の熱交換部。実証試験で使用予定であるスターリング型冷凍機では冷凍機内部のヘリウムガスと超電導ケーブルの冷媒である液体窒素をコールドヘッド(銅の熱交換部)を介して熱交換する。

### 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。

### 冷凍能力

被冷却体の熱損失と定常的に温度バランスしているときの冷凍システムの能力で定義される。

### 冷熱サイクル

ここでは、超電導ケーブルが室温と液体窒素温度を繰り返し経験するサイクルをさす。

### レーザー CVD

レーザーによる励起により、原料気相からの析出を効率的に行う CVD 法。従来のレーザー CVD は、ナノドット、ウィスカー、薄膜などの作製に用いられてきたが、東北大学（後藤孝教授ら）は、結晶配向を制御した高速成膜が可能な手法を開発した。本手法は、Y 系超電導膜形成法として有望視される。

### レーザーアブレーション法

ターゲットと呼ばれる高温超電導体の塊に高エネルギーのレーザーを照射し、飛散した粒子を基板上に積層させる方法。ターゲット表面層を一気に吹き飛ばすと同時に、基板とターゲットの間に一時的にプラズマを発生させ、酸素を活性化する。

### レーザー蒸着法

レーザー光照射によりターゲット材を蒸発させ、蒸発した元素をターゲットと対向させた基

板上に堆積させる手法。PLD 法参照。

### レーザープルーム分布

レーザーアブレーションの際にターゲットから空間に向かってほぼ垂直方向に発生するプラズマは鳥の羽毛 (plume) のような形状をしており、その中や近傍では粒子のエネルギーに大きな空間分布がある。

### レーザー誘起ゼーベック電圧イメージング法

温度勾配に比例して誘起される電圧をゼーベック電圧といい、両者の比例係数をゼーベック係数と呼ぶ。一般に温度勾配と誘起電圧の関係はテンソルとなる。レーザーによって局所的な温度勾配を誘起し、ゼーベック電圧を観測することで、ゼーベック係数の乱れ、すなわち欠陥位置や結晶傾角に関する情報を得る事が可能である。

### 冷凍機伝導冷却

超電導コイルの冷却に液体窒素や液体ヘリウムなどの冷媒を直接用いずに、冷凍機の冷却ヘッドからの熱伝導で、超電導コイルを冷却する方式。無冷媒であるため、取り扱いが容易になるとともに、超電導コイルの運転温度が冷媒の温度に拘束されず自由に設定できるとの利点がある。

### レドックスフロー電池

二次電池の一種で、イオンの酸化還元反応を溶液のポンプ循環によって進行させて、充電と放電を行う。

### レブリン酸

$\text{CH}_3\text{COCH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$  で表せる。オクチル酸同様、高速化が可能である。

### レヤー巻き (レイヤー巻き)

ソレノイドコイルの巻線方法で、コイル巻枠に対して軸方向に巻回し、層を構成していく方法。パンケーキ巻きはターン方向がコイルの半径方向になるのに対し、レヤー巻きはコイル軸方向となる。

### 連続成膜

Y 系線材作製において、金属基板を移動させながら中間層、超電導層を成膜すること。

### 連続組織形成条件

Y 系超電導体は結晶粒界において臨界電流密度の低下が生じやすい為、良好な臨界電流特性を得るためには試料全体が 1 つの結晶粒からなる連続成長した組織であること必要とされる。そのように 1 つの結晶粒を連続成長させるための作製条件をいう。

### 連続抵抗法電流評価

通電法による  $I_c$  測定では、四端子法が主流だが、電気的な接続にははんだ接合を用いずに

連続的に電極の接触のみでの通電測定を行う方法である。線材との接触抵抗を無くす為に、電極の面積化、押し付けの改善により実現している。

[ろ]

#### ロードセル

力(質量、トルク)を検出するセンサのことで、これらの力を電気信号に変換するというものであり、荷重変換器とも呼ばれる。一般に変換器にはひずみゲージ式がよく用いられる。

#### ロゴスキーコイル

ドイツの電気工学者であるロゴスキー(Rogowski)によって考案された電流検知センサ。被測定導体の周辺にロゴスキーコイルを設置すると、導体電流に対応した電圧がコイルの両端に誘起する。この電圧は導体電流の微分波形で、積分器を通すことで導体電流波形を再現できる

#### ローレンツ力

磁場中で運動する電子に作用する力。磁場中に置かれた第二種超電導体には混合状態において、量子化磁束が侵入し、析出物、格子欠陥、転位、粒界、不純物などのピン止め点に捕捉されている。この状態で外部から磁場と直交した方向に電流を流すと、量子化磁束は磁場・電流ともに直交する方向にローレンツ力を受ける。ピン止め点におけるピン止め力がローレンツ力より強ければ、磁束がピン止めされて電気抵抗がない状態が保たれる。

[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。

**Ag 安定化層**

→銀安定化層

**ARPA-E**

DOE-Advanced Research Projects Agency-Energy

**a 軸結晶粒配向**

Y系超電導線材の超電導体結晶粒は、最適成膜条件の範囲内では下地である中間層上をエピタキシャル成長し、c軸が基板表面に垂直な方位をとる(c軸配向粒)。その結果、超電導を担うCuO<sub>2</sub>面が基板表面と平行に揃うことで高い臨界電流を得ることが出来る。しかしながら、例えば成膜温度が低い場合には、a軸が基板表面に垂直な方位をとるような結晶成長が起き(a軸配向)、電流経路の減少につながり超電導特性が低下する。

[B]

**BaF<sub>2</sub> プロセス**

BaF<sub>2</sub>を含む前駆体膜に用いて、後熱処理により超電導相を合成するプロセスの総称をいう。前駆体膜の作製方法としては、電子ビーム蒸着やTFA-MOD法が用いられる。

**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。

**Bean モデル**

超電導の振る舞いを記述するモデル。簡易的に臨界電流密度が磁場によらず一定であると仮定する。

**Bi2212**

Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>1</sub>Cu<sub>2</sub>O<sub>10+δ</sub> という化学式で表される代表的な高温超電導体。比較的大きな単結晶が得られやすいこともあり、Y系超電導体と共に最も良く調べられている。異方性が非常

に大きい。

### **Bi2223**

$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+6}$  で超電導臨界温度は $-163^\circ\text{C}(110\text{K})$ である。

### **Bi2223 銀シース線材**

$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+6}$  を用いた超電導線材。母材として銀を用いている。超電導臨界温度は $-163^\circ\text{C}(110\text{K})$ 。

[C]

### **CAICISS 表面評価技術**

Co-Axial Impact Collision Ion Scattering Spectroscopy (同軸型直衝突イオン散乱分光)。エネルギーの小さな(数 keV)軽い元素を結晶の表面に入射すると最表面の原子によって散乱される。とくに、入射軸方向に散乱された軽元素のエネルギーを測定して表面の原子の種類を決める評価法。

### **CAST**

韓国応用超伝導技術センター。Center for Applied Superconductivity。

### **Ca ドープ層**

カルシウム(Ca)イオンが微量加えられた超電導層。 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-8}$  層上にこの層を成膜し熱処理して結晶粒界にのみ Ca を拡散させることにより、結晶粒界における臨界電流特性の向上が得られた。

### **CeO<sub>2</sub>**

酸化セリウム。超電導線材の中間層(IBAD 法)に用いられる。

### **CIC (Cable In Conduit)**

冷媒流路を内蔵した超電導撚線導体を、気密な管(コンジット)で覆ったケーブル。ケーブル・イン・コンジット導体

### **CIGRE**

送変電技術に関する技術的検討を深耕するため 1921 年に国際電気標準会議(IEC)から独立して設立された民間の非営利団体。Conseil International des Grands Reseaux Electriques。

### **CIGRE SC**

CIGRE Study Committee

## CO<sub>2</sub>排出係数

1kWh 当たりの電力量を発電するのに、CO<sub>2</sub> 排出量がどの程度となるかを示す係数。単位は、kg-CO<sub>2</sub>/kWh が多く用いられる。

## Corbino 法

円板状の試料の中央と周縁に電極をつけた試料(Corbino ディスク)を用いた測定法。磁束は試料内を円運動するのみで試料端における磁束の出入りがないので、試料端の影響を除いた磁束の運動を調べることができる。

## Cu サイト

高温超電導体は層状構造で、超電導を担う CuO<sub>2</sub> 面と、キャリアを供給する働きをするブロック層から成る。Cu サイトは CuO<sub>2</sub> 面内の Cu を指し、ここに Zn(亜鉛)や Ni(ニッケル)に少量を置換すると置換種、量に依存した超電導状態、常電導状態の変化がみられる。

## 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。

## CVD 法 (Chemical Vapor Deposition)

CVD 法は化学的気相蒸着法のこと、気相プロセスによる薄膜形成技術の一つ。加熱した基板の表面に薄膜の原料となるガスを供給して薄膜を堆積させる。この際、原料ガスの化学的反応は基板表面、或いは気相で生じる場合もある。原子レベルでの多様な微細構造制御と結晶配向制御が可能。被覆性が高く、実用コーティング法として工業的に広く用いられている。

## CV ケーブル

Cross linked polyethylene Vinyl cable。架橋ポリエチレンを絶縁体とし、外側に遮蔽層と防食層を設けた乾式ケーブル。

## [D]

## DAPAS

韓国の Center for Applied Superconductivity(CAST)が推進するプロジェクト。Dream of Advanced Power System by Applied Superconductivity Technologies。

## DCL 電流

整流器型限流器のリアクトル部に流れる直流電流をいう。



## [E]

### **EBSP 法 (Electron Back Scattering Pattern)**

試料に照射した電子線は表面から 20~50 nm 程度の結晶面で弾性散乱し、同時に起こる非弾性散乱の効果により散乱強度が減衰する。この減衰量は入射電子線と回折線との角度に依存して変化するため、EBSP が出現し、これを CCD ディテクタにより取り込み面指数を指数づけすることにより、電子線を当てた領域の方位を決定することができる。この原理を応用した結晶方位評価手法。

### **EDTA (ethylenediaminetetraacetic acid)**

エチレンジアミン四酢酸をいう。無色の結晶性粉末。融点 240°C(分解)。アルカリ土類、希土類、遷移金属など多くの金属と極めて安定な水溶性の錯塩を形成する。

### **Ellipse モデル**

Norris によって提唱された、超電導線材の通電損失を記述するモデルであり、主に低アスペクト比の楕円形状の線材の特性を良く記述する。

### **EMTP**

電磁過渡現象プログラム(Electro-Magnetic Transients Program)の略。現在、British Columbia 大学に在籍する Dommel 教授らのグループが中心になって開発したもので、Bergeron 等価回路を用いて系統各部の要素をそれぞれモデル化し、これを組み合わせることによって広い範囲の系統構成、系統条件の電磁過渡現象を解析できるようにしたプログラム。我が国では同志社大学の雨谷教授を中心とするグループが第一者である。

### **ET 塩**

有機超伝導体中で最高の超電導転移温度(-260°C、13K)をもつ分子性超電導体。銅酸化物高温超伝導体同様、クーパー対の引力相互作用の起源が反強磁性的交換相互作用であったり、超電導電子対の対称性が d 波的である可能性が示唆されている。

### **ex-situ 法**

2 段以上の工程からなる超電導薄膜の製造方法。初期工程で PVD(真空蒸着、スパッタ)等によって比較的低温で高速に前駆体膜をつくり、その後の工程の熱処理により、前駆体膜を結晶化して超電導相を合成する。

## [F]

### **FMEA**

Failure Mode Effect Analysis。故障・不具合の防止を目的とした、潜在的な故障・不具合の体系的なボトムアップによる分析方法。製品設計段階における設計 FMEA と、製造工程設計段階における工程 FMEA に分けられる。

## **freeze-thaw**

凍結融解。

## **FTA**

Fault Tree Analysis。発生原因の潜在危険を論理的にたどって発生頻度を分析し、それぞれの発生確率を加算する故障・事故分析手法。望ましくない事象に対し、その要因を探るトップダウンの解析手法を特徴とする。これは、類似の故障モード影響解析の手法 FMEA とは逆の取り組みである。

## **[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。

## **GIS**

Gas Insulated Switch。絶縁性能の高い六フッ化硫黄ガスを使用したガス遮断器。空気絶縁の場合に比べ、用地面積は少なく済むが、工事費は高くなる。

### **GM (Gifford-McMahon) 方式**

GM 方式冷凍サイクルは 1950 年代の終わりに Gifford により開発され、ガスの断熱膨張と蓄熱材を用い、寒冷を発生する方式である。断熱膨張をさせるディスプレイサーの駆動方法には、機械的に駆動する方法と、作業ガスの圧力差を利用して駆動する方法とがある。GM 方式冷凍サイクルは効率が良いためディスプレイサーの駆動速度が遅くでき、また、内部に使用しているシールにかかる負荷も軽いため、高性能で信頼性の高い冷凍サイクルである。

### **GM 型パルス管**

パルス管冷凍機のうち、常温部に設置する圧力波発信源として圧縮機を別置きとし、圧力変動を弁の切替で行う冷凍機。

## **[H]**

### **HR-PLD**

High-Rate Pulsed Laser Deposition。

### **Hastelloy基板(ハステロイ基板)**

Hastelloyは、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。耐熱・耐食

合金で、Y系テープ線材の無配向基板に使用されている。

## 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℃で、大気圧、0℃での密度は 0.1785kg/m<sup>3</sup>。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。

### Ic\*特性

テープ線材の臨界電流値は超電導層の臨界電流密度が同じ場合でも、超電導層の厚み、テープの幅等により異なるため、1cm 幅あたりに規格化した臨界電流値を Ic\*特性として比較することがある。

### IEC

国際電気標準会議。各国の代表的標準化機関から成る国際標準化機関であり、電気及び電子技術分野の国際規格の作成を行っている。International Electrotechnical Commission。

### in-plume 法

PLD 法は、plume 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plume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plume内部に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で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。

### in-site 法

単一工程で行う超電導薄膜の製造方法。

### IPP (Independent Power Producer)

独立電気事業者。1995 年の電気事業法改正により認められた卸供給事業者がこれに当た

る。「卸供給」とは、電力会社への電力供給であって、その規模が 1、000kW を超えかつ 10 年以上にわたるもの、あるいは 10 万 kW を超えかつ 5 年以上にわたるものをいう。

### **ISD (Inclined Substrate Deposition)法線材**

レーザ蒸着法あるいは電子ビーム蒸着法において、ターゲットに対して基板をある角度を持たせて対向させ成膜することにより、他に特別な操作することなく成膜した材料の結晶方位が 3 次元的にそろえることが YSZ や MgO 等で見いだされている。これを利用して自己配向した中間層を成膜し、その上に超電導層を成膜することにより得られた線材。自己配向法線材とも言う。

### **ITRS**

国際半導体技術ロードマップ。The International Technology Roadmap for Semiconductors。

### **[J]**

#### **J<sub>c</sub>-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。

### **JIS 圧力容器規格**

強制法規における技術基準として制定され、JIS B8265m JIS B8266 を中心に整備された JIS 圧力容器規格体系のことをいう。

### **[K]**

### **KEPRI**

韓国電力公社 電力研究院。Korea Electric Power Research Institute。

### **[L]**

### **La-Fe-As-O<sub>1-x</sub>-F<sub>x</sub>**

鉄系超電導物質現象のひとつ。銅酸化物以外では二ホウ化マグネシウムなどより高い超伝導転移温度(T<sub>c</sub>)を有する高温超伝導物質である。研究が活発化した 2008 年の 1 年間で T<sub>c</sub> が 2 倍以上に急上昇したことから、さらなる研究の発展が期待されている。

## LAO

LaAlO<sub>3</sub>の通称。Y系超電導薄膜作製の際の基板として用いられる。

## LCR メータ

LCR メータは L(インダクタンス)、C(キャパシタンス)、R(レジスタンス)、Z(インピーダンス)などのパラメータを交流で測定する装置である。発振器の信号を試料に加え、試料両端の電圧と、試料を流れる電流を求めて、両者の値からベクトル演算によってこれらパラメータを求める。

## LFC (Load Frequency Control)

負荷周波数制御。負荷変動は発電機出力が一定の場合、電力系統全体の周波数変動となって現れる。この周波数変動量をもとに発電機の出力を制御すること。

## LIWV

雷インパルス耐電圧値。Lightning Impulse Withstand Voltage。

## LN<sub>2</sub> (Liquefied Nitrogen)

液体窒素。1気圧下では 77K。

## LPE 厚膜単結晶

液相エピタキシャル成長により育成した、大面積・厚膜単結晶。MgO 単結晶基板上に成長させるため、機械的強度も確保され、デバイス応用に要求される表面平坦性を得るための研磨も容易である。

## LPE (液相エピタキシン法)

結晶成長の方法として、溶液から固相結晶を基板の配向性を維持させながら晶出させる方法である。気相成長などに比べ成長速度が速く、また熱平衡に近い条件で結晶成長させるため厚膜化しても結晶性の低下が小さいなどの特徴を持つ。

## LAST

(La,Sr)<sub>2</sub>AlTaO<sub>6</sub>。複合ペロブスカイト酸化物の一種で、REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>系超電導材料と格子のマッチングがよい。

## [M]

## MCG

心磁計、心磁図。Magnetocardiography。

## MEG

脳磁計、脳磁図。Magnetoencephalography。

## **MgB<sub>2</sub>**

銅酸化物高温超電導体や C<sub>60</sub> の電界効果超電導以外で、最高の超電導転移温度(-234℃、39K)をもつ化合物。青山学院大学秋光教授グループによって超電導が発見された。応用の可能性については検討中の段階である。

## **MgO**

酸化マグネシウム、マグネシアともいう。無色の立方晶系結晶。空気中に放置すると水、二酸化炭素を吸収し、徐々に水酸化炭酸マグネシウムになる。代表的塩基の一つで一般には炉材、耐熱材の重要成分である。

## **ML-UCD モデル**

多層超電導体の交流損失を記述するモデル。各層に流れる電流が均流化されているという仮定のもと、Bean モデルに基づいて交流損失を計算する。

## **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。

## **MRI (Magnetic Resonance Imaging)**

磁気共鳴イメージング。磁界中に置かれた原子核が特定の周波数で共鳴する現象(NMR、Nuclear Magnetic Resonance、核磁気共鳴)を利用し、生体内部の生理現象を画像化する方法。

## **[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。

## **NEG123**

RE Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>における RE をネオジウム(Nd)、ユウロピウム(Eu)、ガドリウム(Gd)の混合系とした(Nd,Eu,Gd)Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>の略記。

## Ne (Neon)

原子番号 10 の元素。単原子分子として存在し、分子量は 20.18。常温常圧で無色無臭の気体。融点 $-248.7^{\circ}\text{C}$ 、沸点 $-245.9^{\circ}\text{C}$ 。大気圧、 $0^{\circ}\text{C}$ での密度は  $0.8999\text{kg}/\text{m}^3$ 。空気中に 18.2ppm 含まれ、希ガスとしてはアルゴンに次ぐ。空気を液化・分留して作られる。

## Ni 基テープ

Ni(ニッケル)を主要な構成元素として含む金属基板。

## NiO バッファ層

多層構造線材の内、基板となる Ni(ニッケル)基の材料と超電導層との反応を防ぐ役割(バッファ)をもつ NiO(酸化ニッケル)膜の層をいう。

## [O]

## OF ケーブル

Oil-Filled cable。導体上に絶縁紙を巻き、外側に金属シースと防食層を設けたケーブル。金属シース内部に低粘度の絶縁油を脱気脱湿状態で充填して使用する。

## 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]

## PAS

国際電気標準会議(IEC)における公開仕様書。Publicly Available Specifications。

## Patch 式

長尺化のテストのために、数 m・10m長の Hastelloy<sup>TR</sup>等のリードの間に、10~50 cm の IBAD 基板などの試料を所定の間隔で接続した模擬長尺線材で試験する方法。連続して長時間蒸着する際の事前テスト。

## PID 制御

フィードバック制御のひとつ。目標値と制御量の差を偏差値とし、偏差値の大きさに比例(proportional)した動作(P 動作)、偏差値の積分(integral)に比例した動作(I 動作)、偏差の変化量(differential)に比例した動作を組み合わせる制御。

## PID 制御用コントローラ

制御目標値と制御量の差である制御偏差を打ち消すために行なう動作を制御動作と言い、

その基本動作に PID 動作がある。P は比例動作、I は積分動作、D は微分動作を表す。これらの制御を行なう機器を PID 制御用コントローラと呼ぶ。

## PLC

プログラマブルコントローラの略。リレー回路の代替装置として開発された制御装置であり、工場などの自動機械の制御に使われるほか、エレベータ・自動ドアなど身近な機械の制御にも幅広く使用されている。

## PLD (Pulsed Laser Deposition) 法

パルスレーザー堆積法。物理気相蒸着法の一つで、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、クラスター、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。

## PLD プルーム形状

レーザーアブレーションの際にできるプルームの形状は、照射レーザーエネルギーや雰囲気ガス圧力等により大きく変化する。

## POF ケーブル

パイプタイプ OF ケーブル。一般的に鋼管などのパイプに OF ケーブルを引き込み、絶縁油を充填、循環させる電力ケーブル

## 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 および DC 超高压ケーブル用絶縁材料として採用されている。

## PSS (Power System Stabilizer)

電力系統あるいは同期発電機の安定度向上を目的として設置される発電機の補助励磁制御装置。

## PV 仕事入力

圧縮機の入力動力を圧力-体積線図上の積分面積で求めた値。積分値はジュール単位となり、変化に要する時間で割ることによりワット単位となる。

## PV 値

PV 値(Process Value)とはフィードバック制御における制御対象となる値を指す。温度制御ならば対象となる場所の温度となる。

## [Q]



## [R]

### RE サイト

REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> の化学式で表される結晶構造の中で希土類元素(RE)の占める位置。また、Ba の占める位置を Ba サイトと呼ぶ。

### 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 REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> の略式表記。RE(希土類元素)をイオン半径の大きいネオジム(Nd)、サマリウム(Sm)等とした系は臨界温度 T<sub>c</sub> や高磁場での臨界電流密度 J<sub>c</sub> 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

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。

### Reel to Reel 式焼成

特に、MOD 方式での仮焼、本焼で用いた際の合成プロセスの呼称。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、一般に用いられている。予め熱処理パターンが設定された炉内に、送り出しリールでテープを通し連続的に巻取りリールで巻き取る方式。長尺化に有利であることに加え、装置をコンパクトに出来る等の利点がある。

### RE 系超電導線材

「次世代高温超電導線材」と呼ばれる YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>(YBCO)に代表される REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> 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<sub>c</sub>)・臨界電流密度(J<sub>c</sub>)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。

### RHEED (Reflection High Energy Electron Diffraction)

反射高速電子線回折という。低速電子線回折(LEED)、中速電子線回折(MEED)と並ぶ表現。薄膜の場合には、反射電子線回折を用い、薄膜表面付近の結晶構造や成長様式の変化の観察に利用される。

### RMS 値

表面粗さの指標の一つで、平均二乗粗さ(平均値からの偏差の二乗平均値の平方根)のこと。

[S]

**s.f.**

自己磁界。Self-field の略。

**SFQ**

単一磁束量子。2 個のジョセフソン接合を超電導線でリング状に接続したもの。CMOS よりもはるかに高速動作する上、低消費電力化を図れる。single flux quantum。

**SMES**

超電導磁気エネルギー貯蔵。Superconducting Magnetic Energy Storage。

**SN 転移抵抗型限流器**

超電導体が常電導転移(Superconductor to Normal conductor transition : SN 転移)した際の抵抗を利用した限流器。

**SOE (Surface Oxidization Epitaxy) 法**

Ni 基材の自己酸化膜 NiO を中間層として積極的に用いる中間層形成の一手法。従来、NiO は配向中間層形成に害があるとされ、水素還元などの方法を用いて除去し、他の安定化ジルコニア(YSZ)やマグネシア(MgO)の中間層を形成していた。SOE 法は逆転の発想で NiO 自体を配向化し中間層(NiO(100)配向膜)として利用した。

**SQUID (Superconducting Quantum Interference Device)**

ジョセフソン効果を用いて極微少な磁束を測定するための素子。超電導体で作られたリング中に 1 個以上のジョセフソン素子を含んだ高感度の磁束計。SQUID は超電導量子干渉素子と呼ばれ、超電導ループにジョセフソン接合を含む構造をもち、高感度な磁気センサーとして使われる。生体が活動するとき発生する微弱な磁場を検出する脳磁計、心磁計などの生体磁気計測、微弱な電圧、電流などの高精度な物理計測などで応用されている。

**SQUID グラジオメータ**

超電導接合を用いた磁場干渉計(SQUID)には、絶対磁場を計測するマグネトメータと、磁場を補足するループを 2 つ並べることで一定磁場成分をキャンセルさせ、ふたつのループに捕捉される相違分のみを検出するグラジオメータがある。地磁気等、環境磁場ノイズを除去でき、変化分のみを検出できるので、誘導電流による欠陥検出に有用である。

**Strip モデル**

Norris によって提唱された、超電導線材の通電損失を記述するモデルであり、主に高アスペクト比の薄膜形状の線材の特性を良く記述する。

[T]

## T(テスラ)

磁束密度の SI 単位。1T=10<sup>4</sup>G(G:ガウス)。

## T-S 間距離

Target-Substrate(ターゲット-基板)間距離。in-plume と out-plume の大きな違いは T-S 間距離にある。一般的に in-plume の方が高成膜レート(高堆積)、高材料収率である。ただし、現状では out-plume の方が比較的高特性(高 J<sub>e</sub>)膜が得易い。

## 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 20 (TC20)

国際電気標準会議(IEC)内に設置される CV ケーブルなどの既存ケーブルの標準化専門委員会。

## 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(トリフルオロ酢酸) 前駆体

超電導膜作製法の 1 つである MOD(Metal Organic Deposition)プロセスに用いられる前駆体の 1 種であり、トリフルオロ酢酸塩から得られたもの。

## 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。

## TS

国際電気標準会議(IEC)における技術仕様書。Technical Specifications。

[U]

### **UHF-SMES**

Ultra-High Field SMES

### **UPS (Uninterruptible Power Supply)**

無停電電源装置。変換装置、エネルギー蓄積装置(蓄電池が普通)及び必要に応じてスイッチを組み合わせてることによって、交流電源に停電や擾乱による電圧、周波数、波形の変化があっても負荷に対して所定の品質の交流電力を連続して供給するシステム。

[V]

[W]

[X]

[Y]

**Y**

→イットリウム

### **Y (Yttrium) 系線材、Y系超電導導体**

化学式 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ で表される超電導体、および、Yのサイトを他の希土類元素で換えたもので超電導を示す超電導体を用いて作製した超電導線材、超電導導体。

### **YAG レーザ**

$\text{Nd}^{3+}$ (ネオジウムイオン)を活性イオンとして含む YAG 結晶( $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  : Yttrium Aluminum Garnet)に、励起光を照射し得られる波長 1064 nm の近赤外光を発振する固体レーザ。YAG レーザは、正式には  $\text{Nd}^{3+}$  : YAG レーザと書くが、一般には YAG レーザと称されている。

### **YBCO**

$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$

### **YSZ 層 (イットリア安定化ジルコニア層)**

多層構造線材に用いられる中間層の一つ。作製プロセス中に高温加熱処理があり、そのときに基板と超電導層との反応を防ぐ役割と、ISD 法、IBAD 法において配向を得るために用いられる。中間層の結晶配向は超電導膜を形成するときの結晶配向性に影響を与える。

[Z]

「略記号」

**Nd123, Gd123, Dy123,**

RE Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>における希土類元素(RE)をそれぞれネオジウム(Nd), ガドリニウム(Gd), ジスプロシウム(Dy)とした化合物の略記。

[0]

### 0.2%耐力

材料の引張試験を出えられる応力-歪曲線において塑性変形領域において 0.2%の永久変形が生じた点を示す応力の事。銅やアルミなど非鉄金属は明瞭な降伏点を示さないで、この 0.2%耐力を鋼の降伏点に相当する点として用いる。

[1]

### 123 系結晶構造

構成するカチオンの組成比から 123 系と呼称されている  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  あるいは  $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  (RE: 希土類元素)に共通な結晶構造。ペロブスカイト型構造から派生した構造で、Y を挟んで上下に超電導のキャリアが存在する Cu と O からなる 2 次元正方格子  $\text{CuO}_2$  面を配置し、さらにその上下に BaO 層を有する。2つの BaO 層間にも  $\text{CuO}_2$  面を有するが、この面では a 軸方向に酸素が欠損しており、b 軸方向に Cu-O 鎖を形成していることがわかる。この Cu-O 鎖の酸素原子は、酸素分圧や温度を変化させることで、可逆的に結合・解離が起こり、その結果、酸素欠損量  $\delta$  は約 0~1 まで変化する。

[2]

### 2 軸結晶粒配向

結晶の a-b 面(a, b 軸)と c 軸の方位を揃えた構造。Y 系超電導は結晶粒界における傾角依存性が大きく、隣り合う結晶方位のずれが大きいと臨界電流密度が大幅に減少するため、結晶の方位を揃え、隣接する結晶間の角度を出来るだけ小さくさせる必要がある。

### 2 次元集会的ピンニング機構 (Two-dimensional collective pinning mechanism)

磁束の長さ方向の超電導体のサイズがピンニング相関距離(後述)よりも短いような 2 次元ピンニング状態の機構で、点欠陥など微小な欠陥が多数ある場合に成立すると考えられる。ピン力密度が相関体積の中のピンの数の 1/2 乗にしか比例しないため、垂直磁界下の薄膜の場合、臨界電流密度は超電導層厚の 1/2 乗に逆比例する。

### 2 層 LPE 構造

金属基板上に LPE 法により  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  系超電導体を成膜するためには、金属基板と Ba-Cu-O 溶液との反応を抑制する必要がある。そのため金属基板上に MgO あるいは NiO の中間層を形成したうえで、まずその中間層元素を飽和させた溶液を用いて中間層材と溶液の反応を抑制しつつ、中間層元素を含んだ  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  相を第 1 LPE 層として形成する。更に良好な超電導特性を得るために不純物元素を含まない溶液から  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  層を第 2 LPE 層として成長させる。この 2 段の LPE 行程により得られる 2 層 LPE 構造が形成される。

[3]

[4]

[5]

[6]

[7]

[8]

[9]

## 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

電気抵抗ゼロ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（4 K： $-269^\circ\text{C}$ ）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（77 K： $-196^\circ\text{C}$ ）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ことによる。

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およ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産業・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、国および 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：希土類元素)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、省エネルギーおよび地球温暖化ガスCO<sub>2</sub>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。またこの頃には、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、より機能的なシステム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、システム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CO<sub>2</sub>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404 kt、超電導変圧器36 kt、SMES 1,673 kt、と算出され、合計で約2,100 kt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)”CO<sub>2</sub>排出量は、78,200 kt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目指している。その手段としては、日本が世界有数の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、イットリウムに代表されるレアアース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およ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およ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－エネルギー革新技术計画にて選定された CO<sub>2</sub> 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ている。

## 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(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

#### 1.1 研究開発目標

超電導技術の早期産業利用の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ている。

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 SMES 対応線材の安定作製技術開発及び 2 MJ 級モデルコイルシステムを用いた SMES の動作試験を行い、高磁界コンパクト SMES の実用化に目途をつける。

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・低誘電損失ケーブル化技術に関する要素技術の開発を行い、プロジェクト終了時の平成 24 年度までにケーブル対応線材の安定製造技術開発及び 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、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、およ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）に必要な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 1.1-1 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
<p><b>超電導応用基盤技術研究開発(第Ⅱ期)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・Y(イットリウム)系線材の開発</li> <li>・Y系線材による機器(*1)の要素技術開発</li> <li>(*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</li> </ul>					<p><b>イットリウム系超電導電力機器技術開発</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・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</li> </ul>				
<p><b>超電導電力ネットワーク制御技術開発</b> SMESシステムの開発</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・Nb系線材によるSMESの実系統連系試験</li> <li>・電力ネットワーク制御システムの技術開発</li> <li>・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</li> </ul>					<p><b>希少金属代替材料開発</b> 「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」</p>				
					<p><b>高温超電導ケーブル実証プロジェクト</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・Bi(ピスマス)ケーブルシステムによる実系統連系実証試験</li> <li>・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</li> </ul>				

### 1.1.1 超電導電力貯蔵システム (SMES) の研究開発

これまでの 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、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有することの見通しが出来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・最適化を目指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、これまで 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目指すものである。

#### 1.1.1.1 研究開発項目毎の目標

##### 1.1.1.1-1 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 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目指し、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 20 MJ 級システムの要素コイル規模である外径 700 mm 級コイルを開発する。

### (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 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」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 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が得られたことから、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り、これまでの「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。

#### 1.1.1.1-2 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/m<sup>2</sup>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ならびに高効率な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。



### 1.1.1.1-3 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これ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など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目指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年度中）

- ・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： $I_c = 20$  A/cm-w @77 K & 3 T で強度 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。

### 1.1.1.1-4 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合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合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 年度中）

- ・ 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。

### ○ 最終目標（平成 24 年度中）

- ・ 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 万回以上の繰返し充放電による特性検証を実施する。

## (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。

「超電導電力ネットワーク制御技術開発」のプロジェクトにおいて実施した概念設計による最適化結果、及び 2 GJ 級 SMES コイルは磁場、フープ応力等の仕様が 20 MJ 級 SMES コイルと同等であること、また、20 MJ 級 SMES コイルの検証はその複数の要素コイルを用いた試験検証によりトロイド型コイルの電磁特性評価等が検証可能であることから、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。これらの検証終了に

についてはプロジェクト最終年度となる平成 24 年度を最終目標とする。

### 1.1.2 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・コンパクト化技術などの開発を行い、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・コンパクト化技術などの開発を行う。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。

#### 1.1.2.1 研究開発項目毎目標

##### 1.1.2.1-1 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

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） $2\text{ W/m}$ -相@ $5\text{ kA}$  以下
- ・短絡試験 ( $31.5\text{ kA}\cdot 2\text{ sec}$  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  $5\text{ kA}$  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) 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、 $66\text{ kV}/5\text{ kA}$  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  $1\text{ kA}$  級ケーブルにおいて、 $0.1\text{ W/m}$ @ $1\text{ kA}$  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、 $2.5\text{ W/m}$ @ $5\text{ kA}$  程度の損失が発生する。このことから  $5\text{ kA}$  通電時の損失を  $2\text{ W/m}$  以下とした。 $66\text{ kV}$  級実系統に導入する場合、 $31.5\text{ kA}$ 、 $2\text{ sec}$  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、 $5\text{ kA}$  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、 $1\text{ kA}$  級の接続構造を基に、 $5\text{ kA}$  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。

#### 1.1.2.1-2 高電圧・低誘電損失ケーブル化技術開発

##### (1) 研究開発の必要性

都市部およ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

$275\text{ kV}/3\text{ kA}$  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およ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、誘電体損失) 0.8 W/m-相@3 kA 以下。

### (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など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@1 kA より、3 kA 通電時の損失換算値 0.9 W/m の半分弱の 0.4 W/m 以下とし、誘電体損失 0.4 W/m 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およ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、超電導-常電導接続部、電流リードに異常がないこととした。

### 1.1.2.1-3 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・熱特性などの把握が必要である。

また、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およ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およ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およ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およ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有用性のシステム検証を行う。

#### (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 通電および 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およ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など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。

#### 1.1.2.1-4 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

大電流およ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、線形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 系超電導線材および細線化時の強度に優れた IBAD 系中間層付き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、中間層および 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厳密化により製造歩留まり向上を行う。

### (3) 開発目標

#### ●中間目標（平成 22 年度）

- ・  $J_c=15 \text{ kA/cm}^2$ （2 mm 幅×20 m 以上）に相当する線材を安定に作製可能な技術を確立する。

### (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 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結晶粒配向低磁性金属基板では、20 m 長で  $I_c=120 \text{ A/cm-w}$ (77 K, s.f.) を得るとともに、 $259 \text{ A/cm-w}$ (77 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  $J_c=15 \text{ kA/cm}^2$  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度強度金属基板を用いて、500 m 長で  $I_c=300 \text{ A/cm-w}$ (@77 K, s.f.) を達成していることを踏まえ、PLD クラッド配向基板線材および 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。

## 1.1.2.1-5 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・ヒートサイクル条件などを検討し、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 長ケーブルおよ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、課通電試験などを行い、長尺ケーブルシステムの熱・機械的な挙動、電気特性、運転の安定性などを評価し、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  $\phi$  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、1.1.2.1-1～1.1.2.1-4 項の研究開発成果を基に、三心一括ケーブル・終端接続部・冷却システムおよ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。

#### 1.1.2.1-6 275 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、ヒートサイクル条件などを検討し、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およ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、運転の安定性などを評価し、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  $\phi$  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、1.1.2.1-1～1.1.2.1-4 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・冷却システムおよ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。

#### 1.1.3 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、電気抵抗がほとん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、およ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、およ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。

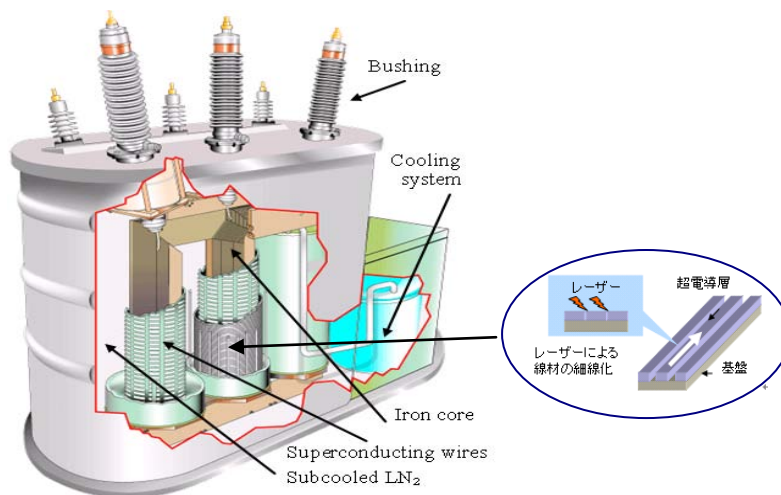


図 1. 1. 3-1 66 kV/6.9 kV-20 MVA 級配電用超電導変圧器の概念図

### 1. 1. 3. 1 研究開発項目毎の目標

#### 1. 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成・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）」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 が通電可能な巻線コイルを開発する。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 級巻線コイルを開発する。③ 短絡電流（20 MVA 級変圧器%インピーダンス 15 %相当）により、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）

- ・ 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 年度中）

- ・ 2 kA 級の通電特性を検証する。また、100 m 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。

#### (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一化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単線材長は 100～300 m 程度が必要である。「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まり等を勘案して 3 分割線による交流損失 1/3 を目標に設定した。

### 1.1.3.1-2 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) 達成目標

#### ●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  $\geq 65\%$ ）及び高効率膨張機（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  $10\text{ m}^3$  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  $20\text{ W/m}^2$  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  $2\text{ kW@65 K}$ 、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、およ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  $2\text{ kW@65 K}$  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  $2\text{ kW@65 K}$  は既存冷却装置（スターリング式）で容量  $1\text{ kW}$  以下@ $80\text{ K}$  の約 3 倍、冷凍機効率  $\text{COP} 0.06$  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。

#### 1.1.3.1-3 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ぐとともに、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) 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。

### (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およ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。

#### 1.1.3.1-4 変圧器対応線材安定製造技術開発

##### (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目指し、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切断およびスクライビング溝加工線材の超電導特性の評価およ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) 達成目標

#### ●中間目標（平成 22 年度）

- ・ 5 mm 幅 3 分割溝加工にて  $I_c=40\text{ A}@65\text{ K}, 0.01\text{ T}$ , 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 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 に幅係数(0.5)、磁場・温度係数 (1.6) 及びスクライビング加工低下率(0.25)を乗じて  $I_c=40\text{ A}$  (5 mm-w、3 分割@65 K,0.01 T)が求められる。

#### 1.1.3.1-5 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。

##### (2) 研究開発の具体的な内容

20 MVA 級変圧器を検証可能な 66 kV/6.9 kV-2 MVA 級モデルを開発し、前記、1.1.3.1-1 項の変圧器巻線技術開発、及び 1.1.3.1-2 項の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。① 要素技術 (巻線、保冷容器、冷却システム等) を組合せて 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。③66 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) 達成目標

#### ●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、内径等のサイズおよ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。

#### 1.1.4 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、これ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ー蒸着 (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、これまでの開発において、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標とする。

##### 1.1.4.1 研究開発項目毎目標

###### 1.1.4.1-1 線材特性の把握

###### (1) 研究開発の必要性

これまでのプロジェクト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、本プロジェクトでは、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など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目指す。

## (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)
  - ・ 各種電力機器の耐久性試験

## (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目指すべく内部目標を設定した。

### 1.1.4.1-2 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目指す観点からは、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）
  - ・  $I_c=30$  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（平成 24 年度）
  - ・  $I_c=50$  A/cm-w @77 K, 3 T - 200 m
  - ・  $I_c=400$  A/cm-w @65 K, 0.1 T - 100 m

## (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  $I_c=300$  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、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、1 次側コイル 1033 ターン、内側 2 次コイル 54 ターン、外側 2 次コイル 54 ターンの条件で、実効値として  $I_c=約 60$  A/ 5 mm-w の特性の線材が必要になる。臨界電流値への変換値( $\sqrt{2}=1.41$ )を乗じ、負荷率(0.8)で除すると  $I_c=約 100$  A/ 5 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、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 倍強に増大させる。従って、1 本の線材に求められる実効電流値は 6 MVA 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。

#### 1.1.4.1-3 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 – 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 mm 幅- $I_c$ = 500 A/cm-w – 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 A/2 mm<sup>2</sup> が必要であることより上記の 300 A/cm<sup>2</sup> 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、1 次側コイル 1033 ターン、内側 2 次コイル 54 ターン、外側 2 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した。

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 A/2 mm<sup>2</sup> が必要になっていることより上記の 500 A/cm<sup>2</sup> 線材の目標値を設定した。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 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。

#### 1.1.4.1-4 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  $J_e$  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  $J_e$  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)

- ・  $I_c = 300 \text{ A/cm-w} \cdot 1 \text{ GPa}$  ; 50 m
- ・  $J_e = 30 \text{ kA/cm}^2$  ; 50 m

### ○ 最終目標 (平成 24 年度)

- ・  $I_c = 500 \text{ A/cm-w} \cdot 1 \text{ GPa}$  ; 200 m
- ・  $J_e = 50 \text{ kA/cm}^2$  ; 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、自己磁場中の特性との比率を 1 と仮定し更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/ 2 mm-w が必要になっている。これは、10 mm-w 換算で 300 A/cm-w 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  $\mu\text{m}$  (システム検証用線材は 130  $\mu\text{m}$  厚) と想定することから断面積が 1  $\text{mm}^2$  となり  $J_e$  値として 30  $\text{kA/cm}^2$  (300 A/cm-w を総断面積 0.01  $\text{cm}^2$  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

500 A/cm-w の  $I_c$  特性が必要との報告がある。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、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 が必要になる。これは、10 mm-w 換算で 500 A/cm-w であり、総線材厚を 100  $\mu$ m と想定し、 $J_c$  が 50 kA/cm<sup>2</sup> (500 A/cm-w を総断面積 0.01 cm<sup>2</sup> で除した値) の目標値を設定した。

#### 1.1.4.1-5 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

中間層形成技術としては、IBAD-MgO 中間層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 3 円/Am 未満の実証

##### (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に技術コスト 3 円/Am 未満の実証とした。

### 1.1.5 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。

#### 1.1.5.1 研究開発項目毎目標

##### 1.1.5.1-1 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、中国など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、機械特性などの基本的な特性の試験方法の規格化が必要である。

#### 1.1.5.1-2 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 などとの 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。

### 1.1.5.1-3 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 国際標準化ニーズを把握する。
- ・ 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。

## 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 24 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けられた。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 系銀シース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、機械強度などにおいて 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に代表されるレアアース系銅酸化物高温超電導線材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およびケーブル、変圧器、限流器、冷凍機、電動機の開発を目指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。

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、これま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)で 200 A/cm-w から 300 A/cm-w の臨界電流( $J_c$ )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。現状では、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など、我が国の経済再生にも大きく貢献することが出来ると考えられる。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高く、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出来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イットリウム系超電導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2GJ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、2GJ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、275kV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。

現在、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など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 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、開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、CO<sub>2</sub> の排出を抑制する効果も期待できる。これまでの 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い。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など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など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する関連技術としては、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 秒までの短絡試験を実施して、劣化等がないことの確認等、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、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目指した研究を進める。

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、およ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。

これまでに、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、系統連系試験なども行われてきた。しかし、磁界中の臨界電流向上や交流損失低減などの課題が残った。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これまでの成果を活用し、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級の超電導モデル変圧器を開発し、実現性を検証することによって、高効率な変電技術の確立を目指す。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巻線モデルを開発する。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、その結果に基づき限流機能付加変圧器の設計を行い、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。

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 級モデルを開発し、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。

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、現在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現在存在しない。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」「MgB<sub>2</sub> 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。MgB<sub>2</sub> 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。昨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る。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 など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など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り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、これ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る。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・歩留り向上技術開発を進めることが重要である。

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

### 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。

これまでの 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・最適化を目指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イットリウム系 SMES コイルの技術開発が緊要である。

このため、これ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も進める。

### 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、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。今回、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目指し、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 級コイルを開発する。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する。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る。

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う。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ことから、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ことが必要であることから、今回、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う。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る。

### 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、その評価を実施する。また、20 K~40 K 温度領域においては、従来の液体ヘリウム温度領域に比べ、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、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する。

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 $3 \text{ W/m}^2$ 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う。

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する。

### 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、線材の長尺性が必要とされ、長尺性の実現には、連続した超電導線材の安定製造技術が要求される。

これまでに、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これまでの成果で確認された。そこで、CVD法の高速製造性と、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1 GPa、100 m-20 A/cm-w (@ 77 K, 3 T)の特性を有するSMES対応線材の安定製造技術の確立を目指す。

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防止することができる。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年度は3 km程度、平成21年度から平成22年度にかけて、総計7 km程度を目安として作製することを目指し、安定した中間層形成の見通しを得る。また、平成22年度は中間層が薄いためIBAD-GZO層より製造速度の大きなIBAD-MgO層付き基板の導入を推進する。

平成20年度は、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る。これにより、100~200 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総長 3 km を目安として作製して、特性の安定性を検証する。平成

21年度は、平成20年度の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4 kmの線材を目安として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る。そして平成22年度では、均質な特性を有する線材を総長 2 kmを作製を目安として、特性の均質化と作製サイクルの安定化を図る。さらに、超電導線材の磁場中臨界電流の改善を図り、50 mで $I_c=20$  A/cm-w (@77 K, 3 T) の実証を目指す。また、平成21年度までに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特性が向上したIBAD-MgO線材を平成22年度に評価しSMESへの適用性を検討する。

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、長尺にわたり安定な線材が必要である。また、Y系超電導線材は積層構造であり、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、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目指す。

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基板を作製し、 $I_c$  安定化の見通しを得る。平成20年度は、まず、精度の高い表面平滑化技術の検討を行う。既存の金属基板の調査を行い、基板の表面欠陥の原因を把握する。製造工程と研磨方法の検討を行い、100~200 A/cm-w (@77 K, s.f.) 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る。平成21年度は、さらなる長尺安定性の向上を図る。平成22年度には、平成21年度に得られた成果をもとに更なる表面平滑化技術の向上を図り、100 m長で $I_c=20$  A/cm-w (@77 K, 3 T) の特性を有するSMES対応線材の安定製造技術の確立を目指す。平成21年度に総長6 km、平成22年度に総長 4 kmを目安とした基板作製を行う。

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-CeO<sub>2</sub>/SP-YSZ/SP-CeO<sub>2</sub>中間層上に、CVD法によるY系超電導層を作製して200 A/cm-wを超える $I_c$ 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う。平成20年度では、既存のリール・トゥ・リール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する。また、キャップ層に関しても、既存のリール・トゥ・リール中間層成膜装置 (スパッタ) を用いてCeO<sub>2</sub>等のキャップ層の成膜条件の適正化の検討を進め、キ

キャップ層の高速かつ安定な作製技術を検証する。さらに、平成21～22年度には、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、平成22年度には、100 m長で $I_c=20$  A/cm-w (@77 K, 3 T) 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目指す。平成21年度に2 km、平成22年度に3 kmを目安としたIBAD層を作製する。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年度に1 km、平成21年度から平成22年度にかけて7 kmを目安として作製する計画である。さらに、平成22年度では、製造速度がIBAD-GZO中間層より大きなIBAD-MgO中間層へのスパッタによるキャップ層の形成技術の適用を推進する。

YBCO層に対しては、CVD技術を導入して線材作製を行う。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、100 m長で $I_c=20$  A/cm-w (@77 K, 3 T) 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目指す。平成20年度では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、 $I_c=100\sim 200$  A/cm-w (@77 K, s.f.) の $I_c$ を持つ超電導層の安定製造の見通しを得る。平成22年度には、100 m長で $I_c=20$  A/cm-w (@77 K, 3 T) の特性を有するSMES対応線材の安定製造技術の確立を目指す。平成21年度に1 km、平成22年度に1.5 kmを目安とした超電導層の作製を行う。

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する。平成20年度では、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する。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する。平成21年度には、SMES導体に適した銅安定化層の長尺製造技術の検討を行う。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年度から平成22年度にかけて合計13 km程度を目標に安定化層の作製を推進することを目指す。

平成23年度から平成24年度にかけて、高磁界コンパクトSMESシステムモデル検証に必要とされるIBAD-MOCVD線材を引き続き作製し、歩留り向上とコイル用導体作製技術のさらなる安定化の促進を図る。

## (2) 長尺IBAD-PLD線材の安定製造の検討

200 A/cm-w 級の臨界電流特性を有する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う。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の線材を作製する。



平成 23 年度から平成 24 年度にかけて、高磁界コンパクト SMES システムモデルの挙動検証のため、モデルコイル用の IBAD-PLD 線材を引き続き作製し、線材製造プロセスのさらなる安定化をさらに推進する。

### (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  $I_c=200$  A/cm-w 級 IBAD-MgO 線材の安定製造技術開発を行う。平成 22 年度に単長数十mの線材を作製する。

平成 23 年度から平成 24 年度にかけて、極低コストの IBAD-MgO 線材を SMES システムモデル検証用コイル向けに作製して、SMES への適用性の向上を図る。

#### 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）

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、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にある。

平成 20 年度は、2 GJ 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う。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、およ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る。

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等が発生した場合の保護の考え方を整理し、クエンチ時の挙動検証等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する。また、平成 23 年度からは、2 万回以上の繰返し充放電による SMES 特性評価試験等を実施し、Y 系 SMES コイルの動作検証を行う。



2.1.1-5 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 →				
	← SMES 動作検証 2 万回以上の繰返し充放電による特性検証 →				
予算 (百万円)	523	512	532	(500)	(500)

注) 各研究項目の予算には NEDO 管理費等を含む。( )内数字は未定

## 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・絶縁材料特性・試作ケーブル試験など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 66kV/5kA 大電流ケーブル研究開発（住友電気工業、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。

##### ・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により、線材間ギャップの影響、細線幅の効果、多層の影響を調べ、その結果をもとに、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年度の結果をもとに、まず0.7 W/m-相@3 kAの検証を行い、その結果をもとに、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、それらのデータをもとに5 kA級導体を製作し、2 W/m-相@5 kAの交流損失の目処を得る。

##### ・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、圧縮などの特性を確認する。

平成20年度は、単心ケーブルコアの特性評価(3 kA級)として、上記の曲げ、引張り、圧縮など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。平成21年度は、単心ケーブルコアの特性評価(5 kA級)として、上記の課題を検証する。

##### ・コンパクトで低損失ケーブルの設計

平成21年度、平成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

### ・超電導－常電導接続部の構造設計検証

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 年度は、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。平成 21 年度は、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。

### ・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 21 年度は、5 kA 級電流リードの設計検討を行う。平成 22 年度は、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の確認と、熱負荷の実測を行い、設計値との比較を実施する。

## (3) 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

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、熱収縮等による応力下でのケーブルコア変形が懸念されることから、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 21 年度は、三心ケーブル（1 心の一部のみ Y 系超電導線材、他ダミー線材）の試作・特性評価を行う。平成 22 年度は、三心ケーブル（1 心を Y 系超電導線材、他 2 心をダミー線材）の試作・特性評価を行い、最終設計の妥当性を確認する。

### ・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 21 年度は、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。また、三相短絡での電磁力の影響を事前にシミュレーションにて評価を行う。平成 22 年度は、31.5 kA・2 sec の三相短絡電流が通過した際の電磁力の影響を検討する。

#### (4) 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・ギャップ間隔、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。合わせて、局所的交流損失測定技術を開発する。また、複合・加工を行った 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、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 年度は、ケーブル構造の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@5 kA 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。平成 21 年度は、平成 20 年度の成果を踏まえ、2 W/m-相@5 kA に向けた技術的な諸要素の見通しを得る。平成 22 年度は、2 W/m-相@5 kA をモデルケーブル導体で実証する。

#### 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など、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）」プロジェクトで、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、誘電率および誘電正接（ $\tan\delta$ ）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。

##### ・275 kV 高電圧ケーブル用導体の交流損失の評価

平成 20 年度から平成 22 年度においては、 $I_c=200$  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、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、0.4 W/m-相レベルの交流損失を達成することを検証し、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、24 年度においては、交流損失(シールド層による損失を含む)、誘電体損失を合わせたケーブル損失で、0.8 w/m-相@3 kA 以下の達成を目指す。

#### ・絶縁材料・絶縁設計の検討

平成 20 年度から平成 22 年度においては、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、シートでの電氣的、機械的な評価を実施する。(一部外部試験機関に外注) 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 時間までの評価を開始する。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。この設計においては、誘電体損失 0.4 W/m-相を達成する見通しを得る。

## (2) 高電圧接続技術の開発

#### ・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の開発を実施する。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より本格的な研究が始まる。

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作成など机上での設計を行う。平成 21 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。

#### ・ 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は、超電導特性評価、初期電気試験およ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 ケーブルの試験基準として、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および懸念箇所の抽出を行う。平成 22 年度は、終端接続部を構成する部品に関して単品試験を実施する。これらデータを蓄積して、システム検証用さらに実機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絶縁特性およ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。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、导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、データの補強を実施し、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、本プロジェクト成果を踏まえ別途検討する。

### 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) 定常通電時およ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 年度は、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などを行う。なお、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。平成 21 年度は、平成 20 年度の成果を踏まえ、大電流ケーブル短絡時の温度上昇解析およ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。平成 22 年度は、平成 21 年度までの成果を踏まえ、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。

なお、平成 23、24 年度は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させることを目標とする。

## (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。

### ・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温の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などが異なってくる。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、実用化を目指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。

### ・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、な



どが考えられる。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 年度は後年度開発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、熱伝達など実用規模の冷却システムの設計に必要な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。

#### ・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・実験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。現在、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ものである。

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伝熱量、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・実験研究を行い、生成方法に関する知見を得る。また、固相率計測器試作機の設計・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、24 年度においては、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する。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など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およ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および導入・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 Y 系超電導線材の安定製造技術を開発する。

##### (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、これまでの成果で、線材を巻き付けた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、配向基板系線材と称す）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 系中間層付き基板を用いた Y 系超電導線材に関して開発を行う。配向基板系線材または IBAD 系中間層付き基板系線材に対して、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結晶粒配向低磁性金属基板での高  $I_c$  化技術等を統合することで、平成 20 年度は、20m 長で  $J_e=10 \text{ kA/cm}^2$  の安定製造を行い、平成 21 年度は 20 m 長で  $J_e=13 \text{ kA/cm}^2$  の安定製造を検討し、平成 22 年度には中間目標である 20 m 長で  $J_e=15 \text{ kA/cm}^2$  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、配向基板系または IBAD 系中間層付き基板系では、超電導層形成において、基板温度、プ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が、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することを目指す。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および増量を確実に実現する。このために、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。出力の安定性および現有装置の 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り、4 km レベルを目安として提供することを目指す。

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組織評価も駆使し、安定製造技術を促進させる。

## (2) 基板・中間層テープの開発

大電流電力機器に 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出来るだけ結晶粒径が小さいことが望ましい。IBAD 法により作製される線材は、無配向で結晶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、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  $16^\circ$  以下の特性を有する IBAD 中間層テープを平成 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。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。

## (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。

・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。現状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±10%以内に収める製造プロセスを検討する。

・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ー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。コンピュータによる流体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、200m級線材で長手方向の特性分布誤差を平成22年度末に±15%以下にする検討を行う。

年度毎の目標は幅5mm、 $I_c=200$  A(1cm幅換算)の仕様の線材で、平成20年度が20m長の線材で特性分布誤差を±15%以下、平成21年度は100m長の線材で±15%以下、平成22年度は200m長で15%以下に分布を収める製造プロセス技術を開発する。

・長尺Y系超電導線材の安定製造の検討

平成20年度は、現状平成19年度末までに固まった製造プロセスをベースに、IBAD-GZO基板上にスパッタ法によりCeO<sub>2</sub>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。また、現状想定している50%の歩留りを平成21年度末に60%、平成22年度末に70%を達成出来るよう、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作製グループに供給し、種々のケーブル試験に供する。平成21年度以降は、前述の(1)で開発した特性向上の結果とともに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、5.0mm幅の線材に対し、1.0cm幅換算で200A通電可能とする仕様で、平成20年度が1.5km(単長10m以上)、平成21年度2.0km(単長30m以上)、平成22年度3.0km(単長30m以上)を供給することを予定している。

#### (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。

#### (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 Y 系超電導線材を電力ケーブルへ組み込む前段階において、臨界電流性能、幅方向の電流均一性評価、機械的欠陥評価、欠陥除去など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とともに、Y 系超電導線材を電氣的及び磁氣的に評価が可能な長尺線材  $L_c$  評価装置などでの評価を行い、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。

### 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、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 23 年度～平成 24 年度には、長尺ケーブルとして約 15 m 長の 66 kV 三心一括ケーブルを製作し、両端に終端部を設け、液体窒素の冷却システムと組み合わせて、超電導電力ケーブルシステムを構築し、課通電試験を行い、システムの熱的・機械的な挙動、電氣的特性、運転の安定性・信頼性を評価するものとするため、平成 22 年度に 66 kV 級大電流ケーブルシステムの設計検討を行う。

また、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

クル条件などを検討し、課通電試験計画書を作成する。

#### 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、定常運転、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、2.1.2-3 項で実施される「電力ケーブルの熱収支に関する評価研究」の成果を活かし、平成 22 年度には検証用の 275 kV 高電圧ケーブルシステムの設計検討を行い、平成 23 年度～平成 24 年度には、両端に終端接続部と、ケーブルの途中で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。また、平成 22 年度には、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および中間接続部等の再設計を行う。

なお、システム設計、システムの試験計画など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、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。

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	大電流・低交流損失ケーブルの基礎特性評価 大容量接続技術の開発 (5 kA 連続通電) 三心一括ケーブル導体の検証(31.5 kA・2s の耐性) 交流損失低減の基礎的研究(2 W/m・相@5kA)				
2. 高電圧絶縁・低誘電損失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 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) 高電圧接続技術の開発 (275 kV 連続課電) 超電導ケーブル電気絶縁特性の調査 (63 kA・0.6s の耐性)				
3. 電力ケーブルの熱収支に関する評価研究	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) スラッシュ窒素の研究 (システム構築)      (システム検証) 超電導電力機器の冷却設備の調査研究				
4. 超電導電力ケーブル対応線材安定製造技術開発	大電流用線材の安定製造技術の開発 ( $J_c = 15 \text{ kA/cm}^2$ 20m 長) 基板・中間層テープの開発 MOD プロセスによる高電圧ケーブル用線材の開発 ( $J_c = 15 \text{ kA/cm}^2$ 20m 長) 微細構造解析 IBAD-PLD 線材の安定製造技術の開発 線材の評価技術の開発				
5. 66 kV 大電流ケーブルシステム検証			システム開発      システム作製・試験・評価		
6. 275 kV 高電圧ケーブルシステム検証			システム設計      システム作製・試験・評価		
予算 (百万円)	586	706	616	(598)	(597)

注) 各研究項目の予算には NEDO 管理費等を含む。( )内数字は未定

### 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、九州大学、ISTEC）

##### (1) 超電導変圧器巻線の大電流化技術開発

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、平成 20 年度に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。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素線間電流を均一化する転位均流化のための変圧器二次巻線モデル（12 重ね 2 並列導体による転位均流モデル）および二次巻線口出部モデルを設計・製作し、試験によって大電流巻線設計のための均流基礎特性を評価する。また、それらの成果に基づき、平成 21 年度に転位均流化のパラメータを調整した最適な転位均流モデルを製作し、試験にて特性を検証することにより、変圧器巻線の多層転位並列導体の構成法およびこれによる超電導変圧器の大電流巻線構成技術の評価する。平成 23～24 年度に転位均流モデルの成果を基に鉄心構造の大電流モデルを製作し、2 kA 級通電特性試験により大電流の巻線技術の評価する。

##### (2) 超電導変圧器巻線の低損失化技術開発

「超電導応用基盤技術研究開発（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比して 1/3 以下となることを検証するため、鉄心を有し、1 次と 2 次巻線からなる低損失化巻線モデルを平成 22 年度に設計・試作する。平成 23 年度には同モデルの交流損失特性試験により、細線化線材の巻線技術による損失低減技術を評価する。

##### (3) 超電導変圧器巻線の耐短絡強度技術開発

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、平成 21～22 年度に一次・二次巻線からなる鉄心付の短絡巻線モデルを試作する。同



モデルの特性を平成 22 年度に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を評価する。

#### (4) 低交流損失性・大電流容量導体および巻線構成技術の検討

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特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指す。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し、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。

### 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、小型膨張タービン、熱交換器小型化およ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。本プロジェクトでは、その基礎技術を試験や解析で確立し、中間目標である断熱効率 65 %の達成やシステム化を行う。

#### (1) 小型膨張タービンの高効率化

「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および知見に基づき、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平成 20 年度に試作する。平成 21～22 年度に試作タービンを用いて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

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圧縮機の技術開発に向けて、インペラー、ケーシング等小型ターボ圧縮機の要素部品について、平成 20 年度に構造・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、平成 21 年度に小型ターボ圧縮機の基礎特性把握用のターボ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、ターボ圧縮機の効率や運用性等の特性を明らかにし、平成 22 年度にターボ圧縮機の試作・改良等により断熱効率 65 %以上を達成する。

### (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。そのため、平成 20～21 年度に熱交換器の性能検討及び設計・試作を行い、平成 22 年度に熱交換器の試験・シミュレーションを実施し、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。

### (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目指し、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先の NEDO 事業「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。5 年間を通してみると、中間時点からコールドボックスの設計や冷凍機運転プロセスシミュレーション検討等の事業項目を開始し、冷凍機の組立へと繋げる。平成 20 年度に冷凍機の基本プロセスを検討し、平成 22 年度の冷凍機組立に伴うコールドボックス他の設計、運転プロセスシミュレーションの検討により、本プロジェクト後期の平成 23～24 年度には冷凍機の評価試験により、最終目標の  $COP \geq 0.06$  を確認する。さらに、サブクール液体窒素循環装置を介して、超電導変圧器と組み合わせた冷却試験を行い、超電導電力機器用冷却システムとしての性能を検証する。

### (5) 冷凍機と機器とのインターフェースの検討

平成 20～22 年度に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。

#### 2.1.3-3 限流機能付加技術開発（九州電力、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する。今回、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、および数百 kVA 級限流機能付加単相変圧器の設計を実施し、中間目標の達成を目指す。

### (1) 限流モデルによる特性検証

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、二次側それぞれの限流特性を個別・独立に評価するために、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（限流モデル）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、発生した主巻線の抵抗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、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・評価する。なお、本モデルの補助巻線（一次と二次）は限流特性を試験するためのものであり、実用化の場合は主巻線（一次と二次）の二巻線構成である。

### (2) 限流応答特性解明と限流効果による巻線保護の検討

平成 21～22 度には上記の限流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。

### (3) 数百 kVA 級限流機能付加変圧器の設計検討

上記の限流モデルの試験や解析の成果について総合評価を行い、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およ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・試作を行う。平成 23

年度には同モデルの過大電流試験により、変圧器巻線構造による限流機能を評価する。

#### 2.1.3-4 超電導変圧器対応線材安定製造技術開発（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 次元的構造の 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出来るだけ結晶粒径が小さいことが望ましい。これまで開発してきたイオンビームアシスト蒸着法（IBAD 法）線材は、無配向で結晶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損失低減ができないことから、結晶粒径だけでなく、超電導膜の長手方向、幅方向の特性の不均一を極力低減する必要がある。超電導層作製時の条件の安定性を改善する必要がある。高温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、「超電導応用基盤技術研究開発（第 II 期）」の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 分割線材にて  $I_c=40 \text{ A}@65 \text{ K}\&0.01 \text{ T}$  で 100 m 以上に相当する線材を安定的に製造する技術開発を行う。また、スクライビング（細線化）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、および線材の特性評価と温度スケールリング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）

これまで IBAD 中間層付き基板上に超電導層をパルスレーザー蒸着法(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（細線化）溝加工後に所定の特性 ( $I_c=40 \text{ A}@65 \text{ K}\&0.01 \text{ T}$ ) 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中間層付き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中間層付き基板を平成20～22年度の3年間で総量約4km（1cm幅線材で換算）を供する。平成23～24年度はPLD線材を総量約10km（1cm幅線材で換算）および、次項に記述するMOD線材用のIBAD中間層付き基板を約4km（1cm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、これまで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5mm幅、100m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（細線化）溝加工後に所定の特性（ $I_c=40\text{ A @ }65\text{ K \& }0.01\text{ T}$ ）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するとともに、プロジェクト後期2ヵ年で開発する2MVA級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2km（1cm幅線材で換算）を供する。平成23年度はMOD線材を総量約2km（1cm幅線材で換算）を供する。

## (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、スクライビング溝加工による細線化が必須である。スクライビング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、これまで開発しているレーザ加工等によるスクライビング溝加工細線化技術の安定製造技術を開発する。具体的には、変圧器用として100m長以上のY系超電導線材で5mm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する。平成20～21年度では100m線材の3分割安定溝加工技術開発を目標とし、プロジェクト後期2ヵ年で開発する2MVA級変圧器モデル用線材に対してのスクライビング溝加工を平成23年度以降に実施する。また、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、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、透過型電子顕微鏡を用いてその微細構造解析を行う。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 年度には、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目指す。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枚数依存性についても検討する。

### 2.1.3-5 2MVA 級超電導変圧器モデルの検証 (九州電力)

#### (1) 2MVA 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が見通せ、冷却システムと組み合わせて検証できるには、実機と同一電圧で、実機に適用できる巻線構成となる最低容量となる、66 kV/6.9 kV-2 MVA 級超電導変圧器モデルの設計検討を平成 22 年度に行い、後期 2 ヶ年で試作・評価する。ここで、同変圧器により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、以下の方針により同変圧器の設計検討を行う。① 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、検討に加えて実施する。② 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。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化モデル技術を適用する。④ 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。⑤ また、同変圧器モデルの交流損失低減や耐電圧特性等検証・評価できる課通電試験の計画を検討する。

#### (2) 20MVA 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 級配電用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。特に、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て検討する。また、それらの設計検討の結果に基づき、超電導変圧器の特徴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纏める。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。

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 →				
	← 小型ターボ式圧縮機開発 →				
	← 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 →				
(3)限流機能付加技術開発	← 限流モデルの特性検証 →		← 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 →				
(4)超電導変圧器対応線材安定製造技術の開発	← 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	← 2/20MVA変圧器の設計 →			← 2MVA 変圧器モデルの検証 →	
予算 (百万円)	631	608	606	(600)	(616)

注) 各研究項目の予算には NEDO 管理費等を含む。( )内数字は未定

#### 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的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目指す。

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、線材試料保存および加速試験用の装置を導入し、IBAD-PLD 及び IBAD-MOD 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 23~24 年度では、ケーブル対応の更なる評価として、長期歪によるクランプ劣化および通電の 30 年保障に関して、試験方法と考え方を検討するとともに



に改良されたケーブル用線材の耐久性試験を進める。また、「各種電力機器の耐久性試験」では、変圧器および SMES に関しても、ケーブルとは異なる環境条件あるいは線材構造において、経時変化評価と劣化限界を評価する。

結晶粒配向金属基板・PLD 線材に対して経時経年特性変化を把握する。その際、必要に応じて X 線回折による構成相の確認と共に組織観察と連携する。

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、ロスアラモス米国立研究所、東京大学、東京工業大学)

本項の開発では、高磁場中 ( $\sim 10$  T) での応用となる SMES 及び比較的低磁場 ( $\sim 0.1$  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。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 BaZrO<sub>3</sub> 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。

平成 20～22 年度における PLD 法による開発では、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、BaZrO<sub>3</sub> 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、特性向上を目指す。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c軸、a軸人工ピン止め点の制御も行う。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。以上の開発においては、PLD製造条件と磁束人工ピン止め点の組織との関係を微細組織評価、また、磁場、温度を変化させたときの磁束ピンニング機構評価、電磁気挙動評価、パーコレーション挙動評価と連携することで上記開発を促進させる。平成23～24年度では、平成22年度までの厚膜化、人工ピン導入技術の最適化を図ると共に新たなピン材料の開発も併せて開発を行い最終目標達成を図る。

平成20～22年度におけるMOD法による開発では、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、長尺化技術を開発し、中間目標を達成する。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。また、前述の技術をベースにMOD法による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を行う。最適化の状況を考慮しつつ、長尺線材の作製を行う。平成23～24年度では、平成22年度までの人工ピン導入技術の最適化を図るとともに厚膜化や新たなピン材料の開発も併せて開発を行い、最終目標達成を図る。

磁束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、長尺線材への適応について貢献する。

SMES用コイルでは、コイルのコンパクト化や運転の安定性向上に磁場中臨界電流特性の向上が有効とされる。CVD法で作製した線材は、超電導層と中間層の界面結合性が良好なため機械的特性に優れており、磁場中臨界電流の向上

によって SMES 用コイルに適した線材とすることができる。

CVD 線材において 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目指す。

平成 20 年度から平成 21 年度で、希土類元素の一部置換等による超電導層の高品質化を検討する。平成 22 年度までに、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  $I_c=30$  A/cm-w (@77 K, 3 T) で強度 1 GPa の線材作製を目指す。平成 23~24 年度では、平成 22 年度までの混晶技術に人工ピン導入技術を加え、安定製造技術開発における成果を合わせることで長尺化へ展開し最終目標達成を図る。

## (2) 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イットリウム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目指す。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、銅酸化物材料およ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、磁気特性および輸送特性測定等によりその異方性の評価を行う。また、磁束ピン止め機構およ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および異方性、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共に、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、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。

平成 20～22 年度における基板中間層の開発では、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合わ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 基板には現在異なる 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、チャンバー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

置依存性等のこれまでなかった指標が重要であり、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  $\mu\text{m}$  級線材で高い  $J_c$  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。これらの開発においては、プロセス条件と微細組織の関係を評価連携することで開発を促進する。平成 23～24 年度では、さらなる極低コスト化のための薄膜化、高速化と幅広基板対応も含めた超電導層の均一性を支援する中間層形成技術を開発し、最終目標達成を図る。

平成 20～22 年度における PLD 法による超電導層形成技術開発では、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および長さ方向の特性分布、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および蒸着装置の温度、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 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 幅線材に関して 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 幅 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。また、以上の細線化工程や超電導層作製条件と微細組織の関係解明、また、新しい細線化された線材に特有のパーコレーション挙動評価、電磁気挙動評価、交流損失挙動と連携することで、上記開発を促進させる。平成 23～24 年度では、さらなる極低コスト化のための高  $J_c$  化、高速化と幅広基板対応も含めた超電導層の均一性向上技術を開発し、最終目標達成を図る。

平成 20～22 年度における MOD 法による超電導層形成技術開発では、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 幅線材に関

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5mm幅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。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。平成23～24年度では、さらなる極低コスト化のための高 $I_c$ 化、高速化と幅広基板対応も含めた超電導層の均一性向上技術を開発し、最終目標達成を図る。

結晶粒配向金属基板-PLD線材に関する特性均一性の向上には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が求められ、成膜時のプラズマ、雰囲気、温度等の安定性向上により行う。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の安定性（温度、雰囲気、プルーム）の向上を図ることで特性の均一化を達成する。均一性は、現状線材の均一度の把握を行うこと、ケーブル開発から要求される均一化の目標を立案する。この開発において、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。平成23～24年度では、短尺で実証している高 $I_c$ 条件と極低コスト条件の両立を目指し、大型レーザー蒸着条件の適正化により最終目標達成を図る。

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。

## (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2～5mm幅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5mm幅に切断し、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。

平成20～22年度における切断加工技術については、これまでに実績のあるYAGレーザー等による加工技術を検討する。現状で7m/h程度の加工速度の向上と端部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2mm幅分割を検討し、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、2mm幅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 23～24 年度では、平成 22 年度までに開発する加工技術の長尺化を図り、最終目標対応技術を確立する。

平成 20～22 年度におけるスクライビング細線溝加工技術については、これまで成果を挙げている YAG レーザ処理と熱処理及び化学エッチング法の組合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 幅線材の 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 幅 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 23～24 年度では、5 mm 幅 10 分割対応スクライビング溝加工技術の開発を行う。ここでは Ag 層と超電導層のそれぞれに対応した 2 種類の異なるレーザを用いるなどの手法などを用いて溝加工を実現し、最終目標達成を図る。

一方、加工技術の長尺化、細線化が進むに従って、長尺細線フィラメント線材の評価が必要になる。平成 20 年度は、これ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 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 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 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る。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させる。平成 23～24 年度では、5 mm 幅 10 分割対応評価技術の開発とその長尺線材対応を行なうことで最終目標達成支援を行なう。

細線加工技術の切断加工では、10 mm 幅で作製されたテープ線材を所定の幅に分割するもので2～5 mm 幅の細線線材への加工が求められている。ここでの課題は、特性劣化防止、歩留り向上等が挙げられる。これまでに実績のあるスリッタ等による機械加工の適正条件の選択とともに条件の適正化を図り、平成20年度では、2 mm 幅へ細線化した時の $J_c$ 維持率90%以上を目標として検討する。加工技術の長尺化、細線化の評価として、これまで原理的に確認ができていたホール素子法などの手法を活用し、上記開発を促進させる。上記の開発において、プロセス条件と組織の関係及び、詳細な電磁気挙動評価と連携することで開発を促進させる。平成23～24年度では、平成22年度までに開発する加工技術の長尺化を図り、最終目標対応技術を確立する。

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。

#### 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、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。

平成20～22年度における、基板・中間層の開発は、超電導層成膜方法により異なる。MOD線材におい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/cm<sup>2</sup> ( $I_c$  500 A / (金属基板 100  $\mu$ m + 安定化層 100  $\mu$ 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  $\mu\text{m}$  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確立する。

平成 20～22 年度における PLD 法による超電導層形成技術では、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  $\text{kA/cm}^2$  程度 (=500  $\text{A}/(100 \mu\text{m}$  金属基板+100  $\mu\text{m}$  安定化層)) であったため、これを 30  $\text{kA/cm}^2$  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  $\mu\text{m}$  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。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、薄離強度等)、電磁気挙動評価、熱的安定性評価で開発を促進させる。平成 20～22 年度における MOD 法による超電導層形成技術では、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  $\mu\text{m}$  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。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。

SMES 用コイルで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要求される。圧延プロセス技術を高度に適正化して、1 GPa の強度を持つ線材に適した基板を作製する。また、実用化線材に求められる  $J_c$  向上の指針を得るため、厚さの異なる基板を使用して基板加工技術の高度化を目指す。

CVD 法で作製した線材は、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も要求される。この要求を、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目指す。

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・剥離強度の向上を目指す。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) の特性の実証を目指す。

なお、前述の PLD 法、MOD 法とともに CVD 法に関して、平成 23~24 年度では、平成 22 年度までの薄肉高強度金属対応成膜技術を基軸に長尺化を推し進め、高  $I_c$  化技術を統合し最終目標対応技術を確立する。

## (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) により近づけることにより長尺高特性線材の実現を目指す。

平成 20~22 年度における極低コスト基板中間層の開発は、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  $I_c$  を規定する最小  $I_c$  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面内配向度  $10^\circ$  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 23~24 年度では、平成 22 年度までの薄肉高強度金属対応中間層成膜技術を基軸に長尺化を推し進め、超電導層形成技術を統合し最終目標対応技術を確立する。

平成 20~22 年度における、PLD 法による超電導層形成技術開発では、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  $\mu\text{m}$  の厚膜化が可能な材料、製造プロセスの改善により、高  $I_c$  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、不純物層、反応層の増加を抑え、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、およ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 の高  $I_c$  化を行う。さらに、平成 21 年度は、高  $I_c$  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 23～24 年度では、平成 22 年度までの薄肉高強度金属対応 PLD 超電導層成膜技術を基軸に高  $J_c$  化、長尺化を推し進め、最終目標達成を図る。

平成 20～22 年度における MOD 法による超電導層形成技術では、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  $I_c=200$  A/cm-w 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 23～24 年度では、平成 22 年度までの薄肉高強度金属対応 MOD 超電導層成膜技術を基軸に高  $J_c$  化、長尺化を推し進め、最終目標達成を図る。

#### 2.1.4-5 低コスト・歩留向上技術開発 (ISTEC、JFCC、九州大学、東北大学、京都大学、早稲田大学、名古屋大学)

##### (1) 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、目標達成を目指す。

## (2) 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。

平成 20～22 年度における高速 IBAD 法による中間層形成技術では、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、現状の構造において 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 CeO<sub>2</sub> キャップ層がその主な対象である。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除去等により、CeO<sub>2</sub> 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、RF スパッタ等の現 IBAD で使用している成膜手法 (イオンビームスパッタ法) とは異なる手法を用いた IBAD 成膜よりも安価な装置での高速成膜技術を開発し、さらなるコストの低減を目指す。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°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。平成 23～24 年度では、CeO<sub>2</sub> 層を主に高速化、さらには層数削減、薄膜化、高速化を開発し、最終目標達成を図る。

平成 20～22 年度における PLD 法による超電導層形成技術では、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  $I_c > 500$  A/cm-w 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、速度 10 m/h 以上で高  $I_c$  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  $I_c$  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 3 円/Am 以下の条件(20 m/h、500 A/cm-w)で 50 m 作製を実証する。平成 23～24 年度では、ターン数の増加やレーザパワーの増加等による高速化、また高  $J_c$  化を推し進め、最終目標達成を図る。本開発では、特に高速化、低コスト化、高特性を図るため前述の他の線材開発よりさらに進んだ構造、製造プロセスとなることが予想される。このため、極低コスト対応高速・高  $J_c$  化技術開発においては、さらに詳細な製造プロセス条件と組織の関係、諸特性の評価、分析が必要になり、これも他と同様、機器応用を見越した検討が必要となる。このためスパッタ、PLD 等の各種蒸着プロセスの評価、詳細な臨界電流、交流損失等の電磁気挙動評価、熱的安定性評価、機械的強度評価（線材、新たな膜構造における接着強度、剥離強度等）およびこれらをコイル形状で評価し、連携することで開発を促進させる。

平成 20～22 年度における MOD 法による超電導層形成技術では、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  $\geq 10$  m/h；本焼  $\geq 5\sim 10$  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 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 1 係及び、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 23～24 年度では、1 回塗布膜厚増加や高速成膜を実現し、本焼プロセスでは減圧条件適正化による高速化とともに厚膜化高  $J_c$  化を推し進め、最終目標達成を図る。

### (3) 接続・補修技術開発

本項の開発では、線材の接続技術およ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および剥離を含めた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。また、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、これ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 幅 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。また、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。平成 23～24 年度では、平成 22 年度までの成果を基に 5 mm 幅 10 分割線材対応技術として位置調整技術等を開発し、最終目標達成を支援する。

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			SMES, 変圧器対応試験	
	ケーブル対応試験				
2. 磁場中高臨界電流線材作製技術開発	厚膜化ピン力向上 (30 A@3 T 等)			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 幅-5 分割/2 mm 幅-50m)			長尺加工 (5 mm 幅-10 分割/2 mm 幅)	
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 mm-1 GPa-50 m)			薄肉高強度基板長尺化 (70 mm-1 GPa-200 m)	
	薄肉基板上高 $I_c$ 化 ( $J_c=30$ kA/cm <sup>2</sup> )			薄肉基板上高 $I_c$ 化 ( $J_c=50$ kA/cm <sup>2</sup> )	
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 (<3 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			10 分割対応接続・補修技術	
予算 (百万円)	1,240	1,159	1,141	(1,347)	(1,322)

注) 各研究項目の予算には NEDO 管理費等を含む。( )内数字は未定



## 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 年度におては、超電導線の一般要求事項（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結果をまとめ、規格素案の規格素案の中間結果を纏める。また、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、国際合意を背景とした日本提案の IEC 国際規格素案を作成する。

### 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、日本提案の IEC 国際規格素案をベースとして国際合意の確立を図る。

### 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標で、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標とし、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、標準化素案を作成するとともに、冷却システム等の規制緩和の検討を行なう。

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 試験法素案 試験法技術調査	H24 試験法素案 試験法技術調査
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 通則素案 国際合意醸成	H24 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	H23 素案 規制緩和の検討
予算 (百万円)	19	15	21	(15)	(15)

注) 各研究項目の予算には NEDO 管理費等を含む。( )内数字は未定

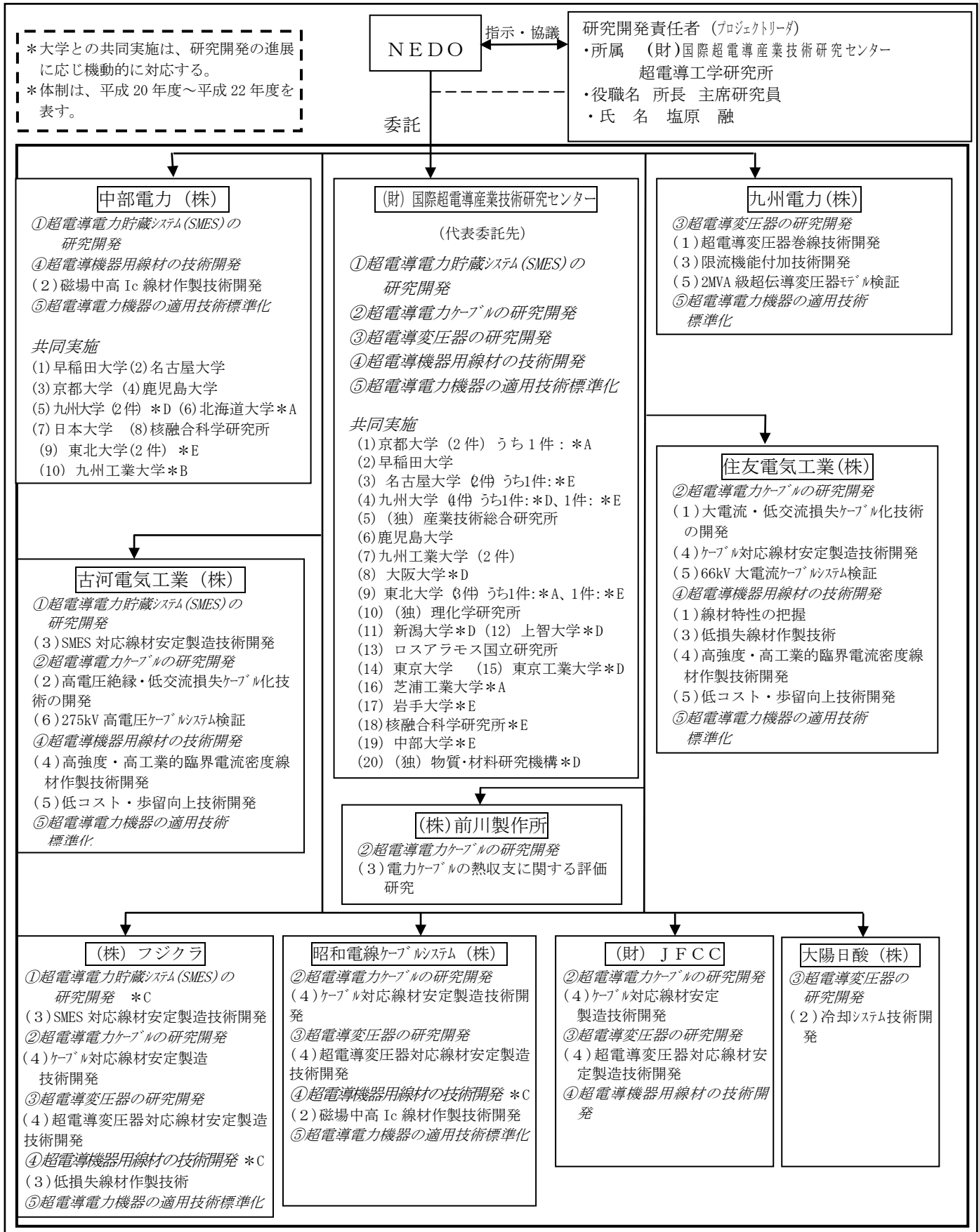
## 2.2 研究開発の実施体制

本プロジェクトにおける研究開発では、これまで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、低コスト化を目指した技術開発を実施している。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ている。

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、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センター (JFCC) の連名提案企業・研究機関、およびその共同実施先 (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ている。

実施者間の強力な連携体制のもと、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)、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)、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予定：平成 22 年 7 月～25 年 3 月)、九州電力株式会社、総合研究所、電力貯蔵技術グループ、グループ長の林秀美 (超電導変圧器開発担当)、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、効率的に推進している。

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。



(注) \*A: 平成 20 年度のみ実施 \*B: 平成 21 年度のみ実施 \*C: 平成 22 年度のみ実施  
 \*D: 平成 20~21 年度実施 \*E: 平成 21~22 年度実施

図 2.2.1 「リットリウム系超電導電力機器技術開発」実施体制

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、九州工業大学
- (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 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) 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
- (3) 超電導電力ケーブルの熱収支に関する評価研究
- (a) 定常通電時およ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設備の調査研究 -----ISTEC
- (4) 超電導ケーブル対応線材安定製造技術開発
- (a) 大電流線材の安定製造技術の開発 -----住友電工
- (b) 基板・中間層テープの開発 -----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  
 -----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 -----ISTEC
- (f) 線材の評価技術の開発 -----ISTEC

(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

(b) 超電導変圧器巻線の低損失化技術開発 -----九州電力

(c) 超電導変圧器巻線の耐短絡強度技術開発 -----九州電力

(d) 低交流損失・大電流容量導体および巻線構成技術の検討  
-----ISTEC、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 -----ISTEC、九州大学

(3) 限流機能付加技術開発

(a) 限流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および熱伝導率の  
熱的特性の評価 -----ISTEC、九州大学、岩手大学

(d) 数百 kVA 級限流機能付加変圧器の設計検討 -----九州大学

(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 -----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  
-----ISTEC

(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 -----ISTEC、九州大学

(5) 2 MVA 級超電導変圧器モデルの検証

(a) 2 MVA 級超電導変圧器モデルの設計検討 -----九州電力

(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) 高強度金属基板対応線材作製技術開発
- (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 -----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新エネルギー技術開発部が主催の「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いる。本プロジェクトの推進方針及び新エネルギー技術開発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ている。

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ている。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ている。

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ている。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も努力をしている。今後もこのような効率的運用を徹底していく。

### (1) 「超電導技術委員会」

NEDO 内には産学官の有識者を集めて超電導技術委員会 (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ており、そこで得られた助言等を基に超電導技術開発の効率的、効果的運営を図っている。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ている。



## (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ており、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およ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・審議頂いている。

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

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 22 年度)

	氏名	所属・役職
委員長	塩原 融	(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(プロジェクトリーダー、PL)
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 准教授
	松下 照男	九州工業大学 大学院 情報工学研究院 電子情報工学研究系 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)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)取締役 技術開発センター長
	磯嶋 茂樹	住友電気工業(株)材料技術研究開発本部 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(サブプロジェクトリーダー、SPL)
	藤本 浩之	(財)鉄道総合技術研究所 材料技術研究部 主任研究員
	藤波 秀雄	(財)電力中央研究所 電力技術研究所長
	武藤 昭一	東京電力(株)技術開発研究所長
	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	(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 超電導プロジェクト室 室長	
高橋 浩	富士電機システムズ(株)エネルギーソリューション本部 グリーンエネルギーソリューション事業部 グリーンエネルギーソリューション統括部 原子力技術部 部長	

	井上 至	古河電気工業(株)研究開発本部メタル総合研究所 超電導開発部 部門統括
	町田 明登	(株)前川製作所 技術研究所 副所長
	河島 裕	三菱重工業(株)原動機事業本部 高砂製作所 水・エネルギー部 開発グループ 主席技師
	大熊 武	(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(サブプロジェクトリーダー、SPL)
	和泉 輝郎	(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(サブプロジェクトリーダー、SPL)
事務局	友金 仁志	(財)国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所 企画部 部長代理兼 電力機器研究開発部 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ている

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

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 22 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
	船木 和夫	九州大学 大学院システム情報科学研究院 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
	菅野 未知央	京都大学 大学院工学研究科 電子工学専攻 助教
	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
	濱島 高太郎	東北大学 大学院工学研究科 電気・通信工学専攻 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
	早川 直樹	名古屋大学 エコトピア科学研究所 教授
	山本 寛	日本大学 理工学部 電子情報工学科 教授

	野口 聡	北海道大学 大学院 情報科学研究科 システム情報科学専攻 准教授
	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
	塚本 修巳	横浜国立大学 特任教授
	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
	磯野 高明	(独)日本原子力研究開発機構 那珂核融合研究所 ITER超伝導磁石開発グループ 主任研究員
	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) 総合研究所 電力貯蔵技術グループ長
	宮崎 隆好	(株)神戸製鋼所 技術開発本部 電子技術研究所 超電導研究室長
	伊藤 勝彦	住友重機械工業(株) 精密機器事業本部 商品戦略 Gr GL
	笠原 奉文	(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
	齊藤 隆	(株)フジクラ 超電導プロジェクト室 室長
	坂本 久樹	古河電気工業(株) 研究開発本部 メタル総合研究所 超電導開発部 マネージャー
	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
	河島 裕	三菱重工業(株) 原動機事業本部 高砂製作所 水・エネルギー部 開発グループ 主席技師
	和泉 輝郎	(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	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	(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
オブザーバー	山田 穰	(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	(財)国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所 線材研究開発部主任研究員
	平野 直樹	中部電力(株) 技術開発本部 電力技術研究所 研究主査
	成瀬 光人	中部電力(株) 技術開発本部 電力技術研究所 研究副主査
	式町 浩二	中部電力(株) 技術開発本部 電力技術研究所 研究副主査
事務局	安藤 拓哉	(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ている

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

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 22 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 マネジャー
	青木 裕治	昭和電線ケーブルシステム(株)技術開発センター 超電導技術開発室 開発グループ長
	増田 孝人	住友電気工業(株)超電導・エネルギー技術開発部 主幹
	鳥居 慎治	(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 超電導プロジェクト室 室長
	向山 晋一	古河電気工業(株)環境・エネルギー研究所 環境技術開発部 マネージャー
	矢口 広晴	(株)前川製作所 技術研究所 課長
	田辺 圭一	(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	(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	(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	(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	(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	友金 仁志	(財)国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所 企画部 部長代理 兼 電力機器研究開発部 主管研究員
	丸山 修	(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 兼 線材研究開発部 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・普及を目指し、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・評価を行っている。また、研究開発の進捗およ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ている。

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

表 2.3.4 超電導変圧器研究開発委員会 委員リスト  
(平成 22 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院 准教授
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
	岡元 洋	九州電力(株)総合研究所 電力貯蔵技術グループ 主幹研究員
	池尻 吉隆	(株)キューヘン 技術開発部長
	青木 裕治	昭和電線ケーブルシステム(株)技術開発センター 超電導技術開発室 開発グループ長
	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	(財)電力中央研究所 企画グループ スタッフ 上席

	隅 和憲	(株)日本AEパワーシステムズ 変圧器事業部 副事業部長
	齊藤 隆	(株)フジクラ 超電導プロジェクト室 室長
	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
	今野 雅行	富士電機システムズ(株)エネルギーソリューション本部 グリーンエネルギーソリューション事業部 グリーンエネルギーソリューション統括部 原子力技術部 電気制御グループ マネージャー
	田辺 圭一	(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)総合研究所 電力貯蔵技術グループ長
PL	塩原 融	(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
オブザーバー	山田 穰	(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	(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	五所 嘉宏	(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・評価を行っている。また、研究開発の進捗およ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ている

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

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 22 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 准教授
	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 准教授
	石山 敦士	早稲田大学 理工学術院 教授
	林 秀美	九州電力(株)総合研究所 電力貯蔵技術グループ長
	青木 裕治	昭和電線ケーブルシステム(株)技術開発センター 超電導技術開発室 開発グループ長
	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 文晴	(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 超電導プロジェクト室 室長
	今野 雅行	富士電機システムズ(株)エネルギーソリューション本部 グリーンエネルギーソリューション事業部 グリーンエネルギーソリューション統括部 原子力技術部 電気制御グループ マネージャー
	坂本 久樹	古河電気工業(株) 研究開発本部 メタル総合研究所 超電導開発部 マネージャー
	大熊 武	(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	(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	(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	(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	
SPL	和泉 輝郎	(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	(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	(財)国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所 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ている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

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 22 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 教授
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
	淵野 修一郎	(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 主任研究員
	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・ITER超伝導磁石開発グループリーダー
	林 秀美	九州電力(株)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 技術開発本部 電子技術研究所 超電導研究室長
	佐藤 謙一	住友電気工業(株)材料技術研究開発本部 技師長
	増田 孝人	住友電気工業(株)超電導・エネルギー技術開発部 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 超電導プロジェクト室 室長
	坪内 宏和	古河電気工業(株)金属カンパニー 日光伸銅工場 超電導製品部長
	中尾 公一	(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	(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	(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	三村 正直	(財)国際超電導産業技術研究センター 標準部長
	飯村 順子	(財)国際超電導産業技術研究センター

### (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ている。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ている。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ている。

<検討小委員会>

- ・「SMES 用 Y 系集合導体検討小委員会」
- ・「SMES コイル検討小委員会」
- ・「超電導電力ケーブル絶縁検討小委員会」
- ・「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、電力実系統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、導入可能な機器および電力系統から適宜、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

#### (1) 一般への普及啓発活動

研究開発成果およ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 CO<sub>2</sub> 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ている。2008 年にはエコプロダクツ展に併設して、「超電導」の展示会（「超電導 EXPO2008」）を一般来場者向けに開催した。本プロジェクトの代表受託者の ISTE C は、超電導の未来をイメージしたジオラマを中心に、NEDO や企業とともに展示した。3 日間開催のエコプロダクツ展には延べ 17 万人の入場者があり、その中で超電導 EXPO2008 への来場者には 40、50 代が多いのが特徴的であった。超電導 EXPO2008 で実施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。

2009 年は同エコプロダクツ展の中に、電線メーカ 4 社と ISTE C で協同ブース「超電導パビリオン」を NEDO ブースに近接して出展した。「超電導パビリオン」では、ISTE C からは超電導の未来をイメージしたジオラマに加え、プロジェクトでの研究内容の紹介パネルや超電導ケーブル、SMES、超電導コイルなどのサンプルを展示し、電線メーカでは超電導線材をはじめとして関連部材やパネル展示を実施した。エコプロダクツ 2009 の来場者は、2008 年を上回る 18 万人となり、超電導パビリオン来場者へのアンケート調査でも、10 代の来場者の増加が目立ち、より広範な来場者に超電導技術を PR できたと考えている。また、アンケート調査では、超電導への期待は相変わらず高く、2008 年より具体的なパネル展示や、サンプル展示の影響か、超電導ケーブルや SMES をはじめとしたエネルギー分野への期待が高いのが特徴的であった。

引き続き 2010 年もエコプロダクツ展への出展につき、現在、ISTE C を中心

に、後述する研究組合、関連企業等とともに出展の計画立案を開始している。

## (2) 超電導産業における国際協調・連携

日米欧及びニュージーランドは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(財)国際超電導産業技術研究センター (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) であり、現在、韓国が新規加盟の意向を示しており、検討中である。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。2008年度は日本のつくば(第17回会合)で、2009年度はニュージーランド、ウェリントン(第18回会合)で開催され、本年度は10月にイタリア(第19回会合)で開催される予定である。

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、第17回会合では、「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、第18回会合では、「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はなくてはならず、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、これまでも経営幹部、マネージャー等の積極的参加を得ている。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ている。

### (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）、（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。

### (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（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。これまでに制定された 14 件の規格のうちで Nb 系超電導線の試験方法規格が 10 件となっており、低温超電導材料を主とした試験方法規格を我が国が提案し成立させてきた。

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ている。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、本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目指している。

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目指し、この分野の国際標準活動に対して主導的役割を果たしている。

## 2.4.2 実用化につなげる知財マネジメント

### (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

「Y 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 Y 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ている。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ている。

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ている。共同研究体内での単独なら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。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ている。

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ている。

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 事務局に実施届書を提出することで、実施できる。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。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、原則、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ている。

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う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ている。

## (2) 特許調査

平成 20 年度、平成 21 年度に「Y 系超電導電力機器」ならびに「Y 系超電導線材」について、国内特許および米国特許を対象とし調査を行った。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 2 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データベースの拡充を行うものである。特許データベースは研究者が容易に検索や概要チェックができるようになっており、プロジェクトの関連性や評価者のコメントを記入することも可能である。また、データベースから特許公報の PDF ファイルを閲覧する機能を設けることで特許公報全体を見ることもでき、研究者の特許調査や特許確認作業を効果的に行うことができる。調査対象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いプロジェクト関連特許を選別するとともに、関連特許の重要度を判定し主要特許を抽出した。

### (2.1) 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 年度にケーブル、変圧器、限流器、冷凍機の国内特許と米国特許、および SMES 国内特許を対象として調査を行った。平成 21 年度はこれらに加え 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 21 年 3 月までの国内特許、および平成 19 年 1 月から平成 20 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 20 年 12 月)である。以下に、国内特許と米国特許における主要特許数と Project 関連特許累計数を示す。

表 2.4.2-1 Y 系超電導電力機器 国内主要特許件数(H20)

	国内特許		米国特許	
	主要特許	Project 関連特許	主要特許	Project 関連特許
SMES	4	101	-	-
ケーブル	2	240	0	65
変圧器	1	105	0	17
限流器	5	269	0	156
冷凍機	0	55	1	23

表 2.4.2-2 Y系超電導超電導電力機器 米国主要特許件数(H21)

	国内特許		米国特許	
	主要特許	Project 関連特許	主要特許	Project 関連特許
SMES	1	107	3	106
ケーブル	0	268	0	80
変圧器	0	107	2	20
限流器	0	270	1	163
冷凍機	4	77	1	26

(2.2) 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、平成21年度ともに、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および米国特許を対象として調査を行った。調査対象期間は平成19年4月から平成21年3月までの国内特許、および平成19年1月から平成20年12月までの米国特許である。この結果、昭和62年(1987年)以降に出願され平成21年3月以前に公開された国内特許として新たに1175件を補充することで、データベースを27,235件に拡張した。米国特許については昭和61年1月から平成20年12月までに登録されたデータベースとして新たに294件を補充し、3,812件まで拡張した。以下に、国内特許について「プロジェクト参加企業出願」と「それ以外」の分類における主要特許数とProject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「それ以外」の分類における主要特許数とProject関連特許累計数を示す。

表 2.4.2-3 Y系超電導線材 国内主要特許件数 (H20)

	プロジェクト参加企業出願		左記以外出願	
	主要特許	Project 関連特許	主要特許	Project 関連特許
基材	5	30	3	18
中間層	5	58	4	39
超電導層	5	129	2	164
保護層	1	16	1	13
その他	4	21	1	27

表 2.4.2-4 Y系超電導線材 米国主要特許件数 (H20)

	日本企業・機関出願		左記以外出願	
	主要特許	Project 関連特許	主要特許	Project 関連特許
基材	0	4	0	27
中間層	1	10	2	58
超電導層	1	116	1	167
保護層	0	10	0	30
その他	0	9	0	24

表 2.4.2-5 Y系超電導線材 国内主要特許件数 (H21)

	プロジェクト参加企業出願		左記以外出願	
	主要特許	Project 関連特許	主要特許	Project 関連特許
基材	0	37	2	27
中間層	4	62	2	44
超電導層	1	131	3	172
保護層	0	18	1	15
その他	0	28	0	30

表 2.4.2-6 Y系超電導線材 米国主要特許件数 (H21)

	日本企業・機関出願		左記以外出願	
	主要特許	Project 関連特許	主要特許	Project 関連特許
基材	0	5	0	27
中間層	0	10	3	66
超電導層	5	121	5	173
保護層	0	10	0	31
その他	0	9	0	25



### 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

1. 「超電導電力貯蔵システム (SMES) の研究開発」				
	523	512	532	(500)
2. 「超電導電力ケーブルの研究開発」				
	586	706	616	(598)
3. 「超電導変圧器の研究開発」				
	631	608	606	(600)

4. 「超電導電力機器用線材の技術開発」					
	1,240	1,159	1,141	(1,347)	(1,322)
5. 「超電導電力機器の適用技術標準化」					
	19	15	21	(15)	(15)
予算額合計（百万円）	3,000	3,000	2,916	(3,060)	(3,050)

注) 各研究項目の予算には NEDO 管理費等を含む。( )内数字は未定

### 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「Y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」および「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19～24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、実システムに連系した実証試験を計画しており、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システム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実システムに接続し、長期連系試験を行う計画である。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「Y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、前述のNEDO新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）においては、“超軽量高性能モータ向け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ている。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する計画である。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ている。なお、本「Y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ている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 新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ている。

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性能・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が採択された 5 つの研究内容で、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目指している本「Y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ている。

「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（ $\text{La-Fe-As-O}_{1-x}\text{-F}_x$ ）で  $T_c = 26 \text{ K}$  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大幅に強化する計画である。本「Y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「Y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ISTEC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ている。

本「Y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、1MJ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。

国家プロジェクトとしての取り組みとしては、昭和63年度から平成2年度の3年間、資源エネルギー庁の委託調査「超電導電力機器調査」の中で、(財)国際超電導産業技術研究センター（ISTEC）がSMESの機器製作技術及び電力系統への適用性等に関するフィジビリティ調査が行われた。平成3年度からは8年間に亘り、100kWhの多目的SMESを対象に要素技術（超電導コイル、電力変換システム等）の開発を進め、平成10年度までに、パイロットシステムを実現できる技術的見通しを得た。しかし、電力システムとして実用化するにはコスト面での問題が大きく、経済性を高め、競合技術（SVC等）と拮抗できるようなものにすることが大きな課題であり、平成11年度からの5年間のプロジェクトでは、これらの課題を踏まえ、市場ニーズがあり実用化の可能性が見込まれる小規模な系統制御用SMESにターゲットを絞り、超電導コイルを主体とした低コスト化のための技術開発を行うとともに、冷凍システム面で高効率化による簡素化が図れ、将来のさらなるコスト低減の可能性が期待される高温超電導材を用いたSMESについての技術調査を行った。さらに、平成16年度から4年間のプロジェクトでは、SMESシステムの開発に必要な各種システム構成技術、実系統連系運転試験によるシステム性能検証、システムコーディネーション技術の設計・製作・検討・性能評価を行い、100MW級電力ネットワーク制御システム技術を確立するための開発を実施した。特に要

素機器（設備容量 10 MVA 変換器、貯蔵容量 20 MJ 超電導コイル等）を SMES システムとして組合せ、実系統に連系し実際の負荷変動を入力として補償動作を当初目標の 2 万回以上に対して 5 万回以上実施することにより、耐久性・安定性を確認するという成果を挙げた。

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、300 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、実系統による実証試験「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」が行われる。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共に、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て、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 ISTEK、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「Y 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。

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-2223 テープ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-2223 テープ線材による単相 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研究開発」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、② 66 kV/6.9 kV 変圧器の 1 次 2 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-2223 による単相 25 kV/1.2 kV/440 V (3.5 MVA, 66 K) を試作し、JIS に準拠した通電・耐電圧試験を実施した。

### 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の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 年に新たに補助総額 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。開発された超電導電力機器は実際のグリッドに組み込まれ、現在、機能実証試験が進められている。また、昨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、昨年 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、今年度から、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)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、企業が独自に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 万ユーロのイットリウム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。欧州には EU 又は政府ベースのオーバオールな Y 系超電導線材開発資金援助プログラムは存在しないが、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ている。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) に関しての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 (5~10 GWh) の概念設計に端



を發し、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、今年度から、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年計画で開始したと発表があり、ABB社が主体でSuperPower社、ブルックヘブン(Brookhaven)国研が開発を進めるとのことである。

韓国では国家プロジェクトにおいて2.5 MJ級の SMES が開発中である。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、性能のみでなく、プロジェクトの予算も反映してどちらの線材を使用した SMES を製作するかは検討している。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評価されている。SMES コイルの伝導冷却システムの開発においては、伝導冷却温度は日本と同じ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。

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を思われる。

SMES の研究開発に関して、欧米では、米国企業の1~3 MJ級の金属系 SMES が瞬低用途等に一部導入されているが、我が国の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導体を用いた技術開発である。

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、3 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。現在も稼動中である。

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 350 m 34.5 kV 800 A 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、端末組立などが行われ、2006 年 6 月から運転が開始された。このケーブルは、住友電工製の Bi 系超電導線材を用いた 3 相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 系超電導線材より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、問題なく運転が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×3 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。現在も稼動中である。その後、第 2 期の計画として、三相のうち 1 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するとのことで、開発を進行中。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いる。

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 300 m 3 相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。

New Orleans プロジェクトは New Orleans 州に 13.8 kV/2.0 kA/1700 m の 3 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 年の運転開始を目指し 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でいる 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ている。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、最近では、154 kV、1 GMVA 級超電導ケーブルの開発に取り組んでおり、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、2011 年までに試験を実施する計画としている。

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、2010 年の運転開始を目指している。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、500 m 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×3 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、2012 年に試験実施を計画している。

欧州の状況については、EU 資金援助を受け Nexans、Bruker HTS などが参加した 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、長さ 6 km の限

流機能を有した三相同軸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。2012 年の運転開始を目指している。

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・検証テストなどを実施し、2010 年末にモスクワの実系統に導入を計画している。

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 社など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 24.9/4.2 kV-5/10 MVA 器の開発を試みたが、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などから、開発は一時中断していた。2011 年より、3 相 70.5/12.47 kV-28 MVA の超電導変圧器の研究開発がスタートする。このプロジェクトはカリフォルニア州 Irbine 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 630 kVA, 18.2 kV/420 V の 3 相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。

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 22.9 kV/6.6 kV-単相 1 MVA 級が開発され、最終的には 100 MVA 級変圧器を目指している。

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

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など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<sup>TR</sup> 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 x 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、1065 m で 282 A/cm-w の特性を有する線材が現在での世界最高の  $I_c \cdot L$  値 (300 kAm 強) を示している。短尺での高  $I_c$  線材としては 3.3  $\mu\text{m}$  の膜で 813 A/cm-w を報告している。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 BaZrO<sub>3</sub>(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下で強い効果を表している。これまでのところ、3.3 μm の膜で 77 K, 3 T の条件下で  $I_{c,min}$  値として 50 A/cm-w が報告されている。また、この手法の長尺展開も図られており、50 m 長線材において 14 A/cm-w (@77 K, 3 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により開発を行っており、短尺試料では 5 分割線材で交流損失 1/5 を実現しているが、長尺線材に関しては加工線材の写真は示すものの、損失低減の結果はこれまで報告されていない。薄肉高強度線材の開発に関しては、50 μm 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<sup>TR</sup>) 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、一昨年より成果が挙がり始め、現在では、250 A/cm-w を有する 500 m 線材の作製に成功している。短尺での成果としては、2.0 μm の膜で 660 A/cm-w を報告している。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 μm の膜を一回塗布で実現し、450 A/cm-w 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、複合材料化やタンゲステン(W)濃度制御など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 A/cm-w (@77 K, 3 T) に留まっており、長尺線材のデータはない。

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っていたが現在は中止しており、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 の値が最高値である。

最近、伸長著しいのは韓国で、昨年から急激に進展している。従来より研究所レベル(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、最近、この原理と適用した 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始まっている。既に 200 m 長線材において平均  $I_c$  で 298 A/cm-w を高速で製造しており、今後更なる進展が予想される。

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x3相	Bi	2008/4~	○	AMSC、NEXANS、Air Liquid、LIPA	DOE
米国	LIPA-2 Project	Long Island	138 kV	2,400 A	<600 m	単心x3相	Y	2011~(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~	○	Southwire、AMSC、Plaxair、AEP	DOE
米国	HYDRA Project	New York	13.8 kV	4,000 A	300 m	三相同軸	Y	2008~2010(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	2010~2011	○	AMSC、Southwire、NKT、ORNL	DOE
米国	Southwire	Georgia carrollton	12.5 kV	1,250 A	30 m	単心x3相	Bi	2000~	○	Southwire、IGC 他	DOE
米国	Detroit Edison	Detroit	24 kV	2,400 A	120 m	単心x3相	Bi	2001/10~終了	×	Pirreli、EPRI、AMSC	DOE
オランダ	Neuon Project	Amsterdam	50 kV	3,000 A	6,000 m	三相同軸	Y	計画中 2012運転目標	○	Ultera、Plaxair	-
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x3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
ロシア	Russian Project	Moscow	20 kV	1,500 A	200 m	単心x3相	Bi	2009-2010	○	VNIIEP、RAO USE、ENIN、住友電工	-
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x3相	Y	2010(試験開始予定)	○	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	単心x3相	Y	2008~2010(運転予定)	○	LS Cable、韓国電力、他	韓国政府
中国	雲南プロジェクト	雲南地区	35 kV	2,000 A	33.5 m	単心x3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x3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	北京プロジェクト	北京市	110 kV	3,000 A	1 km	未定	Y	2012~(運転予定)	○	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	2007~2012	○	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 バイポール	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	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) ビスキャス(市原)	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	主たる参加	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	福岡県コソシム	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	25/1.2/0.4kV	単相	4MVA	66K	Bi-2223	～2005	JR 総研、九州大、富士電機	MLIT
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～	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	Simens	鉄道車両	5.5/1.1kV	単相	100kVA	77K	Bi-2223	～2001	Simens	
欧州	Simens	鉄道車両	25/1.4kV	単相	1MVA	66K	Bi-2223	～2006	Simens	BMBF
韓国	DAPAS	電力	22.9/6.6kV	単相	1MVA	65K	Bi-2223	～2004	KPU、HYU、KSU (大学のみのみ)	KETEP
中国	TBEA	電力	10.5/0.4kV	3相	630kVA	77K	Bi-2223	～2005	TBEA、CAS	MOST
NZ	TRST	電力	11/0.4kV	3相	1MVA	70K	YBCO-Roebel cable	2010～2013	IRL、HTS-110、WTC、ETEL	TRST

表 3.2-4 国内外における Y 系超電導線材開発動向 (\*単長 50m 異常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-w	L, m	Ic×L, A・m		Ic, A/cm-w (厚み, μm)	Ic min., A/cm-w (厚み, μm)	長さ, m	Ic min., A/cm-w (厚み, μm)
日本	フジクラ	GdBCO (PLD) - GZO (IBAD)	349.6	503.5	176024	997 (6.0)	GdBCO (PLD) - MgO (IBAD)	40 (2.5)	90	
		GdBCO (PLD) - MgO (IBAD)	645	170	109650					
	住友	HoBCO (PLD) - NiW (RABiTS)	205	200	41000	316 (1.8)				
		昭和	YBCO (MOD) - GZO (IBAD)	310	500	155000	370 (1.5)			
	ISTEC	YBCO (MOCVD) - GZO (IBAD)	205	198	40590	294 (1.8)	YGdBCO+BZO (MOCVD) - MgO (IBAD)			21 (1.4)
		YBCO (PLD) - GZO (IBAD)	212.6	245	52087	751 (3.0)	GdBCO (PLD) - MgO (IBAD)	34 (1.5)	51	56 (3.0)
	YBCO (MOD) - MgO (IBAD)	260	94	24440	760 (1.9)	YGdBCO+BZO (MOD) - MgO (IBAD)	14 (1.5)	15	35 (1.9)	
米国	SuperPower	YBCO (MOCVD) - MgO (IBAD)	282	1065	300330	813 (3.3)	YGdBCO+BZO (MOCVD) - MgO (IBAD)	14	50	50 (3.3)
			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)	298	200	59600	510				
	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などを真剣に検討する」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、中部電力など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、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、低コスト化を目指しており、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、CO<sub>2</sub>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」という目標達成を目指すためには、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

く課題の克服を目指し、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目指し、「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、石油関連技術など、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」

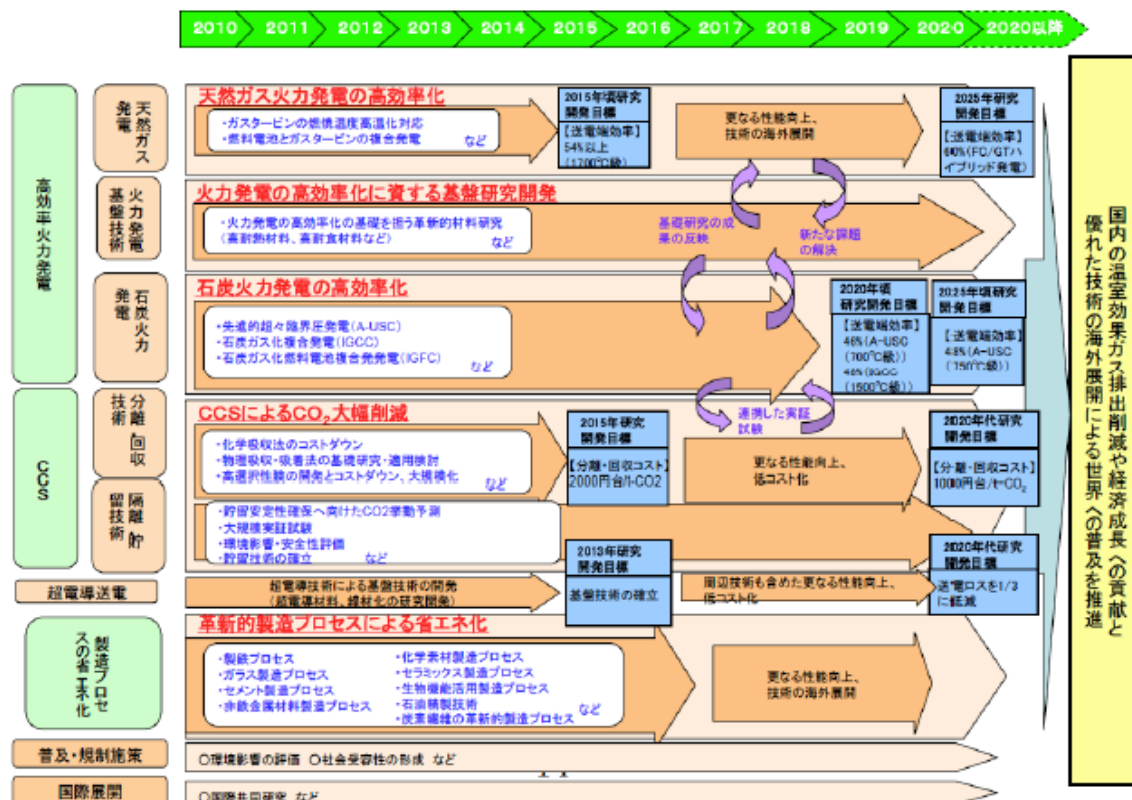


図 3.3.2-1 「科学・技術重要施策アクション・プラン」中の方策俯瞰図

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。昨今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りがない、と考えるべきである。また、環境・エネルギー問題など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)。



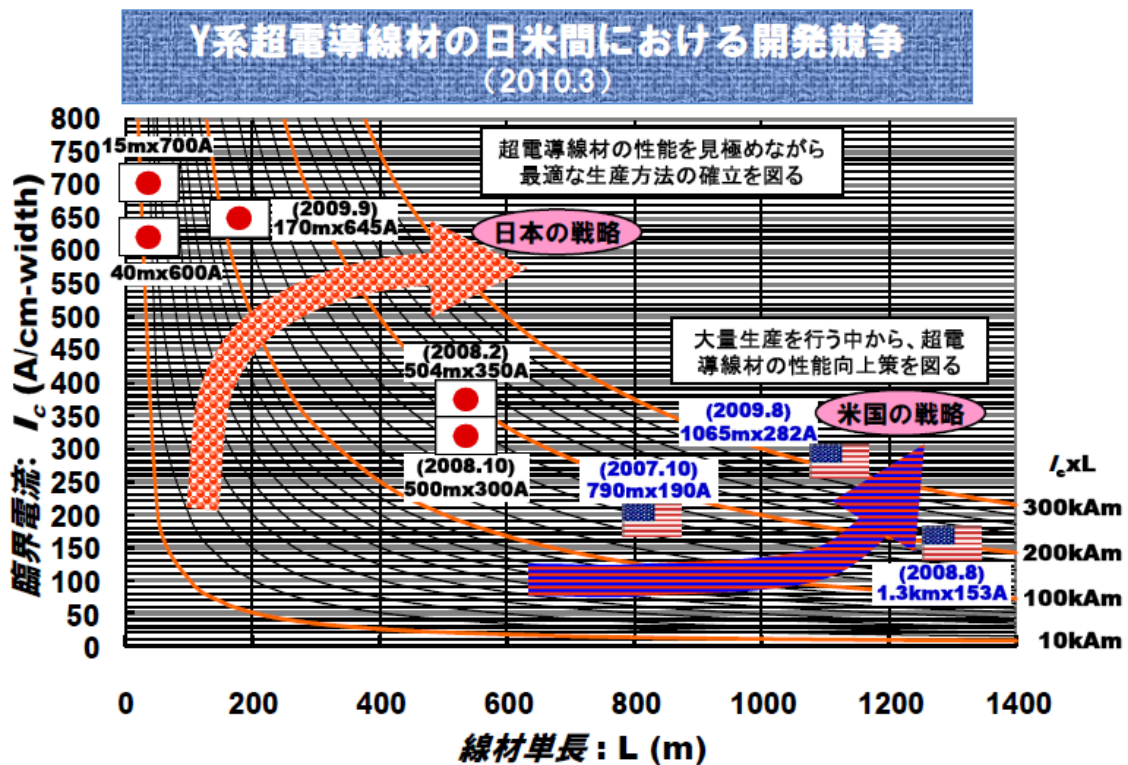


図 3.3.3-1 イットリウム系線材の日米間における開発競争

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、ユーザー・メーカー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-エネルギー革新技术計画を、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CO<sub>2</sub>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実用化および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級変圧器実用化および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。

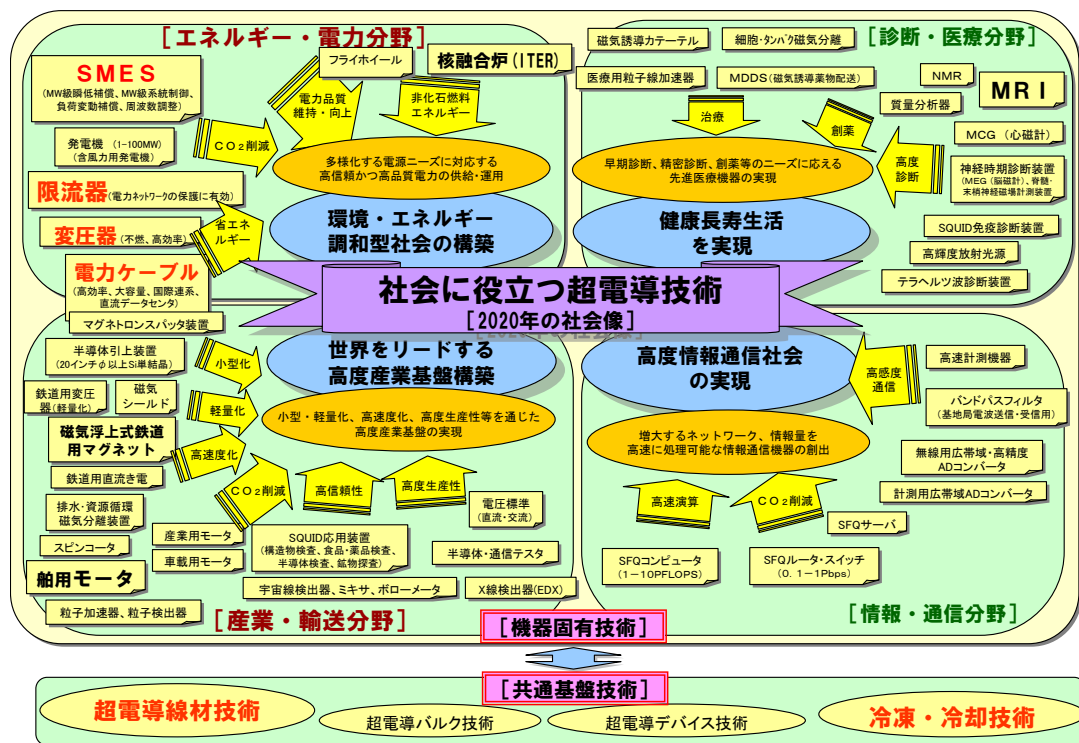


図3.3.4-1 2010年度の戦略マップ

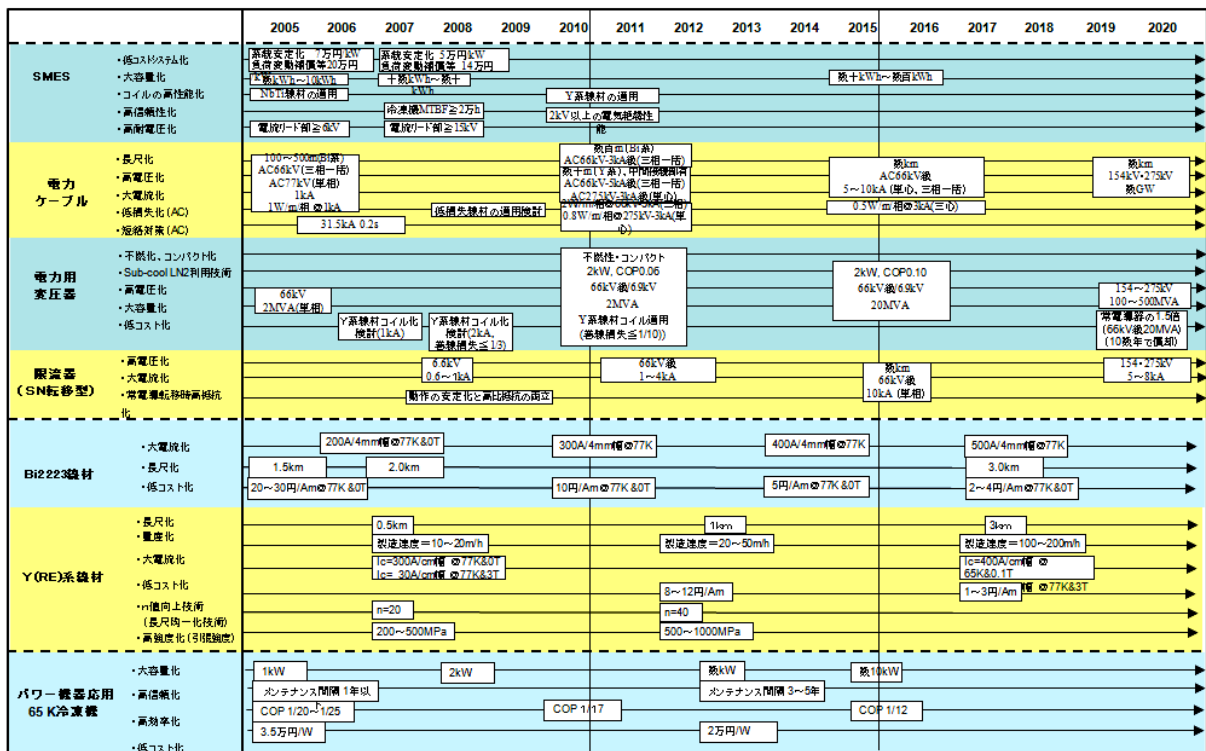


図3.3.4-2 本プロジェクトと強く関連している機器及び共通基盤技術のロードマップ(2009年度版)

### 3.4 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。

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、先の三機器の開発テーマの中に Y 系超電導 線材開発が含まれていた。ここでは、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となる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 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、細線加工技術など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 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 22 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	$J_e=15$ kA/ cm <sup>2</sup> (2 mm 幅×20 m) に相当する線材	$J_e=30$ kA/ cm <sup>2</sup> (2 mm 幅×50 m 以上) に相当する線材	$J_e=50$ kA/ cm <sup>2</sup> (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など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 ( $J_e$ ) 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 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ている。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も努力をしている。今後もこのような効率的運用を徹底していく。

#### (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ている。

#### (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り、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およ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。出力の安定性および現有装置の 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目指している。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ている。

### (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 用超電導コイル導体作製には、平坦で高い寸法精度が Y 系超電導線材に要求される。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防止することができる。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 を用いる手法の開発に成功したことから、平成 22 年度からは中間層が薄く、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により研究開発の高効率化を図っている。

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ている。

### (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。

## 3.4.3 情勢変化へのプロジェクトとしての対応

### (1) CO<sub>2</sub> 削減効果について

CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 削減効果を試算している。

その結果、SMES、ケーブル、変圧器を合計した 2030 年の CO<sub>2</sub> 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、試算結果の概要および算出条件は以下のとおりである。



表 3.4.3-1 超電導機器による CO<sub>2</sub> 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 3.4.3-2 超電導機器による CO<sub>2</sub> 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>

- ・ CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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：配電用変圧器およ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およ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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 3.4.3-3 のとおり 2020 年までの累計で約 26 億円、CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 3.4.3-3 超電導限流器の導入量推移と CO<sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> 削減量 (kt/年)	5.7	25.8

## (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 3.4.3-4 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、LSI 工場あたり、年間 1、2 回深刻な瞬低が起これると仮定すると、国内の LSI 工場を 100 箇所程度と見積もると、おおよそ年間 100 億円～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。SMES は半導体産業の瞬低を補償できるとして、投資額が 1、2 回の瞬低回避で回収できる可能性がある。また、一般産業では、1 回あたりの瞬低被害が数百万～数千万円と半導体産業ほど深刻ではないが、SMES が長い間瞬低被害を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ほか、欧米のプレミアム・パワー（インダストリー）パーク工業団地単位での保護をすることにより複数の工場の瞬低被害を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 3.4.3-4 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) 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

3.2 の項の「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ることとしている。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ている。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ている。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る。

### 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

平成 20 年度から平成 22 年 7 月までに得られた成果、ならびに今後の計画及び目標達成の見込みについて、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 に最終目標達成への見込み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目指し、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。

これ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イットリウム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。

今後も引き続き、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る。具体的には、平成 22 年度末までには、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する計画である。

#### 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/m<sup>2</sup> 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ことを目標としている。

これまで得られている成果としては、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するとともに、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/m<sup>2</sup> 以上の熱流束を可能とする高熱伝導冷却システムの試験を実施している。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が判った。

今後については、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/m<sup>2</sup> 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 年度末までには製作した外径 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する。

#### 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、 $I_c=100\sim 200$  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ことを目標としている。

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、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ている。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った。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ている。

今後は、これまでの MOCVD 法による超電導線材製造技術の実績を踏まえ、モデルコイル試験用の提供線材の作製を実施するとともに、さらに歩留りの改善を図る。また、IBAD-PLD 法により作製する Y 系超電導線材の SMES モデルコイルの成立性も確認して、コイル開発用線材の適用性の拡大を図る。

#### 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する。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ている。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実施することを最終目標としている。

これまでの成果としては、2 GJ 級トロイド型 SMES において、イットリウム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た。

今後も引き続き、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る。具体的には、イットリウム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計画しており、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する。

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、冷却試験を実施中。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。	達成見込み
(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: $I_c=20 \text{ A/cm}\cdot\text{w}@77 \text{ K}\&3 \text{ T}$ 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中である。これらの作製を通じて、特性向上と歩留り改善を進めている。	達成見込み
(4) 高磁界コンパクト SMES システムモデル検証 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。 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。	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などの試験計画立案に必要なコイル特性を取得中。	達成見込み



表 1.1.1-2 超電導電力貯蔵装置の最終目標達成への見込みのまとめ

研究テーマ	最終目標	達成へのアプローチ及び見込み
(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、最終目標を達成する見込みである。
(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 <sup>2</sup> ) の 7 倍 (21 W/m <sup>2</sup> ) の発熱量に対し冷却システムが成立することを実証中。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、性能を確認する。今後、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、最終目標を達成する見込みである。
(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： $I_c=20$ A/cm-w @77 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。引き続き、モデルコイル用の線材作製を行い供給目標・安定製造を達成する見込みである。
(4) 高磁界コンパクト SMES システムモデル検証	2 MJ 級評価用試験モデルを用いて、電力系統制御 SMES の運転を模擬した 2 万回以上の繰り返し充放電による特性検証	積層した φ 650 mm 級の 4 束導体コイルを伝導冷却型クライオスタットに組み込み、日光で系統連係試験時の波形を電源から入出力することで、繰り返し充放電による Y 系 SMES コイルの特性を検証する見込みである。

### 1.1.1-7 海外との比較

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 (H22 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、現状で世界最大、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。更に、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開始しており、これも世界最先端の開発状況であると思われる。

「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 (H24 年度) 時点

最終目標としては、開発したコイル、冷却システムをクライオに組み込み、電力系統制御用 SMES システムを模擬し、2 万回以上の繰返し充放電の実証試験を実施する。韓国、フランスにおける SMES プロジェクトの進捗状況にもよるが、最終目標時点においても、Y 系 MJ 級 SMES システムとして、2 万回以上の充放電は世界初になるものと思われる。

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  ↓ <b>世界最大・最高性能のコイル開発</b>
(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開始  ↓ <b>世界最高水準の冷却技術確立</b>
(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  ↓ <b>世界初</b>  (最終目標) ・ 系統制御を模擬し Y 系 SMES システムの 2 万回以上の繰返し充放電  ↓ <b>世界初の見込み</b>

## 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、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 2 W/m-相@5 kA 以下。

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・導体構造などを加味した交流損失シミュレーションおよび 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 もしくは 50 A/ 2 mm-w 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  $I_c$  向上および、2 mm 幅線材の端部の  $J_c$  劣化改善により平成 22 年度内に中間目標達成を見込む。

#### (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。

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。平成 22 年度内に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することで中間目標達成を見込む。

#### (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ないことを確認した。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った。検証については平成 22 年度内実施予定である。

機械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た。試作した単心ケーブルコアおよ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、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、ヒートサイクル特性などを検証するシステム設計案および課通電試験計画書案を作成した。詳細設計を平成 22 年度内に完了する見込み。最終目標達成に向けて、中間目標達成までに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させる見込み。

#### 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＋誘電体損失 0.8 W/m-相@3 kA 以下

3 kArms 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 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、絶縁厚は 25.5 mm となり、誘電体損失は 0.46 W/m 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。最終目標達成に向けて、線材の端部  $J_c$  の向上に伴う交流損失の低減と、低  $\tan\delta$  絶縁材の適用の可能性の検討を進める予定。

##### (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無し。

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。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。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。

##### (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。

275 kV の絶縁材料として、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、ケーブルシュミ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事を確認した。

#### (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。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、中間接続部などを組み合わせ、超電導電力ケーブルシステムを設計した。平成 22 年度内に設計の妥当性を確認する。

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。

最終目標達成に向けて、中間目標達成までに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させる見込み。

#### 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： $J_e=15 \text{ kA/cm}^2$ （2 mm-w×20 m）に相当する線材を安定に作成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。

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およ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、 $J_e = 17 \text{ kA/cm}^2$ （2 mm 幅線材×28 m、 $J_e$ は 20  $\mu\text{m}$  の Cu メッキを含む線材厚さ 170  $\mu\text{m}$  で算出）の特性を有する線材を作製・実証した。また、ケーブル用線材を計画通り平成 21 年度時点

で 4.3 km 作製しており、平成 22 年度内に総長 4 km レベルの線材の作製を実施し、線材のさらなる特性向上、長尺線材作製、歩留り改善等を実施することで、線材の安定製造技術を確立し、中間目標の達成を見込む。

## (2) 基板・中間層テープの開発

- 中間目標：IBAD 中間層テープ線材提供 20 km。

$J_e = 15 \text{ kA/cm}^2$  (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。

平成 21 年度末までに提供した IBAD-GZO 中間層テープは総長で約 16.2 km であり、平成 22 年度末までの提供量は総長で約 27.0 km となる見込みである。

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、 $J_e = 15 \text{ kA/cm}^2$  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。

## (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、歩留り向上：70%達成。

平成 20 年度～22 年度において供給計画の通り、IBAD-MOD 線材を高電圧ケーブルプロジェクトへ供給する見込みである。なお、試作用ケーブルの長さが 30 m であることから、平成 21 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 63%となった。

なお、基板の傷など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 単長の歩留まりを上げ、さらに 100 m を超える長さの線材の歩留り向上を図る。

## (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。

銅めっき後のサンプルを SEM 断面観察し、Cu/Ag は非常によい密着性を示しており、超電導特性が健全な領域で YBCO/CeO<sub>2</sub>/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およ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 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-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 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、 $0.0258 \text{ W/m}@1 \text{ kArms}$  (負荷率 0.51) を得た。以上の通り中間目標を達成した。

## (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  $I_c$  評価装置などで評価を行い、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た。それぞれの特徴を生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。

### 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) 定常通電時およ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確立。

定常通電時およ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を確認できた。

今後は、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・評価およ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、275 kV 高電圧超電導ケーブルシステム検証においては、気中終端接続部の超電導／常伝導接続の電流転流の挙動解析および気中終端接続部の熱解析を行っていくことで、最終目標である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を目指す。

## (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新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およびケーブル端末など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および粒子径の制御が可能なが分かった。約 5 g/sec の固体の生成および、平均粒子径 100  $\mu\text{m}$  程度の固体粒子生成が出来る生成装置を開発した。最終目標に対しては、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、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する予定である。

## (3) 超電導電力機器の冷却設備の調査研究

●中間目標：冷却設備の最新動向、超電導ケーブルなどに要求される冷却設備の仕様および法的規制に関する調査の実施。

冷凍機的能力を確認し、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。

## 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
<b>1. 66 kV 大電流ケーブル化技術の開発</b>			
大電流・低交流損失	ケーブル交流損失 2 W/m・相@5 kA 以下	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 導体構造を導体 4 層、シールド 2 層に絞り込み</li> <li>・ 線材幅 2 mm、4 mm の導体を試作</li> <li>・ 3 W/m・相@4.5 kA まで低減</li> </ul>	達成見込み
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の検討を平成 22 年度内に行うことで達成見込み	達成見込み
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	達成見込み
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	システム設計案および課通電試験計画書案を作成した。	達成見込み
<b>2. 275 kV 高電圧ケーブル化技術の開発</b>			
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"> <li>・ 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</li> <li>・ 絶縁材料の絶縁設計検討</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 超電導導体の 3 kA における交流損失は 0.235 W/m 達成。</li> <li>・ PPLP-C を絶縁紙として採用し、現在までの設計で 0.46 W/m の誘電体損失見込み</li> <li>・ 交流損失と誘電体損失を合わせて 0.70 W/m となった。</li> </ul>	達成
高電圧接続技術の開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 中間部、終端部接続部を開発</li> <li>・ 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。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 超電導-超電導接続部は数 nΩ の低抵抗を達成した。</li> <li>・ 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事を確認した。</li> </ul>	達成見込み
超電導電力ケーブル電気絶縁特性の調査	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 長時間課電時、およ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。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ モデルケーブルでの連続課電、寿命特性を取得</li> <li>・ 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した。</li> <li>・ 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事を解析的にも確認した。</li> <li>・ 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 s）による温度上昇の抑制ができた。</li> </ul>	達成見込み
システム検証	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ ケーブルシステムのシステム設計をする</li> <li>・ 耐久性を評価できる課通電試験計画書を作成する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ ケーブルシステムを設計した。</li> <li>・ 他規格などを調査し、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。</li> </ul>	達成見込み

3. 超電導電力ケーブル対応線材の安定製造技術開発			
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"> <li>・<math>J_e=15 \text{ kA/cm}^2</math> (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</li> <li>・大電流ケーブル用線材総長 8 km を安定製造・提供する。</li> </ul>	<p>ケーブル化に必要な性能およ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、<math>J_e=17 \text{ kA/cm}^2</math> (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 km 製作予定</p>	達成見込み
基板・中間層テープの開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>・IBAD 中間層テープ線材提供 20 km</li> <li>・<math>J_e = 15 \text{ kA/cm}^2</math> (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</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・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 27.0 km 提供予定</li> <li>・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 <math>I_c</math> 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 <math>I_c</math> 値を実現しており、<math>J_e = 15 \text{ kA/cm}^2</math> 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。</li> </ul>	達成見込み
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 21 年度時点で TFA-MOD 法により作製された線材 3.8 km(10 mm 幅換算)を供給し、歩留り 63 %を達成した。	達成見込み
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 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、 $I_c=2750 \text{ A}@77 \text{ K}$ の特性を得た。また、導体の交流損失として、 $0.0258 \text{ W/m}@1 \text{ kA}_{\text{rms}}$ (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 $I_c$ 評価装置などで評価を行い、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
4. 超電導電力ケーブルの熱収支に関する評価研究			
定常通電時およ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、実用化を目指したスラッシュ窒素冷却システムを明確にする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 の固体の生成および、平均粒子径 100 $\mu\text{m}$ 程度の粒子生成が出来る生成装置を開発。	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・超電導ケーブルなど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・普及に向けた法規制関係を調査した。	達成

### 1.1.2-6 最終目標と達成の見込みのまとめ

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の見込みを表 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	最終目標	達成の見込み
<b>1. 66 kV 大電流ケーブルシステム検証</b>		
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 ・ 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させる見込み。
<b>2. 275 kV 高電圧ケーブルシステム検証</b>		
高電圧絶縁・低誘電損失技術の基礎特性評価	・ ケーブル損失（交流損失、誘電体損失）0.8 W/m・相@3 kA 以下	線材の端部 $J_c$ の向上と細線化劣化の抑制による交流損失の低減と、低 $\tan\delta$ 絶縁材の適用の可能性の検討を進め目標を達成する見込み。
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） ・ 外径 150 mm 以下 ・ 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させる見込み。
<b>3. 超電導電力ケーブルの熱収支に関する評価研究</b>		
定常通電時およ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確立する。	ケーブルシステム検証における、温度上昇解析・短絡電流通過時の電磁力解析、気中終端接続部の超電導/常伝導接続の電流転流の挙動解析および伝熱解析を行っていくことで目標を達成する見込み。
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する。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する。

### 1.1.2-7 海外との比較

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生かし、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生かし、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・接続部技術などを開発し、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0.1を考慮)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ケーブルと比べると、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を目指している。

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もつもので、これまでに端末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ている。この先、長期信頼性検証など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、CO<sub>2</sub>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ている。

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	<p>●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/m<sup>2</sup></p> <p>●交流損失について Albany Project (米国) ・ Albany ケーブル 0.35W/m-相@0.8 kA DAPAS プロジェクト (韓国) ・ LS ケーブル 1.14 W/m @ 1.4 kA</p>	<p>●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/m<sup>2</sup></p> <p>↓</p> <p>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。</p> <p>●交流損失について 本プロジェクト 2.1w/m-相@5 kA 以下</p> <p>↓</p> <p>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> <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を目指している。</p>
(2) 275 kV 高電圧ケーブル化技術の開発	<p>●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</p> <p>●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)</p>	<p>●送電電圧 送電容量 本プロジェクト 275 kV/3 kA、</p> <p>↓</p> <p>世界最大の電圧、送電容量 ケーブル損失 0.8 W/m-相@3 kA</p> <p>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</p> <p>●交流損失について 本プロジェクト 導体損失 0.235 W/m (LANL, ORNL の 1/3 以下) ケーブル外径 150 mmφ以下 (管路布設可)</p> <p>↓</p> <p>世界でもトップの低損失・コンパクトなケーブルを実現する</p> <p>CO<sub>2</sub> 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>

### 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、1.1.2 節に述べた計画内容に基づき、これまでに、①Y 系超電導線材による巻線技術開発、②冷却システム技術の開発、③限流機能付加変圧器技術の開発、④対応線材の安定供給技術の開発、⑤66/6.9 kV・2 MVA 超電導変圧器モデルと配電用 20 MVA 級超電導変圧器の設計と試験の検討を進めてきた。現在、線材の安定供給技術における細線化が一部中間目標に達成していないが、その他は着実に的確な成果を得ている。

特に、線材安定供給では、線材コスト低減に有効な IBAD-MgO 中間層付き金属基板線材の巻線基礎技術や細線化の検証で良好な成果を得た。また、4 巻線限流モデル変圧器の限流機能試験が良好で、数百 kVA 級限流モデルの前倒し製作や 2 MVA 変圧器モデルへの限流機能技術の反映が可能になった。

プロジェクトの成果をより充実し、実用化を促進するため、当初計画から次の 2 項目を変更した。①IBAD-MgO 中間層付き金属基板適用による線材工程を平成 23 年度迄延期した。②数百 kVA 級限流モデル製作を平成 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、九州大学、ISTEC）

##### (1) 超電導変圧器巻線の大電流化技術開発

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。線材を多層並列導体(12 重 2 並列)の転位均流モデルで、各素線間の電流分流のバラツキは最大で 14 %であり、変圧器用として可能である。

##### (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 幅線材を 3 分割溝加工)した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。今後、100 m 級 3 分割溝加工線材による低損失モデルを試作し、交流損失低減を検証予定である。

##### (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巻線モデルを製作した。その短絡電流試験で良好な耐短絡強度を確認した。

#### (4) 低交流損失性・大電流量導体および巻線構成技術の検討

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。

#### (5) MgO 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 基板は薄く、基板製造速度の向上（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、曲げ歪み・過電流特性及び線材素線間抵抗(1 MΩ/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

「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目指して 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ーを試作した試験にて、断熱効率 65 %以上(目標 65 %)を全て達成した。今後、インペラーとハウジング間ギャップの調整等の最適化を図り、さらなる高効率化を目指す。

#### (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、インペラー等の部品の構造・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圧縮機を試作した。モータ温度上昇のため定格流量 (1,200 Nm<sup>3</sup>/hr) の 75 % (900 Nm<sup>3</sup>/hr) までの計測であるが、断熱効率 68 %(目標 65 %)を達成した。今後、冷却能力を増強したモータジャケットに交換し、定格流量での断熱効率 65 %以上を目指す。

#### (3) 熱交換器の小型化/最適化

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ことを得た（「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）。今後、ブロック数を減じた試験を実施し、その成果を反映して冷凍機プログラムの精度向上を図る。また、任意の冷却システムの小型化設計技術も明確にする。



#### (4) 冷凍機開発と冷却システム開発

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。

#### (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。今後、新冷却方式の優位性を実証するとともに、効率の良い新冷却方式の具現化を目指す。

### 1. 1. 3-3 限流機能付加技術開発（九州電力、九州大学、岩手大学、ISTEC）

#### (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

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設計試作

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およ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った。

### 1.1.3-4 超電導変圧器対応線材安定製造技術開発（フジクラ、昭和電線ケーブルシステム、JFCC、九州大学、ISTEC）

#### (1) 超電導変圧器対応線材安定製造技術開発（PLD 法）

IBAD 中間層付き基板上に超電導層をパルスレーザー蒸着法（PLD 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細線溝加工後に所定の特性 ( $I_c=40 \text{ A @}65 \text{ K}\&0.01 \text{ T}$ ) 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、現在までに 4km（目標 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 中間層付き基板の安定製造技術を開発するとともに、MOD 線材用の IBAD 中間層付き基板を現在までに 4 km（目標 22 年度末で総量約 4 km）を供給した。

#### (2) 超電導変圧器対応線材安定製造技術開発（MOD 法）

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 ( $I_c=40 \text{ A @}65 \text{ K}\&0.01 \text{ T}$ ) 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、現在までに 1 km（目標 22 年度末で総量約 2 km）を供給した。

#### (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

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。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、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した。

#### (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

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、臨界電流の磁界印加角度依存性、Y 系超電導線材の積層枚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の検討 (九州電力)

#### (1) 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は極力実機相当とする；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 3 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。

#### (2) 20 MVA 級超電導変圧器の設計検討

最終的には、2 MVA 級変圧器モデルの試験結果を反映する予定であるが、現段階では、既存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 級変圧器の設計検討を行った。概略の設計結果を既存油入変圧器と比較し、損失は冷却動力を考慮しても油入変圧器の 16 % (約 1/6) で、鉄心の低減などから変圧器本体（冷却システム除く）の重量は 54 % となることを得た。今後は、冷却システムを含む特徴の検討、要素技術やシステムの試験結果の反映、超電導変圧器のトータルコストの算定を行う予定である。

### 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限流機能付加変圧器技術、④対応線材安定供給技術、⑤2 MVA 超電導変圧器モデル設計）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。



項目	目標 (H22 年度達成)	これまでの成果	達成度
熱交換器の小型化	熱交換器の性能検討、設計・試作および試験・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合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>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
<b>3. 限流機能付加技術開発</b>			
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およ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 系線材の銀層および保護金属層 (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) の確認および保護金属層の熱流通特性 (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 限流機能付加モデル変圧器を設計した。	達成 見込み
<b>4. 超電導変圧器対応線材安定製造技術開発</b>			
対応線材安定製造技術開発 (PLD 法)	5 mm 幅 3 分割にて $I_c=40 \text{ A}@65 \text{ K}\&0.01 \text{ T}$ 、100 m 以上に相当する線材を安定に作製可能な技術を確認。	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 $I_c=40 \text{ A}@65 \text{ K}\&0.01 \text{ T}$ 、100 m 以上に相当する線材を安定に作製可能な技術を確認。	100m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認、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せいさく作製線材の微細構造解析およ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する。	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、測定評価および温度スケーリング法則による推定法の確立および線材の積層枚数依存性等を検討。	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

項目	目標 (H22 年度達成)	これまでの成果	達成度
<b>5.2 MVA 級超電導変圧器モデルの設計</b>			
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および冷却システム系の検討を実施。	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 最終目標と達成見込みのまとめ

超電導電力変圧器の研究開発においては、5 年のプロジェクト終了までに「無加工線材比で 1/3 以下の低交流損失化、2 kA 級の大電流化」、「2 kW 以上の冷凍能力@65 K、冷凍効率 COP=0.06@80 K」および「数百 kVA 級限流モデル、2 MVA 変圧器モデルの試作・検証」を実施し、所要の性能を満足することを最終目標としている。このため、前期 3 年においては、変圧器設計に必要な技術や設計技術などの重要な要素技術開発について目標を定め、これを達成する技術開発を行ってきた。この結果、個々に設定されたすべての中間目標について達成もしくは達成する見込みである。さらにこの成果に基づく今後の研究開発計画であるシステム検証の設計を終了し後半 2 年の最終目標を達成する見込みである。

個々の実施項目に対する目標達成の状況および見込みについて以下に記す。

#### (1) 巻線技術開発

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、多層化に伴う転位長の線材曲げ特性を確認した。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素線間電流を均一化する転位均流化のための変圧器二次巻線モデル (12 重 2 並列) および二次巻線口出し部モデルを設計・製作し、均流基礎特性を評価した。また、系統事故時等に発生する短絡電流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巻線構造を開発し、一次・二次巻線からなる鉄心付の短絡巻線モデルを製作した。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を評価した。さらに、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、電流分流等電磁特性について、理論及び実験の両面から低損失化、変圧器巻線の構成法および最適転位巻線方法について検討した。

今後、2 kA 級大電流の巻線技術と低交流損失の巻線技術の確立が必要であるが、前述のとおり転位構造の最適化までは実施済のため、鉄心構造を含む大電流巻線モデルの製作・通電試験により目標達成は可能である。また、長尺細線化線材の製造技術確立までは見通せるため、低交流損失モデルによる巻線技術

の目標達成も可能である。

## (2) 冷却システム技術開発

「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および知見に基づき、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した。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 %以上を達成した。また、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圧縮機の技術開発に向けて、インペラー、ケーシング等小型ターボ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った。小型ターボ圧縮機の基礎特性把握用のターボ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し、小型ターボ圧縮機製作に必要な基礎技術や知見を取得した。これらの基礎試験や解析の成果により、ターボ圧縮機の効率や運用性等の特性を明らかにし、ターボ圧縮機の試作・改良等により断熱効率 65 %以上を達成した。熱交換器の性能検討、設計・試作、および試験・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、冷凍機システムにおける熱交換器の小型化を検討した。また、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し最終目標の  $COP \geq 0.06$  を確認した。

今後、冷凍能力が 2 kW@65 K、冷凍効率 (COP)が 0.06@80 K の冷却システム 技術確立および超電導変圧器との組み合わせ試験が必要であるが、膨張タービンおよびターボ圧縮機の技術などは達成済みであり、熱交換器を含めた冷凍機システムの目標達成は可能である。

## (3) 限流機能付加技術開発

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。また、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。

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およ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った。

今後、数百 kVA 級限流機能付加変圧器により機能検証(過大電流を定格電流の 3 倍以下に抑制)が必要であるが、限流モデルにより限流特性までは確認済みのため、物性データおよび数値解析ソフトにより目標達成は可能である。

#### (4) 超電導変圧器対応線材安定製造技術開発

IBAD 中間層付き基板上に超電導層をパルスレーザー蒸着法 (PLD 法) および有機酸塩熱分解法 (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細線溝加工後に所定の特性 ( $I_c=40 \text{ A}@65 \text{ K}\&0.01 \text{ T}$ ) 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。

今後、線材は全体で、PLD 線材を約 5 km、MOD 線材を約 2 km、IBAD 中間層付き基板を約 4 km の提供し、その中での歩留まり向上が必要である。安定製造および加工技術の改良により線材の長手・幅方向の  $I_c$  特性向上技術を確認中であるため、目標達成は可能である。

#### (5) 20 MVA 級超電導変圧器の設計検討

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、低損失で小型など高性能化を確認した。

今後は、冷却システムを含む 66/6.9 kV-2 MVA 変圧器システムの試作・試験を実施する。また、その成果を反映して、66/6.9 kV-20 MVA 級実用変圧器システムのコンパクト性、高効率性等の特長を見極めるとともに、コスト評価を行う予定である。それらは、上記のシステム設計、巻線技術および冷却システム技術の達成により目標達成は可能である。



表 1.1.3-2 超電導変圧器の最終目標と達成見込みのまとめ

研究テーマ	最終目標	達成へのアプローチ及び見込み
(1) 超電導変圧器巻線技術開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 2 kA 級巻線技術の確立</li> <li>・ 巻線の低交流損失 <math>\leq 1/3</math>(対細線化なし線材)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 最適な転位基礎構造は実証済みであり、2 kA 級大電流モデルによる目標達成は可能。</li> <li>・ 長尺細線化線材の製造は見通せ、巻線基礎技術は検証済みであり、低損失モデルによる目標達成は可能。</li> </ul>
(2) 冷却システム技術開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 冷凍能力：2 kW@65 K</li> <li>・ 冷凍効率(COP):0.06@80 K</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 膨張タービンやターボ圧縮機の効率は達成済みで、熱交換器を含む冷凍機システムの解析も良好なため、目標達成は可能。</li> </ul>
(3) 限流機能付加技術開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 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)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 限流モデルにより限流特性は確認済みで、それに基づく 400 kVA 限流機能付加変圧器の設計も良好なため、目標達成は可能。</li> </ul>
(4) 超電導変圧器対応線材安定製造技術開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 安定製造、加工技術の向上(歩留向上)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 安定製造や加工技術の改良により線材の長手・幅方向の <math>I_c</math> 特性向上技術は確立中のため、目標達成は可能。</li> </ul>
(5) 2 MVA 級超電導変圧器モデルの設計	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 66/6.9kV 2 MVA 変圧器モデルの課通電試験による性能検証</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 上記の要素技術や冷却システム技術の達成により 2 MVA 級変圧器モデルの目標達成は可能。</li> </ul>

### 1.1.3-8 海外との比較

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、進展がみられない。しかし、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、開発を進めている。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 1.1.3-1 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 3 相 5/10 MVA (24.9 kV/4.2 kV, 25 K)を開発した<sup>(1-2)</sup>。しかし、3 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

2009年に、Y系超電導線材による3相28MVA(70.5kV/12.5kV, 70K)の開発計画が発表された<sup>(3)</sup>。2011年より研究開発がスタートする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3相630kVA(18.7kV/420V)を開発し、1年間実系統試験を実施した<sup>(4)</sup>。その後、立案された3相10MVA開発プロジェクトは中止された<sup>(5)</sup>。

#### 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100kVA(5.5kV/1.1kV, 77K)、さらに2006年に単相1MVA(25kV/1.4kV, 66K)を開発し高周波運転時の課題を明らかにした<sup>(6-7)</sup>。

### (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目指し、2001年からDAPAS(Dream of Advanced Power system by Applied Superconductivity technologies)プログラムを開始している。Bi-2223線材により、2004年に単相1MVA(22.9kV/6.6kV)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る。77Kにおける無負荷試験、絶縁耐力試験などが行われた<sup>(8)</sup>。最終目標は2011年に100MVA級変圧器の開発である。

### (4) 中国の超電導変圧器プロジェクト

#### ・TBEAプロジェクト

TEBA(TheTebian Electtic 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3相630MVA(10.5kV/0.4kV)を開発した<sup>(9)</sup>。

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"> <li>低損失化は NZ プロジェクト等におけるローベル導体の採用。</li> <li>耐短絡強度は巻線モデルによる検証。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>低損失化は細線化および転移巻線構造の最適化により達成可能。耐短絡強度技術は 400 kVA 短絡モデル変圧器で実証。</li> <li><b>世界初の Y 系変圧器の短絡特性を実証</b></li> </ul>
(2) 冷却システム技術開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>タービン膨張器およびターボ圧縮機の断熱効率 &gt; 65 % 達成は確実。</li> <li><b>世界に先駆け小型タービン方式冷凍機要素技術を開発</b></li> </ul>
(3) 限流機能付加技術開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>変圧器巻線による限流機能開発は米国の変圧器プロジェクトで開始予定。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Y 系線材の変圧器巻線モデルにより限流特性を実証。さらに数百 kVA 級限流機能付加変圧器の設計製作を実施中。</li> <li><b>世界初の Y 系変圧器の限流特性を実証</b></li> </ul>
(4) 超電導変圧器対応線材安定製造技術開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>低損失化対応細線化線材は米国で開発中。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>3 分割 100 m 長線材 (40 A@0.01 T, 66 K) の製造・加工技術の開発</li> <li><b>世界に先駆け細線化線材加工技術を開発</b></li> </ul>
(5) 2 MVA 級超電導変圧器モデルの設計	<ul style="list-style-type: none"> <li>Y 系変圧器の開発は米国のプロジェクトで開始予定。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>巻線技術開発の成果のもとに 2 MVA 級変圧器モデルの検証が可能。</li> <li><b>世界に先駆け Y 系変圧器を開発</b></li> </ul>

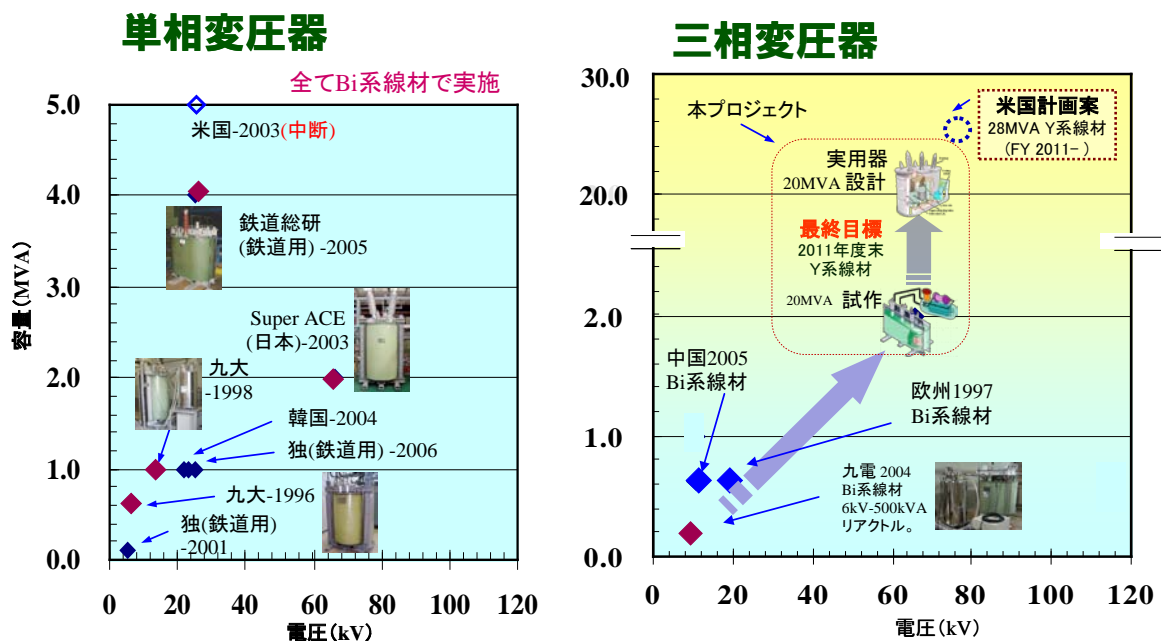


図 1.1.3-1 国内外の超電導変圧器の開発状況

## 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. upercond., 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. Somg, 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.

#### 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う。

中間目標では、ケーブル耐久試験条件としての試験項目・条件の決定を目指している。また、最終内部目標として、変圧器、SMES の機器使用環境に対する耐久性評価を実施することとしている。

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、これをもとに「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 °C、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 °C、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、ハンダ付温度 (180 °C) での加熱試験に対し、230 °C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) を越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電流通電試験を行い、1000 時間通電試験を行っても、 $F-V$ 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 倍の裕度をもつことが明らかになった。劣化機構としては、素線が 500 K 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生成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わかった。

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（プロジェクト内で設定）に向けては、ケーブル対応のさらなる評価として、長期歪によるクリープ劣化および通電の30年保障に関して、試験方法と考え方を検討するとともに改良されたケーブル用線材の耐久性試験を進める。また、「各種機器の耐久性試験」では、変圧器およびSMESに関しても、ケーブルとは異なる環境条件あるいは線材構造において、経時変化評価と劣化限界を評価する。方法論が今回でほぼ確立するとともにケーブルとの共通項目もかなりあり、今回の成果が最終目標達成にも十分活かすことができると考えられる。ただし、それぞれの機器に独特な環境条件もある。具体的には、変圧器では、スクライブ（溝加工）された分割線材が用いられており、SMESでは、高磁場、繰返し歪やフープ力、温度条件などそれらに関しても試験方法を提案していく。

#### 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ている。

中間目標値としては、本プロジェクト終了後に想定されている実証研究時に求められる線材仕様として以下の通り設定されている。

SMES 対応仕様：30 A/cm-w@77 K,3 T-50 m

変圧器対応仕様：300 A/cm-w@65 K,0.02 T-50 m

また、最終目標としては、2020年頃に想定されている普及導入時期に必要なとされる仕様に基づいて以下の通りに設定されている。

SMES 対応仕様：50 A/cm-w@77 K,3 T-200 m

変圧器対応仕様：400 A/cm-w@65 K,0.1 T-100 m

またコストに関してはすべてにおいて技術コスト 3 円/Am 未満の実証が課せら

れている。

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目指している。

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目指した。レーザのエネルギー密度の向上等により高速化、高  $J_c$  化を図り、10 m/h の製造速度で膜厚 1.5  $\mu\text{m}$ 、長さ 51 m 線材を作製し、32.7 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、長尺線材での磁場中  $J_c$  特性として、世界最高で 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る。

最終目標に向けて、SMES 対応目標特性は 50 A@77 K, 3 T を短尺では実証しているが、極低コスト条件とともに長尺化を達成しなければならない。今後は、厚膜化技術とともにナノサイズのピン止め点導入技術を含めて 50 A@77 K, 3 T とコストとの両立を目指す。変圧器対応目標である 400 A@65 K, 0.1 T は、実証できているが今後は長尺化を目指し、最終目標を達成していく。

一方、IBAD-MOD 線材に関しては、BZO ナノ粒子の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 610 A/cm-w(@65 K, 0.5 T)、34 A/cm-w(@77 K, 3 T) を実現した。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となる。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、コスト条件は満たしていないが、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ている。今後は、長尺化や極低コスト化とともに磁場中特性のさらなる向上のために、厚膜化、Zr 濃度増加等で中間目標達成を図る。最終目標に関しては、現在の Zr 添加の最適化に加えて、さらなるピン止め力向上技術が必要である。これには、より効果的なピン材料の開発や形状制御技術などを勢力的に行う。また、より厚膜で線材を作製する技術も有効であることから、均一線材作製技術開発の成果と合わせて、高ピン止め力厚膜の作製技術を開発し目標達成を図る。

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。今後は、元素の一部置換や元素添加の適正化を図り中間目標達成を目指す。最終目標に向けては、平成 22 年度までの混晶及び添加技術の最適化に加え、安定製造技術開発における成果を合わせることで長尺化へ展開し最終目標達成を図る。

#### 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および細線加工技術の開発を行う。

中間目標値としては、本プロジェクト終了後に想定されている実証研究時に求められる線材仕様として以下の通り設定されている。

ケーブル対応仕様：2 mm 幅線材 300 A/cm-w(@77 K, s.f.) 50 m

変圧器対応仕様：5 mm 幅線材(50 m)を 5 分割溝加工し交流損失が 1/5 に低減できることを実証

また、最終目標としては、2020 年頃に想定されている導入・普及時期に必要なとされる仕様に基づいて以下の通りに設定されている。

ケーブル対応仕様：2 mm 幅線材 500 A/cm-w(@77 K, s.f.) 200 m

変圧器対応仕様：5 mm 幅線材(100 m)を 10 分割溝加工し交流損失が 1/10 に低減できることを実証

またコストに関してははすべてにおいて技術コスト 3 円/Am 未満の実証が課せられている。

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目指している。

IBAD 系基板/中間層に関しては、PLD-CeO<sub>2</sub>/Sputter-LMO/IBAD-MgO/Sputter-GZO/Hastelloy™ 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 線材にわたって CeO<sub>2</sub> 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わかった。

最終目標に向けては、MOD ベッド層の最適化、各層の薄肉化、高速化等による極低コスト化技術の取り込みと長尺化、さらには、幅広基板利用による均一領域利用技術も選択肢として開発を行う。

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イ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幅線材に対し300 A/cm-w@77K, s.f.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)評価で実証可能な見通しを得た。(何れも極低コスト条件を満足)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を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、既に7 m長での損失低減を報告している超電導応用基盤技術開発プロジェクト成果で、既に我が国が大きく先行した技術といえるが、50 m長で確認できればこれを凌駕し追随を許さない程の成果になるといえる。

最終目標達成に向けては、ターン数増加やレーザーパワー増加等による極低コスト化技術の取り込みと、超電導層成膜時に発生する欠陥の除去を行い、これらの長尺化を図る。更に、幅広基板利用による均一領域利用技術も選択肢として開発を行う。

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°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。この現象を積極的に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、発電機など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。

結晶粒配向金属基板-PLD線材においては、30 mm幅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メッキ後の $I_c$ 維持率90%以上となる加工プロセスを確立し、2 mm幅線材に対し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。最終目標達成に向けては、中間層均一成膜技術の確立とともに大型レーザーの安定成膜技術を開発する。また、大型レーザーのパワーの有効利用技術やターン数増加等による極低コスト化技術との統合により最終目標達成を目指す。

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幅・20 m長線材において、275 A/cm-w(@77 K, s.f.)の $I_c$ 値を確認した。また、同様に20 m線材において5 mm-w 5分割溝加工線材において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)評価で実証可能な見通しを得た。今後は、長尺線材において同様の評価とともに、コイル状態での長尺線材としての損失評価を実施する予定である。IBAD-PLD線材における成果概要で紹介したとおり、20 m長であっても5分割溝加工して交流損失低減が実証できれば世界トップレベルの成果であり、特にAMSC社の線材は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、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。最終目標達成に向けては、均一塗布手法の開発を進めるとともに Reel to Reel (RTR)装置のレーン数増加やバッチ炉利用による極低コスト化技術統合を行ない、これらの長尺化を図る。さらには、幅広基板利用による均一領域利用技術も選択肢として開発を行う。

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ー照射と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 $I_c$ 低下も低減できる見通しを得るとともに50 m長の5 mm幅線材の5分割溝加工に成功した。また、細線線材の非破壊評価法として、SQUID渦電流法の高速評価（80 m/h）と欠陥種別の識別に成功するとともに、高速レーザ走査形状観測装置や交流磁化率による交流損失相対評価法を開発し、均一線材作製プロセスや細線加工プロセスの改善に貢献した。最終目標達成に向けては、現状の手法での課題である溝幅限界を克服する手法として、ソフトレーザ加工技術などを行なう。現在、短尺試料において原理検証を進めているが、可能性を見極めた上で、長尺線材用の技術開発を進めていく予定である。

#### 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ている。

中間目標値としては、本プロジェクト終了後に想定されている実証研究時に求められる線材仕様として以下の通り設定されている。

SMES 対応仕様 : 300 A/cm-w@77 K, s.f. 1 GPa 50 m

ケーブル対応仕様 :  $J_c = 30 \text{ kA/cm}^2 @77 \text{ K, s.f. } 50 \text{ m}$

また、最終目標としては、2020年頃に想定されている導入・普及時期に必要なとされる仕様に基づいて以下の通りに設定されている。

SMES 対応仕様 : 500 Acm-w@77 K, s.f. 1 GPa 200 m

ケーブル対応仕様 :  $J_c = 50 \text{ kA/cm}^2 @77 \text{ K, s.f. } 200 \text{ m}$

またコストに関してはすべてにおいて技術コスト 3 円/Am 未満の実証が課せられている。

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目指している。

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70~80  $\mu\text{m}$ 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。最終目標達成に向けては、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確立する。

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 70  $\mu\text{m}$  厚 Hasteloy<sup>TM</sup> 基板上での成膜で、15 m/h の製造速度で作製した線材において 400 A/cm-w@77 K,s.f.以上の  $I_c$  値特性を確認し（極低コスト条件を満足）、安定化層厚みを 30  $\mu\text{m}$  と想定した場合には 1 GPa 以下で以下で特性が劣化した。これは成膜前の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。引張り試験を液体窒素温度で行うことや、銅の厚みが機械強度に貢献する複合則で考慮して計算するなどの方策により、目標値を満足する予定である。また、80  $\mu\text{m}$  厚 Hasteloy<sup>TM</sup> 基板上において 30 m/h の製造速度で作製した線材においも 400 A/cm-w@77 K,s.f. 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<sup>2</sup> となり中間目標値を達成している。現在、この線材の引っ張り強度と超電導特性の関係を評価しているところである。最終目標達成に向けては、平成 22 年度までの薄肉高強度金属対応成膜技術を基軸に長尺化を推し進め、高  $I_c$  化技術を統合し最終目標対応技術を確立する。

一方、IBAD-MOD 法による成膜技術開発としては、PLD 法に比べて低温ではあるが長時間熱処理されることから同様に加熱による焼鈍効果を抑制することが必要である。高強度 70  $\mu\text{m}$  厚 Hasteloy<sup>TM</sup> 基板上での成膜で、極低コスト条件は未達ではあるが 37 m 線材で 300 A/cm-w@77 K,s.f.を超える高い  $I_c$  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  $J_c$  値として特性に関して中間目標値である 30 kA/cm<sup>2</sup> を超えており、長尺化と低コスト条件での線材作製が課題となるがそれぞれ要素技術は出来ており、達成は見込める状態にある。最終目標達成に向けては、平成 22 年度までの薄肉高強度金属対応成膜技術を基軸に長尺化を推し進め、高  $I_c$  化技術を統合し最終目標対応技術を確立する。

#### 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目指している。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う。

中間目標としては、技術コスト 3 円/Am の実証を設定した。

また、最終目標としては、技術コスト 3 円/Am 未満の実証を設定した。

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および 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 層および CeO<sub>2</sub> 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 CeO<sub>2</sub> 膜高速化、層数削減、MOD ベッド層の適正化などにより低コスト化を図る。

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、レーザパワー、周波数などの作製条件最適化、マルチターン数の増加による蒸着面積の増加、ヒータ改造などの装置改善、プルーム位置の最適化などを施し、代表的な例として、51 m 長で製造速度 10 m/h で  $I_c=524 \text{ A/cm-w@77 K,s.f.}$  の特性を得て 2.93 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。最終目標達成に向けては、15-30 m/h で  $I_c$  値が 500-600 A/cm-w@77 K,s.f. 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、マルチターン数の増加(5 ターン → 6 ターン)、ヒータ均熱板の構造の改良による基板送り速度の向上(60 m/h → 80 m/h)、発振レーザエネルギーの増加などを既に実施しており 30 m/h の高速製造下でも、材料収率向上(約 10 %増加)、蒸着率の増加(約 1.2 倍)が見られ、それに伴い  $I_c$  値も約 1.2 倍向上を確認している。これにより技術コストが約 15 %低減し、2.3 円/Am にまで下がった。1 円/Am 未満の超電導層の技術コスト達成のために、さらに高速化、高  $I_c$  化に重点をおいた研究開発を進めて、最終目標を達成する。

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などを行い、長さ 25 m、製造速度 5 m/h で  $I_c>370 \text{ A/cm-w@77 K,s.f.}$  の特性を得て、長さ以外は 3 円/Am の中間目標を達成できた。長さに関しては、中間層の欠陥低減などにより均一性を改善することで、今年度中に達成する見込みである。最終目標達成に向けては、10 m/h で 500 A/cm-w@77 K,s.f. 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、プロセスの高速化、特性を維持した厚膜化が必要である。原料溶液においては、Y 有機酸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、1 回塗布膜厚について 0.4  $\mu\text{m/coat}$  まで 2 MA/cm<sup>2</sup> 以上の  $J_c$  特性を維持した厚膜化に成功している。これは、Reel to Reel 方式マルチ仮焼炉に適用することで 10 m/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、製造速度 10 m/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更なる製造速度の高速化が期待できる。最終目標に向けては、2.5  $\mu\text{m}$  厚の線材を作製するための厚膜塗布技術が課題になると考えられる。平成 23~24 年度は均一

線材作製技術向上による厚膜塗布技術の確立を行うと共に、Reel to Reel 方式仮焼・本焼炉、Batch 方式本焼炉によるプロセス条件の最適化により最終目標をクリアする予定である。

また、新しい製法としてレーザ CVD の開発を行い、短尺ながら超電導層において結晶粒面内配向度 3.8 度を得た。これより、従来の PLD 法などの 100 倍の高速成膜を活かしたレーザ CVD による新たな線材作製方法の可能性が高まった。最終目標達成に向けては、本手法での可能性を見極め連続化、長尺化プロセス開発を進めることで極低コスト化へ貢献を目指す。

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 幅 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、現時点での歩留り率は 5 割以上である。

最終目標達成に向けては、拡散接合による実証を主体とし、さらに機器応用を目指して、交流応用のための低ロス化が可能な 5 mm 幅 10 分割のフィラメント溝加工線材での長尺化も開発していくことで最終目標達成へ貢献を目指す。

表 1. 1. 4-1 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

中間目標	研究開発成果	達成度
<p>(1) 線材特性の把握</p> <p>■電力ケーブル耐久試験 適正条件の決定</p>	<p>■「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。</p> <p>■電力ケーブル耐久試験適正条件を決定</p>	<p>中間目標達成</p>
<p>(2) 磁場中高 <math>I_c</math> 線材 作製技術開発</p> <p>① 30 A/cm-w @77 K, 3 T-50 m</p> <p>② 300 A/cm-w @65 K, 0.02 T-50 m</p>	<p>&lt;PLD&gt; ■33 A/cm-w@77K, 3 T- 51 m ■492 A/cm-w@77 K, 0.02 T- 51 m</p> <p>&lt;MOD&gt; ■14 A/cm-w@ 77 K, 3 T-20 m ■&gt;300 A/cm-w@65 K, 0.02 T- 50 m 極低コスト未達</p> <p>&lt;CVD&gt; ■20 A/cm-w@77 K, 3 T-短尺</p> <p>&lt;高 Birr&gt; ■BZO 添加 MOD 線で 65 T で高 <math>B_{irr}</math></p>	<p>中間目標達成</p>
<p>(3) 低損失線材 作製技術開発</p> <p>① 2 mm 幅 -300 A/cm-w-50 m</p> <p>② 5 mm 幅-5 分割-50 m -無分割に対し損失 1/5</p>	<p>&lt;PLD&gt; ■2 mm 幅-50 m-<math>I_c \geq 388</math> A/cm-w ■5 mm 幅・5 分割- 50m 損失 1/5 見通す</p> <p>&lt;MOD&gt; ■2 mm 幅-50 m-<math>I_c \geq 397</math> A/cm-w ■5 mm 幅・5 分割- 20 m 損失 1/5 見通す</p> <p>&lt;RABiTS-PLD&gt; ■2 mm 幅-28 m-<math>I_c \geq 310</math> A/cm-w</p> <p>&lt;加工&gt; ■スライビング: 5 mm 幅 5 分割- 50 m ■スリッター切断: 2 mm 幅-30 m -<math>I_c</math> 劣化 <math>\leq 10\%</math></p>	<p>中間目標ほぼ達成</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・目標①: 達成</li> <li>・目標②: コイルで損失 1/5 の確認が残</li> </ul>
<p>(4) 高強度高 <math>J_e</math> 線材 作製技術開発</p> <p>① 300A/cm-w-1GPa-50m</p> <p>② <math>J_e = 30</math> kA/cm<sup>2</sup>-50 m</p>	<p>■強加工 70, 80 <math>\mu</math>m ハステロイ基板線材 <math>I_{c, min} = 400</math> A/cm-w-<math>J_e &gt; 36</math> kA/cm<sup>2</sup> - 50 m -0.95 GPa (Ag30 <math>\mu</math>m 想定)</p>	<p>中間目標ほぼ達成</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・目標①: 強度の低温測定が残</li> <li>・目標②: 達成</li> </ul>
<p>(5) 低コスト・歩留向上 技術開発</p> <p>■3 円/Am の実証@50 m 例) PLD: <math>I_c = 420</math> A -15 m/h or 325 A 30 m/h MOD: 350 A 5 m/h</p>	<p>&lt;基板中間層&gt; ■MOD ベット層: MOD-YBCO 膜 で <math>J_c = 2.5</math> MAcm<sup>2</sup></p> <p>■IBAD-MgO 配向向上 ⇒セリア 500 nm <math>\Delta\phi(\text{CeO}_2) \sim 3^\circ</math></p> <p>■IBAD-MgO: 200 m/h-<math>\Delta\phi(\text{CeO}_2) &lt; 4^\circ</math></p> <p>&lt;PLD&gt; ■<math>I_c = 435</math> A@15 m/h-50 m, 524 A@10 m/h-50 m</p> <p>&lt;MOD&gt; ■<math>I_c = 370</math> A@5 m/h-25 m, 270 A@5 m/h-50 m</p>	<p>中間目標ほぼ達成</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・全ての中間層の条件の組合せ実証が残</li> <li>・PLD 超電導層: 達成</li> <li>・MOD 超電導層: 高速化、長尺化実証が残</li> </ul>

表 1.1.4-2 超電導電力機器用線材の最終目標達成への見込みのまとめ

研究テーマ	最終目標	達成へのアプローチ及び見込み
(1) 線材特性の把握	<p>■変圧器、SMES の機器使用環境に対する耐久性評価</p>	<p>ケーブルとは異なる環境条件あるいは線材構造において、経時変化評価と劣化限界を評価する。</p> <p>方法論が中間目標時期でほぼ確立すると共にケーブルとの共通項目もかなりあり、今回の成果が最終目標達成にも十分活かすことができる。</p>
(2) 磁場中高臨界電流( $I_c$ )線材作製技術開発	<p>① <math>I_c=50</math> A/cm-w @77 K, 3 T-200 m</p> <p>② <math>I_c=400</math> A/cm-w @65 K, 0.1 T-200 m</p>	<p>厚膜化技術とともにナノピン止め点導入技術を含めて <math>I_c=50</math> A@77 K, 3 T とコストとの両立を目指す。</p> <p>特に PLD 線材では目標特性の実証は済んでいる。</p>
(3) 低交流損失線材作製技術開発	<p>① 2 mm 幅 - <math>I_c=500</math> A/cm-w-200 m</p> <p>② 5 mm 幅-10 分割-100 m - 無分割に対し損失 1/10</p>	<p>均一塗布手法の開発や均一成膜技術開発の最適化を図る。また、高速化、高 <math>I_c</math> 化等の極低コスト化の統合を図る。更には、幅広基板利用による均一領域利用技術も選択肢として開発を行う。</p> <p>幅広成膜技術は一部実績もあり。</p>
(4) 高強度高工業的臨界電流密度( $J_c$ )線材作製技術開発	<p>① <math>I_c=500</math> A/cm-w - 1GPa-200 m</p> <p>② <math>J_c=50</math> kA/cm<sup>2</sup>-200 m</p>	<p>薄肉高強度金属基板の長尺化と高 <math>I_c</math> 化を統合するとともに高速化等の極低コスト線材化技術との統合を図る。</p> <p>高強度金属基板の基本技術は既に確立している。</p>
(6) 低コスト・歩留向上技術開発	<p>■ 3 円/Am の実証@200 m 例) PLD: 500~600 A-15~30 m/h MOD: 500 A 10 m/h</p>	<p>PLD 線材では、マルチターン数の増加、搬送速度の向上、発振レーザーエネルギーの増加などによる高速、高 <math>I_c</math> 化を図り、MOD 線材では、一回塗布厚増加の原料開発や減圧高速反応制御などで高速、高 <math>I_c</math> 化を図る。</p> <p>特に、PLD では既に効果を確認できている。</p>

#### 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。

「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、使用環境に即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。例えば、高湿度環境での劣化予測や通電、事故電流印可時の挙動に関して機構検討も含めて整理した。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、世界的にも初めての、実用上重要な成果が挙げられているといえる。

「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、MOCVD 法による YGdBCO 膜に Zr 添加した系で、3 T の磁場中で 50 A/cm-w@77 K の特性を報告している。TFA-MOD 法に関しては、AMSC 社が YDyBCO 膜で 3 T の下で推定 10 A/cm-w@77 K の  $I_c$  値を得ているとしている。後者の 2 つは長尺プロセスへの展開も可能な手法である。これに対し、本プロジェクトで得られた成果を比較すると、気相蒸着法（PLD 法、MOCVD 法等）に関しては、短尺で 3  $\mu$ m 厚の PLD 膜で 56 A/cm-w @77 K, 3 T の特性を、TFA-MOD 法でも 35 A/cm-w @77 K, 3 T を得ており、いずれも世界最高値である。一方、磁場中特性を目指した長尺線材の成果に関しては、ほとんど報告がなく、日本以外でこれに至っているのは、米国 SuperPower 社が唯一である。同社では、上記の MOCVD 法による YGdBCO+Zr 膜での長尺安定性の検討を行っている。77 K, 3 T での  $I_{c, min}$  特性としては報告されていないが、50 m 長線材で 14 A/cm-w 程度の  $I_c$  特性（推定）が報告されている。これに比べると、本プロジェクトの成果は、PLD 膜で 51 m 長線材で 33 A/cm-w@77 K, 3 T の特性を達成していることから、世界的にみても飛び抜けて高い特性を実現しているといえる。

「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に至っている機関は少なく、SuperPower 社のみである。しかしながら、短尺で 4 mm 幅 5 分割線材（フィラメント幅<0.8 mm）で損失 1/5 は確認しているものの長尺線材での損失低減に関する報告はない。日本における成果と比較すると、短尺では超電導応用基盤プロジェクトの成果として、既に 10 mm 幅 20 分割線材（フィラメント幅<0.5 mm）で損失 1/20 を確認している。また、長尺線材に関して



も、超電導応用基盤技術開発プロジェクトにおいて 5 mm 幅 5 分割溝加工—単長 7 m 線材を総長 70 m 使用したコイルで損失 1/5 を確認するとともに、本プロジェクト成果として PLD 線材では 50 m、TFA-MOD 線材でも 20 m 長線材において 5 mm 幅 5 分割溝加工線材での交流損失 1/5 への見通しを得ていることから、この分野でも追従を許さないほど技術的に先行しているといえる。

「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  $\mu\text{m}$  厚の Hastelloy TR 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  $\mu\text{m}$  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、世界的にコスト計算を公表し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、研究開発マネージメントの海外動向で紹介した  $I_c \times L$  積がある。同指標により比較すると、SuperPower 社が、1065 m 長で 282 A/cm-w@77 K,s.f. を有する線材の作製を報告しており、現在の世界最高値の  $I_c \times L = 300 \text{ kAm}$  を報告している。AMSC 社も、TFA-MOD 法線材で、500 m—250 A/cm-w@77 K,s.f. 線材 ( $I_c \times L = 125 \text{ kAm}$ ) を報告している。最近では、韓国 SuNAM 社が反応共蒸着法 (Reactive Co-evaporation: RCE) で、200 m で 298 A/cm-w@77 K,s.f. の平均  $I_c$  を有する線材 ( $I_c \times L = 300 \text{ kAm}$ ) を報告している。これらの世界動向に対し、日本では、フジクラが IBAD-GZO 線材で 504 m-350 A/cm-w@77 K,s.f. ( $I_c \times L = 176 \text{ kAm}$ ) を得ているのが最高値であり、世界的に見ると上述 SuperPower の後塵を拝している(第 2 位)ことになる。昭和電線ケーブルシステムも TFA-MOD 法により 500 m-310 A/cm-w@77 K,s.f. ( $I_c \times L = 155 \text{ kAm}$ ) を得ており、この手法の線材としては、上述 AMSC 社を上回っており世界最高レベルといえる。

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"> <li>劣化挙動については系統的に評価した例はな</li> </ul>	必要な負荷に対する試験を実施 ↓ <b>世界初の系統的な成果</b>
(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) $I_c=234$ A/cm-w@75 K, 1T SuperPower(米国) : IBAD-MOCVD 短尺 $I_c=50$ A/cm-w@77 K, 3 T 50 m $I_c=14$ A/cm-w@77 K, 3 T AMSC (米国) : RABiTS-TFA-MOD 短尺 $I_c=10$ A/cm-w@77 K, 3 T	短尺 $I_c=56$ A/cm-w@77 K, 3 T(PLD) 50 m $I_c=33$ A/cm-w@77 K, 3 T(PLD) 短尺 $I_c=35$ A/cm-w@77 K, 3 T(MOD) 12 m $I_c=14$ A/cm-w@77 K, 3 T(MOD) ↓ <b>世界最高の磁場特性</b>
(3) 低交流損失 線材作製技術開発	SuperPower(米国) : IBAD-MOCVD 短尺 4 mm 幅 5 分割—損失 1/5 長尺 報告なし	短尺 10 mm 幅 20 分割—1/20 7 m 5 mm 幅 5 分割—1/5 (超電導応用基盤プロ成果) 50 m-5 mm 幅 5 分割(PLD) 20 m-5 mm 幅 5 分割(MOD) の見通し ↓ <b>世界的に先行した技術</b>
(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 $\mu$ m 厚ハステロイ金属基板 ⇒800 MPa AMSC (米国) : クラッド結晶粒配向金属基板 ⇒426 MPa	70, 80 $\mu$ m ハステロイ基板線材 $I_{c,min}=400$ A/cm-w- $J_c>36$ kA/cm <sup>2</sup> · 50 m -900 GPa (Ag30 $\mu$ m 想定) ↓ <b>強度は世界最高</b>
(5) 低コスト・歩留向上 技術開発	SuperPower(米国) : IBAD-MOCVD 1065 m 長- $I_c=282$ A/cm-w@77 K, s.f. ( $I_c \times L=300$ kAm) AMSC (米国) : RABiTS-TFA-MOD 500 m- $I_c=250$ A/cm-w@77 K, s.f. ( $I_c \times L=125$ kAm)	フジクラ : IBAD-PLD 504 m- $I_c=350$ A/cm-w@77 K, s.f. ( $I_c \times L=176$ kAm) 昭和電線 : IBAD-TFA-MOD 500 m- $I_c=310$ A/cm-w@77 K, s.f. ( $I_c \times L=155$ kAm) ↓ 長尺特性でリード 長さは米国が先行

### 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カ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る。

このため、前期 3 カ年においては、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もしくは達成する見込みである。さらにこれらの成果に基づき標準化規范文書を作成し、後半 2 カ年の最終目標を達成する見込みである。

以下に、個々の実施項目に対する目標達成の状況および見込みについて記す。

#### 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)

超電導線関連技術標準化では、Y 系を含む超電導線を実用超電導線とした超電導線並びにその試験方法の規格素案を作成済みである。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っており、中間目標を達成する見込みである。後半 2 年においては国際合意を背景として日本提案の国際規格素案を見直すことで最終目標を達成する見込みである。以下に小項目に対する成果概要を記す。  
(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。
- ・ 超電導線小委員会において、各国のコメントを反映して「超電導線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、平成 21 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。

#### 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）

超電導電力ケーブル関連技術標準化では、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、中間目標を達成する見込みである。後半 2 ヶ年においては、国際合意を確立することで最終目標を達成する見込みである。以下に小項目に対する成果概要を記す。

（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」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。

#### 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）

超電導電力機器関連技術標準化等では、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

一タ等の体系化を行っており、中間目標は達成済みある。後半2年においては、これらの成果をベースとした標準化素案の作成と冷却システムの規制緩和の検討を行い、最終目標を達成する見込みである。以下に小項目に対する成果概要を記す。

(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。

以上の成果を表 1.1.5 にまとめて示す。

表 1.1.5 超電導電力機器の適用技術標準化の成果全体のまとめ

項目	目標 (H22 年度達成)	これまでの成果	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「超電導線の国際標準化」の合意醸成に努めた	達成見込
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 などとの 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 と連携してにおいて国際標準化合意の醸成に努めた	達成見込
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