

「イットリウム系超電導電力機器技術開発」
中間評価報告書

平成22年11月

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
研究評価委員会

平成22年11月

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
理事長 村田 成二 殿

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
研究評価委員会 委員長 西村 吉雄

NEDO技術委員・技術委員会等規程第32条の規定に基づき、別添のとおり
評価結果について報告します。

目次

はじめに	1
分科会委員名簿	2
審議経過	3
評価概要	4
研究評価委員会におけるコメント	7
研究評価委員会委員名簿	8
第1章 評価	
1. プロジェクト全体に関する評価結果	1-1
1. 1 総論	
1. 2 各論	
2. 個別テーマに関する評価結果	1-19
2. 1 超電導電力貯蔵システム（SME S）の研究開発	
2. 2 超電導電力ケーブルの研究開発	
2. 3 超電導変圧器の研究開発	
2. 4 超電導機器用線材の研究開発	
2. 5 超電導電力機器の適用技術標準化	
3. 評点結果	1-40
第2章 評価対象プロジェクト	
1. 事業原簿	2-1
2. 分科会における説明資料	2-2
参考資料1 評価の実施方法	参考資料 1-1

はじめに

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構においては、被評価プロジェクトごとに当該技術の外部専門家、有識者等によって構成される研究評価分科会を研究評価委員会によって設置し、同分科会にて被評価対象プロジェクトの研究評価を行い、評価報告書案を策定の上、研究評価委員会において確定している。

本書は、「リットリウム系超電導電力機器技術開発」の中間評価報告書であり、第25回研究評価委員会において設置された「リットリウム系超電導電力機器技術開発」（中間評価）研究評価分科会において評価報告書案を策定し、第27回研究評価委員会（平成22年11月26日）に諮り、確定されたものである。

平成22年11月
独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
研究評価委員会

「リットリウム系超電導電力機器技術開発」

中間評価分科会委員名簿

(平成22年9月現在)

	氏名	所属、役職
分科会長	しまだ りゅういち 嶋田 隆一*	東京工業大学 原子炉工学研究所 教授
分科会長 代理	もり しゅんすけ 森 俊介	東京理科大学 理工学部 経営工学科 教授
委員	きた りゅうすけ 喜多 隆介	静岡大学 創造科学技術大学院 創造科学技術研究部 教授
	さとう よしひさ 佐藤 義久	大同大学 工学部 電気電子工学科 教授
	しもやま じゅんいち 下山 淳一*	東京大学大学院 工学系研究科 応用化学専攻 准教授
	みうら おおすけ 三浦 大介	首都大学東京大学院 理工学研究科 電気電子工学専攻 准教授
	むろやま せいいち 室山 誠一	株式会社 NTTファシリティーズ総合研究所 通信エネルギー技術本部 エネルギー技術部 部長

敬称略、五十音順

注*：実施者の一部と同一大学であるが、所属部署が異なるため（実施者：東京工業大学フロンティア創造共同研究センター、東京大学大学院工学系研究科附属原子力工学研究施設）「NEDO 技術委員・技術評価委員規程(平成22年7月1日改正)」第34条（評価における利害関係者の排除）により、利害関係はないとする。

審議経過

- 第1回 分科会（平成22年9月1日）

- 公開セッション

- 1. 開会、分科会の設置、自己紹介
 - 2. 資料の確認、分科会の公開について
 - 3. 評価の実施方法と評価報告書の構成について
 - 4. プロジェクトの概要説明及び質疑
 - 5. プロジェクトの詳細説明及び質疑

- 非公開セッション

- 6. 全体を通しての質疑

- 公開セッション

- 7. まとめ・講評
 - 8. 今後の予定
 - 9. 閉会

- 現地調査会（平成22年8月27日）

- 財団法人 国際超電導産業技術研究センター（東京都江東区）

- 第27回研究評価委員会（平成22年11月26日）

評価概要

1. 総論

1) 総合評価

地球環境保護の推進、再生可能エネルギーによる発電装置の大量導入、省エネルギーの推進、電力系統の安定化の必要性など社会的要請が強い超電導電力機器開発において、線材の開発から電力機器の開発まで総合的に取り組んでおり、超電導線材特性の性能向上、低コスト化を進めながら、その実績を基に応用機器開発へと迅速に展開し、現在までに開発されている技術の多くが世界的にもトップレベルなものであることは、高く評価できる。

また、その製造プロセスや歩留まりなどにも立ち入って開発をメーカーと協力して行い、線材の評価方法など、必要な技術が同時進行しており、全体開発プロジェクトのバランスがとれている。

但し今後は、これまでのように検討課題全てを等価に推進するのではなく、より効果的な、産業として日本が世界をリードできる礎となる課題を抽出し、それを重点的に推進すべきと考える。

一方、実用化の観点からは、2020年頃に始まる大規模な電力設備の更新時期をリチウム系超電導電力機器が実用化されるチャンスと捉え、それに向けた現実的な開発を行っていることは理解できるが、単なる機器のリプレースになっている。今後、超電導技術がさらに飛躍するためには、超電導技術が無ければ成り立たないという強いニーズを開拓しなければならないが、この技術は、日本だけで完結すべきものではなく、世界、特に直流送電とスマートグリッドの効果の大きい諸国に寄与が大きい。ただ、こうしたプロジェクトを本プロジェクトだけで対応するのは限界があるため、他の超電導技術開発プロジェクトと連携して進めることが望まれる。

2) 今後に対する提言

海外の動向も十分認識した上で世界のトップレベルの機器開発が達成されるよう研究開発を進めて欲しい。広く社会に開発成果を広めるためには、製品化、実機化が必要で、普及するためのチームを設置して、開発の方向など出口イメージの協議を進めるべきである。

また、遠未来の産業応用に向けて、日本が永くリードし続けられるような高度な技術集積が必要で、ニーズが高く、かつ超電導産業の根幹を担う研究課題に対して、研究費を集中させていくべきである。今後、超電導機器の優位性が発揮でき、超電導でしかできない適用先の調査研究を充実し、研究開発課題・市場規模を明確化し

てほしい。

さらに、インフラの海外進出はこれまで限られた成功例しかないが、超電導は世界に誇れる技術なので是非とも海外市場で成功したい。2020年目標を達成してからの売り込みでは韓国や中国に先を越される懸念が強く、海外市場調査や売り込みのタイミングや技術要件などマーケティングを視野に入れるべきである。

2. 各論

1) 事業の位置付け・必要性について

エネルギーイノベーションの一分野の技術として超電導利用は大きな期待があるが、技術的には、多くの課題があり、研究開発リスクも高く、民間活動のみでの実施よりも効率的に成果が得られていること、さらに共通基盤的な技術開発が進められているなど、NEDOの事業として妥当な内容である。

また、早期に実用機器を開発することにより、世界における当分野の技術先導性を確保し、「ものづくり」につなげるため、本事業の目的は妥当と考える。

一方、世界が必要とするエネルギー技術の超電導技術でトップである日本がその責任を果たす意味でも海外展開の検討が必要である。再生可能エネルギーとのグローバルなネットワーク化なども夢物語では無く、ITER（国際熱核融合実験炉）などのような国際協力を視野に入れて、本事業の波及効果の検討・調査を引き続き充実して進めてほしい。

2) 研究開発マネジメントについて

社会的要請やこれまでの技術開発経緯を踏まえ、研究開発目標を設定しているとともに、電力送配電設備の更改時期を踏まえた着実な需要を見据え、技術開発スケジュールを策定している。さらに研究開発の到達度についてはコストを含めた指標を導入し、実用化への到達度を定量化している。また、従来 of 線材開発に絞ったサイエンスよりの開発体制から、一歩進めて製品化の出口を見据えて標準化やロス低減、高密度化など技術開発がなされており、産・学・官の協力体制がしかれ、PLの強いリーダーシップのもと適切にマネジメントが実施されている。

一方、この3年間の研究費配分をみると、課題ごと、年度ごとのメリハリがなく、重点的に研究開発すべき項目には予算的な措置を強化するなど、もっとダイナミックな予算配分を行っても良い。

さらに、国際的な情勢や競合技術の動向は、刻々と変化しており、今後、それらに合わせた目標の修正・課題の絞り込みを行う柔軟な対応が必要である。

3) 研究開発成果について

世界初、世界最高の特性が各要素技術において達成され、すべての研究開発中間目標について達成済または今年度内達成見込みであり、順調に進捗していると評価できる。また、達成された中間目標の成果は最終目標に十分繋がるものであることから、最終目標の達成可能性はかなり高いと判断できる。

しかし、線材の量産化・歩留まり改善と低コスト化の実現と、剥離の課題解決が最も肝要であり、これらが達成できないと機器開発は空転する。

また、中間レベルであることから特許数が少ないことは仕方ないが、特許マップを作成し、重点分野の抽出など特許戦略についてもう少し明確にすべきである。主要技術については周辺、関連特許を合わせて海外出願するなどにより、実用機器製造時における我が国の技術優位性を確保する必要がある。

さらに、成果の普及に関して、折角開発された技術を埋もらせることのないよう、一般への超電導技術の啓蒙活動をもう少し強化すべきであり、またシームレスに技術移管が民間になされるようなシステムを構築して頂きたい。

4) 実用化、事業化の見通しについて

実用化に向け産業技術として適用の可能性、適用までの解決すべき課題と解決の指針は明確にされている。本プロジェクト後半には重電機器メーカーの参画が予定されていることから、本プロジェクトの成果の実用化可能性は期待できる。高温超電導を応用した機器が実用化されれば、地球環境に及ぼす効果は極めて大といえ、技術的、社会的波及効果は大きい。

一方、実用化、事業化を達成するには、一層のコスト低減に対する開発が必要である。特に既存設備の更改を行うためには、コスト、信頼性などについての既存技術との競争が激烈であることは容易に推察されるため、超電導の応用が圧倒的に有利なストーリーが描かれているべきである。

これが無ければ成り立たないといった強いニーズ、競合技術との比較検討、波及効果等について、コストや信頼性も含めて今後更なる市場調査が必要である。

研究評価委員会におけるコメント

第27回研究評価委員会（平成22年11月26日開催）に諮り、了承された。研究評価委員会から以下のコメントが出された。

イットリウム系超電導電力機器技術開発（中間評価）

- 最初の実証／実用化は国内に拘泥する必要は無く、新技術導入に積極的に資金を有する外国でも良いのではないか。海外で早期に実証／実用化し、その実績を踏まえて日本へ戻すような進め方も検討すべき。

研究評価委員会

委員名簿（敬称略、五十音順）

職 位	氏 名	所 属、役 職
委員長	西村 吉雄	学校法人早稲田大学大学院 政治学研究科 (科学技術ジャーナリスト養成プログラム) 客員教授
委員長 代理	吉原 一紘	オミクロンテクノロジージャパン株式会社 最高顧問
委員	安宅 龍明	オリンパスビジネスクリエイツ株式会社 事業企画本部 戦略探索部 探索2グループ シニアマネージャー
	伊東 弘一	学校法人早稲田大学 理工学術院総合研究所 客員教授（専任）
	稲葉 陽二	日本大学 法学部 教授
	大西 優	株式会社カネカ 顧問
	尾形 仁士	三菱電機エンジニアリング株式会社 相談役
	小林 直人	学校法人早稲田大学 研究戦略センター 教授
	小柳 光正	東北大学未来科学技術共同研究センター 教授
	佐久間一郎	国立大学法人東京大学大学院 工学系研究科 精密機械工学専攻 教授
	菅野 純夫	国立大学法人東京大学大学院 新領域創成科学研究科 メディカルゲノム専攻 教授
	架谷 昌信	愛知工業大学 工学部機械学科 教授・総合技術研究所所長
	宮島 篤	国立大学法人東京大学 分子細胞生物学研究所 教授

第1章 評価

この章では、分科会の総意である評価結果を枠内に掲載している。なお、枠の下の「○」「●」「・」が付された箇条書きは、評価委員のコメントを原文のまま、参考として掲載したものである。

1. プロジェクト全体に関する評価結果

1. 1 総論

1) 総合評価

地球環境保護の推進、再生可能エネルギーによる発電装置の大量導入、省エネルギーの推進、電力系統の安定化の必要性など社会的要請が強い超電導電力機器開発において、線材の開発から電力機器の開発まで総合的に取り組んでおり、超電導線材特性の性能向上、低コスト化を進めながら、その実績を基に応用機器開発へと迅速に展開し、現在までに開発されている技術の多くが世界的にもトップレベルなものであることは、高く評価できる。

また、その製造プロセスや歩留まりなどにも立ち入って開発をメーカーと協力して行い、線材の評価方法など、必要な技術が同時進行しており、全体開発プロジェクトのバランスがとれている。

但し今後は、これまでのように検討課題全てを等価に推進するのではなく、より効果的な、産業として日本が世界をリードできる礎となる課題を抽出し、それを重点的に推進すべきと考える。

一方、実用化の観点からは、2020年頃に始まる大規模な電力設備の更新時期をイットリウム系超電導電力機器が実用化されるチャンスと捉え、それに向けた現実的な開発を行っていることは理解できるが、単なる機器のリプレースになってしまっている。今後、超電導技術がさらに飛躍するためには、超電導技術が無ければ成り立たないという強いニーズを開拓しなければならないが、この技術は、日本だけで完結すべきものではなく、世界、特に直流送電とスマートグリッドの効果の大きい諸国に寄与が大きい。ただ、こうしたプロジェクトを本プロジェクトだけで対応するのは限界があるため、他の超電導技術開発プロジェクトと連携して進めることが望まれる。

〈肯定的意見〉

- 目標設定の明確さ、プロジェクト推進状況、現時点での成果などからみて、非常によくマネジメントされ、中間目標をほぼ満足できる成果が上がっていると判断できる。特に線材の劣化挙動を系統的に評価し、ケーブル耐久試験適正条件を明確化した点は、今回開発対象の全装置へ適用可能であり、装置実用化に向けた重要な成果のひとつとして特筆すべきと考える。
- 期待されながらなかなか実用化の難しかった超伝導の電力システム利用について確実に進捗が見られる。開発体制も、実用化をにらんだ地に足のついたものとなっている。特に、実用化のための期限を明確にさだめ、これから逆算する形で開発を進めているやり方は、これまでの NEDO プロジェクトとは一線を画すものとなっている。

- イットリウム系超電導材を導入するために必要な開発を、先回りして行っている。その製造プロセスや歩留まりなどにも立ち入って開発をメーカーと協力して行っている。線材の評価方法など、必要な技術が同時進行（共進化）していると言える。全体開発プロジェクトのバランスがとれている。
- 線材の開発から電力機器の開発まで総合的に取り組んでいる点、組織的な取り組みを高く評価します。
- 中間目標に対して大半の項目で達成もしくは年度内に達成可能であることを感じさせる成果を挙げており、順調に進捗していることがうかがえた。また、現在までに達成されている各数値・性能・技術の多くが世界的にもトップレベルなものであることを認めた。
- 超電導線材特性の性能向上、低コスト化を進めながら、その実績を基に応用機器開発へと迅速に展開し、中間目標値の達成および達成見込みがついていること、また全ての応用機器で世界トップレベルの性能が獲られていることは高く評価でき、またこのことから本プロジェクトが極めて順調に進んでいると判断できる。特に、SMESにおいては実用機がイメージできる具体的な性能評価が着実に進んできている点、超電導ケーブルにおいては基本諸特性をクリアし、変圧器においては限流機機能による高機能化がなされている点、また線材開発においては量産化を視野に入れた高性能化低コスト化を加速している点などが大きく評価できる。
- 機器の要請に応じた線材開発に関して目標の I_c と線材長の中間目標値を達成していることは地道な努力の賜物であり十分に評価できる。また変圧器、SMES も十分とは言えないがそれなりの成果がでている点は評価できる。本プロジェクトは我が国の超伝導の工学応用に関する中心的な位置を占めており、その実用化の可否がこの分野にとって非常に大きな意味を持つ。その意味で着実な成果が達成されており、今後さらに目標に向かって努力して頂きたい。

〈問題点・改善すべき点〉

- この技術は、日本だけで完結すべきものではなく、世界、特に直流送電とスマートグリッドの効果の大きい諸国に寄与が大きい。日本からこのようなインフラ市場に貢献することは、今後の日本の産業の進むべき道と考える。その意味で、日本の送電システムのリプレースはあくまで第一ステップであってその次の段階を含めた戦略的視点がやや不足しているように思える。
- 開発の出口に魅力が無いのが問題だ。企業家が飛びつくほどの魅力あるものになっていない。イノベーションは、死の谷を越える際の向こう側の目標がありきたりなものでは、駄目である。それが無ければ成り立たないと

というような強いニーズを開拓しなければならないが、本プロジェクトは、実機の市場を開拓するのではなく、拓くのを「待っている」と言った感じである。

- 目標設定に対して順調な進捗状況ではあるが、多くの機器が既存の機器の置き換えを重要な応用分野と捉えているが（まずの目標としては妥当ではあるが）、多少物足りないと感じる。超電導技術でしか実現できない市場が無いのか、更なる市場開拓についてもう少し検討を続けてもらいたい。国外の市場開拓についても積極的に検討すべきである。
- 線材の交流ロスの低減に関して、レーザースクライビング法による分割線材を試みているが、各セグメントの I c の劣化が大きいのが気かりである。また、SMES や変圧器用の線材に関してさらに低損失化が求められると思うが、この方法以外に損失を低減する手法についても新たに考案して頂きたい。また十分な線材長が得られない場合のジョイント方法についても今後検討して頂きたい。さらに線材、機器両者の作製コストの低減が今後期待されている。
- 2020 年頃に始まる大規模な電力設備の更新時期をイットリウム系超電導電力機器が実用化されるチャンスと捉え、それに向けた現実的な開発を行っていることは理解できます。しかし、それ故、単なる機器のリプレースになってしまっており、超電導電力機器としての魅力に欠ける開発仕様になってしまっている。今回の現実的な目標に加え、その先の超電導電力機器が本来目指すべき大きな夢を明示すべきではないでしょうか。
- 中間目標、最終目標数値・性能は本プロジェクト開始時に設定されたものであるが、これらが達成されたところで、即、超電導電力機器開発に結び付くものは少ない。これまでの 2 年半のように検討課題全てを等価に推進するのではなく、より効果的な、産業として日本が世界をリードできる礎となる課題を抽出し、それを重点的に推進すべきと考える。

〈その他の意見〉

- ・ 数多くの目標数値に縛られたプロジェクトであるため、それら達成に向けての堅実な研究開発を積み重ねざるを得ないことは理解できる。しかし、これは大きなブレークスルーの発見を妨げるものではなく、目標の枠を超えた突出した成果も追究してほしい。
- ・ NEDO のプロジェクト全体に言えることだが、実施者のイノベーション革命に対する本気度が低く、例えば世界記録を出すための研究に終わっている。

- ケーブル、変圧器、SMES の 3 点セットでなくても、単体で十分に機能するように実用化して頂きたい。そうすれば導入可能性は国内だけでなく海外にも広がる可能性が大きい。
- まずは交流を意識した開発となっているが、ヨーロッパ、ロシア、米国、中国、アフリカ、中東、アジアなど、いずれの国も電力貿易は視野に含まれている。その際の次世代の高電圧直流送電のための技術開発はどの程度必要となるのか。また、前回のプロジェクトで挙げられた課題(電流の振動等)はどの程度解決したのか。このような点がより明確になるべきである。

2) 今後に対する提言

海外の動向も十分認識した上で世界のトップレベルの機器開発が達成されるよう研究開発を進めて欲しい。広く社会に開発成果を広めるためには、製品化、実機化が必要で、普及するためのチームを設置して、開発の方向など出口イメージの協議を進めるべきである。

また、遠未来の産業応用に向けて、日本が永くリードし続けられるような高度な技術集積が必要で、ニーズが高く、かつ超電導産業の根幹を担う研究課題に対して、研究費を集中させていくべきである。今後、超電導機器の優位性が発揮でき、超電導でしかできない適用先の調査研究を充実し、研究開発課題・市場規模を明確化してほしい。

さらに、インフラの海外進出はこれまで限られた成功例しかないが、超電導は世界に誇れる技術なので是非とも海外市場で成功したい。2020年目標を達成してからの売り込みでは韓国や中国に先を越される懸念が強く、海外市場調査や売り込みのタイミングや技術要件などマーケティングを視野に入れるべきである。

〈今後に対する提言〉

- ・ 遠未来の産業応用に向けて、日本が永くリードし続けられるような技術を残したい。そのためにも高度な技術集積が必要で、ニーズが高く、かつ超電導産業の根幹を担う研究課題に対して、研究費を偏らせていくべきである。これには、線材性能、線材生産技術が該当すると思われる。機器開発についてはニーズが不透明なものも含まれており、また線材性能の変化によって設計仕様等が変わるものが多い。課題の一部については縮小または中断が検討されるべきである。
- ・ 現在の開発ペースを維持しながら、他国の動向も十分認識した上で世界のトップレベルの機器開発が達成されるよう研究開発を進めて欲しい。大型の機器開発については、研究予算を追加して、小型機器と平行して、もう少し加速して開発を進めてもいいのではないかと思われる。
また、これまで種々のデバイス開発においてすばらしい性能を持ちながら、実用化には至らなかったケースが過去に多く見られる。最終目標の機器性能が達成され、実用機が完成した際に、本当にユーザーが使ってくれるかどうか、今後更なる市場調査（例えば、ユーザーの意識調査など）が必要と思われる。さらに、高温超電導機器の信頼性については未知の部分が多いので、今後十分な信頼性の確保を機器メーカーと十分協力して進めて欲しい。

- 多くの開発研究の失敗は、研究成果を実機、商品化する企画能力の低さから来ている。日本企業の中央研究所はここで失敗しているが、中央研究所を NEDO が 肩代わりしている図である。広く社会に開発成果を広めるためには、製品化、実機化が必要で、普及するためのチーム（営業チームのような）を設置して、開発の方向など出口イメージの協議に参加するべきである。イノベーションは新規な市場を開拓、または古い市場を壊さなければならない。NEDO が既存の大手会社が開発委託するところに、すでにこの矛盾が表れている。大手会社は古い市場にしがみついているのでイノベーションの主役にならない方がよい。
- 限られた期間内に達成すべき現実的な目標に加え、本プロジェクトの先にある超電導電力機器が本来目指すべき大きな目標を分けて明示して頂きたい。少なくとも将来目指すべき方向性を参考意見・目標でもよいので明示願いたい。
- 機器に使用する線材の特性を使用温度、磁場で整理してみしてほしい。最終的にはそれらの特性と機器とのマッチングや線材の歩留まりを含めた作製コストとを精査して使用線材の選定を行う必要がある。
- 国内送電線網のリプレースという具体的な目標と時期が設定されており、それから逆算した開発スケジュールが立てられている点は大変足が地についている印象である。しかしその反面、本技術が最も必要とされるアジア発展地域への売り込みがあまり視野に入っていない様に思われる。2020 年目標を達成してからの売り込みでは韓国や中国に先をこされる懸念が強い。海外市場調査や売り込みのタイミングや技術要件などマーケティングを視野に入れるべきである。
- 変圧器やケーブルなどの当面の適用先として、既存設備の更改需要を見込んでおり堅実な実用化開発が行われていると考えられるが、超電導機器の優位性を発揮するためにも、超電導でしかできない、という適用先の検討も忘れずに進めてほしい。

〈その他の意見〉

- 線材、機器開発においては性能の向上とともに信頼性の獲得が不可欠である。トップデータの更新と同時に、生産技術の質の向上も図られるべきで、その実態や課題については正直に公開されることが望ましく、構成メンバー外からアイデアや意見を募ることも有効と考える。
- 標準化は好ましい試みだが、製品化、普及してこそ意味がある。それを目的化して何になるのか。標準化をビジネスにどう結び付けるか、国益になるのかが分かっていない。超電導技術は、世界 1 になっている。諸外国の興味は薄くなっておりその反映で日本も興味を失いつつある。

- インフラの海外進出はこれまで限られた成功例しかないが、超電導は世界に誇れる技術なので是非とも海外市場で成功したい。送電系統インフラは今後の世界に不可欠な技術であり、銅資源の有限性を考えると日本の主力国際商品となりうる潜在性がある。世界市場への売り込みを念頭においた戦略的な取組みが望まれる。

1. 2 各論

1) 事業の位置付け・必要性について

エネルギーイノベーションの一分野の技術として超電導利用は大きな期待があるが、技術的には、多くの課題があり、研究開発リスクも高く、民間活動のみでの実施よりも効率的に成果が得られていること、さらに共通基盤的な技術開発が進められているなど、NEDOの事業として妥当な内容である。

また、早期に実用機器を開発することにより、世界における当分野の技術先導性を確保し、「ものづくり」につなげるため、本事業の目的は妥当と考える。

一方、世界が必要とするエネルギー技術の超電導技術でトップである日本がその責任を果たす意味でも海外展開の検討が必要である。再生可能エネルギーとのグローバルなネットワーク化なども夢物語では無く、ITER（国際熱核融合実験炉）などのような国際協力を視野に入れて、本事業の波及効果の検討・調査を引き続き充実して進めてほしい。

〈肯定的意見〉

- いままでに日本が世界をリードしてきた HTS の特性向上の歴史を踏まえ、その実用化においては特にエネルギーと環境という視点で考えると NEDO が推進してしかるべきと思う。しかしながら実用化を必ず行う、という強い信念をもった取り組みが今後、必要とされる。その際、内需拡大のみならず、新幹線やリニアのように世界各国に技術輸出することを真剣に考え、その戦力を練って頂きたい。
- エネルギーイノベーションの一分野の技術としては着実な進歩を示している。また、民間活動のみでの実施よりも効率的に成果が得られていること、さらに共通基盤的な技術開発が進められているなど、NEDO の事業として妥当な内容である。ここまで長くやってきた下地があつてであるが、この程度の予算で、予算並みには十分成果が上がっていると言える。
- 超電導利用は古くから大きな期待がありながら進展に時間がかかった。リスクも大きい課題であるので、国家的な支援が不可欠である。よって NEDO 事業として妥当である。
- エネルギー問題の解決や、ものづくり分野の強化の観点からも NEDO 事業として十分妥当である。
- 既存の電力機器のリプレースを目指すという具体的な開発目標、スケジュールは妥当である。
- 地球環境保護の推進、再生可能エネルギーによる発電装置の大量導入、省エネルギーの推進、電力系統の安定化の必要性など社会的要請が強いことおよび技術的には、多くの課題があり、研究開発リスクも高いことから、民間のみでの技術開発は困難が多いと考えられる。そのため NEDO の事

業として行うことが妥当なプロジェクトと考える。

内外で活発に技術開発が進められており、本技術開発は熾烈な開発競争下にあると考えられる。また、早期に実用機器を開発することにより、世界における当分野の技術先導性を確保し、「ものづくり」につなげるため、本事業の目的は妥当と考える。

〈問題点・改善すべき点〉

- 実用化のめどが立つ前にユーザーである電力会社との間で導入に関する細部にわたるきちんとしたコンセンサスを形成しておく必要がある。現在立ち遅れている風力発電のようなことの無いようにして頂きたい。
- 実用化が見えてきた。電気事業者も開発に参加しているため、国内市場における問題は詳細に把握されている。しかし海外市場への売り込みには、さらに詳細な市場調査が必要である。早期にどのような技術開発課題が必要かを調査する体制が望まれる。
- 今後大型超電導応用機器開発が進められていくが、予算規模が他国と比べて妥当かどうか十分検討すべきである。
- イットリウム系超電導線の開発の現状に大きく依存した超電導電力機器の開発になっている感がある。もう少し電力機器側から超電導線材への要求仕様が強く出されることを希望する。
- 高温超電導技術開発は、基盤技術開発から応用技術開発に変化しつつあり、徐々に共通的な研究課題から機器個別のものにシフトしている。個別の課題においては公開が適当でないノウハウの蓄積も多く、民間企業や電力会社それぞれが主体となって取り組むべきと考える。その意味で NEDO 事業として実施する妥当性は今後薄まる。また、NEDO 事業の課題設定や数値目標は事業開始前には妥当なものであったと思われるが、国際的な情勢や競合技術の動向は刻々と変化しており、それらに合わせた目標の修正、課題の絞り込みを行う柔軟な対応が必要である。
- 世界が必要なエネルギー技術である超電導技術、日本がトップで、その責任が果たせていない。日本がリードしなくてどこがやるのだ、と言うくらいの気概が無い。海外展開を全然考えていない。海外政府にも参画させるべきである。

〈その他の意見〉

- 超電導にしかできない、画期的なシナリオ、例えば北沢先生が提案された再生可能エネルギーとのグローバルなネットワーク化なども夢物語では無くなってきている。ITER などのような国際協力を視野に入れ、是非検討して頂きたい。
- 海外の研究機関にも門戸を開き, ITER のような国際プロジェクトにするべきである。
- NEDO の超電導事業については用いる超電導物質を限定したものばかりで、なかでも Y 系に巨額の研究費が長期にわたって投下されてきた。超電導技術開発では超電導物質に依存しない共通的な要素が多い。特に日本の超電導技術の優位性を高めるためには、Y 系より量産性、歩留まり、応用実績にはるかに優れる Bi 系線材をケーブル実証以外の課題にも積極的に取り込んでいくことを考えるべきである。

2) 研究開発マネジメントについて

社会的要請やこれまでの技術開発経緯を踏まえ、研究開発目標を設定するとともに、電力送配電設備の更改時期を踏まえた着実な需要を見据え、技術開発スケジュールを策定している。さらに研究開発の到達度についてはコストを含めた指標を導入し、実用化への到達度を定量化している。また、従来の線材開発に絞ったサイエンスよりの開発体制から、一歩進めて製品化の出口を見据えて標準化やロス低減、高密度化など技術開発がなされており、産・学・官の協力体制がしかれ、PLの強いリーダーシップのもと適切にマネジメントが実施されている。

一方、この3年間の研究費配分をみると、課題ごと、年度ごとのメリハリがなく、重点的に研究開発すべき項目には予算的な措置を強化するなど、もっとダイナミックな予算配分を行っても良い。

さらに、国際的な情勢や競合技術の動向は、刻々と変化しており、今後、それらに合わせた目標の修正・課題の絞り込みを行う柔軟な対応が必要である。

〈肯定的意見〉

- 社会的要請やこれまでの技術開発経緯を踏まえ、研究開発目標を設定しているとともに、電力送配電設備の更改時期を踏まえた着実な需要を見据え、技術開発スケジュールを策定している。さらに研究開発の到達度についてはコストを含めた指標を導入し、実用化への到達度を定量化している点など、本研究開発マネジメントは全般にわたり妥当と考える。また、当技術分野におけるトップクラスの研究者、技術者により共同研究体を構成して、互いに連携しながら技術開発を進めるとともに、成果適用先と考えられる電力会社とも連携がなされている点から、研究開発体制も妥当であると思われる。
- 世界全体の技術動向や市場動向を十分考慮して極めて具体的な目標設定がなされ、目標をクリアする戦略と適切な研究開発実施体制を構築している点は高く評価できる。
- 開発目標、計画、体制いずれも明確になっており、概ね妥当である。
- 従来の線材開発に絞ったサイエンスよりの開発体制から、製品化の出口を見据えて標準化やロス低減、高密度化など製品開発のマネジメントがなされている。そのために産・学・官の協力体制がしかれまたPLのリーダーシップもよく機能したと思われる。
- 本事業の開始前に検討されたことを考えると、目標は適切に設定されており、基盤技術構築の範囲では、チーム構成は妥当であったと考える。

- 研究開発マネジメントに関してはPLの強いリーダーシップのもと、適切に実施されていると見受けられる。なお当初の設計、目標に必ずしもとらわれず、今後関連した情勢変化への対応を的確に行ってほしい。

〈問題点・改善すべき点〉

- 本事業は、それまでの線材中心の開発から一步進めて機器開発に乗り出しているが、実用規模の機器開発さらに産業応用への意志が薄く、技術の進歩までで留まることが懸念される。また、この3年間の研究費配分をみると、課題ごと、年度ごとのメリハリがなく戦略が感じられない。今後、研究費配分、さらにチーム構成も見直し、整理されることが適当である。
- これまでの指摘で繰り返すよう、海外市場のマーケティングに基づきどのような課題の克服が必要か、どのような特性の製品が必要かを調査できる体制が必要である。
- 個々の応用機器間での情報交換に関して、さらに密に連携していくことが、実用化を進める上で今後有効となると思われる。
- 過去の成果と現状及び今後の方向性が必ずしも明確ではない。現状の世界最高性能のイットリウム系超電導線材に依存し過ぎた開発目標になっている。社会情勢の変化を先取りした開発計画も提示して欲しい。
- 細かく評価しすぎである。もっと大まかに自由にやらしてもらったら、かえって開発費の有効利用になる。

〈その他の意見〉

- ・ 他国の開発進捗状況に応じて、重点的に研究開発すべき項目には予算的な措置を強化すべきである。
- ・ 開発の出口戦略が日本しか市場を考えてないので、今や、中国・インドの電力の需要の伸びをみるとすべて陳腐である。
- ・ 本事業の最終目標は、実用機器開発のためのいくつかの重要な課題を解決し性能を検証するものであるが、緊急性、重要度はそれぞれにかなり異なる。日本の超電導技術の優位性の確立、超電導応用のエネルギーインフラ参入の効果の実証に向けては、各課題の個別目標の優先度を明らかにして、数値の見直しや取捨が行われるべきである。
- ・ 本事業の各年度における研究費をみると、合計額はほぼ同一であり、各研究開発項目の使用額も大きな増減はない。研究開発の進捗により、もっとダイナミックな予算配分を行っても良いように思われる。
- ・ あまりにそつがなく、うまくまとまりすぎ、意外性が無く、おもしろくないのが印象だ。逆に目標が小ぶりかで、開発の評価がうまくゆきすぎている。

3) 研究開発成果について

世界初、世界最高の特性が各要素技術において達成され、すべての研究開発中間目標について達成済または今年度内達成見込みであり、順調に進捗していると評価できる。また、達成された中間目標の成果は最終目標に十分繋がるものであることから、最終目標の達成可能性はかなり高いと判断できる。

しかし、線材の量産化・歩留まり改善と低コスト化の実現と、剥離の課題解決が最も肝要であり、これらが達成できないと機器開発は空転する。

また、中間レベルであることから特許数が少ないことは仕方ないが、特許マップを作成し、重点分野の抽出など特許戦略についてももう少し明確にすべきである。主要技術については周辺、関連特許を合わせて海外出願するなどにより、実用機器製造時における我が国の技術優位性を確保する必要がある。

さらに、成果の普及に関して、折角開発された技術を埋もらせることのないよう、一般への超電導技術の啓蒙活動をもう少し強化すべきであり、またシームレスに技術移管が民間になされるようなシステムを構築して頂きたい。

〈肯定的意見〉

- すべての研究開発中間目標について達成済または今年度内達成見込みであり、順調に進捗していると評価できる。また、世界トップ、世界初の成果も多数あり、研究開発成果は大である。さらに最終目標達成に向けた課題も明確で、それらの課題の解決、最終目標達成は大いに期待できる。
- 研究成果は当初の計画通りに行っているようである。
- 設定したすべての中間目標を達成あるいは達成見込みがついていると判断できる。また、達成した中間目標のレベルは世界最高あるいはトップレベルの性能であることは高く評価できる。また、達成された中間目標の成果は最終目標に十分繋がるものであることから、最終目標の達成可能性はかなり高いと判断できる。
- 成果は全て中間目標をクリアしており、概ね満足できレベルである。
- 世界初、世界最高の特性が各要素技術において達成されており、十分に評価できる。
- 2020年のリプレース目標に対しては目標を十分にクリアしていると判断できる。予算に対しては確実に成果が出されていると考える。
- 中間目標は既に概ね達成されており、未達成の課題も近未来の達成が可能な状況にあることを認めた。成果の多くは世界最高水準のものである。

〈問題点・改善すべき点〉

- 特許出願は国内、国外に対して戦略的に行われている模様であるが、今後一層積極的に出願を進める必要があると思われる。その際、主要技術については周辺、関連特許を合わせて出願するなどにより、実用機器製造時における我が国の技術優位性を確保する必要がある。
- 論文は遅くてもよいが特許などは、論文より先に出さねばならないが少ないと思う。受託会社間で、牽制しているのか少ない。また国内特許は国策的このような開発では意味が無いので海外出願をもっとすべきである。その成果が 2 年後はどう評されるかここで世界情勢も見て変更すべきである。
- 特許出願は国内、国外に対して戦略的に行われている模様であるが、今後一層積極的に出願を進める必要があると思われる。その際、主要技術については周辺、関連特許を合わせて出願するなどにより、実用機器製造時における我が国の技術優位性を確保する必要がある。
- 本技術の日本の先導性を考えると、もっとプロジェクトを大規模化して広範な製品開発を視野に入れてもよいと思われる。
- 特許出願は国内、国外に対して戦略的に行われている模様であるが、今後一層積極的に出願を進める必要があると思われる。その際、主要技術については周辺、関連特許を合わせて出願するなどにより、実用機器製造時における我が国の技術優位性を確保する必要がある。
- 中間目標自体にインパクトの大きいものが無く、本事業の成果は特に興味を持つ関係者のなかに限定的に知られている。また、技術課題が多い割には特許出願が少ないのも心配であり、積極的な特許出願の戦略指導があつて良いと思われる。最終目標の達成の見通しについても、現技術の延長線上で考えて大半は可能であると思われる。しかし、線材の量産化・歩留まり改善と低コスト化の実現と、剥離の課題解決が最も肝要であり、これらが達成できないと機器開発は空転する。
- 成果そのものは満足すべき水準であるが、新規市場の開拓、現状の電力機器のリプレース製品になり得るか否かは不明確。単に機器の大きさ・重量減少、コストが既存品と同等ではリプレースのリスクを取り難い。新たな機能の付加が必要不可欠であり、その観点が欠如している。

〈その他の意見〉

- ・ それらの成果の普及に関して、シームレスに技術移管が民間になされるようなシステムを構築して頂きたい。(折角開発された技術を埋もらせることのないようにお願いします。)

- 世界最高水準の成果が多いことを認めるが、他国での取り組みが無い分野も多く、また現成果や最終目標値と実用機器開発のレベルが、実機スケールとこれに伴う線材使用量の観点から大きく乖離している。現構想では世界を圧倒的にリードし、また社会にインパクトを与える成果は期待しにくいので、一部の課題の目標を変更して突出した成果の創出も目指してほしい。
- 特許についての戦略を考え直すべきである。
- 線長についてはなお機器への適用には不足しているものの徒に長さを競うよりも製造の信頼性や検査方法の開発に力を注いでいる点は正しい方向と思われる。ただし現状から必要な線長、例えば **km** オーダーの線材がいつ実現するかの見通しがあまり明確ではなかった印象である。

4) 実用化、事業化の見通しについて

実用化に向け産業技術として適用の可能性、適用までの解決すべき課題と解決の指針は明確にされている。本プロジェクト後半には重電機器メーカーの参画が予定されていることから、本プロジェクトの成果の実用化可能性は期待できる。高温超電導を応用した機器が実用化されれば、地球環境に及ぼす効果は極めて大といえ、技術的、社会的波及効果は大きい。

一方、実用化、事業化を達成するには、一層のコスト低減に対する開発が必要である。特に既存設備の更改を行うためには、コスト、信頼性などについての既存技術との競争が激烈であることは容易に推察されるため、超電導の応用が圧倒的に有利なストーリーが描かれているべきである。

これが無ければ成り立たないといった強いニーズ、競合技術との比較検討、波及効果等について、コストや信頼性も含めて今後更なる市場調査が必要である。

〈肯定的意見〉

- 大まかな実用化から事業化のシナリオの見通しはあるが、後半戦はさらに詳細な検討（特にユーザーとのコンセンサスが重要）が必要になる。
- 実用化に向け、本プロジェクト終了後のシナリオ、および、実用化に向け線材メーカーの役割分担が明確化されている。さらに、本プロジェクト後半には、重電機器メーカーの参画が予定されていることから、本プロジェクトの成果の実用化可能性は大いに期待できる。
高温超電導を応用した機器が実用化されれば、地球環境に及ぼす効果は極めて大といえ、技術的、社会的波及効果は大きい。また、新規の超電導産業を興す効果も期待でき、経済的波及効果も大である。さらに、論文等の外部発表件数から見て、多数の若手研究者、技術者の育成が促進されていると考えられ、当技術の広がりは今後の実用化に向けた大きな推進力になると考える。
- 2020年のリプレースという目標がほぼ見えており、特に変圧器については産業技術としての実用化が明確になっている。線材開発、ケーブル開発、機器開発のいずれも実用化へ向けた課題が確実に克服されつつあるといえる。コスト評価もよく検討されている。
- 実用化にキーとなる技術課題を明確に抽出し、課題解決のアプローチも十分になされている。コストに関する検討も進められている。

- 産業技術として適用の可能性、適用までの解決すべき課題と解決の指針は明確にされている。但しシーズサイドからの見方である。成果は市場やユーザーのニーズに対応した方向性のものである。構成チームの範囲では研究開発や人材育成等が促進されており、多くの学会報告などもその舞台として利用されている。
- 実用化の可能性は概ね明確になっている。

〈問題点・改善すべき点〉

- 電力関連の機器開発に限らず、超電導応用では超電導でしかできない技術、超電導に置き換えることによって大きく効率・性能が上がる技術、がターゲットになるが、後者の場合にはメンテナンスや価格面での不利と競合技術の進捗が直接超電導に転換するニーズに影響する。本事業で扱われているのは後者の課題ばかりであるので、超電導の応用が圧倒的に有利なストーリーが描かれているべきである。確かに有利な面については良く分析されているが、不利な面についてもよく解析し総合的に超電導化の利点を評価し、事業内容の見直しが行われるべきであろう。
- 得られた成果は、高い性能を持つ実用機の開発が可能であることを示したが、本当にユーザーが使ってくれるのかどうか、コストや信頼性も含めて今後更なる市場調査が必要と思われる。
- 開発・実用化と産業用機器としての普及は全く次元が異なる。ユーザーニーズ、競合技術との比較検討、波及効果等について更に検討が必要不可欠である。
- 国内の交流送電ケーブルの置換用としてはほぼ見通しがついていると思われる。しかし海外に売り込む際にどのような点をメリットとして強調するのが次の問題であり、それにより開発課題も次々と現れると思われる。国際送電網と直流高圧送電は世界的な趨勢であり、本格化すれば銅価格の高騰が予想される。超電導はそのギャップを埋めるだけの潜在力があるためである。
- コストについては、十分考慮した研究開発が進められているが、実用化、事業化を達成するには、一層のコスト低減に対する開発が必要と思われる。特に既存設備の更改を行うためには、コスト、信頼性などについての既存技術との競争が激烈であることは容易に推察されるため、この課題を克服するための一層の努力が望まれる。
- 実機として系統での運用を前提に、委託研究機関を選ぶべきであった。開発には協力してもそれを採用するかどうかは、疑問である。電力会社はこの技術開発リスクの義務を負わなければいけない。

〈その他の意見〉

- 遠未来においての本格的な電力関連の機器普及を目指しているので、事業化までのシナリオが明確にし辛いのは仕方ないが、参画している電力会社は自社の将来展望と併せて、具体的な導入計画や実機サイズへのスケールアップの予定を示し、本事業の位置付けをより明確にすべきと思われる。また、電力の質を良くする、という超電導機器接続による測りにくい効果についても解析し、理想的な電力系統の未来像と効果的な超電導機器導入のシナリオが明示されるのが望ましい。
- もっと、これが無ければ成り立たないといった、強いニーズ、ユーザーが必要です。
- コスト、効率、サイズなど実用化した場合のイメージを示している。かえって夢が無くなる。

2. 個別テーマに関する評価結果

2. 1 超電導電力貯蔵システム (SMES) の研究開発

1) 研究開発成果について

2GJ 級高磁界大電流コンパクトコイル開発、高効率伝導冷却技術、システム開発や線材開発など設定した中間目標を達成し、実用化目標に向け順調に進んでおり、他のエネルギー貯蔵機器とのコスト比較についても十分な検討がなされている。また、フープ応力耐性と伝導冷却イットリウム系コイル外径は世界最高であり、新たなクエンチ保護法も世界に先駆けて開発されているなど、成果の意義も大きい。

しかし、今のところ、プロトタイプ短いコイルを製作し強度や通電特性を評価している段階であり、実際に大型のコイル試作まで行わないと、磁場中の繰り返し通電の課題や接続部の構成の最適方法などはっきりできない。さらに、ジョイント部の問題、線材の剥離、線材を分割した際の特性評価が必要であり、線材で長物ができずに継ぎ接ぎになる場合に関して、早急に見直しを含めた機器設計を行う必要がある。

また、系統安定化のための機器として、電池など他選択肢とのコスト競争力が強調されているが、応答特性やNAS (ナトリウム・硫黄電池) と比較しての維持エネルギーの小ささや安定性など、SMES のメリットの強調が必要である。

〈肯定的意見〉

- 中間目標はすべての項目について達成済みか本年度中に達成見込みであり、良好な結果である。また、フープ応力耐性と伝導冷却 Y 系コイル外径は世界最高であり、新たなクエンチ保護法も世界に先駆けて開発されているなど、成果の意義も大きい。最終目標達成に向けたアプローチが示されており、達成可能性は高いと判断される。
- 2GJ 級高磁界大電流コンパクトコイル開発、高効率伝熱冷却技術、システム開発や線材開発など設定した中間目標を達成している (達成見込み) と判断できる。達成した成果は世界最高性能であり、実用化目標に向け順調に進んでいる。他のエネルギー貯蔵機器とのコスト比較についても十分な検討がなされている。
- 数値目標を十分クリアしており、成果は概ね満足できる。
- SMES のための線材開発では、単なる電流密度や線長だけでなく力学的強度が必要とされるが、十分にこの点はクリアできていると認められる。
- SMES 開発は汎用的な超電導コイル作製の技術の向上を伴う点では評価できる。また、中間目標をクリアできる進捗ではある。

〈問題点・改善すべき点〉

- 今回の開発目標と産業用に普及する機器との仕様の差異が不明確である。したがって、今回の開発目標の難易度が不明確である。最終目標と本プロジェクトでの開発目標との差異を明確にし、本プロジェクトの目標のレベルを明示して頂きたい。
- 本プロジェクトにおける研究費、開発稼働の割に、特許出願件数は少ないように感じられる。重要技術について、一層の権利化を進める必要がある。
- SMES としての開発と考えると目標が低いと言える。新線材の適用研究と位置付けると言うことか。
- 線材が新しいところだけが、目新しい研究だ。線材がうまくいかなければ、この研究は無駄になる
- 今のところ、プロトタイプのコイルを製作し強度や通電特性を評価している段階であり、事業終了までには繰り返し試験を予定しているだけで、最終目標の 2GJ 級の開発を見通す成果とはかなりかけ離れている。実際に大型のコイル試作まで行わないと、磁場中での繰り返し通電の課題や接続部の構成の最適方法などはっきりできない。よって中間期までに一定の成果を得た本事業では、今後大幅に縮小または中断しても、遠い将来の 2 GJ 級 SMES 開発を遅延させるものではない。
- 中間目標がやや未達成（実験的に）。特にジョイント部の問題、線材の剥離、線材を分割した際の特性評価に関して。線材で長物ができずに継ぎ接ぎになる場合に関して、早急に見直しを含めた機器設計行う必要がある。
- 系統安定化のための機器として、電池など他選択肢とのコスト競争力が強調されているが、応答特性や NAS と比較しての維持エネルギーの小ささや安定性などで SMES のメリットの強調が必要と思われる。

〈その他の意見〉

- ・ 瞬低用 SMES は技術としては Nb-Ti 製コイルを用いたシステムで実現しており、その高温超電導化も 10 MJ 級の小規模 SMES として検討されている。しかし、競合技術の能力や超電導方式でなければならぬニーズ、さらには高温超伝導化によるデメリットについて冷静に検討されるべきと考える。
- ・ SMES はエネルギー貯蔵技術のなかで、有望で、日本が一番必要として、また、技術の一番進んでいる領域だ。もっと実機に向けた開発を進められないものか？
- ・ コスト競争力以外の他手段とのメリット・デメリット比較表があると分かりやすいと思われる。

- 研究発表・講演は十分であるが、特許、論文、新聞発表、展示会への出展など極端に少なく、成果の公表が不十分と思われます。仲間内での発表会が多すぎる感じを受けます。ナショプロであるので、成果の公表にもっと注力願います。

2) 実用化、事業化の見通しに関する評価及び今後の提言

SMES に対する市場ニーズは種々存在すると考えられることから、十分な低コスト化が図られれば実用化可能であり、一層のコスト低減技術の開発強化が必要である。

電池、フライホイールと競合する容量では超電導瞬低対策装置の市場化は無理であり、更なる市場ニーズ調査を進めるべきである。コスト面に優れていても熱維持の必要な NAS や、応答性に優れていても大型化に限度のあるキャパシタに比べると、SMES には規模の経済性が期待され、その点を活かせる大型化 SMES の開発（都心での大規模な電力平準化装置等）も視野に入れるべきである。

〈肯定的意見〉

- SMES の開発成果は、CO₂ 削減に大きく貢献するとともに、他の分野への応用も期待できることから、波及効果は大きいと考えられる。
- 系統安定化のための 4 GJ オーダーの SMES の実用化はほぼ見極めが付いていると認められる。
- 最終的な実用機までのシナリオが明確に設定されており、コスト分析により最終目標性能で、他のエネルギー貯蔵機器と比べて十分な競争力があることは高く評価できる。
- 実用化技術の見極め手法、波及効果については概ね評価できる。
- 超電導だけが可能な領域を求めるとそれは SMES だ。それは大規模な電力平準化装置を都心に成立させることだ。
- SMES の競合機器に対してメリット、デメリットを大まかには把握されているが、もう少し細部に関して比較評価して頂きたい。

〈問題点・改善すべき点〉

- 更なる市場ニーズ調査を進めるべきである。例えば系統安定化としては何台、瞬停対策用としては何台の需要が見込めるのかなど、電力、産業用について幅広い需要の調査が必要と思われる。
- 基幹系統安定化用 2GJ-SMES という開発目標を決定した経緯が不明確である為、今回の開発目標をクリアしても、それで実用化するか否か、また普及するか否か不明確である。最終目標と本プロジェクトでの開発目標を区別して明示して頂きたい。ユーザーニーズ、競合技術との比較について更に検討が必要である。

- 本事業での成果の範囲では、実用化が議論できるレベルに至らない。むしろ SMES 用途に限定せず、Y 系線材を用いたコイル化要素技術を変圧器開発と共同して高める方向に進めた方が、後々に生きる汎用性の高い成果をもたらすと思われる。
- SMES に対する市場ニーズは種々存在すると考えられることから、十分な低コスト化が図られれば、実用化可能であると考えられる。一層のコスト低減技術の開発強化が必要である。
- コスト面に優れていても熱維持の必要な NAS や、応答性に優れていても大型化に限度のあるキャパシタに比べると、SMES には規模の経済性が期待できるであろう。その点を活かせる大型化 SMES の開発も視野に入れるべきである。
- 電池、フライホイールと競合する容量では超電導瞬低対策装置の市場化は無理である。イノベーションは代替え需要では進まない。新規市場を開拓しなければいけない。

〈その他の意見〉

- ・ ISTEK の成果と受託先の成果の区別が不明確。大きい意味では NEDO の成果=ISTEK の成果でしょうが、実施先・中部電力の成果なのか更にその先のメーカーの成果なのか、もう少し明確にして頂きたい。また多くの大学が参画していますが、大学がどのように、どの程度寄与しているかが全く不明である。各大学の寄与を明確にして頂きたい。
- ・ 日本では重要性が低いものの、ネットワークが大規模化しているにもかかわらず送電インフラ投資が十分とはいえない欧米ではスマートグリッドは特に注目されている。SMES はまず、このような小規模地域エネルギーネットワークの安定化オプションとして市場を見いだせよう。
- ・ 海外の特に中国・インドのニーズはすごい。連携して開発できると開発資金も得られてよい。
- ・ SMES の設計、開発はコイル化技術の成熟後に別のプロジェクトもしくは電力会社の自社事業として行われるのが適当である。

2. 2 超電導電力ケーブルの研究開発

1) 研究開発成果について

大電流ケーブル、高電圧ケーブルともに設定した中間目標を達成しており、成果は世界トップレベルである。大電流ケーブルは RABITS-PLD（配向金属基板—パルスレーザ蒸着）と高電圧ケーブルは IBAD-MOD（イオンビームアシスト蒸着—有機金属熱分解）の同時開発や検査方法の開発など数値に表しにくい課題についても目標を達成するなど、高く評価できる。

先行しているビスマス系線材では数百 m 級のケーブル実証試験が世界各地で行われているのに対し、本事業では短尺の 15 m 級試験にしかすぎない。しかし、さらなる大容量ケーブル開発に向け、重要な要素技術となる大電流化、高電圧化、コンパクト化、低交流損失などの点で世界最高性能の技術開発を行っており、今後は、温度変動に伴う輸送特性変化など、 T_c （転移温度）が運転温度に近いイットリウム系導体特有の課題を調査し、ケーブル運転条件の適正範囲を明らかにするような展開が望まれる。

〈肯定的意見〉

- 大電流ケーブル、高電圧ケーブルともに設定した中間目標を達成している（達成見込み）と判断できる。達成した成果は世界トップレベルであり、その成果は高く評価できる。信頼性試験やシステム検証や熱解析など実用化目標に向け順調に進んでいる。
- 短絡電流の試験など良くやっていると言える。
- IBAD-PLD と MOD の同時開発や検査方法の開発など数値に表しにくい課題についても、成果は目標を達成していると認められる。成果は、国内市場のみならず海外市場にも進出可能と考えられる。
- 数値目標をクリアしており、概ね満足できる。
- 中間目標はすべて本年度中に達成済みまたは達成見込みであり、着実に成果が上がっている。また、達成された成果は世界最高レベルであり、意義は大きい。
- Y 系線材を用いたケーブル試作に向けての研究開発は国内唯一のものであり、注目されるものである。

〈問題点・改善すべき点〉

- 線材の剥離の問題を重視すべき。ケーブルにおいても繰り返し応力を受ける可能性あり。
Bi 系との比較がなされているが、もう少し細部に関して比較評価した表を作成してもらいたい。

- 経済性なら、すでに、ビスマス線材でもよい、この研究は市場が狭い、将来性の無い一回だけの需要かもしれないと危惧する。
- エネルギー問題への関心が高まる状況にあっては、超電導ケーブルは貢献する意味合いが大きい。既存のケーブルの置き換えも重要ではあるが、CO₂削減や省エネルギーの観点から、もう少し、一般への啓蒙普及活動が望まれる。
- やや国内のリプレースが前面に出てきすぎた観がある。海外では長距離送電への期待が大きいことから、超電導ケーブルの貢献の可能性を強調すべきと考える。
- 論文が少ない。
- 既に、Bi系線材では数百m級のケーブル実証試験が世界各地で行われており、Y系線材についても長尺ケーブルの試験や試作が進められている。本事業の15m級の試験では大電力、低交流損失の点で世界最高の性能であるが、設計と仕様をややかえただけの対応であり、先行事業と比べて新規成果としての魅力に乏しい。むしろ、温度変動に伴う輸送特性変化などT_cが運転温度に近いY系導体特有の課題を調査し、ケーブル運転条件の適正範囲を明らかにするような展開が望ましい。

〈その他の意見〉

- ・ 絶縁物の評価はどうなっているのか
- ・ 低交流損失化の点でY系線材の優位性が最終的に証明できるかどうか重要である。Bi系線材のケーブルの場合、交流損失の点で不利とされるが、通電量に対して電流容量が大きい設計にすればそれが解決される。ちなみにBi系線材の電流容量は500 A/cm程度であり、ここで試作されるY系線材(320 A/cm)よりも大きい。T_cの点でも不利なY系線材がケーブルとして使われるようになるには、高電流密度化など、Bi系線材を圧倒的に凌ぐ設計が必要であるが、その狙いはこの事業には見えていない。

2) 実用化、事業化の見通しに関する評価及び今後の提言

66kV 大電流ケーブルおよび 275kV 高電圧ケーブルともに既存ケーブルの増強や老朽ケーブルの更改などの需要を明確にするとともに、既存管路設備に設置可能なコンパクト化を十分考慮した開発を行っている。限られた地下スペースで、大容量送電を行うには、超電導ケーブルが有効であり、超電導ケーブルの需要は東京など大都市に経済的に成り立つと考えられるので、実用化が期待される。

一方、引っ張り、曲げ以外の強度面で不安があるイットリウム系線材だけに、接合部の耐久性の評価が長尺ケーブル開発には重要である。今後、通電量変動、温度変動に対するケーブルの耐久性、液体窒素中での絶縁物の経年変化など調べるのが望ましい。

また、本技術の市場は広く海外に広がるべきものであり、海外市場をにらんだ開発課題を明確にする必要がある。たとえば、直流送電ケーブルは原理的には交流送電ケーブルよりも単純であるが、より高電圧が要求されるので、直ちに対応ができるよう戦略的な体制を作るべきである。

〈肯定的意見〉

- 2020 年の日本の送電システムのリプレースという予定に沿って実用化の見極めができています。
- 66kV ケーブルに的を絞った開発になっており、技術的な見極め、事業化シナリオは概ね満足できる。
- 概ね明確化されているが、コスト評価に甘さがある。Bi 系との優位性をきちんと見極める必要がある。
- 66kV 大電流ケーブルおよび 275kV 高電圧ケーブルともに既存ケーブルの増強や老朽ケーブルの更改などの需要を明確にするとともに、既存管路設備に設置可能なコンパクト化を十分考慮した開発を行っており、大いに実用化が期待される。
- 中間目標で達成された性能は、大きく実用化への見通しを広げるものである。また、エネルギーを取り巻く環境を考慮すると、本成果は社会に与える影響が極めて高いと考えられる。
- 超電導ケーブルの需要は、東京など大都市に経済的に成り立つ。狭い地下洞道に設置可能なケーブルは超電導だけだからである。それをイットリウムにすることで世界記録を作るという成果は上がっている。
- 電力の規格としては、ニーズに対応したものである。また超電導ケーブルとしては東京の大電力網補強の唯一の方法として期待されている。

〈問題点・改善すべき点〉

- 実用化の目途は本事業の終了を待たなくても、各所で行われているプロジェクトで既に立てられている。わずか 15 m のケーブル開発であるので、短期に製造し前倒しで評価試験を終え、大電力対応、低交流損失特性の成果を早く挙げ、次のステップ（新規プロジェクト）に進むかどうかを検討すべきである。
- ケーブル製造技術において、さらなるコスト低減が可能かどうか検討する必要がある。
- 本技術の市場は広く海外に広がるべきものである。その点、海外市場をにらんだ開発課題を明確にする必要がある。たとえば、直流送電ケーブルは原理的には交流送電ケーブルよりも単純であるが、より高電圧が要求される。対応が直ちにできるよう戦略的な体制を作るべきである。
- 東京・大阪・シカゴなどすでに地中線がいつぱいな大都市にはいいがアジア、アフリカの過疎地帯では採用されそうにない。
- ユーザーニーズを把握しているか否か若干不安が残る。従来の管路に入るだけのメリットで果たしてリプレース需要があるだろうか。さらに、従来技術との比較検討、ユーザーニーズの正確な把握に努めて頂きたい。

〈その他の意見〉

- ・ 液体窒素中での絶縁物の経年変化について、電線メーカは自信を持って商品として出せるのだろうかと思っている。
- ・ 引っ張り、曲げ以外の強度面で不安がある Y 系線材だけに、接合部の耐久性の評価が長尺ケーブル開発には重要である。例えば NEDO で実施している Bi 系ケーブルの実証試験の終了後に Y 系ケーブルで置き換える可能性も視野に入れて、通電量変動、温度変動に対するケーブルの耐久性が調べられるのが望ましい。
- ・ 適用分野として、送電ケーブルだけでなく、データセンター用や輸送用など直流送電を行う分野への適用性も高いと思われる。これらの分野への適用をにらんだ開発を進め、波及効果を高めていただきたい。

2. 3 超電導変圧器の研究開発

1) 研究開発成果について

電流分担を均等化できる巻線技術や限流機能付き変圧器の見通しなど世界初の成果が含まれ、設定した中間目標を達成していると判断できる。コイル素線間の電流分担の均等化の成果は評価できるとともに、特に従来品の単なる置き換えではなく、限流効果等の付加価値・波及効果にまで言及している点は、高性能化という観点からも評価できる。

しかし、変圧器の性能は既に十分高く、超電導化によるメリットとして重量 1/2、面積 2/3 というコンパクトネスを前面に押し出すのみではリプレース需要は難しいため、変電所新設の繰延べ効果や限流機能付加に伴う短絡容量対策代替効果等についても、さらに論理的に説明していく必要がある。

また、既存変圧器とのコスト比較や特性比較等でのメリットについて、引き続き検討を充実させ、できるだけ早期に条件を整理し、超電導変圧器の優位性を更にアピールする必要がある。

〈肯定的意見〉

- 巻線技術、冷却システムなど設定した中間目標を達成している（達成見込み）と判断できる。特に限流器機能を付加した点は、高性能化という観点から高く評価できる。また、達成した成果は世界トップレベルである。
- 超電導トランスに限流機能を抱き合わせたことは良い。イノベーションはそのようなことで進む気がする。
- 交流損の低減を基本とした線材開発を中心に、既存機器と十分にコスト競争力を持つ機器開発について、ほぼ目標が見えている。
- 中間目標に対する達成度はいずれも達成済あるいは今年度中に達成見込みであり、電流分担を均等化できる巻線技術や限流機能付き変圧器の見通しなど、世界初の成果が含まれ、意義も大きい。また、最終目標に対する課題、見通しは明確であり、今後も着実な進捗が見込まれることから達成可能性は高い。
- 超電導変圧器は従来品の単なる置き換えではなく、限流効果等の付加価値・波及効果にまで言及している点が高く評価できる。
- 中間目標は概ね既に達成されている。限流機構を取り入れたことは技術的に評価できる。
- 限流効果は大きく評価できる。

〈問題点・改善すべき点〉

- 多数の成果があがっている割に、特許出願が少ないと思われる。実用化時の技術優位性を確保するためにも、一層積極的な出願を推進すべきと考える。
- 有用な成果が多いがその割に出願数が少ないと思われる。戦略的な特許出願が必要。
- 変圧器の超電導化は特殊な領域から始まると思うが、一般トランスの代替え需要と言っている。そんなことは絶対に起こらない。トランスの鉄芯が発熱するのを防げないものか
- 変圧器は非常に完成度の高い成熟機器なので、重量 1/2、面積 2/3、高効率ではリプレース需要は難しいと思われます。限流効果、不燃、下位系統の機器設計が格段に楽になる等の超電導化することによる付加価値、波及効果に、もっと積極的に言及して頂きたい。やはり、査読論文が少ない。大学の貢献度が不明確。
- 中間目標以後の 2 年間の課題はかなりヘビーで、例えば 2 MVA 器の検証には 11 km の導体が必要である。一方、低交流損失化が超電導変圧器の唯一の課題であり、細線化線材の開発が鍵を握っているがこれはケーブルと共通したものである。また巻線技術は SMES と共通する部分が多い。このほか線材接合の問題も同様である。2 MVA 器の検証の前にこれらについて予めクリアしておく必要がある。よって 2 MVA 器開発を事業期間内に行うことはかなり困難と考えられ、仮に形ができたとしても性能や耐久性には不安が残る。
- 誰にどのように売り込むかの市場戦略が明確ではない。コンパクトネスのみでは安価な製品に負ける危険がある。
- 線材のセグメント化の問題に関連して交流損失の問題は残る。

〈その他の意見〉

- ・ 変圧器の性能は既に十分高く、超電導化によるメリットはダウンサイジング以外にほとんど無い。電力会社が超電導化することに本当に魅力を感じているのか、超電導以外の技術者の冷静な意見を聞きたい。
- ・ 導入のメリットをもう少し詳しく説明されたい。

2) 実用化、事業化の見通しに関する評価及び今後の提言

超電導変圧器は、既存の油入変圧器の更改需要があり、不燃化、省エネ、小型軽量化などのニーズに応えられる可能性が大きい。実用化に向けた明確な課題設定とモデル検証を通じた効果的なアプローチがなされ、実用的なスケールの変圧器に対する適当な課題の抽出、検討項目の選定も行われている。

一方、限流効果、不燃、下位系統の機器設計が格段に楽になる等の超電導化による付加価値、波及効果にもっと積極的に言及するなど、超電導変圧器の実用化によるユーザーメリットを明確にし、ニーズを掘り起こす必要がある。

また、既存技術も極めて高いレベルにあるため、コンパクトネスだけでなく、高信頼性をアピールできるようにすべきと考える。

〈肯定的意見〉

- 実用的なスケールの変圧器に対する適当な課題の抽出、検討項目の選定が行われている。
- 産業技術の一選択肢としては見極めができています。事業化も、需要側からみれば一つの魅力ある選択肢として映るであろうレベルに達している。
- 実用化に向けた明確な課題設定とモデル検証を通じた効果的なアプローチがなされていると判断できる。
- 超電導変圧器は、既存の油入変圧器の更改需要があり、不燃化、省エネ、小型軽量化などのニーズに応えられる可能性が大きく、実用化の可能性は高い。
- 実用化に必要な要素技術の抽出・確認は適切であり、概ね満足できる。
- 事業化に関してはケーブル、SME Sとセットでなくても単体で十分機能するように考慮していただきたい。そうすれば海外ですぐにでも必要とところがあるはずであり、またそれを探すマーケティングも必要となる。

〈問題点・改善すべき点〉

- 特殊なニーズを掘り起こしてそこに開発委託するべき。
- 限流の効果が分かったが、それがどのようなイノベーションにつながるかの説明がないが残念だ。
- コンパクトネスだけでなく、高信頼性をアピールできるようにすべきと考える。コンパクト性(=高市場効率性)+高信頼性では本製品は世界にきわめて広い市場を持つ。既存技術の効率も極めて高いレベルにあるため、その上でなおメリットをアピールするには船舶や既存建物などへの応用可能性をもっとアピールすべきである。

- 実用化に当たっては、運用経費を含めた低コスト化が重要であり、既存設備に対する優位性を確保するためにも、一層の低コスト化に向けた技術開発の強化が望まれる。
- 最終的に、20MVA 実用機が完成した際に、どの程度の価格と信頼性なら本当にユーザーが使ってくれるのかどうか、市場調査を通してユーザーの要求度を明確にしていく必要があると思われる。
- 実用器規模は 20 MVA であり、このスケールをはるかに下回る試作器(2 MVA)における評価が行われても本格的な事業化に向けての検証課題は山積する。また、現行技術との効率面の優位性がわずかであることから、導入コスト、運転コストの見積もりが超電導化のメリットを明確にするために重要である。これらを総合し事業化までのシナリオを電力会社が本事業終了時に描けるかどうかポイントとなる。

〈その他の意見〉

- ・ そもそもユーザーニーズにマッチしているか否かではなく、超電導変圧器の実用化によるユーザーメリットを明確にし、ニーズを掘り起こす必要があるのではないのでしょうか。限流効果、不燃、下位系統の機器設計が格段に楽になる等の超電導化することによる付加価値、波及効果に、もっと積極的に言及して頂きたい。査読論文が少ない。
- ・ 別の項でも述べたが、超電導変圧器を通すことによる電力改質の効果が訴えられれば、効率改善以上の導入の動機となる。総合的な電力設備として変圧器の超電導化の効果が調査されるべきである。
- ・ 本プロジェクトは世界を先導する位置づけであるため、世界の市場の製品の要件を海外コンサルタントなど活用してあぶり出し、官民を挙げて世界市場への参入への取り組み体制を構築すべきと考える。

2. 4 超電導機器用線材の研究開発

1) 研究開発成果について

線材開発は各機器の基盤的技術であり、各機器の実用化に重要な位置づけを担っている。必要な線材特性の抽出と検査の実行、また磁場中特性、低交流損失や低コスト化など設定した中間目標を達成している。特に、磁場中での世界トップレベルの性能、更なる低コスト化の達成、さらにケーブル製作・運転条件における具体的な環境性能課題の抽出を行い、その試験項目を明確化にするとともに劣化が無いことを確認した点は実用化を進める上で高く評価できる。

さらに、線材用途ごとの技術課題の棲み分けは好ましい戦略であり、長さ、量産性を強化し、日本がイットリウム系線材をリードできる素地を作ってほしい。

一方、線材は機器開発と異なり多くのノウハウや科学的技術を押し込められるもので、一度優位性を確保し発展を続け始めれば他国の技術の追従は容易でないので、本事業では研究予算の配分増によって重点的にこれを推進することが望ましい。

また、線長のチャンピオンデータを追うよりも電流密度や信頼性をあげることで結果的に低コスト化を実現するという方針に誤りはないものの、機器開発や送電線への実装という点で、本機器用線材の研究開発は、SMES、変圧器及びケーブル開発と引き続き密接に連携し、これまでややアピール力に欠ける点を解消することが望まれる。また、線材の早期の実用化・事業化を進めることも望まれる。

〈肯定的意見〉

- 線材の開発目標を超電導電力機器の開発仕様から見直し、その数値目標をクリアしており、十分満足できるレベルである。
- 中間目標は概ねクリアできると思われる。また最終目標もクリアできる技術レベルを獲得しつつある。線材用途ごとの技術課題の棲み分けは好ましい戦略であり、長さ、量産性を強化し、日本がY系線材をリードできる素地を作ってほしい。
- 中間ではあるが、イットリウム材の悪評判に対して、かなりの成果が上がっている、全体に卒なくやっている印象。それだけに、日本の時代遅れとなったシーズ・プッシュ型開発の典型的例と言われるのが成果か。線材開発で開発したレーザアブレーション技術、基板平坦化技術など、他の分野にも波及する可能性がある。

- 必要な線材特性の抽出と検査の実行、また磁場中特性、低交流損失や低コスト化など設定した中間目標を達成している（達成見込み）と判断できる。特に、磁場中での世界トップレベルの性能、更なる低コスト化の達成、さらにケーブル製作・運転条件における具体的な環境性能課題の抽出を行い、その試験項目を明確化にするとともに劣化が無いことを確認した点は実用化を進める上で高く評価できる。
- 中間目標を達成した I_c 値、線材長は評価できる。
- SMES や変圧器、送電ケーブルなどの機器開発の基本となるのが線材開発であることはいうまでもない。ここでは IBAD-PLD と MOD の同時開発や検査方法の開発など数値に表しにくい課題についても、成果は目標を達成していると認められる。成果は、国内市場のみならず海外市場にも進出可能と考えられる。
- 線材開発は各機器の基盤的技術であり、各機器の実用化に重要な位置づけを担っている。この線材開発の中間目標はいずれも達成済あるいは今年度内に達成見込みである。また、世界に先駆けた成果や実用化に重要な技術が達成されており、意義も大きい。特に、耐久性試験条件の決定は、今後の各機器の実用化開発に極めて重要な技術であり、特筆すべきと考える。

〈問題点・改善すべき点〉

- 交流損失低下に向けた対策が急務である。特に分割による I_c 劣化の問題とそれに付随する交流損失の増加の懸念。また、剥離対策も非常に重要な課題である。
- 開発目標はクリアしているが、そもそも電力機器側からの要求仕様が低く過ぎるということはありませんか？電力機器側からの要求仕様と開発目標の関係を、もう少し明確にして頂きたい。
- 線長のチャンピオンデータを追うよりも電流密度や信頼性をあげることで結果的に低コスト化を実現するという方針に誤りはないものの、世界にアピールする際は機器開発や送電線への実装という点でややアピール力に欠ける点は否めない。早期の機器応用と製品化が望まれる。
- 現状の歩留まりを向上させるためや、更なる高性能化を進める上での具体的な戦略を明確に設定する必要がある。
- 担当幹事会社の主導で電線メーカーの開発と特許問題は起きないのか。特許がこの程度しかないと言うことは、換言すれば電線メーカーは将来市場性が無いと思っている。メーカー独自の特許室で費用が捻出できないのか。プロジェクト費に特許費用も入っているはず。

- 線材は機器開発と異なり多くのノウハウや科学的な技術を押し込められるもので、一度優位性を確保し発展を続け始めれば、他国の技術の追従は容易でない。本事業では研究予算の配分増によって重点的にこれを推進することが望ましい。また、線材が十分に高い電流値で使える条件(温度、磁場)を評価、公表することにより、本事業以外のユーザーの関心を惹くことも、用途拡大に重要である。

〈その他の意見〉

- ・ 類似した技術をもとにY系線材化が世界で展開されている。日本の技術が突出できる革新的な線材構成・微細組織形成の創製にも大いに期待したい。
- ・ 素材型プロジェクトは出口が大切だ。世界記録をいくつ作って、ギネスブックに載せるのが目的かと言われてしまう。世間が評価するのは、社会がそれでどれだけ役に立ったかである。単に産業や製造メーカーのために開発しているのではない。

2) 実用化、事業化の見通しに関する評価及び今後の提言

様々な超電導応用機器を実用化する上で、個々機器の要求に応じた具体的かつ明確な線材開発の目標設定がなされ、成果が着実に上がっているとともに、各線材メーカーにおける戦略と結び付けられており、実用化が大いに期待できる。イットリウム系線材実用化は、ビスマス系線材が不得意な高温磁場発生応用、低交流損失応用の点で強く期待されている。

一方、線材の低コスト化は機器実用化に対して極めて大きな意味を持つので、プロセスの改善以外にも、引き続き材料工学的な観点から性能向上に取り組むことが重要である。高性能線材の開発とともに、生産速度、高歩留まり化も並行しての開発検討の強化が望まれる。

なお、臨界電流特性の改善による実用可能な条件の拡大とともに、信頼性の獲得、生産性の向上が急務である。特に信頼性に関わる剥離問題の解決はイットリウム系線材普及の命運を握っており、温度や電磁力が変化する運転時においても支障がないことが保証できるデータの提示が望まれる。

〈肯定的意見〉

- 各機器の基盤技術として、成果が着実に上がっているとともに、各線材メーカーにおける戦略と結び付けられており、実用化が大いに期待できる。
- 素晴らしいイットリウム系高温超電導線材に期待できる成果がでていますが、コストが問題だ。歩留まりなども考慮している点も評価できる。
- 交流損失の低減対策など実用化に必要な技術開発がなされており、概ね満足できるレベルである。
- Y系線材実用化は、Bi系線材が不得意な高温磁場発生応用、低交流損失応用の点で強く期待されている。
- 変圧器用線材およびSMES用線材はほぼ実用化が見えていると思われる。
- 大まかな導入シナリオはできているが、以下の点に留意されたい。
歩留まりを含めた線材コストの見積もりと今後のコスト予想これに関してはLCAも今後は考慮されたい。
ユーザーのニーズを再度確認されたい。導入の確固としたコンセンサスが得られなければならない。また得られるような目標改善を順次実施して頂きたい。
- 様々な超電導応用機器を実用化する上で、個々機器の要求に応じた具体的かつ明確な線材開発の目標設定がなされている。線材の高性能化は、薄膜技術のレベルアップや高い技術を持った人材の育成にも貢献している。

〈問題点・改善すべき点〉

- 板状の線材を5～10分割して交流損失を低減させていますが、工数が増加するのと材料の損出が気になります。素人考えで恐縮ですが、細い丸芯線に成長させる等、他の細線化手法はないのでしょうか。現状の成果は世界トップレベルであり、高く評価しますが、もし、他の全く違うアプローチが考案されると完全に後発になってしまいます。他のアプローチにも注意を払って下さい。
- 送電ケーブルでは都市内での実用化は見えているものの、世界的にアピールできる海外市場における長距離送電にはまだ道のりが必要である。
- 臨界電流特性の改善による実用可能な条件の拡大とともに、信頼性の獲得、生産性の向上が急務である。特に信頼性に関わる剥離問題の解決はY系線材普及の命運を握っており、温度や電磁力が変化する運転時においても支障がないことが保証できるデータの提示が望まれる。これについては線材表面の組織制御も重要な要素である。また、コストダウンの目標は多数の生産実績に対して課されるべきものであり、特別な1バッチの製造で目標を達成することの意義は小さい。この点では工程の減少（例えば中間層数を減らす）も検討課題となる。
- 線材の各目標を達しても実用は開かれない。それで、ニーズ・プル型の開発とドッキングするべきである。

〈その他の意見〉

- ・ 本研究の成果を実機・市場に投入する手段を考えよう。投資家は、商品化などの市場が評価してくれるような成果が無いと動いてくれない。
- ・ 実用化に向けては一層の低コスト化が必要と考えられることから、現在、米国に先行を許している長尺化についても、一層の開発検討の強化が望まれる。
- ・ 線材の低コスト化は機器実用化に対して極めて大きな意味を持つので、プロセスの改善以外にも、材料工学的な観点から性能向上に取り組むことも重要であるのでこの分野の強化も重要と思われる。
- ・ 本事業のなかで各種機器開発目標の制約になっているのは線材の生産量であることは明らかである。突出した高性能線材の開発とともに、生産速度、高歩留まり化も並行して実現されたい。

2. 5 超電導電力機器の適用技術標準化

1) 研究開発成果について

超電導技術は日本が先導的であるため日本発の標準化が強く望まれる中、国際合意形成のための素案作成、意見交換などを着実にを行い、世界主要各国と着実に調整を進め成果を上げている点は評価できる。特に、日本が標準化のイニシアチブを取れる体制作りの経過は評価できる。

一方、標準化にあたっては各国・各地域のレベルの違いによって認識が異なり、現時点での集約が困難であることが予想される。完全な標準化に至らなくても、重要な項目を抽出し部分的に標準化手法の確立を図るといった柔軟性も必要である。

また、長期にわたって継続しなければならないので、長期間携わって頂けそうな大学の若い先生方をもっと活用すべきである。

〈肯定的意見〉

- 電力関連機器評価の標準化などは時期尚早の感がするが、日本が標準化のイニシアチブを取れる体制作りの経過は評価できる。特に、各国の標準化の意識を高める積極的な活動も評価できる。
- 今から標準化を取り込んだことは評価できる。まだ、商品化されていない。されないかもしれない **SMES** や超電導変圧器も含めて議論しておくことと先手必勝と言うことで良い。
- 国際合意形成のための素案、意見交換などが着実に行われている。中間目標はいずれも今年度内達成見込みであり、順調に進捗していると考えられる。
- 超電導線や超電導ケーブルの技術標準化に関して通則素案実現に向け設定した中間目標を達成している（達成見込み）と判断できる。特に、世界主要各国と着実に調整を進めており成果を上げている点は高く評価できる。
- 開発と同時に技術標準化に組織的に取り組んでいる点を高く評価します。
- 導入シナリオを強力にフォローするような標準化戦略が必要。特に今後技術輸出が非常に大きなテーマとなってくる。これを踏まえ早急にイニシアチブを取れるような戦略を練って頂きたい。
- 超電導技術は日本が先導的であるため、日本発の標準化が強く望まれる。

〈問題点・改善すべき点〉

- 標準化にあたっては各国・各地域のレベルの違いによって認識が異なり、現時点での集約が困難であることは十分に予想できる。完全な標準化に至らなくても、重要な項目を抽出し、部分的に標準化手法の確立を図るといった柔軟性も必要と思われる。
- 相手があることで、うまくいくかどうか。経済効果は、そのまた先のことで、見通しが無い。長期にわたって継続しなければならないので本プロジェクトで終わってはならない。
- 標準化に長期間携わって頂けそうな大学の若い先生方をもっと活用すべき。

〈その他の意見〉

- ・ 仕分け人に、一番になる必要があるのかと言われて答えられない人がいましたが、標準化を日本主導とする必要があるのかと問われて答えられますか。
- ・ 他国から安価な製品が市場に参入し、デファクトスタンダードになってしまうことのないよう、標準化を急ぎたい。そのためには、製品化とのタイムラグが最小になることが望ましい。

2) 実用化の見通しに関する評価及び今後の提言

超電導技術は日本が世界を先導する開発分野であり、超電導線材、超電導ケーブルについて国際標準化に必要な素案を作成し各国と密接に連携し、交渉は順調に進んでいる。この時期に国際規格化や標準整備に着手することは適切である。

国際交渉はタフな仕事であり、簡単に進捗するものではないが、技術的に先行し世界をリードすることは、日本がリーダーシップをとるために重要と考える。今後とも積極的に開発成果をアピールし、標準化へ向けて努力を強化していただきたい。

〈肯定的意見〉

- 交渉は順調に進んでいるという印象である。
- 国際標準化に向けた努力がなされており、活動状況は概ね満足できる。
- 超電導技術は日本が世界を先導する珍しい開発分野である。世界もそれを認めている。その証拠に欧米は日本に勝てないので開発をやめようとしているのでまさに好機である。過去の金属系超電導線材の国際標準化も見直すべきである。
- 超電導線材、超電導ケーブルについて国際標準化に必要な素案を作成し各国と密接に連携し合意実現を進めており、国際規格化が実現する見通しが高いと判断できる。
- 部分的に留まる可能性はあるものの、この時期に国際規格化や標準整備に着手することは適切である。

〈問題点・改善すべき点〉

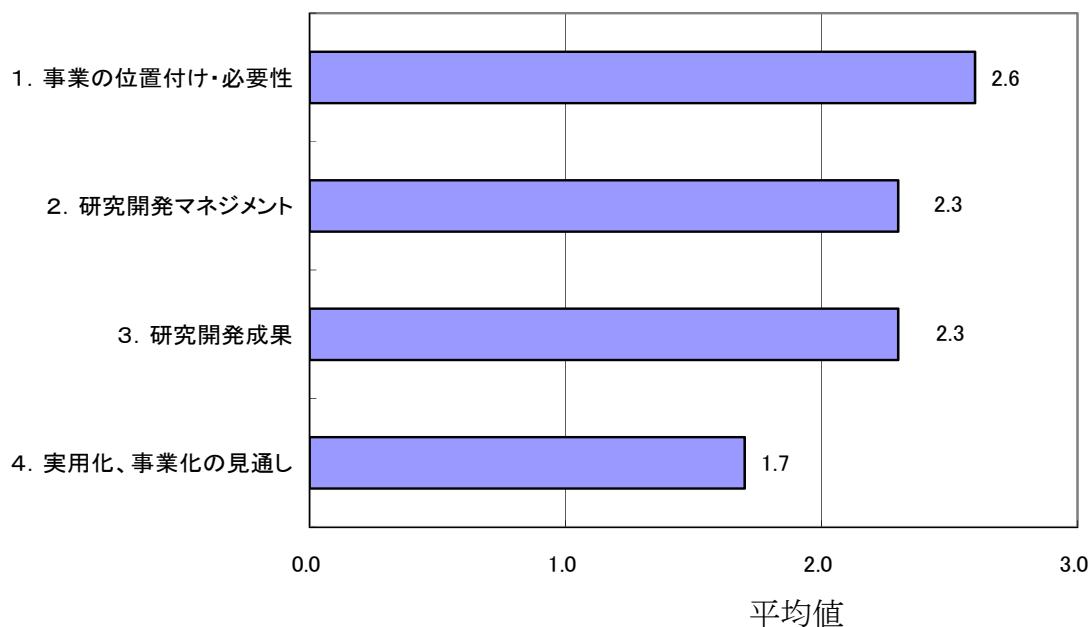
- 欧米がやめると日本もやる気が無くなってしまった、ということの無いようにしてほしい。
- 若い先生方の活用を御一考願います。

〈その他の意見〉

- ・ 各国の事情があり、簡単に進捗するとは思えないが、技術的に先行し、世界をリードすることが重要と考える。今後とも積極的に開発成果をアピールし、標準化へ向けて努力を強化していただきたい。
- ・ 一般向けの広報が必要である。標準化が成功したとして、波及効果はどの程度あるのか
- ・ 国際交渉はタフな仕事であるが、日本がリーダーシップをとるために成果を上げてほしい。

3. 評点結果

3. 1 プロジェクト全体



評価項目	平均値	素点 (注)							
		A	A	A	B	C	A	A	
1. 事業の位置付け・必要性について	2.6	A	A	A	B	C	A	A	
2. 研究開発マネジメントについて	2.3	A	A	A	C	B	B	B	
3. 研究開発成果について	2.3	A	B	A	B	C	A	B	
4. 実用化、事業化の見通しについて	1.7	B	B	A	C	D	A	C	

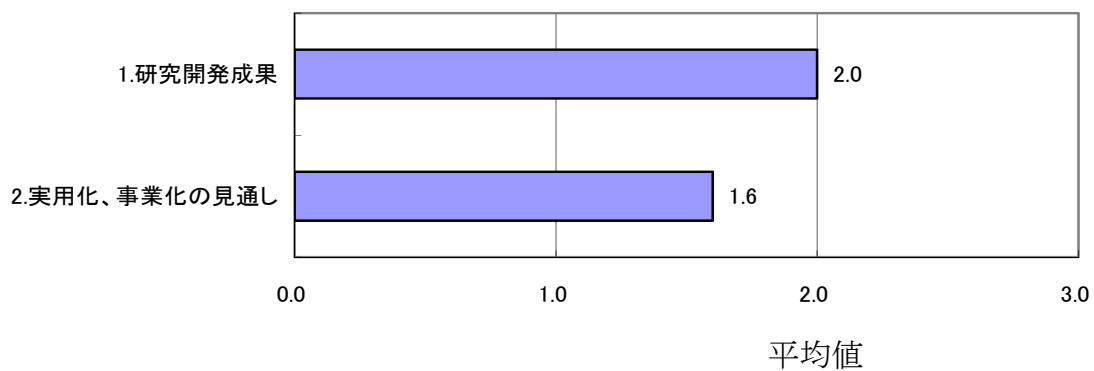
(注) A=3, B=2, C=1, D=0 として事務局が数値に換算し、平均値を算出。

〈判定基準〉

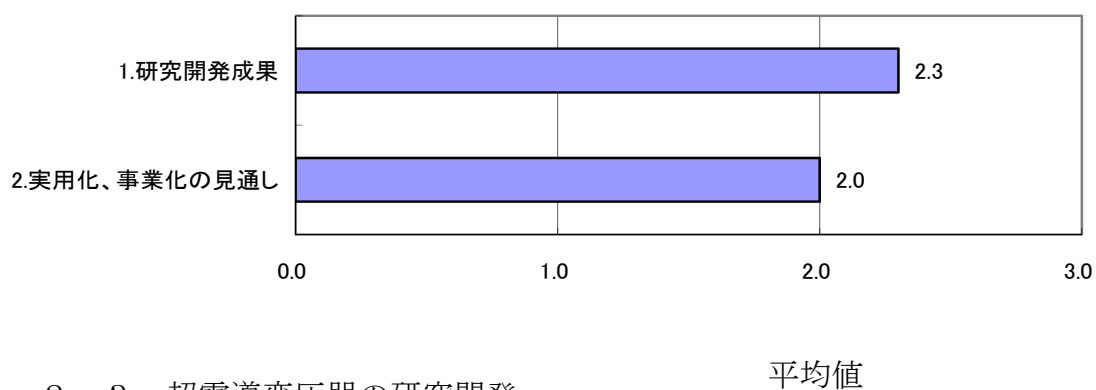
1. 事業の位置付け・必要性について	3. 研究開発成果について
・非常に重要 →A	・非常によい →A
・重要 →B	・よい →B
・概ね妥当 →C	・概ね妥当 →C
・妥当性がない、又は失われた →D	・妥当とはいえない →D
2. 研究開発マネジメントについて	4. 実用化、事業化の見通しについて
・非常によい →A	・明確 →A
・よい →B	・妥当 →B
・概ね適切 →C	・概ね妥当であるが、課題あり →C
・適切とはいえない →D	・見通しが不明 →D

3. 2 個別テーマ

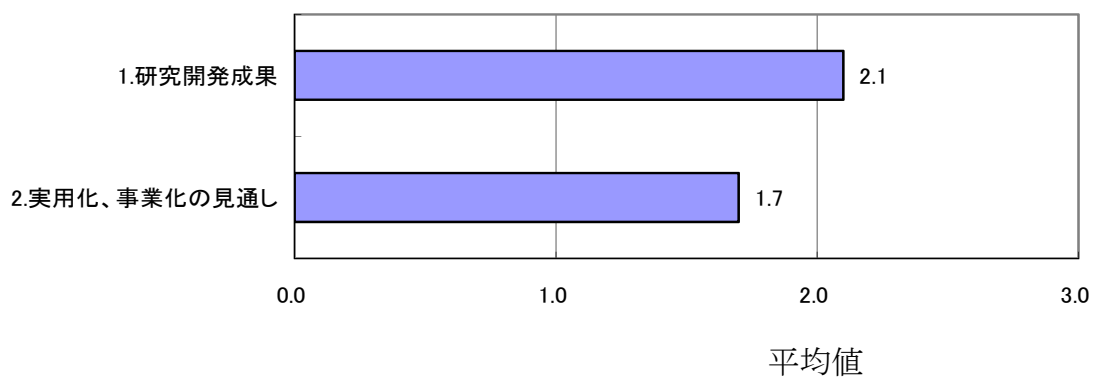
3. 2. 1 超電導電力貯蔵システム（SME S）の研究開発



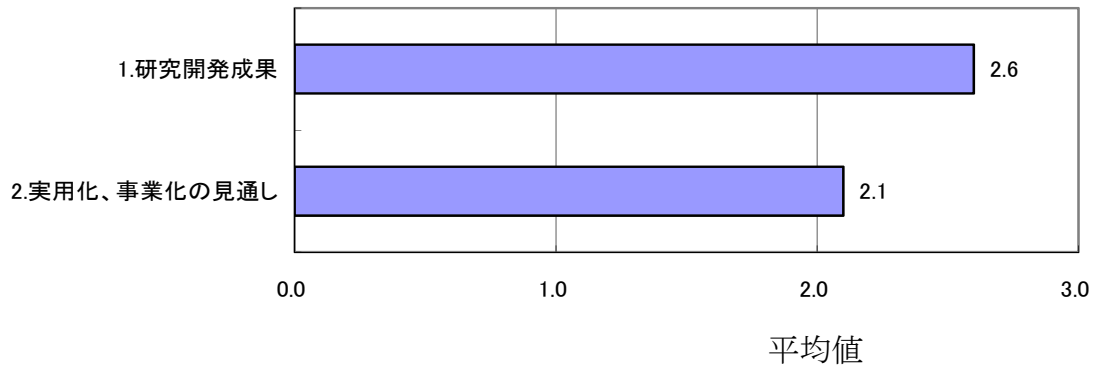
3. 2. 2 超電導電力ケーブルの研究開発



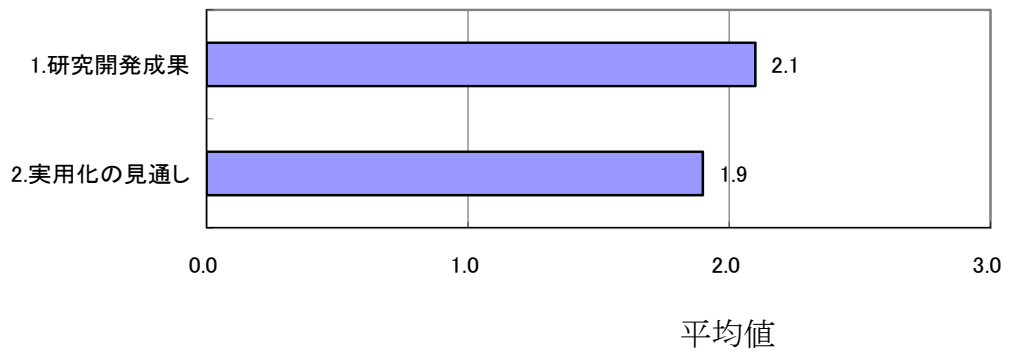
3. 2. 3 超電導変圧器の研究開発



3. 2. 4 超電導機器用線材の研究開発



3. 2. 5 超電導電力機器の適用技術標準化



個別テーマ名と評価項目	平均値	素点 (注)							
超電導電力貯蔵システム (SME S) の研究開発									
1. 研究開発成果について	2.0	A	B	A	C	C	A	C	
2. 実用化、事業化の見通しについて	1.6	A	B	B	D	C	B	C	
超電導電力ケーブルの研究開発									
1. 研究開発成果について	2.3	A	A	A	C	C	A	B	
2. 実用化、事業化の見通しについて	2.0	A	B	B	B	C	B	B	
超電導変圧器の研究開発									
1. 研究開発成果について	2.1	B	B	A	B	C	A	B	
2. 実用化、事業化の見通しについて	1.7	B	B	B	C	C	A	C	
超電導機器用線材の研究開発									
1. 研究開発成果について	2.6	A	A	A	B	B	A	B	
2. 実用化、事業化の見通しについて	2.1	A	B	A	B	C	B	B	
超電導電力機器の適用技術標準化									
1. 研究開発成果について	2.0	A	B	B	B	B	B	C	
2. 実用化の見通しについて	1.9	A	B	B	B	C	B	C	

(注) A=3, B=2, C=1, D=0 として事務局が数値に換算し、平均値を算出。

〈判定基準〉

1. 研究開発成果について	2. 実用化、事業化の見通しについて
・非常によい	→A ・明確 →A
・よい	→B ・妥当 →B
・概ね適切	→C ・概ね妥当であるが、課題あり →C
・適切とはいえない	→D ・見通しが不明 →D

第2章 評価対象プロジェクト

1. 事業原簿

次ページより、当該事業の事業原簿を示す。

「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CO₂排出量削減は各産業界共通の至上命令であり、電力機器も低炭素化社会の実現に貢献できる新技術を駆使した開発が必要である。</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CO₂削減量] 単位: kt/年</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 I_c 線材作製技術(3)低損失線材作製技術(4)高強度・高 I_c 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 $j_c=17\text{kA/cm}^2$ 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、$I_c=40\text{A @}65\text{K. }0.01\text{T. }100\text{m}$ 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 J_c 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 J_c 線材作製技術では、(a) 300A/cm-1GPa-50m (b) $J_c=30kA/cm^2-50m$ 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="359 869 598 965">投稿論文</td> <td data-bbox="598 869 1437 965">[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="359 965 598 1064">特許（国内/海外）</td> <td data-bbox="598 965 1437 1064">[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>CO₂ 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）を合わせて約 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、超電導変圧器は、電力需要増に伴う変圧器増の対応、変電所の新設対応が有利であり、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>Y系超電導線材の技術開発では、我が国は世界最高水準の成果を挙げている。既に実用化・事業化のための足がかりとしてY系超電導線材の販売も開始し、Y系超電導線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

YBa₂Cu₃O_{7-δ}(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・多結晶体制作後の熱処理。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、CuO₂ 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 Bi2212 は異方性が大きい。従って、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/cm³、融点 1520°C、沸点 3300°C。

イットリウム系線材 (Y 系線材)

YBa₂Cu₃O_{7-δ} (YBCO)あるいは Y のサイトを他の希土類元素で換えた RE₂Cu₃O_{7-δ}(RE:希土類元素)の超電導材料で作られた線材。一般的に、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

YBa₂Cu₃O_{7-δ} 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/cm³ 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。LN₂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。YBa₂Cu₃O_{7-δ} 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_c、J_c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挙げられている。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)Ba₂Cu₃O_{7-δ}系材料とした際に超電導体となる、La, Nd, Sm, Eu, Gd を指す。これらの元素を用いた場合には、(LRE)と Ba が置換した固溶体を形成しやすく、超電導特性が変化する。

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。

クリープ

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。YBa₂Cu₃O_{7-δ}の面外配向度($\Delta\omega$)は、(005)または(006)面の X 線回折ロックアップ測定で、面内配向度($\Delta\phi$)は、(103)面の X 線極点図測定を行い、その ϕ スキャンピークの半値全幅で評価する。

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 10⁹Pa)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、硅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_{sub} は基板結晶の格子定数、 a_{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°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 δ は約0~1まで変化する。この δ 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 CeO_2 、 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}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。理論的な効率は無理想サイクルといわれ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

REBa₂Cu₃O_{7-δ} 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所的な高温、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 Ba₂Cu₃O_{7-δ} 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 χ 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° 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 Ωm 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気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

電気抵抗や熱起電力(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。

電気化学反応

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

トロイダル

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 μm 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-)10⁻⁹の意味の接頭語。記号はn。

ナノ・ロッド(Nano-rod)

c 軸に平行に生じる、半径が数 nm の円柱状の常電導化合物相で、強いピン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)Ba₂Cu₃O₇₋₈ 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、REBa₂Cu₃O₇₋₈ 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 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°C (110K)。

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 μm 、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の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、クラスター等)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 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 Y₂O₃, 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°C 以上では Y_2BaCuO_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^{TR}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(CaF₂)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 CuO₂ 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 CuO₂ 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 Ba₂Cu₃O_{7-δ}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 REBa₂Cu₃O_{7-δ}相内に取り込みながら成長する。このとき REBa₂Cu₃O_{7-δ}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、レーザー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 Φ_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 CuO₂ 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]

BaF₂ プロセス

BaF₂ 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

Bi₂Sr₂Ca₁Cu₂O_{10+δ} 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。YBa₂Cu₃O_{7-δ}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。

CeO₂

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

CO₂排出係数

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

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 CuO₂ 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 CuO₂ 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°C で、大気圧、 0°C での密度は 0.1785kg/m^3 。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、プルームに指向性があるため、他の成膜手法と比較して成膜速度が遅いという欠点をもっている。また、通常の PLD 法(out-plume 法)はプルームのショックフロント部あたりに基板を配置することで成膜を行うが、この方法では成膜レートが遅いという問題がある。そこで、完全にプルーム内部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_c-B 特性

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

JEC 2200

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

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_{1-x}-F_x

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_c)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_c 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

LaAlO₃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。

LN₂ (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)₂AlTaO₆。複合ペロブスカイト酸化物の一種で、REBa₂Cu₃O_{7-δ}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。

MgB₂

銅酸化物高温超電導体や C₆₀ 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で、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 Ba₂Cu₃O_{7-δ}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)Ba₂Cu₃O_{7-δ}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°C 、沸点 -245.9°C 。大気圧、 0°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^{TR}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、分子、原子等を、ターゲットに対向して設置された基板の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

REBa₂Cu₃O_{7-δ} 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 REBa₂Cu₃O_{7-δ} 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_c や高磁場での臨界電流密度 J_c がイットリウム(Y)とした系に比べ優れており、液体窒素温度(77 K)での高磁場応用にとって重要な材料である。

Reel to Reel

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 YBa₂Cu₃O_{7-δ}(YBCO)に代表される REBa₂Cu₃O_{7-δ} 系(RE : rare earth, 希土類酸化物 Gd, Sm, Er, Nd 等)超電導線材。これらは、磁場中での臨界電流(I_c)・臨界電流密度(J_c)が高く、また、Bi 系線材のような銀シースを不要とする構造であるため低コスト化が可能であり、さらに線材の構造上後加工が容易なため、超電導ケーブル、変圧器、モータ、SMES 等の電力応用に対して低交流損失化が可能である等の観点から現在注目されている高温超電導線材である。

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=10⁴G(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_e)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

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 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 Ba₂Cu₃O_{7-δ}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ので、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 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 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 δ 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： $-269\text{ }^\circ\text{C}$ ）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： $-196\text{ }^\circ\text{C}$ ）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CO₂削減に資する有力なエネルギー関連技術としての機能が期待できる。またこの頃には、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CO₂削減効果は、超電導電力機器へのリプレース本格化から10年後の2030年にて、超電導電力ケーブル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)”CO₂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 CO₂ 大幅削減 21 技術のなかの超電導高効率送電に選定され、技術開発ロードマップが策定された。

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

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

1.1.1 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る、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/m²以上の熱流束を可能とする高熱伝導冷却システムの開発を行う。

(3) 開発目標

●中間目標（平成22年度）

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

(4) 目標設定の根拠

20 K以上の温度領域においては、4 K温度領域と異なり高い熱安定性ならびに高効率な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 W/m -相@ 5 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 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 kA 級ケーブルにおいて、 0.1 W/m @ 1 kA 以下の交流損失を確認しているが、交流損失が通電電流の 2 乗で増加すると仮定した場合、 2.5 W/m @ 5 kA 程度の損失が発生する。このことから 5 kA 通電時の損失を 2 W/m 以下とした。 66 kV 級実系統に導入する場合、 31.5 kA 、 2 sec 相当の短絡電流に耐えることが必要であると規定されており、ケーブル線路にこの短絡電流が通電した際、ケーブルは劣化なく耐えることとした。また、 5 kA 通電を可能する終端接続部は、これまで開発されていないことから、 1 kA 級の接続構造を基に、 5 kA 級の電流リードを開発し、超電導導体、超電導-常電導接続部、電流リード、終端接続部において、安定的に連続通電できることも目標とした。

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 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 ϕ の管路に収納できること。
- ・ケーブル損失（交流損失、誘電体損失）；2.1 W/m-相@5 kA 以下。
- ・中間目標で得られた課通電試験の設定条件下における課通電試験を実施し、試験計画書の性能を満足することを検証する。

(4) 目標設定の根拠

66 kV/5 kA 大電流ケーブルにおいては、1.1.2.1-1～1.1.2.1-4 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 ϕ 以下。
- ・ケーブル損失（交流損失、誘電体損失）；0.8 W/m-相@3 kA 以下。
- ・中間目標で得られた課通電試験の設定条件下における課通電試験を実施し、試験計画書の性能を満足することを検証する。

(4) 目標設定の根拠

275 kV/3 kA 高電圧ケーブルにおいては、1.1.2.1-1～1.1.2.1-4 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。

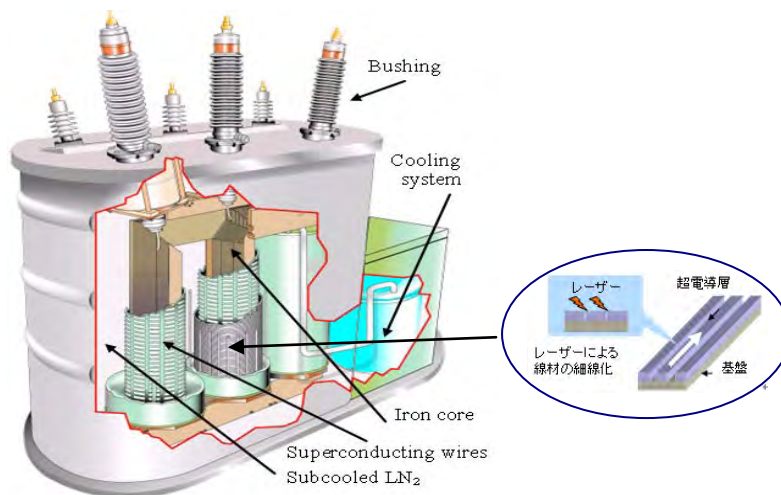


図 1. 1. 3-1 66 kV/6.9 kV-20 MVA 級配電用超電導変圧器の概念図

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

(4) 目標設定の根拠

冷却システムの冷凍能力は、変圧器を適用する変電所や変圧器の形態、変圧器の利用率、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 kW@65 K 程度とされている。変圧器用冷却装置には長寿命でコンパクト化、運用性や経済性に優れた性能も要求されている。冷凍容量の 2 kW@65 K は既存冷却装置（スターリング式）で容量 1 kW 以下@ 80 K の約 3 倍、冷凍機効率 $\text{COP} 0.06$ 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 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。③ 66 kV/6.9 kV-2 MVA 級超電導変圧器モデルの特性を検証する。

(3) 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 mm² が必要であることより上記の 300 A/cm² 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 mm² が必要になっていることより上記の 500 A/cm² 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 μm (システム検証用線材は 130 μm 厚) と想定することから断面積が 1 mm^2 となり J_e 値として 30 kA/cm^2 (300 A/cm-w を総断面積 0.01 cm^2 で除した値) の目標値を設定した。

最終目標値に関しては、SMES の導入・普及時に必要な線材の作製が可能になることと設定した。SMES の導入・普及段階では、2 GJ 級 SMES が想定(「超電導電力ネットワーク制御技術開発」報告会資料参照)されており、その構成や仕様の詳細は今後の検討課題でもあるが、一例として、10 T 以上の磁場中

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 μ m と想定し、 J_c が 50 kA/cm² (500 A/cm-w を総断面積 0.01 cm² で除した値) の目標値を設定した。

1.1.4.1-5 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、CO₂ 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」「MgB₂ 超電導線」「Bi 系銀シース超電導線」がある。銅線はコストが安価であるものの、Y 系超電導線材に比して輸送可能な電流密度が 1/100 程度であり、大容量時のコンパクト化に難がある。NbTi 超電導線材もコストが 1 円 /Am(@4.2 K)以下と安価ではあるが、臨界温度(T_c)が低いことから使用温度が液体ヘリウム温度に限られ、冷媒にコストがかかるのに加えて低温で比熱が小さいことからクエンチが起きやすい。MgB₂ 超電導線材もコストが安く、加工性にも優れているが、NbTi 超電導線材と同様に T_c が低いこと、及び磁場中での特性低下が激しい点で Y 系超電導線材が有利である。 T_c も高く、開発も進んでいる Bi 系銀シース線材との関係は、開発が先行していることから長尺線材の安定製造の観点からは Bi 系銀シース線材が有利であるといえるが、将来低コストが可能であること、磁場中の高臨界電流特性、高機械強度、低交流損失化のための可加工性の点で Y 系超電導線材が勝っている。このことから、

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

2.1.1 超電導電力貯蔵システム (SMES) の研究開発

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

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 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コイル用導体で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-CeO₂/SP-YSZ/SP-CeO₂中間層上に、CVD法によるY系超電導層を作製して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CeO₂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気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 J_c 化技術等を統合することで、平成 20 年度は、20m 長で $J_c=10 \text{ kA/cm}^2$ の安定製造を行い、平成 21 年度は 20 m 長で $J_c=13 \text{ kA/cm}^2$ 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 $J_c=15 \text{ kA/cm}^2$ 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_c 、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° 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CeO₂中間層を形成し、TFA-MOD法によりY系超電導層の形成を行い、歩留りのデータ収集を行う。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、ケーブルの途中に中間接続部を有する 275 kV 級、単心、3 kA、30 m 長の超電導電力ケーブルシステムを製作し、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	<p>大電流・低交流損失ケーブルの基礎特性評価</p> <p>大容量接続技術の開発 (5 kA 連続通電)</p> <p>三心一括ケーブル導体の検証(31.5 kA・2s の耐性)</p> <p>交流損失低減の基礎的研究(2 W/m・相@5kA)</p>				
2. 高電圧絶縁・低誘電損失ケーブル化技術の開発	<p>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)</p> <p>高電圧接続技術の開発 (275 kV 連続課電)</p> <p>超電導ケーブル電気絶縁特性の調査 (63 kA・0.6s の耐性)</p>				
3. 電力ケーブルの熱収支に関する評価研究	<p>定常通電時および事故時の伝熱特性検討 (シミュレーションの実施) (シミュレーション技術の確立)</p> <p>スラッシュ窒素の研究 (システム構築) (システム検証)</p> <p>超電導電力機器の冷却設備の調査研究</p>				
4. 超電導電力ケーブル対応線材安定製造技術開発	<p>大電流用線材の安定製造技術の開発 ($J_c = 15 \text{ kA/cm}^2$ 20m 長)</p> <p>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)</p> <p>微細構造解析</p> <p>IBAD-PLD 線材の安定製造技術の開発</p> <p>線材の評価技術の開発</p>				
5. 66 kV 大電流ケーブルシステム検証	<p>システム開発 システム作製・試験・評価</p>				
6. 275 kV 高電圧ケーブルシステム検証	<p>システム設計 システム作製・試験・評価</p>				
予算 (百万円)	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 (~ 10 T) での応用となる SMES 及び比較的低磁場 (~ 0.1 T) ながら垂直磁場成分が関与するソレノイドコイルが想定されている超電導変圧器等の応用を想定し、Y 系超電導線材の磁場中特性の向上技術を開発する。

(1) 人工ピン止め点導入関連技術開発

本項の開発では、「RE 混晶系材料」及び「異相人工ピン止め点の導入」のアプローチで磁場中での特性向上技術を開発する。RE 混晶系材料としては、PLD 法、MOD 法等のそれぞれで実績のある混晶系を基軸にプロセス適正化を進める。PLD 法では GdBCO 及び La 置換系、MOD 法においては Y の一部を Sm 等での置換系を基本に組成、作製条件の最適化を進めるとともに、さらに効果的な RE 材料の組合せ等の検討も行う。一方、異相人工ピン止め点の導入においては、PLD 法における BaZrO₃ 材料のバンブー構造及び MOD 法における等方的磁束人工ピン止め点の導入の技術を基軸に異相材料に関して、添加量、作製条件等の因子の適正化を行うとともに、より効果的な異相材料及び粒径等の微細組織制御法等の検討により磁場中特性の向上を図る。

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、BaZrO₃ 等の酸化物ナノロッド等による人工ピン止め点を導入し、ピンの濃度、サイズ、分布状態の最適化を図り、特性向上を目指す。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 μm 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。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2～5 mm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5 mm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7 m/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2 mm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、2 mm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/cm² (I_c 500 A / (金属基板 100 μ m + 安定化層 100 μ m)) であり、中間目標に近い J_c 値を有しているため、目標達成への課題は基板の薄肉化や高 I_c 化よりも長尺化に重きが置かれる。そこでPLD法を用いた線材開発用には、従来肉厚基板を用いて、より長尺の基板作製を行い、高い I_c 値の特性を活かして $J_c \times L$ (長さ) 値の向上を行うとともに、薄肉高強度金属基板を用いて研磨条件を含めた、成膜条件の再検討を全ての間層成膜プロセスに対して行い、従来基板と同等あるいはそれ以上の結晶粒配向度を有する基板を作製する。また、補修線材には、補修部の

盛り上がりを抑えるため、極薄肉の超電導線材が望ましいため、補修線材用に極薄肉基板の開発及びこれに適した中間層成膜条件の適正化も行う。これには高強度が必要条件とならないことから、上記のアプローチに加えて金属基板の選定も行い、より安価で高い特性を有する極薄補修線材用基板中間層を開発する。金属基板の薄肉化は強度のみならず、特にケーブル応用時のクエンチ・発熱による常伝導伝播に影響を及ぼすため、機械強度特性、伝熱挙動解析等の特性評価を利用して機器仕様を満足するよう開発を進める。上記のアプローチにより、平成 20 年度には、70 μm 以下の極薄肉金属基板を用いて従来基板と同等の結晶粒配向度を有する基板を作製する。ここで、薄肉高強度基板としては SMES の線材強度仕様を満足する金属基板を用いる。平成 21 年度は長尺線材用としては薄肉化と長尺化を進め、中間目標を達成する。上記の開発においては、金属基板特性の評価と適した成膜条件の探索を連携することで開発を促進する。平成 23～24 年度では、平成 22 年度までに開発する薄肉高強度金属基板及びそれに対応した中間層形成技術の長尺化を図るとともに、高 I_c 化技術を統合し、最終目標対応技術を確立する。

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 $I_c=500$ A/cm-w 線材) において、 J_c は 25 kA/cm² 程度 (=500 A/(100 μm 金属基板+100 μm 安定化層)) であったため、これを 30 kA/cm² へ高めるとともに長尺化と極低コスト構造の実証を進める。平成 20 年度では、薄肉金属基板を用いた成膜においてプロセス条件の適正化により、薄肉金属基板での連続プロセス技術を開発する。また、安定化層も 30 μm 程度に抑える熱的安定性の理論検討とともに、これを実現する開発を行う。平成 21 年度は、この線材の長尺化と次項の高 I_c 化技術開発の成果と統合し、高 J_c 化、>30 kA/cm² (@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 μm 厚) の場合と同

様の特性を薄肉基板で実現すべく技術開発を行う。また、機械的負荷に対する積層界面での剥離強度向上のための材料選択及び微細組織制御を行う。これらの開発を通して、平成 20 年度では、薄肉基板を用いた成膜で連続製造プロセス技術を開発する。さらに、平成 21 年度では、前年度開発技術を基に長尺化を進めるとともに次項の高臨界電流化技術の開発成果を反映させ、平成 22 年度では、さらなる長尺化技術を開発し、中間目標を達成する。上記の開発において、製造プロセス条件と微細組織の関係及び、交流損失を含めた電磁気挙動評価、伝熱挙動、機械的強度評価と連携することで開発を促進させる。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° 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 μm 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 CeO₂ 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、CeO₂ キャップ層においては IBAD 層、バッファ層の結晶粒配向度改善と、バッファ層の結晶粒微細化や成膜条件の最適化等による自己配向速度向上により、それぞれ薄膜化を図る。IBAD 層については、「超電導応用基盤技術研究開発 (第 II 期)」プロジェクトにおいて導入された大型イオンビーム成膜装置を用いることにより 100 m/h 以上への高速化が実現可能であるが、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、CeO₂ 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ー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 ≥ 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) →	
	← 高不可逆磁場材料開発 →				
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 ²) →			← 薄肉基板上高 I_c 化 ($J_c=50$ kA/cm ²) →	
5. 低コスト・歩留向上技術開発	← 金属基板中間層高速化・高配向化 →			← 基板中間層簡素化・高配向化 →	
	← 超電導高速・高 I_c 化 (3 円/Am 対応) →			← 高速・高 I_c 化 (<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。

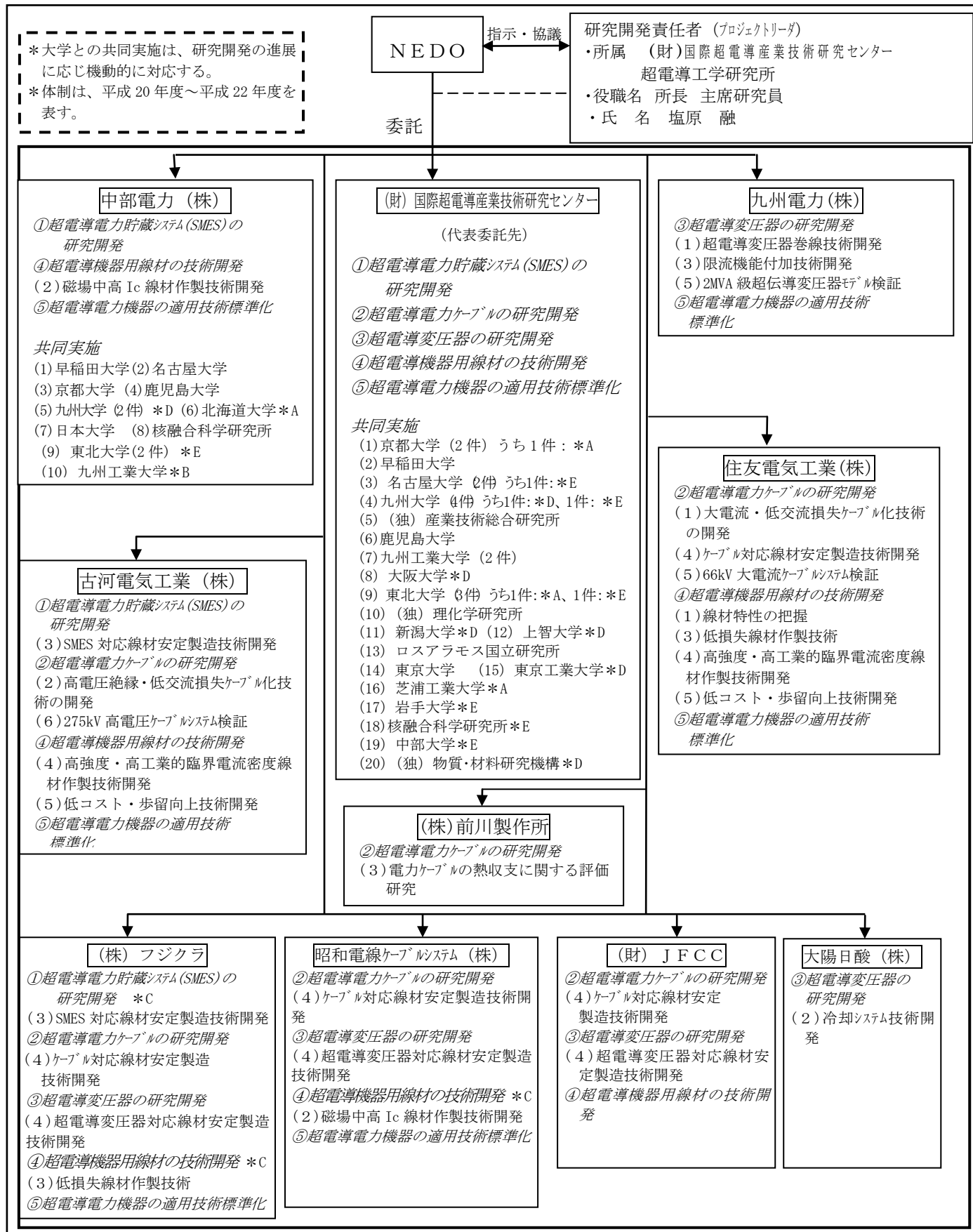


表 2.2.1 研究開発分担

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 CO₂ 等の温室効果ガス排出削減がエネルギー効率向上により貢献できること等の展示を行っている。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なくはならず、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て、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、前述の通り住友電気・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。

東京電力と住友電気は平成 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気、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、古河電気、住友電気により 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^{TR} 基板上に IBAD-MgO を主とした複数の中間層を配し、その上に MOCVD 法により超電導層を形成する手法で長尺線材の開発を行ってきた。同社は、日本の ISTEK 及び(株)フジクラと臨界電流 \times 長さ ($I_c \cdot L$) の積で常に最高値を競っているトップ企業であるといえる。これまでの長尺線材としては、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 μm 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 BaZrO₃(BZO)を人工ピン止め点として導入するプロセス開発を行っている。導入した BZO の形態としては PLD 法に対するものと類似して超電導層の c 軸に沿ってロッド状に成長するために、磁場が c 軸に平行に印加された条件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^{TR}) 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	○	VNIKP、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)	66 kV	5,000 A	15 m	三心一括	Y	2008~2012	×	ISTEC、住友電工、京都大学、早稲田大学	NEDO
		ビスキャス(市原)	275 kV	3,000 A	30 m	単心	Y		×	ISTEC、古河電工、フジクラ、昭和電線、京都大学、早稲田大学	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)	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 Ic, A/cm-w (厚み, μm)	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 min., A/cm-w (厚み, μm)	
			Ic, A/cm-w	L, m	Ic×L, A・m			Ic min., A/cm-w (厚み, μm)	長さ, m		
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、CO₂大幅削減を可能とする「21」技術を選定。

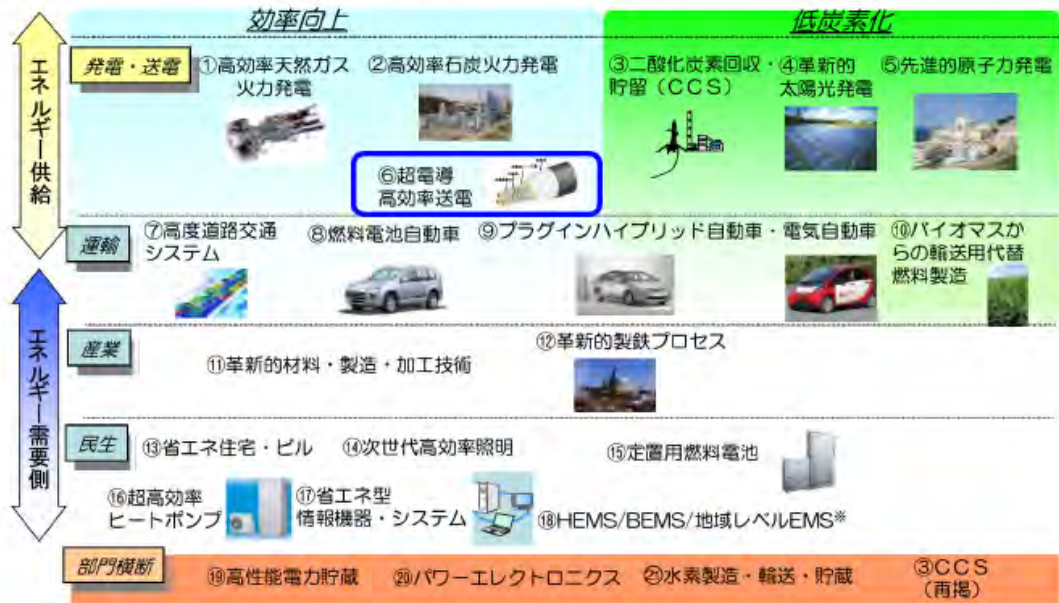


図 3.3.1-1 重点的に取り組むべきエネルギー革新技術

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

平成 21 年 9 月の「国連気候変動サミットにおける鳩山総理演説」で掲げられた「すべての主要国による意欲的な削減目標の合意を前提として、温室効果ガスを 2020 年までに 1990 年比で 25 %削減する」という目標達成を目指すためには、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な使用の中に「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。

「化石資源の効率的な使用」

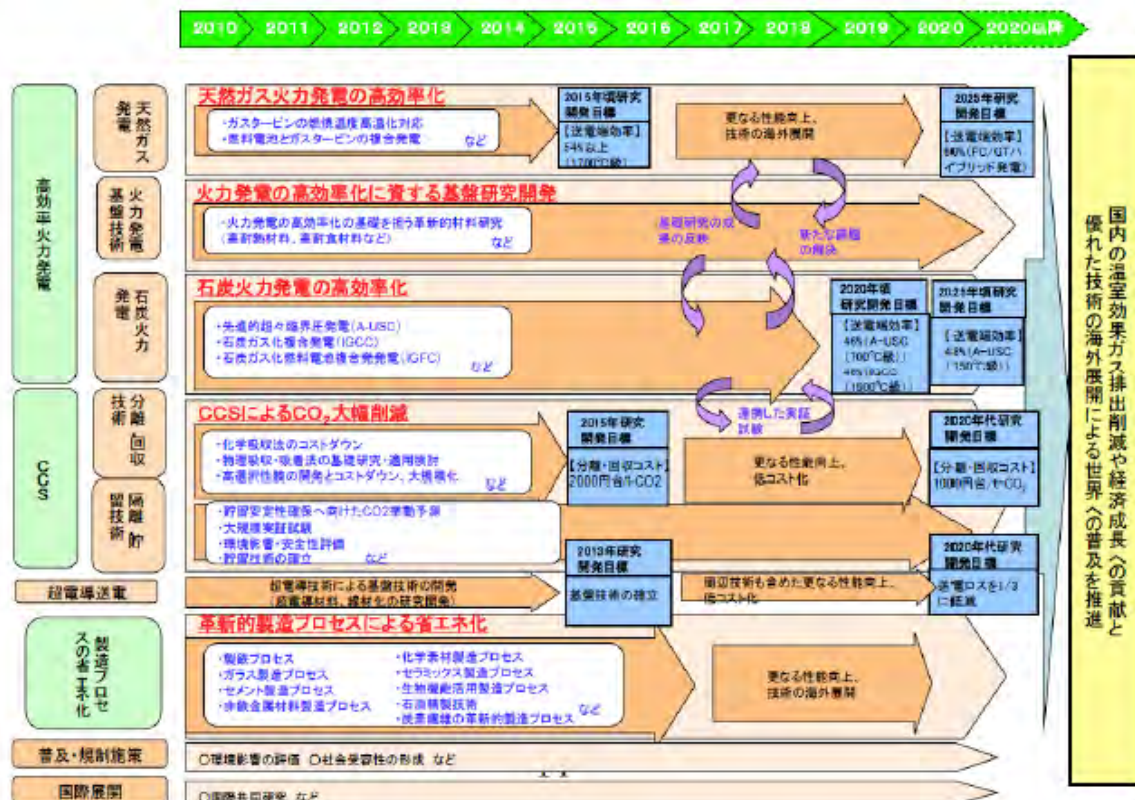


図 3.3.2-1 「科学・技術重要施策アクション・プラン」中の方策俯瞰図

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)。

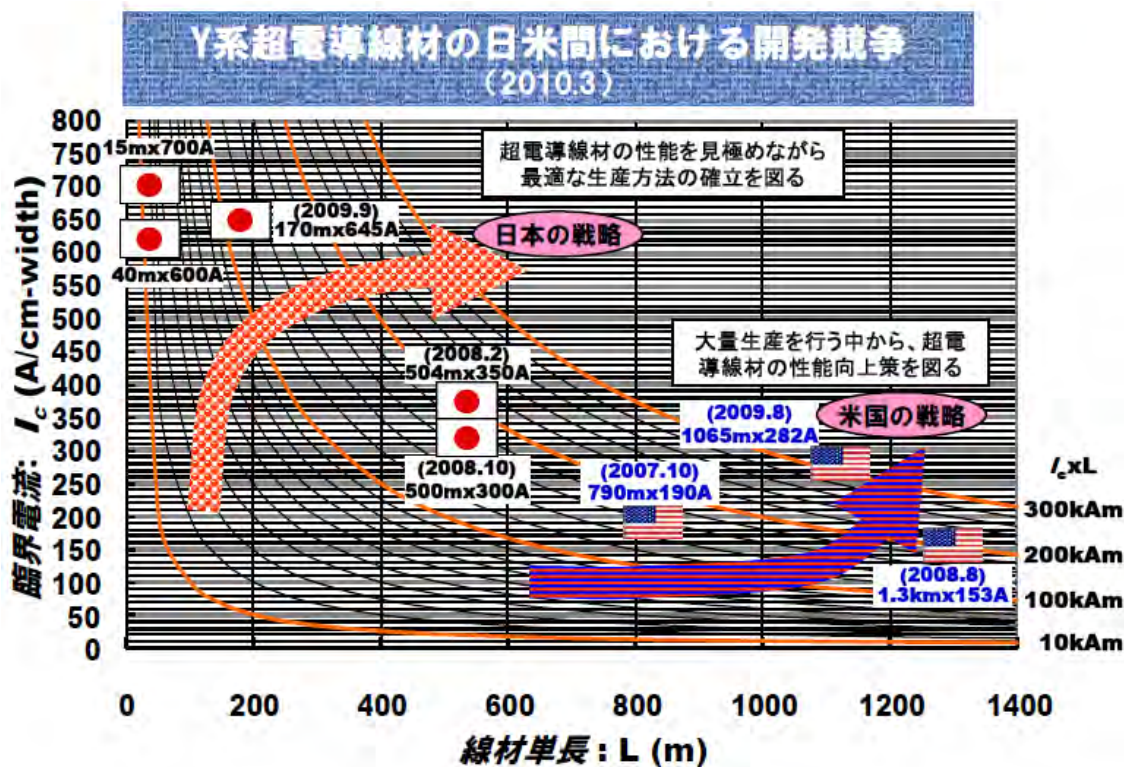


図 3.3.3-1 イットリウム系線材の日米間における開発競争

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CO₂の25%削減目標（2020年）を加え、海外での取組について、米国、欧州、アジアにおける最新の研究開発プロジェクト等が追記されている。具体的には、フライホイール装置(50 kWh)実用化を2012年頃から2016年頃に、2011年頃の負荷変動補償・周波数調整用SMES実用化および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。

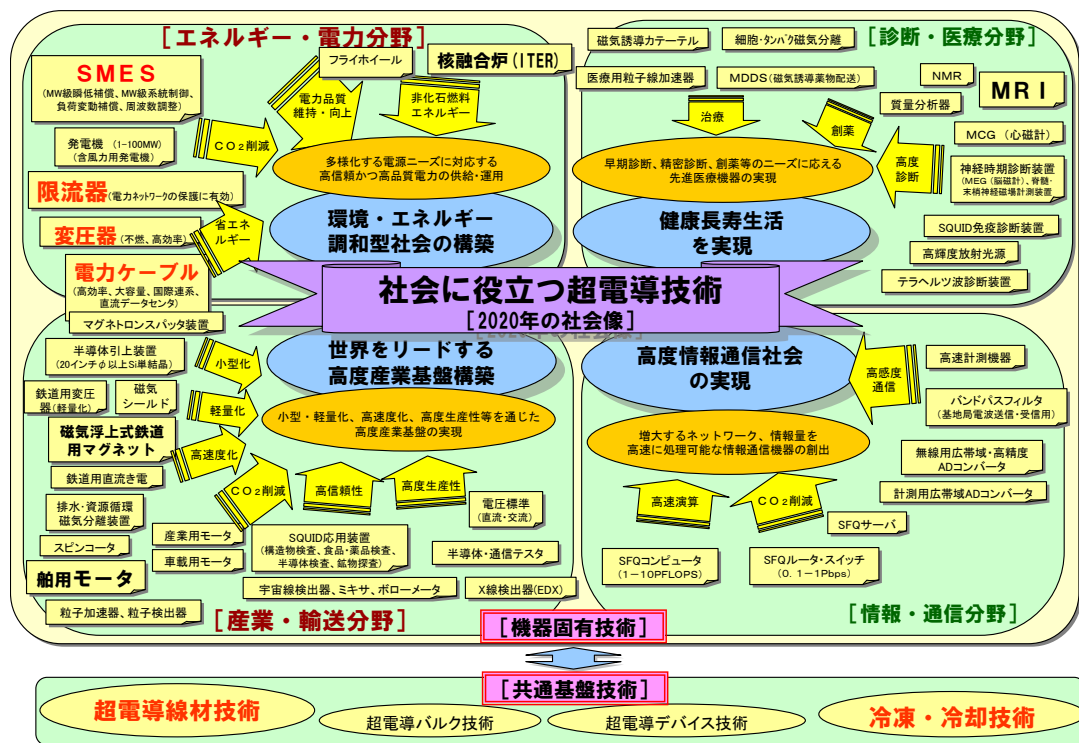


図3.3.4-1 2010年度の戦略マップ

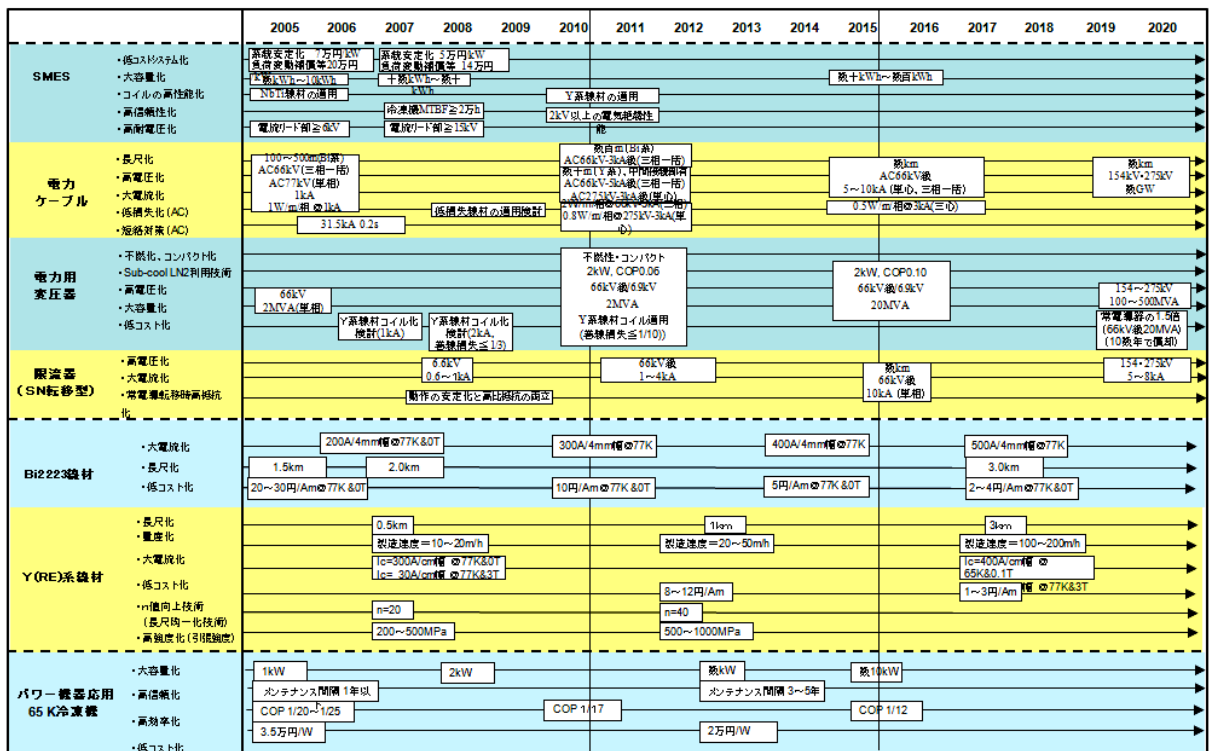


図3.3.4-2 本プロジェクトと強く関連している機器及び共通基盤技術のロードマップ (2009年度版)

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。そこでは、それぞれの機器開発テーマにおいて「本プロジェクト内で実施する機器開発に使用する仕様の線材を安定に製造する技術開発」とともに本プロジェクト終了直後に実施すると想定されている長期信頼性確認を目的とした「実証試験時期に必要な高い仕様の線材の開発」、さらには、その後 2020 年頃に始まるとされている「導入・普及時に必要となる、さらに高い仕様の Y 系超電導線材の開発」が含まれている。これらの線材開発に関わる目標値をまとめると表 3.4.1 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 ² (2 mm 幅×20 m) に相当する線材	$J_e=30$ kA/ cm ² (2 mm 幅×50 m 以上) に相当する線材	$J_e=50$ kA/ cm ² (2 mm 幅×200 m 以上) に相当する線材
超電導変圧器の研究開発	5 mm 幅 3 分割にて $I_c=50$ A@65K&0.01T, 100 m 以上に相当する線材	5 mm 幅 5 分割にて $I_c=100$ A@65K&0.02T, 50 m 以上に相当する線材	5 mm 幅 10 分割にて $I_c=100$ A @65K&0.1T, 100 m 以上に相当する線材

さらには、「実証試験時期に必要な仕様の線材」及び「導入・普及開始時に必要な仕様の線材」に求められる Y 系超電導線材は、いずれの機器に関しても極低コスト線材である必要があり、より安価な線材が求められるとともに、これまで系統的な検討がなされてこなかった経時変化や過電流耐性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) CO₂ 削減効果について

CO₂ 削減効果については、正式に刊行されている「高温超電導電力応用機器の市場調査研究報告書（平成 19 年 2 月、ISTEC）」の結果等をベースとして IV-1 項に整理しているが、本プロジェクトを推進する中では、グリーンイノベーション等への対応から別途 CO₂ 削減効果を試算している。

その結果、SMES、ケーブル、変圧器を合計した 2030 年の CO₂ 削減量は、最大ケースで 429 万 t/年、最小ケースでも 283 万 t/年となった。なお、試算結果の概要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 CO₂ 削減効果の試算（最大ケース）

単位：万 t/年

	2020 年	2030 年	2040 年	2050 年
SMES	18.3	258.4	365.7	494.5
ケーブル	29.4	117.8	206.1	294.4
変圧器	9.4	53.2	128.7	204.2
合計	57.1	429.4	700.5	993.1

表 3.4.3-2 超電導機器による CO₂ 削減効果の試算（最小ケース）

単位：万 t/年

	2020 年	2030 年	2040 年	2050 年
SMES	4.3	212.6	271.7	342.6
ケーブル	8.2	32.8	57.4	82.1
変圧器	9.4	37.4	65.4	93.5
合計	21.9	282.8	394.5	518.2

<主な算出条件>

- ・ CO₂ 排出源単位：0.41 kg/kWh（2006 年度 実績値 電気事業連合会）
- ・ ケーブル及び変圧器の設備量（2008 年版）は、電事連 HP から抜粋
- ・ 超電導ケーブルの普及率は 2020 年：10%、2030 年：40%、2040 年：70%、2050 年：100%として算出
超電導変圧器の普及率は、配電用変圧器はケーブルと同様に 2020 年：10%、2030 年：40%、2040 年：70%、2050 年：100%として算出
ただし、系統用変圧器は配電用変圧器よりも 10 年遅れで 2020 年：0%、2030 年：10%、2040 年：40%、2050 年：70%として算出
- ・ また SMES については、SMES による周波数調整を前提に新エネ発電＋SMES 補償プラント建設、既設電源代替として算出
なお、2020 年、2030 年の新エネルギー導入量は「長期エネルギー需給見通し（再計算）」資源エネルギー庁 H21.8 のデータを引用。なお、2040 年、2050 年は導入量が鈍化し、1.2 倍／10 年のペースと仮定。
- ・ 各超電導機器の CO₂ 削減効果における最大・最小ケースについては、以下の条件にて算出した。

●SMES

最大ケース：新エネルギーを最大限普及させたケースを想定

最小ケース：耐用年数を迎えた機器を順次入れ替えを想定

●ケーブル

最大ケース：電圧階級 275 kV 以下のケーブルを導入対象

最小ケース：電圧階級 110 kV 以上 275 kV 以下のケーブルを導入対象

●変圧器

最大ケース：配電用変圧器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 CO₂ 削減効果が一層増大することから、超電導機器導入の加速方策の 1 つとして考えられるのが、限流機能の付加である。今後、風力や太陽光等の再生可能エネルギーの導入拡大に伴い、電力系統の不安定化が助長され、特に電力系統に異常が発生した場合に事故電流が増大するため、これをいかに抑制できるかが重要になってくる。

限流機能付加超電導変圧器は、電力系統への異常発生時の事故電流を瞬時に抑制することができるため、電力系統運用の安定化に大きく貢献する。したがって、限流機能付加超電導変圧器が設置されている電力系統では、再生可能エネルギーの連系制約が大幅に緩和され、その結果再生可能エネルギーの連系量が増大することから、間接的に CO₂ 削減効果に寄与する。

このように、限流機能を付加する技術の早期確立が実現すれば、超電導機器の導入が加速されるとともに、同技術の海外輸出により、この分野の技術開発で鎊を削る欧米各国に対して優位な立場を確保することができる。

なお、超電導限流器の導入効果（リプレース分）については、前述の「高温超電導電力応用機器の市場調査研究報告書（平成 19 年 2 月、ISTEC）」において、表 3.4.3-3 のとおり 2020 年までの累計で約 26 億円、CO₂ 削減量は 5.7 kt/年と試算されているが、将来的な電源構成の変更（化石燃料発電所から再生可能エネルギー発電所への全面的なシフト）を考慮すると、それに伴う超電導限流器の市場規模及び CO₂ 削減量は、上記リプレース分の数 10 倍以上の規模になるものと想定される。

表 3.4.3-3 超電導限流器の導入量推移と CO₂ 削減効果

年度	2020	2030
累計導入量 (MW)	531	2,402
累計導入額 (億円)	26	120
CO ₂ 削減量 (kt/年)	5.7	25.8

(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/m² 以上の熱流束を可能とする高熱伝導冷却システムの開発を行う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/m² 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/m² 以上の熱流束が可能であることの検証試験結果を基に、平成 22 年度末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 ²) の 7 倍 (21 W/m ²) の発熱量に対し冷却システムが成立することを実証中。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 ↓ 世界最大・最高性能のコイル開発
(2) 高効率コイル伝導冷却技術開発	フランス, 韓国 (伝導冷却技術)	(中間目標) ・ 伝導冷却 ・ 6 kV 以上の絶縁性能 ・ 実システムでの実証試験開始 ↓ 世界最高水準の冷却技術確立
(3) 高磁界コンパクト SMES システムモデル検証	フランス (規模不明) 韓国 (最終目標 2.5 MJ)	(中間目標) ・ 偏流現象を利用するクエンチ保護システムの考案 ↓ 世界初 (最終目標) ・ システム制御を模擬し Y 系 SMES システムの 2 万回以上の繰返し充放電 ↓ 世界初の見込み

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 μm の Cu メッキを含む線材厚さ 170 μm で算出）の特性を有する線材を作製・実証した。また、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/CeO₂/GZO の積層構造は保たれていた。ハンダ処理により超電導特性が劣化していた領域を調査したところ、Hastelloy 構成元素の成分が安定化 Ag 層と超電導層の間に堆積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 μm 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
1. 66 kV 大電流ケーブル化技術の開発			
大電流・低交流損失	ケーブル交流損失 2 W/m・相@5 kA 以下	<ul style="list-style-type: none"> ・導体構造を導体 4 層、シールド 2 層に絞り込み ・線材幅 2 mm、4 mm の導体を試作 ・3 W/m・相@4.5 kA まで低減 	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
2. 275 kV 高電圧ケーブル化技術の開発			
高電圧絶縁・低誘電損失技術の基礎特性評価	<ul style="list-style-type: none"> ・ケーブル損失（交流損失（導体層）、誘電体損失）0.8 W/m・相@3 kA 以下 ・絶縁材料の絶縁設計検討 	<ul style="list-style-type: none"> ・超電導導体の 3 kA における交流損失は 0.235 W/m 達成。 ・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 ・交流損失と誘電体損失を合わせて 0.70 W/m となった。 	達成
高電圧接続技術の開発	<ul style="list-style-type: none"> ・中間部、終端部接続部を開発 ・275 kV 連続課電を行い、ケーブル導体、超電導-常電導接続部、電流リードに異常がないことを確認する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・超電導-超電導接続部は数 nΩ の低抵抗を達成した。 ・3 kA の超電導導体を作製・評価を通して、ケーブル導体、超電導-常電導接続部に異常がない事を確認した。 	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"> ・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。 	<ul style="list-style-type: none"> ・モデルケーブルでの連続課電、寿命特性を取得 ・絶縁厚 10 mm までの課電試験を実施し、誘電特性、破壊特性、部分放電特性を取得した。 ・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。 ・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。 	達成見込み
システム検証	<ul style="list-style-type: none"> ・ケーブルシステムのシステム設計をする ・耐久性を評価できる課通電試験計画書を作成する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ケーブルシステムを設計した。 ・他規格などを調査し、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。 	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"> ・$J_e=15 \text{ kA/cm}^2$ (2 mm-w×20 m) に相当する線材を安定に作製可能な技術を確立する ・大電流ケーブル用線材総長 8 km を安定製造・提供する。 	<p>ケーブル化に必要な性能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、$J_e=17 \text{ kA/cm}^2$ (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"> ・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 	<ul style="list-style-type: none"> ・IBAD-GZO 基板を平成 21 年度時点で 16.2 km 提供した。平成 22 年度に 27.0 km 提供予定 ・100 m 長の IBAD-GZO 中間層を使用した線材において $380 \text{ A/cm-w}@ (77\text{K}, \text{s.f.})$ の I_e 値を、170 m 長の IBAD-MgO 中間層を使用した線材は $300 \text{ A/cm-w}@ (77\text{K}, \text{s.f.})$ の I_e 値を実現しており、$J_e = 15 \text{ kA/cm}^2$ 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。 	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_e 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 μm 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
1. 66 kV 大電流ケーブルシステム検証		
システム検証	検証システム作製・課通電試験実施（66 kV/三心一括/5 kA, 15 m 長） ・ 150 mmφの管路に収納可能 ・ 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。
2. 275 kV 高電圧ケーブルシステム検証		
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。
3. 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。	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、CO₂削減や経済的な275 kV超電導ケーブルの実現のために、交流損失低減が重要な技術であるが、Y系超電導線材の細線化技術により世界最小の交流損失を達成することができている。

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/m²</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/m²</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>CO₂ 削減可能な高効率送電、建設コスト低減による低コスト送電の実現の見込みを得ることができた。</p>

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 Nm³/hr) の 75 % (900 Nm³/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 ≥ 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。

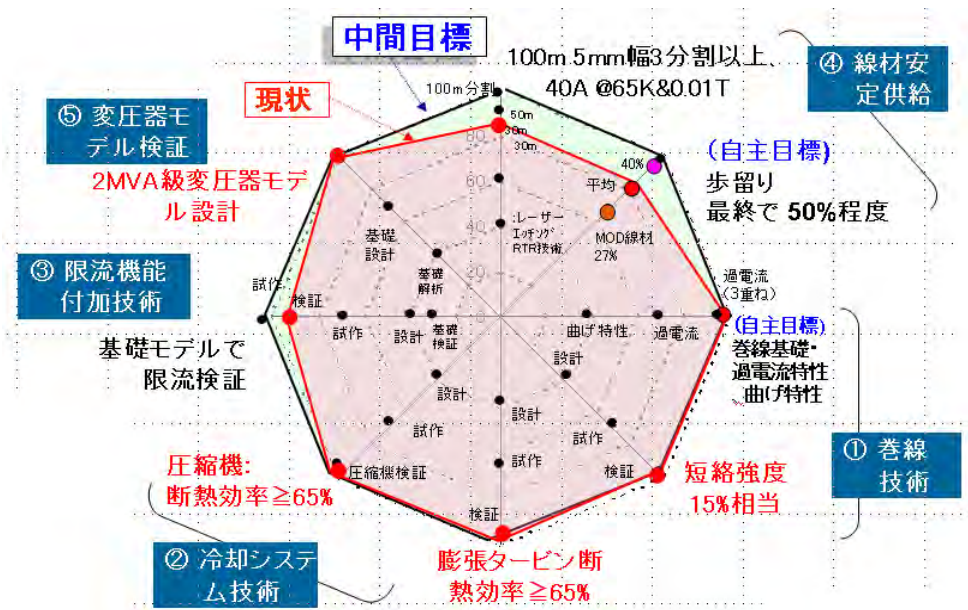


図 1.1.3-1 超電導変圧器プロジェクトの進捗 (対中間目標)

表 1.1.3-1 超電導変圧器の成果全体まとめ

項目	目標 (H22 年度達成)	これまでの成果	達成度
1. 超電導変圧器巻線技術開発			
大電流化技術開発	・保護銅層を付加した線材の曲げ特性の確認。 ・多層並列導体の転移均流化モデルの構成法の評価。	転位巻線構造の曲げ特性試験による最適転位長の確認。保護銅層付加の多層巻線の過電流特性の確認。12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と素線間電流分率の確認。	達成
低損失化技術開発	交流損失 1/3 となる細線化線材を用いた低損失巻線モデルによる変圧器の設計、試作。	100~300 m 級の 3 分割線材による低損失化モデル変圧器の設計およびモデルコイルの試作。	達成見込み
耐短絡強度技術開発	多層並列導体の短絡巻線モデルによる変圧器の設計、短絡電流 (20 MVA 級変圧器%インピーダンスの 15 %相当) 試験で巻線の健全性の検証と耐短絡強度を評価。	400 kVA 短絡モデル変圧器 (6.6/2.3 kV、15 %) を設計、製作し短絡試験を実施。設計どおりの短絡電流通電による巻線の耐短絡強度を確認。	達成
低交流損失性・大電流容量導体および巻線技術の検討	細線化線材、転位導体の交流損失、電流分流等の特性についての理論、実験による検討。	転位導体の電流分流の均等化方法の理論、実験による解明。並列導体の付加的交流損失の理論を解明の実施。	達成
2. 冷却システム技術開発			
小型膨張タービンの高効率化	断熱効率 65 %以上。	磁気軸受けを採用した小型膨張タービンを平成 20 年度に試作、試験・評価により約 70 %を実証。	達成
小型ターボ式圧縮機開発	断熱効率 65 %以上。	応力解析ソフトによるシミュレーションで小型・高効率化の設計・検討を実施。基礎特性把握用のターボ圧縮機モデルの試作、試験により定格の 75 %流量で効率 65 %を達成。	達成見込み

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
3. 限流機能付加技術開発			
4 巻線モデルによる特性検証	4 巻線モデル変圧器による突発短絡試験の実施、過大電流の応答特性の検証、評価。	短絡電流の数十分の一の限流動作を確認。巻線の常電導領域抵抗の一次電圧依存性を確認。	達成
限流応答特性解明と限流効果による巻線保護の検討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
4. 超電導変圧器対応線材安定製造技術開発			
対応線材安定製造技術開発 (PLD 法)	5 mm 幅 3 分割にて $I_c=40 \text{ A}@65 \text{ K}&0.01 \text{ T}$ 、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ル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ル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ル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
5.2 MVA 級超電導変圧器モデルの設計			
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 カ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 カ年においては、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 カ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 特性向上技術を確立中であるため、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"> ・ 2 kA 級巻線技術の確立 ・ 巻線の低交流損失 $\leq 1/3$(対細線化なし線材) 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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。 ・ 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。
(2) 冷却システム技術開発	<ul style="list-style-type: none"> ・ 冷凍能力：2 kW@65 K ・ 冷凍効率(COP):0.06@80 K 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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。
(3) 限流機能付加技術開発	<ul style="list-style-type: none"> ・ 数百 kVA 級限流機能付加変圧器による機能検証(過大電流を定格電流の3倍以下に抑制) 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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。
(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"> ・ 安定製造、加工技術の向上(歩留向上) 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 安定製造や加工技術の改良により線材の長手・幅方向の I_c 特性向上技術は確立中のため、目標達成は可能。
(5) 2 MVA 級超電導変圧器モデルの設計	<ul style="list-style-type: none"> ・ 66/6.9kV 2 MVA 変圧器モデルの課通電試験による性能検証 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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。

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⁽¹⁻²⁾。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⁽³⁾。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⁽⁴⁾。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⁽⁵⁾。

b. Siemensプロジェクト

鉄道車両用として、Bi-2223線材により2001年に単相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⁽⁶⁻⁷⁾。

(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⁽⁸⁾。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⁽⁹⁾。

表 1.1.3-3 超電導変圧器開発の世界動向との比較

研究テーマ	世界動向	本プロジェクト成果と位置づけ
(1) 超電導変圧器巻線技術開発	<ul style="list-style-type: none"> 低損失化は NZ プロジェクト等におけるローベル導体の採用。 耐短絡強度は巻線モデルによる検証。 	<ul style="list-style-type: none"> 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。 世界初の Y 系変圧器の短絡特性を実証
(2) 冷却システム技術開発	<ul style="list-style-type: none"> タービン方式冷却システムは、米国の限流器開発プロジェクトで適用計画あり。 	<ul style="list-style-type: none"> タービン膨張器およびターボ圧縮機の断熱効率 > 65 % 達成は確実。 世界に先駆け小型タービン方式冷凍機要素技術を開発
(3) 限流機能付加技術開発	<ul style="list-style-type: none"> 変圧器巻線による限流機能開発は米国の変圧器プロジェクトで開始予定。 	<ul style="list-style-type: none"> 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。 世界初の Y 系変圧器の限流特性を実証
(4) 超電導変圧器対応線材安定製造技術開発	<ul style="list-style-type: none"> 低損失化対応細線化線材は米国で開発中。 	<ul style="list-style-type: none"> 3 分割 100 m 長線材 (40 A@0.01 T, 66 K) の製造・加工技術の開発 世界に先駆け細線化線材加工技術を開発
(5) 2 MVA 級超電導変圧器モデルの設計	<ul style="list-style-type: none"> Y 系変圧器の開発は米国のプロジェクトで開始予定。 	<ul style="list-style-type: none"> 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。 世界に先駆け Y 系変圧器を開発

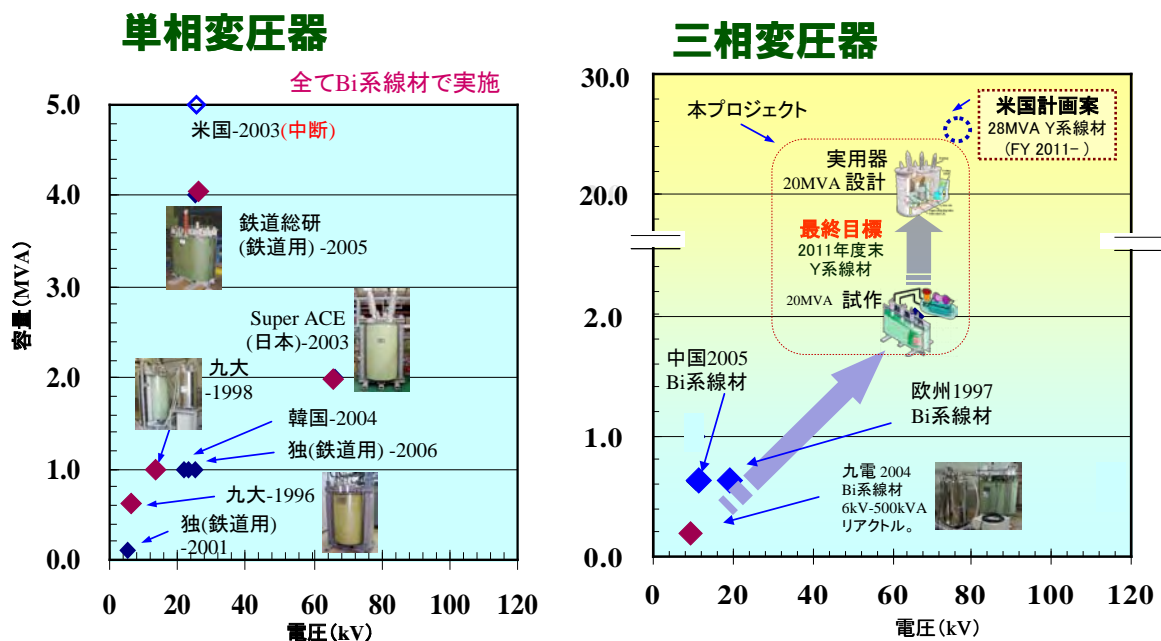


図 1.1.3-1 国内外の超電導変圧器の開発状況

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 μm 、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-CeO₂/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 CeO₂ 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 μm 厚基板に比べて薄肉となる 70~80 μm 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 μm 厚 HasteloyTM 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 μm 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 μm 厚 HasteloyTM 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 μm と想定した場合の J_c 値は 36 kA/cm² 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 μm 厚 HasteloyTM 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 μm 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/cm² 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 CeO₂ 層の最適条件による薄膜化、高速化により、設定された技術コスト 3 円/Am に必要な成膜条件、品質を実現した。最終目標達成に向けては、IBAD を含む中間層で 200 円/m、基板 180 円/m、研磨 60 円/m、安定化層 60 円/m の低コスト化技術開発を設定している。これらの条件を満足するには、「基板/中間層」において、PLD 成膜領域拡大改造や結晶粒高配向薄肉化等による CeO₂ 膜高速化、層数削減、MOD ベッド層の適正化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 $I_c=524 \text{ A/cm-w}@77 \text{ K,s.f.}$ 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 $I_c>370 \text{ A/cm-w}@77 \text{ K,s.f.}$ 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/cm² 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 μm 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 μm 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 I_c 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><PLD> ■33 A/cm-w@77K, 3 T- 51 m ■492 A/cm-w@77 K, 0.02 T- 51 m</p> <p><MOD> ■14 A/cm-w@ 77 K, 3 T-20 m ■>300 A/cm-w@65 K, 0.02 T- 50 m 極低コスト未達</p> <p><CVD> ■20 A/cm-w@77 K, 3 T-短尺</p> <p><高 Birr> ■BZO 添加 MOD 線で 65 T で高 B_{irr}</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><PLD> ■2 mm 幅-50 m-$I_c \geq 388$ A/cm-w ■5 mm 幅・5 分割- 50m 損失 1/5 見通す</p> <p><MOD> ■2 mm 幅-50 m-$I_c \geq 397$ A/cm-w ■5 mm 幅・5 分割- 20 m 損失 1/5 見通す</p> <p><RABiTS-PLD> ■2 mm 幅-28 m-$I_c \geq 310$ A/cm-w</p> <p><加工> ■スライビング: 5 mm 幅 5 分割- 50 m ■リッター切断: 2 mm 幅-30 m -I_c 劣化 $\leq 10\%$</p>	<p>中間目標ほぼ達成</p> <ul style="list-style-type: none"> ・目標①: 達成 ・目標②: コイルで損失 1/5 の確認が残
<p>(4) 高強度高 J_e 線材 作製技術開発</p> <p>① 300A/cm-w-1GPa-50m</p> <p>② $J_e = 30$ kA/cm²-50 m</p>	<p>■強加工 70,80 μm ハステロイ基板線材 $I_{c,min} = 400$ A/cm-w-$J_e > 36$ kA/cm² - 50 m -0.95 GPa (Ag30 μm 想定)</p>	<p>中間目標ほぼ達成</p> <ul style="list-style-type: none"> ・目標①: 強度の低温測定が残 ・目標②: 達成
<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: $I_c = 420$A -15 m/h or 325A 30 m/h MOD: 350A 5 m/h</p>	<p><基板中間層> ■MOD ベット層: MOD-YBCO 膜 で $J_c = 2.5$ MAcm²</p> <p>■IBAD-MgO 配向向上 ⇒セリア 500 nm $\Delta\phi(\text{CeO}_2) \sim 3^\circ$</p> <p>■IBAD-MgO: 200 m/h-$\Delta\phi(\text{CeO}_2) < 4^\circ$</p> <p><PLD> ■$I_c = 435$ A@15 m/h-50 m, 524 A@10 m/h-50 m</p> <p><MOD> ■$I_c = 370$ 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"> ・全ての中間層の条件の組合せ実証が残 ・PLD 超電導層: 達成 ・MOD 超電導層: 高速化、長尺化実証が残

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 $I_c=50$ A/cm-w @77 K, 3 T-200 m</p> <p>② $I_c=400$ 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 $I_c=50$ 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 - $I_c=500$ 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 I_c 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 $I_c=500$ A/cm-w -1GPa-200 m</p> <p>② $J_c=50$ kA/cm²-200 m</p>	<p>薄肉高強度金属基板の長尺化と高 I_c 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 I_c 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 I_c 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 μ 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 μm 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 μm 厚で SuperPower 社成果にはやや劣るものの強度的には約 1 GPa を実現しており、一歩リードしているといえる。

「低コスト・歩留向上技術開発」に関しては、世界的にコスト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"> 劣化挙動については系統的に評価した例はな 	必要な負荷に対する試験を実施 ↓ 世界初の系統的な成果
(2) 磁場中 高臨界電流(I_c)線材 作製技術開発	LANL (米国) : IBAD-PLD(短尺) $I_c = 234 \text{ A/cm-w@75 K, 1T}$ SuperPower(米国) : IBAD-MOCVD 短尺 $I_c = 50 \text{ A/cm-w@77 K, 3 T}$ 50 m $I_c = 14 \text{ A/cm-w@77 K, 3 T}$ AMSC (米国) : RABiTS-TFA-MOD 短尺 $I_c = 10 \text{ A/cm-w@77 K, 3 T}$	短尺 $I_c = 56 \text{ A/cm-w@77 K, 3 T(PLD)}$ 50 m $I_c = 33 \text{ A/cm-w@77 K, 3 T(PLD)}$ 短尺 $I_c = 35 \text{ A/cm-w@77 K, 3 T(MOD)}$ 12 m $I_c = 14 \text{ A/cm-w@77 K, 3 T(MOD)}$ ↓ 世界最高の磁場特性
(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 ↓ 世界的に先行した技術
(4) 高強度高工業的 臨界電流密度(J_c) 線材作製技術開発	SuperPower(米国) : 50 μm 厚ハステロイ金属基板 $\Rightarrow 800 \text{ MPa}$ AMSC (米国) : クラッド結晶粒配向金属基板 $\Rightarrow 426 \text{ MPa}$	70, 80 μm ハステロイ基板線材 $I_{c, \text{min}} = 400 \text{ A/cm-w} \cdot J_c > 36 \text{ kA/cm}^2 \cdot 50 \text{ m}$ -900 GPa (Ag30 μm 想定) ↓ 強度は世界最高
(5) 低コスト・歩留向上 技術開発	SuperPower(米国) : IBAD-MOCVD 1065 m 長 $I_c = 282 \text{ A/cm-w@77 K, s.f.}$ ($I_c \times L = 300 \text{ kAm}$) AMSC (米国) : RABiTS-TFA-MOD 500 m $I_c = 250 \text{ A/cm-w@77 K, s.f.}$ ($I_c \times L = 125 \text{ kAm}$)	フジクラ : IBAD-PLD 504 m $I_c = 350 \text{ A/cm-w@77 K, s.f.}$ ($I_c \times L = 176 \text{ kAm}$) 昭和電線 : IBAD-TFA-MOD 500 m $I_c = 310 \text{ A/cm-w@77 K, s.f.}$ ($I_c \times L = 155 \text{ kAm}$) ↓ 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

2. 研究開発項目毎の成果

2.1 超電導電力貯蔵システム (SMES) の研究開発

2.1.1 2 GJ 級高磁界・大電流コンパクトコイル構成技術開発

2.1.1-1 開発方針

(1) 研究開発目標

中間目標 (平成 22 年度)

- ・ 20~40 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) 研究内容

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、磁場中特性に優れた Y 系超電導線材によるコイルを用いた高磁界化による貯蔵エネルギー高密度化が必要となる。この高磁界コイルの実現には、コイル通電時に発生する通電電流と最大経験磁場、コイル径の積として加わる強力な電磁力 (フープ応力) の繰返しに耐えるコイル構成を開発することが不可欠である。「超電導電力ネットワーク制御技術開発」プロジェクトにおいて IBAD/ CVD-YBCO 線材の機械強度を評価し、77 K 液体窒素中においてフープ応力方向の一軸引張応力が 1 GPa を超えても I_c 値が可逆領域であること、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、IBAD/ CVD-YBCO 線材を用いて、応力集中が懸念されるコイル電極部構造への対策を施した小型コイルを作製してフープ応力試験を実施し、実際に耐フープ応力 1 GPa を有することを実証した。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 20MJ 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(77 K,s.f.)-200 m 長級線材を用いて目標レベルのフープ応力の検証評価ができるよう配置した外部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ため、均流化を実現する電極構成により集合導体化コイルを開発した。高磁界コイルは電極部での高応力に耐える必要があることから、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 集合導体・コイルの応力歪特性検討（中部電力、京都大学）

(1) 研究開発目的

大容量 SMES コイルの開発には、大電流導体の開発が不可欠である。Y系超電導線材は従来の超電導線材構造と異なり、基板に薄膜を積層した厚さ方向に非対称なテープ状構造であるため、Y系超電導線材の大電流容量導体化について、集合導体コイル構造の最適化の観点から応力歪特性について評価した。

(2) Y系集合導体の積層構造間の応力歪評価

Y系超電導線材は薄膜積層構造をしているため、厚さ方向に非対称である。このため、集合導体の構成方法において、パターン別にコイル巻線時に負荷される応力歪の比較評価を実施した⁽¹⁾。ここで、安定化層を構成する Cu 層に関しては、弾性変形のみの場合と塑性変形を含む場合の両方について検討した。計算に用いた積層構造モデルは図 2.1.1-2-1 の 3 パターンである。ただし、Cu 層と Hastelloy™ 基板のヤング率 E_{Cu} 、 E_H 、厚さ t_{Cu} 、 t_H はそれぞれ、 $E_{Cu}=120$ GPa、 $E_H=200$ GPa、 $t_{Cu}=t_H=0.1$ mm とした。

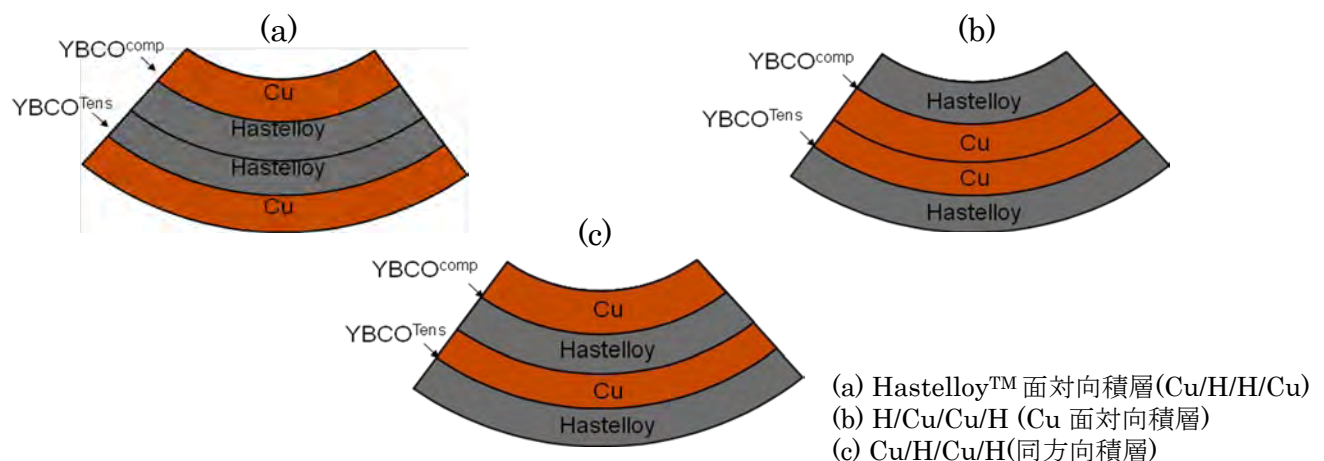


図 2.1.1-2-1 Y系線材 2本集合化時の積層パターン

導体中心から中立軸までの距離 (mm)をパターン別に表 2.1.1-2-1 に示す。また、Y系超電導層に発生する引張曲げひずみを図 2.1.1-2-2 に示す。大容量 SMES コイルサイズにおいては、いずれの場合も小さく、問題ないレベルと考えられる。

表 2.1.1-2-1 導体中心から中立軸までの距離 (mm)

	Cu/H/H/Cu	H/Cu/Cu/H	Cu/H/Cu/H
Cu:Elastic	0	0	0.0125
Cu:Plastic	-0.0346	-0.0117	0.0038

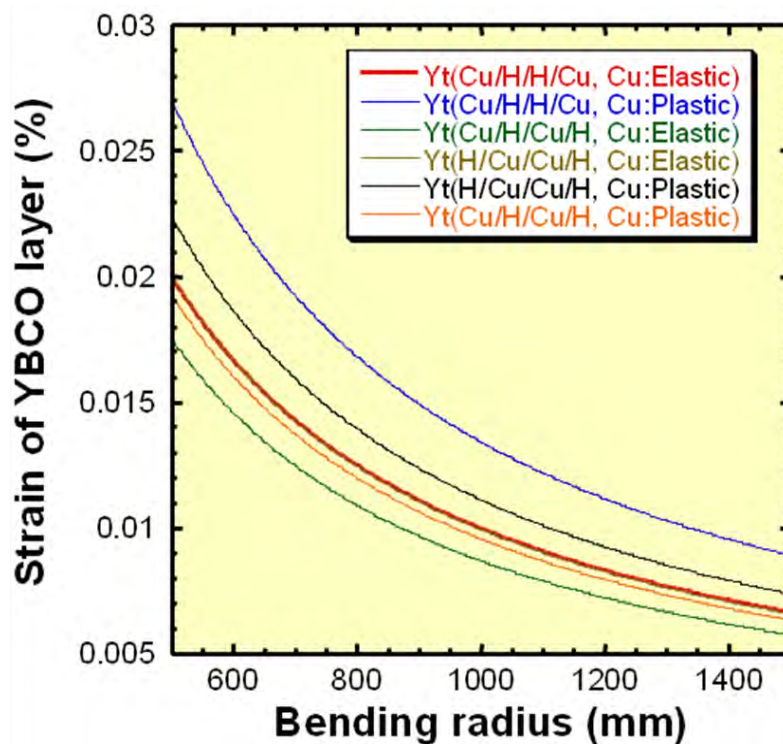


図 2.1.1-2-2 引張曲げひずみと曲げ半径の関係

次に、導体の曲げ、せん断応力の計算を実施した。3点曲げにより、2点支持の間は 100 mm とし、曲げ半径 1 m で評価した。パターン別のせん断応力分布および曲げ応力分布を図 2.1.1-2-3～図 2.1.1-2-5 に示す。パターン別に応力の違いがあるが、いずれの場合も絶対値は小さい。

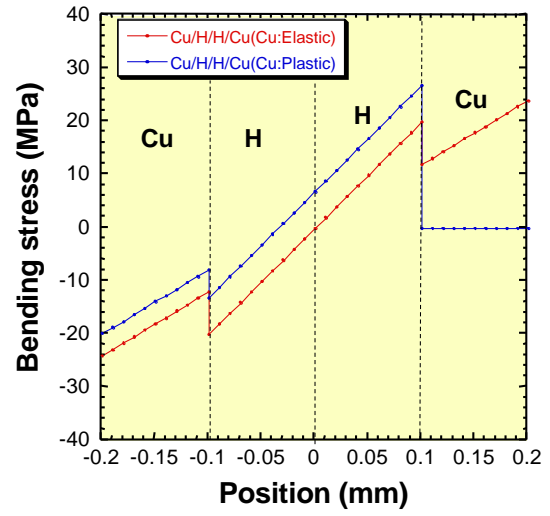
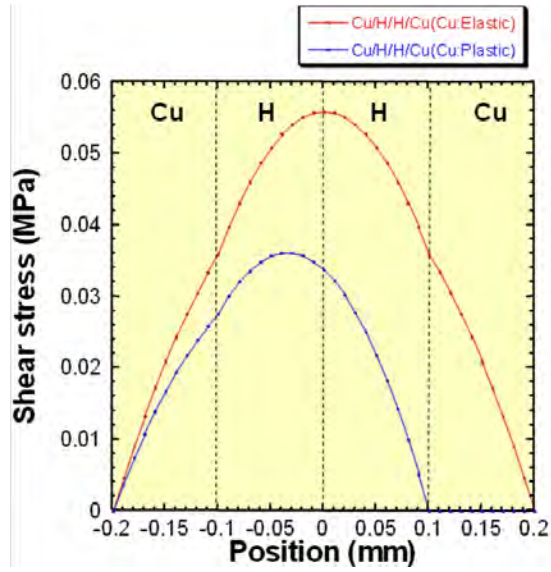


図 2.1.1-2-3 Hastelloy™ 面対向積層(Cu/H/H/Cu)時のせん断応力および曲げ応力

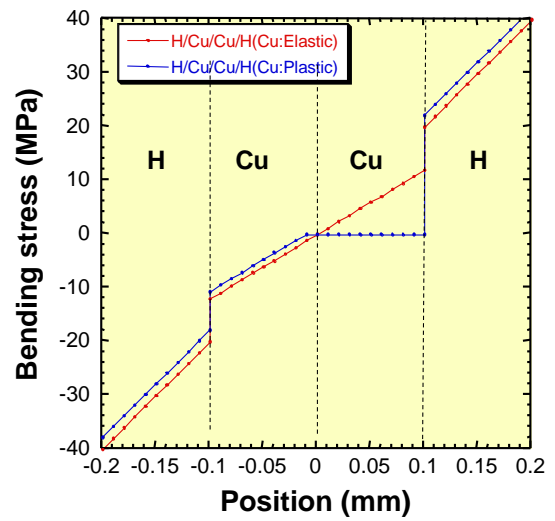
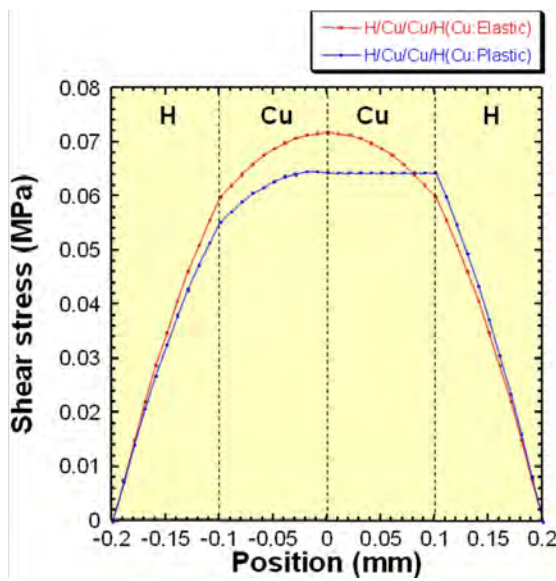


図 2.1.1-2-4 H/Cu/Cu/H (Cu 面対向積層)時のせん断応力および曲げ応力

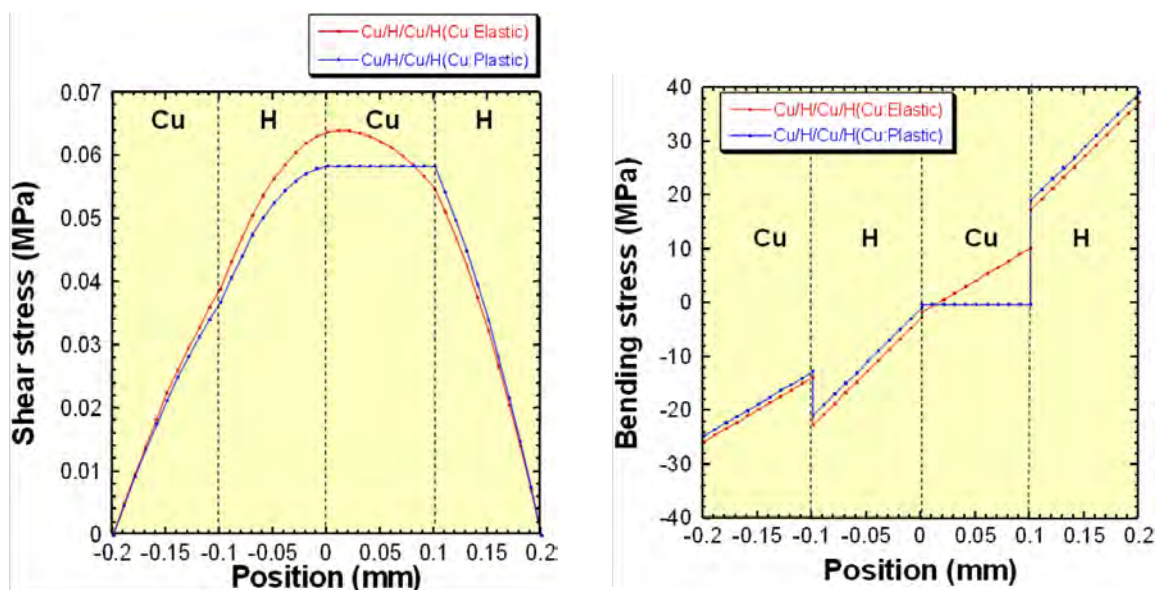


図 2.1.1-2-5 Cu/H/Cu/H(同方向積層)時のせん断応力および曲げ応力

(3) 結果

集合導体の構成方法において、パターン別にコイル巻線時に負荷される応力歪の比較評価を実施した。その結果、大容量 SMES コイル規模では、いずれの積層構造についても Y 系超電導層に発生する曲げひずみは 0.015 %以下と小さく、Cu/Hastelloy™ 界面に働くせん断応力は、導体厚さが薄いため非常に小さいことが確認された。よって、SMES コイル設計においては、導体の曲げ応力、せん断応力以外の応力（フープ応力、樹脂/線材間の熱残留応力等）への配慮がより重要と考えられる。

引用論文リスト

- (1) 「材料力学の基礎」 培風館 p.68

2.1.1-3 集合導体・コイルの構造最適化検討（中部電力、早稲田大学）

(1) 研究開発目的

大容量 SMES コイルの開発には、大電流導体の開発が不可欠である。このため、Y 系超電導線材を用いた大電流容量集合導体コイルの構造最適化のため、通電特性・熱特性について評価した。

(2) 集合導体・コイルの通電特性・熱特性評価

SMES 用コイルの素線として想定する Y 系超電導線材は、テープ幅は 10 mm、超電導層の厚さ 1 μm 、77 K における自己磁界中の臨界電流(I_c)は 280 A/cm-w である。この線材を用いて設計した SMES 用コイルの諸元を表 2.1.1-3-1 に示す。内

半径 1.0 m、外半径 1.4 m、厚さ 0.6 m の要素コイル 180 個が、半径 3.7 m でトロイダル状に配置される。1 要素コイルは 4 つのパンケーキコイルから成り、1 ターンの幅は 1.1 mm である (表 2.1.1-3-2)。この SMES 用コイルに 1 素線当たり 540 A の電流を通電すると、動作温度 20 K で 2.4 GJ の磁気エネルギーを蓄積できる。

表 2.1.1-3-1 2 GJ 級トロイダル SMES の諸元

貯蔵エネルギー	2.4 GJ
運転温度	20 K
要素コイル数	180
トロイダル中心半径	3.7 m
最大運転電流	2160 A
最高磁場 (垂直成分)	11 T (0.67 T)

表 2.1.1-3-2 2 GJ 級トロイダル SMES を構成するパンケーキコイルの諸元

内径	ϕ 2.0 m
外径	ϕ 2.8 m
高さ	0.06 m
線材巾	15 mm
線材厚さ (絶縁材・補強材込)	1.1 mm
導体素線数	4
巻数	91

Y 系超電導線材はテープ形状をしているため、導体は積層導体となる。2 kA の導体の場合、想定される素線の通電電流が 540 A であるから、基本的に 4 枚を積層することになる。そこで、図 2.1.1-3-1 に示すような Y 系超電導線材を 4 枚束ねた Y 系集合導体について検討した。

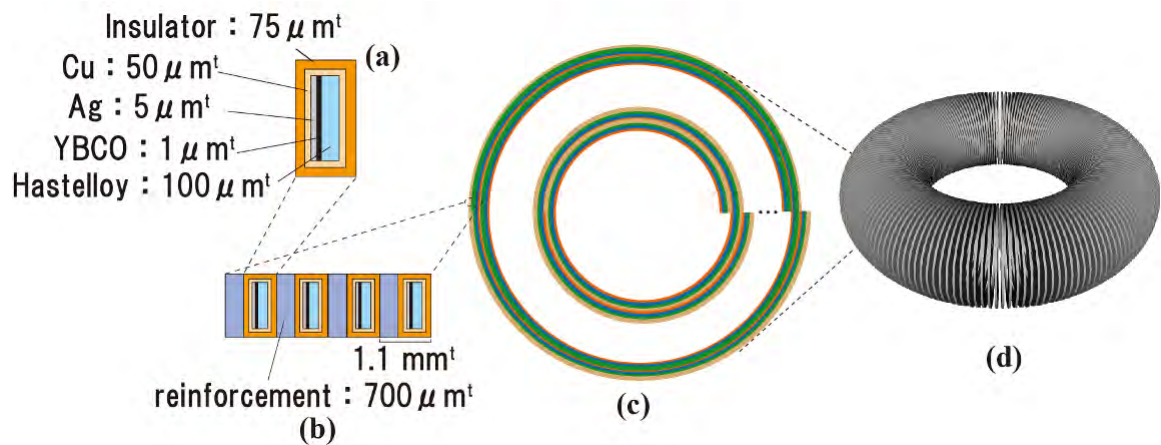
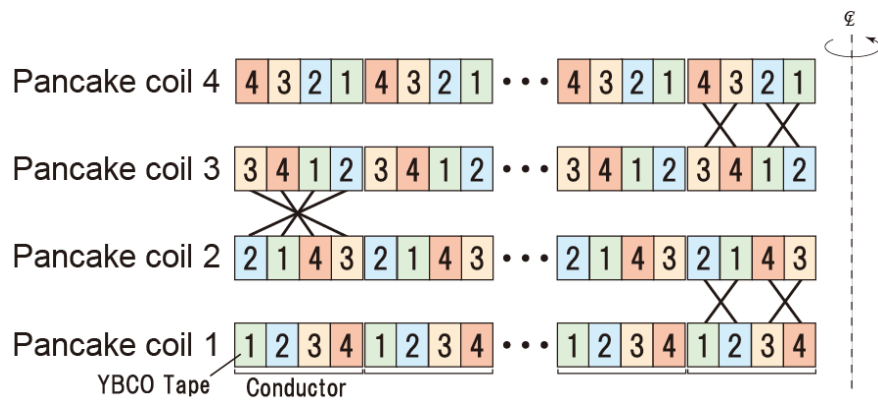


図 2.1.1-3-1 (a) Y 系超電導線材、(b)集合導体、(c)パンケーキコイル、
(d)トロイダルコイルの概略図

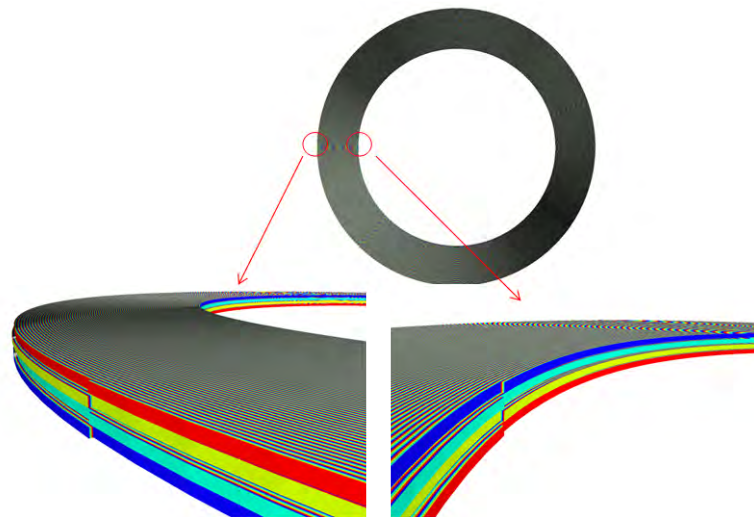
テープを積層して導体化する場合、偏流と交流損失が問題となる。偏流が発生すれば、導体の電流容量の低下、交流損失の増大が問題となるため、均流化が不可欠となる。一方、交流損失はテープ面に垂直な磁界変動が損失を支配するが、これは多モジュールコイル／トロイダル方式の採用により、垂直磁界の低減を図る方向で検討している。一方、積層導体の素線間の電磁結合が大きいと平行磁界に対する結合損失が大きくなるため、素線間の電磁結合の抑制が課題となる。そこで、検討している集合導体の素線は、交流損失を低減するため、素線間電気絶縁を施すこととした。素線絶縁された素線を集合導体にした場合、素線間の電流転流が端部で起きる。導体の均流化のためには転位が必須であるが、Y 系超電導線材はテープ形状をしているため、ツイストによる転位ができない。従って、パンケーキ間の接続部で転位を行う必要がある。

本プロジェクトで想定している導体は図 2.1.1-3-1 (b)のように超電導層厚さ $1 \mu\text{m}$ × 幅 1 cm の線材が 1.1 mm 間隔で 4 枚巻かれる。トロイダルコイルを構成するユニットコイルは 4 個のパンケーキコイルから成る。したがって、接続転位はユニットコイル内では 3 回まで可能である。そこで、図 2.1.1-3-2 に示すような転位を考える。コイルの諸元は表 2.1.1-3-1 で示した通りである。このときインダクタンスは表 2.1.1-3-3 で与えられる。結合係数は表 2.1.1-3-4 のように 0.999 程度になり、素線間結合は非常に強い。

ユニットコイルのインダクタンスは図 2.1.1-3-3 に示す。ユニットコイルの各線材に流れる電流を計算すると、電流の分布は図 2.1.1-3-4 のようになり、均流していることが確認できた。



(a) 接続部の転位



(b) インダクタンス計算のモデル

図 2.1.1-3-2 4 枚積層導体、4 パンケーキコイルの転位

表 2.1.1-3-3 コイルに巻かれた集合導体内の素線のインダクタンス

	Tape 1	Tape 2	Tape 3	Tape 4
Tape 1	0.51215 H	0.51207 H	0.51200 H	0.51207 H
Tape 2	0.51207 H	0.51215 H	0.51207 H	0.51200 H
Tape 3	0.51200 H	0.51207 H	0.51215 H	0.51207 H
Tape 4	0.51207 H	0.51200 H	0.51207 H	0.51215 H

表 2.1.1-3-4 コイルに巻かれた集合導体内の素線の結合係数

	Tape 1	Tape 2	Tape 3	Tape 4
Tape 1	--	0.99983827	0.99970913	0.99982753
Tape 2	0.99983827	--	0.99983084	0.99970913
Tape 3	0.99970913	0.99983084	--	0.99983827
Tape 4	0.99982753	0.99970913	0.99983827	--

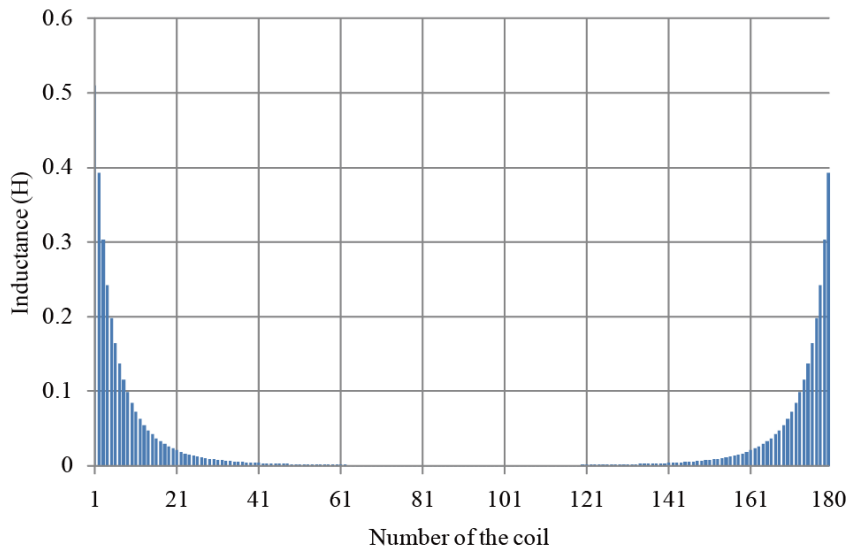


図 2.1.1-3-3 ユニットコイルのインダクタンス

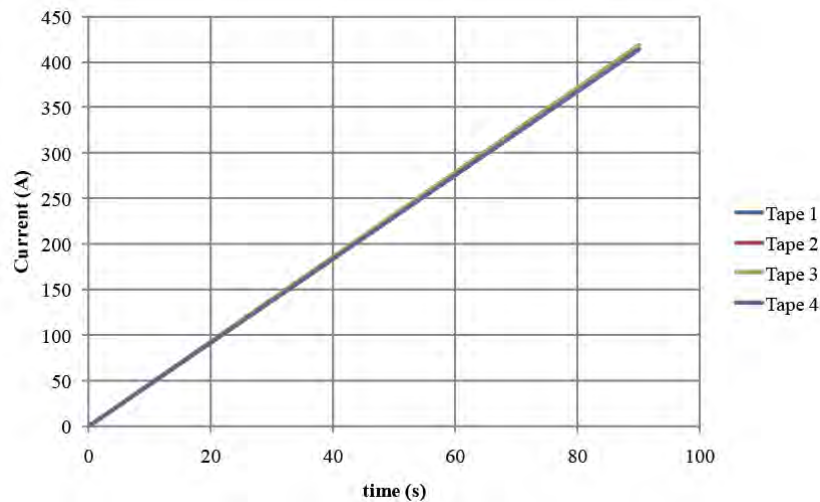


図 2.1.1-3-4 4枚積層導体の素線の電流分布

コイルは集合導体で巻かれるが、電流が各素線に均等に流れていると仮定すれば、素線 1 本について常電導伝播解析をすればよい。そこで、安定化層の厚さが異なる Y 系超電導線材に局部的に常電導部が発生した場合の線材内の温度分布、発生電圧について調べた。

解析において、Y 系超電導線材の抵抗発生は I - V 特性 (J_c 、 n 値) の分布に依存するため、有限要素法で解くことにした。Y 系超電導線材は、幅 1 cm、ハステロイ厚さ 100 μm 、Cu 層厚さ 25~200 μm で、 $I_c=600 \text{ A/cm-w}$ (@1 $\mu\text{V/cm}$ 、20 K)、 n 値は 30 のものを想定した。

I_c の温度依存性は、以下のように仮定した。

$$E = E_c \left(\frac{I}{I_c} \right)^n \quad (\text{式 2.1.1-3-1})$$

$$I_c = I_{c0} \frac{T_c - T}{T_c - T_{op}} \quad (\text{式 } 2.1.1-3-2)$$

ここで、 E_c は I_c を定義する電界、 I_{c0} は運転温度 T_{op} における臨界電流である。

通電電流は $I_c=600 \text{ A}$ (@ $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ 、 20 K) に対して負荷率 0.5、0.6、0.7、0.8、0.9 に相当する値を流し続けた。

図 2.1.1-3-5 は、長手方向に 1 cm の劣化 ($I_c = 0 \text{ A}$) が発生した場合、コイル両端電圧が 0.1 V になるまでにかかる時間とそのときの温度を Cu 層の厚さを横軸に整理したものである。これらの結果から、この結果から、 0.1 V 発生時のホットスポットの温度は負荷率に増加に伴って、減少する傾向がある。また、安定化層の厚さが増えると、ホットスポットの温度は減少する。 0.1 V 発生時のホットスポットの温度は最高で 140 K 程度である。

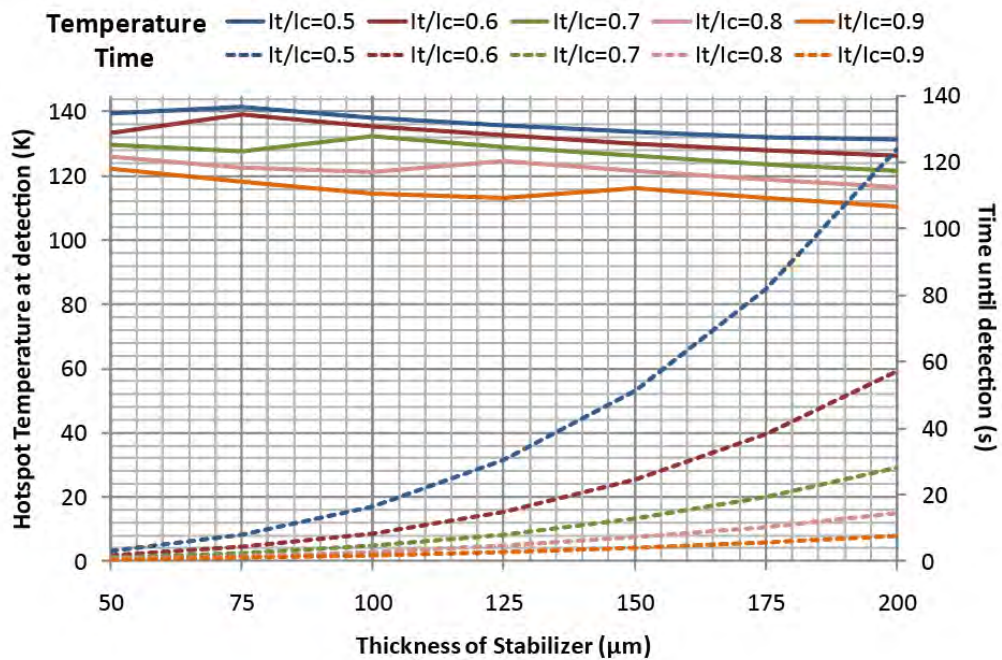


図 2.1.1-3-5 1 cm の劣化が発生した時の線材両端で 0.1 V 発生するのに要する時間と劣化部の温度

(3) 結果

テープを積層して導体化する場合、素線間の電磁結合が大きいと平行磁界に対する損失が大きくなるため、素線間の電磁結合の抑制が課題となる。そこで、交流損失を低減するため、集合導体の素線は素線間絶縁を施すことと決定した。Y 系超電導線材はテープ形状をしているため、ツイストによる転位ができない。このため、パンケーキ間の接続部で転位を行うこととした。その時のユニットコイルの各線材に流れる電流を計算した結果、電流の分布は均流していることが確認された。また、

電流が各素線に均流に流れている場合において、素線絶縁を施した集合導体コイルの常電導発生後の温度変化について評価した。その結果、素線絶縁を施した集合導体内で、ある素線で常電導領域が発生しても、転流は速やかに発生することが明らかとなった。

2.1.1-4 均流化に関する検討（中部電力、東北大学）

(1) 研究開発目的

超電導コイルに用いる高温超電導体（HTS）は、一般的に Bi 系、あるいは Y 系のテープ線材である。1 本の HTS テープ線材の電流容量は約 100 A 以下であるので、それ以上の大電流に対して、多数のテープ線材を用いる必要がある。そこで、超電導コイルの大容量化を図る構成として、多数の HTS テープ線材を一組の導体とし、それを並列に積層して巻線した並列多層超電導コイルがある。例として並列 4 線材多層ダブルパンケーキコイルは、外径側に計 8 個の電極を形成する。これにより単線式のものと比較して線材の枚数に応じて容量が大きくなり、要素コイルあたりの使用線材単長が短くなる。しかしこのように多重テープ導体を単純に多層に巻線する構成のコイルでは、電流が最も内側のテープ線材に集中する偏流現象が発生する。単純に多重線材を多層に巻き合わせた構成の並列多層超電導コイルでは、各線材におけるリアクタンスが不均一となるため電流が内側の線材に多く流れてしまう。この現象を偏流現象と呼び、SMES 用超電導コイルの通電能力低下などの特性劣化現象が多く見つかっている。偏流を防止する方法の一つとして、矩形断面を持った並列線材に対し適切な箇所転位を施すことにより各線材におけるリアクタンスを均一にする方法がある⁽¹⁾⁽²⁾。ここで、ダブルパンケーキコイルでは最内層において軸方向に一度の転位を施すが、要素コイル当たりでは転位は一度しかできない。よって並列 2 線材多重超電導コイルでは一度の転位で偏流が防止できるが、並列 3 線材以上では一度の転位ではリアクタンスが対称とならない線材が存在してしまう。この制約条件により、任意の層数および線材本数に対する超電導ダブルパンケーキコイルを構成することができない。

本研究では、SMES を構成する要素コイルの導体構成パラメータを直接扱うことのできる電流分布の評価方法を確立することが目的である。具体的には、コイルの最内層で軸方向転位を施す並列多層超電導ダブルパンケーキコイルを対象として、任意の層数、任意の線材本数において偏流のない様な電流分布を得る方法を新しく提案し、並列多層超電導ダブルパンケーキコイルの電流分布と線材の構成パラメータとの関係を明らかにする。

(2) 並列多層超電導コイルの構造選択

Y 系超電導テープ線材の 1 本の電流容量は数 100 A 程度であるので、それ以上の大電流を目指すには多数のテープ線材を用いる必要がある。HTS テープ線材を

多数用いる場合の最も単純な方法は、多数のテープを並列に重ねて1導体を構成する方法であろう。しかし、この多重テープ導体を巻線する構成のパンケーキコイルでは、最も外側となるテープのインダクタンスが最も大きくなるので、電流が最も内側のテープ線材に集中する偏流現象が発生する。したがって、多重テープ構成の導体を用いたパンケーキコイルでは、全てのテープ線材に均一に電流を流せるように構成することが重要な課題となる。

この偏流現象をなくす従来の有効な方法は、テープ線材を横に2並列構成して適切な箇所でトランスポーズ（転位）する方法である。この場合には、転位する位置で発生するテープ線材の横方向の曲げ歪や、隙間での歪による劣化が予想される。また、転位の間隔は、各テープ線材の受ける磁界がほぼ均一になるような距離の範囲が望ましいが、テープ数が多くなるに伴い、全て転位するための範囲が長くなり、各テープ線材の経験する磁界が異なってくると、偏流発生の原因になる。さらに、Y系超電導テープ線は機械的な強度が高く剛性も強いために転位の距離が大変に長くなり、従来型の横2並列型転位の方法は実用的でない。

したがって、ここでは、SMESに用いる4テープ線材の並列多重導体を次の2つの転位方法で構成したコイルについて検討する。

- ① 4パンケーキコイル：導体を構成する4枚のテープ線の重なる順番が各パンケーキでそれぞれ同じ位置を経験できるように各パンケーキの端部で転位する方法で、均流化には4つのパンケーキを必要とする。
- ② 2パンケーキコイル：ダブルパンケーキの最内層端部でのみ4枚のテープ線を全て転位する方法で、2つのパンケーキで均流化が可能となる。

(3) 電流均流化のための各パンケーキの導体内各テープ構成

① 4パンケーキによる方法：

この方法で構成した各パンケーキの導体内のテープ線材の順番を図2.1.1-4-1に示す。図中の①から④のそれぞれは、同じ電気的接続をするテープ線材に相当し、各パンケーキで順番が異なる。したがって、各テープ線材は導体内の全ての順番を経験することになる。

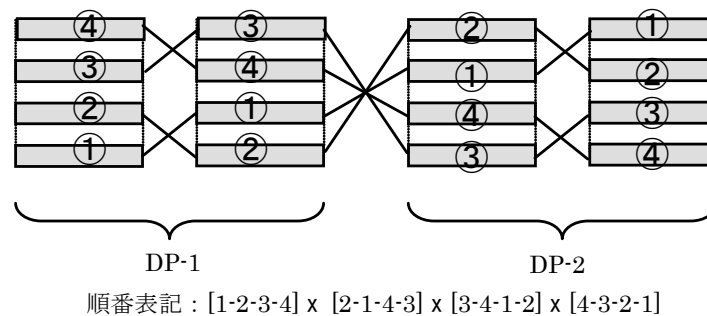


図2.1.1-4-1 1回の転位のDP配置

② 2パンケーキによる方法：

この方法は、各テープ線材の鎖交する磁束が等しくなるようにするために、図 2.1.1-4-2 に示すように、テープ間に追加の絶縁物、あるいは、補強材を追加する方法である。この方法では、2つのパンケーキの内側の導体渡り部の1箇所の転位で均流化できる。4枚のテープ線材で構成する導体の場合には、②と③の間、および③と④の間に追加厚を挿入する。

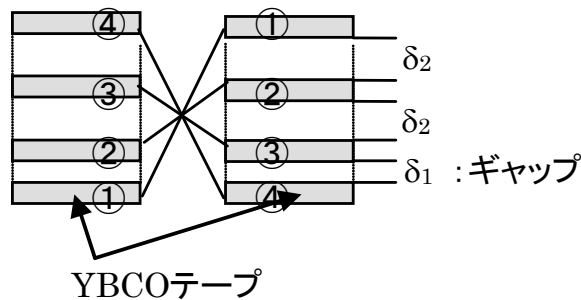


図2.1.1-4-2 ダブルパンケーキ内の1回の転位のテープ導体構成図

(4) 超電導導体と試験コイル

本パンケーキに用いる Y 系超電導テープ線材と導体の諸元を表 2.1.1-4-1 に、また、その構成図を図 2.1.1-4-3 に示す。追加厚が必要な場合には、図に示すように、絶縁物を挿入する。

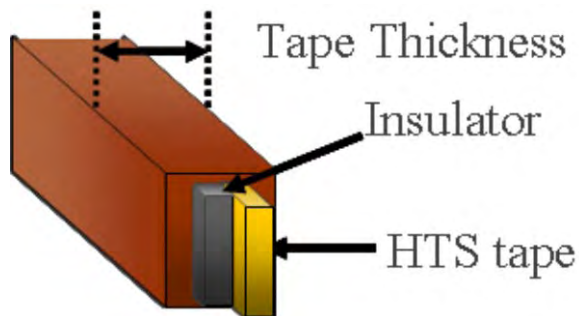
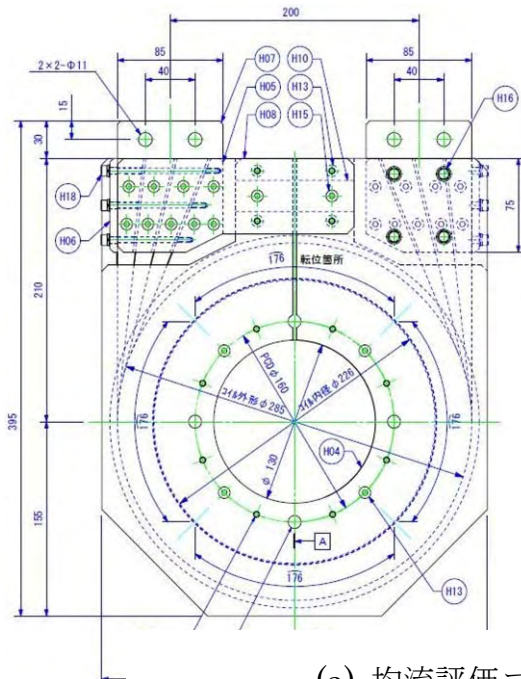


図2.1.1-4-3 テープ線材の構成図

表 2.1.1-4-1 HTS テープ線と導体の諸元

HTS テープ構成	
(1) IBAD/CVD-YBCO 寸法	10 mm w x 0.1 mm t
(2) 銅めっき厚さ	0.05 mm
(3) カプトンテープ	0.025 mm x 2 層ラップ巻
(4) テープの寸法	10.2 mm w x 0.3 mm t
導体構成	4 枚並列
追加厚のないときの導体寸法	10.2 mm w x 1.2 mm t

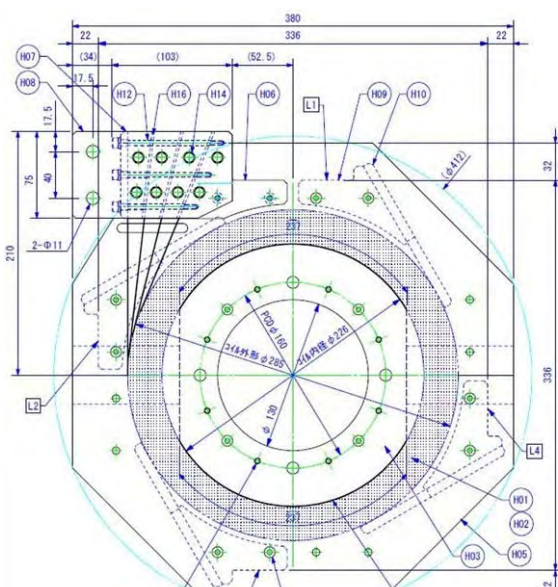
今回用いた試験コイルの諸元と構成図を図 2.1.1-4-4 に示す。



(a) 均流評価コイル (2パンケーキ)

均流評価コイル(単独タイプ)諸元

線材	CuメッキCVD-YBCO線材
断面形状	10.1 mm×0.21 mm(絶縁前) 10.2 mm×0.31 mm(絶縁後)
導体	絶縁素線4枚束導体
断面形状	No. 4, No. 3 素線に0.075mm厚
	10.2 mm×1.39 mm
コイル形状	ダブルパンケーキ型
コイル内径	226 mm
コイル外径	283 mm
コイル高さ	24 mm
巻数	20×2 ターン



(b) 均流評価コイル (4パンケーキ)

均流評価コイル(2積層タイプ)諸元

線材	CuメッキCVD-YBCO線材
断面形状	10.1 mm×0.21 mm(絶縁前) 10.2 mm×0.31 mm(絶縁後)
導体	絶縁素線4枚束導体
断面形状	10.2 mm×1.24 mm
コイル形状	ダブルパンケーキ型2積層
コイル内径	226 mm
コイル外径	280 mm
コイル高さ	24 mm
巻数	20×2 ターン

図 2.1.1-4-4 試験コイル

(5) 試験装置と測定方法

装置は図 2.1.1-4-5 に示すように、試験コイルを液体窒素中で浸漬冷却し、可変周波数電源で電流をコイルへ供給し、各テープ線に鎖交する電流を Rogowski コイルで測定する。Rogowski コイルは必ずしも均一に巻線されていないことや、設置場所の関係でテープ線を中心とした円形に取り囲むことができないために、全体を通電したのちに、各テープ線に単独に通電して Rogowski コイルの出力の校正を行った。Rogowski コイルの校正のために、電極は脱着可能な接続構成として、各テープ線に単独通電ができる構成である。したがって、ハンダ接続のような低電気抵抗とならないため、電極表面にインジウム薄膜を挟んで接触抵抗の低減を行い、直流接触抵抗値として $20 \mu\Omega$ 以下で実験を行った。解析によると、この程度以下の接触抵抗では抵抗による位相のずれが無視できる。

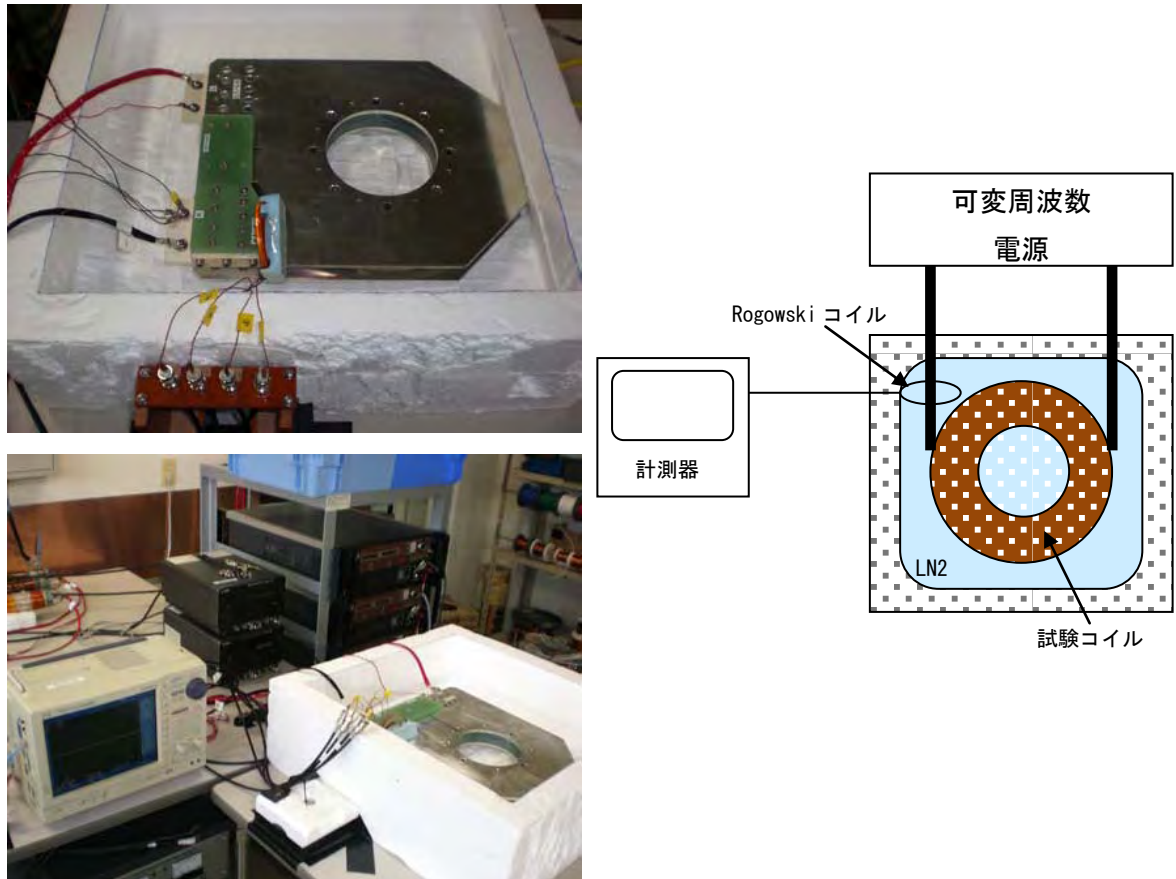


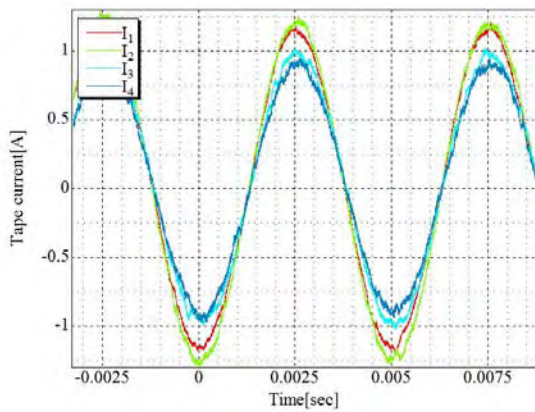
図 2.1.1-4-5 実験装置の写真と配置図

(6) 試験結果と考察

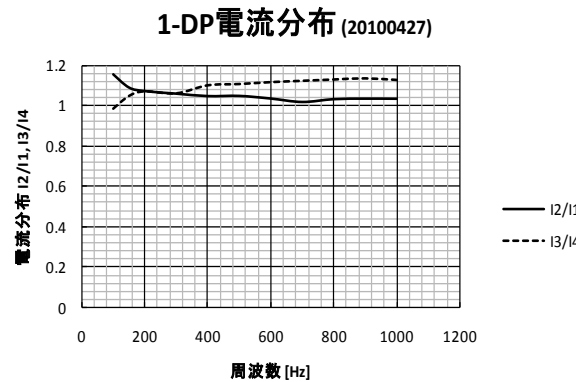
① 2パンケーキ試験コイル：

図 2.1.1-4-6(a)に 2パンケーキ試験コイルの Rogowski コイル出力を校正して各テープ線に流れる電流波形結果を、また、図(b)には、同試験コイルの I_2/I_1 、および、 I_3/I_4 の電流分布の周波数依存性を示す。

図の 2パンケーキコイルの波形と周波数依存性から、各テープ線の電流分布は I_2/I_1 、および、 I_3/I_4 の比の不均一度が約 5%である。図 2.1.1-4-7には、20ターンの試験コイルのテープ追加厚さと均一度のターン数依存性の解析結果を示す。図から、追加テープ厚さが $75\ \mu\text{m}$ では、約 5%の分布の不均一度があることが分かり、ほぼ試験結果と一致する。



(a) 2パンケーキコイルの各テープ電流波形 (200 Hz)



(b) 2パンケーキコイルの I_2/I_1 と I_3/I_4 の周波数依存性

図 2.1.1-4-6. 1-DP 試験コイルの各テープの電流波形

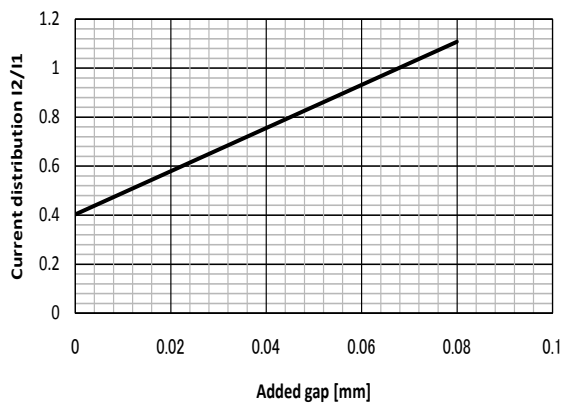


図 2.1.1-4-7 2パンケーキ試験コイルのテープ厚さと均一度の解析結果

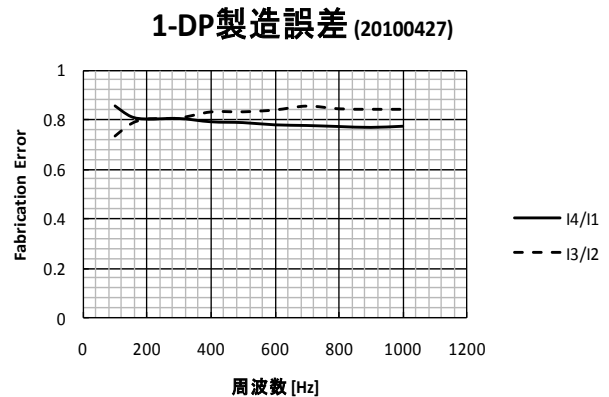


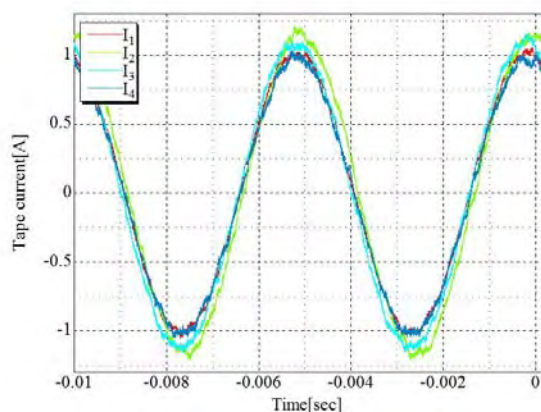
図 2.1.1-4-8 2パンケーキコイルの I_4/I_1 と I_3/I_2 の製造誤差

一方、テープ線の本来の特性から、全く同様に製作されるならば、 $I_1 = I_4$ と $I_2 = I_3$ との同じ特性を示す筈であるが、図 2.1.1-4-6 では少し特性が異なるように見えるので、図 2.1.1-4-8 に I_4/I_1 と I_3/I_2 の特性を示す。図 2.1.1-4-8 の不均一度は製造誤差によるものと考えられ、その大きさは約 20 %程度である。この製造誤差の原因を確かめるために、片側パンケーキの最内層 1 層のテープ間隔がそれぞれ、(1-2)間=0.141 mm、(2-3)間=0.262 mm、(3-4)間=0.148 mm の誤差厚が生じたとして解析すると、均一度は $I_2/I_1=1.07$ 、 $I_3/I_1=0.86$ 、 $I_4/I_1=0.81$ となり、約 20 %の不均一度は製作時の僅かな誤差によるものと考えられる。

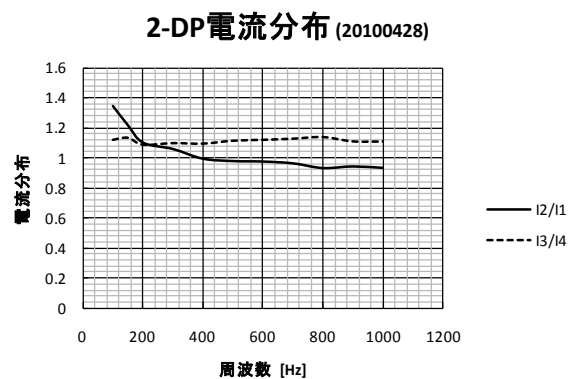
② 4 パンケーキ試験コイル

また、図 2.1.1-4-9 には同様に、4 パンケーキ試験コイルの電流波形と、 I_2/I_1 と I_3/I_4 の電流分布の周波数依存性を示す。電流分布 I_2/I_1 は周波数に多少依存するが、 I_3/I_4 はほぼ一定で 9 %程度の不均一度である。図 2.1.1-4-10 には、4 パンケーキ試験コイルの均一度の層数依存性の解析結果を示す。層数が 20 ターンの試験コイルでは約 9 %の不均一度であるので、 I_3/I_4 はほぼ予定値である。

また、図 2.1.1-4-11 には、 I_4/I_1 と I_3/I_2 の特性を示す。図から、 I_4/I_1 は幾何学的に同じ特性であり、同じように製造されているようで、ほぼ 1 に近い値である。一方、 I_3/I_2 は周波数に依存して変化しているが、最大でも 15 %程度の製造誤差に伴う不均一度が認められる。



(a) 4 パンケーキコイルの各テープ電流波形 (200Hz)



(b) 4 パンケーキコイルの I_2/I_1 と I_3/I_4 の周波数依存性

図 2.1.1-4-9 4 パンケーキ試験コイルの各テープの電流波形

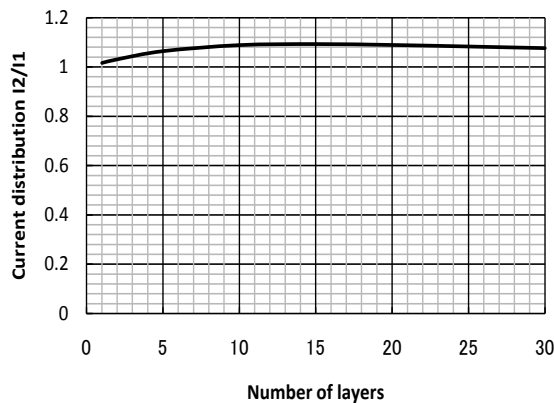


図 2.1.1-4-10 4 パンケーキ試験コイルの層数と均一度の解析結果

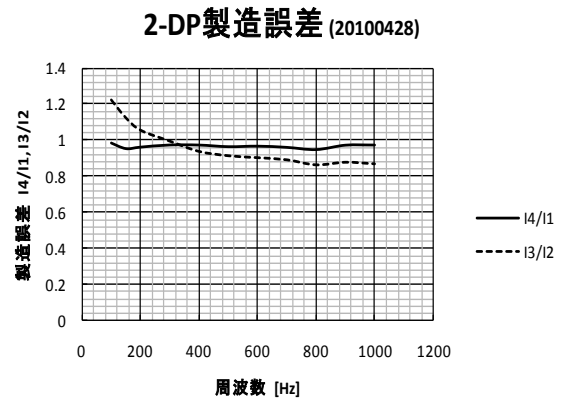


図 2.1.1-4-11 I4/I1 と I3/I2 の製造誤差

(7) 結果

今回の試験では、各テープ線の電流分布を正確に計測するために Rogowski コイルを電極に取り付け、その校正のために電極間を単なる締め付けで行うことになった。したがって、ハンダ接続と異なり、コイルのターン数が少なく、インダクタンスも小さい本試験コイルでは、接触抵抗の影響を完全に無くすることはできなかった。しかし、解析では抵抗分による位相のずれを無視できる程度になることが予想できる値である数 $10 \mu\Omega$ 以下にまで抑えて実験を行った。試験結果は、予想した均一度をほぼ満足して得ることができたので、理論の基本的な実証ができた。

以上のことから、多層導体でコイルを構成して導体内の電流分布を均一化する方法には、テープ本数に等しいパンケーキを用いてパンケーキ毎に転位して均一電流分布を得る方法や、今回の実験で証明できたように、2 パンケーキの 1 箇所での転位とテープ間厚さを調整して電流分布を均一化する方法があることが分かった。

引用論文リスト

- (1) 後村直紀, 千葉悠太, 谷貝剛, 津田理, 濱島高太郎, 式町浩二, 平野直樹, 長屋重夫: 「SMES 用ダブルパンケーキコイルに用いる並列多層 HTS テープ導体内の電流分布解析」, 第 82 回 2010 年度春季低温工学・超電導学会講演概要集, p22, 2010
- (2) 千葉悠太, 後村直紀, 津田理, 濱島高太郎, 式町浩二, 平野直樹, 長屋重夫: 「ダブルパンケーキコイル用並列多層 HTS テープ導体内の電流分布の一様化」, ASC-10-034, pp89-94, 2010

2.1.1-5 低損失化に関する検討（中部電力、鹿児島大学）

(1) 研究開発目的

大容量 SMES コイルの開発には、大電流導体の開発が不可欠である。Y 系超電導線材を用いた大電流容量集合導体コイルの損失を低減する構造について最適化を検討するため、トロイダル形状に依存した磁場中での交流損失特性について評価した。

(2) トロイダル型 SMES コイルの交流損失評価

磁化損失とは、Y系超電導線材に外部磁界を印加した際に超電導部分で発生する損失である。要素コイル単体とトロイダル配置したコイルにおける巻線に印加される磁界の分布の比較を図2.1.1-5-1 に示す。ソレノイドコイルに対して、コイルをトロイダル配置にし、全てのコイルに通電するとコイルの1 ターン分の磁界分布は導体長手方向に変化し不均一になる。したがって、磁化損失は不均一磁界中で発生することになる。不均一な磁界中での磁化損失測定を行うために、一様磁界空間内に、Y系導体を捻った状態で設置した。作製した導体は、Y系超電導線材1 枚およびY系超電導線材を4 枚積層させたものの2 種類である。積層枚数によって磁化損失特性が変化するので、Y系超電導線材1 枚の導体とY系超電導線材を4 枚積層した導体を用意した。Y系超電導線材を4 枚積層したものは銀面とハステロイ™面が向き合うように重ね、線材間に絶縁シートを挿入して絶縁処理を施している。また、導体幅広面に垂直に印加される磁界成分を導体長手方向に対して変化させるため導体の両端を捻り、捻り角度を0度から360度まで変化させ、不均一の特性長が磁化損失に及ぼす影響を調べた。

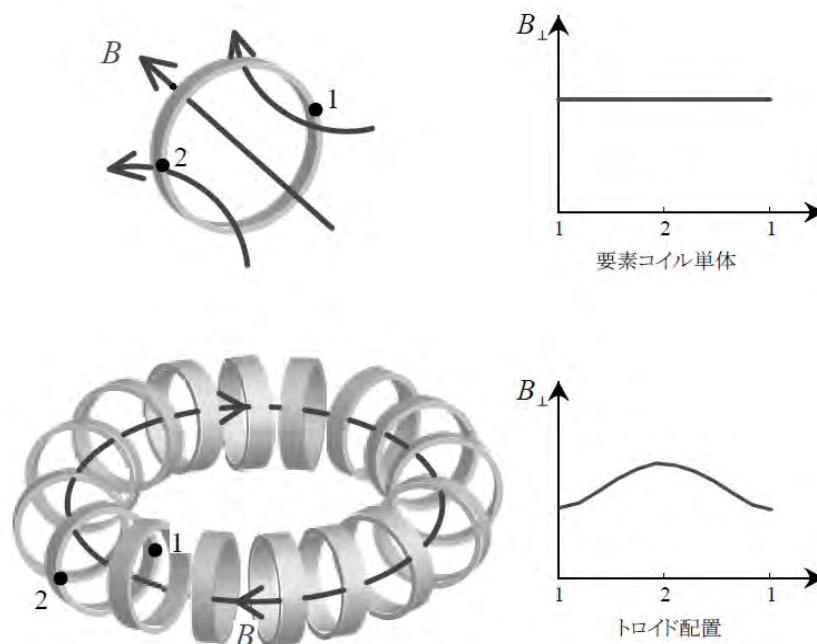


図 2.1.1-5-1 要素コイル単体とトロイダル配置にしたコイルの磁界分布

1 枚導体の捻り角度が0度の際の交流損失測定結果を図2.1.1-5-2 に、捻り角度を0度から360度まで変化させたときの交流損失測定結果を図2.1.1-5-3 に示す。4 枚積層導体の捻り角度が0度の際の交流損失測定結果を図2.1.1-5-4に、捻り角度を0度から360度まで変化させたときの交流損失測定結果を図2.1.1-5-5 に示す。縦軸は一周期あたり、単位体積あたりの交流損失をとっている。また、図中の(a)、(b)はそれぞれ周波数特性、印加磁界特性である。図2.1.1-5-3、図2.1.1-5-5は捻り角度を変化させた際に、1 枚導体、4 枚積層導体の交流損失特性に変化があるかを確かめるために (a) は10 mT に、(b) は0.04 Hz と1 Hz に注目した。測定結果から以下のことが分かる。(1) 捻り角度を変化させた1 枚導体、4 枚積層導体どちらの場合でも測定値に周波数依存性はない。このことから、測定した損失は導体幅広面に垂直な磁界成分による磁化損失であり、周波数依存性のある渦電流損失は磁化損失に対して非常に小さい。(2) 測定値は、1 枚導体において印加磁界の約2.65 乗に、4 枚積層導体において印加磁界の約2.7 乗に比例しており印加磁界に対する損失の傾きが一定である。このことから、印加磁界はそれぞれの導体の中心到達磁界より十分小さい。(3) 捻り角度および線材の積層枚数で周波数特性や印加磁界特性などの交流損失特性に大きな変化は見られない。

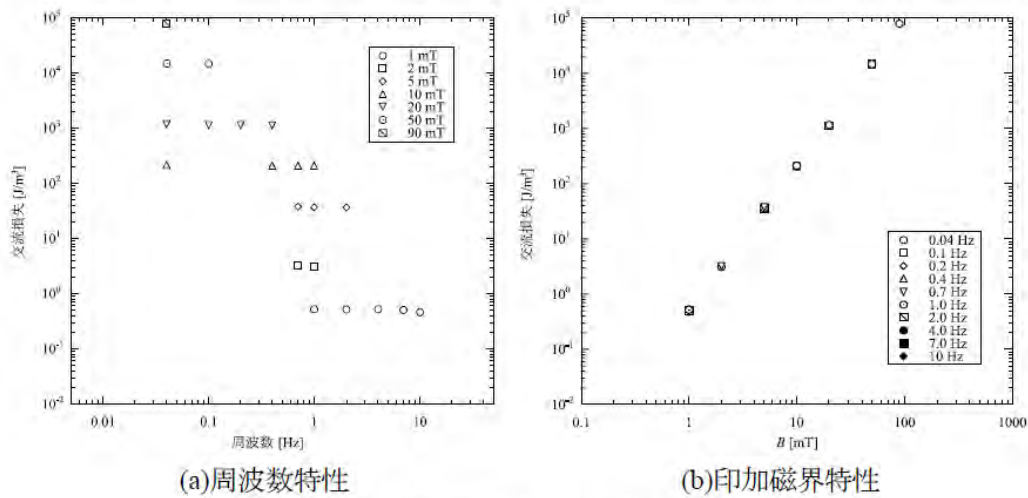
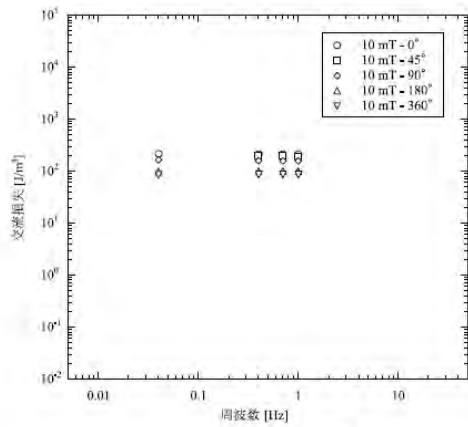
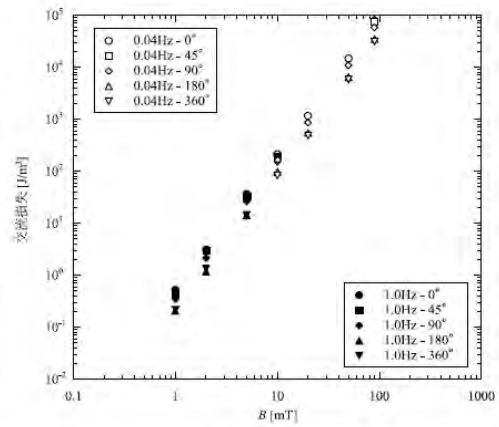


図 2.1.1-5-2 1 枚導体を 0 度捻った場合の磁化損失測定結果

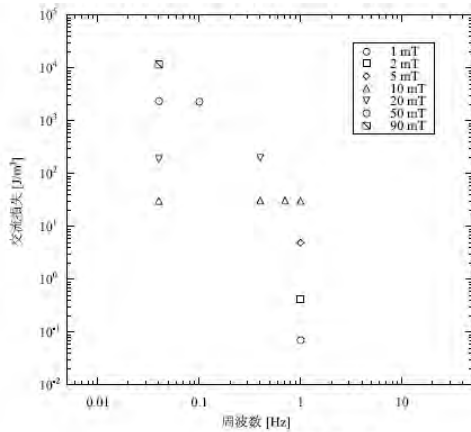


(a)周波数特性

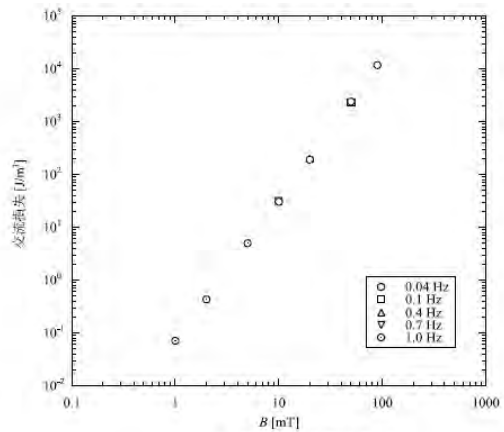


(b)印加磁界特性

図 2.1.1-5-3 1 枚導体を 0~360 度捻った場合の磁化損失測定結果

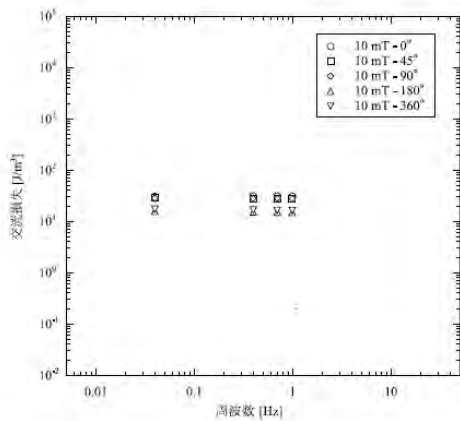


(a)周波数特性

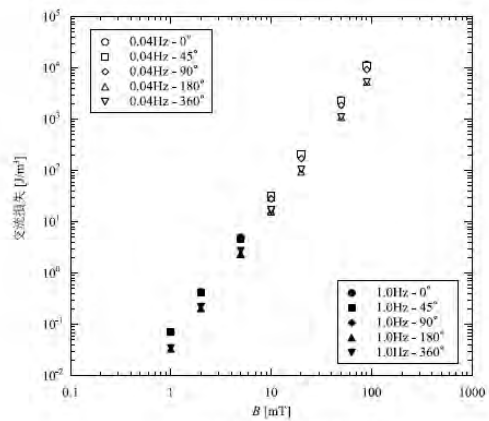


(b)印加磁界特性

図 2.1.1-5-4 4 枚導体を 0 度捻った場合の磁化損失測定結果



(a)周波数特性



(b)印加磁界特性

図 2.1.1-5-5 4 枚導体を 0~360 度捻った場合の磁化損失測定結果

サンプル導体を捻った状態で一様な垂直磁界を印加すると、導体には導体幅広面に垂直な磁界成分と、導体幅広面に平行な磁界成分が印加される。導体幅広面に平行な磁界成分による磁化損失は、導体幅広面に垂直な磁界成分によるものに比べて非常に小さいことが明らかにされている。このため、磁化損失の検討は印加された磁界のうち導体幅広面に垂直な磁界成分によって発生する損失のみを検証する。

一様磁界空間内にサンプル導体を捻った状態で設置すると、図2.1.1-5-1 に示したように導体幅広面に垂直な磁界成分が長手方向に対して変化する。これに伴い、磁化損失も長手方向に対して変化する。ここで、磁化損失に周波数依存性がないことは明らかであるため、印加磁界依存性のみを考える。1枚導体の捻り角度0度の場合、磁化損失は印加磁界の2.64 乗に、4枚積層導体の捻り角度0度の場合には印加磁界の2.67 乗に比例している。したがって、Y系超電導導体の各場所で発生する磁化損失が、1枚導体は印加磁界の2.64 乗に、4枚積層導体は印加磁界の2.67 乗に比例するとして、各場所で発生する損失を導体全長にわたって積分したものを磁化損失の計算値とする。

まず、1枚導体の磁化損失の捻り角度依存性について検討する。1枚導体の捻り角度依存性を図2.1.1-5-6に示す。また、測定値、計算値を捻り角度0度の値で規格化したものを示している。図2.1.1-5-6から測定値は計算値とよく一致していることがわかる。このことから、1枚導体では不均一磁界が交流損失に及ぼす影響はほとんどないと考えられる。

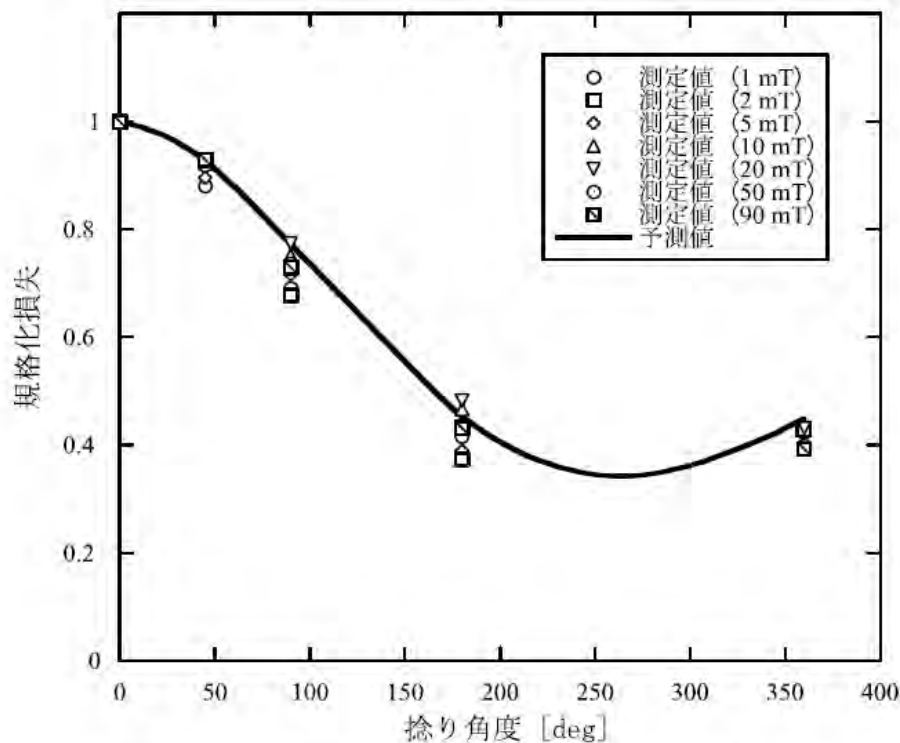
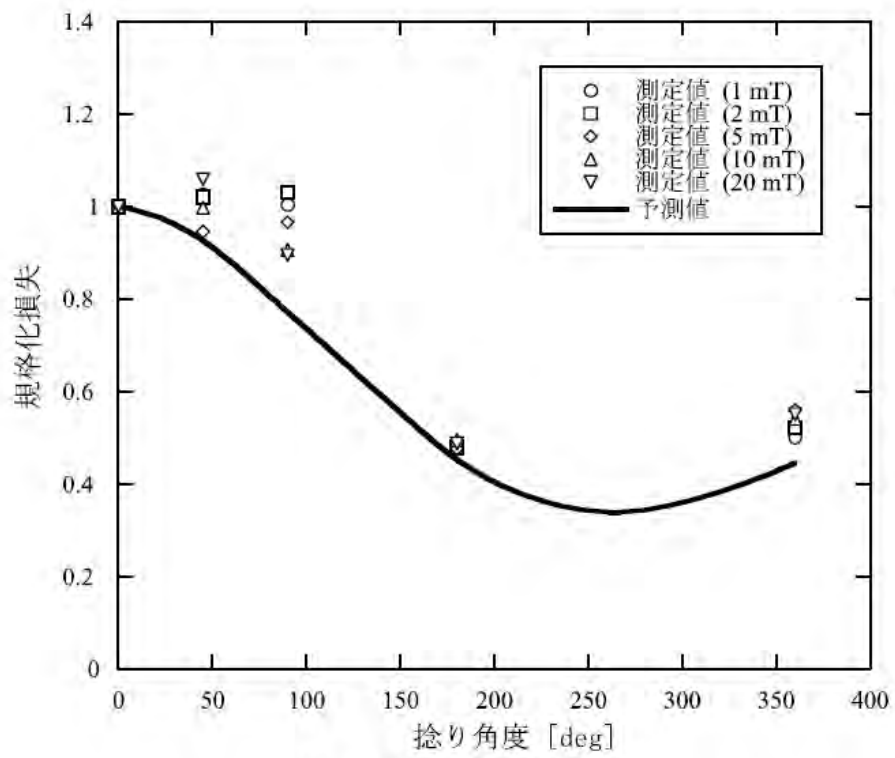
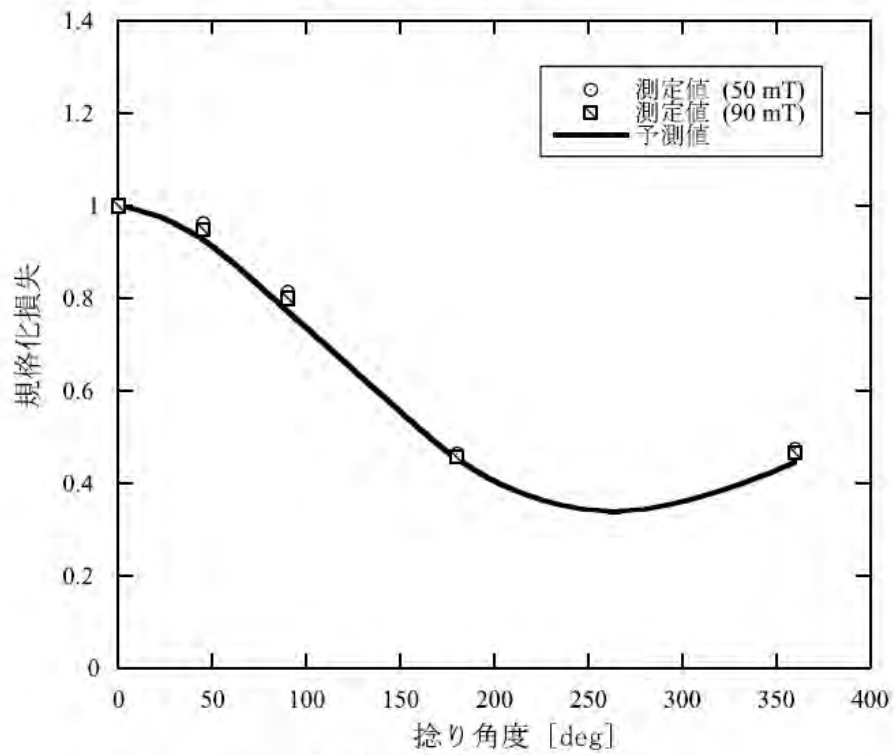


図 2.1.1-5-6 1枚導体の磁化損失の捻り角度依存性



(a) 印加磁界 1~20 mT



(b) 印加磁界 50,90 mT

図 2.1.1-5-7 4 枚積層導体の捻り角度依存性

次に、4枚積層導体の磁化損失の捻り角度依存性について検討する。4枚積層導体の捻り角度依存性について、印加磁界が1~20 mTのものを図 2.1.1-5-7 (a) に、印加磁界が50、90 mTのものを図 2.1.1-5-7 (b) に示す。図 2.1.1-5-7には測定値、計算値を捻り角度0度の値で規格化したものを示している。図 2.1.1-5-7 (a) より印加磁界が1 mTから20 mTのときの捻り角度が45度と90度では、測定値が計算値よりも大きくなっている。これは不均一磁界が交流損失に及ぼす影響と、4枚積層した線材のうちいずれかの線材が他の線材と比べて臨界電流分布が極端に不均一であること、線材間の相互作用などが考えられる。また、図 2.1.1-5-7 (b) より印加磁界が50 mTと90 mTの場合は測定値と計算値がよく一致しているため、測定値は導体幅広面に垂直な磁界成分による磁化損失であることがわかる。以上のことから、トロイダル配置のコイルで導体長手方向に生じる不均一磁界中での磁化損失は、印加磁界が小さい場合は不均一磁界が交流損失におよぼす影響などにより大きくなるが、印加磁界が大きい実用条件（垂直磁界が0.6 T近傍）では導体幅広面に垂直な磁界成分を考慮すれば求まることがわかった。

(3) 結果

SMES用トロイダルコイルでは、コイル1ターン分の磁界分布が、ソレノイドコイル1つだけに通電した場合とは異なり、不均一になる。そこで、不均一な磁界分布が交流損失に及ぼす影響を調べるため、不均一磁界中でのY系短尺超電導導体の磁化損失を測定し、その検討を行った。その結果、不均一磁界中での磁化損失特性においては、1枚導体では、捻り角度を変化させた場合でも、発生する損失は導体幅広面に垂直な磁界による磁化損失であることがわかった。さらに4枚積層超電導導体では、印加磁界が小さい場合、導体幅広面に垂直な磁界成分による磁化損失よりも大きくなったが、印加磁界が大きい実用条件(0.6 T近傍)では導体幅広面に垂直な磁界成分を考慮すれば求まることがわかった。

2.1.1-6 高耐フープ応力特性評価（中部電力、東北大学）

(1) 研究開発目的

これまでCVD法により作製されたYBCO超電導線材（以降CVD-YBCO線材と称す）の機械特性評価⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾とともに単層ソレノイド巻コイルのフープ応力基礎検証評価⁽⁵⁾を実施し、高強度特性を検証してきた。今回、長尺のCVD-YBCO線材を使用した小型多層巻パンケーキコイルを製作し、外部磁場中で600 MPa級のフープ応力試験を実施し、CVD-YBCOコイルの電磁応力耐性を評価した。

(2) CVD-YBCO コイルのフープ応力試験評価

a. コイル製作

SMES 開発で目標としているフープ応力 600 MPa を実証するため、長尺 CVD-YBCO 線材を用いてフープ応力試験用小型コイルを製作した。使用した線材は幅 10 mm、厚さ 100 μm のハステロイTM基板に IBAD 法による中間層、CVD 法による YBCO 層を成膜後、5mm 幅に切断し、安定化銅を線材全周囲に厚さ 50 μm めっきした。Cu めっき後の線材寸法は、幅約 5.5 mm、厚さ約 250 μm である。この線材を用いて製作したシングルパンケーキ(SP)コイル 2 個を積層した 2-SP コイルの諸元を表 2.1.1-6-1 に、その設計図、外観写真を図 2.1.1-6-1、図 2.1.1-6-2 に示す。コイルはエポキシ樹脂により真空含浸した。

表 2.1.1-6-1 フープ応力試験用 2-SP コイル諸元

線材種類	Cu めっき IBAD/ CVD-YBCO テープ線材
線材長	50 m + 50 m
絶縁線材平均幅	5.7 mm
絶縁線材平均厚さ	350 μm
コイル形状	シングルパンケーキ型コイル 2 積層
内径	200 mm
外径	249 mm
高さ	12 mm
巻数	139

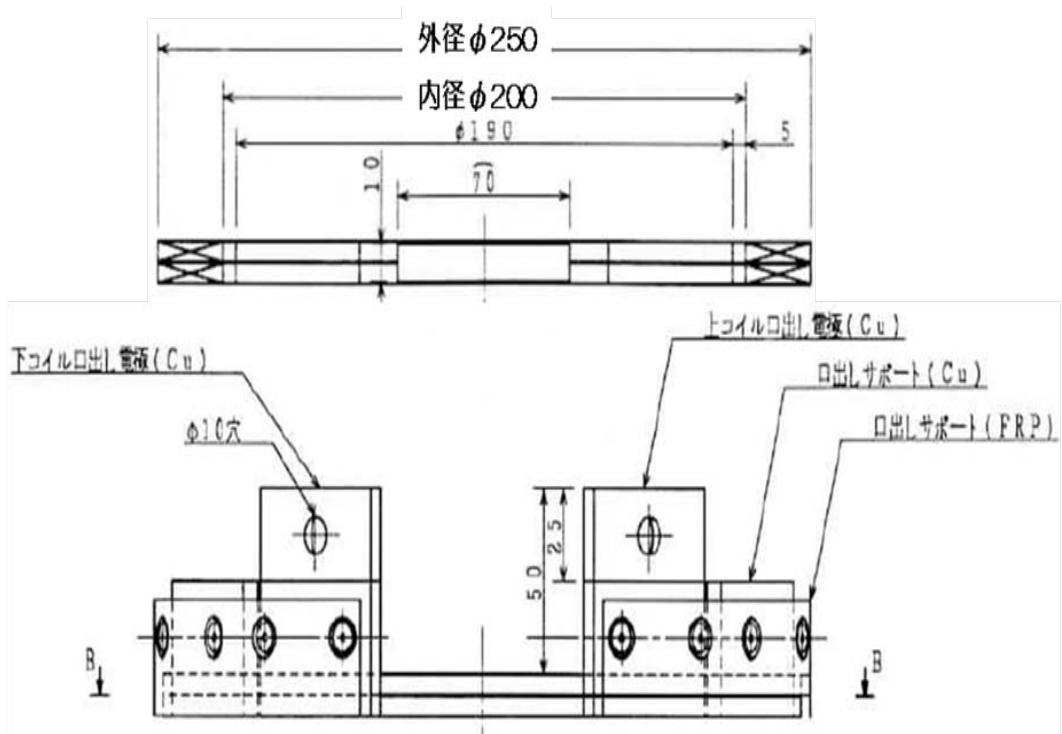


図 2.1.1-6-1 フープ応力試験用 2-SP コイル図

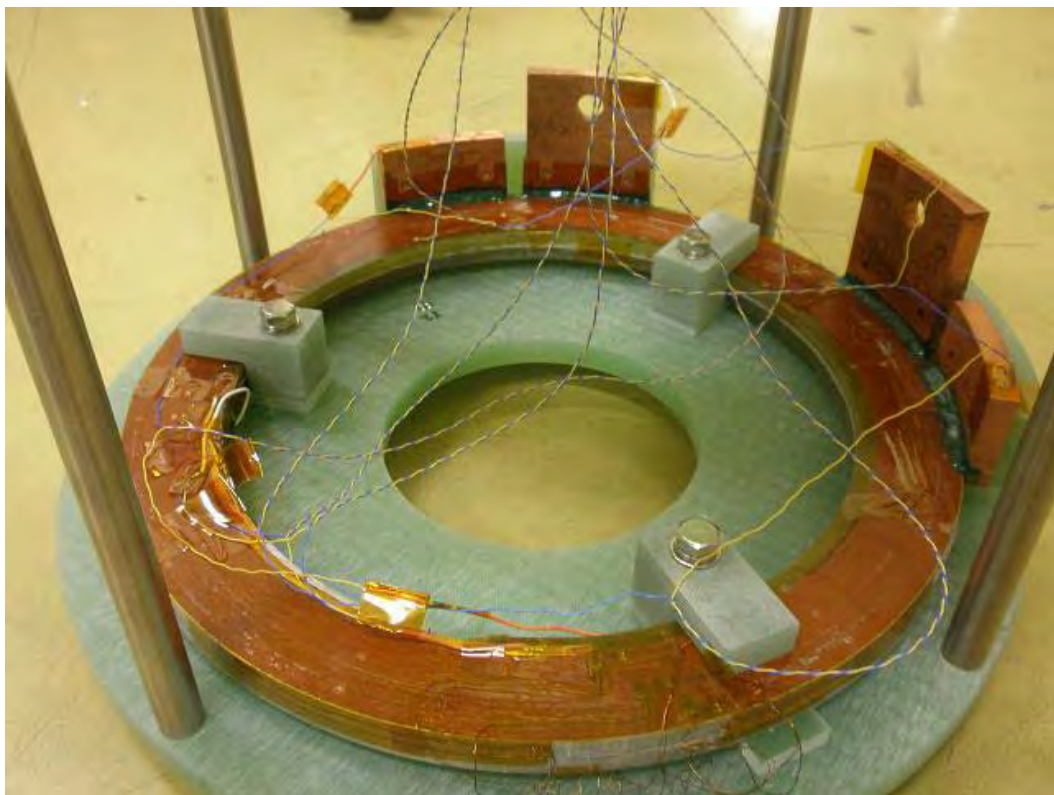


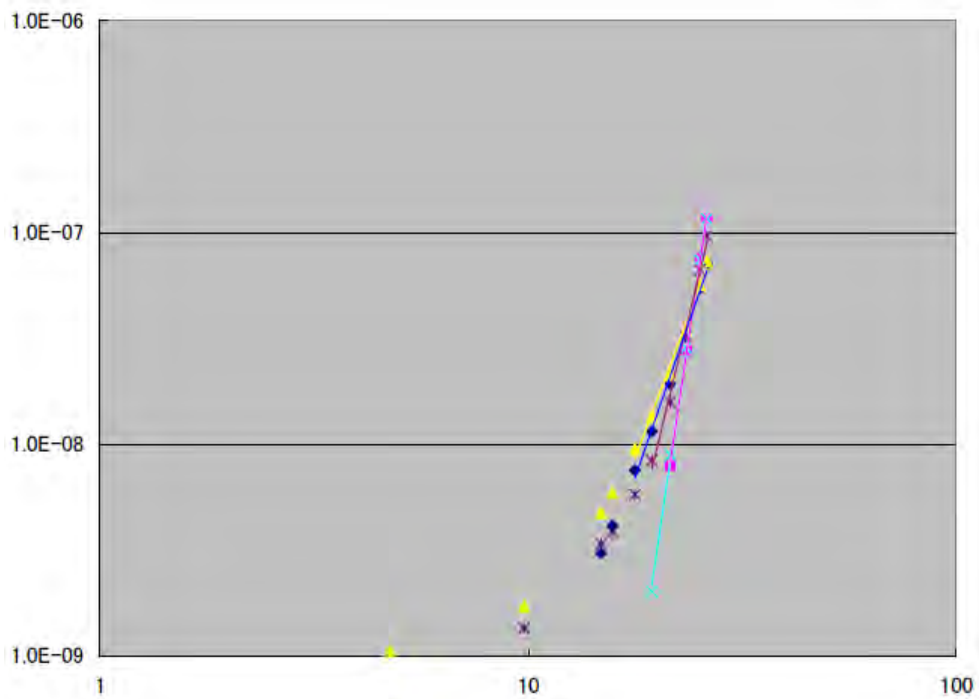
図 2.1.1-6-2 フープ応力試験用 2-SP コイル外観

b. 通電確認試験

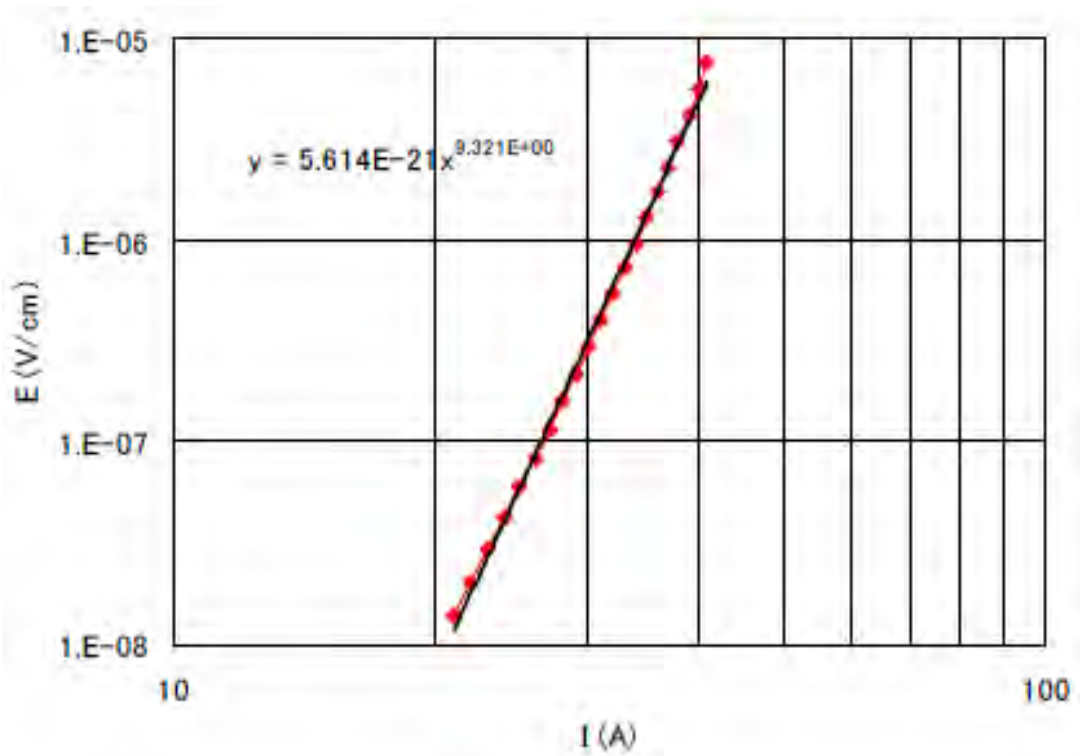
液体ヘリウム中でのフープ応力試験の実施に先立ち液体窒素浸漬冷却によりコイルの通電試験を実施し、2-SP コイルの特性を確認した。上・下段コイル（電極込・除）、2-SP コイルの各部 I-V 測定結果を図 2.1.1-6-3(a)に示す。コイル 2 個を積層する前に通電した結果、電極部を除いた上段コイルの I_c 値および n 値はそれぞれ 31 A, 14 であり、下段コイルではそれぞれ 42A、 6 であった。また、上下段 2 個積層した 2-SP コイルの I_c 値は 35 A、 n 値は 8 程度であった。また、Cu めっき前の線材 I-V 特性から 2-SP コイル I-V 特性を推定した計算結果を図 2.1.1-6-3 (b) に示す。使用した CVD-YBCO 線材の I_c -B-T- θ 特性は網羅できていないが、計算結果は表 2.1.1-6-1 の結果からコイル自己磁場を考慮して I_c 値低下を概略見込んでいる（磁場分布に応じ線材 I_c 値の 0.46-0.71 倍）。コイルの I-V 実測結果は推定結果とほぼ一致しており、CVD-YBCO 線材は問題なく巻線されたと考えられる。

c. フープ応力試験

液体ヘリウム浸漬冷却により 2-SP コイルを 4.2 K まで冷却し、外部磁場を印加後に通電することで、多層巻 CVD-YBCO コイルとしてのフープ応力耐性を検証した。図 2.1.1-6-4 に 2-SP コイルの電圧タップ取り付け位置を示す。図 2.1.1-6-5 に外部磁場 11 T において 2-SP コイルを 3 回繰り返し通電した時の上段コイル両端、下段コイル両端および上下段コイル間接続電極の I-V 測定結果を示す。上段コイルは下段コイルと比較して I_c 値は高いものの n 値が低いため、120 A 付近から上段コイルにおいて電圧が発生し始めている。1 回目に 176 A 付近まで通電した際、コイル間接続電極の電圧が跳ね上がった。その後、再通電、再々通電により電流値を増加し、通電電流の増加とともに発生電圧が上昇し、最終的に 214 A 付近で過電圧により通電不能となった。試験後の検査により、電圧の跳ね上がりはコイル間接続電極の不具合が原因であることが判明した。本試験において 11 T 中では 3 回繰り返し通電を実施したが、電極部を除くコイル電圧は常に同じ軌跡を辿っており、今回のフープ応力負荷によるコイル巻線部の劣化はなかったと考えられる。



(a)



(b)

図 2.1.1-6-3 2-SP コイルの I-V 特性 (a) 測定値 (b) 計算値

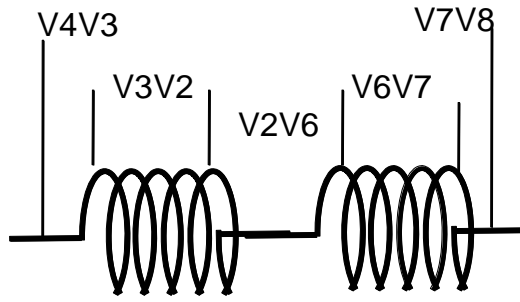


図 2.1.1-6-4 2-SP コイルの電圧タップ位置

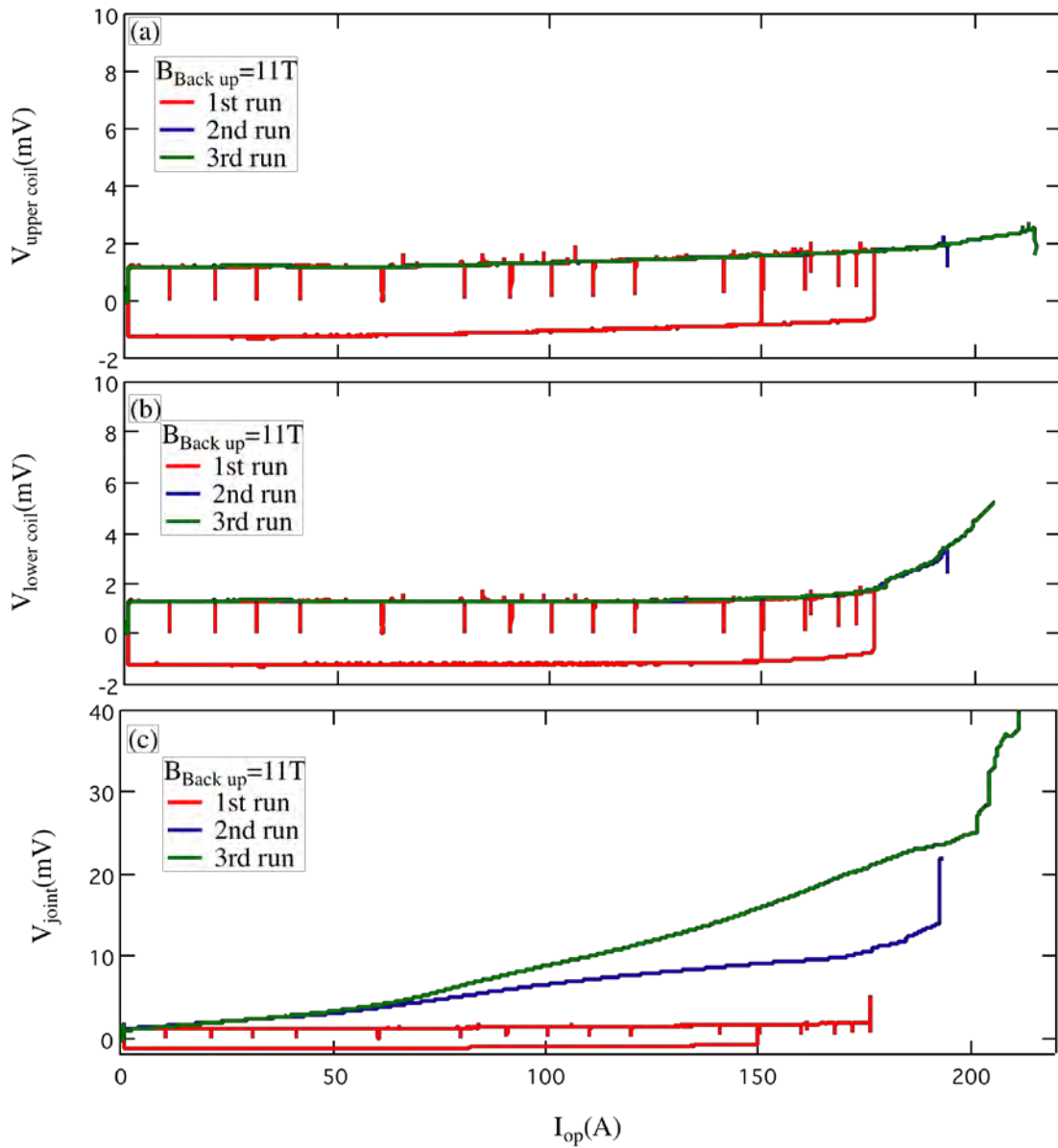


図 2.1.1-6-5 2-SP コイルの I-V 特性

(a) 上段コイル (b) 下段コイル (c) 上下段コイル接続部

図 2.1.1-6-6 に 214 A 通電時に 2-SP コイルに誘起される電磁応力分布を示す。ここで σ_{bjr} , σ_{θ} , σ_r は、それぞれ線材を独立とした時の周方向応力、一体変形する場合の周方向応力、径方向応力である。特にコイル周方向の応力であるフープ応力は、線材が完全に独立であるとして磁場(B) \times 電流密度(J) \times 半径(R)で計算した値 σ_{bjr} とコイルが一体変形した場合の値 σ_{θ} を示している。ただし、応力はハステロイ™ 基板にかかる応力としている。なお、 σ_{θ} は無限長のコイルを仮定して Wilson の式から計算した結果である。図から分かるように、コイルが完全に一体変形を起こす場合には、コイル内部応力は BJR から計算される値とは異なる。この違いは、コイルの径方向に働く応力が影響するためであり、コイルが発生する自己磁場と外部磁場の割合によって振る舞いが異なる。今回の場合では、 σ_{bjr} と σ_{θ} の半径方向の分布が大きく異なっていることが分かる。結果として、最大フープ応力は σ_{bjr} より σ_{θ} の方が大きくなる。これらの結果から、214 A の通電によって、一体変形を仮定すると 636 MPa, BJR の場合には 560 MPa の最大フープ応力が 2-SP コイルに負荷されたと考えられる。

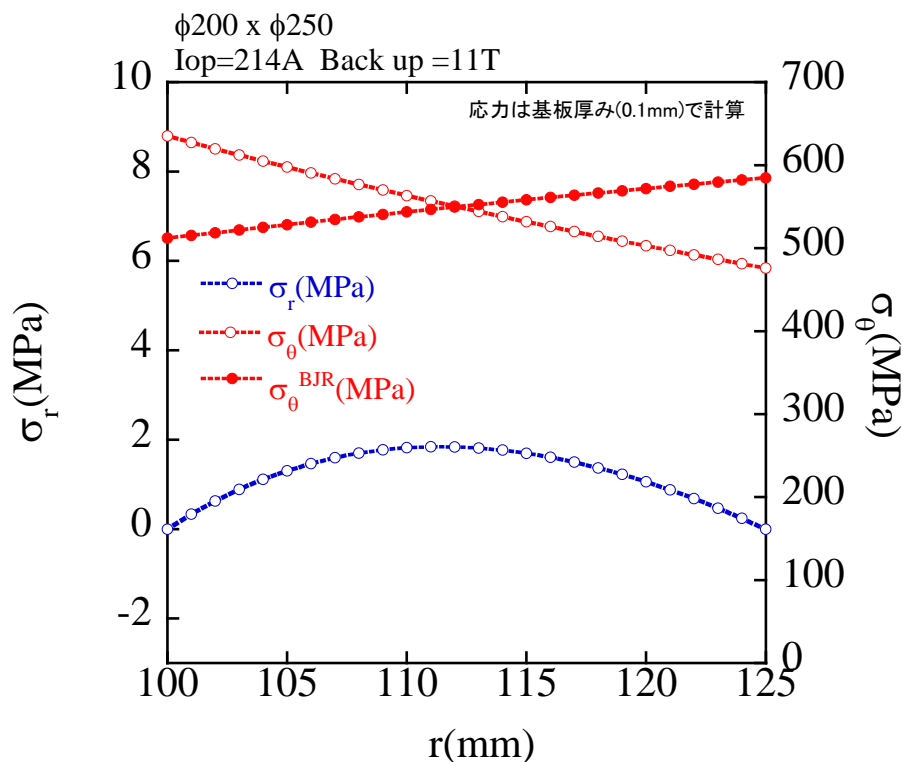


図 2.1.1-6-6 外部磁場 11 T 中で 214 A 通電時の 2-SP コイルの応力分布

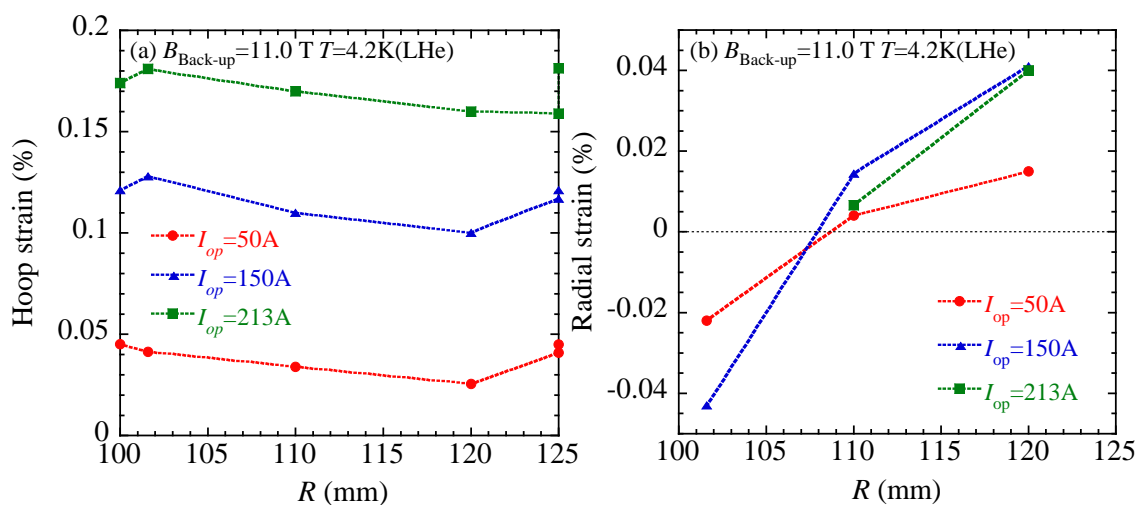
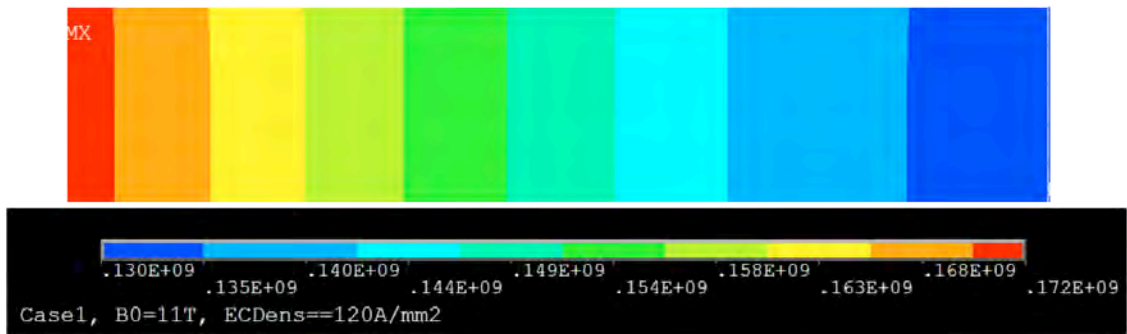


図 2.1.1-6-7 外部磁場 11 T 中で励磁時の 2-SP コイルの歪み分布
(a) 周方向 (b) 径方向

歪みゲージで測定した各部の歪み分布を図 2.1.1-6-7 に示す。フープ応力により誘起された歪み(図 2.1.1-6-7 (a))は最内層で最大となりコイル外側に向かって減少し、さらに最外層部分で増加する傾向が見られた。この結果、図 2.1.1-6-6 と比較すると、コイルが一体変形すると仮定した結果と定性的に一致する。また、コイル径方向(コイルの内層-外層間)の歪みは、最内層で圧縮を示したがコイル中心では引っ張りとなり、最外層ではさらに大きくなっている。したがって、少なくとも印加した応力レベルでは、コイルは一体変形を起こしたと結論できる。図 2.1.1-6-8 に、有限要素法によってさらに詳細に計算した内部応力分布の結果を示す。図 2.1.1-6-8 より、フープ応力は最内層で最大となる図 2.1.1-6-6 の結果と概ね一致していることが分かる。一方で、径方向の応力分布は最内層で負となり外に向かって増大する傾向を示し、図 2.1.1-6-6 の解析的な計算結果とは異なっているが、図 2.1.1-6-7 の実験結果と定性的な一致が見られている。図 2.1.1-6-6 の計算結果は、無限長のコイルを仮定しコイル内部の磁場分布を線形としているために、実際の結果とは若干相違が見られていると考えられる。従って、本実験ではコイルの一体変形挙動が歪み分布の測定結果から実証することができた結論できる。

(a) Hoop stress (Pa)



(b) Radial stress (Pa)

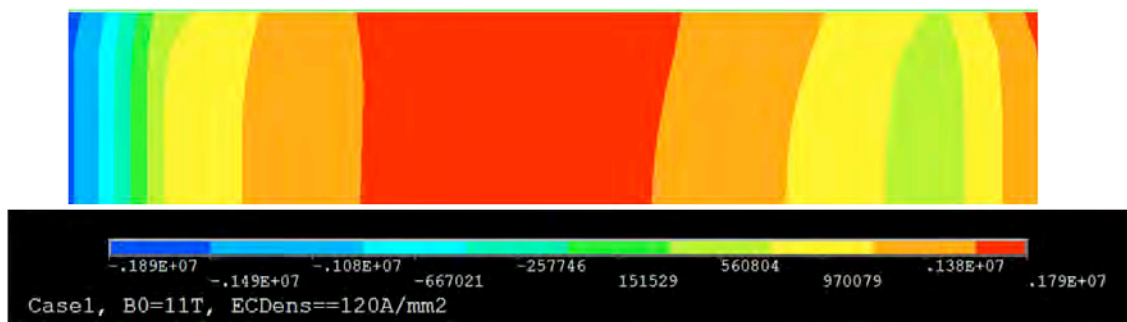


図 2.1.1-6-8 有限要素解析による外部磁場 11 T 中で 214 A 通電時の応力分布
(a) 周方向フープ応力 (b) 径方向応力

d. フープ応力再試験

幅 10 mm のテープを用いて中間ジョイントのないシングルパンケーキ SP を作製(2nd SP coil)し、さらに大きな電磁力試験を行った。コイルサイズは上述のコイルと同じ内径 200 mm x 外径 250 mm である。本コイルには 3 箇所 J_c 低下部分の補修を施し、その影響も調べた。

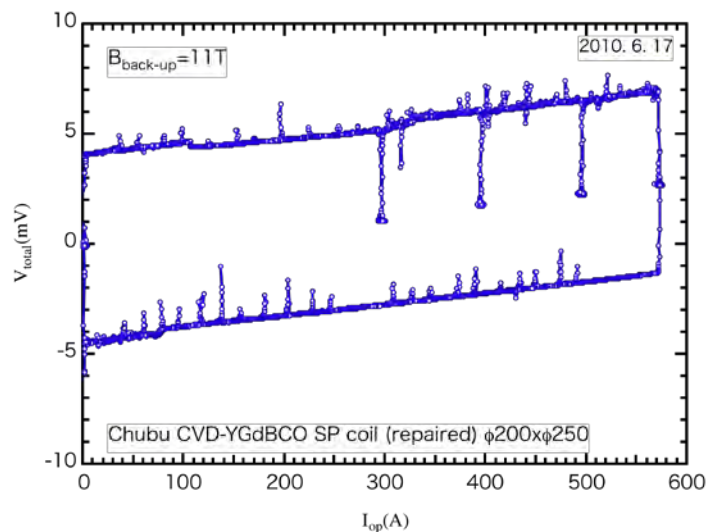


図 2.1.1-6-9 外部磁場 11 T 中での補修有り線材を用いた再試験用コイルの全電圧

図 2.1.1-6-9 は 2nd SP coil のバックアップ 11 T における電流-電圧特性である。発生電圧には、コイルのインダクタンスに起因したヒステリシスを伴う電圧約 4 μV と両端電極の接触抵抗成分が現れているが、最高 572 A までの通電に対して常伝導転移にとまらぬ電圧発生は見られなかった。

図 2.1.1-6-10 に 572 A 通電時に 2nd SP コイルに誘起される電磁応力分布を示す。ここで σ_{bjr} , σ_θ , σ_r は、2.1.1-6-6 同じ内容を示している。ただし、応力はハステロイ TM 基板にかかる応力としている。この時の最大電流によってコイルに誘起される電磁応力は、ハステロイ TM 基板に対して *BJR* で約 744 MPa、一体変形で約 854 MPa と見積もられる。

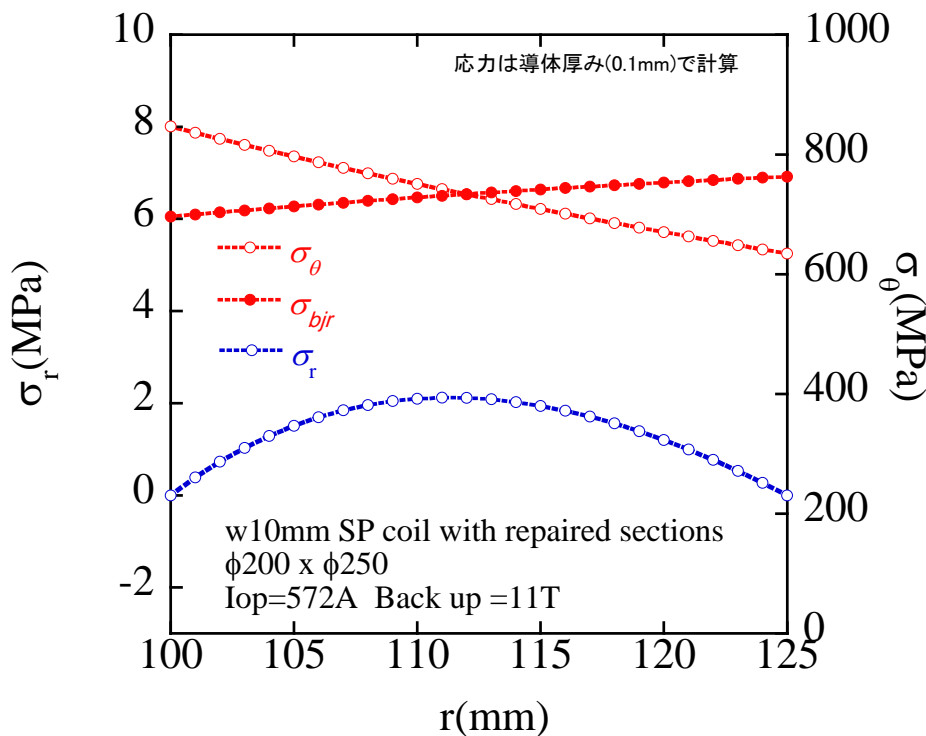


図 2.1.1-6-10 外部磁場 11 T 中で 572 A 通電時の 2nd SP コイルの応力分布

図 2.1.1-6-11 は、各補修箇所における電流-電圧特性である。補修 1 及び 3 からは電圧の発生が全く見られていない。また補修 2 には線形抵抗が観測されているが、これは補修時に残った接触抵抗であり、電磁力印加による劣化はないと見なすことができる。従って、補修箇所すべては、液体窒素温度で試験した結果をほぼ再現しており、600 MPa を越えるフープ力による劣化は全く見られていないことが確認できた。

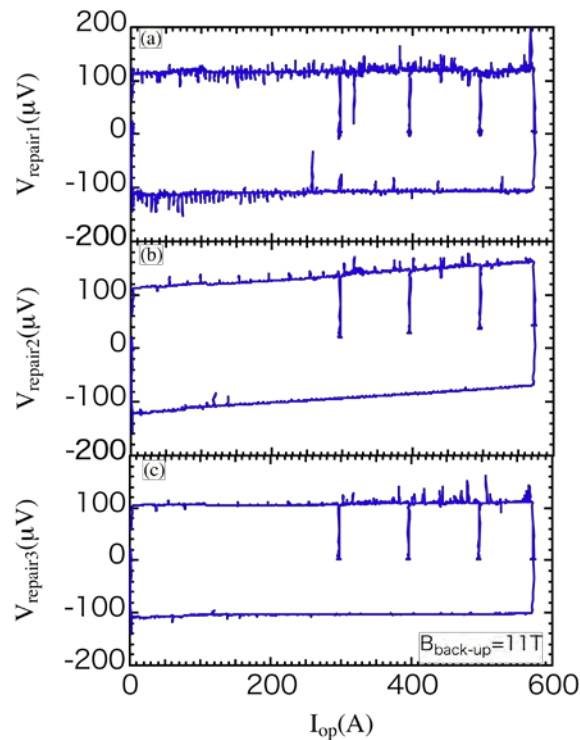


図 2.1.1-6-11 外部磁場 11 T 中で 572 A 通電時の 2nd SP コイルの補修部 3 箇所
の I-V 特性

(3) 結果

大規模 SMES のコイル化要素技術を開発するため、CVD-YBCO 線材を使用した小型多層巻コイルを製作し、フープ応力特性を評価した。液体ヘリウムで浸漬冷却し、11 T の外部磁場中で通電することで、多層巻 CVD-YBCO コイルが線材基板に対し 600 MPa のフープ応力に耐えることを実証した。さらに今回の評価結果から、コイルが一体変形していることが検証できた。一体変形の場合は最大フープ応力が軽減されており、一体変形の最大フープ応力を許容可能とした場合、さらに高磁界コンパクト化を高めることが可能であると考えられる。

引用論文リスト

- (1) M. Sugano, T. Nakamura, K. Shikimachi, N. Hirano, S. Nagaya, "Stress tolerance and fracture mechanism of solder joint of YBCO coated conductor," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 17, pp. 3067-3070, 2007.
- (2) M. Sugano, K. Shikimachi, N. Hirano, S. Nagaya, "Simultaneously Bending and Tensile Strain Effect on Critical Current in YBCO Coated Conductors," *Physica C* 463-465 (2007) 742-746.
- (3) M. Sugano, Y. Yoshida, M. Hojo, K. Shikimachi, N. Hirano, S. Nagaya, "Two different mechanisms of fatigue damage due to cyclic stress loading at 77 K

for MOCVD-YBCO coated conductors,” *Supercond. Sci. Technol.* 21 (2008) 054006.

- (4) M. Sugano, T. Nakamura, T. Manabe, K. Shikimachi, N. Hirano, S. Nagaya, “The intrinsic strain effect on critical current under a magnetic field parallel to the c axis for a MOCVD-YBCO-coated conductor,” *Supercond. Sci. Technol.* 21 (2008) 115019.
- (5) G. Nishijima, H. Oguro, S. Awaji, K. Watanabe, K. Shikimachi, N. Hirano, S. Nagaya, “Transport Characteristics of CVD-YBCO Coated Conductor under Hoop Stress”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 18, pp. 1131-1134, 2008.

2.1.1-7 実規模コイルの作製と性能評価（中部電力）

(1) 研究開発目的

大出力容量を実現するため、SMES コイルには高耐電圧とともに大電流が要求される。想定している SMES の 100 MW 級出力には 2 kA 以上の電流容量が必要となるため⁽¹⁾、Y 系超電導線材を集合導体としてコイル化する必要がある。今回、素線絶縁した CVD-YBCO 線材(CVD 法により作製された Y 系超電導線材) 4 本を共巻きした集合導体コイルを製作し、液体ヘリウム中で 2 kA 級の大電流通電試験を実施し、集合導体コイルの通電特性を評価した。

(2) CVD-YBCO 集合導体コイルの大電流特性評価

a. 集合導体コイル製作

SMES コイルに要求される 2 kA 以上の電流容量を確保するため、Y 系超電導線材 4 枚を並列に束ねた集合導体としてコイル巻線した。また、コイルサイズは 2 GJ 級トロイダル型 SMES 主要諸元(11 T、600 MPa)と同等となる 20 MJ 級トロイダル型 SMES の要素コイルの外径 $\phi 650$ mm 級とした。そのコイル諸元を表 2.1.1-7-1 に、その外観写真を図 2.1.1-7-1 に示す。コイルは円盤型の一体内側電極に、4 素線を 90 度ずらした対称配置でハンダ付けして巻き始め、90 度ずつずらして対称配置された外側電極で巻き終わる形とすることで、回転対称の形状を確保し、4 素線のインダクタタンス等の電気定数を合わせることで、4 素線の均流化を図っている。

表 2.1.1-7-1 大電流通電試験用 4 束導体コイル諸元

線材種類	Cu めっき絶縁 CVD-YBCO 線材
線材幅	10 mm
導体素線数	4
コイル形状	シングルパンケーキ
内径	φ 520 mm
外径	φ 611 mm
高さ	11 mm
巻数	33 ターン

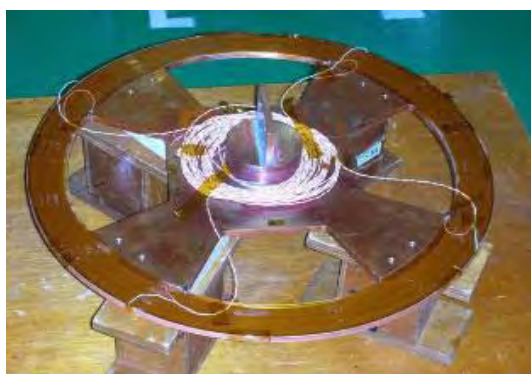


図 2.1.1-7-1 大電流通電試験用 4 束導体コイル外観（含浸後）

b. コイル通電確認試験

2 kA 級大電流通電に先行して、4 束導体コイルを液体窒素中で通電し、コイルの通電特性を確認した。素線電流は各素線にシャント抵抗を接続し、測定した。通電結果を図 2.1.1-7-2 に示す。4 束集合導体コイルの各素線電流には大きなばらつきが観測され、218 A 通電時、#4 素線の電流割合は 10 % 以下であった。各素線の外径側末端部の電圧をそれぞれ測定した結果、#4 素線抵抗値が他より高く観測された。#4 線材は電極接続部において Cu めっきが十分ではなかったため、接触抵抗が高くなり、偏流が生じたと考えられる。

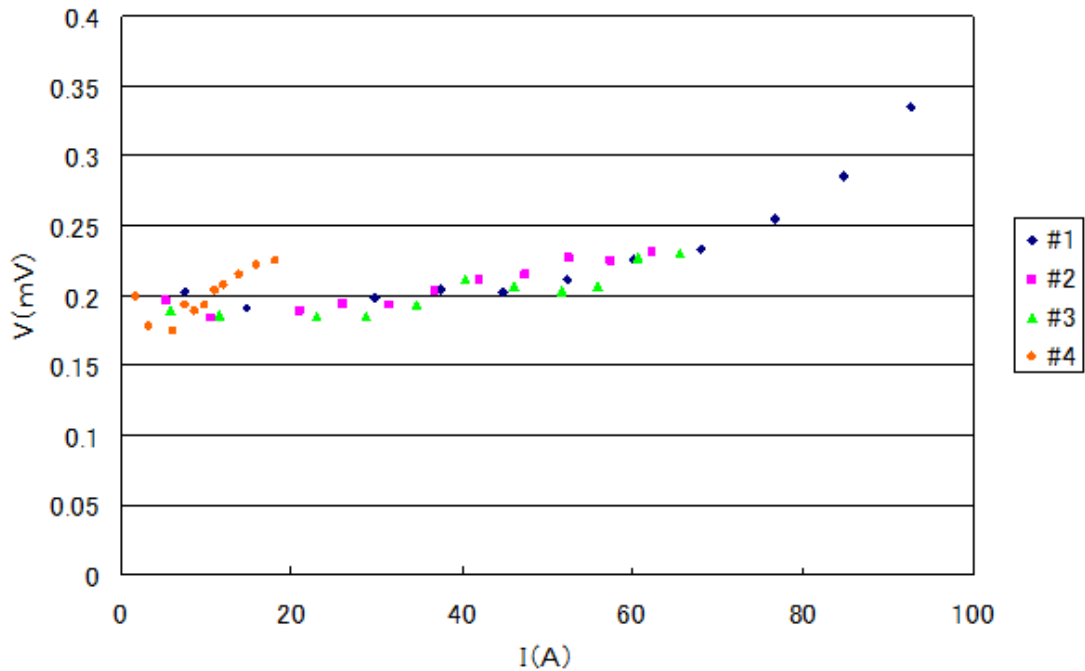


図 2.1.1-7-2 液体窒素中での 4 束導体コイル各素線 I-V 特性

c. 2 kA 級大電流通電試験

通電確認試験において 4 束導体電極部の抵抗差による偏流が生じたため、液体ヘリウム浸漬冷却通電試験を実施する前に、端末接続部を除き、Cu めっきが比較的良好な部位にて電極を形成した。電極部における線材接続長は全て 100 mm である。また、各素線の発生電圧を測定するための内側電極－外側端部間電圧タップの他、各素線間の偏流特性を評価するため、各外側電極近傍にホール素子を、また、4 束導体の各素線の外側端部－外側電極間に電圧タップを設置した。図 2.1.1-7-3 にコイルに設置したこれらの計測センサーの位置を示す。

液体ヘリウム中においてコイルに大電流を通電した時のコイル各素線の発生電圧を図 2.1.1-7-4 に示す。横軸はコイルの全通電電流を示したものである。コイルの全通電電流が 1 kA 付近までは各素線の発生電圧に大きな差異は観測されていないが、1 kA 付近から各素線の発生電圧に明確な差異が観測されているため、素線間に偏流が発生していることが推測される。

各素線の電流値を観測するために設けたホール素子で測定した各外側電極部での磁界の 1 次関数からの差異分、および外側端部－外側電極間電圧の 1 次関数からの差異分をそれぞれ図 2.1.1-7-5、および図 2.1.1-7-6 に示す。ホール素子で測定した各外側電極部での磁界の一次関数からの差異は、各素線間の偏流に基づく磁界と考えられる。また、外側端部－外側電極間電圧は、接続抵抗や Cu 電極そのものの抵抗による電圧降下が支配的であることから、外側端部－外側電極間電圧は各素線の通電電流と比例関係にあると考えられる。図 2.1.1-7-5、2.1.1-7-6 に示されるように両者は同様の傾向を示しており、全通電電流が 1 kA を超えた付近から素線#3 の電流割合が低下し、その後、素線#4 の電流割合が増加し、電流が増加するにつ

れ、素線 #3 から素線 #4 へ偏流が顕著に発生していると考えられる。

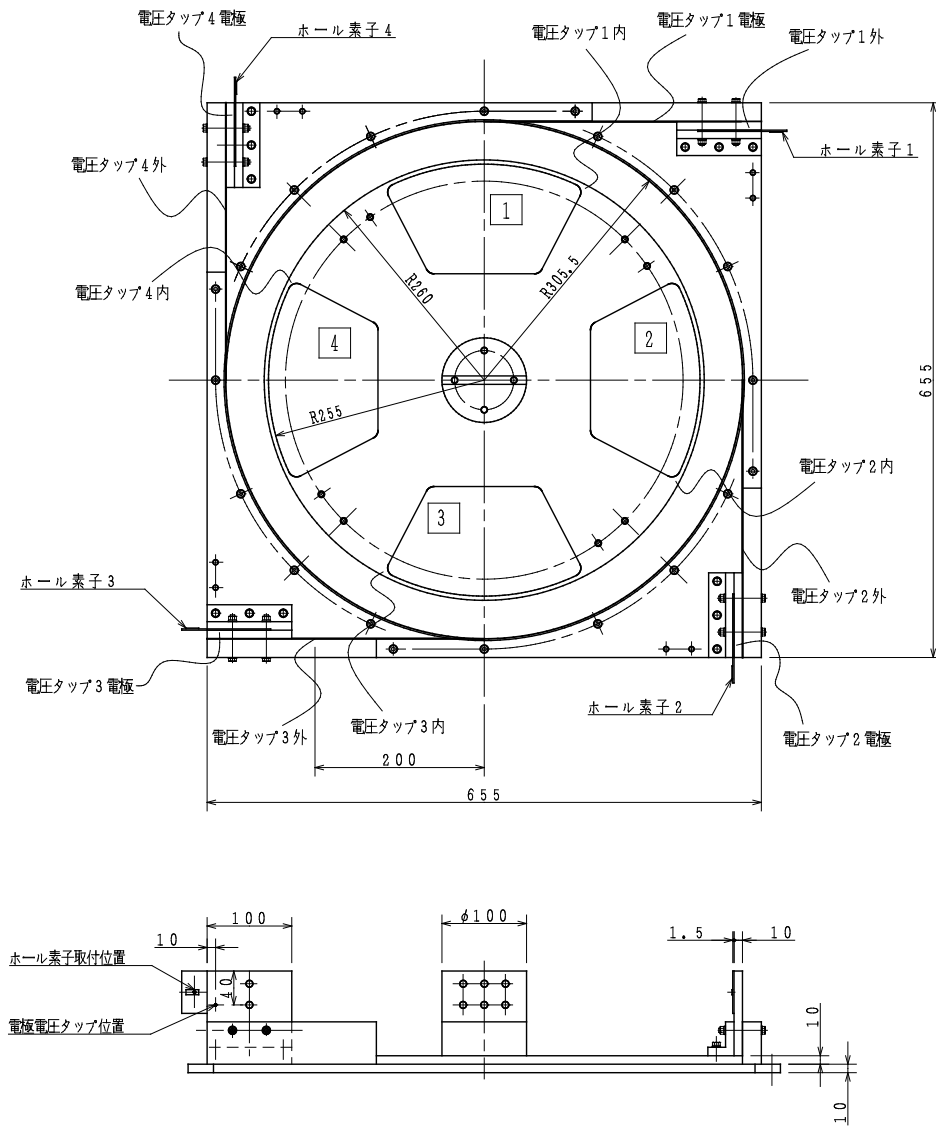


図 2.1.1-7-3 4 束導体コイルの電圧・磁界計測位置

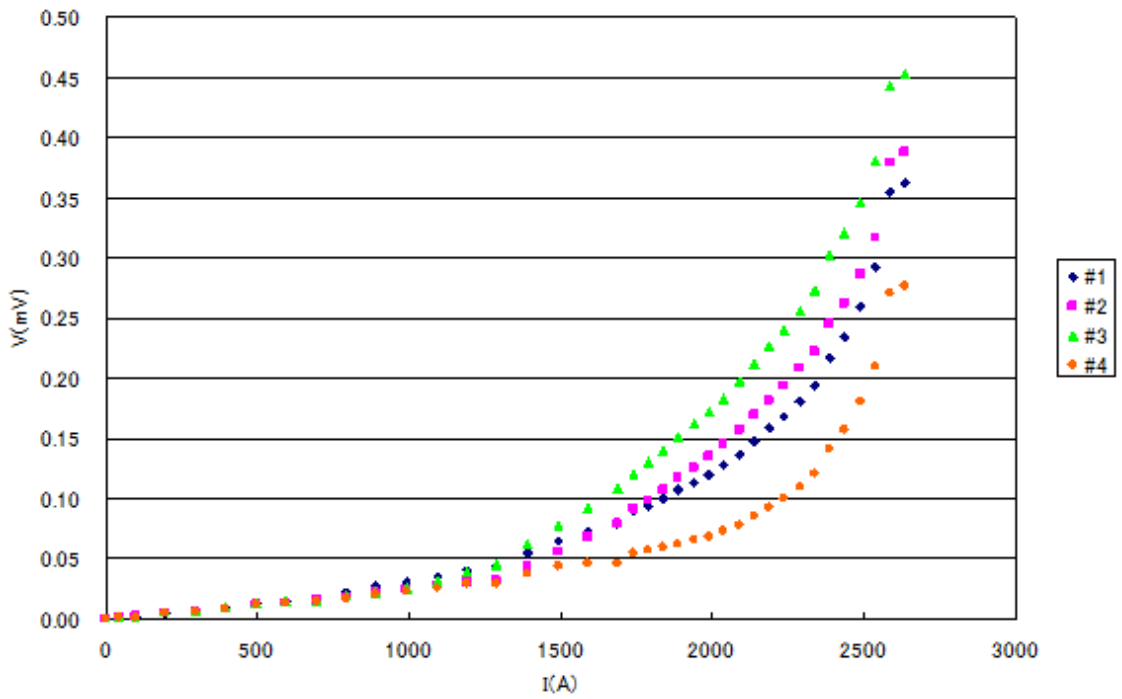


図 2.1.1-7-4 液体ヘリウム中での 4 束導体 I-V 特性
(横軸の電流値はコイル全電流)

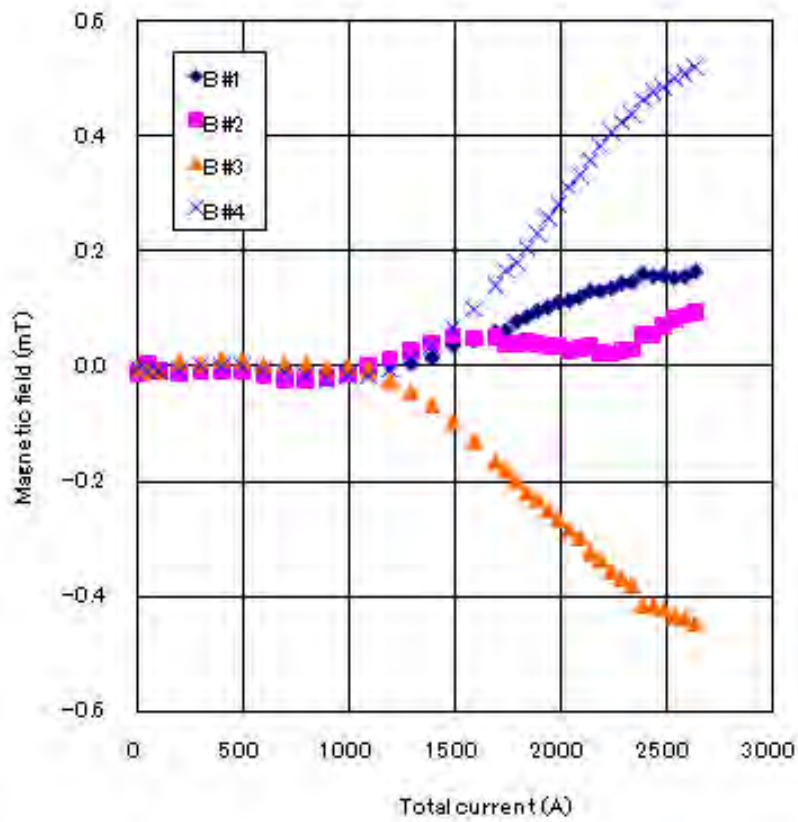


図 2.1.1-7-5 外側電極部での測定磁界 (一次関数からの差異分)

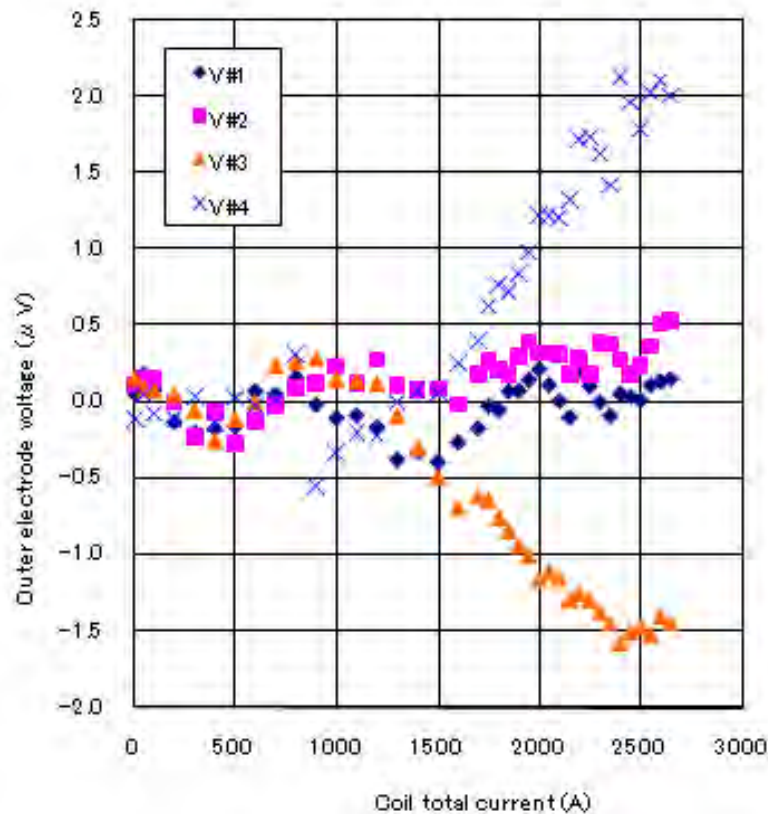


図 2.1.1-7-6 外側電極部の測定電圧（一次関数からの差異分）

これらのデータから各素線に流れた電流値を下記の 2 通りの方法で推定した。

まず、測定された磁界と解析解との比較から各素線に流れる電流値を推定した。ただし、以下の仮定を設定した。

- ・対象外の素線外側電極を流れる電流による影響は無視
- ・全電流 1 kA まで偏流はなく、1 kA 以上での磁界の変動が偏流によるものとし、データを補正(1 次係数の決定)
- ・推定した各素線電流の和が全電流と一致するように補正(2 kA 時で 3 %程度)

次に、外側端部－外側電極間電圧は主に抵抗成分によるものとし、1 kA までの発生電圧から、1 kA 以上の領域での通電電流値を推定した。ただし、以下の仮定を設定した。

- ・全電流 1 kA まで偏流はなく、1 kA 以上での電圧の変動が偏流によるものとし、データを補正(1 次係数の決定)
- ・推定した各素線の電流値の和が全電流と一致するように補正。(2 kA 時で 3 %程度)

以上の条件で算出した大電流通電試験時の各素線の電流値を図 2.1.1-7-7、図 2.1.1-7-8 に示す。両者は同様の傾向を示しており、1.2 kA 付近からコイル電流の増加に伴い偏流が顕著となり、最大 2,637 A 通電時の素線 #3 と素線 #4 の間には約 2 倍の電流差が生じたと推定される。これは、4 本の素線そのものの通電特性

に差があり、通電時の各素線インピーダンスに対して磁束フローによる発生電圧が無視できないレベルまで増加したためと考えられる。磁束フロー発生領域までのコイル通電を含めた SMES 運転を想定する場合は、冷却コストとの兼ね合いとなるが、集合化導体の素線通電特性が偏流に影響を及ぼし、さらに損失や電磁力へも影響を及ぼすことに留意する必要がある。

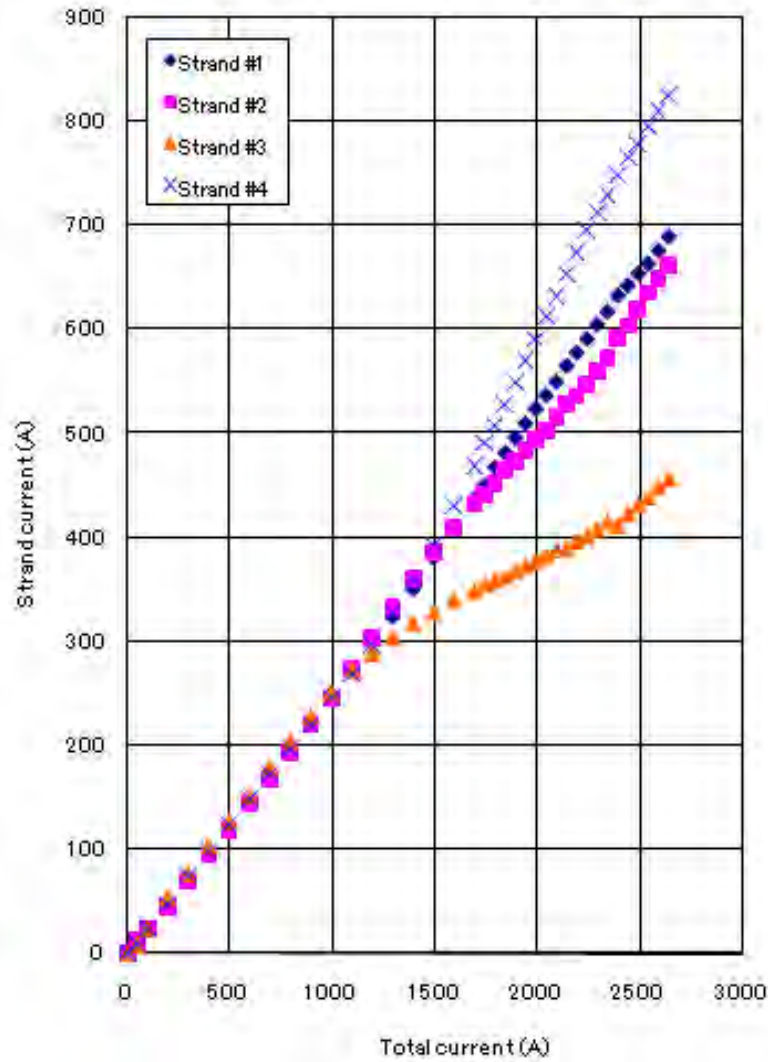


図 2.1.1-7-7 測定磁界から算出した 4 束導体コイルの各素線電流

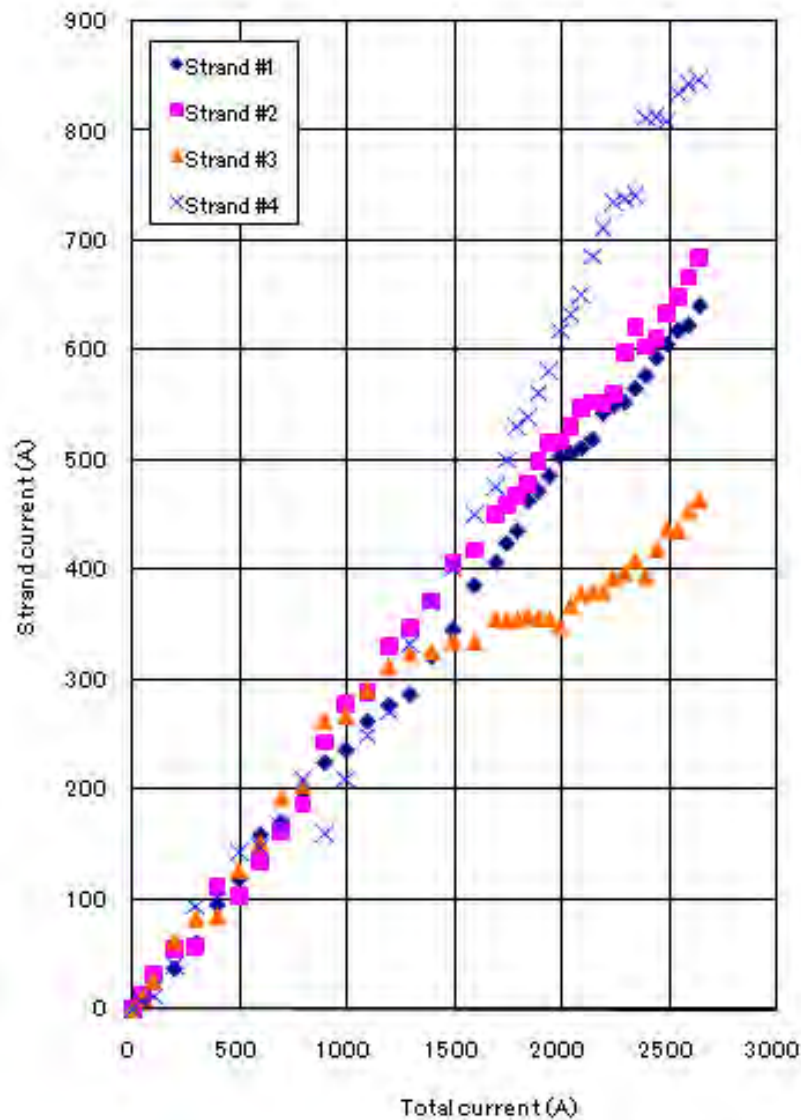


図 2.1.1-7-8 電極電圧から算出した 4 束導体コイルの各素線電流

(3) 結果

大出力容量 SMES コイルに要求される大電流通電特性を評価するため、CVD-YBCO 線材 4 本を束ねた集合導体コイルを製作し、2.6 kA の大電流通電を実証するとともに均流特性を確認した。

引用論文リスト

- (1) K. Shikimachi, N. Hirano, S. Nagaya et al., “System Coordination of 2 GJ Class YBCO SMES for Power System Control”, IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.19, no.3, pp.2012-2018, 2009.

2.1.1-8 まとめ

従来の金属系 SMES コイルの許容可能なフープ応力(300 MPa 程度)の 2 倍の応力(600 MPa)を連続して繰返し加えても使用可能な高強度コイルとして、2 GJ 級大容量 SMES コイルの技術見通しを得るために必要な 20 MJ 級システムの要素コイル規模である外径 700 mm 級コイルを対象とした、フープ応力 600 MPa 以上、2 kA 以上の通電容量を持つ SMES コイル構成技術確立することを目標とし、開発を進めた。

CVD-Y 系超電導線材を用いたフープ応力評価用小型コイル(外径 250 mm)を製作し、従来の金属系 SMES コイルの許容フープ応力の 2 倍となる 600 MPa 級のフープ応力試験を CVD-Y 系コイルを用いて実施した。また、2GJ 級大容量 SMES コイルの技術見通しを得るために必要な 20 MJ 級システムの要素コイル規模となる SMES コイルの開発を開始した。SMES システムとして必要な出力容量を実現するため、機械特性や交流損失等を評価して構造を決定した大電流容量 Y 系超電導集合導体を用いて、高強度・低損失が実現可能な定格 2 kA 級、外径 650 mm 級のコイルを製作し、通電特性等の基礎検証試験を開始した。

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、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。

2.1.2 高効率コイル伝導冷却技術開発

2.1.2-1 開発方針

(1) 研究開発目標

中間目標（平成 22 年度）

- ・ 20～40 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。

(2) 研究内容

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るため、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の温度領域に比べ、コイルが非常に高い熱安定性を有することを同プロジェクトにおいて確認しており、高い熱容量を活かした短時間過負荷運転が可能であり、また、高効率な冷凍機で冷却することが可能である。ただし、同温度領域においては、4K 温度領域と異なり固体熱伝導のみによる冷却システムだけでは十分な熱伝達の実現が困難である。一方、SMES システムとして必要な出力容量を実現するために必要となる高熱伝導性能とトレードオフの関係になる電気絶縁性能に関しては、「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、「超電導電力ネットワーク制御技術開発」プロジェクトにおいて樹脂含浸コイルを試作して 20-40 K 領域において絶縁性能評価試験を行い、含浸コイルの部分放電開始電圧が 3 kV 程度であることを検証しているものの、同温度領域での真空／固体複合絶縁系に関する試験評価データは少ない。以上のことから、同温度領域の伝熱・電気絶縁に関するコイル特性評価を行い、高効率伝導冷却性能を有するとともに 2 kV 以上の電気絶縁性能を有するコイル構造を検討する。

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、20-40 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 W/m² 以上の熱流束を可能とする高熱伝導冷却システムの開発を行う。

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。

2.1.2-2 コイル損失検討(中部電力、九州大学)

(1) 研究開発目的

2 GJ 級 SMES コイルは、多数のパンケーキコイルをトロイダル配置した構造を有するが、パンケーキコイルで発生する交流損失、特に超電導体内部への不可逆な磁束侵入に伴うヒステリシス損失の評価手法はまだ確立されていない。そこで、本研究では、パンケーキコイル特有の内部構造や、SMES として想定される運転パターンを考慮した履歴損失の算出方法を検討し、SMES コイル内で発生する交流損失を定量的に評価する。

(2) 通電電流の影響を考慮した SMES コイルの交流損失評価

電力系統制御用として概念設計された 2 GJ 級 SMES コイル⁽¹⁾に関して、図 2.1.2-2-1 に示すような 2 つのパターンで SMES を運転した場合を想定して、発生する交流損失を見積もった。ただし、通電電流の影響を考慮した各ターンの平行磁界損失と垂直磁界損失をそれぞれ評価し、その和を全交流損失とした^{(2)・(6)}。交流損失の全積算値(コイル 180 個分)に対する結果を表 2.1.2-2-1 に示す。外部磁界のみを考慮した場合と同様に、通電電流の影響を考慮した場合もパターン 2 の方が磁界変化の振幅が大きく、結果として発生する交流損失も大きくなる。外部磁界のみと比較して、平行磁界損失の大きさはほとんど変わらず、通電電流の影響は無視できることがわかる。これは、平行磁界成分の磁界振幅が中心到達磁界に比べて非常に大きいためである。一方、垂直磁界損失は通電電流の影響を強く受け、値が 2 倍以上増加した。その結果、パターン 2 の場合で全交流損失は 0.47 kW となる。SMES システム全体コストの観点から、全損失を 10 kW 以下に抑えることが必要であるが、この場合でも十分小さく、問題ないレベルである。

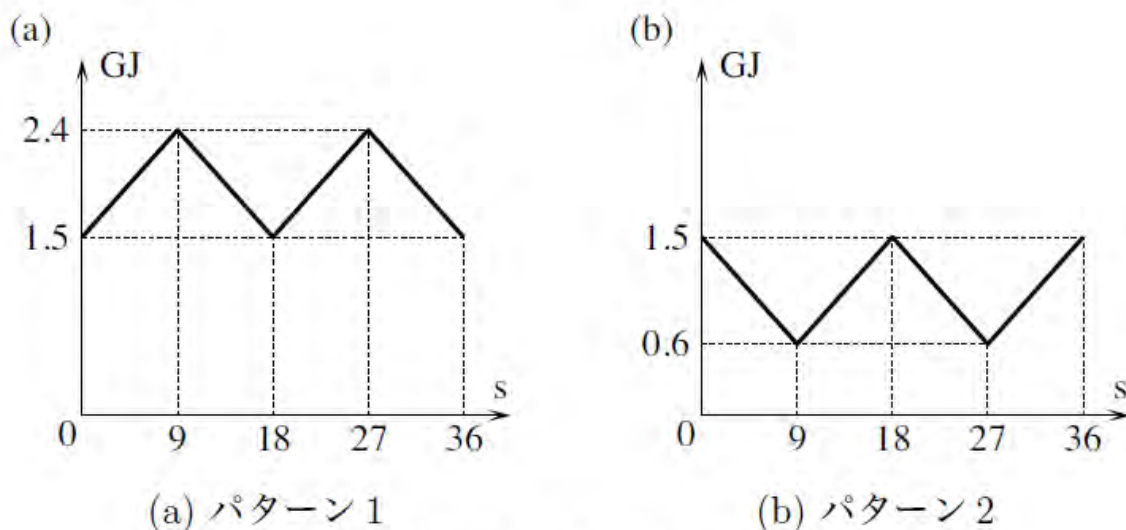


図 2.1.2-2-1 SMES の典型的な運転パターン

表 2.1.2-2-1 通電電流の影響を考慮した SMES コイルの交流損失

成分	パターン 1	パターン 2
平行磁界損失	0.05 kW	0.07 kW
垂直磁界損失	0.18 kW	0.40 kW
全交流損失	0.23 kW	0.47 kW

(3) 結果

Y 系超電導線材からなるパンケーキコイルを多数トロイダル配置した SMES 用コイルで発生する交流損失を定量的に評価した。負荷変動補償用 SMES の運転パターンを分析することにより、パンケーキコイルがさらされる複雑な電磁環境を明らかにし、従来の外部磁界のみに加え、通電電流の影響を考慮して交流損失を算出したが、冷却コストから制約される目標 10 kW より十分低い値であることを確認した。

引用論文リスト

- (1) K. Shikimachi, N. Hirano, S. Nagaya, H. Kawashima, K. Higashikawa and T. Nakamura: “System coordination of 2 GJ class YBCO SMES for power system control,” IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 19, No. 3 (2009) pp. 2012-2018.
- (2) W.J. Carr, Jr.: “AC loss from the combined action of transport current and applied field,” IEEE Trans. Magn., Vol. 15, No. 1 (1979) pp. 240-243.
- (3) K. Funaki, M. Iwakuma, K. Kajikawa, M. Takeo, J. Suehiro, M. Hara, K.

- Yamafuji, M. Konno, Y. Kasagawa, K. Okubo, Y. Yasukawa, S. Nose, M. Ueyama, K. Hayashi and K. Sato: “Development of a 500 kVA-class oxide-superconducting power transformer operated at liquid-nitrogen temperature,” *Cryogenics*, Vol. 38, No. 2 (1998) pp. 211-220.
- (4) K. Kawasaki, K. Kajikawa, M. Iwakuma and K. Funaki: “Theoretical expressions for AC losses of superconducting coils in external magnetic field and transport current with phase difference,” *Physica C*, Vols. 357-360, Part 2 (2001) pp. 1205-1208.
- (5) 柁川一弘、船木和夫、式町浩二、平野直樹、長屋重夫：「SMES の充放電動作を模擬したパンケーキコイル巻線の交流損失評価」、第 80 回 2008 年度春季低温工学・超電導学会(2009) 1P-p19.
- (6) K. Kajikawa, K. Funaki, K. Shikimachi, N. Hirano and S. Nagaya: “Numerical and theoretical evaluations of AC losses for single and infinite numbers of superconductor strips with direct and alternating transport currents in external AC magnetic field,” *Physica C* (2010) in press.

2. 1. 2-3 高耐電圧・高熱伝導コイル構造検討（中部電力）

(1) 研究開発目的

伝導冷却システムに組み合わせることが可能で、対地絶縁性能 2 kV（設計目標 6 kV）、及び表面での熱流束 3 W/m²（一様）となるコイルについて構造検討する。なお、表面での熱流束については、2 GJ 級 SMES の運転に伴い発熱する熱量を、冷却できるコイル断面積で除した値として設定したものである。

(2) 絶縁設計の考え方

はじめに、対地絶縁性能 2 kV（設計目標 6 kV）を満たす絶縁厚さを計算する。巻線機器の直流機器の試験電圧は、JEC によると定格電圧 E(kV)の場合に 2E+1 kV の試験電圧と定められている。本装置でも目標定格電圧 6 kV に対して試験電圧を 2E+1 の 13 kV とする。設計値はこれに裕度を考慮する。ケーブルでは規格が決まっているが、電力機器ではこのようなものは無く、各メーカーで基準が異なる。

設計裕度として絶縁耐圧の経時劣化を考慮し以下のように設定する。絶縁耐圧の時間変化には $t \propto V^{-n}$ の関係があり、FRP では $n = 12 \sim 14$ になるとされている。ここではより劣化の大きい $n = 12$ の場合を想定する。1 分間の耐電圧試験で確認した耐電圧が 30 年後にどこまで劣化するかを図 2.1.2.-3-1 に示す。この場合、30 年後には 25 %まで低下するので、これを見越して裕度 4 倍以上が必要である。ここでは $13 \times 4 = 52$ kV を設計値とする。

ここで、絶縁破壊電圧は耐電圧試験で確認した電圧より高いこと、 n が 12 より大きければ経時劣化はもっと小さいこと、真空中・低温の環境で使用する超電導コ

イルでは熱および酸化劣化が小さいと考えられることから、4 倍の裕度は安全側と考えられる。

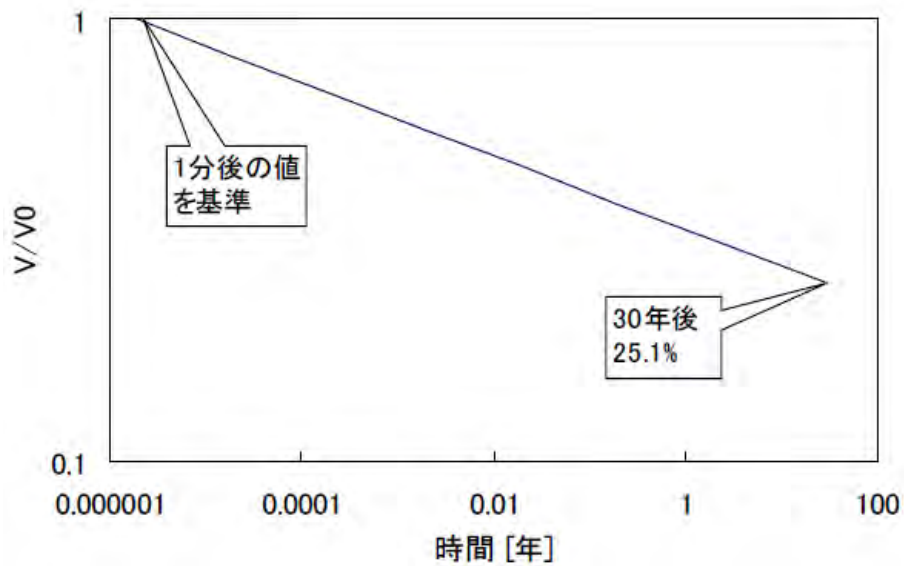


図 2.1.2-3-1 絶縁耐力の経時変化

一方、GFRP 板の絶縁耐圧は材料により異なるが安全側のデータとして、厚さ 3.175 mm の板で 15.7 kV/mm の値を用いた。また絶縁板の厚さと絶縁耐圧の間には $V \propto d^n$ の関係があり、 n は 0.6~1 の値を示す。図 2.1.2-3-2 に n が 0.6 の場合と 1 の場合の絶縁板厚さと絶縁耐圧の関係を示す。2 本の線の低い方の値を採用することにして、この図から 52 kV に耐える厚さを求めると 3.4 mm 以上となる。本検討では絶縁用 FRP 板の厚さを 4 mm とした。

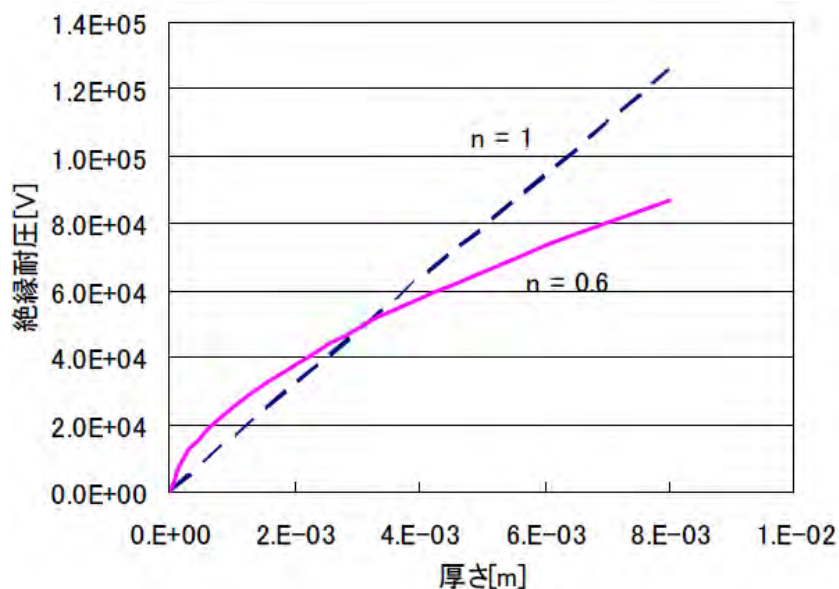


図 2.1.2-3-2 GFRP の厚さと絶縁耐圧の関係

(3) コイルの伝熱量の考え方

コイル断面構造を仮定し、コイル表面で 3 W/m^2 の一様な熱流束があった場合のコイル内部および対地絶縁部で生じる温度差について検討した。

計算モデルとしてコイル断面形状を図 2.1.2-3-3 に示す。コイル表面での熱流束が一様な条件なので r 、 θ 方向の対称性から z 軸のみの 1 次元モデルとした。また、対称性を考慮して 4 パンケーキの下半分の 2 パンケーキ分をモデル化した。計算モデルを図 2.1.2-3-4 に示す。

コイルへの熱負荷としては、コイル発熱と外部からの輻射熱が考えられるが、コイル発熱と比較して輻射熱は小さいため、熱負荷としてコイル発熱のみを考慮した。コイル発熱はコイル表面での熱流束が 3 W/m^2 となる条件とし、コイル巻線部で一様に発熱するとした。

計算に用いた諸元を表 2.1.2-3-1 に示す。

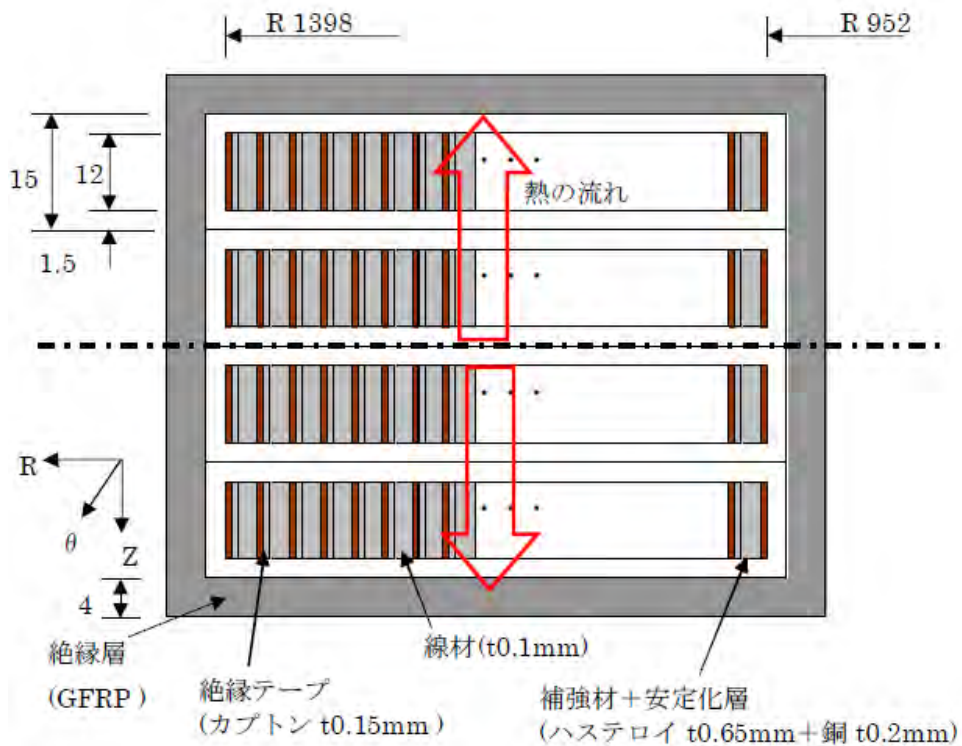


図 2.1.2-3-3 コイル断面形状

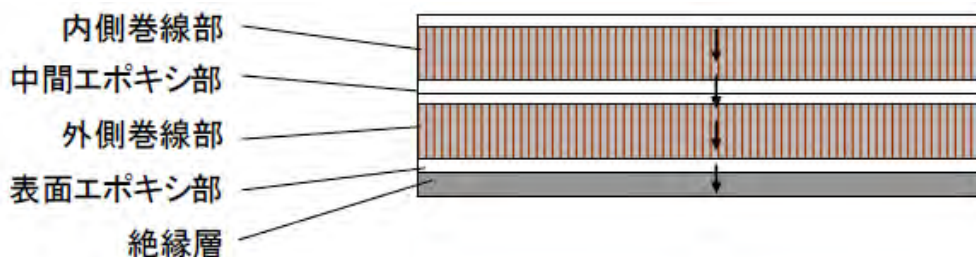


図 2.1.2-3-4 計算モデル(1次元)

表 2.1.2-3-1 検討条件

要素コイル寸法	外半径	1.4 m
	内半径	1.0 m
	高さ	60 mm
	表面積(両側面)	6.03 m ²
熱流束 (一様)		3.0 W/m ²
伝熱量(1 コイル当り)		18.1 W

コイル内部の z 方向温度分布は、コイル内をセルに分割して各セルの温度差を計算し、この温度差を積算する方法を用いた。各セルの温度差は式 2.1.2-3-1 で表される。

$$q = \frac{Q}{A} = \lambda \frac{dT}{dx} \quad \text{式 2.1.2.3-1}$$

ここでλは、絶縁層とエポキシ部及び FRP 板ではエポキシの熱伝導率を用い、コイル巻線部ではコイル巻線部 z 軸方向の等価熱伝導率を用いた。コイル巻線部の z 軸方向の等価熱伝導率λ_zは、線材と補強材の熱伝導率としてハステロイ™の値を、絶縁テープと絶縁材の熱伝導率としてエポキシの値を用い、安定化層を銅として式 2.1.2-3-2 から計算した。

$$\lambda_z = \frac{A_{\text{ハステロイ}}}{A} \lambda_{\text{ハステロイ}} + \frac{A_{\text{エポキシ}}}{A} \lambda_{\text{エポキシ}} + \frac{A_{\text{銅}}}{A} \lambda_{\text{銅}} \quad \text{式 2.1.2.3-2}$$

各材料の熱伝導率と等価熱伝導率を表 2.1.2-3-2 に示す。温度分布計算には 20K での値を用いた。

表 2.1.2-3-2 各材料の熱伝導率と等価熱伝導率

材質	厚さ	熱伝導率
線材(ハステロイ™)	0.10 mm	2.8 W/m K
補強材(ハステロイ™)	0.65 mm	2.8 W/m K
安定化銅	0.20 mm	833 W/m K
カプトン	0.15 mm	0.10 W/m K
巻線部 z 軸方向	1.10 mm	153 W/ mK

(4) 結果

伝導冷却に用いるコイルの形状について検討した。このときの線間の絶縁厚については、解析結果より、FRB の厚み 4 mm あれば 2 kV 以上の絶縁を確保できることがわかった。ここで、コイル内の温度差の分布の計算結果を図 2.1.2-3-5 に示す。コイル巻線部と絶縁部では熱伝導率が異なるため温度分布に違いが生じ、コイ

ル表面と絶縁層の温度差は 0.17 K で、コイル内部の温度差を合わせても 0.21 K となる。コイルと冷凍機間の温度差としてこの温度差を見込むこととした。今後、伝導冷却システムの検証の中で、今回設計した絶縁性能について確認する予定である。

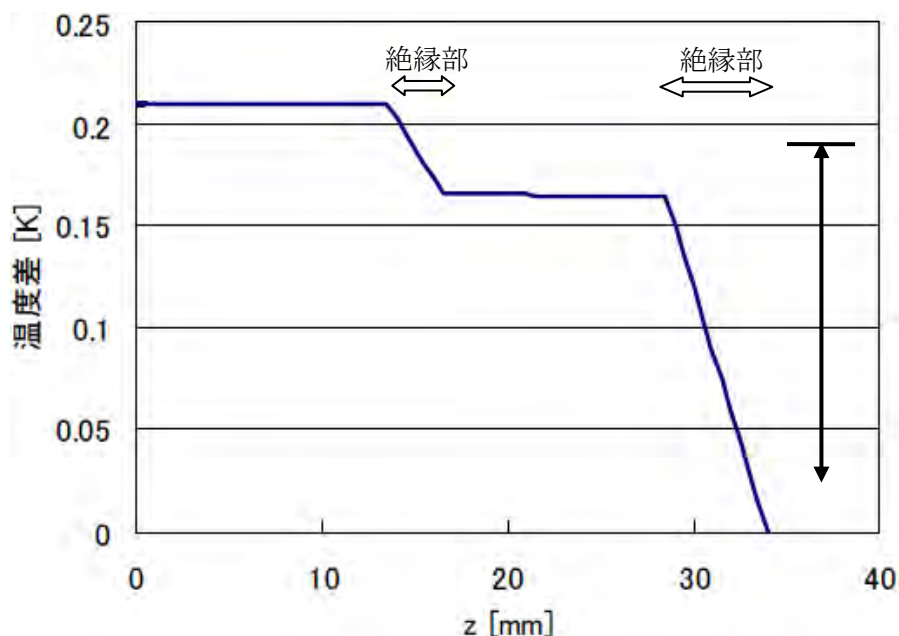


図 2.1.2-3-5 コイル内の温度差分布

引用論文リスト

- (1) 放電ハンドブック 第2版 下巻 p251
- (2) 超伝導・低温工学ハンドブック p1088

2.1.2-4 長距離伝導冷却システム試作・評価（中部電力）

(1) 目的

2 GJ 級 SMES の冷却システム実現に必要な伝導冷却特性（2 GJ 級 SMES の熱負荷を加えてコイル温度を 20 K 程度に冷却できる能力）および電気絶縁性を満足する冷却試験モデルシステムを作製し、性能を検証する。

具体的には、2 GJ 級コイル表面での熱流束 3 W/m^2 を模擬するため、試験発熱体で約 9 W 相当の熱量を発生(模擬コイル表面積 3 m^2)させ、試験体各部の温度を測定・記録し、コイル表面温度が上昇しないことを確認する。

(2) 冷却系の構成

伝導冷却試験装置の構成を図 2.1.2-4-1 に示す。1 台のコイル用冷凍機で冷却したガスを用いて試験用発熱体を冷却する。

この冷却系における配管出口温度を検討し、構成が妥当であることを検証する。ここでは配管の熱伝達による温度差等は無視し、冷凍機の温度上昇と配管入口出口の温度差のみを考慮した。検討に用いた冷凍機の冷凍能力を図 2.1.2-4-2 に示す。また、熱交換器効率を 95 %、室温温度は 300 K とした。熱負荷条件を表 2.1.2-4-1 に示す。

検討結果として、 3 W/m^2 の熱負荷での流量と配管出口温度の関係を図 2.1.2-4-3 に、 9 W/コイル の熱負荷での流量と配管出口温度の関係を図 2.1.2-4-4 に示す。配管出口温度は 20 K 程度であり、冷却系の構成は妥当であると考えられる。

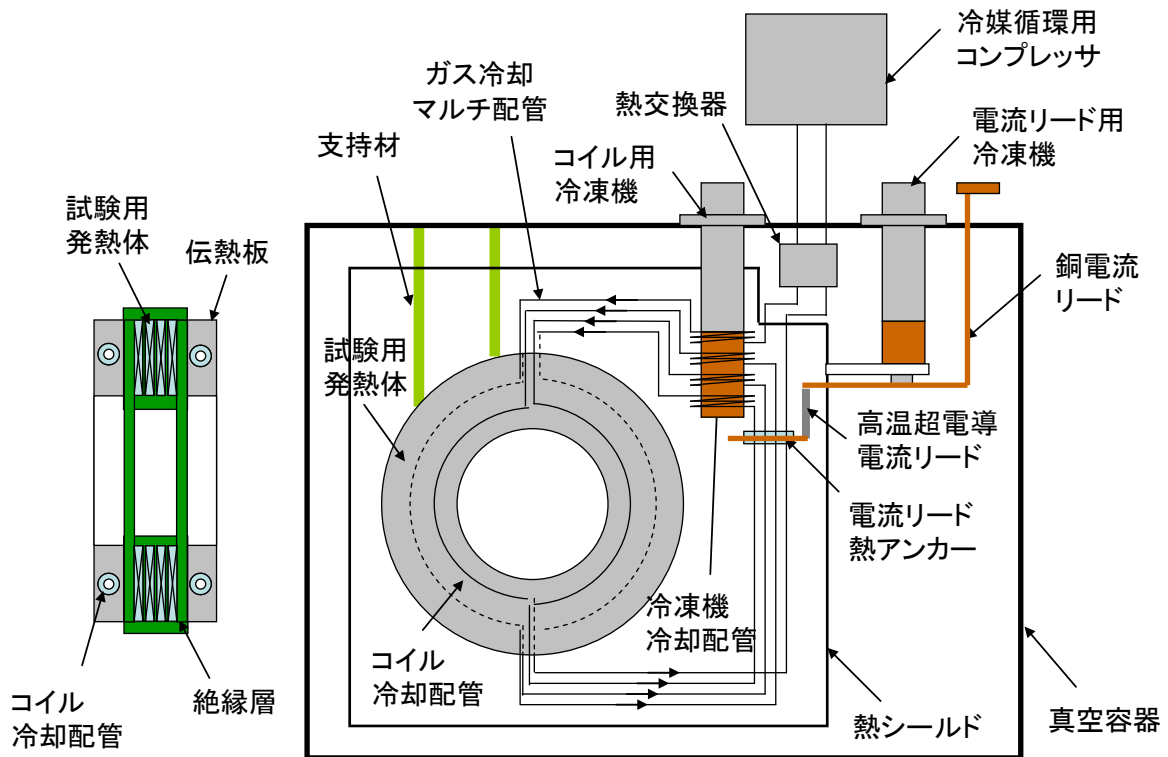


図 2.1.2-4-1 伝導冷却試験装置の構成

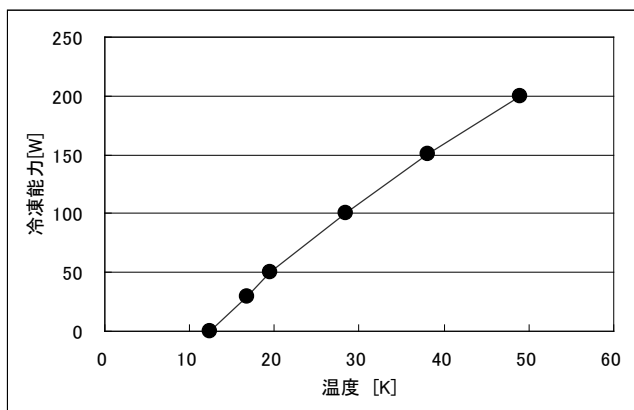


図 2.1.2-4-2 冷凍機温度と冷凍能力の関係

表 2.1.2-4-1 試験用発熱体の熱負荷

	条件 1	条件 2
コイル発熱(模擬)	1.23 W	9.0 W
1 配管当りの伝熱量	0.31 W	2.25 W

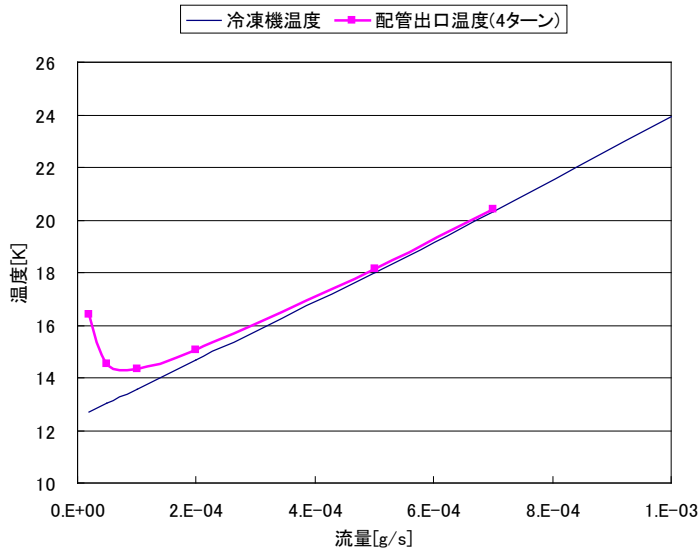


図 2.1.2-4-3 3 W/m²相当の熱負荷での流量と配管出口温度の関係

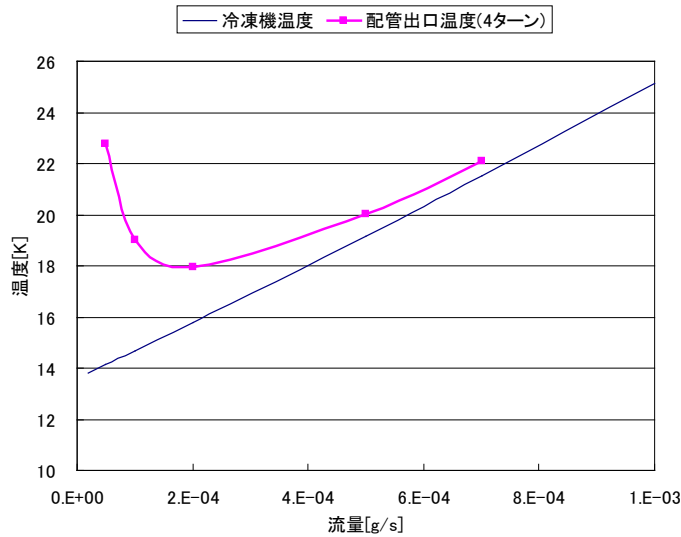


図 2.1.2-4-4 9 W/コイル相当の熱負荷での流量と配管出口温度の関係

(3) 試験用発熱体の構成

試験用発熱体の寸法は実規模コイルの寸法に合わせ表 2.1.2-4-2 の数値とした。また r 、 θ 、 z 方向の等価熱伝導率が 2 GJ 級 SMES コイルに近くなるような構成を考える。2 GJ 級 SMES コイルの材質と等価熱伝導率を表 2.1.2-4-3 に示す。等価熱伝導率の計算は直列の場合は式 2.1.2-4-1 を並列の場合は式 2.1.2-4-2 を用いた。

$$\text{直列の場合} \quad \lambda = \left(\sum_k \frac{l_k}{l} \frac{1}{\lambda_k} \right)^{-1} \quad (\text{式 2.1.2-4-1})$$

$$\text{並列の場合} \quad \lambda = \sum_k \frac{A_k}{A} \lambda_k \quad (\text{式 2.1.2-4-2})$$

θ 、 z 方向の等価熱伝導率は153 W/m Kと大きく、アルミ(A1100)と同程度である。一方、 r 方向の等価熱伝導率はかなり小さくこれを模擬するためにはアルミ板を分割してFRPを挟む構成とする。試験用発熱体の断面形状を図2.1.2-4-5に、この構成での等価熱伝導率を計算した結果を表2.1.2-4-4に示す。

表 2.1.2-4-2 試験用発熱体の寸法

外径	650 mm
内径	400 mm (1.29 mm 幅×160 m 線材 97 ターンと仮定)
厚さ	60 mm

表 2.1.2-4-3 コイルの構成と等価熱伝導率

	材質	厚さ	比率	熱伝導率
線材	ハステロイ TM	0.10 mm	9.1 %	2.80 W/m K
補強材	ハステロイ TM	0.65 mm	59.1 %	2.80 W/m K
安定化材	銅	0.20 mm	18.2 %	833 W/m K
絶縁材	エポキシ	0.15 mm	13.6 %	0.10 W/m K
合計		1.10 mm		

巻線部等価熱伝導率(θ 、 z) 153 W/m K

巻線部等価熱伝導率(r) 0.62 W/m K

表 2.1.2-4-4 試験用発熱体の分割構成と等価熱伝導率

	材質	幅	比率	熱伝導率
アルミ板	A1100	105 mm	84.0 %	200 W/m K
絶縁材	FRP	20 mm	16.0 %	0.10 W/m K

巻線部等価熱伝導率(θ 、 z) 168 W/m K

巻線部等価熱伝導率(r) 0.62 W/m K

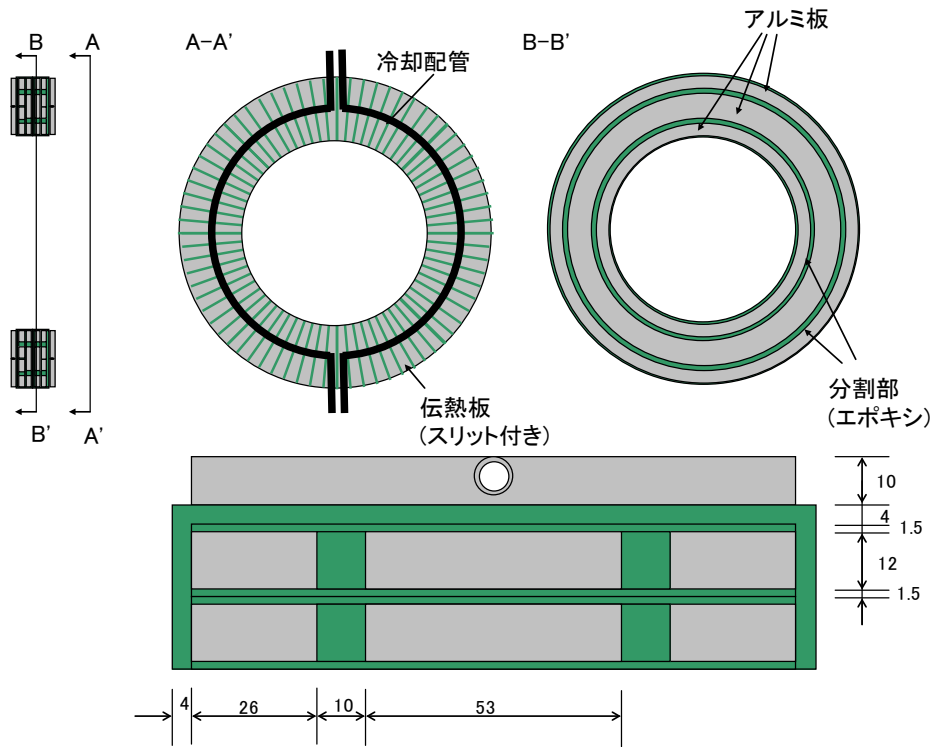


図 2.1.2-4-5 試験用発熱体の断面形状

(4) 実規模コイルの発熱分布モデルと冷却シミュレーション

これまではコイルが均一発熱している場合について検討してきたが、2 GJ 級 SMES コイルには発熱分布が存在する (図 2.1.2-4-6)。

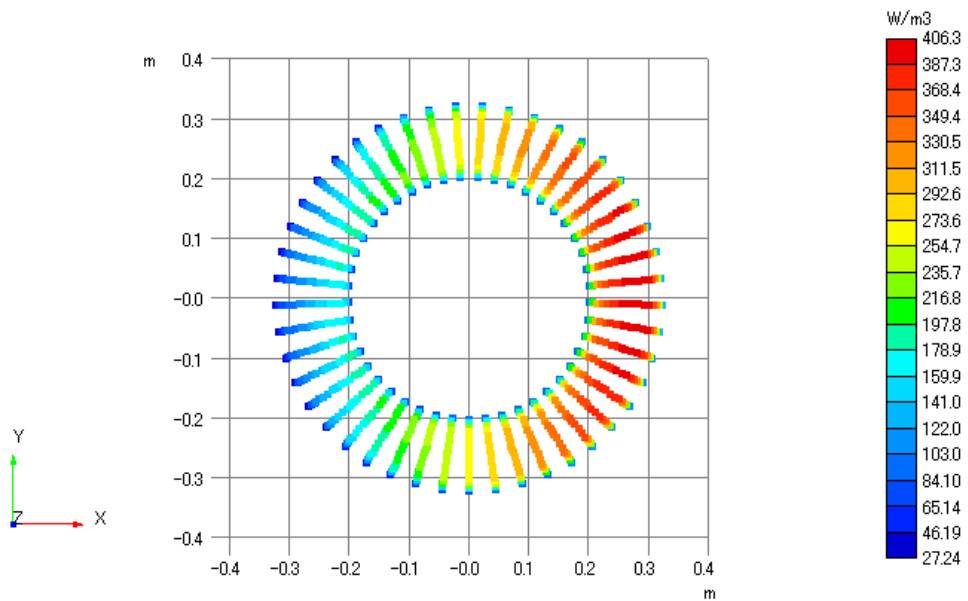


図 2.1.2-4-6 実規模コイルの発熱分布 (外側コイル)

この発熱分布がある実規模コイルに対し冷却シミュレーションを実施した。解析条件を表 2.1.2-4-5 に示す。

表 2.1.2-4-5 発熱分布がある実規模コイルの冷却シミュレーション条件

	C 1
コイル表面熱流速	21.8 W / m ²
配管 1 本当たり発熱量	2.25 W / 配管
配管長	825 mm
配管径	外径 8 mm、内径 6 mm
ガス流量	0.56 g / s
発熱分布	分布

注)ガス流量は 2 GJ 級 SMES コイルにおいて計算上冷却能力が最も高くなる値を採用

解析結果を図 2.1.2-4-7 に示す。

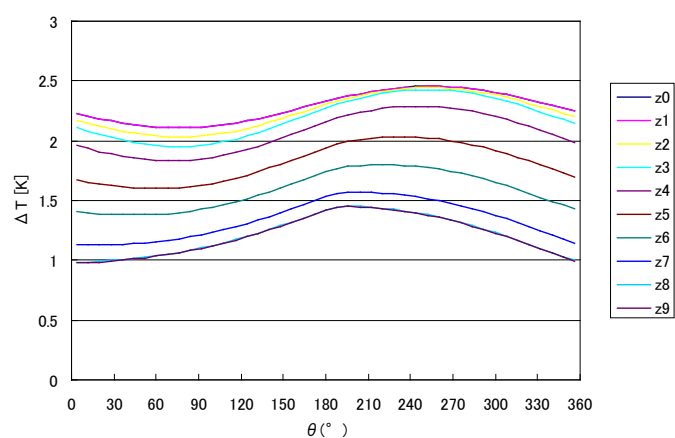


図 2.1.2-4-7 実規模コイルの ΔT 分布 (1 配管当たり発熱 2.25 W)
(最外周部、配管入口温度基準、z0 がコイル内側、発熱分布有り)

(5) 試験用発熱体のヒーター取付け位置

前項の結果を受け、発熱分布を模擬できるようにヒーターは周方向に 6 等分配置することとする。取付け位置を図 2.1.2-4-8 及び図 2.1.2-4-9 に示す。

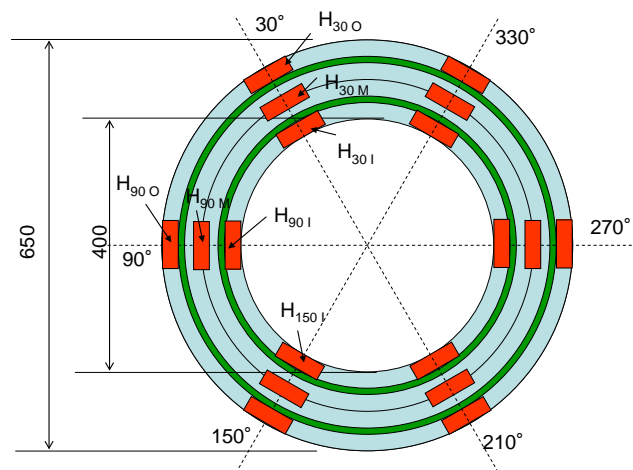


図 2.1.2-4-8 ヒーター取付け位置（平面図）

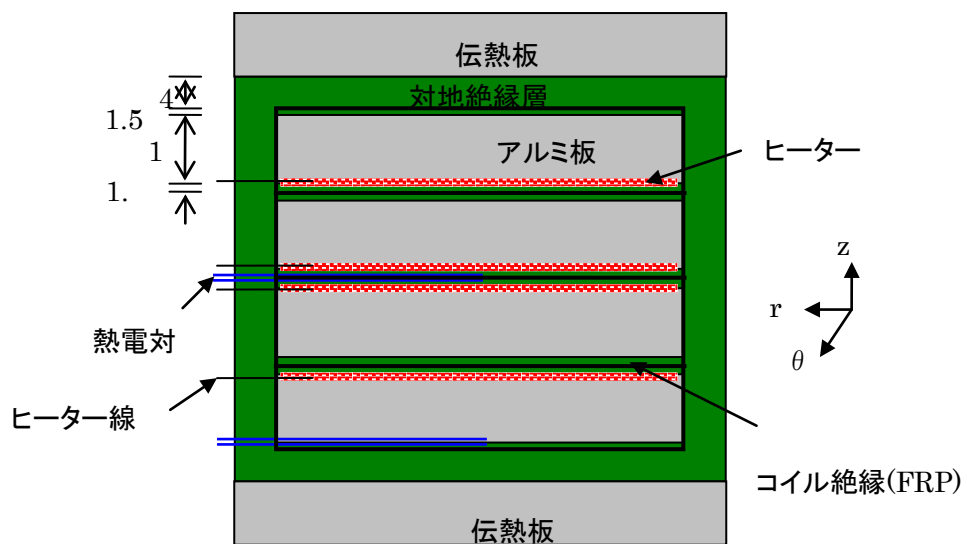


図 2.1.2-4-9 ヒーター取付け位置（断面図）

(6) 伝導冷却試験装置製作

①伝熱性能

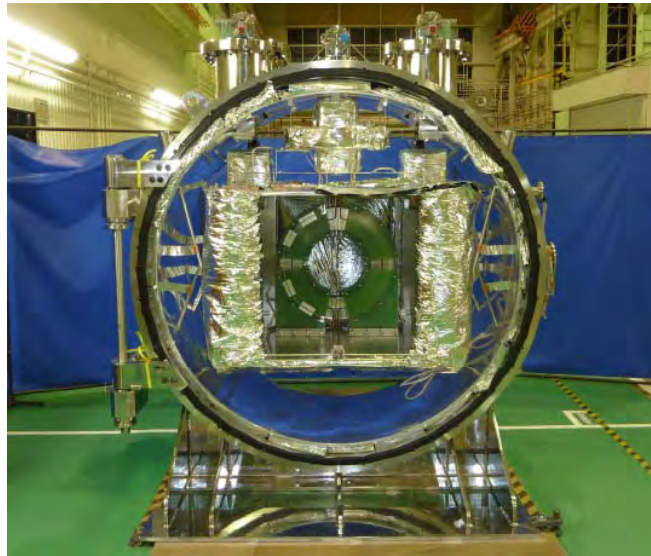
コイル（試験用発熱体）表面で平均熱流束 3 W/m^2 の熱交換を行い、コイル（試験用発熱体）温度を 20 K 程度に冷却できる能力とする。また、冷却性能を検証するため、以下のア～オの温度を $4 \sim 80 \text{ K}$ 領域において 0.1 K 程度の精度で計測を行えるものとする。

- ア) コイル（試験用発熱体）温度
- イ) コイル（試験用発熱体）－伝熱板間の絶縁層温度
- ウ) 伝熱板温度
- エ) コイル冷却配管内の入口及び出口温度
- オ) 冷凍機冷却配管の入口及び出口温度

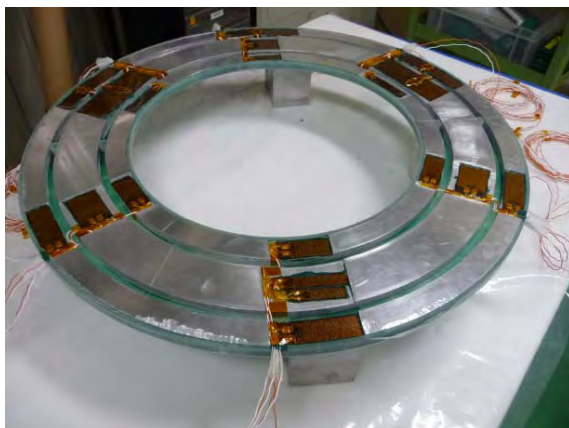
②絶縁性能

コイル（試験用発熱体）－伝熱板間の電気絶縁性能を 6 kV 以上とする。

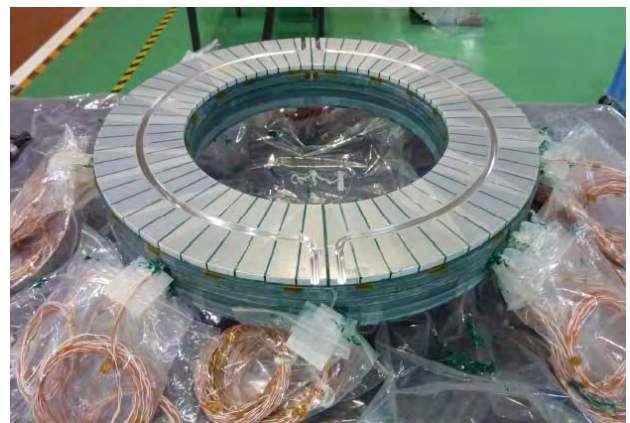
これらの性能を満たす伝導冷却試験装置について図 2.1.2-4-10 のように製作した。



(a) 伝導冷却試験装置全体



(b) 試験用発熱体



(c) 試験用発熱体冷却部

図 2.1.2-4-10 伝導冷却試験装置

(7) 模擬コイルによる伝導冷却試験

図 2.1.2-4-10 の伝導冷却試験装置は、冷凍機で冷却したヘリウムガスを循環させることで、コイルを模擬した試験用発熱体を冷却する。冷凍機－伝熱板間のガス冷却系での伝熱と、伝熱板とコイル内部の伝導冷却系の伝熱特性を測定する。ガス冷却系は循環用コンプレッサ、熱交換器、冷凍機伝熱部、コイル伝熱部、電流リード熱アンカーとそれらをつなぐ配管で構成される。ガス冷却系の測定項目としては、コンプレッサ流量特性、熱交換器効率、各伝熱部の伝熱特性、各部の圧力損失がある。また、伝導冷却系は伝熱板、絶縁層、コイル（試験用発熱体）で構成される。伝導冷却系の測定項目としてはコイル内伝熱特性、絶縁層伝熱特性、伝熱板伝熱特

性がある。

そこで、伝導冷却試験装置の温度、圧力、流量の計測点を図 2.1.2-4-11 に示す。また、コイルに与えるヒーター入力値を表 2.1.2-4-5 に示す。

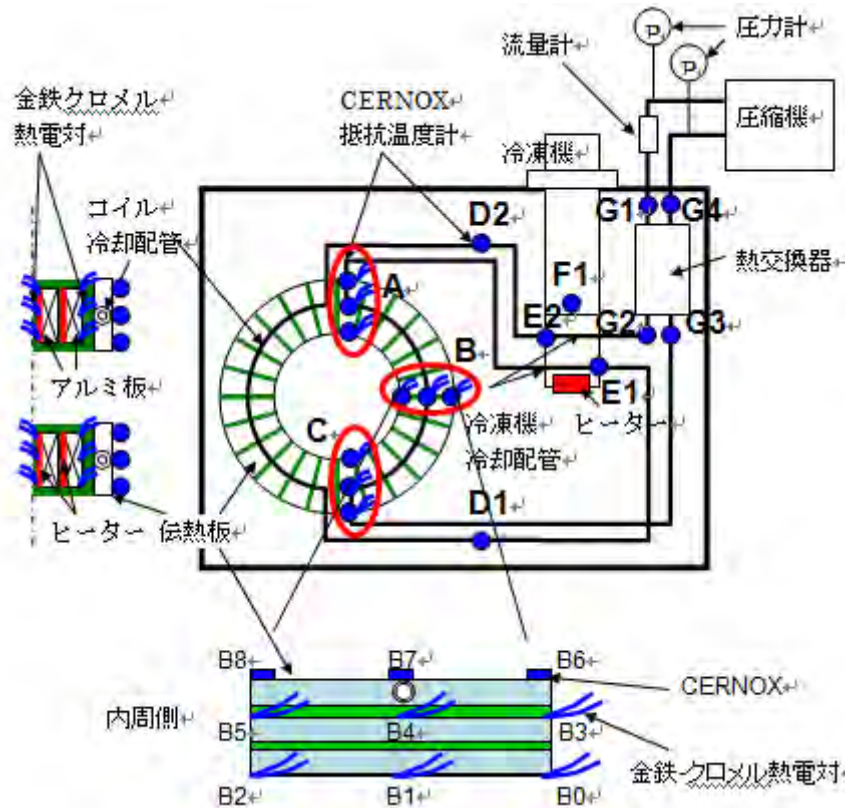


図 2.1.2-4-11 伝導冷却試験装置の計測点

表 2.1.2-4-5 発熱分布を模擬した場合のヒーター入力値 (合計 9 W)

	内側コイル			外側コイル		
	内側:内周	内側:中間	内側:外周	外側:内周	外側:中間	外側:外周
0° -60°	0.009 W	0.023 W	0.014 W	0.084 W	0.306 W	0.125 W
60° -120°	0.009 W	0.023 W	0.014 W	0.084 W	0.226 W	0.125 W
120° -180°	0.009 W	0.023 W	0.014 W	0.084 W	0.306 W	0.125 W
180° -240°	0.009 W	0.023 W	0.014 W	0.153 W	0.500 W	0.227 W
240° -300°	0.009 W	0.023 W	0.014 W	0.200 W	0.575 W	0.227 W
300° -360°	0.009 W	0.023 W	0.014 W	0.153 W	0.500 W	0.227 W

今後、模擬発熱体を使った伝導冷却システム試験装置を運転し、設計通り冷却できているかを評価する予定である。また、模擬発熱体を実規模コイルに置き換え、実規模コイルにおいても冷却性能を確認する予定である。

引用論文リスト

超伝導・低温工学ハンドブック p1088

2.1.2-5 絶縁特性向上に関する検討（中部電力、名古屋大学）

(1) 研究開発の目標

SMES 開発において解決すべき技術課題の一つとして、電気絶縁設計が挙げられる。SMES の電力機器としての基礎性能である耐電圧性能については未解明な部分が多く、実用化に向けての技術的障壁となっている。特に、伝導冷却 SMES では、極低温／真空／固体絶縁物による複雑な絶縁環境が形成される。このような複合絶縁系においては、絶縁破壊の前駆現象としての部分放電（PD）特性の把握が重要となるが、極低温／真空／固体複合絶縁系の PD 特性に関する研究は皆無であると言っても過言ではない。そこで、本研究では、伝導冷却 SMES における超電導コイルの絶縁性能向上を目標として、電界解析によりターン間絶縁および対地絶縁方法を検討した。さらに、伝導冷却コイルモデルを用いて、PD 開始特性を実験的に評価した。

(2) 研究開発の内容

a. SMES コイルの印加電圧波形

SMES システムは、図 2.1.2-5-1 に示すようにインバータ、チョッパ、超電導コイルで構成され、超電導コイルには図 2.1.2-5-2 に示すような直流電圧とサージ電圧が重畳した両極性繰り返し電圧が印加される。このような複雑な電圧波形が印加される SMES コイルの絶縁性能を評価する際、正弦波交流電圧による絶縁試験が考えられる。これは、SMES コイルの電圧波形がピーク値を持つこと、両極性の繰り返し波形であることなどの類似点に基づいている。また、サージ電圧に対する耐電圧が交流電圧に対する耐電圧よりも一般的に高いことを考慮すれば、安全サイドの絶縁性能を確保すると言う意味においても妥当である。以上のような観点から、本研究では正弦波交流電圧（60 Hz）を用いることとした。

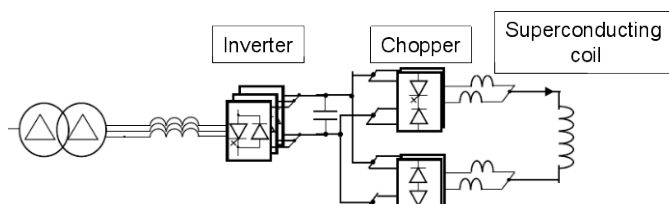


図 2.1.2-5-1 SMES システムの構成

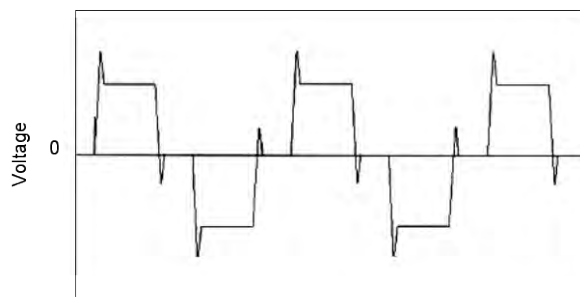


図 2.1.2-5-2 SMES コイルの印加電圧

b. Y系超電導コイルモデルの電界解析

1) Y系超電導コイルモデル

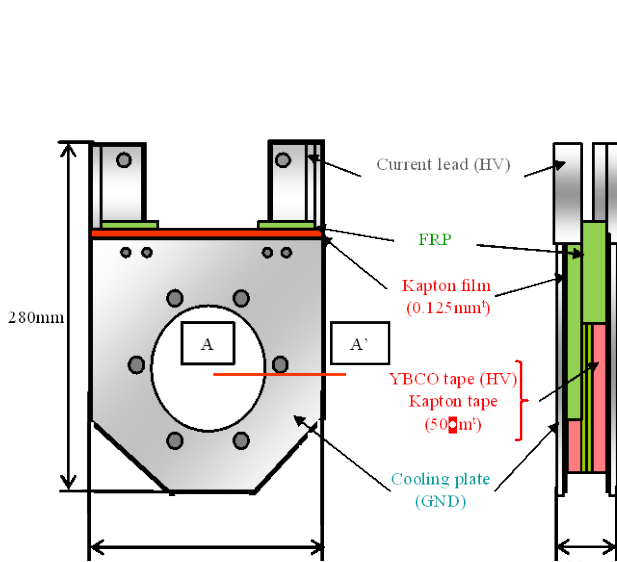


図 2.1.2-5-3 SMES コイルモデル

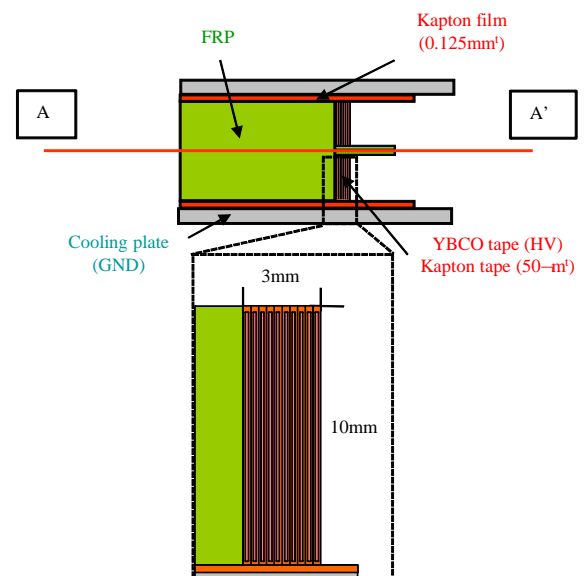


図 2.1.2-5-4 SMES コイルモデルの断面図

Y系超電導コイルモデルの構造を図 2.1.2-5-3 に示す。図 2.1.2-5-4 は図 2.1.2-5-3 の A-A'断面図である。Y系超電導コイルは 10 mm 幅の Y系超電導線材テープを 1 層あたり 10 ターン巻回したダブルパンケーキコイルであり、両側面は冷却板 (Cu) でサンドイッチされた構造である。コイルと冷却板の間は厚さ 0.125 mm のカプトンフィルム、Y系超電導線材テープは厚さ 50 μm のカプトンテープ、ダブルパンケーキの層間絶縁は厚さ 1.5 mm の FRP2 枚を介して絶縁されている。

Y系超電導コイルモデルにおける絶縁特性向上方法として、超電導コイルのターン間絶縁方法の「共巻き」と「ラップ巻き」を検討した。ここで、「共巻き」とはテ

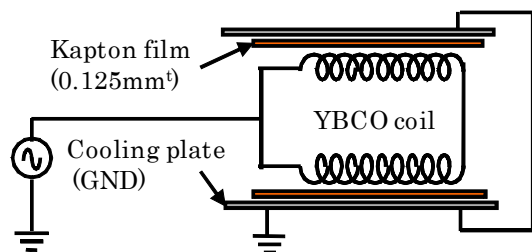
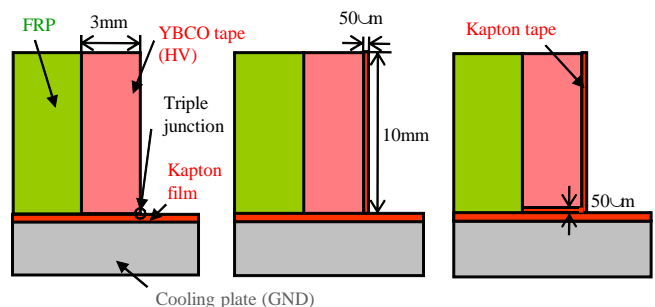


図 2.1.2-5-5 SMES コイルモデルの絶縁構成



(a) Triple junction (b) Laminated insulation (c) Lapped insulation

図 2.1.2-5-6 Y系超電導線材テープの絶縁モデル

ープ導体（Y系超電導線材）と絶縁テープ（カプトン）を重ね合わせて巻く方法である。また、「ラップ巻き」とはテープ導体に絶縁テープを螺旋状に巻きつけてテープ導体を完全に覆う巻き方である。

2) 電界解析

供試コイルの絶縁試験において、図 2.1.2-5-5 に示すように Y 系超電導線材コイルを高電圧電極として正弦波交流電圧を一括印加し、カプトンフィルムを介して、冷却板を接地する。超電導コイルのターン間絶縁として共巻きを用いた場合、Y 系超電導線材テープとカプトンテープとの重なり具合により、Y 系超電導線材テープのエッジ部分において高電圧電極（コイル）－固体絶縁物（カプトンフィルム）－真空のトリプルジャンクションが形成されて電界が集中し、耐圧の低い真空側が弱点となり、放電が発生する可能性がある。図 2.1.2-5-6 にトリプルジャンクション近傍領域をモデル化した図を示す。(a)図はトリプルジャンクションが形成された場合のコイルモデル、(b)図は共巻きのコイルモデル、(c)図はラップ巻きのコイルモデルである。各モデルにおいて Y 系超電導線材テープ（HV 側）に電位 $1 \text{ kV}_{\text{rms}}$ を与え、有限要素法により 2 次元モデルとして電界解析を行った。

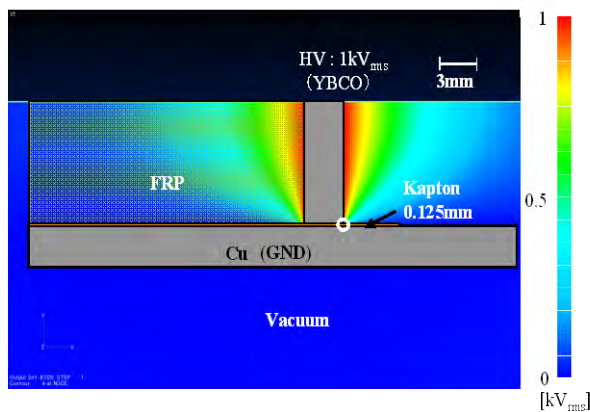


図 2.1.2-5-7 SMES コイルモデルの電位分布

トリプルジャンクションがある Y 系超電導コイルモデルの電位分布を図 2.1.2-5-7 に示す。ここで、図中の白丸で囲まれたトリプルジャンクション近傍の電位分布および電界分布を図 2.1.2-5-8 および図 2.1.2-5-9 にそれぞれ示す。両図において、トリプルジャンクション近傍において電界が集中しているこ

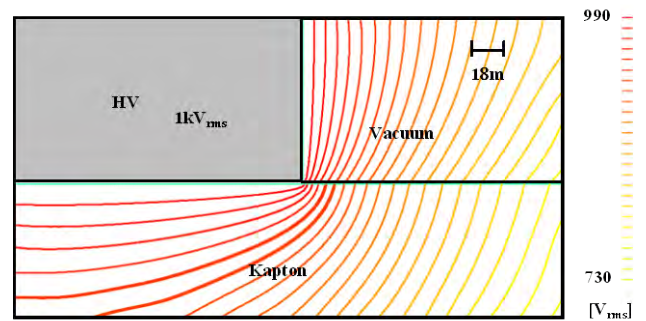


図 2.1.2-5-8 トリプルジャンクション近傍の等電位線

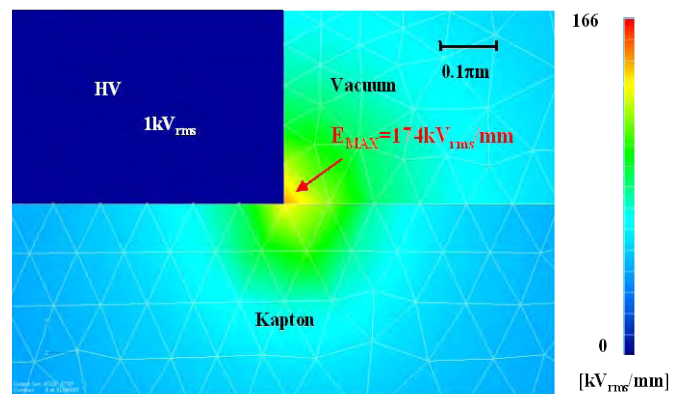


図 2.1.2-5-9 トリプルジャンクション近傍の電界分布

とがわかる。

Y系超電導コイルのY系超電導線材テープ（HV側）－冷却板（GND側）間のカプトンフィルムの厚さを変化させ、図 2.1.2-5-6 の各絶縁モデルにおいて同様の電界解析を行った。Y系超電導線材テープの絶縁方法とカプトンフィルムの厚さ依存性を調べるために、真空中最大電界のカプトンフィルム厚さ依存性を図 2.1.2-5-10 に示す。同図の縦軸は、トリプルジャンクションあり/カプトンフィルムの厚さ 0.125 mm のケースで規格化している。同図より、トリプルジャンクションありのケースと比較して、共巻きモデルでは 15%、ラップ巻きモデルでは 13%にまで最大電界が緩和されることがわかる。さらに、ラップ巻きモデルにおいて、カプトンフィルムの厚さを 1 mm に増加することにより、最大電界が 5%にまで緩和されることがわかる。

以上の電界解析から、超電導コイルのターン間絶縁をラップ巻きにしてトリプルジャンクションの形成を防止し、対地絶縁のカプトンフィルムを厚くすることで最大電界を 5%にまで緩和できることを定量的に明らかにした。このような絶縁方法により、Y系超電導コイルの耐電圧向上が期待される。

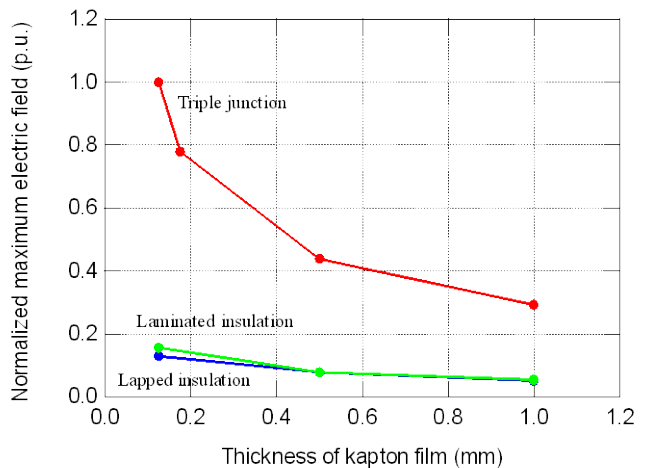


図 2.1.2-5-10 真空中最大電界のカプトンフィルム厚さ依存性

c. Y系超電導コイルモデルの絶縁特性

1) 実験方法

今回用いた Y系超電導コイルサンプルの外観を図 2.1.2-5-11、実験系を図 2.1.2-5-12 に示す。同図のダブルパンケーキコイルにおいて、コールドヘッド側のコイルをコイル A、反対側のコイルをコイル B とする。冷凍機のコールドヘッドから L字型の高純度アルミプレート（純度 99.99%以上）2枚を介してコイル両側面の冷却板に接続し、伝導冷却系を構成した。Si ダイオードセンサを冷却板下部側の左右の 2箇所および上部側の 1箇所に取り付け、冷却過程の温度分布および温度推移を取得した。

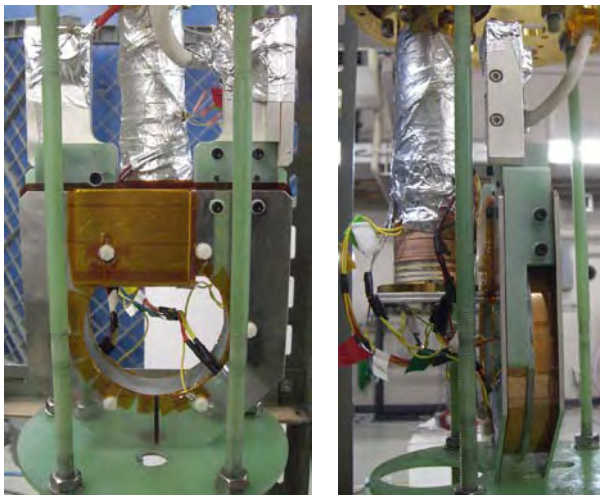


図 2.1.2.5-11 コイルサンプル

交流電圧印加時の部分放電開始電圧 (PDIV) を測定するために構築した実験回路を図 2.1.2-5-13 に示す。交流電源 (60 Hz) を用いて、クライオスタット内に設置したコイルサンプルに課電した。コイルサンプルと冷却板を電氣的に絶縁し、CR 検出回路を介して PD 信号を検出した。PD 検出感度は 40 pC である。

2) 実験結果および考察

ターン間の絶縁方法としてラップ巻を用い、カプトンフィルムの厚さが 0.125 mm の Y 系超電導コイルモデルの伝導冷却特性を図 2.1.2-5-14 に示す。同図より、冷却開始から 10 時間後に各測定点の温度が約 20 K で一定になり、コイル全体が一様に冷却されていることがわかる。

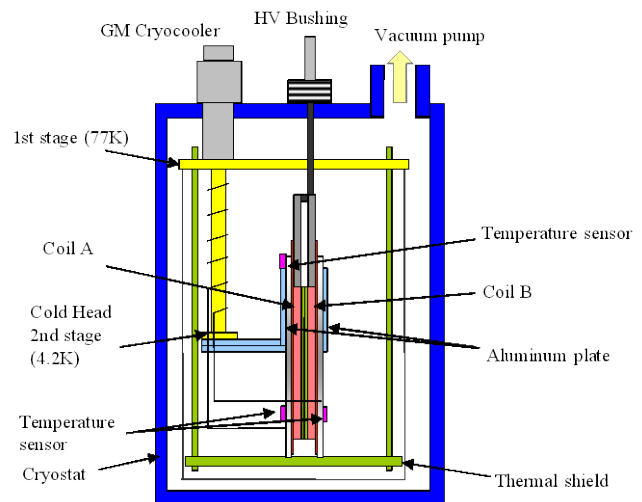


図 2.1.2.5-12 実験系

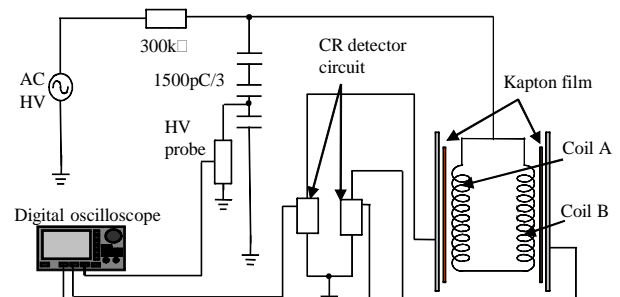


図 2.1.2-5-13 実験回路

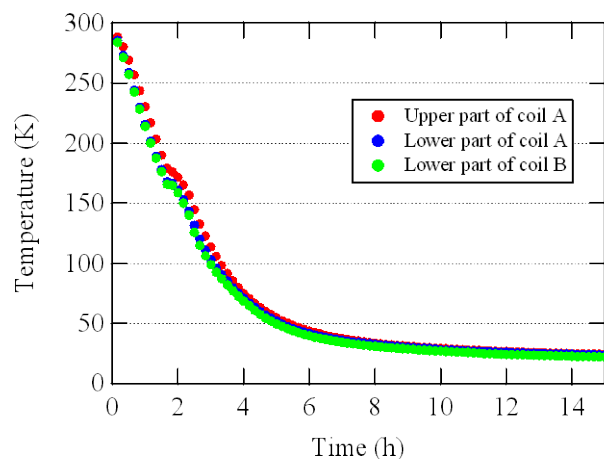


図 2.2.5-14 コイルサンプルの冷却特性

供試コイルモデルにおいて、ターン間絶縁方法とカプトンフィルムの厚さをパラメータとして、PDIVを繰り返し測定した結果を図 2.1.2-5-15 に示す。同図には、共巻き/カプトンフィルム厚さ 0.125 mm⁽¹⁾、ラップ巻き/厚さ 0.125 mm、ラップ巻き/厚さ 1 mm における PDIV の電圧印加履歴を示している。同図より、どの

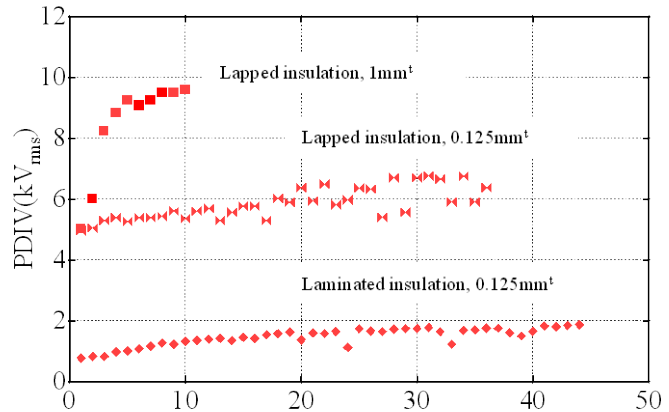


図 2.1.2-5-15 PDIV の電圧印加履歴

ケースにおいても電圧印加回数の増加に伴い、PDIV が向上・飽和していることがわかる。これは真空放電現象特有のコンディショニング効果⁽²⁾によるものと考えられる。PDIV の飽和後の平均値は、共巻き/厚さ 0.125 mm のとき 1.7 kV_{rms}、ラップ巻き/厚さ 0.125 mm のとき 6.3 kV_{rms}、ラップ巻き/厚さ 1 mm のとき 9.5 kV_{rms} であった。すなわち、供試コイルの PDIV は、共巻きからラップ巻きにすることで 3.7 倍、さらにカプトンフィルムの厚さを 0.125 mm から 1 mm にすることで 5.6 倍に向上した。

以上の実験結果から、先に述べたラップ巻きによる最大電界緩和効果、Y 系超電導線材テープ (HV 側) - 冷却板 (GND 側) 間のカプトンフィルムの厚さ依存性を検証することができた。

(3) 具体的な成果

本研究では、伝導冷却 SMES の電気絶縁特性の向上を目指し、電界解析によってラップ巻きによる最大電界緩和効果と電極間の固体絶縁物の厚さ依存性を評価した。また、Y 系超電導コイルモデルを用いて絶縁試験を実施し、以下の結果を得た。

- a. 電界解析により、超電導コイルのターン間絶縁方法として共巻きを用いると、トリプルジャンクションありのケースに対して最大電界を 15 %、ラップ巻きを用いると 13 %にまで緩和できることを明らかにした。さらに、ラップ巻きにしてトリプルジャンクションの形成を防止し、カプトンフィルムを 1 mm に厚くすることで最大電界を 5%にまで緩和できることを定量的に明らかにし、Y 系超電導コイルの耐電圧向上の可能性を示唆した。
- b. Y 系超電導コイルモデルにおける真空中コンディショニング飽和後の PDIV は、共巻きをラップ巻きにすることで 3.7 倍、さらに電極間のカプトンフィルムを 0.125 mm から 1 mm に厚くすることで 5.6 倍に向上することを明らかにした。

(4) 今後の計画

供試コイルの PD は、コイルエッジ部分の微小な空隙で発生していると考えられる。そこで、その空隙を樹脂含浸することによって PDIV をさらに向上するとともに、含浸方法を最適化し、その効果を検証する。

引用論文リスト

- (1)大村、早川、小島、遠藤、平野、長屋、大久保:「伝導冷却 SMES コイルモデルの真空/固体複合絶縁系における電気絶縁特性」、電気学会全国大会、No.5-122 (2009)。
- (2)塩入、上川路、横倉、大島、柳父:「真空ギャップのコンディショニング効果に関する実験的検討」、電気学会論文誌 B、Vol.120、No.10、pp.1343-1349 (2000)。

2.1.2-6 高効率伝導冷却技術の開発 (中部電力、日本大学、核融合科学研究所)

(1) 研究概要

超電導技術の電力機器への応用を妨げている理由として、液体ヘリウム温度の極低温までの冷却が必要なことによる取り扱いの煩雑さ、信頼性の低下や高コストなどが挙げられてきた。酸化物高温超電導体の発見によって、冷却の煩雑さから開放され、その応用が一気に加速するものと期待されている。しかしながら、超電導コイルの運転温度の上昇に伴い、構成材料の熱拡散率の低下により、コイル内で発生した熱を速やかに外部に取り出すことが困難となるなど、新たな技術開発課題も明らかとなってきた。そこで、超電導コイルの冷却に新技術を導入することにより、高効率かつ高熱負荷への対応が可能な伝導冷却技術を開発する。さらに、コイル構造に関して安定性、安全性の両面からの詳細な検討を行い、今後の超電導コイルの主流になると考えられる伝導冷却型コイルシステムの設計指針を確立する。また、20~40 K 付近の温度領域における高信頼、高効率な冷凍システムを目指し、スターリング型パルス管冷凍機における 40 K 以下の温度で最適となる低温部構造も合わせて検討することを目的とする。

(2) 自励振動式ヒートパイプの極低温での動作特性

① 固体熱伝導冷却と自励振動式ヒートパイプの比較

固体熱伝導とヒートパイプを用いた冷却方式の違いについて図 2.1.2-6-1 に示す。固体熱伝導 (銅バー) による冷却では、銅バーと加熱端、冷却端の間の温度差 ΔT_{hs} 及び ΔT_{cs} は小さく、大部分の温度差は銅バーの長手方向に生じる。一方、ヒートパイプ冷却では、作動流体とのパイプ壁面との熱伝達+パイプ肉厚方向の熱伝導+加熱端、冷却端での接触熱抵抗による温度差 (ΔT_{hs} 及び ΔT_{cs}) が支配的で、ヒートパイプ内部の作動流体の温度差はほとんど発生しない。従って、熱輸送距離が長

くなるほど固体熱伝導に対するヒートパイプ冷却の優位性は高く、熱輸送特性及び時間遅れの両方の観点から明らかである。

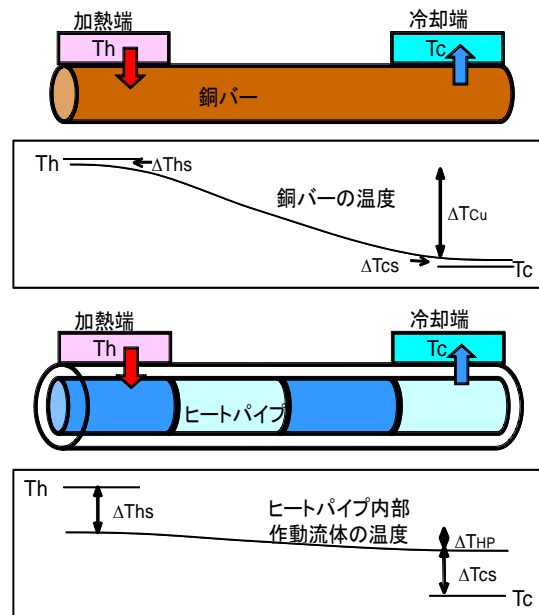


図 2.1.2-6-1 固体熱伝導とヒートパイプ冷却の特性比較

② 自励振動式ヒートパイプの低温での動作実験

自励振動式ヒートパイプは、ヒートパイプ内に封入した作動流体の気液 2 相の密度変化及び温度勾配によって発生する自励振動を利用した高性能の熱輸送素子である。図 2.1.2-6-2 にその動作原理を示す。パイプを繰り返し折り返し、両端を接続したループ形状のパイプ内に、気液の混合比が 50 % 程度の作動流体を充填し、気体と液体のプラグが縞模様をなした状態とする。加熱部と冷却部の間に温度差が生じると気体と液体の密度差に起因して自励振動が発生する。この自励振動を駆動力として凝縮端から蒸発端に気液混合状態の作動流体を環流させる。自励振動式ヒートパイプは、重力による液体の環流を利用したサーモサイフォン等と違い、設置方向の制限がないこと及び薄いシート状に加工できることから、超電導マグネット内に組込む高熱伝導率の冷却素子として適している。

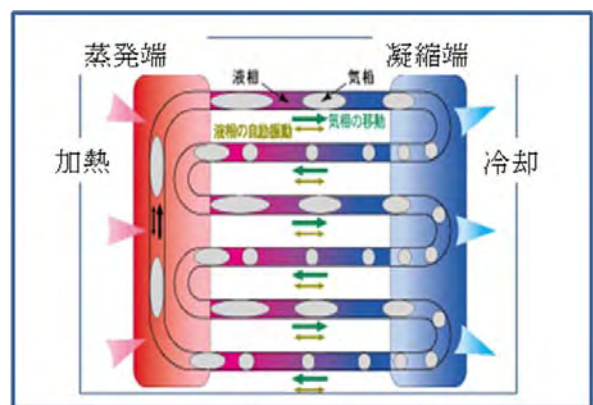


図 2.1.2-6-2 自励振動式ヒートパイプの動作原理

低温での作動流体のリークを防止し、作動流体の種類を変えた実験を可能とする自励振動式ヒートパイプ構造として、図 2.1.2-6-3 に示した外径 1/16 インチ (1.59 mm)、内径 0.78 mm のステンレス配管を 10 回折り返し、両端を 1/16 インチのス

エジロック T 字継手に接続している。T 字継手の先端の空いた部分は作動流体の導入部となる。加熱端及び冷却端となる銅ブロックはステンレス配管のピッチに合わせた溝加工を施してあり、配管とはハンダで接合されている。加熱端の銅ブロックの裏面にヒータを貼り付け、入熱量の制御を行う。冷却端の銅ブロックは冷凍機のコールドヘッドに接続された冷却銅板に取り付けられ、冷却端の温度を一定の試験温度に保つ。ヒートパイプ全体の形状を保つため、ステンレス製の枠に銅ブロックが固定されている。加熱端、冷却端の銅ブロックには抵抗温度計測素子を取り付けられ、ヒータ入熱量と温度差との関係を測定することにより、ヒートパイプの熱輸送特性が測定可能となっている。

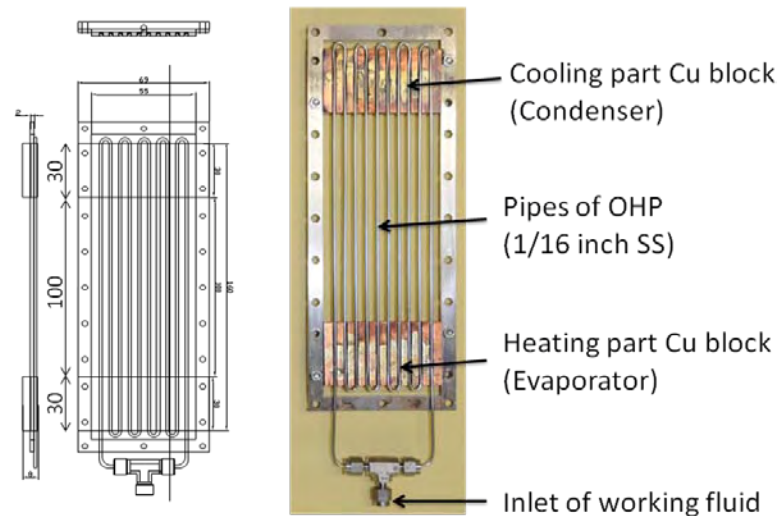


図 2.1.2-6-3 低温動作実験用自励振動式ヒートパイプ

③ 作動流体の種類による動作特性の相違

作動流体を変更することにより、ヒートパイプの動作温度範囲を変更することができる。表 2.1.2-6-1 に作動流体を、窒素、ネオン、水素にした場合の動作温度範囲、液体封入率、入熱量を変化させた場合の等価的な熱伝導率をまとめる。作動流体を適切に選択することにより、17 K～91 K の幅広い温度範囲で、自励振動式ヒートパイプを動作させることが可能である。

表 2.1.2-6-1 自励振動式ヒートパイプ(1/16 インチ)の作動流体の相違による動作特性の比較

作動流体	動作温度範囲 [K]	液体封入率 [体積 %]	入熱量 [W]	等価的な熱伝導率 [W/(m*K)]
窒素	67 - 91	17 - 70	0 - 7	5,000 - 18,000
ネオン	26 - 34	16 - 95	0 - 1.5	1,000 - 8,000
水素	17 - 27	31 - 80	0 - 1.2	500 - 3,500

④ ヒートパイプの設置方向による影響

本来自励振動式ヒートパイプは設置方向の制限がないことが特徴となっている。しかし、図 2.1.2-6-4 に示すように、自励振動を起こしやすい上側冷却一下側加熱のヒートパイプの設置方向に対し、逆向きの上側加熱一下側冷却の方向に設置したところ、自励振動を誘発することができず、自励振動式ヒートパイプの動作が確認できなかった。そこで、図 2.1.2-6-5 に示したように、単体では動作しない上側加熱一下側冷却のヒートパイプと上側冷却一下側加熱のヒートパイプの両端を直列に接続した動作実験を行った。

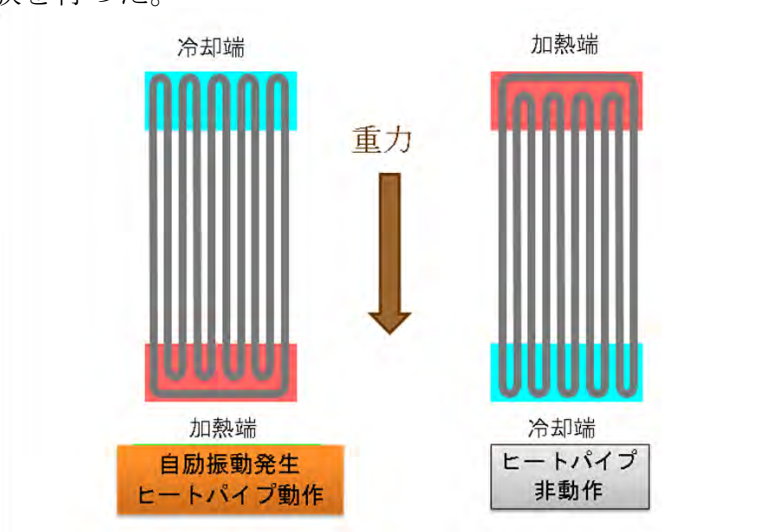


図 2.1.2-6-4 自励振動式ヒートパイプの設置方向の影響

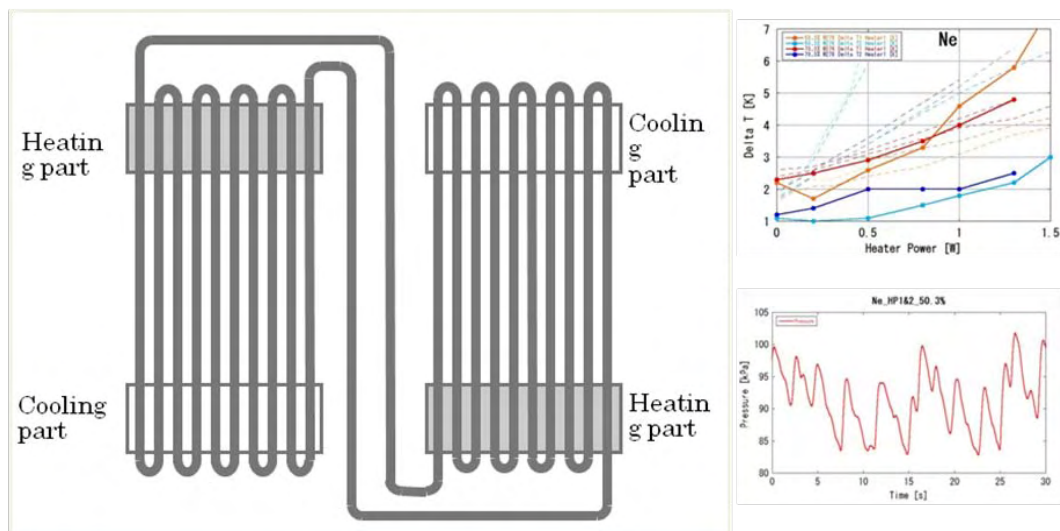


図 2.1.2-6-5 設置方向の異なる自励振動式ヒートパイプの直列接続動作結果

結果として、2つのヒートパイプの直列接続により、上側加熱一下側冷却のヒートパイプに自励振動を誘発することができ、両者を同時に動作させることが可能であることが明らかとなった。

⑤ 両端冷却中央加熱ヒートパイプの動作実験

超電導マグネット内に組み込む自励振動式ヒートパイプについて、設置方向の相違による動作特性の差が起こり難いことが望ましい。今後、配管径や並列流路の最適化などにより、上側加熱一下側冷却のヒートパイプについても動作可能となる可能性もあるが、より確実に安定な動作が見込める方法として、図 2.1.2-6-6 に構造示した両端冷却—中央加熱方式の自励振動式ヒートパイプを開発した。

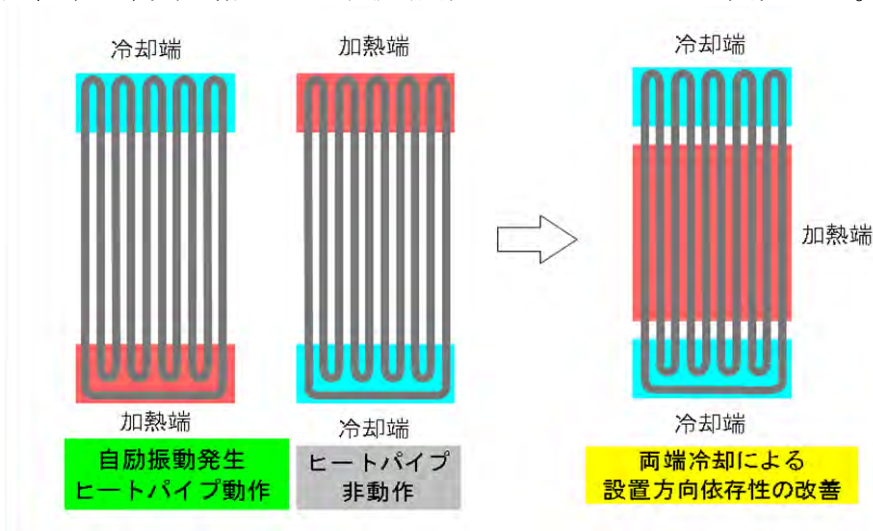


図 2.1.2-6-6 両端冷却型自励振動式ヒートパイプの構造

図 2.1.2-6-7 に低温動作実験用に試作した両端冷却中央加熱の自励振動式ヒートパイプを示す。

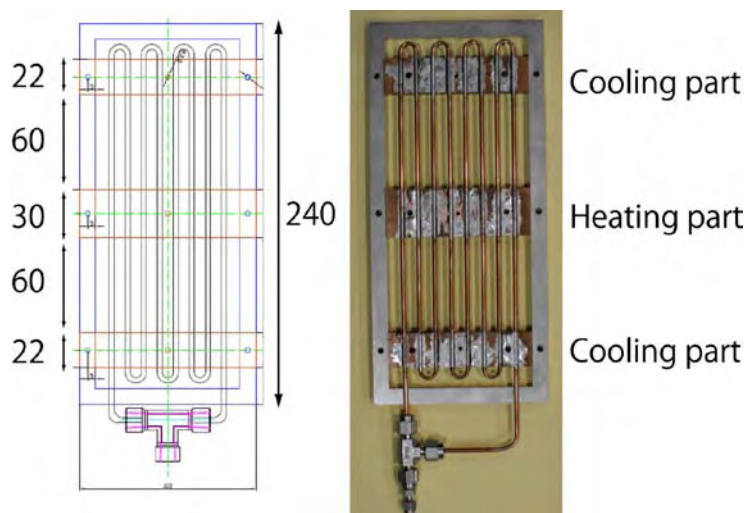


図 2.1.2-6-7 試作した両端冷却型自励振動式ヒートパイプ

図 2.1.2-6-8 に圧力波形を示すように、片側冷却、片側加熱のヒートパイプ単独動作時と同様な安定な圧力振動が得られており、安定な自励振動動作が発生していることが確認できた。

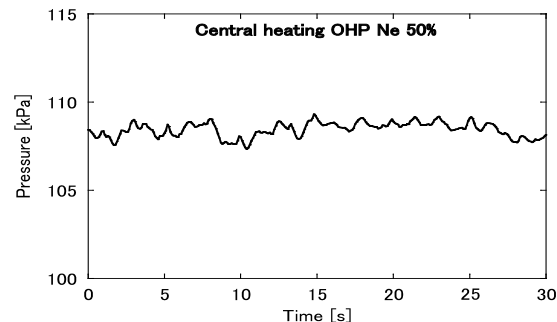


図 2.1.2-6-8 自励振動式ヒートパイプ
圧力波形

⑥ 今後の予定

図 2.1.2-6-9 のように、自励振動式ヒートパイプを組み込んだ冷却パネルと超電導コイルを模擬したダミーコイルとの組み合わせ実証実験を行う予定である。

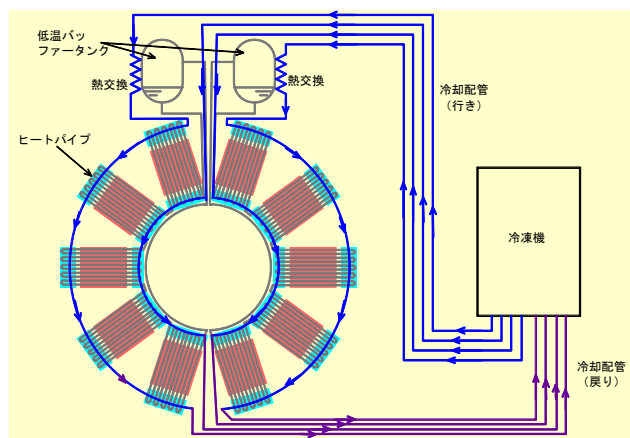


図 2.1.2-6-9 ダミーコイルを用いた自励振動
ヒートパイプの実証実験

(3) 高効率冷凍機システムの開発

図 2.1.2-6-10 に代表的なイナータンス方式パルス管冷凍機に対する多段化の構成例を示す。圧力振動源としては GM 型、スターリング型いずれにも適用できる。

図 2.1.2-6-10(a)の構成では各段のパルス管と蓄冷器とはそれぞれ同一の温度レベルで動作している。すなわち下段パルス管の高温端に熱的に統合されている。このような直列型パルス管による多段化方式の問題点は、下段パルス管内でのエンタールピーの流れを上段パルス管の冷凍仕事の一部を消費することによってのみ取り去らなければならないため、効率の良い多段冷凍機を構成させることが難しいと考えられる。そこで、パルス管用として、(b)や(c)に示すようにパルス管を並列にした多段化方式が新たに提案され、(b)方式の 3 段パルス管では極低温 3.6 K も達成され、並列方式の優位性が実証されるようになった。

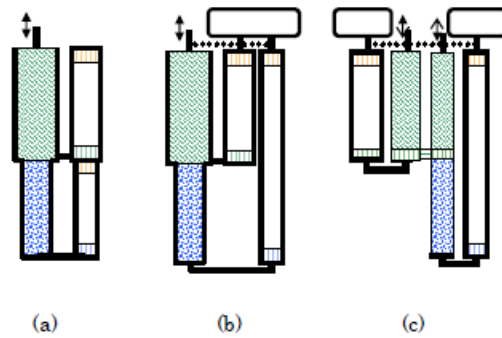


図 2.1.2-6-10 インナータンス方式の多段パルス管冷凍機の構成例
 (a)直列型多段方式, (b)並列多段方式 (直列蓄冷材), (c) 並列多段方式 (並列蓄冷材)
 (塗り込められた部分は蓄冷材、両端に色付けしたのはパルス管、両端矢印は圧力振動、白抜き四角はバッファータンク、等々)

今回、蓄冷材の検討が重要となるため、2 段蓄冷部が比較的容易に切り離され、独立して改変し易い(c)の方式を採用することにした。また、20 K 温度領域における蓄冷材として鉛が有効的なため、図 2.1.2-6-11 のような蓄冷材を充填する容器を考案し、性能確認できるようにした。今後、これらを冷凍機に組み込み冷凍性能を確認する予定である。

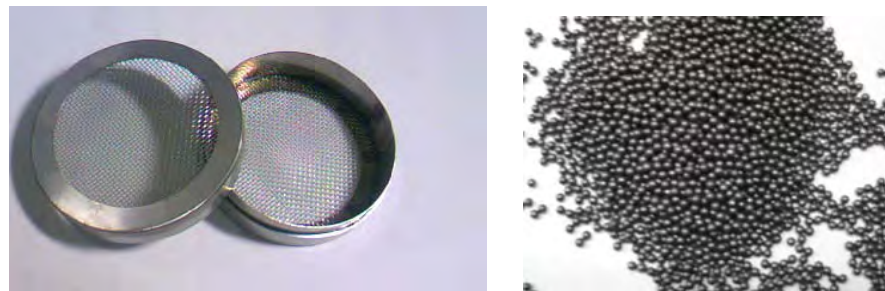


図 2.1.2-6-11 蓄冷材充填容器と充填材 (鉛)

2.1.2-7 まとめ

20~40 K 付近の温度領域において十分な熱伝達を得るため、ガス冷媒配管を一部活用した 3 W/m^2 以上の熱流束を可能とする高熱伝導冷却システムについて検討を行い、伝導冷却システムを検証する試験装置の製作を完了した。平成 22 年度中に、試験を実施し評価する予定である。また、自励式ヒートパイプを用いた伝導冷却システムにおいて単体での動作確認が完了し、今後、模擬コイルに組み込み、コイル伝導冷却技術の検証を実施する見込みである。

2 kV 以上の電気絶縁性能を有する高伝熱コイル構造については、製作を進めており、平成 22 年度中に実際に装置に組み込み、絶縁性能を確認出来る見込みである。以上により、高効率伝導冷却性能かつ高耐電圧性能を有する高効率コイル伝導冷却技術については、当初目標を達成できる見込みである。

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

(1) 開発目標

高磁界・コンパクトコイルの技術開発に適用可能な SMES 対応 Y 系超電導線材の安定製造技術の確立を目的とした開発を進める。そのため、金属基板は高磁場中の大電流通電によるフープ力に耐える機械強度を有すること、中間層は薄化され線材の平坦性を維持できることが必要とされる。また、Y 系超電導層は SMES 運転条件下において必要とされる通電特性を有していること、安定化層は SMES 用導体の通電時の安定性と加工歩留りの向上に適していることが肝要とされる。本開発では、前述の要素を兼備した、SMES モデルコイル作製に必要とされる超電導線材の供給を通じて安定製造技術の確立を図る。線材仕様の一例として、「 $I_c=20$ A/cm-w(77 K, 3 T)で引っ張り強度 1 GPa を有する 100 m に相当する線材」が挙げられる。この仕様例は SMES モデルコイルの経験磁場とその磁場中における超電導線材の臨界電流によって定義される。図 2.1.3-1 は素線 1 本に 540 A/cm-w (20 K) を通電するモデルコイルにおける超電導線材の経験磁場とその磁場下の超電導線材の臨界電流の推定値を示す。素線 1 本に 540 A/cm-w を通電するコイルにおいて、コイルの磁場により超電導線材の通電電流が 540 A/cm-w 以上であるためには、77 K、3 T で超電導線材表面に平行から 10 度傾斜した磁場中で $I_c=20$ A/cm-w 以上であることに相当することになる。

さらに磁場中の通電特性の改善を図り 3 T の垂直磁場下で $I_c=20$ A/cm-w(77 K, @3 T)で引っ張り強度 1 GPa を有する 50 m の線材の安定製造技術開発を目指す。

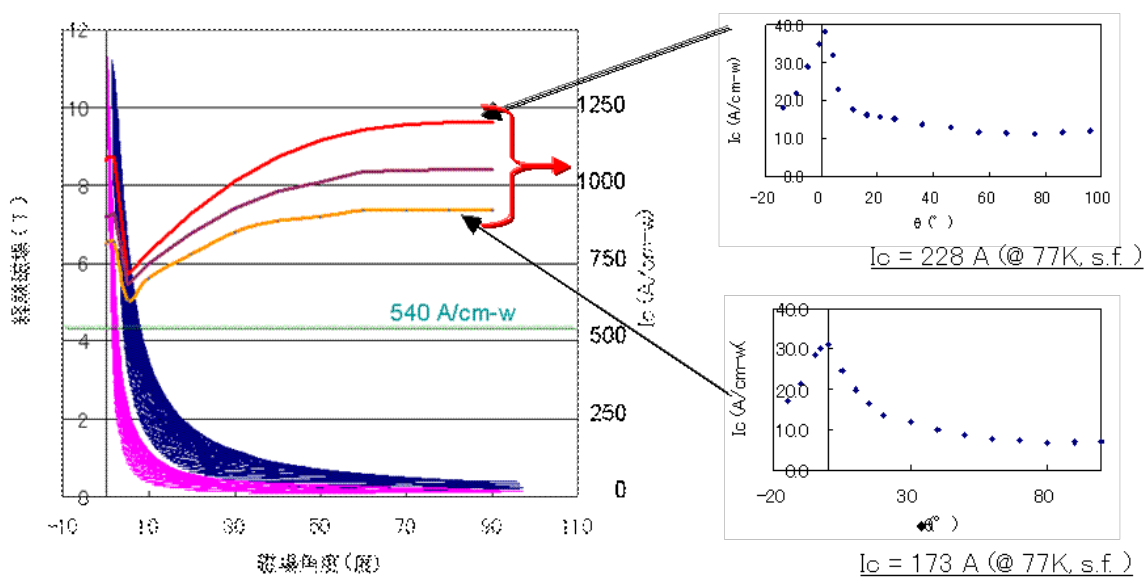


図 2.1.3-1 2 GJ 級 SMES コイルにおける Y 系超電導線材の経験磁場と臨界電流の推定値

(2) 研究開発内容

a. SMES 対応線材安定製造技術開発 (IBAD-MOCVD 線材)

a-1 MOCVD プロセス対応金属基板作製技術開発

SMES コイル用導体に使用される超電導導体は、高磁場中での大電流通電時のフープ応力に耐え得るために、機械的強度の強い線材であることが必要であり、長尺にわたり安定な線材が必要である。また、Y 系積層線材では、中間層や超電導層の剥離の懸念があり、各層の接合性の向上も要求される。これらの観点から、コイル構成技術開発、システムモデル検証に必要な Y 系超電導線材の安定製造技術開発の確立を目指した。

金属基板に関しては、基板表面の平滑性が 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ことを目標に開発を行った。まず、既存のハステロイ™ 基板の調査から、基板表面欠陥は、図 2.1.3-2 に示すような、基板圧延時の異物の押し込み、接品との擦れ、圧延ロール表面荒れの転写などであることを突き止め、ロール、接品管理などにより、その改善を図った。また、電解研磨、精密機械研磨などの表面平滑化方法の検討を行い(図 2.1.3-3)、精密機械研磨法により、算術平均粗さ (Ra) ≤ 3 nm の表面を持つ短尺基板サンプルを作製した。この短尺基板上に IBAD-GZO 層/PLD-CeO₂ 層/MOCVD-YBCO 層を作製し評価した結果、膜厚 1 μ m の YBCO 層で $I_c=300$ A/cm-w(77 K, s.f.) が得られた。さらに、精密機械研磨法により試作した 200 m 長の表面平滑化基板は、光学検査において全長にわたり著しい欠陥が無いこと、40 m 毎に切り出した試料基板に IBAD-GZO 層/PLD-CeO₂ 層/MOCVD-YBCO 層を形成し評価した結果、いずれの試料も $I_c=250$ A/cm-w(77 K, s.f.) 以上を膜厚 1 μ m の YBCO 層で達成できることが確認された。この結果から長尺にわたり安定な特性を有する超電導線材を作製するための基板作製技術の見通しを得た。この知見をもとに、平成 20 年度後半より長尺基板の作製を行っている。図 2.1.3-4 に基板表面性状の一例として、精密機械研磨前後の基板表面の原子間力顕微鏡(AFM)像を示す。表 2.1.3-1 に平成 20 年度および 21 年度における基板の作製結果を示す。作製本数を重ねるに従い、圧延後、および平滑化後の表面粗さ (Ra) が改善される傾向にある。また、図 2.1.3-5 に基板の応力-伸び曲線を示す。基板強度は 0.2 %耐力で 1.6 GPa 程度が安定に得られている。

次に、研磨によって平滑化したハステロイ™ 基板の超電導線材作製への適用を検討した。非研磨ハステロイ™ 基板を用いた超電導線材の I_c 分布は、図 2.1.3-6 に一例を示すように低 I_c 箇所が頻繁に出現し、高 I_c 箇所も少ない。一方、研磨したハステロイ™ 基板を使用することで到達 I_c 値が向上し、かつ低 I_c 箇所も減少させることが可能であることが判明した。その結果、図 2.1.3-7 に示すような高 I_c ・長尺線材を平成 20 年度に作製した。図 2.1.3-6 および図 2.1.3-7 に示されるように同じ中間層構造全長 (PLD-CeO₂ (450 nm) / IBAD-GZO (500 nm) / IBAD

-YNbO₄ (30 nm)) であっても、平滑化基板を使用すると長尺線材において 200 A/cm-w(@77 K, s.f.)以上の I_c 値が得られ、金属基板の平滑化により特性向上と均質化が図られることが確認された。

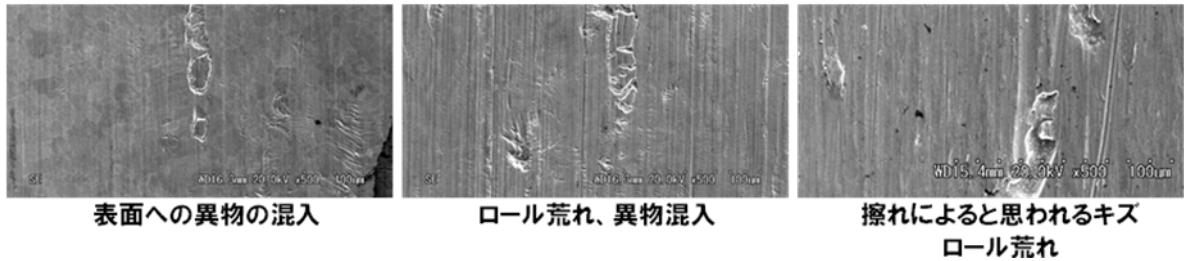


図 2.1.3-2 従来基板における表面欠陥の例

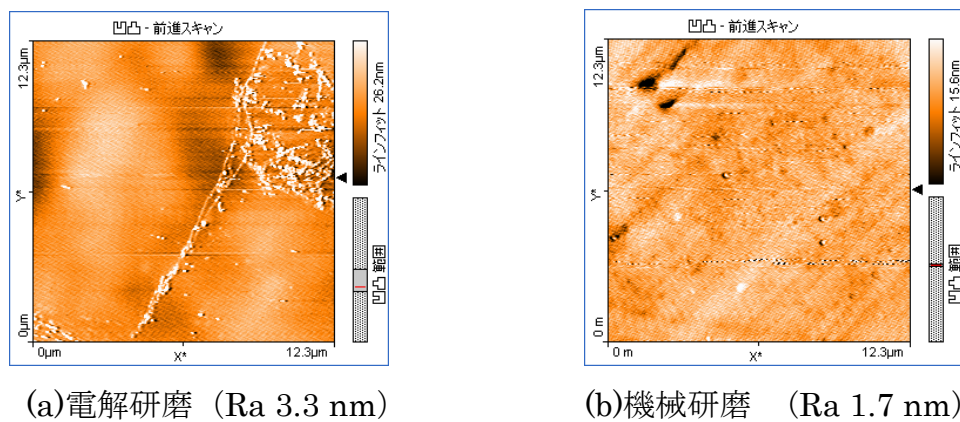


図 2.1.3-3 各種研磨法における基板表面

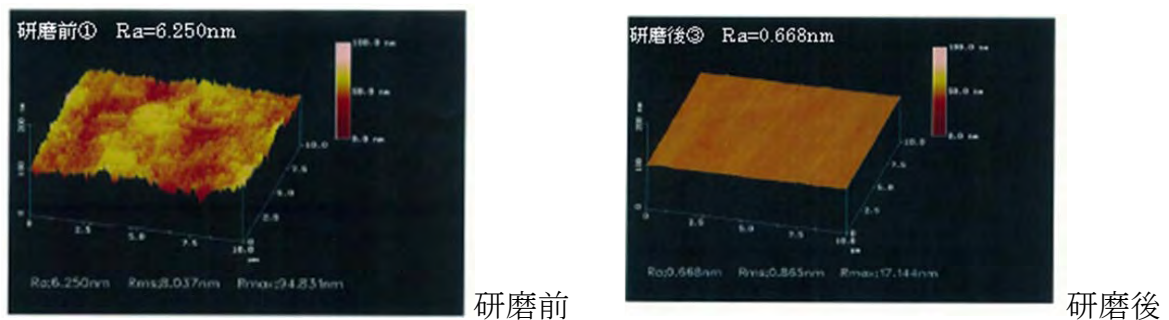


図 2.1.3-4 精密機械研磨前後における基板表面の原子間力顕微鏡 (AFM) 像

表 2.1.3-1 平滑化基板の作製結果

作製期間	作製量の和 (m)	平滑化前の基板の Ra (nm)		平滑化後の基板の Ra (nm)	
		先頭	後端	先頭	後端
平成 20 年度	1364	4.8-13.7	5.3-12.1	1.1-2.3	1.1-2.9
平成 21 年度	6238	3.8-11.7	4.4-11.9	0.7-1.7	0.7-2.0

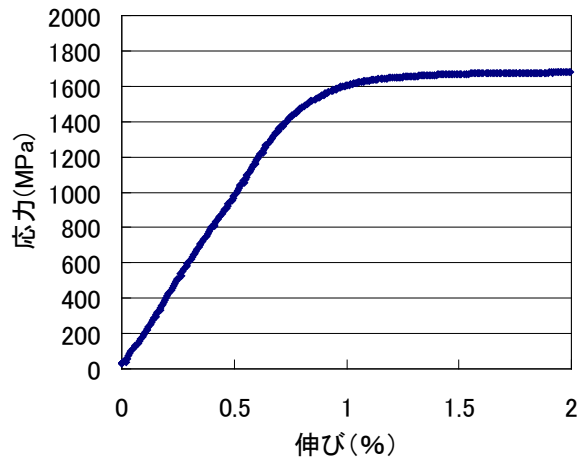


図 2.1.3-5 基板の応力-伸び線図 (室温)

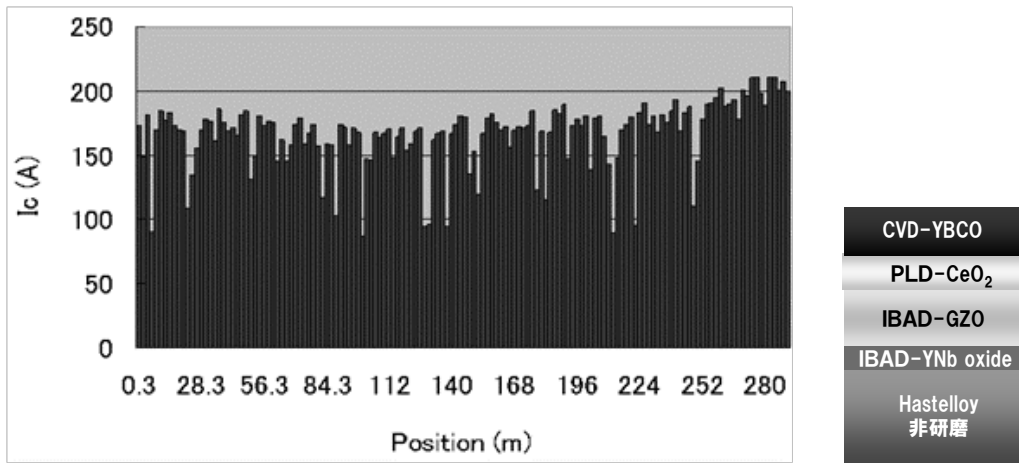


図 2.1.3-6 非研磨ハステロイTM基板を用いて作製した MOCVD 線材の I_c 分布の一例

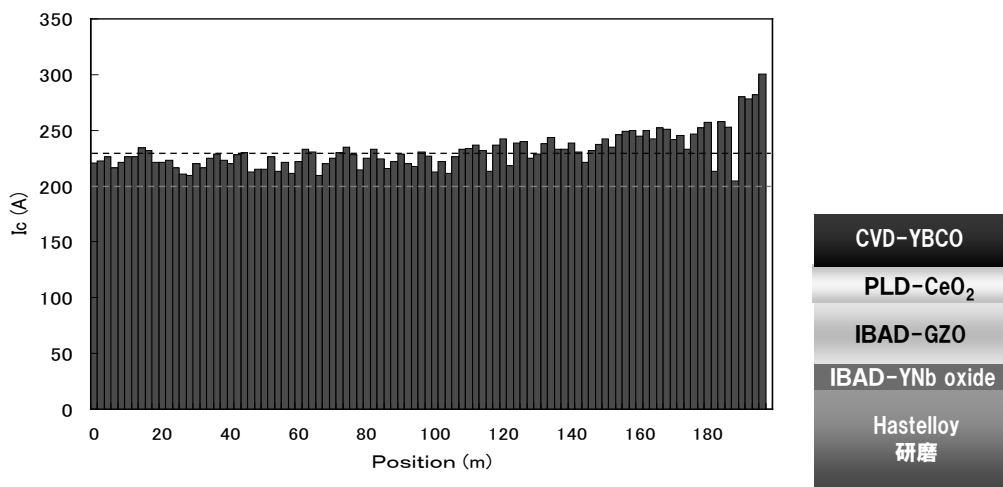


図 2.1.3-7 研磨ハステロイTM基板を用い作製した MOCVD 線材の I_c 分布の一例

a-2 MOCVD による超電導層形成の安定化

MOCVD による超電導層形成では、原料ガスとキャリアガス、酸素ガスのガス流経路の形状を適正化するために平成 20 年度に MOCVD 装置の改造として、図 2.1.3-8 に示すようなガス流のバランスシステムを 3 基の 12 段 MOCVD ユニットに設置した。12 段 MOCVD ユニートを 3 基連結した MOCVD 装置では、1 つのユニットの真空状態の変動が他のユニットの真空も変動させたり、ガス流経路を歪ませるなど、相互にユニットが影響することが問題であった。ガスバランスシステムを MOCVD ユニット間で動作させることで、雰囲気制御時のユニット間の連動した真空の変動のような相互の影響が抑制されるので、単独のユニットを各々制御することで複数のユニットの同時運転が可能となった。

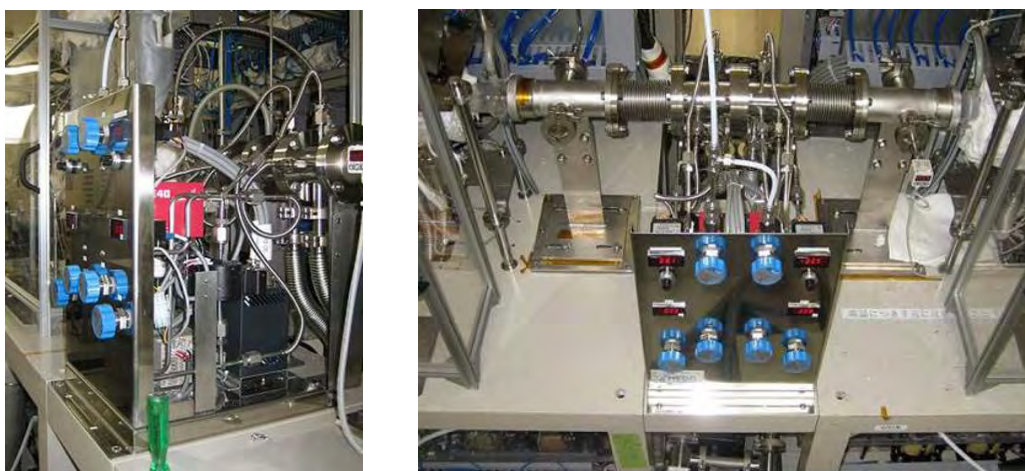


図 2.1.3-8 ガスバランスシステム

次に、平滑化基板を用いて複数の 12 段 MOCVD ユニートを使用した長時間成膜を行い、超電導層の成膜サイクルの高速化と長時間成膜に伴う特性低下の要因の把握を図った。図 2.1.3-9 に示すように局所的な低 I_c 箇所を有する線材の超電導層の表面を、銀安定化層を除去して観察したところ原料ガスの導入ノズルと似た形状の変色領域が観察された。変色箇所は図 2.1.3-10 に示すように、正常箇所と比較して粒状の組織になっており、銅などの元素の偏析が確認された。変色領域がノズルに似た形状であることから、気化器もしくは原料配管からの噴出によって低 I_c 箇所が発生したと推察された。有機溶剤に有機金属原料を溶解させた液体原料を気化させる際、不適正な気化温度では、溶剤の優先蒸発などで原料の析出や分解が生じる。原料ガスの噴出防止のため、気化器の原料導入部での急激な溶剤の蒸発を抑制し、原料配管までに完全に気化するように気化器内に温度傾斜を設定し原料の気化の適正化を推進した。その結果、図 2.1.3-11 に示すように高 I_c 線材を作製した。線材の焼損防止のため通電は 205 A までとした。中央部のハンドリングミスにより線材に折れが生じた箇所を除いて、 I_c 値が 150 A/cm-w(@77 K, s.f.)以下に低下することは無く、均質性が向上したことを確認した。

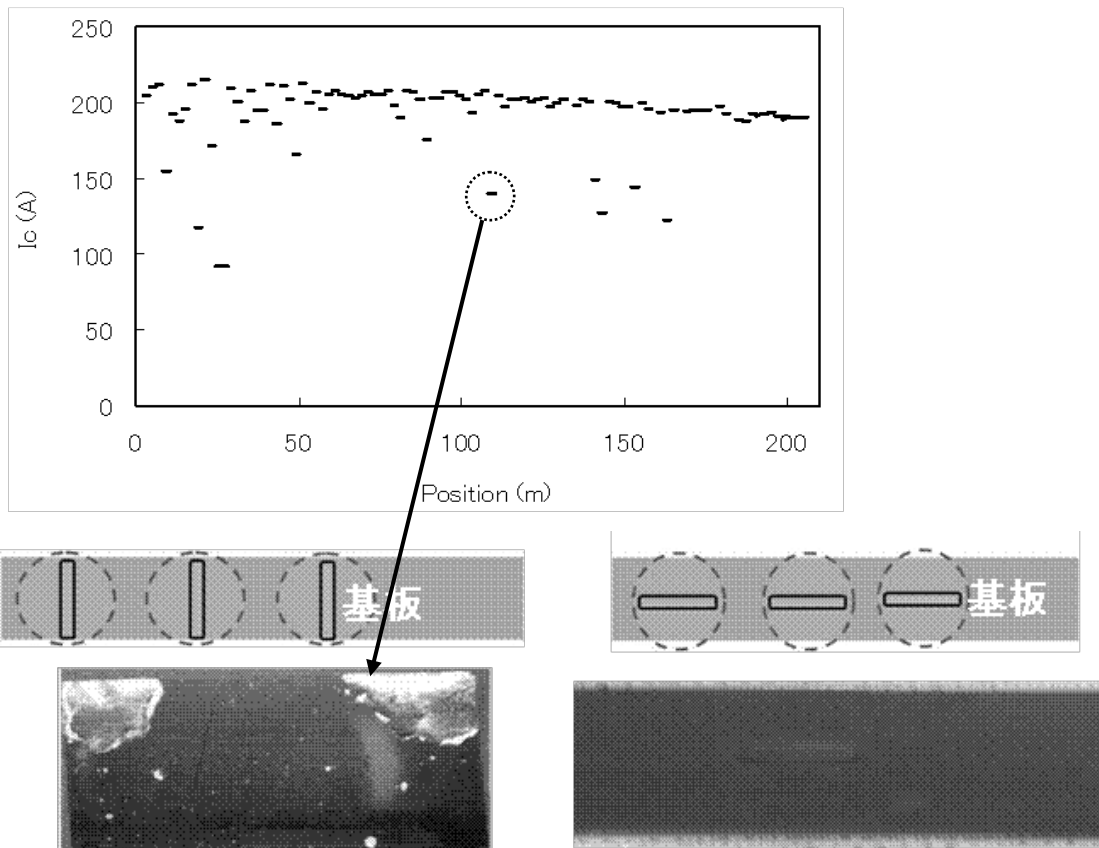


図 2.1.3-9 原料ガスの導入ノズルと超電導層の変色領域の形状

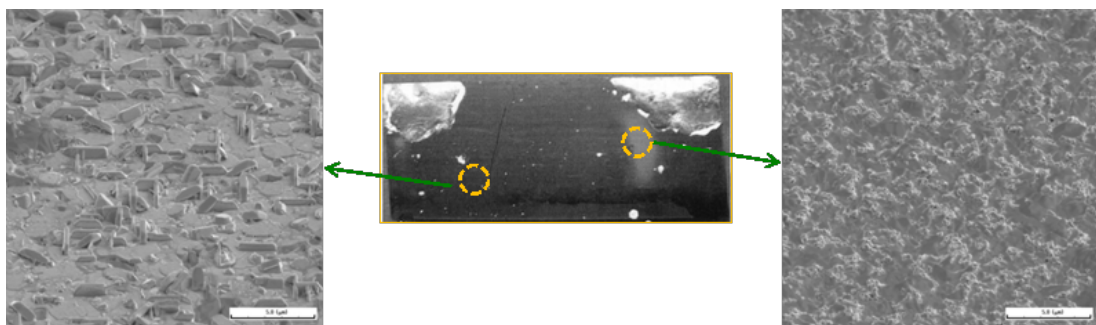


図 2.1.3-10 超電導層の正常領域(左)と変色領域(右)の表面観察結果

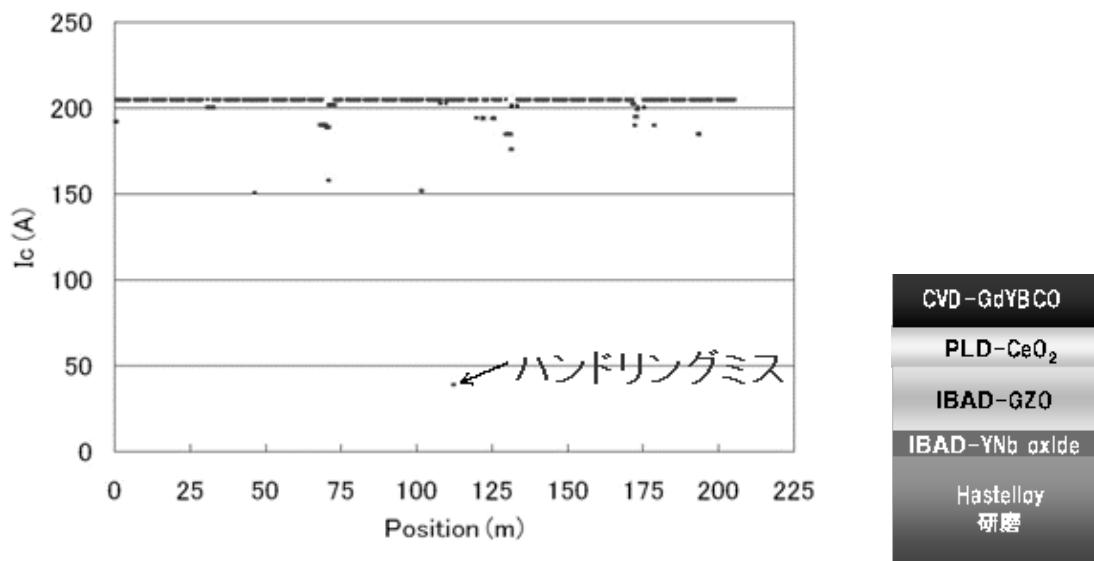


図 2.1.3-11 気化器及び配管の温度を調整して作製した MOCVD 線材の I_c 分布例

また、平滑化基板を用いて磁場中通電特性の向上のため、Y-Gd 混晶系の超電導層の厚膜化による高 I_c 化を検討した。MOCVD プロセスに混晶系を適用すると、厚膜化時の a 軸成長結晶粒の生成が抑制される傾向が、X 線回折および SEM による表面観察の結果から確認され、 I_c 膜厚依存性も図 2.1.3-12 に示すように通常の Y 系超電導膜に比して、 I_c の増大が厚膜化しても維持される傾向にあった。膜厚 $1.5 \mu\text{m}$ の混晶系超電導層の短尺試料では $I_c=390 \text{ A/cm}\cdot\text{w}(@77 \text{ K, s.f.})$ という高い通電特性を得、さらに図 2.1.3-13 に示す磁場中特性 ($77 \text{ K, } B \perp \text{ テープ線材面}$) の評価結果を得た。磁場 3 T における I_c 値は $20 \text{ A/cm}\cdot\text{w}(@77 \text{ K, } 3\text{T.})$ であり、磁場中超電導特性向上の指針を得た。

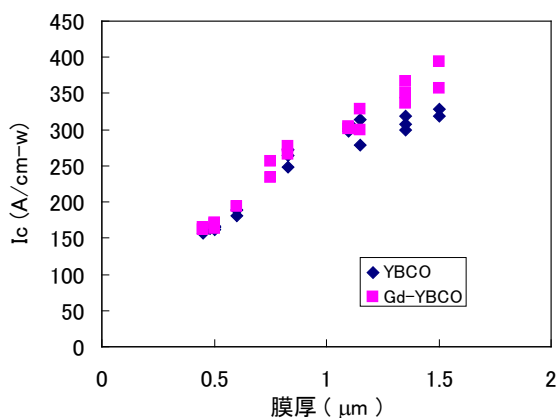


図 2.1.3-12

平滑化基板上に MOCVD で形成した超電導層の膜厚依存性

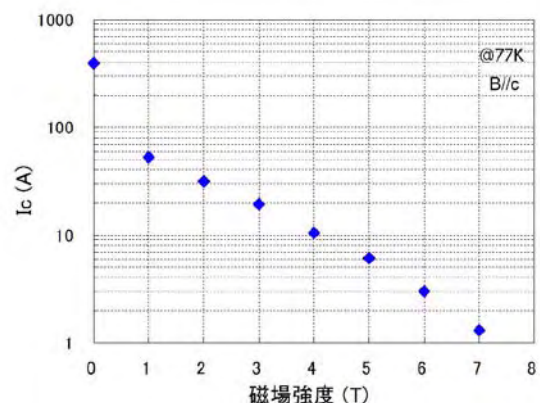


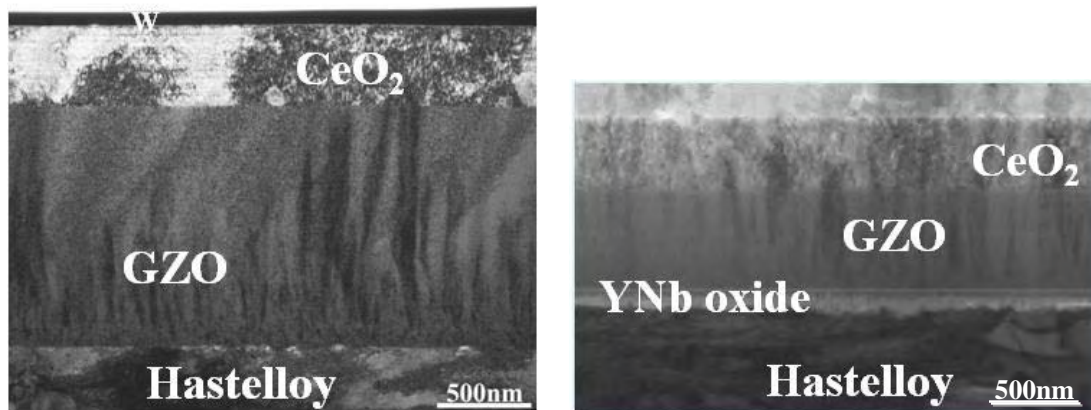
図 2.1.3-13

平滑化基板上に MOCVD で形成した Gd-YBCO 層の磁場特性

a-3 MOCVD プロセス対応中間層作製技術開発

MOCVD による超電導層形成では、中間層に関しては、SMES 用超電導コイルにおいて、超電導線材に必要とされる長尺性、平坦性を有する中間層を作製することによって、製造工程と線材品質の安定化を検討した。

線材の平坦性の保持には、IBAD 中間層を薄化する必要があり、かつ IBAD 中間層の薄化は中間層の作製速度の増大につながる。IBAD 中間層は従来の GZO 層のみの構造から、GZO 層を主体として Y-Nb 複合酸化物を組み合わせた構造で薄化を図り、長尺基板を作製した。図 2.1.3-14 に両者の構造の違いを示す。また、金属基板は当初、非研磨の Hastelloy™ を使用していたが、研磨した Hastelloy™ 基板を用いた短尺試験の結果で通電特性の向上が確認できたため、研磨基板を使用した開発に変更した。表 2.1.3-2 に作製した基板の結晶粒の配向度をまとめた。基板前・後端の IBAD 中間層の $\Delta\phi$ が 17 度以下で安定して得られており、同様に PLD-CeO₂ キャップ層の $\Delta\phi$ も基板前後端で 6 度以下に制御されているので、安定製造に貢献しうるものとする。



従来の IBAD-GZO 中間層

Y-Nb 酸化物を用いた IBAD-GZO 中間層

図 2.1.3-14 Y-Nb 複合酸化物を用いて薄化した IBAD-GZO 中間層構造

表 2.1.3-2 GZO を主体とした IBAD 基板の作製結果

作製期間	構造	作製量の和(m)	$\Delta\phi$ (GZO層)		$\Delta\phi$ (PLD-CeO ₂ 層)	
			先頭	後端	先頭	後端
平成20年度	GZO/非研磨 Hastelloy	373	11.2 - 12.7	10.9 - 12.8	3.4 - 4.8	3.2 - 4.8
	GZO/YNbO/非研磨 Hastelloy	1,763	12.0 - 15.8	13.4 - 16.9	4.3 - 5.4	4.4 - 5.7
	GZO/YNbO/研磨 Hastelloy	967	11.4 - 14.3	10.9 - 15.5	3.3 - 4.1	2.9 - 3.7
平成21年度	GZO/YNbO/非研磨 Hastelloy	1,578	11.0 - 16.7	12.4 - 16.9	3.8 - 5.8	4.0 - 5.9
	GZO/YNbO/研磨 Hastelloy	3,227	10.2 - 14.6	11.9 - 15.2	2.6 - 3.4	3.8 - 4.5

IBAD 基板上のキャップ層に関しては PLD による CeO₂ キャップ層形成だけでなく、スパッタを用いて、高速かつ安定な作製技術の検証を進めた。まず、スパッタ法による CeO₂ キャップ層と IBAD 層の界面接合性を確保するため、折り曲げ破

断においても、CeO₂ キャップ層と IBAD 層との剥離が認められず、CeO₂ キャップ層と IBAD 層の接合性が確保される成膜条件を確認した。次に、図 2.1.3-15 に示す様に種々の IBAD 基板上で CeO₂ キャップ層厚と、CeO₂ キャップ層の $\Delta\phi$ を検討することにより、平滑化基板上、CeO₂ キャップ層厚 200 nm において、 $\Delta\phi \leq 6$ 度の見通しを得た。これにより、1 μm 厚の YBCO 層成膜において $I_c = 300 \text{ A/cm-w} (@77 \text{ K, s.f.})$ の結果を得た。さらに、スパッタ法による CeO₂ キャップ層成膜の高速化を行うため、複数ターゲット化および reel to reel 成膜のマルチターン化の検討を進めた。マルチターン成膜における影響およびレーン間における特性分布を検討し、CeO₂ キャップ層成膜の安定性、中間層の接合性に問題がないことを確認した。この結果から、複数ターゲット化およびマルチターン化により、CeO₂ キャップ層厚 200 nm において成膜速度 10 m/h の高速成膜が可能であることを確認した。スパッタによる CeO₂ キャップ層の長尺成膜の結果の例を図 2.1.3-16 に示す。平滑化基板上において $\Delta\phi = 6$ 度が安定に得られている。スパッタ法を用いた CeO₂ キャップ層に関しては、平成 20 年度に総量 983 m を作製した。

さらに、中間層の安定性の向上をはかるため、GZO 層より IBAD 中間層の薄化が可能な IBAD-MgO 系中間層の導入を、ISTEC の協力の下、推進した。IBAD 層直上への CeO₂ キャップ層形成よりも、IBAD 層と CeO₂ キャップ層の間へ LMO 層を導入した構造の方が、 $\Delta\phi$ が 5 度程度の CeO₂ キャップ層が安定に二軸配向することを確認した。表 2.1.3-3 に中間層の構造と酸化物キャップ層 (PLD-CeO₂) の配向を作製結果のまとめとして示す。いずれの PLD-CeO₂ 酸化物キャップ層の $\Delta\phi$ も基板前後端で 5 度以下に制御されており、配向の安定性が示された。また、PLD-CeO₂ 酸化物キャップ層の表面を AFM により観察した結果、図 2.1.3-17 に示すように、IBAD-MgO 層上では欠陥の発生が比較的抑制されていることが確認された。

表 2.1.3-3 IBAD-MgO 層上の PLD-CeO₂ キャップ層の配向

試料 No.	基板長 (m)	$\Delta\phi$ (LMO層)		$\Delta\phi$ (PLD-CeO ₂ 層)	
		先頭	後端	先頭	後端
1	205	—	—	3.73	4.63
2	213	13.7	13.8	4.17	2.68
3	223	14.6	13.5	4.43	3.73
4	222	16.6	18	3.93	3.64



スパッタ法による CeO₂ キャップ層形成においては、GZO 中間層と同等の条件では、長尺において特性の低下が生じたが、成膜条件の適正化により、図 2.1.3-18 に示す様に $\Delta\phi = 5$ 度程度の安定した長尺成膜が可能となった。この、より薄化した IBAD 層に関しては、これまでに 2.4 km 程度作製した。

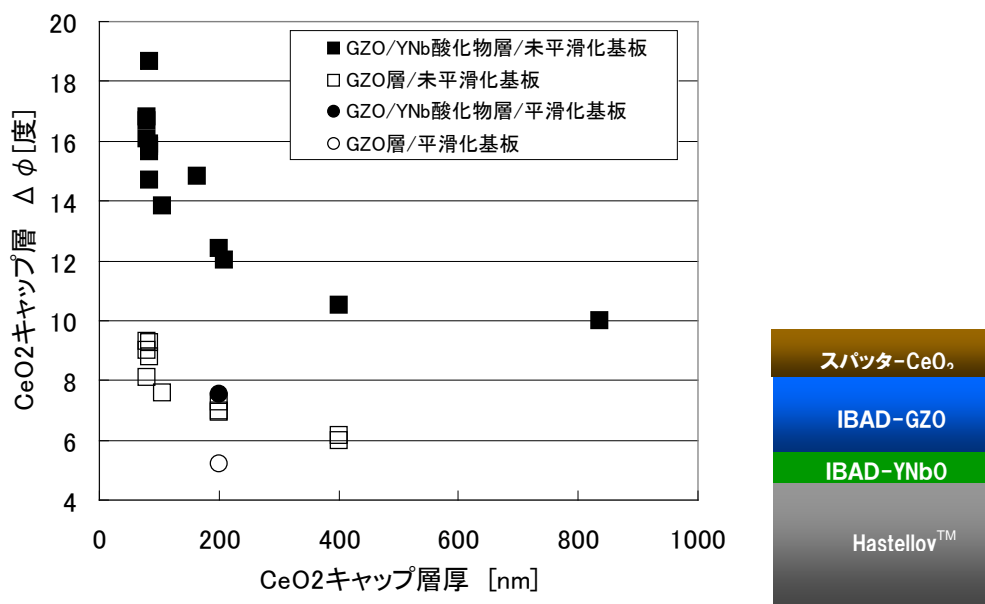


図 2.1.3-15 種々の IBAD 基板上で CeO₂ キャップ層厚と、CeO₂ キャップ層の Δφ の比較

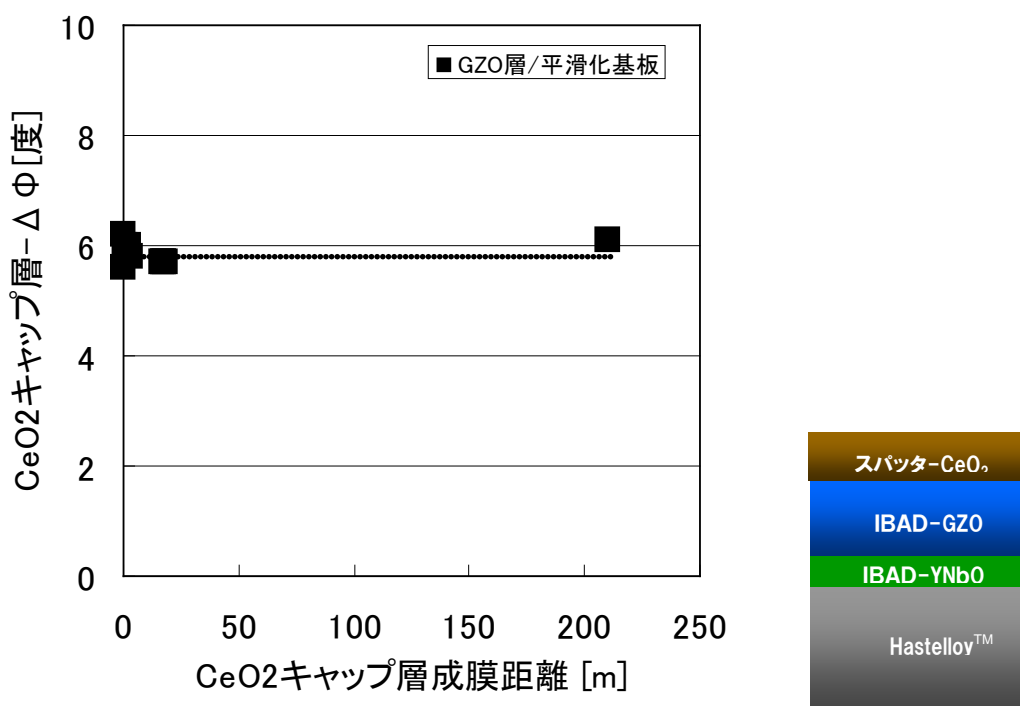


図 2.1.3-16 スパッタ法による CeO₂ キャップ層長尺成膜結果 (IBAD-GZO 層上)

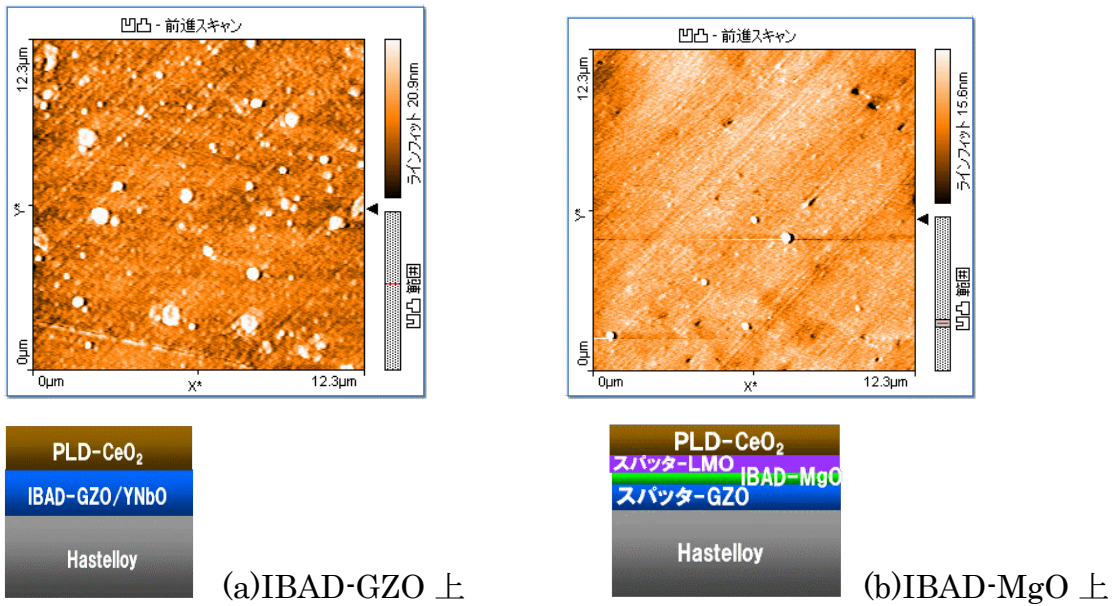


図 2.1.3-17 各構造の IBAD 中間層上の PLD-CeO₂ キャップ層表面

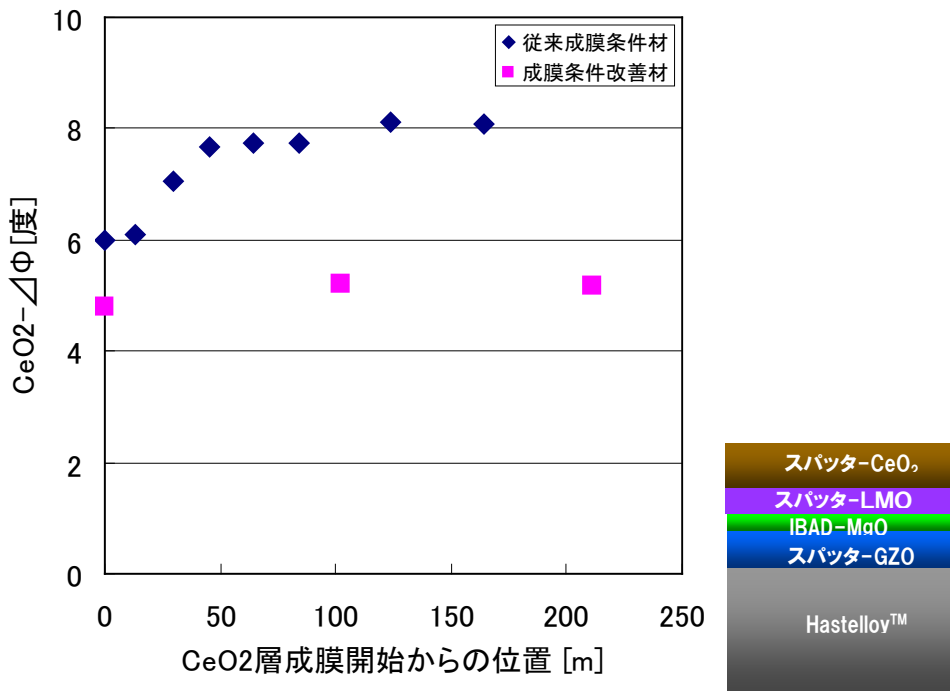


図 2.1.3-18 スパッタ法による CeO₂ キャップ層長尺成膜結果 (IBAD-MgO/LMO 層上)

続いて、薄化によって中間層の欠陥が抑制された IBAD-MgO 基板を用いて超電導線材作製を行った。図 2.1.3-19 に IBAD-MgO 基板を用いて作製した線材の I_c 分布を示す。線材の焼損防止のため通電は 205 A までとして測定を行なった。若干の低 I_c 箇所が認められるが、殆どの箇所 $I_c > 205 \text{ A/cm-w} (@77 \text{ K, s.f.})$ 以上を達成し、高い通電特性を有する線材を複数本作製することが可能になった。

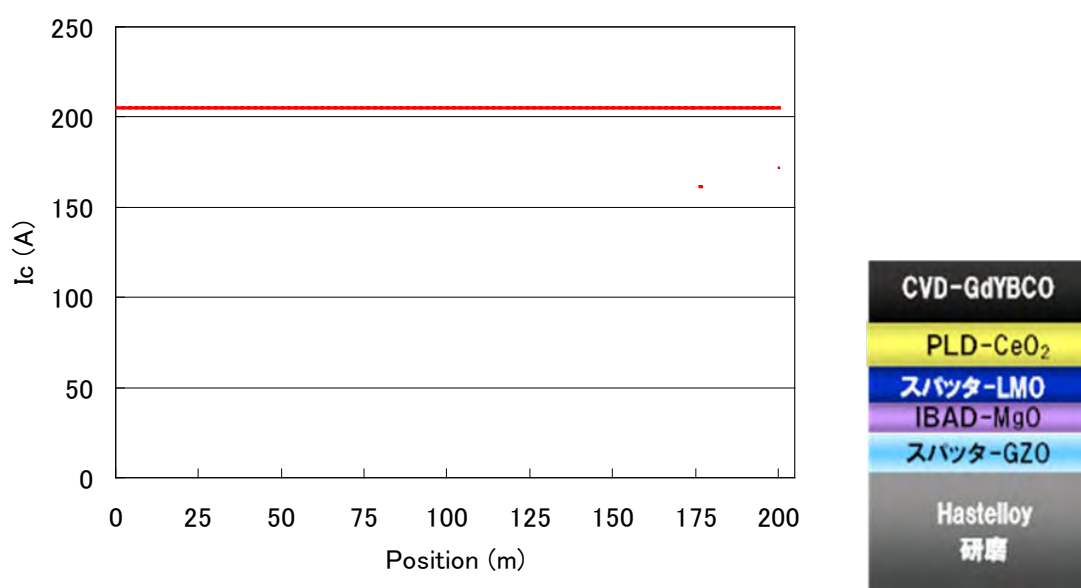


図 2.1.3-19 IBAD-MgO 基板を使用して作製した MOCVD 線材の I_c 分布例

以上の超電導製造技術開発によって、SMES モデルコイル用導体用の安定化層複合化技術開発や SMES モデルコイルの要素技術検討、要素試験などに平成 20 年度は総長で 1.5 km、平成 21 年度は 4.8 km の超電導線材を供給した。表 2.1.3-4 にこれまでに作製した線材量とその歩留りを示す。金属基板の平滑化、中間層構造の適正化、MOCVD の原料ガス供給系（気化器・配管）の温度の適正化を行ってきた結果、平成 22 年度に入ってから、 I_c 値：200 A/cm-w(@77 K,s.f.)、150 m 長を超える線材の歩留りも向上した。

表 2.1.3-4 IBAD-MOCVD 線材の製造実績

期間	作製長 (m)	100 A以上、50 m以上		200 A 級、75 m以上		200 A 級、150-300m	
		本数	歩留	本数	歩留	本数	歩留
H20	1,503	11	48.4	1	14.3	1	14.3
H21	4,363	33	58.0	0	0	0	0
H22(~7月)	841	6	84.1	3	59.2	2	50.0
歩留: 作製長に対する所定 I_c と所定単長を達成した線材長の割合							

a-3 Cu めっきを用いた安定化層形成技術開発

安定化層に関しては、まず、硫酸銅浴を用いた電解 Cu めっき法により銅安定化層の短尺試作を行い、片側 50 μm 厚の Cu めっきが可能ないことを確認した（図 2.1.3-20）。Cu 複合法と Cu めっき法との比較では、表 2.1.3-5 に示すようにハンダで Cu テープを複合する Cu 複合法に比べ、Cu めっき法が SMES 用導体として適していることを確認した。平成 21 年度には、Reel to Reel 式の超電導線材用 Cu めっき装置を導入し、Cu 安定化層の長尺化を図った。図 2.1.3-21 (a) に初期の Cu めっきによる Cu 安定化層材の

断面写真を示す。この図から明らかなように、線材の端部において Cu めっき厚が厚い。めっきにおいては、線材端部に電界集中が生じるため線材端部に Cu が偏肉してめっきされる。コイル化のためには、断面形状が一様であることが望ましいため、Cu めっき槽内における線材端部への電界集中を避ける検討を行い、図 2.1.3-21 (b)に示す線材形状を得た。SMES 用線材の場合、積層導体における電流偏流の抑制のために、線材形状の均一性は重要な開発要素であるため、Cu めっき材の厚さの長手方向分布を測定した。その結果を図 2.1.3-22 に示す。めっき材の両端において厚さの変動があるが、これは、超電導線材とその両側のダミー線との抵抗の違いによってめっき厚に違いが生じたものである。この部分を除くと、長手方向においても厚さ変動は少ないと考えられる。図 2.1.3-23 に長尺の Cu 安定化線材の Cu めっき前後における I_c の測定結果を示す。線材の焼損防止を目的に Cu めっき前は $I_c = 205 \text{ A/cm-w} (@77 \text{ K, s.f.})$ で Cu めっき後においても $225 \text{ A/cm-w} (@77 \text{ K, s.f.})$ で通電制限をしているため、Cu めっき前後における詳細な I_c 値の比較は行っていない。しかし、 I_c 値が Cu めっき前に低下していた箇所において、Cu めっき後の I_c 値が低下する傾向が認められている。基本的に I_c 値が大きく低下している箇所は、コイルに使用されないが、今後の線材製造歩留りの向上のため、Cu めっきの条件の適正化により I_c 値低下を防ぐことができるか、あるいは、Ag 保護層/超電導層の界面の接合性に問題があり、それが Cu 層が付加されることにより顕著になるのか等を含め今後の安定化製造技術開発を通して検討する。

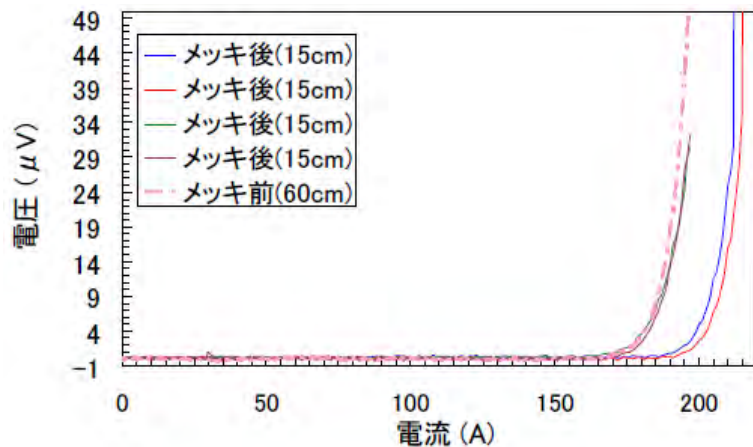


図 2.1.3-20 短尺試料における Cu めっき前後の I_c 変化

表 2.1.3-5 Cu めっき法と Cu テープ複合法の比較 (概要)

項目	Cuテープ複合法	Cuめっき法
片厚 $50 \mu\text{m}$ の安定化層	◎ : Cuテープ寸法精度良好	○ : めっき条件により調整
銅層と銀層の密着性	△ : 端部に複合不良部有	◎ : 密着性良好
複合後の厚さ	△ : 複合不良部の厚さ大 ハンダ部の厚み付加	○ : 断面内の厚さにばらつき有



(a) 改善前の Cu めっきによる Cu 安定化線材



(b) 改善後の Cu めっきによる Cu 安定化線材

図 2.1.3-21 Reel to Reel 式 Cu めっき装置による線材断面 (形状改善前後)

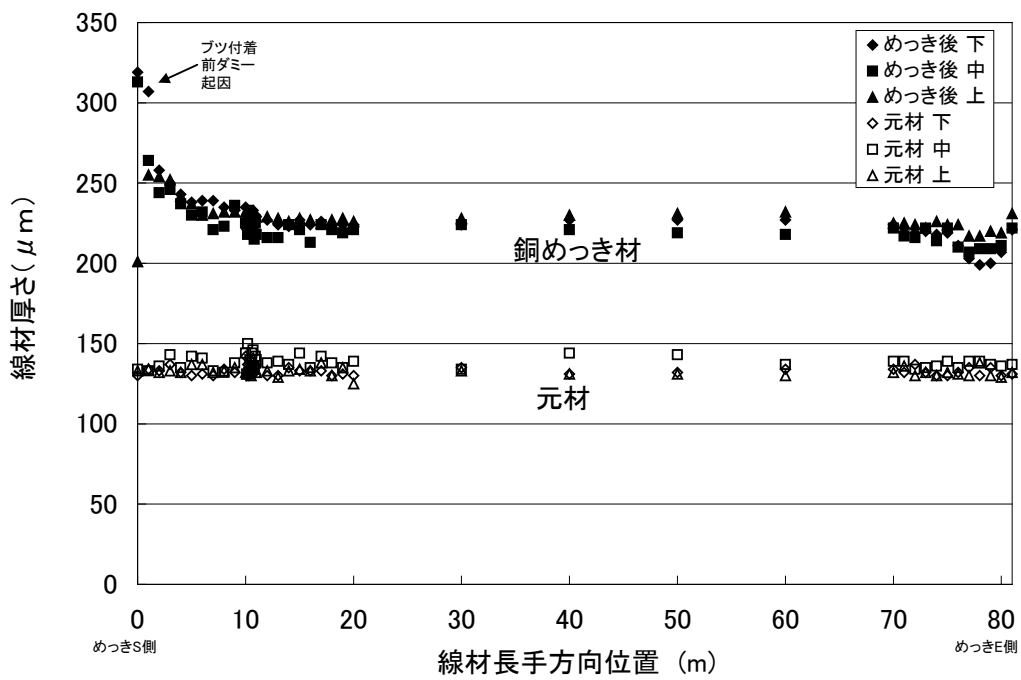
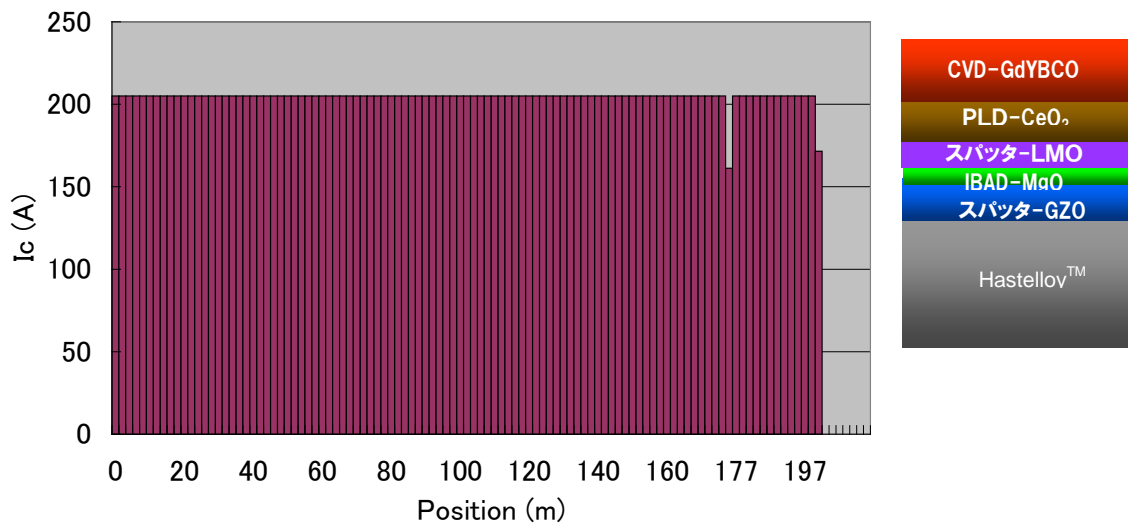
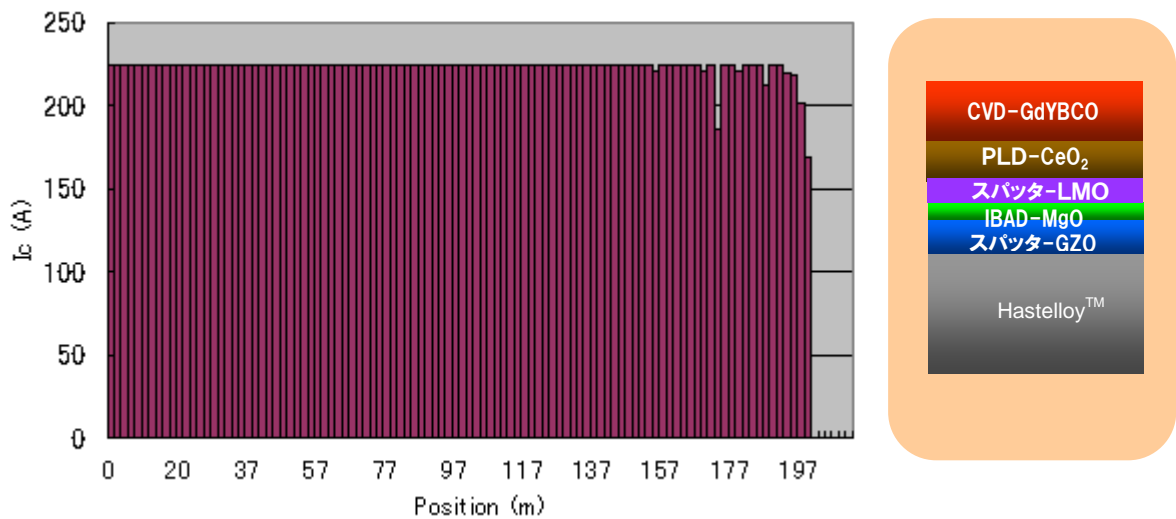


図 2.1.3-22 Cu めっき材の寸法の長手方向分布例



(a)Cu めっき層付加前 (205 A で通電制限)



(b)Cu めっき層付加後 (225 A で通電制限)

図 2.1.3-23 Cu めっき安定化層付加前後の I_c 比較

b. SMES 対応線材安定製造技術開発(IBAD-PLD 線材)

b-1 長尺 IBAD-PLD 線材の安定製造の検討

200 A/cm-w(@77 K, s.f.)級 IBAD-PLD 線材を用いた SMES モデルコイルの成立性を確認するため、2 kA 以上の通電が可能な大電流容量コイルの導体の評価用の IBAD-PLD 線材の安定製造技術の開発を行ってきた。

今回開発を行った線材における超電導線材は図 2.1.3-24 に示すように PLD-CeO₂ (500 nm)/ IBAD-MgO(10 nm)/Y₂O₃-bed 層(20 nm)/ Al₂O₃-bed 層(100 nm)の構造の中間層をハステロイ™上に形成し、超電導層は PLD で GdBCO を厚

さ 約 $2.2 \mu\text{m}$ 成膜した。図 2.1.3-25 に作製した線材の I_c 分布図を示す。300 m 以上の全長にわたって $I_c > 300 \text{ A/cm-w} (@77 \text{ K, s.f.})$ 以上を達成し、測定箇所数から求めた平均 I_c 値は $437 \text{ A/cm-w} (@77 \text{ K, s.f.})$ に達した。特性の長手方向の位置依存性として中央部が若干 I_c 値が低い傾向があるが、これは中間層の配向などに起因する特性低下で、IBAD-MgO もしくはキャップ層の成膜時の成膜条件の時間変動によるものと推定される。今回の線材作製結果は全長で高い特性を得ており、歩留りは 100 % で、安定製造という観点からは、十分な安定性を示し、目標を達成した。

材料	厚さ
銀	$16 \mu\text{m}$
$\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$	$\sim 2.2 \mu\text{m}$
CeO_2	500nm
MgO	$\sim 10\text{nm}$
Y_2O_3	$\sim 20\text{nm}$
Al_2O_3	$\sim 100\text{nm}$
ハステロイ	$100 \mu\text{m}$

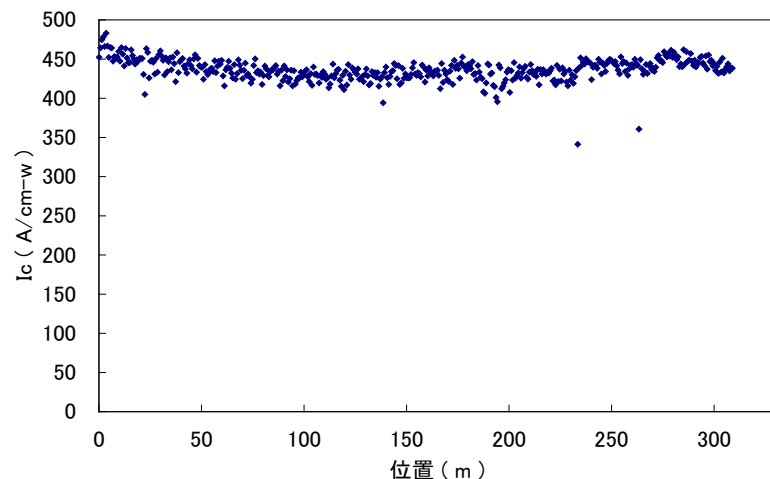


図 2.1.3-24
長尺 IBAD-PLD 線材の構造

図 2.1.3-25
長尺 IBAD-PLD 線材の I_c 分布図

b-2 長尺 IBAD-PLD 線材の安定製造の検討

極低コスト線材として中間層に IBAD-MgO を用いた超電導線材の SMES への適用性を評価するために $200 \text{ A/cm-w} (@77 \text{ K, s.f.})$ 級 IBAD-MgO 線材の安定製造技術開発を行っている。本項では、IBAD-MgO 中間層を用いた線材の安定製造技術開発の成果をまとめる。IBAD-MgO 線材は、ベッド層、IBAD 層、バッファ層、キャップ層から成るが、構造、材料によって省略される層もある一方、ベッド層などは複数の層で形成される場合もあり、4 つ以上の中間層を有する 경우가一般的である。全部で 2 層の IBAD-GZO 線材に比べて複雑な構造ではあるが、それぞれの層が非常に薄く、高速で成膜が出来るメリットがある。中間層厚みが 2 層合わせて $2 \mu\text{m}$ にもなる GZO 系の場合に比べて、MgO 系の場合は全中間層層の合計厚みは $1 \mu\text{m}$ 以下であり、層数が多くかつそれぞれが薄いという特徴を有する。高製造速度化が可能な特徴から将来線材として位置付けられている IBAD-MgO 基板であるが、薄い多層構造であるため、長尺での安定性確保が難しく、また、界面が多いため GZO 系に比べて剥離しやすいことも考えられる。そこで、SMES への IBAD-MgO 線材の適用性評価のため、 $200 \text{ A/cm-w} (@77 \text{ K, s.f.})$ 級の単長数十 m 線材を作製することを目標とし、安定製造技術の開発を行った。

今回開発を行った線材における中間層の構造は PLD-CeO₂ (500 nm) / Sputter-LMO (18 nm) / IBAD-MgO(5 nm) / Sputter-GZO(110 nm) / ハステロイ™ であり、超電導層の材料および作製プロセスとしては PLD-GdBCO (厚み：1.2～1.5 μm) を選択し、単長 75 m、150 A/cm-w(@77 K, s.f.) を仕様として 4 本の線材 A-D を作製した。図 2.1.3-26(a)～(d) に作製した線材の I_c 分布図を示す。線材 C を除く 3 本は目標の単長 75 m、150 A/cm-w(@77 K, s.f.) をクリアしたが、線材 C は一ヵ所目標 I_c 値を下回る結果となった。この低 I_c 部は磁化法測定により 2 cm 程度のサイズと確認出来、この場所は中間層付き基板に同程度のサイズの欠陥が確認されており、特性劣化が欠陥に起因するものであることが示唆される。また、線材 A 及び C には、特性の位置依存性に全体として減少あるいは増加の傾向があるが、これは基板の配向度の分布に起因する特性低下であり、IBAD-MgO 層成膜時に成膜条件が時間経過によって変化したことによるものと考えられる。

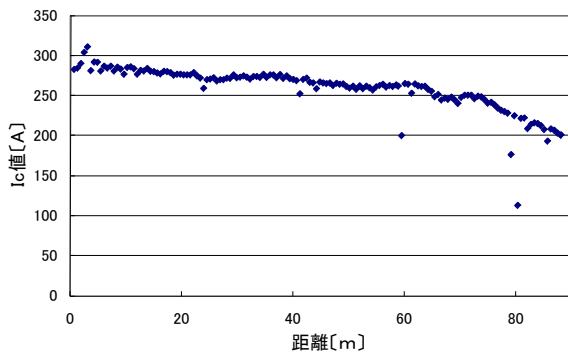


図 2.1.3-26(a) 線材 A の I_c 分布図

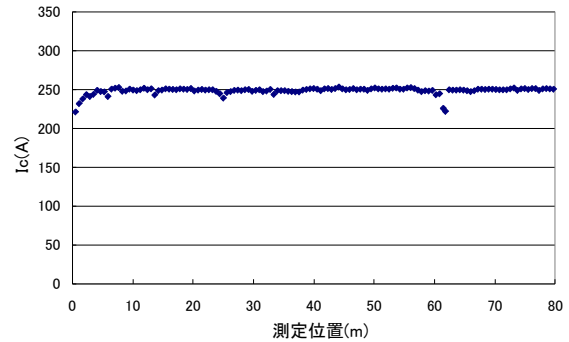


図 2.1.3-26(b) 線材 B の I_c 分布図

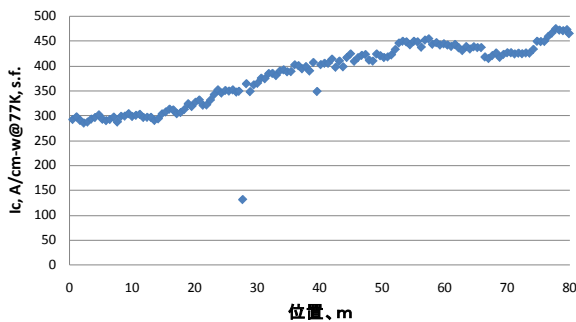


図 2.1.3-26(c) 線材 C の I_c 分布図

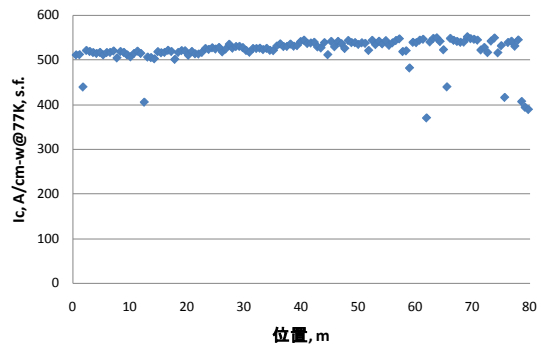


図 2.1.3-26(d) 線材 D の I_c 分布図

これまでに、様々な線材における特性劣化部位とその原因究明を行った結果、大きな特性低下の原因となる欠陥は、中間層成膜時、特に IBAD-MgO 層成膜までに金属基板に付着した汚れが主要因ではないかと考えられており、基板の清浄化と成膜条件の安定化により特性劣化部の抑制が可能になると考えられる。

安定製造という観点からは、今回の線材作製における歩留りとしては 3/4 と、開発途中の線材としては十分な安定性を示した。また、作製した線材の殆どの部分で

は $I_c > 200 \text{ A/cm-w} (@77 \text{ K, s.f.})$ の特性を得ており、目標を達成した。

(3) SMES 対応線材安定製造技術開発のまとめ

高磁界・コンパクトコイルの技術開発に適用可能な SMES 対応 Y 系超電導線材の安定製造技術の確立を目的として Y 系超電導線材を作製し、モデルコイル作製への寄与を図ってきた。

IBAD-MOCVD 線材の安定製造において、以下のような安定製造に向けた技術の進展が達成された。

1. ハステロイTM 基板の圧延加工および精密機械研磨の検討により長尺基板の高強度化と平滑性の向上が達成された。
2. 平滑化ハステロイTM 基板を使用によって、到達 I_c 値および I_c 分布の向上が可能であるという知見を得た。また MOCVD 装置の気化器および周辺温度の適正化によって、局所的な低 I_c 箇所の発生を低減し均質性の向上が図られた。
3. 中間層の薄化について、GZO 層を主体として Y-Nb 複合酸化物を組み合わせた IBAD 中間層構造の検討を行い、 CeO_2 酸化物キャップ層の $\Delta \phi$ が長尺基板の前後端で 6 度以下に制御された長尺基板が安定して作製された。
4. 中間層の薄化有効な IBAD-MgO 中間層の検討を行い、 CeO_2 酸化物キャップ層の $\Delta \phi$ が長尺基板の前後端で 6 度以下に制御されている長尺基板を再現性よく作製した。また、IBAD-MgO 基板上で高い通電特性を有する線材が複数本作製され、歩留りが向上してきた。
5. Cu 安定化層形成では、長手方向において厚さ変動が少なく、課題となるような I_c の低下を抑えることが可能と思われる長尺線材に向けた Cu めっき技術を開発した。

IBAD-PLD 線材の SMES モデルコイルへの適用性検討においては、これまでに約 600 m の線材を作製し、線材の殆どにおいて $I_c > 200 \text{ A/cm-w} (@77 \text{ K, s.f.})$ の特性を得た。また、作製した線材はコイル開発に使用する導体の作製検討に供した。

(4) 今後の計画と達成の見通し

IBAD-MOCVD 線材はこれまでの開発によって不良箇所発生を抑制し、歩留り向上を図ってきた。金属基板、中間層、超電導層にそれぞれ改善が施されたことによって現在までに歩留りが向上してきている。今後は、引き続き、コイル試験用超電導線材の作製供給を通じて、さらなる歩留り向上を図り、目標達成を目指す。

IBAD-PLD 線材の安定製造技術開発では、 $I_c > 200 \text{ A/cm-w} (@77 \text{ K, s.f.})$ の特性を線材の殆どで得ており、高い歩留りと超電導特性の安定性を得た。今後は、引き続き、Y 系超電導線材をコイル開発用導体の作製検討に提供するとともに、Cu めっき技術による安定化層複合化やコイル加工を行い、コイル適用への課題抽出とその解決を図り、適用化を目指す。

2.1.4 高磁界コンパクト SMES システムモデル検証

2.1.4-1 開発方針

(1) 研究開発目標

中間目標（平成 22 年度）

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

最終目標（平成 24 年度）

- ・ 2MJ 級評価用試験モデルを用いて、適用性検証評価試験計画に基づいて SMES 動作検証を行うとともに、電力系統制御 SMES の運転を模擬した 2 万回以上の繰返し充放電による特性検証を実施する。

(2) 研究内容

本プロジェクトにおける SMES システムモデル検証の最終目標としては、2.1.1 項、2.1.2 項 に記載の要素コイル開発結果を反映し、複数個のコイルの組合せにおいてクエンチ等の動的な変化等が発生した場合を想定したコイルの限界性能を把握し、コイル自体ならびにコイルシステムとしての裕度の適正化を図ることで、Y 系コイルの限界設計技術を確立し SMES のさらなる低コスト化の見通しを得ることにある。

平成 20 年度は、2 GJ 級 SMES コイル基本システム構成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 2.1.1 項、2.1.2 項(1)、(2)に記載の Y 系 SMES コイル評価結果を反映して 2 GJ 級 SMES コイル基本システム構成の改善を図るとともに、そのために検証すべき複数個のコイルの組合せにおいてクエンチ等の動的な変化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。

2.1.4-2 コイル構成最適化の検討（中部電力、北海道大学）

(1) 研究開発の目標

トロイダル配置した 180 個の要素コイルの間には、電気絶縁、冷却手段、機械的強度サポートなどを配置する必要がある。また、設計諸元に対し、実際に製作実現可能であることが必須である。これらを勘案し、構成要素の寸法制約を検討して、「超電導電力ネットワーク制御技術開発」プロジェクトの概念設計結果に対してコイルの基本電気設計を見直し、最適化検討を実施した。

(2) 2.4 GJ コイル設計最適化の考え方

a. トロイダル中心半径の計算

トロイダル配置した 180 個の要素コイルの間には、電気絶縁、冷却手段、機械的サポートなどを配置する必要がある。これらの構成要素の寸法制約を検討して、「超電導電力ネットワーク制御技術開発」プロジェクトの概念設計結果に対して要素コイル間のスペースを考慮したコイルの基本電気設計を見直した。基本設計を検討する際の拘束条件を表 2.1.4-2-1 に示す。トロイダル中心半径を大きくした場合には蓄積エネルギーが小さくなるが、コイルの内径を小さくして巻数を増やすことで対応する方針とした。

表 2.1.4-2-1 基本設計の条件

項 目	値
最大蓄積エネルギー	2.4 GJ
運転温度	20 K
要素コイル数	180 コ
パンケーキコイル数／要素コイル	4 コ
線材寸法	幅 12 mm×厚 0.2 mm

コイルと、基本的な構成要素である対地絶縁構成、冷却構成、機械的強度サポート等の概略を図 2.1.4-2-1 に示す。コイルを冷却するために、巻線部端面には絶縁板を介して冷却板を取り付ける。これを要素コイル 1 ユニットとして、これらの中に機械的強度サポート部品を配置する。以下で各項の寸法を検討する。

1) 要素コイル

要素コイルを構成するパンケーキコイルは、12 mm 幅の線材を 13 mm 幅の巻枠に巻き、端面に FRP を接着する。パンケーキコイル間の絶縁は、要素コイル両端に 6 kV 印加時、隣接コイル間で耐圧 3 kV が必要になる。耐電圧を考慮して、片側に 1 mm ずつの FRP 板を接着した 2 mm の FRP による絶縁を想定した。パンケーキコイル幅は 15 mm となる。ターン間の絶縁については、要素コイル両端に

6 kV を印加時のターン間電圧は 4 V 程度であり、線材間にカプトンを介在させる。

2) 絶縁板

対地絶縁は、巻線部とコイル冷却板との間で 6 kV を確保するため、厚さ 4 mm の FRP 絶縁板を入れることを想定した。

3) 冷却板

各要素コイルの端面に、冷却配管を埋設したアルミ製の冷却板を接着する。配管は、冷媒の圧力損失を考慮して内外径を決め、冷却板はこの配管を埋設できる厚さとする。配管の内径は「超電導電力ネットワーク制御技術開発」プロジェクトで成実性が確認された内径 6 mm φ (外径 8 mm φ) を最大とし、これを埋め込む冷却板は厚さ 10 mm を想定した。

4) コイル間サポート

電磁力に対する補強構造設計にとって、向心力サポートが重要である。向心力サポートは、要素コイル間にウェッジ形状の FRP 板を挟みこんで接着する方法とする。この部材のトロイダル中心側は、製作性を考慮して厚さ 5 mm を想定した。

以上の結果により、角度 2 度毎の周長 d は、

$$d = (\text{パンケーコイル} \times 4 \text{ 個}) + (\text{絶縁板} \times 2 \text{ 枚}) + (\text{冷却板} \times 2 \text{ 枚}) + (\text{コイル間サポート端部})$$

$$= (15 \text{ mm} \times 4) + (4 \text{ mm} \times 2) + (10 \text{ mm} \times 2) + (5 \text{ mm})$$

$$= 93 \text{ mm}$$

となり、次式よりトロイダル中心半径 R が 4064mm 必要であることが分かった。図 2.1.4-2-2 に構成図を示す。ただし、図 2.1.4-2-2 中の内径は「超電導電力ネットワーク制御技術開発」プロジェクトにおける値である。

$$93 = 2\pi(R - 1400) \times \frac{2}{360}$$

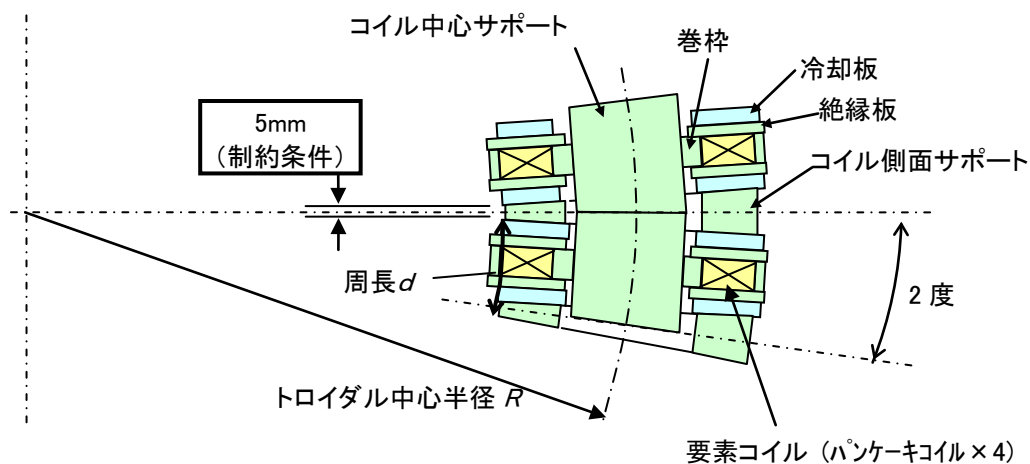


図 2.1.4-2-1 コイル間に必要な構成要素

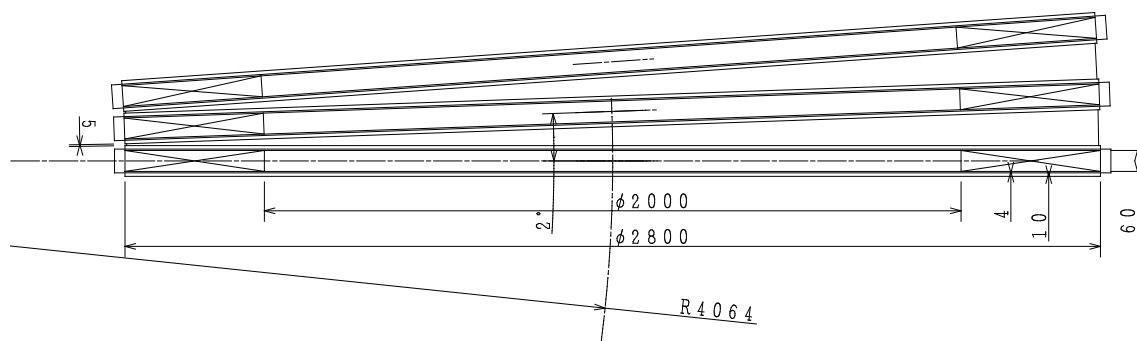


図 2.1.4-2-2 コイル配置の成立性に関わる構成要素と寸法制約

b. 全体構成の検討

向心力サポートがあることによって電極および冷却配管の構成が制約されるため、それらの全体構成について検討した。

電極やフィーダは、向心力サポートとの干渉を避けて配置する必要がある。また、バンドルする線材間の偏流を抑制するために、線材に同じ磁場を経験させる構成にする必要がある。偏流抑制に関しては、各コイルが上下対称・トロイダル内/外側で非対称であり、また、4 シングルパンケーキの積層中心で対称である形状を考慮してバンドル数を 4 枚とし、電極 4 個を 90 度ずらした 4 回対称に配置する構造が適していると考えられる。

冷却配管は、電極部や口出しをかわすためにコイルの上下から導入する構成とした。冷却板は、磁場変動による渦電流を定量的に検討し、スリットを入れる等の対策を施す必要がある。

全体構成の概略を図 2.1.4-2-3 に示す。要素コイルの自重量は、コイル側面サポートに取り付けた吊サポートで保持することができる。

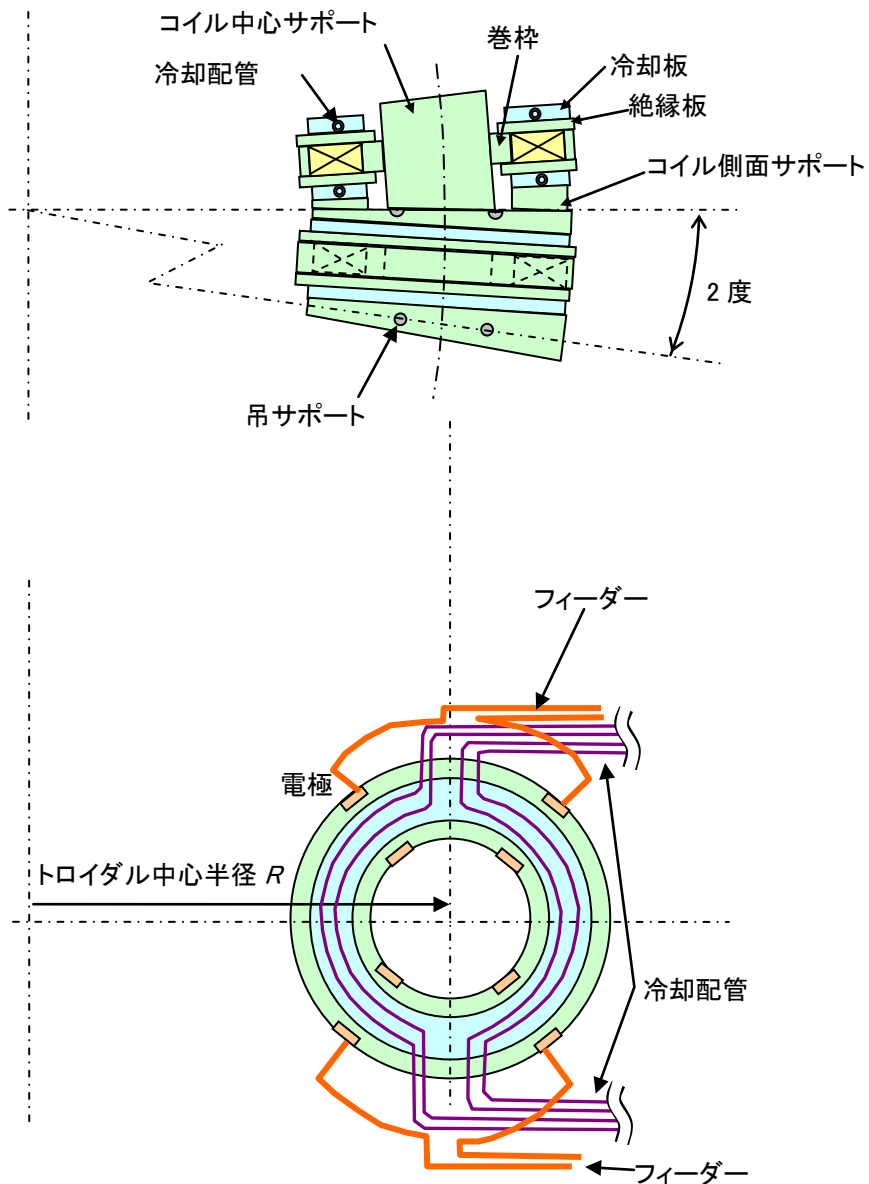


図 2.1.4-2-3 全体構成案

c. 2.4 GJ コイルの基本設計

トロイダル中心半径を増加し、コイル内半径を調節して蓄積エネルギー2.4 GJを維持させたコイルの基本設計をした。主要な諸元を表 2.1.4-2-2 に示す。図 2.1.4-2-4 に、パンケーキコイルの断面構成を示す。1 ターン分の厚さ 1.1 mm のうち Y 系超電導線材 (主に Hastelloy 基板) は 0.1 mm とする。安定化層 (銅) の厚さは、「超電導応用基盤技術開発 (第 II 期)」プロジェクトでの検討結果に基づいて 0.2 mm を仮定し、線材寸法を 0.1 mm として、絶縁 0.15 mm を引いた残り 0.65 mm を Hastelloy 補強材とした。コイル外半径は 1398 mm となり、巻数を増やすためにコイル内径は 952 mm と小さくした。フープ力を Hastelloy TM 断

面で担うとすると、*BJR* 最大値は 588 MPa になる。

表 2.1.4-2-2 トロイダルコイルの諸元

蓄積エネルギー	2.4 GJ
運転温度	20 K
要素コイル数	180
トロイダル中心半径	4064 mm
コイル内半径	952 mm
コイル外半径	1398 mm
コイル高さ	60 mm
ターン数/要素コイル	1620
使用線材長	2153 km
線材幅	12 mm
1 ターン厚さ	1.10 mm
ハステロイ基板	0.10 mm
安定化層	0.20 mm
補強材(ハステロイ)	0.65 mm
絶縁材	0.15 mm
通電電流@素線	540 A (2160 A/4 枚バンドル)
最大磁界	10.3 T
<i>BJR</i> 最大値 ※1	588 MPa
向心力@要素コイル	3.42 MN

※1 *BJR* はハステロイTM の断面 (基板+補強材) で負担と仮定

$$J = 540 / \{12 \times 10^{-3} \times (0.10 \times 10^{-3} + 0.65 \times 10^{-3})\} \text{ [A/m}^2\text{]}$$

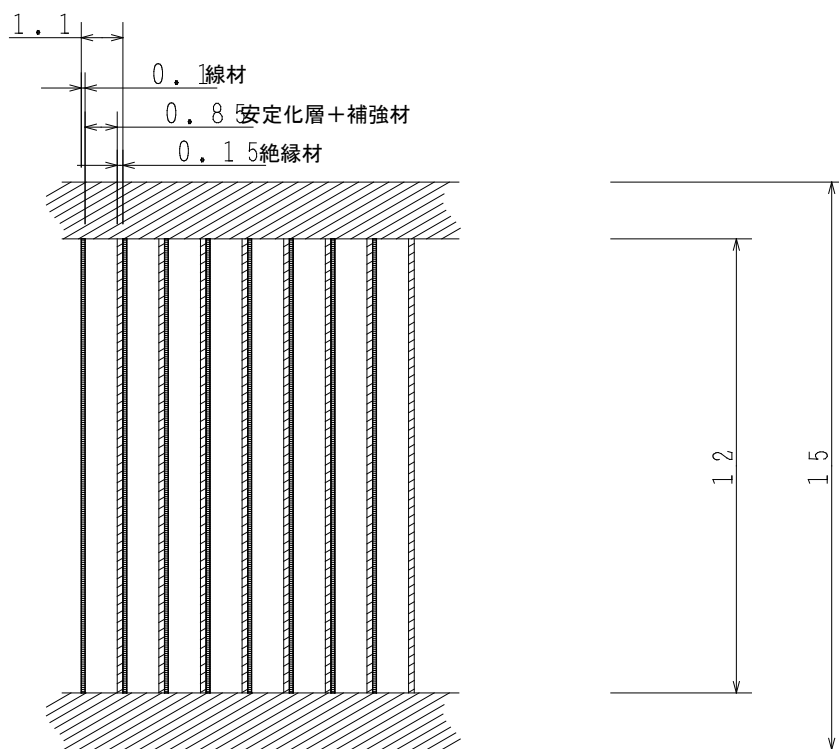


図 2.1.4-2-4 パンケーキコイルの断面構成

d. 磁場解析結果

要素コイル 180 個をトロイダル配置し、素線に電流 540 A (4 並列で 2160 A) を通電した時の発生磁場を計算した。180 個のコイルを配置した外観を図 2.1.4-2-5 に示す。1 つの要素コイルについて、経験磁場分布の解析結果を図 2.1.4-2-6 に示す。

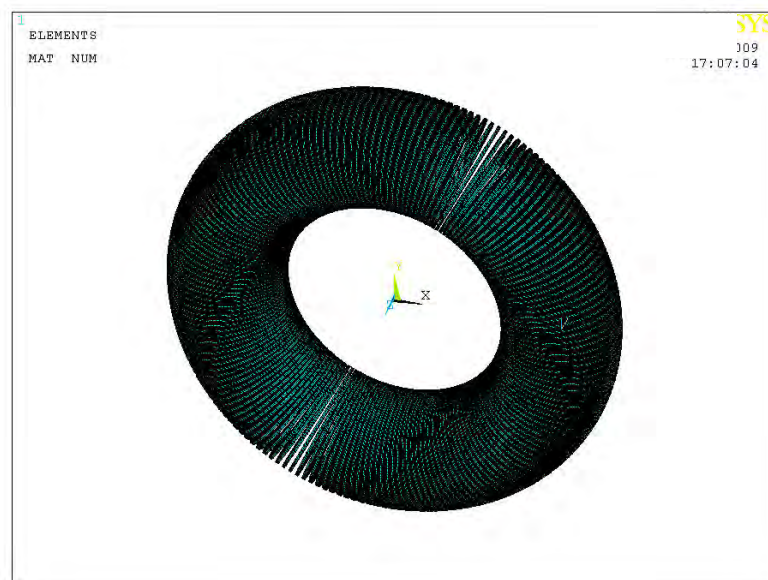


図 2.1.4-2-5 要素コイルを 180 個配置した外観

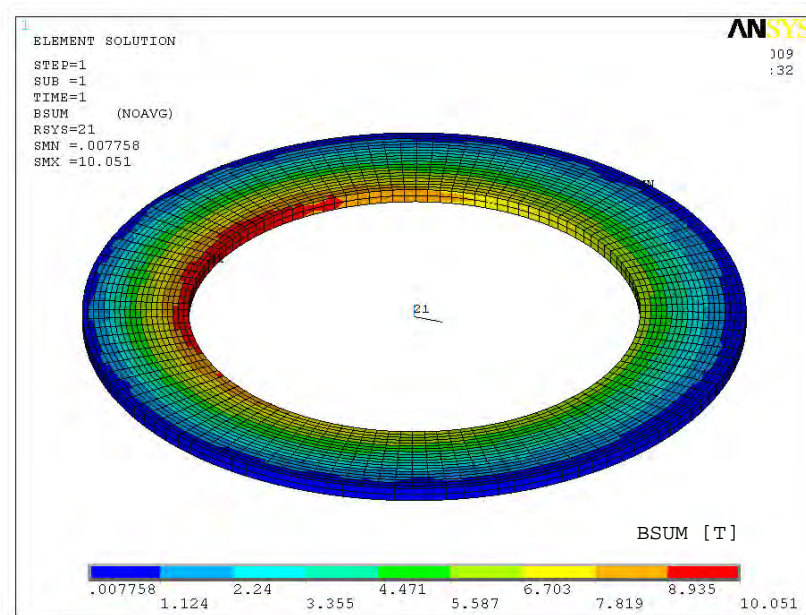


図 2.1.4-2-6 要素コイルの磁束密度分布

(3) トロイダル型コイルの機械強度評価

コイルの支持構造は、コイル間サポートとコイル中心サポートとで隣接コイル同士を支えあう構造とした。支持構造の構成を図 2.1.4-2-7 に示す。以下に考慮したポイントごとに検討した内容をまとめる。

a. 向心力

励磁により定常的にコイルに生じる向心力は、トロイダル周方向の圧縮力で保持される。したがって支持部材はこの圧縮力に耐えられるように、面積を確保する必要がある。以下に、圧縮力を支持する 2 つの方法について検討する。

要素コイル間に「コイル側面サポート」を入れ、向心力をコイル側面（ $\phi 1904 - \phi 2796$ のドーナツ型、 3.3 m^2 ）で支持する方法が考えられる。その場合、圧縮力 $F=106 \text{ MN}$ ($3.71 \text{ MN}=F \cos 89 \text{ 度} \times 2$) が加わり、面圧は 32 MPa になる。これは FRP の強度で耐えられる値である。

コイル巻枠の側面で圧縮力を受ける方法もあるが、同等の面圧にするには、直径 $\phi 1700 \text{ mm}$ 程度の巻枠内側全体を支持体で埋める必要がある。この「コイル中心サポート」で圧縮力を受けると、面圧は 46 MPa になる。コイル側面サポートに加えてこの巻枠内側のコイル中心サポートを併用することで、面圧を低減することができる。ただし、コイル中心サポートは巻線部の内径側（高負荷率）部分に圧縮力を与えることになる。コイル内側は高磁場であり渦電流による発熱が問題になる可能性があるため、材質は FRP とする。

b. 転倒力

コイル間隔の製作誤差があった場合や保護時などの不均衡なコイル電流が発生した場合には、コイルに転倒力が発生するため、その支持構造が必要となる。この転倒力に対しても、前述のコイル側面サポートが有効である。

c. せん断力

トロイダル配置の外側方向成分の力により、くさび型の面（ウェッジ）の摩擦力が低いとすべりが生じる。コイル間サポートの面積に向心力がほぼ水平に加わるとき、せん断応力は 0.6 MPa になる。これは、コイル側面とコイル側面サポートとの摩擦力（接着力）で保持できる値であると考えられる。

また、製造寸法誤差の影響で要素コイルがトロイダル配置の θ 方向にずれた場合にはコイル間の吸引力が、 r 、 z 各方向にずれた場合にはコイル側面にせん断力が生じる。これらもコイルとコイル間サポートとの接着力で拘束させる。

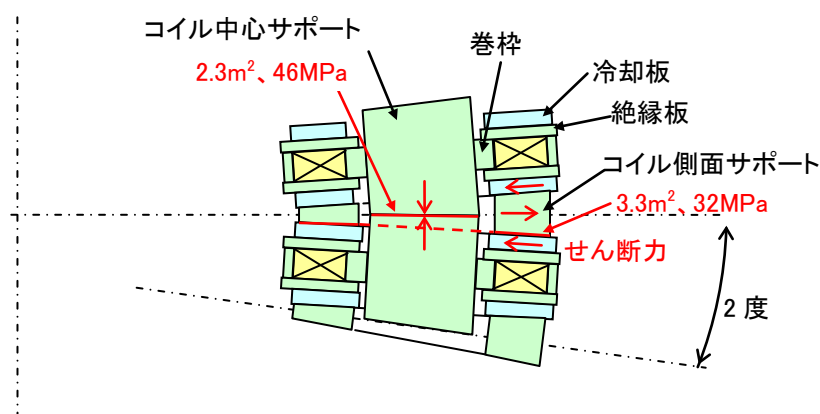


図 2.1.4-2-7 支持構造の構成（圧縮応力はそれぞれ単独での値）

コイル構造および支持構造について解析モデルをもとに r 方向・ θ 方向・ z 方向の応力、トロイダル半径方向変位量について評価した。解析モデルの全体図を図 2.1.4-2-8 に、モデルの構成を図 2.1.4-2-9 に示す。巻棒の厚さは 100 mm とした。なお、解析ケースは以下の 4 通りで実施した。

- 解析ケース (1) : コイル中心サポートあり、巻棒あり
- 解析ケース (2) : コイル中心サポートなし、巻棒あり
- 解析ケース (3) : コイル中心サポートなし、巻棒なし
- 解析ケース (4) : コイル中心サポートなし、巻棒なし、
コイル側面サポートの物性値変更

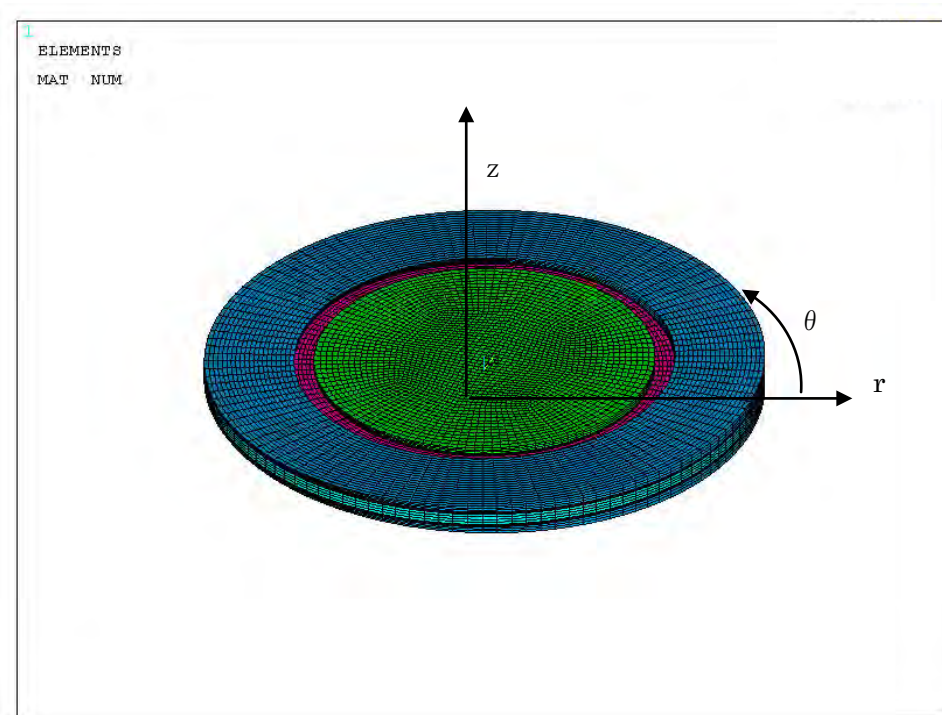


図 2.1.4-2-8 解析モデルの全体図

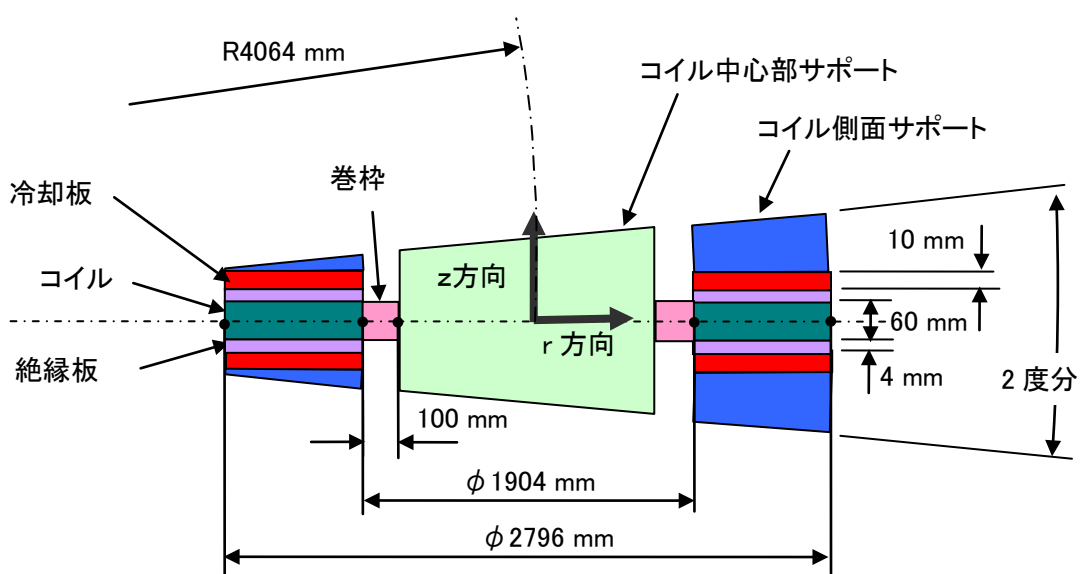


図 2.1.4-2-9 解析モデルの構成 (断面図)

Y系超電導線材の剥離方向の力となるために最も懸念されたコイルのr方向の引張り応力に関しては、「コイル中心サポートなし、巻枠なし、コイル側面サポートの材質をFRP-B」とした場合が2MPaと最も小さくなり、支持構造として適していると考えられる。このケースでの他の応力成分は、コイルのθ方向の最大引張り応力は251MPa（Y系超電導線材に換算して460MPa）、最大圧縮応力は-123

MPa、コイル z 方向の最大引張り応力は 130 MPa、最大圧縮応力は、-100 MPa となった。

また、要素コイルが完全に設計図どおりに配置されず、製造寸法誤差などが原因でずれた場合にコイルに加わる電磁力についても評価したが、問題ないレベルであることが確認された。

(4) 結果

2 GJ 級コイルの概念設計結果を基にして、要素コイル 180 個からなるトロイダルコイルの基本電気設計を行った。要素コイルの間に必要な、電気絶縁、冷却手段、機械的サポートなどの構成要素を検討し、それらの寸法制約からトロイダル中心半径とコイル内半径を調節して、蓄積エネルギー 2.4 GJ のコイルの基本設計を得た。

2 GJ 級 SMES 用高強度コイルとしてのトロイダル型 Y 系コイル構造の成立性を確認するため、向心力、フープ応力などを考慮して支持構造を仮定し、構造解析を実施した。その結果、Y 系超電導線材の剥離方向の力となるために最も懸念されたコイルの r 方向の引張り応力に関して、最も小さい場合で 2 MPa となり、Y 系 SMES コイルの支持構造として実現可能と考えられる。

2.1.4-3 システム安定性に関する検討（中部電力、早稲田大学）

(1) 研究開発目的

大容量 SMES では、漏れ磁束を少なくし、磁気エネルギーを効率よく蓄積するために、複数のコイルをトロイダル配置することが想定される。超電導コイルでは、1 つのコイルに何らかの異常が発生した場合、保護のため、外部抵抗によってそのコイルのエネルギーをダンプすることになる。コイルをトロイダル配置すると、1 つのコイルをダンプした場合、他のコイルを永久電流モードのままにしておくと、ダンプするコイルの電流減衰による誘導電流が重畳されることとなる。こうしたトロイダル配置の SMES コイルシステムにおいて、1 個あるいは複数のコイルが保護動作に入った場合の他のコイルの挙動を解析し、システムとしての安定性について評価した。

(2) トロイダルコイルシステムの安定性

解析評価に用いたコイルの諸元を表 2.1.4-3-1、表 2.1.4-3-2 に示す。パンケーキコイル 4 段を要素コイルとし、それを 180 個トロイダル配置する。図 2.1.4-3-1 にインダクタンスの計算結果を示す。

表 2.1.4-3-1 2 GJ 級 SMES 用トロイダルコイル諸元

要素コイル内半径	1.0 m
要素コイル外半径	1.4 m
要素コイル高さ	0.06 m (15mm × 4 layers)
1ターン幅	15 mm
1ターン厚(補強材)	1.10 mm (0.85 mm)
導体構成	4枚バンドル(導体厚4.4mm)
ターン数	364 (91 turns × 4 bundles)

表 2.1.4-3-2 2 GJ 級 SMES 用トロイダル要素コイル諸元

運転温度	20 K
要素コイル	180
位置(トロイダル中心半径)	3.7 m
要素コイル内半径	1.0 m
要素コイル外半径	1.4 m
要素コイル高さ	0.06 m
通電電流@素線	540 A

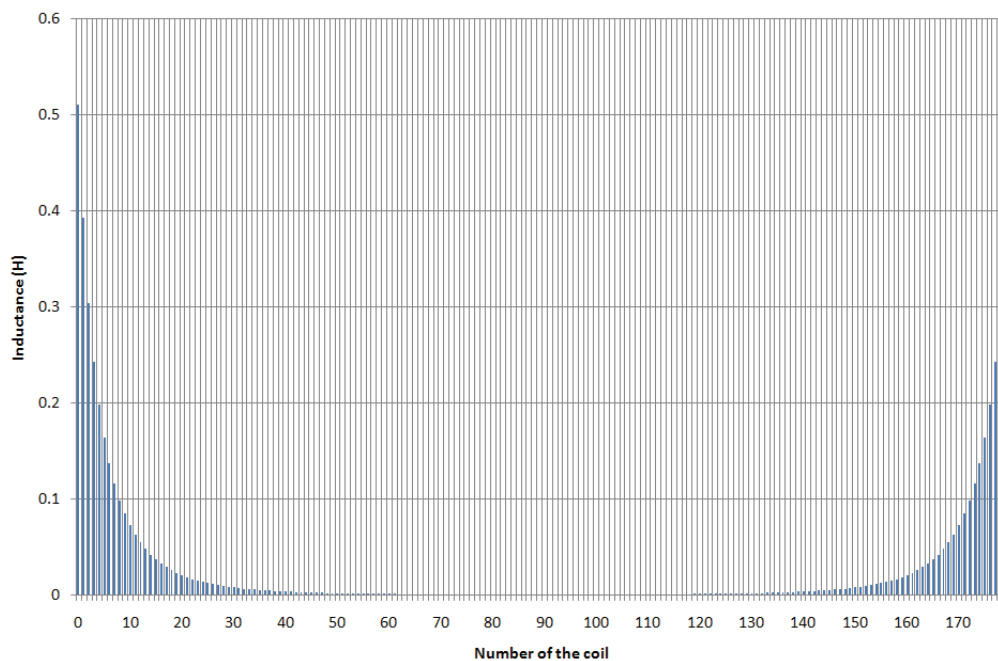


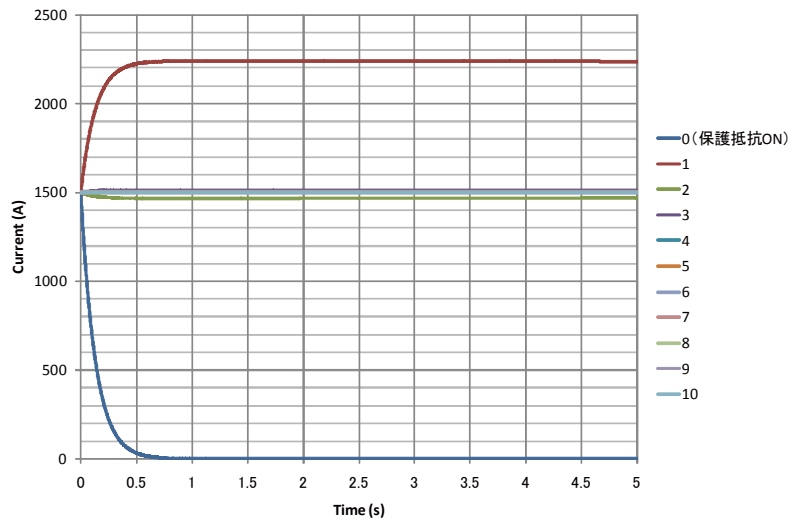
図 2.1.4-3-1 トロイダル要素コイルの各インダクタンス

a. 永久電流モード

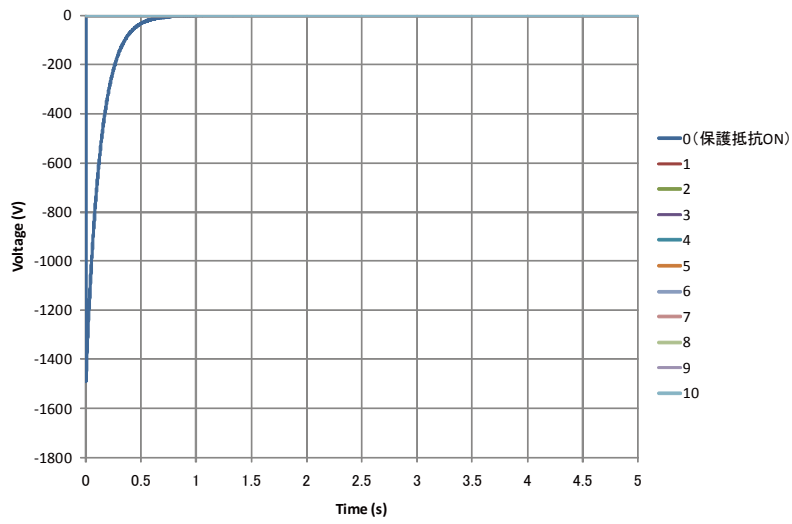
180 個のコイルが独立に電流 1500 A (素線 375 A × 4 枚バンドル) で永久電流モードにあるとする。その状態から、いくつかのコイルが外部抵抗保護モード (抵抗 1 Ω で閉ループ)、他のコイルがそのまま永久電流モード (0 Ω で閉ループ、超電導状態を維持) の場合、各コイルの電流、電圧変化を回路方程式と熱解析も連成し

て計算した。Y系超電導線材は幅 1cm、ハステロイ厚さ 100 μm 、銅層厚さ 100 μm で 4 枚バンドル、 $I_c=2160\text{ A}$ (@20 K、0.05 $\mu\text{V/cm}$ 基準)、 $n=30$ とした。 I_c の温度依存性と銅層抵抗の温度依存性を考慮したが、磁場依存性は考慮していない。また、交流損失は考慮していない。熱解析においては、銅とハステロイTM の熱容量の温度依存性を考慮した。

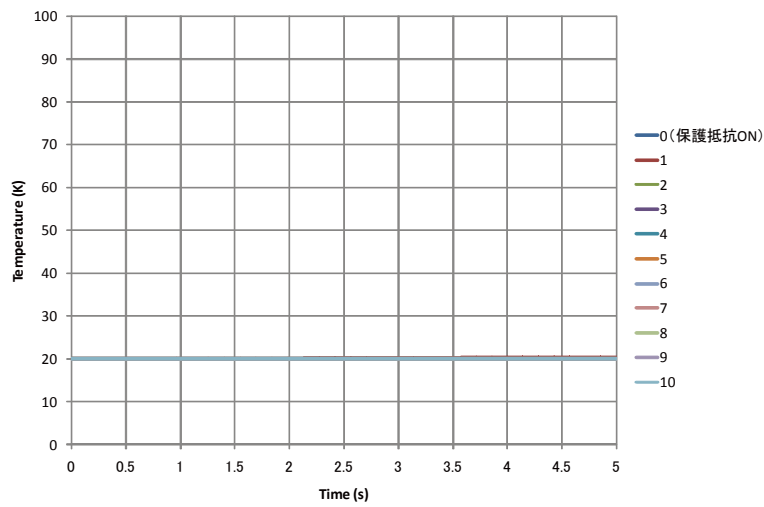
コイル 1 個および 5 個ダンプした場合の計算結果をそれぞれ図 2.1.4-3-2、図 2.1.4-3-3 に示す。1 つのコイルが保護動作を開始したとき、隣のコイルの超電導状態が維持される限り、磁場の変化はそのコイルでほとんど遮へいされるため、隣のコイルの電流が 1.5 kA から 2.2 kA に増加する。増加した場合でも超電導状態は維持される。2 つ以上のコイルが保護動作に入った場合、1 つ隣のコイルの電流上昇が大きいため、超電導状態が維持できなくなる。従って、コイル自身の抵抗によって、電流減衰が始まる。その結果、2 つ隣のコイルの電流が上昇する。以下、クエンチが次から次へとコイルに伝播していく。



(a) 電流

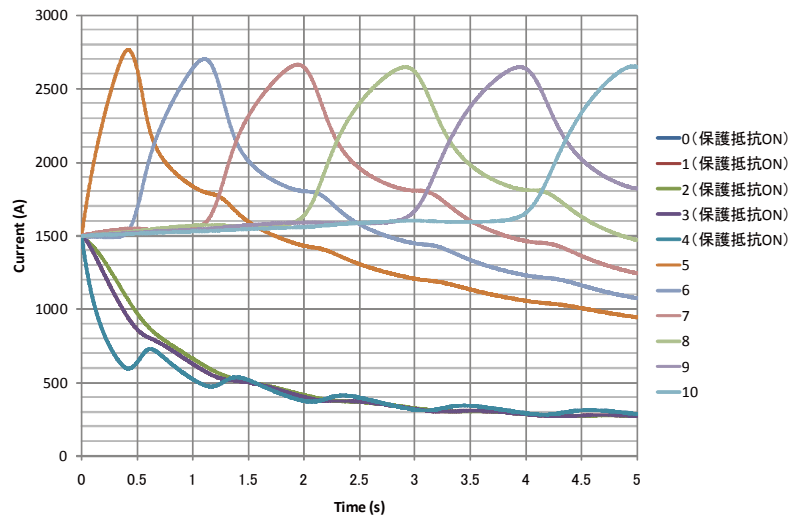


(b) 電圧

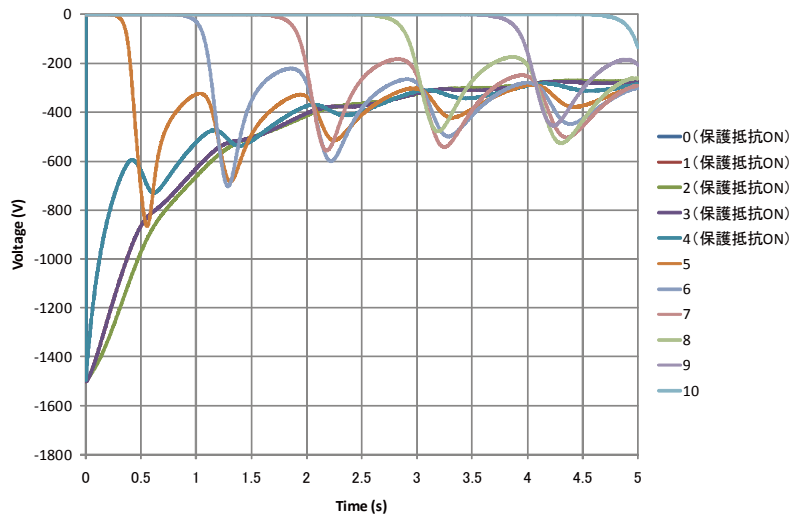


(c) 温度

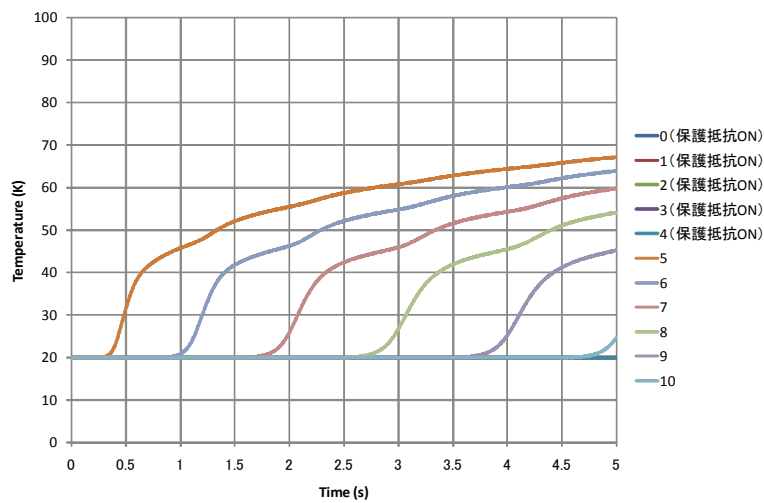
図 2.1.4-3-2 永久電流モード運転の場合の保護動作時の電流・電圧・温度変化 (コイル 1 個をダンプ)



(a) 電流



(b) 電圧



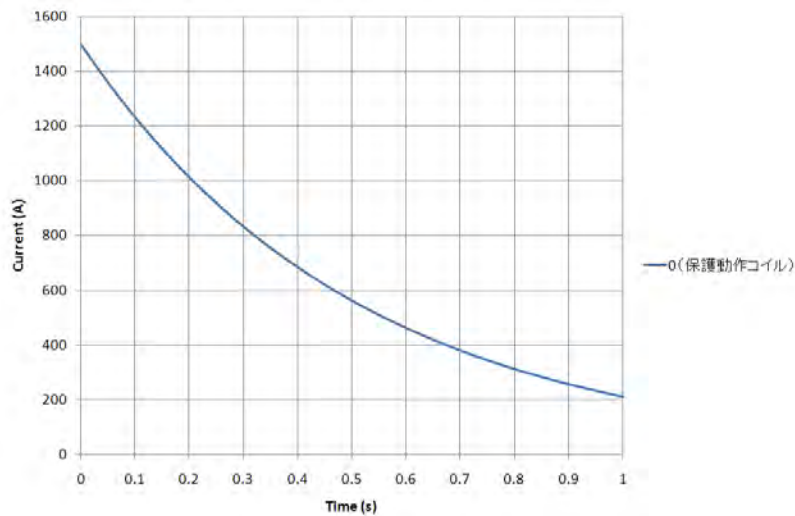
(c) 温度

図 2.1.4-3-3 永久電流モード運転の場合の保護動作時の電流・電圧・温度変化 (コイル 5 個をダンプ)

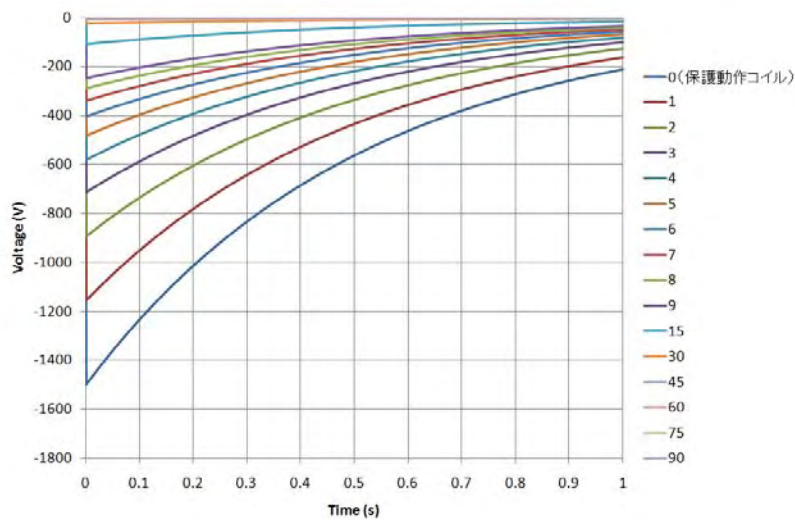
b. 定電流モード

180個のコイルが独立に電流 1500 A ($375 \text{ A} \times 4$) で定電流モードにあるとする。1つのコイルがある時定数 (1 Ω 相当) で強制減衰し、他のコイルはそのまま定電流モードを維持した場合の、各コイルの電流、電圧の変化を求めた。

結果を図 2.1.4-3-4 に示す。各コイルは、ダンプするコイル以外は、定電流であるため、そのコイルとの誘導成分の電圧が発生する。この結果から、1つのコイルが保護モードの入った場合、他のコイルが定電流を維持できれば、最大発生電圧は保護動作中のコイルで 1.5 kV、隣のコイルで 1.15 kV であることがわかる。



(a) 電流



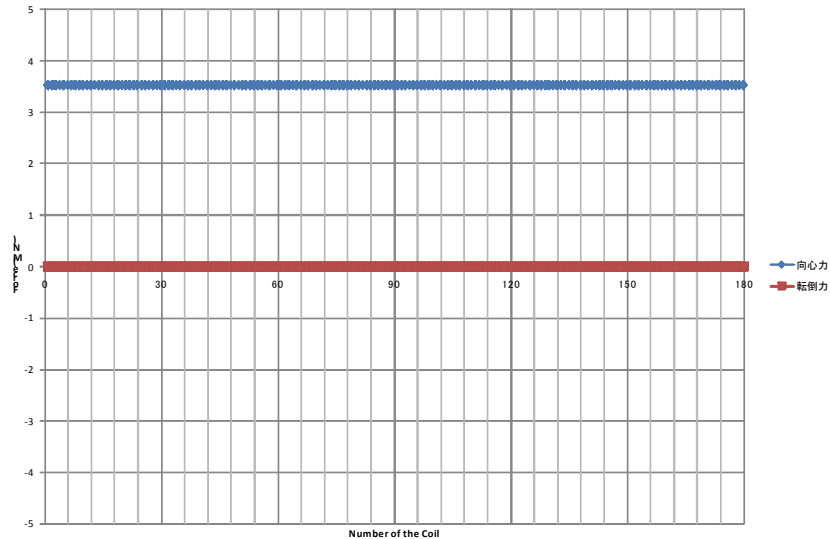
(b) 電圧

図 2.1.4-3-4 定電流モード運転の場合の保護動作時の電流・電圧変化

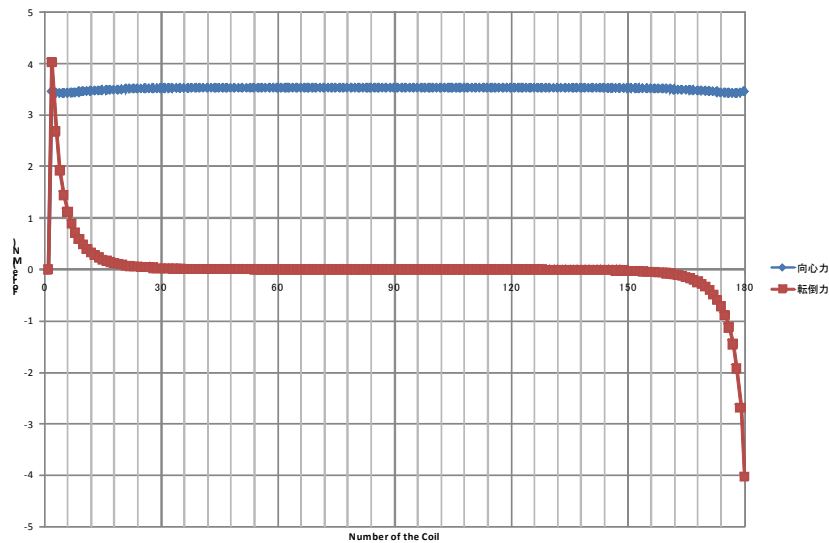
c. コイルに作用する転倒力

コイルをトロイダル配置した場合、すべてのコイルに同じ電流が流れていれば、転倒力は発生しない。しかし、これまで述べてきたような保護動作によって1つのコイルがダンプすると、力の平衡がくずれて、転倒力が発生する。図 2.1.4-3-5 に

定常運転時と保護動作時の向心力および転倒力の計算結果を示す。定常運転時、向心力は 3.5 MN、転倒力は 0 MN であるが、保護動作時は、向心力は 3.5 MN、転倒力は 4 MN が発生する。



(a) 定常時



(b) 保護動作時

図 2.1.4-3-5 定常運転時と保護動作時の向心力および転倒力

(3) 結果

大容量 SMES 用トロイダル配置のコイルにおいて、いくつかのコイルが保護動作に入った場合の他のコイルの挙動を回路解析によって評価した。その結果、永久電流モードにおいて運転する場合は、隣接コイルの電流が増加するため、そのマージンを考慮した保護システムを構築する必要がある。変換器と要素コイルを 1 対 1 で構成するような定電流モードにおいて運転することができる場合は、保護動作時においても隣接コイルの誘導電圧は低く抑えられることが確認された。また、トロイダル配置において、いくつかのコイルが保護動作に入った場合、不平衡荷重によ

り転倒力が作用するが、解析結果、問題ないレベルであることが確認された。

2.1.4-4 クエンチ検出・保護方法に関する検討（中部電力、早稲田大学）

(1) 研究開発目的

コイルのクエンチ検出は、一般にコイル端子間電圧を監視することにより行われる。コイル内の常電導部で発生した電圧が一定の閾値を超えるとクエンチが発生したと判断される。HTS 線材・コイルは、LTS に比べて圧倒的に高い熱的安定性を有しているが、何らかの要因で常電導転移が発生すると、常電導領域の伝播が極めて遅いため、局所的な温度上昇発生の可能性がある。一方、集合導体内の素線は結合損失を抑制するために、絶縁を施しており、常電導発生後の転流は接続部で発生する。この転流による電圧は非常に微小で数 mV レベルであるため、検出は困難である。また、SMES の運転を想定した場合、変換器などのノイズレベルによっては常電導による発生電圧が埋もれてしまって、検出が困難になることが考えられる。したがって、素線絶縁を施した集合導体コイルのクエンチ検出は電圧を監視する方法では困難であるため、新たな検出法について検討した。

(2) クエンチ時の集合導体コイルの挙動

集合導体は、素線間絶縁を施しているため、線材の途中で他の線材に転流せず、線材端部でのみ転流が起きる。従って、素線レベルの自己および相互インダクタンス L 、 M を集中定数で与えた。熱解析は有限要素法を用いて、電流分布解析と連成することで、発熱分布を考慮できるようにした。冷却条件は断熱とした。運転温度は 20 K とし、導体を構成する 4 枚の線材 1 枚で長手方向に 1 cm 劣化した場合 ($I_c = 0$) の常電導伝播特性を解析した。なお、計算は線材の温度が 400 K になった時点で終了した。

a. 待機状態 1680 A（1 枚当たり 420 A）通電

待機状態 1680 A（1 枚当たり 420 A）通電時に線材 1 枚（Tape 1）で 1 cm の劣化が発生した場合について、各素線の電流および両端電圧と温度を計算した。図 2.1.4-4-1 に導体および各線材に流れる電流、各線材の劣化部の温度、導体および各線材両端に発生する電圧を示す。図 2.1.4-4-1(a) より、10 秒程度で劣化が発生した Tape 1 の電流が約 200 A 減衰し、他の線材に転流するが、Tape 2、4 の電流が線材の I_c に到達し、Tape 3 に転流が始まる。転流が起きている間、両端電圧はほとんど発生しない。この時点で線材の劣化部の温度は図 2.1.4-4-1 (c) より、約 30 K である。100 秒後には、電流の変化がなくなり、Tape 2、3、4 の電流値が同じになる。その後、170 秒で Tape 2、3、4 の電流が減衰し、Tape 1 に転流が始まる。これは、Tape 2、3、4 で温度が徐々に上昇し、 I_c が下がり、抵抗が発生したためである。この後、図 2.1.4-4-1 (b) のように導体両端の電圧が急上昇する。このとき、

0.1 V 発生時で 120 K、0.5 V 発生時で 245 K である。

b. ピーク状態 2160 A (1 枚当たり 540 A) 通電

動作ピーク時に相当する 2160 A (540 A/tape) 一定で通電し続けた際、線材 1 枚 (Tape 1) で 1 cm の劣化が発生した場合について、各素線の電流および両端電圧と温度を計算した。図 2.1.4-4-2 に導体および各線材に流れる電流、各線材の劣化部の温度、導体および各線材両端に発生する電圧を示す。図 2.1.4-4-2 (a) より、3 秒程度で劣化が発生した Tape 1 の電流が約 100 A 減衰し、他の線材に転流するが、Tape 2、4 の電流が線材の I_C に到達し、Tape 3 に転流が始まる。この時点で線材の劣化部の温度は図 2.1.4-4-2 (c) より、約 30 K である。その後、10 秒で Tape 2、3、4 の電流が減衰し、Tape 1 に転流が始まる。これは、Tape 2、3、4 で温度が徐々に上昇し、 I_C が下がり、抵抗が発生したためである。この後、図 2.1.4-4-2 (b) のように導体両端の電圧が急上昇する。このとき、0.1 V 発生時で 115 K、0.5 V 発生時で 228 K である。

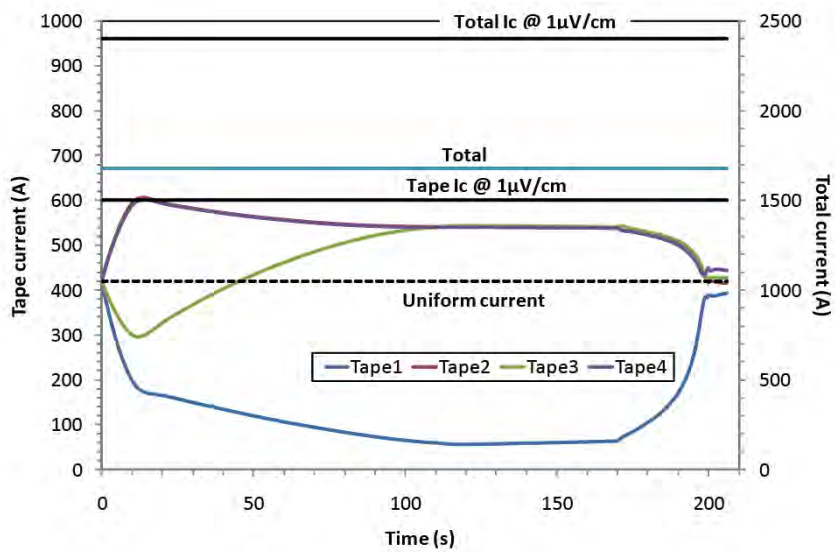
c. 系統安定化運転

系統安定化 SMES の運転パターン (1680 A \Rightarrow 2160 A \Rightarrow 1680 A の 3 秒周期の三角波パルス を 5 回) を通電する際、最初のパルスが入った時に、線材 1 枚 (Tape 1) で 1 cm の劣化が発生した場合について、各素線の電流および両端電圧と温度を計算した。図 2.1.4-4-3 に導体および各線材に流れる電流、各線材の劣化部の温度、導体および各線材両端に発生する電圧を示す。図 2.1.4-4-3 (a) より、パルス通電中に転流が発生し、パルス終了後に、20 秒程度で劣化が発生した Tape 1 の電流が約 200 A 減衰する。その後、Tape 2、4 の電流が Tape 3 に転流する。この時点で線材の劣化部の温度は図 2.1.4-4-3 (c) より、約 30 K である。その後、110 秒で Tape 2、3、4 の電流が減衰し、Tape 1 に転流が始まる。これは、Tape 2、3、4 で温度が徐々に上昇し、 I_C が下がり、抵抗が発生したためである。この後、図 2.1.4-4-3 (b) のように導体両端の電圧が急上昇する。このとき、0.1 V 発生時で 115 K、0.5 V 発生時で 228 K である。

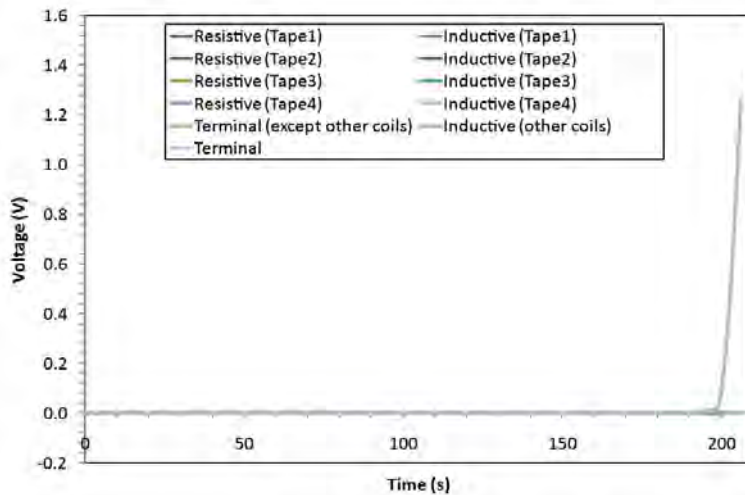
d. 負荷変動補償運転

負荷変動補償 SMES の運転パターン (1680 A \Rightarrow 2160 A \Rightarrow 1680 A の 18 秒周期の三角波パルスの繰り返し) を通電する際、最初のパルスが入った時に、線材 1 枚 (Tape 1) で 1 cm の劣化が発生した場合について、各素線の電流および両端電圧と温度を計算した。図 2.1.4-4-4 に導体および各線材に流れる電流、各線材の劣化部の温度、導体および各線材両端に発生する電圧を示す。図 2.1.4-4-4 (a) より、パルス通電中に転流が発生し、パルス終了後に、5 秒程度で劣化が発生した Tape 1 の電流が約 100 A 減衰する。その後、Tape 2、4 の電流が Tape 3 に転流する。この時点で線材の劣化部の温度は図 2.1.4-4-4 (c) より、約 30 K である。その後、25 秒で Tape 2、3、4 の電流が減衰し、Tape 1 に転流が始まる。これは、Tape 2、3、

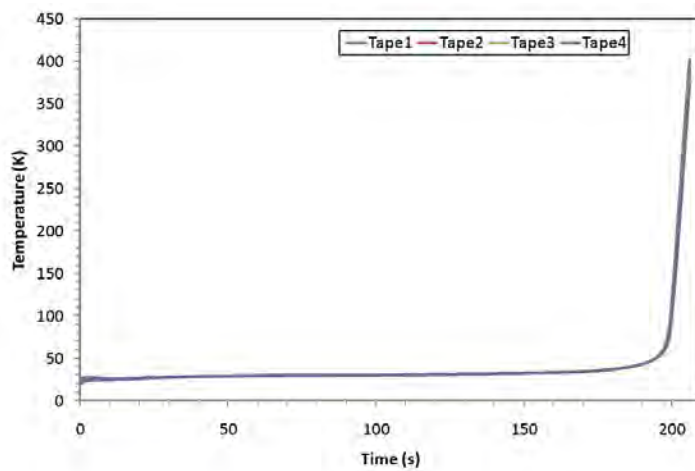
4で温度が徐々に上昇し、 I_C が下がり、抵抗が発生したためである。この後、通電電流は減衰しているものの、図 2.1.4-4-4 (b)のように導体両端の抵抗性電圧は急上昇する。ただし、導体の全電圧は 100 V 級の誘導性電圧が重畳されるためこのとき、ほとんど変化は見られない。抵抗性電圧が 0.1 V 発生時で線材温度は 130 K、0.5 V 発生時で 250 K である。



(a) 集合導体の電流

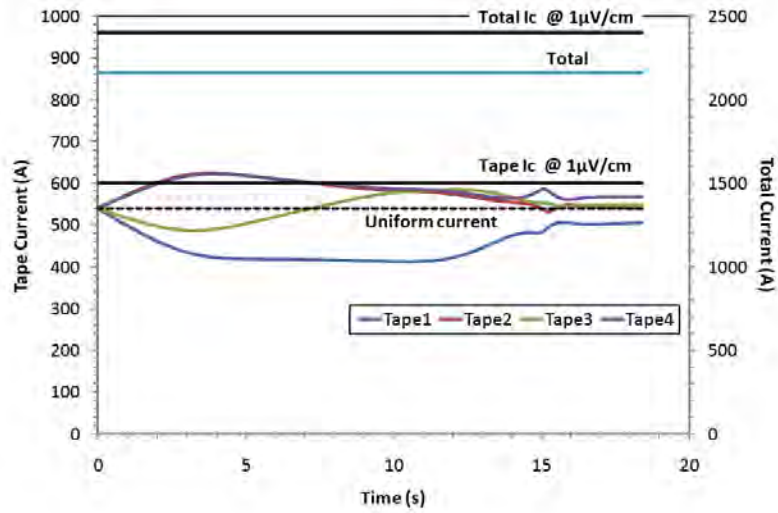


(b) 電圧

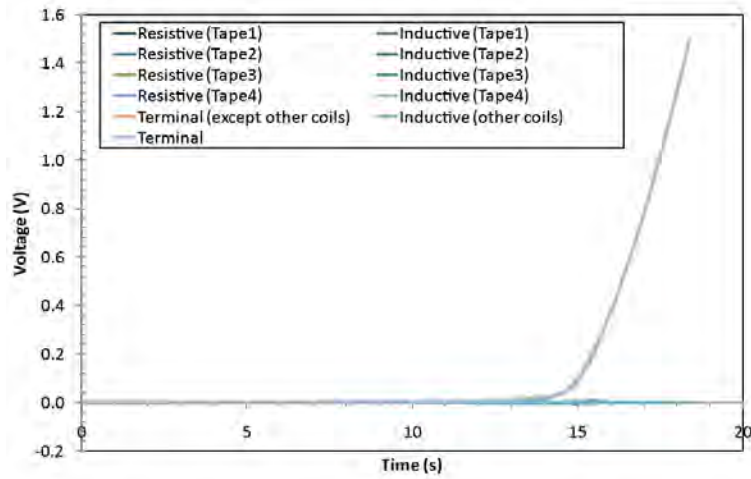


(c) 劣化部の温度

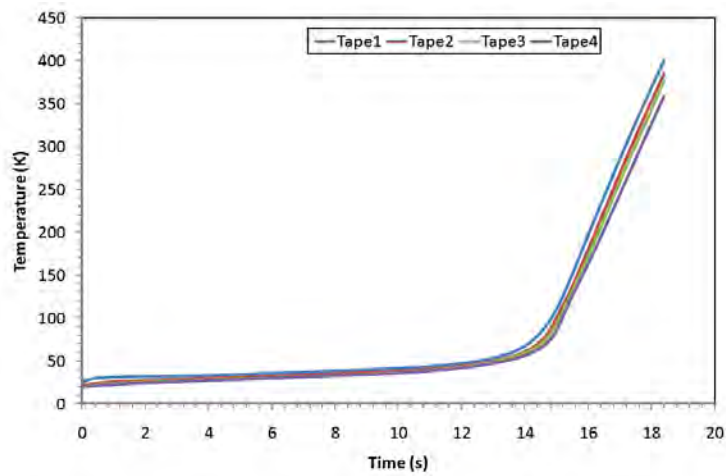
図 2.1.4-4-1 待機状態 1680 A (1 枚当たり 420 A) 通電時に線材 1 枚で 1 cm の劣化が発生した場合の集合導体内の電流分布、電圧、温度



(a) 集合導体の電流

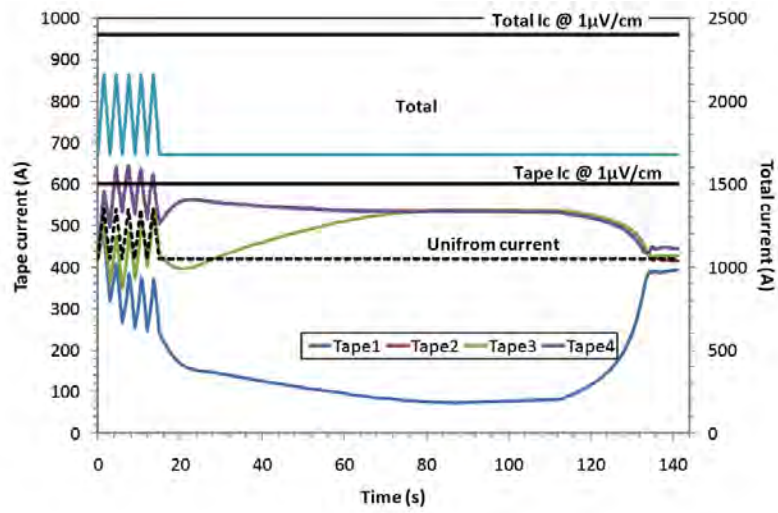


(b) 電圧

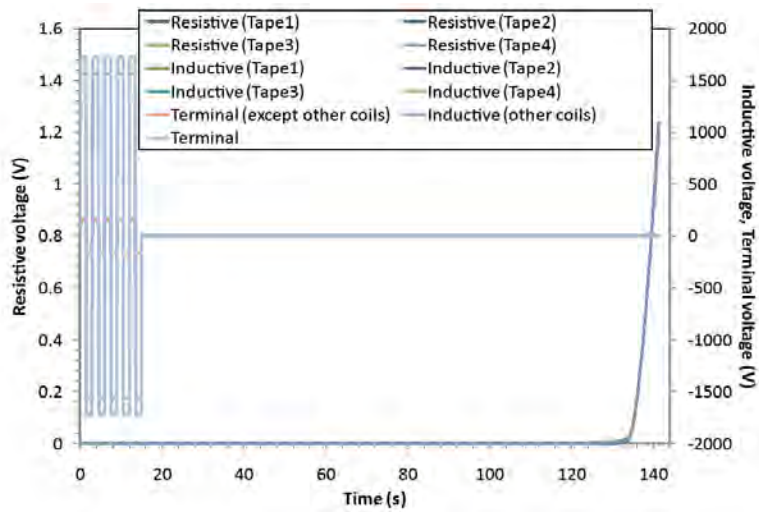


(c) 劣化部の温度

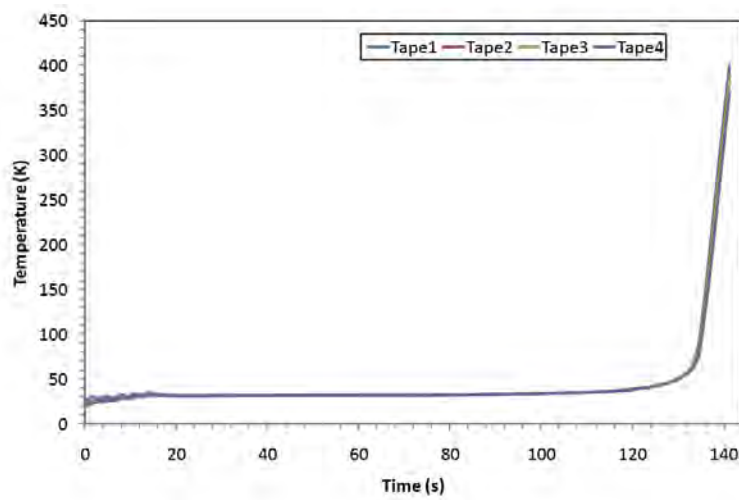
図 2.1.4-4-2 ピーク状態 2160 A (1 枚当たり 540 A) 通電時に線材 1 枚で 1 cm の劣化が発生した場合の集合導体内の電流分布、電圧、温度



(a) 集合導体の電流

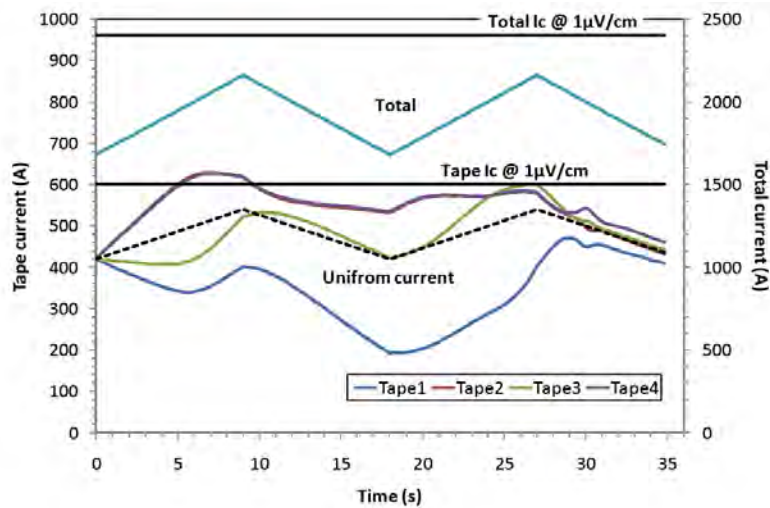


(b) 電圧

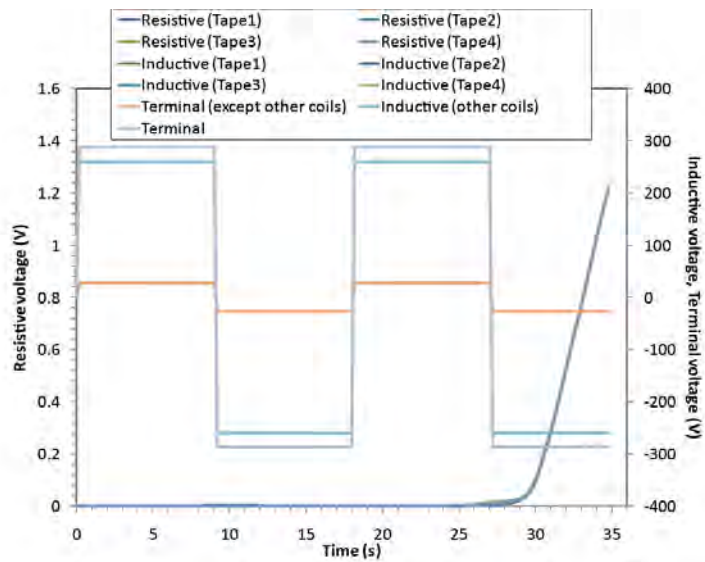


(c) 劣化部の温度

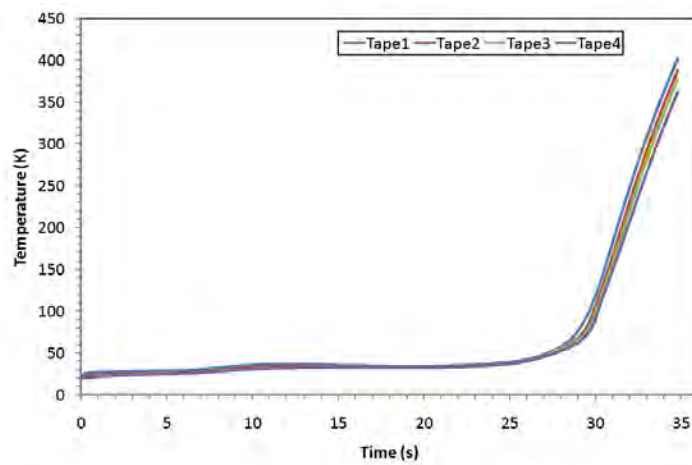
図 2.1.4-4-3 系統安定化運転時に線材 1 枚で 1 cm の劣化が発生した場合の集合導体内の電流分布、電圧、温度



(a) 集合導体の電流



(b) 電圧



(c) 劣化部の温度

図 2.1.4-4-4 負荷変動補償運転時に線材 1 枚で 1 cm の劣化が発生した場合の集合導体内の電流分布、電圧、温度

(3) クエンチ検出方法の検討

「(2) クエンチ時の集合導体コイルの挙動」で述べたように素線絶縁を施した集合導体内で、ある素線で常電導領域が発生しても、転流は速やかに発生する。ここで発生する転流を監視すれば、クエンチの検出が可能になると考えられる。そこで、集合導体内の素線 1 枚で常電導が発生した場合と同様に 2～4 枚で常伝導が発生した場合についても評価し、表 2.1.4-4-1 に偏流（導体内の素線の最大電流と最小電流の差）が 100 A になるまでの時間と温度を示す。これによると、偏流 100 A を検出した時点で、常電導部の温度は 30～40 K である。積層導体内の素線で常電導領域が発生しても、偏流によってクエンチ検出が可能と考えられる。

一方、抵抗性電圧が 0.1 V 発生するのにかかる時間とその時の温度を表 2.1.4-4-2 に示す。偏流によるクエンチ検出は 4 枚の線材で発生する常電導領域の抵抗の差がある場合に有効である。しかしながら、抵抗の差がない場合、特に 4 枚の線材で全く同じ常電導領域が発生した場合、偏流は発生しない。この場合は電圧検出を利用することになる。表 2.1.4-4-2 より、0.1 V 発生時の線材の温度は 120～150 K となる。

以上の結果を踏まえ、既に提案している「外部保護抵抗によるエネルギー回収に基づく安定化層厚の決定法」によって、必要な安定化層厚を求めることが可能となる。

表 2.1.4-4-1 線材に 1 cm の劣化が発生した場合の集合導体内で偏流 100 A 時点の温度

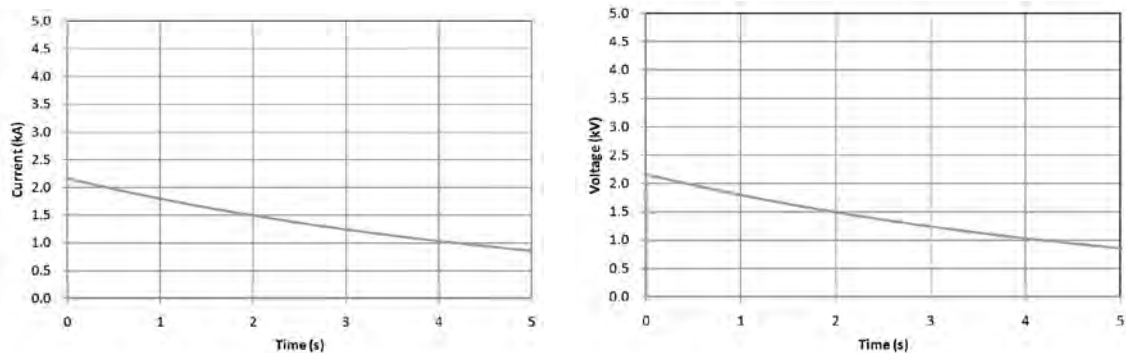
	1 枚劣化	2 枚劣化	3 枚劣化	4 枚劣化
待機状態	1.85 s 27 K	6.75 s 37 K	1.95 s 34 K	偏流なし
ピーク状態	1.45 s 31 K	3.80 s 46 K	1.50 s 41 K	偏流なし
系統安定化	1.60 s 30 K	5.10 s 43 K	1.70 s 39 K	偏流なし
負荷変動補償	1.80 s 28 K	5.85 s 41 K	2.00 s 36 K	偏流なし

表 2.1.4-4-2 線材に 1 cm の劣化が発生した場合の集合導体内で抵抗性電圧 0.1 V 時点の温度

	1 枚劣化	2 枚劣化	3 枚劣化	4 枚劣化
待機状態	200 s 118 K	32.2 s 127 K	18.1 s 133 K	13.4 s 136 K
ピーク状態	15.1 s 117 K	8.5 s 125 K	5.8 s 131 K	4.8 s 134 K
系統安定化	135 s 119 K	15.1 s 132 K	9.8 s 135 K	7.4 s 138 K
負荷変動補償	30.0 s 119 K	13.0 s 138 K	9.6 s 149 K	8.0 s 139 K

(4) トロイダル型集合導体コイルの保護

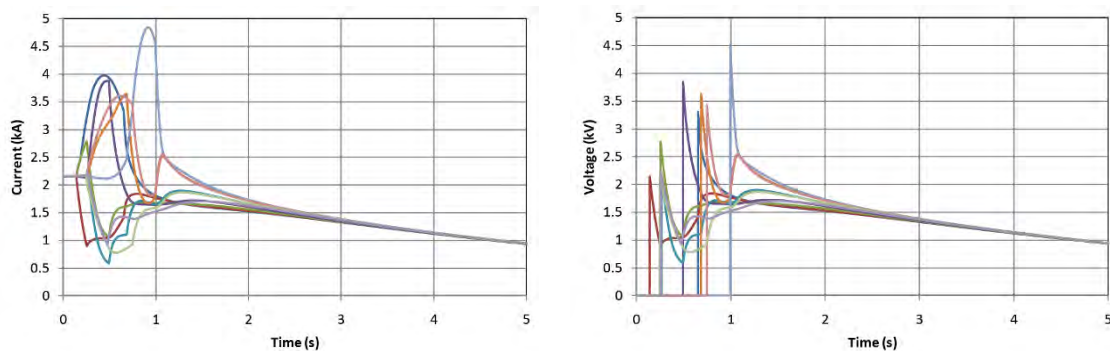
現在、想定されている 2 GJ 級 SMES では 180 個のパンケーキコイルが系統から見ると変換器を介して並列に接続されている。例えば、コイルが永久電流モードの状態では 1 つのコイルでクエンチが検出され、外部抵抗でエネルギーを回収する場合、隣のコイルに電流が誘導され、運転電流に重畳されることになる。さらに、180 個のコイルが完全に同時ダンプすれば、図 2.1.4-4-5 のように全てのコイルが同じ電流・電圧でエネルギー回収がなされるが、ダンプ開始にばらつきがあれば、ダンプ開始が遅れたコイルでは電流が重畳された状態でエネルギー回収が開始するため、コイル両端電圧 ($V = R_{ext}I$) は図 2.1.4-4-6 のように運転電流で想定される値よりも大きくなる。したがって、重畳される電流値が耐絶縁電圧 $V_{max} = R_{ext}I$ を超えない時間内に 180 個のコイルがエネルギー回収を始める必要がある。ダンプ抵抗 R_{ext} が小さい方が、重畳される電流値が許容値を超える時間に余裕ができるが、エネルギー回収時定数が長くなる。



(a) Current

(b) Voltage

図 2.1.4-4-5 トロイダルコイルにおいて全てのコイルが同期してダンプした場合の電流および電圧変化



(a) Current

(b) Voltage

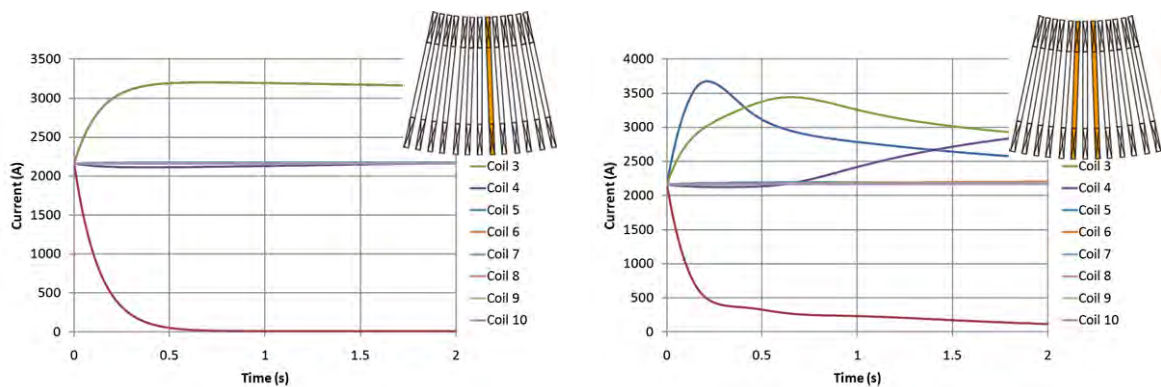
図 2.1.4-4-6 トロイダルコイルにおいてダンプのタイミングがずれた場合の電流および電圧変化

a. 誘導電流

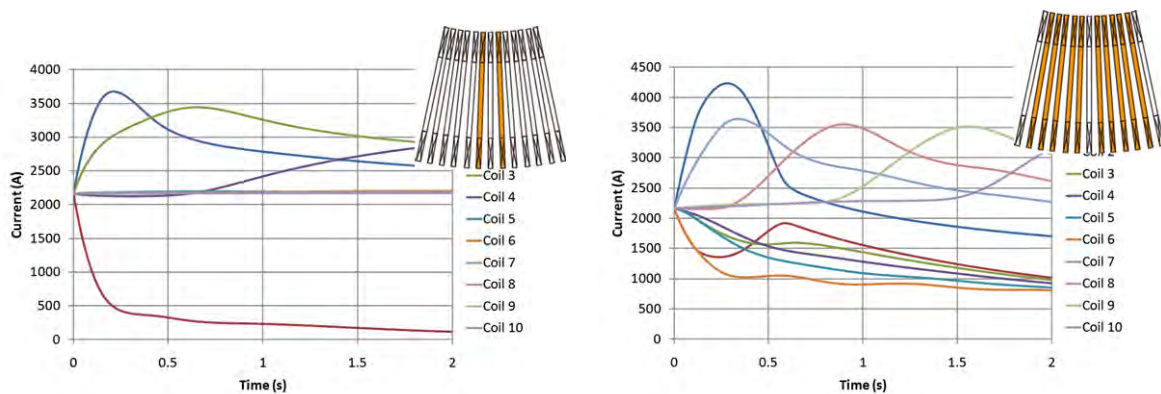
解析結果の一例として、保護抵抗 1.0Ω で1個、2個、4個、10個のコイルがダンプした場合の電流変化を図 2.1.4-4-7 に示す。1個のコイルがダンプした場合、隣のコイルの超電導状態が維持される限り、磁場の変化はほとんど遮へいされるため、隣のコイルの電流が 2.16 kA から 3.2 kA に増加する。しかし、温度上昇はないため、クエンチせずとその状態で電流が流れ続ける。一方、2個以上のコイルがダンプした場合、健全なコイルに誘導される電流が I_c を超えるため、コイル自身の抵抗によって、電流減衰が始まる。その結果、さらに隣のコイルの電流が上昇する。以下、クエンチが次から次へとコイルに伝播していく。10個のコイルがダンプした場合、電流のピーク値は 4.3 kA となる。

b. 向心力および転倒力

解析例として、保護抵抗 1.0Ω で1個、2個、4個、10個のコイルがダンプした場合の向心力および転倒力を図 2.1.4-4-8、2.1.4-4-9 に示す。1個のコイルがダンプした場合、向心力は 5.2 MN 、転倒力は 4 MN 発生する。ダンプするコイルの数が増えると、向心力、転倒力ともに増加する。10個のコイルがダンプした場合、向心力は 6.8 MN 、転倒力は 12 MN 発生する。

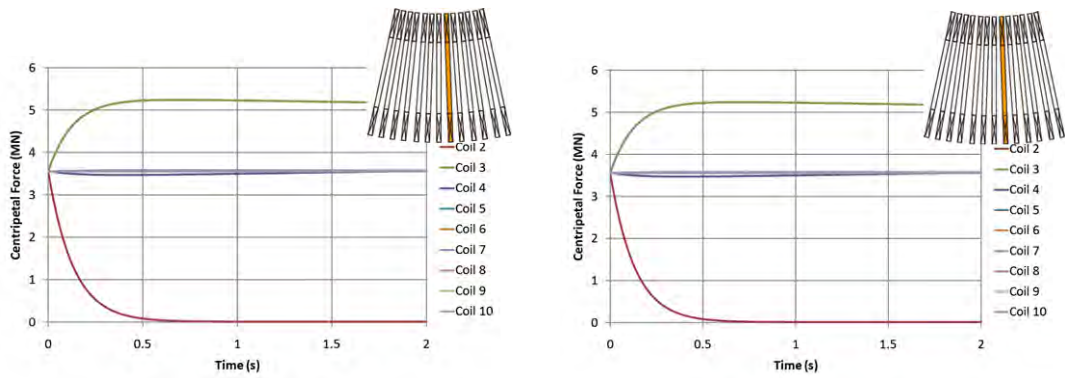


(a) dump of 1 coil (b) dump of 2 coils

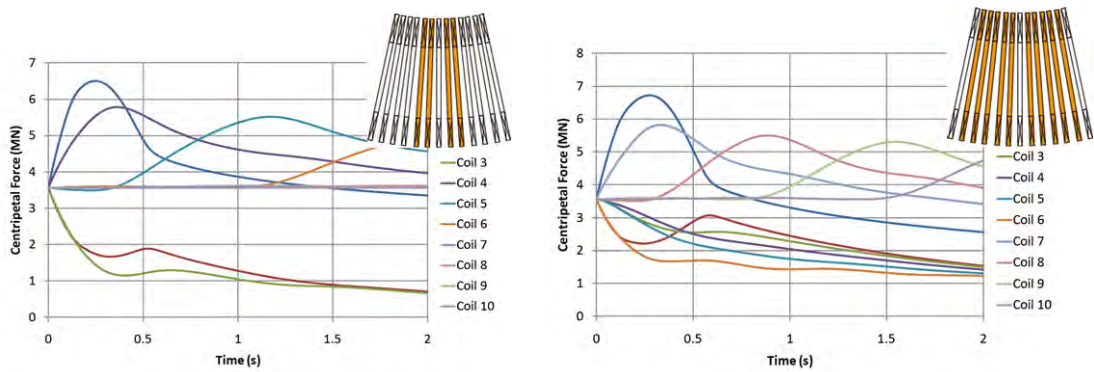


(c) dump of 4 coil (d) dump of 10 coils

図 2.1.4-4-7 1.0Ω でダンプした場合の電流変化

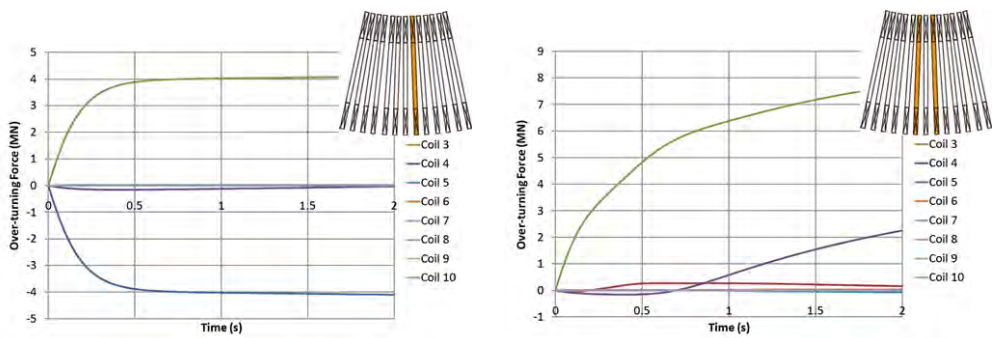


(a) dump of 1 coil (b) dump of 2 coils

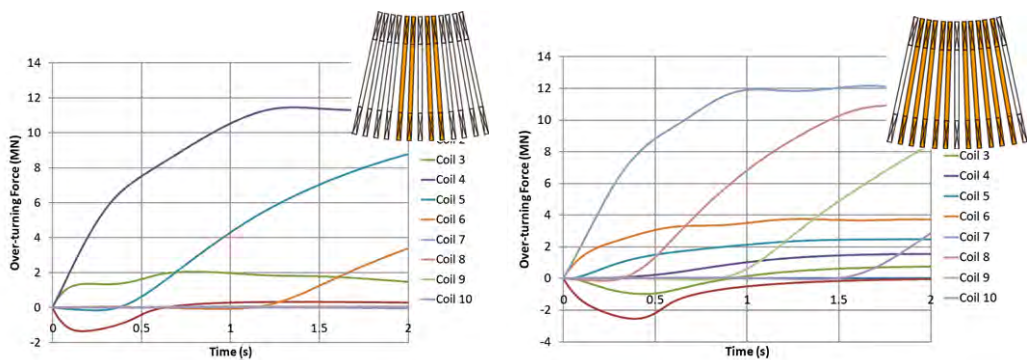


(c) dump of 4 coil (d) dump of 10 coils

図 2.1.4-4-8 1.0 Ω でダンプした場合の向心力の変化



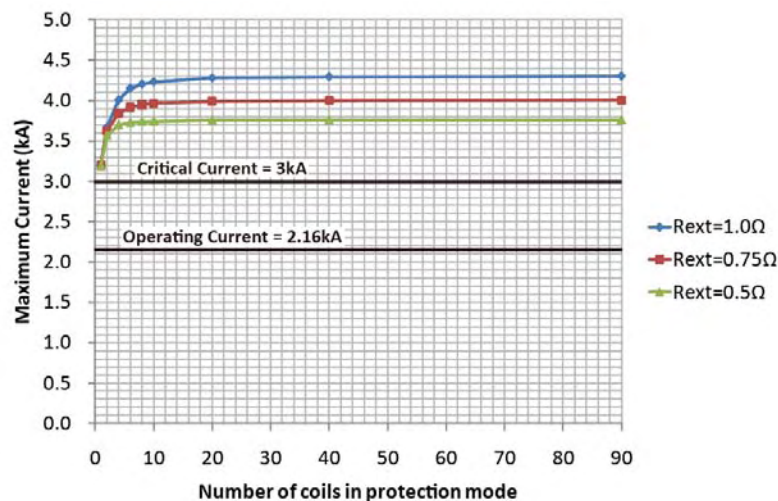
(a) dump of 1 coil (b) dump of 2 coils



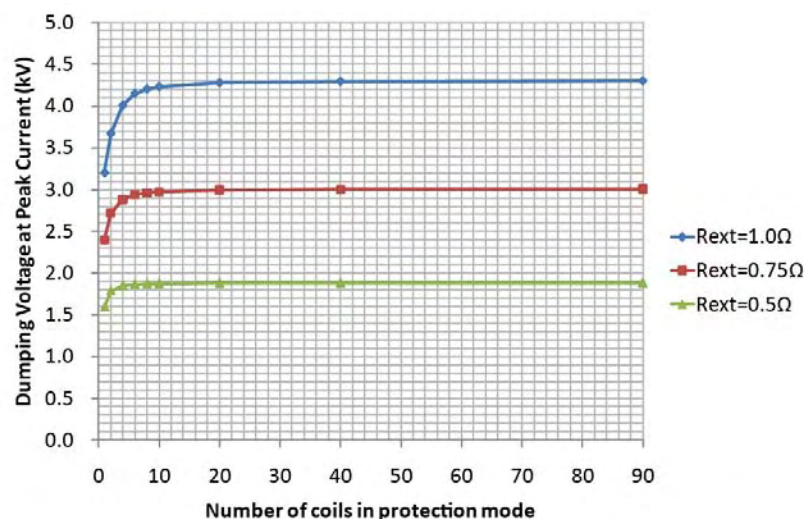
(c) dump of 4 coil (d) dump of 10 coils

図 2.1.4-4-9 1.0 Ω でダンプした場合の転倒力の変化

図 2.1.4-4-10 にダンピングするコイルの個数と電流の最大値、コイル両端電圧の最大値を示す。保護抵抗が 1.0、0.75、0.5 Ω の場合、最大電流はそれぞれ、4.3、4.0、3.8 kA になり、コイル両端電圧はそれぞれ 4.3、3.0、1.9 kV となる。図 2.1.4-4-11 にコイル両端の最大発生電圧を 2.0、2.5、3.0 kV に抑えるためにダンピングを開始する時間を示す。表 2.1.4-4-3 に保護抵抗と最大電流、最大電圧の結果をまとめる。以上の結果から、保護抵抗 1.0 Ω の場合、コイル両端電圧を 2.0 kV に抑えることはできない（完全に同時にダンピングした場合でも 2.16 kV 発生する）が、20 ms、50 ms 以内にすべてのコイルがダンピングを開始すれば、それぞれ 2.5、3.0 kV に抑えることができる。保護抵抗 0.75 Ω では、コイル両端電圧を 2.0 kV 以下に抑えるためには 40 ms の以内にすべてのコイルでダンピングを開始する必要がある。保護抵抗 0.5 Ω では、コイル両端電圧は常に 2.0 kV 以下に抑えられる。



(a) Maximum current



(b) Maximum voltage

図 2.1.4-4-10 保護動作中の最大電流および最大電圧

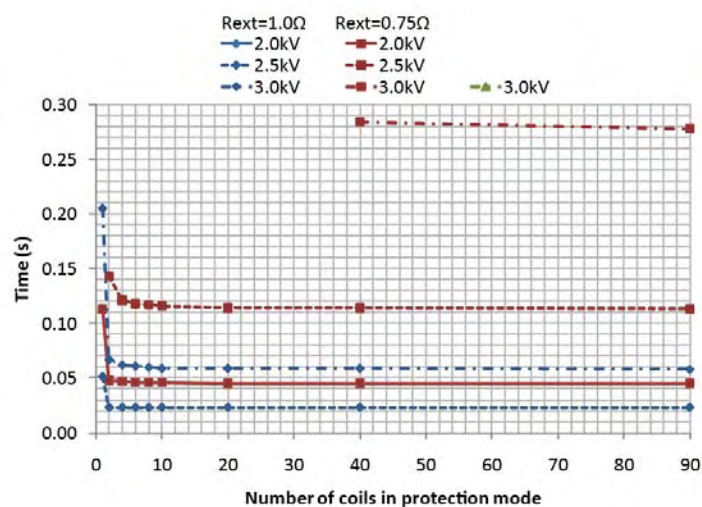


図 2.1.4-4-11 ダンプした際の電圧が 2.0、2.5、3.0 kV で抑えるための遅れ許容時間

表 2.1.4-4-3 保護動作中の最大電流および最大電圧

保護抵抗	1.0 Ω	0.75 Ω	0.5 Ω	
最大電流 (I_{max}/I_t) (I_{max}/I_c)	4.3 kA (2.0) (1.43)	4.0 kA (1.86) (1.34)	3.8 kA (1.74) (1.25)	
最大電圧	4.3 kV	3.0 kV	1.9 kV	
遮断時定数	5.4 s	7.2 s	10.8 s	
許容可能遮断 遅れ時間	< 2.0 kV	×	40 ms	○
	< 2.5 kV	20 ms	0.1 ms	○
	< 3.0 kV	50 ms	0.25 s	○

超電導コイルが常電導転移すると、コイルに蓄積されていた磁気エネルギーは常電導転移領域で熱として消費されて温度が上昇し、最終的に特性劣化や焼損に至ることがある。したがって、コイルと並列にダンプ抵抗を接続し、この抵抗によって事故時にコイル内に蓄積されていた磁気エネルギーを回収する方法（外部抵抗保護法）が採られる。ここでは、Y系線材を4枚バンドルした集合導体で2 GJ級のトロイダル型 SMES コイルを構成した場合のエネルギー回収について調べた。例えば、長手方向に1 cmの劣化（ $I_c = 0$ A）が発生した場合、「(3)クエンチ検出方法の検討」の結果から、偏流100 A発生時の温度は50 K、クエンチ検出電圧0.1 Vのときの温度は150 Kである。この温度からダンプした場合、最高到達温度300 Kを抑えるために必要な銅安定化層の厚さを求める。保護抵抗は、「(4)トロイダル型集合導体コイルの保護」の結果を考慮すると、コイル両端電圧2 kV以下に抑えるためには、0.75 Ωあるいは0.5 Ωが適している。コイル両端電圧2.5 kVまで許容す

れば保護抵抗 1.0Ω でもエネルギー回収が可能である。ユニットコイル1つ当たりのエネルギーを $E = 2.4 \text{ GJ} / 180 \text{ coils} = 13.4 \text{ MJ}$ 、線材積層数 $N = 4$ 、線材幅 $w = 1 \text{ cm}$ 、Y系超電導層の厚さ $d_{\text{YBCO}} = 1.0 \mu\text{m}$ 、中間層は無視、基板の厚さ $d_{\text{sub}} = 800 \mu\text{m}$ （補強材 $700 \mu\text{m}$ を含む）として、必要な銅安定化層の厚さを求めた。表 2.1.4-4-4 に結果をまとめる。

表 2.1.4-4-4 エネルギー回収条件から要求される安定化層の厚さ
(a) 保護抵抗 1.0Ω

トロイダルコイルの貯蔵エネルギー	2.4 GJ			
要素コイル数	180			
要素コイルの貯蔵エネルギー, E	13.4 MJ			
運転電流, I_0	2.16 kA			
要素コイルのインダクタンス, L (相互インダクタンス込)	5.74 H			
保護抵抗, R	1.0 Ω			
端子間電圧, V_m	2.16 kV			
遮断時定数	5.74 s			
YBCO 層厚さ, d_{YBCO}	1.0 μm			
基板厚さ, d_{sub}	100 μm			
補強材厚さ, d_{reinf}	700 μm			
導体素線数, N	4			
クエンチ検出時の温度, T_0	50 K		150 K	
最高到達温度, T_m	300 K			
保護動作開始遅れ時間, t_d	0 s	0.5 s	0 s	0.5 s
銅安定化層厚さ, d_{stab}	95 μm	110 μm	197 μm	226 μm

(b) 保護抵抗 0.75 Ω

トロイダルコイルの貯蔵エネルギー	2.4 GJ			
要素コイル数	180			
要素コイルの貯蔵エネルギー, E	13.4 MJ			
運転電流, I_0	2.16 kA			
要素コイルのインダクタンス, L (相互インダクタンス込)	5.74 H			
保護抵抗, R	0.75 Ω			
端子間電圧, V_m	1.62 kV			
遮断時定数	7.66 s			
YBCO 層厚さ, d_{YBCO}	1.0 μm			
基板厚さ, d_{sub}	100 μm			
補強材厚さ, d_{reinf}	700 μm			
導体素線数, N	4			
クエンチ検出時の温度, T_0	50 K		150 K	
最高到達温度, T_m	300 K			
保護動作開始遅れ時間, t_d	0 s	0.5 s	0 s	0.5 s
銅安定化層厚さ, d_{stab}	123 μm	137 μm	250 μm	277 μm

(c) 保護抵抗 0.5 Ω

トロイダルコイルの貯蔵エネルギー	2.4 GJ			
要素コイル数	180			
要素コイルの貯蔵エネルギー, E	13.4 MJ			
運転電流, I_0	2.16 kA			
要素コイルのインダクタンス, L (相互インダクタンス込)	5.74 H			
保護抵抗, R	0.5 Ω			
端子間電圧, V_m	1.08 kV			
遮断時定数	11.5 s			
YBCO 層厚さ, d_{YBCO}	1.0 μm			
基板厚さ, d_{sub}	100 μm			
補強材厚さ, d_{reinf}	700 μm			
導体素線数, N	4			
クエンチ検出時の温度, T_0	50 K		150 K	
最高到達温度, T_m	300 K			
保護動作開始遅れ時間, t_d	0 s	0.5 s	0 s	0.5 s
銅安定化層厚さ, d_{stab}	175 μm	187 μm	346 μm	369 μm

(5) 結果

素線絶縁を施した集合導体コイルの常電導発生後の転流現象について、数値解析によって評価した。その結果、素線絶縁を施した集合導体内で、ある素線で常電導領域が発生しても、転流は速やかに発生することが明らかとなった。

SMES の運転を想定した場合、変換器などのノイズレベルによっては常電導による発生電圧が埋もれてしまって、検出が困難になることも考えられる。そこで、今回、集合導体の転流を監視する方法を検討した。集合導体内の素線で常電導が発生した場合、偏流（導体内の素線の最大電流と最小電流の差）が 100 A を検出した時点で、常電導部の温度は 30～40 K となった。積層導体内の素線で常電導領域が発生しても、偏流によってクエンチ検出が可能と考えられる。

この結果を踏まえ、外部保護抵抗によるエネルギー回収に基づく安定化層厚の決定法によって、必要な安定化層厚を求めることが可能となる。現在、想定している 2 GJ 級 SMES では 180 個のパンケーキコイルが系統から見ると変換器を介して並列に接続されている。例えば、コイルが永久電流モードの状態ですべてのコイルでクエンチが検出され、外部抵抗でエネルギーを回収する場合、隣のコイルに電流が誘導され、運転電流に重畳されることになる。そこで、ダンプするコイルの個数と電流の最大値、コイル両端電圧の最大値について評価し、必要となる安定化層の厚さを求めた。その結果、保護抵抗が 0.75 Ω の場合、初期温度（クエンチ検出時温度） $T_0 = 150$ K、最高到達温度 $T_m = 300$ K とすると、必要な銅安定化層の厚さは 108 μm となる。保護抵抗が 0.5 Ω の場合、同様に必要な銅安定化層の厚さを計算するとは 154 μm となった。

2.1.4-5 高磁界コンパクト SMES システムモデル評価試験方法の検討（中部電力）

(1) 研究開発目的

通電特性や冷却性能、絶縁性能などの Y 系 SMES コイル評価結果を反映し、2 GJ 級 SMES コイル基本システム構成の改善を図るとともに、トロイダルコイル配置となるコイルシステムを構成する複数個のコイルの組合せにおいて、クエンチ等の動的な変化等が発生した場合のクエンチ検出ならびに保護の考え方を前項において検討・整理した。本項では、クエンチ時の挙動検証等を含めた高磁界コンパクト SMES システムモデルの評価試験方法について検討する。検討に当たっては、前フェーズにおいて実施した試験法検討結果を踏襲し、新たに Y 系超電導コイルシステムとして追加すべき評価試験方法について検討を実施する。

(2) SMES 試験法

前フェーズにて検討した SMES 試験方法を以下に示す。

a. SMES デバイス試験法

今後の標準となりうる SMES システム試験法について検討した。SMES システムは図 2.1.4-5-1 のように構成される。

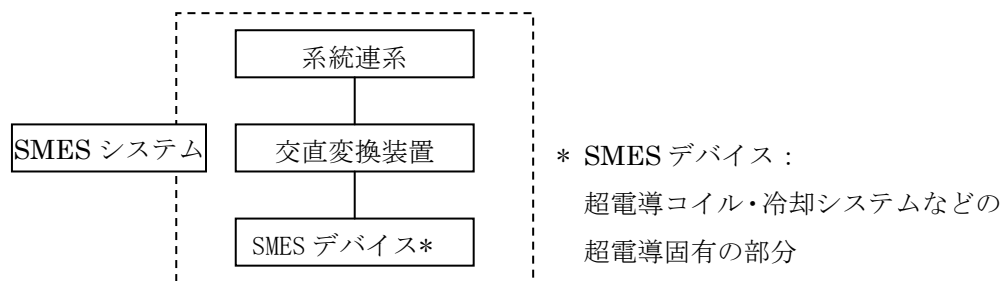


図 2.1.4-5-1 SMES システムの構成

このうち、交直変換装置と系統連系に関しては、他の電力貯蔵装置における標準的な試験法が既に存在している。そこで、まずは SMES デバイスに関する試験法の検討を行い、成果として、SMES デバイス試験法を取りまとめた。

試験とはすなわち「性能」の確認である。ここでいう「性能」には、狭義の性能（使用に足ること）と、安全性の2つの意味合いがある。また、安全性の確認として、機械的な安全性と、電気的な安全性の2面がある。これらを峻別することは特にユーザの使用に際して非常に重要であり、表 2.1.4-5-1 に取りまとめた。

表 2.1.4-5-1 試験項目の分類

機械的安全性の確認に係る試験	<ul style="list-style-type: none"> ・外観検査・寸法検査 ・耐圧力試験 ・気密試験 	<ul style="list-style-type: none"> ・真空リーク試験 ・安全確認試験
電気的安全性の確認に係る試験	<ul style="list-style-type: none"> ・絶縁抵抗測定 ・電気絶縁耐力試験 	<ul style="list-style-type: none"> ・電流遮断試験 ・漏洩磁界測定
使用に足ることの確認に係る試験	<ul style="list-style-type: none"> ・冷却試験 ・熱侵入量測定 	<ul style="list-style-type: none"> ・定格通電試験 ・繰返し充放電試験

b. SMES システムの試験法

SMES デバイス試験法をもとに、SMES システム全体の試験法について検討した。

まず、他の電力貯蔵装置における試験法の調査、そして今回のフィールド機における試験法検討のなかで、次の2つの規格を引用・参照できることが判明した。

- ① JEC-2470-2005 分散形電源系統連系用電力変換装置
- ② JEAC 5006-2000 電力貯蔵用電池規程

上記2規格の引用参照範囲と、SMES デバイス試験法の対象範囲の関係は図 2.1.4-5-2 のとおり。

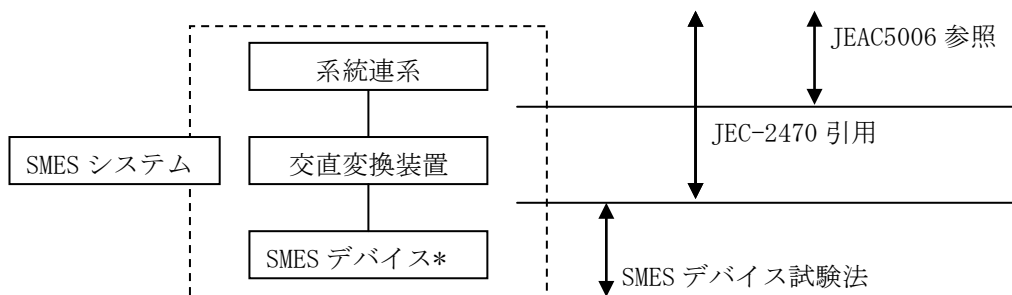


図 2.1.4-5-2 引用・参照範囲および対象範囲の関係

以上により、SMES デバイス試験法をベースに、JEC-2470 を引用し、JEAC5006 を参照することで、SMES システム全体について一通りカバーできることになる。

前項に倣って、狭義の性能（使用に足ること）の確認、機械的安全性の確認、電気的安全性の確認の、いずれに該当するかを以下の表 2.1.4-5-2 に取りまとめた。

表 2.1.4-5-2 試験項目の分類

	SMES デバイス	SMES システム (SMES デバイスを除く)
機械的安全性の確認に係る試験	<ul style="list-style-type: none"> ・外観・寸法検査 ・耐圧力試験 ・気密試験 ・真空リーク試験 ・安全確認試験 	<ul style="list-style-type: none"> ・外観検査
電気的安全性の確認に係る試験	<ul style="list-style-type: none"> ・絶縁抵抗測定 ・電気絶縁耐力試験 ・電流遮断試験 ・漏洩磁界測定 	<ul style="list-style-type: none"> ・接地抵抗測定 ・絶縁抵抗測定 ・電気絶縁耐力試験 ・保護インターロック試験 ・負荷遮断試験
使用に足ることの確認に係る試験	<ul style="list-style-type: none"> ・冷却試験 ・熱侵入量測定 ・定格通電試験 ・繰返し充放電試験 	<ul style="list-style-type: none"> ・起動・停止試験 ・監視制御装置試験 ・過渡応答特性試験 ・充放電試験

(3) 高磁界コンパクト SMES システムモデル評価試験方法

Y 系 SMES システムモデルは、複数個のコイルが伝導冷却状態で通電されることとなる。このため、伝導冷却性能試験や低温真空中での電気絶縁性能を評価試験することが求められる。また、コイルクエンチした場合、隣接するコイルに与える影響を考慮した保護手法の検証評価を、コイルがトロイダル配置されることにより経験する磁界が不均一であることを盛り込んだ評価試験を実施することが求められる。

本件については、製造メーカーや学識経験者などの有識者からなる試験法検討小委員会において、具体的な試験項目や試験方法を検討する計画である。

2.1.4-6 まとめ

2 GJ 級 SMES コイル基本システム構成の最適化並びに高磁界コンパクト・高効率伝導冷却コイルを用いた評価用試験モデルの設計と、SMES システムとしての適用性を検証評価する試験計画を作成することを中間目標とし、これらの目標を達成した後、2 MJ 級評価用試験モデルを用いて、適用性検証評価試験計画に基づいて SMES 動作検証を行うとともに、「超電導電力ネットワーク制御技術開発」プロジェクトにおいて実施した試験をベースとした 2 万回以上の繰返し充放電による特性検証を実施することを最終目標として検討を進めている。

これまでの成果としては、2 GJ 級トロイダル型 SMES において、Y 系集合導体構造コイルのクエンチ保護方法について検討した。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等を開催し、コイル構造やクエンチ挙動等を十分に議論した上で開発を進める。

具体的には、Y 系集合導体構造コイルの特徴を活かしたクエンチ検出方法とコイル保護方法について、モデルによる試験検証を計画しており、すでに明らかとしている絶縁素線集合化導体でクエンチが発生した場合の素線間転流シミュレーション結果との比較検証を実施する計画である。

2.2 超電導電力ケーブル研究開発

2.2.1 66 kV 大電流ケーブル化技術の開発

Y系超電導線材はBi系超電導線材に比べ高い臨界電流密度を有し、また低交流損失を実現できる可能性も有している。このことから、66 kV/5 kA級のコンパクトで大容量の超電導ケーブルの開発を目指している。過去の検討から、交流損失を低減するためにはY系超電導線材テープ表面に対しての垂直磁場の影響を低減する必要があり、細線化線材の適用や、多層化時の影響を考慮したケーブル設計を行う必要がある。本開発では、ケーブル形状に導体化した場合の線材特性への影響、多層導体構造での低交流損失設計の検討および低損失化の実証、ケーブルの機械的強度特性に関する検証等を行った。併せて大電流適用に対応した電流リード部と超電導-常電導接続部の構造設計の開発を行った。また、三心一括型ケーブルとする場合には、三心形状での機械特性や熱収縮応力下でのケーブル変形の影響、短絡電流通過時の電磁力によるケーブルコアへの影響等が懸念されるため、それらの検証・評価を行った。

さらに、66 kV級大電流ケーブルの実用性を検証するためには、大電流通電技術、交流損失低減技術等の開発成果を活かしたケーブルを作製し、実用化時の要求仕様に基づいた課通電試験を行う必要がある。このため、課通電試験向けケーブルシステムの設計および課通電試験計画案を作成した。

なお、本プロジェクトで設定した目標を表 2.2.1-1 にまとめる。

表 2.2.1-1 大電流ケーブルの開発目標

項目	中間目標	最終目標
①大電流・低交流損失 交流損失の測定・評価 ケーブル導体の評価	ケーブル交流損失 2 W/m-相@5 kA 以下	左記、各要素特性を備えた 66 kV/5 kA/15 m ケーブルを開 発し、2.1 W/m-相以下の損失検 証と、課通電試験計画書に沿っ た試験を行い、ケーブルがそれ らの特性を有していることを 検証する
②三心一括ケーブル導体の検証 三心一括型導体の試作・評価 過電流通過時の影響評価	短絡試験 (31.5 kA, 2 sec 相 当) でケーブルの性能に劣化 が無いこと	
③大容量接続技術の開発 接続部の構造設計検証 5 kA 級電流リードの開発	5 kA 連続通電を行い、ケー ブル導体、超電導-常電導接 続部、電流リードに異常がな いこと	
④システム検証 システム設計 試験条件検討	検証用超電導ケーブルシス テムのシステム設計完了 課通電試験計画書の作成	

2.2.1-1 大電流導体技術(住友電気工業)

(1) 研究開発目標

超電導ケーブルの通電電流を 5 kA に大容量化するためには多層導体を形成する必要がある。一方で、導体多層化時の課題としては、ケーブルの大径化や各層に対して通電電流を均等に分配させる(均流化)設計の必要性が挙げられる。このため、本項では、66 kV 級三心一括型超電導ケーブルの構造について説明した後に、大電流化(多層化)に関して検討した結果について述べる。

(2) 三心一括型超電導ケーブルの構造

三心一括型超電導ケーブルの構造を図 2.2.1-1 に示す。三本のコアを 1 つの断熱管に収納する構造であり、それぞれのコアに断熱管を必要とする単心型超電導ケーブル・3 条と比較して、ケーブルの布設スペースや外部侵入熱が小さくなるメリットを有している。ケーブルコアは、銅撚り線フォーマの上に、超電導導体層、電気絶縁層、超電導シールド層、銅シールド層を同軸上に巻付けた構造となっている。定常時は超電導導体層に送電電流が流れる。この際、両端末で三心コアのシールド層を短絡接続することにより、超電導シールド層には電磁誘導によって導体電流とほぼ同じ大きさの電流を逆位相で流すことができる。本構造により、磁気遮蔽が実現でき、ケーブルの外部に対して EMI (Electromagnetic Interference; 電磁波障害) フリーとなる。

また、短絡事故時においては、定格電流の数倍の大電流が導体やシールドに流れるが、この事故電流を超電導線のみで流すように設計すると非経済的である。よって、超電導導体層に対しては銅フォーマを、超電導シールド層に対しては銅シールド層を設けることにより、事故電流をこれらの保護層に分流させ、温度上昇を抑制する構造を採用している。

ケーブルコアを収納する二重ステンレスコルゲート管の間には多層断熱層を設けるとともに、高真空に維持することにより、高い断熱性能を得ている。

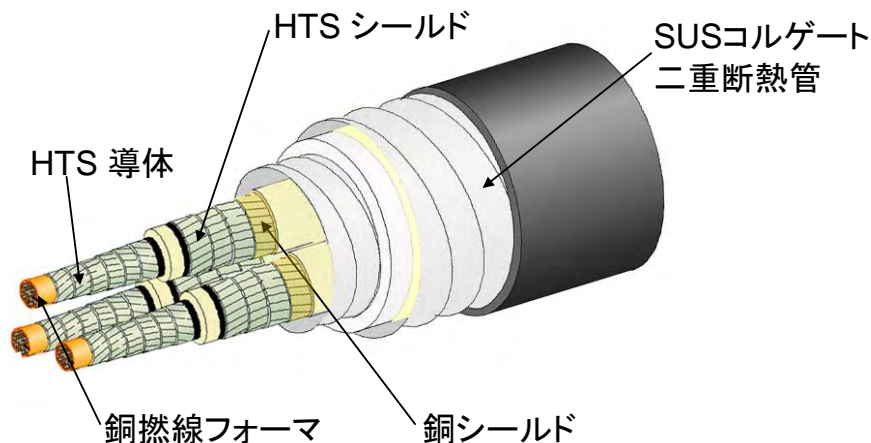


図 2.2.1-1 三心一括型超電導ケーブルの構造

(3) 三心一括型超電導ケーブルの設計検討

上記のような構造を有する三心一括型超電導ケーブルに対して、超電導導体層および超電導シールド層の層数をパラメータとして構造設計を行った結果を表 2.2.1-2 に示す。一例として、「超電導導体 4 層、超電導シールド 2 層」構造の設計結果を表 2.2.1-3 に示す。フォーマにはこれまでに 66 kV 級超電導ケーブル用フォーマとして使用した実績のある分割集合タイプの銅撚り線フォーマを採用し、絶縁層は液体窒素中で良好な課電実績を有する PPLP[®] (Polypropylene laminated paper) を主絶縁とし、実績のある 7 mm 厚に対して裕度を削った 6 mm 厚で設計を行った。なお、Y 系超電導線材の厚みは 0.17 mm とした。本ケーブルの開発目標である内径 150 mmφの管路内に収納するためには、ケーブル外径を 140 mm 以下に抑える必要があり、表 2.2.1-2 に示す結果から「導体 6 層、シールド 3 層」が多層化の限界であることが分かる。なお、「導体 2 層、シールド 1 層」構造では、現状の線材特性に対して 5 kA の通電容量を確保することが困難なため設計候補から除外した。

表 2.2.1-2 多層超電導ケーブルの設計結果

	導体 2 層 シールド 1 層	導体 4 層 シールド 2 層	導体 6 層 シールド 3 層	導体 8 層 シールド 4 層
コア外径 (mm)	39.7	41.7	43.6	45.6
ケーブル外径 (mm)	131.5	135.8	140.0	144.3

表 2.2.1-3 多層超電導ケーブルの設計例 (導体 4 層、シールド 2 層)

項目	諸元	外径 (mm)
フォーマ	140 mm ² 分割集合銅撚り線導体	18.0
超電導導体	4 層、層間絶縁あり	20.3
絶縁層	内部半導電層 主絶縁層：PPLP [®] 、厚さ 6 mm 外部半導電層	33.7
超電導シールド	2 層、層間絶縁あり	34.7
銅シールド	4 層、層間絶縁あり	39.2
保護層 (ケーブルコア外径)	クラフト紙、不織布	41.7
断熱管 (ケーブル外径)	二重ステンレスコルゲート管 真空多層断熱方式 PVC 防食層	135.8

交流超電導ケーブルにおいて導体を多層化した場合、各層の巻付けピッチ（スパイラルピッチ）を同じにすると、各層のインダクタンスが外層ほど小さくなるために電流は外層に集中して流れる。このような偏流状態にある導体では各層の負荷率（臨界電流値に対する通電電流ピーク値の割合）が大きく異なり、大容量化や低損失化が困難となる。この偏流現象を解消するため、各層のスパイラルピッチを調整して、各層の電流を均一に（均流化）する方法が一般的に用いられている。

多層導体の各層を図 2.2.1-2 に示す円筒モデルで近似し、電流がスパイラル方向と平行に流れていると仮定した場合、各層の自己インダクタンスと相互インダクタンスは式(2.2.1-1,2)で表される。ここで、 d はケーブルの長さ、 a は各層の中心半径、 p は各層の撚りピッチ、 s は撚り方向の係数（S 撚りが 1、Z 撚りが -1）である。

$$L_i = \mu_0 \frac{\pi a_i^2}{p_i^2} d + \frac{\mu_0 d}{2\pi} \left(\ln \frac{2d}{a_i} - 1 \right) \quad (2.2.1-1)$$

$$M_{ij} = \mu_0 s_i s_j \frac{\pi a_i^2}{p_i p_j} d + \frac{\mu_0 d}{2\pi} \left(\ln \frac{2d}{a_j} - 1 \right) \quad (j > i) \quad (2.2.1-2)$$

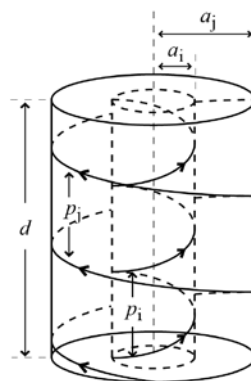


図 2.2.1-2 多層導体の円筒モデル

上記インダクタンスを用いて多層導体の電気回路方程式をたて、各層の電流値が等しくなるような条件で解いたときに得られる解が、各層を均流化するスパイラルピッチとなる。このとき注意すべき点として以下の 3 点が挙げられる。

- ① 線材をフォーマ上に巻きつけたときに特性が低下しないスパイラルピッチ以上で構成する。

→フォーマに対するスパイラル試験の結果、100 mm ピッチ以下では線材の歪みが限界歪みを超え I_c が低下するため、最小スパイラルピッチを 120 mm として導体設計を実施した。

- ② ケーブルをドラム曲げした際に特性が低下しないスパイラルピッチ以下で構成する。

→集合機を用いた導体化後の曲げ試験において、600 mm ピッチ以上では線材に座屈発生したため、最大スパイラルピッチを 500 mm として

ケーブル設計を実施した。

③ 製造時や布設時に発生するピッチ乱れを許容できる解を選択する。

図 2.2.1-3 は、最小スパイラルピッチを 120 mm として多層導体の均流化ピッチを検討した結果であり、2 層導体および 4 層導体については設計可能な解が存在するが、6 層導体については解が存在しない。なお、最小スパイラルピッチを 100 mm として 6 層導体の均流化ピッチを検討した場合には、600 mm 以下の範囲で解が存在するが、この際には要求されるスパイラルピッチの精度が数 mm 以下と非常に厳しく、ケーブル設計が困難と判断した。なお、各層の巻方向を変えたり、超電導シールド層が存在したりする場合の均流化ピッチの解は異なるが、必要な最大スパイラルピッチは大きくは変わらない。

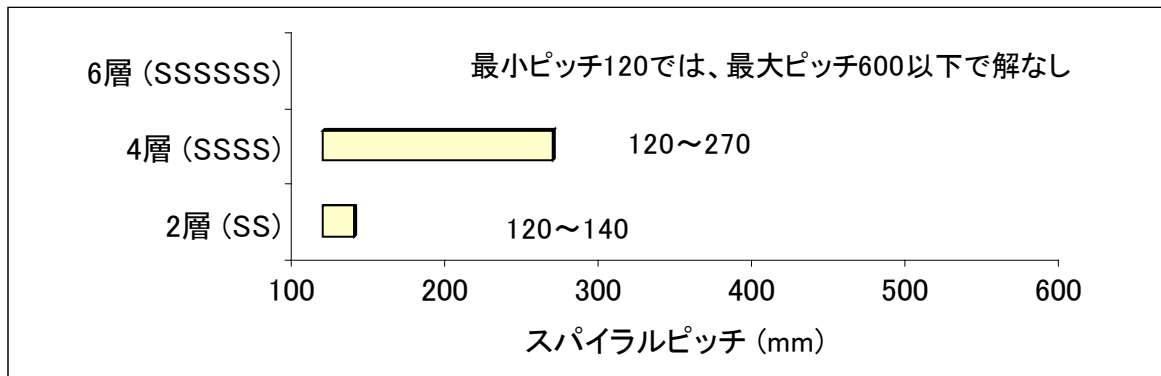


図 2.2.1-3 均流化ピッチ検討結果

(4) まとめ

- ・ 内径 150 mmφの管路に収納できる大電流ケーブルの構造に関する設計検討を行った結果、「超電導導体 4 層、超電導シールド 2 層」構造を選定し、各種要素技術開発を進めることとした。

2.2.1-2 交流損失低減技術(住友電気工業、京都大学)

(1) 研究開発目標

従来ケーブルと比較して超電導ケーブルの送電損失を低減するために、交流損失の低減は重要な技術課題である。Y 系超電導線材の超電導層は非常に薄く、断面アスペクト比が非常に大きいため、その交流損失特性は著しい異方性を示す。すなわち、線材面に平行な交流磁界変動に対する交流損失は大変小さく、線材面に垂直な交流磁界変動に対する交流損失は大きくなる。一般的に、超電導ケーブルにおいては、磁界は線材面に平行な成分が主となるが、Y 系超電導線材においては、その著しい異方性ゆえに、交流損失は実質的には線材幅方向端部近傍の垂直磁界成分に支配され、その低減が交流損失低減の鍵となる。下記のプロジェクト目標を達成する

ため、線材の細線化と可撓性の利用という二つのアプローチを用いて、交流損失低減に関する技術開発を行った。

●中間目標（平成 22 年度）

- ・ ケーブル損失（交流損失）2 W/m-相@5 kA 以下

(2) 低損失化への指針

薄い超電導層で真円状断面の円筒を構成し、それに交流電流を通電した場合、磁界は超電導層に完全に平行になるため、交流損失は極めて小さくなる。高臨界電流密度の単層円筒超電導体が交流損失低減の観点から超電導ケーブルの理想形であるが、このようなケーブルを製造することは難しく、現実のケーブルは数 mm 幅の超電導線材を多角形状、多層に集合化して構成されている。この場合、集合導体断面が真円でなく多角形であること、線材間の有限のギャップ数で導体周りの磁力線が乱れることに起因して線材面に対する垂直磁界成分が発生し、交流損失を増加させている。このため、図 2.2.1-4 に示すように、「線材の細線化」と「線材の可撓性を活かした導体化」により、集合導体断面を真円に近づけ、垂直磁界成分を減少させることにより低損失化を図った。

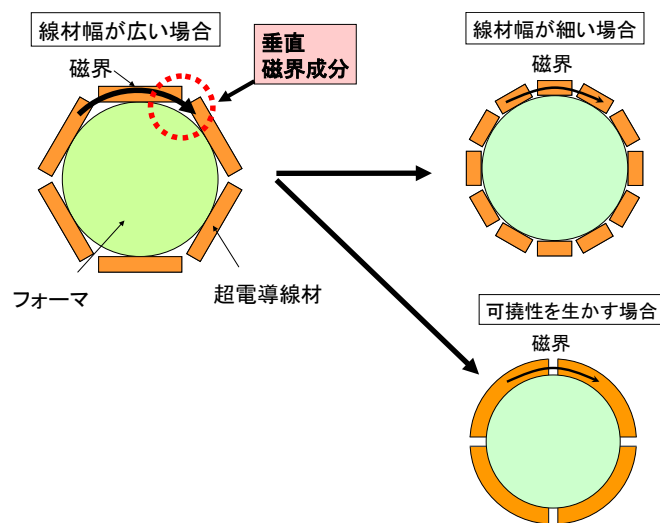


図 2.2.1-4 低損失化の指針（細線化と可撓性）

(3) 細線化による交流損失低減

集合導体断面を真円形状に近づけて垂直磁界成分を減少させ、交流損失を低減するためには、線材を細線化して、層を構成する線材数を増加させればよい。これにより、臨界電流と導体層の径を一定に保ったままで多角形の角数が増加して真円に近づく。一方で、現実の集合導体では、線材間のギャップの存在も垂直磁界成分発生につながるが、線材数を増やすということはギャップ数を増やすことであり、細線化（線材数増加）に伴うギャップ数増加は交流損失を増加させる可能性もある。そこで、数値電磁界解析によって超電導ケーブルの交流損失を求め、細線化による

交流損失低減効果について理論的に評価した。

実際のケーブルでは、各層を構成する線材はケーブル（集合導体）軸に対して螺旋（スパイラル）を成しているが、このようなスパイラル構造は無視して線材はケーブル軸に等しいと仮定し、ケーブル（集合導体）軸に垂直な2次元平面内で解析を行った。さらに、Y系超電導線材の超電導層は極めて薄いことから、各線材について、線材面に平行な磁束密度成分・線材面に垂直な電流密度成分を無視した薄板近似を適用した⁽¹⁾。

まず、基礎的な現象を把握するため、表 2.2.1-4 に線材幅と各層の構成を示した線材間ギャップ 0.2 mm の 2 層導体（断面を図 2.2.1-5 に示す）および、その外層と同構成の単層導体に対して解析を行った。交流損失の計算値を図 2.2.1-6 に示す。

●単層導体の解析結果（図 2.2.1-6 (a)参照）

- ・ 線材幅を 8 mm から 4 mm に減らすと交流損失は大幅に減少する。これは、導体の断面が真円形状に大きく近付き、これにより線材面に対する垂直磁界成分が大幅に減るためと考えられる。
- ・ 線材幅を 4 mm から 2 mm に減らしても損失はあまり減少しない。この領域では、導体断面が真円に近づくというメリットと、ギャップ数増加というデメリットが拮抗してしまうためと考えられる。

●2層導体の解析結果（図 2.2.1-6 (b)参照）

- ・ 線材幅を 4 mm から 2 mm に減らしても交流損失は大きく減少する。その原因は外層の損失減少にある。外層の交流損失の主要因は、内層電流の作る外部磁界であり、内層電流が作る外部磁界に関して言えば、線材間ギャップの存在が外層線材に対する垂直磁界成分を増加させることはない。このため、細線化によって、線材間ギャップの数が増えることは外層の損失を押し上げず、断面が円に近づくという細線化のメリットがうまく利用され、交流損失が低減すると考えられる。
- ・ 線材間ギャップを 0.2 mm から 0.4 mm に広げることにより交流損失は増加する。層数の少ない導体において、細線化によって交流損失を低減する場合には、線材間ギャップを小さく保った状態で線材を集合する技術が重要である。

表 2.2.1-4 線材幅と 2 層導体の内層・外層の線材数

線材幅	2 mm	4 mm	8 mm
1 層目（内層）の線材本数	32	16	8
2 層目（外層）の線材本数	36	18	9
線材間ギャップ	0.2 mm		
内径	22.3 mm	21.1 mm	19.8 mm
外径	25.2 mm	23.8 mm	22.6 mm
内層と外層の距離	1.4 mm	1.35 mm	1.36 mm

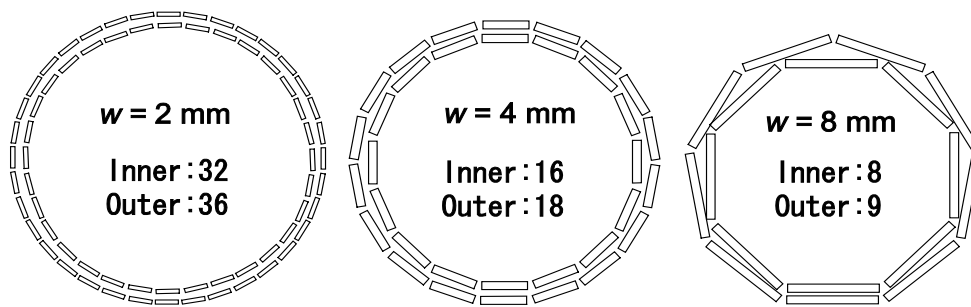
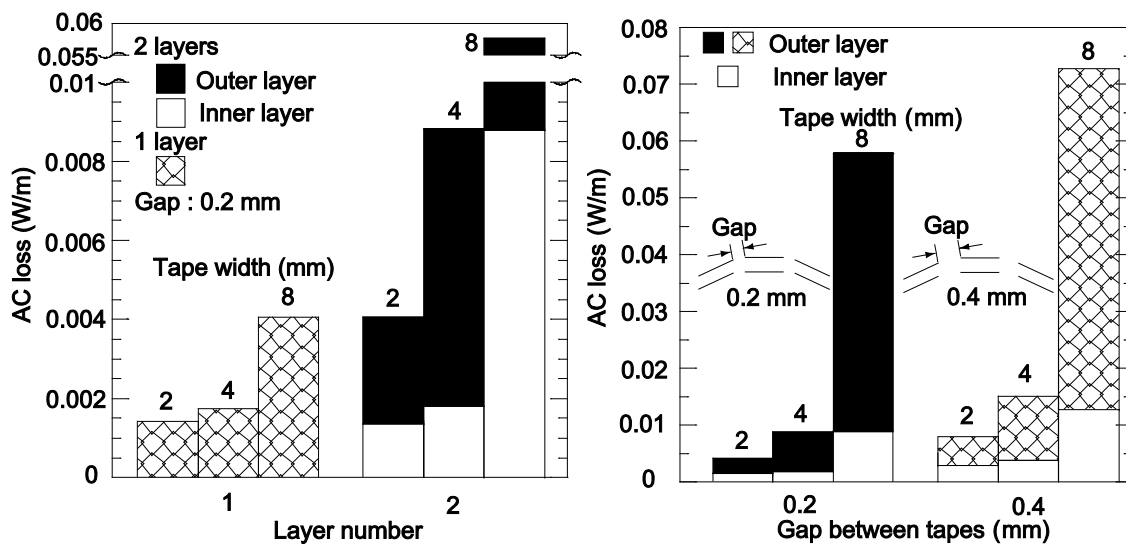


図 2.2.1-5 2層導体の断面図



(a)線材幅の影響、(b)線材間ギャップの影響

図 2.2.1-6 単層および2層導体の交流損失解析結果

次に、表 2.2.1-5 に諸元を示すような、2 mm 幅および 4 mm 幅線材で構成した 4 層導体の交流損失を計算して比較した。導体臨界電流は 11.8 kA に、通電電流は 5 kA_{rms} に固定した。ギャップは表に示すような 3 通りをパラメータとし、線材幅方向の J_c 分布については、図 2.2.1-7 に示すように、一様な場合、線材端部 0.2 mm で J_c が低下している場合、線材端部 0.3 mm で J_c が低下している場合の 3 通りについて計算を行った。図 2.2.1-8 に交流損失の計算結果を示す。

●4層導体の解析結果

- ・ 4層導体においても、線材幅を 4 mm 幅から 2 mm 幅に減らす効果は大きい。
- ・ 2層導体と比較して、線材間ギャップが交流損失に与える影響は小さく、0.4 mm 程度のギャップであれば損失の増加は小さい。
- ・ 線材幅方向 J_c 分布が交流損失に与える影響は大きい。特に 2 mm 幅線材を用いた場合には、理想的な Flat な J_c 分布 (J_c 均一) を有する線材と、端部 0.3 mm で J_c が低下している線材では損失が倍程度異なる。
- ・ 2 mm 幅線材を用いた導体の損失は 1 W/m@5 kA 程度に収まっており、4層導体で 12 kA 級の J_c を有する導体の実現できれば損失目標達成の可能性が高い。

- 4 mm 幅線材を用いた導体の損失は 2 W/m@5 kA 程度であり、損失目標達成には、導体の高 J_c 化、あるいは後述する線材の可撓性を活かした低損失化等が必要である。

表 2.2.1-5 2 mm 幅および 4 mm 幅線材で構成する 4 層導体の諸元

線材幅	線材本数	ギャップ (mm)	線材 I_c (A)	導体 I_c (kA)	通電電流 I_c (kA _{rms} /kA)
2	25	Small: 0.26/0.25/0.24/0.23	111	11.8	5/7.07
	26	Midium: 0.36/0.35/0.34/0.33			
	27	Large: 0.56/0.55/0.54/0.53			
4	13	Small: 0.26/0.25/0.24/0.23	203	11.8	5/7.07
	14	Midium: 0.36/0.35/0.34/0.33			
	15	Large: 0.56/0.55/0.54/0.53			
	16				

※ ギャップ数値は内層側から外層側へ順番に記載

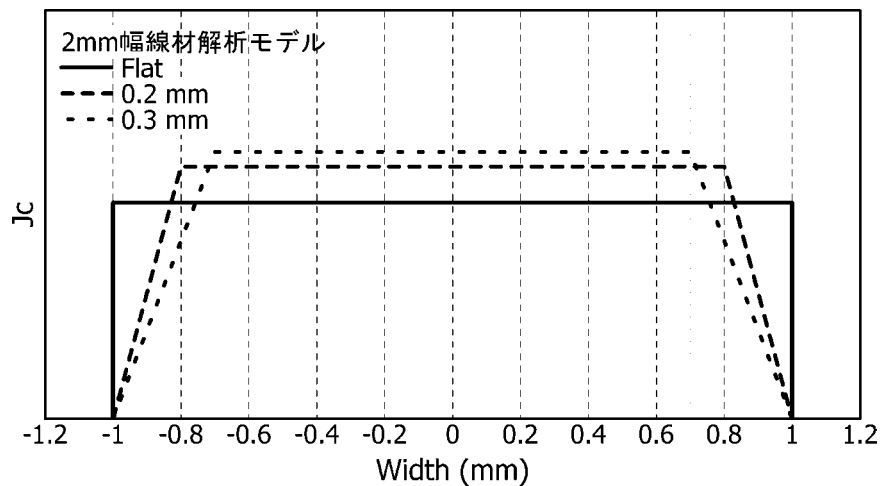
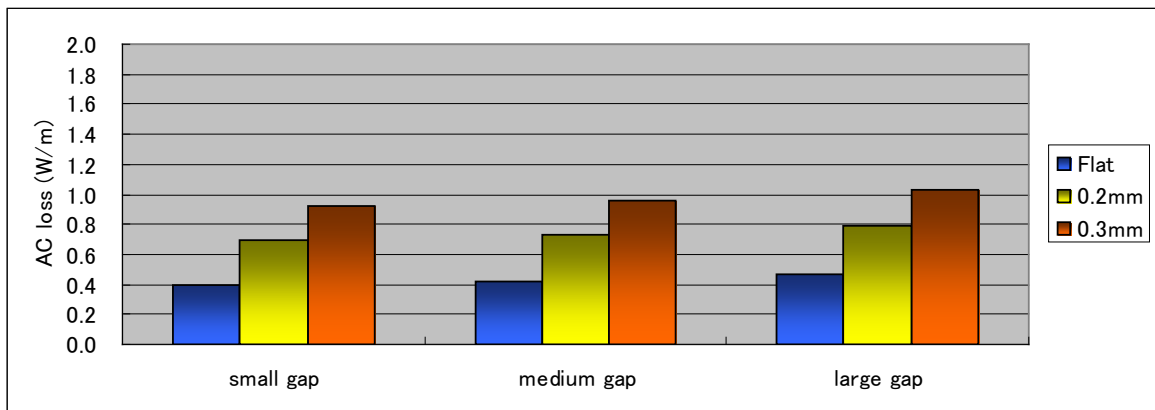
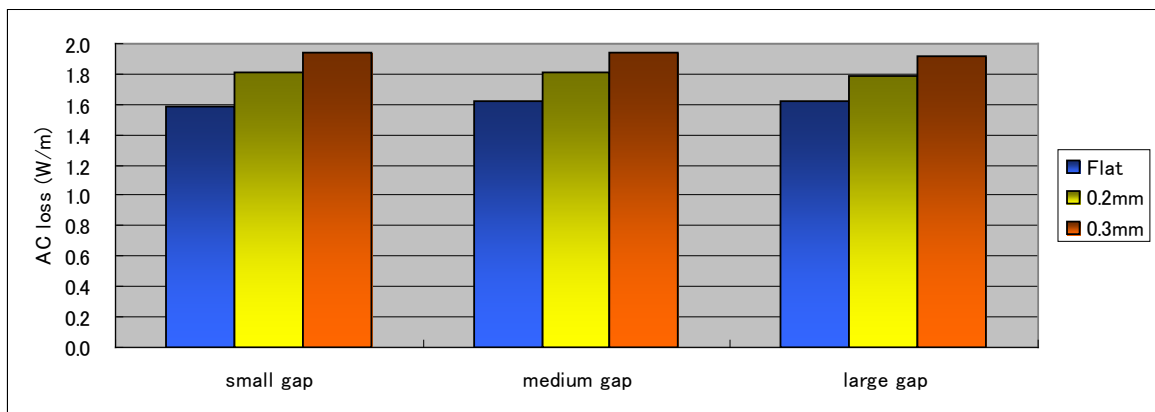


図 2.2.1-7 線材端部 J_c 低下を模擬した幅方向 J_c 分布モデル (2 mm 幅線材)



(a) 2 mm 幅線材の解析結果



(b) 4 mm 幅線材の解析結果

図 2.2.1-8 4 層導体の交流損失解析結果

(線材間ギャップと線材端部 J_c 低下が損失に与える影響)

●シールド付きケーブルコアの解析結果

表 2.2.1-6 に諸元を示すような、「導体 4 層、シールド 2 層」構造のケーブルコアの交流損失を計算して比較した。なお、導体層は 2 mm 幅の線材を用いて構成し、シールド層は 2 mm 幅線材を用いた場合と、4 mm 幅線材を用いた場合の 2 通りを計算した。導体層及びシールド層の臨界電流は 11.8 kA に、通電電流は 5 kA_{rms} に固定した。なお、線材の幅方向 J_c 分布は Flat (J_c 均一) である。図 2.2.1-9 に交流損失の計算結果を示す。

- ・ シールド層に対しても、線材幅を 4 mm から 2 mm に減らす効果は大きい。
- ・ 4 mm 幅線材を用いた場合でも、シールド層の損失は全体の 1/4 程度であり、ケーブルコアの主たる損失は導体層で発生する。

本解析結果より、シールド層の損失は導体層に比べて小さいことが予想されるため、まずは導体層の低損失化に目処をつけることとした。この際、導体層の低損失化の目標値としては、ケーブルコア全体の損失目標値 (2 W/m@5 kA) の 3/4 に相当する 1.5 W/m@5 kA とした。

表 2.2.1-6 ケーブルコアの諸元 (導体 4 層、シールド 2 層)

導体層数	シールド層数	ギャップ (mm)	線材 I_c (A)	導体 I_c (kA)	通電電流 I_t (kA _{rms} /kA)
4 (2mm 幅)	-	0.26/0.25/0.24/0.23	111	11.8	5/7.07
4 (2mm 幅)	2 (2mm 幅)	0.26/0.25/0.24/0.23 - 0.23/0.22	111 - 119	11.8 - 11.8	
4 (2mm 幅)	2 (4mm 幅)	0.26/0.25/0.24/0.23 - 0.23/0.22	111 - 231	11.8 - 11.8	

※ ギャップ数値は内層側から外層側へ順番に記載

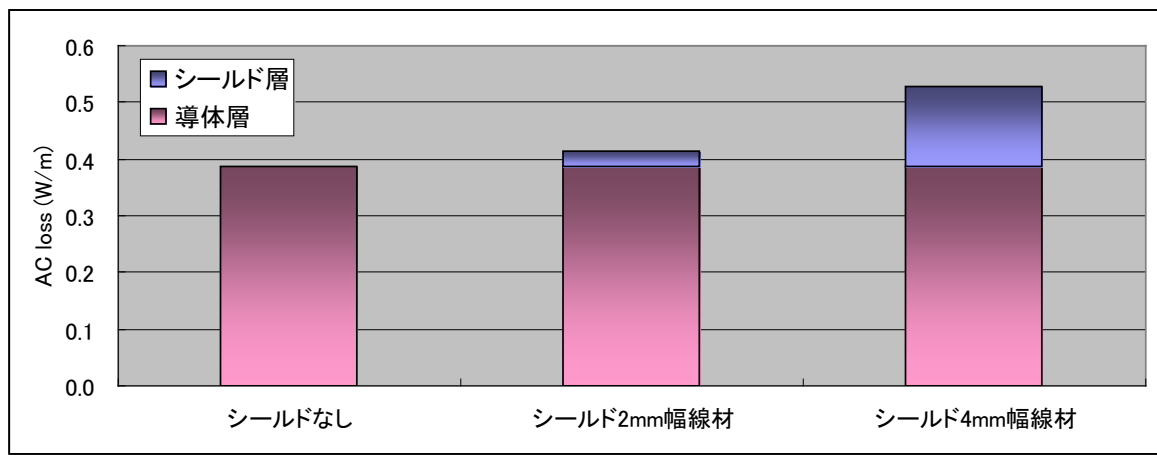


図 2.2.1-9 ケーブルコアの交流損失解析結果 (導体 4 層、シールド 2 層)

以上の解析結果から、細線化による低損失化の方針として、まずは導体層に 2 mm 幅線材を適用した 4 層導体を試作して損失特性を検証することとした。損失目標値は導体層だけで 1.5 W/m@5 kA 以下とし、使用する線材の幅方向の J_c 分布が損失特性に大きく影響することに注意する必要があるため、使用する線材の J_c 分布の測定も合わせて行うこととした。

(4) 可撓性を利用した交流損失低減

ハステロイ™ 基板と異なり、結晶粒配向金属基板はある程度軟らかく可撓性を有している。円形フォーマの上に、配向金属基板上に超電導層を積層した Y 系超電導線材を並べ、その可撓性を利用して円形フォーマに沿わせて変形させれば、多角形導体に比較して線材面に対する垂直磁界成分を低減でき、交流損失を低減できる可能性がある。

まず、可撓性を利用した集合導体の円断面化による損失低減を理論的に検証するため、数値電磁界解析による交流損失計算を行った。円断面化した集合導体においては、損失が低減された結果として線材面に対して平行な磁界成分の交流損失への寄与が無視できなくなる可能性があるため、ここでは、前項で述べた薄板近似は適用せず、線材面に垂直な磁束密度成分と平行な磁束密度成分の双方を考慮して、ケ

ケーブル（集合導体）軸に垂直な 2 次元平面内で解析を行った⁽²⁾。解析は図 2.2.1-10 に示したような集合導体断面が円形になるように線材を变形させた導体と、比較のために平らな線材を集合した六角形導体について行った。解析に用いた有限要素モデルを図 2.2.1-11 に示す。解析対象は線材数 6 本の単層集合導体であるが、対称性から、線材 1 本を実際の解析領域とした。解析結果の磁束線分布と交流損失を図 2.2.1-12、図 2.2.1-13 にそれぞれ示す。円断面化によって、線材端部での線材面に対する垂直な磁束が減り、交流損失は約 10 分の 1 になっている。

次に、幅 10 mm の結晶粒配向金属基板（クラッド基板）線材 6 本を用いて円断面導体と六角形導体を実際に製作し、その交流損失を実測した。それぞれの臨界電流は 887 A と 903 A、線材間ギャップは 0.47 mm と 1.34 mm である。測定にあたっては、線材間の電流分布を一様にするために 6 本の線材を直列接続して通電した。損失測定結果を図 2.2.1-13 に合わせて示す。円断面化によって、交流損失が約 3 分の 1 に低減できていることがわかる。なお、理論値と実験値を比較すると、理論値では交流損失が約 10 分の 1 になっているのに対して、実験値では交流損失の減少は約 3 分の 1 にとどまっている。この理由としては、用いた線材の幅方向の臨界電流密度分布の不均一性や基板の磁性の影響、および導体断面構成の誤差（ギャップの不均一性等）の影響が考えられる。

解析および実験の両面から、線材の可撓性を活かした導体化によって損失の低減が可能であることが示された。しかしながら、線材をフォーマに沿わせて曲げた場合、線材の幅方向曲げによる臨界電流の低下が問題となり得る。表 2.2.1-7 に、上記実験で用いた円断面導体を構成する 6 本の線材の、集合化前（曲げる前の平らな状態）の臨界電流と、集合化後（フォーマに沿わせて曲げた後）の臨界電流を比較して示す。線材によりばらつきはあるものの、線材 1 を除いて 1 割前後の臨界電流の低下が発生している。このように、幅広の線材を完全に小径フォーマに沿わせて集合化した状態では臨界電流が低下するため、実際には、幅 4~5 mm 程度の細線化と可撓性を利用した円断面化とを組み合わせることが現実的と考えられる。

図 2.2.1-8 に示したように、4 mm 幅線材を用いた 4 層導体 ($I_c=11.8$ kA) では、1.5 W/m@5 kA 以下にすることは難しいが、可撓性を組み合わせることにより 2 割程度損失が低減されれば損失目標を達成できる可能性がある。このため、4 mm 幅線材を用いた 4 層導体についても試作を行い、損失特性を評価することとした。

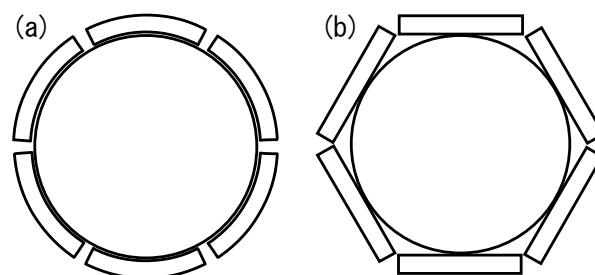
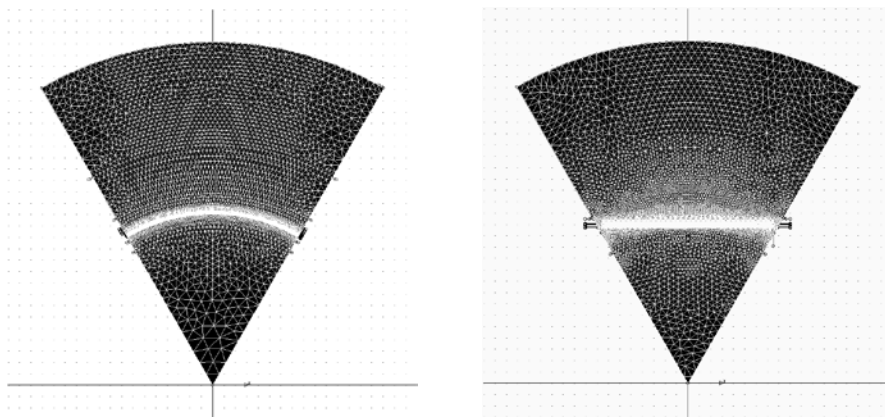
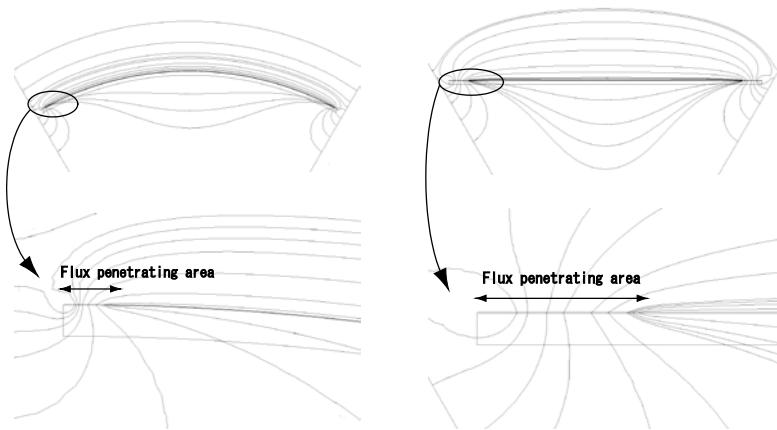


図 2.2.1-10 円断面導体と六角形導体



(a)可撓性を利用した円断面導体 (b)六角形導体

図 2.2.1-11 解析対象の有限要素モデル



(a)可撓性を利用した円断面導体 (b)六角形導体

図 2.2.1-12 解析によって求められた磁束分布図

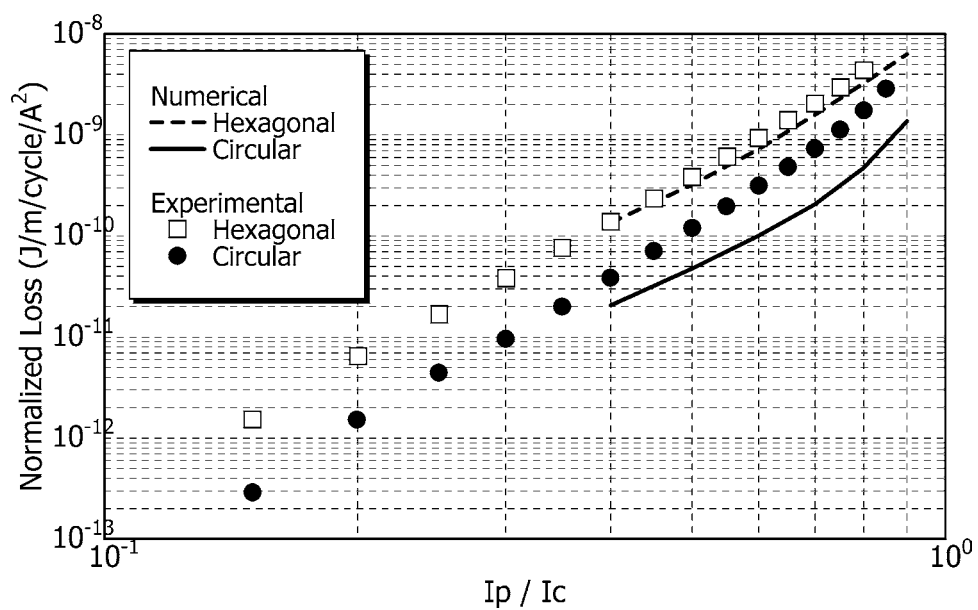


図 2.2.1-13 円断面導体と六角形導体の交流損失比較 (解析および実験結果)

表 2.2.1-7 円断面集合導体における各線材の幅方向曲げによる臨界電流低下

線材番号.	1	2	3	4	5	6
曲げ前の I_c	168 A	168 A	164 A	162 A	168 A	169 A
曲げた状態の I_c	136 A	151 A	151 A	146 A	147 A	155 A

(5) 低損失配向基板線材の評価

上記検討により、2 mm 幅への細線化、4 mm 幅程度の線材で可撓性を活かすという二つのアプローチがともに交流損失低減に有効であるという見通しを得ることができた。一方で、結晶粒配向金属基板線材を用いる場合、基板自体が有する磁化損失（ヒステリシス損失）の低減が課題となる。住友電気工業では、これまで Ni 合金配向基板を用いた線材開発を行っていたが、金属基板の磁化損失が大きく、機械強度も弱いという問題点があった。このため、高強度のステンレステープの表面を、2 軸配向を有する銅およびニッケル膜で覆ったクラッドタイプの結晶粒配向金属基板（Clad 基板）を開発した。図 2.2.1-14 は、Clad 基板および Ni 合金基板のヒステリシス曲線を示しており、Ni 合金基板に比べて Clad 基板の磁性が大きく低下しているのが分かる。表 2.2.1-8 に示すように、基板の磁化損失は 1/25 に低減、強度は 2.5 倍に向上し、安価で高強度かつ低損失な配向基板の開発に成功した。

表 2.2.1-8 基板の磁化損失と機械強度

基板	磁化損失 (J/m^3)	機械強度 (MPa)
Clad 基板	52	500
Ni 合金基板	1300	200

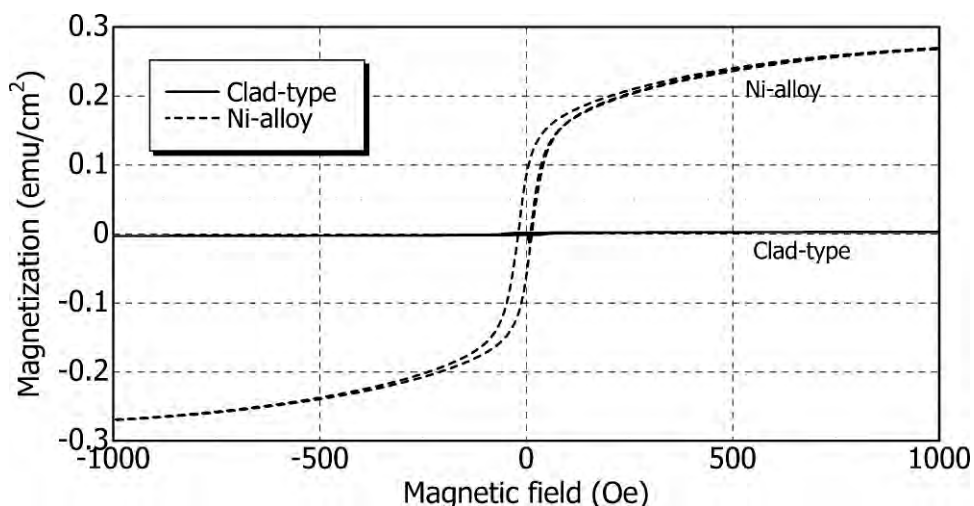


図 2.2.1-14 基板のヒステリシス曲線

Clad 基板線材のケーブルへの適性を検証するため、10 mm 幅で成膜した Clad 基板線材を 2 mm 幅にスリットして 2 層導体（C-1）を作製した。作製した導体の

諸元を表 2.2.1-9 に示す。なお、比較対象として 4 mm 幅の Ni 合金基板線材を用いて作製した導体 (C-2) の諸元も同表中に示す。図 2.2.1-15 に 2 本の導体の交流損失測定結果を示す。使用した線材の臨界電流値 (I_c) の差異により導体 I_c が大きく異なるため、横軸は I_c で規格化した通電電流ピーク値、縦軸は I_c の 2 乗で規格化した交流損失値で示す。主に基板の磁化損失 (Q_{Sub}) の低減により、C-1 の損失は C-2 に比べて大きく低減している。Clad 基板線材を用いた C-1 の損失は 0.08 W/m@1 kA_{rms} であり、本線材を用いたケーブルの低損失化の可能性を実証した⁽³⁾。

表 2.2.1-9 超電導導体の諸元

導体番号	C-1	C-2
フォーマ直径	17.5 mm	18.5 mm
超電導導体層 (2 layers)	Clad-type wires 2 mm-w, 52 本	Ni-alloy wires 4 mm-w, 28 本
外径	18.5 mm	19.5 mm
長さ	1.5 m	1.0 m
導体臨界電流 (I_c)	2440 A	1340 A

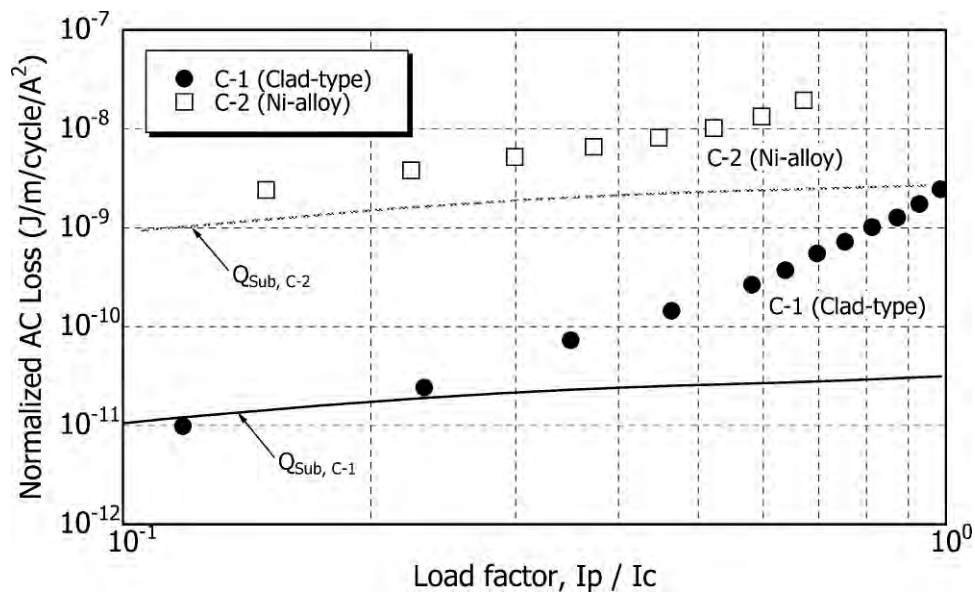


図 2.2.1-15 超電導導体の交流損失測定結果 (規格化)

(6) 大電流導体の試作・評価

次ステップとして、4 層構造の多層ケーブル導体の試作を行い、交流損失特性の評価を実施した。使用した線材の仕様を表 2.2.1-10 に示す。線材は、幅 30 mm の Clad 基板上に CeO₂ / YSZ / CeO₂ の中間層を積層し、中間層上に GdBa₂Cu₃O_x の超電導層を PLD 法により成膜したものである。上記線材は、Ag 安定化層をスパッタリングした後に 2 mm 幅あるいは 4 mm 幅にスリットされ、全周に銅メッキ

を施してある。ケーブル導体の諸元を表 2.2.1-11 に示す。FRP パイプ上に線材をスパイラル状に巻き付けた 4 層導体であり、各層のスパイラルピッチは、交直流電流が均等に分流するように調整を行っている。なお、導体の有効長は約 1.5 m である。試作した 2 本の導体の臨界電流測定結果 (77 K、大気圧) を図 2.2.1-16 に示す。1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ で定義した臨界電流は、C-3 が 4510 A、C-4 が 4180 A であり、使用した線材の I_c 総和と J_c - B 特性を考慮した計算値と一致することを確認した。

表 2.2.1-10 使用線材の諸元

	2 mm 幅線材	4 mm 幅線材
幅 (mm)	2	4
厚さ (mm)	0.15	0.15
臨界電流@77 K (A)	40~50	70~90

表 2.2.1-11 4 層ケーブル導体の諸元

	C-3 (2 mm 幅線材)	C-4 (4 mm 幅線材)
フォーマ	FRP フォーマ、18 mm ϕ	FRP フォーマ、18 mm ϕ
超電導導体層	4 層 2 mm 幅 Clad 基板線材 (104 本)	4 層 4 mm 幅 Clad 基板線材 (52 本)
臨界電流@77 K (A)	4510	4180

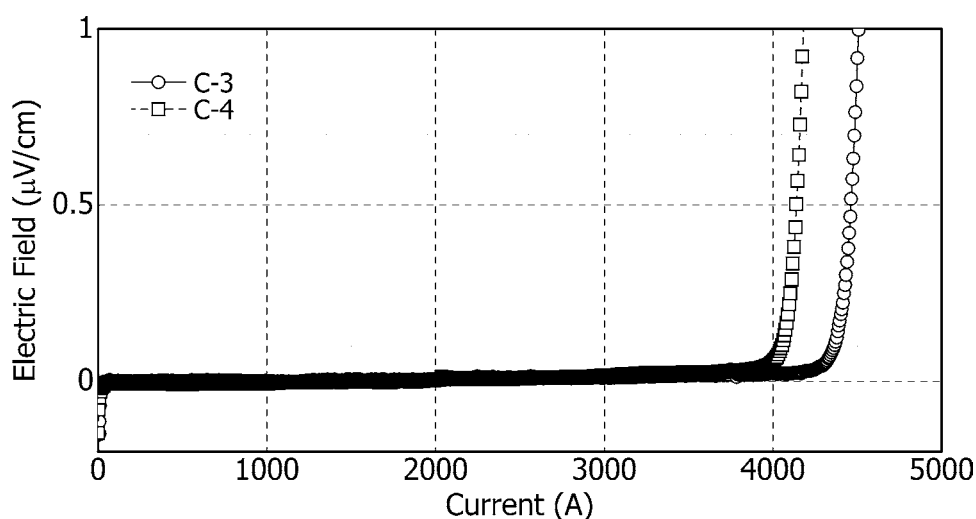


図 2.2.1-16 4 層導体の臨界電流測定結果 (77 K、大気圧)

77 K における 4 層導体の交流損失測定結果を図 2.2.1-17 に示す。同図中には、線材端部の J_c 低下を模擬して、図 2.2.1-7 に示すように、幅方向の J_c 分布が均一でない線材で構成した 4 層導体の交流損失解析結果 (解析導体の臨界電流は全て 4500 A) も示してある。また、実際に 2 mm 幅および 4 mm 幅 Clad 基板線材の幅方向の J_c 分布を磁気ナイフにより測定した結果を図 2.2.1-18 に示す。

- $2 \text{ kA}_{\text{rms}}$ 通電時の損失は、 2 mm 幅線材を用いた 4 層導体 (C-3) が 0.33 W/m (50 Hz , 負荷率 0.63)、 4 mm 幅線材を用いた 4 層導体 (C-4) が 0.47 W/m (50 Hz , 負荷率 0.68) であり、導体 I_c の違いによる負荷率の相違を考慮すると、両者の交流損失はほぼ同程度であると考えられる。
- C-3 (2 mm 幅) について、図 2.2.1-18 に示すように実際の線材の端部 J_c 低下領域が 0.3 mm 程度であるのに対して、導体交流損失実測値は「端部 $0.6 \text{ mm} \cdot J_c$ 低下」を模擬した解析値とほぼ同等である。
- C-4 (4 mm 幅) について、導体交流損失実測値は「端部 $0.3 \text{ mm} \cdot J_c$ 低下」を模擬した解析値とほぼ一致し、実際の線材の端部 J_c 低下と一致する (図 2.2.1-18 参照)。ただし、注意すべき点として、数値解析では線材の可撓性の効果を考慮していないため、 4 mm 幅線材を用いた導体の交流損失実測値も解析値より大きいと見るべきである。

これまでの解析による検討結果から、実験結果と解析結果の乖離の一因として線材幅方向の J_c 分布の不均一性が挙げられる。 J_c 分布測定を行った線材は図 2.2.1-18 に示した 1 サンプルずつのみであり、導体作製に使用した線材の J_c 分布が測定結果とは異なる可能性もある。本件については、今後測定サンプル数を増やして検討を進める。

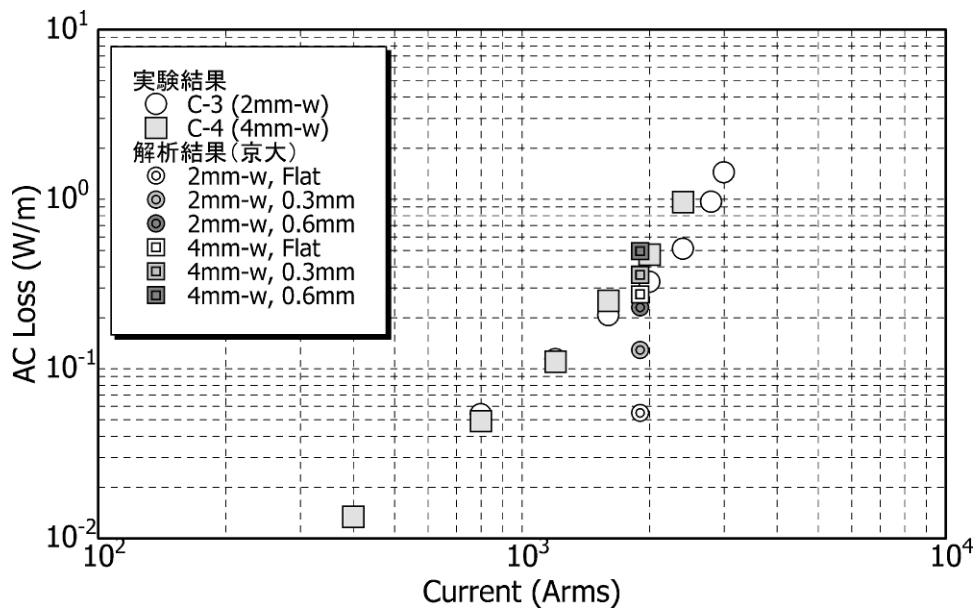


図 2.2.1-17 4 層導体の交流損失測定結果 (77 K、大気圧)

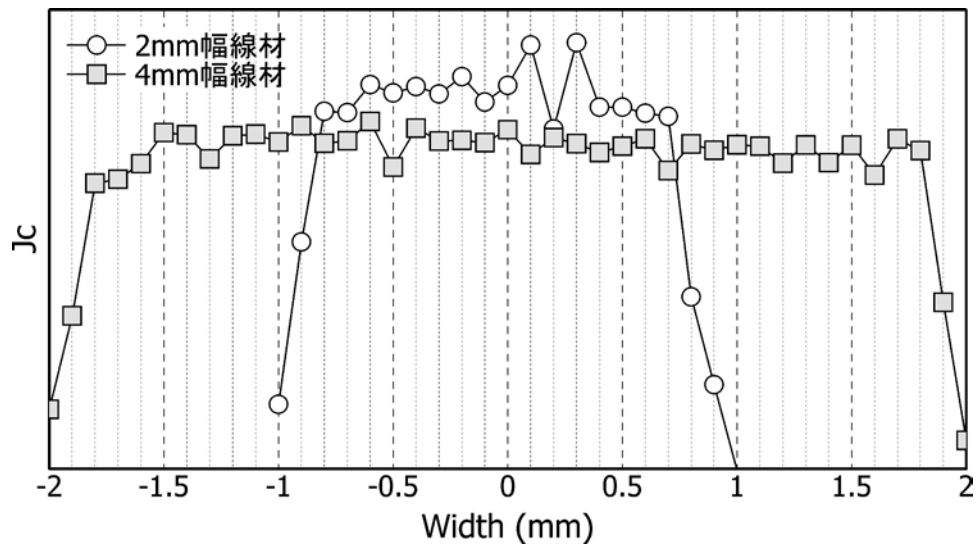


図 2.2.1-18 Clad 基板線材の磁気ナイフによる幅方向 J_c 分布測定結果

(7) 今後の計画と中間目標達成の見通し

上記測定結果および解析結果を踏まえて、A : 4 mm 幅線材を用いた場合の目標達成の方策、B : 2 mm 幅線材を用いた場合の目標達成の方策を以下に示す。なお、下記の線材必要特性については、ケーブル外径を 140 mm まで大きくした場合 (20 mmφ フォーマ) を想定して計算を行っている。

A : 4 mm 幅線材を用いた場合の目標達成の方策

図 2.2.1-19 は、図 2.2.1-17 に示した交流損失測定結果をもとに、線材 I_c が向上した場合を想定して導体損失を予想した曲線である。損失目標である 2 W/m-相@5 kA は「導体層+シールド層」の損失であり、導体層のみの損失としては 1.5 W/m-相@5 kA が目標達成の目安となる。図 2.2.1-19 より目標達成には 14000 A 程度の I_c が必要となる。このとき必要な線材 I_c は下記の通りである。

$$14000 \text{ A} / 59 \text{ 本 (4 mm-w)} = 237 \text{ A} / 4 \text{ mm-w} (= 593 \text{ A/cm-w}) (@77 \text{ K, s.f.})$$

現状の線材 I_c は 100 A/4 mm-w (@77 K, s.f.) (250 A/cm-w) 程度であるが、2.2.3-1 項で述べるように、新レーザの導入によって 320 A/cm-w (@77K, s.f.) 級の特徴が得られている。今後、さらなる特性向上を目指す。中間目標時点では、130 A/4 mm-w (320 A/cm-w) 級線材を用いて導体を製作し、過冷却運転をすることで線材の I_c を高くして上記 14000 A の導体 I_c を得るようにする。例えば、65 K まで運転温度を下げた場合には 1.9 倍程度の臨界電流向上が見込まれるため、計算では 14300 A 程度の導体 I_c が期待できる。これにより、中間目標である 2 W/m/-相 @ 5 kA の検証を行う。

なお、図 2.2.1-17 に示した導体 (C-4) を過冷却により 64 K まで温度を下げて損失を測定した結果は図 2.2.1-20 に示すとおりであり、損失の実測値は 2.8 W/m@4.5 kA であった。このときの導体 I_c は 8730 A であり、必要である 14000 A

には満たないため、中間目標値には達していないが、77 Kの導体 I_c (4180 A) よりも I_c が高くなることで、ほぼ予想通りに損失が低下することを確認した。これにより本指針は、目標達成に向けた方策として有効であると考えられる。

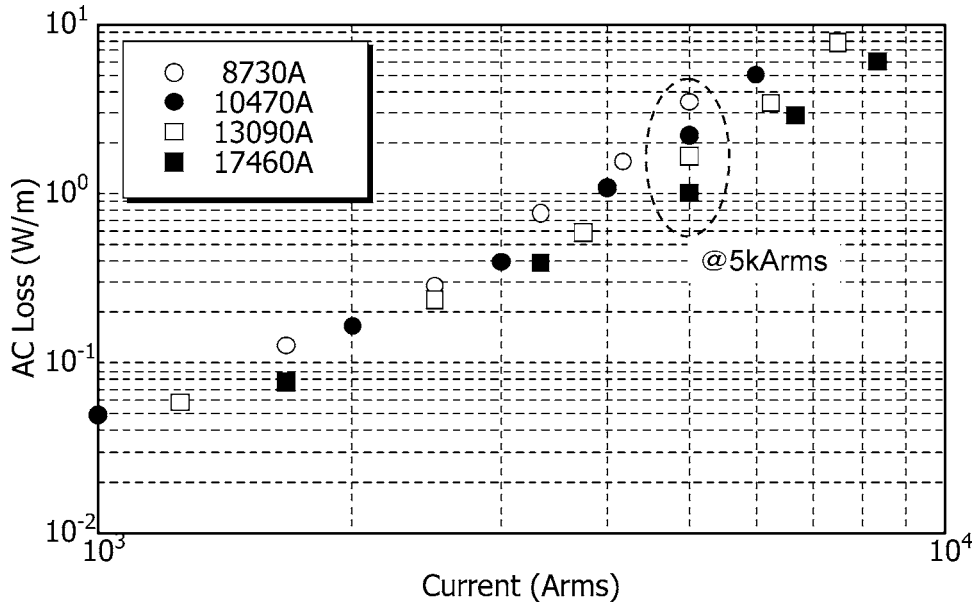


図 2.2.1-19 導体 I_c をパラメータとした損失予想 (4 mm 幅線材)

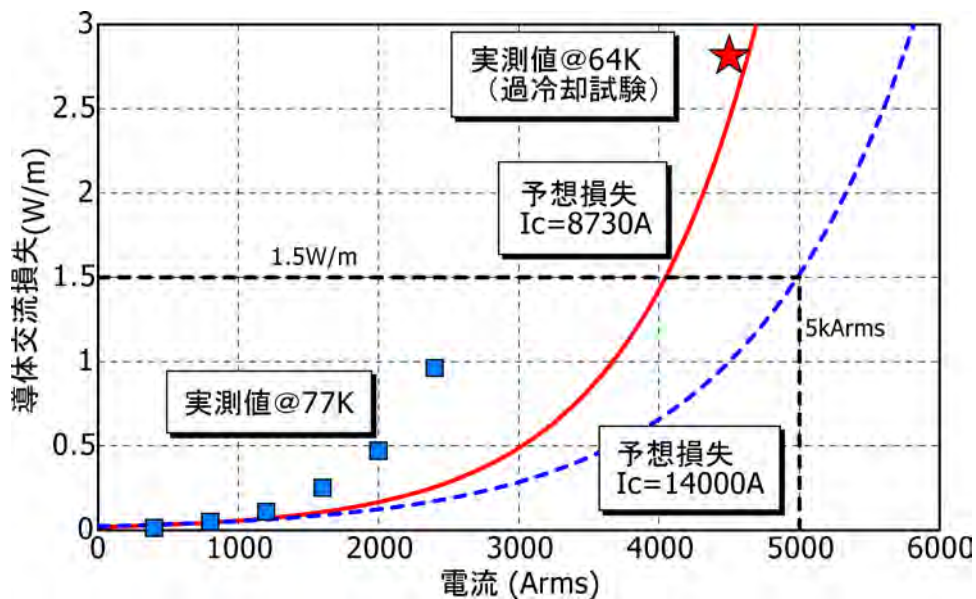


図 2.2.1-20 4 mm 幅線材を用いた 4 層導体の過冷却試験結果

B : 2 mm 幅線材を用いた場合の目標達成の方策

2 mm 幅線材を用いた導体に対して同様の議論をした場合、必要線材 I_c は 400 A/cm-w(@77 K, s.f.)を上回る。一方で、図 2.2.1-17 に示したように、2 mm 幅線材を用いて導体を構成した場合には線材端部の J_c 低下が損失に大きく影響する。今後、線材スリット方法を改善することにより、損失が現状の 2 割程度減少すると想

定して損失を予想した結果を図 2.2.1-21 に示す。この場合には、導体 I_c は 10000 A 程度で目標を達成するが可能となり、このとき必要な線材 I_c は下記の通りである。

$$10000 \text{ A} / 118 \text{ 本} (2 \text{ mm}\cdot\text{w}) = 85 \text{ A} / 2 \text{ mm}\cdot\text{w} (= 425 \text{ A/cm}\cdot\text{w} (@77 \text{ K, s.f.}))$$

現状の 50 A/2 mm·w (250 A/cm·w) (@77 K, s.f.)級の線材を用いて構成した導体に対して、65 K まで運転温度を下げた場合、11000 A 以上の導体 I_c が期待できるため、中間目標を検証することが可能と推測される。また、2 mm 幅に細線化した線材においても 65 A/2 mm·w (320 A/cm·w) 級の I_c が実現できれば、より 77 K に近い温度領域で目標を検証することが可能と思われる。

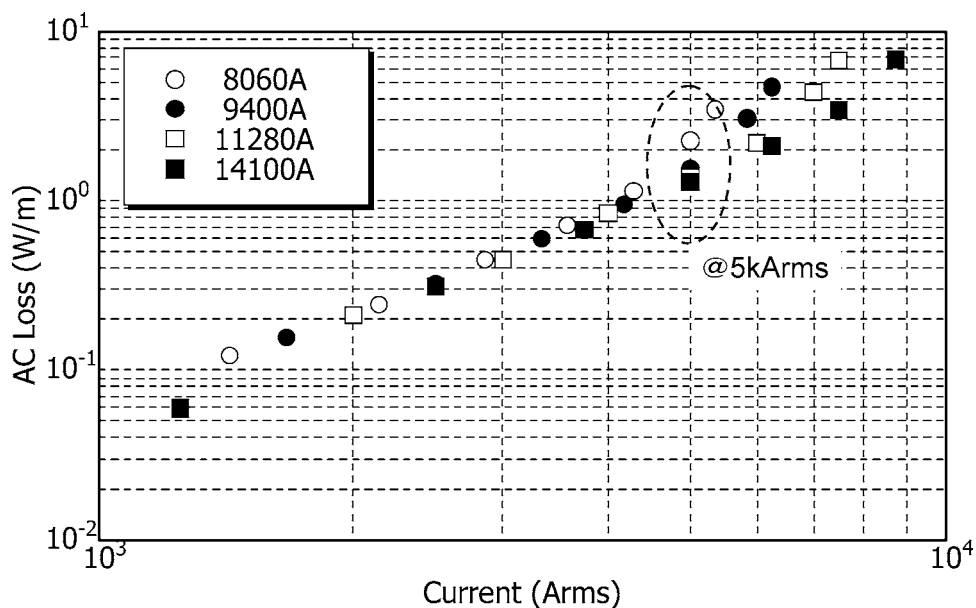


図 2.2.1-21 導体 I_c をパラメータとした損失予想 (2 mm 幅線材)

(8) まとめ

- ・ 数値解析および実験により、2 mm 幅への細線化による低損失化、線材可撓性を活かした低損失化の可能性を示した。
- ・ 2 mm 幅線材を用いた 4 層導体では、現実的な線材間ギャップやスリット時の線材端部 J_c 低下を考慮しても、12 kA 程度の I_c を有する導体を実現することにより 1 W/m·相@5 kA 程度に低損失化できる解析結果を得た。
- ・ 10 mm 幅線材の可撓性をいかした活かした低損失化を試みたが、フォーマに巻付けた際に線材 I_c 低下が発生することが判明し、10 mm 幅線材の適用を断念した。
- ・ 2 mm 幅および 4 mm 幅線材を採用候補として 4 層多層導体を作製し、交流損失特性を評価した。2 mm 幅を用いた導体の交流損失は解析結果の 2 倍程度と大きく、使用した線材の端部 J_c 低下が懸念される。4 mm 幅を用いた導体の交流損失は解析結果とほぼ同等であり、2 mm 幅を用いた導体とほぼ同等の交流損失特性を示した。
- ・ 現時点で目標値 2 W/m·相@5 kA は達成出来ていないが、4 mm 幅線材を用い

た導体については、現状より I_c を向上させた線材 ($130 \text{ A}/4 \text{ mm}\cdot\text{w} = 320 \text{ A}/\text{cm}\cdot\text{w}$ 級(@77 K, s.f.)) を適用することにより目標値を達成できる見込みである。2 mm 幅線材を用いた導体については、線材 J_c 分布の改善により現状の 2 割程度損失特性が改善されれば、現状の線材 I_c ($50 \text{ A}/2 \text{ mm}\cdot\text{w} = 250 \text{ A}/\text{cm}\cdot\text{w}$ 級(@77 K, s.f.)) でも目標値の達成が可能であると考えられる。

(9) 今後の予定

- ・ 320 A/cm-w 級(@77 K, s.f.)の線材を適用し、4 mm 幅線材を用いた 4 層導体を作製して、1.5 W/m-相@5 kA 以下の交流損失を確認する。
- ・ 並行して線材スリットの改善を行い、2 mm 幅線材を用いた極低損失ケーブルの実現の可能性を検討する。
- ・ 4 層導体で 1.5 W/m-相@5 kA 以下を達成した後、シールド層付きのケーブルコアを作製し、最終目標 2 W/m-相@5 kA を検証する。

2.2.1-3 耐過電流ケーブル設計技術 (住友電気工業、早稲田大学)

(1) 研究開発目標

電力系統においてケーブルの相間短絡事故が起こった場合、定格電流に比べて非常に大きな短絡電流が流れる。例えば、本ケーブルのターゲットである 66 kV 系統においては、最大「31.5 kA、2 sec」の短絡電流が流れると想定されている。超電導ケーブルの場合、この電流を超電導状態で流すためには非常に多くの本数の超電導線材が必要であり、ケーブルの寿命期間に発生するかしないかの短絡事故のために、定格電流の数倍もの事故電流を流すための超電導線材を用いることは非常に不経済であるといえる。本項では、経済性も考慮し、短絡電流が流れた場合は超電導状態から常電導状態に移り、常電導抵抗によるジュール熱が発生することを許容する設計方針とし、短絡電流が流れてもケーブルが健全であることを検証した。

●中間目標 (平成 22 年度)

- ・ 短絡試験 (31.5 kA, 2 sec 相当) でケーブルの性能に劣化がないこと

(2) 耐過電流設計

設計コンセプトとしては、短絡電流が流れた場合に超電導状態を維持できないことを許容し、常電導抵抗によるジュール熱が発生してもケーブルが健全性を保てることを保証する設計とする。そのためには、定格電流以上の短絡電流が流れた場合に、超電導層以外の常電導保護層に電流を分流させ、ケーブルコア内の発熱を小さくすることで、温度上昇を抑制する必要がある。一方で、過剰な常電導保護層を設けることはケーブル径を大きくし、内径 150 mmφの管路に収納できるサイズに抑えることを困難にする。このため、早稲田大学の計算機シミュレータ (電流分布-熱伝導連成解析プログラム) (4)を用いて過電流が流れた場合の温度上昇を解析し、

耐過電流保護設計の妥当性を検証した。

66 kV 級大電流超電導ケーブルの保護設計の概要および数値シミュレーションモデルを図 2.2.1-22 に示す。電流分布解析は 3 次元有限要素法 (ϕ 法) を用いて定式化し (式(2.2.1-3))、Y 系超電導線材の I - V 特性には n 値モデルを採用した (式(2.2.1-4))。ここで、式(2.2.1-3)の ϕ は電気スカラーポテンシャル、 σ は導電率である。式(2.2.1-4)の I は超電導線材に流れる電流、 V は発生電圧、 I_c は臨界電流、 V_c は基準電界 ($1 \mu\text{V}/\text{cm}$)、 n は n 値である。なお、超電導線材の臨界温度を 90 K とし、臨界電流の温度依存性を線形近似している。

$$\nabla \cdot \sigma(\nabla \phi) = 0 \quad (2.2.1-3)$$

$$V = V_c \left(\frac{I}{I_c} \right)^n \quad (2.2.1-4)$$

自己インダクタンス L および相互インダクタンス M は集中定数として回路方程式 (式(2.2.1-5)) に代入し、3 次元有限要素法より求めた各導体内のスカラーポテンシャル (電位 ϕ) より各導体両端の電位差 V を求め、各導体に流れる電流 I を求めた。なお、式(2.2.1-5)の R は端末部の常電導接続抵抗、 E は導体層の両端電圧であり、シールド層は三相短絡を想定して両端電圧を 0 としている。それぞれの変数に対する添え字の *cond* は導体層を、*shield* はシールド層を意味する。

$$\begin{bmatrix} R_{cond} & 0 \\ 0 & R_{shield} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} I_{cond} \\ I_{shield} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{cond} & M \\ M & L_{shield} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{Bmatrix} I_{cond} \\ I_{shield} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} V_{cond} \\ V_{shield} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} E_{cond} \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2.2.1-5)$$

銅フォーマのインダクタンス算出に際しては円柱モデルを用い、電流が断面内を一樣に分布して長手方向に流れると仮定した。超電導導体層と超電導シールド層および銅シールド層の各層は図 2.2.1-22 に示す円筒モデルで近似し、電流が断面内を一樣に撚りピッチと並行に流れると仮定した。銅フォーマの自己インダクタンスおよび他層との相互インダクタンスを式(2.2.1-6)および式(2.2.1-7)に示す。超電導導体層と超電導シールド層および銅シールド層の各層の自己インダクタンスおよび多層との相互インダクタンスを式(2.2.1-8)および式(2.2.1-9)に示す。式(2.2.1-6)-(2.2.1-9)の d はケーブルの長さ、 a は銅フォーマの半径および他各層の中心半径、 p は銅フォーマ以外の各層の撚りピッチ、 s は撚り方向の係数 (S 撚りで 1、Z 撚りで -1) である。

$$L_i = \frac{d}{2\pi} \left(\frac{\mu_0}{4} + \mu_0 \left(\ln \frac{2d}{a_i} - 1 \right) \right) \quad (2.2.1-6)$$

$$M_{ij} = \frac{\mu_0 d}{2\pi} \left(\ln \frac{2d}{a_j} - 1 \right) \quad (j > i) \quad (2.2.1-7)$$

$$L_i = \mu_0 \frac{\pi a_i^2}{p_i^2} d + \frac{\mu_0 d}{2\pi} \left(\ln \frac{2d}{a_i} - 1 \right) \quad (2.2.1-8)$$

$$M_{ij} = \mu_0 s_i s_j \frac{\pi a_i^2}{p_i p_j} d + \frac{\mu_0 d}{2\pi} \left(\ln \frac{2d}{a_j} - 1 \right) \quad (j > i) \quad (2.2.1-9)$$

熱伝導解析は 3 次元有限要素法を用いてモデル化し、式(2.2.1-10)より定式化した。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_j - Q_q \quad (Q_q = h(T - T_b)) \quad (2.2.1-10)$$

上式の ρ は密度、 c は定圧比熱容量、 k は熱伝導率、 T は温度、 Q_j は電流分布解析から求まるジュール発熱、 Q_q は液体窒素冷却を示し、 h は液体窒素への熱伝達係数、 T_b は液体窒素の温度 (77.3 K) である。比熱容量、熱伝導率などの各物性値には非線形性を考慮し、各時間ステップにおけるケーブル各層の温度分布を計算している。境界条件は、ケーブル最外層の保護層の表面が液体窒素に接触しているとし、液体窒素への熱伝達係数は非線形熱伝達特性を考慮した。なお、PPLP[®]の比熱容量と熱伝導率は、液体窒素との混合状態を考慮した一定値とした。

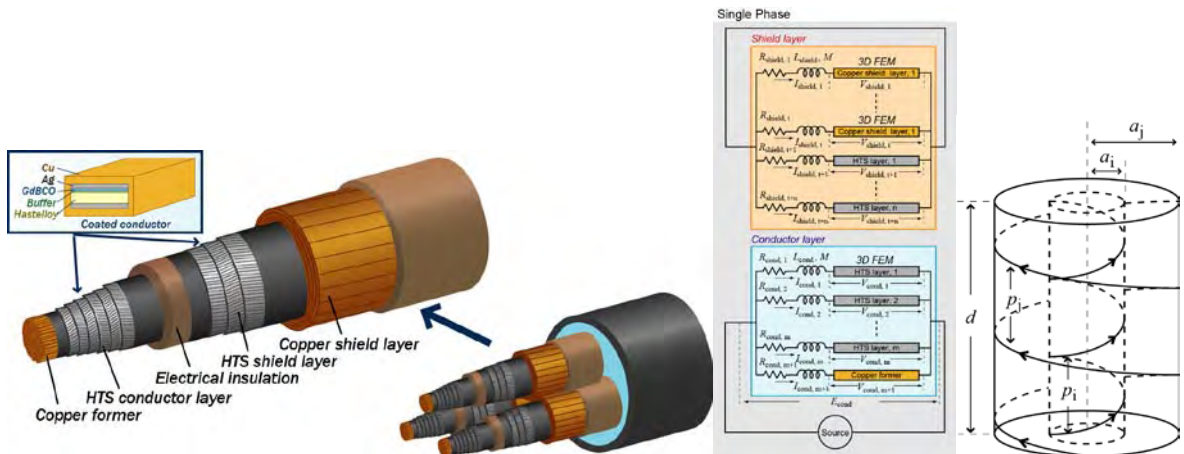


図 2.2.1-22 超電導ケーブルの保護設計と数値シミュレーションモデル

数値シミュレーションの対象とした超電導ケーブルコアの諸元を表 2.2.1-12 に示す。フォーマは銅撚り線を用いた分割集合導体であり、銅の断面積は 140 mm² である。超電導導体層は 4 層構成で、トータルの I_c を 3060 A とした。超電導導体層と超電導シールド層の主絶縁層は PPLP[®] で構成し、厚さは 6 mm である。超電導シールド層は 2 層構成で、トータルの I_c を 2700 A とした。銅シールド層は 4 層構成で、トータルの銅の断面積が 100 mm² である。超電導線材は厚さ 0.17 mm、幅 4 mm であり、安定化層として厚さ 20 μ m の銅メッキ加工が施されている。Y 系超電導線材の常電導転移後 (90 K 以上の温度領域) の「抵抗-温度特性」は実際の線材の測定値をプログラムに組み込んだ。

表 2.2.1-12 66 kV 級超電導ケーブルコアの諸元

項目	諸元	外径 (mm)
フォーマ	140 mm ² 分割集合銅撚り線導体	18.0
超電導導体	4 層、層間絶縁あり	20.3
絶縁層	内部半導電層 主絶縁層：PPLP [®] 、厚さ 6 mm 外部半導電層	33.7
超電導シールド	2 層、層間絶縁あり	34.7
銅シールド	4 層、層間絶縁あり、100 mm ²	39.2
保護層	クラフト紙、不織布	41.7 (ケーブルコア外径)

「31.5 kA、2 sec」の過電流に対する数値シミュレーションの結果を図 2.2.1-23 に示す。超電導導体層および超電導シールド層の温度上昇 (ΔT) は常電導保護層に比べて小さく、それぞれ 142 K および 160 K である。また、導体層を構成する超電導線材 1 本に流れる電流波形は図 2.2.1-24 に示す通りである。

想定される過電流が超電導線材に流れて温度が上昇した際の、線材の臨界電流特性 (I_c) の健全性を検証するため、線材単体に対する耐過電流試験を実施した⁽⁵⁾。図 2.2.1-25 に示すように、線材を FRP 製の治具に固定した状態で低温真空容器内に配置し、伝導冷却により温度を 77 K まで下げた。この後、図 2.2.1-24 に示す電流波形の相似形状の電流を印加し、線材の温度上昇および過電流印加前後の I_c の変化を測定した結果を図 2.2.1-26 に示す。横軸は線材に流した電流と想定電流 (図 2.2.1-24 の電流波形) との比を示している。なお、本試験で過電流を印加する 2 sec 間において線材は断熱状態と見なすことができ、周囲に液体窒素が存在する実際のケーブルよりも厳しい条件下における試験となっている。超電導線材に対して、事故時に想定される過電流を流した際の温度上昇は 170 K であり、図 2.2.1-23 の温度上昇解析結果よりも若干大きいにも関わらず I_c の低下は発生していない。また、想定電流の 1.3 倍の電流を流しても I_c に低下は見られず、図 2.2.1-23 に示したケーブルコアに対する解析結果 (温度上昇) は超電導線材にダメージが発生しない範囲内に収まっていると考えられる。以上の検討結果より、表 2.2.1-12 に示す常電導保護層を有するケーブルコアに対して短絡電流試験を実施することとした。

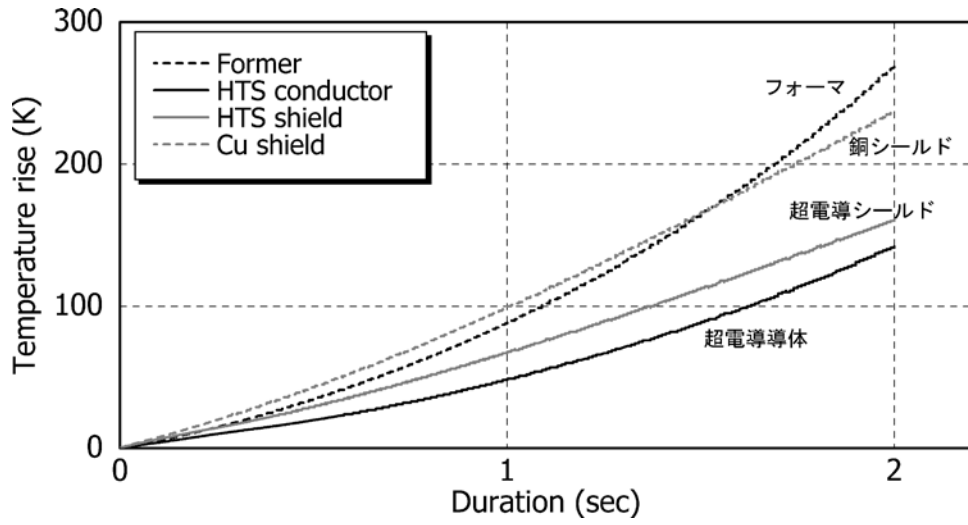


図 2.2.1-23 過電流印加時の温度上昇解析結果 (31.5 kA、2 sec)

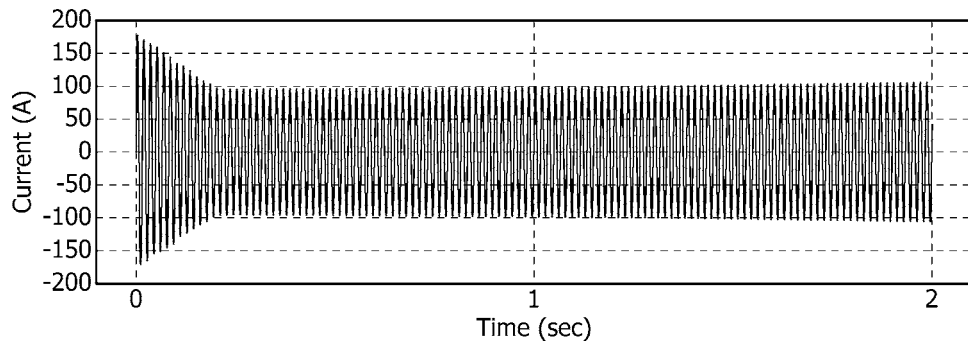


図 2.2.1-24 短絡事故時に超電導線材 1 本に流れる電流



図 2.2.1-25 線材単体の耐過電流試験の概要

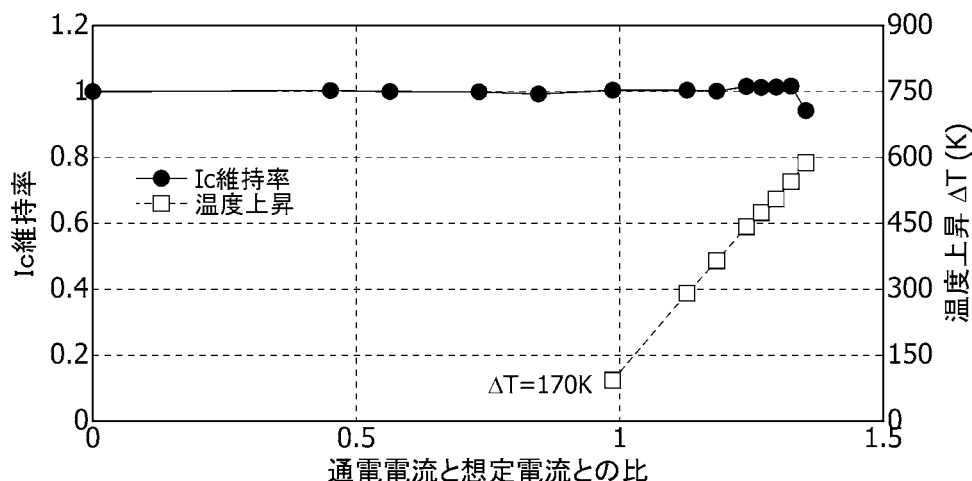


図 2.2.1-26 線材単体の耐過電流試験結果

(3) 耐過電流試験

超電導ケーブルコアに、最大「31.5 kA、2 sec」の過電流が流れても導体が健全であることを確認するため、図 2.2.1-27 に示す短絡発電機を有する試験設備を用いて、過電流が流れた際の温度上昇の確認、および過電流が超電導特性に与える影響について検証した。

過電流試験は、図 2.2.1-28 に示すように、約 2.7 m の 2 本の超電導ケーブルコアを並べ、2 本のコアのシールド層を短絡、閉回路とした状態で導体層に往復通電を行うことで、シールド層に遮蔽電流が誘起される方式とした。試験サンプルの諸元を表 2.2.1-13 に、写真を図 2.2.1-29 にそれぞれ示す。試験サンプルの臨界電流 (I_c) は、コア 1 の導体層が 3270 A、コア 2 の導体層が 3670 A、コア 1 のシールド層が 3650 A、コア 2 のシールド層が 2900 A であり、計測素子として、過電流印加時のコア内部温度上昇を計測するための熱電対、シールド層の誘導電流を計測するためのログスキーコイル、およびコアの漏れ磁場を計測するためのホール素子を取り付けられている。

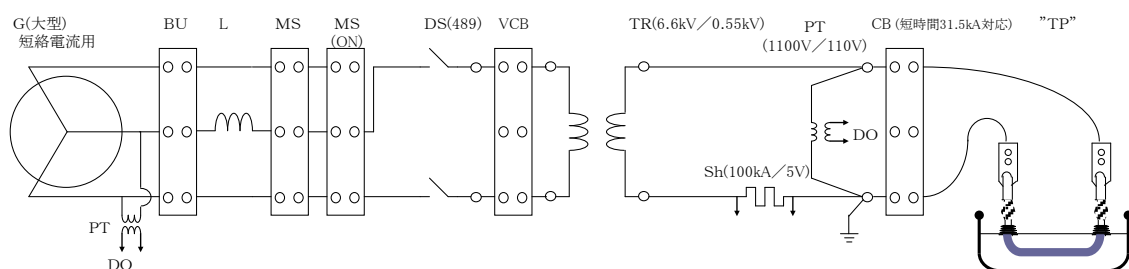


図 2.2.1-27 耐過電流試験回路の概要図

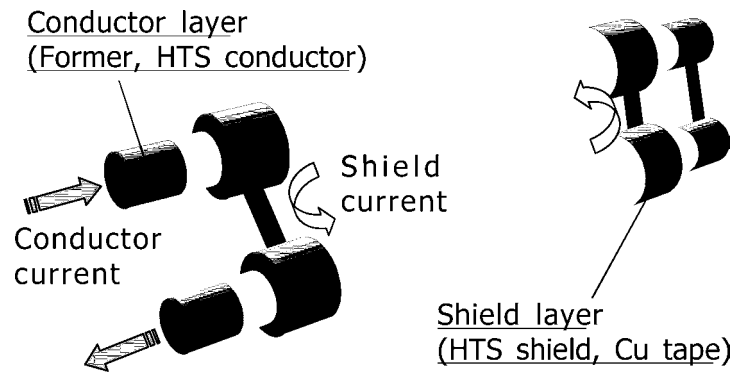


図 2.2.1-28 耐過電流試験サンプルの概要

表 2.2.1-13 耐過電流試験用ケーブルコアの諸元

項目	Core 1	Core 2
フォーマ	140 mm ² 分割集合銅撚り線導 体	140 mm ² 分割集合銅撚り線導 体
超電導導体	4層、4mm幅線材 $I_c=3270$ A	4層、2mm幅線材 $I_c=3670$ A
絶縁層	内部半導電層 主絶縁層：PPLP ^a 、厚さ 6 mm 外部半導電層	内部半導電層 主絶縁層：PPLP ^a 、厚さ 6 mm 外部半導電層
超電導シールド	2層、4mm幅線材 $I_c=3650$ A	2層、4mm幅線材 $I_c=2900$ A
銅シールド	4層、層間絶縁あり、100 mm ²	4層、層間絶縁あり、100 mm ²
保護層	クラフト紙、不織布	クラフト紙、不織布

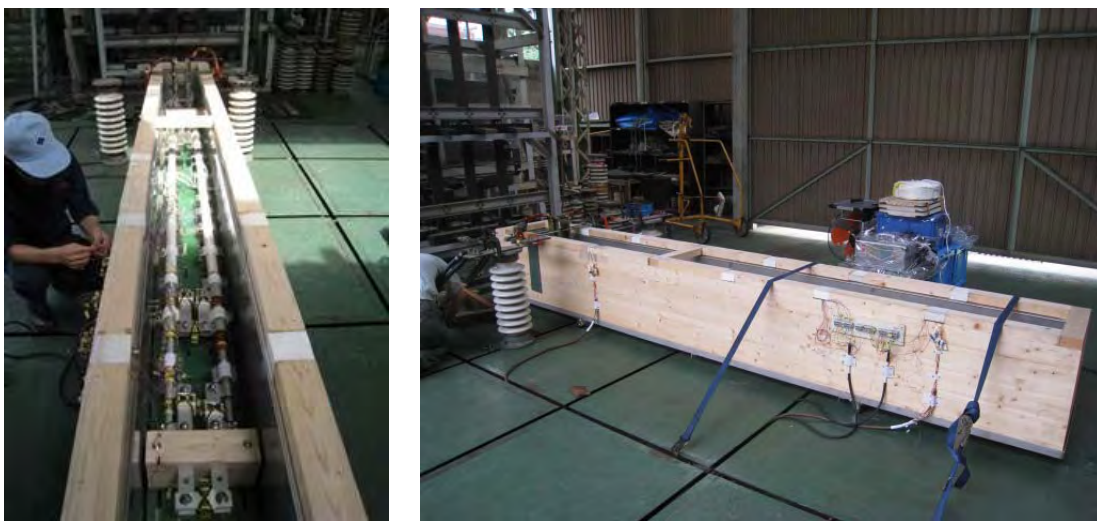


図 2.2.1-29 過電流試験サンプルおよび試験場の写真

「31.5 kA、2 sec」の耐過電流試験時の導体層およびシールド層の電流波形を図 2.2.1-30 に、ケーブルコアの温度上昇を示す。最大「31.5 kA、2 sec」印加時の温度上昇は、超電導導体層で約 100 K、超電導シールド層で約 120 K である。同図中には、数値シミュレーション結果 (図 2.2.1-23 に示した結果) も示してあり、試験結果は解析結果から想定される範囲内である。短絡電流試験後のケーブルコアの健全性を確認するために実施した臨界電流測定結果を、試験前の測定結果と合わせて図 2.2.1-32 に示す。試験前後において、2 本のコアの導体層及びシールド層すべてにおいて臨界電流特性に変化は見られず、最大「31.5 kA、2 sec」の過電流に対してケーブルコアにダメージが発生しないことを確認した。

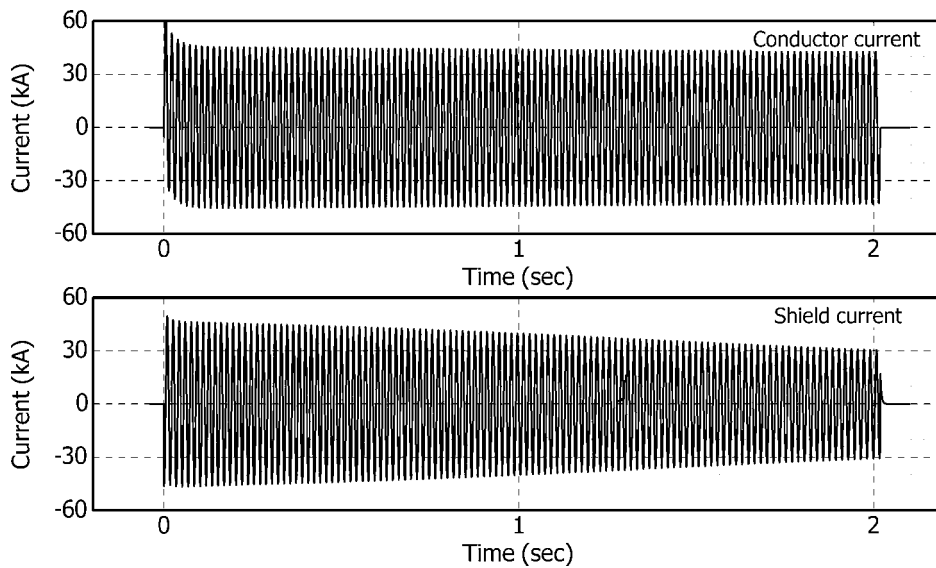


図 2.2.1-30 過電流試験時の電流波形

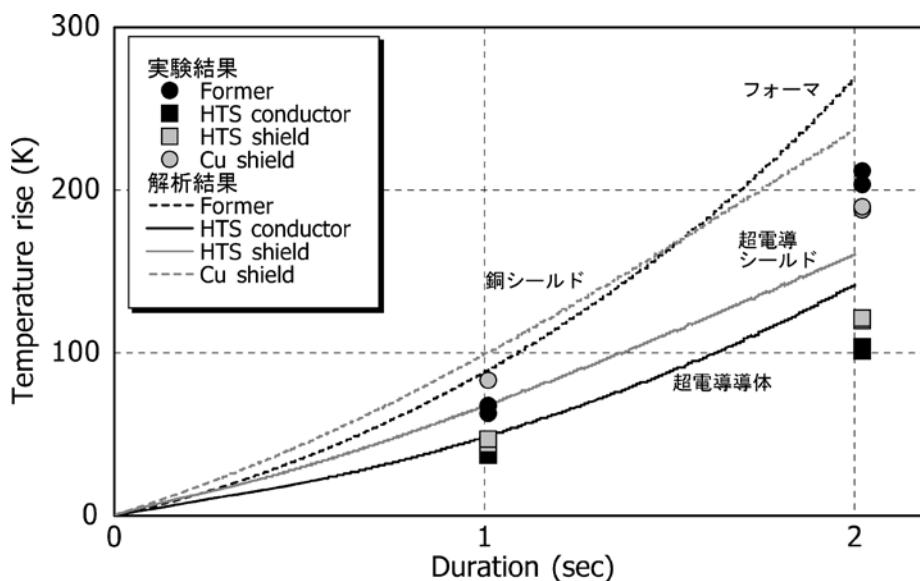


図 2.2.2-31 過電流試験時の導体温度上昇と解析結果との比較 (実験結果の各 2 点はコア 1 とコア 2 の結果を示す)

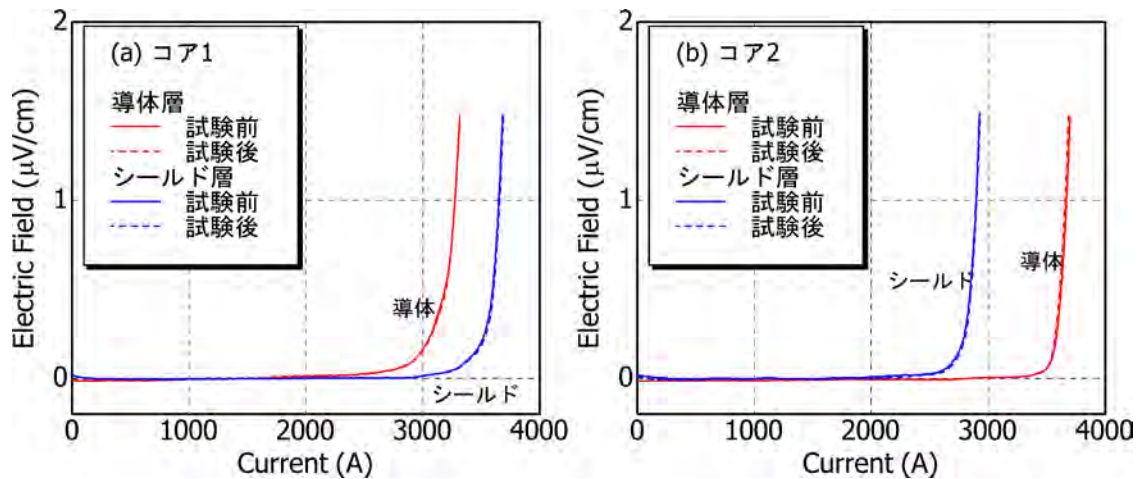


図 2.2.1-32 過電流試験前後の臨界電流測定結果

(4) 短絡事故時の電磁力の影響検討

超電導シールド層を有する三心一括型ケーブルにおいて、定常時は、超電導導体層に流れる送電電流とほぼ同じ大きさで逆位相の電流が超電導シールド層に誘導されて磁気遮蔽を実現するため、ケーブルコア間に発生する電磁力は無視できる。一方で、臨界電流を超える事故電流が流れた場合には、超電導シールド層が常電導転移し、図 2.2.1-30 に示したようにシールド電流が減衰するため、コア外部への漏れ磁場が発生してコア間に電磁力が発生する。この電磁力による影響が懸念されるため、シミュレーション結果を基に検討を行なった。

漏れ磁場が最大となるのは、シールド電流の減衰が大きい遮断直前であり、短絡事故時 (31.5 kA、2 sec) の電流波形解析結果の遮断直前の拡大図を図 2.2.1-33 に示す。本図において、導体電流(A)とシールド電流(B)との和、つまり非遮蔽電流(C)に起因した漏れ磁場が発生すると想定される。前項の耐過電流試験において、コア直上に取り付けたホール素子によって測定した漏れ磁場の大きさは、この非遮蔽電流(C)によって発生する磁場の大きさと同程度であることを確認しており、以下の議論では、最大 20 kA_{peak} の非遮蔽電流によって発生する漏れ磁場の影響を検討した。

図 2.2.1-34 に示すように、三相のうち二相間で短絡事故が発生した場合、事故相 (W, V 相) には位相が反転した事故電流が流れると想定され、2 コア間に反発力が発生する。上述のように、非遮蔽電流 20 kA_{peak} に対して 2 コア間に発生する反発力 (側圧) を計算した結果、1860 N/m となった。本側圧値は、これまでの開発実績から考えて、ケーブルの特性に影響を及ぼさない範囲に収まっていると考えられるが、今後詳細な電磁力解析を行うとともに、その影響を実験により検証する予定である。

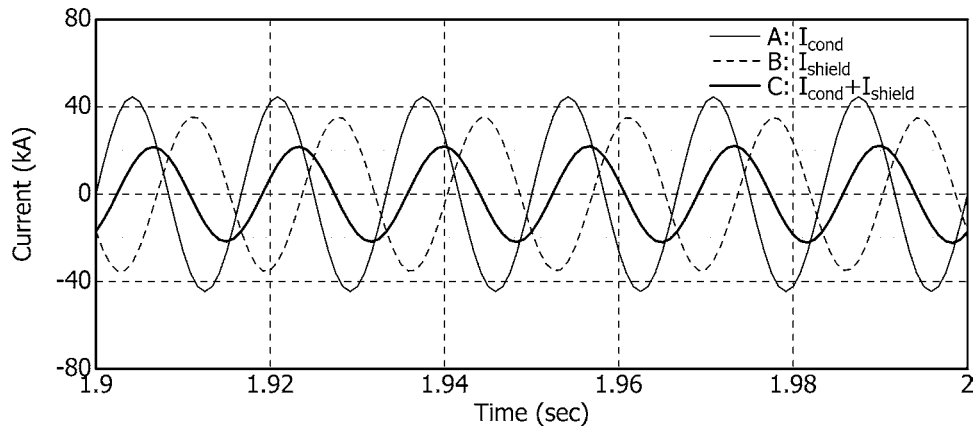


図 2.2.1-33 短絡事故時（31.5 kA、2 sec）の電流波形解析結果（拡大図）

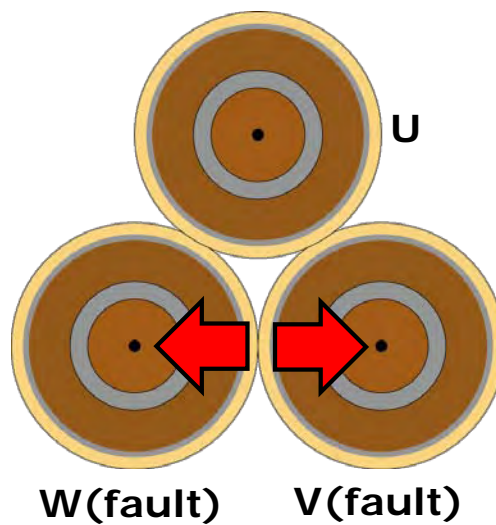


図 2.2.1-34 二相短絡時のモデル

(5) まとめ

- 計算機シミュレータを用いて過電流通電時の温度上昇解析を行い、内径 150 mmφの管路に収納可能なケーブルの保護設計を行った。
- 過電流保護設計の妥当性を確認するため、ケーブルコアを作製して短絡試験を行った結果、ケーブルコア内の温度上昇はシミュレーション結果から想定される範囲内であり、最大「31.5 kA、2 sec」の過電流に対してケーブルコアにダメージが発生しないことを確認した。
- 二相短絡事故（31.5 kA、2 sec）を想定して、ケーブルコア間に発生する電磁力の検討を行った。

(6) 今後の予定

- 短絡事故時にコア間に発生する電磁力の詳細解析を行い、ケーブルに及ぼす影響についてさらに検証を進める。

2.2.1-4 三心一括ケーブル技術（住友電気工業）

(1) 研究開発目標

検証用超電導ケーブルの最終設計に際しては、前項 2.2.1-2 項の交流損失低減技術、2.2.1-3 項の耐過電流設計技術をもとにケーブル構造を決定するが、それら以外に考慮すべき点として、ケーブル製造時のドラム曲げや三心撚りによってケーブルに機械的な応力（引張り、曲げ）が加えられるため、その応力に対してもケーブルの健全性が保たれることが重要となる。さらに、両端末を固定した状態で初期冷却を行う三心一括型ケーブルにおいては、室温から液体窒素温度まで冷却した際に発生する約 0.3 %の熱収縮に対するケーブル特性の劣化が懸念される。

本項では、三心一括型ケーブルの製造から初期冷却までの工程において、ケーブル（Y 系超電導線材）が経験する機械的な応力に対する健全性を検証するため、下記の試験を実施した結果について述べる。

- ・ 実際の製造ラインを通した三心ケーブルコアの試作・検証
- ・ 初期冷却を模擬した三心ケーブルコアの熱機械特性検証試験

(2) 三心ケーブルコアの試作・検証

各種要素試験により決定した試作用三心一括型ケーブルの設計を表 2.2.1-14 に示す。フォーマは分割集合導体であり、銅の断面積は 140 mm² である。超電導導体層は 2 mm 幅の Clad 基板線材を用いて構成した 4 層構造である。なお、超電導導体層に使用する線材幅は 4 mm 幅を本命としているが、スリット技術の改善によって 2 mm 幅線材を採用する可能性も残っているため、機械的な特性に劣る 2 mm 幅線材を用いた試作を実施することにした。超電導導体層と超電導シールド層の間の絶縁層は PPLP[®]で構成し、厚さは 6 mm である。超電導シールド層は 4 mm 幅の Clad 基板線材を用いて構成した 2 層構造である。銅シールド層は 4 層で構成され、銅の総断面積が 100 mm² である。Y 系超電導線材には安定化層として銅がメッキ加工されており、メッキ厚が 20 μm である。なお、ケーブルコア 3 心のうち、超電導線材が入っているのは 1 心（超電導コア）のみであり、残りの 2 心は機械強度特性を揃えるために基板を同幅にスリットしたダミー線材を用いて構成したダミーコアである。また、超電導コアの各超電導層に使用した Y 系超電導線材は 3 本であり（超電導導体層：計 12 本、超電導シールド層：計 6 本）、残りの線材は機械特性および表面摩擦係数を揃えるために基板を同幅にスリットしたダミー線材に同厚の銅メッキを施した線材を用いている。

上記設計に対して試作した「10 m 三心ケーブルコア」の試作概略工程と試作時の状況写真を図 2.2.1-35 に示す。本試作は超電導ケーブルの製造に使用する実際のラインを通じて行った。超電導線材集合工程において、2 mm 幅に細線化した線材のギャップ管理等に問題がないことを確認した。

表 2.2.1-14 試作用三心一括型超電導ケーブルの設計（導体 4 層、シールド 2 層）

項目	諸元	外径 (mm)
フォーマ	140 mm ² 分割集合銅撚り線導体	18.0
超電導導体	4 層、2mm 幅 Clad 基板線材 層間絶縁あり	20.3
絶縁層	内部半導電層 主絶縁層：PPLP [®] 、厚さ 6 mm 外部半導電層	33.7
超電導シールド	2 層、4mm 幅 Clad 基板線材 層間絶縁あり	34.7
銅シールド	4 層、層間絶縁あり、100 mm ²	39.2
保護層 (ケーブルコア外径)	クラフト紙、不織布	41.7
三心撚り (三心コア外径)	緩み無し三心集合	89.8

【製造概略工程】

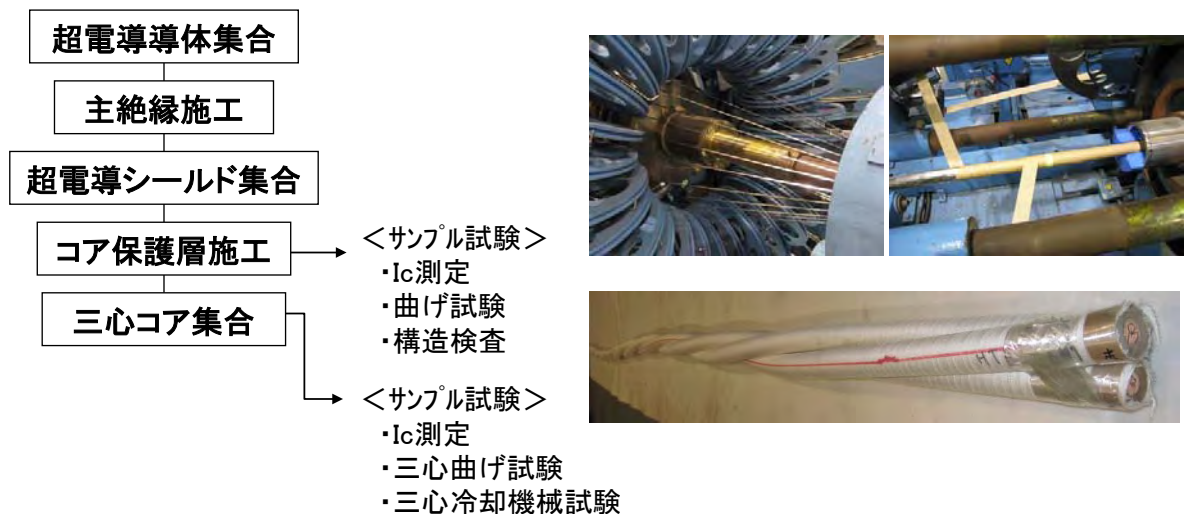


図 2.2.1-35 10 m 三心ケーブルコアの試作概略工程と試作時の写真

●単心ケーブルコア検証結果

コア保護層施工後に切り出した 2.5 m 単心ケーブルコアの I_c 測定を行った結果、全ての線材で I_c の低下がないことを確認した。本結果から、単心コア製造工程において、2 mm 幅および 4 mm 幅に細線化した Clad 基板線材の特性が低下しないことを確認した。

図 2.2.1-36 は、 I_c 測定終了後の 2.5 m 単心ケーブルコアに対して実施した曲げ試験結果である。曲げ試験では、所定の直径を有する曲げ治具に対して 2 回の往復曲

げを行った後に直状にもどした状態で I_c 測定を実施した。なお、縦軸はケーブル化後（曲げ試験前）に測定した I_c に対する曲げ試験後の I_c の維持率を示しており、各層 3 本の超電導線の維持率の平均値で示している。試験結果から分かるように、試作したコアは 1500 mmφ の曲げに対しても I_c 低下が生じることはなく、十分な機械特性を有していることが確認された。

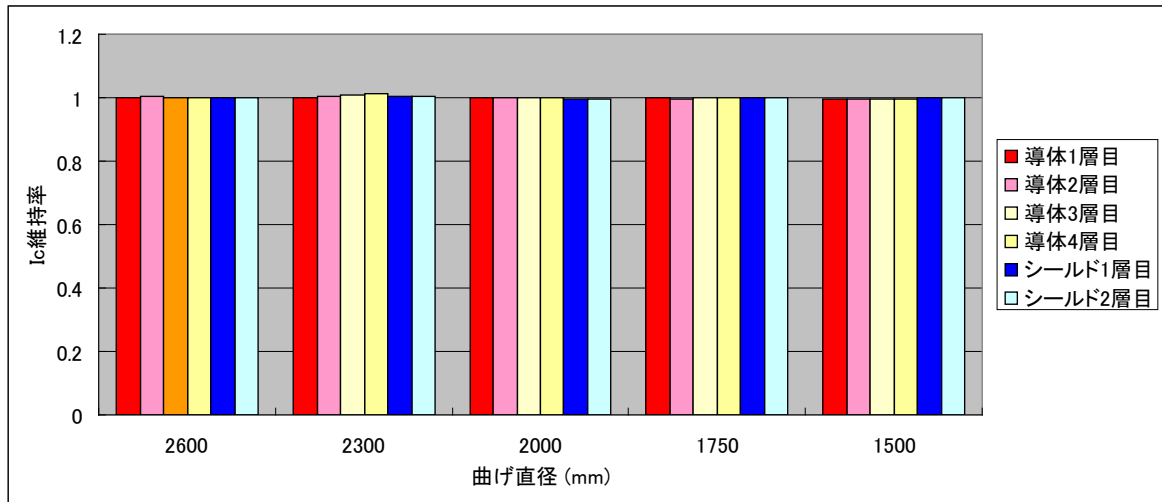


図 2.2.1-36 単心ケーブルコアの曲げ試験結果

●三心ケーブルコア検証結果

三心撚り工程後に切り出した 7 m 三心ケーブルコアの I_c 測定を行った結果、全ての線材で I_c の低下がないことを確認した。本結果から、三心コア製造工程において、2 mm 幅および 4 mm 幅に細線化した Clad 基板線材の特性が低下しないことを確認した。

図 2.2.1-37 は、 I_c 測定終了後の 7 m 三心ケーブルコアに対して実施した曲げ試験結果である。曲げ試験では、2300 mm φ の直径を有するドラムに対して 2 回の往復曲げを行った後に直状にもどした状態で I_c 測定を実施した。なお、縦軸は曲げ試験前に測定した I_c に対する曲げ試験後の I_c の維持率を示しており、各層 3 本の超電導線の維持率の平均値で示している。試験結果から、試作した三心コアは 2300 mm φ の曲げに対して I_c 低下が発生しないことが確認された。140 mm φ のケーブルに対する出荷試験で規定されている曲げ直径は 2500 mm φ（ケーブル外径の 18 倍）程度であり、十分な機械特性を有していることが確認された。

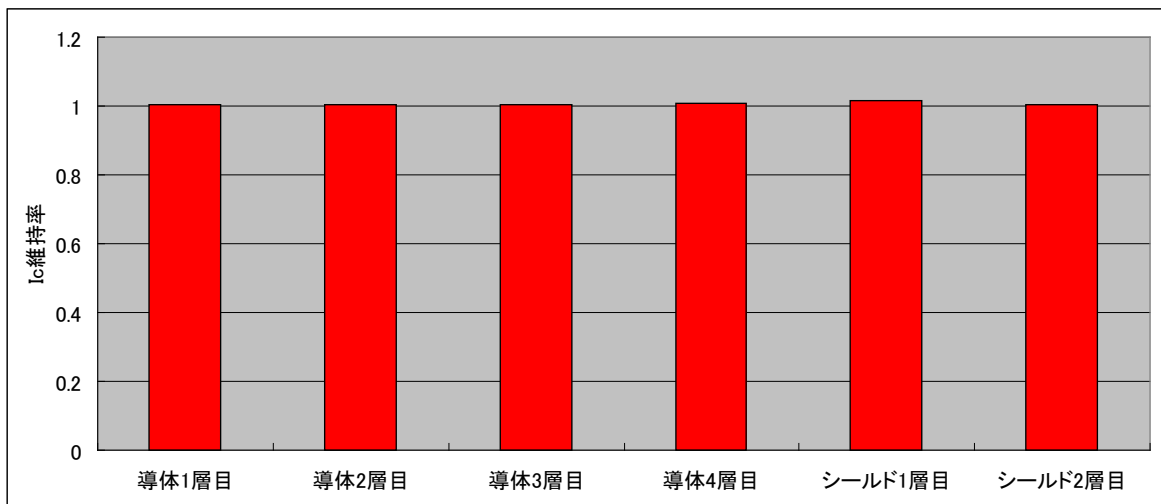


図 2.2.1-37 三心ケーブルコアの 2300 mm φ曲げ試験結果



図 2.2.1-38 三心ケーブルコアの曲げ試験

(3) 三心ケーブルコアの熱機械特性検証試験

ケーブルは室温から液体窒素温度に冷却すると約 0.3 %の熱収縮を起こす。これまでは、三心ケーブルを弛ませて冷却時の熱収縮を弛みで吸収する方法が検討されてきた。一方、本プロジェクトでは、150 mm φ管路に適用するケーブルを目指しており、そのコンパクト化が求められている。これまでの設計検討の結果、従来通り三心を弛ませる構造では、ケーブルサイズをコンパクトにすることが難しく、三心を弛ませないことを前提にケーブル設計を進めている。三心を弛ませず、かつ端末を固定した状態においてケーブルを室温から冷却すると、ケーブルコアに熱収縮による引張力が印加される。ここでは、この引張力を試作した三心ケーブルコアを用いて実測するとともに、熱収縮に対するケーブル性能の健全性について検証した。

試験装置の概略図および概観写真を図 2.2.1-39 および図 2.2.1-40 に示す。三心コアサンプルは試験容器の両端に固定されており、サンプルを液体窒素中に浸漬した状態で試験容器を引っ張ることにより引張試験を行う。試験容器部には、引張試

験時に容器自身が分担する張力を抑制するためにベローズが 2 箇所挿入されており、0.3 %伸びに相当するサンプル引張時に容器が分担する張力は約 20 kg である。上記張力は、サンプルに発生する張力約 3 t レベルに比べ無視できるほど小さい値である。なお、試験時の引っ張り量は 1.5 mm ピッチのボルトナットの回転数により管理した。試験状況を図 2.2.1-41 に示す。

液体窒素中における引っ張り試験結果を図 2.2.1-42 に示す。液体窒素中において最大 0.35 %の引っ張り歪みをサンプルに印加したが、線材の I_c 特性に低下は見られなかった。また、0.3 %熱収縮に相当する引張力は約 3 t であり、フォーマの機械特性から想定される値とほぼ同等であることを確認した。なお、本サンプルで確認した引張力は直線状態での値であり、実際の長尺ケーブルでは曲がりおよびオフセットなどが存在することから、実際のケーブルに発生する引張力は上記値よりも小さくなると予想される。

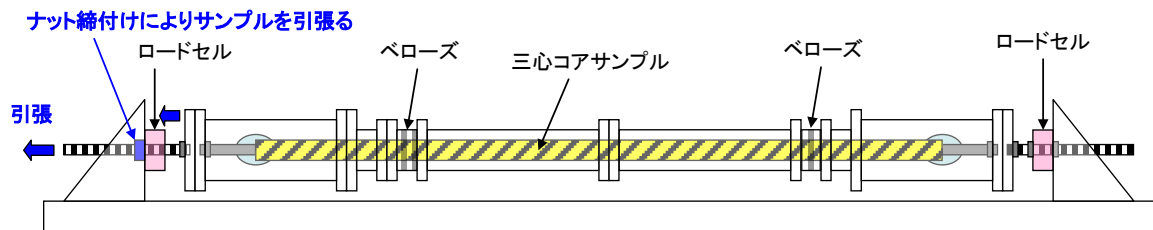


図 2.2.1-39 三心コア引張試験装置の概略図



図 2.2.1-40 三心コア引張試験装置の概観写真



図 2.2.1-41 三心コアサンプルの LN₂ 中での引張試験状況

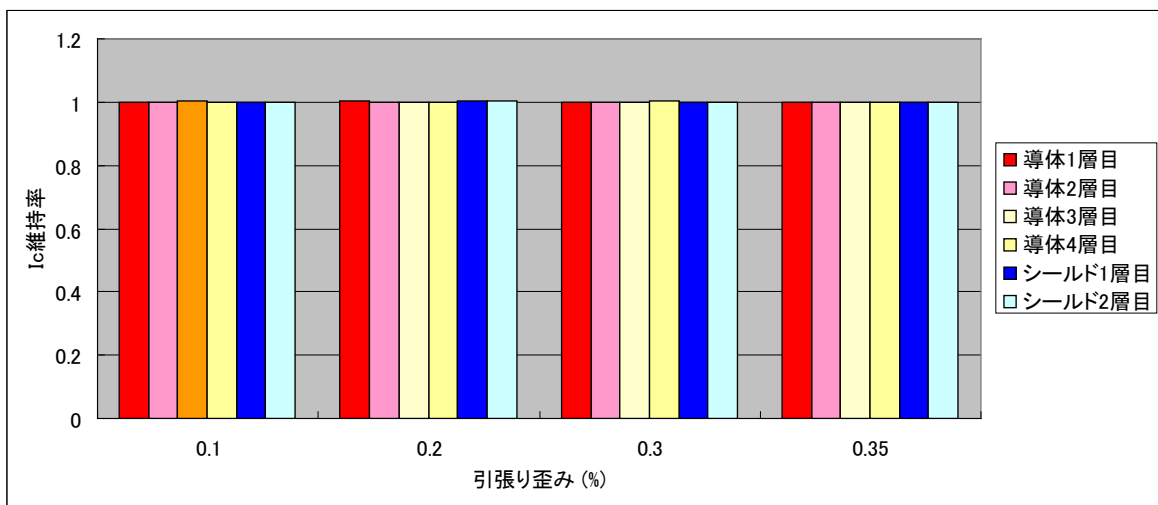


図 2.2.1-42 三心コアサンプルの熱機械試験結果

(4) まとめ

- ・ 実際の製造ラインを通した三心ケーブルコアの試作により、2 mm 幅および 4 mm 幅線材ともに製造工程において特性が低下しないことを確認した。
- ・ 試作した単心ケーブルコアおよび三心ケーブルコアに対して曲げ試験を実施した結果、十分な機械特性を有することを確認した。
- ・ ケーブル両端末を固定した状態で冷却した際に発生する熱収縮によって、ケーブルの特性が低下しないことを確認した。

(5) 今後の予定

- ・ ケーブル最終設計完了後に再び機械試作を行い、15 m 検証ケーブルの製造条件および健全性の確認を行う。

2.2.1-5 終端接続技術（住友電気工業）

(1) 研究開発目標

大電流・低損失超電導ケーブルシステムの実現のためには、超電導ケーブルの開発だけでなく、それと常電導機器（送電線、遮断器、変圧器等）とを接続する終端接続部の開発が不可欠である。しかしながら、これまでに 5 kA 級の大電流高温超電導機器向けの終端接続部の開発が行なわれた実績はほとんどなく、本項では大容量接続技術の開発を行なった結果について述べる。

終端接続部の特徴をまとめると、以下のように記述できる。

- ▶ 機械的特性：超電導ケーブルシステムが室温から液体窒素温度まで冷却された際に発生する熱収縮によってケーブル部に引張力が発生するため、終端接続部はその引張力を引止める構造を有する必要がある。
- ▶ 電気的特性：超電導部と常電導部との電氣的な接続部には接続抵抗が存在する。ここで発生するジュール熱がケーブル部に伝達し、ケーブルの温度を上昇させて常電導転移させることなく安定に通電できる必要がある。
- ▶ 熱的特性：接続する常温機器からの外部からの侵入熱や上述した接続抵抗による発熱など、終端接続部はケーブル部と比べて熱損失が大きくなる箇所である。特に極低温部から常温部へ電気を引き出す電流リードからの侵入熱は大きく、その侵入熱の低減が重要な課題である。

前項 2.2.1-4 において熱収縮によって発生する引張力は従来と同等であることが確認されたため、「機械的特性」に関する新規開発項目はない。一方で、5 kA の大電流化に対しては、電流リードの大容量化と超電導－常電導接続部の熱的安定性の確認が重要課題である。下記のプロジェクト目標を達成するため、電流リードおよび超電導－常電導接続部の開発を行った。

●中間目標（平成 22 年度）

- ・ 5 kA 連続通電*を行い、ケーブル導体、超電導－常電導接続、電流リードに異常がないこと

※ケーブルの熱平衡が得られるまで連続通電を行う

(2) 大容量電流リードの開発

電流リードのサイズは、端末容器やブッシング等の終端接続部全体のサイズを決定する要因であることから小型化が期待されている。本プロジェクトでは定格電流が 5 kA と大電流であることから、小型化に適している絶縁被覆を有する細径銅素線を撚り合わせた素線絶縁銅撚線を用いた電流リードを採用した。

電流リードの熱損失は終端接続部全体の熱損失において支配的であることから、電流リードの低損失設計が望まれている。電流リードの熱損失は電気抵抗から発生するジュール損失と常温側からの熱伝導による侵入熱が主なファクターであり、これらの熱損失を低減するために、電流リード断面積をパラメータとした検討を実施

した。

電流リード長さは 66 kV 級の碍子サイズから 2.7 m と決定し、電流リードの断面積と 5 kA 通電時における熱損失の相関を定常熱伝導シミュレーションにより求めた結果を図 2.2.1-43 に示す。図(b)から分かるように、5 kA 通電時の熱損失を最小にするためには約 6000 mm²の電流リードが必要となる。一方で、図(a)から分かるように、断面積を大きくすれば無負荷時の熱損失は大きくなり、同時に電流リード自体のサイズも大きくなる。ここではよりコンパクトな電流リードを指向することとし、電流リードの断面積を 3500 mm²に決定して試作・検証を行った。

電流リードの熱損失測定試験状況を図 2.2.1-44 に示す。電流リードは 66 kV 級の FRP ブッシングを貫通した状態で容器内に挿入され、2 本の電流リードに往復通電を行って熱損失を測定した。電流リードの熱損失測定結果を解析結果と合わせて図 2.2.1-45 に示す。実験により得られた熱損失は解析結果から想定される範囲であり、設計の妥当性を確認した。さらに、熱損失測定試験に引き続き、5 kA の連続通電試験を実施した結果を図 2.2.1-46 に示す。電流リード各部の温度をモニタしながら通電を行った結果、通電中に急激な温度変化等は見られず、熱的な平衡が安定に得られていることを確認した。

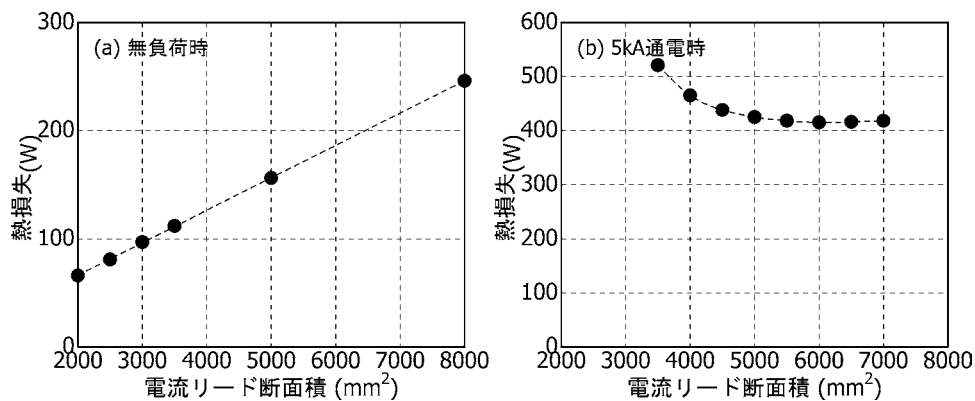


図 2.2.1-43 電流リード熱損失数値解析結果



図 2.2.1-44 3500 mm²電流リードと熱損失測定試験

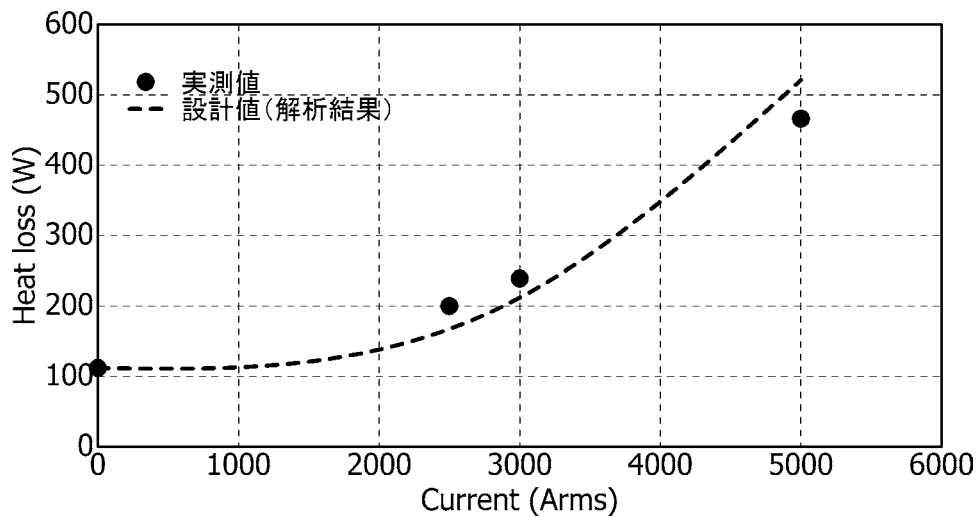


図 2.2.1-45 3500 mm² 電流リードと熱損失測定試験結果

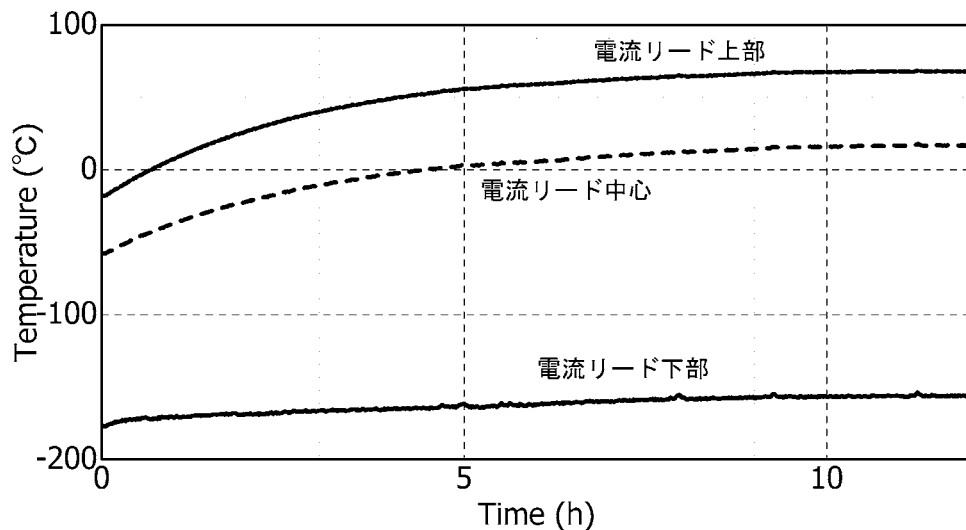


図 2.2.1-46 5 kA 通電時の電流リード各部の温度変化

(3) 超電導—常電導接続部の開発

超電導—常電導接続部では、超電導線と銅製の接続金具とがハンダで接続される。接続金具の設計において重要なパラメータとなるのが、接続長と金具厚みである。接続長を長くすれば接続抵抗は小さくなるが金具のサイズが大きくなる。また、金具厚みを厚くすれば直流抵抗は小さくなるが、交流通電時には表皮効果により通電に寄与する断面積が増加しない懸念がある。この 2 つの設計寸法を決定するため、以下の試験および解析を実施した。

超電導線と接続金具との接続長を決定するため、図 2.2.1-47 のような治具を用いた接続抵抗測定試験を実施した。接続長をパラメータとして接続抵抗を測定した結果を図 2.2.1-48 に示す。なお、使用した線材は 4 mm 幅の Clad 基板線材である。試験の結果、20 mm 以上の接続長では接続抵抗の変化はほとんどなく、施工時のズレを加味して接続長を 25 mm に決定した。

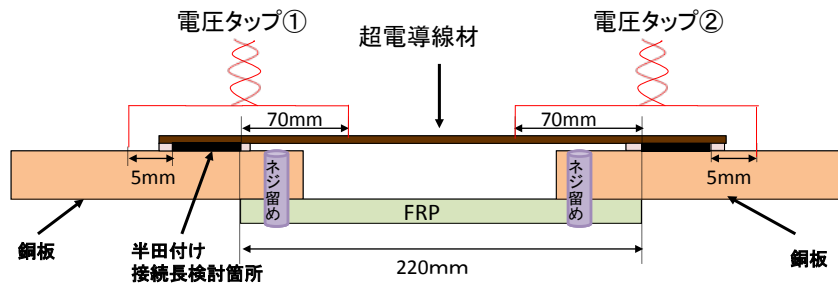


図 2.2.1-47 接続抵抗測定試験モデル図

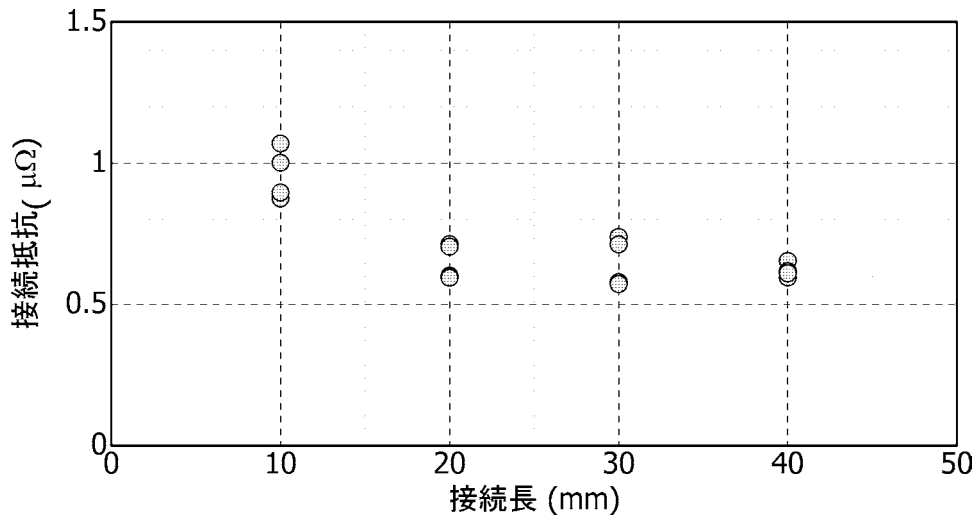


図 2.2.1-48 接続抵抗測定試験結果

次に、金具厚みを決定するため、金具厚みをパラメータとして電流分布解析を実施した結果を図 2.2.1-49 に示す。図には典型的な例として厚みが 3 mm の場合と 10 mm の場合の 2 通りを示しているが、金具が厚くなるほど電流は表面を流れ、断面積の大部分が通電に寄与しない結果、交流抵抗は 3 mm と 10 mm でほとんど差異がない。実際に 1 層導体を用いて金具の交流抵抗を測定した試験においても同様の結果が得られた。以上の結果から接続金具の厚みを 3 mm に決定した。

以上の検討結果を反映して設計した超電導－常電導接続金具の構造を図 2.2.1-50 に示す。今後、本金具とケーブルとを組み合わせた 5 kA 連続通電試験を実施する予定である。

(4) まとめ

- ・ 5 kA 級電流リードの設計検討を行った結果、3500 mm² 撚り線構造を採用した。
- ・ 3500 mm² 電流リードを試作して熱損失を評価した結果、設計値と同等の 470 W@5 kA であることを確認した。
- ・ 電流リードの 5 kA 連続通電に成功した。この際、電流リード各部で熱的な平衡が安定に得られていることを確認した。
- ・ 超電導－常電導接続金具の設計パラメータである接続長と金具厚みに対して

実験および数値解析による検討を行い、構造設計を完了した。

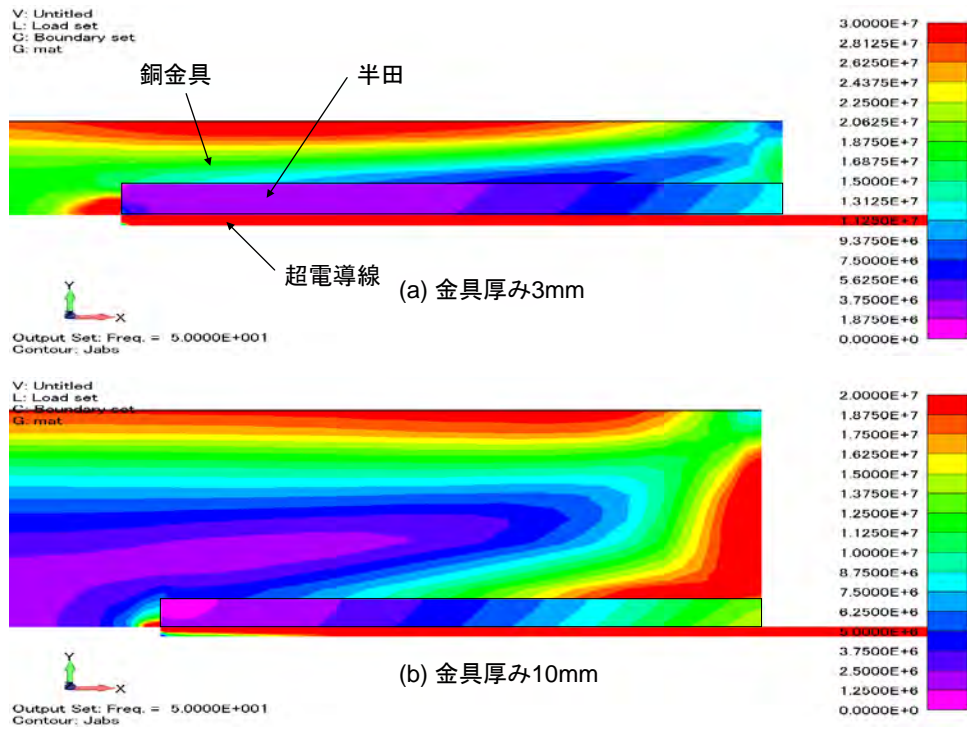


図 2.2.1-49 金具厚みをパラメータとした電流分布解析結果

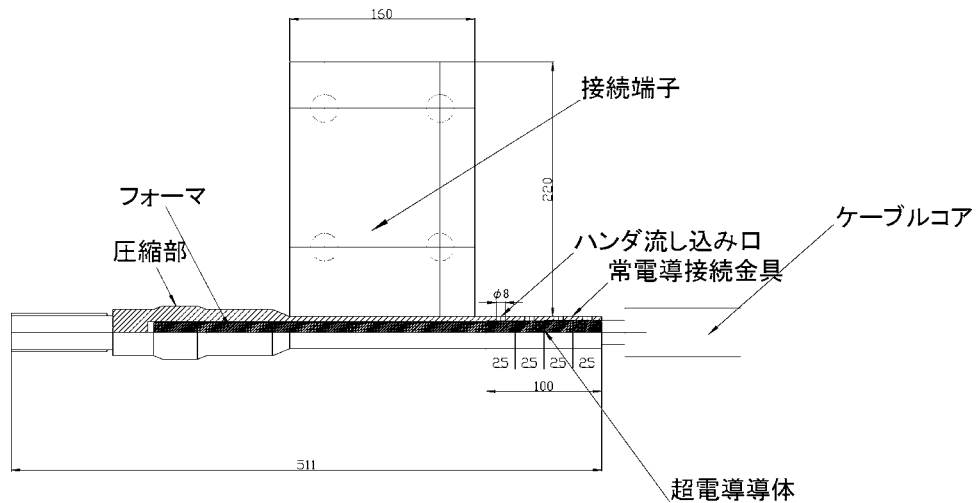


図 2.2.1-50 超電導－常電導接続金具の構造

(5) 今後の予定

- ・ 超電導ケーブルと超電導－常電導接続金具を組み合わせた 5 kA 連続通電試験を実施し、設計の妥当性を確認する。
- ・ 5 kA 級電流リードのさらなる低損失化の可能性について検討を行う。

2.2.1-6 66 kV 大電流ケーブルシステム検証（住友電気工業）

(1) 研究開発目標

66 kV 大電流ケーブルの実用性を検証するためには、大電流通電技術、交流損失低減技術の開発成果を活かしたケーブルを開発し、実用化時の要求使用に基づいた課通電試験を行う必要がある。このため、前記大電流・低損失ケーブル化技術の開発成果を踏まえて、検証用超電導ケーブルシステムの設計を行い、課通電試験計画案を作成した。

●中間目標（平成 22 年度）

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

○最終目標（平成 24 年度）

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

(2) 検証試験項目（案）

66 kV 大電流ケーブル実用化時の耐久性を評価するためにとりまとめた試験条件を表 2.2.1-15 に示す。15 m ケーブルシステムを用いて検証すべき主要試験項目は以下の 3 点となる。

- ・ 66 kV 級電力ケーブルに要求される耐電圧試験
- ・ 30 年間運用に相当する加速試験条件における課通電試験
- ・ ケーブル損失 2.1 W/m/-相@5 kA, 66 kV の確認

耐電圧試験および課通電試験（加速試験）条件の算定根拠を表 2.2.1-16 に示す。試験条件の決定に際しては、超電導ケーブル実証プロジェクト(2007 年)、Super-GM-500 m ケーブル試験結果（2004 年）、及び JEC3401（66 kV / 77 kV 級ケーブルの試験電圧、2006）を参考にした。課通電試験（加速試験）は試験スケジュールを考慮して試験期間を 1 ヶ月とし、30 年運用に相当する加速試験条件として試験電圧を 51 kV に設定した。なお、通電は 8 時間 ON、16 時間 OFF のサイクル試験とした。

表 2.2.1-15 検証試験項目

No.	項目	出荷試験	15m 検証試験	残存試験
1	商用周波長時間耐電圧試験 (90 kV, 3 h)	●		●
2	商用周波耐電圧試験 (110 kV, 10 min)	●		●
3	部分放電試験	●	○	●
4	雷インパルス耐電圧試験 (±385 kV, 3 回)	●		●
5	長期課通電試験 (1 ヶ月)		○	
6	外観検査	○	○	
7	静電容量試験	○ (室温) ●	○	●
8	誘電正接試験	●	○	●
9	絶縁抵抗試験	● (室温)	○ (メガ)	
10	導体抵抗試験 (フォーマ)	●		
11	構造試験	●		
12	曲げ試験	●		
13	I_c 測定	●	○	●
14	シールド電流測定		○	
15	交流損失測定	●	○	●
16	断熱管侵入熱測定		○	
17	気密試験	○ (室温)	○ (室温)	
18	真空リーク試験	○ (室温)	○ (室温)	
19	圧力損失測定		○ (参考)	
20	インダクタンス測定	● (参考)		

●サンプル試験あるいはモデル試験、○全長試験

表 2.2.1-16 試験電圧の算定根拠

試験項目	OF ケーブル (JEC-3401(2006))	超電導ケーブル (15 m 検証ケーブル)
形式試験 <u>商用周波</u> <u>長時間</u> <u>耐電圧試験</u> (サンプル)	$V_{ac} = \frac{U_m}{\sqrt{3}} \times K1 \times K2 \times K3$ Um : 最高使用電圧 72 kV K1 : 時間係数 (30 年/3 時間) ^(1/n) , n=30 K2 : 抜き取り試験に対する安全率 1.1 K3 : その他係数 1.25 <u>Vac = 90 kV at 3 時間</u>	左記計算式より計算。 超電導ケーブルの n については、Super-GM にて n=49 が報告されているが、データ数が少ないため、厳しい側として OF ケーブルで使われている n=30 を使用。 <u>Vac = 90 kV at 3 時間</u>
開発試験 <u>商用周波</u> <u>耐電圧試験</u> (サンプル)	試験電圧 V=Um×C1×K3 C1=k1×k2×k3×k4 k1: 1 線地絡時の健全相の電圧上昇倍率 1.0 at 66 kV k2: 時間換算係数 (2/600) ^(1/n) ; n=20 (短時間) k3: 負荷遮断時の電圧上昇倍率 1.35 at 66 kV k4: 機器の耐電圧試験裕度 1.14 K3: 不確定要素に対する裕度 1.1 <u>V = 100 kV at 10 分</u>	左記計算式より計算。 K2 の値は未確定。 厳しい側で考え、n=30 とする。 <u>V = 110 kV at 10 分</u>
開発試験 雷インパルス 試験 (サンプル)	<u>試験電圧=LIWV×K2'×K3'=425 kV</u> LIWV = 350 kV (66 kV 級) K2' : 温度係数 1.1 (常温) K3' : 裕度 1.1 <u>回数 : ±3 回</u>	左記計算式より計算。 温度係数については、温度変化が小さいため、K2'=1.0 として計算。 <u>試験電圧 385 kV at ±3 回</u>
開発試験 <u>長期</u> <u>課通電試験</u> (全長)	試験電圧 = (30 年/試験期間) ^(1/n) × Um / √3 試験期間=30 年/2 ^M M= (試験温度 - 基準温度) /7 通電条件 : 当事者間で協議 ※例 電圧 : 48 kV 試験期間 0.5 年、n=30、Um=72 kV at 66 kV	左記計算式より計算。 n=30、試験期間 1 ヶ月として、 <u>電圧 : 51 kV</u> <u>通電 : 8 時間 ON, 16 時間 OFF</u>

(3) 検証試験システム構成 (案)

図 2.2.1-51 に検証用超電導ケーブルシステムの構成案を示す。ケーブルは 15 m 長の三心一括型であり、三心のうち二心は課電および通電を行う課通電コアであり、残り一心は課電のみを行う課電コアである。ケーブル両端には終端接続部 (端末) を設けており、A 端末はブッシング 3 本 (うち通電用電流リードを有するのは 2 本) を有する端末であり、B 端末はシステム全体の熱負荷を低減するために容器内部で各相の接続を行うブッシングがない端末である。なお、両端末内においてケーブルは大地に対して固定され、この状態で冷却および昇温が行われる。本ケーブルシステムを冷却システムに接続し、液体窒素を循環させることで冷却を行う。冷却システムは、冷凍機、液体窒素循環ポンプ、リザーバタンクなどで構成されている。

通電時には、課通電コア二心の導体層に单相 (往復) 通電を行う。この際、二心のシールド層は両端末内で短絡処理されているため、シールド層には導体層とは位相が反転した誘導電流が発生する。ケーブルの交流損失測定は、ケーブル各部に取り付けられた温度センサを用いて液体窒素の温度差を測定し、熱損失に換算するカロリメトリック法を用いる。また、課電時には、三心の導体層に対して单相電圧課電を行う。

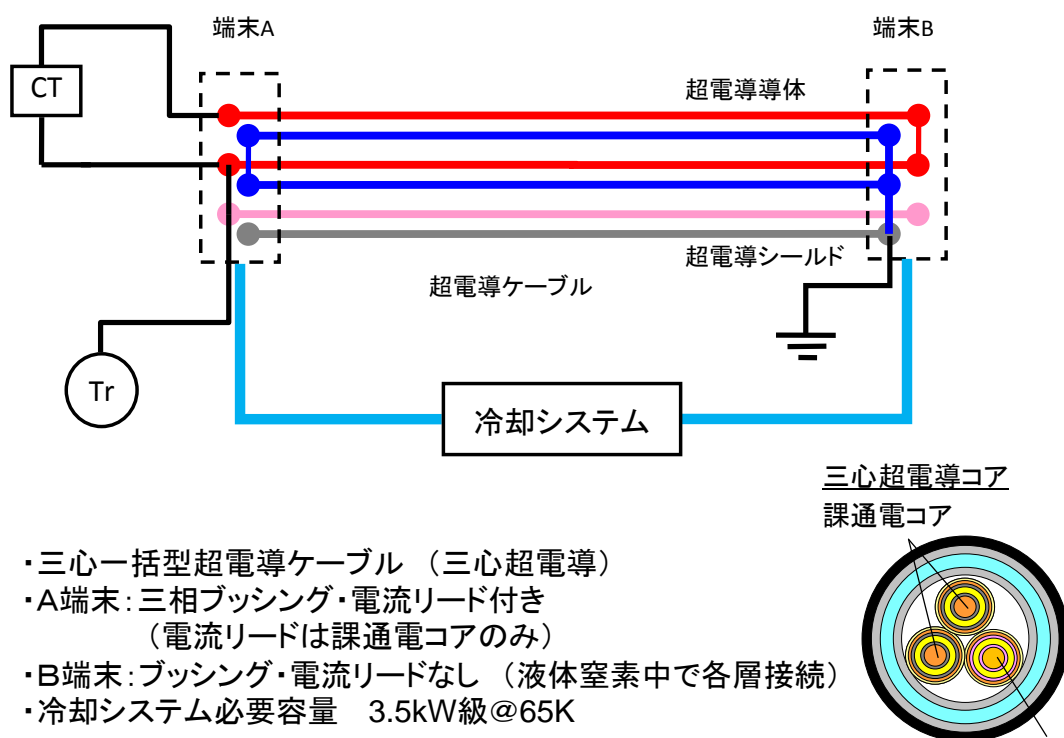


図 2.2.1-51 15 m 超電導ケーブル検証システムの構成 (案)

表 2.2.1-17 15 m 超電導ケーブル検証システムの特徴

項目	内容
構成	15 m、三心超電導コア ブッシング付き端末 1 台、ブッシングなし端末 1 台
課通電	二心へ单相（往復）通電（通電用 CT×1 台） 三心へ单相電圧課電
I_c 測定	導体のみ測定（二相一括、課通電相のみ測定）
AC ロス	二相分の AC ロス測定（熱的手法）
熱機械特性	三相両端固定にて、冷却および昇温
必要冷却容量	3.5 kW at 65 K
最終目標達成	三心形状の実現、66 kV 課電、5 kA 通電、AC ロス評価等、目標の検証可能

(4) 検証試験スケジュール（案）

検証試験用超電導ケーブルの製造および検証試験のスケジュール案を図 2.2.1-52 に示す。平成 23 年度上期までに線材製造を終了させ、下期に検証用 15 m ケーブルの製造を行う。合わせて、終端接続部や冷却システムの製造を平成 23 年度中に終了させ、平成 24 年度第一四半期にて検証システムの組立を行う。この後、約 3 ヶ月間の検証試験を実施し、残存性能の確認を行って検証試験を終了とする。

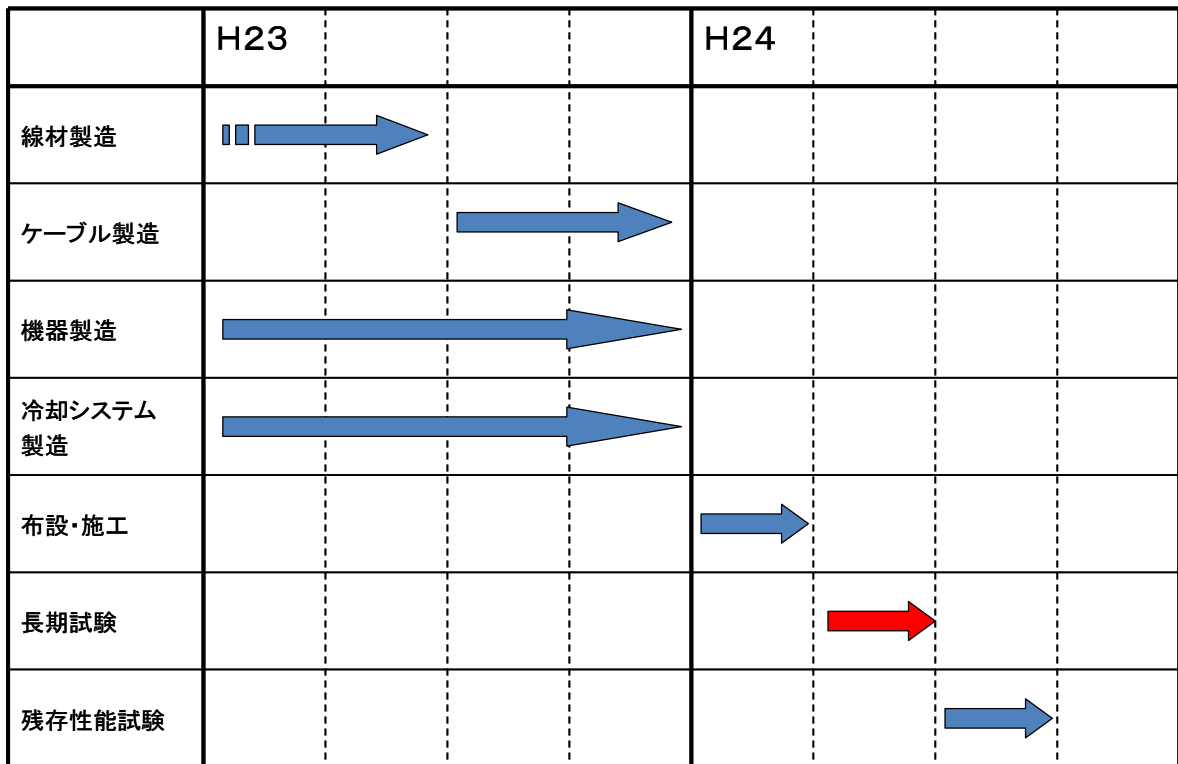


図 2.2.1-52 検証試験スケジュール（案）

(4) まとめ

- ・ 両端に終端接続部を有する検証用 66 kV / 三心一括 / 5 kA, 15 m 長の超電導ケーブルシステムのシステム設計案を取りまとめた。
- ・ 66 kV 大電流ケーブル実用化時の耐久性を評価するための試験条件をとりまとめ、課通電試験計画案を作成した。

(5) この後の予定

- ・ 中間評価後に、端末容器や冷却システム、および課通電試験装置の詳細設計を行う。

2.2.1-7 成果のまとめ

<構造設計>

- ・ 内径 150 mm ϕ の管路に収納できる大電流ケーブルの構造設計を行った結果、「超電導導体 4 層、超電導シールド 2 層」構造を選定した。

<交流損失低減技術>

- ・ 中間目標である交流損失値 2 W/m-相@5 kA の達成に向けて、線材 I_c の向上あるいは線材 J_c 分布の改善が必要である。
- ・ 4 mm 幅線材を用いた導体については、130 A/4 mm-w (320 A/cm-w 相当) (@77 K,s.f.)級の I_c (@77 K,s.f.)を有する線材を適用することにより目標値の達成を検証できる。なお、この場合は 65 K でのサブクール液体窒素冷却試験を前提としている。
- ・ 2 mm 幅線材を用いた導体については、線材 J_c 分布の改善により現状より 2 割程度損失が低減すると期待されるため、現状の線材 $I_c=50$ A/2 mm-w = 250 A/cm-w 相当) (@77 K,s.f.)でも目標値達成の検証が可能である。なお、この場合も 65 K でのサブクール液体窒素冷却試験を前提としているが、より高い I_c を有する線材を使用すれば、77 K 付近での検証も可能と考えている。

<耐過電流設計技術>

- ・ 線材開発/線材特性の把握により線材の耐久性を確認し、この線材を集合化してケーブルを作製した。
- ・ 最大「31.5 kA、2 sec」の過電流に対してケーブルコアにダメージが発生しないことを確認した。
- ・ 二相短絡事故 (31.5 kA、2 sec) を想定して、ケーブルコア間に発生する電磁力の検討を行った。

<三心一括ケーブル技術>

- ・ 機械試作により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。
- ・ 冷却時に発生する熱収縮に対する健全性を確認した。

< 終端接続技術 >

- ・ 大容量電流リードを開発し、5 kA の連続通電に成功した（熱的平衡を確認）。
- ・ 超電導－常電導接続金具の構造設計を完了した。

< 検証システム設計 >

- ・ 検証用システムの設計案および課通電試験計画案を作成した。なお、設計に際し、線材開発/線材特性の把握による知見が一部寄与されている。

2.2.1-8 今後の計画と目標達成の見通し

図 2.2.1-53 に今後の開発計画を示す。

- ・ 320 A/cm-w(@77 K,s.f.)級の 4 mm 幅線材を用いて 4 層導体を作製し、1.5 W/m-相@5 kA 以下を確認する（平成 22.7/E）。
- ・ 線材スリットの改善を行い、2 mm 幅線材を用いた極低損失ケーブルの実現の可能性を検討する（平成 22.9/E）。
- ・ シールド層付きケーブルコアで最終目標 2 W/m-相@5 kA を達成する（平成 23.3/E）。
- ・ 短絡事故時に発生する電磁力がケーブルに及ぼす影響について検証する（平成 22.12/E）。
- ・ 最終設計に対して機械試作を行い、製造条件および健全性の確認を行う（平成 23.3/E）。
- ・ 5 kA 連続通電試験を実施する（平成 23.3/E）。
- ・ 検証システムの詳細設計を完了する（平成 23.3/E）。

表 2.2.1-18 大電流ケーブルの目標達成度

項目	中間目標	成果（状況）	見通し
①大電流・低交流損失	ケーブル交流損失 2 W/m・相@5 kA 以下	導体構造を「導体 4 層、シールド 2 層」に絞り込み 2 mm 幅、4 mm 幅線材を用いて導体を試作・評価 3 W/m/相@4.5 kA まで損失を低減	4 mm 幅線材の I_c 向上 (320 A/cm-w(@77 K,s.f.))、及び 2 mm 線材の端部改善により、平成 22 年度中に目標性能検証の見込み
②三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	線材開発/線材特性の把握により線材の耐久性を確認し、この線材を集合化したケーブルコアを作製し、31.5 kA、2 sec の過電流で性能が低下しないことを確認	平成 22 年度中に電磁力の影響を検討 →達成の見込み
③大容量接続技術の開発	5 kA 連続通電を行い、ケーブル導体、超電導-常電導接続部、電流リードに異常がないことを確認する	大容量電流リードを開発し、5 kA 通電を実施して異常のないことを確認	ケーブルと接続部を組み合わせた 5 kA 通電試験を平成 22 年度中に実施 →達成の見込み
④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、課通電試験計画案を作成 なお、設計に際し、線材開発/線材特性の把握による知見が一部寄与されている。	平成 22 年度中に技術委員会等にて意見を聞いて確定予定 →達成の見込み

	H22 8	9	10	11	12	H23 1	2	3
交流損失 低減技術	スリット改善、2mm線材を用いたさらなる低損失化		シールド付きケーブルコアの損失評価、2W/m-相@5kAの達成					
耐過電流 設計技術			短絡事故時の電磁力の影響検証					
三心一括 ケーブル技術					最終設計に対する試作・検証			
終端接続技術			5kA連続通電の確認					
検証システム設計			システム詳細設計					

図 2.2.1-53 今後の開発計画

引用論文リスト

- (1) N. Amemiya, Z. Jiang, T. Kato, K. Ohmatsu, T. Masuda and Y. Shiohara, “Transport losses in polygonal assemblies of coated conductors with textured-metal substrate”, *Physica C* vol.469 (2009) 1427-1431
- (2) K. Takeuchi, N. Amemiya, T. Nakamura, M. Ohya, H. Yumura, Y. Shingai, T. Nagaishi, N. Fujiwara and Y. Shiohara, “AC loss reduction of superconducting power transmission cable using flexibility fo coated conductors with textured metal substrate”, 21st International Conference on Magnet Technology (MT-21) (2009)
- (3) M. Ohya, H. Yumura, T. Masuda, Y. Shingai, T. Nagaishi and N. Fujiwara, “AC loss characteristics of RE-123 superconducting cable”, 9th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 2009)
- (4) X. Wang, A. Ishiyama, M. Ohya and N. Fujiwara, “Over-current characteristics in 66 kV REBCO Superconducting Model Cable”, The Papers of Technical Meeting on Application of Superconductivity, IEE Japan, (2010) ASC-10-026
- (5) X. Wang, M. Hiroshi, A. Ishiyama, M. Ohya, O. Kazuya and N. Fujiwara, “AC Over-Current Characteristics of REBCO Coated Conductors”, The Papers of Technical Meeting on Application of Superconductivity, IEE Japan, (2010) ASC-10-027

2.2.2 275 kV 高電圧ケーブル化技術の開発

高電圧ケーブルは 275 kV/3 kA_{rms} を送電可能とする終端部と中間接続部を有する単相ケーブルであり、後半 2 ヶ年間で 30 m ケーブルの検証試験を計画している。高電圧ケーブルに使用する Y 系超電導線材の構造とケーブルの構造を図 2.2.2-1 に示す。Y 系超電導線材は、ハステロイ™ 基板上に IBAD 法等により中間層を、MOD 法によって超電導層(YB_{1.5}C₃O_y 組成)を形成し、その上に DC スパッタリング法で Ag 安定化層を形成する。その後、銅メッキ等を施し、ケーブル用 Y 系超電導線材を作製する。高電圧ケーブルは、フォーマ、超電導層、電気絶縁層、シールド層、保護層から構成される超電導ケーブルコアを、2 重構造のステンレス製コルゲート管に収納し、ケーブルコアと管の隙間を流れる液体窒素で冷却される。このケーブル開発状況について以下に述べていく。

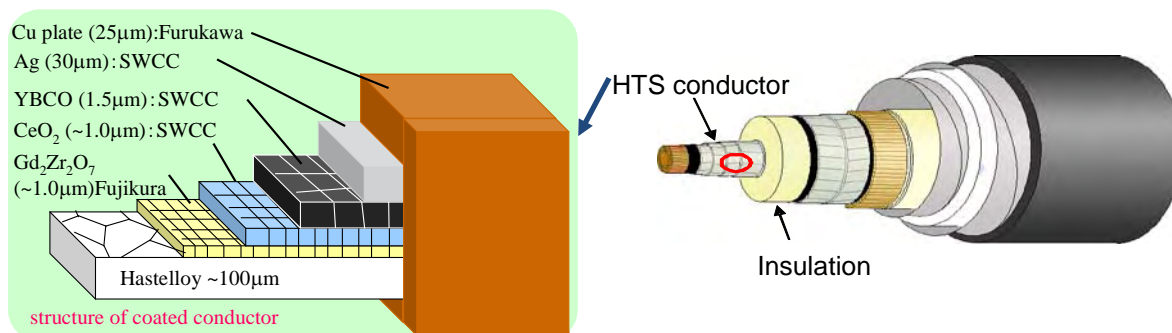


図 2.2.2-1 275 kV 高電圧ケーブルの構造と使用する超電導線材

2.2.2-1 高電圧絶縁・低誘電損失技術（古河電気工業、名古屋大学）

(1) 研究開発目標

超電導ケーブルによる高密度・大容量・低損失送電の実現に向けて、世界各国において実証試験が進められている。この超電導電力ケーブル開発での重要技術課題の一つとして、電気絶縁技術がある。超電導電力ケーブルの電気絶縁構造は、高電圧導体上に積層・巻回された絶縁テープに液体窒素が含浸された複合絶縁系である。この絶縁テープについては、液体窒素中における複合的な材料による電気的特性、機械特性を把握する必要がある。超電導ケーブル、低温機器、高電圧設備に使用実績のある材料を選択し、誘電特性、破壊特性、機械特性を取得している。特に、誘電特性に於いては 275 kV 超電導ケーブルの損失の主要因となる可能性があり、3 kA_{rms} の交流損失と 275 kV の誘電体損失で 0.8 W/m 以下とすることを目標とした。

(2) 研究内容 1 ー絶縁材料の選定ー

高温超電導ケーブルの電気絶縁材料としては、半合成紙（クラフト紙とポリプロピレンフィルム（PP）のラミネート紙）が使われており、この半合成紙としては、

これまで PPLP®-A (A 紙) が用いられてきた。しかしながら、A 紙はクラフト紙の比率が高いために誘電体損失が大きくなる問題がある。そこで、A 紙に加えて新たに 3 種類の絶縁紙を評価した。この選定基準は、大量に入手可能で超電導ケーブル、低温機器、高電圧設備に使用実績のあるものとした。PPLP®-C (B 紙) は PP の比率を A 紙の 40 % から 60 % にしている。次に、極低温電線の絶縁紙として実績のある Tyvek® にカレンダー処理を施したもの (C 紙)、さらに変圧器に実績のある絶縁紙としてノーマックス紙に、電気特性をあげるためにマイカ (雲母) を混入させて高圧の電気機器への応用を目指したタイプ 418 (D 紙) を候補とした。ここで、A 紙は仕様厚み 125 μm のもの、B 紙は仕様厚み 120 μm のものを使用した。

機械試験は、以下のように実施した。まず、幅 25 mm に絶縁材料を切断し、その両端を固定端部間 75 mm で固定し、室温と液体窒素に浸漬した状態 (浸漬時間 5 分以上) でそれぞれ引張試験 (引張り速度 10 mm/min) を実施し、破断強度を測定した。長手方向と幅方向で測定した結果、液体窒素中の方がほとんどの場合で強度が大きくなっており、液体窒素下での使用に関しての問題はない。

次に、絶縁厚 4 mm、長さ 2 m の絶縁モデルケーブルを作製して、比誘電率 ϵ と誘電正接 $\tan\delta$ 測定した。これらの試験結果を表 2.2.2-1 に示す。この試験結果から、導体遮蔽外径を 27 mm として、絶縁厚 25 mm とした場合の 275 kV (対地電圧 160 kV) 課電時の誘電体損失も合わせて示した。D 紙は、誘電体損失に影響する $\tan\delta$ が大きく、ケーブル開発目標である損失 0.8 W/m-相を達成できない。また、A 紙を使用するとケーブルの全損失 0.8 W/m 以下を達成するのに、交流損失分のマージンが小さくなり、目標達成が難しい。C 紙 (Tyvek) を使用すると、誘電体損失が 0.06 W/m と見込まれ、目標レベルの 1/10 の低損失である。一方、B 紙では誘電体損失がやや高く、交流損失のマージンが少なくなる。しかしながら、このレベルの交流損失低減は可能と判断した。

この結果、絶縁材料候補として、B 紙と C 紙に絞り込んだ。

表 2.2.2-1 絶縁材料の誘電特性と見込まれる誘電体損失

Sample	ϵ	$\tan\delta$ [%]	誘電体損失 W/m 導体遮蔽径 27 mm 絶縁厚 25 mm で試算
A 紙	1.9	0.077	0.62
B 紙	1.9	0.057~0.061	0.46~0.49
C 紙	1.8	0.008	0.06
D 紙	2.2	0.22	2.03

次に B、C 紙を用いて、破壊特性を調査した。 $\phi 20$ mm の長さ 400 mm の金属ロッド上に絶縁厚 1 mm の絶縁モデルケーブルを作製し、0.3 MPa (abs) に加圧した液体窒素下にて課電試験を実施した。この時の絶縁モデルケーブルの仕様を表 2.2.2-2 に、その外観を図 2.2.2-2 に示す。

表 2.2.2-2 絶縁モデルケーブル仕様

構造	仕様
電極	φ20 mm、400 mm 長の銅棒
内部半導電層	カーボン紙 2 枚、1/2 ラップ巻き
電気絶縁層	1/3 ラップ Gap 巻き。絶縁 1 mm 厚 (B 紙 9 枚、C 紙 11 枚)
外部半導電層	カーボン紙 2 枚、1/2 ラップ巻き



図 2.2.2-2 絶縁モデルケーブルの外観 (上が C 紙、下が B 紙)

図 2.2.2-3 は B 紙と C 紙の AC 破壊試験を示しており、電圧は 1 分毎に 1 kV 上げるステップとした。図 2.2.2-4 は PPLP®-C と Tyvek®の雷インパルス (Imp) 破壊試験を示しており、Imp 電圧は、設定電圧で 3 回行なった後に、3 kV ずつ電圧を上げるステップとした。図 2.2.2-3,図 2.2.2-4 より、AC, Imp 試験ともに、B 紙の耐電圧特性の方が C 紙よりも良いことが確認された。このため、C 紙で設計すると、絶縁厚が厚くなり、コンパクト性を失ってしまう。一方、誘電特性においては、表 2.2.2-1 で示したように C 紙の方が一桁程度小さく出来る。今回、使用した C 紙はカレンダー加工を施して、厚みを均一化したがる、密度差があり、特に絶縁厚が厚くなればなるほど、皺が入りやすいという問題点が見つかった。275 kV ケーブルは基幹線路として高信頼性を必要とするため、今回の研究では B 紙に絞り込んで、体積効果や長期特性のデータを取得することにした。

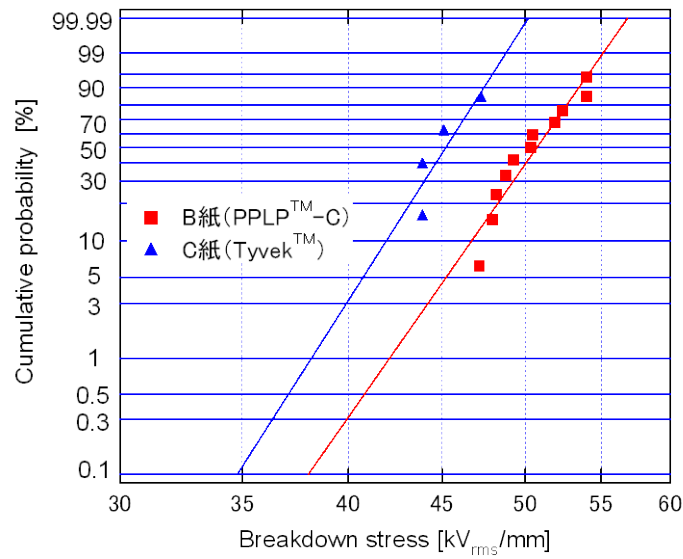


図 2.2.2-3 AC 破壊試験結果のワイブルプロット

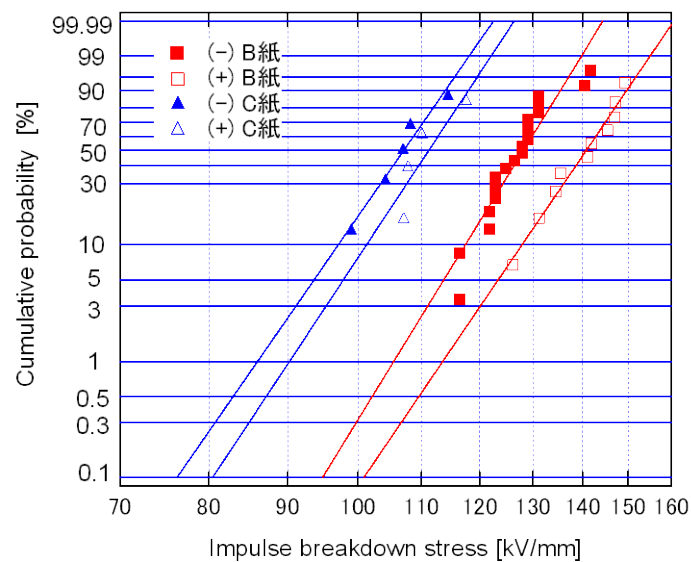


図 2.2.2-4 Imp 破壊試験結果のワイブルプロット

(3) 研究内容 2 一部分放電特性一

超電導ケーブルで用いられている液体窒素／積層テープ複合絶縁系に局所的な部分放電 (PD: Partial Discharge) が長期間発生すると絶縁耐力の劣化を引き起こし、最終的には絶縁破壊に至る危険性があると言われている。そこで、超電導電力ケーブル用の電気絶縁材料を用いた液体窒素／積層テープ複合絶縁系の部分放電計測を行い、実用的・合理的な絶縁設計に資する部分放電開始特性の取得を試みた。

A 紙 (PPLP-A) は 500 m の超電導ケーブル実証試験⁽¹⁾にも使用されており、多数の部分放電データの蓄積がある。今回選定した B 紙 (PPLP-C) が A 紙と比較して、どのような部分放電特性を持っているのかを調査した。

供試電極系の構造を図 2.2.2-5 に示す。供試電極系は、エポキシモールドを施した高電圧平板電極と接地平板電極との間に PP 積層テープを挟み、バッドギャップを模擬した直径 5 mm の円孔を設けた平行平板電極モデルである。実験では、積層テープの種類、枚数、バッドギャップ数、および高電圧電極径を変化させた。A 紙のデータは文献などで公表されているデータ^②を使用した。

PD 検出時点の印加電圧実効値を積層テープ中の電界値に換算したものを部分放電開始電界 (PDIE: PD Inception Electric field strength) と定義した。各実験条件において PDIE を 20 回測定し、この PDIE をワイブル分布により統計的に処理し、統計的電界体積 (SSLV: Statistical Stressed Liquid Volume) を算出した。SSLV は絶縁材料の誘電率の違いから電界が集中する部分において、その微小ユニットの局所電界での重み付けを考慮した有効長全体の電界体積である^③。B 紙 (PPLP-C) の 50 %PD 開始電界 (PDIE50) の SSLV 依存性を A 紙 (PPLP-A) とともに図 2.2.2-6 に示す。同図より、A 紙、B 紙ともに、SSLV の増加とともに絶縁上の弱点 (液体窒素中のマイクロバブルなど) が増加するため、PDIE50 は減少した後、ほぼ一定になることが分かる。PDIE50 の一定値 (下限値) は A 紙で 15.4 kV/mm、B 紙で 21.6 kV/mm であり、B 紙の方が A 紙よりも約 40 %高いことが分かる。これは、PP 割合の高いことによる効果と考えられる。また、ケーブル構造では、SSLV は大きくなるため、同図のほぼ一定値の部分に相当する。このことから、ケーブルの絶縁厚が 1 mm でも 30 mm でも、PDIE 値は、ほぼ同じ値を持つことが期待される。

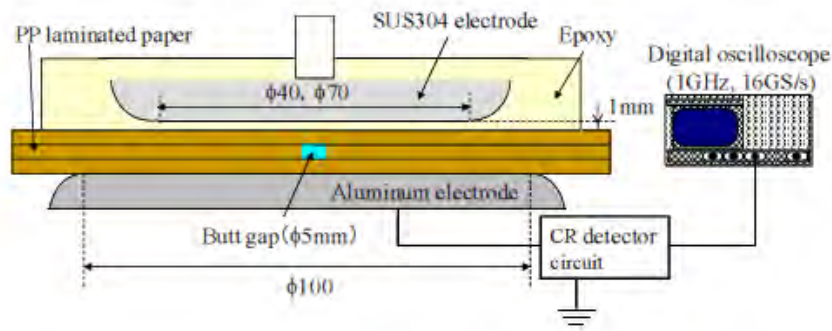


図 2.2.2-5 供試電極系

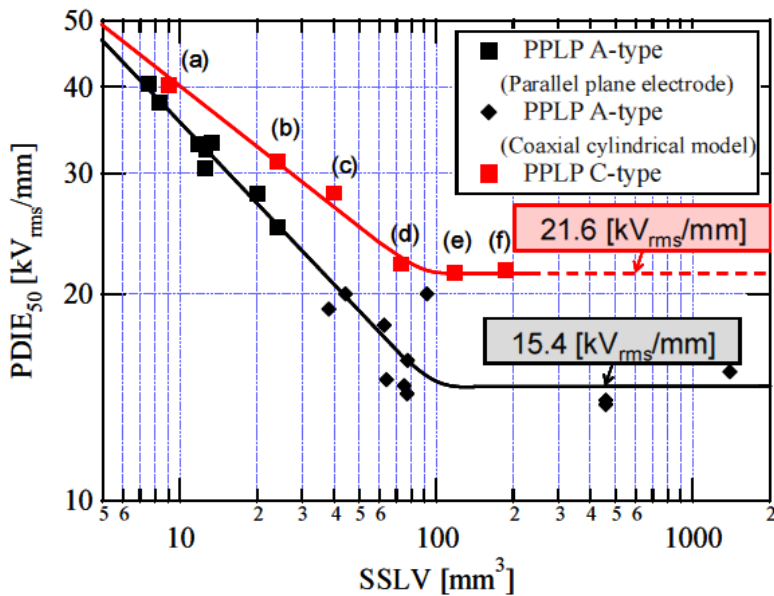


図 2.2.2-6 A 紙、B 紙の PDIE50-SSLV 特性

表 2.2.2-2 の 1 mm 絶縁モデルケーブルの PDIE を測定した。電圧は 1 kV/min のステップで上げ、約 5 pC の部分放電信号をトリガーにした。そのワイブルプロットを図 2.2.2-7 に示す。同図より、PDIE50 は 26.0 kV/mm、0.1 % の累積確率は 21.0 kV/mm となり、0.1 % の累積確率値を暫定の設計ストレスとした。部分放電信号は図 2.2.2-8 に示すように、波形のピークで発生している。

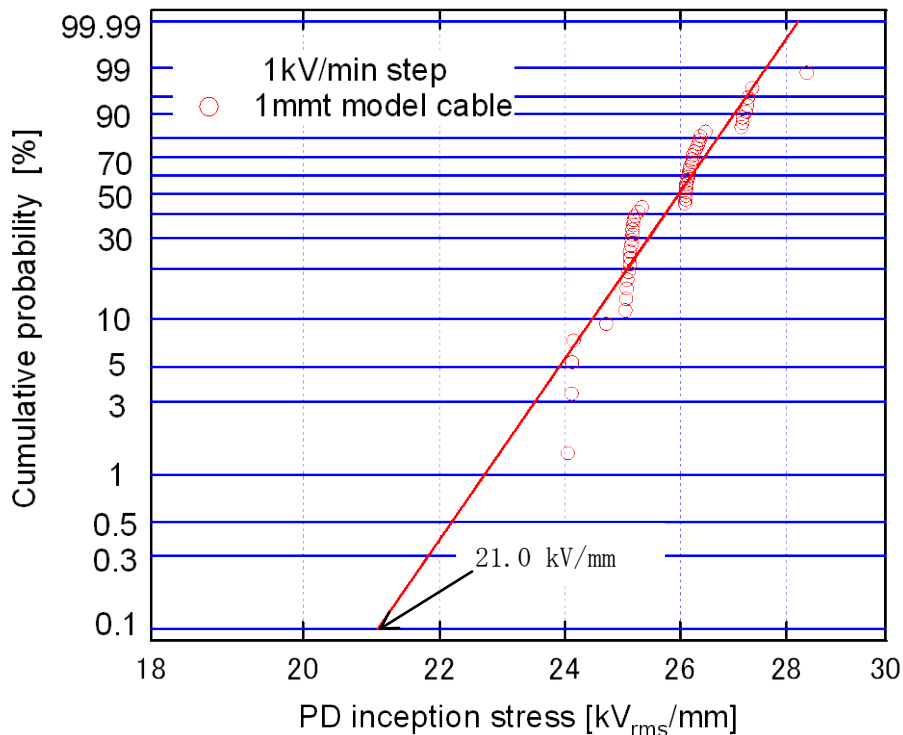


図 2.2.2-7 B 紙の PDIE のワイブルプロット

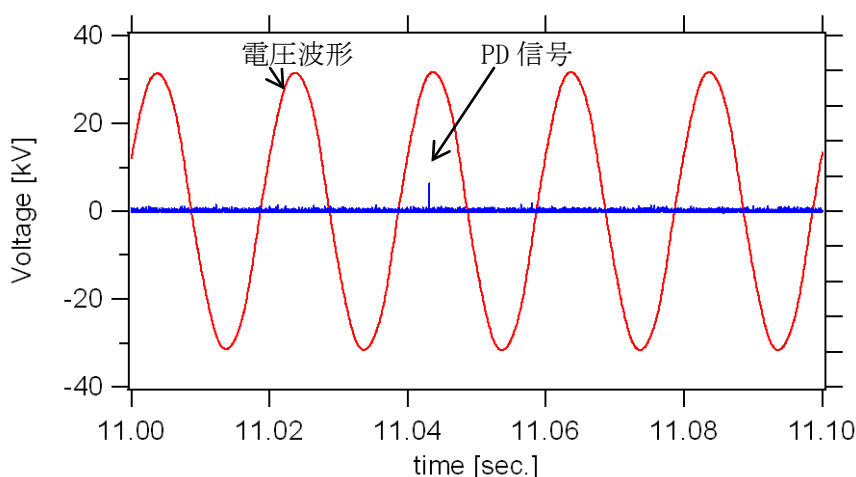


図 2.2.2-8 B 紙の PDIE の発生状況

次に、表 2.2.2-3 の 10 mm 絶縁モデルケーブルの PDIE を測定した。図 2.2.2-9 の容器に 5 m 長のケーブルを入れ、液体窒素への浸漬は 1 日以上とし、0.3 MPa(abs)の圧力で 30 分以上維持した後、部分放電(PD)試験を開始した。この試験では、5 m 長のケーブルの中央に遮蔽のスリットを入れ、スリット両側のケーブルを同調させることで、部分放電測定を行った。この時の部分放電の検出感度はパルスジェネレータにより 30 pC であった。課電時の部分放電の様子を図 2.2.2-10 に示す。185 kV から 190 kV の電圧を上昇する過程で 50-100 pC の信号を検出し、190 kV で 1000-2000 pC の部分放電信号が連続で検出された。この条件での PD 開始電圧を 190 kV とし、電圧値を徐々に下げて、PD 消滅電圧を確認した後、電圧をゼロまで落とした。このサイクルを 5 回繰り返したところ、1 回目の PD 開始電圧が 180 kV (24.8 kV/mm)、2-5 回目が 190 kV (26.2 kV/mm) であり、PD 消滅電圧は全て 160 kV であった。この結果、1 mm と 10 mm の絶縁モデルケーブルの PDIE はほとんど変化無く、今回想定している 20~30 mm の絶縁モデルケーブルでも PDIE 値は、ほぼ同じ値を持つことが期待される。

表 2.2.2-3 10mm 絶縁モデルケーブルの仕様

構造	仕様	外径 [mm]
銅フォーマ (高電圧)	325 mm ² 銅撚り線	21.7
半導電層	カーボン紙	23.5
絶縁層	PPLP®-C	43.5-43.7
半導電層	カーボン紙	44.9
遮蔽 (接地)	平編み銅線	



図 2.2.2-9 課電試験容器

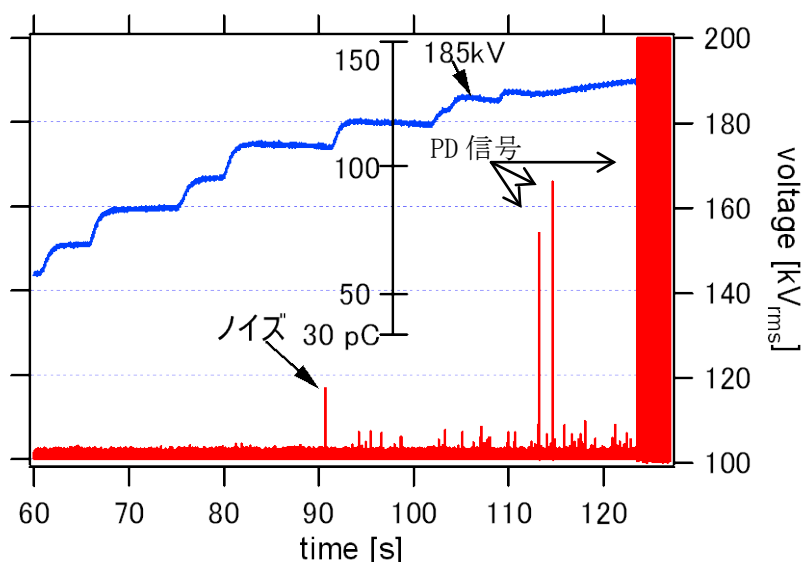


図 2.2.2-10 10 mm 絶縁モデルケーブルの PDIE の発生状況

(4) 研究内容 3 –Imp 破壊特性–

表 2.2.2-3 の 10 mm 絶縁モデルケーブルの雷インパルス(Imp)試験を実施した。雷インパルス電圧の昇圧は 25 kV-3 回のステップとした。正極性で 750 kV(755 kV-3 回をクリア)の耐電圧を確認後、負極性で試験を行い、746 kV で試料有効部での破壊を確認した。電界値で換算すると正極性では 104.3 kV/mm 以上、負極性では 103.1 kV/mm となった。この値を 1 mm 絶縁モデルケーブルと比較したのが、図 2.2.2-11 である。この結果より、10 mm 絶縁モデルケーブルの破壊値は 1 mm のそれと比較して低下傾向にある。今後、20-30 mm 絶縁モデルケーブルの Imp 破壊データ数を増やして、バラツキを評価する予定である。Imp の設計ストレスは、10 mm 絶縁モデルケーブルの破壊データが 1 mm 絶縁モデルケーブルと同様のバラツキ (3σ) をもつとして、83 kV/mm とした。

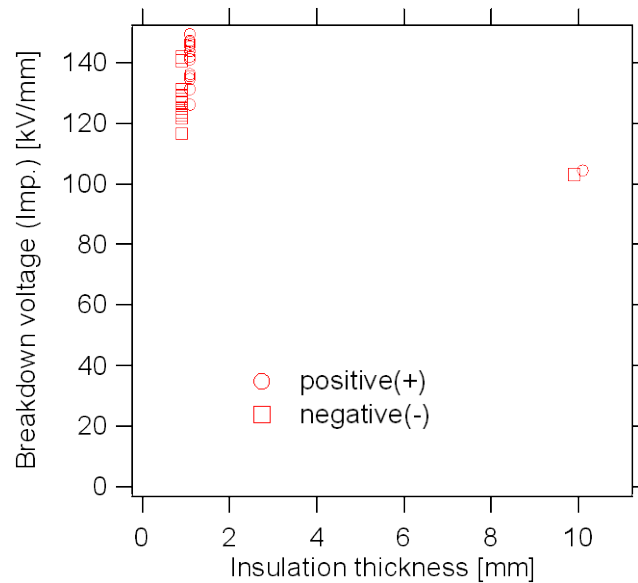


図 2.2.2-11 10 mm 絶縁モデルケーブルと 1 mm 絶縁モデルケーブルの Imp 破壊特性

(5) 研究内容 4 -AC 破壊と部分放電の長期特性-

A 紙については、絶縁厚 1 mm の絶縁モデルケーブルにおいて、1,000 時間までの破壊特性が取得されており、破壊の寿命指数 $n=49$ が見いだされている⁽⁴⁾。B 紙においても図 2.2.2-12 に示すように 1 時間までであるが、寿命指数 $n=51$ が得られている。図中では B 紙の絶縁強度が A 紙と比較して低く見えるが、これは圧力条件の違いによるもので、同条件で測定した場合の破壊強度は同等である。B 紙は A 紙と材料構成がほとんど変わらないことから、A 紙と同様の破壊の寿命指数 49 が予想される。一方、A 紙の部分放電の長期特性は、シートサンプルにおいて、100 前後の寿命指数が公表されている⁽⁵⁾。B 紙の絶縁モデルケーブルについては、図 2.2.2-12 (右) のように、現時点で寿命指数 91 が確認されており、A 紙の文献値と同等である。今後、1000 時間までのデータを取得して、長期特性を確認する予定である。

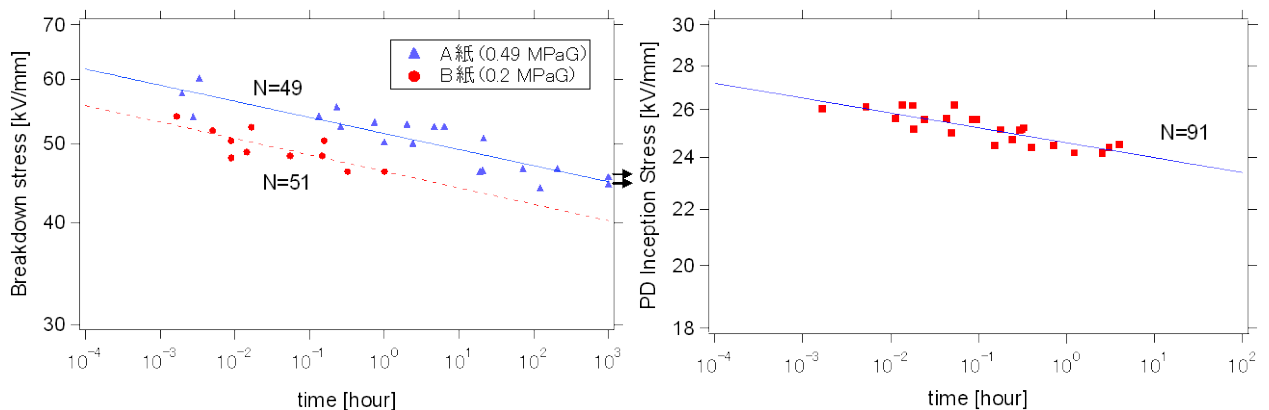


図 2.2.2-12 B 紙絶縁モデルケーブルの破壊 Vt 特性 (左)、PD の Vt 特性 (右)

(6) 研究内容 5 –ケーブルの設計–

試験条件については、2.2.2-6 で後述するが、Imp 試験が 1155 kV-3 回、AC 試験が 300 kV-10 分で部分放電フリーとした。

Imp の設計電界は 10 mm 絶縁モデルの結果 103.1 kV/mm(746 kV 破壊)から 1 mm 絶縁モデルの 3 σ をとって、83 kV/mm とした。一方、AC の設計電界は図 2.2.2-7 のワイブルの結果から 0.1%の発生確率として 21.0 kV/mm であり、この値を設計ストレスとした。絶縁厚 t は式 (2.2.2-1) から算出する。

$$t = r \times (\exp(V/Er) - 1) \quad (2.2.2-1)$$

ここで、 r は導体遮蔽外半径、 V は試験電圧、 E は設計電界である。

2.2.2-2 の交流損失低減技術および 2.2.2-4 の耐過電流ケーブル設計技術から導体遮蔽外半径は 13.5 mm としており、この数値を代入すると、絶縁厚は Imp 設計で 24.5 mm、AC 設計で 25.5 mm となる。そのため、25.5 mm を絶縁厚とした。

この時のケーブル設計を表 2.2.2-4 に示す。絶縁厚 25.5 mm のケーブルに、現在まで得られている誘電特性の値を使用すると、誘電体損失は 0.46 W/m となり、交流損失のマージンはやや少ない。一方、誘電特性を減らして、さらに設計電界への裕度をもたせて、絶縁厚を 28 mm にした場合、誘電体損失は 0.43 W/m となり、交流損失へのマージンは大きくなる。

表 2.2.2-4 275 kV 超電導ケーブルの設計

構成		絶縁紙：B 紙 (PPLP-C)		
設計絶縁厚		24.5 mm (IMP 設計)	25.5 mm (PD フリー設計)	28 mm (誘電体損失小)
フォーマ外径		21.7	21.7	21.7
導体遮蔽外径		27.0	27.0	27.0
絶縁外径		76.0	78.0	83.0
コア全体外径		85.0	87.0	91.0
断熱内管	内径	95	95	95
	外径	105	105	105
断熱外管	内径	127	127	127
	外径	141	141	141
防食層		150	150	150
誘電体損失(275 kV)		0.47 W/m	0.46 W/m	0.43 W/m
交流損失のマージン		0.33 W/m	0.34 W/m	0.37 W/m

(7) 成果

275 kV で使用する絶縁材料を選定した。C 紙 (Tyvek) を使用すると、誘電体損失が 0.06 W/m と見込まれ、目標レベルの 1/10 の低損失である。しかし、現在

入手可能な C 紙は密度や厚さにムラがあるため、絶縁が厚くなる 275 kV ケーブルでは、巻き皺が生じやすく、信頼性に不安がある。そのため、今後の適用可能性はあるものの、今回は、従来材料 (A 紙 PPLP-A) に近い B 紙 (PPLP-C) を採用した。これにより、誘電体損失は 0.4~0.5 W/m となり、全体を 0.8 W/m 以下にするには、交流損失は 0.3~0.4 W/m になるが、このレベルの交流損失低減は可能と判断した。

B 紙は従来材料と比較して、ポリプロピレンの比率を 40% から 60% に上げているが、これにより部分放電開始特性は 40% も改善した。部分放電開始特性はシートだけではなく、1 mm, 10 mm 絶縁厚のモデルケーブルでも同様の特性が得られている。

B 紙の AC 長期特性は、現在までの所、A 紙と同等の結果を得ており、今後、さらに長期間の特性取得を試みる。

B 紙の Imp 特性は、現在までの所、絶縁厚 10 mm のモデルケーブルで 746 kV の破壊データを得ている。

今回得られた B 紙のデータを基に、部分放電フリー設計と Imp 耐電圧設計を行ったところ、設計絶縁厚は 25.5 mm になった。このケーブルの誘電体損失は 0.46 W/m となるが、交流損失の低減により、目標の 0.8 W/m 以下の損失は達成可能である。

引用論文リスト

- (1) S. Mukoyama, S. Maruyama, M. Yagi, N. Ishii, H. Kimura, H. Suzuki, M. Ichikawa, T. Takahashi, T. Okamoto, A. Kimura and K. Yasuda, "Demonstration and verification tests of a 500 m HTS cable in the super-ACE project", *Physica C* 426-431 (2005) 1365-1373
- (2) N. Hayakawa, R. Yamaguchi, H. Kojima, F. Endo and H. Okubo, "Partial Discharge Inception Strength in a Full-scale HTS Cable Based on LN₂/Polypropylen Laminated Paper Insulation", 16th IEEE International Conference on Dielectric Liquids, pp. 353-356, 2008
- (3) N. Hayakawa, T. Kobayashi, M. Hazeyama, T. Takahashi, K. Yasuda and H. Okubo, "Partial Discharge Inception Characteristics of LN₂/PP Laminated Paper Composite Insulation System for High Temperature Superconducting Cable", *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 12, No.1, pp. 166-174 (2005)
- (4) M. Yagi, S. Mukoyama, S. Tanaka, S. Honjo, M. Shimodate and Y. Takahashi, "V-t characteristics of liquid nitrogen impregnated insulation for HTS cable", in Proc. 13 the Annual Conference of Power & Energy Society, IEE Japan, No.423(2002) (in Japanese)
- (5) H. Okubo, M. Hazeyama, N. Hayakawa, S. Honjo, and T. Masuda, "V-t

characteristics of Partial Discharge Inception in Liquid Nitrogen/PPLP Composite Insulation System for HTS Cable”, IEEE Trans, Dielect. Elect Insulation, Vol.9, No.6, pp. 945-951 (2002)

2.2.2-2 交流損失低減技術（古河電気工業、京都大学）

(1) 研究開発目標

3 kA_{rms} / 275 kV 級高電圧ケーブルの開発において、交流損失の低減が大きな技術課題となっている。Y系超電導テープ線材の超電導層は非常に薄く断面アスペクト比が非常に大きいので、その交流損失特性は著しい異方性を示す。すなわち、線材面に平行な交流磁界変動に対する交流損失は大変小さく、線材面に垂直な交流磁界変動に対する交流損失は大きくなる。一般的には磁界は線材面に平行な成分と垂直な成分を持つが、Y系超電導テープ線材においては、交流損失は実質的には垂直磁界変動成分に支配され、その低減が交流損失低減の鍵である。

275 kV-3 kA_{rms} で 0.8 W/m の損失以下（侵入熱を除く）とすること、150 mmφ以下のケーブル外径が目標として掲げられており、超電導導体の低交流損失化がより一層重要となっている。2.2.2-1 項より誘電体損失が 0.4~0.5 W/m が見込まれることから、3 kA_{rms} の交流損失として、0.3 W/m 以下を目標とした。

(2) 研究内容 1 – 交流損失低減（その 1） –

275 kV 用の 2 層超電導導体を作製した。その仕様を表 2.2.2-5 に示す。

表 2.2.2-5 作製した超電導導体の仕様

構造	仕様
超電導線材	ロッド番号 SWM-0010 Hastelloy/Gd ₂ Zr ₂ O ₇ /CeO ₂ /YBCO/Ag=100/1/1/1.5/10 μm
幅, I _c	4.5 mm, 249-330 A/cm-w
超電導導体	2 層 銅撚り線中空フォーマ 250 mm ² 1-layer 内径φ30.0 -500 mm (S)ピッチ 2.25 mm幅 36本 (2227.1 A) 2-layer 内径φ30.7 +500 mm (Z)ピッチ 2.25 mm幅 38本 (2319.8 A)
長さ, 合計 I _c	1 m, 4547 A

極力、超電導線材の I_c 値を揃えたが、使用した線材は 112.1 A~148.8 A であり、10 mm 換算にすると、249 A~331 A/cm-w とかなり大きい。さらに、レーザ加工は光ファイバレーザを用いており、条件が最適化されていないこともあって、劣化

率も 9 %前後とやや大きい。導体の仕上がりを図 2.2.2-13 に示す。

この導体の I_c の温度依存性を図 2.2.2-14 に示す。この図で 77.3 K での I_c は 4612 A であり、導体作製前の線材の I_c 合計 4547 A から変化していない。

交流損失の測定結果 (77.3 K) を図 2.2.2-15 に示す。0.0904 W/m@1 kA_{rms} の結果は、前プロジェクトの実績である⁽¹⁾。一方、今回作製した導体は、この実績に対して、約 1/9 にまで損失が小さくなっている。この理由として、 I_c の向上 (約 2 倍)、径が大きくなる (φ20→30) ことによる経験磁場の減少、超電導導体の層数の減少 (3 層から 2 層) による経験磁場の減少、が理由として考えられる。図 2.2.2-15 中の実線は Norris のストリップモデルの計算式(2.2.2-2)から算出された損失である。今回の導体は 2.25 mm 幅の超電導線材が 74 枚から構成されており、1 枚あたり 61.5 A の I_c となる。Norris のストリップモデル⁽²⁾は、1 枚の線材が通電により自分自身で発生する交流磁界のみで交流損失を表す解析式であり、線材同士がお互いに磁場的に影響を与えないときの損失を示している。

$$Q_{NS} = \frac{N \cdot I_c^2 \cdot \mu_0}{\pi} \left\{ \left(1 - \frac{I_t}{I_c} \right) \ln \left(1 - \frac{I_t}{I_c} \right) + \left(1 + \frac{I_t}{I_c} \right) \ln \left(1 + \frac{I_t}{I_c} \right) - \left(\frac{I_t}{I_c} \right)^2 \right\} \quad (2.2.2-2)$$

ここで、 Q_{NS} [J/m/cycle]、 N は線材の本数、 I_t は通電電流のピークを表している。

実際の超電導導体では、各線材が発生した磁場が他の線材に影響を与えるので、このモデルとは一致しない。単層構造であれば、隣り合った線材同士が発生磁場により、端部での縦磁界がキャンセルされるので、損失は Norris のストリップモデルよりも小さくなる。2 層導体であれば、1 層目の損失は単層導体と同様に損失は小さくなるが、2 層目の損失は、1 層目の導体の発生磁場の影響を受けるため、Norris のストリップモデルよりも大きくなる。結果として、今回の 2 層導体の損失は Norris のストリップモデルよりは若干高い値となっている。将来的には 2 層導体でも Norris のストリップモデルよりも小さくすることが目標であり、Norris のストリップモデルとの比較は、損失の指標としては有用である。

次に、交流損失の温度依存性を図 2.2.2-16、図 2.2.2-17 に示す。図 2.2.2-17 のように I_c で規格化すると温度依存性はほとんど見えなくなっている。74.0 K で I_c は 6100 A であり、3 kA_{rms} での交流損失は 0.8 W/m ($I_t/I_c=0.70$)、72.0 K で I_c は 7047 A であり、3 kA_{rms} での交流損失は 0.49 W/m ($I_t/I_c=0.60$) であった。この損失値は、Norris のストリップモデルよりも 1.3 倍程度高く、この比率を使えば、目標の 0.3 W/m 以下にするには I_c を上げれば到達も可能 ($I_c=9$ kA (約 68 K) で 3 kA_{rms} の交流損失は 0.27 W/m) である。

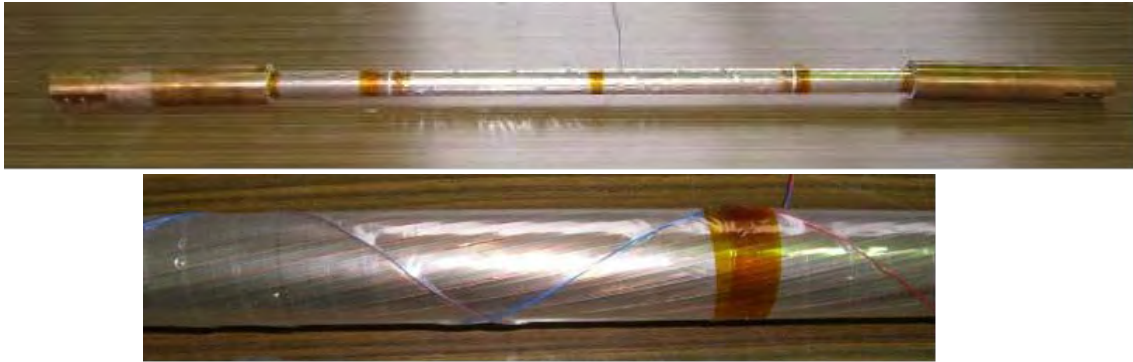


図 2.2.2-13 作製した超電導導体

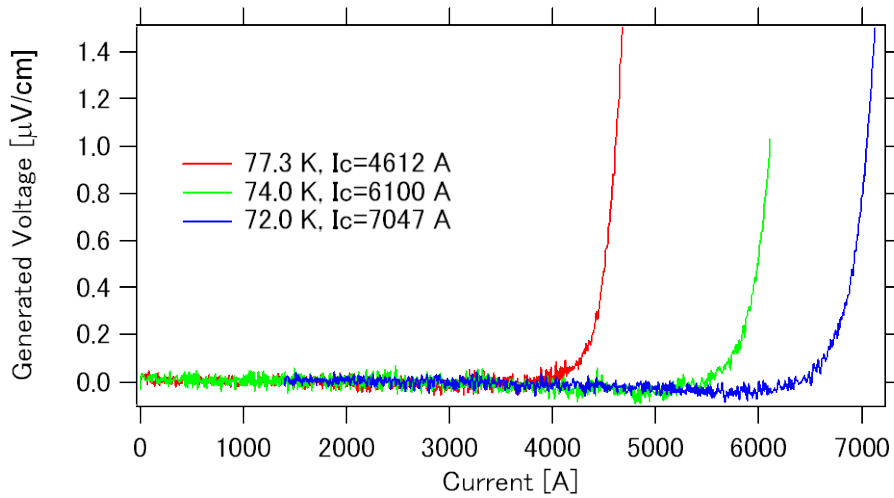


図 2.2.2-14 作製した超電導体の I_c の温度依存性

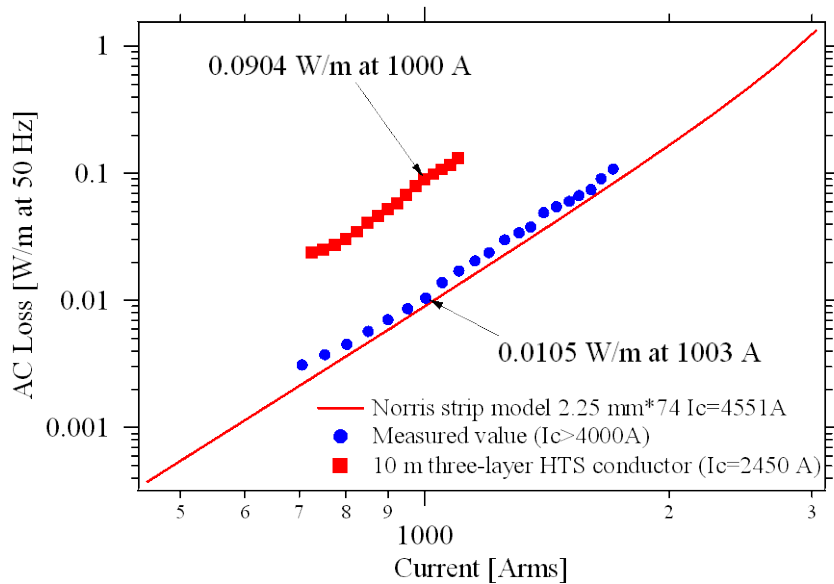


図 2.2.2-15 交流損失測定結果 前プロジェクトの導体と比較

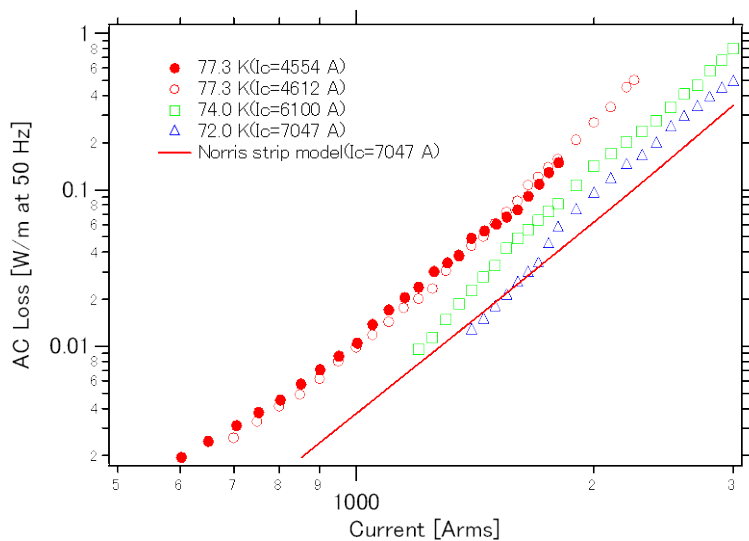


図 2.2.2-16 作製した 2 層導体の交流損失

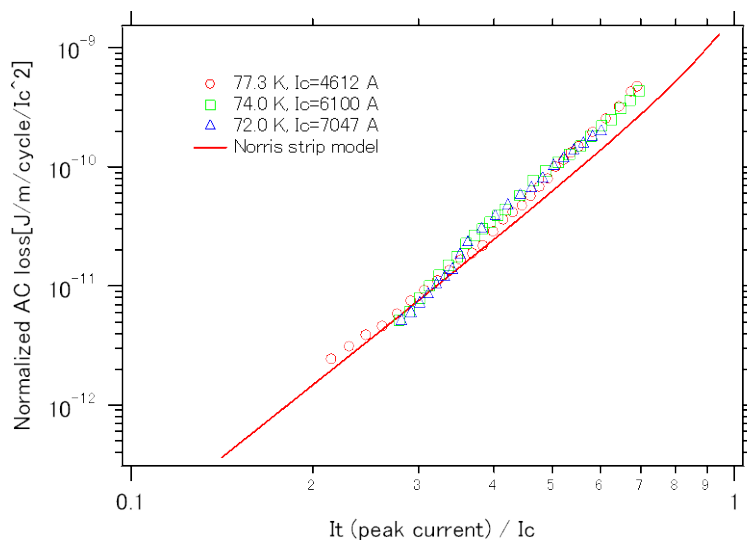


図 2.2.2-17 I_c で規格化した交流損失

(3) 研究内容 2 —交流損失低減 (その 2) —

提供された超電導線材の幅は 5 mm であるが、 CeO_2 を付けた後に、10 mm 幅の基板をスリッタで切断しており、この切断により、マイクロクラックが生じ、YBCO の成膜の妨げとなる。また、TFA-MOD 法は、線材の幅方向両端の J_c (臨界電流密度) が低くなることが分かっている。そこで、両端の J_c を図 2.2.2-18 のように仮定して、肩のスロープ s をパラメータにして、数値計算を実施した。両端 J_c の特性は、交流損失に大きく影響を与えると考えられる。

まず、第 1 の交流損失低減手法として、多層導体の層間を離すことで、損失の主要因となる外層の経験磁場を減らすことを考えた。具体的な構造とその結果を表 2.2.2-6 に示す。線材は 5 mm 幅を想定したため、図 2.2.2-18 の J_c 分布のパラメー

タは、 $S=0.8, W=5$ を使用した。表 2.2.2-6 の構造図を見ると、5-a 導体と 5-b 導体の線材使用量は同じで、2 層目の構造は同じである。1 層目の構造が異なっており、5-b は 1 層目の内径を小さくすることで、1 層目と 2 層目の層間距離が伸びている。層間を離すと、発生磁場の波打ちは小さくなって円周に近づき、1 層目が発生する磁場は、2 層目へあまり影響を与えなくなる（垂直磁場が減少する）と考えて、損失は小さくなると思った。しかし、実際は 2 層目を通電することによる自己磁場により発生磁場は波打ちし、1 層目の発生磁場と重ね合わせると、たまたま、強め合うところも出る。これは、1 層目と 2 層目の線材配置に起因するものであり、数値計算の結果、表 2.2.2-6 に示すとおり、層間を離すことによる交流損失の低減効果はほとんど見られなかった。層間距離を開くことは、ケーブルのコンパクト性を失うことになるので、層間距離は 5-a のように従来そのままとした。

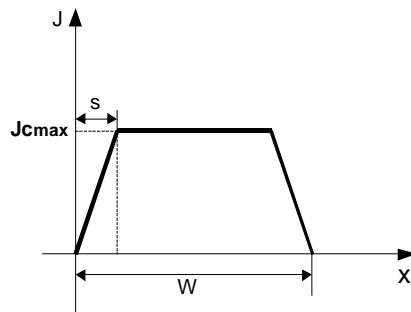
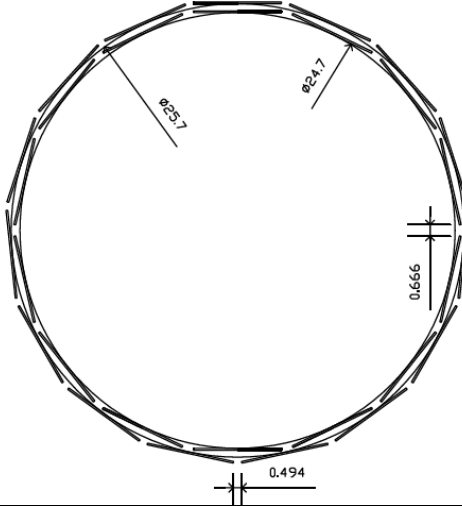
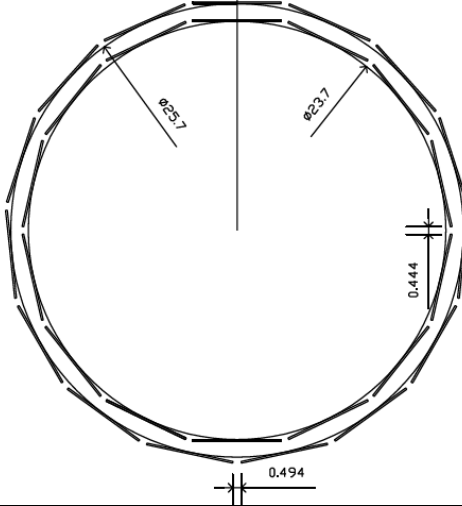


図 2.2.2-18 線材の幅方向 J_c 分布

表 2.2.2-6 層間距離を変えた導体の損失比較




	5-a	5-b
Structure		
Spec.	線材幅 5 mm (1 layer/2 layer=14/15)、 1 層目内径 24.7 2 層目内径 25.7 導体外径 26.9 mm、層間距離小	5 mm (1 layer/2 layer=14/15) 1 層目内径 23.7 (5-a より層間が広い) 2 層目内径 25.7 層間距離大 (5-a との比較)
Loss	1 層目の損失 3.963E-01 W/m 2 層目の損失 6.980E-01 W/m 1.095 W/m at 3kA ($I_c = 7.308$ kA)	1 層目の損失 3.847E-01 W/m 2 層目の損失 7.202E-01 W/m 1.105 W/m at 3 kA ($I_c = 7.308$ kA)

次に、第 2 の交流損失低減手法として、線材端部の J_c 劣化部をレーザで落とす事で、交流損失低減を考えた。両端 0.5 mm を落として 4 mm 幅の線材、両端 1 mm を落として、3 mm 幅の線材を加工した。数値計算では、図 2.2.2-18 のスロープ長 s をパラメータとして、5 mm 幅の未処理の線材 ($w=5$ mm) ではスロープ長 s を 0.8 mm、3 mm、4 mm 幅の線材 ($w=4$) ではレーザ加工による熱影響部とスロープ長 s に分けられると考えた。レーザ加工前後の I_c から熱影響部は 4 mm 幅線材で 0.375 mm、3 mm 幅線材で 0.1 mm とし、この熱影響部では、 I_c は無くなっていると仮定した。これは、線材幅 w が狭くなっていることと同意であり、4 mm 幅の線材、3 mm 幅の線材の w はそれぞれ、3.3 mm、2.8 mm となる。さらに、スロープ長 s はどちらも 0.1 mm とした。細線化で使用したレーザは「超電導応用基盤技術開発 (第 II 期)」プロジェクトで実績のある YAG レーザとし、これらの超電導線材を使って、表 2.2.2-7 に示す 3 つの導体を作製した。

使用した線材の分布を図 2.2.2-19 と 2.2.2-20 に示す。図 2.2.2-19 はロッド番号 0076 の線材分布である。使用箇所は 10.5-55.5 m であり、長手方向には均等な分布である。図 2.2.2-20 はロッド番号 0071 の線材分布である。使用箇所は 13~70.5 m であり、長手方向には均等な分布である。

図 2.2.2-21 に 3 つの導体の交流損失の比較を示した。5 mm 幅の未処理の線材は、端部の J_c 低下が大きいいため、低電流領域の交流損失が大きい。4 mm 幅の線材は端部 J_c の低い部分を取り除き、さらにレーザーによる熱影響で、 J_c 分布が一様になったと考えられ、Norris のストリップモデルに近い結果を得た。しかし、レーザーによる熱影響部が大きいいため、線材間ギャップを小さくした効果は顕著に見られなかった。一方、3 mm 幅の線材は、端部 J_c の低い部分を取り除き、レーザーによる劣化も小さいことから、線材間ギャップが小さくしたことによる垂直磁場のキャンセルの効果が見られている。3 kA_{rms} の交流損失は、0.297 W/m ($I/I_c=0.50$)、0.235 W/m ($I/I_c=0.46$)と目標値である 0.3 W/m 以下を達成した。

表 2.2.2-7 3本の超電導導体仕様

導体名	5-C	4-C	3-C
線材幅	5 mm	4 mm	3 mm
導体構造			
導体仕様	1層目内径 23.7 mm 14本 400 mm ピッチ 2層目内径 24.5 mm 14本 -250 mm ピッチ、 導体外径 25.5 mm	1層目内径 23.7 mm 18本 400 mm ピッチ 2層目内径 24.5 mm 18本 -250 mm ピッチ 導体外径 25.5 mm	1層目内径 23.7 mm 23本 400 mm ピッチ 2層目内径 24.5 mm 23本 -250 mm ピッチ 導体外径 25.5 mm
使用した線材のロッド番号と I_c	0068,0078 140 – 160 A (280 – 320 A /m-w)	0076(10.5-55.5 m) 150-160 A (300-320 A /m-w)	0071(13-70.5 m) 150 -165 A (300 -330 A/m-w)
3kA _{rms} の交流損失	1.56 W/m ($I/I_c=0.76$)	0.421 W/m ($I/I_c=0.51$)	0.297 W/m($I/I_c=0.50$) 0.235 W/m($I/I_c=0.46$)

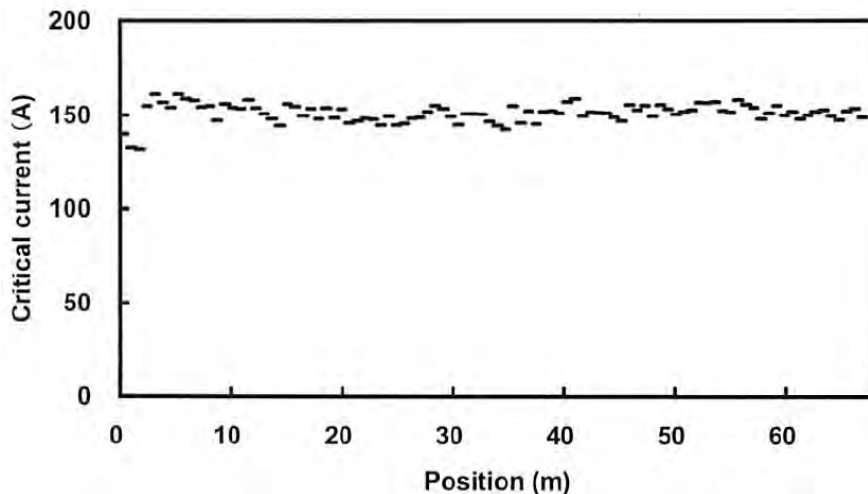


図 2.2.2-19 4-C で使用した線材(ロッド番号 0076)の長手方向分布

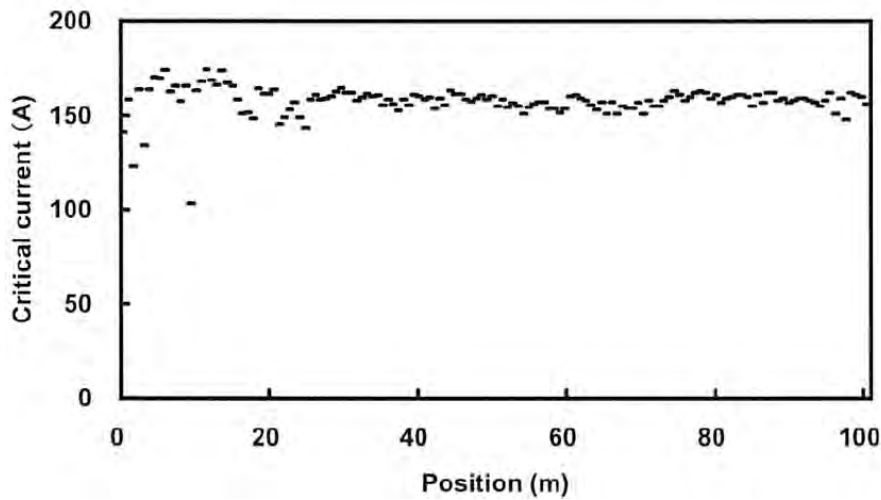


図 2.2.2-20 3-C で使用した線材(ロッド番号 0071)の長手方向分布

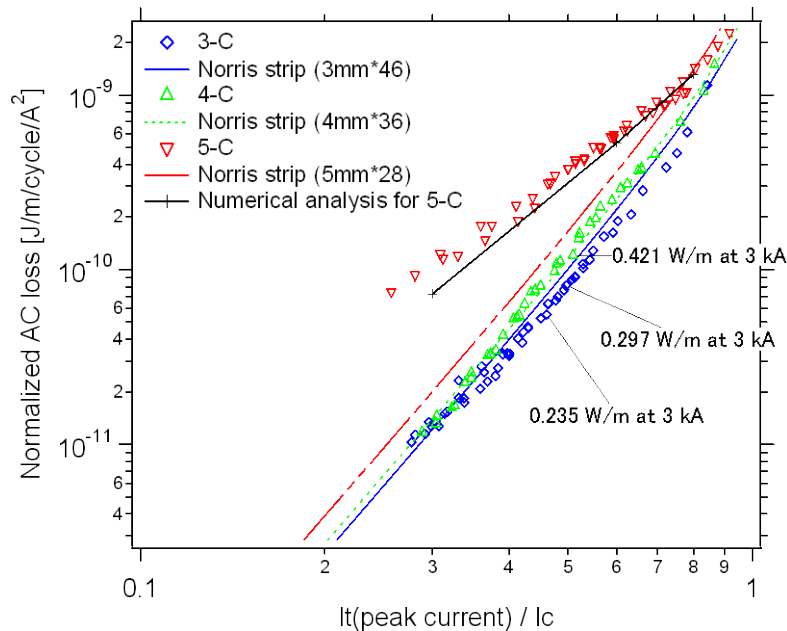


図 2.2.2-21 3つの導体の規格化した超電導の交流損失

3-C の臨界電流の特性を図 2.2.2-22 に示す。77.3 K で I_c が 4700 A であったが、3 mm 幅線材 1 本当たり 102 A であり、5 mm 幅に換算すると 170 A である。元々の未処理の線材の I_c が 150-165 A であり、 J_c の低い端部を除いたことを考えると、妥当な結果である。

図 2.2.2-23, 図 2.2.2-24 に交流損失の結果を示す。Norris のストリップモデルよりも明らかに損失の低減が見られ、線材間ギャップを小さくすることによる、垂直磁場のキャンセル効果が見られている。3 kA_{rms} の交流損失は、0.297 W/m ($I/I_c=0.50$)、0.235 W/m ($I/I_c=0.46$)と目標値である 0.3 W/m 以下を達成した。

また、解析では、レーザによる熱影響部 (0.1 mm) および端部の J_c (図 2.2.2-18 線材の幅方向 J_c 分布で $s=0.1$ mm) の改善を考慮したところ、今回の実験結果とほぼ良い一致をみせた。

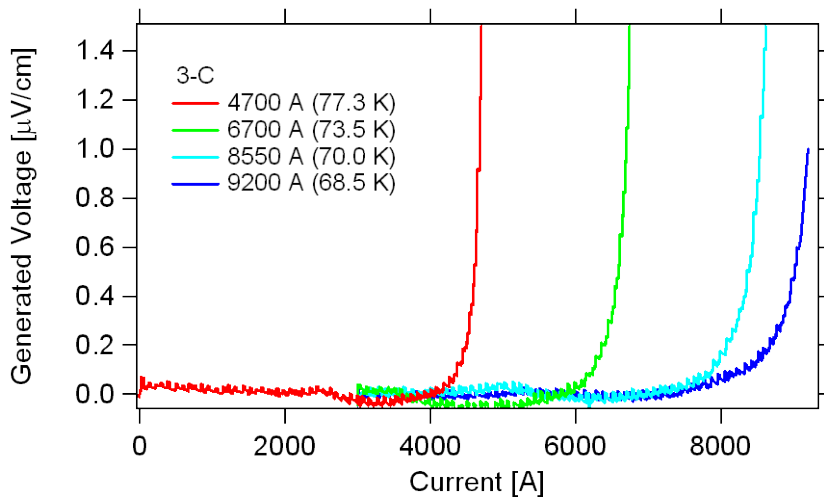


図 2.2.2-22 3-C の V-I 特性

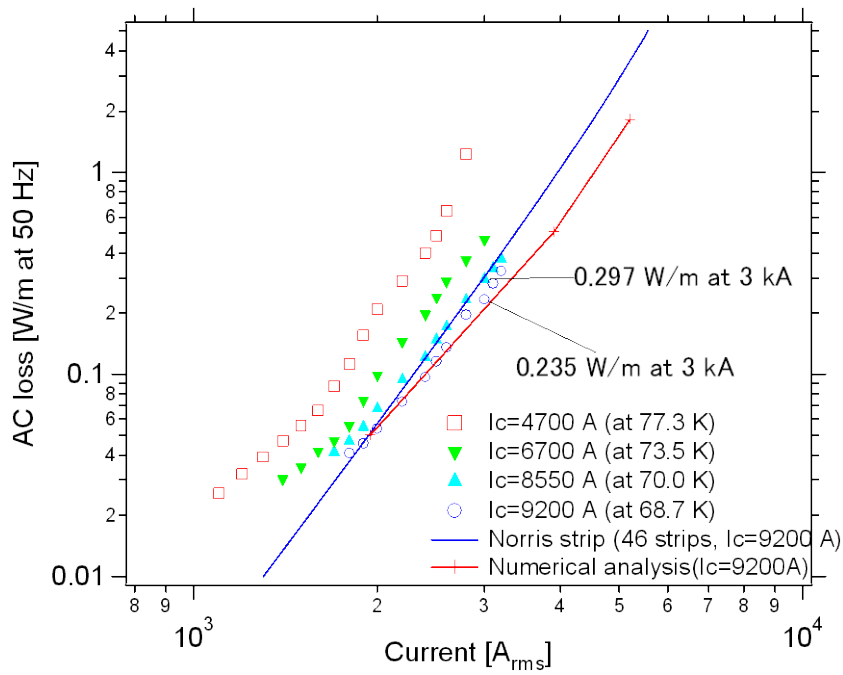


図 2.2.2-23 3-C の交流損失結果

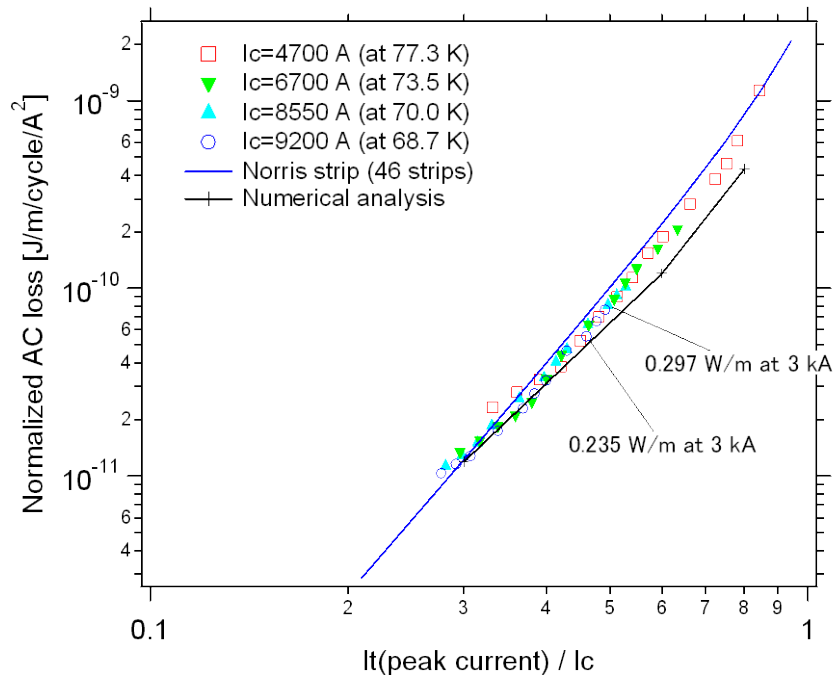


図 2.2.2-24 3-C の I_c で規格化された交流損失結果

(4) 研究内容 3 -機械曲げ特性-

325 mm²の銅撚り線に超電導線を巻き付け、絶縁厚 26 mm にして、275 kV 級のケーブルコアを作製してケーブル曲げ試験を実施した(図 2.2.2-25)。曲げ直径を変えて曲げ履歴を与えた後に、 I_c 測定を行い劣化率の調査と、2 m 曲げ後にケーブルコアを解体して絶縁紙の状況を確認した。その結果、曲げ直径 2.5 m まで超電導性能の低下がないことを確認して、さらに 2 m 曲げまで絶縁紙への変形(破れ、皺)が無いことが確認できた。275 kV の超電導ケーブルコアとして、曲げ特性としては製造上問題ないことが確認できた。

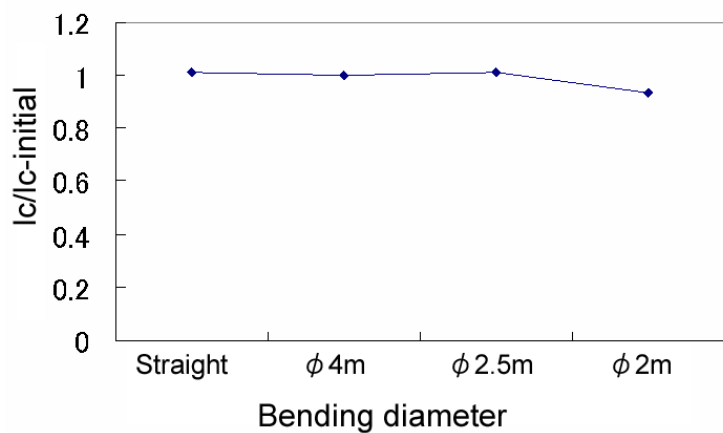


図 2.2.2-25 機械曲げ試験

(5) 成果

線材端部の特性劣化部をレーザーで落とすことで、交流損失低減を考えた。5 mm 幅の超電導線材の両端 1 mm をレーザーで切断し、3 mm 幅の線材を使って、導体を作製した結果、3 kA_{rms} の交流損失は、0.297 W/m ($I/I_c = 0.50$)、0.235 W/m ($I/I_c = 0.46$)と目標値である 0.3 W/m 以下を達成した。

曲げ直径 2.5 m まで機械試験を行い、超電導性能の低下と絶縁紙への変形(破れ、皺)が無いこと分かり、275 kV 超電導ケーブルの曲げに対する機械的な課題がないことを確認した。

引用論文リスト

- (1) M. Yagi, S. Mukoyama, N. Amemiya, S. Nagaya, S. Kashima and Y. Shiohara, “Development of a 10 m long 1 kA 66/77 kV YBCO HTS cable with low AC loss and a joint with low electric resistance”, Supercond. Sci. and Tech. Vol.22 (2009) 085003
- (2) Norris W T 1970 J. Phys. D: Appl. phys. 3 489-507

2.2.2-3 定常通電の伝熱特性検討 (早稲田大学、古河電気工業)

(1) 研究開発目的

275 kV 高電圧ケーブルは、単心で管路内に布設するケーブル構造が考えられており、ケーブルコアは冷却性向上のため、銅フォーマを従来の丸撚り形状から中空にすることも検討されている。275 kV という高電圧により、絶縁体の誘電体損失が大きくなり、さらに、3 kA_{rms} の通電により、超電導導体層と超電導シールド層で交流損失が発生する。ケーブルの絶縁厚は、275 kV の耐電圧特性を持たせるために、厚くなり、その結果、伝熱特性が悪くなるので、定常運転に影響を与える可能性がある。よって、275 kV 高電圧ケーブルでは、交流損失と誘電体損失による発熱を考慮した定常通電の伝熱特性評価が重要である。そこで、275 kV 高電圧ケーブルの交流損失と誘電体損失を想定した伝熱特性評価を行い、適切な銅フォーマの形状について検討するために、銅フォーマが中空と丸撚りのモデルケーブルを 2 本作製して、定常伝熱特性試験を実施するとともに、有限要素法を用いてモデルケーブル内の伝熱特性について数値解析を行い、実験結果と比較して数値解析の妥当性を確認する。

(2) 研究内容 1 一定常伝熱特性試験

銅フォーマが中空 A と丸撚り B のモデルケーブルを 2 本作製し、交流損失と誘電体損失を模擬するヒータをモデルケーブル内に配置した。図 2.2.2-26 にモデルケーブル A、B の写真を示す。

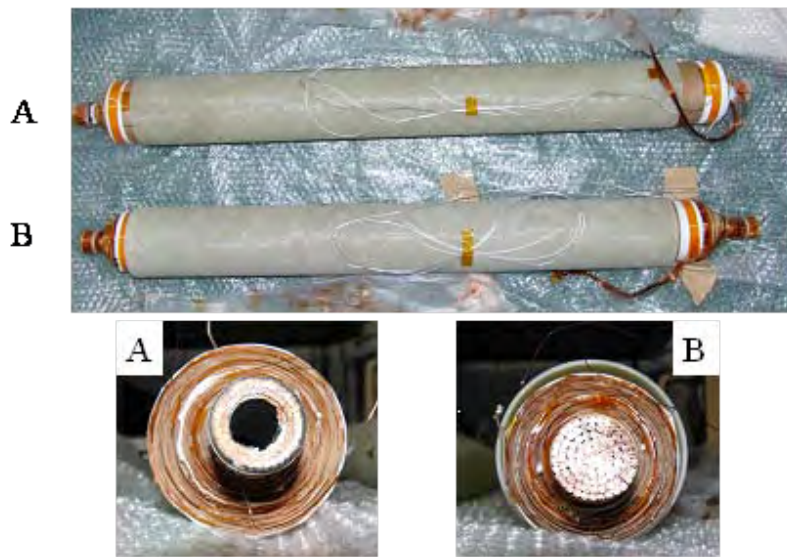


図 2.2.2-26 中空 A と丸撚り B のモデルケーブル

モデルケーブル A の寸法およびヒータと白金抵抗温度計の配置図を図 2.2.2-27 に示す。モデルケーブル A の中空部は直径 18 mm である。モデルケーブル B の寸法およびヒータと温度計の配置は、銅フォーマの形状が丸撚りであることを除いて A と同様にした。

モデルケーブル A、B は、超電導導体層・絶縁層中央・超電導シールド層にヒータを配置して、交流損失と誘電体損失を模擬した。275 kV 高電圧ケーブルのプロジェク設計目標値である 0.8 W/m をもとに、交流損失と誘電体損失はそれぞれ 0.3 W/m と 0.5 W/m に設定し、ヒータの出力は超電導導体層で 0.15 W/m、絶縁層中央で 0.5 W/m、超電導シールド層で 0.15 W/m となるように実験を行った。モデルケーブル A、B は、全長約 1 m のケーブル中央に 12 個の白金抵抗温度計 (T1-T6、T11-T16) を配置して温度測定を行なった。なお、T1 と T11、T2 と T12、T3 と T13、T4 と T14、T5 と T15、T6 と T16 はそれぞれケーブル中心から同距離に設置した。実験は、77.3 K の液体窒素を 0.03-0.05 MPaG のヘリウム加圧した冷却条件で行った。測定は、ヒータに通電し、温度計の出力が定常状態に落ち着くまで温度観測を行なった。なお、外部から実験装置への熱侵入により液体窒素の温度が上昇するため、モデルケーブルのすぐ外にも温度計を配置し、ケーブル内の温度からケーブル外部の熱侵入の影響を除去した。

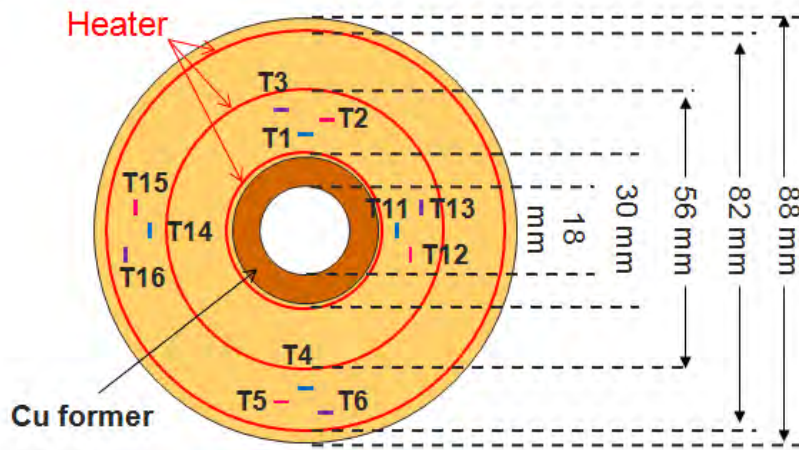


図 2.2.2-27 モデルケーブル A の寸法、ヒータと白金抵抗温度計の配置図

(3) 研究内容 2 –伝熱特性の数値解析–

伝熱特性の数値解析は 3 次元有限要素法を用いてモデル化し、式(1)、(2) より定式化した。比熱容量、熱伝導率などの各物性値の温度依存性や非線形性を考慮して、各時間ステップにおけるケーブル内の温度分布を計算している。境界条件はケーブル最外層の絶縁層 (PPLP) の表面が液体窒素に触れているとして、液体窒素への非線形熱伝達特性 (図 2.2.2-28 参照⁽¹⁾) を考慮した。なお、ケーブル表面は円筒状だが、切り開いた場合に平板として近似できるため、モデルは平板を考慮している。PPLP は液体窒素が浸漬した状態であるため、熱物性値の熱伝導率 k_{pplp} と比熱容量 c_{pplp} は既存するデータがなく、本解析ではパラメータとして推定した。式(2.2.2-3)の ρ は密度、 c は定圧比熱容量、 k は熱伝導率、 T は温度、 Q_j は電流分布解析から求まるジュール発熱、 Q_q は液体窒素の冷却項である。式(2.2.2-4)の h は液体窒素への熱伝達係数、 T_s はモデルケーブル表面の温度、 T_b は液体窒素の温度である。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_j - Q_q \quad (2.2.2-3)$$

$$Q_q = h(T_s - T_b) \quad (2.2.2-4)$$

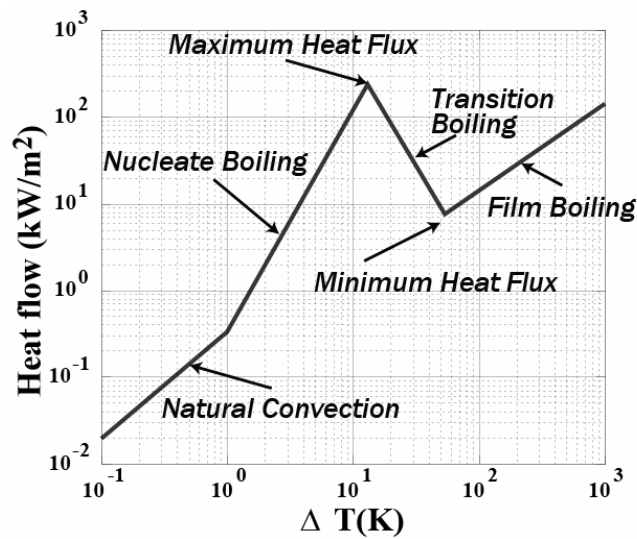


図 2.2.2-28 液体窒素の非線形熱伝達特性

(4) 研究内容 2 –実験結果との比較–

ヒータから交流損失と誘電体損失を模擬する発熱を投入し、定常状態になるまでモデルケーブル A、B 内の温度分布を測定した。モデルケーブル A について、定常時におけるケーブル断面の半径方向の温度分布の実験結果と解析結果を図 2.2.2-29 に、同様にモデルケーブル B の結果を図 2.2.2-30 に示す。またモデルケーブル A について、定常状態になるまでの温度分布の実験結果と解析結果を図 2.2.2-31 に、同様にモデルケーブル B の結果を図 2.2.2-32 に示す。図 2.2.2-29、2.2.2-30 の横軸はケーブル中心から半径方向への距離で、縦軸は初期温度からの温度上昇である。図 2.2.2-31、2.2.2-32 の横軸は時間で、縦軸は初期温度からの温度上昇である。実験における超電導導体層、絶縁層中央、超電導シールド層のヒータ出力はそれぞれ約 0.15 W/m、0.48 W/m、0.14 W/m であった。図 2.2.2-29、2.2.2-30 の LN₂ は液体窒素領域を表す。図 2.2.2-29 のモデルケーブル A は中空部である 0-0.009 m までも液体窒素領域である。図 2.2.2-30 の解析において、PPLP の熱伝導率 k_{pplp} は 0.1-0.2 W/mK、比熱容量 c_{pplp} は 0.5×10^6 J/m³K を用いた。図 2.2.2-29 の解析において、PPLP の熱伝導率 k_{pplp} は 0.2-0.3 W/mK、比熱容量 c_{pplp} は 0.8×10^6 J/m³K を用いた。

図 2.2.2-29 より、モデルケーブル A は絶縁層中央のヒータ (0.48 W/m) 付近で最も温度上昇が大きく、その両側は一定の傾きで低下していく。これは、中空部及びケーブル外部の両方から冷却されているためである。また、絶縁層中央のヒータより両側の温度分布は非対称になっており、ケーブル外側の温度が低い。これは、中空部よりもケーブル外部の冷却面積が広いためである。図 2.2.2-29 より、モデルケーブル B はケーブル中心に近いほど温度が高い傾向にある。これは、ケーブル外部のみから冷却されているためである。図 2.2.2-29、2.2.2-30 の解析結果は実験結果とよく一致しており、モデルケーブル A の最大温度上昇は 0.4 K 以下、モ

デルケーブル B は 0.3 K 以下と推定される。

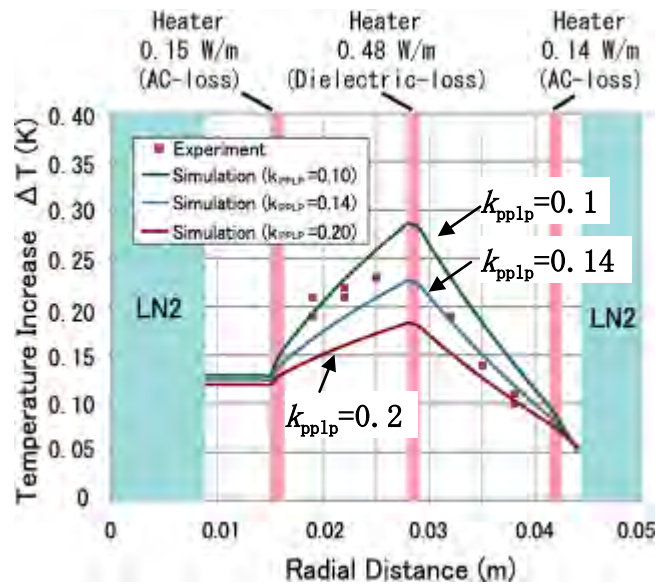


図 2.2.2-29 モデルケーブル A の半径方向の温度分布

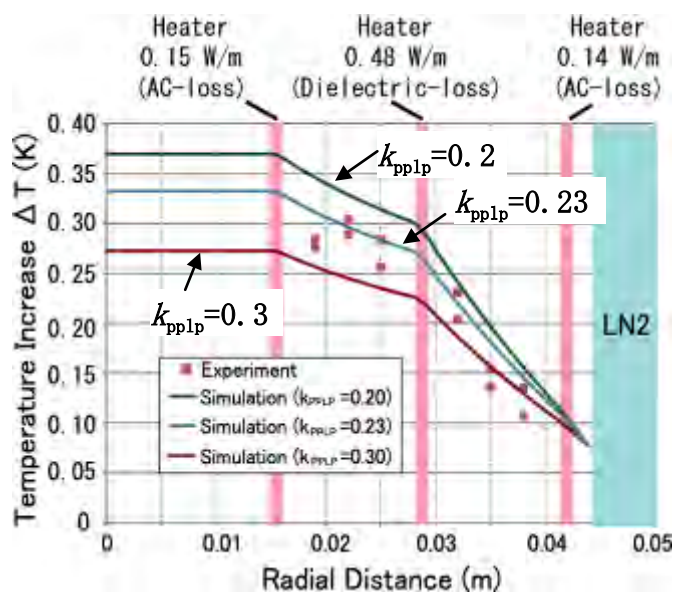


図 2.2.2-30 モデルケーブル B の半径方向の温度分布

図 2.2.2-31、2.2.2-32 より、両モデルケーブルはヒータ投入開始 (0 s) からとも 6000 s 程度で定常状態になった。解析結果は実験結果とよく一致しており、ケーブル内部の過渡的な熱特性の再現を確認した。また解析結果より、液体窒素浸漬状態の PPLP の熱伝導率 k_{pplp} は 0.1-0.3 W/mK、比熱容量 c_{pplp} は 0.5×10^6 - 0.8×10^6 J/m³K と推定でき、この物性値は世界的にも報告例がなく、超電導ケーブルの熱特性評価において非常に重要なデータである。

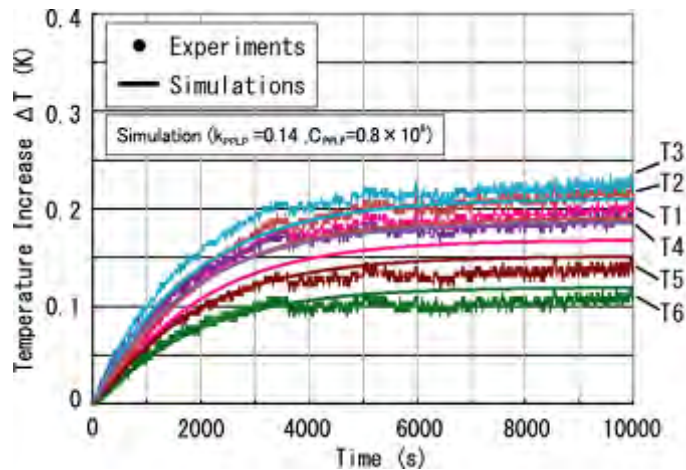


図 2.2.2-31 モデルケーブル A の定常までの温度分布

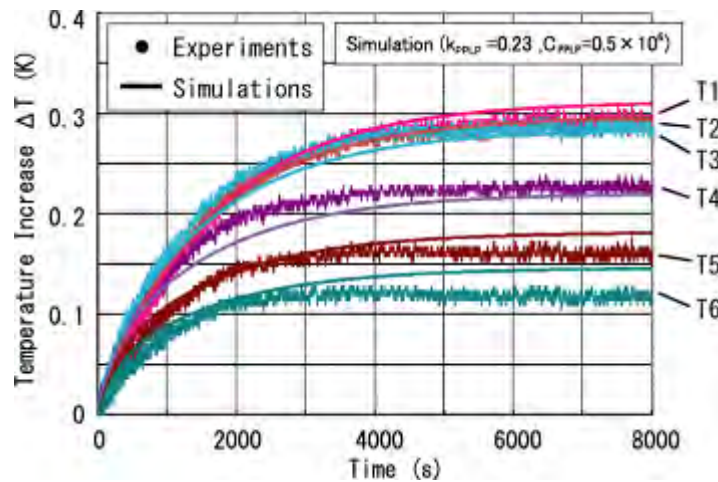


図 2.2.2-32 モデルケーブル B の定常までの温度分布

(5) 成果

中空 A と丸撚り B の銅フォーマで構成されたモデルケーブルの定常通電における伝熱特性を十分に確認した。両モデルケーブルの伝熱特性に大きな差がなく、丸撚りの銅フォーマによるケーブル構造を選択した場合でも、定常運転時における伝熱特性に問題はなく、実現可能であることが確認された。

引用論文リスト

- (1) 「超伝導・低温工学ハンドブック」 p1065 図 2-57 液体窒素の沸騰熱伝達曲線

2.2.2-4 耐過電流ケーブル設計技術 (古河電気工業、早稲田大学)

(1) 研究開発目標

275 kV 級高電圧超電導ケーブルは、単心で管路内に布設するケーブル構造が考えられており、ケーブルコアは図 2.2.2-33 のようにケーブル中心から銅フ

フォーマ、超電導導体層、絶縁層、超電導シールド層、銅シールド層で構成されている。超電導導体層と超電導シールド層には、それぞれ複数の Y 系超電導線材が並列に接続されており、それらの複合導体には最大で 63 kA_{rms}、0.6 sec の突発的な短絡事故電流が流入する恐れがある。それゆえ、突発的な短絡事故電流による温度上昇が線材の劣化・焼損を引き起こさないように、超電導保護層としての銅安定化層、銅フォーマや銅シールド層を適切に設計することが必要となる。

本研究の目標は、275 kV 系統で考えられる最悪の事故ケース 63 kA_{rms}-0.6 sec の過電流に対しても超電導が耐性を示す超電導ケーブルを開発することである。

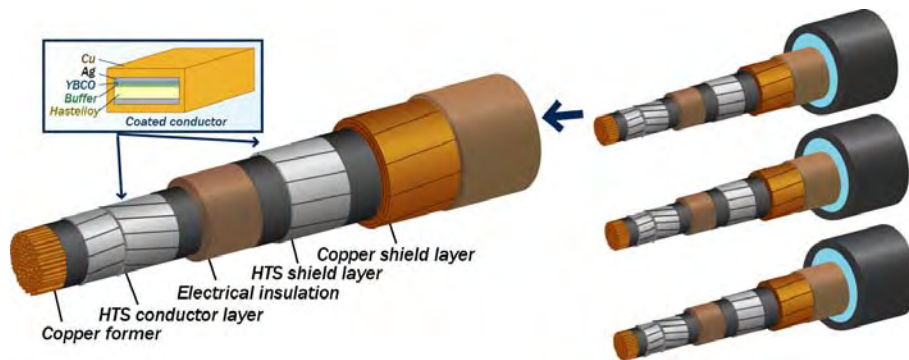


図 2.2.2-33 275 kV 級高電圧超電導ケーブル

(2) 研究成果 1 ー超電導線材への耐過電流対策ー

超電導線材の銅メッキ厚と銅シールド層の断面積をパラメータとして、275 kV 級高電圧超電導ケーブルで想定される最大の短絡事故電流 63 kA_{rms}、0.6 sec 通電した際のケーブル内の温度上昇について解析評価した。銅メッキ厚と銅シールド層の断面積の解析設定値を表 2.2.2-8 に示す。解析対象のケーブル構造は、銅メッキ厚と銅シールド層の断面積を除いて、図 2.2.2-33 で示した超電導モデルケーブルと同様にした。銅フォーマと超電導導体 1, 2 層目の温度上昇と銅メッキ厚の関係を図 2.2.2-34 に、銅シールド層が 240 mm² および 310 mm² での超電導シールド層の温度上昇と銅メッキ厚の関係を図 2.2.2-35 に示す。図 2.2.2-34 の解析結果より、銅メッキ厚の増加に伴い、超電導導体 1, 2 層目の温度上昇は増加し、一方銅フォーマの温度上昇は緩やかに低下した。この原因として、銅メッキ厚の増加により超電導導体層の抵抗が減少し、全過電流のうち超電導導体層に流れる電流が増加したためである。一方、超電導導体層に流れる電流が増加することで銅フォーマに流れる電流は減少し、銅フォーマの熱容量が大きいことから温度変化しにくいこともあり、温度上昇は緩やかに低下した。図 2.2.2-35 の解析結果より、銅メッキ厚の増加に伴い、超電導シールド層の温度上昇は図 2.2.2-35 の HTS 導体層と同様に増加した。この原因は超電導導体層の原因と同じである。また図 2.2.2-35 の解析結果より、銅シールド層の断面積を 310 mm² から 240 mm² に減らしたことで、超電導シールド

層の温度上昇は各銅メッキ厚とも約 15 K 増加した。これは、銅シールド層を減らしたことにより、超電導シールド層に流れる電流の増加を引き起こしたものである。なお、銅シールド層の断面積の変化は銅フォーマと超電導導体層の温度上昇にはほとんど影響がなかった。図 2.2.2-34, 図 2.2.2-35 の解析結果から今回の銅メッキ厚と銅シールド層断面積の設定範囲において、熱的な要因による超電導特性の劣化が引き起こされる可能性は極めて低く、275 kV 級高電圧超電導ケーブルで想定される最大の短絡事故電流 $63 \text{ kA}_{\text{rms}}$, 0.6 sec の熱的ダメージから超電導ケーブルを保護できるといえる。一方、超電導ケーブルの作製コストの低減を考えた場合には、できる限り保護としての銅層を減らすことが重要となる。よって、今回の解析結果は、銅メッキ厚と銅シールド層断面積を減らした構造も短絡事故から 275 kV 級高電圧超電導ケーブルを保護できる可能性があることを示唆している。

表 2.2.2-8 線材の銅安定化層の厚みと銅シールド層の断面積

	構造
銅メッキ	厚み 12.5, 25, 32.5, 50, 75 μm
銅シールド層	断面積 240, 310 mm^2 (2, 3 層)

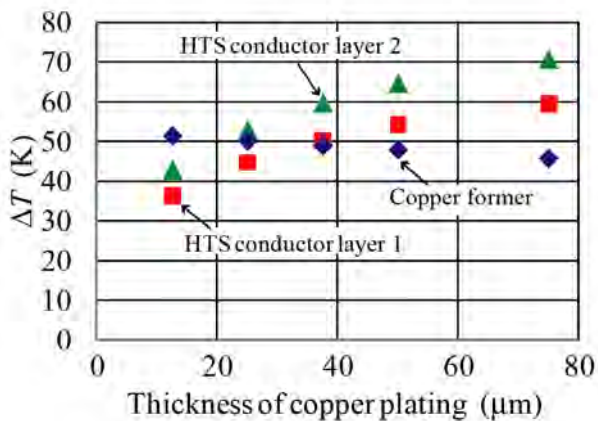


図 2.2.2-34 銅フォーマと超電導導体層の温度上昇

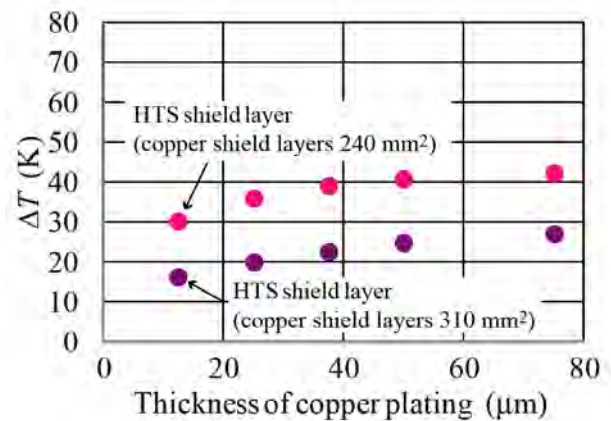


図 2.2.2-35 超電導シールド層の温度上昇

(3) 研究成果 2 ー過電流時の分流ー

275 kV 級高電圧超電導ケーブルの開発では、 $63 \text{ kA}_{\text{rms}}$, 0.6 sec の耐短絡電流特性が要求される。今回はその耐短絡電流特性の検証として、2 m 級超電導モデルケーブルを用いて過電流通電試験を行った。モデルケーブルの諸元を表 2.2.2-9 に示す。モデルケーブルは 2 本とも同じ構造である。銅フォーマは銅断面積 325 mm^2 の撚り線構造となっている。超電導導体層は 2 層構成でトータル I_c が約 700 A である。超電導導体層と超電導シールド層の間の絶縁層はポリプロピレンラミネート紙 (PPLP) で構成し、25 mm 厚である。超電導シールド層

は 1 層構成でトータル I_c が約 1,300 A である。銅シールド層は 3 層構成で、銅断面積が約 310 mm² となっている。超電導線材は 5 mm 幅で、安定化層として銀層はスパッタリングされて厚みは 15 μm と銅層はメッキ加工されており、メッキ厚は 25 μm である。試験で使用した超電導線のメッキの様子を図 2.2.2-36 に示す。端部での膨らみが無くなり、表面も綺麗に仕上がっている。

試験回路は 2 本のモデルケーブルの導体層（銅フォーマ、超電導導体層）を電源と直列接続し、シールド層（超電導シールド層、銅シールド層）は両モデルケーブルの端部を短絡接続して、導体層からの誘導でシールド電流が流れるように構成した。過電流通電によるケーブル内の温度上昇を測定するため、ケーブル長手方向の中央部に白金抵抗温度計（Platinum thermometer）を設置した。実験は液体窒素浸漬冷却（初期温度 77.3 K）で行い、過電流として約 10, 20, 30, 40, 63 kA_{rms} を通電した。

表 2.2.2-9 275 kV 級超電導モデルケーブルの諸元

	仕様	外径 (mm)
銅撚り線フォーマ	325 mm ²	21.7
超電導導体層 (2 層)	28 tapes	26.9
絶縁層 (PPLP-C)	厚み:25 μm	79
超電導シールド層 (1 層)	42 tapes	80
銅シールド層(3 層)	310 mm ²	85
保護層	絶縁紙	90

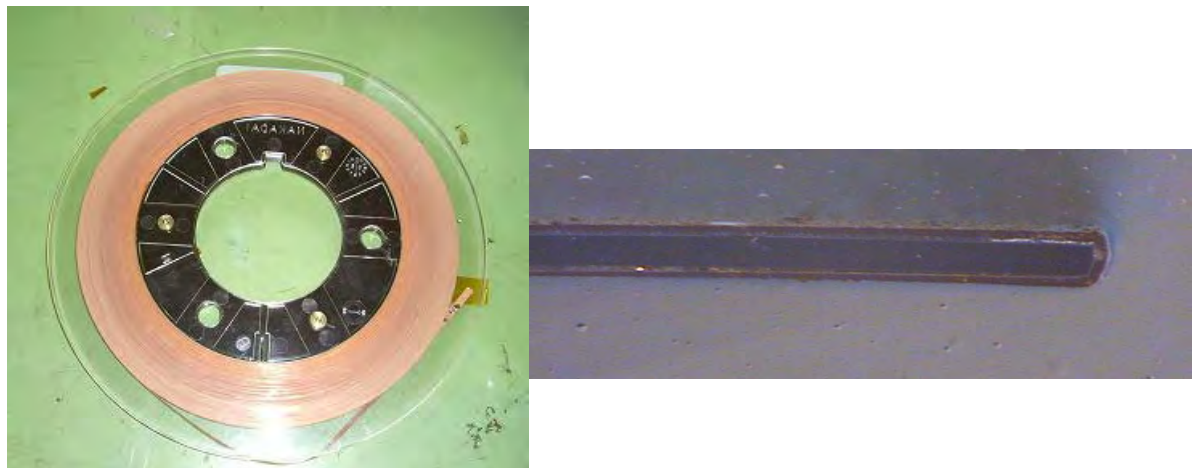


図 2.2.2-36 銅メッキ仕上げ後の超電導線材

次に、銅フォーマ、超電導導体 1, 2 層目、超電導シールド層の初期温度 (77.3 K) からの温度上昇 (ΔT) について、63 kA_{rms} 通電時の通電時間との関係を図 2.2.2-37 に、また 10, 20, 30, 40, 63 kA_{rms} の 0.6 sec 通電時の過電流値との関係を図 2.2.2-38 に示す。図 2.2.2-37, 2.2.2-38 のプロットは実験値で、実線が解析値である。図 2.2.2-37 の実験結果より、275 kV 級高電圧超電導ケーブル

で想定される最大の短絡事故電流 $63 \text{ kA}_{\text{rms}}$, 0.6 sec を通電した際に、銅フォーマは約 53 K 、超電導導体 1 層目は約 30 K 、超電導導体 2 層目は約 42 K 、超電導シールド層は約 15 K の温度上昇となった。図 2.2.2-37 の解析結果は、時間推移に伴う各層の温度上昇が 0.3 sec まで実験とよく一致している。 0.6 sec では実験と解析に差が出ているが、実験での温度計には時間遅れがあるため、測定誤差が生じていると考えられる。また、解析のモデル構成が完全に実験の構成を再現できていないことも原因と考えられる。図 2.2.2-38 の実験結果において、過電流値の増加に伴い、各層の温度も急激に上昇している。特に銅フォーマの温度上昇は、 $63 \text{ kA}_{\text{rms}}$ 通電時には超電導導体層と同程度もしくはそれ以上になっている。以上より、熱的な解析結果は、実験結果と定性的によく一致している。

$40 \text{ kA}_{\text{rms}}$ 通電時の各層の電流分布の実験結果を図 2.2.2-39 に、解析結果を図 2.2.2-40 に示す。図 2.2.2-39 の実験結果よりシールド電流は通電開始直後からほとんど減衰がなく、遮蔽率は約 91% である。通電開始から 0.3 sec 付近における各層の電流分布は、銅フォーマのピーク値が約 55 kA 、HTS 導体層が約 3.1 kA 、超電導シールド層が約 3.6 kA 、銅シールド層が約 47.5 kA である。図 2.2.2-40 の解析結果も実験結果と同様にシールド電流は通電開始直後からほとんど減衰がなく、遮蔽率は約 97% である。通電開始から 0.3 sec 付近における各層の電流分布は実験結果とよく一致しており、各層の電流位相差もほぼ再現できている。

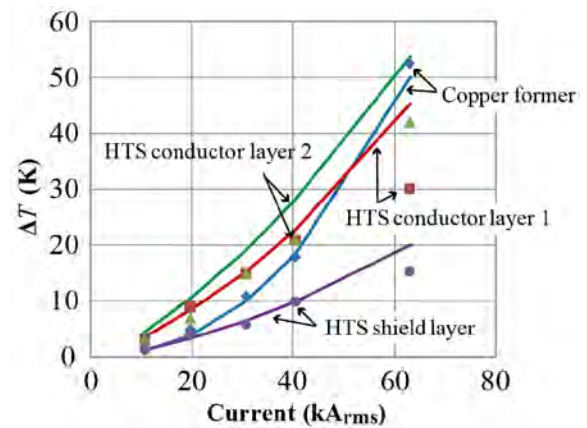
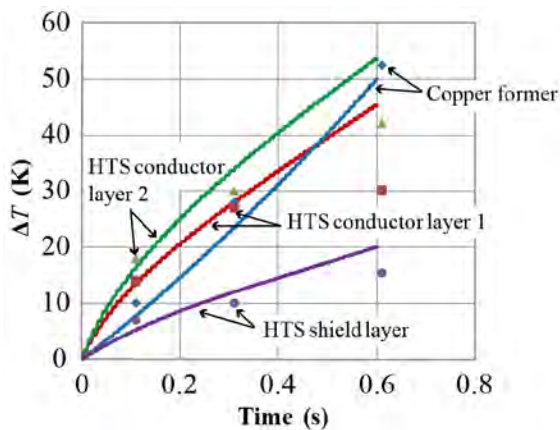


図 2.2.2-37 $63 \text{ kA}_{\text{rms}}$ 通電時の温度上昇

図 2.2.2-38 過電流値と温度上昇の関係

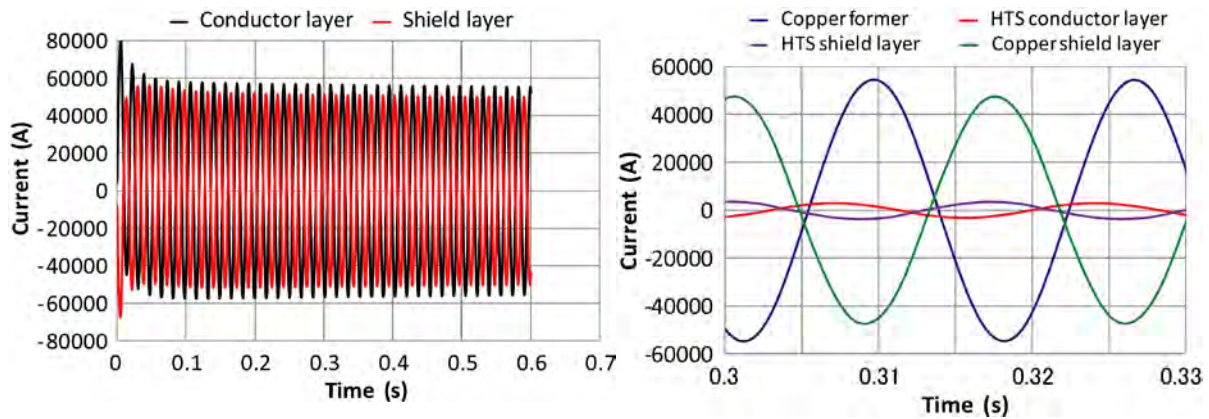


図 2.2.2-39 40 kArms 通電時の電流分布の実験結果

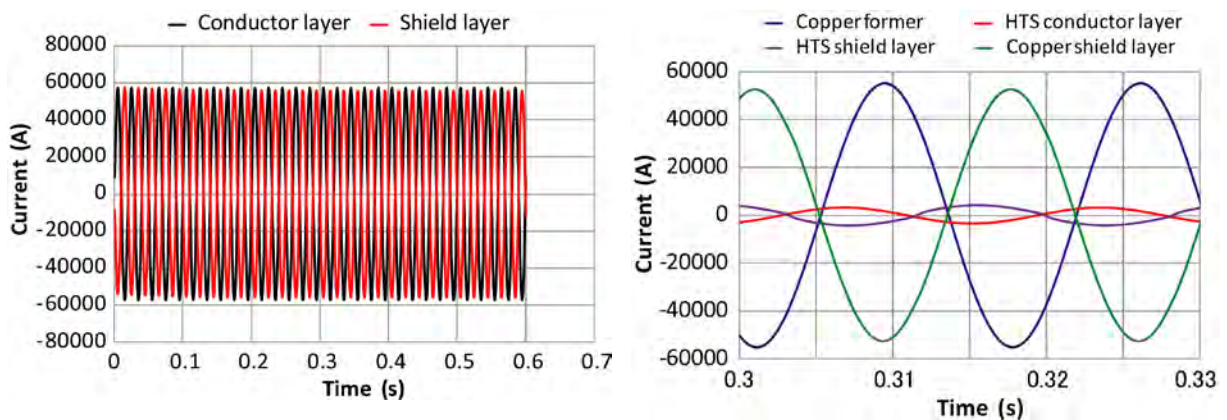


図 2.2.2-40 40 kArms 通電時の電流分布の解析結果

(4) 研究成果 3 –超電導ケーブルへの耐過電流対策–

超電導線の I_c が 300 A/cm-w(@77 K,s.f.) の場合で、短絡前後の健全性を評価した。超電導線材は 5 mm 幅で、超電導の I_c が高いため、安定化層として銀層の厚みは 30 μm と厚くしており、銅層はメッキ加工されており、メッキ厚が 25 μm である。試験回路は 2 本のモデルケーブルの導体層（銅フォーマ、超電導導体層）を電源と直列接続し、シールド層（超電導シールド層、銅シールド層）は両モデルケーブルの端部を短絡接続して、導体層からの誘導でシールド電流が流れるように構成した。ケーブルの仕様を表 2.2.2-10 に示す。超電導導体、シールドを図 2.2.2-41 に、供試体を図 2.2.2-42 に示す。作製後の導体とシールドの I_c を測定したところ、それぞれ、4370 A と 6340 A であり、表 2.2.2-10 で示した超電導線材単線の I_c 合計値と変わらず、作製・取付に伴う I_c 低下は見られなかった。

図 2.2.2-43～46 までに 63 kArms -0.05, 0.1, 0.3, 0.6 sec の試験波形を示す。最初のピーク値で直流成分を重畳して 120 kA にしたが、シールド電流もそれに誘導されて、遮蔽率は 92 % であり、設計通りであった。図 2.2.2-47,48 には過電流後の温度上昇を示している。63 kArms -0.05,0.1 s では最高到達温度は

90 K 以下に抑えられている。一方、63 kA_{rms} -0.3、0.6 sec では温度上昇は大きく、0.6 sec では、約 70 K の温度上昇が見られた。63 kA_{rms} -0.6 sec の過電流試験後に図 2.2.2-42 の直流電源を使用し、超電導の I_c を測定した。その VI 特性図を図 2.2.2-43 に示しているが、 I_c は試験前後で全く変わらず、過電流試験への耐性を確認した。

表 2.2.2-10 275kV-3kA 仕様の超電導モデルケーブル

超電導線材	5 mm 幅 Ag 安定化層 30 μ m、銅メッキ 25 μ m I_c 140-160 A(@77 K,s.f.) (280-320 A/cm-w 相当)	
構成	仕様	外径(mm)
銅フォーマ	325 mm ² 銅撚り線	21.7
超電導導体	2 層 28 本 $I_c=4200$ A (単線の合計)	26.8
半導電層	カーボン紙	27.0
絶縁体	PPLP-C 厚さ 24 mm	75.0
半導電層	カーボン紙	75.3
超電導シールド	1 層 43 本 $I_c=6450$ A (単線の合計)	75.8
銅シールド層	3 層 310 mm ²	82.2
保護層	絶縁紙	84.0

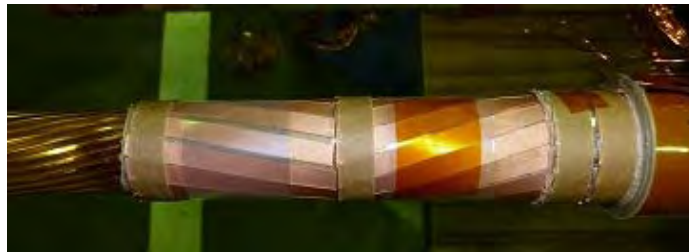


図 2.2.2-41 超電導導体 (上)、超電導シールド (下)

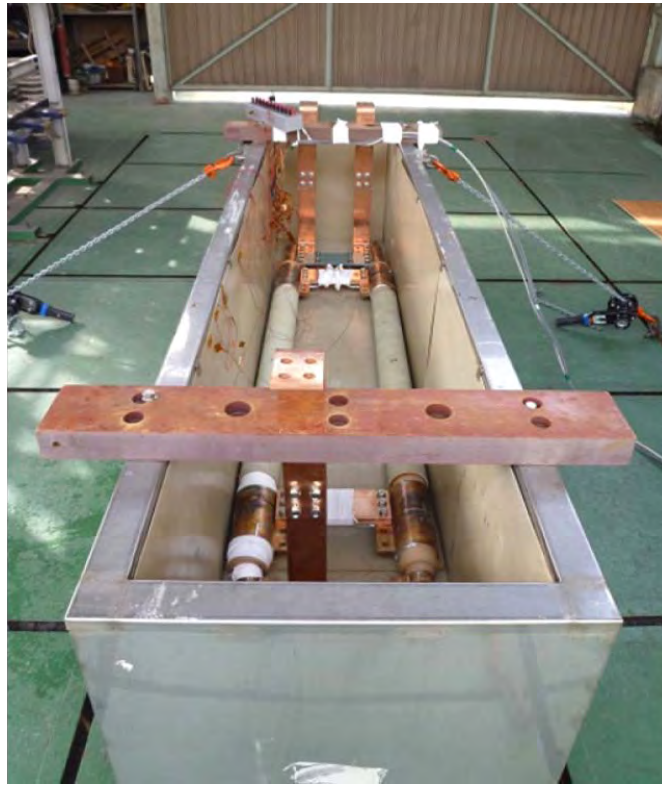


図 2.2.2-42 過電流試験の供試体

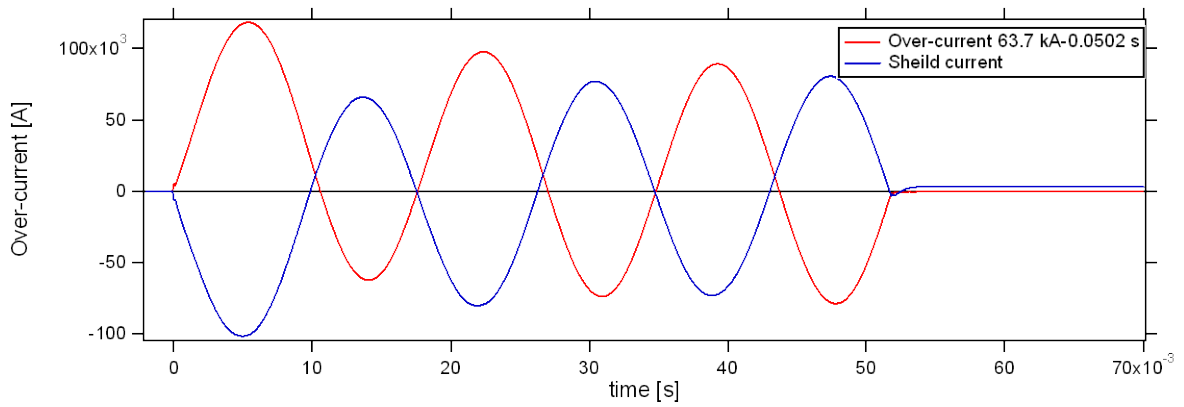


図 2.2.2-43 63 kA_{rms} -0.05 sec の試験波形

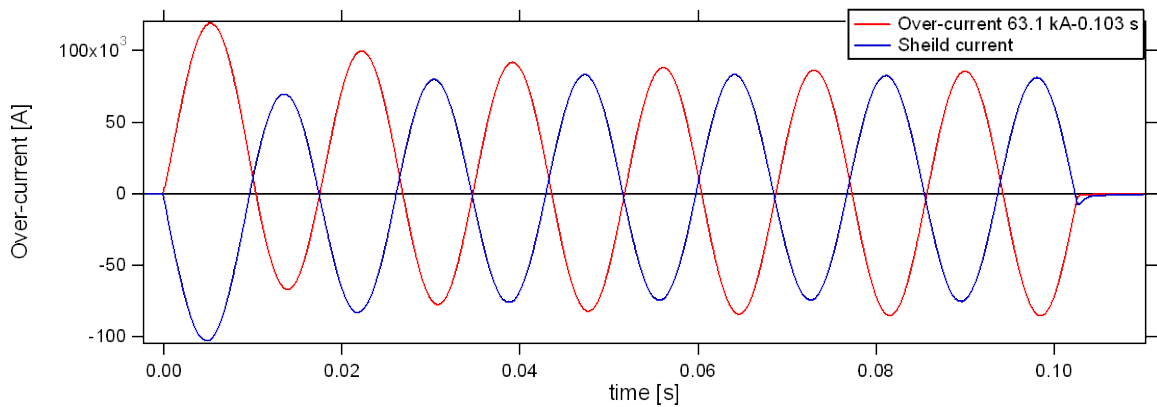


図 2.2.2-44 63 kA_{rms} -0.1 sec の試験波形

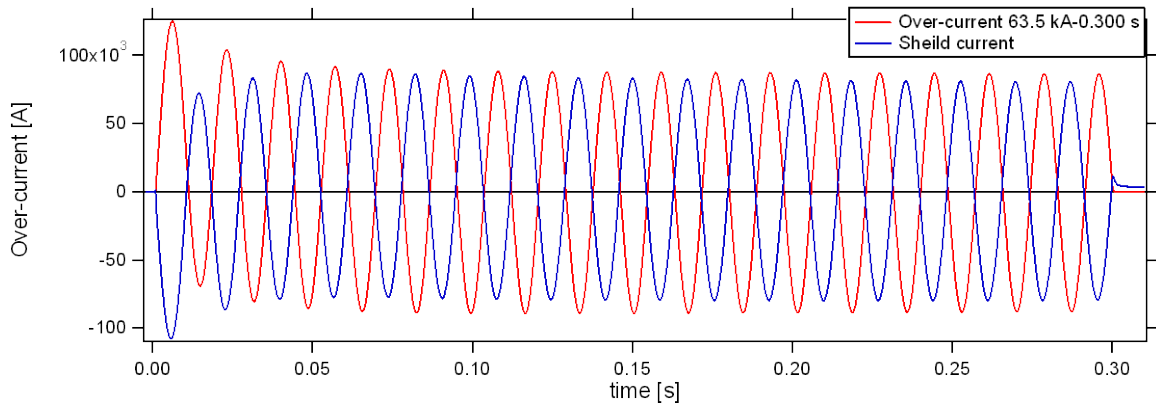


図 2.2.2-45 63 kA_{rms}-0.3 sec の試験波形

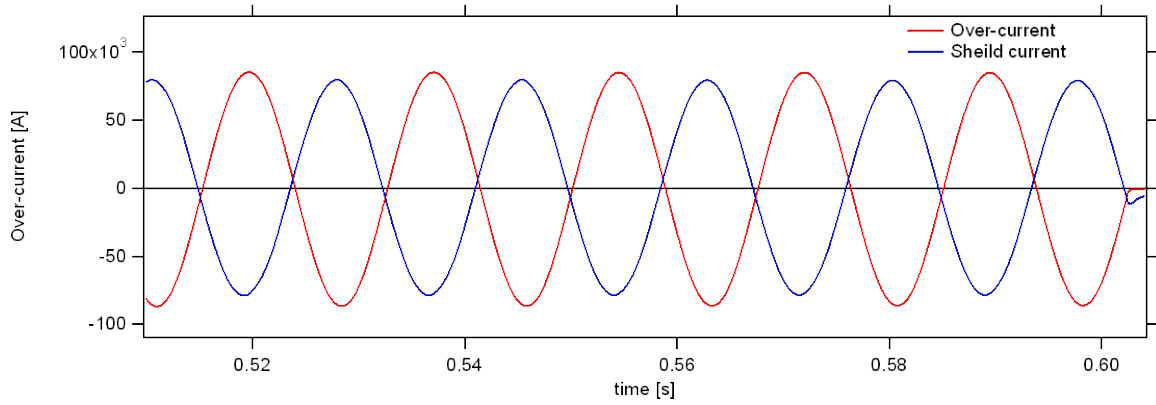
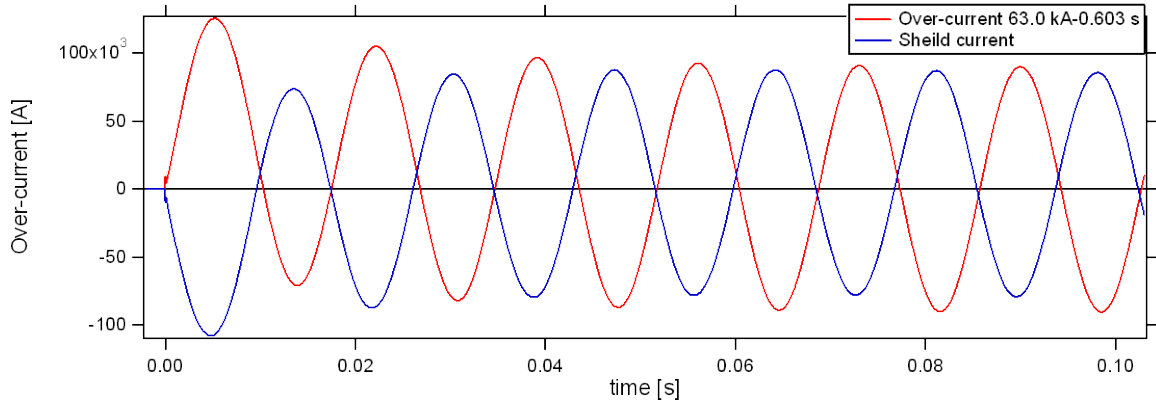


図 2.2.2-46 63 kA_{rms}-0.6 sec の試験波形
0-0.1 sec (上)、0.5-0.6 sec (下)

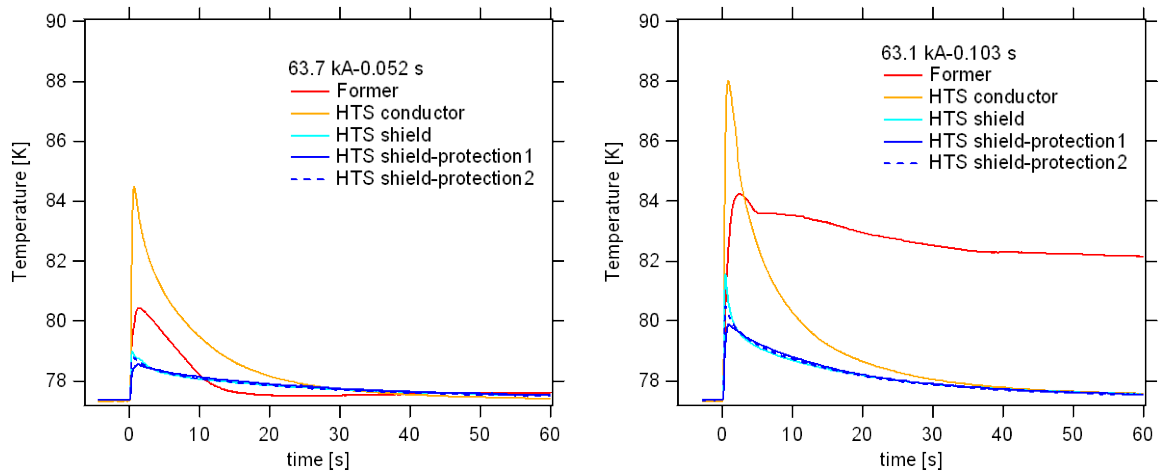


図 2.2.2-47 63 kA_{rms} 時の温度上昇、0.05 sec 時 (左)、0.1 sec 時 (右)

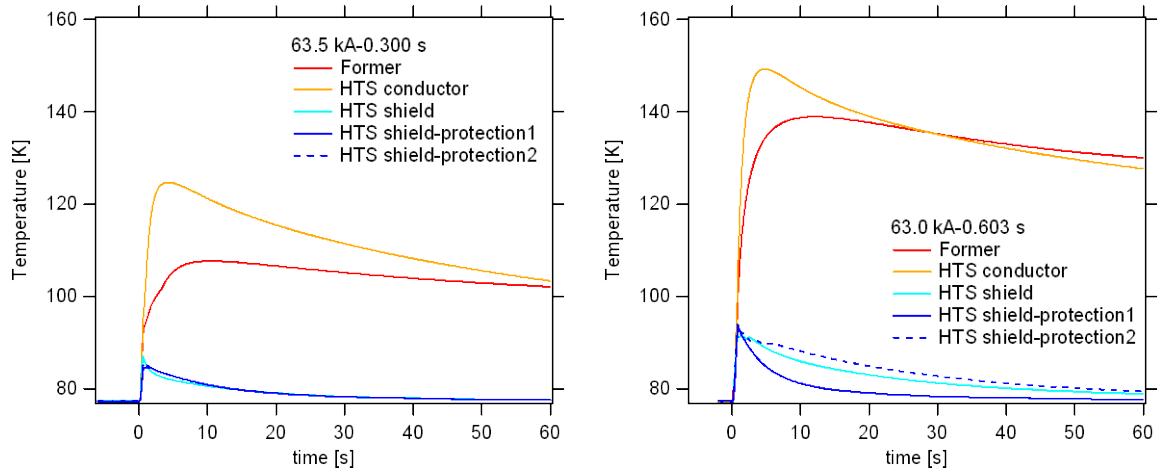


図 2.2.2-48 63 kA_{rms} 時の温度上昇、0.3 sec 時 (左)、0.6 sec 時 (右)



図 2.2.2-49 直流電源による I_c 測定

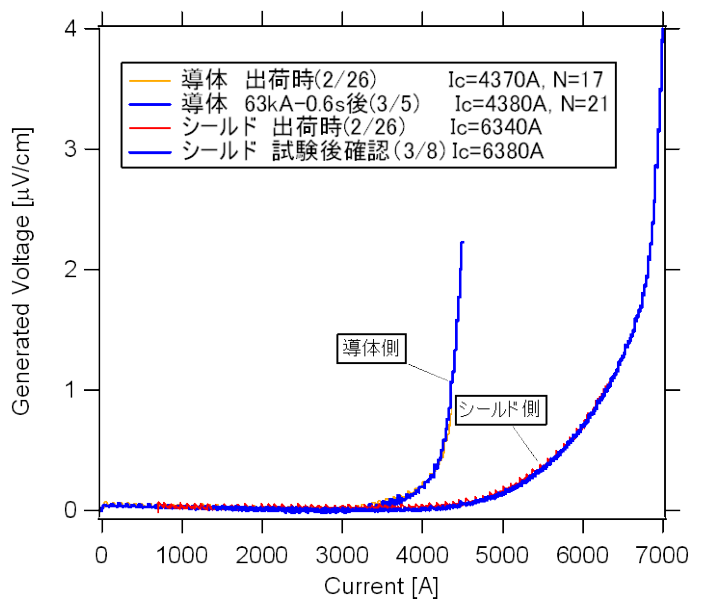


図 2.2.2-50 試験前後の I_c

(5) 成果

超電導モデルケーブルを用いて過電流通電試験を行い、超電導モデルケーブル内の温度上昇と電流分布について数値シミュレーションの結果と比較検討を行なった。解析結果は実験結果とよく一致しており、開発した計算機シミュレータの妥当性を確認できた。

実験で使用した超電導導体には銅撚り線 325 mm² の丸撚り導体、超電導シールドには銅編組線 310 mm² を使って、事故電流による過電流保護としたところ、最悪の事故ケース 63 kA_{rms}-0.6 sec の過電流に対しても耐性を示し、中間目標を達成した。

2.2.2-5 中間・終端接続技術（古河電気工業）

(1) 研究開発目標

275 kV高電圧ケーブルのシステム検証を行うためには、超電導電力ケーブルの両端に課通電用の終端接続部として気中終端接続部、ケーブル接続部には中間接続部が必要である。

275 kV高電圧ケーブルの中間接続部としては、局所的な発熱と絶縁の問題、 I_c 値の高い線材の接続技術と接続抵抗の把握が重要である。275 kV終端接続部としては、ケーブルの試験を実施するために、ケーブルと同等の性能を持つ必要がある。実施計画で述べられている研究開発目標は、以下の通りである。

- ・（中間接続部）高 I_c 線材の接続抵抗評価、電界解析のための解析モデルの作成、中間接続部の設計と試作、さらに課電試験を通して中間接続部の設計を確立する。
- ・（終端接続部）室温から低温部への温度勾配、電界分布を担うブッシングの開発、ケーブル絶縁の開発のために、試験末端を用いた交流課電試験、インパルス課電試験、部分放電試験を実施する。この試験基準として、国内規格、国際規格、さらには過去の超電導ケーブル試験を参考にする。さらに、終端部を構成する部品に関して単品試験を行う。これらのデータを蓄積して、システム検証用さらに実機としての終端接続部設計を行う。

(2) 研究内容(1) ー超電導線材の接続ー

高 I_c のY系超電導線材（5 mm幅で150 A（300 A/cm-w）@77 K,s.f.）を2本用意して、図2.2.2-51に示すように超電導線を接続した。接続長は100 mmであり、この時の接続抵抗測定の結果を表2.2.2-11に示す。この表に示すように47～73 nΩの低抵抗な接続ができることを確認した。

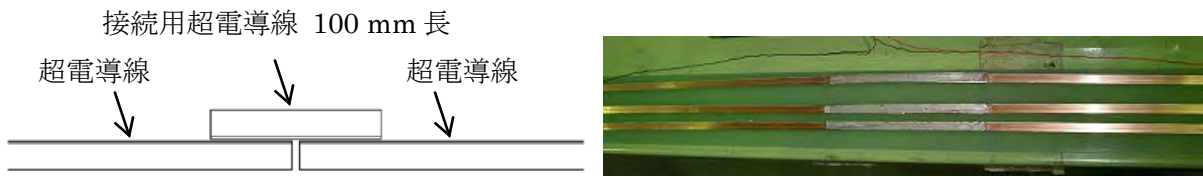


図2.2.2-51 5 mm幅Y系超電導線の接続

表2.2.2-11 5 mm幅Y系超電導線の単線の接続抵抗

	接続抵抗 [nΩ]
Joint 1	59
Joint 2	47
Joint 3	68
Joint 4	62
Joint 5	73

実際の超電導線材はスパイラルで巻き付けられているため、そのスパイラルに合わせて1本ずつ接続することは難しく、図 2.2.2-52 のように接続用線材を並べて、層全体で接続する⁽⁴⁾。接続部全体の概略図を図 2.2.2-53 に示す。この図に示すように超電導導体の各層の接続長は 100 mm (シールドは 120 mm) としている。熱が拡散するように各層の接続部は重ならないようにしている。この設計に基づいて、実際の超電導ケーブルの導体接続を試みた。超電導線材は 5 mm 幅を 14 本使用した超電導導体を使用した。(図 2.2.2-54)。接続した結果、接続抵抗は 3.6 nΩ であり、単線の抵抗 14 本分の合成とほぼ同等である (50 nΩ が 14 本とすれば、合成抵抗は 3.6 nΩ である)。

接続抵抗がこのように低い場合、接続部の温度上昇は、他の部位と比較して、約 0.1 K 未満に抑えられることが解析結果から推定されている。そのため、局所的な発熱による絶縁性能の低下の可能性はきわめて極めて低いと考えられる。

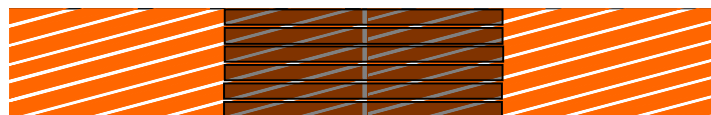


図2.2.2-52 スパイラルに巻き付けられた場合の超電導線材の接続

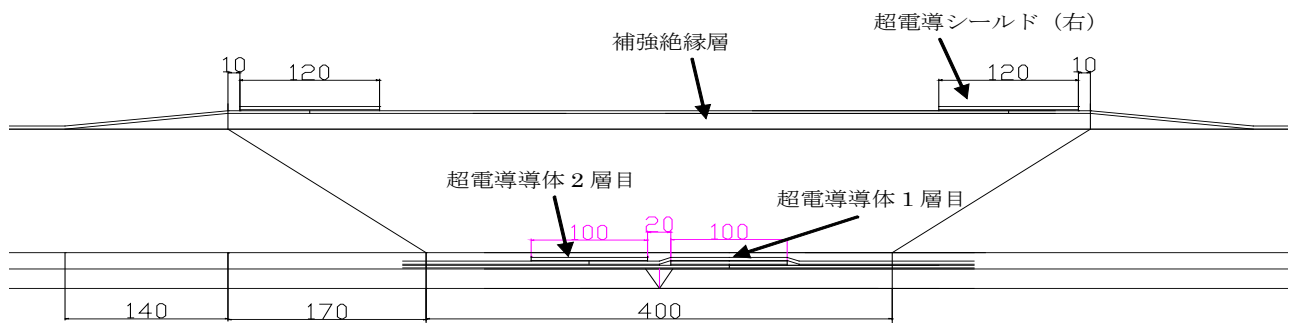


図2.2.2-53 超電導ケーブルの接続図

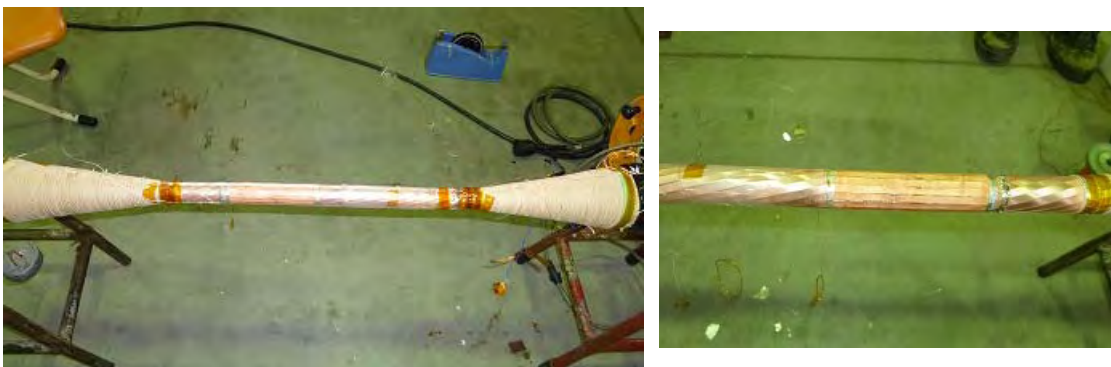


図2.2.2-54 超電導ケーブル接続の組立（接続抵抗は3.6 nΩ）

(3) 研究内容(2) —中間接続部の設計—

図2.2.2-53に考えている中間接続部を示したが、補強絶縁部は現地による施工で行うため、その部位の破壊ストレス評価が必要である。通常、工場で作製したケーブルよりも設計電界は劣ると考えられ、この評価用として、2つの中間接続部を設計した。2つの接続とは、図2.2.2-55の補強絶縁部の貫通破壊用、図2.2.2-56の沿面の破壊用である。これらの図には電界解析結果も示しており、等電位線の間隔が狭いほど電界のストレスは大きい。図2.2.2-55では、スロープの電界よりも補強絶縁の電界ストレスが大きいため、補強絶縁で壊れると考えられる。また、図2.2.2-56では補強絶縁部が厚いため、スロープの電界の方が大きくなり、スロープ部で壊れると考えられる。このように、中間接続部を実際に作製し、破壊特性を取ることで、設計電界および現地工事による裕度を考えて設計を行う。

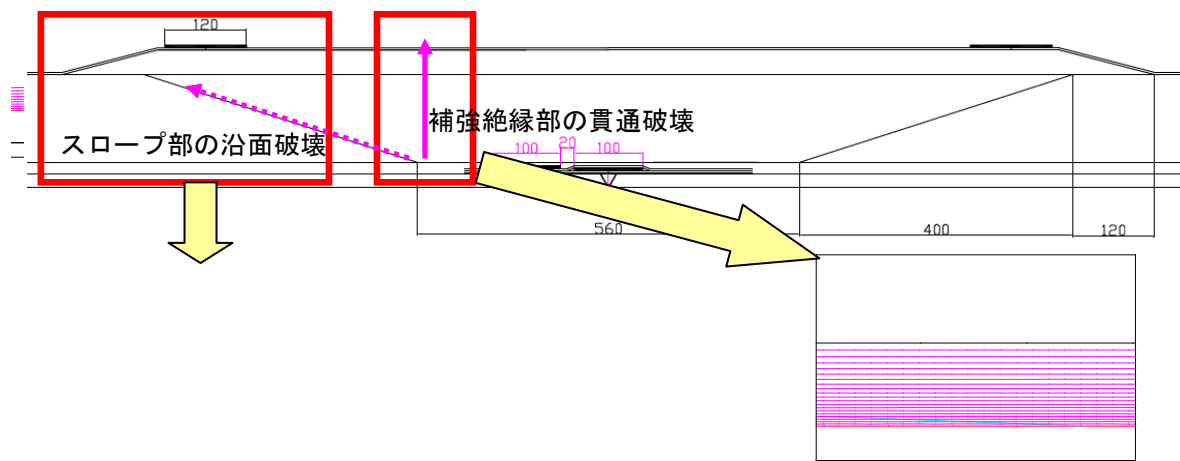


図2.2.2-55 補強絶縁部の破壊用の中間接続部

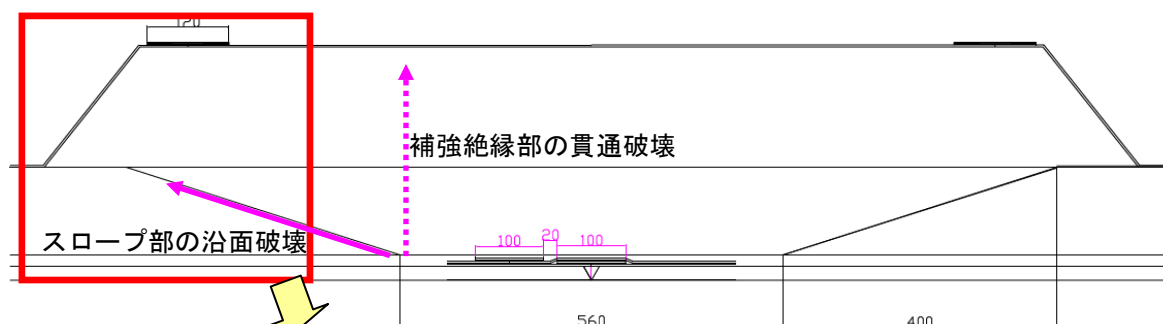


図2.2.2-56 スロープ部の破壊用の中間接続部

(4) 研究内容(3) ー終端接続部用の作製と評価ー

気中終端部の中で、電流を室温部から低温部への温度勾配部で低熱侵入を実現するための電流リード設計を行った。その結果、熱侵入を120 Wに抑える電流リードの設計を完了した。この電流リード設計結果を用いて、電気絶縁を担うブッシングの設計を行った。

この気中終端接続部に要求される電気特性は、構造に近いOFケーブルの試験電圧である。気中終端部の仕様耐電圧はAC400 kVで部分放電フリー、Imp1260 kVで破壊しない構造で終端接続部の設計・作製を行った。ブッシング単体での初期試験では、誘電特性・気中での100 kVの部分放電試験を行い、設計通りの特性を得た(図2.2.2-57)。また、液体窒素と常温のヒートサイクル試験、絶縁ガスSF₆中での180 kVの部分放電試験、気密試験にそれぞれ、合格し、想定通りのブッシングの作製に成功した。現在、このブッシングを図2.2.2-58に示す終端部に組み込んで、

終端接続部を完成し、275 kV超電導ケーブルのシステム検証のために使用している。現在、20 mm絶縁厚ケーブルとともに試験を実施し、ACでは325 kV-10分間までの性能を確認している。

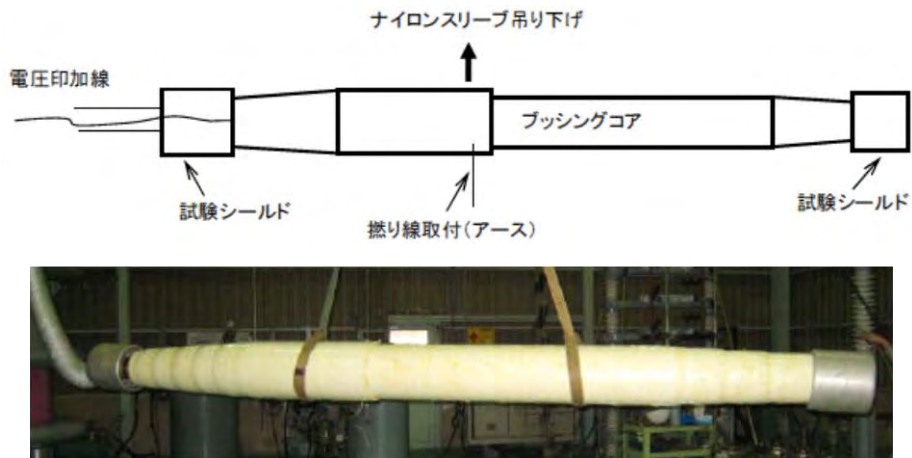


図2.2.2-57 ブッシングの単体試験

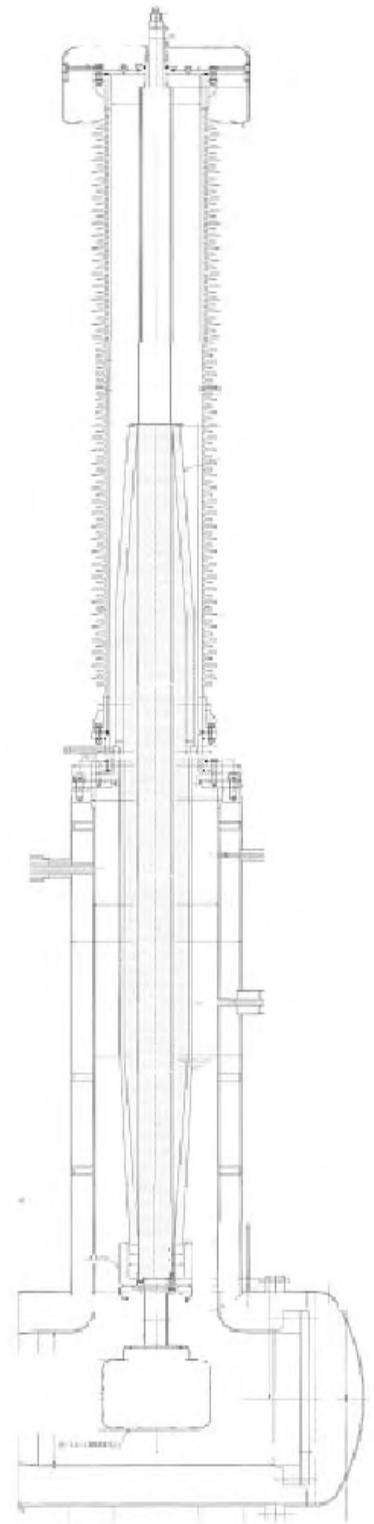


図 2.2.2-58 終端接続部

(5) 成果

高 I_c 超電導線の接続を実施し、低抵抗な超電導接続が可能であることを確認した。また、実際の中間接続部を組み立てて、 $3.6 \text{ n}\Omega$ という低抵抗な接続を確認した。数値計算によると、このときの温度上昇は 0.1 K 未満であり、定常運転に問題ないことが示唆された。

2 通りの中間接続部を設計し、この中間接続部を今後評価することで、さらに課電試験を通して中間接続部の設計を確立する。

室温から低温部への温度勾配、電界分布を担うブッシングを開発した。気中終端部の仕様耐電圧は $AC400 \text{ kV}$ で部分放電フリー、 $Imp1260 \text{ kV}$ で破壊しない構造とした。初期試験は当初の設計通りであり、ブッシングを気中終端に組み込み、 275 kV 超電導ケーブルのシステム検証のために使用している。現在、 20 mm 絶縁厚ケーブルとともに試験を実施し、 AC では 325 kV -10 分間までの性能を確認している。

引用論文リスト

- (1) M. Yagi, S. Mukoyama, N. Amemiya, S. Nagaya, S. Kashima and Y. Shiohara, “Development of a 10 m long 1 kA 66/77 kV YBCO HTS cable with low AC loss and a joint with low electric resistance”, Supercond. Sci. and Tech. Vol.22 (2009) 085003

2.2.2-6 275 kV 高電圧ケーブルシステム検証 (古河電気工業)

(1) 研究開発目標

275 kV 高電圧ケーブルシステムの検証として、両端に終端接続部と中間接続部を有する検証用 275 kV /単心/ $3 \text{ kA}_{\text{rms}}$ 、 30 m 長の設計を行う必要がある。試験の実施にあたってはまず、試験条件の検討を行い、次に耐久性を評価できる課通電試験計画書を作成した。

(2) 研究内容 1 –試験電圧の決定–

AC (交流) における絶縁破壊メカニズムは、①絶縁紙間あるいはバットギャップで部分放電が開始される(部分放電開始電圧)、②バットギャップでの部分放電の連続発生と進展、③バットギャップでの部分放電の進展と増大、絶縁紙の劣化、④絶縁破壊、と考えられている⁽¹⁾。①と④の間には約 2 倍近い電界値の違いがあり、①を基に設計しておけば、長期においても絶縁破壊は起きる危険はない。 Imp (インパルス) における絶縁破壊メカニズムは、①インパルス部分放電の発生、②絶縁体全体への部分放電の進展、③絶縁破壊、である。

275 kV の絶縁試験電圧の考え方としては、現有の $XLPE$ ケーブルおよび OF ケーブルの試験電圧と整合をとる必要がある。国内規格であれば、 $JEC-3401-2006$

(OF ケーブル)、JEC-3408 (XLPE ケーブル)、国際規格であれば IEC60141-1-1993 (OF ケーブル)、IEC62067-2006 (XLPE を含むプラスチック ケーブル) がある。また、過去・現在の国内での超電導ケーブル試験とも整合を取る必要がある。試験としては、全て 66/77 kV の同一の電圧階級であり、東電-住友 100 m ケーブル、Super-ACE500 m ケーブル、現在 NEDO プロで進めている「Bi ケーブル実証プロジェクト」300 m ケーブルがある。

ここでは、Super-ACE の場合と同じように JEC-3408 を基調にして、設計を進めた。試験法は「開発試験」、「形式試験」、「受入試験」の 3 種類に区別される。開発試験は開発品の設計・製造施工方法が実用可能であることを実証するために行うもので、現在は開発試験の段階である。形式試験は設計・製造および施工方法の認定試験、受入試験は出荷製品の製造・品質の確認である。

275 kV 超電導ケーブルは開発段階であることから開発試験を規定する。開発試験には以下の 3 つの試験がある。

- ①長期課通電試験---所定の商用周波電圧に耐える寿命を有すること。試験条件として、V-t 特性の n 乗則を用いて、ケーブルの最高電圧と使用期間に相当する試験電圧と試験期間で確認する。
- ②雷インパルス試験---長期課通電試験を終了した試料から供試して、系統に発生する雷インパルス過電圧に耐えること。
- ③商用周波数耐電圧試験---長期課通電試験を終了した試料から供試して、系統上で発生する異常電圧（過電圧）耐えること。例えば、負荷遮断時の電圧上昇や一線地絡時の健全相電圧上昇などがある。超高压送電線では有効接地系（直接接地系）を採用して異常電圧を抑制している。

①～③の試験条件について、その詳細をみていく。①の長期課通電試験では

$$V_{ac}=(E_0/\sqrt{3})\times K1 \quad (2.2.2-5)$$

ここで、 E_0 : 最高電圧 300 kV、

$K1$: 劣化係数 = (使用年数 30 年 / 試験期間) ^(1/n)、n: 寿命指数

寿命指数を n=15 (XLPE ケーブル)、n=30 (OF ケーブル)、n=49 (超電導ケーブル) でそれぞれ考えると試験電圧は表 2.2.2-12 のようになる。

表 2.2.2-12 長期課通電試験の試験電圧

試験期間	1 ヶ月	3 ヶ月	6 ヶ月
n=15	260 kV	240	230
n=30	220	210	200
n=49	200	200	190

②の雷インパルス試験では、以下とする。

$$V_{imp}=LIWV\times K1\times K2 \quad (2.2.2-6)$$

ここで、LIWV : 機器の耐電圧 (1050 kV)、 $K1$: 裕度 1.1、 $K2$: 温度係数 1、

超電導ケーブルは考慮しない。よって、試験電圧は 1155 kV とする。

③の商用周波耐電圧では以下とする。

$$\begin{aligned} \text{異常電圧} &= \text{ケーブル最高電圧} \times \text{負荷遮断時の電圧上昇倍率 (継続時間 1.43 秒)} \\ &= 300 \text{ kV} \times 1.79 / \sqrt{3} = 310 \text{ kV} \end{aligned} \quad (2.2.2-7)$$

1.43 秒の短時間現象を、10 分の試験として時間係数を掛けてさらに裕度を掛けて試験電圧とする。

$$V_{ac} = \text{異常電圧} \times (1.43 / \text{試験時間(10 分)})^{(1/n)} \times \text{裕度(1.1)} \quad (2.2.2-8)$$

寿命指数 $n=15$ のとき試験電圧値 270 kV、 $n=30$ で 290 kV、 $n=49$ で 300 kV となる。以上より、超電導の寿命係数 49 を使った場合の試験電圧を表 2.2.2-13 にまとめた。

表 2.2.2-13 開発試験の試験条件 (現状案)

試験名称	試験条件	判定
長期課通電試験	200 kV-3 ヶ月	部分放電フリー
雷インパルス試験	1155 kV-正負 3 ショット	絶縁破壊しないこと。
商用周波耐電圧試験	300 kV-10 min	絶縁破壊しないこと。但し、長期課通電前では部分放電フリー
(参考試験 IEC62067) 商用周波耐電圧試験 2	400 kV-30 min	規定しないが絶縁破壊しないことが望ましい

他の規格を表 2.2.2-14, 表 2.2.2-15 に示す。国際規格においては type test が開発試験に相当し、耐電圧試験 400 kV-30 min が最も高い電圧であり、表 2.2.2-13 に参考試験として追加した。なお、JEC-3408 の形式試験に 525 kV-1 h という試験があるが、これは形式試験であり今回の適用外であること、 n 値を 15 と設定していること、温度係数 1.2 が掛け合わされていること等、これらを考慮して今回の試験からは除外した。

表 2.2.2-14 国内規格による 275 kV の試験条件

試験項目	OF ケーブル JEC-3401-2006		XLPE ケーブル JEC-3408-1998	
長期課通電試験 (開発)	200 kV	0.5 年 N 値 30	230 kV	0.5 年 N 値 15
雷インパルス (開発、形式)	1260 kV 1155 kV(高温)	正負 3 回 LIWV1050 kV	1455 kV 1155 kV(高温)	正負 3 回 LIWV1050 kV
商用周波耐電圧 (開発)	330 kV	10 分 N 値 30	275 kV	10 分 N 値 15
商用周波耐電圧 (形式)	350 kV	3 時間 N 値 30	525 kV	1 時間 N 値 15
出荷耐電圧 (受入)	330 kV	10 分 N 値 30	300 kV	10 分 N 値 15
誘電正接特性試験 (開発、形式)	159 kV 318 kV	誘電正接に判定値有り		

表 2.2.2-15 国際規格による 275 kV($U_0=160$ kV)試験条件

T:Type tests, S: sample tests, R: routine tests

試験項目	OF ケーブル IEC60141-1-1993		XLPE ケーブル他 IEC62067-2006-03	
High Voltage test	(T)375 kV, 1.73× U_0 +100 (R)275 kV	24 h 15 min	(R,T)400 kV 2.5× U_0	30 min
Partial discharge			(R,T)240 kV 1.5× U_0	280 kV-10 s 後に 240 kV
Heating cycle test			(T)320 kV 2.0× U_0	8 h(heating)-16 h (cooling)×20
Impulse voltage test	(T)1050 kV		(S,T,P) 1050 kV	10 positive, 10 negative
Voltage test after Impulse			(S,T) 320 kV	15 min

(3) 研究内容 2 –試験計画書の作成–

最終形態の超電導ケーブルは 0.8 W/m-相(3 kA_{rms})の損失である。この損失値は Super-ACE で実施した 500 m 長の交流損失値 1.3 W/m-相(1 kA_{rms})よりも小さい値である。さらに、断熱管の外部浸入熱が Super-ACE での実績値 (1 W/m) と同

等であれば、500 m 長冷却システムの考えがそのまま踏襲でき、数 km の長尺冷却が可能である。

試験の手順は以下のように考えた。

①30 m ケーブルを作製後、数 m の作製余長を使って初期課電・通電試験を行う。課電試験は雷インパルス試験、部分放電試験を行い、設計通りの絶縁性能を有しているか確認する。また、これとは別に通電試験を行い、設計通りの I_c を有しているか確認する。

②30 m 長 275 kV-3 kA_{rms} 超電導ケーブルの長期課通電試験の電圧条件は 3 ヶ月、1 ヶ月の場合、200 kV の連続課電とする。通電条件は、3 kA_{rms} とし、8 時間オン／16 時間オフの 1 日 1 回のヒートサイクルを行う。長期課通電試験条件の試験構成を図 2.2.2-59 に示す。布設は曲げ半径 5 m の U 字形状とし、中間接続部は長期課通電後の試験に供試するため終端部側に配置する。通電回路は XLPE ケーブルを使用するが、3 kA_{rms} を通電するには XLPE ケーブル 1 本では十分ではなく、2 本使用する。冷却回路としては、CE (Cold Evaporator) から供給される窒素を減圧冷却して貯めたりザーバタンクを用意する。30 m の超電導ケーブルを循環する窒素は、このリザーバタンクを通して、冷却される。

③長期課通電試験前後には、誘電特性を測定し、設計通りの低誘電体損失が維持されているか確認する。また、 I_c と交流損失を測定し、設計通りの低損失が達成されているか確認する。

④試験終了後には、中間接続部端部で切断し、中間接続部とケーブルに雷インパルス試験、耐電圧試験を行い、30 年を模擬した長期課通電後もその性能を維持していることを確認する。解体時に接続抵抗を確認する。

以上の 275 kV システム検証試験のスケジュールを表 2.2.2-16 に、試験項目と判定条件を表 2.2.2-17 にまとめた。

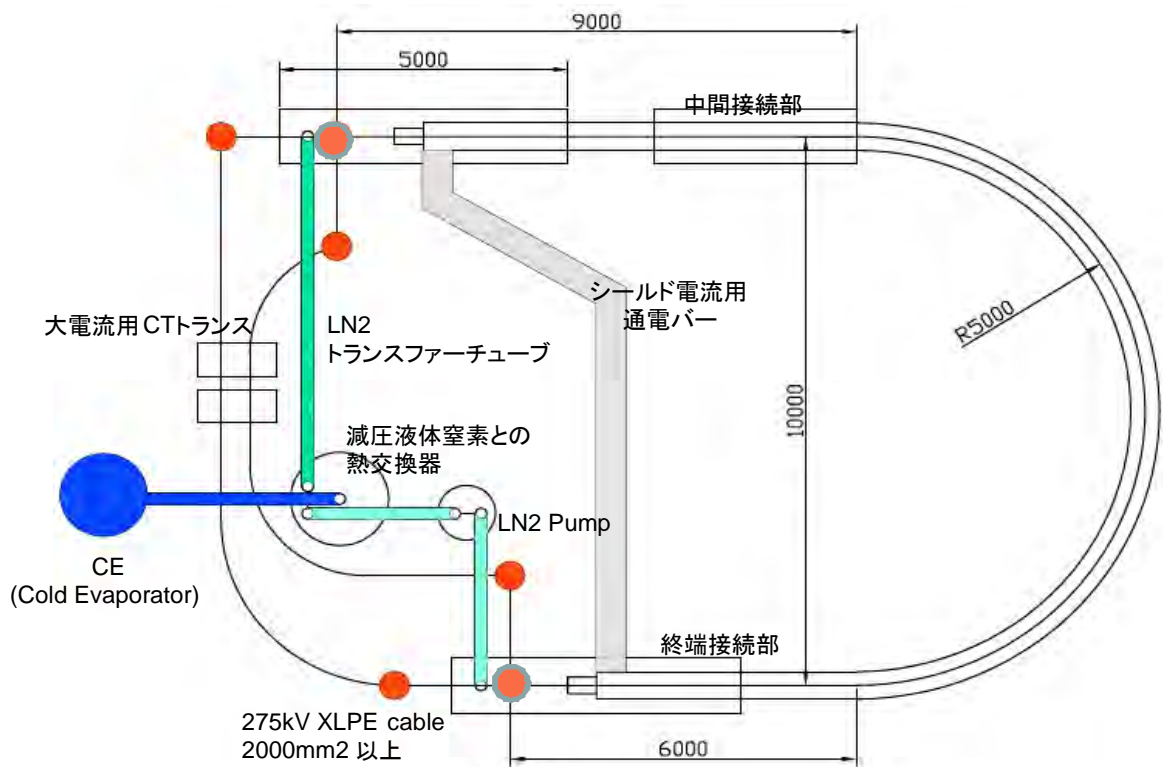


図 2.2.2-59 長期課通電試験の試験回路図

表 2.2.2-16 275 kV システム検証試験の試験スケジュール

	H23				H24			
	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q
①30m 275kV-3kA超電導ケーブル作製			■					
②275kV-3kA終端接続部の作製	■							
③試験設備の設営(課電、通電、冷却)	■							
④超電導ケーブルの初期課電・通電試験 (雷インパルス、商用周波数耐電圧、臨界電流)					■			
⑤中間接続部の組み立て						■		
⑥開発試験(長期課通電、雷インパルス、商用周波数耐電圧、誘電特性試験)							■	
⑦残存性能試験								■

表 2.2.2-17 275 kV システム検証試験の試験項目と判定

試験項目	試験条件	判定	部位
ケーブル I_c (初期)	直流通電による VI	使用した線材の I_c 合計値と同等	余長
部分放電特性 (初期)	課電電圧のステップ昇圧	300 kV 部分放電フリー	余長
商用周波耐電圧試験 (初期)	400 kV-30 min	絶縁破壊しないこと	余長
雷インパルス試験 (初期)	1155 kV-正負 3 ショット	絶縁破壊しないこと	余長
ケーブル I_c	直流通電による VI	使用した線材の I_c 合計値と同等	30 m
通電による交流損失	カロリメトリック法 (一定の液体窒素循環による上流と下流の温度差)	設計通り (目安: 0.3 W/m 未満)	30 m
誘電特性	課電時のシェーリングブリッジ / カロリメトリック法	設計通り (目安: 0.5 W/m)	30 m
部分放電特性	課電電圧のステップ昇圧	300 kV 部分放電フリー	30 m
長期課通電試験	200 kV-1 ヶ月 or 3 ヶ月 3 kA _{rms} -8 時間オン / 16 時間オフ	絶縁破壊しないこと	30 m
ケーブル I_c	直流通電による VI	初期と同等	30 m
通電による交流損失	カロリメトリック法	初期と同等	30 m
誘電特性	課電時のシェーリングブリッジ / カロリメトリック法	設計通り (目安: 0.5 W/m)	30 m
部分放電特性	課電電圧のステップ昇圧	—	30 m
商用周波耐電圧試験	300 kV-10 min	絶縁破壊しないこと	30 m
雷インパルス試験	1155 kV-正負 3 ショット	絶縁破壊しないこと	抜取
商用周波耐電圧試験	300 kV-10 min	絶縁破壊しないこと	抜取
商用周波耐電圧試験 2	400 kV-30 min	絶縁破壊しないこと	抜取
解体	絶縁紙外観、ブッシング etc	破れ、皺、放電痕のないこと	抜取
接続部の接続抵抗	直流通電による VI	設計通り	抜取

(4) 成果

275 kV ケーブルシステム検証用の試験条件を検討・整理し、その案をまとめた。長期課通電試験としては 200 kV-1 ヶ月又は 3 ヶ月、雷インパルス試験としては 1155 kV 正負 3 ショット、耐電圧試験としては 300 kV-10 分間とした。また、両

端に終端接続部と中間接続部を有する検証用 275 kV/単心/3 kA_{rms}、30 m 長のシステム検証試験の試験項目と判定条件をまとめ、耐久性を評価できる課通電試験計画書を作成した。

引用論文リスト

- (1) 早川他 「超電導電力機器における電気絶縁技術研究の現状と展望」 電学論 B, Vol. 126 (2006)

2.2.2-7 成果のまとめ

- ・ 3 kA_{rms} での交流損失評価を実施した。レーザ細線化による交流損失低減に成功し、世界最小となる 0.235 W/m を確認した。
- ・ ケーブルフォーマや銅保護層の断面積の最適化、ならびに線材の銅メッキ層の最適化により過電流通電 (63 kA-0.6 sec) の耐性を確認した。なお、ケーブルの過電流における耐久性を設計するにあたり、線材開発/線材特性の把握における線材単体の過電流に対する知見が寄与している。
- ・ 複数材料の電気特性を評価して、275 kV の絶縁材料として PPLP-C を選定した。さらに、1 mm 厚と 10 mm 厚絶縁ケーブルによる AC 課電試験、1 mm 厚と 10 mm 厚と 20 mm 厚絶縁ケーブルの Imp 試験を実施し、そのデータを取得した。
- ・ ケーブルモデルを試作して、曲げ試験を実施して、曲げ径 > 2500 mmφ で絶縁上、超電導上 (I_c) 劣化等の問題がないことを確認した。
- ・ ケーブル評価用として、275 kV 級気中端末の製作と試験を実施した。現在まで、325 kV の AC 課電まで問題ないことを確認した。
- ・ 中間接続部については、電界計算を実施して構造設計を行なった。さらに、超電導-超電導接続部を作製し、3.6 nΩ の低抵抗を確認した。
- ・ 275 kV 級超電導ケーブルの設計検討として、これまで得られた電気絶縁データを基にした設計電界、交流損失や短絡対策による導体サイズなどを考慮した。さらに、275 kV 級超電導ケーブルの試験電圧に関する検討を行った結果、現時点での絶縁厚は 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。なお、設計に際し、線材開発/線材特性の把握による知見が一部寄与している。
- ・ 後半の 30 m 超電導ケーブル試験に対する試験計画の提案を行った。

2.2.2-8 今後の計画と目標達成の見通し

- ・交流損失、誘電体損失を合わせたケーブル損失で、 $0.8 \text{ W/m}\cdot\text{相}@3 \text{ kA}_{\text{rms}}$ 以下の達成を目指す。具体的には、線材の端部 J_e 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て目標達成を目指していく。
- ・ケーブル外径 150 mm 以下の達成に関しては、ケーブル損失と絶縁厚、フォーマ径などを合理的に設計してコンパクト化を達成する。さらに、断熱管のスリム化検討も並行して目標達成を目指す。
- ・平成 23 年度より 275 kV 級、 $3 \text{ kA}_{\text{rms}}$ の 30 m 超電導ケーブルシステムの設計、製造を行い、平成 24 年度に長期試験を含め他フィールド試験を実施する。このフィールド試験においては、超電導ケーブルの初期性能特性の評価、長期課通電試験の実施を行う。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予定でいる。また、フィールド試験においては、事前に故障解析等を用いた安全性評価を実施する。さらに、ケーブルの各種センサを配置して、運転時のモニタリングによる危険回避をすることで、実際の超電導ケーブルに反映できる運転に関する技術等の習得も可能と考えている。

表 2.2.2-18 中間目標とその達成見込み

	中間目標	達成状況	達成見込み
高電圧絶縁・低誘電損失ケーブル化技術の開発	ケーブル損失（交流損失（導体層）、誘電体損失） $0.8 \text{ W/m}\cdot\text{相}@3 \text{ kA}_{\text{rms}}$ 以下	超電導導体の $3 \text{ kA}_{\text{rms}}$ における交流損失は 0.235 W/m 達成。	達成
		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。	
		交流損失と誘電体損失を合わせて 0.70 W/m となり、目標の 0.8 W/m 以下を達成した。	
	短絡試験（ $63 \text{ kA}_{\text{rms}}\cdot 0.6 \text{ sec}$ 相当）でケーブル性能に劣化がないことを確認する	線材開発/線材特性の把握により線材の耐久性を確認し、この線材を集合化してケーブルを作製した。 $63 \text{ kA}_{\text{rms}}\cdot 0.6 \text{ s}$ の短絡試験で耐性を確認し、温度、分流は設計通りであった。	達成
	$275 \text{ kV}(3 \text{ kA}_{\text{rms}})$ 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無いことを確認する	$3 \text{ kA}_{\text{rms}}$ 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。 超電導-超電導接続部は $3.6 \text{ n}\Omega$ の低抵抗を達成した。	<ul style="list-style-type: none"> ・超電導-超電導接続部の連続通電を行い、定常状態の安定性を確認する。 ・電流リードの作製と安定運転を確認して、達成見込み。

	中間目標	達成状況	達成見込み
275 kV 高電圧 ケーブルシステム 検証	両端に終端接続部と 中間接続部を有する 検証用 275 kV/単 心/3 kA _{rms} , 30 m 長の超電導電力ケー ブルシステムのシス テム設計を完了する	絶縁厚 10 mm までの AC 課電試 験を実施し、誘電特性、部分放電 特性を取得した。 絶縁厚 10 mm までの Imp 課電試 験を実施し、破壊特性を取得し た。 275 kV 用終端部の設計と作製を 行い、現在まで、325 kV・10 min の耐電圧まで確認した。 中間接続部の設計を行った。 275 kV の課電試験電圧（案）を 選定した。なお、設計に際して、 線材開発/線材特性の把握による 知見が一部寄与している。	・絶縁厚 20 mm の試験、絶 縁厚 1 mm の長期 V-t 試験を 経て、ケーブル絶縁を設計 し、設計絶縁厚で設計の妥当 性を確認する。 ・275 kV 終端部の最終仕様 性能までの確認をする。 ・中間接続部の部分放電・破 壊特性から最適設計を行い、 設計の妥当性まで確認する。 以上を行い、達成見込み。
	耐久性を評価できる 課通電試験計画書 を作成する	他規格などを調査し、275 kV・3 kA _{rms} の試験条件の選定。長期課 通電試験の計画書を作成した。	達成

2.2.3 超電導電力ケーブル対応線材安定製造技術開発

2.2.3-1 大電流用線材の安定製造技術の開発（住友電気工業）

(1) 研究開発目標

大電流超電導ケーブルシステムへの適用を目指して、結晶粒配向金属基板(配向金属基板)を用いた超電導線材を安定に作製可能な技術を確立する。作製する超電導線材は、結晶粒配向金属基板、RF スパッタリング法により基板上に作製した中間層(CeO₂、YSZ、CeO₂の三層)、レーザ蒸着法(PLD 法)により中間層上に作製した超電導層(GdBa₂Cu₃O_x)、そして銀安定化層と銅保護層から構成される。銀安定化層成膜後、ケーブルの仕様に合わせて、2 mm 幅もしくは 4 mm 幅に機械スリッタにより細線加工を施す。

表 2.2.3-1 に大電流超電導モデルケーブルの目標性能を示す。この目標値を満たす超電導ケーブルを開発するためには、素材として十分な I_c を持ち、かつ大量の超電導線材が要素開発及び製造に必要である。また、特に達成レベルが高度な損失目標を達成するためには線材自体が強い磁性を持たないことが重要であり、従来の Ni 合金系磁性基板は適用できない。そこで、まず低磁結晶粒性配向金属基板上と Ni 合金系磁性基板で得た、高 I_c 、長尺線材作製技術を統合することにより低磁性結晶粒配向金属基板上、高 I_c 超電導線材作製技術開発を行い、その後に基板の幅広化 (1 cm 幅→3 cm 幅) と長尺線材作製プロセスの最適化によるスループットの向上を行うことにより高い I_c を持つ Y 系超電導線材を大量に製造する技術開発を行い、大電流超電導モデルケーブル用線材を安定的に製造することのできるプロセスの確立を行った。また、PLD 装置を更新することにより超電導層の歩留りを向上させ、さらなる製造能力の向上を図った。開発内容を以下に示す。

- ・低磁性結晶粒配向金属基板を用いた高 I_c 線材の開発
- ・中間層の幅広化、安定製造技術開発
- ・超電導層の幅広化、安定製造技術開発
- ・PLD 装置更新による超電導層成膜プロセスの歩留り向上

目標とするケーブル開発用線材の提供量は、1 cm 幅で平成 20 年度は総長 1 km レベル、平成 21 年度は総長 3 km レベル、平成 22 年度は総長 4 km レベルである。

(2) 低磁性配向金属基板を用いた高 I_c 線材の要素技術開発

開発に際して、Ni 合金系磁性基板と低磁性結晶粒配向金属基板の I_c 差は大きく、後者の I_c を大幅に向上させる必要があった。図 2.2.3-1 に基板による I_c の超電導層厚依存性を示す。Ni 合金系磁性基板上超電導線材(◆プロット)と低磁性結晶粒配向金属基板上超電導線材 (●プロット) の I_c 差は大きく、低磁性配向金属基板を用いた超電導線材の I_c 値は Ni 合金系磁性基板の約半分の値であった。

表 2.2.3-1 大電流超電導ケーブルの仕様と達成目標

容量	5 kA-66 kV、3 相
損失	2.1 W /m-相@5 kA 以下
サイズ	15 m 長、150 mmφ管路に収納可能

ケーブル用線材の超電導層の設定膜厚を $2\ \mu\text{m}$ とした場合、低磁性配向金属基板を用いた超電導線材の I_c 値は $150\ \text{A/cm-w}(@77\ \text{K,s.f.})$ が見込まれ、 J_c に換算すると $9\ \text{kA/cm}^2$ となり、平成 20 年度の目標値である、 $J_c = 11\ \text{kA/cm}^2$ に満たない値となる (本項での J_c は $20\ \mu\text{m}$ の銅保護層まで成膜した際の総線材厚み $170\ \mu\text{m}$ で計算した値とする)。そこで、この I_c 差の原因を究明し、低磁性配向金属基板上での I_c 向上を試みた。

中間層以降の製法は、Ni 合金系磁性基板、低磁性結晶粒配向金属基板とも同一であるので基板の比較を行った結果、Ni 合金系磁性基板表面に比べ、低磁性結晶粒配向金属基板表面は多くの欠陥が確認された。また、この欠陥は中間層及び超電導層成膜後にも確認されたことより、この欠陥が超電導電流の流れを阻害し、結果として低磁性結晶粒配向金属基板上超電導層の I_c 値が低下していることが予想された。そこで、基板表面の平滑化を図った結果、表面の欠陥はほぼ解消した。改善後の基板を用いて I_c 値の膜厚依存性を調査した結果、図 2.2.3-1 中の改善後に示すように、低磁性配向金属基板においても Ni 合金系磁性基板と同等の I_c 値が得られた。また、短尺線材において GdBCO 超電導膜厚が $2\ \mu\text{m}$ 時の I_c 値は最大で $380\ \text{A/cm-w}(@77\ \text{K,s.f.})(J_c = 22\ \text{kA/cm}^2)$ を示し、ケーブル用線材として十分な I_c 値が得られることが確認された。

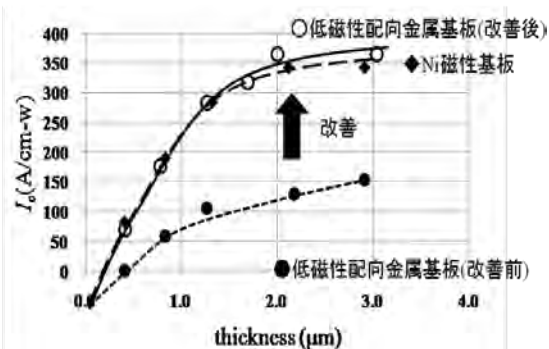


図 2.2.3-1 基板による I_c の超電導膜厚依存性

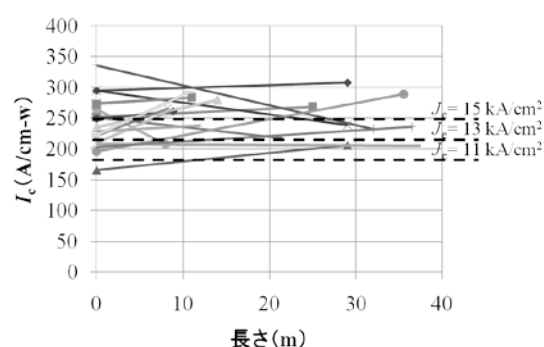


図 2.2.3-2 作製した線材の長さ及び I_c

次に、開発した技術を基に低磁性結晶粒配向金属基板を用いた長尺 Y 系超電導線材の作製を行った。作製した線材の長さ及び I_c を図 2.2.3-2 に示す。作製された線材は長手方向に I_c 値の差が生じているが高い J_c 値を有することが確認された。また、平成 22 年度の目標である、 $J_c = 15\ \text{kA/cm}^2$ ・20 m をこえる超える線材の作製に成功したことも確認でき、1 cm 幅の低磁性配向金属基板を用いたケーブル

用超電導線材の作製要素技術開発に成功した。この結果を基に、平成 20 年度の製造目標である 1 km/cm-w を製造し、ケーブル用線材として供給した。

(3) 中間層の幅広化 (3 cm 幅プロセス)

3 cm 幅の低磁性結晶粒配向金属基板を用いることにより線材スループットの向上を試みた。幅広化にあたり、まず中間層作製工程の 3 cm 幅化を行った。中間層は CeO₂、YSZ、CeO₂ の 3 層からなっており、RF スパッタリング法により作製している。作製した 3 cm 幅中間層の最表層 CeO₂ 層の面内方向の結晶粒配向性($\Delta\phi$)、表面粗さ(Ra)、CeO₂(200) 結晶粒配向度の幅方向分布を図 2.2.3-3 に示す。 $\Delta\phi$ 、Ra、CeO₂(200)配向度ともに幅方向に分布はなく、均一な特性であった。次に 3 cm 幅中間層を 1 cm 幅に分割し、同条件で超電導層を成膜することにより、中間層による幅方向の I_c 特性を調査した。その結果、1 cm 幅—3 本の I_c の差は 10% 以内であり、 I_c 特性においても大きな幅方向の特性差が確認されず、3 cm 幅において均一な特性を持つ中間層が作製されたことを確認した。

次にケーブル用線材の安定製造技術を確立するため、3 cm 幅中間層の長尺線材作製技術開発に着手した。30 m 長の第一 CeO₂ 中間層を作製し、その長手方向の特性を評価したところ、CeO₂(200) 結晶粒配向性の長手方向の分布に図 2.2.3-4 のような長さとともに低下する結果が得られた。十分な特性を持つ超電導線材を作製するためには第一 CeO₂ 層の CeO₂(200) 結晶粒配向性は 90 % 以上が必要である。そこで第一 CeO₂ 層の CeO₂(200) 結晶粒配向性の安定化を成膜時毎、成膜時間による雰囲気、成膜温度条件の変化と CeO₂(200)配向性の相関を調査した結果、成膜温度と強い相関があることがわかり、温度の安定化を図った。その結果、図 2.2.3-5 に示すように長手に渡り、均一な CeO₂(200) 結晶粒配向性を持つ 100 m 級の 3 cm 幅長尺の中間層が得られた。また、抜き出し検査により、 $\Delta\phi$ 、Ra、CeO₂(200) 結晶粒配向度の幅方向特性が均一であることも確認でき、3 cm 幅、100 m 級中間層の安定製造技術確立を確認した。

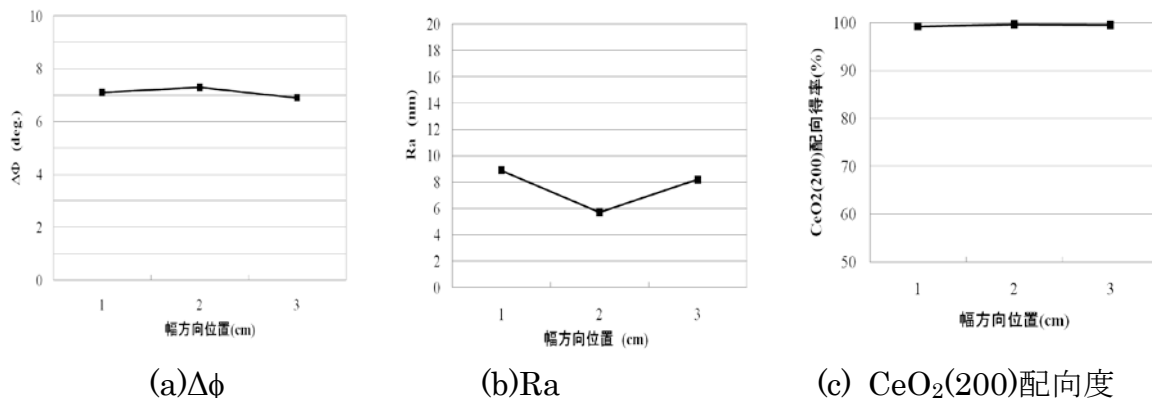


図 2.2.3-3 3 cm 幅中間層の幅方向特性分布

(4) 超電導層の幅広化 (3 cm 幅プロセス)

3 cm 幅中間層の作製技術確立後、超電導層作製工程の 3 cm 幅化を実施した。3 cm 幅中間層上に $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ を作製し、その幅方向 I_c を評価したところ、図 2.2.3-6 に示すように基板の中央 2 cm で従来の I_c 値 ($I_{c0} = 200 \sim 250 \text{ A/cm-w} @ 77 \text{ K, s.f.}$) が得られた。これにより超電導層作製工程のスループットが実質 2 倍となった。次にさらなるスループット向上を行うために、幅方向端部の低 I_c 原因の調査・解決を試みた。調査の結果、幅方向端部は成膜時の温度が低いため、 I_c 値が低下していることが判明した。そこで、PLD の成膜ヒータを 3 cm 幅全域に亘り、均熱が得られるヒータに更新した。新ヒータで成膜した結果を図 2.2.3-7 に示すが、狙い通り幅方向端部の I_c が改善していることが確認できた。本技術開発結果を基に、平成 21 年度目標である、3 km/cm-w の超電導線材を 3 cm 幅プロセスにて製造した。本工程において作製した 2 mm 幅線材の典型例を図 2.2.3-8 に示す。また、作製した超電導線材の I_c 度数分布を図 2.2.3-9 に示す。 $I_c = 200 \text{ A/cm-w} @ 77 \text{ K, s.f.}$ 以上の Y 系超電導線材の歩留りは図 2.2.3-8 より 68 % と算出された。大電流ケーブル開発用に適用可能な長さを有する Y 系超電導線材を安定に製造できるプロセスを確立した。

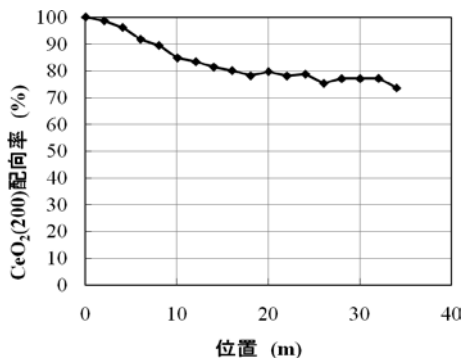


図 2.2.3-4 第一 CeO_2 層の $\text{CeO}_2(200)$ 結晶粒配向性 (改善前)

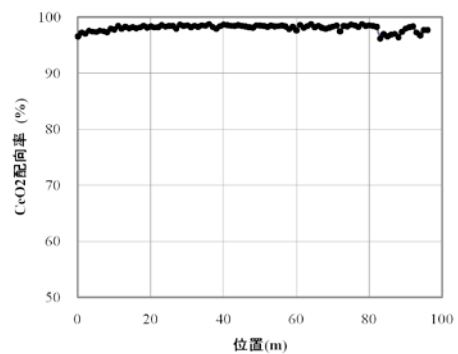


図 2.2.3-5 第一 CeO_2 層の $\text{CeO}_2(200)$ 結晶粒配向性 (改善後)

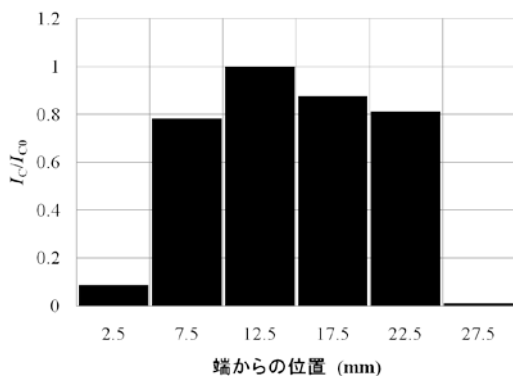


図 2.2.3-6 3 cm 幅超電導層の I_c 分布 (改善前)

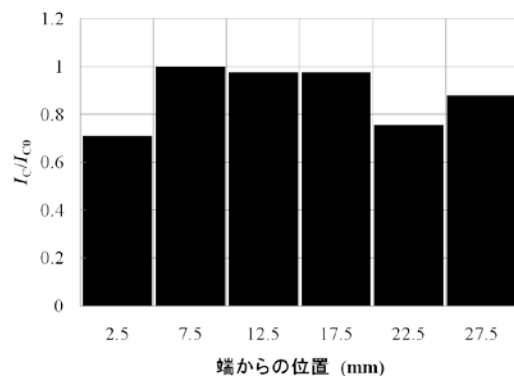


図 2.2.3-7 3 cm 幅超電導層の I_c 分布 (改善後)

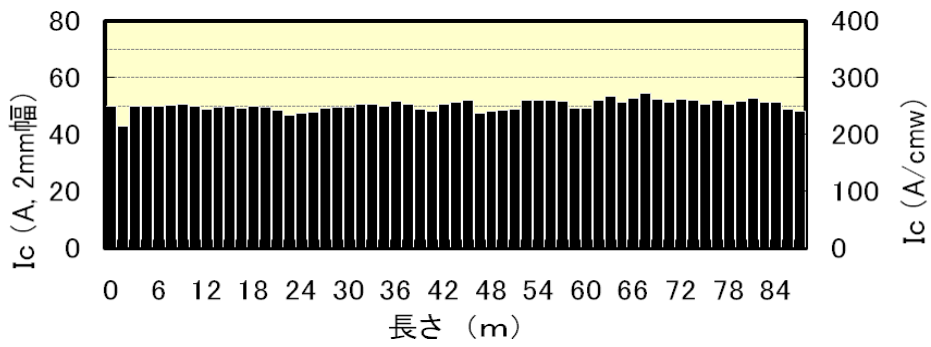


図 2.2.3-8 3 cm 幅プロセスにて作製した 2 mm 幅線材の典型例

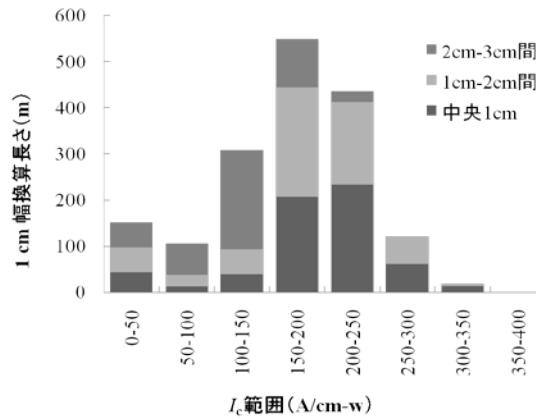
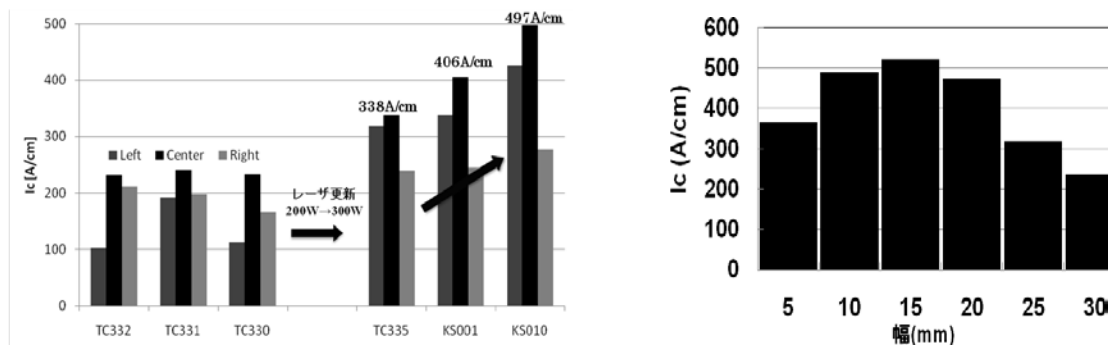


図 2.2.3-9 作製した線材の I_c 度数分布

(5) PLD 用新レーザ導入による安定製造技術開発

ケーブル開発用線材の供給を確実にし、ケーブル開発の促進を図るには線材の製造能力を向上させることが重要となる。このために、超電導層形成プロセスにおいて、従来の 1.5 倍(200 W → 300 W)の高出力を有する PLD 用エキシマレーザを新規導入した。図 2.2.3-11 に、新レーザを使用して成膜した 30 mm 幅線材の幅方向 I_c 分布を示す。新レーザによるレーザ出力向上とプルームサイズの増大により、超電導層の単位膜厚当たりの成膜速度が旧レーザに比べ 1.75 倍に向上し、より短い成膜時間で線材全体の I_c が向上する結果が得られた。

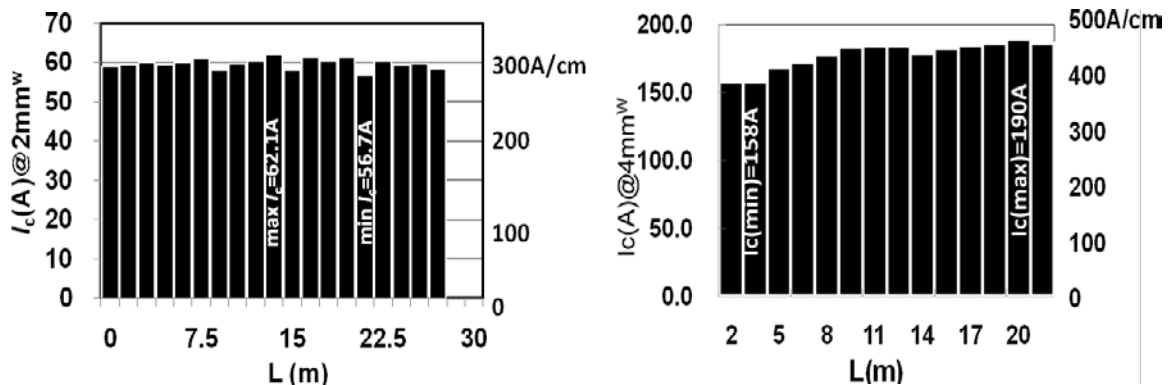


(a) 30 mm 幅線材の I_c 向上の推移

(b) 30 mm 幅線材の高 I_c 分布

図 2.2.3-10 レーザ更新による I_c の向上

図 2.2.3-10(a)中の各線材の膜厚は、新レーザ導入前 (TC330、TC331、TC332) が $2 \mu\text{m}$ 、新レーザ導入後 (TC335、KS001、KS010)) が $2.8 \mu\text{m}$ である。また、成膜速度が向上したことにより、基板が受ける熱履歴が低下し、歩留り低下の原因であった膜剥がれも抑制され、線材の歩留りが向上した。さらに、新レーザによるレーザーエネルギーの安定性向上と、ヒータ周辺の温度分布の改善により、幅方向の I_c 分布も改善され、図 2.2.3-10(b)に示すように線材中央部で $500 \text{ A/cm} (@77 \text{ K, s.f.})$ 以上の I_c を得た。従って、膜厚増加による I_c 向上と線材幅方向の I_c 分布改善により、ケーブル開発用線材として提供できる線材量の増加が見込める結果が得られ、図 2.2.3-11 に示すように細線加工後の 2 mm 幅線材と 4 mm 幅線材の I_c 特性も大幅に向上した。、さらに、超電導線材の月当たりの製造量は 3 cm 幅化により最大 1 km/cm-w に向上し、平成 22 年度の 4 km/cm-w が製造可能となったことが確認できた。以上より、 I_c 特性と歩留りの向上、および成膜速度の高速化を実現し、 4 km レベルのケーブル開発用線材の製造見通しを得た。



(a) 2 mm 幅線材 ($J_e = 16.7 \text{ kA/cm}^2$ -28 m) (b) 4 mm 幅線材 ($J_e = 23 \text{ kA/cm}^2$ -21 m)
 図 2.2.3-11 高 I_c を有す細径線材 (レーザ更新後)

(6) 成果

大電流・低交流損失ケーブルに適用するための低磁性クラッドタイプの結晶粒配向金属基板-PLD 線材作製技術開発を実施し、ケーブル化に必要な性能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た。本技術を基にして、中間目標である $J_e = 15 \text{ kA/cm}^2$ (2 mm 幅 $\times 20 \text{ m}$ 以上)の製造技術レベル達成を確認するために、 $J_e = 17 \text{ kA/cm}^2$ (2 mm 幅線材 $\times 28 \text{ m}$ 、 J_e は 20 \mu 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。なお、線材提供実績は、平成 20 年度 : 1.1 km 、平成 21 年度 : 3.2 km であり、平成 22 年度計画は 4.0 km である。

(7) 今後の計画と目標達成の見通し

今後 (平成 22 年度) は、これまでに開発した製造技術と向上された線材製造能力を基に、 1 cm 幅で総長 4 km レベルのクラッド結晶粒配向金属基板-PLD 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、 $J_e=15 \text{ kA/cm}^2$ (@77 K,s.f.) (2 mm 幅×20 m 以上)に相当する線材の安定製造技術を確立する。

2.2.3-2 基板・中間層テープの開発（フジクラ）

(1) 研究開発目標

交流電力機器に Y 系超電導線材を適用する際問題となるのは、アスペクト比の非常に大きなテープ状線材に対して垂直方向にかかる磁界成分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。IBAD 法中間層線材は、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、2 mm 幅の幅狭線材においても 20 m 長において $J_e = 15 \text{ kA/cm}^2$ (77 K,s.f.)の通電特性を実現し得る基板・中間層テープの安定で高速な製造技術を検討する。プロトタイプケーブル用線材の基板として結晶粒配向度 16 度以下の特性を有する IBAD 中間層テープを平成 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。

(2) 中間層テープの提供

「超電導応用基盤技術開発（第 II 期）」プロジェクトで（株）フジクラ及び（財）ISTEC が開発を進めてきた大型 IBAD 装置には、世界最大のアシストイオンソースが設置されており、結晶粒配向度が 16 度以下の IBAD-Gd₂Zr₂O₇(以下 IBAD-GZO)中間層テープを連続的に 100 m 以上のオーダで製造することが可能である。平成 20 年度～22 年度にプロジェクトより課せられた IBAD-GZO 中間層テープの供給計画は表 2.2.3-2 のとおりである。

表 2.2.3-2 中間層付きテープ供給計画

年度	計画	
	条長(m/月)	総長(m/年度)
20 年度	1125	7875
21 年度	750	7500
22 年度	900	10800

平成 20 年度～21 年度にフジクラがプロジェクト内の他機関に対して提供した

IBAD-GZO 中間層テープの供給実績を表 2.2.3-3 に示す。

表 2.2.3-3 平成 20 年度～21 年度 中間層テープ提供実績

年度	実績		
	条長 (m/月)	総長 (m/年度)	期間
20 年度	1126.6	7886	9 月～3 月
21 年度	832.0	8319.8	6 月～3 月
22 年度	900 (予定)	10800 (予定)	4 月～3 月

平成 20 年度は 3 月末時点で、7886 m を提供し、平成 21 年度は 8319.8 m を提供した。月毎の提供量は必ずしも一定ではないが、各年度の計画に対して年度内に全量を提供済みである。平成 21 年度末までに提供した総長で約 16.2 km であり、平成 22 年度末までの提供量は 27.0 km である。

(3) 中間層高速堆積方法検討

IBAD-GZO 中間層は、結晶粒配向度を 16 度以下にするために、1 μm 厚程度まで膜を成長させる必要がある。そのため、IBAD-GZO 層の製造速度は 5～7 m/h が上限であった。中間層の提供を円滑に行うためには製造速度のさらなる高速化が不可欠となる。

図 2.2.3-12 に示した連続巻き取り式イオンビームアシスト蒸着装置は、中央部分が薄膜を堆積させる真空チャンバであり、チャンバ内部には 110×15 cm² の世界最大のアシストイオンソースが設置されている。装置両脇には、送り出し・巻き取りリールを配置されており、連続的にテープ基材が真空チャンバに供給され、数 100 m の長さを有する基材上に IBAD 層が形成することが可能となっている。



図 2.2.3-12 連続巻き取り式イオンビームアシスト蒸着装置

本装置を用いて IBAD 法により極めて薄い膜厚で結晶粒高配向度の中間層を形成可能な MgO 層（以下 IBAD-MgO）の導入を検討した。IBAD-MgO は、金属基板上に金属元素の拡散を防止するため 100 nm 厚の Al₂O₃ 膜と、その上にベッド層として形成した 20 nm の Y₂O₃ 膜上に形成される。図 2.2.3-13 はベッド層形成後

に図 2.2.3-12 の装置で毎時 1,000 m で成膜した IBAD-MgO 層断面の透過電子顕微鏡(TEM)写真である。ベッド層の上に厚さ 5~10 nm 程度の IBAD-MgO 層が形成され、さらにその上に結晶粒が配向した CeO₂ 結晶粒が連続的に成長している様子が観察された。

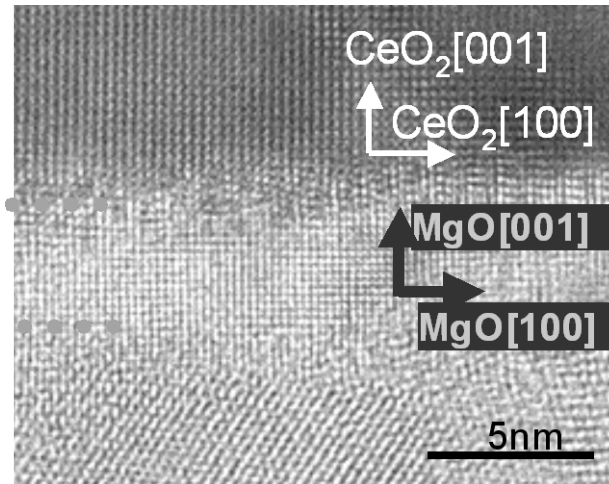


図 2.2.3-13 IBAD-MgO 層の透過電子顕微鏡観察結果

そこで、IBAD-MgO 層上に IBAD-GZO 層と同程度厚さの CeO 層を形成後に、厚さ 1 μm の超電導層を形成した。得られた線材の I_c の長さ方向の分布を図 2.2.3-14 に示す。

77 K、s.f.において直接通電により線材を 700 mm 間隔で I - V 特性を測定し、1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ に到達した電流値を I_c 値とした。170 m 超の長さを有する線材において、全長にわたって 300 A/cm-w 以上の I_c 値を実現している。 I_c 値の平均値は 340 A/cm-w であり、標準偏差は 6.1 A であった。また、IBAD-MgO 中間層を使用した線材は $J_c = 2.2 \text{ MA}/\text{cm}^2$ の性能を有し、 J_c 値に換算すると 18.5 kA/cm² の通電特性を実現し得ることが確認された。(J_c 値は 25 μm の Cu メッキ層、1.5 μm の超電導層を含む線材厚さ 183.5 μm で算出)

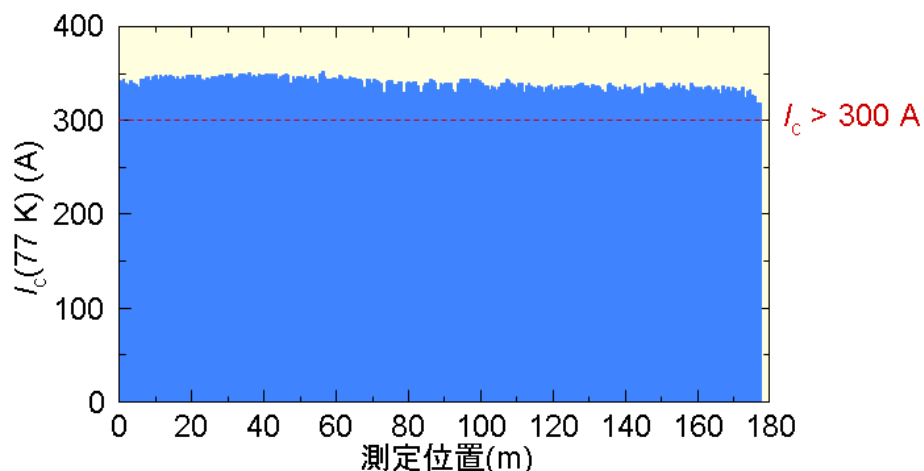


図 2.2.3-14 IBAD-MgO 層、PLD-CeO₂ 層上に形成された超電導層の I_c の長さ方向分布

図 2.2.3-15 に IBAD-GZO 層上に CeO_2 層を形成後、厚さ $1\ \mu\text{m}$ の超電導層を形成した線材の I_c の長さ方向分布を示す。

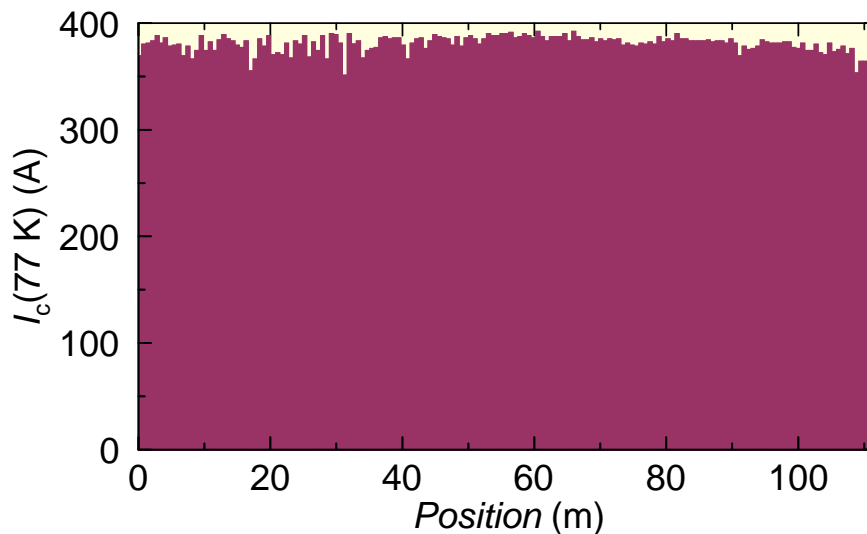


図 2.2.3-15 IBAD-GZO 層、PLD- CeO_2 層上に形成された超電導層の I_c の長さ方向分布

100 m 超の長さを有する線材において、 I_c 値の平均値は $380\ \text{A/cm-w}(@77\ \text{K}, \text{s.f.})$ であり、標準偏差は $7.3\ \text{A}$ であった。このことから IBAD-GZO 層と比較して 100 倍以上の高速で成膜された IBAD-MgO 層は、IBAD-GZO に代わって長尺の Y 系超電導線材製造に十分使用可能であることが確認された。

(4) まとめ

平成 20 年 9 月より本プロジェクト内での中間層の提供を開始しており、平成 20 年 9 月から平成 23 年 3 月までに提供する $5\ \text{mm}$ 幅の IBAD-GZO 中間層テープは総長で約 $27.0\ \text{km}$ となる見込みである。月毎に計画された提供量をほぼ計画通り提供している。平成 22 年度は毎月 $900\ \text{m}$ をプロジェクト内での供給する予定である。

100 m 長の IBAD-GZO 中間層を使用した線材において $380\ \text{A/cm-w}(@77\ \text{K}, \text{s.f.})$ の I_c 値を、170 m 長の IBAD-MgO 中間層を使用した線材は $300\ \text{A/cm-w}(@77\ \text{K}, \text{s.f.})$ 以上の I_c 値を実現しており、 $J_e = 15\ \text{kA/cm}^2$ 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。

2.2.3-3 MOD プロセスによる高電圧ケーブル用超電導線材の開発（昭和電線ケーブルシステム）

(1) 研究開発目標

超電導電力ケーブルで使用される超電導線材は、交流損失低減の見地から将来的

には幅 2 mm の細線化が求められている。このため、線材の幅方向に存在する欠陥や膜厚の不均一性の存在は臨界電流特性の低下を招き、好ましくない。従って、線材長手方向の均一性ととも幅方向の均一性を向上させることが重要となる。

本プロジェクトでは、以下の検討を行うことにより TFA-MOD 法による長尺安定製造技術の確立を図る。

- (i) 仮焼膜の膜厚分布の調査
- (ii) 長手方向の特性分布向上の検討
- (iii) 長尺 Y 系超電導線材の安定製造の検討

(2) 仮焼膜の膜厚分布の調査

三弗化酢酸塩を原料とする有機酸塩熱分解法(TFA-MOD 法)で作製した幅 5.0 mm の線材において、幅方向の膜厚分布を測定した。(株)フジクラより供給された IBAD-Gd₂Zr₂O₇(GZO)中間層付ハステロイ™ 金属基板の上に、高周波スパッタリング法により CeO₂ 中間層を形成した。この CeO₂ 中間層の表面に TFA-MOD 法で超電導層となる仮焼膜を作製した。基板表面に原料溶液を塗布する手法は一般にディップコーティングと呼ばれるものであり、溶液溜りに基板を漬け、基板を引き上げる速度と溶液の粘度のバランスで膜厚をコントロールするものである。本検討に使用した試料は、実際に供給用の線材を作製する Reel-to-reel(RTR)式仮焼炉で作製したものであり、12 回の塗布で 1.5 μm の膜厚を塗布するように溶液粘度を調整したものである。図 2.2.3-16 に仮焼炉の全景を示す。膜厚分布を計測した試料は、塗布速度を 5 m/h と 10 m/h で塗布したものとバッチ式本焼炉に塗布用の治具を取り付けて作製した 1 点を用意した。



図 2.2.3-16 Reel-to-Reel 式連続塗布塗布仮焼炉の全景

仮焼膜を本焼した後、5.0 mm 幅の線材を幅方向に 3 分割し、その試料片の超電導層を硝酸に溶かしてプラズマ発光質量分析(ICP)により元素の質量分析を行った。

求めた各元素の重量と、理論密度、試料の面積から膜厚を換算した結果を図 2.2.3-17 に示す。線材の引き上げ速度が 5 m/h において、幅方向に均一に超電層が形成されており、基板の引き上げ速度がさらに速い 10 m/h やバッチ炉を使用した塗布では端部と中央部の膜厚のバラツキが大きくなることを示しており、5 m/h の塗布速度で仮焼した膜の幅方向の膜厚は $\pm 4.8\%$ 以内に入り、塗布膜の膜厚均一性を $\pm 10\%$ 以内に収める目標を達成した。

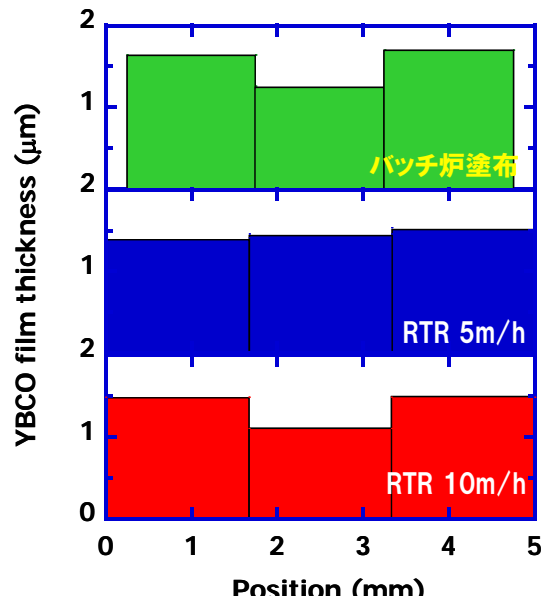


図 2.2.3-17 異なる塗布速度で作製した Y 系超電導膜の幅方向の膜厚分布

(3) 長手方向の特性分布向上の検討

TFA-MOD 法による長尺線材に使用する CeO_2 中間層の作製方法として、昭和電線ケーブルシステムは高周波スパッタリングプロセスを選択した。装置の導入コストが低コストで済み、自動インピーダンス整合器を併用することで長時間の無人運転が可能なこと、非常に平滑な表面を形成できることなどが主な理由である。高周波スパッタリングによる CeO_2 中間層成膜に関する研究は日が浅く、Y 系超電導線材の長手方向の特性分布を向上させる研究開発において重要なテーマであると考えられる。成膜条件の最適化を行った結果、図 2.2.3-18 に示すように 130 m 単長で全長に亘って $\Delta\phi=5$ 度の均一な結晶粒 2 軸配向性を示し、均一な CeO_2 中間層を作製出来ることが判った。図 2.2.3-19 に平成 21 年度に提供用線材に使用する目的で成膜した CeO_2 中間(単長：80~100 m)層の結晶粒 2 軸配向度を使用した IBAD-GZO 層の結晶粒 2 軸配向度に対してプロットした結果を示す。

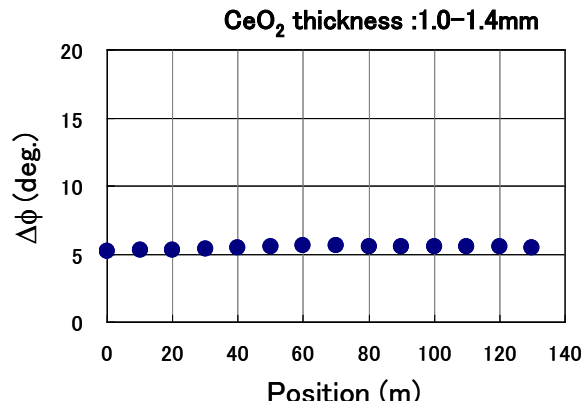


図 2.2.3-18 130 m 長で作製した CeO₂ 中間層の結晶粒 2 軸配向度の分布

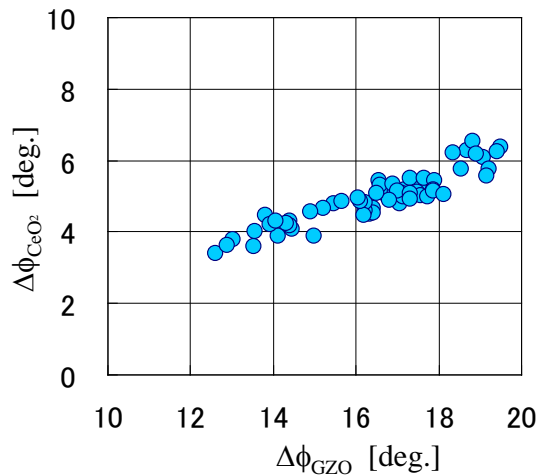


図 2.2.3-19 提供線材の両端から採取した CeO₂ 中間層における結晶粒 2 軸配向度と IBAD-GZO 層の結晶粒 2 軸配向度の関係

図2.2.3-20に100 m単長で作製した線材の I_c 値の長手方向の均一性を示す。全長にわたり亘り1 cm幅換算で300 A/cm-w(@77 K,s.f.)を超える I_c 値を示しているが、所々 I_c 値が低下した箇所が散見される。全体では±10%の範囲に I_c 値は分布している。局所的に低下している箇所は、中間層の欠陥や傷、仮焼膜の作製工程において付着した異物に起因するケースが多い。今後、各工程において対策を行ない、さらなる均一性の向上を図る。

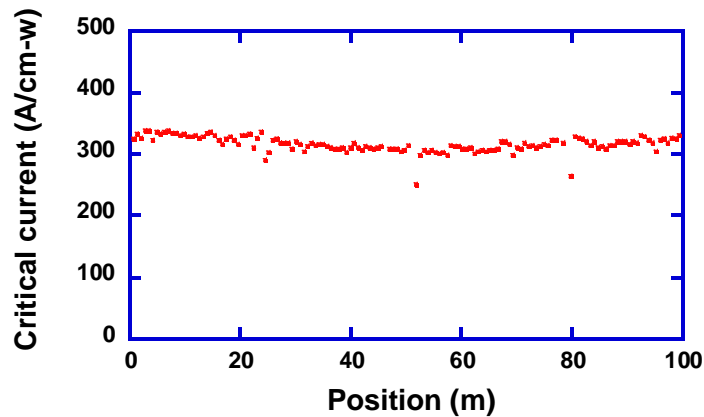


図2.2.3-20 長さ100 mで作製した線材の I_c 分布

(4) 長尺Y系線材の安定製造の検討

高電圧要ケーブルに使用する超電導線材は、将来の低コスト化が見込まれるTFA-MOD法にバッチ式本焼プロセスを適用した作製方法で製造した。このY系超電導線材は、超電導線材の性能を表す臨界電流値と線材長さの積（以下 $I_c \times L$ ）で世界第3位の155,000 Amの特性を示した実績がある。平成20年度～22年度にプロジェクト内で予定するIBAD-MOD超電導線材の供給計画は表2.2.3-4のとおりである。

表2.2.3-4 平成20年度～22年度の超電導線材供給計画

	試験項目	線材仕様		
		I_{cAv} (A)	単長(m)	総長(m)
平成20年度	新しいレーザー加工の評価1	>75	10	100
	新しいレーザー加工の評価2	>75	10	100
	試験用線材（早大）	>75	4	4
	試験用線材（早大）	>75	4	4
	導体の作製(電圧用)	>75	30	150
	導体の作新製(電圧用)	>75	30	450
	導体の作製(交流損失評価用)	>75	60	600
	導体の作製(電流通電用)	>75	60	600
平成21年度	導体の作製(長尺用)	>75	100	1,000
	低交流損失導体の作製・評価1	>100	>10	600
	低交流損失導体の作製・評価2	>100	>10	600
	低交流損失導体の作製・評価3	>100	>10	600
	機械特性評価	>100	>10	1,000
	中間接続評価1	>100	>10	300
	中間接続評価2	>100	>10	300
過電流試験評価	>100	>10	600	

	試験項目	線材仕様		
		I_{cAv} (A)	単長(m)	総長(m)
平成 22 年度	30 m 導体作製検証	>100	>33/66	3,000
	30 m シールド作製	>100	66	3,000
平成 23 年度	ケーブルシステム検証用	>100	66	6,000

表2.2.3-5 平成20年度～21年度の超電導線材供給実績

	試験項目	提供実績		
		I_{cAv} (A)	提供線材 の長さ	総長(m)
平成 20 年度	新しいレーザー加工の評価 1	>103	80 m+20 m	100
	新しいレーザー加工の評価 2	>100	30 m×2 本+75m	135
	試験用線材 (早大)	>104	4	4
	試験用線材 (早大)	>104	4	4
	導体の作製(電圧用)	>139	30 m×3 本他	150
	導体の作製(電圧用)	>109	110 m×1 本他	472
	導体の作製(交流損失評価用)	>117	123×2 本 134×2 本他	636
	導体の作製(電流通電用)	>117	133 m×2 本他	635
	導体の作製(長尺用)	>120	123 m×3 本、124 m×1 本他	1,056
平成 21 年度	低交流損失導体の作製・評価 1	>117	100.8 m×1 本他	615
	低交流損失導体の作製・評価 2	>123	78.4 m×1 本、 67.2 m×1 本他	672
	低交流損失導体の作製・評価 3	>105	44.8 m×4 本他	610
	機械特性評価	>103	89 m×2 本他	1,153
	中間接続評価 1	>110	100.8 m×1 本他	347
	中間接続評価 2	>100	67.2 m×1 本他	312
	過電流試験評価	>109	78.4 m×2 本他	660

表 2.2.3-5 は供給実績である。5 mm 幅線材で平成 20 年度 3,192 m、平成 21 年度に 4,369 m を高電圧ケーブルプロジェクトへ提供した。

(5) 結果

平成 20 年度より高圧超電導ケーブル対応線材安定製造技術開発プロジェクトに対し 5 mm 幅の超電導線材 7,588 m を供給した。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 とした場合の歩留り計算の結果を表 2.2.3-6 に示す。

表 2.2.3-6 平成 21 年度製造線材の単長 30 m の歩留り

30 m 単長	
良品本数 (本)	歩留り (%)
145	63

試作用ケーブルの長さが 30 m であることから、単長を 30 m として整理した。平成 21 年度にケーブル向けに製造した線材総長 6,887 m に対し、有効本数 145 本 (4,350 m) となり歩留りは 63 % となった。

供給するために線材を大量製造した年度後半で製造歩留りが低下する傾向がみられた。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 単長の製造歩留りを上げ、さらに 100 m を超える長さの超電導線材の製造歩留り向上を図る。

(6) 成果のまとめ

- ・仮焼膜を塗布する工程における線材の引き上げ速度を変えた試料で仮焼膜の膜厚分布を調査した結果、線材の両端部の膜厚が厚くなる傾向が認められた。線材の引き上げ速度を 5 m/h に設定すると幅方向の膜厚分布は±4.8 % となり、目標を達成することが分かった。
- ・長手方向の特性分布の向上については、本プロジェクトにおいて適用した高周波スパッタ法による CeO₂ 中間層成膜の結果が鍵となっており、その結果、100 m 級で全長にわたり亘り均一な結晶粒二軸配向膜が得られ、1 cm 幅換算で 300 A/cm-w(@77 K,s.f.)の通電特性が得られることを確認した。
- ・高電圧超電導ケーブルに使用する Y 系超電導線材提供については、平成 20 年度、21 年度合わせた提供目標 7,000 m (5 mm 幅) に対し、7,580 m を提供し、目標を達成した。

(7) 今後の計画と目標達成の見通し

- ・平成 22 年度と 23 年度に提供を予定する線材の総量は、各々 6,000 m (5 mm 幅) である。平成 22 年 10 月以降の提供を予定しており、歩留り 50 % 以上が確保できれば予定通り提供できる見通しである。
- ・歩留り向上の対応として、局所的な特性低下の原因を調査・分類し、各々の対策を実施中である。対策後は局所的な特性低下部が減少することが期待され、30 m 以上の単長で歩留りが、さらに向上することを期待している。

2.2.3-4 微細構造解析 (JFCC)

(1) 実施目的

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

(2) 実施内容

超電導ケーブル対応線材安定製造技術開発における、安定化銅成膜プロセス開発を支援するため、有機酸塩熱分解(MOD)法により作製された Y 系超電導線材(5 mm 幅に分割切断)に銅メッキを施したサンプルの断面を、走査型電子顕微鏡(SEM)観察および TEM 観察を行った。観察を行った領域は、磁気光学(MO)法により超電導特性が健全と判断された領域と、メッキ銅の上にハンダ付けし、超電導特性が劣化していると判断された領域である。サンプルは Hastelloy™ 基板の上に $\text{CeO}_2/\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7(\text{GZO})$ 中間層を形成し、MOD 法により $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y(\text{YBCO})$ 層を成膜し、スパッタリング法により安定化 Ag 層を形成した後、銅メッキされたものである。このように作製された線材の断面観察試料調製は集束イオンビーム(FIB)法を用いた。図 2.2.3-21(a)に健全と判断された領域の $\text{Cu}/\text{Ag}/\text{YBCO}/\text{CeO}_2/\text{GZO}/\text{Hastelloy}$ の断面 SEM 像、(b)に劣化と判断された領域の断面 SEM 像を示す。両方の部位で Cu メッキ層と Ag 層は密着していることがわかる。MO により健全と判断された領域の YBCO 層内部にいくつか空隙が観察されるものの、 $\text{YBCO}/\text{CeO}_2/\text{GZO}$ の積層構造は保たれている。これに対し、ハンダ付け後に劣化と判断された領域では Ag 層と超電導層の間に大きな隙間が形成され、Ag 層直下に層状のコントラストが観察でき、本来 YBCO 層が存在した領域上に球状の物質が形成されている。

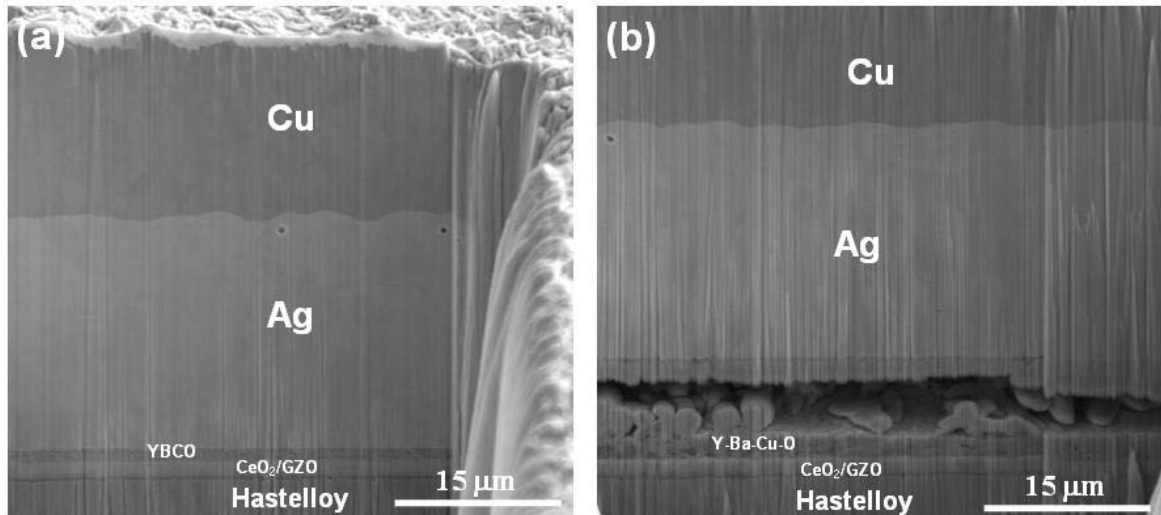


図 2.2.3-21 (a)MO により健全と判断された領域の Cu/Ag/YBCO/CeO₂/GZO /Hastelloy™ の断面 SEM 像
 (b)MO により劣化と判断された領域の断面 SEM 像

さらに、図 2.2.3-22(a)~(j)に劣化と判断された領域の Ag、Y、Ba、Cu、Ce、Gd、Zr、Cr、Ni、O の EDS 元素マッピング結果および(k)にマッピング領域の SEM 断面像を示す。Ag 層直下および、本来超電導層であったところの上部に、Hastelloy 成分である(i)Ni、(h)Cr、(j)Mo が強いコントラストで現れており、何らかの熱により Hastelloy™ 成分が安定化 Ag 層と超電導層の間に堆積したと考えられる。このサンプルで、安定化 Ag 層直下の領域を TEM 観察した。図 2.2.3-23 に安定化 Ag 層直下の断面 TEM 像を示す。Ag 層直下には積層構造が観察される。その積層構造から得られた電子回折図形および回折リングの指数を図 2.2.3-24 に示す。積層構造は主に、Ag、Ni を含む Hastelloy™ 成分から構成されていることが判明した。

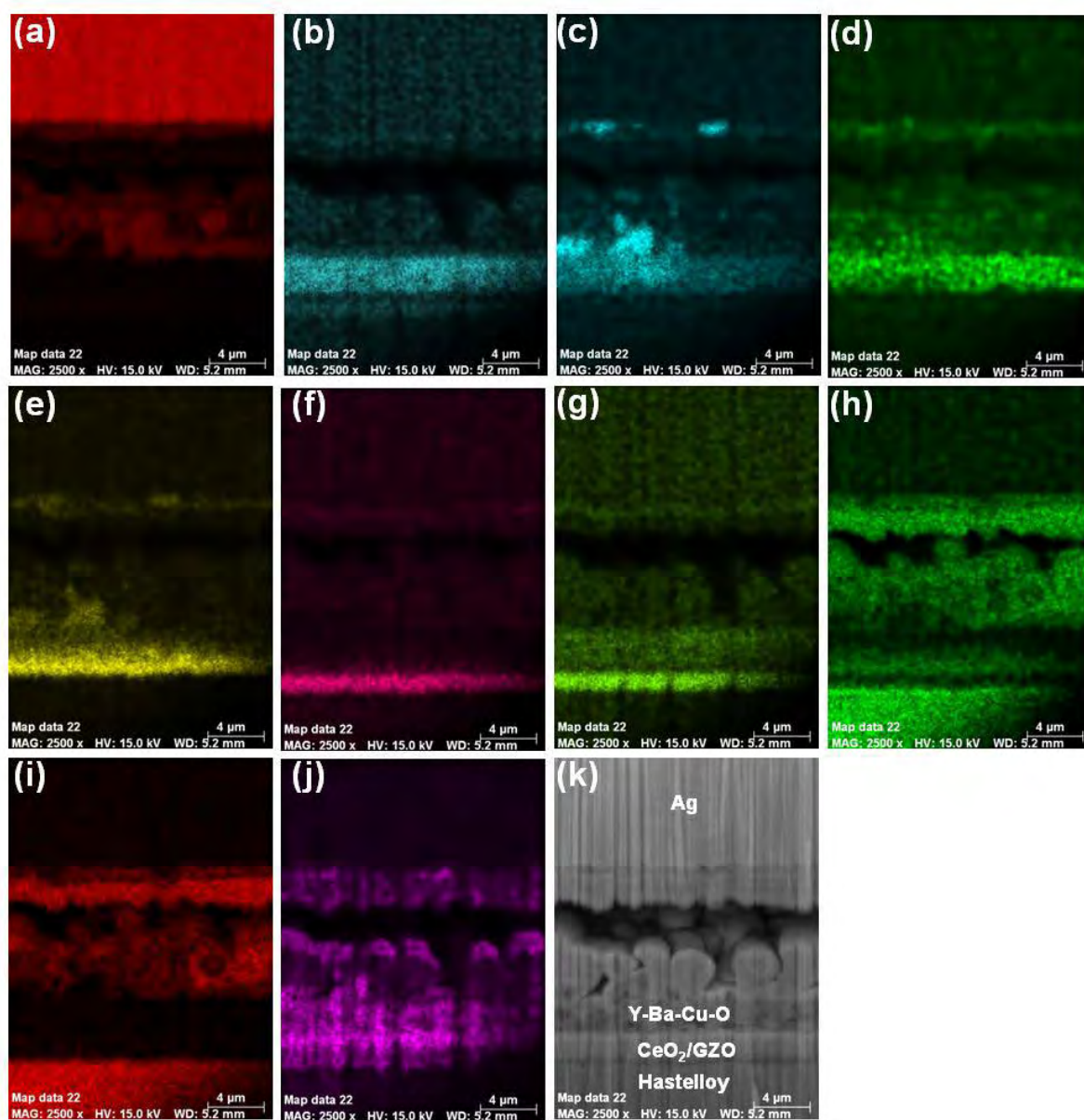


図 2.2.3-22 MO により劣化と判断された領域の EDS 元素マッピング結果
 (a)Ag、(b) Y、(c) Ba、(d) Cu、(e) Ce、(f) Gd、(g) Zr、(h) Cr、(i) Ni、
 (j) O および、(k) マッピング領域の SEM 断面像

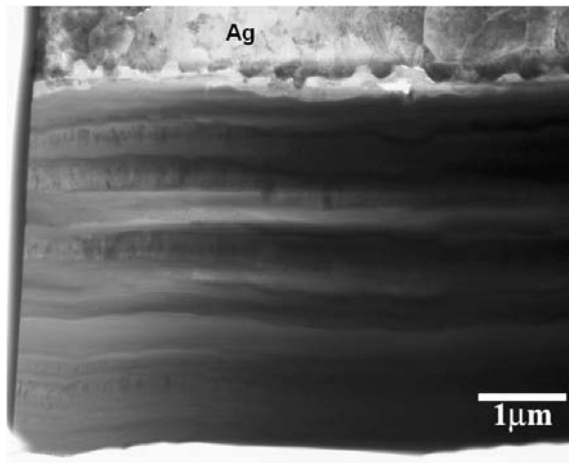


図 2.2.3-23 MOにより劣化と判断された領域の安定化 Ag 層直下の断面 TEM 像

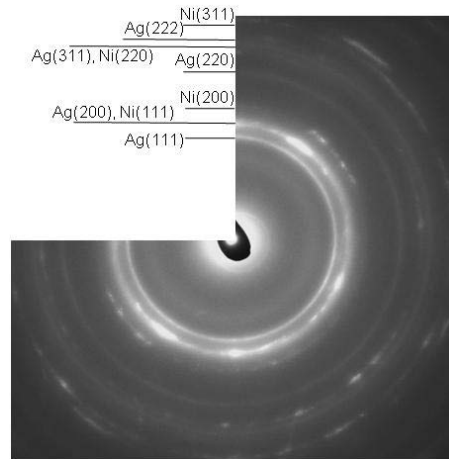


図 2.2.3-24 図 2.2.3-23 で示した積層構造から得られた電子回折図形および回折リングの指数

次に、超電導ケーブル用に線材を分割するプロセス開発を支援するため、種々の線材切断手法とメッキ手順を変えたサンプル切断面を SEM 観察した。観察したサンプルは、①スリッタ切断後、銅メッキしたサンプル、②銅メッキ後にレーザ切断を行い、その後、再び銅メッキしたサンプル、③銅メッキ後にレーザ切断したサンプル 3 つである。図 2.2.3-25(a)~(c)に①~③の切断面の断面 SEM 像を示し、(a')~(c')に拡大 SEM 像を示す。①のサンプルでは超電導層および中間層 (CeO₂/GZO) に亀裂 (図 2.2.3-25(a')に矢印で示す) が入っている。③のサンプルでは、切断加工面からおよそ 50 μm 内側に超電導層/中間層界面に亀裂 (図 2.2.3-25(c)および(c')に矢印で示す) が入っている。②のサンプルでは切断加工面からおよそ 10 μm 程度まで超電導層に空隙が観察されるのみである。以上のような SEM 観察から、分割加工後の線材組織を詳細に解析することができ、これらの結果と分割後の I_c 値の変化を比較することにより、超電導電力ケーブル対応線材安定製造のための切断プロセス開発、メッキプロセス開発を支援している。

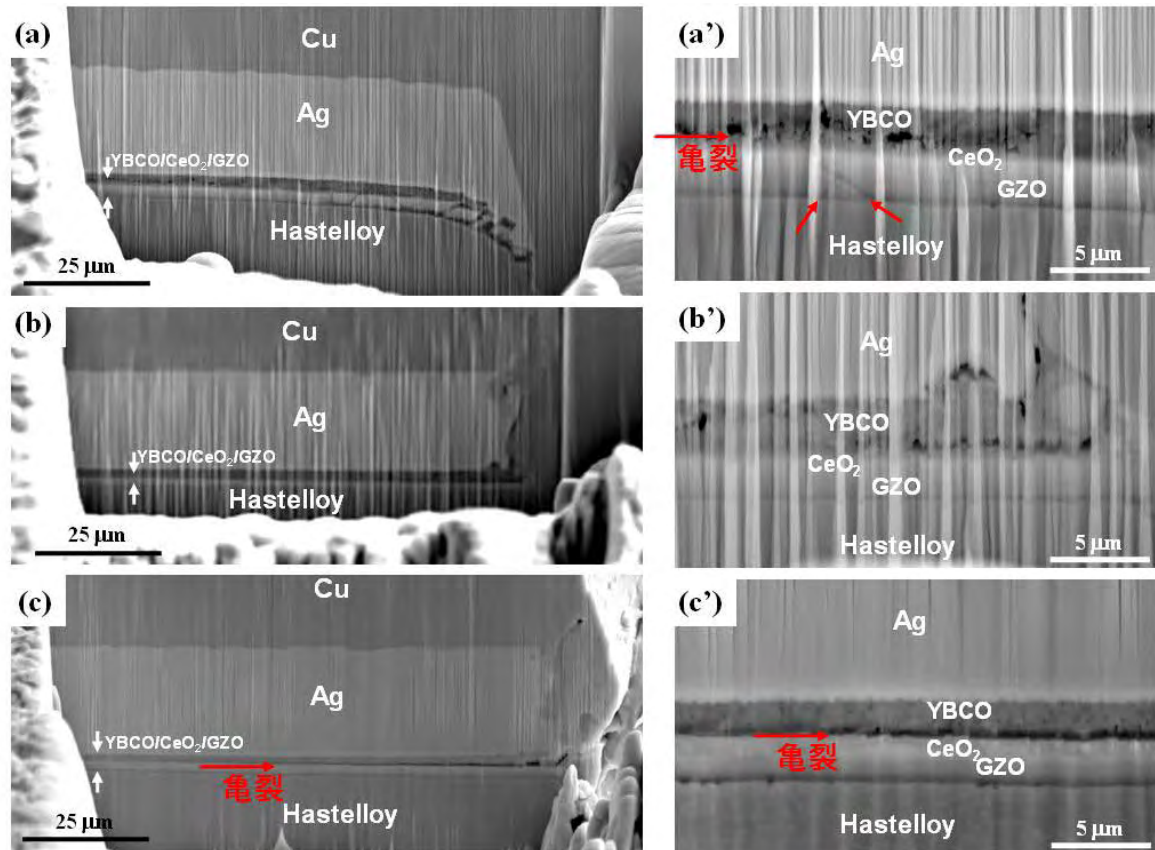


図 2.2.3-25 分割加工および銅メッキを施した線材切断面の断面 SEM 像
 (a)スリッタ切断後、銅メッキしたサンプル
 (b)銅メッキ後にレーザ切断を行い、再銅メッキしたサンプル
 (c)銅メッキ後にレーザ切断したサンプル
 (a')~(c')は(a)~(c)の拡大 SEM 像

(3) 成果のまとめ

銅メッキ後のサンプルを SEM 断面観察したところ、Cu/Ag は非常によい密着を示しており、超電導特性が健全な領域で YBCO/CeO₂/GZO の積層構造は保たれていた。銅メッキを行い、銅上にハンダ付けを施した後、超電導特性が劣化していた領域を調査したところ、Hastelloy™ 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メッキ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組織変化を示すことができた。また、これらの組織観察と分割後の線材の I_c 値の変化を比較することにより、超電導電力ケーブル対応線材安定製造のための切断プロセス開発、メッキプロセス開発を支援している。

今後も、超電導電力ケーブル研究開発のケーブルシステム検証に必要な Y 系超電導線材について、透過型電子顕微鏡(TEM)等を用いて詳細にその微細構造解析を行う。これら微細構造解析結果と線材の超電導特性とを比べ、検討することにより、

比較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用超電導線材の安定製造技術開発支援を行う。

2.2.3-5 IBAD-PLD 線材の安定製造技術開発 (ISTEC)

(1) 開発目的

200 A/cm-w(@77 K,s.f.)級 IBAD/PLD 線材による電力ケーブルシステム成立性を確認するため、Y 系超電導線材の安定製造技術開発を行い、IBAD-MgO/PLD-GdBCO 線材による超電導導体を作製・評価する。

(2) 200 A/cm-w 級 IBAD/PLD 線材

超電導線材の作製工程は、ハステロイ™ 基板を機械研磨にて表面平滑性を向上させ、1 cm-w に加工する。この基板の上に Ion Beam Sputtering-Gd₂Zr₂O₇/IBAD-MgO/RF Sputtering-LaMnO₃/PLD-CeO₂ の各層を蒸着する。この上に PLD 法にて GdBCO 超電導層、DC スパッタ法にて Ag 安定化層を形成する。作製した超電導線材の特性結果を図 2.2.3-26、27、28 に示す。図 2.2.3-26 はホール素子式長尺線材 I_c 評価装置（連続ホール素子法、）による測定結果であり、80 m-300 A/cm-w(@77 K,s.f.)、90 m-200 A/cm-w(@77 K,s.f.)の特性を有していることが分かる。また図 2.2.3-27 は超電導線材を 60 cm 間隔で I - V 特性（閾値 1 μ V/cm）を評価し、 I_c 特性と線材長の関係を示したものであり、この結果からも 80 m-300 A/cm-w(@77 K,s.f.)、90 m-200 A/cm-w(@77 K,s.f.)の特性を有していることが分かり、図 2.2.3-26 と図 2.2.3-27 の結果が一致している。次に、図 2.2.3-28 は作製した線材をレーザーで 1 mm-w に 10 分割し、 I - V 特性（閾値 1 μ V/cm）を測定し、幅方向における均一性を評価した結果である。レーザーによる損失は、加工前 ($I_c = 346$ A/cm-w(@77 K,s.f.)) と加工後 ($I_c = 315$ A/cm-w(@77 K,s.f.)) から約 9%、1 回の加工による損失は約 1%であり、幅方向の線材特性は、両端 1 mm-w に線材特性の低値が確認された。

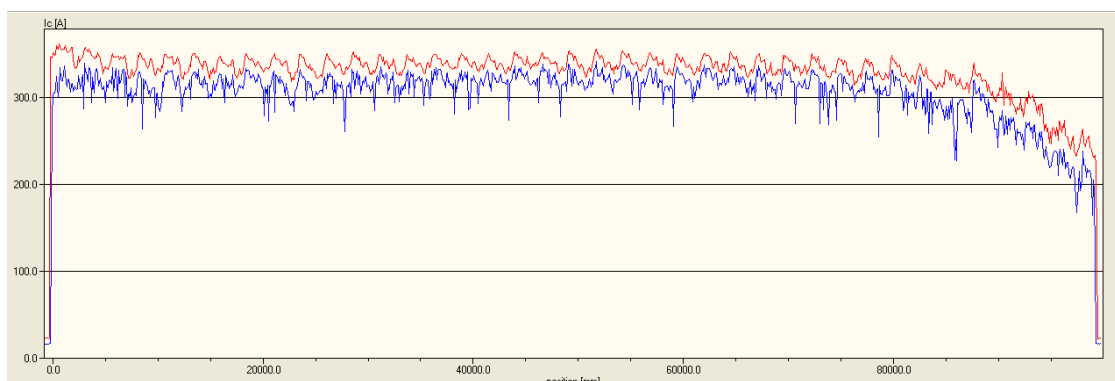


図 2.2.3-26 100 m 級 GdBCO 超電導線材の I_c 値の連続ホール素子法による測定結果

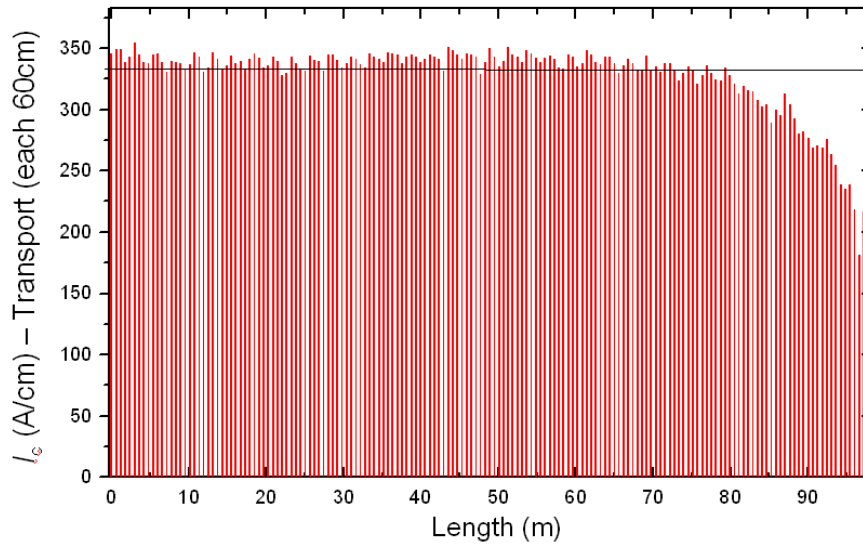


図 2.2.3-27 100 m 級 GdBCO 超電導線材の I_c 特性

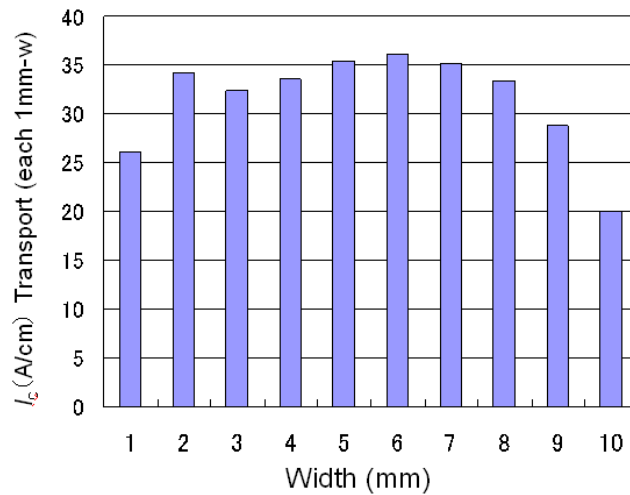


図 2.2.3-28 10 分割 1 mm-w の I_c 特性

(3) 1 m 級導体

2.2.3-5 (2)項で示した超電導線材を用いて、導体を作製した。 I_c 特性が低い両端 1 mm をレーザーで切断し、2 mm-w の線材 4 本を作製した後、電解メッキによる銅安定化層を形成した。2 mm-w の超電導線材を 50 cm 間隔で $I-V$ 特性 (閾値 1 $\mu\text{V}/\text{cm}$) の評価を行い、 I_c 特性と線材長の関係を図 2.2.3-29 に示す。線材の一部に劣化が確認されるものの、概ね 40 A/2 mm-w(@77 K,s.f.)の I_c 特性を示している。これらの線材を用いて 2 層導体を作製した。表 2.2.3-7 に 2 層導体の仕様、図 2.2.3-30 に作製した導体、図 2.2.3-31、32 に導体の特性を示す。作製した 2 層導体は 2,750 A (@77 K,s.f.)の特性を有し、交流損失 0.0258 W/m@1 kA_{rms} (負荷率 0.51) を示した。

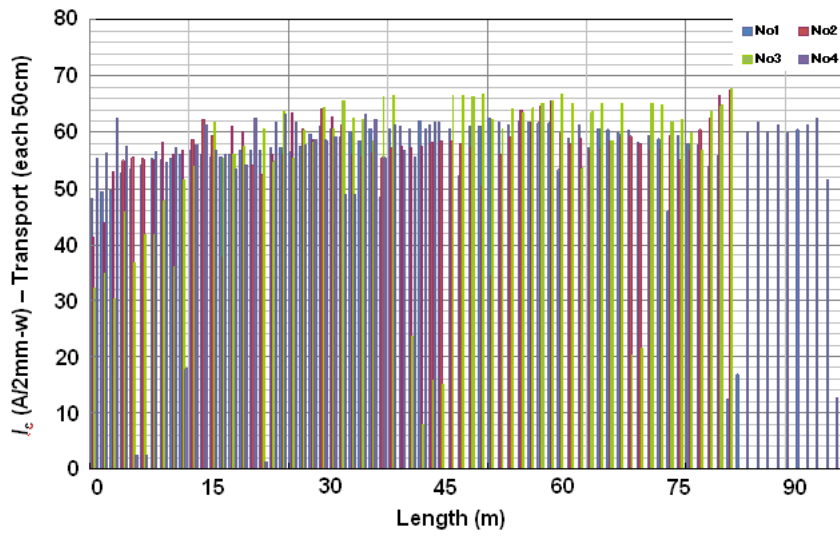


図 2.2.3-29 100 m 級 2 mm-w 線材の I_c 特性

表 2.2.3-7 2 層導体の仕様

項目	内径 (1 層目)	導体層数	線材幅	線材本数 (内層/外層)	$I_c@77\text{ K}$
2 層導体	18.0 mm	20	2 mm	25/25	2750 A



図 2.2.3-30 作製した 2 層導体

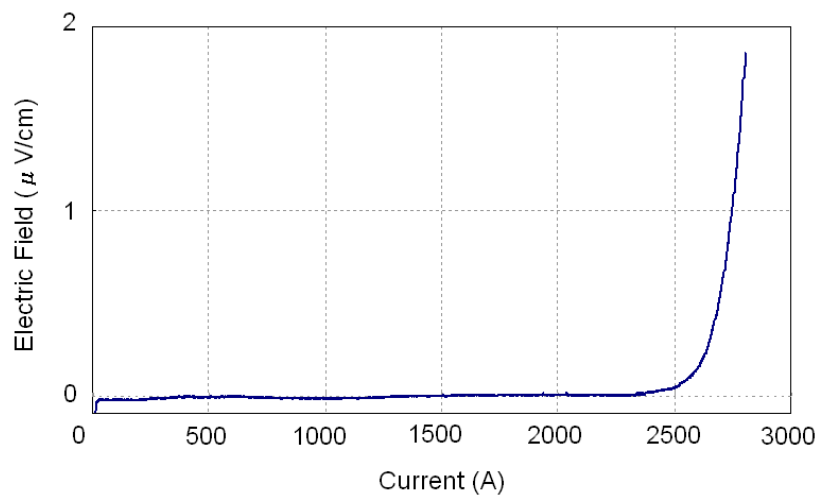


図 2.2.3-31 2 層導体の I - V 特性

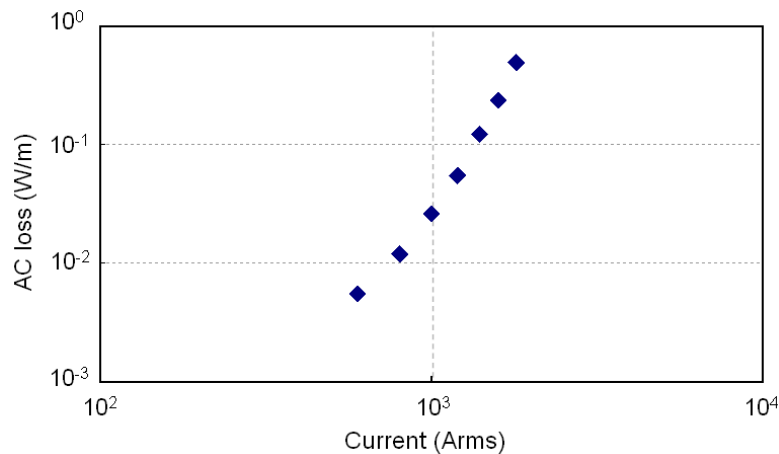


図 2.2.3-32 2層導体の交流損失

(4) まとめ

- ・ IBAD-MgO/PLD-GdBCO 線材を作製し、90 m-200 A/cm-w(@77 K,s.f.)の特性を持った線材開発を行った。
- ・ 超電導ケーブルの要素技術である細線化技術を用いて線材加工し、40 A/2 mm-w(@77 K,s.f.)線材を作製した。
- ・ 上記加工線材 2 mm 幅 50 本を用いて 2 層構造を持った超電導導体を作製し、 $I_c=2750$ A(@77 K,s.f.)の特性を得た。
- ・ 導体の交流損失として、 0.0258 W/m@1 kA_{rms} (負荷率 0.51) を得た。

2.2.3-6 線材の評価技術の開発 (ISTEC)

(1) 実施目的

Y系超電導線材を用いた電力ケーブルが所用の性能を達成するためには、線材の安定的な製造技術の確立とともに、線材の性能を的確に把握する評価技術が重要である。テープ状の超電導線材を電力ケーブルへ組み込む前段階において、超電導線材の臨界電流性能、幅方向の電流均一性評価、機械的欠陥評価、欠陥除去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。

超電導線材を連続ホール素子法、長尺線材 I_c 評価装置などの装置での評価を行い、評価パラメータによる効率的、効果的な評価について検証を行う。

(2) 超電導線材評価装置

「超電導応用基板技術研究開発」で開発された超電導線材評価装置を用いて線材評価を行い、評価パラメータによる効率的、効果的な評価について検証を行う。評価装置を下記に示し、特長を記す。

- (i)連続抵抗法 I_c 測定装置 (Reel to Reel- I - V 特性：直接通電法)
- (ii)連続ホール素子法
- (iii)MOI 線材評価装置 (磁気光学法)
- (iv)SQUID 評価装置 (超電導量子干渉素子法)
- (v)連続線材 X 線評価装置 (X 線回折)

(i) 連続長尺 I_c 評価測定装置 (Reel to Reel- I - V 特性：直接通電法)

直接的に長尺線材の I_c 値を 4 端子法を用いて測定する。通常の 4 端子法では、ハンダ付け等で 4 端子を接続し、通電によって発生する電圧を測定する。しかし、この方法では、長尺線材を測定するのに時間を要する。そこで、端子を線材に押し付けることによって測定を行い、評価速度を上げている。線材は 1 cm 幅 500 m 長まで連続して測定することができ、1 回の測定長は、10 cm～1 m まで可変することができる。線材評価速度は、10 m/h～50 m/h である。評価装置図を図 2.2.3-33 に示す。この装置を用いて 100 m 級線材を単長 60 cm ごとに測定した結果を図 2.2.3-34 に示す。評価時に測定温度は液体窒素 77 K に浸して行う。

Y 系超電導線材の機器応用には、磁場中での臨界電流特性 I_c 値も重要な特性である。超電導ケーブルでは磁場中の影響は小さいが、変圧器 0.02 [T]、SMES1.0 [T] 程度の磁場中の I_c 特性を知る必要がある。本装置は、0.1 MPa@77 K で 0.1～0.5 [T] まで磁場を線材に対して垂直に発生させることができ、Y 系超電導線材の磁場中の I_c 特性を評価することができる。図 2.2.3-35 に 30 m 長の磁場中における I_c 特性測定結果を示す。磁場を 0, 0.1, 0.3, 0.5 [T] まで変化させ、単長 60 cm ごとに測定した結果であり、超電導線材の磁場中の I_c 特性が評価できている。



図 2.2.3-33 連続抵抗法 I_c 値測定装置

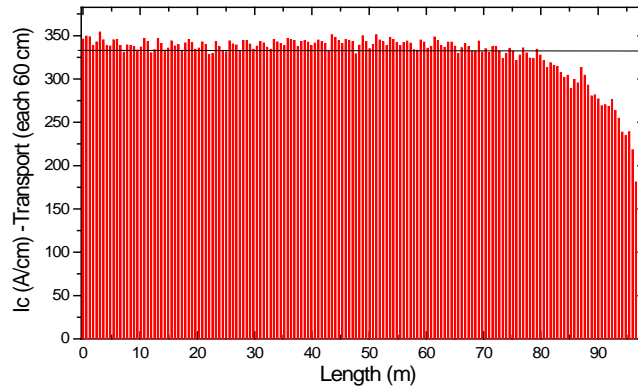


図 2.2.3-34 100 m 長線材の連続抵抗法 I_c 値測定装置による評価結果

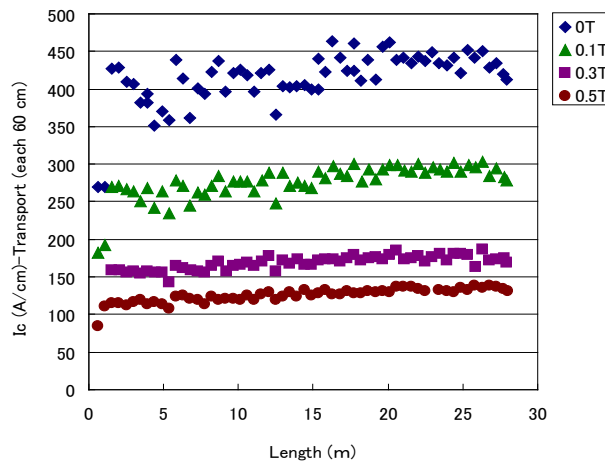


図 2.2.3-35 連続抵抗法 I_c 値測定装置による 30 m 長線材の垂直磁場中 (0~0.5 [T]) の I_c 特性評価結果

(ii) Reel to Reel-連続ホール素子法による線材特性評価

Reel to Reel-連続ホール素子法は対象物（超電導線材）に外部磁場を印加させ超電導線材中に超電導電流を誘起し、誘起された電流の作る磁場の大きさと分布をホール素子アレーで観測する方法である。電流を導入する方法を必要としないため、電極の必要がなく試料の損傷がほとんどないことが特徴である。試料を一定の速度で動かしながら測定でき、長尺線材を比較的短期間に連続的に測定ができる。測定可能線材長は 1 km、測定速度は 270 m/h、サブクール液体窒素を使用して 66K、外部磁場は 3 T まで可能であり、低磁場では、ホール素子法が、高磁場では誘導法による測定となる。図 2.2.3-36 に Reel to Reel-連続ホール素子法装置の概略図を示す。図 2.2.3-37 に温度依存性と磁場依存性の測定結果を示す。温度依存性は、77.6 K~66.8 K まで液体窒素をサブクール状態まで冷却し、Y 系超電導線材の温度依存性を Reel to Reel で評価し、磁場依存性は、0~0.16 T まで磁場を変化させ

線材の磁場依存性を Reel to Reel で評価した。誘導法による評価は、実際の電流を印加する I_c 測定よりも低い電解領域での測定となる。

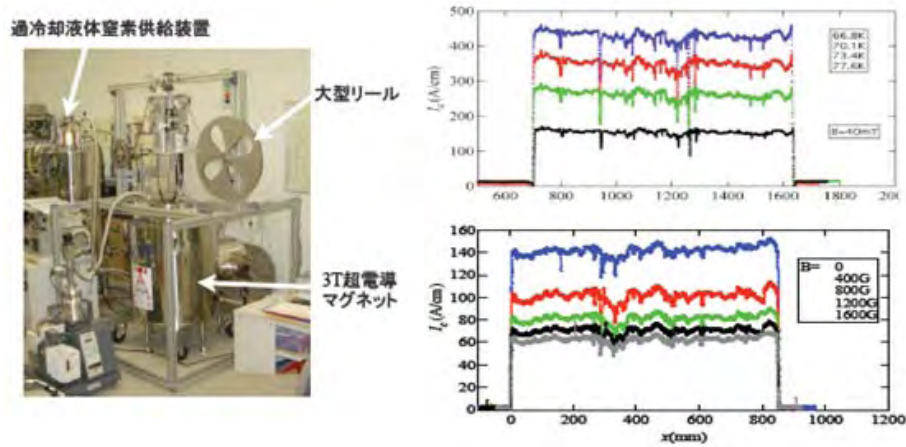


図 2.2.3-36 Reel to Reel-連続ホール素子
法装置の概略図

図 2.2.3-37 温度依存性 (上)
磁場依存性 (下)

(iii) Reel to Reel-MOI 装置による線材特性評価 (磁気光学法)

Reel to Reel-MOI 装置の概観を図 2.2.3-38 に示す。測定速度は 1.5~2.0 m/h と低いものの、CCD 分解能は 1 μm と高いため、欠陥位置の同定や加工線材の評価に用いられる。図 2.2.3-39 に 5 mm 幅 MOD 線材の測定結果を示す。白い箇所が線材特性の低い箇所または、特性劣化している箇所を示している。

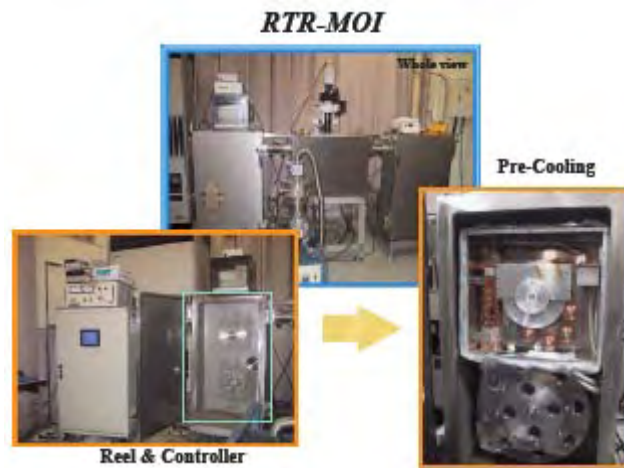


図 2.2.3-38 Reel to Reel-MOI 装置の概観

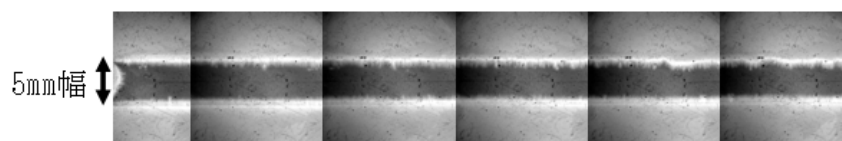


図 2.2.3-39 Reel to Reel-MOI 評価装置による 5 mm 幅線材の評価結果

(iv) Reel to Reel-SQUID を用いた高温超電導線材検査装置

超電導線材の剥離や欠損などを高温超電導-SQUID を用いて検査する。図 2.2.3-40 に装置概略図と装置内部を示す。超電導線材は、Reel to Reel で送りながら 2 台の冷凍機に接続された冷却ステージと液化窒素で冷却された補助冷却機構によって熱接触で冷却される。誘導コイルにより超電導線材に誘導電流が流れ、超電導層内に欠陥がある場合、この誘導電流は欠陥を迂回して流れる。そのときそこに生じる垂直磁場成分の傾きを SQUID で検出する。また渦電流法非破壊検査装置用高感度センサとして、グラジオメータを用い磁気シールドの無いシステムであり、最大計測速度は 80 m/h、500 m 長の線材を測定できる。図 2.2.3-41 に 5 mm 幅線材を測定した結果を示す。

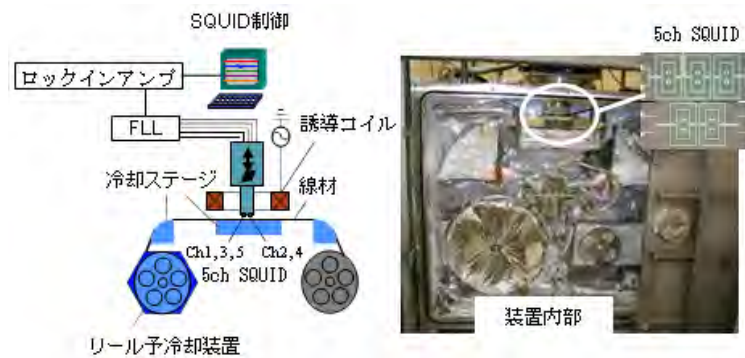


図 2.2.3-40 HTS-SQUID を用いた高温超電導線材検査装置

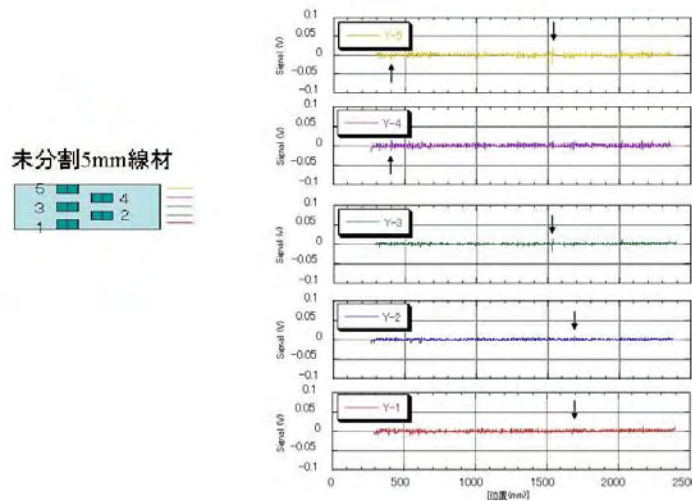


図 2.2.3-41 HTS-SQUID による 5 mm 幅線材を測定した結果

(v) Reel to Reel-X 線回折評価装置

線材作製において、基板上に成膜される物質の結晶粒面内配向が優れているものほど、特性が高い。薄膜積層構造である Y 系超電導線材は、各層の結晶粒面内配向を良くし、超電導層の結晶粒面内配向の向上を目指し、開発している。その評価として、X 線回折が用いられる。従来の X 線回折では、短尺のものしか評価でき

ず、線材一様（長手・幅）の結晶粒面内配向度を評価できなかった。本装置は一定の間隔で超電導線材の結晶粒面内配向度を評価・確認でき、線材の均一化が図れる。図 2.2.3-42 に装置図を示し、図 2.2.3-43 に 200 m 長線材の中間層（CeO₂）を 5 m 間隔について、結晶粒面内配向度を評価した結果を示す。この結果から、長手方向に一様な結晶粒面内配向を有していることが分かる。1 箇所測定に有する時間は 2 分、測定間隔は 10 cm～数 m、線材移動速度は 0.5 m/sec、自動で測定することが可能である。

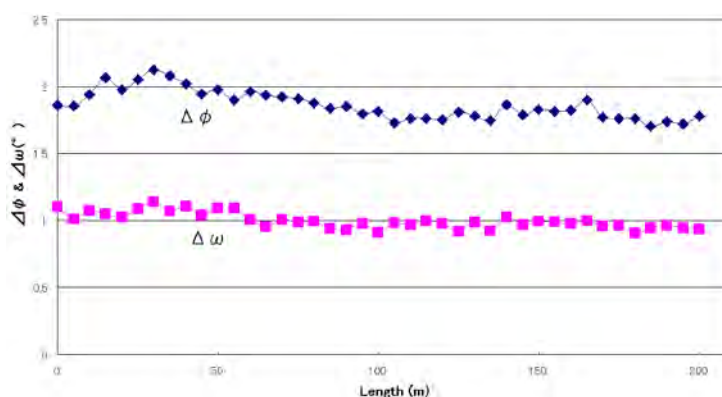


図 2.2.3-42 RTR-X 線回折装置 図 2.2.3-43 200 m 長の中間層（CeO₂）の面内結晶粒配向評価結果（5 m 間隔）

(3) 評価装置の比較

ケーブル用 Y 系超電導線材の特性を評価する装置について、性能を比較した。評価装置の分解能と測定速度の関係について、図 2.2.3-44 に示す。測定速度が遅く、分解能が小さい Reel to Reel-MOI は詳細な観察を行うことに向いている。Reel to Reel-SQUID は、測定速度は速いが分解能が小さく、 I_c 特性を評価することができない。Reel to Reel- $I-V$ 測定装置は、測定速度が速く、直接通電法により $I-V$ 特性を得、 I_c 特性を評価できるが、通電することで線材へダメージを与える可能性がある。Reel to Reel 連続ホール素子法は、非破壊に I_c 特性を見積もることができ、測定速度も速い。また、1 km 長まで連続して評価することができ、分解能が 1 mm 前後のため、異常部位を特定し易く、他の評価装置による 2 次検査に入り易い。このことから、効率よく評価する装置としては、Reel to Reel 連続ホール素子法が有効と思われる。

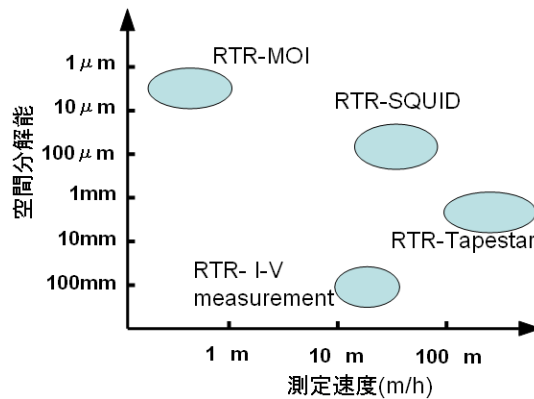


図 2.2.3-44 分解能と測定評価速度の関係

(4) まとめ

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。それぞれの特徴を活かした適材適所の評価運用を行うことで、効率的に評価できる。線材特性を効率的・簡易に評価するには、Reel to Reel 連続ホール素子法が優れているが、 I_c 特性は見積もられたものあり、真値が必要な場合には、Reel to Reel- $I-V$ 特性評価装置である。劣化・剥離等を効率的に確認するには、Reel to Reel-SQUID 装置であり、細かく評価するには Reel to Reel-MOI 評価装置である。

2.2.3-7 成果のまとめ

大電流・低交流損失ケーブルに適用するための低磁性クラッドタイプの結晶粒配向金属基板-PLD 線材作製技術開発を実施し、ケーブル化に必要な性能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た。本技術を基にして、中間目標である $J_e = 15 \text{ kA/cm}^2$ (@77 K, s.f.) (2 mm 幅×20 m 以上) の製造技術レベル達成を確認するために、 $J_e = 17 \text{ kA/cm}^2$ (@77 K, s.f.) の特性を有する Y 系超電導線材を作製・実証した。なお、線材提供実績は、平成 20 年度：1.1 km、平成 21 年度：3.2 km であり、平成 22 年度計画は 4.0 km である。

基板・中間層テープの開発においては、IBAD-GZO 基板を平成 21 年度時点で 16.2 km 提供した。平成 22 年度には 10.8 km 提供を予定している。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 値を、170 m 長の IBAD-MgO 中間層を使用した線材は 300 A/cm-w (@77 K, s.f.) 以上の I_c 値を実現しており、 $J_e = 15 \text{ kA/cm}^2$ 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。

高電圧超電導ケーブルに使用する TFA-MOD 法により作製された Y 系超電導線材の提供については、線材供給 6.5 km (平成 20~22 年度) に対し、平成 21 年度時点で線材 3.8 km (10 mm 幅換算) を供給し、歩留り 63 % を達成した。

また、線材の引き上げ速度を 5 m/h に設定すると幅方向の膜厚分布は $\pm 4.8\%$ となり、目標を達成することが分かった。長手方向の特性分布の向上については、100 m 級で全長にわたり均一な結晶粒二軸配向膜が得られ、1 cm 幅換算で 300 A/cm-w(@77 K,s.f.)の通電特性が得られることを確認した。

微細構造解析においては、線材の加工技術の影響を評価し、加工工程・技術に寄与した。また、MOD プロセスによる超電導線材の断面観察を行い、超電導構造および中間層の状態を確認および劣化箇所の組成分析を実施した。

IBAD/PLD 線材の安定製造技術の開発においては、IBAD-MgO/PLD-GdBCO 線材を作製し、90 m-200 A/cm-w (@77 K,s.f.)の特性を持った Y 系超電導線材開発を行ない、超電導ケーブルの要素技術である細線化技術を用いて線材を切断加工し、40 A/2 mm-w(@77 K,s.f.)線材を作製した。上記加工線材 2 mm 幅 50 本を用いて 2 層構造を持った超電導導体を作製し、 $I_c=2750$ A (@77 K,s.f.)の特性を得た。また導体の交流損失として、 0.0258 W/m@1 kA_{rms} (負荷率 0.51) を得た。

線材評価装置については、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 連続ホール素子法が優れているが、 I_c 特性は見積られたものあり、真値が必要な場合には、Reel to Reel- I - V 特性評価装置である。劣化・剥離等を効率的に確認するには、Reel to Reel-SQUID 装置であり、細かく評価するには Reel to Reel-MOI 評価装置である。

2.2.3-8 今後の計画と目標達成の見通し

大電流ケーブル用 Y 系超電導線材の安定製造技術の開発として、今後は開発された製造技術と向上された線材製造能力を基に、1 cm 幅で総長 4 km レベルのクラッド結晶粒配向基板-PLD 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、 $J_e=15$ kA/cm²(@77 K,s.f.)(2 mm 幅×20 m 以上)に相当する Y 系超電導線材の安定製造技術を確立する。

高電圧ケーブル用への基板・中間層テープの供給については、平成 22 年度末までに総長で約 27 km 供給予定であり、目標達成の見込み。

TFA-MOD プロセスによる高電圧ケーブル用 Y 系超電導線材の供給については平成 22 年度と 23 年度に提供を予定する線材の総量は、各々 6,000 m(5 mm 幅)である。平成 22 年 10 月以降の提供を予定しており、目標達成の見込み。なお、歩留り向上の対応として、局所的な特性低下の原因を調査・分類し、各々の対策を実施中である。対策後は局所的な特性低下部が減少するので、30 m 以上の単長で歩留りが向上することが期待でき、歩留り 70 %を達成の見込み。

微細構造解析については、超電導電力ケーブル研究開発のケーブルシステム検証に必要な Y 系超電導線材について、透過型電子顕微鏡(TEM)等を用いて詳細にその微細構造解析を行う。これら微細構造解析結果と線材の超電導特性とを比べ、検

討することにより、比較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用超電導線材の安定製造技術開発支援を行う。

評価技術の開発については、現状の評価装置を用いて線材評価を続け、線材特性のデータ蓄積および線材特性の選別を効率良く行うことで、線材特性評価装置の用途を把握する共に、評価装置の性能向上に繋げていく。

2.2.4 超電導ケーブルの熱収支に関する評価研究

2.2.4-1 定常通電時および事故時の伝熱特性検討（早稲田大学、ISTEC）

(1) 開発目的

コンパクト化・大電流化をめざす 66 kV/5 kA 超電導電力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、絶縁材料の厚い 275 kV/3 kA 高電圧ケーブルにおいては事故時の伝熱特性のみならず、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。

耐過電流導体構成技術の確立を目指して、66 kV/5 kA 大電流ケーブルおよび 275 kV/3 kA 高電圧ケーブルの定常時・事故時の発熱・冷却に関する熱収支検討と最適設計化のための計算機シミュレータ開発を行い、システム検証用ケーブルの設計にて熱解析を行い、ケーブルの最適設計手法を確立し、シミュレーション結果を設計へフィードバックすることを目的とするとともに、汎用性のあるシミュレーション技術を確立する。なお、基礎的な評価実験との整合性を確認しながらデータベース化とシミュレータの反映を行う。

●中間目標: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。

○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を確立する。

(2) 66 kV 大電流ケーブルの過電流通電時の伝熱特性

66 kV 級大電流超電導ケーブルの耐過電流導体構成評価および設計用に、3次元有限要素法と回路方程式に基づく電流分布-熱伝導連成解析用計算機プログラムを開発した。

66 kV 級大電流超電導ケーブルの開発では、31.5 kA_{rms}、2 s の耐短絡電流特性が要求される。今回はその耐短絡電流特性の検証として、2 m 級超電導モデルケーブルを用いて過電流通電試験を行なった。約 2.7 m の 2 本の超電導ケーブルコアを並べ、2 本のコアのシールド層を短絡、閉回路とした状態で導体層に往復通電を行うことで、シールド層に遮蔽電流が誘起される方式とした。実験は液体窒素浸漬冷却（初期温度 77.3 K）で行い、過電流として 31.5 kA_{rms}、2 s 通電した。

試験結果では、66 kV 級大電流超電導ケーブルで想定される最大の短絡事故電流 31.5 kA_{rms}、2 s を通電した際に超電導導体層は約 100 K、超電導シールド層は約 120 K の温度上昇となった。試験結果は解析結果から想定される範囲内である。

(3) 275 kV 高電圧ケーブルの定常通電時の伝熱特性解析

中空銅フォーマと丸撚り銅フォーマの伝熱特性を確認するため、2つのモデル導体を作製した。導体内部にヒータを設置し、ヒータから交流損失と誘電体損失を模擬した発熱を投入し、定常状態になるまで中空銅フォーマのモデルケーブル、丸撚り銅フォーマのモデルケーブルの温度分布を測定した。中空銅フォーマの解析において、PPLPの熱伝導率 k_{pplp} は $0.1\sim 0.2$ W/mK、比熱容量 c_{pplp} は 0.5×10^6 J/m³Kを用いた。丸撚り銅フォーマの解析において、PPLPの熱伝導率 k_{pplp} は $0.2\sim 0.3$ W/mK、比熱容量 c_{pplp} は 0.8×10^6 J/m³Kを用いた。解析結果と実験結果はよく一致しており、中空銅フォーマの最大温度上昇は 0.4 K 以下、丸撚り銅フォーマは 0.3 K 以下と推定される。また、両モデルケーブルはヒータ投入開始 (0 s) からともに 6000 s 程度で定常状態となり、解析結果は実験結果とよく一致しており、ケーブル内部の過渡的な伝熱特性の再現を確認した。また解析結果より、液体窒素浸漬状態のPPLPの熱伝導率 k_{pplp} は $0.1\text{-}0.3$ W/mK、比熱容量 c_{pplp} は $0.5\times 10^6\text{-}0.8\times 10^6$ J/m³K と推定できた。この物性値は世界的にも報告例がなく、超電導ケーブルの熱特性評価において非常に重要なデータである。

(4) 275 kV 大電流ケーブルの事故時の伝熱特性解析

超電導線材の銅メッキ厚と銅シールド層の断面積をパラメータとして、 275 kV 級高電圧超電導ケーブルで想定される最大の短絡事故電流 63 kA_{rms}, 0.6 sec を通電した際のケーブル内の温度上昇について解析評価した。解析結果より、銅メッキ厚と銅シールド層断面積の設定範囲において、熱的な要因による超電導特性の劣化が引き起こされる可能性は極めて低く、 275 kV 級高電圧超電導ケーブルで想定される最大の短絡事故電流 63 kA_{rms}, 0.6 sec の熱的ダメージから超電導ケーブルを保護できることが分かった。今回の解析結果より、銅メッキ厚と銅シールド層断面積を減らした構造も短絡事故から 275 kV 級高電圧超電導ケーブルを保護できる可能性があることが分かった。

耐短絡電流特性の検証として、 2 m 級超電導モデルケーブルを用いて過電流通電試験を行った。実験は液体窒素浸漬冷却（初期温度 77.3 K）で行い、過電流として約 $10, 20, 30, 40, 63$ kA_{rms} を通電した。

実験結果では、 275 kV 級高電圧超電導ケーブルで想定される最大の短絡事故電流 63 kA_{rms}, 0.6 sec を通電した際に、銅フォーマは約 53 K、超電導導体 1 層目は約 30 K、超電導導体 2 層目は約 42 K、超電導シールド層は約 15 K の温度上昇となった。解析結果では、時間推移に伴う各層の温度上昇が実験とよく一致していた。実験と解析のわずかな誤差は、温度計に時間遅れがあるため、測定誤差が生じている可能性や解析のモデル構成が完全に実験の構成を再現できていないことが推測された。また、実験結果において、過電流値の増加に伴い、各層の温度も急激に上昇し、特に銅フォーマの温度上昇は、 63 kA_{rms} 通

電時には超電導導体層と同程度もしくはそれ以上になり、解析結果と実験結果は定性的かつ定量的によく一致した。

(5) 成果

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。

(6) 今後の見通し

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。

2.2.4-2 スラッシュ窒素の研究（前川製作所）

(1) 研究開発目的

現状の高温超電導ケーブルの冷却システムの冷媒には、超電導性能や絶縁特性などを考慮し、サブクール状態の液体窒素が用いられている。サブクール窒素は、ケーブルを冷却するに従い温度が上昇していくが、固体と液体の二相流であるスラッシュ窒素では固体が存在する限り、その温度は融解温度である 63 K という、サブクール窒素より低温かつ一定に維持される。このことはケーブル性能の向上にも寄与できると考えている。

本研究では、高温超電導ケーブルの新冷媒として、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ので以下に報告する。

(2) システムの検討

スラッシュ窒素とは、液体窒素中に微細な固体窒素粒子が分散したスラリー状の固液二相流体であり、サブクール窒素冷却と比較し以下のような長所を有する。

- ・融解潜熱分だけ冷却に利用できるエネルギーが液体窒素より大きい。
- ・固体の融解の効果で、固体が融解するまで一定温度を維持することが可能。
- ・融解温度が維持されるため冷却温度がサブクール窒素冷却と比べ低く保持するこ

とが可能。

また、壁面と流体間の冷却を示す無次元数としてヌッセルト(Nu)数がある。これまでの液体窒素冷却とスラッシュ窒素冷却の管内冷却試験を比較してもヌッセルト数は同等⁽¹⁾で、これは固体窒素の融解潜熱が寄与しているためと考えられる。これらのことからスラッシュ窒素はサブクール窒素よりも低温かつ冷却性能も優れた特性を有しているといえる。

サブクール窒素冷却における主要な構成機器は、冷凍機、循環ポンプとサブクール窒素を貯留するリザーバタンクである。スラッシュ窒素冷却ではこれらに付加して固体窒素を生成する生成装置、生成装置に付属する冷凍機、一定した固相率でケーブル管内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。連続的かつ微細な固体窒素を生成する生成装置と生成した固体窒素の固相率の計測方法については後述のように研究開発を実施してきた。

スラッシュ窒素の特性を活かした適応場所についても検討を実施した。検討例として、発電機端から昇圧トランスに至るケーブルの冷却が想定される。ここは距離が短いものの電流変化も大きく、超電導化しても性能上負担の大きい場所であると考えられる。スラッシュ窒素冷却ではケーブル温度がサブクール窒素冷却よりも低く保たれるため交流損失やケーブル負荷率が低く抑えられることが期待できる。また、ケーブル端末なども熱負荷が大きく、スラッシュ窒素冷却に適した場所と考えられる。

(3) 固相率制御方法の研究

現状の高温超電導ケーブルの冷却では、冷媒にサブクール窒素を用いているが、超電導ケーブルの入口のサブクール窒素温度を所定範囲内で制御することでケーブルの必要とする冷却量を安定的に供給している⁽²⁾。スラッシュ窒素の場合には、サブクール窒素の温度に代わり、全流体中に占める固体の質量割合である固相率を一定とすることで常に一定の冷却量をケーブルに供給する。そこで、固相率の制御はスラッシュ窒素冷却の実用化に欠かせない技術であり、本研究では、固相率一定の状態ですラッシュ窒素を冷却部に供給するための制御方法の研究を行った。

固相率を制御するには、固体窒素とサブクール窒素を混合しスラッシュ状態とした後ヒータにより固相率を調節する方法、固相率の高いタンクを別途設けサブクール窒素と混合し固相率を調節する方法、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した結果、本研究では生成装置で固体生成量を調節する方式を採用し、生成装置としては冷凍機の運転方法を変えることで生成量を調節でき、かつスラッシュ水素の生成方法⁽³⁾としても実績のある掻き取り方式を採用した。

本研究で開発したスラッシュ窒素生成装置の概略図を図 2.2.4-1 に、写真を図 2.2.4-2 にそれぞれ示す。本生成装置では、冷凍機を用いて液体窒素を冷却面に固化させ、固化した窒素を掻き取り羽根で剥離することでスラッシュ窒素を生成する

方法を用いている。生成装置は、スラッシュ窒素およびサブクール窒素を貯槽する液体窒素槽、2台のGM冷凍機、掻き取り羽根、羽根を駆動するモータから構成されている。モータの回転数を変更して掻き取り速度を調整する。

掻き取り速度を変更して生成装置の生成量を確認した。生成量は、スラッシュ窒素が生成される際の熱量を測定し、融解潜熱を用いて算出した。掻き取り速度を変更した場合におけるスラッシュ窒素の生成熱量と冷凍機冷凍能力の関係を図 2.2.4-3 に、算出した生成量を図 2.2.4-4 にそれぞれ示す。解析の結果図 2.2.4-3 に示すように、掻き取り速度 17 rpm の場合には冷凍機冷凍能力 160 W の内、125 W の冷熱量をスラッシュ窒素の生成熱量として利用出来ることが分かった。さらに、掻き取り速度 17 rpm の場合にはスラッシュ窒素の生成量が約 5g/s であることが分かった(図 2.2.4-4)。また、掻き取り速度を増加させると生成量が減少しており、掻き取り速度を用いて生成量の制御が可能であることを確認した。

スラッシュ窒素を用いて超電導ケーブルをより効率的に冷却するためには、ケーブル内における均一な二相流状態(分散二相流)の保持が重要であり、これを実現するためには μm オーダーの均一な粒子径を有する固体窒素を生成する必要がある。そこで、分散二相流状態の保持を可能とする最適な粒子径を定性的に理解するために数値シミュレーションを用いた評価研究を行った。シミュレーション結果を図 2.2.4-5 に示す。本結果は、配管内径 $\phi 14\text{ mm}$ 、配管長さ 300 mm の中に流速 0.2 m/s にて粒径 1.4 mm、100 μm 、50 μm の粒子をそれぞれ流し、搬送開始 1 秒後における粒子の分散の様子を表しており、図中の点は固体粒子を表現している。シミュレーションの結果より、100 μm 程度まで固体窒素粒子の微細化を行えば、現状の高温超電導ケーブルに用いられているサブクール窒素の流速 (0.2~0.3 m/s) でも管内において固液分離しない見通しを得た。

さらに、生成装置にて生成した固体粒子をテレセントリックレンズおよび高速カメラを用いて撮影し、投影面積を求めて粒子径を算出した。図 2.2.4-6 に掻き取り速度 100 rpm において観測された代表的な粒子の写真を示す。また、図 2.2.4-7、図 2.2.4-8 に掻き取り速度 17 rpm と 100 rpm での粒子径のヒストグラムをそれぞれ示す。本測定では 250 個以上の粒子の投影面積から粒子径を求めた。測定の結果より、掻き取り速度 100 rpm において中央値 119 μm の粒子が生成され、数値シミュレーションから得た目標をほぼ満足することが分かった。さらに、掻き取り速度 100 rpm の場合は、17 rpm に比べて粒径のピークが鋭くなっており、平均粒径が小さくなるとともに、より均一な粒径の生成がなされていることが分かった。

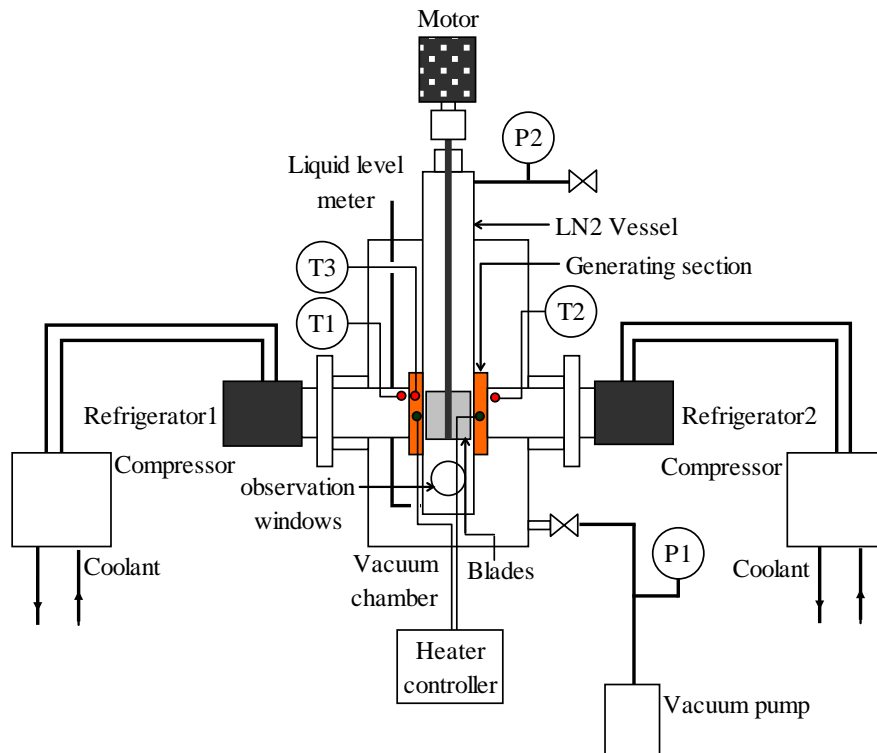


図 2.2.4-1 スラッシュ窒素生成装置の概略



図 2.2.4-2 スラッシュ窒素生成装置の写真

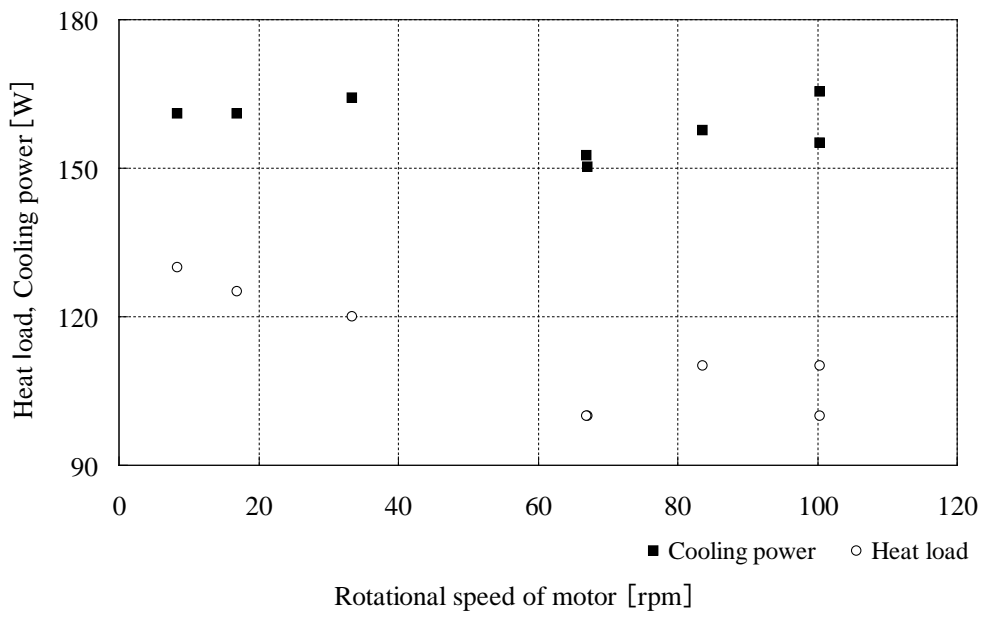


図 2.2.4-3 掻き取り速度と生成熱量

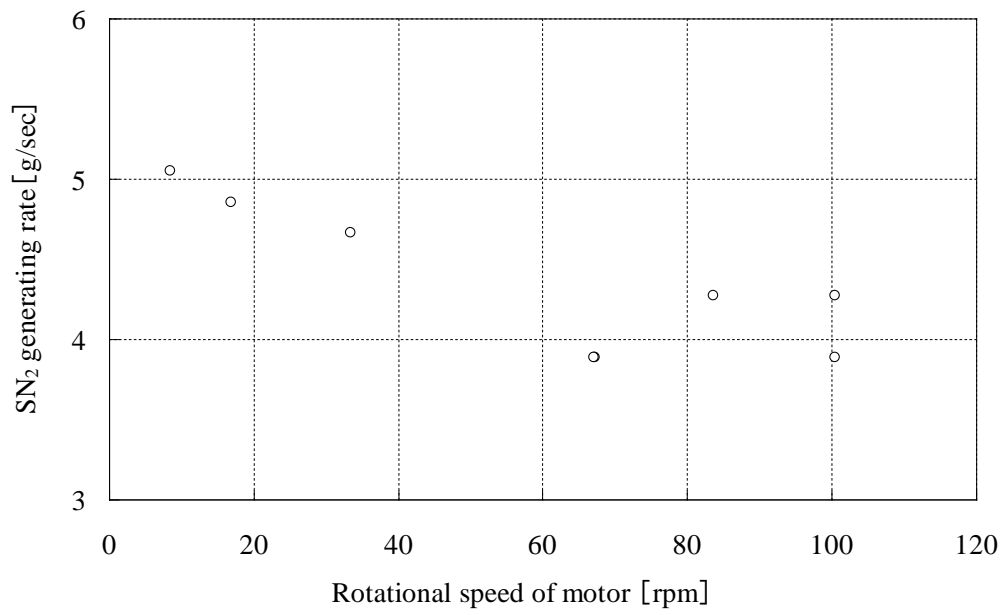


図 2.2.4-4 掻き取り速度と生成量

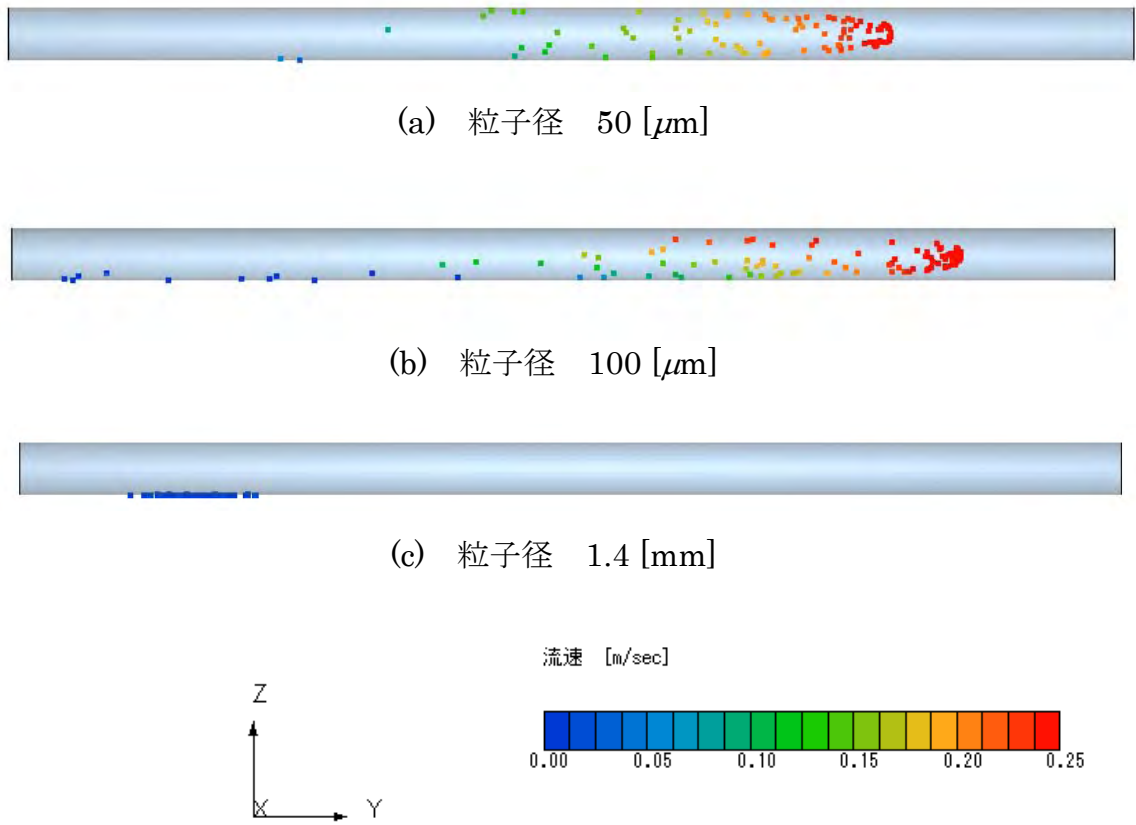


図 2.2.4-5 固体窒素粒子径変更による管内搬送数値シミュレーションの結果

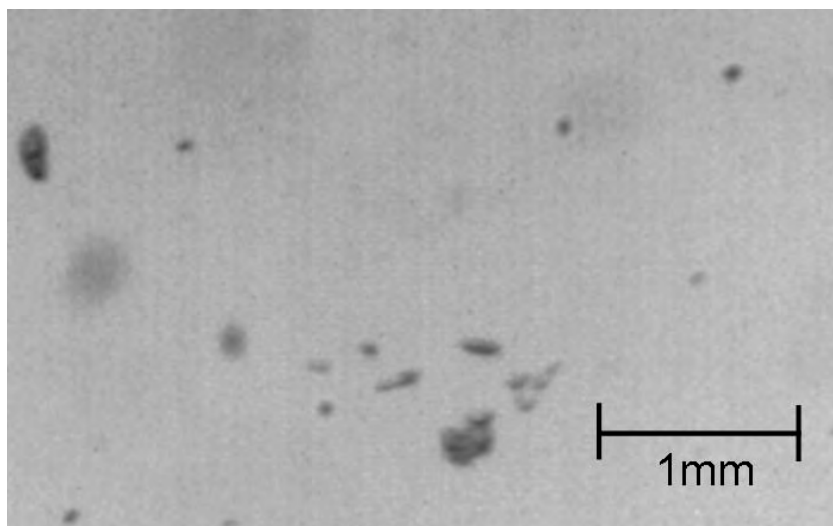


図 2.2.4-6 掻き取り速度 100 rpm における代表的な粒子

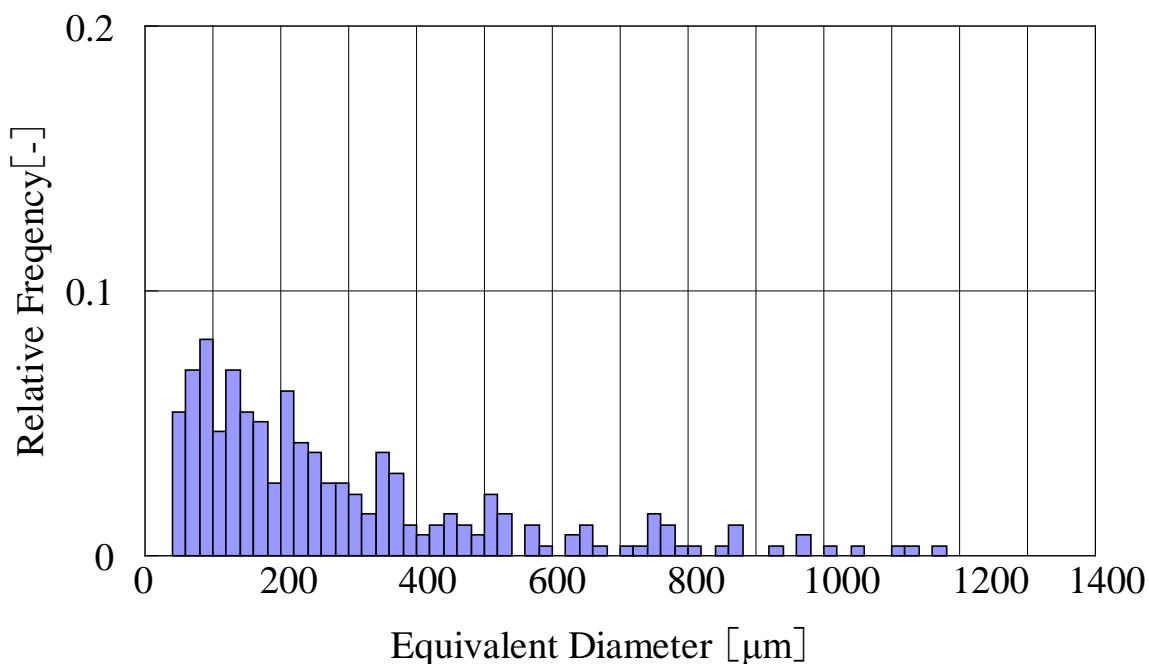


図 2.2.4-7 掻き取り速度 17 rpm における固体窒素粒子径のヒストグラム

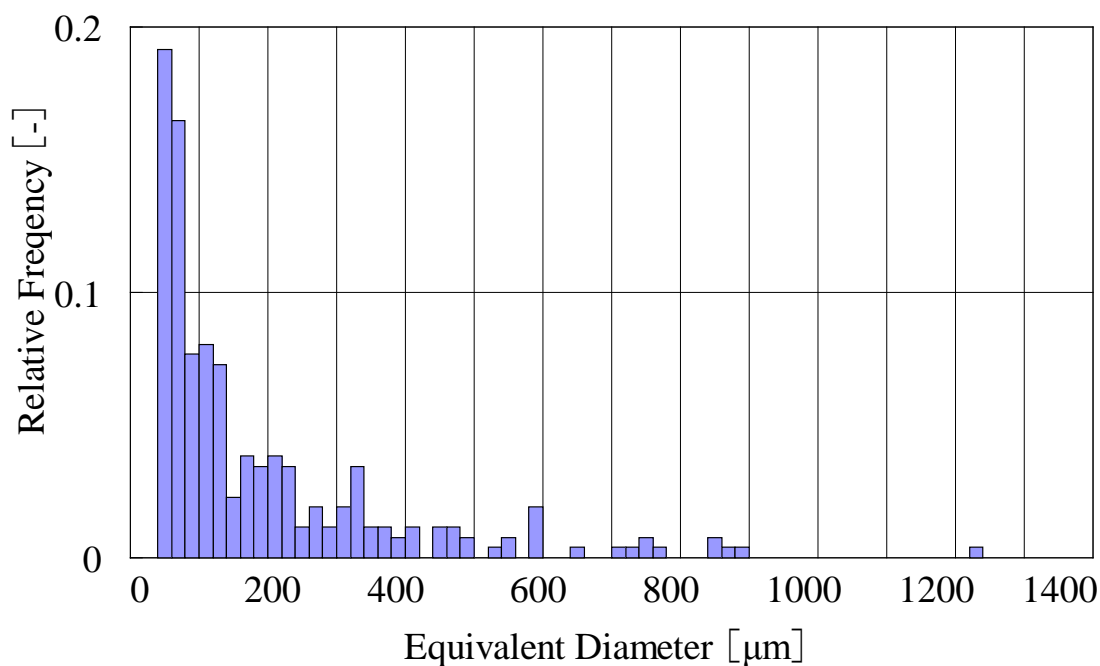


図 2.2.4-8 掻き取り速度 100 rpm における固体窒素粒子径のヒストグラム

(4) 連続生成方法の研究

スラッシュ窒素を実際の高温超電導ケーブル冷却システムに用いる場合、スラッシュ窒素を連続的に生成、搬送し、ケーブル冷却に利用するための運転研究による最適化が必要となる。そこで、スラッシュ窒素を連続的に生成する生成装置が必要となる。固体窒素の生成には低温ガス（ヘリウム等）を用いたバブリング法やエジェクタ法、真空引きで三重点に到達し固体を生成する **FREEZE THAW** 法がある

が、前者は窒素中に溶け込んだガスの分離に課題があり後者は連続的な生成ができない。そこで、2.2.4-2 (3)項に記した伝熱面に固体を生成しそれを剥離させて生成する固体窒素生成法を開発した。

スラッシュ窒素の冷却特性を評価するため、スラッシュ窒素生成装置を組込んだ搬送装置を製作した。搬送装置の概略図を図 2.2.4-9 に、装置写真を図 2.2.4-10 にそれぞれ示す。本装置は、液体窒素を貯槽する液体窒素タンク、連続的にスラッシュ窒素を生成する生成装置、ヒータおよび温度計を設置したヒータユニットから構成した。ヒータユニットは全長約 4 m の二重管で、外管は真空断熱とした。温度計は図 2.2.4-9 に示す 6 箇所の内管中央部に取り付けた。内管の外周部には全長にパイプ式のヒータを設置した。液体窒素タンク内のサブクール状態の液体窒素を生成装置にヘリウムガスを用いて圧送し、生成装置でスラッシュ窒素を生成してスラッシュ窒素を常に混合させながらヒータユニットに送液し、ヒータユニットにて所定負荷を印加して流体の温度を測定した。

なお、今回は試験の都合上スラッシュ窒素の圧送にヘリウムガスを用いたが、ヘリウムガスは液体窒素中に溶解するため実用上使用できないことが明らかとなっている⁽⁴⁾。そこで、次年度以降は循環ポンプを使用してスラッシュ窒素を圧送することで試験を実施する予定である。

ヒータユニット出口での流量約 4.0 L/min、ヒータ負荷約 100 W での試験結果を図 2.2.4-11 に示す。本結果より、ヒータユニットの入口から距離 0.5 m までの流体の温度が、ほぼスラッシュ窒素の温度 63.1 K であり、さらに温度上昇がほとんどないことから、生成装置にてスラッシュ窒素を連続的に生成しながらヒータユニットに搬送することが出来た。

さらに、スラッシュ窒素の固体と液体の比重比を模擬した水とフェノール樹脂の混合流体を用いてコリオリ式質量流量計の流量測定精度の確認を行った。その結果、コリオリ式質量流量計は液体に固体が混合した場合でも十分に流量測定可能であることが分かった。

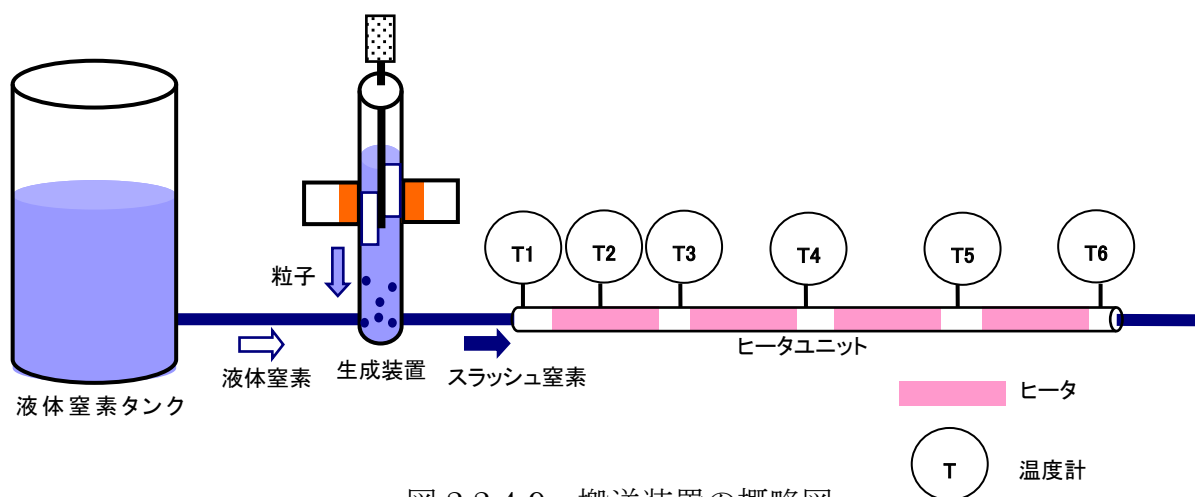


図 2.2.4-9 搬送装置の概略図

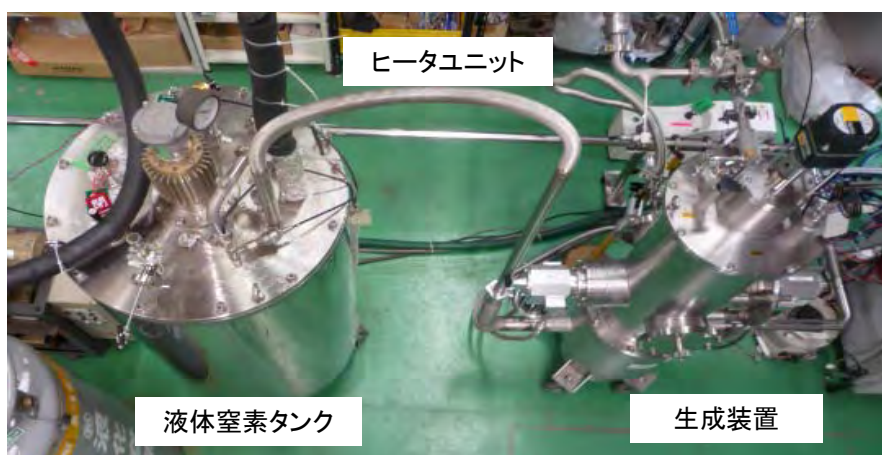


図 2.2.4-10 搬送装置の写真

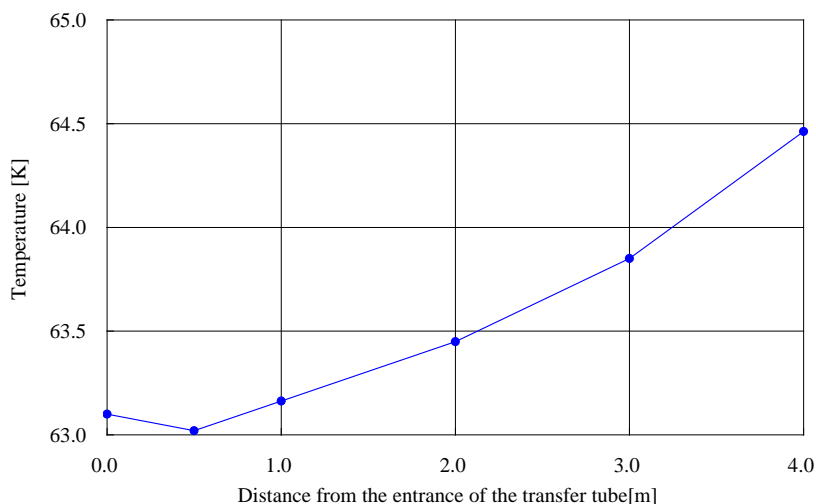


図 2.2.4-11 冷却評価試験結果

(5) 結論

高温超電導ケーブル用新冷媒としてのスラッシュ窒素の冷却特性を評価するため、システムの検討、固相率制御方法の研究、連続生成方法の研究を実施した。

システムの検討については、スラッシュ窒素の冷却システムでは微細な固体窒素を連続的に生成する生成装置、生成装置に付属する冷凍機、一定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、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ことが分かった。最大約 5 g/sec の固体の生成および、平均粒子径 100 μm 程度の粒子生成が出来る生成装置を開発した。

連続生成方法の研究では、スラッシュ窒素を連続的に生成しながら、スラッシュ窒素の温度 63.1 K で流体を搬送し、その特性の確認を行なった。

(6) 成果のまとめ

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。

スラッシュ窒素の冷却システムでは、ケーブル温度が液体窒素冷却よりも低く保たれることや交流損失やケーブル負荷率が低く抑えられることが期待できる。そこで、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。スラッシュ窒素を高温超電導ケーブル冷却システムに用いる場合、スラッシュ窒素を連続的に生成、搬送し、ケーブル冷却に利用するための運転研究による最適化が必要となる。そこで、本研究ではスラッシュ窒素の生成装置を開発し、平均 100 μm 程度の粒子を連続的に生成、搬送出来ることを確認した。

スラッシュ窒素を連続的に生成しながら、スラッシュ窒素の温度 63.1 K で流体を搬送し、その特性の確認を行なった。

(7) 今後の計画と目標達成の見通し

H21 年までに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。

引用論文リスト

- (1) 池内他、“スラッシュ窒素の管内熱伝達特性に関する基礎研究”、低温工学 42 巻、4 号、2007
- (2) H.Yumura、et.al、SEI TECHNICAL REVIEW、No.64 (2007)
- (3) D.E.Daney、V.D.Arp、R.O.Voth、“HYDROGEN SLUSH PRODUCTION WITH A LARGE AUGER”、ADVANCES IN CRYOGENIC ENGINEERING、Vol.35、pp.1767-1776 (1990)
- (4) NEDO 委託事業、平成 16 年度委託業務成果報告書、「交流超電導電力機器基盤技術研究開発」超伝導送電ケーブル基盤技術の研究開発、ケーブル用長尺冷却技術の研究開発、長尺断熱管の冷却特性向上の研究、古河電気工業株式会社委託分、p21-p27 (2005 年 3 月)

2.2.4-3 超電導電力機器の冷却設備の調査研究 (ISTEC)

(1) 実施目的

超電導電力機器に用いる冷却設備の最新動向について調査を行い、超電導電力ケーブル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制度について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普及・導入時の整備対象とする。)

(2) 冷却設備の最新動向

高温超電導機器の冷凍機技術は、現状技術では十分ではなく、超電導機器の開発に伴い、冷凍機技術の開発が望まれている。これまでの冷凍機として、GM 冷凍機、パルス管冷凍機、スターリング冷凍機、タービン冷凍機などがある^(1,2)。しかし、超電導機器に適用できる冷凍機は少なく、MRI 用冷凍機、実験機器用冷凍機などの特定機器に対して製造されてきた。超電導機器としては、ケーブル、変圧器、SMES、モータ、限流器、発電機などがあり、それらの必要な冷却能力と現在の冷凍機能力を図 2.2.4-12 に示す。超電導機器に必要な冷凍能力は図 2.2.4-12 に示す領域と考えられており、現在入手可能な冷凍機で得られる温度領域は 3 K~100 K まであり、超電導機器を冷却するには十分な温度領域を網羅している。1 kW 以下の冷凍能力で冷却可能な超電導機器には、GM 冷凍機、パルス管冷凍機、スターリング冷凍機があり、冷却方法は冷却対象物を直接冷却する、または冷媒を通して冷却する。一方で、10 kW 以上の冷凍機としてタービン式冷凍機があり、冷凍機側で冷却された冷媒 (He) を用いて、冷却対象物の冷媒 (LN₂) を冷却する方式である。しかし、図 2.2.4-12 で示すように、超電導機器に必要とされる冷却能力では、現状の冷凍機能力では不足または過大であり、超電導機器に必要な冷凍能力を持った冷凍機の開発が必要であり、コスト面、運用面、信頼面、システム面などを考慮しての開発が望まれる。1 kW 以下の冷凍方式での大容量化は難しく、開発には至っていないが、タービン式ブレイトン冷凍機では、2 kW 級の開発を行っており、今後の開発動向に注目される。

超電導機器を冷却するには、1 台で行う必要はなく、設置場所、コスト、運用、信頼性、効率、など様々なことを考慮して冷却システムとして設計する必要があり、1 kW 級以下の冷凍機では、メリットを維持し、効率を向上させた大容量化が望まれる。

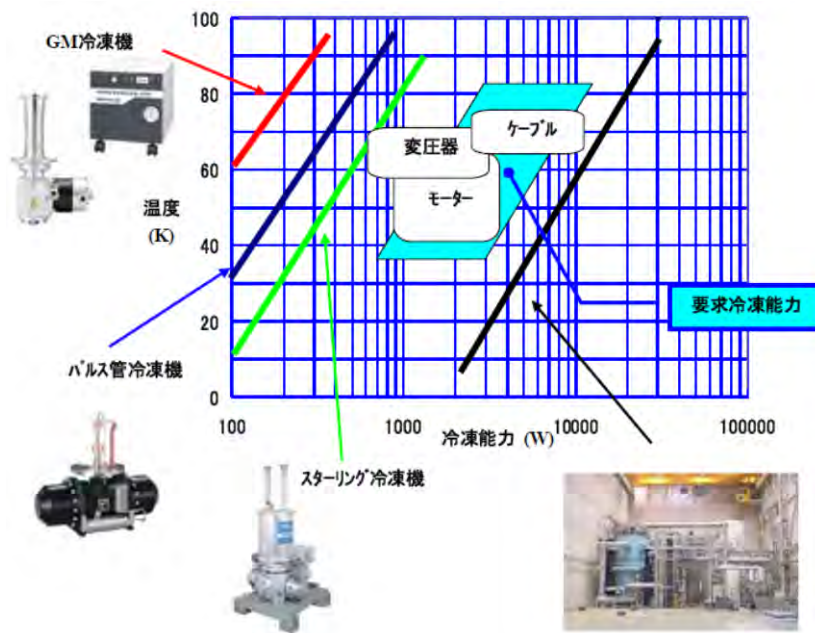


図 2.2.4-12 冷凍機の冷凍能力

(3) 超電導ケーブルの冷却設備の仕様

超電導電力ケーブルを冷却する方法には2つの方法がある。直接冷却と間接冷却である。前者は、冷却対象物（超電導ケーブル等）を冷却する冷媒（ LN_2 ）を直接冷凍機で冷却する。特徴として、①熱交換が1回で済み、熱効率が良い、②冷凍機の出力調整により、冷媒の温度制御に対する応答性が良い、③圧力損失が大きい、などがある。後者は、冷却対象物（超電導ケーブル等）を冷却する冷媒（ LN_2 ）を冷却する冷媒（ Ne ）を冷凍機側の冷媒で冷却する。特徴として、①圧力損失が小さい、長距離輸送に向いている、②熱交換が2回あり、熱効率が低い、③冷却に対する応答性は低い、④故障時、設備の切り離しが可能、などがある。

現在、既存の地中送電ケーブルで採用されている冷却方式は後者であり、強制風冷、強制水冷が主である。ここで水冷冷却について記述する。水冷方式は、冷却対象物（ケーブル）の近郊に水冷管路を布設し、空気およびトラフを通じて冷却対象物を冷却する。冷媒である水は、数百 m～数 km を循環している（途中で圧力損失により流速が低下するため、ブースターポンプを有する場合がある）。冷媒は冷凍機および冷却塔で冷却され、貯水槽（送水用）に蓄えられ、送水ポンプにて循環され、貯水層（帰路用）に戻り、再び冷凍機等で冷却される。この方法では、貯水槽を有するため、冷凍機が故障しても短時間の冷却装置運転が可能である。

過去の超電導ケーブル開発（Super-GM 500 m ケーブル、東電 - 住友 100 m ケーブル）における冷却方法について記す。冷却方式は、直接冷却であり、冷媒である液体窒素（ LN_2 ）を冷凍機にてサブクール状態にし、循環ポンプにて循環・冷却している。このとき使用されたのは、スターリング冷凍機（1 kW 級）である。Super-ACE 500 m ケーブルでは、スターリング冷凍機 6 台（1 kW 級）をケーブ

ル冷却用 4 台、終端部冷却用 2 台として使用した。

本プロジェクトでは、66 kV-5 kA 大電流・低損失ケーブル技術開発においては、ケーブル損失 2.1 W/m-相 (計 6.3 W/m) としている。室温からの熱侵入は 1 W/m と見込まれ、計 7.3 W/m と見積もられる。5 km 間隔で冷却設備を設置では、36.5 kW の冷却能力を有する設備が必要となる。1 km 間隔で 7.3 kW であり、500 m 間隔で 3.7 kW の冷却能力が必要となる。275 kV-3 kA 高電圧・低誘電損失ケーブル技術開発においては、ケーブル損失 0.8 W/m-相 (計 2.4 W/m) としている。室温から侵入熱は 1 W/m-相が見込まれ、計 5.4 W/m と見込まれる。1 km 間隔で冷却設備を設置する場合 5.4 kW、500 m で 2.7 kW の冷却能力が必要となる。長距離ほど高い冷却能力が必要である。もちろん、複数台で冷却能力を満足しても良く、コスト、設置箇所、運用面、信頼性、圧力損失、流量、流速などを考慮して設置することが必要である。

表 2.2.4-1 は、冷却装置の能力を比較したものである^③。スターリング冷凍機は超電導ケーブルとして実績がある。騒音・メンテナンス面で難があるが、他と比較して COP が高い。パルス管冷凍機は次世代として期待され、開発が進められている。メンテナンスの必要はほとんどないが、低容量・低 COP のため難がある。また、大型冷凍機であるブレイトン冷凍機の小型化の開発も行われているが、低 COP、また圧縮機のセパレーターのメンテナンス等、難がある。超電導機器においては、必要冷凍能力に応じた冷凍機を採用するが、COP・メンテナンス・装置サイズなどの技術開発向上が望まれる。

表 2.2.4-1 冷凍機の仕様と能力

項目	スターリング 冷凍機	スターリング パルス管	GM パルス管	ブレイトンサイクル	ブレイトンサイ クル(応用基盤)
冷凍容量 (kW)	1 kW (77 K) 低温での容量低下:大	0.3及び1kW(77 K) 低温での容量低下:大	1 kW/65 K 低温での容量低下:大	10 kW 以上 低温での容量低下:小	2.7 kW (70 K)
メンテナンス 間隔	6000~8000 時間 メンテ所要期間 1ヶ月	長寿命	長寿命	10000 時間以上 メンテ所要期間 1ヶ月	30,000 時間
COP (運転効率)	0.067@77 K (1 kW)	0.38@77 K(10 W)	0.36@77 K (850 W)	0.06@77 K	0.044@70 K
ケーブル 用実績	有	無	無	無	無
現状レベル	カタログ品	評価中	開発中	実用化	開発・ 評価中
騒音	80 dB/台	50~60 dB/台	50~60 dB/台	88 dB/台	
設置スペース (5~10kW)	9 m ³ /kW (*1)	4 m ³ /kW	2 m ³ /kW	8 m ³ /kW	
課題	騒音・保守対策 大容量化が必要	信頼性、熱交換器 大容量化	信頼性、圧縮機、 大容量化	騒音、少容量化、 保守対策	運転効率、 信頼性 保守対策

(4) 法的規制に関して

超電導機器を運用するにあたり関連規制として2つ挙げられる。(i)電気事業法と(ii)高圧ガス保安法である。電気事業法では、開発途中である超電導電力設備に関する規制はない。そのため、実証段階では、電気事業法内の類する規制に則り運用することとなる。また液体窒素による冷却システムを使用するため、高圧ガス保安法に則ることとなる。高圧ガス保安法では、「電気事業法第二条第一項第十六号の電気工作物（政令で定めるものに限る）内における高圧ガス」は適用しないと規定しているが、準拠する必要はある。電気事業法で超電導電力機器に関する明確な規制がないため、実系統導入・運用するためには、位置づけを明確にする必要がある。そのためには、超電導電力機器のデータ・情報などを多く集め、有識者による法整備が必要となる。

電気事業法や高圧ガス保安法の他に、下記のような規制がある。規制には、国、都道府県、市町村による規制があり、騒音・振動規制法や建築基準法などは、設置地域により様々で様ではない。道路法や道路交通法は、機器や機材のサイズや重量など運搬に関するの制約を受ける。安全面では、労働安全衛生法、消防法などの規制を受ける。超電導機器に付属する設備を含め、的確な対応・許可・届出が必要となる。

- ・ 電気事業法（施行規則含む）
- ・ 電力設備に関する技術基準を定める省令 EMF（1mの高さ 3 kV/m以下）
- ・ 高圧ガス保安法 冷凍保安規則（第1種製造設備）冷凍則 一般則
- ・ 消防法
- ・ 労働安全衛生法
- ・ 騒音、振動規制法 設置・居住地域で決まる
- ・ 建築基準法
- ・ 道路交通法
- ・ 道路法
- ・ 環境保健基準（EMF）100 μ T
地上1mにて地中ケーブル：2.7 μ T 架空線：1.5～9.2 μ T

(5) まとめ

冷凍機の能力を確認し、超電導機器に必要な冷凍能力を確認した。また超電導ケーブルを布設するための必要な冷凍能力を検討した。法規則に関しては、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。

2.2.4-4 成果のまとめ

- ・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。
- ・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を開発した。
- ・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。
- ・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となり、約 5 g/s の固体の生成および、平均粒子径 100 μm 程度の粒子生成が出来る生成装置を開発した。
- ・連続生成方法の研究では、スラッシュ窒素を連続的に生成しながら、スラッシュ窒素の温度 63.1 K で流体を搬送し、その特性の確認を行なった。
- ・冷凍機の能力を確認し、超電導機器に必要な冷凍能力を確認し、超電導電力ケーブルに必要な冷凍能力を確認した。
- ・法規制について、現状把握を実施し、的確な対応・許可・届出が必要であることを確認した。

2.2.4-5 今後の計画と目標達成の見通し

定常通電時および事故時の伝熱特性検討について、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。

スラッシュ窒素の研究においては、平成 21 年までに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。

引用論文リスト

- (1) ISTECS 超電導 Web21 2008 年 6 号 「冷凍機技術開発の進展」 P.3-P14
- (2) ISTECS 超電導 Web21 2009 年 6 号 「冷凍・冷凍技術の現状」 P.3-P13
- (3) NEDO 委託事業、平成 21 年度中間評価分科会、「高温超電導ケーブル実証プロジェクト事業原簿」、冷却システムの設計検討 p116-p125 (2009 年 11 月)

2.3 超電導変圧器の研究開発

超電導変圧器は、II-2.1.3 で述べた計画内容に基づき、①Y系超電導線材による低交流損失で大電流容量の巻線技術開発、②冷却システム技術の開発、③限流機能付加変圧器技術の開発、④それらの成果を反映して66 kV/6.9 kV-2 MVA 超電導変圧器モデルの試作と特性検証を行う。これらにより高効率でコンパクトな配電用の66 kV/6.9 kV 20 MVA 級超電導変圧器の実現に資する重要な技術を開発に取り組んでいる（表 2.3-1）。また、併せて変圧器巻線技術、限流機能付加技術、2 MVA 級超電導変圧器モデル検証等の技術開発に必要な Y 系超電導線材（5 mm 幅 3 分割以上、40 A @65 K&0.01 T）の安定製造技術の開発を進めた。

表 2.3-1 超電導変圧器モデルと実用超電導変圧器の諸元

	2 MVA 超電導変圧器モデル	20MVA 級超電導変圧器(実用器)
容量、相数、周波数	2 MVA 3φ, 60 Hz	20 MVA 3φ, 60 Hz
電圧	66 kV/6.9 kV	66 kV/6.9 kV
電流	17.5 A/167.4 A	175 A/1674 A
%インピーダンス	4.5 % (2 MVA 基準)	15 % (20 MVA 基準)
冷却	サブクール液体窒素 (66 K)	サブクール液体窒素 (66 K)

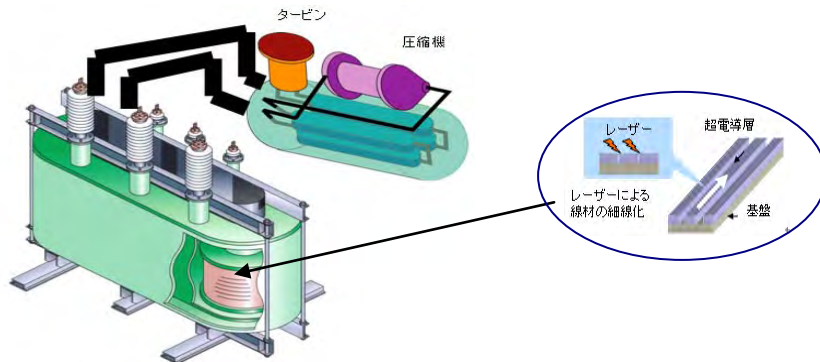


図 2.3-1 2 MVA 級超電導変圧器モデルの概念図

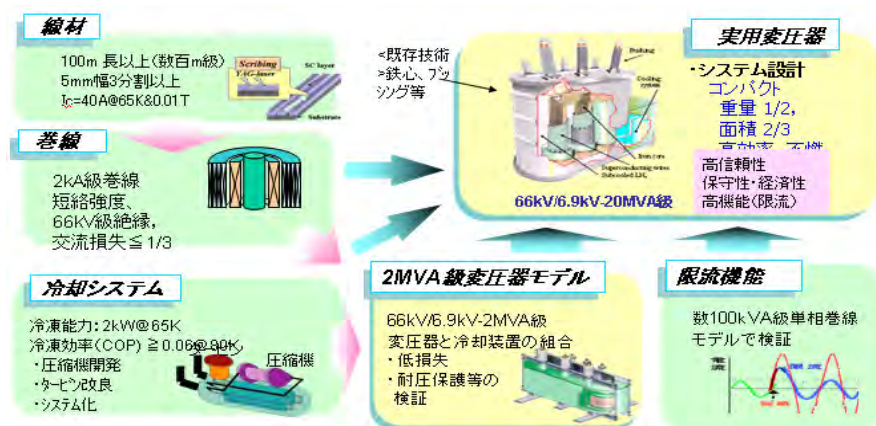


図 2.3-2 超電導変圧器技術開発の体系

2 MVA 超電導変圧器モデルと 20 MVA 級実用超電導変圧器の諸元を表 2.3-1 に、2 MVA 変圧器モデルの概念図を図 2.3-1 に示す。20 MVA 級変圧器の技術を見通すには、耐電圧や機器構成に必要なブッシング、鉄心等は 20 MVA 相当とし、電流に起因する巻線構成等は、20 MVA 級と等価にするために、巻線のターン数および超電導導体の多層並列構造は実機と同等とし、巻線を極力低減することが必要である。それらを考慮して最低容量は 2 MVA とした。超電導変圧器技術開発の体系を図 2.3-2 に、超電導変圧器技術開発のスケジュールを図 2.3-3 に示す。

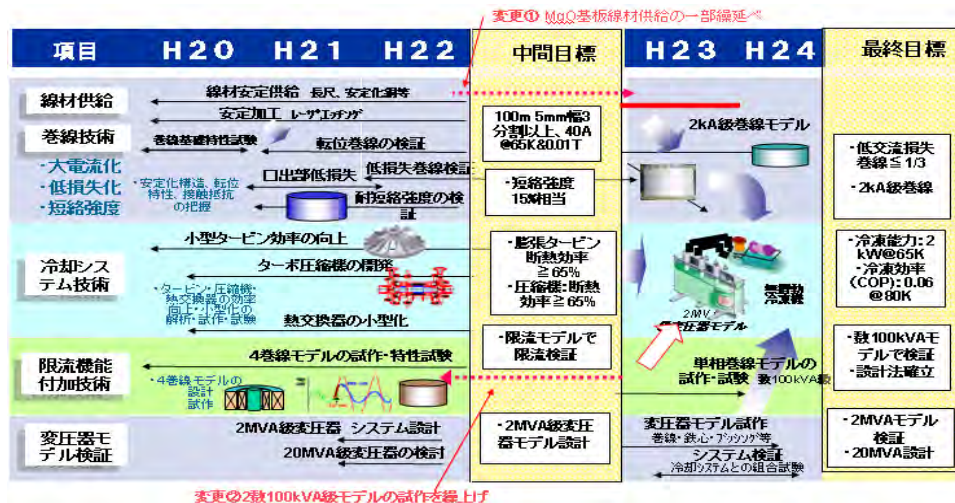


図 2.3-3 超電導変圧器技術開発のスケジュール

※ 開発計画の変更

また、プロジェクト遂行中に当初計画から開発項目を次の 2 項目を変更した。しかし、両変更は基本計画および開発費には影響していない。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。これは、IBAD-MgO 中間層は薄く（膜厚は従来の GZO 層の約 1 / 100）でも結晶粒は高面内配向であり、中間層製造速度の向上（約 100 倍）により線材コスト低減が図れるとともに、細線化や巻線技術の検証も良好であることによる（2.3.1-4、2.3.1-5 参照）。数百 kVA 級限流モデル製作を平成 23 年度から平成 22 年度に前倒した。これは、4 巻線限流モデル変圧器の限流機能試験が良好であり、同限流モデル作製が見極められるとともに、この実証により、変圧器モデルや実用変圧器へのよりの確な限流機能技術の反映が可能になったことによる（2.3.3-1～2.3.3-3 節参照）。

2.3.1 巻線技術開発

20 MVA 級超電導変圧器の実現には、従来の線材では困難であった大電流化、低損失化が課題となる。これら解決には、細線化した Y 系超電導線材を積層し、大電流化した導体による巻線コイル製作技術が必要となる。また、同構造のコイルが系統や変圧器の故障により発生する短絡電流に対しても、変圧器を健全に維持できる強度を有する構造とする必要がある。

そのため、超電導応用基盤技術開発（第 II 期）における検証の結果より、以下の開発を行う。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。

中間目標は、短絡電流（20 MVA 級変圧器%インピーダンス 15 %相当）により巻線が劣化しないことの検証とした。また、巻線関連技術の明確化のため、2 MVA 変圧器モデルの試作・検証および 20 MVA 実用変圧器機の設計を目指したステップ毎の技術開発フローを図 2.3.1-1 に示す。

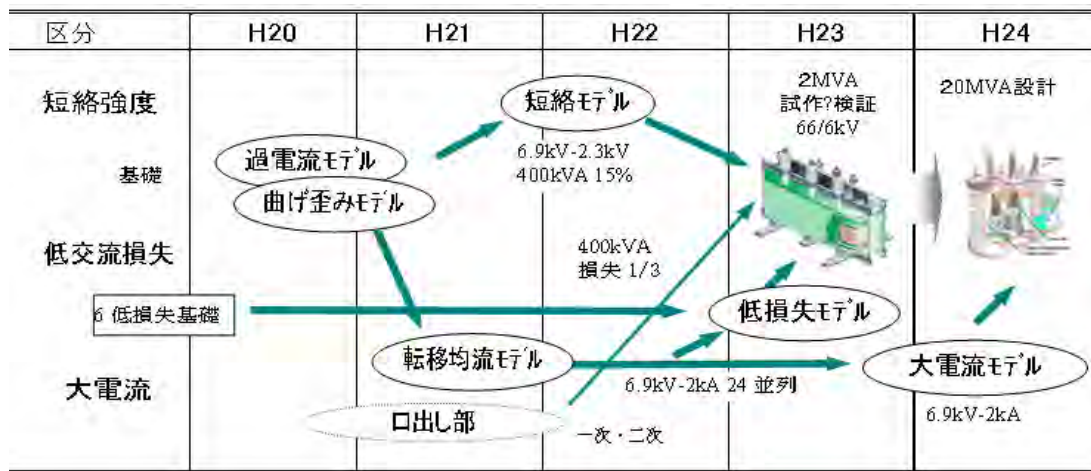


図 2.3.1-4 超電導変圧器の巻線技術開発フロー

2.3.1-1 超電導変圧器巻線の大電流化技術開発（九州電力）

超電導変圧器の二次巻線に必要な 2 kA 級の大電流通電に向け、まず、多層化に伴う安定化材付線材曲げ特性と過電流特性を確認した。線材を多層並列導体（12 重 2 並列）とし、素線を転位することでインダクタンスを合せ素線間電流を均一化する転位均流化の変圧器二次巻線モデル（12 重 2 並列の転位均流巻線モデル）及び二次巻線口出部モデルを設計・製作し、大電流巻線構成技術を確認した。

(1) 曲げ特性の検証

超電導変圧器用巻線に適用する多層転位並列導体用の転位に必要な曲げ特性について、2 種類の間中層線材（GZO 基板、MgO 基板の線材、2.3.4-1(5)節参照）の転位長 L を変化（134～198 mm）させたモデルコイル（内径 ϕ 350、1 重ね 2 並列巻線）を試作し、臨界電流 I_c 特性を試験した。その転位長 L の定義とコイルを図 2.3.1-5 に、試験結果を図 2.3.1-6 に示す。同図から最短長 134 mm の転位長 L において、両種の間中層を使用した超電導線材の転位曲げ試験による I_c 値の低下がなく、健全であることを確認した。

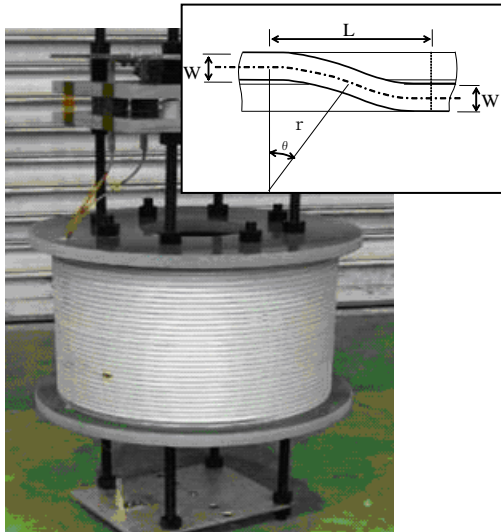


図 2.3.1-5 転位長の定義と曲げ特性
試験モデルコイル

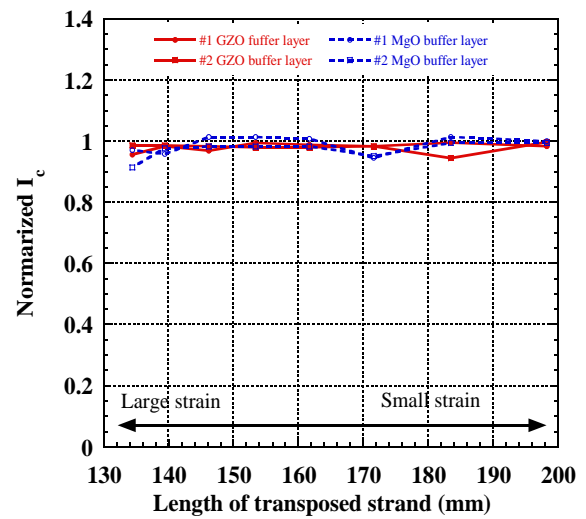


図 2.3.1-6 転位長による曲げ試験結果
(GZO 基板および MgO 基板線材)

(2) 三重ね巻線モデルの検証

超電導変圧器巻線用に必要な多層転位並列導体の構成の基礎検証として、保護層銅付の線材(素線)3枚で構成した導体を適用した三重ね巻線モデル(内径 $\phi 250$ mm、12 turn、巻線長 9.4 m)を試作(図 2.3.1-7)し、過電流試験による各素線の分流および曲げ歪み特性を試験した。試験温度は 66 K とし、直流 I - V 測定、交流通電、直流 I - V 測定の繰返しの順で実施した。過電流の第 1 波は $1395 A_{rms}$ ($465 A_{rms}$ /素線)として、試験コイル両端電圧、巻線温度および超電導線と保護層銅の電流を測定した。

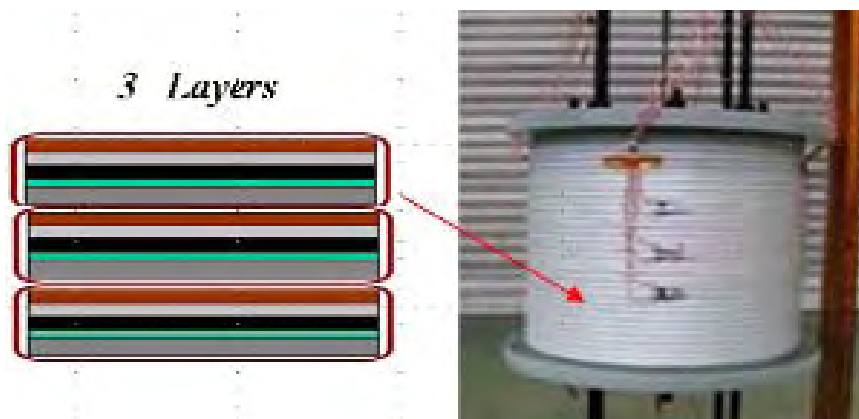


図 2.3.1-7 三重ね Y 系線材による巻線モデル($\phi 250$ mm)

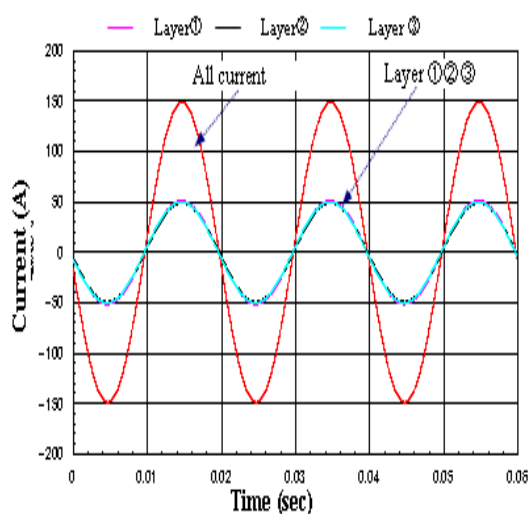


図 2.3.1-8 三重ね巻線の分流特性試験結果（定格電流以下）

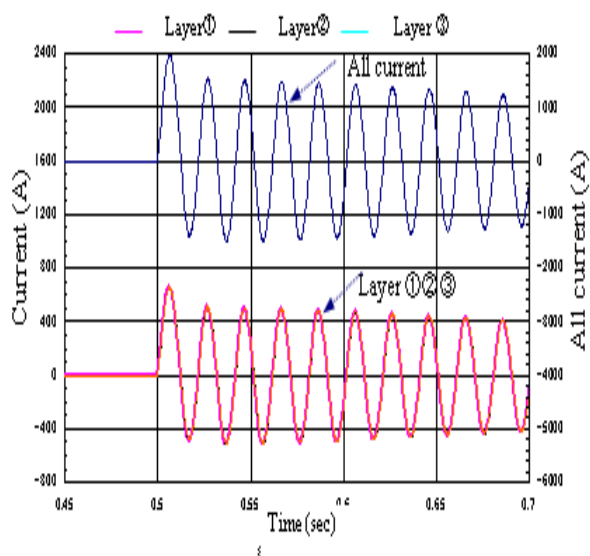


図 2.3.1-9 三重ね巻線の過電流特性試験結果

その結果のうち、三重ね巻線の定格電流以下での通電時の分流特性を図 2.3.1-8 に示す。同図から各素線の電流は均一であり、各巻線に均一に分流しており、転位が有効であることが分かる。また、三重ね巻線の過電流試験結果を図 2.3.1-9 に示すが、過電流に対しても、各巻線の転位が有効で、各素線に均一に分流していることが分かる。また、過電流試験の銅部と超電導部（GdBCO の高温超電導部）の電流特性を図 2.3.1-10 に示す。同図から超電導部の常電導転移により電流が銅部に移動していることが確認できる。さらに、三重ね巻線モデルの規格化したエネルギー特性（MgO 中間層基板線材と GZO 中間層基板線材の I_c を GZO 中間層基板を基準として規格化）を図 2.3.1-11 に示す。同図から、MgO 中間層基板線材と GZO 中間層基板線材の特性は殆ど同等であり、ともに短絡時の線材当たりのエネルギーは 410 J/m （短絡電流が 0.2 s 間通電による巻線の素線に印加するエネルギー）の 2 倍以上のエネルギーまで劣化は見られなく、健全であることが分かる。

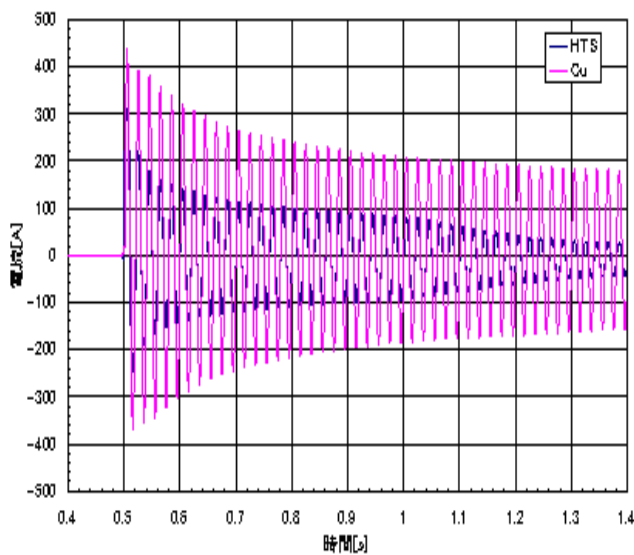


図 2.3.1-10 三重ね巻線モデルの過電流試験結果(MgO 基板線材)

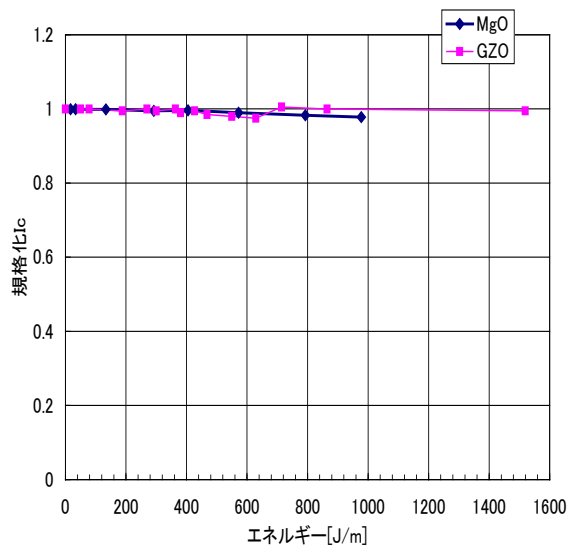
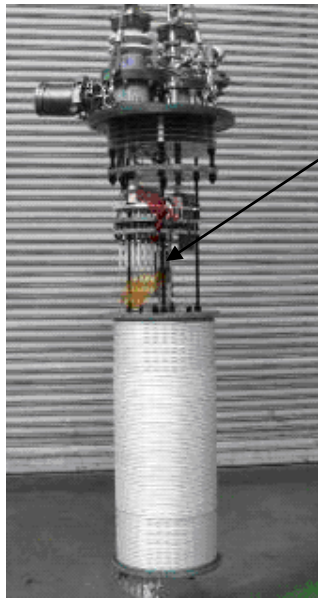


図 2.3.1-11 三重ね巻線モデルの規格化したエネルギー特性(GZO と MgO 中間層基板線材)

(3) 転位均流巻線モデルの検証

変圧器二次巻線の素線の転位によってインダクタンスを同等にして素線間電流を均一化する転位均流巻線モデル(内径 $\phi 350$ mm、12 重ね 2 並列導体、48 turns)について、転位均流化のパラメータを最適化し多層転位並列導体の構成法を確認した。その転位均流巻線モデルの諸元と外観を図 2.3.1-12 に示す。試験ではコイル転位部電圧、両端電圧及び同一の転位長さを 2 箇所測定、8 種類の転位長さ $\times 2=16$ 箇所を測定した。液体窒素温度(77 K)での 800 A 交流通電時の素線電流と全電流の波形を図 2.3.1-13 に、素線間電流分流率を図 2.3.1-14 に示す。同図から各素線間の電流分流率のバラツキは最大で 14 %であり、変圧器用としては十分対応可能なことが確認できた。また、MgO 基板線材と GZO 基板線材の I_c を規格化して比較したが、ほぼ同等の特性であった。



線材	$I_c@77K$	100 A 以上
	安定化銅厚	0.1 mm
	55 m×24 本	1.320 m
コイル	φ350、12 重×2 並列	

図 2.3.1-12 転位均流化モデルの諸元と外観

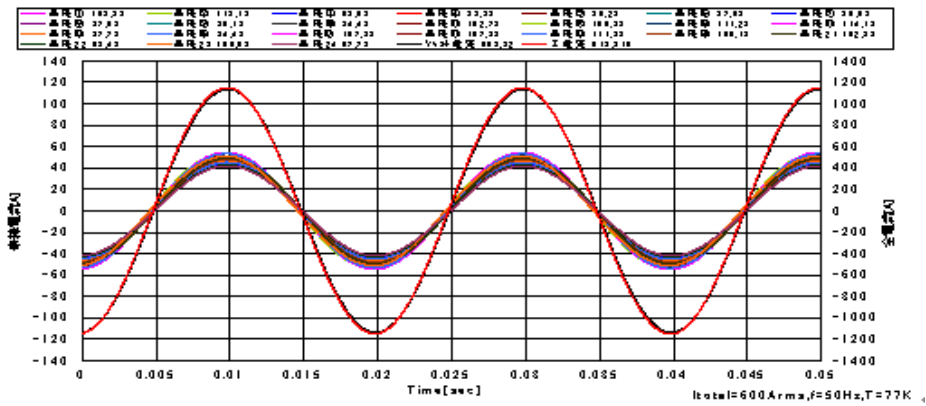


図 2.3.1-13 素線電流と全電流の波形

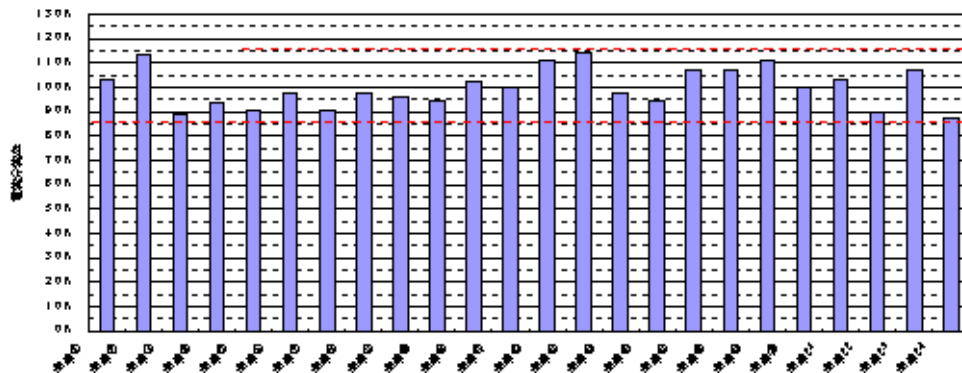


図 2.3.1-14 素線間電流分流率

2.3.1-2 超電導変圧器巻線の低損失化技術開発（九州電力）

「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低損失化の技術成果を反映し、線材長が 100 m 級で交流損失 1/3 以下の細線化線材を用いて、変圧器用巻線モデルの交流損失が無加工線材に対して 1/3 以下となることを検証するため、鉄心を有し 1 次と 2 次巻線からなる低損失化巻線モデルの基礎技術を検討した。また、変圧器巻線の低損失化は、細線化線材の巻線が主体であるが、長尺細線化技術開発と平行し、巻線の層間の接続部における口出し部の特性も確認した。さらに、MgO 基板線材の超電導変圧器用としての適用性についても、本節で総合的に評価して述べた。

(1) 細線化線材による巻線モデルの検証

超電導変圧器の交流損失の低減には線材の細線化が不可欠であり、レーザー加工による長尺 Y 系中間層線材 (5 mm 幅) の 3 分割の細線化技術 (線材単長は 100~300 m) を開発中である。また、20 MVA (66/6.9 kV、175/1,674 A) の超電導変圧器は、系統事故時の過電流は定格電流の約 7 倍である。現設計では、変圧器巻線素線の短絡電流は 465 A (実効値) である。ここで、素線が一定時間の事故電流に耐えるには、Y 系超電導線材の安定化銀層や銅層などの保護構造の最適化が必要である。そのため、今回、5 mm 幅線材を 3 分割した細線化線材による巻線の過電流特性を確認した。

細線化溝加工線材による巻線モデルの外観を図 2.3.1-15 に示す。巻線モデルは内径 ϕ 250 mm、12 ターン、素線数 1、3 分割細線化溝加工線材 (超電導線材の銀層側の上に保護銅層を配置) の各フィラメントの臨界電流 (9.9 m 長) は 33~55 A である。過電流特性は、サブクール液体窒素温度 (66 K) で、上記の短絡電流 (交流) の通電時間を変化させ試験した。細線化線材の過電流特性の通電エネルギーと規格化 I_c の関係を図 2.3.1-16 に示す。100~200 (J/m) 間の規格化 I_c の低下は、冷媒のサブクール液体窒素温度の上昇に伴う影響である。目標エネルギー (410 J/m: 465 A を 0.2 秒間の通電) 以内では、巻線 I_c の低下は殆ど見られないことから、細線化線材は保護銅の配置により、耐過電流特性が確認できた。また、巻線に通電した全電流と保護銅に流れた電流波形を図 2.3.1-17 に示す。

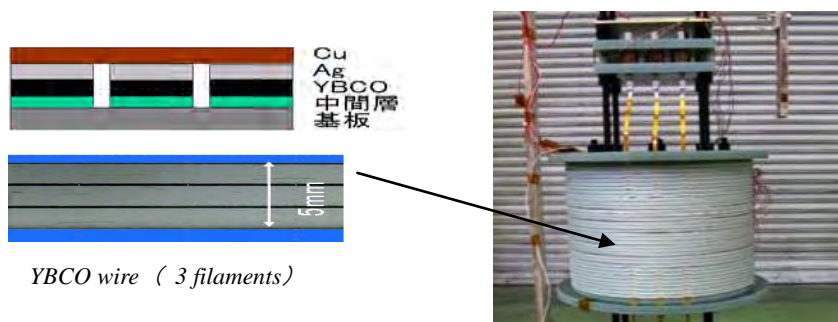


図 2.3.1-15 細線化線材による巻線モデルの外観

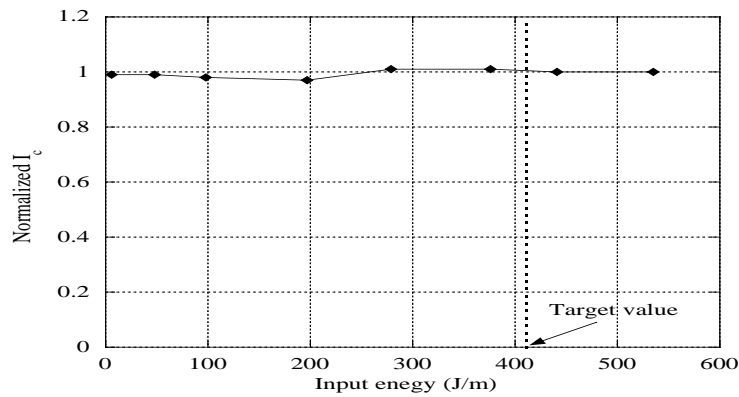


図 2.3.1-16 過電流試験での巻線モデルの規格化したエネルギー特性

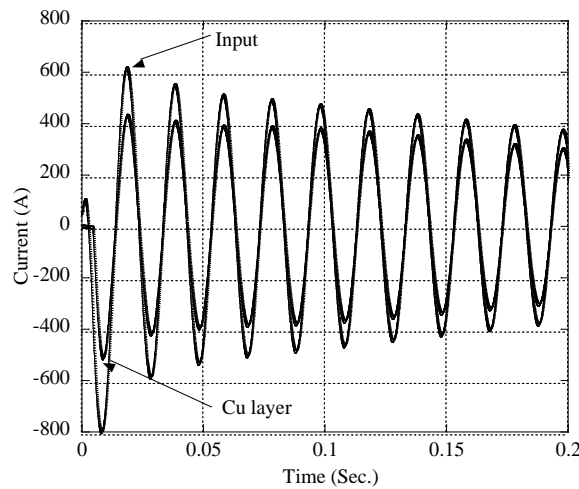


図 2.3.1-17 細線化線材による巻線の電流分布

過電流通電時には、保護銅へ速やかな転流が分かる。今後、変圧器サイズの長尺細線化線材による過電流特性を引き続き検証する。

(2) 巻線口出し部モデルの検証

巻線口出し部モデルにおいて、一括と4分割の口出し部損失を比較し、両方における相違がないことを確認した。図 2.3.1-18 に一括と4分割型の口出し部モデル、図 2.3.1-19a に一括型口出し部の損失、図 2.3.1-19b に4分割型の口出し部の損失試験結果を示す。試験結果は殆ど同等の損失であった。これらの試験成果および口出し部は製作上4分割型が有利であることから、4分割型を適用することとした。

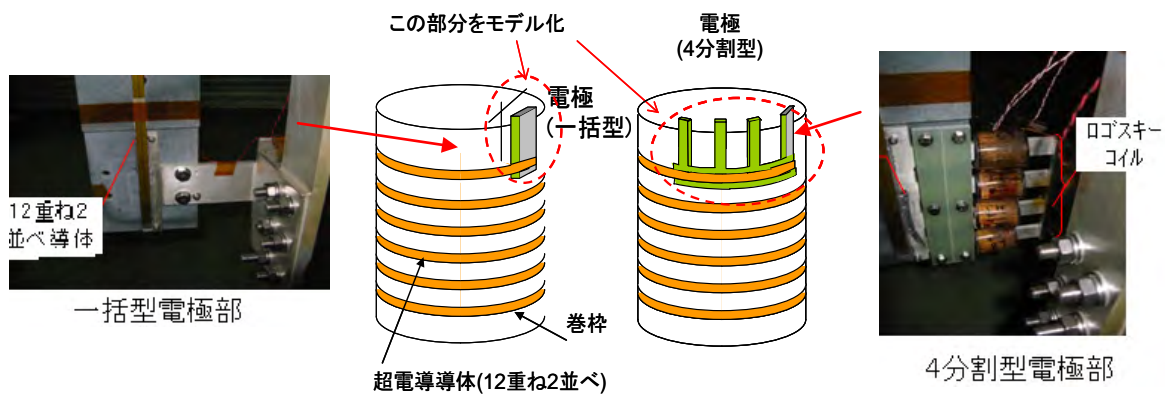


図 2.3.1-18 巻線口出部の試験モデル

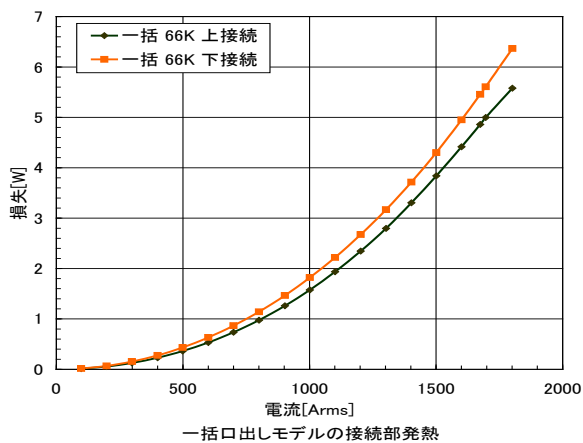


図 2.3.1-19a 一括型口出部の損失

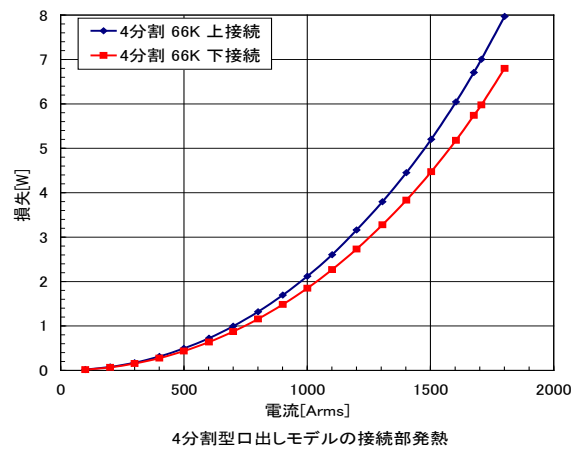


図 2.3.1-19b 4分割型口出部の損失

2.3.1-3 超電導変圧器巻線の短絡強度技術開発（九州電力）

多層転位並列導体を用いた変圧器巻線が、系統事故時等に発生する短絡電流（20 MVA 級変圧器%インピーダンス 15 %相当）による強大な電磁力対しても、劣化せずその機能を健全に維持できる強度を有する巻線構造を開発し、一次・二次巻線からなる鉄心付きの短絡巻線モデル（400 kVA 6.6/2.3 kV）を試作し、短絡電流試験で健全性を評価する。

(1) 短絡モデル変圧器の設計

配電用変電所に設置する電力用変圧器の%インピーダンスは 10 MVA 基準で 7.5 %である。そのため、66 kV/6.9 kV・20 MVA 変圧器の一次巻線の短絡電流は定格電流の約 6.7 倍の 1,166 A となり、素線（3 重ね導体の 1 本分）の短絡電流は 389 A となる。今回の 400 kVA 短絡モデル変圧器は、実用 20 MVA 変圧器の耐短絡特性を検証するため、導体の素線当たりの短絡電流は同等にした。400 kVA 短絡モデル変圧器と 20 MVA 変圧器の仕様を表 2.3.1-2 に示す。Y 系超電導線材の構成は、ハステロイ^{TR}の金属基板上に中間層、超電導層および銀の保護層による積層構造、

線材サイズは 5 mm 幅×約 0.15 mm 厚である。0.3 mm 厚の銅は短絡電流通電時の保護層として、Y 系超電導線材の銀層側に配置した。今回使用した Y 系超電導線材の臨界電流 I_c は 110~170 A/5 mm-w(@77 K,s.f.) 程度である。巻枠寸法は、一次巻線が最小内径φ463 mm×高さ 629 mm、二次巻線が最小内径φ346 mm×高さ 662 mm である。二次巻線 (3 重ね導体) は電流均流化のために転位を行っている。

短絡試験検証のために、短絡モデル変圧器の二次側換算等価回路による回路方程式(1)と熱平衡式(2) (巻線は断熱と仮定) の連立方程式により、短絡電流と温度変化の過渡解析を行った。

$$RI + L \frac{dI}{dt} = V_0 \sin(\omega t) \quad (1) \quad \rho(T) \cdot \frac{1}{S} \cdot I(t, T)^2 = l \cdot S \cdot \gamma \cdot C_p(T) \frac{dT}{dt} \quad (2)$$

ここで、R:巻線抵抗、L:巻線インダクタンス、ここで、 ρ :抵抗率、C:比熱、l:導体長、S:導体面積である。なお、解析条件は、①液体窒素への熱伝達なし、②電気抵抗への寄与は保護層の銅と銀のみで、超電導層とハステロイ TR には通電なし、③熱容量への寄与は保護層の銅と銀およびハステロイ TR のみとした。

保護層の銅厚 (0.1~0.3 mm) と銀厚 (5~50 μm) をパラメータにして解析した。

保護層の対定格電流倍率と到達温度への寄与は、銀厚より銅厚が大きいことが分かった。図 2.3.1-20 に、0.2 秒後の短絡二次電流の対定格電流倍率と到達温度の保護層銅厚依存性の解析結果を示す。図 2.3.1-21 には保護層銅厚 0.3 mm、保護層銀厚 7 μm の場合の解析結果 (短絡二次電流、温度) を示す。0.2 秒後の短絡二次電流 (1,630 Ap) は定格二次電流 (246 Ap=174 Arms) の 6.7 倍、温度上昇 12 K (初期温度 66 K) となった。

表 2.3.1-2. 400kVA 変圧器短絡モデルおよび実用変圧器の巻線諸元

	変圧器短絡モデル	実用変圧器
定格容量、相数	400 kVA-単相	20 MVA-三相
定格電圧(一次/二次)	6.9 kV/2.3 kV	66 kV/6.9 kV
定格電流(一次/二次)	58 A/174 A	175 A/1673 A
%インピーダンス	15 %	15 %
短絡電流印加電圧(一次/二次)	387 A/1160 A	1167 A/11153 A
素線並列本数	1 本 (96 ターン×6 層) /3 本 (96 ターン×2 層)	3 本/24 本
素線当り短絡電流印加電圧 (一次/二次)	387 A/387 A	389 A/465 A

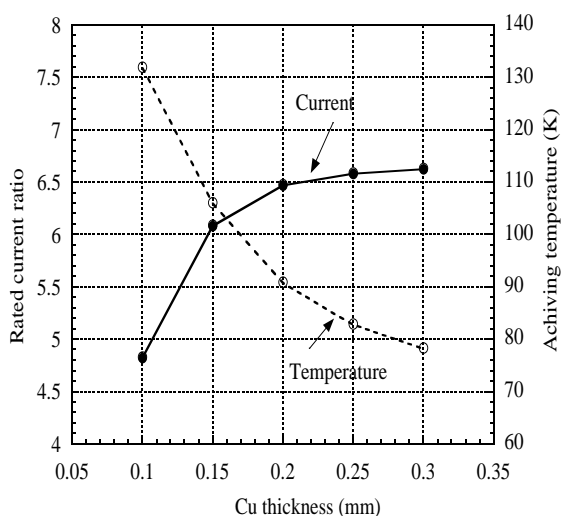


図 2.3.1-20 短絡二次電流の定格電流倍率解析結果

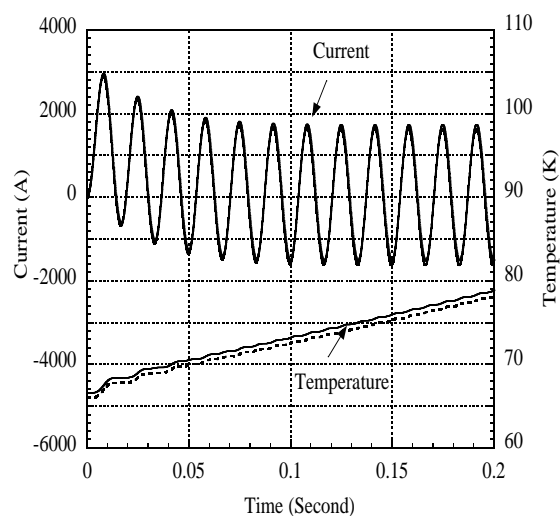


図 2.3.1-21 短絡二次電流と温度上昇と到達温度

短絡モデル変圧器は、外形寸法（鉄心、フレームおよびブッシング含む）は幅 1,200 mm×奥 1,000 mm×高さ 2,300 mm、重量（液体窒素含む）は 2,000 kg である。サブクール液体窒素（66 K）における短絡モデル変圧器の受入試験結果は次のとおりである。① 短絡インピーダンス試験として、一次巻線を短絡し二次巻線に定格周波数・電圧を印加し定格二次電流を通電時の短絡インピーダンス電圧は 15.6 %（設計値 15.3 ± 7.5 %）となった。② 無負荷試験では、一次巻線を開放し、二次巻線に定格周波数の電圧を印加した無負荷損を測定し、無負荷損は 906 W で設計値 1,200 W 以下であることを確認した。③ 短時間交流耐電圧試験として、一次巻線に 16 kV、二次巻線に 10 kV の定格周波数の交流電圧を各々 1 分間印加し、健全であり絶縁強度を有することを確認した。

(2) 短絡試験

短絡電流試験回路の概要は図 2.3.1-22 に示す。同モデル変圧器の巻線温度をサブクール液体窒素温度（66 K）に設定し、一次側に 6.9 kV を印加後二次側の遮断器によって、0.2 秒間の短絡試験を実施した。図 2.3.1-23 短絡電流試験時の保冷容器の液面と圧力、図 2.3.1-24 に短絡二次電流波形と一次側電圧波形を示す。短絡一次電流の第 2 波（JEC2200 による計測値）は $1460 \text{ Ap} = 1,030 \text{ A}_{\text{rms}}$ であり、定格電流の 6 倍程度、0.2 秒後もほぼ同程度であり、短絡に伴い発電機電圧が低下（15 %程度）していることを考慮すると事前の解析値とほぼ同じ値である。試験後の巻線インピーダンス試験結果は、試験前は 15.36 %で、試験後は 15.34 %となり、JEC の短絡インピーダンス変化の判定基準（ ± 2 %以内）を満たしている。また、図 2.3.1-25 に短絡電流試験前後の巻線の電圧・電流特性を示す。試験前後でほぼ同一であり巻線の健全性が確認できた。

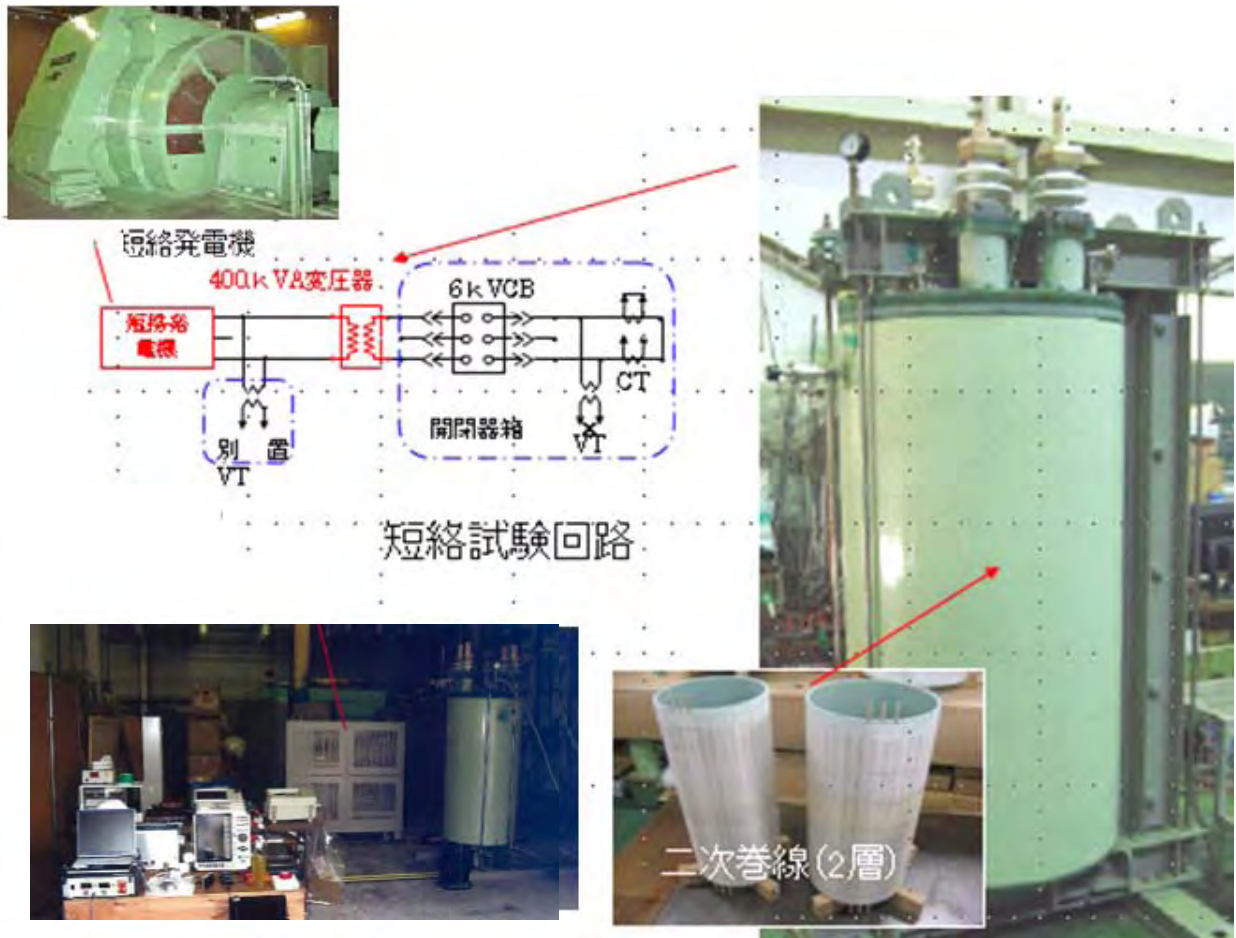


図 2.3.1-22 400 kVA 短絡モデル変圧器と試験回路

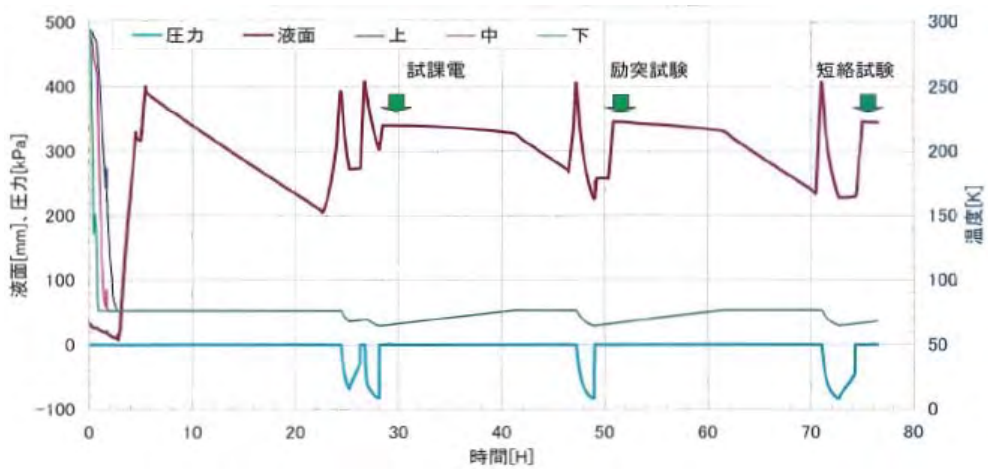


図 2.3.1-23 短絡電流試験時の保冷容器の液面と圧力

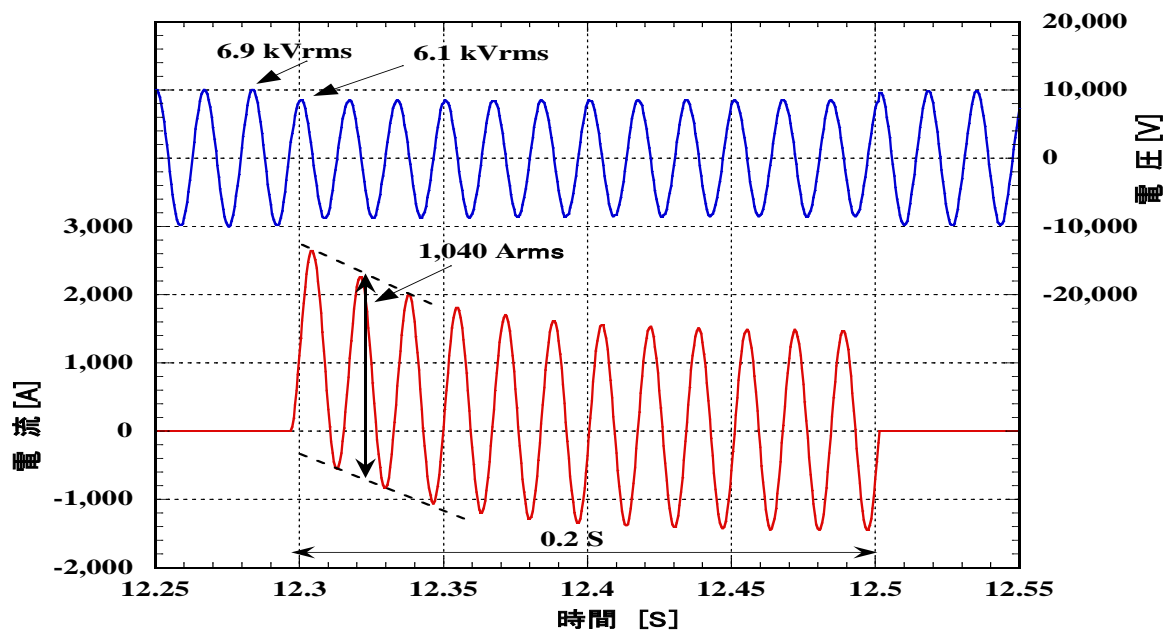
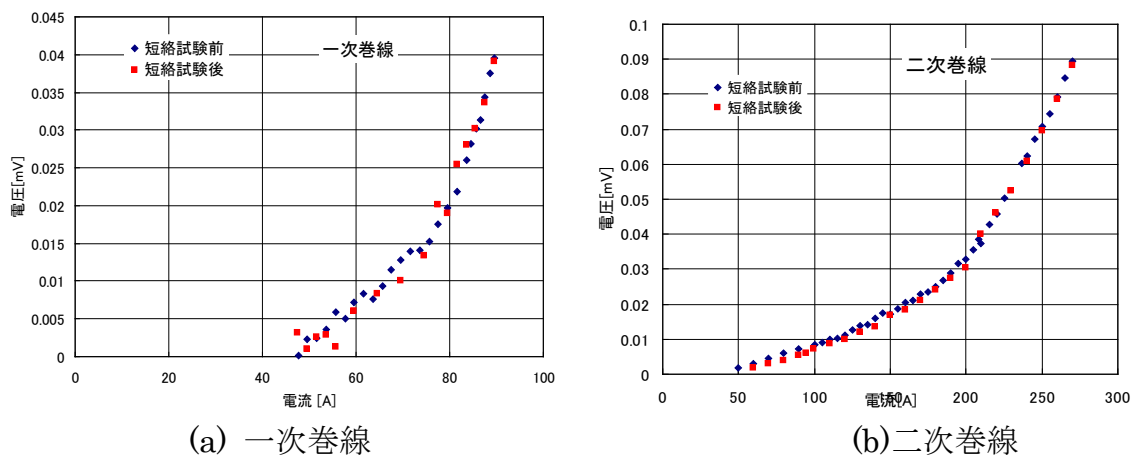


図 2.3.1-24 短絡試験時の電圧と電流波形



(a) 一次巻線 (b) 二次巻線
図 2.3.1-25 短絡電流試験前後の巻線の電圧・電流特性

2.3.1-4 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 (九州大学、ISTEC)

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では、フィラメント加工により低交流損失化を図った細線化 Y 系超電導線材を用いて線材素線レベルでの低交流損失性を維持したまま大電流容量導体・巻線 (ソレノイド型) を構成する技術の確立を目指すことを目標とした。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。

研究内容は、実器設計手法の確立のため、転位並列導体の電流分流特性を評価し

うる数値解析プログラムを作成し、変圧器巻線に相当する単層コイルの転位方法について検討した。転位方法の不明点を明確にし、実験によって明らかにすべき課題を抽出し、検証モデルコイルを設計した。また、転位並列導体を多層コイルに巻いた場合において、電流分流特性を均等にする普遍的転位法を数値解析により見だし、一部を実験的に検証した。例として、図 2.3.1-26 は 6 本並列導体を用いて最適層数 (24 層) 以上の層数を巻く場合に、電流分流を均等にするための転位パターンである。また、3 本並列導体については、超電導線材を用いて多層コイルを構成し、実験的に最適転位パターンの妥当性を検証した。図 2.3.1-27 は巻線中の超電導 3 本並列導体コイルを、図 2.3.1-28 は素線間電流分流の測定結果を示している。理論計算通りほぼ均等に流れていることがわかる。

研究成果として、転位並列導体の多層コイル形状における電流分流特性を均等にする普遍的転位方法を見出し、一部を実験的に検証した。また、並列導体構成に伴う付加的交流損失についても理論・実験の両面から検討を進めた。

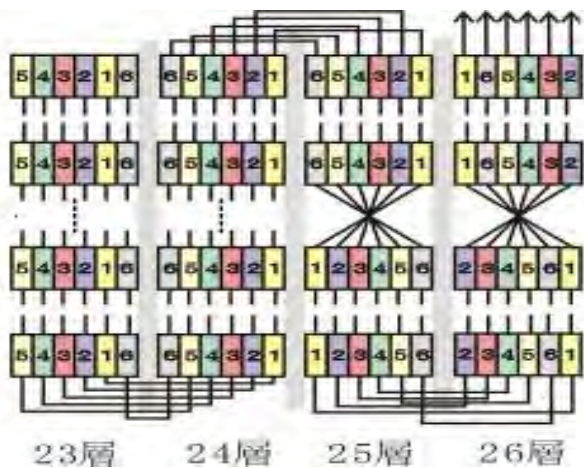


図 2.3.1-26 最適転位層数以上の層数における 6 本並列導体の層間・層内転位

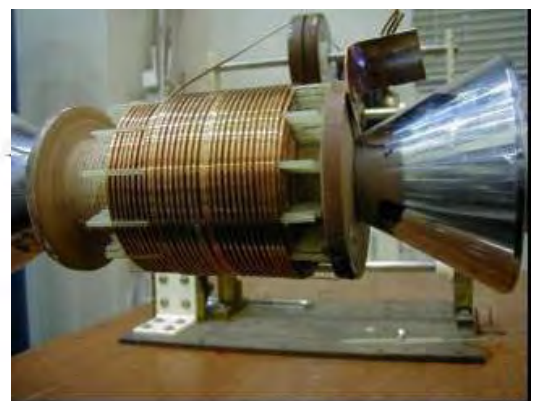


図 2.3.1-27 巻線中の超電導 3 本並列導体

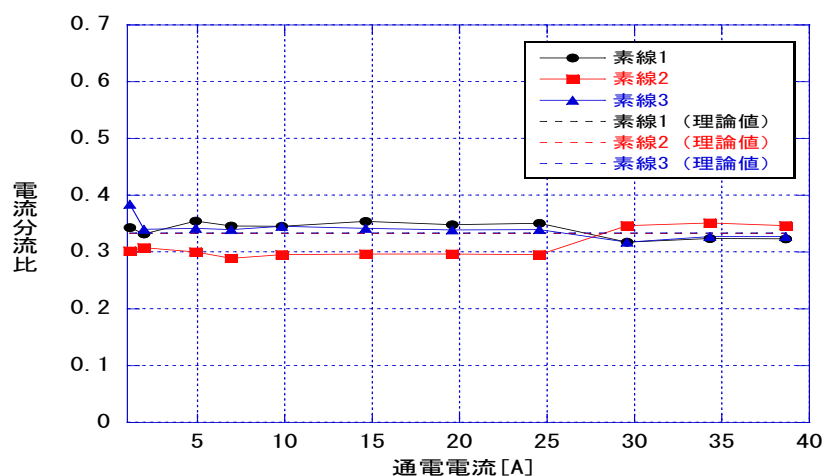


図 2.3.1-28 超電導 3 本並列導体コイルの素線間電流分流測定結果

2.3.1-5 MgO 基板線材の超電導変圧器用線材としての適用性評価(九州電力、九州大学、ISTEC)

IBAD-MgO 中間層は薄く（膜厚は従来の GZO 中間層の約 1 / 100）でも結晶粒は高配向であり、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特長を有す(2.3.4-1(5) 節参照) ことから、超電導変圧器用の巻線としての MgO 基板線材の適用性を、過電流特性、曲歪み特性、線化線材の素線間抵抗の観点から、次の通り検証した。その結果は、

- ① 過電流特性として、GZO 中間層基板線材と同様に、巻線モデルによる過電流通電試験を実施したが、 I_c 劣化は無く良好であった(2.3.1-2(1)節参照)。
- ② 曲歪み特性として、GZO 中間層基板線材と同様に、転位部を模擬した曲げ巻線モデルによる通電試験を実施したが、 I_c 劣化は無く良好であった(2.3.1-1(1)節参照)。
- ③ 細線化線材の素線間抵抗は $1 \text{ M}\Omega/\text{cm}$ (GZO 中間層基板と同等) で良好である(2.3.4-1(5)節参照)。

である。これらの技術面及び線材コスト低減を考慮して、今後、MgO 中間層基板線材を適用することとした。このため、線材供給工程を平成 23 年度まで延期した。

2.3.1-6 超電導変圧器巻線技術開発のまとめ

次の開発成果から中間目標は達成できた。追加成果として、線材コスト低減が図れる MgO 中間層基板線材も適用性が確認できた。

- (1) 超電導変圧器巻線の大電流化技術開発
 - ・ 大電流通電に向け、安定化銅付線材の単線と三重ね巻線モデルによる曲げ特性と過電流試験で短絡エネルギー (410 J/m) の 2 倍での健全性を確認した。
 - ・ 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 幅を 3 分割)した巻線モデルの過電流試験で健全性を確認した。
 - ・ 変圧器二次巻線の口出し部モデルで、接続部損失が保冷容器の熱侵入量等より十分低いこと、4 分割型方式は損失で一括型と同等だが製作性が有利である。
 - ・ 今後、100 m 級 3 分割線材の低損失モデルにて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・大電流容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 中間層基板線材の超電導変圧器用線材としての適用性評価<追加成果>
 - ・ IBAD-MgO 中間層基板は薄く、中間層付き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 M Ω /m 以上)の観点から:実証し、良好な結果を得た。

2.3.2 冷却システム技術開発

冷却システムは、前プロジェクト「超電導応用基盤技術開発（第Ⅱ期）」（平成15～19年度）にて開発した小型膨張タービンの成果を活用して、1.1.3-2節の目的や1.2.3-2節に述べた計画内容に基づき、超電導変圧器用として、①小型膨張タービンの高効率化、②小型ターボ圧縮機開発、③熱交換器の最適化・小型化、④冷凍機開発と冷却システム開発、⑤冷凍機と機器とのインターフェイスの検討を進めた(1-2)。

また、中間目標は、小型膨張タービンの断熱効率65%以上、小型ターボ圧縮機の断熱効率65%以上とし、本プロジェクト前半では小型膨張タービンと小型ターボ圧縮機を中心に開発する。また、本プロジェクト後半では、最終目標は、65K運転時の冷凍機冷凍能力2kW以上、80K運転時の冷凍機効率(COP)0.06以上とし、2MVA変圧器と組み合わせて、性能を実証する計画である。

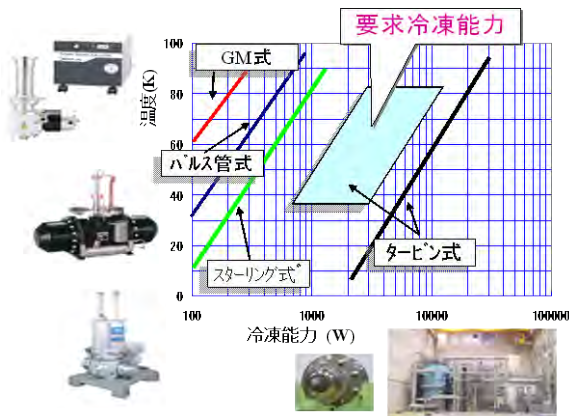


図 2.3.2-1 各方式の冷却システムと本開発システムの位置づけ

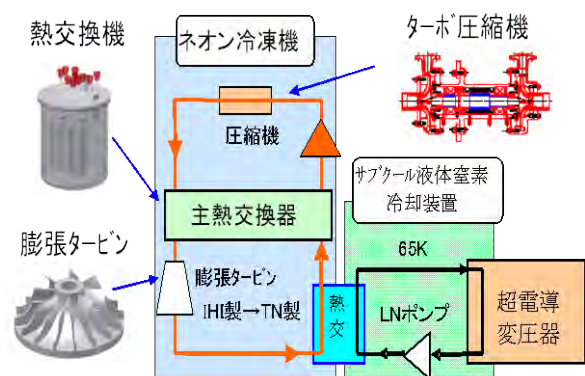


図 2.3.2-2 本開発冷却システムの構成（ネオン冷却システム）

	H20	H21	H22	中間目標	H23・H2	最終目標
タービン		小型タービン効率の向上		<ul style="list-style-type: none"> 膨張タービン断熱効率 $\geq 65\%$ 圧縮機：断熱効率 $\geq 65\%$ 		冷凍能力： 2kW@65K 冷凍効率 (COP)： :0.06@80K
圧縮機		小型・高効率ターボ圧縮機				
熱交換器		熱交換器の小型化				
システム化		小型・高効率システム設計			2MVA変圧器とシステム検証	

図 2.3.2-3 超電導変圧器対応線材の安定製造技術開発フロー

2.3.2-1 小型膨張タービンの高効率化（大陽日酸）

膨張タービンは冷凍機の性能を大きく左右されるため高効率であると同時に、低

温部に配置されるためメンテナンスフリーが要求される。そのため、膨張タービンは非接触で磨耗がなく、高速回転での安定性に優れた 5 軸制御の磁気軸受を採用するとともに、タービンで発生した動力を電力として回収する発電機制動方式とした⁽³⁻⁴⁾。

(1) タービンの設計・製作

膨張タービン形式は、小流量でも効率が高いラジアルタービンを採用した。冷凍機のプロセスシュミレーションから求めた膨張タービンの設計仕様を表 2.3.2-1 に示す。製作したタービンのノズルとインペラを図 2.3.2-4 に示す。ノズルの羽根形状は直線翼、羽根の数は 15 とし、インペラは半径方向から流入し、軸方向に流出する 3 次元の混流型とした。インペラの羽根枚数や羽根形状はタービン効率に大きく影響するため、数種類を検討した。ノズル材料は低温での機械的特性に優れた SUS304 とし、インペラは軽量化を図るためアルミ合金とした。

表 2.3.2-1 タービン・圧縮機の設計仕様

	タービン	圧縮機
回転数	1250 rps	617 rps
入口圧力	1.0 MPa	0.5 MPa
出口圧力	0.5 MPa	1.0 MPa
入口温度	68 K	303 K
流量	1200 Nm ³ /h	1200 Nm ³ /h
インペラ外径	32 mm	155 mm

今回、設計・製作した発電機制動磁気軸受式膨張タービンの構造を図 2.3.2-4 に示す。タービンは入口と出口の配管を下側にしてコールドボックス(真空断熱)に垂直に取り付けられ、大口径フランジ部分でシールされている。常温部には磁気軸受と発電機が配置され、発電機の周囲は水冷構造となっている。タービン本体はカートリッジ構造であり、コールドボックス内は真空状態でタービンのインペラ、ノズル及び軸受等の交換が可能である。同図に高速回転するタービンロータの外観写真も示す。手前にタービンインペラがネジ止め固定され、中央にはアキシャル磁気軸受のスラストディスクが配置され、発電機のロータエレメントはスラストディスクの奥側に焼きばめ固定され、ロータの総重量は 1.87 kg である。

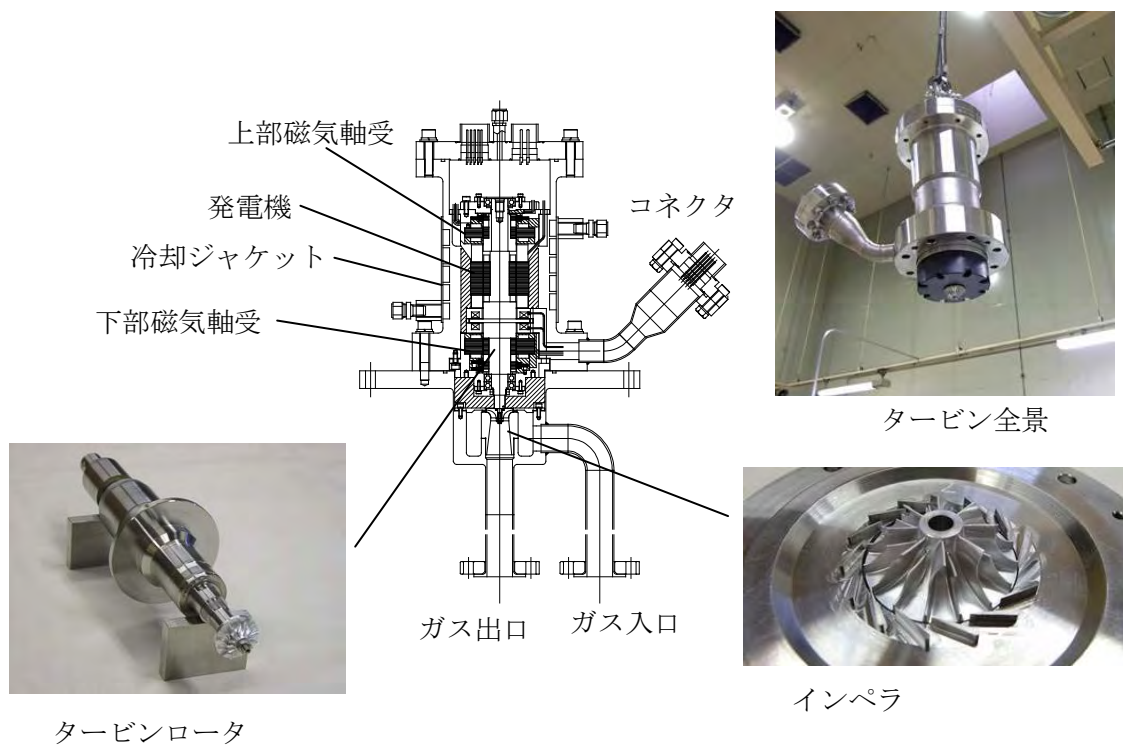


図 2.3.2-4 タービン構成

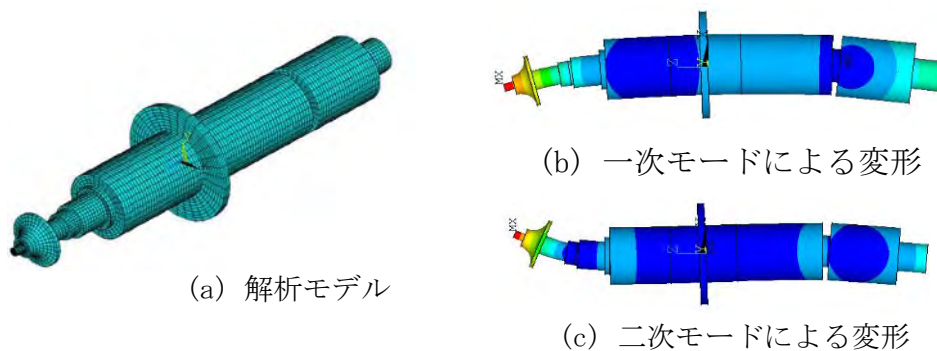


図 2.3.2-5 タービンロータ固有振動解析

図 2.3.2-5 に有限要素法によるタービンロータの固有振動解析結果を示す。(a) は解析モデルのメッシュ図、(b) は一次の曲げ固有振動モード、(c) は二次の曲げ固有振動モードである。一次の曲げ固有振動数は 1449 Hz、二次の曲げ固有振動数は 3290 Hz であり、タービンの回転数 1250 rps と 15 % 以上離れていることが確認された。タービンをネオン冷凍機に搭載する前にタービン単独で高圧のネオンガス中で 1300 rps まで回転させたが、磁気軸受で支持されたタービンロータの振動は小さく、安定に運転できることが確認できた。

(2) タービンの運転

膨張タービンをネオン冷凍機に搭載して磁気軸受の安定性を確認し、タービンの流量や効率を測定した。タービンの起動は、まず、磁気軸受を動作させてタービン

ロータを非接触浮上させる。ネオン冷凍機の主圧縮機を起動した後、インバータによりタービンの発電機を 1200 rps までモータモードで駆動する。タービンの入口圧力を上昇させるとタービンで発生した動力によってインバータの励磁周波数よりタービンロータの回転数が上昇し、モータは発電機として動作するようになる。タービン入口圧力が定格に到達するとタービンの回転数は 1250 rps に近づく。図 2.3.2-6 に起動から停止までのタービンの回転数(約 1150 rps)と流量の変化を示す。タービンが停止する前のデータは、タービンが定格の入口圧力、温度に到達した時のデータであり、この時のタービン流量は 1200 Nm³/h で定格流量と一致している。図 2.3.2-7 と図 2.3.2-8 に主圧縮機とタービンの圧力変化(ゲージ圧力、単位 MPaG)と温度変化を示す。タービンの入口、出口温度は起動直後は室温であるが、約 3 時間後には定格付近の 70 K まで温度降下している。

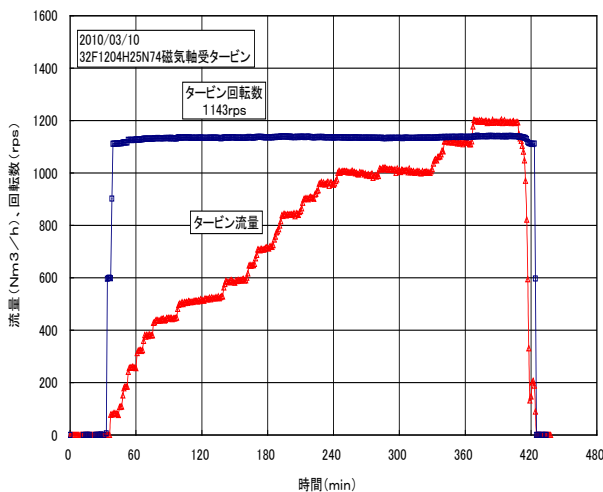


図 2.3.2-6 回転数と流量の変化

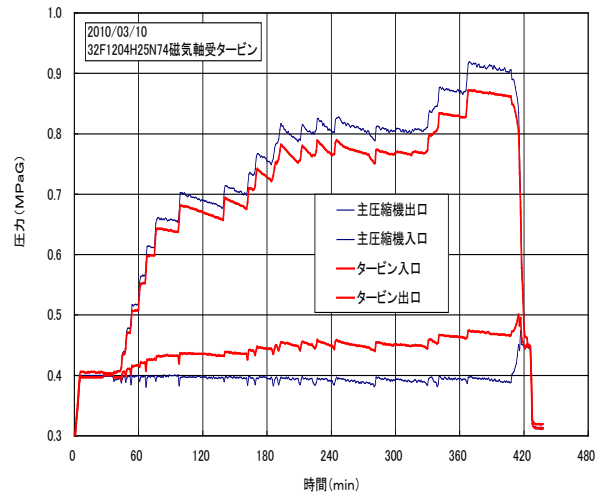


図 2.3.2-7 圧力変化

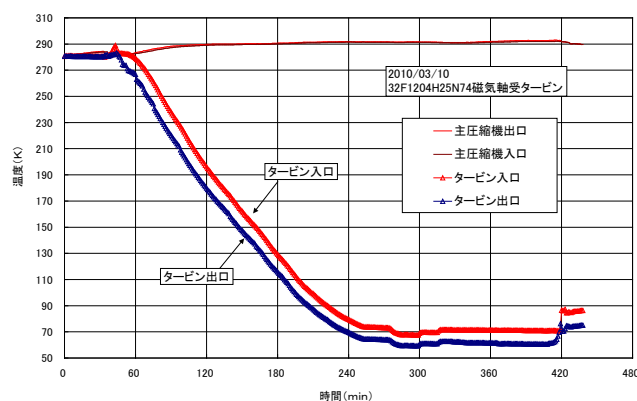


図 2.3.2-8 温度変化

(3) タービンの性能

タービンの断熱効率 η_T を(1)式に、理論断熱噴出速度 C_0 (タービン入口から出口まで等エントロピ変化した時のガスの流速) は(2)式示す。タービンの効率に影響

を与える重要なパラメータとして速度比 U/C_0 が一般に用いられる。ここで、 H_1 ：タービン入口エンタルピ、 H_2 ：タービン出口エンタルピ、 H_{2S} ：断熱膨張（等エントロピ変化）した時のタービン出口エンタルピ、 U ：タービンインペラの周速度である。

$$\text{断熱効率 } \eta_T = \frac{H_1 - H_2}{H_1 - H_{2S}} \quad (1) \quad \text{理論断熱噴出速度 } C_0 = \sqrt{2(H_1 - H_{2S})} \quad (2)$$

タービンの性能に大きな影響を与える因子としては多くが挙げられるが、このネオン用タービンではインペラ径が 32 mm と超小型であるため、インペラ羽根形状がタービン効率にどの程度の影響を与えるかに着目し、3種類のインペラを製作した。

図 2.3.2-9 に 3 種類のインペラ形状を示す。図(a)は羽根枚数 12 枚のフルブレードインペラ 32F1204、図(b)は 16 枚のフルブレードインペラ 32F1604、図(c)は 8 枚はフルブレード、8 枚はスプリッタブレードの 32S1604 である。3種類とも外径 32 mm、羽根厚さはハブ側が 0.5 mm、シュラウド側が 0.3 mm、羽根出口の直径と羽根角度はすべて同じとしたが、32S1604 インペラの外径部の羽根高さは 2.2 mm と他のインペラよりも 0.3 mm だけ低くした。

図 2.3.2-10 にネオン冷凍機に搭載して試験したタービン効率の実測値を示す。3種類のインペラのタービン効率の最大値は 70 %以上で、スプリッタブレードの 32S1604(□)が他のインペラ(○、△)よりも効率はやや低めとなっている。32S1604 インペラの試験ではノズル羽根出口角度が 71 度のノズルリングと組み合わせ、羽根高さを他のインペラよりも 0.3 mm 低くしたことが、他のインペラよりも効率が低くなった原因と思われる。いずれにせよ、3種類とも目標タービン効率 65 %を大きく上回ることができた。

膨張タービンの軸受に磁気軸受を採用した大きな理由は、膨張タービンの信頼性と耐久性の向上である。磁気軸受の膨張タービンは空気分離装置に搭載して長期間ノーメンテで連続運転した実績があり、ネオン冷凍機に搭載した小型の膨張タービンも同様な信頼性・耐久性が期待できる。当該膨張タービンを組み込んだネオン冷凍機の 24 時間連続運転を 11 日間実施したところ、タービンの回転数や軸受の振動には変化はなく、タービンの効率も運転初期と同じであり、安定した運転が確認された。



図 2.3.2-9 供試インペラ (3 種類)

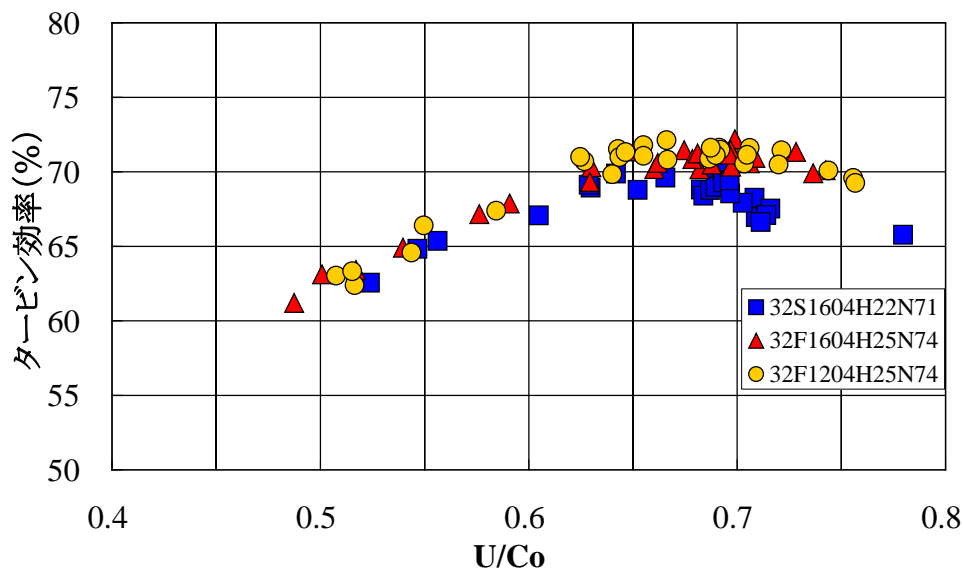


図 2.3.2-10 タービン効率の試験結果

2.3.2-2 小型ターボ式圧縮機開発（大陽日酸）

(1) 圧縮機的设计

冷凍機のプロセスシュミレーションから決定されたターボ圧縮機を設計した。圧縮機の圧力比は 2 であり、ターボ圧縮機の圧力比としてはそれほど大きな圧力比ではないが、流量が少ないため比速度が小さくなり、1 段で圧縮するよりも 2 段で圧縮する方が効率的に有利となるため、2 段圧縮のターボ圧縮機として設計した。圧縮機のインペラは図 2.3.2-11 に示すようにインペラ出口羽根の取り付け角を回転方向と逆向きに 30 度傾けたバックワードインペラとし、インペラの外側には羽根付ディフューザを配置した。一般に、インペラ出口羽根の取り付け角を半径方向としたラジアルインペラよりもバックワードインペラの方が、同じ圧力比を得るための回転数は高くなるが、インペラ出口の流速が小さくなって断熱効率が高くなり、作動範囲も広がる⁽⁵⁾。インペラの羽根枚数は 18 枚、ディフューザは羽根枚数が 15 枚と 8 枚の 2 種類を用意した。図 2.3.2-11 に羽根枚数 15 枚のディフューザを示す。羽根の形状は 15 枚と 8 枚とで同じであるが、羽根枚数を変えることで羽根入口スロート幅が 15 枚は 7.7 mm、8 枚は 20.6 mm となり、入口スロートの面積は 8 枚の方が 1.43 倍大きくなっている。圧縮機ディフューザの入口スロート面積は圧縮機の性能に対して非常に重要である⁽⁶⁾。

ターボ圧縮機の構造を図 2.3.2-11 に示す。図の右側が 1 段側の圧縮機、左側が 2 段側の圧縮機である。中央部には 60 kW の高周波モータがビルトインされており、インバータで駆動される。モータの左側にアキシアル磁気軸受、その両側にラジアル磁気軸受が配置された構造となっている。圧縮機インペラの内側には磁気軸受が何らかの要因によって正常に動作できなくなった場合に備えて回転軸と軸受が接

触するのを防ぐためにタッチダウン軸受と呼ばれる無潤滑のボールベアリングが設けてある。

また、摩擦損失とモータの損失による発熱を除去するために、モータの外側は水冷式の冷却ジャケットを設けている。

図 2.3.2-12 に圧縮機ロータの固有振動モードの解析結果を示す。図の上段(a)は解析モデルのメッシュ図、中段(b)は一次の曲げモード、下段(c)は二次の曲げモードで、一次の固有振動数は 706 Hz、二次の固有振動数は 1756 Hz で、圧縮機ロータの設計回転数 617 rps からは 14 %以上離れている。

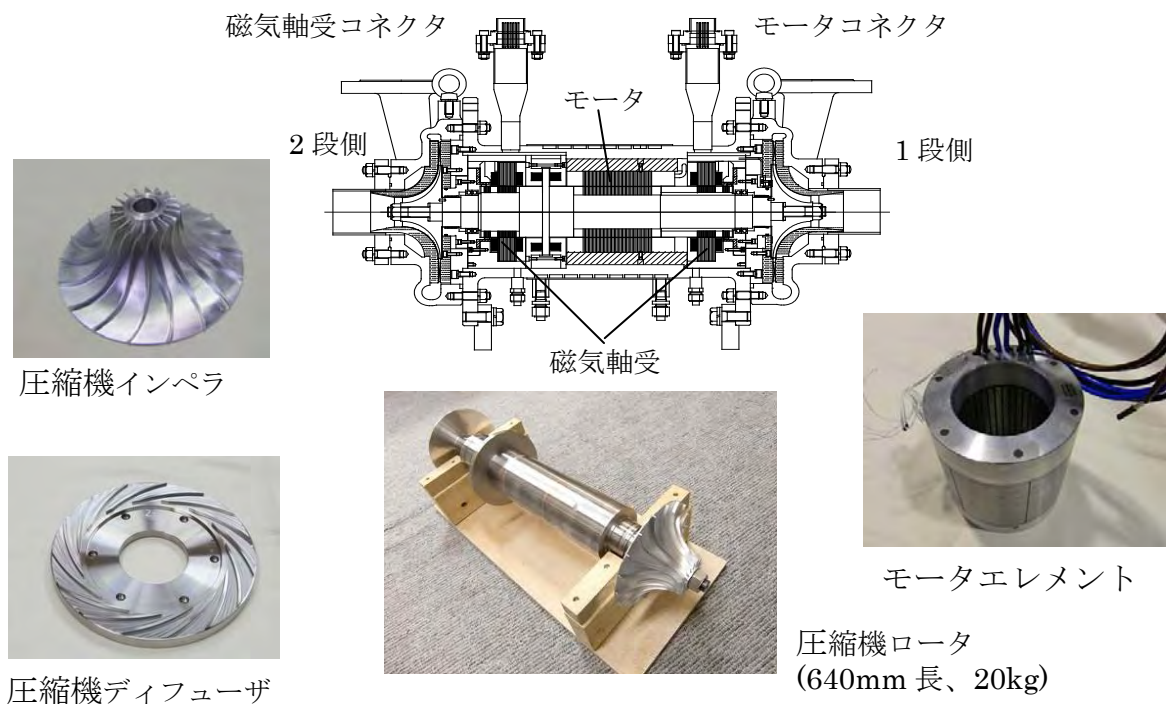


図 2.3.2-11 小型ターボ圧縮機の構造

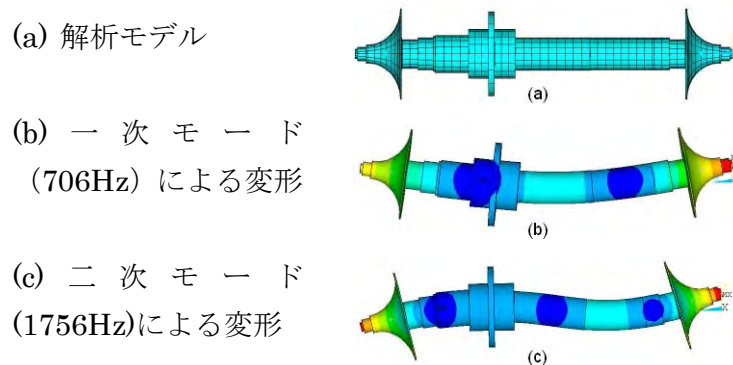


図 2.3.2-12 圧縮機ロータの固有振動モード

(2) 圧縮機の運転

新開発した一ボ圧縮機をネオンガス雰囲気中で運転するための試験設備の主要部を図 2.3.2-13 に示す。1 段目の圧縮機で圧縮されたガスは約 100 °Cまで温度上

昇するため、水冷式のインタークーラで 30℃まで冷却されて 2 段側の圧縮機に入る。2 段目の圧縮機出口のガスも同様に約 100℃まで温度上昇するため、水冷式のアフタークーラで 30℃まで冷却され、流量調整用のバルブで減圧された後、1 段目の圧縮機に戻る。図には示していないが、1 段目の圧縮機入口圧力が設計圧力の 0.5 MPa で一定となるようにガスの補充と回収用のポートを設けている。

各段の圧縮機の入口、出口配管には JIS B 8345 の「ターボ形ガス用ブロウ・圧縮機の閉回路による試験および検査方法」で定められた位置に圧力計、温度計、流量計等を設置して運転データを計測した。

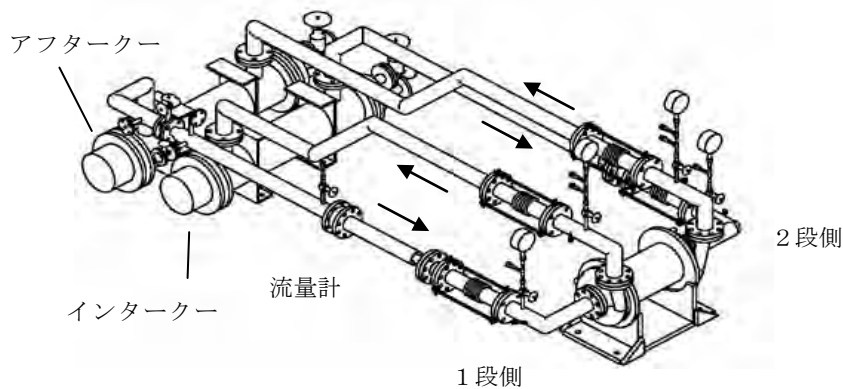


図 2.3.2-13 圧縮機試験設備

(3) 圧縮機の性能試験

ターボ圧縮機の断熱効率 η_C も膨張タービンと同様な式で表される。

$$\eta_C = \frac{H_{2S} - H_1}{H_2 - H_1} \quad \eta_C = \frac{T_{2S} - T_1}{T_2 - T_1} \quad T_{2S} = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\left(\frac{\kappa - 1}{\kappa} \right)}$$

ここで、 H_1 : 圧縮機入口エンタルピ、 H_2 : 圧縮機出口エンタルピ、 H_{2S} : 断熱圧縮 (等エントロピ変化) した時の圧縮機出口エンタルピ、 T_1 : 圧縮機入口温度、 T_2 : 圧縮機出口温度、 T_{2S} : 断熱圧縮 (等エントロピ変化) した時の圧縮機出口温度、 P_1 : 圧縮機入口圧力、 P_2 : 圧縮機出口圧力、 κ : ガスの比熱比 (ネオンガスの場合 $\kappa = 1.668$)

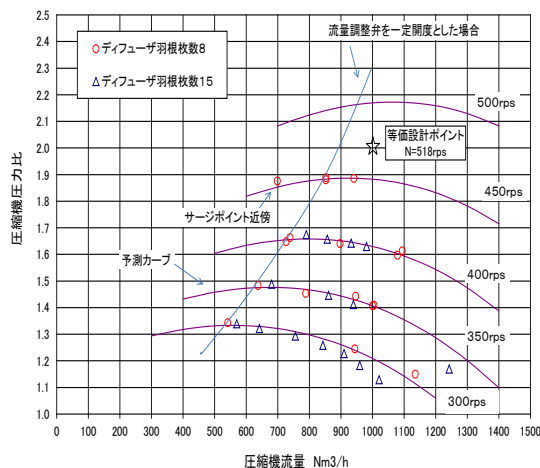
タービンの場合は入口と出口の温度が 70 K 以下という非常に低温度となるため、ネオンガスを理想気体として扱うと多少の誤差が生じるが、圧縮機の場合は動作温度が室温よりも高いため、理想気体として取り扱っても問題は無い。理想気体の場合はエンタルピの代わりに温度を用い、上記の式で圧縮機の断熱効率を表現することができる。

a. 窒素ガスでの等価性能試験

ターボ圧縮機を最初からネオンガスで実験すると、試験中に何らかの不具合があって配管を取り外したり、圧縮機の一部を開放点検する度に高価で貴重なネオンガ

を大気中に放出することになる。そのため、ネオンガスで本格的に性能試験を実施する前の予備試験としてネオンガスと物性が近い窒素ガスで圧縮機の性能試験を実施した。実際と異なるガスで試験する方法は前述した JIS B 8345 で詳細に規定されており、これに基づいて窒素ガスによる圧縮機の等価性能試験を実施した。ネオンガスでの圧縮機的设计回転数は 617 rps であるが、これと等価な窒素ガスの運転回転数は 518 rps となる。ネオンガスの设计流量は 1200 Nm³/h であるが、これと等価な窒素ガスの流量は 1006 Nm³/h となる。

図 2.3.2-14 に圧縮機の圧力比を示す。横軸は圧縮機の標準状態 (0°C、1 気圧) での流量であり、図の☆印が等価設計ポイント、すなわち、窒素ガスに換算したネオンガスでの圧縮機的设计ポイントである。図中の○印が羽根枚数 8 枚の圧縮機ディフューザでの試験結果であり、△印が羽根枚数 15 枚の圧縮機ディフューザの試験結果である。一定回転数毎に図示した曲線は羽根枚数 8 枚の圧縮機ディフューザの性能試験データから圧縮機の相似則を用いて性能を予測したものである。図より等価設計ポイント(☆印)は 450 rps と 500 rps の中間の回転数域にあり、等価回転数 518 rps で圧縮機を運転すれば圧縮機の圧力比は約 2.2 が得られ、等価設計ポイントの圧力比 2.0 を十分上回ると予想される。



2.3.2-14 圧力比と圧縮機流量の関係
(流体：窒素)

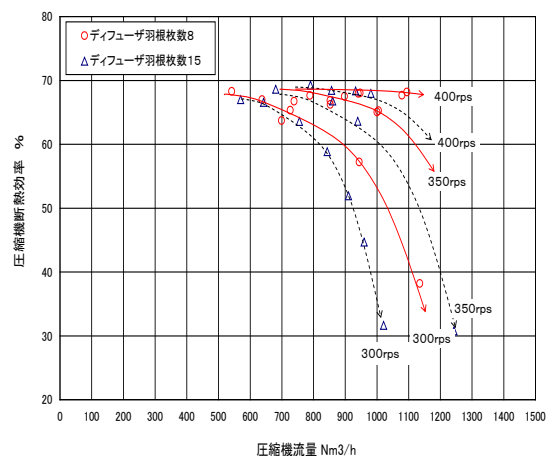


図 2.3.2-15 圧縮機効率と圧縮機流量
の関係 (流体：窒素)

図 2.3.2-15 に窒素ガスでの圧縮機の断熱効率を示す。図中の実線はディフューザ羽根枚数 8 枚の回転数ごとの傾向を示している。一方、破線はディフューザ羽根枚数 15 枚の傾向を示す。ディフューザ羽根枚数 8 枚の 450 rps データについてはデータ点数が少ないため傾向は図示していない。

羽根枚数 8 枚 (○印) と 15 枚(△印)の圧縮機効率の傾向を比較すると最高効率はどちらも約 68 %程度を示しているが、ディフューザ羽根枚数が 8 枚よりも 15 枚の方が流量が多くなるにつれ効率の低下が大きく、ディフューザの羽根枚数による特性の違いが明らかになった。なお、現時点では磁気軸受のチューニングとモータ

発熱対策が十分でないため圧縮機の回転数を 450 rps を上限として性能試験を実施した。圧縮機入口が 0.5 MPa よりも低い状態ではモータ発熱が小さいため最大 550 rps まで圧縮機を運転して磁気軸受のチューニングを実施している。

b. ネオンでの性能試験

窒素ガスでの等価試験によってターボ圧縮機の運転特性や試験データの再現性を十分検証することができたので、試験回路内の窒素ガスをネオンガスに置換してネオンガスによる圧縮機の性能試験を実施した。

図 2.3.2-16 にネオンガスでの圧縮機の圧力比を示す。圧縮機ディフューザ羽根枚数は 15 枚を使用した。図の 300~600 rps の一定回転数毎の曲線は窒素ガスの等価試験で述べたように圧縮機の相似則を用いて性能予測したものである。

また、図の破線は流量調整用のバルブの開度を一定に保持したまま圧縮機の回転数を変化させた時の圧縮機の変化を示したものである。

窒素ガスとネオンガスでは比熱比が異なるため同じ回転数でもネオンの圧力比は小さくなる。したがってネオンでの性能試験は 350~450 rps の回転数域を重点的に実施した。なお、流量 780 Nm³/h の 1 点だけではあるが、500 rps での性能データも収集した。さらに、回転数 450 rps で圧縮機の流量を減らして圧縮機がサージングに突入する試験も実施した。図中に Near surge と矢印で付記したポイントから圧縮機の流量を減らすと圧縮機の入口、出口の圧力は大きく変動し、騒音が発生するが、磁気軸受の制御は安定であった。

図より、目標とする 1200 Nm³/h での圧力比 2.0 は回転数が 550~600 rps の中間域にあることがわかる。磁気軸受のチューニングとモータ発熱対策が完了して回転数が設計の 617 rps まで回転できるようになれば、圧縮機の相似則より圧縮機の圧力比は目標値を十分上回ると予想される。

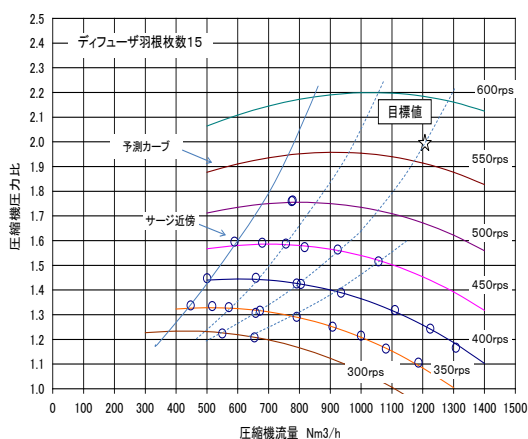


図 2.3.2-16 圧力比と圧縮機流量の関係 (流体：ネオン)

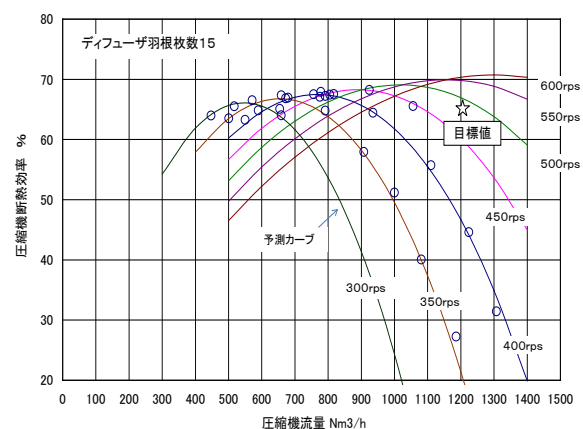


図 2.3.2-17 圧縮機効率と圧縮機流量の関係 (流体：ネオン)

圧縮機の断熱効率を図 2.3.2-17 に示す。図中の実線は 300~500 rps の実測効率と圧縮機の相似則により予想される回転数ごとの効率カーブである。圧縮機効率は

回転数が高くなるとピーク効率も高くなる傾向がある。図より 350～450 rps での回転数毎のピーク効率は約 66～68 %の範囲にあり、設計回転数より低い回転数域ではあるが、目標とする効率 65 %を超えることが確認でき、さらに圧縮機流量 1200 Nm³/h、圧力比 2.0 における圧縮機効率も 65 %を超える見通しを得た。

(4) 目標達成の見通し

窒素ガスおよび実ガスであるネオンを用いてターボ圧縮機の性能試験を実施したが、設計よりも低い回転数で得られた性能データと圧縮機の相似則から求めた性能曲線とはどちらのガスも良く一致することが確認できた。現在、圧縮機の磁気軸受のチューニングは回転数 550 rps が最大であり、目標とする回転数 617 rps までもう一步のところにある。回転数をこれ以上増加すると圧縮機のモータ発熱によってモータの巻線温度が耐熱温度上限の 130 °Cを超えてしまうことが判明した。試験データから推測すると 617 rps まで回転数を増加させると巻線の温度は 150 °Cまで上昇する。この温度上昇を抑制するためには圧縮機ボディに設けた水冷ジャケットの冷却能力を高める必要がある。冷却能力の強化のために水冷ジャケットの伝熱面積や冷却水の流路形状を変更すると、圧縮機ボディの形状寸法を変更せざるを得なく、既に製作した軸受部品等が使用できなくなってしまう。したがって、圧縮機ボディの材質を現状のオーステナイトステンレス鋼(SUS304)から熱伝導率が約 2.7 倍大きいクロムモリブデン鋼(SCM440)に変更することでモータの巻線温度を 120°C以下に抑える対策を実施した。熱解析シミュレーションを行った結果、圧縮機ボディの材質を熱伝導率の大きい SCM440 に変更することで巻線温度上昇は SUS304 の圧縮機ボディよりも約 35 °C低く抑えることができることがわかった。現在、SCM440 の圧縮機ボディ製作が完了し、ターボ圧縮機の組み立て準備中である。したがって、本対策によって設計回転数の 617 rps でターボ圧縮機を運転してもモータの巻線温度上昇は 120 °C以下に抑えることができ、流量 1200 Nm³/h で圧力比 2.0 以上、断熱効率 65 %以上を達成するという中間目標は本年度中に達成できる見込みである。

2.3.2-3 熱交換器の小型化/最適化 (大陽日酸)

前プロジェクト「超電導応用基盤技術開発 (第Ⅱ期)」(平成 15～19 年度)にて製作したプロトタイプ冷凍機では図 2.3.2-18 に示すようにプレートフィン型熱交換器が 5 ブロック組み込まれていた。それぞれの熱交換器ブロックは同一形状・寸法であり、幅 290 mm×奥行き 270 mm×高さ 1300 mm である。我々の研究目的の一つは所定の冷凍機性能を得る最低限の熱交換器の大きさを検討することである。COP や冷凍能力は、熱交換器の効率 (伝熱面積即ち大きさ)、膨張タービン・圧縮機の断熱効率に大きく依存している。そこで、膨張タービン・圧縮機の断熱効率を現実的な値に設定することにより熱交換器のブロック数、即ち大きさを見積ることとした。

我々は、平成 21 年度にプロセスシミュレーションプログラム“gPROMS”にガス物性プログラム“REFPROP”を組み込み、熱交換器や配管の圧力損失を考慮した冷凍プロセスシミュレータを開発した。その開発した冷凍機シミュレータを用いて熱交換器のブロック数をパラメータとして冷凍機性能を見積もった。その結果を表 2.3.2-2 に掲げる。膨張タービン及び圧縮機の断熱効率が 70 %になれば熱交換器は 3 ブロック、すなわちプロトタイプ冷凍機の 3/5 の大きさで冷凍能力 2.5 kW@65 K、COP0.06@80 K という冷凍機性能が達成可能であることが予測された⁽⁷⁾。



図 2.3.2-18 プレートフィン型熱交換器ブロック

表 2.3.2-2 熱交換器ブロック数と冷凍機性能予測

冷却温度 (K)	熱交換器ブロック数	COP (回生あり)	COP (回生なし)	冷凍能力 (kW)	熱交換器全体効率	タービン圧縮機断熱効率	膨張比	回生電力 (kW)
65	5	0.0453	0.0433	2.5	0.991	0.65	1.97	3.17
65	5	0.0538	0.0510	2.7	0.991	0.70	1.97	3.41
65	4	0.0526	0.0498	2.6	0.988	0.70	2.01	3.53
65	3	0.0497	0.0469	2.5	0.984	0.70	2.04	3.68
80	5	0.0589	0.0557	3.2	0.991	0.65	1.95	3.86
80	5	0.0698	0.0655	3.5	0.991	0.70	1.95	4.14
80	4	0.0695	0.0649	3.4	0.988	0.70	1.99	4.30
80	3	0.0672	0.0627	3.3	0.984	0.70	2.02	4.45

計算条件

圧縮機入口圧力: 455 kPa,

圧縮機出口圧力: 1001 kPa,

圧縮比: 2.20,

流量: 0.3kg/sec,

タービン、圧縮機の機械効率: 0.8

2.3.2-4 冷凍機開発と冷却システム開発 (太陽日酸)

冷凍機の効率向上のため、膨張タービンの膨張比とプロセス圧力の関係を調査・研究した。すなわち、冷凍効率 (COP) とタービン膨張比の関係を膨張タービンの断熱効率及び熱交換器の効率をパラメータとして計算した。その結果を図 2.3.2-19(a)、(b)に示す。計算条件は簡素化のために、冷凍機サイクルは単純ブレイトンサイクルで理想気体を冷媒とし、冷凍機内における圧力損失を無視している。また、COP は他の冷凍機にとの比較のため、80 K での値を計算している。結果から解るように COP の数値は膨張比 2 近傍にて最大値を示している。さらにこの結果

より、COP が 0.06 以上を達成するためには膨張タービン及び圧縮機の断熱効率が 70%、熱交換器の効率が 99%程度必要であることが解る。次に、膨張比 2 を選んだ際に、65 K における冷凍能力 2.5 kW を達成するための必要流量を検討した。その結果を図 2.3. 2-19(c)、(d)に示す。65 K における冷凍能力と流量の関係、膨張タービンと圧縮機の断熱効率が 70%、熱交換器の効率が 99%程度であれば、必要流量は 0.3 kg/sec となる。

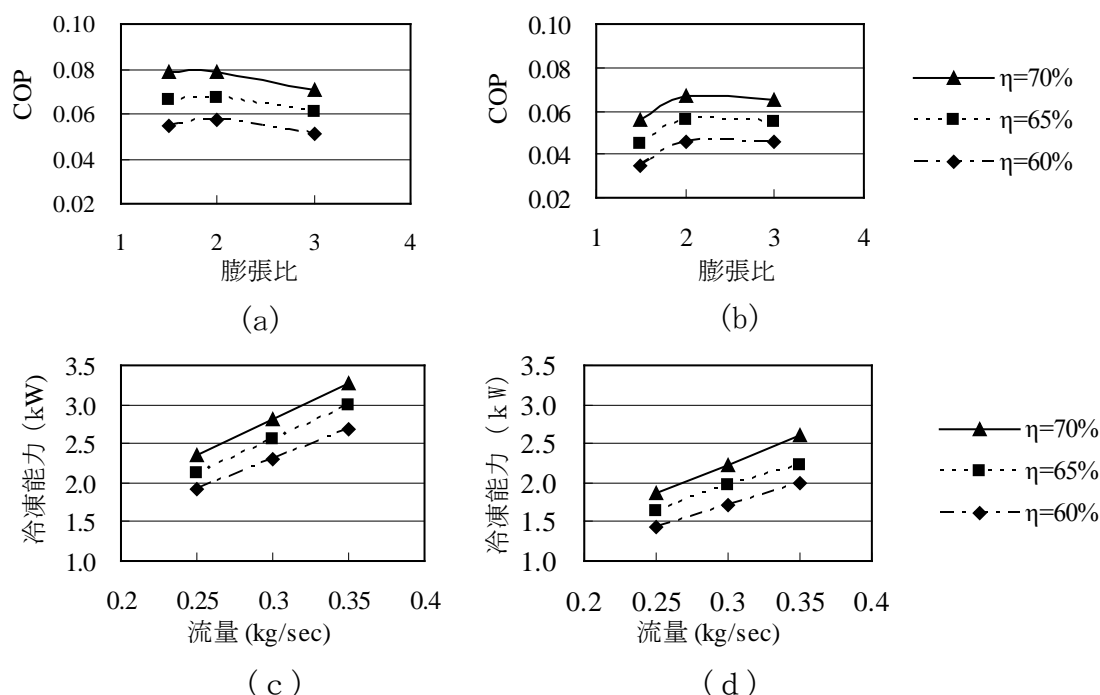


図 2.3.2-19 (a) 80 K 運転時の COP (熱交換器効率 99%)
 (b) 80 K 運転時の COP (熱交換器効率 98%)
 (c) 65 K 運転時の冷凍能力 (熱交換器効率 99%)
 (d) 65 K 運転時の冷凍能力 (熱交換器効率 98%)

但し、冷媒：理想気体、 η ：膨張タービンと圧縮機の断熱効率

次にプロセス圧力の影響を検討した。理想気体では膨張比のみが冷凍機性能に影響するが、実気体ではプロセス圧力が冷凍機性能に影響を与える。我々は、実気体の物性プログラム”GASPAK”を計算プログラムに組み込み、ネオンガスを冷媒にした際の検討を行った。この検討において、我々は数種類のプロセス圧力と膨張比を設定し、さらに冷凍サイクルも単純ブレイトンサイクルを基本にいくつかの派生冷凍サイクルを考慮した。図 2.3.2-20 に検討した 6 つのサイクルを示す。(a)は基本

となる単純ブレイトンサイクルであり、(b)は高压側に熱負荷を配置したブレイトンサイクルである。(c)と(d)は二段膨張をプロセスであり、特に(d)では中間圧力地点に熱交換器を配置したプロセスである。(e)と(f)は分流プロセスであるが、(e)は膨張後に分流したモデル、(f)は分流後に膨張させるモデルである。そのそれぞれのプロセスに対して幾つかの膨張比・プロセス圧力の組合せを設定して 80 K における COP の計算を実施した。今回の検討では、膨張タービンによる発生エネルギーは全て回収し、圧縮機動力に還元される条件で行っている。結果としてそれぞれのプロセスにおいて 1.0 MPa/0.5 MPa のプロセス圧力での運転が他のプロセス圧力よりも高い COP が得られた。COP 最高効率は、同図(c)の二段膨張プロセスで得られているが、構造の簡略性を考慮し、実機では図 2.3.2-20(a)に示す単純ブレイトンサイクル、プロセス圧力 1.0 MPa/0.5 MPa のプロセスとした。ただ、もう一つの可能性として同図 (b)に示す単純ブレイトンサイクルで高压側に熱負荷を配置したモデルを挙げておく。ネオン冷媒がサブクール液体窒素や HTS 機器と熱交換する際に、ネオン冷媒が高压であれば熱交換器内での圧力損失が少なくなるからである。

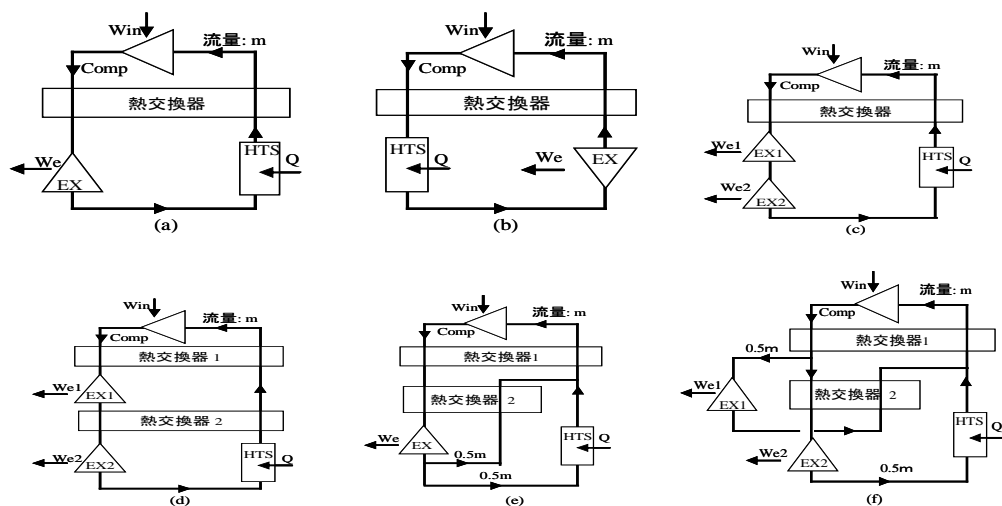


図 2.3.2-20 プロセス検討、(a)基本サイクル（単純ブレイトンサイクル）、(b)変形基本サイクル、(c)二段膨張プロセス、(d)中間熱交付き二段膨張、(e)膨張後分流プロセス、(f)分流後膨張プロセス、HTS：高温超電導機器、EX：膨張タービン、Comp：圧縮機、Q：冷凍能力、Win：圧縮機入力、We：回生エネルギー、m：冷媒流量

ここで、最終目標の一つであるで冷凍能力 2 kW@65 K の達成の見通しについて考えてみる。膨張タービン性能試験においてネオン流量 0.3 kg/sec のとき、65 K で約 2.4 kW の冷凍能力が得られている。現段階での小型ターボ圧縮機の窒素ガス等価試験では、所定の性能を確認しており、ネオンガスによる所定性能（圧力 1.0 MPa/0.5 MPa、流量 0.3 kg/sec）が達成できれば、当該最終目標が達成できる見通しである。

一方、もう一つの最終目標である COP0.06@80 K に目を向けると、現状の試験冷凍機に用いているレシプロ圧縮機は断熱効率が低く、80 K 運転における COP

が 0.05 程度である。これこそ、COP 改善のために高性能な小型ターボ圧縮機を開発している大きな理由である。小型ターボ圧縮機の断熱効率は保証値 65 %として設計しているが、65 %以上の数値が期待できるので、COP の予測計算では小型ターボ圧縮機の断熱効率が 65 %と 70 %の二通りを設定して計算を行った。この予測計算では、COP 予測値をさら現実の値に近づけるため、小型ターボ圧縮機の機械効率を 90 %、膨張タービンによる回生エネルギーの変換効率を 70 %とした。その結果は、小型ターボ圧縮機の断熱効率が 70 %あれば、現段階の構成機器組合せでも 80 K 運転での COP が 0.06 に到達できることが解った。現段階での小型ターボ圧縮機の窒素ガス等価試験では、既に中間目標値である断熱効率 65 %以上を達成しており、今後断熱効率 70 %以上が期待できる状況にある。

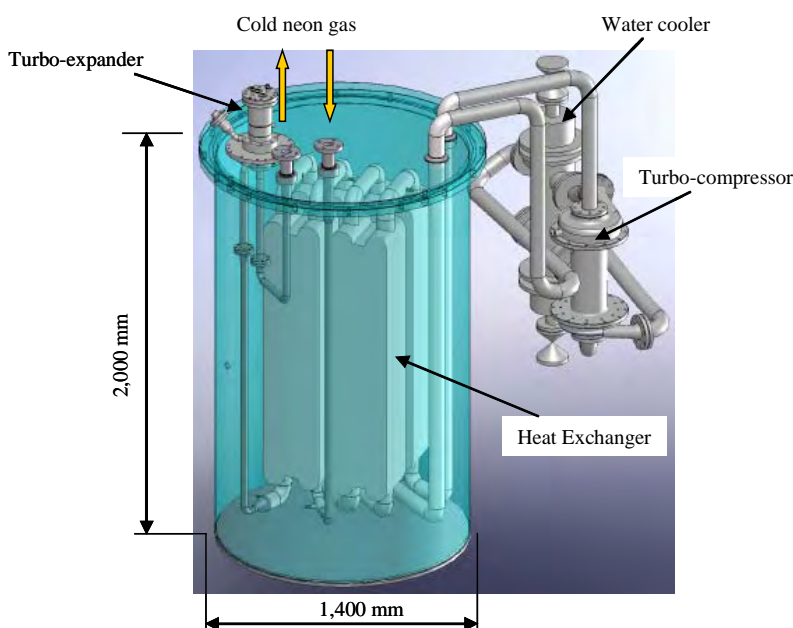


図 2.3.2-21 新型ネオン冷凍機構想図

また、低圧プロセス (1.0 MPa/0.5 MPa) におけるシミュレーション結果と改良型プロトタイプ冷凍機運転実測値とを比較したところ、コールドボックス内の配管圧力損失に幾分差異が生じている。そこで、シミュレーション予測値よりも圧力損失が大きい箇所は、流路の拡大等の改善を行えば、さらに冷凍機性能が向上するものとする。今後、実測値との詳細な比較検討を行い、低圧プロセスにおけるシミュレーション精度の向上を図る予定である。以上のような手法により、開発中の冷凍機は COP0.06@80 K を達成する見込みである。図 2.3.2-21 に本研究にて開発を目指すネオン冷凍機の構想図を示す。

2.3.2-5 冷凍機と機器とのインターフェースの検討 (九州大学、ISTEC)

冷凍機の冷媒であるネオンガスから変圧器巻線の冷媒であるサブクール液体窒素への冷熱のインターフェース (伝達方法) について、変圧器と冷却システムの組

合せ構造の簡略化、熱交換の高効率化の観点から検討した。

高効率冷却システムとして、従来方式（変圧器とは別に冷凍機と液体窒素との熱交換機を置き、液体窒素を循環させる方式）とは異なり、新方式（変圧器の真空断熱の保冷容器内に冷凍機ヘッドを設置する方式）を考案した。この冷凍機ヘッドはタービン膨張式冷凍機の冷媒ガスをこの中に導き、液体窒素と熱交換をさせるものである。また、この液体窒素との熱交換部について、一般の冷凍機（G・M 等）と本プロジェクトで開発中の冷凍機を用いる場合の 2 通りについて、数値解析プログラムを作成し、開発中の冷凍機で冷媒ガスを保冷容器内に移送する解析を行った。図 2.3.2-22 に、従来と本提案の冷却方式による超電導変圧器の断面図を、図 2.3.2-23 に両方式の温度分布を示す。新方式では温度上昇が少なく、熱交換が高効率なことを明確にした。

さらに、冷凍機ヘッドの形状を含め、この方式の冷却システムを実験的に検討し高効率な冷却システムを目指して、開発中のネオンガスを用いたタービン冷凍機を大学の既存タービン膨張式ヘリウム冷凍機で代替し、模擬クライオスタット中で液体窒素と熱交換するシステムを設計、製作を行った。今後、本システムの実験を行い、高効率な液体窒素冷却システムの実現を目指して検討を進める。

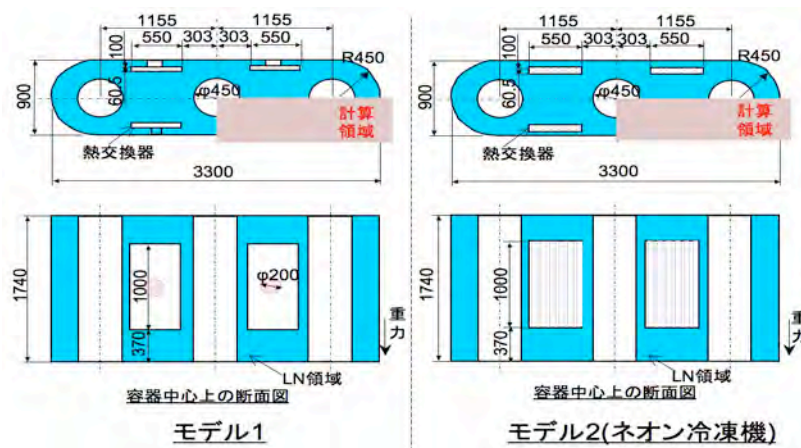


図 2.3.2-22 冷凍機ヘッドからの冷熱を用いる従来方式（左）と冷媒ガスをクライオスタット内に持ち込む新方式（右）の場合のクライオスタット内部構造

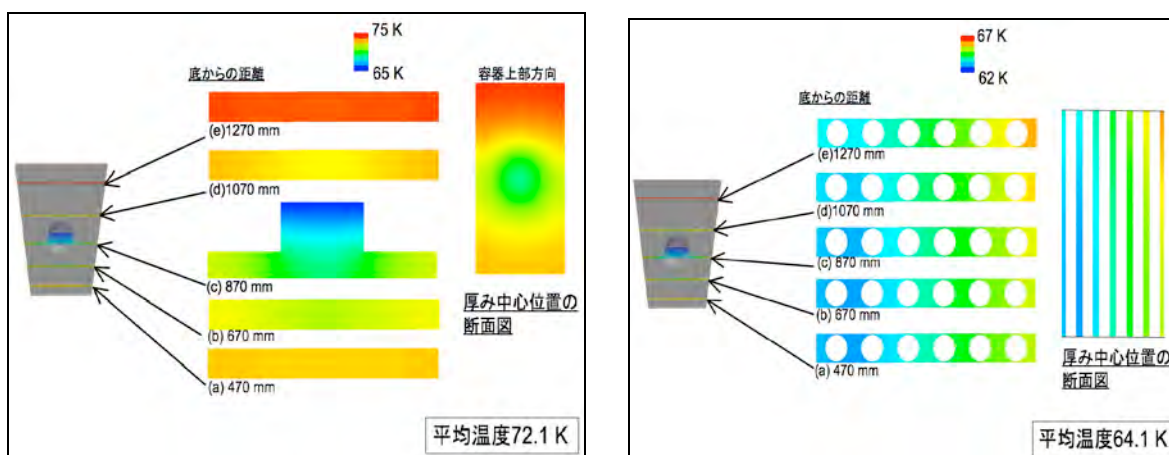


図 2.3.2-23 従来の冷却方式(左)と新提案の冷却方式 (右)を用いた場合のクライオスタット内温度分布の数値解析結果。

2.3.2-6 まとめと今後の計画

(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) 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を試作して試験にて、断熱効率 65 %以上(目標 65 %)を全て達成した。今後、インペラとハウジング間ギャップの調整等の最適化を図り、更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 Nm³/hr) の 75 % (900 Nm³/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 個で試験)。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

プロトタイプ冷凍機 (「超電導応用基盤技術開発 (第Ⅱ期)」プロジェクトで製作) に、今回開発の膨張タービンを組み込んだ試験にて、冷凍能力 2.4 kW(約 65 K)を

確認し、最終目標である 2 kW 以上 (65 K) の見通しを得た。また、開発中の小型ターボ圧縮機を含むシミュレーションでは、小型ターボ圧縮機の断熱効率は約 70 %で、COP は 0.06 以上(80 K)となった。これらより、最終目標 (冷凍能力 2 kW@65 K、COP0.06@80 K 以上) の達成見通しが得られた。今後、開発した膨張タービンとターボ圧縮機を組合せて、性能試験を行う。その成果を基に、2 MVA 超電導変圧器の冷却システム (サブクール液体窒素発生装置含む) の設計・製作を行う。

(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。

引用論文リスト

- (1) 平井、鈴木、他、”高温超電導機器用冷却システムの開発”、大陽日酸技報 No.27、2008 年、36-37
- (2) H.Hirai, et al., “Development of a turbine cryocooler for high temperature superconductor applications”, Physica C 469 Proceedings of 21th International Symposium on Superconductivity (2009) 1857-1861
- (3) 平井、弘川、他、”磁気軸受ネオン膨張タービンの開発”、大陽日酸技報 No.28、2009 年、1-5
- (4) H.Hirai, et al., “Development of a neon cryogenic turbo-expander with magnetic bearings,” Advances in Cryogenic Engineering 55, to be published
- (5) 汎用機事業部第一設計部、”自動車用小形ターボチャージャの技術動向”、石川島播磨技報第 24 巻第 5 号、1984 年 9 月、354-359
- (6) 玉木、山口、相沢、”羽根付きディフューザの取付角が遠心圧縮機性能に及ぼす影響”、ターボ機械第 29 巻第 12 号、2001 年 12 月、8-14
- (7) S.Yoshida, et al., “New Design of Neon Refrigerator for HTS Power Machines”, Advances in Cryogenic Engineering 55, to be published

2.3.3 限流機能付加技術開発

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

2.3.3-1 4巻線モデルによる特性検証（九州電力、九州大学）

(1) 研究開発目標と開発方針

平成 20 年度に限流機能付加変圧器の基礎技術の検証用として、一次側、二次側ともに主巻線と並列に接続された補助巻線を持つ 4 巻線構造の小型超電導変圧器モデルを試作する。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イットリウム系線材を適用する。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、イットリウム系線材の液体窒素温度における過大電流に対する基礎的な応答特性を定量的に検証・評価する。なお、実用化する場合の限流機能付加超電導変圧器は主巻線のみ的一次巻線と二次巻線の構成である。

(2) 超電導変圧器の設計と製作

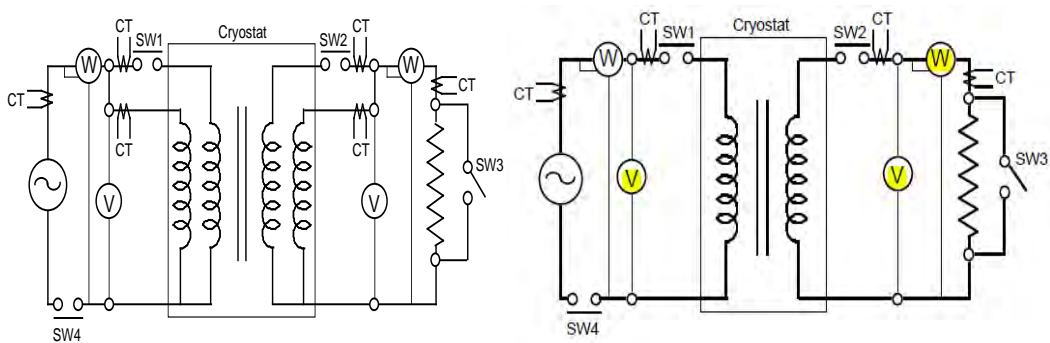
臨界電流を越える短絡過大電流によって発生する超電導巻線の常電導抵抗を一次、二次巻線それぞれ個別に観測するために、超電導変圧器は 4 巻線構造とした。4 巻線構造では、一次、二次巻線ともに主巻線と並列に補助巻線が配置される。変圧器の巻線構成と試験回路を図 2.3.3-1 に、概略設計図を図 2.3.3-2 に示す。いずれの巻線も円筒巻線で、6 層構造である。巻数比は 1 : 1 で、定格電圧は 400 V、容量は 10 kVA である。一次主巻線は 2 分割し、二次主巻線を内外から挟み込むサンドイッチ構造とした。主巻線の外側に一次補助巻線を配置し、主巻線の内側に二次補助巻線を配置した。設計は下記の挙動を目指したものである。一次、二次巻線間の漏れリアクタンスは表 2.3.3-1 に示すように一次、二次主巻線間が最も小さく、通常運転時は主巻線同士に負荷電流の大部が流れる。表 2.3.3-2 は各巻線に使用した Y 系線材の臨界電流 I_c を示している。主巻線の I_c は補助巻線の I_c より小さく、

突発短絡事故時にはいずれの巻線の電流も通常時と同じ比率で増えるが、まず主巻線が常電導に転移し、発生した常電導領域の抵抗により、短絡電流は補助巻線に転流する。補助巻線間の漏れリアクタンスは主巻線間よりはるかに大きいため、補助巻線に流れる短絡電流はこの漏れリアクタンスによっても限流される。この短絡状態での変圧器の等価回路は図 2.3.3-3 のように単純化され、次式が成り立つ。すなわち、一次、二次側ともに主巻線、補助巻線の電流を観測すれば、一次、二次主巻線それぞれに発生した常電導抵抗を個別に求めることが可能となる。

$$R_1 I_1 = j\omega L_{\sigma 1'} I_1' \quad (1)$$

$$R_2 I_2 = j\omega L_{\sigma 2'} I_2' \quad (2)$$

ここで、 R は主巻線の常電導抵抗、 L は巻線間の漏れリアクタンス、添字の 1、2 は一次、二次主巻線を、1'、2' は一次、二次補助巻線を表している。超電導変圧器諸元は、層数 6、ターン数 50 ターン×6 層=300、電圧 393.6 V、電流 20 A、負荷 20 Ω、1 ターン電圧は 1.3 V ($e = \sqrt{2}\pi B_s S_c f x$) である。



(a) 4巻線での試験時

(b) 2巻線での試験時(主巻線のみ)

図 2.3.3-1 4巻線構造超電導変圧器の巻線構成と試験回路

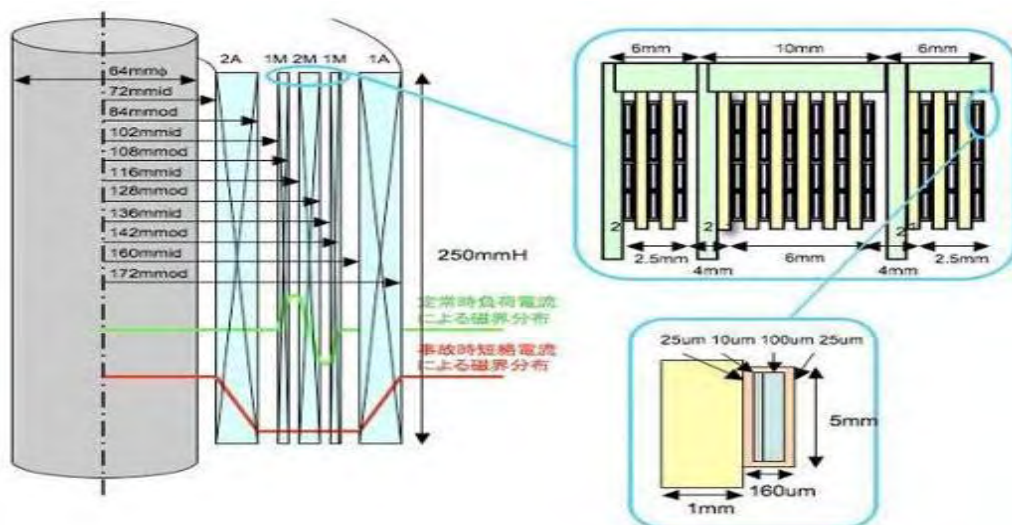


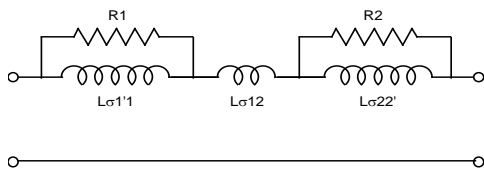
図 2.3.3-2 4巻線構造超電導変圧器の主要寸法

表 2.3.3-1 巻線間漏れリアクタンス

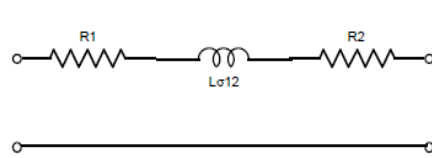
	設計値 (Ω)	実測値 (Ω)
主巻線間 (1M&2M)	0.299	0.266
補助巻線間 (1A&2A)	4.08	4.02
一次主&二次補助 (1M&2A)	0.94	0.78
一次補助&二次主 (1A&2M)	2.81	2.80

表図 2.3.3-2 変圧器に使用した Y 系線材の臨界電流 I_c

巻線	I_c	N 値	I_c 基準電圧 1	線材および I_c の範囲
2A	78.7 A	20	0.29 mV	MOD 線材、SWM-0031:95~160 A
1M 内	25.2 A	23	0.19 mV	PLD 線材、F09-401c:25~38 A
2M	43.2 A	30	0.46 mV	PLD 線材、F09-401a:68~86 A
1M 外	23.3 A	29	0.27 mV	PLD 線材、F09-401b:23~32 A
1A	43.0 A	4	0.73 mV	MOD 線材、SWM-0004:30~127 A



(a) 4巻線での試験時



(b) 2巻線での試験時(主巻線のみ)

図 2.3.3-3 4巻線構造超電導変圧器の短絡事故後の簡易等価回路



図 2.3.3-4 4巻線構造変圧器 (巻線、鉄心) の外観



図 2.3.3-5 4巻線構造変圧器 (クライオスタット内部) と試験装置

同心円状に組み上げた 4 巻線構造超電導変圧器 (巻線、鉄心) の外観を図 2.3.3-4 に示す。なお、巻線で囲まれた部分の鉄心断面は飽和磁束向上のために円形であり、脚とヨークの接合部は両方向からの珪素鋼板を交互に入れ込む構造となっている。図 2.3.3-5 には 4 巻線構造超電導変圧器 (クライオスタット内部) と試験装置の外

観を示す。77 Kにおいて観測した各巻線の I-V 特性から、1 次主巻線の I_c は 20 数 A で、二次主巻線の I_c は 40 数 A で I_c がばらついた。また、補助巻線の I_c は二次側が 78 A と主巻線の 2 倍以上であるが、一次側は 40 数 A と当初計画より低かった。しかし、銀層が 30 μm と厚いことにより高電界領域まで通電は可能であった。

(3) 通常運転時の変圧器特性試験結果

最初に二次側を開放して一次側から電圧を印加し、主巻線と補助巻線は並列に接続した無負荷損（鉄損）を測定した。鉄損の一次電圧依存性を図 2.3.3-6 に示す。定格電流 400 V に対する励磁電流は数 A、鉄損は 20 W 程度で、設計通りであった。

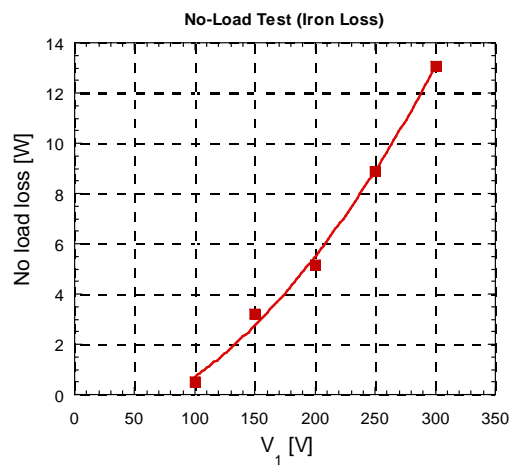


図 2.3.3-6 無負荷損（鉄損）の一次電圧依存性

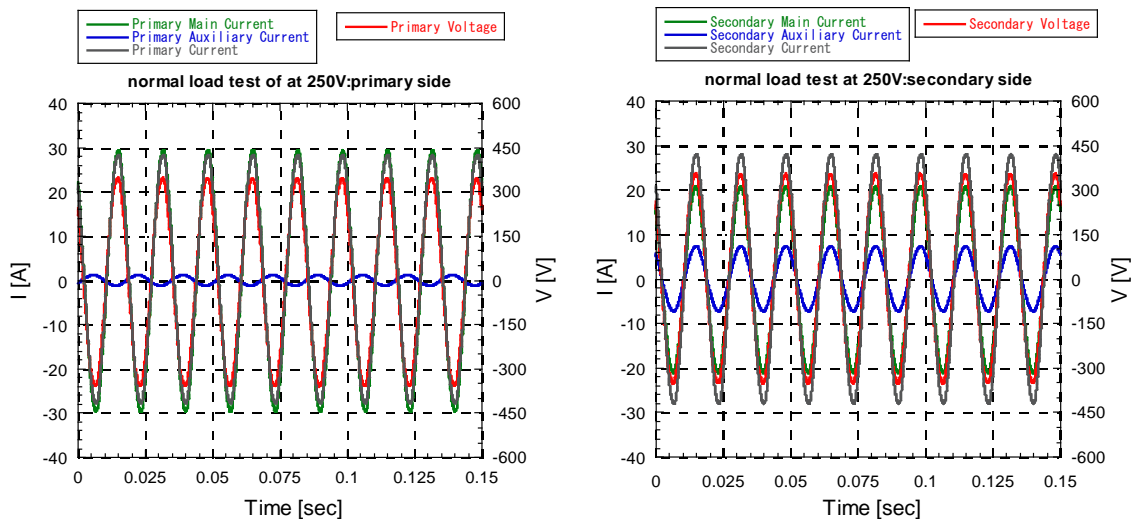


図 2.3.3-7 通常運転時の一次(左)、二次(右)の主・補助巻線電流及び全電流波形

次に、一次側、二次側ともに主巻線と補助巻線を並列に接続して、二次側に負荷として抵抗 11 W を接続し、一次電圧を徐々に上げて、主巻線と補助巻線の電流

分流比を観測した。この際の一次側、二次側の主巻線・補助巻線電流および全電流の波形を図 2.3.3-7 に、また主巻線、補助巻線の電流分流比を図 2.3.3-8a に示す。

図 2.3.3-8 は、設計における電流分流比も示している。設計における電流分流比は、各巻線を無限ソレノイドコイルとして近似して計算したものであることを考慮すると、電流分流比はほぼ設計通りと言える。

次に、二次側を短絡して、負荷損、いわゆる銅損を測定した。無論、ここでは超電導巻線の交流損失である。測定の都合上、一次側、二次側それぞれにおいて、巻線は主巻線か補助巻線のどちらか一方のみを接続した。主巻線同士、補助巻線同士に通電した負荷損の測定結果を図 2.3.3-8b に示す。

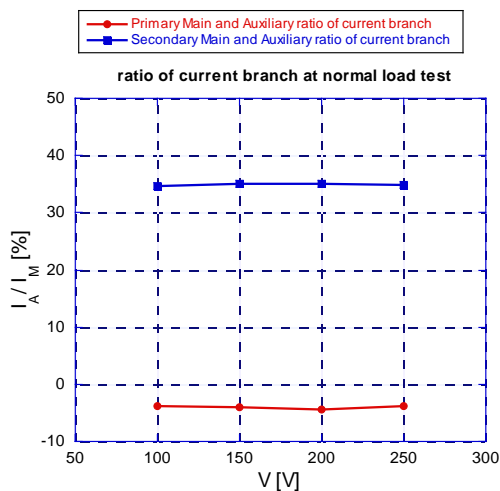


図 2.3.3-8a 通常運転時の一次側、二次側における主巻線、補助巻線の電流分流比の一次電圧依存性

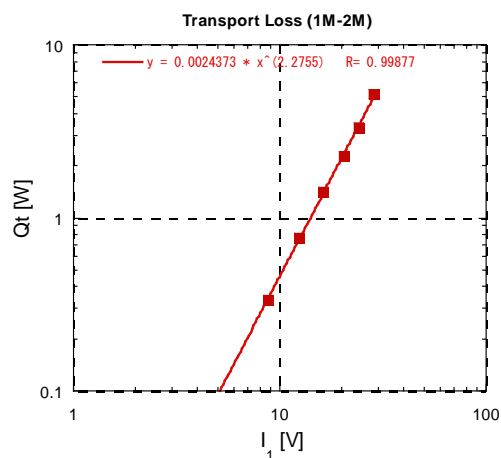


図 2.3.3-8b 主巻線(左)、補助巻線(右)同士に通電した負荷損 (巻線の交流損失)

(4) 突発短絡試験結果

通常負荷運転時に二次側負荷を短絡することにより、突発短絡事故を模擬し、その際の各巻線（主巻線と計測用補助巻線の 4 巻線で実施）の電流波形を観測した。図 2.3.3-9 に一次側巻線、二次側巻線の電流波形を示す。

通常負荷運転時には主巻線に電流の大部分が流れ、負荷短絡と同時に主巻線が短絡過大電流により常電導転移して主巻線に抵抗が発生し、短絡電流の多くが補助巻線に転流していることがわかる。図 2.3.3-10 は、主巻線が常電導転移しない場合の電流波形の計算結果である。主巻線が常電導転移しない場合の短絡電流は 1.2 kA にもなるのに対し、図 2.3.3-9 に示す実際の全短絡電流は 100 A 程度に限流されている。特に、図 2.3.3-9 の一次主巻線の電流は 40 A 程度であり、大幅に限流されていることがわかる。これは Y 系超電導変圧器における限流機能の世界初の確認である。

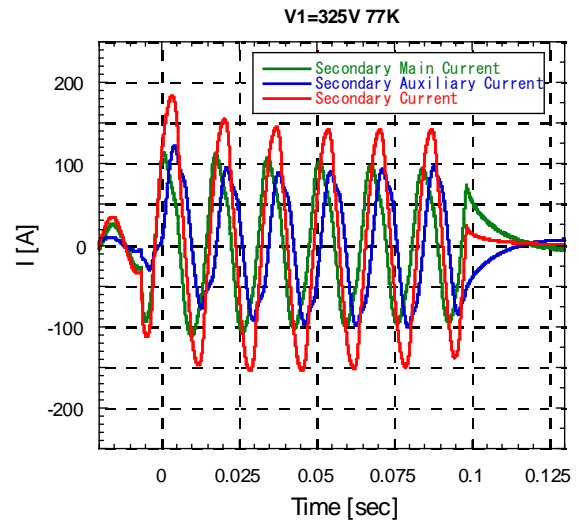
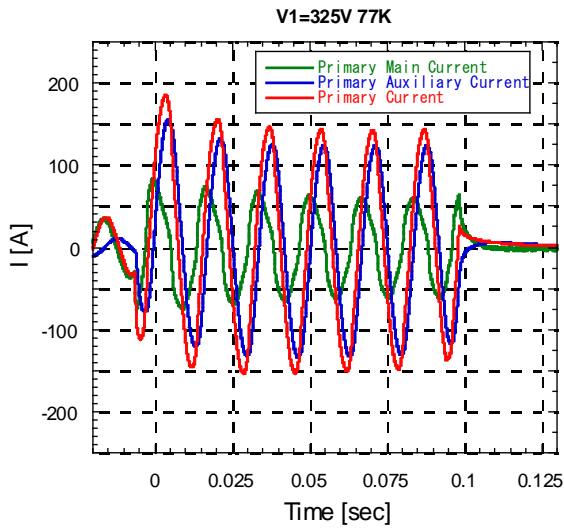


図 2.3.3-9 突発短絡時の一次巻線電流(左)、二次巻線(右)電流等の波形
(主巻線と計測用補助巻線の 4 巻線で実施)

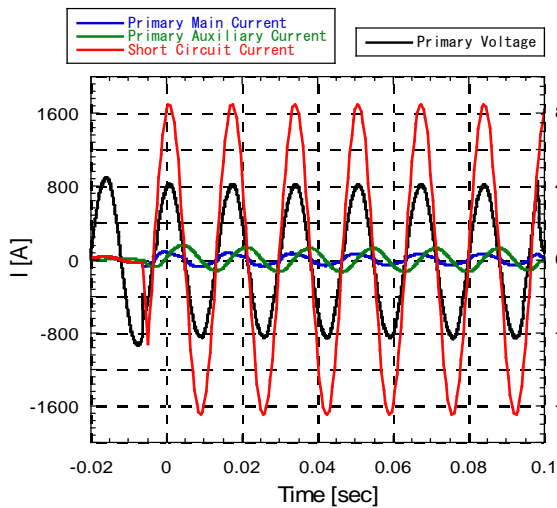


図 2.3.3-10 主巻線が常電導転移しないと仮定して計算した突発短絡時の一次側電流波形

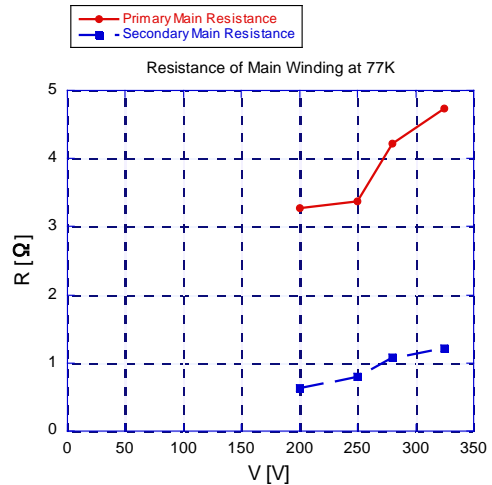


図 2.3.3-11 観測した主巻線、補助巻線の電流値から図 2.3.3-3 に示す等価回路を用いて算出した一次、二次主巻線の短絡過大電流による常電導転移領域の抵抗値の一次電圧

図 2.3.3-11 は、観測した主巻線、補助巻線の電流値から図 2.3.3-3 に示す等価回路を用いて算出した一次、二次主巻線の常電導領域の抵抗値である。一次、二次ともにほぼ一次電圧に比例して巻線抵抗が増加し、また I_c が小さい一次主巻線は巻線抵抗が大きいことがわかる。

また、主巻線のみでの 2 巻線で実施した突発短絡時の巻線電流、短絡電流,等の波形を図 2.3.3-12 に示す。同図の一次巻線の短絡電流 1200 A は 40 A 程度に大幅に

限流されていることがわかる。また、図 2.3.3-9 に示す 4 巻線（主巻線れ+補助巻線）で実施した場合とほぼ同等の成果となった。この結果により、超電導変圧器が完全に 2 巻線での限流機能が実証できた。

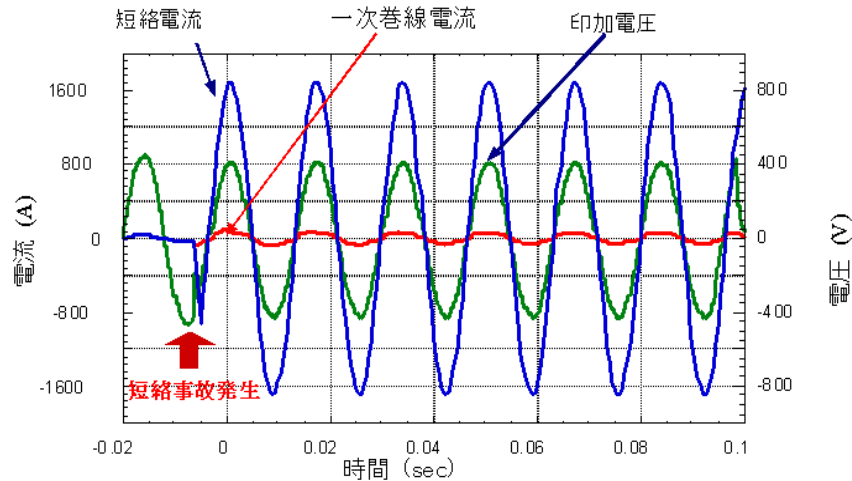


図 2.3.3-12 突発短絡時の巻線電流,等の波形(主巻線のみ 2 巻線で実施)

(5) 結果

Y 系超電導銅線材を用いて 4 巻線構造超電導変圧器を設計、製作し、変圧器として設計通りの通常負荷運転を確認した後、4 巻線と 2 巻線りケースの突発短絡試験を実施した。短絡電流波形等を観測し、各ケースとも短絡電流の数十分の一へ限流された良好な成果が得られ、世界で初めて Y 系超電導変圧器としての限流動作が確認できた。また、巻線における常電導領域の抵抗値の一次電圧依存性も測定した。巻線の常電導抵抗は一次、二次ともに一次電圧にほぼ比例して増加した。

2.3.3-2 限流応答特性解明と限流効果による巻線保護の検討および熱伝導率等の熱的特性の評価（九州大学、岩手大学、ISTEC）

(1) 限流応答特性解明と限流効果による巻線保護の検討

a. 研究開発目標

2.3.3-1 節に述べた 4 巻線構造変圧器モデルを用いて突発短絡事故を模擬した巻線モデルの特性試験等の各種の実験を行い、その結果等に基づき変圧器巻線の短絡電流に対する電氣的、熱的応答特性を記述しうる基礎方程式の導出について検討し、イットリウム系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。

b. 実験および解析

2.3.3-1 節に述べた 4 巻線構造変圧器の突発短絡実験に加えて、一次、二次主巻線のみ突発短絡実験等も行い、短絡過大電流印加時の主巻線の応答特性について

さらに詳細に調べた。図 2.3.3-13a は、常電導転移後の巻線温度が 77 K であると仮定して算出した一次、二次主巻線における短絡過大電流による常電導転移領域の長さの一次電圧依存性である。この常電導転移領域が巻線全長に対してどの程度の割合を占めるのかを、同じく巻線温度が 77 K であると仮定して算出したものを図 2.3.3-13b に示している。

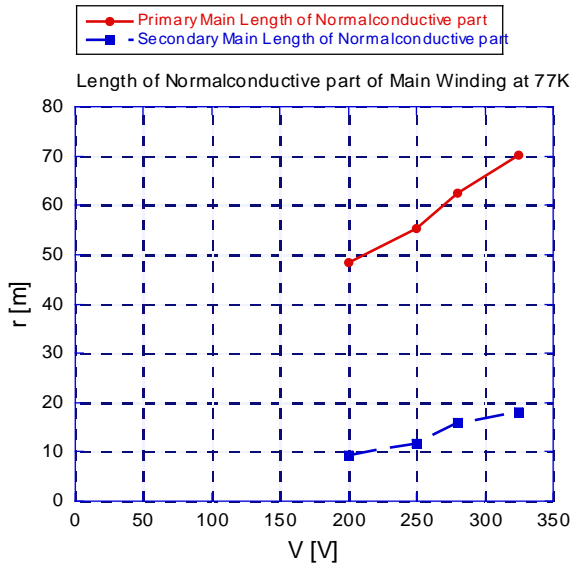


図 2.3.3-13a 常電導転移後の巻線温度が 77 K であると仮定して算出した主巻線における短絡過大電流により常電導転移した領域の長さの一次電圧依存性

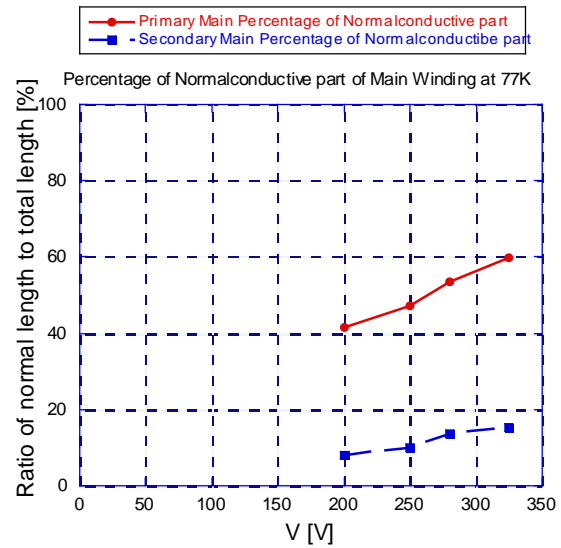


図 2.3.3-13b 主巻線において短絡過大電流により常電導転移した領域の巻線全長に対する割合の一次電圧依存性

巻線は I_c 以上の過大電流印加にも拘わらず、巻線全長が常電導転移せず、全長に対する割合は十分の一（二次側）から数分の一（一次側）であることがわかる。現在、この突発短絡事故を模擬しうる数値解析プログラムを構築し、各種物性値を精査し始めた段階である。図 2.3.3-15 に、一次電圧 250 V の場合の突発短絡時の主巻線電流波形の数値計算結果を実験値と比較して示している。数値解析は実験結果とよく一致している。この場合の一次巻線各部の温度上昇の数値計算結果を図 2.3.3-15 に示している。巻線全長に亘って、 I_c 以上の電流が印加されているにも拘わらず常電導転移しているのは巻線の一部であることがわかる。

c. 成果

4 巻線構造変圧器の突発短絡実験に加えて、一次、二次主巻線のみ突発短絡実験等も行い、短絡過大電流印加時の主巻線の応答特性についてさらに詳細に調べた。現在、この突発短絡事故を模擬しうる数値解析プログラムを構築し、実験との比較検討を始めたところである。実験、数値解析ともに、巻線全長に亘って、 I_c 以上の電流が印加されているにも拘わらず常電導転移しているのは巻線の一部であるこ

とが示唆されており、限流機能を有する超電導変圧器の設計に資するには今後さらに詳細に検討を進めていく必要がある。

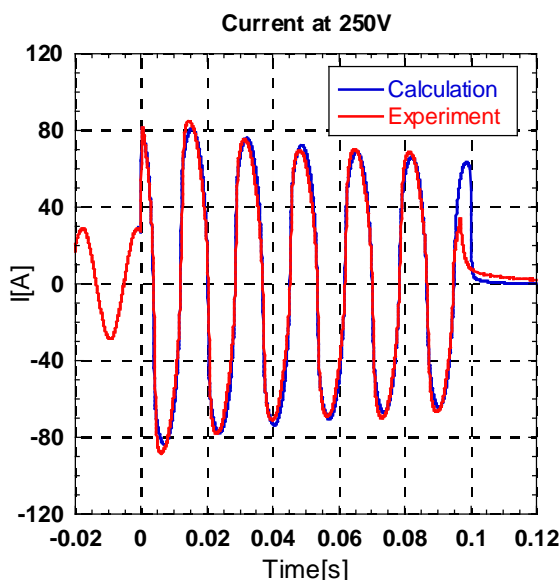


図 2.3.3-14 一次電圧 250 V の場合の突発短絡時の主巻線電流波形の数値計算結果と実験値との比較

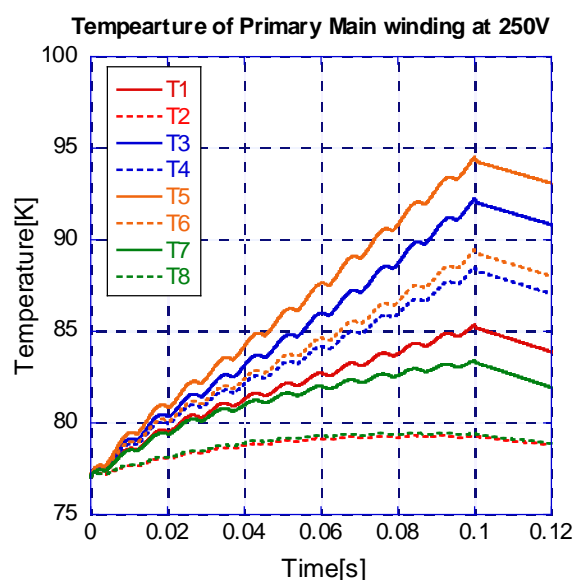


図 2.3.3-15 一次電圧 250 V の場合の突発短絡時の一次主巻線各部の温度の数値計算結果

(2) 熱伝導率等の熱的特性の評価

a. 研究開発目標

Y 系超電導線材は次世代超電導線材として大いに期待されており、変圧器や限流器などの実用機器応用においては臨界電流密度の向上や長尺化の他に、熱的安定性が重要となる。本研究では、機器設計において熱侵入および熱放散の見積りに不可欠な熱伝導率を中心に測定した。特に、Y 系超電導線材の安定化層である Ag 層厚が異なる線材の熱伝導率および電気抵抗率を評価した。また、安定化金属として Cu または CuNi 薄板を貼り付けた Y 系線材の熱伝導率および電気抵抗率の測定も行った。

b. 試験結果

Y 系超電導線材は IBAD-PLD 法により(株)フジクラで作製された。熱伝導率 $\kappa(T)$ は一般的な定常熱流法で測定した。電気抵抗率 $\rho(T)$ は直流四端子法で測定した。図 2.3.3-16 に Ag 層厚の異なる 3 つの Y 系超電導線材の熱伝導率の温度依存性 $\kappa(T)$ を示す。熱流はテープ面に平行に印加された。Ag 層厚 20 μm 、35 μm および 55 μm のサンプルをそれぞれ YCC-Ag20、YCC-Ag35 および YCC-Ag55 と呼ぶ。YCC-Ag20 の $\kappa(T)$ は 300 K から 85 K 付近まで温度の低下とともに単調に減少し、その後緩やかな増加に転じた。50 K 以下で急激に増大し始め、その後 20 K 付近でピークを示した。YCC-Ag35 および YCC-Ag55 の $\kappa(T)$ は YCC-Ag20 の $\kappa(T)$ とほぼ

同様の振る舞いであった。 $\kappa(T)$ の絶対値は Ag 層厚の増加とともに増大した。図 2.3.3-1 の挿入図に 100 K における熱伝導率の Ag 層厚 t_{Ag} 依存性を示す。 $\kappa(T)$ のピーク温度は Ag 層厚の増加にともない高温側に移動した。観測された $\kappa(T)$ のピークは、高純度金属の $\kappa(T)$ に見られる特徴的な振る舞いである。従って、Y 系超電導線材の熱伝導は主に Ag 層が担っていると考えられる。

図 2.3.3-17 に安定化金属として Cu 薄板を貼り付けた Y 系線材 (Cu-YBCO) の熱伝導率の温度依存性 $\kappa(T)$ を示す。Cu の厚さは 0.1 mm と 0.3 mm の 2 種類で、両者の Y 系線材部分の Ag 層厚は 10 μm で共通である。また、Cu 薄板(厚さ 0.1 mm)の $\kappa(T)$ も併せて示す。Cu-YBCO の $\kappa(T)$ は室温から 80 K 付近まではほぼ一定の値を示した。80 K 以下になると $\kappa(T)$ は温度の低下とともに増加し始め、その後 20 K 付近で最大値を示した。Cu の厚さとともに $\kappa(T)$ の絶対値は増加しており、サンプルに与えた熱流は主に Cu 部分を流れていると考えられる。ただし、低温で Cu-YBCO の $\kappa(T)$ が Cu 薄板の $\kappa(T)$ より大きくなっているなど定量的な問題は残っている。

図 2.3.3-18 に安定化金属 CuNi を貼り付けた Y 系線材 (CuNi-YBCO) の熱伝導率の温度依存性 $\kappa(T)$ を示す。Ag 層厚がそれぞれ 10 μm 、20 μm および 30 μm の Y 系線材に厚さ 0.3 mm の CuNi 薄板をそれぞれ貼り付けた。また、CuNi 薄板(厚さ 0.3 mm)の $\kappa(T)$ も併せて示す。CuNi-YBCO の $\kappa(T)$ は温度の減少とともに単調に減少し、30 K 付近でピーク構造を示した。Ag 層厚の増加とともに $\kappa(T)$ の絶対値は増加し、ピーク構造も明瞭になった。CuNi 薄板の $\kappa(T)$ は単調な温度依存性を示すことから、このピーク構造は Ag 層の寄与であると考えられる。

図 2.3.3-19 に Ag 層厚の異なる Y 系超電導線材の電気抵抗率の温度依存性 $\rho(T)$ を示す。Ag 層厚の増加とともに電気抵抗率は減少した。挿入図に Ag 層の電気抵抗率の温度依存性 $\rho^{\text{Ag-layer}}(T)$ を示す。 $\rho^{\text{Ag-layer}}(T)$ は以下のように見積もった。

$$\rho^{\text{Ag-layer}} = \rho^{\text{tape}} \times \left(\frac{t_{\text{Ag}}}{t_{\text{tape}}} \right)$$

ここで、 ρ^{tape} は Y 系線材の電気抵抗率、 t_{tape} は Y 系線材の厚さである。全ての $\rho^{\text{Ag-layer}}(T)$ はほぼ同一線上にスケールされた。室温の $\rho^{\text{Ag-layer}}$ 値は 1.6-1.7 $\mu\Omega\text{cm}$ となり、報告されている Ag(純度 3 N 程度)の ρ とほぼ等しい。従って、電流はほぼ Ag 層を流れていると考えて良い。図 2.3.3-20 に安定化金属 Cu または CuNi を貼り付けた Y 系線材(Cu-YBCO または CuNi-YBCO)の電気抵抗率の温度依存性 $\rho(T)$ を示す。Cu-YBCO の $\rho(T)$ は Cu の厚さの増加とともに低下していることから電流のほとんどが Cu 部分を流れていると考えられる。一方、CuNi-YBCO の $\rho(T)$ は Ag 層厚の増加とともに減少している。従って、電流は Ag 層を流れていると思われる。

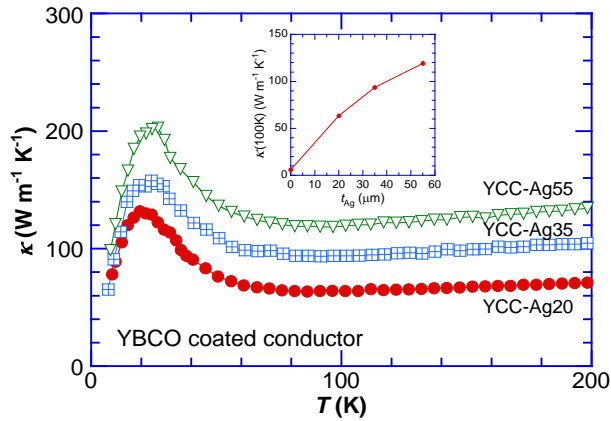


図 2.3.3-16 Y系超電導線材の熱伝導率の温度依存性。挿入図は 100 K における熱伝導率の Ag 層厚(t_{Ag})依存性。

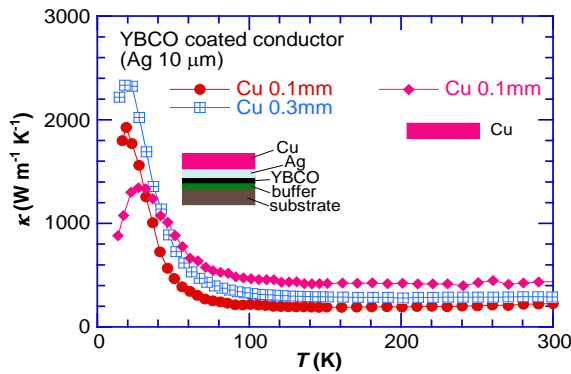


図 2.3.3-17 安定化金属 Cu の Y系超電導線材 (Cu-YBCO) および 0.1mm 厚 Cu の熱伝導率の温度依存性

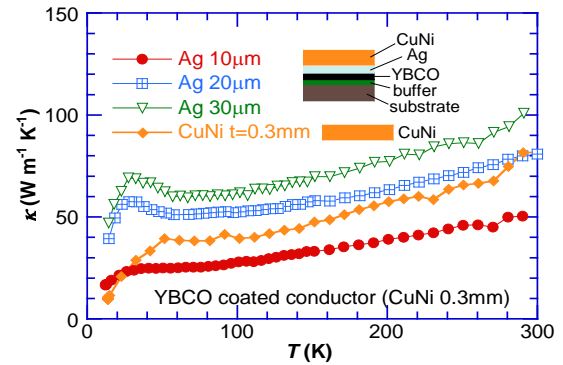


図 2.3.3-18 安定化金属 CuNi の Y系超電導線材 (CuNi-YBCO) および 0.3 mm 厚 CuNi の熱伝導率の温度依存性

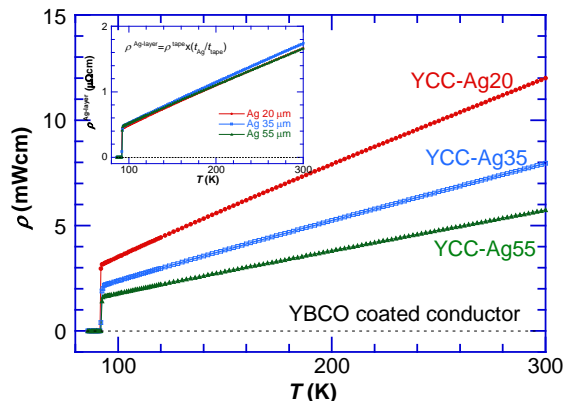


図 2.3.3-19 Y系超電導線材の電気抵抗率の温度依存性

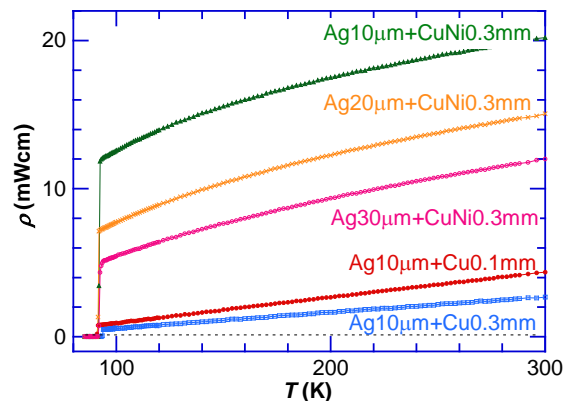


図 2.3.3-20 安定化金属 Cu、CuNi 付きの Y系超電導線材の電気抵抗率の温度依存性

c. 結果、成果など

本研究では、Y系線材の熱伝導率と電気抵抗率の測定を行った。Ag 層厚と熱伝導率の関係から Y系線材の熱伝導は主に Ag 層が担っていることが分かった。

また、ハステロイ基板と、ハステロイ基板上に中間層を積層したサンプルの熱伝導率の比較から、中間層の熱伝導への寄与はほぼ無視できる。安定化金属を貼り付けた Y 系線材の熱伝導率を測定した結果、Cu 貼り付け試料の場合、熱流は熱伝導の良い Cu 部分を通る。一方、CuNi 貼り付け試料の場合、熱流は CuNi 部分ではなくほぼ Ag 層を流れていると考えられる。これら熱伝導率の結果は電気抵抗率の結果と矛盾しない。

2.3.3-3 数百 kVA 級限流機能付加変圧器の試作（九州電力）

上記の 4 巻線構造変圧器モデルの試験や解析の成果および熱的特性の評価について総合評価を行い、4 巻線構の主巻線と補助巻線を複合した 2 巻線構成とし、過大電流による過渡特性が確認できる数百 kVA 級限流機能付加単相変圧器モデルに関して、励磁突流印加時や地絡事故時に巻線で発生する常電導抵抗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。

(1) 数百 kVA 級限流機能付加モデル変圧器の設計

高抵抗（Cu、CuNi）保護層導体の巻線導体構成により、過電流通電後 0.2 秒に定格電流の 3 倍以下となる設計を行い、モデル変圧器の実証試験を行う。表 2.3.3-4 に限流機能付加モデル変圧器の基本仕様を示す。表 2.3.3-5 に限流機能付加コイルの仕様を示す。

表 2.3.3-4 限流機能付加モデル変圧器の基本仕様

相数	単相
容量	400 kVA
電圧	6.9 kV / 2.3 kV
電流	58 A / 174 A
周波数	60 Hz
%インピーダンス	10 %
冷却	過冷却液体窒素浸漬冷却 (66 K)

表 2.3.3-5 限流機能付加コイルの仕様

	1 次巻線	2 次巻線
素線	ReBCO 線材 (5 mm ^w , 保護層導体付)	ReBCO 線材 (5 mm ^w , 保護層導体付)
導体構成	1 枚 (1 並列)	3 重ね (3 並列)
巻数	576 ターン (96 ターン×6 層)	192 ターン (96 ターン×2 層)
巻線個数	6	2
巻線長さ	931 m	243 m (×3 並列=729 m)

(2) 限流機能解析

図 2.3.3-21 には保護層 (CuNi0.3 mm)、銀層 (30 μm) の場合、400 kVA 限流機能モデル変圧器の二次短絡時の電流波形 (青)・電圧波形 (紫)・巻線温度上昇 (水) の解析結果を示す。限流機能により電流は短絡後 0.2 S では電流 734 A peak、定格電流の 3 倍程度となる。なお、電流波形 (赤)、巻線温度上昇 (橙) は限流機能なしの波形を示す。図 2.3.3-22 は、数百 kVA 限流機能付加変圧器の外形図を示す。

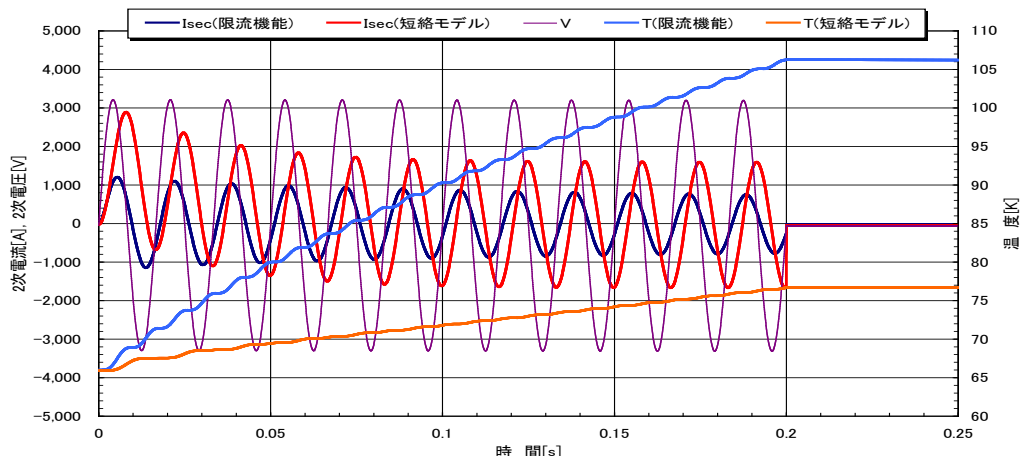


図 2.3.3-21 限流機能の解析波形

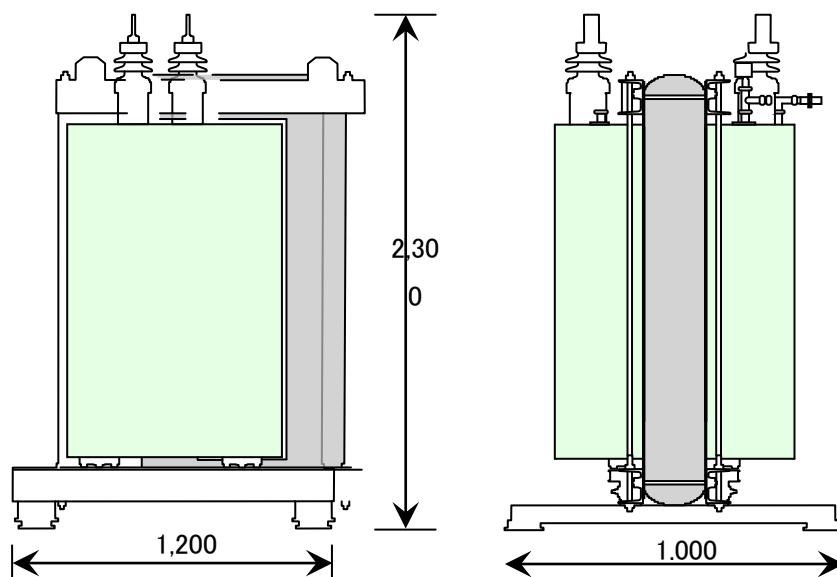


図 2.3.3-22 数百 kVA 級限流機能付加モデル変圧器の外形

2.3.3-4 線材特性評価と温度スケーリング則による巻線の交流損失見積り手法検討 (九州大学、ISTEC)

モデルコイル用線材の交流損失特性を鞍型ピックアップコイルを用いて評価し、低交流損失コイル化技術開発を支援するとともに、温度スケーリング則手法により機器巻線の交流損失を簡略に推定する手法の確立を目指す。PLD 法及び MOD 法で作製されたイットリウム系線材について、細線化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。

(1) IBAD-PLD 線材についての検討結果

ここでは、IBAD-PLD 法により製作された GZO を中間層とする Y 系超電導線材の結果を示す。測定は短尺 6cm 長試料を 3 枚重ねて行った。図 2.3.3-23 は 35 K から 77 K において測定した磁化測線、図 2.3.3-24 は、測定した磁化曲線から求めた I_c - B 特性の温度依存性である。

また、 B_b 以上の磁界に対し、ピンカモデルとして Irie-Yamafuji モデルを仮定し、 I_c の磁界依存性を $I_c = \alpha B^\gamma$ と表した際の γ の温度依存性を調べてみるとほぼ一定であった。そこで、図 2.3.3-24 に示す I_c - B カーブを縦軸、横軸ともに I_{c0} で規格化してみた。図 2.3.3-25 に示すように、規格化した I_c - B カーブは温度に依らず一致して、 I_c が温度でスケーリングされることがわかる。

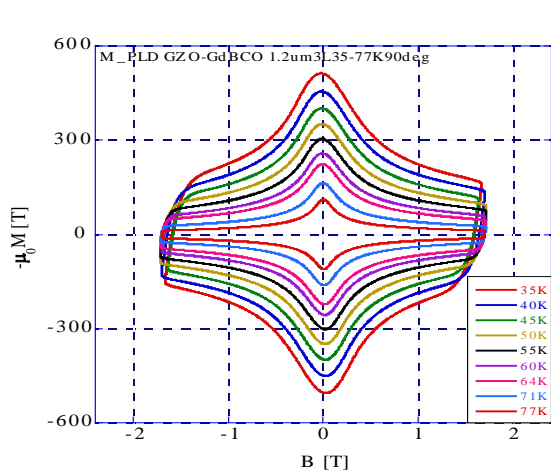


図 2.3.3-23 測定した GZO 中間層を持つ Y 系超電導線材の磁化曲

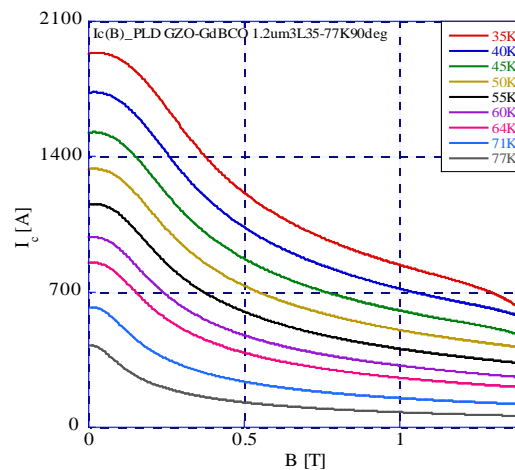


図 2.3.3-24 磁化曲線から求めた I_c - B 特性の温度依存性

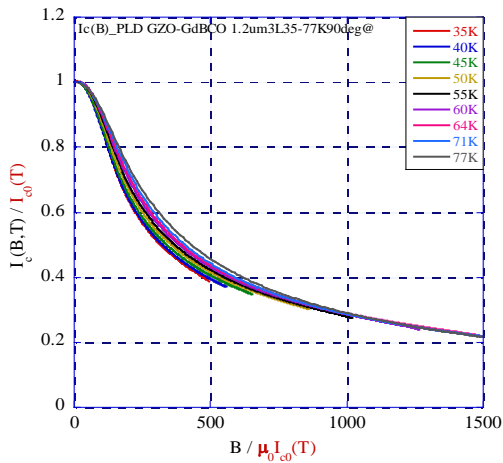


図 2.3.3-25 図 2.3.3-24 の I_c - B カーブの対数表示

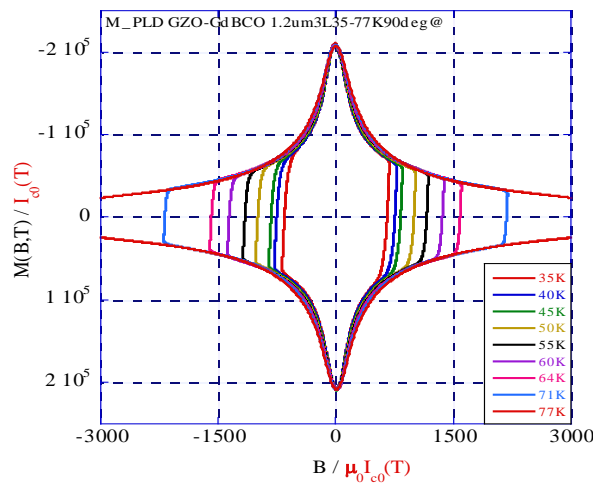


図 2.3.3-26 I_{c0} で規格化した磁化曲線

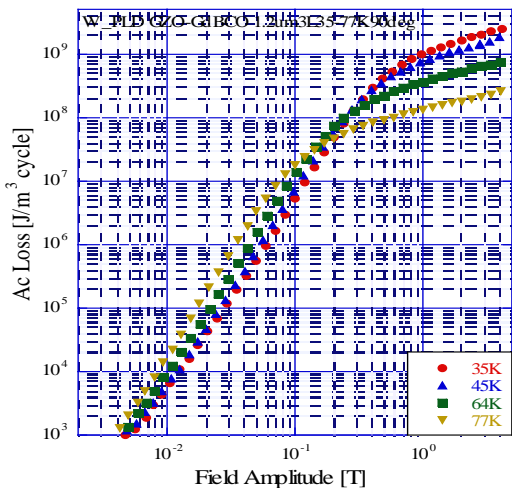


図 2.3.3-27 Y系超電導線材の交流損失測定値

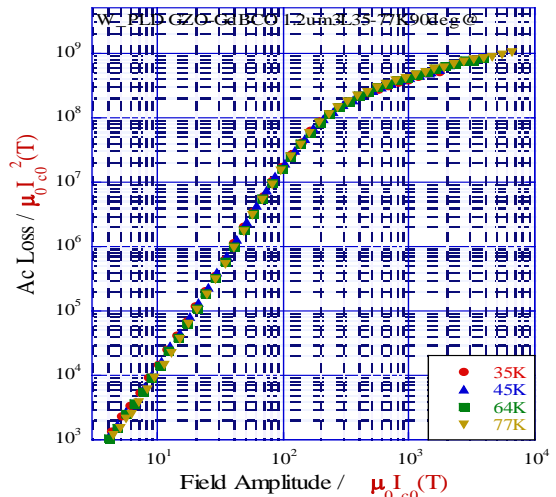


図 2.3.3-28 規格化した交流損失

I_c - B 特性は磁化曲線から求めたものであるから、無論、磁化曲線も I_{c0} で規格化すると図 2.3.3-26 に示すように温度に依らず一致して、温度でスケールされる。さらに、磁化曲線の囲む面積が交流損失に相当するから、図 2.3.3-27 に示す各温度で測定した交流損失は、磁界振幅を I_{c0} 、交流損失を I_{c0} の二乗で規格化することにより、図 2.3.3-28 に示すように一本のマスター曲線に乗り、温度でスケールされる。

ここで示した Y系超電導線材を含め、中間層が異なる数種の線材についても I_c - B 特性、交流損失の温度スケール則が成立することを確認し、変圧器設計指針の一部を構築した。

2.3.4 超電導変圧器対応線材安定製造技術開発

超電導変圧器対応 Y 系超電導線材の安定製造技術開発は、2.1.3-4 節に述べたように、特に、交流損失の低減が重要である。本項では、Y 系超電導線材を適用する超電導変圧器の技術開発にあたり、IBAD-PLD（パルスレーザ蒸着法）線材及び IBAD-MOD（有機酸塩熱分解法）線材にて、超電導変圧器の技術開発に必要な 5 mm 幅 3 分割にて $I_c=40 \text{ A}@65 \text{ K}\&0.01 \text{ T}$ で 100 m 以上に相当する線材を安定的に製造し提供する技術開発の成果について述べる。また、スクライビング溝加工前後の微細組織変化を詳細に解析し、加工条件等の適正化、および線材の特性評価と巻線の交流損失見積り手法についての成果も述べる。なお、表 2.3.4-1 に超電導変圧器対応線材の安定製造技術開発フローを示す。

表 2.3.4-1 超電導変圧器対応線材の安定製造技術開発フロー

	H20	H21	H22	H23	H24
巻線技術開発	基礎試験モデル	短絡モデル	転位均流モデル 低損失モデル	2kA 級巻線モデル 2MVA 変圧器モデル	
線材安定供給		PLD 線材 km,		Mgo 基板線材	
PLD 線材					
MOD 線材		PLD 線材 km		Mgo 基板線材	
線材加工		細線化 30m 長 (100m 5mm 幅 3 分割以上、40A @65K&0.01T) 中間目標		Mgo 基板線材細線化	
線材プロジェクト				(m 5mm 幅 5 分割以上)	

2.3.4-1 超電導変圧器対応線材安定製造技術開発（フジクラ）

IBAD 中間層付き基板上にパルスレーザ蒸着法（PLD 法（図 2.3.4-1））により形成された超電導層は比較的欠陥が少なく安定して製造することが可能である。この技術を活用して、5 mm 幅、100 m 長以上の Y 系超電導線材に対して、3 分割のスクライビング細線溝加工後に所定の特性（65 K、0.01 T における $I_c=40 \text{ A}$ ）を



図 2.3.4-1 PLD 線材構造

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 級変圧器モデル用に使用する線材を供給する。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、有機酸塩熱分解法による超電導層成膜用の IBAD 中間層付き基板を供給する。

(1) 超電導線材の提供

IBAD法により形成した中間層上にPLD法により超電導層を形成する手法により製造したY系超電導線材（以下IBAD-PLD線材）は、超電導線材の性能を表す臨界電流値と線材長さの積（以下 I_L ）で世界最高クラスの176.023 Amの線材製造した実績がある。平成20年度～22年度にプロジェクトより課せられたIBAD-PLD線材の供給計画は表2.3.4-2のとおりである。

表 2.3.4-2 超電導変圧器用線材の供給計画と実績

年度	適用巻線モデル	条長(m)、()内は安定化材仕様	
		計画	実績
H20	安定化銅構造	55 m(0.1 mmt Cu), 100 m(0.1 mmt Cu)	56 m (0.1 mmt Cu), 117 m (0.1 mmt Cu)
	曲げ歪み	54 m (0.1 mmt Cu), 54m	54 m (0.1 mmt Cu), 59 m
	4 巻線限流	252 m (0.1 mmt Cu)	252 m (0.1 mmt Cu)
	2 次口出し接続	58 m (0.1 mmt Cu)	59 m (0.1 mmt Cu)
H21	短絡	1170 m (0.3 mmt Cu)	1825.1 m (0.3 mmt Cu)
	転位均流	1320 m (0.1 mmt Cu)	1320 m (0.1 mmt Cu)
	数 100 kVA級限流	120 m (0.3 mm CuNi)	120 m (0.3 mm CuNi)
	曲げ歪み	54 m	106.6 m (無し)-
H22	磁界分布	666 m (0.1 mmt Cu), 940 m	
	数 100 kVA 級限流	741 m (0.05 mmt Cu), 944 m	

表 2.3.4-3 平成 21 年度製造線材の歩留りの製品単長依存性

出荷	総長 m ※	安定化材	単長 30 m		単長 50 m		単長 100 m	
			本数	歩留%	本数	歩留%	本数	歩留%
09/04	138	0.3 mmt Cu-Ni	4	87.0	2	72.4	0	0
09/05	740	0.3 mmt Cu	20	81.1	11	74.3	4	54.0
09/06	1,838	0.3 mmt Cu	33	53.9	17	46.2	7	38.1
09/07	266	0.3 mmt Cu-Ni	4	45.1	2	37.5	0	0
09/09	1,186	0.1 mmt Cu	34	86.0	18	75.9	8	67.4
	4,168		95	68.4	50	60.0	19	45.6

IBAD-PLD 法で超電導層を形成後、その用途に応じて Ag の保護層厚さや材質や厚さの異なる安定化材を線材に形成することが求められた。表 2.3.4-2 は、平成 20 年度～21 年度の供給実績である。安定化材の種類ごとに貼り合わせ方法を検討し、プロジェクトの要求を満たす線材を提供した。5 mm 幅線材で平成 20 年度 597 m、平成 21 年度に 3371.7 m を納入した。また、表 2.3.4-3 に平成 21 年度製造線材の歩留りの製品単長依存性を示す。

(2) 中間層テープの提供

IBAD-Gd₂Zr₂O₇(以下 IBAD-GZO)中間層は、成膜装置を大型化し大面積化することにより、結晶粒面配向度が 16 度以下のテープを連続的に 100 m オーダで製造することが可能である。平成 20～22 年度にプロジェクトより課せられた IBAD-GZO 中間層テープの供給計画と実績は表 2.3.4-4 のとおりである。

表 2.3.4-4 中間層付きテープ供給計画と実績

年度	計画		実績	
	条長(m/月)	総長(m/年度)	条長(m/月)	総長(m/年度)
H20	187.5	1312.5	187.8	1314.3
H21	125	1250	138.7	1386.6
H22	150	1800	150.0	1800.0

平成 20 年度～21 年度に当社よりプロジェクト内の他機関に対して提供した IBAD-GZO 中間層テープの供給実績を図 2.3.4-2 に示す。棒グラフは月毎の提供量を示し、◆印は累計の出荷長を示している。

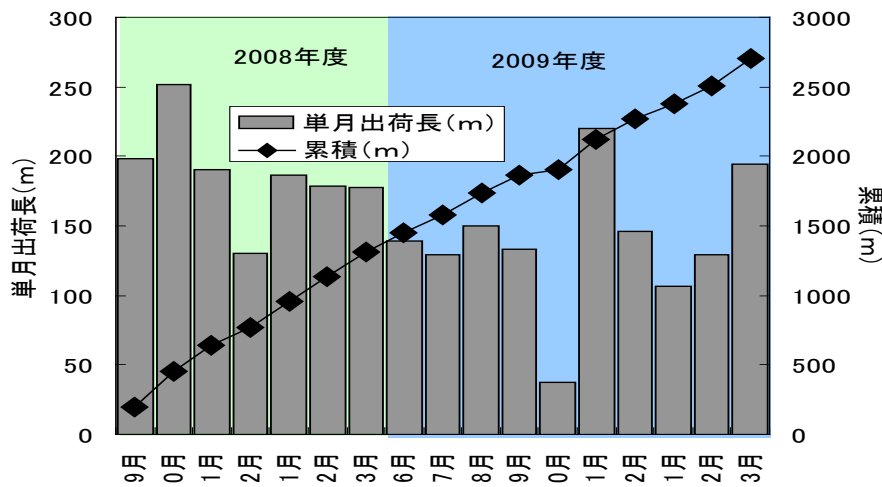


図 2.3.4-2 平成 20～21 年度に中間層テープ提供実績

平成 20 年度は 3 月末時点で、1314.3 m を提供し、平成 21 年度は 1386.6 m を提供した。月毎の提供量は必ずしも一定ではないが、各年度の計画に対して年度内に全量を提供済みである。平成 21 年度末までに提供した総長で約 2.7 km である。

(3) 線材特性分布の均一化の検討

PLD法はY系超電導体のように多元系元素からなる薄膜の形成に適した方法であるが、当社では超電導線材の幅方向および長さ方向の特性を均質化するために、装置の構造を検討してきた。図2.3.4-3にフジクラで開発したホットウォール加熱式PLD装置の外観を示す。



図 2.3.4-3 ホットウォール加熱式
PLD 装置

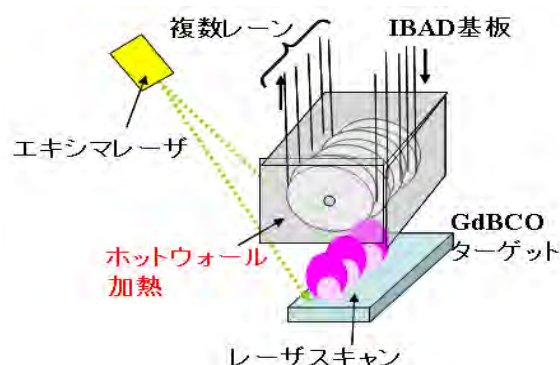


図 2.3.4-4 真空チャンバー内部図

装置中央部が薄膜を堆積させる真空チャンバであり、その両脇に、送り出し・巻き取りリールを配置してあることから連続的にテープ基材 (IBAD 中間層付き金属基板) が真空チャンバに供給され、基材上に超電導層が形成される。真空チャンバ内を図 2.3.4-4 に模式的に示す。

ターゲット上に照射されたレーザー光により真空チャンバ内に放出された原料がホットウォールと呼ばれる炉内の IBAD 中間層付き金属基板上に堆積する。薄膜の成長面はホットウォールからの輻射熱により一定温度に保たれていることから、本装置により均質な超電導結晶薄膜の形成が期待される。そこで、本装置を用いて均一な超電導特性を有する Y 系超電導線材安定製造条件を検討した。

図2.3.4-5にIBAD-MgO基板上に形成したホットウォール加熱式PLD装置で超電導層を形成した線材の I_c の線材長さ方向分布を示す。77 K、s.f.において直接通電により線材を700 mm間隔でI-V特性を測定し、 $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ に到達した電流値を I_c とした。

170 m超の長さを有する線材において、全長に亘って $300 \text{ A}/\text{cm}\cdot\text{W}$ (@77 K,s.f.) 以上の I_c を実現している。 I_c の平均値は $340 \text{ A}/\text{cm}\cdot\text{W}$ (@77 K,s.f.) であり、標準偏差 6.1 A であり、長手方向に特性の均質な超電導線材が形成された。

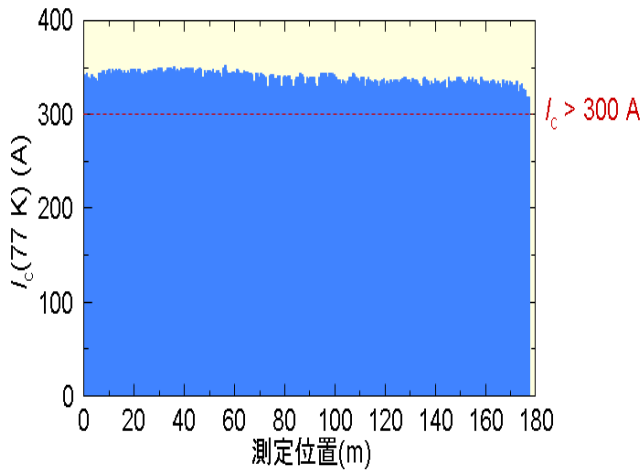


図 2.3.4-5 I_c の長さ方向分布 (340A) 図 2.3.4-6 連続巻き取り式イオンビームアシスト蒸着装置

(4) 中間層高速堆積方法検討

IBAD-GZO 中間層は、結晶粒面内配向度を 16 度以下にするために、1 μm 厚程度まで膜を成長させる必要がある。そのため、IBAD-GZO の製造速度は 5-7 m/h が上限であった。中間層付き基盤の提供を円滑に行うためには製造速度のさらなる高速化が不可欠となる。

図 2.3.4-6 に示した連続巻き取り式イオンビームアシスト蒸着装置は、中央部分が薄膜を蒸着させる真空チャンバであり、チャンバ内部には 110×15 cm^2 の世界最大のアシストイオンソースが設置されている。装置両脇には、送り出し・巻き取りリールを配置されており、連続的にテープ基材が真空チャンバに供給され、数百 m の長さを有する基材上に IBAD 層を形成することが可能となっている。

本装置を用いて IBAD 法により極めて薄い膜厚で高配向の中間層を形成可能な MgO (以下 IBAD-MgO) 層の導入を検討した。IBAD-MgO 層は、金属基板上に金属元素の拡散を防止するため 100 nm 厚の Al_2O_3 膜と、その上にベッド層として形成した 20 nm の Y_2O_3 膜上に形成される。図 2.3.4-7 はベッド層形成後に図 2.3.4-6 の装置で毎時 1000 m で成膜した IBAD-MgO 層断面の透過電子顕微鏡写真である。ベッド層の上に厚さ 5~10 nm 程度の IBAD-MgO 層が形成され、さらにその上に結晶粒が配向した CeO_2 が連続的に成長している様子が観察された。

MgO 層中の結晶粒 2 軸面内配向中間層は極めて薄いことから、X 線を使って直接配向度を測定することは事実上不可能である。そのため、IBAD-MgO 上に CeO_2 キャップ層を形成したテープの $\Delta\phi$ の長手方向分布を評価した結果を図 2.3.4-8 に示す。

1000 m の全長で CeO_2 キャップ層の $\Delta\phi$ が 5 度以下を実現している。これは IBAD-GZO 層上に形成された CeO_2 キャップ層と同等の結晶粒の配向度である。

このことから IBAD-GZO 層と比較して 100 倍以上の高速で成膜された IBAD-MgO 層は、IBAD-GZO 層に代わって長尺の Y 系超電導線材製造に十分使用可能であることが分かった。

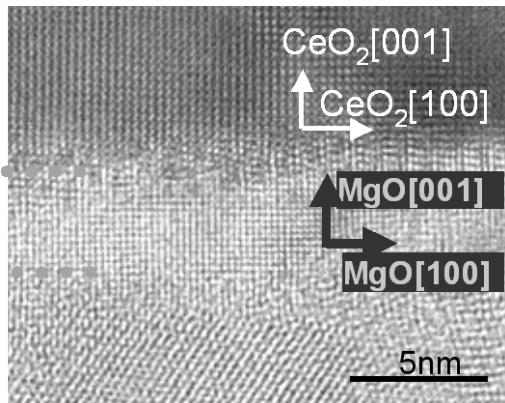


図 2.3.4-7 IBAD-MgO の透過電子顕微鏡観察結果

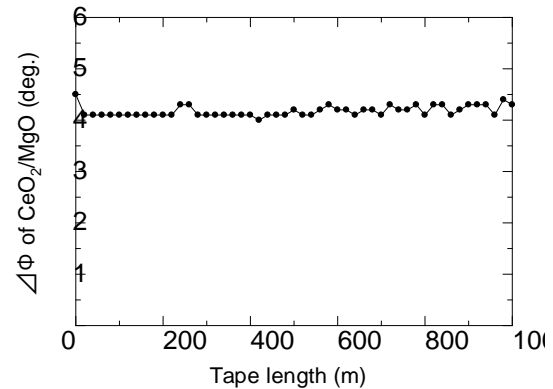


図 2.3.4-8 MgO の 2 軸配向中間層上に形成したキャップ層の $\Delta\phi$ の長手方向分布

(5) まとめ

平成 20 年度より超電導変圧器の研究開発事業の超電導変圧器対応線材安定製造技術開発プロジェクトに対し 5 mm 幅の超電導線材を 3968.7 m を供給した。

平成 21 年度に製造した線材に対して、製品単長を 30 m、50 m、100 m とした場合の歩留りのシミュレーション結果を表 2.3.4-3 に示す。製品単長が長くなるにつれて、歩留りが低下している。これは、線材長さ方向に不定期間隔で出現する不良箇所によるものである。平成 22 年度以降は不良箇所の出現原因の探索を進め、根本的な対策を実施することで、100 m を超える長さの線材の歩留り向上を検討する予定である。

超電導特性の均質化検討では、高性能な長尺の Y 系超電導線材の製造方法である IBAD-PLD 法により製造した線材の長さ方向の臨界電流特性を測定し、150 m を超える超電導線において 700 mm 間隔で測定した臨界電流特性は標準偏差が 5 % 以下の均質な超電導線を得ることができた。今後は線材幅方向の I_c 分布特性を把握することにより、均質性を評価し、長さ方向と同様に均質な超電導特性が得られるよう成膜条件の最適化等を実施する。さらに 300 m 級線材において実現するよう長尺化の研究開発を進める。

中間層テープに関しては平成 20 年 9 月より 10 mm 幅の IBAD-GZO 中間層テープの供給を開始した。平成 20 年度は 3 月末時点で、1314 m を提供し、平成 21 年度は 1387 m を提供した。月毎の提供量は必ずしも一定ではないが、各年度の計画に対して年度内に全量を提供済みである。平成 21 年度末までに提供した総長で約 2.7 km である。

平成 22 年度以降のプロジェクトへの量的な安定供給に貢献できる技術として

IBAD-MgO 中間層付きテープの開発に着手し、IBAD-GZO と同等の性能を有する線材の開発に成功した。平成 21 年度に IBAD-MgO 中間層テープを超電導変圧器の研究開発事業の超電導変圧器対応線材安定製造技術開発、並びに超電導電力ケーブルの研究開発事業の基板・中間層テープ開発プロジェクト内の他機関に提供し、適応の可否を検討した。ケーブルプロジェクトにおいては採用にいたらなかったが、変圧器プロジェクトにおいては、当社で製造する超電導線材に IBAD-MgO 中間層線材を用いることを関して関係機関の了解を得られたことから、平成 22 年度より IBAD-MgO 中間層付きテープを用いて製造した IBAD-PLD 超電導線材を供給する予定である

2.3.4-2 超電導変圧器対応線材安定製造技術開発（昭和電線）

有機酸塩熱分解法（MOD 法）は将来の低コスト化が見込まれる線材作製方法として期待されるプロセスの一つである。長尺化に向けた開発は「超電導応用基盤技術研究開発(第Ⅱ期)プロジェクト」からであり、他の気相成膜プロセスと比較してスタートの時期こそ遅かったものの高性能な線材の安定製造（歩留り向上）に成功しつつある。この技術を活かして、5 mm 幅、100 m 長以上の Y 系超電導線材に対して、3 分割のスクライビング細線溝加工後に所定の特性（@65 K、0.01 T における $I_c=40$ A）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 級変圧器モデル用に使用する線材(総量約 2 km)を供給する。

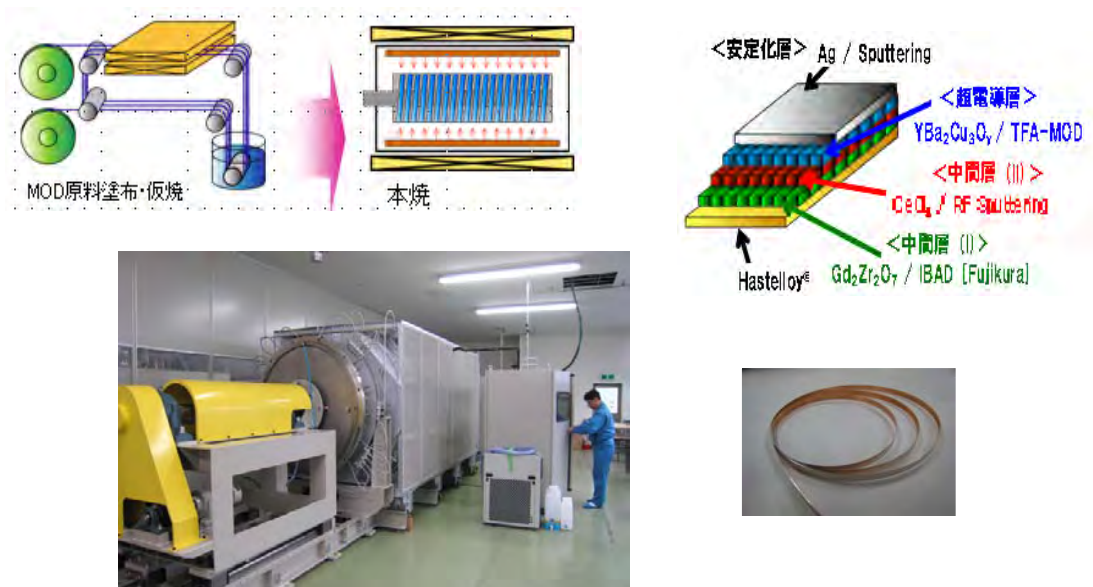


図 2.3.4-9 MOD 線材構造

(1) 超電導線材の提供

三弗化酢酸塩溶液（TFA）を用いる有機酸塩熱分解法（MOD法）は、TFA-MOD

法と呼ばれる。中間層付き金属基板の表面に金属有機酸塩溶液を塗布した仮焼膜を一度形成し、仮焼膜を結晶化させる熱処理工程（本焼）を経ることによって超電導薄膜を形成するプロセスである（MOD法（図2.3.4-9））。本焼工程において使用する電気炉は、ISTECやアメリカンスパーコンダクター社で開発されたReel-to-Reel（RTR）式の連続熱処理炉が一般に用いられているが、本プロジェクトでは量産性に優れた大型バッチ式熱処理炉を採用した。

バッチ式熱処理炉を使用した本焼プロセスは、全長100 m以上の線材を炉内のドラムに装填し、短時間で焼き上げる手法である。このため、RTR式熱処理炉に比べて短時間で線材を焼成することが可能であり、密閉された空間で反応させるため外部環境の擾乱を受け難いという特長がある。しかしこの特長は両刃の剣であり、本焼中に投入線材から一斉に発生する結晶成長に有害なガスがRTR式熱処理炉に比べて短時間で多量に発生し、しかも密閉空間であることからガスの影響を低減することが難しくなる。この為、プロジェクトで使用する昭和電線が開発した大型バッチ式熱処理炉以外、100 m以上の線材作製に成功した例は存在しない。

下地に使う基板は、(株)フジクラよりIBAD法で作製したGd₂Zr₂O₇中間層付き基板の供給を受け、RFスパッタリング蒸着法によりCeO₂中間層を昭和電線で形成したものを使用している。このY系超電導線材（以下IBAD-MOD線材）は、超電導線材の性能を表す臨界電流値と線材長さの積（以下 I_L ）で世界第3位の155,000 Amの線材製造した実績がある。平成20年度～22年度にプロジェクトで予定したIBAD-MOD線材の供給計画は表2.3.4-5のとおりである。

IBAD-MOD法で超電導層を形成後、その用途に応じてAgの保護層厚さや材質や厚さの異なる安定化材を線材に形成することが求められた。表2.3.4-5は供給実績である。5 mm幅線材で平成20年度593 m、平成21年度に327 mを納入した。スクライビング細線化技術の検討のために561mの線を作製した。

平成21年度に製造した線材に対して、製品単長を30 m、50 m、100 mとした場合の歩留りを計算した結果を表2.3.4-6に示す。

表 2.3.4-5 超電導変圧器用線材の供給計画と実績

	適用モデル	条長 (m)、()内は安定化材仕様	
		計画	実績
20 年度	安定化銅構造	55 m (0.1 mmt Cu) 100 m (0.1 mmt Cu)	57 m (0.1 mmt Cu) 100 m (0.1 mmt Cu)
	曲げ歪み	54 m (無し) , 54 m (0.1 mmt Cu)	54 m (無し), 108 m (0.1 mmt Cu)
	4 巻線限流 (補助一次、二次)	188 m (幅: 4.5 mm, 無し) 79 m (無し)	188 m (無し) 86 m (無し)
21 年度	Edge wise	54 m (無し)	0 m
	転移均流	1,320 m (無し)	0 m
	1 次コイル間接 続	159 m, 168 m (無し)	0 m
22 年度	磁界分布モデル	1,050 m, 1,050 m (無し)	

表 2.3.4-6 平成 21 年度製造線材の歩留まりの製品単長依存性計算結果

出荷日	総成膜長 m ※	安定化材	単長 30 m		単長 50 m		単長 100 m	
			本数	歩留%	本数	歩留%	本数	歩留%
09/04/30	2,329*	銀 15 mm	54	69.5	29	62.2	7	30.0
09/08/02	190	銀 30 mm	4	63.2	1	26.3	0	0
09/08/03	45	銀 30 mm	1	66.7	0	0	0	0
09/08/03	75	銀 30 mm	2	80.0	1	66.7	0	0
	2,639		61	69.3	31	58.7	7	26.5

(2) スパッタプロセスによる長尺中間層の検討

長尺線材に使用する CeO_2 中間層は、従来 ISTEK の Pulse Laser Deposition (PLD)装置を借用して作製していたが、本プロジェクトより昭和電線に導入した高周波スパッタリング(RF-Sputtering)装置を用いて作製する事とした。高周波スパッタリング装置を選択した理由は、① 装置導入時のコストが PLD 装置に比べて安く済むこと、② 長時間運転において自動インピーダンス整合器を使用することにより無人運転が可能となり、線材のコスト低減に対して有効であること、③ スパッタリングプロセスで成膜した膜の表面形状は粒子が細かく、非常に平滑な表面を形成できること、④ MOD 法で致命的となる結晶粒の欠落に伴うクレータ状の欠陥形成を抑制する効果が期待できること、等である。図 2.3.4-10 に CeO_2 中間層の成膜に使用したマルチターン機構 RTR 式スパッタリング装置の外観を示す。高周波スパッタリング装置の初期検討として、 CeO_2 薄膜自己配向効果の確認を行った。



図 2.3.4-10 Reel-to-Reel 式連続高周波スパッタリング装置

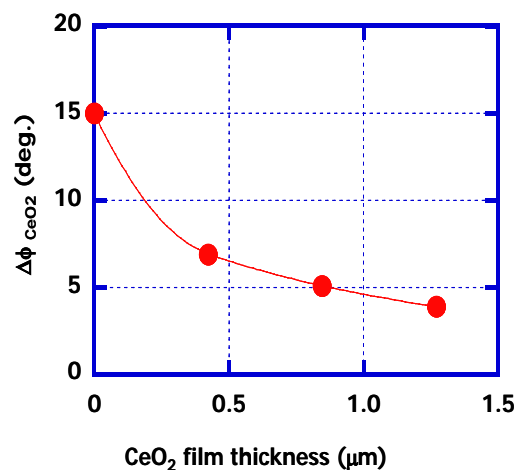


図 2.3.4-11 高周波スパッタリングで作製した CeO_2 中間層の自己配向効果

図 2.3.4-11 より、従来の PLD プロセスと同様に CeO_2 中間層の膜厚増加と共に面内配向度が向上する自己配向効果が高周波スパッタプロセスでも生じているこ

とが明らかである。CeO₂中間層を1 μm程度成膜することにより、CeO₂中間層の面内配向度 Δφ は4度以下が得られる。図 2.3.4-12 に(株)フジクラ殿より供給された IBAD-GZO 中間層付き基板の結晶粒面内配向度と昭和電線の高周波スパッタリング装置で作製した CeO₂中間層の結晶粒面内配向度の関係を示す。

IBAD-GZO 基板は、結晶粒面内配向度 18度以下のものが供給されており、スパッタリングプロセスにより6度以下の結晶粒面内配向度を示す CeO₂中間層を供給用線材として作製している。図 2.3.4-12 にこの CeO₂中間層を使用した Y系超電導線材の臨界電流値 I_c(cm幅換算)の長手法区の分布を示す。全長にわたり I_c>200 A/cm-w の通電特性が得られ、局所的な I_c低下は膜の傷や付着物に起因することが分かっている。

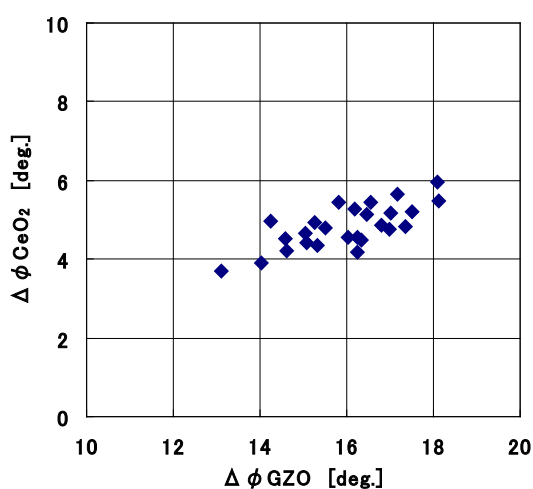


図 2.3.4-12 IBAD-GZO 中間層付き基板の面内配向度

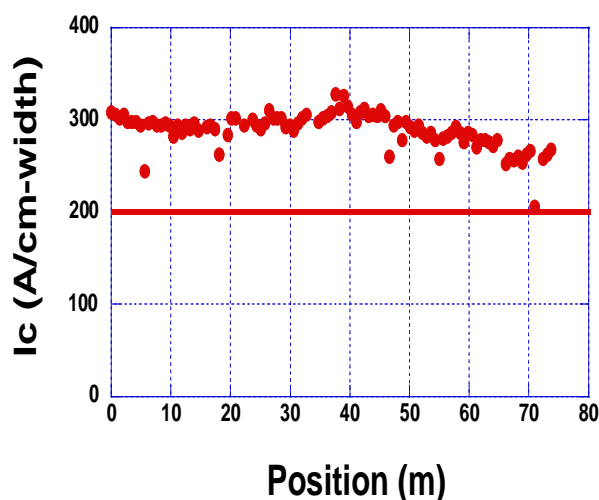


図 2.3.4-13 I_cの長さ方向分布

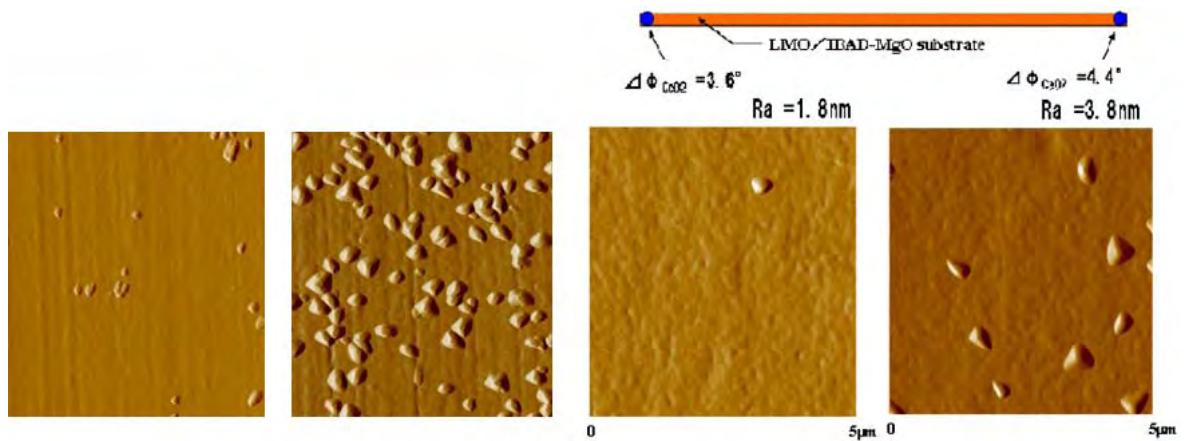
(3) IBAD-MgO 中間層に対する検討

IBAD-GZO 中間層付き基板上に I_c >200 A/cm-w の通電特性を持つ超電導層を TFA-MOD プロセスで形成するには6度以下の結晶粒面内配向性を持つ CeO₂中間層が必要である。そのためには18度以下の IBAD-GZO 基板の結晶粒面内配向性が必須となるが、結晶粒面内配向度で16度以下を得るためためには1 μm厚程度まで膜を成長させる必要があり、IBAD 中間層膜の製造速度を律速していた。近年、IBAD 中間層の材料を GZO から MgO に変更することになり、薄い膜厚で GZO 並、あるいはそれ以上の結晶粒面内配向性を得ることが判明した。IBAD-MgO 中間層への移行が急速に進んでおり、改めてスパッタプロセスによる CeO₂中間層成膜条件の最適化を行う必要が生じた。このことから、IBAD-MgO 中間層の表面に La-Mn-O (LMO) キャップ層を一層形成した状態で基板を提供してもらい、CeO₂中間層の成膜条件の検討を実施した。

IBAD-MgO 中間層上へ(200)配向した CeO₂中間層を作製する成膜条件の最適化

は基板の製造ロットが変わると同一条件で成膜しても異なる表面形状を示し、成膜条件を絞ることは難航した。具体的な例を図 2.3.4-14 に示す。

右の写真に見える三角柱状突起は (111)配向した CeO_2 の結晶粒である。(200)面の面内配向度は左の表面平滑性に優れるもので 2.7 度、左の突起が多いもので 3.7 度を示しているが、(111)配向した粒子が膜の表面に沢山見られる試料では、超電導層を形成しても低い I_c しか得ることが出来ない。因みに左の写真の試料は $I_c = 240 \text{ A/cm-w}$ であるのに対し、右は $I_c = 0 \text{ A/cm-w}$ である。従って、(111)配向した結晶粒の成長を抑制することが高特性の線材を得る必要条件となる。図 2.3.4-16 に(111)配向した結晶粒周辺の TEM 観察写真の結果を示す。図中の 3、4 の反射電子線回折像は、 CeO_2 膜の(200) 配向と各結晶粒が面内で方位が若干ずれていることを示した。 CeO_2 層の配向の乱れが小さくなるよう成膜条件を改めて検討した結果、酸素の濃度を従来の条件よりも増やしたところ、(111)配向した結晶粒の成長を抑制すること判明した。



Ra=3.1nm(5×5μm) Ra=8.0nm(5×5μm) 突起 30-60nm
 図 2.3.4-14 異ロットの IBAD-MgO 中間層上に同一条件で作製の CeO_2 中間層の表面形状

図 2.3.4-15 IBAD-MgO 基板上(90 m)にスパッタリング法で作製した長尺 CeO_2 中間層

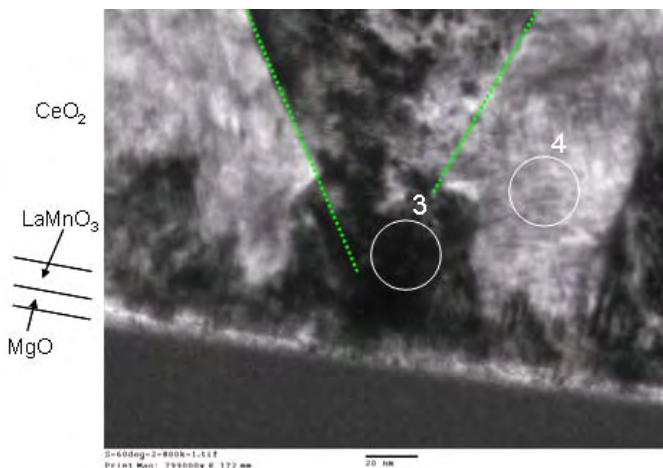


図 2.3.4-16 (111)配向した CeO_2 結晶粒の断面 TEM 写真

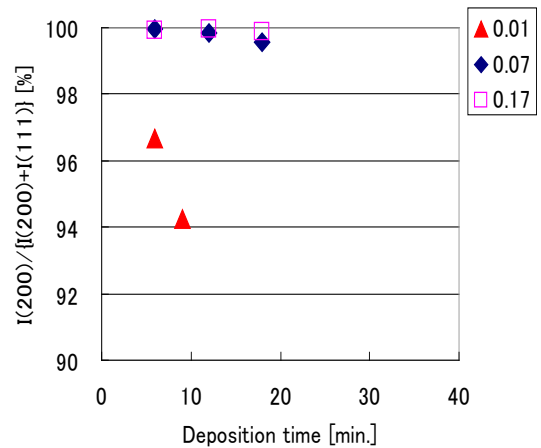


図 2.3.4-17 異なる酸素濃度で成膜した CeO_2 中間層の(200)面の配向率

図 2.3.4-17 に異なる酸素濃度で成膜した CeO_2 中間層薄膜の(111)面に対する(200)面の配向率を成膜時間に対してプロットした結果を示す。酸素濃度を 0.01 % とした時は成膜時間の増加共に(111)面の割合が増加するのに対し、他の条件では(111)配向の成長を抑制している事がわかる。90 m の LMO/IBAD-MgO 基板に RTR 式のスパッタ装置で連続成膜を行った結果を図 2.3.4-15 に示す。前端と後端で同等の表面平滑性が得られている。25 m の LMO/IBAD-MgO 基板に作製した超電導線材では $I_c=250 \text{ A/cm-w}$ の特性が得られている。

(5) まとめ

平成 20 年度より超電導変圧器対応線材安定製造技術開発プロジェクトに対し 5 mm 幅の Y 系超電導線材 927 m を供給した。

製品単長が長くなるにつれて、歩留りが低下している。これは、Y 系超電導線材長さ方向に不定期間隔で出現する不良箇所起因するものである。これは、基板の傷など明らかな欠陥と認識されるもの以外に、中間層成膜時に付着した異物（剥離した CeO_2 の破片）を巻き込んだものや仮焼膜の作製において付着した異物に起因する物が多い。平成 22 年度はこれ迄に明らかになった工程内で発生する欠陥の対策を行う。50~100 m 単長の歩留りを上げ、更に 100 m を超える長さの線材の歩留り向上を図り、年度末までに Y 系線材の提供を行う。

平成 22 年度以降のプロジェクトへの線材供給は、IBAD-GZO 中間層付き基板よりも高性能化、低コスト化が期待される IBAD-MgO 中間層付き基板上の Y 系超電導線材に移行する。スパッタプロセスによる CeO_2 中間層特有の問題と考えられていた(111)配向結晶粒の不規則な結晶成長に対し、対策を講じる事に成功して 90 m 級の CeO_2 中間層の成膜に成功した。また、25 m 級の基板で Y 系超電導線材を TFA-MOD 法で作製し、IBAD-GZO 層と同等の性能を有する線材の開発に成功した。

2.3.4-3 超電導変圧器対応安定製造技術線材の評価及び細線安定加工技術開発 (JFCC、ISTEC)

超電導変圧器で使用される線材は垂直磁場変動に起因した交流損失の低減のため、スクライビング細線溝加工による細線化が必須である。しかしながら、スクライビング細線溝加工を施すと、線材中の欠陥の大きさによっては細線化したフィラメントに通電できない場合も生じる。本項目では、これまで ISTEC で開発しているレーザ加工等によるスクライビング細線溝加工技術の安定製造技術を開発する。具体的には、変圧器用として 100 m 長以上の Y 系超電導線材で 5 mm 幅への切断及び 3 分割のスクライビング細線溝加工を安定して実施可能な技術を開発する(図 2.3.4-18)。プロジェクト後期 2 カ年で開発する 2 MVA 級変圧器モデル用線材に対してのスクライビング細線溝加工を平成 23 年度以降に実施するために、100 m×3 分割の安定溝加工技術を平成 21 年度末までに開発することを目標とする。また、切断及びスクライビング細線溝加工前後の線材の超電導特性を評価して、安定製造加工技術開発に資するとともに、変圧器対応 Y 系超電導線材安定製造技術開発にフィードバックすることにより幅方向及び長手方向の超電導特性の均一性向上に反映させる。

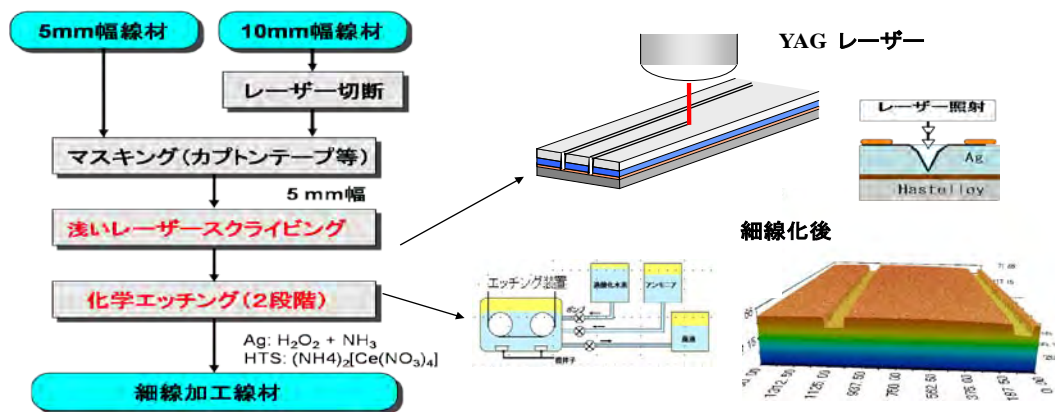


図 2.3.4-18 細線化のプロセスの概要

(1) 研究開発の経緯

2 MVA 級変圧器モデルの実証には、単長で最大約 300 m、総長約 10 km の 5 mm 幅の Y 系超電導線材の 3 分割スクライビング細線溝加工が必要となる。細線溝加工された Y 系超電導線材に対しては、65 K、0.01 T の磁場中で約 40 A の I_c とともに、1 MΩ/cm 程度のフィラメント間絶縁抵抗が要求される。加工前の線材の I_c を 200 A/cm-w と仮定すると、許容される加工による I_c 低下率は $40/(\alpha-1.6)/100 = 0.25$ となる。ここで、 α は 65 K、0.01 T と 77 K, self-field 条件における I_c 値の比率であり、加工後の I_c としてはフィラメントの最小 I_c 値の 3 倍を用いる。ISTEC では、NEDO「超電導応用基盤技術開発(第 II 期)」プロジェクトの中で、Nd:YAG レーザ (波長 355 nm) を用いた線材の切断技術、スクライビング細線溝加工技術

を開発した。ここでは、レーザの照射パワーを上げることにより表面の安定化層からハステロイ™基板までの切断が可能であり、照射パワーを下げることでハステロイ™基板表面付近までのスクライビング細線溝加工ができる。しかしながら、本プロジェクト開始時のスクライビング細線溝加工実績としては、総長 70 m の 5 分割加工が行われたものの、単長では最大 4.5 m に留まっていた。また、高いフィラメント間電気抵抗を得るためには、レーザスクライブ後に溝中に残留した熔融金属のドロスを化学エッチングで除去することが有効であることが示唆されていたが、プロジェクト開始前はバッチ式のエッチング処理の実績しかなく、またフィラメント間電気抵抗の再現性も悪いなど、長尺線材に適用するためにはプロセス上の多くの課題があった。

本研究開発項目においては、最大単長約 300 m の線材に適用可能な安定した 5 mm 幅切断技術、3 分割スクライビング細線溝加工技術の確立を目指し、加工プロセス上の課題解決を試みた。この際、50 m 長 5 分割溝加工による交流損失の 1/5 低減を中間目標とする超電導機器用線材技術開発における細線加工技術開発と連携し、その成果を最大限利用することで研究開発を効率的に進めた。また、長尺化により必要となる可能性のあるスクライビング細線溝加工線材の補修技術、剥離防止をねらいとした樹脂被覆技術についても超電導機器用線材技術開発における成果の適用検討を行った。

変圧器モデルで要求される細線溝加工長尺線材の性能を実現するためには、加工による特性劣化を抑制するとともに、超電導変圧器対応安定製造技術線材の長手方向及び幅方向の特性均一性の向上が必要となる。ここでは、安定製造技術線材の加工前後の評価を各種の長尺線材評価装置を用いて行い、製造技術開発へのフィードバックを試みた。安定製造技術線材としては、当初 IBAD-GZO 中間層を用いた PLD 線材および MOD 線材の検討が行われたが、より低コスト化が期待できる IBAD-MgO 中間層への移行が検討され、本研究開発項目においても、スクライビング細線溝加工に対する適用性の検討を行った。

(2) 具体的成果

a. 線材安定切断技術の開発

超電導変圧器は線材幅が 5 mm であることを前提として設計されている。しかし IBAD-PLD 線材は 10 mm 幅で作製されているため、欠陥や突起を発生させることなく安定的に 5 mm 幅に切断する技術を開発した。なお IBAD-MOD 線材の 5 mm 幅分割加工については 2.3.4(b)を参照されたい。

まず、銀層まで形成された IBAD-PLD 線材の切断に最適なレーザの選定を行った。比較を行ったのは、UV 波長領域 (355 nm) の Q スイッチ式 Nd:YAG レーザおよび IR 波長領域(1064 nm)のパルス式 Nd:YAG レーザである。それぞれのレーザ装置の特徴を表 2.3.4-7 にまとめた。

表 2.3.4-7 切断加工に用いたレーザーの比較

レーザー波長	最大出力	パルス幅	周波数	励起光
355 nm	5 W(10 KHz)	< 50 nsec	1 – 50 kHz	LD (808 nm)
1064 nm	250 W	0.08–1.2 ms	500 Hz (Duty 15 %)	LD (808 nm)

どちらの方式でも切断による I_c の劣化は生じなかった。これらのレーザーで切断した線材の断面を SEM 観察した結果を図 2.3.4-19 に示す。(a)は Q スイッチレーザー(355 nm)で切断した断面、(b)はパルスレーザー(1064 nm)で切断した断面である。レーザーの入射は図の上側、すなわち銀安定化層からとした。図中で上、下とあるのは、10 mm 幅を 5 mm 幅に切断した際の上側部分と下側部分のことを示している。出力の大きなパルスレーザーが切断に有利であると思われていたが、Q スイッチレーザーでは断面が垂直に切り立っているのに対して、パルスレーザーではレーザー入射方向から反対側に向かって傾斜 (テーパ) が掛かったような形状をしており、レーザー光が抜ける部分 (ハステロイTM側) では突起 (バリ) が発生している。このような突起が発生した原因は、パルスレーザーのパルス幅が広いためハステロイTMが溶融し付着していること、および繰り返し周波数が低いために付着したハステロイTMのドロスをレーザー光によって除去することができなかつたと考えられる。

変圧器対応線材では、切断後に様々な工程 (銅安定化材料の貼付け、スクライビング時のマスキングテープの貼付け、絶縁テープの巻付け等) が想定されており、このような突起が発生していると銅テープのハンダ付けで片側が浮いてしまったり、マスク不良を生じさせてサイドのオーバーエッチが発生する、絶縁テープに亀裂が入るなどの支障をきたすおそれがあるので、切断に用いるレーザーとしては Q スイッチレーザーが好ましいという結論を得られた。

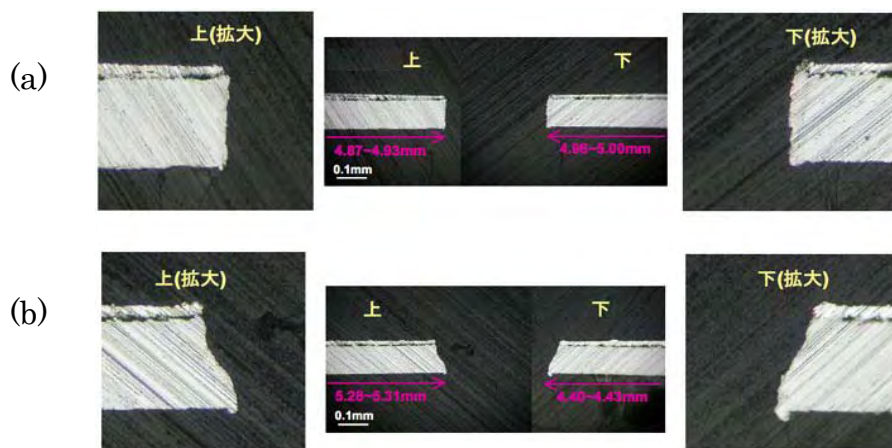


図 2.3.4-19 異なる方式のレーザー (表 2.3.4-7) による切断断面観察結果
(a) 355 nm 波長の Q スイッチレーザー、(b) 1064 nm 波長のパルスレーザー

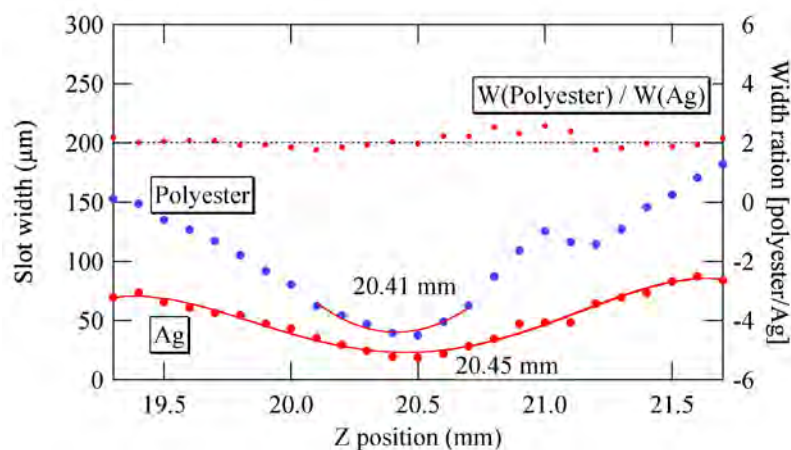


図 2.3.4-20 線材とレーザー光学系との距離 Z と切断幅との関係

上記のように、切断に Q スイッチレーザを用いる方が突起等の発生が少ないことが判明したので、次に、フォーカス位置の最適化を行なった結果を図 2.3.4-20 に示す。今回使用した Q スイッチレーザは光学集光方式であるため、被切断線材とレーザー光学系との距離 (Z) によってビーム径が変化する。そこでビーム径と距離 Z との関係測定し、切断により除去される線材の量を可能な限り低減するための条件を検討した。ここで、ビーム径の大きさを測定するために線材の表面にポリエステルテープを貼付し、テープ表面および銀層に生じた切断幅をプロットしてある。ポリエステルと銀での切断幅の比はほぼ一定であり、ビーム径は相似形の変化をしていることが分かる。この結果より、 $Z=20.45$ mm の場合に最小幅 $19 \mu\text{m}$ となることが判明した。この条件はレーザービームが最も細く絞られてエネルギー密度が高くなる条件であることから、切断の高速化も期待される。切断の最適条件は $Z=20.45$ mm であることが判明した。

Q スイッチレーザ (表 2.3.4-7 中の 355 nm 波長のレーザ) での長尺線材の 5 mm 幅切断加工をより短時間で行うため、上記のレーザー切断の高速化の検討も行った。表 2.3.4-8 に $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7/\text{CeO}_2$ バッファ層上に成膜された 3 種類の線材 (TFA-MOD 線材、out-of-plume の PLD/IBAD 線材、in-plume の PLD/IBAD 線材) での線材切断結果を示す。この結果から、銀安定化層の膜厚で多少の違いはあっても切断速度をこれまでの 7.2 m/h から 25.2 m/h まで高められることが判明した。しかしながら、高速化により切断面にバリが発生する可能性も除外できないので、現時点では、変圧器プロジェクトで使用される線材の安定的加工においてはこれまでと同じ 7.2 m/h の切断速度を維持し、切断速度の高速化は平成 21 年度後半に導入した出力の高い Q スイッチファイバーレーザ (波長 1064 nm、繰り返し周波数 50 - 100 kHz) を用いて 100 m/h 以上の高速切断を目指して検討を行っている。

表 2.3.4-8 線材切断速度の高速化の検討結果

線材種類	Ag 厚 (μm)	線材搬送速度 (m/h)							
		7.2	10.8	14.4	18.0	21.6	25.2	28.8	32.4
TFA-MOD 線材	20	切断可能領域						切断不可領域	
PLD/IBAD 線材 (out-of-plume)	8	切断可能領域							
PLD/IBAD 線材 (in-plume)	10	切断可能領域						切断不可領域	

表 2.3.4-9 には、上述のようにバリ発生がない 7.2 m/h の条件で変圧器用提供線材の 5 mm 幅切断加工を行った実績を示す。これまで総長で 5 km 長以上の加工を行っている。5 mm 幅切断においては、線材受け入れ時および切断加工後に必ず連続ホール素子法を用いた長手方向の I_c 分布の評価を行うこととを電力会社、線材メーカーおよび ISTEK 間で取り決めており、表 2.3.4-9 に記したすべての線材で切断加工後に I_c の目立った劣化が発生しなかったことが確認された。

表 2.3.4-9 レーザによる線材切断実績

日付	製作	長さ	加工	日付	製作	長さ	加工	日付	製作	長さ	加工
2009.4.15	フジクラ	200m	2分割	2009.7.13	ISTEC	2.4	2分割	2010.1.28	ISTEC	2.5	5分割 (2mm幅)
2009.4.20	フジクラ	300m	2分割	2009.7.26	フジクラ	94	2分割	2010.2.2	ISTEC	2.5	5分割 (2mm幅)
2009.4.27	フジクラ	320	2分割	2009.7.28	フジクラ	251	2分割	2010.2.10	ISTEC	49.5	5分割 (2mm幅)
2009.4.30	フジクラ	230	2分割	2009.7.30	フジクラ	270	2分割	2010.3.4	ISTEC	100	2分割
2009.5.11	フジクラ	278	2分割	2009.8.6	ISTEC	11	2分割	2010.4.14	フジクラ	120	2分割
2009.5.25	フジクラ	250	2分割	2009.8.6	フジクラ	250	2分割	2010.4.15	フジクラ	125	2分割
2009.5.27	フジクラ	300	2分割	2009.8.10	ISTEC	100	両端 1mm 中央4分割	2010.5.28	フジクラ	51	2分割
2009.5.28	フジクラ	221	2分割	2009.8.24	フジクラ	300	2分割	2010.5.28	フジクラ	131	2分割
2009.5.29	フジクラ	120	2分割	2009.8.26	フジクラ	286	2分割	2010.5.31	フジクラ	56	2分割
2009.6.12	ISTEC	134	2分割	2009.9.16	フジクラ	300	2分割	2010.6.7	ISTEC	200	2分割
2009.6.29	ISTEC	2	2分割	2009.11.6	ISTEC	55	2分割				
2009.6.29	ISTEC	30	2分割	2009.11.19	ISTEC	40	2分割				
2009.7.1	フジクラ	15	2分割	2009.12.28	ISTEC	2	5分割				
2009.7.6	ISTEC	10	2分割	2010.1.6	ISTEC	50	2分割				
合計											

b. 線材安定スクライビング細線溝加工技術の開発

表 2.3.4-10 には、長尺線材のレーザスクライビング細線溝加工の技術課題と開発内容、プロジェクト開始時の状況とこれまでの到達点をまとめる。

表 2.3.4-10 細線加工の技術課題と進捗状況

技術課題	プロジェクト開始時	開発内容	進捗状況(22年6月)
I_c 残留率の向上	31 - 52 %	プロセス改良 ・弱出力レーザー照射 ・2段階エッチング ・ドロス低減	短尺 3分割 10-15 % 5分割 16-25 %
絶縁確保	分布あり (1 Ω - 1 M Ω)	・溝幅低減 ・マスクテープ選定 ・洗浄工程の追加	1 M Ω /cm 以上 (30 m 3分割)
エッチング時間	30分/4.5 m (9 m/h)	2段階エッチングの改良	エッチング速度 46m/h
長尺エッチング	バッチ式 (最長 4.5 m)	線材加工装置開発 ・RTR マスク装置 ・RTR エッチング装置	長尺線材加工装置のプロトタイプを開発
長尺加工実績	最長 5 m	長尺加工装置の活用	120 m 3分割
剥離防止	高温アニール	被覆検討	I_c 劣化の少ないポリアミドイミド被覆を実現

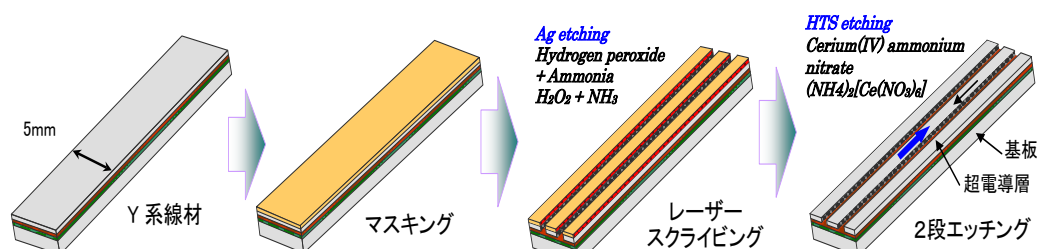


図 2.3.4-21 改良型レーザスクライビングプロセスの概要

プロジェクト開始時には、レーザー照射によりハステロイ™基板表面に達する溝を形成していたが、熔融金属のドロスが溝に残留し、フィラメント間の電気絶縁が取れないという問題があった。フィラメント間の絶縁抵抗を確保するためには、硝酸セリウムアンモニウム溶液による化学エッチングでドロスとその周囲の超電導層を除去する必要があるが、エッチング時間が長くなると、オーバーエッチングのため I_c 低下率が大きくなるという問題があった。超電導機器用線材技術開発における低交流損失線材作製技術開発 (2.4.3 項) で詳細に述べるが、この問題を解決するため図 2.3.4-21 に示すようにプロセスを改良した。この改良プロセスでは、レーザー照射のパワーを絞り、銀安定化層の途中までスクライビングを行い、その後過酸化水素とアンモニアの混合溶液で銀層を、硝酸セリウムアンモニウム溶液で超電導層を2段階でエッチングする。この方法により、ドロスの発生が抑制でき、溝幅の低減が可能になるとともに、化学エッチング時間を 1/5 程度に大幅に短縮できる。図 2.3.4-22 には、改良プロセスにより作製したフィラメント端部の断面 SEM 像を示す。超電導層のオーバーエッチングが 10 μm 以下に抑えられていることがわかる。

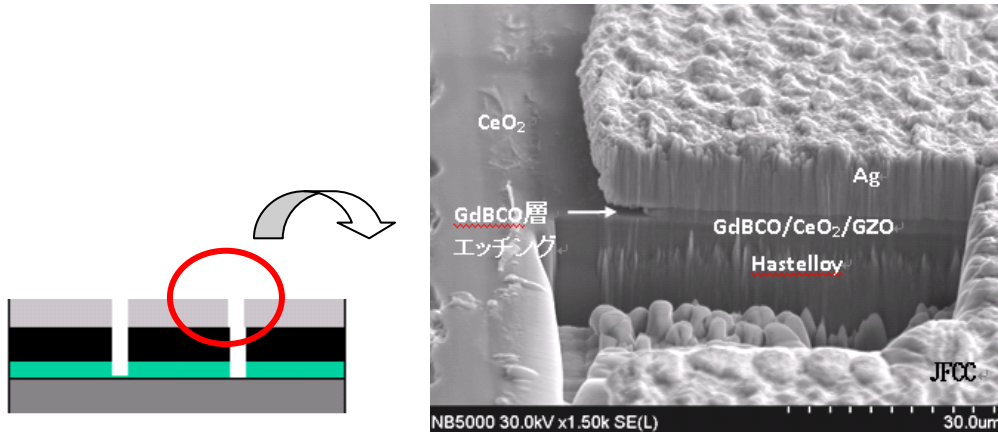


図 2.3.4-22 改良型プロセスで形成した溝周辺の断面 SEM 観察結果

エッチング加工はプロジェクト開始前にはバッチ式で行われていたが、長尺線材の加工を安定にかつ高速に行うため、全プロセス工程の **Reel to Reel (RTR)** 化を行った。図 2.3.4-23 には、開発したマスキングテープ貼り合わせ装置、エッチング装置の写真を示す。この **Reel to Reel** 式エッチング装置の導入により、銀層および超電導層のエッチングをそれぞれ 40 m/h 以上の速度で行うことが可能になった。

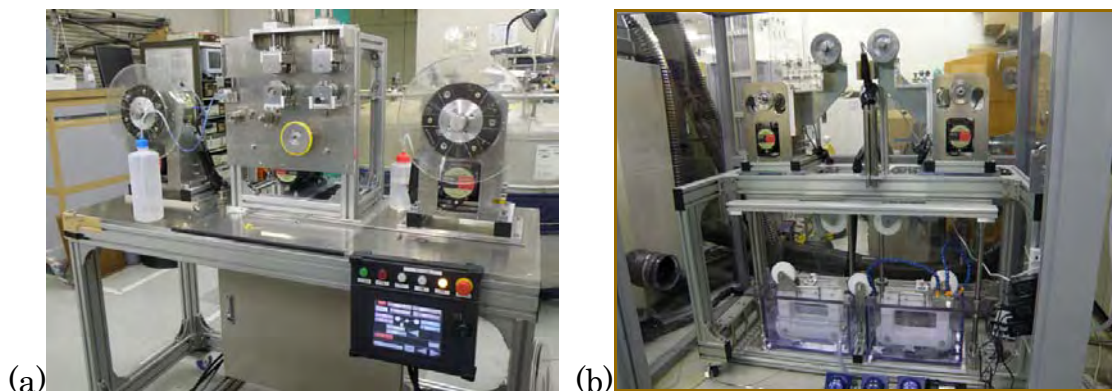


図 2.3.4-23 開発した(a)マスキングテープ貼合せ装置と(b)RTR エッチング装置

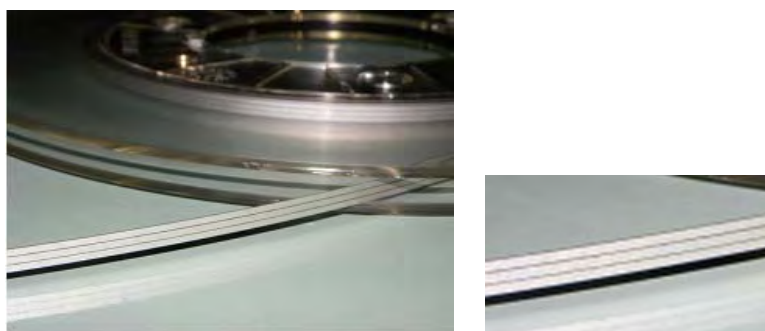


図 2.3.4-24 30 m 長 3 分割スクライビング溝加工線材の写真

長尺線材のスクライビング細線溝加工のもう一つの大きな課題は、エッチングのためのマスキングである。マスキングとしては、例えばフォトレジストのような樹脂を塗布乾燥し用いる方法もあるが、低コスト化の観点およびプロジェクト開始前

の実績から接着剤付きテープによるマスキングを採用した。しかしながら、従来採用していた接着剤付きカプトンテープは 20 m 長までしか入手ができないため、新たな材料検討を行った。その結果、300 m 長まで対応可能なテープ素材として 12.5 μm 厚のポリエステル（ゴム系接着剤使用）と 12 μm 厚のポリプロピレン（アクリル系接着剤）を選択し、長尺線材加工の検討を行った。図 2.3.4-24、図 2.3.4-25 には、30 m 長の PLD GdBCO 線材（中間層は IBAD-GZO）に対する加工後の写真、加工前後の電流-電圧 (I - V) 特性をそれぞれ示す。マスキングテープとしては、ポリエステルを用いた。加工前の $I_c = 118 \text{ A/cm-w}(@77 \text{ K,s.f.})$ に対し、加工後の 3 フィラメントの総 I_c は $101 \text{ A/cm-w}(@77 \text{ K,s.f.})$ であり、その低下率は 14.7 % であった。加工による超電導層の断面積の低下率は 12.4 % と見積もられた。したがって、加工によるフィラメント I_c の劣化率は 2.3 % と低く抑えられていることが証明された。一方、機器応用の際に重要となる最小フィラメント I_c ($I_{c \text{ min}}$) 値の 3 倍の値は 89.4 A で、加工前の I_c 値に対する減少率は 24.3 % である。この値は、線材特性の均一化やフィラメント幅の均一化により改善可能と考えられるが、65 K、0.01 T での要求仕様である 40 A を十分満たしている。また、フィラメント間抵抗としては、いずれのフィラメント間も 100 k Ω 以上の値を示し、1 cm 長さ当たり換算すると 300 M Ω という十分な絶縁特性が得られていることが分かった。

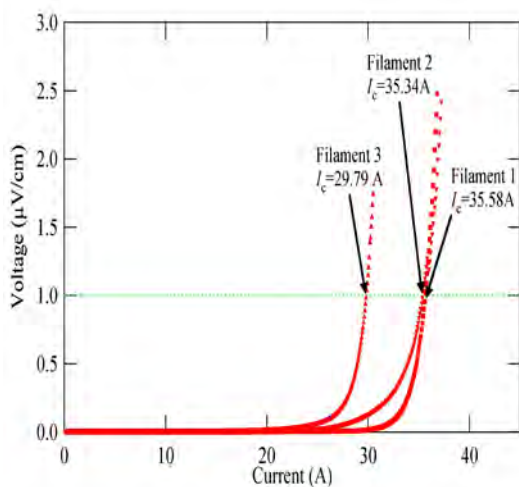


図 2.3.4-25 PLD GdBCO 線材の 3 分割後の各フィラメント I - V 曲線

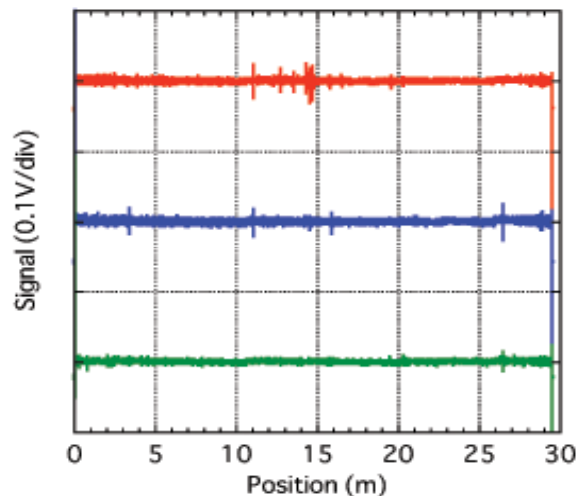


図 2.3.4-26 30 m 3 分割線材の SQUID グラジオメータによる評価結果

加工した 30 m 長線材に対し、RTR の SQUID 検査装置で欠陥評価を行った結果を図 2.3.4-26 に示す。最も I_c の低いフィラメント 1 に対しては、14.5 m の位置に欠陥に起因する連続的な信号が見られる。また、このフィラメント及び中心のフィラメント 2 に対して、11 m の位置に比較的シャープな信号が見られる。これらの信号位置に対して線材の磁気光学 (MO) 観察を行った結果を図 2.3.4-27 に示す。フィラメント 1 に見られた連続的な信号はハンドリングにより導入された部分的な剥離、またフィラメント 1 と 2 で見られた信号は、両者にまたがる局所的に超電

導性が低下した欠陥に起因するものであることがわかった。RTR の SQUID 検査装置は、このようなフィラメントのマクロ欠陥に起因する信号を最高で 80 m/h の速度で検出することができ、加工技術へのフィードバックとともに、長尺加工線材の要補修箇所を検出に大きく役立つ。スクライビング細線溝加工された本線材は、絶縁処理後に過電流試験に用いられ、過電流に対する耐性が実証されている。IBAD-MgO 中間層は、IBAD-GZO に比べはるかに薄い膜厚で高い結晶粒面内配向

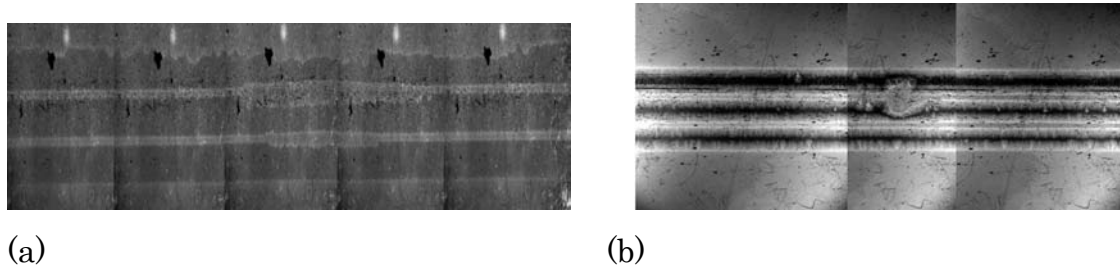


図 2.3.4-27 SQUID 検査装置で見つかった信号位置に対する MO 観察結果
(a) 14.5 m 付近、(b) 11 m 付近

度が得られるため、 CeO_2 自己配向キャップ層の厚さの薄化が可能で、極低コスト線材用の中間層として大きく期待されている。一方、低コスト化のため中間層全体の厚さを低減することにより、ハステロイ™基板と超電導層との電気絶縁性の低下や金属基板を通してのフィラメント間電気絶縁抵抗の低下が懸念される。変圧器用線材としての適用性を評価するため IBAD-MgO 中間層上の PLD GdBCO 線材に対し、銀安定化層とハステロイ™基板間の抵抗を評価した結果を図 2.3.4-28 に示すが、評価面積を広くした場合においても $0.2 \sim 1 \text{ M}\Omega\text{cm}^2$ の特性抵抗が得られている。この特性抵抗値を用いると、基板を介したフィラメント間抵抗は 300 m 長で 60Ω 以上と見積もられ、変圧器応用に十分な値となる見通しが得られた。実際に 3 分割スクライビング溝加工を行った 15 cm 長の短尺線材の各フィラメントの I_c とフィラメント間抵抗を表 2.3.4-11 にまとめる。フィラメント間抵抗は最小でも $0.83 \text{ M}\Omega$ であり、1 cm 当たり $12 \text{ M}\Omega$ と十分高い絶縁抵抗が得られることが確認された。また、総 I_c 低下率、 $I_{c \text{ min}} \times 3$ の低下率ともに IBAD-GZO 中間層を用いた線材と同等の特性が得られることも確認された。

表 2.3.4-12 には、これまで 5 mm 幅 3 分割のレーザスクライビング溝加工を行なった長尺線材の実績をまとめる。十分高いフィラメント I_c 及びフィラメント間抵抗が得られる歩留りは現状で約 50 % である。歩留り低下の主な原因としては、スクライビング溝への接着剤の残留によるエッチング不良で引き起こされるフィラメント間絶縁不良、マスキングテープ着脱や複数回の I_c 測定の際のハンドリングミスによるフィラメント I_c 不良がある。表 2.3.4-12 に示した 30 m 長線材の加工の際にはゴム系接着剤付きのポリエステルテープを用いたが、ゴム系接着剤は完全な除去が難しく、後述する補修工程での線材 I_c 劣化の原因となる可能性がある。

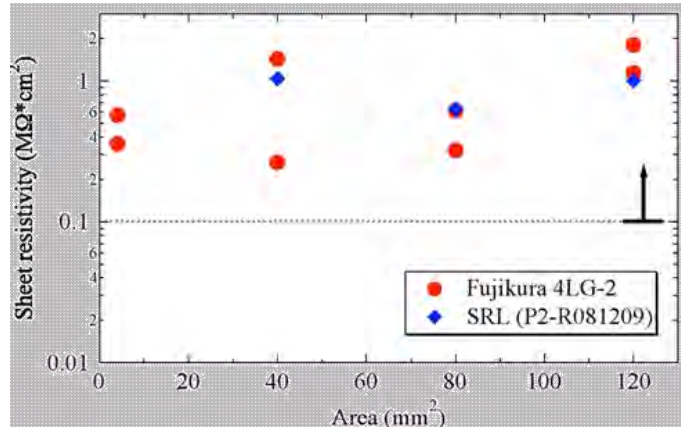


図 2.3.4-28 IBAD-MgO 中間層上線材の裏面抵抗

表 2.3.4-11 3分割スクライビング溝加工した 15 cm 長 IBAD-MgO PLD 線材の各フィラメントの I_c 及びフィラメント間抵抗

	フィラメント		溝		絶縁抵抗	
	幅	I_c		幅		
F1	1548 μ m	54A	F1~F2	219 μ m	F1~F2	0.83M Ω
F2	1450 μ m	50.5A	F2~F3	226 μ m	F2~F3	1.61M Ω
F3	1426 μ m	44A			F3~F1	2.06M Ω

表 2.3.4-12 長尺線材の 3 分割スクライビング溝加工実績

PET: ポリエステル, PP: ポリプロピレン

線材番号	長さ (m)	分割数	I_c (A)					最小 I_c × 分割数 (A)	最小 I_c 残留率 (%)	加工後 I_c 残留率 (%)	フィラメント間平均抵抗 (M Ω /cm)	マスク材	判定
			加工前	F1	F2	F3	加工後合計						
#1	30	3	118.1	29.8	35.3	35.6	100.7	89.4	76	85	294.7	PET	○
#2	19	3	128.0	35.7	45.5	30.9	112.1	92.7	72	88	0.0	PET	×
#3	29	3	127.8	10.0	26.2	13.0	49.2	30.0	23	38	0.0	PET	×
#4	15	3	140.0	39.8	44.3	41.0	125.1	119.4	85	89	5.0	PP	○
#5	30	3	154.6	30.7	41.8	53.3	125.8	92.1	60	81	1.9	PP	○
#6	30	3	175.1	33.1	72.7	61.9	167.7	99.3	57	96	0.0	PP	×
#7	19	3	135.5	42.8	35.6	30.5	108.9	91.6	68	80	0.1	PP	○

洗浄工程追加以降

#8	120	3	105.0	17.7	33.6	18.2	69.5	53.1	51	66	1.0	PP	○
#9	120	3	149.6	15.4	8.3	3.7	27.4	11.1	7	18	0.8	PP	×
#10	110	3	→	27.7	49.3	51.6	128.6	83.1	56	86	0.8	PP	○

より除去が容易なアクリル系接着剤を用いたポリプロピレンテープを現在は主に用いているが、溝に接着剤が部分的に残留する可能性があるため、その洗浄クリーニングによる除去を検討している。この方法を取り入れてスクライビング溝処理加工を行った 120 m 長 PLD GdBCO 線材の加工前後の I - V 特性を図 2.3.4-29 に、フィラメント間電気抵抗等の値を表 2.3.4-12 に示す。

また、図 2.3.4-30 には、29 m 長の TFA-MOD 線材に対する 3 分割スクライビング細線溝加工前後の I - V 特性を示す。このように、開発したスクライビング細線溝加工技術は TFA-MOD 長尺線材に対しても適用できる見通しが得られた。

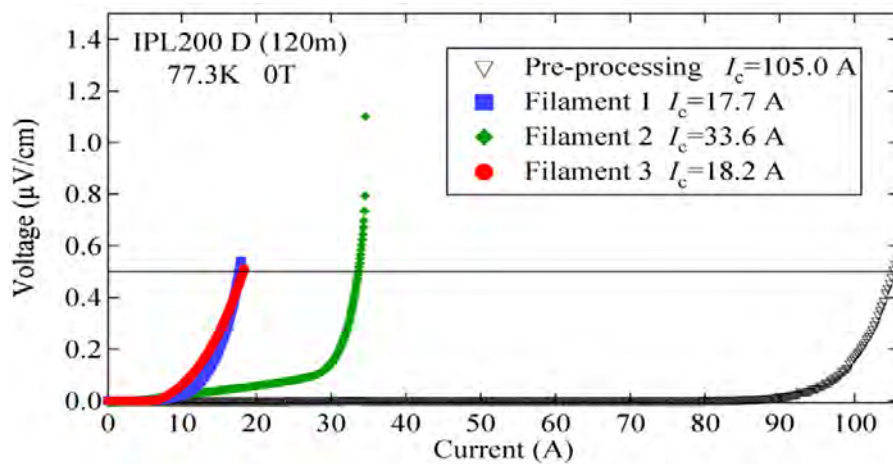


図 2.3.4-29 100 m 長の線材 3 分割

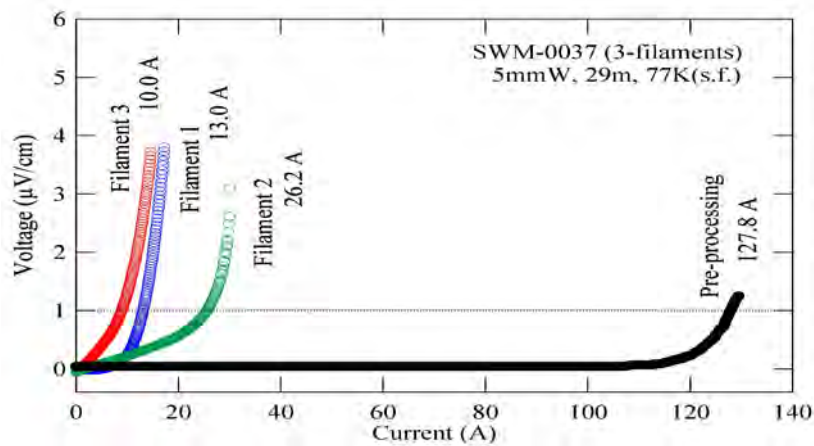


図 2.3.4-30 29 m 長の線材 3 分割

2 MVA 級変圧器モデルの 1 次巻線コイルに用いられる 3 分割スクライビング溝加工線材の単長は 250-300 m であり、例えば加工後に I_c の局所的に低い欠陥箇所が見つかった場合、これを補修することで機器用線材の歩留まりを向上させることが期待できる。「超電導応用基盤技術開発(第 II 期)」プロジェクトの中で、Y 系超電導線材に対する銀拡散法による接続・補修技術を開発した。補修の場合、線材の欠陥箇所に正常な線材パッチをそれぞれの銀安定化層を対向させるように置き、10-20 MPa の圧力を加えながら 400 °C 程度の温度で熱処理することにより電流の迂回路を作ることができる。銀安定化層の接触面での接続抵抗は 10-20 $n\Omega\text{cm}^2$ 程度であり、補修部での発熱は大きな問題とならない。図 2.3.4-31 には、短尺の 3 分割加工 GdBCO 線材に対する補修前後の I - V 特性の例を示すが、人工欠陥を導入したフィラメントに対して補修により I_c が回復していることがわかる。しかしながら、この技術を変圧器用の線材に適用する場合には、過電流に対する耐性や線材の転位箇所での機械的強度が課題となる。過電流試験用および転位曲げ試験用の約 10 m 長の長尺補修線材の試作を行い、その評価を予定している。

レーザスクライビング細線溝加工を行なった線材の各フィラメントは両端部が

エッチングされ超電導層が露出されているため、剥離強度の低下や水分付着による劣化などの懸念がある。このような加工線材を樹脂で被覆し保護する研究開発を現在、細線加工技術開発の中、実施している。樹脂の材質としては、ハンダ付け等の熱に対する耐性、電気絶縁性、部分除去の容易さの観点から現在までポリイミドアミドに絞り込んで検討を行っている。図 2.3.4-32 には、短尺の 3 分割加工線材に対し、ポリイミドアミド樹脂を数回にわたり 15 μm 程度 250°C で焼き付けた後の表面写真を示す。また被覆前および被覆後（電極部分の被覆除去工程後）の I - V 特性の変化を図 2.3.4-32 に示す。これより、 I_c の低下は 5 % 程度に抑えられることがわかった。エッジワイズ曲げ試験用に、10 m 長の 3 分割加工線材を作製し、樹脂被覆処理を行った。

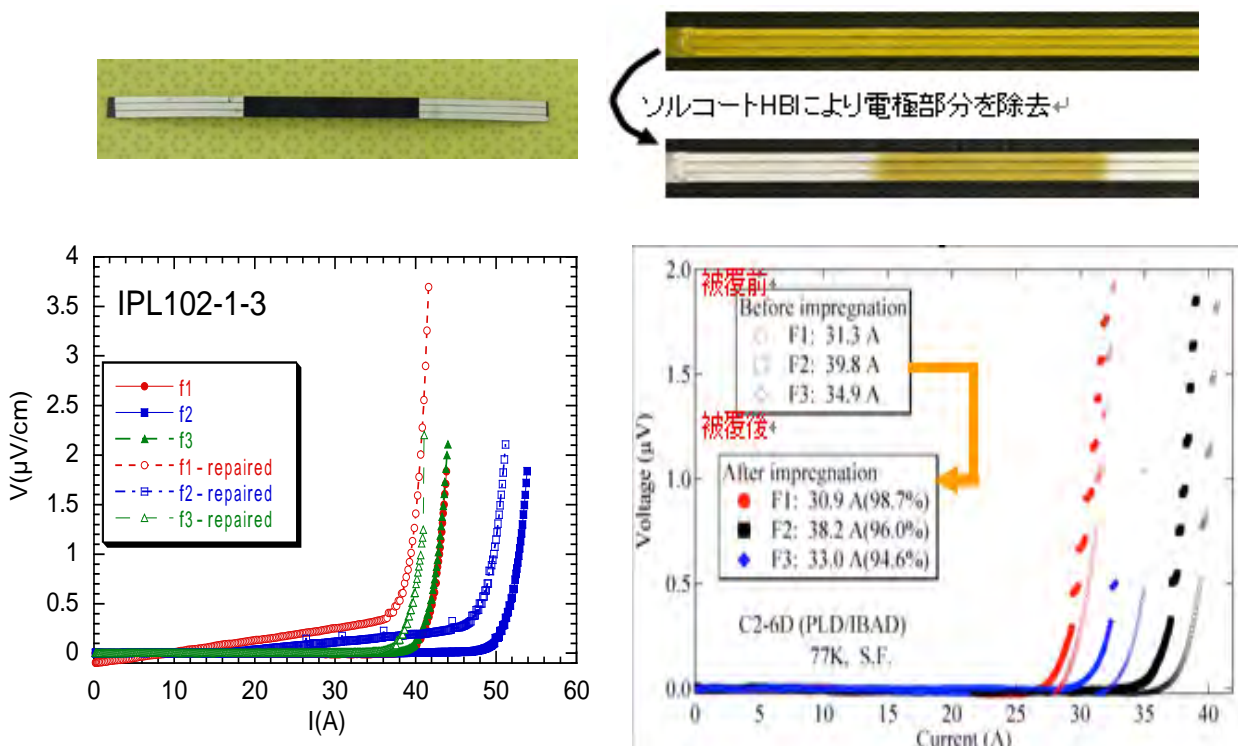


図 2.3.4-31 3分割スクライビング溝加工線材の補修前後の I - V 特性例

図 2.3.4-32 ポリイミドアミド被覆した線材の I - V 特性

c. 安定製造技術線材の評価実績

変圧器用の安定製造技術長尺線材は全て連続ホール素子法による非接触の I_c 評価を行った。連続ホール素子法においては、 I_c の長手方向分布に加え、幅方向の均一性もある程度評価することができる。図 2.3.4-33 には、IBAD-PLD 線材について代表的な評価結果を示す。(a)は 10 mm 幅線材の片側 5 mm に I_c の低下した領域が断続的に見られる例であり、(b)はプロセス改良により 10 mm 幅全体での幅方向の均一性が改善された線材の例である。また、安定製造技術長尺線材の欠陥分布を評価しプロセスにフィードバックするために MO 観察の評価も一部行った。

d. まとめ

線材切断技術については、UV波長領域（355 nm）のQスイッチ式Nd:YAGレーザを用い、バリのない切断を7.2 m/hの速度で安定して行う技術を確立した。また、H23年度からの2 MVA級変圧器モデル用の総長約10 kmの線材の切断加工を効率的に行うため、出力の高いQスイッチファイバーレーザ（波長1064 nm、繰り返し周波数50-100 kHz）を用い100 m/h程度の高速切断を目指した条件検討を行っており、H22年度中には使用可能になる見通しであるレーザスクライビング細線溝加工技術については、改良プロセス（低パワーレーザ照射+2段階エッチング法）の開発、Reel to Reel方式のエッチング装置等の開発、マスキングテープの最適化等により、100 m長級の5 mm幅3分割溝加工が可能となる技術を開発した。今後は、H22年度中に100-300 m長級の加工実績を積み上げるとともに、補修技術や樹脂被覆技術の適用性を確認することで加工線材の歩留りを向上させ、2 MVA級変圧器モデル用線材のレーザスクライビング細線溝加工をH23年度中に行なえる見通しである。

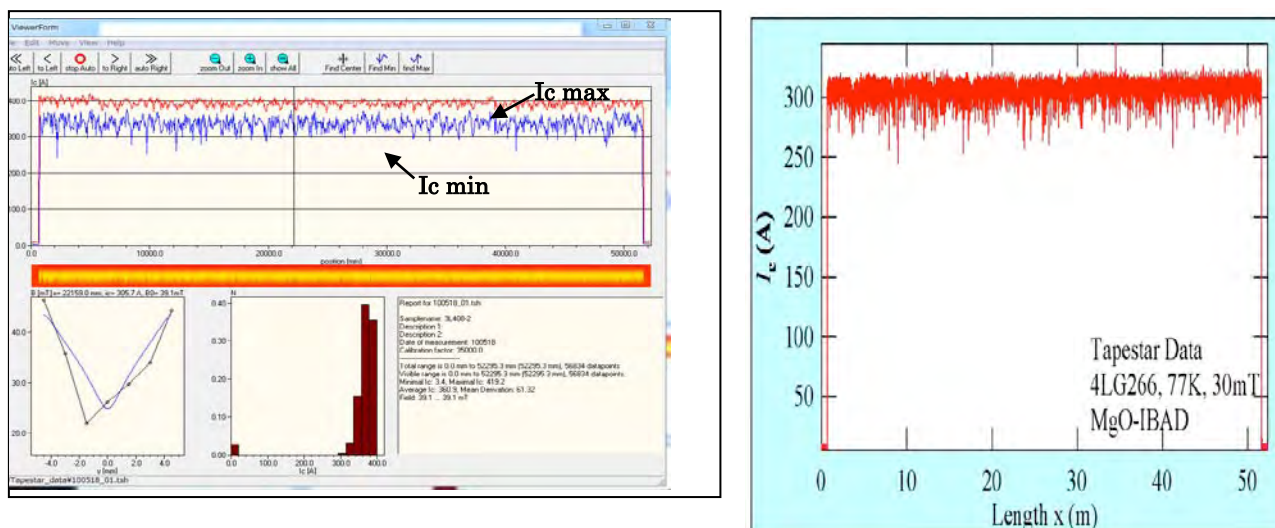


図 2.3.4-33 ホール素子法による I_c の非接触評価例

2.3.5 2 MVA 級超電導変圧器モデル検証

66 kV/6.9 kV-20 MVA 級配電用超電導変圧器（以下、20 MVA 級変圧器）の実現には、巻線技術（低損失技術、大電流技術等）や冷却システム技術等の要素技術を総合的に組み合わせた実機を作製し、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、Ⅱ-1.1.3-5 節に示す技術開発目標及びⅡ-2.1.3-5 節に示す技術開発内容に基づき、開発を進めた。今回、66 kV /6.9 kV-2 MVA 級超電導変圧器モデル（以下、2 MVA 級変圧器モデル）は巻線技術開発等の要素技術の段階的な成果を反映して設計検討を行い、その課通電試験の基礎計画書も作成した。また、配電用変電所に設置する 20 MVA 級超電導変圧器の設計検討も行った。

2.3.5-1 2 MVA 級超電導変圧器モデルの設計検討（九州電力）

配電用変電所用の 20 MVA 級変圧器の実現に向けて、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相当の巻線構成となる最低容量は 2 MVA となる。また、2 MVA 級変圧器モデルを次のステップで開発・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設計・製作する。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。③ 66 kV /6.9 kV-2 MVA 級超電導変圧器モデルの特性を検証する。

(1) 2 MVA 級変圧器モデルの設計

実機変圧器を見通す技術を早期に効率的かつ経済的に開発するため、以下の方針で 2 MVA 級超電導変圧器の設計検討を行った。

① 損失低減技術は一般変圧器の設計技術も加えて検討する。② 定格 66 kV の耐電圧（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、巻線径・巻線構成等）は極力実機相当とする。③ 電流に起因する変圧器巻線技術等は多層並列導体や転位均流化モデル技術を適用する。④ 前述の要素技術開発での成果を変圧器モデルに反映する。⑤ 極力鉄損の低減を図れるように鉄心は内鉄形で室温空間に配置し、巻線は絶縁面から一層毎に GFRP 巻枠を使用する円筒巻線とする。⑥ 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。

二次巻線の導体は、20 MVA 級（24 本並列）との転位技術の等価性のため 8 本並列とした。なお、定格電圧は同一なため、2 MVA 級の定格電流は一次 17.5 A：二次 167 A で、線材並列数は一次 1 本：二次 3 本となる。

短絡電流を 20 MVA 級と等価（線材 1 本の一次側短絡電流 389 A）とするには

4.5%となる（1.5%では一次側短絡電流 1167 A となり線材 1 本では困難）。単純に 20 MVA 級から 2 MVA 級に電流量を下げると、2 MVA 級超電導変圧器の%インピーダンスは 2 MVA 基準で 1.5%となる。この時の短絡電流は 20 MA 級と同一であり、一次側短絡電流は 1,167 A となり、超電導線 1 本で耐えられる範囲を超えてしまう。2 MVA 級で短絡試験を行う予定はないが、短絡電流を 20 MVA 級と等価にすることが望ましいと考えた。20 MVA 級の一次側の短絡電流は 1 本当たり 389 A であるので、これと等価にするためには 2 MVA 級の%インピーダンスを 2 MVA 基準で 4.5%となる。それを考慮し、20 MVA 級と同等の巻線寸法とし、2 MVA 級の%インピーダンスを上げることを検討した。%インピーダンスを上げるためには、後述する 2.3.5-2 節の(2-3)式からわかるように、 α 間距離を大きくすることや磁束通路数を減らすことである。検討の結果、磁束通路数を 1 にして、細かい調整は α 間距離で行うことで 4.5%に設定が可能になることが判明した。表 2.3.5-1 に 2 MVA 級超電導変圧器と 20 MVA 級実用超電導変圧器の主な仕様を、図 2.3.5-1 に 66 kV /6.9 kV 三相 2 MVA 級超電導変圧器の巻線配置を、図 2.3.5-2 に線材の I_c とロードラインを示す。2 MVA 級変圧器では、フィラメント分割線材の適用を想定したため 20 MVA 級で使用した特性より低くしている。また、負荷率が低くなっているが、これは 2 MVA 級変圧器として最適化したものではなく、20 MVA 級変圧器の巻線体格に準じたことや短絡電流を合わせたことに起因している。

表 2.3.5-1 66 kV/6.9 kV -2 MVA 変圧器モデル及び実用 20 MVA 変圧器の仕様

諸元	2MVA 変圧器モデル	20MVA 超電導変圧器(実用器)
相数、結線	3 ϕ 、Y-Y	3 ϕ 、Y-Y
定格電圧	66 kV/6.9 kV	66 kV/6.9 kV
定格電流	17.5 A/167.4 A	175 A/1674 A
%インピーダンス	4.5 % (2 MVA 基準)	15 % (20 MVA 基準)
巻線層数	8 層/2 層	8 層/2 層 (二次巻線は一次巻線の内外に配置)
ターン数	1033 (129.1 \times 8 層)/108(54 \times 2 層)	1033 (129.1 \times 8 層)/108(54 \times 2 層)
V/N	36.9	36.9
導体構成	1 本/8 並列(4 重 2 並)	3 並列(3 重)/24 並列(12 重 2 並)
線材断面寸法	5.3 mm \times 0.25 mm (0.1 mm 安定化銅と絶縁込)	5.3 mm \times 0.25 mm (0.1 mm 安定化銅と絶縁込)
線材長	9.6 km/1.5 km(合計 11.1km)	19.3 km/16.3 km(合計 35.6 km)
鉄心重量	8.0 t	7.2 t

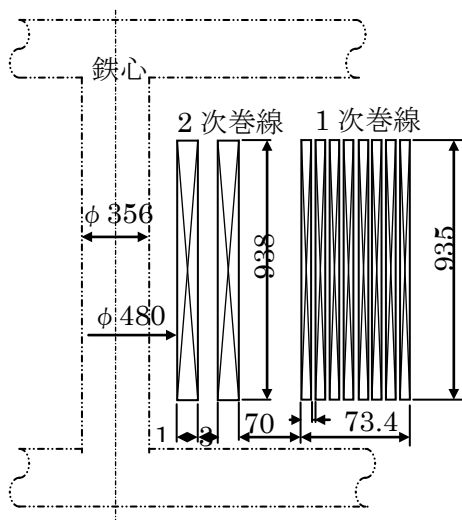


図 2.3.5-1 66 kV/6.9 kV 三相 2 MVA 級超電導変圧器の巻線配置

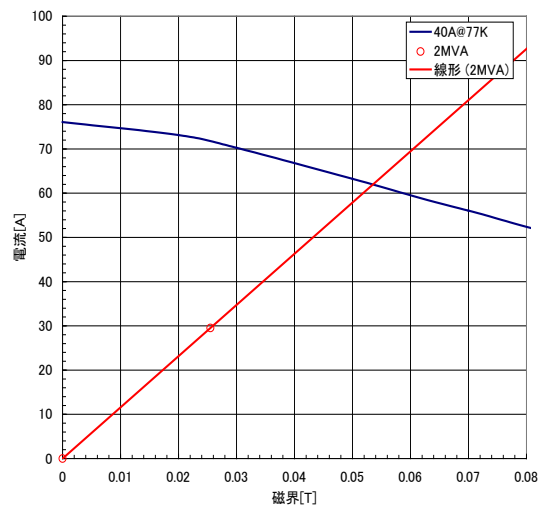


図 2.3.5-2 Y 系超電導線材の I_c とロードライン

この巻線仕様に基づき磁界解析を行った。その結果の磁束線図を図 2.3.5-3 に、磁界分布を図 2.3.5-4 に示す。方法や条件は 2.3.5-2 節と同一のため本節では省略する。図 2.3.5-5 に短絡電流解析結果を示す。この結果、短絡電流は $3,592 A_{rms}$ となり、超電導線 1 本あたりでは $449 A_{rms}$ になり、温度は短絡後 0.2 s で 173 K となり、これらは 20 MVA 級超電導変圧器の結果 (2.3.5-2 節) とほぼ一致した。

これらの成果から、2 MVA 級超電導変圧器本体の設計検討ができた。この変圧器用の冷却容器と冷却システムについて検討した結果を図 2.3.5-6 に示す。

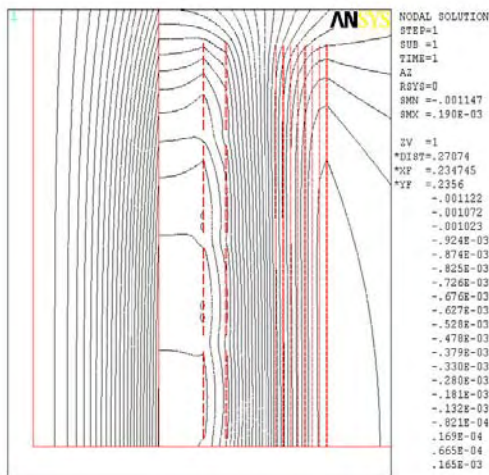


図 2.3.5-3 磁束線図

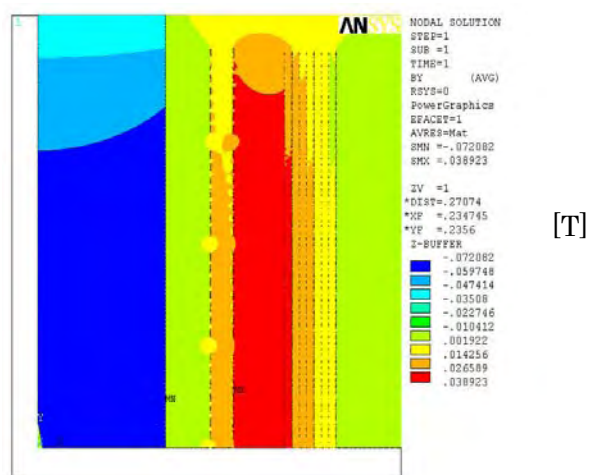


図 2.3.5-4 磁界分布

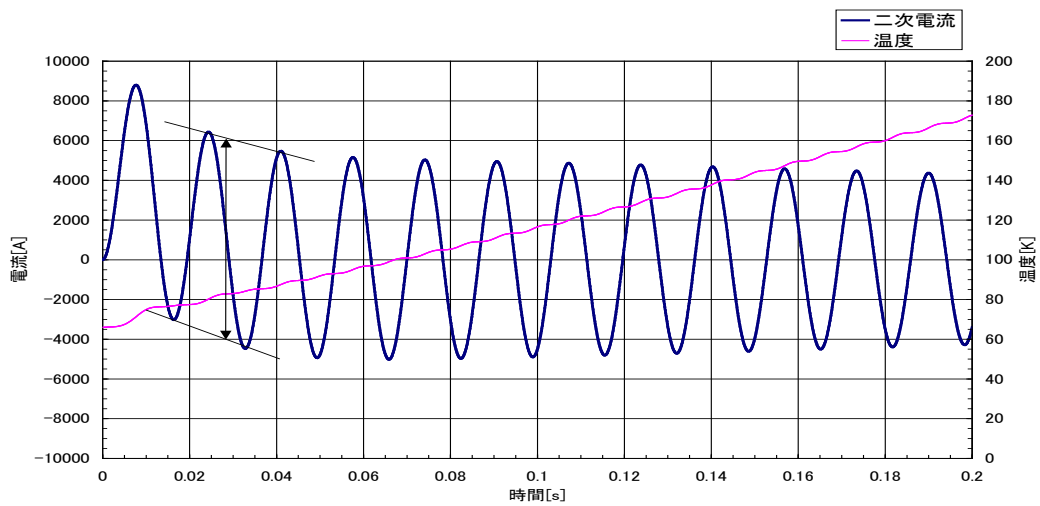


図 2.3.5-5 2 MVA 級超電導変圧器(%IZ=4.5%)の短絡電流と温度(二次側電流)

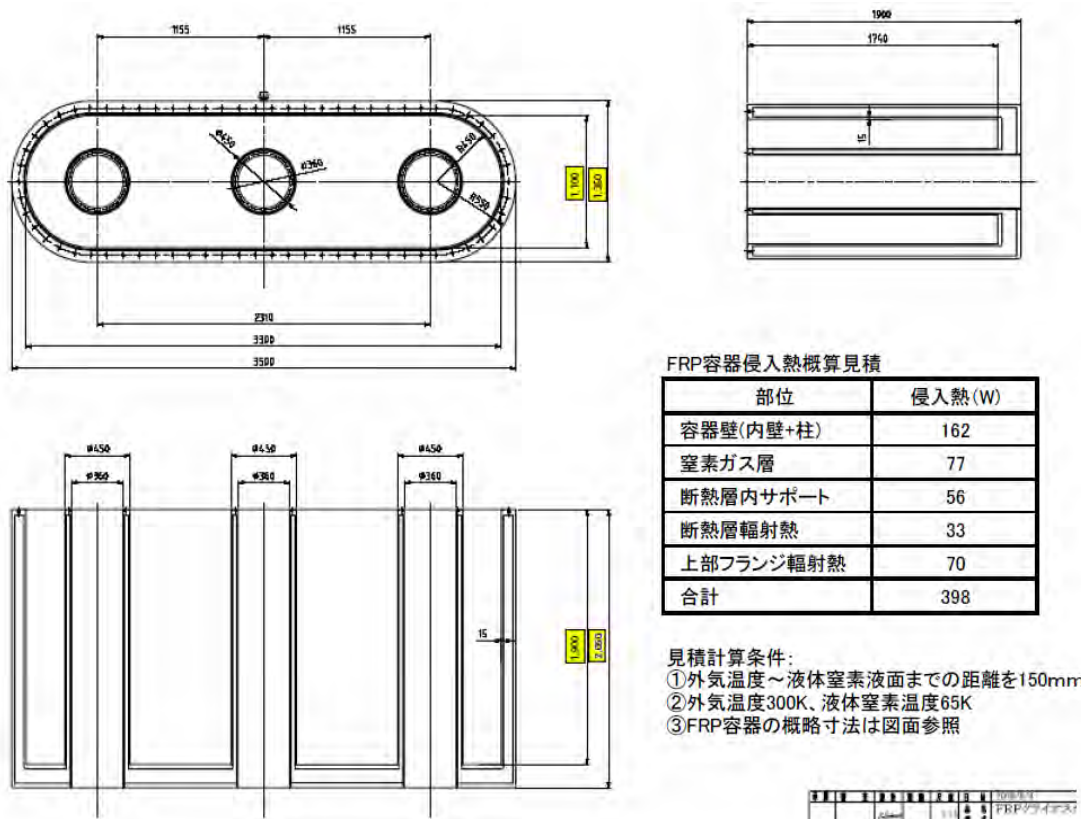


図 2.3.5-6 2 MVA 級超電導変圧器の冷却容器検討結果

(2) 2 MVA 級超電導変圧器試験の検討

前項で試作した 66 kV /6.9 kV -2 MVA 級超電導変圧器モデルの試験について、課通電試験について、以下のとおり検討した。

表 2.3.5-2 2 MVA 級超電導変圧器の課通電試験

試験項目		概要
受入試験 (変圧器単体)	絶縁抵抗*	・ 絶縁抵抗計で一次及び二次のアース間、一次～二次間の絶縁抵抗値を測定。
	巻線抵抗*	・ 一次及び二次巻線に直流通電により、電流電圧特性を測定。
	変圧比	・ 一次側に電圧を印加し、一次及び二次側の端子電圧から変圧比を測定。
	短絡インピーダンス及び負荷損	・ 短絡インピーダンス：一次側を短絡し、二次側に低電圧の定格周波数・定格電流を通電し、二次側端子電圧から測定。 ・ 負荷損一次側を短絡し、二次側に定格電流まで通電し、キャンセル法で負荷損を測定。
	無負荷損及び無負荷電流	・ 一次側を開放し、二次側に定格電圧を印加し無負荷損と無負荷電流を測定。
	短時間交流耐電圧 (誘導/加圧)	・ 誘導試験：一次側を開放し、鉄心、フレーム等を接地し、二次側に 22 kV (定格周波数の 2 倍) を 1 分間印加。 ・ 加圧試験：鉄心、フレーム等を接地し、二次側には 140 kV 及び二次側に 22 kV を 1 分間印加。
	雷インパルス	・ 二次巻線、鉄心、フレーム等を接地し、一次側からインパルス電圧 (全波、350 kV _{peak}) を印加
システム試験 (冷却装置と組合せ)	冷却特性試験	・ 冷却装置を定格運転し、室温の超電導変圧器に、冷媒注入を開始して所定の液面、温度に至る時間の測定。
	定格通電試験	・ 浸入熱、導体交流損失等の全損失相当熱負荷による温度上昇を測定。冷却装置を定格運転し、冷媒温度が定格状態後に一次巻線を短絡し、二次巻線に電圧を印加し、一次巻線に規定電流を通電し負荷損を供給。冷媒温度が定常状態になり、温度変化が規定値内に到達で試験終了。

*は室温でも実施。

2.3.5-2 20 MVA 級超電導変圧器の設計検討 (九州電力)

(1) 超電導変圧器の設計

66 kV /6.9 kV -20 MVA 級配電用変圧器の設計は、2.3.5-1 節に示す目標に向けて、次のとおり設計検討を進めた。① 定格 66kV の耐電圧や機器構成に起因する技術、電流に起因する巻線構成、冷却システム技術は 2 MVA 級の設計結果 (実証後) と前述で得られた要素技術の開発成果を反映する。② 損失低減技術に関しては、一般変圧器の設計技術も導入する。③ 鉄損を低減するため鉄心は内鉄形とし室温空間に配置し、巻線は絶縁面から一層毎に GFRP 巻枠を使用する円筒巻線とする。④ 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。

最終的には、2 MVA 級超電導変圧器モデルの試験結果に基づきその設計技術を反映するが、2 MVA モデルも設計段階であるため、現段階では、既存油入変圧器を基に、コンパクト性、高効率性等から 20 MVA 級変圧器の設計を進めた。20 MVA

級配電用変圧器の基本仕様を 2.3.5 節の表 2.3.5-1 に示す。

変圧器巻線の線材の I_c 値は 100 A~150 A/5 mm-w(@77 K,s.f.)として、一次巻線は 3 本並列、二次巻線は 24 本並列導体化とした。設計に当たっては、1 ターン電圧 (V/N) をパラメータにして超電導変圧器の高さ寸法、重量などを計算した。この%インピーダンス (線抵抗と漏れリアクタンスのベクトル和) を 15 %とし、巻線抵抗は無視できるほど小さいので(2-1)式で与えられる。ここで、P : 一脚当たりの変圧器容量、 α : 一次・二次巻線間間隔、 d_1, d_2 : 一次及び二次巻線の幅、 f : 周波数、 l_m : 一次及び二次巻線長さの算術平均長、 q : 漏れ磁束通路数、V/N : 1 ターン当たりの電圧、 h : 巻線高さ、 k : 磁束通路高さ(巻線高さ)に対する補正係数 ($k \doteq 1 - (\alpha + d_1 + d_2) / (\pi h)$)である。

$$\%IZ = 0.395 \frac{Pl_m [\alpha + (d_1 + d_2) / 3] 2f}{q (V/N)^2 \cdot h/k 100} \quad (2-1)$$

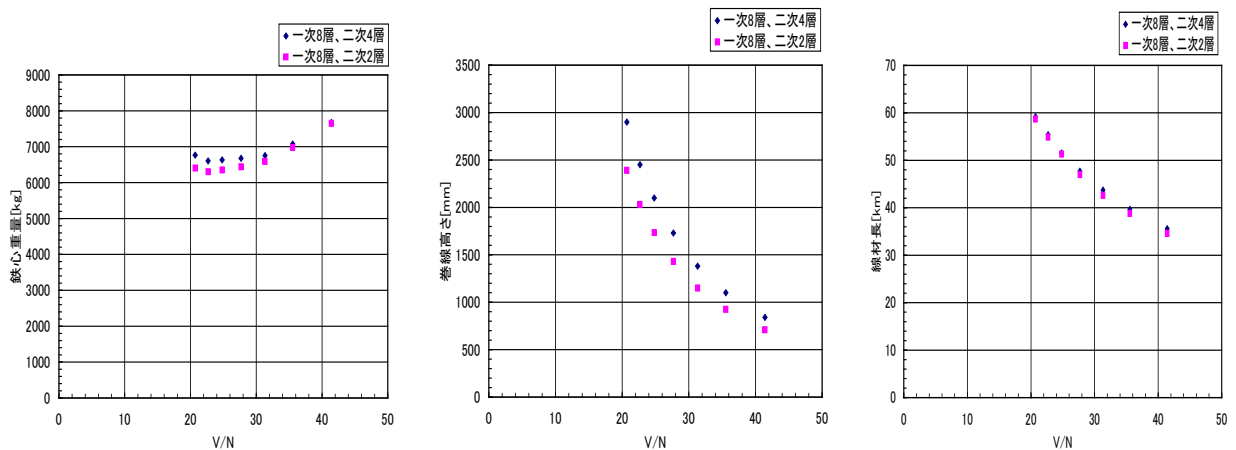
また、V/N は(2-2)式で、%IZ は(2-3)式で与えられる。ここで、B : 鉄心の磁束密度、S : 鉄心断面積である。(2-1)式に(2-2)式を代入し、P、 f 、 k などのほぼ一定とみなせる係数を K とする。

$$V/N = 4.44 fBS \quad (2-2) \quad \%IZ = K \frac{l_m (\alpha + (d_1 + d_2) / 3)}{qB^2 S^2 h} \quad (2-3)$$

図 2.3.5-9 に、 α 間距離はこれまでの研究実績から 50 mm、鉄心の磁束密度は 1.5 T とし、一次巻線の層数を 8 層、二次巻線を 4 層としたときの巻線配置図を示す。図 2.3.5-8 に、鉄心重量、巻線高さ及び線材長の V/N 依存性を示す。鉄心重量は 25 V/N 付近で最も小さくなる。これに対し、巻線高さとは線材長は V/N と逆比例の関係になる。

鉄心を室温配置にすると電気絶縁材料の低温容器 (一般的に GFRP) が必要となり、経済的に製造できる高さは約 2 m が限界である。液体窒素の変温層と窒素ガス空間は約 0.5 m の高さになる。この結果からは 40 V/N 付近の場合のみ、経済的に製造できる範囲となる。また、巻線高さを低くするには、(3)式から α 間を小さくすることが有効であるが絶縁上から限界がある。

そのため、磁束通路数を 2 に増やす検討を行い、巻線高さや鉄心重量を低減することが可能となった。鉄心重量、巻線高さ及び線材長の V/N 依存性を図 2.3.5-8 に、磁束通路数 2 での鉄心重量、巻線高さ及び線材長の比較表を図 2.3.5-7 に示す。巻線高さは二次巻線数 2 層の方が小さいこと、鉄心重量と線材長は二次巻線数による影響は殆どないこと、から二次巻線を 2 層とした。また、一次巻線は 8 層、V/N は巻線高さが 1000 mm 以下となる 1 ターン電圧を 35~40 V/N とした。



(a) 鉄心重量比較 (b) 巻線高さ比較 (c) 線材長比較

図 2.3.5-7 一次巻線を 8 層で二次巻線を 2 層と 4 層とした比較

磁束通路数を 2 とし、一次巻線を 8 層、二次巻線を 2 層としたとき鉄心重量、巻線高さ及び線材長の V/N 依存性を図 2.3.5-8 に、巻線配置を図 2.3.5-9 に示す。

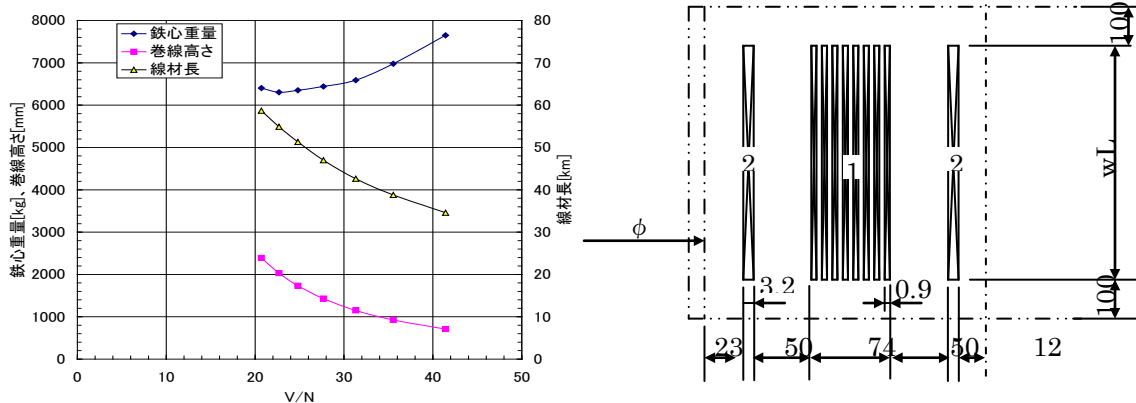


図 2.3.5-8 鉄心重量、巻線高さ及び鉄心重量、巻線高さ及び線材長の V/N 依存性 (磁束通路数 2、一次巻線 8 層、二次巻線 2 層)

図 2.3.5-9 巻線配置図(磁束通路数 2、一次巻線 8 層、二次巻線 2 層)

次に、巻線仕様を決めて磁界解析を行った。二次巻線の電流は $1674 \text{ A}_{\text{rms}}$ (ピーク電流は $2,367 \text{ A}$) で、線材垂直方向の磁界を 0.1 T とし 66 K での線材 I_c 値から素線 24 本の並列導体となり、素線の電流分流を均等にする転位が必要である。24 本並列導体を 2 並べ 12 重ねで構成すると、11 箇所転位部 (1 層当たり 129.1 ターン) にて各々の素線が全ての半径方向位置を経験することになる。これらを基に、20 MVA 級超電導変圧器の基本設計を行った。図 2.3.5-10 に巻線配置図を示す巻線仕様を基に磁界解析を行った。図 2.3.5-11 に Y 系超電導線材の I_c とロードラインを、図 2.3.5-12a に磁束線図を図 2.3.5-12b に磁界分布を示す。

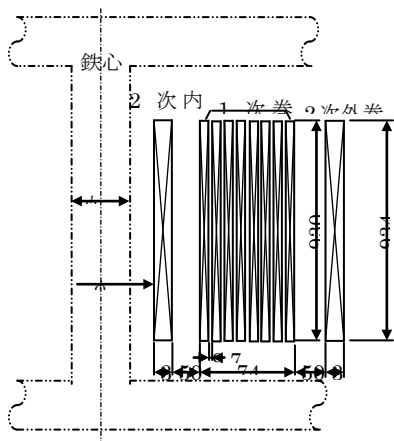


図 2.3.5-10 66 kV/6.9 kV 三相 20 MVA 級超電導変圧器の巻線配置

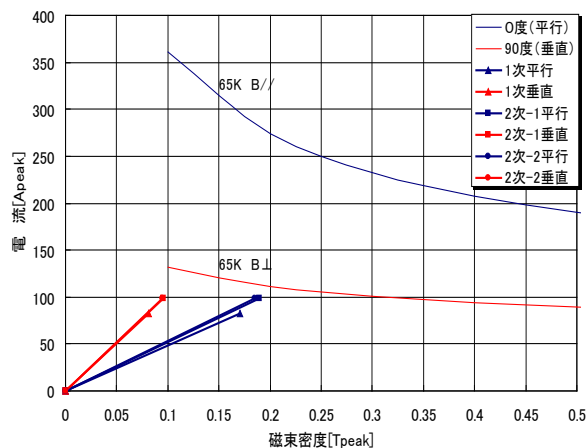


図3.1-6 Y系20MVA-HTS変圧器のロードライン
(w=5mm, Ic=100A at 77.3K相当)

図 2.3.5-11 Y系超電導線材 I_c とロードライン

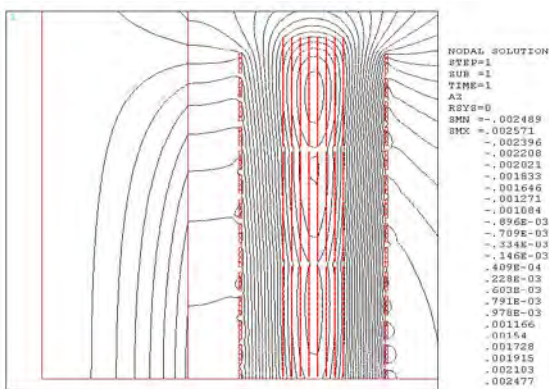


図 2.3.5-12a 磁束線図

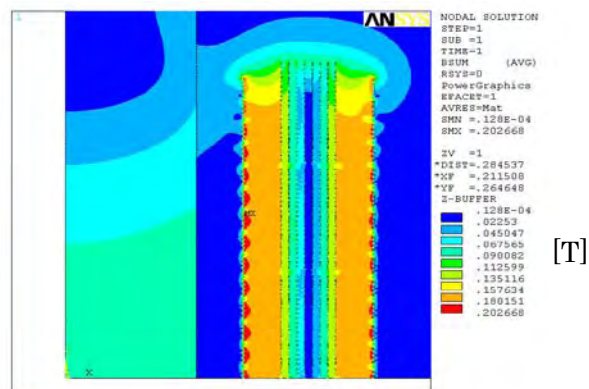


図 2.3.5-12b 磁界分布

さらに、短絡時の短絡電流解析を巻線仕様に基いて行った。図 2.3.5-13 に、2巻線変圧器の 2 次側に換算した等価回路図を示す。a は変圧比 (66,000/6,900=9.565) である。このうち、R は 1 次巻線抵抗 R_1 と 2 次巻線抵抗 R_2 を計算により求めて分離可能であるが、L は分離不可能である。

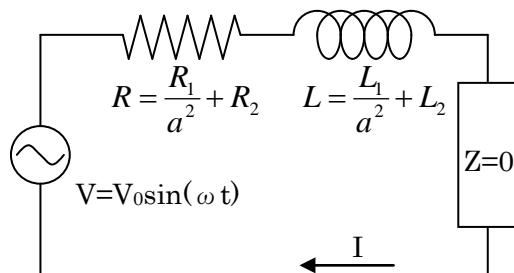


図 2.3.5-13 二次側換算等価回路

L は、 $\%IZ = \%IX$ として、

$$L = \frac{V \times \%IZ}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot I} = \frac{6900 \times 0.15}{2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot 1673} = 1.641 \times 10^{-3} \quad [H]$$

と求められる。図 2.3.5-13 に示す回路の回路方程式を解いて、電流 I を求めると、

$$I = \frac{V_0}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \times \left\{ \sin(\omega \cdot t + \phi) - e^{-\frac{R}{L}t} \cdot \sin \phi \right\} \quad \text{但し、} \quad \phi = \tan^{-1} \left(\frac{R}{\omega L} \right) \quad (2-4)$$

となる。上式で、 $V_0 = 6,900 \times \sqrt{2} = 9,758$ [V]となる。一方、巻線を断熱と仮定したときの熱平衡式は(2-5)式となる。(2-4)式と(2-5)式を連立させて解くことにより、電流値と温度を求める。

$$\rho(T) \cdot \frac{l}{S} \cdot I(t, T)^2 = l \cdot S \cdot \gamma \cdot C_p(T) \frac{dT}{dt} \quad (2-5)$$

なお、今回の解析は次の条件で実施した。① 超電導線の構成材（基板、中間層、超電導層、銀層、安定化材）の温度は一樣とする。② 液体窒素への熱伝達は考慮しない。③ 投入位相は 0° (電圧 0 V) とし最も厳しい条件とする。④ 電気抵抗に寄与する構成材は安定化材と銀層とし、超電導層と基板には電流が流れないこととする。⑤ 熱容量に寄与する構成材は、安定化材、銀層、基板 ($t=0.1$ mm) とする。⑥ 短絡継続時間は、配電系統で実際に設定されている 0.2 s とする。

20 MVA 器の短絡解析結果を図 2.3.5-14 に示す。2 次側換算の定格短絡電流(単純換算値)は、 $1,674 \text{ A}/0.15 = 11,160 \text{ Arms}$ となり、超電導線 1 本あたり 465 Arms/枚 となり、波高値で $658 \text{ A}_{\text{peak}}$ に相当する。具体的には、短絡電流 11,160 A、最大到達温度 194.7 K、第 1 波波高値 7,587 A、第 12 波波高値 14,159 A、対定格電流倍率 5.98 倍、1 次巻線単位長さ当りのエネルギー 287 J/m、2 次巻線単位長さ当りのエネルギー 410 J/m、1 次 2 次平均単位長さ当りのエネルギー 343 J/m となった。

また、本解析の温度上昇は 195 K であることから（超電導線の I_c が劣化温度は 600°C 程度）、 I_c 劣化の可能性は殆どないと考えられる。

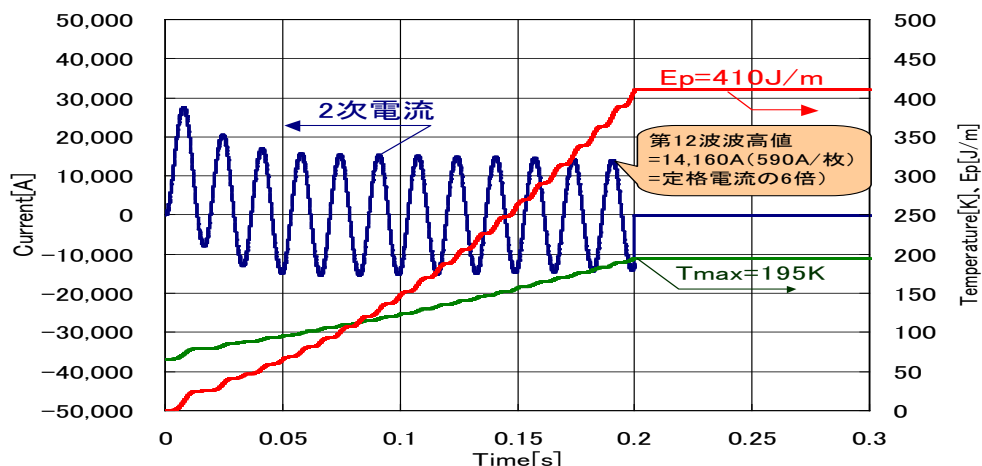


図 2.3.5-14 短絡電流解析結果(二次側電流、温度、単位長の発生エネルギー)

(2) 20 MVA 級変圧器の特性検討

66 kV/6.9 kV-20 MVA 級超電導変圧器の設計検討から、既存油入変圧器に対する軽量性、高効率性等の特性について検討した。現在、基礎検討の段階であるが、その検討結果を表 2.3.5-3 に、66 kV/6.9 kV-20 MVA 級配電用超電導変圧器の概念図を図 2.3.5-15 に示す。

検討の結果、効率面では、超電導変圧器は保冷容器や電流リードなどの熱侵入があるものの、既存変圧器の銅損に対して超電導変圧器の交流損失が極端に小さくなり、さらに超電導変圧器は鉄損を低減する設計ができることから、冷却動力を考慮しても油入変圧器の 16 % (約 1/6) となる。また、鉄心の低減などから変圧器本体の重量は 54 % となる。なお、冷却システムのサイズを検討中であるため、冷却システムを含む重量とコンパクト性は今後検討する予定である。

表 2.3.5-3 66 kV/6.9 kV-20 MVA 級超電導変圧器と既存油入変圧器の特性比較

	YBCO 変圧器	油入変圧器
線材	Y 系超電導線材	Cu
冷却システム	ガスクール液体窒素 (巻線)	油冷却
損失	16 % ($\leq 1/6$)	100 %
銅損/交流損失	3 % (交流損失)	91 % (銅損)
鉄損	5 %	9 %
熱侵入	8 % (保冷容器・電流リード)	—
効率	99.9 %	99.4 %
重量 (変圧器本体)	54 % (約 1/2)	100 %

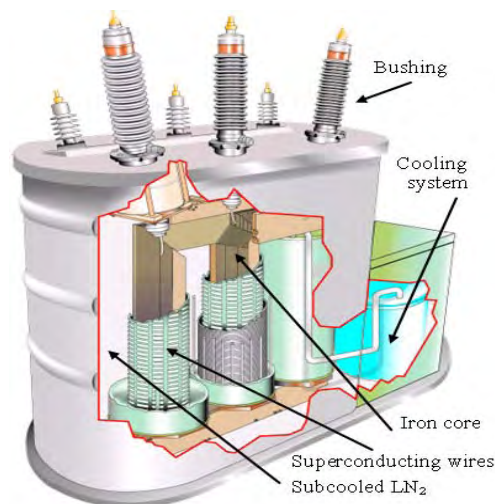


図 2.3.5-15 66 kV/6.9 kV-20 MVA 級配電用超電導変圧器の概念図

2.3.5-3 2 MVA 級超電導変圧器モデル検証のまとめ

(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 級変圧器モデルは 20 MVA 級変圧器の実用機との相

関性（耐電圧や機器構成に起因する技術（変圧器のブッシング、鉄心、巻線構成等）は極力実機相当とした）を反映して、巻線技術や限流機能試験の成果を基に設計検討を行った。

- ・ 巻線構成における線材並列数は一次 1 本：二次 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 3 %とし、磁界解析や短絡電流解析から巻線構成や CuNi 厚さ 0.2 mm 等とした。
- ・ 同変圧器モデルの交流損失低減や耐電圧特性等を検証する課通電試験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、既存油入変圧器を基に、超電導変圧器の特長であるコンパクト性、高効率性等から、巻線構成を主体に 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、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。

2.4 超電導電力機器用線材の技術開発

2.4.1 線材特性の把握 (ISTEC、住友電気工業、九州大学、早稲田大学、京都大学、JFCC)

(1) 研究開発目標

ケーブル、変圧器等の電力機器の耐用年数は30年以上であり、その間に、超電導体の劣化による超電導機器の劣化が生じないことを予め確かめておく必要がある。本項目では、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 ）等の超電導特性の経時・経年変化を評価する。必要に応じてX線回折、電子顕微鏡による結晶構造・微細組織観察等を実施し、劣化機構とともにこれを抑制する手法の提案をめざす。まず各応用機器の運転環境の把握と課題抽出を行い、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、IBAD-PLD、IBAD-MOD、結晶粒配向金属基板（以後、配向基板と称す）-PLD線材等の現在研究開発が進められている線材に対し、様々な環境下での経時特性評価を行い、経時変化の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。さらに、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等により、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の試験項目や試験条件を決定する(中間目標)。さらに、変圧器を含めた各種機器環境に対する耐久性評価を実施する（最終内部目標）。

(2) 研究の経緯と実施体制

機器用線材の特性把握として、初めにケーブル応用を念頭におき、耐久性試験条件の検討を実施した。まず、機器製作メーカーにヒアリングを行い、機器の製作・運転・事故・保守環境において線材が受ける最大の負荷を調べ、それらの負荷をパラメータとして、試験方法および解析手法を提案し、線材への負荷量が経時・経年変化に与える影響を評価した。本プロジェクトにおいては、超電導電力ケーブル研究開発の中で、66 kV 大電流ケーブルおよび275 kV 高電圧ケーブルに対し、長期通電、耐電圧、過電流などの耐久性試験条件が検討されているが、この中では素線自体の劣化がないことが前提になっている。そこで、本研究項目では、素線の劣化を引き起こす負荷の限界条件を解明し、現在想定しているケーブルの作製・運転条件がY系超電導線材の劣化限界より十分負荷の小さな領域にあることを明らかにすることをめざした。また同時に、素線の劣化機構の解明とその抑制手法の提案を行った。

実施体制としては、IBAD-PLD 及び IBAD-MOD 線材の特性把握は ISTEC が担当し、配向基板-PLD 線材の特性把握は住友電気工業が担当した。また、九州大

学、京都大学、早稲田大学、JFCC とともに研究開発を共同で実施することで、電磁気挙動の経時変化、特性分布評価、事故電流による特性変化の評価、負荷による微細組織変化を実施した。

(3) 具体的成果

(a) IBAD 基板-PLD/MOD 線材の経時・経年変化

i) 経時特性変化

中間目標に掲げられている 275 kV 高電圧超電導ケーブルについて、ケーブル製作担当である古河電気工業(株) より作製・運転・事故・保守環境において線材が受ける負荷の種類と大きさに関する情報を収集し、劣化の可能性のある原因の抽出および調査条件設定を行った。図 2.4.1-1 に、275 kV 高電圧超電導ケーブルの作製から運転までの流れと、その際に線材が受ける負荷の種類を示す。この環境条件から抽出した、経年劣化の原因となる負荷として、運転時および事故時の電流（通電、過電流）による劣化、ケーブル製作・敷設時および保守時における機械的（機械歪み、熱サイクル(=熱歪み)）劣化、ケーブル製作時の加熱（絶縁紙乾燥時の真空加熱、ドラム巻き（曲げ））劣化、中間接続時のハンダ流し込み時の過熱）劣化、線材保管時の湿度による劣化を調査対象とした。これを表 2.4.1-1 に示す。

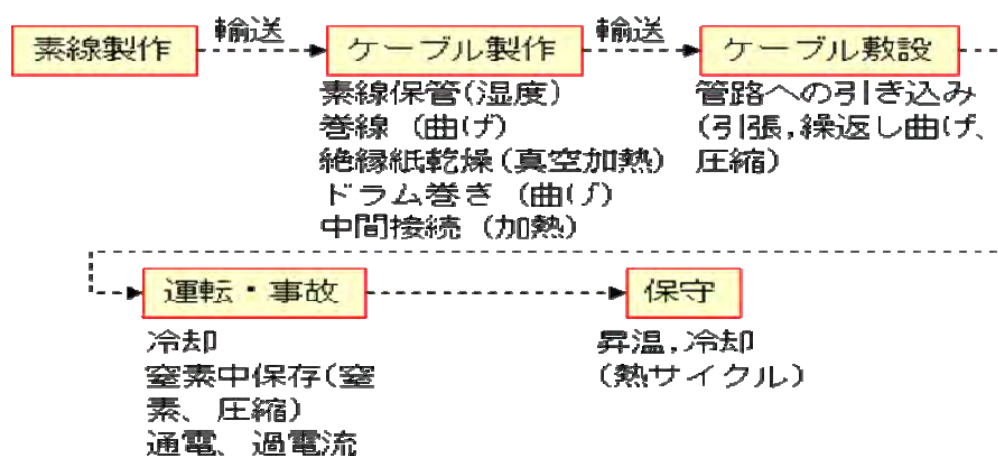


図 2.4.1-1 275 kV 高電圧超電導ケーブルの製作・敷設・運転・保守工程の概要

表 2.4.1-1 275 kV 高電圧超電導ケーブルの環境条件から抽出した経年劣化の原因と検討パラメータ

環境	原因	劣化の可能性	ケーブルでの条件	検討方法
製作	湿度	保管時の湿度	最大40°C-RH100%	湿度劣化試験
	温度	絶縁紙の真空加熱乾燥	真空100°C-24h	真空加熱試験
		中間接続時のハンダ加熱	230°C-20分以内	加熱試験
	機械	巻線時の曲げ	最大0.39% (フォーマ径20-30mmφ)	曲げ試験
		ドラム巻き時の歪	0.1%の両曲げ、8回、引張り、圧縮	繰返し曲げ試験
		コルゲート管による圧縮	絶縁紙に9mmφの円筒で16kgfの圧縮	圧縮試験
保守	熱サイクル	室温-液体窒素温度の熱サイクル	熱サイクル試験	
運転	電流	通電	I_c の50%以下	連続通電試験
事故		過電流	63 kA _{rms} - 0.6 sec	過電流試験

以下、この表にしたがって試験を実施した結果を以下にまとめる。

・電流による劣化調査

電流による劣化に関しては、高磁場用コイルでフープ力が加わる機器を除き、 I_c 値以下であれば長期間にわたる連続通電試験でも劣化したという報告はない。電流による劣化の報告があるのは、全て I_c 以上の過電流を印加した場合である⁽¹⁾。これらの劣化は、安定化層を流れる電流による発熱に起因した熱歪みや酸素脱離による焼損、変形、剥離などが原因と考えられているが、未だ明らかにはなっていない。また、過電流で劣化する場合、多くの線材では 500 K 以上までの温度上昇があることが報告されている。極短時間で大電流を流した際には、エレクトリックマイグレーションやローレンツ力により劣化したという報告もあるが、超電導ケーブルで想定されている条件は、これらが原因で劣化する条件とはかけ離れて小さいことから、その影響は考慮しないこととする。

ここで、電流による劣化の可能性を整理するために、過電流印加時の電流分流通態の模式図を図 2.4.1-2 に示す。また、これまでの報告例と本研究の実験結果をもとに、印加電流の大きさ及び電流印加時間と線材劣化の関係を推定し、図 2.4.1-3 に模式図として表した。線材の I_c 値以下である領域(A)では、電流は超電導層にのみ流れるが、電流を増加させて I_c 値以上の領域(B)に入ると、超電導層に抵抗が発生するため電流は抵抗に応じて超電導層と安定化層で分流し始め、抵抗のある層を電流が流れることにより発熱する。さらに電流を増加させると超電導層の抵抗が上昇し、ついに電流は安定化層のみに流れる様になって領域(C)に入る。領域(C)に入っても発熱による温度上昇後の温度が比較的低温であれば劣化は生じないと考えられる。さらに電流を増加させると発熱による安定化層の抵抗増加とあいまって発

熱量は加速的に増加し、500 K を超えるような大きな発熱が起こったことで領域 (D) に入り、線材が劣化するものと推定している。ここで、事故電流のような短時間の電流印加の条件では、発熱量が限られているため温度上昇にも限界があり、比較的大電流の印加にも耐えると考えられる。なお、ここで示した概念は、本研究開発で実施した実験結果から推定したものであり、(B)、(C) および (D) の領域広さと境界位置は、短時間電流印加では線材の構造と I_c 値に依存し、長時間の電流印加では冷却効率にも依存するものと考えられる。

・長期連続過通電試験

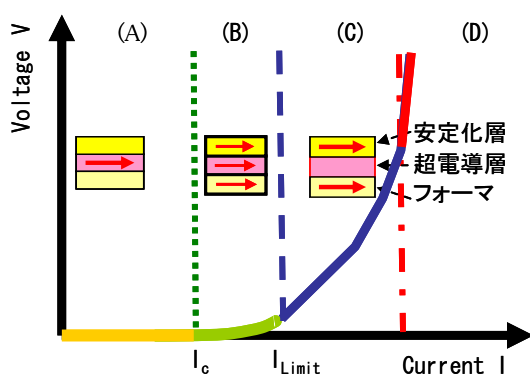


図 2.4.1-2 過電流印加時の電流分流量の状態の模式図

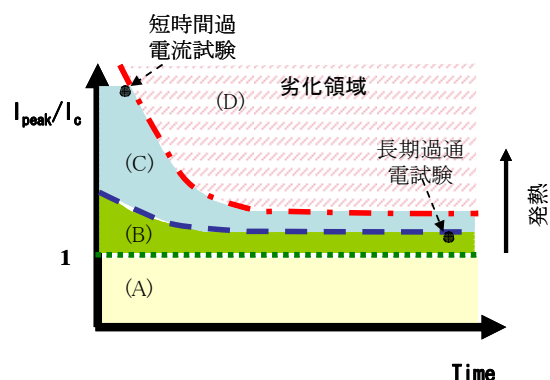


図 2.4.1-3 印加電流及び電流印加時間と線材劣化の関係の推定

液体窒素中で長期にわたる連続通電により、劣化が生じないことを確かめるため、電流負荷条件を限界まで厳しくして、長期連続過通電試験を行った。試料は、IBAD-MOD 線材(2.5 mm 幅)を用いた。ここで、欠陥が存在して電流が不均一に流れる試料においても連続通電による劣化が生じないことを確かめるために、欠陥が多数存在しており I_c 分布が 40 %程度ばらついている試料を意識的に使い、液体窒素中で 50 Hz の交流を連続過通電した。試験に用いた試料の連続ホール素子法 (Tapestar™) I_c 分布と磁気光学顕微鏡 (MO) 観察結果を図 2.4.1-4(a)及び(b)に示す。最大電流値は、 $I_c = 44 \text{ A/cm-w} (@77 \text{ K, s.f.})$ に対して、 220 A/cm-w (ピーク電流値；本実験条件での限界電流値 I_{Limit}) を印加した。ここで、発熱量 J は、 $J = I^2 R$ (I : 電流、 R : 導体の抵抗) で記述される。 I_c 値が低い本実験試料では発熱量が少ないため大きな I_{Limit}/I_c を印加できたが、 I_c 値が大きく大電流を通電する試料では、大きな I_{Limit}/I_c を印加することはできないと考えられる。また、領域 (A) および (B) の範囲 (I_{Limit} 以下) において超電導層に電流が流れていることを確認するため、 I_{Limit} 前後における入力電流 I と出力電圧 V の関係を調べ、 I_{Limit} 以上の $I-V$ 曲線から安定化層の抵抗値 R を求め、超電導層の抵抗成分を計算し、さらに安定化層と超電導層が並列回路を形成しているとして電流の分流量を見積もったところ、領域 (A) および (B) においては、大半の電流が超電導層を流れていることが確かめられた⁽²⁾。これを図 2.4.1-5 (a) 及び (b) に示す。この条件で連続過通電試験を実施し、適宜

I_c 測定を行うことで経時変化の評価を行った。その結果を図 2.4.1-6 に示す。

図 2.4.1-6 より、1000 時間を越える長期連続交流過通電試験でも I - V 曲線に何ら変化がないことが分かる。このことから、線材に多少の欠陥がある場合でも、印加最大電流値が I_{Limit} 以下であれば劣化は生じないと考えられる。また、一般に、液体窒素温度(77 K)以下の低温では、化学反応が生じることは考えにくく、かつ、ケーブル使用条件での運転電流は、 I_c 値の 50 % 以下程度になるように設計されていること等から、通常の運転時に劣化が生じる可能性は著しく低いと言える。

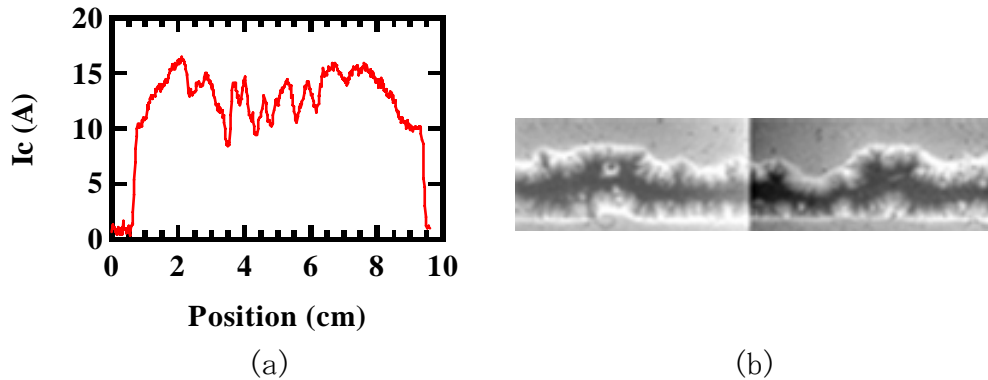


図 2.4.1-4 長期連続過通電試験に使用した線材
(a) 連続ホール素子法による I_c 分布(2.5 mm 幅)、(b) 4-5 cm 部の MO 観察像

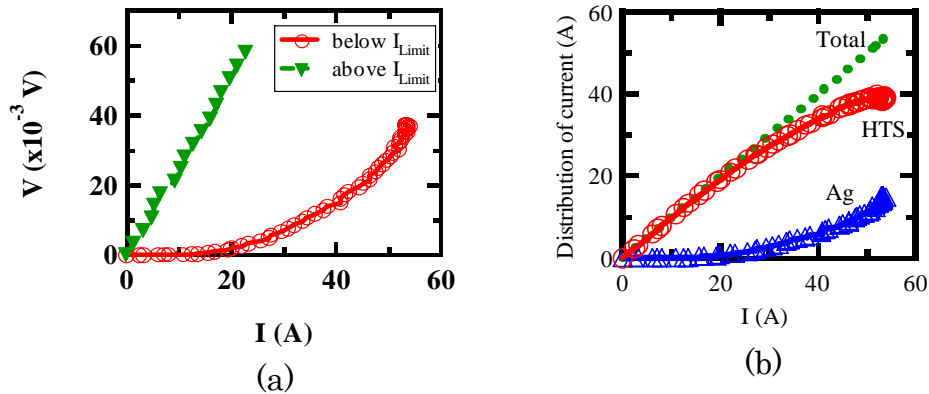


図 2.4.1-5 連続過通電試験時の電流分流状態
(a) I_{Limit} 前後での抵抗発生状態
(b) I_{Limit} 以下における Ag と超電導層の電流分流

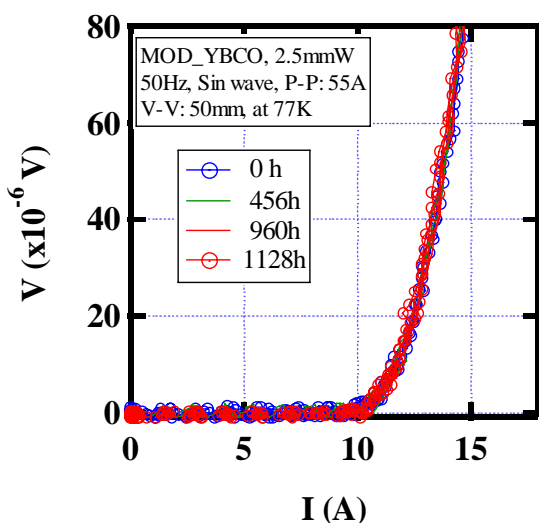


図 2.4.1-6 長期連続過通電試験による I - V 曲線の経時変化

・事故電流による特性変化に関する検討(安定化膜厚みの効果)

超電導線材を電力機器に応用した場合、短絡電流が流入する恐れがあり、この短絡電流により超電導線材の温度が急上昇し、特性劣化する可能性がある。そのため特性劣化や焼損しない限界の温度を設計における指標・基準の一つとして考える必要がある。その基準を考慮した上で安定化層を含めた線材構成要素の最適化が不可欠となる。そこで、超電導線材の特性劣化を調査するために GM 冷凍機伝導冷却条件下で、方形波状過電流パルスをもとに 1 秒間通電し、突発的な短絡電流を模擬した特性劣化試験を行った。同時に特性劣化要因を特定することをめざし、新しく開発した熱応力解析プログラムを用いて、方形波状過電流パルス通電による熱応力を解析した。なお、事故電流に対する劣化試験は早稲田大学において実施した。

4 本(Sample24-28)の IBA 基板—MOD 線材を用いて特性劣化試験を行った。Sample24-28 の劣化開始温度を図 2.4.1-7、劣化開始時の過電流値を図 2.4.1-8 に示す。Sample24、25 がハンダ付けによる Cu 複合化線材(Cu 厚 $100 \mu\text{m}$)、Sample26 が Cu 無し線材、Sample27 と Sample28 が Cu めっき線材 (Cu 厚 $50 \mu\text{m}$) である。図 2.4.1-7 および図 2.4.1-8 より、Cu 複合化を施すと安定化層の抵抗値が小さくなる分、Cu 層無しの線材よりも高い電流値に耐えられる。しかし、劣化開始温度は 3 種類の線材はどれも 500 K 前後で有意差は見られなかった。これらの結果から、Cu の厚みを増すことで過電流領域における線材の抵抗値が下がることにより、より大きな過電流を印加することができ、過電流に対する裕度を増加させられることが分かった。また、劣化開始温度に差異がないことから、過電流による劣化は、温度上昇により層状構造を有する Y 系超電導線材の各層間に発生する熱応力が関与していることが示唆された。

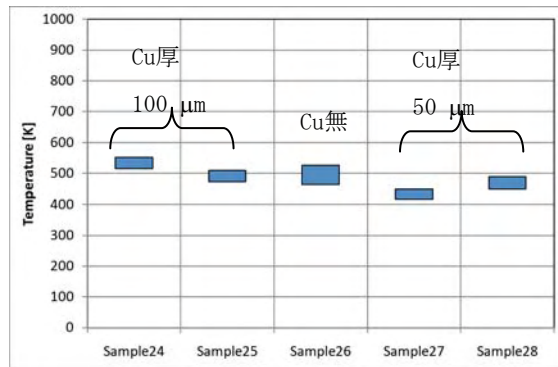


図 2.4.1-7 劣化開始温度

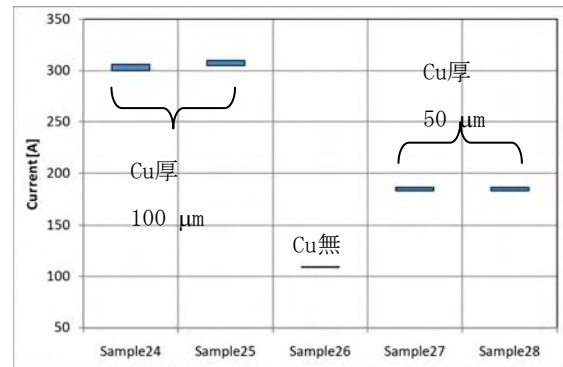


図 2.4.1-8 劣化開始電流

現在、特性劣化の原因解明のために、劣化した線材について MO 観察や SEM/TEM の評価を行っている。また、劣化原因として考えられる熱応力について、有限要素法を用いた解析評価も行い、熱膨張係数の異なる層状線材が温度上昇することで発生する熱応力が劣化の主因であることを示す結果を得ている。

・過電流試験（事故電流による劣化限界）

事故電流による劣化限界とケーブル使用条件に対する裕度を調べるために、短時間交流過電流試験を実施した。試験自体は早稲田大学で行い、ISTEC は試験前後の特性分布の評価等を行った。印加電流条件は、高電圧ケーブルの耐事故電流に対する基準(63 kA_{rms} - 0.6 sec) より、素線 1 本あたりに想定される過電流パターンをシミュレーションした結果に基づいて決定した。図 2.4.1-9 に、素線 1 本あたりに想定される過電流パターン（計算結果）を示す。過電流試験は、この過電流パターンの電流減衰率を変えずに、ピーク電流値を少しずつ大きくすることで、その限界値を求めた。試験線材には、高圧ケーブル用線材である Cu めっき付 IBAD-MOD 線材 ($I_c = 160 \text{ A/5 mm-w}$) を用い、液体窒素浸漬冷却で試験を実施した。図 2.4.1-10 に過電流試験の結果例を示す。図より、 I_c 値が 160 A/5 mm-w に対して、 610 A/5 mm-w までは劣化せずに 640 A/5 mm-w で劣化を始めており、 I_c 値に対して約 3.8 倍、想定される最大事故電流 412 A/5 mm-w に対し約 1.48 倍の裕度があることが確認できた。

また、繰返しの過電流に対して劣化が生じるかどうかを確かめるため、劣化限界値(610 A/5 mm-w)以下の電流値で繰返し過電流試験を行った。電流は 500 A/5 mm-w (想定される最大事故電流 412 A/5 mm-w に対し約 1.2 倍)、回数は年 1 回で事故が起こり、30 年間使用することを想定して、30 回に設定した。この結果を図 2.4.1-11 に示す。図より、劣化限界値以下の電流値であれば、繰返し過電流印加による劣化はないと考えられる。

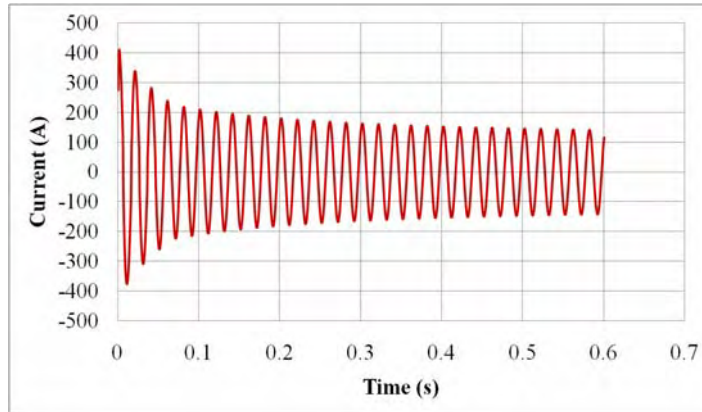


図 2.4.1-9 素線 1 本あたりに流れる過電流パターン

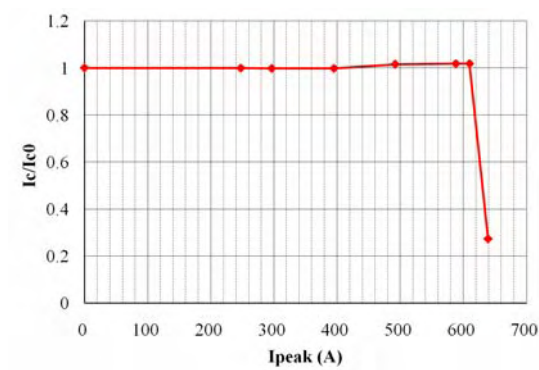


図 2.4.1-10 交流過電流による I_c 劣化

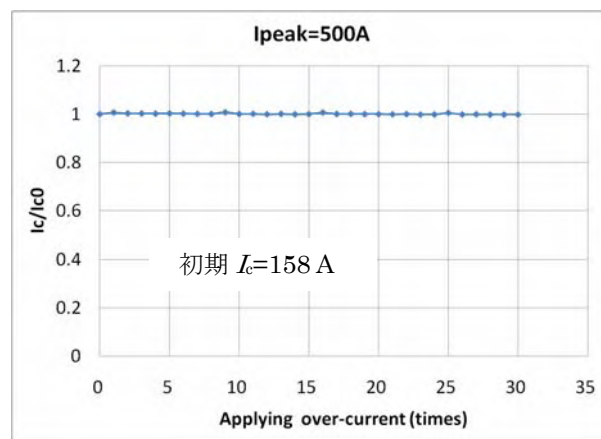


図 2.4.1-11 繰返し過電流の影響

・電流による劣化機構の推定

過電流による劣化の機構を調べるため、線材に約 1 cm 毎に複数個の電圧タップを装着し、場所毎の温度上昇と I_c 値変化を測定した。試験は、1 sec のパルス電流値を少しずつ増加させて 77 K で実施した。試験には Cu めっき付き IBAD-MOD 線材 (5 mm 幅) を用いた。この結果を図 2.4.1-12 に示す。試料には、初期の I_c 値低下箇所が存在したが、劣化は欠陥箇所とは少し離れた箇所でも長手方向に垂直な欠陥として観測された。この原因として、500 K 近くまでの温度上昇により剥離あるいは屈曲が生じ、線材にクラックが生成したことが想定されたため、JFCC において微細組織観察を実施したところ、剥離は見られないことが判明した。そこで現時点では、熱膨張係数の異なる積層材料において、発熱により片面が膨張して屈曲し、その歪みによりクラックが生成して劣化したものと推測している。

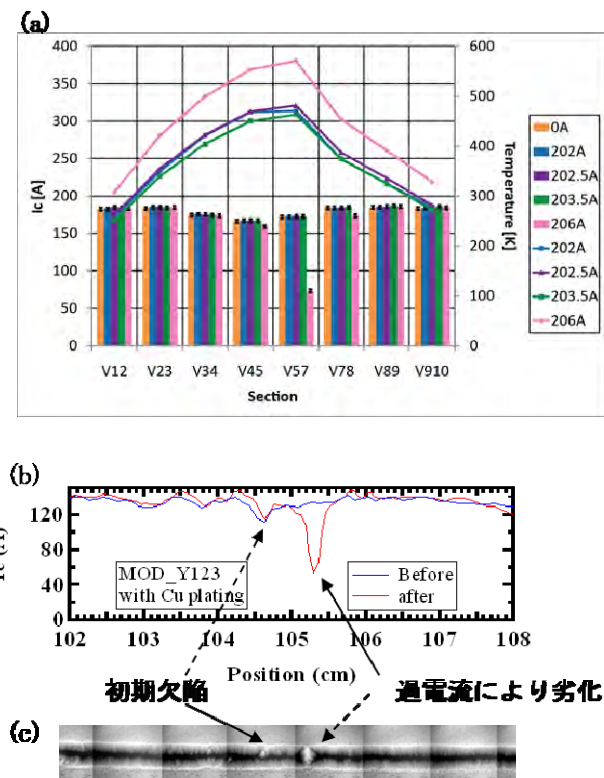


図 2.4.1-12 過電流による劣化

- (a) 過電流による I_c 変化と温度上昇
- (b) 連続ホール素子法による I_c 分布の変化
- (c) 劣化後の MO 観察像

<電流による劣化のまとめ>

表 2.4.1-2 に、電流による劣化に関する検討結果を整理した。長期連続過通電試験および短時間過電流試験より、図 2.4.1-2 で示した領域(B)以下の電流値で劣化することは考えにくく、劣化は、事故電流のような大電流が安定化層に流れ、線材が発熱することで発生する。劣化のメカニズムとしては、熱膨張係数差による線材の屈曲が主因として考えられている。実際に、配向基板上線材の過電流試験では、線材の屈曲が観察されている。ここで、温度上昇による劣化が主因とすれば、劣化に対する裕度を大きくしたい場合には、安定化層を厚くするなど対処可能であると考えられる。これらは、ケーブルの設計に既に織り込まれ、過電流が流れた際に、温度が一定以上に上昇しない条件で設計されている。

表 2.4.1-2 電流による劣化のまとめ

劣化の可能性	劣化限界	劣化機構(推定)	対策
通電	I_c 以下で劣化なし	なし	不要
過電流	想定過電流に対し裕度約1.5倍(早大で継続試験中)	温度上昇による屈曲等	裕度増加 →安定化層厚み増加、素線 I_c 増加、線材本数増加

・応力・歪みによる劣化調査

ハステロイ™基板を用いた線材の応力・歪みによる劣化に関するこれまでの報告としては、引張、曲げ、圧縮試験等が報告されており、引張では700 MPa以上、0.4-0.7%の歪み、曲げでも0.4~0.7%程度の歪みで劣化することが報告されている(3,4)。圧縮試験では、100 MPa以上印加しても劣化しないと報告されている(5)。

ここで、引張と曲げの違いは、引張が応力・歪みが均一に印加されるのに対し、曲げは線材厚み中央の応力中立線からの距離で応力・歪みに分布をもつということであり、線材の厚みが均一であり欠陥を含んでいなければ、本質的には同じ意味をもつと言える。また、ハステロイ™の降伏応力(弾性変形から塑性変形に変わる限界値)と I_c 値の可逆限界値がほぼ一致することから、基板材料の強度が劣化限界を決めているといえる。さらに、本プロジェクトにおけるY系超電導線材では、基板に高強度化強加工を施したハステロイ™が用いられ、その降伏応力は1 GPa(0.5%歪み)以上と高い。

・室温引張試験

ケーブルに供するIBAD線材に対し室温で引張試験を行い、歪み量を少しずつ上昇させて I_c 値の変化を調べた結果を図2.4.1-13に示す。ハステロイ™基板を用いたY系超電導線材は、歪みとして0.5-0.6%程度までは可逆であり、限界歪みを超えると、 I_c 値が戻らず劣化した。ケーブル応用では、Cuフォーマに線材を巻きつけた際に最大歪みが発生するが、最も大きい箇所でも0.39%以下であり、線材が均一であれば劣化する可能性は低い。

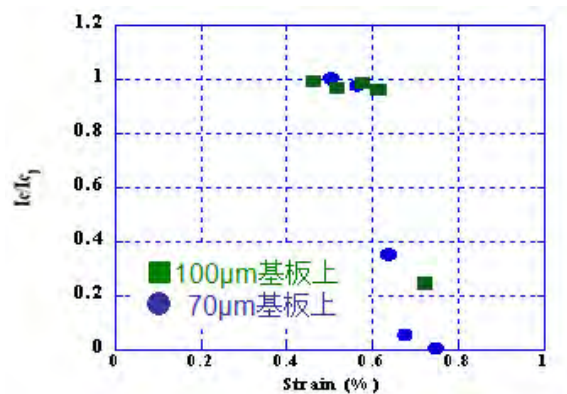


図 2.4.1-13 室温引張試験結果例

・繰返し曲げ試験

室温で繰返し曲げ歪みを加えた場合も同様に調査した。図 2.4.1-14 に、IBAD-MOD 線材 (5 mm 幅) をケーブル適用条件である 20 mm ϕ (0.39 %歪み)~30 mm ϕ (0.26 %歪み)に曲げ履歴を与えた後、フラットに戻して I_c 測定を実施し、その回数依存性を測定した結果を示すが、30 回までは I_c 値の低下は見られなかった。一方、0.4 %の曲げ歪みを 10000 回加えても、 I_c 値の変化はなく、 I_c 値の低下が見られたのは、限界歪みを超えた場合のみであり、歪み限界以内では数万回の繰返し曲げによる劣化は生じないことが報告されている⁽⁶⁾。

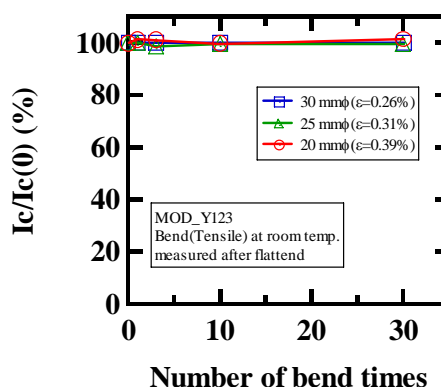


図 2.4.1-14 繰返し曲げ試験結果例

・熱サイクル試験

製作・敷設・保守時などに室温と液体窒素温度間で冷却と昇温が行われる。Y 系超電導線材は、熱膨張係数が異なる材料が積層された構造を有しているため、その熱膨張係数差で層間に歪みが誘起される。この歪み (熱歪み) により試料が劣化することがないかを確認するため、熱サイクル試験を実施した。試験は線材を液体窒素に浸漬冷却した後、ドライヤーで加熱して室温に戻し、その熱衝撃回数と I_c 値変化を調べた。一例として、図 2.4.1-15 (a)及び(b)に IBAD-MOD 線材 (5 mm 幅) の熱サイクル試験の結果を示す。図より、250 回の熱サイクルを繰り返しても、連続ホール素子法 (TapestarTM) による I_c 分布にも通電法による $I-V$ 曲線にも試験前後で何ら変化は見られなかった。さらに別の試料においては、IBAD-PLD 線材及び MOD 線材ともに 1000 回の熱サイクル試験を実施しても劣化が生じないことを確認した。劣化しない理由は、ハステロイTM 基板と YBCO 層間の熱歪み量は室温-液体窒素 (77 K) 間において 0.05 %程度 (限界歪み量以内) と小さいためであり、線材が均一であれば劣化することはないと考えられる。

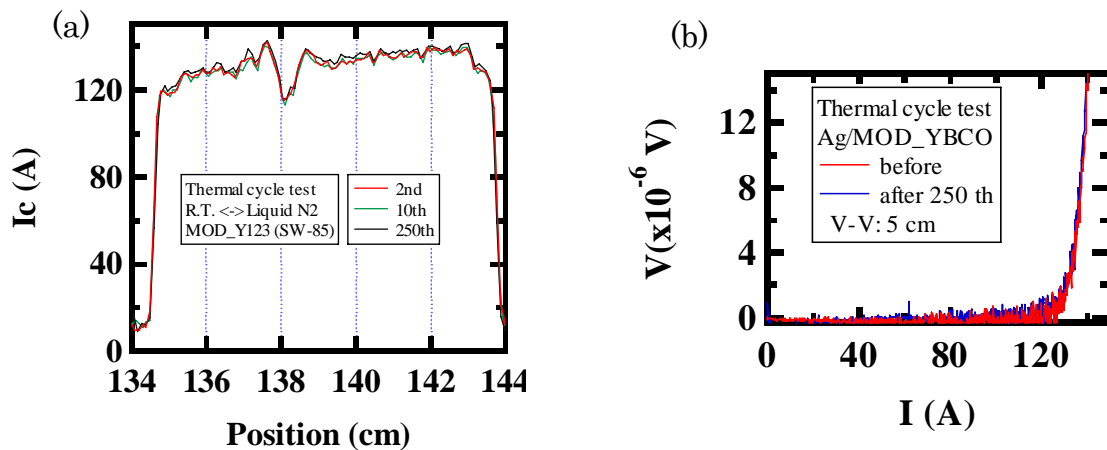


図 2.4.1-15 熱サイクル試験前後の変化 (IBAD-MOD 線材)
 (a) 連続ホール素子法による I_c 分布、(b) $I-V$ 曲線

高電圧ケーブル用線材は、当初 0.1 mm 厚 Cu テープをハンダで貼り付けることで行っていたが、ごくまれに、均一にハンダ付けされていない箇所で熱サイクル試験により部分剥離を起こして劣化することがあった。図 2.4.1-16 に、熱サイクル試験で劣化したケースを示す。この評価結果をケーブル開発担当者に示し、改良策としてめっきへの変更を提言した。ケーブル開発担当者は、耐候性や幅の制御性など別の観点からも変更する必要を感じており、安定化層の付け方をハンダ付けから、めっきに変更した。このような不均一性による剥離が生じている場合は、数回の熱サイクル試験でも I_c 値低下が検知できる。

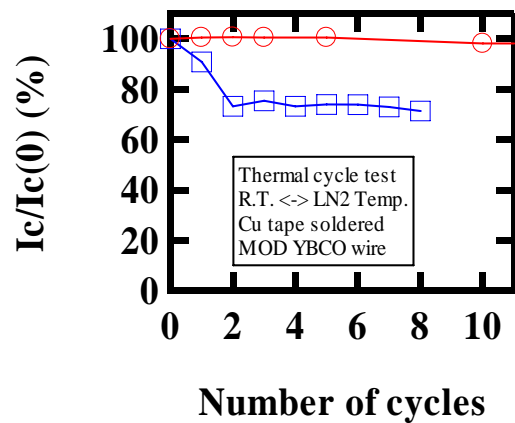


図 2.4.1-16 室温-液体窒素間熱サイクル試験結果例

<応力歪みによる劣化のまとめ>

表 2.4.1-3 に、応力歪みによる劣化に関して整理した。応力・歪みの限界値は、基板材料に依存し、本プロジェクトで用いているハステロイ™基板の場合は、限界歪みが 0.5 %以上と高いため、最大歪みを過大に見積っても 0.4 %以下であるケーブル応用の際には、線材の組織や寸法が均一であれば劣化する可能性は低い。圧縮に関しても試験を実施し、20 MPa の圧縮でもケーブル用素線が劣化しないことを確認した。

表 2.4.1-3 応力歪みによる劣化のまとめ

劣化の可能	劣化限界	劣化機構(推定)	ケーブルでの対策
曲げ引張歪	0.5%以上	クラック	不要
圧縮応力	20MPa以上	組織破壊	不要
繰返し歪	歪限界以内では 回数依存なし	なし	不要
熱サイクル	回数依存なし	なし	不要

・温度による劣化調査

Y系超電導材料を構成している $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ 結晶は、酸素の不定比性を有し、加熱することで酸素が離脱して特性変化を示すことが良く知られている⁽⁷⁾。一般的には、300℃以上で、酸素の離脱が明確に現れてくる。高電圧ケーブルでは、絶縁紙の乾燥(真空中、100℃-24時間)とハンダ付けによるケーブルの中間接続(230℃-20分以内)において加熱処理が行われる。しかし、この低温度での加熱による特性変化を調べた報告はあまりない。そこで、高電圧ケーブルに用いる IBAD-MOD 線材(5mm幅)の加熱試験を実施した。

・真空下加熱試験

図 2.4.1-17 に、真空下加熱試験結果例を示す。加熱条件は、真空中、100℃-100時間までとした。また、裕度を調べるため、150℃-100時間および30mmφの曲げを印加した状態で加熱した前後の I_c 値変化を調べた。その結果、5%以上の I_c 低下がみられた試料はなかった。これより、絶縁紙乾燥時に特性劣化する可能性は低いと言える。

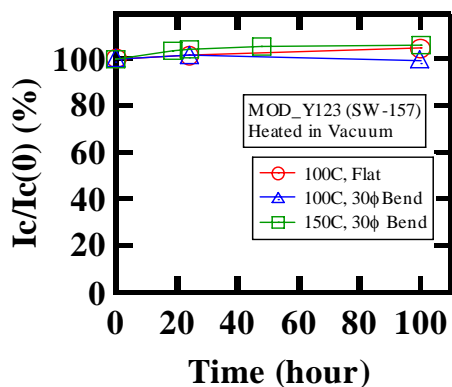


図 2.4.1-17 真空下加熱試験結果例

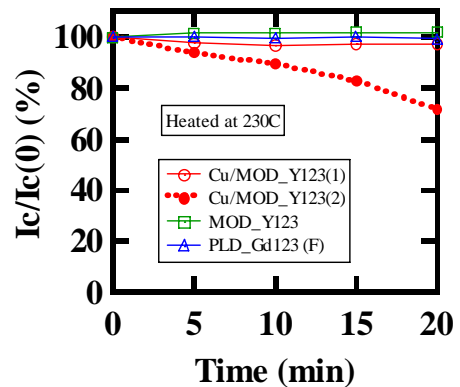


図 2.4.1-18 ハンダ付け温度(230℃)での加熱試験結果例

・ハンダ付け温度での過熱試験

また、ハンダ流し込み温度(230℃)での経時変化を調べた。通常用いられる共晶ハンダの融点は180℃程度であり、実際の作業温度は20-50℃程度高い温度に設定される。試験は、試料の中心2cmを上下から加熱板で挟みこみ、5分加熱する

毎に I_c 値測定を行った。その結果を、図 2.4.1-18 に示す。一部の試料を除き、この条件で劣化することはない。一部の試料で I_c 値が低下した理由は、Cu めっきの不良が原因と推定しており、現在、ケーブル開発担当者らと協力して、線材のめっき前処理方法の検討による改善を実施している。

<温度による劣化のまとめ>

表 2.4.1-4 に、温度による劣化のまとめを記載した。一部の試料を除いて、高電圧ケーブル作製時の加熱で劣化する可能性は低いと言える。

表 2.4.1-4 温度による劣化のまとめ

ケーブル作製上の工程	劣化限界	劣化機構(推定)	ケーブルでの対策
絶縁紙の真空加熱乾燥	150℃-100時間までは劣化5%以内	酸素抜け	不要
中間接続時のハンダ加熱	230℃-20分で5%以上劣化する試料あり	酸素抜け、他	検討中

・湿度による劣化調査

Y系超電導粉末や焼結体は、水や空気中の水蒸気により劣化することが良く知られている^⑧。Y系超電導線材は、Cu や Ag の安定化層で表面が覆われているため、劣化する可能性は低いと見られていたが、予備試験により、開発段階である現状の線材では、水分により僅かではあるが経時変化することが判明した。ここで、ケーブル製作から機器製作までの間の保管がどの程度の期間可能なのかの調査を行った。考えうる最大の湿度条件として 40℃で相対湿度が 100%（雨が降っている真夏にむき出しで工場に保管した環境、水蒸気分圧: 67 hPa）を想定し、その条件における劣化時間を推定する方法を考案した。

・湿度下加熱試験

試験は、電気炉内に短尺線材を設置して、67 hPa に固定した水蒸気雰囲気とし、85℃、115℃、150℃及び180℃に試料加熱し、 I_c 値の経時変化を測定した。図 2.4.1-19 に、IBAD-PLD 線材を各温度で湿度下加熱試験した時の処理時間による I_c 値の低下率をプロットした結果を示す。図より、ばらつきはあるものの、温度が高いほど劣化速度が速く、温度と相関があることが明らかとなった。

・劣化時間の推定

次に図 2.4.1-19 の結果から、各処理温度において I_c 値が 5 % 低下する速度 R を求め、 $\ln R$ vs $1/T$ でアレニウスプロットすると、直線に乗ることが確かめられた。これを図 2.4.1-20 に示す。ここで、40 °C における劣化機構が 85 °C ~ 180 °C と同一であることを仮定し、最小 2 乗法で直線回帰して 40 °C における劣化速度を求めたところ、IBAD-PLD 線材の場合、40 °C-相対湿度 100 % 条件で I_c 値が 5 % 劣化するには 10 年以上かかると推測された。実際には、1 年以内に製作が終了するであろうことを考えると、無視しても良いくらい劣化が遅いことが確かめられた。

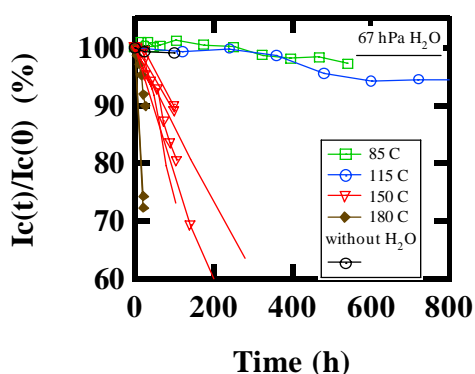


図 2.4.1-19 湿度下加熱試験結果例

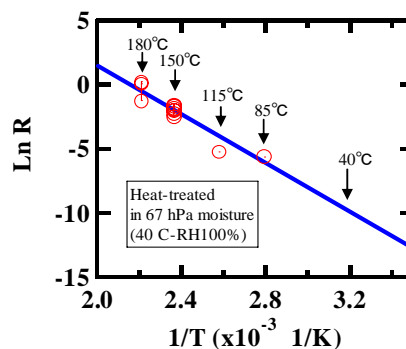


図 2.4.1-20 常温高湿度下での劣化時間の推定結果例

・湿度劣化試験試料の微細組織観察

JFCC では、実用線材の各種環境負荷後の微細組織を透過型電子顕微鏡(TEM)により詳細に解析し、劣化機構とともにこれを抑制する手法の提案を支援した。本報告では、この内、IBAD-PLD 線材について、実使用環境を模擬した湿度劣化試験を行い、劣化した組織を走査型電子顕微鏡(SEM)および TEM により詳細に解析した結果を報告する。観察領域は、レーザ加工切断面側であり、MO 観察結果からも超電導特性が劣化していると判断された領域である。図 2.4.1-21 に、湿度劣化試験後におけるレーザ切断側の SEM 断面写真を示す。切断面からおよそ 50 μm 程度(太線矢印で示す)まで GdBCO 層が変質している。さらに、変質した組織の詳細な組織観察を行うため、TEM を用いた。図 2.4.1-22 に図 2.4.1-21 の太線で示す領域近傍の TEM 像と TEM 像の A、B 領域の電子回折図形を(a)、(b)に示す。湿度劣化試験により変質した領域は多結晶になっていることが判明した。(形成された多結晶については、今回の観察から全て特定できていないが、 BaCO_3 、 CuO 、 Gd_2O_3 等が形成されていると考えられる。) B の領域では c 軸配向結晶を保っている。耐久試験により、この領域では中間層の CeO_2 層、 $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 層およびハステロイ™ 基板の構造は変化していない。以上のように湿度劣化試験後の線材の組織観察から、超電導特性が劣化した原因の一つを特定することができた。これらの劣化を抑制するには、水蒸気が超電導層に直接触れないように、線材端を何らかの方法で覆うことが必要であると考えられる。

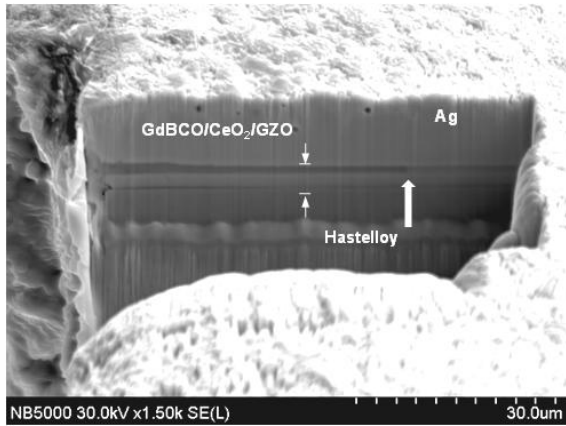


図 2.4.1-21 湿度劣化試験後のレーザ切断側の SEM 断面写真

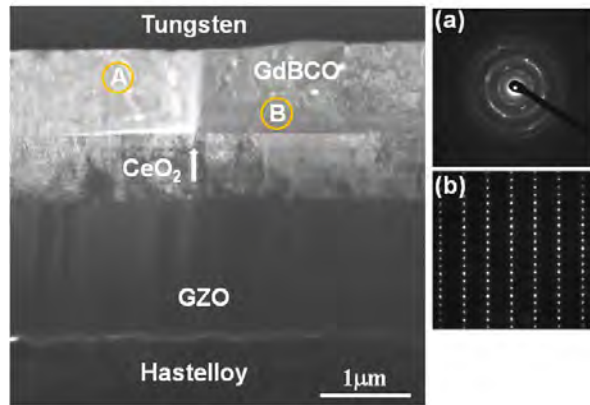
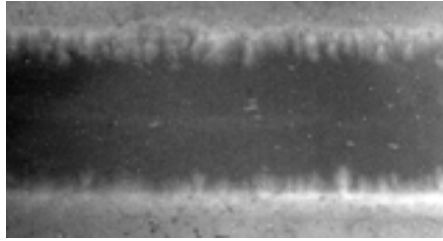


図 2.4.1-22 図 2.4.1-21 の太線領域近傍の TEM 像及び電子回折像(a)A 領域、(b)B 領域

・劣化機構の推定

水蒸気による線材の劣化機構を調べるにあたり、連続ホール素子法 (Tapestar™) による長手方向 I_c 値の分布測定、MO 観察による超電導の均一性評価、表面 SEM 観察を行うとともに、JFCC により劣化箇所の断面 SEM 観察及び TEM による構造評価を実施した。前述したように、Ag 安定化層を付加した後に線材幅を要求値に合わせるためにレーザ切断した試料に関しては、劣化は切断面から生じている様子が検出された。これは、切断により、Ag で覆われずに YBCO 超電導層が露出したために劣化しやすい箇所となったものと考えられる。一方、未切断試料および Ag 安定化層の上に Cu をめっきした試料においては、試料の所々に点状の劣化部が広がった様子が MO 観察により見られた。これを図 2.4.1-23 に示す。ここで、表面観察より、Ag 安定化層にはピンホールや低密度に見える箇所が観察されたことから、切断面のみならず、これらの欠陥からも水蒸気が侵入し劣化が生じる機構を推定した。前述した劣化時間の推定において、通常の線材であれば、常温高湿度下においても長時間の保持が可能であることを示したが、外気に露出する箇所 (欠陥など) を完全になくすことにより、さらに耐湿性が向上するものと考えられる。

(a)



(b)

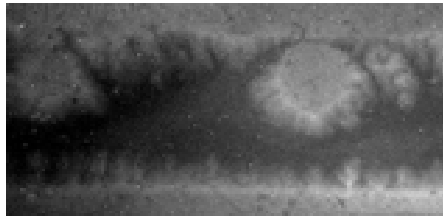


図 2.4.1-23 湿度劣化前後の MO 観察像
(IBAD-MOD 線材)

(a) 劣化前 (b) 湿度劣化後 (150 °C-220 h 後)

<湿度による劣化のまとめ>

表 2.4.1-5 に、湿度による劣化のまとめを示す。ここで、高温における劣化速度を調べることで、常温での劣化速度を推定する方法を考案した。また、PLD 線材では常温高湿度下で線材を保管しても1年以内に5%以上劣化する可能性は低いことが確認できた。ただし、加工方法（めっき、切断）や製作方法により、劣化しやすい線材も存在する。これらに関しては、Ag 層を厚くすることで改善が可能かどうか検討を進めている。また、高湿度下で保管しない等の配慮が必要と考えられる。

表 2.4.1-5 湿度による劣化のまとめ

劣化の可能性	劣化限界	劣化機構(推定)	ケーブルでの対策
保管時の湿度	5%劣化するのに、最大40°C-相対湿度100%で9年以上(ただし劣化速度が速い線もある)	安定化層のポア・粒界などを通して浸透した水蒸気と超電導相・不純物相との化学反応	通常は不要(劣化が早い線は、Ag厚みなど変更し試験中)

表 2.4.1-6 に、ケーブル作製・運転・保守・事故環境条件と線材の劣化限界値の対比を示す。これより、ケーブル作製から運転の条件では、全て限界値以内であり、十分な裕度があることが確かめられた。ここで、基本的な判定には、材料の不均一性や偶発的な欠陥が原因とみなされるデータは取り除いているが、1回でも不良を示した測定結果が出た場合は、念のため例外ありと但し書きをした。

表 2.4.1-6 ケーブル環境条件と線材の劣化限界値の対比

原因	劣化の可能性	ケーブルでの条件	ケーブル用線材の判定、劣化限界値
電流	通電	I_c の50%以下	I_c 以下で劣化なし
	過電流	素線1本あたり最大412 A・0.6 sec	問題なし。 I_c に対して3.8倍、想定過電流に対して1.5倍の裕度
機械	熱サイクル	室温-液体窒素温度の熱サイクル, 30回	問題なし (例外あり)
	歪	最大0.39% (20 mm ϕ)	問題なし、歪0.5%以上 (例外あり)
	繰返し歪	0.1%の曲げ、8回、引張り、圧縮曲げ	歪限界以内では無し
	圧縮	2 MPa	問題なし、20 MPa以上
温度	真空加熱乾燥	真空中、100 °C・24 h	問題なし。150 °C・100時間までは I_c 劣化5%以内
	ハンダ加熱	230 °C・20分以内	通常は問題なし (一部例外あり)
湿度	保管時の湿度	最大40 °C・RH100%、数ヶ月以上	一例として9年以上 (例外あり)

・ 275 kV 高電圧ケーブル用線材の耐久性試験条件

上述の検討に基づいて、ケーブル製作・運転環境から導きだされた要求条件とそれら各々の劣化機構から、耐久性試験項目及び試験条件の概要を表 2.4.1-7 に示す。試験項目には線材構造変更時に確認試験を実施する必要がある項目を抽出した。また、全数検査するか、抜取り検査するか等、実際の運用に関しては、今後もケーブル開発担当者らと密に連携をとりながら進めていく。

表 2.4.1-7 275 kV 高電圧ケーブル用線材の耐久性試験条件

大項目	試験項目案	試験方法	判定方法
電流	過電流試験	想定最大過電流値412 A・0.6 sec (63 kV・0.6 sに対応する1本あたりの電流値) から数A毎に電流を増加させ、 I_c が5%以上低下する電流値を計測	想定過電流値に対する裕度が1.2倍以上あること
歪	繰返し熱サイクル試験	室温-液体窒素のサイクル3回で I_c 測定	1回目と3回目で変化がないこと。(試験後の I_c 低下が5%以内)
	限界歪確認試験	20mm ϕ に曲げ履歴を加えた後、フラットに戻して I_c 測定し、前後の I_c 低下が5%以内(別途、曲げ歪- I_c 曲線取得)あるいは、Goldaker方式等で引張方向の歪 vs I_c 測定を行い、20 mm ϕ までの可逆歪と I_c 低下率を測定するとともに可逆限界値を測定する。	20mm ϕ での I_c 低下率が5%以内でかつ可逆であること
加熱	ハンダ温度加熱試験	大気中、230 °C・20分間加熱した前後の I_c 測定	試験後の I_c 低下が5%以内
湿度	湿度劣化試験	40 °C・RH100%相当の加湿環境下において、150 °C・10時間の熱処理を行った前後の I_c 測定	試験後の I_c 低下が5%以内

(b) 配向基板-PLD 線材の経時・経年変化

配向基板-PLD 線材に対して経時経年特性を把握する目的で、66 kV 大電流ケーブルの製造環境および運転環境の把握を行い、想定された環境に対応した配向基板-PLD 線材の試験方法の調査を行った。表 2.4.1-8 に 66 kV 大電流ケーブル用線材の保存・環境条件の典型例を示す。

表 2.4.1-8 66 kV 大電流ケーブル用線材の保存・環境条件

環境	項目	条件
線材保存	温度	室温
	湿度	40 -100 %
	保存期間	1 年間
	I_c 測定	熱サイクル (常温-77 K)
	線材巻替	曲げ径 100 mm
ケーブル製造	温度	室温 (-10 °C ~ 50 °C 程度)
	湿度	40 -100 %
	曲げ	直径 45 ~ 50 mm
	巻き線時曲げ	直径 45 mm 相当 (引張り張力 1 kgf)
	断熱管真空引き	真空、最大 100 °C - 10 日間程度
	側圧	最大 15 kg/m 程度
敷設	温度	室温 - 65 K
	長期線材歪み	最大 0.3 % (引張り)
運転	熱サイクル	室温 - 液体窒素温度
	圧力	0.2-1 MPaG (液体窒素加圧)
	過電流	31.5 kA-2 sec

上記内容を基にすると、線材レベルにおいて配向基板-PLD 線材の経時経年変化を評価するための基本的な超電導特性試験内容は、主に以下の 4 項目にまとめられる。

- 1) 湿度、温度、真空による超電導特性 (T_c , J_c , I_c 等)
- 2) I_c の熱サイクル特性 (液体窒素温度 ~ 100 °C)
- 3) I_c の歪み依存性 (圧縮 : 0.15 %、引張り : 0.3 %、スパイラル曲げ歪み (Cu フォーマに線材をらせん状に巻きつけた際の捻り方向の歪み) 等)
- 4) I_c の過電流特性

経時経年特性評価に用いた配向基板-PLD 線材の諸元の典型例を表 2.4.1-9 に示す。本線材を用いて、上記 4 項目に対応する環境下での経時特性評価を行い、経時変化主要因となる環境影響を調査した。

表 2.4.1-9 配向基板-PLD 線材の諸元と特性

構成	材料	作製プロセス	諸元
配向基板	クラッド基板	クラッド加工 配向化熱処理	厚さ 120 μm 幅 30 mm
中間層	CeO ₂ (第一中間層)	RF スパッタ法	膜厚 100 nm
	YSZ (第二中間層)		膜厚 200 nm
	CeO ₂ (第三中間層)		膜厚 70 nm
超電導層	GdBCO	PLD 法	膜厚 2~3 μm
保護層	Ag	DC スパッタ法	膜厚 2~8 μm
細径加工	Ag 被覆までの線材	機械式スリット	30 mm 幅→2 mm 幅/4 mm 幅
安定化層	Cu	電界めっき法	10、20 μm
臨界電流 I_c (77 K,s.f.)			I_{c2} (2 mm 幅線材の I_c 値) = 36~45 A I_{c4} (4 mm 幅線材の I_c 値) = 80~100 A

まず、 I_c 値の湿度、温度、真空による特性調査を実施した結果を、図 2.4.1-24 および 25(a),(b)に示す。真空下の加熱による I_c 特性は、3 種の条件 (100 °C、150 °C、100 °Cで 30 mm ϕ 曲げ) のいずれにおいても特性変化は無かった。一方、湿度下 (67 hPa の H₂O) の加熱による I_c 特性調査では、室温から 80 °C までは 600 時間経過後においても著しい I_c 値の変化はなかったが、115 °C 以上の温度条件では温度の増加とともに時間経過に伴って I_c 値の低下が観測された。また、IBAD 線材と同様に劣化速度をアレニウスプロットして 40 °C-相対湿度 100 %において 5 %劣化する時間を見積もったところ約 9 年かかると見積もられた。

しかしながら、今回 I_c 値低下が観測された条件は、表 2.4.1-8 に示す線材の保存・環境条件を大きく超えており、ケーブル用線材の想定された湿度、温度、真空下においては、経時経年変化は生じないと考えられる。

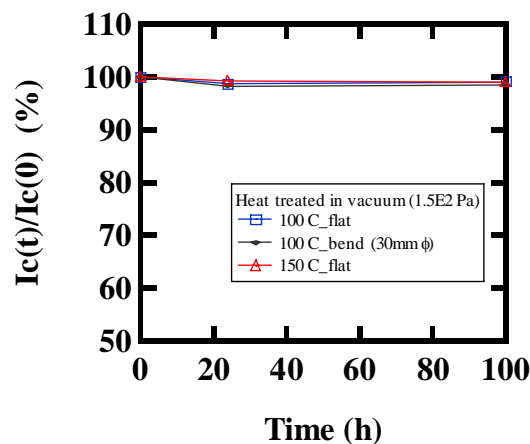


図 2.4.1-24 真空下の加熱による I_c 特性変化

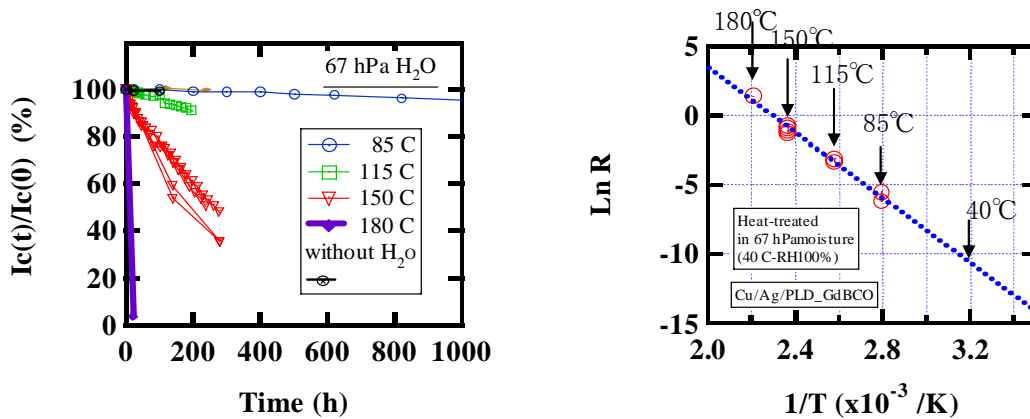
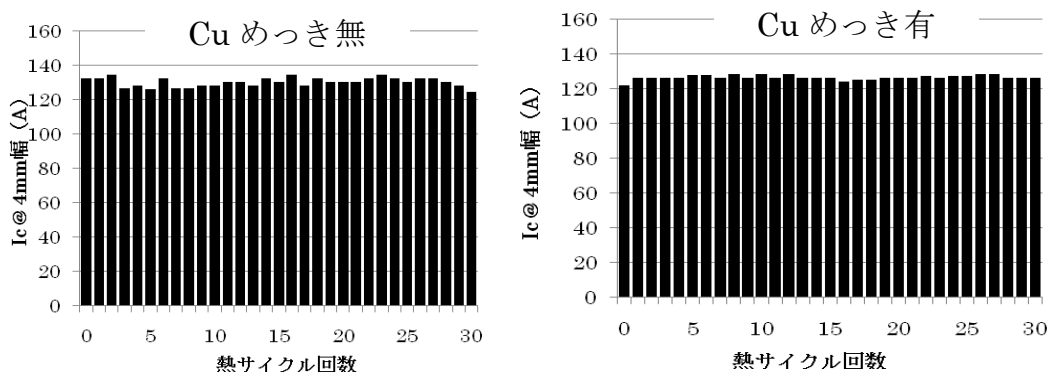


図 2.4.1-25 I_c 値の湿度および温度による変化

- (a) 湿度下の加熱による I_c 特性
- (b) 常温高湿度下での劣化時間の推定

次に、線材 I_c 値の熱サイクル特性について調査した。試験は、線材保存および運転条件を模擬して、室温と液体窒素温度の間を多数回の熱サイクル履歴を印加させながら I_c 値の変化を調査した。試験結果を図 2.4.1-26 に示すが、30 回までの熱サイクル試験では、 I_c 値の変化は無く、また安定化 Cu の有無に対する影響も無かった。運転開始時以降は、室温から液体窒素温度までの熱サイクルはケーブルメンテナンス時の昇温に対応するが、ケーブル敷設後の運転開始以降の熱サイクルは 30 回より少ないと考えられることから、本試験結果により配向基板・PLD 線材の基本的な熱サイクル耐性が確認された。

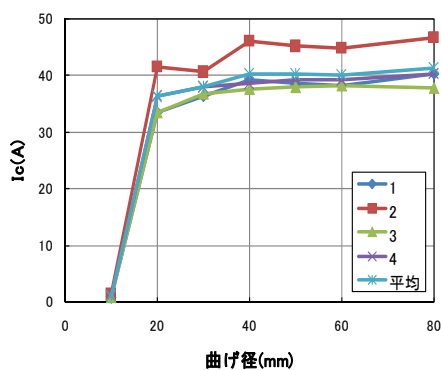


(a)安定化 Cu 無の線材 (b)安定化 Cu 有の線材

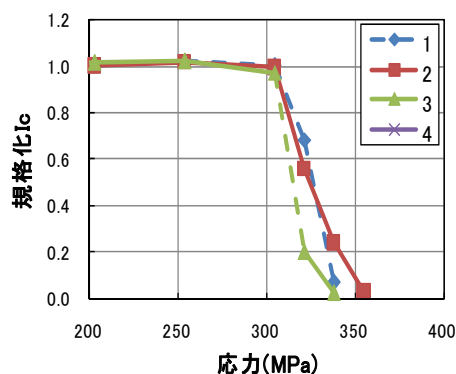
図 2.4.1-26 I_c 値の熱サイクル特性 (室温～液体窒素温度)

I_c 値の歪み依存性は複数の評価法により実施した。まず基本的な線材の I_c -機械的特性は、室温で線材に単純曲げ歪みおよび引張り張力を印加し、その後 I_c 値を測定する手順で、これらの歪みおよび張力を増加させ I_c 値が低下する領域まで試験を実施した (図 2.4.1-27)。これらより曲げ強度限界は $20\text{ mm}\phi$ 、引張り強度限界は 300 MPa であることを把握するとともに、実際のケーブル製造条件に比較して線材単体としては十分な裕度を有していることが確認された。また、スパイラル曲げ歪み特性については、大電流ケーブル構造を模擬したフォーマ径 ($16\text{ mm}\phi$)

を用いてピッチ（線材が一回りする距離）を変化させ、 I_c 値が低下し始める最小スパイラルピッチが 100 mm であることを把握した（2.2.2-1 参照）。ケーブル製造ではこれら限界値レベルで製造することは考えられず、一定の裕度を維持することで経時経年変化に備える必要がある。



(a) I_c の単純曲げ歪み特性



(b) I_c の単純引っ張り特性

図 2.4.1-27 I_c の機械的特性

I_c 値の過電流特性は、31.5 kA、2 秒の過電流がケーブル導体に流れた場合に対応した評価が必要となる。本評価では、超電導線材 1 本に流れる電流波形を解析で求め、線材に印加する交流電流のピーク値を徐々に大きくし、 I_c 劣化が開始する I_{peak} を調査した。さらにこの I_{peak} 未満で最大 30 回までの繰り返し過電流を流して I_c 値の低下が無いことを確認した（2.2.2-3 参照）。これらの試験では、安定化 Cu の厚みを 10 μm 及び 20 μm の 2 水準で行った。その結果、想定される最大事故電流に対し 1.5 倍以上の裕度をもち、 I_{peak} 未満での劣化は無いことが明らかになった。

一方、磁気ナイフ法（京都大学）やホール素子顕微鏡法（九州大学）を用いた線材の特性分布評価や電磁気挙動評価も実施した。さらに、切断加工の影響による影響も明らかにし、ケーブル耐久試験条件として試験項目や試験条件を決定するための基礎データを得た。これらを図 2.4.1-28 および図 2.4.1-29 に示す。

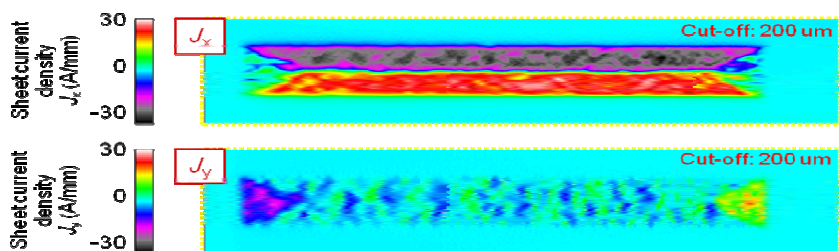
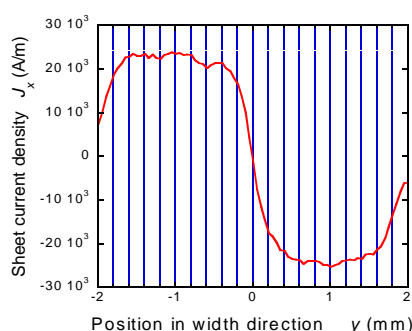
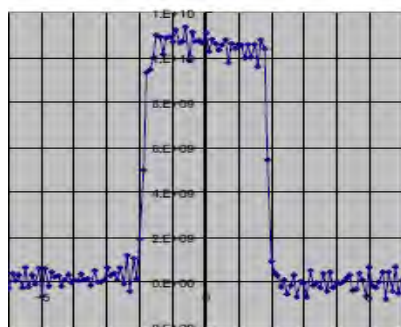


図 2.4.1-28 ホール素子顕微鏡法による電磁気特性分布評価



1) 磁気ナイフ法

2) ホール素子顕微鏡法

図 2.4.1-29 切断加工を施した細径線材の I_c 値分布特性

・66 kV 大電流ケーブル用線材の耐久性試験条件

上述の検討に基づいて、ケーブル製作・運転環境から導きだされた要求条件とそれら各々の劣化機構から、耐久性試験項目及び試験条件の概要を表 2.4.1-10 に示す。線材構造を変更した際には、確認試験を実施する必要がある項目を抽出した。ここで、試験項目は、一連の試験結果から、線材の偶発的な欠陥由来の劣化を含む何らかの劣化を検出できた項目を取り上げた。ただし、本質的なところで、試験で検知している要因が重なっていることも考えられる。また、全数検査するか、抜取り検査するか等、実際の運用に関しては、今後もケーブル開発担当者らと密に連携をとりながら進めていく。

表 2.4.1-10 66 kV 大電流ケーブル用線材の耐久性試験条件案

大項目	試験項目案	試験方法	判定方法
電流	過電流試験	想定最大過電流値320 A・2 sec（想定過電流31.5 kV・2 secに対応する1本あたりの電流値）から数A毎に電流を増加させ、 I_c が5%以上低下する電流値を計測	想定過電流値に対する裕度が1.2倍以上あること
歪	繰返し熱サイクル試験	室温-液体窒素のサイクル3回で I_c 測定	1回目と3回目で変化がないこと。（試験後の I_c 低下が5%以内）
	限界歪確認試験	20mmφに曲げ履歴を加えた後、フラットに戻して I_c 測定し、前後の I_c 低下が5%以内(別途、曲げ歪- I_c 曲線取得)あるいは、Goldaker方式等で引張方向の歪 vs I_c 測定を行い、20 mmφまでの可逆歪と I_c 低下率を測定するとともに可逆限界値を測定する。	20mmφでの I_c 低下率が5%以内でかつ可逆であること
加熱	ハンダ付け温度加熱試験	大気中、230℃・20分間加熱した前後の I_c 測定	試験後の I_c 低下が5%以内
湿度	湿度劣化試験	40℃・RH100%相当の加湿環境下において、150℃・10時間の熱処理を行った前後の I_c 測定	試験後の I_c 低下が5%以内

(4) 成果のまとめ

本研究開発項目では、30年以上という電力機器の耐用年数の間に超電導体の劣化が生じないことを確かめることを目的に、保存環境や運転環境を模擬した様々な環境下に線材を保存し、 I_c 等の特性の経時・経年変化の評価を行うとともに、劣化機構の解明やその抑制方法の検討を行った。本期間中は、中間目標であるケーブル耐久試験条件としての試験項目や試験条件の決定をめざし、主としてケーブル用の線材素線の劣化を引き起こす負荷の限界条件や裕度を明らかにした。以下に主な成果をまとめる。

- ・高電圧ケーブル、大電流ケーブルについて、製作担当へのヒアリングにより、ケーブルの製作、敷設、運転、保守時に素線が受ける負荷の種類と条件を抽出し、これをもとに通電・過電流、応力歪み、加熱、湿度という負荷に対する試験項目と試験方法を決定した。
- ・局所的 I_c 値劣化のある IBAD-MOD 線材に対し、 I_c 値を大きく超える交流電流通電を 1000 時間行っても、 $I-V$ 特性の変化は全く観測されなかった。これにより通常の I_c 値以下の運転では素線の劣化が生じる可能性はないと判断される。
- ・事故電流を想定した交流過電流試験において、大電流ケーブル用 Cu めっき素線は、 I_c 値に対し 2.8 倍、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。また、高電圧ケーブル用 Cu めっき素線は、 I_c 値に対し 3.8 倍、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。
- ・パルス電流印加実験により、素線が 500 K 程度まで温度上昇したときに劣化し、その劣化は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。本プロジェクトのケーブルの設計では、事故電流による温度上昇は 200 K 以内に抑えられることが確認されており、素線が劣化する可能性はないと考えられる。
- ・室温引っ張り試験、繰り返し曲げ試験において、素線の可逆歪み限界（IBAD 線材の場合は 0.6 %程度）を越えない歪みを繰り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。ただし、Cu シートをハンダで貼り付けた線材では一部に劣化が観測され、ハンダ貼り付けの不均一に起因することが判明したため、Cu めっきに変更した。
- ・素線は 150 °C、100 時間の真空中加熱試験によっても劣化せず、100 °C、24 時間というケーブル製作時の乾燥工程での熱処理に対し十分な裕度をもつ。
- ・ハンダ付け温度（ハンダ融点 180 °C）での加熱試験において、230 °Cでも素線の劣化は生じない。一部の Cu めっきした素線で劣化が見られたが、めっきの不良が原因と推定された。
- ・配向基板-PLD 線および IBAD-PLD 線材において、素線は Cu めっき等で表面が覆われている、いないにかかわらず、100 °C以上の高温、高湿度化で劣化する。

I_c 値の劣化速度はアレニウス式に従い、最悪の素線の保管条件 40 °C、相対湿度 100 %においても I_c 値が 5 %劣化するのに 9 年以上を要することが明らかになった。

- 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。一方、素線の作製条件や仕様を変更した際に確認すべき素線に対する耐久性試験項目、試験方法、判定条件をこれらの結果に基づき提案した。

これまで、Y 系超電導線材の経時経年変化を実用機器の利用環境にあてはめて劣化の原因と対比しながら系統立てて調べられたことはなく、これが初めての系統立った研究報告といえる。本項で得られた結果は、他の機器応用の条件に当てはめて整理しなおすことにより、その機器独自の項目を追加、修正するだけで、適用可能な汎用性のある手法や考え方を提案しており、非常に有用な成果といえる。また、ケーブル用に適した線材への修正提案などを実施しており、ケーブル開発にも貢献した。

表 2.4.1-11 に、中間目標とその達成状況を記す。中間目標：「ケーブル耐久性試験条件としての試験項目や試験条件を決定する」に対し、ケーブル用線材がケーブル製作～運転条件において受ける各種のストレス（電流、機械歪み、熱サイクル、加熱、保管中の湿度）に対し、線材自体の劣化条件（ストレスの限界量）とケーブルにおける条件からの裕度を明らかにし、さらに劣化原因の推定を行なった。その結果、現ケーブルの条件では、一部の例外を除き現仕様の線材自体が劣化することはないことを確認するとともに、線材仕様に変更された場合などに検査すべき試験条件案を定めた（表 2.4.1-7 および表 2.4.1-10 参照）。これを受けて、ケーブル開発では、線材自体が劣化することはないという前提を再確認することができ、ケーブル化技術開発の短絡試験およびシステム検証のシステム設計など耐久性に関わる試験条件の設定を行った（参照：2.2.2 275 kV 高電圧ケーブル化技術の開発 2.2.2-8 項の表および 2.2.1 66 kV 大電流ケーブル化技術の開発 表 2.2.1-18）。このように、本項で得られた結果は、ケーブルシステム開発に貢献しており、本開発項目の中間目標は達成されたものと考えられる。

表 2.4.1-11 中間目標とその達成状況

ケーブル 耐久性試 験条件と しての試 験項目や 試験条件 を決定す る。	ケーブル製作～運転条件において、線材が受ける各種のストレス（電流、機械歪み、熱サイクル、加熱、保管中の湿度）に対し、線材自体の劣化条件（ストレスの限界量）とケーブルにおける条件からの裕度を明らかにし、さらに劣化原因の推定を行った。その結果、現ケーブルの条件では、一部例外を除き現仕様の線材自体が劣化することはないことを確認するとともに、線材仕様が変更された場合などに検査すべき試験条件案を定めた（参照：表2.4.1-7および表2.4.1-10）。本項で得られた結果は、ケーブルシステム検証のシステム設計に生かされている。（参照：2.2.2 275 kV高電圧ケーブル化技術の開発 2.2.2-8項の表および2.2.1 66kV大電流ケーブル化技術の開発 表2.2.1-18）	◎ 達成
--	---	---------

◎：中間目標達成 ○：H23年3月末までの中間目標達成が見通せている
 △：H23年3月末中間目標達成には技術開発の大きな進展が必要

(5) 最終目標達成の見通し

最終内部目標「各種機器の耐久性試験」では、改良されたケーブル用線材の耐久性試験を進めるとともに、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必要がある。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、繰返し歪みやフープ力、温度条件などに関しても試験方法を提案していく。

引用論文リスト

- (1) A. Ishiyama, Y. Nishio, H. Ueda, N. Kashima, M. Mori, T. Watanabe, S. Nagaya, M. Yagi, S. Mukoyama, T. Machi, Y. Shiohara, “Degradation Characteristics of YBCO-Coated Conductors Subjected to Overcurrent Pulse” IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.19, No.3 (2009) 3483-3486
- (2) N. Sakai, K. Nakao, Y. Hato, X. Wang, A. Ishiyama, T. Kato, M. Yagi, Y. Aoki, S. Lee, N. Chikumoto, Y. Ichikawa, N. Fujiwara, K. Tanabe, ” Understanding of deterioration phenomenon for RE123 coated conductors” Abstracts of CSJ Conference, spring, No. 1A-p05 (2010) 15
- (3) N. Cheggour, J. W. Ekin, Y.-Y. Xie, V. Selvamanickam, C. L. H. Thieme, D. T. Verebelyi, “Enhancement of the irreversible axial-strain limit of Y-Ba-Cu-O-coated conductors with the addition of a Cu layer” Appl. Phys. Lett. 87 (2005) 212505

- (4) Y. Sutoh, K. Kakimoto, N. Kaneko, Y. Iijima, T. Saitoh, "Mechanical bending property of YBCO coated conductor by IBAD/PLD" *Physica C* 426-431 (2005) 933-937
- (5) N. Cheggour, J. W. Ekin, C. L. H. Thieme, Y.-Y. Xie, "Effect of Fatigue Under Transverse Compressive Stress on Slit Y-Ba-Cu-O Coated Conductors" *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 17 (2007) 3063-3066
- (6) S. Bamba, Y. Tanaka, T. Ando, H. Ueda, A. Ishiyama, Y. Yamada, Y. Shiohara, "Fatigue tests of YBCO coated conductors" *J. Phys. Conf. Ser.* 97 (2008) 012170
- (7) M. Klaser, J. Kaiser, F. Stock, G. Muller-Vogt, A. Erb, "Comparative study of oxygen diffusion in rare earth REBa₂Cu₃O_{7-d} single crystals (RE=Y, Er, Dy) with different impurity levels" *Physica C* 306 (1998) 188-198
- (8) J-P. Zhou, J.T. McDevitt, "Reaction of the oxygen-deficient YBa₂Cu₃O₆ phase with water" *Solid State Comm.* 86 (1993) 11-14

2.4.2 磁場中高臨界電流(J_c)線材作製技術開発 (ISTEC、中部電力、古河電気工業、JFCC、昭和電線ケーブルシステム、名古屋大学、九州大学、九州工業大学、新潟大学、上智大学、物材機構、核融合研究所、大阪大学、理化学研究所、東京工業大学、ロスアラモス米国立研究所)

(1) 研究開発目標

本項では、高磁場中(~11 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標とする。

具体的な数値目標としては SMES 応用を想定した 30 A/cm-w@77 K, 3 T-50 m、及び変圧器応用を想定した 300 A/cm-w@65 K, 0.02 T-50 m が中間目標として設定されている。さらに最終目標はそれぞれ、50 A/cm-w@77 K, 3 T-200 m、及び 400 A/cm-w@65 K, 0.1 T-100 m である。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。

開発手法としては、「超電導応用基盤技術研究開発 (第Ⅱ期)」プロジェクトの成果を踏まえ、磁場中臨界電流の向上をめざす。また PLD 法、MOD 法、MOCVD 法のそれぞれに適した人工磁束ピン止め点 (以後、人工ピン止め点と記述) 導入法を開発する。さらに従来の開発方針よりさらに広い視野から高不可逆磁場材料の探索及び開発を行い、より広い温度・磁場領域において高性能を持つ線材の開発をめざす。またこれらの技術開発を効率化するためにミクロからマクロにわたる各種評価法を開発する。

(2) 研究の経緯及び実施体制

PLD 法については、「超電導応用基盤技術研究開発 (第Ⅱ期)」プロジェクトの成果を踏まえ、MgO 基板上において極低コスト技術開発と両立することを優先し、臨界温度(T_c)低下の危惧のない人工ピン止め点導入を用いず高 J_c 化、厚膜高 I_c 化を主体として中間目標達成をめざすこととした。低コスト化については 2.4.5 項で中間層、各種超電導層作製コスト削減技術開発を行っている。中間目標実証には上記低コスト化の技術開発の成果を踏まえ、高 I_c 化及び長尺化実現のための開発検討を行うこととした。

MOD 法については、前プロジェクトにおいて、(Y/Sm)BCO の混晶材料中に人工ピン止め点を微細分散させることにより磁場中の I_c 値が向上し、さらに I_c 値の角度依存性が小さくなることが明らかになっている。本プロジェクトではこの知見を受け、前プロジェクトで開発した TFA-MOD による Y/RE 混晶材料の組成最適化や人工ピン止め点の最適材料、添加量を検討することにより磁場中特性を改善することを試みた。また、本プロジェクトでは ISTEC と昭和電線が共同で開発を行い、ISTEC で MOD 原料の開発、仮焼・本焼の基礎技術を主に検討し、本焼技術については前プロジェクトで Batch タイプの本焼炉を開発し 500 m-300 A/cm-w

級の長尺 Y 系超電導線材作製が可能な技術を有する昭和電線が Y(RE)混晶材料の本焼技術開発を主とした長尺化技術の検討を担当することとした。

MOCVD 法については、Y を Gd で置換した Y(Gd)BCO 線材に Zr を添加する手法で、超電導層中に BaZrO₃ (以後、BZO と記述) 等の有効なピン止め点を導入することにより、超電導線材の磁場中特性の改善を試みている。

実施体制としては、PLD 超電導層作製プロセス((a-1)i)、MOD 超電導プロセス((a-2)i)に関しては、主として ISTECC が担当し、これを、微細組織観察技術により JFCC ((a-2) iv) が支援する。MOD 超電導プロセスに関しては、特に長尺プロセス開発に関して SWCC が実施する((a-2) ii))。プロセス基礎に関しては、PLD 法に関して名古屋大学((a-1) ii) が MOD 法に関しては、九州大学電磁特性評価技術で九州大学((a-2) iii) が支援する体制である。一方、MOCVD 法による、超電導層作製プロセス開発では、中部電力、古河電気工業((a-3) i) 及び ii)) が担当している。

磁場中特性向上をめざした超電導膜の評価としては、膜厚依存や低異方性膜の電磁氣的解析を九州工業大学((a-4) i)) が、その組織の三次元観察を九州大学((a-4) ii)) が実施し、その他磁束ピン止め力評価や $J_c \cdot B \cdot T \cdot \theta$ 、 n 値などの評価は、九州工業大学、九州大学、東北大学(((a-4) iii~vi)) で実施し、直流磁場下での機械特性や繰り返し応力耐性、導体化対応性などは、上智大学、新潟大学、核融合研究所で実施する体制である。さらには、高不可逆磁場材料の開発では、Cu 系の改良プロセス開発を主に ISTECC が((b-1) i)) が行い、JFCC が微細組織観察技術により((b-1) ii) 開発支援を行なっている。量子線照射等でのピン形状の影響検討((b-1) iii) や、微量添加によるキャリア濃度調整((b-1) iv) は、理研及び大阪大学が担当し、電磁氣的特性評価は九州大学及び LANL とともに研究を共同実施している。さらには、最近発見された、異方性の小さな Fe 系超電導材材料の評価を ISTECC 及び東京工業大学で行なうことで((b-1) vii) 及び ((b-1) viii)) 線材開発の指針探索を行うこととしている。

(3) 具体的成果

(a) 人工ピン止め点導入関連技術開発

(a-1) PLD 法による磁場中特性改善技術開発

i) PLD 法による長尺線材磁場中特性改善技術開発

「超電導応用基盤技術研究開発 (第 II 期)」プロジェクトで特性向上技術開発において得られた磁場中特性の開発成果を表 2.4.2-1 に示す。ここでは、IBAD-GZO 基板上において BZO 人工ピン止め点の導入を行ない、磁場中 I_c 値として 30 A/cm-w@77 K, 3 T という高特性を長さ 60 m で実証している。

この結果を本プロジェクトの目標と比較した場合、磁場中 I_c 向上技術と IBAD-MgO 基板導入を含めた極低コストとの両立が課題となる。

表 2.4.2-1 前プロジェクトでの磁場中特性成果

IBAD 種類	GZO 基板
ピン種類	BZO
長さ	60 m
$I_c@77\text{ K}$	300 A/cm-w@s.f.
	30 A/cm-w@3 T

表 2.4.2-2 磁場中 I_c 向上&極低コスト両立のアプローチ

	メリット	デメリット
ピンなし	MgO 基板導入により、極低コストクリアの見込み	磁場中 I_c 低下率が比較的大きい
BZO ピン	GZO 基板上で 30 A/cm-w@77 K, 3 T クリアの実績	自己磁場中 I_c 低下により極低コストクリアが困難

表 2.4.2-2 は磁場中 I_c 向上&極低コスト両立実現のアプローチとしてピン止め点なしと BZO 人工ピン止め点導入の比較である。極低コスト化を単独で考えた場合、BZO 人工ピン止め点導入での実現が困難となる一方、人工ピン止め点の導入なしにおいても厚膜化による磁場中特性向上が見込めることが明らかになった((a-4)磁場中線材評価 i)参照)。そこで、中間目標に対しては、MgO 基板上において極低コスト技術開発と兼ねることが可能な人工ピン止め点の導入なしでの高 J_c 化、厚膜高 I_c 化により目標達成をめざすこととした。

その際、厚膜化は単純に自己磁場中での I_c 値の向上だけではなく、要素ピン力の増大も見込めることから、磁場中特性向上には有効であると考えられる((a-4)参照)。図 2.4.2-1 には、短尺試料における膜厚と磁場中での I_c 値減衰率を示す。同図から、自己磁場中の I_c 値に対する 3 T 磁場中での I_c 値の比率が厚膜化とともに向上していることがわかる。

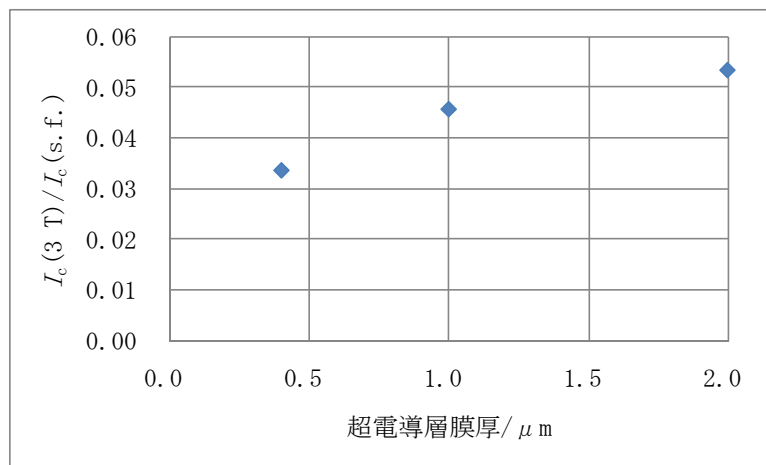


図 2.4.2-1 磁場中 I_c の膜厚依存性

図 2.4.2-2 には、IBAD-MgO 基板を用いた 41 m 長線材における磁場依存性の結果を示した。本線材は、32 A/cm-w@77 K, 3 T を示し、IBAD-GZO 基板上での結果と同等の磁場中特性を得ることができた。しかしながら、技術コストが、5.0 円/Am であり、高速化、高 J_c 化が必要である。低コスト化については 2.4.5(3)(a-2)PLD 法による超電導層作製コスト削減技術開発で報告する。

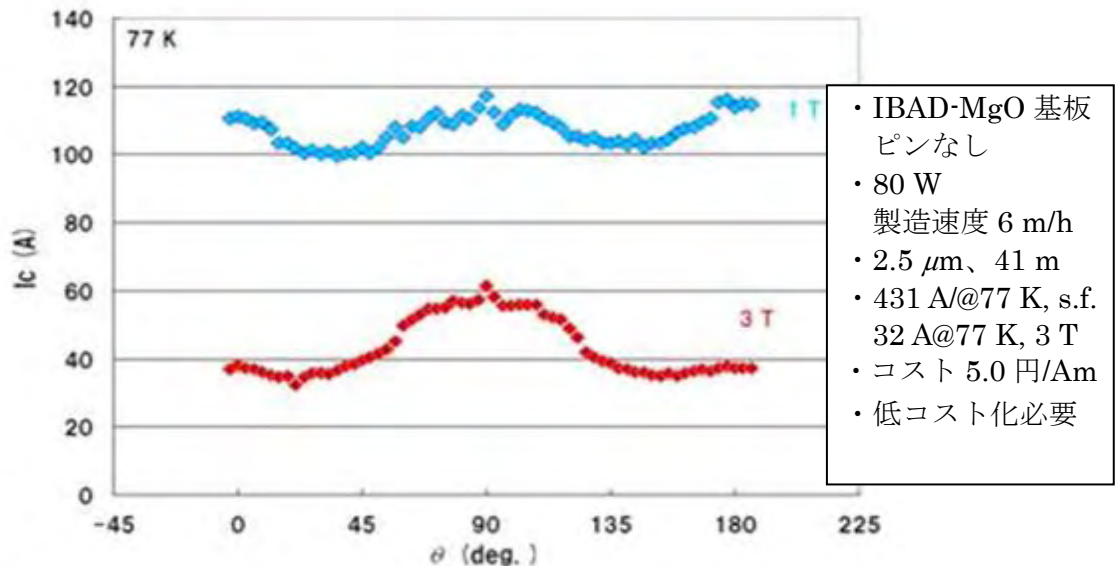
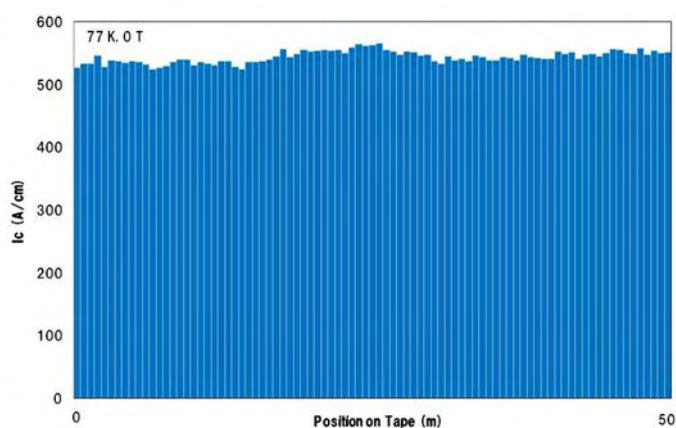


図 2.4.2-2 IBAD-MgO 基板導入による厚膜線材の磁場中特性

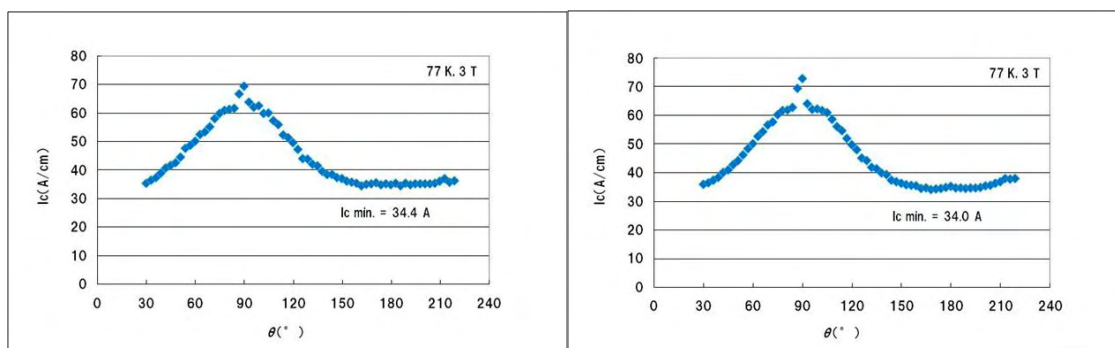
磁場中 I_c 向上&極低コスト両立には、膜厚超電導層(1 μm 以上)で高速化などによる超電導層作製コストの削減が必要である。そこで、レーザエネルギー密度向上、高成膜温度、および T-S 間(ターゲット-基板間)距離調整などにより高 J_c 条件における高速成膜を実施し、膜厚 1.5 μm の超電導層を有する線材を作製した。主な結果を表 2.4.2-3 にまとめる。また、同線材から切り出した、短尺線材の 77 K, 3 T 条件における磁場中 I_c 値評価の結果を図 2.4.2-3 に示す。

表 2.4.2-3 超電導層作製コスト削減技術開発結果

IBAD 種類	MgO 基板
ピン有無	ピンなし
超電導層膜厚	1.5 μm
長さ	51 m
I_c @ 77 K, s.f.	min524 A/cm-w(標準偏差 1.77 %)
コスト	2.9 円/Am



a.長尺測定結果



b.スタート端
530 A@77 K, s.f.

c.エンド端
545 A@77 K, s.f.

図 2.4.2-3 電力貯蔵システム向け磁場中 I_c 特性評価結果

SMES 対応の中間目標値である I_c 値@77 K, 3 T は連続 I_c 測定機での評価が困難であることから、図 2.4.2-3 で示した評価結果に基づいて得られる I_c 値@77 K, s.f. と I_c 値@77 K, 3 T の比を用いて、長手方向の値@77 K, s.f. 分布から求めた最低 I_c 値に同比を掛けることで全長での I_c 値@77 K, 3 T 最低値を求めた。長手方向の I_c 値@77 K, s.f. 分布から求めた最低 I_c 値は、524 A/cm-w であり図 2.4.2-3 から求めた比は、0.624 であることから I_c 値@77 K, 3 T 最低値を 32.7 A/cm-w@77 K, 3 T とした。この結果から SMES 対応の中間目標値である磁場中 I_c 条件(30 A/cm-w@77 K, 3 T)を達成したことになる。

図 2.4.2-4 には、同線材の 77 K, 0.02 T 条件における特性評価の結果を示す。連続 I_c 測定機を用い、0.7 m 間隔で測定したものである。その結果、最低値が 492 A/cm-w であり、65 K では I_c 値がさらに増加するのは明らかであることから、変圧器対応の中間目標値である磁場中 I_c 条件(300 A/cm-w@65 K, 0.02 T)を達成したと言える。

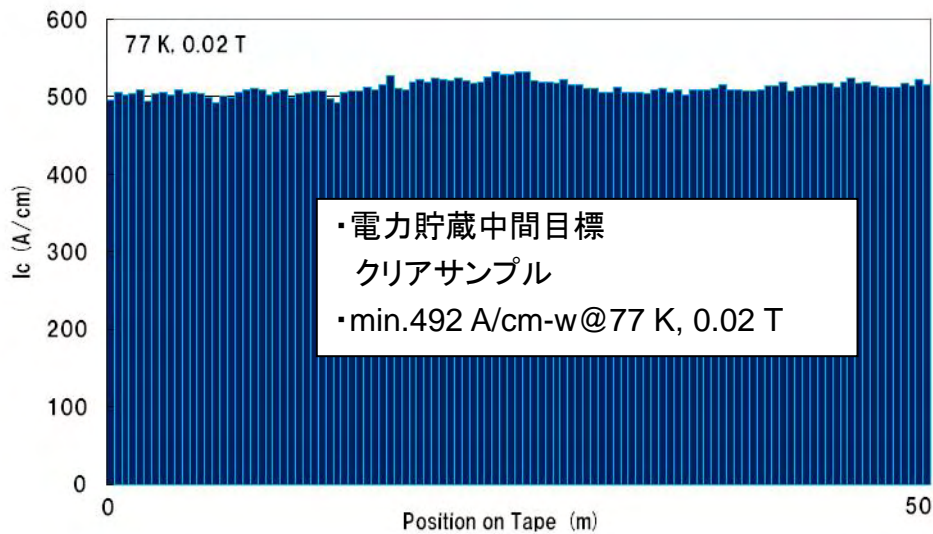


図 2.4.2-4 変圧器向け磁場中 I_c 特性評価結果

表 2.4.2-4 には中間目標と成果をまとめた。いずれの成果も中間目標を上回っている。以上のことからピンなし超電導層膜厚 $1 \mu\text{m}$ 以上での超電導層作製コスト削減技術開発の結果、磁場中高臨界電流(I_c)の中間目標を達成した。

表 2.4.2-4 中間目標と成果まとめ

		中間目標	成果
磁場中 I_c	$I_c@77 \text{ K}, 3 \text{ T}$	30 A/cm-w	32.7 A/cm-w
	$I_c@65 \text{ K}, 0.02 \text{ T}$	300 A/cm-w	>492 A/cm-w
長さ		50 m	51 m
コスト		3 円/Am	2.9 円/Am

表 2.4.2-5 には、最終目標と現状との比較を行った。最終目標実現にはさらに高い磁場中 I_c 特性と低コスト化の両立と、さらなる長尺化が求められる。特に SMES 向け磁場中 I_c 値の最終目標である $50 \text{ A/cm-w}@77 \text{ K}, 3 \text{ T}$ は現状を大きく上回る目標値である。そこで、 $50 \text{ A/cm-w}@77 \text{ K}, 3 \text{ T}$ をめざし、アプローチの一つとして、これまでの開発の延長線上で超電導層の厚膜化を検討した。結果を図 2.4.2-5 に示す。膜厚を $3.0 \mu\text{m}$ まで向上させた短尺試料においてその可能性を評価した結果、 $56 \text{ A/cm-w}@77 \text{ K}, 3 \text{ T}$ を確認することができた。しかしながら、厚膜化において成膜速度が低下したことから技術コストが 3.8 円/Am となった。今後は、コスト条件を満たすための高速化の開発が必要になる。

表 2.4.2-5 最終目標と現状

		最終目標	現状
磁場中 I_c	$I_c@77\text{ K}, 3\text{ T}$	50 A/cm-w	32.7 A/cm-w
	$I_c@65\text{ K}$	400 A/cm-w@0.1 T	>492 A/cm-w@0.02 T
長さ		200 m	51 m
コスト		3 円/Am 未満	2.9 円/Am

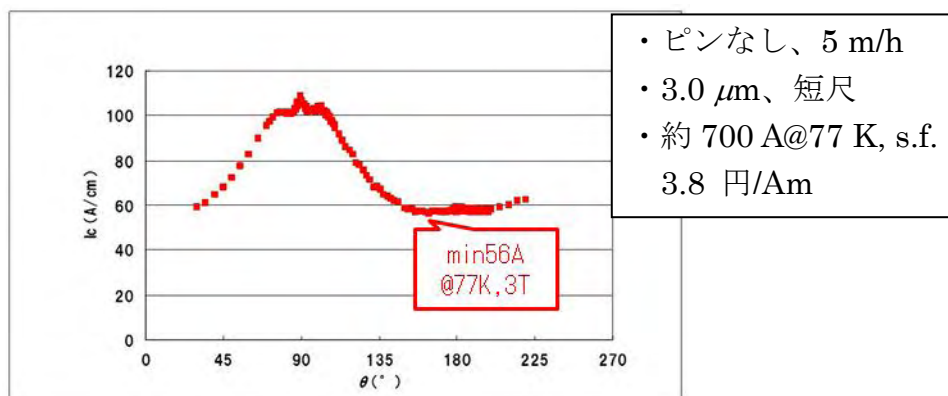


図 2.4.2-5 電力貯蔵システム向け磁場中 I_c 評価結果

一方で、もう一つの磁場中特性向上のアプローチに BZO ナノロッドをはじめとしたナノメートルサイズのピン (ナノピン) 導入技術がある。図 2.4.2-6 には、BZO ナノロッドの Reel to Reel 成膜へ適用した際に得られる特性例を示す。77 K, 3 T においても I_c 値の磁場角度 θ に対する依存性が小さい傾向が見られる。この線材に関して、BZO ナノピンの形状を三次元的に評価したところ、ナノロッドが広い偏角角度を持って中間層界面直上から回転しながら広がっていることが明らかになった。(a-4)参照)。この偏角角度分布が θ 依存性低減に寄与していると考えられ、今後この形状の制御因子の解明により、磁場中特性のさらなる向上を図っていく予定である。

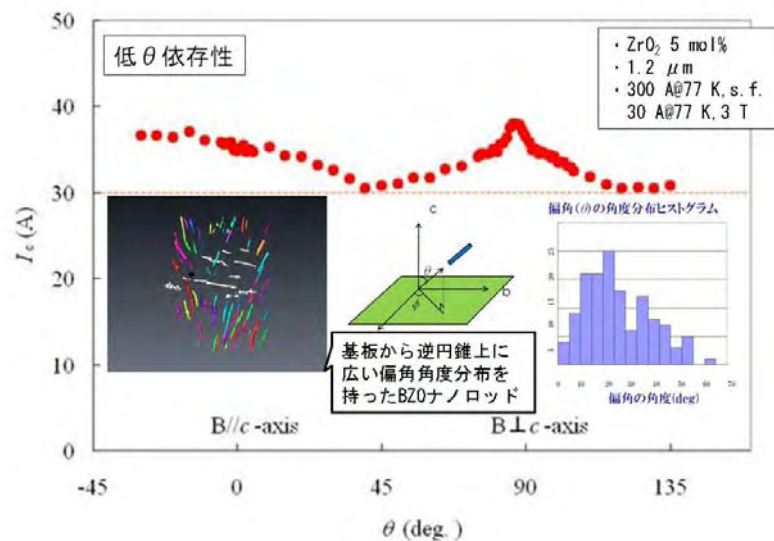


図 2.4.2-6 BZO ナノロッドの Reel to Reel 成膜適用例

ii) PLD 法におけるピン導入による磁場中特性改善技術開発

金属基板を用いた RE 系超電導線材の磁場中特性の改善には、各種ピンニング特性の理解が重要である。ハステロイ™テープ上に IBAD(Ion Beam Assisted Deposition)法で MgO 中間層を作製した IBAD-MgO 基板上に PLD 法で Y 系薄膜を作製し、評価を行ったところ、 J_c の磁場印加角度依存性において、磁場が Y 系超電導相結晶構造の c 軸（テープ面に垂直方向）に平行($B//c$)の時に大きな J_c のピークを確認した。IBAD 基板上の Y 系薄膜におけるピン止め点に関しては様々な報告があり、未解明の部分が多い。本研究では、c 軸方向における J_c のピークの原因を解明するため、Y 系超電導線材の膜厚を変化させ、微細構造観察、超電導特性について比較検討を行った。

図 2.4.2-7 に、IBAD-MgO 基板上に作製した Y 系超電導線材の 77 K、1~7 T における $J_c(B//a,b)$ ($\theta=90$ 度)で規格化を行った J_c の磁場印加角度依存性を示す。本研究の Y 系超電導線材において、

$B//c$ ($\theta=0$ 度)のとき、非常に大きな J_c のピークが確認される。この結果より、YBCO 薄膜には、他のグループが報告した超電導薄膜と比較し、高密度ならせん転位や Y_2O_3 ナノパーティクルなどのピン止め点が導入されており、 $B//c$ の J_c 値を向上させていると考えられる。膜厚の異なる Y 系超電導線材における J_c 値の磁場印加角度依存性を確認したところ、膜厚が増

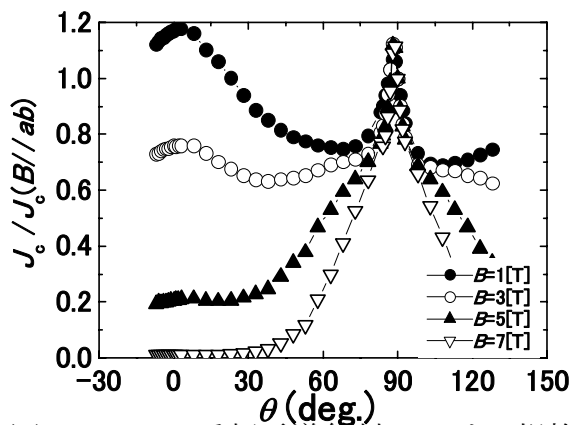


図 2.4.2-7 Y 系超電導線材における規格化 J_c 値の磁場印加角度依存性

加することで、 B/I_c における J_c 値のピークが大きくなっていることが分かり、膜厚増加に伴いc軸相関ピンが増加していると考えられる。

このc軸相関ピンの種類を明らかにするために断面TEM像による観察を行った。その結果を、図2.4.2-8に示すc軸方向に成長している欠陥を白い矢印で示す。この欠陥は、刃状転位やらせん転位と考えられる。断面TEM像より、薄膜内部から生じている欠陥が見られた。よって、膜厚が増加することでこれらの欠陥が増加し、c軸相関ピンとして働いていると考えられる。薄膜内部からの欠陥の増加は、膜厚が増加することで、中間層とY系超電導層材料の結晶格子ミスフィットによる歪みが大きくなり、それを緩和するために刃状転位が増加したと考えられる。これらの新たな人工ピン止め点の生成機構を理解することにより、RE系超電導線材の磁場中高性能化に反映させている。

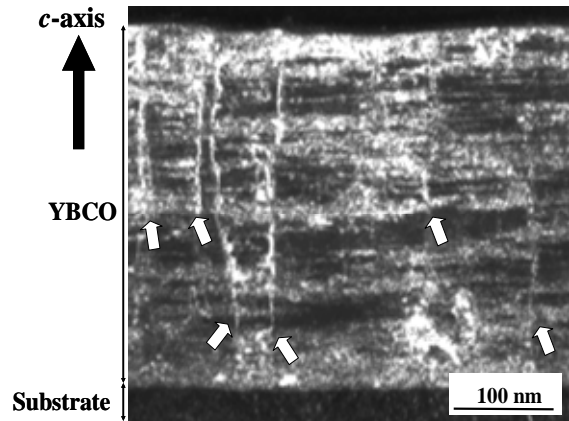


図 2.4.2-8 Y系超電導線材の断面TEM像

(a-2) MOD法による磁場中特性改善技術開発

i) MOD法におけるピン止め点導入による磁場中特性改善技術開発

PLD法による超電導層成膜の場合、ターゲットに ZrO_2 , YSZなどを添加することによって超電導層中に微細な $BaZrO_3$ (BZO)ロッドを導入し、磁束のピン止め点として有効に作用させ磁場中 I_c 特性を改善する手法が開発されている。MOD法によるピン止め点導入については、「超電導応用基盤技術研究開発(第II期)」プロジェクトにおいて(Y/Sm)BCOの混晶材料中に人工ピン止め点を微細分散させることにより、磁場中の I_c 値向上及び I_c 値の角度依存性が小さくなることを報告している。本プロジェクトでは前プロジェクトで開発したTFA-MODによるY/RE混晶材料の組成最適化や人工ピン止め点の最適材料、添加量を検討することにより磁場中特性を改善することを目指した。また、今回のプロジェクトでは昭和電線と共同で研究開発を実施し、ISTECでMOD原料の開発、仮焼・本焼の基礎技術を主に検討し、本焼技術については前プロジェクトでBatchタイプの本焼炉を開発し500 m・300 A/cm-w級の長尺Y系超電導線材作製可能な技術を有する昭和電線がY(RE)混晶材料の本焼技術開発を主とした長尺化技術の検討を担当することとした。

図2.4.2-9にY系超電導線材のY成分の一部をGd, Sm置換及び人工ピン止め点としてZrを導入した線材の $I_c \cdot B \cdot \theta$ 測定結果を示す。図よりYを一部Sm, Gdに置換及びZrピンを導入することにより磁場中の J_c 値が向上し、特にYを一部Gdに置換しZrを添加した材料ではYBCOと比較すると J_c 最小値が3倍以上に上昇している。

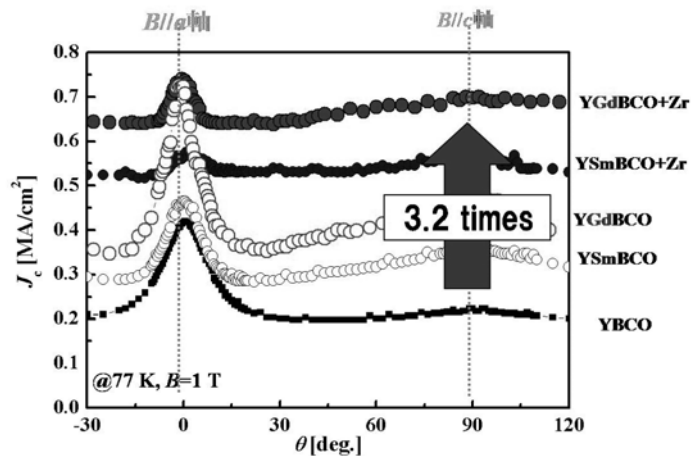


図 2.4.2-9 Y系超電導線材の I_c - B - θ 測定結果

磁場中特性の向上は Y を一部 Gd に置換したことによる I_c 向上の効果と Zr を導入することによって生成した人工ピン止め点として働いたものと考えられる。

Zr を人工ピン止め点として導入した Y(Gd)BCO 膜の断面 TEM 観察した結果を図 2.4.2-10 に示す。観察の結果から Y(Gd)BCO 中に導入した Zr は Ba と反応して数 10 nm 程度の BaZrO_3 の微細な粒子を形成し膜中に均一に分散していることがわかっている。このことから、膜中に分散した BaZrO_3 (BZO) が人工ピン止め点として働き磁場中の特性を向上させたと考えられる。また、 BaZrO_3 ピンは仮焼膜を本焼し超電導層が成長し始める前に生成することがわかっている。従来報告されている PLD 法による BaZrO_3 ピンの場合には柱状のナノロッドとして導入されているという報告が多数行われているが TFA-MOD 法の場合には均一な組成に分散されてあらかじめ積層されたアモルファス状の仮焼膜から Ba と Zr が反応して BZO が生成し微細分散する。PLD の場合には超電導層と BZO 層を同時に積層させながら成膜していくことによって形成する BZO が柱状に成長しピン止め点となることから、MOD 法と PLD 法によって形成される人工ピン止め点の形状が異なると思われる。

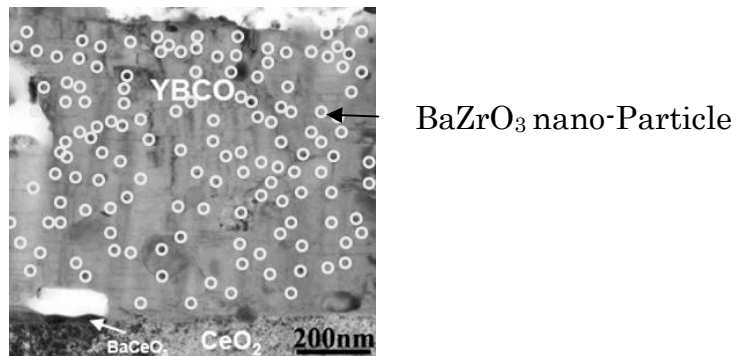


図 2.4.2-10 BaZrO_3 ピンを導入した Y(Gd)BCO 線材の断面 TEM 観察結果

Y(Gd)BCO + 1 wt%Zr 膜を高 I_c 化の観点から検討した結果、760 A/cm-w (@77 K, s.f.) と非常に高 I_c 値を得ており、図 2.4.2-11 に示す厚膜試料の 77 K および 65 K の磁場中 I_c 測定結果より、0.5 T, 65 K および 77 K, 3 T の I_c 値がそれぞれ 610 A/cm-w、34 A/cm-w と得られていることから中間目標値である 300 A/cm-w (@65 K, 0.02 T)、30 A/cm-w (@77 K, 3 T) はクリア可能な材料であると考えられる。

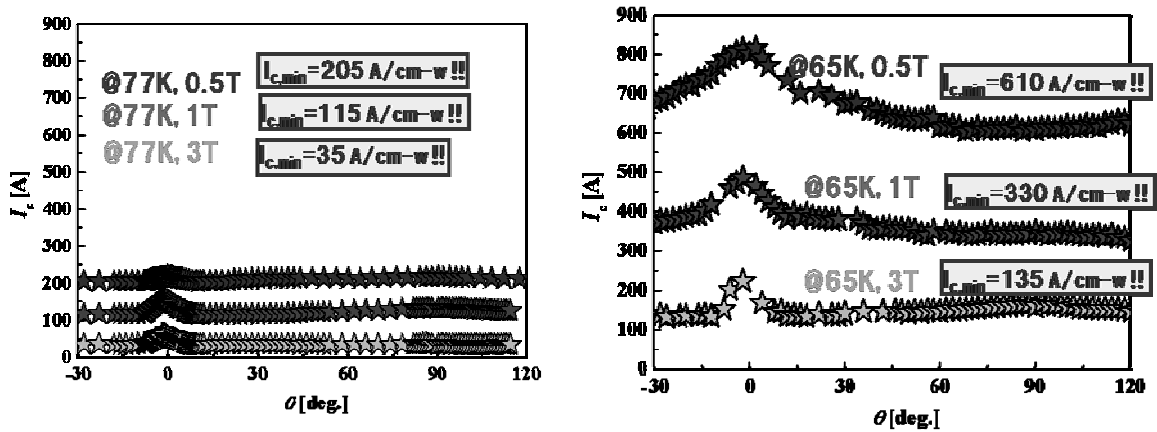


図 2.4.2-11 BaZrO₃ ピンを導入した Y 系超電導線材の I_c の角度依存性 (YGdBCO+1 wt%Zr)($I_c = 760$ A/cm-w(@77 K, s.f.))

長尺化については Y(Gd)BCO + 1 wt%Zr 原料を用いて検討を行った。仮焼膜の長尺化は Dip コーティングによる塗布と仮焼を連続的に行う Reel to Reel プロセスを用いた。Reel to Reel 仮焼によって成膜した 15 m 線材を焼成した結果、約 12 m 区間の I_c 特性は約 300 A/cm-w(膜厚 1.5 μ m、 J_c : 約 2 MA/cm²)を示した(図 2.4.2-12)。端部の磁場特性評価を行った結果 77 K, 3 T 中の磁場中 I_c 値の最小値は 14 A/cm-w(77 K, s.f. の $I_c = 360$ A/cm-w)であった。

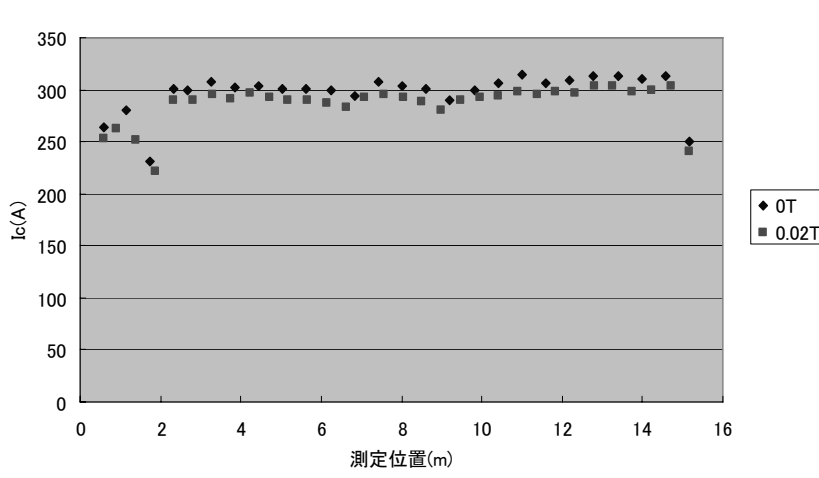


図 2.4.2-12 15 m 線材の I_c 分布(Y(Gd)BCO + 1 wt%Zr : 膜厚約 1.5 μ m) (I_c 測定間隔 60 cm)

また、長尺本焼の検討として Batch 型電気炉による焼成の検討を進めており、約 10 m おきに仮焼膜を配置して作製した 50 m 模擬線材による焼成条件の検討の結果、262~322 A/cm-w の I_c 値が得られている。MOD による Y(Gd)BCO + Zr 線材の長尺化は極低コスト目標である 5 m/h 相当の Reel to Reel 仮焼(ISTEC-SRL)と 10 m/h の Batch 本焼(SWCC)の組み合わせで行うことが可能であることがわかった。また、Batch 焼成した膜の磁場中 I_c 値測定結果を表 2.4.2-6 に示す。表より 65 K, 0.1 T の I_c 特性は約 450 A/cm-w と変圧器用線材の磁場中特性の中間目標値 300 A/cm-w (@65 K, 0.02 T)は現状の特性でクリア可能であると考えられるが、77 K, 3 T の I_c 値は 12 A/cm-w であった。これは SMES 用線材の中間目標 30 A/cm-w(@77 K, 3 T)に対して低い値となっている。

一方、極低コスト条件を満たす速度で Reel to Reel 本焼した YBCO 膜の I_c 特性の場所依存性から 50 m 長で 77 K, 0.02 T の I_c 値が 247 A/cm-w が得られている(図 2.4.2-13)。YBCO 膜の 65 K, 0.02 T の I_c 特性は 77 K, 0.02 T の約 1.8 倍程度であるのでこの線材の 65 K, 0.02 T の $I_{c,min}$ は約 450 A/cm-w であり変圧器用線材の磁場中特性の中間目標値 300 A/cm-w (@65 K, 0.02 T)はクリアされた。

以上の結果から、SMES 用線材の中間目標 30 A/cm-w(@77 K, 3 T)に対して特性向上が課題であることが言える。

表 2.4.2-6 Batch 焼成した Y 系超電導線材の I_c 値の磁場および温度依存性 (Y(Gd)BCO+1 wt%Zr)(膜厚約 1.5 μ m、仮焼 : Reel to Reel@SRL, 本焼 : BATCH 炉@SWCC)

	I_c (A/cm-w)		
	77 K, s. f.	77 K, 3 T	65 K, 0.1 T
Batch 焼成試料	322	12	448
中間目標	300	30	300 (65 K, 0.02 T)

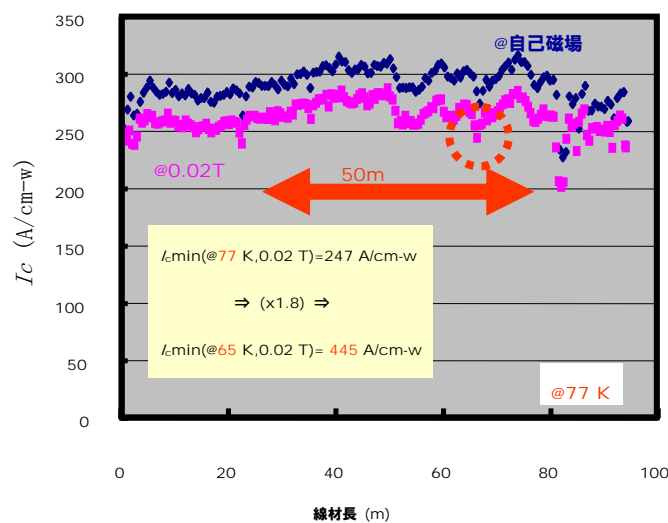


図 2.4.2-13 Reel to Reel 本焼した長尺 YBCO 膜の I_c 特性の均一性評価結果

(非公開)

(非公開)

ii) バッチ炉を用いた MOD 法による磁場中特性改善技術開発

RE 混晶系材料と異相人工ピン止め点の導入を適用することにより、磁場中特性の向上技術を確立することを目的とし、ISTEC より移管を受けた異相人工ピン止め点の導入技術を SWCC におけるバッチ式本焼プロセスに適用して長尺 Y 系超電導線材の作製を行った。

バッチ式本焼プロセスは、Y 系超電導線材の結晶化反応の過程で発生する HF ガスを効率良く炉外に排出するため、50 Torr の減圧雰囲気で行う。このため、結晶の成長速度が速くなり、特に混晶系の材料では成長速度の制御が重要となる。ISTEC より技術移管された 1.0 wt%-Zr を加えた人工ピン止め点導入用仮焼膜を使用し、焼成条件の最適化を実施し、図 2.4.2-17 に示す破線で囲んだ領域において $J_c > 2.0 \text{ MA/cm}^2$ の特性が得られることが判明した。

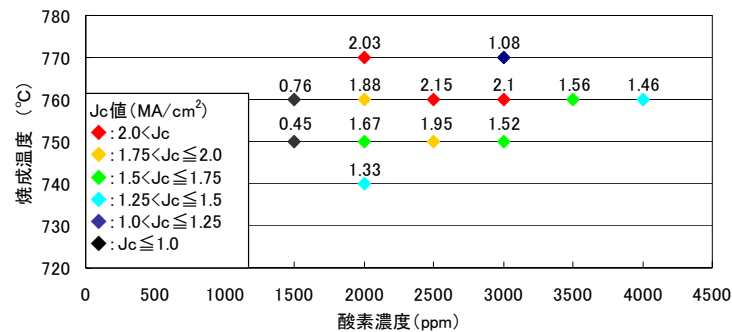


図 2.4.2-17 減圧焼成(50 Torr)における温度と酸素濃度の最適領域

それまでに明らかになった焼成温度と酸素濃度の組み合わせを基本とし、Sputter-CeO₂/IBAD-MgO に形成した短尺仮焼膜試料をダミー線に接続した 50 m 長模擬線材によるパッチワーク試験を実施、本焼条件の検討を行った。その結果、50 m の模擬線材に各所に仕込んだ試料全てにおいて $I_c > 250 \text{ A/cm-w}$ の特性が得られた。この結果、バッチ式本焼プロセスにより RE 混晶系+人工ピン止め点導入線材の長尺化が可能であることが示唆された。磁場特性の角度依存性を評価した結果、65 K、0.1 T で $I_{c,min} = 448 \text{ A/cm-w}$ 、77 K、3 T で $I_{c,min} = 12 \text{ A/cm-w}$ を示した。

(非公開)

iii) MOD 法における各種ピン導入法の比較研究

SMES あるいは変圧器応用に対応できる Y 系高性能超電導線材を得るには磁場中特性の向上が必要である。ここでは、MOD 法を用いたピン止め点導入による YBCO 膜の磁束ピン止め挙動及び組織への影響を調査し、高 I_c 線材作製技術開発への知見を得る。

(非公開)

(非公開)

iv) PLD 法及び MOD 法におけるピン止め点導入線材の微細組織観察

高磁場における臨界電流を向上させるため、超電導層に人工ピン止め点としてナノ粒子を分散させている。本項では PLD^(1,2)および MOD 法^(3,4)それぞれの手法により長尺超電導層中に形成されたナノ粒子の形状、組成、分布等の微細構造について述べる。PLD 法により BaZrO₃(BZO)ナノロッドが形成された長尺 GdBa₂Cu₃O_y (GdBCO)線材の TEM 断面写真を図 2.4.2-20 (a)に示し、①、②、③領域を拡大した写真を図 2.4.2-20 (b)-(d)に示す。GdBCO 層内部の黒い線状のコントラストは GdBCO のらせん転位であり、BZO ナノロッドは淡い線状のコントラストで現れている。BZO ナノロッドはおよそ 5 nm 径であり、CeO₂層直上から。表面領域に均一に存在していることが分かる。以上の結果から、GdBCO 層に、人工ピン止め点として有効に作用する BZO ナノロッドを分散させることが可能であることを示すことができた。

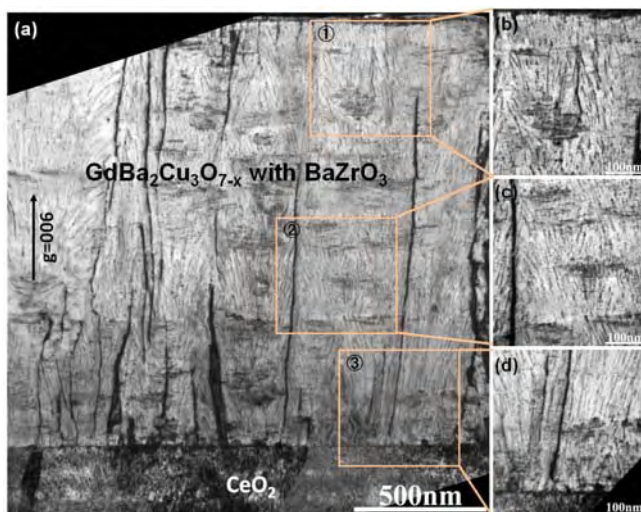


図 2.4.2-20 (a)BZO ナノロッド添加長尺 GdBCO 線材の断面 TEM 写真。(b)-(d)は(a)の領域①-③の拡大写真

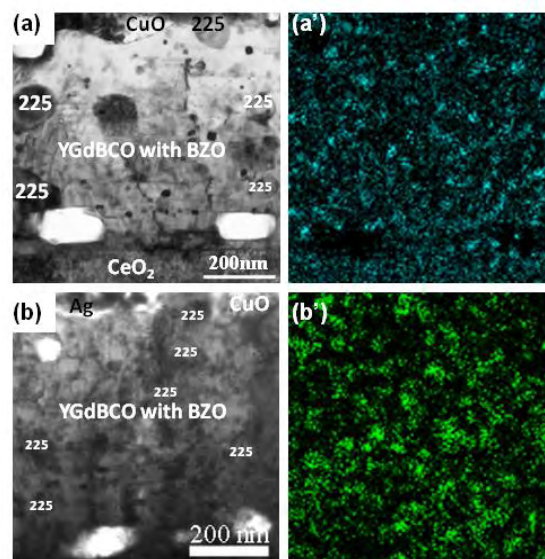


図 2.4.2-21 BZO ナノ粒子を分散した YGdBCO 断面 TEM 像 (a) A サンプル、(b) B サンプル Zr 元素マッピング像 (a') A サンプル、(b') B サンプル

次に、BZO ナノ粒子が分散した MOD- $Y_xGd_{1-x}Ba_2Cu_3O_y$ (Y(Gd)BCO) 線材について、その微細構造について述べる。観察した試料は、MOD 溶液に Zr を (A) 1 wt% 導入したサンプル、(B) 2 wt% 導入したサンプルである。図 2.4.2-21 (a)、(b) に (A) および (B) のサンプルの断面 TEM 像、(a')、(b') それぞれのサンプルの Zr 元素マップを示す。両サンプルとも超電導層は c 軸配向結晶となっているが、空隙や 100~200 nm 径程度の $Y_2Cu_2O_5$ が存在している。さら、サンプルともに BZO 粒子が超電導層全体に分布し、その粒径はおよそ 20 nm 程度である。また、Zr の添加量を 2 倍にした場合、磁場中での超電導特性が向上しており、TEM 観察の結果から、BZO 粒子の数がほぼ倍になっていることが分かった。以上の結果から、MOD 溶液への Zr 添加量を変えることで、ナノ粒子の分布状態を制御することができた。本項で示した PLD 超電導層および MOD 超電導層では、高磁場中での I_c 値が向上し、さらに、磁場角度依存性が低減されていることが分かっている。本項で述べた微細組織観察の結果は、磁場中高臨界電流線材の設計において重要な指針となる結果である。

(a-3) MOCVD 法による磁場中特性改善技術開発

i) MOCVD 法における希土類元素の一部置換による磁場中特性改善技術開発

MOCVD 法による希土類元素の一部置換による超電導層の高品質化について検討を行った。具体的には、Y 系超電導線材の構成元素である Y、Ba、Cu のうちの Y について、一部を希土類元素(Gd)で置換し、いわゆる混晶系とすることでの高品質化を試みた。なお、本検討では、PLD-CeO₂/IBAD-GZO/ハステロイ™ をテンプレ

レートとして使用した。

はじめに、Y に対する Gd の置換量の最適化を行った。Gd の置換量をパラメータとして実験を行った結果、MOCVD 装置では、Y のうち 30 %程度を Gd で置換することで、比較的高い I_c 値が得られることが分かった。

次に、上記で得られた混晶比において、超電導層の厚膜化による高 I_c 値化の検討を行った。MOCVD 法により膜厚 $1.5 \mu\text{m}$ の混晶系超電導層を成膜し、 I_c 値を測定した。結果の一例を図 2.4.2-22 に示す。温度 77 K、自己磁場中で $I_c = 390 \text{ A/cm-w}$ ($J_c = 2.7 \text{ MA/cm}^2$) という高い通電特性を実現することに成功した。

これら混晶系の特徴として、通常の Y 系超電導線材では厚膜化時に問題となる a 軸成長結晶粒の生成が抑制されることが、X 線回折および SEM による表面観察の結果から確認された。磁場中特性の改善には、まずは自己磁場での I_c 値を向上させることが重要であり、今回、混晶系線材により、a 軸生成が抑制され、 J_c 値の劣化を生じることなく、厚膜化が実現でき、比較的高い I_c 値が得られたことから、磁場中特性改善につながる重要な技術的知見が得られたと考える。

本線材の磁場中特性の評価結果を図 2.4.2-23 に示す。なお、温度は 77 K、磁場印加方位はテープ面に垂直である。最大 8 T までの磁場を印加し、8 T で、ほぼ I_c 値は 0 A となった。なお、磁場 3 T における I_c 値は 20 A/cm-w であった。

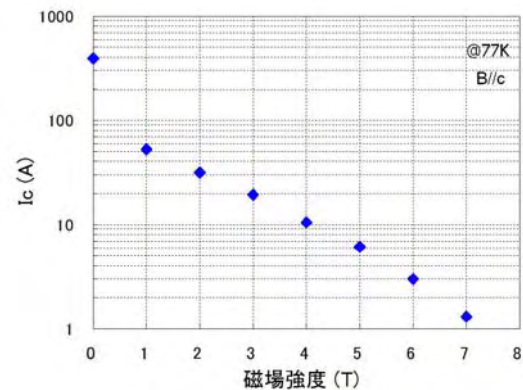
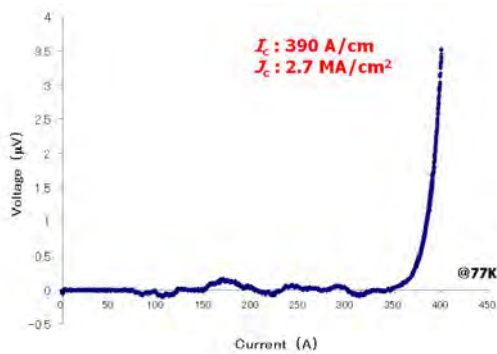


図 2.4.2-22 Y(Gd)BCO 線材の I - V 特性

図 2.4.2-23 Y(Gd)BCO 線材の磁場特性

ii) MOCVD 法における Zr 添加による磁場中特性改善技術開発

Y のうち 30 %程度を Gd で置換した Y(Gd)BCO 線材に Zr を添加し、超電導層中に BaZrO_3 等の有効なピン止め点を導入することにより、MOCVD 法により作製する超電導線材の磁場中特性の改善を試みた。

はじめに、Zr 添加量の検討を行った。Zr 添加量を 1~3 mol% として Ba, Cu 量、成膜条件を調整し、最も高い I_c 値が得られる条件を探索した。無添加の場合と Zr を添加した場合の超電導層厚 $0.9 \mu\text{m}$ での 77 K, s.f. での I_c 値は、Zr 添加量の増加につれて減少している。しかし、3 T の磁場における I_c 値の最小値の比較では、図 2.4.2-24 に示すように、Zr 添加量 1~2 mol% において最も良い値 ($\sim 18 \text{ A/cm-w}$) を示すという知見が得られた。この結果は、PLD 法による超電導層では、より Zr 添加

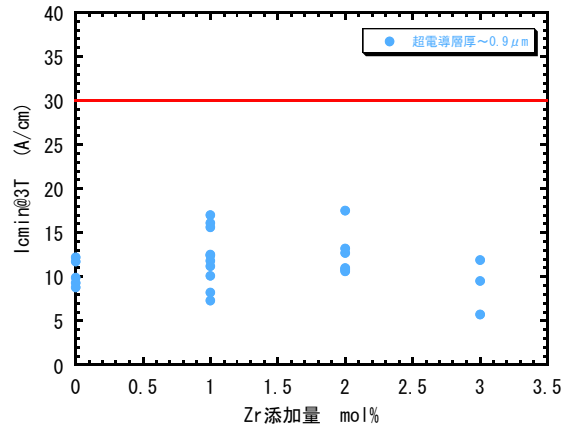


図 2.4.2-24 Zr 添加量(mol%)と 3 T での I_c 値の最小値の関係(超電導層厚 $0.9 \mu\text{m}$)

量の多い側に I_c 値のピークがあるという点で異なるが、MOCVD 法による線材においても Zr 添加により何らかのピン止め効果が得られるということを示唆している。図 2.4.2-25 に Zr 添加量 1 mol% 試料の TEM 像を示す。

この結果をもとに、Zr 添加量 1~2 mol% での超電導層の厚膜化を進めており、Zr 添加量 1 mol%、超電導層厚 $1.4 \mu\text{m}$ において、3 T での I_c 値の最小値 21 A/cm-w が得られている(図 2.4.2-26)。長尺対応装置にて超電導層の厚膜化を進めており、 $2 \mu\text{m}$ 程度まで厚膜化を図ることにより、3 T の磁場印加全方位において、目標である 30 A/cm-w を達成する。

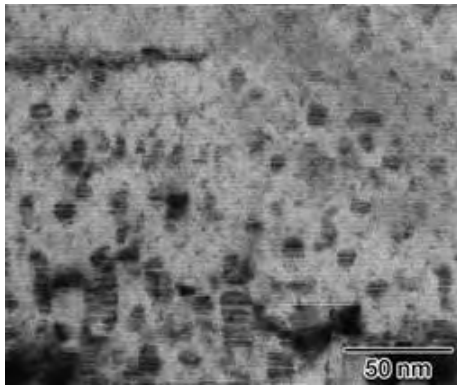


図 2.4.2-25 Zr 添加量 1 mol% 試料の TEM 像

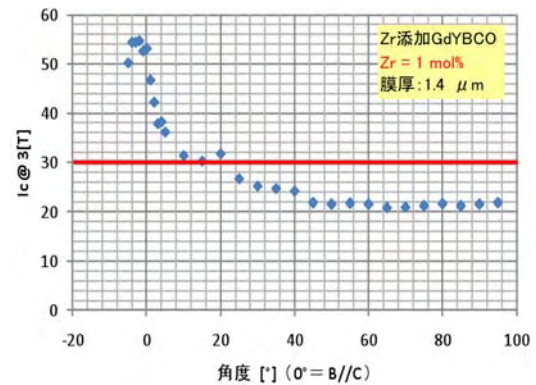


図 2.4.2-26 Zr 添加量 1 mol% 材における磁場 3 T での I_c 値の角度依存性

(a-4) 磁場中特性向上線材特性評価

i) ピン止め点特性に関する研究

目標とする磁場中の臨界電流値を大きくすることに有効なのは超電導層の厚みを増すことであるが、これは単に電流が流れる領域の断面積を大きくするだけの効

果ではない。すなわち、熱擾乱を受けて磁束がピン止め点から外れることにより臨界電流密度が低下するという磁束クリープを防ぐ上からも重要なポイントである。これまでの研究において PLD 線材の厚みを増すことによって、組織の乱れによる臨界電流密度の低下はあっても、それを上回って高磁場特性を向上させることができることが明らかとなった。図 2.4.2-27 は 1 T における超電導電流密度の時間緩和のしにくさを表す見掛けのピンポテンシャル U_0^* の磁場依存性で、超電導層が厚くなるにつれて高磁場特性が改善されている。また、図 2.4.2-28 に示されるように臨界電流密度が 0 となる不可逆磁場も同様に改善されるが、いずれの結果からも厚くすることで磁束がピン止め点から外れにくくなっていることが検証された。したがって、超電導層の厚膜化が有効であるという指針を示すことが出来、それに基づいて超電導層の劣化なしに超電導層を厚くする技術が開発された。これにより I_c 値の中間目標値をクリアできる見通しが立ち、実際にこうした方針で I_c 値の中間目標値(77.3 K、3 T において最小 I_c 値が 30 A/cm-w)を超えた線材が作製されている。

(注)なお、かつて米国を中心として、超電導層厚を厚くした場合に臨界電流密度が低下する事実が磁束ピン止めの次元性によってもたらされる不可避なものであるという考えが広がったが、磁束ピン止めの相関距離と厚みの関係からそうした考えが正しくないことを理論的に明確にし、 I_c 値の中間目標値の達成が可能であることを世界で初めて示した。実際に、微細組織観察により臨界電流密度の低下は超電導層劣化によるものであることが判明し、そうした組織の改良により厚膜化によっても臨界電流密度が劣化しない線材が作製できるようになってきている。この事実及び理論は今後の線材特性向上に非常に重要な発見と成り得る。

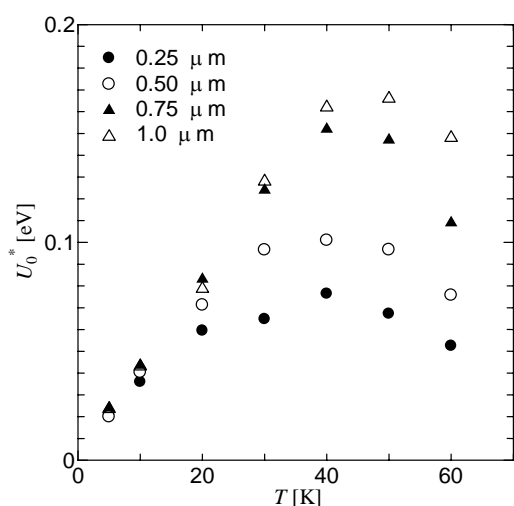


図 2.4.2-27 PLD 法による線材の 1 T における見掛けのピンポテンシャルの温度依存性

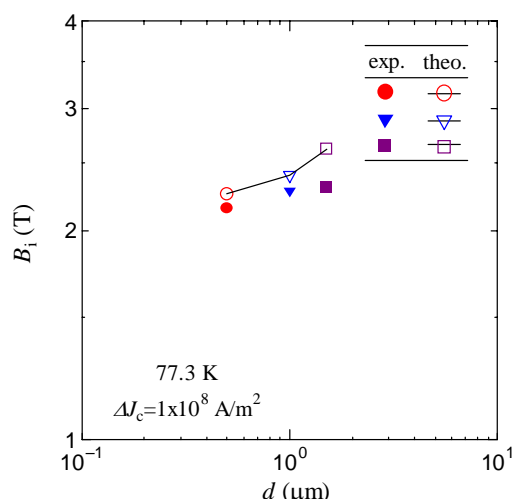


図 2.4.2-28 PLD 法による線材の 77.3 K における不可逆磁場の超電導層厚依存性

一方、 J_c 値の最終目標値は中間目標値を大きく上回ることから、こうした上質な超電導層の厚膜化だけでなく、本質的な臨界電流密度の改善が必要になってくる。その実現にピン止め点の導入が有効であるかどうかの評価が重要で、それを実証する研究を実施した。図 2.4.2-29 はスパイラル状に広がったナノロッド形状の人工ピン止め点を導入した場合の PLD 線材の 77.3 K および 80 K における臨界電流密度の磁場角度依存性で、極めて異方性が少ない良好な特性となっている。一方、図 2.4.2-30 はナノ粒子形状の人工ピン止め点を導入した場合の MOD 線材の 77.3 K における磁場角度依存性で、ピン止め点の導入により臨界電流密度の値が増加することに加えて異方性も改善している。

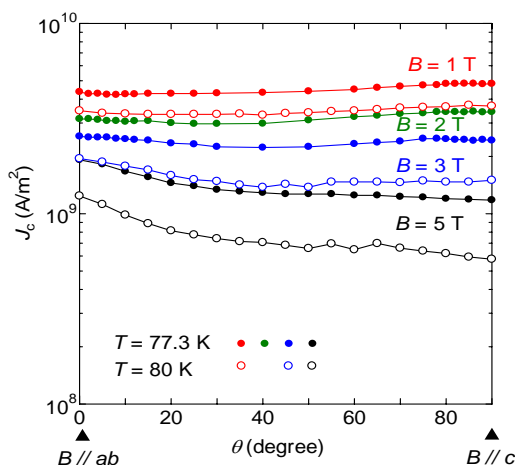


図 2.4.2-29 ナノロッドを導入した PLD 線材の J_c の磁場角度依存性

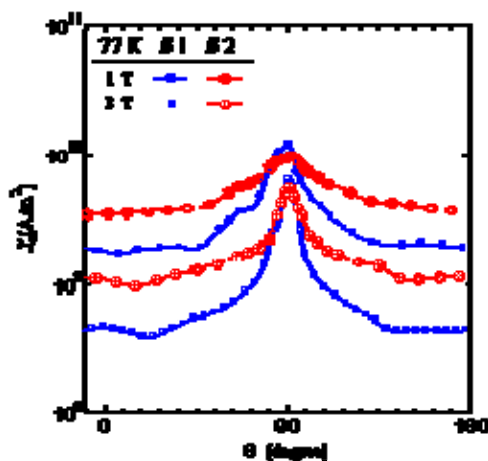


図 2.4.2-30 ナノ粒子導入の前(#1)と後(#2)の J_c の磁場角度依存性の変化

これらのピン止め点のピン止め特性について、電顕による観察から得られたピン止め点のサイズ、数濃度等の情報を基に理論的に評価した結果、世界で初めて磁場角度異方性を含めて臨界電流密度の実験結果を定量的に説明することができ、ピン止め点導入の有効性を実証した。とくに、今回新しく見つかったスパイラル状に広がったナノロッド形状の人工ピン止め点が磁場角度異方性をなくす上で、極めて有効であることも明らかとなった。したがって、こうした解析手法を用いて最終目標

を達成するのに有効な人工ピン止め点構造の設計が可能となったので、製造プロセスへのフィードバックを通して本プロジェクトの最終目標の達成が視野に入ってきたといえる。

ii) ピン止め点形状の三次元解析

超電導体中の磁束の運動を抑制するためにはピン止め点の導入が有効である。例えば、Y系超電導体に結晶構造が類似の BaZrO_3 (BZO) を導入することにより、母相の結晶性の乱れを抑制しつつ、人工ピン止め点としての析出物を効果的に導入する技術が確立されている⁵⁾。高温超電導体の一種である $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (GdBCO) は、磁場中の I_c 値が高く、試料作製時の成膜温度の低温化が可能であるとともに、成膜速度も速いことから、次世代の超電導線材として期待されている材料である。BZO を分散させた GdBCO は磁場中において等方的な I_c 特性を示す⁵⁾ が、この詳細は明らかにされていない。そこで、本プロジェクトの中間目標 (30 A/cm-w@77 K, 3 T) を達成するための微細組織評価として、析出物の立体的なナノ構造解析を電子線トモグラフィ (TEM-CT) 法により試み、ピン止め点の形態・分散と磁場中 I_c 特性の相関を解明することを目的とした。

解析には PLD-ハステロイ $\text{TM}/\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7/\text{CeO}_2$ により作製した GdBCO + BZO を用いた⁵⁾。集束イオンビーム法により、厚みが 100 nm-150 nm の板状ならびに直径が約 100 nm の針状の TEM 試料を作製した。連続傾斜像の取得には Tecnai-F20 (加速電圧 200 kV)、3次元像の再構築には SIRT 法、可視化には Avizo Fire 6.1 を使用した。

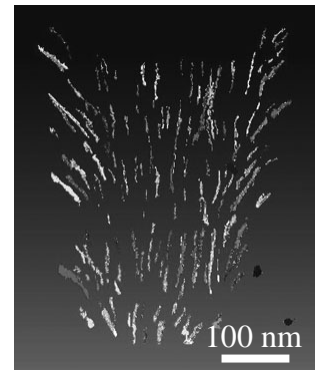


図 2.4.2-31 三次元再構築像

三次元再構築像 (図 2.4.2-31) からは、ナノロッド状の BZO 析出物の分散状態のみならず、GdBCO の成長方向 ($[001]_{\text{GdBCO}}$) に対する偏角を求めることも可能である (図 2.4.2-32)。偏角の最小値が約 1 度、最大値が約 65 度であり、広い角度分布を有していることが判明した。また、BZO ナノロッドの数密度は $2.45 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ であり、体積率が 1.93 %、濃度は 4.51 mol% と算出された。

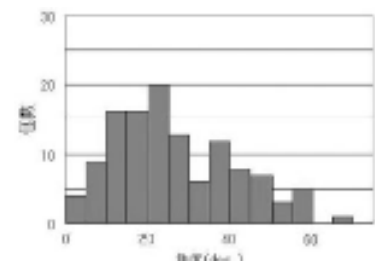


図 2.4.2-32 ロッド状析出物の偏角分布

三次元解析の結果、様々な方向に成長したナノロッド状の人工ピン止め点を分散させることが磁場中 I_c 特性の改善に有効であることが判明し、 I_c 値の磁場侵入角度依存性を低減させ、本プロジェクトの目標を達成するための材料設計指針を得ることができた。

iii) ナノロッド導入の効果

IBAD 基板を用いた超電導線材において早急に解決すべき課題として、磁場中

の J_c 特性向上に関する問題があげられる。現状では Gd123 や Y123 超電導層へ BaZrO₃(BZO)ナノロッド等の人工ピン止め点の導入が行われており、これによって磁場中 J_c 値の向上が実現している。しかし最終目標である 50 A/cm-w@77 K, 3 T-200 m や 400 A/cm-w@65 K, 0.1 T-100 m の達成には、より効率的な人工ピン止め点の開発が重要である。ここでは、現在開発中の人工ピン止め点による不可逆磁場特性とピン止め特性に関して、微細組織の観点から得られた知見について述べる。

図 2.4.2-33 は開発された BZO ナノロッドや BaSnO₃(BSO)ナノロッドなどの各種人工ピン止め点による不可逆磁場特性を示したものである。ナノロッドを導入していない YBCO 薄膜に比べて 4%BSO や 4%BZO ナノロッドを導入した YBCO 薄膜の不可逆磁場が増大していることが分る。しかしながら BZO ナノロッドを導入すると T_c が若干低下していることが観測されており、この点に関しては BSO ナノロッドが優れている。図 2.4.2-34 は各種ナノロッドの断面 TEM 写真を示す。これから BZO ナノロッドは細く密度が高いが、BSO ナノロッドは太く、その密度は低い。一方、BSO ナノロッドが示す巨視的ピン止め力($F_p = B \times J_c$)は 77 K、 $B//c$ において 28 GN/m³ を超え、BZO ナノロッドが示す 16 GN/m³ を凌駕している。また、最近の米国ロスアラモス国立研究所が開発した Ba₂YNbO_y ナノロッドはさら

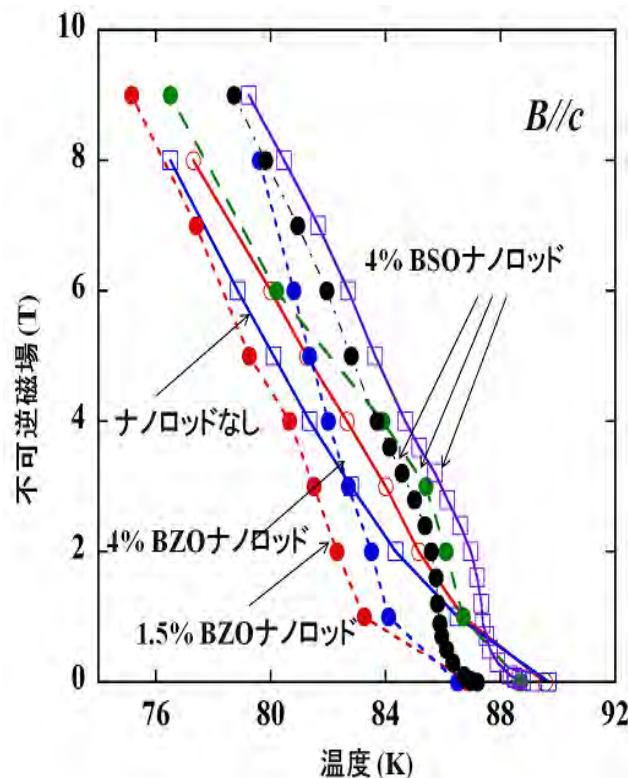
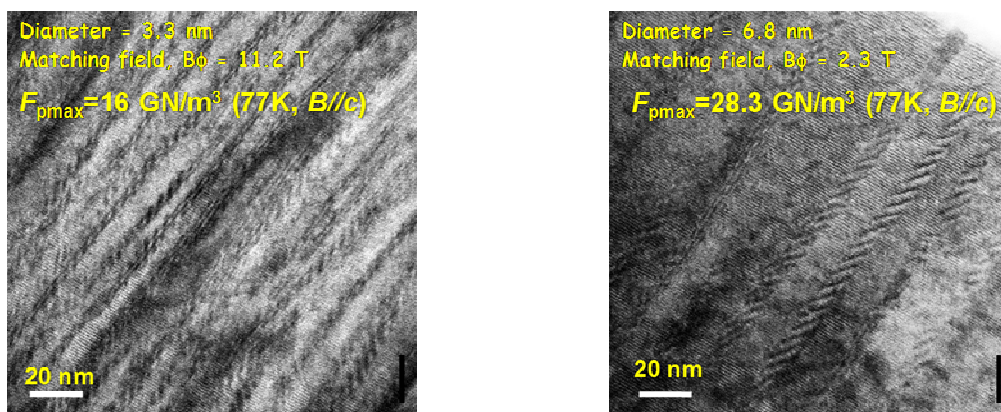


図 2.4.2-33 各種人工ピンによる不可逆磁場曲線。
BZO は BaZrO₃、BSO は BaSnO₃ を意味する。4%BSO や 4%BZO の導入により不可逆磁場は増大



(a) (b)

図 2.4.2-34 各種人工ピン止め点の断面 TEM 写真。

(a)BZO ナノロッド、(b)BSO ナノロッド。

にナノロッド径が太く巨視的ピン止め力も極めて高いことが報告されている。以上の結果から、77 K や 65 K の磁場中 J_c 値をさらに向上させ、本プロジェクトの最終目標を達成するためには T_c 値を低下させず J_c 値向上の期待できる径の太いナノロッドの導入が今後必要であると予想される。

iv) 四端子法による人工ピン止め点導入効果の研究

四端子法により、各種製法による線材の磁場中電流輸送特性を調べ、基板研磨による均一性の向上は低磁場特性の改善に有効であることを示した。同時に、高磁場特性(不可逆磁場)改善のためには、人工ピン止め点導入が必要であることを明らかとした。図 2.4.2-35 に、テープ面に垂直な磁場中における I_c 特性を示す⁽⁶⁾。現在の成膜プロセスでは、IBAD-GZO,IBAD-MgO と同等の品質を有しており、得られる線材の超電導特性もほぼ同様の磁場、角度依存性を有する。人工ピン止め点導入により、s.f.での J_c 値はやや低下するが、77 K では 3 T 以上の外部磁場において

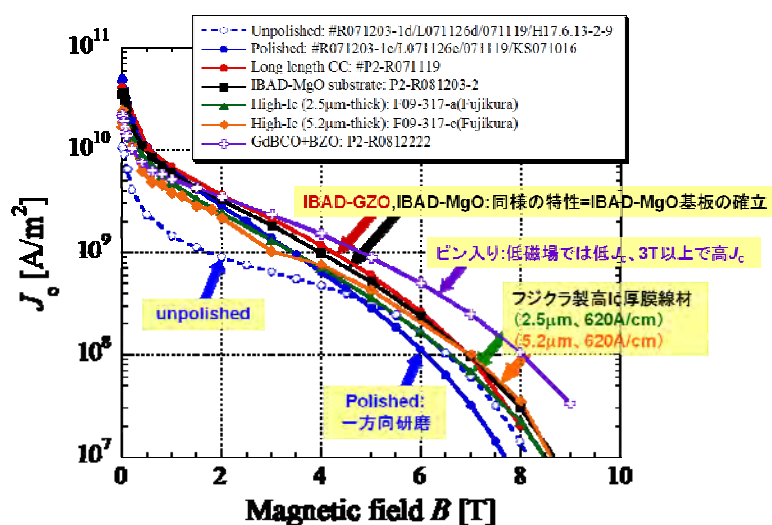


図 2.4.2-35 各種材料の高磁場特性の比較

J_c 値改善効果が顕著となる。図 2.4.2-36 に示す J_c 値の角度依存性から明らかとなり、 ZrO_2 による人工ピン止め点導入試料では c 軸方向の相関ピンが有効に作用

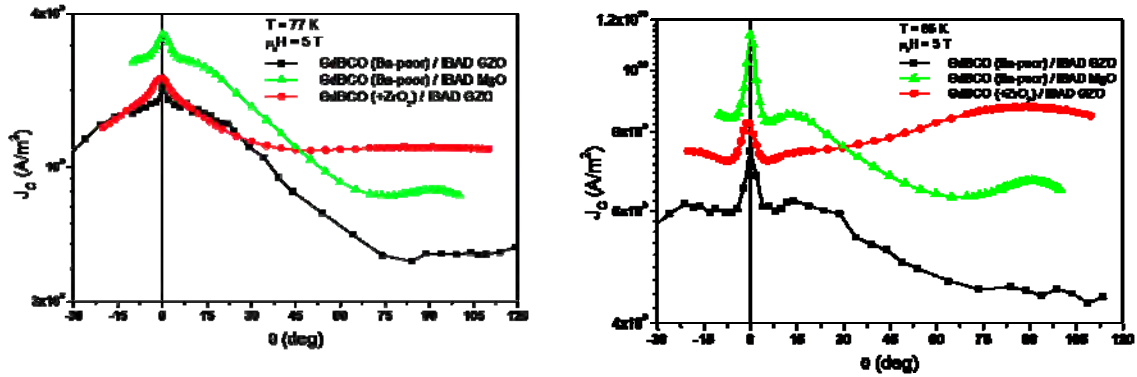


図 2.4.2-36 人工ピン止め点導入による J_c 値の角度依存性の改善

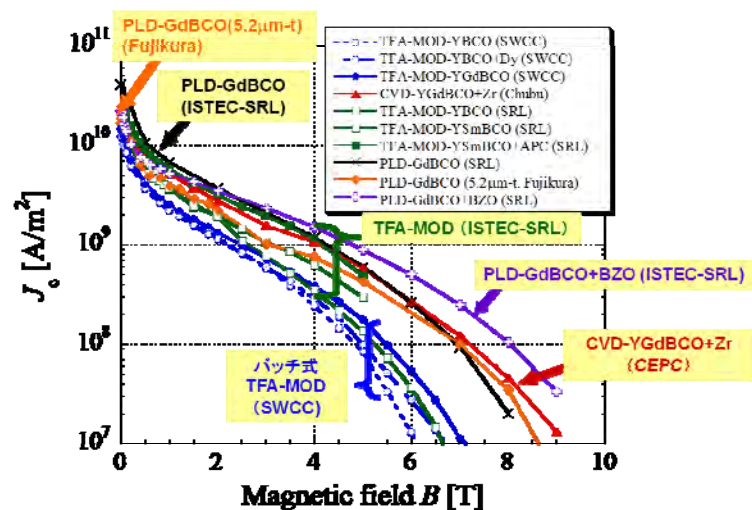


図 2.4.2-37 各種製法による Y 系超電導線材の人工ピン止め点導入による磁場中 J_c 特性改善の比較

することが分かる⁽⁷⁾。

さらに、PLD 法その他、MOD 法並びに CVD 法との比較を図 2.4.2-37 に示す。いずれの手法においても人工ピン止め点の導入によって、高磁場特性が改善することが分かる^(8,9)。これらの知見は長尺線材の磁場特性を向上させて本プロジェクトの目標達成のために極めて有用である。

v) 低温高磁場特性改善技術開発

低温強磁場の臨界電流密度特性改善のため、MOD 法及び PLD 法により作製した線材の臨界電流密度特性を低温・強磁場までの広い温度・磁場範囲で詳細に測定し、その磁束ピンニング特性について議論を行った。結果として、低温強磁場領域

における最適化手法の確立のため、人工ピン止め点導入法等の技術手法を提案することを目標とした。

MOD-(Y,Gd)Ba₂Cu₃O_y(YGdBCO)テープに人工ピンとしてZrを導入した試料で77.3 K近傍の温度領域で J_c 値の向上が起こることが分かっているが、不可逆磁場と J_c 値の磁場・温度・磁場角度依存性を詳細に測定した結果、Zrドープにより強いランダムピンが導入されていることが分かった。すなわち、人工ピン止め点導入前から存在していた弱いc軸相関ピンと強いランダムピンが共存して J_c 特性を決めている点で、高い J_c 特性を示す低温合成法(LTG法)によって作製したSmBCO膜と類似している。さらに B_{c2} の異方性を調べた結果、MOD-YGdBCOテープはLTG-SmBCOと比べ若干のアンダードープ状態にあることが、高磁場 J_c 値が他のプロセス試料と比べて劣る原因であると推察される。

これまで報告されているように、人工ピン止め点としてのZr添加は、PLD法の場合にはc軸に揃ったナノロッドが、MODの場合にはランダムに分散したナノ粒子が形成される。これらはいずれも磁場中の J_c 特性を向上させるが、等方的に効果があるランダムピンとc軸方向にのみ効果のあるナノロッドの違いを調べた。図2.4.2-38にMOD法、PLD法、CVD法によって作製したテープ線材の20 Kにおける J_c 特性を示す。図中の凡例には77.3 K、3 T、 $B//c$ の J_c 値と膜厚を記載した。膜厚の違いを考慮する必要があるが、ナノサイズのランダムピンの導入により77.3 Kにおける J_c 特性は向上するが、低温の J_c 値の磁場依存性はほとんど同じとなる。一方で、ナノロッド導入試料では磁場依存性が他と比べて大きくなっていることが分かる。これは、不可逆磁場とマッチング磁場が近い高温領域では、不可逆磁場向上の効果によって高磁場特性の向上が見られているが、低温ではc軸相関ピンがマッチング磁場をこえた超えた高磁場で急激に効果を下げていることを示唆している。

図2.4.2-39に、 $B//c$ と $B\perp c$ に対する J_c 値の比をその異方性として示す。温度の低下に伴い J_c 値の異方性は一旦減少し最小となった後、さらに低温ではまた増加する。この結果はプロセスに関係なく起こるが、その原因は $B\perp c$ と $B//c$ でIntrinsic

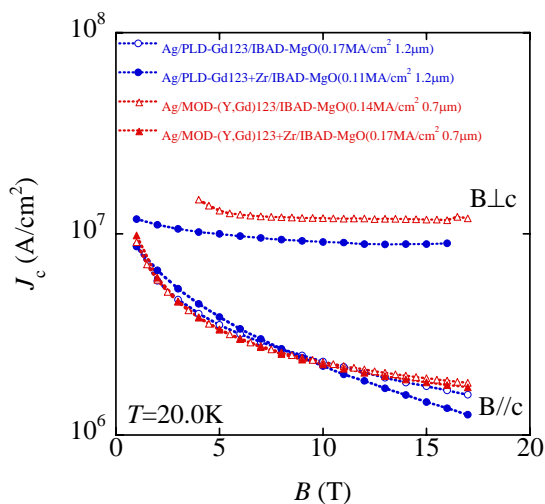


図 2.4.2-38 20 K における J_c - B 特性

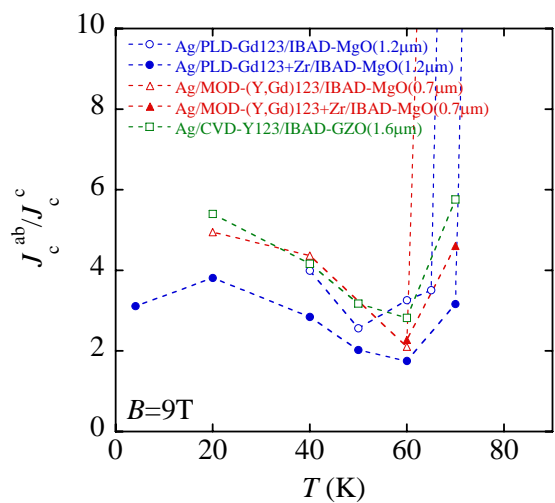


図 2.4.2-39 9 T における J_c 値の異方性

Pinning と Extrinsic Pinning がそれぞれ主体的に働くためと認識されている⁽¹⁰⁾。試料間の比較をすると、相関ピンであるナノロッドの導入により低温における異方性も低下している。この傾向は少なくとも 17 T の高磁場でも定性的に同様である。したがって、高温で顕著である c 軸相関ピン導入による磁場中 J_c 値向上の効果は、低温高磁場領域ではその効果が著しく減少するものの、ゼロではないことを示唆している。従ってナノロッド導入は、低温でもある程度の効果が見込まれると結論できる。

図 2.4.2-40 に、3 T における J_c 値の温度依存性を示す。比較のため、 J_c 値は 77.3 K の値で規格化した。77.3 K, 3 T の J_c 値は不可逆磁場の影響を受けているので、これで規格化した J_c 値の温度依存性は、定性的に高温領域の J_c 値が小さいほどその温度依存性が大きくなる傾向となる。図 2.4.2-40 の結果はおおむねその傾向を示しているが、人工ピン止め点の導入によってさらに温度依存性が変化している。従って、低温高磁場領域の J_c 特性を、77.3 K, 3 T の J_c 値を低温強磁場特性の目安とするプロジェクト目標の設定が必ずしも十分でないことを示唆している。

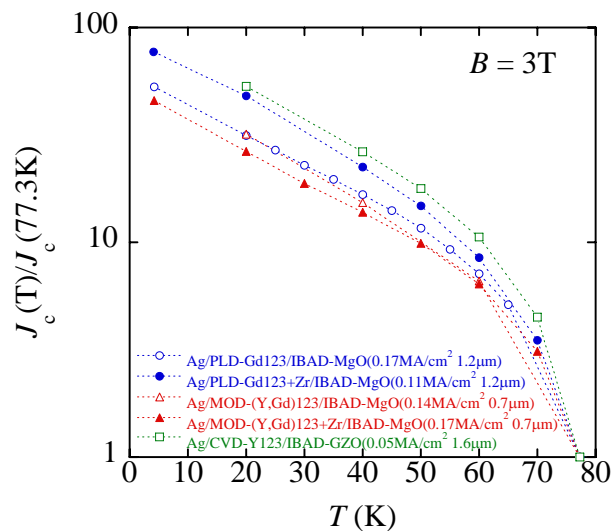


図 2.4.2-40 77.3 K の値で規格化した J_c 値の温度依存性. (括弧内は 77.3 K, 3 T の J_c 値と膜厚)

得られた結果から示唆される最終目標への指針は以下ようになる。

- 人工ピン止め点としてのナノロッドは低温強磁場でも有効である。しかし、長尺では、REBCO マトリックスの超電導性が劣化しているため差引ゼロとなっている。このため、結晶性の高い試料が得られる長尺プロセス開発が重要となる。
- MOD プロセスでは、ナノ粒子導入による特性改善ができていますが、さらに酸素濃度の最適化が必要である。とくに MOD 法試料では under-dope となっているため over-dope 状態に持って行くことが重要である。

vi) 低温強磁場中での電流電圧特性

Y系超電導線材は、高磁場中での通電特性に優れ、SMESのように電力機器のなかでも磁場中での大電流運転が求められる分野で期待されている。磁場中で効率的に大電流を通電するためには、超電導線材を冷却し、線材の臨界電流を上げて使用する必要がある。たとえば極低温である4.2 Kにおいては、高磁場中であっても極めて大きな臨界電流が期待できる。そこで、本研究では高磁場、低温化での大電流通電を考慮して液体He中にY系超電導線材を浸漬し、4.2 Kに冷却した状態で高磁場中(18 T)での I_c - B 特性を取得することを目的とした。

極低温である4.2 Kにおいては非常に大きな臨界電流密度となり、フラックスフローが発生し始めると、一気に発熱・焼損する危険性が高い。そこで、測定サンプルは安定化層としてCuメッキを施したY系超電導線材を用いた。Y系超電導線材は、77 K, s.f.中で臨界電流500~600 A/cm-w級のものであり、Cuメッキ厚みを0, 10, 20, 30, 50, 100 μm と複数のもを用意し、Cuメッキ厚による通電特性への影響も評価した。

測定は、サンプル搭載のFRP部と電極が一体となったサンプルホルダーに線材サンプルをハンダ付けで接続・固定し、液体窒素中77 K, s.f.で I_c 値を測定した後、液体He(4.2 K)に浸漬し、高磁場(~18 T)中で電流を掃引して I_c 値を測定した。この測定は、線材のc軸が磁場に垂直な場合と平行な場合の両方向で行った。

Cuメッキ厚みを変えたサンプルで I_c 値を測定した結果を $B \perp c$ について図2.4.2-41に、 $B \parallel c$ について図2.4.2-42にそれぞれ示す。500~600 A/cm-w級の線材で磁場18 T、 $B \perp c$ にて I_c 値が2000~3000 A/cm-w、 $B \parallel c$ にて500~1000 A/cm-wを通電できることを確認した。 I_c 値は77 K, s.f.に対して、4.2 K、18 Tでは、 $B \perp c$ で4.5~7.5倍、 $B \parallel c$ で1~2倍となった。 $B \parallel c$ はほぼ予想通りであったが、 $B \perp c$ については想定した値よりも低かった。原因として、熱収縮による影響が考えられ、基板の熱応力を計算すると、約700 MPaと大きく、サンプル保持構造で発生する熱応力によって I_c 値が制限されたと推定される。また、Cuメッキ厚さと I_c 値の関

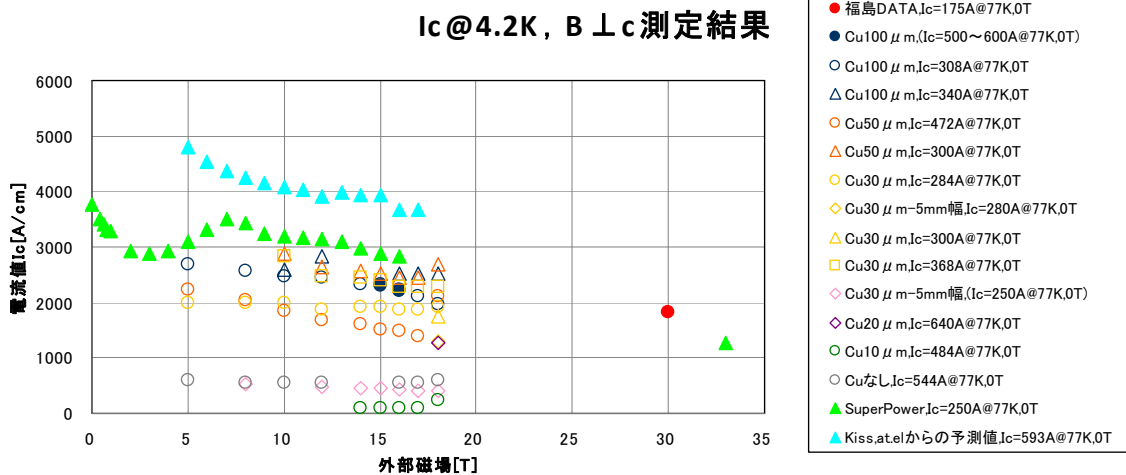


図 2.4.2-41 Cuメッキ線材の4.2 Kでの I_c - B 特性($B \perp c$)

※ グラフ凡例の I_c 値で()付きは尺取や他部位での I_c 値

I_c@4.2K, B//c 測定結果

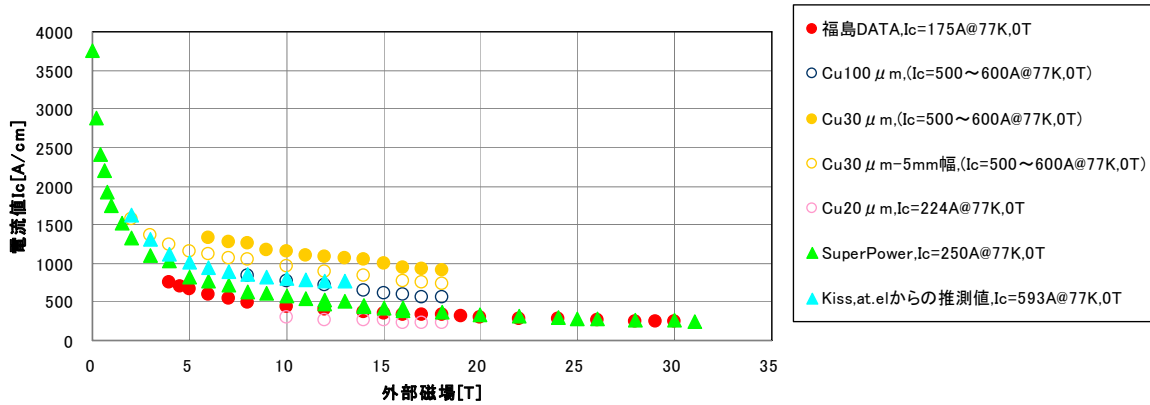


図 2.4.2-42 Cu メッキ線材の 4.2 K での I_c -B 特性(B//c)

※ グラフ凡例の I_c 値で () 付きは尺取や他部位での I_c 値

係について明確な傾向はなかった。Cu メッキ厚さを考慮した I - V 曲線を計算すると、電界 $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ の領域ではほとんど差がなく、ほぼ超電導線材の性能によることが分かった。これから Cu メッキ厚による I_c 値への影響は軽微であり、さらに高い電界レベルで温度抑制の効果を発揮すると考えられる。

以上をまとめると、ここでは $500 \sim 600 \text{ A}/\text{cm-w}$ 級の線材で磁場 18 T、 $B \perp c$ にて I_c 値として $2000 \sim 3000 \text{ A}/\text{cm-w}$ を通電できることを確認した。ただし、冷却時の熱収縮を改善することにより、さらに通電できる可能性がある。また、Cu メッキ厚さは、 I_c 値にほとんど影響を及ぼさないことを確認した。これらの知見は将来 Y 系超電導線材の低温強磁場領域での応用を検討する際に極めて有用である。

vii) 直流磁場下の通電特性

超電導機器において Y 系超電導線材・導体は直流磁場の下、機械的応力と変動磁場に同時にさらされる。このような磁場下で通電中(同時掃引)の線材・導体の全損失を評価する。これらのデータにより、コイル設計に利用できるデータを得るとともに、線材製造技術へのフィードバックに資することを目的とする。

直流強磁場下での同時掃引時の損失を評価するために、直流強磁場に変動磁場を重畳して、変動電流を流した状態での Y 系超電導線材の全交流損失を評価する。

直流強磁場下での同時掃引時の損失を評価するために、直流強磁場に変動磁場を重畳して、変動電流を流した状態での Y 系超電導線材の全交流損失を評価する。

直流強磁場下での同時掃引時の全交流損失を電氣的に測定する装置を作製した。装置の概略図等を図 2.4.2-43 に示す。伝導冷却型超電導マグネットの常温ボア内に、液体窒素溜の容器を設置し、その中にスプリット型銅コイルを配置する。スプリット型銅コイル中心に Y 系超電導線材のサンプル線材を配置して、直流強磁場と変動磁場を重畳した外部磁場を印加する。本装置によっては実際のコイル応用での電磁条件は装置の制約上カバーできないが、解析モデルを用いることにより予測することが可能である。

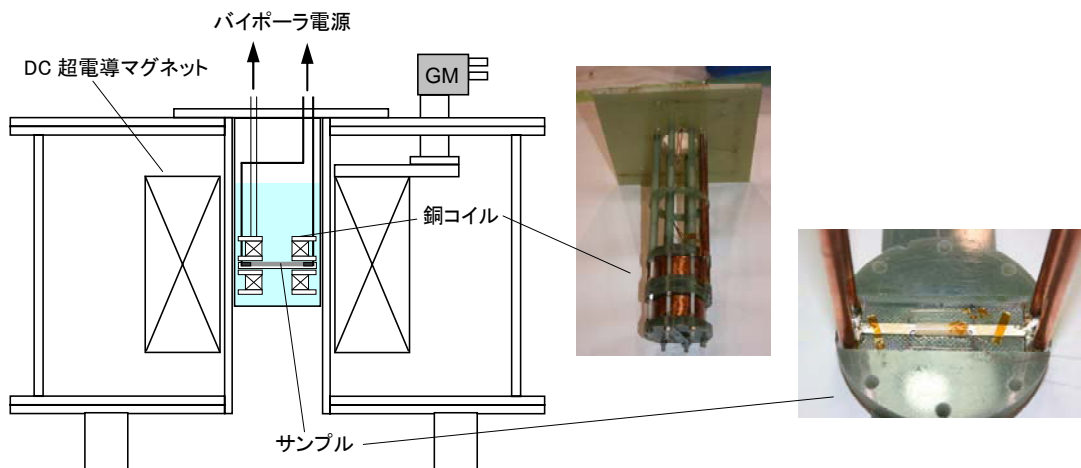
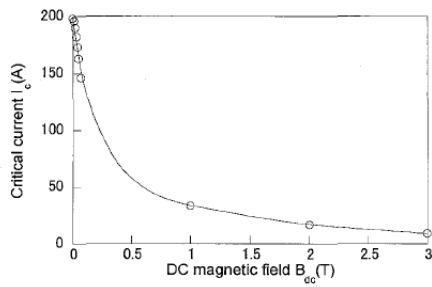


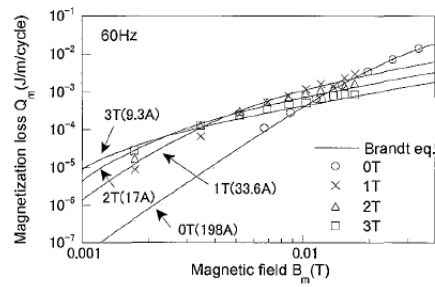
図 2.4.2-43 測定装置の概要

測定結果を図2.4.2-44に示す。同時掃引の測定に先立ち、直流磁場のみを印加してサンプル線材の臨界電流測定を行なった。図には、既に我々の有する解析モデルによる数値解析結果を比較して示してある。測定結果と数値解析は良く一致しており、測定結果の妥当性が示されていると考えられる。

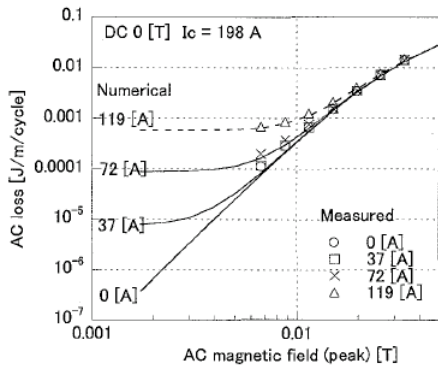
直流強磁場下での変動磁場・変動電流（同時掃引）の交流損失を測定。また、測定結果と数値解析結果を比較して検証を行った。その結果、両者は概ね良く一致した。従って、現在の測定システムではカバーできない範囲の測定条件でも、数値解析により交流損失を予測できると考えられる。



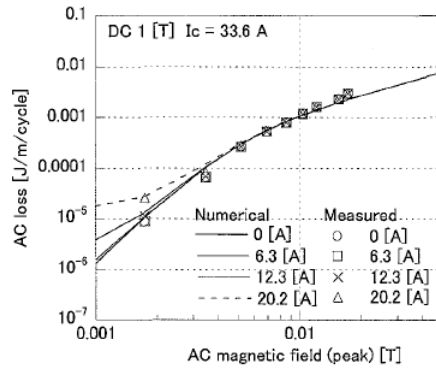
(a) 臨界電流特性



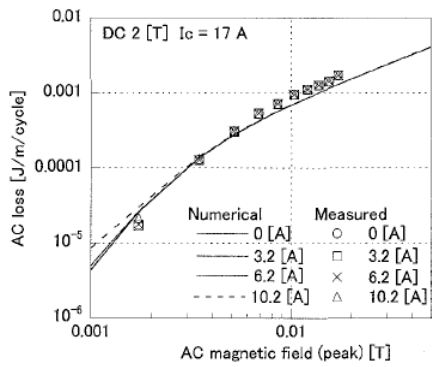
(b) 無通電の磁化損失



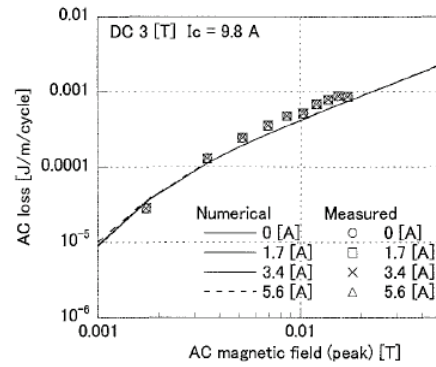
(c) DC ; 0 T での全損失



(d) DC ; 1 T での全損失



(e) DC ; 2 T での全損失



(f) DC ; 3 T での全損失

図 2.4.2-44 (a)臨界電流値の磁場依存性、(b)無通電時の磁化損失、(c-f)各直流磁場下での全損失

viii) 繰り返し応力印加による特性劣化

Y系超電導線材・導体およびコイルには電磁力によるフープ応力が働き、また繰り返し変動磁場に伴いこのフープ応力も繰り返しになる。本研究では、フープ応力(繰り返し応力を含む)に対するY系超電導線材, 導体, コイルの変動磁場損失, 許容電流値への影響を評価した。

その際、フープ応力は線材にとって引張り応力になることから、具体的には長さ約 15 cm の直線状短尺試料に最大 50,000 回の繰り返し引張り応力を印加する試験を実施した。使用したサンプルホルダーと試験機を図 2.4.2-45、46 に示す。

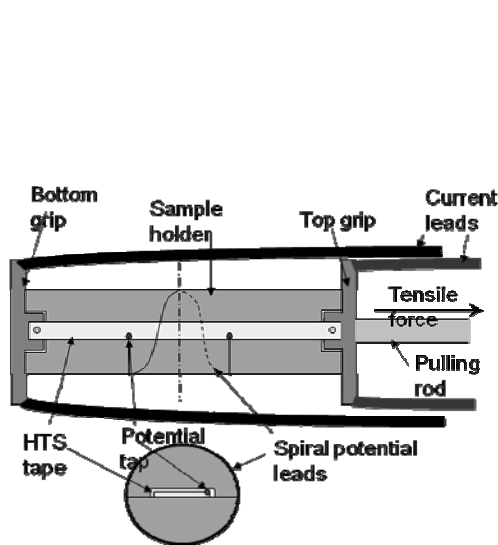


図 2.4.2-45 サンプルホルダー

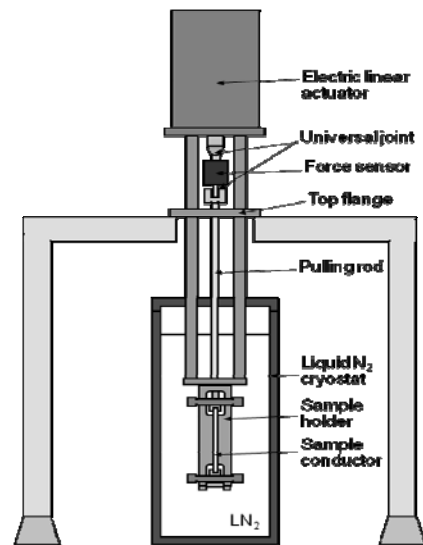


図 2.4.2-46 試験機

用いた超電導線は、長さ 15 cm、幅 2.5 mm の GdBCO テープである。

この線材を用いた試験結果を図 2.4.2-47、48 に示す。図 2.4.2-47 は線材への引張り応力を増加させた際の I_c 値劣化である。図より応力 663 MPa は可逆領域であり、そこまでプロットしてある線材は可逆領域でのゼロから 663 MPa までの繰り返し荷重試験に用いた。また応力 824 MPa まで印加すると I_c 値は初期の 85 %程度まで低下し不可逆領域に入る。そこまでプロットしてある線材は不可逆領域でのゼロから 824 MPa までの繰り返し荷重試験に用いた。

図 2.4.2-48 は繰り返し荷重による I_c 値劣化である。可逆領域の応力 663 MPa では 50,000 回繰り返ししても I_c 値劣化は見られなかった。一方、不可逆領域の応力 824 MPa の繰り返しでは I_c 劣化が進行し、繰り返し回数 3,000 回で初期の 6 割近くまで低下した。これらの知見は長尺線材の機器応用を検討する上で極めて有用である。

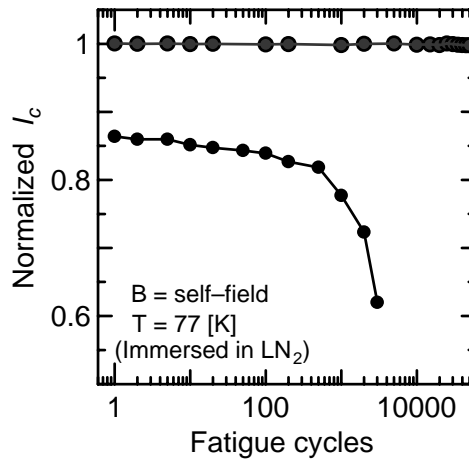
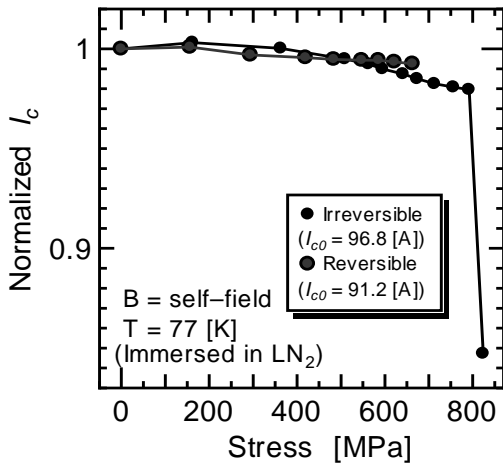


図 2.4.2-47 応力による I_c 値劣化

図 2.4.2-48 繰返しによる I_c 値劣化

ix) 大電流用導体の検討

高温超電導(HTS)線材を SMES などの大型マグネットに応用する場合、方向性の一つとして大電流容量の導体を用いることが考えられる。大電流容量の導体を構成する場合、線材間の電流分布を均一にするとともに、交流損失を低減するため、線材間に転位を施すことが重要である。本研究では線材間に転位を入れた導体試作を行って特性を調べ、Y 系超電導線材の大電流導体への適用可能性について検証を行っている。

Y 系超電導線材に転位を施す方法として、ドイツのカールスルーエ工科大学では ROEBEL 型導体が開発されている。この導体では、テープ線材を切り欠いてジグザグ形状に加工し、それらを順次撚り合わせていくことで転位構造を実現するため、線材の半分近くが捨てられることになる。これに対して、本研究では、線材をエッジワイズ方向に緩く蛇行させることによって類似構造の導体を構成することを考えた。TFA-MOD 法による Y 系超電導線材(5 mm 幅)20 枚を用いて各 1.3 m 長の単純積層導体 1 本と ROEBEL 型導体 2 本(線材の転位長は 600 mm、および、1300 mm)を製作し、液体窒素中で通電試験を行った。単純積層構造の導体については、臨界電流は 2050 A であったが、ROEBEL 型導体のうち 1 本の線材のピッチ長が 600 mm のものについては、臨界電流が 1520 A 程度に低下した結果となり、単純積層導体に比べて約 7 割となった。導体の臨界電流が低下した理由としては、転位を導入した線材(20 枚中 8 枚)についてエッジワイズ方向の歪みが 0.4 % と大きかったことが原因として考えられる。線材のピッチ長が 1300 mm のもの(最大曲げ歪みは 0.2 %)については、臨界電流は 1830 A であり、1 割程度の低下であった。また、導体に曲げ加工を行って液体窒素中で臨界電流を測定し、劣化の度合いを調べたところ、線材部にかかるフラットワイズ方向の最大の曲げ歪みで 0.4 % 程度までについては、ほとんど劣化が見られなかった。今後、0.5 % 程度までの歪みを加えてさらに様子を観察する計画である。

Y 系超電導線材を用いて大電流容量の ROEBEL 型導体を構成するために、線材

間を緩く蛇行させることによって転位構造を導入する方法を提案した。エッジワイズ方向の曲げ歪みが 0.2 %では劣化は 10 %程度であり、こうした導体を構成できることが実証できた。より短い転位長を実現するためには、線材の機械強度の増加が望まれる。ひとつの方策として、線材の周囲に銅の被覆材を施すことが有効であると考えられる。今後は、コイル状サンプルの特性試験を行って交流損失や電流分布について詳細に調べていく予定としている。これらの知見は将来 Y 系超電導線材の大電流導体への応用を検討する際に有用と思われる。

(b) 高不可逆磁場材料の開発

(b-1) 高不可逆磁場材料の開発

i) 新規高不可逆磁場材料の開発

本項の開発では、これまでの線材作製に用いられてきた Y 系銅酸化物超電導材料に比べ、より高い臨界温度やより小さな異方性をもつ材料を開発することにより、本質的により高い不可逆磁場をもつ材料を実現し、磁場中高 I_c 線材の作製裕度の向上に資することをめざす。また、ピン止め機構および磁束ダイナミクスを理解に基づき、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。

変圧器、SMES 等のパワー機器応用においては、不可逆磁場(B_{irr})の大きさ及び磁場角度依存性が重要なパラメータとなってくる。Y 系を含む銅酸化物系超電導材料は、その結晶構造や電子状態に起因し、大きな電磁氣的異方性をもつため、 B_{irr} は上部臨界磁場に比べかなり低い。この B_{irr} の値及び磁場角度依存性は電磁氣的異方性の大きさ及びピン止め点の種類に大きく依存することが知られている。そこで、本項目では、まず、磁場中特性の向上及び I_c 値の磁場角度依存性の低減化を目的として、in-plume PLD 法で成膜した GdBCO 線材の 77 K における I_c 値の磁場強度及び磁場角度依存性の把握及び成膜条件の影響について検討した。また、高いピン止め中心導入効果が期待される BaZrO₃(BZO)、BaSnO₃(BSO)添加効果についても検討を行った。

図 2.4.2-49 に線速 30 m/h で 2 回成膜を行った線材について、磁場をテープ面垂直方向に対して $\theta = 45$ 度、90 度($B//ab$)、 $\theta = 180$ 度($B//c$)に印加した時の I_c 値の磁場依存性を示す。この線材の 77 K, s.f. 中の I_c 値は 475 A/cm-w であった。図より低磁場では磁場の印加方向による差がほとんどないことがわかる。この原因を調べるために、 I_c 値の磁場角度依存性を詳細に調べたところ、図 2.4.2-50 に示すように、 $\theta = 90 \pm 20$ 度方向に大きなピークが生じ、それが低磁場での磁場角度依存性の低減化に寄与していることがわかった。このようなピーク構造は従来の PLD 法線材では報告されておらず、本方法で製造した線材に特有なものであると考えられる。

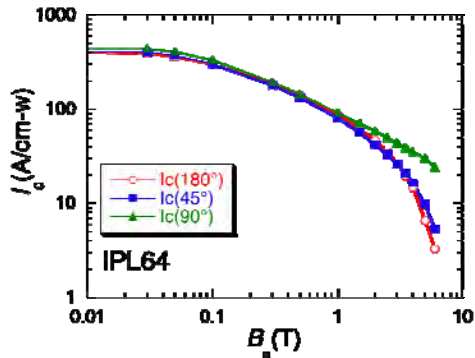


図 2.4.2-49 in-plume PLD 法で製造した GdBCO 線材の I_c - B 特性

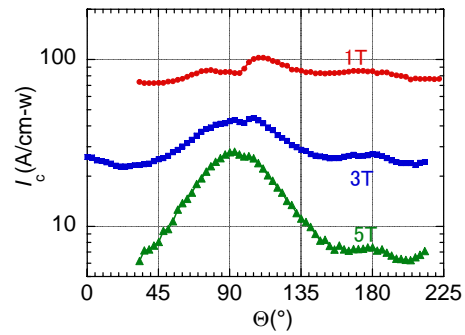


図 2.4.2-50 in-plume PLD 法で製造した GdBCO 線材の I_c 値の磁場角度依存性

ピークの生じる起源について明らかにするために、ピークが観察される試料とされない試料の断面 TEM 観察を行った。その結果を図 2.4.2-51 に示すが、ピークが観察される試料においては、ab 面方向に高密度の積層欠陥が観察される。また詳細な分析結果を 2.4.2(b-1) ii) に記載するが、積層欠陥の起源はダブル Cu-O チェーンであることが明らかとなっている。このダブル Cu-O チェーンが生成する機構について現在調査中であるが、その密度が Reel to Reel 成膜の線速と相関がみられることから、プルーム中の原料濃度変動が関係している可能性が高い。

この試料について、out-of-plume による線材との比較を図 2.4.2-52 に示すが、図(a)より in-plume 法による線材の不可逆磁場は標準的な PLD 試料に比べ高い値を有しており、本ピン止め点が高磁場特性の向上に有効であることが分かる。本線材はまた、同図(b)に示すとおり、より低温域においても優れた J_c 特性を維持していることが明らかとなった。

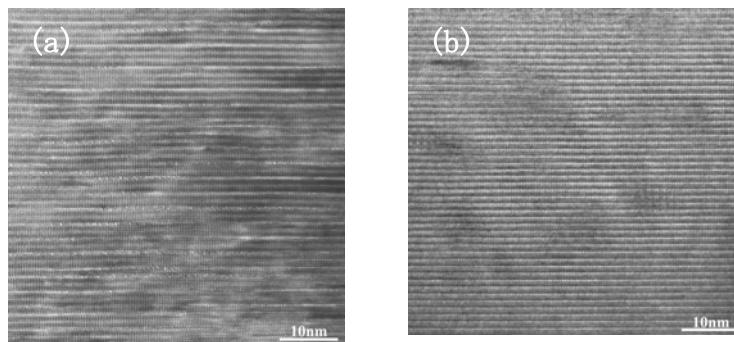
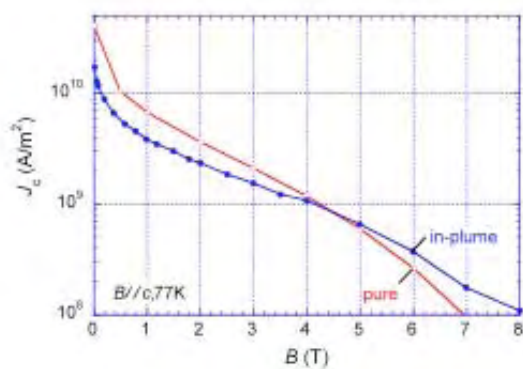
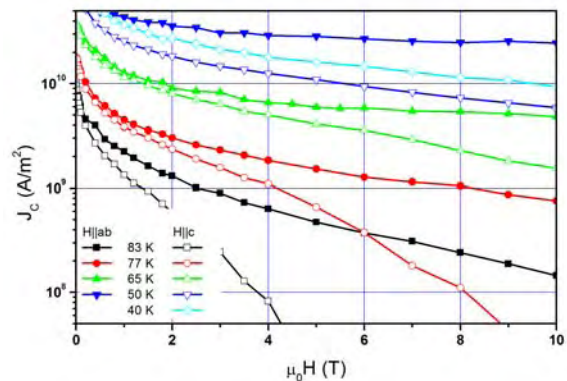


図 2.4.2-51 (a)サイドピークがみられる試料と(b)みられない試料の断面 TEM 写真



(a)



(b)

図 2.4.2-52 in-plume 法及び out-of-plume 法人工ピンなし PLD 線材の磁場中臨界電流特性の比較。(a)77 K、垂直磁場における標準 PLD 試料との比較。(b)広い温度域を含む垂直磁場、平行磁場中の特性。● : in-plume 法、○ : out-of-plume 法。

次に、in-plume PLD 法における、BaZrO₃(BZO)、BaSnO₃(BSO)添加効果を述べる。PLD 法で RE123 を成膜する際に、ターゲットに BZO や BSO、ZrO₂、SnO₂ 等を混入すると、超電導層内にナノロッド状の BZO や BSO が導入され、磁場中 I_c 値特性が向上することが「超電導応用基盤技術研究開発 (第 II 期)」プロジェクトにおいて、見いだされている。そこで、in-plume PLD 法においても同様の効果が得られるかについて検討を行った。

図 2.4.2-53 に 5 mol%BZO 添加した時の I_c 値の角度依存性の変化を示す。成膜速度は 20 m/h(40 m/h×2 パス)であり、膜厚は約 1.7 μm であった。BZO 添加により全般的に I_c 値が低下してしまっており、特に、 $B_a//ab(\theta = 90^\circ)$ の低下の度合いが大きい。また、1 T と比較して 3 T の方が低下の度合いが小さくなっている。こ

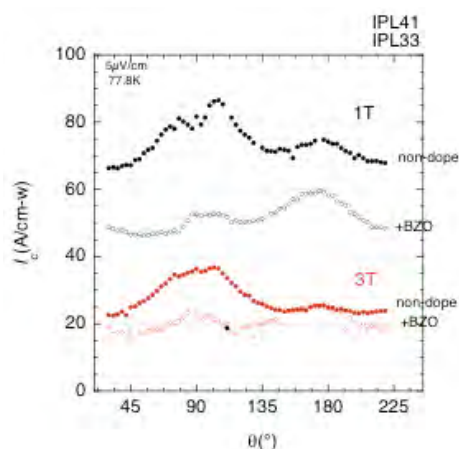


図 2.4.2-53 In-plume PLD 法で成膜した Gd123 における BZO 添加効果

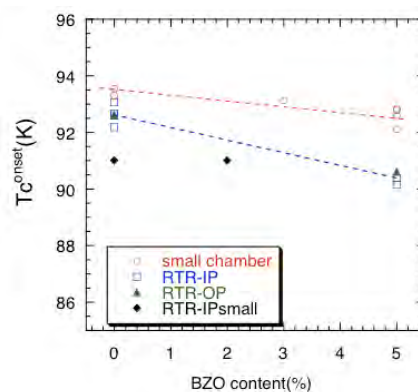


図 2.4.2-54 各種製法における Gd123 線材の T_c 値と BZO 添加量の関係

の J_c 値が低下した原因については、図 2.4.2-54 に示す様に、in-plume PLD 法をはじめとして、PLD 法全般に Reel to Reel 成膜において、BZO 添加により T_c 値が大きく低下することが原因と考えられる。

しかしながら、図 2.4.2-55 に示すように、BZO 添加により、 B_{irr} の向上がみられており、また、 J_c 値の磁場依存性においても、3 T 以上の高磁場では、BZO 添加による向上が見られており、BZO ナノロッドは高磁場においては有効なピン止め点として働くことが明らかとなった。今後、 T_c 値の低下の原因究明を行い、その対策することにより、低磁場での J_c 値向上をめざす。

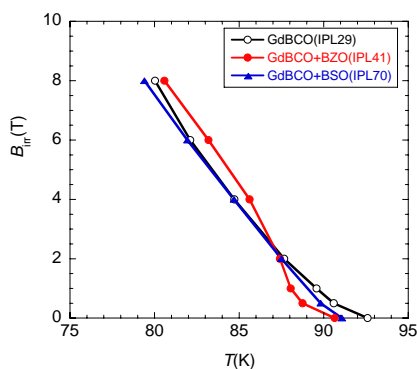


図 2.4.2-55 In-plume PLD 法で製造した GdBCO 線材の不可逆磁場曲線と BZO、BSO 添加効果

ii) in-plume PLD 膜の微細組織観察

本研究項目は新規人工ピン止め点を導入した線材等について、微細構造解析からその開発を支援することを目的としている。本項では in-plume PLD 法により成膜された長尺 $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (GdBCO) 線材に導入された高密度な欠陥および人工ピン止め点について述べる。線速 60 m/h で成膜されたサンプルにおいて、GdBCO の 006 回折を用いて撮影 ($g=006$ 条件) した GdBCO 層の断面 TEM 暗視野像を図 2.4.2-56 に示す。この条件では、GdBCO 層のらせん転位と積層欠陥のコントラストが明瞭に観察することができる。らせん転位が CeO_2 層直上から GdBCO 層表面まで観察され、さらに CeO_2 界面と平行に高密度な積層欠陥が形成されていることが分かる。この積層欠陥について原子の配列を明らかにするため、収差補正レンズを搭載した走査透過型電子顕微鏡による環状暗視野 (HAADF) 像を撮影した。HAADF 像では原子番号に依存したコントラスト (Z コントラスト) 像を得ることができる。図 2.4.2-57 に GdBCO 層の HAADF 像を示し、さらに、Gd、Ba、Cu 位置を示す。積層欠陥はダブル Cu-O チェーンであることが分かる。この GdBCO 層は高磁場における J_c - B - θ を測定すると、 $ab//B$ の磁場侵入付近で非対称な J_c 値のサブピークが現れる。このサブピークが現れる要因の一つとして、ダブル Cu-O チェーンによる積層欠陥が関係していると考えられる。

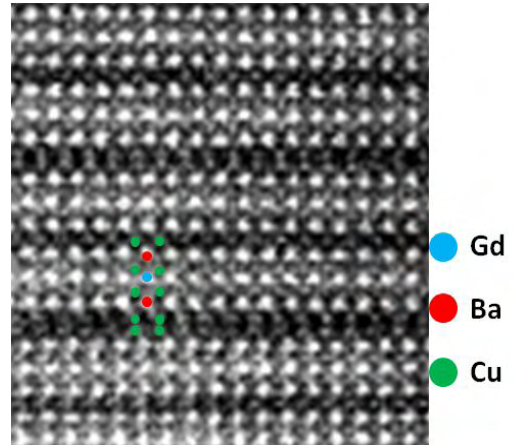
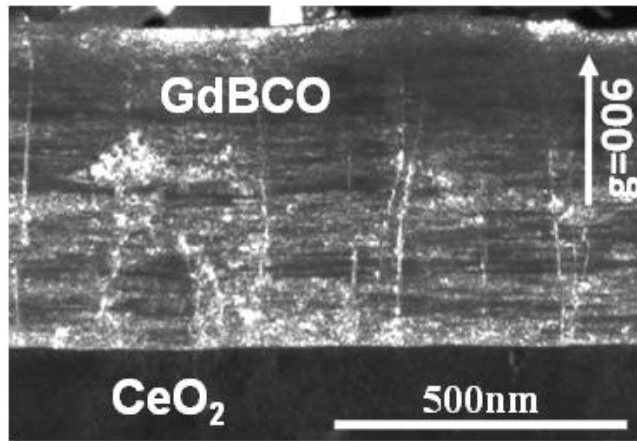


図 2.4.2-56 GdBCO の $g=006$ 条件における GdBCO 層の暗視野像

図 2.4.2-57 GdBCO 層の HAADF 像

次に、in-plume PLD 法により超電導層内部にナノロッドが形成されたサンプルについて述べる。図 2.4.2-58 に BaSnO_3 (BSO) ナノロッドが形成された GdBCO 層の断面 TEM 像を示す。GdBCO 層内部の暗い線状のコントラストは GdBCO のらせん転位であり、BZO ナノロッドは淡い線状のコントラストで現れている。BZO ナノロッドはおよそ 5 nm 径であり、 CeO_2 層直上から、表面領域にわたり均一に存在していることが分かる。また、in-plume PLD 法では BaZrO_3 (BZO) ナノロッド(およそ 5 nm 径)も同様に GdBCO 層の全域に渡り均一に分布させることが可能であることを TEM 観察から確認している。以上のように人工ピン止め点として有効である BSO、BZO ナノロッドが in-plume PLD 法でも形成可能であることを示すことができた。

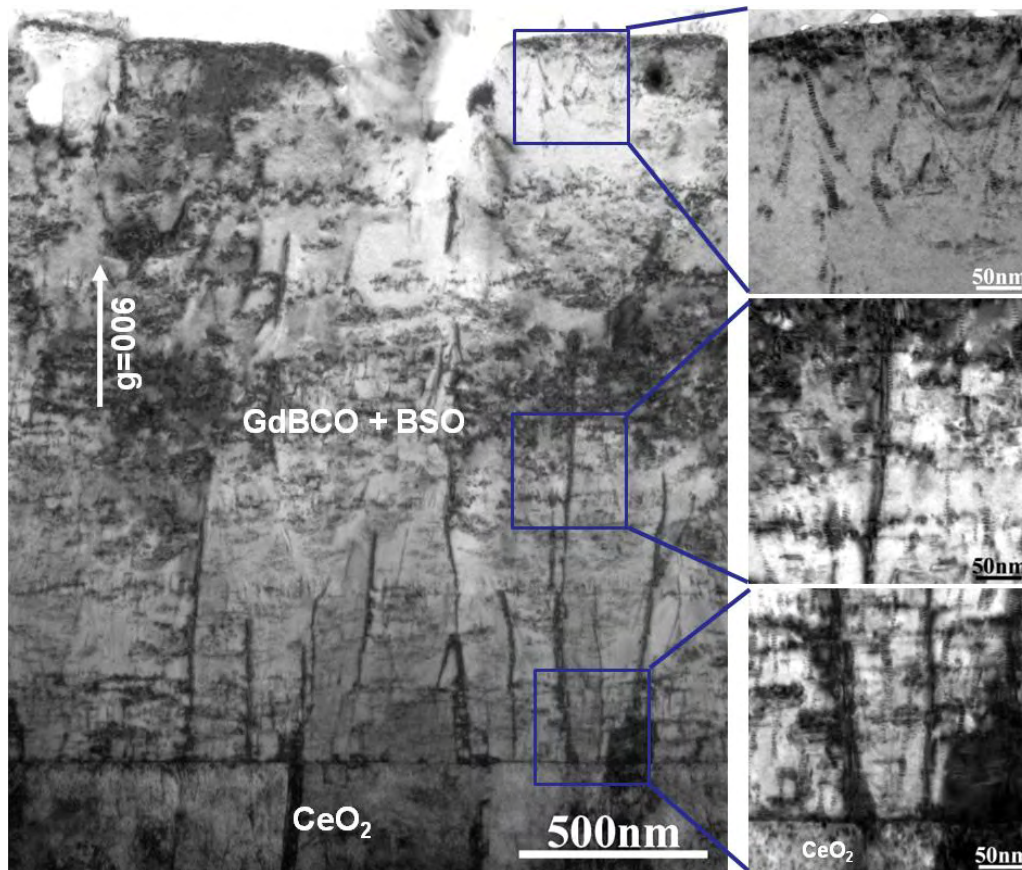


図 2.4.2-58 BaSnO₃(BSO)ナノロッドが形成された GdBCO 層の断面 TEM 像

iii) 量子線照射を用いた高不可逆磁場材料の開発

量子線照射は、作製工程によらず、照射条件を変化させることで超電導体内のピン止め点の形状・密度を制御できる利点がある。中でも特に重イオン照射によってできる円柱状欠陥は、PLD 法での成膜において、ターゲットに BaZrO₃(BZO) を添加することによって導入されるナノロッド状の析出相と同様の形状をしていることから、BZO によるピン止め効果の原理検証に有効な手段である。そこで、本研究では、重イオン照射を用い、ロッド状欠陥によるピン止めの基礎特性の把握および最適条件の検討を行った⁽¹¹⁾。

図 2.4.2-59 に PLD-Y123 線材に対して、450 MeV Xe イオンを 7.5×10^{11} ions/cm² (マッチング磁場: $B_0 = 15$ T)、c 軸に平行に照射した時の 77 K、1 T 及び 3 T における J_c 値の磁場角度依存性の変化を 1 例として示す。ここで、磁場をテープ面に平行に印加した時を $\theta = 0$ 度と定義した。照射方向($\theta = 0$ 度及び 180 度)の J_c 値が大きく上昇し、導入された円柱状欠陥が強いピン止め点となっていることがわかる。一方、 $\theta = 90$ 度の J_c 値の減少が見られた。

未照射試料における $\theta = 90$ 度 ($B_a // ab$) の J_c 値のピークについては、一般には銅酸化物超電導体特有の層状構造による intrinsic pinning あるいは積層欠陥等によるピン止めが起源といわれている。重イオン照射により異方性や積層欠陥の数は変化していないと考えられることから、 $\theta = 90$ 度の J_c 値のピークの減少の起源につ

いて、直交する c 軸相関ピンの導入によって、ab 面方向のピン止めの二次元性が弱まる等で実効的なピンポテンシャルが減少したことが考えられる。

また、図 2.4.2-59 (b)にそれぞれの磁場における照射前の $\theta=90$ 度の J_c 値で規格化したプロットを示すが、 $\theta=90$ 度のピークは磁場とともにシャープになるのに対し、照射試料でみられる $\theta=0$ 度ピークの幅は 1 T と 3 T ではほとんど変化していないことがわかる。この $\theta=0$ 度ピークの広がりから、円柱状欠陥によるピン止めの有効角度(trapping angle: θ_r)は約 45 度と見積もられる。この値は Doyle ら⁽¹²⁾による単結晶基板上に PLD 成膜した Y 系超電導薄膜における結果($\theta_r \sim 50$ 度(1 T、 $T/T_c = 0.86$))と良い一致をみている。一方、Paulius ら⁽¹³⁾は Y 系単結晶を用いた測定で、 θ_r は温度及び磁場によって変化し、85 K では 1 T で $\theta_r \sim 75$ 度、4 T で $\theta_r \sim 24$ 度と報告している。この違いの原因としては、単結晶と比較して薄膜や金属基板上線材では、らせん転位等の既存の欠陥の影響等があるためと考えられるが、今後、温度依存性も含めたより詳細な議論が必要である。

次に、欠陥密度と J_c - B 特性の関係について議論する。図 2.4.2-60 は照射フルエンスが 2.5×10^{11} ($B_{\Phi} = 5$ T) と 7.5×10^{11} ions/cm² ($B_{\Phi} = 15$ T)及び未照射試料の 77 K における J_c - B 特性の比較である。なお、 J_c 値は照射前の 0.01 T の J_c 値で規格化した。照射量とともに J_c 値は増加し、また、磁場依存性も小さくなることがわかる。特に、高磁場領域での J_c 値の増加が大きく、ロッド状の欠陥の導入は不可逆磁場の向上に有効であることを意味する。

一方、ロッド状欠陥の有効磁場 B^* を低磁場の $J_c \propto B^a$ からずれが生じる磁場で定義すると、フルエンスが 2.5×10^{11} ions/cm² のとき 1.1 T、 7.5×10^{11} ions/cm² のとき 2.4 T となり、照射量から見積もられるマッチング磁場より小さく、約 1/5 となっている。このことは、導入された欠陥の 20 % ぐらいしか、磁束ピン止めとして寄与していないことを示唆している。このことは、重イオン照射で導入される欠陥分布はランダムな分布をもつ一方、磁束線は磁束線同士の反発力により、できるだけ三角格子を組もうとするため、必ずしもすべての欠陥がピン止めに使われるとは限らないことを考えると定性的に理解できる。

以上のことから、ナノロッド状欠陥は不可逆磁場の向上に有効であること、また有効磁場角度範囲は約 45 度と比較的大きいこと等が明らかとなった。これらの知見は長尺線材の磁場特性向上のためにナノロッド状人工ピン止め点の導入が検討されていることを考慮すると、極めて重要である。

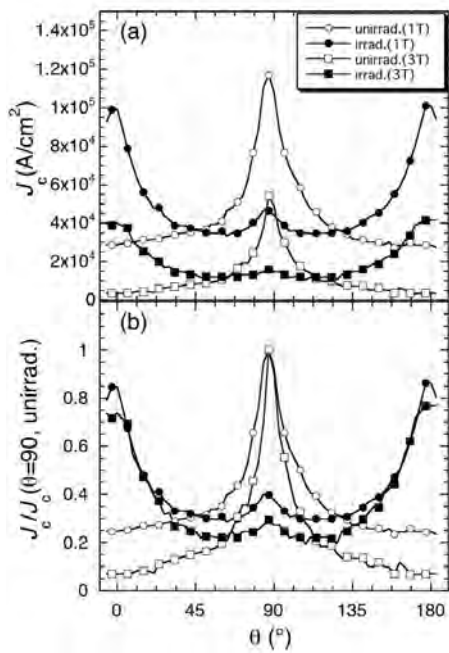


図 2.4.2-59 (a)Xe イオン照射(フルエンス： 7.5×10^{11} ions/cm²)前後の Y 系超電導線材の 1 T 及び 3 T、77 K における J_c 値の磁場角度依存性 (b) J_c 値を未照射試料の $J_c(B, 90^\circ)$ 値で規格化したプロット。

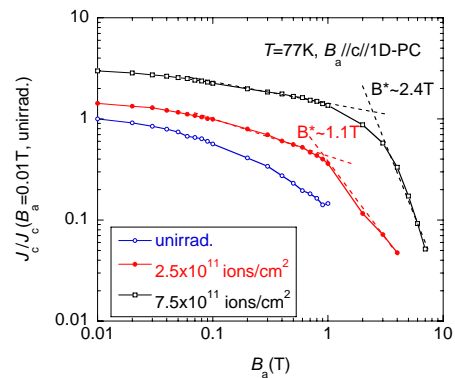


図 2.4.2-60 Xe イオン照射による Y 系超電導線材の 77 K における J_c - B 特性の変化。なお、磁場は c 軸方向に平行に印加した。

iv) 不可逆磁場に対するキャリア濃度の影響

高不可逆磁場材料の開発として、試料に添加物を加えることにより、異方性制御、磁場中 J_c 値の向上、不可逆磁場 B_{irr} の上昇をめざすこととした。良質の単結晶試料を作製し、その物性を評価することにより、線材にフィードバックすることを目的としている。本項では Y 系単結晶に炭酸を添加した場合、および Gd 系単結晶に Ca を添加した場合についての結果を報告する。同時に、本質的に高い T_c 値を持つ材料開発を目的として格子の不安定性に注目し、格子歪みのない Y124 系単結晶の動的構造評価をおこなった。

Y 系銅酸化物では Cu-O 鎖が炭酸基と置換する。Cu-O 鎖の酸素はキャリア濃度と関連しており、また、炭素置換により c 軸長が減少することから、この置換により異方性・キャリアドーピング制御が同時に行われる可能性がある。さらに、一般的に炭酸は銅酸化物を作る際の原料の一部であるため、特に低温合成手法で結晶内に入ることが予想され、線材特性に影響を与えうると考えられる。炭酸置換 Y 系銅酸化物単結晶の物性評価を行なった⁽¹⁴⁾。

実験の結果より炭酸濃度(図 2.4.2-61 中 x)が上昇するとアンダードープになることがわかった(図 2.4.2-61 上図)。同じキャリア濃度の J_c 値を測定してみると($T=77$

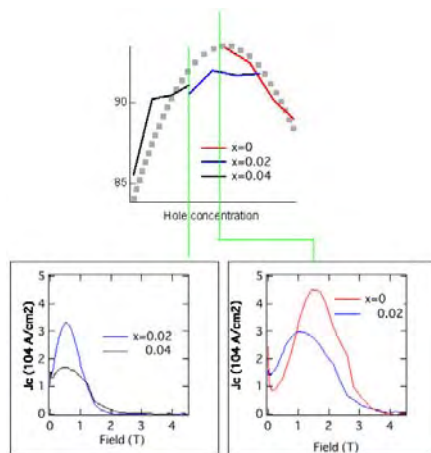


図 2.4.2-61 上図; c 軸抵抗から求められた炭酸置換 Y 系単結晶のキャリア濃度依存性。下図: 上図同一キャリア濃度(上図中緑線)における異なる炭酸濃度を持つ Y 系超電導単結晶の J_c 値

K)、炭酸置換により磁場中の J_c 値が減少していることがわかる(図 2.4.2-61 下図)。従って炭酸を含まない条件下で線材を作製することが望まれることが判明した。

一方、 B_{rr} を上昇させるためには、系をオーバードープにすることがよいと考えられる。そこで、Gd 系銅酸化物の Gd サイトを Ca で置換した Ca 置換 Gd 系銅酸化物単結晶を育成しキャリア濃度制御を試みた。2%Ca 添加により B_{rr} が 5 T から 6 T 付近に上昇しているのが判明した。このことから、少量の Ca 添加により線材特性を向上させられる可能性が示唆される。

v) 四端子法による不可逆磁場の評価

四端子法により、低温強磁場領域を含む広い条件下における電流輸送特性について信頼性の高いデータを得るとともに、各種材料特性の比較を行うことにより、本プロジェクトで開発した GdBCO 線材は他の材料を凌駕する高不可逆磁場特性を有することを示した。図 2.4.2-62 に人工ピン止め点は導入せずにストイキオメトリ組成で得られた PLD-GdBCO 線材の特性、及び前プロジェクトで得られた PLD-YBCO 線材の測定結果を示す。また、参考のために他の材料の特性を合わせて示した⁽¹⁵⁻¹⁷⁾。また、図 2.4.2-63 にはマグネット応用等で重要となる、強磁場中での角度依存性の特性を示す^(18,19)。低温域においては、実用的な強磁場中において、フラットな依存性を示すことが分かる。

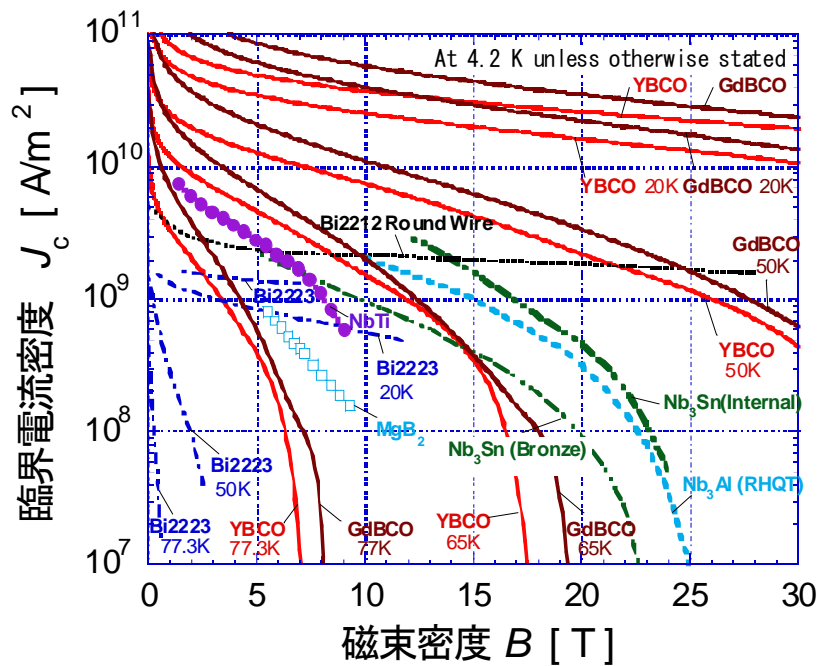


図 2.4.2-62 各種材料の高磁場特性の比較⁽¹⁵⁻¹⁷⁾

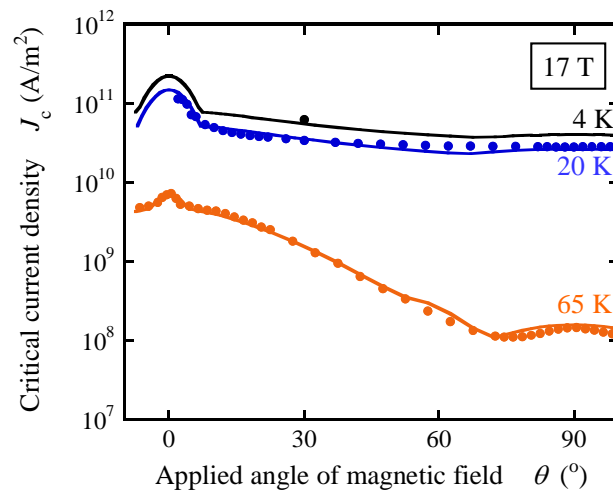


図 2.4.2-63 強磁場中での J_c 値の角度依存性^(18, 19)

vi) パルス強磁場を用いた高不可逆磁場材料の評価

本プロジェクトにおける、ロスアラモス米国立研究所(以下 LANL)と ISTEK の共同研究は 2008 年 6 月から開始され、LANL の 65 T マグネットを用いて ISTEK において作製された試料の磁場中特性を高磁場まで実際に測定し、Y 系超電導線材の磁場中特性の理解とさらなる高不可逆磁場材料化への指針を得ることを目標とした。ISTEK から LANL へのサンプル提供と研究者の派遣、情報交換などを行い、これまでに以下の成果を得た。

図 2.4.2-64 に 65 T のパルスマグネットと DC マグネットを用いて測定した、各温度における MOD-YBCO 線材の電気抵抗の磁場依存性を示す。各マグネットによって電気抵抗挙動に差異は見られず、良く一致したことから、パルスマグネット

を用いた本測定方法は DC マグネットを用いた場合と同等に扱うことが可能であることが明らかになった。そこで、パルスマグネットを用いて MOD 法により作製された通常の YBCO 線材、YGdBCO に BZO を微細分散させた高磁場特性線材の 2 種類の試料の不可逆磁場を測定した。その結果、図 2.4.2-65 に示すように、どちらの試料も、全温度領域において $H//c$ の場合に最も低く、 $H//ab$ の場合に最も高い不可逆磁場を示した^(20,21)。BZO を導入した試料は $H//ab$ では通常の YBCO 線材とほぼ同等の特性であったが、 $H//c$ と 45 度の条件では不可逆磁場の向上を示した^(20,21)。これは、20 nm 程度の BZO 粒子が微細分散した試料においては、BZO ナノ粒子が磁束のピン止め点として高磁場まで有効に作用していることを示唆している。この結果から、さらなる不可逆磁場特性の改善には、BZO 粒子のようなナノ粒子のサイズ・分布を最適化することが有効であることが分かった。これらの結果は世界で初めて測定に成功したものであり、学会においてはもちろん、一般の新聞各紙にも掲載されて高い評価を得ている。

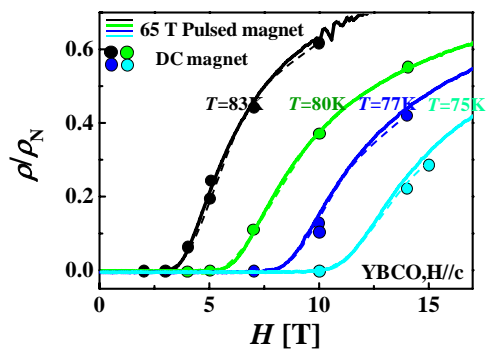


図 2.4.2-64 MOD-YBCO 線材の電気抵抗の磁場依存性

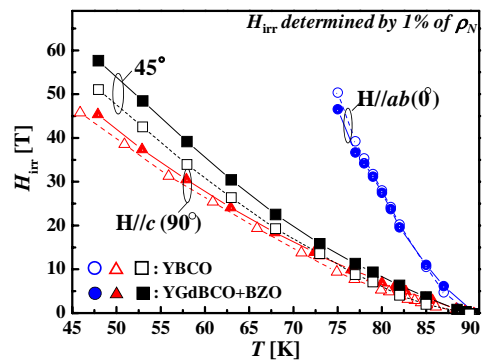


図 2.4.2-65 異なる磁場印加角度及び温度における MOD 線材の不可逆磁場特性

vii) 鉄系超電導体の合成

2008 年 2 月に発見された鉄ニクタイト系高温超電導体⁽²²⁾は銅系に次いで高い臨界温度値($T_c \sim 55$ K)を有することから、発見当初から、その物理に対する興味のみならず応用材料としても注目を集めている。

銅系酸化物高温超電導体はその発見以来 20 年以上を経過し、現在では Y 系超電導体を中心に本プロジェクトを含め世界各国でその応用研究が盛んに行われている。しかしその物理的本質については、依然として完全には解明されておらず、そのことが応用研究の進展を阻害する要因の一つであると考えられている。新しく発見された鉄ニクタイト系超電導体は、Y 系超電導体を含む銅系酸化物高温超電導体と、高い臨界温度を持つこと以外にも、ともに層状構造を持つこと、反強磁性相と隣接していること、非超電導相にキャリアを導入することによって超電導性が表れることなど、偶然とは思われない共通性を有している。従ってこれら二つの系を詳細に比較することにより、高温超電導体の本質が解明できるのではないかという期

待がもたれている。一方で、銅系酸化物高温超電導体の母相が絶縁体であるのに対し鉄系超電導体の母相が金属的であること、銅系酸化物高温超電導体の超電導対称性が d 波であるのに対し鉄系超電導体においては s 波であるらしいことなど、いくつかの興味ある相違点もある。それらの相違点を調べることにより、Y 系超電導体に残されているいくつかの課題を克服するためのヒントが得られる可能性がある。

そこで本研究では鉄系超電導体の応用的観点から見たポテンシャルの把握のため、上部臨界磁場及び臨界電流特性の評価を行った。

鉄系超電導体は REFeAsO (RE = La, Ce, Pr, Nd など) (通称 Fe1111)、BFe₂As₂ (B = Ba, Sr) (通称 Fe122)、AFeAs (A = Li, Na) (通称 Fe111)、 α -FeSe の 4 種類に分類され、Fe1111 において最も高い T_c 値、 $T_c \sim 55$ K が報告されており⁽²³⁾、Fe122 においても、比較的高い 38 K が得られている⁽²⁴⁾。経済性の観点からいえば、液体窒素冷却が可能な $T_c \gg 65$ K が望ましいが、冷凍機冷却が許容できる超電導磁石等に用いる分には十分高い T_c 値であるといえる。

そこで、まず、REFeAsO (RE: Gd, La) の多結晶試料の合成を行い、 B_{c2} の測定を行った。図 2.4.2-66 に LaFeAsO_{1-x}F_x と GdFeAsO_{1-x} 多結晶体の B_{c2} をまとめる。LaFeAsO_{1-x}F_x (x = 0.04, 0.11) は封管法、GdFeAsO_{1-x} は高压合成法 (5 GPa) によって合成を行った。いずれの試料も下凸のカーブを示し、 $-dB_{c2}/dT \sim 1.2$ T/K と大きな値を示し、非常に大きな $B_{c2}(0)$ をもつことを示唆する。また図 2.4.2-67 に LaFeAsO_{1-x}F_x (x = 0.11) の J_c -B 曲線を示すが、 J_c 値が大変小さく、粒間結合が非常に弱いことを表している。また、GdFeAsO_{1-x} はほぼ可逆な磁化曲線を示し、 $J_c \sim 0$ であった。GdFeAsO_{1-x} においては、Fe-As 系の析出層が高い分率で存在しており、それらが粒界結合を阻害しているためと考えられる。様々な出発組成を用いてこれら析出層の低減化を行ったが、今のところ成功に至っていない。

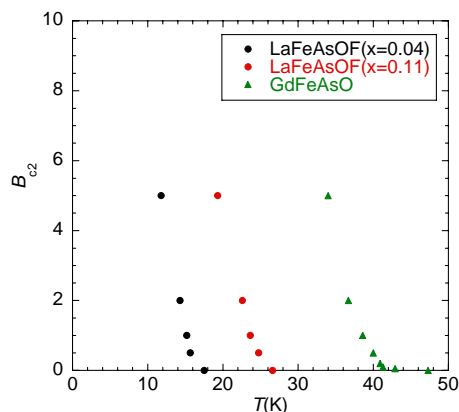


図 2.4.2-66 LaFeAsO_{1-x}F_x (x = 0.04, 0.11) と GdFeAsO_{1-x} 単結晶の B_{c2} の温度依存性。

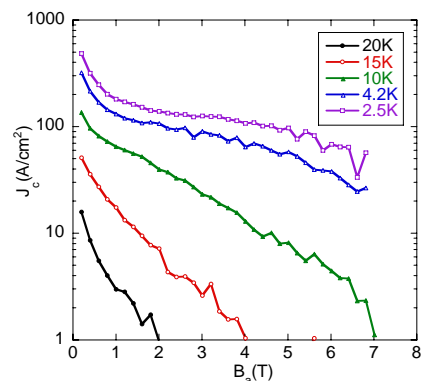


図 2.4.2-67 LaFeAsO_{1-x}F_x (x = 0.11) の J_c -B 特性

一方、図2.4.2-68にBa(Fe,Co)₂As₂単結晶の J_c - B 特性を示すが、比較的高い J_c 値を示している。

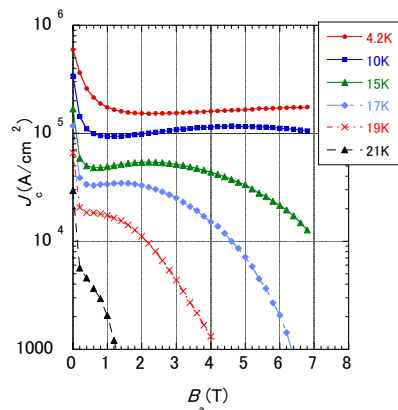


図 2.4.2-68 Ba(Fe,Co)₂As₂ 単結晶の J_c - B 特性。

従って、線材化のためには、今後、FeAs 等の不純物層の粒界への析出を抑える合成ルートの開発による粒間 J_c 値の向上が必要であり、その技術的ブレークスルーなしには、現状の鉄系超電導材料においては低温での不可逆磁場は高いものの、その T_c 値や線材作製に要するコストの面から Y 系超電導材料を凌ぐ線材用材料にはなり得ないと考えられる。一方、鉄系超電導体群では多くの元素の組み合わせが可能と考えられ、高 T_c 値を有する新物質系において応用に適した材料が発見される可能性がある。これを含めた新超電導材料の探索研究は、平成 21 年度末からスタートした内閣府の FIRST プログラムで行われる予定である。

viii) 鉄系超電導体の粒界特性

2008 年 2 月に東工大・細野グループにより発見された新しい高温超電導体群である鉄系超電導材料は、現状では T_c 値が最高でも 55 K 程度であるが、低温での上部臨界磁場が 100 T を超えるとともに、異方性が小さいなど線材应用到に好ましい性質を有している。結晶粒界の性質も線材应用到にとって非常に重要である。Y 系超電導材料では、隣接する結晶粒の傾角が数度以上で J_c 値の急激な低下が起こるため、高い結晶粒面内配向度を有する中間層上に薄膜エピタキシャル成長により超電導層を形成することが必須であり、高コストとなるとともに線材の形状が制約される。逆に、結晶粒間の配向を厳密に取る必要がない高温超電導材料であれば、線材应用到にとって非常に有利となる。従って、Y 系超電導材料と鉄系超電導材料における粒界特性を比較検討することは、Y 系超電導材料の高度化のための方策を考える上からも重要である。

鉄系超電導材料の結晶粒界の性質を調べるため、(La,Sr)(Al,Ta)O₃(LSAT)バイクリスタル基板上(傾角 30 度)に Nd:YAG レーザを用いた PLD 法により、厚さ約 250 nm の Ba(Fe,Co)₂As₂ エピタキシャル薄膜を作製した。薄膜は 22.6 K の $T_{c, onset}$ と 1.1 K の非常に狭い転移幅を示し、また 3 K での粒内 J_c 値は 2-10 MA/cm² と高く、結晶粒の性質を調べるのに十分な品質をもっていると考えられる。⁽²⁵⁾ バイク

リスタル基板の結晶粒界を横断する方向に幅 $10\ \mu\text{m}$ 、長さ $300\ \mu\text{m}$ のマイクロブリッジをイオンミリング法で作製した。

図 2.4.2-69 には、 $10\ \text{K}$ における電流-電圧(I - V)特性を示すが、典型的な RSJ(Resistively Shunted Junction)特性となっており、また $0.9\ \text{mT}$ という弱磁場の印加で超電導電流は 95 %以上減少することから、結晶粒界は典型的なジョセフソン接合になっていることがわかる。図 2.4.2-70 には、このマイクロブリッジの J_c 及び $I_c R_N$ 積(R_N は接合抵抗)の温度依存性を示す。 J_c 値は図中に示した粒内 J_c 値

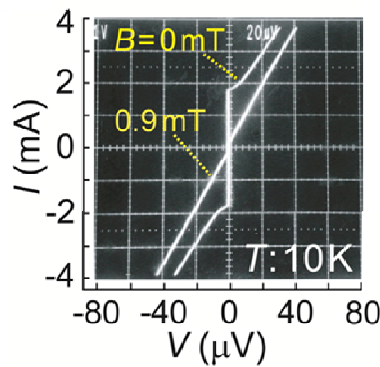


図 2.4.2-69 傾角 30 度のバイクリスタル基板上に形成した $\text{Ba}(\text{Fe},\text{Co})_2\text{As}_2$ 薄膜マイクロブリッジの $10\ \text{K}$ における I - V 特性

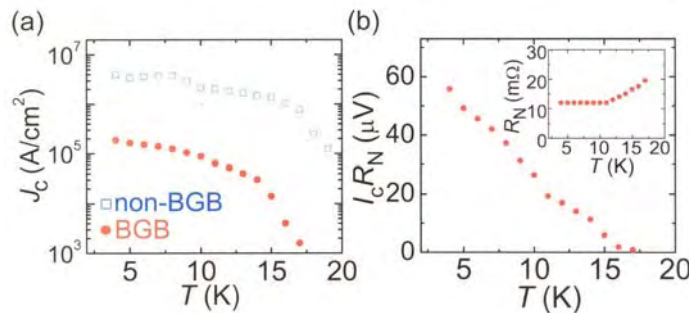


図 2.4.2-70 鉄系超電導体バイクリスタル接合(傾角 30 度)の J_c 、 $I_c R_N$ 、 R_N の温度依存性

の約 $1/20$ であるが、これは同じ傾角のバイクリスタル基板上の Y 系超電導薄膜で報告されている値 $1/500$ ⁽²⁶⁾ に比べ減少率としては小さい。また、接合抵抗は金属的な温度変化を示すと共に、規格化した抵抗 $A R_N$ (A は接合面積) は Y 系バイクリスタル接合に比べ 1 桁以上小さい。Y 系超電導材料は、 d 波対称性をもつとともに母物質が反強磁性絶縁体であることから、結晶粒界は超電導-絶縁体-超電導(SIS)接合的な特性を示す。一方、鉄系超電導材料は拡張 s 波の対称性を持ち、母物質が金属あるいは半金属であることから、超電導-常電導-超電導(SNS)的な振る舞いを示すものと考えられる。より低傾角での特性を注意深く調べる必要はあるが、鉄系超電導材料においても、粒界弱結合の問題は存在し、線材応用のためには結晶をある程度揃えて作る必要があることがわかった。したがって、現状の鉄系超電導材料は、低温での不可逆磁場は高いものの、その T_c 値や線材作製に要するコストの面から

Y系超電導材料を凌ぐ線材用材料にはなり得ないと考えられる。一方、鉄系超電導体群には多くの元素の組み合わせが可能と考えられる。これを含めた新超電導材料の探索研究は、今後は平成 21 年度末からスタートした内閣府の FIRST プログラムで行われる予定である。

(4) 成果のまとめ及び中間目標達成への見通し

PLD 法については電力貯蔵システム向け、および変圧器向けの両方において、数値目標が設定されている、磁場中特性、単長、コストのすべての基準において中間目標を達成した。

MOD 法については短尺試料において、YGdBCO+1 wt%Zr 膜の高 I_c 値化を検討した結果、760 A/cm-w @77 K, s.f.と非常に高い I_c 値を得ており、77 K および 65 K の磁場中 I_c 値測定結果より、0.5 T、65 K および 3 T, 77 K の I_c 値がそれぞれ 610 A/cm-w、34 A/cm-w と得られていることから中間目標値である 300 A/cm-w (@0.02 T, 65 K)、30 A/cm-w (@3 T, 77 K)はこの材料によりクリア可能であると考えられる。長尺化は極低コスト目標である 5 m/h 相当の Reel to Reel 仮焼(ISTEC-SRL)と 10 m/h の Batch 本焼(SWCC)の組み合わせで行うことにより可能であると予想される。現状では、50 m 長線材において 65 K,0.1 T の I_c 値は約 450 A/cm-w が実現しており、今後は低コスト化技術開発成果との連動で変圧器用線材の磁場中特性の中間目標値 300 A/cm-w (@65 K,0.02 T)-50 m は十分クリア可能であると考えられる。一方、が、SMES 用線材の中間目標 30 A/cm-w (@77 K, 3 T)-50m に関しては、12 m 長線材で 14 A/cm-w (@77 K, 3 T)の I_c 値となっている。

(非公開)

MOCVD 法についても、30%程度の Y を Gd で置換した YGdBCO 線材に Zr を添加し、超電導層中に BaZrO₃ 等の有効なピン止め点を導入することにより、磁場中特性が改善されるという知見を得ている。ただし、まだ膜厚が十分ではないため、磁場中臨界電流値に関する中間目標を達成するには至っていない。今後は、長尺対応装置にて 2 μ m 程度まで厚膜化を図ることにより目標達成を図る。

表 2.4.2-7 には、中間目標とこれまでの実績の比較及び中間目標達成への見通しをまとめる。

表 2.4.2-7 中間目標と実績の比較及び達成への見通し

成膜法	中間目標	実績 (H22年7月現在)	目標 達成度	H23年3月までの 中間目標達成見通し と根拠
PLD 法	30 A/cm-w @77 K, 3 T-50 m	32.7 A/cm-w @77 K, 3 T-51 m (2.9 円/Am)	◎	達成
	300 A/cm-w @65 K, 0.02 T-50 m	492 A/cm-w @77 K, 0.02 T-51 m (2.9 円/Am)	◎	達成
TFA- MOD 法	30 A/cm-w @77 K, 3 T-50 m	14 A/cm-w @77 K, 3 T-12 m 34 A/cm-w @77 K, 3 T-短尺	○	BZO ピン量の増加 及び Ba 組成調整＋ 厚膜化(2 μm)及び 極低コストテーマ との連動で達成の 見込み。
	300 A/cm-w @65 K, 0.02 T-50 m	448 A/cm-w @65 K, 0.02 T-50 m 極低条件未達	○	極低コスト条件で の実証が課題で同 テーマと連動して 達成する見込み。
MOCV D 法	SMES 用 30 A/cm-w@77 K, 3 T-50 m	21 A/cm-w @77 K, 3 T-短尺 極低条件未達	△	長尺対応装置にて 2 μm 程度まで厚膜 化を図る

◎：中間目標達成 ○：H23年3月末までの中間目標達成が見通せている

△：H23年3月末中間目標達成には技術開発の大きな進展が必要

(5) 最終目標達成への見通し

PLD 法についてはすでに中間目標を達成した。最終目標達成に向けては、電力貯蔵システム向け特性である 50 A/cm-w@77 K, 3 T を短尺試料ですでに実証している。しかしながら、極低コスト条件 (<3 円/Am) を満足していないことから、今後はナノサイズのピン止め点導入技術を含めて 50 A/cm-w@77 K, 3 T とコストとの両立をめざす。変圧器向け条件としては 400 A/cm-w@65 K, 0.1 T の線材を 3 円未満条件で作製することを実証した。今後は長尺化をめざし、最終目標を達成していく。

MOD 法については

(非公開)

(非公開)

MOCVD 法についても、平成 22 年度までの混晶技術の人工ピン止め点導入技術の最適化を進めるとともに、安定製造技術開発における長尺製造技術の成果を合わせることで最終目標達成をめざす。表 2.4.2-8 には、最終目標とその見通しをまとめる。

表 2.4.2-8 最終目標とその見通し

成膜法	最終目標	課題	アプローチ
PLD 法	50 A/cm-w @77 K, 3 T-200 m	極低コスト 条件との両立	短尺試料で 50 A/cm-w@77 K, 3 T をすでに実証。ナノピン導入技術開発によりコストとの両立をめざす。
	400 A/cm-w @65 K, 0.1 T-100 m	長尺化	400 A/cm-w@65 K, 0.1 T を 3 円未満条件で実証 (50 m)。長尺化を図る。
MOD 法	50 A/cm-w @77 K, 3 T-200 m	ピン止め力 向上、厚膜 化とその長 尺化	短尺では 1wt%Zr 添加膜で 35 A/cm-w@77 K, 3 T を達成。 長尺化および 2.5 μm 程度までの厚膜化を図る。
	400 A/cm-w @65 K, 0.1 T-100 m	長尺化	短尺では 610 A/cm-w@65 K, 0.5 T を達成。長尺化を図る。
MOCVD 法	50 A/cm-w @77 K, 3 T-200 m	ピン止め力 向上 長尺化	混晶技術の人工ピン止め点導入技術の最適化及び安定製造技術開発における長尺製造技術

引用論文リスト

- (1) Y. Yamada, K. Takahashi, H. Kobayashi, M. Konishi, T. Watanabe, A. Ibi, T. Muroga, S. Miyata, T. Kato, T. Hirayama, Y. Shiohara, “Epitaxial nanostructure and defects effective for pinning in Y(RE)Ba₂Cu₃O_{7-x} coated conductors”, Appl. Phys. Lett., 87, (2005) 132502.
- (2) T. Kato, H. Sasaki, Y. Gotoh, Y. Sasaki, T. Hirayama, K. Takahashi, M. Konishi, H. Kobayashi, A. Ibi, T. Muroga, S. Miyata, T. Watanabe, Y.

- Yamada, T. Izumi, Y. Shiohara, “Nanostructural characterization of Y123 and Gd123 with BaZrO₃ rods fabricated by pulsed-laser deposition”, Phys. C, 445-448, (2006) 628-632.
- (3) M. Miura, T. Kato, M. Yoshizumi, Y. Yamada, T. Izumi, Y. Shiohara and T. Hirayama, “Enhancement of flux pinning in Y_{1-x}Sm_xBa_{1.5}Cu₃O_y coated conductors with nanoparticles”, Appl. Phys. Express 1, (2008) 51701.
- (4) T. Kato, M. Miura, M. Yoshizumi, Y. Yamada, T. Izumi, T. Hirayama and Y. Shiohara, “Transmission Electron Microscopy Study of A Y_{1-x}Sm_xBa₂Cu₃O_y Coated Conductor Containing BaZrO₃ Particles”, J. Electro. Microscopy (2010) in press.
- (5) A. Ibi, S. Miyata, R. Kuriki, H. Kobayashi, H. Fukushima, A. Kinoshita, T. Kato, T. Hirayama, Y. Yamada, Y. Shiohara, “Development of long REBCO coated conductors with artificial pinning centers by using MPMT-PLD method”, Physica C Vol. 468 (2008) 1514-1517.
- (6) R. Fuger, M. Inoue, K. Higashikawa, T. Kiss, M. Namba, S. Awaji, K. Watanabe, A. Ibi, H. Fukushima, Y. Yamada, T. Izumi, “Evaluation of current transport properties of Gd₁Ba₂Cu₃O_{7-δ} coated conductors over a wide range of temperature and external magnetic fields”, European Superconductivity News Forum (ESNF), Issue 11 (2010) ST145.
- (7) M. Inoue, R. Fuger, K. Higashikawa, T. Kiss, M. Namba, S. Awaji, K. Watanabe, A. Ibi, S. Miyata, Y. Yamada, T. Izumi, “Current transport property in GdBCO coated conductor with artificial pinning centers in a wide range of temperature, magnetic field up to 27 T, and field angle”, Physica C in press.
- (8) M. Inoue, T. Kiss, K. Motoyama, S. Awaji, K. Watanabe, M. Yoshizumi, Y. Yamada, T. Izumi, Y. Shiohara, “Critical current property in YBCO coated conductor fabricated by improved TFA-MOD process”, Physica C Vol. 469, (2009) 1443-1445.
- (9) M. Miura, T. Kato, M. Yoshizumi, Y. Yamada, T. Izumi, T. Hirayama, Y. Shiohara, “Magnetic field dependence of critical current and microstructure in TFA-MOD Y_{1-x}Sm_xBa₂Cu₃O_y with nanoparticles for coated conductors”, IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol. 19 (2009) 3275-3278.
- (10) 淡路ら, “CVD-YBCO コート線材に対する J_c の低温異方性”, 2009 年度秋期 第 70 回応用物理学関係連合講演会 9p-R-15.
- (11) 筑本 知子, 中島 一雄, 宇敷 洋, 寺井 隆幸, “Y 系テープ線材への高エネルギー重イオン照射によるピン止め中心導入と臨界電流密度特性“, 低温工学 vol.44 (2009) p523.
- (12) R.A. Doyle, W.S. Seow, J.D. Johnson, A.M. Campbell, P. Berghuis, R.E.

- Somekh, J.E. Evetts, G. Wirth, J. Wiesner, “Effect of columnar defects on the elastic behavior of vortices in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-d}$ thin films”, *Phys. Rev. B.* **51** (1995) 12763-12770.
- (13) L.M. Paulius J.A. Fendrich, W.-K. Kwok, A.E. Koshelev, V. M. Vinokur, G.W. Crabtree, B.G. Glagola, “Effect of 1-GeV uranium ion irradiation on vortex pinning in single crystals of hte high-temperature superconductor $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-d}$ ”, *Phys. Rev. B.* **56** (1997) 913-924.
- (14) H. Uchiyama, N. Matsukura, and N. Chikumoto, "Carbonate effects in single-crystalline $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-d}$ ", *Phys. Rev. B* (2010) 81 060511(R).
- (15) 木須隆暢, NEDO 「技術戦略マップ 2009」超電導技術分野 参考資料 2
<http://www.nedo.go.jp/roadmap/2009/ene2.pdf>.
- (16) M. Inoue, T. Kiss, D. Mitsui, T. Nakamura, T. Fujiwara, S. Awaji, K. Watanabe, A. Ibi, S. Miyata, Y. Yamada, Y. Shiohara, “Current transport properties of 200 A-200 m-class IBAD YBCO coated conductor over wide range of magnetic field and temperature”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* , Vol. 17 (2007) 3207-3210.
- (17) R. Fuger, M. Inoue, K. Higashikawa, T. Kiss, M. Namba, S. Awaji, K. Watanabe, A. Ibi, H. Fukushima, Y. Yamada, T. Izumi, “Evaluation of current transport properties of $\text{Gd}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ coated conductors over a wide range of temperature and external magnetic fields”, *European Superconductivity News Forum (ESNF)*, Issue 11 (2010) ST145.
- (18) K. Higashikawa, T. Kiss, M. Inoue, K. Imamura, T. Nakamura, S. Awaji, K. Watanabe, H. Fukushima, Y. Yamada, Y. Shiohara, “Coupled Analysis Method for High-Field Magnet Coil Using Coated Conductor Based on J-E Characteristics as a Function of Temperature, Magnetic Field Vector and Mechanical Strain”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 19, no. 3 (2009) pp. 1621-1625.
- (19) K. Higashikawa, T. Kiss, M. Inoue, S. Awaji, K. Watanabe, H. Fukushima, Y. Yamada, Y. Shiohara, “Significant Reduction in Volume, Stored Energy and Magnetization Loss of High-Field Magnet Coil Based on the Improvement of Critical Current Characteristics in GdBCO Coated Conductor”, *Physica C*, vol. 469 (2009) pp. 1776-1780.
- (20) M. Miura, S. A. Baily, B. Maiorov, L. Civale, J. O. Willis, K. Marken, T. Izumi, K. Tanabe and Y. Shiohara, “Vortex liquid-glass transition up to 60 T in nanoengineered coated conductors grown by metal organic deposition”, *Applied Physics Letter* **96** (2010) 072506.
- (21) M. Miura et al., “Vortex Liquid-glass Transition Up to 60 T in Nano-engineered Coated Conductors”, *Magnet Science & Technology*

(National High Magnetic Field Laboratory 2009 Annual reports, USA),
chapter 2, P35-36.

- (22) Y. Kamihara, T. Watanabe, M. Hirano, and H. Hosono, “Iron-Based Layered Superconductor $\text{La}[\text{O}_{1-x}\text{F}_x]\text{FeAs}$ ($x = 0.05-0.12$) with $T_c = 26$ K”, *J. Am. Chem. Soc.* 130, 3296 (2008).
- (23) Z. A. Ren, et al., “Superconductivity at 55 K in Iron-Based F-Doped Layered Quaternary Compound $\text{Sm}[\text{O}_{1-x}\text{F}_x]\text{FeAs}$ ”, *Chin. Phys. Lett.* 25 (2008) 2215.
- (24) M. Rotter, M. Tegel, D. Johrendt, “Superconductivity at 38 K in the Iron Arsenide $(\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x)\text{Fe}_2\text{As}_2$ ”, *Phys. Rev. Lett.* 101 (2008) 107006.
- (25) T. Katase, Y. Ishimaru, A. Tsukamoto, H. Hiramatsu, T. Kamiya, K. Tanabe, and H. Hosono, “Josephson junction in cobalt-doped BaFe_2As_2 epitaxial thin films on $(\text{La},\text{Sr})(\text{Al},\text{Ta})\text{O}_3$ bicrystal substrates”, *Appl. Phys. Lett.* 96, 142507 (2010).
- (26) H. Hilgenkamp and J. Mannhart, “Grain boundaries in high- T_c superconductors”, *Rev. Mod. Phys.* 74, 485 (2002).

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

(1) 研究開発目標

本項では、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ことを目標とする。

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(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、超電導特性が均一な線材作製技術及び細線加工技術の開発を行う。前者では、基板/中間層での表面平坦性及び結晶粒の完全性、結晶粒配向性等の幅方向及び長さ方向における均一性を向上させるとともに、超電導層の膜厚及び結晶粒配向度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特性均一線材作製技術開発を行う。後者では、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、2~5 mm 幅への切断加工が必要となる。一方、変圧器用長尺線材に対しては、5 mm 幅に切断した線材をさらに 5 分割にフィラメント化する分割・溝加工(以後、「スクライビング」と記述)が必要となり、また、普及・導入時レベル対応では、10 分割のフィラメント化が可能なスクライビングが必要となる。

これらの技術開発により、ケーブル用線材としては、2 mm 幅で 77 K, s.f. 中で 300 A/cm-w の I_c 値をもつ 50 m 長線材、また 500 A/cm-w の I_c 値をもつ 200 m 長線材を実現することをそれぞれ中間目標、最終目標とする。一方、変圧器用線材としては、50 m 長 5 mm 幅線材を 5 分割加工し、交流損失が無加工線材に比べて 1/5 に低減できることを実証することを中間目標とし、100 m 長 5 mm 幅線材を 10 分割スクライビングし、交流損失が無加工線材に比べて 1/10 に低減できることを実証することを最終目標とする。また、実証に使用する線材は、3 円/Am 以下の極低技術コスト条件で作製されたものとする。

(2) 研究の経緯と実施体制

特性均一線材作製技術開発においては、ISTEC が極低技術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 ((a-1) i) し、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った。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 IBAD-MgO 中間層を用いる基板(IBAD 系基板)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各層の成膜条件等の条件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った。

PLD 法による超電導層形成技術開発では、レーザ照射条件、基板温度、ターゲット

ットスイング条件等の適正化により超電導層の長手方向及び幅方向の不均一性の改善を図った。MOD 法による超電導層形成技術開発では、塗布方法及び条件の適正化による膜厚の均一化や仮焼、本焼条件の適正化による超電導層の長手方向及び幅方向の不均一性の改善を図った。平成 22 年度からは、ISTEC ((a-2) i、(a-3)) に加えフジクラ ((a-2) iii) が PLD 超電導層の特性均一化技術の開発を ISTEC と連携しながら行った。一方、住友電気工業は、主にケーブル用の結晶粒配向金属基板-PLD 線材に対し、中間層や超電導層の成膜条件の適正化等により特性均一性の向上を図った ((a-4))。

細線加工技術開発に関しては、ISTEC では、これまで実績のある YAG レーザを用いた切断技術、YAG レーザ処理と化学エッチング法の組合せによるスクライビング溝加工技術を主として検討し、 I_c 値劣化率低減、フィラメント間高抵抗化、長尺化に対応した加工高速化、剥離防止等の課題の解決を図った ((b-1) i、ii)。また、長尺加工線材に対応した評価技術として SQUID センサアレイ渦電流法等の開発を進め、加工技術へのフィードバックを図った ((b-3) i)。一方、住友電気工業は、ケーブル用の 2 mm 幅線材への切断加工技術の開発を担当し、スリッタ等による機械加工の条件の適正化を図った ((b-2))。

本研究開発においては、九州工業大学 ((a-1) ii)、九州大学 ((a-5) i、ii、(b-3) ii)、京都大学 ((a-5) iii、(b-3) v、vi) 鹿児島大学 ((b-3) iii)、産業技術総合研究所 ((b-3) iv) が IBAD 基板の均一性評価や線材特性の分布評価を一部担当し、また JFCC が加工前後の線材の微細組織観察 ((a-2) ii、(b-4)) を担当し、特性均一線材作製技術開発や細線加工技術開発へのフィードバックを図った。

(3) 具体的成果

(a) 特性均一線材作製技術開発

(a-1) IBAD 系基板の均一性向上技術開発

i) IBAD 系基板の均一性向上技術開発

本項では、高製造速度が実現可能な IBAD-MgO 基板の均一性向上技術開発における成果をまとめる。本プロジェクト開始時点では、40 m 級の長尺 IBAD-MgO 基板の作製に成功したところであり、高速化・高配向化・長尺化の開発が急ピッチで進められている状況であった。中間層の均一性については、長手方向、幅方向、マイクロ、マクロともに情報が不足しており、本テーマでは課題の把握から始めてその解決までを、他テーマの開発進展と並行して行った。目標としては、中間目標を達成できる中間層付き基板の開発であり、超電導層の成膜、加工の結果と合わせて目標を達成するものである。

まず、幅方向については、本プロジェクトで装置導入した Reel to Reel 式高速 XRD 評価装置を用いて PLD-CeO₂/Sputter-LaMnO₃(LMO)/IBAD-MgO/Sputter-GZO/ハステロイ™ 構造の中間層付き基板の結晶粒面内配向度の幅方向

分布を測定したところ、図 2.4.3-1 に示すように、線材幅 10 mm に対して、両端のビームがテープ外にかかってしまう測定不良領域を除いて CeO_2 厚に依らずほぼ均一な結晶粒面内配向性を示した。これにより、面内配向不良部は多くても両端 100 μm 以下の領域であることがわかった。TEM 観察によって詳細を確認したところ、研磨・テープ走行による端部に形状的なダレが数十 μm 程度あり、中間層は結晶粒の面内配向を保ってはいるものの、c 軸が基板と垂直方向を維持しているため、ダレに伴い c 軸が傾いていることがわかった。この領域は結晶粒の配向は良いものの、c 軸が傾いた状態であるため超電導電流の幅方向への乗り移りが無いと考えられ、 I_c 特性向上には寄与し難い領域になっていると理解される。プロジェクト目標の細線化は最終目標でも線材幅が約 500 μm であるため、これによる影響は少なく、幅方向の結晶粒配向性に関しては問題ないレベルの成果が得られた。

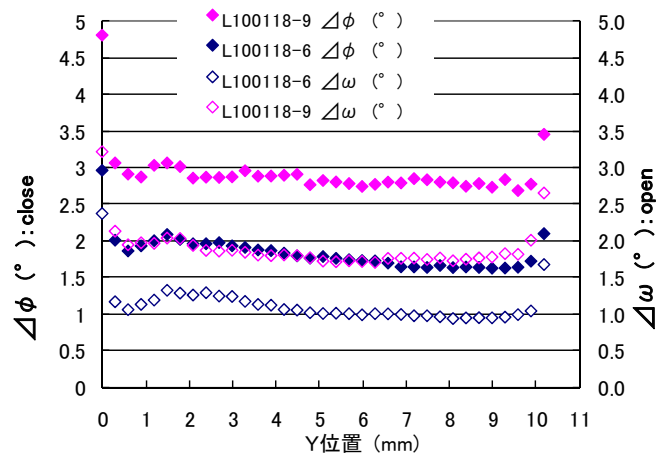


図 2.4.3-1 PLD- CeO_2 /Sputter-LMO/IBAD-MgO/Sputter-GZO/ハステロイ™ 中間層付き基板の結晶粒面内配向度の幅方向分布

一方、長手方向については、線材作製条件によりばらつきがあり、長時間の安定性に問題がある条件では、後端で結晶粒配向性が劣化することがあった。各プロセスで求めた長時間安定な条件を用いて成膜することにより、200 m 線材の前端で 3.17 度、後端で 3.07 度とほぼ同等の結果を得た。この線材の長手方向の位置による面内配向依存性を調べた所、図 2.4.3-2 に示すように 200 m 長線材においても大きなバラツキのない線材を得ることができた。

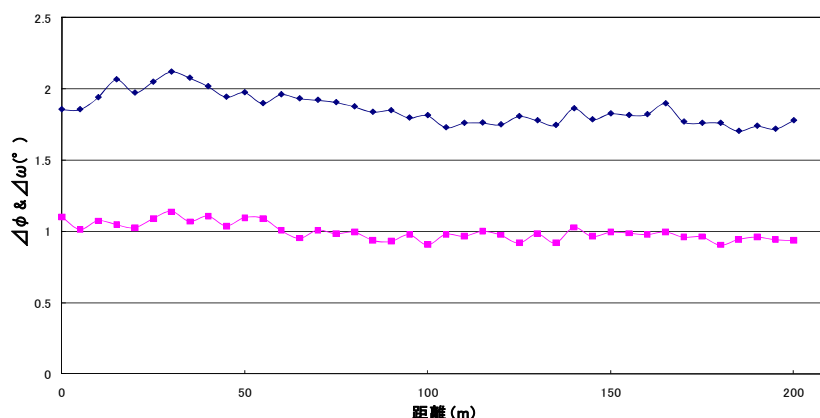


図 2.4.3-2 PLD-CeO₂/Sputter-LMO/IBAD-MgO/Sputter-GZO/
ハステロイ™構造の 200 m 長 中間層付き基板の結晶粒の
面内配向度の長尺位置依存性

中間層付き基板の均一性が及ぼす超電導特性への影響について考えると、特に細線化時の問題としては、様々な原因で生じる欠陥の存在が挙げられる。そこで、金属基板の圧延痕や傷、各工程で発生する汚れや傷のサイズ、頻度、超電導特性への影響を把握するため、100 m 長線材の作製にあたり、工程毎に走査型レーザ観察装置を用いてレーザ反射率の変化を測定することで欠陥を検出、これを 100 m 全長において実施し、超電導層成膜後に SQUID 検査装置、連続ホール素子法などを用いて測定した超電導特性の分布と比較した。

検出された欠陥は各層の成膜後にも引き継がれ、成膜される毎にゴミなどの付着物を巻き込むことなどから、数が増加し、特に CeO₂ の成膜時に顕著に増加した。この欠陥の分布と SQUID、連続ホール素子法の結果とを対応させると、CeO₂ 表面の欠陥数が多い部分で SQUID により剥離が検出され、剥離領域が広い場合に I_c 特性の劣化まで影響が出ていることがわかった。この剥離は 10 mm 幅時点では I_c 特性その他に大きな影響を及ぼさないが、細線化加工時に大きな問題となる。加工後にこの剥離部分を起点として線材が剥離し、拡張する要因となる。CeO₂ 成膜前後で欠陥数が大きく増加することから、欠陥を抑制するため、10 m 線材を用いて様々な条件で成膜を行い、成膜前後の欠陥分布を比較した。一例として図 2.4.3-3 に PLD-CeO₂ 成膜時のレーザパルス周波数による基板表面の欠陥数変化を示す。図から、周波数の増加に伴い欠陥数が増加すること、特に通常条件からの増加により急激に増加していることがわかった。周波数増加による高速成膜は均一性の低下を引き起こすため、高速化については別の手立てを講じなければならない。ターゲット上のレーザエネルギー密度と欠陥数の関係については、エネルギー密度増加によって顕著な欠陥数の増加は見られなかった。コスト削減をめざした高速化には、エネルギー密度の増加が有効であることがわかった。

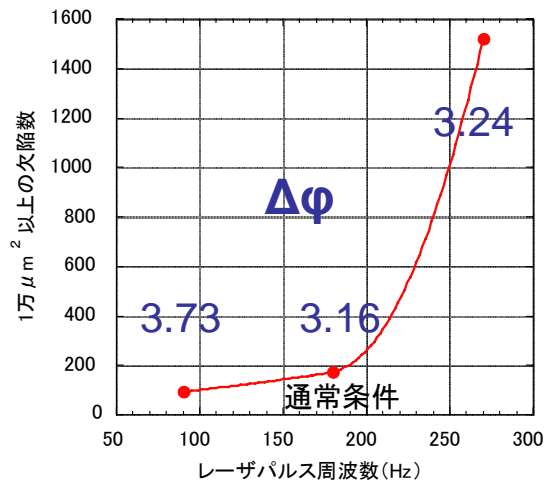


図 2.4.3-3 PLD-CeO₂成膜時のレーザパルス周波数と欠陥数との関係

Y系超電導線材は多層構造を有しているため、その成膜プロセスは多数の工程を経て、それに伴う付着物発生が欠陥となる。そこで、CeO₂成膜前後で付着物を拭き取ることにより欠陥発生を抑制する手法を試みた。LaMnO₃(LMO)成膜直後には10 m長の基板に255個の欠陥が検出されたが、アセトンを用いて洗浄することによりその数が68個まで減少した。この欠陥数は金属基板の欠陥数とほぼ一致しており、CeO₂成膜までの段階では欠陥数を増加させないことが明らかになった。

洗浄によるCeO₂成膜後の欠陥数を比較したところ、洗浄無しのものでは171個、洗浄した場合には105個と顕著な改善効果が見られた。また、この時CeO₂の結晶粒面内配向も3.73度(洗浄無し)から3.04度(洗浄有り)に向上した。一方、CeO₂成膜後に洗浄した場合は、欠陥数、結晶粒面内配向度ともに変化は見られなかった。CeO₂成膜までの欠陥は主に付着物のような突起であるのに対し、CeO₂成膜後の欠陥は凹みであるため、洗浄の影響が無かったものと理解される。LMOまでの成膜は非常に薄いために、付着物を固定する効果が殆ど無いため、拭き取りの効果が大きい。CeO₂は比較的厚いために、付着物の上から成膜された際にテープ搬送時の曲げ伸ばしによって応力集中が発生しやすく、そのために成膜中に剥がれ落ちて凹んだ欠陥になると推測される。

さらに欠陥を抑制するには、研磨後の金属基板に存在している欠陥を減らす、即ち欠陥修復の技術開発が必要となる。欠陥修復の手法としては、MOD法により溶液を塗布し、表面張力によって平滑化することで欠陥修復を図る方法が有効である。本構造の中間層においては、MgO層の下地となるベッド層にこの手法が適用可能であり、研磨コストの削減にも繋がる(2.4.5(3)(a-1)項参照)ため、国内外で開発が進められている。現在Gd₂Zr₂O₇(GZO)、Ce₂Zr₂O₇(CZO)を用いて長尺線材の作製に成功しており、MOD法の適用による欠陥修復の効果について評価を進めている。

今後、上述の成果を統合し、CeO₂層成膜時のレーザエネルギー密度増加やベッド層成膜におけるMOD法の適用により技術コスト目標を満足しつつ、細線化が可能なレベルまで欠陥発生を抑制した中間層付き長尺基板の作製を行う。

ii) IBAD 系基板均一性の MOD 超電導層への影響

IBAD 基板上に形成した MOD-YBCO 超電導層とその下地である中間層のそれぞれの結晶粒配向機構や、それらの配向性が超電導特性に与える影響について知見を得ることを目的とした。具体的には、EBSP(Electron Back Scatter Diffraction Pattern)法を用いて結晶粒配向微細組織観察を行い、これらの配向機構について試料表面における中央部と端部を比較した。また、面内配向度の異なる試料を用いて試料断面の配向組織をそれぞれ観察し評価を行った。

図 2.4.3-4 に示すように、MOD-YBCO 薄膜は特に中央部表面に凹凸が見られ、中央部の粒径の方がやや大きくなっていた。一方、下地の CeO₂ 薄膜は YBCO 薄膜のような凹凸は見られず、中央部と端部の表面組織の差異はなかった。CeO₂ 薄膜は PLD 法によって成膜されたものである。これらの違いをより詳しく比較するため、EBSP 法による微細組織観察を行った。図 2.4.3-5 に中央部、端部における MOD-YBCO 薄膜の粒界マップを示す。赤い色が強いほど YBCO 結晶粒が(001)配向をしていることを示している。また黒い線は 15 度以上の傾角をもった結晶粒界を表しており、中央部はそのような粒界が少なく、端部において顕著であった。このことから、中央部に比べて端部において局所的な J_c 値の低下が起こる可能性があることがわかった。このような組織の違いを探るため、さらに下地である IBAD 基板上の CeO₂ 薄膜に関しても EBSP による観察を行った。図 2.4.3-6 は中央部と端部に相当する CeO₂ 薄膜の粒界マップである。図からもわかるように PLD 法によって形成された下地の CeO₂ 層は極めて均質であることがわかった。このことから、端部と中央部の YBCO 膜の差異は、超電導層成長中に生じたものであると考えられ、今後、原因究明及び均質化制御法開発を図る予定である。

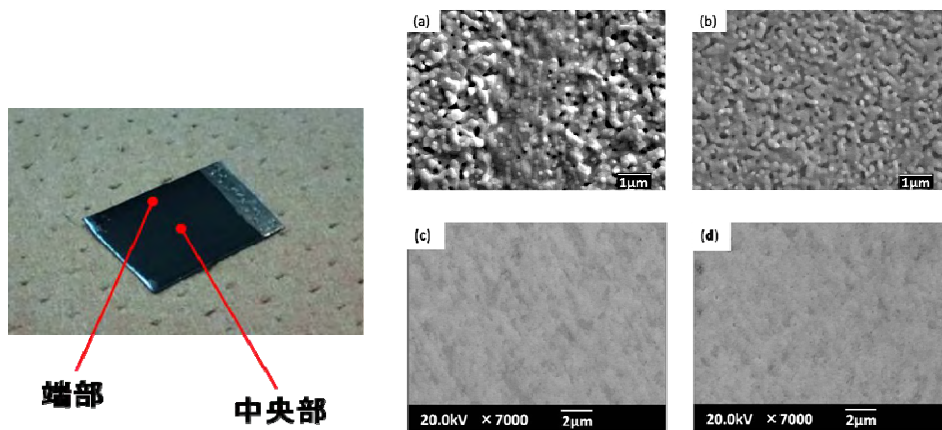


図 2.4.3-4 IBAD 基板上的の MOD-YBCO 薄膜の外観写真と SEM 写真
 (a)中央部の MOD-YBCO 薄膜表面 (b) 端部の MOD-YBCO 薄膜表面
 (c)下地である中央部の CeO_2 薄膜表面 (d)下地である端部の CeO_2 薄膜表面

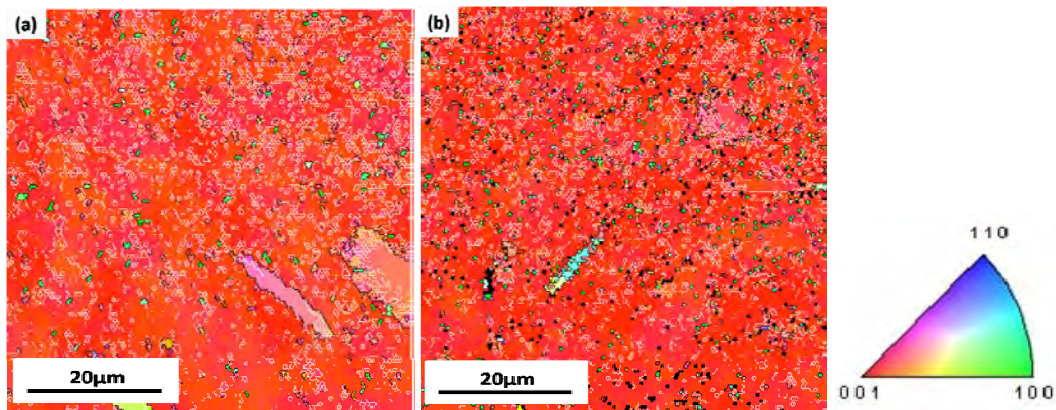


図 2.4.3-5 EBSP による MOD-YBCO 薄膜の粒界マップ。赤い色は結晶粒が (001)配向していることを示す。また黒い線は 15 度以上の傾角の粒界を表す。(a)中央部、(b)端部。

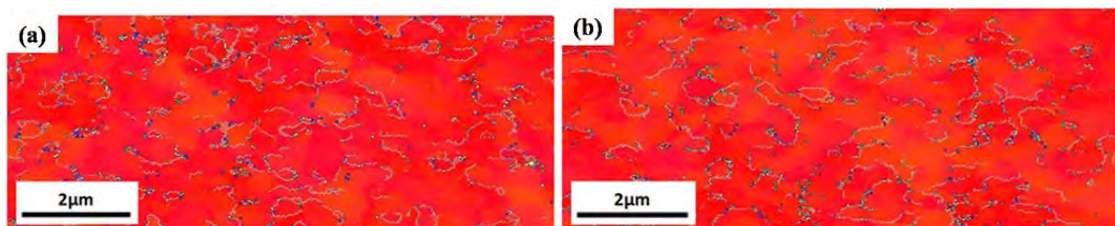


図 2.4.3-6 EBSP による IBAD 基板上的の CeO_2 薄膜の粒界マップ。
 (a)中央部、(b)端部

(a-2) PLD 線材の均一性向上技術開発

i) PLD 線材の均一性向上技術開発

PLD 法^(1~5)を用いた長尺 RE(レアアース (希土類元素))系超電導線材の長さ方向の I_c 値の均一性を向上させるためには、長さ方向の I_c 特性分布、不均一性を調べ、製造因子(成膜条件)との相関を把握し、これを改善するための成膜方法・条件の最適化を行う必要がある。図 2.4.3-7~10 は、主に PLD 法による RE 系超電導層の成膜方法に起因した長尺 GdBCO 超電導線材(基板構造: PLD-CeO₂/LMO/IBAD-MgO/GZO/ハステロイ™)の I_c 値の不均一性の例を示したものである。

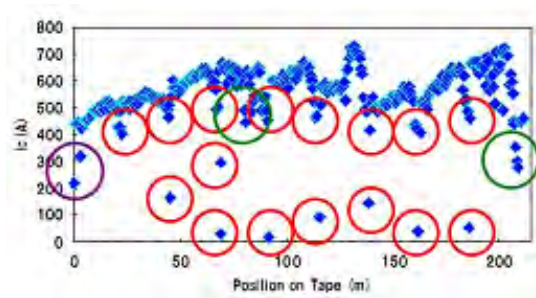


図 2.4.3-7 PLD 装置レーザー停止による I_c 値の不均一性

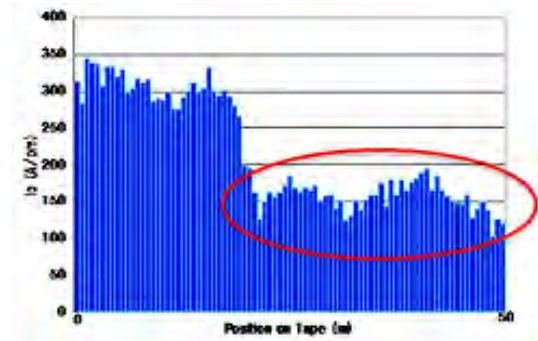


図 2.4.3-8 成膜条件の経時変化による I_c 値の不均一性

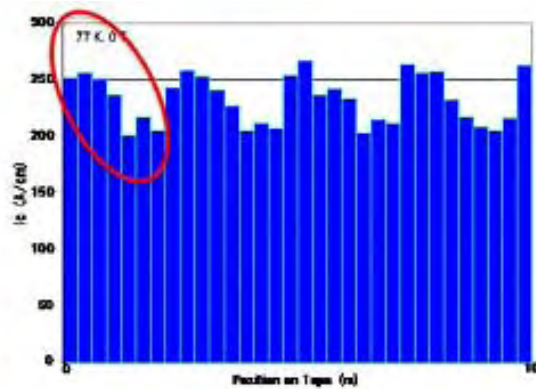


図 2.4.3-9 レーザパルスの周期的な変化に相関する I_c 値の不均一性

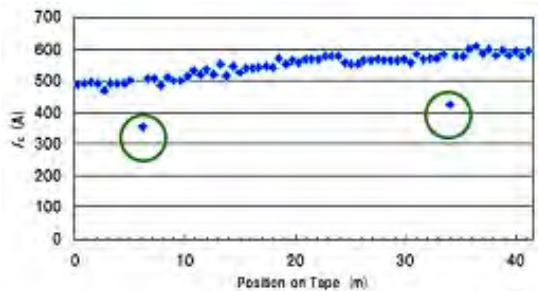


図 2.4.3-10 超電導層及び基板に存在する欠陥による I_c 値の不均一性

図 2.4.3-7 では、主に超電導層成膜の際にレーザーが停止したことによる I_c 値の低下が不均一性の原因である。レーザー停止と同時にヒータが OFF になるため、成膜条件のずれが生じたことが考えられる。また、再度その位置から成膜を行う際も、Reel to Reel による成膜のため再開位置に誤差が生じ、その結果最適成膜条件からのずれが起こる。レーザーの安定性や装置システムを改善することでこの種の不均一性は解消された。

図 2.4.3-8 は、経時変化による成膜条件のずれが原因で起こる I_c 値低下の例を示したものである。レーザの状態が不安定である場合、短時間でレーザ発振エネルギーが低下する現象が起き、超電導層の特性が低下する。また、光学系のミラー・レンズに経年劣化があると、ある時間経過に伴ってミラーの反射率・レンズの透過率が著しく低下する現象が起こる。さらに、基板上に成膜されなかった酸化物がヒータの均熱板に大量に付着している状態では、均熱板と基板の接触が不十分となり、短時間で成膜温度低下を引き起こしたり、付着した酸化物によって基板上に成膜された膜が汚染されたりする原因ともなる。これらの要因によって、図 2.4.3-8 のような、 I_c 値の不均一性が起こったと考えられる。レーザ、光学系のミラー・レンズ及びヒータ均熱板の状態を改善することによって、均一性向上が可能となった。

図 2.4.3-9 は、成膜時のプルーム(アブレーションプラズマ)の周期的な変化に対応した I_c 値分布を示したものである。長尺 RE 系超電導層の成膜には比較的長時間の成膜時間が必要なため、成膜用ターゲットの挙動表面形状の変化には注意を要する。可能なかぎりターゲット表面全体に均等にレーザビームが照射されるように制御しなければ、ターゲット表面凹凸が生じ、プルームの傾き・周期的な揺れの原因となる。その結果、図 2.4.3-9 のようなプルームの揺れに対応した周期的な I_c 値分布となり均一性を低下させてしまう。プルームの傾き・揺れを低減するようなターゲットの動き、また、多少の傾きや揺れに影響をされないように基板の送り速度を向上する等の改善を行うことで均一性は向上した。

図 2.4.3-10 は、長尺 GdBCO 超電導線材の I_c 値分布の中で局所的に低 I_c 値部が存在する状態を示したものである。これは、PLD 法による RE 系超電導層の成膜に要因する場合と、各種中間層及び金属基板に存在する欠陥が要因となっている場合とが考えられる。そのため両方の原因をつきとめ解決する必要があるが、現状ではまず各種中間層及び金属基板の欠陥の有無・解消を中心にして研究を進めている。図 2.4.3-11 は、局所的な I_c 値低下部の MO(magneto-optical)観察したものである。図のように、 I_c 値低下部には欠陥が存在することがわかる。また、中央に存在する長さ方向に沿った線状の部分は、金属基板である Hasteloy™ 上にある欠陥である。

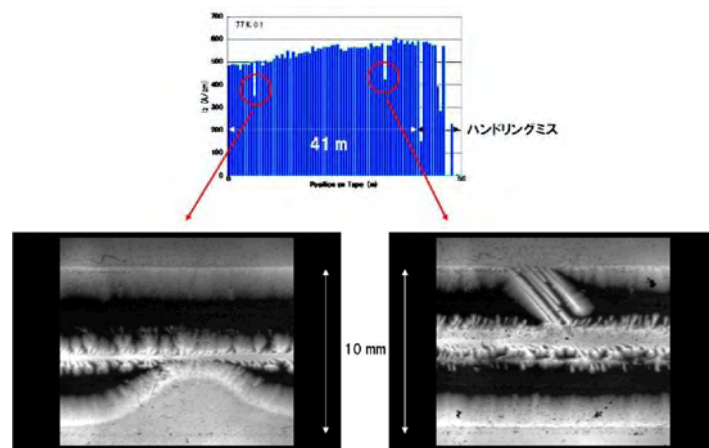


図 2.4.3-11 局所的な I_c 値低下部の MO 観察結果

ることがわかっている。このように、超電導層だけでなく、各種中間層・基板も含めた欠陥の原因・改善を行うことで均一性は向上してきている。

図 2.4.3-7～11 のような不均一性の原因となる課題を改善した結果、図 2.4.3-12～13 のような長手方向の I_c 値分布の標準偏差が 2 %以下となる均一性の高い線材を作製することが可能となった。図 2.4.3-12 及び図 2.4.3-13 の線材は、それぞれ技術コストが 2.9 円/Am、2.65 円/Am と見積もられ、極低技術コストの条件を満足している。

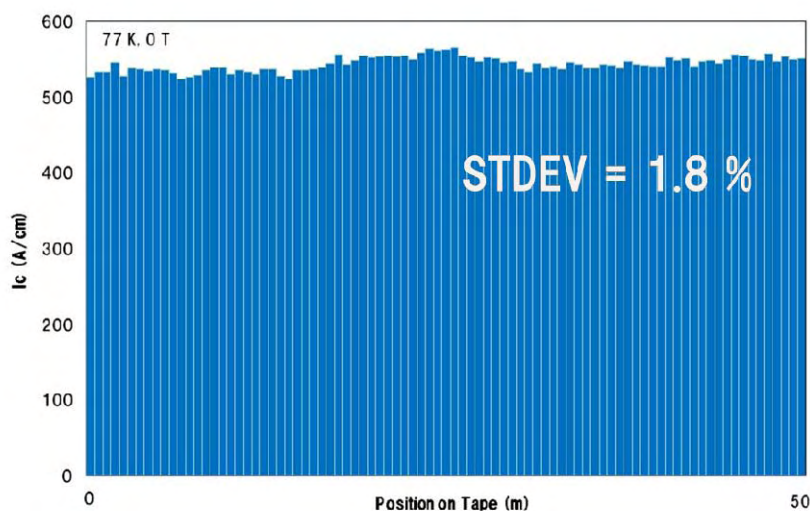


図 2.4.3-12 50 m 長 GdBCO 超電導線材の長さ方向 I_c 値分布

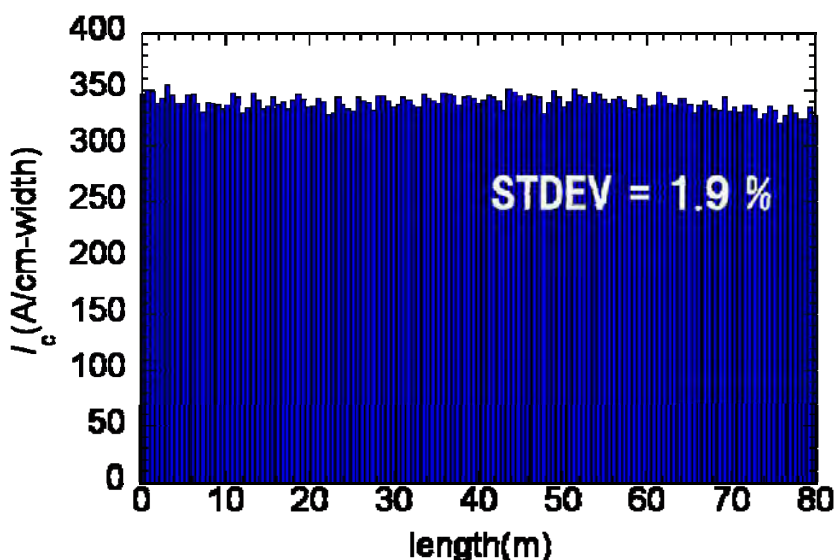


図 2.4.3-13 80 m 長 GdBCO 超電導線材の長さ方向 I_c 値分布

他方、超電導線材の幅方向の I_c 値の均一性は、超電導変圧器対応線材や超電導ケーブル対応線材等に使用する際には非常に重要な要素となる。図 2.4.3-14 は、PLD 法で作製した短尺(～20 cm)GdBCO 超電導線材を長さ方向にスクライビングした際の幅方向の I_c 値分布である。

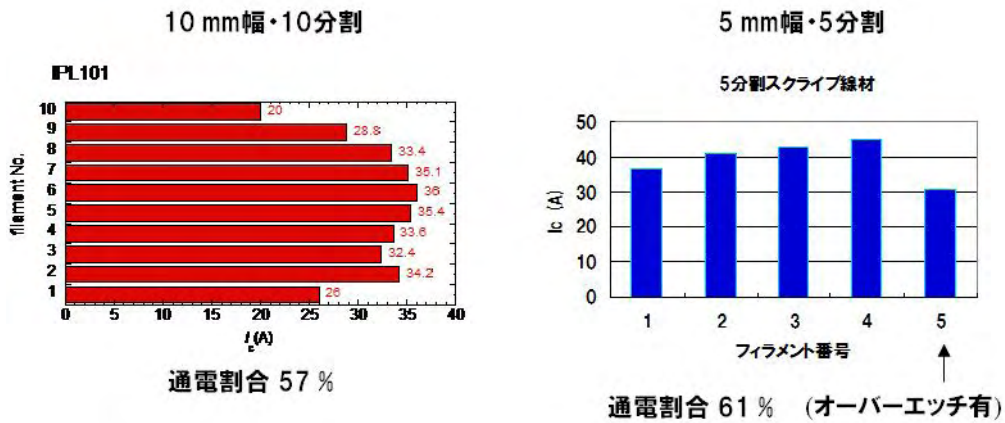


図 2.4.3-14 PLD 法で作製した GdBCO 短尺(～20 cm)超電導線材の幅方向 I_c 値分布

図 2.4.3-14 の左は、10 mm 幅・10 分割、右は 5 mm 幅・5 分割の結果である。ここで、最小 I_c 値を分割数倍し元の I_c 値で割ったものを通電割合と定義する。図 2.4.3-14 の右図中にあるように、一部スクライビング時のオーバーエッチ部があるため、正確な値ではないが、通電割合は、幅 1 mm の加工の場合、約 60 %程度であることがわかる。この通電割合は、現状の 10 mm 幅 PLD 線材のテープ端の約 1 mm 以内の領域の I_c 値が低下していることに起因すると考えられる。左図中において、幅 2 mm に加工したと想定した場合の通電割合は 75 %程度となる。

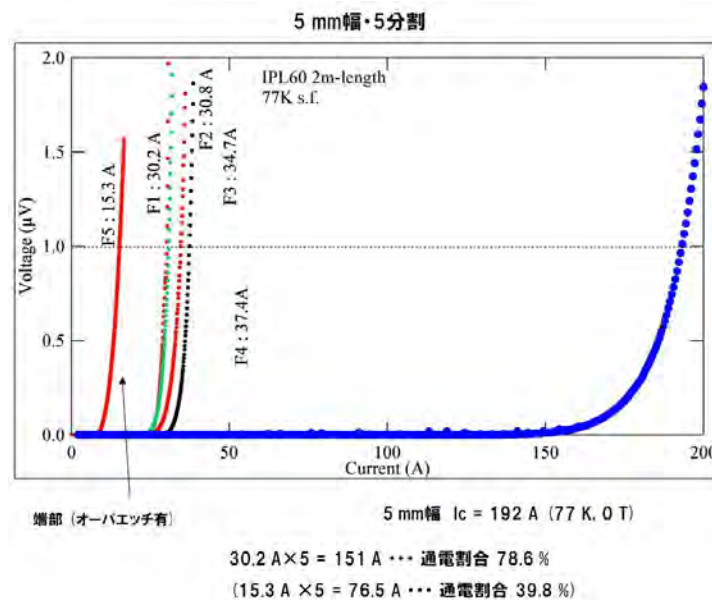


図 2.4.3-15 PLD 法で作製した 2 m 長 GdBCO 超電導線材の 5 分割加工後の I_c 値分布

図 2.4.3-15 は、2 m 長の GdBCO 超電導線材の 5 mm 幅・5 分割加工後の I_c 値分布の結果である。この線材にもオーバーエッチ部が存在するため正確な値ではないが、全体での通電割合は約 40 %である。ただし、線材端の 1 mm を除けば約 80 %

と高い値が実現されている。図 2.4.3-16 は、50 m の GdBCO 超電導線材の 5 mm 幅・5 分割加工後の I_c 値分布の結果である。加工前の線材の I_c 値はそれほど高くないが、中間目標である 50 m の長尺に対しても、通電割合 42 %、各フィラメントの I_c 値が 8.0-11.9 A/5 mm-w という比較的高い均一性が得られた。

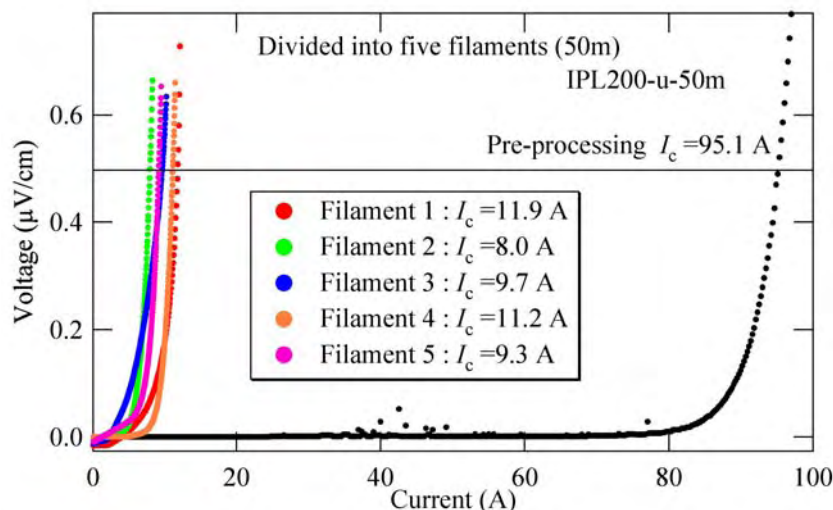


図 2.4.3-16 50m 長の PLD-GdBCO 超電導線材の 5 分割加工後の I_c 値分布

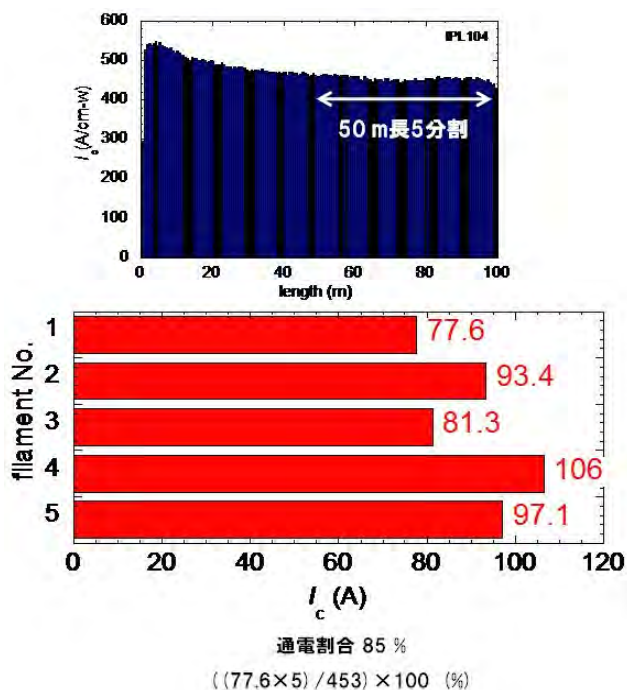


図 2.4.3-17 2 mm 幅に切断した 50 m 長 GdBCO 線材の幅方向 I_c 値分布

図 2.4.3-17 は、10 mm 幅・50 m 長線材を 2 mm 幅・50 m×5 本に切断した線材の End to End の I_c 値(幅方向 I_c 値分布)を示している。最小 I_c 値の 5 倍は 388 A であり、2 mm 幅で 77 K、自己磁場中で 300 A/cm-w の I_c 値をもつ 50 m 長線材と

いう中間目標値は達成された。元の 10 mm 幅の I_c 値 453 A/cm-w に対し通電割合は 85 %であることがわかる。このように、幅方向の I_c 値分布は、2 mm 幅の場合、長さ方向の I_c 値分布均一性の向上の影響も相まって、50 m 長においても 85 %程度にまで向上してきている。

ii) 低交流損失開発用線材の微細組織観察

透過型電子顕微鏡(TEM)観察から、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耐えうる線材作製技術開発を支援することを目的とする。本項目では、長尺 PLD 線材の長手方向の超電導特性改善を示すため、高 I_c 値領域と低 I_c 値領域の TEM 断面観察を行い、それらの組織の違いから、低 I_c 値領域となった原因を解明し、プロセスを改善し長手方向の均一化に貢献した結果について述べる。図 2.4.3-18 に高 I_c 値領域の PLD-GdBa₂Cu₃O_y(GdBCO)層の断面 TEM 像を示し、TEM 像の A 及び B 領域からの電子回折図形を(a)、(b)に示す。高 I_c 値領域では、GdBCO 層はほとんど c 軸配向結晶により構成されている。しかしながら、A で示す GdBCO 結晶は、基板に垂直な方向に対し c 軸が傾斜した結晶である。高 I_c 値領域でも GdBCO 層表層に、このような結晶粒の配向が乱れた結晶がいくつか観察されるが、集束イオンビーム(FIB)-走査電子顕微鏡(SEM)デュアルビームシステムによる 3 次元解析から、結晶粒の配向が乱れた結晶は超電導層の 1 %未満であることがわかっている。これに対し低 I_c 値領域(図 2.4.3-19)では、超電導層の大部分が a 軸配向結晶粒で構成されている。a 軸配向結晶粒は基板温度が低下した場合に、発生することが知られていることから、低 I_c 値領域は成膜時の温度低下が原因であると結論できる。そのため、今回の TEM による微細組織観察から、長尺線材への長手方向の均一化のためには、成膜温度の管理が極めて重要であることを示すことができ、長尺線材プロセス開発に貢献した。

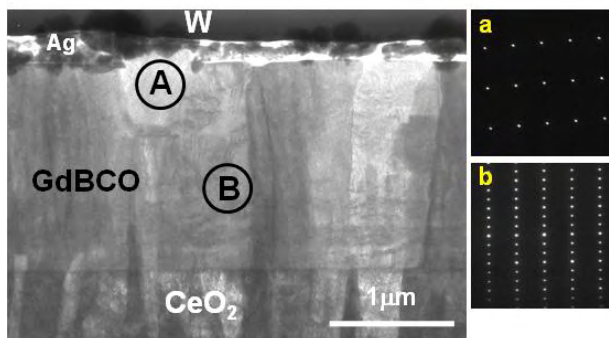


図 2.4.3-18 高 I_c 値領域の PLD-GdBCO 層の断面 TEM 像
(a)TEM 像 A 領域
(b)TEM 像 B 領域の電子回折図形

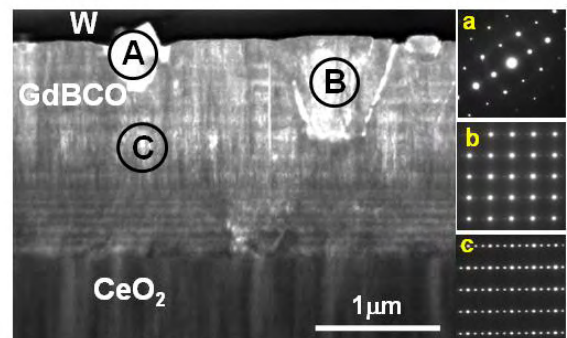


図 2.4.3-19 低 I_c 値領域の PLD-GdBCO 層の断面 TEM 像
(a)TEM 像 A 領域、(b)TEM 像 B 領域、(c)TEM 像 C 領域の電子回折図形

iii) Hot-wall 式 PLD 線材の均一性向上技術開発

PLD法はY系超電導体のように多元系からなる薄膜の形成に適した方法であるが、超電導線材の幅方向及び長さ方向の特性を均質化するために、装置の構造を検討してきた。図2.4.3-20にはホットウォール加熱式PLD装置の外観を示す。



図2.4.3-20 ホットウォール加熱式PLD装置

装置中央部が薄膜を成膜させる真空チャンバであり、その両脇に、送り出し・巻き取りリールを配置してあることから連続的にテープ基材（IBAD 層等中間層付き金属基板）が真空チャンバに供給され、基材上に超電導層が形成される。真空チャンバ内を図 2.4.3-21 に模式的に示す。

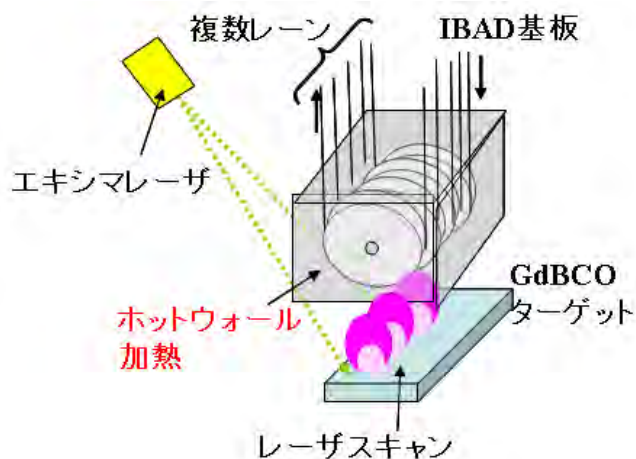


図2.4.3-21 真空チャンバ内模式図

ターゲット上に照射されたレーザー光により真空チャンバ内に放出された原料がホットウォールと呼ばれる炉内の基材（IBAD基板）上に成膜する。薄膜の成長面はホットウォールチャンバの熱容量及び輻射熱により一定温度に保たれていることから、本装置により均質な超電導結晶薄膜の形成が期待される。そこで、本装置

を用いて均一な超電導特性を有する線材製造条件を検討した。

図2.4.3-22にIBAD-MgO基板上に形成したホットウォール加熱式PLD装置で超電導層を形成した線材の I_c 値の線材長さ方向分布を示す。77 K,s.f.において直接通電により線材を700 mm間隔で I - V 特性を測定し、 $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ に到達した電流値を I_c 値とした。

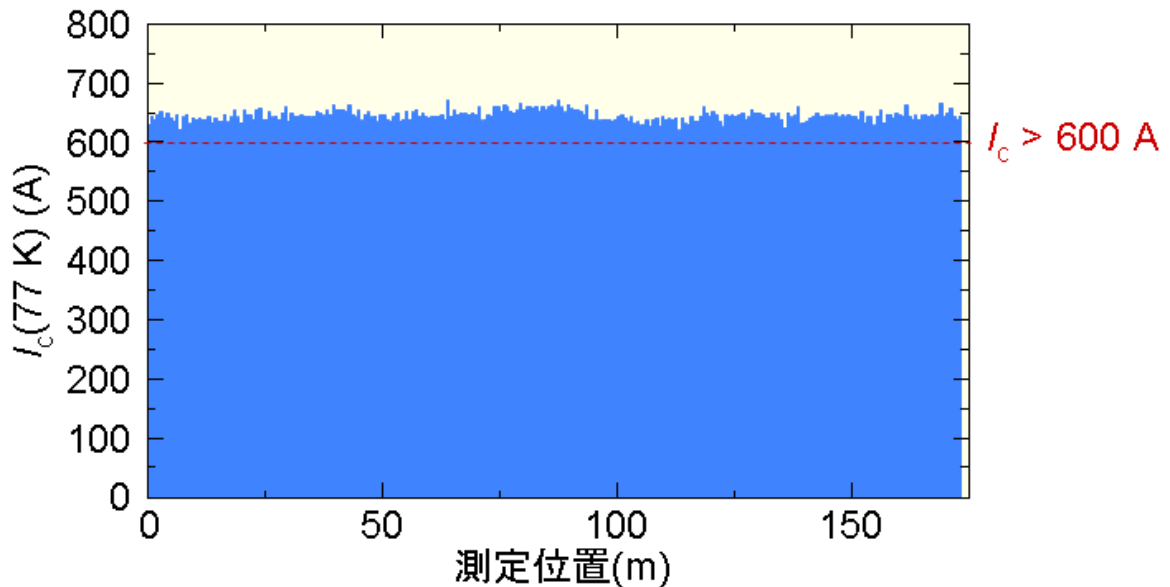


図 2.4.3-22 高 I_c 値線材の I_c 値の長さ方向分布

150 m 超の長さを有する線材において全長に亘って $600 \text{ A}/\text{cm-w}$ (@77 K,s.f.) 以上の I_c 値を実現している。標準偏差は $8.7 \text{ A}/\text{cm-w}$ であり、高 I_c 値の線材においても長さ方向に均質な超電導特性を得ることができた。

図 2.4.3-23 には 10 mm 幅線材の幅方向の I_c 値分布を示すが、端の 1 mm の領域を除いて高い均一性が得られている。

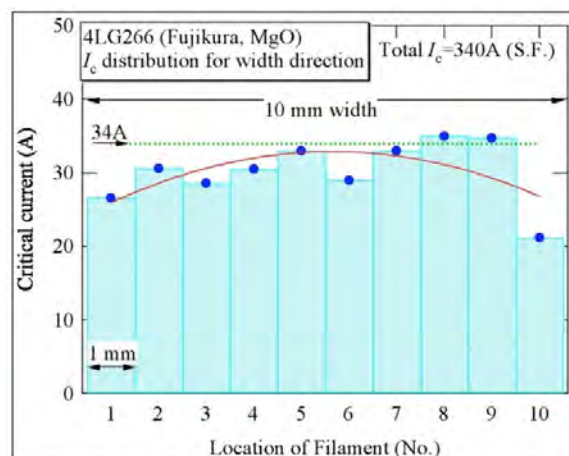


図 2.4.3-23 線材幅方向の I_c 値分布

このように、高性能な長尺の Y 系超電導線材の製造方法である IBAD-PLD 法により製造した線材の長さ方向の I_c 特性を測定し、150 m 長を超える超電導線材に

において 700 mm 間隔で測定した I_c 特性は標準偏差が 5 %以下の均質な超電導線材を得ることができた。

(a-3) MOD 線材の均一性向上技術開発

MOD 法による Y 系超電導線材は低コストで作製が可能なことからケーブル、変圧器、SMES などの将来の電力機器への適用が期待されている。これらの応用を実現するには、長尺の線材が必要であり、また、運転時の交流損失を低減するために作製後に幅方向に分割加工されて使用されることから、長手方向、幅方向に亘って均一な特性を有していることが重要である。そこで、本項では Y 系 MOD 超電導線材の均一性向上技術開発を行った。

ここで、本プロジェクトにおける中間目標は以下の通りである。

- ・ ケーブル用 : 2 mm 幅 $I_c = 300 \text{ A/cm}\cdot\text{w}(@77 \text{ K,s.f.})$, 50 m
- ・ 変圧器用 : 5 mm 幅 5 分割線材 ; 分割無に比べて交流損失 1/5

(内部目標として、5 mm 幅 5 分割線材は $I_c = 200 \text{ A/cm}\cdot\text{w}(@77 \text{ K,s.f.})$, 50 m を設定)

まず、長手方向及び幅方向での均一性を向上させるために、局所的な特性の低下要因を除去する必要があるとあり、作製した線材の局所的な I_c 特性低下部を調査し、線材作製方法の改良を行った。その後、幅方向の I_c 特性の均一性について調査を行い、線材作製時の幅方向端部の I_c 特性が低いことを確認し、その原因が線材作製時の幅方向端部の膜厚分布の不均一が原因であると考え、幅方向膜厚分布均一化のための改良を行った。それらの結果を踏まえて 20 m 長及び 50 m 長 Y 系 MOD 超電導線材を作製し、作製後の線材を 2 mm 幅に切断して幅方向 I_c 値分布の調査及び 5 mm 幅×5 分割に切断加工を行い、幅方向 I_c 値分布の調査及び分割前後で交流損失の比較を行った。

Y 系 MOD 超電導線材の作製工程の中で Y、Ba、Cu の有機酸塩を混合した溶液を IBAD-MgO 基板に塗布する方式として Dip-coating 方式を適用しているが、リール回転方式で作製した線材では長手方向で I_c 特性が局所的に低下している部分(図 2.4.3-24)があり、その部分を調査した結果、リールに付着した濃化液体が基板に付着することにより、仮焼熱処理時において焼損発生の原因になることを確認した(図 2.4.3-25)。

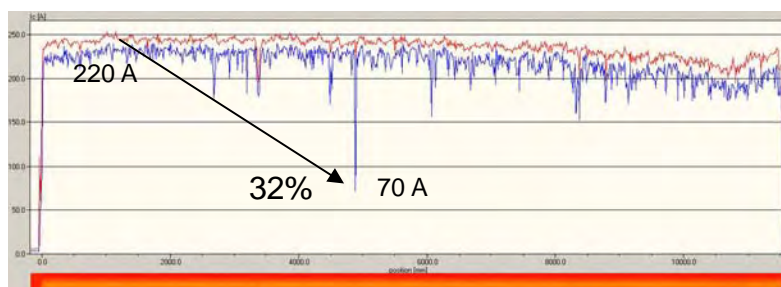


図 2.4.3-24 局所的な I_c 値低下部を有する長尺線材の I_c 値分布例

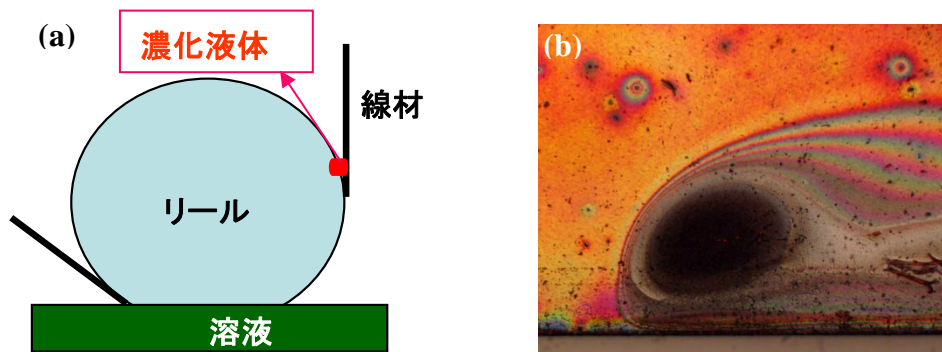


図 2.4.3-25 リール回転方式における濃化液体発生状況(a)及び同部の焼損状況(b)

この濃化液体の基板への付着を抑制するために、基板と塗布部が接触しないような塗布方式として、チューブ塗布方式へと改善した(図 2.4.3-26)。これにより、線材が溶液から出る際に接触部がないことから溶液が溜まることが防げると考えた。このような改善を行い、作製した線材の長手方向 I_c 値分布を調査した結果を図 2.4.3-27 に示す。この結果から、チューブ塗布方式の採用により、局所的な I_c 値低下部の発生が低減出来ることを確認した。

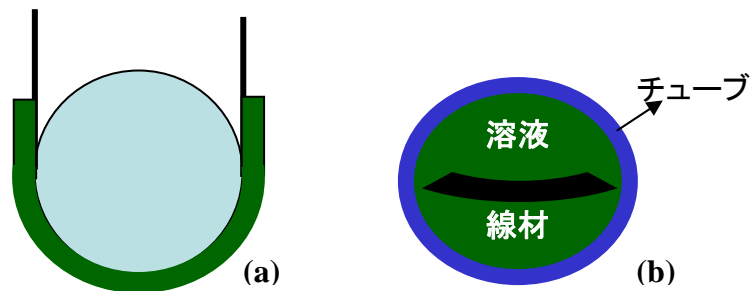


図 2.4.3-26 チューブ塗布方式の模式図。側面(a)及び上方(b)からのイメージ図

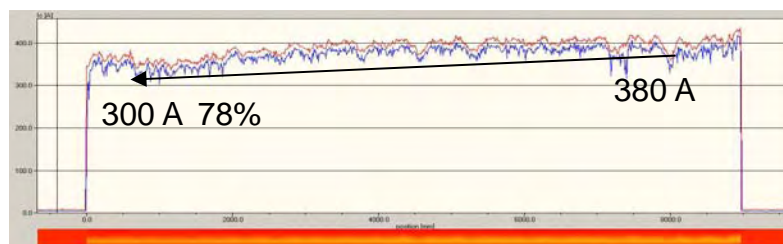


図 2.4.3-27 チューブ塗布方式により作製した線材の I_c 特性分布

次にチューブ塗布方式を適用して作製した Y 系 MOD 超電導線材の幅方向の I_c 特性分布及び膜厚分布を調査した結果、幅方向 I_c 特性分布及び膜厚分布が不均一であった。この結果から、幅方向 I_c 値分布が不均一である原因は幅方向膜厚分布が不均一である場合、部分的に厚膜となった部分でクラックが発生しやすく、また幅方向最端部の膜厚が薄いことによって生じると考え、IBAD-MgO 基板に塗布される溶液量が基板とチューブの距離に依存することをチューブと基板の距離を変化させた時の幅方向の膜厚分布の調査によって確認した。チューブサイズを変化させた場合の幅方向膜厚分布の調査結果を図 2.4.3-28 に示す。この結果から、基板

端部とチューブ内壁の距離が小さく、基板塗布面とチューブ内壁の距離は大きいほうが膜厚均一化を図るために有効であることがわかった。

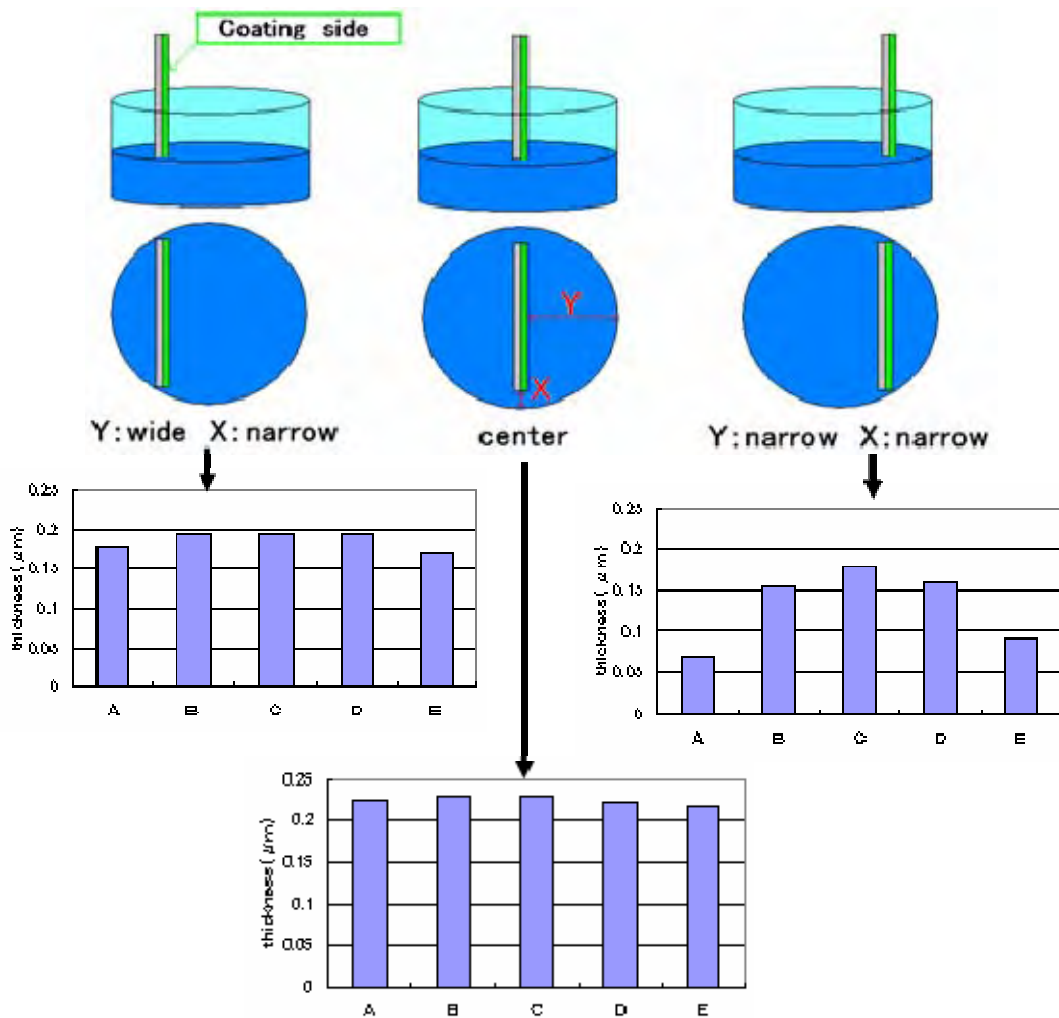


図 2.4.3-28 基板とチューブ内壁距離による膜厚分布の関係

上記の知見に基づいて作製した 10 mm 幅の 20 m 長 Y 系 MOD 超電導線材を 2 mm 幅に切断して、幅方向の I_c 特性分布を調査した結果を図 2.4.3-29 に示す。この結果、2 mm 幅に切断した線材の 5 本中 4 本で $I_c = 55 \text{ A}/2 \text{ mm-w}$ が得られた。位置 5 に該当するエッジ部では、 I_c 特性の低下がみられたが、原因が、線材作製時にリールの罫に線材が接触することによる変形であることを確認し、既に接触を防ぐ対策を施している。これらの知見の基、50 m 長線材を作製し、2 mm 幅に切り出し長手方向の I_c 特性分布を調査した結果を図 2.4.3-30 に示す。本試料の End to End の I_c 値を評価した結果、79.4 A/2 mm-w が得られ、中間目標である 300 A/cm-w を超える 397 A/cm-w を確認した。

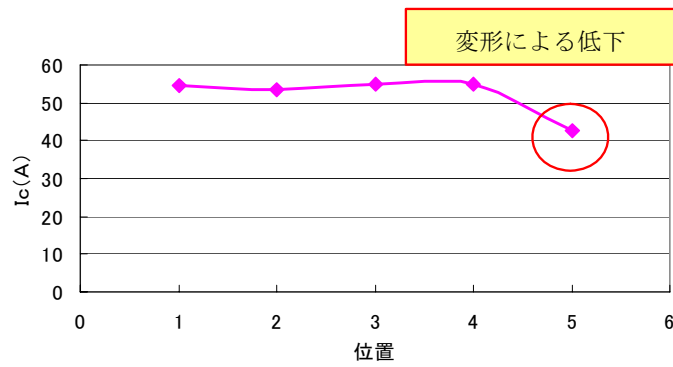


図 2.4.3-29 20 m 長 Y 系 MOD 超電導線材の 2 mm 幅毎の幅方向 I_c 値分布

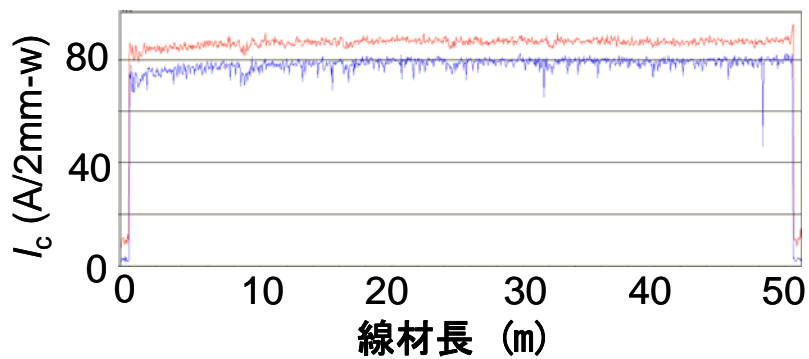


図 2.4.3-30 MOD 法により作製した 50 m 長線材から切り出した 2 mm 幅線材の長手方向の I_c 値分布

また、同様の条件で作製した 20 m 長 MOD 線材を 5 mm 幅×5 分割にスクライビングした後に、スクライビング前と比較した結果、交流損失の主たる成分であるヒステリシス損失は 1/5 以下に低下し、スクライビングによりヒステリシス損失が低減できることを確認した。ヒステリシス損失測定結果を図 2.4.3-31 に示す。但し、図 2.4.3-31 の評価は局所的な損失の評価であり、目標値の確認にはコイル化した上で損失評価もしくは均流確認が必要である。

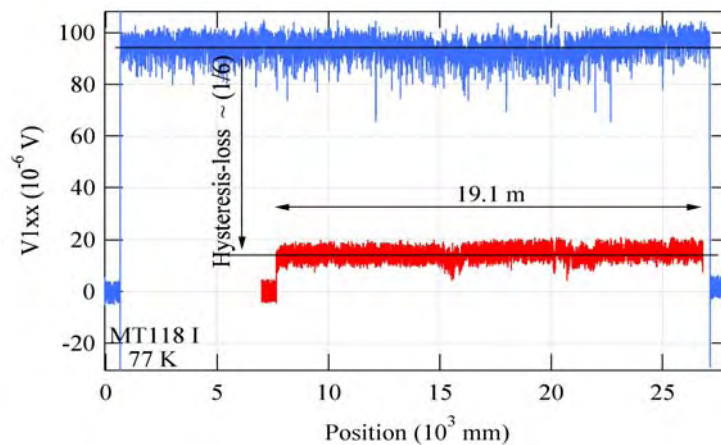


図 2.4.3-31 5 mm 幅×5 分割×20 m Y 系 MOD 超電導線材の分割前後でのヒステリシス損失比較

(a-4) 結晶粒配向金属基板-PLD 線材の均一性向上技術開発

結晶粒配向金属基板 - PLD 線材に関する均一性の向上には、中間層の平坦性及び結晶粒の配向度の均一性の向上、また中間層形成条件の安定性が求められる。中間層は RF スパッタで成膜し、 $\text{CeO}_2/\text{YSZ}/\text{CeO}_2$ の三層構造を有しており、中間層形成条件の安定化は成膜時のプラズマ、雰囲気、温度等の安定性向上により行った。30 mm 幅の結晶粒配向クラッド基板に成膜した CeO_2 や YSZ 層のピーク強度比 $I(200)/[I(200)+I(111)]$ の評価から、線材幅 30 mm、約 80 m の全長に亘って 92 % 以上の強度比を維持し、均一な結晶性と配向度が得られることを確認した(図 2.4.3-32)。

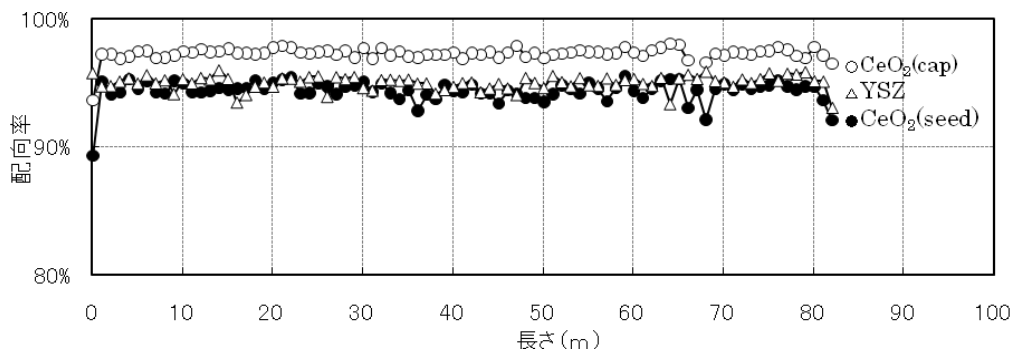


図 2.4.3-32 中間層 $\text{CeO}_2/\text{YSZ}/\text{CeO}_2$ の長手方向の結晶粒配向度分布

PLD 法による超電導層形成に関しては、中間層と同様に成膜条件の安定性(温度、雰囲気、プルーム)の向上を図ることで均一化を達成するとともに、新規大型レーザの導入により I_c 特性の向上を図った。新規導入レーザを使用して成膜した 30 mm 幅線材の幅方向 I_c 値分布から、従来の 1.5 倍のレーザ出力(300 W)とプルームサイズが増大したことで一層成膜当たりの膜厚が増加し、線材全体の I_c 値が向上した結果が得られた。また、新レーザによるレーザエネルギーの安定性向上とヒータ周辺の温度分布の改善により幅方向 I_c 値分布も改善され、30 mm 線材の全領域で 200 A/cm-w 以上の I_c 値、中央部で最大 500 A/cm-w 級の I_c 値を得た(図 2.4.3-33)。

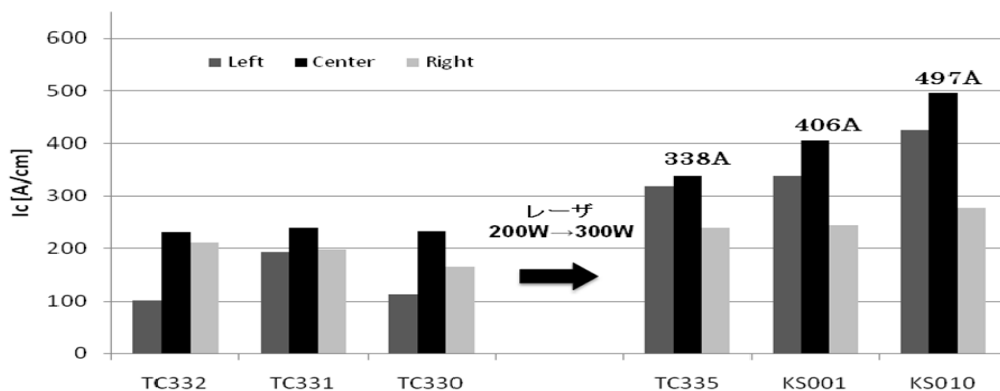


図 2.4.3-33 30 mm 幅線材の I_c 値分布の向上推移

図 2.4.3-34 に 300 W レーザで作製した 30 mm 幅線材を 4 mm 幅にスリットした場合の 15 m 長線材の I_c 値分布の代表例を示す。15 m 長の 4 mm 幅線材では最大 $I_c = 178 \sim 190$ A/4 mm-w ($I_c = 445 \sim 475$ A/cm-w) の I_c 特性が得られた。一方、図 2.4.3-35 に 200 W レーザで作製した 2 mm 幅線材の I_c 特性の代表例を示す。中間目標値である 2 mm 幅-300 A/cm-w (60 A/2 mm-w)-長さ 50 m に対し、2 mm 幅-285 \sim 310 A/cm-w (57 \sim 62 A/2 mm-w)-長さ 28 m が得られた。2 mm 幅線材においても 300 W レーザで作製した高 I_c 特性を有す 30 mm 幅線材をスリット加工することで、今年度中の中間目標値の達成が見込まれる。これら特性均一線材作製技術開発においては、中間層及び PLD 超電導層の成膜プロセス条件と XRD 評価装置による結晶性評価及び SEM・AFM 観察から得られる各層の最表面組織の関係を調査し、最適な成膜プロセスの開発を実施した。

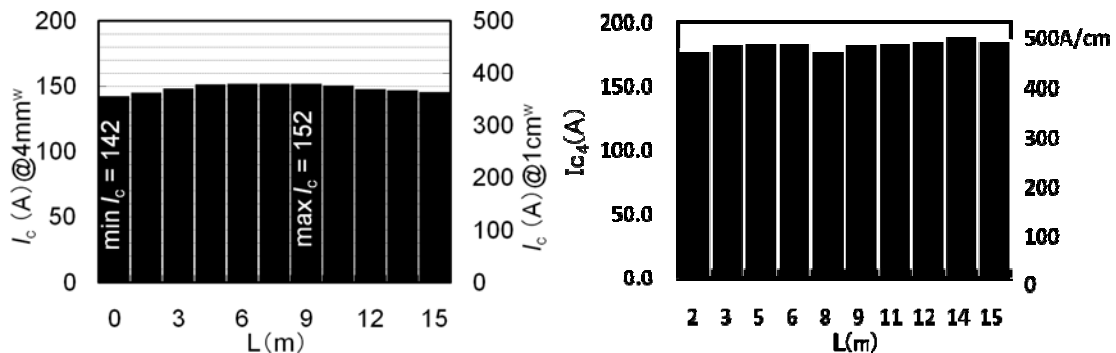


図 2.4.3-34 4 mm 幅線材の I_c 値分布

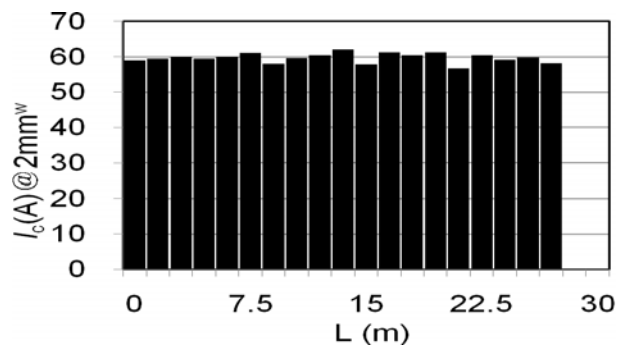


図 2.4.3-35 2 mm 幅線材の I_c 値分布

本研究開発の実施により、これまで 30 m 長級の線材において高 I_c 値かつ長手方向に均一な特性を有する結晶粒配向金属基板-PLD 線材の作製技術を開発し、66 kV 大電流ケーブル用線材の安定製造に反映させた。今年度の中間目標と平成 24 年度の最終目標に向けて、長尺プロセスの確立を図るとともに、 I_c 値向上の要因となる中間層の結晶性や平滑性の改善と、PLD プロセスにおける超電導膜の組成制御等により I_c 値の向上と幅方向の均一化を図り、目標達成をめざす。

(a-5) 線材特性分布評価

i) PLD 線材のマイクロ特性分布評価

局所的な損失発生箇所を低温レーザ顕微法によって特定し、プロセスとの関係を明らかにすることによって、均一性の向上に貢献した。また、損失分布と細線加工時の J_c - B 特性との関係を調べることによって、均一性の向上が中、低磁場中での J_c 向上に有効であることを示した。図 2.4.3-36 (a) に均一性改善プロセスによる線材の自己磁場における局所損失分布、同図(b)に従来プロセスでの分布、同図(c)にそれぞれの線材の J_c - B 特性を示す(6, 7)。

また、素線のマルチフィラメント加工ならびに細線化加工において重要となるテープ線材内の J_c 値の面内分布評価手法として、磁気顕微法を基に非接触かつ非破壊に J_c 値分布を定量的に評価可能な手法を開発した。1 cm 幅の PLD-GdBCO 線材ならびに機械加工によって 4 mm 幅の線材に加工した細線化試料の線幅方向の J_c 値分布を評価した結果を、それぞれ図 2.4.3-37 (a)、(b)に示す。いずれの場合も、方形波状の均一な J_c 値を線材幅方向に亘って得られていることがわかる。線材の左右で反転しているのは、磁気遮蔽電流が反転していることを意味しており、測定原理に依る。本評価は、加工プロセス前後の信頼性の検証に加え、細線化した素線を用いて集合導体を形成する際の設計指針に有益な知見を提供した。

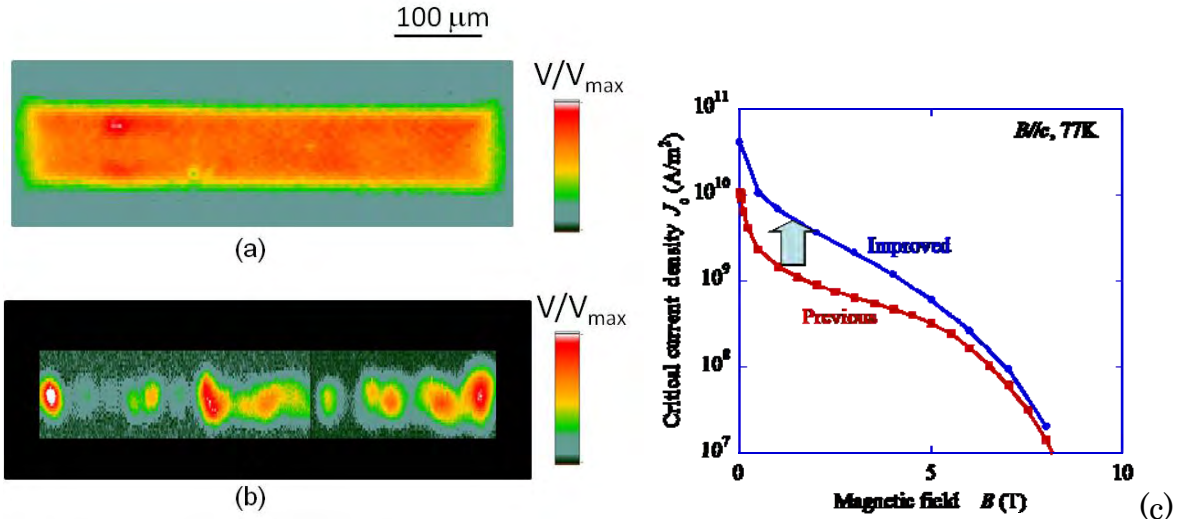


図 2.4.3-36 局所均一性の改善と J_c 値の向上：レーザ顕微法による局所損失の可視化

- (a)改善プロセス、(b)従来プロセス、
- (c)それぞれの線材における J_c - B 特性

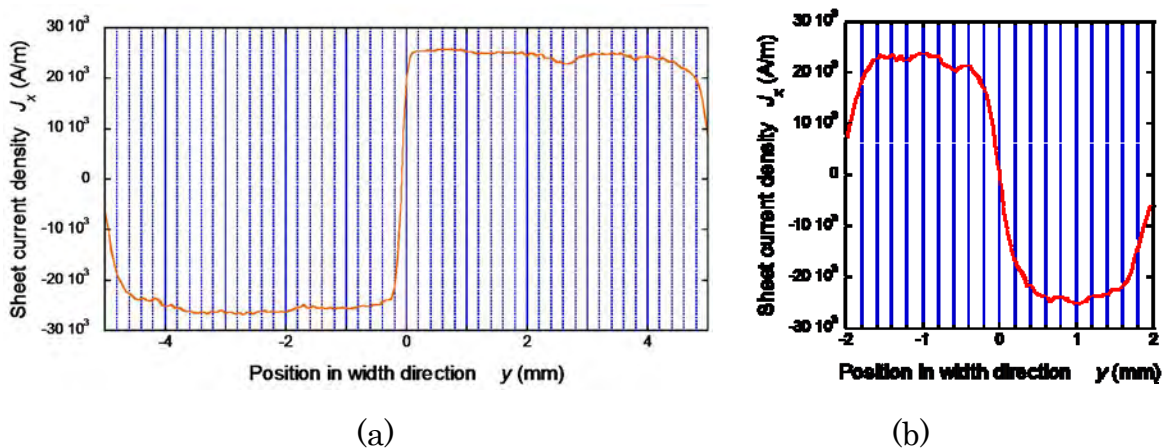


図 2.4.3-37 磁気顕微法を用い外部磁場より評価した線材内の幅方向 J_c 値分布
 (a) 1 cm 幅 PLD-GdBCO 線材(105 mT の外部磁場中)、
 (b) 4 mm 幅加工線材の J_c 値分布

ii) PLD 線材の交流損失評価

本項では、世界に先駆けて本研究開発において見出した REBCO 超電導線材特有のユニークな電磁現象について報告する。本現象は、めざしている電気機器に要求される電流・磁場変動運転時の低交流損失化のみならず、加速器等直流運転機器の磁化低減(磁化による発生磁場の乱れ抑制)にも大きく貢献する。

図 2.4.3-38 に、IBAD-PLD 法により ISTEK において作製された GZO 中間層を持つ GdBCO 線材の磁化曲線を示している。図(a)は 35 K において ab 面内に対する磁場印加角度を 90 度 (c 軸方向) から 10 度まで 5 度刻みで変えた際の磁化曲線である。従来の臨界状態モデルに従えば、磁化曲線はほぼ上下左右対称であるが、観測した磁化は、外部磁場を正負の磁場ピークから減らし始めた直後にゼロ付近を通る軌跡を描いた後、通常の J_c 値に比例する軌跡に戻っている。また、外部磁場がゼロを横切る時、すなわち外部磁場の方向が変わる時、磁化が大きく減少していることがわかる。さらに、印加角度 10 度では磁化曲線が膨らんでいない。図 2.4.3-38(b)は対応する交流損失の測定値である。交流損失は従来理論では垂直磁場： $\theta=90$ 度の値に対し $\sin\theta$ で減少するのに対し $\theta=10$ 度, 15 度では測定値は二桁以上も減っている。この傾向は磁場が高いほど、温度が低いほど、 θ が小さいほど顕著になった。図 2.4.3-39(a),(b)は 77 K において 1 T、2 T のバイアス磁場を印加し $\theta=15$ 度で測定した磁化曲線と交流損失である。バイアス磁場が 2 T の場合、磁場振幅 0.5 T まで磁化曲線は膨らまず、交流損失も従来理論の予測値より 2 桁以上も小さいことがわかる。また、図 2.4.3-40(a), (b)には 35 K ではあるが $\theta=60$ 度の場合のバイアス磁場中の磁化曲線と交流損失の測定結果を示している。 $\theta=60$ 度でも温度が下げ、磁場を高くするとこの小磁化・低交流損失現象は発現する。

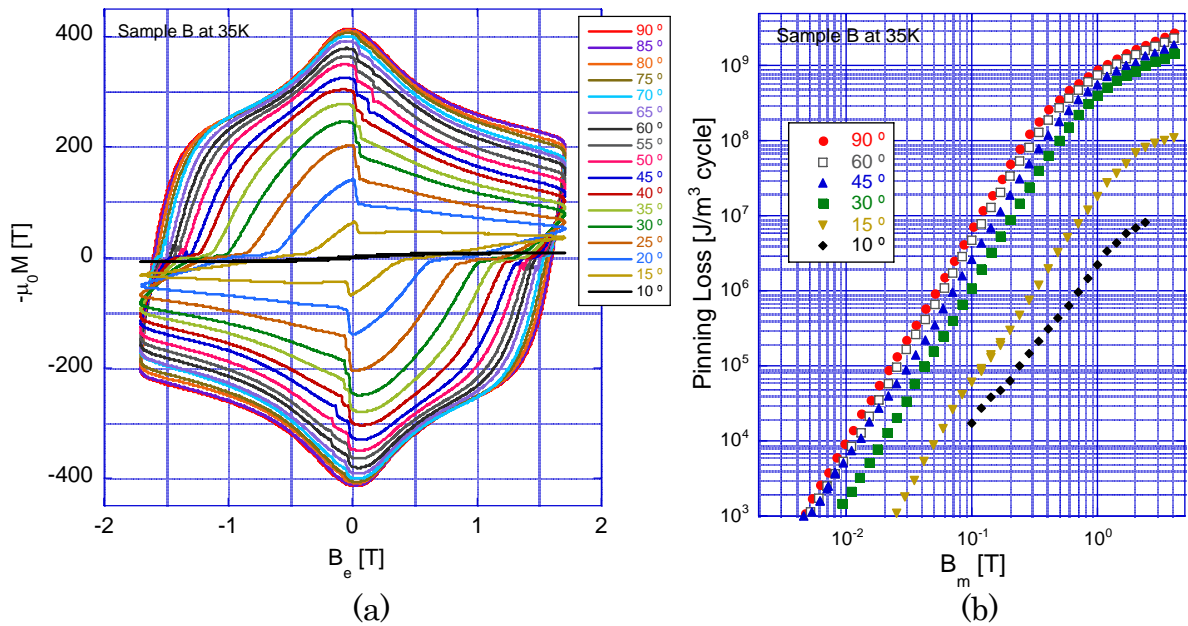


図 2.4.3-38 IBAD-PLD 法により作製した GZO 中間層を持つ GdBCO 線材の 35 K における(a)磁化曲線と(b)交流損失の磁場振幅依存性

本研究では、この現象が REBCO 超電導薄膜に特有の現象であること、また結晶粒面内配向度 $\Delta\phi$ が小さい、すなわち結晶粒の配向性が良い線材ほど、この現象が顕著であることも確認した。この現象の発現機構については多角的に検討中であるが、 J_c 値が高い見返りとして変動磁場中ではヒステリシス損失が大きいという従来概念から解放された初めての事象であり、REBCO 超電導線材の低交流損失化を図る上での新たな指針を世界で初めて得たことは、今後の電動機、風力発電機等への展開上大きな意義があると考えられる。

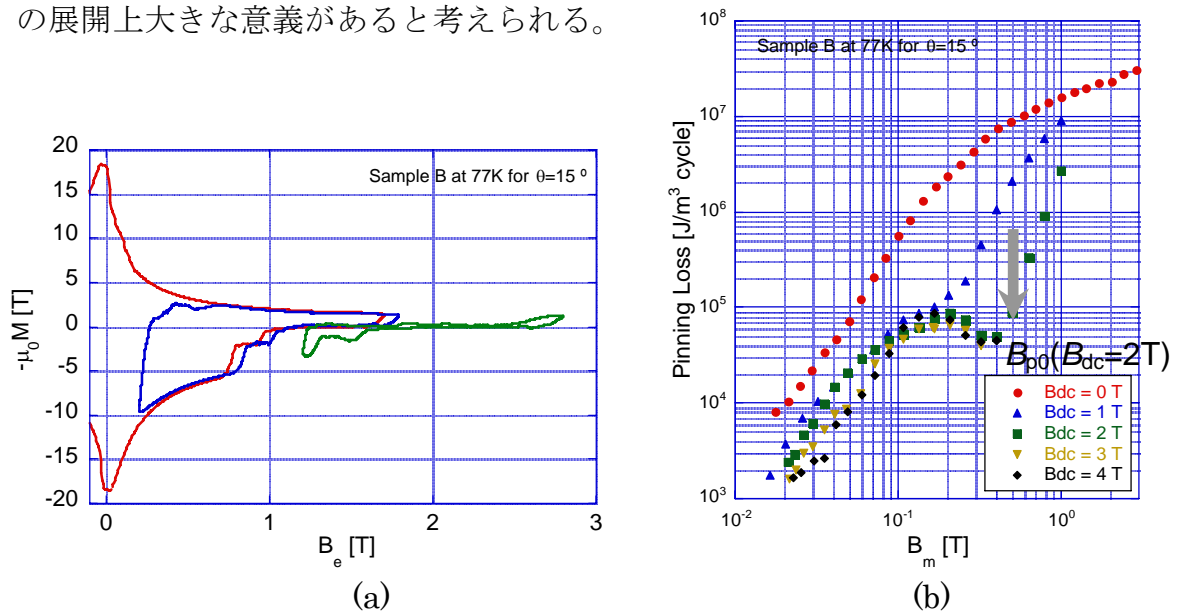


図 2.4.3-39 IBAD-PLD 法により作製した GZO 中間層を持つ GdBCO 線材の 77 K、バイアス磁場中における(a)磁化曲線と(b)交流損失の磁場振幅依存性($\theta = 15$ 度)

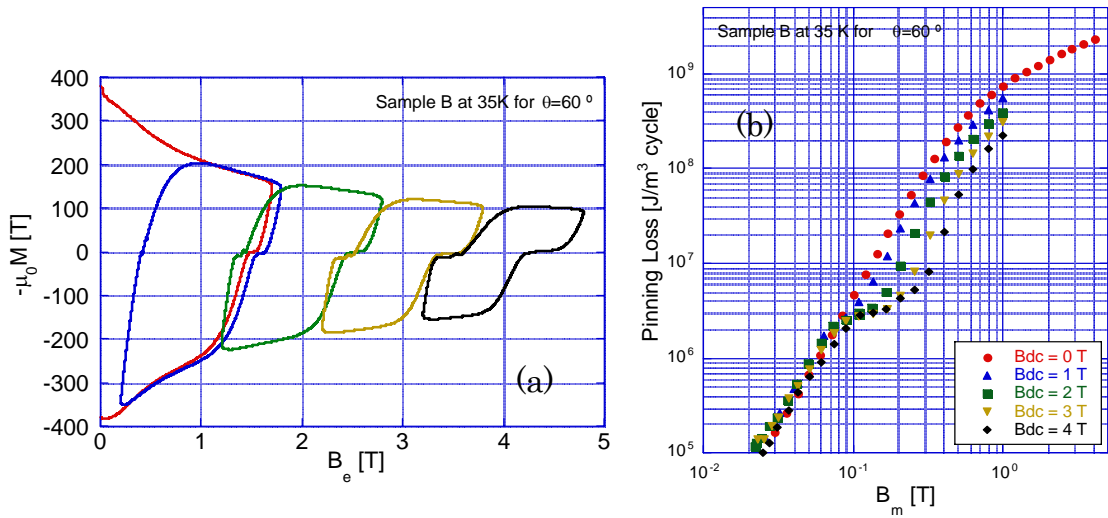


図 2.4.3-40 IBAD-PLD 法により作製した GZO 中間層を持つ GdBCO 線材の 35 K、バイアス磁場中における(a)磁化曲線と(b)交流損失の磁場振幅依存性($\theta = 60$ 度)

iii) 線材特性の幅方向分布評価

MgO 中間層の上に PLD 法により Gd123 超電導層を積層した高 I_c 特性の線材の幅方向の J_c 値分布を磁気ナイフ法で測定した(図 2.4.3-41)。幅方向にみてスパイク状に J_c 値分布が低下している部分がみられる。同じ部分の線材の MO 観察(図 2.4.3-42)において、長手方向に線上に劣化部分が観測され、磁気ナイフ法で測定した J_c 値分布が低下している部分と対応している。これは、超電導層積層前の基板・中間層に存在したスクラッチ状の不良部の影響と考えられる。

また、線材の長手方向の I_c 特性分布は必ずしも均一ではない。線材長手方向の I_c 特性のばらつきの標準偏差が σ である線材で小コイルを巻いたときの総発熱と最大電界を理論的に求めた(図 2.4.3-43~44)。その結果、線材の I_c 特性のばらつきは、ホットスポット形成などに関係する最大電界に特に大きな影響を与えることがわかった。

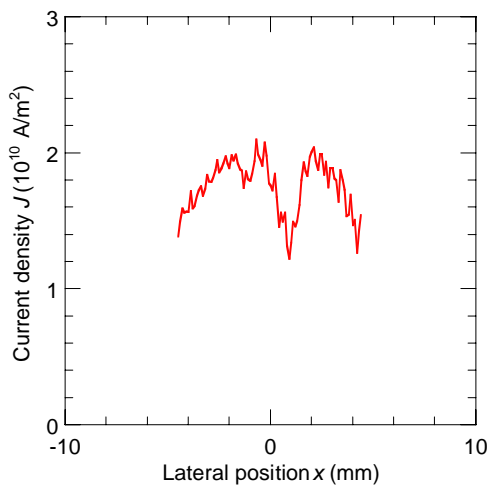


図 2.4.3-41 幅方向 J_c 値分布

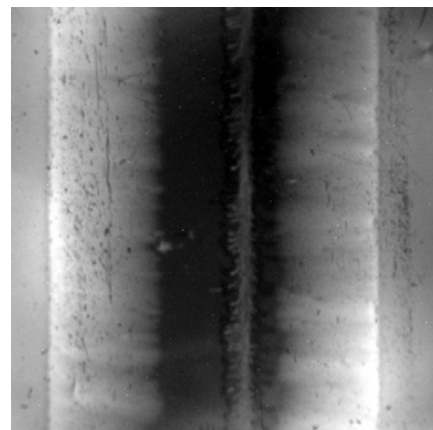


図 2.4.3-42 線材の MO 観察結果

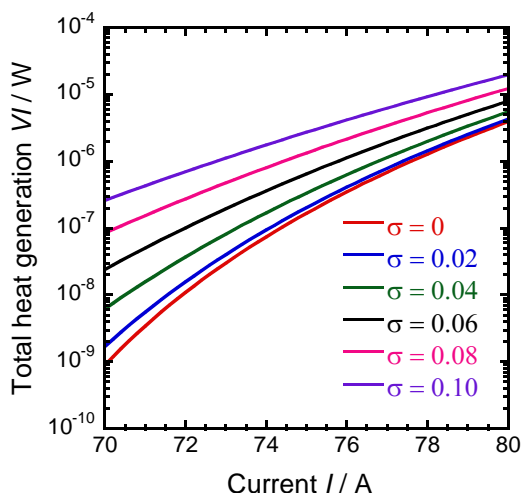


図 2.4.3-43 I_c 特性のばらつきと
コイル総発熱

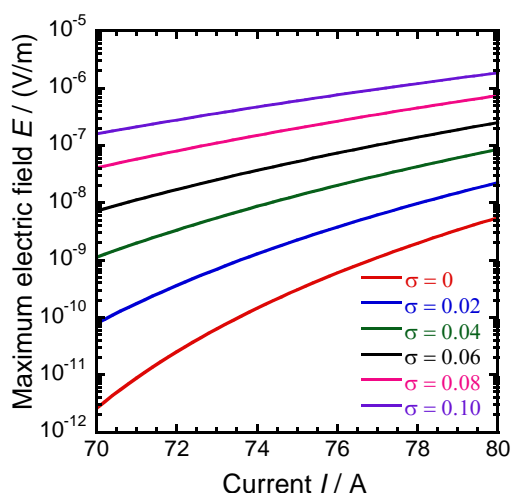


図 2.4.3-44 I_c 特性のばらつきと
コイル内の最大電界

(b) 細線加工技術開発

(b-1) IBAD 基板-PLD/MOD 線材の細線加工・評価技術開発

i) IBAD 系基板-PLD/MOD 線材の細線加工技術開発

「超電導応用基盤技術開発(第 II 期)」プロジェクトで基礎が築かれたレーザスクライビング細線加工手法(レーザ照射と化学エッチングを組み合わせた方法)について詳細な検討を行った結果、表 2.4.3-1 のような技術課題が存在することがわかった。項目分けした課題について、それぞれの具体的な問題点と発生原因の考察を示す。

表 2.4.3-1 細線加工技術開発における主な技術課題

技術課題項目	具体的問題	課題の発生原因の考察
フィラメント間電気絶縁の安定化	抵抗が 1 Ω から 1 M Ω まで幅広く分布し、再現性に乏しかった	レーザで溶かされたハステロイが固まりドロスとなって電気絶縁不良を起こした
溝幅の減少と制御	超電導層に 300-500 μm のオーバーエッチが発生	硝酸系エッチング液に対して、超電導層のエッチングレートが銀層よりも高い
化学エッチングの短縮	エッチングはバッチ式で 1 回のエッチング時間が 30 分以上	
剥離対策	加工後の熱サイクルで剥離が頻発	線材の経時変化、剥離の起点、機械強度等が不明だった
長尺線材対応プロセス開発	エッチング方式の問題	バッチ式では処理できる線材長は 4.5 m と短い
マスクテープ選定	実績のあるカプトン粘着テープは 50 m 長を越えるものが市販されていない	カプトンテープに替わる粘着テープの探索が必要
溝内の残留物除去	ドロス及びエッチング成分の残留が発生した	ドロス発生防止や残留物除去の研究が必要
レーザ照射の位置精度	レーザ照射の設定位置ずれは 10 μm 以上、巻き返し後は 100 μm のずれが生じた	1 ライン毎のレーザ照射のため巻き返しによる機械的位置ずれが生じた

レーザスクライビング細線加工手法でめざすマルチフィラメント線材の模式図を図 2.4.3-45 に示す。安定化銀層及び超電導層までが細線化され、バッファ層やハステロイ™基板はそのまま残った構造となり、フィラメント間電気絶縁を確保しながら 5 mm 幅を維持した構造となっている。ここでは簡単のため、3 分割線材を模した図を示した。

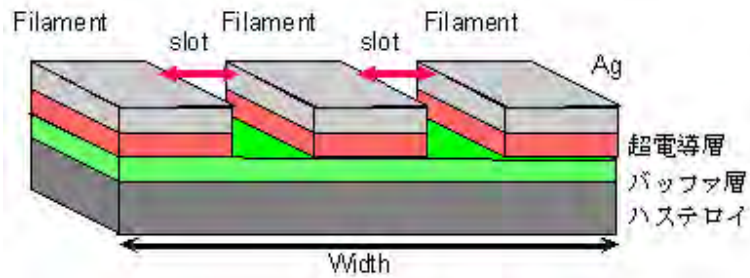


図 2.4.3-45 マルチフィラメント線材の構造の模式図

従来の加工プロセスにおけるフィラメント間の電気絶縁不良の原因を探るため、エッチング後の溝付近の 3 次元観察を行った結果を図 2.4.3-46 に示す。レーザ照射後に、銀層より 30 μm も飛び出るようなドロスが発生していることがわかる。ドロスはハステロイ™が熔融凝固したものであり、フィラメント間電気絶縁を確保するためには、ドロスの周辺を数百 μm に亘ってエッチングしなければならないため、フィラメント間隔を低減することは困難である。

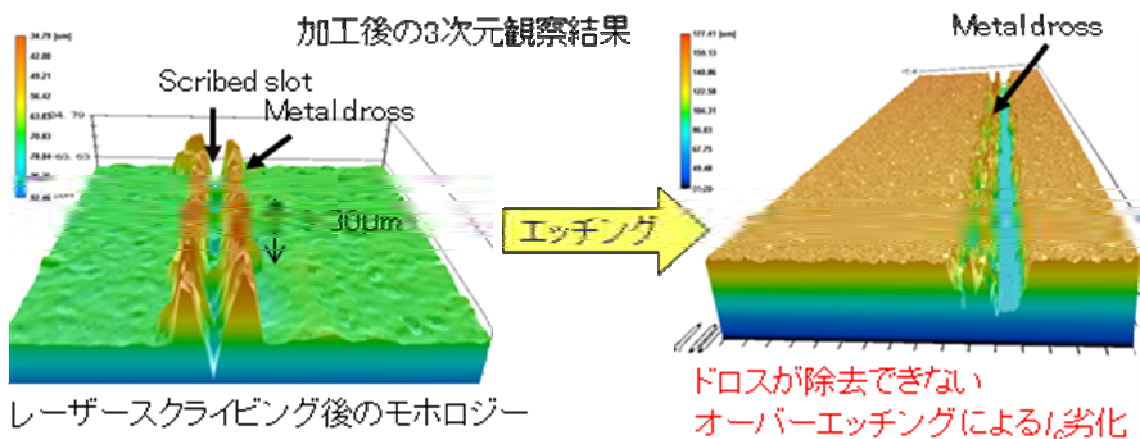


図 2.4.3-46 従来のレーザスクライビング細線加工手法による溝の 3 次元像観察結果

またエッチング液として用いた硝酸セリウムアンモニウムに対するエッチングレートは銀よりも超電導層の方が高いため、レーザ照射で形成された溝幅よりも超電導層の溝幅は 200-500 μm もオーバーエッチされてしまうという問題もあった。

エッチングに関しても、バッチ式であったため処理できる最大長が 5 m 未満と短く、長尺線材への適用は困難な状態であった。またエッチングのマスク材として

用いていた粘着性カプトンテープは、最大長 50 m であり、最終目標で必要な単長 100 m 以上という分割線材へのマスク形成は不可能であった。

ii) 改良型加工プロセスの開発

ドロス発生を低減するために、マスクテープと銀層だけに照射されるようにレーザの出力を抑えた。次にエッチング速度を高めつつオーバーエッチを抑えることができるように銀層と超電導層を異なるエッチング液で処理する方法を検討した。特に、超電導層にダメージを与えずに銀層だけをエッチングできるエッチング液として過酸化水素水（濃度 35 wt%）とアンモニア水（濃度 28~30 wt%）を混合した溶液を選択した。図 2.4.3-47 には開発した改良型プロセスのフローを示す。

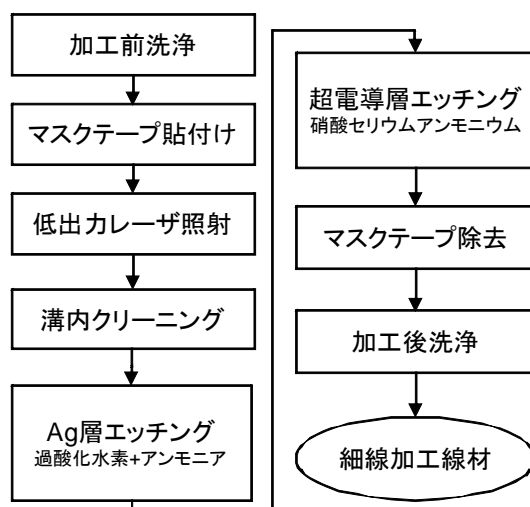


図 2.4.3-47 改良型レーザスクライビング細線加工手法のフローチャート

図 2.3.4-47 での低出力レーザ照射は、紫外線領域で最大 5 W の出力を有する Q スイッチ型のレーザ装置を用いた。改良されたレーザスクライビング細線加工手法を用いて作製した細線化試料の三次元観察及び光学顕微鏡観察を行った結果を図 2.4.3-48~49 に示す。従来型のレーザスクライビングの場合(図 2.4.3-46)と比較して、ドロスの発生が抑えられ、溝の断面が長方形に近い形になっているのがわかる。

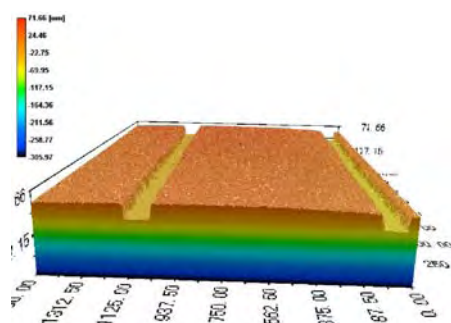


図 2.4.3-48 改良型レーザスクライビング細線加工手法による溝の 3 次元観察像

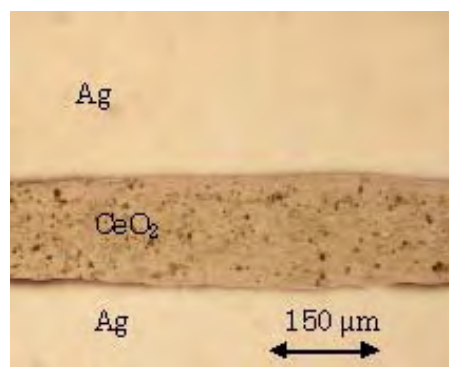


図 2.4.3-49 改良型レーザスクライビング細線加工手法による溝の光学顕微鏡像

ドロスの発生が抑えられ、平坦な溝が形成されるようになったので、溝幅の制御も可能となった。図 2.4.3-50 には、レーザ照射出力と線材の搬送速度だけを変え、他の条件を一定にして溝幅分布を測定した結果を示す。レーザ照射出力(横軸)が増加するほどグラフ中の数値(溝幅)が大きくなり、線材の搬送速度(縦軸)が遅い領域では、線材が切断されてしまう領域(黒色)がある。逆に搬送速度が速く照射出力が低い領域(茶色)ではマスクテープを貫通できずにスクライビングできないことを表している。水色で囲った領域では溝幅の変化がなだらかなのである。照射出力や搬送速度の微妙なずれが生じた場合でも、この領域に制御すれば安定な溝幅を長尺線材において確保できることがわかった。

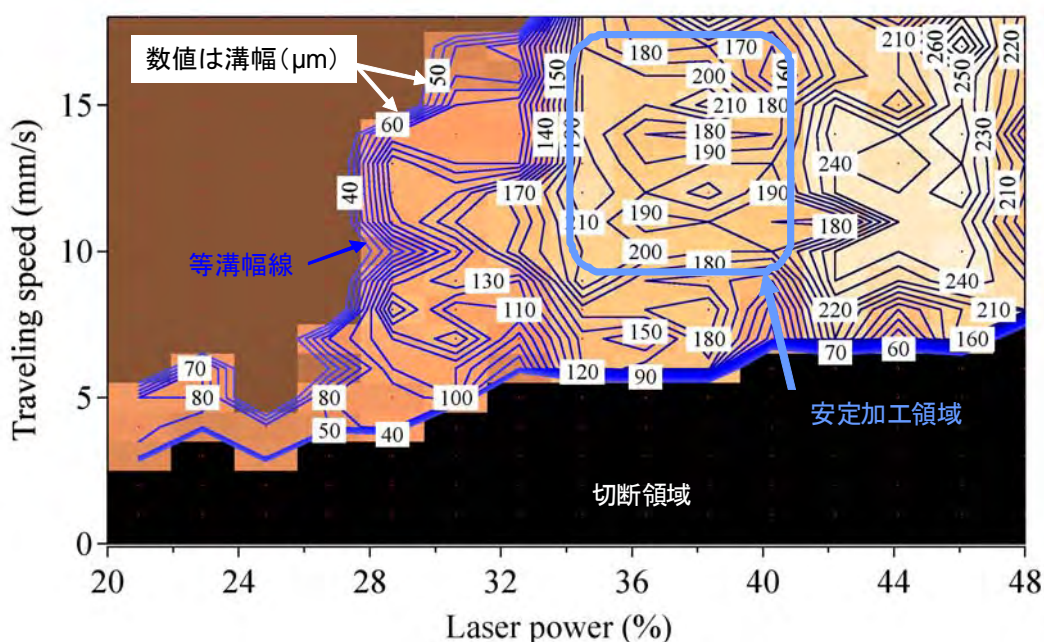


図 2.4.3-50 レーザ照射出力と線材搬送速度の変化による溝幅の制御

上で述べたようにプロジェクト開始時のレーザスクライビング細線加工手法における様々な技術課題の解決が見込めたので、次のステップとして、長尺線材加工用の装置開発を行った。開発したのはマスクテープを Reel to Reel で連続して貼付けられる装置(図 2.4.3-51)とエッチングを Reel to Reel で連続に行える装置(図 2.4.3-52)である。図 2.4.3-52 に示した Reel to Reel エッチング装置は、銀層と超電導層で若干構成が異なっている。銀層のエッチング液として過酸化水素水(H_2O_2)とアンモニア水(NH_3)の混合溶液を用いるが、過酸化水素は分解しやすいので、図中で左側にあるエッチング槽で直接混合する方式を用いている。超電導層のエッチングは従来と同じ硝酸セリウムアンモニウム水を用い、図 2.3.4-52 の左側エッチング槽に満たして行った。どちらのエッチングもリンスは水の吹付けによってクリーニングした。

(非公開)



図 2.4.3-51 Reel to Reel マスクテープ
貼り合わせ機の外観



図 2.4.3-52 Reel to Reel エッチング
装置の外観

開発したこれらの長尺線材加工用の装置を用いて、まず 5 mm 幅 30 m 長の線材の 3 分割加工を行った。ここで用いたマスクテープはゴム系粘着材を使用したポリエステルテープであった。加工前後の End to End の I_c 特性の変化を図 2.4.3-53 に示した。加工前の I_c 値は $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ の基準で 118.1 A/5 mm-w で、加工後は各フィラメントの I_c 値が 35.6 A、35.3 A、29.8 A となった。これらを合計した総 I_c 値は 101 A であり低下率は 14.7 %となるが、レーザスクライビングによる断面積減少率は 12.4 %であったので、加工によって低下した I_c 特性の割合は 2.3 %と非常に低い値を得ることができた。

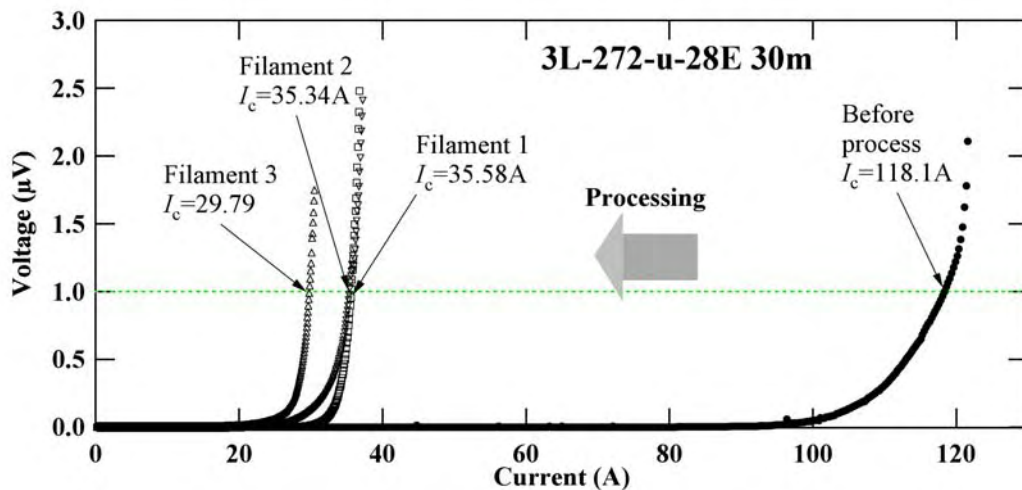


図 2.4.3-53 ポリエステルテープを用いた 5 mm 幅 30 m 3 分割加工前後の I_c 値

交流電流印加時に均流条件が満たされる電流は最も低い I_c 値のフィラメントで規定される。したがって、[全フィラメント中で最低の I_c 値×分割数]が実効的な I_c 値ということになるので、 $29.79 \times 3 \approx 89.4 \text{ A}$ が実効的な I_c 値である。フィラメント間抵抗は 30 m 長で 100 k Ω を越えており、1 cm あたり 100 M Ω であったので、内部目標値(1 cm あたり 0.1 M Ω 以上)をはるかにこえる超えることができた。

次に、中間目標である 5 mm 幅 5 分割 50 m 線材の加工を行った結果を図 2.4.3-54 に示す。加工前の I_c 値は 95.1 A/5 mm-w であったものが、5 分割加工によって表 2.4.3-2 に示す I_c 値のフィラメントに分割された。ここでマスクテープにはゴム系よりも除去が容易なアクリル系粘着材を使用したポリプロピレンテープを用いた。また線長が長くなり、短尺での I_c 値の定義である $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ では線材の焼失の危険性があるため、定義を $0.5 \mu\text{V}/\text{cm}$ に引き下げて、 I_c 値算出にとっては通常よりも厳しい条件とした。フィラメント間抵抗は 1 cm あたり $0.5 \text{ M}\Omega$ を越えており、 $0.1 \text{ M}\Omega\text{cm}$ 以上という要求を満たしていた。平均の溝幅は約 $350 \mu\text{m}$ であったので、面積減少率は 30 %であった。各フィラメントの I_c 値の合計は 50.1 A となり、 I_c 値の低下率は 47.4 %であるので、加工による劣化は約 17 %であった。劣化率を下げるためには、さらなるプロセスの改良が必要である。交流応用上の実効的 I_c 値は 40 A となった。

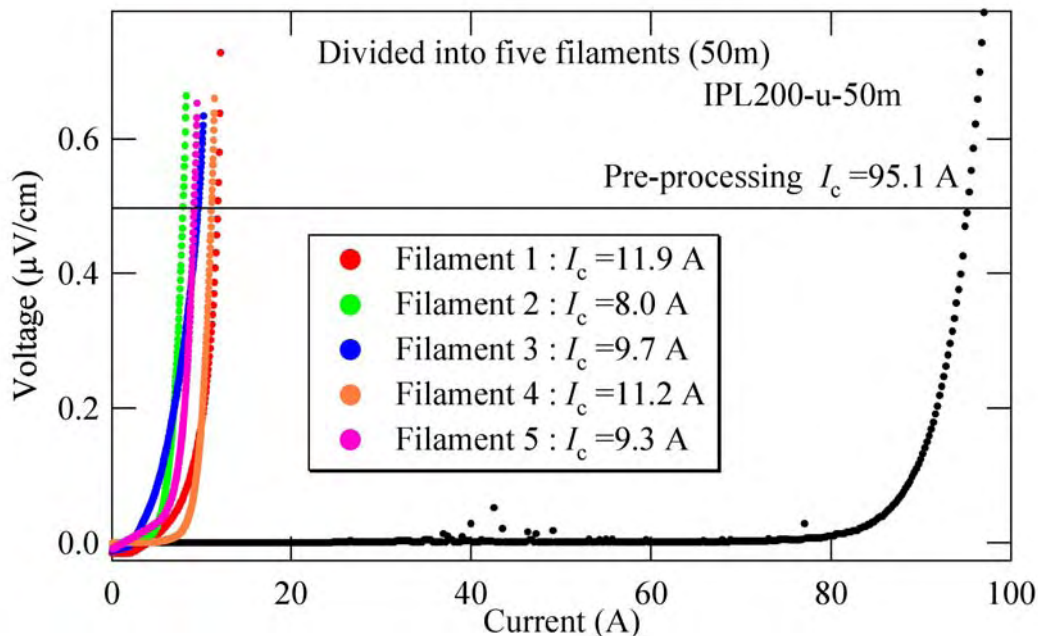


図 2.4.3-54 5 mm 幅 50 m 5 分割加工前後の I_c 特性

表 2.4.3-2 5 mm 幅 5 分割 50 m 細線加工の結果

Filament	I_c (A)	Between	R (Ω)	R^s (Ω/cm)
#1	11.9	F1-F2	101	505,000
#2	8.0	F2-F3	178	890,000
#3	9.7	F3-F4	134	670,000
#4	11.2	F4-F5	120	600,000
#5	9.3	F5-F1	105	525,000

中間目標は 50 m 長 5 mm 幅線材の 5 分割加工により交流損失が 1/5 を実証することである。素線レベルでの交流損失を把握するために、Reel to Reel 交流磁化率の測定を加工前後で行った結果を図 2.4.3-55 に示す。交流磁化率の複素成分(位相

成分)は交流損失の最も大きな成分であるヒステリシス損失に比例するため、素線レベルでの損失の相対評価をすることが可能である。

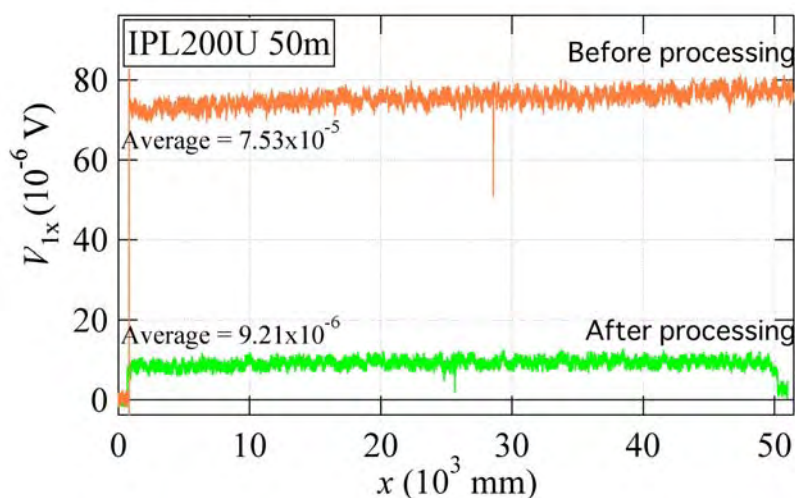


図 2.4.3-55 ヒステリシス損失に比例する交流磁化率の分割による変化

この結果は交流磁化率が約 8 分の 1 に減少したことを示している。5 分割溝加工であるので、ヒステリシス損失は理想的には 5 分の 1 になるはずであるが、これは I_c 値に比例する量であるので、溝加工前の交流磁化率が面積減少率 30 % の割合で減少したと考えると、ヒステリシス損失は約 6 分の 1 となる。すなわち、素線レベルで交流磁化率を用いた結果からは、5 分割溝加工によって損失が 5 分の 1 以下に減少したと考えてもよい。今後は、コイルへの加工を行い、交流電流が各フィラメントに均一に流れることを確認する方法で交流損失 1/5 への低減を今年度中に実証する予定である。

一方、現行のレーザスクライビング細線加工手法では、エッチング用マスク材料として粘着性プラスチックテープを用いているため、粘着材を含んだマスクテープの厚みは 50 μm 以上となり、レーザ照射によるプラスチック基材の縮小を考えると長尺で安定的な溝幅としては 100 μm が最小幅とならざるをえない。今後、最終目標である 5 mm 幅 10 分割 100 m のマルチフィラメント線材を作製するためには、溝幅 50 μm 以下を長尺に亘って安定的に加工できる手法を開発するという技術課題を克服しなければならない。粘着性マスクテープを使用しない方法であれば 5 mm 幅 10 分割溝加工は可能であると予想される。その原理検証のため、超音波援用スピンドルを用いた機械加工によって 10 分割溝加工を試みた。加工した長さは約 15cm である。用いたブレードの刃厚は 97 μm であったので、面積減少率は 17.5 % の分割加工となった。加工前の I_c 値は 137 A/5 mm-w であったので、 I_c 値の低下率は 46% で最小 I_c 値での低下率は 53% であった。最適条件出しを行なったわけではないが、加工による低下率は 28 % と高いが、原理的には溝幅を細くして 10 分割に到達することは可能であると考えられるが機械加工では、微細構造観察でロールケーキ状の欠陥が入ることが判明しており、またブレードの摩耗や破損と

いう事態が生じる（(b-4) 参照）可能性があるため長尺対応の装置を開発するのはかなり難易度が高い方法と言える。

(非公開)

(b-2) 結晶粒配向金属基板-PLD 線材の細線加工技術開発

低交流損失ケーブルに適応した細線加工技術として、結晶粒配向金属基板-PLD 線材を 2 mm 幅又は 4 mm 幅にスリッタで切断加工する技術の開発を実施した。結晶粒配向金属基板-PLD 線材は、10~30 mm 幅プロセスで作製された超電導層上に銀保護層を DC スパッタで形成し酸素中で熱処理を行った後、スリッタにより 10 mm 幅から 2 mm 幅又は 4 mm 幅に機械加工する。その後、電気めっき法によって 10~20 μm 厚みの銅を被覆する。2 mm 幅に加工したときの J_c 値維持率(幅あたり I_c 値維持率)90%以上を目標に、加工条件の適正化を行った。

線材作製プロセスを進める中で、切断加工されたエッジでの微小な変形が原因で、Cu 安定化層形成後の線材で安定化層の剥離が発生する現象が明らかとなった。スリッタによる切断加工では、固い金属テープを再現性良く加工する方式として、矩形刃によるスリットを採用しており、刃の構造、刃間の隙間、張力、線速などが重要な条件となる。これらの切断加工条件の適正化を実施した結果、図 2.4.3-56 に示すように、適正な切断エッジ形状が得られ、 I_c 値維持率は図 2.4.3-57 に示すように、90%以上を確立した。さらに、刃の磨耗を含めてこの条件を維持管理していくことで、長尺線材の安定した切断加工が可能となった。

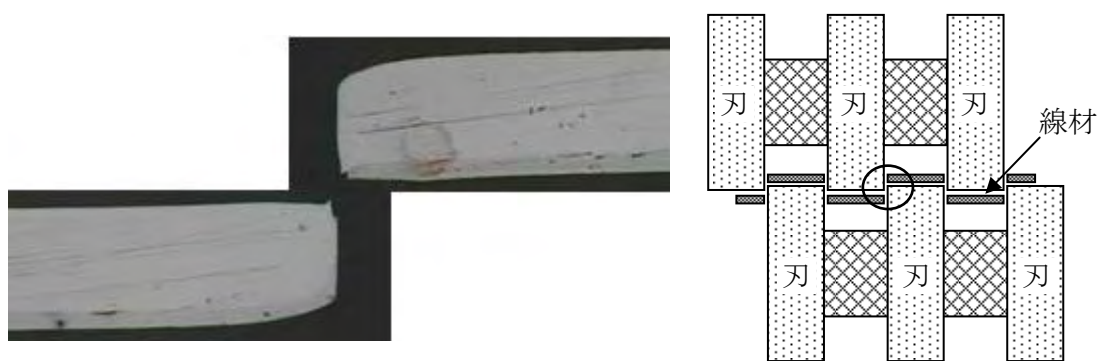


図 2.4.3-56 適正化後の切断エッジ形状とスリット模式図

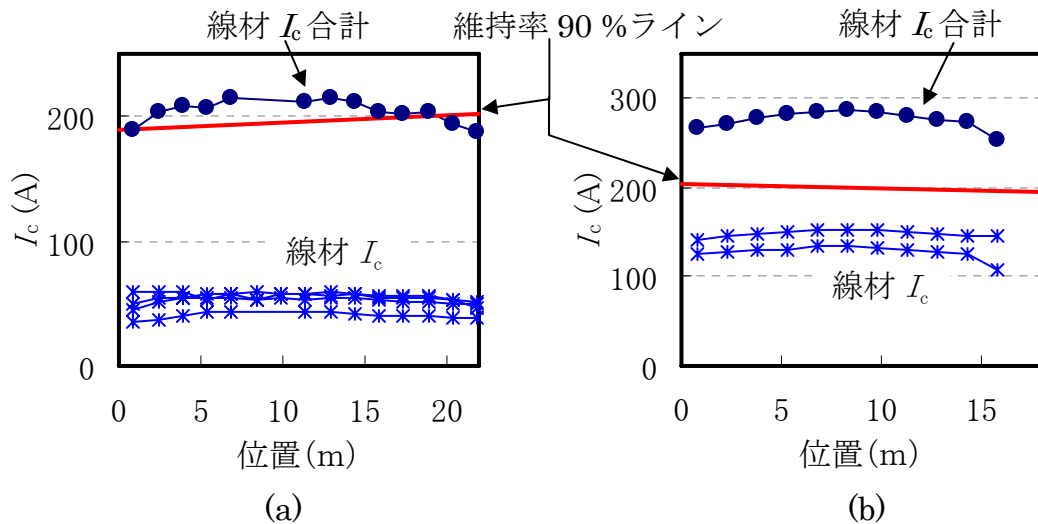


図 2.4.3-57 切断加工線材の I_c 値分布 (a)2 mm 幅線材 (b)4 mm 幅線材

(b-3) 細線加工線材の評価技術開発

i) 長尺細線加工線材評価技術

平成 20～22 年度は、長尺線材 5 mm 幅 5 分割スクライビングの技術開発を支援する評価技術の開発を行った。基本的な評価として線材加工の前後に下記の評価手段を整備した。

- 加工前： 1) End to End の I_c 値測定
 2) ホールセンサアレイによる Reel to Reel 測定
 3) 四端子法による Reel to Reel 測定
 加工後： 4) 分割線間ごと End to End の I_c 値測定
 5) 分割線間の電気絶縁性測定

1)、4)、5)では線材全体を液化窒素中に浸漬して測定を行う。特に大電流を流す 1)と 4)の測定用として、長尺線材を途中で折り返して重ねて巻くことのできる簡易無誘導巻きリールを考案した。2)と 3)は測定したい部分を浸漬冷却して、線材を順次送りながら全長に亘り Reel to Reel 測定を行う。2)では高速測定(200 m/h 以上)が可能である。また、センサアレイの信号を適当な仮定をもとにシミュレーションしたカーブとフィッティングすることで、幅方向の均一性を評価する手法を開発した。この手法により分割前に、分割後フィラメント線材がどの程度均一な I_c 値を有するかを予測できるようになった。

さらに、詳細な欠陥評価のために下記の評価手段を整備あるいは独自開発した。

- 6) 誘導法（交流磁化率）の Reel to Reel 測定；2)の設備を利用
- 7) MO 観察法による Reel to Reel 測定
- 8) SQUID センサアレイ渦電流法による Reel to Reel 測定
- 9) レーザ走査形状計測による Reel to Reel 測定
- 10) 表面反射光計測による Reel to Reel 測定；9)の設備を利用

これらはいずれも Reel to Reel で線材全長に亘って検査ができ、しかも非破壊の検

査技術である。よって適宜プロセスの途中で検査することができ、それぞれのプロセスにおける問題点を抽出し、改善策を講じる重要な手がかりを得ることができる。また、それぞれ原理の違いを考慮して結果検討を行うことで欠陥の識別判定が可能となる。

6)は、2)の設備に軽微な変更を加えて行える評価である。ホールセンサの代わりにピックアップコイルを使用し、交流磁化率測定を行いヒステリシス損失の相対的变化を評価する。外部磁場の印加に超電導マグネットを使用できるため強磁場中での測定も可能である。また分割後の線材に適用することで、分割フィラメントのおおよその I_c 値及び分割不良部分の有無が評価できる。(図 2.4.3-58 参照)ただし、フィラメントごとの寄与を分離して計測することはできない。

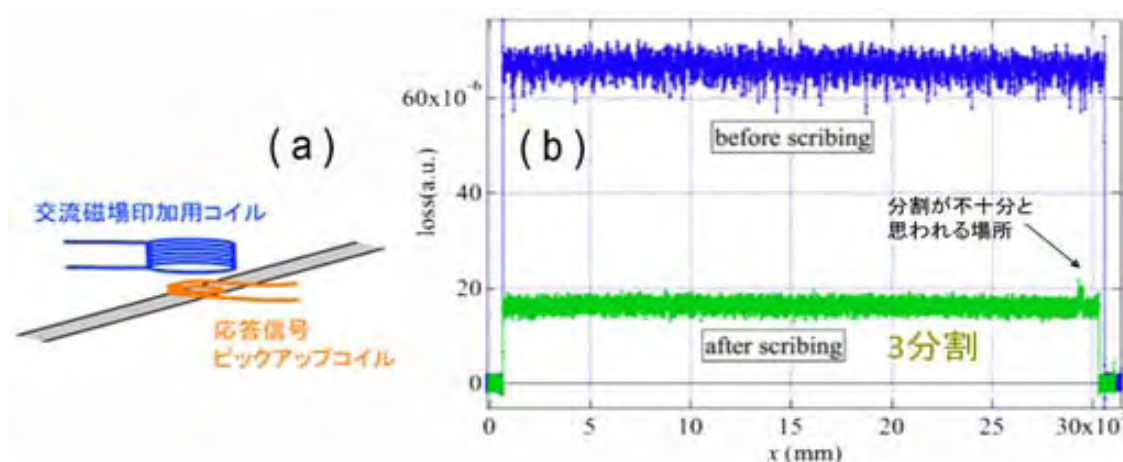


図 2.4.3-58 分割前後のヒステリシス損失測定例

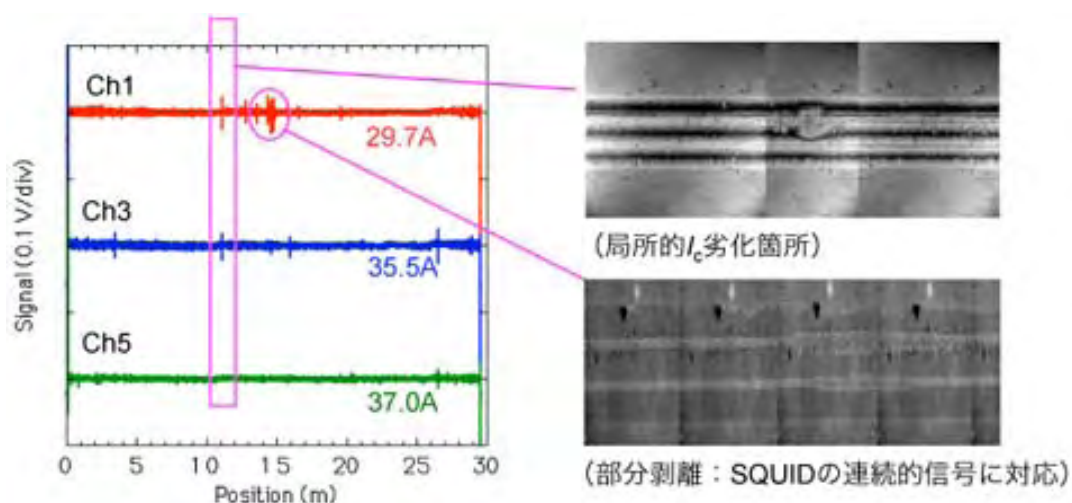


図 2.4.3-59 (a)SQUID センサ及び(b) MO 観察法を用いた 5 mm 幅 3 分割線材の評価例

7)ではMO観察法によって欠陥部分を高い空間分解能で観察する。測定速度は遅いが、欠陥種類を識別するには極めて有効な手段である。8)では高温超電導 SQUID グラジオメータアレイによって線材中の欠陥の有無を高速で検査する。アレイは線材の幅方向に並べられており、どのフィラメントに欠陥があるのかを識別することができる。測定速度は、線材の冷却機構など装置上の改良により 80 m/h の高速を実現した。図 2.4.3-59 に 5 mm 幅 3 分割線材に対する測定例を示す。SQUID センサアレイによる高速チェックで検出した不良箇所を MO 観察法で詳しく調べたところ局所的な劣化部や部分剥離による不良であることが判明した。これまでのデータ蓄積から SQUID センサの信号形状からでもある程度の欠陥種類の識別も可能になってきている。9)は線材表面にレーザをスキャンさせて段差や形状を計測するものである。形状を検査することで分割不良や剥離によるフィラメントの浮き(図 2.4.3-60)を検知することができる。高さ分解能は 3 μm 程度である。10)ではレーザの反射率の変化を調べる。さらに小さな凹凸の有無の調査に有効な情報が得られる。例えば、ハステロイTM 基板上の傷や洗浄不良を検出できる。また各層の成膜ごとにチェックすることで個々の成膜プロセスで生じている問題点を抽出することが可能である。

以上述べてきた複数の検査手法を相補的に活用することで、効率的な不良箇所調査ができる体制が整備できた。これら開発した長尺線材評価技術は、分割加工プロセスだけでなく、その前の線材作製プロセス全般に亘って改善支援に役立てられており(2.4.3(3)(a-1) i)項目参照)、プロセス改善に大きく貢献した。

一方、SQUID 磁気センサを用いた渦電流法による非破壊検査は、交流渦電流が材料深部に侵入する低周波領域においても高い感度をもつという特徴がある。したがって、加工線材素線だけではなく、線材の多層構造からなるケーブルや変圧器用コイル等の、巻線時等の後加工で生じる内部の大きな欠陥も外部から検出できる可能性がある。例えば、高電圧ケーブルの場合、内部導体とシールド層の間の絶縁層は約 25 mm 程度の厚さをもっている。このようなシールド及び厚い絶縁層の下にある多層導体中の欠陥検出をねらいとし、図 2.4.3-61 に示すような、ベースライン長(2つの磁場検出コイル間の距離)の長い高温 SQUID グラジオメータセンサを平成 20 年度の加速及びその継続研究で開発した。これらのセンサを用い、アルミ多層試験体中の 38 mm の深さにあるスリット状欠陥が検出可能であることを明らかにした。一方、ケーブルのような細線化された並列多層導体では一様導体に比べ渦電流は流れにくくなるが、このような場合にも、励磁コイルの形状等を工夫することで内部の断線等が検出できる可能性を、有限要素法を用いた磁場解析により明らかにした。

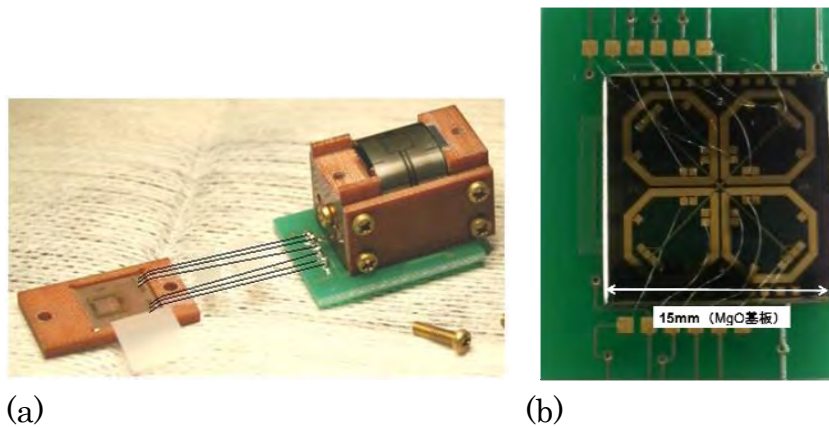


図 2.4.3-61 多層導体検査用に開発したベースライン長の長い SQUID センサ
 (a)Y 系超電導線材を検出コイルに用いた同軸型センサ、
 (b)平面型 2 軸グラジオメータ

ii) スクライビング線材の特性分布評価技術

マイクロホール素子を用いた顕微鏡システムを構築し、実用レベルの大電流印加時のテープ線材内の電流分布を評価し^(8,9)、変圧器作製に用いられる 5 mm 幅 5 分割スクライビング線材の欠陥位置を同定することによって、スクライビング技術の確立に貢献した。

本手法がまた、交流印加時のマルチフィラメント線や、欠陥部位における電磁現象の観測手法として優れたポテンシャルを有することを明らかとし、その空間分解能は、本プロジェクトの最終目標である 5 mm 幅 10 分割線材に十分適用可能なレベルにあることを、モデル線材を用いて実証した。図 2.4.3-62 に、欠陥やブリッジングを模擬したマルチフィラメントモデル線材に 2 Hz の正弦波電流を印加した際の評価結果を示す。印加電流に同期して各座標位置での自己磁場信号を取得し、位相遅れをパラメータとして再構築することによって、各瞬時ににおける自己磁場の 2 次元像を得る。この結果より、ビオ・サバル則の逆変換によって、電流分布の時間変化を得ることが出来る。また、ファラデーの法則より、各瞬時ににおける誘導電界の空間分布を評価することが可能である。さらに、電流分布と電界分布が得られたことから、両者の積によって各瞬時ににおける損失の分布を得ることが可能となる^(10, 11)。すなわち、本評価法によって、超電導線材の交流損失分布の時間依存を詳細に把握することが可能であり、交流印加時の低交流損失化を実現する最適な素線構造や、欠陥部位またその補修箇所など複雑な構造を有する部位における電磁現象の解明が可能となる。

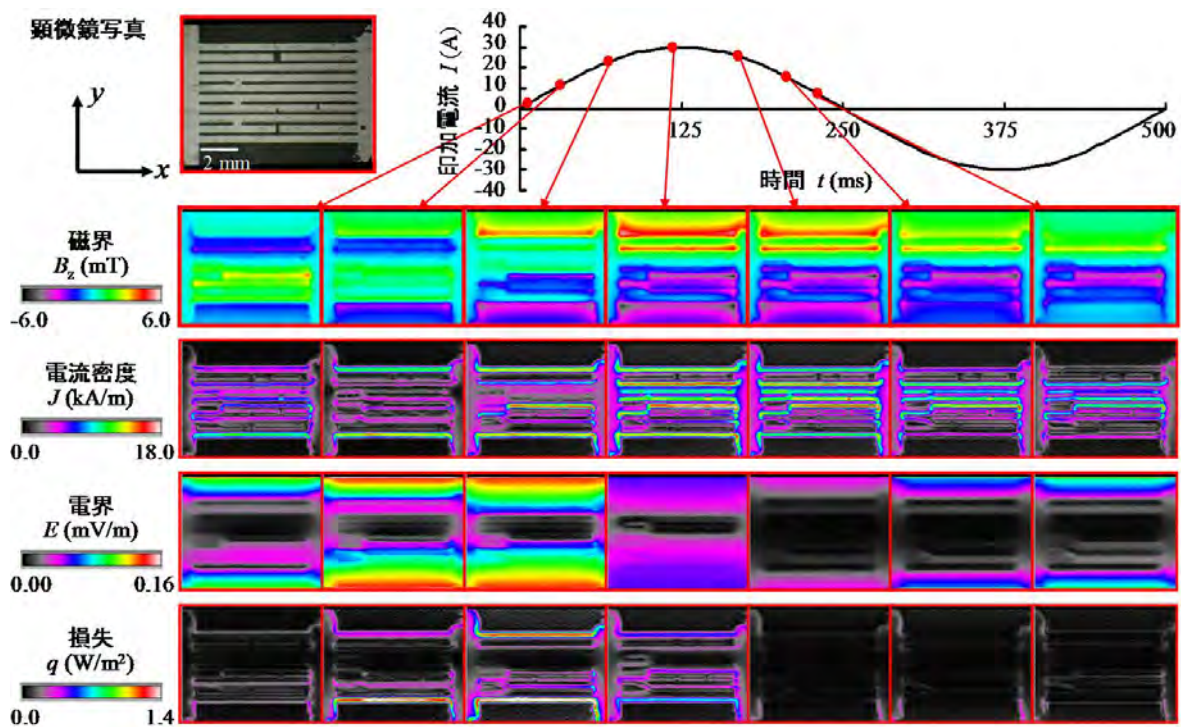


図 2.4.3-62 走査型ホール素子磁気顕微鏡による 5 mm 幅 10 分割マルチフィラメントモデル試料への交流印加時の電磁特性の可視化⁽¹¹⁾

iii) スクライビング線材の電流分布非接触評価技術

本項の研究開発では、低交流損失化をめざして作製されたスクライビング Y 系超電導線材における各フィラメント電流の均流特性を、非接触で精度良く評価できる手法を確立すること、ならびにこの手法を用いて長尺線材の健全性の評価や低交流損失線材製造プロセスへのフィードバックを図ることを目的としている。本項の研究において、交流通電時の線材の電流分布特性は、図 2.4.3-63 に示すような直径 40 μm の極細銅線で巻線された極小サイズのピックアップコイル群を用いて非接触で測定する。

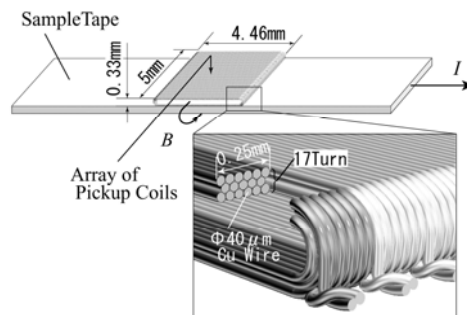


図 2.4.3-63 ピックアップコイル群の概観

細線加工技術開発の中間目標である 5 mm 幅 5 分割のスクライビング Y 系超電導線材に対し、その線材の均流特性の評価が十分に行えるように、本電流分

布測定法の測定精度の向上を図った。そのために、まずピックアップコイル群の製作精度の改善や実体顕微鏡を利用した試料線材への設置精度の改善を行った。さらに、電流分布を算出する際の数値計算プログラムの改良ならびに高速化なども行った。測定精度は、1.1 mm 幅の Cu テープ線材を水平方向に 5 本並べた模擬スクライビング溝加工試験導体を用いて評価した。また、1 mm 幅の GdBCO 線材 5 本を用いた試験導体に対しても本測定法を適用した。

5 本の Cu テープ線材から成る試験導体を用いて測定精度を評価した結果、各 Cu フィラメントの電流は 5 % 以内の誤差で測定できることを確認できた。また、5 本の GdBCO 線材を用いた試験導体での測定結果から、GdBCO 線材のフィラメント電流も 10 % 以内の誤差で測定できるレベルに到達した。

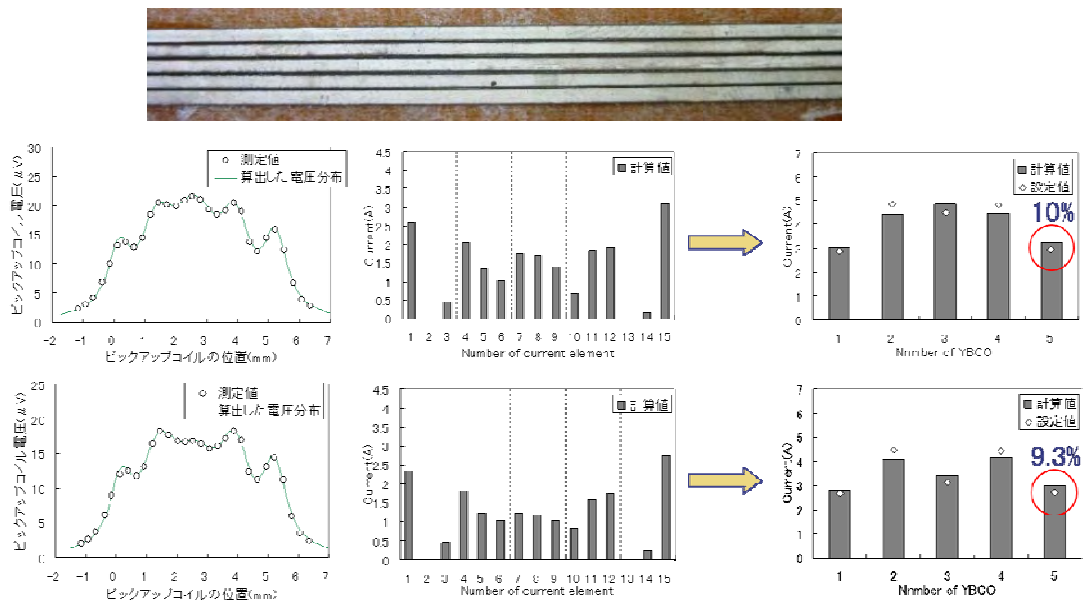


図 2.4.3-64 5 分割スクライビング Y 系超電導線材の各フィラメント I_c 特性の評価例

本測定法における電流測定精度は、5 mm 幅 5 分割スクライビング Y 系超電導線材の均流特性を評価できるレベルに到達した。今後、開発中の線材に対し、本測定法を適用していく。本測定法はロゴスキーコイルを用いた電流測定法と比較して簡便に行えるメリットがあり、低交流損失化のためにさらなる細線化が行われたとき、このメリットも助長される。また、本測定法は 2 MVA 級変圧器の電流分布特性の評価へもピックアップコイル群の取り付け方法の工夫などにより適用可能である。細線加工技術開発の最終目標である 5 mm 幅 10 分割スクライビングの Y 系超電導線材に対する本項の課題として、細線化に応じた測定空間分解能の向上が挙げられる。これに対しては、ピックアップコイルの使用線材径を 30 μm に変えてコイルを小型化し、かつコイル群の校正精度のさらなる改善を図ることで、必要とされる測定精度の達成をめざしていく。

iv) 切断加工線材の交流損失シミュレーション

切断加工により低交流損失線材を開発する際、線材が実際の超電導機器に使用される状況を踏まえて切断加工の指針を明らかにする必要がある。そこで、本研究開発では、電力ケーブルの低損失化をめざした線材切断加工技術開発の指針を理論的に明らかにすることを目的として研究開発を行った。先ず電力ケーブル導体の交流損失を理論的に求めてその機構を解明し、次にその結果を基に電力ケーブルに用いられる線材の切断技術開発の指針について考察した。

電力ケーブルは、多数の線材を円筒フォーマの周囲に並列して多層に螺旋巻きに配置された複雑な構造をもつが、ここでは簡単のため、図 2.4.3-65 に示したような、螺旋巻を無視した多角形状の単層の電力ケーブル導体について考察した¹²⁻¹⁵⁾。この導体の交流通電損失について理論解析を行った結果、交流損失機構として「ギャップ効果」と「多角形状効果」があることを明らかにした^{13,15)}。「ギャップ効果」とは隣り合う線材エッジ間のギャップで交流損失を生ずる効果で、ギャップ幅が小さくギャップ数(すなわち線材数)が少ない方が低損失となる。一方「多角形状効果」は、多角形状の導体形状が真円からずれることで損失が増大する効果である。細線化した多数の線材を用いれば「多角形状効果」は抑えられて低損失となるが、同時にギャップ数が大きくなって「ギャップ効果」により損失は増大するので、これら二つの効果の競合を考慮しつつ最適な細線化を行う必要がある。

単層電力ケーブル導体の交流損失の解析結果から示唆される、切断加工技術開発の指針は次のようになる。

- 電力ケーブルの低損失化のためには、線材エッジ間のギャップ幅を小さくする必要がある。線材エッジ付近の I_c 特性(幅あたりの I_c 値)の劣化は等価的にギャップ幅の増大をもたらすので、エッジ付近の I_c 特性の劣化を防ぐ必要がある。
- 多角形状の電力ケーブルの低損失化のためには、ギャップ幅に限界がなければ、線材の細線化により多角形状効果を抑制することが有効である。
- ただし、ケーブルの柔軟性の確保や線材エッジの I_c 特性劣化などの要因によりギャップ幅に下限が存在する場合、過剰な細線化はケーブル径の増大や I_c 特性の減少といった問題を引き起こすことがある。

これらの指針は、 I_c 特性の劣化を抑えつつ線材幅を減少させる切断加工技術開発の基本的な方向性を示すものである。過剰な細線化は上述した問題を生じる場合があるので、線材幅は必ずしも細ければ良いわけではなく最適値が存在することを示唆している^{13,15)}。つまり、線材幅はその最適値を目標に細くすれば十分で、むしろ切断加工による I_c 特性の劣化を防ぐことに注力すべきである。線材幅の最適値が実施計画書にある 2~5 mm 程度であることは、本研究開発の単層電力ケーブル導体の解析からも確認された¹⁵⁾。

ただし、線材幅の最適値は電力ケーブルの詳細設計に依存するので、上述の単層電力ケーブル導体の考察では不十分である。そこで最終目標に向けて、今後はより現実に近い多層電力ケーブル導体の交流損失について理論解析を行い、線材幅の最適値を明らかにするなど線材切断加工技術開発の定量的指針を得ることをめざして研究開発を進める予定である。現在すでに二層の場合の解析モデルを考案しており、これを一般化してさらに多層の場合の理論解析を行う。本研究開発は解析的理論を基にしており、この手法による超電導電力機器及び線材に関する研究開発は世界中でも稀少であるという特徴を持つ。解析的理論は、交流損失特性などの物理的機構の解明や導体構造の系統的最適化に極めて有効であり、その特徴を活かした研究開発を進めている。

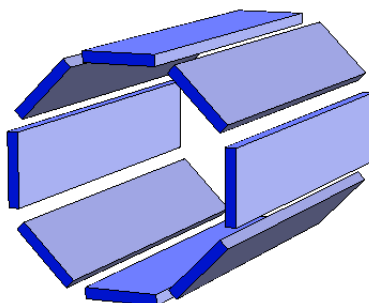


図 2.4.3-65 多角形状の単層電力ケーブル導体

v) レーザ切断加工線材の幅方向特性分布評価

線材幅方向の J_c 値分布は、超電導ケーブルの交流損失特性に大きく影響を与え得る。特に、超電導ケーブルでは交流損失低減のために 10 mm ないしそれ以上の幅の線材を 5 mm~2 mm 程度まで切断加工が可能だが、この切断加工後の状態で線材端部の J_c 値の低下が超電導ケーブルの交流損失に特に大きな影響を与える。

10 mm 幅 IBAD 基板-PLD 線材を、レーザで 5 mm 幅に切断加工した線材の幅方向 J_c 値分布を磁気ナイフ法により測定した結果を図 2.4.3-66 に示す。線材端部の J_c 値が低下している領域は 0.3~0.5 mm 程度である。この程度の端部での J_c 特性低下領域は、様々な製法の Y 系超電導線材において観測される未切断線材端部での J_c 特性低下領域と同程度であり、このレーザによる切断加工技術が線材端部を大きく劣化させることがないことを示した。すなわち、レーザによる切断加工技術がケーブル用線材の細線化に適用できる可能性を示せた。

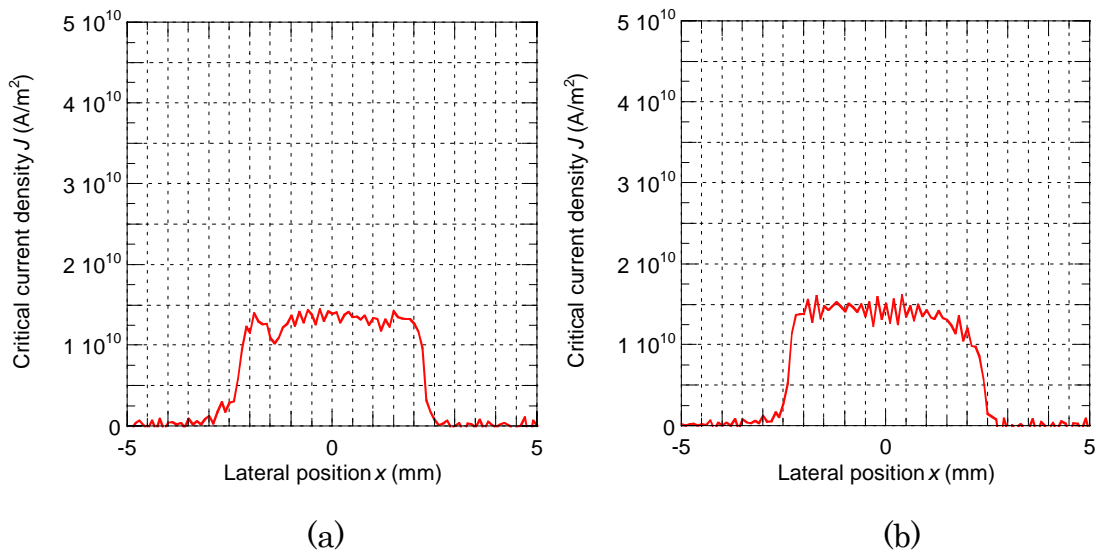


図 2.4.3-66 10 mm 幅 IBAD 基板-PLD 線材をレーザにより 5 mm 幅に切断加工した線材の幅方向 J_c 値分布((a)の右端、(b)の左端が切断端)

vi) 機械式切断加工線材の幅方向特性分布評価

線材幅方向の J_c 値分布は、超電導ケーブルの交流損失特性に大きく影響を与え得る。大電流ケーブルでは交流損失の低減が大きな課題であり、そのため、もっとも細い場合で 2 mm の細線化も検討されている。また、大電流ケーブルに使用される結晶粒配向金属-PLD 線材は、幅広で成膜したのち、スリッタによる機械加工で切断を行う。そのため、スリッタによる切断加工時の線材端での J_c 値低下を評価する必要がある。

スリッタによる切断加工の際には、スリッタの刃の間隔や切断方向によって加工後の J_c 特性に影響が出る。スリッタの刃の間隔を微調整し切断方向を最適にして、結晶粒配向金属-PLD 線材を 4 mm、2 mm に切断加工した線材の幅方向 J_c 値分布を磁気ナイフ法により測定した。その結果を図 2.4.3-67 に示す。加工前の線材が幅広線材であるので、4 mm 幅細線、2 mm 幅細線いずれにおいても、両端ともスリッタによる切断端である。図 2.4.3-67 から、線材端部の J_c 値が低下している領域は 0.3 mm 程度であり、刃や切断方向の調整を適切に行えばスリッタによる細線加工技術が線材端を大きく劣化させることがないことを示した。すなわち、このスリッタによる切断加工技術がケーブル用線材の細線化に適用できる可能性を示せた。

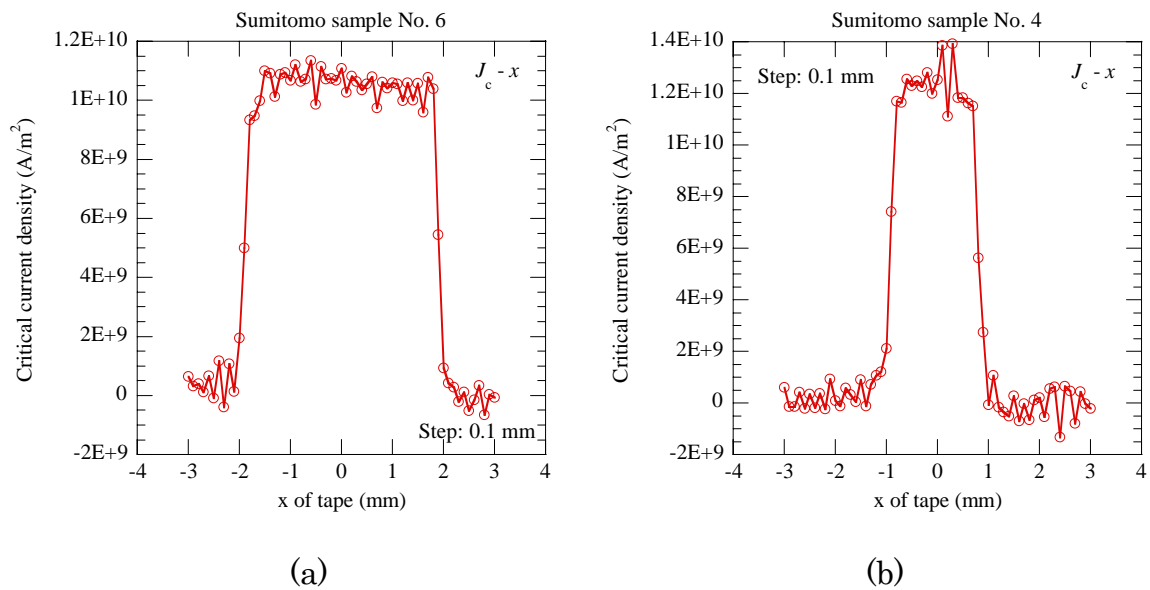


図 2.4.3-67 結晶粒配向金属-PLD 線材を 4 mm、2 mm に細線化した線材の幅方向 J_c 値分布((a)4 mm 幅細線、(b)2 mm 幅細線)

(b-4) 加工線材における微細組織観察

切断加工及びスクライビング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、これらの結果を細線化プロセスにフィードバックし、加工条件等の適正化支援を目的とする。本節では、長尺線材の切断加工の最適化を支援した結果について述べる。図 2.4.3-68 に超音波切断を行った切断面端面及び切断面から 100 μm 内部の組織を示す断面 SEM 写真を示す。この切断を行った加工条件は、ブレード粒度が#600(粒度 20~30 μm)、超音波振幅幅が 6 μm である。また、サンプルの断面出しには集束イオンビーム(FIB)法を採用した。加工面端面はハステロイ™、超電導層、中間層とロールケーキ状に折れ曲がっていることがわかる。切断加工面から 100 μm 内部では Ag/GdBCO/CeO₂/GZO/ハステロイ™の積層構造が保たれていることがわかり、超電導特性は健全であると考えられる。次に図 2.4.3-69 でブレード粒度#2500 により切断した切断加工面端面の断面 SEM 像を示す。図 2.4.3-68 で示すようなハステロイ™の巻き込みは無いが、超電導層及び中間層の破壊は加工端面からおよそ 30 μm 内部まで観察され、銀層の剥離は 50 μm 程度まで確認できる。これらの結果を踏まえ、超音波ポリッシュカットによる切断を行った。この条件で切断した端面の断面 SEM 像を図 2.4.3-70 に示す。この条件では、切断端面近傍でも YBCO/CeO₂/GZO の積層構造が保たれており、切断面も極めてシャープである。以上のように、線材切断加工後 SEM による微細組織観察を行い、その観察結果から切断加工条件を適正化することに貢献した。

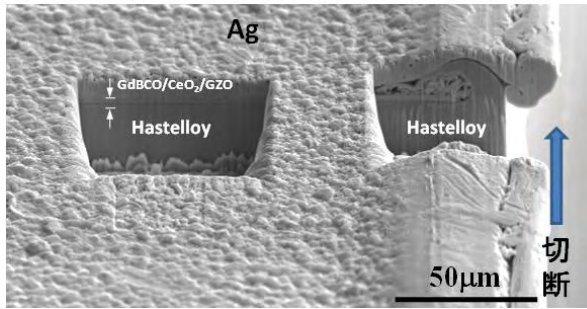


図 2.4.3-68 超音波機械切断加工面の断面 SEM 像、ブレード;粒度#600

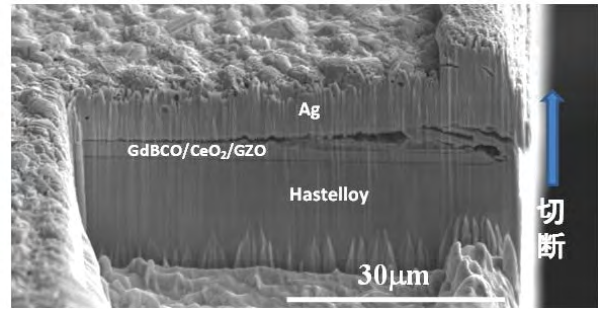


図 2.4.3-69 超音波機械切断加工面の断面 SEM 像、ブレード;粒度#2500

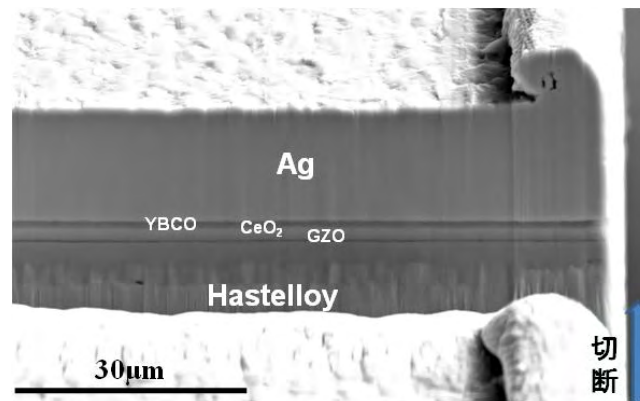


図 2.4.3-70 超音波ポリッシュカットにより切断した端面の断面 SEM 像

(4) 成果のまとめ

本研究開発項目では、ケーブル用及び変圧器用の低交流損失線材として、それぞれ 2 mm 幅で 77 K,s.f. 中で 300 A/cm-w の I_c 値をもつ 50 m 長線材、また 50 m 長 5 mm 幅線材を 5 分割加工することによる交流損失の 1/5 低減の実証という中間目標の達成をめざし、IBAD 基板、PLD 及び MOD 超電導層、結晶粒配向金属-PLD 線材などの均一性向上技術の開発を行うとともに、線材の 2 mm 幅切断加工や 5 分割スクライビング溝加工などの細線加工技術の開発を行った。また、加工前後の線材の特性分布評価技術を開発し、線材作製及び加工プロセスにフィードバックすることにより、目標達成を支援した。以下に主な成果をまとめる。

- PLD-CeO₂/Sputter-LMO/IBAD-MgO/Sputter-GZO/ハステロイ™ 中間層付き基板について、各層の長時間安定条件を把握することにより、200 m 線材に亘って CeO₂ 層の面間配向度約 3 度の均一性を実現した。また、結晶粒面内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。
- Reel to Reel の走査型レーザ観察装置により中間層の各層成膜プロセス後の欠陥密度の評価を行いプロセスに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。

- PLD 超電導層作製工程において、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 値均一化(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(@77 K,s.f.)を達成した(最小 I_c 値の 5 倍で 388 A/cm-w(@77 K,s.f.))。
- IBAD-PLD 線材の I_c 値の幅方向分布の評価を行い、10 mm 幅線材の両端 1 mm の領域で I_c 値低下が見られるものの、通電割合($I_{c, \min}$ x 分割数/加工前 I_c 値)として短尺で 60 %、中間目標の 50 m の長尺で 42 %程度(5 分割スクライビング後)と、5 分割加工後のヒステリシス損失 1/5 低減を実証可能な均一性を得た。
- IBAD-MOD 線材の作製工程において、チューブ塗布方式を用いた膜厚の長手方向及び幅方向の均一化により、2 mm 幅-20 m 長線材で 55 A/2 mm-w (@77 K,s.f.) の I_c 値を得た(加工前 I_c 値をわずかに向上させることにより年度内に中間目標が達成できる見通し)。また、20 m 長線材を 5 mm 幅-5 分割スクライビング加工を実施し、連続局所測定でヒステリシス損失が 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。
- 高い結晶粒面内配向度を有する GdBCO- IBAD-PLD 線材に対し、1~4 T 程度の磁場が線材面に対し 15~60 度程度の角度で印加された場合、そのヒステリシス損失が理論に比べ 1~2 桁小さくなる新現象を発見した。この現象は、今後の SMES、電動機、風力発電機等、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。
- 30 mm 幅の結晶粒配向クラッド金属基板上的 $CeO_2/YSZ/CeO_2$ 中間層作製技術を開発するとともに、PLD 法による超電導層成膜条件の安定性(温度、雰囲気、プルーム)の向上を図ることで、2 mm 幅 28 m 長線材に対し 300 A/cm-w (@77 K,s.f.)の I_c 値を達成し、中間目標の 50 m 長線材での同 I_c 値を年度内に達成する見通しを得た。
- ケーブル用の 2 mm 幅及び 4 mm 幅切断技術については、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 値維持率 90 %以上となる加工プロセスを確立した。
- 低パワーでのレーザ照射と 2 段階化学エッチングからなる改良型のレーザスクライビング技術を開発し、加工の高速化とともに、高いフィラメント間抵抗を保ちながらオーバーエッチによる I_c 値低下を低減できる見通しを得た。
- Reel to Reel のエッチング装置等を開発するとともに、マスキングテープ素材や加工条件の適正化を行うことにより、中間目標である 50 m 長の 5 mm 幅線材の 5 分割スクライビングに成功した。高いフィラメント間抵抗とヒステリシス損失の 1/5 以下への低減が得られており、コイルに加工後の交流損失評価に使用できる見通しである(年度内に達成見込み)。
- 長尺加工線材の非破壊評価法として、SQUID 渦電流法の高速化(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、超電導特性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。

- マイクロホール素子を用いた磁気顕微鏡による細線加工線材における電磁特性のマイクロ分布の評価技術、ピックアップコイルアレイを用いた細線加工線材中の電流分布の非接触評価技術など、細線加工プロセスの改善に貢献できる評価技術を開発した。
- SEM、TEM 等を用いた加工前後の線材の微細組織観察を行い、線材作製・加工プロセスの改善に貢献した。

以下の表 2.4.3-3 に目標に対する達成度をまとめる。

表 2.4.3-3 中間目標と実績の比較、見通し

成膜法	中間目標	実績 (H22年7月現在)	目標 達成 度	H23年3月までの 中間目標達成 見通しと根拠
IBAD系基板		CeO ₂ 層配向度4度未満 200 m	○	低コスト目標と同時に達成見込み
IBAD-PLD 線材	ケーブル用 2 mm 幅- 300 A/cm-w, 50 m (@77K,s.f.)	2 mm 幅-50 m, 388 A/cm-w	◎	達成
		5 mm 幅5分割線材(50 m) ヒステリシス損失 1/5 以下を確認	○	コイル形状での 評価で達成の見 込み
IBAD-MOD 線材	変圧器用 5 mm 幅 5分割-交流 損失 1/5	2 mm 幅-50m 397A/cm-w	◎	達成
		5 mm 幅5分割線材(20 m) ヒステリシス損失 1/5 以下を確認	○	長尺化・コイル 形状での評価で 達成の見込み
結晶粒配向金 属基板-PLD 線材		2 mm 幅-28m, 300 A/cm-w	○	レーザ安定化に より 50 m 長達 成見込み
IBAD系基板 -PLD/MOD 線材細線加工 技術	50 m 長 5 mm 幅 5分割 溝加工	50 m 5 mm 幅5分割 フィラメント間抵抗 > 0.1 MΩ/cm ヒステリシス損失 1/5 以下	○	コイル加工後、 均流の確認によ り交流損失 1/5 実証見込み
結晶粒配向金 属基板-PLD 線材細線加工 技術	2 mm 幅切 断加工後 I_c 値維持率 90 % 長さ：50 m	I_c 値維持率 90 %以上 28 m	○	上記 PLD 線材の 長尺化により達 成見込み

◎：中間目標達成 ○：H23年3月末までの中間目標達成が見通せている

△：H23年3月末中間目標達成には技術開発の大きな進展が必要

(5) 今後の計画と目標達成の見通し

ケーブル用の 50 m 長、2 mm 幅線材に対し 300 A/cm-w 以上の I_c 値という中間目標は、IBAD-PLD 線材において極低コスト条件とともに達成することができた。IBAD-MOD 線材については、加工前線材の I_c 値向上の検討を進めることで、今年度中に目標達成ができる見通しである。一方、200 m 長、2 mm 幅線材に対し I_c 値が 500 A/cm-w という最終目標を達成するためには、線材のさらなる高 I_c 値化、長尺に亘っての均一化が必要である。本期間中においては、IBAD-MgO 中間層の高配向化、配向度の均一化に成功し、線材の I_c 値としては 500 A/cm-w(@77 K,s.f.) 以上を超える値が 50 m で既に実現されている。2 mm 幅切断加工による I_c 値の保持率を現状の 90 % と仮定すると、560 A/cm-w(@77 K,s.f.) の線材を作製できればよい。現状で線材の J_c 値は 3-4 MA/cm²(@77 K,s.f.) に達しているの、これは膜厚 1.4-1.8 μm の線材を極低技術コスト条件で作ることを意味し、現状の作製条件を最適化していくことで十分達成可能と考えられる。最も大きな課題は、200 m 長の基板の全長に亘って大きな欠陥のない中間層付き基板を作る技術であり、導入した Reel to Reel のレーザ走査形状観察装置を用いた評価を各工程にフィードバックし、欠陥頻度の低減を図っていく予定である。

変圧器用の線材に対しては、線材特性の均一化に加え、改良型レーザスクライビング技術の開発により 50 m 長 5 mm 幅線材の 5 分割溝加工に成功し、変圧器応用に必要な十分高いフィラメント間抵抗が保持できることを実証した。今後、5 分割線材をコイル形状に加工し、交流電流の均流を実証することで交流損失 1/5 の実証という中間目標を今年度中に達成できる見通しである。一方、100 m 長 10 分割溝加工という最終目標達成には、2 つの大きな課題があると考えられる。第一の課題は線材特性の幅方向分布の均一化である。現状の線材は、テープ端から 100-200 μm 程度の領域で I_c 値が低下していることが明らかになった。これは、主として超電導層などの成膜プロセスに起因するものである。テープ端は中央に比べ基板温度の低下やプラズマの回り込みなどのある特異点となっており、成膜条件の適正化によりある程度改善できる可能性はあるが、本質的な解決方法としては例えばテープ幅を 10 mm から 12 mm に拡張し、両端を切り落とす方法も考えられる。結晶粒配向金属基板上線材では 30 mm 幅で均一化に成功しているの、極低コスト条件の維持という課題はあるものの、今後選択肢の一つとして検討していく。

一方、5 mm 幅 10 分割のスクライビングについては、現状のレーザスクライビングと接着剤付きマスキングテープを用いた化学エッチングを併用した方法では溝幅を 100 μm 以下にすることはできず、各フィラメントの I_c 値を維持することは困難が予想される。

(非公開)

(非公開)

表 2.4.3-4 最終目標とその見通し

分類	最終目標	課題	アプローチ
IBAD 基板		配向度：～4 度 長さ>200 m 基板幅広化による 幅方向均一化	H23 に各層の薄膜化、高速化 (極低コスト化)を短尺実証。 H24 に 200 m 化。基板幅広化 (例えば 12 mm 化)により幅方 向均一化可能。
IBAD-PLD 線材	ケーブル用 2 mm 幅 500 A/cm-w (@77 K,s.f.) 200 m	I_c : >560 A/cm-w 長さ> 200 m 基板幅広化による 幅方向均一化	・高速化...ターン数増加、レー ザパワー増加、・高 J_c 値化に より達成可能。H23 高 I_c 値で 速度向上、H24 200 m 化。
IBAD-MOD 線材	変圧器用 5 mm 幅	I_c : >560 A/cm-w 長さ> 200 m 基板幅広化による 幅方向均一化	Reel to Reel 装置改造による 2 レーン化、高速化、昭和バッチ 炉採用により達成。H23 I_c 値向 上、H24 200 m 化。 基板幅広化により端部での膜 厚増加の問題を回避できる
結晶粒配向 金属-PLD 線材	10 分割 100 m	I_c : >560 A/cm-w 長さ> 200 m	レーザの安定化やマルチコー トによる膜厚増加で達成予定
IBAD 基板 -PLD/MOD 線材の細線 加工技術	交流損失が 加工無しに比 べ 1/10	5 mm 幅 10 分割加 工、フィラメント間 抵抗 >0.1 MΩ/cm 長さ 100 m	(非公開)
結晶粒配向 金属-PLD 線材の細線 加工技術		2 mm 幅切断加工 I_c 値維持率 >90 % 長さ 200 m	30 mm 幅線材作製プロセスの 適正化、スリッタ機械加工条件 最適化により達成可能

引用論文リスト

- (1) Y. Iijima, K. Kakimoto, Y. Sutoh, S. Ajimura, and T. Saito, "Development of long Y-123 coated conductors by ion-beam-assisted deposition and the pulsed-laser-deposition method", *Supercond. Sci. Technol.* Vol. 17 (2004) 264-268.
- (2) N. Chikumoto, S. Lee, K. Nakao, K. Tanabe, "Development of inside-plume PLD process for the fabrication of large $I_c(B)$ REBCO tapes", *Physica C* Vol. 469 (2009) 1303-1306.
- (3) S. Lee, N. Chikumoto, T. Yokoyama, T. Machi, K. Nakao, and K. Tanabe, "Development of In-Plume Pulsed Laser Deposition of High- I_c GdBCO Films for Coated Conductors", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* Vol. 19 No. 3 (2009) 3192-3195.
- (4) A. Ibi, H. Fukushima, R. Kuriki, S. Miyata, K. Takahashi, H. Kobayashi, M. Konishi, T. Watanabe, Y. Yamada, Y. Shiohara, "Development of long YBCO coated conductors by IBAD-PLD method", *Physica C* Vol. 445-448 (2006) 525-528.
- (5) A. Ibi, H. Fukushima, Y. Yamada, S. Miyata, R. Kuriki, K. Takahashi and Y. Shiohara, "Development of long GdBCO coated conductor using the IBAD/MPMT-PLD method", *Supercond. Sci. Technol.* Vol. 19 (2006) 1229-1232.
- (6) 木須隆暢, "超伝導体中の電流分布・量子化磁束ダイナミクスの可視化技術", *応用物理*, Vol. 79 No. 1 (2010) 38-42.
- (7) A. M. Matsekh, M. Inoue, T. Kiss, A. Ibi, S. Miyata, Y. Yamada, T. Izumi, "Improvement of spatial homogeneity in GdBCO/IBAD-MgO coated conductor", *Physica C*, in press.
- (8) M. Inoue, K. Abiru, Y. Honda, T. Kiss, Y. Iijima, K. Kakimoto, T. Saitoh, K. Nakao, Y. Shiohara, "Observation of current distribution in high- T_c superconducting tape using scanning Hall-probe microscope", *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, Vol. 19 No. 3 (2009) 2847-2850.
- (9) K. Abiru, Y. Honda, M. Inoue, T. Kiss, Y. Iijima, K. Kakimoto, T. Saitoh, K. Nakao, Y. Shiohara, "Visualization of non-uniform current flow in coated conductors by scanning Hall-probe magnetic microscopy", *Physica C*, Vol. 469 (2009) 1450-1453.
- (10) 木須隆暢, "超伝導体中の電流分布・量子化磁束ダイナミクスの可視化技術", *応用物理*, Vol. 79 No. 1 (2010) 38-42.
- (11) K. Higashikawa, Y. Honda, M. Inoue, M. Iwakuma, T. Kiss, K. Nakao, Y. Yamada, T. Izumi, "Spatially-resolved measurement on time-dependent

electromagnetic behavior in alternating current carrying coated conductor", *Physica C*, in press.

- (12) Y. Mawatari and K. Kajikawa, "Hysteretic ac loss of polygonally arranged superconducting strips carrying ac transport current", *Appl. Phys. Lett.* Vol. 92, No. 1 (2008) 012504.
- (13) A.P. Malozemoff, G. Snitchler, and Y. Mawatari, "Tape-Width Dependence of AC Losses in HTS Cables", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* Vol. 19, No. 3 (2009) 3115-3118.
- (14) Y. Mawatari, "Field distributions in curved superconducting tapes conforming to a cylinder carrying transport currents", *Phys. Rev. B* Vol. 80, No. 18 (2009) 184508.
- (15) Y. Mawatari, A.P. Malozemoff, T. Izumi, K. Tanabe, N. Fujiwara, and Y. Shiohara, "Hysteretic ac losses in power transmission cables with superconducting tapes: effect of tape shape", *Supercond. Sci. and Tech.* Vol.23 No.2 (2010) 025031.

2.4.4 高強度・高工業的臨界電流密度(J_c)線材作製技術開発 (ISTEC、古河電気工業、JFCC、東北大学、中部大学)

(1) 研究開発目標

本項では、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、かつ限られた断面積の中で大電流を実現しなければならない大電流ケーブルから求められる高強度、高 J_c (臨界電流/線材総断面積) 線材の開発が目標である。

高 J_c 線材の実現には線材断面積の大半を占める金属基板の薄膜化と臨界電流値の向上がともに必要である。ここでは主に金属基板の薄肉化、およびそれを可能にするための高強度化を主な目標とする。また、臨界電流値の向上は他の研究項目においても実施されているため、そこで開発された臨界電流向上技術を当研究項目で開発された高強度金属基板上で実現することが目標となる。具体的には中間目標として 300 A/cm-w(@77 K,s.f.)-1 GPa-50 m、 $J_c = 30$ kA/cm²(@77 K,s.f.)-50 m が設定されている。さらに最終目標としては 500 A/cm-w(@77 K,s.f.)-1 GPa-200 m、 $J_c = 50$ kA/cm²(@77 K,s.f.)-200 m をめざす。

(2) 研究の経緯及び実施体制

ハステロイ™ 基板の薄肉・高強度化には、冷間圧延における強加工が必要となる。これに伴い、残留応力の悪影響や、基板の薄肉化により成膜時の基板表面の温度が変化することなどが危惧されるので、従来の中間層および超電導層成膜条件がそのまま適用できるかどうかは自明ではない。そのためまず、他の研究テーマで開発されている成膜技術が本研究テーマで開発する高強度基板上でも同様に有効であるかを確認することから始めた。また、作製した線材については機械強度及び、数値目標としては設定されていないが強磁場中の応用が想定されるため、強磁場中の通電試験を含む精密な評価も行った。

実施体制としては、PLD 及び MOD 線材対応高強度基板/中間層プロセス開発 ((a-1) i)、これを用いた PLD 超電導層形成技術 ((a-2)) 及び MOD 超電導層形成技術 ((a-4)) に関しては、主として ISTEC が担当し、これを、微細組織観察により JFCC (a-3)) が支援する。一方、MOCVD 対応高強度基板/中間層プロセス開発及びその上の MOCVD 超電導層形成技術は中部電力と古河電気工業が ((a-5)) 担当している。これらの開発線材の電磁氣的評価として低温強磁場中での評価を東北大学 ((a-6)) が、機器適用性評価を山口大学 ((a-6) ii) が実施する体制である。高臨界電流化技術開発では、基板/中間層開発 ((b-1))、PLD 開発 ((b-2)) 及び MOD 開発 ((b-4)) に関しては、主として ISTEC が担当し、これを、微細組織観察により JFCC ((b-3)) が支援する体制で進めている。

(3) 具体的成果

(a) 高強度金属基板対応線材作製技術開発

(a-1) PLD/MOD 線材対応高強度基板・中間層作製技術開発

本項では、高強度薄肉線材の開発にあたり、薄肉基板とそれを用いた中間層作製技術の開発成果を纏める。

ハステロイ™を用いた Y 系超電導線材の薄肉・高強度化には、まず金属基板の冷間圧延における強加工が必要となる。これに伴い、残留応力により線材の幅方向・厚み方向ともに直進性が低下するため、成膜時に線材端部が成膜装置リールと接触して端部の部分的な歪みや剥離などを生じる恐れがある。また、基板の薄肉化により成膜時の基板表面の温度が変化し、成膜条件に影響を与える可能性もある。また、成膜時の高温処理により引っ張り強度が低下すると予想されるため、これらのバランスを取ることが重要である。

図 2.4.4-1 に従来基板と強加工を施した薄肉基板の応力-歪み曲線を示す。薄肉基板において、強加工を施すことにより安定化層分を考慮して 1 GPa の強度目標が達成しうる強度が得られた。次に、基板に最も高温のプロセスである PLD による超電導層成膜環境と同じ熱履歴を経験させて基板強度の変化を調べた結果を図 2.4.4-2 に示す。成膜環境経験により、1 割強の強度の低下が確認された。このことから、成膜時には高温暴露時間の短縮、すなわち成膜時間短縮と低成膜温度の適用を考慮する必要があると考えられる。中間層成膜時においても、成膜前のオリジナル基板からの強度低下を出来るだけ抑えるため、上記の問題に注意しつつ、最適条件において成膜を行ったところ、PLD-CeO₂ (500 nm) /sputter-LMO/IBAD-MgO/ sputter-GZO 構造において、 $\Delta\phi_{\text{CeO}_2} = 3.7$ 度と 70 μm 厚基板においても 100 μm 厚基板と同等の良好な結晶粒配向性を得た。

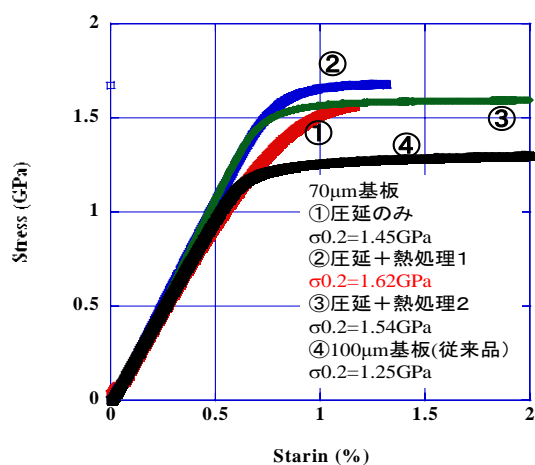


図 2.4.4-1 各種ハステロイ™テープの
応力-歪み曲線

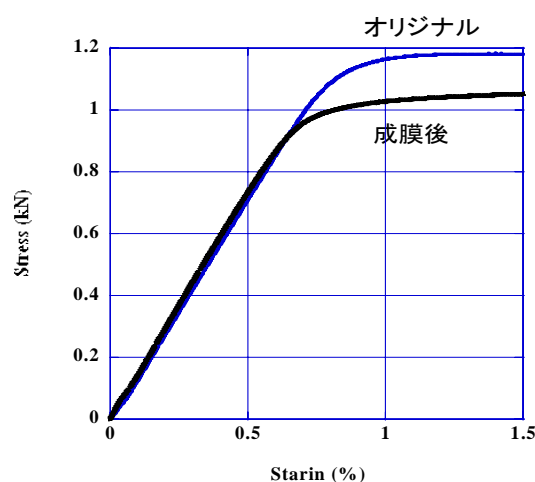


図 2.4.4-2 金属基板と PLD 成膜後線材
の応力-歪み曲線

各プロセスにおいてテンションや成膜温度の調整を行い、この中間層構造を有する基板を長尺化し、50 m 長の前後において $\Delta\phi_{\text{CeO}_2} = 3.7 - 3.8$ 度の良好な結晶粒の面内配向を有する中間層付き基板の作製に成功した。このような基板を用いて超電導層の成膜を行い、 I_c 値が維持出来る限界の引っ張り強度を測定した。結果は PLD、MOD による超電導層成膜後評価であるため、後の(a-3)、(a-4)に詳述するが、どちらの成膜方法によっても室温での強度評価では目標とした 1 GPa をわずかに下回った。Cu 層の強度寄与を無視していることや、実際は室温ではなく低温で使用されるため、低温での評価を行うなどにより目標を達成見込みである。

(a-2) PLD 法による高強度線材作製技術開発

本項では、(a-1)PLD/MOD 対応高強度基板・中間層作製技術開発において開発された中間層付き基板に PLD 法により超電導層を成膜して高強度線材を製造する技術開発の成果を纏める。

PLD 法による成膜では、基板が短時間ではあるが 800 °C 以上の高温に晒されるため、成膜により金属基板が焼鈍されて強度が低下する。また、薄肉基板の場合には厚みに伴う基板の熱容量の減少とテープ内温度勾配の増加により、テープ表面の温度が上昇しやすく、通常基板とは成膜条件が異なることが考えられる。これらの課題を解決するため、特に温度に着目して、最適成膜条件を検討した。この際、焼鈍効果につながる成膜温度・時間を抑えるため、成膜回数の抑制も行った。成膜後は通電により I_c 特性を評価し、常温での引っ張り試験の後、再度 I_c 値測定を実施して I_c 特性の維持限界強度を調べた。

様々なパラメータを調整した結果、極低コスト条件を満足する 15 m/h で 400 A/cm-w(@77 K, s.f.)以上の特性を得ることが出来たので、この線材を用いて機械強度の評価を行った。図 2.4.4-3 に、PLD 法により成膜された高強度 70 μm 厚ハステロイ™基板を用いた GdBCO 線材の応力-歪み曲線を示す。通常基板と高強度薄肉基板を比較すると、安定化層厚みを 30 μm と想定した場合には 1 GPa 近傍で降伏していることが分かる。これは成膜前の金属基板強度からの比較では 1 割程度低下しており、成膜による焼鈍効果が出たものと考えられる。

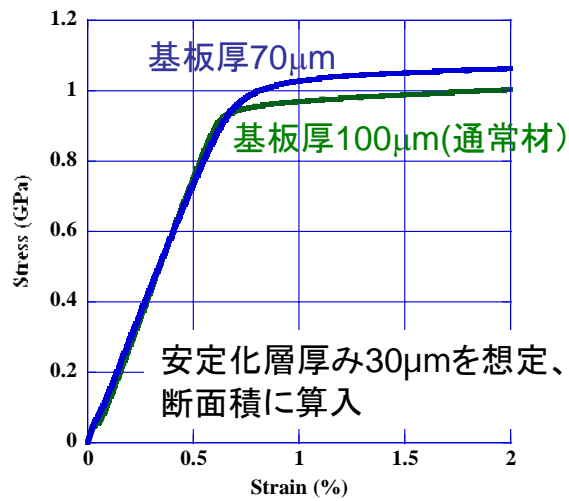


図 2.4.4-3 厚みの異なる基板を用いて PLD により成膜した線材の応力-歪み曲線

図 2.4.4-4 は薄肉基板と従来基板の引っ張り試験による I_c 値の可逆限界応力である。応力は安定化層 $30 \mu\text{m}$ として算出しており、わずかに 1 GPa を下回る 0.9 GPa で I_c 値が低下している。そこで強度としては 1 割程度の上昇を期待出来るため、同様に強加工を施した $80 \mu\text{m}$ 厚の基板を用いて長尺線材の作製を行った。図 2.4.4-5 に $80 \mu\text{m}$ 厚基板を用いて作製した PLD-GdBCO 線材の I_c 値分布図を示す。ここで、この線材は製造速度 30 m/h で作製されており、技術コストは 2.27 円/Am と極低技術コスト条件を満足している。

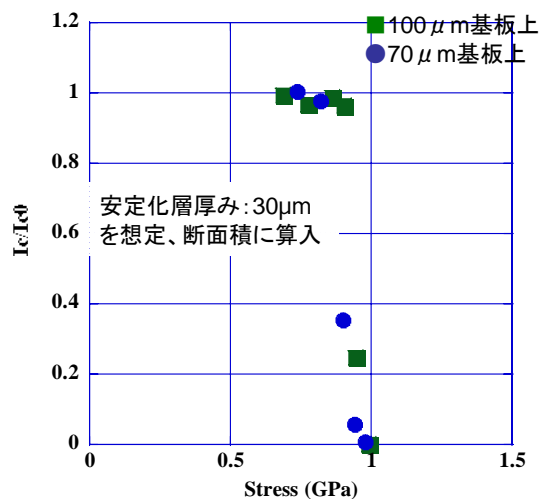


図 2.4.4-4 厚みの異なる金属基板を用いて PLD 成膜した線材の引張り応力による I_c 値変化

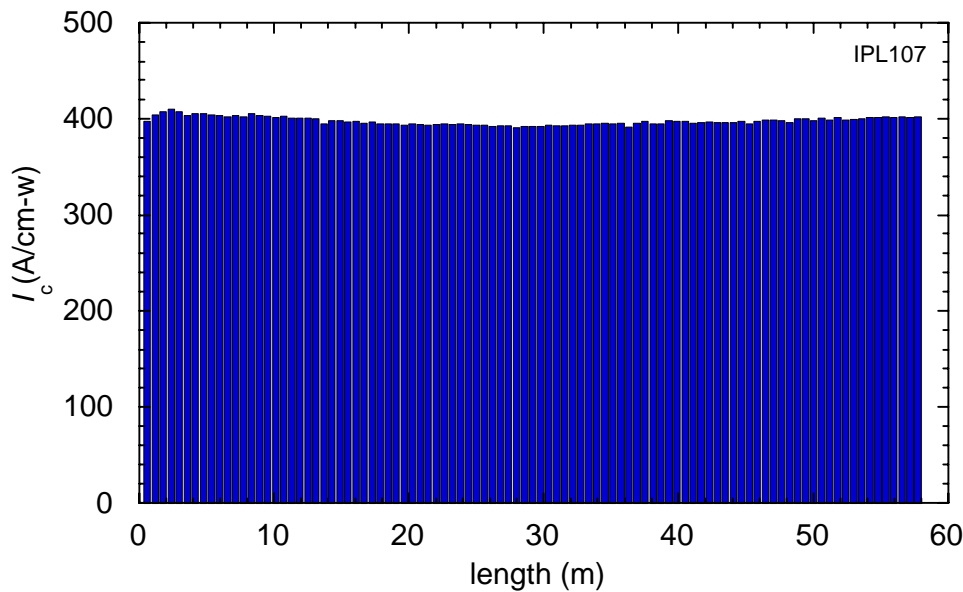


図 2.4.4-5 80 μm 厚基板を用いて作製した PLD-GdBCO 線材の I_c 値分布

現在、この線材の強度を試験・評価中である。中間目標と現状の差はわずかであり、この基板厚み増加により達成する見込みである。評価に際しては上記の 70 μm 厚基板を用いた線材も含めて、引っぱり試験を液体窒素温度で行うことや、銅の厚み分、銅の機械強度貢献を複合則で考慮して計算するなどの方策により、さらに実用性・信頼性の高い評価結果とする。また今後は、フープ力試験なども行い、SMES に代表される磁場中応用への適用性を評価する。

(a-3) 微細組織観察

高強度・高工業的臨界電流密度(J_c)線材開発のため、薄肉基板を用いて、超電導線材を製造する必要がある。本項では、70 μm 厚のハステロイ™に $\text{CeO}_2/\text{LaMnO}_3(\text{LMO})/\text{MgO}/\text{Gd-Zr-O}(\text{GZO})$ 中間層を形成した基板を用いて、基板をプルーフ内部で成膜することで高速成膜を行う PLD 法の一つである in-plumePLD 法⁽¹⁾により $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y(\text{GdBCO})$ 超電導層を形成したサンプルについて、TEM による微細構造観察を行った結果について述べる。

図 2.4.4-6 に 70 μm 厚のハステロイ™薄肉基板上に形成された GdBCO/ $\text{CeO}_2/\text{LMO}/\text{MgO}/\text{GZO}$ 層の断面 TEM 像と TEM 像中の A および B 領域から得られた電子回折図形を a および b に示す。GdBCO 層および CeO_2 層はそれぞれ、1.3 μm 厚、0.6 μm 厚であり、極めて良好な 001 配向をしている。GdBCO 層の表層に一部突起物（矢印部：a 軸配向、傾いた c 軸配向、45 度面内回転した c 軸配向など、配向の乱れた GdBCO 結晶粒）が観察されるが、ほとんどの GdBCO 層は c 軸配向結晶により構成されていることが TEM 観察から判明した。これまで、100 μm 厚のハステロイ™基板上へ in-plumePLD 法により成膜された GdBCO 層の組織を多数観察したが、それらの組織と同様な組織が形成されていることが分かった。

以上のように、70 μm 厚の薄肉基板上へも、従来の 100 μm 厚の HastelloyTM 基板上への中間層、超電導層の成膜と同様な条件で、同様な中間層・超電導層組織が形成できることを TEM 観察から証明した。

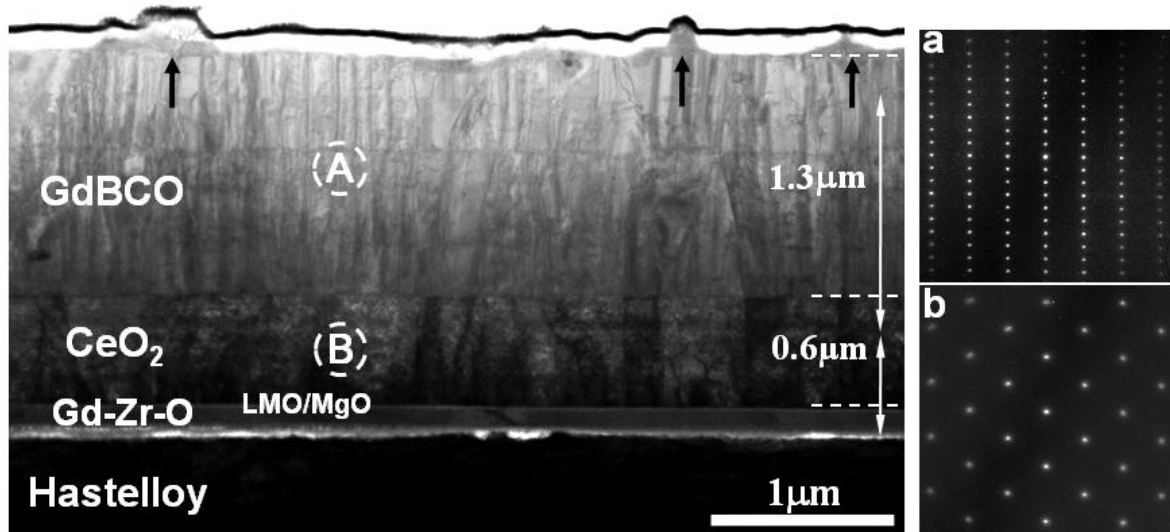


図 2.4.4-6 70 μm 厚の HastelloyTM 薄肉基板上に形成された GdBCO/CeO₂/LMO/MgO/GZO 層の断面 TEM 像と A および B 領域から得られた電子回折図形。(a) GdBCO 層の電子回折図形、(b) CeO₂ 層の電子回折図形

今後も主に TEM 観察から超電導層及び中間層の結晶粒配向、欠陥構造、異相の有無、各層の界面構造等を詳細に解析し、薄肉基板上への作製条件の最適化に貢献する予定である。

(a-4) MOD 法による高強度線材作製技術開発

本項では、高強度薄肉線材の開発にあたり、中間層付き薄肉基板を用いた MOD 法による高強度線材作製技術の開発成果を纏める。

PLD 法による成膜条件と比較すると、MOD 成膜の環境はやや低温で長時間熱処理されることになる。この場合にも、加熱による焼鈍効果を抑制するため短時間で成膜する必要があることと、金属基板厚みが増加した場合にテープ表面の温度が変化して成膜条件が変化する可能性があることを考慮に入れておく必要がある。成膜の技術コスト削減のため、別項にて MOD 成膜の高速化技術開発を行っているが、これと並行して開発が進められた本項目では、まずは薄肉基板における成膜条件の最適化を行った。技術コストとしては 3 円/Am には未達のプロセス条件である。

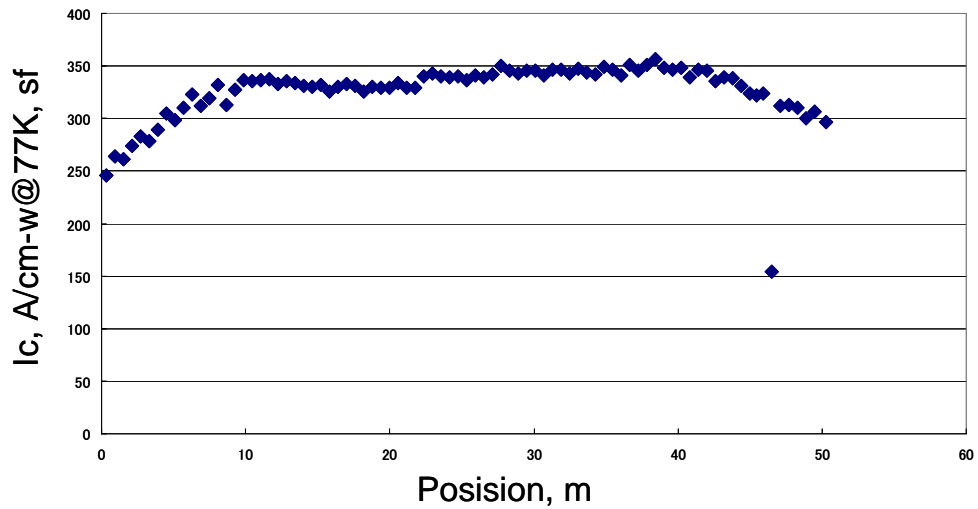


図 2.4.4-7 70 μm 厚基板を用いて作製した 50 m 長 MOD-YBCO 線材の I_c 値分布

図 2.4.4-7 から、MOD 線材はほぼ 300 A/cm-w(@77 K,s.f.)を超える高い I_c 値を得ており、薄肉基板を用いての MOD 法による高強度線材の作製見通しを得たといえる。本結果はコスト目標を満足するものではないが、コスト目標を満足する技術開発を別項目で行っており、今後、その成果を今回の結果とあわせ、適用することでこの技術コストに関する課題を解決する。

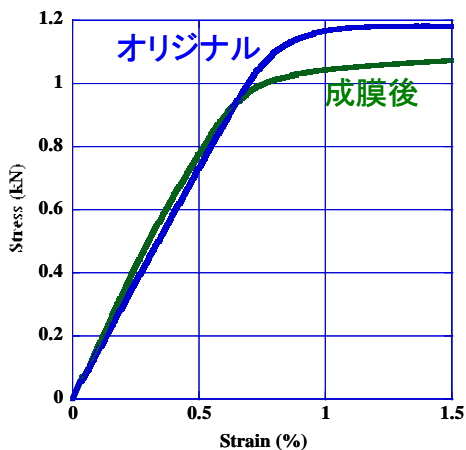


図 2.4.4-8 70 μm 厚基板（図中オリジナル）を用いて作製された MOD-YBCO 線材の応力-歪み曲線

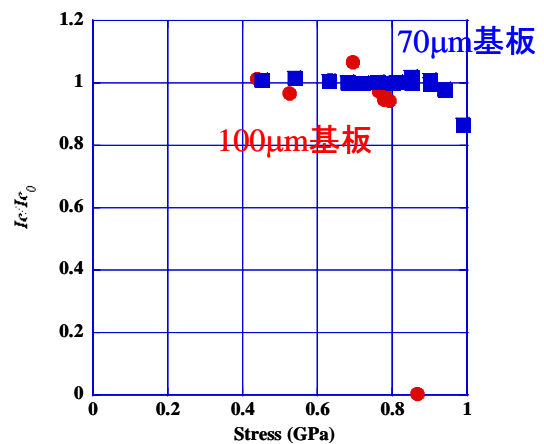


図 2.4.4-9 厚みの異なる金属基板を用いて MOD 法により成膜した線材の引張り応力による I_c 値変化

上記の線材を用いて、強度試験を PLD 線材と同様に行った。図 2.4.4-8 に 70 μm 基板の MOD 成膜前後の応力-歪み曲線を示す。図から、PLD 線材同様に成膜処理による焼鈍効果で強度が低下していることが分かる。また、成膜による強度低下は PLD の場合とほぼ同程度であった。

図 2.4.4-9 に薄肉基板と従来基板を用いて作製した MOD-YBCO 線材の引張り応力による I_c 値の変化を示す。応力は安定化層 30 μm として算出しており、この場合もわずかに 1 GPa を下回る 0.9 GPa 強で I_c 値が低下している。

今後は Y 系 MOD 超電導線材においても、液体窒素温度での引っ張り試験の実施や、安定化層銅の強度貢献算入などを行い、特性評価を進めると同時に、技術コスト目標を満足するプロセス開発の成果を適用して年度内の中間目標達成をめざす。

(a-5) MOCVD 線材対応高強度基板・中間層作製技術開発

SMES 用コイルでは強磁場中での大電流通電時のフープ応力に耐え得るために、機械強度の高い線材が要求されるため、本項では MOCVD 法に対応した高強度基板・中間層の開発を試みた。

まず、基板材料としてハステロイ™を用いて、厚さの異なる基板において、1 GPa の強度を持つ基板の加工プロセスの開発を進めた。加工プロセスにおける冷間加工度と強度との比較を行い、冷間加工度の制御により図 2.4.4-10 に示すように 75、100 μm 厚の基板において、室温での 0.2 %耐力が 1.6 GPa 以上を得た。

こうした高強度基板は圧延工程等が従来と異なる条件で作製されるため、この上の中間層、超電導層の作製条件にも影響を与える懸念がある。そこで、1 GPa を超える強度を持つ高強度基板上への中間層と MOCVD-YBCO 層成膜を検討した。その結果、高強度基板上でも従来基板と同等の成長条件が適用でき、 $I_c = 240$ A/cm-w(@77 K, s.f.)、 $J_c = 2.4$ MA/cm² を得た。

これらの成果をもとに、長尺基板加工プロセスの安定・高度化を図った。圧延条件の適正化を進めることにより、表 2.4.4-1 に示すように、室温での 0.2 %耐力 = 1.6 GPa を有する 250 m 長の基板を安定して得られるようになった。表に記載した 10 条における 0.2 %耐力の標準偏差は 2 MPa 程度である。また、77 K においては、室温より 10 %以上高い 0.2 %耐力を示すことを確認した。

さらに、薄化 IBAD 中間層において、中間層の成膜条件の適正化を行い、高強度基板上の MOCVD-YGdBCO 層において $I_c = 330$ A/cm-w(@ 77 K, s.f.)、 $J_c = 4.1$ MA/cm² を得た。また、基板や中間層の結合性・剥離に関しては、中間層の薄化にともなう剥離などの生じない成膜条件の検討を行った。「MOCVD 法による磁場中特性改善技術開発」の成果とあわせ、50 m 長の線材で $I_c = 30$ A/cm-w(@77 K, 3 T)、基板強度 1 GPa の中間目標を年度内に達成する。

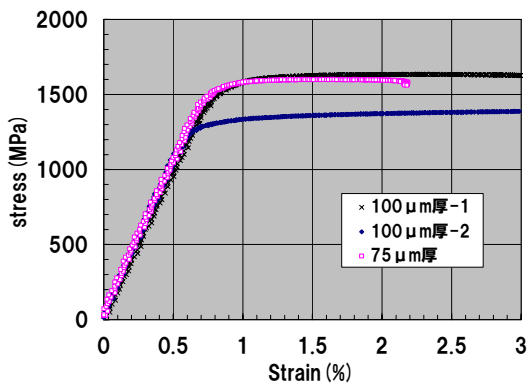


図 2.4.4-10 各種ハステロイ™材の常温での応力-伸び曲線

表 2.4.4-1 長尺高強度基板の 0.2 %耐力

基板Lot.	0.2% 耐力 (MPa)室温	
	0 m位置	250 m位置
基板A-1	1626	1625
基板A-2	1621	1621
基板A-3	1624	1621
基板A-4	1620	1619
基板B-1	1608	1614
基板B-2	1617	1611
基板B-3	1599	1610
基板B-4	1599	1614
基板B-5	1599	1619
基板B-6	1608	1606

(a-6) 高強度線材特性評価

i) 低温強磁場中特性評価

本項の研究では、作製した長尺線材の機械的応力下の超電導特性の理解と実証を目的とし、大口径モデルコイルによるフープ力試験及び、短尺試料の引っ張り歪み試験を実施した。

図 2.4.4-11 に 77.3 K 及び 4.2 K における I_c 値の引っ張り歪み依存性と同時測定した応力-歪み特性を示す。測定した試料は、PLD 法で作製した GdBCO 線材を 2 mm 幅にカットしたものである。安定化層としてスパッタ法により 10 μm の Ag を積層している。応力-歪み特性は 77.3 K と 4.2 K でほぼ同等である。一方で I_c 値は、77.3 K, s.f. と比べ、4.2 K の低温において歪みに対してより鈍感であり、不可逆歪みも向上していることが分かった。

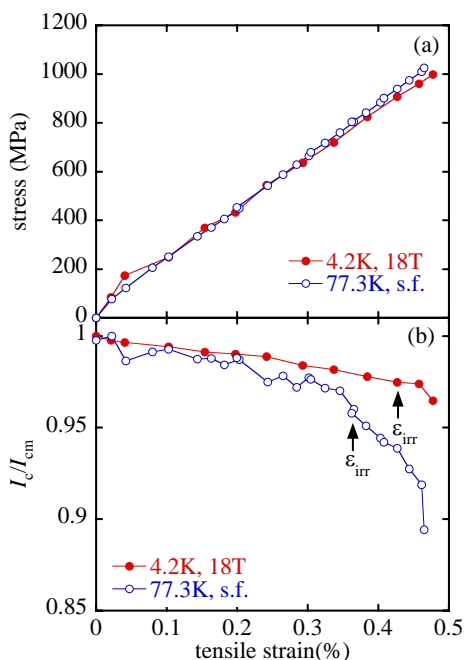


図 2.4.4-11 PLD-GdBCO テープに対する (a) 応力-歪み特性と (b) I_c 値の歪み依存性

これまでの報告では、磁場の印加によって I_c 値の歪みによる低下率は大きくなるが、温度低下では逆に小さくなる。4.2 K、18 T は不可逆磁場よりも十分小さい磁場と考えることができるので、温度低下の効果が大きく寄与することで、 I_c 値の歪み依存性が減少していると考えられる。

次に、直径 280 mm の単層コイルに対してフープ力試験を行った。用いた試料は引っ張り試験を行った試料と同じ PLD-GdBCO テープで幅 5 mm である。

液体窒素で浸漬冷却してコイルの I_c 値を測定した結果、自己磁場下で $I_c = 204 \text{ A/5 mm-w}$ 、 n 値@ $1 \mu\text{V/cm} = 38$ となり、短尺の値とほぼ同じであることが分かった。このコイルを室温ボア 360 mm の大口径超電導マグネットに挿入して試験を実施した。図 2.4.4-12 に、コイル表面に取り付けた歪みゲージで測定した歪みと、通電電流から計算した電磁力の関係を示す。横軸のフープ力はコイルの半径 R 、線材全断面積から求めた電流密度 J 、線材位置での磁束密度 B の積である BJR によって求めた。図 2.4.4-12 から、コイル変形は最大印加電磁力である 1300 MPa 近傍までほぼ線形に変形し、数回の通電に対してその挙動は可逆であることが分かった。この傾きから計算したコイルの見かけ上のヤング率は約 200 GPa となり、短

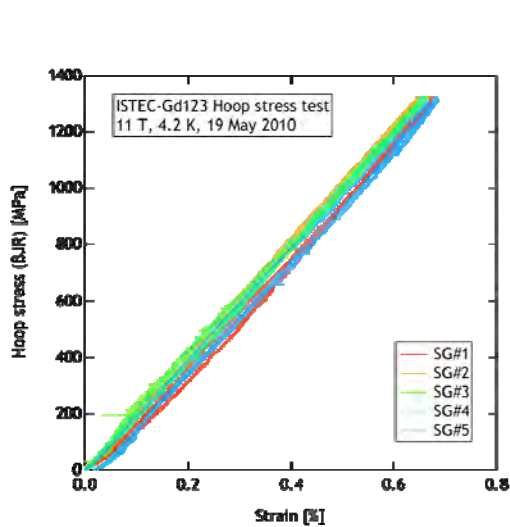


図 2.4.4-12 PLD-GdBCO コイルにおける電磁応力-歪み特性

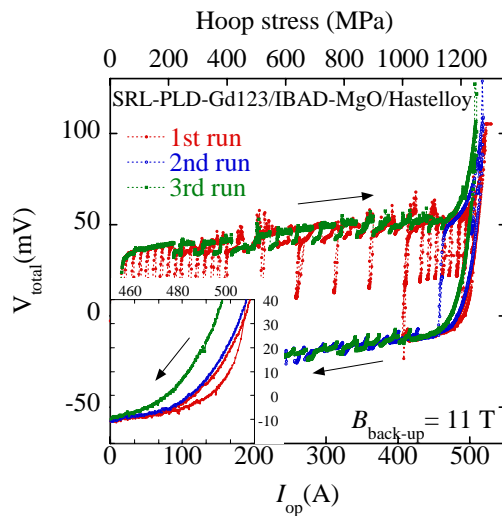


図 2.4.4-13 PLD-GdBCO コイルの電流-電圧特性

尺試料で得られた結果と良い一致を示すことが分かった。次に同時測定した電流-電圧特性を図 2.4.4-13 に示す。図に示した電圧コイルの電極を含む両端電圧のため、電極の抵抗が乗っている。またコイルのインダクタンスによるコイル電圧も現れている。図 2.4.4-13 から、480 A/5 mm-w(@77 K,s.f.)近傍からコイルの超電導-常伝導転移に伴う電圧発生が見られている。図 2.4.4-13 の挿入図は電流減少時における転移近傍の電流-電圧特性の詳細図である。数回の通電により電圧発生が起こる電流が減少していることから、電磁力によって超電導特性が不可逆に劣化していることが分かる。図 2.4.4-11 に示したように、4.2 K における不可逆歪みは約 0.43 % であり、フープ試験では不可逆歪みよりも大きい約 0.7 % 程度の歪みが線材に誘起されていることから、電磁力による超電導線材の劣化が起こったものと考えられる。その他に、いくつかのコイル試験の結果、以下の点が明らかになった。

- コイルにラップジョイントを入れた場合、ジョイント部の剪断応力限界 2~3 MPa によってコイルの耐電磁力特性が決まる。このため、ジョイント部を作製

する場合には、その部分の機械的補強が必要である。

- 表面の超電導層側に電極の端部が来るような巻線状態では、電極端部の超電導層劣化によりさらに低いフープ応力でコイルが劣化する。このため、コイル巻線をしたときの電極構造には、超電導層を機械的に保護する仕組みが必要である。

最終目標に向けて、低温で 1 GPa を目標とするには不可逆歪みの向上が必要である。基板の降伏応力は十分高いので、超電導層の不可逆歪み向上が最も効果的と考えられる。これまでの報告では 77.3 K で 0.6 % 程度の不可逆歪みの報告があることから、不可逆歪み評価方法の見直しや再現性の確認とともに、不可逆歪みや I_c 値の歪み依存性そのものの機構解明が重要となる。

ii) 大電流導体用特性評価

この研究項目ではデータセンターでの直流超電導送電システムの応用を想定した超電導ブスバーについての基本的な設計を行った。さらに、ISTEC で作製した Y 系超電導線材を銅板に半田付けして、超電導特性を測定した。

データセンター(iDC)の消費電力抑制のために高圧直流給電が検討されている。大電流導体については、従来のようなケーブルを用いるより超電導ブスバーを用いることが適当であると考えられる。これは、テープ線材を多段複数列に積み、それを銅ケース内に納めてある電流容量にしたのち、まとめて集合導体として低温配管に納める方式である。比較的低電圧・大電流領域における応用であるので、超電導が必須であり、同時に電磁力が大きくなるため高強度線材を利用する必要性が出てくる。

テープ線材からブスバーを作るために、銅板(0.5 mm 厚)にテープ線材をハンダ付けすること、その臨界電流特性を求めること、電流分布を見積もるために磁場分布測定を行うこと、銅板を曲げることによって臨界電流特性や電流分布がどのように変化するか等について実験を行い、同時に解析を進めることを目標に研究開発を進めた。

銅板にテープ線材をハンダ付けした構造を図 2.4.4-14 に示す。

これを液体窒素で冷却し、電流電圧特性を測定した。結果を図 2.4.4-15,16 に示す。Y 系超電導線材は磁場中 I_c 特性が Bi 系超電導線材に比べて優れているため、磁場中 I_c 特性に関する知見を得るために、永久磁石(PM、0.5 T)を端の線材上に乗せて測定を行った場合と単独の場合で比較を行った。PM を使わない場合には、臨界電流が 130 A/cm-w(@77 K,s.f.)程度となり、出荷時の値とほぼ同じ値を得ることができた。また、PM を利用した場合には、臨界電流が 35 A/cm-w@77 K 以下になった。これは今までに公表されてきた 0.5 T 磁場印加時の I_c 特性に比べて低い。今後の検討が必要である。なお、PM を使わないときの臨界電流測定時の n 値@1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ については、15 以上の値が得られ、極めて良好であった。

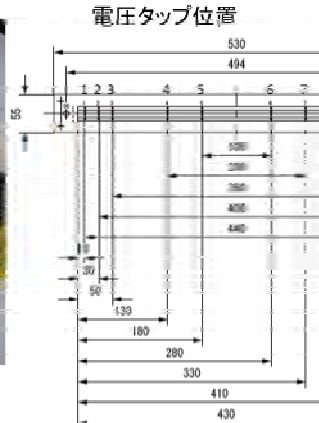
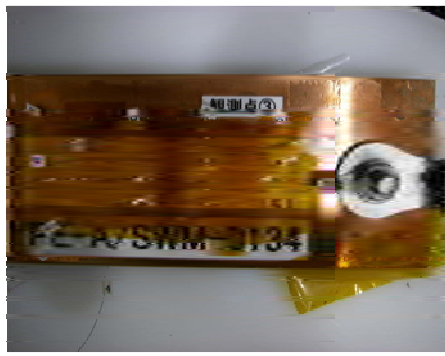


図 2.4.4-14 銅板にテープ線材をハンダ付けした構造

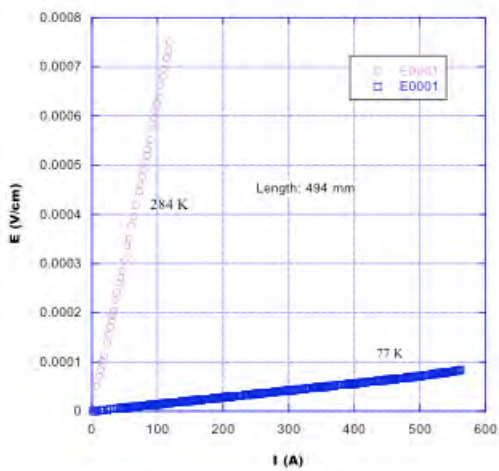


図 2.4.4-15 常温と 77 K の電流—電圧特性

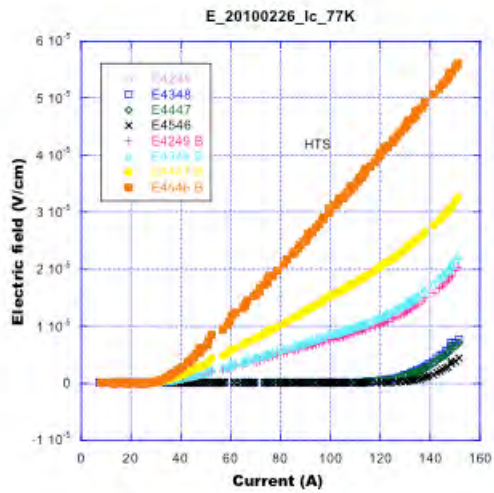


図 2.4.4-16 77 K における電流—電圧特性

(b) 高臨界電流化技術開発

(b-1) 高臨界電流化対応基板・中間層作製技術開発

本項では、高工業的臨界電流密度 (J_c) 線材の開発にあたり、高臨界電流化技術開発の一環としてそれに対応した基板・中間層作製技術の開発成果を纏める。

高臨界電流化には高臨界電流密度化と厚膜化の 2 通りの技術開発方向があるが、対応する中間層付き金属基板の技術開発方向は結晶粒の高配向化により高臨界電流密度化を促すことと、厚膜化に伴う成膜時間の長時間化に対応した中間層の開発、そして高均一化により I_c 特性の劣化部発生を抑制すること、の 3 つが考えられる。このうち、高均一化により I_c 特性の劣化部発生を抑制するテーマについては 2.4.3(a-1)IBAD 基板の均一性向上技術開発の項を参照されたい。結晶粒の高配向化による高臨界電流密度化については、中間層全体として CeO_2 層の結晶粒面内配向度の向上をめざすことになる。 CeO_2 層の結晶粒面内配向度と I_c 特性の関係を

PLD-GdBCO 線材を用いて調べた結果を図 2.4.4-17 に示す。図から、薄膜試料においては $\Delta\phi = 6$ 度の中間層を用いても約 6 MA/cm^2 (@77 K, s.f.) の非常に高い J_c 値が得られており、下地の結晶粒配向度による影響が小さい。一方、厚膜試料は下地となる中間層の配向度に敏感であるが、 $\Delta\phi \sim 4$ 度からはその影響が殆ど無くなることから、中間層の結晶粒配向度としては 4 度程度以上に向上しても高臨界電流化への貢献は殆ど期待できない。結論として、中間層構造としては CeO_2 層の結晶粒面内配向度を 4 度程度に出来るような CeO_2 層の厚みと、それを技術コストとして満足する作製条件を探索することになる。これについては 2.4.5 低コスト・歩留り向上技術開発の項を参照されたい。

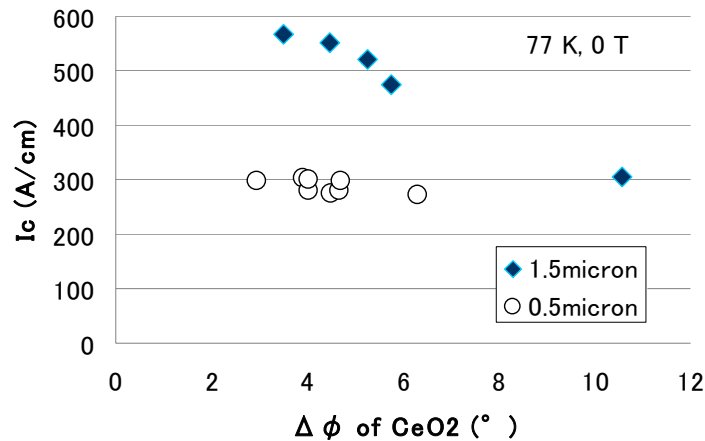


図 2.4.4-17 PLD-GdBCO 線材の I_c 特性の $\Delta\phi$ 依存性

厚膜化による高 I_c 値化に対応する中間層の課題としては、拡散バリア機能の強化が挙げられる。中間層付き基板は長時間加熱により膨れが発生し、最終的には図 2.4.4-18 に示すような MgO 層-GZO 層間での剥離となるが、この時、剥離部分には Ni 元素が拡散していることが EDS により確認された。超電導層の厚膜化によって、現状の拡散防止層厚みでは不十分になる可能性がある。拡散防止層の厚み増加は製造速度の低下とそれに伴うコスト高を引き起こすが、MOD ベッド層の成膜においてはマルチターン化処理により、殆ど技術コストを上げることなく膜厚を上げることが可能である。

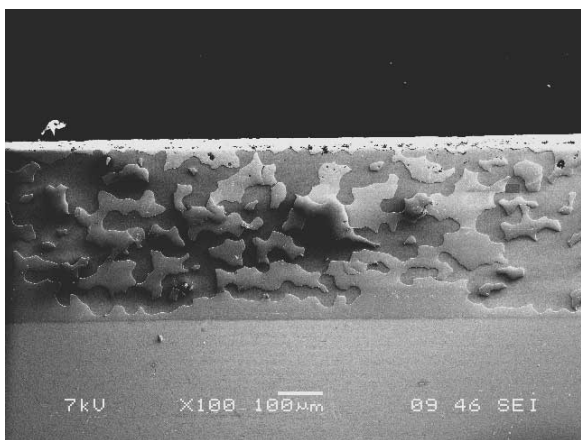


図 2.4.4-18 中間層付き基板の熱処理による剥離部

全ての層において、必要最低限の厚みにすることにより成膜時間を短縮して技術コストを削減することが求められてい

るため、超電導層の高 I_c 値化に対応した中間層を作製する場合には、超電導層の成膜時間に応じた拡散防止層膜厚を選んで成膜する必要がある。

現在の拡散防止層膜厚、中間層構造の基板を用いて、PLD、MOD 両方のプロセスによって 700 A/cm^2 (@77 K, s.f.) を超える短尺 I_c 値を得ており、現在の中間目標段階では、超電導層の成膜速度向上の技術開発の進展も相まって、PLD、MOD ともに求める I_c 特性をクリアするに際してこの問題を考慮する必要はなかったが、最終目標を見据えた場合には必要になってくる可能性がある。

今後は、超電導層の製造速度に応じた最適拡散防止層厚みを求め、技術コストの削減と併せて高臨界電流化対応中間層の開発を進めていく。

(b-2) PLD 法による高臨界電流線材作製技術開発

本項では、高臨界電流線材の開発にあたり、PLD 法を用いた超電導層作製技術の開発成果を纏める。

高臨界電流化には、超電導層の高臨界電流密度化、厚膜化、臨界電流劣化部の抑制、の 3 つのアプローチがある。臨界電流劣化部の抑制については、2.4.3(a-2) PLD 線材の均一性向上技術開発の項を参照されたい。残る高臨界電流密度化と厚膜化についてであるが、PLD 法による成膜では、通常、厚みを上げるにつれて臨界電流密度が低下し、膜厚の増加に伴う I_c 特性の向上が得られない。これは厚みが上がるにつれて超電導層の表面が黒体化し、輻射率が上がるために表面温度が低下して a 軸配向粒子の発生を引き起こすことが主な原因である。これを抑えるためには厚みが上がるに従って成膜温度を上げる手法が有効であることが分かっている。また、厚みを上げるには通常、成膜時間が長時間化するため、一方で技術コストの上昇を招くという問題もある。これに対しては 2.4.5 低コスト・歩留り向上技術開発の項で詳述するのでそちらを参照されたい。

高 J_c 化のため、薄肉金属基板を用いるにあたり、ターゲット組成、ロット間差を抑えるための検討に加えてターゲット-基板間距離などの各種パラメータの最適化を試みたうえで、50 m 長を超える長さの薄肉基板を用いて線材作製を行った。図 2.4.4-19 に長尺線材の I_c 値分布を示す。

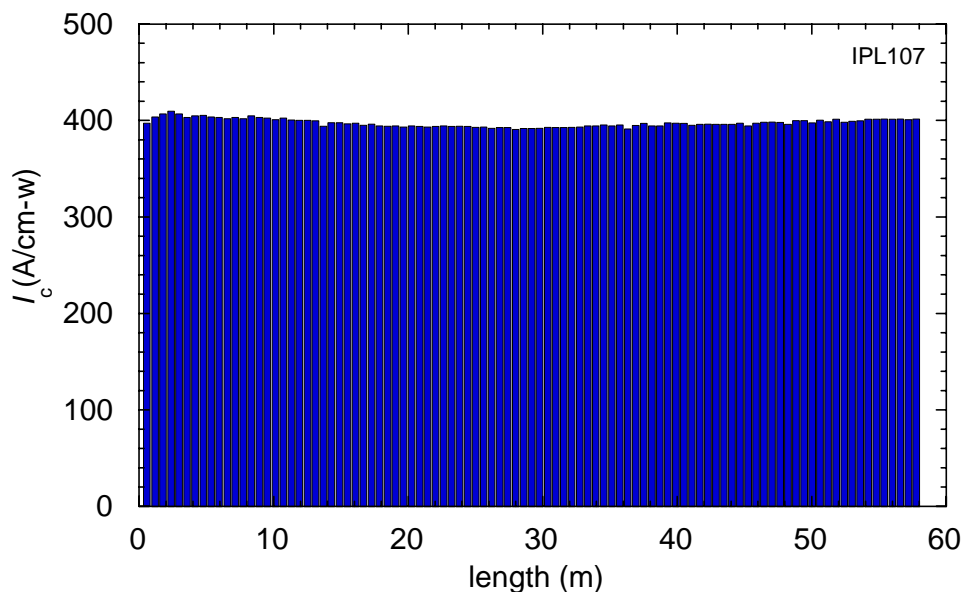


図 2.4.4-19 80 μm 厚基板を用いて作製された PLD-GdBCO 線材の I_c 値分布図

この 57.2 m 線材は $I_c(\text{min}) = 391 \text{ A/cm-w}(@77 \text{ K, s.f.})$ であり、その J_c 値は安定化層 30 μm 厚とした場合でも全長にわたって 30 $\text{kA/cm}^2(@77 \text{ K, s.f.})$ を超えており、中間目標を達成した。今後は最終目標に向けて、さらなる高 I_c 値化と長尺性能向上を、基板の完全化や超電導層の厚膜化によって実現していく。

(b-3) 微細組織観察

in-plume PLD 法は従来の PLD 法に比べ、ターゲット成分の高収率化、高速成膜が可能であるため、プロセスの低コスト化が期待できる。しかしながら、in-plume 法により成膜された GdBCO 層表面には電流を阻害する多数の突起物が形成されることが知られている。これら突起物が形成される原因を特定し、突起物を抑制することにより、高 I_c 値化に貢献できる。そこで、本項では、in-plume PLD 法により成膜された GdBCO 層の微細構造を解析し、高 I_c 値化のためのプロセス開発支援の例について述べる。

図 2.4.4-20 に GdBCO 層の断面 TEM 像を示す。GdBCO 層のほとんどの領域は c 軸配向結晶粒であった。GdBCO 層の表面に存在する突起物は、a 軸配向結晶粒、c 軸が基板垂直方向から傾斜した GdBCO 結晶粒であることが判明した。この他、マトリックスの GdBCO 層に対して、面内に 45 度ローテーションした c 軸配向結晶粒も観察できている。c 軸が傾斜した GdBCO 結晶粒やローテーションした GdBCO 結晶粒と c 軸配向結晶粒の間に CuO 結晶粒が形成されている (図 2.4.4-20)。この結果は、in-plume PLD プロセスでは、GdBCO 層表面に CuO 結晶粒が形成された後に、突起物が発生することを示唆している。さらに、これら突起物の 3 次元分布を解明するため、FIB-SEM デュアルビームシステムにより GdBCO 層の 3 次元構築を行った結果、これら突起物の形状から、c 軸傾斜の GdBCO 結晶粒、45 度ローテーションした c 軸配向結晶粒の下部に CuO 結晶粒が存在することが分

かった（図 2.4.4-21）。この結果から、in-plume PLD プロセスでは、高 I_c 値化のため、CuO 結晶粒の形成を抑制し、突起部の数を減らすことが必要である。また、成膜の際、プルーム内部で Cu の濃度分布（組成ずれ）が存在することが分かっている。そのため、プルーム形状、及びレーザースキャン方法を改善するとともに、Reel to Reel による基板通過位置を最適化し、さらに基板搬送速度を速くした。その結果、図 2.4.5-22 で示すように GdBCO 層の厚さが $1.7 \mu\text{m}$ の厚膜化を達成し、GdBCO 層表面近傍に突起物が形成するもののその突起物の大きさを抑制することができた。この GdBCO 層の I_c 値は $480 \text{ A/cm-w}(@77 \text{ K, s.f.})$ であり、TEM による組織観察から高 I_c 値化への in-plume PLD プロセスの改善に貢献できた。

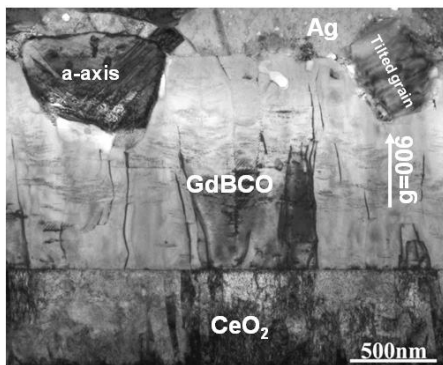


図 2.4.4-20 in-plume PLD 法により成膜された GdBCO 層の断面 TEM 像

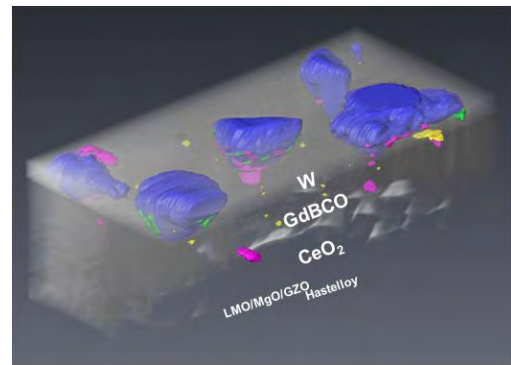


図 2.4.4-21 in-plume PLD-GdBCO 線材の 3 次元構築結果
 ■:突起物、■:空隙、■:CuO、
 ■:Gd₂O₃

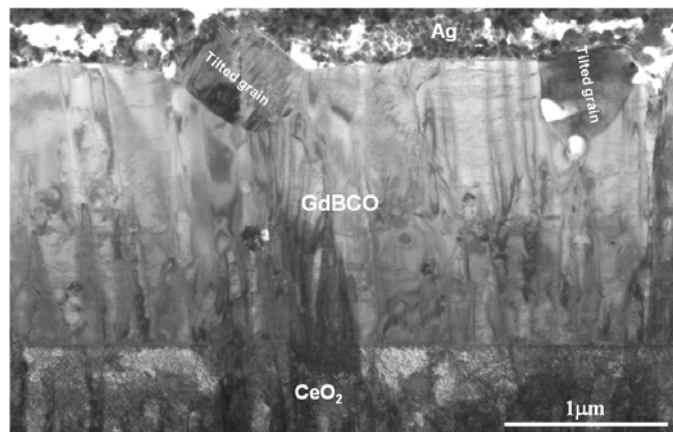


図 2.4.4-22 プロセス改善後の in-plume PLD 法により成膜された GdBCO 層の断面 TEM 像

(b-4) MOD 法による高臨界電流線材作製技術開発

本項では、高臨界電流線材の開発にあたり、MOD 法を用いた超電導層作製技術の開発成果を纏める。

高臨界電流化には、超電導層の高臨界電流密度化、厚膜化、臨界電流劣化部の抑制、の3つのアプローチがある。臨界電流劣化部の抑制については、2.4.3(a-3)MOD線材の均一性向上技術開発の項を参照されたい。残る高臨界電流密度化と厚膜化についてであるが、MOD 法による成膜では、原料開発による J_c 値向上を検討し、RE 種を一部 Y から Sm や Gd に代える事により J_c 特性を向上させることに成功した。これを厚膜化、長尺化することを考えると、Reel to Reel 成膜においては線材の幅方向端部に厚膜部分が発生しやすく、この部分でクラックが発生するため、厚膜化の障害となっている。また、厚膜化時の J_c 値低下の抑制は、焼成時間の長時間化による未反応粒子の粗大化や膜上部での a 軸配向結晶粒およびランダム核発生を抑制することが主な課題である。さらに塗布・仮焼工程における一層あたりの膜厚調整や Reel to Reel 成膜における J_c 値低下についても検討した。

図 2.4.4-23 に RE を一部 Y から Gd に代えた原料溶液を用いた短尺 MOD 線材の J_c 特性の厚み依存性を示す。ここで、フッ化物を含む前駆体仮焼膜から酸化物 REBCO 結晶を得るために水蒸気との反応を用いるが、この反応の副生成物である HF ガスの除去が REBCO 成長速度を規定するため、REBCO 成長速度に影響を及ぼす要因の一つである焼成雰囲気中の水蒸気分圧を変化させた場合の影響も調査した。焼成雰囲気が低水蒸気分圧の試料では、厚膜化するに従って J_c 特性の伸びが止まっているのに対して、焼成雰囲気を高水蒸気分圧雰囲気にし、成長速度を上げることにより、 J_c 特性の劣化を抑制して、厚膜においてもほぼ均一な J_c 特性が得られている^③ことが分かる。これらの試料の微細組織を観察した結果、低水蒸気分圧雰囲気下では、厚膜化時には膜上部の結晶粒が粗大化しているとともに、

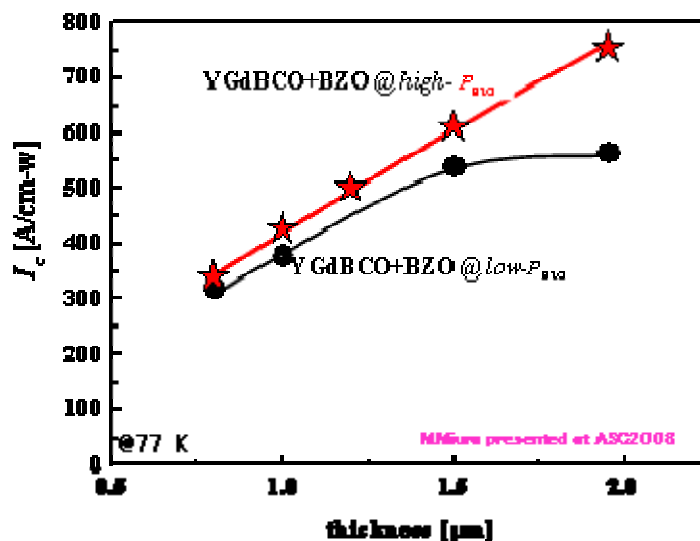


図 2.4.4-23 MOD-YGdBCO+BZO 線材の J_c 特性の膜厚依存性

$\text{Y}_2\text{Cu}_2\text{O}_5$ 、 CuO （未反応物）粒子の分布も膜厚方向で変化しており、基板側から表面の方向に対して下部から上部に行くに従い、量も増えていた。低成長速度条件においては、低 Ba 環境下においても成長界面遠方から Ba の供給が行われるため、膜上部において Ba が足りなくなるとともに、上部の未反応粒子は前駆体の状態で長時間保持されるために粗大化する。このことから、厚膜時には高成長速度条件の適用により、未反応物の高温粗大化と組成ずれを防ぐことが出来、高い J_c 特性、ひいては高い I_c 特性の実現が可能となる。結果として、 $1.9 \mu\text{m}$ の厚みで MOD による世界最高特性となる $760 \text{ A/cm-w}(@77 \text{ K,s.f.})$ を得た。

長尺化に際しては、膜厚分布の抑制とそれを利用した厚膜化、さらに先に挙げた現象による高速結晶成長条件での焼成の全てをクリアする必要がある。膜厚分布の抑制については、詳細は 2.4.3(a-3) を参照されたい。溶液塗布時のチューブ径のコントロールなどにより幅方向端部での膜厚増加が小さい MOD 膜が得られており、この技術の適用により従来の $1.5 \mu\text{m}$ 程度というクラック発生限界を超えることが可能になると考えている。これまでに、薄肉金属基板を用いて高 J_c 長尺線材の作製を行った結果、図 2.4.4-7 に示す I_c 値分布を有する線材が得られ、安定化層 $30 \mu\text{m}$ 厚とした場合、約 20 m 長に亘って $J_c > 30 \text{ kA/cm}^2(@77 \text{ K,s.f.})$ となった。

今後は、さらなる短尺での高 I_c 値化とその成果を活かした長尺性能向上を、基板の欠陥抑制や厚膜化、高速化など、他テーマの成果と併せることによって実現していく。

(4) 成果のまとめ

PLD 法による高強度線材作製技術開発においては、強加工を施した $70 \mu\text{m}$ 厚の基板を用いて、 $\Delta\phi_{\text{CeO}_2} = 3.7 - 3.8$ 度の良好な結晶粒面内配向度を有する 50 m 長の間層付き基板の作製に成功した。この基板を用いて超電導層の成膜を行い、 I_c 値が低下しない限界の引張り強度を測定した。その結果 PLD、MOD のどちらの成膜方法によっても室温での機械強度評価では 0.9 GPa と中間目標である 1 GPa をわずかに下回った。しかし Cu 層の強度寄与を無視していることや、実際は室温ではなく低温で使用されるため、低温で評価すべきことなどを考慮して中間目標は達成見込みである。また確実に強度 1 GPa を実現するために強加工を施した $80 \mu\text{m}$ 厚の HastelloyTM 基板を用いて長尺線材の作製を行った。 I_c 値としては 57.2 m 長に亘って $391 \text{ A/cm-w}(@77 \text{ K, s.f.})$ が得られている。安定化層の厚さを $30 \mu\text{m}$ として評価すると、この線材は中間目標値である $J_c = 30 \text{ kA/cm}^2 - 50 \text{ m}$ を達成している。またこの線材の超電導層は製造速度 30 m/h で作製されており、技術コストは計 2.27 円/Am と極低技術コスト条件も満足している。

MOD 法による高機械強度線材作製技術開発においては、現在のところ技術コストとしては目標の 3 円/Am を満足しないプロセスではあるが、長尺線材の作製を試み、 $70 \mu\text{m}$ 厚金属基板を用いてほぼ $300 \text{ A/cm-w}(@77 \text{ K, s.f.})$ を超える高い I_c 値を 50 m 長で得ている ($J_c = 30 \text{ kA/cm}^2 - 41.5 \text{ m}$)。現在、他研究項目においてコス

ト目標を満足する技術開発を行っており、その成果を合わせるにより、技術コストに関する課題を解決したいと考えている。

MOCVD 法による高強度線材作製技術開発においては、SMES 用コイルとして強磁場中での大電流通電時のフープ応力に耐え得る機械強度の高い線材開発を試みた。まず、基板材料としてハステロイ™を用いて、厚さの異なる金属基板において、1 GPa の強度を持つ基板の加工プロセスの開発を進めた。冷間加工度の制御により 75、100 μm 厚の基板において、室温での 0.2 % 耐力 ≥ 1.6 GPa を得た。さらにこれらの高機械強度基板上へ中間層と MOCVD-YBCO 層成膜を検討した。その結果、高機械強度基板上でも従来基板と同等の成膜条件が適用でき、 $I_c = 240$ A/cm-w(@77 K, s.f.)、 $J_c = 2.4$ MA/cm² が得られた。また、77 K においては、室温より 10 % 以上高い 0.2 % 耐力を示すことを確認した。今後「MOCVD 法による磁場中特性改善技術開発」の成果と併せ、50 m 長の線材で $I_c = 30$ A/cm-w(@77 K, 3 T)、基板強度 1 GPa を達成する。

以上、H22 年 7 月現在の実績を研究項目別に中間目標・達成度・H23 年 3 月までの見通しとその根拠を表 2.4.4-2 にまとめて示す。

表 2.4.4-2 中間目標と実績の比較、見通し

分類	H22 年度中間目標	実績 (H22 年 7 月現在)	中間目標 達成度	H23 年 3 月までの中間 目標達成見通しと根拠
高強度 基板・ 中間層	1 GPa-50 m	50 m 長, $\Delta\phi_{CeO_2} = 3.7 - 3.8$ 度, 成膜後は 1 GPa をわずかに下回る	○	低温での評価を行うなどにより達成を見込む
PLD 法高 強度線材	300 A/cm-w @77 K, s.f. 1 GPa -50 m	391 A/cm-w @77 K, s.f.-57.2 m、 コスト条件達成	○	強度試験実施中
MOD 法高 強度線材		300 A/cm-w @77 K, s.f.-45 m	○	低温での強度試験の実施、低コストプロセス開発の成果を適用
MOCVD 法高強度 基板・中間 層		室温での 0.2 % 耐力 = 1.6 GPa-250 m	△	MOCVD 法による磁場 中特性改善技術開発の 成果と併せ目標達成を 見込む
高臨界電 流化対応 基板・中間 層	$J_c =$ 30 kA/cm ² -50 m	PLD、MOD 両方のプ ロセスによって短尺 $I_c > 700$ A/cm-w @77 K, s.f.	◎	中間目標達成
PLD 法高 臨界電流 線材作製		$J_c = 35.5$ kA/cm ² @77 K, s.f.-57.2 m コスト条件達成	◎	中間目標達成
MOD 法高 臨界電流 線材作製		短尺で 760 A/cm-w @77 K, s.f. $J_c = 30$ kA/cm ² @77 K, s.f.-41.5 m	○	基板の欠陥抑制や厚膜 化、高速化の成果とあ わせ中間目標達成を見 込む

◎：中間目標達成 ○：H23 年 3 月末までの中間目標達成が見通せている

△：H23 年 3 月末中間目標達成には技術開発の大きな進展が必要

(5) 最終目標達成への見通し

最終目標である $500 \text{ A/cm-w}(@77 \text{ K, s.f.})\text{-}1 \text{ GPa}\text{-}200 \text{ m}$ 、 $J_e = 50 \text{ kA/cm}^2(@77 \text{ K, s.f.})\text{-}200 \text{ m}$ を達成するためには今後いくつかの課題を克服する必要がある。

高強度基板・中間層の作製については、中間目標達成時までには得られる技術を基本に、長尺化を図る。一方、さらなる高 I_c 値化のための超電導層の厚膜化に伴い、熱処理時間増による強度低下が危惧される。この課題に対しては、圧下率増加による強度向上、超電導層の高製造速度化による熱処理時間維持等の方策をもって、H24 年度目標達成を見込んでいる。また、必要に応じて新規基板の採用も検討する。

以上のアプローチによって得られた長尺の高強度基板・中間層上に、PLD 法及び MOD 法による高 I_c 値化・高速化・長尺安定化をめざしている他研究テーマの成果を適用して成膜することにより、高強度線材の最終目標を達成する。

また、高 I_c 値化については短尺においては目標特性を実現しているので、均一化テーマにおける開発成果を薄肉基板上へ適用することにより高 J_e 値化及びその長尺化を図り、高 J_e 線材開発に関する最終目標を達成する。

MOCVD 法については短尺における高 I_c 値化およびその長尺化がともに課題であるが、これまで得られた超電導層厚膜化の成果を基に、さらに厚膜化に対応した基板金属元素の拡散防止等の中間層の適正化を行い、最終目標を達成する予定である。

以上、最終目標を達成するための課題、及びそれらの課題を克服するためのアプローチと目標達成の見通しを表 2.4.4-3 にまとめて示す。

表 2.4.4-3 最終目標とその見通し

分類	最終目標	課題	アプローチと見通し
高強度基板・ 中間層	500 A/cm-w @77 K, s.f. -1 GPa-200 m、 $J_e = 50 \text{ kA/cm}^2$ -200 m	<ul style="list-style-type: none"> ・高 I_c 化（厚膜化）に伴う熱処理時間増による強度低下抑制 ・長尺化 	<ul style="list-style-type: none"> ・圧下率増加による強度向上 ・新規基板の採用 ・超電導層の高製造速度化による熱処理時間維持 ・均一化開発結果の適用 上記統合により H24 年度達成を見込む
PLD 法 高強度線材		<ul style="list-style-type: none"> ・高 I_c 化 ・高速化 ・長尺安定化 	<ul style="list-style-type: none"> ・高 I_c 線材作製のコスト削減と長尺化を他テーマの成果とあわせることにより、H24 年度達成を見込む
MOD 法 高強度線材			
MOCVD 法 高強度基板・ 中間層		<ul style="list-style-type: none"> ・ 500 A/cm-w @77 K, s.f.短尺 ・ 500 A/cm-w @77 K, s.f.の長尺化 (200 m) 	MOCVD 法による超電導層厚膜化の成果を基に、さらに超電導層厚膜化に向けた基板金属元素の拡散防止等の中間層の適正化を行い、最終目標を達成する。
高臨界電流化 対応基板・ 中間層		<ul style="list-style-type: none"> ・長尺化（短尺では高 I_c 達成） 	<ul style="list-style-type: none"> ・均一化テーマ開発成果の薄肉基板上への適用により、H24 年度達成を見込む
PLD 法高臨界 電流線材作製		<ul style="list-style-type: none"> ・長尺化 ・高速化 	<ul style="list-style-type: none"> ・高 I_c 線材作製のコスト削減と長尺化を他テーマの成果とあわせることにより、H24 年度達成を見込む
MOD 法高臨界 電流線材作製			

引用論文リスト

- (1) S. Lee, N. Chikumoto, T. Yokoyama, T. Machi, K. Nakao, and K. Tanabe, “Development of In-Plume Pulsed Laser Deposition of High- I_c GdBCO Films for Coated Conductors”, IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol. 19 No. 3 (2009) 3192-3195.
- (2) D. M. Feldmann, T. G. Holesinger, R. Feenstra, C. Cantoni, W. Zhang, M. Rupich, X. Li, J. H. Durrell, A. Gurevich and D. C. Larbalestier, “Mechanisms for enhanced supercurrent across meandered grain boundaries in high-temperature superconductors”, J. Appl. Phys., 102 (2007) 083912.
- (3) M. Miura, T. Kato, M. Yoshizumi, Y. Yamada, T. Izumi, Y. Shiohara, T. Hirayama, “Enhancement of Flux Pinning in $Y_{1-x}Sm_xBa_{1.5}Cu_3O_y$ Coated Conductors with Nanoparticles” Appl. Phys. Exp. Vol.1 No.5 (2008) 51701.

2.4.5 低コスト・歩留向上技術開発 (ISTEC、九州大学、東北大学、名古屋大学、JFCC、昭和電線ケーブルシステム)

(1) 研究開発目標

「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、500 m の長尺化を達成した IBAD-PLD 及び IBAD-MOD 線材について、電力機器応用の実用化技術開発の際に必要な性能及び製造速度等を満足させる Y 系超電導線材作製技術の開発を行い、より低コストで提供できる線材開発をめざす。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。また、最近開発され、PLD、MOD 法以上の高速化が見込まれ、一層の低コスト化が可能なレーザ CVD 法についても線材化可能性の検討を行った。中間目標(平成 22 年度)としては、技術コスト 3 円/Am の実証、最終目標(平成 24 年度)として、中間目標線材の安定製造技術、技術コスト 3 円/Am 未満の実証を設定した。

(2) 研究の経緯及び実施体制

平成 15～19 年度の「超電導応用基盤技術研究開発 (第 II 期)」プロジェクトにおいて、従来から開発されていた GZO($\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$)層による IBAD 法の長尺化がなされたが、同時に極薄で高速化が可能な MgO 層による IBAD 法の原理検証もなされた。この成果を利用して、本プロジェクトの平成 20～22 年度計画では、高速 IBAD-MgO 法をさらに改善し、中間層形成技術で低コスト化を図った。具体的には、1) 薄膜化等による成膜時間の短縮と成膜速度の向上、2) 新材料、手法による高速化である。すなわち、現状の構造(イオンビームスパッタ法 GZO ベッド層、IBAD 法 MgO 層、スパッタ法 LaMnO_3 (LMO)バッファ層、PLD 法 CeO_2 キャップ層)において、配向度などの特性と作製条件の最適化およびより低コストな MOD 法などによる作製を行い、その膜厚、層数削減、あるいは低コストな MOD-GZO 層を使った検討を行った。これにより、従来製法の成膜速度や装置、製法コストの改善を行い、極低コスト用基板の実証を試みた。

PLD 法による超電導層形成技術では、マルチターン法を用いて、プルーム位置(out-of-plume, in-plume 法)、ターゲットや超電導膜材料、組成の検討を行い、これにより蒸着面積向上、超電導層における不純物相の低減、原材料収率向上、配向度の向上を製造速度、臨界電流の向上により、極低コスト化が可能な高 I_c 値、高速化により中間目標とした 3 円/A 以下の条件(例えば、10 m/h、515 A/cm-w)で 50 m 長尺線材の作製を実証する。

MOD 法による超電導層形成技術では、仮焼、本焼プロセスの改善、装置改造を行い、高速塗布・仮焼技術と高速本焼技術を統合し、高速で高特性線材を作製するための指針を明らかにしつつ開発を行った。すなわち、塗布方法の改善、仮焼、本焼工程の主に水蒸気に関する最適条件化などを検討した。これにより、中間目標と

した 3 円/Am 以下の条件を実証する。また、従来の Reel to Reel 方式に加え、第Ⅱ期超電導応用基盤技術研究開発プロジェクトにおいて 500 m 線材作製に成功しているバッチ方式の製法(昭和電線ケーブルシステム株式会社(SWCC)にて本焼を実施)にも取り組み、低コスト化を実証する。

また、超電導層成膜プロセスにおいては、上記 PLD 法、MOD 法の数倍から数 100 倍の高速成膜が得られるレーザ CVD 法に組み込み、単結晶基板や短尺の IBAD 基板で結晶粒の高配向性および超電導特性などの線材化の可能性を探ることとした。

いずれの開発においても、製造プロセス条件と組織の関係及び電磁気挙動評価と連携することで開発を促進させる。

さらに、低コスト化、歩留り向上につながる接続・補修技術開発も行った。線材の接続技術が可能になれば、長尺の線材化が歩留りよく可能になり、また、補修技術では、細線加工等により特性の不均一性、低特性の箇所に健全な線材を貼り合わせて長尺線材及び加工線材の歩留り向上に寄与できる。Ag 安定化層を利用した拡散接合法、その最適条件化による接続抵抗の低減、交流応用に重要なフィラメント化線材に応じた接続技術の開発も行った。

実施体制としては、中間層作製プロセス((a-1) i)、PLD 超電導層作製プロセス((a-2))、MOD 超電導プロセス((a-3))に関しては、主として ISTEK が担当し、これを、微細組織観察技術により JFCC((a-1) ii)が、電磁特性評価技術で九州大学((a-3))が支援し、革新的なレーザ CVD 法の研究開発を東北大学((a-3))が担当することで開発を進めている。また、接合・補修技術に関しては、長尺化、スクライビング対応技術開発に関して ISTEK が担当((b-1))し、基礎技術開発を九州大学((b-2))、名古屋大学((b-3))が実施する体制で開発を進めている。

(3) 具体的成果

(a) 低コスト対応高速・高 L_c 化技術開発

(a-1) 中間層作製コスト削減技術開発

i) 中間層作製コスト削減プロセス開発

本項では、プロジェクト開始直前に開発した、低コスト化が期待出来る IBAD-MgO を用いた中間層付き金属基板の低コスト化技術開発における成果を纏める。本プロジェクト開始時点では、40 m 級の長尺 IBAD-MgO 基板の作製に成功したところであり、高速化・高配向化・長尺化の開発が急ピッチで進められている状況であった。この段階では、技術コストに 3 円/Am を装置の大型化などに依って実現出来る見通しを得ることが出来ていたが、本プロジェクトではこれを進めて実証することを目標とした。

プロジェクト開始時点での基板研磨および各中間層の構造と製造速度、目標値とその時の技術コストを表 2.4.5-1 に示す。

表 2.4.5-1 中間層付き基板の構造と製造速度のプロジェクト開始時と中間目標値

名称	プロセス	プロジェクト開始時		中間目標		
		厚み (nm)	製造速度 (m/h)	厚み (nm)	製造速度 (m/h)	技術コスト (円/m)
キャップ層	PLD-CeO ₂	500	4.8	200	30	175
バッファ層	Sputter-LMO	18	30	10	50	34
IBAD層	IBAD-MgO	5	24	5	120	29
ベッド層	Sputter-GZO	110	20	<100	40	60
	MOD-GZO	N/A		100	10	60
研磨	機械/電解		5/20 2000 円/m		100/20	60

目標値についてであるが、中間層に必要とされる機能は、超電導層が十分な特性を発揮出来るような、必要最低限の結晶粒配向度と金属基板からの元素拡散を抑制する拡散バリアおよび超電導層と基板との絶縁である。結晶粒配向度については、キャップ層の配向度と I_c 特性との関係から、 $\Delta\phi_{\text{CeO}_2} < 5$ 度が満足すべき指標となる。拡散バリア機能については、各層の厚みと超電導層の成膜温度及び成膜時間に依存するため、必要膜厚を決定することは難しく、厚膜化時にも超電導特性の劣化がないことが目標となる。絶縁機能についても、単純に必要な膜厚を決定することは難しいため、これらについては開発の進捗に応じて評価・成膜へのフィードバックを行うこととした。目標である、技術コストの削減に関しては、中間層つき基板の中では研磨のコストとキャップ層のコストが突出して高いため、これらのコスト削減が主眼となる。

キャップ層のコスト削減には、その製造速度の向上が必要となるが、製造速度の向上を装置の大型化なしにめざすには、成膜時間の短縮、つまり必要膜厚の削減が必要となる。キャップ層の結晶粒配向度は PLD 法により作製し、自己配向効果を発揮させることにより向上するため、下地の結晶粒配向度を上げることにより、必要膜厚を下げることができ、成膜時間の短縮とそれに伴う製造速度の向上が図られる。IBAD-MgO 層の結晶粒配向度は 10 度以下にもなるという報告⁽¹⁾もあることから、IBAD-MgO 層の結晶粒高配向化によりキャップ層の必要膜厚の削減を行なった。また、装置のマルチターン化改造により、成膜エリアの拡大とそれに伴う高速化を行い、さらにレーザの高周波数利用やエネルギー密度上昇などにより高速化を行なった。

研磨コストの削減については、研磨速度の高速化が必要となるが、研磨時間短縮により基板平坦性の劣化を伴う。IBAD-MgO 層の結晶粒配向度に大きな影響を与える平坦性は、 $R_a < 2 \text{ nm}$ が必要という報告⁽²⁾もあり、研磨コストの削減には、平坦性の確保が課題となる。そこで、低い平坦性の金属基板を用いて MOD 法により平坦性を向上させるプロセス⁽³⁾の導入を検討した。MOD 法は平坦性の向上に加えて欠陥修復機能も期待できるため、ベッド層の成膜手法として有望である。

IBAD-MgO 層においては、平成 20 年度に導入した大型 IBAD 装置を用いることにより 120 m/h への高速化を行うのに加えて、結晶粒配向度を向上させることによりキャップ層の膜厚削減に貢献することを目標とした。

結果として、IBAD-MgO 層については、大型装置を用いた成膜により、製造速度 200 m/h でキャップ層厚み 380 nm において $\Delta\phi_{\text{CeO}_2} < 4$ 度と十分な結晶粒配向度を有する基板の作製に成功した。長尺線材作製においても、図 2.4.5-1 に示すようにパッチ線材において 50 m 長にわたって $\Delta\phi_{\text{CeO}_2} \leq 4.4 \pm 0.2$ 度と、良好かつほぼ一定の配向度を実現した。

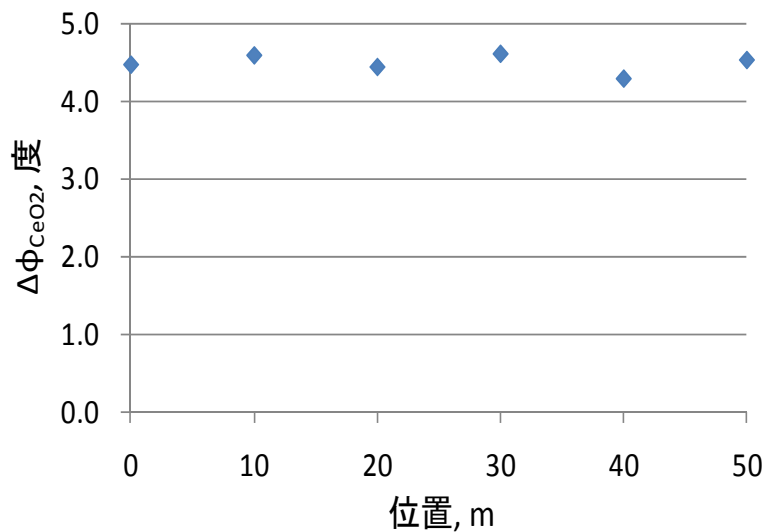


図 2.4.5-1 200 m/h で成膜した 50 m パッチ IBAD-MgO 基板の CeO_2 層成膜後の結晶粒面内配向度分布

次に、MgO 層の結晶粒高配向化であるが、MgO 層表面の平坦性、特に長周期の平坦性が大きく影響していることが分かってきた。アシストイオンビーム強度を上げて長時間方向に最適条件をずらすことにより、平坦性の悪化開始が遅れ、それに伴い MgO 層の結晶粒高配向化が実現できた。図 2.4.5-2 にキャップ層厚みと結晶粒面内配向度の関係を示す。結晶粒高配向 MgO 基板を用いることにより、従来と同等のキャップ層厚み 500 nm 成膜した線材の結晶粒配向度は約 3 度になっており、長尺においても劣化なく結晶粒高配向を実現できた。この結晶粒配向度は、5 度以下の配向を得るために必要なキャップ層厚みを 200~300 nm にほぼ半減させることが出来るものであり、目標をクリアしたと言える。

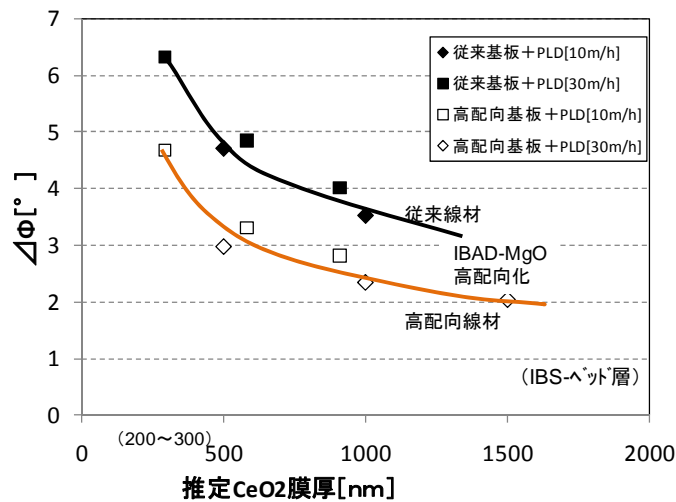


図 2.4.5-2 PLD-CeO₂成膜条件によるキャップ層厚みと結晶粒面内配向度の関係

キャップ層においては、マルチターン化改造を行い、4.8 m/h から 10 m/h までの高速化を行った。さらに、前述した MgO 層の高配向化により必要膜厚を半減するとともに、CeO₂ 成膜時のレーザ照射条件(周波数、エネルギー密度)を変えることにより高速化を図り、30 m/h の目標値をクリアした。この構造の基板を用いて超電導層を成膜したところ、5 MA/cm²以上の J_c を 77 K, s. f. で得ることが出来、キャップ層を薄くしても拡散バリア機能に問題がないことを確認した。

研磨コストの削減をめざした MOD プロセスの導入においては、IBS を用いて IBAD-MgO のベッド層として実績のある GZO、NiW 基板上での MOD 法による中間層形成実績のある CZO を材料として選択し、成膜を試みたところ、図 2.4.5-3 に示すように、塗布回数が増えるに従い、平坦性が向上する結果が得られた。平坦性は塗布回数と塗布溶液の収縮率を用いて $R_n = R_0(\text{収縮率})^n$ の関係式で表す⁽³⁾ことができ、収縮率 89%での値は実験結果と良く一致した。

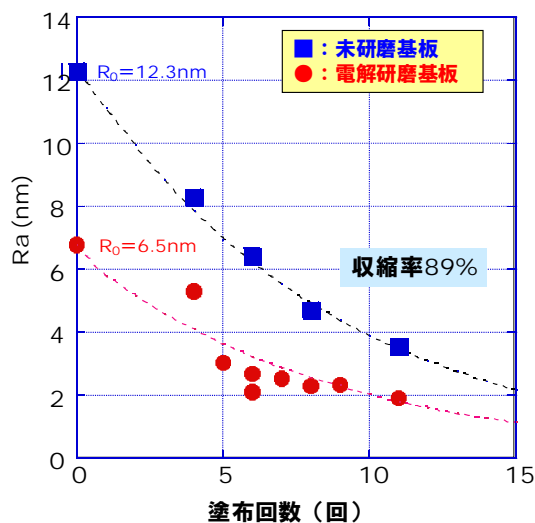


図 2.4.5-3 MOD ベッド層の表面平坦性(R_a)に対する塗布回数依存性

平坦性が約 2 nm になった膜を用いて IBAD-MgO の成膜を行い配向度の評価を行ったところ、十分な配向度が得られなかったため、JFCC にて TEM による微細組織を観察した結果、IBS により成膜したものと比較して、XRD では捉えられないレベルではあるが、結晶化が進んでおり、その上の MgO 層の結晶粒配向性も乱れていることが明らかになった(図 2.4.5-4)。

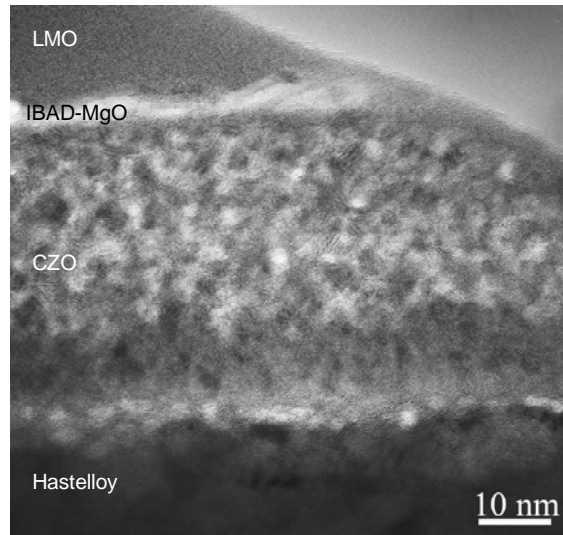


図 2.4.5-4 MOD ベッド層(CZO)上に成膜した IBAD-MgO 層の断面 TEM 像

そこで、結晶化度の抑制のため、焼成温度の低温化を指向して焼成条件を変更し、酸素中で焼成を行うことにより、焼成温度の低温化を行った。これにより $Ra < 2$ nm の良好な平坦性とキャップ層の結晶粒配向度約 4 度(キャップ層厚み 500 nm)を長尺線材においても得ることが出来た(図 2.4.5-5)。この時、製造速度は 10 m/h であり、目標値をクリアしている。

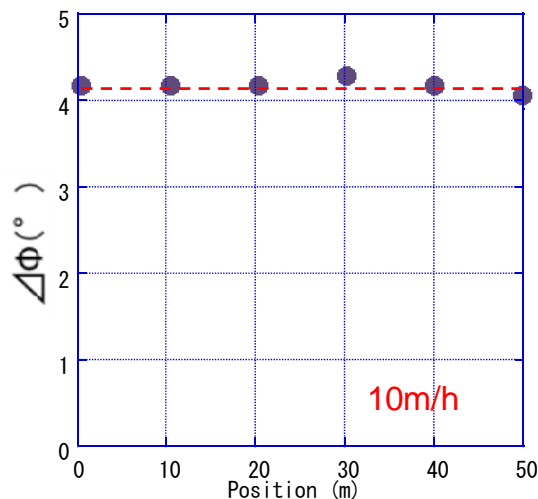


図 2.4.5-5 MOD ベッド層を用いた中間層付き 50 m 長線材のキャップ層結晶粒配向度

ベッド層は IBAD 層に対する nucleation 層としての機能と拡散バリア機能を主に担うため、スパッタから MOD への成膜プロセスの変更は、拡散バリア機能と絶

縁及び剥離についての評価に影響する可能性がある。超電導層成膜による拡散バリア機能評価の結果、通常の $1\ \mu\text{m}$ までの成膜においては、 T_c 値及び J_c 特性の劣化は確認されず、良好な特性が得られた。絶縁特性の評価も、必要な面抵抗をクリアした。しかしながら、剥離試験を行った結果、剥離強度が従来の構造に比べて 6 割程度に低下した。通常、剥離面は超電導層/キャップ層間であるのに対し、この構造の基板では、部分的にキャップ層の下から剥離している場所があった。今後、焼成条件の検討と、材料の複合化により剥離強度の向上に努めたい。

中間層においては、線速を向上させるため、ヒータ出力を上げて成膜を行ったところ、膜厚 $10\ \text{nm}$ 以下で、結晶粒配向度を維持して $50\ \text{m/h}$ での成膜に成功した。しかしながら、長尺線材における配向度の安定性が若干低い傾向が見てとれたため、LMO 膜厚の均一性に問題があるのではないかとの考えで、出力を上げて $10\ \text{nm}$ 以上の膜厚を確保することで問題を解決し、目標値をクリアした。

以上により、それぞれに必要とする目標はクリアしたが、最終的には全てを一体化する必要がある。これまでに、各プロセスの開発後の条件適用を進めた結果、残る主な課題は、MOD ベッド層を用いた安価研磨基板上での結晶粒高配向 IBAD 条件の探索とそれに伴うキャップ層製造速度の向上である。これまでの検討により、MOD ベッド層を用いた基板とスパッタを用いたベッド層との成膜条件の差が明らかになってきており、この知見を活かすことにより結晶粒高配向条件を見つけることが可能であると考えている。

ii) 低コスト線材開発における微細組織観察

超電導線材作製プロセスの改善による低コスト化を達成するには、超電導層、中間層、基板の組織(結晶粒配向、欠陥構造、第 2 層の有無、各層の界面構造)を詳細に解析することが重要である。ここでは、MOD ベッド層(IBAD 層の配向を促す下地層)の TEM 組織観察から、ベッド層成膜プロセスを改善して低コスト化に寄与したので、その内容を述べる。

図 2.4.5-6 に MOD 法によりハステロイTM上に成膜された $\text{Ce}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ (CZO)ベッド層の断面 TEM 写真を示す。CZO 層に格子縞が多数観察されることから、微結晶により構成されていることが分かった。ハステロイTM基板研磨によるコストを低減させるため、ベッド層を形成することにより、極力基板凹凸を小さくすることが重要な役割である。そのためには、ベッド層はアモルファス状の構造であることが望ましい。そこで、この TEM 観察結果を受け、MOD ベッド層の焼成温度を低下させ、さらに大気雰囲気中で焼成することにより、より平坦な MOD ベッド層を形成することができた。このように改善されたベッド層上に IBAD-MgO 層、 LaMnO_3 層、さらに CeO_2 層を形成すると CeO_2 層の $\Delta\phi$ が 2.5 度という結晶粒高配向の二軸配向 CeO_2 層の形成に成功した。以上のように、MOD ベッド層の TEM による組織観察から、MOD ベッド層の成膜プロセス条件の最適化に貢献した。

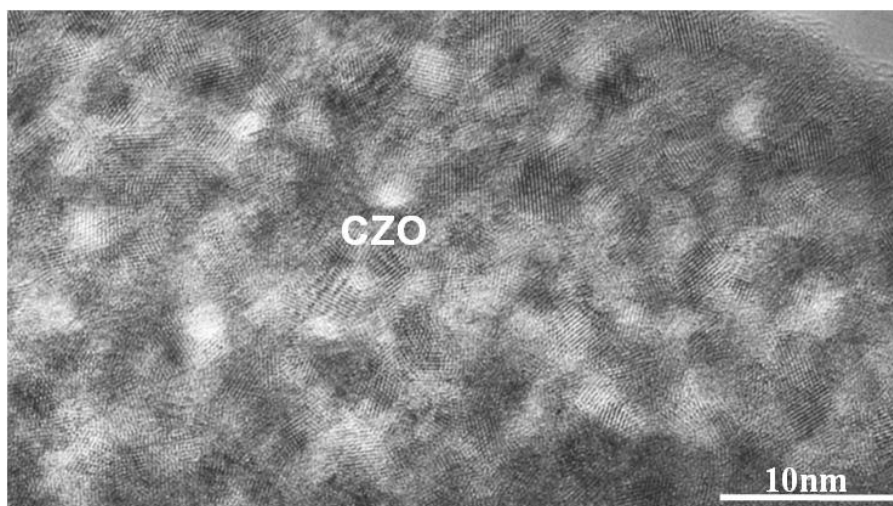


図 2.4.5-6 MOD 法によりハステロイ™上に成膜された CZO ベッド層の断面 TEM 像

以上、MOD-CZO ベッド層を TEM により微細組織を詳細に観察、解析した。その結果、MOD ベッド層の成膜条件を改善し、その作製条件の最適化に貢献し、より低コストな MOD ベッド層線材への可能性を広げた。

今後の計画としては、主に TEM 観察から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、最終目標の低コスト化への作製条件の最適化に貢献する予定である。

(a-2) PLD 法における超電導層作製コスト削減技術開発

PLD 法^(4~8)を用いた RE(レアアース)系超電導層形成技術では、極低コスト化が見込める IBAD-MgO 基板(PLD-CeO₂/LMO/IBAD-MgO/GZO/ハステロイ™)等を用いて、マルチターン、マルチプルームによる蒸着面積向上、レーザーパワーの増加による高速化、超電導層における a 軸配向粒や不純物相の低減、原材料収率向上、及び結晶粒配向度の向上を行い、これに適したレーザ、ターゲット、超電導膜材料、組成等の成膜条件の検討を行う。これにより、3 円/Am の極低技術コスト化が可能な高速製造技術を開発する。

図 2.4.5-7 は、プロジェクト開始当初に作製した約 40 m 長 GdBCO 線材の長さ方向の I_c 値分布を示したものである。この GdBCO 線材の技術コストは 5.0 円/Am(製造速度 6 m/h (30 m/h×5 回成膜), End to End $I_c = 431$ A/cm-w(@77 K,s.f.), GdBCO 膜厚 2.5 μ m)であり、目標の 3 円/Am には達していない。技術コスト 3 円/Am を達成するためには、REBCO 層の製造速度に対して、図 2.4.5-8 のような I_c 値を満たす必要がある。例えば、速度を 10 m/h 以上に上げ、500 A/cm-w(@77 K,s.f.) 以上の I_c 値が必要となる。このため、以下のような高速化、高 J_c 値化を行うことで PLD 法を用いた RE 系超電導層の低コスト形成技術の開発を行った。

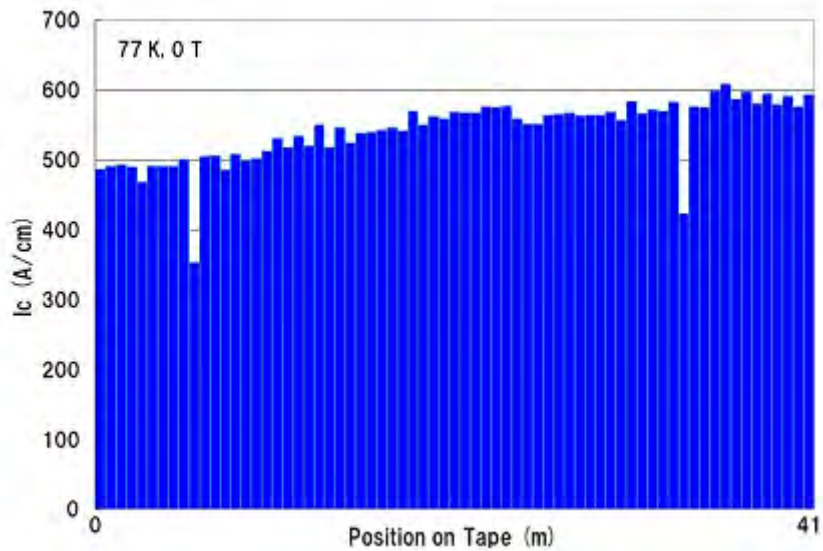


図 2.4.5-7 約 40 m 長 GdBCO 線材の長さ方向 I_c 値分布

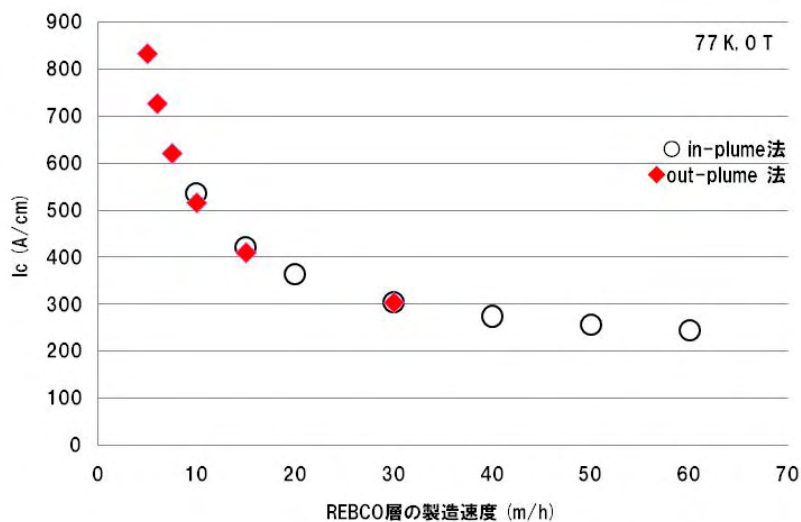


図 2.4.5-8 3 円/Am を満たすために必要な I_c 値と線材作製速度

・ PLD 高速化技術開発

コスト削減には製造速度の向上が有効である。そのため、Reel to Reel で成膜する際の長尺基板の送り速度の向上を試みた。基板の送り速度向上に対して十分な成膜温度を維持するためには、ヒータ均熱板のスケールアップ及びヒータのパワーアップが必要となる。また、成膜領域前の段階で、基板にある程度の温度上昇を持たすために補助的なヒータを加えることも有効である。基板の送り速度を上げるだけでは 1 回の成膜で蒸着する超電導層の体積は逆に減少してしまうので、成膜ターゲットに入射する発振レーザーエネルギー及びレーザー繰り返し周波数を増加させて蒸着量を増加させる必要がある。また、Reel to Reel での成膜の際、基板を成膜領域に対して複数回巻きまわすマルチターン方式を採用しているが、このターン数の増

加も1回の成膜での蒸着量が増加するので高速化には有効である。このような方法を用いることで、基板送り速度は従来の30 m/hから60 m/h、レーザーパワー(発振レーザーエネルギー×レーザー繰り返し周波数)は、従来の約90 W (500 mJ×177 Hz)から約200 W (650 mJ×300 Hz)、マルチターン数も従来の4ターンから5ターンに増加させての成膜が可能となった。その結果、40 m/h で $I_c = 283 \text{ A/cm-w}(@77 \text{ K,s.f.})$ (膜厚 $0.9 \mu\text{m}$)、コストは2.89 円/Am、また、30 m/h (60 m/h の2回成膜) で $I_c = 339 \text{ A/cm-w}$ (膜厚 $1.0 \mu\text{m}$)、コスト2.65 円/Am という短尺試料の結果が得られた。

さらに、成膜時に基板をプルーム(アブレーションプラズマ)中を通すように成膜する方法(in-plume 法^(5,6))を用いることで高蒸着量・高収率が得られる。その結果、蒸着量は通常のPLD法の2倍、材料収率は約1.6倍(47%)に増加させることが可能となった。ただし、プルームの中に基板を通して成膜させるので、成膜用ターゲットの組成と蒸着された膜の組成にずれが生じ、膜の超電導特性を低下させてしまう可能性があるため、成膜用ターゲットの組成を適正化させる必要がある。その結果、種々の組成を検討したが、現段階では $\text{GdBa}_{1.8}\text{Cu}_3\text{O}_x$ のターゲットが最適であると考えられる。図2.4.5-9は、このような方法を用いて作製した極低コスト50 m長 GdBCO 線材の長さ方向 I_c 値分布を示したものである。その結果、レーザーパワー195 W、T-S 間距離60 mm、製造速度15 m/h、膜厚 $2.2 \mu\text{m}$ の条件で2.9 円/Am の特性を得た。

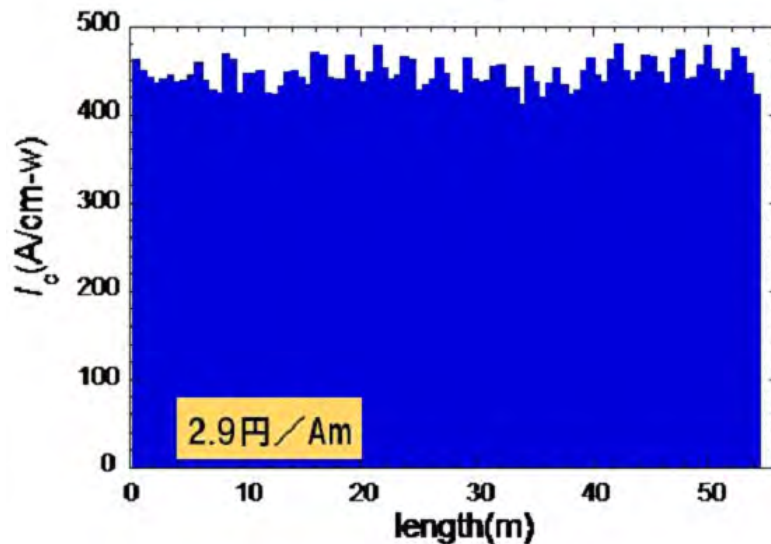


図 2.4.5-9 極低コスト 50 m 長 GdBCO 線材の長さ方向 I_c 値分布

・ PLD 高 J_c 化技術開発

極低技術コスト化へのもう一つのアプローチとして、比較的薄膜の高 J_c 層を積層することで高 I_c 値化を行なう方法が考えられる。高 J_c 層は従来の成膜方法(out-plume 法^(4,5))の方が得やすい。その中で、成膜条件の最適化(高成膜温度($850 \sim 900 \text{ }^\circ\text{C}$))、高レーザーエネルギー密度化($3 \text{ J/cm}^2 \sim$)、T-S 間距離の微調整等、成膜用ターゲットの組成適正化($\text{GdBa}_{1.9}\text{Cu}_3\text{O}_x$)を行った。この結果、IBAD-MgO 基板

上での短尺試料で、 $I_c = 325 \text{ A/cm-w}$ (@77 K, s.f.), $J_c = 6.5 \text{ MA/cm}^2$ (膜厚 $0.5 \mu\text{m}$), 製造速度 30 m/h , 技術コスト 2.79 円/Am や、 $I_c = 518 \text{ A/cm-w}$ (@77 K, s.f.), $J_c = 5.1 \text{ MA/cm}^2$ (膜厚 $1.0 \mu\text{m}$), 製造速度 15 m/h , 技術コスト 2.36 円/Am の作製が可能となった。図 2.4.5-10 は、このような方法を用いて作製された極低コスト 50 m 長 GdBCO 線材の長さ方向の I_c 値分布を示したものである。この時、レーザーパワー 106 W 、T-S 間距離 97 mm 、製造速度 10 m/h 、膜厚 $1.5 \mu\text{m}$ であり、技術コストとして 2.9 円/Am を得た。すなわち、これは中間目標の技術コスト 3 円/Am を達成し、長さも 50 m をクリアしている。

また、上記のような成膜条件の最適化に加えてレーザーパワーの増加(約 210 W ($700 \text{ mJ} \times 300 \text{ Hz}$))を試みることで、比較的高 J_c (約 4.5 MA/cm^2)で長尺(20 m)高 I_c 値の GdBCO 線材の作製も可能である。

上述のように、技術コスト 3 円/Am の RE 系超電導線材の作製は可能となり、これらの基本技術を磁場中高 I_c 線材作製技術、低損失線材作製技術、および高強度高 J_c 線材作製技術の開発へ展開している。

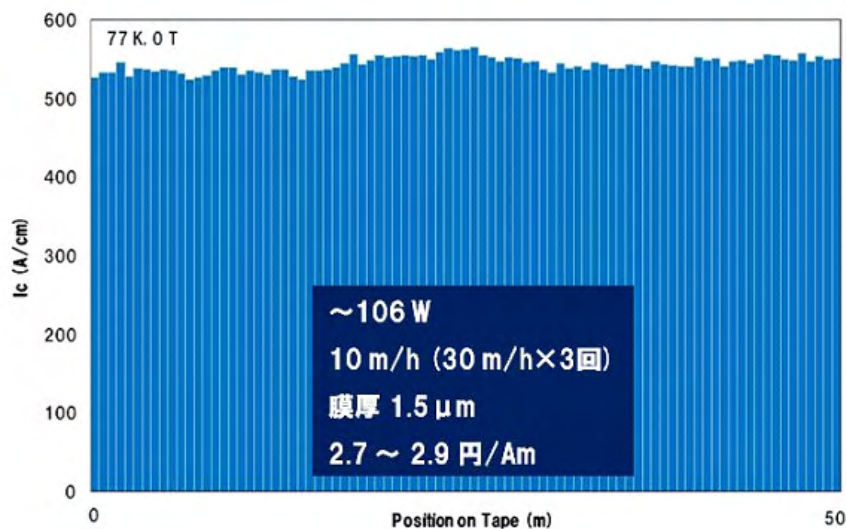


図 2.4.5-10 極低コスト 50 m 長 GdBCO 線材の長さ方向 I_c 値分布

今後と最終目標

最終目標値は、技術コスト 3 円/Am 未満の実証である。実用化のために、現状よりも高 I_c 値化かつ長尺化を促進し、さらなる低コスト化を進める必要がある。技術コストの最終目標値は 3 円/Am 未満としたが、一層の低コスト化を進めるため内部目標値を線材の技術コスト 1 円/Am 台とした。この際、PLD 法超電導層のみの技術コストは 1 円/Am 未満が必要となる。この時の製造条件としては、例えば、典型例としては、以下のとおりである。

- ・ in-plume 法 PLD では、製造速度 20 m/h 、 $I_c = 552 \text{ A/cm-w}$ 、 $J_c = 2.3 \text{ MA/cm}^2$ (@77 K, s.f.)
- ・ out-of-plume 法 PLD では、製造速度 10 m/h 、 $I_c = 830 \text{ A/cm-w}$ 、 $J_c = 3.4 \text{ MA/cm}^2$ (@77 K, s.f.)

もちろん、より高速化が可能になれば、必要な I_c 値も小さくてすむ。例えば、

- ・ in-plume 法 PLD では、製造速度 30 m/h、 $I_c = 510$ A/cm-w、

$J_c = 2.3$ MA/cm²(@77 K, s.f.)

- ・ out-of-plume 法 PLD では、製造速度 15 m/h、 $I_c = 600$ A/cm-w、

$J_c = 6$ MA/cm²(@77 K, s.f.)

で、1 円/Am 未満の超電導層の技術コストが達成できる。

これらに必要な技術課題のうち、例えば、高速化に対しては既に最終目標値に向けた検討を開始した。

- ・ 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を改良による基板送り速度の向上(60 m/h → 80 m/h)
- ・ 発振レーザーエネルギーの増加

これらの技術検討により、in-plume 法では 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 倍向上した。これにより技術コストが約 15 %減り 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、out-of-plume 法とあわせてさらに高速化、高 I_c 値化の検討を進めている。高 I_c 値及び高 J_c 値化のためには、成膜条件のより詳細な最適化、RE 系超電導層の膜厚増加に対する J_c 値の低下の要因の特定・解決など基礎的検討も必要であると考えられる。以上のとおり、in-plume 法 PLD、out-of-plume 法 PLD の高速化、高 I_c 値化に重点をおいた研究開発を進めて、最終目標を達成する。

(a-3) MOD 法における超電導層作製コスト削減技術開発

MOD 法による超電導層作製コスト削減技術開発として、ISTEC と SWCC が共同で線材技術コスト 3 円/Am 以下の実証をめざして開発を実施している。MOD 法による長尺超電導層作製プロセスとしては、長さに制限の少ない Reel to Reel 方式と高速処理が期待できる Batch 方式があるが、仮焼プロセスは ISTEC、SWCC とともに Reel to Reel 方式、本焼プロセスについては ISTEC では Reel to Reel 方式、SWCC では Batch 方式を採用することとした。

ISTEC での Reel to Reel 方式による仮焼、本焼プロセスによる検討を以下に述べる。前回のプロジェクトにおいて、ISTEC で得られた成果を表 2.4.5-2 に示す。

表 2.4.5-2 「超電導応用基盤技術研究開発 (第 II 期)」プロジェクトでの成果
(Reel to Reel 式本焼)

線材長 (m)	膜厚 (μ m)	プロセス製造速度 (m/h)		I_c 特性 (A/cm-w)
		仮焼(Reel to Reel)	本焼(Reel to Reel)	
56	1.2	1.8	1.2	250

中間評価の技術コスト目標である 3 円/Am 以下を満足する線材構造として、IBAD-MgO 基板(50 m)を用い、超電導層の仕様は I_c : 350 A/cm-w(@77 K, s.f.)、膜厚: 1.5 μ m、塗布・仮焼プロセス製造速度: 5 m/h、本焼プロセス製造速度: 5 m/h

とする条件を選択した。この構造でコスト計算した結果、2.87 円/Am (基板: 0.52 円/Am、中間層: 0.85 円/Am、超電導層: 1.31 円/Am、安定化層: 0.19 円/Am)を得たためこれを中間目標とした。中間目標を満足する線材を作製するためには、製造プロセスの高速化、線材の高特性化を推し進める必要がある。塗布・仮焼プロセス高速化の検討にあたって、安定したプロセスと再現性を実現するために、原料溶液には、前プロジェクトで開発した Cu-オクチル酸塩を用いた溶液を使用した。

Reel to Reel 方式シングル仮焼炉により 2 m/h の製造速度で 11 m 長線材作製を行った結果、図 2.4.5-11 に示すように、線材の途中で突発的に I_c 特性劣化を示す箇所が多数存在する問題が明らかになった。Reel to Reel 方式の仮焼炉を用いて、再現実験を試みた結果、塗布部に問題があることを確認した。塗布部は、図 2.4.5-12 に示すようにドラム式になっている。塗布時には、ドラムと線材間に原料溶液が溜まり濃化され、この濃化液体が溢れ出る際、線材端部に濃化液体が塗布される。また、ドラム表面には原料溶液が固化した固形物が形成され、これが線材の端部に付着する。これらが焼成されることで仮焼膜に図 2.4.5-13 に示すような焼損が発生し、 I_c 特性の劣化を引き起こすことが判明した。

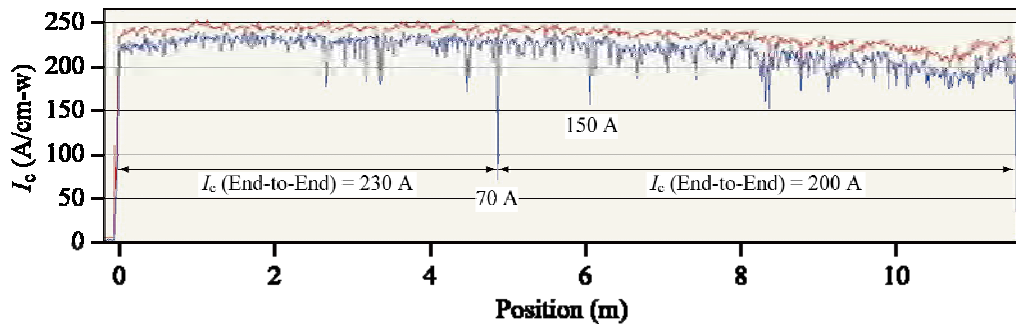


図 2.4.5-11 Reel to Reel 式 TFA-MOD 法による 11 m 長線材の I_c 値分布

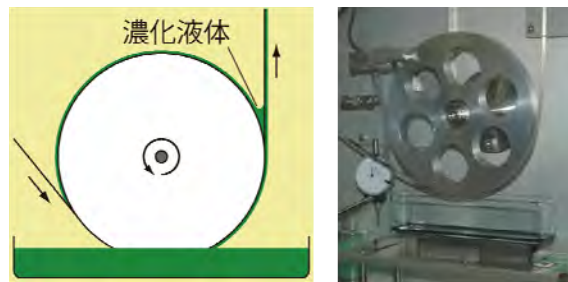


図 2.4.5-12 ドラム式塗布部

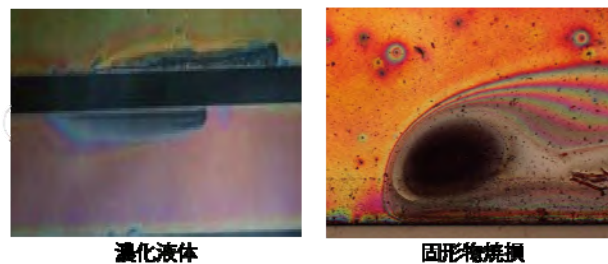


図 2.4.5-13 仮焼時における濃化液体と固形物焼損

そこで、塗布部をドラム式から図 2.4.5-14 に示すようなチューブ式に変更し、濃化液体の溢れ出しおよび固形物の形成を防止する処置を行った。

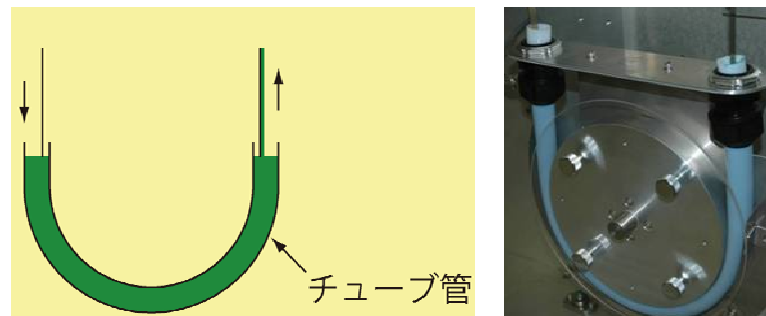


図 2.4.5-14 チューブ式塗布部

チューブ式塗布部の効果を確認するため、チューブ式塗布部を装着した Reel to Reel 方式シングル炉を用いて 2 m/h の製造速度で 20 m 長線材作製を行った。図 2.4.5-15 にこの線材の I_c 特性分布を示す。ドラム式塗布部の場合に見られたような焼損は見られず、突発的な著しい I_c 特性劣化を示す箇所は消失し、チューブ式塗布部の有効性が明らかになった。

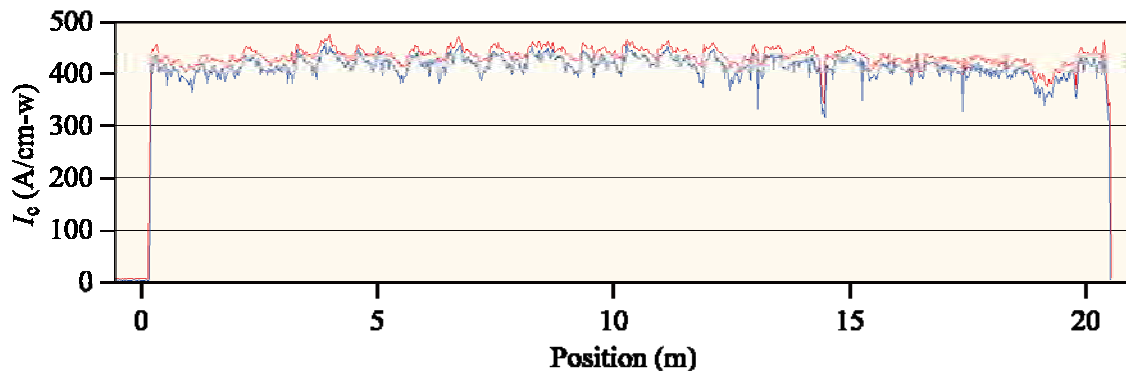


図 2.4.5-15 Reel to Reel 方式 TFA-MOD 法による 20 m 長線材の I_c 値分布

チューブ式塗布部を Reel to Reel 方式マルチ仮焼炉に適用し塗布・仮焼プロセスの高速化を図った。仮焼プロセスの高速化において、仮焼時における単位時間あたりの発生水蒸気量の増大が予想される。「超電導応用基盤技術研究開発 (第 II 期)」プロジェクトの成果から得られた知見より、仮焼時に低温度領域で試料が湿潤雰囲気と晒されると特性が著しく劣化することが分かっている。炉内に滞留した水蒸気が特性を劣化させることがないように、Reel to Reel 方式マルチ仮焼炉においては、ガス流通を良好に行うために図 2.4.5-16 に示すような縦吹き構造を採用した。

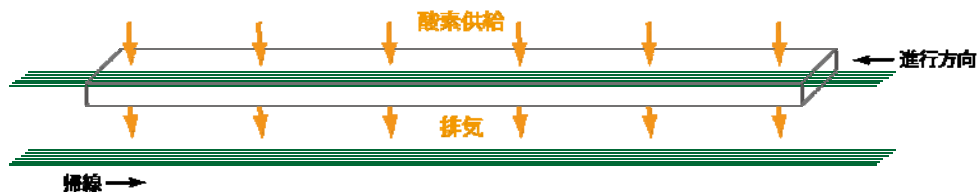


図 2.4.5-16 Reel to Reel 方式マルチ仮焼炉模式図

続いて、本焼プロセスの高速化を図るために YBCO 結晶成長速度向上の検討を行った。TFA-MOD 法では、以下の式により、YBCO の結晶成長速度は規定される⁹⁾。

$$R = A \sqrt{\frac{u \cdot P(\text{H}_2\text{O})}{P_t}}$$

R : 成長速度, A : 定数, u : ガス流速, $P(\text{H}_2\text{O})$: 水蒸気分圧, P_t : 全圧

これにより、結晶成長速度増加には、ガス流速(u)の増加、全圧(P_t)の低下が有効であることが分かる。Reel to Reel 方式本焼炉の配管径の見直し、ポンプ増強などの装置改造により、表 2.4.5-3 に示すような Reel to Reel 方式本焼炉の性能向上を行った。

表 2.4.5-3 Reel to Reel 方式本焼炉の能力増強

	流量(L/min)	到達圧力(kPa)
従来	70	24.0
処置後	150	6.7

Reel to Reel 方式プロセスの高速化および長尺安定性を確認するために、Reel to Reel 方式仮焼プロセスの製造速度が 5 m/h、Reel to Reel 方式本焼プロセスの製造速度が 2.5 m/h の条件で、100 m 級線材の作製を行った。この Reel to Reel 方式本焼炉において、焼成には炉の半分しか用いておらず、全面用いた場合に換算すると、製造速度は中間目標値である 5 m/h に相当する。この線材の I_c 値分布を図 2.4.5-17 に示す。全体にわたって特性が維持されており、Reel to Reel 方式の高速化および長尺安定性の実現が確認できる。

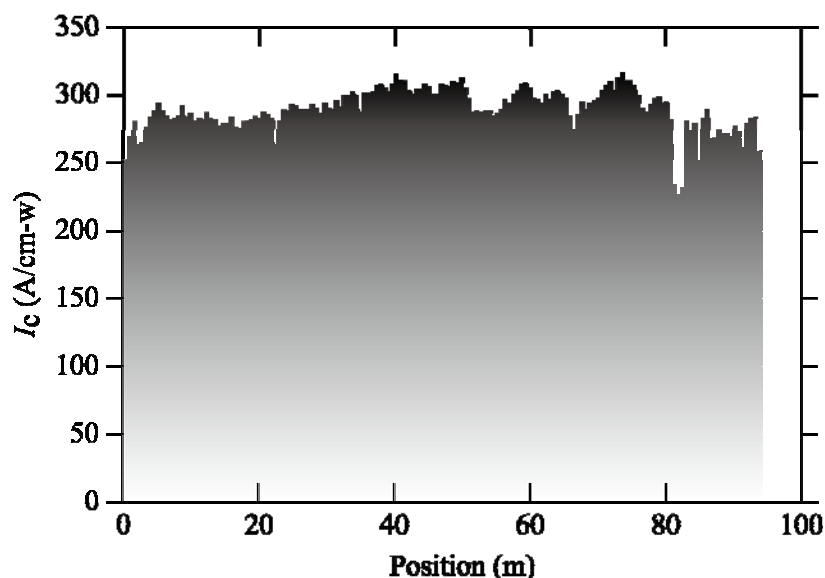


図 2.4.5-17 Reel to Reel 方式 TFA-MOD 法による 100 m 級線材の I_c 値分布

上記の様々な技術開発の成果を受けて Reel to Reel 方式仮焼プロセスで 5 m/h、Reel to Reel 方式本焼プロセスが 2.5 m/h(5 m/h 相当)の製造速度で超電導層が 1.5 μm 厚の 50 m 級線材を作製した。図 2.4.5-18 に、得られた線材の I_c 値分布を示す。3 箇所ほど I_c 特性が劣化している箇所が見られるが、その他は中間目標を見越した 350 A/cm-w を超える高い特性が実現されている。この線材の特性劣化部と正常部の断面 TEM 観察の結果を図 2.4.5-19 に示す。特性劣化部は、中間層の結晶粒配向性が悪く、 I_c 特性劣化の原因は中間層の異常に起因することが示唆される。これより、MOD 法による超電導層作製においては製造速度および特性に関して中間目標を達成する技術見通しを得たと言える。

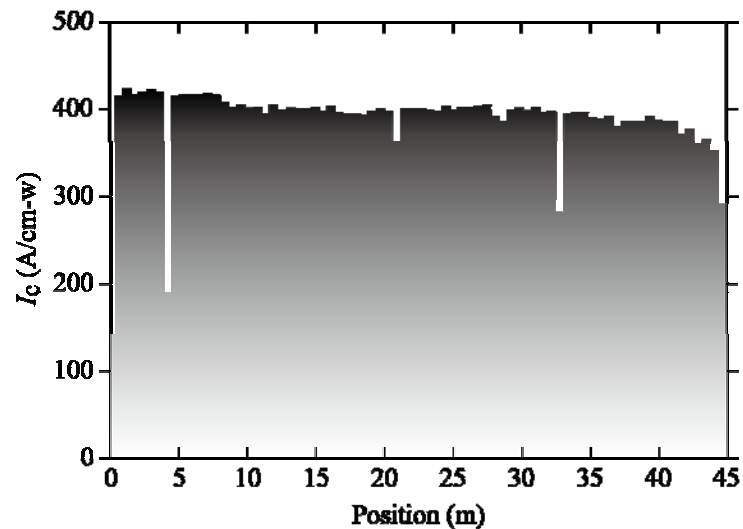


図 2.4.5-18 Reel to Reel 方式 TFA-MOD 法による 50 m 級線材の I_c 値分布

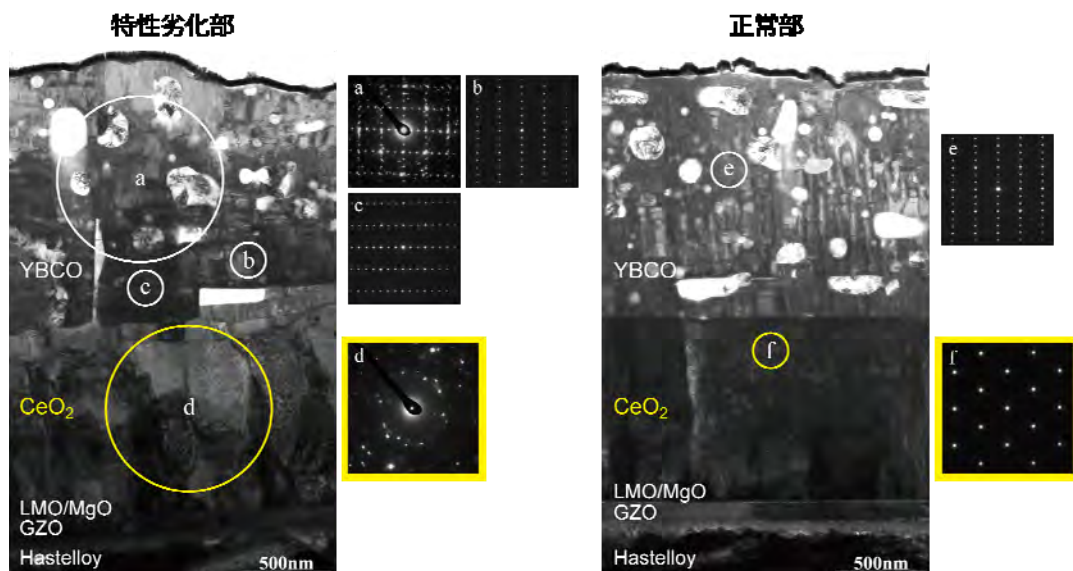


図 2.4.5-19 Reel to Reel 方式 TFA-MOD 法による 50 m 級線材の断面 TEM 像

次に、SWCC における、Reel to Reel 方式仮焼プロセス、Batch 方式本焼プロセスによる検討を述べる。「超電導応用基盤技術研究開発 (第 II 期)」プロジェクト

において、SWCC で得られた成果を表 2.4.5-4 に示す。

表 2.4.5-4 超電導応用基盤技術研究開発プロジェクト(第Ⅱ期)での成果
(Batch 方式本焼)

線材長 (m)	膜厚 (μm)	プロセス製造速度 (m/h)		I_c 特性 (A/cm-w)
		仮焼(Reel to Reel)	本焼(Batch)	
500 (IBAD-GZO)	1.5	5	11	300

中間目標の技術コスト目標である 3 円/Am 以下を満足する線材構造として、IBAD-MgO 基板(50 m)を用い、超電導層の仕様は I_c : 300 A/cm-w、膜厚: 1.5 μm 、塗布・仮焼プロセス製造速度: 5 m/h、本焼プロセス製造速度: 10 m/h とする構造を選択、コスト計算によりこの構造で 2.98 円/Am (基板: 0.60 円/Am、中間層: 0.99 円/Am、超電導層: 1.16 円/Am、安定化層: 0.23 円/Am)を得たためこれを中間目標とした。線材長、製造速度および特性は、既に中間目標を満足しているが、用いた基板が IBAD-GZO であるため IBAD-MgO 基板の適用が課題となる。また、磁場特性の向上を併せて期待し、(Y/Gd 系 + ピン材料)原料溶液の適用を図った⁽¹⁰⁾。

図 2.4.5-20 に Batch 方式本焼炉による IBAD-MgO 基板を用いた 50 m 長(Patch)線材作製の結果を示す。仮焼膜は Reel to Reel 方式マルチ仮焼炉で作製した。 I_c 特性は、最大値で 321 A/cm-w を示し、IBAD-MgO 基板を用いても Batch 方式本焼炉で焼成可能であることが確認できた。また、 I_c 特性の最小値は 261 A/cm-w であったが、Reel to Reel 方式マルチ仮焼炉での(Y/Gd 系 + ピン材料)原料溶液の仮焼プロセス条件最適化によりさらなる特性向上が期待できると考えられる。

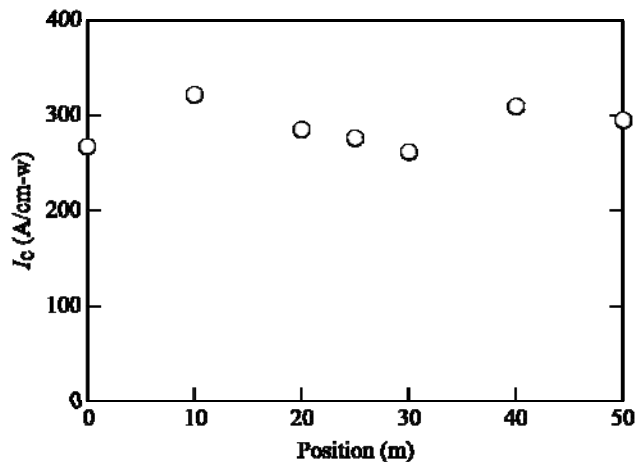


図 2.4.5-20 Batch 方式本焼炉による 50 m 長(Patch)線材の I_c 値分布

最終技術コスト目標である 3 円/A 未満を満足する線材構造として、超電導層の仕様は、同時に磁場中特性改善技術開発の達成も考慮して I_c 値を 500 A/cm-w(@77 K,s.f.)とし、膜厚: 2.5 μm 、塗布・仮焼プロセス製造速度: 10 m/h、本焼プロセス製造速度: 10 m/h とする構造を選択した場合、コスト計算によりこの構造で 1.42 円/Am (基板: 0.36 円/Am、中間層: 0.40 円/Am、超電導層: 0.52 円/Am、安定化

層: 0.14 円/Am)を得るためこれを最終目標とした。最終目標を満足する線材を作製するためには、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 塩もフッ素フリー化した Y-レブリン酸塩を原料として用いた溶液を開発し、図 2.4.5-21 に示すように 1 回塗布膜厚について 0.4 $\mu\text{m}/\text{coat}$ まで 2 MA/cm² 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、図 2.4.5-22 に示すように、製造速度 5 m/h(10 m/h 相当)まで特性を維持したまま 1.5 μm 厚の超電導層を焼成可能な結果が得られており、さらにレーン数の増加による焼成時間増加により、さらなる製造速度の高速化が期待できる。最終目標に向けては、2.5 μm 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ともに、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。

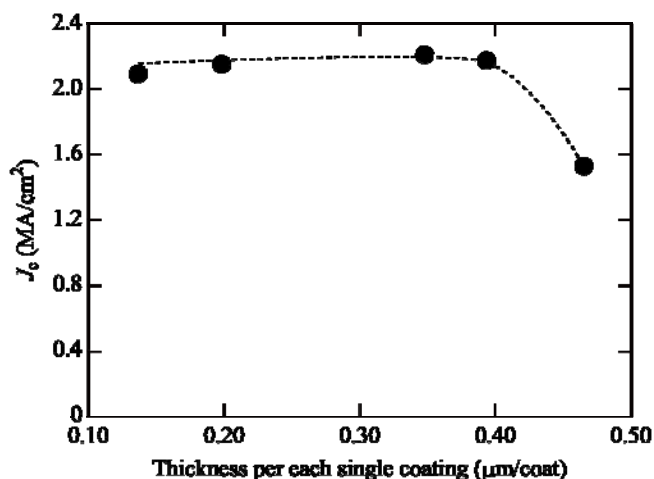


図 2.4.5-21 1 回塗布膜厚と特性との関係

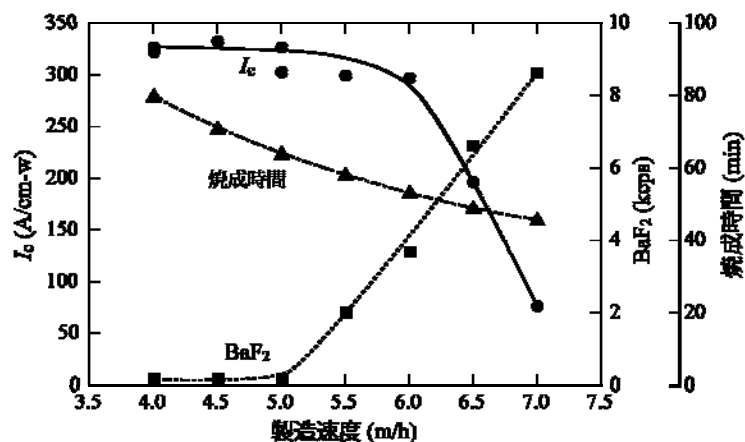


図 2.4.5-22 Reel to Reel 方式本焼炉における製造速度と特性との関係

(a-4) 低コスト線材の電流特性評価

これまで記載した通り、種々の低コスト線材の開発、特にプロセスの改良などを行っているが、実際に使う際の電流特性の把握が今後の応用上重要である。このため、本章では高速成膜が可能となる in-plume 法による低コスト PLD-GdBCO 線材について、磁場中電流輸送特性ならびに磁束ピン止め特性について詳細な測定を行った⁽¹¹⁾。図 2.4.5-23(a)に示すとおり、in-plume 法による線材の不可逆磁界は標準的な PLD 試料に比べ高い値を有しており、磁束ピン止め点が導入されていることが分かる。本線材はまた、同図(b)に示すとおり、より低温域においても優れた J_c 特性を維持していることが明らかとなった。

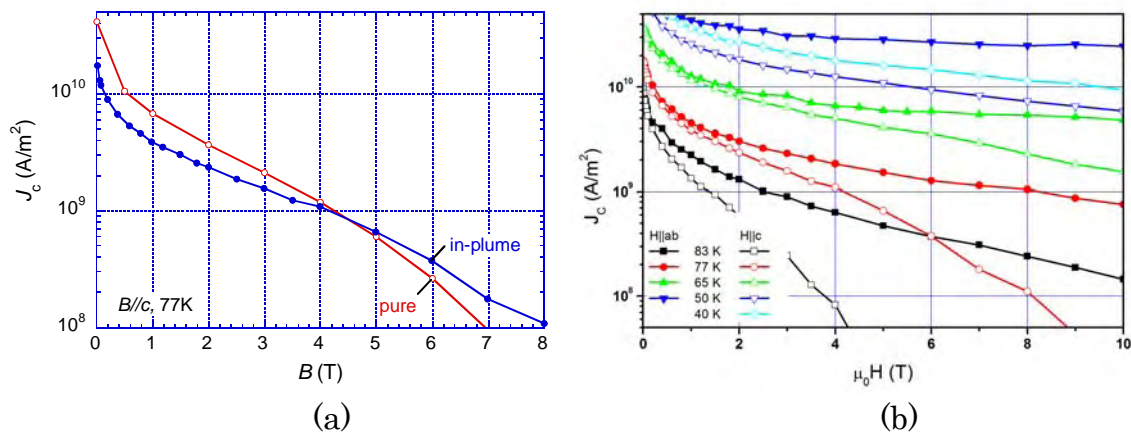


図 2.4.5-23 in-plume 法 PLD 線材の磁場中臨界電流特性 (a)77 K、垂直磁界における標準 PLD 試料との比較 (b)広い温度域を含む垂直磁界、平行磁界中の特性

この in-plume 法による低コスト PLD-GdBCO 線材のピン止め特性に関する特性をより詳細に調べるため、角度依存性について評価を行った。図 2.4.5-24 に示すとおり、低磁界中において J_c 値の角度依存性は、非対称な特性を有しかつヒストリー効果が現れており、得られる J_c 値は試料内の磁束分布とローレンツ力の印加方向による。このことから、比較的高温、低磁場の領域においては、バックグラウンドの高密度欠陥に伴う磁束ピン止めによって支配されていることが分かる。一方、図 2.4.5-25(a)に示すように、低温の高磁場領域に移るに従って、角度依存性の非対称は弱められ Ginzburg-Landau パラメータの異方性に起因すると考えられる標準的な試料と同様の振る舞いを示す。加えて、ab 面に平行な磁界中で、急峻な J_c 値のピークと共に n 値の低下が観測されており、Intrinsic ピンニングによる量子化磁束線のダイナミクスが大きく変化を示唆している。ab 面に平行な磁場中での n 値の低下は、実用上も重要な振る舞いであることから、電界依存性を考慮した考察が必要である。図 2.4.5-25(b)に示すとおり、平行磁界中では E - J 特性そのものが単純なパワー則から乖離することを示しており、低電界領域の n 値は増大することから、前述した通電法による見かけ上の n 値の低下は、必ずしも低電界中におけるクリープの増大を意味してはいない。

以上、高速成膜が可能な in-plume 法 PLD 線材では磁場中で高い不可逆磁場が得られ、より高磁場で高 J_c 値が見込まれると思われた。今後、SMES など磁場中応用に使う際の有力な検討対象線材となることがわかった。

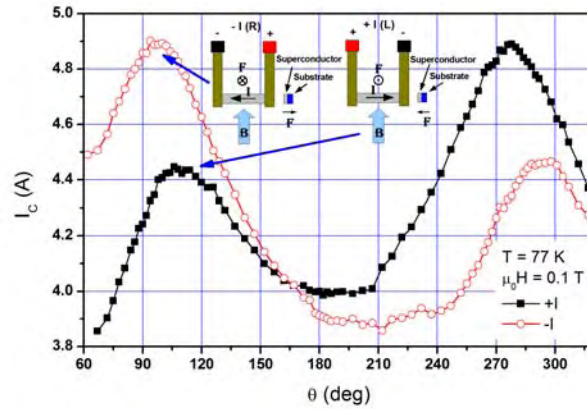


図 2.4.5-24 J_c 値の角度依存性に見られるヒストリー効果

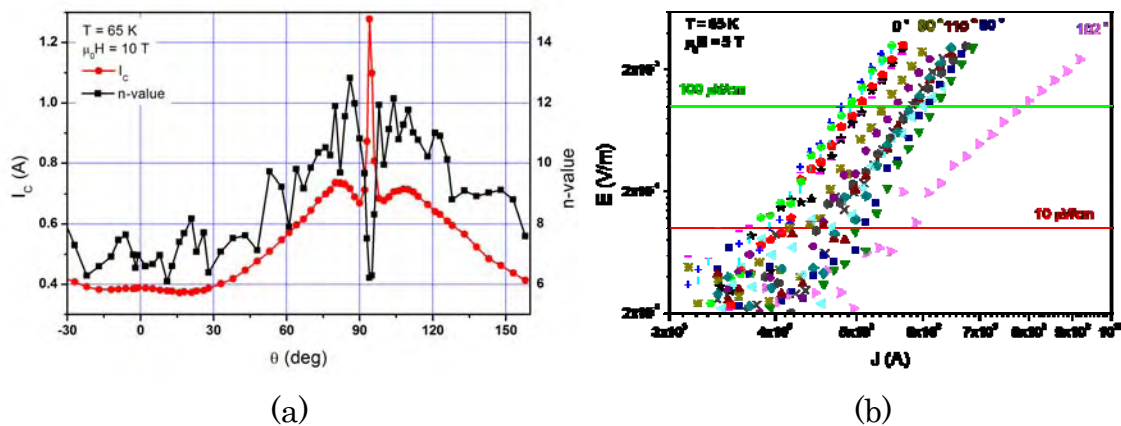


図 2.4.5-25 高磁場平行磁界下における Intrinsic ピンニングの影響

(a-5) レーザ CVD 法による作製コスト削減技術開発

Y 系超電導線材の低コスト化には、超電導層の高速成膜プロセスの開発が必要である。Y 系超電導膜は、熱 CVD 法やレーザアブレーション法により合成されているが、成膜速度が低いことが問題である。一方、本研究グループでは、大面積・高出力のレーザを CVD 法に導入することによって、種々の酸化物膜を熱 CVD 法より数十から数百倍の速度で高速成膜し、結晶配向を制御してきた⁽¹²⁾。

本研究開発では、レーザ CVD 法による c 軸配向した Y 系超電導膜の高速合成を行う。そして、Y 系超電導膜の組成、結晶配向および成膜速度などに及ぼす成膜条件の影響を精査し、レーザ CVD 法の Y 系超電導層形成への適用性を検討することにより、極低コスト線材に必要な高特性・高速成膜技術への原理検証を行う。

・レーザ CVD 法による多結晶 Al_2O_3 基板上への Y 系超電導膜の合成

レーザには、Nd: YAG レーザ (波長: 1064 nm; 連続発振) を用いた。有機金属

錯体の固体原料 (Y(dpm)_3 、 Ba(dpm/tmod)_2 および Cu(dpm)_2) をそれぞれ 468～493 K, 595～623 K, 523～533 K で気化させ、Ar ガスを用いて炉内に搬送し、 O_2 ガスと反応させて Y 系超電導膜を合成した。基板には多結晶 Al_2O_3 を用い、673～873 K で予熱した。

レーザー出力 130 W、基板予熱温度 873 K、炉内圧力 1.0 kPa、Ba 原料気化温度 600 K、Cu 原料気化温度 528 K において、Y 原料気化温度を変化させた。いずれの Y 原料気化温度でも、c 軸配向した Y 系超電導膜が得られた。463 K では、 Y_2O_3 相の回折ピークがわずかに認められたが、Y 系超電導膜のほぼ単相膜が得られた。Y 原料気化温度 473 K で合成した Y 系超電導膜は、粒径数 μm の平坦な正方結晶と緻密な断面組織からなっており、成膜速度は $100 \mu\text{m/h}$ であった。表面および断面形態は、空气中 823 K で 12 h の熱処理後もほとんど変化しなかった。後熱処理した Y 系超電導膜は、30 K 程度の低温ながらも超電導転移を示した。

レーザー CVD 法による単結晶 (100) MgO 基板上への Y 系超電導膜の合成

上記研究で最適化した合成条件を元に、(100) MgO 基板上に Y 系超電導膜を合成した。成膜温度 975 K 以下では結晶粒が a 軸配向した Y 系超電導膜が得られ、1000 K 以上で結晶粒が c 軸配向した Y 系超電導膜の単相膜が得られた。成膜温度 927 K で合成した Y 系超電導膜の極点図形には、四回対称の回折スポットが観察され、結晶粒が c 軸配向した Y 系超電導膜の 2 軸配向成長を示した (半価幅 1.2 度)。成膜温度 927 K で合成した Y 系超電導膜の表面には、2 軸配向を反映した正方形の結晶粒が成長しており、成膜速度は、 $57\sim 77 \mu\text{m/h}$ であった。成膜温度 1044 K で合成し、酸素雰囲気中で後熱処理した Y 系超電導膜は、 $T_c = 86 \text{ K}$ 近傍で超電導転移を示した。

レーザー CVD 法による IBAD 線材上への Y 系超電導膜の合成

本手法の Y 系超電導層形成への適用性を検討するために、PLD- $\text{CeO}_2/\text{LaMnO}_3/\text{IBAD-MgO}/\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ /ハステロイ™線材 (IBAD 線材) 上に Y 系超電導膜を合成した。成膜温度 828 K で合成した Y 系超電導膜の極点図形には、四回対称の回折スポットが観察され、結晶粒が c 軸配向した Y 系超電導膜の 2 軸配向成長を示した (半価幅 3.8 度) (図 2.4.5-26)。得られた膜は、緻密な断面と微細な長方形の粒子からなる表面をしており、成膜速度は最大 $83 \mu\text{m/h}$ であった。酸素雰囲気中で後熱処理した Y 系超電導膜は、 $T_c = 90 \text{ K}$ 近傍で超電導転移を示した (図 2.4.5-27)。

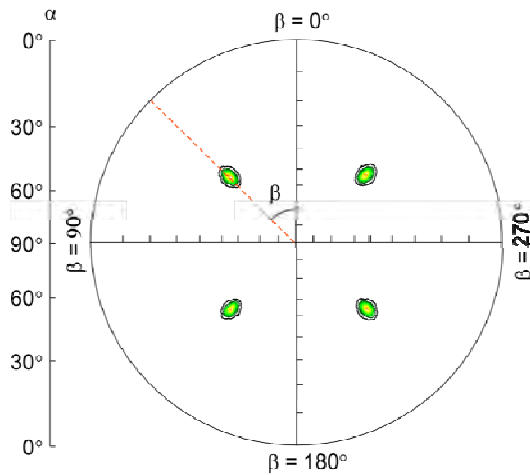


図 2.4.5-26 817 K で合成した YBCO/IBAD 膜の極点 XRD 図形

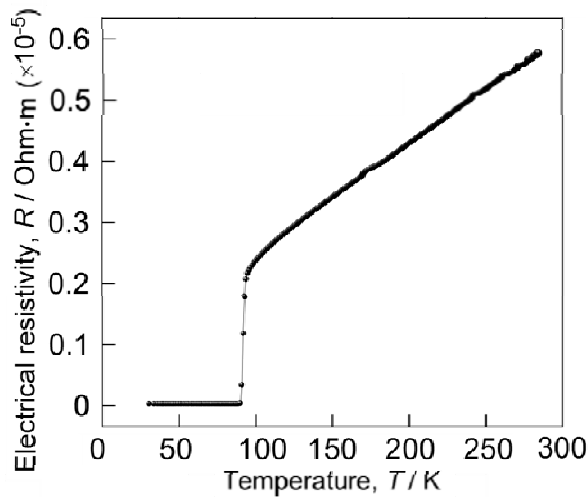


図 2.4.5-27 817 K で合成した YBCO/IBAD 膜の電気伝導特性

まとめ

レーザー CVD 法を用いて各種基板上に種々の条件で Y 系超電導膜を合成した。単結晶 (100) MgO および IBAD 線材上では、結晶粒が 2 軸配向した Y 系超電導膜が得られた。後熱処理した Y 系超電導膜は、 $T_c = 85 \sim 90$ K 近傍で超電導転移を示した。成膜速度は最大 $83 \mu\text{m/h}$ に達し、既存の CVD 法^(13,14)と比べて 8~1000 倍の製造速度が見込める。以上より、レーザー CVD 法の Y 系超電導線材における極低技術コスト線材に必要な超電導層高速成膜技術開発により、今後、製造速度の向上が進められ、最終目標 (3 円未満/Am の低コスト化) 達成に寄与できる。

(b) 接続・補修技術開発

(b-1) 銀拡散接合法による接続・補修技術開発

本開発では、線材の接続技術および欠陥等により低特性となった箇所健全な線材を貼り合わせて補修する技術を開発し、長尺線材及び加工線材の歩留り向上に資する。特に、今回、Gd 系超電導線材とその分割線材の接合・補修技術を開発し、

また、接合・補修部における電流分布も検討して、十分な高い I_c 値の流れる接合・補修を開発し、線材の歩留り向上に寄与できる結果を得た。

低コスト基板線材の銀拡散接合条件最適化

接合・補修技術としては、これまで線材の接続方法として実績があり、低抵抗接続が可能な Ag 安定化層を利用した拡散接合法を主として検討を行なった^(15,16)。プロジェクト開始時においては、従来基板(PLD-CeO₂/IBAD-GZO/ハステロイ™)を用いた Y 系超電導線材について接続技術はほぼ確立していたため、その知見をもとにして、低コスト基板である IBAD-MgO 上 Gd 系超電導線材について条件検討を行った。その結果、Y 系超電導線材とほぼ同じ条件で低抵抗接続が得られることを確認した。図 2.4.5-28 に Y 系超電導線材と Gd 系超電導線材における接合抵抗をまとめる。Y 系超電導線材においては、線材製造法に依らず、接合抵抗が 5~10 nΩcm²であったのに対し、Gd 系超電導線材では 15~25 nΩcm²と高くなる傾向にあることが明らかとなった。なお、ハンダ接着法による接続では、接続部抵抗が Y 系は 25 nΩcm²、Gd 系は 37 nΩcm²と銀拡散法よりも 10 nΩcm²以上高い値となり、本方法が低抵抗接続を得る上で有効であることが確認された。

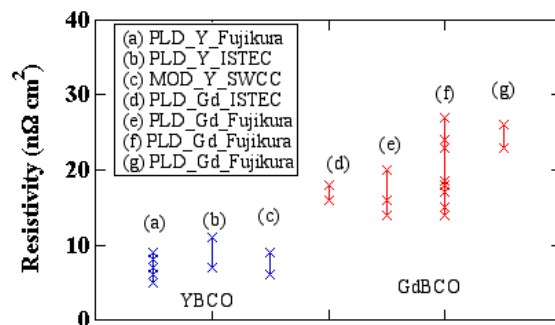


図 2.4.5-28 Y系超電導線材と Gd系超電導線材における銀拡散接合による接合抵抗の比較

長尺線材対応接合技術の開発

本プロジェクトの中間目標である 50 m 及び最終目標である 200 m 級線材の接続・補修に対応するため、長尺線材対応接合装置の開発を行った。装置の外観を図 2.4.5-29 に示す。銀拡散接合法において低抵抗接続を再現よく得るため熱処理時の抑え圧力を一定に制御する機構を設けている。図 2.4.5-28 の(a)と(e)は抑えジグにて固定する方法、それ以外は本装置を用いた方法で接続したものであるが、従来法とほぼ同様の抵抗値が得られている。

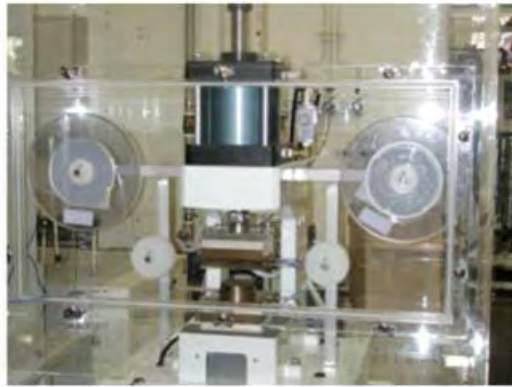


図 2.4.5-29 長尺線材対応接合装置の外観写真

分割加工線材補修技術の開発

変圧器用線材においては、フィラメント化加工等により特性の不均一性が顕在化しやすく、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が必須である。本プロジェクトにおいては、超電導変圧器の研究開発において 5 mm 幅 3 分割線材の安定供給、超電導電流機器用線材技術開発においては、中間目標において 5 mm 幅 5 分割、最終目標において 5 mm 幅 10 分割のフィラメント化溝加工が課題となっており、これらに対応した補修技術開発が必須である。

そこで、平成 20 年度においては、5 mm 幅 3 分割線材補修技術最適化検討、平成 21～22 年度前半には 5 mm 幅 3 分割線材補修の長尺対応技術開発及び 5 mm 幅 5 分割線材補修技術最適化検討を行った。また、剥離を含めた強度の把握のため、曲げ延ばし試験を行った。

図 2.4.5-30 に PLD-Gd 線材 5 mm 幅 3 分割線材の補修前後の $I-V$ 特性の比較の 1 例を示す。f1 と f2 について、 I_c 値測定後に化学エッチング法により超電導層を 2 mm 長に渡って除去して分断した後、銀拡散接合法により修復を行った。補修後、 I_c 特性はほぼ回復していることがわかる。また修復部の抵抗は約 40～60 $n\Omega\text{cm}^2$ (接続部一か所あたり約 20～30 $n\Omega\text{cm}^2$) と非分割線材とほぼ同様の値が得られており、また、補修前後でフィラメント間抵抗が維持され短絡が起きていないことが確認された。長尺線材については、10 m 級線材の補修実績が 10 回以上あり、現時点での歩留まりは 5 割以上である。現状での歩留まりが低い原因としては、銀表面の清浄化不足やフィラメント加工に用いるマスク材の糊の残留等による接合不良、熱処理による銀層/超電導層あるいは超電導層/ CeO_2 層間の剥離等があげられる。前者については、清浄化方法の見直しによりほぼ解決されるものと考えられる。また、後者においては、接合形成後の酸素アニール処理時に主に生じるため、熱処理時の線材のそり防止等により対策を行う。

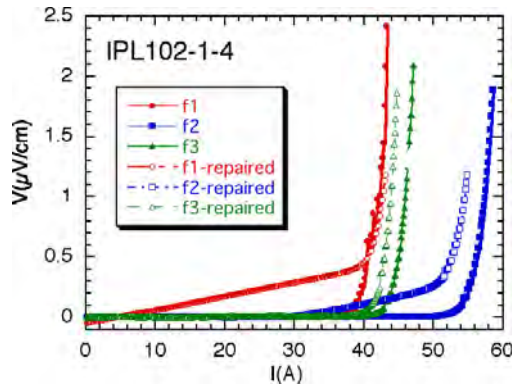


図 2.4.5-30 PLD-Gd 線材 5 mm 幅 3 分割線材の補修前後の $I-V$ 特性の比較
 I_c 値測定後、f1 と f2 に欠陥を導入し、銀拡散接合により補修

接合部の強度の把握のため、5 mm 幅 3 分割線材について 90 mmφの曲げ延ばし試験を行った。結果の一例を図 2.4.5-31 に示す。90 mmφの曲げ延ばし 1 回では接合部での I_c 値の低下及び剥離はみられなかったものの、複数回の曲げ延ばし及び室温・液体窒素温度の昇降温により接合部で剥離を生じる例もあった。今年度末までに、異なる曲半径での曲げ試験を引き続き行う予定である。

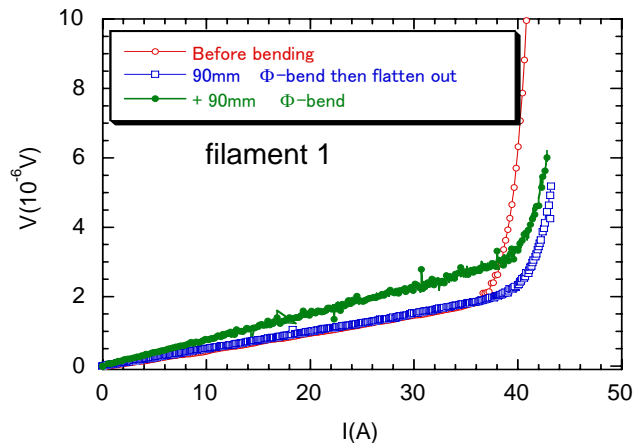


図 2.4.5-31 PLD-Gd 線材 5 mm 幅 3 分割線材の 90 mmφ曲げ試験における $I-V$ 特性の変化

次に、5 mm 幅 5 分割の補修例について、図 2.4.5-32 に示す。ここでは PLD-Y 系の線材を用い、#3 と #5 にダイヤモンドブレードにより傷を導入後、補修を行った。右図に補修後の $I-V$ 特性を示すが、補修後 I_c 値が回復していることがわかる。また、補修部抵抗は約 $22 \Omega\text{cm}^2$ (接続部一か所あたり約 $11 \text{ n}\Omega\text{cm}^2$) と非分割線材と同様の値となっており、また補修前後でフィラメント抵抗が維持され、短絡がないことが確認された。

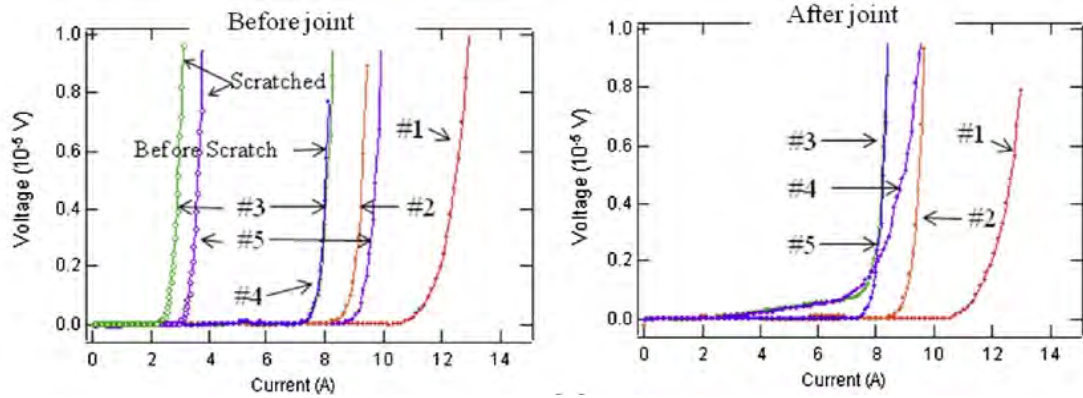


図 2.4.5-32 PLD-Y 系超電導線材 5 mm 幅 5 分割線材の補修例。フィラメント #3 と #5 に欠陥を導入後、銀拡散接合法にて補修

また接続・補修の交流損失に及ぼす影響を調べるために、5 mm 幅 5 分割線材を接続・補修した試料としていない試料との交流特性の比較を行い(図 2.4.5-33)、接続・補修による交流損失の増加がないことが確認された(17)。

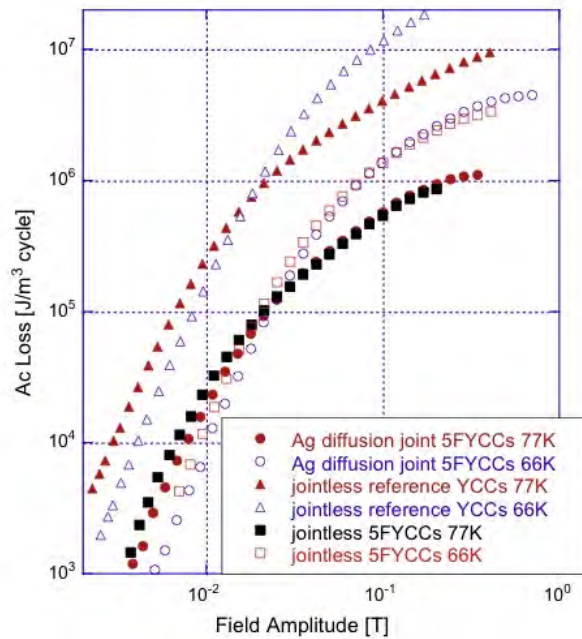


図 2.4.5-33 接続・補修の交流損失に及ぼす影響

接合・補修部の特性把握

本研究では、RE 系超電導線材の接続部における電磁現象の把握を目的に、走査型ホール素子顕微鏡を用いて電流分布を評価した。測定対象となる試料の写真を図 2.4.5-34 に示す。同試料は 5 mm 幅と 2 mm 幅の GdBCO 線材で構成されており、両線材間は銀拡散接合法により接続されている。同試料に通電した際の自己磁界分布を測定し、得られた自己磁界分布に対して Biot-Savart 則の逆問題を解くことにより、同試料内の電流分布を 2 次元シート電流密度分布として評価した。

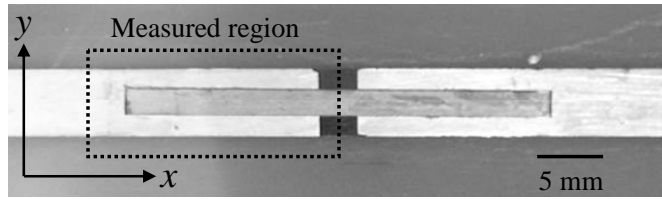


図 2.4.5-34 GdBCO 線材を用いた接合試料の写真

測定温度約 80 K、通電電流 25 A の条件下で得られたシート電流密度分布を図 2.4.5-35 に示す。なお、同分布は両線材の電流分布の重ね合わせに対応する。基本的には電流が試料形状の縁に集中して流れる分布が得られている。一方、 $y = \pm 1.0$ mm の幅方向位置に若干の起伏が見られることに注意を要する。

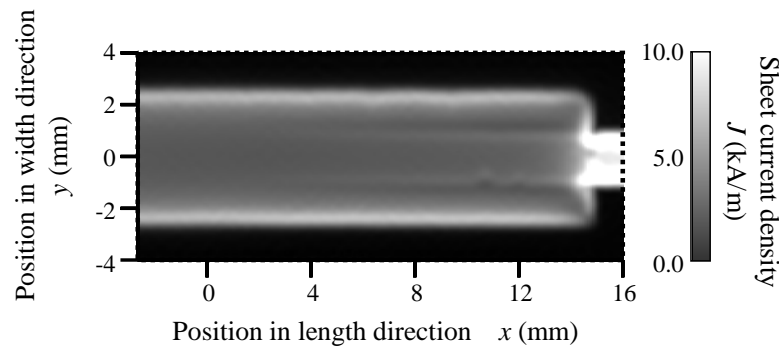


図 2.4.5-35 走査型ホール素子顕微鏡によって得られたシート電流密度分布

実は、本試料のように幅の異なる線材を用いた場合、その起伏の大きさが両線材の電流分担割合に応じて変化することが予め行った数値解析によりわかっている。具体的には、図 2.4.5-36 に示すように、幅の狭い線材の電流分担が増加するほど、得られるシート電流密度分布の起伏が大きくなる。

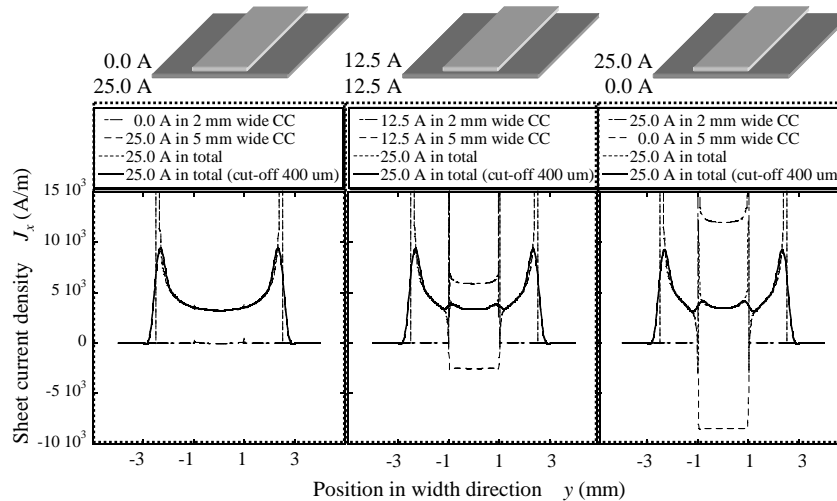


図 2.4.5-36 電流分担割合評価の原理

ここで、図 2.4.5-37 に示した実験結果に着目すると、両線材の接合部では長手方向(x 方向)に進むに従って、上記起伏が徐々に大きくなっていることがわかる。以上から、5 mm 幅線材から 2 mm 幅線材へ電流の移り変わりは、図 2.4.5-37 に示すように、接合部のほぼ全長を通じて行われていることが明らかとなり、均一性に優れた接合が実現されていると結論付けられる。

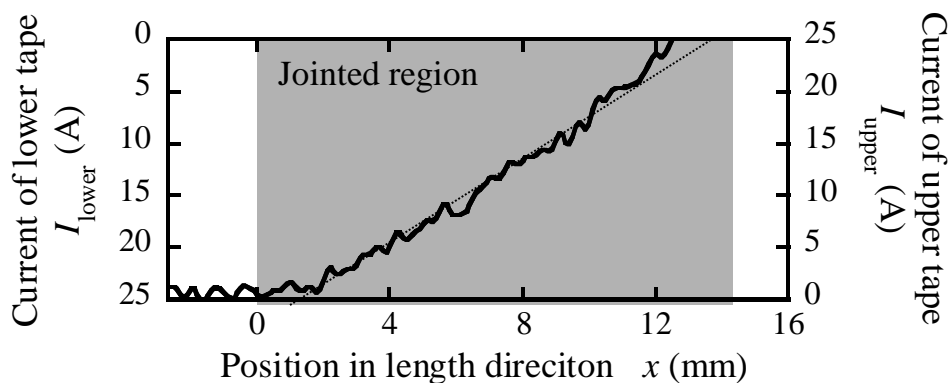


図 2.4.5-37 5 mm 幅線材から 2 mm 幅線材への電流の遷移

(b-2) 加圧接合法による接続・補修技術開発

SMES あるいは変圧器応用の線材をには、線材接合・補修技術開発が重要である。その接続技術の中で、これまでの Y 系超電導線材の加圧接合^(16,18)を基に、接合抵抗への圧力因子の影響を考察し、低抵抗接続を得て、今後の長尺線材及び加工線材の歩留まり向上に寄与した。

圧力設定が正確な重錘式加圧炉に YBCO 及び GdBCO 超電導線材の安定化層 (Ag) を対向させて設置し、加圧熱処理による Ag の拡散及び変形を利用した接合技術開発を行った。4 端子法により接合抵抗を測定し、電子顕微鏡により断面組織を観察した。

接合体の界面抵抗は、接合圧力に対して図 2.4.5-38 のような依存性を示した。接合抵抗と接合圧力の関係に及ぼす要因を解析し、圧力増加に伴う Ag の接合面の密着性・拡散接合度の向上、及びそれとは逆の効果として、基板の凹凸や圧力下での Ag の不均一変形等に起因して圧力増加に伴い YBCO/中間層の劣化が起り得ること、これらの要因により接合抵抗が決定されることを指摘した。これら知見を基に、試料の平滑性向上、治具の精密化、均質接合面積拡大を図った結果、いずれの圧力でも抵抗値が改善され、10 MPa で約 $6.5 \text{ n}\Omega\text{cm}^2$ の接合抵抗値を得た。一方、GdBCO 超電導線材では、治具改善や熱処理温度適正化により $35 \text{ n}\Omega\text{cm}^2$ 程度に改善されたが、YBCO 超電導線材より高い接合抵抗値を示した。電子顕微鏡による組成分析による原因調査から、接合前のテープ試料において Ag 層中への Gd の拡散が観察された。

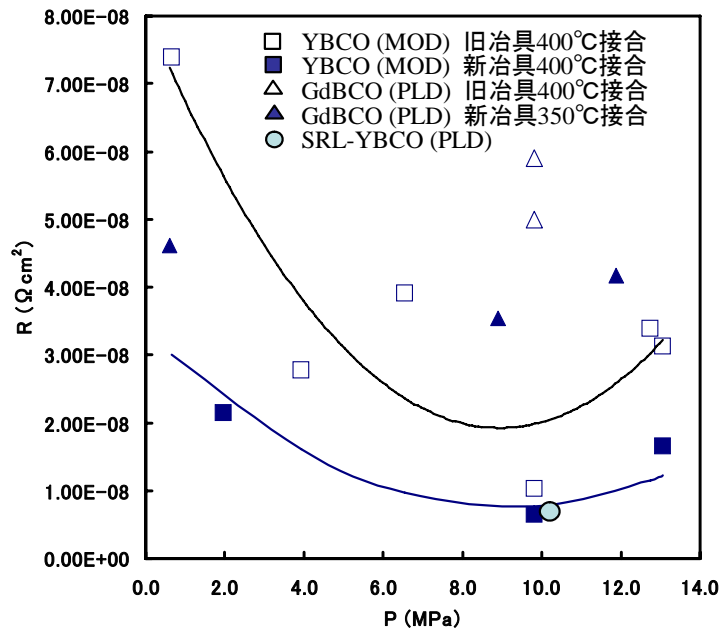


図 2.4.5-38 テープ接合体の接合圧力と接合抵抗

以上、安定化層を利用した加圧接合法による条件適正化により、接合体の低抵抗化が図れることが示されたが、GdのAg層への拡散によりGdBCO層の膜質劣化の結果も得られ、このことが界面性状や抵抗に影響を与えていることも考えられる。よって、GdのAg層への拡散を抑制していけば、GdBCO超電導線材においても一層の低抵抗化が実現できるものと推察される。これら線材の接合技術開発により、今後、低コスト化や歩留りの向上が進められ、最終目標達成に寄与できる。また、MOD法等により超電導層上に超電導原料塗布膜や仮焼膜を重ねて作製し、対向させ熱処理することで超電導層が配向成長すれば、超電導接合が実現できる可能性があるものと考えられる。

例えば、図 2.4.5-39 に示した超電導層上に原料塗布膜を重ねて作製し熱処理した予備実験からは、表面までYBCO層が成長していることが認められた。

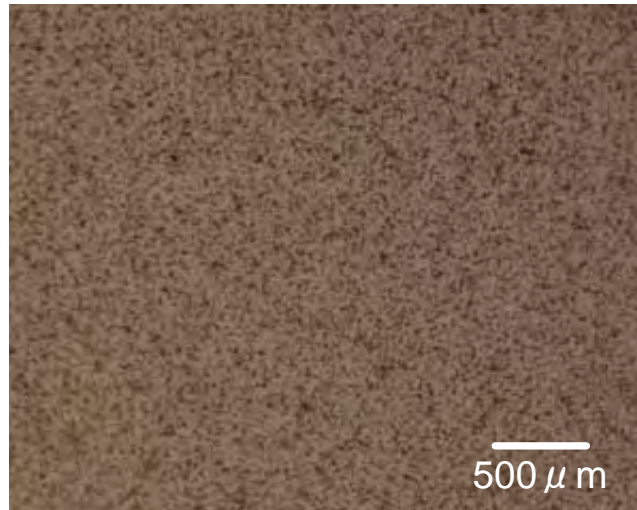


図 2.4.5-39 超電導層上に原料塗布膜を重ねて熱処理した YBCO 膜の光学顕微鏡による表面組織

(b-3) 極薄金属界面を用いた接合・補修技術開発

ここでは、従来の Ag 拡散接合技術において、より低抵抗を得るために、接合温度の低温化と Ag 層の極薄化、接合圧力の均一化を検討した。その結果、接続抵抗の低抵抗化が期待できる結果を得た。

RE 系超電導線材における接合は線材安定化層の面同士を張り合わせて、加圧接合熱処理を行う手法が一般的である。超電導線の接続には、より発熱の少ない接合抵抗(R_j)の低減が求められる。RE 系超電導線材は高温で熱処理を行うと、超電導体における酸素の脱離によって超電導特性の低下や相転移が起き、大きな抵抗が接合部近辺で生じやすい。このため、できるだけ低温で接合熱処理を行うことが求められる。

そのため、本研究では接合温度を低温化し、その際の銀安定化層の表面形態の変化および接合時の圧力分布の改良を行い、接合抵抗(R_j)の低減を行った。

図 2.4.5-40 に 650°C の低温で接合した Gd 系超電導線材の表面 SEM 像を示す。用いた試料は銀安定化層を 10 μm 厚および表面研磨により 1 μm 厚に極薄化した Gd 系短尺線材である。図 2.4.5-40 左図より、10 μm 厚の Ag 厚みの場合、Ag 結晶は大きな粒子に変化しており、銀は再結晶を行っていると考えられる。一方、図 2.4.5-40 右図は、1 μm 厚の Ag 厚みの場合であるが、矢印で示した箇所では極薄化した銀安定化層の下に Gd 系超電導層が観察された。すなわち、極薄の Ag 安定化層の接続では、再結晶化、蒸発などにより、Gd 系超電導層が現れ、超電導層同士を反応接合させることができる可能性がある。

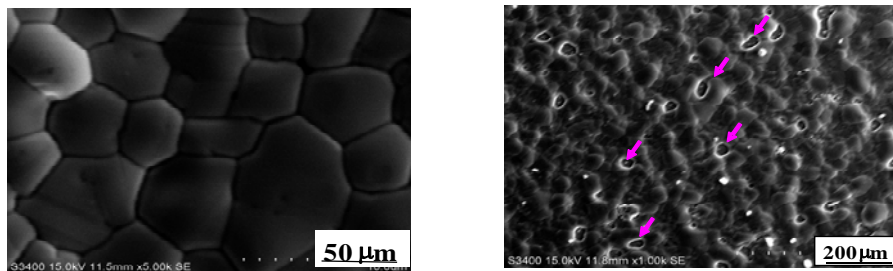


図 2.4.5-40 650°C で熱処理後 10 μm 厚および 1 μm 厚の Ag 安定化層の表面形状

さらに、接合実験に用いた接合用ジグの圧力分布の不均一性を改善した。従来の二点接合ジグを用いた際の圧力分布を図2.4.5-41に示す。二点接合ジグのみで圧力をかけた場合、圧力分布に非常にムラがある。これに対して、三点圧力接合ジグおよびセラミックス板を使用した改善を行った。接合時に治具と試料の平坦性、圧力均一性が増し、ほぼ全体に均一に圧力がかかっていることがわかった。これにより、接合力が大きく改善される可能性が示された。

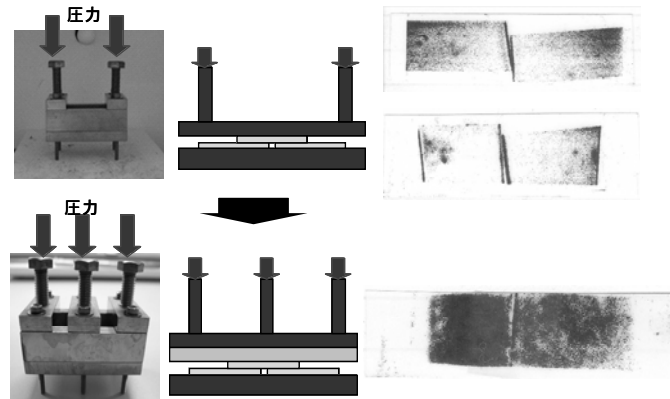


図 2.4.5-41 簡易型圧力治具における接合界面の圧力分布

今後、さらに銀安定化層の平坦性、極薄膜化、接合加工時の圧力分布均一化技術の構築により、現状の金属-金属接合から、超電導接合へと展開していくことが期待される。

(4) まとめ

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。

IBAD-MgO 法においては、

- ・ 研磨工程の高速化などによる低コスト化
- ・ IBAD-MgO 層の最適条件化による結晶粒高配向、低技術コスト化
- ・ ベッド層の材料、プロセス検討による低コスト化
(従来のスパッタ法 GZO 層から低コスト MOD 法-CZO 層へ)
- ・ LMO 層および CeO₂ 層の最適条件による薄膜化、高速化による低コスト化

超電導においては、PLD 法において

- ・ レーザパワー、周波数などの製作条件最適化
- ・ 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
- ・ out-of-plume, in-plume などのプルーム位置の最適化

また、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
 - ・ 製造速度と反応効率の検討
- を行った。

その結果、以下の表 2.4.5-5 に示すように、IBAD-PLD 法においては、例えば代表的な例として、51 m 長で製造速度 10 m/h で $I_c = 524 \text{ A/cm-w}(@77 \text{ K,s.f.})$ 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 を達成できた。

また、IBAD-MOD 法においては長さ 25 m、製造速度 5 m/h で $I_c > 370 \text{ A/cm-w}(@77 \text{ K,s.f.})$ 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、全長で 3 点の低 I_c 値部の欠陥があったが、現在、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。

表 2.4.5-5 中間目標と実績の比較、見通し

分類	中間目標 技術コスト 3 円/Am の実証	実績 (H22 年 7 月現在)	達成度	H22 年 3 月までの 中間目標達成見通し
基板・ 中間層	配向度：4 度台 各層速度： 10~120 m/h 長さ > 50 m	CeO ₂ 層、LMO 層、 IBAD-MgO 層、MOD-GZO ベッド層達成 約 360 円/m	○	下記超電導層とあ わせてコスト目標 達成見込み
PLD 超 電導層	I_c ：420 A/cm-w 速度：15 m/h 長さ>50 m	435 A/cm-w(@77 K,s.f.) 15 m/h 50 m など	◎	—
MOD 超電導 層	I_c ：350 A/cm-w 速度：5 m/h 長さ > 50 m	370 A/cm-w(@77 K,s.f.) 仮焼 5 m/h, 本焼 5 m/h, 25 m	○	中間層欠陥排除な どで均一化により 50 m 達成予定

◎：中間目標達成 ○：H23 年 3 月末までの中間目標達成が見通せている

△：H23 年 3 月末中間目標達成には技術開発の大きな進展が必要

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 2 軸配向度 3.8 度を得た。これより、従来の PLD 法などの 100 倍の高速成膜を生かしたレーザ CVD による新たな線材作製方法の可能性が高まった。

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 超電導線材において低抵抗化、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-Gd 線材 5 mm 幅 3 分割線材において、 I_c 値の劣化が少ない技術を開発することができた。長さは、10 m(補修実績が 4 回以上)あり、現時点での歩留りは 5 割以上である。中間目標は、5 mm 幅 5 分割線材における長尺化であるが、短尺ではすでに実績があるので、5 分割フィラメント形状の線材の長尺を待って、十分、今期達成見込みである。また、大学との研究の共同実施により、さらなる低抵抗化の検

討を行っている。PLD-Y 系超電導線材を用いた空孔拡散接合で加圧条件などの最適化により $6.5 \text{ n}\Omega\text{cm}^2$ の低抵抗を得ている。また、MOD 法による重ね塗り試験によれば、表面まで超電導相結晶の成長が見られ、これを接続部に展開することでさらなる低抵抗化や超電導接合も可能であると思われた。

(5) 最終目標の見通し

低コスト化に関して、一層の実用化のために最終目標を技術コスト、3 円/Am 未満(ただし、内部目標として最大 2 円/Am 以下)とした。また、実用化には長尺での実証が重要であるため、長さを中間目標の 4 倍の 200 m として、線材メーカーへの移管実証が容易なレベルとした。表 2.4.5-6 にその目標値、見通しをまとめた。

具体的には、例えば、最大内部目標 2 円/Am 以下の場合、①IBAD 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 の低コスト化を図った結晶粒配向基板の上に②PLD 法で 15~30 m/h で 500~600 A/cm-w(@77 K,s.f.)、③MOD 法で 10 m/h で 500 A/cm-w(@77 K,s.f.)の特性の超電導層作製をめざす。この時 I_c 値が 500 A/cm-w(@77 K,s.f.)以上であるのは、技術コスト的に 2 円/Am 以下になるのに加え、応用上重要な磁場中 I_c 値も最終目標で 50 A/cm-w が必要なためである。

表 2.4.5-6 最終目標とその見通し

分類	最終目標	課題	アプローチと見通し
基板・中間層	・ 中間目標の安定製造技術 ・ 技術コスト 3 円/Am 未満の実証	配向度:4 度台 各層速度: 10~200 m/h コスト 200 円/m 長さ>200 m	CeO ₂ 層は PLD 改良による高速化、LMO 層無しによる配向化検討、MOD-GZO ベッド層の適正条件化による高速化(剥離性改善)により達成 H23 に各層の薄膜化、高速化を短尺実証。H24 に 200 m 化
PLD 超電導層		例) I_c : 500 ~ 600 A/cm-w(@77 K,s.f.) 速度: 15~30 m/h 長さ > 200m	・ 高速化...ターン数増加、レーザーパワー増加、 ・ 高 J_c 化により達成可能 H23 高 I_c 値で速度向上、H24 200 m 化
MOD 超電導層		例) I_c : 500 A/cm-w (@77 K,s.f.) 速度: 仮焼 10 m/h, 本焼 10 m/h 長さ > 200 m	Reel to Reel 装置改造による 2 レーン化、高速化、SWCC バッチ炉採用により達成 H23 I_c 向上、H24 200 m 化

レーザー CVD に関しては、短尺ながら IBAD 中間層付き金属基板上で 3.8 度の結

晶粒配向度を得ており、原理的に線材化への適用が可能と思われた。今後は、長尺化の前に I_c 、 J_c などの超電導特性を最適化し、線材化見通しを高めたい。本方法の成膜速度は数十～100 nm/h であり、他の真空薄膜プロセスに比べると 100 倍もの高速化製造が可能である。これにより、長尺実証のあと、本装置、技術開発により、最終目標の 3 円/Am 未満(内部目標として 1 円/Am 級)への寄与が期待できる。

超電導接続・補修技術は、将来の機器応用の本格化の際、線材の製造歩留り向上、接続による長尺化が可能などのメリットがあり、実用上極めて重要である。ISTEC で中心に開発してきた空孔拡散接合による実証を主体とし、さらに機器応用をめざして、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線材での長尺化、Ag-Gd の拡散や MOD 仮焼膜などを用いた超電導接続も開発していく。

引用論文リスト

- (1) V. Matias, B. J. Gibbons, J. Hanisch, R. J. A. Steenwelle, P. Dowden, J. Rowley, J. Y. Coulter, D. Peterson, “Experiments Using Continuous Fabrication of IBAD-MgO Based Coated Conductors”, IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol.17 No.2 (2007) 3263-3265
- (2) S. Kreiskott, P. N. Arendt, L. E. Bronisz, S. R. Foltyn, V. Matias, “Continuous electropolishing of Hastelloy substrates for ion-beam assisted deposition of MgO”, Supercond. Sci. Technol. Vol.16 No.5 (2003) 613-616
- (3) P. G. Clem, “All solution deposited coated conductor program”, Presentaion at DOE annual peer review 2007
- (4) Y. Iijima, K. Kakimoto, Y. Sutoh, S. Ajimura, and T. Saito, “Development of long Y-123 coated conductors by ion-beam-assisted deposition and the pulsed-laser-deposition method”, Supercond. Sci. Technol. Vol. 17 (2004) 264-268.
- (5) N. Chikumoto, S. Lee, K. Nakao, K. Tanabe, “Development of inside-plume PLD process for the fabrication of large $I_c(B)$ REBCO tapes”, Physica C Vol. 469 (2009) 1303-1306.
- (6) S. Lee, N. Chikumoto, T. Yokoyama, T. Machi, K. Nakao, and K. Tanabe, “Development of In-Plume Pulsed Laser Deposition of High- I_c GdBCO Films for Coated Conductors”, IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol. 19 No. 3 (2009) 3192-3195.
- (7) A. Ibi, H. Fukushima, R. Kuriki, S. Miyata, K. Takahashi, H. Kobayashi, M. Konishi, T. Watanabe, Y. Yamada, Y. Shiohara, “Development of long YBCO coated conductors by IBAD-PLD method”, Physica C Vol. 445-448 (2006) 525-528.
- (8) A. Ibi, H. Fukushima, Y. Yamada, S. Miyata, R. Kuriki, K. Takahashi and Y

- Shiohara, "Development of long GdBCO coated conductor using the IBAD/MPMT-PLD method", *Supercond. Sci. Technol.* Vol. 19 (2006) 1229-1232
- (9) T. Honjo, Y. Nakamura, R. Teranishi, Y. Tokunaga, H. Fuji, J. Shibata, S. Asada, T. Izumi, Y. Shiohara, Y. Iijima, T. Saitoh, A. Kaneko, K. Murata, "Fabrication and growth mechanism of YBCO coated conductors by TFA-MOD process", *Physica C* Vol.392-396 (2003) 873-881
- (10) M. Miura, T. Kato, M. Yoshizumi, Y. Yamada, T. Izumi, Y. Shiohara, T. Hirayama, "Enhancement of flux pinning in $Y_{1-x}Sm_xBa_{1.5}Cu_3O_y$ coated conductors with nanoparticles", *Appl. Phys. Express* 1 (2008) 051701
- (11) R. Fuger, T. Kiss, M. Inoue, N. Chikumoto, S. Lee, Y. Yamada, T. Izumi, "Current transport properties of $Gd_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ coated conductor deposited by the in-plume PLD reel-to-reel technique", Extended abstract of International Workshop on Coated Conductors for Applications, CCA2009, (2009) D1-P27
- (12) T. Goto, T. Kimura, "High-speed oxide coating by laser chemical vapor deposition and their nano-structure", *Thin Solid Films* 515 (2006) 46-52.
- (13) S. Oda, H. Zama, S. Yamamoto, "Superconductivity and surface morphology of YBCO thin films prepared by metalorganic chemical vapor deposition", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 5 (1998) 1801-1804
- (14) H. Abe, T. Tsuruoka, T. Nakamori, " $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ Film Formation by an OM-CVD Method", *J. Jpn. Appl. Phys.* 27 (1988) L1473-1475
- (15) J. Kato, N. Sakai, S. Miyata, M. Konishi, Y. Yamada, N. Chikumoto, K. Nakao, T. Izumi, Y. Shiohara, "Optimization of the diffusion joint process for the Ag layers of YBCO coated conductors" *Physica C* 463-465 (2007) 747-750
- (16) J. Kato, N. Sakai, S. Miyata, A. Ibi, Y. Sutoh, Y. Yamada, N. Chikumoto, K. Nakao, T. Izumi, Y. Shiohara, "Diffusion joint using silver layer of YBCO coated conductors for applications", *Physica C: Superconductivity*, Vol. 468, No.15-20, 15 (2008) 1571-1574
- (17) S. Yamasaki, M. Iwakuma, K. Funaki, J. Kato, T. Chikumoto, K. Tanabe, K. Nakao, T. Izumi, Y. Yamada, Y. Shiohara, T. Saito, "Transport and AC loss properties of the repaired multifilamentary REBCO superconducting tapes" *Physica C: Superconductivity*, in Press.
- (18) T. Maebatake, Y. Miyanaga, K. Yuuki, H. Kai, N. Mori, K. Yamada, R. Teranishi, M. Mukaida, N. Chikumoto, N. Sakai, M. Miura, M. Yoshizumi, Y. Yamada, T. Izumi, "Effects of joining conditions on the structures and properties of joints of REBCO coated conductors", *Physica C* (2009) in press

2.5 超電導電力機器の適用技術標準化

イットリウム系超電導電力機器技術開発の事業では、超電導電力機器の中で最も導入時期が早いと考えられる超電導電力ケーブル、超電導電力貯蔵システム、超電導変圧器に絞って研究開発が進められ、かつそれらの応用に特化した超電導線材の開発が行なわれている。また超電導技術の国際標準化を積極的に推進してきたわが国にとって、これら開発と平行して超電導電力機器の国際標準化を目指すことは産業競争力強化の観点からも重要である。

そこで、本事業では、超電導線材やこれを適用した超電導電力ケーブル等超電導電力機器に関する標準化に必要な技術動向や標準化ニーズ動向の調査を実施し、国際標準化合意醸成をはかりつつ、国際的な規范文書原案につながる規格素案の作成を目指した。これによって、超電導電力機器の早期実用化、市場導入の円滑化、グローバル市場の拡大に資するものと考えられる。

以下に超電導線材、超電導電力ケーブル及び超電導電力機器における標準化の成果について報告する。

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

超電導線材の一般要求事項(通則)の作成を目標として、超電導線材の通電特性並びに機械的電磁気特性の試験方法を調査するとともに、Y系超電導線材並びに実用超電導線材の特徴を整理し、規格素案をまとめた。また、この規格素案作成に併行して、米国、欧州、アジア等の現地調査や国際専門家討論会を通じて情報集約並びに国際合意状況の把握を行なった。

(1) 超電導線材の通電特性並びに機械的電磁気特性の試験方法の調査

高温超電導線材の通電特性と機械的電磁気特性の試験方法の調査を目的として、九州大学及び東北大学との共同研究等を実施した。その結果、超電導線材の臨界電流試験に係わる電界基準及び電圧端子間距離に関して、線材特性が均一である場合、現行規格の電界基準(1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ 及び 0.1 $\mu\text{V}/\text{cm}$)並びに電圧端子距離(30 mm から 100 mm)は妥当であることが分かった。一方、線材の長手方向に亘って局在的な欠陥の分散で不均一の場合には、局在的な欠陥に基づく電圧発生があるにもかかわらず電圧端子間距離で平均化されることを考慮した検討が必要と考えられる。また、超電導線材の機械的電磁気特性の試験方法については、応力-歪特性、 I_c の歪依存性及びn値の歪依存性を調査し、統計的なデータ解析を実施した。

(a) 臨界電流試験法についての検討

現在、超電導線材の臨界電流の決定にあたっては四端子法が主要な測定法であり、10 $\mu\text{V}/\text{m}$ と 100 $\mu\text{V}/\text{m}$ の電界基準及び 10^{-14} Ωm と 10^{-13} Ωm の抵抗率基準が金属

超電導線材に適用されている（Bi系超電導線材では $100 \mu\text{V/m}$ と $500 \mu\text{V/m}$ の電界基準及び $2 \times 10^{-13} \Omega\text{m}$ と $10^{-12} \Omega\text{m}$ の抵抗率基準）。しかしながら、過去の超電導電力機器の標準化に関するパネル討論会において、Y系超電導線材については臨界電流決定に用いる電界基準を見直すべきでないかという意見が提出された。今後、磁界下での臨界電流測定などを含めて、様々な修正要求が出されることが想定されるため、そうした修正の必要性などについての検討が求められるであろう。

ここではそうした背景から、Y系超電導線材の場合に出された見直し提案の妥当性を検討するにあたり、提案された電界基準値が現行の金属系超電導線材の試験で用いられる二つの電界基準値の間にあることから、この電界基準を用いた測定を実行し、電界基準値を変更することの影響を考察した。

試料は幅 10 mm 、超電導層厚さ $1.0 \mu\text{m}$ の IBAD/PLD 法 Y系超電導線材で、測定では長さ 160 mm の線材を用い、電流端子間距離 124 mm 、電圧端子間距離 104 mm 、電流端子部の長さ 18 mm の構造とした。これを液体窒素に浸漬し、電流を通電しながら発生する電圧を測定した。

得られた電流-電界特性を図 2.5.1-1 に示す。この結果、臨界電流値は現行の $10 \mu\text{V/m}$ の電界基準を用いた場合に 132 A 、 $100 \mu\text{V/m}$ を用いた場合に 139 A となる。したがって、両者の違いは 5.2% である。なお、パネル討論会で提案された電界基準は $20 \mu\text{V/m}$ であるが、この定義を用いても臨界電流値は 134 A で、大きな違いはない。本測定試料の n 値は $10\text{--}100 \mu\text{V/m}$ の電界域で 42 である。

以上のように n 値が 42 の試料の場合、電界基準の値によって得られる臨界電流値の違いはほんのわずかでしかなく、現行の金属系超電導線の二つの基準の違いによっても、最大で 5.2% 程度である。すなわち、この二つの値の間の任意の基準で測定した結果について、これを矩形分布とみなしても対応する相対的標準偏差は 1.5% でしかなく、同一条件の試験法で目標とするラウンドロビン試験の目標 COV の 5% よりもはるかに小さい。なお、長尺の線材の場合に使用条件と合わせるためにさらに低い電界基準を用いることになったとしても、図 2.5.1-1 に見られるようにさらに n 値が増加するため、現行の電界基準で得られる臨界電流値と大きく違わないと判断される。

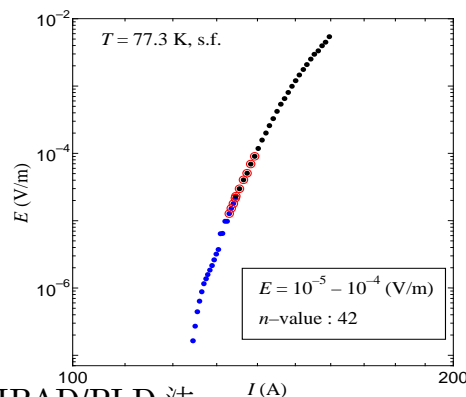


図 2.5.1-1 IBAD/PLD 法
Y系超電導線材の電流(I)-電界(E)特性 (77 K、自己磁界中)
III-2.5.2

したがって、Y系超電導線材の場合、電界基準の違いは性能評価において大きな問題ではなく、金属系超電導線材に対して用いられている電界基準で十分である。Y系超電導線材の臨界電流の試験法の標準化を目指すにあたってこの電界基準の変更の必然性はなく、むしろ金属系超電導線材との競合を想定した場合、同一の基準とすることが望ましい。n値の違いによってある程度の違いはありうるが、今後、n値を必要な試験項目としておけば、製作者と使用者の間で大きな齟齬をきたす問題もないと考えられる。

しかしながら、将来、高磁界応用の可能性が高いことから、n値が下がる高磁界での臨界電流試験法において現行の電界基準でよいかどうかについては議論を残すところである。Y系超電導線材を用いて $0.2 \mu\text{V/m}$ の超低電界までの輸送特性の測定結果から用いる電界基準が臨界電流値の評価結果に及ぼす影響を調べた。試料はn値が42の標準的なものであるが、得られた結果では現行の金属系超電導線材について用いられている電界基準の範囲内で大きな違いとはならず、現行の電界基準で十分であることが判明した。むしろ、金属系超電導線材とY系超電導線材の互換性の観点からは共通の基準とするほうが標準化の趣旨に合致するものと判断される。

ところで、臨界電流試験で用いられている四端子法では、直接計測は電圧(V)であり、電界値は空間均一性を仮定した値である点に注意が必要である。Y系超電導線材では、結晶粒界や欠陥により局所的な臨界電流値の不均一性の影響を受ける。したがって、臨界電流値の定義を与える電界基準の議論においては、対象とする試料内の不均一性を支配する空間周波数と、電圧端子間距離を考慮した議論が不可欠である。Y系超電導線材の実用化にあたっては、試料内の長周期なマクロ欠陥などextrinsicな因子の影響と共に、ピン止め機構や熱擾乱などによるE-J特性そのものに対するintrinsicな因子の影響についてさらに検討していく必要がある。前者の影響は特に、長尺線材の全長試験において、後者は磁場中角度依存性や、直流応用を想定した超低電界領域での損失を把握するうえにおいて重要になると考えられる。

(b) 機械的電磁気特性試験方法についての検討

超電導線を超電導電力機器に適用する場合の引張、曲げ、ねじりなどの単一あるいは複合的な機械的応力・歪環境における超電導線の電磁気特性の試験方法を調査した。

表 2.5.1-1 に示す Bi2223 テープ線材 Type S および Type ST を試料とした。各線材は 25 m あり、本年度試験では端部より 1 m の部分から試験片を切り出した。試験片長は 40 mm、試験片数は Type S について 4 片 Type ST について 5 片である。

表 2.5.1-1 Bi2223 線材諸元

	Type S	Type ST
Width [mm]	2.6±0.3	2.7±0.4
Thickness [mm]	0.19±0.03	0.32±0.04
Critical current (I_c) [A] at 77 K, self-field	~70	~70
Lamination	--	Cu-alloy (50 μ m)× 2
Sample length [mm]	40	40
Number of samples	4	5

装置は片桐らによって開発された強磁場極低温応力効果測定装置^[1]をもとにして、報告者らによって開発された^[2]。本装置の特徴を下記に挙げる。

超電導マグネットのボア中（直径 52 mm）で、試料に引張り応力を印加しながら臨界電流を測定できる。応力は室温で負荷ロッドの引張り力をロードセルによって測定する。また、試料の伸びは、電流端子間距離をクリップゲージで計測しており、変位を初期長さで除することで歪を得る。試料長 40 mm のうち、電流端子長を除いた有効試料長は約 20 mm である。電圧端子間距離は 10 mm である。

クリップゲージ（歪ゲージ式変換機）の磁場、温度の影響を実験的に較正するための機構を有している。実験毎に較正を行うため、信頼性の高い歪値を得られる。本研究では液体窒素温度でのデータが必要との考えから、本装置の試料部分を液体窒素デュワに浸漬した。試料に応力を印加し、一定歪を保持した状態で、200 A/10 V の定電流源によって 3.3 A/s の掃引速度で電流を線形に供給し、試料に発生する電圧を測定した。

Type S および Type ST の臨界電流(I_c)の歪依存性、n 値の歪依存性および応力-歪特性を、図 2.5.1-2 に示す。Type S, ST とともに I_c の歪依存性はほぼ線形に緩やかに低下している。Type S は 0.4 %、Type ST は 0.6 %歪で破断した。 I_c の歪依存性が観測されなかった理由は、破断箇所が電圧端子間の外、電極近傍であったためである。電極近傍に応力が集中して機械的に劣化することはコイルでもしばしば観測されるため、コイル設計の際は注意する必要がある。

対数表示した電流-電界曲線の、1 μ V/cm 近傍の傾きから求めた n 値は、S および ST とともに約 20 であり、破断直前まで大きな変化は見られなかった。本研究では装置の制約から電圧端子間距離が 10 mm であるために、0.1 μ V/cm 以下の低電界領域の n 値が評価できなかった。低電界領域の n 値が評価できればフィラメントクラックに起因する n 値低下の情報が得られると考えられる。

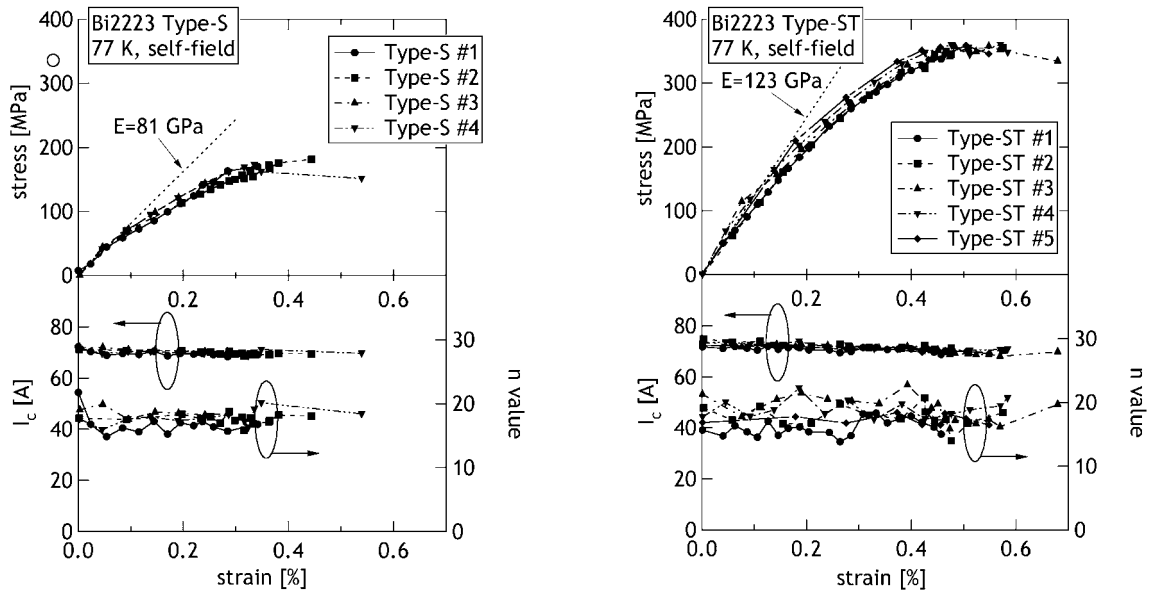


図 2.5.1-2 Type-S(左)および Type-ST(右)について、応力-歪特性、 I_c の歪依存性、 n 値の歪依存性

応力-歪曲線からは、低歪側の勾配よりヤング率が求められ、Type S, ST それぞれ 81 MPa, 123 MPa となる。しかし、Ag 合金マトリクスは低歪で降伏してしまうために、0.05~0.1 %以上は塑性域であり、ヤング率は意味を持たない。材料の強度の指標として用いられる 0.2 %耐力も、超伝導線材の場合はそのような大きな歪では用いられないので、意味が無い。そこで、0.2 %歪に対応する塑性流動応力を比較すると、Type S が 120 MPa であるのに対して Type ST は 200 MPa と 1.7 倍に向上している。破断応力もそれぞれ 180 MPa, 360 MPa であり、Cu 合金によるラミネーションの効果が顕著であることがわかる。

Type S #4 と ST #3 がそれぞれ他の試料に比べて大きな歪まで到達しているが、これは断線直前に完全に降伏してしまったためである。このことは応力-歪曲線において歪が増加していても応力が不変か、むしろ低下していることから明らかである。Type-S および ST の測定値に基づき、ゼロ歪における I_c [A] および n 値について単一箇所における測定の不確かさ解析を行った。計算過程は Type-S のみについて示し、表 2.5.1-2 に結果をまとめた。

ここで、Type-S は
 単一箇所における試験数 $n=4$
 単一箇所における平均値 x

$$x(I_c) = (72.16 + 71.24 + 71.96 + 71.31) / n = 71.67 \text{ [A]}$$

$$x(n) = (21.72 + 17.71 + 19.92 + 17.84) / n = 19.02 \text{ [-]}$$

である。また、平均値の実験標準偏差 $s(x)$ は

$$s(x) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

$$s(I_c) = \sqrt{\frac{(72.16 - 71.67)^2 + (71.24 - 71.67)^2 + (71.96 - 71.67)^2 + (71.31 - 71.67)^2}{4-1}}$$

$$= 0.4614$$

$$s(n) = \sqrt{\frac{(21.72 - 19.02)^2 + (17.71 - 19.02)^2 + (19.02 - 19.02)^2 + (17.64 - 19.02)^2}{4-1}}$$

$$= 1.9070$$

である。標準不確かさ $u(x)$ は

$$u = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad , \quad u(I_c) = \frac{s(I_c)}{\sqrt{n}} = 0.2307 \quad , \quad u(n) = \frac{s(n)}{\sqrt{n}} = 0.9535$$

とした。

表 2.5.1-2 データ解析結果一覧

	Type-S	Type-ST
単一箇所における試験数 n	4	5
単一箇所における測定値	$I_c=72.16, 71.24, 71.96, 71.31$ [A] $n=21.72, 17.71, 19.02, 17.64$	$I_c=71.72, 74.82, 73.75, 73.12, 72.35$ [A] $n=15.63, 19.13, 21.24, 17.73, 16.83$
単一箇所における平均値 x	$I_{c,average}=71.67$ [A] $n_{average}=19.02$	$I_{c,average}=73.15$ [A] $n_{average}=18.11$
平均値の実験標準偏差 $s(x)$	$s(I_c)=0.4614$ $s(n)=1.9070$	$s(I_c)=1.2078$ $s(n)=2.1662$
標準不確かさ $u(x)$	$u(I_c)=0.2307$ $u(n)=0.9535$	$u(I_c)=0.5401$ $u(n)=0.9688$

今後、これらの知見を Y 系超電導線材にも適用して検討していく必要がある。

参考文献リスト

- (1) K. Katagiri et al., Adv. Cryog. Eng. 36(1990)69
- (2) 西島ら, 第 79 回 2008 年度秋季低温工学超電導学会

(2) 超電導線の電力機器側からの要求事項の検討

超電導線は、各種超電導電力機器並びに超電導マグネットに適用される。したがって、各用途分野からの要請に適合する用語の定義及び試験方法の整備が必要である。ここでは、各種超電導電力機器並びに超電導マグネットからの要件特性項目を調査・抽出すると共に、超電導線関連規格の素案作成に反映した。

具体的には、次の技術資料に基づく調査を実施し、表 2.5.1-3 の結果を得た。

- ・超電導応用基盤技術研究開発－標準化調査、平成 20 年 3 月
- ・平成 16 年新発電システム等調査研究（超電導電力機器技術基盤の標準化に関する調査研究）、平成 17 年 3 月
- ・電気学会技術報告書 第 946 号－超電導電力機器の仕様と特性－、2003 年 11 月

表 2.5.1-3 超電導電力機器側からの超電導線の試験項目要件調査

電力機器名	機器システム性能項目 (機器仕様)	機器・コイル製作側への要求項目	超電導線への試験項目要件
超電導電力ケーブル	(交流超電導電力ケーブルの場合 ^{a)})	寸法設計	寸法設計
	(同軸型ケーブル)	ケーブル断面構成寸法	超電導線最外寸法
		ケーブル最大外寸法	超電導線条長
	相数	ケーブル条長	
	周波数	中間・終端接続寸法	
	定格電圧		
	交流耐電圧	電磁気設計	電磁気設計
	インパルス耐電圧	ケーブル心数	超電導線臨界温度
	短絡・地絡電流	ケーブル定常・過負荷電流密度	超電導線臨界電流
	布設条件における静電容量	公称電圧	超電導線の臨界電流温度依存性
	耐压構造及び耐圧力	定常最高電圧	超電導線の過負荷電流特性
	ケーブルの断面構成の詳細	超電導線/常電導線接続抵抗	超電導線の長期通電特性
	電気絶縁厚さ、最大電位傾角	出荷耐電圧	
	運転条件における最大定格電流	シールド臨界電流	
	運転温度における有効抵抗	熱設計	熱設計
	布設条件におけるインダクタンス	定常・過負荷運転温度範囲	超電導線交流損失温度依存性
	冷媒温度	定常(交流損失)・過負荷熱損失	超電導転移直上抵抗
		断熱方式	超電導線熱(収縮・比熱)特性
			超電導線の比熱・熱伝導率
		機械設計	機械設計
		ケーブル曲げ特性	超電導線応力/歪特性
		ケーブル引張強度	超電導線引張強度
		ケーブル冷却重量	超電導線の疲労・繰返曲げ特性
	ケーブル冷却特性	超電導線の単位重量	
	冷凍機保守間隔・保守時間	超電導線の熱サイクル特性	

SMES	(100 MW 級 SMES の場合)	寸法設計	寸法設計
	(成形撚線)	コイル形状・寸法	超電導線最外寸法
	(テープ積層集合導体)	SMES デバイス最外寸法	超電導線条長
	定格交流電圧	電磁気設計	電磁気設計
	定格交流電流	定格直流電圧	超電導線の I_c - B - T 特性
	定格周波数	定格直流電流	超電導線の総電流密度
	相数、線数	定格貯蔵容量	
	運転温度	利用可能容量	
	導入・設置場所	最大磁界	
	冷却方式		
		熱設計	熱設計
	変換装置定格	動作時間	超電導線交流損失
	直流遮断機定格	最大許容温度	MQE
	保護装置定格		安定性
	クエンチ検出定格	機械設計	機械設計
	真空断熱容器定格	最大圧力	超電導線応力/歪特性
	冷却装置定格	コイル冷却重量	超電導線引張強度
	監視制御装置定格	コイル冷却特性	超電導線の疲労・繰返曲げ特性
		冷凍機保守間隔・保守時間	超電導線の単位重量
		超電導線の熱サイクル特性	
超電導変圧器	(2 MW 級超電導変圧器の場合)	寸法設計	寸法設計
	(スライブテープ積層集合導体)	コイル最外寸法	超電導線最外寸法
		変圧器最外寸法	超電導線条長
	設置場所	電磁気設計	電磁気設計
	相数	定格 1 次/2 次電圧	超電導線臨界温度
	定格容量	定格 1 次/2 次電流	超電導線臨界電流
	定格電圧	ターン間、層間電圧	
	定格周波数		
	冷媒温度上昇	熱設計	熱設計
	系統短絡容量	負荷損失	超電導線交流損失
	短絡%インピーダンス	無負荷損失	
	負荷損・無負荷損		
	定格力率	機械設計	機械設計
	騒音	定格冷媒温度	超電導線応力/歪特性
	重量	定格冷媒圧力	超電導線引張強度
		コイル冷却重量	超電導線の疲労・繰返曲げ特性
		コイル冷却特性	超電導線の単位重量
		冷凍機保守間隔・保守時間	超電導線の熱サイクル特性

超電導限流器	(SN 転移型及び整流器型の場合)	寸法設計	寸法設計
	(テープ積層集合導体)	限流素子最外寸法	超電導線最外寸法
		限流器最外寸法	超電導線条長
	定格電圧	電磁気設計	電磁気設計
	定格電流	超電導状態転移温度	超電導線臨界温度
	商用周波数耐電圧	定常定格電流	超電導線臨界電流
	雷インパルス	限流時電流電圧	超電導転移直上抵抗
	開閉インパルス耐電圧	超電導転移直上抵抗	
	定格周波数		
	効率	熱設計	熱設計
	限流動作・不動作責務	超電導転移直上抵抗	超電導転移直上抵抗
	限流電流	冷却保持時間	超電導線の常電導伝搬速度
	限流時間	定格冷媒温度	超電導線熱特性
	限流動作回数	許容温度条件	
	定常・最終限流インピーダンス		
	限流動作開始電流	機械設計	機械設計
	過渡回復電圧	騒音・耐震	超電導線応力/歪特性
	短時間耐電流	定格冷媒圧力	超電導線引張強度
		初期冷凍時間	超電導線の疲労・繰返曲げ特性
		冷凍機復帰時間	超電導線の単位重量
	コイル冷却重量	超電導線の熱サイクル特性	
	コイル冷却特性		
	冷凍機保守間隔・保守時間		
超電導回転機	(超電導発電機、電動機など)	寸法設計	超電導線寸法
	(成形撚線、テープ積層集合導体)	電磁気設計	超電導線 I_c -T 特性
		界磁コイル設計	超電導線の総電流密度
	動作電流	電機子コイル設計	超電導線の磁界中最大電流変化率
	動作電圧	熱設計	超電導線の交流損失特性
	運転温度	機械設計	超電導線の単位重量
超電導直流器	(高磁界マグネット、NMR、MRI、加速器など)	寸法設計	超電導線寸法
	(丸線、平角線、テープ、成形撚線)	電磁気設計	超電導線 I_c -B-T 特性
		ソレノイドコイル設計	超電導線応力/歪特性
	動作電流	パンケーキコイル設計	超電導線引張強度
	動作磁界	熱設計	超電導線の疲労・繰返曲げ特性
	運転温度	機械設計	超電導線の単位重量
	含浸コイル設計		

上記の検討結果を後述する超電導線材の通則素案へ反映させた。具体的な項目としては、不可逆磁界試験、 n 値試験、臨界電流分布試験、工業的臨界電流密度試験、フラックスジャンプ試験、交流損失試験、形態検査、超電導線固有寸法（丸線、平角線、テープ）試験、引張・圧縮・曲げ試験、可とう性試験、超電導線固有剥離試験、疲労試験、摩耗試験、耐溶剤試験、超電導線固有耐冷媒試験、はんだ付け試験、融着性試験、電気抵抗試験、残留抵抗比試験、接続抵抗試験、絶縁破壊試験、熱的パラメータ試験、熱サイクル試験及び熱衝撃試験をあげた。しかし、臨界電流試験における電界基準の選定、高温超電導線の磁界中特性試験、蒸発法による交流損失試験、可逆歪み特性試験、過電流特性試験、最小クエンチエネルギー（MQE）試験、クエンチ伝ぱん試験及び超電導線の信頼性に関する寿命試験並びに加速試験に関しては、今後の高温超電導線及び各超電導機器の技術進展を調査し反映することとした。

(3) 超電導線の規格素案の作成

2008年のIEC/TC90 ドイツ・ベルリン会議において、超電導線関連のアドホックグループ設置の基本合意が得られ、超電導線の国際標準化に向けた検討を行なっている。IEC/TC90 アドホックグループ 3 の国内外のメンバー(ad-hoc3)からのコメントを反映させ、超電導線の規格通則素案を作成した。

(a) 国内外からのコメントに対する検討

スコープにおいて、超電導線の内 LTS 線はすでに商品化済であるため高温超電導線に限定してはどうか（ドイツ）に関して、低温超電導線と高温超電導線を網羅した超電導線として合意醸成に努める。超電導素線の英語訳 strand か monolithic strand に関して、strand が選定される方向である。

出荷表示（Shipping label）には、一般に製品を識別するためのラベル（Label）とその製品の性能等の技術情報（Technical reports）の表記がある。ラベルに関しては、現行規格及び実態調査を反映し、簡潔な表記にする。例えば、製品名又は製品コード、超電導線の長さ、超電導線の重さ、出荷日及び製造者名を製品に表記する。技術情報に関しては、当事者間で協議事項とし、随意とする。Labe 表記に関して、米国からこのままの表記では vendor 仕様を利用者に押しつけることが危惧される旨の意見が寄せられ、Labe 項目から臨界電流及び絶縁層の 2 項を削除した一般的な表示項目に変更した対案やその根拠を提示することによって米国の合意醸成に努める。

米国から超電導に関する幅広い用語説明（lexicon）に関して、購入仕様の交渉に有用と思われる反面、超電導線の構造の制限、革新的製品の市場導入制限、規定されていないより良い製品の制限、自由な超電導製品利用に対する一義的な IEC 規格の拘束などが危惧されるとの指摘がなされた。この指摘に対して、現行 Draft 並びに附属書について超電導に関する現行規格を前提とした引用、工業製品として

要求されるべき事項の峻別、工業製品としての新規試験項目の推奨などの視点で精査した対案を提示して合意醸成に努める。超電導線の一般的特徴、超電導特性、超電導線の構成と形態及び工業材料としての一般的特性試験はいずれも参考事項とする。

米国から、このまま ad-hoc3 を発展させるよりも、用語説明 (lexicon) の有用性もあるので WG1 (超電導関連用語) に某の議論動議するような方向転換を期待するとの提案がなされたが、WG1 における高温超電導体に係わる用語追加などメンテナンスの進捗状況を説明するとともに、「超電導関連用語」と「超電導線通則」の違いを丁寧に説明し、「超電導線通則」に対する理解を求める方針とする。

ドイツからの「超電導線通則」提案の取り下げ動議並びに米国からの現行 Draft の見直し提案を重く受け止め、「超電導線通則」の提案者でありかつ幹事国である日本としては、ドイツ及び米国 (L.Cooley) に対して誠意を持って対応し、標準化に係わるいろいろな危惧を払拭することに努めるべきとの確認がなされた。

(b) 超電導線の規格通則素案の概要

これらのコメントを反映して超電導線の規格通則素案を作成した。その概要を表 2.5.1-4 に示す。

表 2.5.1-4 「超電導線の通則」の規格素案の概要

目次	概要
1.序文	
2.適用範囲	超電導線の一般的共通事項について規定、集合導体、編組導体、より線導体は含まれない
3.引用規格	関連する国際規格のリストを記載
4.用語	IEC 61788 と IEC 60050-815 および ISO 6892 で与えられるもの
5.定義	附属書 A の中で概説された特性を規定
5.1 超電導に関する特性	i) 臨界温度; ii) 臨界磁場; iii) 臨界電流; iv) 安定化; v) 交流損失; vi) 機械的・電磁気学的特性; それらの詳細な記述は附属書 B
5.2 超電導線の構成	i) 線を構築する部材 a. 超電導体; b. マトリックス; c. 安定化材料;

<p>5.3 工業原料としての一般的な特性</p>	<p>d. 補強材 e. 高抵抗材料 f. 絶縁材料 ii) 線の断面形状 iii) SC 線の応用 それらの項目別の記述は附属書 C 項目別の記述は附属書 D</p>
<p>6.出荷書類 6.1 表示 6.2 技術報告書</p>	<p>i) 超電導線の名称あるいはコード名 ii) 超電導線の長さ iii) 超電導線の重量 iv) 出荷の日付 v) 製造者名 上述した 5 節の項目が商取引に必要な時、それらの項目の試験報告書を含めることが可能</p>
<p>附属書 A (参考) 超電導線の一般的な特徴 A.1 超電導線の特性 A.2 超電導線の工学的観点</p>	<p>以下の項目毎に超電導線の特徴を説明 i) 臨界温度: ii) 臨界磁場及び不可逆性磁場 iii) 臨界電流及び n 値 iv) 安定化; v) 交流損失; vi) 機械的・電磁気的特性 i) 線の構成材料 a. 超伝導材料: b. マトリクス材: c. 安定化材料 d. 補強材: ii) 線の構造 iii) 応用別の超電導線の分類: iv) 統計特徴:</p>
<p>附属書 B (参考) 超電導に関連する特性</p>	<p>以下の特性の測定原理、試験方法、その標準規格について記載 (1)臨界温度 (2)臨界磁場および不可逆磁場 (3)臨界電流および n 値</p>

	<p>(4)安定化</p> <p>(5)交流損失</p> <p>(6)機械的・電磁気的特性</p> <p>(7)信頼度</p>
<p>附属書 C (参考)</p> <p>超電導線の構成</p>	<p>要素材料、断面形状、応用に分類して記載</p> <p>C.1 線の構成要素（超電導材料：超電導材料、金属系、Bi 系、レアース系、補足材料：マトリックス材、安定化材、補強材、高抵抗材、絶縁材）</p> <p>C.2 線の断面形状（丸、矩形、膜）に分類</p> <p>C.3 超電導線の応用（直流、交流、パルス）</p>
<p>附属書 D (参考)</p> <p>工業原料としての一般的な特性</p>	<p>以下の項目について測定原理と測定方法と標準規格について記載</p> <p>(1)検査 表面検査</p> <p>(2)形態 直径、ツイストピッチ、幅と厚さ、銅比、基板と安定化材の厚さ</p> <p>(3)機械的特性 引張特性、圧縮特性、曲げ特性、可とう性、剥がれ試験、摩擦抵抗、疲労特性</p> <p>(4) 化学的性質 溶解性、冷却耐性、ハンダ性、付着性</p> <p>(5)電気特性 電気抵抗、残留抵抗、接触抵抗、絶縁破壊、均一性試験</p> <p>(6)熱的特性 比熱、熱伝導率、熱膨張、熱衝撃、熱サイクル</p> <p>(7)信頼性 表面検査、全長抵抗の均一性検査</p>

(4) 超電導線の試験方法の規格素案の作成

2008 年の IEC/TC90 ドイツ・ベルリン会議において、超電導線関連のアドホックグループ設置の基本合意が得られ、超電導線の試験方法についても国際標準化に向けた検討を行なっている。

超電導線の試験方法としては、寸法試験、機械的特性試験、化学的特性試験、電

磁気的特性試験、熱的特性試験及び信頼性試験に大別した。表 2.5.1-5 に超電導線材の試験方法の規格素案の概要を示す。

表 2.5.1-5 「超電導線の試験方法」の規格素案の概要

目次	概要
まえがき	
序文	共通する試験方法を規格化の対象
1.適用範囲	高次に加工する超電導導体及び／又は超電導機器に用いる超電導線の試験方法について規定
2.引用規格	引用規格リストを記載
3.用語及び定義	主な用語及び定義は、IEC 60050-815 による。
4.一般要求事項	全ての試験は、個々の試験方法に規定された条件の範囲で実施、試験環境、試験準備作業など
5.外観検査	たば巻き、ドラム巻き、ボビン巻き又はリール巻きの状態で実施
6.寸法検査	一般寸法試験法、ツイストピッチ長試験法、テープ状超電導線の寸法試験法などについて記述
7.機械的特性試験	室温引張試験、圧縮試験、曲げ試験、可とう性試験、剥離試験などについて記載
8.化学的特性試験	耐溶剤試験、耐冷媒試験、ハンダ付け性試験、融着性試験などについて記載
9.電磁気的特性試験	臨界温度試験、臨界磁界試験、不可逆磁界試験、室温電気抵抗試験、残留抵抗比試験、臨界電流試験、n 値試験について記載
10.熱的特性試験	比熱測定試験、熱伝導率測定試験、熱膨張率測定試験、熱サイクル試験、熱衝撃試験について記載
11 信頼性試験	長手方向の故障間隔評価、渦流探傷試験、疲労試験について記載
附属書 A (参考)	n 値試験方法について説明
附属書 B (参考)	不可逆磁界試験方法について説明

今後の国際合意醸成の状況を反映し、試験方法は見直していくことになる。特に臨界電流試験における電界基準の選定、高温超電導線の磁界中特性試験、蒸発法による交流損失試験、可逆歪み特性試験、過電流特性試験、最小クエンチエネルギー (MQE) 試験、クエンチ伝ぱん試験、超電導線の信頼性に関する寿命試験並びに加速試験等に関しては、さらに技術情報を収集する必要がある。

高温超電導線の臨界電流試験に関して、臨界電流基準の見直し及び臨界電流の磁

界依存性の系統的な調査も必要である。また Y 系超電導線材の臨界電流試験に係わる電界基準及び電圧端子間距離に関して、これまでの考察から次の知見が得られている。

- ① Y 系超電導線材の長手方向に亘って材料特性が均一である場合、現行規格の電界基準 ($1 \mu\text{V}/\text{cm}$ 及び $0.1 \mu\text{V}/\text{cm}$) 並びに電圧端子距離 (30 mm から 100 mm) は妥当である。
- ② ただし、外部磁界を印加する場合、測定空間や計測器の精度の制約がある。
- ③ Y 系超電導線材の長手方向に亘って局在的な欠陥が分散するなど材料特性が不均一である場合、局在的な欠陥に基づく電圧発生があるにもかかわらず電圧端子間距離で平均化されて顕在化しない恐れがある。したがって、このような場合、現行規格に準拠した試験方法と連続ホール素子法 (TapeStar™)、MOI などによる非破壊全長検査の併用が肝要である。
- ④ Y 系超電導線材の長手方向に亘って局在的な欠陥が分散するなど材料特性が不均一である場合、健全な線材を用いた補修が可能である。その場合線材の臨界電流試験に際し接触界面積 (接続長さ) に依存する抵抗に起因する電圧発生があることを考慮する必要がある。

2.5.2 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)

既存規格及び超電導電力ケーブル関連技術動向を調査し、超電導電力ケーブルの規格素案を作成した。また、国際大電力システム会議 (CIGRE) 等との連携により国際専門家討論会を通じて情報集約並びに国際合意状況の把握を行なった。

(1) 超電導電力ケーブルシステム等の環境安全面についての検討

超電導電力ケーブルシステム等の導入による、経済側面、環境及び安全側面について効果を評価することになるが、システムの設計仕様に基づく原材料の調達に始まり、製造、流通、使用並びに処分の過程までのライフサイクルを考慮した検討を行う必要がある。ここでは、超電導電力ケーブルシステム等の導入効果のガイドラインを検討することとし、それを策定するにあたり ISO/IEC ガイドに基づく次の JIS を参照した。

JISZ8051:2004(ISO/IEC GUIDE 51:1999):安全側面－規格への導入指針

JISQ0064:1998(ISO GUIDE 64:1997):製品規格に環境側面を導入するための指針

(a) 環境側面

超電導電力ケーブルシステムは、運転時の送電損失を軽減することができるので、それに係わる発電のための原料や発電プロセスに係わるコストを低減に寄与することができる。その結果、CO₂ 排出量の削減にも効果があると考えられる。超電導電力ケーブルシステムにおいては、すでに IEC/TC20 では現行電力ケーブルシステムについて“Environmental statement specific”として技術報告書を発行している。また、CIGRE の超電導ケーブルに関する前フェーズ WG (Working Group) の報告書においても“Environmental aspect”が調査された経緯が報告されているなど関係者の大きな関心事である。したがって、今後 CIGRE における TF (Task Force) 及び WG の活動に資するためにも、わが国として国際性のある包括的な情報提供が求められることが想定される。

超電導電力ケーブルシステムに係わる廃棄コストには、超電導電力ケーブルシステムのすべての原材料調達、製造プロセス、布設、運用、廃棄において、ガス、水などの放出物、法規制物質を伴わない製品設計、廃棄物の処理の経済的負担の軽減、省エネルギープロセスの継続的な技術開発等を通じて CO₂ 排出量削減等環境改善への寄与を包括することが望まれる。

また、超電導電力ケーブル及び関連機器において法規制された物質の有無、製造プロセスで使用する溶剤及び補助材料中の法規制物質の有無、製造プロセスにおける処分製品中の法規制物質の有無は超電導電力ケーブル製造者の責任のもとですべてが把握されなければならない。したがって、最終製品である超電導電力ケーブル並びに関連機器に法規制物質が含まれるか否かは製品に明確にその存在形態並

びに適切な処理方法を表記しなければならないであろう。ここに、法規制物質とは、欧州連合加盟国に適用される法令「電気電子機器に含まれる特定物質の使用制限に関する指令 2002/95/EC（施行予定 2003 年 2 月 13 日）：Restriction of the use of Certain Hazardous Substances in Electrical and Electric Equipment」略称 RoHS（ローズ）指令又は RoHS 基準に規定された次の 6 種類の特定化学物質を指す。すなわち、鉛、水銀、六価クロム、ポリ臭化ビフェニール(PBB)又はポリ臭化ジフェニールエーテル(PBDE)は 0.1 wt%(1000 ppm)以下、カドミウムは 0.01 wt%(100 ppm)以下とする。

(b) 安全側面

安全側面は、超電導電力ケーブルシステム等の企画、設計、開発、製造プロセス、布設、流通及び廃却のすべてのライフサイクルを考慮して、人、財産、環境又はこれらの組合せに及ぼすハザード（危害の潜在的な源）の特定並びにリスク（危害の程度）の見積・低減の方策を講じなくてはならない。すなわち、超電導電力ケーブルシステム等の安全は、特定されたハザードが許容可能なリスクレベル内に維持されていなければならない。したがって、すべての超電導電力ケーブルシステムには許容可能なリスクレベルが決定されていることが望ましい。

超電導電力ケーブルシステム等では、JIS Z 8051 に準拠する特定されるハザードとして極低温液体冷媒、気化冷媒ガス、低温露出部、漏れ磁束、クエンチ時の蓄積エネルギー放出、関連電気機器などがあり、個々の機器におけるリスクレベルを見積り、決定した結果を規格に記載することが必要である。具体的には、極低温液体冷媒が溢れた場合の凍傷、気化冷媒ガスに伴う酸素欠乏水準、漏れ磁束と 5 ガウスライン、一般電気取扱則の遵守などを挙げることができる。また、これらに関連する地域固有の法規制（電気事業法、高圧ガス保安法、等）にも配慮しなければならない。

(2) 超電導電力ケーブルシステムの技術調査

超電導電力ケーブルの規格素案作成のための技術調査として、国内外の超電導電力ケーブル開発状況及び超電導電力ケーブル試験項目を調査した。

(a) 超電導電力ケーブル関連プロジェクトの調査

超電導電力ケーブル関連プロジェクト実態調査を実施し、その結果を表 2.5.2-1～表 2.5.2-5 に示した。既に終了した超電導電力ケーブルプロジェクトは 9 件で、その内で交流超電導電力ケーブルは 8 件、直流超電導電力ケーブルは 1 件である。また、進行中及び計画中超電導電力ケーブルプロジェクトは 25 件で、その内で交流超電導電力ケーブルは 22 件、直流超電導電力ケーブルは 3 件(IEECAS、1.3 kV、10.0 kA、380 m, Energized in 2010：中部大学、±10 kV、>2 kA、200 m、Bi2223：Tres Amigas, SuperStation Project、±200 kV、12.5 kA、5 GW、YBCO) である。

表 2.5.2-1 高温超電導電力ケーブルプロジェクトの調査（日本）

日本										
Project		Members	Utility	Fund	Budget	Cable			Period	Etc.
1	TEPCO	SEI	TEPCO	Private	20M\$	66kV-1000A,100m	CD	3-in-One Bi2223	2001- 2002	—
2	Super-ACE	Super-GM (Furukawa, CRIEPI)		METI/ NEDO		77kV-1000A,500m	CD	Single x 1 Bi2223	2004- 2005	
3	NEDO	SEI		METI/ NEDO		66kV-5kA,15m 2.1W/m-phase @5kA	CD	3-in-One YBCO	2008- 2012	Started
4	NEDO	Furukawa		METI/ NEDO		275kV-3kA,30m 0.8W/m-phase @3kA	CD	One-in-One YBCO	2008- 2012	Started
5	Yokohama	SEI	TEPCO, Mayekawa	METI/ NEDO	27M\$	66kV-200MVA, ~300m	CD	3-in-One Bi2223	2007- 2012	Started
6		Chubu U, SEI	Chubu U	MEXT /Japan		10kV-3kA,DC,20m	CD	One-in-One Bi2223	2005- 2009	Current only
7	DC-SCP T	Chubu U, SEI	Chubu U	MEXT/ Japan		±10kV->2kA,DC, 200m	CD	Bipolar, One-in-One Bi2223	2010- 2013	Planning

表 2.5.2-2 高温超電導電力ケーブルプロジェクトの調査（韓国）

韓国 (アンダーラインは、未確認情報を指す。)										
Project		Members	Utility	Fund	Budget	Cable			Period	Etc.
8	DAPAS1	LS cable, KERI,KIMM	KEPCO	Korean Ministry of S&T		22.9kV-1250A, 30m	CD	3-in-One Bi2223	2001- 2004 2004.5 -12	Test
9	DAPAS2	LS Cable, KERI,AMSC	KEPCO	Korea Gov		22.9kV-1250A -50MVA, 100m	CD	3-in-One Bi2223	2005- 2007	Alive
10	DAPAS3	LS Cable, KERI, AMSC	KEPCO	Korea Gov		154kV-1GVA, 100m	CD	3-phase, YBCO	2008- 2011	Gochang Test Center
11	KEPRI LS cable	KEPRI, AMSC, KBSI, LS cable etc.	KEPCO	KEPRI Korea Gov.	2.4M\$	22.9kV-1250A, 100m	CD	3-in-One Bi2223	2007-	Alive Cable development
12	KEPRI SEI cable	KEPRI,SEI, KERI,KBSI, etc	KEPCO	KEPRI Korea Gov.		22.9kV-1250A, 100m	CD	3-in-One Bi2223	2006-	Operation method training
13		LS Cable, AMSC	Seoul, Korea			22.9kV-50MVA , 500m	CD	3-phase, YBCO	2009-	Install & Operation in 2010

表 2.5.2-3 高温超電導電力ケーブルプロジェクトの調査（中国）

中国 (アンダーラインは、未確認情報を指す。)										
Project		Members	Utility	Fund	Budget	Cable			Period	Etc.
14	Yunnan	Innopower, InnoST, Shanghai Cable	Yunnan Electric	China S&T, Beijing City, Yunnan Pro.	5M\$	35kV-2000A, 33.5m	WD	Single x 3 Bi2223	2004.4-	
15	Lánzhōu	IEE/CAS, Changtong Power Cable Company AMSC		China S&T	1.2M\$	10.5kV-1500A, 75m	WD	Single x 3 Bi2223	2004-	
16	China EPRI	China EPRI	Beijing, China			110kV-3000A, 1000m	CD	YBCO	2011-2015	Planning
17		IEECAS	China			1.3kV-10.0kA, DC, 380m	WD		2006-2010	

表 2.5.2-4 高温超電導電力ケーブルプロジェクトの調査（欧州）

欧州 (アンダーラインは、未確認情報を指す。)										
Project		Members	Utility	Fund	Budget	Cable			Period	Etc.
18	Copenhagen	NKT, NST		Denmark DOE		30kV-2000A, 30m	WD	Single x 3 Bi2223	2001-2003	
19	Super3C	Nexans, Bruker (EHTS)	Spain, Labein lab.	European Union	5.2M Euros	10kV-1000A, 30m	CD	One phase YBCO/MOD	2004-2008	
20		Nexans	Hannover, Denmark			138kV, 1.8kA, 30m	CD	One-phase, YBCO	2007	
21	Amsterdam	NKT, Plaxair, Ultra	Nuon	TBD		50kV-250MVA, 6000m	CD	Triaxial YBCO	2009-2014	
22		Nexans	Spain			20kV-1kA, 30m	CD	One-phase, YBCO	2008-2013	
23		VNIKP, Nexans, SEI	Moscow, RU			20kV-50MVA, 200m	CD	Single x 3 Bi2223		Installed by the end of 2010
24	Edesa	Nexans,	Spain Barcelona			25kV-3.2kA, 30m,	CD	One-phase, Bi2223		

表 2.5.2-5 高温超電導電力ケーブルプロジェクトの調査 (米国)

米国 (アンダーラインは、未確認情報を指す。)										
Project		Members	Utility	Fund	Budget	Cable			Period	Etc.
25	Southwire	Southwire		DOE		12.5kV-1250A, 30m	CD	Single x 3 Bi2223	2000-	
26	Detroit	Pirelli, AMSC	Detroit Edison	DOE		24kV-2400A, 120m	WD	Single x 3 Bi2223	2001	Failed
27	Albany	SuperPower SEI, Linde	National Grid	DOE、 NYSERDA	26M\$	34.5kV-800A, 350m	CD	3-in-One B2223, YBCO	2006- 2009	On Grid to Apr.08
28	Ohio	Ultera	AEP Columbus	DOE		13.2kV-3000A, 200m	CD	Triaxial Bi2223	2006-	Sep. On Grid
29	LIPA 1	AMSC, Nexans, AirLiquide	Long Island Power Authority	DOE	46.9M\$	138kV-2400A, 600m	CD	Single x 3 Bi2223	2008-	Apr. 08 On grid
30	LIPA 2A	AMSC, Nexans, AirLiquide	LIPA	DOE	18M\$ +7.6M\$	138kV-2400A, 600+am One phase will be replaced with intermediate joint Bi2223 → YBCO	CD	Single x 1 YBCO Single x 2 Bi2223	2008- 2011	Started
31	Hydra	AMSC, Southwire	Con- Edison	DHS	39.3M\$	13.8kV-4000A, 300m	CD	Triaxial YBCO	2007- 2010	Started
32	Entergy	Southwire, NKT	Entergy, US New Orleans	DOE	26.6M\$	13.8kV-48MVA, 1760m	CD	Triaxial YBCO	2007- 2011	Started
33	Tres Amigas, Super Station	AMSC	Clovis, New Mexico, US	Tres Amigas, LLC		±200kV-12.5kA, 22.5 sq. miles,5GW, DC		Bipolar YBCO		Planning

(b) 直流送電システム関連の技術調査

CIGRE SC B1 WG のガイドラインでは、すべてのケーブルシステム（単心、3心、3心撚りケーブル）が対象とされている。既存のケーブルには交流送電ケーブルシステムと直流送電ケーブルシステムがあるため、超電導電力ケーブルについても交流超電導電力ケーブルと直流超電導電力ケーブルを対象にした調査が必要と想定されるため、直流送電の実態調査を実施した。その調査結果を表 2.5.2-6 に示す。

(注記) 出典：田辺茂ほか：直流システム関連規格の状況、平成 21 年電気学会産業応用部門大会シンポジウム S10、2009 年 9 月 2 日

表 2.5.2-6 主な直流送電

Project	Members	Utility	Cable/Overhead trans.			Period	Etc.
	ASEA/ Sweden	スウェーデン Gotland 島	10-20MW			1954	世界初
北本連系	古河電工 住友電工 フジクラ 日立電線	電源開発	600MW	±250kV	167km	1979	日本初
	ABB	スウェーデン Hellsjon	3MW	±10kV		1997	VSC 適用 世界初
インガ・シャバ	ASEA/ Sweden	コンゴ	600MW	±500kV	1700km	1985	最長架空
紀伊水道直流連 系	古河電工 住友電工 日立電線 フジクラ	電源開発 関西電力 四国電力	1.4GW	±500kV 2800A	100km	2000	当時 世界最大 容量
Trans Bay	CETS, USA	Pittsburg-San Francisco	400MW	200kV	59-miles	2006- 2008	VSC 適用
ノルネッド	ABB	ノルウェー オランダ	700MW		580km	2008	最長海底
CAPRIVI LINK INTER- CONNECTOR	ABB	ナミビア		±350kV	970km	2009	VSC 適用
NIMSCAN	State Grid DC Project Constructio n Co. Ltd.	シャンジャハ Xiangjiaba -上海	6.4GW	±800kV 4kA	2071km	2010-2011	
イタイプ	ASEA/ Sweden, ASEA/Brazi l, PROMON, FURNAS, CEPEL	ブラジル	6.3GW	±600kV	800km	2012	最高容量

IEC/TC22 (パワーエレクトロニクス) から引き継いだ IEC SC22F において、1970 年以降“高電圧直流送電(HVDC)”が扱われている。1995 年以降、“Power Electronics For Electrical Transmission and Distribution Systems”に改名して活動、活動範囲は直流送電 HVDC、静止形無効電力補償装置 SVC 及びサイリスタ制御直列コンデンサ TCSC である。活動が活発な国は、中国、ドイツ、日本、ロシア、スウェーデン、英国などである。P-メンバーは 13 ヶ国。これまでの成果、IS4 件、TS1 件、TR2 件、PAS5 件。

IEC60633 : HVDC の関する用語 ; バルブ、変換器の動作状態、HVDC 構成、変換所機器、制御方法など。→2008 年改訂済み。将来 IEC60050IEVPart55 に TC1 と協調し組み込む予定。

－IEC60700-1 : HVDC 用サイリスタバルブの電気試験。IEEEstd857 との協調必

要。

- －IEC607001：メンテナンス（保守）関連
- －IEC61803：交直変換所の損失の求め方についての規格
- －IEC61954：SVC（TCR 及び TSC）用サイリスタバルブの電気試験の規格 → 改正中
- －IEC60919：Part1；定常特性（TR）、Part2；開閉動作や事故時の過渡特性（TR）、Part3；交流系統との相互作用や高調波共振等を考慮したダイナミック特性（TS） →改正中、審議中
- －IECPAS61975-2004：HVDC 設備のシステム試験のガイド→IS 規格移行検討中
- －IECPAS62001-2004：HVDC 変換所の交流フィルタの仕様作製及び設計評価のためのガイド
- －IECPAS62344-2007：HVDC 用設置電極の設計ガイド
- －IECPAS62543-2008：VSC 変換器を使用した HVDC システムの全般を網羅したガイド
- －IECPAS62544-2008：HVDC におけるアクティブフィルタのガイド
- －IEC62501：自励 HVDC 用バルブの電気試験 WG 作業中
- －他 TC/SC との連携：TC115（100kV を越える高電圧直流送電システム）、TC28（絶縁協調）、TC33（電力用コンデンサ）
- －超電導直流ケーブル関連資料として、次の論文が 1 件抽出された。
露木和彦、鷺田 栄、丹田 修、増田孝人、加藤幸一、中島武憲、向山晋一：超電導直流ケーブルの電気絶縁に関する研究、低温工学、Vol.35、No.7(2000)、（b p350-p365

(c) 超電導電力ケーブル試験項目調査

交流超電導電力ケーブルの試験項目に関して、IEC、JEC 及び、AEIC 規格等をもとに、CV ケーブル、OF ケーブル及び POF ケーブル関連規格項目との対比検討を実施した。形式試験、受入試験及び竣工試験の各試験項目の対比結果を表 2.5.2-7～表 2.5.2-9 に示し、試験方法素案の見直しに反映した。

直流送電システムについても試験方法調査を実施し、その結果を表 2.5.2-10 及び表 2.5.2-11 に示す。

（注記）出典：小山茂ほか：紀伊水道横断 DC±500kV 海底 OF ケーブル、フジクラ技報、第 98 号、pp28-37、2000 年 4 月

表 2.5.2-7 型式試験項目

番号	試験項目	従来ケーブル試験項目			超電導ケーブル試験項目				備考	コメント
		形式			形式					
		CV	OF	POF	出荷相当品		全長			
			室	低	室	低				
1	外観点検	○	○	○			●			
2	構造試験	◎	○	○	●					
3	絶縁抵抗試験	○	○	○			●	●		
	シース絶縁抵抗試験	○	○				●		室温全長試験追記	必要なし
4	静電容量試験	○	○	○	●	●	●	●		
5	出荷耐電圧試験	○	◎			●		●	12と同じ	
6	直流耐電圧試験又はスパーク試験	○	○				●			
7	導体抵抗試験	○	○	○			●			
8	誘電正接試験		○	○	⊖	●	⊖	●	室温時は水分の影響 大低温での値に意味	
9	誘電正接温度特性試験	◎	◎	○					温度変化小さく不要	
10	ガス試験		○						OF特有	
11	長期導通電試験	◎							不要・開発試験	OF開発試験、CV規定なし・必要
12	商用周波数耐電圧試験	◎	◎	○		●			部分放電の確認を行う	
13	雷インパルス耐電圧試験	◎	◎	○		●				必要
	雷インパルス耐電圧試験 (シース)	⊖	⊖						項目削除	
14	半導電層試験	△							DM特有	
15,16	シース又は防食層試験	◎	◎		⊖				CVでの材料試験、不要	
17	部分放電試験	◎							不要でよいか?	
18	絶縁体試験	○△							DM特有	
19	耐火試験	△							DM特有	
20	水密試験	△							DM特有	
21	ブリーディングアイ試験	○	○	○			●		ブリーディング単体試験	
22	曲げ試験	◎	◎	○	●					必要なし
23	側圧試験			○					不要でよいか	必要
24	絶縁油試験		○	○					OF/POF特有	
25	油圧試験		○						代替	
26	商用周波破壊試験	○	○	○					納入者明示事項	
27	雷インパルス破壊試験	○	○	○						
28	防食層雷インパルス破壊試験	○	○							
29	極度曲げ試験		○	○						
30	捻り曲げ試験	○	○							
31-44	その他									
101	定格電流試験					●		●	追記	必要なし
	臨界電流試験					⊖		⊖	明示事項	
102	交流損失試験					⊖		⊖	明示事項	必要なし
103	断熱性能試験					⊖		⊖	明示事項	必要なし
104	過負荷試験								開発試験	
105	短絡電流試験								開発試験	
106	圧力損失試験							●	明示事項	必要なし
107	布設模擬試験								開発試験	
108	気密試験				●			●		必要
109	耐圧力試験				●			●		必要
110	ケーブルインダクタンス試験								協議事項	
111	サーマルサイクル試験								開発試験	
112	圧力サイクル試験								協議事項	
113	低温老化・変形試験								協議事項	
114	漏れ磁界測定								協議事項	
115	熱収縮試験								開発試験	

○JEC等国内規格のみ規定されているもの、◎国内、海外規格に規定されているもの
 △海外規格にのみ規定されているもの、●超電導ケーブル試験項目
 OF、CVケーブルの海外規格は、IEC、POFの海外規格はAEIC

表 2.5.2-8 受入試験項目

番号	試験項目	従来ケーブル試験項目			超電導ケーブルの試験項目案				備考	コメント
		受入			受入					
		CV	OF	POF	出荷ケーブルから切		全長			
			室	低	室	低				
1	外観点検	○	○	○			●			
2	構造試験	◎	◎	◎	●					
3	絶縁抵抗試験	○	○	○			●			
	シース絶縁抵抗試験	○	○						形式でよい	必要なし
4	静電容量試験	◎	◎	○	⊖	⊖	●		5と同時測定	
5	出荷耐電圧試験	◎	◎	◎		●			部分放電の確認を行う	
6	直流耐電圧試験又はスパーク試験	○	○				●			
7	導体抵抗試験	◎	◎	◎			●			
8	誘電正接試験		◎	◎	⊖	⊖	●		5と同時測定	
9	誘電正接温度特性試験			○					温度変化小さく不要	
10	ガス試験		○						OF特有	
11	商用周波数耐電圧試験			◎		⊖			不要(5で実施)	
12	雷インパルス耐電圧試験			◎		⊖			不要(5で実施)型式で確認	
	雷インパルス耐電圧試験(シース)			⊖					不要(項目削除)	
13	部分放電試験	◎							5で測定	必要
14	絶縁体試験	○							CV特有	
15	ブーリングアイ試験		○	○			●		単体試験	
16	曲げ試験			◎					不要よいか?	必要なし
17	非金属シースの電気試験	△							CV特有	
18	導体検査	△							?	
19	絶縁体のホットセット	△							CV特有	
20	防食層試験		△						?	
21	機械試験		△	△					?	
22	シース厚測定			△					?	
23	合成紙剥がれ試験								?	
101	臨界電流試験					●			初期特性把握 導体、シールド測定	必要なし
102	交流損失試験					●			初期特性把握	必要なし
103	断熱性能試験					●			初期特性把握	必要なし
104	過負荷試験								協議事項	
105	短絡電流試験								協議事項	
106	圧力損失試験								不要	必要なし
107	布設模擬試験								協議事項	
108	気密試験						●			必要
109	耐圧力試験						●			必要
110	ケーブルインダクタンス試験								協議事項	
111	サーマルサイクル試験								協議事項	
112	圧力サイクル試験								協議事項	
113	低温老化・変形試験								不要	
114	漏れ磁界測定								協議事項	
115	熱収縮試験								協議事項	
116	シールド電流測定									必要なし
117	真空リーク試験						●			必要なし

○JEC等国内規格のみ規定されているもの、◎国内、海外規格に規定されているもの
 △海外規格にのみ規定されているもの、●超電導ケーブル試験項目案
 OF、CVケーブルの海外規格は、IEC、POFの海外規格はAEIC

表 2.5.2-9 竣工試験項目

番号	試験項目	従来ケーブル試験項目			超電導ケーブル試験項目案		備考	コメント
		竣工			竣工			
		CV	OF	POF	全長			
			室	低				
従来ケーブル試験項目	1 導体抵抗試験	○	○	○	■			
	2 絶縁抵抗試験	○	○	○	■			
	3 シース絶縁抵抗試験	○	○	○	■			
	4 静電容量試験	○	○	○		■		
	5 誘電正接試験	○	○	○		■		
	6 耐電圧試験	◎	◎	◎		■		
	7 油流抵抗試験		○	○			106で代用	
	8 ガス定数試験		○	○			OF特有	
	9 絶縁油分析		○	○			OF特有	
	10 もれ電流試験	○					不要	必要なし
	11 部分放電試験	○					協議事項	
	12 防食層試験		○				協議事項	
	13 警報回路動作試験		○				不要	
	14 シース耐圧力試験	△					108で代用	
超電導ケーブル特有の試験項目	101 臨界電流試験					●		
	102 交流損失試験					●	測定難、不要	
	103 断熱性能試験					●		
	104 過負荷試験						不要	
	105 短絡電流試験						不要	
	106 圧力損失試験					■		
	107 布設模擬試験						不要	
	108 気密試験				■			
	109 耐圧力試験						不要	
	110 ケーブルインダクタンス試験						不要	
	111 サーマルサイクル試験						不要	
	112 圧力サイクル試験						不要	
	113 低温老化・変形試験						不要	
	114 漏れ磁界測定						不要	
115 熱収縮試験						不要		
116 シールド電流測定						協議事項		
117 真空リーク試験					●			

QJEC等国内規格のみ規定されているもの、◎国内、海外規格に規定されているもの
 △海外規格にのみ規定されているもの、●超電導ケーブル試験項目案
 OF、CVケーブルの海外規格は、IEC、POFの海外規格はAEIC

表 2.5.2-10 中間試験項目

試 験 項 目		
枠試験	外観検査	
	直流導体抵抗試験	
	静電容量試験	
	絶縁抵抗試験	
	ガス試験	
	絶縁体直流電圧試験	
	防食層商用周波耐電圧試験	
試料試験	構造試験	
	曲げ試験	
	直流長時間耐電圧	
	極性反転耐電圧	
	直流重畳開閉インパルス耐電圧	
	開閉インパルス耐電圧	
	雷インパルス耐電圧	
	誘電正接温度電圧特性	
	防食層	防食層雷インパルス耐電圧
		引張試験
		加熱老化
		耐油性
		加熱変形
	絶縁油	絶縁油粘度試験
		絶縁油商用中は絶縁破壊試験
		絶縁油防食試験
油圧試験		

表 2.5.2-11 完成試験項目

試験項目		
枠試験	外観検査	
	直流導体抵抗試験	
	静電容量試験	
	絶縁抵抗試験	
	ガス試験	
	絶縁体直流耐電圧試験	
	油流抵抗試験	
	光ファイバ	光ファイバユニット接続部損失
		接続部防食層直流耐電圧
		光ファイバユニット通光特性
		ステンレス管溶接部外観
		光ファイバユニット損失(温度センサ以外)
		温度センサ機能(温度センサのみ)
	埋設位置検知線	直流導体抵抗試験
接続部外観検査		
接続部耐電圧試験		
試料試験	構造試験	

(3) 超電導電力ケーブル関連国際標準化の状況調査

(a) 各国固有の冷凍関連法令

超電導電力ケーブルに係わる我が国の高圧ガス保安法及び冷凍保安規則の扱いは、実証試験段階が続く限り実用実績を監督官庁に提示することができないため、当面冷凍システム個別に特認扱いを受けて対応せざるを得ない。我が国固有の地域的阻害事項とも考えられるため、国際標準化の観点から、実用実績を蓄積し最終的には特認扱いを越えて無人システムを目指すというシナリオを策定することが必要と考えられる。

(b) 国際標準化の進め方

2008年から1年間活動した CIGRE SC B1 TF は、2009年9月22日～24日にポーランドのボスナンで開催された CIGRE SC-B1 の定例会議において、昨年から立ち上がった超電導ケーブルの TF B1-31 の報告が、Convener の Lindsay 氏からなされた。付託事項 (TOR) として、電圧階級の範囲、冷却に関して、短絡条件下の検討などいくつかの修正がされた。また、電圧が 10～145kV であるために、8 番目として、275 kV まで展望して視野に入れることを追加した。提出された TF

B1-31 の Technical report は承認され、WG 移行も異議なく承認された。

CIGRE SC WG B1 31 は 2009 年 9 月から 2012 年 8 月まで 3 年間の予定である。CIGRE SC WG B1 31 には、カナダ、フランス、ドイツ、韓国、イタリア、オランダ、スペイン、日本、アメリカの 9 ヶ国が参加表明した。

CIGRE SC WG B1 31 の委員募集が、原則 1 カ国 1 名、2009 年 12 月 20 日で行われた。日本から住友電工増田孝人氏、古河電工向山晋一氏の両氏を推薦した。結果として、委員として増田氏、オブザーバとして向山氏の参加がそれぞれ承認された。CIGRE SC WG B1 31 の課題として、次の 6 項が採択された。

- (i) 対象は高温超電導(HTS)のみとし、低温超電導(LHS)は含めない。電圧階級は 10~145kV とする。
- (ii) 極低温冷却機器は SC-WG B1 31 の対象範囲外であるので、本 WG でも対象外とする。ただし、運転仕様、信頼性、要求機能は取り扱うことにする。
- (iii) 現存の HTS プロジェクトの詳細実績を調査する。
- (iv) 運転条件下並びに短絡条件下でのケーブル、接続部、付属品をふくむ HTS ケーブルシステムを検討対象とする。
- (v) ガイドラインは、すべて既存のケーブルシステム (単心、3 心、3 心撚りケーブル) を対象とする。
- (vi) ガイドラインは、HTS ケーブルシステムに適用される圧力パイプや圧力容器の設計や運転に係わる試験要求事項を含める。
- (vii) HTS ケーブルシステムの推奨試験項目として以下を扱う。形式試験/長期認定試験、工場試験、竣工試験
- (viii) 275 kV まで展望として視野に入れる。

2009 年で終了した CIGRE SC D1 (コンビーナ: 大久保 仁、名古屋大学) は、2009 年 9 月後続で CIGRE SC D1 を提案し、承認された。後続 CIGRE SC D1 は、期限を 2009 年から 2014 年までとし、目的を超電導に係わる共通技術 (絶縁材料、構造材料、冷凍設備) とする。したがって、後続 CIGRE SC D1 と CIGRE SC WG B1 31 との連携が肝要である。

(4) 超電導電力ケーブルの規格素案の作成

超電導電力ケーブルシステムの定義の再確認として、交流超電導電力ケーブル及び直流超電導電力ケーブルに係わる総括的な通則について、超電導ケーブルシステム定義、規格大系、一般要求事項並びに各記述項目の過不足を明らかにし、超電導電力ケーブルシステムの定義をつぎのように確認した。

超電導電力ケーブルシステムは、変電所間及び又は変換所間を結ぶ連系線路のうち、超電導に係わる交流超電導送電線路及び又は直流超電導送電線路並びに超電導状態を維持・制御する関連機器システムと定義する。なお、超電導電力ケーブルシ

システムには構内利用及び特高・高圧配電線を含めるものとするが、発電機並びに調相設備、変圧器、遮断器、断路器、避雷器、フィルタ、接地電極、コンデンサなど現行の送変電関連機器は含めないものとする。

ここで、交流超電導送電線路は、単数又は複数の交流超電導電力ケーブル、中間接続及び終端接続（厳密には終端接続のヘッドまで）で構成する。また、直流超電導送電線路は、単数又は複数の直流超電導電力ケーブル、中間接続及び終端接続（厳密には終端接続のヘッドまで）で構成する。更に、超電導状態を維持・制御する関連機器システムは、断熱管路、冷媒、冷凍機、冷媒循環など冷却システム及び監視システムで構成される。

超電導電力ケーブルシステムに係わる国際規格大系案を表 2.5.2-12 に示す。当面、超電導電力ケーブルシステムに係わる国際標準化は、国際的な技術動向と標準化ニーズ動向に鑑みて、超電導電力ケーブルシステム通則及び交流超電導電力ケーブルの試験方法に注力することにした。当面国際規格化の対象とする項目を太字で示した。

表 2.5.2-12 超電導電力ケーブルシステムに係わる規格体系

超電導電力ケーブルシステム通則	交流超電導送電線路	交流超電導電力ケーブル	用語、性能、試験
		中間接続	(交流超電導送電線路関連機器)
		終端接続	
		冷却システム	
		監視システム	用語、性能、試験
	直流超電導送電線路	直流超電導電力ケーブル	用語、性能、試験
		中間接続	(直流超電導送電線路関連機器)
		終端接続	
		冷却システム	
		監視システム	用語、性能、試験

上記固有事項の調査結果を反映し超電導電力ケーブル通則を作成した。その概要を表 2.5.2-13 に示す。超電導電力ケーブルとしては、交流超電導電力ケーブル及び直流超電導電力ケーブルを適用範囲とした。ただし、CIGRE SC WG B1 31 のガイドラインが交流超電導電力ケーブルに有ることも加味することにした。

表 2.5.2-13 超電導電力ケーブルシステムの通則」の規格素案の概要

目次	概要
まえがき	
序文	
1.適用範囲	電力システムに超電導電力ケーブルを適用するための超電導電力ケーブルシステムに対する一般要求事項について規定
2.引用規格	関連する国際規格のリストを記載
3.用語及び定義	<p>主な用語の定義は、IEC 60050-815:2000 によるほか、次による</p> <p>超電導電力ケーブルシステム、超電導電力ケーブル、交流超電導電力ケーブル、直流超電導電力ケーブル、低温絶縁超電導電力ケーブル、室温絶縁超電導電力ケーブル、単心超電導電力ケーブル、3心超電導電力ケーブル、3相同軸超電導電力ケーブル一本のフォーマの周りに、これと同心的かつ層状に3相の導体を組合せたケーブル、中間接続（箱）、終端接続（箱）、冷媒循環装置、交流送電、直流送電：HVDC、静止形無効電力補償装置：SVC、サイリスタ制御直列コンデンサ：TCSC</p>
4.使用条件	
5.システム構成	電力システムの構成要素となる超電導電力ケーブルシステムは、超電導電力ケーブル、中間接続、終端接続などから構成する付属機器及び冷媒循環装置から構成

<p>6.性能</p> <p>6.1 交流超電導電力ケーブルの性能</p> <p>6.2 直流超電導電力ケーブルシステムの性能</p> <p>6.3 その他付属機器の性能</p>	<p>電力ケーブルシステムの性能は、つぎによる他 IEC60502-2(2005) 、 IEC60840(2004) 及び IEC62067-ED1.1(2006)に準拠</p> <p>次の性能項目を明示</p> <p>(1) 定格電圧(kV)</p> <p>(2) 交流耐電圧(kV)</p> <p>(3) インパルス耐電圧(kV)</p> <p>(4) 短絡・地絡電流、短時間耐電流 (kAs)</p> <p>(5) 布設条件における静電容量 (μF)</p> <p>(6) 管路の耐压構造及び耐圧力(Pa)</p> <p>(7) ケーブルの断面構成の詳細</p> <p>(9) 電気絶縁厚さ(mm)、最大電位傾度 (E_0/mm)</p> <p>(10) 定格電流(A)</p> <p>(11) 運転温度における超電導電力ケーブルの有効抵抗(Ω/km)</p> <p>(12) 布設条件におけるインダクタンス(H/km/相)</p> <p>(13) 冷媒温度(K)</p> <p>直流超電導電力ケーブルシステムを構成する直流超電導電力ケーブルに係わる性能明示項目については、受渡当事者間の協議</p> <p>電力ケーブルシステムにおけるその他付属機器の性能は、IEC6050-2(2005) 、 IEC60840(2004) 及び IEC62067-ED1.1(2006)に準拠</p>
<p>7.試験</p> <p>7.1 試験の種類</p> <p>7.2 試験項目</p> <p>7.3 試験方法</p>	<p>超電導電力ケーブルシステムの試験の種類は、IEC60840(2004)及び IEC62067 に準拠</p> <p>形式試験 (Type test)、受入試験 (Sample test)、竣工試験 (After laying test) について記載</p> <p>試験項目は、形式試験、受入試験及び竣工試験について、設定</p> <p>交流超電導電力ケーブルシステム固有の試験項目を現行電力ケーブルシステムの試験項目の対比を附属書 C (参考) に記載</p> <p>交流超電導電力ケーブルシステム試験方法は別途規定、直流超電導電力ケーブルシステムの試験方法は当事者間で協議</p>

8.表示	
8.1 一般的共通事項	各要素製品の表記及び信頼性に係わる表記
8.2 要素製品の表記事項	要素製品に対する表記、包装の対する表記（名称又は超電導線の分類、寸法、長さ、重さ、代表的特性、製造年月日、製造者名）
8.3 要素製品の信頼性	輸送及び規定環境条件に耐える巻付け、当事者間で決めたドラム、超電導電力ケーブルの外観等代表的特性が簡易的に確認できることなどを記載
9.付帯事項	
附属書 A(参考)	超電導電力ケーブルシステムの基本構成概念
附属書 B(参考)	超電導電力ケーブルの構成概念 (a) 常温絶縁超電導電力ケーブル概念構成図 (b) 低温絶縁超電導電力ケーブル概念構成図 (b)-1 単心超電導電力ケーブル (b)-2 3心超電導電力ケーブル (b)-3 3相同軸超電導電力ケーブル
附属書 C(参考)	交流超電導電力ケーブルシステムの試験項目形式試験 (Type test)、受入試験 (Sample test)、竣工試験 (After laying test)について詳細な試験項目について記述
附属書 D(参考)	直流超電導電力ケーブルシステムの試験項目中間試験項目と完成試験項目について記載
参考文献	

(5) 超電導電力ケーブル試験方法の規格素案の作成

交流超電導電力ケーブルと現行の電力ケーブルとの大きな操作上の相違点は、現行電力ケーブルよりも約 150 °C以上低い温度で操作されること、超電導固有の材料に依存する臨界温度、臨界電流値があることなどを挙げることができる。したがって、初期導入・運用機関並びに初期操作関係技術者を対象とした視点で検討した。まず、一般的な技術課題は、交流超電導電力ケーブルがどの程度信頼性がある、それをどのように定量的に試験し、規格にどのように反映するかである。信頼性試験に関する一般的な事項を調査し、交流超電導電力ケーブルにおける信頼性試験事例の情報収集、これらの試験方法規格素案への反映について検討を進めることとした。

また、CIGRE SC WG B1 31 のガイドラインが交流超電導電力ケーブルにあることから、交流超電導電力ケーブル試験方法に注力した。交流超電導電力ケーブル

試験方法に関して、Super-ACE で検討結果、平成 12 年度交流基盤での検討結果及び AEIC の POF ケーブルの試験項目内容をまとめ、超電導電力ケーブルの試験方法の規格素案を作成した。その概要を表 2.5.2-14 に示す。

(注記) 平成 12 年度 委託業務成果報告書 交流超電導電力機器基盤技術研究開発 トータルシステム等の研究 導入効果等の調査 平成 12 年度成果報告書 平成 13 年 3 月、(社)電気学会この報告書は、JEC や IEC の項目がうまくまとめられている。

(注記) Specification for impregnated paper and laminated paper polypropylene insulated cable high-pressure pipe-type (5th edition), Association of Edison Illuminating Companies (AEIC) 600 North 18th Street, Post Office Box 2641 Birmingham, Alabama 35291-0992, May 1990, AEIC-CS2-90

表 2.5.2-14 「交流超電導電力ケーブルの試験方法」の規格素案の概要

目次	概要
まえがき	
序文	
1.適用範囲	酸化物系超電導線を適用した交流超電導電力ケーブルであって、低温電気絶縁を施した単心、3心又は3相同軸型ケーブル構造を有し、かつ液体窒素循環装置に適合するケーブルに適用
2.引用規格	関連する国際規格のリストを記載
3.用語	主な用語の定義は、IEC 60055-1:2005 及び IEC 60050-815(815):2000 によるほか、次による公称電圧、ケーブル及びその付属機器が通常動作する電圧、最高インパルス耐電圧、ケーブル及びその付属機器に印加できる最高の電圧、定格電圧、最大許容電圧、地絡継続時間、定格値、概略値、測定値、接続、端末、臨界電流、運転温度、環境温度、最大許容張力を記載
4.一般要求事項	
4.1 一般試験条件	環境温度、周波数試験電圧の周波数及び波形、雷インパルス試験電圧の波形、開閉インパルス試験電圧の波形、験電圧と定格電圧の関係について記載
4.2 超電導固有試験条件	試験温度及び圧力、試験ケーブル長について記載

5.試験	
5.1 試験の種類	形式試験 (Type test)、受入試験 (Sample test)、竣工試験 (After laying test) について記載
5.2 試験対象	超電導電力ケーブルであって、超電導電力システムを構成する中間接続、終端接続及び冷媒循環装置を含まない
5.3 試験項目	形式試験 (Type test)、受入試験 (Sample test)、竣工試験 (After laying test) の詳細な試験項目について記述
5.4 超電導固有試験方法	超電導固有の試験方法は、附属書 A による
6.性能	
6.1 基本性能明示事項	交流超電導電力ケーブルの表にしめす性能事項を明示しなければならない
6.2 固有性能明示事項	ルートプロフィール (ケーブル高低差、冷却区間長、ケーブル且長など)、ケーブル布設条件 (管路、洞道など) などを加味しなければならない
6.3 交流超電導電力ケーブル性能事例	性能事例を附属書 B に示す
附属書 A (規定)	交流超電導電力ケーブルの固有試験方法 出荷耐電圧試験、商用周波数耐電圧試験、雷インパルス耐電圧試験、部分放電試験、臨界電流試験、交流損失試験、断熱性能試験、保護層の耐電圧試験について規定
附属書 B (参考)	交流超電導電力ケーブルの性能事例

形式 (Type) 試験項目 (表 2.5.2-7)、受入試験項目 (表 2.5.2-8)、竣工試験項目 (表 2.5.2-9) は既に示した通りであるが、中間接続、端末、安全弁、真空排気設備等附属部品・関連設備の試験項目は、今後の検討項目とする。

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

SMES、超電導変圧器等の機器仕様並びにこれらの試験方法の標準化の基礎となるデータ等を調査するとともに、技術動向並びに標準化ニーズ調査も実施した。これらの結果をもとに SMES 及び超電導変圧器の規格骨子案を作成した。

(1) SMES 導入に係わる固有事項の調査

(a) SMES 導入に関する国内外の情勢

国際エネルギー機構（International Energy Agency, IEA）は、2050 年までに CO₂ 排出量を半減させるシナリオ（BLUE Map シナリオ）として、再生可能エネルギー源を積極的に導入する場合に不可欠と考えられる電力貯蔵設備の拡充に着目し、現行 100 GW の設備能力を 2050 年までに 500 GW まで増加させる数値目標を設定している。この目標達成のためには、現行の主力揚水発電に加え電池、CAES（圧縮空気エネルギー貯蔵）、SMES などの得失分析調査が必要としている。超電導エネルギー貯蔵研究会（RASMES）は、平成 20 年 12 月 IEA のこの活動・要請に応じた WG を発足し、平成 21 年 4 月に報告書を IEA に提出した。

IEA が想定する 2050 年迄に最大 305 GW の必要貯蔵設備に主力揚水発電に加え電池、CAES、SMES などの貯蔵設備を想定しており、これらのうち SMES にはその優れた性能から今後の貯蔵装置として期待されている。

国内の SMES 開発は、国家プロジェクトとして多目的用途 SMES から用途を系統安定化・負荷変動補償の電力系統制御用に絞り、平成 3 年度から進められてきており、現在は 4 期目の Y 系超電導線材を用いたコイル開発が取り組まれている。この背景には、従来の金属系 SMES では系統制御用途の SMES であっても貯蔵エネルギーが 500 kWh クラスの容量を実現するためには電力貯蔵部である超電導コイルやそれを保冷するクライオスタットが大型となるため、Y 系超電導線材の特長である高磁場での高い通電特性と電磁力にも耐えうる高強度を活かしたコイル開発により、コンパクトで低コストな SMES を実現することが狙いにある。また、最近活発に検討されている再生可能エネルギーの電力系統への大量導入の将来シナリオにおいて、電力の需給調整力として、従来、火力発電の果たしてきた役割を担う調整能力が必要との議論がある。これに対し、繰り返しの電力の入出力を行っても電力貯蔵部が劣化せず、応答性も速い SMES が火力発電に代わって機能することで、CO₂ 削減にも寄与することが期待されている。

再生可能エネルギーの導入は、陸上風力を年間 4800 万 kW、洋上風力を 2300 万 kW、太陽光発電 3000 万 kW、太陽熱発電 2000 万 kW、地熱発電 10 万 kW の増設を見込んでいる。2008 年の欧州委員会では、風力イニシヤティブ、貯蔵イニシヤティブ、電力系統イニシヤティブなどの戦略計画が提示されている。これに呼応して、我が国の「Cool Earth－エネルギー革新技术計画」2009 年 8 月では、高

性能電力貯蔵に関して日欧で蓄電分野の安全性と寿命に関する評価・試験方法について連携していくことが合意されている。再生可能エネルギーの導入候補の内、図 5.2.3-1 に示すように出力の不随変動対策（出力安定化）が特に不可欠な風力発電の年間 7100 万 kW に対応可能な出力 100-200 MW 級 SMES として、表 2.5.3-1 に示すような 3 つの用途モデルが提示されている。

IEA の風力発電時間 8 時間/日、稼働率 50 %、稼働期間 42 年間として必要貯蔵容量の再調査により、2050 年までに全世界で必要とする貯蔵設備が最大 305 GW になる。一方、現行の貯蔵設備で賄えるのは 100 GW に過ぎないことを考慮すると、RASMES が提示した SMES は、有力な技術候補になるものと期待される。

（出典：超電導エネルギー貯蔵研究会技術委員会：超電導エネルギー貯蔵研究会研究会平成 20 年度研究報告書、平成 21 年 6 月）

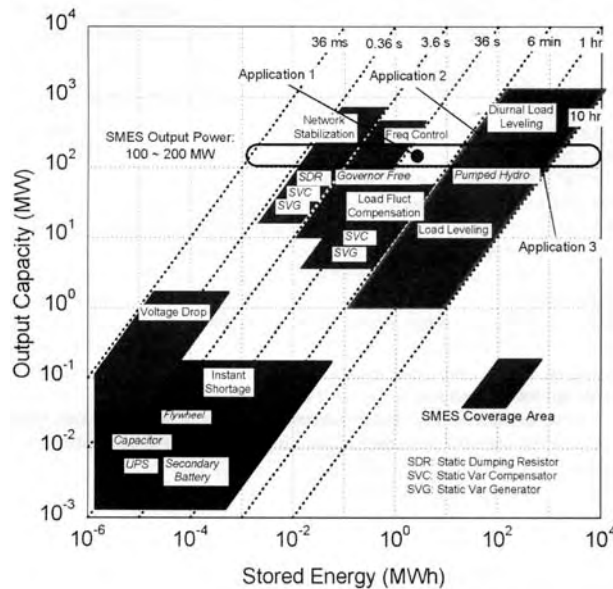


図 2.5.3-1 SMES の適用領域

表 2.5.3-1 各用途 SMES の概要

	用途 1	用途 2	用途 3
目的	周波数調整・負荷変動補償・ 発電変動補償：分単位補償	負荷平準化：ピーク カット効果	日負荷平準化：揚 水代替
出力、MW	100～200	100～200	100～200
補償時間	100 sec	30 min～1 hr	5～10 hr
使用可能貯蔵エネルギー、MWh(GJ)	3～6 (10～20)	50～100 (180～720)	500～2000 (1800～7200)
備考	対応技術ほぼ完成	技術展開可能	技術課題大

(b) 電導エネルギー貯蔵研究会 (RASMES) の報告書の調査

SMES 装置 1 基当たりの設備容量を技術的に可能とされる 100-200 MW に設定し、導入対象を①分単位補償（風力対応など周波数調整、負荷変動補償、発電変動補償）、②30 分-1 時間負荷変動補償及び③5-10 時間補償（日負荷平準化）の 3 パターンとして提案されている。大型超電導コイル技術の実績として①の対象に対応する蓄積エネルギーとして 1-数 10 GJ のシステムを達成ことは可能であるが、SMES コイルの実績としては 5-20 MJ の水準であることから、導入対象の規模に依存するが小容量のコイルを 10 個程度並列ユニット化するシステムモデルを提案した。

SMES システムの経済性に関しては、現行の超電導コイルの価格実績並びに国プロによるコスト低減予測を参考に、現行の¥10 M/kWh を 1/100 にするためには SMES システムが複数個設置できることで¥100 k/kWh が達成できるとの試算が行なわれている。更に、SMES システムの経済性を競合機と比較するためには、ライフサイクルコストで比較することの必要性を指摘されている。この観点から評価すれば、SMES の年間コストは NaS 電池や揚水発電よりも有利であるとの試算が行なわれている。

(c) 「リットリウム系超電導電力機器技術開発」における SMES 開発について

IEA 向け RASMES の報告書は、プロジェクトにおける SMES が掲げる技術的方向性（20 MJ→200 MJ→2 GJ）に合致するものであると同時に、将来の SMES 技術の適用対象を再生可能エネルギー源用電力貯蔵設備と明確化されている点で大きく評価し、SMES 技術の展開の 1 選択肢として考えられる。SMES はその電力貯蔵の原理から、大容量の電力貯蔵には必ずしも有利ではなく、短時間に大出力が可能な瞬時電圧低下補償、系統安定化用途や、数秒～分周期の充放電の繰り返し求められる負荷変動補償、周波数調整用途に適した電力機器として期待されている。RASMES の報告書は、SMES の開発初期に目指した揚水発電代替の時間オーダーの GWh 級電力貯蔵の可能性について、競合技術となる NaS 電池との比較結果が提示されており、性能面だけでなくコストでも十分競合すると結論付けられている。SMES 開発が直ちに GWh 級の大容量化に向かうとは考えにくいですが、少なくとも将来の再生可能エネルギー大量導入により必要となる需給調整機能を有した電力機器として、現在、国家プロジェクトで開発ターゲットとしている出力 100 MW/10 sec、使用可能貯蔵エネルギー 2 GJ(500 kWh)級 SMES の早期実現が期待されることは言うまでもない。

(d) 高圧ガス保安法等地域法令

SMES は、電気事業法における電気工作物の適用を受ける・受けないにかかわらず、その冷凍に関しては現行法において高圧ガス保安法の適用を受けるため、冷凍機に係わる規制緩和の取り組みを行った経緯がある。現在、冷凍機に関する規制

緩和申請を監督官庁に行い、その判断待ち状態である。

高圧ガス保安法も個別の機器容量によって単機容量規制かシステム総容量規制かを適用地域自治体ごとに精査することが肝要である。また、この方式を国際標準にどのように展開するか、あるいはさらなる法令緩和を必要とするかは、今後の諸外国の法令調査の結果によって判断することが肝要である。

(2) SMES 関連規格骨子案の作成

2008年のIEC/TC90 ドイツ・ベルリン会議によると、超電導電力ケーブルを除く SMES 等超電導電力機器の国際標準化ニーズが急速に進展する可能性が低いと判断された。かかる状況に鑑みて、ここでは前項の調査結果等及び関連 IEC 規格を参考にして、SMES 規格骨子案を作成した。その結果を表 2.5.3-2 に示す。

表 2.5.3-2 「SMES の通則」の規格素案の目次

超電導磁気エネルギー貯蔵装置に対する一般要求事項 General requirements for superconducting magnetic energy storage system
目次
まえがき
序文
1. 適用範囲
2. 引用規定
3. 用語
4. 一般要求事項 4. 1 使用条件 4. 2 定格 4. 3 性能 4. 4 構成 4. 5 試験 4. 6 表示 (銘板に記載すべき事項)
5. 試験方法 5. 1 SMES システム試験方法 5. 2 SMES デバイス試験方法
6. 付帯事項 6. 1 環境側面 (企画、設計、製造、設置、廃棄、省エネルギー効果、CO ₂ 排出量削減効果) 6. 2 安全側面 (冷媒、発生ガス)
附属書 A (参考) 代表的 SMES システムの入出力と貯蔵容量
附属書 B (参考) SMES の基本的要素の概念構成
附属書 C (参考) SMES システムの試験項目
附属書 D (規定) SMES デバイスの試験項目
附属書 E (参考) SMES の仕様事例
引用文献

本規格骨子案では、SMES システム通則と SMES の試験方法を融合し、SMES システム通則事項を一般要求事項に集約した。また SMES の試験方法を新試験方法とした。さらに付帯事項として、環境側面（企画、設計、製造、設置、廃棄）及び安全側面（冷媒、発生ガス）を記載することを検討している。

(3) 超電導変圧器関連規格骨子案の検討

SMES と同様に超電導変圧器の国際標準化ニーズも急速に進展する可能性が低いと予想されていることから、ここでは前項の SMES 等の調査結果等及び関連規格（IEC60076-1（変圧器一般）、JEC2200（1995）（変圧器））を参考にして、超電導変圧器の規格骨子案を作成した。超電導変圧器の規格骨子案を表 2.5.3-3 に示す。

表 2.5.3-3 「超電導変圧器の通則」の規格素案の目次

超電導変圧器に対する一般要求事項及び試験方法 General requirements for superconducting transformers and their test methods
目次
まえがき
序文
1. 適用範囲
2. 引用規定
3. 用語
4. 一般要求事項 4. 1 使用状態 4. 2 定格 4. 3 構造 4. 4 裕度 4. 5 試験 4. 6 表示（銘板に記載すべき事項）
5. 試験方法 5. 1 一般試験方法（IEC60076-1（変圧器一般）及び JEC2200(1995)（変圧器）の引用） 5. 2 超電導変圧器固有の試験方法
6. 付帯事項 6. 1 環境側面 （企画、設計、製造、設置、廃棄、省エネルギー効果、CO ₂ 排出量削減効果） 6. 2 安全側面 （冷媒、発生ガス、騒音）
附属書 A（規定） 箇条 1 から箇条 6 までの追加規定事項
附属書 B（参考） 変圧器の照合並びに注文の際の指定事項
附属書 C（参考） 超電導変圧器の開発試験
附属書 D（参考） 単相 1MVA 高温超電導変圧器の製作仕様事例－Bi 系
附属書 E（参考） 単相 2 MVA 高温超電導モデル変圧器の製作仕様事例－Bi 系
附属書 F（参考） 66kV/6.9kV-2MVA(20MVA)高温超電導モデル変圧器の製作仕様事例－RE 系
引用文献

本規格骨子案では、超電導変圧器通則的事項を一般要求事項とし、超電導変圧器固有試験方法を現行変圧器試験方法と超電導変圧器試験方法とで構成した。照合並びに注文の際の指定事項及び開発試験を附属書（参考）に記載した。また試験方法は、一般的試験方法は現行規格の引用記述とし、超電導変圧器固有の試験方法を **normative**（規定）として詳述する方針とした。さらに、注意事項を付帯事項に集約し、環境側面（企画、設計、製造、設置、廃棄）及び安全側面（冷媒、発生ガス）を記載することを検討している。

(4) 限流器・回転器等超電導電力機器の技術調査

国内外で開発が進んでいる超電導限流器及び超電導回転機等を取り上げ、これら超電導電力機器の標準化を目的として技術調査を実施した。

(a) 超電導限流器

(a-1) 用語

①超電導限流器 **superconducting fault current limiter**

限流器は、落雷等に伴う電力系統内の短絡事故時に発生する過大な事故電流を抑制する装置であり、超電導限流器は従来の非超電導タイプと比較して、次の 2 つの特長を有する。

- ・ 平常時の送電損失が非常に小さい。（従来タイプの 1/10 以下）
- ・ 事故時の限流動作が素早い。（事故電流によるクエンチ現象を利用して瞬時に動作）

②限流機能付き超電導電力機器 **superconducting power equipment with functional current limiting**

前項①の超電導機器は単体で存在するものであるが、近年は超電導変圧器や超電導ケーブルに限流機能が付加されたタイプも研究開発されている。これは、超電導電力機器（変圧器、ケーブル）自体の機能を維持しながら、機器構成を大幅に変更することなく限流機能を有するものである。

(a-2) 分類

①超電導限流器

- － SN 転移形（抵抗形、鉄心飽和形）
- － 整流器形（超電導コイル形）

(a-3) 技術の現状

①SN 転移形

1980 年代後半、金属系超電導線（NbTi 線材）の製造に併せ、超電導限流器の開発が始まった。その後、酸化物超電導線材（Bi 系、Y 系線材）が製造され始めると、国内外で高温超電導限流器の研究が進められるようになって

た。

②整流器形

上述の SN 転移形における酸化物超電導線 (Bi 系超電導線材) の製造に併せ、国内外で高温超電導限流器の研究が進められるようになった。

③各国の開発状況

2010 年 1 月時点における各国の開発状況を表 2.5.3-4 及び表 2.5.3-5 に示す。超電導限流器は単体、変圧器組込型、ケーブル組込型の 3 つの形態で研究が進められていることが分かる。超電導限流器の開発については、実用化に向けた取組みが各国で実施されているが、全体的に見ればまだ研究途上にあり、その技術動向を今後も見守っていく必要がある。

中国のプロジェクトでは Bi 系超電導線材の限流器単体型で実運用中である。名古屋大学では、2 MVA の超電導限流変圧器を製作し、限流動作試験及び超電導復帰試験を実施中である。またイットリウム系超電導電力機器技術開発プロジェクトでは、4 巻線構造のモデル変圧器を使った試験で限流機能の現象確認を完了し、現在は試験データを詳細分析中であり、その結果を今後試作する数百 kVA 級モデル変圧器の設計に反映する予定である。なお、SuperPower からの情報によると、同社も参画している DOE のスマートグリッド関係の研究において、Waukesha Electric Systems が限流機能付超電導変圧器を開発中とのことであり、その動向が注目される。

表 2.5.3-4 国内外の超電導限流器開発状況

プロジェクト	国	容量(kVA)	電圧(kV)	電流(A)	型式	線材	系統連系	開発期間	その他
Y系電力機器	日本	20,000	66		抵抗型	Y系		2008-2012	変圧器組込型
応用基盤	日本		6.6	1,000	抵抗型	NiCrY(Gd)系	○	2005-2008	
名古屋大学	日本	2,000	22	52.5	抵抗型	YBCO/Cu Bi2223Ag		2009-	変圧器組込型
DOE AMSC	米国	2,000	115	2,000	抵抗型	Y系(AMSC)	○	2007-2013	
DOE SuperPower	米国		138		抵抗型	Y系	○	2009-	
DOE Zenergy Power	米国		13.8	800	鉄心飽和型	Y系	○	2008-2011	最終目標 56MVA, 138kV, 800A
CESI	伊	15,000	9.5	200	抵抗型	1G,2G	○	2008-2011	
CURL10	独	10,000	10	600	バルク型	Bi2212	○	1999-2007	
ECCOFLOW	EU		138級			Y系	○	2009-	Nexans他15社
DAPAS	韓国	8,300	22.9	630	SN/Siハイブリッド型	Y系(AMSC)	○	2001-2010	最終目標 154kV, 4,000A
KEPCO	韓国		22.9	630/3,000	SN/Siハイブリッド型	Y系(AMSC)	○	2009-2013	
InnoPower	中国	90,000	35	1,200	鉄心飽和型	Bi系	○	-2008	実運用中
InnoPower	中国		220	1,200	鉄心飽和型		○	2009-	

青字:進行中 黒字:終了 赤字:新規or計画中

表 2.5.3-5 国内外の限流機能組込型超電導ケーブル開発状況

プロジェクト	国	電圧 kV	電流 A	容量 MVA	長さ m	形態	線材	系統連 系	試験年	その他
LIPA2 (DOE)	米国 Long Island, NY	138	2400	574	600	単心×3	Y	○	未公表	1相中間接続部有 LIPA1の張替
Hydra (DHS)	米国 NY	13.8	4000	96	300	tri-axial	Y	○	2010	3m、25mテスト実施中
KEPCO	韓国	22.9	1260	50	500	三心	Y	○	2010	KEPCO/LS Cable Soul 近郊 Ichcon substation
			3780	150		三心	Y	○	2013	

青字:進行中 黒字:終了 赤字:新規or計画中

(b) 超電導回転機

(b-1) 用語

- ①超電導回転機 **superconducting rotating machine**
回転又は直進の動作が電磁誘導作用に基づく超電導装置。
- ②超電導単極発電機 **superconducting homopolar generator**
機械的回転力をスリップリングとブラシを介して直流電力に変換する超電導機械。直流発電機ともいう。
- ③超電導同期発電機 **superconducting synchronous generator**
機械的な回転速度が系統の周波数の正確に比例するような交流電気力に変換する超電導機械。交流発電機ともいう。
- ④超電導同期調相機 **superconducting synchronous condenser**
機械的負荷のない状態で系統の周波数と正確に比例するように回転する超電導機械。
- ⑤超電導フライホイール **superconducting flywheel**
超電導コイル又は超電導バルクを利用して回転子に機械的エネルギーとして蓄え、この機械的エネルギーを電気エネルギーに変換して放出する機械。
- ⑥超電導電動機 **superconducting motor**
電力を機械的動力に変換する超電導機械。

(b-2) 分類

[超電導回転機]

- ①発電機
 - －超電導単極発電機
 - －超電導同期発電機
 - －超電導同期調相機
- ②調相機
 - －超電導同期調相機、超電導同期電動機
 - －超電導フライホイール

③電動機

- アキシヤルギャップ型超電導モータ
- 超電導同期モータ
- かご型回転子誘導超電導モータ

(b-3) 技術の現状

①発電機

初期の超電導発電機は、単極発電機（直流発電機）が主流であった。その後、運転特性、効率、制御性、高圧化に優れた同期発電機（交流発電機）に開発の主流が移行した。わが国における低温超電導同期発電機の開発の歴史は、図 2.5.3-2 に示すように 1970 年代の遡ることができる。また、1980 年代後半からスタートした Super-GM における 70 MVA の超電導同期発電機は、実系統連係試験まで実施した点で世界最高の技術水準にある。

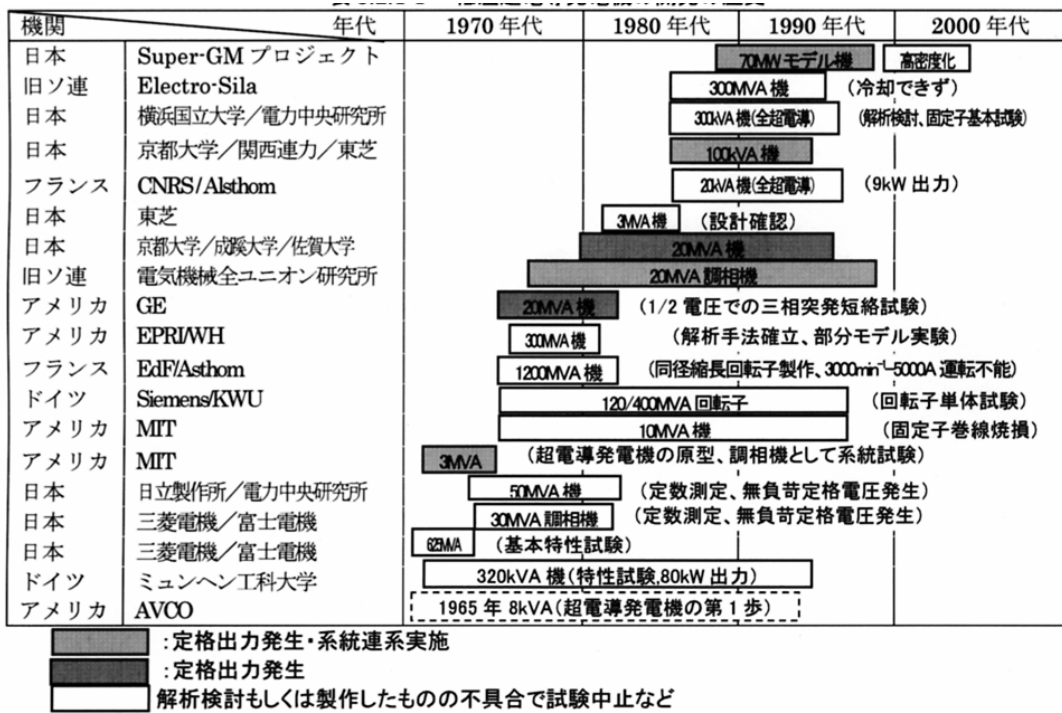


図 2.5.3-2 低温超電導発電機の開発の歴史⁽¹⁾

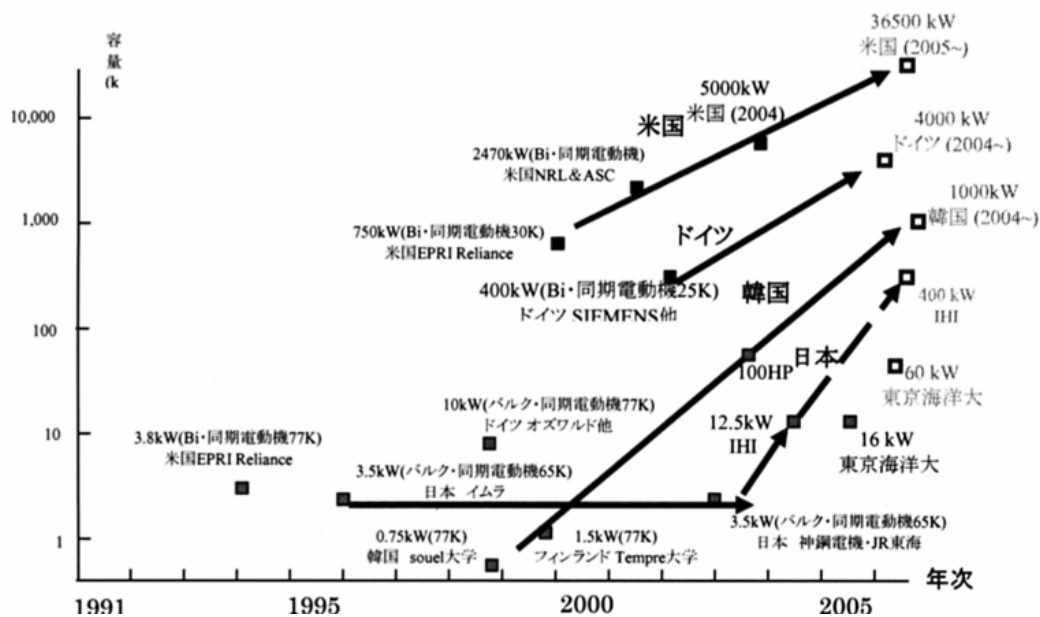


図 2.5.3-3 高温超電導回転機の開発状況⁽¹⁾

一方、高温超電導体の技術開発に伴い、図 2.5.3-3 に示すように 1990 年代後半から世界的に高温超電導バルク材を適用した同期電動機の研究開発が活発化しているものの、高温超電導体が発電機に適用された事例は現在のところない。しかし、英国の Convertteam 社は、8 MW、12 rpm の超電導同期発電機を第 3 世代風力発電のナセルに搭載する計画を 2005 年に立案し、2010 年製造開始、2013 年運転開始を目標に掲げ技術開発を進めるとしている。

②調相機

超電導調相機の技術開発は、超電導発電機の開発とほぼ同時期に開始されている。まず、低温超電導線を適用した 30 MVA 級の超電導調相機が 1980 年代初頭に開発されている。その後、Bi 系超電導線材を適用した同期電動機が開発され、調相機としての動作確認がなされた。米国の AMSC 社では 4 MVR の超電導ダイナミック同期コンデンサ (SuperVAR) の商品化に続き、4 MVR の超電導ダイナミック同期コンデンサを開発している。

一方、フライホイール方式による瞬低補償など超電導調相機に超電導軸受を適用する技術開発が、我が国で精力的に実施された。平成 12 年度から平成 16 年度にラジアル型超電導バルク軸受を適用した 100 kWh 級を目指した 5 kWh 級のフライホイール実証試験が、また平成 17 年度～平成 19 年度に超電導コイルスラストを適用した 50 kWh 級を目指したフライホイールのパイロットシステム試験が実施された。

③電動機

高温超電導材料の技術開発の進展に合わせて、図 2.5.3-4 に示すように 1990 年代後半から超電導電動機の技術開発がなされている。まず超電導バルクを適用したバルク同期電動機が、2000 年代になって Bi 系超電導線材を適用した同期電動機の

技術開発がなされている。我が国では、2008年にBi系超電導線材を用いた400kW級のアキシタルギャップ型超電導モータが、2006年にY系超電導線材を適用した15kWの同期電動機が開発されている。

米国のAMSC社によるBi系超電導線材を適用した36.5MWの船舶用電動機、ドイツのジーメンス社のBi系超電導線材を適用した4MW同期電動機、韓国の1MW級の超電導同期電動機、また日本の川崎重工業の1MW級船舶用電動機がそれぞれ開発されている。

(b-4) 今後の見通し

超電導発電機に関して、Y系超電導線材を用いた同期発電機の技術動向を見守る必要がある。超電導調相機に関して、Y系超電導線材を用いた同期調相機及び超電導軸受けを適用したフライホイールの技術動向並びにこれらの実系統における実証実績を見守る必要がある。超電導電動機に関して、Y系超電導線材を用いた同期電動機の技術動向を見守る必要がある。

参考文献リスト

- (1) NEDO 委託「超電導技術を利用した風力用発電機の実用化可能性調査」平成18年度成果報告書、平成19年3月、(財)国際超電導産業技術研究センター
- (2) NEDO 委託「超電導フライホイールシステムの開発」平成17年度～平成19年度成果報告書、平成20年5月、東海旅客鉄道株式会社

2.5.4 超電導電力機器技術の動向調査

超電導線の試験方法及び超電導電力機器に係わる技術動向及び標準化ニーズ等を国際会議に参加して調査した。

(1) ASC2008 (米国イリノイ州シカゴ市)

8月17日より22日まで2008 Applied Superconductivity Conference (ASC2008)が米国シカゴ市の Hyatt Regency Chicago において開催された。本会議における発表は Electronics, Large Scale, Materials の3部門に分類されており、ここでは超電導線と超電導電力機器について重要と思われるものについて報告する。

(a) 超電導線の技術動向

(a-1) Y系超電導線材の開発状況に関するもの

3MAセッションではY系超電導線材、特にその長尺化がテーマであった。まず3MA01ではSuperPower社のSelvamanickamが自社の研究開発の進展について報告した。内容はY系超電導線材をはじめて実際の送電網に組み込んで運転した事、Zr添加によって人工ピンを導入して磁場中特性を向上させた事、ソレノイドコイルを巻いてこれまでで最高の磁場を発生させた事、km級の長尺線の作製が可能になった事などを含む盛りだくさんな物だった。続いて3MA02ではAMAC社のLiが同様に最近の成果を紹介した。それらは従来の4cmに加えて、10cm幅の線材が製作可能になった事、4cmの場合には100A,200m級の線材が製作可能になった事、新たに真鍮を安定化層とする構造を開発した事、などである。3MA03と3MA04ではSRLの山田とフジクラの羽生によって日本における最近の成果が報告された。3MA05ではEuropean High Temperature Superconductors (EHTS)のUsoskinがヨーロッパの現状を報告した。EHTSにおける手法はSRLやフジクラとおなじPLD法である。ヨーロッパの長尺線材作製技術は日米には遅れをとっているが、それでも40m長で300A/cm-wが実現しているという事であった。3MA06ではTrithorのBaeckerがall-chemical solution法について紹介した。但しこれは将来の技術開発に待つところが大きい手法である。3MA07ではヒューストン大のFreyhardtがNIST等を含む共同研究を代表してY系超電導線材の電氣的及び剥離の問題を含む機械的特性について報告した。最後の3MA08ではIndustrial Research社のBadcockがRoebel型ケーブル開発について報告した。これは交流ロスの低減を第一に重視し、他の不都合には甘んじるという方式と言えるが、臨界電流値400A程度のケーブルの試作に成功しているようである。また欠陥の検出に28個のホールセンサーからなるアレーを用いる方法とホールセンサーを連続的にスキャンする方法を用いているが、これらは他の形状の線材の評価にも使える方法である。

(a-2) 超電導線の試験方法に関するもの

1LPJ01 で GE の Lvovsky は I-V 測定から n 値を求める場合、臨界電流値以下のわずかな発熱の効果で n 値が過大評価される現象について注意を喚起していた。1LPJ03 では Oak Ridge 国立研の Rey が Y 系超電導線材の接続部の電気抵抗について発表していた。接続部の電気抵抗の温度依存性は弱い、磁場依存性は強いという事であった。1LPJ10 では Lawrence Berkeley 国立研のグループで超電導マグネットがクエンチを起こしたとき、その起点がどこであったかを突き止めるための測定システムを提案していた。

3MPC は Y 系超電導線材 の機械特性がテーマであった。3MPC01 はフロリダの強磁場国立研究所の発表で、線材の特性のばらつきを統計的手法で解析しようという試みである。今後大量の線材が製作されるようになるので生産管理の点で統計的手法は必要になると思われる。ただし、この発表で採用されていた方法が適切かどうかは検討を要すると思われる。

3MPD04 はスイスからの発表で超電導体内の電流分布を数値計算で求める場合に空間次元の内一つを時間と見なし、時間発展方程式を解く形にする事によって計算スピードが向上するという報告であった。5MC02 でロスアラモス研の Coulter は永久磁石を使った長尺線材の評価法を紹介した。これは以前から同研究所で行っている方法であるが永久磁石が増強されていた。また臨界電流値の分布だけでなく n 値の分布も合わせて測っていたが、この二つの分布に相関があるという結果であった。5MC03 はオースオリアの magnetoscan の発表であった。この方法も以前から行われているが、今回特に大きな進歩は見られなかった。5MC04 は Cambridge の Durrell の発表でプログラムとタイトルが違っていたが、RABiTS 基板上の PLD および MOD 線材における粒界の影響を調べる内容であった。5LB08(5MC07 から変更) は Air Force Research Laboratory の Levin の発表で線材安定化層超電導層との間の界面抵抗が安定性に与える影響がテーマであった。結論は数値計算の結果、現状の界面抵抗の値で十分であるという事であった。

5MZ のテーマは高温超電導体の機械特性であった。5MZ01 は 3MPC01 と同じ研究者による発表で同じ方針による解析である。5MZ02 はヒューストン大の発表で薄膜線材のひねり変形に関するものであった。変形のモードとして理想的なものを仮定しているが実際にはもっと複雑な変形がおこるので、単純な解析は無効ではないかと思われる。座長の Ekin が盛んに “very complex experiment” と複雑な状況であることを指摘していたが、暗にその事を言っているようにも思えた。5MZ03 は NIST の発表で線材に歪みを与えた時の臨界電流値の可逆的变化に関するものであった。同グループがかねてから詳しく調べているテーマであるが、単結晶基板上の薄膜のデータ等が新しかった。機構として臨界温度の歪み依存性を考えているようだが、それが正しいかどうか現在の所不明である。5MZ04 は京大の Sugano の発表で、同じく臨界電流値の歪み依存性の実験であるが同グループでは

測定を磁場中で行っているのが特徴である。磁場領域によって定性的な振る舞いが違ってくるということであった。5MZ03 は Karlsruhe のグループの発表で Roebel 型ケーブルを念頭に置いた研究であるが特にひねり変形に注目していた。これについても 5MZ02 の時と同じようなニュアンスの Ekin のコメントがあった。5MZ06 は SuperPower 社の発表で、より実用サイドからのアプローチで、細線化線材、Roebel 型ケーブル、接合部などの特性を調べたものである。細線化については 4 mm 幅テープを 5 分割している。15 m 長の細線化に成功しているが、細線化の方法については明確にしていない。

(a-3) 超電導線の応用に関するもの

8 月 19 日の Plenary Lecture の講演者はフロリダ州立大の Luongo で内容は高温超電導体を航空機応用するというものであった。これは電気飛行機と言うべきもので、ガスタービンによって発電した電力でモータをまわし推力とするものである。モータは当然軽量かつ高効率でなければならず、超電導モータが使われる。電氣化する事により設計の自由度が生まれるために、航空機燃料の効率的消費が実現し、騒音も減少するという事であった。現在は様々な要素技術の原理検証の段階で、2030 年頃の実用化を目指しているという事であった。今はまだ夢のような話としか思えないが、ライト兄弟から 100 年で航空機の技術が今のような状態までは発展した事を考えると、数十年後の事は予測が難しいであろう。

ポスターセッション 2LPP は電流リードのセッションであった。2LPP02 ではドイツのグループがトカマク用の酸化物高温超電導体の電流リードについて発表していた。4.5 K の領域と 77 K の領域をつなぐ電流リードで 25.7 kA の容量を持つものである。2LPP05 では産総研のグループが液体窒素温度での超電導機器の運転を想定し、室温から液体窒素温度をつなぐ電流リードの平均的な Lorenz number を各種材料について液体窒素の蒸発量から換算する方法で評価していた。2LPP08 では韓国のグループが semi-retractable な電流リードについて発表していた。これは液体ヘリウム中で運転する超電導マグネットのためのもので、液体ヘリウム温度から中間温度までを高温超電導体でつなぎ、そこから室温までを正常金属でつなぎものである。超電導マグネットを励磁した後永久電流モードに移し、正常金属の電流リードのみを取り外して熱流入を防ぐというアイデアである。2EPL04 では神戸大、岩谷、NIMS、のグループが細い MgB₂ 線を液体水素の液面計に応用する研究を発表していた。2MPM02 では韓国のグループが YBCO 線材を接合する際に接合抵抗を減少させるために安定化層をケミカルエッチングで除去する方法を提案していた。2MPM02 ではスロバキアのグループがテープ線材の幅方向の電流分布を評価する方法を提案していた。これはホールセンサーによって線材表面の垂直方向の磁場分布を測定し、そのデータからある仮定に基づいて電流分布を算出するものである。幅方向の臨界電流密度分布の評価は YBCO 線材の細線化にあたっては重要な情報になるので今回の学会でもいくつかの評価法が提

案されている。この発表もその一つである。ただ方法は既知のものであり、特に新しいアイデアは含まれていないように見受けられた。

8月20日のPlenary Lectureの講演者はMITのAntayaで小型サイクロトロンへの応用についてであった。他の条件が同じであればサイクロトロンのサイズは磁場に反比例する。従って、必要なサイクロトロンの体積は磁場の3乗に反比例する事になる。超電導マグネットによる強磁場を利用できればサイクロトロンは巨大な装置ではなくポータブルな物になる。小型サイクロトロンの応用としては放射線治療などがあるが、その他意外な応用としては、核物質の発見がある。米国ではテロリストによる核物質を使った攻撃に非常に敏感になっているが、高濃縮ウランの放射能はあまり強くないので比較的簡単にシールドされてしまい、受動的な検出法ではなかなか発見できないそうである。そこでサイクロトロンから疑わしい物質にむかってしかるべき放射線を照射し、それによって引き起こされる核反応を検出しようというのである。小型サイクロトロンを航空機に積んで、接近しつつある船舶または航空機に特殊核物質が積載されていないかを調べようという計画があるらしい。

8月21日の3日目のPlenary Lectureの講演者はGEのBrayで超電導体が実用化されるために最も必要なのは何かテーマだった。それは基礎的な研究者が考える臨界温度や臨界電流値というよりも、むしろコストや信頼性であるという、いわれてみればもっともな話であった。ただし各種要請の優先順位が民生用と軍事用ではかなり違っているという点も興味深かった。軍事用という発想は日本の普通の研究者にはすぐには浮かばないであろう。

8月22日の最終日のPlenary Lectureの講演者はITERのWuで、中国における超電導応用の現状がテーマであった。主な内容は中国における超電導トカマクの開発、ITER計画における中国の分担内容および中国におけるY系超電導線材の開発であった。

(b) 超電導電力機器の技術動向及び標準化ニーズ

(b-1) 超電導電力ケーブルに関するもの

ロングアイランドに設置された高温超電導ケーブルの実証試験(米国、American Superconductor)について報告があった。ケーブルは138 kVで574 MVA供給でき、長さ600 mを設置。プロジェクト概要、ケーブルと終端接続部、冷却装置、試験サイト、試験結果などの報告がなされた。2007年にケーブル、終端接続部及び冷却装置を設置し、2008年にケーブルを系統連系している。ケーブル終端接続部は、Nexans製。現場でのケーブル試験は、交流高圧試験、部分放電測定などが実施されている。今後は、2008年4月から最低1年間運転して限流波形、冷凍装置の運転状況、ケーブルの熱と電氣的運転状況を観測する予定である。また、LIPA2期プロジェクトとして、同地区で600 mの2G(Y系)ケーブルの実証試験をする

予定。

アルバニーケーブルプロジェクトのフェーズ I、II の試験結果（米国、SuperPower）について報告があった。ケーブルは 34.5 kV、48 MVA 供給でき、長さ 350 m をフェーズ I では BSCCO ケーブルで設置し、フェーズ II ではそのうち 30 mm を YBCO ケーブルに張替えて試験を行った。ケーブル仕様、冷却装置の概要説明の後、2008 年の成果として、YBCO/BSCCO ケーブルの設置、冷却について、見通しが得られたこと等が報告された。30 m YBCO ケーブルでは、AC ロスは、0.34 W/m/phase at 0.8 kArms, 60Hz とのことであった。耐電圧試験は、AEIC に基づき 10 分間の交流 69 kV、5 分間の直流 100 kV で実施した。フェーズ I、II の試験を通して、すべての目標を達成し、12 ヶ月以上もケーブルは稼働し続け、設備/システムともに商業上の要求を満足しているとのことであった。

日本の応用基盤プロジェクトの成果として、京都大学の雨宮先生から応用基盤技術開発のケーブル要素技術開発の成果について報告があった。低交流損失化技術は、40 cm 導体での原理検証、次に 1 m 導体で 0.05 W/m@1 kA 以下を達成。低コスト線材導体化技術では、線材単体で 0.2 W/m@1kA 以下の低交流損失を達成。過電流技術では、20 m 導体で 31.8 kA、2.02 S を達成。ケーブル接続技術については、中間部の接続抵抗 0.6 $\mu\Omega$ を達成し、これらすべて NEDO の開発目標をクリアし、20 m ケーブルの試験によって検証されたことが報告された。

DAPAS 計画(韓国、韓国電気工学研究所)は、ケーブル、変圧器、限流器、モータなどの技術を開発するプロジェクトで、2001 年から取組みがなされている。高温超電導開発品の研究と商業化を第 1 のターゲットとして取組み、2001 年から 3 ヶ年を第 1 フェーズとしコアテクノロジー期間、2004 年から 3 ヶ年(第 2 フェーズ)を商業化前の予備期間、2007 年から 4 ヶ年(第 3 フェーズ)を商業化期間として、取組みが行われている。ケーブルプロジェクトは、22.9 kV ケーブル開発、22.9 kV 100 m システム開発の後、今フェーズでは 3 相の 1 GVA、154 kV のものを開発目標に掲げて取組んでいる。2006 年の 100 m ケーブル試験では、普通のケーブルと変わらない操作性を検証し、負荷サイクル試験、誘電損失の結果等試験は成功を収めたとのことであった。また、3 相 100 m (154 kV、1 GVA) の設備を KEPCO 試験センターに設置し、第 3 フェーズを始めたことが報告され、これにより韓国の原子力発電所 20 基分が 1 GVA 超電導ケーブル 1 つでカバーでき、韓国全体の最大電力容量 60 GW を賄えるとのことであった。

東京電力で実施している高温超電導ケーブルに実証プロジェクトが、住友電工によって報告された。66 kV 300 MVA 級高温超電導ケーブルで、3 心一括の構造のものを東京電力の朝日変電所に設置して検証を実施している。プロジェクトは 2007 年より、5 ヶ年で計画され、ケーブル形状、雷サージに対する影響評価、交流損失測定結果、短絡電流通電試験結果等が報告され、系統に運用可能な見通しが得られたとの報告がなされた。今後、2008 年 30 m 級ケーブルの事前検証とデモ

装置のケーブルを 2009 年に作成予定である。

100 m 高温超電導ケーブルシステムの試験結果（韓国、韓国電気工学研究所）について報告があった。KEPCO の系統に設置した 22.9 kV 超電導ケーブルシステムを、3 年にわたり冷却や常温化を 7 回実施し、ケーブルの影響評価、DC 臨界電流試験、熱損失、交流損失などを計測した結果が報告されていた。DC 臨界電流試験の結果、悪影響がなかったこと。冷却システム検証による技術の確立、高温超電導ケーブルシステムの系統導入技術の確立などが報告されていた。2009 年に 500 m ケーブルプロジェクトがスタートする予定。

YBCO 超電導ケーブルの低交流損失と接続部の低電気抵抗に関する開発について、古河電工から報告があった。古河製と住友製の高温超電導ケーブルを接続し、交流損失、耐過電流特性、ケーブル接続損失などを 20 m のケーブルで検証。交流損失は、10 m で 0.1 W/m 以下。耐過電流に対しては、31.5 kA・2 秒に耐え、低交流損失、低電気抵抗の検証が図れたと報告されていた。

20 m 長 YBCO 超電導ケーブルの過電流特性の報告が早稲田大学からあった。オールで発表のあったケーブル要素技術開発における過電流試験の試験結果が、詳細に報告されていた。

(b-2) SMES に関するもの

ポーランド SMES の設計と試験結果についてポーランドの超電導技術研究所から報告があった。Bi2223 を使用した 7 つのダブルパンケーキ型のコイル形状で構成されており、寸法は、直径 210 mm の外形で、高さ 191 mm。50 K で 10 kJ の貯蔵容量である。高温超電導マグネットと冷却システムは、試験も順調に進み、今後 3 年間で操作性の試験をする予定である。

2.5 MJ SMES 開発に向けた高温超電導マグネットの設計について韓国の韓国電気技術・科学調査研究所から報告があった。韓国国家プロジェクトの 600 kJ 級の SMES の成果を基に、2.5 MJ の SMES を開発。コイル形状を検討しソレノイドとトロイド配置で検証。今回の結果を受け。トロイドタイプを調整した 2.5 MJ 級の SMES の設計を行う予定との報告がなされた。(形状は日本の SMES プロジェクトで検討したものに非常に似ていた)

(b-3) 超電導変圧器に関するもの

超電導変圧器の設計手法についてドイツのカールスルーエ物理学技術研究所から報告があった。超電導変圧器の最適設計手法の報告。巻き線電圧に対し、変圧器の体積、重さとコストの関係を計算し、変圧器の最適形状と最適化により、超電導変圧器の開発に役立つ見通しが得られると報告されていた。

154 kV 超電導変圧器と負荷タップ切換器の絶縁設計について韓国の Gyeongsang 国立大学から報告があった。超電導変圧器の商業化のための技術には、AC ロスの低減、高温超電導特性の改善、冷却システム、絶縁技術及び負荷タップ

切換の技術が必要であり、今回、154 kV 級変圧器と負荷タップ切換の絶縁設計及びブッシングの絶縁設計について報告がされた。

(b-4) 限流器等に関するもの

限流器の電流制限開始についての制御技術概念の報告が電力中央研究所からあった。限流器の動作を温度コントロールし、制限時の臨界電流と始動電流の温度依存性を測定した。結果、液体窒素の温度を調整することにより、限流器の臨界電流を制御可能なことを証明したことが報告されていた。

直列接続の YBCO 導体のクエンチ特性について韓国の Yonsei 大学から報告があった。直列接続の導体について、クエンチ特性を解明する取組みで、導体化マグネット応用を高電圧送電線で適用するために検証されたものである。検証の結果、導体に分路抵抗を平行に取付けることにより、クエンチの安定性が増す結果が報告されていた。今後、分路抵抗器を使用して、クエンチ効果を良くした超電導限流器の仕様について、調査が進められる予定である。

限流モジュールを統合したモジュール型超電導限流器の限流特性について韓国の朝鮮大学から報告があった。YBCO 導体を使った超電導リアクトルで、単体を組合せて特性を解析。単体と接続時のリアクトルで作られた磁場分布の結果では、接続時リアクトルでの磁場が単体リアクトルに比べ大きいことが確認された。また、接続時リアクトルでは、外部磁場は中心より 40 mm はなれた時点でもっとも大きくなることなどが報告されていた。

(2) EUCAS2009 (独、ドレスデン)

2009 年 9 月 13 日から 9 月 17 日に開催された第 9 回欧州応用超電導会議 (EUCAS2009)にて報告のあった超電導線材と超電導電力機器について報告する。

第 9 回 EUCAS において発表された超電導電力機器のプロジェクトについて表 2.5.4-1 にまとめる。電力ケーブルについては、日本、アメリカでの開発が進むとともに、オランダ、スペインやロシアなどヨーロッパでの開発が再び始められた。限流器については、ヨーロッパと中国で Grid 接続へ進んでいる。モータ、発電機については、実規模のデモ機が完成間近である。

表 2.5.4-1 超電導電力機器技術動向調査結果

対象	プロジェクト	開発者	進捗状況
ケーブル	Ohio Bixby	Southwire, AEP (Dept. of Energy)	13.2 kV-3000 A-200 m 2006.8.6 スイッチオン後、継続してGridに接続中
ケーブル	Entergy New Orleans	Southwire (Dept. of Energy)	13.8 kV-60 MVA-1700 m 230kV ケーブルに代わる solution として計画中
ケーブル	NY Hydra	AMSC, Southwire, ConEdison, (Dept. of Homeland Security)	13.8 kV-4000 A-200 m 短絡電流を25 %減少させ、変圧器の共有を可能とする目的で計画中。25 m サンプルで原理検証
ケーブル	横浜	SEI, 東電, マエカワ	66 kV-200 MVA-~300 m 30 m 検証用ケーブル評価試験中
ケーブル	M-PACC	SEI, 古河, ISTE C	66 kV-5000 A-15 m, 275 kV-3000 A-30 m 開発中
ケーブル	中部大学	中部大学	20 kV(DC)-2000 A-200 m 布設完了
ケーブル	Amsterdam	NKT, Ultera, Alliander	50 kV-250 MVA-6,000 m 原理検証(2009-2011)、順調に行けば2013-2014 に 布設
ケーブル	BNI IKP	BNI IKP	20kV-2000 A-200 m 2009.10 月、評価開始
ケーブル	ENDESA	Nexans	25 kV-3200 A-30 m 進行中
ケーブル	POSE ² IDON	Nexans	600 V-10 kV(DC) 船舶用DC ケーブル
ケーブル	中国	不明	北京の 110 kV 級ケーブルなど2 件立案中
限流器	Vattenfall	Nexans	12 kV-800 A-4100 A(50ms) 2009.10 月にGrid 接続予定
限流器	UK/ASL	Nexans	12 kV-100 A-460 A(10s) 2009.10 月にGrid 接続予定
限流器	Puji	Innopower	35 kV-1500 A 2008.1 月から運転中
限流器		Siemens	138 kV-1200 A 2012 に3 相分完成予定
限流器		産総研	500 V-200 A 10 cm × 30 cm の大面積基板
変圧器		名古屋大	2 MVA-22 kV/6.6 kV 評価中
モータ		川崎重工	1 MW(30 K), トルク : 150 kNm 開発中
モータ		Siemens	4 MW@120rpm, トルク : 320kNm Rotor 試験中
発電機	EU Framework 6	Convertteam	1.7 MW-5.25 kV-28 pole@214 rpm Hirschaid の水力発電所に導入予定

(3) IEC/TC90-VAMAS/SWTA16 合同会議（日本、つくば）

2009年11月5日に開催されたIEC/TC90-VAMAS/SWTA16合同会議にてヨーロッパを主にした超電導電力機器関連プロジェクト関連の技術動向調査を行なった。以下にSMES、超電導電力ケーブル、限流器及び回転機について表2.5.4-2、表2.5.4-3、表2.5.4-4及び表2.5.4-5にそれぞれまとめて示す。

表 2.5.4-2 SMES 関連プロジェクト

中心企業	国	時期	データ	適用材料	応用
FZ Karlsruhe	Germany	1997	320 kVA, 203 kJ	NbTi	Flicker compensation
AMSC	USA		2 MW, 2.6 MJ	NbTi	Grid stabilization
FZ Karlsruhe	Germany	2004	25 MW, 237 kJ	NbTi	Power Modulator
Chubu	Japan	2004	1 MVA, 1 MJ	Bi 2212	Voltage quality
Chubu	Japan	2005	10 MVA, 21 MJ	NbTi	Voltage quality
KERI	Korea	2005	750 kVA, 3 MJ	NbTi	Grid quality
Chubu	Japan	2007	1 MVA, 19 MJ	NbTi	Load compensation
CAS	China	2007	0.5 MVA, 1 MJ	Bi 2223	-
CNRS	France	2008	800 kJ	Bi 2212	Military application
KERI	Korea	2009	1 MJ	Bi 2223	-
Chubu	Japan	2012	2 MJ (20K)	YBCO	Grid stabilization

表 2.5.4-3 交流超電導ケーブル関連プロジェクト

企業名	設置場所, 国, 時期	絶縁	データ	適用材料
Furukawa	Yokosuka, JP, 2004	CD	77 kV, 1 kA, 500 m, 1-ph.	Bi 2223
Innopower	Yunnan, CN, 2004	WD	35 kV, 2 kA, 33 m, 3-ph.	Bi 2223
Sumitomo	Albany, US, 2006	CD	34.5 kV, 800 A, 350 m, 3-ph.	Bi 2223
Ultera	Columbus, US, 2006	Triax	13.2 kV, 3 kA, 200 m, 3-ph.	Bi 2223
Sumitomo	Gochang, KR, 2006	CD	22.9 kV, 1.25 kA, 100 m, 3-ph.	Bi 2223
LS Cable	Gochang, KR, 2007	CD	22.9 kV, 1.26 kA, 100 m, 3-ph.	Bi 2223
Sumitomo	Albany, US, 2007	CD	34.5 kV, 800 A, 30 m, 3-ph.	YBCO
Nexans	Hannover, D, 2007	CD	138 kV, 1.8 kA, 30 m, 1-ph.	YBCO
Nexans	Long Island, US, 2008	CD	138 kV, 1.8 kA, 600 m, 3-ph.	Bi 2223
Nexans	Spain, 2008	CD	10 kV 1 kA, 30 m, 1-ph	YBCO
Ultera	New York, US, 2010	Triax	13.8 kV, 4 kA, 240 m, 3-ph.	YBCO
Ultera	New Orleans, US, 2011	Triax	13.8 kV, 2.5 kA, 1700 m, 3-ph.	to be defined
Ultera	Amsterdam, NL, -	Triax	50 kV, 2.9 kA, 6000 m, 3-ph.	YBCO
Nexans	Long Island, US, -	CD	138 kV, 2.4 kA, 600 m, 1-ph.	YBCO
LS Cable	Gochang, KR, 2011	CD	154 kV, 1 GVA, 100 m, 3-ph.	YBCO
LS Cable	Seoul, KR	CD	22.9 kV, 50 MVA, 500 m, 3-ph.	YBCO
Sumitomo	Yokohama, JP, 2013	CD	66 kV, 200 MVA, 200 m, 3-ph.	Bi 2223
Sumitomo	TEPCO, JP	CD	66 kV, 5 kA	to be defined
Furukawa	TEPCO, JP	CD	275 kV, 3 kA	Bi 2223
Sumitomo	Chubu U., JP, 2010	CD	10 kV, 3 kA DC, 20 m, 200 m	Bi 2223
VNIKP	Moscow, RU	CD	20 kV, 200 m	Bi 2223
Nexans	Spain	CD	10 kV, 3,2 kA, 30 m, 1 ph.	Bi 2223

表2.5.4-4 限流器関連プロジェクト

中心企業	国/試験時期	タイプ	データ/対地電圧	相数	適用材料
ACCEL/NexansSC	Germany / '04	Resistive	12 kV, 600 A	3-ph.	Bi 2212 bulk
CAS	China / '05	Diode bridge	10.5 kV, 1.5 kA	3-ph.	Bi 2223 tape
CESI RICERCA	Italy / '05	Resistive	3.2 kV, 220 A	3-ph.	Bi 2223 tape
CESI RICERCA	Italy / '05	Resistive	0.6 kV, 270 A	1-ph.	MgB2 wire
Siemens / AMSC	D / USA / '07	Resistive	7.5 kV, 300 A	1-ph.	YBCO tape
LSIS	Korea / '07	Hybrid	24 kV, 630A	3-ph.	YBCO tape
Hyundai / AMSC	Korea / '07	Resistive	13.2 kV, 630 A	1-ph.	YBCO tape
KEPRI	Korea / '07	Res.-hybrid	22.9 kV, 630 A	3-ph.	Bi 2212 bulk
Innopower	China / 2008	DC biased iron core	35 kV, 90 MVA	3-ph.	Bi 2223 tape
Toshiba	J / 2008	Resistive	6.6 kV, 72 A	3-ph.	YBCO tape
Nexans SC	D / 2009	Resistive	12 kV, 100 A	3-ph.	Bi 2212 bulk
Zenergy Power	USA / 2009	DC biased iron core	12 kV, 1.2 kA	3-ph.	Bi 2223 tape
Zenergy Power	USA / 2009	DC biased iron core	15 kV, 1.2 kA	3-ph.	Bi 2223 tape
Nexans SC	D / 2009	Resistive	12 kV, 800 A	3-ph.	Bi 2212 bulk
Nexans SC	D / 2011	Resistive	12 kV, 800 A	3-ph.	YBCO tape
Innopower	China / 2010	DC biased iron core	220 kV, 300 MVA	3-ph.	Bi 2223 tape
ERSE	I / 2010	Resistive	9 kV, 250 A	3-ph.	Bi 2223 tape
ERSE	I / 2010	Resistive	9 kV, 1 kA	3-ph.	YBCO tape
KEPRI	Korea / 2010	Resistive	22.9 kV, 3 kA	3-ph.	YBCO tape
AMSC / Siemens	USA / D / 2012	Resistive	115 kV, 1.2 kA	3-ph.	YBCO tape
Rolls Royce	UK / -	Resistive	11.5 kV, 400 A	3-ph.	MgB2 wire

表 2.5.4-5 高温超電導回転機関連プロジェクト

企業／国	回転機の容量	時期
AMSC (US)	5 MW demo-motor	2004
	8 MVA, 12 MVA synchronous condenser	2005/2006 (Field test)
	40 MVA generator design study	2006
	36 MW ship propulsion motor	2008
	8 MW wind generator design study	2010
GE (US)	100 MVA utility generator	2006 (discontinued)
	5 MVA homopolar induction motor	2008
LEI (US)	5 MVA high speed generator	2006
Reliance Electric (US)	10.5 MVA generator design study	2008
IHI Marine, SEI (JP)	365 kW ship propulsion motor	2007
	2.5MW ship propulsion motor	2010
Doosan, KERI (Korea)	1 MVA demo-generator	2007
	5 MW motor (homopolar)	2010
Siemens (Germany)	400 kW demo-motor	2001
	4 MVA industrial generator	2005 (Field test)
	4 MW ship propulsion motor	2010
Converteam (UK)	200 kW demonstrator	2006
	1.25 MVA hydro-generator	2010
	500 kW demo-generator	2008
	8 MW wind generator design study	2010

2.5.5 パネル討論会の結果

超電導電力機器関連国際標準化の国際合意醸成の一環として、第6回パネル討論会（ISS2008 と併催）並びに第7回パネル討論会（IEUCAS2009 と併催）を開催した。

(1) 第6回パネル討論会（ISS2008 と併催）

2008年10月27日につくば国際会議場にてISS2008との併催の形で第6回パネル討論会を開催した。本討論会の目的は、超電導関連技術の国際標準化の理解深化と必要性の討論である。今回の討論会では、参加者は49名、参加国は6カ国であった。

(a) 報告内容

松下委員長から超電導関連の国際標準化への理解深化のために、“Standardization in IEC/TC90 for Superconductivity”と題した報告がなされた。長村光造氏（応用科学研究所）から超電導関連パネル討論会実施状況とIEC/TC90における標準化活動レビューがなされた。Dr. David Larbalestier氏（Florida State University, USA）からは“HTS wire development and measurement methods in ASC”に関する話題提供がなされた。また、中尾公一氏（SRL/ISTEC）から“Measurement methods of Y-system coated conductors”に関する報告がなされた。大崎博之氏（東京大学）から“HTS power cable technology and measurement methods”に関する話題提供がなされた。佐藤謙一氏（住友電工）からは“How to international-standardize SC power cable”に関する報告がなされた。最後に Dr. Paul N. Barnes氏（Air Force Laboratory, USA）から“SC machines related measurement methods”に関する話題提供がなされた。

(b) 標準化に関する討論

上記の報告及び話題に対して次の討論がなされた。

(b-1) 超電導線の国際標準化

国際規格化に際し、目下開発中の線材もあり、標準化対象を明確にする必要がある。開発中の線材を対象にした微視的試験方法、特性の均一性試験方法などは、均一性を前提とする実用超電導線材に対して工業的試験方法としてどの程度簡略化できるかを見極めが必要である。長尺の実用超電導線材における臨界電流 I_c 及び工学的臨界電流密度（オーバオール J_c ） J_c は、IEC60050-815のメンテナンス時に定義の見直しが必要である。実用超電導線材における特性保証は、低温超電導線材で実施されているプロセス保証が究極の姿である。

(b-2) 超電導電力ケーブル

国際大電力システム会議 CIGRE と IEC とはリエゾン関係にないため、国際標

準化には周到的配慮が必要である。超電導電力システムには超電導線材、超電導ケーブル、中間接続、冷凍システム、終端接続など多くの構成要素について、システム設計側との密接な連携と話し合いの基でニーズを包括した規格化が肝要である。冷凍システムは不可欠であることから、信頼性試験及び保安項目の記述に配慮が必要である。

(b-3) その他の超電導機器

超電導機器には多くに個別パラメータがあるが、超電導機器に共通するパラメータと機器固有のパラメータの峻別が必要である。工学的臨界電流密度（オーバオール J_c ） J_c や絶縁に関して、超電導線レベルと機器レベルで異なった定義になることを明確にする必要がある。高温超電導線材を適用する機器においては、クエンチの検出方法と試験方法との整合性が必要である。

(b-4) 超電導電力機器関連の国際規格化

超電導電力機器の導入の動機はライフサイクルコストに大きく依存するため、個々の機器における規格化にはなんらかの配慮が肝要である。超電導電力機器の国際規格化には、研究者、機器技術者及びユーザの密接な協力関係が必要である。超電導電力機器関連の国際規格化のタイミングから判断し、超電導線材及び超電導電力ケーブルの国際標準化の着手判断は妥当である。

(2) 第 7 回パネル討論会（EUCAS2009 と併催）

2009 年 9 月 15 日にドイツのドレスデン工科大学にて EUCAS2009 との併催の形で第 7 回パネル討論会を開催した。本討論会の目的は、過去の 6 回のパネル討論会の成果のレビュー、超電導電力ケーブルの現在の R&D 活動のレビュー（CIGRE の活動含む）と標準化の早期実現への準備の議論、及び超電導線の現在の R&D 活動のレビューと標準化の早期実現への準備の議論である。今回の討論会では、参加者は 18 名、参加国は 8 カ国であった。

(a) 報告内容

まず松下委員長から過去の 6 回のパネル討論会の成果が紹介され、その中で電流リードに続いて応用化が最も進んでいる超電導ケーブルと、あらゆる応用機器に用いられる超電導線についての標準化の必要性が高まってきていることが紹介された。佐藤謙一氏（住友電工）からこれまでに行われた、そして現在、進行中及び計画中の超電導ケーブルのプロジェクトの紹介があり、ついで、参加できなかった Lindsay 氏の代理として、高温超電導電力ケーブルについての CIGRE と IEEE の活動の紹介があった。湯山洋康氏（住友電工）から日本国内の現在、進行中の超電導電力ケーブルのプロジェクト 3 件の紹介がなされた。これは Bi 線材を用いた横浜プロジェクト、ISTEC が推進する YBCO コート線材を用いたプロジェクト及び中部大学が推進する直流超電導ケーブルのプロジェクトである。Dag Willen 氏

(ULTERA, Denmark) からは、ヨーロッパ及びロシアにおける幾つかのプロジェクトの紹介があった。Ying Xin 氏 (Innopower, China) からは、中国における 2 件のプロジェクトの紹介があった。Steven Fleshler (AMSC, USA) 氏からは、米国における LIPA のプロジェクトの紹介があった。長村光造氏 (応用科学研究所) から、これまでの議論をベースに TC90 のアドホック・グループ 3 で作成した超電導線の標準化のドラフト (Ver. 1 と委員からの修正を加えた Ver. 2) が配布され、これについての説明が行われた。Chan Park 氏 (Seoul N. Univ., Korea) からは、DAPAS プロジェクトで開発されている SmBCO コート線材の報告があった。Ying Xin 氏 (Innopower, China) からは、中国で開発されている ITER 用の Nb-Ti、Nb₃Sn 線材、Bi-2223 テープ、Y 系超電導線材、MgB₂ 線材についての紹介があった。

(b) 標準化に関する討論

上記の報告及び話題に対して次の討論がなされた。

(b-1) 超電導電力ケーブルの国際標準化

Pre-standard 活動をする CIGRE において新しいワーキング・グループを作ることが合意される予定で、今後、試験方法などについて検討が行われ、3 年くらい後に IEC に勧告が出される見通しであることが紹介され、了承された。ケーブルについて従来の標準を主体とするか、新しい標準とするかについて質問があった。今後、TC90 から超電導ケーブルについての特殊性がある事項の情報を TC20 に提供し、この件について詰めていくこととした。

(b-2) 超電導線の国際標準化

scope の定義の中で超電導線材を”monolithic strand”としていることについて異議が提出された。会議での議論の結果、定義を”single strand”とすることについて異論はなかった。Label に normative information として何を載せるかについて、特に contract title の中に材料名 (材質名) を記載することについて意見交換を行った。代表的な意見は「取引の当事者は材料についてはよく承知しているので contract 番号等、当事者間で了解できる内容に留めればよい。」であった。しかし stock yard (stock room) に数種の超電導製品が置かれていることを想定すると、当事者が現場作業員に指示する時点では、作業者に“材料名”、“重量”、“長さ”を具体的に指示したほうが作業が容易になることが想定される。他の材料、例えば銅線、アルミニウム線等における Label の調査は参考になると考えられる。企業からの専門家にさらに調査と意見の提出を依頼することになった。

ドイツの参加者より、高温超電導線材と低温超電導線材を分け、低温超電導線材についてはすでに当事者間に defacto 的な線材仕様が決められているので、新しく standard を作る必要性はないという意見が提出された。これに対して、本来の International Standard の精神は共通化した知識・技術を open にして市場を活性

化させることである。将来的に新しく市場に参入する者にとり高温超電導線材と低温超電導線材を分けることよりも、統一的なしかも open な standard のほうが理解しやすく、扱い易いという意見も出された。なお、現状において、Nb-Ti インゴット、MRI 等の原材料、製品は国際的な一部企業が独占しているため、IEC/TC90 で International Standard を作成することは不可能である。

工業製品である超電導線を議論する委員会に企業からの委員を加えるべきとのドイツからの意見に基づき新しいメンバーを追加したアドホック・グループ 3 メンバー構成にするため、最初のメンバーに追加を行った新しいメンバー案を紹介した。会議でさらにアメリカ、ドイツにメンバーとしての参加を要請したところ、Fleshler 氏から Cooley 氏と相談してみるとの発言を得た。

今後、新しいメンバーを加えたアドホック・グループ 3 で議論していくこととなった。

2.5.6 成果のまとめと今後の予定

電力・エネルギー、産業・輸送、診断・医療等の分野における超電導技術の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た。また国際標準化合意醸成をはかりつつ、これら技術に対する規格素案を作成した。

超電導線関連技術標準化では、超電導機器側からの試験項目要件を調査し、この調査結果とアドホックグループの各委員から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「超電導線の試験方法」の規格素案を作成した。また、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、及び2009年9月ドイツドレスデンにおける第7回パネル討論会などを通じて、日本から提案している超電導線標準化に対して合意醸成に努めた。今後も国際合意醸成を図り、日本が提案する国際規格の制定を目指していく。

超電導電力ケーブル関連技術標準化では、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、これの結果とこれまで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。また、国際大電力システム会議(CIGRE)と連携した国際標準化活動を実施するとともに、TC90/TC20 国内リエゾンアドホックグループで国内意見の集約に努めた。今後、国内のTC90とTC20の連携強化を図り、CIGRE内での合意を最優先とした活動を行なっていく必要がある。

超電導電力機器関連技術標準化等では、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、これらの結果を踏まえてSMES及び超電導変圧器の規格骨子案を作成した。今後、これらの成果をベースとしてSMES並びに変圧器の規格素案の作成を行う。

IV. 実用化の見通しについて

1. 実用化の見通し

1.1 超電導電力貯蔵システム (SMES) の実用化の見通し

1.1.1 実用化の見通し

SMES は、NaS 電池やレドックスフロー電池等の 2 次電池やコンデンサなど他の電力貯蔵装置に比べ、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がある。また、SMES はコイルで電力を貯蔵することから、コイル容量や通電電流により、エネルギー貯蔵量に自由度が高く、必要なエネルギー量だけ貯蔵することが可能である。さらに、繰り返しの充放電では、電池の場合、その回数に制約があり、頻度の多い場合、電池本体の交換が必要となるが、SMES の場合、基本的には貯蔵部のコイルは数万から数十万回の充放電に耐える。このことから SMES は、繰り返しの変動が発生する分散電源や自然エネルギーの変動電力を補償する用途や、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に最適な電力貯蔵装置である。

そこで、低コスト高信頼性の SMES システム技術開発が達成された暁には、まず電力自由化の進展や電力コストの抑制の面から低コストで送電線運用容量の大幅アップが期待される箇所への適用が想定される。また、風力等の自然エネルギーや分散電源の系統連系点での補償装置としての適用も期待される。

これまでの技術調査により、SMES システムが実用化できた場合、初期コスト、ライフサイクルコストともに十分な経済性をもちうることが判明している。

現在までの成果に基づき、実用化のイメージを想定すると、今後、本プロジェクトでの酸化物系超電導線材の適用も含めたパイロットシステムの製作、検証、システム技術確立を踏まえることができれば、これまでの SMES プロジェクト（「超電導電力貯蔵システム技術開発」「超電導電力ネットワーク制御技術開発」）の成果である金属系 SMES を用いて産業応用が実現している瞬低補償用途から市場導入が考えられる。

なお、金属系超電導線材を用いた出力 10 MW の瞬低補償用 SMES は、液晶テレビ工場に設置され現在も稼働しており、フィールド試験期間を含めこれまでに 30 回以上の瞬時電圧低下を補償する実績を上げ、最先端の製造現場で多大な貢献をしている。現在、液晶テレビ工場だけでなく、研究施設や半導体工場への SMES 設置が進められている。

負荷変動補償用では、需要家側での個別ニーズに合わせた仕様、性能、機能に

より需要家側の利便が十分大きくなる場合、他と同様に市場参入が行われると考えられる。例えば、新幹線による変動補償を SMES で行うことを想定した場合は、新幹線用変電所 30 カ所に出力 30 MW の SMES を配置するとして、90 万 kW の市場が推定される。

系統安定化用途では、電力系統の安定度面からの運用制約により送電容量が抑えられている箇所では、その対策に膨大な設備投資が必要とされ電力コストの増大要因となる。そのため、SMES を設置することにより低コストで送電線運用容量の大幅アップが期待される箇所への市場参入が行えると考えられる。

系統安定化および負荷変動補償・周波数調整用の SMES システムそれぞれの用途で導入コストを上回る便益が得られる見通しが先のプロジェクトの成果として得られている。また、これを実現するコスト低減技術の中心であるコイル系や大容量電力変換システム、ランニングコストに影響を与える極低温冷凍機の信頼性向上については、要素技術確立の見通しが得られている。加えて、先のプロジェクトにおいて 10 MVA/20 MJ 級 SMES システムを製作し、電力系統との連系試験実施したことで、SMES システムとしての技術を検証することができている。これらの成果とともに、貯蔵部を Y 系超電導線材を用いた高磁場コンパクトコイル化することで、一層の低コスト化を実現することが実用化には不可欠である。さらに、実規模級のパイロットプラントを開発し、総合的に実フィールドでの実証を行なった後、長期的な信頼性に関する評価・改良を進めて市場導入を図ることになる。その後、さらなるコストダウンを進め、普及拡大を目指す。

超電導技術の応用は、電力分野では発電機、送電ケーブル、変圧器、限流器が、医療関連分野では MRI や NMR、また、産業分野では磁気分離、電動機、加速器や核融合に代表される各種高磁場利用が考えられている。本事業で開発される SMES システム技術は、特に、現時点の超電導技術の実用化に立ちはだかる大きな要因であるコストパフォーマンスの問題を大幅に改善することに貢献できるものである。超電導技術を応用する場合、その大半はコイルを用いるため、本プロジェクトによる高磁界コンパクトな Y 系超電導コイル開発や伝導冷却技術などが与える波及効果は極めて大きい。また、本プロジェクトにより開発される SMES は、電力分野においてコスト面で成り立つ初の実用超電導機器となると考えられ、超電導技術の広範な産業応用に大きく貢献が期待される。

また、系統制御技術としての要求よりは、小さな規模で済む産業応用への波及分野としては、電気エネルギーに高い品質と信頼性を要求するハイテク産業における瞬低対策技術として、広汎な導入・普及が期待される。

今回の開発により、ヘリウム温度領域を越えた 20 K 付近で利用可能な超電導コイル応用における線材設計の高度化のほか、市場拡大による超電導線材の低廉化が

期待でき、他の超電導技術応用分野での経済性向上の可能性が高まってくる。加えて、将来の超電導応用機器としての要求性能と期待される市場が明確化されたことにより、これに必要な線材開発が一層活発化して行くものと考えられる。

1.1.2 実用化の効果 (CO₂削減量)

CO₂削減効果については、II.3.4.3項において、SMES、ケーブル、変圧器毎に試算している。ここでは、太陽光や風力発電などの再生可能エネルギーが電力系統に大量導入されることを想定した場合に、想定される電源構成比の変化に伴い電力貯蔵技術の必要性が高まることを仮定し、それによるCO₂削減量を試算し、最後にSMES、NaS電池、鉛蓄電池のコスト比較も行う。

(1) 再生エネルギー導入によるCO₂削減効果

再生可能エネルギー大量導入時には、低負荷時に発電が需要を上回ることで発生する余剰電力対策の他に、太陽光発電の出力変動を緩和するためのLFC (Load Frequency Control: 負荷周波数制御) 調整力が必要となる。通常、LFC調整力としては火力発電が用いられるが、その場合、部分負荷で稼動する必要があるため発電効率が低下する (図 1.1.2-1)。

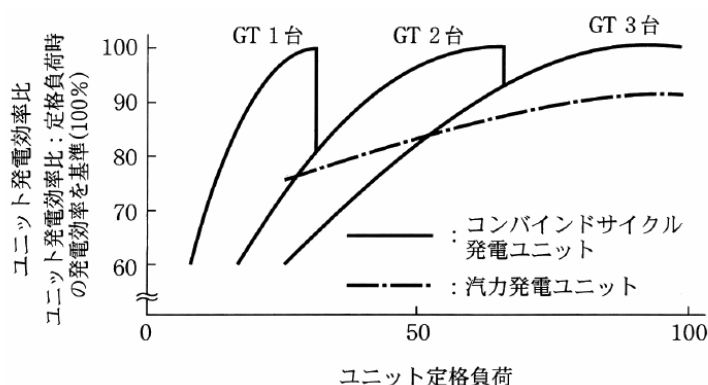


図 1.1.2-1 ガスタービンの総合発電効率特性の例

出典)「ガスタービン技術」(財)エネルギー総合工学研究所

一方、LFC 対策用の電力貯蔵装置を導入した場合、火力発電を定格運転することができるため、火力発電の効率が向上し、その分のCO₂削減効果が見込める。「長期エネルギー需給見通し (見直し)」から、2030年における発電種別毎の、設備容量、発電電力量および設備利用率は表 1.1.2-1 のとおりである。

表 1.1.2-1 2030 年における発電設備容量、発電量、設備利用率

発電種別	発電設備 (万 kW)	発電量 (億 kWh)	設備利用率
水力	5,077	889	15 %
一般	2,302	834	32 %
揚水	2,775	54	2 %
火力	12,090	3,080	22 %
石炭	3,003	1,346	39 %
LNG	4,881	1,371	25 %
石油等	4,206	363	8 %
原子力	6,315	4,695	65 %
地熱	120	75	55 %
再生可能エネルギー	5,975	907	13 %
合計	29,577	9,646	29 %

出典) 発電設備および発電量は「長期エネルギー需給見通し(再計算)」より。

この表から、発電設備容量に設備利用率を乗じ、2030 年における平均的な火力発電所の容量を求めると 2,698 万 kW となる。

ここで、再生可能発電エネルギー導入量の 10 %、30 %、50 %が必要であると仮定した場合の LFC 調整量は表 1.1.2-2 の通りになる。

表 1.1.2-2 再生可能エネルギー導入による LFC 調整必要量

再生可能エネルギー導入量 (万 kW)	5,975		
LFC 調整力として必要な割合 (%)	10	30	50
LFC 調整力の必要量 (万 kW)	598	1,793	2,988

表 1.1.2-2 で算出した LFC 調整力を全て火力発電で担うこととし、その際の負荷を 80 %とすると、火力発電の運転構成は表 1.1.2-3 のようになる。

表 1.1.2-3 火力発電の構成 (LFC 用電力貯蔵装置の設置なし)

LFC 割合	項目	定格運転 (万 kW)	80 %運転 (万 kW)	合計 (万 kW)	不足 LFC (万 kW)
10 % ケース	必要火力設備	308	2,988	3,296	0
	火力出力合計	308	2,390	2,698	
30 % ケース	必要火力設備	0	3,373	3,373	1,118
	火力出力合計	0	2,698	2,698	
50 % ケース	必要火力設備	0	3,373	3,373	2,313
	火力出力合計	0	2,698	2,698	

ここで、火力発電を負荷率 80 %で稼動した場合の定格運転からの効率低下を

5%、火力発電のCO₂排出量原単位を0.69 kg-CO₂/kWh、表 1.1.2-1 から火力発電所の設備利用率を22%として、火力発電のCO₂排出量を求めると表 1.1.2-4 の通りとなる。

本検討では火力発電からのCO₂削減を検討しているため、CO₂排出量原単位は火力発電の値である0.69 kg-CO₂/kWhを用いた。なお、発電設備全体としては0.34 kg-CO₂/kWhとなる。

表 1.1.2-4 LFC 用電力貯蔵装置を設置しない場合の火力発電からのCO₂排出量

項目	10%ケース (百万 tCO ₂)	30%ケース (百万 tCO ₂)	50%ケース (百万 tCO ₂)
CO ₂ 排出量	38.1	38.3	38.3

一方、LFC 調整力を電力貯蔵装置で賄い、稼動する火力発電を定格運転とした場合、火力発電の運転は表 1.1.2-5 のようになる。

表 1.1.2-5 火力発電の構成 (LFC 用電力貯蔵装置を設置)

LFC 割合	項目	定格運転 (万 kW)	80%運転 (万 kW)	火力合計 (万 kW)	LFC 不足量 (万 kW)
全ケース	必要火力設備	2,698	0	2,698	0
	火力出力合計	2,698	0	2,698	

表 1.1.2-5 から、前述のケースと同様に火力発電所からのCO₂排出量を求めると、一律36.4百万tCO₂となる。

よって、LFC 用電力貯蔵装置を導入することによって、部分負荷で稼動する火力発電設備が削減されることで得られるCO₂削減効果は表 1.1.2-6 のとおりとなる。

表 1.1.2-6 LFC 調整用電力貯蔵装置によるCO₂削減効果

項目	10%ケース (百万 tCO ₂)	30%ケース (百万 tCO ₂)	50%ケース (百万 tCO ₂)
CO ₂ 排出量 (電力貯蔵装置なし)	38.1	38.3	38.3
CO ₂ 排出量 (電力貯蔵装置設置)	36.4	36.4	36.4
CO ₂ 削減効果	1.7	1.9	1.9

(2) LFC 用電力貯蔵装置の導入コスト比較

(非公開)

(非公開)

(非公開)

1.2 超電導電力ケーブルの実用化の見通し

1.2.1 実用化の見通し

(1) 送電分野における現状と課題

昨今、地球温暖化防止対策における CO₂ 排出量の削減は、喫緊の課題となっている。また、「Cool Earth-エネルギー革新技术計画」の中で、重点的に取り組むべきエネルギー革新技术「21」に「超電導高効率送電」がエネルギー供給側技術で効率向上をめざす発電・送電部門に位置づけられている。この超電導高効率送電の技術概要には「高温超電導材料を送電ケーブルに活用することにより、現行の 5 %程度の送電ロスがこの技術を適用する区間で 1/3 程度に削減することが可能である」と紹介されている。

このように超電導電力ケーブルを早期に実用化することにより、電気抵抗による送電損失を極小化できるゆえ、送電ロスの少ない電力の輸送が実現することで、運転コストが低減できるとともに、多量の CO₂ 削減効果が可能となり、CO₂ の低減と資源の有効活用を達成し、無駄の少ないエネルギーの利用に資することが期待されている。

また、超電導電力ケーブルは、従来の電力ケーブルと比較して導体部分のエネルギー密度が非常に高く、また低損失なことから、冷却に必要なスペースを考慮してもケーブル収容断面積を小さくすることが可能となる。つまり従来の電力ケーブルは、都市部において洞道と呼ばれる直径約 2~3 m のトンネルに布設されている。これが超電導電力ケーブルに置換わると、管路と呼ばれる地中埋設された内径 150 mm の管に布設することができ、新たな収容設備(洞道、管路)の建設を行うことなく、既設設備を有効利用することによって、コンパクトな設置が可能となる。よって地中設備形成の建設コストの大幅な削減、コストダウンにもつながることが期待できる。

一方、既設の電力ケーブルのうち、OF(Oil Filled)ケーブルや POF(Pipe-type Oil Filled)ケーブルは布設後約 40 年が経過しているものも多く、老朽化に伴う漏油の問題が生じており、経年ケーブルから順次取替が必要となってきた。また、一般家庭等の電化率の向上による電力需要の増加に対応すべく設備の増強の必要性があり、電力流通設備の地中化率(図 1.2.1-1)が年々増加しているが、将来に亘り従来の電力ケーブルによる新たな送電設備を地下に設けるには莫大なコストと地下埋設のスペースが必要となる。さらには、電力需要の増加、高信頼度の系統構成の構築により、火力発電所の増強等のリプレースによる熱効率の向上や稼働率の向上に伴って、電力流通設備の新增設や超高压送電線の冷却設備の建設等の電力流通設備に対する増容量対策が必然となってきた。

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る。

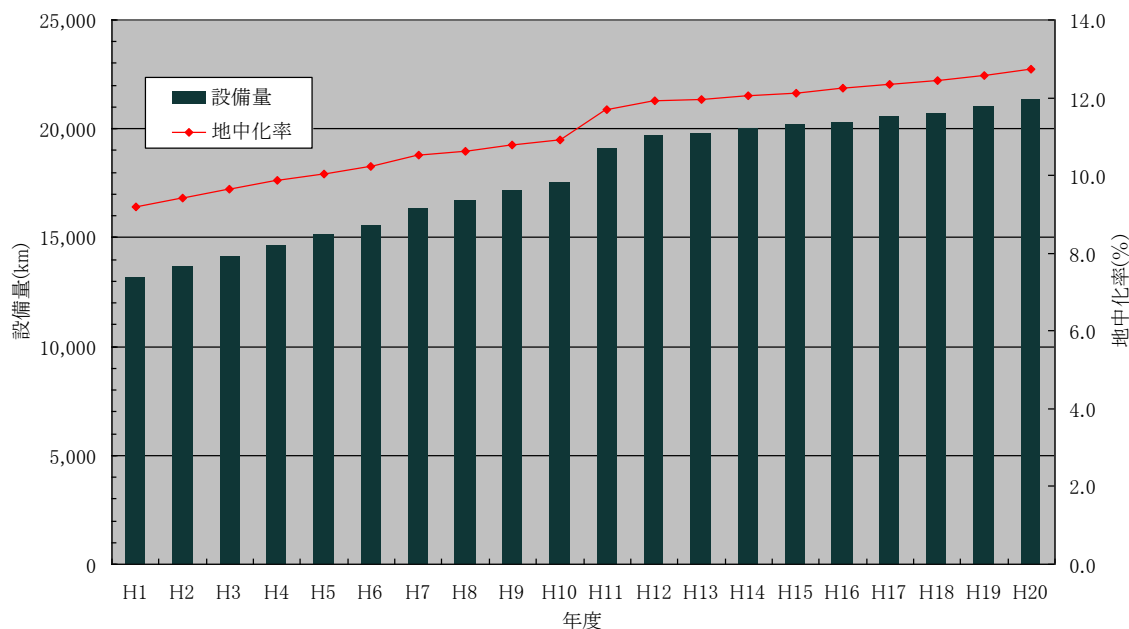


図 1.2.1-1 地中送電設備量の推移

(2) 66 kV 大電流・低交流損失の超電導ケーブルの適用

① 背景

配電用変電所への供給や変電所間の連系など都市部の連系用電力ネットワークの主流は、154 kV や 66 kV 系統となっている。この 154 kV や 66 kV 系統は、特に夏場や冬場の電力需要がピークに達する時期には過負荷となり、設備の稼働としてはギリギリの運用をしている箇所もある。また、都市部における設備の形態は非常に過密化しており、新たな設備の増設は不可能に近く、既存の 154 kV または 66 kV 系統の増容量化を行うことは容易ではない。

さらに近年、経年化による順次リプレースの必要性のある系統も少なくはなく、CV(Cross linked polyethylene Vinyl)ケーブルで対応する場合には既設管路の活用による送電容量の制約から既存の経年ケーブル等の増容量は出来ず、増容量対策を行うには新たな管路設備(洞道)が必要となってくる。

② 過負荷の 66 kV または 154 kV 系統設備への適用

都市部の配電用変電所への供給や変電所間の連系（都市部連系系統）など、154 kV や 66 kV 系統となっている過負荷設備に 66 kV 大電流・低交流損失の超電導ケーブルを適用すると、課題なる過負荷が解決でき、新增設を行うことなく増容量化に対応できるうえに既設管路の活用が可能で、大幅なコストダウン

と CO₂ 削減が可能となる。(図 1.2.1-2 参照)

③ 経年化した 66 kV または 154 kV 系統設備への適用

経年化した既存の 66 kV または 154 kV の都市部連系系統 (CV ケーブル、OF・POF ケーブル等) の代替としての 66 kV 超電導ケーブルを適用すると、既設管路へそのまま CV ケーブルにリプレースする場合の送電容量の制約が解消でき増容量対策が可能となるとともに、増容量対策による新たな設備の必要性がなくなりコスト削減が可能となる。

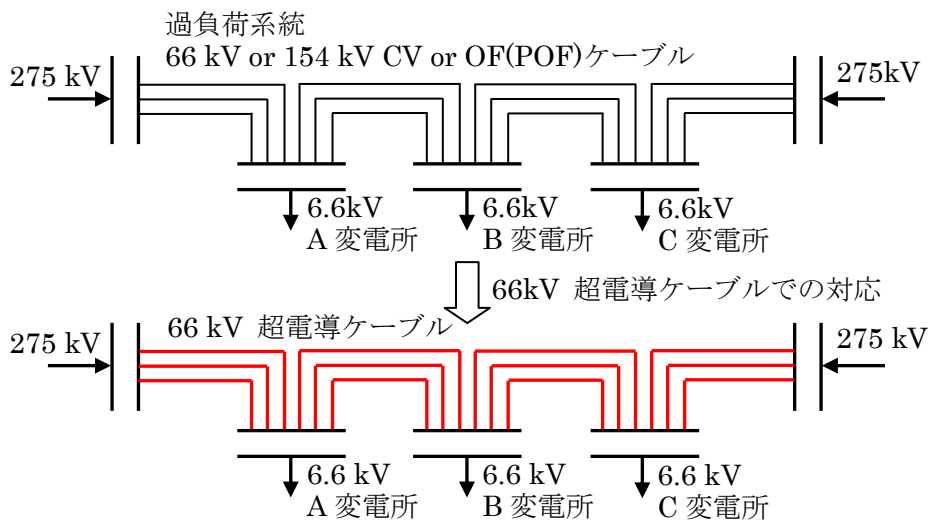


図 1.2.1-2 66 kV or 154 kV 過負荷系統への超電導ケーブルの適用例

(3) 275 kV 高電圧絶縁・低誘電損失ケーブルの適用

① 背景

電源から都市部へ電力を供給する流通設備(電力系統)は、架空送電線と地中送電ケーブルで構成され、特に都市部においては地中送電ケーブルが用いられている。このような設備構成の中、超電導ケーブルの最も有効な適用例は、275 kV の地中送電ケーブルで構成される基幹系の電力送電網への導入である。

電力需要の増加、高信頼度の系統構成に伴い、275 kV 系統の増強が不可欠となってくる中、これを既存の 275 kV 現用ケーブルで構築するとなると新たな布設管路(洞道、管路)の建設が必要となり莫大なコストがかかってしまう。特に都市部においては地下空間に公共インフラが集中しており、新たな収容設備を建設することが非常に困難になっている。(図 1.2.1-3 参照)

さらには電圧 275 kV 超電導ケーブルの適用から系統両端の既存設備、遮断機や断路器、変圧器等の主要機器の使用電圧が超電導ケーブルと同じ 275 kV なので大幅な機器の改修の必要性がなくなってくる。

② 都心導入系統への適用例

具体的な適用例としては、防災トラフ内間接水冷システムが導入されている設備で冷却システムの稼働率が高い系統での適用が挙げられる。特にその中でも、高効率な発電所から超高圧変電所間の都心導入系統で年間を通して平均して過負荷に近い大電流が流れ、かつ冷却システムの稼働率が高い系統への超電導ケーブルの適用が考えられる。(図 1.2.1-4 参照)

③ 連系系統への適用例

都市部における 275 kV 超高圧変電所間の連系、特に防災トラフ内間接水冷システムが導入されている設備で冷却システムの稼働率が高い系統(冷却システムを稼働しないと要求される送電容量が確保出来ない系統)への適用が考えられる。また、275 kV 超高圧変電所間の連系用系統で超高圧線路が多回線布設され、他の系統からの熱の影響を直接受けるような線路で、他線路の影響が送電容量の制約となってしまう系統への適用も有効と考えられる。

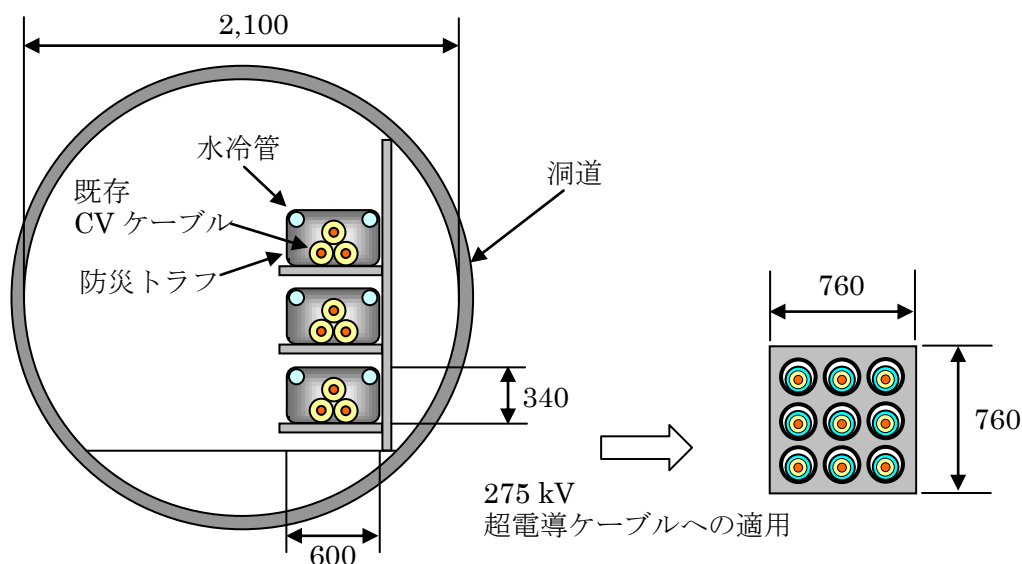


図 1.2.1-3 275 kV 現用ケーブルと超電導ケーブルの布設サイズ例の比較

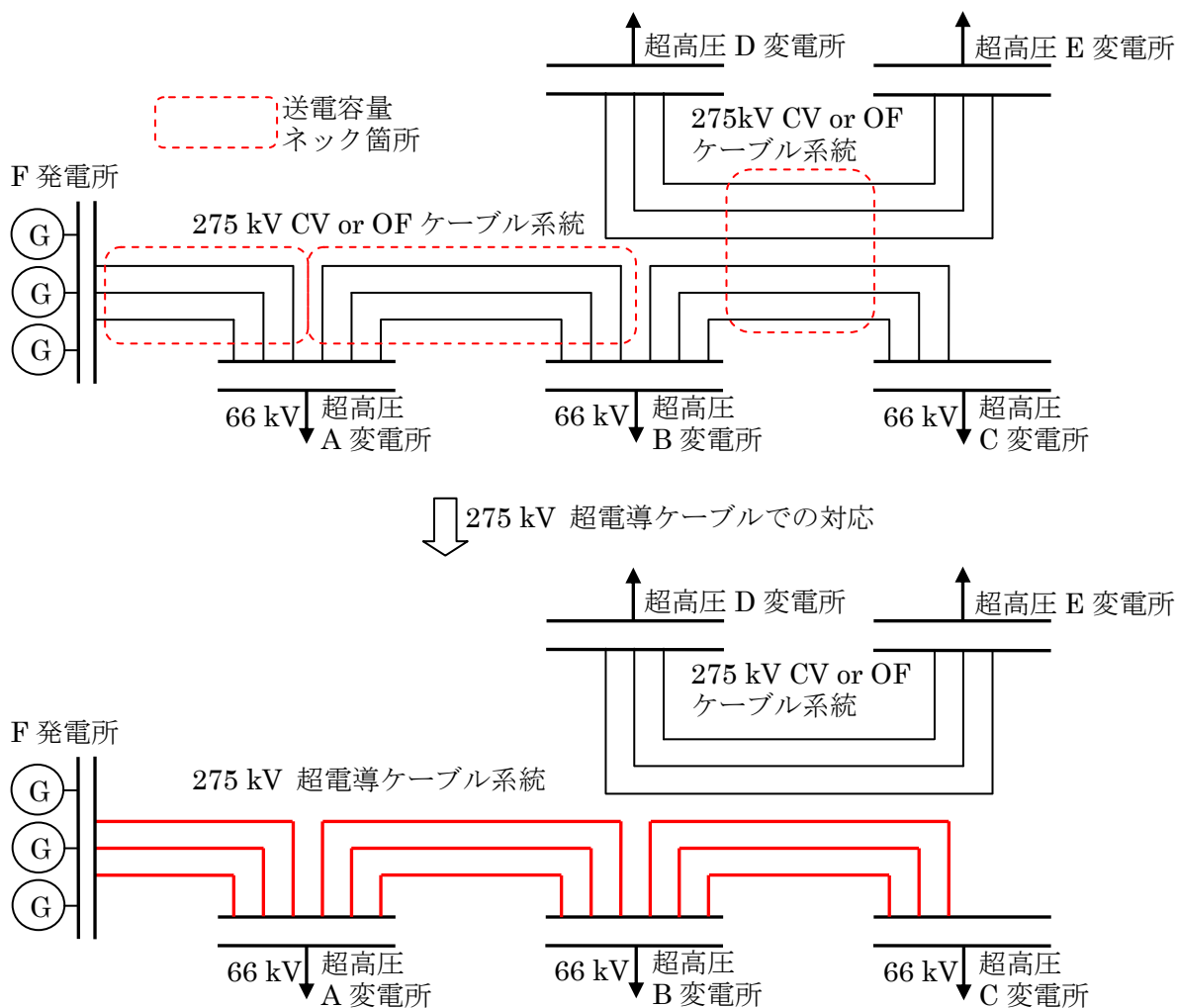


図 1.2.1-4 275 kV 系統(電源系統、都心導入系統)への超電導ケーブルの適用例

(4) 超電導ケーブル実用化までのシナリオ

本「Y系超電導電力機器技術開発」プロジェクトにおいては、2020年頃の超電導電力ケーブルの導入・普及に向けて、重要な要素技術開発、モデル機器開発およびシステム検証試験を実施することによってシステム検証を行う。一方、1.2.1項にて示した適用例のような実用化を目指すためには、こうしたシステム検証に加え、実系統などでの長期課通電による実証試験によって機器としての性能を確認するとともに、機器の信頼性、メンテナンス性などについて十分な検証が必要である。

この実証試験では、超電導電力ケーブルを電力の安定供給を支える電力設備としての性能を検証・確認するとともに、電力ケーブルシステムとしての信頼性、メンテナンス性、さらにはユーザーである電力会社が導入するためのコスト

ト検証を行う必要がある。具体的には、変電所構内などでの試験を考慮した 150 m 級のものから、地中線設備として変電所間を結ぶ最小長さを想定した中間接続部を有する 500 m 級電力ケーブルシステムでの長期間の課通電試験を実施する。

この実証試験においては、電力ケーブルを実際の設置環境を想定した布設工事を実施することによって、設置に対する性能の検証を行うことも重要であり、さらに布設した状態での初期冷却および冷媒による継続的な冷却運転、冷凍機の連続運転性能、実負荷での各種性能など様々な試験・計測を長期間実施する。これにより電力ケーブル設備のみならず、冷却システムなどの補機類のメンテナンスに関するデータを取得し、超電導電力ケーブルのトータルシステムとしての信頼性、メンテナンス性を確認・検証する。

このためにも、本プロジェクトでは、Y 系超電導線材を用いた超電導ケーブルシステムとしての技術開発を行い、モデル機器開発およびシステム検証によって、ケーブル設計技術を確立するとともに、実システムへの適用を考慮した低損失・大電流、大容量接続、高電圧絶縁、高電圧接続などの重要な要素となる技術開発とケーブル性能を検証するために必要な試験条件などを導く技術開発を行う。この結果は、プロジェクト後半のシステム検証試験を実施することによって、最終目標とする Y 系超電導線材を用いたケーブル設計技術と性能検証技術の確立を図ることで、次のステップへとつなげて行く。

また、本プロジェクトの開発成果について、他部門への波及効果としては、電力ケーブル以外に産業分野（工場・ビル内など）におけるケーブルや直流送電技術として、太陽光や風力発電など自然エネルギー用送電設備、データセンター用屋内配線、直流き電などへの応用が考えられる。

1.2.2 実用化の効果

(1) CO₂削減効果

超電導ケーブル導入による地球環境対策としての CO₂ 量削減の効果が期待できる。超電導ケーブル導入量(国内)をベースに CO₂ 削減量を計算すると、表 1.2.2-1&2 のように試算される。2030 年の省エネ効果は 279 GWh/年となり、CO₂ 削減効果は 95 千 t-CO₂/年になると推計した。公開データによると 2008 年度の 1 世帯あたりの電力消費量は、年間で約 3,460 kWh(出典：「原子力・エネルギー」図面集 2010)であることから、省エネ効果は、およそ 8 万世帯が 1 年間に消費する電力量が期待できる。

なお、この推定は国内の 66 kV 以上のケーブルへの適用を考えた場合であり、全世界的で考えれば、数十倍～数百倍の効果が期待できる。

表 1.2.2-1 予想される超電導ケーブルの導入量

	超電導ケーブル線路 (累積) (km 回線)
2020 年	190
2025 年	400
2030 年	650

表 1.2.2-2 予想される省エネ量・CO₂削減量

年	A	B	C		
	超電導化による 損失低減量 kW/km(Lf=1.0)	累積 導入 量 km	損失 率(Lf)	1年間の低減電力量 A×B×C(24×365) GWh/年	1年間の CO ₂ 削減量 千 t-CO ₂ /年
2020 年	70	190	0.7	82	28
2025 年	70	400	0.7	172	58
2030 年	70	650	0.7	279	95

(注)常電導ケーブルの損失量は 100 kW/km、超電導ケーブルの損失量は 30 kW/km@2020 年以降と考え、その差が表中 A の損失低減量にあたる。2020 年以降の CO₂ 排出原単位は、電気事業連合会による目標 0.34 kg-CO₂/kWh を適用した。なお、超電導ケーブルの実用化に伴う省エネ量、CO₂ 削減量については「高温超電導電力応用機器の市場調査研究報告書 (平成 19 年 2 月 ISTEK)」の試算結果を参照している。

(2) コストの削減効果

既存ケーブルでの系統構築から超電導ケーブルでの系統構築に移行することにより、既存ケーブル用の洞道新設が不要となるなど、大幅なコスト削減が期待される。

(非公開)

(非公開)

1.3 超電導変圧器の実用化の見通し

1.3.1 実用化の見通し

今後の電力需要や高経年変圧器などから、配電用変圧器の市場規模について検討した。配電用変圧器の市場は、「電力統計情報」(電気事業連合会)から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(2台設置)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年と仮定すると、変圧器の更新数は、約220台/年となる。また、「平成18年度供給計画の概要」(中央電力協議会)変電所増分容量の伸び率は0.5%であることから変圧器の新設は約40台/年となり、合せて約260台/年と想定される。その市場規模の想定を図1.3.1-1に示す。

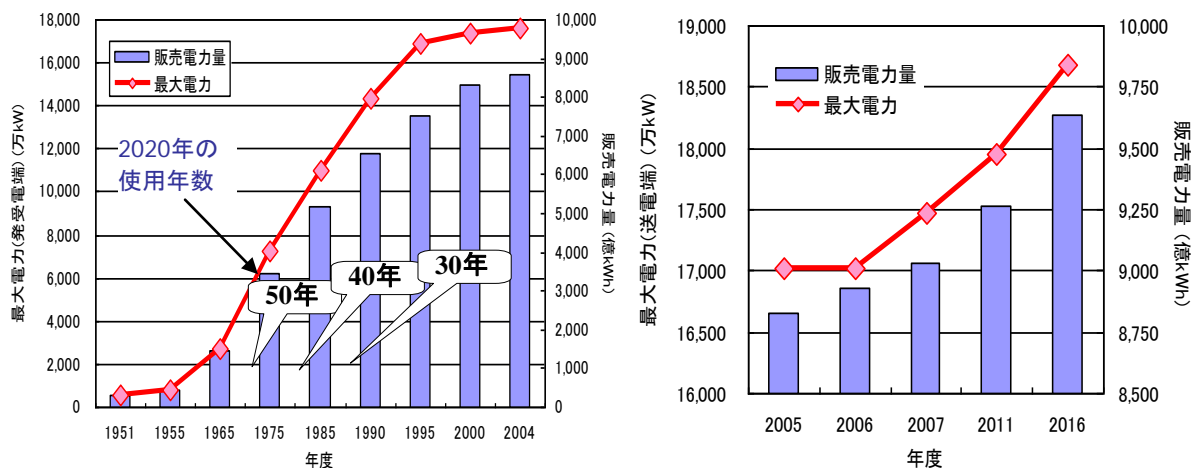


図 1.3.1-1 配電用変圧器の市場規模の想定

変圧器の技術の動向として、電気学会技術報告(第1023号、2005年)の「社会動向やニーズから見た配電用変圧器対応技術及び製品動向」を図1.3.1-2に示す。Y(YBCO)系超電導線材を変圧器に適用すると、その高電流密度や低損失特性から、巻線や鉄心の断面積を小さくでき、大幅な小型・軽量化が図れるとともに、冷媒は液体窒素であるため不燃となる(図1.3.1-2)。それらの特長から、超電導変圧器は、電力需要増に伴う変圧器増の対応、変電所の新設対応が有利であり、超電導ケーブルと共存(変電所容量増、限流機能)などの用途が考えられ、都心部を主とした変電所やビル等での早期実用化が期待されている(図1.3.1-4)。

小型・高効率化(冷却装置の削減)から地下式や屋内式変電所の容量増対応や保守面で有利となる。また、小型化(容量増)から、変電所(送電線含む)

の新設回避や繰延べに有利となる（図 1.3.1-5）。限流機能付変圧器では、限流器運用に加え、超電導ケーブル適用時の送電容量と短絡容量対策に貢献できる（図 1.3.1-6）。それらの用途を考慮した超電導変圧器の開発成果と実用化見通しを図 1.3.1-7 に示す。

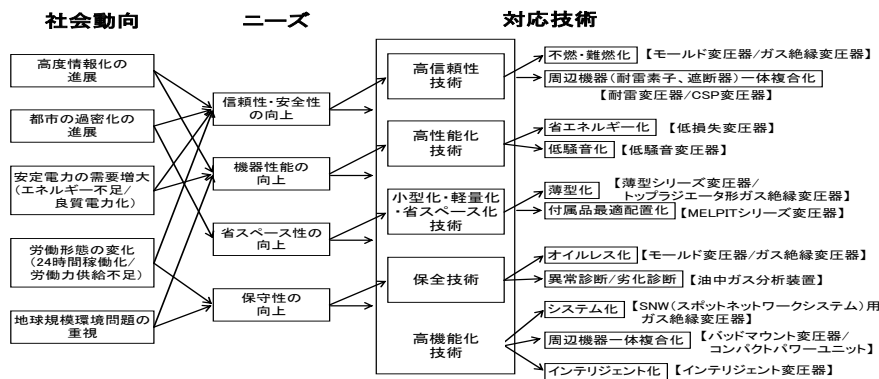


図 1.3.1-2 社会動向から見た配電用変圧器対応技術及び製品動向
 (出典：電気学会技術報告第 1023 号 2005 年 6 月)

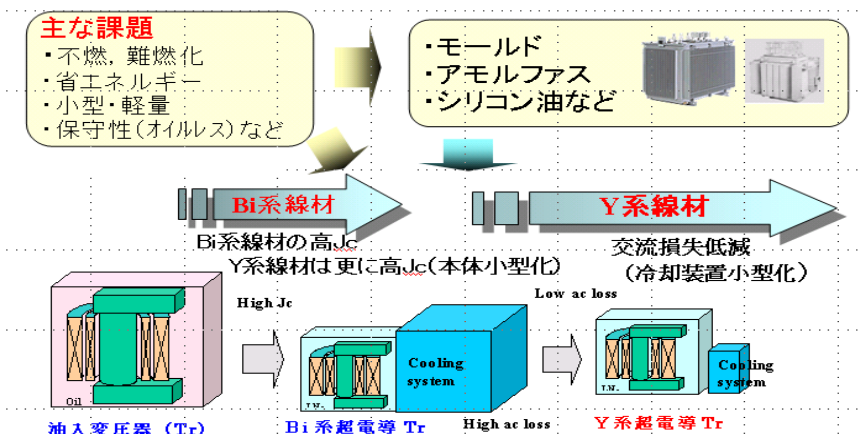


図 1.3.1-3 Y系変圧器の特長（Y系線材の低損失化により冷却装置の小型化が図れる）

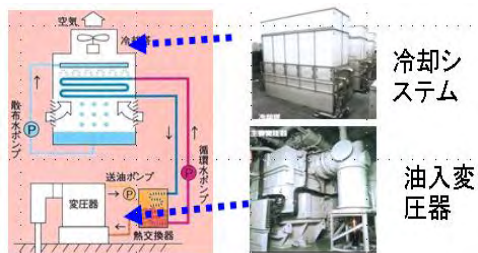


図 1.3.1-4 地下式変電所の既存変圧器例

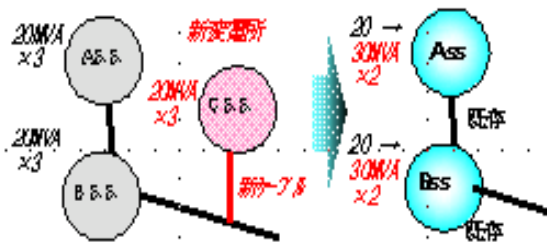
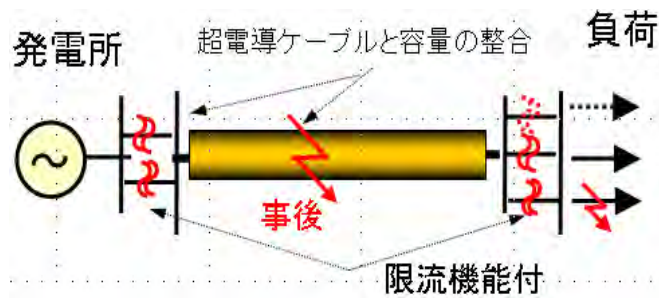


図 1.3.1-5 変電所（送電線含む）の新設回避や繰延べに有利な例



1.3.1-6 超電導限流機能変圧器の効果(同変圧器は限流器運用に加え、超電導ケーブル適用時の送電容量と短絡容量対策にも有効)

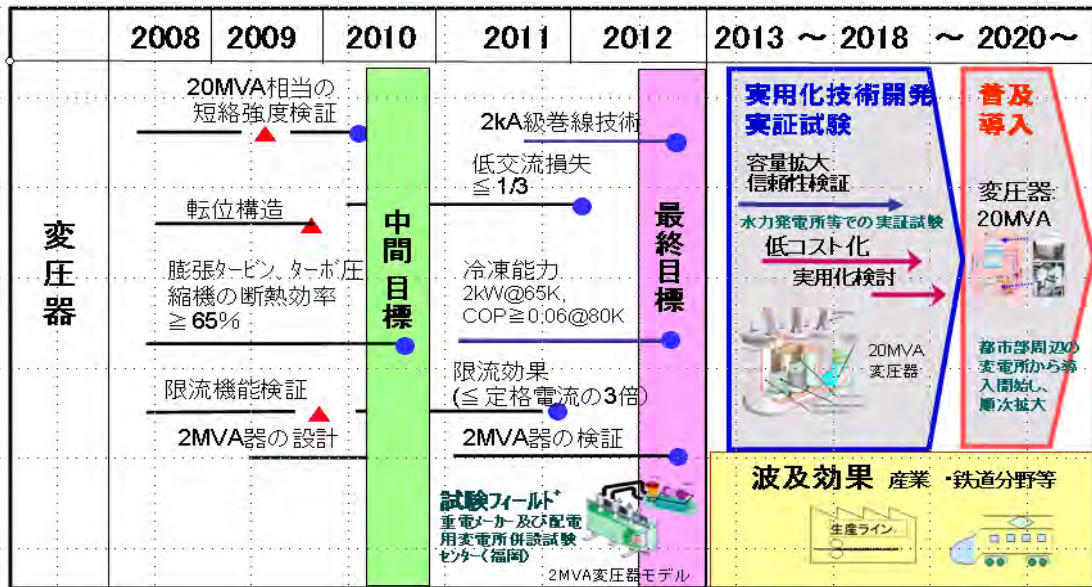


図 1.3.1-7 超電導変圧器の開発成果と実用化の見通し

1.3.2 実用化の効果

(1) CO₂削減効果

省エネルギー量は、既存変圧器と高温超電導変圧器との損失量の差から求め、それに CO₂ 排出係数を乗じて CO₂ 削減量を求めた。

具体的には、省エネ量は油入変圧器と Y 系変圧器のそれぞれの効率 (99.4 %、99.85 %)、設備利用率 (50 %)、超電導変圧器の予想普及台数から試算した。なお、変圧器の予想普及台数は、電事連の電力統計情報 (2004 年版) をベースに「超電導分野技術戦略マップ」(第 4 回同左策定委員会) による伸び率を用いて算定し、CO₂ 排出係数は、電気事業連合会による排出原単位目標及び資源エネルギー庁の見解に基づき、2020 年 0.34 (kg-CO₂/kWh) を適用した。ケース 1 は 66 kV 以上 77 kV 以下のみを対象、ケース 2 はケース 1 + 110 kV 以上 275 kV 以下を対象として試算した。それらの超電導変圧器による CO₂ 削減効果を表

1.3.2-1 に示す。本試算によると、2030 年までの CO₂削減量は約 37～52 万 t/年となる。

表 1.3.2-1 超電導変圧器による CO₂ 削減効果

	2020 年	2030 年	2040 年	2030 年
ケース 1 (kt/年)	93.5	373.9	654.4	934.8
ケース 2 (kt/年)	93.5	523.0	1286.9	2041.7

(2) 超電導変圧器の経済性

超電導変圧器の経済性の評価として、その設備費である初期コストと運転・保守時の損失などの運用コストとを合せた総合コストを算定し、油入変圧器と比較した。初期コストは、開発予定の Y 系線材技術、冷却装置技術を基に Y 系変圧器のコストを算定した。主な諸元は次のとおりである。

(非公開)

(非公開)

(3) 超電導変圧器の波及効果

超電導変圧器は、超電導ケーブルや限流器と複合して適用することにより、将来的に増大するリプレース需要や大容量電力輸送に貢献するとともに、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る。また、超電導機器の適用により、電力系統運用への貢献や、低炭素化及び経済性等での貢献も期待される。

一方、変圧器は、電力用はもとより、産業用や輸送用など、殆どの電力機器へ、系統電圧の返還や侵入雷の絶縁対策等から適用されている。図 1.3.2-2 に 超電導変圧器の各種設備への適用例を、図 1.3.2-3 に超電導変圧器の各種設備展開への適用技術の相関を示す。これらの超電導変圧器は、用途により設備利用率超電導化により、小型、高効率及び不燃などの高性能化への貢献及び低炭素社会への貢献が期待される。

超電導変圧器の冷却システムについても、電力用に加え産業用や科学分野でも貢献できると考えられる。図 1.3.2-4 に 超電導変圧器用冷却システム技術の適用拡大例を、図 1.3.2-5 に既存の石油ガス・希ガスの極低温蒸留分離装置およびスペースチャンバーコールドパネル冷媒供給装置を示す。冷却システムを含

め超電導変圧器の周辺技術の適用拡大も期待される。

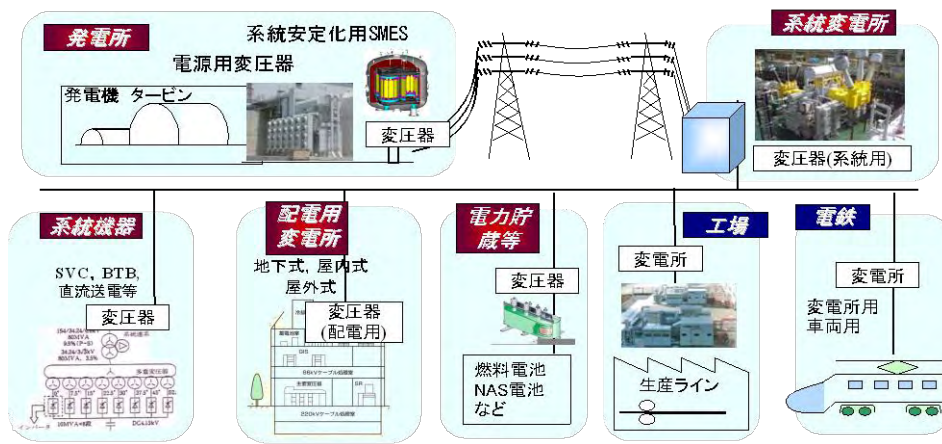


図 1.3.2-2 超電導変圧器の各種設備への適用例

分野	2005	2010	2015	2020
電力分野	・配電用変圧器 (再生可能エネルギー用) ・系統用変圧器 ・限流機能変圧器	巻線、冷却等の要素技術開発 2MVA変圧器システム開発	容量拡大、低コスト化 信頼性検証	段階的に 高電圧化、大容量化 信頼性検証、低コスト化 実用化
産業分野	・工場・ビル等用の 変圧器		容量拡大、低コスト化 信頼性検証、実用化検討	小規模から 実用化
輸送分野	・車載用、船用の変 圧器		耐振動対策、低コスト化 信頼性検証、実用化検討	小規模から 実用化

図 1.3.2-3 超電導変圧器の各種設備展開への適用技術の相関

分野	2005	2010	2015	2020
電力分野	・配電用変圧器 ・系統用変圧器 ・超電導ケーブル等	冷却の要素技術、2MVA変圧器	容量拡大、低コスト化、信頼性	段階的に 大容量化 実用化
産業分野	石油ガス・希ガスの 極低温蒸留分離		大容量化、低コスト化、高効率化 信頼性検証、蒸留プロセスとの融合	小規模から 実用化
科学分野	スペースシャトル コールドパネル		大容量化、低コスト化 信頼性検証、低温度化	実用化

図 1.3.2-4 超電導変圧器用冷却システム技術の適用拡大例



図 1.3.2-5 石油ガス・希ガスの極低温蒸留分離装置およびスペースチャンバーコールドパネル冷媒供給

1.4 超電導電力機器用線材の実用化の見通し

超電導電力機器用線材の技術開発を中心的に実施している(財)国際超電導産業技術研究センター (ISTEC) は、自ら研究員及び研究設備・資機材を保有しており、過去 20 年以上に亘り超電導の研究開発にあたり、単独あるいは共同研究体を組織し、広い範囲にわたり多くの成果を挙げている。それぞれの共同研究体においては、研究の遂行のみでなく、研究体の中枢として研究方針・内容などの策定を行い、自身の成果を挙げるのみではなく、マネジメント機能も発揮し、共同研究体としての成果も出している。本テーマである Y 系超電導線材の開発に関しては、全てのテーマに関して中間目標として設定されている実証試験時に必要とされる線材レベル達成に主体的に取り組み、世界最高水準の成果を挙げている。ここでは、低コスト化や経時・経年変化の把握と対策等の線材作製プロセスの基本重要技術の開発はもとより、機器応用に必要な磁場特性向上や特性均一化と細線化、フィラメント化の複合化による低交流損失線材開発及び高強度で高 J_c 線材の開発などの開発中の各電力機器から求められる個別仕様を満足する線材の開発を精力的に遂行してきている。

今後は、当財団が公益法人であることから、自らが実用化・事業化主体にはなれないものの、エンドユーザをはじめとする多くの会員企業との連携により実用化・事業化に繋げていきたいと考えている。具体的には、導入・普及時に必要な仕様を満足させる線材作製プロセス開発を推し進め、上記の技術を含めて核となるプロセス技術を線材メーカーへ移管することで実用化に貢献する。また、一方で、エンドユーザを含めた委員会等を組織し運営することや、学会等を通じた普及啓蒙活動を通して、超電導市場の開拓、拡大に努める考えである。その際、機器を含めた分析・評価等の活動を通し上記活動を加速させることにより実用化を促進させたいと考えている。

Y 系超電導線材の実用化・事業化を担うことになる線材メーカーの実用化見通しは以下の通りである。

住友電気工業(株)は、クラッド型結晶粒配向金属基板上の PLD 成膜線材において、高 J_c 開発と安定製造技術開発により低コスト量産技術を確立して市場への販売を開始し、高温超電導線材をニーズに応じて提供していく意向である。応用展開については、高機能低コスト Y 系長尺超電導線材の段階的開発状況に応じて、ケーブル開発や超電導モータ等の応用開拓や実証にも注力していきたいとしている。超電導技術の進展には線材の開発と並行して応用の開発を進めることが重要との視点に立って、これまで積極的に、主として Bi 系超電導線材ではあるが、線材応用のプロジェクトに参画してきている。超電導ケーブルのデモンストレーションでは主要なものとして(株)東京電力との共同研究の電力

中央研究所横須賀研究所のフィールドで実施した 100 m ケーブル実証プロジェクト(66 kV、1000 A)、米国 DOE、NYSERDA のスポンサーシップにより NY 州 Albany 市において 7000 時間に亘って 7 万所帯に電力を供給した 350 m ケーブル実線路(一部 30m は Y 系超電導ケーブル)デモンストレーション(34.5 kV、800 A)、韓国電力・電力研究院(KEPRI)に納入した 100 m ケーブルのデモンストレーション(22.9 kV、1250 A)があげられる。いずれのデモンストレーションも成功裡に終了し、超電導ケーブルシステムの製作技術、布設技術、運転技術が実用レベルに至っていることを実証してきた。また、船用超電導モータ、超電導自動車用モータ、MRI 用マグネットなど多岐に亘る超電導応用プロジェクトを進めている。なお、現在開発が進められている超電導ケーブルプロジェクトのうち、1 件は住友電気工業(株)が(株)東京電力と共同で実施中の NEDO プロジェクト高温超電導実証ケーブルプロジェクトである。これは横浜の旭変電所構内に約 300 m 長のケーブル(66 kV、3 kA)を布設して実負荷試験を行なうものであり、2011 年に運開の予定である。住友電気工業(株)としては、超電導線材のリーディングカンパニーとして、多様なユーザニーズ、応用ニーズに対する品ぞろえを用意することが必要と考えている。高い特性と低コストのポテンシャルを秘めた Y 系超電導線材について、高機能低コスト長尺線材の安定製造技術の確立を行いたいと考えている。低磁性高強度の特性を有すクラッド型結晶粒配向金属基板線材により、高 I_c 線材開発と安定製造技術開発により大電流ケーブル実証を行う。中長期的には、低コスト量産技術を確立して市場への販売を開始し、高温超電導線材をニーズに応じて提供できるメーカーの位置を構築していきたいとのことである。

古河電気工業(株)では、本委託業務成果と古河電気工業(株)が保有する超電導線材加工、電力ケーブル製造等の量産化技術を融合し、製造技術を高めるとともに量産体制を確立し、市場の需要に対応していきたいと考えている。市場としては、高温超電導線材の現在「Y系電力機器開発プロジェクト」で行われている SMES、電力ケーブル、超電導変圧器等の電力機器応用に加え、さらには発電機、モータなどへの応用も考えられ、大幅な省エネルギー化が期待されている。また、エネルギー・環境問題への切札的技術とも言われ、幅広い応用が期待されているのも追い風である。その市場については、全世界的に 2015 年以降、本格的に市場が立ち上がり、2020 年以降、大きなビジネスになるものと考えている。そこで、その市場の需要にあわせて、古河電気工業(株)としては、現在のプロジェクト終了の数年後から本委託業務成果と古河電気工業(株)が保有する製造技術を高め、高温超電導線材の長尺製造技術、コスト低減化技術のさらなる進展を図りながら、量産体制を確立していきたいと考えている。同時に、品質保証体制を構築し、市場の需要に対応していきたいと考えている。

超電導電力ケーブル用線材の事業化については、以下のように考えている。国内では、2020年からの超高圧OFケーブル、POFケーブルの寿命引き換えタイミングで、その一部の置き換えから始まると考えられる超電導電力ケーブルに、そのタイミングに対応して、電力ケーブル用線材の開発・製造を行っていきたいと考えている。また、海外においては国内より市場も大きく、ケーブル・線材で進出を図りたいと考えている。さらに、SMES等の各種機器応用に向けた超電導線材の外販を進めていく予定であり、プロジェクトの成果である超電導線材の高磁界、高強度化技術および安定製造技術をさらに応用して、より優れた超電導マグネット用線材を供給したいと考えている。また、古河電気工業(株)では金属系超電導線材の事業を行っており、そのノウハウを活用しながら、金属系超電導線材と高温超電導線材の両方が供給可能な総合線材メーカーとして、市場へのアクセスを図り、需用の拡大を図っていく。

Y系超電導線材の実用化・事業化へは①長尺かつ低コスト線材製造技術確立②種々の機器への応用・実証の段階を経て、市場を睨みながら、2015年頃には数百 km/年、2020年頃には数千 km/年の生産能力をもち、世界へ供給したいと考えている。

(株)フジクラでは、Y系超電導線材作製のキーテクノロジーといえる結晶粒配向中間層作製技術であるIBAD法を開発し、その後、長尺線材化・高性能化・低コスト化の可能性を鑑み、IBAD/PLD法を選択し、研究開発を進めてきた。「超電導応用基盤技術研究開発(第Ⅱ期)」プロジェクトが始まった平成15年においては、まだ数十 m、 I_c 値で数十 A/cm-w(@77 K,s.f.)の線材がようやくできたころであった。平成19年度末のプロジェクト終了時において I_c 値で 350 A/cm-w(@77 K,s.f.)、502 m を得るに至った。この時点においては、まだ 300 A を超える特性の超電導線材は年間数本しか製作することができなかったが、現プロジェクトにおいて、歩留り改善、長さ方向の均質性改善に取り組んだ結果、100~300 m 長の超電導線材に対して 70%を超える歩留りで製造できる目処が立つようになった。さらに長さ方向の臨界電流分布では H19 年においては 20~30%程度あったが、標準偏差で 3%以下に出来る見通しも得られるようになった。既に平成 20 年にはプロジェクトで活用した超電導線製造装置の一部について購入を行い、事業化のための足がかりとして平成 21 年度より超電導線材の販売も開始し、Y系超電導線材の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、機器試作、モデル機器等に進展することで超電導機器への活用が拡大していくものと考えている。提供価格は未だ「超電導応用基盤技術研究開発(第Ⅱ期)」プロジェクトでの技術コストである 12 円/Am を大きく上回っているが、今後、さらなる特性改善、超電導原料等の作製コスト削減等によりコスト低減にも注力し、より安価な超電導線材の供給ができるよう努力を継

続いていくとともに、事業規模のさらなる拡大を目指している。

現時点において超電導プロジェクトで実施している電力機器以外の実用化を目指した国のプロジェクトや民間のプロジェクトに対して線材の販売や共同研究形態による実用化のための機器開発に関与している。国のプロジェクトでは科学技術振興機構(JST)が推進しているイノベーション創出事業 (S-イノベ) における機器開発用の Y 系超電導線材の販売を始めた。S-イノベでは超電導機器として 5 つの課題について推進されているが、このうちいくつかのテーマについては超電導線材の販売や引き合いを頂いている。また東北大学での高磁場マグネットに Y 系超電導線材を適用するための検討に参画している。さらに、これ以外に自らの資金により超電導機器を開発する内外の企業等にも超電導線の販売や共同研究として実施している。これらにより Y 系超電導機器の早期実現・実証を行い、Y 系超電導機器の実用化および超電導事業の確立を目指している。

昭和電線ケーブルシステム(株)においては、線材開発で先行する Bi 系超電導線材による機器検証を進めながら市場の掘り起こしが行われ、Y 系超電導線材に転換することによって機器の性能向上を推進しながら実用化が進んでいくと考えている。置き換えの対象となる応用機器は、医療・分析機器の分野では MRI や NMR、産業・輸送・電力の分野では単結晶引上げ装置、リニアモーターカー、大型モータ、電力ケーブル、車載用を含めた変圧器等が見込まれるとしている。このうち、電力ケーブルや変圧器などは次世代送電網の発展とともに実用化が図られ、特に海外を中心とした市場が形成されると考えている。中国、韓国においてもケーブルを中心としたプロジェクトが複数立ち上がっており、中国は国内で使用するケーブルシステムとして、韓国としては輸出用システムとして開発が始まっている。また、これまで超長距離送電でなければコストメリットが出ないと言われてきた直流送電についても、近年直流給電に対する取り組みがデータセンター、構内配電の分野で活発化し、流れが変わって来ている。昭和電線ケーブルシステム(株)では、ケーブルリングを担当する他社との協業を念頭に、安価な MOD 法による Y 系超電導線材の供給会社としての事業を行うことを考えている。また、直流ケーブルへの電流供給を行うための端末の開発もすでに自社開発を開始しており、こちらの方でも市場参入を図っていく方針である。送電ケーブルの展開に関しては、国内で Y 系超電導線材を使用したシステム構築を行い、海外で実証試験・導入といった展開が最も好ましく、本プロジェクトにおいて線材供給でケーブル用線材に必要な技術課題を克服し、プロジェクト終了後に事業を開始できるような状態を整えておきたいと考えている。また、市場展開に必要な特許問題に関しては、米国特許の調査を終了しており、現在は中国国内の特許調査を実施しているところである。中国での超電導開発

や市場性についても随時調査を行っていく予定である。加えて、昭和電線ケーブルシステム(株)は超電導電流リードを超電導線材の実用化に向けたキーパーツとして捉えている。超電導電流リードはあらゆる超電導応用機器に少なくとも1対使用される部品であり、超電導機器ビジネスの拡大とともに電流リードビジネスも拡大する。過去15年に亘りBi系酸化物超電導電流リードを製造・販売してきた実績がある。しかし、Bi系酸化物超電導焼結体を用いてきたため、加速器や核融合炉用に使用する大容量タイプの電流リードの作製は難しかった。これに対し、Y系超電導線材を使用した電流リードでは、線材の本数を調節することにより所望の通電容量を実現することが可能となり、通電容量に対し大きな自由度を持つ。また~20 Tの高磁場中で使用する機器の電流リードでは外部磁場の影響を無視することができ、外部磁場に起因する特性低下を見込んだ容量設計が不要となることなどそのメリットは大きい。磁場特性に優れるY系超電導線材を使用することにより、これまでできなかった高磁場用機器及び大型機器向け大容量電流リードの製品化が可能となり、市場の拡大を目指すことができる。

さらに、平成21年4月22日に鉱工業技術研究組合法を技術研究組合法に改正する法案が可決・成立し、新たな研究開発パートナーシップ制度(技術研究組合制度)が創設され、研究開発から事業化まで一貫して行い、研究成果をビジネスにつなげることが容易・可能となった。この制度を積極的に活用し、(株)フジクラ、昭和電線ケーブルシステム(株)、及び(財)国際超電導産業技術研究センターは、産業用超電導線材・機器技術研究組合(ISTERA)を、平成21年9月24日に設立し、超電導技術を利用した次世代の産業用機器及び当該機器に用いる線材の研究開発を実施し、一般超電導機器の実用化・事業化を目指して、関連技術を保有する線材メーカーと研究機関が協同し、機器の要素技術及び線材作製技術の開発を進めている。超電導技術を巡る我が国の国際競争力の強化とともに、高性能MR I・医療用加速器、リニアモーターカー、高効率産業用モーター等の実現を通じ新市場の創出を目指している。

以上の通り、本「Y系超電導電力機器技術開発」プロジェクトを最先端の技術・人的資産・設備・ノウハウを備えた上述の機関の参画により遂行することで超電導電力機器の実用化展開が大いに見込まれるものである。

2. 今後の展開

2.1 プロジェクト研究開発実施体制の見直し

本事業を効率的に遂行して超電導電力機器の実用化を図るには、線材安定製造技術や変圧器および SMES 要素技術の開発、機器設計の検討が終了した段階で、機器製作の設備や技能を有する重電メーカーの積極的参画が必要である。そのため、前期 3 ヶ年で要素技術に関する実績や特許を有する電力会社、大学、および国際超電導産業技術研究センター (ISTEC) による機器要素技術や線材メーカーによる線材供給技術を確立するとともに、重電メーカーは後期 2 ヶ年に本事業への参画を検討し、実施する予定である。但し、重電メーカーは技術開発状況を把握するため、委員会には前期から参加してきた。

超電導電力機器用線材の実用化に向けては、それぞれの機器開発時期に対応した性能・コストを含めた仕様及び量を満たした線材の十分な供給体制が整えられている必要がある。本プロジェクト終了後の「実用化技術開発」及び「導入・普及」時期には、それぞれの機器に適した高性能仕様の線材が必要になる。本事業中の「超電導機器用線材の技術開発」では、前期 3 ヶ年（平成 20 年度～平成 22 年度）において、「実用化技術開発」に必要な線材を作製する技術を開発し、後期 2 ヶ年（平成 23 年度～平成 24 年度）においてこれを線材メーカーで安定的に製造できる技術として確立することで本事業終了後の長期信頼性試験等の「実用化技術開発」に必要な線材を提供可能な体制構築を目指している。これと並行し、後期 2 ヶ年（平成 23 年度～平成 24 年度）では、2020 年頃の「導入・普及」時期に必要な線材仕様を満たす線材の製造技術を開発する。このレベルの線材の安定製造、量産技術開発に関しては、上述の「実用化技術開発」時期に並行して線材メーカーが行い、必要時期となる 2020 年頃までには供給体制を構築することで線材の事業化及び機器の事業化につなげる事になる。なお、本プロジェクトで開発を進めている電力機器（SMES、ケーブル、変圧器）の実用化、普及・導入へのシナリオ・スケジュールを、図 IV.2.1-1 に示す。

2008			2012			2020								
20	21	22	中間目標		23	24	最終目標							
イットリウム系超電導電力機器技術開発プロジェクト														
SMES			<ul style="list-style-type: none"> SMESコイル構成技術 フー応力600MPa、電流2kA以上 コイル伝導冷却技術 20~40K領域、電気絶縁2kV以上 2GJ級SMESコイル 基本システム最適化 		 <ul style="list-style-type: none"> ○ MJ級SMES動作検証 20K伝導冷却コイルにおける 2万回以上の繰返し充放電 試験フィールド：中部電力東政変電所 併設超電導試験センター（名古屋） 		実用化技術開発 (実証試験) SMES：～MW級 性能・コスト等の 総合評価 競合技術との比較検討 ↓ 系統対策必要箇所検討 実証試験 ケーブル：150～500m  <ul style="list-style-type: none"> ○66kVケーブル B1実証内のように変電所 箱内等での実証試験 ○275kVケーブル 地変電所等の構内での 実証試験 変圧器：20MVA  水力発電所等での 実証試験		普及 導入 SMES： MW級以上 実証試験結果を 踏まえ、分散電源 大量導入時等の 系統対策必要箇 所に導入を検討 ケーブル：10km ○66kVケーブル 都市部連系系統 既存ケーブルの増強 ○275kVケーブル 都市導入部系統 老朽化ケーブルの リプレイス 変圧器： 20MVA 都市部周辺の変電 所から導入開始し、 順次拡大					
			<ul style="list-style-type: none"> ○大電流ケーブル ケーブル損失(交流損) 2W/m-相@5kA 短絡試験：31.5kA-2s 5kA連続通電 ○高電圧ケーブル ケーブル損失 (交流損・誘電損) 0.8W/m-相@3kA 短絡試験：63kA-0.6s 275kV連続通電 								 <ul style="list-style-type: none"> ○大電流ケーブル 66kVケーブルシステム製作・試験 試験フィールド：住友電工(鶴取) 66kV/三心一括/5kA, 15m ケーブル損失：2.1W/m-相@5kA 内径150mmφ 管路内布設 ○高電圧ケーブル 275kVケーブルシステム製作・試験 試験フィールド：徳島システム(市原) 275kV/単心/3kA, 30m ケーブル損失：0.8W/m-相@3kA ケーブル外径：150mmφ以下 			
			<ul style="list-style-type: none"> 20MVA相当の短絡強度検証 膨張タービン、ターボ圧縮機 の断熱効率≧65% 変圧器モデルで限流機能を検証 2MVA級変圧器モデルの設計 実用化技術開発用線材作製 技術の開発 								 <ul style="list-style-type: none"> ○2MVA級変圧器 2kA級巻線技術 低交流損失≦1/3 限流効果(≦定格電流の3倍) 冷凍能力 2kW@65K, COP≧0.06@80K 試験フィールド：重電メカ及び 配電用変電所併設試験センター(福岡) 			

図 IV.2.1-1 実用化、普及・導入へのシナリオ・スケジュール

2.2 超電導線材・機器の実用化への展開

(1) 「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)との連携強化

本プロジェクト「Y系超電導電力機器技術開発プロジェクト」とともにビスマス系(Bi)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)(Biケーブル実証プロジェクト)が進行している。

Biケーブル実証プロジェクトにおいては、ケーブル化技術で実績のあるBiケーブルの開発成果などを踏まえ、高温超電導ケーブルや冷却技術などを統合する高温超電導ケーブルシステムを構築し、ケーブル単体のみならず、線路設計、運転、保守を含めたトータルシステムの信頼性を実証するために実系統に連系した実証試験を実施することとしている。これによって超電導ケーブルのトータルシステムとしての総合的な信頼性を実証するとともに、革新的な高効率送電技術の開発・検証を行っている。

一方、本プロジェクトにおいては、Y系超電導線材が優れた特長を有する一方、線材の長さや供給量がBiに及ばないため、Y系超電導線材の特長を生かした大電流化や低損失化を目指した高性能な短尺ケーブル(15m、30m)の技術

開発を行っている。さらに、大学との共同研究によってケーブル設計の基本となる大電流化した際の交流損失低減、過電流通電時の熱挙動、液体窒素温度領域での電気絶縁現象について基礎的な研究を行っている。

Bi ケーブル実証プロジェクトでは、冷却を含めたシステム化や、運転、保守を含めたトータルシステムの信頼性について、今後の Y 系超電導ケーブルの開発に非常に役立つ内容が含まれているため、Bi ケーブル実証プロジェクトの成果を参考にする必要はある。さらに、両プロジェクトには、ケーブル試験や機器の標準化といった点で共通した検討を行い、効率的に研究を進める必要がある。

こうした観点から、両プロジェクトは強い連携関係を持って、今後の開発を進めている。

(2) 希少金属使用量削減プロジェクトとの連携強化

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)では、IBAD/PLD、IBAD/TFA-MOD 法により 300 A/cm-w(@77 K、自己磁場)の特性を有し、1km 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。本プロジェクトにおける「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、将来、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り、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で謳われている「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。」が可能になる。更には、この高性能長尺線材の供給体制の構築は、より広い応用展開が期待できることになり、同じアクションプランで記されている、「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。」を実現させることが可能となる。このスマートグリッド関連技術は世界的に強く求められている技術であり、国内に留まることなく戦略的に米国、欧州を始めとする海外への技術展開が期待できることになると考えられる。

2.3 標準化事業の今後の積極的展開

超電導分野の国際標準化活動は、これまでは基盤的規格である超電導材料の試験方法規格を我が国が提案し成立させてきたが、今後は、超電導関連産業競争力、超電導関連市場創成拡大の観点から、製品規格の標準化を目指すことに

シフトしていく必要がある。

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、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を形成し、この分野の国際標準活動に対して、今後も主導的役割を果たしていくことが重要である。

今後は、超電導関連産業競争力、超電導関連市場創成拡大の観点から、本プロジェクトで得られた成果を基に高温超電導技術に関連した製品規格の標準化を目指すことにシフトしていく。また、超電導デバイス分野についても研究開発と標準化とを一体的に推進していくとともに、超電導エレクトロニクス素子等に関して国際標準化を目指して調査研究を継続していく。

(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.
 - 4. エネルギーイノベーションプログラム
 - ① 総合エネルギー効率の向上
 - ④ 原子力等利用の推進とその前提となる安全の確保
- イノベーションプログラム俯瞰図……………添付資料 3.
 - 4. エネルギーイノベーションプログラム
 - (2) 省エネルギー
 - (3) 原子力・電力
- プロジェクト基本計画……………添付資料 4.
- 技術戦略マップ……………添付資料 5.
 - (分野別技術ロードマップ)
- 事前評価関連資料
 - 事前評価書……………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.

イノベーションプログラム 基本計画

平成20年5月16日
経済産業省

経済産業省

平成20・03・27産局第1号
平成20年4月1日

経済産業省産業技術環境局長



経済産業省商務情報政策局長



ITイノベーションプログラム基本計画の制定について

上記の件について、イノベーションプログラム実施要領（平成16・07・27産局第1号）第4条第1項の規定に基づき、別添のとおり制定する。

(別 添)

平成20・03・27産局第1号

平成20年4月1日

ITイノベーションプログラム基本計画

1. 目的

我が国が目指す高度情報通信ネットワーク社会の構築に向け、経済成長戦略大綱、IT新改革戦略、科学技術基本計画及び技術戦略マップ等に基づき、情報化の進展に伴うエネルギー消費量の増大等の課題にも考慮しつつ、その基盤となる情報通信機器・デバイス等の情報通信技術を開発し、実社会への利用を促進する。また、情報システム・ソフトウェアについて品質、信頼性及び生産性の向上を推進し、組込みソフトウェア産業強化、オープンソースソフトウェアを安心して活用するための環境整備、独創的な人材の発掘等、我が国産業競争力強化のための必要な基盤整備を実施することによって、ITの利活用の深化・拡大を図り、より豊かな国民生活を実現するとともに、我が国の経済活力の向上を図ることを目的とする。

2. 政策的位置付け

「経済成長戦略大綱」(2006年7月財政・経済一体改革会議。2007年6月改訂、経済財政諮問会議報告)

IT革新による競争力強化、IT革新を支える産業・基盤の強化に必要な研究開発の推進に対応

「第3期科学技術基本計画」(2006年3月閣議決定)

国家的・社会的課題に対応した研究開発の重点推進4分野である情報通信分野、分野別推進戦略(2006年3月総合科学技術会議)における重点分野である情報通信分野に位置づけられるもの。

「IT新改革戦略」(2006年1月高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部)
次世代のIT社会の基盤となる研究開発の推進等に対応。

3. 達成目標

(1) 情報経済社会を形成する上で必要不可欠な基盤技術である情報通信機器・デバイス等に関しては、「革新的な技術の確立」と「その開発成果の普及促進」を図る。

【目標】

- ・情報通信機器・デバイス産業の付加価値額を、2020年度において、2007年度比で、約50%増加させる。
- ・半導体の微細化に係る革新的基盤技術の開発(テクノロジーノード45nm以細)
- ・情報家電の音声認識のタスク率(95%以上の達成)
- ・革新的な大型ディスプレイ技術の開発(消費電力を現状機器と比較して約50%以下)
- ・革新的なネットワーク機器技術の開発(消費電力を現状機器と比較して60%以下)

- (2) 経済社会システムの信頼性確保に大きく寄与する情報システム・ソフトウェアに関しては、品質、信頼性及び生産性の向上や産学官の開発リソースの連携強化により、「人材育成」と「ソフトウェア工学の開発」等を積極的に推進する。

【目標】

- ・情報サービス・ソフトウェア産業の付加価値額を、2015年度において、2004年度比で、約25%増加させる。
- ・組み込みシステム等の不具合発生率(2011年度までに2006年度比50%減)

4. 研究開発内容

[プロジェクト]

- ・ITコア技術の革新

[i] 世界最先端デバイスの先導開発

- (1) 次世代半導体材料・プロセス基盤プロジェクト(MIRAI)(運営費交付金)

概要

テクノロジーノード45nm以細のデバイスの実現に必要な極限微細化技術や、新構造CMOSの研究開発などの既存技術のブレークスルーが期待される先端的基盤技術研究を行う。また、国際半導体ロードマップにおいてエマージングテクノロジーと呼ばれる萌芽的な先端基盤技術の開発に取り組み、技術の見極め・絞り込みを行う。

技術目標及び達成時期

2010年度までに半導体の微細化に関してテクノロジーノード45nm以細のデバイス実現に必要な革新的基盤技術を、産業界において自ら実用化に向けた展開を図る際の判断ができる水準まで技術開発を行い、技術選択肢として提示する。

研究開発期間

2001年度～2010年度

- (2) 次世代低消費電力半導体基盤技術開発(MIRAI)(運営費交付金)(再掲)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、IT化の進展、IT利活用の高度化を支え、あらゆる機器に組み込まれている半導体の低消費電力化を図るため、テクノロジーノード(微細化レベル)45nm以細の次世代低消費電力半導体の実現を目指し、微細加工の基盤技術やマスク(半導体素子製造過程で用いる原板)の低コスト化・製造時間短縮に必要な基盤技術開発を行う。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、マスク設計・描画・検査の各工程に共通的なマスクデータ処理技術、繰り返しパターンやパターン重要度を利用した描画・検査高速化技術等の基本的な開発及びEUVLマスク基盤技術として、許容欠陥の指標明確化、ブランクス有位相欠陥検査技術の確立等を完了する。

研究開発期間

2004年度～2010年度

(3) ドリームチップ開発プロジェクト(運営費交付金)

概要

あらゆる社会ニーズに情報技術が今後も迅速に対応し、夢の社会を創り上げるため新しい方向の半導体技術として、これまで平面的な構造に過ぎなかった半導体デバイスに、立体構造という新たな概念を取り込み、社会ニーズの要請に適確に対応すべく、産業・ユーザーと密接な連携をとりながら、多様な用途に応じた夢の新機能デバイス(ドリーム・チップ)を開発する。

技術目標及び達成時期

2012年度までに、立体構造化技術を発展・統合し、これまでにない革新的な半導体(ドリームチップ)基盤技術を開発する。

研究開発期間

2008年度～2012年度

(4) 次世代プロセスフレンドリー設計技術開発(運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、あらゆる機器に組み込まれている半導体の低消費電力化を図るため、テクノロジーノード45nm以細の半導体に対応するSoC(System on Chip)設計技術を開発する。具体的には、テクノロジーノード45nm以細の半導体の共通設計基盤技術開発として、DFM(Design For Manufacturing)基盤技術を中核とした設計及び製造の全体最適を確保する全く新しいSoC製造フローを開発する。

技術目標及び達成時期

テクノロジーノード45nm以細のSoC開発において製造性を考慮した共通設計基盤技術を確立し、システムLSIデバイスの省エネルギーを実現するとともに、設計生産性を従来予想に比べ2倍にすることを目標とする。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(5) ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発 - うち新材料・新構造ナノ電子デバイス(再掲)

概要

ナノエレクトロニクスは、ナノテクノロジーの最大の応用領域の一つであり、デジタル・デバイスのCMOS構造というアーキテクチャは、優れた工学概念である。

また、これまでの半導体技術の微細化に基づく高集積化・高速化・低消費電力化の追求は、シリコン材料をベースとするプレーナ構造を基本とした微細加工プロセスの高度化にあった。

しかし、さらなる微細化によるデバイスのパフォーマンス向上は物理的限界に直面しつつあり、問題は、FETを、シリコン材料をベースとして作製することにより現出していると考えられる。

そのため、次世代の電子デバイスのために「シリコンで培った微細化技術やデバイス原理をこれまで同様に活用しながら、シリコンという材料の物理的限界を突破するための“新材料”や“新(デバイス)構造”を実現すること」、すなわち、「New Nano Materials/Structure on Silicon for “Mor

e Moore”の半導体技術を、ナノテクノロジーを最大限に活用することによって研究開発を行い、将来の産業応用への目を見出ししていく取りかかりとする。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、産業界が10年後を見据えた将来の電子デバイスを開発する際に、産業技術として活用できるかどうかの実現可能性を見極め、また技術シーズを確立する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(6) スピントロニクス不揮発性機能技術プロジェクト(運営費交付金)(再掲)

概要

将来のエレクトロニクスにおいて中核的な基盤技術となりえるスピントロニクス技術(電子の電荷ではなく、電子の自転=「スピン」を利用する全く新しいエレクトロニクス技術)を確立するため、強磁性体ナノ構造体におけるスピンの制御・利用基盤技術を開発し、我が国が世界に誇るシーズ技術を核として、産学官の共同研究体制を構築し、将来の中核的エレクトロニクス技術における我が国の優位性の確保を図る。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、超高集積で高速な不揮発性メモリとして期待されるスピンメモリのための基盤技術を確立する。また、新ストレージ・メモリデバイス、不揮発性スピン光機能素子、スピン能動素子等の新しい動作原理によるスピン新機能素子の実現のための基盤技術を確立する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(7) 次世代高度部材開発評価基盤の開発(運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。半導体産業分野で、集積回路の消費電力低減に必要な配線形成用各種材料等の開発のネックとなっているナノレベルでの材料間の相互影響を評価可能な統合部材開発支援ツールを開発する。これにより、集積回路の種類やデザインルールに応じて、配線形成用各種材料とプロセスの最適な組み合わせの提案技術(統合的材料ソリューション提案技術)を確立する。

技術的目標及び達成時期

2008年度までに、半導体材料開発に貢献する材料評価基盤を構築するとともに、上記の統合的材料ソリューション提案技術を確立する。また、本プロジェクトを通して得られた基礎データ等については、プロジェクト実施期間中にデータを体系的に整理し、幅広く社会に提供を図る。

研究開発期間

2006年度～2008年度

[ii] 半導体アーキテクチャの革新

(1) 半導体アプリケーションチッププロジェクト(運営費交付金)(再掲)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、情報通信機器、特に、情報家電（車載を含む）の低消費電力化を実現できる半導体アプリケーションチップ技術の開発を行う。

技術目標及び達成時期

2009年度までに情報家電の低消費電力化を実現できるアプリケーションチップ技術を開発する。

研究開発期間

2003年度～2009年度

(2) 次世代回路アーキテクチャ技術開発事業

概要

大学等での優秀な人材による革新的な半導体デバイス技術の開発を促進するため、革新的なアイデアによる半導体デバイス技術の提案を募集し、研究開発により設計された半導体デバイスを実際の半導体デバイスとして試作・評価を行う。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、本プロジェクトによって産業界が「実活用が期待できる」と評価する回路アーキテクチャを10件以上創出する。

研究開発期間

2008年度～2012年度

[iii] 光技術の革新利用

(1) 低損失オプティカル新機能部材技術開発（運営費交付金）（再掲）

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、近接場光の原理・効果を応用した低損失オプティカル新機能部材技術を開発し、実用化の目処を得ることを目的とする。動作原理に近接場光を用いるオプティカル新機能部材は、従来の材料特性のみに依存した光学部品では不可能な機能・性能を発揮し、液晶プロジェクター・液晶ディスプレイなど情報家電の省エネルギー、高性能・高信頼化を図る上でのキーデバイスとなることが期待できる。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、共通基盤技術として、ナノ構造部材の設計・作製・評価技術を開発するとともに、ナノ構造部材に発現する近接場光の機能を動作原理とする低損失オプティカル新機能部材を検討し機能を確認する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(2) 次世代光波制御材料・素子化技術（運営費交付金）（再掲）

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、ガラス材料に関する精密モールド技術を確立し、機能性の高い光波制御素子を低コストで生産できるプロセス技術を開発することで部材の小型化・高機能化を図りつつ、省エネを実現する。

技術目標及び達成時期

2010年度までにサブ波長レベルの微細構造をガラス表面にモールド成形する技術を実現し、実装可能な具体的なデバイスを作製する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(3) 三次元光デバイス高効率製造技術(運営費交付金)(再掲)

概要

波面制御素子による空間光変調技術を確立し、ガラス中に三次元造形を高精度に一括形成できるプロセス技術を開発する。この技術を用いて、具体的な光デバイスを作製し、当該技術の有効性の確認と市場への早期参入のための基盤技術を確立する。

技術目標及び達成時期

2010年度までに波面制御素子による空間光変調技術を用いたフェムト秒レーザー照射技術等を確立し、高精度の光デバイスを高速に作製できるプロセス技術を開発する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

・省エネ革新

[i] 情報ネットワークシステムの徹底的省エネの実現

(1) グリーンITプロジェクト(運営費交付金)(再掲)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、IT化の進展によりネットワークを流れるデータ量が大幅に増加する中で、IT機器による消費電力量の大幅な増大に対応し、環境調和型IT社会の構築を図るため、個別のデバイスや機器に加え、ネットワーク全体での革新的な省エネルギー技術の開発を行う。

技術目標及び達成時期

2012年度までに、IT機器・システムのエネルギー消費効率を2倍に向上させる基盤技術を開発する。

研究開発期間

2008年度～2012年度

(2) 次世代高効率ネットワークデバイス技術開発(運営費交付金)(再掲)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、ネットワークで伝送されるデータ量の爆発的増加に伴い、関連機器の消費エネルギーが増大している中で、ネットワーク全体の消費電力量を抑制することが喫緊の課題であり、消費エネルギーの低減に大きく貢献するルータ・スイッチの高速化のための研究開発を実施するとともに、機器そのものの消費エネルギーを低減するための研究開発を実施する。

技術的目標及び達成時期

2011年度までに、1チャンネルあたり40Gbps超の通信速度に対応するトラフィック計測・分析・管理技術や40Gbpsのインターフェース、さらなる通信速度向

上(100Gbps超)を実現するハードウェア技術、SFQ(単一磁束量子)スイッチに関する基盤技術を開発する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(3) ITSの規格化事業(第2フェーズ)

概要

我が国ITS産業の振興と国際競争力強化に貢献するため、これまでの個別システム等の規格化から共通基盤の構築のための規格化に重点を移し、ITS情報通信基盤の規格化、情報収集・活用基盤の規格化、システム社会導入条件の整備等ISO/TC204に対応したITSの国際規格化等を実施。

技術的目標及び達成時期

平成22年度までにITSに係る標準化案を作成しISOに対して提案又は国際規格として制定する。また自動車の電子化技術に関して、次世代では日本が主導をとるべく戦略を策定。

研究開発期間

2006年度～2010年度

[ii] 情報機器の徹底的省エネの実現

(1) 次世代大型低消費電力ディスプレイ基盤技術開発(運営費交付金)(再掲)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、次世代の大型液晶及び大型プラズマディスプレイに関する低消費電力ディスプレイを実現するための研究開発を行う。

技術的目標及び達成時期

2011年度までに、液晶に関しては、高効率バックライト、革新的なTF-Tアレイプロセス技術・製造装置及び低消費電力型の画像処理エンジン等に係る技術を確立する。また、プラズマディスプレイに関しては、超低電圧駆動等に係る技術を確立する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

[iii] 省エネを支えるプロセス基盤技術

(1) パワーエレクトロニクスインバータ基盤技術開発(運営費交付金)(再掲)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、省エネルギーを進めるために、シリコンよりも材料特性に優れたワイドギャップ半導体デバイスを用いた高効率インバータ等の実用パワーエレクトロニクス機器システムの基盤技術の開発を行う。

技術目標及び達成時期

2008年度までに、ワイドギャップ半導体デバイスを用いた高効率インバータ等の実用パワーエレクトロニクス技術を開発する。

研究開発期間

2006年度～2008年度

(2) ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発 - うち窒化物系化合物半導体基盤・エピタキシャル成長技術の開発(運営費交付金)(再掲)

概要

窒化物系化合物半導体は日本が強みを有し、パワーデバイス、高周波デバイス、発光デバイス等、今後のIT社会を支えとなることを期待されている分野である。しかし、既存のバルク単結晶基板成長技術やエピタキシャル成長技術では、従来の半導体では実現できない領域で動作可能なハイパワー、超高効率デバイス性能を十分に引き出すには至っていない。

これを突破するため、大学あるいは研究所を拠点に材料メーカー、デバイスメーカー、装置メーカー等が相互連携して、窒化物半導体の結晶欠陥低減技術やナノ構造作製技術等の革新を図り、これらデバイスの飛躍的な性能向上と消費電力削減の実現を図る。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、次世代窒化物系半導体デバイスを実現する以下結晶作製技術を開発する。

基板技術(GaN、AlNバルク結晶作製技術)

- ・ 口径2～4インチで高品質エピ成膜を可能とする低コストの単結晶基板作製技術の確立。

エピ技術(エピタキシャル成膜及び計測評価技術)

- ・ 低欠陥高品質エピ層を実現する成膜技術及び膜成長過程を計測評価する技術の確立。
- ・ 高出力かつ高安定動作可能なエピ層の実現
- ・ 高耐圧超高速な新しいデバイス構造の開発

研究開発期間

2007年度～2011年度

・ 情報爆発への対応

ITの利活用による知の創造

(1) 情報大航海プロジェクト

概要

情報家電や携帯電話などに蓄積している、文字情報、画像情報、位置情報等の多種多様で大量の情報の中から、必要な情報を簡便かつ的確に検索・解析するための技術を開発・展開する。

技術的目標及び達成時期

2009年度までに、必要な情報を簡便かつ的確に検索・解析するための技術を開発し、汎用化してオープンに利用できるような共通基盤を構築する。

研究開発期間

2007年度～2009年度

・情報システム・ソフトウェアの信頼性・生産性の向上とオープンスタンダードの普及推進

(1) セキュアプラットフォームプロジェクト

概要

我が国産業のIT生産性の向上及び情報セキュリティレベルの底上げを図るため、異なる情報システムを一つのサーバ上に統合するだけでなく、これまで情報システムごとに別々に設定していた情報アクセス権限を統合し集中管理する機構を導入した革新的な仮想化技術(セキュア・プラットフォーム)の開発を行う。

技術的目標及び達成時期

2009年度までに、統合アクセス制御基盤や、それにより制御可能となるよう必要なアクセス機構を備えた仮想化機能等を開発する。

研究開発期間

2007年度～2009年度

(2) 産学連携ソフトウェア工学の実践(運営費交付金を含む)

概要

我が国経済社会システムの基盤であり、製造業をはじめとするあらゆる産業の付加価値の源泉であるソフトウェアについて、ソフトウェアの信頼性及び生産性を向上させるため、産学官が連携して実践的なソフトウェア開発手法等に関する研究・調査、ツール整備、普及啓発、実証等を行う。また、信頼性を確保できる開発手法に基づいた高信頼な組込みソフトウェアの開発を行う。

技術的目標及び達成時期

2009年度までに、本事業による成果をユーザやベンダなどの民間企業に広く普及し、活用することにより、我が国におけるソフトウェアの生産性及び信頼性を向上させる。

研究開発期間

2004年度～2009年度

(3) オープンソフトウェア利用促進事業(運営費交付金)

概要

オープンソフトウェアを安心して活用するための基盤整備として、オープンな標準の普及、オープンソースソフトウェア(OSS)を扱える人材育成などを行う。

技術的目標及び達成時期

2012年度までに、技術参照モデル(TRM)の開発・普及やOSSサポートに係る人材育成などを行うことにより、オープンスタンダードの普及推進を図る。

研究開発期間

2008年度～2012年度

(4) IT投資効率向上のための共通基盤開発プロジェクト

概要

我が国の生産性及び競争力の向上のため、情報家電をはじめとした分野でのIT投資を、競争領域と非競争領域に峻別し、非競争領域について共通基盤を開発・オープン化等を進めていく。海外の組込みソフトウェアの動向も調査することにより、国際的に通用する共通基盤の構築を目指す。あわせて情報システム分野において、海外の動向も踏まえつつ、

業界横断的に利用可能な共通基盤を検討する。

技術的目標及び達成時期

非競争領域においては企業間で連携・強調し、IT投資の効率向上を図ることを目的とする共通基盤を2009年までに構築する。また、2010年までに共通基盤を用いた検証を行い、その結果を踏まえた上で、共通基盤の改善と産業界へ利用促進を図る。

研究開発期間

2008年度～2010年度

(5) 情報家電センサー・ヒューマンインターフェイスデバイス活用技術の開発

概要

ヒューマンインターフェイスデバイス等消費者の利便性に直結する技術について、機器やメーカーの違いを超えて相互連携できるための基盤技術の開発を行い、その技術の普及を図ることで仕様の共通化を図り、利用者の実生活をより充実させる環境の提供を実現する。

技術的目標及び達成時期

2008年度までに、多様な利用形態や生活支援を実現する、音声認識等のヒューマンインタフェース技術、音声認識においては95%のタスク達成率を可能とするミドルウェア基盤技術の開発等を行う。

研究開発期間

2006年度～2008年度

(6) 中小企業経営革新ベンチャー支援事業（運営費交付金）

概要

財務処理・税務処理など中小企業等が必要とする機能をSaaS型で提供する革新的なアプリケーションをベンチャー企業に開発させることでイノベーションの促進を図る。

技術的目標及び達成時期

支援対象企業のうち、売上高1億円以上を達成する企業を10件とすることを目標として支援を行う。

研究開発期間

2008年度～2009年度

5. 政策目標の実現に向けた環境整備

【法律】

- ・ 情報処理の振興を目的に、昭和45年に情報処理の促進に関する法律が制定。
- ・ 半導体集積回路の回路配置の適正な利用の確保を目的に、昭和63年に半導体集積回路の回路配置に関する法律が制定。

【税制】

- ・ 情報セキュリティ強化を確保しつつ生産性の向上を図るためのIT投資に対し、35%特別償却又は7%税額控除（情報基盤強化税制）
- ・ ソフトウェアを含む機械装置等に対し、30%特別償却又は7%税額控除（中小企業投資

促進税制)。

【国際標準化】

各プロジェクトで得られた成果のうち、標準化すべきものについては、適切な標準化活動（国際規格（ISO/IEC）、日本工業規格（JIS）、その他国際的に認知された標準の提案等）を実施する。特に、産学連携ソフトウェア工学の実践における組込みソフトウェア開発については、国際標準の動向を踏まえた開発を促進することにより、プロジェクトの成果の幅広い普及を促進する。

【関係機関との連携】

各プロジェクトのうち、研究開発を効率的・効果的に推進する観点から関係機関との連携が必要なものについては、これを積極的に行う。

但し、関係機関が行う研究開発等の独自性を妨げるものではない。

【導入普及促進】

成果の普及を図るため、これまでの終了プロジェクトの成果の全部または、一部についてはオープンソースソフトウェアとして公開する。

【プロジェクト等間の連携について】

高信頼な組込みソフトウェアの開発では、ソフトウェアエンジニアリングセンター（SEC）において提供される各種エンジニアリング手法を開発現場に適用し、当該技術の効果を明らかにしながら開発を進める。

【その他】

・ Grant 事業

NEDOの産業技術研究助成事業を活用し、萌芽的・革新的な情報通信関係の技術シーズの発掘を行う。また、ソフトウェア分野の独創的な技術やビジネスシーズを有した人材を発掘する。

・ 事業終了後の連携

産学官連携の研究体制を通して活動を行い、これらの事業の終了後も各分野の研究者・技術者が有機的に連携し、更に新たな研究を作り出す環境を構築する。

・ 人材育成

ハードウェア分野においては、出来る限り大学との連携を重視し、各種フェロースhip制度を活用しつつ、最先端の情報通信基盤研究現場への学生等の参画を推進することにより次世代の研究開発人材の育成を図る。また、ソフトウェア分野における独創的な人材を発掘し、育成するとともに、優秀な人材が集うコミュニティを構築するなど、発掘された人材の才能をさらに伸ばすための取組を進める。

・ 広報 / 啓発

毎年10月を「情報化月間」としている。

6．研究開発の実施に当たっての留意事項

事業の全部又は一部について独立行政法人の運営費交付金により実施されるもの（事業名に（運営費交付金）と記載したものは、中期目標、中期計画等に基づき、運営費交付金の総額の範囲内で、当該独立行政法人の裁量によって実施されるものである。

7．改訂履歴

- (1) 平成12年12月28日付け、情報通信基盤高度化プログラム基本計画を制定。
- (2) 平成14年2月28日付け、情報通信基盤高度化プログラム基本計画及び次世代半導体デバイスプロセス等基盤技術プログラム基本計画を制定。情報通信基盤高度化プログラム基本計画（平成12・12・27工総第12号）は廃止。
- (3) 平成15年1月31日付け、情報通信基盤高度化プログラム基本計画及び次世代半導体デバイスプロセス等基盤技術プログラム基本計画を制定。情報通信基盤高度化プログラム基本計画（平成14・02・25産局第17号）及び次世代半導体デバイスプロセス等基盤技術プログラム基本計画（平成14・02・25産局第18号）は、廃止。
- (4) 平成15年3月10日付け、情報通信基盤高度化プログラム基本計画、次世代半導体デバイスプロセス等基盤技術プログラム基本計画、次世代ディスプレイ技術開発プログラム基本計画及び情報通信基盤ソフトウェア開発推進プログラム基本計画を制定。情報通信基盤高度化プログラム基本計画（平成15・01・29産局第1号）及び次世代半導体デバイスプロセス等基盤技術プログラム基本計画（平成15・01・29産局第2号）は、廃止。
なお、情報通信機器高度化プログラム基本計画（平成15・01・29産局第1号）及び次世代半導体デバイスプロセス等基盤技術プログラム基本計画（平成15・01・29産局第2号）の一部は、次世代ディスプレイ技術開発プログラム基本計画及び情報通信基盤ソフトウェア開発推進プログラム基本計画へ移行。
- (5) 平成16年2月3日付け、高度情報通信機器・デバイス基盤プログラム基本計画及び情報通信基盤ソフトウェア開発推進プログラム基本計画を制定。情報通信機器高度化プログラム基本計画（平成15・03・07産局第14号）、次世代半導体デバイスプロセス等基盤技術プログラム基本計画（平成15・03・07産局第7号）、次世代ディスプレイ技術開発プログラム基本計画（平成15・03・07産局第4号）は、高度情報通信機器・デバイス基盤プログラム基本計画に統合することとし、廃止。また、情報通信基盤ソフトウェア開発推進プログラム基本計画（平成15・03・07産局第14号）は、廃止。
- (6) 平成17年3月25日付け、高度情報通信機器・デバイス基盤プログラム基本計画を制定。高度情報通信機器・デバイス基盤プログラム基本計画（平成16・02・03産局第1号）は廃止。また、平成17年3月31日付け、情報通信基盤ソフトウェア開発推進プログラム基本計画を制定。情報通信基盤ソフトウェア開発推進プログラム基本計画（平成16・02・03産局第2号）は廃止。
- (7) 平成18年3月31日付け、高度情報通信機器・デバイス基盤プログラム基本計画及び情報通信基盤ソフトウェア開発推進プログラム基本計画を制定。高度情報通信機器・デバイス基盤プログラム基本計画（平成17・03・25産局第7号）及び情報通信基盤ソフトウェア開発推進プログラム基本計画（平成17・03・25産局第6号）は廃止。
- (8) 平成19年4月2日付け、高度情報通信機器・デバイス基盤プログラム基本計画及び情

報通信基盤ソフトウェア開発推進プログラム基本計画を制定。高度情報通信機器・デバイス基盤プログラム基本計画（平成18・03・31産局第4号）及び情報通信基盤ソフトウェア開発推進プログラム基本計画（平成18・03・31産局第5号）は廃止。

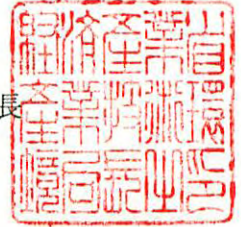
- (9) 平成20年4月1日付け、ITイノベーションプログラム基本計画を制定。情報通信機器高度化・デバイス基盤プログラム基本計画（平成19・03・12産局第7号）及び情報通信基盤ソフトウェア開発推進プログラム基本計画（平成19・03・12産局第8号）は、本プログラム基本計画に統合することとし、廃止。

経済産業省

平成 20・03・24 産局第 1 号

平成 20 年 4 月 1 日

経済産業省産業技術環境局長



経済産業省製造産業局長



ナノテク・部材イノベーションプログラム基本計画の制定について

上記の件について、イノベーションプログラム実施要領（平成16・07・27産局第1号）第4条第1項の規定に基づき、別添のとおり制定する。

ナノテク・部材イノベーションプログラム基本計画

1. 目的

このプログラムは、情報通信、ライフサイエンス、環境、エネルギーなど、あらゆる分野に対して高度化あるいは不連続な革新（ジャンプアップ）をもたらすナノテクノロジー及び革新的部材技術を確立するとともに、その実用化や市場化を促進することで、我が国産業の国際競争力の維持・強化や解決困難な社会的課題の克服等を可能とすることを目的とする。

2. 政策的位置付け

第 3 期科学技術基本計画（2006 年 3 月閣議決定）

- ・ 「ナノテクノロジー・材料分野」は、特に重点的に研究開発を推進すべき分野（重点推進 4 分野）の一つに指定されていて、優先的に資源配分することとされている。
- ・ 我が国の材料技術は、基礎研究から応用研究、素材、部材の実用化に至るまでの全ての段階において世界のトップレベルを堅持しており、我が国製造業の国際競争力の源泉となっている。

「イノベーション 25」（2007 年 6 月閣議決定）

- ・ 「ナノテクノロジー・材料分野」は、中長期的に取り組むべき課題として、「1. 生涯健康な社会形成」、「2. 安全・安心な社会形成」、「4. 世界的課題解決に貢献する社会形成」、及び「5. 世界に開かれた社会形成」の分野に位置付けられている。
- ・ 所要の措置を講じていくことが必要である事項として以下の点が指摘されている。
 - ・ 学際領域・融合領域における教育等人材育成、拠点形成
 - ・ 社会受容を促すための積極的な取り組み
 - ・ 知的財産確保のための戦略的な取り組み

「経済成長戦略大綱」（2006 年 7 月財政・経済一体改革会議）

- ・ 「我が国の国際競争力の強化」の取り組みとして、高度な部品・材料産業やモノ作り中小企業の強化が掲げられている。
- ・ 「技術戦略マップ」の活用等により、ユーザー企業との垂直連携による研究開発を推進することを通して、我が国経済発展の基盤である高品質、高性能な部品・材料産業の強化を図ることが今後の取組として記載されている。

「新産業創造戦略 2005」（2005 年 6 月経済産業省）

- ・ 部材分野は、新産業群の創出を支える共通基盤技術として位置づけられている。
- ・ 「高度部材・基盤産業」の集積を形成していることが、「ものづくり」に不可欠な基盤技術のネットワーク化を通じた現場レベルでの迅速かつ高度な摺り合わせを可能としており、我が国「ものづくり」の強みの源泉となっていると記載されている。

3. 達成目標

- ・世界に先駆けて、ナノテクノロジーを活用した非連続な技術革新を実現する。
- ・我が国部材産業の強みを更に強化することで、他国の追随を許さない競争優位を確保するとともに部材産業の付加価値の増大を図る。
- ・ナノテクノロジーや高機能部材の革新を先導することで、これら部材を活用した情報通信、ライフサイエンス、環境、エネルギーなどの幅広い産業の付加価値の増大を図る。
- ・希少金属などの資源制約の打破、圧倒的な省エネルギー社会の実現など、解決困難な社会的課題の克服を目指す。

4. 研究開発内容

[プロジェクト]

・ナノテクノロジーの加速化領域

ナノテクノロジーを活用した不連続な技術革新を加速・促進する。

(1) 異分野異業種融合ナノテクチャレンジ(運営費交付金)

概要

革新的なナノテクノロジーを活用し、川上と川下の連携、異業種異分野の連携で行う部材開発に対して支援を行い、燃料電池、ロボット、情報家電、健康・福祉・機器・サービス、環境・エネルギー・機器・サービスの5分野に資するキーデバイスの実現を目指す。

技術目標及び達成時期

マテリアル・プロセス研究、加工・計測技術研究、昨今の環境意識向上に対応した研究、社会課題を解決するための基盤技術研究に加え、異分野等の融合研究を推進することにより、2011年度までにナノテクノロジーの産業化のための基盤的技術を確立し、実用化を図る。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(2) ナノテク・先端部材実用化研究開発(運営費交付金)

概要

新産業創造戦略の趣旨に則り、革新的なナノテクノロジーを活用し、川上と川下の連携、異業種・異分野の連携で行うデバイス化開発の支援を行うため、

ナノテクノロジー活用による材料・部材の高度化を図る先導的研究開発(ステージ)

ナノテクノロジー研究成果の部材等への課題設定型実用化により目指した開発支援(ステージ)

について提案公募を実施する。

技術目標及び達成時期

2010年頃に想定される半導体微細加工の限界を克服するため、分子・原子を1つずつ制御し部品部材に組み上げる「ボトムアップ型」のナノテクノロジーなど革新的なナノテクノロジー等の活用により、情報家電・ロボット、燃料電池等新規産業5分野等において、従来の性能・効率を大幅に改善するナノテク・先端部材技術を開発し、我が

国が優位にあるナノテクノロジーを基盤とした国際的な産業競争力を強化することを目標とする。

研究開発期間

2005年度～2011年度

・情報通信領域

ナノテクノロジーや革新的部材開発技術を駆使して既存技術の微細化の壁を突破し、電子デバイス・光デバイスで世界をリードするとともに、高度化された製造技術の開発を行う。

(1) ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発 - うち新材料・新構造ナノ電子デバイス

概要

ナノエレクトロニクスは、ナノテクノロジーの最大の応用領域の一つであり、デジタル・デバイスのCMOS構造というアーキテクチャは、優れた工学概念である。また、これまでの半導体技術の微細化に基づく高集積化・高速化・低消費電力化の追求は、シリコン材料をベースとするプレーナ構造を基本とした微細加工プロセスの高度化にあった。

しかし、さらなる微細化によるデバイスのパフォーマンス向上は物理的限界に直面しつつあり、問題は、FETを、シリコン材料をベースとして作製することにより現出していると考えられる。

そのため、次世代の電子デバイスのために「シリコンで培った微細化技術やデバイス原理をこれまで同様に活用しながら、シリコンという材料の物理的限界を突破するための“新材料”や“新(デバイス)構造”を実現すること」、すなわち、「New Nano Materials/Structure on Silicon for “More Moore”」の半導体技術を、ナノテクノロジーを最大限に活用することによって研究開発を行い、将来の産業応用への目を見出していく取りかかりとする。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、産業界が10年後を見据えた将来の電子デバイスを開発する際に、産業技術として活用できるかどうかの実現可能性を見極め、また技術シーズを確立する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(2) ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発 - うち窒化物系化合物半導体基板・エピタキシャル成長技術の開発(運営費交付金)(再掲)

概要

窒化物系化合物半導体は日本が強みを有し、パワーデバイス、高周波デバイス、発光デバイス等、今後のIT社会を支えとなることを期待されている分野である。しかし、既存のバルク単結晶基板成長技術やエピタキシャル成長技術では、従来の半導体では実現できない領域で動作可能なハイパワー、超高効率デバイス性能を十分に引き出すには至っていない。

これを突破するため、大学あるいは研究所を拠点に材料メーカー、デバイスメーカー、装置メーカー等が相互連携して、窒化物半導体の結晶欠陥低減技術やナノ構造作製技術等の革新を図り、これらデバイスの飛躍的な性能向上と消費電力削減の実現を図る。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、次世代窒化物系半導体デバイスを実現する以下結晶作製技術を開発する。

1) 基板技術 (GaN、AlNバルク結晶作製技術)

・口径2～4インチで高品質エピ成膜を可能とする低コストの単結晶基板作製技術の確立。

2) エピ技術 (エピタキシャル成膜及び計測評価技術)

- ・低欠陥高品質エピ層を実現する成膜技術及び膜成長過程を計測評価する技術の確立。
- ・高出力かつ高安定動作可能なエピ層の実現
- ・高耐圧超高速な新しいデバイス構造の開発

研究開発期間

2007年度～2011年度

(3) スピントロニクス不揮発性機能技術プロジェクト (運営費交付金)

概要

将来のエレクトロニクスにおいて中核的な基盤技術となり得るスピントロニクス技術 (電子の電荷ではなく、電子の自転 = 「スピン」を利用する全く新しいエレクトロニクス技術) を確立するため、強磁性体ナノ構造体におけるスピンの制御・利用基盤技術を開発し、我が国が世界に誇るシーズ技術を核として、産学官の共同研究体制を構築し、将来の中核的エレクトロニクス技術における我が国の優位性の確保を図る。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、超高集積で高速な不揮発性メモリとして期待されるスピンメモリのための基盤技術を確立する。また、新ストレージ・メモリデバイス、不揮発性スピン光機能素子、スピン能動素子等の新しい動作原理によるスピン新機能素子の実現のための基盤技術を確立する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(4) 三次元光デバイス高効率製造技術 (運営費交付金)

概要

波面制御素子による空間光変調技術を確立し、ガラス中に三次元造形を高精度に一括形成できるプロセス技術を開発する。この技術を用いて、具体的な光デバイスを作製し、当該技術の有効性の確認と市場への早期参入のための基盤技術を確立する。

技術目標及び達成時期

2010年度までに波面制御素子による空間光変調技術を用いたフェムト秒レーザー照射技術等を確立し、高精度の光デバイスを高速に作製できるプロセス技術を開発する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(5) 次世代高度部材開発評価基盤の開発* (運営費交付金) (再掲)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。半導体産業分野で、集積回路の消費電力低減に必要な配線形成用各種材料等の開発のネックとなっているナノレベルでの材料間の相互影響を評価可能な統合部材開発支援ツールを開発する。これにより、集積回路の種類やデザインルールに応じて、配線形成用各種材料とプロセスの最適な組み合わせの提案技術(統合的材料ソリューション提案技術)を確立する。

技術的目標及び達成時期

2008年度までに、半導体材料開発に貢献する材料評価基盤を構築するとともに、上記の統合的材料ソリューション提案技術を確立する。また、本プロジェクトを通して得られた基礎データ等については、プロジェクト実施期間中にデータを体系的に整理し、幅広く社会に提供を図る。

研究開発期間

2006年度～2008年度

(6) 超フレキシブルディスプレイ部材技術開発* (運営費交付金) (再掲)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から、製造工程等の省エネルギー化を実現するために行う。従来、表示デバイスの製造には、真空蒸着と高温下での焼成と、それに伴う排ガス排水処理が必須であった。これを、ロールtoロール方式に代替することで常圧、常温下での製造を実現し、フレキシブルな薄型ディスプレイを効率よく製造する。そのために、有機TFT材料およびコンタクトプリント技術等を開発する。

技術的目標及び達成時期

2009年度までに、実用化に向けた実証のための巻き取り方式ディスプレイのプロトタイプを試作する。またフレキシブルデバイス材料開発に貢献する部材ならびに薄膜複合化技術を開発し、これらをパネル化するための実用化技術を確立する。

研究開発期間

2006年度～2009年度

(7) 低損失オプティカル新機能部材技術開発* (運営費交付金) (再掲)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、近接場光の原理・効果を活用した低損失オプティカル新機能部材技術を開発し、実用化の目処を得ることを目的とする。動作原理に近接場光を用いるオプティカル新機能部材は、従来の材料特性のみに依存した光学部品では不可能な機能・性能を発揮し、液晶プロジェクター・液晶ディスプレイなど情報家電の省エネルギー、高性能・高信頼化を図る上でのキーデバイスとなることが期待できる。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、共通基盤技術として、ナノ構造部材の設計・作製・評価技術を開発するとともに、ナノ構造部材に発現する近接場光の機能を動作原理とする低損失オプティカル新機能部材を検討し機能を確認する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

・ライフサイエンス・健康・医療領域

ナノテクノロジーを駆使して初めて可能となる診断・治療により革新的な医療を実現する。

(1) 次世代DDS型悪性腫瘍治療システムの研究開発事業(運営費交付金)(再掲)

(深部治療に対応した次世代DDS型治療システムの研究開発事業)

概要

DDSのさらなる裾野の拡大、及び早期実用化を目指し、様々な外部エネルギー(機器技術)と薬剤技術を組み合わせることにより、比較的人体の深部にある臓器(肺、消化器)等のがんを対象としたDDS型治療システムの開発を行う。

技術目標及び達成時期

光線力学治療システムの前臨床試験の開始及び治療効果・安全性の検証と、超音波診断・治療システムの前臨床試験を可能とする薬剤及び装置の完成に関する開発を難治性がんの治療に向けて行う。

研究開発期間

2006年度～2009年度

(2) 個別化医療実現のための技術融合バイオ診断技術開発(運営費交付金)(再掲)

概要

我が国が有する微細加工技術・表面処理技術といったナノテク等の強みを活かし、染色体異常を高感度、高精度かつ迅速、安価で非コード領域までを検出するゲノムアレイや解析基盤技術開発を行うとともに、全自動解析システムの開発を行う。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、BAC(染色体の断片)を用いた非コード領域を含むゲノム全領域を検出できる高精度ゲノムアレイを開発する。さらに、臨床現場において、微量サンプル(数ナノグラム)から、12時間以内に染色体異常(増幅、欠失、コピー数多型等)を、低コストかつ定量性・再現性を確保して検出ができる自動染色体異常解析システムのプロトタイプを開発する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(3) 分子イメージング機器研究開発プロジェクト(運営費交付金)(再掲)

(3-1) 生活習慣病超早期診断眼底イメージング機器研究開発プロジェクト

概要

細小血管の分子レベルでの代謝機能を非侵襲で可視化する細胞代謝イメージングを実現し、代謝異常を細胞レベルで観察することにより、循環器系疾患等の早期の診断・治

療を図る。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、ナノテクノロジーを活用した光学基盤技術等を確立することにより、細胞やタンパク質レベルの組織診断を可能とする機器を開発する。

研究開発期間

2005年度～2009年度

(3-2) 悪性腫瘍等治療支援分子イメージング機器研究開発プロジェクト

概要

良性・悪性の区別も含めた腫瘍の超早期診断を実現するため、悪性腫瘍に特異的に反応する標的物質を利用することにより生体細胞の分子レベルの機能変化を抽出・検出できる機器の開発を行う。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、全身で3mm、局所で1mmの分解能を有する分子イメージング機器を開発する。

研究開発期間

2005年度～2009年度

．エネルギー・資源・環境領域

ナノテクノロジーや革新的部材開発技術を駆使して、エネルギー・資源・環境等の社会的制約を克服すると同時に我が国の強みであるナノテック関連産業・部材産業の競争力を強化する。

() エネルギー制約の克服

(1) サステナブルハイパーコンポジット技術の開発(運営費交付金)(再掲)

概要

炭素繊維複合材料は、軽量、高強度等の優れた特性を有している。従来の熱硬化性樹脂を用いた炭素繊維複合材料では成形性・加工性に乏しくリサイクルが困難であったため、熱可塑性樹脂を用いた炭素繊維複合材料(CFRP)の開発を行う。

技術目標及び達成時期

2012年度までに、炭素繊維と熱可塑性樹脂との中間基材を開発し、熱可塑性CFRP加工技術を開発する。

研究開発期間

2008年度～2012年度

(2) 革新的ガラス溶融プロセス技術開発(運営費交付金)(再掲)

概要

プラズマ等による高温を利用し瞬時にガラス原料をガラス化することにより、極めて効率的にガラスを気中で溶融(インフライトメルティング法)し省エネに資する革新的ガラス溶融プロセス技術を開発する。

技術目標及び達成時期

2012年度までに、インフライトメルティング法により原料を溶解する技術、カレットをガラス原料として利用するため高効率で加熱する技術、カレット融液とインフライトメルティング法による原料融液とを高速で混合する技術を開発する。

研究開発期間

2008年度～2012年度

(3) 高温超電導電力ケーブル実証プロジェクト(運営費交付金)(再掲)

概要

革新的な超電導送電技術を確立するため、工業生産プロセスで実用化レベルに達している高温超電導線材を活用し、実用化のための実証試験及び評価を行う。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、200MVA級の中間接続部を有した三心一括型高温超電導ケーブルを、冷却装置や保護装置などの付帯設備とともに66KV実系統に接続して、12ヶ月以上の長期連系試験を行うことによって総合的な安全性や信頼性を実証する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(4) マルチセラミックス膜新断熱材料の開発(運営費交付金)(再掲)

概要

住宅やビルなどの冷暖房における大幅な省エネを実現する画期的な断熱性能を示す壁および窓材料を、セラミックスのナノ多孔体構造やナノ羽毛状構造およびセラミックス・ポリマー複合化構造などからなるマルチセラミックス膜アセンブリ技術によって開発する。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、熱貫流率(熱の伝わりやすさ)が $0.3\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ 以下、壁厚さ10mm程度の超断熱壁材料および熱貫流率が $0.4\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ 以下、光(可視光)透過率が65%以上(Low-Eガラス使用)、ヘイズ率が1%以下の超断熱窓材料を実現する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(5) カーボンナノチューブキャパシタ開発プロジェクト(運営費交付金)(再掲)

概要

従来の活性炭電極では不可能な高出力かつ高エネルギー密度の電気二重層キャパシタを実現するため、高度に配向した長尺の単層カーボンナノチューブの大量合成技術を開発するとともに、これを用いたキャパシタ電極の開発を行う。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、単層カーボンナノチューブの高度配向技術及び大量生産技術を確立するとともに、キャパシタ製造技術を確立することで、 $20\text{Wh}/\text{Kg}$ の高エネルギー密度と耐久性を有する電気二重層キャパシタを開発する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(6) 発電プラント用超高純度金属材料の開発(運営費交付金)(再掲)

概要

従来の金属材料と比べ耐食性、耐久性、加工性などの飛躍的な向上が期待できる超高純度金属材料の発電プラント部材としての実用化を目指し、低コスト・量産化製造プロセス、及び加工・溶接技術等の開発を行い、部材としての実用特性の評価・検証を行う。また、実用化に向けたフィージビリティ調査を行い経済性の評価等を実施するとともに、材料特性に関するデータベースの整備及びそれに必要な試験研究を行う。

技術目標及び達成時期

2009年までに、不純物総量100ppm未満、溶解量数100kg以上の低コスト・量産化技術製造技術を開発するとともに、製造された超高純度材料が発電プラントの各種機器に適用でき、本材料の持つ優れた特性を長期に亘って発揮できることを確認する。

研究開発期間

2005年度～2009年度

(7) セラミックリアクター開発(運営費交付金)(再掲)

概要

電気化学的に物質やエネルギーを高効率で変換する次世代型セラミックリアクターの実現のため、低温作動と急速作動停止を可能とする材料の開発とマイクロセルの集積構造化技術等の開発を行う。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、新電解質材料の適用や電極反応の高効率化等による、低温作動時(650以下)での出力性能を向上させる材料技術と共に、マイクロセルの集積構造化や精緻なインターフェース構築のための製造プロセス技術を開発。そして、これらの技術を統合することにより、次世代型セラミックリアクターとしてのプロトタイプモジュール実証(出力性能2kW/L等)を行う。

研究開発期間

2005年度～2009年度

(8) 高機能チタン合金創製プロセス技術開発プロジェクト(再掲)

概要

大量の電力を必要とする従来のバッチ処理方式のチタン製錬法(クロール法)を、エネルギー効率の高い連続処理方式へ転換する抜本的なプロセス改善のための技術を開発する。また、併せて、成形性の高いチタン合金設計技術及び成形プロセス技術を開発する。

技術目標及び達成時期

2008年度までに省エネ型チタン新製錬プロセスの基盤技術を開発し、2010年

までに実用化を目指す。また、本製錬技術により得られるチタンをベースとして、加工性、強度等をさらに向上させた合金設計・成形プロセス技術を確立する。

研究開発期間

2005年度～2008年度

() 資源制約の克服

(1) 希少金属代替材料開発プロジェクト(運営費交付金)

概要

希少金属は、特殊用途において希少な機能を発揮する一方で、その希少性・偏在性・代替困難性から、市場メカニズムが必ずしもうまく機能せず、その供給停止は川下の経済成長の制約要因となり得るリスクを伴っている。近年、「コンピュータによる材料設計」、「ナノテクによる微細構造制御」等が飛躍的に向上した結果、従来出来なかった、「コンピュータによる最適制御設計による候補元素系の探索」、「結晶粒界、界面の制御等マイクロ構造の制御」等が可能となりつつあることから、こうした最先端技術を用いることで、希少金属の新たな代替/使用量低減技術を開発する。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、以下希少金属元素の使用原単位について現状と比較して以下の低減ができる製造技術を開発し、ユーザー企業、大学等の外部機関に対して機能評価のためにラボレベルで提供できる(試料提供)水準に至るまでの技術を確立することを目標とする。また、製品の機能や製造コストは現状と同等を少なくとも維持することを前提とする。

〔対象元素〕	〔使用原単位の低減目標値〕
・透明電極向けインジウム(In)	: 現状から50%以上低減
・希土類磁石向けディスプロシウム(Dy)	: 現状から30%以上低減
・超硬工具向けタングステン(W)	: 現状から30%以上低減

研究開発期間

2007年度～2011年度

() 環境制約の克服

(1) グリーン・サステナブルケミカルプロセス基盤技術開発

概要

化学品等の製造プロセスにおけるシンプル化、クリーン化、原材料・資源の多様化、更に、廃棄物の減容化、容易なりサイクル等を実現し、産業競争力強化、国際規制の先取りを図って、将来にわたっても持続的に化学品等を製造するための必要な新規なGSC(グリーン・サステナブルケミストリー)プロセスを開発する。

技術的目標及び達成時期

2015年度までに、有害な化学物質を大幅に削減、使わない革新的なプロセス及び化学品の開発や廃棄物、副生成物の大幅に削減できる革新的なプロセス及び化学品の開発を行う。

研究開発期間

2008年度～2015年度

(2) 次世代高信頼性ガスセンサ技術開発(運営費交付金)(再掲)

概要

一酸化炭素中毒やガス漏れなどのガス事故を限りなくゼロに近づけるため、センサー素子のナノレベルでのメカニズム解析及び開発設計を行い、コードレスで高信頼性を有する次世代高信頼性ガスセンサー(COセンサー・メタンセンサー)を開発する。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、最先端のナノテクノロジー及びMEMS技術を導入し、電池駆動で5年以上の長寿命、高信頼性(数百ppm以下の故障率)、低コストなCOとメタンのセンサーを開発する。

研究開発期間

2008年度～2011年度

(3) 革新的膜分離技術の開発(再掲)

概要

河川水等の浄水工程における、微量の有害物質、微生物等の除去に係る水処理技術のうち、分離膜方式による高効率(省エネ)な分離技術を開発する。

技術目標及び達成時期

2012年度までに、ナノテクノロジー等新技术を用いて新素材を開発し、高度な水質制御と高速処理を兼ねた膜ろ過システムを開発する。

研究開発期間

2008年度～2012年度

(4) 循環社会構築型光触媒産業創成プロジェクト(運営費交付金)

概要

我が国で発見された光触媒技術の新産業分野開拓を目指し、サイエンスにさかのぼることにより、紫外光のみならず、可視光レベルでの性能・機能の飛躍的な向上のための技術基盤を構築する。これにより、従来では困難とされてきた医療関連分野や土壌処理、PFC処理/フッ素回収などの環境関連分野等に光触媒技術を導入し、光触媒の最大のメリットである自然エネルギーを利用した安心・安全な環境を提供できる技術を開発する。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、材料レベルで紫外光応答型2倍、可視光応答型10倍の感度向上を達成し、その高感度光触媒を適用した薄膜プロセス技術の基盤技術を確立する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(5) 革新的マイクロ反応場利用部材技術開発*(運営費交付金)(再掲)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、マイクロリアクター、ナノ空孔などの精密反応場を利用し、反応分子の自由な運動を活性種レベルで制御した革新的な化学反応プロセスと新機能材料創成技術の確立を目指す。さらに、マイクロリアクターとナノ空孔反応場の組み合わせ、各反応場とマイクロ波等のエネルギー供給手段との組み合わせにより協奏的反応場を構成し、さらなる高効率生産等を可能にする基盤技術を開発する。これらの技術の確立により、反応システムの小型化、多段プロセスの簡略化等を通じた化学産業の製造工程等の省エネルギー化を図る。

技術的目標及び達成時期

2010年度までに、マイクロリアクター技術、ナノ空孔技術を軸とし、これらに更にマイクロ波、超臨界流体等のエネルギー供給手段を組み合わせた協奏的反応場を構成することにより、これまでにない革新的な化学反応プロセスを確立し、新機能材料創成技術を実現する。さらに、これらの技術を用いて高性能・高機能電子材料、医薬中間体などの部材を開発する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(6) 高感度環境センサ部材開発*

概要

ダイオキシンをはじめとする微量有害有機物質を高感度・高選択・安価・迅速に計測するため、分子認識部位として生体分子を用い、有害有機物質の結合の有無・量を直接電気信号に変換するセラミックスセンシング材料(電極材料)を用いたセンサ部材を開発する。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、ダイオキシン類、エストラジオール及びビスフェノールAについて、 $0.001 \text{ ng} \cdot \text{ml}$ の濃度において有意な電気信号として検出し得る小型・携帯型計測器に挿入可能な寸法のセンサ部材の開発を目標とする。

研究開発期間

2006年度～2010年度

・材料・部材領域

極めて広範囲な産業領域に波及する材料・部材領域について、ユーザー製造業等との連携(川上・川下連携)を促進し、高度な部材産業群の「すり合わせ力」を一層強化する。

(1) 高機能複合化金属ガラスを用いた革新的部材技術開発(運営費交付金)

概要

複合化金属ガラス(金属ガラスマトリックス中に第二相として微結晶や微粒子または微小空隙等を分散させたもの)を創製して、次世代高密度記録媒体、超微小モータ用部材および高強度・高導電性電気接点部材を開発する。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、複合化金属ガラス合金を創製し、従来の金属ガラス単層合金の持つ優れた特徴に加えて、塑性加工性、硬磁気特性、高電気伝導性等を付与する。この

複合化金属ガラスの新規特性を用いて、従来の金属ガラス単層合金では為しえなかった革新的部材の開発を行い、さらに多様な工業製品に応用することで、我が国産業の優位性を確保する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(2) 超ハイブリッド部材技術開発 (運営費交付金)

概要

従来実現が不可能と考えられていた相反する複数機能(トレードオフ機能)を両立できる材料を、異種素材の組合せ(ハイブリッド化)により実現するための技術を開発する。要素技術として、異種材料間の界面挙動をシミュレーション技術等により解明し、ナノレベルよりもさらに微小な原子・分子レベルでのハイブリッド化構造・配列制御のための合成技術を開発する。従来の単一材料では実現困難であったトレードオフの性能を引き出すことで、自動車用構造材料、パワーデバイス用材料、光学材料等を出口イメージとした、高機能革新部材製造に必要な技術基盤を開発する。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、電気・電子材料、光学材料、その他工業材料について従来材料では実現できなかった相反機能を解消するとともに、市場評価が可能な成果物を供試し、市場(ユーザー)から、客観的な実用化研究開発課題を抽出する。また、単なる相反機能の解消ではなく、相反機能を制御・実現する技術を開発する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(3) 鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化基盤研究開発 (運営費交付金) (再掲)

概要

プラント、構造物や自動車等の革新的な高効率化、省エネルギー化、長寿命化、安全・安心化を図るため、最新の科学的知見を導入し、鉄鋼材料及び鋼構造体を超高機能化する基盤的研究開発を行う。具体的には、高強度鋼、高機能鋼の実用化拡大の基盤となる(1)高級鋼厚板(高強度鋼、極低温用鋼、耐熱鋼)溶接部の信頼性・寿命を大幅に向上する溶接施工技術(高密度・清浄熱源溶接技術)、及び金属組織制御技術を基本とする材料技術(クリープ破壊及び水素破壊の機構解明等を踏まえた)の開発、(2)部材の軽量化を図るために強度、加工性等の最適機能傾斜を付与する機械部品鍛造技術(駆動部材の信頼性確保のための耐疲労破壊特性の向上を踏まえた)の開発を行う。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、高級鋼厚板(高強度鋼・極低温用鋼・耐熱鋼)の溶接を予熱・後熱なしに可能とする溶接技術と材料技術を開発するとともに、傾斜機能部材の鍛造技術を開発する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(4) マグネシウム鍛造部材技術開発プロジェクト* (運営費交付金)

概要

マグネシウム合金部材について、製品歩留まりが高く、高耐疲労性を付与する鍛造技術の開発を行う。また、循環型素材としてのマグネシウム合金部材の特性を活かし、リサイクル材の鍛造用ピレット化に係る課題抽出を行う。当該技術開発により、マグネシウム鍛造部材製造技術の基盤を構築し、我が国の家電、自動車等の川下産業の競争力の強化に不可欠な高度部材を供給する。

技術目標及び達成時期

2010年度までに高強度・高耐疲労・加工性に優れたマグネシウム鍛造技術を確立する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(5) 先端機能発現型新構造繊維部材基盤技術の開発* (運営費交付金)

概要

電界紡糸や溶融紡糸等により創製される極微細な繊維状材料に対してナノオーダーの成形加工や微細な界面加工ならびに複合化することで材料を高機能化した革新的部材を創出する。高機能新材料を求めるユーザーの要望を満たす繊維の極微細加工と高次複合化を解決する基盤技術開発を行う。

技術的目標及び達成時期

2010年度までに、電界紡糸法による繊維高機能化、大型装置化技術およびナノ溶融分散紡糸法による超極細炭素繊維製造技術を開発し、これら基盤技術を活用して、高性能・高機能電池用部材、高性能・高機能フィルター用部材、高性能・高機能医療衛生用・産業用部材を開発する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(6) 次世代光波制御材料・素子化技術* (運営費交付金) (再掲)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、ガラス材料に関する精密モールド技術を確立し、機能性の高い光波制御素子を低コストで生産できるプロセス技術を開発することで部材の小型化・高機能化を図りつつ、省エネを実現する。

技術目標及び達成時期

2010年度までにサブ波長レベルの微細構造をガラス表面にモールド成形する技術を実現し、実装可能な具体的なデバイスを作製する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

・ナノテクノロジー・部材分野推進共通基盤領域

ナノテクノロジー、部材分野の研究開発に必要な加工・計測・解析技術等の共通基盤の確

立とともに、信頼性、普遍性、安全性等のリスク不安に対処したリスク管理手法を開発し、社会に貢献する産業化の支援を相互的に推進する。

(1) ナノ粒子の特性評価手法開発 (運営費交付金)

概要

ナノ粒子のキャラクタリゼーション、計測技術の確立とともに、生体影響等評価手法、暴露評価手法及びナノテクノロジーによるリスク不安に対処したリスク管理手法を開発する。

技術目標及び達成時期

2008年度までに、ナノ粒子のキャラクタリゼーション及び計測技術を確立するとともに、2010年までに、生体影響等評価手法、暴露評価手法及びリスク評価手法を開発し、ナノ材料のリスク評価指針及びナノ粒子の管理指針の提言を行う。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(2) 高度分析機器開発実用化プロジェクト* (再掲)

概要

燃料電池・情報家電・ナノテクといった先端新産業において、材料解析・性能評価・品質管理等で必要とされる超微量・超低濃度試料の分析技術の開発を行う。これら産業化の各フェーズに適した分析技術を開発することにより、先端新産業の事業化や製品の高付加価値化を図る。

技術目標及び達成時期

2008年度までに希ガスイオン源を搭載した集束イオンビームの開発、低加速・高分解能・高感度の元素分析用顕微鏡の開発、超微量試料用分離・分析技術の開発を行う。

研究開発期間

2006年度～2008年度

注：*印のある研究開発プロジェクトは2006年度より開始された新産業創造高度部材基盤技術開発の一環として実施しているもの。

5．政策目標の実現に向けた環境整備（関連施策）

ナノテクノロジーは、情報通信、環境、エネルギーなどの分野における科学技術の進歩や課題解決に貢献する重要な技術シーズである。そのため、ナノテクノロジーの研究開発と一体となった関連施策を実施することで、その成果を市場に出していくことが重要である。主な関連施策を、以下に示す。

〔技術戦略マップ〕

- ・NEDO及び経済産業省では、技術戦略マップを策定、毎年改訂し、ナノテク・部材分野の将来の方向性を見定めながら、合理的かつ効果的な研究開発プロジェクトを推進しているところ。また、技術戦略マップを活用して、多様な連携（川上川下の垂直連携、異業種間の水平連携など）による研究開発を促進、支援し、当該分野の技術革新を促進する。

〔サンプル提供・実用化促進〕

- ・NEDOでは、実施するナノテクノロジー関連の研究開発プロジェクト成果のサンプルを対象として、それらを活用した用途の開発、実用化ないし製品化提案を有する企業とのマッチングを図ることで、プロジェクトの事業化を促進する取組みを実施しているところ。

〔基準・標準化〕

- ・ナノテクノロジーの標準化については、研究開発プロジェクトを推進する上で、適切な活動（国際規格ISO/IEC、日本工業規格JIS、その他）を実施し、我が国のナノテクノロジー分野の研究開発、産業活動の効率向上を図り、研究開発の成果が社会で普及する環境を整備する意味でも重要である。これまでの主な取組みについては、下記のとおり。
- ・2005年5月にナノテクノロジーの標準化に向けてISO/TC229の設立がされ、「用語と命名法」、「計測とキャラクタリゼーション」、「健康・安全・環境」の3つのWGにおいて、国際標準化の策定に向けて議論が開始された。
- ・また、2007年6月にシンガポールで開催された第5回総会以降、「材料規格」の分科会の設立に向けて対応しているところ。
- ・さらに、2006年9月にはナノテクノロジーに関する電気電子技術の標準化に向けてIEC/TC113が設立され、「用語と命名法」、「計測とキャラクタリゼーション」、「性能評価」の3つのWGにおいて、国際標準化の策定に向けて議論が開始されている。（なお、はISO/TC229とのジョイントWGとなっている。）

〔広報〕

- ・ナノテクノロジーに関する先端技術及び製品等の世界最大の展示会である「nano tech」が毎年日本で開催されている。2002年に開催された第1回以降、出展者来場者ともに増加傾向にあり、近年は海外、とくにヨーロッパ・アジア等の出展が目立つようになってきている。

〔社会受容〕

- ・ナノテクノロジーの社会受容に対する取組みは、ナノテクノロジーの産業化を推進するため、例えば工業ナノ粒子のキャラクタリゼーション技術や人の健康や環境に及ぼす影響など、潜在的な課題に関する知見を蓄積する取組みが重要である。

- ・経済産業省では、2006年度から「ナノ粒子特性評価手法の研究開発」を開始し、工業ナノ粒子の有害性評価手法、また、そのリスク評価手法の確立を目標としたプロジェクトを開始しているところ。

〔人材育成〕

- ・経済産業省では、「製造中核人材育成事業」を実施しており、産学連携による波及効果の高い人材育成プログラムを開発、実践している。ナノテクノロジー関連の人材育成プログラムも複数実施しているところ。

（例）ナノテク製造中核人材の養成プログラム

概要：情報家電、燃料電池、ロボット、医療機器、バイオ等の応用分野において、その産業の基盤と創出を支える中堅企業を対象として、「基礎加工技能・技術、特殊な要素技能・技術に習熟し、製造技術の高度化を図る人材」及び「豊富なナノ加工プロセスの知識や先端機器を使いこなすノウハウ等を習熟し、製造現場の技能・技術を統括できず人材」を育成するもの。

- ・NEDOでは、我が国の産業技術の発展のため、先端分野や融合分野の技術を支える人材の育成と、人的交流の面から産学連携を促進するための「場」の形成を促進する取り組みを実施している（NEDO特別講座）。具体的には、優れた成果を生み出しつつあり、大学が技術の中核となっている研究開発プロジェクトをコアプロジェクトとし、そのプロジェクトリーダーの所属大学に拠点を設置し、関連技術の人材育成、人的交流の拡大、周辺研究の実施を行うもの。ナノテクノロジー関連の研究開発プロジェクトも複数実施しているところ。

〔他省庁との連携〕

- ・総合科学技術会議／連携施策群において、「ナノバイオテクノロジー」「ナノテク研究推進と社会受容」が設置され、関係省庁と連携して実施しているところ。
- ・経済産業省が実施する研究開発プロジェクトにおいては、文部科学省など他省庁との連携の可能性について検討を行い、研究開発プロジェクトの立案、推進しているところ。

（例）ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発 - うち新材料・新構造ナノ電子デバイスプロジェクト、希少金属代替材料開発プロジェクト など

6．研究開発の実施に当たっての留意事項

事業の全部又は一部について独立行政法人の運営費交付金により実施されるもの（事業に（運営費交付金）と記載したもの）は、中期目標、中期計画等に基づき、運営費交付金の総額の範囲内で、当該独立行政法人の裁量によって実施されるものである。

7．改訂履歴

- (1) 平成12年12月28日付け制定。
- (2) 平成14年2月28日付け制定。材料ナノテクノロジープログラム基本計画（平成12・12・27工総第16号）は、廃止。
- (3) 平成15年3月10日付け制定。ナノテクノロジープログラム基本計画（平成14・02・25産局第8号）は、廃止。
- (4) 平成16年2月3日付け制定。ナノテクノロジープログラム基本計画（平成15・03・07産局第1号）は、廃止。
- (5) 平成17年3月31日付け制定。ナノテクノロジープログラム基本計画（平成16・02・03産局第7号）は、廃止。
- (6) 平成18年3月31日付け制定。ナノテクノロジープログラム基本計画（平成17・03・25産局第4号）は、廃止。
- (7) 平成19年4月2日付け制定。ナノテクノロジープログラム基本計画（平成18・03・31産局第13号）は、廃止。
- (8) 平成14年2月28日付け制定。
- (9) 平成15年3月10日付け制定。革新的部材産業創出プログラム基本計画（平成14・02・25産局第9号）は、廃止。
- (10) 平成16年3月7日付け制定。革新的部材産業創出プログラム基本計画（平成15・03・07産局第5号）は、廃止。
- (11) 平成17年3月31日付け制定。革新的部材産業創出プログラム基本計画（平成16・03・07産局第5号）は、廃止。
- (12) 平成18年3月31日付け制定。革新的部材産業創出プログラム基本計画（平成17・03・25産局第3号）は、廃止。
- (13) 平成19年4月2日付け制定。革新的部材産業創出プログラム基本計画（平成18・03・31産局第14号）は、廃止。
- (14) 平成20年4月1日付け、ナノテク・部材イノベーションプログラム基本計画制定。ナノテクノロジープログラム基本計画（平成19・03・20産局第1号）および革新的部材プログラム基本計画（平成19・03・19産局第4号）は、本イノベーションプログラム基本計画に統合することとし、廃止。

経 済 産 業 省

平成20・03・27産局第3号

平成20年4月1日

経済産業省産業技術環境局長



経済産業省製造産業局長



ロボット・新機械イノベーションプログラム基本計画の制定について

上記の件について、イノベーションプログラム実施要領（平成16・07・27産局第1号）第4条第1号の規定に基づき、別添のとおり制定する。

ロボット・新機械イノベーションプログラム基本計画

1. 目的

我が国の製造業を支えてきたロボット技術・機械技術を基盤とし、IT技術・知能化技術など先端的要素技術との融合を促進することにより、家庭、医療・福祉、災害対応など幅広い分野で活躍する次世代ロボットや新機械技術の開発・実用化を促進し、生産性の向上と人間生活の質の向上を実現するとともに、我が国経済社会の基盤である製造業の競争力の維持・強化を目指す。

2. 政策的位置付け

科学技術基本計画（2006年3月閣議決定）

ロボット・新機械技術は、特に重点的に研究開発を推進すべき分野（重点推進4分野）の一つである情報通信分野や、推進分野であるものづくり技術分野、社会基盤分野に位置付けられている。

「経済成長戦略大綱」（2006年7月財政・経済一体改革会議。2007年6月改定版を経済財政諮問会議に報告）

産学官連携による世界をリードする新産業群の一つとして位置付けられ、次世代ロボット市場の拡大に向けて、サービスロボット市場の整備、ロボットの認識技術の開発等必要な取組を継続することとしている。

またITによる生産性向上と市場創出のためのIT革新を支える産業・基盤の強化技術として、新機械技術の重要分野であるMEMS技術の重要性が位置付けられている。

「新産業創造戦略」（2005年6月経済産業省取りまとめ）

先端的新産業分野として、「ロボット」を戦略7分野の一つとして掲げ、2010（平成22年）までの市場規模、その成長に向けたアクションプログラムを盛り込んでいる。当該アクションプログラムには、ユーザ（施設、地域）を巻き込んだ実証試験を中心としたモデル開発事業による先行用途開発、モデル事業と連携した重要な要素技術や共通インフラ技術の開発支援、及び人間とロボットの共存に必要な安全性の確保と、保険制度等の制度基盤の整備が提示されている。

新機械技術の重要分野であるMEMS技術について、当該新産業群の創出を支える重点四分野（「科学技術基本計画」による）の分野間の融合による推進が指摘されている。

「イノベーション25」（2007年6月閣議決定）

ロボット・新機械技術は、生涯健康な社会や多様な人生を送れる社会の実現に向けて、中長期的に取り組むべき課題として、新たな走行車等の普及促進のための環境整

備、高度みまもり技術導入のためのルール作りなどの安全・安心な社会形成、また、ユビキタスネットワークや民生用ロボットの本格普及に向けた環境整備、低侵襲診断・治療技術の実現、安全・安心な社会のための将来デバイスの実現、さらに世界的課題解決に貢献する社会のための新しいものづくり技術など、今後の研究開発の進展等によって、その成果を社会に適用していく上で取組が必要であるとともに、随時見直しをし、その取組を加速・拡充していくことが必要とされている。

「ロボット政策研究会」(2006年5月経済産業省取りまとめ)

ロボットを実際に市場に導入するための政策の強化、ロボットが現実に使われることを想定した安全性の確保、及び具体的な用途を想定したロボット技術の開発の推進を検討の視点として、これら課題への対応の方向性をまとめた。

3. 達成目標

- (1) 我が国製造業の高度化に必要な不可欠な基盤技術である機械分野においては、バイオ技術やIT技術等の異分野技術を活用した従来の機械の概念を超えた新しい機械の創造及びその計測技術の確立を図ることを目標とする。例えば、2015年頃に革新的MEMSの本格普及を目指すことにより、安全・安心な社会の構築に貢献する。
- (2) 安全・安心な社会、便利でゆとりある生活の実現のために必要不可欠なロボットは、信頼性技術、高機能化・知能化技術、システム化技術が特に重要であり、これら技術を開発することで、2015年頃には、自律的に多様な作業を行うロボットの実用化を目指す。

4. 研究開発内容

[プロジェクト]

・ロボット技術開発

- (1) 基盤ロボット技術活用型オープンイノベーション促進プロジェクト(運営費交付金)

概要

これまでの研究開発プロジェクトの成果を活用し、生活環境やロボットで使用される各種要素部品をRT(Robot Technology)システムで利用しやすい共通の接続方式、制御方式の下で利用可能な形で提供(RTコンポーネント化)するための基盤を開発する。これにより既存の生活環境を簡単にRTシステム化し、それらを活用することにより様々な生活支援機能の提供、基盤ロボット技術の普及と標準化を推進する。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、共通の通信インタフェースとRTミドルウェアで動作させる基盤通信モジュール、既存の要素部品をRTコンポーネント化したRT要素部品、それらを用いたRTシステムを開発する。

研究開発期間

2008年度～2010年度

- (2) 次世代ロボット知能化技術開発プロジェクト(運営費交付金)

概要

生活空間や多品種少量生産の製造現場など状況が変わりやすい環境下では、ロボットの使用条件や用途は大きく限定されている。これを克服するため、ロボットが確実性（ロバスト性）をもって稼動し、ロボットの環境・状況認識能力等の向上とともに、ロボットの知能要素をモジュール化し、その蓄積管理及び組合せ等を可能とする技術を開発する。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、次世代ロボットが高度な作業（タスク）を行う上で必要な効率的で実用的な知能化技術を開発する。具体的には、魅力的でニーズが高いタスクを設定し、知能化技術モジュールを開発し、高機能なロボットシステムの構築を実証する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

（3）戦略的先端ロボット要素技術開発プロジェクト（運営費交付金）

概要

市場ニーズ及び技術戦略マップに基づき、約10年後にロボット技術の活用により達成するミッションを設定した上で、これを達成するために必要なロボットシステム及び要素技術開発を、関係府省の連携の下で実施する。

技術目標及び達成時期

市場ニーズ及び技術戦略マップに基づき、約10年後にロボットを活用して達成するミッションを設定した上で、これを達成するために必要なロボットシステム及び要素技術の開発を実施する。具体的かつ先端的なRT開発を支援することで、我が国のRT競争力の維持・発展を図るとともに、研究開発成果の他分野（自動車、情報家電等）への波及を図る。

研究開発期間

2006年度～2010年度

・MEMSの技術開発・新機械産業の領域開拓

（1）高集積・複合MEMS製造技術開発プロジェクト（運営費交付金）

概要

従来個別に開発されてきた各種センサならびに通信用デバイスについて、MEMS（Micro Electro Mechanical Systems）製造技術を用いて一体形成、高集積化、ナノ機能付加することで、小型・省電力・高性能・高信頼性のMEMSデバイスを製造する技術を開発する。

技術目標及び達成時期

2008年度までに、以下の開発を行う。

- ・MEMS / 半導体の一体形成技術の開発
- ・MEMS / MEMSの高集積化技術の開発
- ・MEMS / ナノテク機能の複合技術の開発

研究開発期間

2006年度～2008年度

(2) 異分野融合型次世代デバイス製造技術開発プロジェクト

概要

高信頼性が必要な医療分野や特殊環境等で活用され、医療や安全・安心等の社会的課題を解決する、小型・高性能・省エネルギーな次世代デバイスの基盤プロセス技術を、MEMS製造技術とナノ・バイオ等の異分野技術の融合により開発する。

技術目標及び達成時期

2012年度までに、次世代デバイス製造に必要不可欠な基盤プロセス技術群である、バイオ・有機材料融合プロセス技術、3次元ナノ構造形成プロセス技術、マイクロ・ナノ構造大面積・連続製造プロセス技術を開発すると共に、得られた知見を系統的に蓄積しデータベース化し、従来の技術情報と統合的に取り扱える知識データベースシステム整備を行う。

研究開発期間

2008年度～2012年度

・分析機器産業の技術開発支援

(1) 高度分析機器開発実用化プロジェクト

概要

燃料電池・情報家電・ナノテクといった先端新産業において、材料解析・性能評価・品質管理等で必要とされる超微量・超低濃度試料の分析技術や機器の開発を行う。これら産業化の各フェーズに適した分析技術を開発することにより、先端新産業の事業化や製品の高付加価値化を図る。

技術目標及び達成時期

2010年度までに希ガスイオン源を搭載した集束イオンビームの開発、低加速・高分解能・高感度の元素分析用顕微鏡の開発、超微量試料用分離・分析技術の開発を行う。

研究開発期間

2006年度～2008年度

5. 政策目標の実現に向けた環境整備（成果の実用化、導入普及に向けた取組）

〔実用化・導入普及促進〕

ロボットやその関連部品等の見本市の開催等を支援することによって、システム開発者、要素部品の開発者、ロボットユーザ等とのマッチングを図り、中小・ベンチャーや異業種企業のロボット産業への参入を促進する。

また、市場創出に貢献するロボットを表彰し、ロボットユーザ、メーカーから一般の方まで広くPRする表彰制度「今年のロボット」大賞を共催機関と協力して実施している。

開発したソフトウェア等の成果については、広く一般に提供するなど積極的な普及を図ることにより、より多くの開発主体がロボット技術開発に参加できる環境を創出し、ロボット技術開発の裾野の拡大を図る。

将来のロボットは人に接する場面が多くなるであろう。したがって、ロボットの導入・普及を促進するためには、安全に対する考え方を整理し、周知することが重要で

ある。平成19年7月には人間と共存する次世代ロボットの安全性を確保するための基本的な考え方をまとめた「次世代ロボット安全性確保ガイドライン」をとりまとめた。今後は、普及や具体化に向けた取組みが求められており、技術開発と並行して安全に係るルールなどの整備を推進することで普及をより現実化させることが必要である。

MEMSの一層の実用化促進を図るため、異分野や製造設備を有していない企業でも容易にMEMSビジネスに参入できるように、MEMS用設計・解析支援システムを開発した。その成果を活用しつつ、実習を中心とした人材育成及び試作環境の充実、製造拠点（ファンドリー）強化などMEMS産業全体の競争力の維持・強化を図る。

〔標準化〕

各プロジェクトで得られた成果のうち、標準化すべきものについては適切な標準化活動（国際規格（ISO/IEC）、日本工業規格（JIS）、その他国際的に認知された標準団体（OMG等）への提案等）を実施する。

特に、ロボットの安全基準や性能の評価基準については、過去に実施した研究開発プロジェクト等による実証データや「次世代ロボット安全性確保ガイドライン」の活用を図りつつ我が国発の国際標準としての提案について検討し、拡大するロボット市場における国際競争力の確保を目指す。

なお、これまでの研究施策の成果である、ロボット部分品の接続の共通化を目指したRTM（ロボット・テクノロジー・ミドルウェア）が、OMG（ソフトウェア技術の国際標準化団体）において、平成19年12月に標準仕様として採択されている。

MEMS技術・製品を世界市場に広く普及するために技術戦略マップに基づくMEMS標準化戦略の策定、国際規格案の開発、提案、推進等の標準化活動に継続的に取り組む。

6. 研究開発の実施に当たっての留意事項

事業の全部又は一部について独立行政法人の運営費交付金により実施されるもの（事業名に（運営費交付金）と記載したものは、中期目標、中期計画等に基づき、運営費交付金の総額の範囲内で、当該独立行政法人の裁量によって実施されるものである。

7. 改訂履歴

- (1) 平成14年2月28日付け、21世紀ロボットチャレンジプログラム基本計画制定。
- (2) 平成15年3月10日付け制定。21世紀ロボットチャレンジプログラム基本計画（平成14・02・25産局第3号）は、廃止。
- (3) 平成16年2月3日付け制定。21世紀ロボットチャレンジプログラム基本計画（平成15・03・07産局第11号）は、廃止。
- (4) 平成17年3月31日付け制定。21世紀ロボットチャレンジプログラム基本計画（平成16・02・03産局第16号）は、廃止。
- (5) 平成18年3月31日付け制定。21世紀ロボットチャレンジプログラム基本計画（平成17・03・25産局第18号）は、廃止。
- (6) 平成19年4月2日付け制定。21世紀ロボットチャレンジプログラム基本計画

- (平成18・03・31産局第7号)は、廃止。
- (7)平成14年2月28日付け、新製造技術プログラム基本計画制定。
- (8)平成15年3月10日付け制定。新製造技術プログラム基本計画(平成14・02・25産局第6号)は、廃止。
- (9)平成16年2月3日付け制定。新製造技術プログラム基本計画(平成15・03・07産局第9号)は、廃止。
- (10)平成17年3月31日付け制定。新製造技術プログラム基本計画(平成16・02・03産局第11号)は廃止。
- (11)平成18年3月31日付け制定。新製造技術プログラム基本計画(平成17・03・25産局第5号)は、廃止。
- (12)平成19年4月2日付け制定。新製造技術プログラム基本計画(平成18・03・31産局第6号)は、廃止。
- (13)平成20年4月1日付け、ロボット・新機械イノベーションプログラム基本計画制定。21世紀ロボットチャレンジプログラム基本計画(平成19・03・15産局第2号)及び新製造技術プログラム基本計画(平成19・03・19産局第3号)は、本イノベーションプログラム基本計画に統合することとし、廃止。

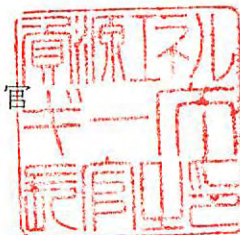
経済産業省

平成20・03・25産局第5号
平成20年4月1日

経済産業省産業技術環境局長



経済産業省資源エネルギー庁長官



エネルギーイノベーションプログラム基本計画の制定について

上記の件について、イノベーションプログラム実施要領（平成16・07・27産局第1号）第4条第1項の規定に基づき、別添のとおり制定する。

エネルギーイノベーションプログラム基本計画

1. 目的

資源に乏しい我が国が、将来にわたり持続的発展を達成するためには、革新的なエネルギー技術の開発、導入・普及によって、各国に先んじて次世代型のエネルギー利用社会の構築に取り組んでいくことが不可欠である。他方、エネルギー技術開発は、長期間を要するとともに大規模投資を伴う一方で将来の不確実性が大きいことから、民間企業が持続的な取組を行うことは必ずしも容易ではない。このため、政府が長期を見据えた将来の技術進展の方向性を示し、官民双方がこの方向性を共有することで、将来の不確実性に対する懸念が緩和され、官民において長期にわたり軸のぶれない取組の実施が可能となる。以下に 5 つの政策の柱毎に目的を示す。

1 - . 総合エネルギー効率の向上

1970年代以来、官民をあげて省エネルギーに取り組み、産業構造の転換や新たな製造技術の導入、民生機器の効率改善等により世界最高水準の省エネルギーを達成している。今後、「新・国家エネルギー戦略」に掲げる、2030年までにGDPあたりのエネルギー利用効率を約30%向上を実現していくためには、産業部門はもとより、全部門において、総合エネルギー効率の向上に資する技術開発とその成果の導入を促進する。

1 - . 運輸部門の燃料多様化

ほぼ100%を石油に依存する運輸部門は、我が国エネルギー需給構造上、最も脆弱性が高く、その需給構造の次世代化は、将来に向けた早急な対策が不可欠な課題となっている。

「新・国家エネルギー戦略」に掲げる目標（2030年に向け、運輸部門の石油依存度が80%程度となることを目指す）の実現のためにも、官民が中長期的な展望・方向性を共有しつつ、技術開発と関連施策を推進する。

1 - . 新エネルギー等の開発・導入促進

太陽光、風力、バイオマスなどの新エネルギーは、エネルギー源の多様化や地球温暖化対策の観点から重要である。しかし、現時点では経済性や出力安定性といった普及へ向けての課題が存在する。

そのため、これらの課題解決に向けた技術開発の推進及び新エネルギーの導入促進のための関連施策の実施により、更なる新エネルギーの普及を推進する。

1 - . 原子力等利用の推進とその大前提となる安全の確保

原子力発電は供給安定性に優れ、運用時にCO₂を排出しないクリーンなエネルギー源である。安全確保を大前提に核燃料サイクルを含む原子力発電を着実に推進する。

1 - . 化石燃料の安定供給確保と有効かつクリーンな利用

化石燃料資源の大宗を輸入に依存する我が国にとって、その安定供給の確保は国家安全保障に直結する課題である。このため、石油・天然ガス等の安定供給確保を目指し、我が国企業による資源国における資源開発等に対する支援等の施策を進めるとともに、その有効かつクリーンな利用を図る。

2. 政策的位置付け

エネルギー基本計画（2007年3月閣議決定）

重点的に研究開発のための施策を講ずべきエネルギーに関する技術及びその施策として、

1. 総合エネルギー効率の向上に資する技術
2. 原子力利用の推進とその大前提となる安全の確保に資する技術
3. 運輸部門のエネルギー多様化に資する技術
4. 新エネルギーに関する技術
5. 化石燃料の安定供給確保と有効かつクリーンな利用に資する技術

以上が位置づけられている。

新・国家エネルギー戦略（2006年5月）

世界最先端のエネルギー需給構造の実現を図るため

1. 省エネルギーフロントランナー計画
2. 運輸エネルギーの次世代化計画
3. 新エネルギーイノベーション計画
4. 原子力立国計画

以上の計画が位置づけられている。また、資源外交、エネルギー環境協力の総合的な強化を図るため、「総合資源確保戦略」が位置づけられている。

第3期科学技術基本計画（2006年3月閣議決定）

国の存立にとって基盤的であり国として取り組むことが不可欠な研究開発課題を重視して研究開発を推進する「推進4分野」であるエネルギー分野、分野別推進戦略（2006年3月総合科学技術会議）における「推進4分野」であるエネルギー分野に位置付けられている。

経済成長戦略大綱（2006年7月財政・経済一体改革会議）

資源・エネルギー政策の戦略的展開として

1. 省エネルギーフロントランナー計画
2. 次世代自動車・燃料イニシアティブ等による運輸エネルギー次世代化
3. 新エネルギーイノベーション計画
4. 原子力立国計画
5. 資源外交、環境・エネルギー協力等の総合的な強化

以上が位置づけられている。

京都議定書目標達成計画（2005年4月閣議決定）

「京都議定書の約束を達成するとともに、更に「脱温暖化社会」に向けて長期的・継続的な排出削減を進めるには、究極的には化石燃料への依存を減らすことが必要である。環境と経済の両立を図りつつ、これらの目標を達成するため、省エネルギー、未利用エネルギーの利用等の技術革新を加速し、効率的な機器や先進的なシステムの普及を図り、世界をリードする環境立国を目指す。」とされている。

3. 達成目標

3-1. 総合エネルギー効率の向上

転換部門における「エネルギー転換効率向上」、産業部門における「製造プロセス向上」、民生・運輸部門における「省エネルギー」などにより、エネルギー消費効率を2030年度までに少なくとも30%改善することを目指す。

3-2. 運輸部門の燃料多様化

バイオマス由来燃料、GTL、BTL、CTLなどの新燃料、電気自動車や燃料電池自動車などの導入により、現在ほぼ100%の運輸部門の石油依存度を2030年までに80%程度とすることを目指す。

3-3. 新エネルギー等の開発・導入促進

太陽光、風力、バイオマスなどの新エネルギーの技術開発や燃料電池など革新的なエネルギー高度利用を促進することにより、新エネルギー等の自立的な普及を目指すことで、エネルギー源の多様化及び地球温暖化対策に貢献する。

3-4. 原子力等利用の推進とその大前提となる安全の確保

2030年以降においても、発電電力量に占める比率を30～40%程度以上とすることを目指すため、高速増殖炉サイクルの早期実用化、既設軽水炉代替へ対応する次世代軽水炉の開発、軽水炉技術を前提とした核燃料サイクルの確立、放射性廃棄物対策などの技術開発を推進する。

3-5. 化石燃料の安定供給確保と有効かつクリーンな利用

石油・天然ガスの化石燃料の安定供給確保を目指し、資源獲得能力の強化に資する先端的な技術開発を推進するとともに、環境負荷低減のために化石燃料の効率的かつクリーンな利用を促進するための技術開発・導入を目指す。

4．研究開発内容

4 - . 総合エネルギー効率の向上

4 - - . 共通

(1) エネルギー使用合理化技術戦略的開発(運営費交付金)

概要

省エネルギー技術開発の実効性を高めるために、シーズ技術の発掘から実用化に至るまで、民間団体等から幅広く公募を行い、需要側の課題を克服し得る省エネルギー技術開発を戦略的に行う。

技術目標及び達成時期

中長期的視点に立った省エネルギー技術戦略を構築し、技術開発の相互連携によりシナジー効果が発揮され技術開発が促進されるよう、超燃焼システム技術、時空を超えたエネルギー利用技術、省エネ型情報生活空間創生技術、先進交通社会確立技術、次世代省エネデバイス技術の技術群に重点化して、省エネルギー技術戦略に沿った技術開発を戦略的に推進する。

研究開発時期

2003年度～2010年度

(2) エネルギー使用合理化産業技術研究助成事業(運営費交付金)

概要

産業界や社会のニーズに応える省エネルギー技術のシーズの発掘とその育成、並びに、省エネルギー技術に関する次世代の研究リーダーの育成を図る。この目的のため、産業界からの期待が高い技術領域・課題を提示した上で、大学や独立行政法人の研究者等から研究開発テーマを募集する。厳正な外部評価によって省エネルギー効果があり且つ独創的・革新的なテーマを選定し、研究者代表者個人を特定して助成金を交付する。

技術的目標及び達成時期

独創性のある研究者等を助成すると共に、中間評価ゲート方式が醸成する競争的環境の下で企業との連携を強化させることにより、10～15年後の実用化が有望な革新的省エネルギー技術の研究開発を促進する。本事業では革新的省エネルギー技術の実用化への第1歩となる特許について、助成期間終了後の出願比率を100%とすることを目標とするとともに、省エネルギー技術に関する次世代の研究リーダーの育成を図る。

研究開発期間

2000年度～

(3) 研究開発型中小企業挑戦支援事業(スタートアップ支援事業)

概要

省エネルギー対策に資する中小企業の優れた技術シーズ、ビジネスアイデアの事業化による創業・新事業展開を促進するため、実用化研究開発に要する経費(原材料費、直接人件費、機械装置費、知的財産取得費等)の一部を補助するとともに、補助事業を行う中小・ベンチャー企業等に対して中小企業基盤整備機構によるビジネスプランの具体化・実用化に向けたコンサルティング等を一体的に実施

する。

技術的目標及び達成時期

中小企業の技術開発を推進し、産業におけるエネルギー使用合理化技術の利用を図り、もって、中小企業の振興と経営の安定を促進する。

補助事業期間終了後2年後の採択企業の研究開発成果の事業化率50%を目標とするとともに、省エネルギー技術開発の高度化を戦略的に推進する。

研究開発期間

2004年度～

(4) 地域イノベーション創出エネルギー研究開発

概要

地域において新産業の創出に貢献し得るような最先端の技術シーズを基に、企業、公設試、大学等の研究開発資源を最適に組み合わせて形成された共同研究体が行うエネルギー使用の合理化並びに非化石エネルギーの開発及び利用に寄与する実用化研究開発の実施。

技術的目標及び達成時期

研究開発終了後3年後における成果の事業化達成率30%以上を目標とする。

研究開発期間

2008年度～2012年度

(5) イノベーション実用化補助事業(運営費交付金)(4 - - 参照)

(6) 非化石エネルギー産業技術研究助成事業(運営費交付金)(4 - - 参照)

4 - - . 超燃焼システム技術

(1) 環境調和型製鉄プロセス技術開発(運営費交付金)(再掲)

概要

高炉ガスからの効率的な二酸化炭素分離と中低温排熱の有効活用及び水素を炭素(コークス)の一部代替として鉄鉱石を還元する革新的製鉄プロセスの開発を行う。

技術的目標及び達成時期

最終的な技術開発目標として製鉄プロセスにおけるCO₂排出量を30%削減することを目指し、2050年までに実用化する。

研究開発期間

2008年度～2017年度

(2) 革新的ガラス溶融プロセス技術開発(運営費交付金)

概要

プラズマ等による高温を利用し瞬時にガラス原料をガラス化することにより、極めて効率的にガラスを気中で溶融(インフライトメルティング法)し省エネに資する革新的ガラス溶融プロセス技術を開発する。

技術的目標及び達成時期

2012年度までに、インフライトメルティング法により原料を溶解する技術、

カレットをガラス原料として利用するため高効率で加熱する技術、カレット融液とインフライトメルティング法による原料融液とを高速で混合する技術を開発する。

研究開発期間

2008年度～2012年度

(3) 革新的マイクロ反応場利用部材技術開発(運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、マイクロリアクター、ナノ空孔などの精密反応場を利用し、反応分子の自由な運動を活性種レベルで制御した革新的な化学反応プロセスと新機能材料創成技術の確立を目指す。さらに、マイクロリアクターとナノ空孔反応場の組み合わせ、各反応場とマイクロ波等のエネルギー供給手段との組み合わせにより協奏的反応場を構成し、さらなる高効率生産等を可能にする基盤技術を開発する。これらの技術の確立により、反応システムの小型化、多段プロセスの簡略化等を通じた化学産業の製造工程等の省エネルギー化を図る。

技術的目標及び達成時期

2010年度までに、マイクロリアクター技術、ナノ空孔技術を軸とし、これらに更にマイクロ波、超臨界流体等のエネルギー供給手段を組み合わせた協奏的反応場を構成することにより、これまでにない革新的な化学反応プロセスを確立し、新機能材料創成技術を実現する。さらに、これらの技術を用いて高性能・高機能電子材料、医薬中間体などの部材を開発する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(4) 植物機能を活用した高度モノ作り基盤技術開発

i) 植物利用エネルギー使用合理化工業原料生産技術開発(運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、現在の化学工業プロセスに代わる、植物の有する有用物質生産能を活用した省エネルギー・低環境負荷型の工業原料生産プロセスへの変換を促進する。具体的には、工業原料の生産に関わる重要な物質生産プロセスに関する代謝系をゲノム情報に基づき解析するとともに、有用物質生産制御に必要な一連の代謝遺伝子群の発現を統一的に制御する技術の開発を行う。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、工業原料として有望なバイオマスとしてイソプレノイド、油脂などの有用物質生産に関わる代謝経路とその調節メカニズム及び生産物質の蓄積・移動に係るメカニズムの解析を行い、関連遺伝子情報を整備するとともに、統括的発現制御技術を開発する。

研究開発期間

2002年度～2009年度

(5) 鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化基盤研究開発(運営費交付金)

概要

プラント、構造物や自動車等の革新的な高効率化、省エネルギー化、長寿命化、安全・安心化を図るため、最新の科学的知見を導入し、鉄鋼材料及び鋼構造体を超高機能化する基盤的研究開発を行う。具体的には、高強度鋼、高機能鋼の実用化拡大の基盤となる(1)高級鋼厚板(高強度鋼、極低温用鋼、耐熱鋼)溶接部の信頼性・寿命を大幅に向上する溶接施工技術(高密度・清浄熱源溶接技術)及びクリープ破壊、金属組織制御技術を基本とする溶接材料技術(クリープ破壊及び水素破壊の機構解明等を踏まえた)の開発、(2)部材の軽量化を図るために強度、加工性等の最適機能傾斜を付与する機械部品鍛造技術(駆動部材の信頼性確保のための耐疲労破壊特性の向上を踏まえた)の開発を行う。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、高級鋼厚板(高強度鋼・極低温用鋼・耐熱鋼)の溶接を予熱・後熱なしに可能とする溶接技術と材料技術を開発するとともに、傾斜機能部材の鍛造技術を開発する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(6) 高機能チタン合金創製プロセス技術開発プロジェクト

概要

大量の電力を必要とする従来のバッチ処理方式のチタン製錬法(クロール法)を、エネルギー効率の高い連続処理方式へ転換する抜本的なプロセス改善のための技術を開発する。また、併せて、成形性の高いチタン合金設計技術及び成形プロセス技術を開発する。

技術目標及び達成時期

2008年度までに省エネ型チタン新製錬プロセスの基盤技術を開発し、2010年までに実用化を目指す。また、本製錬技術により得られるチタンをベースとして、加工性、強度等をさらに向上させた合金設計・成形プロセス技術を確立する。

研究開発期間

2005年度～2008年度

(7) 革新的分離膜技術の開発

概要

河川水等の浄水工程における、微量の有害物質、微生物等の除去に係る水処理技術のうち、分離膜方式による高効率(省エネ)な分離技術を開発する。

技術目標及び達成時期

2013年度末までに、現行の分離膜に比較して単位処理水量当たり50%のエネルギー削減を図る技術を確立する。

研究開発期間

2008年度～2012年度

(8) 微生物機能を活用した環境調和型製造基盤技術開発

i) 微生物機能を活用した高度製造基盤技術開発 (運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、省エネルギーかつ環境負荷が少ないといった特徴を有する微生物機能を活用した有用物質の革新的な生産プロセス (モノ作り) の技術を構築するため、産業用途に必要な機能既知遺伝子で構成されたゲノムを持ち、物質生産性向上につながる性能を備えた高性能宿主細胞の創製や、微生物反応の多様化・高機能化技術を開発するとともに、バイオマスを原料として有用物質を体系的かつ効率的に生産する (バイオリファイナリー) ための基盤技術を開発する。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、物質生産性向上につながる性能を備えた高性能宿主細胞を創製するとともに、バイオプロセスの実用化適用範囲の拡大のための微生物反応の多様化・高機能化技術の開発を行う。バイオリファイナリー技術については、バイオマスを高効率で糖化し、糖から高効率で各種化成品の基幹物質を生産するバイオプロセス体系を構築する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

ii) 微生物群のデザイン化による高効率型環境バイオ処理技術開発 (運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、従来エネルギー多消費・廃棄物多排出型であった廃水・廃棄物処理において、微生物群の構成及び配置等を人為的に制御 (デザイン化) することで、その処理効率を大幅に向上させ、省エネルギーで廃棄物も少ない高効率型廃水、廃棄物処理の基盤技術を確立する。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、特定有用微生物群を人為的に安定導入・維持もしくは人為的に空間配置・優先化させる等のデザイン化技術を開発し、従来の廃水、廃棄物処理に比べより高効率で省エネルギーな処理技術を開発するとともに、実用化に資するための実証可能なテストプラント規模にて評価する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(9) 省エネルギー型化学技術創成研究開発補助事業

概要

化学産業はそれ自身が裾野の広い産業というだけでなく、自動車、IT機器等の川下製品の部材として産業界・国民生活の様々な分野に深く関連している。従って化学業界において、省エネポテンシャルの大きい有望な技術シーズがありながら民間だけでは十分な研究開発投資が行われていない技術について、戦略的な研究開発支援を実施することにより、化学産業のみならず、各種最終製品、他産業においてエネルギー効率の改善を促進する。

技術的目標及び達成時期

2007年度までに、化学分野の生産プロセスや、製品等に関する環境に配慮した省エネルギー技術の革新に向けて、国内・国際市場の創出・拡大も見据えつつ、将来の発展が有望な技術に関する研究開発を行うことにより、化学産業のみならず、我が国の省エネルギー対策に一層寄与する。

研究開発期間

2004年度～2010年度

(10) 高効率酸化触媒を用いた環境調和型化学プロセス技術開発プロジェクト

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、N-オキシ系触媒等の炭素ラジカル創生触媒を化学反応プロセスに適用し、製造工程の短縮や製造効率の向上を図ることで、温暖化効果ガスの排出抑制や省エネルギー効果など総合的なプロセスコストを低減させるため要素技術の開発を行う。

技術的目標及び達成時期

2008年度までにカルボン酸、アルコール、ケトンなどの含酸素化合物製造プロセスに対し、N-オキシ系触媒を適用していくため、現状の触媒活性・選択性の向上、触媒の安定性・寿命の改善、触媒分離プロセスの効率化等を開発する。

研究開発期間

2005年度～2008年度

(11) エネルギー使用合理化繊維関連次世代技術開発

概要

製造エネルギーの低減を図ることができる革新的な繊維製品製造技術の開発や、使用することでエネルギー消費の低減が可能となる新たな繊維製品を開発。

技術的目標及び達成時期

2009年度までに、以下の開発を行う。

炭素繊維製造エネルギー低減技術の研究開発

廃棄衣料のリサイクル技術及び高付加価値商品の開発

排水処理における余剰汚泥の減容化技術開発

次世代資材用繊維の開発

ポリエチレンテレフタレート製造エネルギー低減技術の開発

VOC含有廃棄物の溶剤回収及び再利用処理技術の開発

研究開発期間

2005年度～2009年度

(12) 無曝気・省エネルギー型次世代水資源循環技術の開発（運営費交付金）

概要

所用動力が少なく、汚泥発生も少ない嫌気性処理の利点と、良好な水質が得られる好気性処理の利点の双方の特長を生かし、かつ双方の欠点を克服した、省エネルギー性に優れた廃水処理技術を開発する。

技術目標及び達成時期

2008年度までに、既存技術で廃水処理を行った際に発生する汚泥量の70%削減を実現し、廃水処理に要するエネルギーの70%削減を実現する廃水処理システムを開発する。

研究開発期間

2006年度～2008年度

(13) 高効率ガスタービン実用化技術開発

概要

省エネルギー及びCO₂削減の観点から電力産業用高効率ガスタービンの実用化を目指し、大容量機(25万kW程度(コンバインド出力40万kW))の高効率化(52%～56%)のために1700級ガスタービンの実用化に必要な先端要素技術を適用した各要素モジュールの検証等を実施する。また、小中容量機(10万kW程度)の高効率化(45%～51%)のために有望とされている高湿分空気利用ガスタービンの実用化に必要な多段軸流圧縮機、多缶燃焼器等の開発を行うとともにシステムの信頼性等の検証を行う。

技術的目標及び達成時期

1700級ガスタービン実用化技術開発：先端要素技術を活用した燃焼器、タービン、圧縮機等各モジュールの検証等を行い、送電端熱効率56%以上の達成が可能なことを確認する。

高湿分空気利用ガスタービン実用化技術開発：2011年までに軸流圧縮機の3.5%(空気重量比)吸気噴霧冷却技術、低NO_x燃焼技術(運用負荷帯で10ppm以下)等を開発すると共に、実機に近い条件での要素機器の信頼性・耐久性を確認する。

研究開発期間

2008年度～2011年度

(14) エネルギー使用合理化高効率パルプ工程技術開発(運営費交付金)

概要

紙パルプ産業では、環境に関する自主行動計画に基づき、2010年度までに製品当たり化石エネルギー原単位を1990年度比13%削減し、CO₂排出原単位を10%削減することを目指し、紙パルプ工程における省エネルギー対策を着実に進めているものの、より一層の省エネルギー対策を進めるためには、技術開発によるブレークスルーが必要となっている。紙パルプ産業は、エネルギー多消費型産業のひとつであり、紙パルプ工程での省エネルギー対策は波及効果が大きいことから、紙パルプ工程におけるエネルギー使用合理化に資する技術開発を提案公募により実施する。

技術的目標及び達成時期

京都議定書の第1約束期間中、又は、第2約束期間中を目途として実用化に至るような技術開発を行うことで、京都議定書の第1約束期間の目標を着実に達成するとともに、現在、検討が行われている第2約束期間に向けた省エネルギー対策の更なる深化を進めていく。

研究開発期間

2005年度～2010年度

- (15) 発電プラント用超高純度金属材料開発(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (16) 先進超々臨界圧火力発電実用化要素技術開発(4 - - 参照)
- (17) 噴流床石炭ガス化発電プラント開発(4 - - 参照)
- (18) 石油精製高度機能融合技術開発(4 - - 参照)

4 - - . 時空を超えたエネルギー利用技術

- (1) カーボンナノチューブキャパシタ開発プロジェクト(運営費交付金)

概要

従来の活性炭電極では不可能な高出力かつ高エネルギー密度の電気二重層キャパシタを実現するため、高度に配向した長尺の単層カーボンナノチューブの大量合成技術を開発するとともに、これを用いたキャパシタ電極の開発を行う。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、単層カーボンナノチューブの高度配向技術及び大量生産技術を確立するとともに、キャパシタ製造技術を確立することで、20Wh/Kgの高エネルギー密度と耐久性を有する電気二重層キャパシタを開発する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

- (2) イットリウム系超電導電力機器技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (3) 高温超電導電力ケーブル実証プロジェクト(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (4) 固体酸化物形燃料電池実用化戦略的技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (5) 燃料電池先端科学研究(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (6) 新利用形態燃料電池技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (7) 固体酸化物形燃料電池システム要素技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (9) 水素貯蔵材料先端基礎研究事業(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (8) 水素製造・輸送・貯蔵システム等技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (10) 固体酸化物形燃料電池実証研究(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (11) 風力発電電力系統安定化等技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (12) 大規模電力供給用太陽光発電系統安定化等実証事業(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (13) 次世代蓄電システム実用化戦略的技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)

4 - - . 省エネ型情報生活空間創生技術

- (1) グリーンITプロジェクト(運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、IT化の進展により、ネットワークを流れるデータ量が大幅に増加する中で、IT機器による消費電力量の大幅な増大に対応し、環境調和型IT社会の構築を図るため、個別のデバイスや機器に加え、ネットワーク全体での革新的な省エネルギー技術の開発を行う。

技術的目標及び達成時期

2012年度までに、IT機器・システムのエネルギー消費効率を2倍に向上させる基盤技術を開発する。

研究開発期間

2008年度～2012年度

(2) 次世代高効率ネットワークデバイス技術開発(運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、ネットワークで伝送されるデータ量の爆発的増加に伴い、関連機器の消費エネルギーが増大している中で、ネットワーク全体の消費電力量を抑制することが喫緊の課題であり、消費エネルギーの低減に大きく貢献するルータ・スイッチの高速化のための研究開発を実施するとともに、機器そのものの消費エネルギーを低減するための研究開発を実施する。

技術的目標及び達成時期

2011年度までに、1チャンネルあたり40Gbps超の通信速度に対応するトラフィック計測・分析・管理技術や40Gbpsのインターフェース、さらなる通信速度向上(100Gbps超)を実現するハードウェア技術、SFQ(単一磁束量子)スイッチに関する実現を可能とするための基盤技術を開発する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(3) 次世代大型低消費電力ディスプレイ基盤技術開発(運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、次世代の大型液晶及び大型プラズマディスプレイに関する低消費電力ディスプレイを実現するための研究開発を行う。

技術的目標及び達成時期

2011年度までに、液晶に関しては、高効率バックライト、革新的なTFTアレイプロセス技術・製造装置及び低消費電力型の画像処理エンジン等に係る技術を確立する。また、プラズマディスプレイに関しては、超低電圧駆動等に係る技術を確立する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(4) 有機発光機構を用いた高効率照明の開発(運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、蛍光灯に代わる高効率照明として有機EL発光機構を用いるための技術開発課題(発光効率、演色性、面均一性、生産コスト)等を明らかにし、それをブレークスルーしうる技術シーズを抽出する。

技術目標及び達成時期

2009年までに現在一般に普及している蛍光灯照明に代わる高効率照明としての必要スペックを達成するとともに、次世代照明として同じく期待されているLEDとの差別化要素を技術的に達成し、大面積/高スループット/低コストで量産するプロセス技術を開発する。また、現在蛍光灯の間接・拡散照明が用いられている照明機器を代替する有機EL照明を実用的なコストで製造できる技術を確立する。

研究開発期間

2007年度～2009年度

(5) マルチセラミックス膜新断熱材料の開発(運営費交付金)

概要

住宅やビルなどの冷暖房における大幅な省エネを実現する画期的な断熱性能を示す壁および窓材料を、セラミックスのナノ多孔体構造やナノ羽毛状構造およびセラミックス・ポリマー複合化構造などからなるマルチセラミックス膜アセンブリ技術によって開発する。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、熱貫流率(熱の伝わりやすさ)が $0.3\text{ W/m}^2\text{K}$ 以下、壁厚さ10mm程度の超断熱壁材料および熱貫流率が $0.4\text{ W/m}^2\text{K}$ 以下、光(可視光)透過率が65%以上(Low-Eガラス使用)、ヘイズ率が1%以下の超断熱窓材料を実現する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(6) 超フレキシブルディスプレイ部材技術開発(運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から、製造工程等の省エネルギー化を実現するために行う。従来、表示デバイスの製造には、真空蒸着と高温下での焼成と、それに伴う排ガス排水処理が必須であった。これを、ロールtoロール方式に代替することで常圧、常温下での製造を実現し、フレキシブルな薄型ディスプレイを効率よく製造する。そのために、有機TFT材料およびコンタクトプリント技術等を開発する。

技術的目標及び達成時期

2009年度までに、実用化に向けた実証のための巻き取り方式ディスプレイのプロトタイプを試作する。またフレキシブルデバイス材料開発に貢献する部材ならびに薄膜複合化技術を開発し、これらをパネル化するための実用化技術を確立する。

研究開発期間

2006年度～2009年度

(7) 低損失オプティカル新機能部材技術開発(運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、近接場光の原

理・効果を応用した低損失オプティカル新機能部材技術を開発し、実用化の目処を得ることを目的とする。動作原理に近接場光を用いるオプティカル新機能部材は、従来の材料特性のみに依存した光学部品では不可能な機能・性能を発揮し、液晶プロジェクター・液晶ディスプレイなど情報家電の省エネルギー、高性能・高信頼化を図る上でのキーデバイスとなることが期待できる。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、共通基盤技術として、ナノ構造部材の設計・作製・評価技術を開発するとともに、ナノ構造部材に発現する近接場光の機能を動作原理とする低損失オプティカル新機能部材を検討し機能を確認する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(8) 高環境創造高効率住宅用VOCセンサ等技術開発(運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、住宅における換気負荷を最小化することによって省エネルギーを達成するため、VOCセンサ及びモニタリング併用型換気システム等を開発する。

技術目標及び達成時期

2008年度までに、VOCに対して高選択性・高感度性・即応性を有するVOCセンサ及びVOCセンサを用いたモニタリング併用型換気システム等を開発する。

研究開発期間

2005年度～2008年度

(9) 革新的構造材料を用いた新構造システム建築物研究開発

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、我が国鉄鋼業の約50%を占める建設市場において、建築物のメインフレームに高強度鋼を用いることで、鉄鋼部材の軽量化(リデュース)とそれに伴う輸送効率の向上、高強度化、非溶接化に伴う部材のリユース促進、製造・施工の省エネ・省力化等を図る。

同時に、柔剛混合構造(高強度鋼とダンパーの組み合わせ)技術の確立、関連法規への対応等により、震度7にも耐えうる新構造システム建築物の建設が可能となり、我が国で大きなリスクである大規模地震災害から国民を守り、安心安全社会の実現に寄与する。

技術目標及び達成時期

2013年度までに、最大規模の地震(震度7)に対しても倒壊・損壊しない建築物を高強度鋼(800N/mm²級鋼材)とダンパーの組み合わせによる柔剛混合構造により実現を図るものであり、国土交通省や民間企業と連携してこの建築物のメインフレームに必要な高強度鋼部材、接合法等の開発を行う。主な研究開発目標は以下の通りである。

・震度7弾性新構造システム開発

- ・高強度部材の製造技術開発
- ・超高強度接合部品開発
- ・高強度部材の接合技術開発

研究開発期間

2006年度～2008年度

(10) 次世代光波制御材料・素子化技術（運営費交付金）

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、ガラス材料に関する精密モールド技術を確立し、機能性の高い光波制御素子を低コストで生産できるプロセス技術を開発することで部材の小型化・高機能化を図りつつ、省エネを実現する。

技術目標及び達成時期

2010年度までにサブ波長レベルの微細構造をガラス表面にモールド成形する技術を実現し、実装可能な具体的なデバイスを作製する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

4 - - . 先進交通社会確立技術

(1) エネルギーITS（運営費交付金）

概要

平成19年5月の「次世代自動車・燃料イニシアティブ」に基づき、運輸部門のエネルギー消費効率改善のため、自動運転・隊列走行技術、高度交通流制御技術等の省エネルギーに資するITS技術の開発を行う。

技術的目標及び達成時期

2012年度までにプローブ情報を利用した信号制御機能の実用化を図るとともに、2020年代に実用化が見通せる運転制御、隊列走行の基盤技術の確立を目指す。

研究開発期間

2008年度～2012年度

(2) 革新的次世代低公害車総合技術開発（運営費交付金）

概要

大気環境・地球温暖化・エネルギー問題の同時解決に向けて、次世代の低公害車の技術開発を実施する。

特に、都市間の輸送に用いられる「都市間トラック・バス」を中心とした分野における要素技術の開発を自動車技術・燃料技術の両面から実施していく。

技術目標及び達成時期

平成20年度において、都市間の輸送に用いられる「都市間バス・トラック」を中心とした分野における次世代低公害車の要素技術を確立する。具体的には、以下のとおり。

- ・燃費向上率

貨物車 現行基準値に対して10%

乗用車 2015年基準値に対して20%

・排出ガス

貨物車 NOx：ディーゼル重量車のポスト新長期（挑戦目標）規制値

PM：ディーゼル重量車のポスト新長期規制値

乗用車 NOx：ガソリン車のポスト新長期規制値

PM：ガソリン車のポスト新長期規制値

研究開発時期

2004年度～2008年度

(3) サステナブルハイパーコンポジット技術の開発（運営費交付金）

概要

炭素繊維複合材料は、軽量、高強度等の優れた特性を有している。従来の熱硬化性樹脂を用いた炭素繊維複合材料では成形性・加工性に乏しくリサイクルが困難であったため、熱可塑性樹脂を用いた炭素繊維複合材料（CFRP）の開発を行う。

技術目標及び達成時期

2012年度までに、炭素繊維と熱可塑性樹脂との中間基材を開発し、熱可塑性CFRP加工技術を開発する。

研究開発時期

2008年度～2012年度

(4) 次世代構造部材創製・加工技術開発（次世代航空機用）

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、航空機、高速車両等の輸送機器への先進材料の本格導入を加速させるため、先進複合材料及び先進金属材料について部材開発、設計試作及び評価を実施することで、軽量化によりエネルギー使用効率を大幅に向上させる革新的な構造部材の創製・加工技術の開発を行う。

技術目標及び達成時期

2012年度までに、複合材の構造健全性診断技術、チタン合金の創製・加工技術を確立するとともに、航空機用エンジンへの適用を目指し、耐熱・耐衝撃性に優れた複合材料を開発する。

研究開発期間

2003年度～2012年度

(5) 環境適応型小型航空機用エンジン研究開発（運営費交付金）

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、エネルギー使用効率を大幅に向上し、環境対策にも優れた次世代の小型航空機用エンジンの開発にとって重要な要素技術の研究開発を行う。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、エネルギー使用効率を大幅に向上する構造設計技術、騒音、NOx等の環境負荷対応に優れた環境対策技術、インテグレーション技術、高バイパス比化等の高性能化技術といった要素技術の研究開発・実証を行う。

研究開発期間

2003年度～2010年度

(6) 省エネ用炭素繊維複合材技術開発

概要

航空機、自動車、鉄道、船舶等の輸送機械等における炭素繊維複合材の適用範囲を拡大し、省エネルギーの促進を図るため、先進的な炭素繊維複合材成形技術や、耐雷対策の低コスト化技術等の研究開発・実証を行う。

技術目標及び達成時期

2013年度までに、従来の方法に比べ低コストであり、曲率の大きな部位の成形も行うことができるVaRTM（バータム）法等の炭素繊維複合材成形技術や、炭素繊維複合材を用いた製品の耐雷性能を低コストで確保する技術の研究開発・実証を行う。

研究開発期間

2008年度～2013年度

(7) 燃料電池システム等実証研究（4 - - 参照）

4 - - . 次世代省エネデバイス技術

(1) パワーエレクトロニクスインバータ基盤技術開発（運営費交付金）

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、省エネルギーを進めるために、シリコンよりも材料特性に優れたワイドギャップ半導体デバイスを用いた高効率インバータ等の実用パワーエレクトロニクス機器システムの基盤技術の開発を行う。

技術目標及び達成時期

2008年度までに、ワイドギャップ半導体デバイスを用いた高効率インバータ等の実用パワーエレクトロニクス技術を開発する。

研究開発期間

2006年度～2008年度

(2) ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発 - うち窒化物系化合物半導体基板・エピタキシャル成長技術の開発（運営費交付金）

概要

窒化物系化合物半導体は日本が強みを有し、パワーデバイス、高周波デバイス、発光デバイス等、今後のIT社会を支えとなることを期待されている分野である。しかし、既存のバルク単結晶基板成長技術やエピタキシャル成長技術では、従来の半導体では実現できない領域で動作可能なハイパワー、超高効率デバイス性能を十分に引き出すには至っていない。

これを突破するため、大学あるいは研究所を拠点に材料メーカー、デバイスメーカー、装置メーカー等が相互連携して、窒化物半導体の結晶欠陥低減技術やナノ構造作製技術等の革新を図り、これらデバイスの飛躍的な性能向上と消費電力削減の実現を図る。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、次世代窒化物系半導体デバイスを実現する以下結晶作製技術を開発する。

- ・ 基板技術（GaN、AlNバルク結晶作製技術）
 - 口径2～4インチで高品質エピ成膜を可能とする低コストの単結晶基板作製技術の確立。
- ・ エピ技術（エピタキシャル成膜及び計測評価技術）
 - 低欠陥高品質エピ層を実現する成膜技術及び膜成長過程を計測評価する技術の確立。
 - 高出力かつ高安定動作可能なエピ層の実現
 - 高耐圧超高速な新しいデバイス構造の開発

研究開発期間

2007年度～2011年度

(3) 次世代低消費電力半導体基盤技術開発(MIRAI)(運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、IT化の進展、IT利活用の高度化を支え、あらゆる機器に組み込まれている半導体の低消費電力化を図るため、テクノロジーノード(微細化レベル)45nm以細の次世代低消費電力半導体を実現するため、微細加工の基盤技術やマスク(半導体素子製造過程で用いる原板)の低コスト化・製造時間短縮に必要な基盤技術の開発等を行う。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、マスク設計・描画・検査の各工程に共通的なマスクデータ処理技術、繰り返しパターンやパターン重要度を利用した描画・検査高速化技術等の基本的な開発及びEUVLマスク基盤技術として、許容欠陥の指標明確化、ブランクスの位相欠陥検査技術の確立等を完了する。

研究開発期間

2001年度～2010年度

(4) 半導体アプリケーションチッププロジェクト(運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、IT化の進展、IT利活用の高度化を支え、あらゆる機器に組み込まれている半導体の低消費電力化を図るため、情報通信機器、特に、情報家電の低消費電力化を実現できる半導体アプリケーションチップ技術の開発を行う。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、情報家電の低消費電力化を実現できるアプリケーション

チップ技術を開発する。

研究開発期間

2003年度～2009年度

(5) 次世代高度部材開発評価基盤の開発(CASMAT2)(運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。半導体産業分野で、集積回路の消費電力低減に必要な配線形成用各種材料等の開発のネックとなっているナノレベルでの材料間の相互影響を評価可能な統合部材開発支援ツールを開発する。これにより、集積回路の種類やデザインルールに応じて、配線形成用各種材料とプロセスの最適な組み合わせの提案技術(統合的材料ソリューション提案技術)を確立する。

技術的目標及び達成時期

2008年度までに、半導体材料開発に貢献する材料評価基盤を構築するとともに、上記の統合的材料ソリューション提案技術を確立する。また、本プロジェクトを通して得られた基礎データ等については、プロジェクト実施期間中にデータを体系的に整理し、幅広く社会に提供を図る。

研究開発期間

2006年度～2008年度

(6) 次世代プロセスフレンドリー設計技術開発(運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、IT化の進展、IT利活用の高度化を支え、あらゆる機器に組み込まれている半導体の低消費電力化を図るため、テクノロジーノード45nm以降の半導体に対応するSoC(System on Chip)設計技術を開発する。具体的には、テクノロジーノード45nm以細の半導体の共通設計基盤技術開発として、DFM(Design For Manufacturing)基盤技術を中核とした設計及び製造の全体最適を確保する全く新しいSoC製造フローを開発する。

技術目標及び達成時期

テクノロジーノード45nm以細のSoC開発において製造性を考慮した共通設計基盤技術を確立し、システムLSIデバイスの省エネルギーを実現するとともに、設計生産性を従来予想に比べ2倍にすることを目標とする。

研究開発期間

2006年度～2010年度

4 - - . その他

(1) 希少金属等高効率回収システム開発

概要

小型電子・電気機器にはベースメタルや、金、銀等の貴金属の他、インジウム、ニッケル等の希少金属等を含有している。現状では、これらの機器が廃棄された後は、非常に高温で処理する乾式製錬技術を用いてリサイクル・処理されている

ため、多大なエネルギーを消費するばかりか、回収可能な金属が銅、金、銀等に限定されており、その他の希少金属等は回収できずに廃棄処分されている。このため、湿式製錬技術を活用した高効率な最適技術の開発等を通じて、回収工程の省エネルギー及び希少金属等の回収率向上を図る。

技術目標及び達成時期

- ・ 従来方法（乾式製錬）で処理する場合に比べて、大幅な省エネルギーの実現（省エネルギー効果：原油換算で約78万kl/年削減）
- ・ 廃小型電子・電気機器、廃超硬工具等中に含まれる希少金属等の回収率の向上（インジウム0% 90%、ニッケル50% 95%、コバルト0% 95%、タンタル0% 80%、タングステン90% 95%、レアアース0% 80%）

研究開発期間

2007年度～2010年度

（2）次世代構造部材創製・加工技術開発（次世代衛星基盤）

概要

国際商業市場における我が国衛星メーカーの競争力を強化するべく、次世代の衛星技術として期待されている、準天頂衛星システム（移動中の利用者等に対し、米国が運用するGPSとの補完による高精度な位置情報等の提供を可能にする新システム）の構築に不可欠な基盤技術（産業競争力強化にも直結する衛星の軽量化、長寿命化に関する技術等）の開発を行う。本プロジェクトの一部については、他部門と比較して需要増加の割合が高い運輸部門のエネルギー消費を抑制すべく、航空機、自動車、高速車両等の輸送機器の軽量化・効率化にも資する複合材料製造設計のための基盤技術を確立するためのものであり、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

静止軌道と一定の角度をなす傾斜軌道に複数の衛星を配置し、見かけ上、常に天頂付近に最低1つの衛星を位置させるシステム。

技術的目標及び達成時期

2010年度までに、準天頂衛星システムの構築に不可欠な基盤技術（産業競争力強化にも直結する衛星の軽量化、長寿命化に関する技術等）の開発を行う。

研究開発期間

2003年度～2010年度

（3）高効率重金属処理剤研究開発

概要

重金属等によって汚染された土壌、飛灰、ばいじん、排水・廃液等を安全かつ経済的に処理する技術開発として、少量の使用で重金属等を安定的かつ効率的に捕捉できる複合金属汚染土壌のオンサイト処理に適した高性能の無機系重金属等処理剤及び自然環境への負荷が少ない新規有機系処理剤を開発する。

技術的目標及び達成時期

2008年度までに、飛灰における金属選択性が高く安価な重金属等処理・回収剤及び排水中における亜鉛や6価セレンなどを処理できる重金属等処理剤を開発する。

研究開発期間

2003年度～2008年度

4 - . 運輸部門の燃料多様化

4 - - . 共通

- (1) イノベーション実用化補助事業(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (2) 非化石エネルギー産業技術研究助成事業(運営費交付金)(4 - - 参照)

4 - - . バイオマス由来燃料

- (1) 新エネルギー技術研究開発(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (2) E3地域流通スタンダードモデル(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (3) バイオマス等未活用エネルギー実証事業(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (4) バイオマスエネルギー地域システム化実験事業(運営費交付金)(4 - - 参照)

4 - - . GTL等の合成液体燃料

- (1) 革新的次世代低公害車総合技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (2) 天然ガス未普及地域供給基盤確立実証試験(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (3) 天然ガスの液体燃料化(GTL)技術実証研究(運営費交付金)(4 - - 参照)

4 - - . 燃料電池自動車および水素関連技術

- (1) 固体高分子形燃料電池実用化戦略的技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (2) 燃料電池先端科学研究(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (3) 新利用形態燃料電池技術開発(運営費交付金)(4 - 参照)
- (4) 水素製造・輸送・貯蔵システム等技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (5) 水素貯蔵材料先端基盤研究事業(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (6) 水素社会構築共通基盤整備事業(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (7) 燃料電池システム等実証研究(4 - - 参照)

4 - - . 電気自動車

- (1) 次世代蓄電システム実用化戦略的技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)

4 - . 新エネルギー等の開発・導入促進

4 - - . 共通

- (1) 新エネルギー技術研究開発(運営費交付金)

概要

新エネルギーの自立的普及に向けて、太陽光、風力、バイオマスなど新エネルギー分野でのイノベーションを促進すべく、高効率かつ低コストを目指した先進的技術開発を実施する。具体的には以下の研究開発を実施する。

- A. 革新的な太陽電池の開発を実施する研究拠点を形成し、海外との研究協力等を行いながら、超長期の視野に立って、飛躍的な性能向上を目指した太陽光発電技術の開発を推進する。(革新型太陽電池国際研究拠点整備事業)
- B. 中長期的に、より一層の高効率化と低コスト化を目指して、革新的な材料、構造等を採用した太陽光発電技術の開発を推進する。(太陽光発電システム未来技術研究開発)

- C．2020年の目標発電コスト14円/kWhおよび太陽光発電システムの大幅な効率向上を実現すべく、未来技術研究開発などで得られた要素技術開発の成果の内、実用化が期待できる太陽電池作製に係る技術について課題を設定し早期実用化を助成する。(太陽光発電システム実用化促進技術開発)
- D．電力供給源としての太陽光発電の信頼性を確立し、今後の太陽光発電システムの円滑な普及促進を図るため、太陽光発電システムの大量普及時に不可欠な性能評価技術やリサイクル・リユース技術等システムの共通基盤技術に係る研究等を実施する。(太陽光発電システム共通基盤技術研究開発)
- E．PVシステムの普及拡大のため、「集中連系型太陽光発電システム実証研究」の設備を有効利用しながら、認証制度にも資する複数台連系に係わる試験方法を確立する。(単独運転検出装置の複数台連系試験技術開発研究)
- F．風力発電技術の国際的な動向を把握しつつ、我が国の複雑地形における風力発電利用上の各種課題を克服するための基礎から応用までの技術について研究開発を行う。具体的には我が国の厳しい風特性を反映した風特性モデルの確立及び高々度風況観測を簡便に行うためのリモートセンシング技術の精度検証・評価を行う。
- また、全国規模での落雷電流計測、落雷様相観測による雷特性の把握、落雷特性・落雷保護対策と被害実態との相関把握、上記を踏まえた効果的な落雷保護対策の検討及び実機規模での実雷による保護対策検証等を実施し、高精度落雷リスクマップを作成するとともに、風力発電設備へのより効果的な落雷等に対する対策を策定する。(次世代風力発電技術研究開発事業)
- G．我が国特有の海上特性や気象・海象条件を把握し、これらの自然条件に適した洋上風況観測法や風力発電システムに関する技術開発とその実証を行なうと共に、環境影響評価システム手法を確立する。(洋上風力発電技術研究開発)
- H．バイオマスのエネルギー利用の促進を図るためには、発生地域が分散し、形状・性状が多種多様にわたるバイオマス資源を利用しやすい形態の有用エネルギーへ効率的に転換できる技術を開発する。(バイオマスエネルギー等高効率転換技術開発)
- I．世界的にもベンチャー企業による太陽光発電、新型風力発電、燃料電池、バイオ燃料分野におけるイノベーション活動が活発化していることを踏まえ、詳細目標設定・多段階選抜形の米国SBI R制度を参考に特定のキーテクノロジーに対するベンチャーのチャレンジを強力に支援する。(新エネルギーベンチャー技術革新事業)

技術目標及び達成時期

- A．2050年までに「変換効率が40%超」かつ「発電コストが汎用電力料金並み(7円/kWh)」の太陽電池を実用化することを目指した研究開発の中で、変換効率40%超の実現に向けた技術の基礎・探索研究段階と位置づけて研究開発を実施する。
- B．2020年頃に業務用電力料金並の発電コスト(14円/kWh、モジュール製造原価として75円/W程度)、2030年頃に火力発電の発電コスト(7円/kWh、モジュール製造原価として50円/W程度)の実現に向けた中・長期的な技術開発を行う。

- C . 2015年に向けて市場競争力を備えた本格生産・商用化を目指す。
- D . 2020年度の技術開発目標である発電コスト14円/kWhを目指し、中期的な視点での太陽光発電の普及拡大に資する。
- E . 2009年度末までに、電力系統側が受け入れ可能な、導入台数の制限のない能動型単独運転検出装置の試験方法を確立する。
- F . 2012年度までに、風力発電の基礎から応用までの技術について、国際的な動向を把握しつつ、我が国特有の気象・地形に起因する各種問題(風車耐久性等)を克服するための研究開発を行って、我が国の風車産業の振興に資するとともに、IEA RD&D WINDなどの最先端の国際的風力発電共同研究に研究成果を反映させる。
また、2012年度までに、高精度落雷リスクマップを作成するとともに、風力発電設備へのより効果的な落雷等に対する対策を策定する。
- G . 2013年度までに、我が国の海象・気象条件に適した、洋上風況観測システム、洋上風力発電システム及び環境影響評価の手法等の技術を確立する。
- H . 2004年度より、バイオマスエネルギー転換プロセスにおける各工程のボトルネックを抽出し、2008年度までに開発が完了するよう、それぞれのボトルネックをブレイクスルーする要素技術開発を提案公募方式により実施する。更に、2005年度より2009年度まで、バイオマスのエネルギー転換・利用技術等の分野において2030年の普及を目指した新規な革新的技術を開発するための先導技術研究開発を提案公募方式により実施する。
- I . 潜在的なオプションの顕在化や関連産業分野の技術開発による技術革新により、新エネルギー導入促進技術オプションの多様化と経済性の向上に寄与する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(2) 新エネルギー技術フィールドテスト事業(運営費交付金)

概要

2010年度の新エネルギー導入目標達成に向け、新技術を活用した太陽光発電及び太陽熱利用システムの有効性の検証、バイオマス熱利用システムの性能・経済性等の検証、風車立地に必要な高所の風況データの収集・解析など総合的な新エネルギーフィールドテストを実施する。具体的には以下のフィールドテストを実施する。

- A . 新技術を活用した太陽光発電システム等を設置し、出力特性等の情報収集及び分析を行うことで、その有効性を確認するとともに、ガイドラインの策定等により広く情報発信を行う。(太陽光発電新技術等フィールドテスト事業)
- B . 新利用形態の太陽熱利用システムや未利用分野においてシステムを設置し、出力特性等の情報収集及び分析を行うことで、その有効性を確認するとともに、ガイドラインの策定等により広く情報発信を行う。(太陽熱高度利用システムフィールドテスト事業)
- C . 広く薄く賦存するバイオマスを、民間企業や研究機関等において研究開発が終了段階をむかえた高効率に熱利用できるシステムを設置し、設置場所の熱需要に合わせたフィールドテストを実施することにより、実運転におけるバイオマス熱

利用転換システムとしての課題抽出、解決を行い、早期実用化を図り、バイオマスエネルギーの導入促進を行う。(地域バイオマス熱利用フィールドテスト事業)

- D. 風力発電の導入目標(2010年度300万kW)を達成するため、共同研究事業者と大型風車の導入普及に必要な高所の風況データの収集・解析・評価を行い、公開する。(風力発電フィールドテスト事業)

技術目標及び達成時期

- A. 設置システムについて、2007年度に策定したガイドラインを2009年度、2012年度及び2015年度に見直し改訂する。
- B. 設置システムについて、2007年度に策定したガイドラインを2009年度に改訂する。また、2012年度及び2015年度に見直し改訂する。
- C. 一定レベルまで確立されたバイオマス熱利用技術について、性能や経済性等の状況・データを収集・分析し、熱利用システムの有効性を実証するとともに、これらの結果を公表することで汎用性の高い熱利用システムの確立し、2010年度のバイオマス熱利用の導入目標(308万KL)達成を目指す
- D. 2010年度までに、高所の風況データの解析・評価を行い、導入普及に有用な資料の取りまとめを行い、これらの結果を風力発電事業者、研究機関や風力発電事業を計画している各種団体等に公開することにより、風力発電導入の素地を形成し、風力発電の導入を拡大する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(3) イノベーション実用化補助金(運営費交付金)

概要

科学技術基本計画における戦略的技術領域・課題にかかる技術課題等で石油代替エネルギーの製造・生成・利用に資する実用化開発を行う民間企業に対し助成支援する。

技術目標及び達成時期

助成事業終了後3年以上を経過した時点で25%の実用化達成率。加えて、知的資産経営の方針に対する審査時の評価を通じて、「技術等の知的資産を活かす経営の下で収益拡大を図る(技術を経営、収益につなげる)」意識を普及させる。

研究開発期間

2000年度～

(4) 非化石エネルギー産業技術研究助成事業(運営費交付金)

概要

産業界や社会のニーズに応える石油代替技術のシーズの発掘とその育成、並びに、石油代替技術に関する次世代の研究リーダーの育成を図る。この目的のため、産業界からの期待が高い技術領域・課題を提示した上で、大学や独立行政法人の若手研究者等から研究開発テーマを募集する。厳正な外部評価によって石油代替効果があり且つ独創的・革新的なテーマを選定し、研究者代表者個人を特定して助成金を交付する。

技術目標及び達成時期

独創性のある若手研究者等を助成すると共に、中間評価ゲート方式が醸成する競争的環境の下で企業との連携を強化させることにより、10～15年後の実用化が有望な革新的石油代替技術の研究開発を促進する。本事業では革新的石油代替技術の実用化への第1歩となる特許について、助成期間終了後の出願比率を100%とすることを目標とするとともに、石油代替技術に関する次世代の研究リーダーの育成を図る。

研究開発期間

2000年度～

4 - - . 太陽・風力

(1) 太陽光発電無線送受電技術の研究開発

概要

新たな電力供給方式として地上において様々な用途への応用が見込まれ、また、長期的には将来の新エネルギーシステムとして期待される宇宙太陽光発電システムの中核的技術として応用可能な太陽光発電無線送受電技術を確立するため、安全性等を確保しつつ、太陽エネルギーを効率良く伝送するための要素技術等について研究開発を行う。

技術目標及び達成時期

2010年度までに高効率半導体増幅回路の開発、複数フェーズドアレイパネルの統合による精密ビーム制御技術の開発、高効率受電整流回路の開発を目指すことにより、無線送受電技術の高効率化を図る。

研究開発期間

2008年度～2010年度

4 - - . 電力系統制御・電力貯蔵

(1) 次世代蓄電システム実用化戦略的技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)

(2) 風力発電電力系統安定化等技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)

(3) 大規模電力供給用太陽光発電系統安定化等実証事業(運営費交付金)(4 - - 参照)

4 - - . バイオマス・廃棄物・地熱等

(1) E3地域流通スタンダードモデル創成事業(運営費交付金)

概要

離島(全域)におけるエタノール3%混合ガソリン(E3)の製造から給油までの大規模なフィールドテストを通じ、E3利用に関する社会システムモデルの構築と一般社会へ適用する際の技術課題の抽出を行う。

技術目標及び達成時期

2010年の「京都議定書目標達成計画」の導入目標(50万kl)に資するため、2009年度にE3利用の社会モデルを構築し、2011年度までにその検証を行う。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(2) バイオマス等未活用エネルギー実証事業(運営費交付金)

概要

地域に賦存する未活用の資源であるバイオマスをエネルギーとして有効活用するため、溶融ガス化等熱化学的変換技術による燃料化システムやメタンガス等生物化学的変換技術による燃料化システム等の実証試験事業、事業可能性調査等を実施し、利用ノウハウ等を蓄積、本格的なバイオマス等エネルギーの導入を推進する。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、バイオマス等の種別やエネルギー変換手法、更には地域特性を加味した一連のエネルギー転換システム毎のフィージビリティスタディや試験設備の設置により、バイオマス等の運搬・収集、エネルギー転換及びエネルギー利用に係るデータの収集、分析、評価を実施し、その結果をフィードバックすることによって本格的なバイオマス等エネルギーの導入を目指す。

研究開発期間

2001年度～2009年度

(3) バイオマスエネルギー地域システム化実験事業(運営費交付金)

概要

バイオマスエネルギーの資源収集・運搬、転換、残渣処理、利用までの一連の利活用システムについての、各要素の連携の最適化を図るための実証を実施することによって、地域特性に適合した地域主導によるバイオマスの地産地消・地域循環型の先導的モデルシステムを構築することによりバイオマスエネルギーの導入を促進する。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、国内バイオマス資源の安定的かつ経済的な供給システム、最適なエネルギー転換技術、エネルギー転換後に発生する残渣の処理等の一連の地産地消型エネルギー転換システムについて、ノウハウ蓄積、課題抽出及びその対策方法の策定、技術確立を行う。また、ここで確立されたバイオマスエネルギーシステムは他地域への波及を先導する事例となることを目標とする。

研究開発期間

2005年度～2009年度

4 - - . 燃料電池

(1) 固体高分子形燃料電池実用化戦略的技術開発(運営費交付金)

概要

自動車用、家庭・業務用等に利用される固体高分子形燃料電池(PEFC)の実用化・普及に向け、要素技術、システム化技術及び次世代技術等の開発を行うとともに、共通的な課題解決に向けた研究開発の体制の構築を図る。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、固体高分子形燃料電池の経済性・耐久性の向上や高性能

化のための技術開発を行い、燃料電池の普及段階へ向けて必要な基本的技術を確立する。

研究開発期間

2005年度～2009年度

(2) 燃料電池先端科学研究(運営費交付金)

概要

燃料電池の基本的反応メカニズムについての根本的な理解を深めるために、高度な科学的知見を要する現象解析及びそのための研究体制の整備を行い、現状の技術開発における壁を打破するための知見を蓄積する。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、燃料電池内における反応機構を電気化学(電極触媒反応、イオン移動、分子移動等)及び材料化学(溶解・腐食反応、錯形成反応、ラジカル反応、固相内拡散等)の観点から解明する。また、燃料電池新技術の性能を適切に評価・実証するための基本システムを構築する。

研究開発期間

2005年度～2009年度

(3) 新利用形態燃料電池技術開発(運営費交付金)

概要

ユビキタス社会に対応する燃料電池の実用化・普及拡大を図るため、小型可搬電源となり得る小出力燃料電池等の安全性確保等を目的とする基準・標準化研究開発及び燃料電池の用途開拓のための技術開発を行う。

技術目標及び達成時期

2010年までに、燃料電池の新利用形態、使用環境の拡がり等を考慮した高出力特性等の性能特性向上によって必要となる燃料容器等の周辺機器を含めたシステムの安全・環境基準の設定・標準化、規制緩和に資する試験データの取得、試験方法の開発及びこれらの規格・標準化に準じた新利用携帯用燃料電池技術を開発する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(4) 高耐久性メンブレン型LPガス改質装置の開発(運営費交付金)

概要

高耐久性の水素透過型メンブレン(膜)を開発し、家庭用LPガス供給システムから高純度の水素を供給可能な高効率LPガス改質装置を開発する。

技術目標及び達成時期

2008年度までに、家庭用LPガス供給システムから燃料電池へ高純度の水素を供給する高効率かつ低コストでコンパクトなメンブレン型LPガス改質装置を開発する。

研究開発期間

2006年度～2008年度

(5) 固体酸化物形燃料電池システム要素技術開発(運営費交付金)

概要

固体酸化物形燃料電池(SOFC)は発電効率が高く、分散型電源として期待されるが、実用化・普及のためには耐久性・信頼性向上、低コスト化等の課題を解決することが必要であり、材料開発や劣化要因解明など基盤的な要素技術の研究を行う。

技術目標及び達成時期

2012年度までに、耐久性・信頼性の向上のための劣化要因解明等の基礎研究、低コスト化のための材料等や高出力セルスタックの開発、起動停止対応等の実用性向上のための技術開発を実施する。

研究開発期間

2008年度～2012年度

(6) セラミックリアクター開発(運営費交付金)

概要

電気化学的に物質やエネルギーを高効率で変換する次世代型セラミックリアクターの実現のため、低温作動と急速作動停止を可能とする材料の開発とマイクロセルの集積構造化技術等の開発を行う。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、新電解質材料の適用や電極反応の高効率化等による、低温作動時(650以下)での出力性能を向上させる材料技術と共に、マイクロセルの集積構造化や精緻なインターフェース構築のための製造プロセス技術を開発。そして、これらの技術を統合することにより、次世代型セラミックリアクターとしてのプロトタイプモジュール実証(出力性能2kW/部等)を行う。

研究開発期間

2005年度～2009年度

(7) 水素製造・輸送・貯蔵システム等技術開発(運営費交付金)

概要

水素の製造・輸送・貯蔵等に係る機器やシステムについて、性能・信頼性・耐久性の向上や低コスト化を目指す水素利用技術の研究開発を行い、水素社会の実現に必要な基盤技術の確立を図る。

技術目標及び達成時期

2012年度までに、水素製造・貯蔵・輸送・充填に関する機器やシステムの信頼性・耐久性向上、低コスト化、性能向上等実用化検証や要素技術開発、及び当該技術を飛躍的に進展させることができる革新的技術開発や調査研究などを行い、その成果を産業界に提供することにより、水素エネルギー初期導入間近の関連機器製造・普及技術として完成させ、水素社会の真の実現に必要な基盤技術の確立を図る。

研究開発期間

2008年度～2012年度

(8) 水素貯蔵材料先端基盤研究事業(運営費交付金)

概要

世界トップ水準の優れた研究者を中核に、国内外の研究機関・企業のバーチャルな連携の下、高圧水素貯蔵に比べよりコンパクトかつ効率的な水素貯蔵を可能とする水素貯蔵材料の性能向上に必要な条件等を明らかにすることにより、燃料電池自動車の航続距離の飛躍的向上を図る。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、水素貯蔵材料の基本原則、さらには水素貯蔵能力の革新的向上に必要な条件を明らかにすることにより、水素をより安全・簡便・効率的かつ低コストに輸送・貯蔵するための技術基盤を確立する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(9) 水素先端科学基礎研究事業(運営費交付金)

概要

水素の輸送や貯蔵に必須な材料に関し、水素脆化等の基本原則の解明及び対策の検討を中心とした高度な科学的知見を要する先端的研究を、国内外の研究者を結集し行うことにより、水素をより安全・簡便に利用するための技術基盤を確立する。

技術目標及び達成時期

2012年度までに、水素脆化、水素トライボロジーの基本原則の解明及び対策の検討等を行い、水素をより安全・簡便に利用するための技術指針を産業界に提供する。

研究開発期間

2006年度～2012年度

(10) 水素社会構築共通基盤整備事業(運営費交付金)

概要

燃料電池の導入・普及に資する基盤整備のため、製品性能の試験・評価手法及び国内外の基準・標準の確立を図る。

技術目標及び達成時期

2009年度を目途に、安全性等に係るデータを取得し、そのデータを基に試験・評価手法の確立、国際標準の確立、規制の再点検を三位一体で進める。

研究開発期間

2005年度～2009年度

(11) 固体酸化物形燃料電池実証研究(運営費交付金)

概要

発電効率が高く、分散型電源として期待される固体酸化物形燃料電池(SOFC)の研究開発・実用化の促進のため、耐久性を始めとしたデータの取得・課題

抽出等のための実証を実施する。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、SOFCシステムの実証試験を数十～数百台規模で実施し、蓄積が不足している耐久性を始めとした実証データの取得・課題抽出等を行い、SOFC技術開発等へのフィードバックを行う。

研究開発期間

2007年度～2010年度

(12) 定置用燃料電池大規模実証事業(運営費交付金)

概要

定置用燃料電池コージェネレーションシステムの実用化開発を支援するため、量産技術の確立と実用段階に必要なデータ収集を行う大規模実証を実施する。

技術目標及び達成時期

2008年度までに、定置用燃料電池を大規模かつ広域的に設置し、実使用条件下における耐久性等の運転データを取得・分析、コストダウンに向けた課題抽出を行い、製品改良へのフィードバックを行う。

研究開発期間

2005年度～2008年度

(13) 燃料電池システム等実証研究

概要

実条件に近い中での燃料電池自動車等の実証走行や、高圧水素貯蔵システム、多角的な燃料供給システムの検証を進め、水素エネルギー社会における水素利用の課題等を抽出するとともに、燃料電池・水素に対する国民的理解の醸成を図る。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、実使用条件下における技術的課題を抽出するとともに、環境特性、エネルギー総合効率、安全性、耐久性等に関する基準・標準に資するデータを取得し、燃料電池自動車、水素ステーションの研究開発等へのフィードバックを行う。

研究開発期間

2006年度～2010年度

4 - . 原子力等利用の推進とその大前提となる安全の確保

4 - - . 軽水炉・軽水炉核燃料サイクル

< 新型軽水炉 >

(1) 次世代軽水炉等技術開発

概要

2030年前後に見込まれる大規模な代替炉建設需要に対応するため、安全性・経済性、信頼性等に優れ、世界標準を獲得し得る次世代軽水炉の技術開発を行

技術目標及び達成時期

2010年度までに、次世代軽水炉の実現に必要な要素技術開発等及びプ

ラント概念の成立性について見通しを得るための概念設計検討を行う。

研究開発期間

2008年度～2010年度（見直し）

< プルサーマルの推進 >

(2) 全炉心混合酸化物燃料原子炉施設技術開発

概要

プルサーマルが当面のプルトニウム利用策として期待されていることを踏まえ、既存の軽水炉に比べ約3倍のプルトニウムを装荷することができる全炉心混合酸化物燃料原子炉に必要な技術開発を行う。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、原子炉の開発に必要な設計、解析、試験等を行い、全炉心混合酸化物燃料原子炉技術を確立する。

研究開発期間

1996年度～2011年度

< 軽水炉サイクルから高速増殖炉サイクルへの円滑な移行のための技術開発 >

(3) 高速炉再処理回収ウラン等除染技術開発

概要

FBR実証炉及び関連サイクル施設の早期実現を図るため、文部科学省と連携し、「高速増殖炉サイクル実用化研究開発」を推進する。そのなかで、次世代再処理工場から発生する高線量回収ウラン等を既存軽水炉燃料製造施設で取扱可能とする、次世代再処理工場と調和可能な回収ウラン等の除染技術について、調査・基礎試験等を行い、商業的に利用可能な除染技術候補の検討等を実施する。選定された技術については、プロセス試験等を実施する。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、回収ウラン等の除染プロセスの候補技術の洗い出し及び候補プロセス技術の基礎試験を終了し、次世代再処理技術との適合性の検証を行い、プロセス試験を実施すべき除染プロセス技術を選定する。

また、2015年までに、選定した除染プロセス技術について工学化規模でのプロセス試験を行い、商業的に利用可能な転換前高除染技術としての実効性を検証する。

研究開発期間

2007年度～2015年度

< ウラン濃縮技術の高度化 >

(4) 遠心法ウラン濃縮技術開発

概要

我が国におけるウラン濃縮技術や生産能力の維持・向上のため、世界最高水準の性能を有するなど国際的に比肩し得る経済性と性能を有する新型遠心分離機を開発する。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、国際役務価格\$100/kg SWU相当を目指して、現在実用化している金属胴遠心分離機の約5倍という高い分離性能や同遠心分離器を上回る寿命など国際的に比肩し得る技術レベルを有する新型遠心分離機の開発を目指すとともに、最終仕様の新型遠心分離機を多数台用いたカスケード試験の実施により商用プラントとしての信頼性を確立し、運転要領の策定を行う。

研究開発期間

2002年度～2009年度

< 回収ウラン >

(5) 回収ウラン利用技術開発

概要

六ヶ所再処理工場で回収される回収ウランを再濃縮し、再び軽水炉で利用するため、濃縮施設等既存施設への影響等を把握し、転換プロセスを中心とした回収ウラン利用技術を開発する。併せて劣化ウラン酸化固形化についても検討を行う。

技術目標及び達成時期

2012年頃までに、劣化ウランの取扱・管理の容易さや貯蔵効率を向上させるための劣化ウラン酸化固形化（再転換を含む）技術の研究開発を行い、同技術に係る基礎プロセスを確立する。2015年度頃までに、再処理により回収される回収ウランの濃縮が可能な商用遠心分離機の設計を確定する。

研究開発期間

2008年度～2015年度

< 共通基盤技術開発 >

(6) 革新的実用原子力技術開発費

概要

原子力発電及び核燃料サイクルに関する革新的かつ基盤的技術であって実用化につながる研究開発テーマを競争的環境の下で広く提案公募方式により募集し、将来の原子力技術の発展及び技術の多様化につながる研究開発を行う。

なお、実施に当たっては、研究開発の特性に応じて既存技術分野、基盤技術分野、国際協力技術分野の3分野を設け事業を実施する。

技術目標及び達成時期

2012年まで、既存技術分野、基盤技術分野、国際協力技術分野において個別テーマ毎に研究開発を実施する。

なお、既存技術分野は2008年度で終了となる。

研究開発期間

2000年～2010年（見直し）

4 - - . 高速増殖炉（FBR）サイクル

(1) 発電用新型炉等技術開発

概要

FBR実証炉及び関連サイクル施設の早期実現を図るため、文部科学省と連携し、「高速増殖炉サイクル実用化研究開発」を推進する。具体的には、実証炉に必

要な要素技術のうち、設計・建設段階において必要となる実プラント技術として、格納容器設計技術、耐震性評価技術、高温材料設計技術、保守技術の試験等を実施する。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、実証炉の概念設計へ反映しうる設計基準データ等の技術的根拠を得る。

研究開発期間

2007年度～2010年度

(2) 高速炉再処理回収ウラン等除染技術開発(4 - - 参照)

4 - - . 放射性廃棄物処理処分

(1) 地層処分技術開発

概要

) 地層処分共通技術開発

高レベル放射性廃棄物等の地層処分における共通的技术として、今後段階的に進められる処分地選定の際に重要となる地質等調査技術の高度化開発を行う。

) 高レベル放射性廃棄物関連処分技術開発

高レベル放射性廃棄物処分に係る基盤技術として、人工バリア等の長期性能評価技術、処分場操業の際のオーバーパック溶接や搬送・定置等の遠隔操作技術の開発を行う。

) TRU廃棄物処分関連技術開発

TRU廃棄物の地層処分に係る基盤技術として、高レベル放射性廃棄物との併置処分の可能性も念頭に、TRU廃棄物に固有に含まれる核種の閉じ込め技術や人工バリア等の長期性能評価技術の開発を行う。

技術目標及び達成時期

) 地層処分共通技術開発

2011年度までに、処分地選定の初期段階で必要となる地上からの調査技術のうち、特に沿岸域の環境や高精度での地下水評価等に係る調査評価技術の高度化・確証を行う。

) 高レベル放射性廃棄物関連処分技術開発

2011年度までに、人工バリア等の長期性能評価技術や遠隔操作等の工学技術について高度化を図り、幅広い地質環境に対応可能な技術選択肢と成立性を提示する。

) TRU廃棄物処分関連技術開発

2011年度までに、TRU廃棄物に固有に含まれるヨウ素129や炭素14の閉じ込め、高アルカリ環境下での人工バリアの性能評価等に関し、幅広い地質環境に対応可能なデータ・モデルの整備と技術選択肢の提示を行う。

研究開発期間

1998年度～2011年度

(2) 管理型処分技術開発

）地下空洞型処分施設性能確認試験

概要

T R U廃棄物や発電所廃棄物等の余裕深度処分において検討されている「地下空洞型処分施設」の成立性確認のため、実規模大の空洞を利用した総合的な確認試験を行う。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、実規模大の空洞内にコンクリートピット等からなる地下空洞型処分施設を構築し、施工性や初期性能の総合的な確認を行う。

研究開発期間

2006年度～2011年

(3) 放射性廃棄物共通技術開発

概要

）放射性廃棄物重要基礎技術研究調査

放射性廃棄物処分に係る国内外の最新知見の収集・分析、重要かつ基礎的な課題の抽出並びに研究を実施し、長期に及ぶ処分事業等を支える技術基盤の拡充を図る。

）放射性核種生物圏移行評価高度化調査

放射性廃棄物処分の安全評価に共通的な基盤情報として、生物圏における核種移行プロセスを評価するため、日本の風土を反映した核種移行パラメータ・モデルを整備する。

技術目標及び達成時期

）放射性廃棄物重要基礎技術研究調査

2011年度までに、放射性廃棄物処分に共通的な重要基礎技術として、地質環境の長期安定性評価、人工バリアや岩盤の長期挙動評価等に係る知見を整備する。

）放射性核種生物圏移行評価高度化調査

2011年度までに、沿岸域の環境も含めたわが国表層環境への適用とT R U廃棄物に固有の核種等を考慮した、生物圏核種移行のモデルとデータベースを構築する。

研究開発期間

2001年度～2011年度

4 - - . 原子力利用推進に資する電力系統技術

(1) イットリウム系超電導電力機器技術開発(運営費交付金)

概要

世界的にも我が国が最先端の技術力を有する次世代高温超電導線材を活用し、経済社会の基盤となる電力の安定的かつ効率的な供給システムを実現するため、系統を適正に制御し、電力供給を安定化させるための技術及び発電電力を無駄なく輸送するための高効率な送電技術の確立を目指す。

技術目標及び達成時期

2012年度までに、イットリウム系超電導線材を用いたS M E S、電力ケー

ブル、変圧器実現のための重要な技術開発を行い、各機器の成立性を実証する。

研究開発期間

2008年度～2012年度

(2) 高温超電導ケーブル実証プロジェクト(運営費交付金)

概要

革新的な超電導送電技術を確立するため、工業生産プロセスで実用化レベルに達している高温超電導線材を活用し、実用化のための実証試験及び評価を行う。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、200MVA級の中間接続部を有した三心一括型高温超電導ケーブルを、冷却装置や保護装置などの付帯設備とともに66KV実系統に接続して、12ヶ月以上の長期連系試験を行うことによって総合的な安全性や信頼性を実証する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

4 - - . その他電力供給安定化技術

(1) 風力発電電力系統安定化等技術開発(運営費交付金)

概要

大規模風力発電所等の普及拡大時において懸念される周波数変動等系統上の問題対策として、蓄電システムの併設による出力安定化技術を開発し、実態に応じたシステム稼働データの抽出や当該システムの有効性の検証を行う。

技術目標及び達成時期

長期実証運転を強いられた大容量システムの耐久性や信頼性を評価するため解体分析調査を行うことにより、当該技術の有効性を検証するとともに、そのシステムを確立する。

研究開発期間

2003年度～2008年度

(2) 大規模電力供給用太陽光発電系統安定化等実証事業(運営費交付金)

概要

大規模太陽光発電を電力系統に連系した場合に課題となる系統安定化対策やピーク対策のための技術等を開発するとともに、その有効性を実証する。

また、国内外の先進的な次世代技術の価格性能を比較することを通じて技術開発を加速する。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、下記の実証研究を行い、その有効性を確認する。

(イ) 蓄電池等を組み合わせた出力変動抑制システムの有効性。

(ロ) 発電出力のピーク制御(午後のピーク帯へのシフト)の有効性。

(ハ) 大型インバータによる高調波抑制システムの有効性。

(ニ) 国内外メーカーの太陽電池モジュールの特性比較を行い、性能、経済性等を比較・検証。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(3) 次世代蓄電システム実用化戦略的技術開発(運営費交付金)

概要

蓄電池技術は、新エネルギーの出力安定化や燃料電池自動車(FCV)・ハイブリッド自動車(HEV)・電気自動車(EV)等の高効率次世代自動車に共通する重要なコア技術である。そこで、高性能蓄電システムに係る要素技術開発、新材料開発及び基盤技術の開発を行う。

A. 系統連系円滑化蓄電システム技術開発

B. 次世代自動車用高性能蓄電システム技術開発

技術目標及び達成時期

A. 2010年度末において、寿命10年、コスト4万円/kWh、1MW規模のシステムおよび要素技術の確立と2030年において寿命20年、コスト1.5万円/kWh、20～30MW規模の蓄電システムを見通せる技術開発。また、新エネルギー対応の充放電パターン等、基礎データの整備、大型化に伴う安全性や寿命等の評価手法の確立。

B. 2011年度末において、電池開発では、0.3kWhモジュールを作製し、重量エネルギー密度100Wh/kg、出力密度2000W/kg、寿命10年、コスト4万円/kWhを達成すること(条件:3kWhの組電池、100万台生産ベース)。電池構成材料及び電池反応制御技術の開発では重量エネルギー密度200Wh/kg、出力密度2500W/kg、コスト3万円/kWhを小型単電池で達成すること(上記と同条件)。また、電池周辺機器開発では、格段の高性能化、コンパクト化、低コスト化を達成すること。さらに、重量エネルギー密度500Wh/kgを見通せる新規概念・構造の蓄電池基礎開発の他、劣化・寿命診断法、安全性評価などの各種試験法等の開発およびそれら共通基盤技術の基準・標準化。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(4) 発電プラント用超高純度金属材料の開発(運営費交付金)

概要

従来の金属材料と比べ耐食性、耐久性、加工性などの飛躍的な向上が期待できる超高純度金属材料の発電プラント部材としての実用化を目指し、低コスト・量産化製造プロセス、及び加工・溶接技術等の開発を行い、部材としての実用特性の評価・検証を行う。

また、実用化に向けたフィージビリティ調査を行い経済性の評価等を実施するとともに、材料特性に関するデータベースの整備及びそれに必要な試験研究を行う。

技術目標及び達成時

2009年までに、不純物総量100ppm未満、溶解量数100kg以上の低コスト・量産化技術製造技術を開発するとともに、製造された超高純度材料が発電プラントの各種機器に適用でき、本材料の持つ優れた特性を長期に亘って

発揮できることを確認する。

研究開発期間

2005年度～2009年度

4 - . 化石燃料の安定供給確保と有効かつクリーンな利用

4 - - . 石油・天然ガス・石炭の探鉱・開発・生産技術

(1) 石油・天然ガス開発・利用促進型大型ノ特別研究(運営費交付金)

概要

石油及び可燃性天然ガス資源の開発に係る技術の振興を図る観点から、大水深、複雑な地層といった悪条件化が進む石油・天然ガスの探鉱・開発技術、利用拡大が見込まれる天然ガス田の開発促進に資する天然ガス有効利用技術等について、短期間で実用化が期待され、民間ニーズに直結した研究開発を提案公募により実施する。

技術目標及び達成時期

2012年度までに、我が国の石油・天然ガスの探鉱・開発技術力の向上、及び天然ガスの利用の促進に向けた天然ガスの有効利用技術の開発を行う。

研究開発期間

2001年度～2012年度

(2) 石炭生産技術開発(クリーン・コール・テクノロジーの研究開発の一部)

概要

石油代替エネルギーである石炭の安定供給を図るため、低品位炭の有効利用、石炭生産性の向上のための研究開発等を行う。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、インドネシアにおいて低品位炭の有効利用を図ることを目標に、低品位炭の発熱量を高め、自然発火性を抑制する低品位炭改質技術を確立する。

研究開発期間

2001年度～2009年度

(3) 石油精製物質等簡易有害性評価手法開発(運営費交付金)

概要

石油の生産及び流通の合理化を図る観点から、石油製品等に含まれる化学物質によるリスクを把握し、必要な対策を適切に行うことを可能とするため、*in vitro*培養系技術等の活用により遺伝子組換え細胞等を用いた*in vitro*系簡易有害性予測手法、また、トキシコゲノミクスを活用した短期動物試験結果と相関する遺伝子発現データセットを開発する。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、遺伝子導入技術、幹細胞分化誘導技術、生物発光技術等を適用した培養細胞を用いて、試験期間1ヶ月程度、発がん性、催奇形性及び免疫毒性を予測評価できる試験手法を開発し、また、遺伝子発現解析技術を短期動物試験に適用し、28日間反復投与試験結果と相関する遺伝子発現データセット

を完成させる。また、標準的な試験プロトコルを策定する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(4) 石油資源遠隔探知技術の研究開発

概要

我が国が開発・運用する多様な地球観測センサ(ASTER、PALSAR等)の地球観測データを用いて、石油・天然ガス等の安定供給確保のため、資源開発・探査、環境観測等に有効なデータの処理解析手法の研究開発を行う。また、地球観測データのような大容量のデータを容易に扱えるシステムの研究開発を実施することで資源開発・探査、環境観測を含む多様な分野でのリモートセンシングの利用拡大を図る。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、資源開発・探査、環境観測等の分野における地球観測データ処理・解析技術の向上及び地球観測データの利用の拡大を図る。

研究開発期間

1981年度～2010年度

(5) ハイパースペクトルセンサ等の研究開発(運営費交付金)

概要

資源開発に有効な岩石・鉱物や地質構造解析の高次元解析を可能とするハイパースペクトルセンサの開発を行うとともに、軌道上におけるデータ取得の実証を行い、センサ技術の確立を行う。

技術目標及び達成時期

2011年度までにスペクトル分解能200バンド前後のハイパースペクトルセンサを開発し、地表面のスペクトル情報を取得して資源開発に有効なセンサ技術の実証を行う。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(6) 次世代合成開口レーダ等の研究開発

概要

石油の生産及び流通の合理化を図る観点から行うものであり、石油及び可燃性天然ガス資源等の開発に資するため、資源探査能力を格段に向上した合成開口レーダである次世代合成開口レーダ(PALSAR)の健全性評価やセンサを維持することにより、取得される画像データを用いた石油・天然ガス資源の遠隔探知を行う技術を確立する。

技術目標及び達成時期

PALSARの開発、健全性の評価・維持を実施することにより、2010年度までに、レーダ技術の高度化(アンテナ指向の電子制御化、分解能の向上、多偏波観測等)を図る。

研究開発期間

1993年度～2010年度

(7) 極軌道プラットフォーム搭載用資源探査観測システムの研究開発

概要

石油の生産及び流通の合理化を図る観点から行うものであり、石油及び可燃性天然ガス資源等の開発に資するため、資源探査能力を格段に向上した光学センサである資源探査用将来型センサ(ASTER)の健全性評価やセンサを維持することにより、取得される画像データを用いた石油・天然ガス資源の遠隔探知を行う技術を確立する。

技術目標及び達成時期

ASTERの開発、健全性の評価・維持を実施することにより、2010年度までに、センサ技術の高度化(ポインティング機能の追加、分解能の向上、熱センサの搭載等)を図る。

研究開発期間

1987年度～2010年度

4 - - . 石油・天然ガスの有効利用技術

(1) 石油燃料次世代環境対策技術開発

概要

バイオマス燃料から製造した石油製品が自動車排出ガスに及ぼす影響、新たな自動車燃焼技術(自着火燃焼(着火までに燃料と空気を十分に混合し、その混合気体を点火プラグの使用なしで圧縮することにより着火させる燃焼法でNOx排出低減、熱効率が高い等の利点がある))に適応した燃料に関する技術開発を実施する。

また、建設機械、発電機等のオフロードエンジンの排ガスによる環境負荷低減や石油燃焼機器の効率的な利用を進めるための技術開発を実施する。

技術目標及び達成時期

バイオマス燃料の利用時における、燃料と自動車エンジン技術の両面の影響評価を進め、技術的課題を解決し、運輸部門における燃料多様化を目指す。

また、オフロードエンジンの規制は欧米が先行していることから、2012年頃、欧米において規制強化が予定されている排ガス規制に対応した技術を確立し、我が国における規制強化に対応可能な燃焼技術を実現することを目指す。

研究開発期間

2002年度～2011年度

(2) 石油精製高度機能融合技術開発

概要

石油精製業を中心とする石油コンビナート全体の横断的かつ高度な運営機能の融合を図り、単独企業のみでは達成困難なコンビナート域内の省資源、省エネルギーの向上を進めるため、異業種異企業間における限りある貴重なエネルギー資源の利用効率の高い生産技術に関し技術の開発・実証を行う。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、我が国における他のコンビナートへの波及効果を含め、CO₂排出量を63万トン/年削減可能とする技術を確立する。

研究開発期間

2006年度～2009年度

(3) 将来型燃料高度利用技術開発

概要

省エネ、二酸化炭素削減効果が見込まれる燃料電池自動車の燃料である高純度(99.99%以上)水素を安定的かつ経済的に供給することは重要である。石油は、その長所として豊富な水素供給余力と安価な水素製造技術及び全国に展開した災害に強いガソリンスタンドを保有している。これら石油の長所を活かした水素供給システムの確立により、水素社会の早期実現に貢献するものである。本事業では、製油所からの高純度水素供給技術開発とガソリンスタンドを拠点とする高純度水素製造技術開発を行う。

技術目標及び達成時期

コスト低減のため製油所におけるナフサから高効率(80%以上)な高純度水素製造を可能とする新たな技術を開発する。また、供給地のガソリンスタンドにおいて有機ハイドライドから高純度の水素を高効率(80%)に取り出すための水素発生装置を開発する。また、脱硫後の灯油硫黄分を検出限界以下の10ppb以下とする脱硫剤の開発を行うとともに、貴金属使用量を2-3wt%から0.5wt%以下まで低減しても、従来と同等の高い性能が維持できる改質触媒を開発する。さらに、膜分離型反応器を用いた99.99%高純度水素の製造効率を80%、4万時間の耐久性が期待できる水素製造システムを開発する。

研究開発期間

2008年度～2010年度

(4) 革新的次世代石油精製等技術開発

概要

原油価格の高騰・高止まりや原油の重質化と製品需要構造変化等の石油を巡る大きな環境変化のなか、連産品である石油製品を今後とも長期的に安定化かつ効率的に供給するためには、製油所の更なる高度化に向けた技術の開発実用化が必要である。このため、非在来型原油を含めた重質油を原料として、製油所におけるボトムレス化、余剰となる分解留分の高付加価値等のためのプロセスや触媒技術等の開発を行う。また、次世代の技術シーズ創出のため、これまでの技術とは異なる発想により我が国唯一の革新的な新規触媒研究、新規膜分技術研究、新規製造プロセス研究等を産官学の連携等により実施する。

技術目標及び達成時期

2011年度までに重質油対応型高過酷度接触流動分解技術(HS-FCC)については、3千BD規模(商業レベルの1/10規模)の実証研究を通じ、プロピレン収率20%以上(既存技術4%程度)、将来不足が予想される高オクタン価ガソリン基材(RON98(既存技術92程度))の製造を可能とする技術を確立する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(5) 次世代高信頼性ガスセンサー技術開発

概要

一酸化炭素中毒やガス漏れなどのガス事故を限りなくゼロに近づけるため、センサー素子のナノレベルでのメカニズム解析及び開発設計を行い、コードレスで高信頼性を有する次世代高信頼性ガスセンサー（COセンサー・メタンセンサー）を開発する。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、最先端のナノテクノロジーおよびMEMS技術を導入し、電池駆動で5年以上の長寿命、高信頼性（数百PPM以下の故障率）、低コストなCOとメタンのセンサを開発する。

研究開発期間

2008年度～2011年度

(6) 天然ガス未普及地域供給基盤確立実証試験（運営費交付金）

概要

天然ガスの供給手段が存在せず（パイプラインはもとよりサテライト供給でも採算が合わないため）石油等の燃料に依存している地方都市部の中小規模の天然ガス需要に対し、天然ガスハイドレートを利用した、新たな輸送技術を確認する。

技術目標及び達成時期

従来のLNGチェーンによる供給に係る投資コストに対し、そのコストを約1/4に低減する事が可能な天然ガスハイドレート（NGH）供給システムを2008年度までに確立する。

研究開発期間

2006年度～2008年度

(7) 天然ガスの液体燃料化（GTL）技術実証研究（運営費交付金）

概要

硫黄等を含まず排出ガスがクリーン、着火性が高いという特徴を有することから石油系燃料代替として期待されるGTLについて、天然ガス中に含まれるCO₂を除去せず、原料として積極的に活用することから、従来利用が困難であったCO₂を多く含むガス田からの天然ガスが利用可能、CO₂除去装置が不要であることによる生産設備コストの低減が可能、といった強みを有する我が国独自のGTL製造技術の確立を図る。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、実証プラントによる運転研究（500バレル/日）を行い、商業規模でのGTL製造技術を確認する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

- (8) 高耐久性メンブレン型 L P ガス改質装置の開発 (運営費交付金) (4 - - 参照)
- (9) 石油・天然ガス開発・利用促進型大型 / 特別研究 (運営費交付金) (4 - - 参照)
- (1 0) 高効率ガスタービン実用化技術開発 (4 - - 参照)

4 - - . オイルサンド等非在来化石資源の利用技術

(1) メタンハイドレート開発促進委託費

概要

日本周辺海域に相当量の賦存が見込まれ、国産のクリーンなエネルギー資源として有望なメタンハイドレートを利用可能とするため、資源量評価手法、生産手法及び環境影響評価手法等の確立のための技術開発を行う。

技術目標及び達成時期

2 0 1 6 年度までに、商業的産出のための技術を整備することを目指し、日本周辺海域におけるメタンハイドレートの賦存状況と特性の明確化、有望賦存海域からのメタンハイドレート資源フィールドの選択及び現場産出試験等による生産手法の確立等を推進する。

研究開発期間

2 0 0 1 年度 ~ 2 0 1 6 年度

(2) 革新的次世代石油精製等技術開発 (4 - - 参照)

4 - - . 石炭クリーン利用技術

(1) 革新的ゼロエミッション石炭火力発電プロジェクト

概要

石炭の高効率な利用を図るために、

- ・ 酸素吹きによる石炭ガス化発電 (I G F C) の開発実証
- ・ 化学吸収法による C O 2 の分離・回収技術の実証
- ・ C O 2 を輸送するための船舶の設計
- ・ C O 2 を貯留するための発生源近傍における貯留ポテンシャルやコストの評価
- ・ 石炭ガス化から CCS まで一貫したトータルシステムの設計等を行う。

技術目標及び達成時期

石炭ガス化については、2 0 0 9 年度までに、パイロットプラントにおいて、高圧の石炭ガスから C O 2 の分離・回収技術の確立及びガス化炉の信頼性向上へ向けて、3 炭種以上の適応炭種拡大試験を実施する。また、C C S については、2 0 1 6 年度頃から C O 2 地中貯留の実証試験に着手する。

研究開発期間

2 0 0 7 年度 ~ 2 0 1 2 年度

(2) 国際革新的ゼロエミッション石炭火力発電プロジェクト補助金

概要

石炭火力発電から排出されるCO₂の削減技術について諸外国との実証普及事業等を実施し、当該技術の普及基盤を整備することにより、エネルギー供給に対する環境上の制約を取り除き、もって我が国エネルギー需給構造の安定化を図る。

技術目標及び達成時期

石炭ガス化技術等実証普及事業では、ゼロエミッション型石炭火力発電の実証プロジェクト(Future Genプロジェクト)への参画を通じた石炭ガス化・発電技術、CO₂分離回収技術、CO₂輸送貯留技術等に関する情報収集や関連する技術調査の実施等により、我が国におけるゼロエミッション型石炭火力発電の実用化開発に資する技術・知見を得る。また、将来のCO₂の地中貯留に際しては、国民の正しい理解が不可欠であり、これを念頭においたゼロエミッション型石炭火力発電に係る普及啓蒙活動を積極的に実施する。

酸素燃焼国際共同実証事業では、既存の微粉炭火力発電の改造による酸素燃焼方式のゼロエミッション型石炭火力発電プラントの実用化を目標とするものであり、既存のプラントの改造により対応可能であること、酸素燃焼を行うことにより、燃焼ガスからCO₂を分離する装置が不要であることから、比較的低コストで極めて大きなCO₂削減効果が期待できる。

研究開発期間

2007年度～2016年度

(3) 先進超々臨界圧火力発電実用化要素技術開発費補助金

概要

従来の超々臨界圧火力発電(USC)は、蒸気温度の最高温度は630程度が限界で、送電端熱効率も42～43%が原理的限界といわれてきた。しかしながら、近年の材料技術の進歩により、700以上の蒸気温度を達成できる可能性が見えてきたことから、これらの材料を活用した先進超々臨界圧火力発電技術(A-USC)の開発を行うものである。A-USCは、蒸気温度700級で46%、750級で48%の高い送電端熱効率の達成が可能な技術であり、2020年以降増大する経年石炭火力発電のリプレイス需要に対応するため、早急に技術開発を進める必要がある。そのため、ボイラーメーカー、タービンメーカー及び材料メーカーが共同でA-USCの技術開発に取り組む。

技術目標及び達成時期

平成22年度までにシステム基本設計を完了し、シミュレーションにより送電端熱効率46%～48%の達成が可能なことを確認する。平成24年度までにボイラー、タービン部材等が700以上の蒸気温度に耐えられるかどうかを試作、評価し、経済性を含めたシステム成立性への見通しを得る。平成27年～平成28年度に実缶試験、回転試験を実施し、蒸気温度700以上の条件下でボイラー、タービンの信頼性を確認する。また、ボイラー、タービン部材について3万～7万時間の長期信頼性試験を実施し材料特性を検証する。

研究開発期間

2008年度～2016年度

(4) 石炭利用技術開発(一部、運営費交付金)(クリーン・コール・テクノロジーの

研究開発の一部)

概要

環境適合的な石炭利用の拡大を図るため、石炭ガス化、無灰化技術による転換効率向上に資する技術や石炭からの水素製造技術等、クリーン・コール・テクノロジーの開発を行う。

技術目標及び達成時期

2008年度までに、

- ・ 石炭から合成ガスや軽質オイルを併産する高効率な石炭部分水素化プロセス技術を20t/日のパイロットプラント規模で確立する(石炭部分水素化熱分解技術の開発)

2009年度までに、

- ・ 化学原料等に利用可能な合成用ガスを石炭乾留ガスから無触媒で製造する技術をパイロットプラントで確立する(無触媒石炭乾留ガス改質技術開発)

2011年度までに、

- ・ 石炭利用プロセスにおいて、環境分析技術の高精度化、環境影響成分の挙動解析のためのモデルの構築等により、環境への影響低減手法を開発する(戦略的炭素ガス化・燃焼技術開発)

研究開発期間

1995年度～2008年度(2008年度見直し)

- ・ 戦略的炭素ガス化・燃焼技術開発 2007年度～2011年度
- ・ 無触媒石炭乾留ガス改質技術開発 2006年度～2009年度
- ・ 石炭部分水素化熱分解技術 2003年度～2008年度

(5) 噴流床石炭ガス化発電プラント開発費補助金

概要

供給安定性に優れた石炭の高効率かつ低環境負荷での利用を図るため、石炭をガス化して燃料とし、コンバインドサイクル(ガスタービンと蒸気タービンの組合せ)を駆動する高効率発電技術(石炭ガス化複合発電技術(IGCC: Integrated coal Gasification Combined Cycle)の実証試験を行う。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、25万kWの実証機を用いた実証試験により、熱効率40.5%(送電端、高位発熱量ベース)を目指す。この目標は50万kWの商用機における熱効率46～48%に相当する。本技術は実証試験終了後の2010年度より商用化が可能である。

研究開発期間

1999年度～2009年度

(6) 環境調和型製鉄プロセス技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)

4 - - . その他共通

(1) イノベーション実用化補助事業(運営費交付金)(4 - - 参照)

- (2) 非化石エネルギー産業技術研究助成事業 (運営費交付金)(4 - - 参照)
- (3) 固体高分子形燃料電池実用化戦略的技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (4) 燃料電池先端科学研究 (運営費交付金)(4 - - 参照)
- (5) 新利用形態燃料電池技術開発 (運営費交付金)(4 - - 参照)
- (6) 高耐久メンブレン型 L P ガス改質装置の開発(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (7) 固体酸化物形燃料電池システム要素技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (8) 水素製造・輸送・貯蔵システム等技術開発 (運営費交付金)(4 - - 参照)
- (9) 水素貯蔵材料先端基礎研究事業 (運営費交付金)(4 - - 参照)
- (1 0) 水素社会構築共通基盤整備事業 (運営費交付金)(4 - - 参照)
- (1 1) 水素先端科学基礎研究事業 (運営費交付金)(4 - - 参照)
- (1 2) 固体酸化物形燃料電池実証研究 (運営費交付金)(4 - - 参照)
- (1 3) 定置用燃料電池大規模実証事業 (運営費交付金)(4 - - 参照)
- (1 4) 燃料電池システム等実証研究 (4 - - 参照)

5．政策目標の実現に向けた環境整備（成果の実用化、導入普及に向けた取組）

5 - ．総合エネルギー効率の向上

- 事業者単位の規制体系の導入
- 住宅・建築物に係る省エネルギー対策の強化
- セクター別ベンチマークアプローチの導入と初期需要創出（高効率機器の導入補助等）
- トップランナー基準の対象機器の拡充等
- アジアにおける省エネルギー対策の推進を通じた我が国の国際競争力の向上
- 国民の省エネルギー意識の高まりに向けた取組

5 - ．運輸部門の燃料多様化

- 公共的車両への積極的導入
- 燃費基準の策定・改定
- アジアにおける新エネルギー協力
- 国際標準化による国際競争力向上

5 - ．新エネルギー等の開発・導入促進

- 事業者支援補助金等による初期需要創出
- 新エネルギーベンチャービジネスに対する支援の拡大
- 新エネルギー産業構造の形成
- 電気事業制度・ガス事業制度の在り方の検討

5 - ．原子力利用の推進とその大前提となる安全の確保

- 電力自由化環境下での原子力発電の新・増設の実現
- 資源確保戦略の展開
- 次世代を支える人材育成
- 中小型炉の海外市場への展開、我が国原子力産業の国際展開支援
- 原子力発電拡大と核不拡散の両立に向けた国際的枠組み作りへの積極的関与
- 国と地域の信頼強化

5 - ．化石燃料の安定供給確保と有効かつクリーンな利用

- 資源国等との総合的な関係強化（研究開発の推進・協力、人材育成・技術移転、経済関係強化など）
- 化石燃料のクリーンな利用の開拓

6．研究開発の実施に当たっての留意事項

事業の全部又は一部について独立行政法人の運営費交付金による実施されるもの（事業名に（運営費交付金）と記載したもの）は、中期目標、中期計画等に基づき、運営費交付金の総額の範囲内で当該独立行政法人の裁量によって実施されるものである。

また、事業名に（採択テーマ）と記載された事業は、提案公募事業により採択されたテーマを記載したものであり、その採択や評価等は、提案公募事業の実施機関の責任の下、実施されるものである。

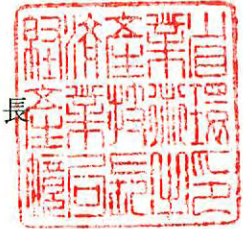
7. 改訂履歴

- (1) 平成16年7月7日付け、省エネルギー技術開発プログラム基本計画、新エネルギー技術開発プログラム基本計画、燃料技術開発プログラム基本計画、電力技術開発プログラム基本計画、原子力技術開発プログラム基本計画制定。固体高分子形燃料電池/水素エネルギー利用プログラム基本計画(平成16・02・03産局第6号)は、新エネルギー技術開発プログラム基本計画に統合することとし、廃止。
- (2) 平成17年3月31日付け制定。省エネルギー技術開発プログラム基本計画(平成16・06・04産局第8号)、新エネルギー技術開発プログラム基本計画(平成16・06・04産局第10号)、燃料技術開発プログラム基本計画(平成16・06・04産局第12号)、電力技術開発プログラム基本計画(平成16・06・04産局第11号)、原子力技術開発プログラム基本計画(平成16・06・04産局第13号)は、廃止。
- (3) 平成18年3月31日付け制定。省エネルギー技術開発プログラム基本計画(平成17・03・25産局第14号)、新エネルギー技術開発プログラム基本計画(平成17・03・25産局第9号)、燃料技術開発プログラム基本計画(平成17・03・25産局第17号)、電力技術開発プログラム基本計画(平成17・03・25産局第12号)、原子力技術開発プログラム基本計画(平成17・03・25産局第13号)は、廃止。また、次世代低公害車技術開発プログラム基本計画(平成17・03・29産局第2号)は、省エネルギー技術開発プログラム基本計画及び燃料技術開発プログラム基本計画に統合することとし、廃止。
- (4) 平成19年4月2日付け制定。省エネルギー技術開発プログラム基本計画(平成17・03・31産局第19号)、新エネルギー技術開発プログラム基本計画(平成18・03・31産局第15号)、燃料技術開発プログラム基本計画(平成18・03・31産局第18号)、電力技術開発プログラム基本計画(平成18・03・31産局第17号)、原子力技術開発プログラム基本計画(平成18・03・31産局第16号)は、廃止。
- (5) 平成20年4月1日付け、エネルギーイノベーションプログラム基本計画制定。省エネルギー技術開発プログラム基本計画(平成19・03・26産局第1号)、新エネルギー技術開発プログラム基本計画(平成19・03・20産局第4号)、燃料技術開発プログラム基本計画(平成19・03・19産局第7号)、電力技術開発プログラム基本計画(平成19・03・16産局第3号)、原子力技術開発プログラム基本計画(平成19・03・23産局第2号)は、本プログラム基本計画に統合することとし、廃止。

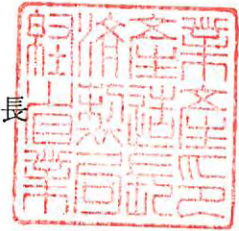
経済産業省

平成20・03・25産局第7号
平成20年4月1日

経済産業省産業技術環境局長



経済産業省製造産業局長



環境安心イノベーションプログラム基本計画の制定について

上記の件について、イノベーションプログラム実施要領（平成16・07・27産局第1号）第4条第1項の規定に基づき、別添のとおり制定する。

環境安心イノベーションプログラム基本計画

1. 目的

資源制約を克服し、環境と調和した持続的な経済・社会の実現と、安全・安心な国民生活を実現するため、革新的な技術の開発等を通じた地球全体での温室効果ガスの排出削減、廃棄物の発生抑制（リデュース）、製品や部品の再使用（リユース）、原材料としての再利用（リサイクル）推進による循環型社会の形成、バイオテクノロジーを活用した環境に優しい製造プロセスや循環型産業システムの創造、化学物質のリスクの総合的な評価及びリスクを適切に管理する社会システムの構築を推進する。

2. 政策的位置付け

第3期科学技術基本計画（2006年3月閣議決定）及び分野別推進戦略（2006年3月総合科学技術会議）における国家的・社会的課題に対応した研究開発の重点推進分野である環境分野及び国の存立にとって基盤的であり国として取り組むことが不可欠な研究開発の推進分野であるエネルギー分野に位置付けられるものであるほか、次のとおりである。

「地球温暖化対策技術研究開発の推進について」（2003年4月総合科学技術会議）

総合科学技術会議重点分野推進戦略専門委員会に設置された温暖化対策技術プロジェクトチームでまとめられた上記報告書における研究開発推進戦略に対応するものである。

Cool Earth - エネルギー革新技术計画（2008年3月経産省公表）

重点的に取り組むべきエネルギー革新技术「21」を含むものである。

京都議定書目標達成計画（2005年4月閣議決定）

目標達成のための対策と施策のうち地球温暖化対策技術開発の推進に位置づけられるものである。

イノベーション25（2007年6月閣議決定）

イノベーション立国に向けた政策ロードマップ - 技術革新戦略ロードマップ「世界的課題解決に貢献する社会 ものづくり技術分野」の中で「3R型設計・生産・メンテナンス技術、製品の設計・製造段階でのリサイクル阻害物質の使用排除を可能とする技術、製品中の有用・有害物質管理技術の開発・標準化」が資源を有効利用し、環境に配慮したものづくり技術として位置づけられている。

21世紀環境立国戦略（2007年6月閣議決定）

今後1、2年で重点的に着手すべき八つの戦略の中で「3R関連法制度等の充実や技術開発の支援を通じて、製品のライフサイクル全体での天然資源投入量の最小化や再生資源の高付加価値製品への利用を促進し、資源生産性の更なる向上と環境負荷の低減を図る」との方針が示されている。

経済成長戦略大綱（2006年7月財政・経済一体改革会議）

「環境と経済の両立を図るため、金融面からの環境配慮を進めるとともに、環境技

術の開発、3Rイニシアティブやアジア環境行動パートナーシップ構想による優れた技術・制度の国際的な普及と標準化等に向けた取組を進める」との方針が示されている。

産業構造審議会廃棄物・リサイクル小委員会基本政策ワーキンググループ報告書（2008年1月）

「近年、安定供給が懸念されているレアメタルの中には、使用製品からの回収・再利用技術が確立していないものもあることから、回収された使用済製品から効率的に抽出するための新たな技術の開発にも取り組むべきである。」とされている。

バイオマス・ニッポン総合戦略（2006年3月閣議決定）

バイオマスの変換に関する戦略として、経済性の向上、革新的な変換技術の開発に取り組むこととしている。

新産業創造戦略2005（2005年6月経済産業省）

先端的新産業分野として揚げられた戦略7分野の一つの「環境・エネルギー・機器・サービス」及び「健康・福祉・機器・サービス」に該当し、「技術戦略マップ」を活用し、効果的な研究開発を促進することが今後の取組として指摘されている。

「新・国家エネルギー戦略」（2006年5月経済産業省）

省エネルギーフロントランナー計画において省エネルギー技術開発の一層の推進を図ることとしている。

バイオテクノロジー戦略大綱（2002年12月BT戦略会議取りまとめ）

持続可能な快適社会の実現（よりよく暮らす）に向けて、バイオテクノロジー（BT）を活用して、画期的な新製品の開発と工業生産の抜本的効率化を図るとともに、生産に要する環境負荷を大幅に減少させることとしている。

3. 達成目標

・地球温暖化防止新技術

- (1) 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のもと、経済成長と温室効果ガスの排出削減の双方を同時に達成できる革新的技術を開発し、それらを通じて2013年以降の次期枠組みに主要排出国の参加を促すための国際協力を推進

【目標】 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

- (2) 「京都議定書」で課せられた温室効果ガス削減目標の達成

（「京都議定書目標達成計画」に示された各部門の目安としての目標（基準年比）は以下のとおり）

【目標】

エネルギー起源CO₂： +0.6%

非エネルギー起源CO₂： 0.3%

メタン： 0.4%

一酸化二窒素： 0.5%

代替フロン等3ガス： +0.1%

- () 「京都議定書目標達成計画」とは、「地球温暖化対策の推進に関する法律」に基づき、「京都議定書」の6%削減約束を確実に達成するために必要な措置を

定めるものをいう（平成17年4月閣議決定、平成18年7月一部変更）。

3 R

2015年度までに以下の目標の達成を図る。

資源生産性：約42万円/トン（2000年度：約26万円/トン）

循環利用率：約14～15%（2000年度：約10%）

最終処分量：約23百万トン（2000年度：約56百万トン）

（備考）

資源生産性 = (GDP)/(天然資源等投入量)

循環利用率 = (循環利用量)/(循環利用量 + 天然資源等投入量)

環境調和産業創造バイオ

バイオプロセスによって有用物質を生産し、廃棄物や汚染物質を発酵等により処理又は再資源化するという、循環型の産業システムを実現するために必要な技術基盤の構築を図るとともに、遺伝子組換え体の産業利用における安全性管理の充実を図る。具体的には、工業プロセスにバイオテクノロジーを導入することや、微生物や植物機能等を活用したモノ作り技術の開発、バイオマス利用、及びバイオ技術による産業廃水等処理技術の開発等を通して、環境調和型産業の創出に資する。

化学物質総合評価管理

化学物質のリスクの総合的な評価を行いつつ、リスクを評価・管理するための技術体系を構築する。そのために、化学物質のリスクに係る国民の理解増進のための基盤、事業者が自らリスクを判断する手段及び国が規制等の施策を講ずる際の手段として、化学物質のライフサイクルにわたるリスクの総合的な評価管理を行うための手法を確立するとともに、リスクの削減に資するプロセス、手法の開発、さらには知的基盤を整備する。

4. 研究開発内容

- 1. CO2固定化・有効利用技術

排出される二酸化炭素を分離回収・固定化することや、有用物質に変換する技術を開発する。

() 共通技術開発等

(1) プログラム方式二酸化炭素固定化・有効利用技術開発

概要

二酸化炭素の固定化・有効利用技術開発は、現時点においては基礎的研究分野に属する研究が多く、長期的観点からの取り組みが必要不可欠。このため本事業では将来において実現可能性の高い二酸化炭素固定化・有効利用技術に関する革新的な技術シーズを発掘し、実現可能性を確認した上で、基盤技術として確立する。

事業期間

1999年度～2011年度

実施形態

適切な研究課題、実施企業等を選定し、先端的研究、基盤技術研究の2段階で

実施。

(2) 地球環境国際研究推進事業

概要

地球温暖化問題の解決に向け、C T I (気候変動技術イニシアティブ) 等の国際的な枠組みを活用し、諸外国との研究協力を進めることにより、世界的な温暖化問題への取り組みを強化する。

事業期間

2 0 0 2 年度 ~ 2 0 1 1 年度

実施形態

諸外国との連携のもと、テーマ毎に適切な研究体制を構築し実施。

() 二酸化炭素分離回収・貯留・隔離技術開発

(1) 低品位廃熱を利用する二酸化炭素分離回収技術開発

概要

二酸化炭素を分離回収するための、低温再生可能な吸収液を開発し、鉄鋼プラントの低温レベルの廃熱と高濃度二酸化炭素排ガスをを用いてパイロット試験を実施して、二酸化炭素分離回収コストが大幅に削減されることを実証する。

技術目標及び達成時期

2 0 0 8 年度までに、C O 2 分離回収コストを大幅に削減する技術を実証する。

研究開発期間

2 0 0 4 年度 ~ 2 0 0 8 年度

(2) 分子ゲート機能 C O 2 分離膜の技術研究開発

概要

圧力を有するガスからの C O 2 / H 2 の分離用に期待されている膜技術の実用化ステップの前進を目的に、分子ゲート機能分離膜の高圧下における C O 2 / H 2 選択性の向上、分離膜モジュールの大型化に取り組む。

技術目標及び達成時期

2 0 1 5 年頃において、石炭ガス化複合発電 (I G C C) 等の圧力ガスから従来の 3 分の 1 程度 (1 , 5 0 0 円 / t - C O 2 程度) のコストで C O 2 を分離回収することを可能とする技術の確立を目指す。

研究開発期間

2 0 0 6 年度 ~ 2 0 1 0 年度

(3) 二酸化炭素地中貯留技術研究開発

概要

火力発電所等の大規模発生源から分離回収された二酸化炭素を地中帯水層へ貯留する技術を開発し、実証する。

技術目標及び達成時期

貯留した二酸化炭素のモニタリング技術、挙動予測手法、環境影響・安全性評価手法の開発、及び全国貯留層賦存量調査を行う。さらに、早期に火力発電所等の大排出源を対象とした大規模実証に着手し、2 0 2 0 年までに実用化の目途を

つけることを目指して技術開発を推進する。

研究開発期間

フェーズ1：2000年度～2004年度

フェーズ2：2005年度～2012年度

(4) 二酸化炭素の海洋隔離に伴う環境影響予測技術開発

概要

火力発電所等の大規模発生源から分離回収された二酸化炭素を海洋中層に放流・隔離を行った場合に、海洋環境へおよぼす影響を評価する技術を開発する。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、海洋隔離に伴う海洋中二酸化炭素の挙動予測技術の確立、隔離可能性及び有効性評価、生物影響評価技術の開発を推進する他、国際的な連携の強化と海洋隔離実施に対する国際的・社会的合意の形成に向けた取り組みを行う。

研究開発期間

フェーズ1：1997年度～2001年度

フェーズ2：2002年度～2006年度

フェーズ3：2007年度～2011年度

(5) 環境調和型製鉄プロセス技術開発（運営費交付金）

概要

高炉ガスからの効率的な二酸化炭素分離と中低温排熱の有効活用及び水素を炭素（コークス）の一部代替として鉄鉱石を還元する革新的製鉄プロセスの開発を行う。

技術目標及び達成時期

最終的な技術開発目標として製鉄プロセスにおけるCO₂排出量を30%削減することを目指し、2050年までに実用化する。

研究開発期間

2008年度～2017年度

() 大規模植林

(1) バイオ技術活用型二酸化炭素大規模固定化技術開発

概要

バイオエタノール化に適した樹木への環境耐性付与を遺伝子技術により実施し、これら原料樹木の不良環境下での効率的な植林技術を開発する。

技術目標及び達成時期

事業4年目までに、未利用の不良環境地でも生育できる高セルロース樹木を遺伝子技術により開発し、実証植林を行う。

研究開発期間

2008年度～2011年度

- 2 . 脱フロン等技術

代替フロンの排出量を抑制するため、代替フロンを削減する技術（脱フロン等技術）を開発する。

（ 1 ）革新的ノンフロン系断熱材技術開発（運営費交付金）

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、住宅・建築物の省エネルギーという社会適用性に応えるため超微細発泡等による断熱性能の向上のための技術開発を行う。

技術的目標及び達成時期

既存のノンフロン断熱材では達成できていない断熱性能を実現し、更には従来のフロン断熱材の断熱性能を超える高断熱性能を実現する断熱材を平成 2 4 年頃を目途に開発する。

研究開発期間

2 0 0 7 年度～ 2 0 1 1 年度

（ 2 ）ノンフロン型省エネ冷凍空調システムの開発（運営費交付金）

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、家庭用・業務用及び運輸用エアコン及びショーケース等に使用可能なノンフロンかつ高効率を達成でき、安全性についても配慮された新たな冷凍システムの開発を行う。

技術的目標及び達成時期

2 0 0 9 年度までに、ノンフロン（自然冷媒等）型省エネ冷凍・空調システムを開発する。

研究開発期間

2 0 0 5 年度～ 2 0 0 9 年度

. 3 R

（ ）建設ストック 3 R 対策

（ 1 ）革新的構造材料を用いた新構造システム建築物研究開発（再掲）

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、我が国鉄鋼業の約 5 0 % を占める建設市場において、建築物のメインフレームに高強度鋼を用いることで、鉄鋼部材の軽量化（リデュース）とそれに伴う輸送効率の向上、高強度化、非溶接化に伴う部材のリユース促進、製造・施工の省エネ・省力化等を図る。

同時に、柔剛混合構造（高強度鋼とダンパーの組み合わせ）技術の確立、関連法規への対応等により、震度 7 にも耐えうる新構造システム建築物の建設が可能となり、我が国で大きなリスクである大規模地震災害から国民を守り、安心安全社会の実現に寄与する。

技術目標及び達成時期

2 0 1 3 年度までに、最大規模の地震（震度 7）に対しても倒壊・損壊しない建築物を高強度鋼（8 0 0 N / mm²級鋼材）とダンパーの組み合わせによる柔剛

混合構造により実現を図るものであり、国土交通省や民間企業と連携してこの建築物のメインフレームに必要な高強度鋼部材、接合法等の開発を行う。主な研究開発目標は以下の通りである。

- ・ 震度7弾性新構造システム開発
- ・ 高強度部材の製造技術開発
- ・ 超高強度接合部品開発
- ・ 高強度部材の接合技術開発

研究開発期間

2006年度～2008年度

() 金属資源等3R対策

(1) 希少金属等高効率回収システム開発(再掲)

概要

小型電子・電気機器にはベースメタルや、金、銀等の貴金属の他、インジウム、ニッケル等の希少金属等を含有している。現状では、これらの機器が廃棄された後は、非常に高温で処理する乾式製錬技術を用いてリサイクル・処理されているため、多大なエネルギーを消費するばかりか、回収可能な金属が銅、金、銀等に限定されており、その他の希少金属等は回収できずに廃棄処分されている。このため、湿式製錬技術を活用した高効率な最適技術の開発等を通じて、回収工程の省エネルギー及び希少金属等の回収率向上を図る。

技術目標及び達成時期

- ・ 従来方法(乾式製錬)で処理する場合に比べて、大幅な省エネルギーの実現(省エネルギー効果:原油換算で約78万kl/年削減)
- ・ 廃小型電子・電気機器、廃超硬工具等中に含まれる希少金属等の回収率の向上(インジウム0% 90%、ニッケル50% 95%、コバルト0% 95%、タンタル0% 80%、タングステン90% 95%、レアアース0% 80%)

研究開発期間

2007年度～2010年度

(2) 希少金属代替材料開発プロジェクト(再掲)

概要

希少金属は、特殊用途において希少な機能を発揮する一方で、その希少性・偏在性・代替困難性から、市場メカニズムが必ずしもうまく機能せず、その供給停止は川下の経済成長の制約要因となりうるリスクを伴っている。近年、「コンピュータによる材料設計」、「ナノテクによる微細構造制御」等が飛躍的に向上した結果、従来できなかった、「コンピュータによる最適制御設計による候補元素系の探索」、「結晶粒界、界面の制御等マイクロ構造の制御」等が可能となりつつあることから、こうした最先端技術を用いることで、希少金属の新たな代替/使用量低減技術を開発する。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、以下希少金属元素の使用原単位について現状と比較して以

下の低減ができる製造技術を開発し、ユーザー企業、大学等の外部機関に対して機能評価のためにラボレベルで提供できる（試料提供）水準に至るまでの技術を確立することを目標とする。また、製品の機能や製造コストは現状と同等を少なくとも維持することを前提とする。

- ・透明電極向けインジウム（In）：現状から50%以上低減
- ・希土類磁石向けディスプロシウム（Dy）：現状から30%以上低減
- ・超硬工具向けタングステン（W）：現状から30%以上低減

研究開発期間

2007年度～2011年度

・環境調和産業創造バイオ

(1) 植物機能を活用した高度モノ作り基盤技術開発

() 植物利用エネルギー使用合理化工業原料生産技術開発（運営費交付金）（再掲） 概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、現在の化学工業プロセスに代わる、植物の有する有用物質生産能を活用した省エネルギー・低環境負荷型の工業原料生産プロセスへの変換を促進する。具体的には、工業原料の生産に関わる重要な物質生産プロセスに関する代謝系をゲノム情報に基づき解析するとともに、有用物質生産制御に必要な一連の代謝遺伝子群の発現を統一的に制御する技術の開発を行う。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、工業原料として有望なバイオマスとしてイソプレノイド、油脂などの有用物質生産に関わる代謝経路とその調節メカニズム及び生産物質の蓄積・移動に係るメカニズムの解析を行い、関連遺伝子情報を整備するとともに、統括的発現制御技術を開発する。

研究開発期間

2002年度～2009年度

(ii) 植物利用高付加価値物質製造基盤技術開発

概要

動物や微生物による物質生産と比較して、安全性が高い、生産コストが低い、省エネルギーで環境調和型といった特徴を有する植物を活用した高機能タンパク質等の高付加価値物質生産（モノ作り）の基盤技術を開発するために、有用物質を高効率に高生産させる組換え植物の基盤技術を開発するとともに、閉鎖型人工環境下での高効率な栽培技術の開発を一体的に進める。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、実用植物において実用可能なレベルまで有用物質を効率的に高生産・高蓄積させる組換え植物を開発するとともに、目的有用物質を安定かつ均一に生産・蓄積させる栽培技術を確立し、その生産の実用性を閉鎖型人工環境下において確認する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(2) 微生物機能を活用した環境調和型製造基盤技術開発(再掲)

() 微生物機能を活用した高度製造基盤技術開発(運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、省エネルギーかつ環境負荷が少ないといった特徴を有する微生物機能を活用した有用物質の革新的な生産プロセス(モノ作り)の技術を構築するため、産業用途に必要な機能既知遺伝子で構成されたゲノムを持ち、物質生産性向上につながる性能を備えた高性能宿主細胞の創製や、微生物反応の多様化・高機能化技術を開発するとともに、バイオマスを原料として有用物質を体系的かつ効率的に生産する(バイオリファイナリー)ための基盤技術を開発する。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、物質生産性向上につながる性能を備えた高性能宿主細胞を創製するとともに、バイオプロセスの実用化適用範囲の拡大のための微生物反応の多様化・高機能化技術の開発を行う。バイオリファイナリー技術については、バイオマスを高効率で糖化し、糖から高効率で各種化成品の基幹物質を生産するバイオプロセス体系を構築する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(ii) 微生物群のデザイン化による高効率型環境バイオ処理技術開発(運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、従来エネルギー多消費・廃棄物多排出型であった廃水・廃棄物処理において、微生物群の構成及び配置等を人為的に制御(デザイン化)することで、その処理効率を大幅に向上させ、省エネルギーで廃棄物も少ない高効率型廃水、廃棄物処理の基盤技術を確立する。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、特定有用微生物群を人為的に安定導入・維持もしくは人為的に空間配置・優先化させる等のデザイン化技術を開発し、従来の廃水、廃棄物処理に比べより高効率で省エネルギーな処理技術を開発するとともに、実用化に資するための実証可能なテストプラント規模にて評価する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(3) バイオマスエネルギー等高効率転換技術開発(再掲)

概要

バイオマスに関する燃料分野と化成品分野の融合・連携を図り、食料と競合しないセルロース系原料から、より低コストで高効率なエネルギー化を可能にする先進的・革新的な新技術の確立を目指すとともに、バイオ燃料の製造のみならず、プロパノール、ブタノール製造、化学品の製造の実用化を目指した技術開発を行う。

技術目標及び達成時期

2012年度までに、セルロース系バイオマスを原料とし、バイオ燃料製造の従来技術に比べて画期的に優れた効率や低コスト化を可能とする糖化・発酵等の基盤

技術を開発するとともに、バイオマス利用に資する微生物の利用基盤技術の開発を行う。さらに、プロパノール等の高効率取得のための触媒開発等により、化成品製造の実用化を目指した技術開発を行い、バイオマスに関する燃料分野と化成品分野の融合・連携を図る。

研究開発期間

2007年度～2012年度

- 1 . 化学物質総合評価管理

(1) 化学物質の最適管理をめざすリスクトレードオフ解析手法の開発 (運営費交付金)
概要

化学物質のリスクを共通指標で比較、検討し、事業者等における代替物質の選択の際に、リスクの相互比較が可能となるリスク評価手法及び社会経済分析等リスクトレードオフ解析手法を構築する。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、代表的な化学物質用途群につき、化学物質のライフサイクルに応じたあらゆる暴露を考慮した排出量推計手法や室内暴露評価手法等環境動態解析手法を構築する。さらに、用途群内の物質間でのリスクトレードオフ解析手法を開発する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(2) ナノ粒子の特性評価手法開発 (運営費交付金)

概要

ナノ粒子のキャラクタリゼーション、計測技術の確立とともに、生体影響等評価手法、暴露評価手法及びナノテクノロジーによるリスク不安に対処したリスク管理手法を開発する。

技術目標及び達成時期

2008年度までに、ナノ粒子のキャラクタリゼーション及び計測技術を確立するとともに、2010年までに、生体影響等評価手法、暴露評価手法及びリスク評価手法を開発し、ナノ材料のリスク評価指針及びナノ粒子の管理指針の提言を行う。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(3) 構造活性相関手法による有害性評価手法開発 (運営費交付金)

概要

従来の動物実験による反復投与毒性試験に代わり、*in silico* や類推等を用いた予測・評価を可能とするため、既知の周辺情報やそれらから得られる新たな知見を基に、よりの確に効率よく毒性を評価可能とする有害性評価支援システムを構築する。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、公開されている反復投与毒性試験データや毒性作用機序情報が搭載されたデータベース、肝臓における代謝産物・代謝経路を予測する手法、及び対象とする化学物質の標的臓器・症状やその毒性の強さの範囲等を予測する手

法を開発する。さらに、それらを統合した有害性評価支援システムを構築する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(4) 石油精製物質等簡易有害性評価手法開発(運営費交付金)(再掲)

概要

石油の生産及び流通の合理化を図る観点から、石油製品等に含まれる化学物質によるリスクを把握し、必要な対策を適切に行うことを可能とするため、*in vitro* 培養系技術等の活用により遺伝子組換え細胞等を用いた *in vitro* 系簡易有害性予測手法、また、トキシコゲノミクスを活用した短期動物試験結果と相関する遺伝子発現データセットを開発する。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、遺伝子導入技術、幹細胞分化誘導技術、生物発光技術等を適用した培養細胞を用いて、試験期間1ヶ月程度、発がん性、催奇形性及び免疫毒性を予測評価できる試験手法を開発し、また、遺伝子発現解析技術を短期動物試験に適用し、28日間反復投与試験結果と相関する遺伝子発現データセットを完成させる。また、標準的な試験プロトコルを策定する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

- 2. 化学物質リスク削減技術開発

(1) 有害化学物質リスク削減基盤技術研究開発(運営費交付金)

概要

環境中に広く排出され、人の健康や生態系へのリスク(有害性×暴露量)を及ぼすおそれのある有害化学物質を効率的に削減、代替する技術について、リスク削減効果が高く、広く導入・普及が可能となる実用化基盤技術を開発する。

技術目標及び達成時期

2008年度までに、PRTTR制度(化学物質排出把握管理促進法に基づき有害なおそれのある化学物質について、事業所からの環境中への排出量及び廃棄物としての事業所外への搬出量等を把握・集計・公表する制度)の排出実態の公表結果等を活用し、環境影響が懸念される有害化学物質の優先順位付けを行い、選定された有害化学物質に対する削減、回収、無害化技術、代替物質の開発及び代替プロセスの構築等を行う。特に、2005年度から大気汚染防止法において規制対象となる揮発性有機化合物(VOC)に重点を置き、同法で定められた「VOCの排出量を2010年度までに2000年度比で3割削減すること」に資する技術開発を行うこととする。

研究開発期間

2004年度～2008年度

(2) アスベスト含有建材等回収・処理等技術開発事業(運営費交付金)

概要

今後、解体廃棄物として、大量の排出が予測されるアスベスト含有建材を対象と

して、そのアスベスト含有状況について簡易かつ確実な探知・分析を可能とし、安全性、信頼性の高い回収・処理を実現する関連機器・システムの技術開発を行う。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、アスベスト含有製品の使用時、解体・回収・廃棄時においてオンサイト方式で検出感度0.1wt%超レベルに検出できる計測技術を確立し、アスベストを含む建材等の回収・除去現場におけるアスベストの飛散及び暴露を最小化し、回収・除去の安全性及び信頼性等を確保する技術を確立する。また、アスベスト含有廃棄物の無害化処理又は再資源化段階における安全性、効率性に優れた技術を確立する。

研究開発期間

2007年度～2009年度

5. 政策目標の実現に向けた環境整備（成果の実用化、導入普及に向けた取組）

【導入普及促進】

排出量の多い品目・業種や処理困難物を中心にリサイクルシステムなどの実証・市場化対策に関するフィージビリティ・スタディを実施する。

サプライチェーングループを対象に、部品等の仕様と原材料の使用・副産物の発生状況等に関する診断を実施し、製品設計及び製造プロセスの同時改善の方向性に関する提案、指導を行うとともに、取組事例を分析・評価し、資源投入量の抑制効果の高い優良な事例を公開する。

商品選択に資するわかりやすい3R配慮情報（省資源性や再生資源・部品の使用状況等）を消費者に提供し、環境配慮型製品の市場拡大を推進するため、指標の策定や、情報提供手法の確立、製品の情報検索が可能なシステムの検討・開発を行う。

3R対策が講じられている製品等の市場開拓を促進するため、政府が環境物品等を率先購入することを定めたグリーン購入法について、同法の判断基準が引き続き3R対策を適切に反映するようにしていく。

化学物質の有害性評価、暴露分析、リスク評価等のデータベースの構築を図るとともに、それらの手法の各種活動（事業者の自主管理活動、事業者、地方自治体等が国民とリスクコミュニケーションを図る活動等）等への導入を図る。

公害防止設備に対する優遇税制等の支援を行う。

【法規制・制度改革】

二酸化炭素回収・貯留（CCS）の国内での本格実施に必要な法規制・制度の整備等に関して検討を行う。

資源有効利用促進法等のリサイクル関連法制度によるスキームを活用して、3R対策を網羅的に講じることにより、循環型社会の構築を図る。

遺伝子組換え生物等の使用等の規制による生物の多様性の確保に関する法律（カルタヘナ法）に基づく立入検査で査収した生物が遺伝子組換え生物であるか否かを判断するための基盤的な技術の高度化や収去方法を確立すること等により、的確な法律の執行体制を整備する。

【ガイドライン】

事業者による自主的取組を促進する観点から、産業構造審議会において策定している「業種別・品目別廃棄物処理・リサイクルガイドライン」（自主的な目標の設定）につい

て、3R対策を加速する観点から適宜フォローアップを行い、改定を行う。

【基準・標準化】

各プロジェクトや民間における技術開発等で得られた成果のうち、標準化すべきものについては、適切な標準化活動（国際規格（ISO/IEC）、日本工業規格（JIS）、その他国際的に認知された標準の提案等）を実施する。

CO₂回収・貯留後のモニタリング、植林等によるCO₂固定化量の計算、バイオマス利用時のCO₂排出削減量の評価、環境影響や安全性評価手法など、CO₂固定化・有効利用を推進するに当たって標準化が必要となる事項については、研究・開発状況や社会情勢を常に意識しながら計画的に標準化を推進する。

リサイクル品などの3R配慮製品に対する需要の創出・拡大を図るため、「環境JIS策定促進のアクションプログラム」に基づき、リサイクル品等の品質基準及び試験評価方法の規格（環境JIS）の策定を引き続き推進する。

バイオマス由来プラスチックにおけるバイオマス含有量測定の標準化を推進するとともに、生分解性プラスチックに係る微生物嫌気分解試験方法の国際標準化を着実に実施する。

高精度・簡易有害性評価システムの開発については、2014年度を目途に有害性評価手法等を経済開発協力機構（OECD）にテストガイドラインとして提案することを検討し、国際標準化を推進する。

【調達促進】

バイオマス由来プラスチック等、生物機能を用いた生産プロセスにより生産された製品について、グリーン購入法に基づく調達品目として位置付けられるべく検討を行う。

【広報・啓発】

研究開発プロジェクトの成果について広く普及啓発を図るため、シンポジウム等を行う。

3Rの普及・促進を図るため、毎年10月を「3R推進月間」とし、この期間を中心として、3R活動への関係者の取組を促すための「3R推進功労者等表彰」や、循環ビジネス振興のための「資源循環技術・システム表彰」等の普及啓発活動を実施する。

【知的基盤整備】

国内外との共同研究等を通じ、革新的な温暖化対策技術や方策についての情報交換に資する、情報ネットワークの構築等を図る。

物質生産用に開発された汎用宿主細胞や取得した生物遺伝資源は、独立行政法人製品評価技術基盤機構に整備し、社会に幅広く提供する。

独立行政法人製品評価技術基盤機構の化学物質管理センターにて事業者・国民・公的機関の化学物質管理に関する冷静な対話（科学的知見の共有）を促進するための知的情報基盤整備を図る。

【国際協力】

生物多様性条約に基づく遺伝子資源へのアクセス促進事業において、日本のバイオ関連企業の遺伝資源保有国（途上国）の遺伝資源に対するアクセスを促進するための技術的環境整備及び遺伝資源へのアクセス実施の調整を行う。

【他省庁との連携】

総合化学技術会議が推進する科学技術連携施策群の「食料・生物生産研究」及び「総合的リスク評価による化学物質の安全管理・活用のための開発技術」、ライフサイエンス

P T、社会還元プロジェクトの下での関係府省間における適切な連携の実施。

【プロジェクト等との連携】

C O 2 固定化・有効利用技術のロードマップに基づき、技術シーズ発掘型技術開発事業成果のプロジェクトへの取り込みや、プロジェクト間の連携により、効果的な固定化・有効利用システムの実現を図る。

植物機能を活用したモノ作り基盤技術開発に係る2つのプロジェクト間での、遺伝子高発現技術やモデル植物での基盤技術及び実用作物への技術展開に関する情報交換を推進する。

6．研究開発の実施に当たっての留意事項

- ・事業の全部又は一部について独立行政法人の運営費交付金により実施されるもの（事業名に（運営費交付金）と記載したものは、中期目標、中期計画等に基づき、運営費交付金の総額の範囲内で当該独立行政法人の裁量によって実施されるものである。
- ・プログラム目標等については、京都議定書目標達成計画の評価・見直しプロセスに伴う対応を行う。
- ・各プロジェクトを横断的観点からマネジメントする体制を整備し、技術の進捗状況や社会情勢等を踏まえた適切な資源配分、技術成果のレビュー、普及施策の検討、実施すべき技術開発テーマ・領域・分野等の検討等を実施する。

7．改訂履歴

- (1) 平成12年12月28日付け、生物機能活用型循環産業システム創造プログラム基本計画、化学物質総合評価管理プログラム基本計画制定。
- (2) 平成14年2月27日付け、生物機能活用型循環産業システム創造プログラム基本計画制定。生物機能活用型循環産業システム創造プログラム基本計画（平成12・12・27工総第15号）は、廃止。平成14年2月28日付け、革新的温暖化対策技術プログラム基本計画、3Rプログラム基本計画、化学物質総合評価管理プログラム基本計画制定。化学物質総合評価管理プログラム基本計画（平成12・12・27工総第14号）は、廃止。
- (3) 平成15年3月10日付け制定。革新的温暖化対策技術プログラム基本計画（平成14・02・25産局第16号）、3Rプログラム基本計画（平成14・02・25産局第13号）、生物機能活用型循環産業システム創造プログラム基本計画（平成14・02・25産局第5号）、化学物質総合評価管理プログラム基本計画（平成14・02・25産局第7号）は、廃止。
- (4) 平成16年2月3日付け制定。革新的温暖化対策技術プログラム基本計画（平成15・03・07産局第18号）及びエネルギー環境二酸化炭素固定化・有効利用プログラム基本計画（平成15・03・07産局第19号）は、革新的温暖化対策技術プログラム基本計画に統合することとし、廃止。3Rプログラム基本計画（平成15・03・07産局第6号）、生物機能活用型循環産業システム創造プログラム基本計画（平成15・03・07産局第3号）、化学物質総合評価管理プログラム基本計画（平成15・03・07産局第8号）は、廃止。
- (5) 平成17年3月31日付け制定。地球温暖化防止新技術プログラム基本計画（平成16・02・03産局第13号）、3Rプログラム基本計画（平成16・02・03産局

第5号)、生物機能活用型循環産業システム創造プログラム基本計画(平成16・02・03産局第15号)、化学物質総合評価管理プログラム基本計画(平成16・02・03産局第3号)は、廃止。

(6)平成18年3月31日付け制定。地球温暖化防止新技術プログラム基本計画(平成17・03・25産局第8号)、3Rプログラム基本計画(平成17・03・29産局第1号)、生物機能活用型循環産業システム創造プログラム基本計画(平成17・03・25産局第2号)、化学物質総合評価管理プログラム基本計画(平成17・03・25産局第10号)は、廃止。

(7)平成19年4月2日付け制定。地球温暖化防止新技術プログラム基本計画(平成18・03・31産局第9号)、3Rプログラム基本計画(平成18・03・31産局第10号)、生物機能活用型循環産業システム創造プログラム基本計画(平成18・03・31産局第3号)、化学物質総合評価管理プログラム基本計画(平成18・03・31産局第11号)は、廃止。

(8)平成20年4月1日付け、環境安心イノベーションプログラム基本計画制定。地球温暖化防止新技術プログラム基本計画(平成19・03・19産局第6号)、3Rプログラム基本計画(平成19・03・19産局第5号)、生物機能活用型循環産業システム創造プログラム基本計画(平成19・03・16産局第2号)、化学物質総合評価管理プログラム基本計画(平成19・03・20産局第2号)は、本イノベーションプログラム基本計画に統合することとし、廃止。

経済産業省

平成20・03・25産局第6号

平成20年4月1日

経済産業省産業技術環境局長



経済産業省製造産業局長



健康安心イノベーションプログラム基本計画の制定について

上記の件について、イノベーションプログラム実施要領（平成16・07・27産局第1号）第4条第1項の規定に基づき、別添のとおり制定する。

健康安心イノベーションプログラム基本計画

1. 目的

今後、世界に類を見ない少子高齢化が進展する我が国において、国民が健康で安心して暮らせる社会を実現することは喫緊の課題である。具体的には、個の医療を通じて健康寿命の延伸、QOL（Quality of Life：生活の質）の向上を図ることが求められている。

この目的を達成するため、創薬に資する基盤技術の開発、再生医療の確立、医療機器・福祉機器の開発等の手段を適切に組み合わせることによって、健康維持増進、疾患の早期診断、及び適切な治療法の提供を実現するほか、関連産業の競争力強化・ベンチャー企業の創出を図る。

2. 政策的位置付け

「イノベーション25」（2007年6月閣議決定）

生涯健康な社会形成に向けて中長期的に取り組むべき課題として、治療重点の医療から予防・健康増進を重視する保健医療体系の転換、生命倫理・安全性と医療技術促進政策の調和などをとりあげ、再生医療及び在宅医療・介護に係る社会還元加速プロジェクトを実施するとともに、臨床研究・臨床への橋渡し研究をはじめとする研究開発ロードマップの提示により所要の措置を講じていくこととしている。

がん対策推進基本計画（2007年6月閣議決定）

がん対策基本法に基づき、国、地方公共団体及び関係者等が、がん対策を総合的かつ計画的に推進するために策定された基本方針であり、取り組むべき施策の一つとして「がん研究」が取り上げられている。具体的には、現状、診断薬・診断機器の開発、治療薬・治療機器の開発等が推進されているが、さらに、有用な早期診断技術についての研究開発の推進等に取り組むことが提示されている。

革新的医薬品・医療機器創出のための5か年戦略（2007年4月）

文部科学省、厚生労働省及び経済産業省の間において革新的な医薬品・医療機器の創出に向け、研究資金の集中投入、ベンチャー企業の育成、臨床研究・治験環境の整備、薬事法における審査の迅速化・質の向上など、研究から上市に至る過程の一貫かつ集中的な支援を実施することとしている。

新健康フロンティア戦略（2007年4月新健康フロンティア戦略賢人会議）、同アクションプラン（2007年12月）

健康寿命の延伸や生活の質の向上を図ることを目的として策定された新健康フロンティア戦略及び新健康フロンティア戦略アクションプランの中で、「人間の活動領域の拡張に向けた取組」及び「医療・福祉技術のイノベーション」において、「先進的予防・診断・治療技術の開発」や「医薬等ベンチャー・基盤産業支援対策」等の施策が提示されている。科学技術の振興及び成果の社会への還元に向けた制度改革について（2006年12月総合科学技術会議）

科学技術の振興や成果還元上障害となる制度的な阻害要因として研究現場等で顕在化している諸問題を解決するための制度改革の実現に向け、制度所管省庁等が取り組むべき工

程表とともに意見具申を行っている。

この中で、「治験を含む臨床研究の総合的推進」として、支援体制等の整備増強、臨床研究者・臨床研究支援人材の確保と育成、研究推進や承認審査のための環境整備、国民の参画の4つの観点から改革の方向を示している。

ライフサイエンス推進議員連盟決議（2006年12月）

イノベーションの成果である革新的な医薬品・医療機器を迅速に国民に提供するため、治験を含む臨床研究の活性化、新たな医薬品等の承認審査の迅速化、及び に関して総合的に検討を行い、当該問題を国全体で取り組むためのハイレベルな政策対話の実現に向け、政府として早急な対応を図るべきであることを決議している。

経済成長戦略大綱（2006年7月財政・経済一体改革会議）

がん等の生活習慣病や感染症等各種疾病対策の推進等国民の保健医療水準の向上に資する医薬品・医療機器産業について、関係府省・機関、企業等の双方向の連携の下、特に、基礎・基盤研究、臨床研究及び基礎研究から臨床研究への橋渡し研究を推進するとともに、臨床研究基盤の整備、治験環境の充実等の国民に医薬品・医療機器を迅速に届けるための環境整備を行うことが提示されている。

新経済成長戦略（2006年6月経済産業省とりまとめ）

産業界、学界、公的機関、政府が連携し、研究から市場へ、市場から研究へと、双方向で鋭い軸が通るようなシステム改革（イノベーションの加速化～「イノベーション・スーパーハイウェイ構想」）を実現するための施策として「がん対策等に資する先進医療機器・技術」の推進、「医薬分野での官民一体の対話の場」など事業化に向けた環境の整備が提示されている。

第3期科学技術基本計画（2006年3月閣議決定）

第2期計画において、優先的に資源を配分することとされたライフサイエンス分野を、引き続き、特に重点的に研究開発を推進すべき分野（重点推進4分野）として位置づけ。また、研究分野の重点化にとどまらず、分野内の重点化も進め、選択と集中による戦略性の強化を図り、基本理念の下で新たに設定する6つの政策目標（イノベーター日本・革新を続ける強靱な経済・産業を実現、生涯はつつ生活・子供から高齢者まで健康な日本を実現等）との関係を明確化することとしている。

バイオテクノロジー戦略大綱（2002年12月BT戦略会議取りまとめ）及び産業発掘戦略 - 技術革新（「経済財政運営と構造改革に関する基本方針2002」（2002年6月閣議決定）に基づき2002年12月取りまとめ）

健康・バイオテクノロジー分野における3つの戦略目標（「研究開発の圧倒的充実」、「産業プロセスの抜本的強化」及び「国民理解の徹底的浸透」）に対応している。

経済財政運営と構造改革に関する基本方針2005（2005年6月閣議決定）

2006年度までの2年間（重点強化期間）における重点課題として、「新しい躍動の時代に向けて、少子高齢化とグローバル化を乗り切る基盤をつくること」という課題を掲げ、その課題に対し、「3．持続的な社会保障制度の構築（健康・予防介護等の推進）」や「6．グローバル戦略の強化（「新産業創造戦略2005」の推進）」に取り組むべき事項としている。

「新産業創造戦略2005」（2005年6月経済産業省取りまとめ、同月13日経済財政諮問会議に報告）

社会ニーズに対応する新産業分野として、「(5)健康・福祉・機器・サービス」を戦略

7分野の1つとしており、2010年の市場規模として約75兆円を掲げ、それに向けたアクションプログラムとし取り組むこととしている5つの課題には、「バイオ技術を活用した個別化医療や予防医療等の実現・普及」、「革新的な医療・福祉機器の開発・普及の促進」が提示されている。

3. 達成目標

医薬品の成功確率の向上に資する技術開発や臨床への橋渡し研究等を通じた、医薬品の上市期間の短縮や開発コストの低減

治療機器、再生医療を含む先進的な医療機器開発等の推進による国内外生産シェアの増大、厚生労働省との連携事業（マッチングファンド、医療機器開発ガイドラインの策定など）による開発から製品に至るまでの期間の短縮等を達成する。

4. 研究開発内容

【プロジェクト】

・創薬・診断

- 1. 革新的医薬品の創出

(1) 糖鎖機能活用技術開発（運営費交付金）

概要

我が国が強みを持つ糖鎖工学分野において、これまでに取得・開発した「糖鎖遺伝子ライブラリー」「糖鎖構造解析技術」「糖鎖合成技術」を活用し、癌や感染症など様々な疾病に關与する糖鎖の機能を解析する基盤技術を確立し、我が国の優位性を維持するとともに、創薬・診断等の分野における糖鎖機能の産業利用の促進を図る。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、糖鎖や糖タンパク質などの機能を分子レベルで効率的に解明するための基盤技術、糖鎖の機能解析・検証技術、及び、有用性が認められた糖鎖機能を産業利用するための基盤技術を開発する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(2) 機能性RNAプロジェクト（運営費交付金）

概要

近年の研究成果により、タンパク質の合成に關与する既知のRNAとは異なり、がんや発生分化等の重要な生命現象に關与するタンパク質をコードしていないRNA（機能性RNA）の存在が明らかになってきており、世界中の注目を集めている。機能性RNAは再生医療やRNA医薬等への応用化にもつながることが期待されていることから、機能性RNA解析のための新規ツールを開発し、機能解析を行うことにより、本分野における我が国の優位性を確立する。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、機能性RNAの候補となるRNAをゲノム配列上から探索するバイオインフォマティクス技術の開発や、機能性RNAを解析するための支援

機器やツールの開発を行い、機能性RNAの機能解析を行う。

研究開発期間

2005年度～2009年度

(3) ゲノム創薬加速化支援バイオ基盤技術開発(化合物等を活用した生物システム制御基盤技術開発)(運営費交付金)

概要

我が国が強みとする完全長 cDNA ライブラリーやタンパク質相互作用解析技術等を最大限に活用し、重要なタンパク質ネットワーク解析等により創薬の対象となるタンパク質の効率的な絞り込みを行うとともに、疾患等の生物現象を制御する化合物の探索まで、一貫した技術開発を行う。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、超高速・高感度にタンパク質の相互作用を解析する技術や疾患を制御する化合物の探索・評価技術を開発する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(4) ゲノム創薬加速化支援バイオ基盤技術開発(創薬加速に向けたタンパク質構造解析基盤技術開発)

概要

創薬上重要な膜タンパク質は複合体を形成していることも多く、その構造解析及び相互作用の情報を取得することは創薬研究において重要であるが、その解析は非常に困難である。そこで、膜タンパク質やその複合体の構造情報を取得する新たな技術等の開発に向けて、タンパク質の立体構造及びその構造変化や膜タンパク質複合体の構造情報等の解析及び構造情報を基にした高精度なシミュレーション技術を開発する。

技術目標及び達成時期

2011年度までに生体内に近い状態での膜タンパク質及びその複合体の構造解析手法、リガンド分子との相互作用解析手法を確立するとともに、当該技術から得られた情報に基づく in silico スクリーニング手法を確立する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(5) ゲノム創薬加速化支援バイオ基盤技術開発(モデル細胞を用いた遺伝子機能等解析技術開発)(運営費交付金)

) 研究用モデル細胞の創製技術開発

概要

医薬品開発における安全性や薬理評価の確実性の向上等、創薬に向けた研究開発を加速するためには、ヒト生体内における様々な反応や遺伝子の機能をより高い精度で解析するツールの開発が重要である。そのため、人体の組織や疾病等の様々なヒトモデル細胞株を創製するための基盤となる技術開発を行う。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、創薬等の研究開発に資する研究用細胞の創製技術を確立し、複数種の研究用のヒトモデル細胞を創製する。

研究開発期間

2005年度～2009年度

)細胞アレイ等による遺伝子機能の解析技術開発

概要

世界的にゲノム創薬が競争激化しているが、創薬のターゲットとなる遺伝子を絞り込みいち早く特許を押さえてしまうことが産業競争力強化のためには重要である。このためには、生体内で非常に複雑に制御されている遺伝子ネットワークシステムを高速・高感度に解析するシステムを開発し、創薬のターゲットの効率的な絞り込みを行うことが必要である。具体的には、多数の細胞に同時に異なる遺伝子を高効率で導入することにより、複数の遺伝子発現等の時系列計測を行い、得られる種々の細胞応答データから遺伝子ネットワークを解析する細胞アレイ技術を確立し、疾患関連遺伝子等、特定の創薬ターゲットの同定に有用な汎用性の高い解析ツールの開発を行う。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、細胞イベント（遺伝子発現、たんぱく質の細胞内局在性等）を測定するための網羅的なレポーターシステム並びに測定装置を新規に開発し、得られるデータから遺伝子ネットワークの解析システムを確立する。

研究開発期間

2005年度～2009年度

(6) 新機能抗体創製技術開発（運営費交付金）

概要

ポストゲノム研究や診断・創薬等において重要となっている機能を有する抗体を創製するため、創薬標的として産業利用上重要だが、解析が困難な膜タンパク質やタンパク質複合体を特異的に認識できる抗体を系統的に作成する技術や抗体の分離・精製を高効率に行うための技術の開発を行う。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、産業上有用と考えられるタンパク質やその複合体を特異的に認識する抗体を創製するための基盤技術、及び、製造コスト低減に向けた抗体の分離・精製等を高効率に行う技術を開発する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(7) 基礎研究から臨床研究への橋渡し促進技術開発（運営費交付金）

i) 橋渡し及び臨床研究拠点を活用した研究開発（運営費交付金）

概要

がん対策等の国民医療高度化を目指し、急速に発展している多様なバイオ技術の融合と医療現場への円滑な橋渡しによるイノベーションの創出・加速のため、総合科学技術会議のもと文部科学省及び厚生労働省と連携し、橋渡し研究の強化に一体的に取り組む。具体的には、民間企業と臨床研究機関（文部科学省や厚生労働省が整備する

橋渡し研究拠点等)が一体となって行う、医薬品、医療機器、診断ツール等の開発を推進する。

技術目標及び達成時期

2011年度までに医療現場及び臨床研究からのフィードバックに基づく研究開発により、医薬品、医療機器、診断ツール等の研究開発成果を円滑に実用化につなげる仕組みを確立する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(バイオ診断ツール実用化開発(運営費交付金))

概要

我が国が有する微細加工技術・表面処理技術といったナノテク等の強みを活かし、微量サンプルから高感度・安価で再現性よく多様な遺伝情報(SNPs、mRNA、タンパク質等)を検出するためのバイオ診断機器を開発し、臨床現場において有効性を検証することにより個別化医療の実現に寄与する。

技術目標及び達成時期

SNPs、mRNA、タンパク質等の遺伝情報を計測対象とするバイオ診断機器の実用化開発を行い、2008年度までに、許認可用データ取得可能な技術レベルに達することを目指す。

研究開発期間

2006年度～2008年度

- 2. 診断ツールの開発

(1) 個別化医療実現のための技術融合バイオ診断技術開発(運営費交付金)

概要

我が国が有する微細加工技術・表面処理技術といったナノテク等の強みを活かし、染色体異常を高感度、高精度かつ迅速、安価で非コード領域までを検出するゲノムアレイや解析基盤技術開発を行うとともに、診断への応用を可能とする全自動解析システムの開発を行う。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、BACを用いた非コード領域を含むゲノム全領域を検出できる高精度ゲノムアレイを開発する。さらに、臨床現場において、微量サンプル(数ナノグラム)から、12時間以内に染色体異常(増幅、欠失、コピー数多型等)を、低コストかつ定量性・再現性を確保して検出ができる自動染色体異常解析システムのプロトタイプを開発する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(2) 糖鎖機能活用技術開発(運営費交付金)【再掲】

(3) 基礎研究から臨床研究への橋渡し促進技術開発(運営費交付金)【再掲】

- 3 . 創薬・診断に係る基盤整備

(1) 統合データベースプロジェクト

概要

ライフサイエンス分野では、自身の研究成果と既存の研究成果と対比することにより、自身の研究成果の仮説を考案する手がかりが得られたり、新しい実用化の発想が得られたりする可能性があるため、国家プロジェクト等により産生された研究データを一括して活用できるデータベースが、産業界や社会から要望されている。

このため、政府全体の“生命科学データベース統合化の取組”の一環として、経済産業省関連の公的資金研究から産出される研究データを、産業上の有用性を評価のうえ、統合化し、産業界等に提供する。

技術目標及び達成時期

2010年までに経済産業省関連機関により実施されたライフサイエンス分野の研究開発プロジェクトの成果に関する情報提供サイトを構築・運用する。また、ヒト遺伝子に関連した各種研究成果に関しては、平性17～19年度に実施したゲノム情報統合プロジェクトにおいて構築した「ヒト全遺伝子のアノテーション統合データベース (H-Invitational)」を基礎として、経済産業省関連の研究成果を連携して利用できるシステムを構築する。

研究開発期間

2008年度～2010年度

. 診断・治療機器、再生医療等

- 1 . 診断・治療機器の開発

(1) 分子イメージング機器研究開発プロジェクト (運営費交付金)

) 生活習慣病超早期診断眼底イメージング機器研究開発プロジェクト

概要

細小血管の分子レベルでの代謝機能を非侵襲で可視化する細胞代謝イメージングを実現し、代謝異常を細胞レベルで観察することにより、循環器系疾患等の早期の診断・治療を図る。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、ナノテクノロジーを活用した光学基盤技術等を確立することにより、細胞やタンパク質レベルの組織診断を可能とする機器を開発する。

研究開発期間

2005年度～2009年度

) 悪性腫瘍等治療支援分子イメージング機器研究開発プロジェクト

概要

良性・悪性の区別も含めた腫瘍の超早期診断を実現するため、悪性腫瘍に特異的に反応する標的物質を利用することにより生体細胞の分子レベルの機能変化を抽出・検出できる機器の開発を行う。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、全身で3mm、局所で1mmの分解能を有する分子イメージング機器を開発する。

研究開発期間

2005年度～2009年度

(2) 次世代DDS型悪性腫瘍治療システムの研究開発事業(運営費交付金)

概要

DDSのさらなる裾野の拡大、及び早期実用化を目指し、様々な外部エネルギー(機器技術)と薬剤技術を組み合わせることにより、比較的人体の深部にある臓器(肺、消化器)等のがんを対象としたDDS型治療システムの開発を行う。

技術目標及び達成時期

光線力学治療システムの前臨床試験の開始及び治療効果・安全性の検証と、超音波診断・治療システムの前臨床試験を可能とする薬剤及び装置の完成に関する開発を難治性がんの治療に向けて行う。

研究開発期間

2006年度～2009年度

(3) インテリジェント手術機器研究開発プロジェクト(運営費交付金)

概要

手術中にがん細胞等の病巣部の位置や動きを正確に診断しながら、必要最小限の切除で確実かつ安全に治療できる診断と治療が一体となった内視鏡手術支援システムの開発を行う。

技術目標及び達成時期

・主要部位対象機器研究開発

脳神経外科領域、胸部外科領域、及び消化器外科領域を対象に、基盤技術を確立し、それらの技術を融合化して、製品化・実用化の目処をつける。非臨床試験を実施し、その有効性と安全性を確認する試験結果を得ることを目標とする。

・研究連携型機器開発

子宮内で行われる出生前治療を行うための新しい手術システム・機器を開発する。非臨床試験を実施し、その有効性と安全性を確認する試験結果を得ることを目標とする。

研究開発期間

2007年度～2011年度(研究連携型機器開発は、2007年度～2009年度)

(4) 基礎研究から臨床研究への橋渡し促進技術開発(運営費交付金)【再掲】

- 2. 再生医療の実用化

(1) 再生医療評価研究開発事業(運営費交付金)

) 評価技術の開発

概要

ヒトから細胞を採取し、これを体外で培養、必要に応じて組織に分化させ、これを患者に移植・治療する再生医療の国内での早期実用化、産業化を目指し、患者自

身の細胞の採取・培養から組織形成・治療までの評価プロセス及び基準を開発、体系化する。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、再生医療の早期実用化、産業化のための、細胞培養評価法の開発、組織形成評価法の開発、実用化レベルでの評価基準の確立を行う。

研究開発期間

2005年度～2009年度

) 心筋再生治療研究開発プロジェクト

概要

心筋再生治療の早期実用化を目指すために、厚い心筋組織で構築された内部に酸素や栄養を供給できるような血管網を有するバイオ心筋の作成技術を開発する。

技術目標及び達成時期

2009年度までに厚さが5mm以上、酸素、栄養を供給できる血管網を有した心筋組織を開発する。

研究開発期間

2006年度～2009年度

) 三次元複合臓器構造体研究開発プロジェクト

概要

生体適合性等を備えた三次元複合臓器構造体を開発し、従来のティッシュエンジニアリング技術では適用できない臓器の再生を可能にするため、大型化、三次元構造化、自己組織化及び計測評価法の確立のための技術基盤の開発を行う。

技術目標及び達成時期

2009年度までに従来のティッシュエンジニアリング技術による単層構造に比べて再生組織の厚さが10倍以上及び構造体積は100倍以上、含有組織は従来の単一組織から3種類以上の複合組織化技術を開発する。

研究開発期間

2006年度～2009年度

(2) 基礎研究から臨床研究への橋渡し促進技術開発(運営費交付金)【再掲】

- 3. 福祉機器の開発

(1) 福祉用具実用化開発推進事業(運営費交付金)

概要

「福祉用具の研究開発及び普及の促進に関する法律」(福祉用具法)に基づき、高齢者・心身障害者及び介護者の生活の質の向上を目的として、生活支援分野、社会活動支援分野を中心とした福祉用具の実用化開発を行う民間企業等に対し、研究開発費用の2/3以内を補助することで、多様な福祉ニーズに対応するとともに、当該分野における新産業の創出、成長の促進に資する。

技術目標及び達成時期

高齢者、障害者の生活支援、社会参加支援に資する福祉用具の実用化開発を促進

することにより、高齢者等の生活における負担の軽減を図り、安全で安心のできる生活を実現する。より具体的な目標として、各々の補助対象事業終了後3年経過した時点で50パーセント以上を製品化する。

研究開発期間

1993年度～

- 4 . 診断・治療機器、再生医療等に係る基盤整備

(1) 医療機器開発ガイドライン策定事業

概要

医療機器産業への投資、新規企業参入、医療機器研究開発の促進及び薬事法審査の円滑化・迅速化にも資する「医療機器開発ガイドライン」を厚生労働省との連携の下、産学の協力を得て、個別の医療機器ごとに策定し、国内での機器開発促進の環境整備を図るとともに、医療機器メーカーと材料・部品メーカーの適切なリスク分担を可能とするモデル契約の策定やリスクマネジメント手法の開発等について検討を行う。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、今後実用化が期待される先進的な医療機器（7機種程度）について、工学的安定性や生物学的安定性等に関する詳細な評価基準を策定し、開発ガイドラインとして取りまとめる。また、治療機器への部材供給活性化のための調査研究を行い、医療機器開発に反映させることで、ハイリスクな医療機器に対する材料・部品の提供を活性化し、医療機器産業の活性化に資するものとする。

研究開発期間

2008年度～2010年度

(2) 福祉機器情報収集・分析・提供事業

概要

福祉用具法に基づき、民間による福祉機器の実用化のための研究開発を促進するため、福祉機器に関する産業技術に係る情報の収集・分析・提供事業を実施することで、当該分野における福祉機器の普及や新規産業の創出・成長の促進を図る。

技術目標及び達成時期

各年において福祉機器に係るニーズ等の調査の実施及び福祉用具実用化推進事業で開発された福祉機器の各種展示会等への出展による情報収集・分析・情報の提供を実施する。

研究開発期間

1993年度～

5 . 政策目標の実現に向けた環境整備（成果の実用化、導入普及に向けた取組）

バイオテクノロジーに係る研究開発・産業化関連

[調査研究]

1) バイオインダストリー安全対策調査（2000～2009年度）

バイオテクノロジーの安全性を確保するため、これまで得られている知見を基に、安

全性関連データベースの整備、安全性評価手法の高度化に必要な事項の検討及びガイドラインの作成を行う。

2) バイオ事業化に伴う生命倫理問題等に関する研究(2002～2011年度)

バイオテクノロジーの実用化に際して、新たな技術に対する国民の理解と合意を得るため、新たな技術の産業化に伴って発生する、我が国の社会における様々な問題を、文献の収集、国内外の調査等を行うことにより研究する。さらに、バイオテクノロジーに対する理解を深めるための情報発信等、社会的受容(public acceptance)を高めるための活動を支援する。

[標準化]

・各プロジェクトで得られた成果のうち、標準化すべきものについては、適切な標準化活動(国際規格(ISO/IEC)、日本工業規格(JIS)、その他国際的に認知された標準の提案等)を実施する。具体的には、統合データベースの情報やインターネットに公開されている情報資源等を相互運用するために、必要なデータ形式、フォーマット等の標準化を推進する。

[導入普及促進]

・個人遺伝情報保護ガイドラインの適切な運用

ゲノム研究の進展は、個人遺伝情報を用い、情報技術を駆使した幅広い医療・健康サービスによる人々の健康や福祉の向上、さらには新しい医療・健康サービス産業の育成に重要な役割を果たそうとしているが、その際、人権を尊重し、社会の理解と協力を得て、個人遺伝情報の厳格な管理の下で適正に事業を実施することが不可欠である。そのため、個人遺伝情報を安全に保護するために作成した事業者が遵守すべきルール「経済産業分野のうち個人遺伝情報を用いた事業分野における個人情報保護ガイドライン(2004年12月17日告示)」(個人遺伝情報保護ガイドラインという)を適切に運用する。

[産業間連携]

・研究開発型ベンチャー支援

バイオベンチャーは商品を市場に送り出すまでに長期間を要する、研究開発のために多額の資金調達を必要とする、事業を行うために様々な規制・審査を経る必要がある等、他業種のベンチャー企業と比較して困難な問題を抱えていることが多い。そのため、バイオベンチャーの様々な問題に対して施策への反映を検討し、補助金等の施策の紹介を通じてバイオベンチャー振興を図る。

また、「産業クラスター計画」に基づき、全国のバイオクラスターにおいて、企業間のネットワーク形成の支援、産学連携による研究開発プロジェクトの支援、地域系ベンチャーファンドによる資金調達支援等を実施していく。

・基礎研究から臨床研究への橋渡し促進技術開発(運営費交付金)【再掲】

[プロジェクト等間の連携について]

・ゲノム創薬加速化支援バイオ基盤技術開発(化合物等を活用した生物システム制御基盤技術開発)については、タンパク質機能解析・活用プロジェクトの成果を活用することで、

超高速・高感度にタンパク質の相互作用を解析する技術を開発する。

・ゲノム創薬加速化支援バイオ基盤技術開発（創薬加速に向けたタンパク質構造解析基盤技術開発）については、「生体高分子立体構造情報解析」の成果を活用することで、膜タンパク質やその複合体の構造情報を取得する新たな技術等の開発に向けて、タンパク質の立体構造及びその構造変化や膜タンパク質複合体の構造情報等の解析及び構造情報を基にした高精度なシミュレーション技術を開発する。

・糖鎖機能活用技術開発については、糖鎖合成関連遺伝子ライブラリー構築、糖鎖エンジニアリングプロジェクトの成果を活用することで、糖鎖の機能を効率的に解析するための基盤技術を開発する。

・ゲノム創薬加速化支援バイオ基盤技術開発の「化合物等を活用した生物システム制御基盤技術開発」、「創薬加速に向けたタンパク質構造解析基盤技術開発」、「モデル細胞を用いた遺伝子機能等解析技術開発」については、必要に応じ、各々の成果を活用し、効率的、効果的な研究開発を図る。

[関係機関との連携]

・総合科学技術会議が推進する基本政策推進専門調査会 分野別推進総合PT ライフサイエンスPT及び科学技術連携施策（「生命科学の基礎・基盤」、「臨床研究・臨床への橋渡し研究」）の下、各プロジェクトについて、関係府省との適切な連携を図る。また、2007年1月に設置された「革新的創薬のための官民対話」の場を通じ、医薬品分野のイノベーションの創出と産業の国際競争力強化に係る諸施策の方向性に対する製薬業界、教育・研究機関、行政（文部科学省、厚生労働省、経済産業省）の認識の共有化を図る。

[その他]

・特許への取組

一段と激化する特許戦争の中、成果実用化・効率的な研究開発を推進するため、プロジェクト企画段階から、研究テーマ周辺の論文及び特許状況のサーベイ実施やプロジェクト実施段階における特許出願後の事業化構想等、特許に関する戦略的取組（プロパテントアプローチの導入）を実施する。

医療福祉機器関連

[標準化]

高齢者等支援機器については、関係省庁との緊密な連携の下、標準化等の手法による実用化及び普及の方策を検討する。

[導入普及促進]

・福祉医療関連機器普及促進（財政投融资制度）（1992年度～2008年9月末）

医療・福祉関連機器の開発、生産、流通、販売等の関連する供給体制を強化するために必要となる設備に対し、長期かつ低金利な融資制度により支援を行い、さらなる製品の高品質化、低価格化を実現し、安定的な供給体制を確保する。

[関係機関との連携]

・医療の進歩・国民の健康に貢献する医療機器・用具の産業技術力向上及び国際競争力強化を目指し、研究開発から市場化までのすべてのプロセスにおけるマクロな戦略の検討と、医療機器の重要性について社会的認知の向上を実現するための仕組み及び個別プロジェクトの形成をはかることを使命とした「医療技術産業戦略コンソーシアム(METIS)」が平成13年に設立され、現在第3期に入っている。また、平成19年4月には「革新的医療機器の創出に向けた医療機器産業界との懇談会」が設置され、経済産業省、厚生労働省、文部科学省の3省が連携して取りまとめた「革新的医薬品・医療機器創出のための5か年戦略」を早期実行するための官民対話が推進されている。

[その他]

・薬事法審査の迅速化

医療機器の審査体制の強化による薬事法審査の迅速化の観点から、2004年から独立行政法人産業技術総合開発機構の工学系研究者を独立行政法人医薬品医療機器総合機構へ派遣したところである。

6. 研究開発の実施に当たっての留意事項

事業の全部又は一部について独立行政法人の運営費交付金により実施されるもの(事業名に(運営費交付金)と記載したものは、中期目標、中期計画等に基づき、運営費交付金の総額の範囲内で、当該独立行政法人の裁量によって実施されるものである。

なお、適切な時期に、実用化・市場化状況等について検証する。

7. 改訂履歴

- (1) 平成12年12月28日付けがん・心疾患等対応高度医療機器プログラム制定。
- (2) 平成14年2月26日付け健康維持・増進のためのバイオテクノロジー基盤研究プログラム基本計画制定。
- (3) 平成14年2月28日付け健康寿命延伸のための医療福祉機器高度化プログラム基本計画制定。がん・心疾患等対応高度医療機器プログラム(平成12・12・27工総第13号)は、廃止。
- (4) 平成15年1月27日付け健康維持・増進のためのバイオテクノロジー基盤研究プログラム基本計画制定。健康維持・増進のためのバイオテクノロジー基盤研究プログラム基本計画(平成14・02・25産局第4号)は、廃止。
- (5) 平成15年3月10日付け健康寿命延伸のための医療福祉機器高度化プログラム基本計画制定。健康寿命延伸のための医療福祉機器高度化プログラム基本計画(平成14・02・05産局第2号)は、廃止。
- (6) 平成16年2月3日付け制定。健康維持・増進のためのバイオテクノロジー基盤研究プログラム基本計画(平成15・01・23産局第4号)及び健康寿命延伸のための医療福祉機器高度化プログラム基本計画(平成15・03・07産局第17号)は、本プログラム基本計画に統合することとし、廃止。
- (7) 平成17年3月31日付け制定。健康安心プログラム基本計画(平成16・02・03産局第12号)は、廃止。

- (8) 平成 1 8 年 3 月 3 1 日付け制定。健康安心プログラム基本計画 (平成 1 7 ・ 0 3 ・ 2 5 産局第 1 号) は、廃止。
- (9) 平成 1 9 年 4 月 2 日付け制定。健康安心プログラム基本計画 (平成 1 8 ・ 0 3 ・ 3 1 産局第 2 号) は、廃止。
- (1 0) 平成 2 0 年 4 月 1 日付け制定。健康安心プログラム基本計画 (平成 1 9 ・ 0 3 ・ 2 0 産局第 5 号) は、廃止。

経済産業省

平成20・03・31産局第5号
平成20年3月31日

経済産業省産業技術環境局長



経済産業省製造産業局長



航空機・宇宙産業イノベーションプログラム基本計画の制定について

上記の件について、イノベーションプログラム実施要領（平成16・07・27産局第1号）第4条第1項の規定に基づき、別添のとおり制定する。

航空機・宇宙産業イノベーションプログラム基本計画

1. 目的

今後、市場規模の拡大が見込まれるとともに、その先端的な部品、材料、システム技術の波及効果を通じて我が国製造業全体の高度化をもたらし、また安全保障上の重要な基盤である航空機産業に関連する技術開発を積極的に推進する。

また、大きな技術波及効果を有し、国民の安全にも密接に関わるだけでなく、高度情報化社会の実現、地球環境の保全、資源開発等多様な社会ニーズに応える基盤となる宇宙産業の国際競争力の強化を図る。

2. 政策的位置付け

第 3 期科学技術基本計画（2006 年 3 月閣議決定）

航空機分野は、先端技術と高度な材料・部品等をシステム統合する分野であり、重点推進 4 分野及び推進 4 分野のうち、「情報通信」、「環境」、「ナノテクノロジー・材料」、「ものづくり技術」、「社会基盤」、「エネルギー」といった複数の分野にまたがる技術開発課題を有している。航空機分野の技術は他分野への技術波及効果も高く、その開発は産業技術政策上も極めて重要であり、特に、環境負荷低減を実現するための技術課題については、地球温暖化対策等の観点からも積極的に取り組むべきである。

第 3 期科学技術基本計画を踏まえて策定された分野別推進戦略では、航空機分野に関連するプロジェクトは主に「社会基盤」分野に位置づけられており、「高速輸送を可能とし、大量運航によって社会生活を支えているのみならず、産業政策上、安全保障上も重要な役割を担っており、諸外国と同様に研究開発リスクを国が負担しつつ、国民の航空輸送ニーズの多様化に応え、安全や環境問題に配慮した技術開発に取り組む必要がある。特に、我が国主導で航空機およびエンジンをインテグレーションできる技術を向上させるとともに、中長期的に技術を育成するための課題に取り組む必要がある」とされている。本プログラム基本計画に含まれる各研究開発事業についても、戦略重点科学技術及び重要な研究開発課題として指定されている。

宇宙分野は、推進分野である「フロンティア」分野において、国家基幹技術、戦略重点科学技術及び重要な研究開発課題に位置付けられた。また、総合科学技術会議において「我が国における宇宙開発利用の基本戦略」（2004 年 9 月総合科学技術会議）が決定されている。

21 世紀環境立国戦略（2007 年 6 月閣議決定）

世界最高水準にある我が国の優れた省エネ技術等の普及、更なる技術開発により、エネルギー効率の一層の改善を図るため、次世代環境航空機の開発・普及などによる航空機からの CO₂ 排出抑制対策等、物流分野のエネルギー効率の改善を進め、運輸部門にお

ける省エネ対策を推進することとされている。

経済成長戦略大綱（2007年6月改定）

産学官連携により世界の潜在需要を喚起する新産業群を創出するため、特に、極限状態における高信頼性が求められる次世代環境航空機など、我が国の製造業の更なる発展に必要な部品・材料産業の高度化にも大きく貢献する新産業群の実現に向けた環境整備や研究開発を推進することとされている。

また、宇宙分野については、宇宙の利用・産業化を推進することとされている。

経済財政改革の基本方針2007（2007年6月閣議決定）

次世代環境航空機等の戦略的分野の研究開発プロジェクトを推進することとされている。

また、宇宙分野については、宇宙の利用・産業化を推進することとされている。

「e-Japan戦略」（2003年7月、IT戦略本部とりまとめ）

宇宙分野は、新しいIT利活用戦略〔衛星測位システム（GPS等）の高度な活用と、準天頂衛星システム等の測位システムや地理情報システム（GIS）の研究開発や整備を統合的に推進し、我が国の国土空間における正確な位置を知ることができる環境の整備〕、「e-Japan重点計画2004」（平成2004年6月、IT戦略本部とりまとめ）における重点政策5分野の1つに対応するものである。

3. 達成目標

大きな技術波及効果によって環境をはじめ、情報、材料等の分野に高付加価値を生み出す航空機関連技術について、材料・構造・システム関連等の中核的要素技術力を一層強化・保持するとともに、機体及びエンジンの完成機関連技術を強化する。

我が国宇宙産業の国際競争力強化に向け、次世代の宇宙機器の開発及び宇宙利用の促進に資する技術を強化する。これにより、我が国における宇宙開発利用の産業化を促進し、自立的な宇宙産業を育成することで、世界の宇宙機器マーケットにおける我が国のシェア拡大を図る。

4. 研究開発内容

【プロジェクト】

・航空機関連（広く産業技術を対象とした研究開発であって航空機関連技術にも裨益するものを含む）

（1）省エネ用炭素繊維複合材技術開発

概要

航空機、自動車、鉄道、船舶等の輸送機械等における炭素繊維複合材の適用範囲を拡大し、省エネルギーの促進を図るため、先進的な炭素繊維複合材成形技術や、耐雷対策の低コスト化技術等の研究開発・実証を行う。

技術目標及び達成時期

2013年度までに、従来の方法に比べ低コストであり、曲率の大きな部位の成形も

行うことができるV a R T M (バータム)法等の炭素繊維複合材成形技術や、炭素繊維複合材を用いた製品の耐雷性能を低コストで確保する技術の研究開発・実証を行う。

研究開発期間

2008年度～2013年度

(2) 次世代航空機用構造部材創製・加工技術開発

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、航空機、高速車両等の輸送機器への先進材料の本格導入を加速させるため、先進複合材料及び先進金属材料について部材開発、設計試作及び評価を実施することで、軽量化によりエネルギー使用効率を大幅に向上させる革新的な構造部材の創製・加工技術の開発を行う。

技術目標及び達成時期

2012年度までに、複合材の構造健全性診断技術、チタン合金の創製・加工技術を確立するとともに、航空機用エンジンへの適用を目指し、耐熱・耐衝撃性に優れた複合材料を開発する。

研究開発期間

2003年度～2012年度

(3) 航空機用先進システム基盤技術開発

概要

航空機の環境適合性、運行経済性、安全性といった要請に対応した、軽量・低コストかつ安全性の高い先進的な航空機用システムを開発する。

技術目標及び達成時期

通信アンテナ、気象用レーダ等の高性能化等を実現する航空機システム先進材料技術を2010年度までに開発する。また、航空機エンジンについても、低損失ギアボックスシステムを2011年度までに開発する。さらに、航空機の安全性向上及び運航コスト低減に資する先進パイロット支援システムを開発し、飛行試験等を通じた技術実証を2012年度までに行う。

研究開発期間

1999年度～2012年度

(4) 空力設計、開発・生産システム、操縦システム等研究開発

概要

空力設計、開発・生産システム、操縦システム等に係る先進的技術の研究開発・実証を通じて、製造業全体の開発・生産プロセス等の高度化等を図る。

技術目標及び達成時期

2013年度までに、空力設計、開発・生産システム、操縦システム等に係る先進的技術の研究開発・実証を行う。

研究開発期間

2008年度～2013年度

(5) 環境適応型小型航空機用エンジン研究開発(運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、エネルギー使用効率を大幅に向上し、環境対策にも優れた次世代の小型航空機用エンジンの開発にとって重要な要素技術の研究開発を行う。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、エネルギー使用効率を大幅に向上する構造設計技術、騒音、NOx等の環境負荷対応に優れた環境対策技術、インテグレーション技術、高バイパス比化等の高性能化技術といった要素技術の研究開発・実証を行う。

研究開発期間

2003年度～2010年度

(6) 小型民間輸送機等開発調査

概要

我が国主導の機体開発を実現するため、小型民間輸送機等の開発可能性を検討すべく、市場調査及び要素技術開発等を実施する。

技術目標及び達成時期

次期輸送機(C-X)、救難飛行艇(US-2)等の防衛省機の民間転用を含め、我が国における民間航空機開発を促進するため、市場動向調査や要素技術開発を実施する。

研究開発期間

1989年度～2011年度

(7) 超高速輸送機実用化開発調査

概要

将来の国際共同開発においても、我が国産業界が然るべき役割を果たすため、遷・超音速領域の飛行を想定した超高速機について、市場ニーズ及び経済性への要求に関する検討を行うとともに、技術的課題の抽出、各種要素技術開発等を行う。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、遷・超音速域(マッハ0.9～1.6程度)を飛行する超高速機の実現のために解決すべき技術的課題を抽出する。また、実現にあたり特に重要となる空力及び材料・構造技術について、超高速機の低抵抗化に資する数値流体(CFD)解析手法や軽量かつ製造コストの低い超高速機用機体構造(胴体・主翼等)の検討を行う。

研究開発期間

2002年度～2009年度

・宇宙産業関連

1．輸送系産業競争力向上基盤技術開発

(1) 次世代輸送系システム設計基盤技術開発プロジェクト(運営費交付金)

概要

国際ロケット市場における我が国宇宙産業の競争力確保を図るため、ロケットを効率的に開発・運用し、ロケットの開発、衛星の受注から打上までの期間を大幅に短縮する基盤技術開発を行う。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、ロケットの設計及び衛星対応設計の効率化技術等を確立する。

研究開発期間

2001年度～2010年度

2．衛星系産業競争力向上基盤技術開発

(1) 次世代衛星基盤技術開発プロジェクト(準天頂衛星システム等開発プロジェクト)

概要

国際商業市場における我が国衛星メーカーの競争力を強化するべく、準天頂衛星システム(利用者に対し、米国が運用するGPSとの補完による高精度な位置情報等の提供を可能にするシステム)の構築に不可欠な基盤技術(産業競争力強化にも直結する衛星の軽量化、長寿命化に関する技術等)の開発を行う。本プロジェクトの一部については、他部門と比較して需要増加の割合が高い運輸部門のエネルギー消費を抑制すべく、自動車、高速車両等の輸送機器の軽量化・効率化にも資する複合材料製造設計等の基盤技術を確立するためのものであり、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

静止軌道と一定の角度をなす傾斜軌道に複数の衛星を配置し、見かけ上、常に天頂付近に最低1つの衛星を位置させるシステム。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、準天頂衛星システムの構築に不可欠な基盤技術(産業競争力強化にも直結する衛星の軽量化、長寿命化に関する技術等)の開発を実施し、宇宙空間での技術実証を行う。

研究開発期間

2003年度～2010年度

(2) SERVICEプロジェクト(運営費交付金)

概要

我が国宇宙産業の国際競争力を強化するため、衛星製造の低コスト化、短納期化及び高機能化を実現すべく我が国産業が有する優れた民生用電子部品の活用に向け、耐放射線試験、高温/低温・振動等の地上試験を行う。また、地上試験結果を踏まえ選定した

民生用電子部品を実証衛星に搭載し、宇宙における放射線、高温/低温・真空等の複合環境への耐環境性能を実証するとともに、これら地上試験及び宇宙実証により取得されたデータを知的基盤（データベース、ガイドライン）として整備する。

技術目標及び達成時期

地上試験及び宇宙実証の結果を踏まえ、2010年度までに民生部品・民生技術の活用のための知的基盤（データベース、ガイドライン）を整備することにより、我が国における衛星製造等の低コスト化、短納期化及び高機能化を図るとともに、国際標準化提案についても検討を行う。

研究開発期間

1999年度～2010年度

(3) 小型化等による先進的宇宙システムの研究開発（運営費交付金）

概要

我が国宇宙産業の国際競争力強化や国内宇宙産業基盤維持を図るために、低コスト化・短納期化・小型化等による先進的宇宙システムを構築する。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、我が国の既存衛星システムに比べ、開発・製造コスト約15分の1、重量約10分の1、開発期間約3分の1を目標とする超高性能小型衛星（光学分解能1m以下）を開発する。また、設計思想の標準化を図るなど、今後の我が国衛星開発の基盤となる開発思想を構築する。

研究開発期間

2008年度～2010年度

(4) ASTERプロジェクト

概要

石油の生産及び流通の合理化を図る観点から行うものであり、石油及び可燃性天然ガス資源等の開発に資するため、資源探査能力を格段に向上した光学センサである資源探査用将来型センサ（ASTER）の健全性評価やセンサを維持することにより、取得される画像データを用いた石油・天然ガス資源の遠隔探知を行う技術を確立する。

技術目標及び達成時期

ASTERの開発、健全性の評価・維持を実施することにより、2010年度までに、センサ技術の高度化（ポインティング機能の追加、分解能の向上、熱センサの搭載等）を図る。

研究開発期間

1987年度～2010年度

(5) PALSARプロジェクト

概要

石油の生産及び流通の合理化を図る観点から行うものであり、石油及び可燃性天然ガス資源等の開発に資するため、資源探査能力を格段に向上した合成開口レーダである次世代合成開口レーダ（PALSAR）の健全性評価やセンサを維持することにより、取得される画像データを用いた石油・天然ガス資源の遠隔探知を行う技術を確立する。

技術目標及び達成時期

PALSARの開発、健全性の評価・維持を実施することにより、2010年度までに、レーダ技術の高度化（アンテナ指向の電子制御化、分解能の向上、多偏波観測等）を図る。

研究開発期間

1993年度～2010年度

（6）ハイパースペクトルセンサ等の研究開発（運営費交付金）

概要

資源開発に有効な岩石・鉱物や地質構造解析の高次元解析を可能とするハイパースペクトルセンサの開発を行うとともに、軌道上におけるデータ取得の実証を行い、センサ技術の確立を行う。

技術目標及び達成時期

2011年度までにスペクトル分解能200バンド前後のハイパースペクトルセンサを開発し、地表面のスペクトル情報を取得して資源開発に有効なセンサ技術の実証を行う。

研究開発期間

2007年度～2011年度

3．宇宙利用促進基盤技術の開発

（1）次世代地球観測センサ等の研究開発

概要

我が国が開発・運用する地球観測センサや2007年度よりNEDOOにて開発が始まったハイパースペクトルセンサ等により得られる地球観測データから、有用な情報を効果的・効率的に抽出するため、スペクトルデータの収集と蓄積、物質ごとの特徴的なスペクトルデータの研究、衛星から得られたデータと地上データと比較・処理解析し、対象物を特定する解析手順・手法、多様なデータとの融合処理等の高付加価値データの処理解析技術等の研究開発を行う。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、環境観測、災害監視、資源探査、農林水産等の分野におけるハイパースペクトルセンサにより得られる地球観測データ処理・解析技術の向上及び地球観測データ利用の拡大を図る。

研究開発期間

2006年度～2011年度

(2) 石油資源遠隔探知技術の研究開発

概要

我が国が開発・運用する多様な地球観測センサ(ASTER、PALSAR等)の地球観測データを用いて、石油・天然ガス等の安定供給確保のため、資源開発・探査、環境観測等に有効なデータの処理解析手法の研究開発を行う。また、地球観測データのような大容量のデータを容易に扱えるシステムの研究開発を実施することで資源開発・探査、環境観測を含む多様な分野でのリモートセンシングの利用拡大を図る。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、資源開発・探査、環境観測等の分野における地球観測データ処理・解析技術の向上及び地球観測データの利用の拡大を図る。

研究開発期間

1981年度～2010年度

(3) 太陽光発電無線送受電技術の研究開発

概要

新たな電力供給方式として地上において様々な用途への応用が見込まれ、また、長期的には将来の新エネルギーシステムとして期待される宇宙太陽光発電システムの中核的技術として応用可能な太陽光発電無線送受電技術を確立するため、安全性等を確保しつつ、太陽エネルギーを効率良く伝送するための要素技術等について研究開発を行う。

技術目標及び達成時期

2010年度までに高効率半導体増幅回路の開発、複数フェーズドアレイパネルの統合による精密ビーム制御技術の開発、高効率受電整流回路の開発を目指すことにより、無線送受電技術の高効率化を図る。

研究開発期間

2008年度～2010年度

5. 政策目標の実現に向けた環境整備

(航空機)

〔人材育成〕

- ・大学から有用な人材を航空機産業に迎えるとともに、開発から次期開発までのサイクルの長い航空機産業において継続的に人材を育成することが重要である。

〔防衛調達等を通じた航空機産業の高度化について〕

- ・効率的な研究開発や生産に向けたインセンティブ等を通じて我が国の航空機産業・技術基盤の維持・育成にも資する防衛調達・研究開発が実現するよう、引き続き関係省庁と連携することが重要である。
- ・防衛機の民間転用を円滑化するための制度整備等について、関係省庁と連携することが重要である。

〔関係機関との連携〕

- ・民間航空機開発推進関係省庁協議会（防衛庁（当時）、文部科学省、国土交通省及び経済産業省局長級による協議会）を設置（平成15年9月）し、研究開発の円滑な実施を図るため、関係省庁の連携を強化。また、協議会の下に、各省庁の担当課長からなる幹事会も併せて設置。産業構造審議会航空機委員会において航空機産業全般にかかる課題と対策を議論。

〔その他〕

- ・中小企業のネットワーク化や認証取得により、我が国の部品・素材の採用拡大を図ることが重要である。
- ・航空機部品へのRFID導入を進めることにより、整備業務等における効率化や高付加価値化を目指すことが重要である。

（宇宙産業）

〔プロジェクト等との主要な連携について〕

（衛星系等基盤技術開発により得られた技術の活用）

A S T E Rプロジェクト及びP A L S A Rプロジェクトの成果を、石油資源遠隔探知技術の研究開発プロジェクトで活用することで、人工衛星から取得される画像データを用いた石油・天然ガス資源の遠隔探知を行う技術を確立する。

〔関係機関との連携〕

産業化を促進するための環境整備（政府による国産ロケットの優先使用、衛星打上げ輸送サービスの整理、大型試験研究設備の利用等）に向けた関係府省及び機関との連携。

関係府省、機関及び企業をメンバーとする連絡会議を活用した産業化関連プロジェクトの推進。

〔導入普及促進〕

プロジェクトを通じて得られた基盤技術、データ（宇宙利用可能民生部品データベース、リモートセンシングデータ等）等について、成果報告会、データベースの一般公開、画像データの一般提供等により、可能な限り速やかに社会に普及し、民間主導による実用化、新技術への応用を促進する。

6．研究開発の実施に当たっての留意事項

事業の全部又は一部について独立行政法人の運営費交付金により実施されるもの（事業名に（運営費交付金）と記載したもの）は、中期目標、中期計画等に基づき、実施されるものである。

7．プログラムの期間

プログラムの期間は2003年度から2013年度まで。

8．改定履歴

- (1) 平成 1 5 年 3 月 1 0 日付け制定。
- (2) 平成 1 6 年 2 月 3 日付け制定。民間航空機基盤技術プログラム基本計画(平成 1 5 ・ 0 3 ・ 0 7 産局第 1 2 号)及び宇宙産業高度化基盤技術プログラム基本計画(平成 1 5 ・ 0 3 ・ 0 7 産局第 1 3 号)は、廃止。
- (3) 平成 1 7 年 3 月 3 1 日付け制定。民間航空機基盤技術プログラム基本計画(平成 1 6 ・ 0 2 ・ 0 3 産局第 8 号)及び宇宙産業高度化基盤技術プログラム基本計画(平成 1 6 ・ 0 2 ・ 0 3 産局第 9 号)は、廃止。
- (4) 平成 1 8 年 3 月 3 1 日付け制定。民間航空機基盤技術プログラム基本計画(平成 1 7 ・ 0 3 ・ 2 5 産局第 1 1 号)及び宇宙産業高度化基盤技術プログラム基本計画(平成 1 7 ・ 0 3 ・ 2 5 産局第 1 0 号)は、廃止。
- (5) 平成 1 9 年 4 月 2 日付け制定。民間航空機基盤技術プログラム基本計画(平成 1 8 ・ 0 3 ・ 3 1 産局第 1 2 号)及び宇宙産業高度化基盤技術プログラム基本計画(平成 1 8 ・ 0 3 ・ 3 1 産局第 8 号)は、廃止。
- (6) 平成 2 0 年 3 月 3 1 日付け制定。民間航空機基盤技術プログラム基本計画(平成 1 9 ・ 0 3 ・ 2 3 産局第 3 号)及び宇宙産業高度化基盤技術プログラム基本計画(平成 1 9 ・ 0 3 ・ 1 6 産局第 4 号)は、廃止。

イノベーションプログラムについて

平成20年5月16日
経 済 産 業 省
研 究 開 発 課

イノベーションプログラムについて

20年度一般会計 502億円(507億円)
特別会計 1,484億円(1,622億円)

1. 「イノベーションプログラム」の中での体系的推進 (Inside Management & Accountability)

経済産業省の全ての研究開発プロジェクトは、政策目標毎に7つの「イノベーションプログラム」の下で体系的に推進。

各プログラムの中で、政策目標に向けたプロジェクトの位置付けと目標の明確化、市場化に必要な関連施策(規制改革、標準化等)との一体化を図り、イノベーション実現に向け各プロジェクトを効果的に推進。

2. 「技術戦略マップ」に基づく戦略的企画立案 (Outside Communication & Networking)

先端産業技術動向を把握し、国が取り組むべき技術課題とイノベーションの道筋を明確化するため、産学官で協働するロードマッピング手法を導入(『技術戦略マップ 2005 / 2006 / 2007 / 2008』)。

研究開発プロジェクトの選定に当たっては、イノベーションプログラムにおける政策目標を基に技術戦略マップに位置付けられた重要技術課題を抽出し戦略的に企画立案。

平成20年度 イノベーションプログラム(IPG)予算総額

平成20年度予算額 (平成19年度予算額)
1,986億円 (2,129億円)

IT IPG

ITコア技術の革新	114億円
省エネ革新	67億円
情報爆発への対応	41億円
情報システムの安全性等	50億円
小計	272億円

ナノテク・部材 IPG

ナノテク加速化領域	36億円
情報通信領域	31億円
ライフサイエンス領域	19億円
エネルギー・資源・環境領域	60億円
材料・部材領域	32億円
共通	6億円
小計	184億円

ロボット・新機械 IPG

ロボット関連技術開発	24億円
MEMS・分析機器	22億円
小計	46億円

健康安心 IPG

創薬・診断技術開発	96億円
診断・治療機器・再生医療等の技術開発	30億円
小計	126億円

エネルギー IPG

総合エネルギー効率の向上	817億円
運輸部門の燃料多様化	358億円
新エネルギー等の開発・導入促進	488億円
原子力等利用の推進とその大前提となる安全の確保	258億円
化石燃料の安定供給確保と有効かつクリーンな利用	554億円
小計	1,447億円 ²

環境安心 IPG

地球温暖化防止新技術	42億円
3R	13億円
環境調和産業バイオ	56億円
化学物質総合評価	16億円
小計	127億円

航空機・宇宙産業 IPG

航空機産業の基盤技術力の維持・向上	163億円
宇宙産業の国際競争力強化	69億円
小計	232億円 ³

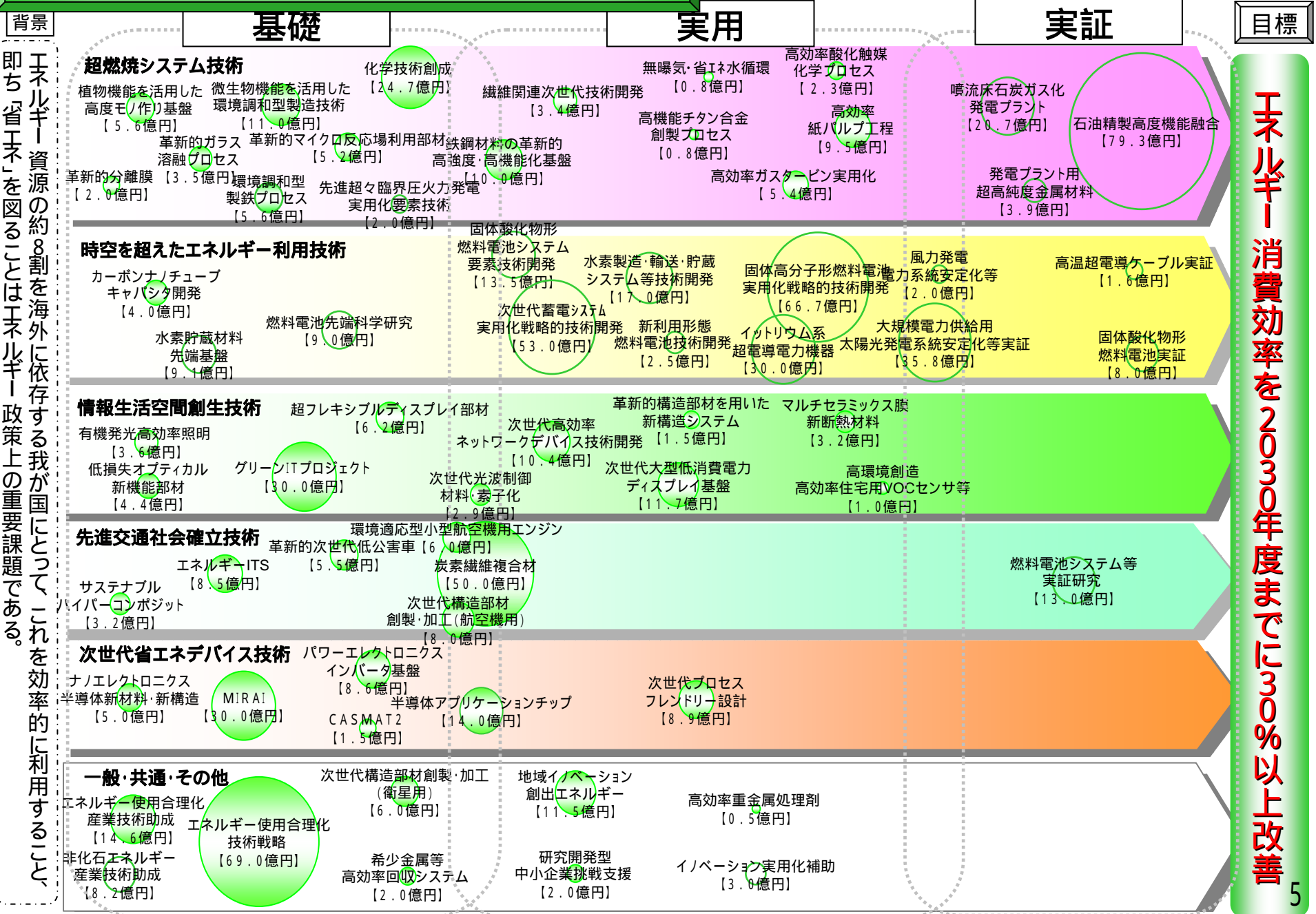
1: 各イノベーションプログラムにおけるプロジェクトの重複を排除した額

2: 各サブプログラムで重複があるため小計と一致しない

3: 一部、財投出資(50億円)、関連予算(8億円)を含む

4. エネルギーイノベーションプログラム 総合エネルギー効率の向上

【20年度予算額 817億円】
基礎、実用、実証の区分内は、任意に配置。



エネルギー消費効率を2030年度までに30%以上改善

4. エネルギーイノベーションプログラム 原子力等利用の推進とその大前提となる安全の確保

【20年度予算額 258億円】
基礎、実用、実証の区分内は、任意に配置。

背景

地球温暖化対策やエネルギー安全保障の観点から、核燃料サイクルを含む原子力発電を推進する国際的な動きが急激に進展している。

基礎・基盤研究

実証・実用化開発

目的

軽水炉・軽水炉核燃料サイクル

回収ウラン利用技術開発
【1億円】

革新的実用原子力技術開発
【8億円】

次世代軽水炉等技術開発
【12.5億円】

遠心法ウラン濃縮
技術開発
【11億円】

全炉心混合酸化物燃料技術開発
【30億円】

高速増殖炉(FBR)サイクル

高速炉再処理回収ウラン等
除染技術開発
【6億円】

発電用新型炉等技術開発
【43.7億円】

放射性廃棄物処理処分

放射性廃棄物共通技術開発
【6.4億円】

地層処分技術調査等
【36.8億円】

管理型処分技術開発
【5.4億円】

その他・共通

イットリウム系
超電導電力機器技術開発
【30億円】

高温超電導ケーブル
実証プロジェクト
【1.6億円】

その他電力供給安定化技術

次世代蓄電システム実用化
戦略的技術開発
【53.0億円】

大規模電力供給用太陽光発電
系統安定化等実証
【35.8億円】

発電プラント用超高純度
金属材料の開発
【3.9億円】

風力発電
電力系統安定化等
【2.0億円】

2030年以降においても、発電電力量に占める原子力発電の比率を30〜40%以上とする

イノベーションプログラム俯瞰図

(案)

平成20年3月5日
経済産業省
研究開発課

4. エネルギーイノベーションプログラム (2) 省エネルギー

[20年度予算740億円 (19年度648億円)]

背景

エネルギー資源の約8割を海外に依存する我が国にとってこれを効率的に利用すること、即ち「省エネ」を図ることはエネルギー政策上の重要課題

基礎

実用

実証

目的

超燃焼システム技術

植物機能を活用した高度モノ作り
【6億円】

省エネ化学技術創成
【25億円】

微生物機能を活用した環境調和型製造技術
【11億円】

革新的ガラス溶融プロセス
【4億円】

革新的マイクロ反応場利用部材技術開発
【5億円】

革新的分離膜 先進超々臨界圧火力発電実用化要素技術開発
【2億円】

環境調和型製鉄プロセス
【5.6億円】

時空を超えたエネルギー利用技術

固体酸化物形燃料電池システム要素技術開発
【14億円】

固体高分子形燃料電池実用化戦略的技術開発
【67億円】

高温超電導ケーブル実証プロジェクト
【2億円】

燃料電池先端科学研究委託費
【9億円】

新利用形態燃料電池技術開発
【3億円】

燃料電池システム等実証研究
【13億円】

次世代蓄電システム実用化戦略的技術開発
【29億円】

リチウム系超電導電力機器技術開発
【30億円】

固体酸化物形燃料電池実証研究
【8億円】

情報生活空間創生技

超フレキシブルディスプレイ部材技術開発
【6億円】

マルチセラミックス膜新断熱材料
【3億円】

高効率住宅用VOCセンサ
【1億円】

有機発光高効率照明
【4億円】

革新的構造部材を用いた新構造システム
【1.5億円】

鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化
【10億円】

次世代光波制御材料・素子化技術
【3億円】

低損失光学部材技術
【4億円】

先進交通社会確立技術

革新的次世代低公害車
【6億円】

環境適応型小型航空機用エンジン
【6億円】

炭素繊維複合材成型技術開発
【35億円】

エネルギーITS
【9億円】

炭素繊維複合材耐雷技術開発
【15億円】

サステナブルハイブリッド技術
【3億円】

次世代航空機用構造部材創製等
【8億円】

次世代省エネデバイス技術

次世代高度部材開発評価基盤
【2億円】

次世代高効率ネットワークデバイス技術開発
【10億円】

グリーンITプロジェクト
【30億円】

ナノエレクトロニクス半導体新材料等
【5億円】

次世代低消費電力半導体基板技術開発
【30億円】

次世代プロセスフレンドリー設計技術開発
【9億円】

カーボンナノチューブキャパシタ開発
【4億円】

パワーエレクトロニクスインバータ基盤技術開発
【9億円】

次世代大型低消費電力デバイス基盤技術開発
【12億円】

地域イノベーション創出エネルギー
【2億円】

一般・共通・その他

エネルギー使用合理化技術戦略
【6億円】

次世代衛星基盤技術開発
【12億円】

高効率重金属処理剤
【0.5億円】

非化石エネルギー産業技術助成
【8億円】

エネルギー使用合理化産技助成
【15億円】

研究開発型中小企業挑戦支援
【2億円】

イノベーション実用化補助事業
【3億円】

エネルギー消費効率30%以上改善

4. エネルギーイノベーションプログラム(3) 原子力・電力

【20年度予算199億円(19年度146億円)】

背景

地球温暖化対策やエネルギー安全保障の観点から原子力発電を評価する気運が高まり、欧州、国際原子力エネルギーパートナーシップ構想の提唱(采国)等、核燃料サイクルを含む原子力発電を推進する動きが急激に進展

基礎・基盤研究

実証・実用化開発

目的

軽水炉・軽水炉核燃料サイクル

回収ウラン利用技術開発
【1億円】

革新的実用原子力技術開発
【8億円】

次世代軽水炉等技術開発
【13億円】

遠心法ウラン濃縮
技術開発
【11億円】

全炉心混合酸化物燃料技術開発
【30億円】

高速増殖炉(FBR)サイクル

高速炉再処理回収ウラン等
除染技術開発
【6億円】

発電用新型炉等技術開発
【44億円】

放射性廃棄物処理処分

放射性廃棄物共通技術開発
【6億円】

地層処分技術調査等
【37億円】

管理型処分技術開発
【5億円】

その他・共通

イットリウム系
超電導電力機器技術開発
【30億円】

高温超電導ケーブル実証
【2億円】

発電電力量に占める原子力発電の比率を30〜40%以上

(エネルギーイノベーションプログラム)

「イットリウム系超電導電力機器技術開発」基本計画

新エネルギー技術開発部

1. 研究開発の目的・目標・内容

(1) 研究開発の目的

資源に乏しい我が国が、将来にわたり持続的発展を達成するため、革新的なエネルギー技術の開発、導入・普及によって、各国に先んじて次世代型のエネルギー利用社会の構築に取り組んでいくことを目的とした「エネルギーイノベーションプログラム」の一環として本研究開発を実施する。

経済社会の基盤となる電力の安定的かつ効率的な供給システムを実現するため、システムを適正に制御し、電力供給を安定化させるための技術及び発電電力を無駄なく輸送するための高効率な送電技術の確立を目指す。そのため、世界的にも我が国が最先端の技術力を有する超電導技術を活用して、コンパクトで大容量の電力供給が期待できるイットリウムに代表されるレアアース系酸化物高温超電導線材（以下「イットリウム系超電導線材」という）を用いた超電導電力機器の開発を目指す。特に、超電導電力貯蔵システム（SME S）、超電導電力ケーブル及び超電導変圧器の実用化に向けた技術を開発し、産業利用の早期実現を図ることは、経済社会を支える重要なエネルギーである電力の一層の安定的かつ効率的な供給システムを実現することに大きく貢献する。

本プロジェクトの研究対象機器は、第3期科学技術基本計画のエネルギー分野の重点科学技術「送電技術」、「電力系統制御技術」、「電力貯蔵技術」に位置付けられており、さらに、超電導技術分野の技術マップ（平成19年4月制定）のエネルギー・電力分野機器開発にも位置づけられている。

本プロジェクトは、「超電導応用基盤技術開発（第Ⅱ期）」（平成15年度～19年度）及び「超電導電力ネットワーク制御技術開発」（平成16年度～19年度）によって得られた開発成果を踏まえて、実用レベルに達したイットリウム系超電導線材を用い、次世代電力機器としてのSME S、超電導電力ケーブル及び超電導変圧器の実用化に目途をつけることを目的とする。

(2) 研究開発の目標

①超電導電力貯蔵システム（SME S）の研究開発

平成22年度までに、2GJ級SME Sの開発を見通す高磁界かつコンパクトなコイル設計技術の開発並びにメンテナンスを容易とするコイルの伝導冷却技術開発を行う。

平成24年度までにSME S対応線材の安定作製技術開発及び2MJ級モデルコイルシステムを用いたSME Sの動作試験を行い、高磁界コンパクトSME Sの実用化に目途をつける。

②超電導電力ケーブルの研究開発

平成22年度までに、電力ケーブルの大電流・低交流損失ケーブル化技術、高電圧絶縁・低誘電損失ケーブル化技術に関する要素技術の開発を完了する。

平成24年度までにケーブル対応線材の安定作製技術開発及び66kV大電流ケーブルシステム、275kV高電圧ケーブルシステムの課通電特性や送電損失等の実用性を検証し、実用化に

目途をつける。

③超電導変圧器の研究開発

平成22年度までに、超電導変圧器用の低損失化技術、大電流巻線技術及び限流機能の開発を行い、66kV/6.9kV-2MVA級変圧器の設計を完了する。

平成24年度までに、2MVA級超電導変圧器モデルを試作・評価し、低損失（従来線材対比の交流損失1/3以下）、大電流（2kA級）で、保護のための限流機能（過大電流を定格電流の3倍以下に抑制）を有する66/6kV 20MVA級超電導変圧器システムの成立性を実証する。

④超電導電力機器適用技術の標準化

超電導電力機器の早期市場導入や実用化を円滑に進めるために共通基盤となる標準化を進める。平成24年度までに、超電導線材及びその試験方法並びに超電導電力ケーブル及びその試験方法について、国際規格提案を行う。また、イットリウム系超電導線材等を適用した変圧器、SMES等の機器及びこれらの試験方法の標準化素案を作成する。

なお、目標（最終目標・中間目標）の詳細は別紙の研究開発計画に記載する。

（3）研究開発内容

上記目標を達成するために、以下の研究開発項目について、別紙の研究開発計画に基づき研究開発を実施する。

〔委託事業〕

①超電導電力貯蔵システム（SMES）の研究開発

- (i) 2GJ級高磁界・大電流コンパクトコイル構成技術開発
- (ii) 高効率コイル伝導冷却技術開発
- (iii) SMES対応線材開発
- (iv) 高磁界コンパクトSMESシステムモデル検証

②超電導電力ケーブルの研究開発

- (i) 大電流・低交流損失ケーブル化技術の開発
- (ii) 高電圧絶縁・低誘電損失ケーブル化技術の開発
- (iii) 超電導電力ケーブル対応線材開発
- (iv) 66kV大電流ケーブルシステム検証
- (v) 275kV高電圧ケーブルシステム検証

③超電導変圧器の研究開発

- (i) 超電導変圧器巻線技術開発
- (ii) 冷却システム技術開発
- (iii) 限流機能付加技術開発
- (iv) 超電導変圧器対応の線材開発
- (v) 2MVA級超電導変圧器モデル検証

④超電導電力機器の適用技術標準化

- (i) 超電導線材関連技術標準化
- (ii) 超電導電力ケーブル関連技術標準化
- (iii) その他超電導電力機器関連技術標準化等

2. 研究開発の実施方式

（1）研究開発の実施体制

本研究開発は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下、「NEDO 技術開発機構」という。）が、単独ないし複数の原則、本邦の企業、研究組合、公益法人等の研究機関（原則、国内に研究開発拠点を有していること。ただし、国外企業の特別な研究開発能力、研究施設等の活用あるいは国際標準獲得の観点からの国外企業との連携が必要な場合はこの限りではない。）から公募によって研究開発実施者を選定の後、委託して実施する。

研究開発に参加する各研究開発グループの有する研究開発ポテンシャルの最大限の活用により効率的な研究開発の推進を図る観点から、財団法人国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所 所長 塩原 融氏をプロジェクトリーダーとし、中部電力株式会社 電力技術研究所 研究主査 長屋 重夫氏、財団法人国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所 電力機器研究開発部 部長 藤原 昇氏、九州電力株式会社 総合研究所 電力貯蔵技術グループグループ長 林 秀美氏および財団法人国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所 線材研究開発部 部長 和泉 輝郎氏をサブプロジェクトリーダーとして効果的な研究開発を実施する。

（2）研究開発の運営管理

研究開発全体の管理・執行に責任を有する NEDO 技術開発機構は、経済産業省及びプロジェクトリーダーと密接な関係を維持しつつ、プログラムの目的及び目標並びに本研究開発の目的及び目標に照らして適切な運営管理を実施する。具体的には、必要に応じて設置される技術検討委員会等における外部有識者の意見を運営管理に反映させるほか、四半期に一回程度プロジェクトリーダー等を通じてプロジェクトの進捗について報告を受けること等を行う。

3. 研究開発の実施期間

本研究開発の期間は、平成20年度から平成24年度までの5年間とする。

4. 評価に関する事項

NEDO 技術開発機構は、技術的及び政策的観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義並びに将来の産業への波及効果等について、外部有識者による研究開発の中間評価を平成22年度、事後評価を平成25年度に実施する。また、中間評価結果を踏まえて必要に応じプロジェクトの加速・縮小・中止等見直しを迅速に行う。なお、評価の時期については、当該研究開発に係る技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗動向等に応じて、前倒しする等、適宜見直すものとする。

5. その他の重要事項

（1）研究開発成果の取り扱い

①共通基盤技術の形成に資する成果の普及

得られた研究開発成果のうち、下記共通基盤技術に係る研究開発成果については、NEDO 技術開発機構、実施者とも普及に努めるものとする。

a) 標準への提案、取得

- ・超電導線材関連技術の国際標準提案
- ・超電導電力ケーブル等の超電導電力機器適用技術の国際標準提案

②知的財産権の帰属

委託研究開発の成果に関わる知的財産権については、「独立行政法人新エネルギー・産業技術

総合開発機構新エネルギー・産業技術業務方法書」第25条の規定等に基づき、原則として、すべて受託先に帰属させることとする。

(2) 基本計画の変更

NEDO 技術開発機構は、研究開発内容の妥当性を確保するため、社会・経済的状況、国内外の研究開発動向、政策動向、プログラム基本計画の変更、評価結果、研究開発費の確保状況、当該研究開発の進捗状況等を総合的に勘案し、達成目標、実施期間、研究開発体制等、基本計画の見直しを弾力的に行うものとする。

(3) プロジェクト根拠法

本プロジェクトは、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法 第15条第1項第1号イに基づき実施する。

(4) その他

超電導関連の他プロジェクト（高温超電導ケーブル実証プロジェクト等）と必要な関係を図るものとする。

6. 基本計画の改定履歴

(1) 平成20年3月、制定。

(2) 平成20年7月、イノベーションプログラム基本計画の制定により、「(1) 研究開発の目的」の記載を改訂。

(3) 平成21年3月、PL、サブPLの氏名を追記して改訂。

(別紙) 研究開発計画

研究開発項目① 「超電導電力貯蔵システム (SME S) の研究開発」

SME Sは、高速な充放電特性や高い繰り返し耐久性を持ち、高出力化や大容量化に優れた電力貯蔵装置である。今後、ますます大規模電源の遠隔化が予想されるが、有効電力・無効電力の同時補償により、有効な長距離大容量送電システムの安定化対策が可能なSME Sは、中間開閉所の設置や送電ルートの複数化等による従来の対策に替わる電力系統安定化装置として期待されている。

このため、「超電導応用基盤技術開発 (第Ⅱ期)」(平成15年度～19年度)及び「超電導電力ネットワーク制御技術開発」(平成16年度～19年度)によって得られた開発成果を踏まえて、実用レベルに達したイットリウム系超電導線材を用い、従来の金属系超電導線材を用いたSME Sコイルでは実現不可能であった2GJ級大容量SME Sコイルを可能とする高磁界・コンパクトコイル構成技術の開発を行う。また、並行してメンテナンスが容易で、イットリウム系超電導線材の性能向上が期待できる温度領域での高効率な伝導冷却技術を開発する。さらに最終目標として、この成果を活かした高磁界トロイドコイルシステムを開発し、モデルコイルシステムでの検証を実施することにより高磁界コンパクトSME S実用化に目途を付ける。

また、SME Sの性能向上とともに導入促進に資する線材開発を行う。

(1) 2GJ級高磁界・コンパクトコイル構成技術開発

(i) 研究開発の必要性

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

(ii) 研究開発の具体的な内容

- ・ 従来の金属系SME Sコイルの許容可能なフープ応力(300MPa程度)の2倍の応力(600MPa)を連続して繰返し加えても使用可能な高強度コイルを開発する。
- ・ SME Sシステムとして必要な通電電流を実現させる積層複合導体を用いたコイル構成技術の開発を行う。

(iii) 達成目標

最終目標 (平成22年度中)

- ・ フープ応力600MPa以上、通電電流2kA以上のSME Sコイル構成技術を開発する。

(2) 高効率コイル伝導冷却技術開発

(i) 研究開発の必要性

SME Sの安定した動作には、コイルの熱安定性が不可欠であり、従来の金属系SME Sで用いられてきた4K温度領域に比べコイルの比熱が高くなる20K以上の温度領域での適用が可能となれば、その安定性が飛躍的に向上する。また、イットリウム系超電導線材は、低温になるに従い飛躍的に磁場中臨界電流特性が向上し、20K近傍の温度領域では、10Tの磁場中でもその特性低下が実用上の問題とならなくなる。しかし、この温度領域では熱伝導率が小さいため、高効率な熱伝導冷却技術が必要である。同時に、伝熱性能とトレードオフの関係になる電気絶縁

性能においても高い絶縁性能を有したコイル構造の開発を要する。

(ii) 研究開発の具体的な内容

- ・ 20～40K 付近の温度領域における伝導冷却を可能とするコイル構造を開発するとともに、高熱伝導性能とトレードオフの関係になる電気絶縁性能においても、高い性能を有したコイル構造を開発する。
- ・ 上記で試作したコイルがSME Sの運転条件から予想される発生熱を伝導冷却により冷却可能であることを検証するとともに、必要な絶縁性能を有することを検証する。

(iii) 達成目標

最終目標（平成22年度中）

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

(3) SME S対応線材開発

(i) 研究開発の必要性

SME S用高磁界コンパクトコイル構成のためには、積層複合導体・SME S本体の構造を含めた機器サイドの開発だけでなく、磁場中臨界電流特性の向上に代表される課題の解決を図ることが重要である。また、導入促進には安定した線材製造技術の確立とともにより安価な製造方法の確立が求められる。

(ii) 研究開発の具体的な内容

(a) 線材特性把握

経年劣化・耐久性評価等

(b) 高磁場中高臨界電流 (I_c) 線材作製技術

ピン導入技術開発

磁場中高特性材料開発

(c) 高強度線材製作技術

薄肉基盤高強度化技術開発

(d) 低コスト・歩留向上技術開発

高速製造技術開発

量産化プロセス適正化技術開発

線材接続技術開発

(iii) 達成目標

中間目標（平成22年度中）

- ・ モデルコイル試作に必要な下記仕様に相当する線材の安定製造技術を確立する。
仕様例： $I_c=20A/cm$ 幅@77K&3T で強度 1GPa を有する 100m に相当する線材
- ・ 実用化技術開発に必要な下記仕様に相当する線材の作製技術を開発する。
仕様例： $I_c=30A/cm$ 幅@77K&3T で強度 1GPa を有する 50m に相当する線材

最終目標（平成24年度中）

- ・ 普及導入時（2020年頃）に必要と想定される下記仕様に相当する線材の作製技術を開発するとともに実用化技術開発に必要な線材を安定に作製可能な技術（再現性を確認）を確立する。
仕様例： $I_c=50A/cm$ 幅@77K&3T で強度 1GPa を有する 200m 以上に相当する線材

(4) 高磁界コンパクトSME Sシステムモデル検証

(i) 研究開発の必要性

2 G J 級電力系統制御用SME Sシステムの実用化を実現するためには、高磁場で利用できコンパクトで熱安定性に優れたコイル構造の開発や、そのコイルを高い信頼性で利用可能な冷却技術開発に加え、SME Sシステムとしての信頼性向上を図ることが必要不可欠である。SME Sは電力機器として、超電導コイルへの繰返し充放電が要求され、繰返し運転において十分な信頼性、耐久性を有していることが求められる。既に、SME Sの系統制御機能については金属系超電導コイルを用いた20MJ級SME Sシステムの実系統連系試験により確認されており、その試験で2万回以上の繰返し試験を実施している。イットリウム系超電導コイルを用いたSME Sシステムにおいても同等の性能を有することを検証することが不可欠である。特に、この繰返し運転により発生する損失を低減するためのコイル配置の最適化や運転条件の最適化、SME S電源から動作時に発生するノイズ等の影響を受けないような保護システムの開発を図る必要がある。

(ii) 研究開発の具体的な内容

- ・ 電力系統制御用SME Sとして、電力変換器や冷凍機等に保護・監視システムを組み合わせたシステムコーディネーションを行い、前記(1)2GJ級高磁界・コンパクトコイル構成技術開発、及び(2)高効率コイル伝導冷却技術開発の成果を踏まえつつ、2GJ級SME Sコイルに必要な仕様を試験用にモデル化した試験システム的设计・製作を行う。
- ・ 金属系SME Sを用いた20MJ級SME Sシステム実系統連系試験で経験した負荷変動パターンを模擬した繰返し充放電試験などの基本性能評価によってSME Sコイルシステムとしての適用性を検証する。

(iii) 達成目標

中間目標 (平成22年度中)

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

最終目標 (平成24年度中)

- ・ 2MJ級評価用試験モデルを用いて、適用性検証評価試験計画に基づいてSME S動作検証を行うとともに、電力系統制御SME Sの運転を想定した2万回以上の繰返し充放電による性能検証を実施する。

研究開発項目② 「超電導電力ケーブルの研究開発」

超電導電力ケーブルはコンパクトな形状で大容量送電を可能とし、既設管路を有効活用した送電容量の増大が可能である。今後、都市部の電力需要増大への対策や老朽化した設備のリプレース対策として地中ケーブルへの適用が期待されている。また、超電導電力ケーブルは既存の導体ケーブルに比較し、送電ロスを低減することが可能であることから、省エネルギー、地球温暖化対策に貢献できることも期待されている。

このため、「超電導応用基盤技術開発（第Ⅱ期）」（平成15年度～平成19年度）によって得られたイットリウム系超電導線材作製技術開発、機器要素技術開発などの成果を活用し、コンパクトで大容量送電を可能とする超電導電力ケーブルについて、大電流導体化技術、冷却技術を含めた高電圧絶縁技術、低損失化技術、中間接続や終端接続等の大容量接続技術、機械的特性向上技術等の技術開発を行う。さらに最終目標として、この成果を活かした超電導電力ケーブルシステムを開発し検証することによって、高効率な超電導電力ケーブルによる送電技術に目途を付ける。

また、電力ケーブルの性能向上とともに導入促進に資する超電導線材開発を行う。

（1）大電流・低交流損失ケーブル化技術の開発

（i）研究開発の必要性

イットリウム系超電導線材はビスマス系超電導線材に比べ交流損失を低減することが可能であるが、そのためには線材を細線化する必要がある。一方、ケーブルの通電電流を5kAに大電流化する場合、多層導体を形成する必要がある。このように細線化線材を多層に集合した構造は未だ実現されておらず、ケーブルとして導体化時の線材特性への影響、多層導体構造での低交流損失設計及び実証、超電導ケーブルの機械的強度特性検証等を行う必要がある。併せて大電流適用に対応した超電導ー常電導接続部の構造設計の検証と電流リード部の開発を行う必要がある。

また、三心一括ケーブルとする場合には、機械特性（引張り、曲げ）、熱収縮応力下でのケーブル変形の影響、短絡電流通過時の電磁力によるケーブルコアへの影響等が懸念されるため、それらの検証・評価を行う必要がある。

（ii）研究開発の具体的な内容

（a）大電流・低交流損失技術の基礎特性評価

大電流ケーブルに使用する超電導線材の多層導体化時の交流損失を含めた電気的特性の基礎データを取得し、コンパクトで低損失なケーブル設計技術を確立する。

- ・素線及びケーブル導体の交流損失の測定・評価
- ・ケーブル導体の曲げ、引張り特性の評価
- ・コンパクトで低損失なケーブル設計

（b）大容量接続技術の開発

- ・超電導ー常電導接続部の構造設計検証
- ・5kA級電流リードの開発

（c）三心一括ケーブル導体の検証

- ・三心一括ケーブル導体の試作・評価
- ・短絡電流通過時のケーブル性能への影響検証

（iii）達成目標

最終目標（平成22年度中）

大電流ケーブル導体等の特性試験によって、コンパクトで低損失なケーブル設計技術及び大容量接続技術等を確立する。

- ・ ケーブル損失（交流損失） 2 W/m-相@5kA 以下
- ・ 短絡試験（31.5kA, 2sec 相当）でケーブルの性能に劣化が無いこと
- ・ 5kA 連続通電※を行いケーブル導体、超電導・常電導接続部、電流リードに異常がないこと
※ケーブルの熱平衡が得られるまで連続通電を行う

（2）高電圧絶縁・低誘電損失ケーブル化技術の開発

（i）研究開発の必要性

66kV 級超電導電力ケーブルに比べて 275kV 級高電圧超電導電力ケーブルは、高電圧に対する絶縁技術が要求される。このため、電氣的絶縁性能を確保しつつケーブルをコンパクト化する技術、誘電損失を低減しつつ液体窒素による導体冷却を適切に行う技術等を確立したうえで高電圧絶縁・低誘電損失ケーブル化技術の技術開発を行う必要がある。

（ii）研究開発の具体的な内容

（a）高電圧絶縁・低誘電損失技術の基礎特性評価

超電導電力ケーブルに使用する電氣絶縁材料の電氣的基礎特性、絶縁厚さと誘電損失の関係など基礎データを取得し、コンパクトで低損失なケーブル設計の基礎特性を確立する。

- ・ 絶縁材料の基礎特性評価
- ・ 誘電損失の評価

（b）大径ケーブルの熱収支特性評価

常時及び事故時の発熱・冷却に関する熱収支検討を行い、ケーブルの最適設計手法を確立し、短絡電流通過時でも熱的に破壊しないことを確認する。

- ・ 通常通電時の熱特性把握
- ・ 事故時の熱特性把握

（c）高電圧接続技術の開発

中間及び終端の接続部を開発し、交流電圧及びインパルスに対して十分な性能を有することを確認する。

- ・ 耐電圧試験（交流耐電圧試験条件、インパルス耐電圧試験条件）計画書の作成
- ・ 中間接続部の開発及び耐電圧試験で異常がないこと
- ・ 終端接続部の開発及び耐電圧試験で異常がないこと

（iii）達成目標

最終目標（平成 22 年度中）

高電圧ケーブル導体等の特性試験によって、コンパクトで低損失なケーブル設計技術及び高電圧接続技術等を確立する。

- ・ ケーブル損失（交流損失、誘電損失） 0.8 W/m-相@3kA 以下
- ・ 短絡試験（63kA, 0.6sec 相当）でケーブル性能に劣化が無いこと
- ・ 275kV 連続課電※を行いケーブル導体、超電導・常電導接続部、電流リードに異常がないこと
※ケーブルの熱平衡が得られるまで連続課電を行う

（3）超電導電力ケーブル対応線材開発

（i）研究開発の必要性

大電流及び高電圧電力ケーブルを実現するためには、損失低減やコンパクト化などの課題があり導体・ケーブルの構造を含めた機器サイドの開発だけでなく線材の詳細な特性を把握し性能向上を図ることが重要である。また、導入促進には安定した作製技術の確立とともに安価な線材作製方法の確立が求められる。

(ii) 研究開発の具体的な内容

(a)線材特性把握

- ・経年劣化・耐久性評価等

(b)低損失線材作製技術

- ・特性均一線材作製技術開発
- ・細線化加工技術開発

(c) 工業的な臨界電流密度(J_e)向上技術

- ・高 I_c ・薄肉基板高強度線材作製技術開発

(d)低コスト・歩留向上技術

- ・高速製造技術開発
- ・量産化プロセス適正技術開発

(iii) 達成目標

中間目標 (平成22年度中)

- ・ケーブル耐久試験適正条件の決定
- ・ケーブルシステム検証に必要な下記仕様例に相当する線材を安定に作製可能な技術を確立する。

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

- ・実用化技術開発に必要な下記仕様例に相当する線材の作製技術を開発する。

仕様例： $J_e=30\text{kA/cm}^2$ (2mm幅×50m以上) に相当する線材

最終目標 (平成24年度中)

- ・普及導入時 (2020年頃) に必要と想定される下記仕様例に相当する線材の作製技術を開発するとともに実用化技術開発に必要な線材を安定に作製可能な技術 (再現性を確認) を確立する。

仕様例： $J_e=50\text{kA/cm}^2$ (2mm幅×200m以上) に相当する線材

(4) 66kV 大電流ケーブルシステム検証

(i) 研究開発の必要性

66kV 大電流ケーブルの実用性を検証するためには、大電流通電技術、交流損失低減技術、誘電損失低減技術の開発成果を活かしたケーブルを開発し、実用化時の要求仕様に基づいた課通電試験を行う必要がある。

(ii) 研究開発の具体的な内容

前記、(1) 大電流・低交流損失ケーブル化技術の開発及び(2) 高電圧絶縁・低誘電損失ケーブル化技術の開発の成果を踏まえつつ、検証用超電導ケーブルシステムの設計・製作を行い、課通電試験によってケーブル性能を検証する。

- ・両端に終端接続部を有する 66kV/三心一括/5kA,15m 長の超電導ケーブルシステムを開発する。
- ・66kV 大電流ケーブル実用化時の耐久性を評価できる試験条件を設定し、開発したケーブルの課通電試験を実施する。

(iii) 達成目標

中間目標（平成22年度中）

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

最終目標（平成24年度中）

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

(5) 275kV 高電圧ケーブルシステム検証

(i) 研究開発の必要性

275kV 高電圧ケーブルの実用性を検証するためには、高電圧絶縁技術、誘電損失低減化技術、大電流通電技術、交流損失低減技術の開発成果を活かしたケーブルを開発し、実用化時の要求仕様に基づいた課通電試験を行う必要がある。

(ii) 研究開発の具体的な内容

前記、(1) 大電流・低交流損失ケーブル化技術の開発、及び(2) 高電圧絶縁・低誘電損失ケーブル化技術の開発の成果を踏まえつつ、検証用超電導ケーブルシステムの設計・製作を行い、課通電試験によってケーブル性能を検証する。

- ・両端に終端接続部と中間接続部を有する 275kV/単心/3kA,30m 長の超電導ケーブルシステムを開発する。
- ・275kV 高電圧ケーブル実用化時の耐久性を評価できる試験条件を設定し、開発したケーブルの課通電試験を実施する。

(iii) 達成目標

中間目標（平成22年度中）

- ・両端に終端接続部と中間接続部を有する検証用 275kV/単心/3kA,30m 長の超電導ケーブルシステムのシステム設計を完了する。
- ・耐久性を評価できる課通電試験計画書を作成する。

最終目標（平成24年度中）

- ・下記性能を有する 275kV/単心/3kA,30m 長の超電導ケーブルを作製する。
 - －ケーブル外径；150mm 以下
 - －ケーブル損失（交流損失、誘電損失）；0.8W/ m・相@3kA 以下
 - －中間目標で得られた課通電試験の設定条件下における課通電試験を実施し、試験計画書の性能を満足することを検証する。

研究開発項目③ 「超電導変圧器の研究開発」

超電導変圧器は従来の変圧器に比べ、高効率でコンパクト化が可能であり、絶縁に油を用いないため、不燃で環境負荷が小さいことを特長とする。今後、都市部を主体とした電力需要増加に伴う変圧器容量対策や変電所の新設対策及び経年劣化に伴う変圧器のリプレース対策に貢献すると考えられている。また、大容量送電を可能とする超電導電力ケーブルとの組み合わせにより、より高効率な電力供給システムが可能となる技術として期待されている。

このため、「超電導応用基盤技術開発（第Ⅱ期）」（平成15年度～平成19年度）におけるイットリウム系超電導線材作製技術開発、機器要素技術開発などの成果を活用し、コンパクトで高効率な超電導変圧器に必要な巻線技術、高電圧絶縁技術等の技術開発を行う。さらに最終目標として、超電導変圧器を開発し、検証することによって、高効率な変電技術に目途をつける。

また、変圧器の性能向上とともに導入促進に資する線材開発を行う。

（1）超電導変圧器巻線技術開発

（i）研究開発の必要性

20MVA 級超電導変圧器の実現のためには、従来の金属系超電導線材やビスマス系超電導線材では達成できなかった大電流化、低損失化が課題となる。これら課題の解決には、細線化したイットリウム系超電導線材を積層し、大電流化した導体による巻線コイル製作技術が必要となる。また同時に、同構造のコイルが系統や変圧器の故障により発生する短絡電流に対しても、変圧器を健全に維持できる強度を有する構造とする必要がある。

（ii）研究開発の具体的な内容

超電導応用基盤技術開発（第Ⅱ期）における検証の結果より、以下の開発を行う。

- ・多層並列転位構造を最適化し、2kA が通電可能な巻線コイルを開発する。
- ・細線化線材により、無加工線を使用した場合に対し損失が 1/3 以下となる 100m 級巻線コイルを開発する。
- ・短絡電流（20MVA 級変圧器%インピーダンス 15%相当）により、巻線が劣化しない巻線コイルを開発する。

（iii）達成目標

中間目標（平成22年度中）

- ・2kA 級の通電特性を検証する。
- ・短絡電流（20MVA 級変圧器%インピーダンス 15%相当）により、巻線が劣化しないことを検証する。

最終目標（平成24年度中）

- ・100m 級巻線コイルにて、交流損失が 1/3 以下（対細線化しない線材）となることを検証する。

（2）冷却システム技術開発

（i）研究開発の必要性

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

ため、設計技術についても開発する必要がある。

(ii) 研究開発の具体的な内容

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

(iii) 達成目標

中間目標（平成22年度中）

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

最終目標（平成24年度中）

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

(3) 限流機能付加技術開発

(i) 研究開発の必要性

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

(ii) 研究開発の具体的な内容

- ・限流技術の基礎試験を行い、限流機能付加変圧器の設計手法を確立する。
- ・数100kVA級変圧器単相巻線モデルを試作し、限流特性を検証する。

(iii) 達成目標

中間目標（平成22年度中）

- ・限流機能付加変圧器の設計手法を確立する。

最終目標（平成24年度中）

- ・数100kVA級単相変圧器の巻線モデルにより、過大電流の限流機能（過大電流を定格電流の3倍以下に抑制）を検証する。

(4) 超電導変圧器対応線材開発

(i) 研究開発の必要性

20MVA級超電導変圧器を実現するため、交流損失低減に代表される課題の解決のために超電導変圧器構造を含めた機器サイドの開発とともに線材の詳細な特性把握に加えてさらなる性能向上が不可欠である。また、導入促進には安定した線材製造技術の確立とともに安価な製造方法の確立が求められる。

(ii) 研究開発の具体的な内容

- ・経年劣化・耐久性の現状把握
- ・低損失線材作製技術

- ・磁場中高 I_c 線材作製技術
- ・低コスト・歩留向上技術

(iii) 達成目標

中間目標（平成22年度中）

- ・変圧器モデル検証に必要な下記仕様例に相当する線材を安定に作製できる技術を確立する。

仕様例：5mm幅3分割にて $I_c=50A@65K\&0.01T$ ，100m以上に相当する線材

- ・実用化技術開発に必要な下記仕様例に相当する線材の作製技術を開発する。

仕様例：5mm幅5分割にて $I_c=100A@65K\&0.02T$ ，50m以上に相当する線材

最終目標（平成24年度中）

- ・普及導入時（2020年頃）に必要なと想定される下記仕様例に相当する線材の作製技術を開発するとともに実用化技術開発に必要な線材を安定に作製できる技術（再現性を確認）を確立する。

仕様例：5mm幅10分割にて $I_c=100A@65K\&0.1T$ ，100m以上に相当する線材

(5) 2MVA級超電導変圧器モデル検証

(i) 研究開発の必要性

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

(ii) 研究開発の具体的な内容

20MVA級変圧器を検証可能な66kV/6.9kV-2MVA級モデルを開発し、前記、(1)変圧器巻線技術開発及び(2)冷却システム技術開発の成果を踏まえつつ、検証用変圧器システムの設計・試作を行い、課通電試験によって性能を検証する。

- ・要素技術（巻線、保冷容器、冷却システム等）を組合せて66kV/6.9kV-2MVA級超電導変圧器モデルを開発する。
- ・交流損失低減や耐電圧性を考慮した試験条件の設定を行い、開発した変圧器モデルの課通電試験を実施する。
- ・66kV/6.9kV-2MVA級超電導変圧器モデルの特性を検証する。

(iii) 達成目標

中間目標（平成22年度中）

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

最終目標（平成24年度中）

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

研究開発項目④ 「超電導電力機器の適用技術標準化」

超電導電力機器にとって共通の基盤となる超電導線関連技術並びに超電導電力ケーブル等の超電導電力機器適用技術の標準化等を行う。

(1) 超電導線関連技術標準化

(i) 研究開発の必要性

超電導電力機器の開発の促進と高効率化のため、種々の超電導電力機器に共通の超電導線関連技術並びに超電導電力機器固有の超電導線関連技術の標準化研究は必要である。

(ii) 研究開発の具体的な内容

イットリウム系超電導線と実用超電導線材との特質を対比調査するとともに、過去に実施された超電導線関連技術標準化の研究成果と一体化し、国際標準化に資する情報の集約並びに国際標準化を提案する。

(iii) 達成目標

中間目標（平成22年度中）

イットリウム系を含む超電導線材並びにその試験方法の規格素案を作成するとともに、国際合意の醸成（アドホック設置活動）を行う。

最終目標（平成24年度中）

超電導線材並びにその試験方法の規格素案について、国際規格提案を行う。

(2) 超電導電力ケーブル関連技術の標準化

(i) 研究開発の必要性

イットリウム系を含め、高温超電導線を適用した超電導電力ケーブルの実証試験が国内外で多数実施されている。特に、我が国の超電導電力ケーブル技術は世界をリードしている。超電導電力ケーブルの開発の促進と国際競争力の確保のため超電導電力ケーブル関連技術の標準化研究は必要である。

(ii) 研究開発の具体的な内容

イットリウム系超電導線を含む超電導線を適用した超電導電力ケーブル技術を調査するとともに、過去に実施された超電導電力ケーブル関連技術標準化の研究成果との融合を図り、国際標準化に資する情報として整理するとともに国際標準化を提案する。

(iii) 達成目標

中間目標（平成22年度中）

イットリウム系を含む超電導線を適用した超電導電力ケーブル並びにその試験方法の規格素案を作成するとともに他TC（既存ケーブル）との国際合意の醸成（アドホック設置活動）を行う。

最終目標（平成24年度中）

超電導電力ケーブル並びにその試験方法の規格素案について、国際規格提案を行う。

(3) その他超電導電力機器関連技術の標準化等

(i) 研究開発の必要性

電力に対するニーズの多様化に伴い電力機器も多様化している。かかる状況にかんがみ、電力の安定供給のみならず、電力品質に対する技術対応が重要になっている。したがって、超電導電力ケーブルのみならず電力品質等に有効な超電導電力機器技術やシステム化技術の標準化研究は

必要である。

(ii) 研究開発の具体的な内容

超電導変圧器、SME Sなどの超電導電力機器を対象に、その電力品質や制御に関連する技術調査を実施し、国内外における諸標準化に資する。また、冷却設備の安全性、運用性を考慮した法規制の在り方を研究する。

(iii) 達成目標

中間目標（平成22年度中）

イットリウム系を含む超電導線等を適用した超電導変圧器、SME S等の機器仕様並びにこれらの試験方法の標準化の基礎となるデータ等の体系化を行う。

最終目標（平成24年度中）

- ・イットリウム系超電導線材等を適用した超電導変圧器、SME S等の機器仕様並びにこれらの試験方法の標準化素案を作成するとともに、国際合意の醸成（アドホック設置活動）を行う。
- ・冷却システムの安全性、運用性を考慮した規制緩和に向けた提案資料を作成する。

超電導技術分野

超電導技術は、電気抵抗がゼロであるという特徴的な性質により電流が流れる際のエネルギー・ロスを抑えることができることや、磁石からでる磁力線を超電導物質が跳ね返す性質（マイスナー効果）、超電導物質内部に侵入した磁力線を捕捉してしまう性質（ピンニング効果）等の様々な特長を有している。1986年に「高温超電導物質」と呼ばれる酸化物系超電導物質が発見されたことをきっかけに、科学技術の大幅な加速進展のみならず、エネルギー・電力分野を始め、産業・輸送分野、診断・医療分野、情報・通信分野等の幅広い分野において、超電導技術の応用に関する期待が世界中で高まり広く研究に取り組まれてきたが、工業化を図るために不可欠な技術が近年出そろい始めており、超電導材料を用いた様々な機器の開発・実証・実用化が現実のものとなりつつある。その一方では、新しい超電導物質の発見や超電導現象の理論解明によるブレークスルーへの試みも続けられており、「常温超電導物質」の発見という人類の夢に向けた試みも絶えてはいない。【参考資料1：超電導の性質と将来性】 【参考資料2：超電導物質の探索】

また、京都議定書発効に伴う温暖化緩和策の一環としての省エネルギー技術の開発・導入や各種資源の枯渇・高騰等も喫緊の課題となっており、「クールアースーエネルギー革新技術計画」の技術テーマにも選定される等、超電導技術を早期に実用化することによって、環境負荷の低減と資源の有効な利用という2つの目的を効率的かつ実効的に達成し、多様な分野におけるエネルギーの効率的利用に資すること等が強く期待されている。

これらの状況を踏まえ、かつての「夢の超電導技術」から「21世紀のキーテクノロジー」と呼ばれるまでに進化を遂げつつある超電導技術について、諸々の社会ニーズに対応していくことを念頭に中長期的な観点と早期実用化の観点から技術戦略マップを作成した。

なお、2020年頃迄を目途に実現が期待される社会の姿についてのイメージを得るため、【参考資料3：社会に役立つ超電導技術 2020年の社会像】を示した。

超電導技術分野の技術戦略マップ

I. 導入シナリオ

(1) 超電導技術分野の目標と将来実現する社会像

研究開発の戦略的な推進については、様々な社会ニーズと研究開発目標との関係を明らかにした上で、効率的な研究開発体制を構築することが重要である。特に、超電導技術応用機器の開発に際しては、全ての機器開発の共通基盤技術である超電導材料の開発（線材化・バルク化・デバイス化）と機器適用周辺技術開発（冷凍・冷却技術）とを同時並行的に進め、要求仕様を相互にフィードバックさせながら、各種応用機器を実現するためのタイムリーな技術開発を進めていくことが必要不可欠である。

超電導技術分野は、その将来的な優位性の高さから、日米欧での熾烈な技術開発競争がなされているところであり、また、韓国、中国も積極的な技術開発を行っている等、海外の動向も無視できない状況にある。（【参考資料4：世界のY系超電導線材開発状況】【参考資料5：SFQ技術の国際評価】等）。しかし、研究開発を推進した結果として国際的な競争力を発生させ得るに足る研究成果が得られたとしても、実用化・事業化が行われなければ何の役にも立たない。研究開発の初期段階から将来の事業化を想定した企業が参画すること等により、スムーズな事業化につながる方策を講じていくことが重要である。

欧米においては、技術的に未成熟な段階から幾つものベンチャー企業が起業し、超電導技術産業に係る市場を創出するべくチャレンジを繰り返してきた。我が国においては、官民のリソースの選択と集中を行うことによりここまで研究開発を進めてきたところであるが、21世紀における良好な環境の維持と我が国経済の持続的成長とを両立させていくためには、超電導技術産業市場の早期創出と自律的な発展の開始に向けた導入普及促進策等の推進や、規制緩和、標準化等を通じた新たな市場競争ルールの導入といった関連施策を行うことにより、民間企業が市場競争の中で自ら効率的な事業展開を図っていくための戦略的な体制作りと研究開発とを一体的に推進することが必要である。

前述のように、近い将来において超電導技術を適用した機器の実現が期待される分野は、①エネルギー・電力分野（電力ケーブル、限流器、変圧器、発電機、フライホイール、SMES（超電導電力貯蔵装置）等）、②産業・輸送分野（船用モータ、磁気浮上式鉄道用マグネット、半導体引上装置、磁気分離装置等）、③診断・医療分野（MRI、NMR、MCG（心磁計）、MEG（脳磁計）、質量分析器等）、④情報・通信分野（ルータ・スイッチ、SFQコンピュータ、バンドパスフィルタ、ADコンバータ等）の4分野に大きく分けることができる。分野によって求められる社会ニーズ等には異なる部分があるが、共通基盤技術が成長しつつあることにより、戦略的な機器開発・導入を図るべき時期が到来していることについては一様である。そこで、4分野それぞれにお

ける代表的かつ戦略的な機器について、開発・導入に係る想定シナリオを時系列で示すこととした。

(2) 関連施策の取組

我が国経済が将来にわたって更なる発展を遂げていくためには、先導的効果を狙った高度に進んだ機器の開発投入や、全ての活動の基礎となるエネルギーについて将来顕在化することが懸念される資源制約等を総合的に考慮した、効率的なアプローチを図っていくことが重要である。また、そのためには、①研究開発の戦略的な推進が不可欠であるとともに、②国際的な競争力を有する研究成果の実用化・事業化の推進、③導入普及促進策、関連産業連携策、規制緩和、標準化等の関連施策と研究開発との一体的な推進が必要である。

[規制・制度改革]

- ・超電導技術の実用化を促進するため、高圧ガス保安法、電気事業法などの規制について導入促進のための規制緩和を図る必要がある。

[基準・標準化]

- ・超電導機器の導入に向けて、研究開発と並行して標準化の検討を進めることが重要なテーマについて、各分野の導入シナリオに示した。(2006年版策定時から)
- ・超電導関係の国際標準化のための取組及び具体的進展状況について理解を容易にするため、【参考資料6：超電導標準化マップ】を示した。(2007年版策定時から)

[広報・啓発]

- ・例年春に行われている「超電導技術動向報告会」や、2007年から冬に開催されることになった「超電導 EXPO」等の展示会を通じて、超電導技術及び超電導市場の最近の動向について広く周知する機会の増加を図る。

(3) 改訂のポイント

- エネルギー・電力分野及び産業・輸送分野を中心に、最新動向を踏まえた改訂を行った。特にエネルギー・電力分野及び産業・輸送分野については、2030年までの技術開発及び実用化のシナリオを追加した。
- エネルギー・電力分野、産業・輸送分野、診断・医療分野、及び情報・通信分野における技術開発及び実用化のシナリオについて、最近の研究開発の進展状況に伴う見直しを行った。
- エネルギー・電力分野において、今後の次世代電力システムへの展開の可能性も視野に入れ、従来のエネルギー貯蔵、送配電、発電用の機器を統合する「システムインテグレート」という領域を追加した。
- エネルギー・電力分野の関連施策にCO₂の25%削減目標(2020年)を加えるとともに、スペースの関係から一部の施策を削除した。
- エネルギー・電力分野等における海外での取組について、米国、欧州、アジアにおける最新の研究開発プロジェクト等を追記した。

Ⅱ. 技術マップ

(1) 技術マップ

超電導技術は、導入シナリオで示した4つの分野において、効率的かつ各々の導入目的に合致した研究開発を行うための技術指標を明確化する必要があるとの観点から技術をカテゴライズした。また、これらと同時並行的に進めていく必要がある共通基盤技術についても、素材・部品を供給するという観点から技術をカテゴライズした。

具体的には、それぞれ以下に示すような考え方に基づく分類を行っている。

① エネルギー・電力分野

エネルギー・電力分野の技術を、発電（創る）技術、送変配電（送る）技術、エネルギー貯蔵（貯める）技術の3つに大別し、これを大分類とした。また、それぞれの技術の利用形態に応じて開発すべき機器が異なるため、これを中分類とした。その上で、利用形態に応じた機器を開発するためにマイルストーンを置いて取り組んでいくことが必要と考えられる主要な技術課題（大電流化、低損失化等）について、小分類とした。

② 産業・輸送分野

産業・輸送分野の技術を、磁場応用（造る）技術、計測機器（測る）技術、回転機（動かす）技術、変圧器（変える）技術の4つに大別し、これを大分類とした。また、それぞれの技術の利用形態に応じて開発すべき機器が異なるため、これを中分類とした。その上で、利用形態に応じた機器を開発するためにマイルストーンを置いて取り組んでいくことが必要と考えられる主要な技術課題（小型軽量化、高磁場化、大容量化等）について、小分類とした。

③ 診断・医療分野

診断・医療分野の技術を、マグネット応用（視る）技術、加速器応用（治す）技術、高周波デバイス応用（測る）技術、SQUID応用（診る）技術の4つに大別し、これを大分類とした。また、それぞれの技術の利用形態に応じて開発すべき機器が異なるため、これを中分類とした。その上で、利用形態に応じた機器を開発するためにマイルストーンを置いて取り組んでいくことが必要と考えられる主要な技術課題（磁場安定化技術、高感度化等）について、小分類とした。

④ 情報・通信分野

情報・通信分野の技術を、コンピュータ・ネットワーク機器（判断する）技術、無線アクセス系機器（飛ばす）技術、計測機器（測る）技術の3つに大別し、これを大分類とした。また、それぞれの技術の利用形態に応じて開発すべき機器が異なるため、これを中分類とした。その上で、利用形態に応じた機器を開発するためにマイルストーンを置いて取り組んでいくことが必要と考えられる主要な技術課題（処理能力／ラック向上、低コスト化等）について、小分類とした。

⑤ 共通基盤技術

共通基盤技術は、超電導材料の開発（線材化・バルク化・デバイス化）及び機器適用周辺技術開発（冷凍・冷却技術）から構成されることから、これを大分類とした。超電導材料の開発については、それぞれを実現する製造方法やそれを加工する方法により技術的アプローチも異なると考えられるため、これを中分類とした。また、同じ製造方法でも物質により性質等が異なってくることから超電導物質別の小分類、同じ加工方法でも実現すべき形状により性質等が異なってくることから加工の要素技術別の小分類とした。

冷凍・冷却技術については、適用される対象の機器等により要求性能が大きく変わることから、これを中分類とした。また、同じ機器でも使用される超電導物質によって要求される冷却能力等が大きく異なってくることから、冷却能力・冷却手法別の小分類とした。

（２）重要技術の考え方

技術マップにおいて抽出された各技術項目はいずれも不可欠であり、官民の一体的取組みや民間の主体的な取組み等による積極的な開発が望まれるが、以下の観点から評価されるものを重要技術と位置づけ、技術マップ中に色分けして示した。

- ① 2020年頃迄を目途に、産業及び技術のブレークスルーを生み出す可能性のある技術
- ② 超電導技術による実現の可能性が高く、コスト・性能等の面で競争優位性を生み出す可能性のある技術
- ③ これらの機器を実現するために不可欠な共通基盤技術

（３）改訂のポイント

- エネルギー・電力分野、産業・輸送分野を中心に、最新動向を踏まえた改訂を行った。
- エネルギー・電力分野の電力ケーブルの技術小分類について、超電導ケーブルを実用化するために低コスト化が重要な課題であることから、「低コスト化」を重要技術に位置づけた。
- 産業・輸送分野の「廃水磁気分離装置」について、工業廃水や自然界に放出される排水の浄化・処理だけでなく、原料や廃棄物からの異物・有価物の磁気分離等の応用も有望と考えられることから、より広い用語として「排水・資源循環磁気分離装置」に修正した。また、「非接触磁気軸受回転機」を、より分かりやすく直接的な名称である「スピンコーター」に修正した。
- 産業・輸送分野の「車載用モータ」の技術小分類（小型軽量化、高速回転、効率向上）について、専門家の助言を得て、より適切な技術課題（小型軽量化、可変速駆動に対して高効率、高トルク密度化）に修正した。
- 産業・輸送分野の輸送用機器の技術中分類に、今後実用化が期待される「鉄道用直流き電」を新たに追加した。
- 診断・医療分野のマグネット応用の技術中分類に、今後実用化が期待される「細胞・

タンパク磁気分離」を新たに追加した。

Ⅲ. 技術ロードマップ

(1) 技術ロードマップ

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

(2) 改訂のポイント

- エネルギー・電力分野、産業・輸送分野、共通基盤技術を中心に、全分野の技術ロードマップについて、最新の動向を踏まえた多くの改訂を行った。
- 特にエネルギー・電力分野、産業・輸送分野については、従来の2020年までのロードマップを2030年まで延長した。
- エネルギー・電力分野の電力ケーブルについては、技術マップの技術小分類において「低コスト化」を重要技術に位置づけたことを受けて、対応する項目・記述を技術ロードマップに追加した。
- 共通基盤技術ー線材のBi2223の大電流化について、最新の状況に合わせて数値を改訂するとともに、量産ベースの数値であることを明記した。
- 共通基盤技術ー線材のY(RE)系のコストについては、技術コストからプライスマドを含む値であることを確認した。
- 共通基盤技術ーバルクの技術ロードマップについて、最新の状況を踏まえて、過年度のローリングにおいて今後の課題とされてきた全面的な見直し・改訂を行った。

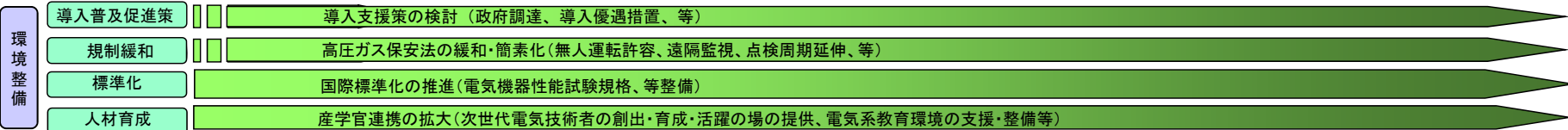
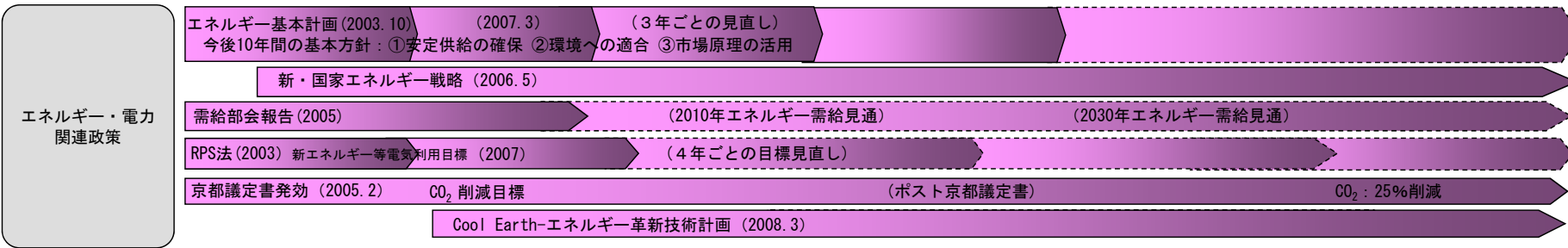
Ⅳ. その他の改訂のポイント

○ 特許の出願動向

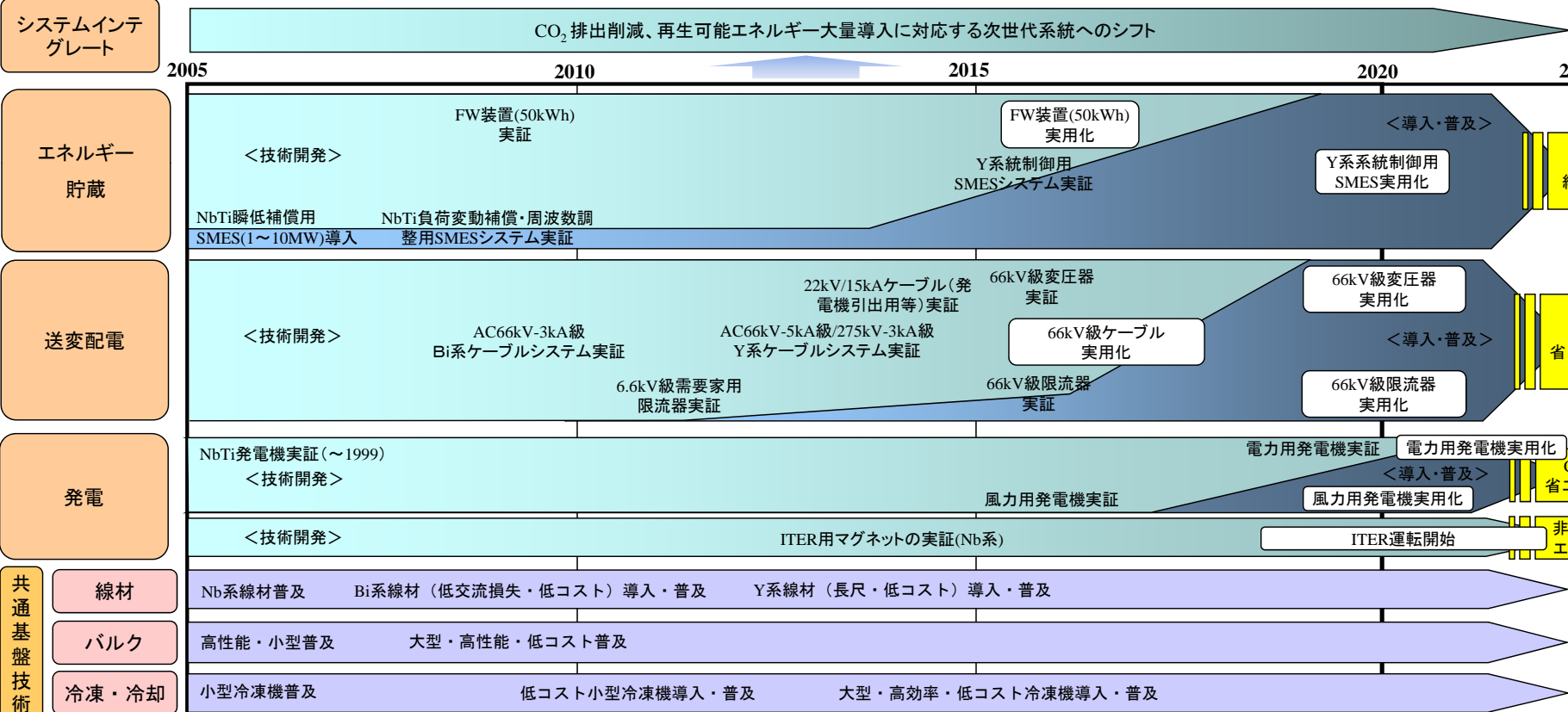
- 超電導技術に関する特許出願動向について、【参考資料7：超電導技術に関する国際特許出願動向】を新たに追加した。
- 日本、中国、韓国の超電導関連の国際特許出願件数とその世界に占める割合は、2000年代前半から後半にかけて大きく増加している。一方、米国、欧州は前半から後半にかけて減少している。ただし直近の動きを見ると、日本は2005年（国際出願件数）、2007年（世界に占める割合）をピークに減少傾向にある一方で、米国は2008年に国際出願件数を大きく増加させている。
- 世界平均と比べた場合の超電導分野への力の入れ方を示す超電導特化度は、日本が最も高く、かつ2000年代前半から後半にかけて上昇している。韓国も2000年代後半から、超電導分野に力を入れている。

超電導技術分野の導入シナリオ (エネルギー・電力分野) (1/4)

関連施策



技術開発



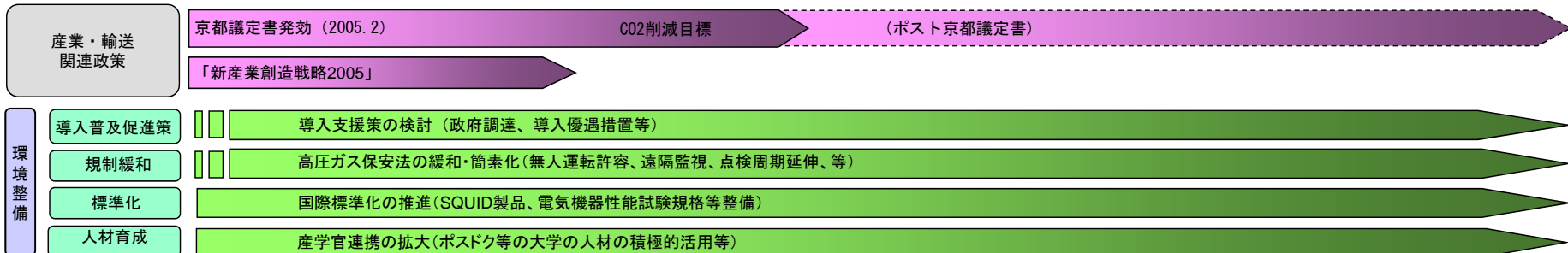
海外での取り組み



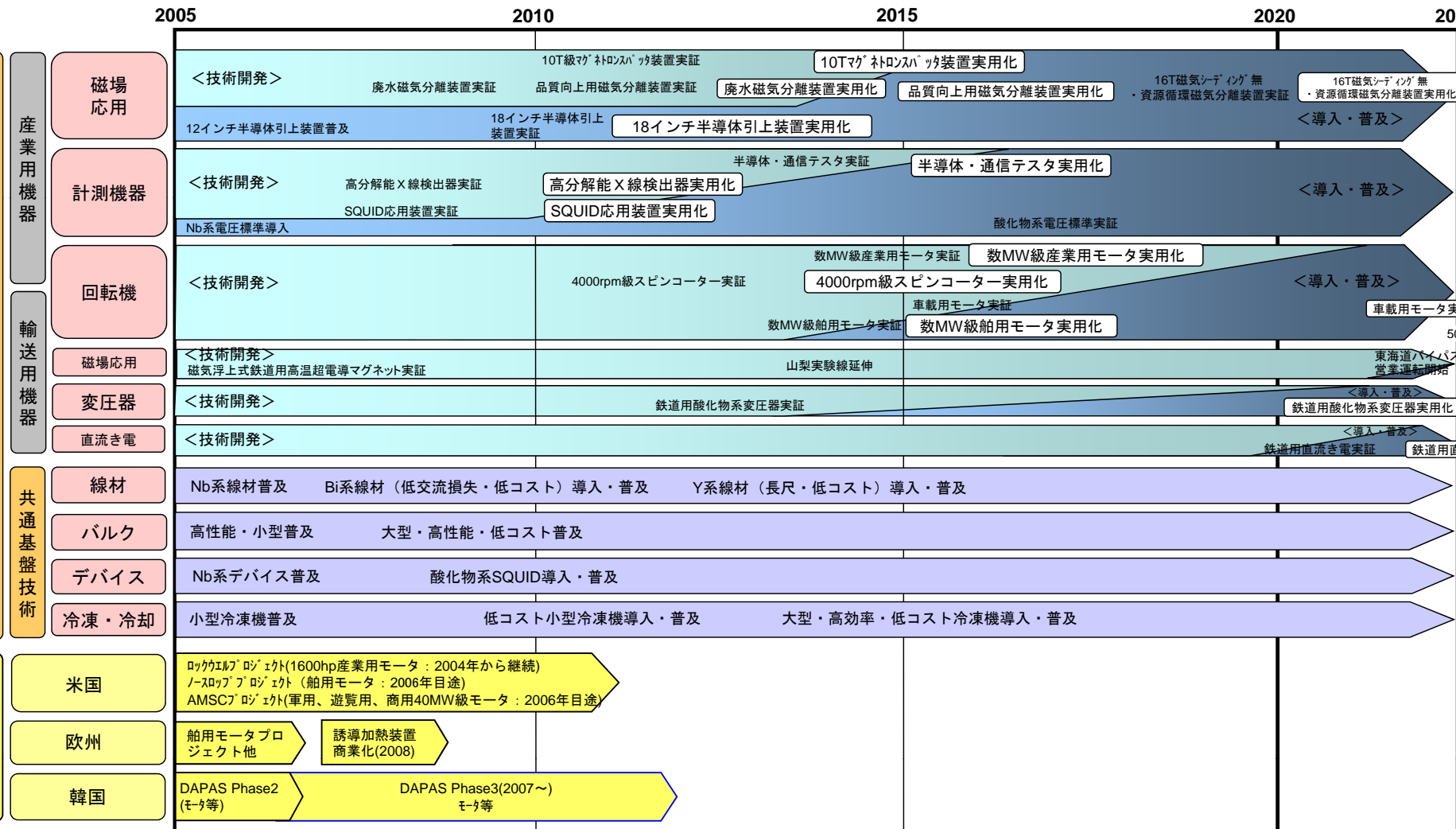
環境・エネルギー調和型社会の構築
 多様化する電源ニーズに対応する高信頼かつ高品質電力の供給・運用

超電導技術分野の導入シナリオ (産業・輸送分野) (2/4)

関連政策



技術開発



世界をリードする高度産業基盤構築

小型・軽量化、高速化、高度生産性等を通じた高度産業基盤の実現

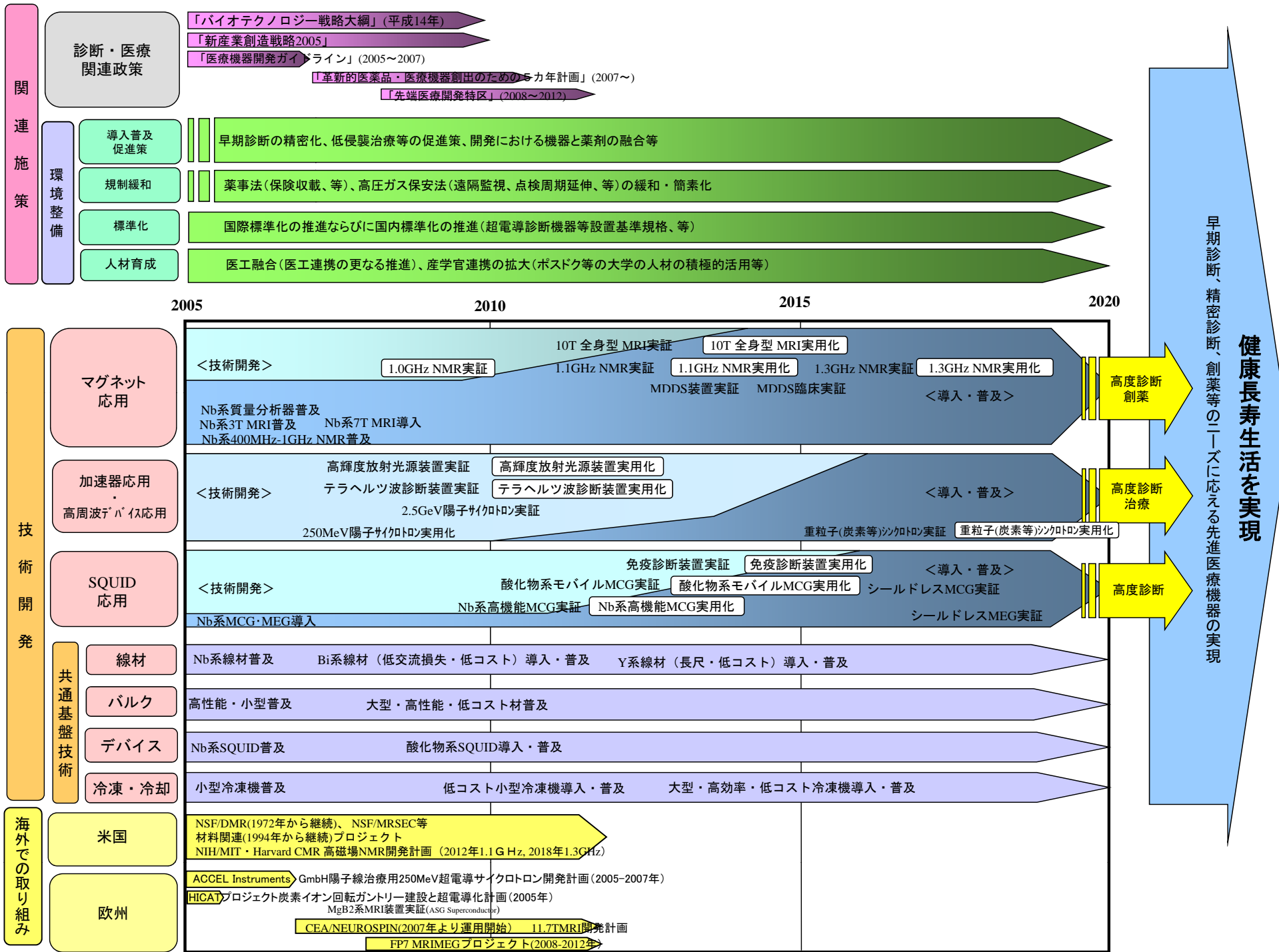
高度生産性 小型化

高度生産性 高信頼性

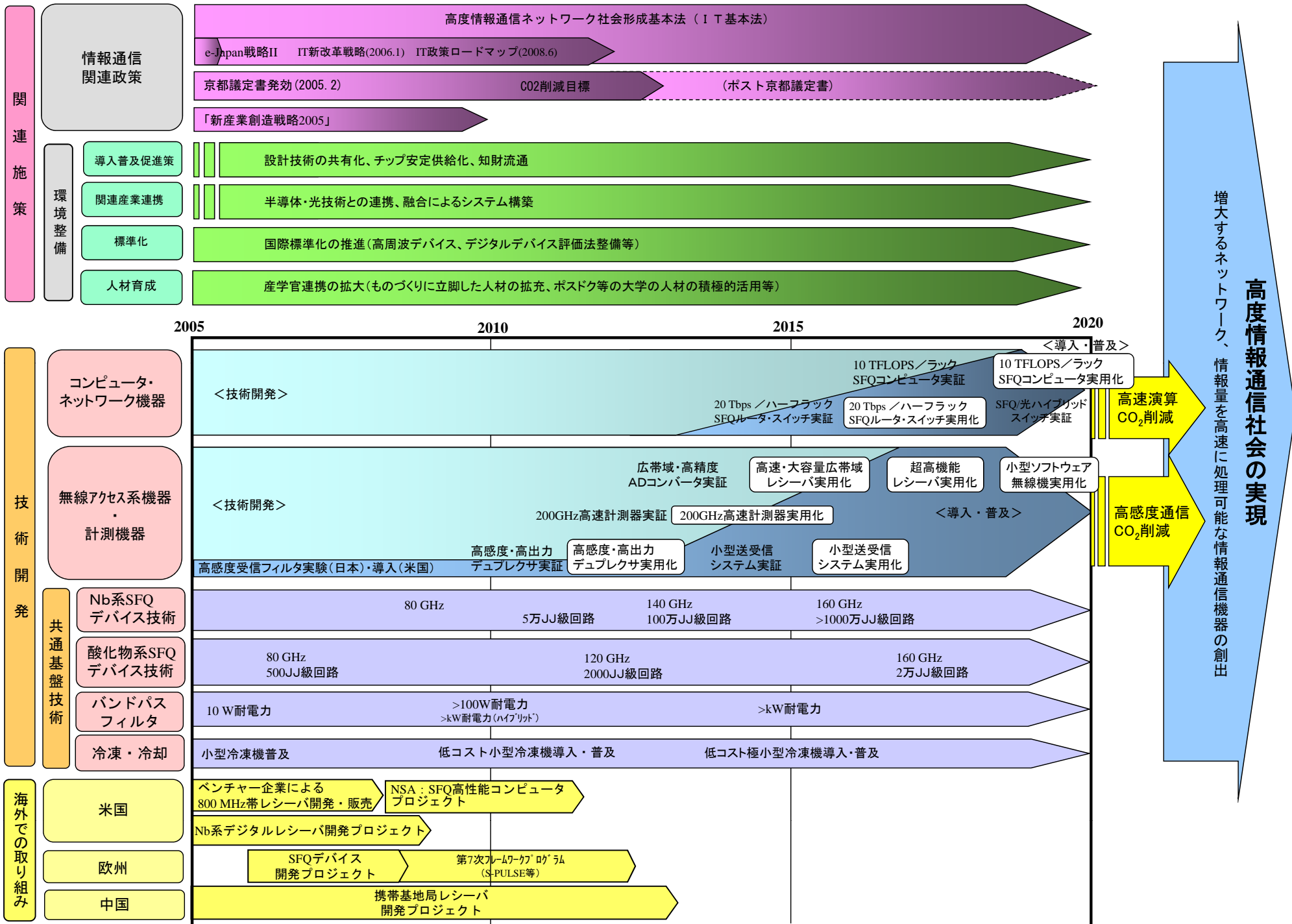
小型化 軽量化 CO₂削減

小型化 軽量化 CO₂削減

超電導技術分野の導入シナリオ (診断・医療分野) (3/4)



超電導技術分野の導入シナリオ（情報・通信分野）（4/4）



超電導技術分野の技術マップ(エネルギー・電力分野)

(1/5)

ニーズ	シーズ			
	技術大分類	技術中分類	技術番号	技術小分類
環境・エネルギー調和型社会の構築	エネルギー貯蔵	SMES	101	・低コストシステム化 ・大容量化 ・コイルの高性能化 ・高信頼性化 ・耐高電圧化
		フライホイール	102	・大容量化 ・低損失化 ・総コスト低減
	送変配電	限流器 (SN転移型)	103	・高電圧化 ・大電流化 ・常電導転移時高抵抗化 ・高速超電導復帰機構
		電力ケーブル	104	・長尺化 ・高電圧化 ・大電流化 ・低損失化 (AC) ・短絡対策 (AC) ・低コスト化
		電力用変圧器	105	・不燃化、コンパクト化 ・Sub-cool LN2技術 ・高電圧化 ・大容量化 ・低コスト化
		同期調相機	106	発電機と共通
	発電	発電機	107	・大容量化 ・低コスト、コンパクト化
		核融合用マグネット	108	・磁場中高特性化 ・大電流高強度化技術 ・低損失化 ・耐放射線化

 重要技術

超電導技術分野の技術マップ(産業・輸送分野)

(2/5)

ニーズ	シーズ					
	技術大分類	技術中分類	技術番号	技術小分類		
世界をリードする高度産業基盤構築	産業用機器	磁場応用	半導体引上装置	201	・ウエハ大口径化	
			鉄鋼圧延装置	202	・配列構造均一化	
			磁性材料調質装置	203	・配列構造均一化	
			排水・資源循環磁気分離装置	204	・高磁場化(磁気シーディング無)	
			粒子加速器	205	・高磁場化 ・磁場均一化	
			マグネトロンスパッタ装置	206	・高磁場化 ・大面積化	
			磁気シールド	207	・高臨界温度化 ・低コスト化	
		計測機器	半導体・通信テスタ (サンプラ)		208	・広帯域化 ・多チャンネル化 ・低コスト化(モジュールコスト) ・冷却技術
			電圧標準	交流	209	・出力周波数向上 ・高温動作化 ・高精度化
				直流	210	・高温動作化 ・高電圧化 ・低コスト化 ・低周波数利用技術
			X線検出器 (EDX)		211	・エネルギー分解能向上 ・計数率向上 ・小型化、低コスト化
			宇宙線検出器		212	・高感度化 ・小型化
			ミキサ		213	・低ノイズ化 ・高周波化
			ポロメータ		214	・エネルギー分解能向上 ・低コスト化
	SQUID 応用装置	構造物検査	215	・小型化、自動化 ・高機能化 ・測定高速化		
		食品・工業製品検査	216	・磁気シールド簡易化 ・異物検出限界向上 ・低コスト化		
		半導体検査	217	・空間分解能向上 ・測定高速化 ・低コスト化		
		鉱物探査	218	・探査深度 ・環境ノイズ除去技術 ・小型化		
	回転機	スピンドーター *		219	・高速回転化 ・高載荷力化	
		産業用モータ *		220	・高速回転、大容量化 ・小型軽量化 ・効率向上 ・低速回転、大容量化	
	輸送用機器	回転機	船用モータ *		221	・低速回転、大容量化 ・小型軽量化 ・効率向上 ・高速回転、大容量化
			車載用モータ *		222	・小型軽量化 ・可変速駆動に対して高効率 ・高トルク密度化
		磁場応用	磁気浮上式鉄道用マグネット		223	・信頼性向上、低コスト化
		変圧器	鉄道用変圧器 *		224	・大容量化 ・低損失化 ・小型軽量化
		直流き電	鉄道用直流き電		225	・システム化 ・省エネ

* 印は、「エネルギー・電力分野」の機器と関連する技術であり、環境・エネルギー調和型社会の構築にとっても重要である。

 重要技術

超電導技術分野の技術マップ(診断・医療分野)

(3/5)

ニーズ	シーズ			
	技術大分類	技術中分類	技術番号	技術小分類
健康長寿生活の実現	マグネット 応用	MRI	301	・大口径、短軸化 ・高磁場化 ・線材高特特性化 ・磁場安定化技術
		NMR	302	・超高磁場化 ・磁場安定化技術
		質量分析器	303	・高磁場化 ・高均一化
		MDDS (磁気誘導薬物配送)	304	・高磁場化 ・高磁気勾配化 ・小型・軽量化 ・低消費電力化 ・ナノ磁性粒子薬剤開発
		磁気誘導カテーテル	305	・高磁場化 ・高磁気勾配化
		細胞・タンパク磁気分離	306	・小型化 ・短時間励減磁
	加速器 応用	高輝度放射光源 (アンジュレータ・ ウイグラー)	307	・高輝度化 ・磁石ギャップ長可変技術
		テラヘルツ波 診断装置(光源)	308	・高機能化
		医療用粒子線 加速器	309	・高機能化 ・コンパクト化
	高周波 デバイス応用	MRI/NMR (高周波プローブ)	310	・高感度化 ・低損失化
		質量分析器 (イオン検出器)	311	・分解能向上 ・測定時間短縮 ・高機能化
		テラヘルツ波 診断装置(検出器)	312	・高機能化
	SQUID 応用	SQUID 免疫診断装置	313	・システム高感度化 ・高機能化(多検体処理) ・操作性向上 ・低コスト化
		MCG (心磁計)	314	・高感度化 ・磁気シールド簡易化 ・高機能システム化
		神経磁気診断装置 (MEG(脳磁計)、脊髄・末 梢神経磁場計測装置)	315	・磁気シールド簡易化 ・多チャンネル化 ・高機能化 ・低コスト化
		超低磁場NMR/MRI	316	・複合化 ・新機能化 ・分解能向上

 重要技術

超電導技術分野の技術マップ(情報・通信分野)

(4/5)

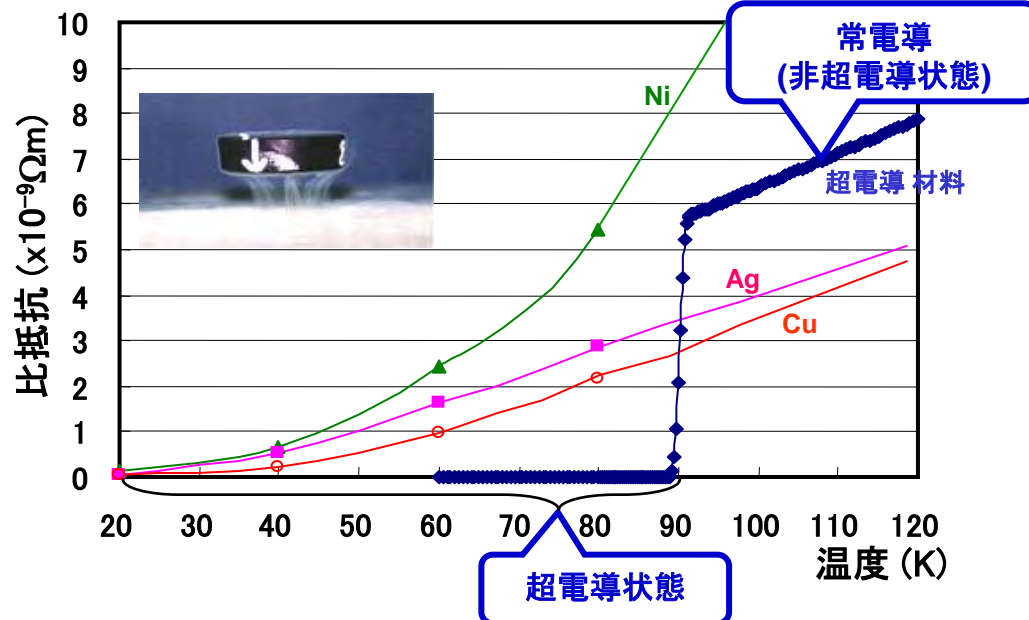
ニーズ	シーズ			
	技術大分類	技術中分類	技術番号	技術小分類
高度情報通信社会の構築	コンピュータ・ネットワーク機器	SFQルータ・スイッチ	401	<ul style="list-style-type: none"> ・大容量化 ・方式、アーキテクチャ ・ラック当たりスループット向上 ・低コスト化
		SFQコンピュータ、サーバ	402	<ul style="list-style-type: none"> ・SFQプロセッサの大規模化 ・高速超電導メモリ大容量化 ・処理能力/ラック向上 ・低消費電力化 ・アーキテクチャ
		量子コンピュータ	403	<ul style="list-style-type: none"> ・回路規模(対応量子ビット数)拡大 ・回路消費電力低減 ・高速化
	無線アクセス系機器	高精度・広帯域ADコンバータ(無線用)	404	<ul style="list-style-type: none"> ・方式 ・帯域・ビット精度向上 ・低コスト化 ・モジュール小型化
		受信フィルタ	405	<ul style="list-style-type: none"> ・高機能化 ・小型化 ・モジュール低コスト化 ・周波数調整技術
		送信フィルタ	406	<ul style="list-style-type: none"> ・耐電力特性向上 ・高調波歪み低減 ・送受信複合化 ・低コスト化
		衛星用通信機器(フィルタ、マルチプレクサ)	407	<ul style="list-style-type: none"> ・小型化、軽量化 ・高信頼化 ・高機能化 ・送受信複合化 ・冷却技術
		超電導アンテナ	408	<ul style="list-style-type: none"> ・指向性、効率向上 ・アレイ化 ・冷却技術 ・環境ノイズ影響低減技術
	計測機器	広帯域ADコンバータ(計測用)	409	<ul style="list-style-type: none"> ・帯域、ビット精度向上 ・モジュール小型化、低コスト化
		高速計測機器(サンブラ)	410	<ul style="list-style-type: none"> ・方式(入力、被測定対象) ・広帯域化 ・小型化、低コスト化 ・高感度化

 重要技術

超電導技術分野の技術マップ(共通基盤技術) (5/5)

技術大分類	技術中分類	技術番号	技術小分類
超電導線材技術	加工熱処理法技術 (含ブロンズ法技術)	501	・NbTi
			・Nb ₃ Sn
			・その他(Nb ₃ Al等)
	パウダーインチューブ法技術	502	・Bi2212
			・Bi2223
			・MgB ₂
			・その他
	薄膜線材技術	503	・Y(RE)系
			・その他
	導体化技術	504	・歪特性改善技術
コイル化技術	505	・素線接続技術	
		・巻線技術	
		・絶縁技術	
超電導バルク技術	溶融凝固バルク技術	506	・RE123系
			・Bi2212系
			・その他
	焼結バルク技術	507	・RE123系
・Bi系			
超電導デバイス技術	デジタルデバイス技術	508	・Nb集積回路プロセス技術
			・NbN集積回路プロセス技術
			・酸化物集積回路プロセス技術
			・Nb系SFQデバイス
			・NbN系SFQデバイス
			・酸化物系SFQデバイス
			・入出インターフェイス技術
			・低温実装技術
	SQUID応用技術	509	・Nbプロセス技術
			・酸化物プロセス技術
			・Nb系SQUID
			・酸化物系SQUID
	高周波デバイス技術	510	・実装技術
			・MgB ₂ 薄膜技術
			・RE123系薄膜技術
			・バンドパスフィルタ
			・アンテナ
			・実装技術
冷凍・冷却技術	パワー機器用冷凍機技術	511	・4K冷凍機
			・20K～50K冷凍機
			・65K冷凍機
	デバイス機器用冷凍機技術	512	・4K冷凍機(1～3W)
			・4K冷凍機(0.1～0.5W)
			・50K、70K冷凍機
	大容量冷却技術	513	・LNG冷熱利用技術
			・サブクール冷却技術
			・LH ₂ 冷熱利用技術
	伝導冷却技術	514	・高効率冷却技術
	クライオスタット技術	515	・薄肉断熱技術
			・封止化技術
・低熱侵入化			
電流リード技術	516	・機械的強度	
		・耐高電圧化	
		・大電流化	

重要技術

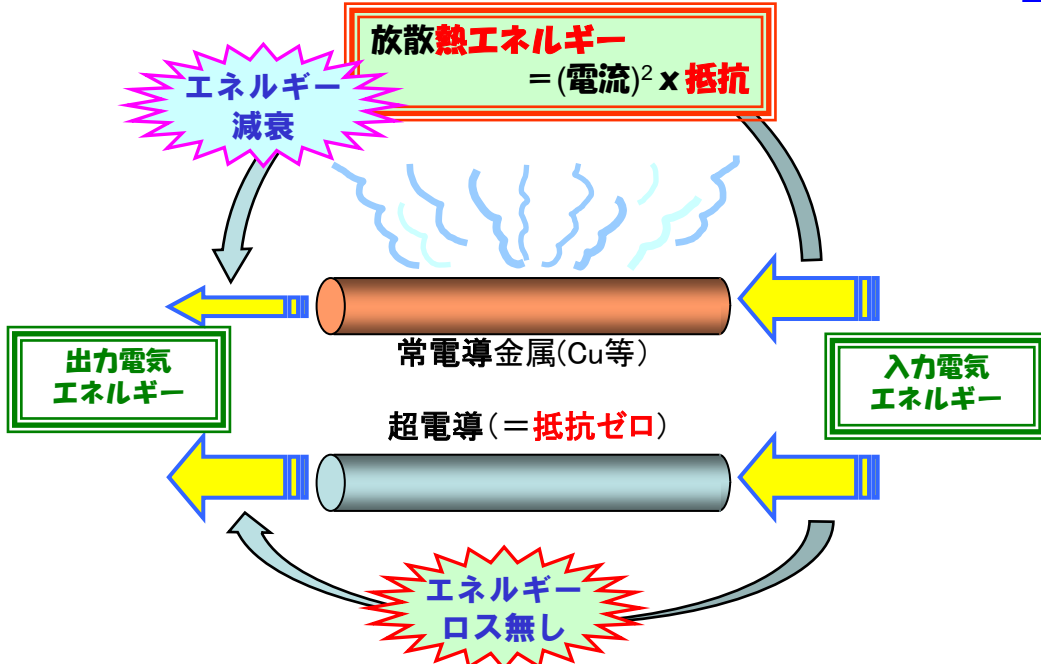
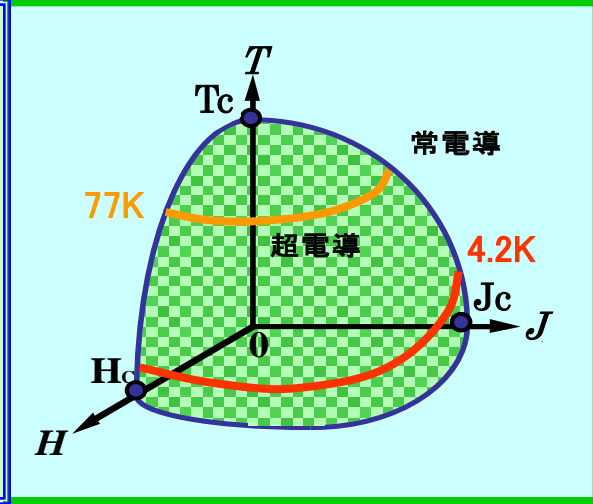


3つの臨界値

臨界温度 (T_c)
超電導を示す温度の上限

臨界電流 (J_c)
超電導を維持できる電流の上限

臨界磁場 (H_c)
超電導を維持できる磁場の上限



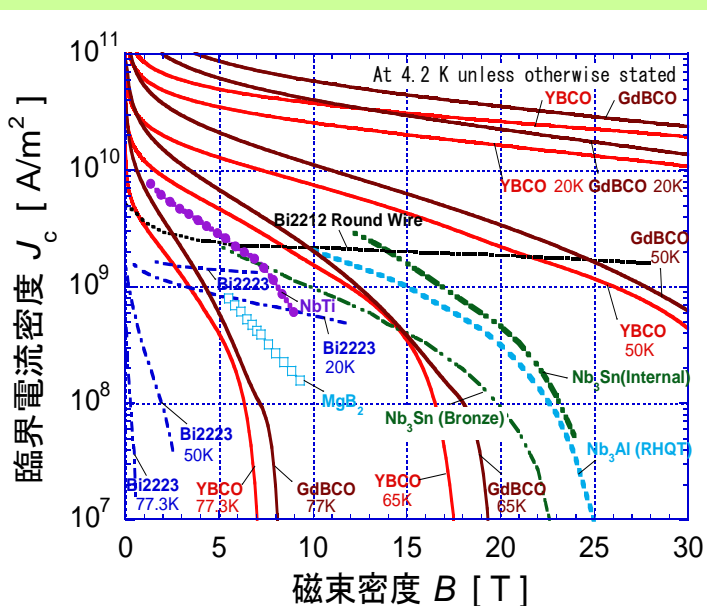
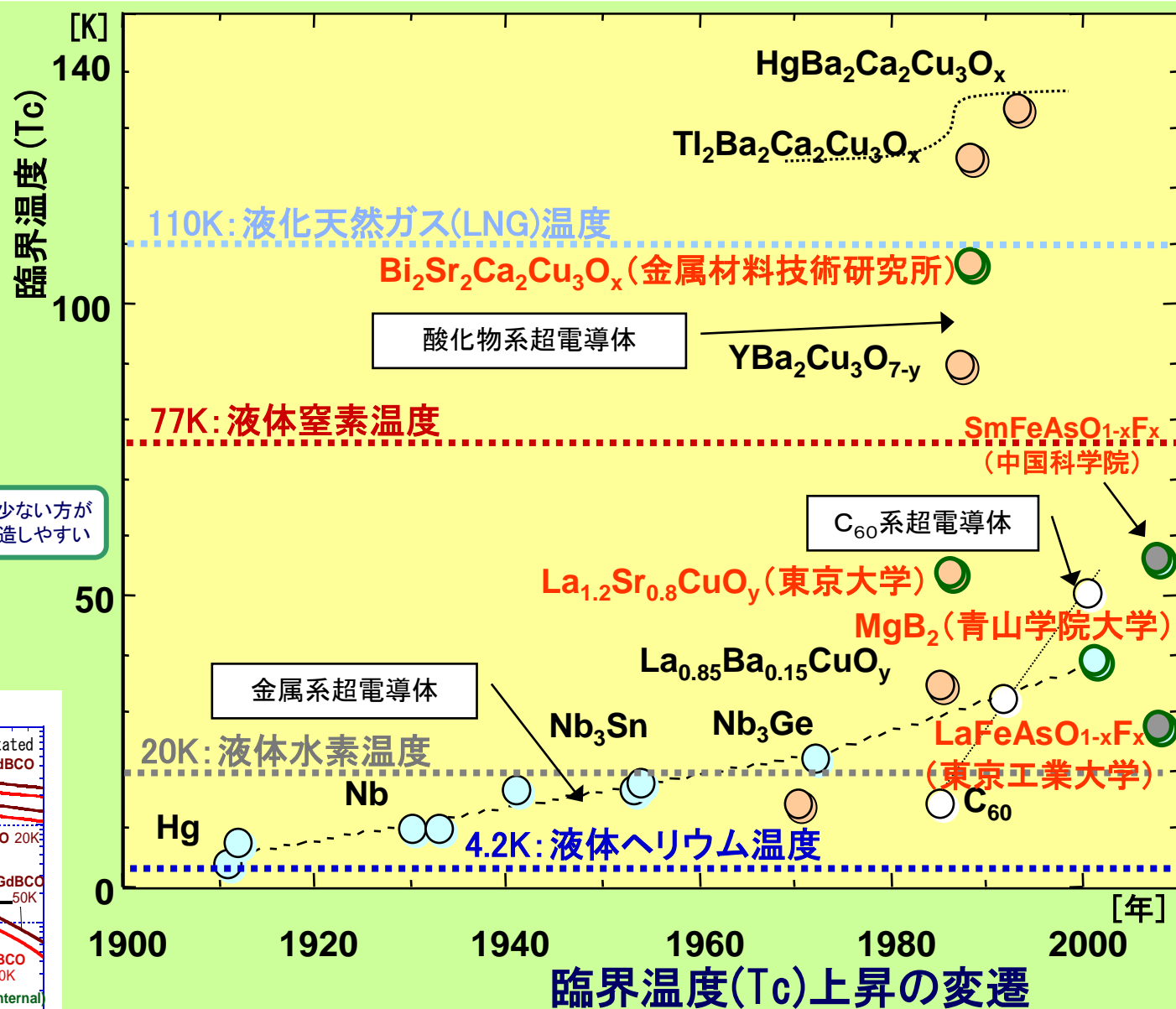
超電導の4条件 (田中の基準)

以下の4条件を全てクリアして、初めて超電導体と認定される。
(東京大学の田中昭二教授が1987年に提唱した客観的条件)

- 結晶構造およびその物質の何が超電導体であるのか
- マイスナー効果を示すか
- 電気抵抗が転移点付近で急激に消失するか
- 実験結果に十分再現性があるか

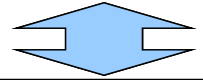
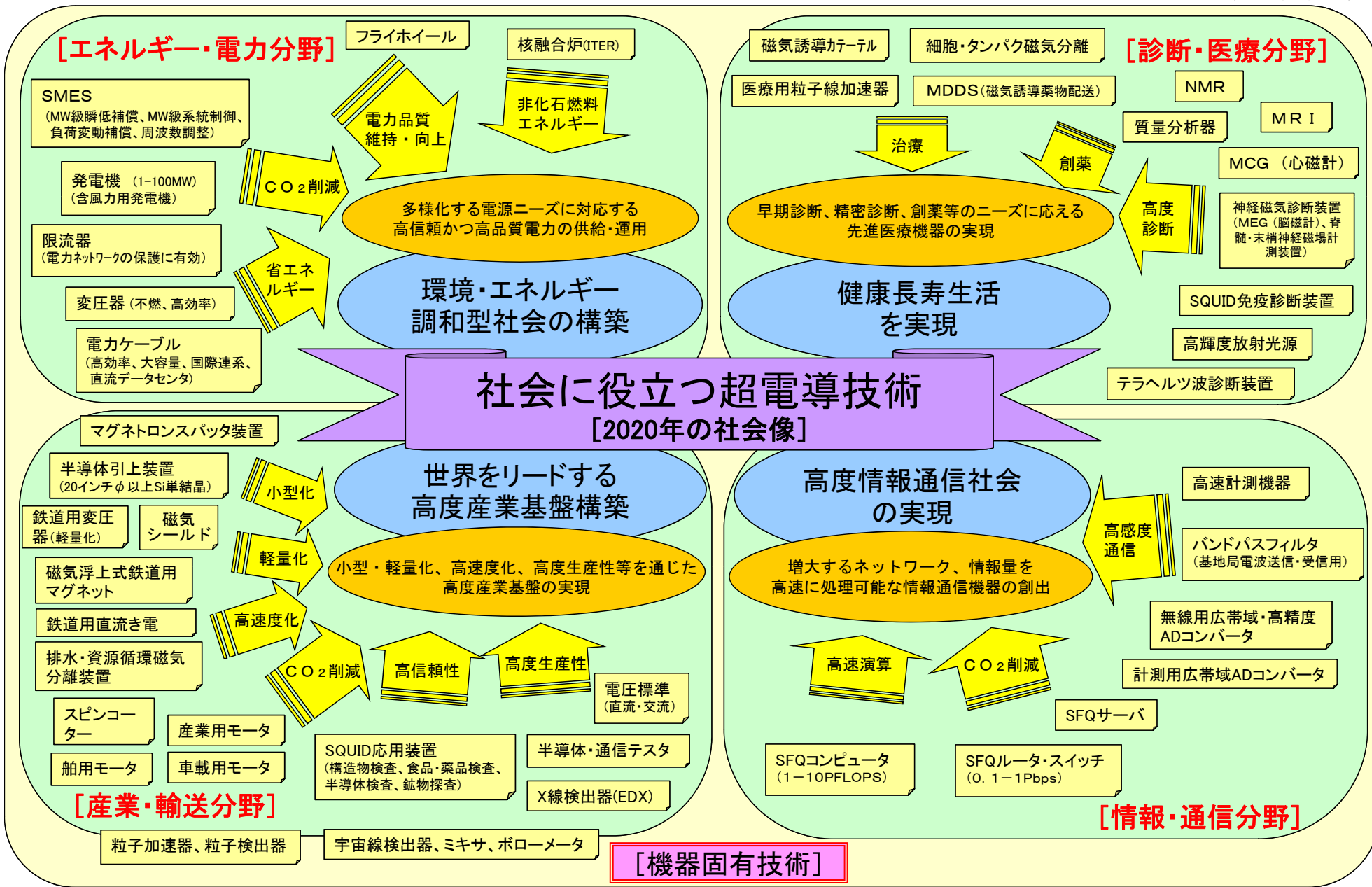
系 (代表物質)	元素数	T _c
Hg系 (HgBa ₂ Ca ₂ Cu ₃ O _x)	5	>110
Tl系 (Tl ₂ Ba ₂ Ca ₂ Cu ₃ O _x)	5	
Bi系 (Bi ₂ Sr ₂ Ca ₂ Cu ₃ O _x)	5	>77
Y系 (YBa ₂ Cu ₃ O _{7-y})	4	
Fe系 (SmFeAsO _{1-x} F _x)	5	>20
La系 (La _{0.9} Sr _{0.1}) ₂ CuO _y)	4	
MgB ₂ (MgB ₂)	2	
Nb系 (Nb ₃ Sn, NbTi)	2	>4.2

元素数が少ない方が
比較的製造しやすい



各種超電導線材の臨界電流密度
(九州大学 木須教授 作成)

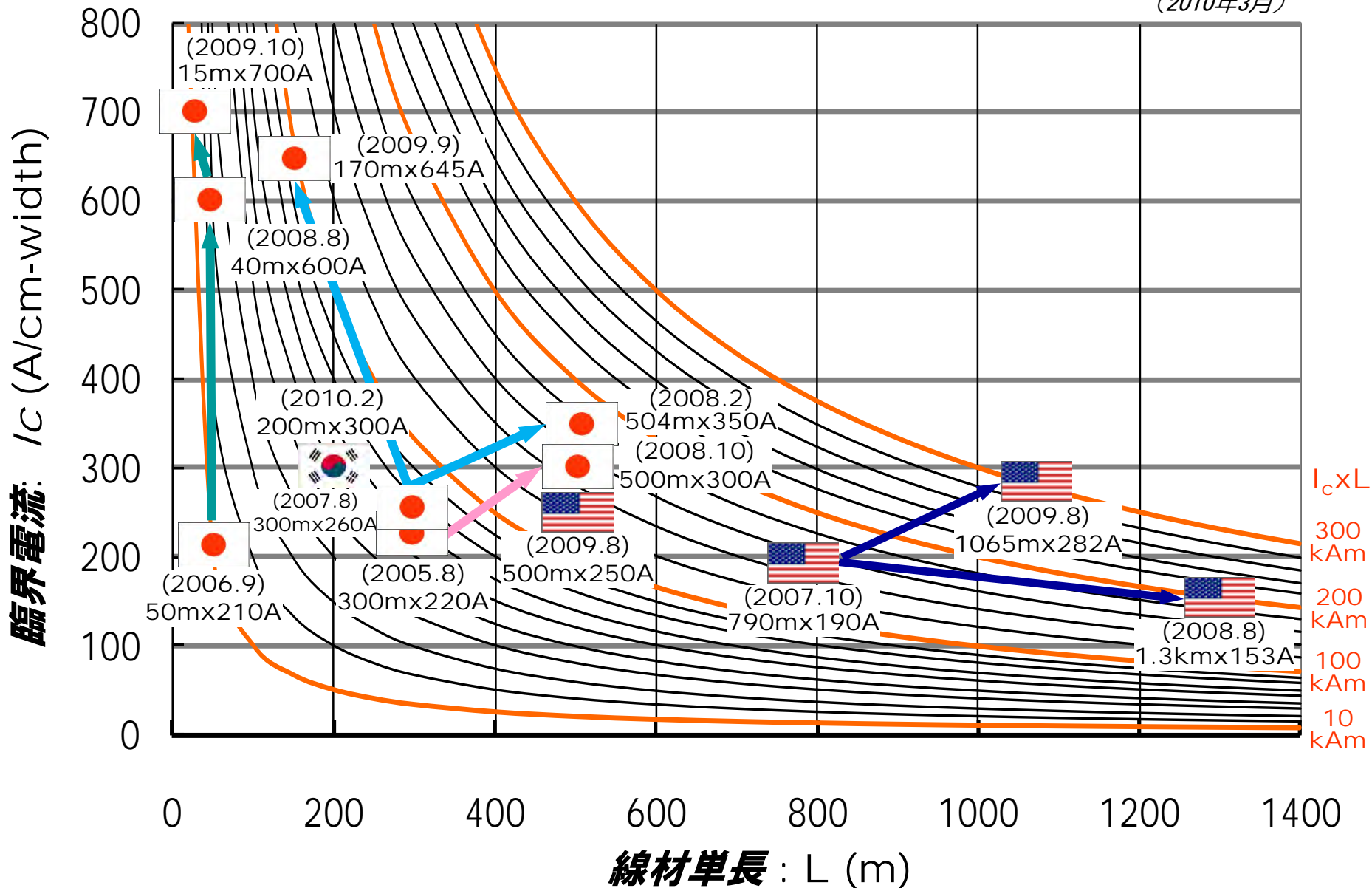
(参考資料2: 超電導物質の探索)



[共通基盤技術]

- 超電導線材技術
- 超電導バルク技術
- 超電導デバイス技術
- 冷凍・冷却技術

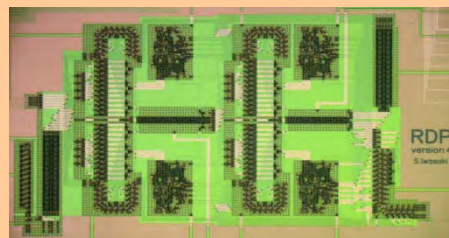
(2010年3月)



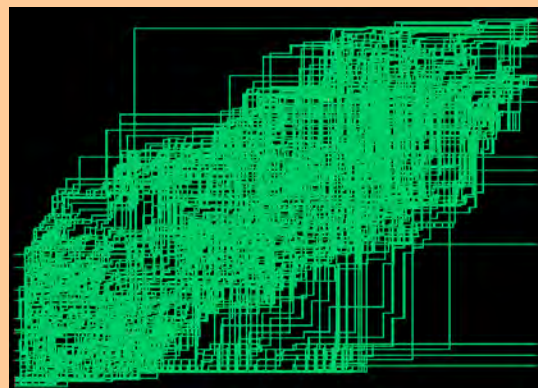
参考資料4：世界のY系超電導線材開発状況

(参考資料5：SFQ技術の国際評価)

名古屋大学がSRL標準プロセスで作製した11,000接合からなる20GHz動作再構成可能なデータパスを持つプロセッサ
(高性能計算機のアクセラレータとして使用) (2008.8)



超電導工学研究所及び名古屋大学が作製した自動配線ツールでレイアウトした大規模SFQ回路(16x16 switch circuit) (2005.3)



名古屋大学がSRL-ADPで作製した90GHz動作2x2 SW (2008.10)

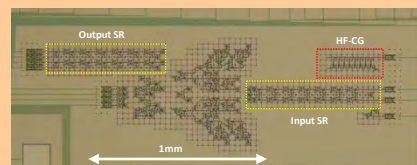


TABLE E-1. REASONS TO DEVELOP SUPERCONDUCTIVE COMPUTER TECHNOLOGY

Technological	Financial
NSA's computing needs are outstripping conventional technology.	Market forces alone will not drive private industry to develop SC technology.
RSFQ technology is an excellent candidate for higher-performance computing capability.	The federal government will be the primary end user of SC computer technology.
RSFQ technology has a clear and viable roadmap.	Other federal government missions will benefit from advances in SC technology.

TABLE E-2. RSFQ SUMMARY

Technical Advantages	Technical Challenges
The most advanced alternative technology.	Providing high-speed and low-latency memory.
Combines high speed with low power.	Architecting systems that can tolerate significant memory access latencies.
Ready for aggressive investment.	Providing very high data rate communications between room temperature technology and cooled RSFQ.

TABLE E-3. DIGITAL RSFQ TECHNOLOGY'S CURRENT STATE OF THE INDUSTRY

Country	Entity	Status
	ISTEC/SRL	<ul style="list-style-type: none"> Joint government/industry center, probably doing the most advanced work in digital RSFQ anywhere in the world today. Responsible for the Earth Simulator system.
	HYPRES	<ul style="list-style-type: none"> Private company focused entirely on SC digital electronics. Has operated the only full-service commercial foundry in the U.S. since 1983.
	Northrop Grumman	<ul style="list-style-type: none"> Had the most advanced foundry and associated design capability until suspended last year. Still has a strong cadre of experts in the field.
	Stony Brook U, UC Berkeley, JPL	<ul style="list-style-type: none"> Currently conducting academic research.
	Chalmers U of Technology	<ul style="list-style-type: none"> Currently conducting academic research.
	NSA, NIST	<ul style="list-style-type: none"> Have resident expertise.

RSFQ技術の評価 ※米ではSFQをRSFQと呼称する
(米NSA「超電導技術評価」報告書(2005.8)より抜粋)



SUPERCONDUCTING TECHNOLOGY ASSESSMENT

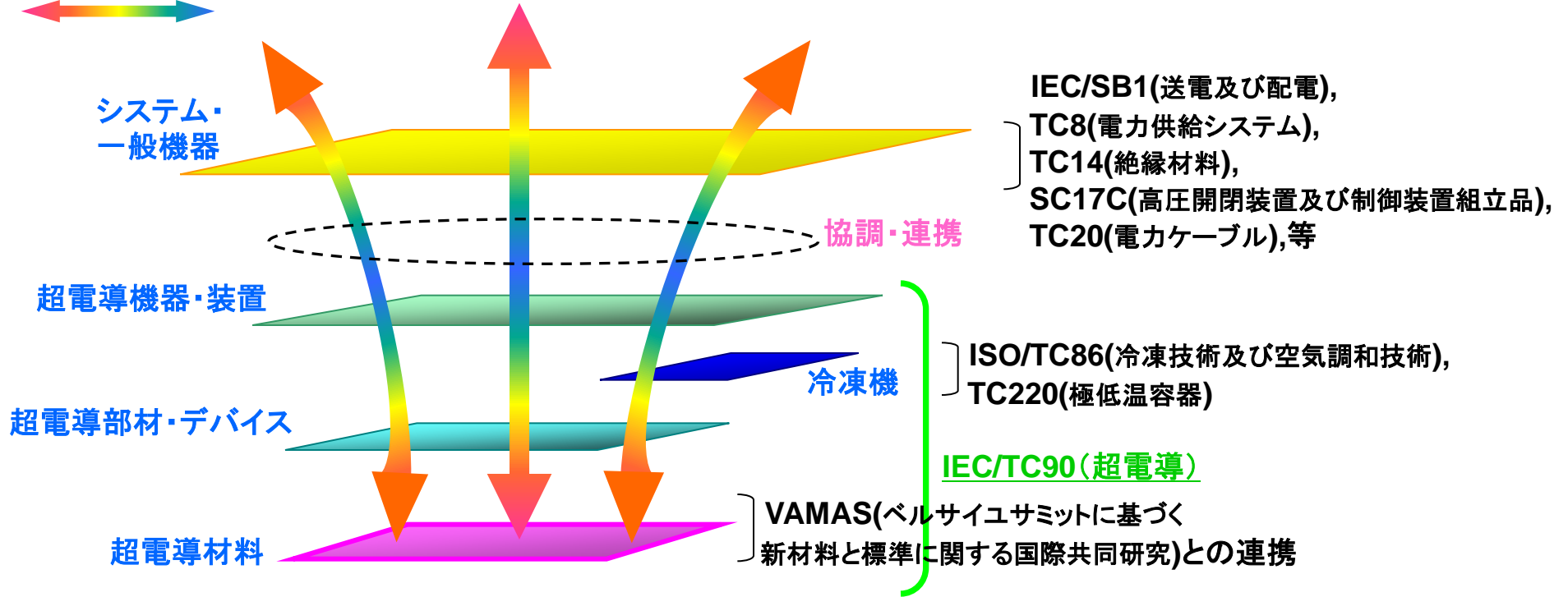


National Security Agency
Office of Corporate Assessments

AUGUST 2005

(参考資料6:超電導標準化マップ)

活発 将来活動



IEC/SB1(送電及び配電),
TC8(電力供給システム),
TC14(絶縁材料),
SC17C(高圧開閉装置及び制御装置組立品),
TC20(電力ケーブル),等

ISO/TC86(冷凍技術及び空気調和技術),
TC220(極低温容器)

IEC/TC90(超電導)

VAMAS(ベルサイユサミットに基づく
新材料と標準に関する国際共同研究)との連携

残
留
臨
界
電
流

機
械
強
度

表
面
抵
抗

臨
界
温
度

交
流
損
失

捕
捉
磁
場

済								Nb-Ti
								Nb ₃ Sn
		検討						酸化物
							未定	MgB ₂

規格化進捗状況

※ 1性能ごとの規格ではないため、
規格数と項目数は一致していない。

用語
(1規格)

電流リードの特性
(1新規格案検討)
[2010年制定見込]

超電導材料の
性能試験方法
(13規格+改正)

事前評価書(案)

作成日		平成20年1月17日
1. 事業名称	イットリウム系超電導電力機器技術開発	
2. 推進部署名	新エネルギー技術開発部	
3. 事業概要	<p>(1) 概要：今後電力機器は、系統安定化や送電損失を飛躍的に低減させることによって、エネルギー資源の有効利用及び地球環境問題に貢献することが要求される。</p> <p>本プロジェクトでは、これらの要求に応えることのできる世界的にも最先端の技術力を有する超電導技術を活用して、コンパクトで大容量の電力供給が期待できるイットリウム系超電導線材を用いた超電導電力機器として、電力ケーブル、変圧器並びに超電導電力貯蔵装置（SME S）の実用化に向けた重要な技術開発を行う。</p> <p>(2) 事業規模：総事業費 150億円（委託）</p> <p>(3) 事業期間：平成20年度～24年度（5年間）</p>	
4. 評価の検討状況		
<p>(1) 業の位置付け・必要性</p> <p>[事業の位置づけ]</p> <p>経済社会の基盤となる電力の安定的かつ効率的なエネルギー供給システムを実現するため、瞬時電圧低下や需要変動時等においても、系統を適正に制御し、電力供給を安定化させるための技術及び発電電力を無駄なく輸送するための高効率な送電技術の確立を目指す。また、系統に分散型電源が大量に導入された場合でも、系統電圧を適正に維持し、安定した電力供給を実現するための系統制御技術の確立を目指す「電力技術開発プログラム」の一環として、世界的にも最先端の技術力を有する超電導技術を活用して、コンパクトで大容量の電力供給が期待できるイットリウム系超電導線材を用いた超電導電力機器として、電力ケーブル、電力用変圧器ならびに超電導電力貯蔵装置（SME S）の実用化に向けた技術開発を行う。</p> <p>それぞれは、超電導技術分野の技術マップ（平成19年4月制定）において、エネルギー・電力分野機器開発のうち「電力ケーブル」、「電力用変圧器」、「SME S」に位置付けられる。また、第3期科学技術基本計画（平成18年4月制定）において、エネルギー分野における「送電技術」、「電力系統制御技術」、「電力貯蔵技術」に位置付けられている。</p> <p>[事業の必要性]</p> <p>我が国は、経済活動の大半が大都市に集中しており、大都市での電力供給支障事故は日本全体の経済活動に大きな影響を及ぼすことになる。また、大都市での電源立地が困難な状況において、益々遠距離化する電源立地点からの長距離送電の安定性の確保を図ることも重要な課題となっている。</p> <p>2020年頃には、高度経済成長期から40年、50年経過した設備のリプレース需要が増大すると想定されており、大都市での電力ケーブルや電力用変圧器のリプレース需要及び長距離・大容量送電に合わせて、事故や災害に強く、電力需要の増大や新エネルギー導入による系統影響にも柔軟に対応できる電力の安定的かつ効率的なエネルギー供給システムの実現が求められている。このような状況を踏まえて、送電損失を飛躍的に低減できる超電導技術を活用して、低損失で安定した電力輸送ができる大容量でコンパクトな超電導電力機器を開発することは極めて重要である。しかし、これらの技術開発は未経験の技術を開発・統合するというリスクの伴ったものであるために民間企業等だけでの実施は困難であり、NEDO技術開発機構が主体となって実施する必要性が高い。</p> <p>さらに、送電損失を飛躍的に低減させる技術であり、エネルギー資源の有効利用及び地球環境問題に貢献できるとともに、世界的にも我が国が最先端の技術力を有する技術であり、米国・欧州等との間での国際協力及び貢献が期待できる。</p>		

(2) 研究開発目標の妥当性

超電導技術分野ロードマップにおいて、2020年にはイットリウム系超電導線材を用いた電力ケーブル、電力用変圧器ならびに超電導電力貯蔵装置（SME S）の実用化が想定されている。これに向けて各機器に関して重要な技術開発を行い、これらの超電導電力機器を実際に検証してみることで、システムを適正に制御し、電力供給を安定化させるための技術及び発電電力を無駄なく輸送するための高効率な電力輸送技術を確立することを目指す。この実現のために、本プロジェクトでは以下を達成する技術開発を行う。なお、具体的な数値目標については、基本計画策定までに技術委員会等で議論して制定するものとする。

[研究開発目標]

①電力ケーブル

高電圧型ケーブルは、275kV/単相/3kA 30m（中間接続部有）を製作し、高電圧設計・製造技術の検証を行う。大電流型ケーブルは、66kV/三相/5kA 15mを製作し、大電流設計・製造技術の検証を行い、長期課通電性能試験（6ヶ月）を通じて超電導電力ケーブルの実用性検証を行う。

②電力用変圧器

66/6kV 20MVA 級配変用変圧器の実用化を見通す66/6kV 2MVA 級変圧器を製作し、低交流損失線材を用いた小型・高効率化設計の検証および事故電流に対する限流機能の検証を行う。

③SME S

長距離送電の系統安定化用2GJ級SME Sの実用化を見通す20MJ級機を構成する2MJ級要素コイルを製作し、SME Sとしての動作検証および伝導冷却の検証を行う。

④標準化活動

ケーブル、変圧器、SME Sの技術開発を通じて、各超電導機器の国際標準化を進めるための標準化項目を明確化するとともに、必要なデータ収集を行い、国際的な規范文書原案の策定・作成を行う。

上記の研究開発は、技術マップ「超電導技術分野ロードマップ 電力ケーブル、電力用変圧器、SME S」に記載されている2020年度の実用化に向けた設定であり妥当である。

(3) 研究開発マネジメント

公募により実施体制を決定し、効率的かつ効果的に研究の推進を図るためPLを設置する。本事業開始後3年目に中間評価を行い、その結果を踏まえて必要に応じて事業全体について見直しを行う。

特に、並行して実施する「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」と定期的なPL会議等を通じて密接な連携を行い、両事業が効率的、効果的に進むよう努める。

また、外部有識者からなる超電導技術委員会に専門的知見の提供・助言を求め、適宜計画の調整を図る。

事後評価については平成25年度に外部有識者からなる委員会にて実施する。上記のようにマネジメントの計画は明確であり妥当と判断する。

(4) 研究開発成果

本事業の研究開発成果である、電力システムを構成する超電導電力機器としての、電力ケーブル、電力用変圧器並びに超電導電力貯蔵装置（SME S）は、社会インフラ設備としての耐久性を含めた長期信頼性の検証に期間を要するため、2020年の実用化のためには現段階から研究開発を開始する必要がある。また、これらの超電導電力機器による省エネルギー効果はCO₂ 2,747kton/年削減(2030年見込み)が期待できる。

超電導電力機器のシステム運用で重要な冷却技術の研究開発成果は産業分野で利用される冷却機器の信頼性等の向上に広く適用されることが期待できる。

上記の成果が期待されることから本プロジェクトを実施することは妥当と判断する。

(5) 実用化・事業化の見通し

2020年の実用化時期には電力ケーブルや電力用変圧器のリプレース需要や長距離送電等による系統安定化対策需要が想定されており、本事業で開発する電力ケーブル、電力用変圧器並びに超電導電力貯蔵装置（SME S）の実用化に向けた重要な技術成果によって、実用化に向けた進展が期待できる。さらに、社会インフラ設備として適用するための長期信頼性検証が必要であるため、実用化技術開発を行うことによって信頼性や経済性等を改善する技術開発が加速され「超電導技術分野ロードマップ」で示されている2020年頃の実現性が更に高まることが期待できるので、本プロジェクトを実施する意義は大きい。

(6) その他特記事項

平成19年12月から平成20年3月まで、「超電導分野における技術開発状況に関する調査」を実施する。この中で、主に海外の超電導電力機器の開発状況調査を行い、超電導電力機器を実用化するための技術課題を調査する。本調査の成果は、本事業の基本計画策定等に反映させる予定。

5. 総合評価

本事業は、系統安定化や送電損失を飛躍的に低減させるイットリウム系超電導線材を用いた超電導電力機器の開発であり、エネルギー資源の有効利用及び地球環境問題への対応という社会的背景、電力供給システムの安定化や送電損失の低減といった公共性並びに国の政策に合致し、また、産業界で未経験の技術を開発・統合するという開発リスクも大きいことから、NEDO技術開発機構の事業として実施するのが適切と判断する。

「イットリウム系超電導電力機器技術開発 基本計画（案）」に対するパブリックコメント募集の結果について

平成19年3月26日
NEDO技術開発機構
新エネルギー技術開発部

NEDO POST 3において標記基本計画（案）に対するパブリックコメントの募集を行いました結果をご報告いたします。
みなさまからのご協力を頂き、ありがとうございました。

1. パブリックコメント募集期間

平成19年2月26日～平成19年3月3日

2. パブリックコメント投稿数＜有効のもの＞

計1件

3. パブリックコメントの内容とそれに対する考え方

ご意見の概要	ご意見に対する考え方	基本計画・技術開発課題への反映
<p>全体について</p> <p>[意見1](1件) 今回の提示案には機器仕様に応じた線材開発が示されており、そちらにシフトする危険性を感じられますので、あくまでも、機器を開発するという目的をずらさないようにしていただきたい。</p>	<p>[考え方と対応]</p> <p>基本計画には超電導電力機器の製作に必要な線材開発を含めていますが、プロジェクトの目的は超電導電力機器の技術開発であり、NEDOに設置する技術委員会や中間評価などを通じて、超電導電力機器技術開発という目的がずれないように、目標達成に向けたマネジメントを行っていきます。</p>	<p>[反映の有無と反映内容]</p> <p>特になし。</p>

特許論文リスト

年度毎の特許、論文、外部発表の件数(内訳)

	特許出願			論文			研究発表 講演	受賞 実績	その他 外部発表 (プレス 発表・展 示会等)
	国内	外国	PCT出願	査読有 (掲載 済)	査読有 (投稿 中)	その他			
H20年度	7	0	0	22	19	1	66	1	6
H21年度	26	0	1	42		16	235	2	8
H22年8月まで	3	1	0	3		2	98	3	4

【特許】

1 超電導電力貯蔵システム(SMES)の研究開発

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	中部電力(株)	特願 2009-082925	国内	2009/3/30	出願	ダブルパンケーキコイル	式町 浩二他
2	中部電力(株)	特願 2009-170229	国内	2009/7/21	出願	コイル装置、保護装置 及び誘導電圧抑制方法	式町 浩二他
3	中部電力(株) 古河電気工業(株)	特願 2009-193951	国内	2009/8/25	出願	超電導線材及びその製 造方法	鹿島 直二他
4	中部電力(株) 大学共同利用機 関法人自然科学 研究機構	特願 2009-241397	国内	2009/10/20	出願	自励振動式ヒートパイ プが組み込まれた超電 導マグネット	平野 直樹他

2 超電導電力ケーブルの研究開発

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	住友電気工業(株) (財)国際超電導 産業技術研究セ ンター	特願 2009-031951	国内	2009/2/13	出願	超電導線材及びそれを 用いた超電導ケーブル	大屋 正義
2	住友電気工業(株) (財)国際超電導 産業技術研究セ ンター	特願 2009-057870	国内	2009/3/11	審査 請求 済	薄膜超電導線材及び超 電導ケーブル導体	種子田 賢宏 他
3	(財)国際超電導 産業技術研究セ ンター 昭和電線ケーブルシ ステム(株)	特願 2009-087670	国内	2009/3/31	出願	酸化物超電導線材とそ の製造方法及びそれに 用いる基板の製造装置	高橋 保夫他
4	住友電気工業(株) (財)国際超電導 産業技術研究セ ンター	特願 2009-112894	国内	2009/5/7	出願	超電導ケーブルの端末 構造	芦辺 祐一他
5	住友電気工業(株) (財)国際超電導 産業技術研究セ ンター	特願 2009-138632	国内	2009/6/9	出願	超電導ケーブルの端末 構造	芦辺 祐一他
6	住友電気工業(株) (財)国際超電導 産業技術研究セ ンター	特願 2009-138633	国内	2009/6/9	出願	超電導ケーブルの中間 接続構造	芦辺 祐一他
7	住友電気工業(株) (財)国際超電導 産業技術研究セ ンター	特願 2009-146883	国内	2009/6/19	出願	超電導ケーブル	大屋 正義
8	住友電気工業(株) (財)国際超電導 産業技術研究セ ンター	特願 2009-228401	国内	2009/9/30	出願	超電導ケーブル	大屋 正義
9	住友電気工業(株) (財)国際超電導 産業技術研究セ ンター	PCT/JP 2009/070302	PCT	2009/12/3	出願	薄膜超電導線材及び超 電導ケーブル導体	種子田 賢宏 他

番号	出願者	出願番号	国内外 外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
10	古河電気工業(株) (財)国際超電導 産業技術研究セ ンター	特願 2010-022909	国内	2010/2/4	出願	極低温ケーブルの終端 接続部	向山 晋一他
11	昭和ケーブルシステム(株)	特願 2010-031359	国内	2010/2/16	出願	酸化物超電導線材製造 方法及び製造装置	小泉 勉他
12	昭和ケーブルシステム(株)	特願 2010-031360	国内	2010/2/16	出願	酸化物超電導線材製造 方法及び製造装置	小泉 勉他
13	古河電気工業(株) (財)国際超電導 産業技術研究セ ンター	特願 2010-108277	国内	2010/5/10	出願	超電導ケーブル	向山 晋一他

3 超電導変圧器の研究開発

番号	出願者	出願番号	国内外 外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	大陽日酸株式会 社	特願 2009-262896	国内	2009/11/18	出願	極低温冷凍装置及びそ の運転方法	弘川 昌樹他
2	昭和ケーブルシステム(株) (財)国際超電導 産業技術研究セ ンター	特願 2009-266450	国内	2009/11/24	出願	希土類系酸化物超電導 線材の製造方法	兼子 敦他
3	昭和ケーブルシステム(株)	特願 2010-029119	国内	2010/2/12	出願	酸化物超電導線材及び 酸化物超電導線材の製 造方法	中西 達尚他
4	昭和ケーブルシステム(株)	特願 2010-030475	国内	2010/2/15	出願	酸化物超電導線材	小泉 勉他

4 超電導機器用線材の技術開発

番号	出願者	出願番号	国内外 外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	住友電気工業(株) (財)国際超電導 産業技術研究セ ンター	特願 2009-001836	国内	2009/1/7	審査 請求 済	薄膜超電導線材の製造 方法および薄膜超電導 線材	新海 優樹
2	住友電気工業(株) (財)国際超電導 産業技術研究セ ンター	特願 2009-015628	国内	2009/1/27	審査 請求 済	超電導線材および超電 導線材の製造方法	種子田 賢宏
3	住友電気工業(株) (財)国際超電導 産業技術研究セ ンター	特願 2009-060989	国内	2009/3/13	出願	超電導線材および超電 導線材の製造方法	新海 優樹
4	(株)フジクラ (財)国際超電導 産業技術研究セ ンター	特願 2009-152128	国内	2009/6/26	出願	超電導線材	須藤 泰範
5	住友電気工業(株) (財)国際超電導 産業技術研究セ ンター	特願 2009-163507	国内	2009/7/10	出願	超電導線材の製造方法 および超電導線材の接 続方法	新海 優樹

番号	出願者	出願番号	国内外 外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
6	昭和ケーブルシステム(株) (財)国際超電導 産業技術研究セ ンター	特願 2009-249173	国内	2009/10/29	出願	希土類系酸化物超電導 線材及びその製造方法	高橋 保夫他
7	昭和ケーブルシステム(株) (財)国際超電導 産業技術研究セ ンター	特願 2009/249172	国内	2009/10/29	出願	希土類系酸化物超電導 線材	高橋 保夫他
8	(財)国際超電導 産業技術研究セ ンター (株)フジクラ 昭和電線ケーブルシ ステム(株)	特願 2009-250785	国内	2009/10/30	出願	低交流損失マルチフィ ラメント型超電導線材 及びその製造方法	町 敬人他
9	(財)国際超電導 産業技術研究セ ンター (株)フジクラ 古河電気工業(株) (株)東芝	特願 2009-250488	国内	2009/10/30	出願	酸化物超電導導体用基 材及びその製造方法と 酸化物超電導体及びそ の製造方法	吉積 正晃他
10	住友電気工業(株) (財)国際超電導 産業技術研究セ ンター	特願 2009-266406	国内	2009/11/24	出願	薄膜超電導線材用金属 基材、その製造方法お よび薄膜超電導線材の 製造方法	新海優樹
11	住友電気工業(株) (財)国際超電導 産業技術研究セ ンター	特願 2009-266441	国内	2009/11/24	出願	超電導薄膜線材の製造 方法	小西 昌也他
12	住友電気工業(株) (財)国際超電導 産業技術研究セ ンター	特願 2010-013847	国内	2010/1/26	出願	薄膜超電導線材	新海 優樹
13	住友電気工業(株) (財)国際超電導 産業技術研究セ ンター	特願 2010-018863	国内	2010/1/29	出願	薄膜超電導線材とその 製造方法	新海 優樹
14	(財)国際超電 導産業技術研究 センター 富士通(株) (株)日立製作所	特願 2010-041757	国内	2010/2/26	出願	磁束トランス及び同軸 立体型ラジオメータ	石丸 喜康他
15	(財)国際超電 導産業技術研究 センター	12/777.686	US	2010/5/11	出願	希土類系酸化物超電導 線材及びその製造方法	高橋 保夫他
16	九州大学 (財)国際超電導 産業技術研究セ ンター	出願準備中	国内		出願	—	—
17	九州大学 九州工業大学 (財)国際超電導 産業技術研究セ ンター	出願準備中	国内		出願	—	—

【論文発表】

プロジェクト全般

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名 ページ番号	査読	発表年
1	Yuh Shiohara	ISTEC	Current status and future prospects of Japanese national project on coated conductor development and its applications	PHYSICA C 468 1498-1503	有	2008
2	Yuh Shiohara	ISTEC	Present status and future prospect of coated conductor development and its application in Japan	SUPERCOND SCI TECH 21	有	2008
3	藤原 昇	ISTEC	超電導電力機器の技術動向	生産と電気 1月号	無	2009
4	Shinya Hasuo	ISTEC	Recent activities at ISTEC	European Superconductivity News Forum 10 1-25	無	2009
5	Yuh Shiohara	ISTEC	Japanese efforts on coated conductor processing and its power applications: New 5 year project for materials and power applications of coated conductors (M-PACC)	PHYSICA C 469 863-867	有	2009
6	Noboru Fujiwara et al.	ISTEC他	Development of YBCO Power Devices in Japan	Physica C	有	投稿中

1 超電導電力貯蔵システム(SMES)の研究開発

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名 ページ番号	査読	発表年
1	平野 直樹	中部電力(株)	超電導電力機器への新型超電導材料の期待	MATERIAL STAGE 第9巻 第8号 p52-54	無	2009
2	平野 直樹	中部電力(株)	超電導電力貯蔵システム(SMES)	冷凍 第84巻 第986号 p48-53	無	2009
3	F. Matsutani et al.	九州工業大学他	Superconducting layer thickness of relaxation properties of persistent current in high magnetic field in YBCO-coated conductor	PHYSICA C 469 1122-1125	有	2009

2 超電導電力ケーブルの研究開発

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名 ページ番号	査読	発表年
1	A. Ishiyama et al.	早稲田大学他	Over-current characteristics of superconducting model cable using YBCO coated conductors	PHYSICA C 468 2041-2045	有	2008

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名 ページ番号	査読	発表年
2	A. Ishiyama et al.	早稲田大学 他	Transient stability characteristics of a 1-m single-layer YBCO	IEEE T APPL SUPERCON 18 1228-1231	有	2008
3	M. Yagi et al.	古河電気工業(株) 他	Development of YBCO HTS cable with low AC loss	PHYSICA C 468 2037-2040	有	2008
4	S. Hanyu et al.	(株)フジクラ	IBAD-MgO buffer layers for coated conductors in the large-scale system	Physica C: Superconductivity Volume 469, Issues 15-20	無	2009
5	S. Hanyu et al.	(株)フジクラ	Progress in Scale-Up of RE-123 Coated Conductors With of 300 A/cm by IBAD/PLD	IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 9, Issue 3	無	2009
6	S. Hanyu et al.	(株)フジクラ	Fabrication of km-length IBAD-MgO substrates at a production rate of km h	Superconductor Science and Technology Volume 23, Number 1	有	2009
7	T. Nagaishi et al.	住友電気工業(株)	Development of REBCO coated conductors on textured metallic substrates	Physica C 469 1311-1315	有	2009
8	向山 晋一他	古河電気工業(株) 他	イットリウム系超電導電力ケーブルの開発	古河電工時報123号	無	2009
9	向山晋一	古河電気工業(株)	鉄系超電導材料の応用の可能性 高温超電導ケーブルの開発	月刊 マテリアルステージ 第9巻 第8号 P. 55 ~P. 57	無	2009
10	N. Amemiya et al.	京都大学他	Transport losses in polygonal assemblies of coated conductors with textured-metal	PHYSICA C 469 1427-1431	有	2009
11	A. Ishiyama et al.	早稲田大学 他	Degradation Characteristics of YBCO-Coated Conductors Subjected to Overcurrent Pulse	IEEE T APPL SUPERCON 19 3483-3486	有	2009
12	S. Mukoyama et al.	古河電気工業(株) 他	Development of (RE)BCO cables for HTS power transmission lines	PHYSICA C 469 1688-1692	有	2009
13	X. Wang et al.	早稲田大学 他	Over-current characteristics of YBCO superconducting cable	PHYSICA C 469 1717-1721	有	2009
14	X. Wang et al.	早稲田大学 他	Over-Current Characteristics of a 20-m-Long YBCO Model	IEEE T APPL SUPERCON 1722-1726	有	2009
15	M. Yagi et al.	古河電気工業(株) 他	Development of a 10 m long 1 kA 66/77 kV YBCO HTS cable with low AC loss and a joint with low electrical resistance	SUPERCOND SCI TECH 22	有	2009
16	M. Yagi et al.	古河電気工業(株) 他	Development of 1 m HTS conductor using YBCO on textured metal	PHYSICA C 469 1693-1696	有	2009
17	X. Wang et al.	早稲田大他	Numerical Simulation on Fault Condition in 66 kV Class RE-123 Superconducting Cable	Physica C	有	投稿中

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名 ページ番号	査読	発表年
18	H. Kono et al.	早稲田大他	Degradation Characteristics of YBCO coated conductors due to fault-current in power cable	Physica C	有	投稿中
19	S. Sato et al.	早稲田大他	Computer Simulation of fault current characteristics in 275 kV class YBCO power Cable	Physica C	有	投稿中
20	K. Hayashiet al.	住友電気工業(株)	Development of GdBCO Coated Conductor on 30mm Wide Clad-Type Textured Metal	CCA	有	投稿中
21	S. Mukoyama et al.	古河電気工業(株)他	Conceptual design of 275 kV class High-TC superconducting cable	Physica C	有	投稿中

3 超電導変圧器の研究開発

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名 ページ番号	査読	発表年
1	H. Okamoto et al.	九州電力他	AC loss properties in YBCO model coils for loss reduction	PHYSICA C 468 1731-1733	有	2008
2	吉田 茂	大陽日酸(株)	読者の広場Q&A「超伝導電力機器にはどのような冷却機が必要でしょう」	超電導Web21（発行：(財)ISTEC）12月号	無	2008
3	平井 寛一他	大陽日酸(株)	磁気軸受ネオン膨張タービンの開発	大陽日酸技報28	無	2009
4	K. Kakimoto et al.	(株)フジクラ	Increase of production rate of RE-123 film by PLD system with the hot-wall type heating	Physica C: Superconductivity Volume 469, Issues 15-20	無	2009
5	H. Kutami et al.	(株)フジクラ	Progress in research and development on long length coated conductors in Fujikura	Physica C: Superconductivity Volume 469, Issues 15-20	無	2009
6	K. Kakimoto et al.	(株)フジクラ	High-speed deposition of high-quality RE123 films by PLD system with hot-wall heating	Superconductor Science and Technology Volume 23, Number 1	有	2009
7	H. Okamoto et al.	九州電力(株)他	Development of 1kA class HTS coil for superconducting power transformers	Pysica C、469、15	有	2009
8	H. Hirai et al.	大陽日酸(株)他	Development of a turbine cryocooler for high temperature superconductor applications	PHYSICA C 469 1857-1861	有	2009
9	M. Iwakuma et al.	九州大学他	Development of REBCO superconducting power transformers in Japan	PHYSICA C 469 1726-1732	有	2009
10	H. Okamoto et al.	九州電力(株)他	Development of 1 kA class HTS coil for superconducting power transformers	PHYSICA C 469 1733-1735	有	2009

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名 ページ番号	査読	発表年
11	吉田 茂	大陽日酸(株)	高温超電導電力機器用冷凍機の実用化を目指して	低温工学協会 九州・西日本支部 レポート 2009	無	2009
12	吉田 茂	大陽日酸(株)	超電導機器の冷凍・冷却技術の進展	超電導Web21 (発行: (財)ISTEC) H21年6月号	無	2009
13	林 秀美他	九州電力(株)	超電導変圧器及び小型タービン式冷却装置の開発について	日本冷凍空調学会会誌「冷凍」12月号	無	2009
14	平井 寛一	大陽日酸(株)	高温超電導機器冷却システムの開発	低温工学協会 九州・西日本支部 レポート 2010	無	2010
15	奈良 範久	大陽日酸(株)	超電導電力機器の冷凍・冷却技術の進展	超電導Web21 (発行: (財)ISTEC) H22年6月号	無	2010
16	林秀美他	九州電力(株)	超電導変圧器の早期実用化を目指して	超電導・低温技術 Report、vol.4	無	2010

4 超電導機器用線材の技術開発

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名 ページ番号	査読	発表年
1	A. Ibi et al.	ISTEC他	Development of long REBCO coated conductors with artificial pinning centers by using MPMT-PLD method	PHYSICA C 468 1514-1517	有	2008
2	T. Izumi et al.	ISTEC他	Research and development of reel-to-reel TFA-MOD process for coated conductors	PHYSICA C 468 1527-1530	有	2008
3	J. Kato et al.	九州大学他	Diffusion joint using silver layer of YBCO coated conductors for applications	PHYSICA C 468 1571-1574	有	2008
4	S. Kawabata et al.	鹿児島大学他	Measurement of AC current distributions in HTS tapes	PHYSICA C 468 1734-1738	有	2008
5	J. Matsuda et al.	ISTEC他	Effect of Ba/Y ratio in starting solution on microstructure evolution of YBCO films deposited by advanced TFA-MOD process	PHYSICA C 468 997-1005	有	2008
6	J. Matsuda et al.	ISTEC他	Microstructure evolution of YBCO films deposited by advanced TFA-MOD process	PHYSICA C 468 1017-1023	有	2008
7	J. Matsuda et al.	ISTEC他	Transmission electron microscopic studies on growth mechanism of YBa ₂ Cu ₃ O _{7-y} films formed by advanced trifluoroacetates metalorganic deposition process	J MATER RES 23 3353-3362	有	2008

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名 ページ番号	査読	発表年
8	A.Mitani et al.	九州大学他	Effect of fabrication conditions on crystalline of SmBCO films fabricated by TFA-MOD method	PHYSICA C 468 1546-1549	有	2008
9	M.Miura et al.	ISTEC他	Enhancement of flux pinning in Y1-xSmxBa1.5Cu3Oy coated conductors with nanoparticles	APPL PHYS EXPRESS 1	有	2008
10	M.Miura et al.	ISTEC他	Introduction of pinning center to enhance I-c under magnetic fields in REBCO coated conductors fabricated by advanced TFA-MOD	PHYSICA C 468 1643-1646	有	2008
11	A.Nakai et al.	ISTEC他	YBCO growth on textured NiW substrates by TFA-MOD method	PHYSICA C 468 1534-1536	有	2008
12	Y.Sutoh et al.	フジクラ他	Formation of CeO2 buffer layer using multi-plume PLD	PHYSICA C 468 1594-1596	有	2008
13	K.Suzuki et al.	ISTEC他	Development of scribing process of coated conductors for reduction of AC losses	PHYSICA C 468 1579-1582	有	2008
14	K.Tada et al.	九州大学他	Growth process of Ba-poor YBCO film fabricated by TFA-MOD process	PHYSICA C 468 1554-1558	有	2008
15	J.Yoshida et al.	九州大学他	Effect of calcination conditions on microstructures and J(c) of YBCO films fabricated by TFA-MOD	PHYSICA C 468 1550-1553	有	2008
16	M.Yoshizumi et al.	ISTEC他	Crystal growth of YBCO coated conductors by TFA-MOD method	PHYSICA C 468 1531-1533	有	2008
17	Tsunehiro Hato et al.	ISTEC	NDE of coated-conductor using HTS SQUID array	Physica C 469 1630-1633	有	2009
18	Noriko Chikumoto et al.	ISTEC	Development of inside-plume PLD process for the fabrication of large Ic(B) REBCO tapes	Physica C 469 1303-1306	有	2009
19	町 敬人	ISTEC	Nd1+xBa2Cu3O7+δ 単結晶試料のピン止め特性の向	低温工学 44 594-59	有	2009
20	F.Matsutani et al.	九州工業大他	Superconducting Layer Thickness Dependence of Relaxation properties of Persistent Current in High Magnetic Field in YBCO-Coated	Physica C 469 1122-1125	有	2009
21	K.Abiru et al.	九州大学他	Visualization of non-uniform current flow in coated conductors by scanning Hall-probe magnetic microscopy	PHYSICA C 469 1450-1453	有	2009

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名 ページ番号	査読	発表年
22	K.Higashikawa et al.	九州大学他	Coupled Analysis Method for High-Field Magnet Coil Using Coated Conductor Based on J-E Characteristics as a Function of Temperature, Magnetic Field Vector and	IEEE T APPL SUPERCON 19 1621-1625	有	2009
23	K.Higashikawa et al.	九州大学他	Significant reduction in volume, stored energy and magnetization loss of high-field magnet coil based on the improvement of critical current characteristics in GdBCO coated	PHYSICA C 469 1776-1780	有	2009
24	H. Ichikawa et al.	ISTEC他	High speed production of YBCO precursor films by advanced TFA-MOD	PHYSICA C 469 1329-1331	有	2009
25	M. Inoue et al.	九州大学他	Observation of Current Distribution in High-T _c Superconducting Tape Using Scanning Hall-Probe Microscope	IEEE T APPL SUPERCON 19 2847-2850	有	2009
26	M. Inoue et al.	九州大学他	Critical current property in YBCO coated conductor fabricated by improved TFA-MOD	PHYSICA C 1443-1445	有	2009
27	T. Izumi et al.	ISTEC他	Present status and strategy of reel-to-reel TFA-MOD process for coated conductors	PHYSICA C 469 1322-1325	有	2009
28	T. Izumi et al.	ISTEC他	Development of TFA-MOD Process for Coated Conductors in Japan	IEEE T APPL SUPERCON 19 3119-3122	有	2009
29	M. Miura et al.	ISTEC他	Rare Earth Substitution Effects and Magnetic Field Dependence of Critical Current in Y _{1-x} RE _x Ba ₂ Cu ₃ O _{7-y} Coated Conductors with Nanoparticles (RE = Sm, Gd)	APPL PHYS EXPRESS 2	有	2009
30	M. Miura et al.	ISTEC他	Magnetic Field Dependence of Critical Current and Microstructure in TFA-MOD Y _{1-x} Sm _x Ba ₂ Cu ₃ O _{7-y} With Nanoparticles for Coated Conductors	IEEE T APPL SUPERCON 19 3275-3278	有	2009
31	Miura, M	ISTEC他	Development of multi-turn reel-to-reel crystallization large furnace for high production rate of YBa ₂ Cu ₃ O _{7-y} coated conductors derived from TFA-MOD process	PHYSICA C 469 1336-1340	有	2009

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名 ページ番号	査読	発表年
32	Y. Miyanaga et al.	九州大学他	Effects of Sn-doping on J(C)-B properties and crystalline structure for YBCO films by advanced TFA-MOD method	PHYSICA C 469 1418-1421	有	2009
33	K. Nakaoka et al.	ISTEC他	Investigation on starting solution of TFA-MOD process for high-speed production of YBCO coated	PHYSICA C 469 1326-1328	有	2009
34	K. Osamura et al.	京都大学他	Reversible strain limit of critical currents and universality of intrinsic strain effect for REBCO-coated conductors	SUPERCOND SCI TECH 22	有	2009
35	M. Sugimoto et al.	九州大学他	Electrodeposition of textured nickel on nickel alloy Hastelloy	PHYSICA C 469 1371-1373	有	2009
36	Y. Sutoh et al.	ISTEC他	Fabrication of high I-c film for GdBCO coated conductor by continuous in-plume PLD	PHYSICA C 469 1307-1310	有	2009
37	T. Takao et al.	上智大学他	Degradation Due to Bending Fatigue Strain in YBCO Coated Conductors	IEEE T APPL SUPERCON 19 2988-2990	有	2009
38	R. Teranishi et al.	九州大学他	Crystal Growth of Ba Concentration Controlled YBCO Films by TFA-MOD Process	IEEE T APPL SUPERCON 19 3200-3203	有	2009
39	R. Teranishi et al.	九州大学他	J(C) properties and microstructures of YBCO films fabricated by low temperature calcination in TFA-MOD method	PHYSICA C 469 1332-1335	有	2009
40	R. Teranishi et al.	九州大学他	Dependence of microstructures on growth rate in YBCO films by TFA-MOD method	PHYSICA C 469 1349-1352	有	2009
41	R. Teranishi et al.	九州大学他	High-J(c) YBCO films using precursors with barium concentration gradient in film thickness by TFA-MOD process	PHYSICA C 469 1345-1348	有	2009
42	Y. Yamada et al.	ISTEC他	Long IBAD-MgO and PLD coated conductor	PHYSICA C 469 1298-1302	有	2009
43	Y. Yamada et al.	ISTEC他	Development of Long Length IBAD-MgO and PLD Coated Conductors	IEEE T APPL SUPERCON 19 3236-3239	有	2009
44	M. Yoshizumi et al.	ISTEC他	High production rate of IBAD-MgO buffered substrate	PHYSICA C 469 1361-1363	有	2009
45	M. Iwakuma et al.	九州大学他	Unique behaviour of RE1Ba2Cu3O7- δ superconducting tapes producing drastic reduction of pinning loss	Superconductor Science and Technology Vol.23 075009-1- 12	有	2010

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名 ページ番号	査読	発表年
46	F. Matsutani et al.	九州工業大他	Influence of Nano-particles on FluxPinning Properties in TFA-MOD Processed YGdBCO Coated	Physica C	有	2010
47	S. Awaji	東北大	Flux pinning properties of TFA-MOD (Y, Gd)Ba ₂ Cu _{30x} tapes with BaZrO ₃ nanoparticles	Superconductor Science and Technology 23 014006-1-5	有	2010
48	Koichi Nakaoka他	ISTEC	Relationship Between Crystallization Process and Superconducting Properties of YBCO Films by TFA-MOD Method using Staring Solutions with Various	Physica C	有	投稿中
49	Teruo Izumi et al.	ISTEC	R&D of Coated Conductors for Power Applications in Japan	Physica C	有	投稿中
50	Seiji Adachi et al.	ISTEC	Improved reproducible fabrication process of HTS-SQUIDs with ramp-edge Josephson junctions and multilayer structures	Physica C	有	投稿中
51	宮田 成紀他	ISTEC	人工ピン導入GdBa ₂ Cu _{307-δ} 超電導薄膜における磁場中J _c の増加的膜厚依存	低温工学	有	投稿中
52	筑本 知子他	ISTEC他	Y系テープ線材への高エネルギー重イオン照射によるピン止め中心導入と臨界電流密度特性	低温工学	有	投稿中
53	M. Kitani et al.	九州工業大他	Influence of nanoparticles on critical current properties in TFA-MOD processed YGdBCO coated conductor	EUCAS	有	投稿中
54	Y. Mawatari	産総研	Field distribution in bent superconducting tapes conforming to a cylinder with transport currets	Physical Review B	有	投稿中
55	T. Katase et al.	東工大他	Josephson junction in C-doped BaFe ₂ As ₂ epitaxial film on (La, Sr)(Al, Ta)O ₃	Applid Physics Letters	有	投稿中
56	T. Katase et al.	東工大他	Josephson junction with Fe-based superconductor C-doped BaFe ₂ As ₂ epitaxial film	ASC	有	投稿中
57	Kenji Kaneko et al.	九州大学他	3D analysis of pinning centers gives isotropic superconductivity in GdBa ₂ Cu _{307-δ}	Nature	有	投稿中

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名 ページ番号	査読	発表年
58	T. Yamaguchi et al.	住友電気工業(株)	DEVELOPMENT OF BUFFER LAYER ON 30mm WIDE TEXTURED METAL SUBSTRATES FOR REBCO COATED CONDUCTORS	Physica C	有	投稿中
59	Y. Shingai et al.	住友電気工業(株)	Development of REBa ₂ Cu ₃ O _x superconducting layers on 30mm wide clad-type textured metal	Physica C	有	投稿中

【学会発表】

プロジェクト全般

番号	発表者	所属	タイトル	発表日	発表先
1	塩原 融	ISTEC	超電導材料の進歩	2008/12/13	材料の微細組織と機能性研究会第200回記念公開シンポジウム
2	Noboru Fujiwara et al.	ISTEC他	Development of YBCO Power Devices in Japan	2009/11/2	(ISS2009) International Symposium on Superconductivity
3	Yuh Shiohara	ISTEC	①Long Term Opportunities of HTS Coated Conductor Applications for Reduction of CO2 Emissions ②Future Prospects of R&D of in	2010/2/9	ISIS-18(International Superconductivity Industry Summit)
4	Noboru Fujiwara	ISTEC	Development of YBCO Power DEVICES IN JAPAN	2010/2/10	ISIS-18(International Superconductivity Industry Summit)

1 超電導電力貯蔵システム(SMES)の研究開発

番号	発表者	所属	タイトル	発表日	発表先
1	大村弘輝他	名古屋大学他	極低温環境下における真空／固体複合絶縁系の基礎絶縁特性	2008/9/18	平成20年度電気学会東海支部連合大会
2	K. Kajikawa et al.	九州大学他	Numerical evaluation of AC loss properties in assembled superconductor strips exposed to perpendicular magnetic field	2008/10/27	21th International symposium on superconductivity (ISS2008)
3	M. Kanno et al.	京都大学他	Reversible strain effect on critical current at various temperatures in YBCO coated conductors	2008/10/27	21th International symposium on superconductivity (ISS2008)
4	Y. Yoshida et al.	京都大学他	Change in fatigue properties and its relation to critical current for YBCO coated conductor with additional Cu layer	2008/10/27	21th International symposium on superconductivity (ISS2008)
5	菅野未知央他	京都大学他	Cu複合化YBCO線材の疲労サイクル負荷による破壊挙動と臨界電流の変化	2008/11/12	2008年度秋季低温工学・超電導学会
6	柁川一弘他	九州大学他	等間隔に配置したcoated conductor の垂直磁界損失特性	2008/11/12	2008年度秋季低温工学・超電導学会
7	柁川一弘他	九州大学他	積層した超伝導ストリップの垂直磁界損失特性	2008/11/29	2008年秋季応用物理学会学術講演会
8	早川直樹他	名古屋大学他	伝導冷却SMESコイルモデルの真空／固体複合絶縁系における電気絶縁特性	2009/3/17	平成21年度電気学会全国大会
9	青木 佳明他	早稲田大学他	高温超電導線材の疲労特性評価試験装置	2009/5/13	2009年度春季低温工学・超電導学会
10	柁川一弘他	九州大学他	SMESの充放電動作を模擬したパンケーキコイル巻線の交流損失評価	2009/5/13	2009年度春季低温工学・超電導学会

番号	発表者	所属	タイトル	発表日	発表先
11	植田 浩史他	早稲田大学 他	コイル巻線化されたYBCO集合化導体の常電導伝播特性解析	2009/5/13	2009年度春季低温工学・超電導学会
12	井口 靖明他	鹿児島大学 他	YBCO積層導体の結合損失特性	2009/5/13	2009年度春季低温工学・超電導学会
13	菅野未知央他	京都大学他	Y系線材のI _c -ひずみ曲線におけるピークひずみと熱残留ひずみの関係	2009/5/13	2009年度春季低温工学・超電導学会
14	三戸 利行他	NIFS他	超電導コイルの高効率伝導冷却技術の開発	2009/5/13	2009年度春季低温工学・超電導学会
15	柁川 一弘他	九州大学他	トロイド配置したY系SMES用パンケーキコイルの交流損失評価	2009/6/12	2009年電気学会超電導応用電力機器研究会
16	植田 浩史他	早稲田大学 他	SMES用冷凍機伝導冷却大電流YBCO超電導コイルの安定性と保護	2009/6/12	2009年電気学会超電導応用電力機器研究会
17	北條 正樹他	京都大学他	Fatigue behavior of YBCO coated conductor with Cu layer at 77K	2009/7/27	17th International Conference on Composite Materials
18	菅野未知央他	京都大学他	Y系線材の機械的特性 繰り返し応力による疲労損傷と通電特性への影響	2009/9/13	2009年度東北・北海道支部/材料研究会/金研強磁場センター合同研究会
19	K. Shikimachi et al.	中部電力(株)	Development of SMES Coil Using CVD-YBCO Tape Coated Conductor	2009/9/13	9th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 2009)
20	N. Kashima et al.	中部電力(株) 他	Study of GdBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} and GdxY _{1-x} Ba ₂ Cu ₃ O _{7-δ} coated conductors by Metal Organic Chemical Vapor Deposition	2009/9/13	9th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 2009)
21	高橋 祐治他	九州工業大学 他	CVD法によるYBCOコート線材の磁化緩和特性評価	2009/9/28	平成21年度電気関係学会九州支部連合大会
22	T. Mito et al.	NIFS他	Development of highly effective conduction cooling technology for a superconducting magnet	2009/10/18	21st International Conference on Magnet Technology
23	S. Awaji et al.	東北大学・ 金研他	Upgrading Design to a 24 T cryogen-free superconducting magnet based on Low temperature and high magnetic field properties of the practical CVD processed coated conductors	2009/10/18	21st International Conference on Magnet Technology
24	H. Ueda et al.	早稲田大学 他	Stability and Protection of Coils Wound with YBCO Bundle Conductor	2009/10/18	21st International Conference on Magnet Technology
25	N. Fujiwara et al.	ISTEC他	DEVELOPMENT OF YBCO POWER DEVICES IN JAPAN	2009/11/2	22th International symposium on superconductivity (ISS2009)
26	M. Kanno et al.	京都大学 他	Unique strain effect in YBCO coated conductor under magnetic field	2009/11/2	22th International symposium on superconductivity (ISS2009)
27	Y. Kawai et al.	早稲田大学 他	Determination of Stabilizer Thickness for YBCO Coated Conductors Based on Coil Protection	2009/11/3	22th International symposium on superconductivity (ISS2009)

番号	発表者	所属	タイトル	発表日	発表先
28	M. Kasahara et al.	古河電気工業(株)他	Development of CeO ₂ /IBAD-GZO-based buffer layers for REBCO coated conductors	2009/11/3	22th International symposium on superconductivity (ISS2009)
29	H. Ueda et al.	早稲田大学他	FATIGUE TESTS YBCO COATED CONDUCTORS	2009/11/3	22th International symposium on superconductivity (ISS2009)
30	Y. Takahashi et al.	九州工業大学他	ESTIMATION OF MAGNETIC RELAXATION PROPERTY FOR CVD PROCESSED YBCO COATED CONDUCTORS	2009/11/3	22th International symposium on superconductivity (ISS2009)
31	K. Fukunaga et al.	JFCC他	DIRECT OBSERVATION OF MAGNETIC FLUXES PENETRATING INTO YBCO BY ELECTRON HOLOGRAPHY	2009/11/3	22th International symposium on superconductivity (ISS2009)
32	K. Kajikawa et al.	九州大学他	Numerical and theoretical evaluations of AC losses for single and infinite numbers of superconductor strips with direct and alternating transport currents in external AC	2009/11/3	22th International symposium on superconductivity (ISS2009)
33	O. Tsukamoto et al.	横浜国立大学他	SMES Coil Development Using IBAD/CVD-YBCO Tape	2009/11/16	2009 KEPRI-EPRI Joint Superconductivity Conference
34	高橋 祐治他	九州工業大学他	CVD法によるYGdBCO線材の超電導特性の超電導層厚依存性	2009/11/18	2009年度秋季低温工学・超電導学会
35	淡路 智他	東北大学他	RE123テープによる18T無冷媒超伝導マグネットのアップグレードデザイン	2009/11/18	2009年度秋季低温工学・超電導学会
36	菅野未知央他	京都大学他	4点曲げ試験法によるY系線材のI _c -ひずみの測定	2009/11/19	2009年度秋季低温工学・超電導学会
37	宮里 尚史他	京都大学他	銅複合化YBCO薄膜超伝導線材におけるYBCO/CeO ₂ 界面はく離の破壊力学的検討	2009/11/19	2009年度秋季低温工学・超電導学会
38	三戸 利行他	NIFS他	自励振動式ヒートパイプを用いた超伝導マグネットの高効率冷却技術の開発	2009/11/19	2009年度秋季低温工学・超電導学会
39	夏目 恭平他	総合研究大学院大学他	超伝導マグネット冷却用自励振動式ヒートパイプの低温動作特性	2009/11/19	2009年度秋季低温工学・超電導学会
40	植田 浩史他	早稲田大学他	YBCO超電導コイルの安定性と保護	2009/11/19	2009年度秋季低温工学・超電導学会
41	青木 佳明他	早稲田大学他	銅メッキYBCO超電導線材の疲労特性試験	2009/11/19	2009年度秋季低温工学・超電導学会
42	植田 浩史他	早稲田大学他	トロイダル配置されたY系SMESコイルの保護動作	2009/11/20	2009年度秋季低温工学・超電導学会
43	和泉 辰矢他	九州工業大学他	CVD法によるYGdBCO線材の超伝導特性の超電導層厚依存性	2009/11/21	平成21年度応用物理学会九州学術講演会
44	高橋 祐治他	九州工業大学他	CVD法によるYGdBCO線材の磁化緩和特性の超伝導層厚依存性	2010/3/16	2010年春季応用物理学会
45	桐原 裕紀他	鹿児島大学他	不均一の中でのYBCO積層導体の交流損失特性	2010/5/12	2010年度春季低温工学・超電導学会

番号	発表者	所属	タイトル	発表日	発表先
46	三戸 利行他	NIFS他	超伝導マグネット組込型シート状自励振動式ヒートパイプの開発	2010/5/12	2010年度春季低温工学・超電導学会
47	兒玉 青樹他	九州大学他	CVD法により作製されたREBCO線材の電流輸送特性	2010/5/12	2010年度春季低温工学・超電導学会
48	高橋 祐治他	九州工業大学他	CVD法によるYGdBCO線材の磁化緩和特性の超電導層厚依存性	2010/5/12	2010年度春季低温工学・超電導学会
49	鈴木 貴裕他	早稲田大学他	SMES用伝導冷却Y系超電導モデルコイルの通電・伝熱特性評価	2010/5/12	2010年度春季低温工学・超電導学会
50	夏目 恭平他	総合研究大学院大学他	自励振動式ヒートパイプにおける低温動作特性の設置方向依存性	2010/5/12	2010年度春季低温工学・超電導学会
51	石渡 洋志他	日本大学、 // 大島商船高専、 中部電力(株) //	20Kスターリング型パルス管冷凍機開発を目指した蓄冷材料の検討	2010/5/12	2010年度春季低温工学・超電導学会
52	室町 和輝他	早稲田大学他	SMES用伝導冷却高温超電導コイルのクエンチ保護	2010/5/13	2010年度春季低温工学・超電導学会
53	宮里 尚史他	京都大学他	銅複合化YBCO薄膜超伝導線材のModel型はく離に対する破壊力学的検討	2010/5/21	第59期 日本材料学会学術講演会
54	式町 浩二他	中部電力(株)他	多層巻CVD-YBCOコイルのフープ応力耐性評価	2010/6	東北大学金属材料研究所強磁場超伝導材料研究センター 平成21年度 年次報告
55	石原 亮輔他	東北大学他	MOCVD-YBCOコート線材のJc特性	2010/6	東北大学金属材料研究所強磁場超伝導材料研究センター 平成21年度 年次報告
56	M. Hohjo et al.	京都大学他	Fatigue behavior of YBCO coated high-temperature superconductor with additional Cu layer at 77K	2010/6/6	10th International Fatigue congress
57	千葉 悠太他	東北大学他	ダブルパンケーキコイル用並列多層HTSテープ導体内の電流分布の一様化	2010/6/10	電気学会研究会 超電導応用電力機器研究会
58	井上 真彰他	名古屋大学他	伝導冷却SMESの超電導コイルモデルにおける電気絶縁性能	2010/6/10	電気学会研究会 超電導応用電力機器研究会
59	石山 敦士他	早稲田大学他	SMES用伝導冷却YBCO超電導コイルのクエンチ特性と保護	2010/6/10	電気学会研究会 超電導応用電力機器研究会
60	式町 浩二他	中部電力(株)他	SMES用Y系コイル構成技術の開発	2010/6/10	電気学会研究会 超電導応用電力機器研究会
61	A. Ishiyama et al.	早稲田大学他	Strain and fatigue tests of YBCO coated conductor with copper stabilizer	2010/7/19	ICEC23-ICMC2010
62	K. Hamashima et al.	東北大学他	Analysis of Current Distribution in Multi-laminated HTS Tape Conductor for Double Pancake Coil of SMES	2010/8/1	Applied Superconductivity Conference 2010

番号	発表者	所属	タイトル	発表日	発表先
63	M.Kanno et al.	京都大学他	Influence of thickness of superconducting layer on double peak behavior in strain effect on critical current under magnetic field for YBCO coated	2010/8/1	Applied Superconductivity Conference 2010
64	Y.Aoki et al.	早稲田大学他	Quench Behavior and Protection in Cryocooler-cooled YBCO Pancake Coil for SMES	2010/8/1	Applied Superconductivity Conference 2010
65	K.Shikimachi et al.	中部電力(株)他	Unit coil development for Y-SMES	2010/8/1	Applied Superconductivity Conference 2010

2 超電導電力ケーブルの研究開発

番号	発表者	所属	タイトル	発表日	発表先
1	T. Koizumi et al.	昭和電線ケーブルシステム(株)	Development of the low cost YBCO coated conductor by TFA-MOD process using a batch-type furnace	2008/8/18	Applied Superconductivity Conference 2008
2	M.Yagi et al.	古河電気工業(株)他	Development of YBCO HTS cable with low AC loss and HTS joint with low electrical resistance	2008/8/19	2008 Applied Superconductivity Conference (ASC2008)
3	A. Kaneko et al.	昭和電線ケーブルシステム(株)	Preparation of long TFA-MOD YBCO tapes on CeO ₂ /CZO buffered cube textured Ni-based alloy tapes	2008/8/19	Applied Superconductivity Conference 2008
4	T. Nagaishi et al.	住友電気工業(株)	Development of REBCO coated conductors on textured metal	2008/10/28	(ISS2008) International Symposium on Superconductivity
5	H. Ota et al.	住友電気工業(株)	Development of REBCO coated conductor on low magnetic substrate	2008/10/28	(ISS2008) International Symposium on Superconductivity
6	S. Mukoyama et al.	古河電気工業(株)他	Development of (RE)BCO cables for HTS power transmission lines	2008/10/28	第21回国際超電導シンポジウム
7	Y. Aoki et al.	昭和電線ケーブルシステム(株)	Development of TFA-MOD Process for Long Length RE-123 Conductor in SWCC	2008/10/28	21st International Symposium on Superconductivity
8	A. Kaneko et al.	昭和電線ケーブルシステム(株)	Development of YBCO coated conductors by TFA-MOD process on the MOD buffered layer.	2008/10/28	21st International Symposium on Superconductivity
9	T. Koizumi et al.	昭和電線ケーブルシステム(株)	Development of long length YBCO superconducting tapes by TFA-MOD process using a batch-type furnace	2008/10/28	21st International Symposium on Superconductivity
10	M.Yagi et al.	古河電気工業(株)他	Development of 1 m HTS conductor using YBCO on textured metal substrate	2008/10/29	第21回国際超電導シンポジウム
11	八木 正史他	古河電気工業(株)他	イットリウム系超電導ケーブルとその中間接続部の開発	2008/11/12	2008年度秋季低温工学・超電導学会

番号	発表者	所属	タイトル	発表日	発表先
12	小泉勉他	昭和電線ケーブルシステム(株)	TFA-MOD法による低コストYBCO線材の開発(7) - 500m線材の開発 -	2008/11/12	第79回2008年秋季低温工学・超電導学会
13	S. Mukoyama et al.	古河電気工業(株)他	Current state of Yttrium-based Superconducting Power	2008/12/4	International Workshop on Coated Conductor for Applications (学会発)
14	竹内 活徳他	京都大学他	次世代高温超伝導線材の可撓性を活かした円断面単層導体の通電損失の測定	2009/1/17	電気学会全国大会
15	藤原 昇他	ISTEC他	イットリウム系超電導ケーブルの開発	2009/3/17	電気学会全国大会
16	八木 正史他	古河電気工業(株)他	高温超電導ケーブル用絶縁材料の機械・電気特性評価	2009/3/19	平成21年電気学会全国大会
17	藤原 昇	ISTEC	Y系線材による機器開発-実証期を迎えた単結晶薄膜テープ技術-	2009/3/30	応用物理学会関係連合講演会
18	大屋 正義他	住友電気工業(株)他	66kV級三心一括型薄膜高温超電導電力ケーブルの開発・	2009/5/12	2010年度春季低温工学・超電導学会
19	八木 正史他	古河電気工業(株)他	275kV-3kA YBCO 高温超電導ケーブルの過電流試験	2009/5/12	2010年度春季低温工学・超電導学会
20	市川 裕士他	ISTEC他	液体窒素下における複合電気絶縁材料の特性について	2009/5/13	低温工学会
21	瓜生 季邦他	早稲田大学他	275kV系統YBCO超電導ケーブル定常運転時の伝熱特性	2009/5/13	低温工学
22	王 旭東他	早稲田大学他	66kV系統YBCO超電導ケーブルの過電流通電特性解析	2009/5/13	低温工学
23	大屋 正義他	住友電気工業他	66kV/3kA 級薄膜超電導ケーブルの交流損失特性	2009/5/13	低温工学
24	大屋 正義他	住友電気工業(株)他	66kV/3kA 級薄膜超電導ケーブルの交流損失特性	2009/5/13	2009年度春季低温工学・超電導学会
25	新海 優樹他	住友電気工業(株)	クラッド基板上超電導薄膜の	2009/5/14	2009 年度春季低温工学・超電導学会
26	太田 肇他	住友電気工業(株)	30mm超電導線材の開発	2009/5/15	2009 年度春季低温工学・超電導学会
27	小泉勉他	昭和電線ケーブルシステム(株)	TFA-MOD法による低コストYBCO線材の開発(8) - TFA-MOD長尺テープ線材量産化の検討 -	2009/5/15	第80回2009年春季低温工学・超電導学会
28	藤原 昇他	ISTEC他	イットリウム系超電導電力ケーブル開発の計画と進捗について	2009/6/11	超電導応用電力機器研究会
29	竹内 活徳他	京都大学他	イットリウム系超伝導ケーブルの低交流損失化に向けたアプローチ	2009/6/11	電気学会研究会 超電導応用電力機器研究会
30	王 旭東他	早稲田大学他	275kV級YBCO超電導電力ケーブルを想定して伝熱特性評価	2009/6/11	電気学会研究会 超電導応用電力機器研究会
31	市川 裕士他	ISTEC他	高電圧超電導電力ケーブルの開発について	2009/8/18	電気学会 B部門
32	Hiroshi Ichikawa et al.	ISTEC	Development of YBCO HTS cables	2009/9/13	(EUCAS2009)European Conference for Applied Superconductivity
33	Xudong Wang et al.	早稲田大学他	Numerical Simulation on Fault Condition in 66 kV YBCO Superconducting Power Cable	2009/9/13	(EUCAS2009)European Conference for Applied Superconductivity
34	Shunsuke Sato et al.	早稲田大学他	Thermal Characterization of 275kV class YBCO Power Transmission Cable	2009/9/13	(EUCAS2009)European Conference for Applied Superconductivity

番号	発表者	所属	タイトル	発表日	発表先
35	Masayoshi Ohya et al.	住友電気工業(株)他	AC loss characteristics of 66kV / 3kA class RE-123 superconducting	2009/9/13	(EUCAS2009)European Conference for Applied Superconductivity
36	M. Ohya et al.	住友電気工業(株)他	AC loss characteristics of RE-123 superconducting cable	2009/9/16	EUCAS2009 (9th European Conference on Applied Superconductivity)
37	Xudong Wang et al.	早稲田大学他	Thermal Characteristics of 275 kV/3kA class YBCO Power Cable	2009/10/18	(MT21)21th International Conference on Magnet
38	Katsutoku Takeichi et al.	住友電気工業(株)他	AC Loss Reduction of Superconducting Power Transmission Cables Using Flexibility of Coated Conductors with Textured Metal Substrate	2009/10/18	(MT21)21th International Conference on Magnet Technology
39	M. Konishiet al.	住友電気工業(株)	Critical current and mechanical property of coated conductors with Cu-stabilizing layers	2009/10/22	MT-21(21st International Conference on Magnet Technology)
40	Tadahiko Minamino et al.	住友電気工業他	Design and evaluation of 66kV class RE-123 superconducting cable	2009/11/2	(ISS2009)International Symposium on Superconductivity
41	X. Wang et al.	早稲田大他	Numerical Simulation on Fault Condition in 66 kV Class RE-123 Superconducting Cable	2009/11/2	(ISS2009)International Symposium on Superconductivity
42	H. Kono et al.	早稲田大他	Degradation Characteristics of YBCO coated conductores due to fault-current in power cable applications	2009/11/2	(ISS2009)International Symposium on Superconductivity
43	S. Sato et al.	早稲田大他	Computer Simulation of fault current characteristics in 275 kV class YBCO power	2009/11/2	(ISS2009)International Symposium on Superconductivity
44	S. Mukoyama et al.	古河電気工業(株)他	Conceptual design of 275 kV class High-TC superconducting cable	2009/11/2	(ISS2009)International Symposium on Superconductivity
45	T. Minamino et al.	住友電気工業(株)	Design and evaluation of 66kV class RE-123 superconducting cable	2009/11/3	ISS2009 (International Symposium on Superconductivity)
46	M. Kasahara et al.	古河電気工業(株)他	Development of CeO ₂ /IBAD-GZO-based buffer layers for REBCO coated conductors	2009/11/3	(ISS2009)International Symposium on Superconductivity
47	T. Koizumi他	昭和電線ケーブルシステム(株)	Investigation of mass production of YBCO coated conductors using TFA-MOD process	2009/11/3	21st International Symposium on Superconductivity
48	新井 道夫他	早稲田大他	YBCO超電導線材の過電流パルス通電による特性劣化試験	2009/11/18	低温工学秋季大会
49	瓜生 季邦他	早稲田大他	66kV系統高温超電導ケーブルの過電流通電特性評価	2009/11/18	低温工学秋季大会
50	百足 弘史他	早稲田大他	YBCO超電導線材の交流過電流通電特性	2009/11/18	低温工学秋季大会
51	王 旭東他	早稲田大他	275kV 系統YBCO超電導ケーブルの過電流通電特性解析	2009/11/18	低温工学秋季大会
52	八木 正史他	古河電気工業(株)他	275kV-3kA YBCO 高温超電導ケーブルの開発	2009/11/18	2009年度秋季低温工学・超電導学会

番号	発表者	所属	タイトル	発表日	発表先
53	小泉勉他	昭和電線ケーブルシステム(株)	TFA-MOD法による低コストYBCO線材の開発(9) - TFA-MODYBCO線在量産プロセスにおける歩留向上の検討 -	2009/11/19	第81回2009年秋季低温工学・超電導学会
54	Noboru Fujiwara et al.	ISTEC他	Development of REBCO HTS cables in Japan	2009/11/22	CCA2009(International Workshop on Coated Conductor for Application)
55	K. Hayashi et al.	住友電気工業(株)	Development of GdBCO Coated Conductor on 30mm Wide Clad-Type Textured Metal Substrates	2009/11/23	CCA2009
56	Noboru Fujiwara et al.	ISTEC他	Development of 66kV-5kA HTS cable using REBCO wires	2009/12/6	ACASC2009(Asian Conference on Applied Superconductivity and Cryogenics)
57	Hiroshi Ichikawa et al.	ISTEC他	Development of 275kV-3kA HTS cable using REBCO wires	2009/12/6	ACASC2009(Asian Conference on Applied Superconductivity and Cryogenics)
58	M. Ohya et al.	住友電気工業(株)他	AC loss in HTS power cable using REBCO wires	2009/12/6	ACASC2009(Asian Conference on Applied Superconductivity and Cryogenics)
59	王 旭東他	早稲田大他	275kV系統YBCO超電導ケーブルの過電流通電特性	2010/1/25	超電導応用電力機器研究会
60	向山 晋一他	古河電気工業(株)他	275kV級高温超電導ケーブルの開発	2010/1/25	電気学会 超電導応用電力機器研究会
61	藤原 昇他	ISTEC他	275kV-3kA 高温超電導電力ケーブルの交流損失評価	2010/3/17	電気学会 全国大会
62	市川 裕士他	ISTEC他	275kV-3kA高温超電導電力ケーブル用絶縁材料の特性	2010/3/17	電気学会 全国大会
63	児島 健太郎他	早稲田大他	YBCO超電導線材の交流過電流通電特性	2010/3/17	電気学会
64	金光 雅也他	早稲田大他	YBCO超電導線材の過電流パルス通電による特性劣化評価	2010/3/17	電気学会全国大会
65	鶴飼 泰之他	名古屋大他	高温超電導ケーブルにおける部分放電開始電界の絶縁材料依存性	2010/3/17	平成22年電気学会全国大会
66	大屋 正義他	住友電気工業(株)他	66kV 級三心一括型薄膜高温超電導電力ケーブルの開	2010/3/17	電気学会全国大会
67	八木 正史他	古河電気工業(株)他	275kV-3kA YBCO高温超電導ケーブルの過電流試験	2010/4/7	第82回2010年度春季低温工学・超電導学会 講演概要集
68	M. Yagi et al.	古河電気工業(株)他	Development of 275kV-3kA YBCO HTS cable	2010/4/15	2010 Korea-Japan Superconductivity Workshop
69	王 旭東他	早稲田大他	YBCO超電導線材の過電流パルス通電による特性劣化試験	2010/5/12	2010年度春季低温工学・超伝導学会
70	王 旭東他	早稲田大他	66kV系統REBCO超電導モデルケーブルの過電流通電特性	2010/5/12	2010年度春季低温工学・超伝導学会
71	神谷 侑司他	早稲田大他	275kV系統YBCO超電導ケーブルの過電流通電特性	2010/5/12	2010年度春季低温工学・超伝導学会
72	児島 健太郎他	早稲田大他	REBCO超電導線材の交流過電流通電特性	2010/5/12	2010年度春季低温工学・超伝導学会
73	大屋 正義他	住友電気工業(株)他	66kV 級三心一括型薄膜高温超電導電力ケーブルの開	2010/5/12	2010年春季低温工学超伝導学会
74	新海 優樹他	住友電気工業(株)	大電流ケーブル用薄膜超電導線材の素線化プロセスの開	2010/5/12	2010年度春季低温工学・超電導学会

番号	発表者	所属	タイトル	発表日	発表先
75	阿比留 健志 他	住友電気工 業(株)	幅広PLDプロセスによる大 電流ケーブル用GdBCO線材の開	2010/5/12	2010年度春季低温工学・ 超電導学会
76	小泉勉他	昭和電線ケ ブルシステム(株)	TFA-MOD法による低コスト YBCO線材の開発(10) ーTFA-MOD YBCO線材量産化 の進捗ー	2010/5/23	第82回2010年春季低温工 学・超電導学会
77	藤原 昇他	ISTEC他	イットリウム系超電導電力 ケーブル開発の進捗状況	2010/6/10	電気学会研究会 超電導 応用電力機器研究会 (超 電導応用ならびに材料関 連技術)
78	王 旭東他	早稲田大他	66kV系統REBCO超電導モデ ルケーブルの過電流通電特性	2010/6/10	超電導応用機器研究会
79	王 旭東他	早稲田大他	REBCO超電導線材の交流過 電流通電特性	2010/6/10	超電導応用機器研究会
80	A. Ishiyama et al.	早稲田大他	Degradation of YBCO coated conductors due to over-current pulse drive	2010/7/19	ICEC23-ICMC2010
81	H. Momotari et al.	早稲田大他	Over-current Characteristics of YBCO coated conductors for Power Application	2010/7/19	ICEC23-ICMC2010
82	X. Wang et al.	早稲田大他	Over-current characteristics of 66 kV RE123 HTS power cable	2010/8/1	(ASC2010) Applied Superconductivity Conference
83	H. Momotari et al.	早稲田大他	Over-current characteristics of YBCO Coated Conductors	2010/8/1	(ASC2010) Applied Superconductivity Conference
84	M. Arai et al.	早稲田大他	Degradation of YBCO Coated Conductors due to over-current pulse drive	2010/8/1	(ASC2010) Applied Superconductivity Conference
85	T. Uryu et al.	早稲田大他	Over-current characteristics of a 275kV class YBCO Power Cable	2010/8/1	(ASC2010) Applied Superconductivity Conference
86	M. Ohya et al.	住友電気工 業(株)他	Design and evaluation of 66kV class HTS power cable using REBCO wires	2010/8/2	(ASC2009) Applied Superconductivity Conference
87	八木 正史他	古河電気工 業(株)他	275kV-3kA 高温超電導 ケーブルの電気材料評価	2010/9/1	平成22年電気学会電力・ エネルギー部門大会
88	大松 一也	住友電気工 業(株)	PLD法によるケーブル用Y系 超電導線材の長尺開発	2010/12/8	電気材料技術懇談会
89	S. Hanyu et. al	(株)フジクラ	IBAD-MgO BUFFER LAYERS FOR COATED CONDUCTORS IN THE LARGE-SCALE SYSTEM	2008. 10. 28	ISS2008
90	羽生智 et al.	(株)フジクラ	大型IBAD装置によるIBAD- MgOの検討	2008. 11. 12	2008年度秋季低温工学
91	Y. Iijima et. al	(株)フジクラ	Development of IBAD process for RE-123 Coated Conductors	2008. 12. 2	MRS2008
92	羽生智 et al.	(株)フジクラ	大型IBAD装置による500m級 長尺中間層の作製と高速化	2008. 5. 27	2008年度春季低温工学
93	S. Hanyu et al.	(株)フジクラ	LONG-LENGTH IBAD-MgO BUFFER LAYERS FOR HIGH- PERFORMANCE RE123 COATED CONDUCTORS BY A LARGE ION BEAM SOURCE	2009. 11. 3	ISS2009
94	S. Hanyu et al.	(株)フジクラ	HIGH - PERFORMANCE 2G WIRE BY PRODUCTIVE IBAD/PLD SCHEME	2009. 12. 16	US-Japan Workshop2009

番号	発表者	所属	タイトル	発表日	発表先
95	羽生智他	(株)フジクラ	大型アシストイオンビームを用いた長尺IBAD-MgO線材の高速成膜	2009.5.15	2009年度春季低温工学
96	飯島康裕他	(株)フジクラ	イオンビーム照射による高効率組織制御	2009.6.24	未踏科学技術協会第72回ワークショップ
97	S. Hanyu et. al	(株)フジクラ	Km-length IBAD-MgO fabricated at 1 km/h by a large scale IBAD system in fujikura	2009.9.11	M2S

3 超電導変圧器の研究開発

番号	発表者	所属	タイトル	発表日	発表先
1	Y. Iijima	(株)フジクラ	Advances in High-Tc Superconductivity Materials for Wire Applications	2008/7/8	WAC2008
2	S. Hanyu et. al	(株)フジクラ	Progress in scale-up of RE-123 conductors with I_c of 300A/cm by IBAD/PLD process	2008/8/20	ASC2008
3	H. Kutami et. al	(株)フジクラ	THE PROGRESS IN RESEARCH AND DEVELOPMENT OF LONG LENGTH COATED CONDUCTORS IN FUJIKURA	2008/10/28	ISS2008
4	M. Igarashi et. al	(株)フジクラ	FABRICATION OF CeO ₂ AND GdBCO LAYERS WITH PLD TECHNIQUE AT EXTRAORDINARY HIGH RATE	2008/10/28	ISS2008
5	K. Kakimoto et. al	(株)フジクラ	INCREASE OF PRODUCTION RATE OF RE123 FILM BY PLD SYSTEM WITH THE HOT WALL TYPE HEATING	2008/10/28	ISS2008
6	H. Okamoto他	九州電力(株)他	Development of 1kA class HTS coil for superconducting power transformers	2008/11/3	(ISS2008) International Symposium on Superconductivity
7	五十嵐光則他	(株)フジクラ	PLD法によるGdBCO線材の高速成膜	2008/11/12	2008年度秋季低温工学
8	柿本一臣 他	(株)フジクラ	ホットウォール加熱型PLD装置によるGd123厚膜化	2008/11/12	2008年度秋季低温工学
9	花田康 他	(株)フジクラ	IBAD-MgO上での中間層の作製	2008/11/12	2008年度秋季低温工学
10	中西達尚他	昭和電線ケーブルシステム(株)	RF-Sputtering法によるRe-123系線材用CeO ₂ 中間層の開発	2008/11/12	第79回2008年秋季低温工学・超電導学会
11	兼子敦他	昭和電線ケーブルシステム(株)	TFA-MOD法により作製したREBCO線材の磁場特性	2008/11/12	第79回2008年秋季低温工学・超電導学会
12	岡元 洋他	九州電力(株)他	イットリウム系超電導変圧器の巻線技術開発	2009/5/13	2009年度春季低温工学・超電導学会
13	柿本一臣他	(株)フジクラ	ホットウォール加熱式PLD装置による高特性RE123膜の高速成膜	2009/5/14	2009年度春季低温工学
14	須藤泰範他	(株)フジクラ	IBAD 中間層構造における中間層高速成膜検討	2009/5/14	2009年度春季低温工学
15	五十嵐光則他	(株)フジクラ	IBAD-MgO基板を用いた長尺GdBCO線材の開発	2009/5/15	2009年度春季低温工学

番号	発表者	所属	タイトル	発表日	発表先
16	中西達尚他	昭和電線ケーブルシステム(株)	RF-Sputtering法によるRe-123系線材用CeO ₂ 中間層の開発(2)	2009/5/15	第80回2009年春季低温工学・超電導学会
17	朽網寛他	(株)フジクラ	Y系超電導線材の高性能化とスループット向上	2009/6/11	2009年度電気学会超電導応用器機研究会
18	S. Yoshida他	大陽日酸(株)他	NEW DESIGN OF NEON REFRIGERRATOR FOR HTS POWER MACHINES	2009/6/30	(CEC/ICMC)Cryogenic Engineering Conference/International Cryogenic Materials Conference
19	H. Hirai他	大陽日酸(株)他	DEVELOPMENT OF A NEON CRYOGENIC TURBO-EXPANDER WITH MAGNETIC BEARINGS	2009/6/30	(CEC/ICMC)Cryogenic Engineering Conference/International Cryogenic Materials Conference
20	K. Kakimoto et. al	(株)フジクラ	Preparation of RE123 film with large current capacity by hot-wall type PLD system	2009/9/11	M2S
21	飯島康裕他	(株)フジクラ	IBAD法及びHotWall-PLD法によるY123線材の量産化開	2009/9/14	低温工学材料研究会東北支部
22	K. Kakimoto et. al	(株)フジクラ	Remarkable progress in fabricating RE123 coated conductors by IBAD/PLD technique at Fujikura	2009/9/14	EUCAS2009
23	羽生智 他	(株)フジクラ	Long-length IBAD-MgO buffer layers for high-performance RE123 coated conductors by a large scale IBAD system at fujikura	2009/9/16	EUCAS2009
24	乙成 貴明他	九大他	限流機能付きY系小型超電導変圧器の試作	2009/9/28	電気学会九州支部
25	高山 洸他	九大他	超電導並列導体をコイル状に巻いた際の電流分流特性	2009/9/28	電気学会九州支部
26	渋田 寛他	九大他	超伝導二本転位並列導体の巻き乱れが付加的交流損失に及ぼす影響	2009/9/28	電気学会九州支部
27	Y. Iijima et al.	(株)フジクラ	HIGH THROUGHPUT COATED CONDUCTOR PROCESSING BY LARGE-SCALE IBAD AND HOT-WALL PLD	2009/11/3	ISS2009
28	M. Igarashi et al.	(株)フジクラ	HIGH - SPEED DEPOSITION OF RE123 FILM WITH LARGE CURRENT CAPACITY BY HOT-WALL TYPE PLD SYSTEM	2009/11/3	ISS2009
29	T. Nakanishi et al.	昭和電線ケーブルシステム(株)	Development of CeO ₂ buffer layer for coated conductors by RF-Sputtering	2009/11/3	21st International Symposium on Superconductivity
30	H. Okamoto他	九州電力(株)他	Stabilizing layer characteristics of Y-based coated conductors for superconducting power transformers	2009/11/3	(ISS2009) International Symposium on Superconductivity
31	乙成 貴明他	九大他	限流機能付きY系小型超電導変圧器の設計・試作と特性評価(1)-設計・試作-	2009/11/18	2009年度秋季低温工学・超電導学会
32	緒方 俊之他	九大他	限流機能付きY系小型超電導変圧器の設計・試作と特性評価(2)-特性評価-	2009/11/18	2009年度秋季低温工学・超電導学会

番号	発表者	所属	タイトル	発表日	発表先
33	高山 洸他	九大他	超電導並列導体をパンケーキコイルに巻いた際の電流分流特性	2009/11/18	2009年度秋季低温工学・超電導学会
34	渋田 寛他	九大他	超電導二本転位並列導体の巻き乱れが付加的交流損失に及ぼす影響	2009/11/18	2009年度秋季低温工学・超電導学会
35	中西達尚他	昭和電線ケーブルシステム(株)	RF-Sputtering法によるRE-123系線材用CeO ₂ 中間層の開発 (3) -IBAD-MgO基板上のCeO ₂ 中間層の成膜-	2009/11/18	第81回2009年秋季低温工学・超電導学会
36	柿本一臣他	(株)フジクラ	IBAD-MgO 基板を用いたPLD法によるRE123 線材作製	2009/11/19	2009年度秋季低温工学・超電導学会
37	岡元 洋他	九州電力(株)他	イットリウム系超電導変圧器の巻線技術開発(2)-過電流と曲げ特性-	2009/11/19	2009年度秋季低温工学・超電導学会
38	中山 祐輔他	九工大他	積層したGdBCOコート線材における磁化損失の評価	2009/11/19	2009年度秋季低温工学・超電導学会
39	乙成 貴明他	九大他	限流機能機Y系小型超電導変圧器の過大電流に対する応答特性の研究(2)-解析-	2010/1/13	平成22年電気学会全国大会
40	吉田 茂	大陽日酸(株)	高温超電導変圧器用プレートン冷凍機の開発	2010/3/2	超伝導科学技術研究会ワークショップ
41	高山 洸他	九大他	超電導並列導体をコイル状に巻いた際の電流分流特性	2010/3/17	平成22年電気学会全国大会
42	緒方 俊之他	九大他	限流機能付きY系小型超電導変圧器の過大電流に対する応答特性の研究(1)設計・試作および特性評価	2010/3/17	平成22年電気学会全国大会
43	岡元 洋他	九州電力(株)	超電導変圧器巻線技術開発	2010/3/19	電気学会全国大会
44	R. Kikutake et al.	(株)フジクラ	High-performance 2G wire by IBAD/PLD process	2010/4/5	Korea-Japan Workshop2010
45	Y. Aoki	昭和電線ケーブルシステム(株)	Development of Coated Conductor Using TFA-MOD Method	2010/4/15	2010韓日超電導ワークショップ
46	内藤 智之他	岩手大他	YBCO薄膜線材の熱伝導率	2010/5/12	2010年春季低温工学・超電導学会
47	渋田 寛他	九州大学他	超伝導二本転位並列導体の巻き乱れによる付加的交流損失に関する検討	2010/5/12	2010年度春季低温工学・超電導学会
48	高山 洸他	九州大学他	YBCO超伝導並列導体をパンケーキコイルに巻いた際の電流分流特性	2010/5/12	2010年度春季低温工学・超電導学会
49	緒方 俊之他	九州大学他	限流機能付きY系小型超電導変圧器の短絡電流に対する応答特性の研究(1)-実験	2010/5/12	2010年度春季低温工学・超電導学会
50	乙成 貴明他	九州大学他	限流機能付きY系小型超電導変圧器の短絡電流に対する応答特性の研究(1)-数値解析-	2010/5/12	2010年度春季低温工学・超電導学会
51	岡元 洋他	九州電力(株)他	イットリウム系超電導変圧器の巻線技術開発(3)-細線化線材の過電流特性-	2010/5/12	2010年度春季低温工学・超電導学会
52	五十嵐 光則他	(株)フジクラ	RE123長尺線材の臨界電流特性と製造歩留まりの向上	2010/5/13	2010年度春季低温工学

番号	発表者	所属	タイトル	発表日	発表先
53	中西達尚他	昭和電線ケーブルシステム(株)	RF-Sputter法によるRe-123系線材用CeO2中間層の開発(4) ー量産検討とIBAD-MgO基板上の成膜検討ー	2010/5/23	第82回2010年春季低温工学・超電導学会
54	林秀美他	九州電力(株)他	Y系超電導変圧器の巻線技術の開発	2010/6/12	電気学会超電導応用電力機器研究会
55	Nara N. 他	大陽日酸(株)他	Development of neon refrigerator for HTS power machines	2010/7/21	International Cryogenic Engineering Conference 23
56	Hirai H. 他	大陽日酸(株)他	Development of a neon turbo-compressor with active magnetic bearings	2010/7/21	International Cryogenic Engineering Conference 23
57	Yoshihiro Goshō 他	ISTEC他	Application of IBAD-MgO buffered coated conductors for HTS power transformers	2010/8/1	(ASC2010) Applied Superconductivity Conference
58	H. Fujishiro 他	岩手大他	Thermal conductivity of YBCO coated conductors reinforced by metal tape	2010/8/1	(ASC2010) Applied Superconductivity Conference

4 超電導機器用線材の技術開発

番号	発表者	所属	タイトル	発表日	発表先
1	木内 勝他	九州工業大学他	GdBCO+ZrO ₂ コート線材の臨界電流密度の印加磁界角度依存性	2008/5/26	第78回低温工学・超電導学会
2	松谷 文也他	九州工業大学他	YBCOコート線材における永久電流の緩和特性の超伝導膜厚依存性	2008/5/27	第78回低温工学・超電導学会
3	姫木携造他	九州工業大学他	CVD法によるYBCO線材の臨界電流特性の超伝導層厚依存性	2008/5/27	第78回低温工学・超電導学会
4	姫木携造他	九州工業大学他	広い電界領域におけるCVD法によるYBCO線材の超伝導特性の超伝導層厚依存性	2008/9/4	第69回応用物理学会
5	松谷 文也他	九州工業大学他	YBCOコート線材における永久電流の緩和特性の超伝導膜厚依存性	2008/9/4	第69回応用物理学会
6	Seiji Adachi et al.	ISTEC	Fabrication of HTS-SQUID with ramp-edge Josephson junctions comprising SmBCO sputtered films for superconducting electrodes	2008/10/27	(ISS2008) International Symposium on Superconductivity
7	Tsunehiro Hato et al.	ISTEC	NDE of coated-conductor using HTS SQUID array	2008/10/27	(ISS2008) International Symposium on Superconductivity
8	Noriko Chikumoto et al.	ISTEC	Development of inside-plume PLD process for the fabrication of large I _c (B) REBCO tapes	2008/10/27	(ISS2008) International Symposium on Superconductivity
9	F. Matsutani et al.	九州工業大学他	Superconducting Layer Thickness Dependence of Relaxation Properties of Persistent Current in High Magnetic Field in YBCO Coated Conductor	2008/10/28	21st Int. Symp. on Supercond.

番号	発表者	所属	タイトル	発表日	発表先
10	K.Himeki et al.	九州工業大学他	Dependence of Superconducting Layer Thickness on Critical Current Density of IBAD/CVD Processed YBCO Coated Conductors	2008/10/28	21st Int. Symp. on Supercond.
11	H. Washimi et al.	ISTEC	Study on low resistance joining of YBCO coated conductor by Ag diffusion coupling	2008/10/29	(ISS2008) International Symposium on Superconductivity
12	筑本 知子他	ISTEC	In-plume PLD法による高Ic-GdBCO長尺線材の高速成	2008/11/12	第79回秋季低温工学・超電導学会
13	町 敬人他	ISTEC	レーザースクライビング法の改良による超電導線材の細線化	2008/11/12	第79回秋季低温工学・超電導学会
14	姫木携造他	九州工業大学他	CVD法によるYBCO線材の超電導特性の超電導層厚依存性(2)	2008/11/12	第79回低温工学・超電導学会
15	淡路 智	東北大	MOD法によるZr添加RE123膜におけるJc及びBi特性	2008/11/12	2008年秋期低温工学・超電導学会
16	Noriko Chikumoto et al.	ISTEC	Development of high rate deposition technique for PLD-GdBCO Coated Conductors	2008/12/4	CCA2008
17	Yutaka Yamada et al.	ISTEC	Strategy Toward Low Cost Coated Conductor in IBAD-MgO and PLD Method	2008/12/4	(CCA2008) The Workshop on Coated Conductor for Application
18	Teruo Izumi et al.	ISTEC他	Efforts for Long Length Coated Conductors with High Performance by TFA-MOD Process in Japan	2008/12/4	(CCA2008) The Workshop on Coated Conductor for Application
19	Teruo Izumi et al.	ISTEC	Efforts for Lowering Cost of TFA-MOD Coated Conductors in Japan	2008/12/4	(CCA2008) The Workshop on Coated Conductor for Application
20	Koichi Nakao et al.	ISTEC	Nondestructive characterization of critical current distribution across the width of coated conductor tapes	2008/12/4	CCA2008
21	Masashi Miura et al.	ISTEC他	Isotropic magnetic field angular dependence of critical current of nanoparticles dispersed Y1-xRExBa2Cu3Oy coated conductors	2008/12/5	(CCA2008) The Workshop on Coated Conductor for Application
22	Hiroyuki Fukushima et al.	ISTEC他	Rapid Fabrication of IBAD-MgO and LaMnO3 layers for REBCO Coated Conductor	2008/12/5	(CCA2008) The Workshop on Coated Conductor for Application
23	Keiichi Tanabe et al.	ISTEC	Striation and diffusion joint for coated conductor	2008/12/6	(CCA2008) International Workshop on Coated Conductor for
24	Hiroshi Ichikawa et al.	ISTEC他	Improvement of Production Rate by Modified TFA-MOD	2008/12/6	(CCA2008) The Workshop on Coated Conductor for Application
25	町 敬人	ISTEC	Progress of coated conductors	2009/1/16	金属学会材質研究会

番号	発表者	所属	タイトル	発表日	発表先
26	安達 成司他	ISTEC	薄膜積層構造を有するHTS-SQUIDの作製とYBCO系長尺線材評価への応用	2009/1/29	電子情報通信学会 超伝導エレクトロニクス研究会
27	筑本 知子	ISTEC	鉄系高温超伝導体の材料物質としてみた資質	2009/3/11	未踏科学技術超伝導科学技術研究会第71回ワークショップ
28	波頭 経裕他	ISTEC	高温超伝導SQUIDアレーを用いたY系テープ線材の高速欠陥評価	2009/3/30	応用物理学学術講演会
29	筑本 知子他	ISTEC	PLD-GdBCO線材の臨界電流及び磁束クリーブ特性に対するBaZrO3添加効果	2009/3/30	2009年春季応用物理学学会学術講演会
30	淡路 智	東北大	MOD法によるRE123テープ線材のJc特性	2009/4/1	2009年春季応用物理学学会
31	筑本 知子他	ISTEC	In-plume PLD 法によるGdBCO長尺線材の高速成膜	2009/5/13	第80回春季低温工学・超伝導学会
32	筑本 知子他	ISTEC他	PLD-Y123及びGd123線材のピン止め特性：重イオン照射欠陥とBaZrO3ナノロッドの比較	2009/5/13	第80回春季低温工学・超伝導学会
33	町 敬人他	ISTEC	Y系超伝導線材のマルチフィラメント化技術の進展	2009/5/13	低温工学
34	吉田 隆他	名古屋大他	IBAD-MgO上に製膜したYBCO線材の微細構造と磁束ピンニング特性	2009/5/13	2009年度春季低温工学・超伝導学会
35	一野 祐亮他	名古屋大	Nd:YAGパルスレーザー蒸着法を用いて作製したYBCO薄膜の超伝導特性	2009/5/13	2009年度春季低温工学・超伝導学会
36	松谷 文也他	九州工業大学他	TFA-MOD法によるYGdBCO線材の臨界電流特性におけるナノ粒子の影響	2009/5/13	低温工学・超伝導学会
37	宮原 和矢他	鹿児島大他	ピックアップコイル群による低損失加工されたHTS線材の電流分布測定	2009/5/13	2009年度春季低温工学・超伝導学会
38	淡路 智	東北大	MOD法RE123線材における強磁場下のn値の挙動	2009/5/13	2009年春季低温工学・超伝導学会
39	鈴木 博之他	名古屋大	YbBCOシード層を用いたIBAD-MgO上YBCO線材の超伝導特性	2009/5/14	春季低温工学・超伝導学会
40	宮田 成紀他	ISTEC他	IBAD-MgO膜の表面ラフニング	2009/5/15	低温工学・超伝導学会
41	高橋 保夫他	ISTEC他	MOD-RE2Zr207を用いたREBCO線材用低コスト基板平坦化技術の開発	2009/5/15	低温工学・超伝導学会
42	畠山 英之他	ISTEC他	高速IBAD-MgO用LMOバッファ層の長尺化	2009/5/15	低温工学・超伝導学会
43	吉積 正晃他	ISTEC	微細組織制御によるTFA-MOD線材の磁場中特性向上	2009/5/15	低温工学・超伝導学会
44	Seiji Adachi et al.	ISTEC	Reproducible Fabrication Process of HTS-SQUIDS with Ramp-edge Josephson Junctions using Superconducting Electrodes of SmBCO and La-doped ErBCO	2009/6/16	(ISEC2009) International Superconductive Electronics Conference
45	Ryo Teranishi et al.	九大他	Film Growth of YBa2Cu3Oy Superconductors by Chemical Solution Processing	2009/6/16	The Third International Conference on the Science and Technology for Advanced Ceramics

番号	発表者	所属	タイトル	発表日	発表先
46	Tsinehiro Hato et al.	ISTEC	High-speed detection of defects in coated conductors using HTS SQUID array	2009/6/17	(ISEC2009) International Superconductive Electronics Conference
47	宮原 和矢他	鹿児島大他	ピックアップコイル群によるHTS線材内の電流分布測定	2009/8/20	2009年度低温工学協会九州・西日本支部若手セミナー研究成果発表会
48	Takato Machi et al.	ISTEC	Modified process for multifilamentary coated conductors	2009/9/7	(M2S-HTSC) Internatoinal Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity and High-Temperature Superconductors
49	町 敬人他	ISTEC	次世代高温超電導線材における加工と評価の基礎技術	2009/9/7	2009年秋季応用物理学関係連合講演会
50	Y. Ichino et al.	名古屋大	Film growth for coated conductor-oriented REBa ₂ Cu ₃ O _y films by means of excimer and Nd:YAG pulsed laser deposition method	2009/9/7	(M2S-HTSC) Internatoinal Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity and High-Temperature Superconductors
51	波頭 経裕他	ISTEC	Y系高温超電導分割テープ線材の高速形状測定による欠陥検査	2009/9/8	応用物理学学術講演会
52	河野 丈治他	ISTEC	高温超電導SQUIDグラジオメーターを用いた多層導体の非破壊検査	2009/9/8	応用物理学学術講演会
53	坂井 直道他	ISTEC	銀拡散接合技術を用いたREBCO線材(RE:Gd, Y)の接合に関する検討	2009/9/8	2009年秋季応用物理学関係連合講演会
54	筑本 知子他	ISTEC	インブルームPLD法で作製したGdBCO線材の臨界電流	2009/9/8	2009年秋季応用物理学関係連合講演会
55	安達 成司他	ISTEC	ランプエッジ接合SQUIDアレーにおける特性ばらつき低減	2009/9/8	第70回応用物理学会学術講演会
56	松谷 文也他	九工大他	TFA-MOD法によるYGdBCO線材の臨界電流特性におけるナノ粒子の影響	2009/9/8	2009年秋季第70回応用物理学会学術講演会
57	高橋 祐治他	九工大他	CVD法によるYBCOコート線材の磁化緩和特性評価	2009/9/8	2009年秋季第70回応用物理学会学術講演会
58	井上 昌睦他	九大他	IBAD-MgO基板上に作製されたGdBCO線材のJ _c の温度、磁場、角度依存性	2009/9/8	2009年秋季第70回応用物理学会学術講演会
59	本田 貴裕他	九大他	走査型ホール素子磁気顕微鏡システムを用いた高温超伝導線材の交流電流分布の可視化	2009/9/8	2009年秋季第70回応用物理学会学術講演会
60	一野 祐亮他	名古屋大	Nd:YAGパルスレーザーを用いてIBAD-MgO基板上に作製したY123薄膜の超伝導特性	2009/9/8	2009年度秋季応用物理学会学術講演会
61	鈴木 博之他	名古屋大	IBAD-MgOテープ上に作製したYBCO線材の低温・高磁場における超伝導特性	2009/9/8	2009年秋季応用物理学会・学術講演会
62	高橋 駿介他	名古屋大	IBAD-MgO上PLD-SmBCO線材の磁場中超伝導特性	2009/9/8	第70回応用物理学会学術講演会
63	宮長 裕二他	九大他	TFA-MOD法におけるSn化合物添加YBCO膜の高特性化	2009/9/11	2009年秋季第70回応用物理学会学術講演会
64	杉本 雅文他	九大他	Ni鍍金の結晶粒制御の研究	2009/9/11	2009年秋季第70回応用物理学会学術講演会

番号	発表者	所属	タイトル	発表日	発表先
65	寺西 亮他	九大他	MOD-YBCO膜へのピンニングセンターの導入による高Jc化	2009/9/11	2009年秋季第70回応用物理学会学術講演会
66	森 信幸他	九大他	REBCO超伝導薄膜線材の接合特性とその要因	2009/9/11	第70回応用物理学会学術講演会
67	Noriko Chikumoto et al.	ISTEC	Complex pinning behavior of REBCO coated conductors in oblique fields	2009/9/12	The 12th international workshop on vortex matter in superconductors
68	Tsunehiro Hato et al.	ISTEC	Improvement of NDE system with HTS SQUID array for striated coated conductors	2009/9/13	(EUCAS2009)European Conference for Applied Superconductivity
69	Sergey Lee et al.	ISTEC	Up-scaling of in-plume pulsed laser deposition technique for reel-to-reel fabrication of GdBCO coated conductors	2009/9/13	(EUCAS2009)European Conference for Applied Superconductivity
70	Nobuyuki Mori et al.	九大他	Effects of uniaxial constant pressures on the joint properties of REBCO coated conductors	2009/9/13	(EUCAS2009)European Conference for Applied Superconductivity
71	Ryo Teranishi et al.	九大他	Doping of Tin-oxides for pinning into TFA-MOD YBCO films	2009/9/13	(EUCAS2009)European Conference for Applied Superconductivity
72	M.Kitani et al.	九工大他	Influence of nanoparticles on critical current properties in TFA-MOD processed YGdBCO coated	2009/9/13	(EUCAS2009)European Conference for Applied Superconductivity
73	Y. Ichino et al.	名古屋大	Critical current density in magnetic fields of REBCO films fabricated by P Nd:YAG pulsed laser deposition	2009/9/13	(EUCAS2009)European Conference for Applied Superconductivity
74	Masateru Yoshizumi et al.	ISTEC他	Recent progress on R&D of TFA-MOD process in Japan	2009/9/14	(EUCAS2009)European Conference for Applied Superconductivity
75	Yutaka Yamada 他	ISTEC他	Progress of IBAD-MgO/PLD Coated Conductor at SRL	2009/9/14	(EUCAS2009)European Conference for Applied Superconductivity
76	Y. Mawatari et al.	産総研他	Alternating current losses in curved superconducting tapes conforming to a cylinder	2009/9/16	(EUCAS2009)European Conference for Applied Superconductivity
77	松谷 文也他	九工大他	TFA-MOD法によるYGdBCO線材の臨界電流特性におけるナノ粒子の影響	2009/9/28	電気学会九州支部
78	中山 祐輔他	九工大他	GdBCOコート線材における磁化損失の形状効果の影響	2009/9/28	電気学会九州支部
79	Yutaka Yamada et al.	ISTEC	Progress of IBAD-PLD Coated Conductor and HTS High Field Magnet	2009/10/20	(MT2009)International Conference on Magnet Technology
80	Yoshihiro Ishimaru et al.	ISTEC	High-Tc SQUID axial gradiometer with a flux-transformer fabricated on HTS tape	2009/11/2	(ISS2009)International Symposium on Superconductivity

番号	発表者	所属	タイトル	発表日	発表先
81	Takato Machi et al.	ISTEC	LASER SCRIBING PROCESS AND CHARACTERIZATION FOR MULTI-FILAMENTARY COATED CONDUCTORS	2009/11/2	(ISS2009) International Symposium on Superconductivity
82	Masateru Yoshizumi et al.	ISTEC	Fabrication of high Jc REBCO coated conductors by TFA-MOD method	2009/11/2	(ISS2009) International Symposium on Superconductivity
83	Koichi Nakaoka et al.	ISTEC	Relationship Between Crystallization Process and Superconducting Properties of YBCO Films by TFA-MOD Method using Staring Solutions with Various Compositions	2009/11/2	(ISS2009) International Symposium on Superconductivity
84	Yasunori Mawatari et al.	産総研他	AC losses of power transmission cables with bent superconducting tapes	2009/11/2	(ISS2009) International Symposium on Superconductivity
85	F. Matsutani et al.	九工大他	Influence of nanoparticles on flux pinning properties in TFA-MOD processed YGdBCO coated conductor	2009/11/2	(ISS2009) International Symposium on Superconductivity
86	Y. Nakayama et al.	九工大他	Evaluation of geometrical effect on magnetization loss in GdBCO coated conductors	2009/11/2	(ISS2009) International Symposium on Superconductivity
87	Y. Ichino et al.	名古屋大	Potential of Nd:YAG Pulsed laser deposition method for coated conductor production	2009/11/2	(ISS2009) International Symposium on Superconductivity
88	鈴木 博之他	名古屋大	Jc anistropy for magnetic field angle in YBCO coated-conductor on IBAD-MgO bufferd metal	2009/11/2	(ISS2009) International Symposium on Superconductivity
89	吉田 隆他	名古屋大	Strong c-axis correlated pinning by natural liner defects in REBCO coated conductors	2009/11/2	(ISS2009) International Symposium on Superconductivity
90	Y. Mawatari et al.	産総研他	Ac losses in power transmission cables with curved superconducting tapes	2009/11/2	(ISS2009) International Symposium on Superconductivity
91	Naomichi Sakai et al.	ISTEC	Study on Degratation Characteristic of REBCO Coated Conductor under Various Environmental Stresses	2009/11/3	(ISS2009) International Symposium on Superconductivity
92	Sergey Lee et al.	ISTEC	HIGH-RATE FABRICATION OF GdBCO AND GdBCO/BZO COATED CONDUCTORS BY UP-SCALED IN-PLUME PULSED LASER DEPOSITION TECHNIQUE	2009/11/3	(ISS2009) International Symposium on Superconductivity
93	筑本 知子他	ISTEC	Effect of processing condition on pinning properties of GdBCO tapes fabricated by in-plume PLD process	2009/11/3	(ISS2009) International Symposium on Superconductivity

番号	発表者	所属	タイトル	発表日	発表先
94	Joji Kawano et al.	ISTEC	Non-destructive evaluation of multilayer conductor using an HTS SQUID gradiometer	2009/11/3	(ISS2009) International Symposium on Superconductivity
95	Keiichi Tanabe et al.	ISTEC	Progress in fabrication and characterization of multi-filamentary coated conductors	2009/11/3	(ISS2009) International Symposium on Superconductivity
96	Yasuo Takahashi et al.	ISTEC他	Planarization of metallic substrate using MOD oxide layer for highly in plane textured IBAD-MgO buffer layer	2009/11/3	(ISS2009) International Symposium on Superconductivity
97	Akira Ibi et al.	ISTEC	High Ic REBCO coated conductors with high production rate by using IBAD/MPMT-PLD method	2009/11/3	(ISS2009) International Symposium on Superconductivity
98	Masashi Miura et al.	ISTEC他	Irreversibility Line up to 65T in Nanoparticle Dispersed Y1-xGdxBa2Cu3Oy Coated Conductors Derived from	2009/11/3	(ISS2009) International Symposium on Superconductivity
99	Seiki Miyata et al.	ISTEC他	Characterization of Surface Roughness of Biaxially-Textured IBAD-MGO Films	2009/11/3	(ISS2009) International Symposium on Superconductivity
100	Hironobu Hirano et al.	ISTEC他	Improvement of Film Thickness Uniformity in TFA-MOD Coated	2009/11/3	(ISS2009) International Symposium on Superconductivity
101	Hideyuki Hatakeyama et al.	ISTEC他	Self-Epitaxy of PLD-CeO₂Layer on IBAD-MgO and LMO Bufferlayers	2009/11/3	(ISS2009) International Symposium on Superconductivity
102	Teruo Izumi et al.	ISTEC	R&D of Coated Conductors for Power Applications in Japan	2009/11/3	(ISS2009) International Symposium on Superconductivity
103	T. Yamaguchi 他	住友電気工業(株)	DEVELOPMENT OF BUFFER LAYER ON 30mm WIDE TEXTURED METAL SUBSTRATES FOR REBCO COATED CONDUCTORS	2009/11/3	(ISS2009) International Symposium on Superconductivity
104	Y. Shingai他	住友電気工業(株)	Development of REBa2Cu3Ox superconducting layers on 30mm wide clad-type	2009/11/3	(ISS2009) International Symposium on Superconductivity
105	Seiji Adachi et al.	ISTEC	Improved reproducible fabrication process of HTS-SQUIDs with ramp-edge Josephson junctions and multilayer	2009/11/4	(ISS2009) International Symposium on Superconductivity
106	T. Maebatake et al.	九大他	Effects of joining conditions on the structures and properties of joints of REBCO coated conductors	2009/11/4	(ISS2009) International Symposium on Superconductivity
107	M. Sugimoto et al.	九大他	Grain shape control studies of electrodeposited nickel on Hastelloy metal tape	2009/11/4	(ISS2009) International Symposium on Superconductivity

番号	発表者	所属	タイトル	発表日	発表先
108	N.Mori et al.	九大他	In-situ observation and simulation of growth process of faceted RE123 crystals	2009/11/4	(ISS2009) International Symposium on Superconductivity
109	Ryo Teranishi et al.	九大他	Influence of tin-compounds addition on crystallinity and microstructure for YBCO films	2009/11/4	(ISS2009) International Symposium on Superconductivity
110	Yuji Miyanaga他	九大他	Enhancement of Jc Property of YBCO film with Sn compound addition by TFA-MOD	2009/11/4	(ISS2009) International Symposium on Superconductivity
111	筑本 知子他	ISTEC	In-plume PLD法でreel-to-reel 成膜したGdBCO線材の磁場中Ic特性	2009/11/18	2009年度秋季低温工学・超電導学会
112	吉積 正晃他	ISTEC	微細組織制御によるTFA-MOD線材の磁場中特性の向上(2)～REBCO+BZO層の結晶成長メカニズム～	2009/11/18	2009年度秋季低温工学・超電導学会
113	三浦 正志他	ISTEC他	ナノ粒子分散TFA-MOD YGdBCO 線材の不可逆磁場特性	2009/11/18	2009年度秋季低温工学・超電導学会
114	宮田 成紀他	ISTEC他	REBa2Cu307-d線材用二軸配向基板の配向度に与えるIBAD-MgO層の表面ラフネスの影響	2009/11/18	2009年度秋季低温工学・超電導学会
115	松谷 文也他	九工大他	TFA-MOD法YGdBCO線材の臨界電流特性に及ぼすナノ粒子の影響(2)-角度異存性の評価-	2009/11/18	2009年秋季低温工学超伝導学会
116	馬渡 康德他	産総研他	電力ケーブルの交流損失における超電導テープ線材の形状効果	2009/11/18	2009年度秋季低温工学・超電導学会
117	宮原 和矢他	鹿児島大他	ピックアップコイル群によるマルチフィラメントHTS線材の電流分布測定	2009/11/18	2009年度秋季低温工学・超電導学会
118	山田 雄一他	ISTEC他	RE123系線材の曲げひずみ特性 1. IBAD-MgO線材のフラットワイズ曲げ	2009/11/19	2009年度秋季低温工学・超電導学会
119	杉本 雅文他	九大他	Ni鍍金の結晶粒面内制御の研究	2009/11/21	平成21年度応用物理学会九州支部学術講演会
120	宮永 裕二他	九大他	TFA-MOD法におけるSn化合物添加によるYBCO膜の高特性化	2009/11/21	平成21年度応用物理学会九州支部学術講演会
121	寺西 亮他	九大他	溶融法によるYBa2Cu30y超伝導膜の特性に及ぼす原料溶液高純度化の効果	2009/11/21	平成21年度応用物理学会九州支部学術講演会
122	前嶋 徹他	九大他	REBCO超伝導薄膜線材の接合特性	2009/11/21	平成21年度応用物理学会九州支部学術講演会
123	鯉田 貴也他	九工大他	TFA-MOD法YGdBCO線材の臨界電流特性に及ぼすナノ粒子の影響	2009/11/21	応用物理学会平成21年度九州支部学術講演会
124	Takato Machi et al.	ISTEC	Multi-filamentary process for various coated conductors by laser scribing method	2009/11/22	(CCA2009) International Workshop on Coated Conductor for Applications

番号	発表者	所属	タイトル	発表日	発表先
125	Keiichi Tanabe他	ISTEC	Nondestructive characterization techniques for long-length coated conductors	2009/11/22	(CCA2009) International Workshop on Coated Conductor for Applications
126	Yasuo Takahashi et al.	ISTEC他	Improve of surface roughness of metallic substrate using MOD oxide layer for highly in plane textured IBAD-MgO buffer layer	2009/11/22	(CCA2009) International Workshop on Coated Conductor for Applications
127	Masashi Miura et al.	ISTEC他	Irreversibility Line up to 65T in Nanoparticle Dispersed TFA-MOD Y1-xGdxBa2Cu3Oy Coated Conductors	2009/11/22	CCA2009 (International Workshop on Coated Conductor for Application)
128	Sergey Lee et al.	ISTEC	High-rate fabrication of GdBCO-based coated conductors by up-scaled in-plume pulsed laser deposition	2009/11/22	(CCA2009) International Workshop on Coated Conductors for Applications
129	Y. Mawatar	産総研	Electromagnetic response of curved superconducting tapes conforming to a cylinder	2009/11/22	(CCA2009) International Workshop on Coated Conductors for Applications
130	Yuichi Yamada et al.	ISTEC	Strain characteristics on RE123 wires fabricated through IBAD-PLD process	2009/12/7	(ACASC2009) Asian Conference on Applied Superconductivity and Cryogenics 2009
131	山口 高史他	住友電気工業(株)	薄膜高温超電導線材の開発	2009/12/11	第8回低温工学・超伝導若手合同講演会の成果報
132	田辺 圭一	ISTEC	積層型高温SQUIDの開発と応用展開	2010/1/20	日本学術振興会超伝導エレクトロニクス第146委員会研究会
133	河野 丈治他	ISTEC	高温超電導SQUID グラジオメータを用いた多層導体の非破壊検査	2010/1/20	電子情報通信学会
134	Keiichi Tanabe	ISTEC	Recent developments of HTS electronic devices and systems in Japan	2010/2/10	ISIS-18 (International Superconductivity Industry Summit)
135	波頭 経裕他	ISTEC	積層型高温超電導SQUIDを用いた非破壊検査システム	2010/3/16	電子情報通信学会
136	塚本 晃他	ISTEC	高温超電導2軸平面型グラジオメータの作製と評価	2010/3/17	2010年春季応用物理学会
137	河野 丈治他	ISTEC	高温超電導SQUIDグラジオメータを用いた多層導体の非破壊検査 (II)	2010/3/17	応用物理学関係連合講演会
138	町 敬人他	ISTEC	次世代高温超電導線材の細線加工と特性評価	2010/3/17	2010年春季第57回応用物理関係連合講演会
139	寺西 亮他	九大他	TFA-MOD法によるスズ化合物を添加したYBCO膜の高Jc化	2010/3/17	第57回応用物理学関係連合講演会
140	寺西 亮他	九大他	REBCO超伝導薄膜線材の接合特性	2010/3/17	第57回応用物理学関係連合講演会
141	鯉田 貴也他	九工大他	TFA-MOD法YGdBCO線材の臨界電流特性に及ぼすナノ粒子の影響	2010/3/17	第57回応用物理学関係連合講演会
142	馬渡 康徳	産総研	垂直磁場中の超伝導薄膜円筒における磁束侵入	2010/3/17	2010年春季第57回応用物理学関係連合講演会
143	片瀬 貴義他	東工大他	鉄系超伝導体Co添加BaFe2As2エピタキシャル薄膜によるジョセフソン接合	2010/3/17	第57回応用物理学関係連合講演会

番号	発表者	所属	タイトル	発表日	発表先
144	馬渡 康德	産総研	垂直磁場中の超伝導薄膜円筒における磁束進入	2010/3/18	2010年度春季第57回応用物理学関係連合講演会
145	坂井 直道他	ISTEC他	RE123系線材の特性把握 (1) 過電流劣化と線材剥離に関する検討	2010/5/12	2010年度春季低温工学・超伝導学会
146	山田 雄一他	ISTEC他	RE123系線材の応力 - ひずみ特性 (2) 線材製造プロセスと曲げひずみ特性	2010/5/12	2010年度春季低温工学・超伝導学会
147	鯉田 貴也他	九工大他	ナノ粒子を導入したTFA-MOD法YGdBCO線材における磁束ピンニング特性	2010/5/12	2010年春季低温工学・超伝導学会
148	馬渡 康德他	産総研他	二層超伝導電力ケーブルにおける交流損失の解析的モデル	2010/5/12	2010年度春季低温工学・超伝導学会
149	鯉田 貴也他	九工大他	ナノ粒子を導入したTFA-MOD法YGdBCO線材における磁束ピンニング特性	2010/5/12	2010年春季低温工学・超伝導学会
150	金光 雅也他	早稲田大他	REBCO超伝導線材の過電流パルス通電による特性劣化要因について	2010/5/12	2010年度春季低温工学・超伝導学会
151	鯉田 貴也他	九州大学他	ナノ粒子を導入したTFA-MOD法YGdBCO線材における磁束ピンニング特性	2010/5/12	2010年春季低温工学・超伝導学会
152	川畑 秋馬他	鹿児島大他	ピックアップコイル群によるマルチフィラメントHTS模擬線材の電流分布測定	2010/5/12	2010年度秋季低温工学・超伝導学会
153	本間 久雄他	ISTEC他	Cuメッキ実用RE123系線材とコイル化の検討	2010/5/13	2010年度春季低温工学・超伝導学会
154	筑本 知子他	ISTEC他	In-plume PLD 法 GdBCO線材の磁場中Ic特性と磁束ピン止め機構	2010/5/13	2010年度春季低温工学・超伝導学会
155	吉積 正晃他	ISTEC	BaZrO3ナノ粒子の分布によるTFA-MOD線材の磁場中特性変化	2010/5/13	2010年度春季低温工学・超伝導学会
156	畠山 英之他	ISTEC	IBAD-MgOの表面状態とCeO2キャップ層面内配向度の関係	2010/5/13	2010年度春季低温工学・超伝導学会
157	宮田 成紀他	ISTEC他	IBAD-MgO二軸配向膜における配向度の膜厚依存性と表面粗さ-配向過程における臨界膜厚-	2010/5/13	2010年度春季低温工学・超伝導学会
158	前畠 徹他	九大他	希土類系超伝導薄膜線材の接合	2010/6/5	日本金属学会九州支部 日本鉄鋼協会九州支部 平成22年度合同学術講演
159	寺西 亮他	九大他	化学溶融法により作製したYBCO超伝導薄膜の電流特性高性能化	2010/6/5	日本金属学会九州支部 日本鉄鋼協会九州支部 平成22年度合同学術講演
160	K. Yamada et al.	九州大学他	GdBCO超伝導体における人工ピンニングセンターの3次元電子線トモグラフィ法による定量解析	2010/6/5	H22年度日本金属学会九州支部学術講演会
161	町 敬人他	ISTEC他	超伝導変圧器のためのY系線材の細線化加工	2010/6/11	電気学会研究会
162	Kenji Kaneko et al.	九州大学他	3D analysis of pinning centers in Superconductive GdBCO	2010/6/24	The 2nd International Symposium on Advanced Microscopy and Theoretical Calculations, AMTC2

番号	発表者	所属	タイトル	発表日	発表先
163	Yuichi Yamada et al.	ISTEC他	Ic-bending strain characteristics of RE123 wires under various fabrication processes	2010/7/20	(ICEC-ICMC) International Cryogenic Engineering Conference - International Cryogenic
164	Tsunehiro Hato et al.	ISTEC	Non-destructive testing of each layer in GdBCO IBAD-PLD coated conductor by using a high-speed scanning laser observation system	2010/8/1	(ASC) Applied Superconductivity Conference
165	Akira Tsukamoto et al.	ISTEC	Fabrication of Integrated Two Axis High-Tc Planar	2010/8/1	(ASC2010) Applied Superconductivity Conference
166	Y. Mawatari et al.	産総研他	Analytical model of the ac losses in power cables with two layer superconducting tapes	2010/8/2	(ASC2010) Applied Superconductivity Conference
167	Joji Kawano et al.	ISTEC	Non-Destructive Evaluation of Deep-Lying in Multilayer Conductors using HTS SQUID Gradiometer	2010/8/3	(ASC2010) Applied Superconductivity Conference
168	Sergey Lee et al.	ISTEC	Progress in fabrication of high-performance long length GdBCO coated conductors by in-plume pulsed laser deposition technique	2010/8/3	(ASC2010) Applied Superconductivity Conference
169	河野 丈治他	ISTEC	高温超電導 SQUID グラジオメータを用いた多層導体の非破壊検査 (Ⅲ)	2010/9/14	2010年秋季第71回応用物理学会学術講演会
170	筑本 知子他	ISTEC他	Ba(Fe, Co)2As2単結晶の臨界電流特性	2010/9/14	2010年秋季第71回応用物理学会学術講演会
171	高橋 佑弥他	名古屋大他	IBAD-MgO上に作製したLTG-SmBCO線材の厚膜化	2010/9/14	応用物理学会学術講演会
172	波頭 経裕他	ISTEC	テープ線材高品質化に向けた全長非破壊検査	2010/9/15	2010年秋季第71回応用物理学会学術講演会
173	坂井 直道他	ISTEC	RE123系テープ線材の層間密着性に関する検討	2010/9/16	2010年秋季第71回応用物理学会学術講演会
174	Kenji Kaneko et al.	九州大学他	3D analysis of pinning centers in Superconductive GdBa2Cu3O7- δ	2010/9/23	IMC-17・国際顕微鏡学会大7回大会
175	馬渡 康德他	産総研他	Minimization of ac losses in power cables with two layers of superconducting tapes	2010/11/1	(ISS2010) International Symposium on Superconductivity

【受賞・褒賞】

番号	タイトル	受賞者	受賞日
1	日本金属学会材料プロセッシング部門 第18回奨励賞	三浦正志 (ISTEC)	2008/9/23
3	低温工学協会 2009年度 奨励賞	三浦正志 (ISTEC)	2009/5/14
2	電気学会優秀論文発表賞「Y系超電導線材の高性能化とスループット向上」	朽網寛 (株)フジクラ	2010/3/31
4	未踏科学技術協会 超伝導科学技術賞 特別賞	塩原融 (ISTEC)	2010/4/13
5	低温工学協会 優秀発表賞「66kV/3kA級薄膜超電導ケーブルの交流損失特性」	大屋正義 (住友電工(株))	2010/5/13
6	電気学会 電力エネルギー部門「研究・技術功労	林秀美 (九州電力(株))	2010/9/2

【成果の普及・プレス発表等】

番号	タイトル	発表者	発表日	発表形態 発表先
1	北海道洞爺湖サミットの「環境ショーケース」に超電導ケーブルを	古河電気工業(株)	2008/7/7-9	展示
2	高温超電導線材生産コスト半減、フジクラ、送電線など向け	(株)フジクラ	2008. 12. 10	日経産業新聞他
3	ISS2008出展	ISTEC他	2008/10/28-29	展示
4	2008秋季低温工学超電導学会出展	住友電気工業(株)、(株)フジクラ、大陽日酸(株)	2008/11/12-13	展示
5	エコプロダクツ2008出展	ISTEC他	2008/12/11-13	展示
6	イットリウム系超電導線供給体制構	(株)フジクラ	2009/2/17	日刊工業新聞
7	2009春季低温工学超電導学会出展	(株)フジクラ、住友電気工業(株)、大陽日酸(株)	2009/5/13-15	展示
8	エコメッセ千葉2009出展	古河電気工業(株)	2009/9/6	展示
9	CEATEC JAPAN 2009	(株)フジクラ	2009/10/6-10	展示
10	イットリウム系酸化物超電導線材 高磁場下での超電導電流を世界で初めて実証	ISTEC	2009/11/2	日刊工業新聞他
11	2009秋季低温工学超電導学会出展	大陽日酸(株)、(株)フジクラ、住友電気工業(株)	2009/11/18-20	展示
12	エコプロダクツ2009出展	ISTEC他	2009/12/10-12	展示
13	イットリウム系低磁性配向基板線材で世界初の高速化、高性能化に成功	NEDO	2010/2/12	NEDOホームページ
14	イットリウム系超電導線材 開発用設備を増強 住友電工、製造能力1.5	住友電気工業(株)	2010/3/30	日刊工業新聞
15	2010春季低温工学超電導学会出展	(株)フジクラ、住友電気工業(株)、大陽日酸(株)	2010/5/12-14	展示
16	クリーン発電&スマートグリッドフェア2010	(株)フジクラ	2010/7/14-16	展示
17	第7回日本加速器学会年会出展	(株)フジクラ	2010/8/4-6(予定)	展示
18	イットリウム系超電導変圧器の耐短絡強度、限流機能を検証 (仮称)	九州電力他	2010/8/中旬(予定)	プレス発表

参考：論文引用回数

「応用基盤技術開発Ⅱ期」以降の論文 (引用回数は2009年末現在)

引用	筆頭者	タイトル	雑誌名	Vol	Page	発行年
87	Yamada, Y	Epitaxial nanostructure and defects effective for pinning in Y(RE)Ba ₂ Cu ₃ O _{7-x} coated conductors	APPL PHYS LETT	87		2005
31	Tokunaga, Y	Advanced TFA-MOD process of high critical current YBCO films for coated conductors	CRYOGENICS	44	817-822	2004
29	Izumi, T	Progress in development of coated conductors by TFA-MOD processing	PHYSICA C	412	885-889	2004
26	Teranishi, R	Highlights of coated conductor development in Japan	SUPERCOND SCI TECH	19	S4-S12	2006
26	Takahashi, K	Magnetic field dependence of J(c) for Gd-123 coated conductor on PLD-CeO ₂ capped IBAD-GZO substrate tapes	SUPERCOND SCI TECH	18	1118-1122	2005
26	Matsuda, JS	Effects of heat-treatment conditions on microstructure of multi-coating Y123 films deposited by advanced TFA-MOD method	PHYSICA C	412	890-895	2004
23	Muroga, T	Rapid fabrication of highly textured CeO ₂ cap layer on MAD tape for YBCO coated conductor	PHYSICA C	412	807-812	2004
20	Takahashi, K	Investigation of thick PLD-GdBCO and ZrO ₂ doped GdBCO coated conductors with high critical current on PLD-CeO ₂ capped IBAD-GZO substrate tapes	SUPERCOND SCI TECH	19	924-929	2006
18	Kashima, N	Fabrication of coated conductors by multiple-stage CVD	IEEE T APPL SUPERCON	15	2763-2766	2005
17	Nakaoka, K	Influence of starting solution composition on superconducting properties of YBCO coated conductors by advanced TFA-MOD process	PHYSICA C	463	519-522	2007
17	Shiohara, Y	Highlights in R&D for coated conductors in Japan	PHYSICA C	445	496-503	2006
17	Ibi, A	Investigations of thick YBCO coated conductor with high critical current using IBAD-PLD method	PHYSICA C	426	910-914	2005
17	Yamada, Y	Current status of pulsed laser deposition YBCO coated conductors in SRL using buffer layers by ion-beam assisted deposition GZO and self-epitaxy pulsed laser deposition CeO ₂	SUPERCOND SCI TECH	17	S328-S331	2004
16	Ibi, A	Development of long YBCO coated conductors by IBAD-PLD method	PHYSICA C	445	525-528	2006
16	Tokunaga, Y	High critical current YBCO films using advanced TFA-MOD process	PHYSICA C	412	910-915	2004

引用	筆頭者	タイトル	雑誌名	Vol	Page	発行年
14	Yamada, Y	Towards the practical PLD-IBAD coated conductor fabrication - Long wire, high production rate and J(c) enhancement in a magnetic field	PHYSICA C	445	504-508	2006
13	Watanabe, T	High rate deposition by PLD of YBCO films for coated conductors	IEEE T APPL SUPERCON	15	2566-2569	2005
13	Iwakuma, M	AC loss properties of YBCO superconducting tapes fabricated by IBAD-PLD technique	PHYSICA C	412	983-991	2004
12	Inoue, M	Current transport properties of 200 A-200 m-class IBAD YBCO coated conductor over wide range of magnetic field and temperature	IEEE T APPL SUPERCON	17	3207-3210	2007
12	Shiohara, Y	Present status & future prospects of coated conductor development in Japan	IEEE T APPL SUPERCON	17	3227-3230	2007
12	Sasaki, H	Specimen preparation for high-resolution transmission electron microscopy using focused ion beam and Ar ion milling	J ELECTRON MICROSC	53	497-500	2004
12	Watanabe, T	Advances in coated conductor development at SRL-Nagoya Coated Conductor Center	PHYSICA C	412	819-823	2004
11	Izumi, T	Progress in development of advanced TFA-MOD process for coated conductors	PHYSICA C	463	510-514	2007
11	Ishiyama, A	Normal transition and propagation characteristics of YBCO tape	IEEE T APPL SUPERCON	15	1659-1662	2005
11	Nakaoka, K	Fabrication of YBCO coated conductors using advanced TFA-MOD process	PHYSICA C	426	954-958	2005
11	Takahashi, Y	Preparation of YBCO coated conductor on metallic tapes using an MOD process	PHYSICA C	412	905-909	2004
10	Amemiya, N	AC loss reduction of superconducting power transmission cables composed of coated conductors	IEEE T APPL SUPERCON	17	1712-1717	2007
10	Shiohara, Y	Current status and prospects of national project on coated conductors in Japan	PHYSICA C	463	40184	2007
10	Ibi, A	Development of long GdBCO coated conductor using the IBAD/MPMT-PLD method	SUPERCOND SCI TECH	19	1229-1232	2006
10	Miyata, S	Effects of assisting and sputtering beams in IBAD method for a long tape fabrication	PHYSICA C	412	824-828	2004
10	Teranishi, R	Fabrication of YBCO film by TFA-MOD process at low-pressure atmosphere	PHYSICA C	412	920-925	2004

引用	筆頭者	タイトル	雑誌名	Vol	Page	発行年
10	Yamada, Y	Progress of PLD and IBAD processes for YBCO wire in the SRL-Nagoya Coated Conductor Centre - new method for a coated conductor using a self-epitaxial PLD-CeO ₂ buffer	SUPERCOND SCI TECH	17	S70-S73	2004
9	Jiang, Z	AC loss characteristics of YBCO coated conductors with varying magnitude of critical current	IEEE T APPL SUPERCON	16	85-88	2006
8	Mori, M	Development of long YBCO coated conductors by multiple-stage CVD	PHYSICA C	445	515-520	2006
8	Fuji, H	Progress on TFA-MOD coated conductor development	PHYSICA C	426	938-944	2005
8	Miyata, S	Long and high rate production of IBAD templates for YBCO coated conductors	IEEE T APPL SUPERCON	15	2671-2674	2005
8	Teranishi, R	High-I _c processing for YBCO coated conductors by TFA-MOD process	PHYSICA C	426	959-965	2005
8	Iwai, H	Investigation of high J _c YBa ₂ Cu ₃ O _{7-x} coated conductors prepared by pulsed laser deposition on self-epitaxial CeO ₂ buffers	SUPERCOND SCI TECH	17	S496-S499	2004
8	Kato, T	Transmission electron microscopy studies of a CeO ₂ /Gd ₂ Zr ₂ O ₇ buffer layer on an Ni-based alloy for YBCO coated conductor	PHYSICA C	412	813-818	2004
8	Sekitani, T	Upper critical field for optimally-doped YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ}	PHYSICA B	346	319-324	2004
7	Matsushita, T	Dependence of critical current properties on the thickness of the superconducting layer in YBCO coated tapes	SUPERCOND SCI TECH	18	S227-S231	2005
7	Nishioka, T	AC loss of YBCO coated conductors fabricated by IBAD/PLD method	IEEE T APPL SUPERCON	15	2843-2846	2005
7	Yamada, Y	Rapid production of buffered substrates and long length coated conductor development using IBAD, PLD methods and "Self-Epitaxial" ceria buffer	IEEE T APPL SUPERCON	15	2600-2603	2005
7	Fuji, H	Processing for long YBCO coated conductors by advanced TFA-MOD process	PHYSICA C	412	916-919	2004
6	Matsuda, J	Effect of Ba/Y ratio in starting solution on microstructure evolution of YBCO films deposited by advanced TFA-MOD process	PHYSICA C	468	997-1005	2008
6	Fukushima, H	GdBCO and YBCO long coated conductors and coils	PHYSICA C	463	501-504	2007
6	Suzuki, K	Development of a laser scribing process of coated conductors for the reduction of AC losses	SUPERCOND SCI TECH	20	822-826	2007

引用	筆頭者	タイトル	雑誌名	Vol	Page	発行年
6	Kimura, K	Film thickness dependence of critical current characteristics of YBCO-coated conductors	PHYSICA C	445	141-145	2006
6	Mukoyama, S	Development of HTS power cable using YBCO coated conductor	PHYSICA C	445	1050-1053	2006
6	Nakao, K	Non-destructive characterization of long coated conductors using a Hall sensor array	PHYSICA C	445	669-672	2006
6	Aoki, Y	Fabrication of 10-m class Y-123 coated conductors using continuous reel-to-reel process by TFA-MOD method	PHYSICA C	426	945-948	2005
6	Izumi, T	Progress in R&D for coated conductors by TFA-MOD processing	IEEE T APPL SUPERCON	15	2743-2746	2005
6	Kashima, N	YBCO coated conductor by multiple-stage CVD	PHYSICA C	426	887-892	2005
6	Teranishi, R	High-Jc thick YBCO coated conductors by TFA-MOD process	IEEE T APPL SUPERCON	15	2663-2666	2005
6	Watanabe, T	Investigation of multi-deposition for high I-c YBCO coated conductors prepared by PLD on self-epitaxial CeO ₂ buffers	IEEE T APPL SUPERCON	15	2620-2623	2005
6	Nishioka, T	Influence of silver layer thickness on magnetization loss of YBCO coated conductors in transverse magnetic field with various orientations	PHYSICA C	412	992-998	2004
6	Yao, X	Direct evidence and the mechanism of superheating in YBCO thin film	J PHYS-CONDENS MAT	16	3819-3826	2004
5	Miura, M	Enhancement of flux pinning in Y _{1-x} Sm _x Ba _{1.5} Cu ₃ O _{7-y} coated conductors with nanoparticles	APPL PHYS EXPRESS	1		2008
5	Ishiyama, A	Degradation of YBCO coated conductors due to over-current pulse	IEEE T APPL SUPERCON	17	3509-3512	2007
5	Matsushita, T	The dependence of pinning properties on superconducting layer thickness in IBAD/PLD YBCO-coated conductors	SUPERCOND SCI TECH	20	S189-S196	2007
5	Izumi, T	R&D for long tapes with high I-c by advanced TFA-MOD process	PHYSICA C	445	533-539	2006
5	Koyanagi, K	Measurement of local current flow around transverse defects in YBCO film by use of scanning SQUID microscope	PHYSICA C	445	677-681	2006
5	Kaneko, A	Fabrication of Y _{1-x} RE _x Ba ₂ Cu ₃ O _{7-y} film by advanced TFA-MOD process	PHYSICA C	426	949-953	2005
5	Kiss, T	Low temperature scanning laser microscopy of YBCO coated IBAD tapes	IEEE T APPL SUPERCON	15	3656-3659	2005
5	Matsuda, JS	Transmission electron microscopic studies on crystallization of YBa ₂ Cu ₃ O _{7-y} films deposited by advanced TFA-MOD method	PHYSICA C	426	1051-1055	2005

引用	筆頭者	タイトル	雑誌名	Vol	Page	発行年
5	Matsuda, JS	Effects of heating rate in calcination process on microstructures of Y123 precursor and final films formed by advanced TFA-MOD method	IEEE T APPL SUPERCON	15	2652-2655	2005
5	Matsushita, T	Flux pinning characteristics of YBCO coated conductor	PHYSICA C	426	1096-1102	2005
5	Nomoto, S	Numerical simulation of TFA-MOD process	PHYSICA C	426	966-972	2005
5	Shiohara, Y	Progress and future prospect of R&D on coated conductors in Japan	PHYSICA C	412	40187	2004
4	Ishiyama, A	Assessment of cryogenic thermography system using commercial fluorescent paints on their applicability to visualization of normal-zone propagation in YBCO coated conductor	IEEE T APPL SUPERCON	17	3765-3768	2007
4	Jiang, Z	Total AC loss characteristics in a stacked YBCO conductor	IEEE T APPL SUPERCON	17	2442-2445	2007
4	Kimura, K	Dependence of superconducting layer thickness on critical current density of YBCO-coated conductors at high temperatures	PHYSICA C	463	697-701	2007
4	Mukoyama, S	Study of an YBCO HTS transmission cable system	PHYSICA C	463	1150-1153	2007
4	Watanabe, T	Rapid formation of 200 m-long YBCO coated conductor by multi-stage CVD	IEEE T APPL SUPERCON	17	3386-3389	2007
4	Aoki, Y	Key factors for scale-up of YBCO coated conductors by the advanced TFA-MOD process	PHYSICA C	445	540-544	2006
4	Kato, JY	Diffusion joint of YBCO coated conductors using stabilizing silver layers	PHYSICA C	445	686-688	2006
4	Kato, T	Nanostructural characterization of Y123 and Gd123 with BaZrO3 rods fabricated by pulsed-laser deposition	PHYSICA C	445	628-632	2006
4	Kobayashi, H	Investigation of magnetic properties of YBCO film with artificial pinning centers on PLD/IBAD metal substrate	PHYSICA C	445	625-627	2006
4	Konishi, M	J(c)-B characteristics of RE-Ba-Cu-O (RE = Sm, Er and [Gd, Er]) films on PLD-CeO2/IBAD-GZO/metal substrates	PHYSICA C	445	633-636	2006
4	Miyata, S	Efforts for high throughput of IBAD-GZO-based substrate process for YBCO coated conductors	PHYSICA C	445	611-613	2006
4	Inoue, M	High magnetic field properties of critical current density in Y1Ba2Cu3O7-delta coated conductor fabricated by improved TFA-MOD process	IEEE T APPL SUPERCON	15	2574-2577	2005

引用	筆頭者	タイトル	雑誌名	Vol	Page	発行年
4	Iwakuma, M	AC loss properties of YBCO superconducting tapes exposed to external Ac magnetic field	IEEE T APPL SUPERCON	15	1562-1565	2005
4	Celik, E	Nb-doped SrTiO3 buffer layers on LaAlO3 substrates by metalorganic deposition for YBCO superconducting films	MAT SCI ENG B-SOLID	110	94-102	2004
4	Kaneko, A	Fabrication of REBa2Cu3O7-y film by advanced TFA-MOD process	PHYSICA C	412	926-930	2004
4	Matsuda, JS	Interfacial structures of Y123 and Nd123 films formed on MgO(001) substrates by liquid phase epitaxy	J MATER RES	19	2674-2682	2004
3	Miura, M	Introduction of pinning center to enhance I-c under magnetic fields in REBCO coated conductors fabricated by advanced TFA-MOD process	PHYSICA C	468	1643-1646	2008
3	Yoshizumi, M	Crystal growth of YBCO coated conductors by TFA-MOD method	PHYSICA C	468	1531-1533	2008
3	Fukushima, H	Properties of long GdBCO coated conductor by IBAD-PLD method - The first GdBCO coil test	IEEE T APPL SUPERCON	17	3367-3370	2007
3	Ishiyama, A	Transient stability characteristics of parallel-connected YBCO coated conductors for power transmission cables	IEEE T APPL SUPERCON	17	1672-1675	2007
3	Iwakuma, M	Development of a 15 kW motor with a fixed YBCO superconducting field winding	IEEE T APPL SUPERCON	17	1607-1610	2007
3	Kitoh, Y	Effect of metal composition ratios of solutions on J(c)-B properties of REBCO coated conductors fabricated by advanced TFA-MOD process	PHYSICA C	463	523-526	2007
3	Tanaka, T	Deposition process, microstructure and properties of YBCO film fabricated by advanced TFA-MOD method	PHYSICA C	463	527-531	2007
3	Yagi, M	Recent development of an HTS power cable using YBCO tapes	PHYSICA C	463	1154-1158	2007
3	Yamada, Y	IBAD-PLD method coated conductor with high critical current in a magnetic field	J JPN I MET	71	1011-1016	2007
3	Maruyama, O	Reduction of error in magnetic knife method to measure J(c) distribution of YBCO coated conductor	IEEE T APPL SUPERCON	16	1035-1038	2006
3	Matsuda, J	Microstructure and crystallization mechanism of YBa2Cu3O7-y films formed by advanced TFA-MOD process	PHYSICA C	445	563-569	2006
3	Nakaoka, K	Influence of calcination conditions on superconducting properties of YBCO coated conductors by advanced TFA-MOD process	PHYSICA C	445	545-548	2006

引用	筆頭者	タイトル	雑誌名	Vol	Page	発行年
3	Muroga, T	Continuous deposition and rapid fabrication of self-epitaxial CeO ₂ cap layers by PLD method on IBAD buffers	IEEE T APPL SUPERCON	15	2695-2698	2005
3	Nomoto, S	Numerical analysis of YBCO crystal growth in the TFA-MOD process	MATER TRANS	46	922-929	2005
3	Shiohara, Y	Activity of R&D for coated conductors in Japan	PHYSICA C	426	40185	2005
3	Iwai, H	Fabrication of high J(c) YBa ₂ Cu ₃ O _{7-x} coated conductors prepared by pulsed laser deposition on self-epitaxial CeO ₂ buffers	J JPN I MET	68	718-722	2004
3	Miyata, S	Development of long YBCO coated conductor by IBAD-PLD method - Fabrication of biaxially-textured long Gd ₂ Zr ₂ O ₇ tape by IBAD method	J JPN I MET	68	723-729	2004
2	Miura, M	Rare Earth Substitution Effects and Magnetic Field Dependence of Critical Current in Y _{1-x} RE _x Ba ₂ Cu ₃ O _y Coated Conductors with Nanoparticles (RE = Sm, Gd)	APPL PHYS EXPRESS	2		2009
2	Yagi, M	Development of a 10 m long 1 kA 66/77 kV YBCO HTS cable with low AC loss and a joint with low electrical resistance	SUPERCOND SCI TECH	22		2009
2	Ishiyama, A	Over-current characteristics of superconducting model cable using YBCO coated conductors	PHYSICA C	468	2041-2045	2008
2	Ishiyama, A	Transient stability characteristics of a 1-m single-layer YBCO cable	IEEE T APPL SUPERCON	18	1228-1231	2008
2	Iwakuma, M	Development of a 7.5 kW YBCO superconducting synchronous motor	IEEE T APPL SUPERCON	18	689-692	2008
2	Izumi, T	Research and development of reel-to-reel TFA-MOD process for coated conductors	PHYSICA C	468	1527-1530	2008
2	Jiang, Z	The dependence of AC loss characteristics on the space in stacked YBCO conductors	SUPERCOND SCI TECH	21		2008
2	Nakai, A	YBCO growth on textured NiW substrates by TFA-MOD method	PHYSICA C	468	1534-1536	2008
2	Shiohara, Y	Current status and future prospects of Japanese national project on coated conductor development and its applications	PHYSICA C	468	1498-1503	2008
2	Tada, K	Growth process of Ba-poor YBCO film fabricated by TFA-MOD process	PHYSICA C	468	1554-1558	2008
2	Yagi, M	Development of YBCO HTS cable with low AC loss	PHYSICA C	468	2037-2040	2008
2	Yazawa, T	Superconducting fault current limiter using high-resistive YBCO tapes	PHYSICA C	468	2046-2049	2008

引用	筆頭者	タイトル	雑誌名	Vol	Page	発行年
2	Izumi, T	Recent progress on R&D of advanced TFA-MOD process for coated conductors	IEEE T APPL SUPERCON	17	3329-3331	2007
2	Kashima, N	Developments of low cost coated conductors by multi-stage CVD process	PHYSICA C	463	488-492	2007
2	Kiss, T	Visualizing transport properties in IBAD based YBCO coated conductors by multiple analysis techniques	IEEE T APPL SUPERCON	17	3211-3214	2007
2	Matsuda, J	Microstructural analysis on growth and crystallization mechanism of YBCO films deposited by advanced TFA-MOD process	PHYSICA C	463	712-716	2007
2	Nakai, A	Growth conditions of buffer layers on textured NiW substrates by pulsed-laser deposition	PHYSICA C	463	615-618	2007
2	Nakaoka, K	Optimization of process parameters for calcination in TFA-MOD method	IEEE T APPL SUPERCON	17	3313-3316	2007
2	Teranishi, R	High production rate process of YBCO coated conductors by TFA-MOD process	IEEE T APPL SUPERCON	17	3317-3320	2007
2	Iwakuma, M	Temperature scaling of ac loss in YBCO superconducting tapes fabricated by the IBAD-PLD technique	SUPERCOND SCI TECH	19	350-358	2006
2	Iwakuma, M	Ac loss characteristics of YBCO superconducting tapes fabricated by TFA-MOD technique	PHYSICA C	426	1276-1283	2005
2	Shikimachi, K	Mechanical properties of YBaCuO formed on Ni-based alloy substrates with IBAD buffer layers	IEEE T APPL SUPERCON	15	3548-3551	2005
2	Hasegawa, K	Improvement of in-plane alignment for surface oxidized NiO layer on textured Ni substrate by two-step heat-treatment	PHYSICA C	412	864-870	2004
2	Kato, T	A new method for preparing plan-view TEM specimen of multilayered films using focused ion beam	J ELECTRON MICROSC	53	501-504	2004
2	Matsuda, JS	Investigation on microstructures and growth mechanism of Y123 films deposited by advanced TFA-MOD method	MATER RES SOC SYMP P	3	17-19	2004
1	Miura, M	Magnetic Field Dependence of Critical Current and Microstructure in TFA-MOD Y1-xSm-x Ba2Cu3Oy With Nanoparticles for Coated Conductors	IEEE T APPL SUPERCON	19	3275-3278	2009
1	Yamada, Y	Long IBAD-MgO and PLD coated conductor	PHYSICA C	469	1298-1302	2009

引用	筆頭者	タイトル	雑誌名	Vol	Page	発行年
1	Yazawa, T	Design and Experimental Results of Three-Phase Superconducting Fault Current Limiter Using Highly-Resistive YBCO Tapes	IEEE T APPL SUPERCON	19	1956-1959	2009
1	Ibi, A	Development of long REBCO coated conductors with artificial pinning centers by using MPMT-PLD method	PHYSICA C	468	1514-1517	2008
1	Matsuda, J	Microstructure evolution of YBCO films deposited by advanced TFA-MOD process	PHYSICA C	468	1017-1023	2008
1	Matsuda, J	Transmission electron microscopic studies on growth mechanism of YBa ₂ Cu ₃ O _{7-y} films formed by advanced trifluoroacetates metalorganic deposition process	J MATER RES	23	3353-3362	2008
1	Nagao, K	Development and fundamental characteristics of a YBCO superconducting induction/synchronous motor operated in liquid nitrogen	SUPERCOND SCI TECH	21		2008
1	Okamoto, H	AC loss properties in YBCO model coils for loss reduction	PHYSICA C	468	1731-1733	2008
1	Sutoh, Y	Formation of CeO ₂ buffer layer using multi-plume PLD	PHYSICA C	468	1594-1596	2008
1	Suzuki, K	Development of scribing process of coated conductors for reduction of AC losses	PHYSICA C	468	1579-1582	2008
1	Futami, S	EBSP observation of oriented textures in Y-based coated conductors	PHYSICA C	463	727-731	2007
1	Inoue, M	Enhancement of critical current in YBCO coated conductors in association with c-axis correlated artificial pinning centers	PHYSICA C	463	674-677	2007
1	Ishiyama, A	A criterion for determining stabilizer thickness of YBCO coated conductors based on coil protection	IEEE T APPL SUPERCON	17	2430-2433	2007
1	Kato, J	Optimization of the diffusion joint process for the Ag layers of YBCO coated conductors	PHYSICA C	463	747-750	2007
1	Kinoshita, A	Development of a thick GdBCO and ZrO ₂ -doped GdBCO film with a high critical current on a PLD-CeO ₂ /IBAD-GZO metal substrate	PHYSICA C	463	630-632	2007
1	Matsushita, T	Critical current properties in high-temperature superconducting wires and tapes	PHYSICA C	463	686-691	2007
1	Nakanishi, T	Fabrication of long Y123 coated conductor tape by advanced TFA-MOD process	PHYSICA C	463	515-518	2007
1	Okamoto, H	Nitrogen boil-off method of measuring AC losses in YBCO coils	PHYSICA C	463	795-797	2007

引用	筆頭者	タイトル	雑誌名	Vol	Page	発行年
1	Sutoh, Y	Effective thickness Of CeO ₂ buffer layer for YBCO coated conductor by advanced TFA-MOD process	PHYSICA C	463	571-573	2007
1	Takao, T	Influence of bending and torsion strains on critical currents in YBCO coated conductors	IEEE T APPL SUPERCON	17	3513-3516	2007
1	Yoshida, T	Evaluation of film thickness dependency of the reversible fluxoid motion in the third harmonic voltage method	PHYSICA C	463	692-696	2007
1	Kitoh, Y	Fabrication of Y _{1-x} RE _x Ba ₂ Cu ₃ O _y films on single crystalline substrates and IBAD buffered metallic tapes by advanced TFA-MOD process	PHYSICA C	445	558-562	2006
1	Nomoto, S	Development of wide area reaction system for Reel-to-Reel TFA-MOD process	PHYSICA C	445	549-552	2006
1	Teranishi, R	Production rate of crystallization process in TFA-MOD method for YBCO coated conductors	PHYSICA C	445	553-557	2006
1	Amemiya, N	AC loss characteristics of coated conductor and the perspective for its AC loss reduction	PHYSICA C	426	1267-1275	2005
1	Inoue, M	Imaging of trapped vortices in YBCO coated conductor by scanning SQUID microscope	PHYSICA C	426	1068-1072	2005
1	Inoue, M	Study on local inhomogeneity in TFA-MOD YBCO coated conductor by use of low temperature scanning laser microscopy	PHYSICA C	426	1073-1077	2005
1	Izumi, T	Crystal growth of superconductive oxide from oxide melts	J PHYS CHEM SOLIDS	66	535-545	2005
1	Muroga, T	Continuous fabrication of self-epitaxial PLD-CeO ₂ cap layer on IBAD tape for YBCO coated conductors	PHYSICA C	426	904-909	2005
1	Takahashi, K	Magnetic field dependence of critical currents in PLD RE-Ba-Cu-O (RE = Er, Dy, Gd) film prepared on CeO ₂ capped IBAD-GZO layers	PHYSICA C	426	1001-1004	2005
1	Fuji, H	Processing for coated conductors by modified TFA-MOD method	MATER RES SOC SYMP P	3	117-119	2004
1	Muroga, T	Development of long YBCO coated conductor by IBAD-PLD method - Self-epitaxial PLD-CeO ₂ cap layer on IBAD buffer substrate	J JPN I MET	68	712-717	2004
1	Oba, F	Effectiveness of BaZrO ₃ buffer layer in SmBa ₂ Cu ₃ O _y epitaxial growth on MgO substrate: A first-principles study	J APPL PHYS	95	2309-2318	2004

引用	筆頭者	タイトル	雑誌名	Vol	Page	発行年
1	Tokunaga, Y	High performance of YBCO coated conductors using advanced TFA-MOD method	J JPN I MET	68	742-747	2004
0	Abiru, K	Visualization of non-uniform current flow in coated conductors by scanning Hall-probe magnetic microscopy	PHYSICA C	469	1450-1453	2009
0	Amemiya, N	Transport losses in polygonal assemblies of coated conductors with textured-metal substrate	PHYSICA C	469	1427-1431	2009
0	Higashikawa, K	Coupled Analysis Method for High-Field Magnet Coil Using Coated Conductor Based on J-E Characteristics as a Function of Temperature, Magnetic Field Vector and Mechanical Strain	IEEE T APPL SUPERCON	19	1621-1625	2009
0	Higashikawa, K	Significant reduction in volume, stored energy and magnetization loss of high-field magnet coil based on the improvement of critical current characteristics in GdBCO coated conductor	PHYSICA C	469	1776-1780	2009
0	Himeki, K	Dependence of superconducting layer thickness on critical current density of IBAD/CVD-processed YBCO coated conductors	PHYSICA C	469	1457-1461	2009
0	Hirai, H	Development of a turbine cryocooler for high temperature superconductor applications	PHYSICA C	469	1857-1861	2009
0	Ichikawa, H	High speed production of YBCO precursor films by advanced TFA-MOD process	PHYSICA C	469	1329-1331	2009
0	Inoue, M	Observation of Current Distribution in High-T-c Superconducting Tape Using Scanning Hall-Probe Microscope	IEEE T APPL SUPERCON	19	2847-2850	2009
0	Inoue, M	Critical current property in YBCO coated conductor fabricated by improved TFA-MOD process	PHYSICA C	469	1443-1445	2009
0	Ishiyama, A	Degradation Characteristics of YBCO-Coated Conductors Subjected to Overcurrent Pulse	IEEE T APPL SUPERCON	19	3483-3486	2009
0	Iwakuma, M	Production and Test of a REBCO Superconducting Synchronous Motor	IEEE T APPL SUPERCON	19	1648-1651	2009
0	Iwakuma, M	Development of REBCO superconducting power transformers in Japan	PHYSICA C	469	1726-1732	2009
0	Izumi, T	Present status and strategy of reel-to-reel TFA-MOD process for coated conductors	PHYSICA C	469	1322-1325	2009
0	Izumi, T	Development of TFA-MOD Process for Coated Conductors in Japan	IEEE T APPL SUPERCON	19	3119-3122	2009
0	Matsekh, A	The Use of Low Temperature Scanning Microscope for Estimating In-Plane Thermal Diffusivity in YBCO Thin Film	IEEE T APPL SUPERCON	19	2867-2871	2009

引用	筆頭者	タイトル	雑誌名	Vol	Page	発行年
0	Matsutani, F	Superconducting layer thickness of relaxation properties of persistent current in high magnetic field in YBCO-coated conductor	PHYSICA C	469	1122-1125	2009
0	Miura, M	Development of multi-turn reel-to-reel crystallization large furnace for high production rate of YBa ₂ Cu ₃ O _y coated conductors derived from TFA-MOD process	PHYSICA C	469	1336-1340	2009
0	Miyanaga, Y	Effects of Sn-doping on J(C)-B properties and crystalline structure for YBCO films by advanced TFA-MOD method	PHYSICA C	469	1418-1421	2009
0	Mukoyama, S	Development of (RE)BCO cables for HTS power transmission lines	PHYSICA C	469	1688-1692	2009
0	Nakaoka, K	Investigation on starting solution of TFA-MOD process for high-speed production of YBCO coated conductors	PHYSICA C	469	1326-1328	2009
0	Okamoto, H	Development of 1 kA class HTS coil for superconducting power transformers	PHYSICA C	469	1733-1735	2009
0	Osamura, K	Reversible strain limit of critical currents and universality of intrinsic strain effect for REBCO-coated conductors	SUPERCOND SCI TECH	22		2009
0	Shiohara, Y	Japanese efforts on coated conductor processing and its power applications: New 5 year project for materials and power applications of coated conductors (M-PACC)	PHYSICA C	469	863-867	2009
0	Sugimoto, M	Electrodeposition of textured nickel on nickel alloy Hastelloy	PHYSICA C	469	1371-1373	2009
0	Sutoh, Y	Fabrication of high I-c film for GdBCO coated conductor by continuous in-plume PLD	PHYSICA C	469	1307-1310	2009
0	Takao, T	Degradation Due to Bending Fatigue Strain in YBCO Coated Conductors	IEEE T APPL SUPERCON	19	2988-2990	2009
0	Teranishi, R	Crystal Growth of Ba Concentration Controlled YBCO Films by TFA-MOD Process	IEEE T APPL SUPERCON	19	3200-3203	2009
0	Teranishi, R	J(C) properties and microstructures of YBCO films fabricated by low temperature calcination in TFA-MOD method	PHYSICA C	469	1332-1335	2009
0	Teranishi, R	Dependence of microstructures on growth rate in YBCO films by TFA-MOD method	PHYSICA C	469	1349-1352	2009
0	Teranishi, R	High-J(c) YBCO films using precursors with barium concentration gradient in film thickness by TFA-MOD process	PHYSICA C	469	1345-1348	2009

引用	筆頭者	タイトル	雑誌名	Vol	Page	発行年
0	Wang, X	Over-current characteristics of YBCO superconducting cable	PHYSICA C	469	1717-1721	2009
0	Wang, XD	Over-Current Characteristics of a 20-m-Long YBCO Model Cable	IEEE T APPL SUPERCON	19	1722-1726	2009
0	Yagi, M	Development of 1 m HTS conductor using YBCO on textured metal substrate	PHYSICA C	469	1693-1696	2009
0	Yamada, Y	Development of Long Length IBAD-MgO and PLD Coated Conductors	IEEE T APPL SUPERCON	19	3236-3239	2009
0	Yoshizumi, M	High production rate of IBAD-MgO buffered substrate	PHYSICA C	469	1361-1363	2009

「応用基盤技術開発 I 期」以降の関連の論文 (2009年末現在引用回数 1 回以上)

引用	筆頭者	タイトル	雑誌名	Vol	Page	発行年
177	Arai, M	Incommensurate spin dynamics of underdoped superconductor YBa ₂ Cu ₃ O _{6.7}	PHYS REV LETT	83	608-611	1999
50	Kambara, M	Construction of the quasi-ternary phase diagram in the Nd _{0.5} -BaO-CuO _x system in an air atmosphere: Part I, equilibrium tie lines in the Nd _{1+x} Ba _{2-x} Cu ₃ O _{6+δ} solid solution and liquid region	J AM CERAM SOC	81	2116-2124	1998
38	Honjo, T	Fabrication and growth mechanism of YBCO coated conductors by TFA-MOD process	PHYSICA C	392	873-881	2003
38	Muroga, T	Pulsed laser deposition method-CeO ₂ buffer layer for YBCO coated conductor	PHYSICA C	392	796-800	2003
34	Yamada, Y	Present status and perspective of IBAD and PLD system in SRL and self-epitaxy in PLD-CeO ₂ on IBAD seed layer	PHYSICA C	392	777-782	2003
33	Fuji, H	Fabrication processing of Y123 coated conductors by MOD-TFA method	PHYSICA C	378	1013-1016	2002
31	Watanabe, T	Progress and future prospects of research and development on coated conductors in Japan	IEEE T APPL SUPERCON	13	2445-2451	2003
30	Honjo, T	Growth mechanism of YBCO films in metal organic deposition method using trifluoroacetates	IEEE T APPL SUPERCON	13	2516-2519	2003
30	Teranishi, R	Growth mechanism of Y123 film by MOD-TFA process	PHYSICA C	378	1033-1038	2002
30	Nomura, K	Preferential growth mechanism of REBa ₂ Cu ₃ O _y (RE = Y, Nd) crystal on MgO substrate by liquid phase epitaxy	J MATER RES	16	979-989	2001
29	Shibata, J	Crystallization mechanism of Nd _{1+x} , Ba _{2-x} Cu ₃ O _{7-y} and YB ₂ Cu ₃ O _{7-y} films deposited by metalorganic deposition method using trifluoroacetates	J MATER RES	17	1266-1275	2002

引用	筆頭者	タイトル	雑誌名	Vol	Page	発行年
28	Nagashio, K	Microstructural control of NdBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} superconducting oxide from highly undercooled melt by containerless processing	J CRYST GROWTH	200	118-125	1999
26	Goodilin, E	Twins and related morphology of as-grown neodymium-rich Nd _{1+x} Ba _{2-x} Cu ₃ O _z crystals	PHYSICA C	299	279-300	1998
24	Muroga, T	CeO ₂ buffer layers deposited by pulsed laser deposition for TFA-MOD YBa ₂ Cu ₃ O _{7-x} superconducting tape	IEEE T APPL SUPERCON	13	2532-2534	2003
23	Yoshizumi, M	Effect of oxygen partial pressure on quasi-ternary phase diagram of Nd _{0.5} -BaO-CuO system	PHYSICA C	334	77-86	2000
21	Yao, X	Growth mechanism of high peritectic temperature Nd _{1+x} Ba _{2-x} Cu ₃ O _{7-δ} thick film on low peritectic temperature YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} seed film by liquid phase epitaxy	J CRYST GROWTH	234	611-615	2002
21	Yao, X	NdBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} stoichiometry control (at pO ₂ =0.21 atm) and enhancement of superconductivity	PHYSICA C	296	69-74	1998
20	Kato, T	TEM observations of Gd ₂ Zr ₂ O ₇ films formed by the ion-beam-assisted deposition method on an Ni-based alloy	PHYSICA C	392	790-795	2003
20	Kiss, T	Angular dependence of critical current properties in YBCO coated tape under high magnetic field up to 18 T	PHYSICA C	378	1113-1117	2002
19	Nakamura, Y	Percolation analysis of the effect of tape length on the critical current density of 123 coated conductors	PHYSICA C	371	275-284	2002
19	Fuji, H	Deposition of CeO ₂ /YSZ buffer layer on Hastelloy substrates for MOD process of YBa ₂ Cu ₃ O _{7-x} film	PHYSICA C	357	1011-1014	2001
19	Izumi, T	Preferential growth mechanism of YBCO film on MgO substrate in initial stage of LPE growth	J CRYST GROWTH	219	228-236	2000
19	Kakimoto, K	Initial growth mechanism of YBCO films in liquid phase epitaxy process	PHYSICA C	334	249-258	2000
18	Kambara, M	Non-steady state solidification of the Nd-123 superconducting oxides	PHYSICA C	330	191-202	2000
17	Izumi, T	High-I _c YBCO coated conductors by metal organic deposition method using trifluoroacetates	IEEE T APPL SUPERCON	13	2500-2503	2003
16	Yao, X	YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} thin-film-seeded Nd _{1+x} Ba _{2-x} Cu ₃ O _{7-δ} thick-film grown by liquid phase epitaxy	PHYSICA C	378	1209-1212	2002

引用	筆頭者	タイトル	雑誌名	Vol	Page	発行年
15	Shibata, J	Effects of heat-treatment conditions on microstructure of Y123 films deposited by TFA-MOD method	PHYSICA C	392	922-926	2003
15	Tokunaga, Y	High critical current YBCO thick films by TFA-MOD process	PHYSICA C	392	909-912	2003
15	Yoshizumi, M	Phase separation of Nd _{1+x} Ba _{2-x} Cu ₃ O _{6+δ} during annealing processing	PHYSICA C	357	354-358	2001
14	Izumi, T	All Japan efforts on R&D of HTS coated conductors for future applications	PHYSICA C	392	40437	2003
14	Kiss, T	Percolative transition and scaling of transport E-J characteristics in YBCO coated IBAD tape	IEEE T APPL SUPERCON	13	2607-2610	2003
14	Nomura, K	Initial growth mechanism of YBa ₂ Cu ₃ O _y crystal on MgO substrate by liquid-phase epitaxy	J MATER RES	16	2947-2958	2001
13	Fuji, H	Processing for long YBCO by TFA-MOD coated conductors process	PHYSICA C	392	905-908	2003
13	Yao, X	Large-sized SmBCO single crystals with T _c over 93 K grown in atmospheric ambient by crystal pulling	SUPERCOND SCI TECH	16	L13-L17	2003
13	Kuznetsov, M	Ternary phase diagram of Sm _{0.5} -Ba ₀ -Cu _{0y} system for melt processing	PHYSICA C	357	1068-1072	2001
12	Kiss, T	Critical current properties in HTS tapes	PHYSICA C	392	1053-1062	2003
12	Takahashi, Y	In-plane textured oxide buffer layer for the TFA-MOD method on $\langle 100 \rangle$ {001} Ni tapes using MOD process	PHYSICA C	392	887-894	2003
10	Inoue, M	Estimation of E-J characteristics in a YBCO coated conductor at low temperature and very high magnetic field	PHYSICA C	392	1078-1082	2003
10	Limonov, MF	Phonon Raman study of the NdBa ₂ (2)Cu ₃ O _y -Nd ₂ Ba ₁ Cu ₃ O _y system	PHYS REV B	58	12368-12376	1998
9	Iguchi, T	Metal-organic deposition of RE-Ba-Cu-O (RE = Dy, Ho, Er, and Tm) films using trifluoro acetates	PHYSICA C	392	900-904	2003
9	Honjo, T	Growth mechanism of Y123 film by MOD-TFA method	J JPN I MET	66	151-154	2002
9	Nomura, K	High quality YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} film prepared by liquid phase epitaxy	J JPN I MET	64	323-326	2000
9	Yao, X	Crystal growth and superconductivity of Y _{1-x} Nd _x Ba ₂ Cu ₃ O _{7-δ} solid solutions	APPL SUPERCOND	6	175-183	1998

引用	筆頭者	タイトル	雑誌名	Vol	Page	発行年
9	Yao, X	Process for high growth rate and high superconducting properties of REBCO single crystals	MAT SCI ENG B-SOLID	53	40499	1998
8	Hasegawa, K	Improvement of superconducting properties of SmBa ₂ Cu ₃ O _y films on MgO substrate by using BaZrO ₃ buffer layer	PHYSICA C	392	835-840	2003
8	Hasegawa, K	Investigation of texture development on MgO films prepared by inclined substrate deposition with electron-beam evaporation	PHYSICA C	357	967-970	2001
8	Hayashi, A	Fabrication of Y-Ba-Cu-O superconducting rods for current leads by unidirectional solidification	PHYSICA C	357	669-672	2001
8	Yao, X	Superconducting transition temperature of NdBCO liquid phase epitaxy film on MgO substrate and effect of Mg diffusion	PHYSICA C	357	1059-1062	2001
8	Goodilin, E	Phase diagram and structure - Related studies of the Nd-rich Nd _{1+x} Ba _{2-x} Cu ₃ O _z solid solution	NATO ASI 3 HIGH TECH	62	145-150	1999
7	Kambara, M	Role of the primary phase particles during the peritectic solidification of Y-123 superconducting oxides	J MATER RES	16	2229-2238	2001
7	Nagashio, K	Direct growth of REBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} (RE=Yb, Er, Y, Dy, Eu, Sm, Nd and Pr) from undercooled melt using aero-acoustic levitator	ACTA MATER	49	2557-2565	2001
7	Izumi, T	Single crystal growth and LPE thin film process for RE-123 superconducting materials	PHYSICA C	337	40378	2000
7	Maeda, J	Microstructures and solidification behavior in Y-Ba-Cu-O/Ag superconducting leads	J MATER RES	14	2739-2750	1999
6	Kai, M	Influence of the second buffer layer for alignment of seed film on Ni tape with NiO buffer layer	PHYSICA C	378	998-1002	2002
6	Takahashi, Y	Preparation of YBCO films on CeO ₂ /Zr ₂ Gd ₂ O ₇ /Hastelloy tapes by the TFA-MOD method	PHYSICA C	378	1024-1027	2002
6	Tokunaga, Y	All Japan efforts on fundamental materials technology developments for HTS applications focusing on R&D of coated conductors	CRYOGENICS	42	393-398	2002
6	Izumi, T	Coated conductor of RE-Ba-Cu-O thick film on metal tape fabricated by liquid phase epitaxy process	IEEE T APPL SUPERCON	11	2917-2922	2001
6	Maeda, J	The effect of residual stress on crack propagation in a YBCO/Ag composite	SUPERCOND SCI TECH	12	563-565	1999

引用	筆頭者	タイトル	雑誌名	Vol	Page	発行年
6	Maeda, J	Unidirectional-solidification of Y-Ba-Cu-O/Ag superconducting rods	PHYSICA C	322	151-162	1999
6	Oka, A	J(c)-H curves for untwinned orthorhombic YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} and NdBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} single crystals	PHYSICA C	314	269-276	1999
6	Sumida, M	Floating zone partial melting and solidification of SmBCO superconductor under low oxygen partial pressure	J MATER RES	13	2807-2818	1998
6	Tagami, M	Equilibrium tie-line in PrO _y -BaO-CuO ternary phase diagram around peritectic temperature of Pr _{1+x} Ba _{2-x} Cu ₃ O _{7-δ}	J MATER RES	13	118-125	1998
5	Araki, T	Carbon expelling scheme and required conditions for obtaining high-J(c) YBa ₂ Cu ₃ O _{7-x} film by metalorganic deposition using trifluoroacetates	IEEE T APPL SUPERCON	13	2803-2808	2003
5	Hasegawa, K	Comparative study on texture development of MgO and YSZ films grown by inclined substrate deposition technique	PHYSICA C	378	955-959	2002
5	Inoue, M	Critical current properties in YBCO coated IBAD tapes	PHYSICA C	372	794-797	2002
5	Matsushita, T	Critical current properties in superconducting Y-123 tapes	PHYSICA C	378	1102-1107	2002
5	Sumida, M	Morphological stability of Sm ₁₂₃ superconductor during peritectic solidification from Sm ₂₁₁ +L mixture	METALL MATER TRANS B	31	141-149	2000
5	Maeda, J	Reaction between YBCO/Ag superconductor and melted silver	SUPERCOND SCI TECH	12	45-47	1999
5	Matsukawa, M	In-plane thermal conductivity of a large single crystal of YBa ₂ Cu ₃ O _{7-x} in the mixed state	J MAGN MAGN MATER	177	529-530	1998
5	Oka, A	Study of oxygen diffusion in NdBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} single crystal by in-situ observation of twin formation	PHYSICA C	305	213-220	1998
4	Teranishi, R	Growth mechanism of YBCO film by TFA-MOD process	PHYSICA C	392	882-886	2003
4	Hasegawa, K	Preparation of SmBa ₂ Cu ₃ O _y films with improved in-plane alignment by pulsed laser deposition	J JPN I MET	66	320-328	2002
4	Shibata, J	Transmission electron microscopic studies on the growth mechanism of YBa ₂ Cu ₃ O _{7-y} and Nd _{1+x} Ba _{2-x} Cu ₃ O _{7-y} films formed by metalorganic deposition method using trifluoroacetates	PHYSICA C	378	1039-1044	2002

引用	筆頭者	タイトル	雑誌名	Vol	Page	発行年
4	Usagawa, T	Homoepitaxial YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} SNS junctions with normal layers of YBa ₂ (Cu _{1-x} Fex) ₃ O _{7-δ} , YBa ₂ (Cu _{1-x} Znx) ₃ O _{7-δ} , and PrBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} grown on (001)YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} single crystal substrates	PHYSICA C	370	132-140	2002
4	Yao, X	Superconducting properties of Ca-doped YBCO thick film by liquid phase epitaxy	PHYSICA C	378	107-111	2002
4	Hasegawa, K	Preparation of MgO films on metal substrate as a buffer layer for liquid phase epitaxy processed RE123 coated conductor	PHYSICA C	354	424-428	2001
4	Honjo, T	Preparation of REBa ₂ Cu ₃ O _{7-x} films grown by metal trifluoroacetate precursors	PHYSICA C	357	999-1002	2001
4	Izumi, T	Effect of volume fraction on coarsening of Y ₂ BaCuO ₅ particles in Ba-Cu-O melt	MATER T JIM	42	227-232	2001
4	Kakimoto, K	Y-system coated conductor on metal substrate by LPE method	PHYSICA C	341	2489-2490	2000
4	Shiohara, Y	R&D of coated conductors in Japan	PHYSICA C	341	2521-2524	2000
4	Oka, A	X-ray absorption study of oxygen configurations in YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} single crystals annealed by two step heat treatments	PHYSICA C	319	249-257	1999
4	Goodilin, E	Crystal growth of the neodymium-rich Nd _{1+x} Ba _{2-x} Cu ₃ O _z solid solution	MAT SCI ENG B-SOLID	53	54-61	1998
3	Kai, M	Fabrication of Zn-doped RE123 LPE films for persistent current switch materials	PHYSICA C	392	961-964	2003
3	Niwa, T	Calcining conditions for YBa ₂ Cu ₃ O _{7-x} films by metalorganic deposition using trifluoroacetates	IEEE T APPL SUPERCON	13	2747-2750	2003
3	Yao, X	Development and problems in liquid phase epitaxy of high temperature superconductor	PHYSICA C	386	374-378	2003
3	Izumi, T	Fabrication of coated conductor using LPE process	PHYSICA C	378	989-992	2002
3	Kai, M	Shape control mechanism in RE123 LPE films for persistent current switch material	J JPN I MET	66	921-924	2002
3	Nomura, K	Fabrication of meander shaped (Y,Yb)BCO LPE films for PCS materials	PHYSICA C	378	1003-1008	2002
3	Izumi, T	Liquid phase epitaxy processed coated conductors on metal tapes	PHYSICA C	357	1027-1033	2001
3	Kawase, Y	Directional solidification of Y123 thin fiber with different growth rates	PHYSICA C	357	673-676	2001
3	Nomura, K	Growth mechanism of RE-Ba-Cu-O film on MgO substrate by liquid phase epitaxy	PHYSICA C	357	1377-1381	2001

引用	筆頭者	タイトル	雑誌名	Vol	Page	発行年
3	Yao, X	Formation of Nd _{1-x} (Ba _{1-y} Sr _y)(2-x)Cu ₃ O ₇ + δ solid solutions by crystal pulling	J MATER RES	16	529-533	2001
3	Nakamura, Y	LPE process application to RE123 coated conductor	PHYSICA C	341	2323-2326	2000
3	Nakamura, Y	Analysis of growth behavior of the RE123 crystals using the ternary phase diagram	PHYSICA C	341	2417-2420	2000
3	Saba, FM	Possibility of Nd _{1.9} Ba _{1.1} Cu ₃ O ₇ + δ and Pr _{1.4} Ba _{1.86} Cu ₃ O ₇ - δ single crystals for insulator in high-speed superconducting circuits	IEEE T APPL SUPERCON	10	1662-1666	2000
2	Hasegawa, K	Mechanism for improvement of in-plane alignment of SmBa ₂ Cu ₃ O _y films by BaZrO ₃ buffer layer on MgO substrate	J JPN I MET	67	295-301	2003
2	Sekitani, T	Transport measurements of high-T _c superconductors at megagauss magnetic fields by means of a radio frequency transmission technique	PHYSICA C	392	116-122	2003
2	Huang, DX	Mechanism of liquid-phase epitaxy growth of NdBa ₂ Cu ₃ O _{7-x} film from low-peritectic-temperature YBa ₂ Cu ₃ O _{7(-x)} seed film	J MATER RES	17	747-754	2002
2	Yao, X	Superconducting REBCO/ME-NdBCO/MgO multilayer structure by the liquid phase epitaxy process (RE = Y, Sm and Nd; ME Ni, Mg)	SUPERCOND SCI TECH	15	23-28	2002
2	Hobara, N	Fabrication of YBa ₂ Cu ₃ O _y layer on metal substrate using liquid phase epitaxy method	PHYSICA C	357	1038-1041	2001
2	Izumi, T	LPE growth of RE123 crystals from NiO saturated solution	IEEE T APPL SUPERCON	11	3481-3484	2001
2	Nomoto, S	Numerical analysis of columnar grains growing in melt convection by phase field model	J JPN I MET	65	310-316	2001
2	Nomura, K	Preferential growth of RE-Ba-Cu-O crystal by liquid phase epitaxy process	J CRYST GROWTH	229	384-390	2001
2	Nomura, K	Initial growth mechanism of YBa ₂ Cu ₃ O _y /MgO film by liquid phase epitaxy	J JPN I MET	65	175-178	2001
2	Shibata, J	Influence of antiphase boundaries on critical current densities in YBa ₂ Cu ₃ O _{7-y} single crystals	J MATER RES	16	1935-1941	2001
2	Yao, X	Crystal growth of NdBa ₂ (Cu _{1-x} Ni _x)(3)O ₇ - δ solid solutions by top-seeded solution growth for HTS device and tape applications	J CRYST GROWTH	229	374-377	2001

引用	筆頭者	タイトル	雑誌名	Vol	Page	発行年
2	Yao, X	REBCO superconductor on Ni-NdBCO buffered MgO substrate by liquid phase epitaxy process (RE = Nd, Sm, Y)	PHYSICA C	357	1063-1067	2001
2	Hobara, N	Fabrication of YBCO-LPE film on metal using MgO-saturated solution	J JPN I MET	64	727-730	2000
2	Nakamura, Y	Phase diagram and crystal growth of RE123 superconductive oxides	PHYSICA C	335	56-60	2000
2	Seiki, S	Low resistivity connection between YBCO superconductor and silver	PHYSICA C	341	2623-2624	2000
2	Maeda, J	Solidification behavior and a quasi-ternary phase diagram of the YBCO Ag system	J JPN I MET	63	397-405	1999
2	Maeda, J	Influence of oxygen partial pressure on growth morphologies in unidirectionally solidified YBCO-Ag superconducting composites	SUPERCOND SCI TECH	12	232-237	1999
2	Nomoto, S	Numerical analysis of purely diffusion controlled Ostwald ripening in a solid-liquid mixture	MATER T JIM	40	1413-1421	1999
2	Oka, A	Effect of heat treatment on J(c)-H curve for YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} single crystal	PHYSICA C	322	65-72	1999
2	Imagawa, Y	Effect of high oxygen partial pressure atmosphere for melt-processed YBa ₂ Cu ₃ O _{6+δ} current lead by unidirectional solidification	PHYSICA C	308	235-242	1998
2	Mimura, T	Unusual resistivity broadening in the mixed state of NdBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} crystals grown by a crystal-pulling technique	PHYSICA C	300	212-216	1998
1	Hayashi, A	Fabrication of Sm-Ba-Cu-O superconducting rods for current leads by unidirectional solidification	PHYSICA C	392	970-974	2003
1	Inoue, A	RE123 LPE film on BaZrO ₃ buffered MgO substrate for PCS material	PHYSICA C	392	965-969	2003
1	Kai, M	Size control mechanism of RE123 LPE film on BaZrO ₃ buffered MgO substrate for PCS material	J JPN I MET	67	153-156	2003
1	Kai, M	Fabrication of meander shaped RE123 LPE films for PCS materials	IEEE T APPL SUPERCON	13	2781-2784	2003
1	Yokoo, T	Incommensurate dynamical properties of optimally doped YBa ₂ Cu ₃ O _{6.9}	J LOW TEMP PHYS	131	731-735	2003
1	Fuji, H	Development of next generation RE-123 coated conductors	J JPN I MET	66	207-213	2002
1	Honjo, T	MOD-TFA processing for REBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} coated conductors	AIP CONF PROC	614	581-588	2002

引用	筆頭者	タイトル	雑誌名	Vol	Page	発行年
1	Nomoto, S	Numerical analysis of coarsening of Y2BaCuO5 particles in Ba-Cu-O melt by phase field model	J JPN I MET	66	139-142	2002
1	Nomura, K	Growth and characterization of large REBa2Cu3Oy (RE = Y, Yb) crystalline films by liquid phase epitaxy process	J JPN I MET	66	289-296	2002
1	Nomura, K	Enlargement of REBa2Cu3Oy (RE = Y, Yb) quasi-single crystalline film by liquid phase epitaxy	PHYSICA C	378	1216-1221	2002
1	Yamada, Y	Development of high critical current TFA-MOD YBCO coated conductors	AIP CONF PROC	614	631-638	2002
1	Yao, X	Cu-site-substituted REBa2Cu3O7-delta single crystals by top-seeded solution-growth (RE = rare earth element)	PROG SOLID STATE CH	30	133-152	2002
1	Hobara, N	Development of double layered LPE processing for high-T-c RE123 coated conductors using MgO saturated system	J JPN I MET	65	799-802	2001
1	Izumi, T	Growth of RE123 films from NiO-saturated solution by liquid phase epitaxy	PHYSICA C	357	1046-1049	2001
1	Nomoto, S	Volume fraction dependence on coarsening of Y2BaCuO5 particles in Ba-Cu-O melt	J CRYST GROWTH	231	136-142	2001
1	Nomura, K	Growth of large REBa2Cu3Oy (RE = Y, Yb) film of 2 inch diameter by liquid phase epitaxy	JPN J APPL PHYS 2	40	L1362-L1364	2001
1	Usagawa, T	(110) NdBa2Cu3O7-delta and YBa2Cu3O7-delta films grown on (110) NdBa2Cu3O7-delta single crystal substrates by 90 degrees off-axis RF magnetron sputtering methods	JPN J APPL PHYS 2	40	L792-L795	2001
1	Yao, X	Improvement of superconducting properties in YBa2Cu3O7-delta liquid phase epitaxy thick-film by Ca doping	JPN J APPL PHYS 2	40	L1314-L1316	2001
1	Yoshizumi, M	Solid state phase transformation of Nd1+xBa2-xCu3O6+delta during annealing processing	J JPN I MET	65	139-142	2001
1	Izumi, T	Growth of RE123 crystal from the NiO saturated solution by LPE method	J JPN I MET	64	719-722	2000
1	Maeda, J	Coarsening of Y211 phase particles in the Y-Ba-Cu-O superconducting system	J JPN I MET	64	184-189	2000
1	Oka, A	Effect of heat treatment on critical current density-magnetic field curve for YBa2Cu3O7-delta single crystal and its microstructure	JPN J APPL PHYS 1	39	5822-5827	2000

引用	筆頭者	タイトル	雑誌名	Vol	Page	発行年
1	Oka, A	Critical current density-magnetic field curve for untwinned orthorhombic Nd _{1+x} Ba _{2-x} Cu _{3O₇} +/-delta single crystal and its microstructure	JPN J APPL PHYS 1	39	6515-6522	2000
1	Yao, X	Crystal growth and superconductivity of Fe-doped YBCO single crystals	PHYSICA C	339	99-105	2000
1	Morishita, T	Homoepitaxial growth of YBa ₂ Cu _{3O_x} films	CHINESE J PHYS	36	269-275	1998
1	Tagami, M	Interface structures of heteroepitaxially grown Pr ₁₂₃ /Y ₁₂₃ and Pr ₁₂₃ /Nd ₁₂₃ crystals by liquid phase epitaxy	PHYSICA C	298	185-194	1998

参考：超電導応用基盤技術研究開発プロジェクト(第Ⅱ期)特許件数

年度 (西暦)	国内	海外
平成15年度 (2003)	1	0
平成16年度 (2004)	6	1
平成17年度 (2005)	14	4
平成18年度 (2006)	19	13
平成19年度 (2007. Apr-Dec)	19	7
平成19年度 (2008. Jan-Mar)	25	8

2. 分科会における説明資料

次ページより、プロジェクト推進・実施者が、分科会においてプロジェクトを説明する際に使用した資料を示す。

「イットリウム系超電導電力機器技術開発」(中間評価)

2008年度～2012年度 5年間

プロジェクトの概要 (公開)

NEDO技術開発機構
 エネルギー対策推進部
 2010年9月1日

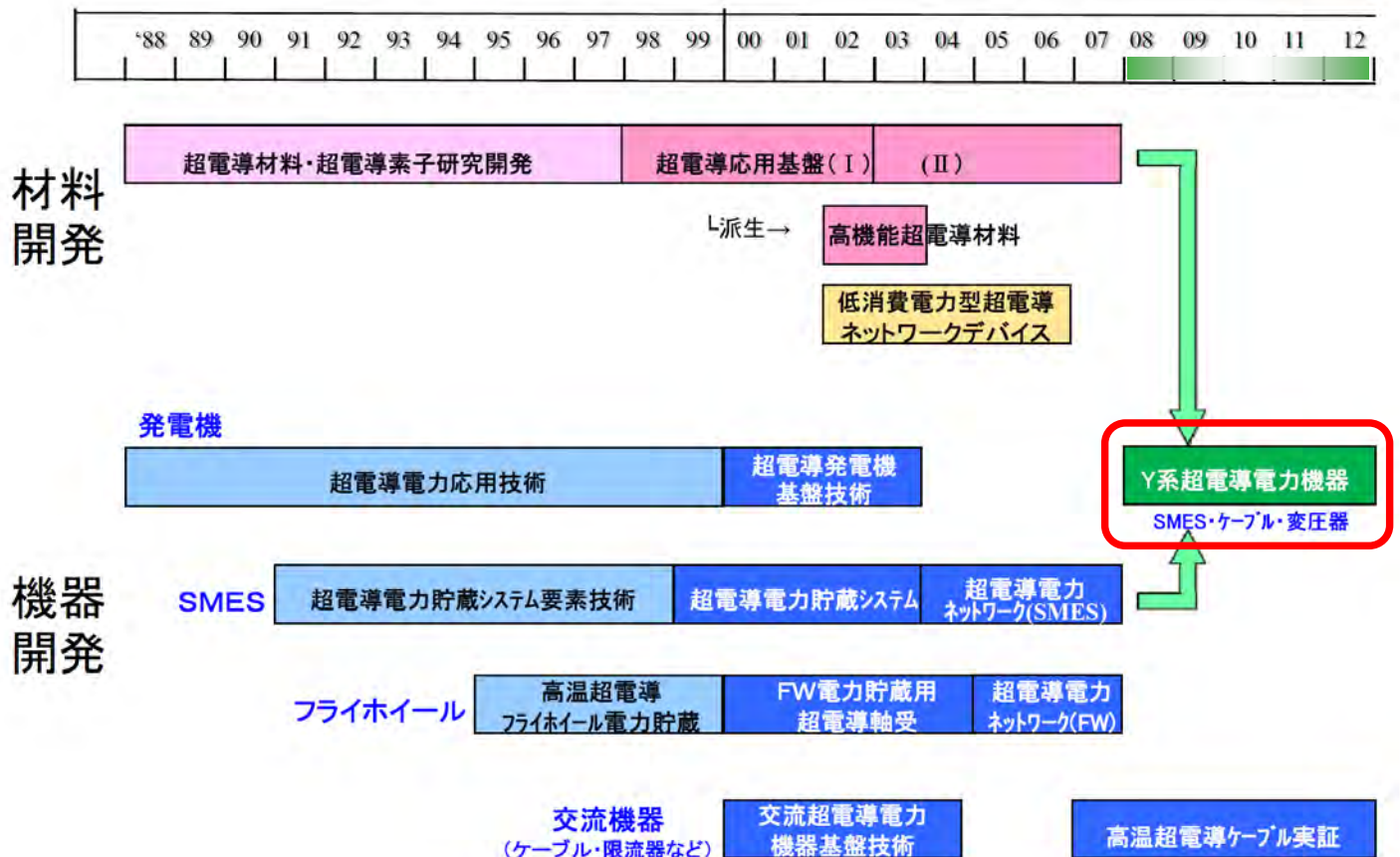
複製を禁ず

1/20

I 事業の位置付け・必要性について

公開

NEDO - 高温超電導(HTS)技術開発の動き



超電導機器による都市部への電力安定供給



研究開発の必要性

社会的要請

電力需要
増大

都市地域
過密化

電力機器
老朽化

地球環境問題
対応

省スペース・高効率 電力機器

高温超電導線材・導体

NEDO 関与する意義

社会的側面

- ・ エネルギー安定供給、地球環境問題への対応
→ 超電導技術の**早期実用化**、**導入普及**が期待される

技術的側面

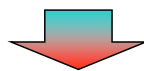
- ・ ほとんど実用化例がない、**高温超電導現象**による**革新的技術開発**
- ・ 実用化には多くの技術課題を有する
→ **民間のみでの事業は困難**



**国・NEDOが主導、産学官の英知を結集して
研究開発を推進する**

政策・施策

- **第3期科学技術基本計画**／平成18年3月 閣議決定
分野別推進戦略
－エネルギー分野、ものづくり分野
- **イノベーションプログラム基本計画**／平成20年4月 経済産業省策定
エネルギーイノベーションプログラム
－原子力等利用の推進とその大前提となる安全の確保
- **Cool Earth－エネルギー革新技術計画**／平成20年3月 経済産業省策定
重点的に取り組むべきエネルギー革新「21」技術
－超電導高効率送電



リ튠系超電導電力機器技術開発

- ・ **エネルギー貯蔵システム(SMES)**
- ・ **ケーブル**
- ・ **変圧器**
- ・ **機器用線材**
- ・ **機器適用技術標準化**

第3期科学技術基本計画 平成18～22年度

1. 基本理念

★ 第3期基本姿勢

- ① 社会・国民に支持され、成果を還元する科学技術
- ② 人材育成と競争的環境の重視～モノから人へ、機関における個人の重視

★ 政府研究開発投資<約25兆円>

(注) 第3期基本計画期間中に政府研究開発投資の対GDP比率が1%、上記期間におけるGDPの名目成長率が平均3.1%を前提としているものである。

★ 政策目標の設定

政府研究開発投資が何を指すのかを明確にし、政策目標に向けた施策を展開。

<理念1> 人類の英知を生む

<目標1> 飛躍知の発見・発明

- ～未来を切り拓く多様な知識の蓄積・創造
- (1) 新しい原理・現象の発見・解明
- (2) 非連続な技術革新の源泉となる知識の創造

<目標2> 科学技術の限界突破

- ～人類の夢への挑戦と実現
- (3) 世界最高水準のプロジェクトによる科学技術の牽引

<理念2> 国力の源泉を創る

<目標3> 環境と経済の両立

- ～環境と経済を両立し持続可能な発展を実現
- (4) 地球温暖化・エネルギー問題の克服
- (5) 環境と調和する循環型社会の実現

<目標4> イノベーター日本

- ～革新を続ける強靱な経済・産業を実現
- (6) 世界を驚かすユビキタス社会の実現
- (7) ものづくりナンバーワン国家の実現
- (8) 科学技術により世界を驚かす産業競争力の強化

<理念3> 健康と安全を守る

<目標5> 生涯はつらつ生活

- ～子供から高齢者まで健康な日本を実現
- (9) 国民を悩ます病の克服
- (10) 誰もが元気に暮らせる社会の実現

<目標6> 安全が誇りとなる国

- ～世界一安全な国・日本を実現
- (11) 国土と社会の安全保障
- (12) 暮らしの安全保障

2. 科学技術の戦略的重点化

(1) 基礎研究の推進

- ・多様性を確保しつつ、一定の資源を確保して着実に推進
- ・科研費等自由な発想に基づく研究は、政策課題対応型研究開発には含まれないことを明確化

(2) 政策課題対応型研究開発における重点化

- ・「重点推進4分野」に優先的に資源配分 ⇒ ライフサイエンス、情報通信、環境、ナノ材料
- ・「推進4分野」に適切に資源配分 ⇒ エネルギー、ものづくり技術、社会基盤、フロンティア
- ・8分野で「分野別推進戦略」を策定し、重要な研究開発課題を選定、各々の政策目標も明確化
- ・本計画期間中に重点投資する「戦略重点科学技術」を選定し、選択・集中・戦略重点科学技術の中で、「国家基幹技術」を精選し、厳正な評価等を実施

(3) 研究開発の効果的な実施 ～「活きた戦略」の実現

- ・年間の政策サイクルを確立し、「活きた戦略」の実施
- ⇒ 情勢変化を踏まえた適切な戦略・資源配分方針見直し、関係府省・研究機関のネットワーク・連携基盤強化 など

4. 社会・国民に支持される科学技術

- (1) 科学技術が及ぼす倫理的・法的・社会的課題への責任ある取組
- (2) 説明責任と情報発信の強化
- (3) 科学技術に関する国民意識の醸成
- (4) 国民の科学技術への主体的参加の促進

3. 科学技術システム改革の推進

(1) 人材の育成、確保、活躍の促進

- ・個々の人材が活きる環境の形成 ⇒ 若手研究者の自立支援、教員の自校出身者比率の抑制、女性研究者採用の目標25% など
- ・大学の科学技術を担う人材の裾野の拡大

(2) 科学の発展と絶えざるイノベーションの創出

- ・競争的環境の醸成 ⇒ 競争的資金の拡充、全ての競争的資金において間接経費30%措置
- ・大学の競争力の強化 ⇒ 世界トップクラスの研究拠点を30程度形成、地域の大学の活性化を通じた地域再生(「地域の知の拠点再生プログラム」)、私立大学の研究機能の強化 など
- ・イノベーションを生み出すシステムの強化 ⇒ 産業界の参画による先端的な融合領域研究拠点の形成 など
- ・研究費の有効活用 ⇒ 競争的資金以外の研究費も含めた府省横断的なデータベースの整備・活用
- ・円滑な科学技術活動と成果還元に向けた制度・運用上の隘路の解消

(3) 科学技術振興のための基盤の強化

- ・優秀な人材の育成・活用を支える研究教育基盤の構築
- ⇒ 老朽化施設の再生を中心とした「第2次国立大学等施設緊急整備5か年計画」の策定
- ・先端大型共用研究設備の整備・共用の促進、「知的基盤整備計画」の見直し など

(4) 国際活動の戦略的推進

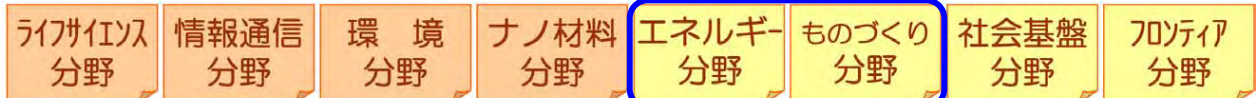
- ・アジア諸国との協力 ⇒ アジア諸国とのハイレベルでの政策対話(アジア地域科学技術関係会議等)

5. 総合科学技術会議の役割

- 司令塔機能の強化 / 「知恵の場」／顔の見える存在
- ・政府研究開発の効果的・効率的推進
- ⇒ 科学技術連携施策群の本格的推進、調査分析・調整機能の強化
- ・基本計画や政策目標達成に向けた適切なフォローアップとその進捗の促進

第3期科学技術基本計画 平成18～22年度

分野別推進戦略の内容



重点推進4分野

推進4分野

8つの分野毎に策定

- 状況認識
- 目標設定
研究開発目標・成果目標を政府の責任部署とともに明記
- 重要な研究開発課題
今後5年間に政府が取り組むべき重要な課題を抽出
- 戦略重点科学技術
特に今後5年間に集中投資すべき科学技術を選定
- 研究開発の推進方策
取組を円滑に進め「活きた戦略」を実現する方策を明記

第3期科学技術基本計画 平成18～22年度

重要な研究開発課題の体系

エネルギー源の多様化

原子力エネルギーの利用の推進

- 次世代軽水炉・軽水炉高度利用技術
 - 高速増殖炉(FBR)サイクル技術
 - ウラン濃縮・新燃料技術
 - 使用済燃料再処理技術(軽水炉関係)
 - 高レベル放射性廃棄物等の地層処分技術
 - 原子力施設の廃止措置技術・放射性廃棄物処理処分技術
 - 核融合エネルギー技術
 - 原子力基礎・基礎、核不拡散技術研究開発
 - 高温ガス炉などの革新的原子システム技術
- 原子力安全の確保
- 原子力安全研究

再生可能エネルギー等の利用の推進

- 太陽エネルギー利用技術
- バイオマス・廃棄物エネルギー利用技術
- 風力等その他の再生可能エネルギー利用技術

水素／燃料電池

- 燃料電池・水素関連技術

化石燃料の開発・利用の推進

- エネルギー資源探査技術
- 化石燃料採掘技術
- 石油精製・利用技術
- グリーン石炭利用技術
- 化石系新液体燃料製造技術
- 高効率天然ガス発電技術
- 高効率ガスエンジン技術
- 二酸化炭素回収・貯留技術

エネルギー供給システムの高度化・信頼性向上

電力関連

- 送電技術
- 電力系統制御技術
- 電力貯蔵技術

ガス関連

- ガス供給技術

石油関連

- 石油供給基盤技術

省エネルギーの推進

民生部門の対策

- 住宅・建築物関連省エネ促進技術
- 高効率空調・給湯・照明技術
- 高効率情報家電・通信機器技術
- 都市システム技術

運輸部門の対策

- 次世代自動車技術
- 省エネ航空機・船舶技術
- 物流効率化技術

産業部門の対策

- 省エネ型素材製造プロセス技術
- 省エネ型組立・加工技術
- 産業間連携省エネシステム技術

部門横断的な対策

- 熱有効利用技術
- 高性能デバイス技術

第3期科学技術基本計画 平成18～22年度

重要な研究開発課題の体系

技術 共通基盤的なものづくり

(1) ITを駆使したものづくり基盤技術の強化

【概要】ITを駆使して、人が協調できる、ものづくり現場で使いやすい日本型ものづくりシステム技術を開発する。国は技術のプラットフォーム化を進めつつ、我が国ものづくりの強みの強化に繋がるようなシステムとし、人が主役のものづくり現場実現を目指す。

(2) ものづくりのニーズに応える新しい計測分析技術・機器開発、精密加工技術

【概要】次世代ものづくりリノベーションを支える基盤技術の高度化、高精度化や、人が協調するものづくり環境の実現、施設や巨大な機械システムの安全性確保等に資する技術の「可視化」を目指して、計測分析技術・機器開発、精密加工技術、センシング、モニタリング技術の開発、高度化を図る。実施にあたっては、(1)ITを駆使したものづくり基盤技術の強化と関連させつつ取り組む。

(3) 中小企業のものづくり基盤技術の高度化

【概要】我が国ものづくり、あるいは燃料電池や情報家電等の先端新産業分野に必要なとされる基盤技術を支える中小企業が主として担う、製造、鍛造、めっき、金型加工等や、我が国の強みであるものづくり基盤技術の高度化を図る。

(4) 巨大な機械システム構築に貢献するものづくり技術

【概要】航空機、ジェットエンジン、ロケット、人工衛星、原子力発電所等の巨大な機械システムを製造、構築していくために、ものづくり基盤技術として推進される、計測、設計、材料、加工、シミュレーション、モニタリング等のあらゆる要素技術をインテグレートした、国際競争力ある総合技術を開発、蓄積する。国は民間企業の取組を支援しつつ、成果が社会と国民の安心・安全につながるような手立てを講じる。

見込まれるものづくり技術 革新的・飛躍的発展が

(5) 世界をリードする高付加価値材料を生み出すものづくり技術

【概要】我が国が強みとしている素材、部材産業について、引き続き競争力を維持、強化するために、革新的手法を用いた材料の高機能化、高付加価値化を目指す。国は公的研究機関を含めた産学連携により、出口を見据えた基礎的な材料の劣化や反応メカニズム解明及びその評価等、科学に立脚した材料開発を支援する。

(6) 人口減少社会に適應する、ロボット等を使ったものづくりの革新

【概要】人が主役のものづくり現場で、人を支援し、人と協働できるロボット等を開発し、(1)ITを駆使したものづくり基盤技術の強化と連動させて、我が国ものづくりの新たな強みを創生する。国は、産学官が取り組むロボット等の開発を支援しつつ、ものづくり現場への普及を図るため、システムの互換性、安全性等使いやすさを追求する基盤や環境整備と標準化に取り組み、世界のデファクトスタンダード化を目指す。

(7) バイオテクノロジーを活用したものづくりの革新

【概要】我が国の強みである、微生物や植物等の生物機能を活用したバイオプロセス技術の開発により、科学技術に裏付けされた革新的な省エネルギー環境調和型ものづくり技術の実現を推進する。国は開発にあたって、法整備や製品から材料にまで渡るトレーサビリティの確保に留意する。

(8) ものづくりプロセスの省エネルギー化

【概要】世界的にも優れた我が国の省エネルギー技術の高度化を図ると共に、ものづくりプロセスに積極的に導入することで、革新的な省エネルギー型ものづくり技術の実現を推進する。国は民間の行う新技術開発を支援しつつ、導入段階における技術の普及・定着を推進するための環境整備にも取り組む。

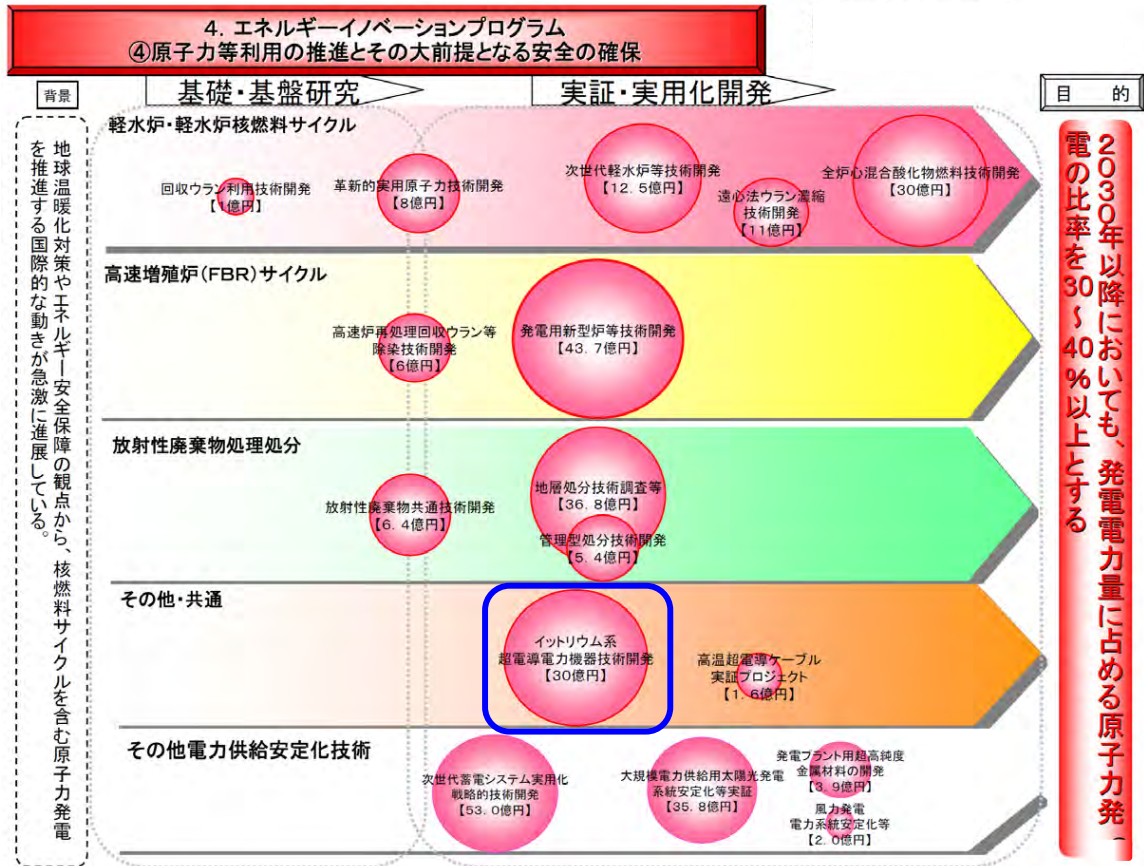
(9) 資源を有効利用し、環境に配慮したものづくり技術

【概要】我が国の強みである材料技術等を駆使して、世界の環境規制よりも厳しい規制をクリアし、資源の有効利用と有害廃棄物発生を抑制する、環境に配慮した革新的なものづくり技術の世界に先駆けて開発する。国は、民間企業が行う新技術開発を支援しつつ、導入段階における技術の普及・定着を推進するための環境整備にも取り組むと共に、開発した技術をグローバルに展開して、環境配慮型ものづくり技術の世界的な普及を目指す。国内では、特に製造業の中核をなす中小企業の取組を支援する。

(10) ものづくり人材の育成強化と活躍促進

【概要】2007年問題によって失われる可能性のある、団塊の世代が有するものづくりの知識、ノウハウ等の現場の技術を維持、確保するための実践的な人材育成を推進する。また、有能で経験豊かな中高年人材の活躍促進の機会や仕組みを構築する。これらの課題の解決には、産業界と大学等の協働による取組が必要であり、国がその方向付けと支援を実施する。

イノベーションプログラム - METI



Cool Earth エネルギー革新技術計画 - METI

— 重点的に取り組むべきエネルギー革新技術 —

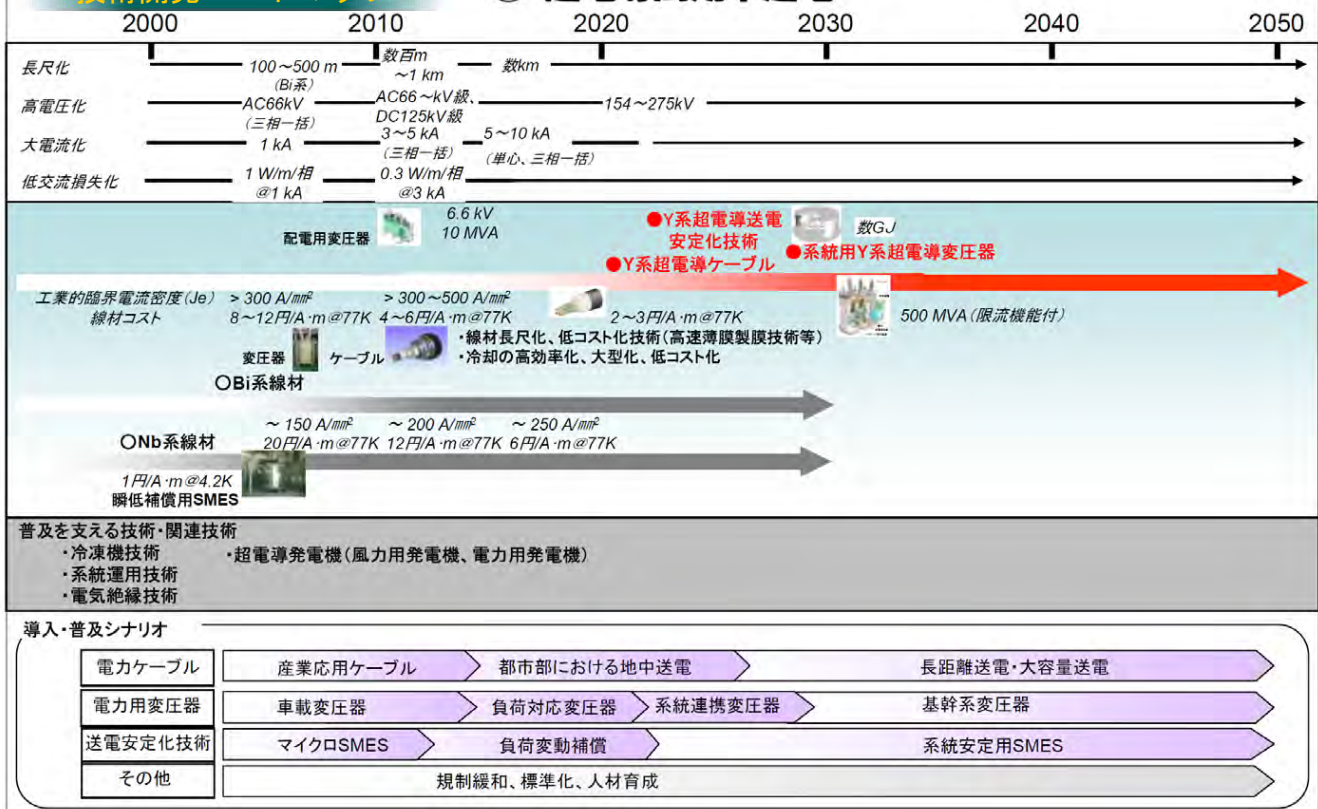
エネルギー源毎に、供給側から需要側に至る流れを俯瞰しつつ、効率の向上と低炭素化の両面から、CO2大幅削減を可能とする「21」技術を選定。



Cool Earth エネルギー革新技術計画 — METI

技術開発ロードマップ

⑥ 超電導高効率送電



プロジェクト実施の効果

事業総額(H20~22fy) 89億円

社会基盤インフラ 機能向上

電力送電系統 — エネルギー損失低減・系統安定化

ものづくり技術力向上

高付加価値材料 — イットリウム系超電導線材

CO₂削減(2030年想定 算出) 約 2,100 kton

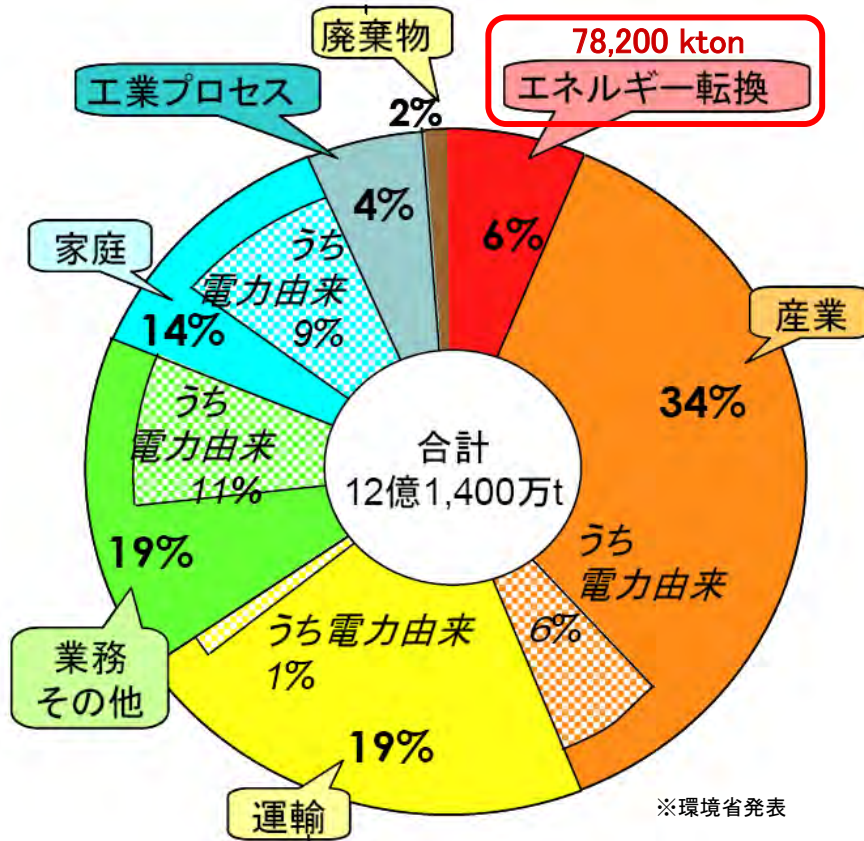
超電導電力貯蔵システム(SMES) 1,670 kton

超電導電力ケーブル 400 kton

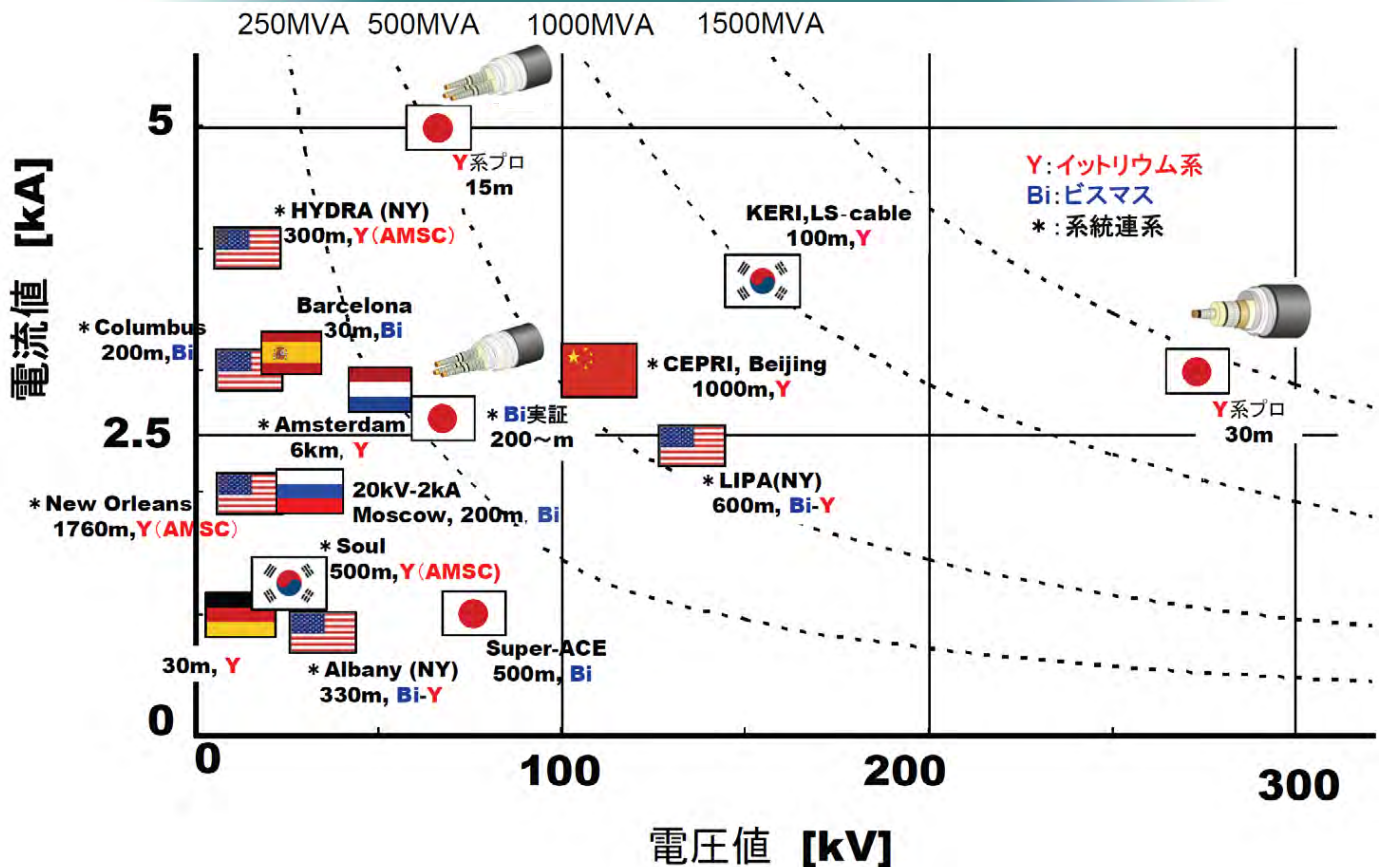
超電導変圧器 35 kton

※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

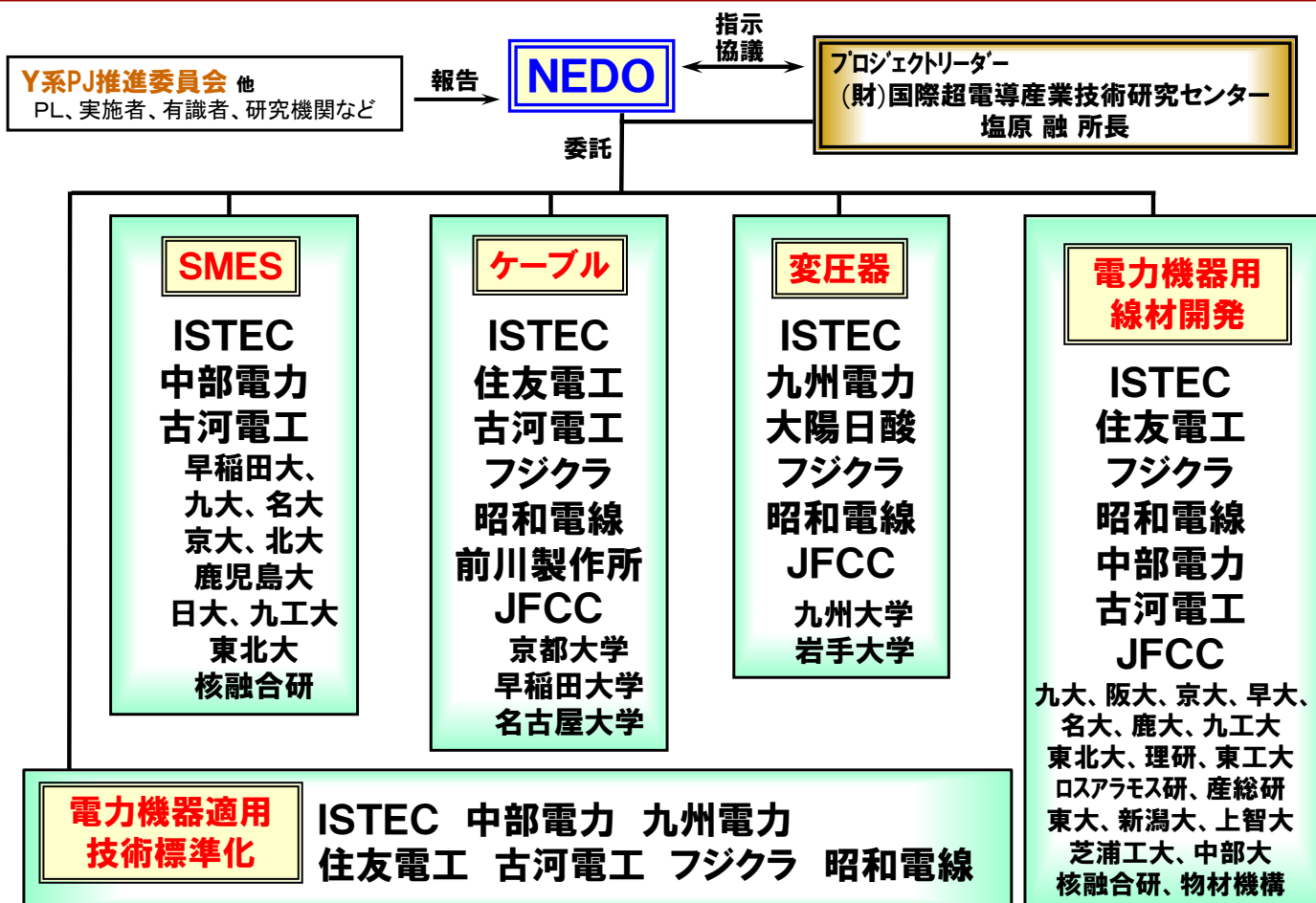
日本 — 分野別CO₂排出量(2008年度)*



国内外の電力ケーブル開発



開発目標	
SMES	2GJ級SMESの開発を見通す 2MJ級モデルコイルシステム の評価試験モデルを作製し、電力系統制御SMESを模擬した2万回以上の繰り返し充放電による性能検証を行う。
ケーブル	三相一括 大電流ケーブルシステム (66kV-5kA,15m、直径150mm管路収納可能、終端接続部)、および単相単心 高電圧ケーブルシステム (275kV-3kA,直径150mm、30m、中間接続部、終端接続部)を作製し、送電損失(現行ケーブル1/2~1/3)を含めた性能検証を行う。
変圧器	66/6kV 20MVA級超電導変圧器システムが成立することを検証するため、 2MVA級超電導変圧器モデル を作製・性能検証を行うとともに、数 100kVA級単相モデル により 限流機能 を検証する。
電力機器用線材開発	各機器の実用化技術開発時に必要な仕様を満たす線材の作製技術の開発を行った上で、この線材を安定に製造できる技術とともに各電力機器の 普及導入時(2020年頃) に必要な仕様を満たす線材の作製技術を開発する。

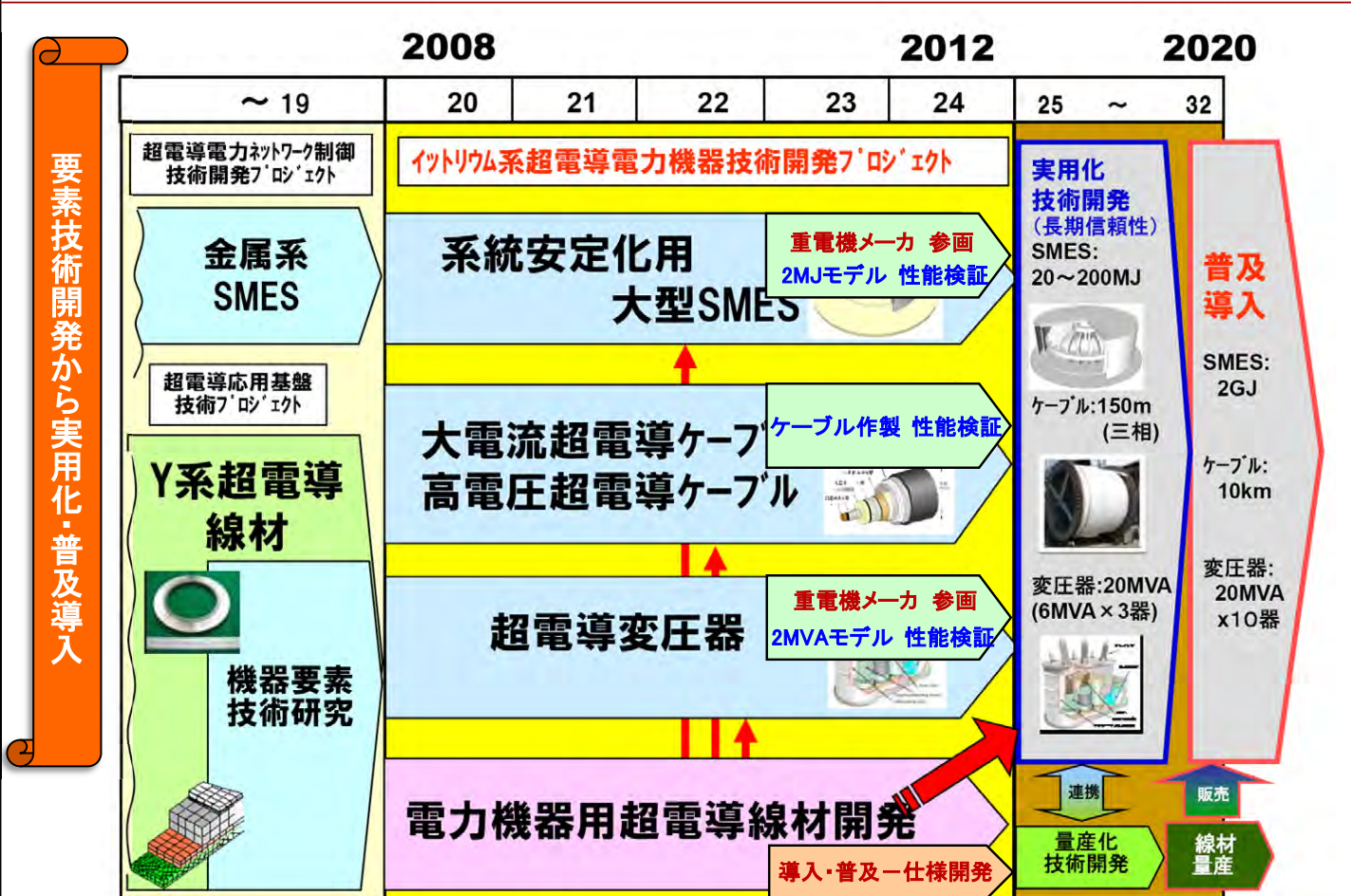


イットリウム系超電導電力機器技術開発 - 事業費

開発項目	H20fy	H21fy	H22fy	Total
SMES	523	512	532	1,567
ケーブル	586	706	616	1,908
変圧器	631	608	606	1,846
線材	1,240	1,159	1,141	3,539
標準化	19	15	21	56
合計	3,000	3,000	2,916	8,916

(単位:百万円)

II 研究開発マネジメント・IV 実用化、事業化までのシナリオ



イットリウム系超電導電力機器研究開発

(中間評価)

2008年度～2012年度 5年間

—プロジェクトの全体概要—

(公開)

平成22年9月1日

プロジェクトリーダー
(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 塩原 融

複製を禁ず

1/48

I. 事業の位置付け・必要性について

公開

プロジェクトの概要説明

I. 事業の位置づけ・必要性

事業の背景・目的・位置づけ

II. 研究開発マネジメント

事業の目標 (目標設定の根拠)

・ 計画内容・情勢変化への対応等

III. 研究成果、目標達成度

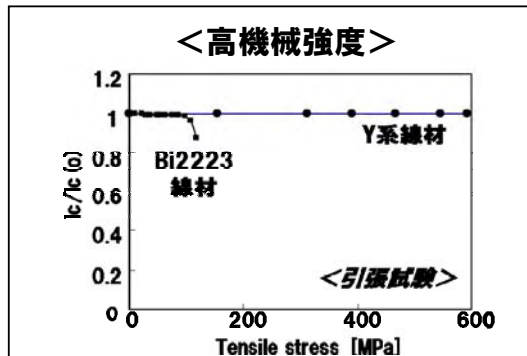
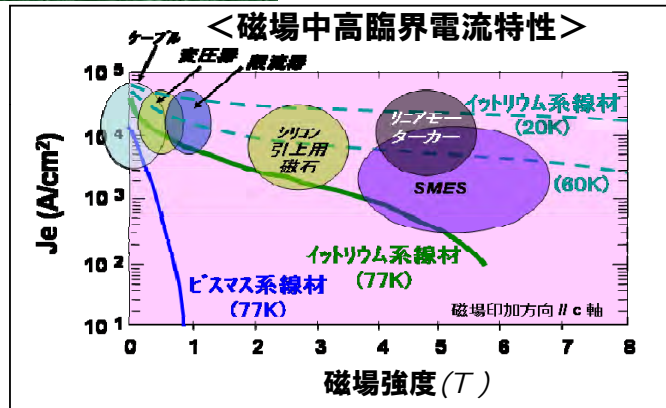
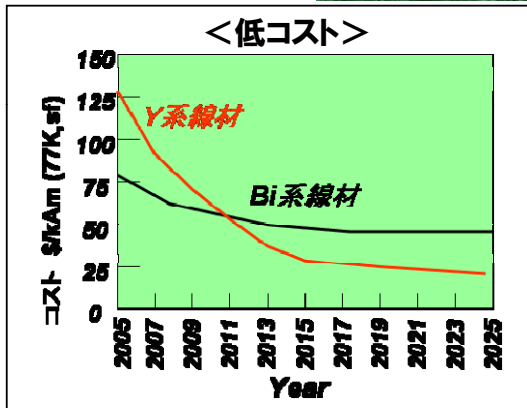
成果の意義・国際比較

IV. 実用化の見通し、シナリオ

成果の普及・啓蒙

2/48

Y系超電導線材のメリット



<低交流損失>

<p>平行磁場の場合</p> <p>アスペクト比 Bi:Y=1:100</p> <p>↓</p> <p>1/100低減</p>	<p>垂直磁場の場合</p> <p>線材分割の容易性 Y:層状構造⇒易 Bi:シース材⇒難</p> <p>↓</p> <p>分割による低減可能</p>
---	---

事業原簿 II-2.1

3/48

プロジェクトの概要説明

I. 事業の位置づけ・必要性

事業の背景・目的・位置づけ

II. 研究開発マネジメント

事業の目標 (目標設定の根拠)・
計画内容・情勢変化への対応等

III. 研究成果、目標達成度

成果の意義・国際比較

IV. 実用化の見通し、シナリオ

成果の普及・啓蒙

4/48

目標：超電導電力機器による都市部への大容量安定供給

研究開発項目

SMES (電力貯蔵)	ケーブル	変圧器	Y系線材
○2GJ級高磁界・大電流コンパクトコイル構成技術開発、 ○高効率コイル伝導冷却技術開発、 ○SMES対応線材安定製造技術、 ○高磁界コンパクトSMESシステムモデル検証	○大電流・低交流損失ケーブル化技術開発、 ○高電圧絶縁・低誘電損失ケーブル化技術開発、 ○超電導電力ケーブル熱収支評価研究、 ○超電導電力ケーブル対応線材安定製造技術、 ○66kV大電流ケーブルシステム検証、 ○275kV高電圧ケーブルシステム検証	○超電導変圧器巻き線技術開発、 ○冷却システム技術開発、 ○限流機能付加技術開発、 ○超電導変圧器対応線材安定製造技術、 ○2MVA級超電導変圧器モデルの検証	○線材特性把握、 ○磁場中高臨界電流 (J_c) 線材作製技術開発、 ○低交流損失線材作製技術開発、 ○高強度・高工業的臨界電流密度 (J_c) 線材作製技術開発、 ○低コスト・歩留向上技術開発
 <p>2GJ SMES</p>	 <p>66kV-5kAケーブル</p>  <p>275kV-3kAケーブル</p>	 <p>66kV/6.9kV-20MVA級変圧器</p>	 <p>イットリウム系超電導線材</p>

SMES

研究開発目標と設定根拠

研究開発項目	中間目標	最終目標	設定根拠
① 2GJ級高磁界・大電流コンパクトコイル構成技術開発	■SMESコイル構成技術 ・フープ応力600MPa以上 ・通電容量2kA以上	■左記性能を満足するコイルによるモデル検証	前フェーズ設計最適化結果で、 金属系SMESの2倍の応力で現実的なコイル仕様 となったことによる。 電流値は変換器等との取り扱いから成立する条件。
② 高効率コイル伝導冷却技術開発	■コイル伝導冷却技術 ・20~40K領域における伝導冷却が可能 ■高伝熱コイル構造 ・電気絶縁2kV以上	■繰り返し充放電試験における冷却システムの検証	Y系線材の特性を活かすことが可能な温度条件であり、 耐電圧値は変換器等との組み合わせから対応可能な目標値として設定
③ 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の最適化 ■評価用試験モデル設計 ■試験計画作成 (SMESシステム適用性検証評価)	■2MJ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 2万回以上の繰返し充放電による特性検証	2GJ級SMESと応力等の条件を同等とし、 前フェーズ実系統連系試験と同等条件の繰返し充放電試験が実施できればシステム成立性が検証できるため
④ SMES用線材安定製造技術開発	■線材安定製造技術確立 SMESシステムモデル試作用 (仕様例： $J_c=20A/cm$ 幅 @77K&3T, 1GPa, 100m)	■左記性能を満足する線材の安定製造による2MJ級モデルコイルへの線材供給	2GJ級SMESの線材が 経験する磁界において必要となる線材仕様として設定

SMESの大電力制御による系統安定化

長距離送電線に故障発生

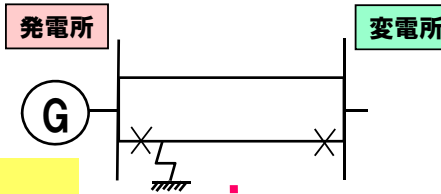
無対策

電圧変動
発電機脱調

発生事象

製造ライン停止
広域停電 など

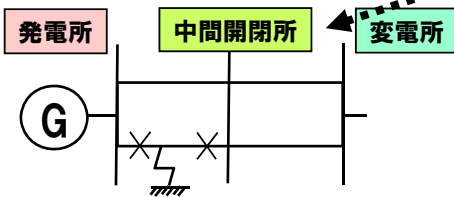
<長距離送電>



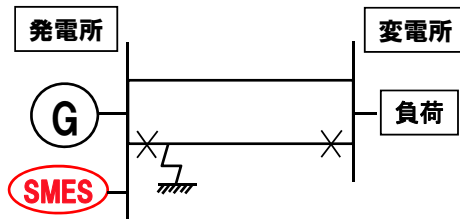
SMES設置
有効電力の瞬時制御によって
系統安定化を図る

開閉所設置
建設用地を含めたコストがかかる

[開閉所建設]



[SMES設置]



中間開閉所にて故障発生系統を切り離し、
不具合拡大を防ぐ。
系統安定化は発電機で実施。

出力：100~300MVA
容量：数百kJ~数GJ

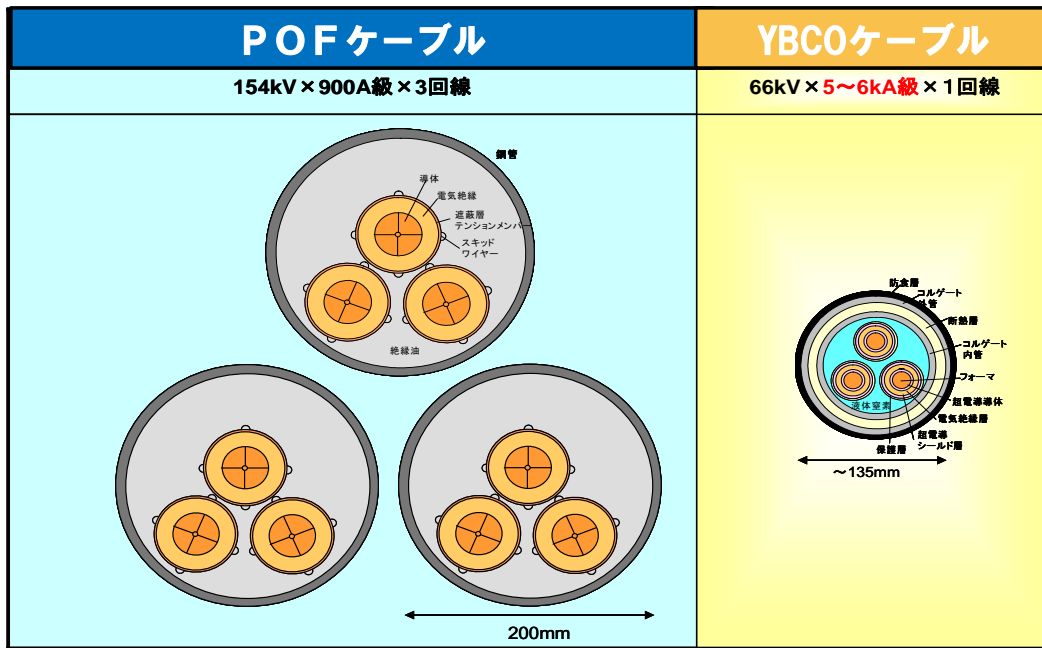
余剰エネルギーをSMESで吸収したり、
不足エネルギーを放出することで電圧や
周波数を安定化。

ケーブル

研究開発目標と設定根拠

研究開発項目	中間目標	最終目標値	設定根拠	
大電流ケーブルの技術開発	ケーブル損失	交流損失2W/m-相@5kA以下	中間目標：交流損失"0.1W/m@1kA"の5kA換算値"2.5W/m"以下	
	三心一括ケーブル検証	短絡試験(31.5kA、2秒相当)の耐性	中間目標：66kV級実システムにおける短絡電流規定値による短絡強度の検証	
	大容量接続技術開発	ケーブルと接続部を組み合わせた5kA連続通電を行い異常無し	中間目標：定格電流連続通電時の安定性の検証	
	システム検証	検証用システムの設計(66kV/5kA、三心一括、15m長)	検証システム作製・課通電試験実施(66kV/三心一括/5kA、15m長) ・150mmφの管路に収納可能 ・損失2.1 W/m-相@5kA以下	中間目標：大電流ケーブル化技術の開発成果を踏まえた、超電導ケーブルシステムの仕様・設計技術の構築 最終目標：実用化時の要求仕様に基づいたシステムの製作・試験
高電圧ケーブルの技術開発	ケーブル損失	交流損失(導体層)+誘電体損失0.8W/m-相@3kA以下	中間目標：交流損失："0.1W/m-相@1kA"の3kA換算値である"0.9W/m-相"の半分"0.4w/m"以下に設定 誘電体損失：絶縁材料選定により0.4w/m-相以下低減 最終目標：シールド層の損失込みで0.8W/m-相@3kA以下	
	絶縁特性の調査	短絡試験(63kA、0.6秒相当)の耐性	中間目標：275kV級実システム短絡時の過電流(規定値)による突発的な温度上昇に対する絶縁および短絡強度の評価	
	高電圧接続技術	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	中間目標：連続課電時の安定性の検証	
	システム検証	検証用システムの設計(275kV/3kA、単心、30m長)	検証システム作製・課通電試験実施(275kV/単心/3kA、30m長) ・外径150mm以下 ・損失0.8 W/m-相@3kA以下	中間目標：高電圧ケーブル化技術の開発成果を踏まえた、超電導ケーブルシステムの仕様・設計技術の構築 最終目標：実用化時の要求仕様に基づいたシステムの製作・試験
熱収支の評価研究	伝熱特性の検討	ケーブル構造最適化のための伝熱・電磁界数値シミュレーションの実施	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	中間目標：ケーブル最適設計に資する研究開発を行う 最終目標：システム検証試験結果との比較により解析技術確立
	スラッシュ窒素の研究	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検討	スラッシュ窒素冷媒の有用性のシステム検証の実施	中間目標：スラッシュ窒素の特徴を生かしたシステム可能性評価 最終目標：冷却システムを用いた有用性を検証
ケーブル用線材安定製造技術開発	安定製造 $J_c=15kA/cm^2$ (2mm幅×20m以上)	-	中間目標：ケーブルシステム検証に必要な性能を有する線材の安定な製造・供給	

- 送電ロスの低減（従来地中送電線の1/3）省エネルギー、CO₂削減
- コンパクトな形状で大容量送電が可能



変圧器

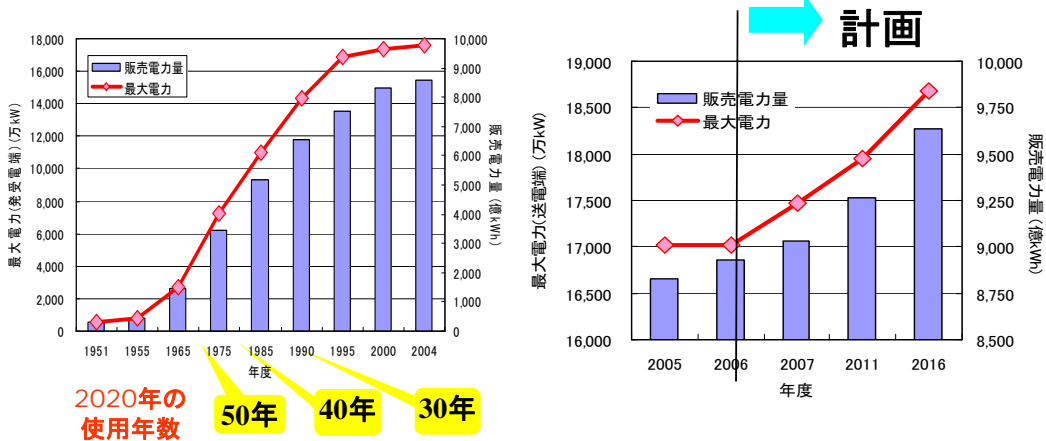
研究開発目標と設定根拠

研究開発項目 (個別テーマ)	中間目標	最終目標	設定根拠
①巻線技術開発	<ul style="list-style-type: none"> ○短絡強度(20MVA,%Z:15%相当)の検証 ○最適な転位巻線技術の確立 	<ul style="list-style-type: none"> ○2kA級巻線技術の確立 ○巻線の低交流損失 $\leq 1/3$(対細線化無し線材) 	<ul style="list-style-type: none"> ○20MVA実用変圧器相当の短絡強度、低損失、大電流の巻線技術が必要。 ・短絡強度は実用器相当の巻線技術。 ・交流損失低減が見逃せる分割線材による巻線技術。 ・定格電流(2kA級)通電時の転位巻線技術。 ○全体の基礎となる短絡強度を中間目標。
②冷却システム技術開発	<ul style="list-style-type: none"> ○膨張タービン: 断熱効率$\geq 65\%$ ○ターボ式圧縮機: 断熱効率$\geq 65\%$ 	<ul style="list-style-type: none"> ○冷凍能力: 2kW @65K ○冷凍効率(COP): 0.06 @80K 	<ul style="list-style-type: none"> ○2MVA変圧器モデルの冷却負荷(交流損失等)相当の2kW以上@65K(既存技術の約3倍)で、高効率化(既存技術の約1.5倍)。 ○中間目標は各要素技術レベル。
③限流機能付加技術開発	<ul style="list-style-type: none"> ○変圧器巻線構造モデルによる限流機能の検証 ○数百kVA級限流機能付加変圧器の設計・試作 	<ul style="list-style-type: none"> ○数百kVA級限流機能付加変圧器による機能検証(過大電流を定格電流の3倍以下に抑制) 	<ul style="list-style-type: none"> ○20MVA変圧器の短絡電流(定格の約6倍)の抑制と限流による巻線温度上昇の許容から、短絡電流の半分の3倍以下に設定。 ○中間目標は最終を見逃せる基礎レベル。
④2MVA級変圧器モデル検証	<ul style="list-style-type: none"> ○66/6.9kV-2MVA級変圧器モデルのシステム設計 	<ul style="list-style-type: none"> ○左記モデルの課過電試験による性能検証 	<ul style="list-style-type: none"> ○巻線を極力低減し、耐電圧や機器構成は20MVA変圧器相当となる最小容量(2MVA)。
⑤変圧器用線材安定製造技術開発	<ul style="list-style-type: none"> ○安定製造 5mm幅3分割100m以上 ($I_c=40A@65K \& 0.01T$) 	<ul style="list-style-type: none"> ○安定製造の向上(歩留り向上) 	<ul style="list-style-type: none"> ○2MVA変圧器モデルに必要な細線化線材(磁場・温度の条件含む)の安定供給。 なお、交流損失低減には細線化が必要。

超電導変圧器の需要・既存変圧器の経年

需要

- 国内の配電用変圧器 約280台/年
- 更新 240台/年 変電所数約4,300箇所 (*1), 変圧器2台, 寿命40年
- 新設 40台/年 変電所増分容量の伸び率 0.5% (*2)



出典: 中央電力協議会HP

(*1) 「電力統計情報」(電気事業連合会)、
(*2) 「平成18年度供給計画の概要」(中央電力協議会)から計算

Y系超電導変圧器のメリット、特徴

既存変圧器

主な課題

- ・不燃、難燃化
- ・省エネルギー
- ・小型・軽量
- ・保守性(オイルレス)等

・モールド

・アモルファス

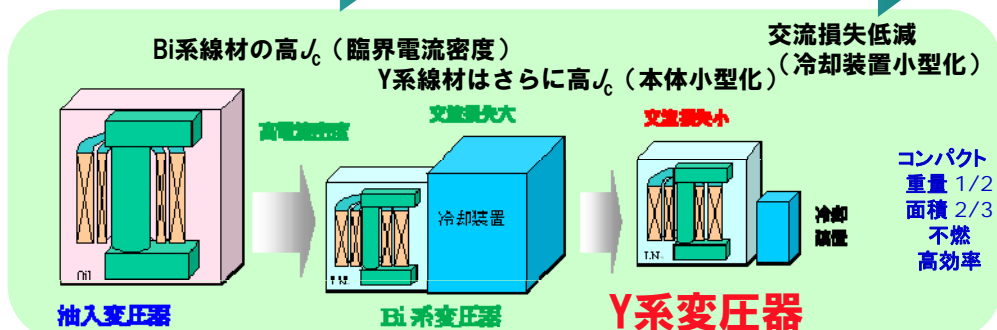
・シリコン油 等

【課題】 ▲ 高電圧化、大型化が難しい
▲ 負荷損(銅損)低減が困難
▲ 鉄心やや大(アモルファス)等

Bi系線材

Y系線材

超電導変圧器



線材

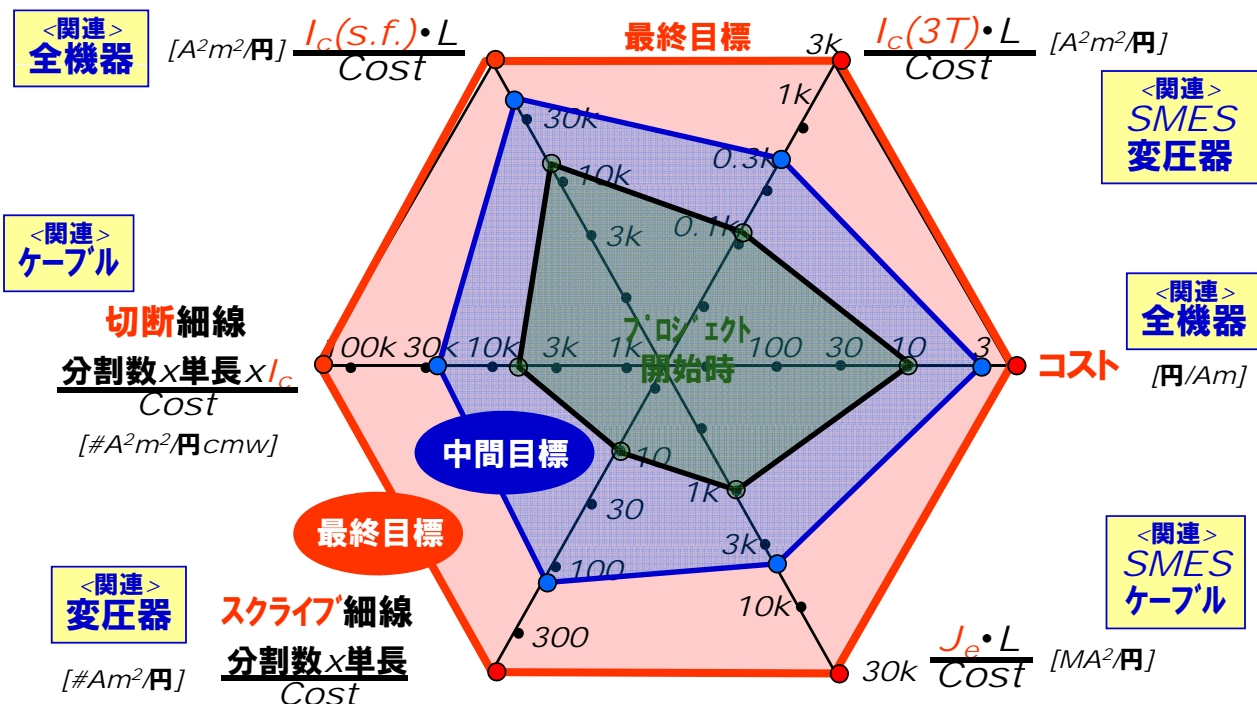
研究開発目標と設定根拠

研究開発項目(個別テーマ)	中間目標	最終目標	設定根拠
①線材特性の把握	・ケーブル耐久試験適正条件の決定	・各種機器環境に対する耐久性を評価(内部目標)	○線材としての保存及び使用環境への耐性或過電流耐性を明確化するため左記目標を設定。 ○中間目標は基本計画で本項目関連の目標が設定されている項目として設定。
②磁場中高 J_c 線材作製技術	・30 A/cm-w @77 K,3 T-50 m ・300 A/cm-w @65 K,0.02 T-50 m	・50 A/cm-w @77 K,3 T-200 m ・400 A/cm-w @65 K,0.1 T-100 m	○実用化技術開発時及び普及導入時に必要な磁場中特性としてそれぞれ中間及び最終目標を設定。 ○77 K,3T特性はSMES対応、65K特性は変圧器対応の必要特性。
③低交流損失線材作製技術	・2 mm幅-300A/cm-w -50m ・5 mm幅5分割-50 m-分割無しに比べて交流損失1/5	・2 mm幅-500 A/cm-w -200 m ・5mm幅10分割-100 m-分割無しに比べて交流損失1/10	○実用化技術開発時及び普及導入時に必要な損失特性としてそれぞれ中間及び最終目標を設定。 ○2mm幅線材特性はケーブル対応、5mm幅線材特性は変圧器対応の必要特性。
④高強度・高 J_e 線材作製技術	・300 A/cm-w -1 GPa-50 m ・ $J_e=30$ kA/cm ² -50 m	・500 A/cm-w -1 GPa-200 m ・ $J_e=50$ kA/cm ² -200 m	○実用化技術開発時及び普及導入時に必要な強度、 J_e 特性としてそれぞれ中間及び最終目標を設定。 ○高強度線材はSMES対応、高 J_e 特性はケーブル対応の必要特性。
⑤低コスト・歩留り向上技術	・技術コスト3 円/Amの実証	・技術コスト3円/Am未済実証 ・中間目標技術を安定に作製可能な技術を確立する。	○実用化技術開発時及び普及導入時に必要な線材技術コストとしてそれぞれ中間及び最終目標を設定。

注：「実用化技術開発時」とは2013年～2019年を想定し、「導入・普及時」とは2020年以降を想定。

事業原簿 II-1.22～、& II-3.27～

線材開発の必要性



注：この図で「分割数」は10mm幅線材に対するもので規格化

事業原簿 II-1.22～

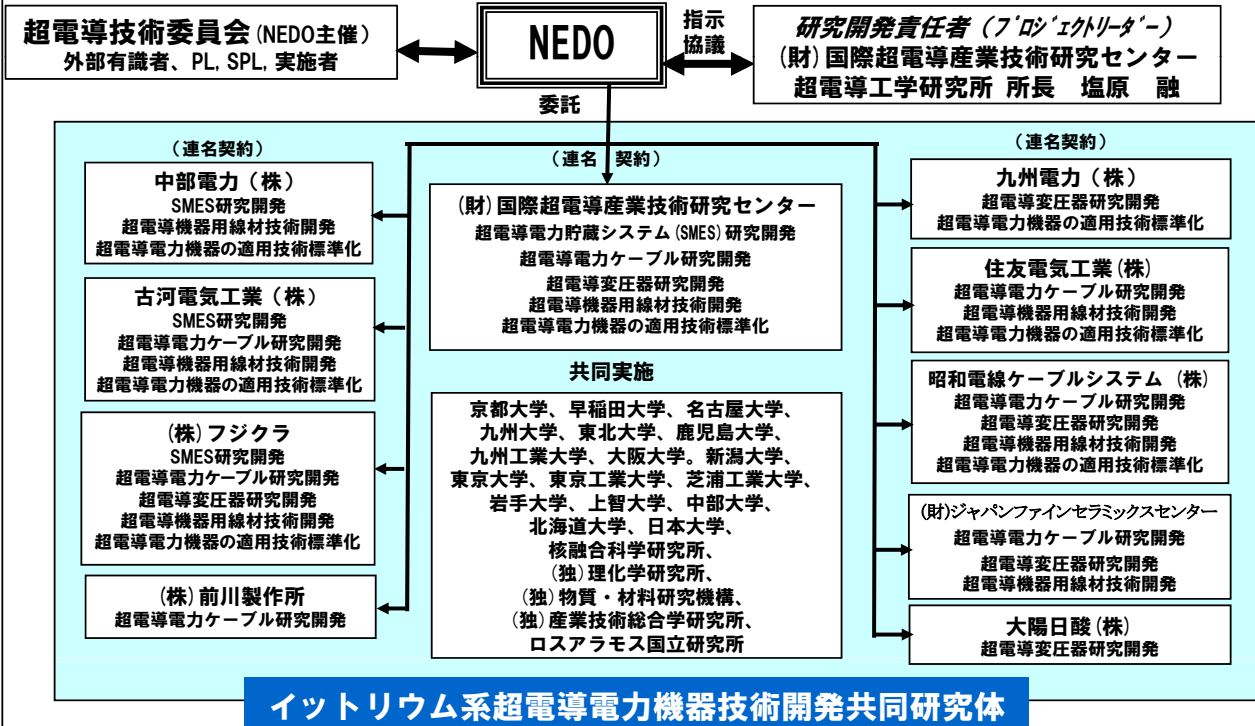
標準化

研究開発目標と設定根拠

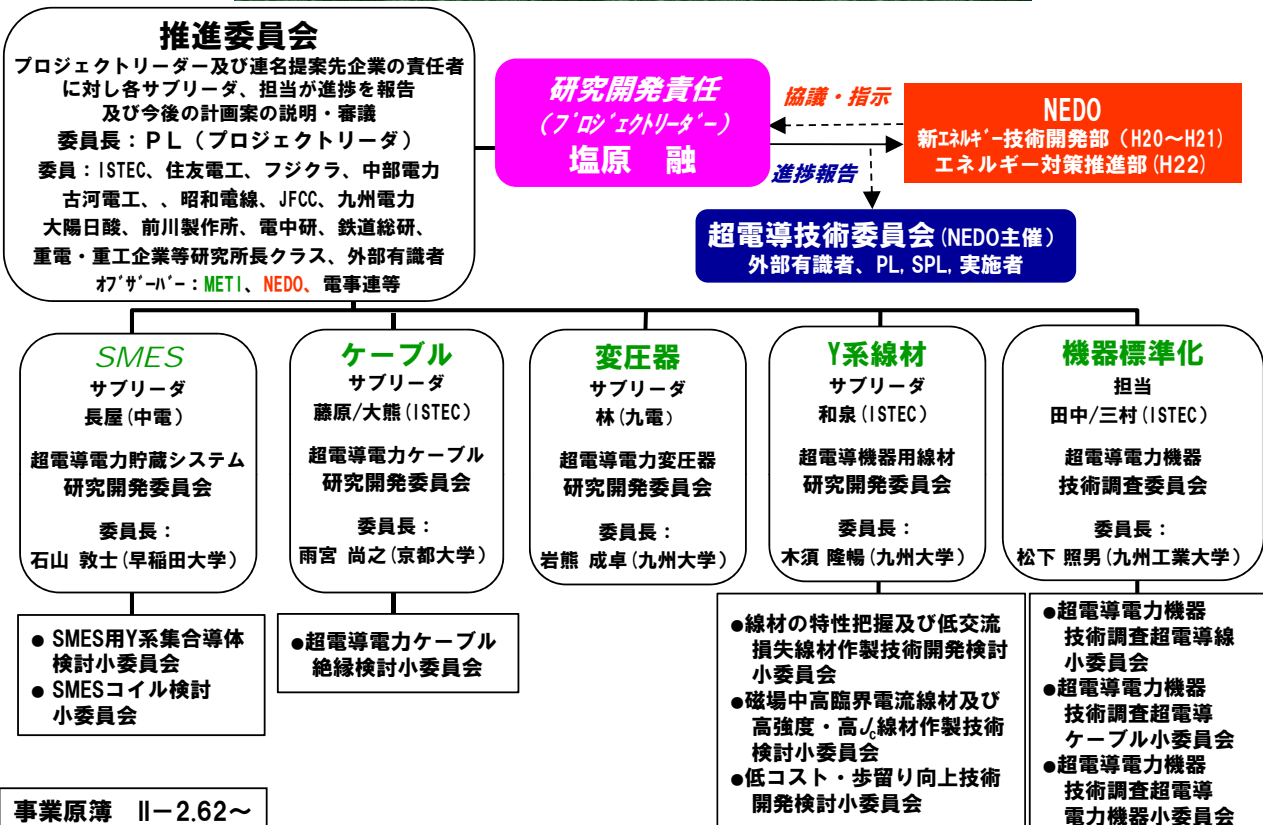
研究開発項目	中間目標	最終目標	設定根拠
① 超電導線材関連技術標準化	<ul style="list-style-type: none"> ■超電導線材並びにその試験方法の規格素案を作成する。 ■IEC国際標準化合意の醸成を図る。 	<ul style="list-style-type: none"> ■超電導線材並びにその試験方法の規格素案と国際合意を背景に、国際規格提案に資する。 	HTS線材とLTS線材の両者に共通した通則が必要。 HTS線材ではLTS線材で規格化された基本特性試験方法の規格化が必要。
② 超電導電力ケーブル関連技術標準化	<ul style="list-style-type: none"> ■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。 ■国際大電力システム会議 CIGRE、他のIEC/専門委員会 TCなどとの国際合意の醸成を図る。 	<ul style="list-style-type: none"> ■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、国際合意を背景に国際規格提案に資する。 	Y系並びにBi系超電導線材を用いて開発中の超電導電力ケーブル開発に対応した日本の技術を国際規格に提案するため。
③ 超電導電力機器関連技術標準化等	<ul style="list-style-type: none"> ■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なう。 	<ul style="list-style-type: none"> ■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規格素案を作成する。 ■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を行なう。 	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。

研究開発項目	H20FY	H21FY	H22FY	H23FY	H24FY
1.「超電導電力貯蔵システム(SMES)の研究開発」	SMESコイル構成・高伝熱コイル構造及び伝導冷却技術開発				
	(IBAD-GZO/MOCVD線材) ⇒ SMES対応線材安定製造技術開発 ⇒ (IBAD-MgO/PLD線材)				
	2GJ級SMESコイル基本システム構成最適化・評価用試験モデル設計検討			SMES動作検証	
	523	512	532	(500)	(500)
2.「超電導電力ケーブルの研究開発」	大電流・低交流損失ケーブル化技術の開発				
	高電圧絶縁・低誘電損失ケーブル化技術の開発 及び 電力ケーブルの熱収支に関する評価研究				
	超電導電力ケーブル対応線材安定製造技術開発			66kV大電流 及び 275kV高電圧ケーブルシステム検証	
	586	706	616	(598)	(597)
3.「超電導変圧器の研究開発」	転位均流モデルの検証・低損失化技術開発・耐短絡電流技術開発		大電流化技術開発		
	冷凍機構・プロセス検討		冷却システム開発		
	限流モデルの特性検証		限流機能付加変圧器の開発		
	変圧器対応線材安定製造技術・細線安定加工技術の開発			2MVA級変圧器モデルの検証	
	631	608	606	(600)	(616)
4.「超電導電力機器用線材の技術開発」	磁場中特性向上(厚膜化・添加工人エピン向上技術)				
	低損失線材(5分割対応均一化・加工技術)			低損失線材(10分割対応均一化・加工技術)	
	高強度・高Je線材(薄肉高強度金属基板線材)			超電導高速・高n化(<3円/Am対応)	
	中間層、超電導高速・高n化(3円/Am対応)			実用化技術(技術移管)	
	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」	超電導線関連技術・超電導電力ケーブル関連技術・超電導電力機器関連技術標準化				
	19	15	21	(15)	(15)
予算額合計(百万円)	3,000	3,000	2,916	(3,060)	(3,050)

研究開発の実施体制（実施期間：H20～H22）



「Y系超電導電力機器研究開発」委員会等構成



NEDO主催による超電導技術委員会(年2~3回開催)

委員長：名古屋大学 大久保 教授

委員：東京大学 大崎 教授、横浜国立大学 塚本 教授、明星大学 仁田 教授、東北大学 濱島 教授、産総研 淵野 研究員、電中研 藤波 研究員、

鉄道総研 正田 理事長、電事連 高見 部長、

オブザーバ：経済産業省、研究開発課、非鉄金属課、資エネ庁電力基盤整備課

外部有識者の意見を運営に反映

- ・Y系超電導線材と各機器要件(相互関係)との緊密な連携をとるべきとのご指摘を受け、線材研究開発委員会に各機器担当SPL並びに機器研究開発の有識者として大学及び重電メーカー等からの委員を増強した。
- ・SMES用線材へのIBAD-MgO基板及びIBAD-PLD線材の適用で、SMES開発の高効率化に対応すべく計画を変更した。
- ・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計画に変更した。

その他、プロジェクト内で推進委員会、研究開発委員会、検討小委員会を開催

実用化につなげる戦略

○一般への普及啓発活動

毎年開催の「エコプロダクツ展」に出展

(約17~18万人の入場者)

2008:「超電導EXPO2008」

2009:「超電導パビリオン」

2010:出展予定(計画中)



—内容—

超電導の未来イメージ(ジオラマ)、サンプル展示、具体的なパネル展示、磁気浮上等の実験・実演、アンケート調査等を実施

その他:各種学会で研究開発活動のパネル展示紹介

○研究開発成果の実用化に向けて対応「産業用超電導線材・機器技術研究組合」(ISTERA)を設立。

新しい研究開発パートナーシップ制度(技術研究組合制度:H21年4月22日法案可決・成立)を活用。

—内容—

本プロジェクトの研究開発成果の早期実用化を目指し、ALL Japan 体制での超電導産業の育成とともに国際市場への進出も視野に入れている。

○超電導産業における国際協調・連携

毎年開催の国際超電導産業サミットの主催・共催

加盟団体:日本(ISTEC)、米国(CCAS)、欧州(CONECTUS)、

ニュージーランド(NZHTSIA)、韓国(加盟の意向)

—内容—

超電導技術の産業化、商業化の目標に向けて企業研究機関の経営幹部、マネージャー等が討議、結果はコミュニケーションを出し、新聞報道等を通じ周知を図る

○標準化事業の展開

国際標準化活動の主導的役割を果たしている

IEC/TC90の幹事国

ISTEC内にIEC/TC90超電導委員会を設置。

—内容—

これまで14件の規格を制定(LTS試験方法規格が主)今後、Y系超電導線材、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、国際規格案のIEC/TC90への提案を経て、国際標準規格制定を目指している。また、NEDO事業の「Biケーブル実証プロジェクト」と緊密に連携して、「国際大電力システム会議:CIGRE」とも連携し、製品企画化の国際合意の醸成を目指している。

実用化につなげる知財マネジメント

○Y系超電導電力機器技術開発**共同研究体**を構築し、知財等成果管理を対応
機能的で柔軟な研究体制、密接な協調を図る。「共同研究体協定書」を締結。共同研究体内での職務により得た知的財産権は、「共同研究体知的財産権取り扱い規定」で公正な取り扱いを定めている。

—内容—

プロジェクトのNEDOからの受託者は、NEDOとの個別の業務委託契約に基づき、産業財産権等に関しては、産業技術強化法第16条の適用を申請し、原則、共同研究体内での単独並びに共同して行った発明等の係る産業財産権等は当該受託者または共同実施者に帰属する。

特許審査会:PLが主宰

出願の要否の判定、発明者の認定、共同発明における権利の帰属、発明等への寄与度に応じた参加者の持ち分の認定等の審議

実用化に向けての規定例:

共同研究体内の参画者は自己実施は代表委託事務局への実施届書の提出で実施できる。

共有権者は他の共有権者の同意を得て、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、成果の実用化の推進の観点から、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ができない。

○特許調査

Y系超電導線材に関する特許の調査は、将来の実用化・事業化を進めるに当たって非常に重要であるとともに、実施者の発明出願要否の判定に重要であるだけでなく、研究開発の実施方針等の策定に対しても効果的である。

—調査内容—

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、及びSMESの国内特許を対象に調査。

平成21年度は、これらの新規公開特許に加えて、SMESの米国特許を調査対象に加えた。

尚、Y系超電導線材に関しては、平成20,21年度ともに、基板(基材)、中間層、超電導層、保護層、その他の分野を国内及び米国特許の対象として、調査を行った。

プロジェクトの概要説明

I. 事業の位置づけ・必要性

事業の背景・目的・位置づけ

II. 研究開発マネジメント

事業の目標(目標設定の根拠)

・計画内容・情勢変化への対応

III. 研究成果、目標達成度

成果の意義・国際比較

IV. 実用化の見通し、シナリオ

成果の普及・啓蒙

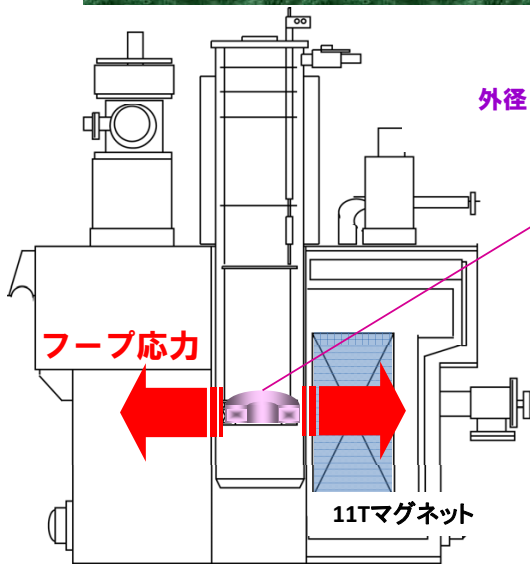
SMES研究開発の目標と達成状況

サブテーマ	中間目標(H22末)	成果	達成度	今後の課題
(1) 2GJ級高磁界・大電流コンパクトコイル構成技術開発	<ul style="list-style-type: none"> ■SMESコイル構成技術 ・フープ応力600MPa以上 ・通電容量2kA以上 	多層巻コイル(外径250 mm)の製作、 600 MPa を超えるフープ応力耐性の実証 Y系4束導体コイル(外径650 mm)の製作、 2.6 kA通電を実証	◎ 達成	最終目標に向け開発を推進
(2) 高効率コイル伝導冷却技術開発	<ul style="list-style-type: none"> ■コイル伝導冷却技術 ・20~40K領域における伝導冷却が可能 ■高伝熱コイル構造 ・電気絶縁2kV以上 	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試験を実施中 6kVの絶縁設計技術確立	○	電気絶縁性能の検証(H22末)
(3) 高磁界コンパクトSMESシステムモデル検証	<ul style="list-style-type: none"> ■2GJ級SMESコイル基本システムの最適化 ■評価用試験モデル設計 ■試験計画作成(SMESシステム適用性検証評価) 	具体的支持構造検討により2GJ級SMESコイル基本システムの最適化を実施 評価用試験モデルのうち伝導冷却試験システムの設計・製作を実施	○	クエンチ検出、コイル保護手法の確立(H22末)
(4) SMES対応線材開発	<ul style="list-style-type: none"> ■線材安定製造技術確立 SMESシステムモデル試作用(仕様例:$I_c=20A/cm-w$ @77K&3T, 1GPa, 100m) 	長尺線材の特性低下に対して、超電導層、中間層、基板の各課題解決をはかり、モデルコイル用線材の歩留が向上。コイル用線材作製を実施中。	○	安定製造技術のメーカ移管

事業原簿 III-1.1.1~

◎:2010年9月1日現在、達成済み
○:2010年度内達成見込み有

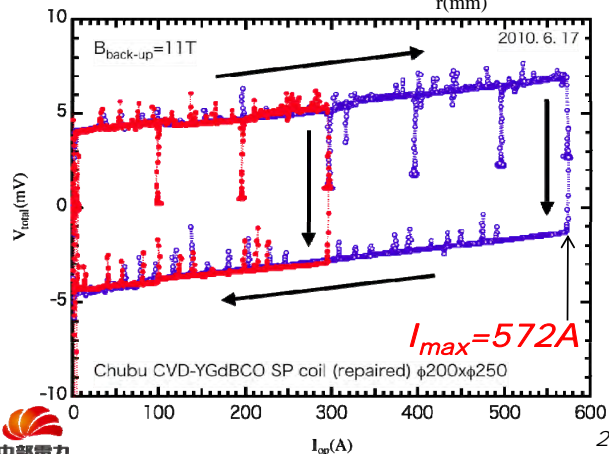
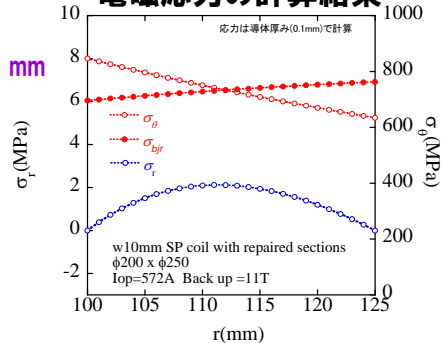
小型多層巻コイルによるフープ応力評価



コイル仕様
シングルバンケーキ型
外径 Φ 250 mm / 内径 Φ 200 mm



電磁応力の計算結果



目標の600MPaに対し、独立変形(BJR)で約740MPa、一体変形で約850MPaのフープ応力耐性を実証

事業原簿 II-2.1.24~

SMESシステムの開発 成果の意義

開発項目	開発成果	成果の意義
(1) 2GJ級高磁界・大電流コンパクトコイル構成技術開発	従来の金属系超電導コイルの2倍相当の600 MPaのフープ応力耐性を大口径多層巻コイルで実証 テープ状Y系線材を束ねた導体コイルによる2 kA以上の通電を実証	世界最高性能
(2) 高効率コイル伝導冷却技術開発	6kV以上の電気絶縁性能を有した20K伝導冷却Y系コイルの開発としては世界最大(外径650 mm級)	世界最高性能
(3) 高磁界コンパクトSMESシステムモデル検証	クエンチ保護が困難な高温超電導コイルに対して素線絶縁集合導体の素線間転流現象を活用する新たな検出法を考案	世界初

超電導電力ケーブル研究開発目標と達成状況

項目	中間目標	成果	達成度	今後の課題	
大電流ケーブル化技術	大電流・低交流損失	ケーブル損失(交流損失) 2 W/m-相@5kA以下	線材幅2.4mmの導体試作、 2.8 W/m-相@4.5kAまで低減	○	4mm幅/向上、2mm幅端部改善を実施(H22中)
	三心一括ケーブル導体の検証	短絡試験(31.5 kA, 2sec相当)でケーブル性能に低下無し	モデルケーブルにて31.5 kA/2secで性能低下無し確認	○	コア間に発生する電磁力の影響を検討(H22中)
	大容量接続技術の開発	5kA連続通電で導体、接続部、電流リードに異常無し	電流リードの5kA通電で異常のないことを確認	○	ケーブルと接続部の組合せ試験を実施(H22中)
	システム検証	ケーブルシステムの設計 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	○	技術委員会等にて確認(H22中)
高電圧ケーブル化技術	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(導体層)+誘電体損失 0.8 W/m-相@3kA以下	超電導導体の交流損失: 0.235 W/m-相@3kA達成 絶縁紙PPLP-C採用により 誘電体損失0.46 W/m(設計)	◎	最終目標に向けた技術開発
	超電導電力ケーブル電気絶縁特性の調査	短絡電流(63kA, 0.6sec)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	フォーマや銅保護層の断面積最適化により、過電流通電(63 kA-0.6 s)による温度上昇を抑制	◎	最終目標に向けた技術開発
	高電圧接続技術の開発	275kV連続課電を行い、導体、超電導-常電導接続部、電流リードに異常無し	3kA超電導導体を作製・評価し、導体、超電導-常電導接続部に異常がない事を確認	○	電流リードと接続部の組合せ試験を実施(H22中)
	システム検証	ケーブルシステム設計 課通電試験計画書を作成	システム設計案および課通電試験の計画書を作成	○	設計の妥当性を確認(H22中)
熱収支評価	伝熱特性の検討	ケーブル構造最適化のための伝熱・電磁界解析の実施	伝熱解析などによりケーブル設計に反映、実験により妥当性を検証	◎	最終目標に向けた技術開発
	スラッシュ窒素素の研究	スラッシュ窒素冷却を実現するためのシステム検討	冷却特性評価および要素研究を実施し、固体生成装置を構築	◎	最終目標に向けた技術開発
線材安定製造技術開発	安定製造 $J_c = 15 \text{ kA/cm}^2$ (2mm-w×20m以上)	$J_c = 17 \text{ kA/cm}^2$ (2mm幅×28m)の線材作製	◎	最終目標に向けた技術開発	

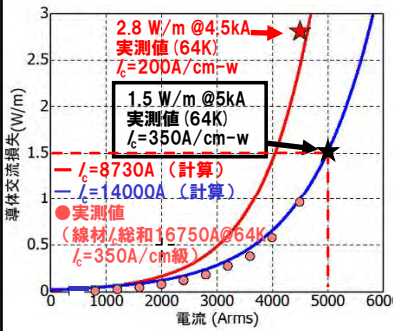
◎:2010年9月1日現在、達成済み

○:2010年度内達成見込み有

(目標) ・低交流損失な超電導導体の開発

・機械的な応力に対し問題無いことを確認

66kV大電流ケーブル交流損失(導体のみ)

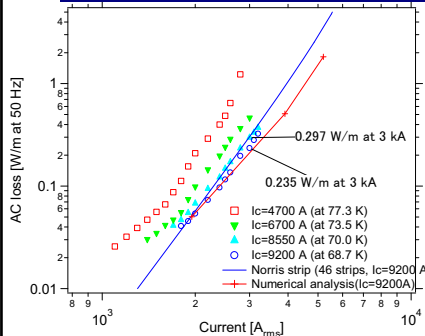


ケーブル導体諸元
 超電導 導体層 4層
 4 mm幅線材
 ・ $I_c=200A/cm-w$ 52本
 ・ $I_c=350A/cm-w$ 57本
導体損失1.5 W/m @5kA 達成→ シールド損失込みで目標2 W/m@5kA達成見込み

66kV大電流ケーブル 三心ケーブルコア



275kV高電圧ケーブル交流損失(導体のみ)



ケーブル導体諸元
 超電導 導体層 2層
 3 mm幅線材
 $I_c=300 A/cm-w$ 46本
0.235 W/m @3kA (目標0.3W/m@3kA) →達成

275kV高電圧ケーブル 曲げ特性試験

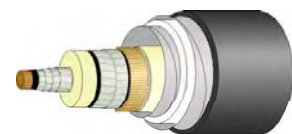


超電導電力ケーブル研究開発 成果の意義

開発項目	開発成果	成果の意義
大電流ケーブル	定格：66kV／5kA 容量：570MVA	世界最大級の三心一括送電容量
	交流損失：2W/m-相	世界最小レベル(三心一括)
	サイズ：150mmφ 管路内布設	世界最大の送電密度
高電圧ケーブル	定格：275kV／3kA	世界最大の電圧と送電容量
	ケーブル損失：0.8W/m-相 (交流損失+誘電体損失)	世界最小レベル
	サイズ：150mmφ 管路相当	世界最大の送電容量



66kV/5kA 大電流ケーブル



275kV/3kA 高電圧ケーブル

超電導変圧器研究開発の目標と達成状況

中間目標	成果	達成度	今後の課題
①巻線技術の開発	<ul style="list-style-type: none"> 短絡強度（20MVA.%Z：15%相当）の検証 最適な転位巻線技術の確立 	<ul style="list-style-type: none"> 400kA短絡モデル変圧器で定格の6倍の短絡電流での健全性を確認（達成） 転位均流モデルで偏差が14%以下を確認（達成） 	<ul style="list-style-type: none"> 2kA級大電流モデルで転位技術を検証（最終目標）
②冷却システム技術開発	<ul style="list-style-type: none"> 膨張タービン：断熱効率$\geq 65\%$ ターボ式圧縮機：断熱効率$\geq 65\%$ 	<ul style="list-style-type: none"> 膨張タービン効率は約70%（達成） ターボ式圧縮機効率は約68%（達成） 熱交換器の小型化を解析で確認 冷熱伝達構造の簡素化を解析で確認 	<ul style="list-style-type: none"> 2kW冷却システムの試作・試験（最終目標）
③限流機能付加技術開発	<ul style="list-style-type: none"> 変圧器巻線構造モデルで限流機能検証 数百kVA級限流機能付加変圧器の設計・試作 	<ul style="list-style-type: none"> 巻線モデルで限流効果検証（達成） 上記成果に基づき400kVA限流機能付加変圧器を設計 ※巻線モデルの良好な成果により、400kVA変圧器の試作前倒し（追加成果） 	<ul style="list-style-type: none"> 同変圧器の試作・試験（H22）
④変圧器対応線材安定製造技術の開発	<ul style="list-style-type: none"> 安定製造 5mm幅3分割100m以上 ($I_c=40A@65K \& 0.01T$) 	<ul style="list-style-type: none"> PLD線材は100mで性能確認（達成） MOD線材は30mで性能確認 ※低コスト化に有効なMgO基板を開発し、良好な適用性を確認（追加成果） 	<ul style="list-style-type: none"> 100m級MOD線材で性能確認（H22）
⑤2MVA級変圧器モデル検証	<ul style="list-style-type: none"> 66/6.9kV-2MVA級変圧器モデルのシステム設計 	<ul style="list-style-type: none"> 2MVA級変圧器モデルを設計（達成） 試験計画を整理 	<ul style="list-style-type: none"> 同モデルの試作・試験（最終目標）

事業原簿 III-1.3.1~

◎:2010年9月1日現在、達成済み
○:2010年度内達成見込み有

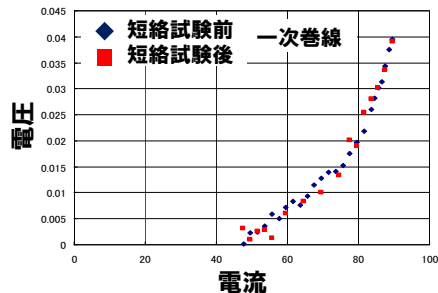
29/48

変圧器用巻線技術（耐短絡強度、転位巻線）の検証

■ 400kVA短絡モデル変圧器による短絡試験（定格電流の6倍、0.2秒間）



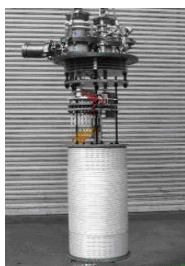
試験後の巻線特性劣化なし



400kVA短絡モデル変圧器

巻線の電圧電流特性（試験の前後）

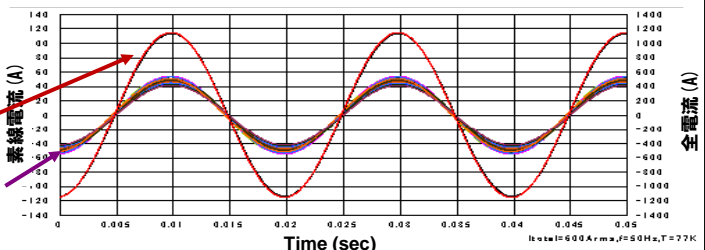
■ 12層2並列巻線の最適転位による均流化



均流化の向上

全電流

素線電流



12層2並列巻線

12層2並列（24素線）巻線の電流波形

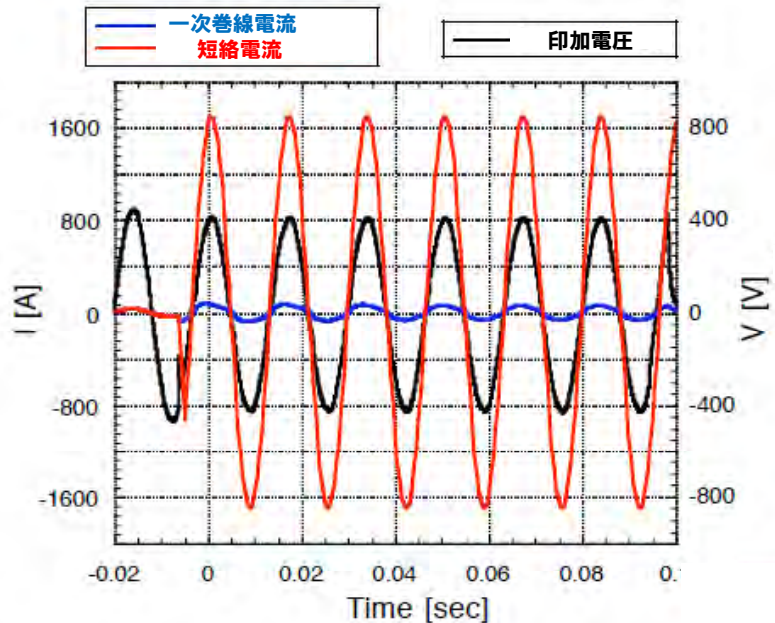
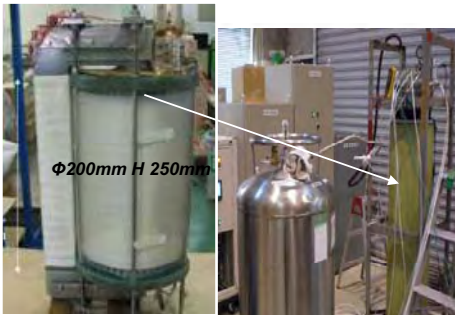
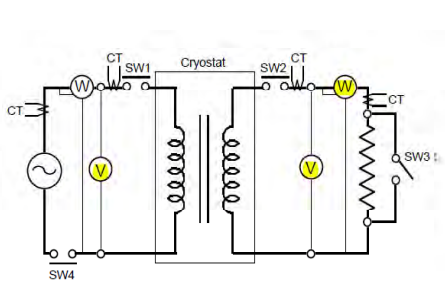
事業原簿 III-2.3.7~

30/48

変圧器への限流機能付加技術の検証

限流機能の検証 (限流モデル変圧器)

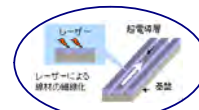
V1=325Vの場合 短絡電流:1200A → 一次主巻線電流: 43 A (限流効果:1/30)



超電導変圧器研究開発 成果の意義

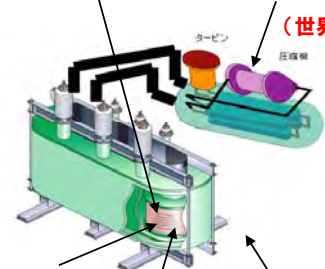
	最終目標	達成状況・意義
①巻線技術開発	<ul style="list-style-type: none"> ○ 2kA級巻線技術の確立 ○ 巻線の低交流損失 $\leq 1/3$ (対無細線化線材) 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 20MVA実用変圧器の短絡強度と大電流用の転位技術を確立 (世界初)。
②冷却システム技術開発	<ul style="list-style-type: none"> ○ 冷凍能力: 2kW@65K ○ 冷凍効率 (COP): 0.06@80K 	<ul style="list-style-type: none"> ○ ネオン冷却システム (世界初) で、冷却能力2kW@65K (既存技術の約3倍) で、高効率化 (既存技術の約1.5倍) が見通せる技術を確立。
③限流機能付加技術開発	<ul style="list-style-type: none"> ○ 数百kVA級限流機能付加変圧器による機能検証 (過大電流を定格電流の3倍以下に抑制) 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 400kVA限流機能付加変圧器 (世界初) が見通せる技術を確立。
④2MVA級変圧器モデル検証	<ul style="list-style-type: none"> ○ 左記モデルの課通電試験による性能検証 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 66/6kV-2MVAY系低損失変圧器 (世界初) が見通せる設計技術を確立。
⑤線材安定製造技術の開発	<ul style="list-style-type: none"> ○ 安定製造の向上 (歩留り向上) 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 2MVA変圧器モデルに必要な細線化線材 (世界初) 安定製造技術を確立。

⑤線材安定製造技術



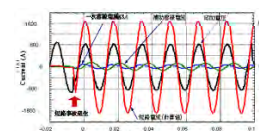
細線化技術 (世界初)

②ネオン冷却システム (世界初)



①巻線技術 (世界初)

④2MVA級変圧器 (世界初)



③限流機能付加技術 (世界初)

線材研究開発の目標と達成状況

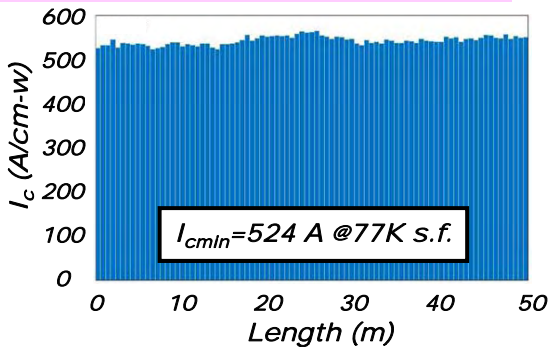
研究開発項目	中間目標	研究開発主要成果	達成度	今後の課題
① 線材特性の把握	・ケーブル耐久試験適正条件の決定	・「温度」、「加熱」、「応力歪み」、「通電・過電流」という必要な負荷に対する試験を実施。 ・ケーブル耐久試験用線材評価 適正条件を決定	◎ 達成	最終目標へ向けた技術開発
② 磁場中高 I_c 線材	・30 A/cm-w @77 K, 3 T-50 m ・300 A/cm-w @65 K, 0.02 T-50 m	IBAD-PLD線材 ・33 A/cm-w@77K, 3 T- 51 m ・492 A/cm-w@77 K, 0.02 T- 51 m IBAD-MOD線材 ・14 A/cm-w@77K, 3 T- 27 m ・>300 A/cm-w@65 K, 0.02 T- 50 m	◎ 達成	最終目標へ向けた技術開発 (PLD以外は残あり)
③ 低交流損失線材	・2 mm幅-300A/cm-w -50m ・5 mm幅5分割-50 m-分割無しに比べて交流損失1/5	IBAD-PLD線材 ・2 mm幅-388 A/cm-w-50 m ・5mm幅・5分割- 50m損失1/5見通す IBAD-MOD線材 ・2 mm幅-397 A/cm-w-50 m ・5mm幅・5分割- 40m損失1/5見通す RABITS-PLD線材 ・2 mm幅- 293 A/cm-w -28 m	○	コイル形状での損失の検証
④ 高強度・高 J_e 線材	・300 A/cm-w -1 GPa-50 m ・ $J_e=30$ kA/cm ² -50 m	IBAD-PLD線材 ・80μmハステロイ- 50 m $I_{cmin} \geq 400$ A/cm-w $J_e > 36$ kA/cm ² -0.9 GPa(RT) IBAD-MOD線材 ・70μmハステロイ- 37 m $I_{cmin} \geq 300$ A/cm-w $J_e > 30$ kA/cm ² -0.9 GPa(RT)	○	低温における強度評価
⑤ 低コスト・歩留り向上	・技術コスト3 円/Amの実証	基板中間層 ・各層での必要条件確認 PLD線材 ・435 A/cm-w@15 m/h-50 m (2.9円/Am) MOD線材 ・370 A/cm-w@5 m/h-25 m (2.9円/Am)	○	全中間層の極低コスト条件組合せ、MOD長尺化等

◎:2010年9月1日現在、達成済み
○:2010年度内達成見込み有

磁場中高臨界電流 (I_c) 線材作製技術開発
(中間目標: 30A/cm-w@77K3T、300A/cm-w@65K0.02T)

<アプローチ①>
高 J_c 厚膜化⇒ I_c 向上+ピン力向上

<アプローチ②>
and/or 人工ピン導入⇒ピン力向上(強)+ T_c 低下



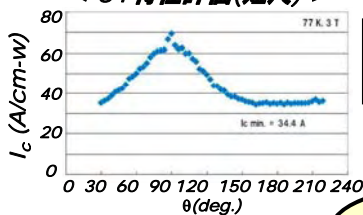
基板: Hastelloy/GZO/IBAD-MgO/LMO/CeO₂
超電導層: PLD-GdBCO (10m/h, 1.5μm, 2.9円/Am)

SMES対応目標達成

$$I_{cmin} = 524 \text{ A} \times 0.062 = 33 \text{ A/cm-w@3T}$$

世界最高の磁場特性!

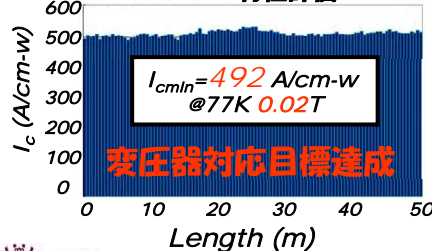
<3T特性評価(短尺)>



$I_c = 545 \text{ A} @ 77 \text{ K s.f.}$
 $I_{cmin} = 34 \text{ A} @ 77 \text{ K } 3 \text{ T}$

$$\frac{I_c @ 77 \text{ K } 3 \text{ T}}{I_{cmin} @ 77 \text{ K s.f.}} = 0.062$$

<0.02T特性評価>



変圧器対応目標達成

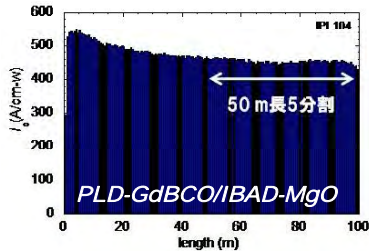
低交流損失線材作製技術開発
(中間目標：2mm幅-300A/cm-w (60A) @77Ks.f.、2mm幅5分割-損失1/5)

＜アプローチ：特性均一線材＞
均一基板、安定成膜条件等

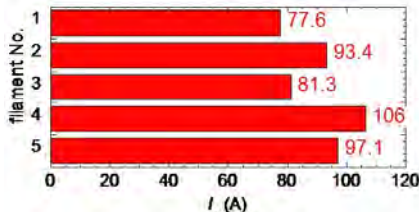
and

＜アプローチ：線材加工技術＞
加工ダメージ抑制、フィラメント間絶縁性確保等

2mm幅切断加工

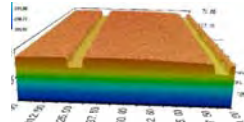


50m-2mm幅線材のIc評価



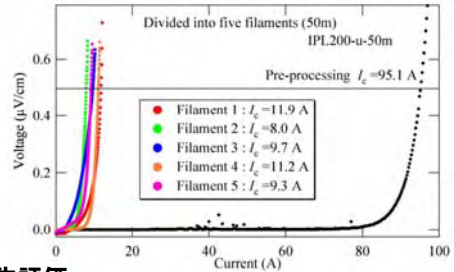
ケーブル対応目標達成

5mm幅5分割スクライピング加工

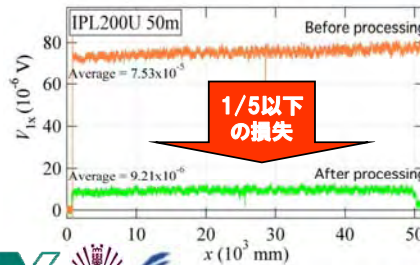


改良型レーザースクライプ加工による溝の三次元観察像

スクライピング加工前後のIc評価



交流帯磁率による損失評価



コイル状での
長尺評価予定



Y系超電導線材研究開発 成果の意義

研究テーマ	世界動向	本プロジェクト成果と意義
①線材特性の把握	劣化挙動を系統的に評価した例は無し	必要な負荷に対する試験を実施 世界初の系統的成果⇒全機器へ適用
②磁場中高Ic線材作製技術	SuperPower(米国) : IBAD-MOCVD 短尺Ic=50 A/cm-w@77 K, 3 T 50 m Ic=14 A/cm-w@77 K, 3 T AMSC(米国) : RABiTS-TFA-MOD 短尺Ic=10 A/cm-w@77 K, 3 T	PLD 短尺Ic=56 A/cm-w@77 K, 3 T 50 m Ic=33 A/cm-w@77 K, 3 T MOD短尺Ic=35 A/cm-w@77 K, 3 T 27 m Ic=14 A/cm-w@77 K, 3 T 世界最高の磁場特性 ⇒多様な磁場応用(ε-タ等)の展開も可
③低損失線材作製技術	SuperPower(米国) : IBAD-MOCVD 短尺 4mm幅5分割 損失1/5 長尺 報告なし	短尺10 mm幅20分割 損失1/20 7 m x 10本コイル 5 mm幅5分割 損失1/5 20~50m-5 mm幅5分割(PLD&MOD)の見通し 世界的に先行した技術
④高強度高Jc線材作製技術	SuperPower(米国) : 50μm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 μm厚ハステロイ基板線材 Ic,min=400 A/cm-w-Jc>36 kA/cm² - 50 m 900 MPa (Ag30μm想定) ⇒NMR等の高磁界マグネットに有用
⑤低コスト・歩留り向上技術	SuperPower(米国) : IBAD-MOCVD 1065 m長-Ic=282 A/cm-w@77K, s.f. AMSC(米国) : RABiTS-TFA-MOD 500 m-Ic=250 A/cm-w@77K, s.f. 長さで先行	フジクラ : IBAD-PLD 504 m-Ic=350 A/cm-w@77K, s.f. 昭和電線 : IBAD-TFA-MOD 500 m-Ic=310 A/cm-w@77K, s.f. 特性で先行

適用技術標準化の中間目標と達成状況

サブテーマ	中間目標 (H22末)	成果	達成度	今後の課題
① 超電導線材関連技術標準化	<ul style="list-style-type: none"> ■超電導線材並びにその試験方法の規格素案を作成する。 ■IEC国際標準化合意の醸成を図る。 	各国の意見を反映して「超電導線に対する一般要求事項」及び「超電導線の試験方法」の規格素案を作成した。 パネル討論会等において日本(JNC)提案の「超電導線の国際標準化」の合意醸成に努めた。	○	国際合意形成のために、ドイツ及び米国との調整中
② 超電導電力ケーブル関連技術標準化	<ul style="list-style-type: none"> ■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。 ■国際大電力システム会議CIGRE、他のIEC/専門委員会TCなどとの国際合意の醸成を図る。 	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。 パネル討論会、CIGRE会議及びTC20等と連携して国際標準化合意の醸成に努めた。	○	国際合意の醸成のための活動が必要
③ 超電導電力機器関連技術標準化等	<ul style="list-style-type: none"> ■SMES、超電導変器等の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なう。 	技術動向並びに標準化ニーズ調査を実施し、これを基に規格骨子案を作成した。	○	試験方法の標準化のために更に技術調査が必要

適用技術標準化 成果の意義

開発項目	開発成果	成果の意義
① 超電導線材関連技術標準化	「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	日本発の規格素案でIEC/TC90のアドホックグループ3を牽引
② 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 CIGRE会議及びTC20等と連携	日本技術をベースに規格素案を作成 CIGRE会議のWGにて超電導電力ケーブルの規格案を検討中
③ 超電導電力機器関連技術標準化等	技術動向並びに標準化ニーズ調査を実施し、これを基に規格骨子案を作成	国内外の開発状況を踏まえて、世界に先駆けて規格骨子案を作成

プロジェクトの概要説明

I. 事業の位置づけ・必要性

事業の背景・目的・位置づけ

II. 研究開発マネジメント

事業の目標（目標設定の根拠）

・計画内容・情勢変化への対応

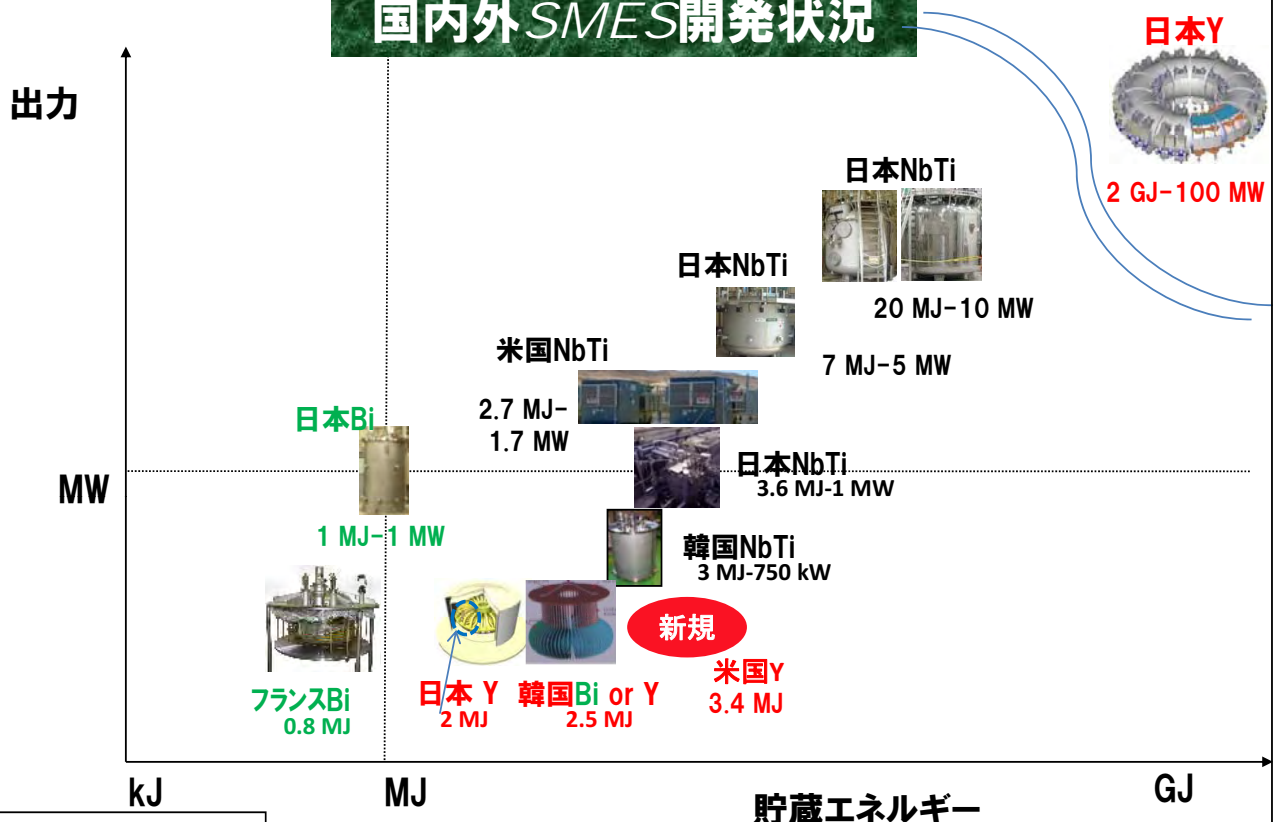
III. 研究成果、目標達成度

成果の意義・国際比較

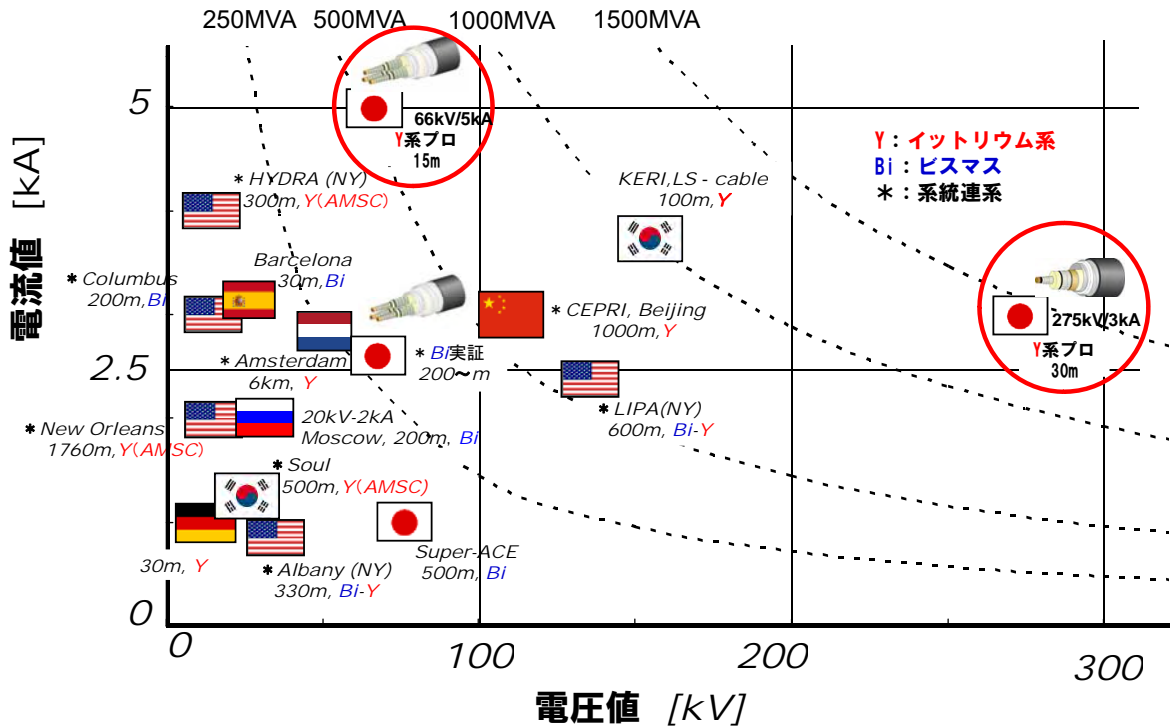
IV. 実用化の見通し、シナリオ

成果の普及・啓蒙

国内外SMES開発状況

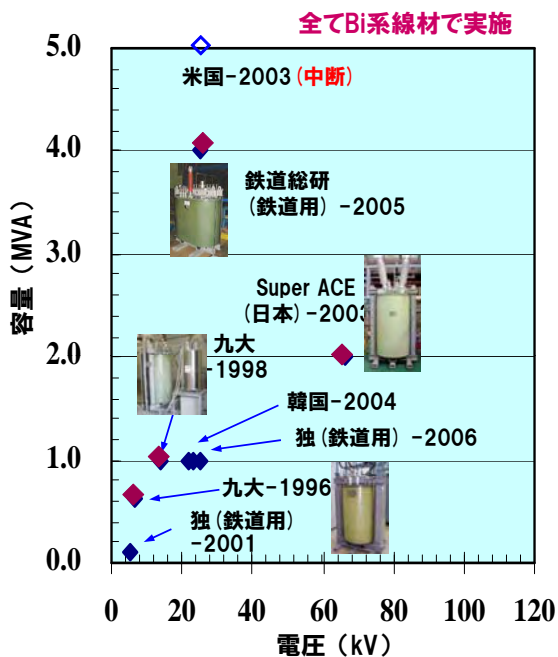


研究開発の世界比較（超電導ケーブル開発）

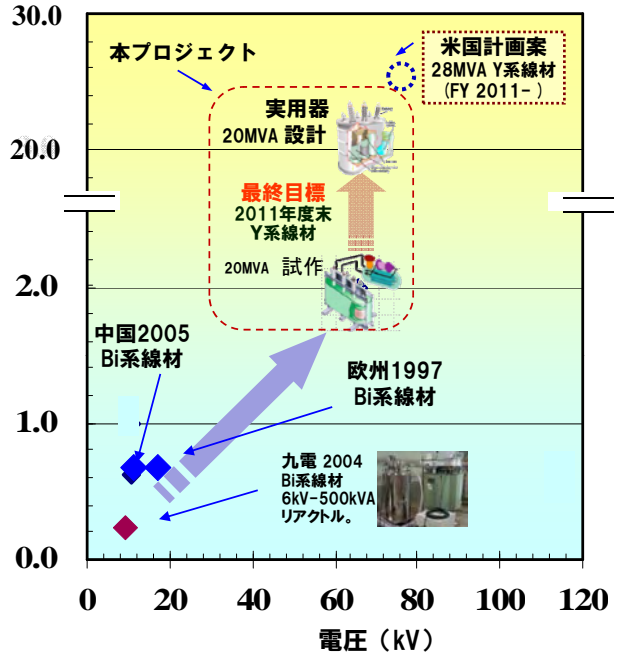


研究開発の世界比較

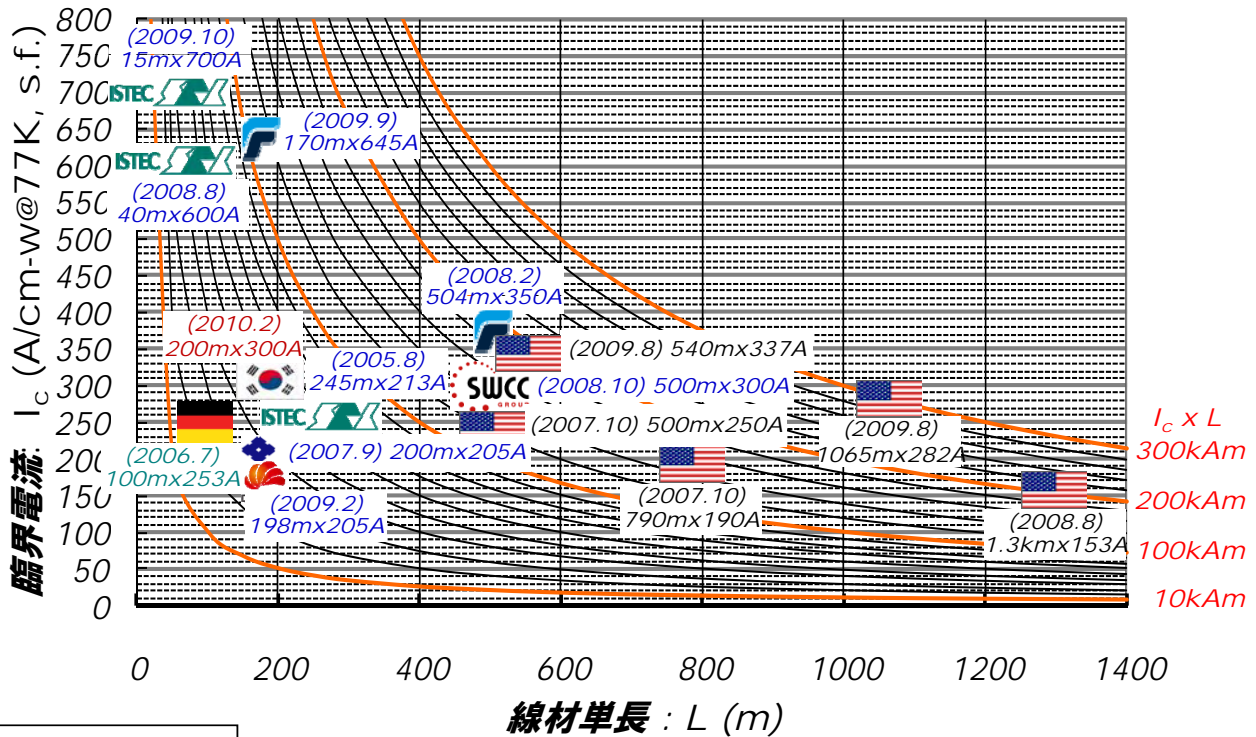
単相変圧器



三相変圧器



Y系超電導線材開発の国際比較 (2010.2)



プロジェクトの概要説明

I. 事業の位置づけ・必要性

事業の背景・目的・位置づけ

II. 研究開発マネジメント

事業の目標（目標設定の根拠）


・計画内容・情勢変化への対応

III. 研究成果、目標達成度

成果の意義・国際比較

IV. 実用化の見通し、シナリオ

成果の普及・啓蒙

2008		2012			2020				
20	21	22	中間目標	23	24	最終目標	25	~	32
リットリウム系超電導電力機器技術開発プロジェクト									
SMES		<ul style="list-style-type: none"> SMESコイル構成技術 7-φ応力600MPa, 電流≧2kA コイル伝導冷却技術 20~40K領域, 電気絶縁≧2kV 2GJ級SMESコイル 基本システム最適化 		 <ul style="list-style-type: none"> MJ級SMES動作検証 20K伝導冷却コイルにおける 2万回以上の繰返し充放電 試験フィールド: 中部電力寛政変電所 併設超電導試験センター(名古屋) 		実用化技術開発 (実証試験) SMES: ~MW級 性能・コスト等の 総合評価 競合技術との比較検討		導入普及 SMES: MW級以上 実証試験結果を 踏まえ、分散電源 大量導入時等の システム対策必要箇 所に導入を検討	
大電流ケーブル		<ul style="list-style-type: none"> 大電流ケーブル ケーブル損失(交流損) 2W/m-相@5kA 短絡試験: 31.5kA-2s 5kA連続通電 		 <ul style="list-style-type: none"> 大電流ケーブル 66kVケーブルシステム製作・試験 試験フィールド: 住友電工(熊取) 66kV/三心一括/5kA, 15m ケーブル損失: 2.1W/m-相@5kA 内径150mmφ 管路内布設 		系統対策必要箇所 実証試験検討 ケーブル: 150~500m		ケーブル: 10km 66kVケーブル 都市部連系系統 既存ケーブルの増強 275kVケーブル 都市導入部系統 老朽化ケーブルの リリース	
高電圧ケーブル		<ul style="list-style-type: none"> 高電圧ケーブル ケーブル損失 (交流損・誘電損) 0.8W/m-相@3kA 短絡試験: 63kA-0.6s 275kV連続課電 		 <ul style="list-style-type: none"> 高電圧ケーブル 275kVケーブルシステム製作・試験 試験フィールド: (徳ビスキヤス(市原)) 275kV/単心/3kA, 30m ケーブル損失: 0.8W/m-相@3kA ケーブル外径: 150mmφ以下 		系統対策必要箇所 実証試験検討 ケーブル: 150~500m 66kVケーブル 都市部連系系統 既存ケーブルの増強 275kVケーブル 都市導入部系統 老朽化ケーブルの リリース		変圧器: 20MVA 都市部周辺 変電所から導入 開始し、順次 拡大	
変圧器		<ul style="list-style-type: none"> 20MVA相当の短絡強度検証 膨張タービン、ターボ圧縮機 の断熱効率≧65% 変圧器モデルで限流機能を検証 2MVA級変圧器モデルの設計 		 <ul style="list-style-type: none"> 2MVA級 変圧器モデル 2MVA級変圧器 2kA級巻線技術 低交流損失≦1/3 限流効果(≦定格電流の3倍) 冷凍能 2kW@65K, COP≧0.06@80K 試験フィールド: 重電メカ及び 配電用変電所併設試験センター(福岡) 		水力発電所等での 実証試験 変圧器: 20MVA		変圧器: 20MVA 都市部周辺 変電所から導入 開始し、順次 拡大	
超電導線材		<ul style="list-style-type: none"> 実用化技術開発時 必要仕様線材の開発 30 A/cm-w@77 K, 3T 5 mm幅5分割損失1/5 等 		 <ul style="list-style-type: none"> 導入普及時 必要仕様線材の開発 50 A/cm-w@77 K, 3T 5 mm幅5分割損失1/10 等 		量産化 技術開発		販売 線材 量産	

超電導機器によるCO₂削減効果 (グリーンイノベーション試算)

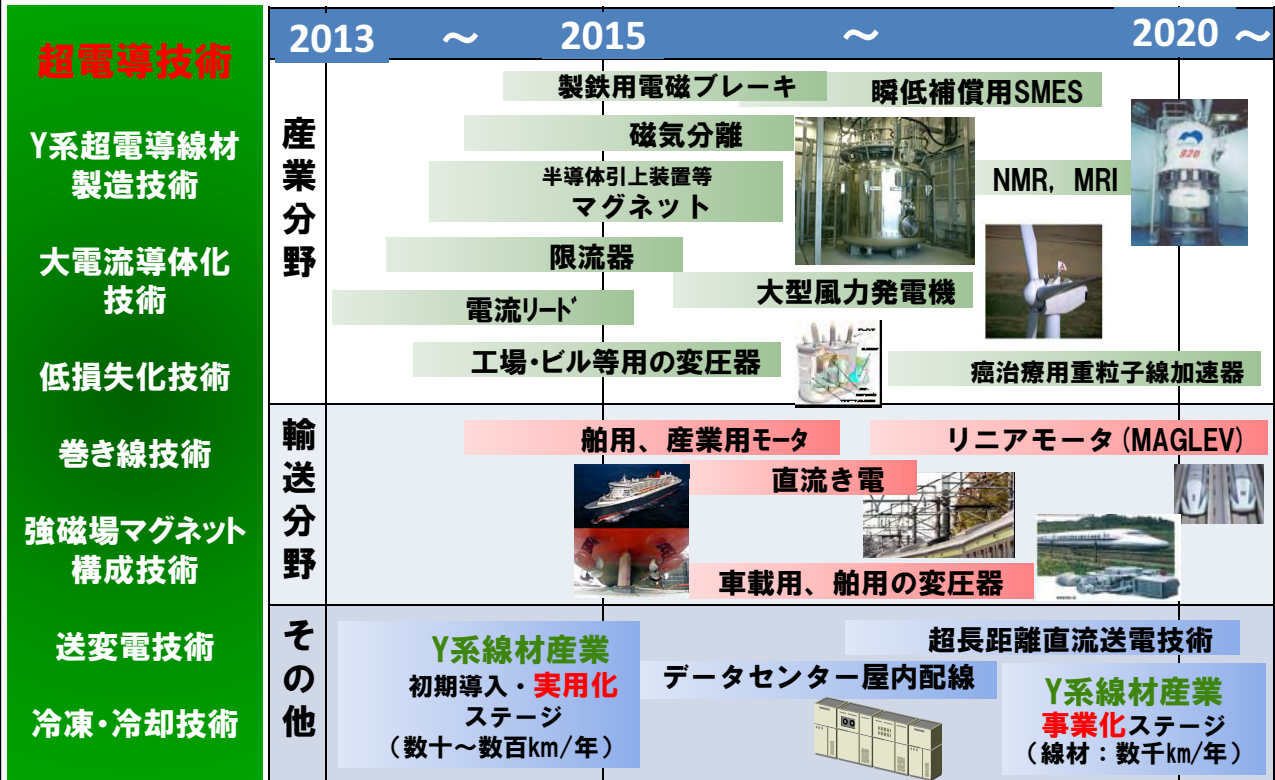
単位: 万t-CO₂/年 ()内: 最小ケース

機器名	2020年	2030年	2040年	2050年
SMES	18.3 (4.3)	258.4 (212.6)	365.7 (271.7)	494.5 (342.6)
ケーブル	29.4 (8.2)	117.8 (32.8)	206.1 (57.4)	294.4 (82.1)
変圧器	9.4 (9.4)	53.2 (37.4)	128.7 (65.4)	204.2 (93.5)
合計	57.1 (21.9)	429.4 (282.8)	700.5 (394.5)	993.1 (518.2)

算定根拠

- SMES** 新エネルギー発電の増加に対して、SMESを含めた電力貯蔵設備により補償し、新エネルギー発電を行うことによるCO₂削減
- 補償設備割合 NaS:SMES=3:1, SMES容量 発電設備容量の50%を確保
 - 最大ケース: 新エネルギーを最大限普及させたケース
 - 最小ケース: 耐用年数を迎えた機器を順次入替えたケース
- ケーブル** 超電導化による損失低減によるCO₂削減
- 損失低減量 常電導ケーブルに比べて, 2/3削減(損失1/3)
 - 導入量 2020年: 10%、2030年: 40%、2040年: 70%、2050年: 100%
 - 最大ケース: 275kV以下 導入, 最小ケース: 110kV以上275kV以下 導入
- 変圧器** 超電導化による損失低減によるCO₂削減
- 損失低減量 60%削減(損失40%)
 - 導入台数 2020年: 10%、2030年: 40%、2040年: 70%、2050年: 100%
(最大ケース時の系統変は2030年から同ペースで導入)
 - 最大ケース: 系統用および配電用変圧器を導入, 最小ケース: 配電用変圧器のみ導入
- CO₂排出原単位 0.41kg/kWh(平成18年度実績値 電事連)

Y系超電導電力機器研究開発 波及効果



知的財産権、成果の普及

	H20	H21	H22	計
特許出願 (国内)	7	26	3	36件
特許出願 (外国)	0	0	1	1件
特許出願 (PCT)	0	1	0	1件
論文 (査読有、掲載済)	22	42	3	67件
論文 (査読有、投稿中)		19		19件
論文 (その他)	1	16	2	19件
研究発表・講演	66	235	98	399件
受賞実績	1	2	3	6件
新聞・雑誌等への掲載	2	3	1	6件
展示会への出展	4	5	3	12件

※ : 平成22年度8月26日現在

「超電導電力貯蔵システム(SMES)の研究開発」 (中間評価)

(2008年度～2012年度 5年間)

プロジェクトの詳細説明(公開)

参画機関: 中部電力株式会社, 国際超電導産業技術研究センター

京都大学, 早稲田大学, 鹿児島大学, 東北大学, 九州大学, 九州工業大学

名古屋大学, 日本大学, 北海道大学, 核融合科学研究所, 古河電工, フジクラ

サブプロジェクトリーダー

中部電力株式会社 技術開発本部 電力技術研究所
超電導プロジェクトリーダー 研究主査 長屋 重夫

2010年9月1日

複製を禁ず

1/39

II. 事業の目標 1. 1. 1 超電導電力貯蔵システム(SMES)の研究開発

公開

研究開発の目標

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

研究開発項目

①2GJ級高磁界・大電流コンパクトコイル構成技術開発

②高効率コイル伝導冷却技術開発

③高磁界コンパクトSMESシステムモデル検証

④SMES対応線材開発

SMESの開発スケジュール

	H20	H21	H22	H23	H24
○SMES対応 線材開発	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block; width: 80%;">モデルコイル用線材作製 200 m - 200 A</div>				
○2GJ級 高磁界・大電流 コンパクトコイル 構成技術開発	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block; width: 80%;">耐フープ応力 600MPa以上 (通電容量 2kA以上)</div>				
○高効率 コイル伝導冷却 技術開発	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block; width: 80%;">20~40K 伝導冷却技術 (電気絶縁性能 2kV以上)</div>				
○高磁界コンパクト SMESシステム モデルコイル検証	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block; width: 80%;">基本システム最適化 保護システム検討</div>				
				<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block; width: 80%;">限界性能把握 2万回以上の充放電試験</div>	

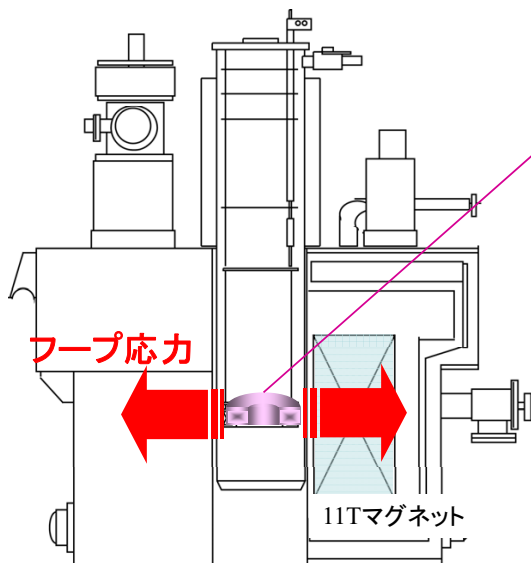
成果と今後の課題

サブテーマ	中間目標 (H22末)	成果	達成度	今後の課題
(1) 2GJ級高磁界・大電流コンパクトコイル構成技術開発	<ul style="list-style-type: none"> ■ SMESコイル構成技術 ・ フープ応力600MPa以上 ・ 通電容量2kA以上 	多層巻コイル(外径250 mm)の製作、600 MPaを超えるフープ応力耐性の実証 Y系4束導体コイル(外径650 mm)の製作、2.6 kA通電を実証	◎	最終目標に向け開発を推進
(2) 高効率コイル伝導冷却技術開発	<ul style="list-style-type: none"> ■ コイル伝導冷却技術 ・ 20~40K領域における伝導冷却が可能 ■ 高伝熱コイル構造 ・ 電気絶縁2kV以上 	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試験を実施中 6kVの絶縁設計技術確立	○	電気絶縁性能の検証 (H22末)
(3) 高磁界コンパクトSMESシステムモデル検証	<ul style="list-style-type: none"> ■ 2GJ級SMESコイル基本システムの最適化 ■ 評価用試験モデル設計 ■ 試験計画作成 (SMESシステム適用性検証評価) 	具体的支持構造検討により2GJ級SMESコイル基本システムの最適化を実施 評価用試験モデルのうち伝導冷却試験システムの設計・製作を実施	○	クエンチ検出、コイル保護手法の確立 (H22末)
(4) SMES対応線材開発	<ul style="list-style-type: none"> ■ 線材安定製造技術確立 SMESシステムモデル試作用 (仕様例: Ic=20A/cm幅 @77K&3T, 1GPa, 100m) 	長尺線材の特性低下に対して、超電導層、中間層、基板の各課題解決をはかり、モデルコイル用線材の歩留が向上。コイル用線材作製を実施中。	○	安定製造技術のメーカ移管

2GJ級高磁界・大電流コンパクトコイル構成技術開発

研究開発項目	研究開発の目標 (青:中間)
2GJ級高磁界・大電流コンパクトコイル構成技術開発	<ul style="list-style-type: none"> ・SMESコイル構成技術 -フープ応力600MPa以上 -通電容量2kA以上
高効率コイル伝導冷却システム開発	<ul style="list-style-type: none"> ・コイル伝導冷却技術 ★20～40K領域における伝導冷却が可能 ★高伝熱コイル構造 ★電気絶縁2kV以上
高磁界コンパクトSMESシステムモデル検証	<ul style="list-style-type: none"> ・2GJ級SMESコイル基本システムの最適化 ・評価用試験モデル設計(高磁界コンパクト・高効率伝導冷却コイル) ・試験計画作成(SMESシステム適用性検証評価) ・SMES動作検証(2GJ級評価用試験モデル) ・特性検証(日光試験ベースの2万回以上繰り返し充放電)
SMES対応線材開発	<ul style="list-style-type: none"> ・モデルコイル用線材作製 <p>(システム検証用: Ic: 20A/cm@77K & 3T)</p>

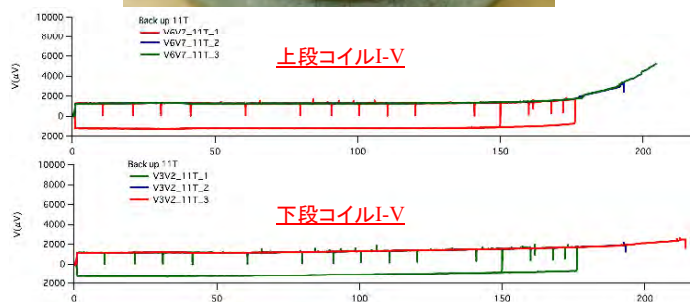
小型多層巻コイルによるフープ応力評価



コイル仕様
 シングルパンケーキ型 2積層
 外径 Φ250 mm / 内径 Φ200 mm

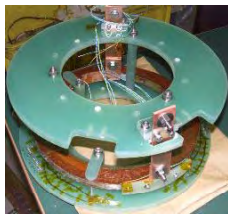


巻線部で高強度基板に対する560MPaの電磁応力耐性を実証
 また、コイルの一体変形を確認
 ただし電極部劣化のため再試験



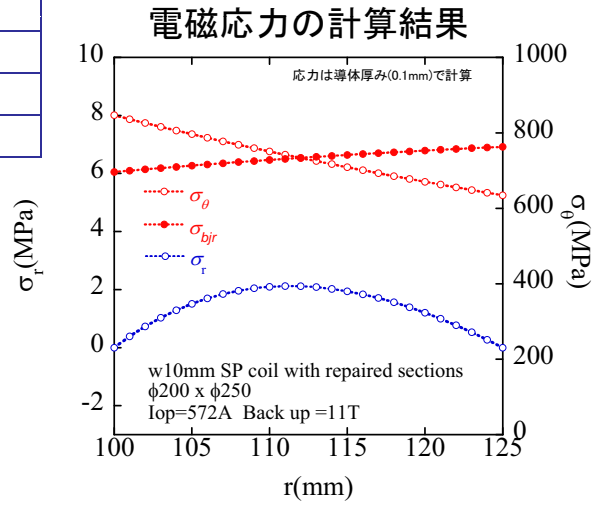
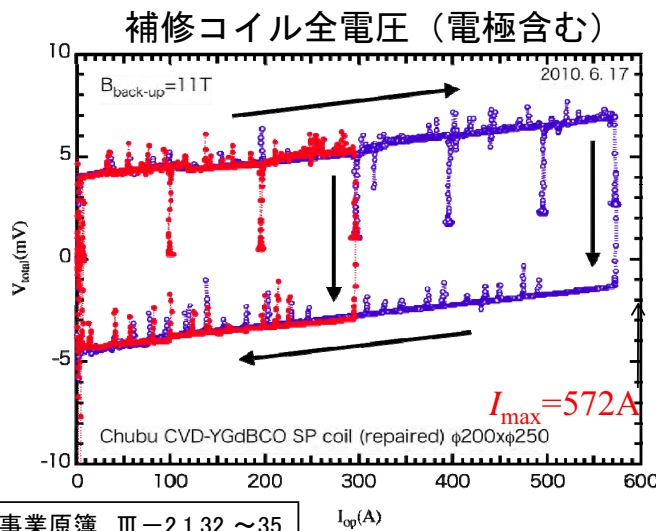
11T外部磁界中でのコイル3回繰り返し通電結果

小型多層巻コイルによるフープ応力再評価



SPコイル（補修有）

コイル内径	mm	200
コイル外径	mm	251
1ターン平均厚さ	mm	0.367
巻数	turns	69.5



目標の600MPaに対し、独立変形 (BJR)で約**740MPa**、一体変形で約**850MPa**のフープ応力耐性を実証

600mm級コイル大電流通電試験結果

<実規模コイル諸元>

線材	Cu安定化CVD-YBCO線材
導体	素線絶縁4本積層
形状	シングルパンケーキ型
内径	520 mm
外径	611 mm
高さ	10 mm
電流	2.6 kA

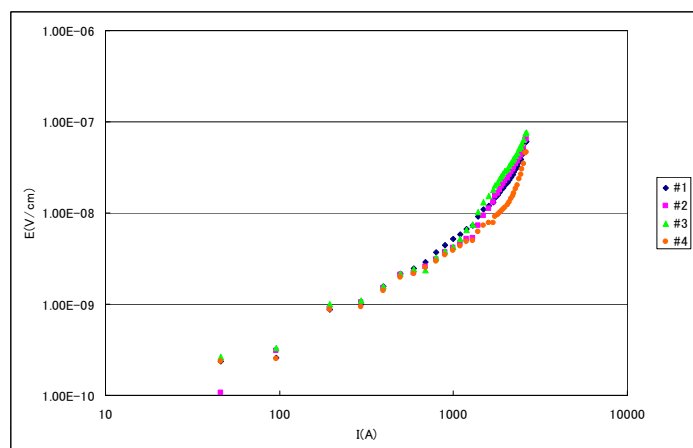


図 LHe中で通電時の各素線発生電圧 (横軸: 全電流)

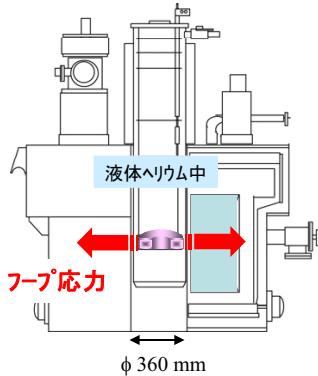
Y系集合化導体を用いた実規模コイルを製作し、通電試験により、2kAを超える大電流通電を実証

Y系コイルの耐フープ応力検証評価

小規模(Φ250mm)による基礎評価 → 実規模(Φ630mm)による検証評価

CVD-YBCOコイル

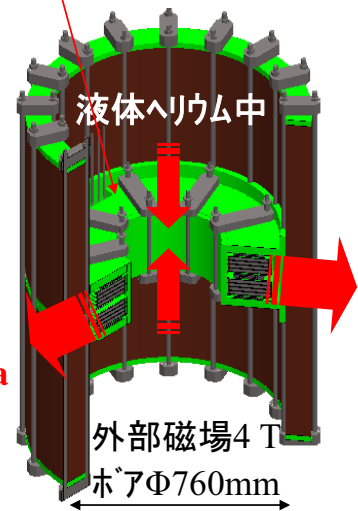
Φ250 mm



CVD-YBCOコイル

Φ630 mm
電流2kA
4枚積層導体
2個程度積層

フープ応力
600 MPa



- 600MPa以上の耐フープ応力検証
- 応力が集中する電極の製作・評価
- コイル励磁時のコイル内部応力伝達・分布の評価

- 集合導体コイルの応力バランス評価
- 繰り返し充放電等によるYBCOコイルの耐性検証

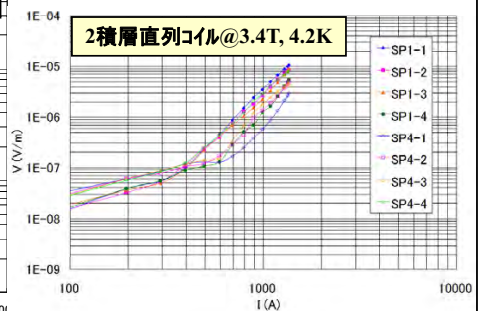
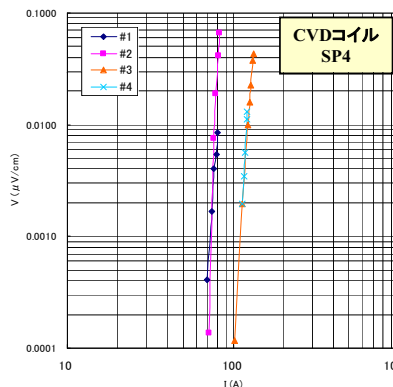
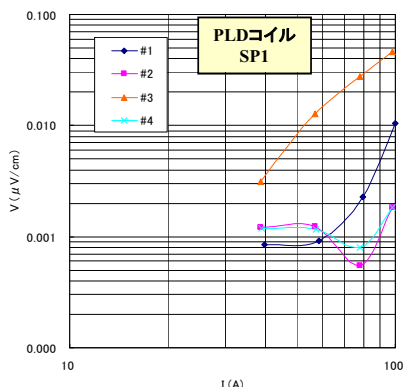
630mmコイル通電試験結果

<実規模コイル諸元>

線材	Cu安定化CVD-GdYBCO線材 Cu安定化PLD-GdBCO線材
導体	素線絶縁4本積層
形状	シングルパンケーキ型
内径	520 mm
外径	630 mm
巻数	各41ターン



コイル2個積層、
3.4Tマグネット中
で1.4kA通電
400MPaのフープ
応力印加



高効率コイル伝導冷却技術開発

研究開発項目	研究開発の目標 (青: 中間)
2GJ級高磁界・大電流 コンパクトコイル構成技術開発	<ul style="list-style-type: none"> SMESコイル構成技術 <ul style="list-style-type: none"> -フープ応力600MPa以上 -通電容量2kA以上
高効率コイル 伝導冷却システム開発	<ul style="list-style-type: none"> コイル伝導冷却技術 <ul style="list-style-type: none"> ★20~40K領域における伝導冷却が可能 ★高伝熱コイル構造 ★電気絶縁2kV以上
高磁界コンパクトSMES システムモデル検証	<ul style="list-style-type: none"> 2GJ級SMESコイル基本システムの最適化 評価用試験モデル設計(高磁界コンパクト・高効率伝導冷却コイル) 試験計画作成(SMESシステム適用性検証評価) SMES動作検証(2GJ級評価用試験モデル) 特性検証(日光試験ベースの2万回以上繰り返し充放電)
SMES対応線材開発	<ul style="list-style-type: none"> モデルコイル用線材作製 (システム検証用: $I_c: 20A/cm@77K \& 3T$)

Y系SMES要素コイル 電気絶縁構造設計

巻線機器(直流)の試験電圧: $2E+1(kV)$

絶縁耐圧の経時劣化を考慮

30年後のFRP絶縁性能25%以上(常温・大気圧)

対地絶縁

定格6(kV) → $13 \times 4 = 52 kV$ を設計値

耐電圧52 kV に耐える厚さ: 3.4 mm以上

層間絶縁

層間最大3kV → 試験電圧: $3 \times 2 + 1 = 7 kV$

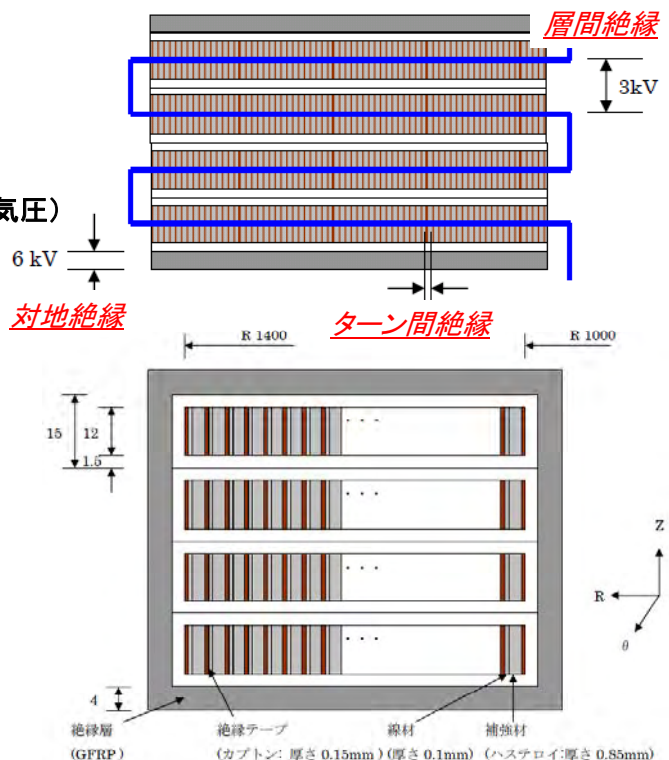
設計電圧: $7 \times 4 = 28 kV$

耐電圧28 kV に耐える厚さ: 1.8 mm以上

ターン間絶縁

$6kV / 1620 \text{ ターン} = 3.7 V$

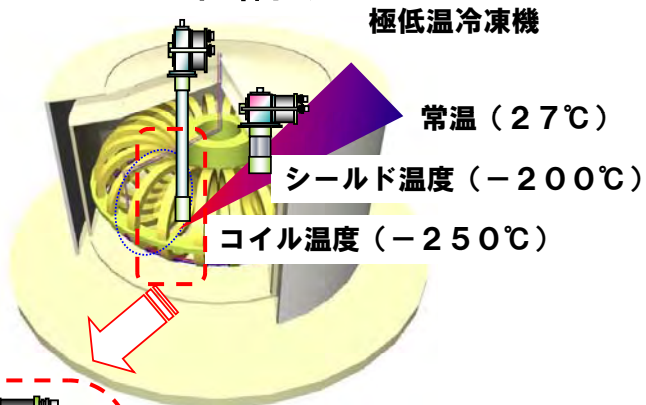
0.15mm カプトンテープで十分



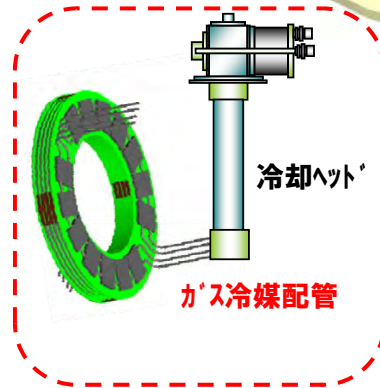
冷却システム基本構成

冷却システムの変遷

コイル温度	冷却方式
金属系: 4K	浸漬冷却 (従来)
↓	↓
Y系: 20~50K	伝導冷却 (今回)



伐熱を
・効率良く
・確実に行う
↓
ガス冷媒配管
による冷却



冷却システムの課題

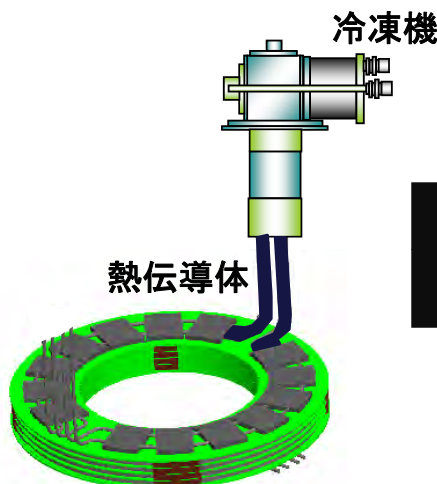
1. 伝導冷却システムの確立
2. 冷凍効率の向上
(ランニングコスト削減)
COP : 0.01 @ -250°C
0.1 @ -200°C

安価で使いやすい冷却システム

コイル伝導冷却

従来

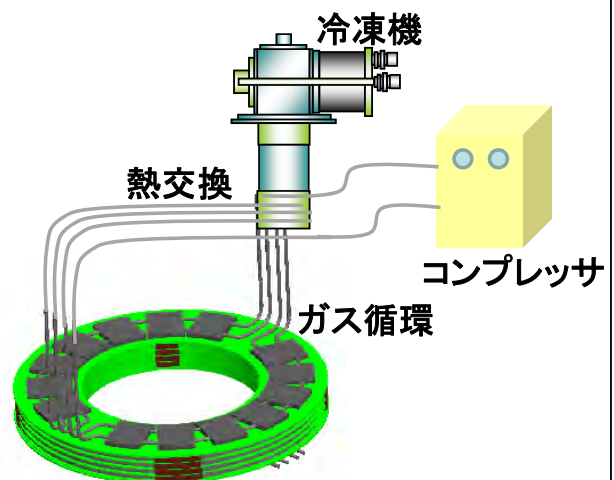
冷凍機とコイル間を固体熱伝導体で接続し伝導冷却



長距離冷却時に熱勾配が発生

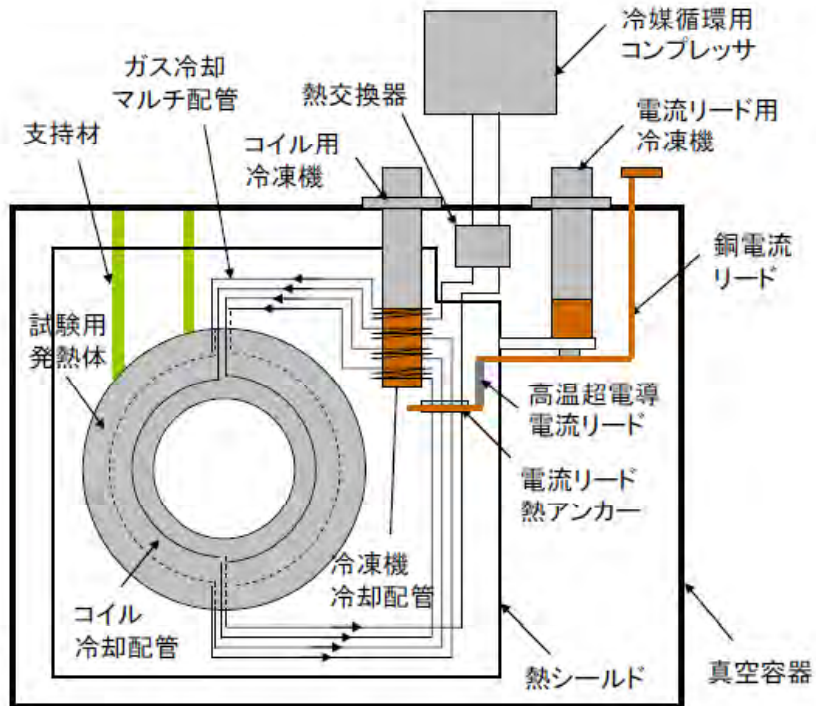
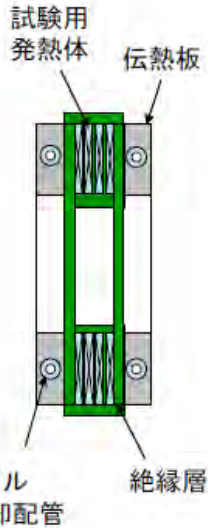
今回

冷凍機とコイル間を極低温ガスの循環により冷却



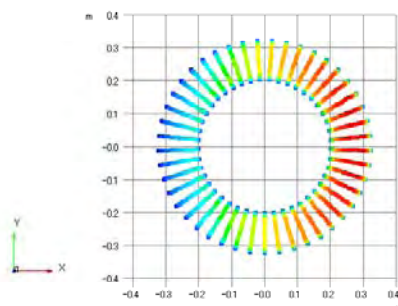
コイル全体を均等冷却

冷却システム試作評価試験



冷却システムのシミュレーション結果

実規模コイルの発熱分布



実規模コイルの模擬発熱体

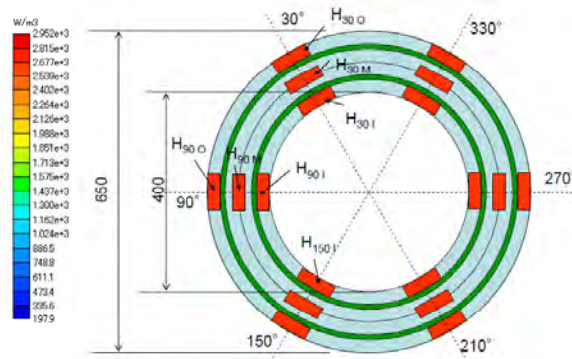


図9-1 ヒーター取付け位置 (平面図)

試験用発熱体の冷却シミュレーション条件
 コイル表面熱流束 21.8 W/m²
 配管1本当たり発熱量 2.25 W/配管
 配管長 825 mm
 配管径 外径8 mm, 内径6 mm
 ガス流量 0.56 g/s
 発熱分布 一様発熱と分布発熱

コイル断面

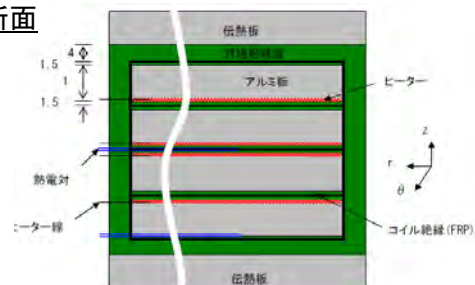
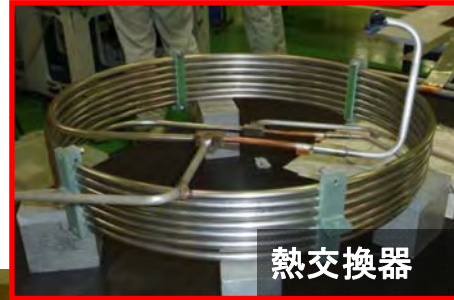


図9-2 ヒーター取付け位置 (断面図)

3 W/m²に対して21.8 W/m²
 の冷却実現の見通し

冷却システム試験装置

クライオ全景



熱交換器



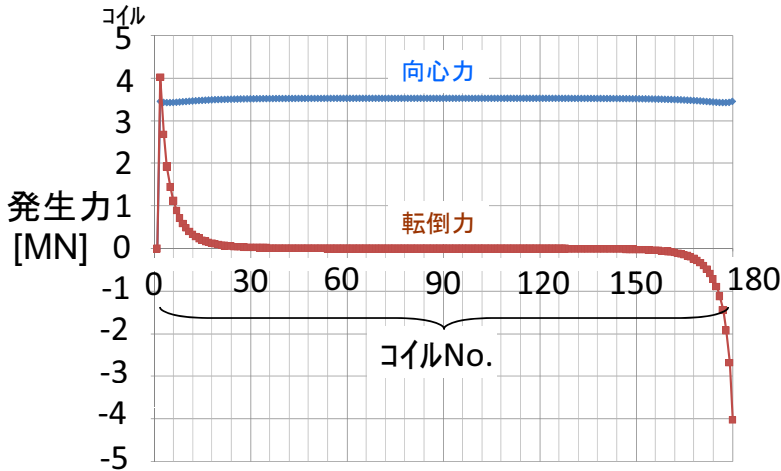
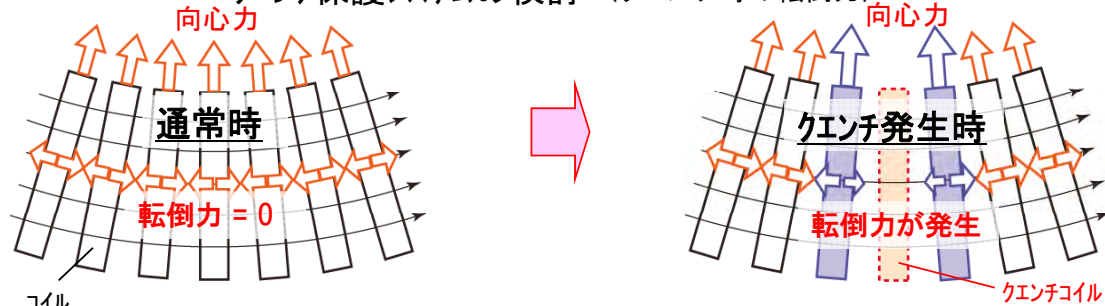
リード部

高磁界コンパクトSMESシステムモデル検証

研究開発項目	研究開発の目標 (青:中間)
2GJ級高磁界・大電流 コンパクトコイル構成技術開発	<ul style="list-style-type: none"> ・SMESコイル構成技術 <ul style="list-style-type: none"> -フープ応力600MPa以上 -通電容量2kA以上
高効率コイル 伝導冷却システム開発	<ul style="list-style-type: none"> ・コイル伝導冷却技術 <ul style="list-style-type: none"> ★20~40K領域における伝導冷却が可能 ★高伝熱コイル構造 ★電気絶縁2kV以上
高磁界コンパクトSMES システムモデル検証	<ul style="list-style-type: none"> ・2GJ級SMESコイル基本システムの最適化 ・評価用試験モデル設計(高磁界コンパクト・高効率伝導冷却コイル) ・試験計画作成(SMESシステム適用性検証評価) ・SMES動作検証(2GJ級評価用試験モデル) ・特性検証(日光試験ベースの2万回以上繰り返し充放電)
SMES対応線材開発	<ul style="list-style-type: none"> ・モデルコイル用線材作製 <p>(システム検証用: $I_c: 20A/cm @ 77K \& 3T$)</p>

基本システム最適化

クエンチ保護システムの検討 (クエンチ時の転倒力)



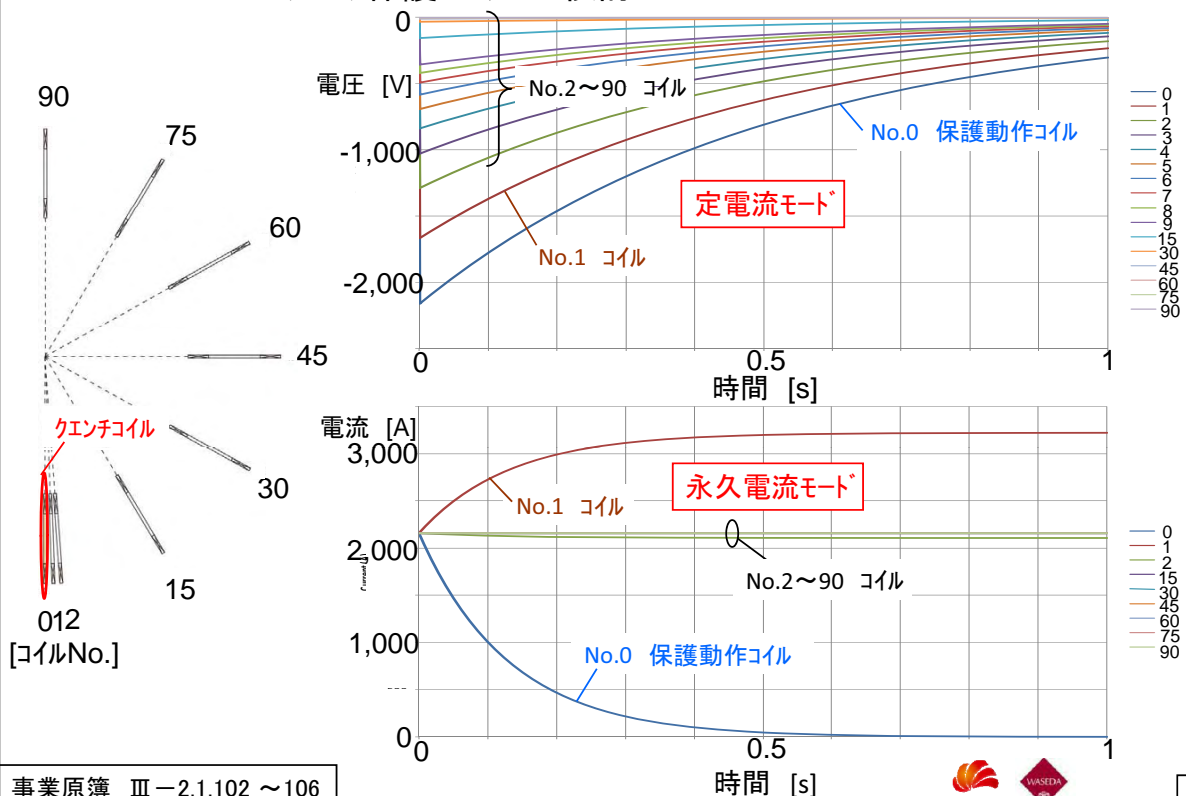
クエンチ発生時

- ①外部抵抗によってクエンチコイル電流を減衰
- ②当該コイル磁束が減衰
- ③全体の磁束変化を少なくするため周辺コイル電流を上昇



基本システム最適化

クエンチ保護システムの検討 (クエンチ時のコイル発生電圧・電流)

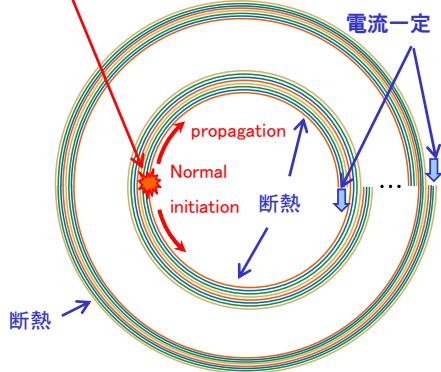


素線絶縁集合導体におけるクエンチ挙動の評価

Y系集合導体コイルのクエンチ現象を解析評価

線材4枚集合化導体

1層目、1ターン目で超電導特性が劣化 ($k=0$) と仮定

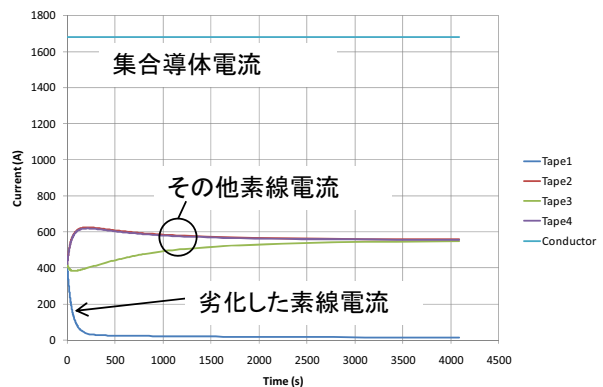


待機運転時に素線1本が劣化した場合の集合導体コイル各素線電流を解析し、他の素線へ転流が発生することを確認
→ クエンチ検出法として検討



素線テープ1
素線テープ2
素線テープ3
素線テープ4

導体電流と素線の電流配分



SMES対応線材開発

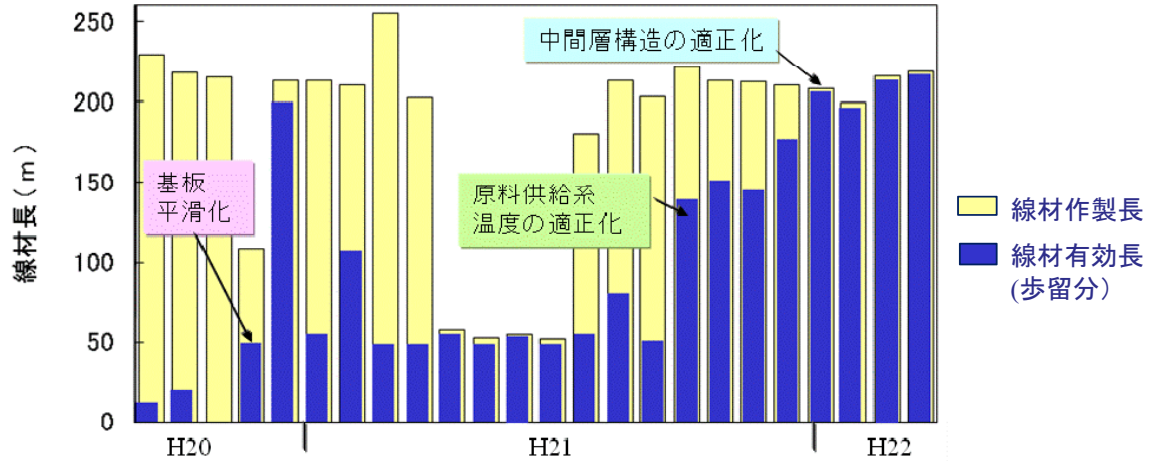
研究開発項目	研究開発の目標 (青: 中間)
2GJ級高磁界・大電流 コンパクトコイル構成技術開発	<ul style="list-style-type: none"> SMESコイル構成技術 <ul style="list-style-type: none"> -フープ応力600MPa以上 -通電容量2kA以上
高効率コイル 伝導冷却システム開発	<ul style="list-style-type: none"> コイル伝導冷却技術 <ul style="list-style-type: none"> ★20~40K領域における伝導冷却が可能 ★高伝熱コイル構造 ★電気絶縁2kV以上
高磁界コンパクトSMES システムモデル検証	<ul style="list-style-type: none"> 2GJ級SMESコイル基本システムの最適化 評価用試験モデル設計 (高磁界コンパクト・高効率伝導冷却コイル) 試験計画作成 (SMESシステム適用性検証評価) SMES動作検証 (2GJ級評価用試験モデル) 特性検証 (日光試験ベースの2万回以上繰り返し充放電)
SMES対応線材開発	<ul style="list-style-type: none"> モデルコイル用線材作製 <p>(システム検証用: 200 A - 200 m)</p>

IBAD-MOCVD長尺線材の作製実績

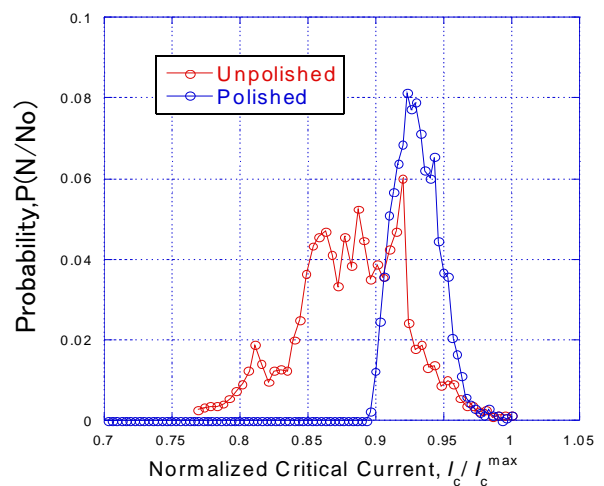
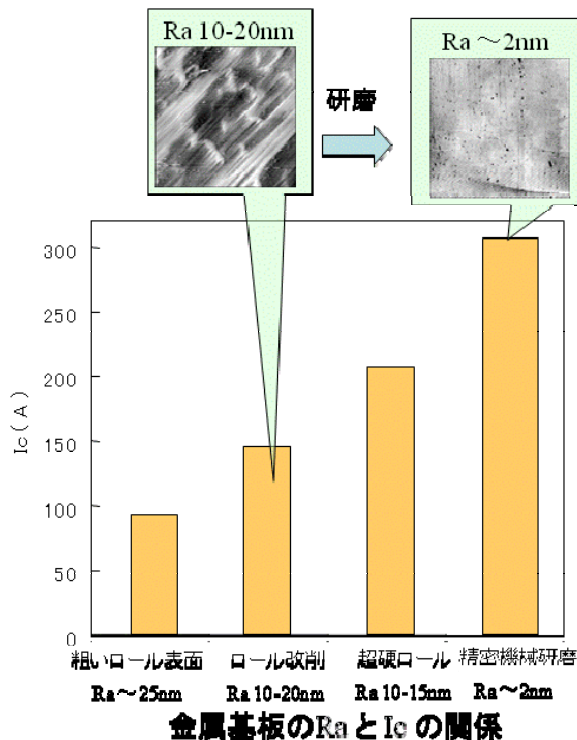
期間	作製長 (m)	100 A以上、50 m以上		200 A級、75 m以上		200 A級、150-300m	
		本数	歩留	本数	歩留	本数	歩留
H20	1,503	11	48.4	1	14.3	1	14.3
H21	4,363	33	58.0	0	0	0	0
H22(～7月)	841	6	84.1	3	59.2	2	50.0

歩留：作製長に対する所定Icと所定単長を達成した線材長の割合

Ic: 200A 級線材の作製状況



基板の平滑化

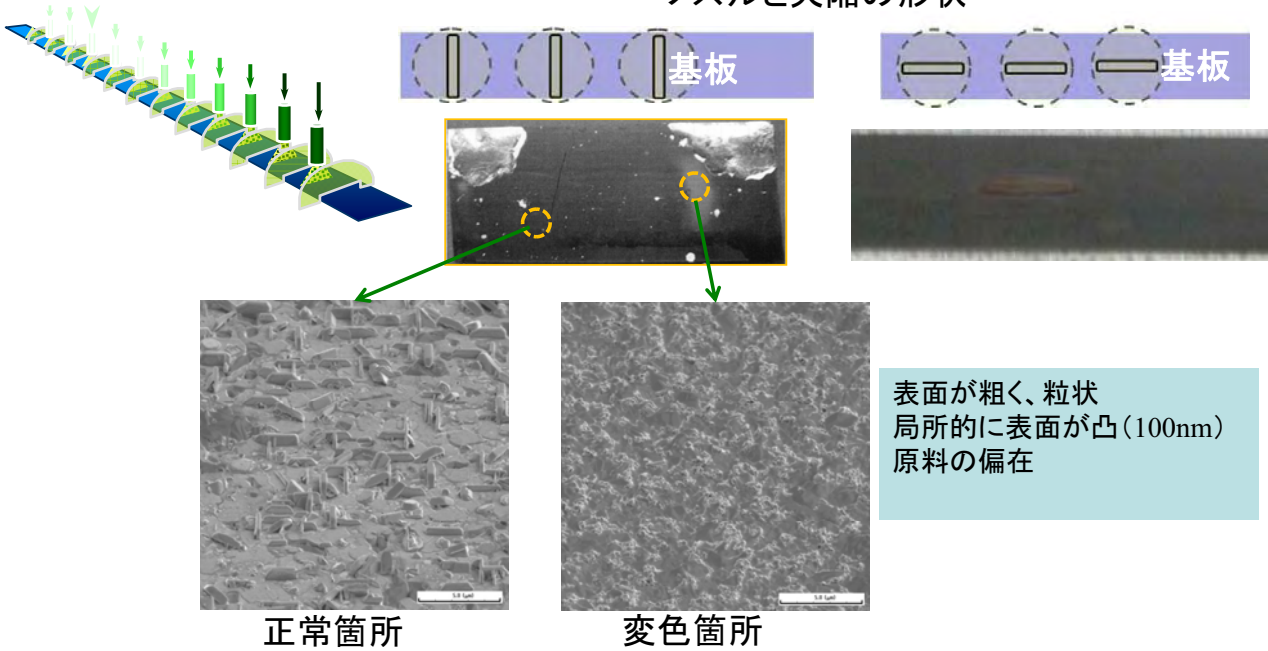


局所Icの統計分布の比較

長時間成膜の特性低下要因検討

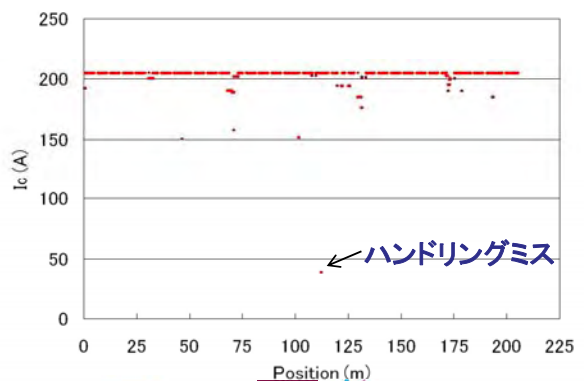
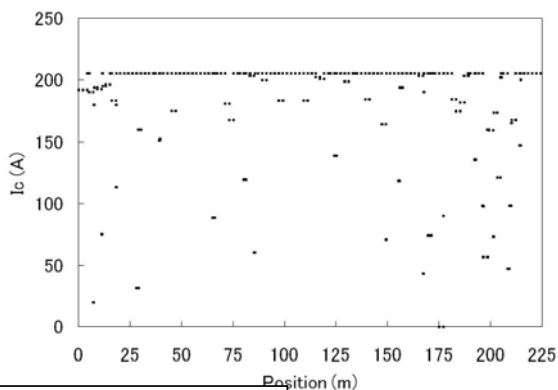
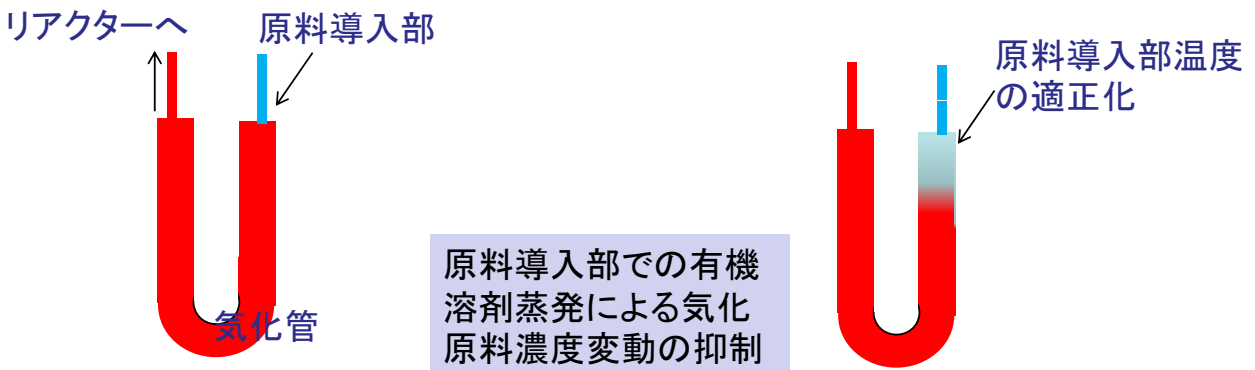
-原料ガスの不安定性-

ノズルと欠陥の形状



局所的な低 I_c 箇所 : ノズル形状に応じた変色領域の発生

原料ガス供給系の安定化

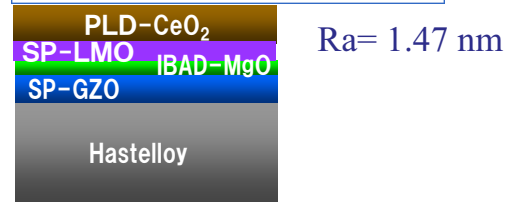
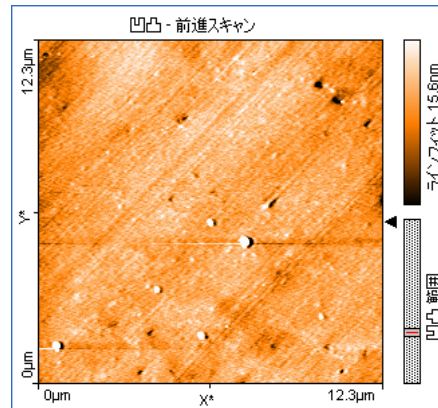
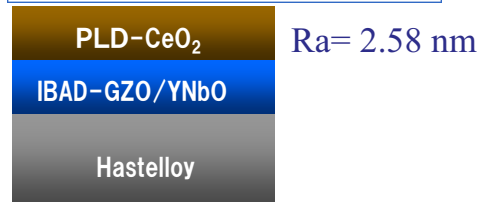
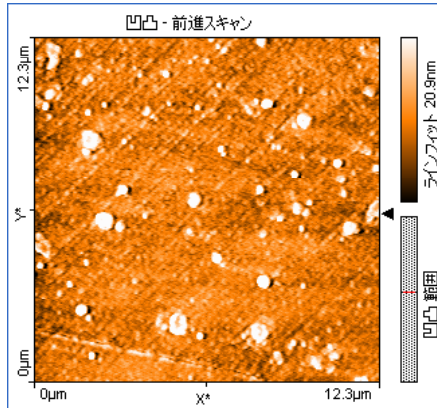


中間層の欠陥の抑制

- ・ 薄化と多層化による欠陥成長の抑制
- ・ 金属基板直上のベッド層による平滑化



中間層表面の欠陥の減少
平滑性の向上



知的財産権、成果の普及

	H20	H21	H22	計
特許出願(出願)	1※	3※	0	4件
論文	0	0	1	1件
研究発表・講演	8	36	21	65件
受賞実績	0	0	0	0件
新聞・雑誌等への掲載	0	2	0	2件
展示会への出展	1	0	0	1件

※ : 2010年度7月30日現在

(注) ※ H20年度特許「ダブルパンケーキコイル、中部電力」
H21年度特許「超電導線材及びその製造方法、古河電気・中部電力」他

超電導EXPO2008での展示
 2008/12/11～12/13
 @東京ビッグサイト



専門雑誌への投稿

国内外SMES開発状況

	日本	韓国	欧州	アメリカ
1990年	NbTi ★ 3.6 MJ			マイクロSMES アラスカSMES NbTi 2.7 MJ NbTi 1.8 GJ ↓ 中止
2000年	NbTi 7 MJ ★ Bi2212 1 MJ	NbTi 3 MJ ★ Bi2223 1 MJ	フランスBi2212 ★ 0.8 MJ	DOEプロジェクト ARPA-E (画期的な クリーンテック戦略)
2010年	2 MJ Y系 ★ 2 GJ	★ Bi or Y系 2.5 MJ	★ フランス Y系	★ Y系 3.4 MJ (4.2K)

SMESシステムの開発 成果の意義

開発項目	開発成果	成果の意義
(1) 2GJ級高磁界・大電流コンパクトコイル構成技術開発	従来の金属系超電導コイルの2倍相当の600 MPaのフープ応力耐性を大口径多層巻コイルで実証 テープ状Y系線材を束ねた導体コイルによる2 kA以上の通電を実証	世界最高性能
(2) 高効率コイル伝導冷却技術開発	6kV以上の電気絶縁性能を有した20K伝導冷却Y系コイルの開発としては世界最大(外径650 mm級)	世界最高性能
(3) 高磁界コンパクトSMESシステムモデル検証	クエンチ保護が困難な高温超電導コイルに対して素線絶縁集合導体の素線間転流現象を活用する新たな検出法を考案	世界初

最終目標に対する達成見込み

研究テーマ	最終目標	達成へのアプローチ及び見込み
(1) 2GJ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 650mm級の4束導体コイルを作製し、3.5T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し最終目標を達成見込み。
(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20-40K、2kV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の7倍(21W/m ²)の発熱量に対し冷却システムが成立することを実証中。絶縁性能においては2kVの3倍(6kV)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 650mm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。
(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2MJ級モデルコイルへの線材供給	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。
(4) 高磁界コンパクトSMESシステムモデル検証	2MJ級評価用試験モデルを用い、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検証	積層したφ 650mm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。

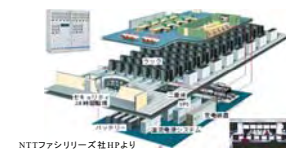
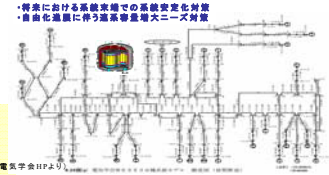
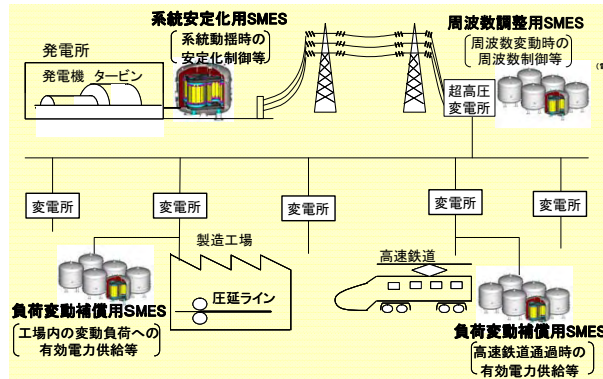
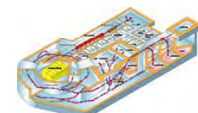
前フェーズ成果

SMESシステム適用技術

目的：SMESシステムの実用化や適用拡大の円滑化

- ・電力ネットワークの規模、形態、目的用途に応じた導入効果の評価
- ・産業応用用途に応じた最適化、コストミニマム化が可能なSMESシステムの適用性検討
- ・試験方法を含む標準化調査

(SMESシステムの適用技術標準化検討対象)



前フェーズ成果

市場ニーズ調査結果

■ SMESは電力用・産業用で各種用途が期待されている。

電力用

系統安定化

過渡安定対策(長距離電源等)
ルート断事故時等の電圧対策
SVC、STATCOM代替

負荷変動補償

変動負荷の平準化
フリッカ対策

周波数調整

火力機ガバナフリー代替

分散電源対応

風力発電・太陽光発電連系対策

産業用

(鉄鋼・非鉄・自動車・電機・化学・鉄道等)

瞬低対策

落雷等による瞬低予防
工場ライン停止予防、不良品排除

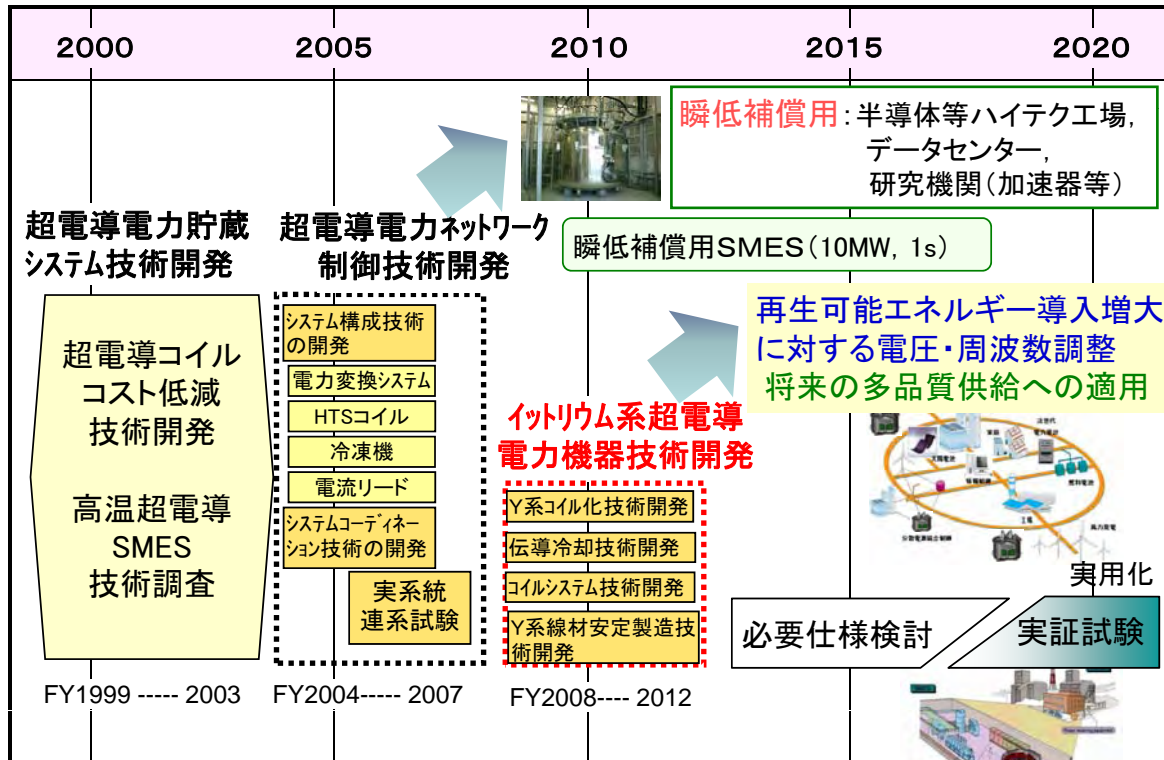
電圧変動対策

鉄鋼炉フリッカ対策
高速鉄道等変動負荷対策
SVC、SC代替

電力品質向上

高品位な電力、無停電源

電力系統制御用SMES開発ロードマップ



SMESの分散電源対応適用イメージ

周波数調整用途

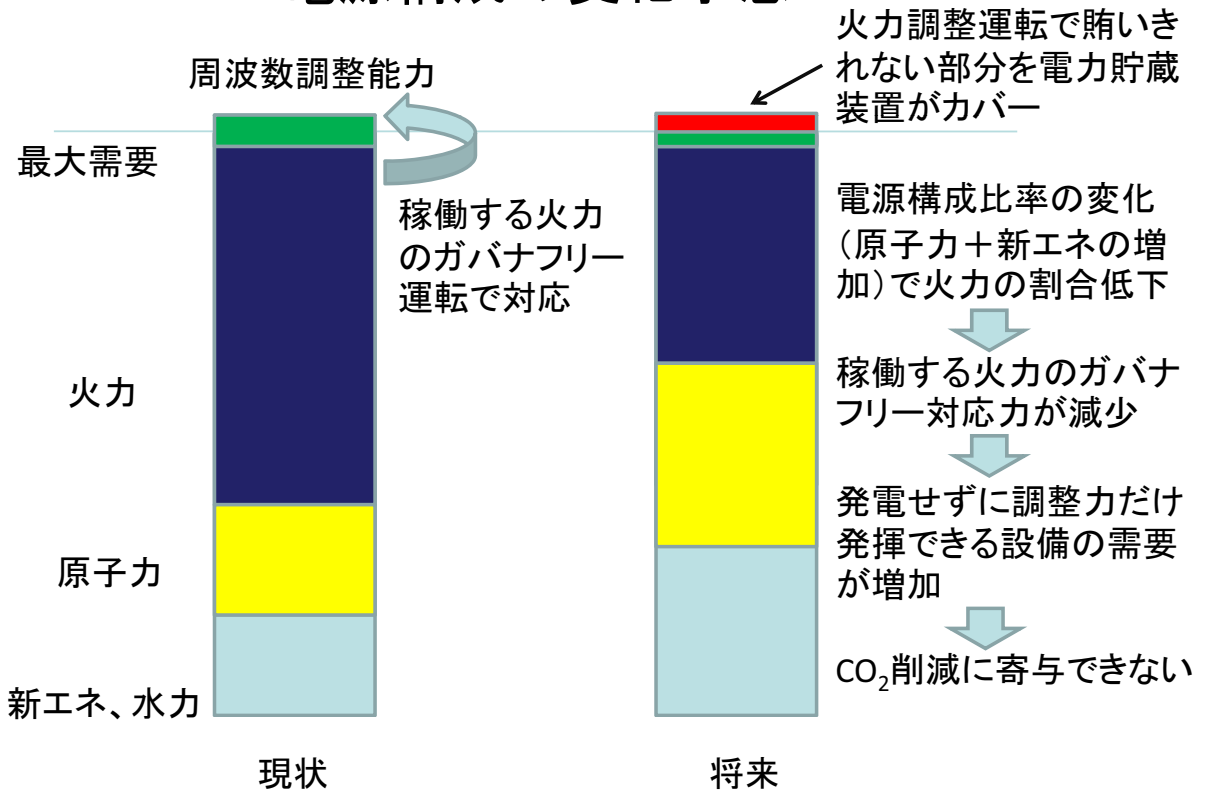
原子量発電や再生可能エネルギーの増加により、電源構成比率が変化し、従来、システムの周波数調整や需給バランス制御を分担してきた火力機の割合が相対的に低下。

太陽光自体はシステムに大きな影響を与えない可能性があり、再生可能エネルギーが増えても電力貯蔵が同時に導入される可能性は低い。

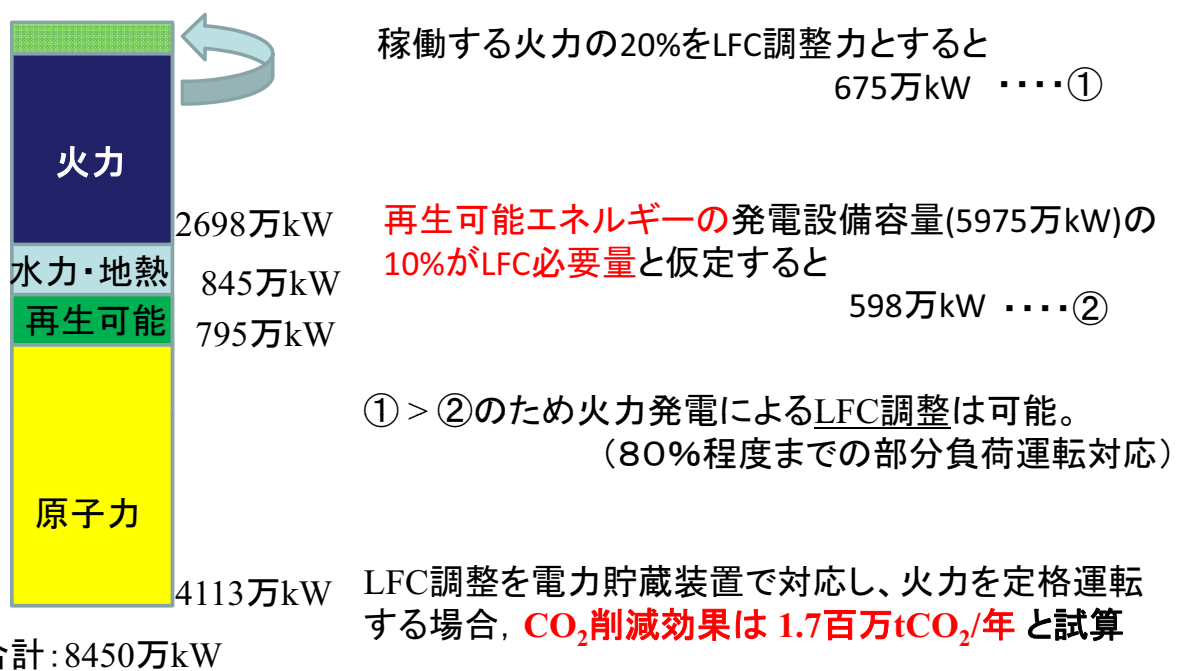
従来通り火力機で調整するとした場合、ホットスタンバイ状態の火力機が増え、CO₂削減に寄与できない。

SMES等の電力貯蔵設備や揚水発電で上記機能を代替することにより、大幅なCO₂削減が期待される。

電源構成の変化予想



CO₂削減効果試算例

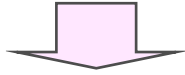


出典:「2009年8月長期需給見通し」より

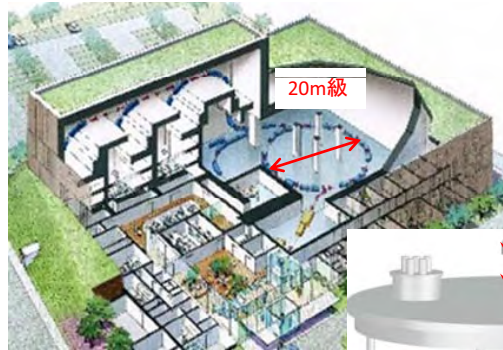
他用途への波及効果

SMES用Y系コイル

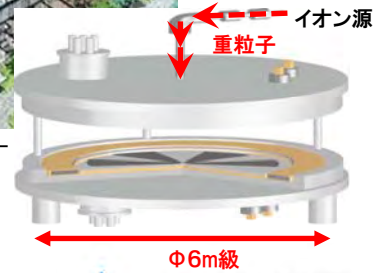
・ 高磁場技術



加速器
核融合
産業用マグネット
MRI, NMR, etc



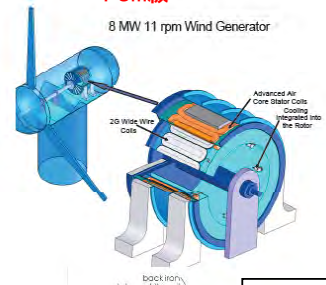
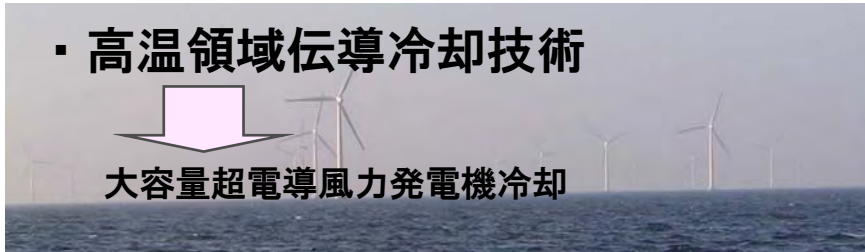
群馬大学 重粒子線医学研究センター
ホームページより



・ 高温領域伝導冷却技術



大容量超電導風力発電機冷却



超電導電力ケーブル研究開発

(中間評価)

(2008年度～2012年度 5年間)
プロジェクトの詳細説明(公開)

サブプロジェクトリーダー
(財)国際超電導産業技術研究センター
藤原 昇 (2008年6月～2010年6月)
大熊 武 (2010年7月～)

参画機関: (財) 国際超電導産業技術研究センター、
住友電気工業(株)、古河電気工業(株)、(株)フジクラ、
(財) ファインセラミックスセンター、昭和電線ケーブルシステム(株)
(株) 前川製作所、京都大学、早稲田大学、名古屋大学

複製を禁ず

2010年9月1日

1/43

II. 研究開発マネジメントについて 1.1 研究開発目標

公開

研究開発の目標

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重要な要素技術の開発およびケーブル対応線材の安定製造技術開発を行い、平成24年度までに、66kV大電流ケーブルシステム、275kV高電圧ケーブルシステムの課通電特性や送電損失等の実用性を検証する。

研究開発項目

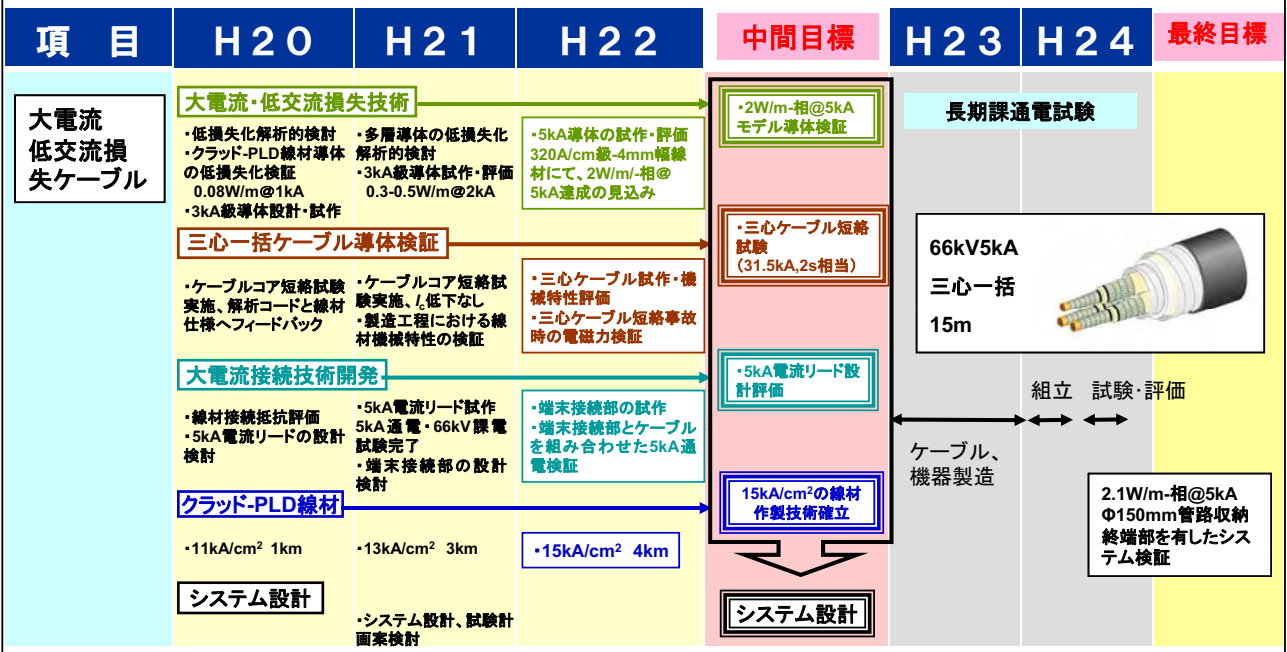
- (1) 大電流・低交流損失ケーブル化技術の開発
- (2) 高電圧絶縁・低誘電損失ケーブル化技術の開発
- (3) 電力ケーブルの熱収支に関する評価研究
- (4) ケーブル対応線材安定製造技術開発
- (5) 66kV大電流ケーブルシステム検証
- (6) 275kV高電圧ケーブルシステム検証

1. 66kV大電流ケーブル化 技術の開発

- ・開発スケジュール
- ・目標と達成度
- ・中間評価までの成果
- ・最終目標の達成

Ⅱ. 研究開発マネジメントについて 2.1 研究開発の内容

電力ケーブルの開発スケジュール (H22年度末)



個別研究開発項目の目標と達成状況 大電流ケーブルの技術開発

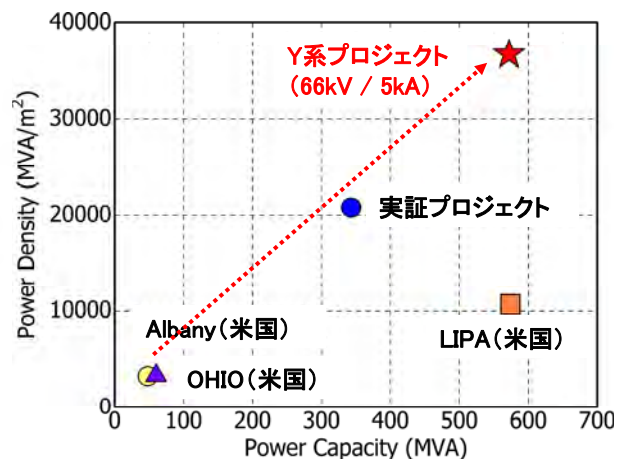
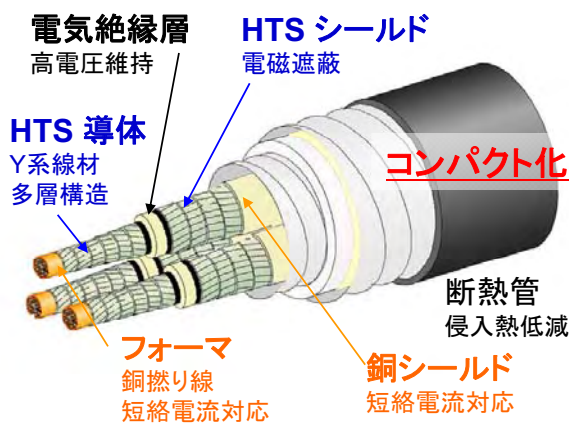
●基本計画：66kV級大電流・低交流損失超電導ケーブルの要素技術開発を完了し、ケーブルシステムの実用性を検証して、実用化に目処をつける。

項目	中間目標 (基本計画書抜粋)	成果(状況)	達成度	達成度と課題
① 大電流・低交流損失	ケーブル交流損失 2W/m-相@5kA 以下	<ul style="list-style-type: none"> • 導体構造を「導体4層、シールド2層」に絞り込み • 線材幅2、4mmの導体を試作 • 3W/m/-相@4.5kAまで低減 	○	4mm幅の I_c 向上(320A/cm)、2mm幅線材の端部 J_c 改善によりH22年度中に実施
② 三心一括ケーブル導体の検証	短絡試験(31.5kA, 2sec相当)でケーブルの性能に劣化が無いこと	モデルケーブルコアを作製し、31.5kA、2secで性能が低下しないことを確認	○	コア間に発生する電磁力の影響について評価をH22年度中に実施
③ 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	大容量電流リードを開発し、5kA通電を実施して異常のないことを確認	○	ケーブルと接続部を組み合わせた5kA通電試験をH22年度中に実施
④ システム検証	検証用超電導ケーブルの システム設計完了 課通電試験計画書作成	システム設計、課通電試験計画書を作成	○	技術委員会等にて意見を聞いてH22年度中に確定

事業原簿 Ⅲ-1.2.7

○: H22年度中に達成見込み

5/43



主な開発目標	根拠
定格: 66kV/5kA 容量: 570MVA	既存の154・275kV-ケーブルを66kV-超電導ケーブルで代替するために必要な目標値 →世界最大級の送電容量
交流損失: 2W/m/相	冷却効率を考慮しても、既存ケーブルの1/3以下となる送電損失レベル →世界最小レベルの交流損失(同構造のAlbanyケーブルの1/7)
短絡電流: 31.5kA、2秒	66kV級遮断器に規定されている過電流レベル
サイズ: φ150mm管路対応	66kV既存ケーブル用の代表的な管路サイズに対応するコンパクト化 →世界最大の送電密度(米国LIPAケーブルの4倍)

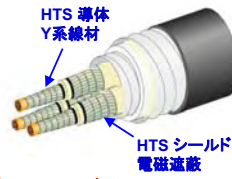
事業原簿 Ⅲ-1.2.11

①大電流・低交流損失

超電導ケーブルの構造検討

■開発目標

- 大電流化: 5kA (66kV)
- 低損失化: 2.1W/m-相@5kA
- 耐短絡電流: 31.5kA、2秒
- コンパクト: 150mmΦ管路対応



※大容量化には超電導層の多層化が必須
→ケーブル外径制限 **140mm以内**

■層数検討

導体層数	2層	4層	6層	8層
シールド層数	1層	2層	3層	4層
コア外径	40	42	44	46
ケーブル外径	132	136	140	144

×: 現状の線材特性で12kA程度の I_c 確保が困難(負荷率0.6想定)

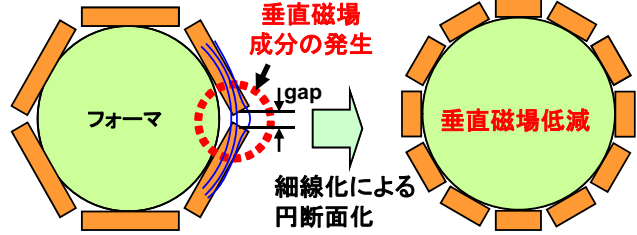
×: 150mm 管路に収納が困難
×: 製造可能な範囲で均流化スパイラルピッチの解がなく不採用

「導体4層、シールド2層」構造を採用

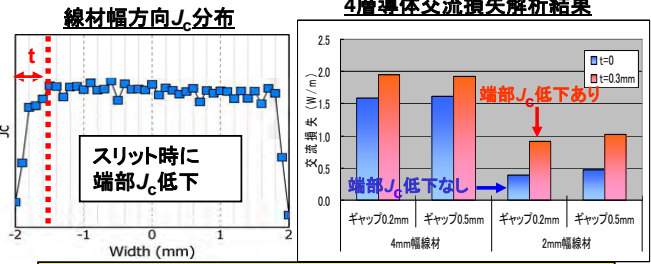
低交流損失化の指針

Y系線材を用いたケーブルの損失の特徴

- テープ面に平行な磁場による損失は非常に小さい
- 損失主要因は線材間ギャップに発生する垂直磁場



■細線化による線材端部の I_c 低下が損失に影響



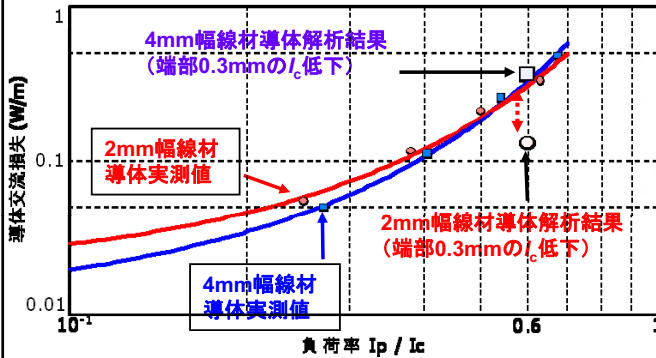
●指針: 細線化により円に沿わした形状
ギャップ部の磁場をテープ面に平行化
→線材幅 4mm、2mmで検討

①大電流・低交流損失

(目標)低交流損失な超電導導体を開発する。交流損失(導体のみ)
「1.5W/m@5kA」以下

交流損失(Y系超電導線材を集合化した導体)

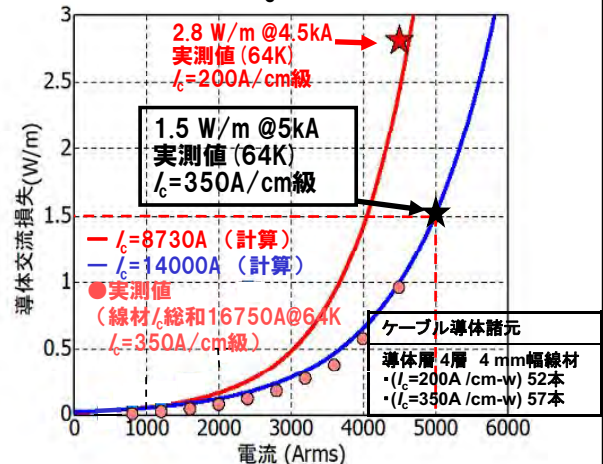
導体: 4層導体	導体 I_c @77K	外観
2mm幅線材(200 A/cm級) × 104本	4510A	
4mm幅線材(200 A/cm級) × 52本	4180A	



- ・4mm幅線材導体: 実験結果と計算とが一致
- ・2mm幅線材導体: 実験結果と計算とは乖離
→線材端部の J_c 低下が予想以上に悪いと推定

目標達成の見通し

①4mm幅線材: 線材 I_c を向上させ4層導体を作製



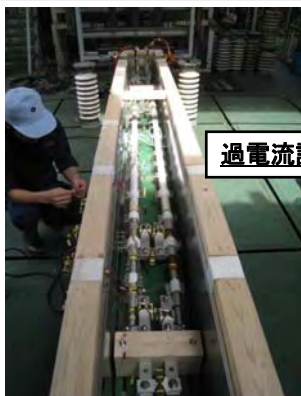
導体損失1.5 W/m @5kA 達成 → シールド損失込みで目標2 W/m@5kA 達成見込み

②2mm幅線材: 線材端部の特性向上を試行中
→スリット方法の改善等(H22下期以降予定)
※①より損失が小さくなる可能性あり

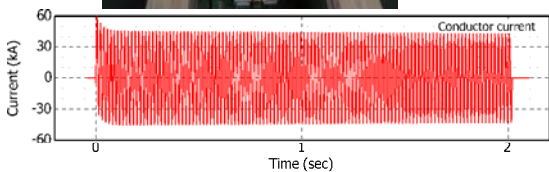
②三心一括ケーブル導体の検証

(目標)線材機械特性検証を行う

(目標)耐過電流特性: 31.5kA、2s 劣化無し



過電流試験サンプル



31.5kA、2秒通電電流波形

- ・過電流試験で特性劣化なし
- ・過電流時の漏れ磁場を測定、電磁解析を実施
→コア間に働く電磁力は影響のない範囲と推定

【製造概略工程】

- 超電導導体集合
- 主絶縁施工
- 超電導シールド集合
- コア保護層施工
- 三心コア集合

＜サンプル試験＞

- ・I_c測定
- ・曲げ試験
- ・I_c測定
- ・三心曲げ試験
- ・三心冷却機械試験
- ・構造検査

三心ケーブルコア(試作)

三心ケーブルコア曲げ試験 三心ケーブルコア引張試験装置

■検証結果 製造工程で線材特性低下なし
ケーブル形状で十分な機械特性確認

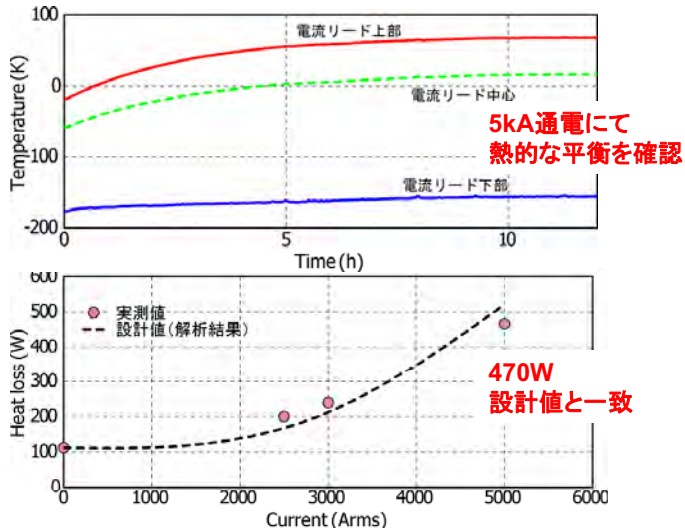
③大容量接続技術の開発

大容量電流リードの開発

(目標): 66kV / 5kA級 終端接続部の開発

■開発結果

- ・大容量電流リードを開発
- 5kA連続通電試験完了
- ・66kV級ブッシング定格課電試験完了



高温超電導機器向け 世界最大級の電流リード

④システム検証

検証システムの設計と試験計画

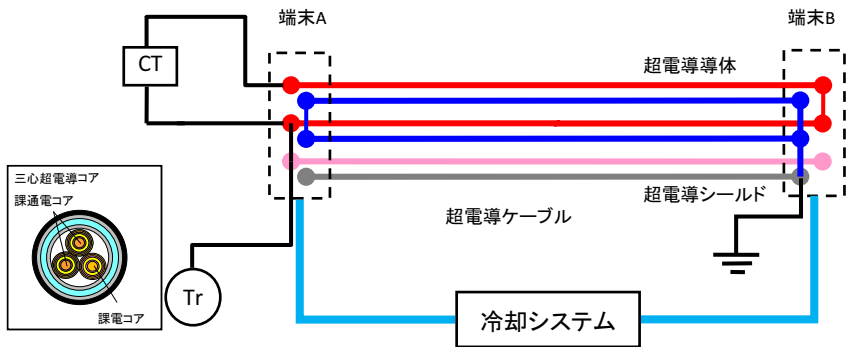
■開発目標

66kV/5kA/15mケーブルを開発し、損失検証と課通電試験を行い、ケーブルが要求特性を満足することを検証

■開発結果

- ・システム概略設計完了
- ・課通電試験計画案作成

世界最大級容量の超電導ケーブルシステム



項目	内容
構成	15m-三心超電導ケーブル、プッシング付き端末1台(端末A)、プッシングなし端末1台(端末B)
課通電	二心へ单相(往復)通電、三心へ单相電圧課電
I _c 測定	導体のみ測定(二相一括、課通電相のみ測定)
ACロス	二相分のACロス測定(熱的手法)
熱機械特性	三相両端固定にて、冷却、昇温
必要冷却容量	3.5kW@65K
最終目標達成	三心形状の実現、66kV課電、5kA通電、ACロス評価等、目標の検証が可能

個別研究開発項目の最終目標の達成可能性
大電流ケーブルの技術開発

	最終目標(平成24年末)	達成見通し
66kV大電流ケーブルシステム検証	(最終目標) 両端に終端接続部を有する検証用66kV/5kA、三心一括の15m長の超電導電力ケーブルシステム製作 ・150mmΦの管路に収納可能 ・損失2.1W/m-相@5kA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、ケーブルシステムを製作
	(最終目標) 課通電試験によりシステム設計の妥当性を検証する。	これまで検討してきた課通電試験計画書の試験条件を用いて、上記のケーブルシステム検証試験を実施し、最終目標の達成見込み。

個別研究開発項目の目標と達成状況 高電圧ケーブルの技術開発

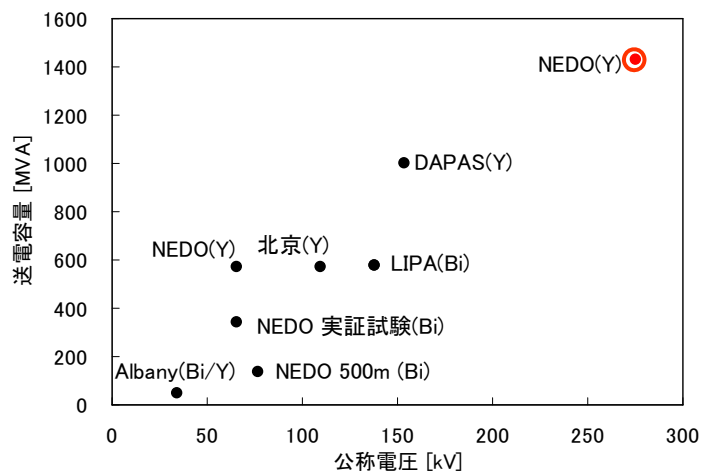
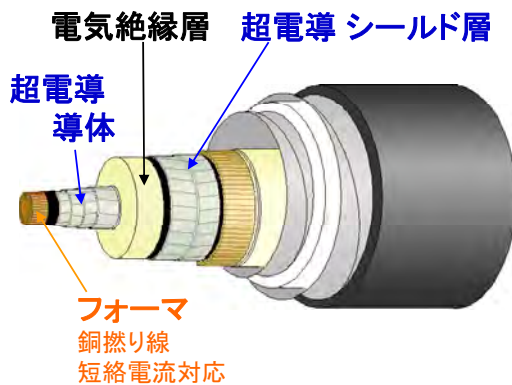
●基本計画：275kV級高電圧・低誘電損失超電導ケーブルの要素技術開発を完了し、ケーブルシステムの実用性を検証して、実用化に目処をつける。

項目	中間目標 (基本計画書抜粋)	成果(状況)	達成度	達成度と課題
①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(導体層)、誘電損失)で 0.8W/m-相@3kA 以下 絶縁材料の絶縁設計検討	・超電導導体の交流損失0.235W/m@3kA ・PPLP-Cを絶縁紙として採用し、誘電体損の設計値0.46 W/mの見込み ・交流損失と誘電体損失で0.70W/m	◎	最終目標に向けて開発
②高電圧接続技術 の開発	中間部、終端接続部の開発 275kV-3kA連続課電 により、 導体、超電導-常電導接続部、 電流リードに異常が無いこと	・超電導-超電導接続部は3.6 nΩの低抵抗を達成 ・3kAの超電導導体を作製・評価し、導体、超電導-常電導接続部に異常が無い事を確認	○	電流リードと接続部などの組合せ試験をH22年度中に実施
③超電導電力ケーブル電気絶縁特性の調査	長時間課電時および 短絡電流(63kA-0.6sec) 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	・モデルケーブルで連続課電、寿命特性取得 ・フォームや銅保護層の最適化により、過電流通電(63kA-0.6s)による温度上昇を抑制 ・課電試験により誘電・破壊・部分放電特性を取得	◎	過電流通電(63kA-0.6s)は達成 長時間課電試験をH22年度中に実施
④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 課電電験計画書 の作成	・ケーブルシステムを設計 ・275kV-3kAの試験条件の選定、課電電験計画を作成	○	設計の妥当性を確認

事業原簿 Ⅲ-1.2.7

◎:達成 ○:H22年度中に達成見込み

15/43



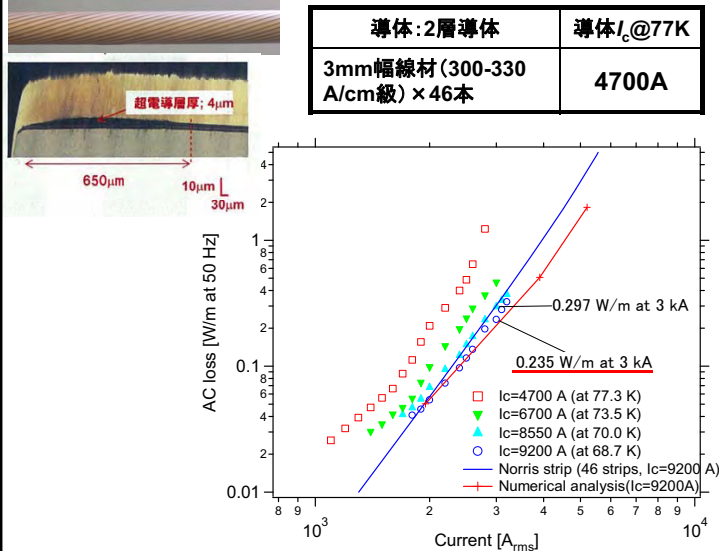
主な開発目標	根拠
定格: 275kV/3kA 容量: 1420MVA	既存の275kVケーブルのリプレースするために必要な目標値 →世界最大の電圧と送電容量
ケーブル損失: 0.8W/m/相 (交流損失+誘電体損失)	冷却効率を考慮しても、既存ケーブルの1/3以下となる送電損失レベル →世界最小レベルの交流損失
短絡電流: 63kA、0.6秒	275kV級遮断器に規定されている過電流レベル
サイズ: φ150mm管路相当	275kV CVケーブルと同サイズ →世界最大の送電容量

事業原簿 Ⅲ-1.2.11

①高電圧絶縁・低誘電損失技術

(目標)低交流損失な超電導体を開発する。
交流損失(導体のみ)「0.3-0.4W/m@3kA」以下

交流損失(3mm幅Y系超電導線材を集合化した導体)

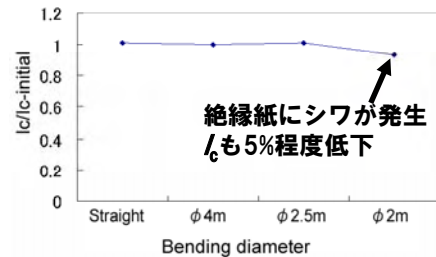


交流損失値 **0.235 W/m @3kA** ($I_t / I_c = 0.46$) 目標達成

(目標)曲げに対する機械的な問題が無いことを確認する



絶縁PPLP-C 26 mm



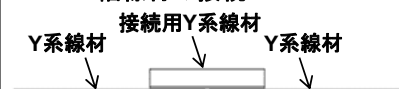
曲げ直径2.5mまで超電導性能の低下無し
製造上の問題がないことを確認

②高電圧接続技術の開発

(目標)275kV-3kA-中間接続部・終端接続部付のケーブルシステムの設計を完了する。

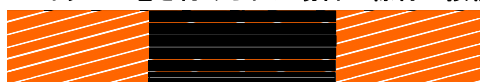
中間接続技術の開発

■5 mm幅線材の接続



47-73 nΩの
低抵抗を確認

■スパイラルに巻き付けられた場合の線材の接続



■ケーブル導体の接続



5 mm幅14本の接続 3.6 nΩの低抵抗を確認

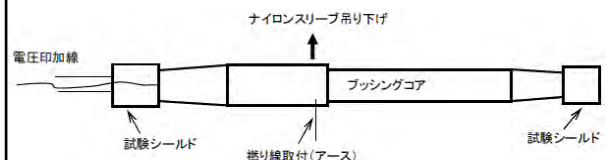
今後: 中間接続の耐電圧試験を実施する。

終端接続技術の開発

仕様: AC400 kV部分放電フリー、Imp1260 kV
耐電圧試験でも部分放電を発生させない。

誘電特性: 設計通り。

部分放電: SF6中で180kVまで、大気中で100kVまでフリー



終端部組立を行い、20mmの絶縁モデルケーブルと共に耐電圧確認→AC325kV-10minクリア。

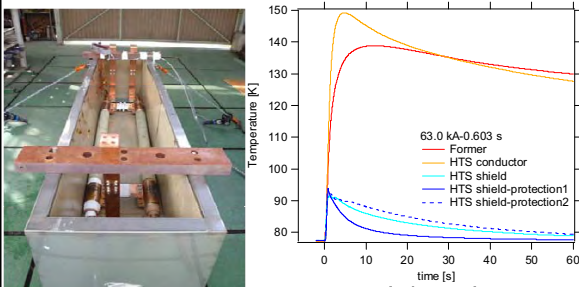
275kV終端部の開発に成功

③超電導電力ケーブル電気絶縁特性の調査

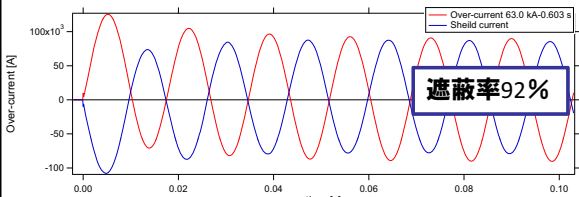
(目標) 63kA_{rms}-0.6 sの過電流に耐える

(目標) 耐高電圧・低誘電損失な材料を選定
275 kVで0.4 W/m以下

超電導ケーブル2本を平行に並べ、
導体は、大電流トランスと閉回路を構成した。
シールドは、誘導電流が流れるように2本を短絡した。



過電流時の温度上昇

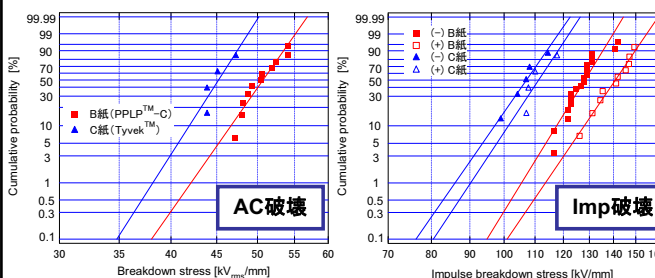


過電流時の電流波形

・試験前後での変化無し。設計された構造で
63kA-0.6secに対して、十分な耐性を示した。

Sample	ε	tan δ [%]	誘電損失W/m ※
A紙 (PPLP-A)	1.9	0.077	0.62
B紙 (PPLP-C)	1.9	0.057~0.061	0.46~0.49
C紙 (Tyvek)	1.8	0.008	0.06
D紙 (Normex418)	2.2	0.22	2.03

※導体遮蔽径27 mm 絶縁厚25 mmで試算



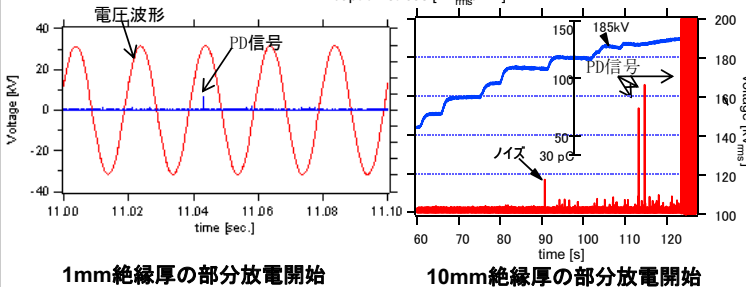
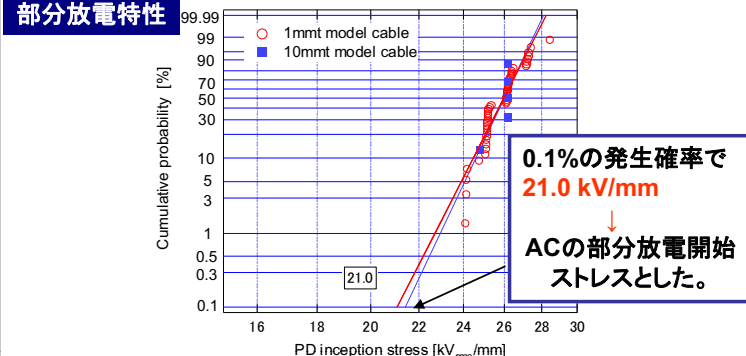
・電気特性はB紙が良い。
・C紙は厚みのバラツキからシワが入りやすい。

B紙を選定。
誘電特性値オーバは交流損失低減でカバーできる。

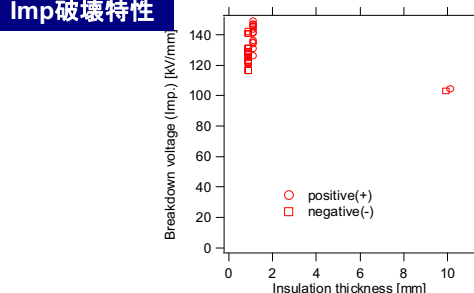
③超電導電力ケーブル電気絶縁特性の調査

(目標) 275 kV-3 kA-中間接続部・終端接続部付のケーブルシステムの設計を完了する。
- 交流課電(AC)・雷インパルス課電(Imp)の設計ストレスを決定する -

部分放電特性



Imp破壊特性



	PPLP-C 1mmt		PPLP-C 10mmt	
	Imp(+)	Imp(-)	Imp(+)	Imp(-)
有効サンプル数	10	20	1	1
平均(kv/mm)	139.9	127.3	104.3以上	103.1
平均-3σ	116.7	107.8		
累積発生0.1%	100.9	94.9		

・厚さに伴い、ストレスは低下傾向にある
・実機レベルの絶縁厚(10mm)が1mmと同様のバラツキ(3σ)をもつとして
Impの設計ストレスを83 kV/mmとした。

④システム検証

(目標)275kV-3kA-中間接続部・終端接続部付のケーブルシステムの設計を完了する
 -ケーブル設計:試験電圧とケーブル絶縁厚を決定する-
 設計条件:誘電損失+交流損失(導体のみ)で0.8 W/m以下、外径150 mm以下

電圧試験条件は、国内規格(JEC)、国際規格(IEC)、超電導ケーブルの実績から選定

構成		絶縁紙: B紙 (PPLP-C)
設計絶縁厚		25.5 mm
フォーマ外径		21.7 mm
導体遮蔽外径		27.0 mm
絶縁外径		78.0 mm
コア全体外径		87.0 mm
断熱内管	内径	95 mm
	外径	105 mm
断熱外管	内径	127 mm
	外径	141 mm
防食層		150 mm
誘電損失(275 kV)		0.46 W/m
交流損失(3 kA _{rms}) (導体のみ)		0.235 W/m

設計条件
 AC 300kV-10分で部分放電フリー
 Imp 1155 kV 3回

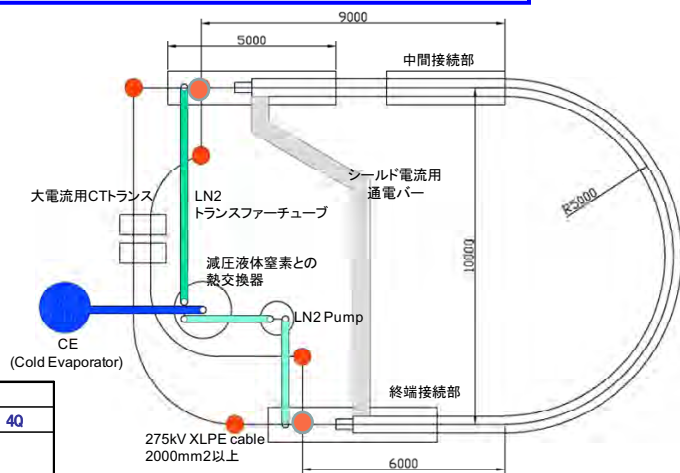
試験名称	試験条件(案)
長期課通電試験	200 kV-3ヶ月
雷インパルス試験	1155 kV-正負3ショット
商用周波耐電圧試験	300 kV-10 min 長期課通電前に部分放電フリー
(参考試験IEC62067) 商用周波耐電圧試験2	400 kV-30 min 破壊しないこと

・外径150 mm以下
 ・誘電損失+交流損失(導体のみ)で0.7 W/mで中間目標値を達成。

④システム検証

(目標) 耐久性を評価できる課通電試験計画書を作成

試験名称	試験条件(案)
長期課通電試験	200 kV-3ヶ月
雷インパルス試験	1155 kV-正負3ショット
商用周波耐電圧試験	300 kV-10 min 長期課通電前に部分放電フリー
(参考試験IEC62067) 商用周波耐電圧試験2	400 kV-30 min 破壊しないこと



長期課通電試験の試験条件、試験スケジュール、試験回路について作成した。

	H23				H24			
	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q
①30m 275kV-3kA超電導ケーブル作製								
②275kV-3kA終端接続部の作製								
③試験設備の設置(録電、通電、冷却)								
④超電導ケーブルの初期課電・通電試験 (雷インパルス、商用周波耐電圧、臨界電流)								
⑤中間接続部の組み立て								
⑥開発試験(長期課通電、雷インパルス、商用周波耐電圧、誘電特性試験)								
⑦残存性能試験								

個別研究開発項目の最終目標の達成可能性
高電圧ケーブルの技術開発

	最終目標(平成24年末)	達成見通し
高電圧絶縁・低誘電損失技術の基礎特性評価	(最終目標) 交流損失(導体・シールド層)、誘電体損失で0.8W/m-相@3kA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tanδ絶縁材料の適用の可能性の検討を進め目標を達成する見込み。
275kV 高電圧ケーブルシステム検証	(最終目標) ケーブル外径150mm以下のシステム検証試験を実施。	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システムを製作
	(最終目標) 課通電試験によりシステム設計の妥当性を検証する。	275kV-3kAの課通電試験および耐電圧試験条件を作成し、中間目標を達成した。 この試験条件を用いて、上記のケーブルシステム検証試験を実施し、最終目標の達成見込み。

3. 超電導電力ケーブル対応線材の安定化製造技術開発

- ・目標と達成度
- ・中間評価までの成果

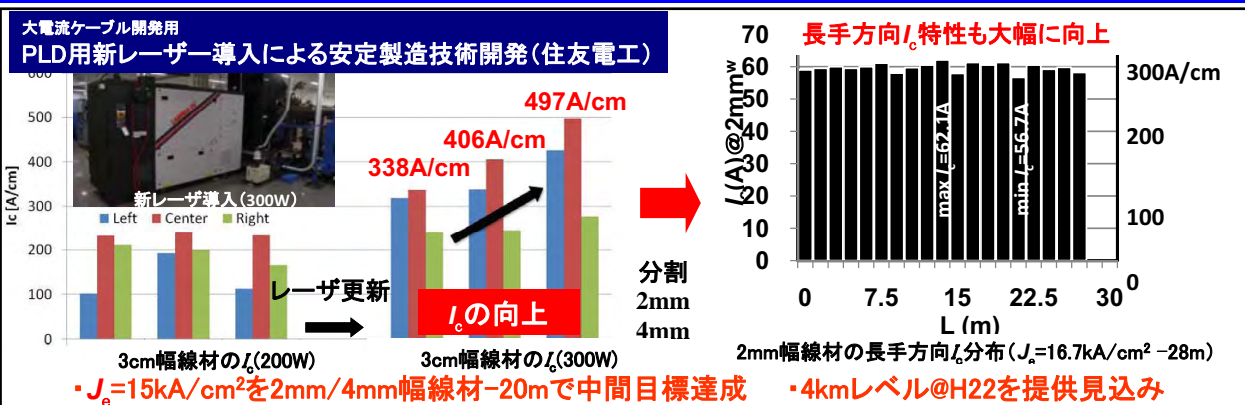
個別研究開発項目の目標と達成状況
超電導電力ケーブル対応線材の安定製造技術開発

項目	目標(H22年度達成)	これまでの成果	達成度	今後の課題
大電流用ケーブル対応線材安定製造技術開発	・ $J_c=15\text{kA/cm}^2$ (2mm-w×20m)に相当する線材安定作製技術確立 ・大電流ケーブル用線材総長8kmを安定製造・提供	・ケーブル用線材製造の要素技術を確立し、 $J_c=17\text{kA/cm}^2$ (2mm幅線材×28m)線材作製・実証 ・これまで4.3km作成	○	H22中に4kmを提供
基板・中間層テープの開発	・ $J_c=15\text{kA/cm}^2$ (2mm-w×20m)を得られる 基板・中間層テープの安定高速製造技術 検討 ・IBAD中間層テープ20km提供	・求められた特性を得られる安定製造技術を開発 ・IBAD-GZO基板をH21年度時点で16.2km提供	○	H22中に10.8kmを提供
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6.5km(H20-22年度) 歩留り向上70%達成(H22年度)	H21年度時点でIBAD-TFA-MOD法により作製された線材3.8km(10mm幅換算)を提供、歩留り63%達成	○	H22中に3kmを提供、歩留まりの向上
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	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	◎	目標の達成
IBAD-PLD線材の安定製造技術の開発	200A/cm-w級 IBAD-PLD線材によるケーブル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線材を用いた2層導体を作製($J_c=2750\text{A}@77\text{K}$) 導体の交流損失:0.0258W/m@1kA _{rms} ケーブルシステムの成立性を確認	◎	目標の達成
線材の評価技術の開発	Y系超電導線材を長尺線材 l_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。	◎	目標の達成

事業原簿 Ⅲ-1.2.8

◎:達成 ○:H22年度中に達成見込み 25/43

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



高電圧ケーブル開発用
GZO-IBAD基板作製(フジクラ)

基板 :ハステロイ
中間層:IBAD

世界最大クラスのイオンソースを配置した大型IBAD装置

基板供給

・計画通り高電圧ケーブル開発用に基板・中間層を提供
・ $J_c=15\text{kA/cm}^2$ を実現し得る基板・中間層を作製

高電圧ケーブル開発用
CeO₂-MOD(YBCO)線材作製(昭和電線)

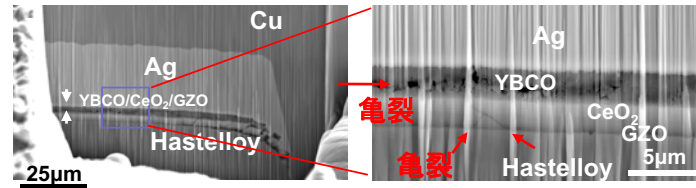
MODプロセスにおいてBatch式熱処理を適用した世界唯一の長尺化プラント

・計画通り高電圧ケーブル開発用線材を提供した
・30m単長の歩留まりは60%以上

(目標) SEM観察等による線材安定製造技術の開発支援

線材分割のプロセス開発を支援 (JFCC)

スリッタ切断後、銅めっきしたサンプル

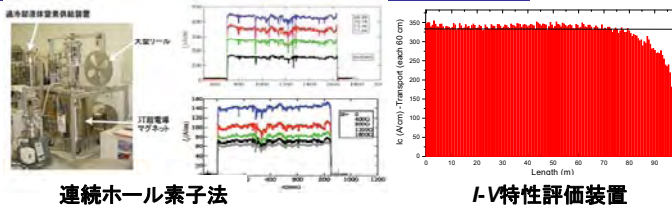


SEM観察により分割加工後の線材組織を詳細に解析できた。
製造プロセスにフィードバックし、安定製造技術開発支援を行う

(目標) 線材の評価技術の開発の開発

Y系超電導線材を長尺線材 I_c 評価装置などで評価し、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

・超電導線材評価装置による評価結果(一部)



(目標) IBAD-PLD線材の安定製造技術の開発

- ・線材の安定製造技術開発
- ・IBAD/PLD線材による超電導導体を作製・評価

IBAD-PLD 2mm幅線材($I_c=200A/cm-w$ の線材)より2層導体を作製



ケーブルシステムの成立性を確認

- 超電導電力ケーブル用線材評価装置の性能を確認した
- 装置の特徴を活かした運用により、効率的な評価が可能
- ・線材 I_c 特性を簡易に評価 → 連続ホール素子法
- ・真値の評価 → I-V特性評価装置
- ・劣化・剥離等の効率的な確認 → SQUID装置
- ・劣化箇所の詳細な評価 → MOI評価装置

4. 超電導電力ケーブルの熱収支に関する評価研究

- ・目標と達成度
- ・中間評価までの成果
- ・最終目標の達成

個別研究開発項目の目標と達成状況
ケーブルの熱収支に関する評価研究

項目	目標(H22年度達成)	これまでの成果	達成度	今後の課題
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	・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 ・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、および実験により妥当性を確認	◎	最終目標にむけて開発
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の検討・課題抽出	・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 μm程度の粒子生成が出来る生成装置を開発	◎	最終目標にむけて開発
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 ・導入・普及に向けた法規制関係を調査	◎	最終目標にむけて開発

◎:達成

(目標)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

3次元有限要素法と回路方程式を結合した電流分布-熱連成解析
各時間ステップごとに連成計算を行う

電流分布解析

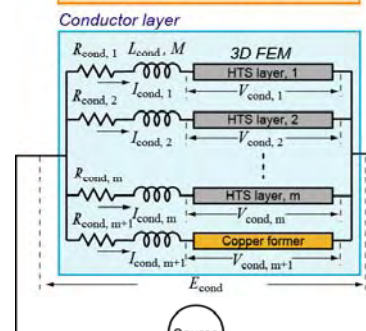
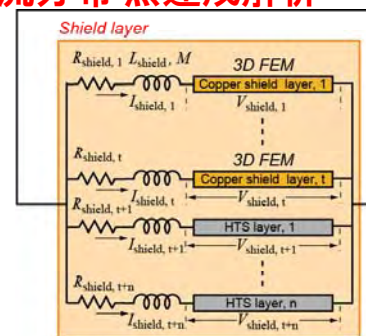
電流分布・ジュール発熱等を計算

$$\nabla \cdot \sigma (\nabla \phi) = 0 \Rightarrow 3D FEM$$

$$\begin{bmatrix} R_{cond} & 0 \\ 0 & R_{shield} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} I_{cond} \\ I_{shield} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{cond} & M \\ M & L_{shield} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{Bmatrix} I_{cond} \\ I_{shield} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} V_{cond} \\ V_{shield} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} E_{cond} \\ 0 \end{Bmatrix}$$

⇒ Equivalent circuit

$$V = V_c \left(\frac{I}{I_c} \right)^n : n\text{-value model}$$



温度分布を計算

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_j - Q_q \Rightarrow 3D FEM$$

ケーブル表面にLN₂(非線形熱伝達特性)

PPLP絶縁紙は、LN₂との混合モデル

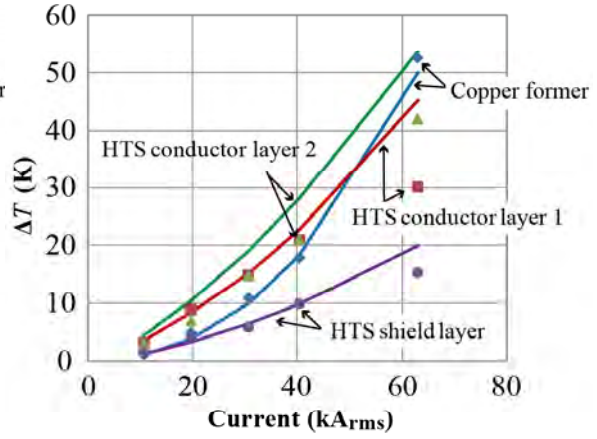
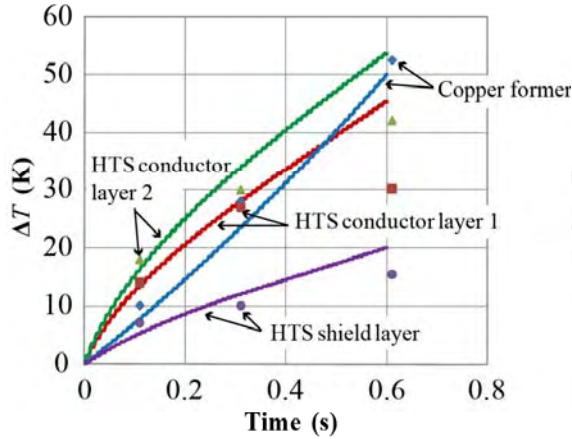
Source 解析モデル

(目標)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

・275 kV級高電圧超電導ケーブルの短絡試験(63kA 0.6sec)の伝熱特性について解析を実施

シミュレーションと実験結果の比較

— Copper former — HTS shield layer — HTS conductor layer 1 — HTS conductor layer 2 プロット:測定結果



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

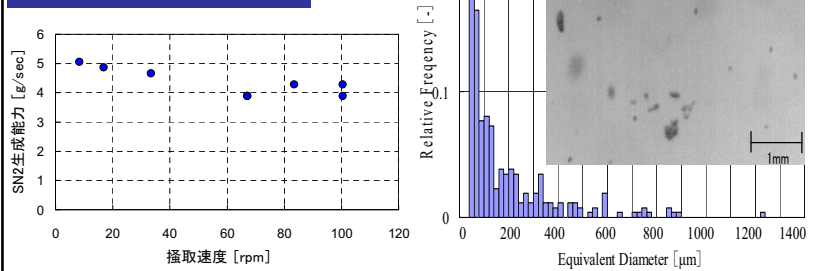
・上記以外、66kV大電流ケーブルにおける過電流通電時の伝熱特性、275kVケーブルの定常時の伝熱特性の解析等を実施し、ケーブル設計へフィードバックした。

(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を構築する

①システムの検討

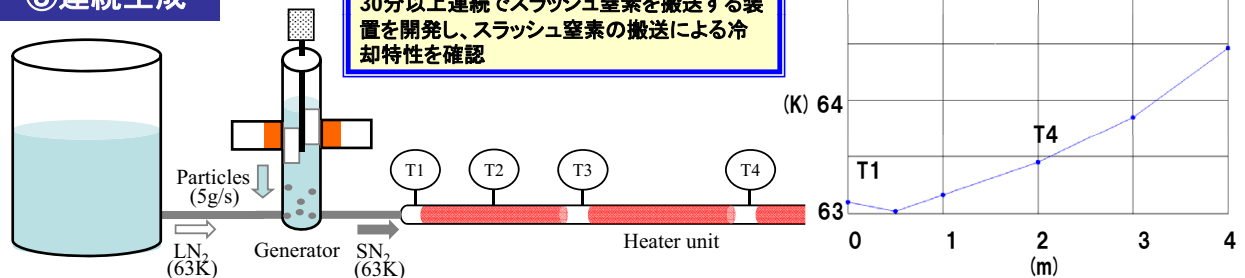


②固相率制御



・掻き取り回転数による粒子生成量の制御を確認。
・平均100μ程度の粒子を連続的に生成、搬送できることを確認

③連続生成



30分以上連続でスラッシュ窒素を搬送する装置を開発し、スラッシュ窒素の搬送による冷却特性を確認

(目標)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
冷却設備に要求される法的制度について調査および提言のための分析を行う

冷却器の仕様と能力

項目	スターリング 冷凍機	スターリング パルス管	GMパルス管	ブレイトンサイクル	ブレイトンサイクル (応用基盤)
冷凍容量(kW)	1 kW(77 K) 低温での容量低下:大	0.3及び1 kW(77 K) 低温での容量低下:大	1 kW/65 K 低温での容量低下:大	10 kW以上 低温での容量低下:小	2.7 kW (70 K)
メンテナンス間隔	6000~8000時間 メンテ所要期間 1ヶ月	長寿命	長寿命	10000時間以上 メンテ所要期間 1ヶ月	30,000時間
COP (運転効率)	0.067@77 K (1 kW)	0.38@77 K(10 W)	0.36@77 K (850 W)	0.06@77 K	0.044@70 K
ケーブル 用実績	有	無	無	無	無
現状レベル	カタログ品	評価中	開発中	実用化	開発・ 評価中
設置スペース (5~10kW)	9m ³ /kW (*1)	4m ³ /kW	2m ³ /kW	8m ³ /kW	
課題	騒音・保守対策 大容量化が必要	信頼性、熱交換器 大容量化	信頼性、圧縮機、 大容量化	騒音、少容量化、 保守対策	運転効率、信頼性 保守対策

超電導機器の運用における関連規制

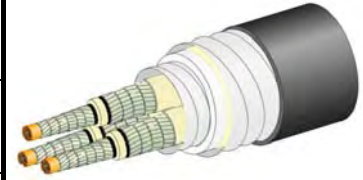
- ・電気事業法(施行法則含む) ・高圧ガス法
- 電気事業法においては超電導電力関連機器に関する明確な規制がない。
- 導入・布設時は該当する関係箇所と協議・確認・許可・申請を的確に行う必要がある。

個別研究開発項目の最終目標の達成可能性
熱収支に関する研究

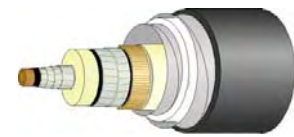
	最終目標(平成24年末)	達成見通し
定常通電時および事故時の伝熱特性検討	(最終目標) システム検証結果に合致する汎用性のあるシミュレーション技術を確立	ケーブルシステム検証における、温度上昇解析・短絡電流通過時の電磁力解析、気中終端接続部の超電導/常伝導接続の電流転流の挙動解析および伝熱解析を行って行くことで目標を達成する見込み
スラッシュ窒素の研究	(最終目標) スラッシュ窒素冷媒の有用性のシステム検証	製作した搬送試験装置を用いて循環試験装置の製作を行い、スラッシュ窒素の固相率を変化させてスラッシュ窒素と液体窒素との冷却特性を把握する。さらに、循環試験装置の冷却容量の拡大やモデルケースに基づく設計検討を実施することで目標を達成する見込み

超電導電力ケーブル研究開発 成果の意義

開発項目	開発成果	成果の意義
大電流ケーブル	定格: 66kV/5kA 容量: 570MVA	世界最大級の 三心一括送電容量
	交流損失: 2W/m-相	世界最小レベル (三心一括)
	サイズ: 150mmΦ管路 内布設	世界最大の送電密度
高電圧ケーブル	定格: 275kV/3kA	世界最大級の 電圧と送電容量
	ケーブル損失: 0.8W/m-相 (交流損失+誘電体損失)	世界最小レベル
	サイズ: 150mmΦ管路 相当	世界最大の送電容量



66kV/5kA大電流ケーブル



275kV/3kA高電圧ケーブル

(3) 知的財産権、成果の普及(超電導電力ケーブル研究開発)

	H20	H21	H22	計
特許出願	4	7	2	13件
論文(査読付き)	3	9	0	12件
研究発表・講演	21	54	22	97件
受賞実績	0	1	1	2件
新聞・雑誌等への掲載	2	3	0	5件
展示会への出展	4	4	3	11件

※平成22年度8月26日現在

特許出願状況

ケーブル開発に関わる特許	国内出願： 13件
	海外出願： 1件

テーマ	代表的特許
①大電流ケーブル化技術の開発	■磁性基板線材を用いたケーブルの低損失化(住友電気)
②高電圧ケーブル化技術の開発	■電氣的に安定な終端接続部(古河、ISTEC) ■低誘電損失な超電導ケーブル絶縁(古河、ISTEC)
③ケーブル対応線材安定製造技術開発	■表裏識別容易な超電導線材(住友電気) ■酸化物超電導線材製造方法及び製造装置(昭和電線)

プレス発表等

「イットリウム系低磁性配向基板線材で
世界初の高速化、高性能化に成功」
NEDO ホームページ
平成22年度2月2日

「イットリウム系超電導線材
開発用設備を増強」
日刊工業新聞
平成22年度3月30日

受賞

低温工学協会 2010年度優良発表賞
「66kV/3kA級薄膜超電導ケーブルの交流損失特性」



プレス発表

「イットリウム系超電導電力ケーブルを
“北海道洞爺湖サミット”に展示」

平成20年6月30日



事業原簿 添付資料8

展示会等



環境エネ展にて、超電導
ケーブルのCO₂削減効果に
ついて説明(2008)

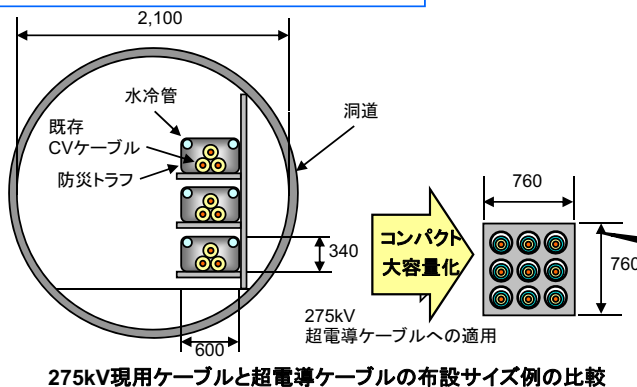
当時 民主党幹事長であった
鳩山前首相に説明



エコメッセ千葉にて超電導の実験

FURUKAWA ELECTRIC

実用化の見通しについて



◎超電導ケーブルのメリット、特徴

- ・送電ロスの低減
(従来地中送電線の1/3)
省エネルギー、CO₂削減
- ・コンパクトで大容量送電が可能

従来の洞道布設が必要なケーブルを
地中に埋設された管路に布設が可能

◎66kV大電流ケーブル

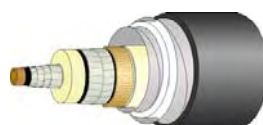
- 都市部連系系統
・既存ケーブルの増強



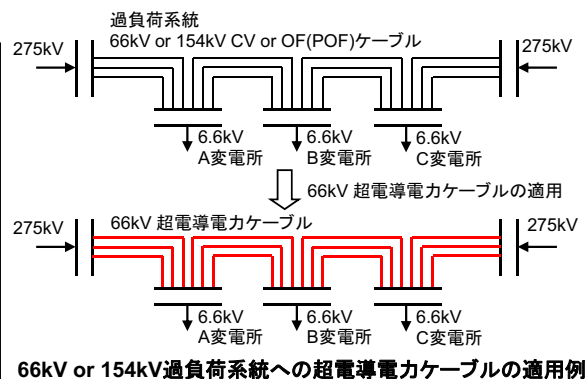
66kV/5kA大電流ケーブル

◎275kV高電圧ケーブル

- 都心導入部系統
・老朽化ケーブルのリプレイス



275kV/3kA高電圧ケーブル



CO₂削減効果について

超電導ケーブル導入による地球環境対策としてのCO₂量削減の効果が期待できる。

超電導ケーブル導入量(国内)をベースにCO₂削減量を計算

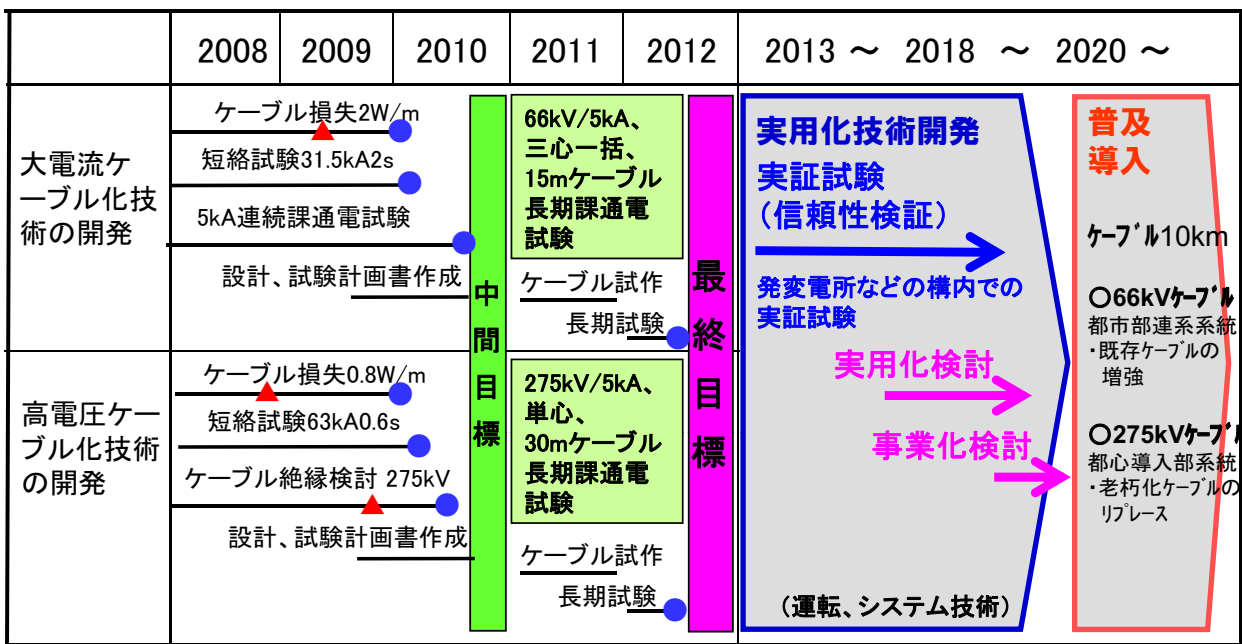
年	A 超電導化による 損失低減量※1 kW/km(Lf=1.0)	B 予想される ケーブル導入量 km(累積)	C 損失率 (Lf)	1年間の低減電力量 A×B×C(24×365) GWh/年	1年間のCO ₂ 削減量 千t-CO ₂ /年※2
2020年	70	190	0.7	82	28
2025年	70	400	0.7	172	58
2030年	70	650	0.7	279	95

2030年の省エネ効果は**279 GWh/年**となり、
CO₂削減効果は**95千t-CO₂/年**になると推計した。





なお、この推定は国内のケーブルへの適用を考えた場合であり、
全世界的で考えれば、数十倍～数百倍の効果が期待できる。

※1 表中Aの“損失低減量”は常電導ケーブル100 kW/kmと超電導ケーブル30 kW/km@2020年の差を示す
 ※2 CO₂排出原係数単位は電気事業連合会による目標値 0.34 kg-CO₂/kWhを適用
 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 ISTEK)」

事業化までのシナリオ



波及効果について

		2010	2015	2020
産業分野	○自然エネルギー用送電 	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">直流送電技術</div> 研究開発 → 実用化検討 → 実証試験 → 実用化		
	○直流送電 ○データセンター用屋内配線 	研究開発 → 実用化検討 → 実証試験 → 実用化		
輸送分野	○直流き電 	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">直流送電技術</div> 研究開発 → 実用化検討 → 実証試験 → 実用化		
その他	○超電導応用機器 	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">冷却技術</div> 研究開発 → 実用化検討 → 実証試験 → 実用化		

「超電導変圧器の研究開発」

(中間評価)

(2008年度～2012年度 5年間)

プロジェクトの詳細説明 (公開)

サブプロジェクトリーダー

九州電力株式会社

林 秀美

参画機関:九州電力(株)、(株)フジクラ、昭和電線ケーブルシステム(株)、
大陽日酸(株)、(財)国際超電導産業技術研究センター、
(財)ファインセラミックスセンター、九州大学、岩手大学

2010年 9月1日

複製を禁ず

1/44

II. 研究開発マネジメントについて 1.1 研究開発目標

公開

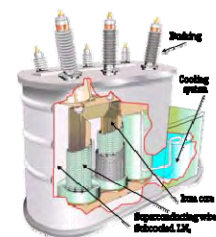
事業の目標、内容

目標

平成22年度までに、超電導変圧器用の低損失化技術、大電流巻線技術、及び限流機能の開発を行った上で、平成24年度までに超電導変圧器対応線材の安定作製技術開発、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、**2MVA級超電導変圧器モデル**の特性試験によって、66/6kV 20MVA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100kVA級変圧器で超電導線材を利用した限流機能**を検証する。


内容

1. 超電導変圧器用巻線技術開発
2. 冷却システム技術開発
3. 限流機能付加技術開発
4. 2MVA級変圧器モデル検証
5. 変圧器対応線材安定製造技術の開発



Y系超電導変圧器の特長・必要性

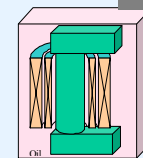
油入変圧器



<課題>

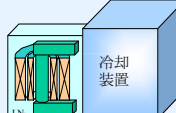
- ・不燃、難燃化
- ・省エネルギー
- ・小型・軽量
- ・保守性 (オイルレス) など

Bi系線材



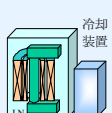
油入変圧器

高電流密度



Bi系変圧器

Y系線材



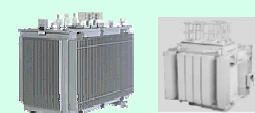
Y系変圧器

低損失

<特長>

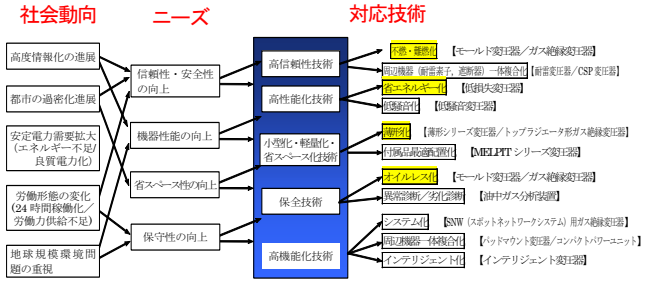
- ・高効率
- ・コンパクト
- ・軽量
- ・省設置スペース
- ・不燃

・モールド、アモルファス、シリコン油など



【課題】

- ▲ 高電圧化、大型化が難しい
- ▲ 負荷損(銅損)低減が困難
- ▲ 鉄心やや大(アモルファス) など

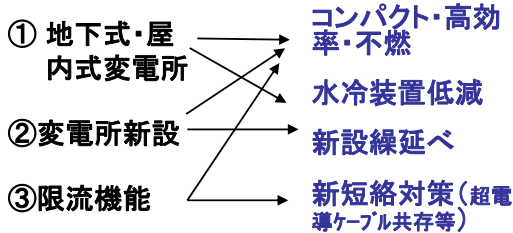


配電用変圧器対応技術動向
(出典: 電気学会技術報告1023号)

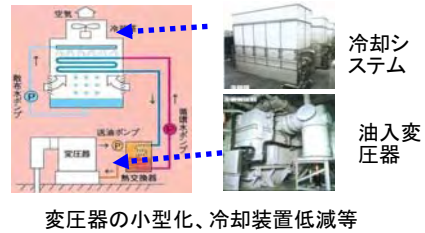


超電導変圧器の適用メリット

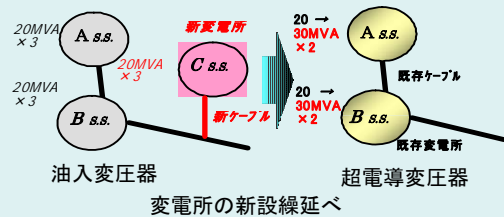
超電導変圧器適用メリット



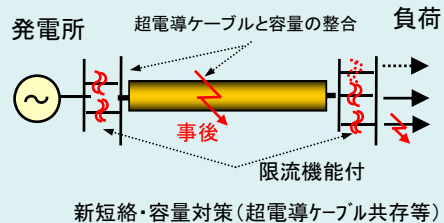
① 地下式・屋内式変電所



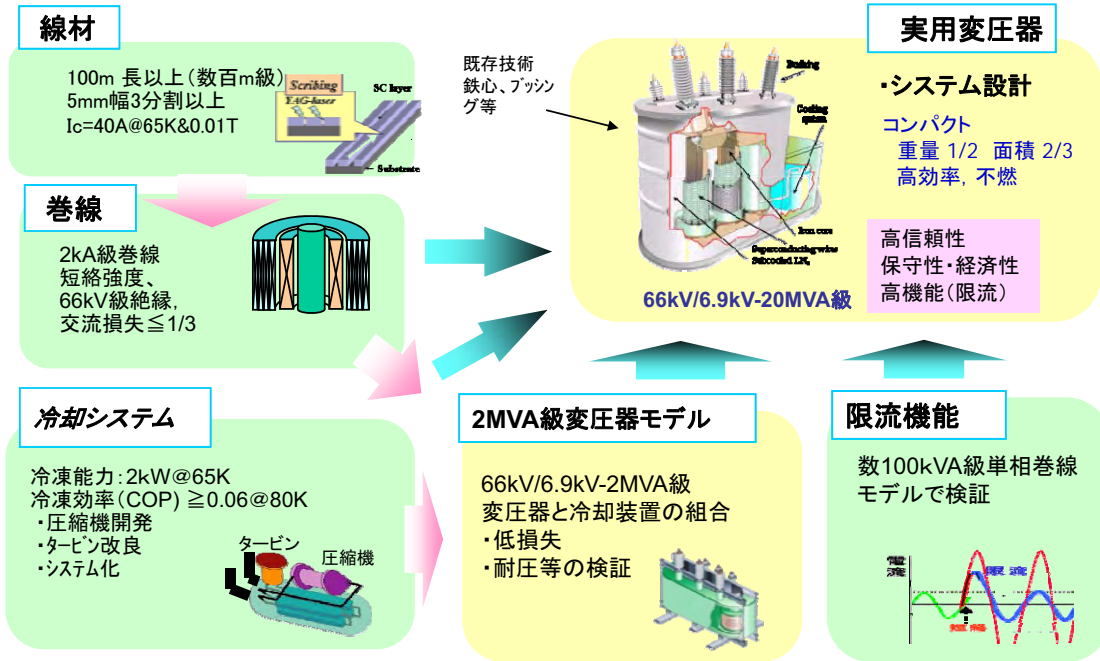
② 変電所の新設



③ 限流機能



事業の目標、内容



研究開発のスケジュール (情勢変化対応含む)

情勢変化

- ・変更① MgO基板線材供給を一部繰延べ ← 安価な中間層 (MgO) の適用性確認
- ・変更② 数100kVA級モデルの試作を繰上げ ← 限流モデル変圧器で限流機能確認

項目	H20	H21	H22	中間目標	H23	H24	最終目標
線材供給	線材安定供給 長尺、安定化銅等	安定加工 レーザ、エッチング					
巻線技術	巻線基礎特性試験	転位巻線の検証	口出部低損失 低損失巻線検証	100m 5mm幅3分割以上、40A @65K&0.01T ・短絡強度 15%相当	2kA級巻線モデル		・低交流損失 巻線 ≤ 1/3 ・2kA級巻線
冷却システム技術	小型タービン効率の向上	ターボ圧縮機の開発	熱交換器の小型化	・膨張タービン 断熱効率 ≥ 65% ・圧縮機: 断熱効率 ≥ 65%	2MVA変圧器モデル	無揺動冷凍機	・冷凍能力: 2kW@65K ・冷凍効率 (COP): 0.06 @80K
限流機能付加技術			4巻線モデルの試作・特性試験	・限流モデルで限流検証	単相巻線モデルの試作・試験 数100kVA級		・数100kVAモデル検証 ・設計法確立
変圧器モデル検証			2MVA級変圧器 システム設計 20MVA級変圧器の検討	・2MVA級変圧器モデル設計	変圧器モデル試作 巻線・鉄心・プッシング等 システム検証 冷却システムとの組合試験		・2MVAモデル検証 ・20MVA設計

(注) 後期に重電メーカーを含む公募を計画中

個別研究開発項目の目標と達成状況

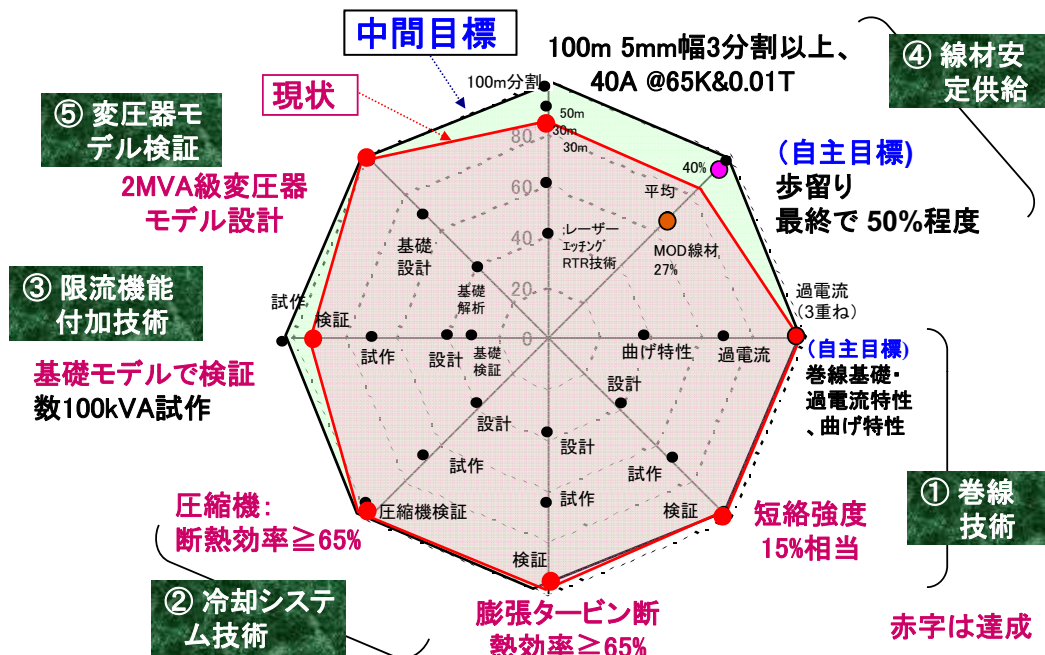
・限流機能と線材供給の一部を除き、中間目標を達成済。

	中間目標	成果	達成度	今後の課題
①巻線技術の開発	・短絡強度(20MVA,%Z:15%相当)の検証 ・最適な転位巻線技術の確立	・400kA短絡モデル変圧器で定格の6倍の短絡電流での健全性を確認(達成) ・転位均流モデルで偏差が14%以下を確認(達成)	◎ 達成	・2kA級大電流モデルで転位技術を検証(最終)
②冷却システム技術開発	・膨張タービン: 断熱効率 $\geq 65\%$ ・ターボ式圧縮機: 断熱効率 $\geq 65\%$	・膨張タービン効率は約70%(達成) ・ターボ式圧縮機効率は約68%(達成) ・熱交換器の小型化を解析で確認 ・冷熱伝達構造の簡素化を解析で確認	◎ 達成	・2kW冷却システムの試作・試験(最終)
③限流機能付加技術開発	・変圧器巻線構造モデルで限流機能検証 ・数百kVA級限流機能付加変圧器の設計・試作	・巻線モデルで限流効果検証(達成) ・上記成果に基づき400kVA限流機能付加変圧器を設計 ※巻線モデルの良好な成果により、400kVA変圧器の試作前倒し(追加成果)	○	・同変圧器の試作・試験(H22)
④変圧器対応線材安定製造技術の開発	・安定製造 5mm幅3分割100m以上(Ic=40A@65K&0.01T)	・PLD線材は100mで性能確認(達成) ・MOD線材は30mで性能確認 ※低コスト化に有効なMgO基板を開発し、良好な適用性を確認(追加成果)	○	・100m級MOD線材で性能確認(H22)
⑤2MVA級変圧器モデル検証	・66/6.9kV-2MVA級変圧器モデルのシステム設計	・2MVA級変圧器モデルを設計(達成) ・試験計画を整理	◎ 達成	・同モデルの試作・試験(最終)

(注)達成度: ◎ 達成、○ 達成見込み △ 達成懸念、「今後の課題」の(最終)は最終目標までの課題

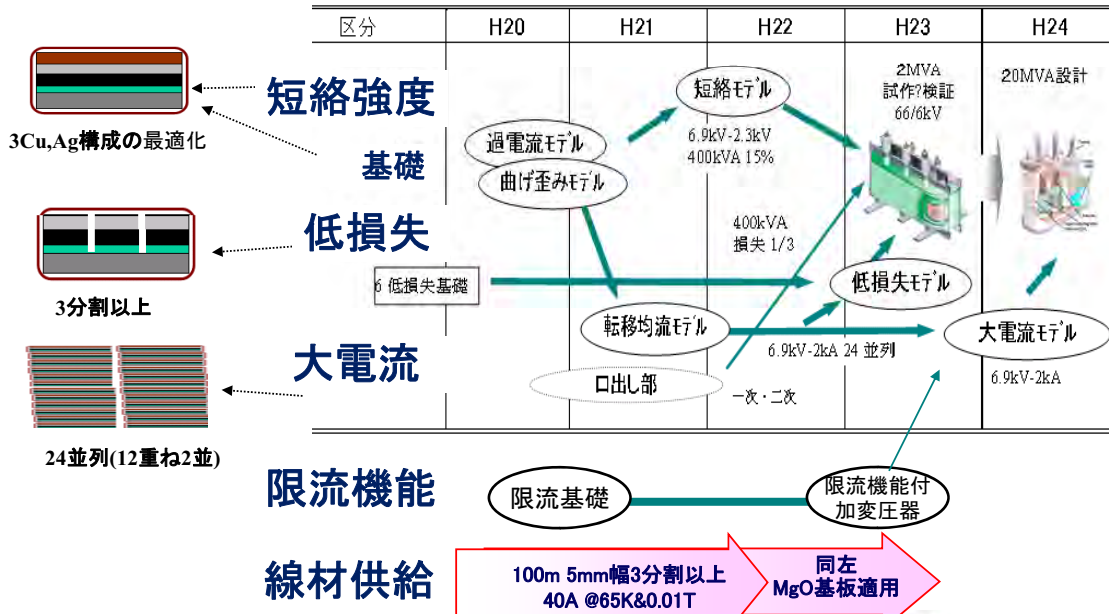
個別研究開発項目の目標と達成状況(中間目標)

・限流機能と線材供給の一部を除き、中間目標を達成済。



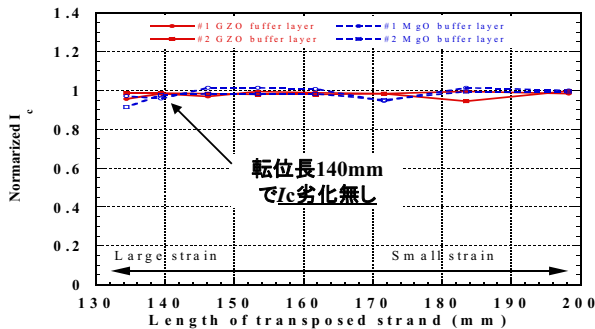
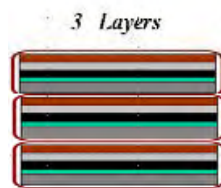
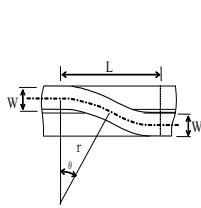
巻線技術開発(1. 巻線技術の相関)

- 目標
 - ・ 短絡強度15%相当、最適な転位巻線技術の確立(中間)
 - ・ 2kA級巻線技術の確立(最終)
 - ・ 巻線の低交流損失 $\leq 1/3$ (対細線化無し線材)(最終)

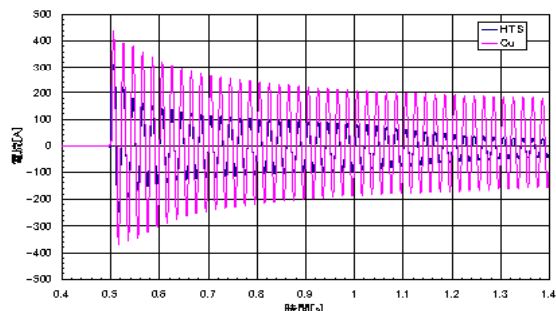


巻線技術開発(2. 大電流化・基礎技術)

- ・ 転位構造の曲げ特性確認 → 転位長140mmで I_c 劣化無く良好
- ・ 3重ね(転位構造)巻線の過電流特性確認 → I_c 劣化無く良好



曲歪み特性試験結果(2並列)



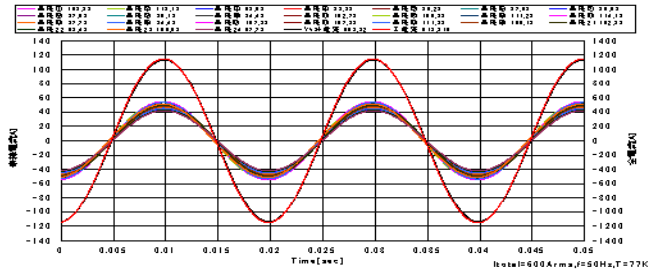
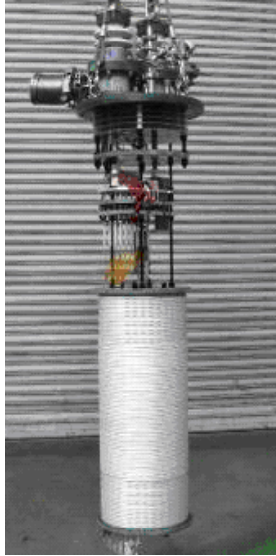
過電流試験結果(3重ね巻線)

巻線技術開発 (2. 大電流化: 転位均流の検証)

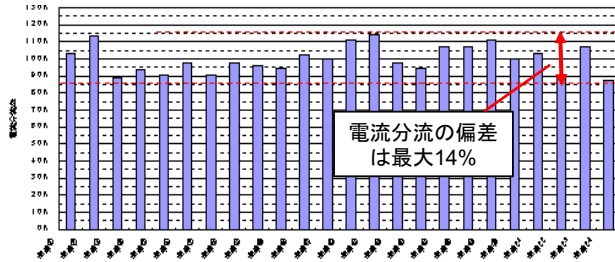
- 24並列導体(12重×2並列)での素線間の電流分流の偏差は最大14%で良好。
→ 2kA級大電流モデル(H24)に向けて、更に低減予定。

目標達成

線様lc 100A以上@77K、55m×24本(1320m)
巻線モデル: φ350mm、12重×2並列



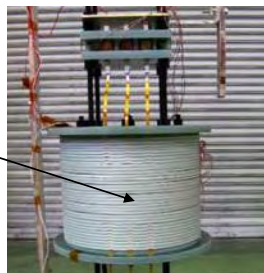
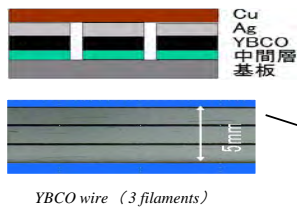
素線電流と全電流の波形



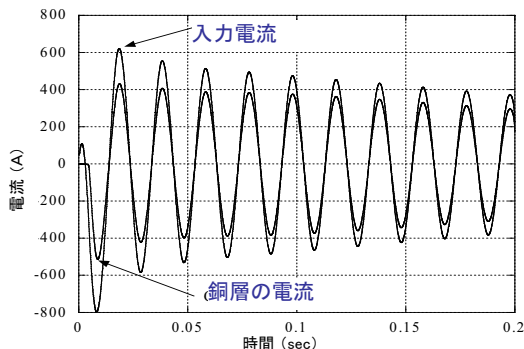
素線間電流分流率

巻線技術開発 (3. 低損失化: 細線化線材)

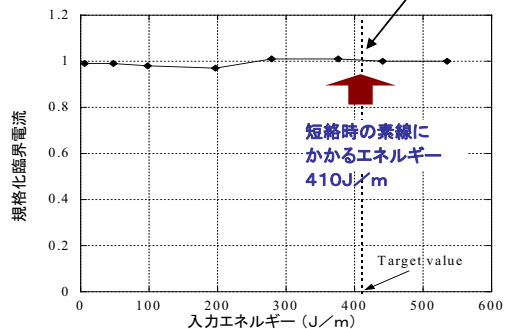
- 3分割線材による巻線の電流分流、過電流特性は良好。



※ 素線にかかるエネルギー
20MVA実用変圧器の短絡事故で温度上昇を195K以内にするため、Y系線材(銅0.1mm)にかかるエネルギー410J/m



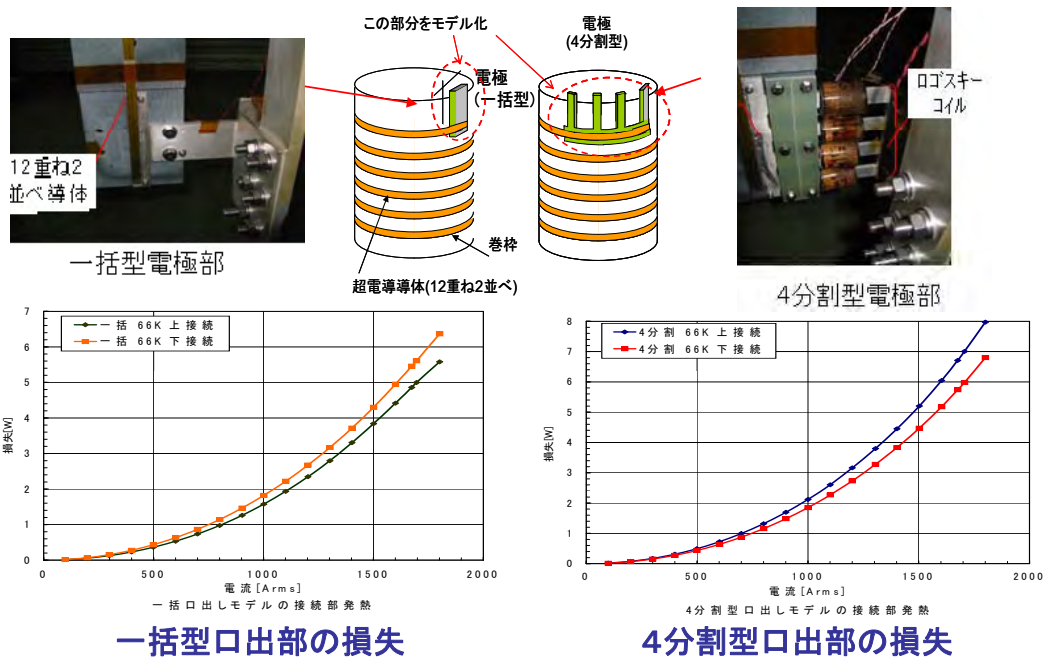
細線化線材による巻線の電流分布



過電流試験での規格化したエネルギー特性

巻線技術開発(3. 低損失化：巻線口出し部)

- 一括型と4分割型の口出部の損失試験結果は殆ど同等の損失
- そのため、製作上有利な4分割型を適用。



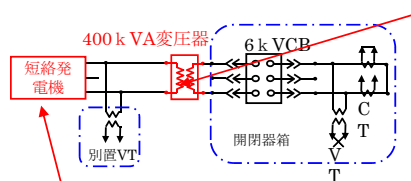
巻線技術開発(4. 耐短絡強度：試験条件)

- 20MVA実用変圧器と素線当りの短絡特性が同等の400kVAモデル短絡特性を検証

短絡モデル巻線

	一次巻線	二次巻線
導体構成	1重ね	3重ね
巻数	96ターン×6層	96ターン×2層
巻線長	1,000m	700m

短絡試験回路



短絡モデル(高さ2.3m 直径1m)



	短絡モデル	20MVA変圧器
相数、周波数	単相、60Hz	三相、60Hz
定格容量	400kVA	20MVA
定格電圧(一次/二次)	6.9kV/2.3kV	66kV/6.9kV
定格電流(一次/二次)	58A/174A	175A/1673A
%IZ	15%	15%
短絡電流定格電圧印加(一次/二次)	387A /1160A	1167A /11153A
素線並列本数	1本/3本	3本/24本
1本当り短絡電流定格電圧印加(一次/二次)	387A /387A	389A /465A



短絡発電機

同等

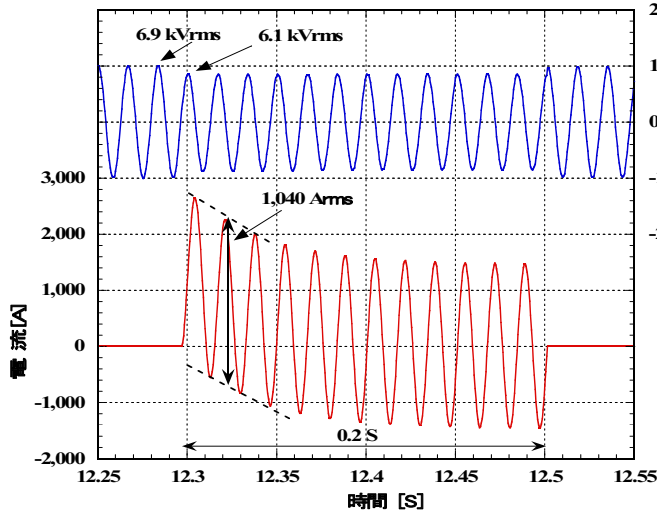
短絡モデルの巻線

巻線技術開発(4. 耐短絡強度: 試験結果)

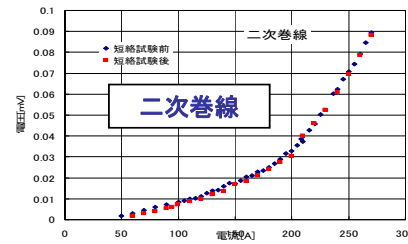
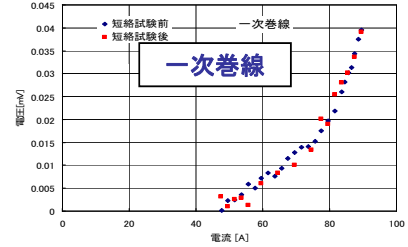
- 短絡電流1,040A(定格電流の6倍)、0.2秒間通電。試験後巻線の健全性(前後は同特性)により、**耐短絡強度を確認**。

目標達成

<プレス発表>



短絡試験時の電圧・電流波形

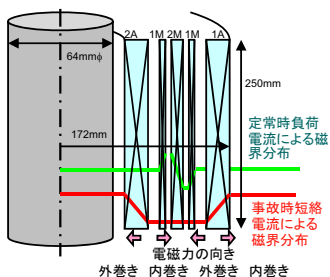
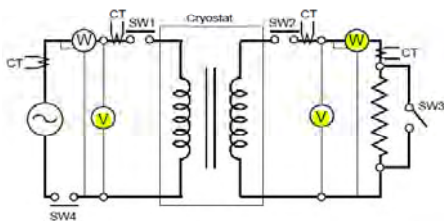


短絡試験前後の巻線特性

限流機能付加技術(1. 限流モデル変圧器)

- 目標 ① 限流モデル変圧器で限流機能確認(済)
② 限流機能付加変圧器で限流機能検証(H22-23)、実用機の設計検討(H23)
- 限流モデル変圧器を試作(10kVA)

九州大学での試験状況



限流モデル変圧器諸元

層数	6
ターン数	50ターン× 6層=300
ターン電圧	1.31V
電圧	393.6 V
電流	20A
負荷	20Ω



限流モデル変圧器(344mmφ)

限流機能付加技術（2. 限流モデル変圧器の試験1）

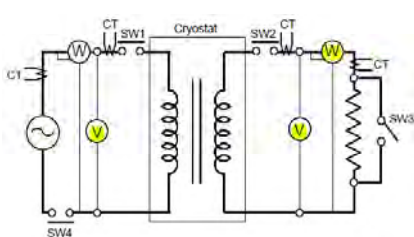
- ・ **限流機能を確認** $V1=325V$ 、短絡電流: $1200A \rightarrow$ 一次巻線電流: $43A$ (限流効果: 約 $1/30$)
- ・ 試験結果の解析で、発生した常電導転移長が $40\sim 50\%$ を確認。

目標達成

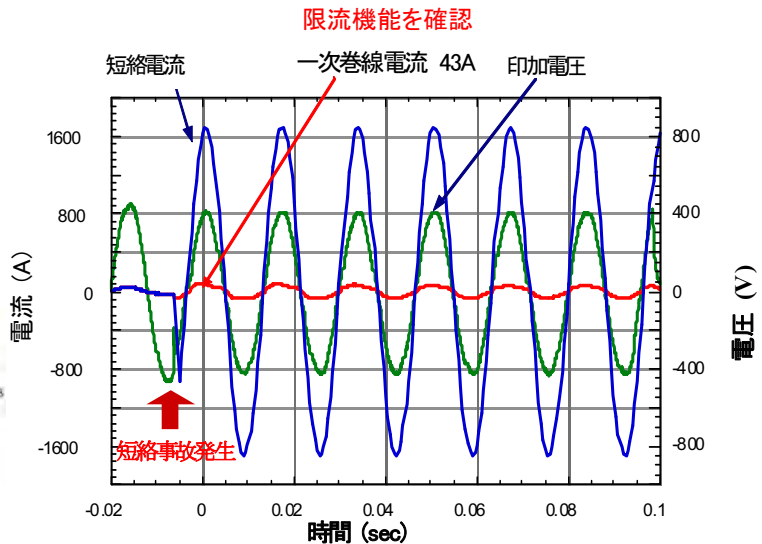
<プレス発表>

<限流機能の試験項目>

- ・ 各巻線のV-I特性試験
- ・ 無負荷試験(鉄損)
- ・ 各巻線間漏れリアクタンス
- ・ **短絡試験(限流効果)**
- ・ 現象解析(主巻線の常電導転移長等)

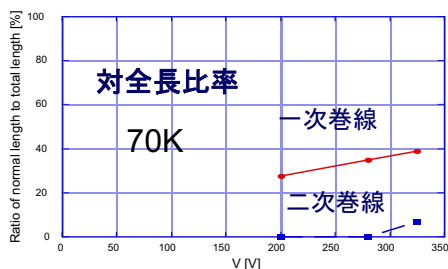
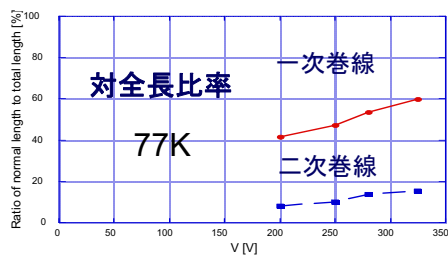


試験回路

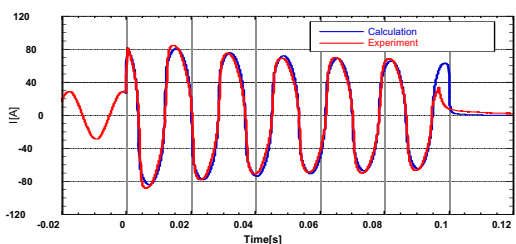


限流機能付加技術（2. 限流モデル変圧器の試験2）

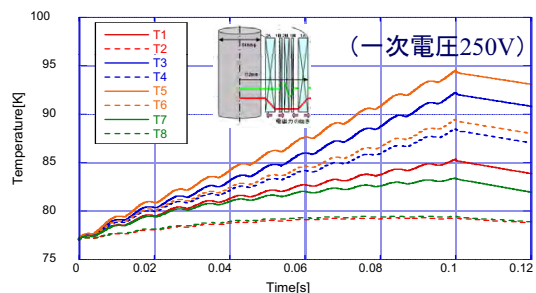
- ・ 限流機能試験結果で、発生した常電導転移長が $40\sim 50\%$ を確認。



発生した常電導転移長 (試験)



短絡時の一次巻線電流(試験・計算)



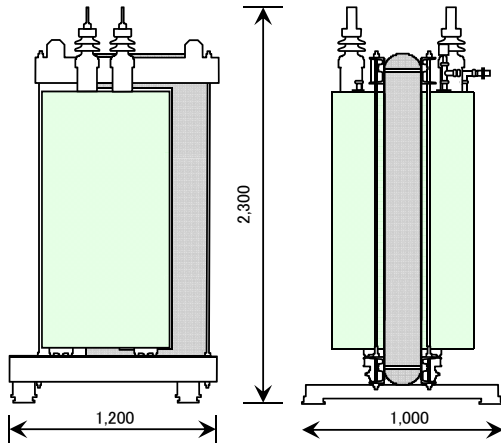
一次巻線各部温度 (計算)

限流機能付加技術 (3. 数100kVA級モデル検討)

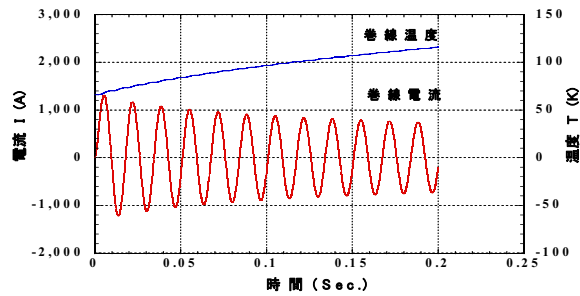
- ・ 限流モデルの試験成果に基づき、限流機能付加変圧器のモデル化・解析中(安定化構成の最適化等のシミュレーション解析)
- ・ 400kVA級単相変圧器モデルを設計検討中

400kVA級限流機能付加変圧器の諸元(案)

項目	仕様
定格容量、相数	400kVA 単相
定格電圧、電流	6.9kV/2.3kV、58A/174A
%インピーダンス	10%
導体構成、ターン数	1枚/3枚、576/192
巻線数	6層/2層



400kVA級限流機能付加変圧器(案)

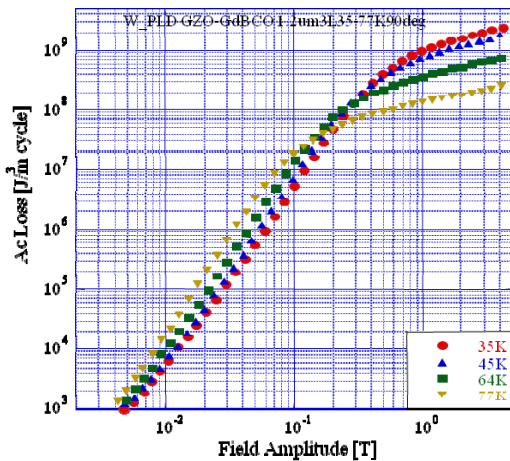


限流動作の解析例(電流・温度上昇)

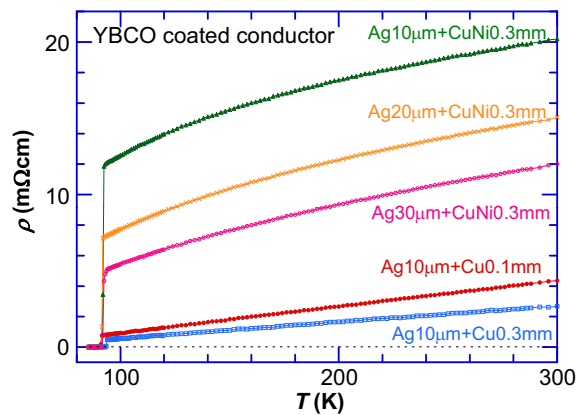
限流機能付加技術 (4. 限流効果の評価)

限流機能設計のため線材特性の評価

- ・ 線材の保護金属層の熱特性(抵抗率等)の測定
- ・ 線材の交流損失の磁界温度特性の測定



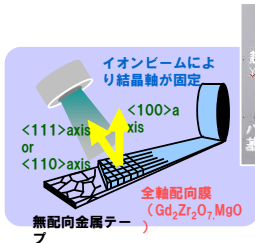
線材磁化損失の温度依存性測定(九大)



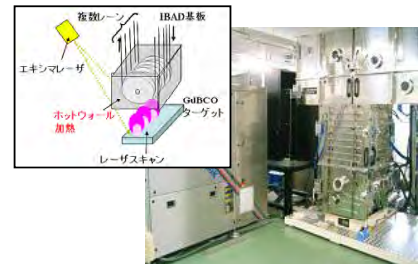
線材抵抗率の熱的特性測定(岩手大)

線材安定製造技術(1. PLD線材)

- ・ 目標は、細線化含め(100m・3分割、40A@66K,0.01T)
- ・ 歩留は現在45%と低いが、ホットウォール加熱式など歩留向上方策を対応中。



PLD線材の製造



ホットウォール加熱式PLD装置

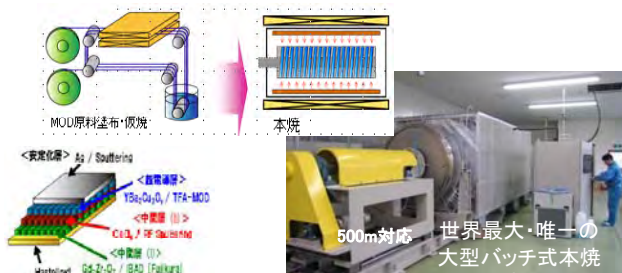
歩留の推移

総長m	安定化材	30m単長		50m単長		100m単長	
		本数	歩留%	本数	歩留%	本数	歩留%
138	0.3mm Cu等	4	87.0	2	72.4	0	0
740	0.3mm Cu	20	81.1	11	74.3	4	54.0
1,838	0.3mm Cu	33	53.9	17	46.2	7	38.1
266	0.3mm Cu等	4	45.1	2	37.5	0	0
1,186	0.1mm Cu	34	86.0	18	75.9	8	67.4
4,168		95	68.4	50	60.0	19	45.6

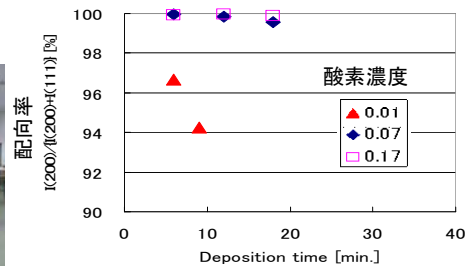
歩留(%)=[単長(m)×本数]/超電導線製作長(m)
 条件: Ic>100A/5mm かつ 仮想連続単長: 30m、50m、100m

線材安定製造技術(2. MOD線材)

- ・ 目標は、細線化含め(100m・3分割、40A@66K,0.01T)
- ・ 歩留は現在27%と低いが、酸素濃度調整など歩留向上方策を対応中。



MOD線材の製造



異なる酸素濃度で成膜したCeO2中間層面の配向率

歩留の推移

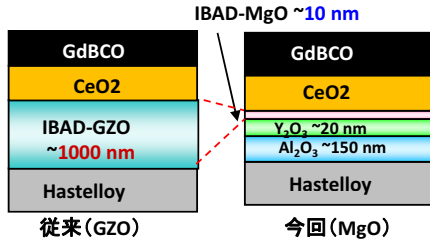
膜長m	安定化材	30m単長		50m単長		100m単長	
		本数	歩留(%)	本数	歩留(%)	本数	歩留(%)
2,329*	銀15μm	54	69.5	29	62.2	7	30.0
190	銀30μm	4	63.2	1	26.3	0	0
45	銀30μm	1	66.7	0	0	0	0
75	銀30μm	2	80.0	1	66.7	0	0
		61	69.3	31	58.7	7	26.5

歩留(%)=[単長(m)×本数]/超電導線製作長(m)
 条件: Ic>100A/5mm かつ 仮想連続単長: 30m、50m、100m

線材安定製造技術(3. IBAD-MgO基板の適用)

- ・ MgO基板は薄くても高配向(膜厚~1/100)を示し、コスト低減(線速~100倍)に有効。
- ・ MgO基板の製造技術は確立、巻線の基礎技術検証は良好(過電流、曲歪み、細線化)。
- ・ 今後、巻線技術にMgO基板を適用(22年2/18 NEDO技術委員会了承)。

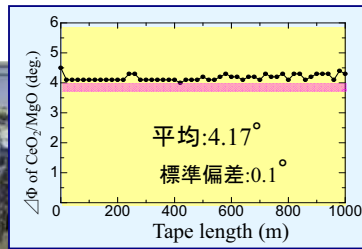
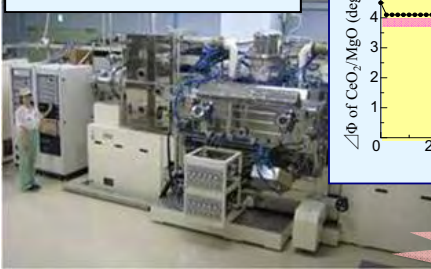
追加成果



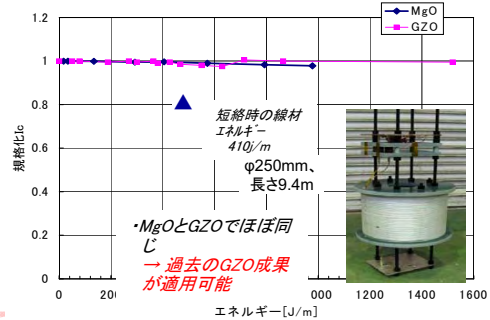
巻線技術は良好<今回検証>

- ・ 過電流特性 : 短絡電流通電による I_c 劣化無
- ・ 曲歪み特性 : 転位部を模擬した曲げでの I_c 劣化無
- ・ 細線化線材の素線間抵抗 1 MΩ/cm (GZO基板と同等)

線材製造技術を確立



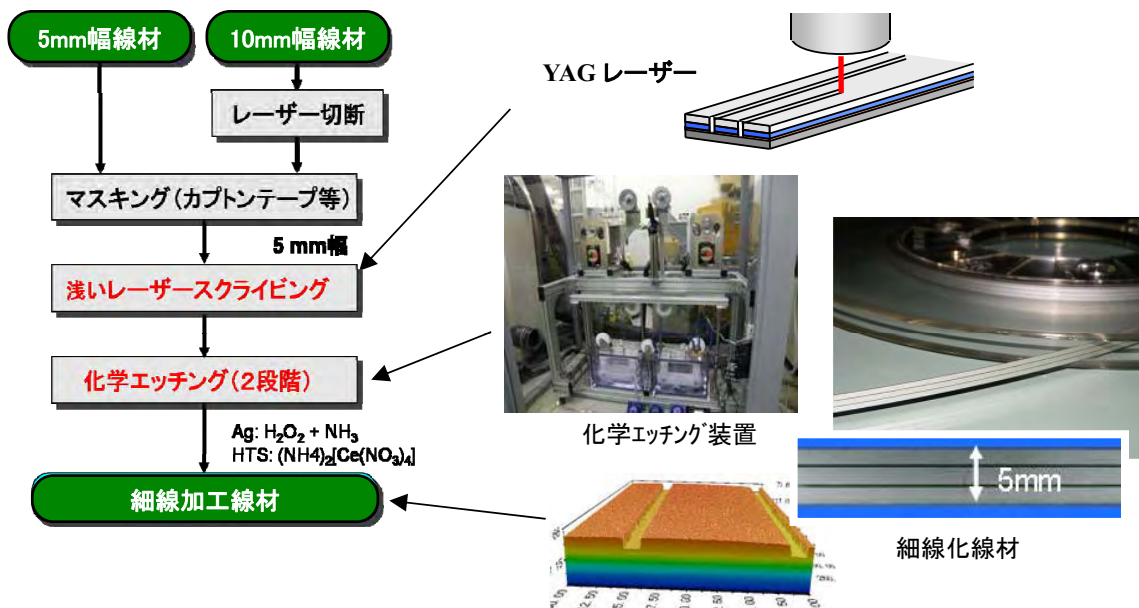
1 km 中間層の作製に成功



過電流特性の試験結果

線材安定製造技術開発(1. 線材加工の概要)

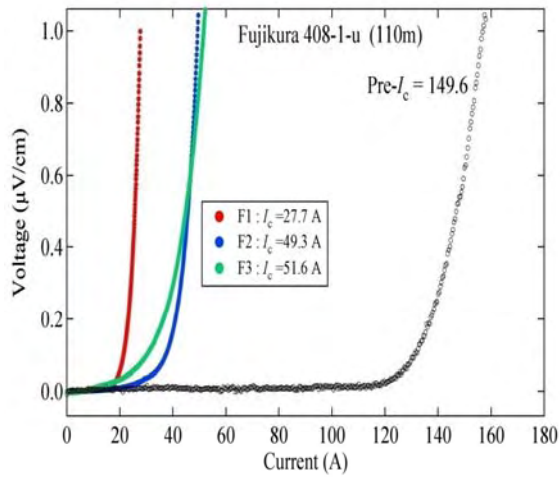
- ・ 目標は、線材(100m、5mm幅・3分割、40A@66K,0.01T)の安定な細線化技術開発。
- ・ 細線化は、切断、レーザースクライビング、化学エッチング等により、劣化低減と歩留向上。



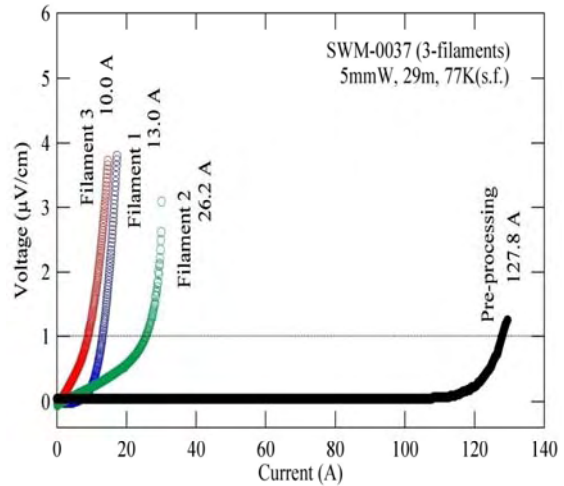
線材安定製造技術開発(2. 細線化, PLD線材・MOD線材)

目標達成

- PLD線材の細線化(100m・3分割): I_c 133A ($\geq 40A@66K, 0.01T$)
- MOD線材の細線化(30m・3分割): I_c 48A@66K → 100m長を年度末に達成見込



PLD線材細線化(30m・3分割)後の I_c 測定
 $27.7A \times 3 = 83A@77K \rightarrow 133A@66K, 0.01T$
 総 I_c の減少 150A → 129A (▲14%)



MOD線材細線化(30m・3分割)後の I_c 測定
 $10A \times 3 = 30A@77K \rightarrow 48A@66K, 0.01T$
 総 I_c 128A → 49A (▲62%)

線材安定製造技術開発(2. 細線化の歩留, 被覆処理)

- 細線化工程の歩留率は57から67%に向上(洗浄工程追加)。今後も引き続き向上予定。
- 巻線用には、絶縁・被覆処理が必要。その工程で I_c 低下率が約5%と小さい。

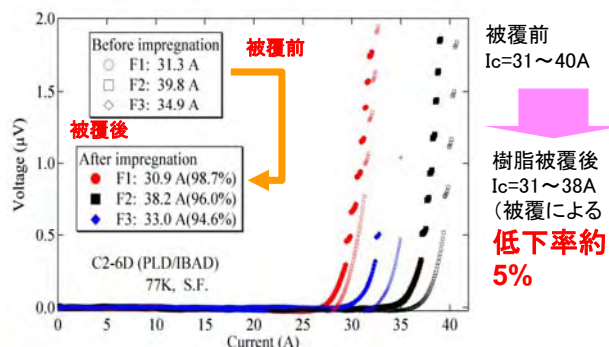
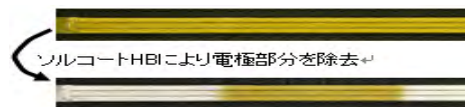
線材細線化の歩留り

歩留の定義: 最小 $I_c \times 3 > 40A@66K$, フィラメント間抵抗率 $0.1M\Omega/cm$

洗浄工程	線材番号	長さ(m)	I_c (A) @77K			最小 $I_c \times$ 分割数 (A)	フィラメント間抵抗率 ($M\Omega/cm$)	歩留率 (%)
			加工前	加工後	加工後合計			
無 10~30m	#1	30	118	30~36	151	90	295	57
	#2	19	128	31~46	150	93	0	
	#3	29	128	10~26	160	30	0	
	#4	15	140	40~44	158	120	5.0	
	#5	30	155	31~53	188	93	2.0	
	#6	30	175	33~73	208	99	0	
	#7	19	136	31~43	158	93	0.1	
有 100m	#8	120	105	17~34	228	53	1.0	67
	#9	120	150	4~12	273	11	0.8	
	#10	110	150	28~52	113	83	0.8	

線材の樹脂被覆処理

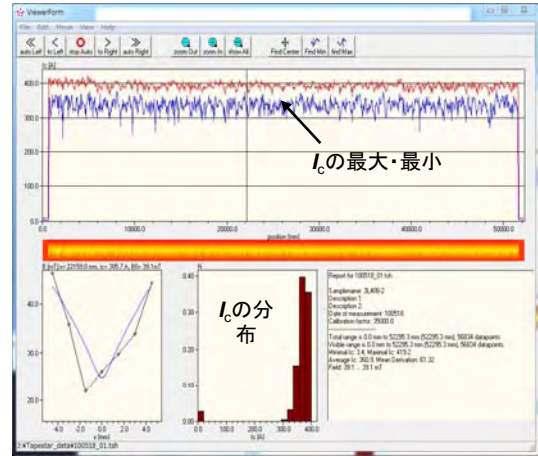
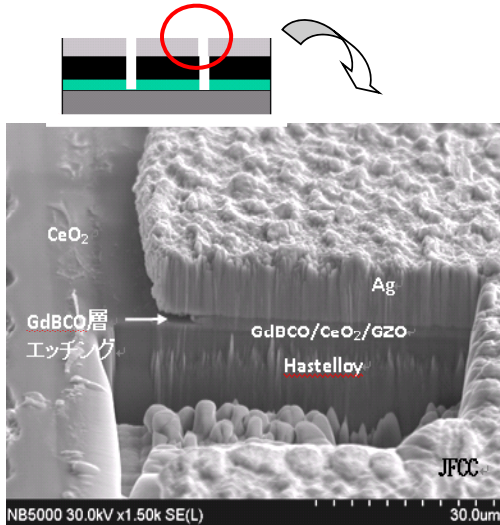
被覆厚さ15.0~18.5 μm 表面状態良好



樹脂被覆後の I_c 測定結果

線材安定製造技術開発(3. 細線化の評価)

- ・ 走査型電子顕微鏡(SEM)で加工面を測定(JFCC)し、加工手法にフィードバック
- ・ ホール素子法(Tape star)による I_c 評価(長手方向、幅方向、分布)

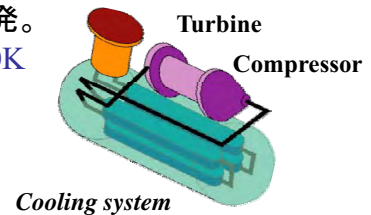


走査型電子顕微鏡 (SEM) での加工面測定

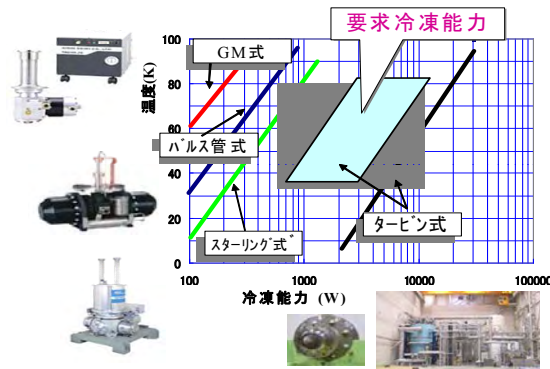
ホール素子法による I_c の非接触評価例

冷却システム 開発(1. ネオン冷却システムの構成)

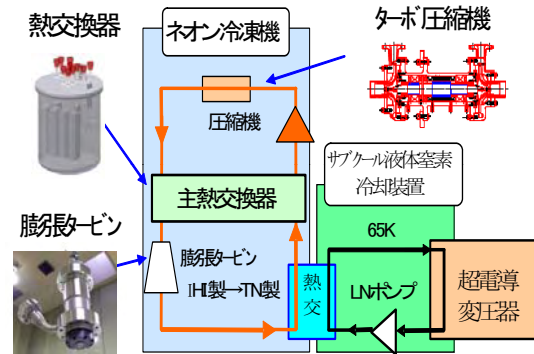
- ・ 超電導変圧器用の高効率、小型、長寿命のシステムを開発。
- ・ 目標 : 冷凍能力2kW@65K、冷凍効率(COP) $\geq 0.06@80K$
 - ・ 長寿命・メンテ容易
 - ・ タービン方式、摺動部レス等
 - ・ 高効率・・・タービン、圧縮機の効率向上等
 - ・ 小型・・・熱交換器の小型化等



前プロジェクト「超電導応用基盤技術開発(第II期)」(平成15~19年度)



各方式の冷却システム

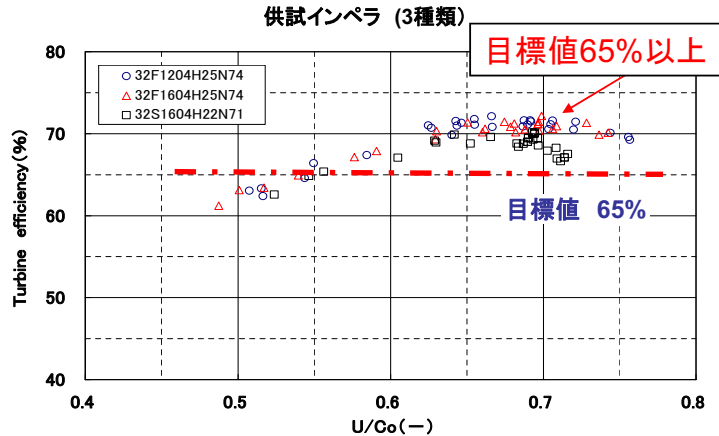
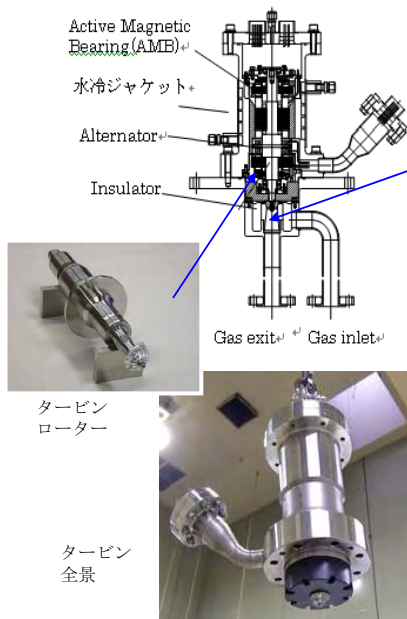


ネオン冷却システムの構成

冷却システム 開発(2. 膨張タービンの開発)

- 膨張タービン用3種類の供試インペラでの効率が**目標値65%以上を確認**。

目標達成

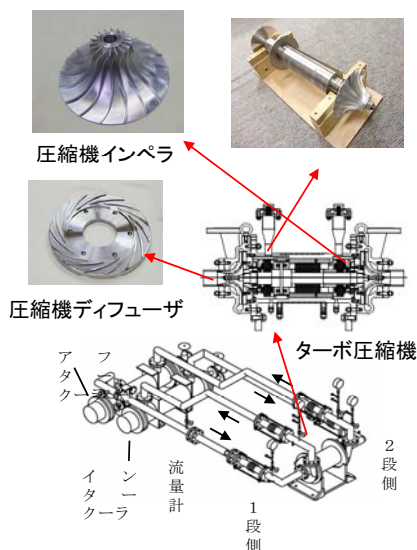


タービン効率の試験結果

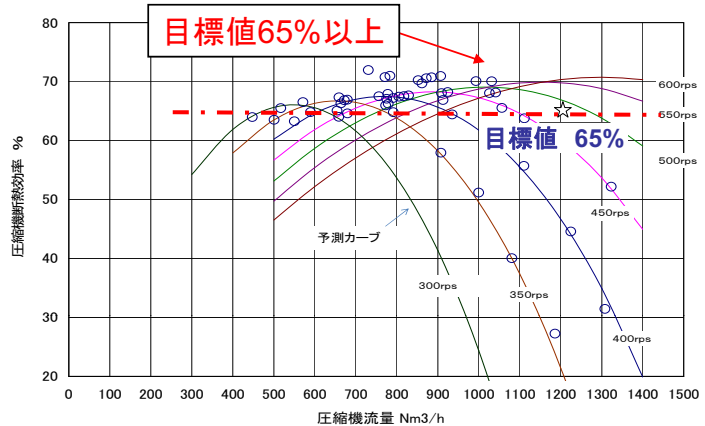
冷却システム 開発(3. ターボ圧縮機の開発)

- ターボ圧縮機の効率測定で、**目標値65%以上を確認**。

目標達成



- 小型化 → 高速・高効率モータ採用
- メンテ容易 → 低振動、5軸制御磁気軸受採用



圧縮機効率と流量の関係(流体:ネオン)

- システムとしては、ネオン冷却システムの理論モデルを開発し、COP0.067(目標0.06以上)を理論的に確認。

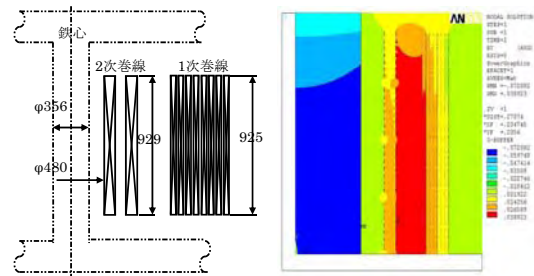
2MVA級変圧器モデル(設計検討)

設計方針

- ・20MVA変圧器相当
(電圧、鉄心、ブッシング等)
- ・巻線は2MVA級で20MVAと相関
- ・冷却システムは2kW級

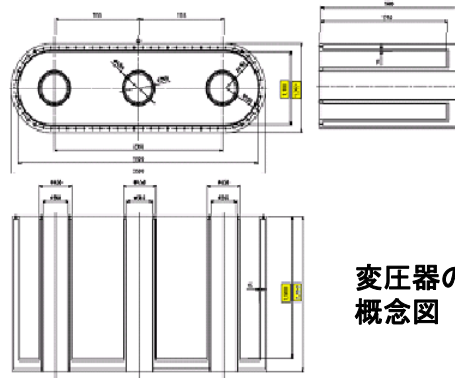
変圧器の諸元(対実用機比較)

諸元	2MVA変圧器モデル	20MVA変圧器(実用器)
相数、結線	3φ、Y-Y	3φ、Y-Y
定格電圧	66kV/6.9kV	66kV/6.9kV
定格電流	17.5A/167A	175A/1674A
%インピーダンス	4.5%(2MVA基準)	15%(20MVA基準)
巻線層数	8層/2層	8層/2層
ターン数	1033/108	1033/108
ターン間電圧 V/N	36.9	36.9
導体構成	1本/8並列	3並列/24並列
線材長	11.1km	35.6km
鉄心重量	7.8ton	7.2ton



変圧器の巻線配置

磁界分布



変圧器の概念図

2MVA級変圧器モデル(試験検討)

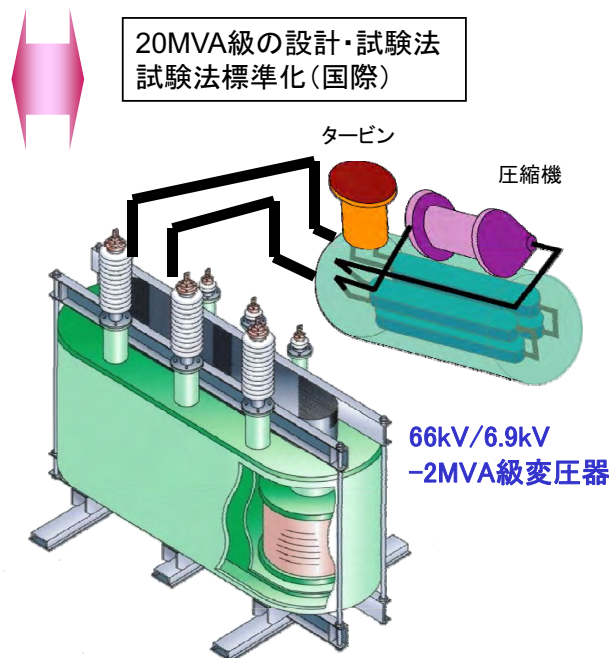
- ・66/6.9kV-2MVA級変圧器モデルのシステムを設計し、試験計画を整理。

目標達成

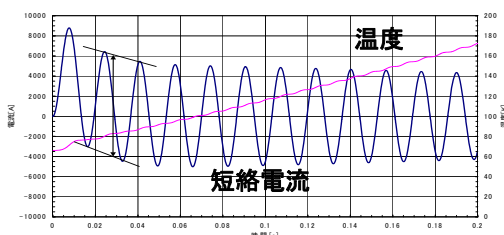
変圧器試験案

変圧器単体試験	絶縁抵抗* 巻線抵抗* 変圧比 短絡インピーダンス及び負荷損 無負荷損及び無負荷電流 交流耐電圧(誘導/加圧) 雷インパルス
システム試験(冷却装置と組合)	冷却特性試験 定格通電試験 保護動作 損失測定等

20MVA級の設計・試験法
試験法標準化(国際)



66kV/6.9kV
-2MVA級変圧器



短絡電流と温度の解析例

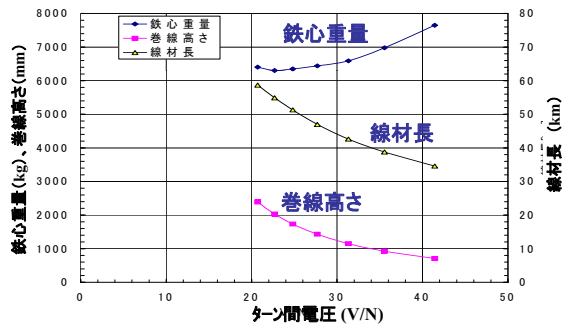
20MVA級実用変圧器(設計検討)

設計方針

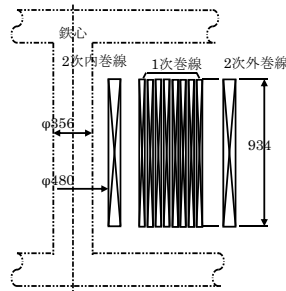
- 2MVA級の設計結果(実証後)と要素技術の開発成果を反映。
- 鉄損低減のため鉄心は室温に配置、巻線は絶縁面から円筒巻線
- 超電導変圧器の特徴であるコンパクト性、高効率性を活かす

変圧器の諸元

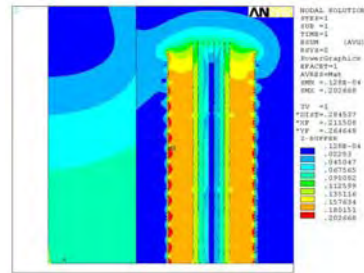
諸元	20MVA変圧器(実用器)
相数、結線	3φ、Y-Y
定格電圧	66kV/6.9kV
定格電流	175A/1674A
%インピーダンス	15%(20MVA基準)
巻線層数	8層/2層
ターン数	1033/108
ターン間電圧 V/N	36.9
導体構成	3並列/124並列
線材長	35.6km
鉄心重量	7.2ton



鉄心重量、巻線高さ及び鉄心重量、巻線高さ及び線材長のターン間電圧 (V/N) 依存性



変圧器の巻線配置



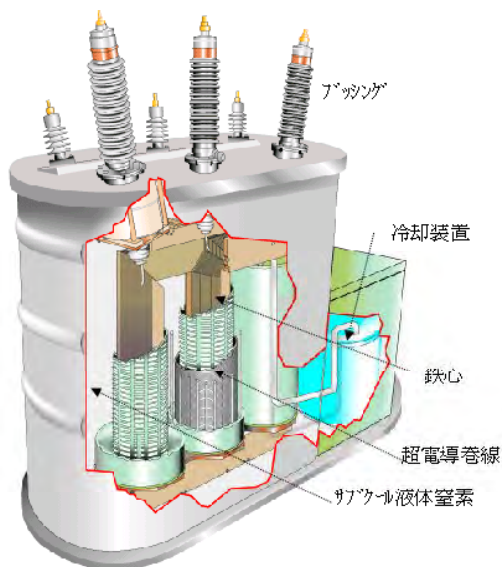
磁界分布

20MVA級実用変圧器(設計検討)

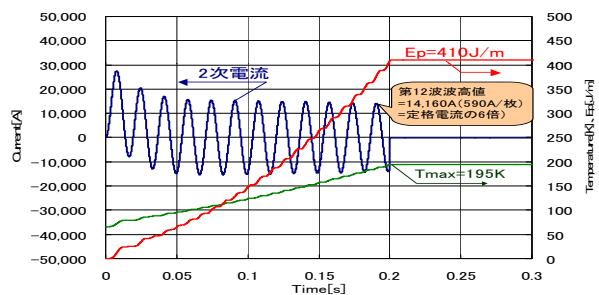
- 20MVA級変圧器の設計で高効率性、コンパクト、不燃性等を理論的に確認。

特性比較例(対油入変圧器)

	油入変圧器	YBCO 変圧器
線材	Cu	YBCO
冷却システム	油冷却	サブクール液体窒素(巻線) 室温(鉄心)
損失	100%	16%($\leq 1/6$)
銅損/交流損失	91%	3%
鉄損	9%	5%
熱侵入	—	8%
効率	99.4%	99.9%
重量	100%	54%(約 1/2)



20MVA, 3相 66 kV/6.9kV, 175A/1,674A, %インピーダンス7.5%(10MVA基準)



短絡電流解析結果(二次側電流、温度、単位長の発生エネルギー)

(3) 知的財産権、成果の普及

	H20	H21	H22	計
特許出願	0	4 ※1	0	4 件
論文(査読有)	1	5	0	6 件
論文(査読無)	1	7	2	10 件
研究発表・講演	11	32	15	58 件
表彰等	0	0	1 ※2	1 件
雑誌等への掲載	0	4	1 ※3	5 件
展示会等への出展	2	2	1	5 件

(注) ※1 21年特許「極低温冷凍装置及びその運転方法、太陽日酸」ほか

※2 22年9月2日に表彰予定

・電気学会 電力・エネルギー部門 研究・技術功労賞の受賞
「超電導技術の発展に貢献」

※3 22年8月19日に新聞発表(2件)

① 世界初のY(イトリウム)系超電導線材を用いた超電導変圧器の短絡性能を実証

② Y系超電導変圧器の巻線による限流機能の世界に先駆けて実証

・17社が報道

新聞記事：日経、読売、朝日、毎日、電気、産経、日経産業、日刊工業、日経産業、
熊本日日、電力時事通信

Web報道：日刊産業、鉄鋼、エコニュース、EETIMES、cybozu、jijicom

<参考> TNC(カメラ・取材)

受賞

新聞発表

(4) 成果の普及(展示等) 1/2

※平成21年11月9日 超電導Web21

※平成21年12月25日 冷凍(REFRIGERATION)

※平成22年4月23日 低温レポート

※平成21年5月15日 低温レポート

ISS2009 (つくば国際会議場) 平成21年11月2~4日

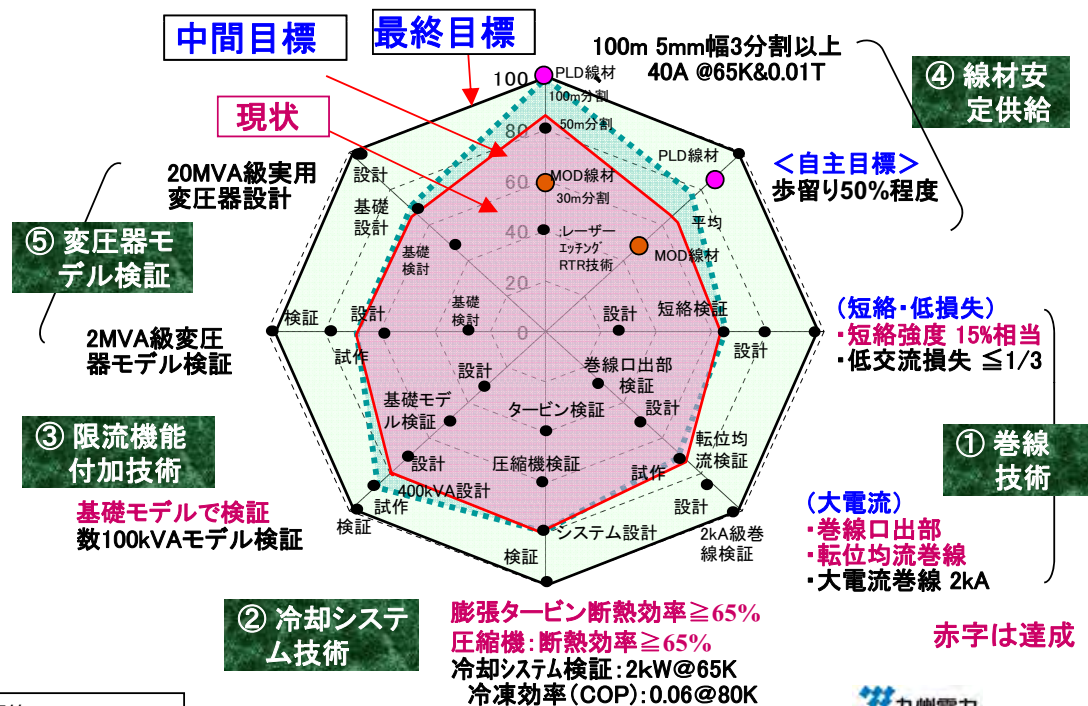
研究成果展示会 (九州電力総合研究所) 平成22年度5月19~20日

成果の最終目標の達成可能性

研究開発項目 (個別テーマ)	最終目標	達成見通し
①巻線技術開発	・2kA級巻線技術の確立 ・巻線の低交流損失 ≤1/3(対細線化無し線材)	・最適な転位基礎構造は実証済みであり、2kA級大電流モデルによる目標達成は可能。 ・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
②冷却システム技術開発	・冷凍能力:2kW@65K ・冷凍効率(COP):0.06@80K	・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
③限流機能付加技術開発	・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)	・限流モデルにより限流特性は確認済みで、それに基づく400kVA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。
④変圧器対応線材安定製造技術の開発	・線材安定製造および線材加工技術の向上 (歩留向上)	・安定製造や加工技術の改良により線材の長手・幅方向のIc特性向上技術は確立中のため、目標達成は可能。
⑤2MVA級変圧器モデル検証	・左記モデルの課通電試験による性能検証	・上記の要素技術や冷却システム技術の達成により2MVA級変圧器モデルの目標達成は可能

個別研究開発項目の目標と達成状況(最終目標)

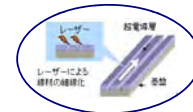
・最終目標に向けても着実に開発を遂行。



(1)-2 事業の目標と達成状況(国際的観点)

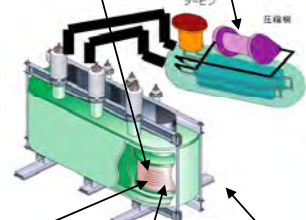
	最終目標	達成状況・意義
①巻線技術開発	○2kA級巻線技術の確立 ○巻線の低交流損失 ≤1/3(対無細線化線材)	○20MVA実用変圧器の短絡強度と大電流用の転位技術を確立(世界初)。
②冷却システム技術開発	○冷凍能力:2kW@65K ○冷凍効率(COP):0.06@80K	○ネオン冷却システム(世界初)で、冷却能力2kW@65K(既存技術の約3倍)で、高効率化(既存技術の約1.5倍)が見通せる技術を確立。
③限流機能付加技術開発	○数百kVA級限流機能付加変圧器による機能検証(過大電流を定格電流の3倍以下に抑制)	○400kVA限流機能付加変圧器(世界初)が見通せる技術を確立。
④線材安定製造技術の開発	○安定製造の向上(歩留向上)	○2MVA変圧器モデルに必要な細線化線材(世界初)安定製造技術を確立。
⑤2MVA級変圧器モデル検証	○左記モデルの課通電試験による性能検証	○66/6kV-2MVAY系低損失変圧器(世界初)が見通せる設計技術を確立。

④線材安定製造技術

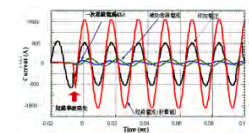


細線化技術
(世界初)

②ネオン冷却システム (世界初)



①巻線技術 (世界初)



⑤2MVA 変圧器 (世界初)

③限流機能付加技術 (世界初)

超電導変圧器によるCO2削減効果

単位: kton/年

	2020年	2030年	2040年	2050年
最小ケース	94	374	654	935
最大ケース	94	532	1,287	2,042

算定根拠

変圧器の超電導化による損失低減によるCO2削減

- ・損失低減量60%削減(損失40%)
20MVA変圧器では損失(鉄損と交流損失)が冷却含め損失が40%(年間平均利用率50%で算定)

- ・導入台数2020年:10%、2030年:40%、2040年:70%、2050年:100%(最大ケース時の系統変は2030年から同ペースで導入)

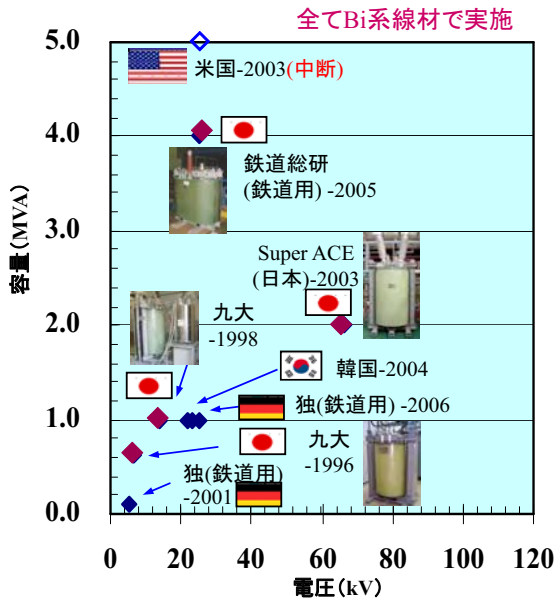
- ・最大ケース:系統用および配電用変圧器を導入
最小ケース:配電用変圧器のみ導入

CO2 排出原単位0.41kg/kWh(平成18年度実績値電事連)

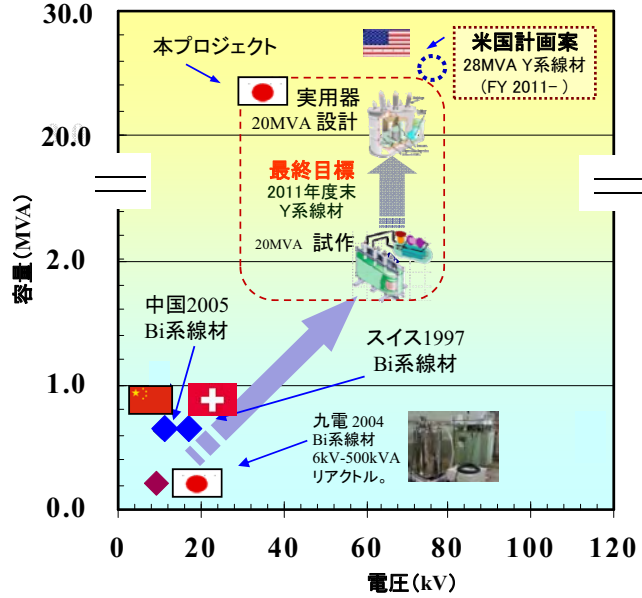
超電導変圧器開発の世界比較

- 海外では、**交流損失低減・絶縁等の課題から、中断していたが最近、再計画中。**
- 本プロジェクトは**変圧器の開発のトップ、更に、限流機能付加変圧器の開発まで実施。**

单相変圧器



三相変圧器



成果の最終目標の達成可能性

	2008	2009	2010	2011	2012	2013 ~ 2018	~ 2020~		
変圧器	20MVA相当の短絡強度検証 ▲		中間目標	2kA級巻線技術 ●		最終目標	普及導入		
	転位構造 ▲			低交流損失 ≤ 1/3 ●				<div style="border: 2px solid blue; padding: 5px;"> 実用化技術開発 実証試験 容量拡大 信頼性検証 水力発電所等での実証試験 低コスト化 実用化検討 20MVA 変圧器 </div>	
	膨張タービン、ターボ圧縮機の断熱効率 ≥ 65% ●			冷凍能力 2kW@65K, COP ≥ 0.06@80K ●					<div style="border: 2px solid red; padding: 5px;"> 変圧器: 20MVA 都市部周辺の変電所から導入開始し、順次拡大 </div>
	限流機能検証 ▲			限流効果 (≦ 定格電流の3倍) ●					
	2MVA器の設計 ▲			2MVA器の検証 ●					
<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> <div style="font-size: small;"> 試験フィールド 重電メーカー及び配電用変電所併設試験センター(福岡) </div> <div style="text-align: center;"> 2MVA変圧器モデル </div> </div>									
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div> 波及効果 産業・鉄道分野等 </div> <div> </div> </div>									

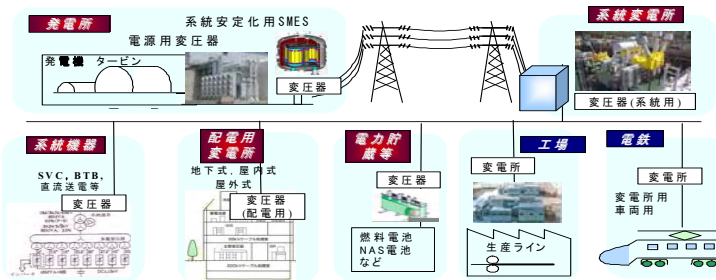
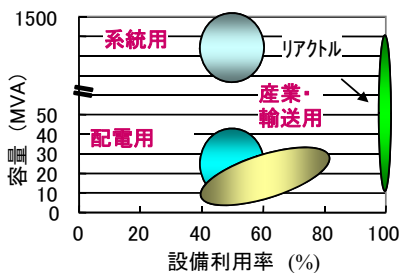
▲: 基本原理確認

●: 基本技術確立

波及効果（電力・産業・輸送分野）

- 超電導変圧器は小型、高効率、不燃等から、電力用（配電用・系統用）に加え、産業用や輸送用でも貢献。

分野	2005	2010	2015	2020
電力分野		巻線、冷却等の要素技術開発 2MVA変圧器システム開発	容量拡大、低コスト化 信頼性検証	段階的に 高電圧化、大容量化 信頼性検証、低コスト化 実用化
産業分野			容量拡大、低コスト化 信頼性検証、実用化検討	小規模から 実用化
輸送分野			耐振動対策、低コスト化 信頼性検証、実用化検討	小規模から 実用化



事業原簿 IV-1.21~22

変圧器の各種適用用途



波及効果（冷却システム）

- 超電導変圧器の冷却システムは電力用に加え、産業用や科学分野でも貢献。

分野	2005	2010	2015	2020
電力分野		冷却の要素技術、2MVA変圧器	容量拡大、低コスト化、信頼性	段階的に 大容量化 実用化
産業分野			大容量化、低コスト化、高効率化 信頼性検証、蒸留プロセスとの融合	小規模から 実用化
科学分野			大容量化、低コスト化 信頼性検証、低温度化	実用化

- 分散型（小型）
極低温蒸留装置
における高効率な
冷熱源の提供



石油ガス・希ガスの
極低温蒸留分離装置

- 液体窒素循環
の代替。低温
度化と循環サイクルによる
省エネ化



スペースチャンバーコールドパネル冷媒供給

事業原簿 IV-1.21~22



「超電導機器用線材の研究開発」

(中間評価)

(2008年度～2012年度 5年間)

プロジェクトの詳細説明 (公開)

サブプロジェクトリーダー

(財)国際超電導産業技術研究センター 和泉輝郎

2010年 9月 1日

複製を禁ず

1/39

II. 研究開発マネジメントについて 2.2 研究開発の実施体制

公開

参画機関

(財) 国際超電導産業技術研究センター 

中部電力 (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)



(財) ファインセラミックスセンター



(独) 理化学研究所



(独) 産業技術総合研究所



ロスアラモス国立研究所



東北大学



東北大学
TOHOKU UNIVERSITY

東京大学



東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO

早稲田大学



早稲田大学
WASEDA UNIVERSITY

上智大学



上智大学
SOPHIA UNIVERSITY

東京工業大学



東京工業大学
Tokyo Institute of Technology

名古屋大学



名古屋大学

新潟大学



新潟大学

京都大学



京都大学
KYOTO UNIVERSITY

九州工業大学



九州工業大学

九州大学



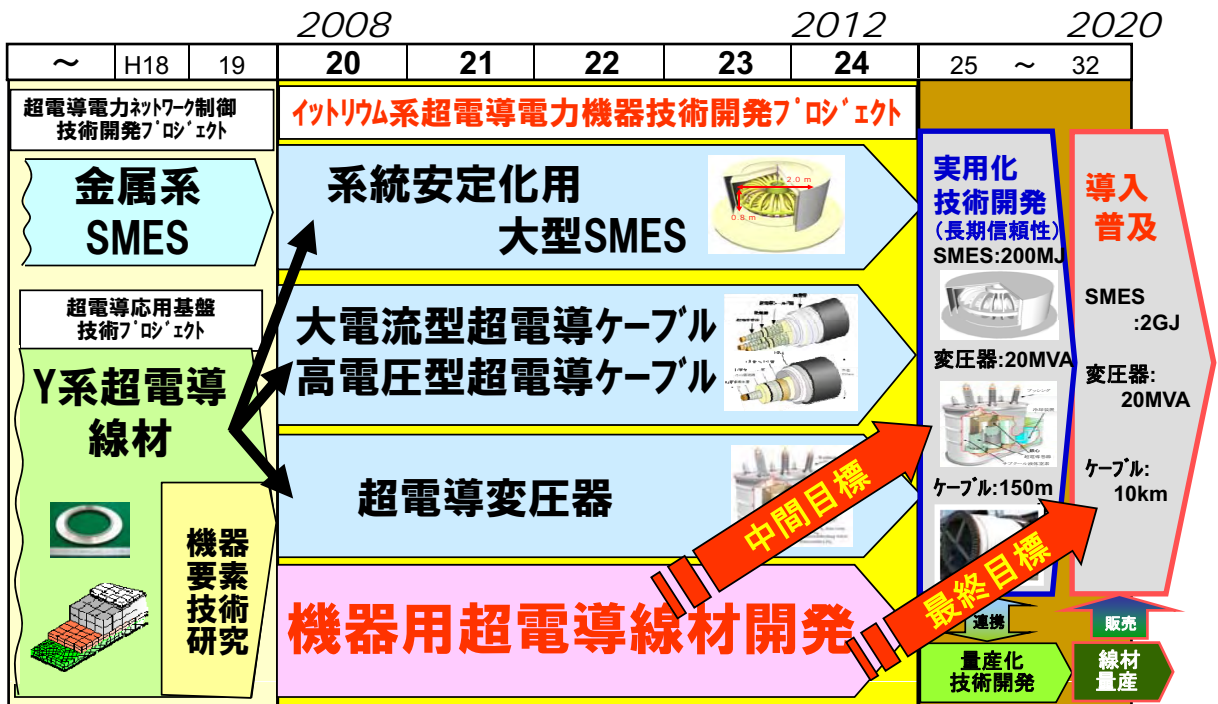
九州大学

鹿児島大学



鹿児島大学
KAGOSHIMA UNIVERSITY

線材開発の位置づけ



線材開発目標の再編（実施計画）

超電導電力貯蔵システム対応線材

(中間目標)
 $I_c = 30A/cm-w @ 77K \& 3T - 50m \ 1GPa$
 (最終目標)
 $I_c = 50A/cm-w @ 77K \& 3T \geq 200m \ 1GPa$

超電導電力ケーブル対応線材

(中間目標)
 $J_e = 30kA/cm^2 (2mm幅 \times \geq 50m)$
 ケーブル耐久試験条件の決定
 (最終目標)
 $J_e = 50kA/cm^2 (2mm幅 \times \geq 200m)$

超電導変圧器対応線材

(中間目標)
 $5mm幅 \ 5分割 \geq 50m \ 100A \ @ 65K \& \ 0.02T$
 (最終目標)
 $5mm幅 \ 10分割 \geq 100m \ 100A \ @ 65K \& \ 0.1T$

超電導機器用線材の研究開発

- (1) 線材特性の把握
- (2) 磁場中高 I_c 線材 作製技術
- (3) 低損失線材作製技術
- (4) 高強度・高 J_e 線材 作製技術
- (5) 低コスト・歩留向上技術

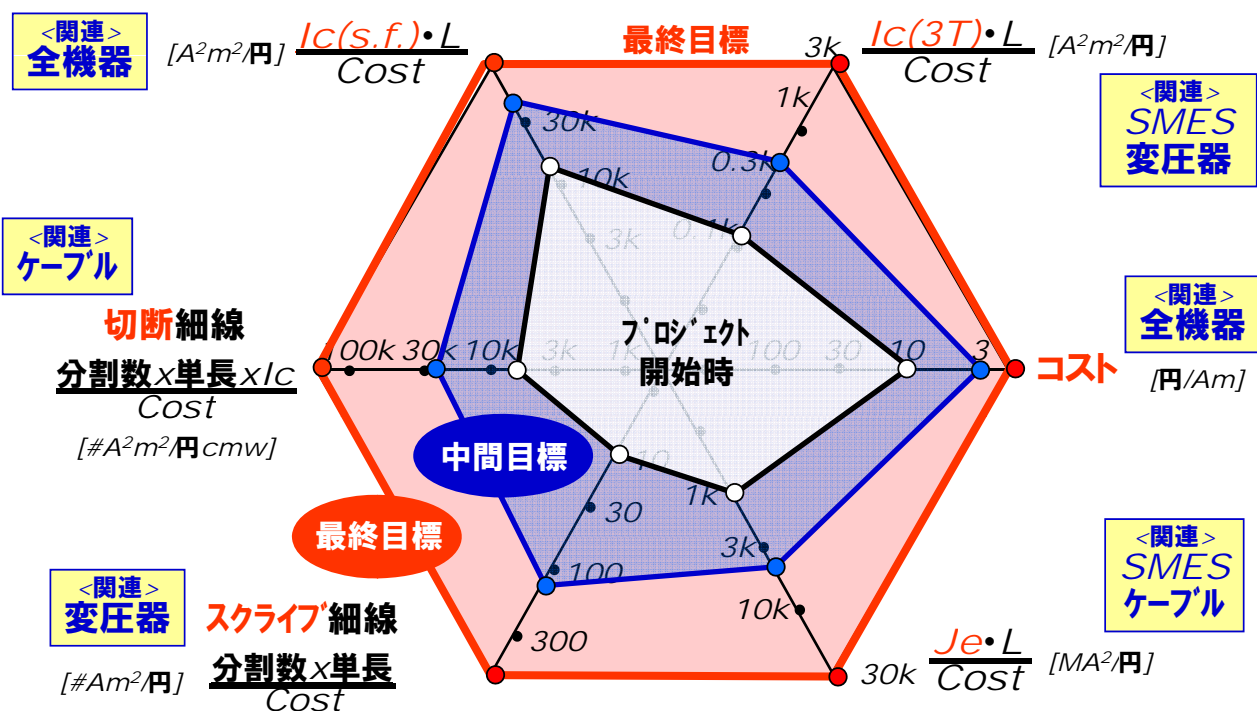
全機器

強い連携

再編後の線材開発目標

テーマ名	中間目標	最終目標
①線材特性の把握	・ケーブル耐久試験適正条件の決定	■各種機器環境に対する耐久性を評価(内部目標)
②磁場中高Ic線材作製技術	・30A/cm-w @77K,3T-50m ・300A/cm-w@65K,0.02T-50m	■50A/cm-w@77K,3T-200m ■400A/cm-w@65K,0.1T-100m
③低損失線材作製技術	・2mm幅-300A/cm-w-50m ・5mm幅5分割-50m-分割無しに比べて交流損失1/5	■2mm幅-500A/cm-w-200m ■5mm幅10分割-100m-分割無しに比べて交流損失1/10
④高強度高Je線材製作技術	・300A/cm-w-1GPa-50m ・Je=30kA/cm ² -50m	■500A/cm-w-1GPa-200m ■Je=50kA/cm ² -200m
⑤低コスト・歩留向上技術	・技術コスト3円/Amの実証	■技術コスト3円/Am未満足証 ■中間目標技術を安定に作製可能な技術を確立する。

プロジェクト開始時技術と目標値の関係



中間目標 と 達成状況 及び 今後の課題

研究開発項目	中間目標	研究開発主要成果(赤字は目標達成成果)	達成度	今後の課題
① 線材特性の把握	・ケーブル耐久試験適正条件の決定	・「温度」、「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。 ・ケーブル耐久試験用線材評価 適正条件を決定	◎	最終目標へ向けた技術開発
② 磁場中高 J_c 線材	・30 A/cm-w @77 K, 3 T-50 m ・300 A/cm-w @65 K, 0.02 T-50 m	IBAD-PLD線材 ・33 A/cm-w@77K, 3 T- 51 m ・492 A/cm-w@77 K, 0.02 T- 51 m IBAD-MOD線材 ・14 A/cm-w@77K, 3 T- 27m (New) ・>300 A/cm-w@65 K, 0.02 T- 50 m	◎	最終目標へ向けた技術開発 (PLD以外は残り)
③ 低交流損失線材	・2 mm幅-300A/cm-w -50m ・5 mm幅5分割-50 m-分割無しに比べて交流損失1/5	IBAD-PLD線材 ・2 mm幅-388 A/cm-w -50 m ・5mm幅・5分割- 50m損失 1/5見通す IBAD-MOD線材 ・2 mm幅-397 A/cm-w -50 m ・5mm幅・5分割- 40m損失 1/5見通す (New) RABITS-PLD線材 ・2 mm幅-293 A/cm-w -28 m	○	コイル形状での損失の検証
④ 高強度・高 J_c 線材	・300 A/cm-w -1 GPa-50 m ・ $J_c=30$ kA/cm ² -50 m	IBAD-PLD線材 ・80 μ m Hastelloy- 50 m $J_{cmin} \geq 400$ A/cm-w $J_e > 36$ kA/cm ² -0.9 GPa (RT) IBAD-MOD線材 ・70 μ m Hastelloy- 37 m $J_{cmin} \geq 300$ A/cm-w $J_e > 30$ kA/cm ² -0.9 GPa (RT)	○	低温における強度評価
⑤ 低コスト・歩留向上	・技術コスト3 円/Amの実証	基板中間層 ・各層での必要条件確認 PLD線材 ・435 A/cm-w@15 m/h-50 m (2.9円/Am) MOD線材 ・370 A/cm-w@5 m/h-25 m (2.9円/Am)	○	全中間層の極低コスト条件組合せ、MOD長尺化等

事業原簿 III-1.4.10

◎:達成 ○:達成見込み(H22年度中に達成)

7/39

詳細成果

①線材特性の把握

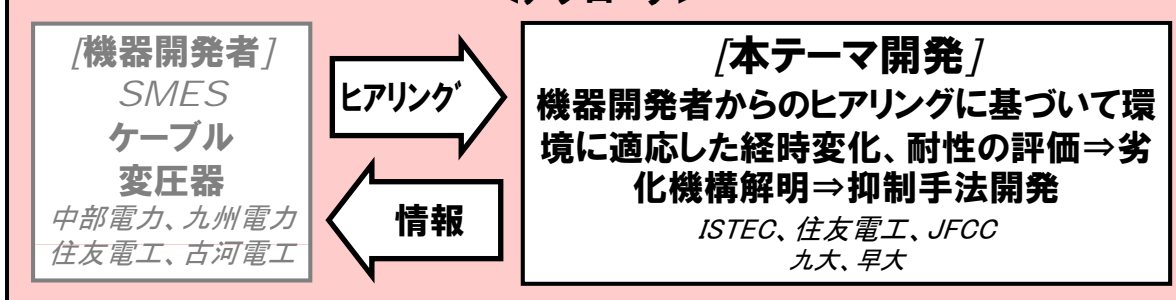
<概要>

超電導機器(SMES,ケーブル,変圧器)の応用に際して、線材が与えられた環境条件(雰囲気、温度、湿度、歪み等)に対して、経時経年変化に関する性質を定量化すると共に、劣化防止策の開発を行う。

<目標値>

中間目標 (H22末)	最終目標 (H24末)
ケーブル耐久試験適正条件の決定	各種機器環境に対する耐久性を評価

<アプローチ>



事業原簿 III-2.4.1

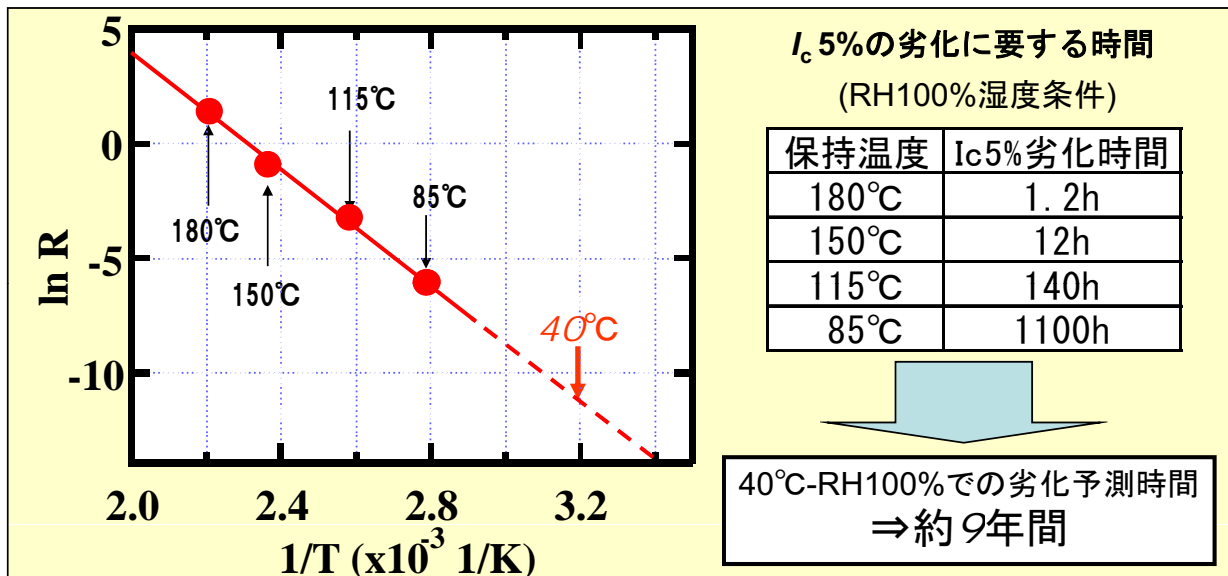
8/39

ケーブル製作・運転条件での環境把握及び課題抽出

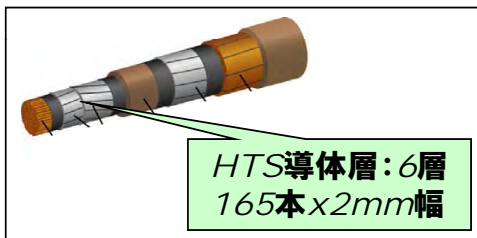
	工程	処理、操作	原因分類	条件
製作環境	工場での線材保管	保存時の湿度	湿度	常温常圧力保管、 1年間 (最大40°C-100%)
	線材加工ケーブル製作	絶縁紙乾燥	温度	真空100°C-24h
		接続時の半田加熱	温度	230°C - 20分以内
		らせん巻時の曲歪	機械強度	らせん巻 30mmφ (43mmピッチ)
		ドラム巻き時の歪	機械強度	0.1%の両曲げ、8回、 引張り、圧縮曲げ
		コルゲート管による圧縮	機械強度	絶縁紙に9mmφの円筒で 16kgfの圧縮印加、24h
敷設時	管路ケーブル引込	機械強度	0.07% (伸び)	
運転環境	通常運転	液体窒素の加圧減圧	機械強度	0.2MPa-1MPa : 30年間
		通電	電流	負荷率、冷却起因歪・曲歪下通電
	事故	過電流	電流	63kA, 0.6s、数回/年
	保守	熱サイクル	電流	室温-液体窒素温度: 数回/年

湿度劣化（線材保管環境耐性）

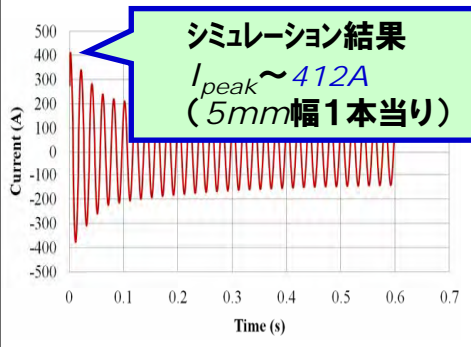
対象工程	想定環境条件
工場での線材保管	常温常圧-1年間 (最大40°C-100%)



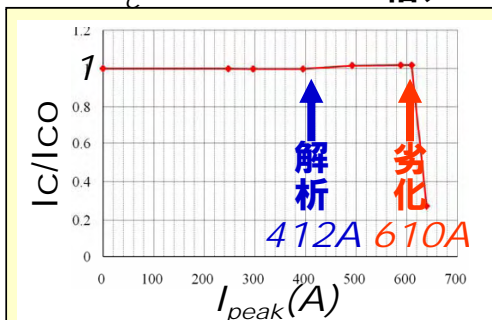
過電流耐性



高電圧型ケーブル過電流条件
63 kArms, 0.6s

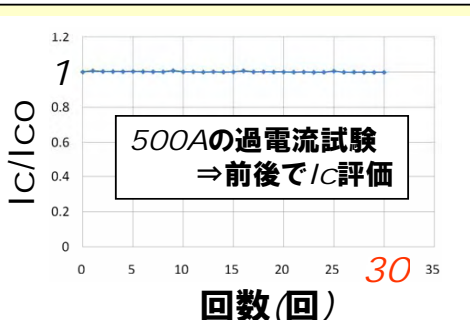


$I_c = 160A @ 5mm$ 幅、Cuメッキ



I_{peak} 値 VS 特性劣化

短絡電流に対する裕度約1.5倍



過電回数 VS 特性劣化

年1回-30年の耐性確認

275 kV高電圧ケーブル用線材の耐久性試験条件

大項目	処理、操作	試験方法	判定方法
湿度	湿度劣化試験	40℃-RH100 %相当の加湿環境下において、150℃-10時間の熱処理を行った前後の I_c を測定	試験後の I_c 低下5%以下
加熱	半田温度加熱試験	大気中、230℃-20分間加熱した前後の I_c を測定	試験後の I_c 低下5%以下
歪み	限界歪確認試験	20mmφに曲げ履歴を加えた後、平坦形状にて I_c 測定し、 I_c 低下率を評価するとともに可逆限界値を測定	20mmφでの I_c 低下率が5%以内でかつ可逆であること
電流	過電流試験	室温-液体窒素のサイクル3回で I_c 測定	1~3回目で変化ないこと。 I_c 低下が5%以内
歪み	繰返し熱サイクル試験	想定最大過電流値412 A-0.6sec (63kV-0.6 sに対応する1本あたりの電流値) から数A毎に電流を増加させ、 I_c が5%以上低下する電流値を計測	想定過電流値に対する裕度が1.2倍以上あること

中間目標達成

世界初の系統的研究!

詳細成果

②磁場中高 I_c 線材作製技術

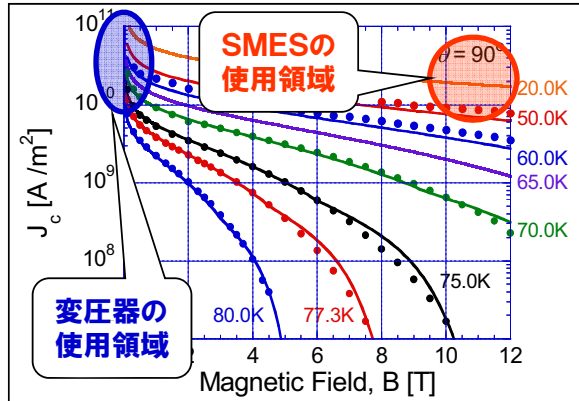
<概要>

「SMES」や「超電導変圧器」で求められる磁場中での I_c 特性の向上を目指す。

<目標値>

	中間目標 (H22末)	最終目標 (H24末)
SMES	30A/cm-w @77K,3T-50m	50A/cm-w @77K,3T-200m
変圧器	300A/cm-w @65K,0.02T-50m	400A/cm-w @65K,0.1T-100m

*極低コスト系線材で実施



<アプローチ>

(a)人工ピン止め点導入関連技術開発

ISTEC、中部電力、昭和電線、JFCC、
九大、九工大、東北大、新潟大、上智大

(b)高不可逆磁場材料の開発

ISTEC、JFCC
阪大、理研、LANL、東工大、東大

PLD法 磁場中高 I_c 線材作製技術

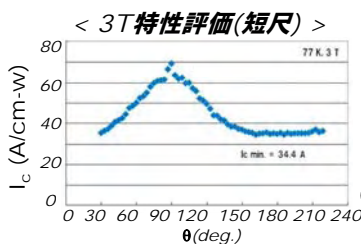
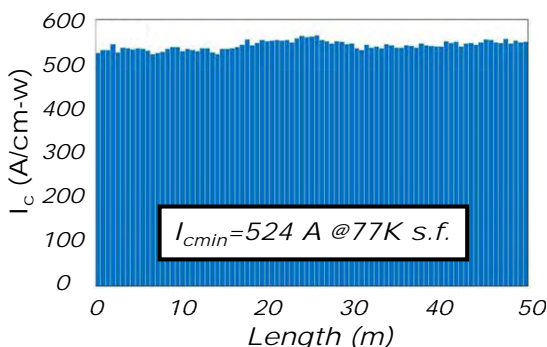
<アプローチ①>

高 J_c 厚膜化 $\Rightarrow I_c$ 向上 + ピン力向上

and/or

<アプローチ②>

人工ピン導入 \Rightarrow ピン力向上(強) + T_c 低下



$$\frac{I_{cmin}@77K\ 3T}{I_c@77K\ s.f.} = 0.062$$

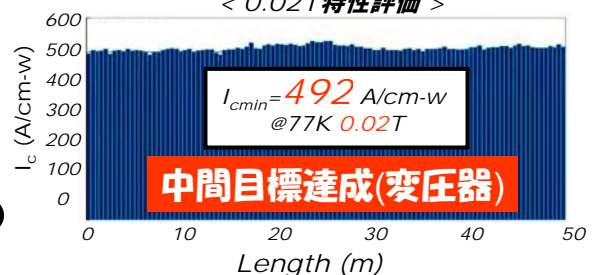
基板 : Hastelloy/GZO/IBAD-MgO/LMO/CeO₂
超電導層 : PLD-GdBCO (10m/h, 1.5 μ m, 2.9 μ 円/Am)

中間目標達成(SMES)

$$524\ A \times 0.062 = 33\ A/cm-w@3T$$

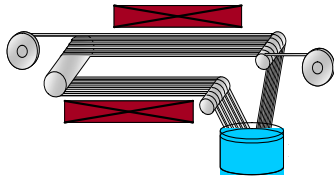
世界最高の長尺線材磁場特性!

< 0.02T 特性評価 >



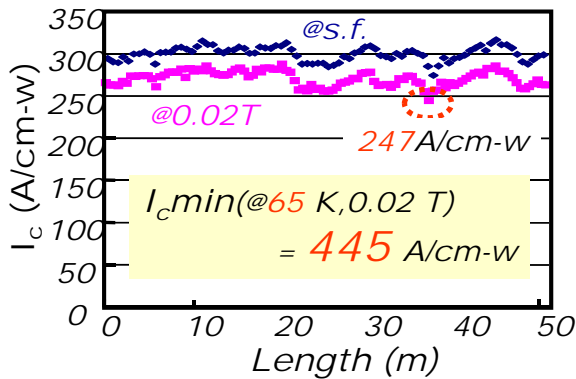
中間目標達成(変圧器)

TFA-MOD法 磁場中高 I_c 線材作製技術



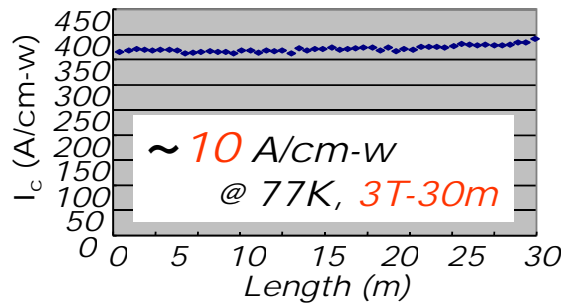
厚膜化 & 高 I_c 化

MOD-YBCO/CeO₂/LMO/IBAD-MgO

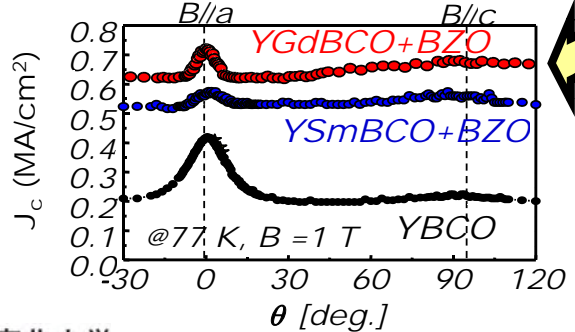


中間目標仕様(変圧器)達成

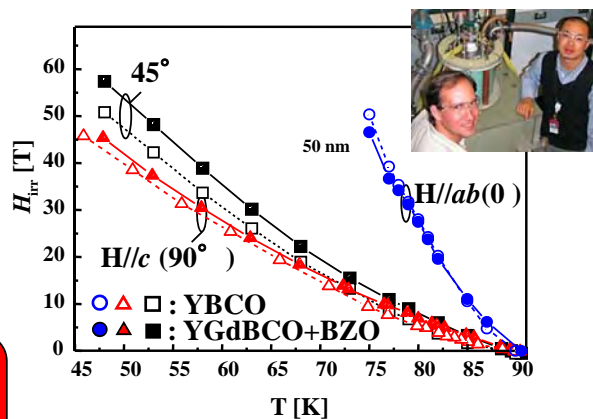
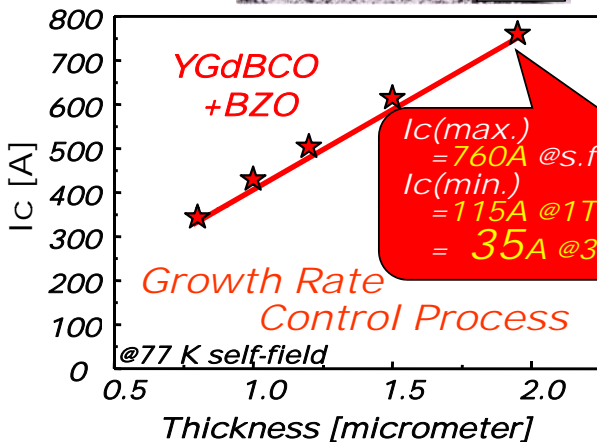
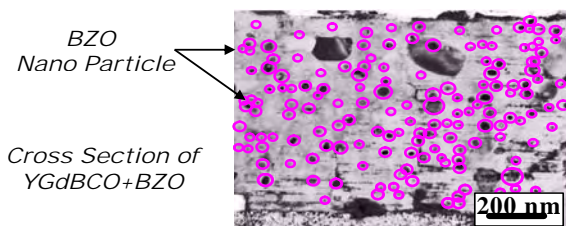
高 I_c 化による3T磁場中特性向上



人工ピン導入技術開発



TFA-MOD法 磁場中高 I_c 線材作製技術



長尺化への展開
 YGdBCO+1wt%BZO/IBAD-MgO
 12⇒27 m長(1.0 μm厚) New
 $I_c(77K, 3T) = 14 \text{ A/cm-w}$

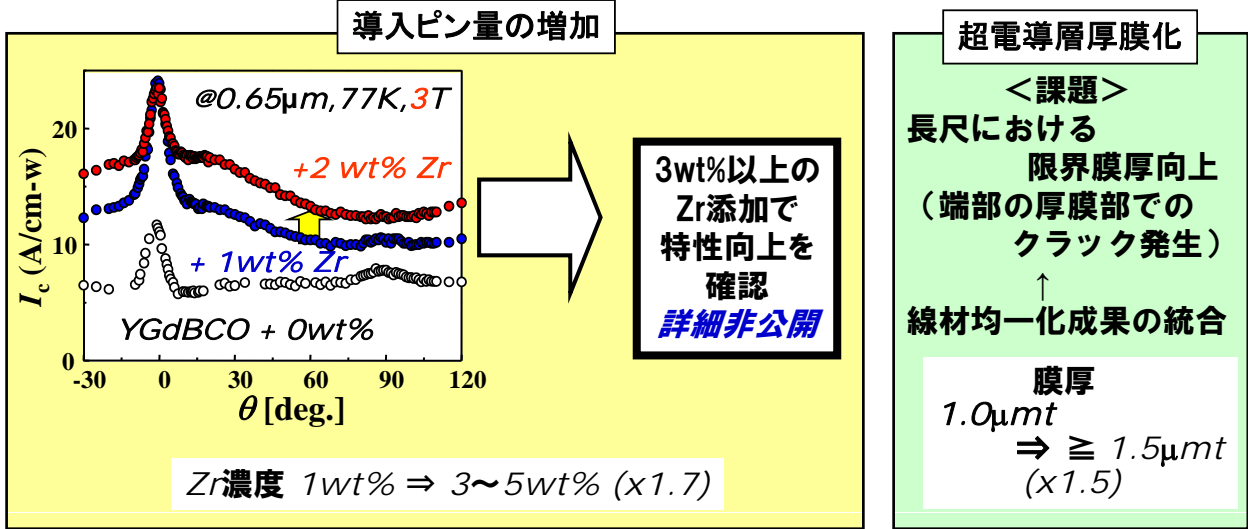
MOD法における世界最高値!



⇒今後の方針

TFA-MOD法 磁場中高 I_c 線材作製技術 今後の方針

長尺線材における磁場中 (3T) I_c 特性の向上
(14 \Rightarrow 30 A/cm-w)



年度末までに中間目標達成の見込み

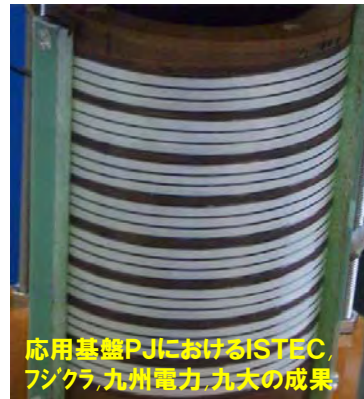
詳細成果

③低損失線材作製技術

<概要>
「超電導ケーブル」や「超電導変圧器」で求められる**交流損失低減**を線材レベルで達成する技術を開発する。

<目標値>		
	中間目標 (H22末)	最終目標 (H24末)
ケーブル	2mm幅-300A/cm-w -50m	2mm幅-500A/cm-w -200m
変圧器	5mm幅5分割-50m 分割無比交流損失1/5	5mm幅10分割-100m 分割無比交流損失1/10

*極低コスト系線材で実施



<アプローチ>

(a) 均一線材作製技術開発
ISTEC、住友電工、JFCC
九大、京大

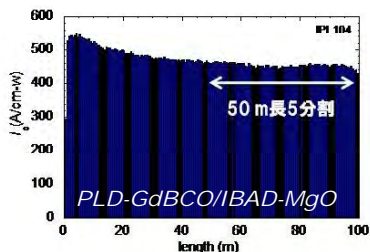
(b) 細線加工技術開発
ISTEC、住友電工、JFCC
九大、鹿大、産総研

PLD法 低交流損失超電導線材プロセス開発

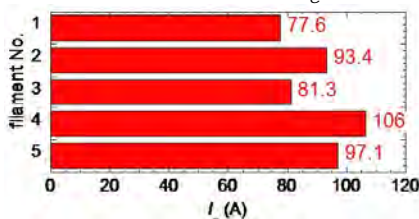
＜アプローチ：特性均一線材＞
均一基板、安定成膜条件等

＜アプローチ：線材加工技術＞
加工ダメージ抑制、フィラメント間絶縁性確保等

2mm幅切断加工

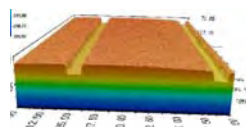


50m-2mm幅線材のIc評価



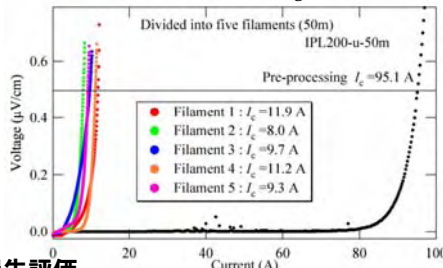
中間目標(ケーブル)達成

5mm幅5分割スクライピング加工

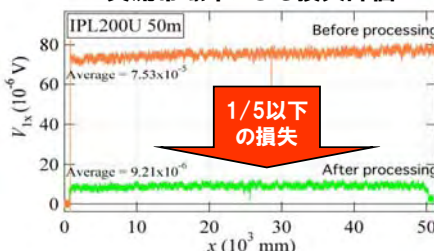


改良型レーザースクライプ加工による溝の三次元観察像

スクライピング加工前後のIc評価(50m)



交流帯磁率による損失評価

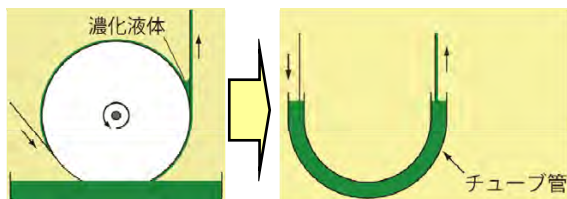


コイル状での長尺評価による交流損失



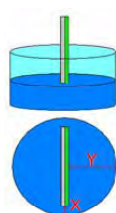
TFA-MOD法 低交流損失超電導線材プロセス開発

＜長手方向の均一性向上技術開発＞

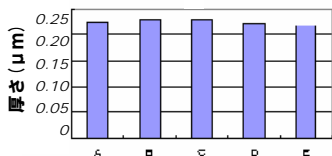


濃化液体付着部の焼損
⇒チューブ方式で解消

＜幅方向の均一性向上技術開発＞



塗布条件による膜厚の均一化



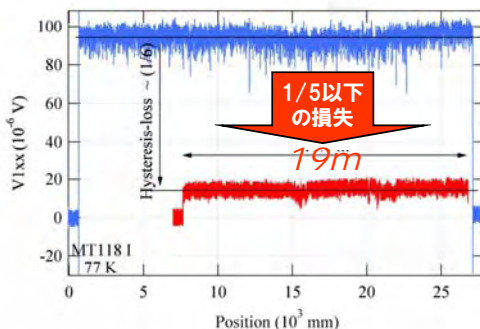
50m-2mm幅線材のIc評価



中間目標(ケーブル)達成

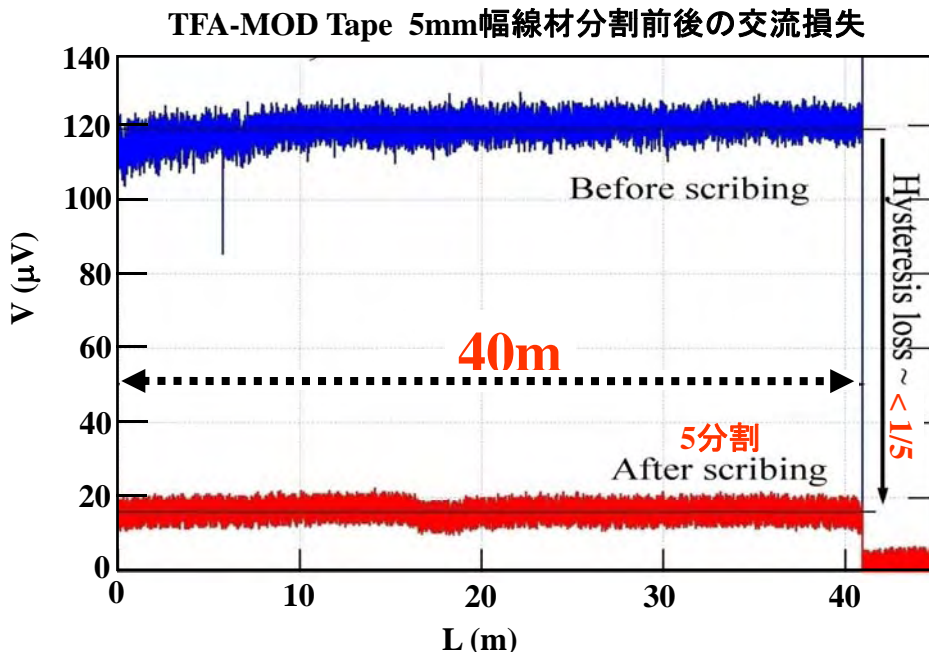
5mm幅5分割スクライピング加工線材評価

交流帯磁率による損失評価



コイル状での長尺評価による交流損失

TFA-MOD法 低交流損失超電導線材7'ロイス開発



New

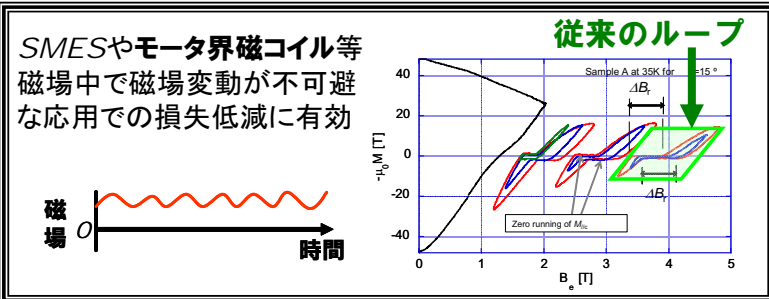
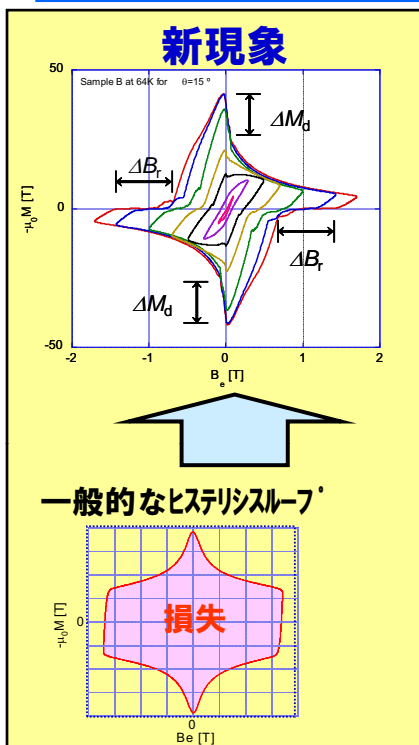
40m-損失 1/5 への見通し



コイル状での長尺評価による交流損失



Y系超電導線材における新現象発見（低損失）



<線材への必要条件>
高配向・高 J_c ($\Delta\phi < 3^\circ$ & $J_c > 3MA/cm^2$)

<使用環境(顕著な出現)条件>
低温、高磁場、磁場印可角度(低角度)

Y系超電導線材特有
⇒自動的な低損失が期待可

Y系線材の本質的な性質

詳細成果

④ 高強度・高 J_e 線材製作技術

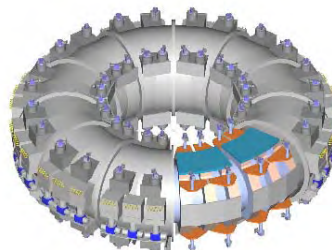
<概要>

「ケーブル導体作製工程&冷却時熱収縮起因応力」更には、「SMES等の高磁場応用時フープ力」に耐えるために必要な強度を有した線材作製技術と共にコンパクト機器を目指した高 J_e 線材の作製技術を開発する。

<目標値>

	中間目標 (H22末)	最終目標 (H24末)
SMES	300A/cm-w-1GPa -50m	500A/cm-w-1GPa -200m
ケーブル	$J_e=30\text{kA/cm}^2-50\text{m}$	$J_e=50\text{kA/cm}^2-200\text{m}$

*極低コスト系線材で実施



<アプローチ>

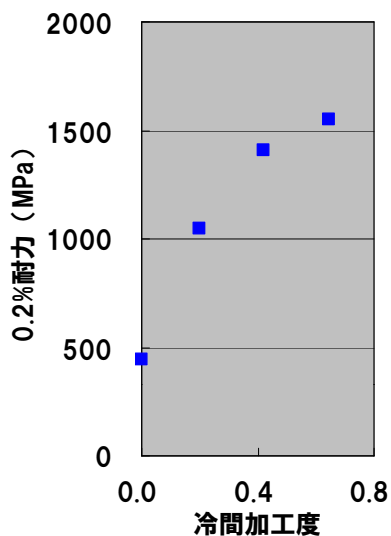
(a) 高強度金属基板対応線材作製技術開発

ISTEC、古河電工、JFCC、九大、早大

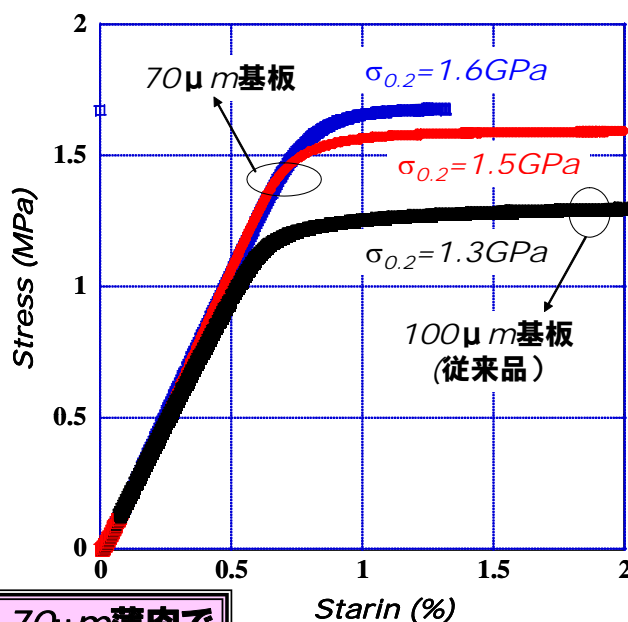
(b) 高臨界電流(I_c)化技術開発

ISTEC、JFCC、九大

薄肉高強度基板作製技術



冷間加工度と耐力との関係



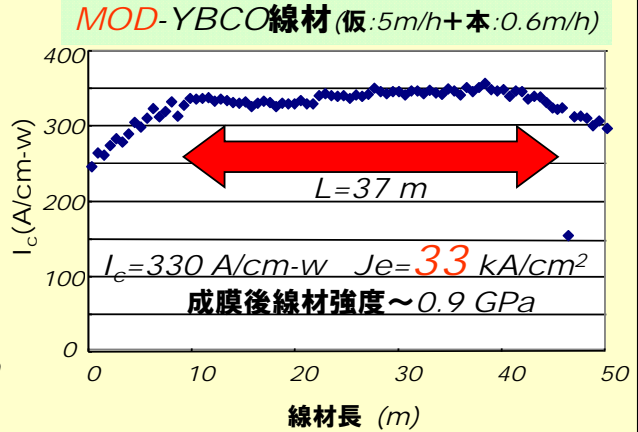
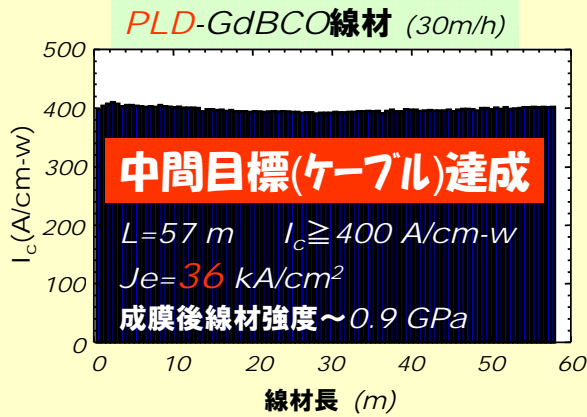
70μm薄肉で
高強度実現

中間層/超電導層成膜試験へ⇒

薄肉高強度基板線材作製技術

強加工 70~80 μ m Hastelloy 基板 \Rightarrow 基板強度: $\sigma_{0.2} = 1.6$ GPa

薄肉金属基板対応: 適正温度制御、張力制御 等

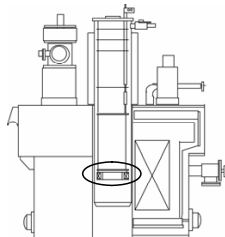
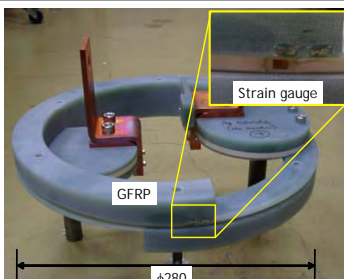


<今後の方針> ■MOD: 高速化技術(極低コスト技術導入), 長尺化
 ■線材強度: 低温評価

高強度線材評価

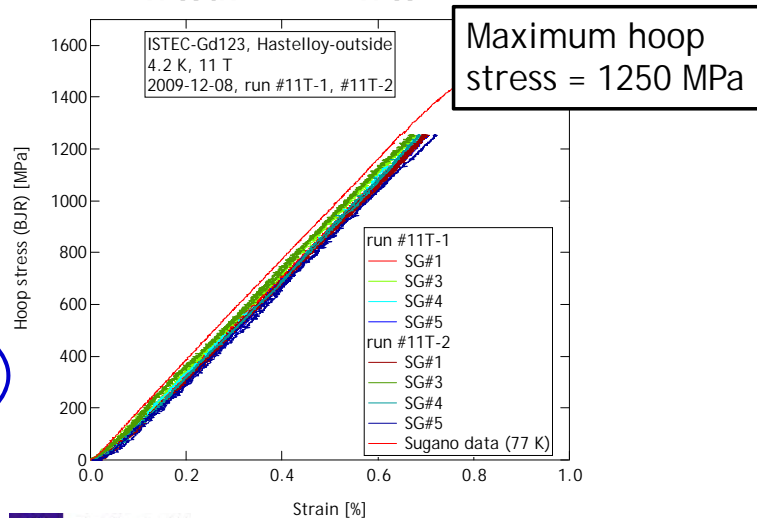
大口徑超伝導マグネットを用いたフープ力試験

Hoop stress = $B \cdot J \cdot R$ [MPa]
 B: magnetic field [T] R: coil radius [m]
 J: current density [A/m²]



SMESへの
適用性確認

基板: Hastelloy (100 μ m)-IBAD-MgO
 超電導層: PLD-GdBCO ($I_c \sim 200$ A)
 安定化層: Ag (10 μ m)
 線材幅: 5mm 線材長: 5m



詳細成果

⑤ 低コスト・歩留向上技術

<概要>

全ての機器に求められる要素として、安定製造とともに、より低コストで提供できる線材開発を目指す。具体的には、「**実用化技術開発**」時及び「**導入・普及**」時に求められるコスト仕様である**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**を開発する。

<目標値>

中間目標 (H22末)	最終目標 (H24末)
・技術コスト 3円/Am の実証 (50m)	・研究項目(2)~(4)中間目標技術の安定製造技術* ・技術コスト 3円/Am未満の実証**

(内部目標)*長さに関しては更なる長尺(例:200m以上) **1円/Am台

<アプローチ>

(b) 低コスト対応高速・高Ic化技術開発

ISTEC、フジクラ、JFCC、九大

(c) 接続・補修技術開発

ISTEC、JFCC、九大、名大

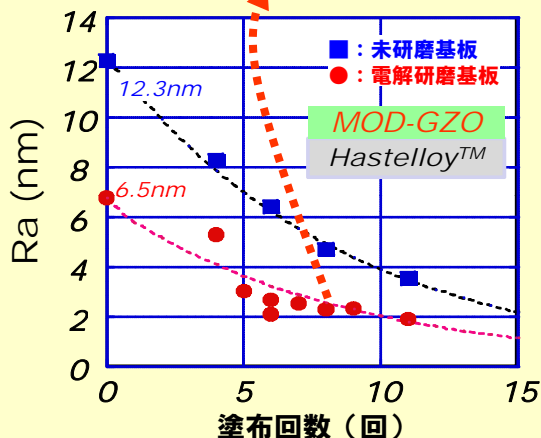
(a) 実用化技術開発用線材安定製造技術開発 (H23~H24)

ISTEC、フジクラ、昭和電線、住友電工、古河電工、JFCC 他

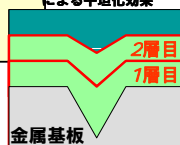
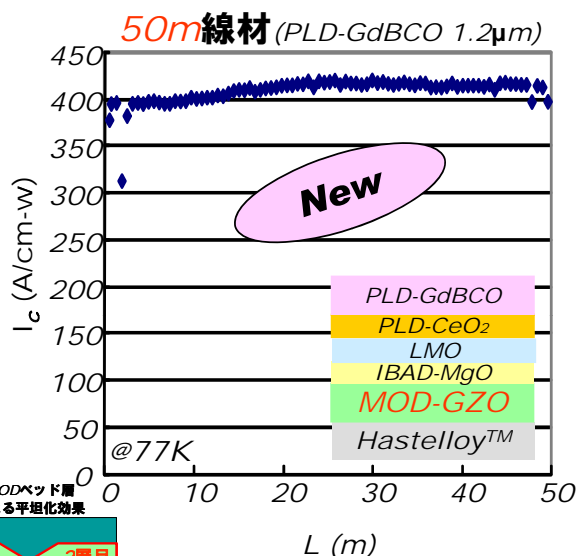
中間層低コストプロセス開発

MODベッド(平坦化)層の開発

$I_c=446 \text{ A/cm-w (1.8}\mu\text{m)}$
YBCO(MOD)/CeO₂/LMO/
MgO(IBAD)/GZO(MOD)/Hastelloy



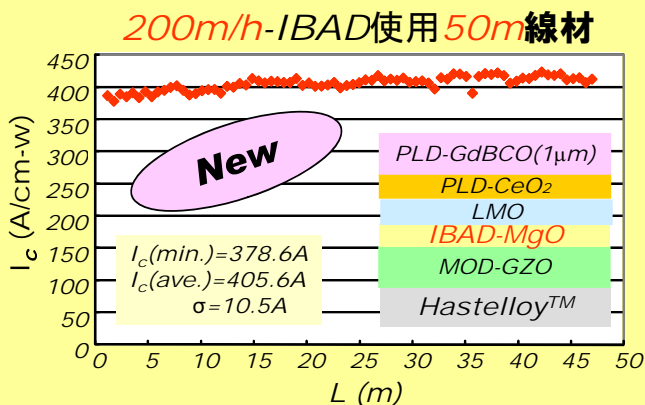
長尺化



中間層低コストプロセス開発

大型IBAD装置による高速化プロセス
(イオン 6x22cm²⇒6x66cm²)

製造速度=200m/h 結晶粒配向度 $\Delta\phi < 4^\circ$



中間層における3円/Amの必要条件例

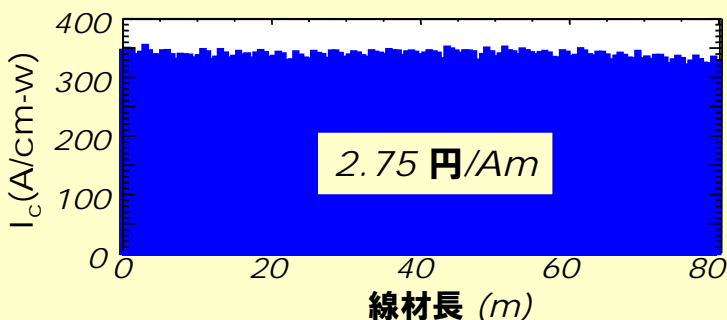
層	材料・手法	中間目標 (例)
キャップ層	PLD-CeO ₂	30m/h
バッファ層	Sputter-LMO	50m/h
IBAD	IBAD-MgO	120m/h
ベッド層	Sputter: MOD-GZO	40:10m/h
研磨ハステロイ	機械 or 電解研磨	60円/m

全層の必要条件を実証
⇒ And条件での実証へ

PLD法 超電導層低コストプロセス開発

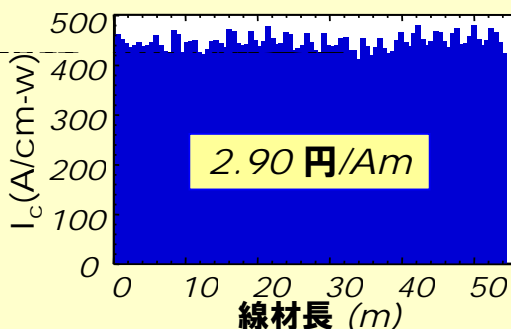
高速条件

基板: IBAD-MgO
原料: GdBCO
速度: 30m/h (60m/hx2)
膜厚: 1.0μm
最小I_c: 339 A/cm幅



高I_c条件

基板: IBAD-MgO
原料: GdBCO
速度: 15m/h (45m/hx3)
膜厚: 2.2μm
最小I_c: 435 A/cm幅

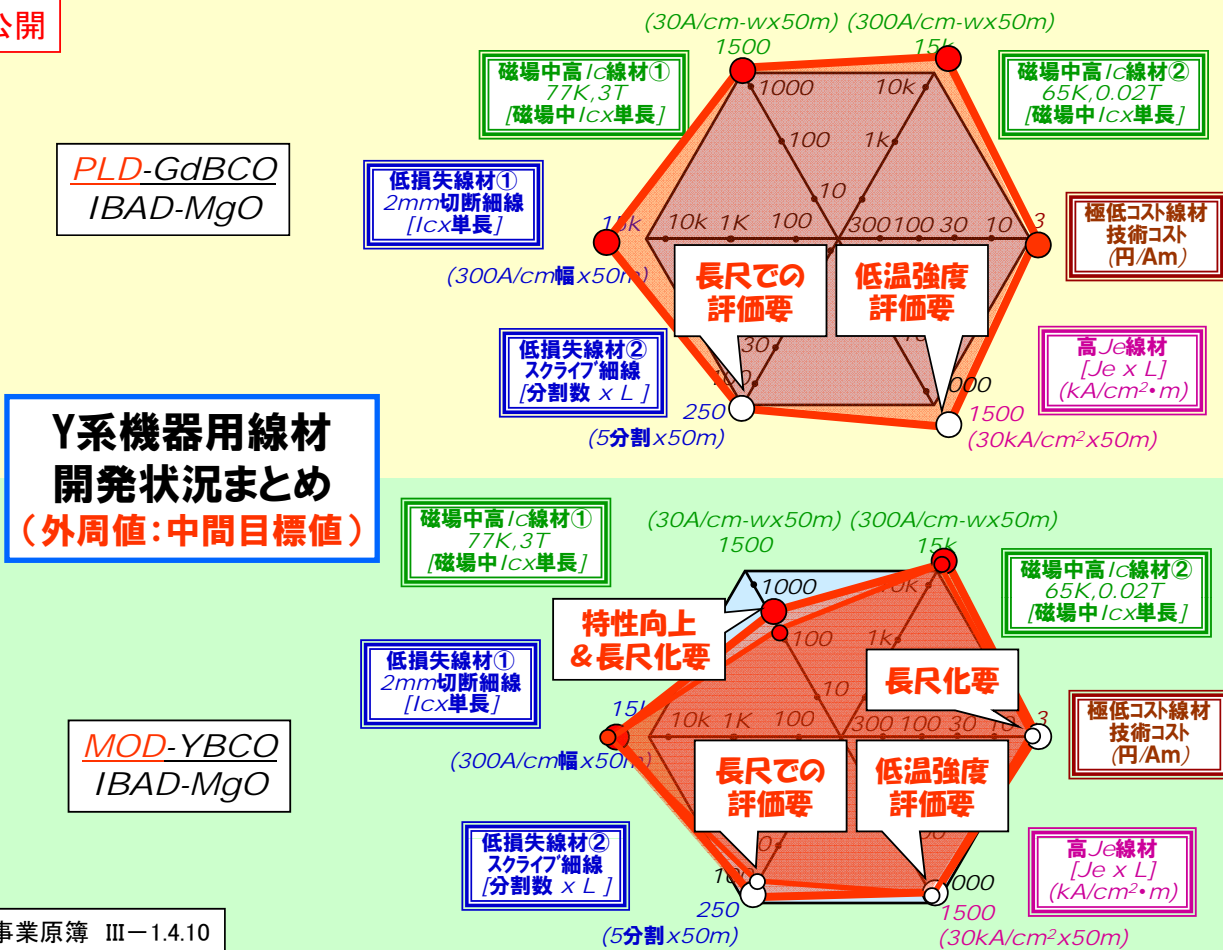
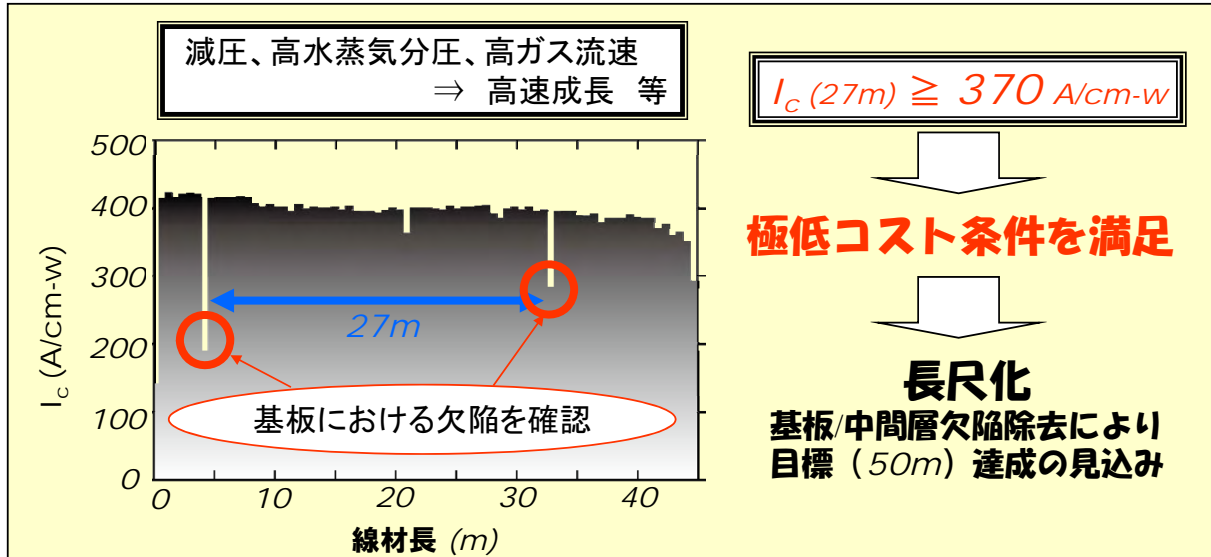


中間目標
技術コスト
3円/Am実証
50m

中間目標
達成

TFA-MOD法 超電導層低コストプロセス開発

基板：IBAD-MgO(10mm幅) 原料：YBCO(Y, Ba-TFA, Cu-Oct) 膜厚：1.5 μ m
 焼成方法及び速度：RTR式5 m/h(仮焼) RTR式5m/h相当(本焼)



成果の意義（世界との比較等）

研究テーマ	世界動向	本プロジェクト成果と意義
①線材特性の把握	劣化挙動を 系統的に評価した例は無	必要な負荷に対する試験を実施 世界初の系統的成果⇒全機器へ適用
②磁場中高Ic線材作製技術	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	PLD 短尺I _c =56 A/cm-w@77 K,3 T 50 m I _c =33 A/cm-w@77 K,3 T MOD短尺I _c =35 A/cm-w@77 K,3 T 27 m I _c =14 A/cm-w@77 K,3 T 世界最高の磁場特性 ⇒多様な磁場応用(F-T等)の展開も可
③低損失線材作製技術	SuperPower(米国) : IBAD-MOCVD 短尺 4mm幅5分割—損失 1/5 長尺 報告なし	短尺 10 mm幅20分割—損失 1/20 7 m×10本コイル 5 mm幅5分割 損失 1/5 50m-5 mm幅5分割(PLD&MOD)の見通し 世界的に先行した技術
④高強度高Je線材作製技術	SuperPower(米国) : 50μm厚HfTi合金基板⇒800 MPa AMSC(米国) : クラッド結晶粒配向金属基板⇒426 MPa	70,80 μm Hastelloy 基板線材 I _{c,min} =400 A/cm-w-J _e >36 kA/cm ² - 50 m 900 MPa (Ag30μm想定) ⇒NMR等の高磁界マグネットに有用
⑤低コスト・歩留向上技術	SuperPower(米国) : IBAD-MOCVD 1065 m 長-I _c =282 A/cm-w@77K,s.f. AMSC(米国) : RABITS-TFA-MOD 500 m—I _c =250 A/cm-w@77K,s.f. 長さで先行	フジクラ : IBAD-PLD 504 m—I _c =350 A/cm-w@77K,s.f. 昭和電線 : IBAD-TFA-MOD 500 m—I _c =310 A/cm-w@77K,s.f. 特性で先行

最終目標達成への見通し

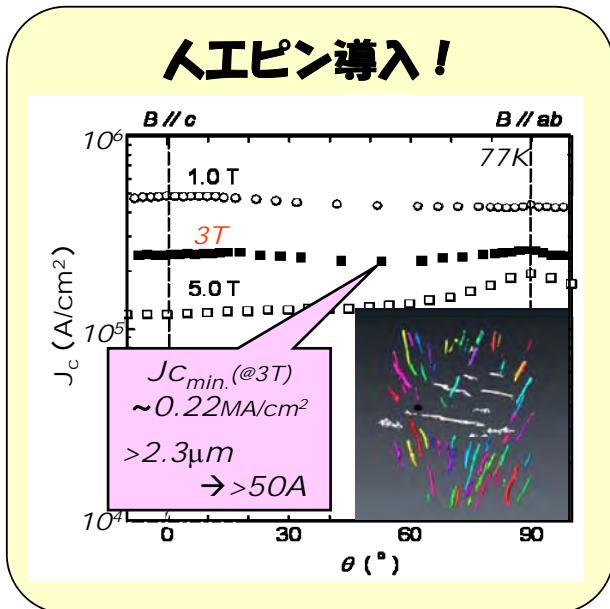
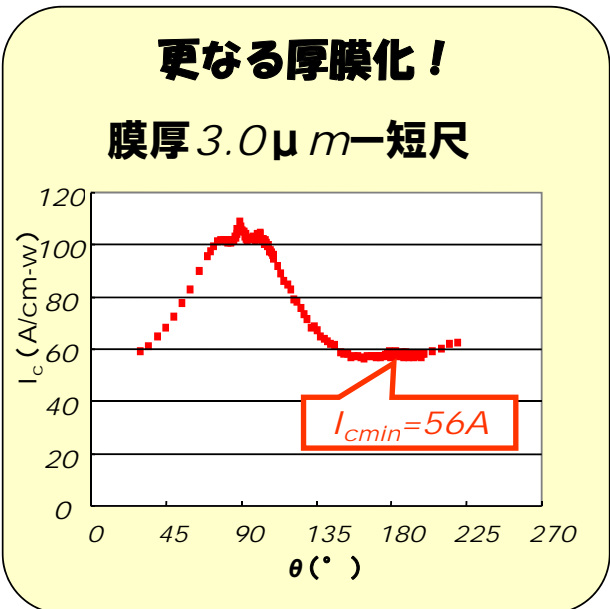
テーマ	中間目標(H22末)	H23	H24	最終目標(H24末)	達成の見通し
①線材特性の把握	■電力ケーブル耐久試験適正条件の決定	各種機器の特殊性明確化他		(■各種機器環境に対する耐久性を評価)	方法論が中間目標時期でほぼ確立。共通項目もあり、今回の成果が十分活用可。
②磁場中高Ic線材作製技術	① 30A/cm-w @77K,3T-50m ② 300A/cm-w @65K,0.02T-50m	50A/cm幅 @77K,3T 50m他		50A/cm-w @77K,3T-200m 400A/cm-w @65K,0.1T-100m	厚膜化技術+ナノピン止め点導入技術で臨む。 PLD線材では目標特性の実証済。
③低損失線材作製技術	① 2mm幅 -300A/cm-w-50m ② 5mm幅-5分割-50m -無分割に対し損失 1/5	10分割—10m 5分割—100m 他		2mm幅 500A/cm-w-200m 5mm幅 10分割-100m -無分割に対し損失 1/10	均一塗布法開発や均一成膜技術の最適化、極低コスト化の統合を図る。幅広基板利用も選択肢。幅広成膜技術は一部実績もあり。
④高強度高Je線材製作技術	① 300A/cm-w -1GPa-50m ② Je=30kA/cm ² -50m	Je=50kA/cm ² 50m 他		500A/cm-w -1GPa-200m Je=50kA/cm ² -200m	薄肉高強度金属基板の長尺化と極低コスト線材化技術との統合を図る。 高強度金属基板の基本技術は既に確立。
⑤低コスト・歩留向上技術	3円/Amの実証 @50m	内部目標 2円/Am実証 中間目標条件の技術移管他		技術コスト3円/Am未済実証 中間目標技術の安定製造技術	PLD線材 : マルチラン数の増加、搬送速度の向上、発振レーザーの増加などで臨む。 MOD線材 : 一回塗布厚増加の原料開発や減圧高速反応制御などで臨む。 PLD線材では効果を確認済。

PLD線材—磁場中 I_c 特性向上（最終目標に向けて）

<アプローチ①>
高 J_c 厚膜化 $\Rightarrow I_c$ 向上 + ビンカ向上

and/or

<アプローチ②>
人工ピン導入 \Rightarrow ビンカ向上(強) + T_c 低下



特許出願状況

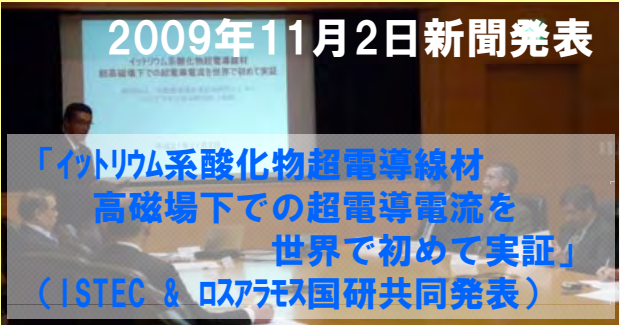
線材開発に関わる特許	国内出願: 16件
	海外出願: 1件

テーマ	代表的特許
②磁場中高 I_c 線材 作製技術	■等方性人工ピン止め点構造(ISTEC、九州大学)
③低損失 線材作製技術	■ダメージ抑制スクライビング溝加工技術(ISTEC、フジクラ、昭和電線) ■高結晶性超電導膜の低ヒステリシス損失新現象(九州大学、ISTEC)
④高強度高 J_e 線材製作技術	■線材の機械的強度を向上させる手法、構造(住友電工、ISTEC)
⑤低コスト・ 歩留向上技術	■MOD法によるベッド層形成手法及びその線材(ISTEC) \Rightarrow 海外出願済 ■中間層において結晶粒配向度を維持しつつ層数を減ずる手法(ISTEC、フジクラ、古河電工、東芝)

成果の普及

<学会・論文>	国内学会（低温工学等）	97件	学術論文（Physica-C、JJAP、低温工学等）	59件
	国際会議（ISS、ASC等）	78件		

<新聞>



2009年11月2日新聞発表

「イットリウム系酸化物超電導線材
高磁場下での超電導電流を
世界で初めて実証」
(ISTEC & ロスアラモス国研共同発表)

平成21年11月3日
日経新聞（Web）
日経産業新聞
日刊工業新聞
電気新聞

2010年2月12日 イットリウム系低磁性配向基板線材で
世界初の高速化、高性能化に成功

2010年3月30日 イットリウム系超電導線材 開発用設備を増強

<受賞>

- 日本金属学会 第18回奨励賞[材料プロセッシング部門] 平成20年9月23日
- 低温工学協会 奨励賞(平成21年5月14日)

実用化のシナリオ及び波及効果

機関名	実用化への考え方
ISTEC	<ul style="list-style-type: none"> ●導入・普及時に必要な仕様線材作製技術を線材メーカーへ移管 ●エンドユーザーを含めた委員会等+学会等を通じた普及啓蒙活動 ⇒超電導市場の開拓、拡大
フジクラ	<ul style="list-style-type: none"> ●現行電力機器の実証を経て事業化へ ●既に小規模ながらY系超電導線材の販売を開始(Sイノベ等) ⇒Y系超電導機器の早期実現により事業を確立
昭和電線	<ul style="list-style-type: none"> ●安価なMOD法による線材供給会社として事業化を推進 ●電流リード(Bi系で実績)を足がかりにビジネス展開 ⇒電力機器+モータ等で新市場を創出
住友電工	<ul style="list-style-type: none"> ●Y系超電導線材の低コスト量産技術を確立して市場へ販売 ●超電導ケーブル、船用モータの実績を基軸に多岐の応用へ展開 ⇒多様なニーズに応える線材のリーディングカンパニー
古河電工	<ul style="list-style-type: none"> ●本PJ終了後数年後から量産体制を確立 ●実績のある金属系超電導線材と併せて総合超電導線材メーカーを目指す ⇒総合線材メーカーとして需要の拡大を目指す

実用化のシナリオ及び波及効果

'03~'07	'08~'12	'20~	
応用基盤プロジェクト	Y系電力機器プロ	電力機器実証 (線材: ~数百km/年)	事業化ステージ (線材: 数千km/年)
<div style="background-color: #0056b3; color: white; padding: 5px; text-align: center;"> Y系超電導線材 プロセス開発 </div> <p style="font-size: small;">500m-300A-5m/h 8~12円/Am</p> <div style="background-color: #0056b3; color: white; padding: 5px; text-align: center; margin-top: 10px;"> 機器要素 技術開発 </div> <p style="font-size: x-small;">ケーブル, 変圧器 モータ, 限流器等</p>	<div style="background-color: #0056b3; color: white; padding: 5px; text-align: center;"> 電力機器開発 </div> <p style="font-size: small;">SMES, ケーブル, 変圧器</p> <div style="text-align: center;"> </div> <div style="background-color: #0056b3; color: white; padding: 5px; text-align: center;"> 線材提供 </div> <div style="background-color: #0056b3; color: white; padding: 5px; text-align: center; margin-top: 10px;"> 機器適用線材 技術開発 </div> <p style="font-size: x-small;">低コスト, 安定化, 高歩留</p>	<div style="background-color: #0056b3; color: white; padding: 5px; text-align: center;"> 電力機器実系統 への試験導入 システム 信頼性検証 </div> <div style="background-color: #0056b3; color: white; padding: 5px; text-align: center; margin-top: 10px;"> 量産化+事業化 </div>	<div style="text-align: center;"> </div> <div style="background-color: #008000; color: white; padding: 10px; text-align: center; margin-top: 10px;"> 機器 導入・普及 </div> <p style="font-size: small;">潜在市場規模 >1.4兆円*</p> <p style="font-size: x-small;">*経産省による国家技術戦略 マップ2008 “超電導技術導入 シナリオ” から</p>
SMESプロジェクト		<div style="background-color: #008000; color: white; padding: 5px; text-align: center;"> 初期導入ステージ (線材: 数十~数百km/年) </div>	<div style="background-color: #008000; color: white; padding: 5px; text-align: center;"> 電流リット </div> <div style="background-color: #008000; color: white; padding: 5px; text-align: center; margin-top: 5px;"> 船用、産業用モータ </div>
<div style="background-color: #0056b3; color: white; padding: 5px; text-align: center;"> 金属系 SMES開発 </div> <p style="font-size: small;">20MJ@4.2K,4T</p>	<div style="background-color: #0056b3; color: white; padding: 5px; text-align: center;"> 限流器 </div>	<div style="background-color: #0056b3; color: white; padding: 5px; text-align: center;"> NMR </div>	<div style="text-align: center;"> </div>

「超電導電力機器の適用技術標準化」(中間評価) (2008年度~2012年度 5年間) プロジェクトの詳細説明(公開)

参画機関:ISTEC、住友電工、フジクラ、中部電力、
昭和電線、古河電工、九州大学、東北大学

ISTEC 標準部 田中 晴三 (2008年4月~2010年3月)
三村 正直 (2010年4月~)

2010年9月1日

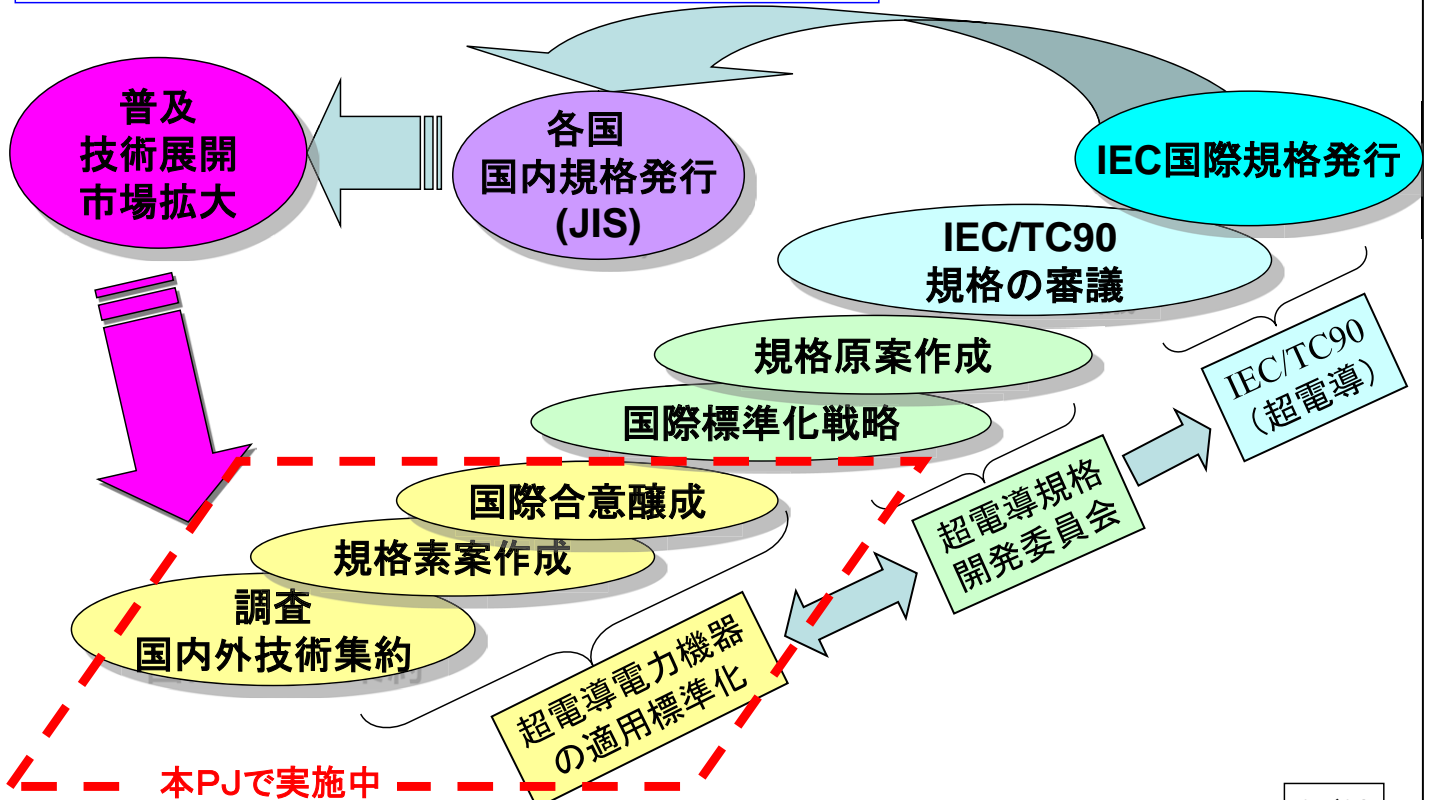
複製を禁ず

1/24

II 研究開発マネジメントについて IV 実用化の見通し

公開

超電導電力機器関連の国際標準化 (国内技術集約~国際規格発行~普及まで)



超電導標準化の現状と予定

- 超電導関連用語
1件 (IEC60050-815:2000年発行)
- 超電導線材等(低温超電導線材が主)の試験方法の規格を発行
13件 (IEC61788-1~IEC61788-13)
- 電流リードの試験方法
1件 (IEC-61788-14:2010年発行)

- 超電導薄膜の試験方法の規格化が進行中
3件
- Nb3Sn線材とBi系線材の試験方法の規格が進行中
2件

(本PJで実施中)

- 超電導線材(HTCとLTC)の一般要求事項(通則)の標準化を検討
Y系超電導線材を含めた試験方法の標準化を検討
- 超電導電力ケーブル(HTCのみ)等の一般要求事項(通則)の標準化を検討
- SMES、超電導変圧器等の標準化を検討

超電導機器の国際規格化の対象

標準化対象製品	海外の開発の現状	国内の開発の現状	標準化ニーズ(緊急性)	本プロジェクトでの対象	国際規格の進捗状況	関連機関
超電導線	◎	◎	◎	○	●○	IEC/TC90 (LTC線試験方法で発行)
超電導電力ケーブル	◎	◎	◎	○	○	CIGRE TF→CIGRE WG →IEC/TC90+IEC/TC20
SMES	○	◎	○	○	△	IEC/TC90+IEC/TC21, TC22
超電導変圧器	○	◎	○	○	△	IEC/TC90+IEC/TC14
超電導限流器	◎	△	△	△		IEC/TC90+IEC/TC17
超電導回転機	◎	△	△	△		IEC/TC90+IEC/TC2
電流リード	○	○	○		●	IEC/TC90IEC/TC9 (IEC61788-14で発行)
超電導センサー	◎	◎	○		○	IEC/TC90+ISO/IEC/JTC 1, IEC/TC47
	◎ ↑ ○ 活発 △	◎ ↑ ○ 活発 △	◎ ↑ ○ 高い △	○: 標準化 △: 調査	●: 発行 ○: 素案 △: 骨子	

超電導電力機器の適用標準化における体制

	プレーヤー	会議
全体	ISTEC、中部電力、九州電力、古河電工、住友電工、フジクラ、昭和電線ほか	超電導電力機器技術調査委員会 (松下委員長)
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、古河電工。九州大及び東北大と共同実施	超電導線小委員会 (中尾委員長) ・超電導線材
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	超電導電力ケーブル小委員会 (増田委員長) ・超電導電力ケーブル(ACとDC)
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	超電導電力機器小委員会 (新富委員長) ・SMES、変圧器、限流器、回転機
関連TCほか	IEC/TC90(超電導)、 IEC/TC20(電力ケーブル)、 CIGRE(国際大電力システム会議)	IEC/TC90アドホックグループ3、 IEC/TC90-20国内リエゾンアドホック会議→「超電導規格開発委員会」 CIGRE SC B1 WG31

超電導電力機器の適用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	H24素案 規制緩和の検討

超電導電力機器の適用標準化における目標と達成状況

項目	目標 (中間-H22年度)	成果	達成度	今後の課題
①超電導線材関連技術標準化	超電導線並びにその試験方法の規格素案を作成 IEC国際標準化合意の醸成	国内技術調査結果をベース「超電導線に対する一般要求事項」及び「超電導線の試験方法」の規格素案を作成した。 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。	○	国際合意形成のための国際間の調整が必要
②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 国際大電力システム会議CIGRE、他のIEC/専門委員会TCなどとの国際合意の醸成	国内技術調査をベースに「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。 パネル討論会等において各国と意見交換をするとともに、CIGRE会議やTC20と連携して国際標準化合意の醸成に努めた。	○	国際合意の醸成のための活動が必要
③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	国内外の技術動向並びに標準化ニーズ調査を実施し、これを基に規格骨子案を作成した。	○	試験方法の標準化のために更に技術調査が必要

事業原簿 II-1.29、III-1.5.1

7/24

①超電導線関連技術標準化の成果

○規格素案作成

- ・超電導電力機器側からの要求事項を調査
- ・Y系超電導線材の開発動向を踏まえて、「超電導線に対する一般要求(通則)」の素案を作成
- ・Y系超電導線材を含めた試験方法の技術調査を実施
- ・上記結果をベースに「超電導線の試験方法」の素案を作成

○国際標準化合意醸成

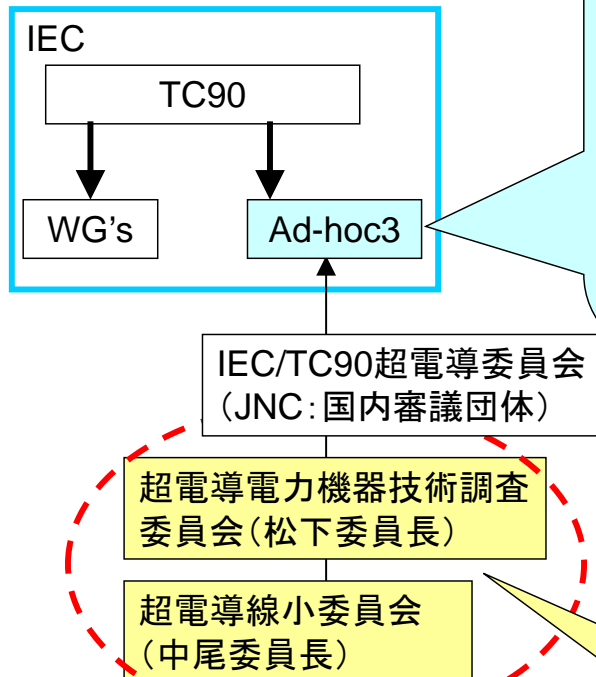
- ・第6回パネル討論会(ISS2008と併催)、第7回パネル討論会(EUCAS 2009と併催)及び第8回パネル討論会(ASC2010と併催)を開催し、日本(JNC)提案の「超電導線の国際標準化」の合意醸成に努めた。
- ・同討論会において、線の通則素案の適用範囲(スコープ)の再検討案が提起され、アドホックグループ3の活動に付された。

事業原簿 III-2.5.1

8/24

IEC/TC90アドホックグループ3

(活動組織)



JNCからの提案で2008年にTC90下部組織として ad-hoc3(準備委員会)設立

体制: IEC/TC90(超電導)を親委員会とする限定会議

Rapporteur: 長村光造(応用科学研究所、理事)

期間: 2009.1.20-2010.10.7

メンバー: 中国(3名)、日本(2名)、韓国(1名)、
ポーランド(1名)、米国(1名): 合計8名

目的: 超電導線の標準化を検討し、2010年10月の IEC/TC90シアトル会議で報告する。

サポート: 超電導電力機器技術調査委員会

- ・線材の通則素案の作成
- ・国際会議中のパネル 討論会開催

超電導線の通則素案の概要

名称	超電導線の一般要求事項(通則)
適用範囲	素線を対象とし、編素線、撚線及びケーブルを対象除外
引用規格	IEC61788/超電導基本特性試験方法
用語	IEC60050-815、ISO6892の適用
定義	超電導基本特性、線の構成、工業材料特性
出荷書類	表示(ラベルと製品技術情報)、技術報告書
附属書A(参考)	超電導線の一般的な特徴
附属書B(参考)	超電導に関連する特性
附属書C(参考)	超電導線の構成
附属書D(参考)	工業材料としての一般的な特性

②超電導電力ケーブル関連技術標準化の成果

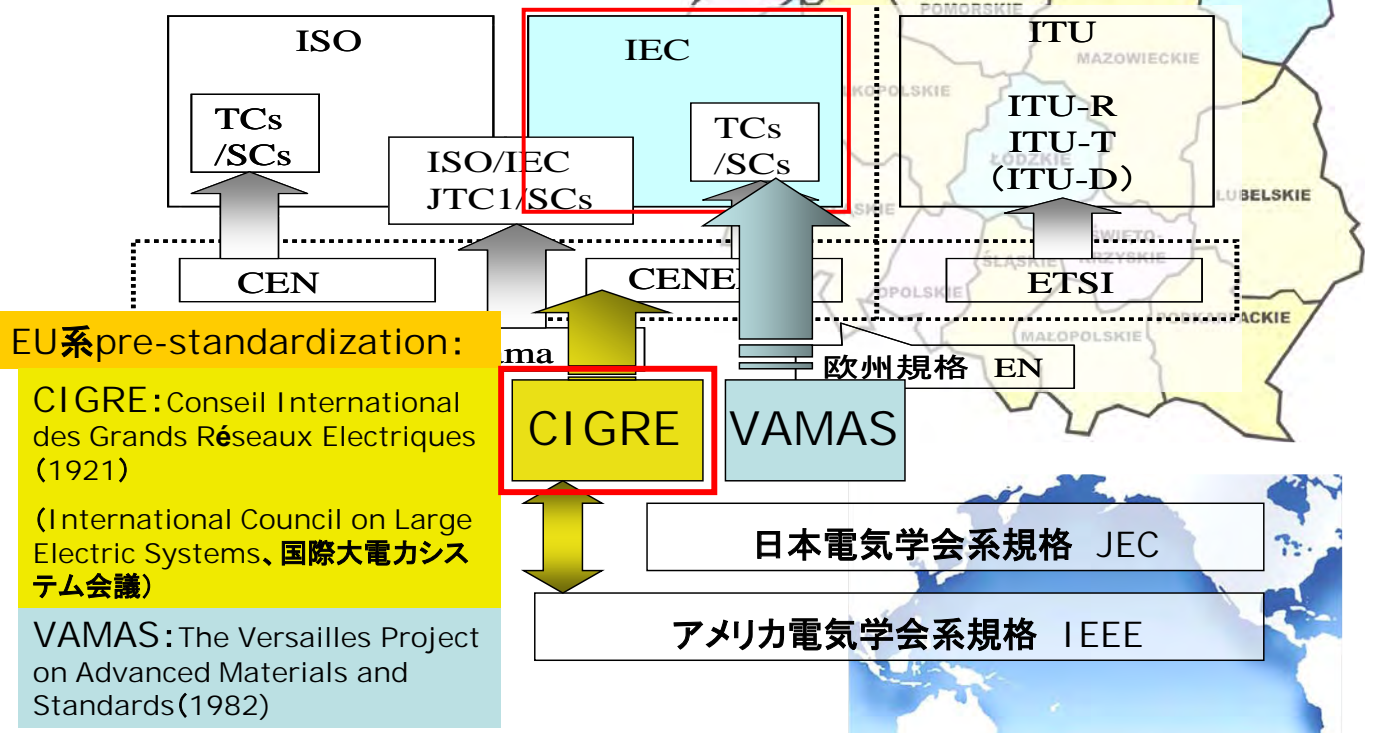
○規格素案作成

- ・国内外のプロジェクトの実態調査と試験項目等の検討
- ・環境安全面についての調査
- ・IEC規格、JEC規格、Super-ACE試案を参考にするとともに、現行の国内プロジェクトでの開発成果をベースとして、「超電導電力ケーブルシステム」の一般要求事項(通則)の素案を作成
- ・同様に、交流超電導電力ケーブルの試験方法の素案を作成

○他TC等との国際標準化合意醸成

- ・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
- ・同時に3年間のワーキンググループ(WG)設置が承認され、活動中
- ・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

地域標準化機関 —ヨーロッパが主導する規格—



国際大電力システム会議（CIGRE SC B1 WG）について

体制：CIGRE調査委員会（B1：絶縁ケーブル、委員長：F. Rüter）のもとに設置したタスクフォース(TF)の報告（2009.9）を受けて設立したワーキンググループ(WG)

コンビーナ：David Lindsay（米国、Southwire）

期間：2009.9－2012.8（3ヶ年）

参加希望国：カナダ、フランス、ドイツ、韓国、イタリア、オランダ、スペイン（初参加）、日本
アメリカの9か国

目的：超電導ケーブルの試験方法を検討する。

ガイドライン：

- ①電圧階級10-145kVのHTSケーブルを扱う、
- ②冷却システムは扱わない（温度、圧力及び冷却システム仕様は扱う、
- ③現行プロジェクトの詳細実績を調査、
- ④通常運転条件並びに短絡条件下でのケーブル、接続及び付属品を対象、
- ⑤すべての既存ケーブルシステム（単心、3心、3心撚りケーブル）、
- ⑥HTSケーブルシステムに適用される圧力パイプや圧力容器の設計及び運転に係わる試験項目、
- ⑦HTSケーブルシステムの推奨試験項目（形式試験/長期認定試験、工場試験、竣工試験）、
- ⑧電圧階級275kVまで視野に入れる。

サポート：

IEC/TC90－IEC/TC20国内リエゾンアドホック会議
（今年度より、超電導規格開発委員会として活動開始）

超電導電力ケーブルシステムの通則素案の概要

名称	超電導電力ケーブルシステムの般要求事項（通則）
適用範囲	電力システムに超電導電力ケーブルを適用するための超電導電力ケーブルシステムに対する一般要求事項について規定
引用規格	IEC61788や関連する国際規格のリスト
用語	IEC 60050-815、ISO6892、他
システム構成	電力ケーブル、中間接続部、終端部等付属品、冷媒循環装置
定義	超電導基本特性、線の構成、工業材料特性
性能	交流超電導電力ケーブルの性能、直流超電導電力ケーブルの性能、その他付属品の性能
試験	試験の種類（型式、受入、竣工）、試験項目（附属書C）、試験方法
表示	一般的共通事項、要素製品の表表記、要素製品の信頼性
附属書A（参考）	超電導電力ケーブルシステムの基本構成概念
附属書B（参考）	超電導電力ケーブルの構成概念
附属書C（参考）	交流超電導電力ケーブルシステムの試験項目
附属書D（参考）	直流超電導電力ケーブルシステムの試験項目

③超電導電力機器標準化の成果

○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
- ・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
- ・SMES及び超電導変圧器の標準化に係わる環境側面及び安全側面の調査を実施

○規格骨子案の作成

- ・SMES及び超電導変圧器の規格骨子案を作成

超電導電力機器標準化に係わる環境側面及び安全側面

○環境側面

- －ライフサイクルコストに基づき機器導入の判断を推奨する。
- －ライフサイクルコストは、企画計画コスト、製造コスト等初期コスト、ランニングコスト、廃棄コスト及び付加的要素コストの合計とする。
- －付加的要素コストには、CO₂排出量削減効果、省エネ効果等を含む。
- －電気電子機器に含まれる特定物質に係わる指令(RoHS指令等)に配慮する。

○安全側面

- －特定されるハザードとして、低温液体冷媒、気化冷媒ガス、低温露出部、漏れ磁束、クエンチ等蓄積エネルギー放出等JISZ8051に準拠する。
- －特に、凍傷、気化冷媒ガスに伴う酸素欠乏、漏れ磁束と5ガウスラインを明記し、これを遵守する。
- －導入地域固有の法規制(電気事業法、高圧ガス保安法等)に配慮する。

SMESの通則骨子の素案

1. 適用範囲
2. 引用規定
3. 用語
4. 一般要求事項
4. 1 使用条件、4. 2 定格、4. 3 性能、
4. 4 構成、4. 5 試験、4. 6 表示
5. 1 SMESシステム試験方法
5. 2 SMESデバイス試験方法
6. 付帯事項
6. 1 環境側面
6. 2 安全側面
附属書A (参考) 代表的SMESシステムの入出力と貯蔵容量
附属書B (参考) SMESの基本的要素の概念構成
附属書C (参考) SMESシステムの試験項目
附属書D (規定) SMESデバイスの試験項目
附属書E (参考) SMESの仕様事例

SMESのシステムと試験方法を融合し、一般要求事項に集約
環境側面(企画、設計、製造、設置、廃棄)及び安全側面(冷媒、発生ガス)を記載を検討

事業原簿 Ⅲ-2.5.38、Ⅲ-2.5.39

超電導変圧器の通則骨子の素案

1. 適用範囲
2. 引用規定
3. 用語
4. 一般要求事項
4. 1 使用状態、4. 2 定格、4. 3 構造
4. 4 裕度、4. 5 試験、4. 6 表示
5. 1 一般試験方法
5. 2 超電導変圧器固有の試験方法
6. 付帯事項
6. 1 環境側面、6. 2 安全側面
附属書A (規定) 箇条1から箇条6までの追加規定事項
附属書B (参考) 変圧器の照合並びに注文の際の指定事項
附属書C (参考) 超電導変圧器の開発試験
附属書D (参考) 単相1MVA変圧器開発仕様例 (Bi系)
附属書E (参考) 単相2 MVA変圧器仕様例 (Bi系)
附属書F (参考) 66kV/6.9kV-2MVA(20MVA)変圧器開発仕様例 (Y系)

現行変圧器試験方法と超電導変圧器試験方法とで構成
一般的試験方法は現行規格の引用記述とし、超電導変圧器固有の試験方法をnormative(規定)として詳述する方針

17/24

超電導電力機器の適用標準化 成果の意義

開発項目	開発成果	成果の意義
① 超電導線材関連技術標準化	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「超電導線の試験方法」の規格素案を作成した。 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。	日本発の規格素案でIEC/TC90のアドホックグループ3を牽引 パネル討論会等で日本提案をアピール
② 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。 パネル討論会等において各国と意見交換をするとともに、CIGRE会議やTC20と連携して国際標準化合意の醸成に努めた。	日本技術をベースに規格素案を作成 CIGRE会議のWGにて日本からの超電導電力ケーブル規格案が審議可能
③ 超電導電力機器関連技術標準化等	技術動向並びに標準化ニーズ調査を実施し、これを基に規格骨子案を作成した。	国内外の開発状況を踏まえて、世界に先駆けて規格骨子を作成

事業原簿 Ⅲ-1.5.1

18/24

超電導電力機器の適用標準化 成果の波及効果

<超電導電力機器の国際標準を提案・獲得することによるメリット>

○国際貢献

- ・超電導技術分野における日本のリーダーシップ発揮
- ・超電導機器のグローバルな普及に伴う国際貢献
(超電導機器は地球規模でCO₂削減及び省エネにとって不可欠でグローバルな展開が必須)

○経済効果

- ・市場導入の待機時間の短縮、市場の活性化
(超電導電力機器分野の2015年～2020年頃の世界市場規模-ストックベースは約2,200億円)
- ・産業・輸送機器、診断・医療機器への波及効果も期待
- ・日本の超電導産業界の国際競争力の強化

超電導電力機器の適用標準化の成果の普及と波及効果

#	Date	Site	Conference	Subjects
1	Oct. 25, 2005	Tsukuba, Japan	ISS2005	Activity of superconductivity standardization The necessity to promote Intern. Standard'tion
2	Aug. 30, 2006	Seattle, USA	ASC2006	Proposal of NWIP on current leads SC cables using HTS wires
3	Oct. 31, 2006	Nagoya, Japan	ISS2006	The necessity of promoting Intern. Standard'tion SC wires as the most promising The SC power
4	Aug. 28, 2007	Philadelphia, USA	MT-20	Advanced SC power The standardization
5	Nov. 6, 2007	Tsukuba, Japan	ISS2007	Build The standardization
6	Oct. 27, 2008	Tsukuba, Japan	ISS2008	internat including HTS ing power cable
7	Sep. 15, 2009	Dresden, Germany	EUCAS2009	Current R&D activity on superconducting power cables the Ad hoc group 3 of superconducting wires
8	Aug. 1, 2010	Seattle, USA	ASC2010	Discuss a draft report from ad-hoc group 3 of superconducting wires Necessity of international standardization for superconducting power devices

＜国際的なパネル討論会＞
標準化の日本提案
・超電導線
・超電導電力ケーブル
に関して国際合意の醸成

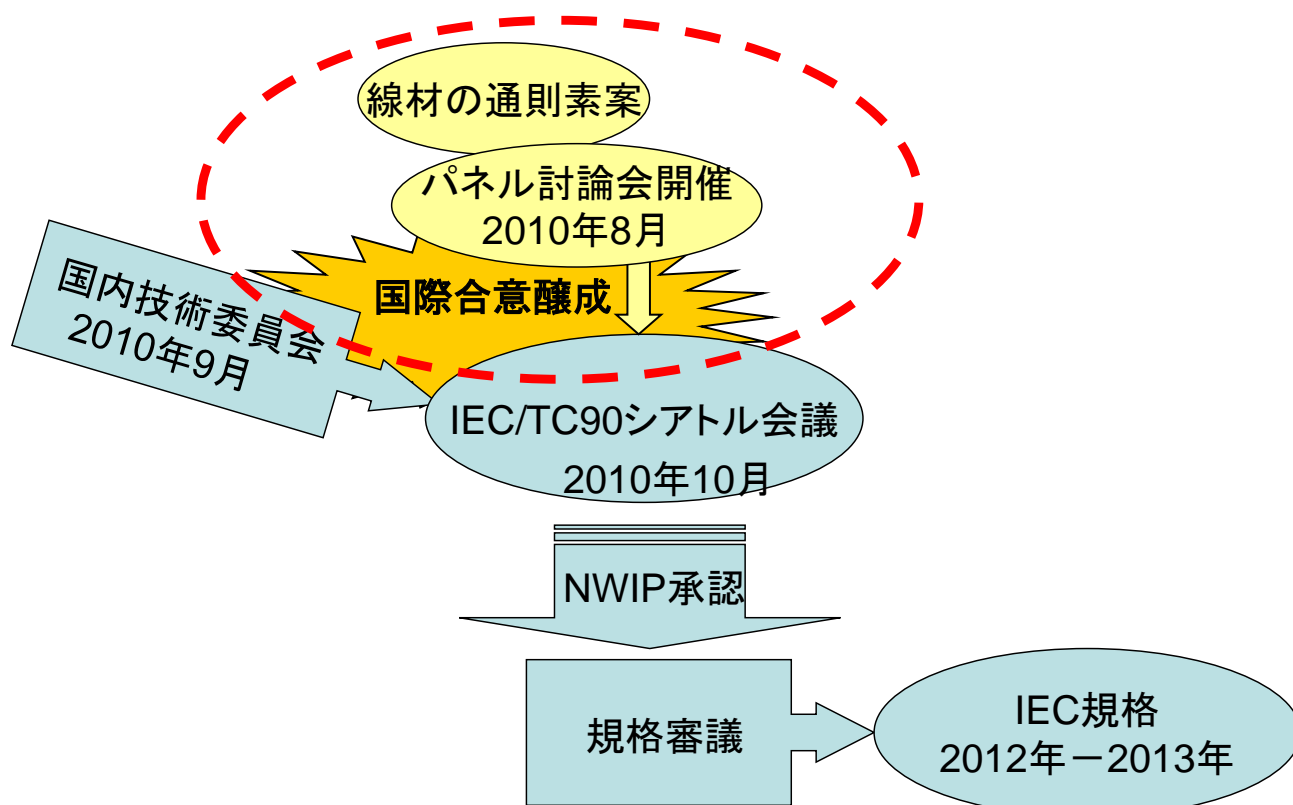
○平成22年5月24日、東京(都市センターホテル)、ISTEC主催「超電導技術動向報告会2010」
“地球環境問題と超電導電力機器関連国際標準化”、松下 照男(九工大)

○平成22年7月16日、大阪(住友電工)、低温工学主催「第1回超電導応用研究会シンポジウム」
“コンセンサス標準と超電導国際規格”、松下 照男(九工大)、長村光造(応用科研)、他

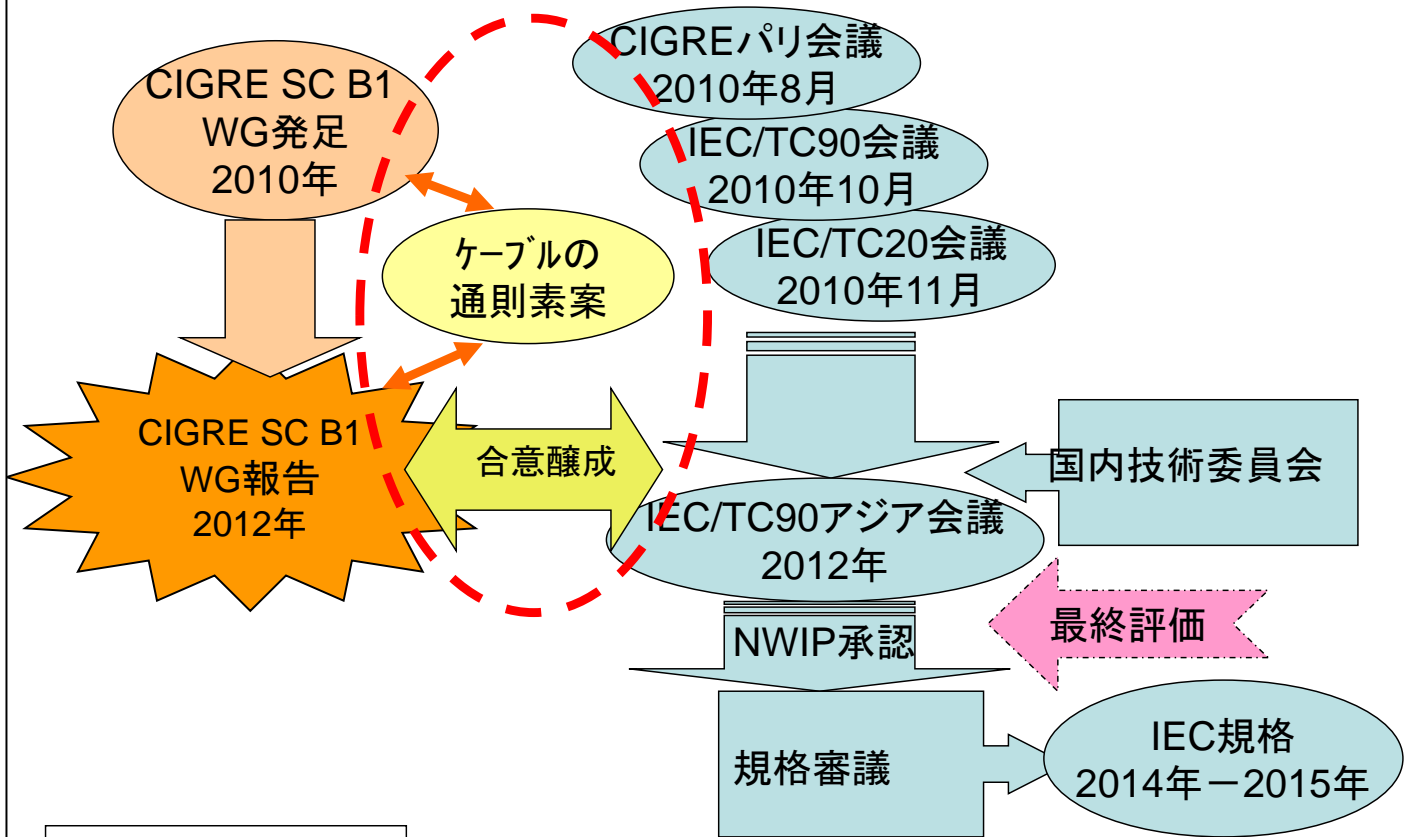
超電導電力機器の適用標準化の最終目標達成について

	最終目標(平成24年度末)	達成見通し
①超電導線材関連技術標準化	<ul style="list-style-type: none"> ■超電導線並びにその試験方法の規格素案と国際合意を背景に、国際規格提案に資する。 	規格素案の修正等で国際間の合意を図り、達成する見込み。
②超電導電力ケーブル関連技術標準化	<ul style="list-style-type: none"> ■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、国際合意を背景に国際規格提案に資する。 	規格素案の修正等で国際間の合意を図り、達成する見込み。
③超電導電力機器関連技術標準化	<ul style="list-style-type: none"> ■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規格素案を作成する。 ■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を行なう。 	素案作成と冷却システム規制緩和の検討により達成する見込み。

超電導線材の通則の今後のスケジュール



超電導電力ケーブルの通則の今後のスケジュール



事業原簿 Ⅲ-2.5.60、Ⅳ-2.4

23/24

超電導電力機器の適用標準化の今後の予定

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	超電導線の通則の素案				
		超電導線の試験方法の素案			
	実用超電導線の特徴調査、及び酸化物超電導線の試験方法等の技術調査				
	超電導線の標準化に関する国際合意醸成				
②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の通則の素案				
	超電導電力ケーブルの試験方法の素案				
	超電導電力ケーブルの特徴調査、及び試験方法等の技術調査				
				超電導電力ケーブルの標準化に関する国際合意醸成	
③超電導電力機器関連 技術標準化等	技術動向調査・標準化ニーズ把握				
	国内規制緩和の調査、及び冷却システム技術調査				
	電力機器の規格化マップ				
	SMES,超電導変圧器等の通則の素案				

事業原簿 Ⅱ-2.56

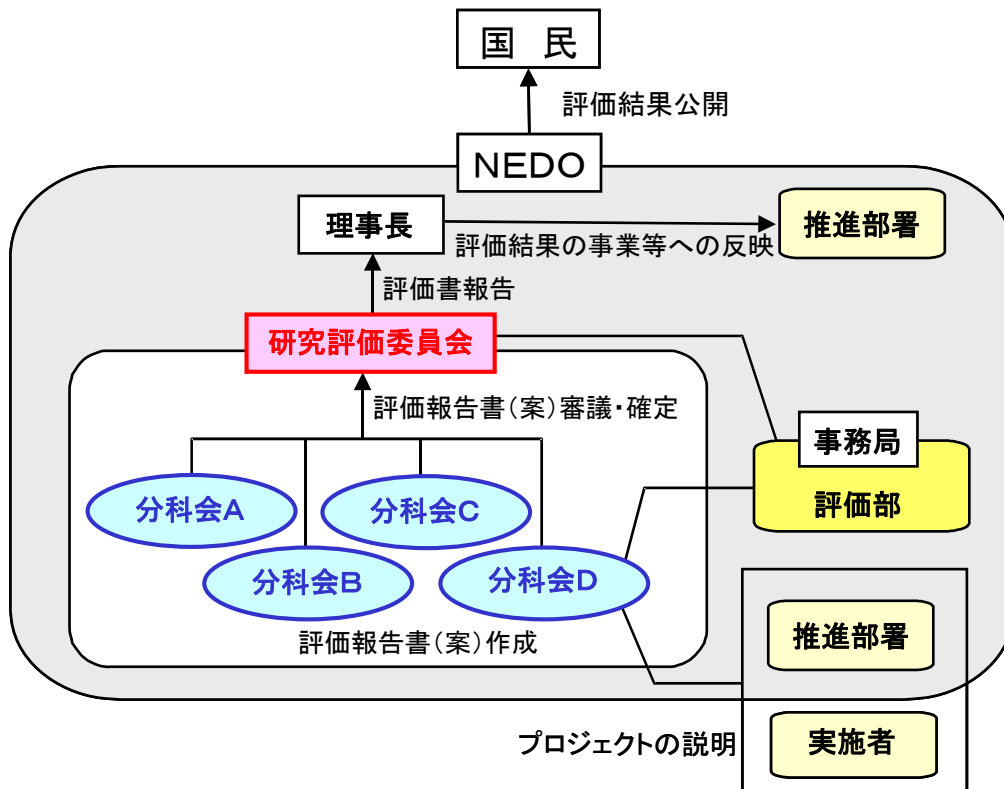
24/24

参考資料 1 評価の実施方法

本評価は、「技術評価実施規程」（平成 15 年 10 月制定）に基づいて研究評価を実施する。

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）における研究評価の手順は、以下のように被評価プロジェクトごとに分科会を設置し、同分科会にて研究評価を行い、評価報告書（案）を策定の上、研究評価委員会において確定している。

- 「NEDO 技術委員・技術委員会等規程」に基づき研究評価委員会を設置
- 研究評価委員会はその下に分科会を設置



1. 評価の目的

評価の目的は「技術評価実施規程」において。

- 業務の高度化等の自己改革を促進する
- 社会に対する説明責任を履行するとともに、
経済・社会ニーズを取り込む
- 評価結果を資源配分に反映させ、資源の重点化及び業務の効率化を
促進する

としている。

本評価においては、この趣旨を踏まえ、本事業の意義、研究開発目標・計画の妥当性、計画を比較した達成度、成果の意義、成果の実用化の可能性等について検討・評価した。

2. 評価者

技術評価実施規程に基づき、事業の目的や態様に即した外部の専門家、有識者からなる委員会方式により評価を行う。分科会委員選定に当たっては以下の事項に配慮して行う。

- 科学技術全般に知見のある専門家、有識者
- 当該研究開発の分野の知見を有する専門家
- 研究開発マネジメントの専門家、経済学、環境問題、国際標準、その他社会的ニーズ関連の専門家、有識者
- 産業界の専門家、有識者
- ジャーナリスト

また、評価に対する中立性確保の観点から事業の推進側関係者を選任対象から除外し、また、事前評価の妥当性を判断するとの側面にかんがみ、事前評価に関与していない者を主体とする。

これらに基づき、分科会委員名簿にある7名を選任した。

なお、本分科会の事務局については、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構研究評価広報部が担当した。

3. 評価対象

平成20年度に開始された「リチウム系超電導電力機器技術」プロジェクトを評価対象とした。

なお、分科会においては、当該事業の推進部署から提出された事業原簿、プロジェクトの内容、成果に関する資料をもって評価した。

4. 評価方法

分科会においては、当該事業の推進部署及び研究実施者からのヒアリングと、それを踏まえた分科会委員による評価コメント作成、評点法による評価及び実施者側等との議論等により評価作業を進めた。

なお、評価の透明性確保の観点から、知的財産保護の上で支障が生じると認められる場合等を除き、原則として分科会は公開とし、研究実施者と意見を交換する形で審議を行うこととした。

5. 評価項目・評価基準

分科会においては、次に掲げる「評価項目・評価基準」で評価を行った。これは、研究評価委員会による『各分科会における評価項目・評価基準は、被評価プロジェクトの性格、中間・事後評価の別等に応じて、各分科会において判断すべきものである。』との考え方に従い、第1回分科会において、事務局が、研究評価委員会により示された「標準的評価項目・評価基準」（参考資料 1-9 頁参照）をもとに改定案を提示し、承認されたものである。

プロジェクト全体に係わる評価においては、主に事業の目的、計画、運営、達成度、成果の意義や実用化への見通し等について評価した。各個別テーマに係る評価については、主にその目標に対する達成度等について評価した。

評価項目・評価基準

1. 事業の位置付け・必要性について

(1) NEDOの事業としての妥当性

- ・ エネルギーイノベーションプログラムの目標達成のために寄与しているか。
- ・ 民間活動のみでは改善できないものであること、又は公共性が高いことにより、NEDOの関与が必要とされる事業か。
- ・ 当該事業を実施することによりもたらされる効果が、投じた予算との比較において十分であるか。

(2) 事業目的の妥当性

- ・ 内外の技術開発動向、国際競争力の状況、エネルギー需給動向、市場動向、政策動向、国際貢献の可能性等から見て、事業の目的は妥当か。

2. 研究開発マネジメントについて

(1) 研究開発目標の妥当性

- ・ 内外の技術動向、市場動向等を踏まえて、戦略的な目標が設定されているか。
- ・ 具体的かつ明確な開発目標を可能な限り定量的に設定しているか。
- ・ 目標達成度を測定・判断するための適切な指標が設定されているか。

(2) 研究開発計画の妥当性

- ・ 目標達成のために妥当なスケジュール、予算（各個別研究テーマ毎の配分を含む）となっているか。
- ・ 目標達成に必要な要素技術を取り上げているか。
- ・ 研究開発フローにおける要素技術間の関係、順序は適切か。
- ・ 継続プロジェクトや長期プロジェクトの場合、技術蓄積を、実用化の観点から絞り込んだうえで活用が図られているか。

(3) 研究開発実施の事業体制の妥当性

- ・ 適切な研究開発チーム構成での実施体制になっているか。
- ・ 真に技術力と事業化能力を有する企業を実施者として選定しているか。
- ・ 全体を統括するプロジェクトリーダー等が選任され、十分に活躍できる環境が整備されているか。

- ・ 目標達成及び効率的実施のために必要な実施者間の連携が十分に行われる体制となっているか。
- ・ 実用化シナリオに基づき、成果の受け取り手（ユーザー、活用・実用化の想定者等）に対して、関与を求める体制を整えているか。

(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

- ・ 成果の実用化、事業化につなげる戦略が明確になっているか。
- ・ 成果の実用化、事業化につなげる知財マネジメントの方針が明確に示され、かつ妥当なものか。

(5)情勢変化への対応等

- ・ 進捗状況を常に把握し、社会・経済の情勢の変化及び政策・技術動向に機敏かつ適切に対応しているか。
- ・ 計画見直しの方針は一貫しているか（中途半端な計画見直しが研究方針の揺らぎとなっていないか）。計画見直しを適切に実施しているか。

3. 研究開発成果について

(1)中間目標の達成度

- ・ 成果は目標値をクリアしているか。
- ・ 全体としての目標達成はどの程度か。
- ・ 目標未達成の場合、目標達成までの課題を把握し、課題解決の方針が明確になっているか。

(2)成果の意義

- ・ 成果は市場の拡大或いは市場の創造につながることを期待できるか。
- ・ 成果は、世界初あるいは世界最高水準か。
- ・ 成果は、新たな技術領域を開拓することが期待できるか。
- ・ 成果は汎用性があるか。
- ・ 投入された予算に見合った成果が得られているか。
- ・ 成果は、他の競合技術と比較して優位性があるか。

(3)知的財産権等の取得及び標準化の取組

- ・ 知的財産権等の取扱（特許や意匠登録出願、著作権や回路配置利用権の登録、品種登録出願、営業機密の管理等）は事業戦略、または実用化計画に沿って国内外に適切に行われているか。

(4)成果の普及

- ・ 論文の発表は、研究内容を踏まえ適切に行われているか。
- ・ 成果の受取手（ユーザー、活用・実用化の想定者等）に対して、適切に成果を普及しているか。また、普及の見通しは立っているか。
- ・ 一般に向けて広く情報発信をしているか。

(5)成果の最終目標の達成可能性

- ・ 最終目標を達成できる見込みか。
- ・ 最終目標に向け、課題とその解決の道筋が明確に示され、かつ妥当なものか。

4. 実用化、事業化の見通しについて

(1)成果の実用化可能性

- ・ 産業技術としての見極め（適用可能性の明確化）ができているか。
- ・ 実用化に向けて課題が明確になっているか。課題解決の方針が明確になっているか。

(2)事業化までのシナリオ

- ・ 成果は市場やユーザーのニーズに合致しているか。
- ・ 市場の規模や成長性、コストダウン、競合技術との比較、導入普及、事業化までの期間、事業化とそれに伴う経済効果等の見通しは立っているか。

(3)波及効果

- ・ 成果は関連分野への波及効果（技術的・経済的・社会的）を期待できるものか。
- ・ プロジェクトの実施自体が当該分野の研究開発や人材育成等を促進するなどの波及効果を生じているか。

個別テーマ 5.5「超電導電力機器の適用技術標準化」の「研究開発成果について」および「実用化の見通しについて」の評価項目に関しては以下の評価基準を用いる。

3. 研究開発成果について

(1)中間目標の達成度

- ・ 成果は目標値をクリアしているか。
- ・ 全体としての目標達成はどの程度か。
- ・ 目標未達成の場合、目標達成までの課題を把握し、課題解決の方針が明確になっているか。

(2)成果の意義

- ・ 成果は市場の拡大或いは市場の創造につながることを期待できるか。
- ・ 成果は、世界初あるいは世界最高水準か。
- ・ 成果は、新たな技術領域を開拓することが期待できるか。
- ・ 成果は汎用性があるか。
- ・ 投入された予算に見合った成果が得られているか。
- ・ 成果は公開性が確保されているか。

(3)知的財産権等の取得及び標準化の取組

- ・ 国際標準化に関する事項が計画されている場合、得られた研究開発の成果に基づく国際標準化に向けた提案等の取組が適切に行われているか。

(4)成果の普及

- ・ 成果の受取手（ユーザー、活用・実用化の想定者等）に対して、適切に成果を普及しているか。また、普及の見通しは立っているか。
- ・ 一般に向けて広く情報発信をしているか。

(5)成果の最終目標の達成可能性

- ・ 最終目標を達成できる見込みか。
- ・ 最終目標に向け、課題とその解決の道筋が明確に示され、かつ妥当なものか。

4. 実用化の見通しについて

(1) 成果の実用化可能性

- ・ 国際標準化に関する事項が計画されている場合、国際規格化等、標準整備に向けた見通しが得られているか。
- ・ J I S化、標準整備に向けた見通しが得られているか。注) 国内標準に限る
- ・ 一般向け広報は積極的になされているか。

(2) 波及効果

- ・ 成果は関連分野への波及効果（技術的・経済的・社会的）を期待できるものか。
- ・ プロジェクトの実施自体が当該分野の研究開発や人材育成等を促進するなどの波及効果を生じているか。

標準的評価項目・評価基準（中間評価）

2010. 3. 26

【中間評価 標準的評価項目・評価基準の位置付け（基本的考え方）】

標準的評価項目・評価基準は、第25回研究評価委員会（平成22年3月26日付）において以下のとおり定められている。（本文中の記載例による1…、2…、3…、4…が標準的評価項目、それぞれの項目中の(1)…、(2)…が標準的評価基準、それぞれの基準中の…が視点）

ただし、これらの標準的評価項目・評価基準は、研究開発プロジェクトの中間評価における標準的な評価の視点であり、各分科会における評価項目・評価基準は、被評価プロジェクトの性格等に応じて、各分科会において判断すべきものである。

1. 事業の位置付け・必要性について

(1) NEDOの事業としての妥当性

- ・ 特定の施策（プログラム）、制度の下で実施する事業の場合、当該施策・制度の目標達成のために寄与しているか。
- ・ 民間活動のみでは改善できないものであること、又は公共性が高いことにより、NEDOの関与が必要とされる事業か。
- ・ 当該事業を実施することによりもたらされる効果が、投じた予算との比較において十分であるか。

(2) 事業目的の妥当性

- ・ 内外の技術開発動向、国際競争力の状況、エネルギー需給動向、市場動向、政策動向、国際貢献の可能性等から見て、事業の目的は妥当か。

2. 研究開発マネジメントについて

(1) 研究開発目標の妥当性

- ・ 内外の技術動向、市場動向等を踏まえて、戦略的な目標が設定されているか。
- ・ 具体的かつ明確な開発目標を可能な限り定量的に設定しているか。
- ・ 目標達成度を測定・判断するための適切な指標が設定されているか。

(2)研究開発計画の妥当性

- ・ 目標達成のために妥当なスケジュール、予算（各個別研究テーマ毎の配分を含む）となっているか。
- ・ 目標達成に必要な要素技術を取り上げているか。
- ・ 研究開発フローにおける要素技術間の関係、順序は適切か。
- ・ 継続プロジェクトや長期プロジェクトの場合、技術蓄積を、実用化の観点から絞り込んだうえで活用が図られているか。

(3)研究開発実施の事業体制の妥当性

- ・ 適切な研究開発チーム構成での実施体制になっているか。
- ・ 真に技術力と事業化能力を有する企業を実施者として選定しているか。
- ・ 研究管理法人を経由する場合、研究管理法人が真に必要な役割を担っているか。
- ・ 全体を統括するプロジェクトリーダー等が選任され、十分に活躍できる環境が整備されているか。
- ・ 目標達成及び効率的実施のために必要な実施者間の連携 and/or 競争が十分に行われる体制となっているか。
- ・ 実用化シナリオに基づき、成果の受け取り手（ユーザー、活用・実用化の想定者等）に対して、関与を求める体制を整えているか。

(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

- ・ 成果の実用化、事業化につなげる戦略が明確になっているか。
- ・ 成果の実用化、事業化につなげる知財マネジメントの方針が明確に示され、かつ妥当なものか。

(5)情勢変化への対応等

- ・ 進捗状況を常に把握し、社会・経済の情勢の変化及び政策・技術動向に機敏かつ適切に対応しているか。
- ・ 計画見直しの方針は一貫しているか（中途半端な計画見直しが研究方針の揺らぎとなっていないか）。計画見直しを適切に実施しているか。

3. 研究開発成果について

(1)中間目標の達成度

- ・ 成果は目標値をクリアしているか。
- ・ 全体としての目標達成はどの程度か。

- ・ 目標未達成の場合、目標達成までの課題を把握し、課題解決の方針が明確になっているか。

(2)成果の意義

- ・ 成果は市場の拡大或いは市場の創造につながる事が期待できるか。
- ・ 成果は、世界初あるいは世界最高水準か。
- ・ 成果は、新たな技術領域を開拓する事が期待できるか。
- ・ 成果は汎用性があるか。
- ・ 投入された予算に見合った成果が得られているか。
- ・ 成果は、他の競合技術と比較して優位性があるか。

(3)知的財産権等の取得及び標準化の取組

- ・ 知的財産権等の取扱（特許や意匠登録出願、著作権や回路配置利用権の登録、品種登録出願、営業機密の管理等）は事業戦略、または実用化計画に沿って国内外に適切に行われているか。
- ・ 国際標準化に関する事項が計画されている場合、得られた研究開発の成果に基づく国際標準化に向けた提案等の取組が適切に行われているか。

(4)成果の普及

- ・ 論文の発表は、研究内容を踏まえ適切に行われているか。
- ・ 成果の受取手（ユーザー、活用・実用化の想定者等）に対して、適切に成果を普及しているか。また、普及の見通しは立っているか。
- ・ 一般に向けて広く情報発信をしているか。

(5)成果の最終目標の達成可能性

- ・ 最終目標を達成できる見込みか。
- ・ 最終目標に向け、課題とその解決の道筋が明確に示され、かつ妥当なものか。

4. 実用化、事業化の見通しについて

(1)成果の実用化可能性

- ・ 産業技術としての見極め（適用可能性の明確化）ができているか。
- ・ 実用化に向けて課題が明確になっているか。課題解決の方針が明確になっているか。
- ・ 国際標準化に関する事項が計画されている場合、国際規格化等、標準整備に向けた見通しが得られているか。

(2)事業化までのシナリオ

- ・ 成果は市場やユーザーのニーズに合致しているか。
- ・ 市場の規模や成長性、コストダウン、競合技術との比較、導入普及、事業化までの期間、事業化とそれに伴う経済効果等の見通しは立っているか。

(3)波及効果

- ・ 成果は関連分野への波及効果（技術的・経済的・社会的）を期待できるものか。
- ・ プロジェクトの実施自体が当該分野の研究開発や人材育成等を促進するなどの波及効果を生じているか。

※基礎的・基盤的研究及び知的基盤・標準整備等の研究開発の場合は、以下の項目・基準による。

*基礎的・基盤的研究開発の場合

2. 研究開発マネジメントについて

(1)研究開発目標の妥当性

- ・内外の技術動向、市場動向等を踏まえて、戦略的な目標が設定されているか。
- ・具体的かつ明確な開発目標を可能な限り定量的に設定しているか。
- ・目標達成度を測定・判断するための適切な指標が設定されているか。

(2)研究開発計画の妥当性

- ・目標達成のために妥当なスケジュール、予算（各個別研究テーマ毎の配分を含む）となっているか。
- ・目標達成に必要な要素技術を取り上げているか。
- ・研究開発フローにおける要素技術間の関係、順序は適切か。
- ・継続プロジェクトや長期プロジェクトの場合、技術蓄積を、実用化の観点から絞り込んだうえで活用が図られているか。

(3)研究開発実施の事業体制の妥当性

- ・適切な研究開発チーム構成での実施体制になっているか。
- ・真に技術力と事業化能力を有する企業を実施者として選定しているか。
- ・研究管理法をを経由する場合、研究管理法が真に必要な役割を担っているか。
- ・全体を統括するプロジェクトリーダー等が選任され、十分に活躍できる環境が整備されているか。
- ・目標達成及び効率的実施のために必要な実施者間の連携 and/or 競争が十分に行われる体制となっているか。
- ・実用化シナリオに基づき、成果の受け取り手（ユーザー、活用・実用化の想定者等）に対して、関与を求める体制を整えているか。

(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

- ・成果の実用化につなげる戦略が明確になっているか。
- ・成果の実用化につなげる知財マネジメントの方針が明確に示され、かつ妥当なものか。

(5)情勢変化への対応等

- ・ 進捗状況を常に把握し、社会・経済の情勢の変化及び政策・技術動向に機敏かつ適切に対応しているか。
- ・ 計画見直しの方針は一貫しているか（中途半端な計画見直しが研究方針の揺らぎとなっていないか）。計画見直しを適切に実施しているか。

3. 研究開発成果について

(1)中間目標の達成度

- ・ 成果は目標値をクリアしているか。
- ・ 全体としての目標達成はどの程度か。
- ・ 目標未達成の場合、目標達成までの課題を把握し、課題解決の方針が明確になっているか。

(2)成果の意義

- ・ 成果は市場の拡大或いは市場の創造につながることを期待できるか。
- ・ 成果は、世界初あるいは世界最高水準か。
- ・ 成果は、新たな技術領域を開拓することが期待できるか。
- ・ 成果は汎用性があるか。
- ・ 投入された予算に見合った成果が得られているか。
- ・ 成果は、他の競合技術と比較して優位性があるか。

(3)知的財産権等の取得及び標準化の取組

- ・ 知的財産権等の取扱（特許や意匠登録出願、著作権や回路配置利用権の登録、品種登録出願、営業機密の管理等）は事業戦略、または実用化計画に沿って国内外に適切に行われているか。
- ・ 国際標準化に関する事項が計画されている場合、得られた研究開発の成果に基づく国際標準化に向けた提案等の取組が適切に行われているか。

(4)成果の普及

- ・ 論文の発表は、研究内容を踏まえ適切に行われているか。
- ・ 成果の受取手（ユーザー、活用・実用化の想定者等）に対して、適切に成果を普及しているか。また、普及の見通しは立っているか。
- ・ 一般に向けて広く情報発信をしているか。

(5)成果の最終目標の達成可能性

- ・ 最終目標を達成できる見込みか。

- ・ 最終目標に向け、課題とその解決の道筋が明確に示され、かつ妥当なものか。

4. 実用化の見通しについて

(1)成果の実用化可能性

- ・ 実用化イメージ・出口イメージが明確になっているか。
- ・ 実用化イメージ・出口イメージに基づき、開発の各段階でマイルストーンを明確にしているか。それを踏まえ、引き続き研究開発が行われる見通しは立っているか。
- ・ 国際標準化に関する事項が計画されている場合、国際規格化等、標準整備に向けた見通しが得られているか。

(2)波及効果

- ・ 成果は関連分野への波及効果（技術的・経済的・社会的）を期待できるものか。
- ・ プロジェクトの実施自体が当該分野の研究開発や人材育成等を促進するなどの波及効果を生じているか。

* 知的基盤・標準整備等の研究開発の場合

2. 研究開発マネジメントについて

(1)研究開発目標の妥当性

- ・ 内外の技術動向、市場動向等を踏まえて、戦略的な目標が設定されているか。
- ・ 具体的かつ明確な開発目標を可能な限り定量的に設定しているか。
- ・ 目標達成度を測定・判断するための適切な指標が設定されているか。

(2)研究開発計画の妥当性

- ・ 目標達成のために妥当なスケジュール、予算（各個別研究テーマ毎の配分を含む）となっているか。
- ・ 目標達成に必要な要素技術を取り上げているか。
- ・ 研究開発フローにおける要素技術間の関係、順序は適切か。
- ・ 継続プロジェクトや長期プロジェクトの場合、技術蓄積を、実用化の観点から絞り込んだうえで活用が図られているか。

(3)研究開発実施の事業体制の妥当性

- ・ 適切な研究開発チーム構成での実施体制になっているか。
- ・ 真に技術力と事業化能力を有する企業を実施者として選定しているか。

- ・ 研究管理法人を経由する場合、研究管理法人が真に必要な役割を担っているか。
- ・ 全体を統括するプロジェクトリーダー等が選任され、十分に活躍できる環境が整備されているか。
- ・ 目標達成及び効率的実施のために必要な実施者間の連携 and/or 競争が十分に行われる体制となっているか。
- ・ 実用化シナリオに基づき、成果の受け取り手（ユーザー、活用・実用化の想定者等）に対して、関与を求める体制を整えているか。

(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

- ・ 成果の実用化につなげる戦略が明確になっているか。
- ・ 成果の実用化につなげる知財マネジメントの方針が明確に示され、かつ妥当なものか。

(5)情勢変化への対応等

- ・ 進捗状況を常に把握し、社会・経済の情勢の変化及び政策・技術動向に機敏かつ適切に対応しているか。
- ・ 計画見直しの方針は一貫しているか（中途半端な計画見直しが研究方針の揺らぎとなっていないか）。計画見直しを適切に実施しているか。

3. 研究開発成果について

(1)中間目標の達成度

- ・ 成果は目標値をクリアしているか。
- ・ 全体としての目標達成はどの程度か。
- ・ 目標未達成の場合、目標達成までの課題を把握し、課題解決の方針が明確になっているか。

(2)成果の意義

- ・ 成果は市場の拡大或いは市場の創造につながることが期待できるか。
- ・ 成果は、世界初あるいは世界最高水準か。
- ・ 成果は、新たな技術領域を開拓することが期待できるか。
- ・ 成果は汎用性があるか。
- ・ 投入された予算に見合った成果が得られているか。
- ・ 成果は公開性が確保されているか。

(3)知的財産権等の取得及び標準化の取組

- ・ 研究内容に新規性がある場合、知的財産権等の取扱（特許や意匠登録出願、著作権や回路配置利用権の登録、品種登録出願、営業機密の管理等）は事業戦略、または実用化計画に沿って国内外に適切に行われているか。
- ・ 国際標準化に関する事項が計画されている場合、得られた研究開発の成果に基づく国際標準化に向けた提案等の取組が適切に行われているか。

(4)成果の普及

- ・ 論文の発表は、研究内容を踏まえ適切に行われているか。
- ・ 成果の受取手（ユーザー、活用・実用化の想定者等）に対して、適切に成果を普及しているか。また、普及の見通しは立っているか。
- ・ 一般に向けて広く情報発信をしているか。

(5)成果の最終目標の達成可能性

- ・ 最終目標を達成できる見込みか。
- ・ 最終目標に向け、課題とその解決の道筋が明確に示され、かつ妥当なものか。

4. 実用化の見通しについて

(1)成果の実用化可能性

- ・ 整備した知的基盤についての利用は実際にあるか、その見通しが得られているか。
- ・ 公共財として知的基盤を供給、維持するための体制は整備されているか、その見込みはあるか。
- ・ 国際標準化に関する事項が計画されている場合、国際規格化等、標準整備に向けた見通しが得られているか。
- ・ J I S 化、標準整備に向けた見通しが得られているか。注）国内標準に限る
- ・ 一般向け広報は積極的になされているか。

(2)波及効果

- ・ 成果は関連分野への波及効果（技術的・経済的・社会的）を期待できるものか。
- ・ プロジェクトの実施自体が当該分野の研究開発や人材育成等を促進するなどの波及効果を生じているか。

本研究評価委員会報告は、独立行政法人新エネルギー・産業技術
総合開発機構（NEDO 技術開発機構）評価部が委員会の事務局
として編集しています。

平成22年11月

NEDO 技術開発機構
評価部

部長 竹下 満
主幹 寺門 守
担当 梶田 保之

* 研究評価委員会に関する情報は NEDO 技術開発機構のホームページに
掲載しています。

(<http://www.nedo.go.jp/iinkai/kenkyuu/index.html>)

〒212-8554 神奈川県川崎市幸区大宮町1310番地
ミューザ川崎セントラルタワー20F
TEL 044-520-5161 FAX 044-520-5162