

「希少金属代替材料開発プロジェクト／Nd-Fe-B 系
磁石を代替する新規永久磁石及びリットリウム系複
合材料の開発／超軽量高性能モータ等向けリットリ
ウム系複合材料の開発」

事後評価報告書

平成24年3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24年3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 古川 一夫 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33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 超長尺イットリウム系複合材料における 希少金属使用量低減技術開発	
2. 2 イットリウム系複合材料の製造工程における 希少金属利用率等の効率向上技術開発	
2. 3 イットリウム系複合材料を用いた回転機要素 技術開発	
3. 評点結果	1-36
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
参考資料2 評価に係る被評価者意見	参考資料 2-1

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、「希少金属代替材料開発プロジェクト／Nd-Fe-B系磁石を代替する新規永久磁石及びリットリウム系複合材料の開発／超軽量高性能モータ等向けリットリウム系複合材料の開発」の事後評価報告書であり、第28回研究評価委員会において設置された「希少金属代替材料開発プロジェクト／Nd-Fe-B系磁石を代替する新規永久磁石及びリットリウム系複合材料の開発／超軽量高性能モータ等向けリットリウム系複合材料の開発」（事後評価）研究評価分科会において評価報告書案を策定し、第31回研究評価委員会（平成24年3月28日）に諮り、確定されたものである。

平成24年3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

「希少金属代替材料開発プロジェクト／Nd-Fe-B系磁石を代替する
 新規永久磁石及びイットリウム系複合材料の開発／超軽量高性能モ
 ータ等向けイットリウム系複合材料の開発」

事後評価分科会委員名簿

(平成23年10月現在)

	氏名	所属、役職
分科会長	くまくら ひろあき 熊倉 浩明	独立行政法人 物質・材料研究機構 強磁場ステーション ステーション長 筑波大学 大学院数理物質科学研究科 教授
分科会長 代理	すぎもと ひでひこ 杉本 英彦	福井大学 大学院工学研究科 特命教授
委員	あさの かつひこ 浅野 克彦	株式会社 日立製作所 電力システム社 日立事業所 主管技師長
	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
	ほしの つとむ 星野 勉	明星大学 理工学部 総合理工学科 教授
	まえだ としひこ 前田 敏彦	高知工科大学 環境理工学群 教授

敬称略、五十音順

審議経過

- 第1回 分科会（平成23年10月18日）

 - 公開セッション

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

 - 非公開セッション

7. 全体を通しての質疑

 - 公開セッション

8. まとめ・講評
9. 今後の予定、その他、閉会

- 現地調査会（平成23年10月6日）

 - 産業用超電導線材・機器技術研究組合 佐倉分室（千葉県佐倉市）

- 第31回研究評価委員会（平成24年3月28日）

評価概要

1. 総論

1) 総合評価

本事業は、資源制約の克服という国家的課題に取り組んでおり、同時に省エネルギー、CO₂削減などの地球環境負荷低減を伴う社会的効果も実現できることから、我が国の社会的背景・要請において、その意義は大きい。設定した研究開発目標は世界をリードする高い水準にあり、開発スケジュール的にみても難易度が高いが、これを約1年間という短期間で震災影響も含めて克服し、全ての目標を達成しており、技術レベルおよび研究開発マネジメントの両方の観点から高く評価できる。特に高特性長尺線材の製造技術という観点できわめて重要な成果が得られ、高温超電導線材の実用化に向けて、日本が世界の先頭に立つ基盤が確立された。

しかしながら、本プロジェクトの本質は超電導線材の製造技術の開発であり、超電導モータへの応用による希少金属削減を前面に打ち出したプロジェクト設定には疑問が残る。超電導モータ向けに超電導線材の実用化を目指すためには、コスト面などいくつかの指標で競合技術との比較評価が必要であるが、その点に関してはさらに検討が必要である。また、個別テーマ②「リ튠系複合材料の製造工程における希少金属利用率等の効率向上技術開発」は基礎的技術開発であり、単年度プロジェクトに向いておらず、複数年度の未来技術開発課題として扱われるべき研究内容であった。

2) 今後に対する提言

大きな成果を上げており高く評価できるが、現時点においても、まだリ튠系超電導線材は実用レベルには至っていない。今後、ここで行った研究開発をさらに推し進めて実用化に結び付けることが強く望まれる。

本プロジェクトは成果として完結したものを求めたものではなく、最終目的に至るまでの材料開発、製造技術を加速させ基盤技術のレベルを高めることを目指したものと見ることができる。実施者に対しては是非、本プロジェクトの成果を材料開発の加速に生かしてほしい。

また、プロジェクト終了後、設備が稼働しておらず、有効に活用されていない。制度面で早急に改善されるべきである。迅速な継続体制の構築が不可欠で、これは今回のプロジェクトだけに限らない課題である。

2. 各論

1) 事業の位置付け・必要性について

高温超電導線材の機能高度化と量産化は、資源制約の克服とともに、省エネルギー、CO₂削減などの地球環境負荷低減を伴う社会的効果が期待でき、事業目的として妥当である。社会的要請から取り組むべき国家的課題であり、大きなリスクを伴うテーマであることから、NEDOの関与が必要と認められる。

しかしながら、本プロジェクトは、その目的として超電導モータへの応用による希少金属削減を前面に打ち出した設定であったが、超電導線材の実用製造技術の開発に予算と時間を集中して実施すべきであった。

また、超電導モータの実現、実用化のためには、多くの技術的課題が存在しており、本プロジェクトから超電導モータの実用化による希少金属の低減までには、相当の距離がある。今後、この距離をどのようにして埋めていくのが問題であろう。

2) 研究開発マネジメントについて

「超電導線材の開発」という観点からは、研究開発の目標、計画ともに妥当であると認められる。特に個別テーマ①「超長尺イットリウム系複合材料における希少金属使用量低減技術開発」（線材開発）は戦略的目標で世界トップレベルであり、判断指標も定量的で明確である。また、高い技術力を有する企業と超電導線材評価に実績のある大学を組み合わせた実施体制も妥当である。さらに、プロジェクト期間が短く、大型生産設備導入後の運転期間がほとんどなかったなかで、東日本大震災による研究中断に対しても適切に対応しており、評価できる。

一方、モータ等向けイットリウム系複合材料の開発というように、既存モータ等の代替と位置づけられる開発の場合は、モータ等を含むシステムとして既存のものより経済性、保守性等を総合的にみて優位であることが必要である。このような観点で代替可能かどうかの検討が十分ではない。また、超電導モータの実用化のためには、コストの問題も含めて多くの技術的課題を克服する必要があると考えられるが、これらの技術課題を克服して実用化につなげる戦略や知財マネジメントの方針が必ずしも明確にはなっていない。

3) 研究開発成果について

すべての数値目標をクリアしており、全体としての目標達成度は相当に高い。また成果の中には、世界初あるいは世界最高水準のものがいくつか含まれている。本技術開発は超電導線材の各種機器への実用化を大きく進展させるものとして高く評価できる。これまで、線材特性では世界一であったが長尺化で遅れ

をとっていた日本の状況を一変させ、特性、長尺化のいずれにおいても日本が世界一となる可能性を示した点において、きわめて重要な成果が得られた。論文発表、プレス発表、展示会発表はタイムリーで適切に行われている。

しかしながら、超電導モータに限定すると、本技術開発が超電導モータの実用化を大きく前進させた、とまでは言えない。従って超電導モータが、従来の希少金属使用のモータの代替になるかどうかは、現段階では必ずしも明らかでない。本来の希少金属代替の目的には合致しているが、他の競合技術との重量・体格比較に加えて、コスト比較評価など、置き換え需要を実現する評価が今後必要である。

4) 実用化の見通しについて

波及効果として、超電導応用機器全般に波及する可能性があることを示しており、本技術開発は超電導線材の様々な電力機器への実用化を大きく進展させるものとして高く評価できる。PLD (Pulsed Laser Deposition : パルスレーザー蒸着) 法による線材製造については、長尺製品開発の見通しが立ったといえる。

しかしながら、超電導モータに関しては、実用化のイメージ・出口イメージは必ずしも明確でない。プロジェクト全体としても、実用化までの今後の研究開発の見通しが必ずしも明確に示されていない。また、今後の進捗を見ながら希土類代替技術への効果は再度検証されるべきものである。

研究評価委員会におけるコメント

第31回研究評価委員会（平成24年3月28日開催）に諮り、本評価報告書は確定された。研究評価委員会からのコメントは特になし。

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	オミクロンナノテクノロジージャパン株式会社 最高顧問
委員	安宅 龍明	一般社団法人ナノテクノロジービジネス推進協議会 企画運営推進会議 副議長
	五十嵐 哲	学校法人工学院大学 工学部 応用化学科 教授
	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	学校法人日本大学 法学部 教授
	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
	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
	佐藤 了平	国立大学法人大阪大学 大学院工学研究科 マテリアル 生産科学専攻（システムデザイン領域担当） 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	学校法人愛知工業大学 特任教授
	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

本事業は、資源制約の克服という国家的課題に取り組んでおり、同時に省エネルギー、CO₂削減などの地球環境負荷低減を伴う社会的効果も実現できることから、我が国の社会的背景・要請において、その意義は大きい。設定した研究開発目標は世界をリードする高い水準にあり、開発スケジュール的にも難易度が高いが、これを約1年間という短期間で震災影響も含めて克服し、全ての目標を達成しており、技術レベルおよび研究開発マネジメントの両方の観点から高く評価できる。特に高特性長尺線材の製造技術という観点できわめて重要な成果が得られ、高温超電導線材の実用化に向けて、日本が世界の先頭に立つ基盤が確立された。

しかしながら、本プロジェクトの本質は超電導線材の製造技術の開発であり、超電導モータへの応用による希少金属削減を前面に打ち出したプロジェクト設定には疑問が残る。超電導モータ向けに超電導線材の実用化を目指すためには、コスト面などいくつかの指標で競合技術との比較評価が必要であるが、その点に関してはさらに検討が必要である。また、個別テーマ②「イットリウム系複合材料の製造工程における希少金属利用率等の効率向上技術開発」は基礎的技術開発であり、単年度プロジェクトに向いておらず、複数年度の未来技術開発課題として扱われるべき研究内容であった。

〈肯定的意見〉

実用超長尺線材の開発は、装置研究であるという側面があり、大胆な研究投資が無ければ、技術革新、研究開発に繋がらない。その点で、本プロジェクトにより、大胆な装置への投資がなされ、初期の目標を達成できる目途が立った事は、称賛に値する。ただ、電動機向け線材開発であるので、繰返し応力、コギングトルク耐性などの線材特性評価をどのようにするか方向性が示されていれば、殊更、高評価となったであろう。

短期間のプロジェクトでありながら、予算的に単年度導入がやや難しい即戦力となり得る長尺線材製造・評価装置群が導入できたという大きな成果を残した。

イットリウム系複合材料の開発において、米国が2009年8月に達成した1065m×282Aを超える1050m×534Aで達成されたことを評価する。本事業は、資源制約の克服という国家的課題に取り組んでおり、同時に省エネルギー、CO₂削減などの地球環境負荷低減を伴う社会的効果も実現できることから、我が国の社会的背景・要請において、その意義は大きい。

また国際的な位置づけにおいても将来的にその重要性と効果が期待できるものであり、日本が世界をリードする技術を構築することにもなる。設定した研究開発目標は世界をリードする高い水準にあり、開発スケジュール的にみても難易度が高いが、これを短期間に震災影響も含めて克服し、全ての目標を達成しており、技術レベルおよび研究開発マネジメントの両方の観点から高く評価できる。

プロジェクト実施自体が、当該分野の研究開発や人材育成等を促進している。

- 短期間の研究開発であるにもかかわらず、全体として注目すべき成果をあげている。数値目標に対しては、すべて達成されているのみならず、いくつかの目標に対しては、目標を大幅に上回る成果を上げており、高く評価できる。
- 特に高特性長尺線材の製造技術という観点できわめて重要な成果が得られ、高温超電導線材の実用化に向けて、日本が世界の先頭に立つ基盤が確立されたものとする。

〈問題点・改善すべき点〉

- 実用化見通しを明確にしていく上で、狙いとする置き換え需要を確実に実現するには、コスト面など、いくつかの指標で競合技術との比較評価が必要であるが、その点に関してはさらに検討が必要と思われる。総合効果を算定・評価する上で、3テーマ①②③を融合し相乗効果を図るべきと考えられるが、②「効率向上技術の開発」の成果は考慮されていない。開発内容の位置づけからは①③による総合効果の評価は妥当と考えられるが、掲げたテーマの全ての成果を総合的效果として反映していく考え方が、本来、必要と考える。
- 明確なターゲット設定という意味では理解できるが、あえて希少金属使用量削減や従来型モータの代替といった枠組みに超電導線材開発を組み込む意義はそれほど感じられない。また、このような短期間ではなく2-3年のスパンでの開発になじむテーマであるとする。
- 本プロジェクトで試算されている希土類の削減量は500kW以上の電動機が全てイットリウム系超電導巻線を用いた同期機に置き換わる前提であると読み取れる。本プロジェクトとは並列にNd-Fe-B系磁石を代替する新規永久磁石の開発がおこなわれており、その成果が上がれば、本プロジェクトで対象としている電動機にも適用されると考えられる。すなわち、他のプロジェクトの成果が上がらない事を前提としている。また既存技術(常電導電動機)の技術革新も見込まなければならない。イットリウム系超

電導電動機が導入されるためには、その制御性能の評価が欠かせないが、本プロジェクトでは制御性能をどのような枠組みで確認していくかの道筋が示されていない。また、なぜイットリウム系超電導線材が必要となるのかの論理が組み立てられていない。イットリウム系超電導線材を開発したための論理組み立てとなっている。He 冷却では効率が悪いと言うのは、理論カルノー効率の 1/40 の効率しか出ていない現状の冷凍機を用いた場合の評価であり、高効率冷凍機への研究投資が行われていないためである。他のプロジェクトにおいても成果が上がる事を前提にし、それらの成果を踏まえてイットリウム系超電導線材の開発が必要であると言う論旨で、本プロジェクトの必要性を補強すべきである。

- 高性能超電導モータ開発に使える超電導線材開発に集約しストレートにプロジェクトを進めるべきであった。収率の改善に関する研究は、単年度プロジェクトに向いておらず、モータの設計もプロジェクト期間内で得られた成果が直接将来のモータ開発に使えるわけではない。
- イットリウム系複合材料は、株式会社フジクラが 2008 年 2 月に 504m×350A を達成されていたことから、イットリウム系複合材料の線材単長をその 2 倍程度、臨界電流を 300A/cm 幅にするという開発目標は高いとは思えず、さらに、浅野克彦委員のご質問に対するご回答で、超電導/常電導/超電導接続が低抵抗で実現できているということであれば、このプロジェクトの第一研究項目である超長尺イットリウム系複合材料技術開発を実施する理由はよくわからない。
また、イットリウム系複合材料の製法として、エキシマレーザ PLD 法、TFA-MOD 法、レーザ CVD 法、YAG レーザ PLD 法を取り上げられており、それぞれの目標が異なるとしても、実用化が急がれているときに並列的に実施する理由はよくわからない。
さらに、同期機の界磁巻線の巻枠に極めて低抵抗になる銅を用いられているが、同期機ではトルク変化等によって巻枠である銅に鎖交する磁束が変化し、その結果、銅である巻枠に大きな渦電流が流れ、同期機に悪影響を及ぼす可能性がある。このような観点の報告は見受けられなかったが、検討が必要であると思う。
一方、実用化に向けて必要な従来機との経済性、保守性、異常事態（例えば冷却能力喪失）対応性等における優位性をみつけることができなかった。従って、実用化についてはみえてこなかった。
- 今回の成果を更に発展させて実用化に結び付けるための具体的な方策が示されていない。今後、この研究をどのように発展させるのか。大きな資金を使った研究開発であるから、実用化までのシナリオを明確にすべきで

あろう。

〈その他の意見〉

- ・ 希少金属代替という目的に対して、その戦略を希土類 123 系線材を用いたモータ開発とするのであれば、既に劇的な省希土類効果は明らかで、線材の高性能化や量産化を追究するのが本筋である。
- ・ プロジェクト名に「超軽量高性能モータ等向け」と付いているにも拘らず、高性能モータの特性定義がされておらず、最終的に発電機への適用が強く示唆された点は残念である。
- ・ 希少（希土類）金属削減期待効果は、イットリウム系複合材料に代替することができるモータの永久磁石使用量と比較することで求められる。それは、希土類比率（0.266）や導入比率（仮定 0.25）に考慮されていると思う。しかし、永久磁石を使ったモータで生産台数が多いのは数百 kW 以下であろう。一方で、数百 kW 以下では経済性、保守性等からみて、永久磁石に代わって 30K 程度に冷却することが必要なイットリウム系複合材料が使われることは多くないと思う。従って、イットリウム系複合材料に代替可能な永久磁石の希土類比率（0.266）や導入比率（仮定 0.25）については十分検討されていると思うが、その妥当性についてはわからなかった。
- ・ 実用化、波及効果では、置き換えが主体となっているが、それ以外にも、超電導ならでは、或いはこのイットリウム系ならでは、の新規応用の狙いも期待したい。

2) 今後に対する提言

大きな成果を上げており高く評価できるが、現時点においても、まだイットリウム系超電導線材は実用レベルには至っていない。今後、ここで行った研究開発をさらに推し進めて実用化に結び付けることが強く望まれる。

本プロジェクトは成果として完結したものを求めたものではなく、最終目的に至るまでの材料開発、製造技術を加速させ基盤技術のレベルを高めることを目指したものと見ることができる。実施者に対しては是非、本プロジェクトの成果を材料開発の加速に生かしてほしい。

また、プロジェクト終了後、設備が稼働しておらず、有効に活用されていない。制度面で早急に改善されるべきである。迅速な継続体制の構築が不可欠で、これは今回のプロジェクトだけに限らない課題である。

〈今後に対する提言〉

- ・ 国益に結びつく産業を創出することは重要なことであり、超軽量高性能モータ等向けイットリウム系複合材料の開発がそれに結びつけばよいと思う。イットリウム系複合材料の開発は希少（希土類）金属削減と省エネルギー化をもたらすと思うが、モータの高効率化は線材のみならずモータシステム全体として捉えるべき問題であると思う。
ご存知のように、数百 kW～数千 kW 級のモータが変圧器を経ないで 6600V 級配電線に直接接続された多レベルコンバータ／インバータで駆動されるようになってきている。また、そのコンバータ／インバータに SiC や GaN の低損失デバイスが経済的な問題が解決できるところから採用され始めている。これらは電力変換効率やモータ効率を向上させ、変圧器を用いないのでその損失も発生しない上に、モータシステム全体の小型化ももたらしている。超軽量高性能モータ等向けイットリウム系複合材料の開発はモータモータシステム全体でその意義を捉えることが重要であると思う。
- ・ 目標は達成しており付記的な意味合いになるが、今回の成果を踏まえて次に向けた課題抽出と対策立案を継続的改善として提言され、より具体化したロードマップのために供されると、さらに価値が高まると考える。実用化のために必要なことについて（コスト評価など）、さらに検討され見通しを提示されると、より意義が高まると思う。
- ・ 約 30 億円の予算を 1 年間のプロジェクトに投じ、その大半は設備の製造に費やされたと思われるので、是非設備の有効利用を検討して欲しい。これは、国民に対する義務でもある。本プロジェクトの設備についても早急に再稼働が可能となることを期待している。評価者は詳細を把握してはい

ないが、本プロジェクトに限らず、各研究開発プロジェクトの成果設備が有効に活用されるスキームが確立されることを期待している。

- 大きな成果を上げており、高く評価できるが、現時点においても、まだイットリウム系線材は実用レベルには至っていない。今後、ここで行った研究開発をさらに推し進めて実用化に結び付けることが強く望まれる。そのための新しいプロジェクトを早急に打ち立てるべく努力をすべきである。
- 本プロジェクトの投資による長尺製造装置の開発によって、初めて目標値を達成する線材が作成されたのであるが、プロジェクト終了後、当該装置が有効に活用されていない。プロジェクト実施者においても相応の投資をしているはずであるが、新たに製造装置を設置するには2重の投資を強いることとなる。プロジェクトとしては、初期の目標を達成したと言う成果が得られているので、投資効果が十分得られたと認められる。したがって、当該資産を有効に活用できるようにすべきである。
- 本プロジェクトは成果として完結したものを求めたものではなく、最終目的に至るまでの材料開発、製造技術を加速させ基盤技術のレベルを高めることを目指したものと見ることができ。よって本プロジェクト実施の効果について、プロジェクト終了時までの成果から評価することはあまり意味がなく、今後の進展をフォローすることによって有効な施策であったのかどうか明らかになる。実施者に対しては是非、本プロジェクトの成果を材料開発の加速に生かしていただきたい。

〈その他の意見〉

- 線材製造装置をプロジェクト終了後、停止させたままでなければならない、という大きなブランクを強いていることは緊急性を要するプロジェクト実施の動機と相反しており、広い意味で国益を損なっている。補正予算プロジェクトの制度の緩和や、迅速な継続体制の構築が不可欠で、これは今回のプロジェクトだけにとどまらない課題と考える。
- クラーク数の論点だけではなく、「可採埋蔵量」と「使用できる状態までへの投入条件（エネルギー、コストなど）」を基にした評価が必要ではないだろうか。

最新の希少金属問題に関する動向を踏まえつつ、希少金属代替に関連する他プロジェクトの動向に留意しての連繋が、肝要かと思われる。

- 超電導は、希少金属の低減に役立つだけでなく、エネルギー問題を解決する切り札の一つと考えられる。大金を投入した本プロジェクトをここで終了させることなく、研究開発を継続して実用化に繋げていくことが必要であろう。その際、希少金属の問題と結び付けることは、必ずしも必要ない

と考える。送電ケーブルや強磁場マグネットなど、より実用が近いと思われる超電導応用を全面に出してプロジェクトを立ち上げることはできないであろうか？

- 上（総合評価）で、同期機の界磁巻線の巻枠に極めて低抵抗になる銅を用いることは同期機に悪影響を及ぼす可能性があるとして述べたが、同期機全体の電磁氣的、機械的、熱的解析が動特性を含めて行われ、同期機系全体が試作され、評価されないとこのプロジェクトを評価することは難しいと思う。

1. 2 各論

1) 事業の位置付け・必要性について

高温超電導線材の機能高度化と量産化は、資源制約の克服とともに、省エネルギー、CO₂削減などの地球環境負荷低減を伴う社会的効果が期待でき、事業目的として妥当である。社会的要請から取り組むべき国家的課題であり、大きなリスクを伴うテーマであることから、NEDOの関与が必要と認められる。

しかしながら、本プロジェクトは、その目的として超電導モータへの応用による希少金属削減を前面に打ち出した設定であったが、超電導線材の実用製造技術の開発に予算と時間を集中して実施すべきであった。

また、超電導モータの実現、実用化のためには、多くの技術的課題が存在しており、本プロジェクトから超電導モータの実用化による希少金属の低減までには、相当の距離がある。今後、この距離をどのようにして埋めていくのが問題であろう。

〈肯定的意見〉

- 希土類材料の使用量削減については、効果がある事が示されており、妥当であろう。
- 希少金属の使用量を減少させることができる可能性のある技術開発であると認められる。また、エネルギー効率の向上（低炭素化）にかかわるテーマで公共性が高いこと、しかしながら民間だけではリスクが大きすぎることから、NEDOプロジェクトとして適当である。
- 高温超電導線材の機能高度化と量産化は、環境・エネルギー問題に対して効果をもたらす様々な超電導応用に向けて不可欠な技術的課題である。しかし、近未来に大量にニーズが発生するものではなく大型市場の形成にも時間がかかる。このような課題に対して、NEDOの関与は適切でかつ必要である。
- 資源戦略が重要となっている現状を考えれば、事業目的はほぼ妥当であり、また、NEDOが担当する事業としても妥当であると考ええる。
- NEDOの関与により、世界と競争しているイットリウム系複合材料の開発において1050m×534Aで達成されたことを評価する。
- 資源制約の克服とともに、省エネルギー、CO₂削減などの地球環境負荷低減を伴う社会的効果が期待でき、事業目的として妥当である。社会的要請から取り組むべき国家的課題であり、大きなリスクを伴うテーマであることから、NEDOの関与が必要と認められる。グローバル化の流れの中で、欧米ベンチャー企業にみられる研究開発資金の創出・事業化手段とは異なる事業化スタイルとして、NEDOの担う役割は大きい。

〈問題点・改善すべき点〉

- 他の代替手段と比べての位置づけをより明確にすべきと思う。
効果は、500kW 回転機を中心とした置き換えとなっているが、対象範囲と実現の上での条件を、より明確にされると良いと思う。本来の希少金属代替の目的には合致しているが、コスト評価などを含めた置き換え見通しが十分にはみえず、従って、投じた予算と効果の比較ができない。
- 超電導モータ（回転機）の実現（実用化）のためには、多くの技術的課題が存在しており、本プロジェクトから超電導モータ（回転機）の実現による希少金属の低減までには、相当の距離がある。今後、この距離をどのようにして埋めていくのかが問題であろう。
- 製造エネルギー等ライフサイクルエネルギーの評価が示されていない。勿論、プロジェクト終了時点でも評価は出来る段階ではないと推察されるが、少なくともライフサイクルエネルギーを評価することが必要であるとの見解を示しておいていただきたい。
- 超電導線材開発は、資源戦略の一面を有するとしても、環境・エネルギー分野などそれのみにとどまらない側面をも有しており、より広い視点でのテーマ設定も可能であると考え。
- 希土類代替技術を創出するための超電導線材開発というやや飛躍のあるプロジェクトであり、成果の優劣によらず希土類代替技術への見通しが短期にはっきりするものではない。本プロジェクトは補正予算であり短期に明確な成果とその効果が期待されるものであるべきである。これは実施者側に対してではなく、NEDO、経産省に再考をもとめるべきものであり、今後、類似のケースに対しては社会に理解が得られやすくなるような配慮、施策が必要と考える。
- イットリウム系複合材料は、株式会社フジクラが 2008 年 2 月に 504m × 350A を達成されていたこと及び浅野克彦委員のご質問に対するご回答で、超電導／常電導／超電導接続が低抵抗で実現できているということであれば、経済性が見通しが立てば民間活動のみで改善でき、達成可能な目標であったようにみえます。
浅野克彦委員のご質問に対するご回答で、経済的にも成り立つ見通しを立てておられているようですが、これはこのプロジェクトの成果によるものではないようにみえます。
イットリウム系複合材料の開発は経済的に成り立つことかどうかわかりませんが、そのため、民間企業のみで実施するにはリスクが大きく、NEDO の関与なしでは進められないと思っていましたが、以上の二つからそうではないようにみえます。従って、NEDO の関与が必要とされる事業かどうかが

わからなくなりました。

事業目的の妥当性については、同期機を含むシステム全体で経済性、保守性等を総合的に検討することが必要ですが、同期機ができていないし、回転もさせていない現段階では、評価することは難しい。

〈その他の意見〉

- ・ イットリウム系複合材料のみならず超電導材料は新しい材料、構造、製法の報告が引き続きある状態である。さらに、新構造超電導モータの報告もある。その都度実用化・事業化に結びつき、開発に費やした費用に見合う利益を生んでいけば何も問題ない。イットリウム系複合材料の開発や新構造超電導モータの開発は実用化・事業化を目指して NEDO をはじめとする公金による多額の費用支援を受けて進められてきたが、費やしてきた費用に見合う利益を生むような循環システムになることが望まれる時期に来ていると思う。そうならなければ公費をつぎ込むことは続かないと思う。さらに、モータは電力変換制御装置、センサ、減速機等を含むモータシステムとして成り立つので、小型化、高効率化、経済性、保守性等はモータシステム全体として捉えることが必要であると思う。
- ・ 効果の評価は「国内製造」のみを対象にした試算が出ているが、グローバルな視点からは、海外生産・需要も含めた評価として、本成果を発展展開させていく考えがあっても良いかと思う。
とりあげる対象が Nd+Dy か、或いは Dy だけか、若干、曖昧に感じた。施策の効果およびその評価は、その点に依存する所もある。

2) 研究開発マネジメントについて

「超電導線材の開発」という観点からは、研究開発の目標、計画ともに妥当であると認められる。特に個別テーマ①「超長尺イットリウム系複合材料における希少金属使用量低減技術開発」（線材開発）は戦略的目標で世界トップレベルであり、判断指標も定量的で明確である。また、高い技術力を有する企業と超電導線材評価に実績のある大学を組み合わせた実施体制も妥当である。さらに、プロジェクト期間が短く、大型生産設備導入後の運転期間がほとんどなかったなかで、東日本大震災による研究中断に対しても適切に対応しており、評価できる。

一方、モータ等向けイットリウム系複合材料の開発というように、既存モータ等の代替と位置づけられる開発の場合は、モータ等を含むシステムとして既存のものより経済性、保守性等を総合的にみて優位であることが必要である。このような観点で代替可能かどうかの検討が十分ではない。また、超電導モータの実用化のためには、コストの問題も含めて多くの技術的課題を克服する必要があると考えられるが、これらの技術課題を克服して実用化につなげる戦略や知財マネジメントの方針が必ずしも明確にはなっていない。

〈肯定的意見〉

- 「超電導線材の開発」という観点からは、研究開発の目標、計画ともに妥当であると認められる。また、高い技術力を有する企業と超電導線材評価に実績のある大学を組み合わせた実施体制も妥当である。
- 高温超電導の発見以来、我が国の超電導研究開発を牽引してきた ISTEK を中心に据えた体制 (iSTERA+大学) は妥当である。主たる開発目標は、第二世代高温超電導線材開発において日本が世界のトップに立つという野心的なものであり、評価できる。スケジュール的には、約1年のプロジェクトであり、やや目標が高いと感じられる面もあるが、すべてのテーマにおいて目標が達成されており、結果的に大いに評価できるものとなった。
- 開発体制やマネジメントについては、概ね適切なもので、短期プロジェクトで震災の影響がありながら想定していた主な成果がほぼ得られている。特に期間内に大型生産設備の導入およびその試運転における順調な動作は評価できる。
- 東日本大震災による研究中断に対して適切に対応している。
- 500kW 級、1800rpm 級の同期機の界磁巻線に限定すれば、長さ 1km のイットリウム系複合材料の研究開発目標は妥当である。株式会社フジクラが 2008 年 2 月に 504m×350A を達成されていたことから目標が達成できると予想できる研究開発計画を立てられたことで研究開発計画も妥当

である。研究開発実施の事業体制についても、実用化シナリオに基づき、成果の受け取り手に対して、関与を求める体制を整えているかがよくわからないことを除けば妥当である。

- 目標は高く、特に使用量低減技術（線材開発）は戦略的目標で世界トップレベルであり、判断指標も定量的で明確である。目標達成に必要な要素技術を明確にしておき、その関係や順序も適切である。実施体制は、基盤技術や実績を有する関係者が適切な組合せで参画している。環境整備、実施者間の連繫がとられ、成果の受け取り手の関与を求める体制も構築できている。情勢変化の中で、震災による被災を克服した努力も認められる。

〈問題点・改善すべき点〉

- 超電導モータの実用化のためには、コストの問題も含めて多くの技術的課題を克服する必要があると考えられるが、これらの技術課題を克服して実用化につなげる戦略や知財マネジメントの方針が必ずしも明確にはなっていない。
- 成立性と最適性の評価が必要と思われる。使用量低減技術（線材開発）では、特に、長さ 1km の必要性（必須ではなく望まれるという位置づけと理解）をより明確にすべきと思われる。接続して対応することでも成立性があるのではないか（特性が落ちても）。計画としてのスケジュールにはやや無理があったのではないかと思われる。実用化につなげる戦略はあるが、実現性やその前提が若干不明確と思われる。
- 約 1 年間のプロジェクトに集中的に投じられた約 30 億円／年という開発費については、もう少し長い 2-3 年のスパンのプロジェクトの方が適切であったように感じられる。
- プロジェクト期間が短く、大型生産設備導入後の運転期間がほとんどなかったなかでは、出来る限りの進捗を認めるが、この設備が安定に稼働し高特性線材の量産、さらには希土類代替技術に展開できることを保証しているわけではない。このような確実な成果まで期間的に至れないプロジェクトに対しての評価は、その後の進展をフォローしてから再度定められるものであるべきと考える。
- 同期機の界磁巻線の長さは同期機の出力、毎分回転数によって異なり、イットリウム系複合材料を用いた線材単長が 1000m を実現できたとしてもそれで十分な場合もあればそうでない場合もあるだろう。そうでない場合は接合してしようすることになると思う。接合技術が、浅野克彦委員のご質問に対するご回答で、今後も研究開発を継続されていくものの超電導／常電導／超電導接続が低抵抗で実現できているということであれば、株式

会社フジクラで2008年2月に504m×350Aを達成されていたイットリウム系複合材料を用いた線材を接合すればよいことになり、その意味では研究開発目標は妥当でないかもしない。

成果をモータ等として実用化しようとするとき受け入れてくれる民間企業も重要であるが、そのあたりについては明確になっていないように思う。この研究開発の中で個別テーマ②の必要性は実用化という観点ではわからない。

この研究開発の中で個別テーマ③は同期機を含むシステムとして設計、試作、評価しないとわからないことが多いと思う。

〈その他の意見〉

- ・ 超長尺の超電導テープの製造期間が安定して確保できるかの検討がなされるべきである。東日本大震災以後、それ以前の常識が適用できなくなっている。
- ・ モータ等向けイットリウム系複合材料の開発というように、既存モータ等の代替と位置づけられる開発の場合は、モータ等を含むシステムとして既存のものより経済性、保守性等を総合的にみて優位であることが必要である。このような観点で代替可能かの検討が十分ではないように思う。

3) 研究開発成果について

すべての数値目標をクリアしており、全体としての目標達成度は相当に高い。また成果の中には、世界初あるいは世界最高水準のものがいくつか含まれている。本技術開発は超電導線材の各種機器への実用化を大きく進展させるものとして高く評価できる。これまで、線材特性では世界一であったが長尺化で遅れをとっていた日本の状況を一変させ、特性、長尺化のいずれにおいても日本が世界一となる可能性を示した点において、きわめて重要な成果が得られた。論文発表、プレス発表、展示会発表はタイムリーで適切に行われている。

しかしながら、超電導モータに限定すると、本技術開発が超電導モータの実用化を大きく前進させた、とまでは言えない。従って超電導モータが、従来の希少金属使用のモータの代替になるかどうかは、現段階では必ずしも明らかでない。本来の希少金属代替の目的には合致しているが、他の競合技術との重量・体格比較に加えて、コスト比較評価など、置き換え需要を実現する評価が今後必要である。

〈肯定的意見〉

- 目標値は主に性能に対して設定されている。その意味で成果は目標値をクリアしており、世界初あるいは世界最高水準にある。
- 設定した目標内容と目標値は、成果として確実に達成されており、確認・検証手段も明確である。技術成果は世界最高水準であり、市場の拡大につながる可能性はあり、その意義が大きい。汎用性については今後の課題であるが、取り組むべき価値がある成果が得られている。論文発表、プレス発表、展示会発表はタイムリーで適切に行われている。一般への情報発信もされている（成果発表会の開催など）。
- すべての数値目標をクリアしており、全体としての目標達成は相当に高い。また成果の中には、世界初あるいは世界最高水準のものがいくつか含まれている。本技術開発は超電導線材の各種電力機器への実用化を大きく進展させるものとして高く評価できる。知的財産、論文発表等も満足すべきレベルであると認められる。
- 全ての項目について設定された目標値をクリアまたはクリアできる見通しが立っていることを認める。
- これまで、線材特性では世界一であったが長尺化で遅れをとっていた日本の状況を一変させ、特性、長尺化のいずれにおいても日本が世界一となる可能性を示した点において、きわめて重要な成果が得られたものとする。
- 東日本大震災による停電の影響が無ければ、目標値を達成できた段階まで進捗したと認められる。

〈問題点・改善すべき点〉

- 目標値の設定に根拠の乏しいものがあり、そのクリアが将来の材料化技術として満足できるレベルであるものかどうか不明である。特に希土類原料の高収率化にかかわる研究については、現在の材料と同レベルの臨界電流特性が前提となるべき課題であり、目標値の達成の実際の意義は乏しい。
- 超電導モータ（回転機）に限定すると、本技術開発が超電導モータの実用化を大きく前進させた、とまでは言えない。従って超電導モータが、従来の希少金属使用のモータの代替になるかどうかは、現段階では必ずしも明らかでない。
- 成果を担保する前提や条件を、より明確にしておくべき点があると思う。
 - －MOD法のパッチ処理の妥当性
 - －収率向上を規定する前提（特性など）本来の希少金属代替の目的には合致しているが、他の競合技術とのコスト比較評価など、置き換え需要を実現する評価が網羅されていないと思われ見通しが確実と言い切ることは難しい。導入比率仮定の妥当性の評価も難しく、従って、投じた予算と効果の比較をすることが難しい。知財マネジメントの方針は良いとして（ノウハウ秘匿）、周辺特許をおさえると、顕現性が出しやすい回転機構造などは出願権利化するといった戦略もあるのではないかと思う。
- プロジェクト終了後、長尺線材製造設備が稼働していない点は、制度面で早急に改善されるべきものと考えます。
- 本プロジェクトでは、継続的に超長尺線材が製造できるかを示す時間が無かった。
- 成果が、他の競合技術と比較して優位性があるかについては、性能が世界初あるいは世界最高水準にあればよいというものではない。経済性等他のこともまた技術の中に含まれる。それについて今後も技術開発が必要なようで、成果が市場の拡大あるいは市場の創造につながるかどうかはわからない。

原理的なところはノウハウでなく特許として知的財産権を取得すべきである。それが無いのは原理的な技術開発は済んでいるというように見える。成果の普及という点ではこれからというところと思う。

〈その他の意見〉

- ・ 目標は達成しているが、成果を踏まえて次に向けた課題抽出と対策立案を提言されると、今後に向けてより意義が高まると思う。
- ・ 個別テーマ③でも述べているが、界磁に鎖交する磁束は変化する。界磁巻

線の巻枠に銅を用いておられるが、銅は 40K 程度の低温では極めて低抵抗で、銅に鎖交する磁束が変化すると大きな渦電流を流れ、それが消滅するのに長時間かかり、制動力を発生させる可能性がある。このことについて検討していく必要があると思う。

- 超長尺線材の継続的製造経験を積み、安定した製造が出来ることが示される様、今後の取り組みに期待される。また、成果物(線材)が多く学界に提供され、望外の使用方法や対象が生れることに期待した。

4) 実用化の見通しについて

波及効果として、超電導応用機器全般に波及する可能性があることを示しており、本技術開発は超電導線材の様々な電力機器への実用化を大きく進展させるものとして高く評価できる。PLD (Pulsed Laser Deposition : パルスレーザー蒸着) 法による線材製造については、長尺製品開発の見通しが立ったといえる。

しかしながら、超電導モータに関しては、実用化のイメージ・出口イメージは必ずしも明確でない。プロジェクト全体としても、実用化までの今後の研究開発の見通しが必ずしも明確に示されていない。また、今後の進捗を見ながら希土類代替技術への効果は再度検証されるべきものである。

〈肯定的意見〉

- 長尺、高臨界電流特性の線材が製造できそうな装置が設置されたことについては、実用材料開発のイメージを強くしたものと考えられる。線材製造については少なくとも PLD 法線材は長尺製品開発の見通しが立ったといえる。長尺線材の開発を経ての応用研究、機器開発の加速など波及効果は十分に見込める。
- 波及効果として、本技術開発は超電導線材の様々な電力機器への実用化を大きく進展させるものとして高く評価できる。また震災で変更があったものの、マイルストーンも明確に示されている。
- 開発したイットリウム系複合材料は超軽量高性能モータ向けにこだわらなければ出口はあるかもしれない。低温超電導材料を用いた線材は現在でもその材料でしかできない強磁場を必要とする特定の用途に使用されている。経済性で勝ればそこに出口はあるのではないか。
- 実用化シナリオを段階的に設定し、また実施者（事業化の主体）を明確にしていることは、妥当な内容である。波及効果として、超電導応用機器（磁石関係）全般に波及する可能性があることを示しており、汎用複合材の提供が実現していけば、妥当な構想と考える。プロジェクト実施自体が当該分野の研究開発や人材育成等を促進している。
- 実用化の必須要件として長尺・高特性線材の製造技術開発があり、その意味で本プロジェクトの成果（特にテーマ①）はきわめて重要である。

〈問題点・改善すべき点〉

- 本プロジェクトでは超電導モータを出口イメージとして想定しているが、それにとらわれると他分野応用への適用に妨げになりかねないことを危惧する。広範な応用分野を視野に入れた今後の進展を期待する。
- 超電導モータに関しては、実用化のイメージ・出口イメージは必ずしも明

確でない。また、プロジェクト全体としても、実用化までの今後の研究開発の見通しが必ずしも明確に示されていない。

- 実用化のためのマイルストーン設定の根拠、課題をさらに具体的に示されると、実現性に向けての施策がより明確になってくると思う。
波及効果における「永久電流モード用途」について、技術的に厳しい点もあるかと思うが、基礎特性から評価検討されている点は確認できた。長尺化と接続数の関係からの最適化（機種に依存するが）が今後の課題の一つにもなると考える。
- プロジェクトの目的である希土類代替技術への展開についての出口イメージはほとんど見えていないが、これは基盤技術開発までという短期間プロジェクトでの了解事項である。但し、今後の進捗を見ながら希土類代替技術への効果は再度検証されるべきものである。
- 開発したイットリウム系複合材料がモータ向けとなると、代替材料に過ぎないから、経済性等総合的に問題ないということにならなければ出口イメージは描けない。1000kW 級の大出力モータや風力発電用大型発電機の我が国の世界シェアは高くはないと聞いている。開発したイットリウム系複合材料を用いた超軽量高性能モータや発電機で巻き返すことができればよいが、そのような出口イメージは明確になっていないと思う。
イットリウム系複合材料の開発、その応用開発を担っている人材は限られている。かなり長い期間にわたって研究開発が進められているが、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は不明である。

〈その他の意見〉

- ・ 同期機の界磁巻線を設計、試作、評価しただけで、同期機として設計、試作、評価したわけでもないのだからわけではないので実用化の見通しについて述べるのは早いのではないかと思う。
- ・ 実用化、波及効果では、置き換え需要が主体となっているが、それ以外にも、超電導ならでは、或いはこのイットリウム系ならでは、といった観点での新規応用の狙いも期待したい。

2. 個別テーマに関する評価結果

2. 1 超長尺イットリウム系複合材料における希少金属使用量低減技術開発

1) 研究開発成果についての評価

エキシマレーザ PLD 法では、目標値を大幅に超えて達成した成果のみならず課題への解決策を確実に実現し、結果として更なる長尺化の可能性も示しており意義が大きい。高く評価できる成果である。一方、TFA-MOD (Trifluoroacetic acid- Metal Organic Deposition : 三フッ化酢酸塩を原料に用いた有機酸塗布熱分解) 法では、プロセス開発を通して課題を解決し目標を達成した。更に同時に開発した長尺複合材料の高速評価技術により、製造・プロセス条件を特性に反映できる手法を確立した。今後に向けて意義ある開発と評価できる。

しかしながら、PLD 法の連続成膜で、随所に現れる特性低下・バラツキの原因が必ずしも明確になっていない。今回の新規開発技術との関連の有無も含めて、具体的な原因の究明とともに安定生産の見通しを得ることを期待したい。

なお、時間的制約が大きかった点は考慮されるべきであるが、TFA-MOD 法による線材作製において長尺線材作製がパッチ型線材にとどまった点にやや残念な印象が残る。超長尺線材の継続的製造経験を積み、安定した製造が出来ることが示される様、今後の取り組みに期待する。

〈肯定的意見〉

- 成果は目標値をクリアしており、世界初で世界最高水準であると思う。
- PLD 法では、数値目標を大幅に上回る線材の作製に成功し、高く評価できる。また、TFA-MOD 法においても目標は達成されており、評価できる。これらの成果はいずれも世界最高レベルであり、今後の実用化に向けたコーテッドコンダクタ開発の基盤になると期待される。
- PLD 法においては、最長 3km までの線材作製可能な装置が設計、導入され、初期稼働に一応成功している。MOD 法においてはバッチ式 1km 長の焼成設備が納品され初期稼働を経験した。
- 東日本大震災による停電の影響が無ければ、目標値を達成できた段階まで進捗したと認められる。
- エキシマレーザ PLD 法による線材作製において、高い目標を設定したにもかかわらず 1km 長線材作製に一定のめどをつけ、また線材特性及び線材長のいずれにおいても世界最高レベルに肉迫する値を得た点は大いに評価すべきと考える。また、TFA-MOD 法による線材作製については、バッチ炉において一定の成果を上げるとともに、RTR 長尺炉の作製にまで踏み込んだ点は評価できる。

- エキシマレーザ PLD 法では、目標値を大幅に超えて達成した成果のみならず課題への解決策を確実に実現し、結果として更なる長尺化の可能性も示しており意義が大きい。高く評価できる成果である。

一方、TFA-MOD 法では、課題をプロセス開発を通して解決し目標を達成したが、更に同時に開発した長尺複合材料の高速評価技術により、製造・プロセス条件を特性に反映できる手法を確立した。今後に向けて意義ある開発と評価できる。

1年間という短期間で、且つ震災影響を乗り越えて、世界最高レベルの目標を達成した実施者のご努力、開発アプローチ・マネジメントの高さは評価できる。

〈問題点・改善すべき点〉

- 長尺線材における I_c (臨界電流) バラツキの原因が必ずしも明確になっていない。この原因究明を第一にやる必要があるのではないか。TFA-MOD 法では、パッチ式成膜であり、1km 線材全体にわたっての成果ではない。
- 主たる目標値が線材単長および臨界電流に設定されており、それは達成されたが、研究開発の世界比較にある過去の成果 504m×350A や 1065m×282A の開発で市場の拡大或いは市場の創造につながる兆しが見られないあるいは限定的なことは、それが難しいことを示していると思う。知的財産権のうち特許出願がないということは特許で優位性を維持するような基本的な技術開発はほぼ終わっているということのように思う。
- PLD 法の連続成膜で、随所に現れる特性低下・バラツキに関して、分科会席上、「生産段階では解決、問題無い」旨ご回答頂いたが、今回の新規開発技術との関連の有無も含めて具体的な原因とともに安定生産の見通しを示されると、実用化に向けての不安要素を払拭でき、より価値が高まると思う。MOD 法のパッチ処理はやむを得ない方策として、長さに対するプロセス処理の安定性・信頼性を別途確認するなど (1km でなく適切な長さで超電導特性を測定せずとも成膜の評価とか)、方策の妥当性評価を行うと良かったと考える。
- 時間的制約が大きかった点は考慮されるべきであるが、TFA-MOD 法による線材作製において長尺線材作製がパッチ型線材にとどまった点にやや残念な印象が残る。
- 今後、超長尺だけでなく高臨界電流特性と高歩留まりの条件をクリアしないと実用的な技術とならない。PLD 法では複数ターゲットの使用手法、MOD 法では全長にわたる 2 軸配向基板上での反応条件の把握が鍵になる。
- 本プロジェクトでは、継続的に超長尺線材が製造できるかを示す時間が無

かった。

〈その他の意見〉

- ・ 超長尺線材の継続的製造経験を積み、安定した製造が出来ることが示される様、今後の取り組みに期待される。また、成果物(線材)が多く学界に提供され、望外の使用方法や対象が生れることに期待したい。
- ・ モータ等向けに開発したというのであれば、線材としてモータ向け等に必要な電氣的、磁氣的、機械的特性が示されるべきものと思う。
- ・ 本プロジェクトで設置した装置の初期稼働状況までは明らかになったが、生産装置としての実績を見ないと、装置導入の真の効果は見極められない。
- ・ PLD 法では Gd、MOD 法では Y を使用しており、Gd と Y の特性の違いを目標値との関係も含めて明確にされることも必要かと思う (Gd と Y の希少度の違いと特性の違いをあわせての選択といった観点から)。
諸外国の最新の開発状況と“将来予想”とあわせて、今回の成果の位置づけ・優位性を可能な範囲で示して頂くと、成果の意義がより高いものになると思う。

2) 実用化の見通しについての評価

1km を超える高特性線材の実現という本テーマの成果は、モータのみならずより広範囲の超電導線材応用に道を拓くものであり、実用化に大きな期待を抱かせる。モータに限ることなく、個別機器ごとに明確な開発目標を今後設定し、実用化を目指すことが望ましい。

一方、モータにおいては、永久磁石の研究開発も進められているし、永久磁石を用いず銅線と鉄心を用いたモータの研究開発も進められている。経済性、保守性等を総合的にみて優位に立てなければ実用化は進まない。素材事業は需要先の事業と強く連携するので、相互の関係での時間軸設定が妥当か、さらに検討していく必要がある。

〈肯定的意見〉

- 1km を超える高特性線材の実現という本テーマの成果は、モータのみならずより広範囲の超電導線材応用に道を拓くものであり、実用化に大きな期待を抱かせる。モータに限ることなく、個別機器ごとに明確な開発目標を今後設定し、実用化を目指すことが望ましい。
- 開発したイットリウム系複合材料がモータ向けと出口イメージは明確になっている。
- 目標達成度の高さから、実用化に向けての必要とされる条件により近づいたことは評価できる。プロジェクト実施自体が、当該分野の設備技術の発展とともに研究開発、人材育成等を促進していると言える。
- 長尺 1km 長以上の線材の用途は多い。つまり出口はあるので高性能、高均一性、高歩留まりの線材開発に結び付けば、前途は明るい。また線材量産によるモータなど機器開発の加速も期待できる。
- 長尺製造装置を導入できたのであるから、数 10 バッチ処理して、安定的に供給できる事を示すべきである。副産物として、イットリウム系線材が供給され、線材の応用研究が促進される。
- 今回の成果により、コーテッドコンダクタを用いた将来の様々な実用超電導機器のイメージが、かなり明確になってきたと思われる。今回の優れた成果は、高温酸化物超伝導線材の製造や、その応用を志向した研究開発に大きな波及効果を及ぼすと考えられる。

〈問題点・改善すべき点〉

- 実用化のためのマイルストーン設定の根拠、課題をさらに具体的に示されると、実現性に向けての施策がより明確になってくると思う。
「安定製造技術」が、どのレベル（長尺化、特性）で実現するという前提

かを示して頂くと、実用化に向けての姿がより明確になると思う。

- 今回の成果を踏まえた今後の研究開発の見通しが必ずしも明確でない。**TFA-MOD** 法はコストの面で **PLD** 法よりも有利と考えられるが、現在のバッチ式の熱処理では、より長尺線材の熱処理に限界があるのではないかと。**Reel-to-Reel** の研究を進めるべきである。
- 前コメントとはやや矛盾するが、プロジェクトの評価として考えれば、本プロジェクトの出口が従来型モータの代替に設定されている以上、そのために必要な線材形態や機械特性等まで考慮された目標設定がなされるべきであったと考える。
- 出口イメージが明確になっておれば実用化に結びつくとは限らない。モータ向けが出口であれば開発されたイットリウム系複合材料は永久磁石や銅線の代替に過ぎない。永久磁石の研究開発も進められているし、永久磁石を用いず銅線と鉄心を用いたモータの研究開発も進められている。経済性、保守性等を総合的にみて優位に立てなければ実用化は進まないと思う。これを進むと思えるだけのマイルストーンが明確になっているかどうかよくわからなかった。市場の拡大ということであれば、株式会社フジクラの2008年2月の504m×350A線材の開発や米国の2009年8月の1065m×282A線材の開発でその兆候が見られるはずで、それが見られないあるいは限定的であると思うので、市場の拡大が期待できないそうにないと思う。従来材料では市場拡大に至らなかったが、今回の材料ではできるといふのであれば、市場の拡大ができる理由を示してもらふ必要がある。

〈その他の意見〉

- ・ 複合材料（線材）の事業化が、高性能回転機（機器）事業化に先立って設定されるのは理解できるが、素材事業は需要先の事業と強く連携するので、相互の関係での時間軸設定が妥当か、さらに検討していく必要があると思われる。
- ・ 試用実績を稼ぐべく、広くユーザーに扱われる機会が増えることが実用化の広がりや普及の速度に影響する。国内の各種研究プロジェクトなどで積極的に取り扱われる機会が増えることが望ましい。
- ・ 成果はモータ向けというより永久磁石や銅線の代替に過ぎないということになり、実用化に際しては経済性、保守性が問題になる。成果が代替ではない新規分野に展開できれば波及効果が望めると思う。

3) 今後に対する提言

優れた成果が得られているが、超電導線材としてはまだ実用レベルに届かない。出口であるモータの競合技術に対して、差別化できる性能、使いやすさ、価格など何らかの特長を備えた線材開発に結び付けていかなければならない。日本は現在、世界最大の超電導線材供給元となり得る状況にあり、その意味で、本テーマの成果が早期の実用化として結実し、産業として成立するよう研究開発をさらに迅速に進めていくべきである。

〈今後に対する提言〉

- ・ PLD 法と MOD 法の棲み分けなど、分科会でご説明頂いた通りと思うが、適用先製品の異なる要求・仕様に対して、評価指標と各々が持つ特長をさらに明確にして整理頂くと、今後の応用展開に有益な情報になると思う。
- ・ 優れた成果が得られているが、超伝導線材としてはまだ実用レベルに届かない。予算措置もふくめて、今後は説得力のある研究開発計画を提示することが必要であろう。また、コスト面で有利な MOD 法による長尺線材の開発を急ぐべきではないだろうか。
- ・ モータ向けの場合、線路単長が 1000m 程度あればよいというものではない。コイルに用いる線路長はモータ出力によって変わるので、さらに長い線路長が必要な場合が生じる。超電導／常電導／超電導の接続が低抵抗でできるということなので、それに期待している。
界磁巻線のみならず電機子巻線への展開を考えると、モータ出力によって電流値も変わり、大電流を流すことが必要になる場合もあると思うが、これについては今後の課題ということでしょうか。
- ・ 競合技術に対して、差別化できる性能、使いやすさ、価格など何らかの特長を備えた線材開発に結び付けていかなければならない。
- ・ 日本は現在、世界最大の超電導線材供給元となり得る状況にあり、その意味で、本テーマの成果が早期の実用化として結実し、産業として成立するよう研究開発をさらに迅速に進めていくべきと考える。

〈その他の意見〉

- ・ エキシマレーザ PLD 法と TFA-MOD 法の両方で超長尺リットリウム系複合材料を開発されたのは、将来両方とも生き残る技術ということでしょうか。
- ・ 開発された設備を今後、効果的に活用・運用することで、当該分野の伸張・発展に貢献頂きたいと思う。

2. 2 イットリウム系複合材料の製造工程における希少金属利用率等の効率向上技術開発

1) 研究開発成果についての評価

レーザ CVD 法、ならびに YAG レーザ PLD 法ともに、原料収率の数値目標をクリアしており、今後の発展が期待される新しいプロセスを採用し、一定の特性の線材作製に成功した点は評価できる。

しかしながら、線材製造方法の改善による希土類利用率向上という形での節約は、希土類使用量の対永久磁石比の低減が難しい場合には意味を持つが、このプロジェクトでは性能（＝臨界電流特性）×収率の観点からの効果が認められない。超電導線材におけるレアアースの使用量は臨界電流特性にも大きく依存し、利用率が高くても特性が低ければ、使用量は増大させざるを得ない。従って利用率と特性との双方を考慮に入れた議論が必要である。

本テーマは、複数年度の未来技術開発課題として扱われるべき研究内容である。

〈肯定的意見〉

- LCVD 法、Nd:YAG-PLD 法という今後の発展が期待される新しいプロセスを採用し、一定の特性の線材作製に成功した点は評価できる。
- 設定された目標を達成する成果をあげている。目標達成のためのアプローチも、固体原料・固体成膜（レーザ CVD 法）といった挑戦的課題や高度なプロセス条件最適化や成膜制御技術（YAG レーザ PLD 法）に取り組んでいる。
- レーザ CVD 法、ならびに YAG レーザ PLD 法ともに、原料収率の数値目標をクリアしており評価できる。特に YAG レーザ PLD 法では高い収率が達成された。また、両手法ともに小型ながらも長尺化を念頭に置いた Reel-to-Reel の装置を用いて評価している点も評価できる。
- 成果は目標値をクリアしていると思う。
- 収率は目標値まで向上している。
- 収率の改善目標という点は達成された。但し、あくまでも数値上のことであり、塗布法であれば原理的に 100%に達し得る。

〈問題点・改善すべき点〉

- 超電導線材におけるレアアースの使用量は臨界電流特性にも大きく依存する。利用率が高くても特性が低ければ、使用量は増大させざるを得ない。従って利用率と特性との双方を考慮に入れた議論が必要である。

- ターゲットを近づける、反応領域に対してターゲットを広く取る等は収率を上げる常套であるが、製膜された超電導特性の評価が定まっていない。今後の展開でどのような方向性になるかが示されているとなお良くなる。
- 収率向上の目標設定において、同時に規定すべき前提や条件が明確になっていなかったかと思うが（自主的に J_c （臨界電流密度） $\geq 1\text{MA}/\text{cm}^2$ を設定していたとのご説明を頂いたが）、特性、寸法、スループットの規定条件がある程度必要かと思う。
- 線材製造方法の改善による希土類利用率向上という形での節約は、希土類使用量の対永久磁石比の低減が難しい場合には意味を持つが、このプロジェクトでは性能（＝臨界電流特性）×収率の観点からの成果が全く認められない。
- 収率において、目標値を従来値以上とした点はやや説得力に欠ける印象が否めない。目標値の設定根拠は明確であることが望ましいと考える。
- イットリウム系複合材料の製造工程における希少金属利用率等の効率向上技術開発により、経済性が改善できるのであればこのテーマを取り上げることに大きな意義があり、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と思うが、その見通しは不明で、この個別テーマで市場の拡大或いは市場の創造を期待する時期ではないと思う。

〈その他の意見〉

- ・ Nd:YAG-PLD 法の収率向上効果については、真に YAG レーザによる効果かどうかやや曖昧であると感じられる。今後その検証がなされることを期待する。
- ・ レーザ CVD 法と YAG レーザ PLD 法の両方でイットリウム系複合材料の製造工程における希少金属利用率等の効率向上を図ろうとされたのは、将来両方とも生き残る技術ということでしょうか。
- ・ 複数年度の未来技術開発課題として扱われるべき研究内容であるが、劇的な収率向上が達成されたとしても、インパクトは大きくない。

2) 実用化の見通しについての評価

レーザ CVD 法は従来の MOCVD 法と容易に組み合わせることができ、また YAG レーザ PLD 法は従来のエキシマレーザ PLD 法におけるレーザを容易に代替できる。現時点では比較的収率が高い新規成膜手法を増やしたというレベルに留まっており、実用化が強く推せるような長所は見いだせていないが、今後の進展により、実用化において重要な役割を果たす可能性もあり、引き続き開発が進められることを期待する。

〈肯定的意見〉

- 収率が増える事が示されているが、他の方法との比較検討が出来るようになる準備ができたと考えられる。
- LCVD 法は従来の MOCVD 法と容易に組み合わせることができ、また Nd:YAG-PLD 法は従来のエキシマレーザ PLD 法におけるレーザを容易に代替できる。今後の進展により、実用化において重要な役割を果たす可能性もあり、引き続き開発が進められることを期待する。
- 今回の手法をベースにして高臨界電流密度を有する線材の開発に成功すれば、希少金属使用量の大幅な低減が実現し、大きなコスト低減効果が得られて、応用超電導機器の拡大につながる成果となり得る。
- 出口イメージは明確になっている。
- プロジェクト実施自体が当該分野の研究開発や人材育成等を促進しているとは言える。

〈問題点・改善すべき点〉

- 現段階の技術動向で本プロジェクトの 1 テーマとすることにはやや違和感があり、より基礎的なステージでの開発が好ましいと考える。
- レーザ CVD 法、ならびに YAG レーザ PLD 法ともに長尺化に適応し得る手法であると思うが、km 級線材作製に応用する場合の見通しが明確でない。km 級線材に適用しようとする場合、困難に直面することはないか。
- 比較的収率が高い新規成膜手法を増やしたというレベルに留まっており、実用化が強く推せるような長所はこのプロジェクト期間内には見いだせていない。
- 得られた製膜の超電導特性の評価をする手順(今後の展開)を示されるべきである。
- 実用化イメージはない。
- 実用化に向けての主体は、組合、線材メーカーということだが、実際に本開発内容や成果をどう活用していくか、さらに明確にして頂くと、より具体

性が高まると思う。波及効果に至る点も含めて、複合材料技術との関連を今後どう考えていくかを明確にされると、今後に向けての具体性が高まると思う。

〈その他の意見〉

- ・ 個別テーマ①が実用化を意識したテーマであるように見えるのに対し、この個別テーマ②は実用化を意識したテーマには見えない。イットリウム系複合材料を用いた線材をコスト分析したとき希少金属の占める割合が高ければこのテーマを取り上げる意義があり、これにより実用化が早まるというのであれば開発を促進しなければならないが、そうではなく、当面個別テーマ①で実用化を目指すというのなら、並行的に取り上げなければならない理由が明確でない。

3) 今後に対する提言

このプロジェクトで試された 2 つの手法は、希土類収率を格別に高くするものではない。むしろ、新しい高臨界電流特性線材の製造手法としての可能性を探り、既存技術を超えるような要素が見つかるかどうかを検討されるべきである。超電導線材開発においていまだ萌芽的な段階にある技術（プロセスに限らず）は多くあると考えられ、それらの基礎的技術開発に広く種を蒔くような施策も重要である。

〈今後に対する提言〉

- ・ 超電導線材開発においていまだ萌芽的な段階にある技術（プロセスに限らず）は多くあると考えられ、それらの基礎的技術開発に広く種を蒔くような施策も重要であるとする。
- ・ 基礎、基盤技術として理解しており、今回の対象範囲に留まらず、他の分野へ当該技術を適用・応用できないか、ご検討頂くと（示されると）良いと思う。
- ・ 個別テーマ①のエキシマレーザ PLD 法や TFA-MOD 法に比べて、性能、経済性等総合的にみて優位に立てる見通しがあれば実用化開発を促進すべきと思う。
- ・ このプロジェクトで試された 2 つの手法は、希土類収率を格別に高くするものではない。むしろ、新しい高臨界電流特性線材の製造手法としての可能性を探り、既存技術を超えるような要素が見つかるかどうかを検討されるべきであろう。
- ・ 原料の使用量と臨界電流特性の双方を睨んだ線材開発を進める必要がある。また、なるべく早く km 級線材の製造に適用して、km 級線材でも高い収率が得られることを確認する必要がある。

〈その他の意見〉

- ・ エキシマレーザ PLD 法、TFA-MOD 法、レーザ CVD 法、YAG レーザ PLD 法が取り上げられているが、将来、互いの長所を生かしてともに実用化されるものでしょうか。それとも発展性を期待するとか知的財産を保有するというような別の観点で開発を実施されているのでしょうか。

2. 3 イットリウム系複合材料を用いた回転機要素技術開発

1) 研究開発成果についての評価

短期間で概念設計、小型モデルコイルの試作と評価を実施し、目標を超える成果を得たことは評価できる。また、界磁巻線構造の比較評価、特性を左右する技術である冷却技術に関する基礎データの取得など、回転機としての重要技術の高度化に着実な取り組みをしている。

しかしながら、技術面だけでなく、今後はコストの面も含めた総合的な検討に基づいて、イットリウム系線材を用いた回転機で、永久磁石を用いた多くの回転機を置きかえることが可能になるのかの検討が重要である。

〈肯定的意見〉

- 設定された目標を達成する成果をあげている。目標達成のためのアプローチも、界磁巻線構造の比較評価、特性を左右する技術である冷却技術に関する基礎データの取得など、回転機としての重要技術の高度化に着実な取り組みをしている。
- 成果は目標値をクリアされているように見えるが、同期機として評価されていないので不明であるが、界磁巻線の巻枠に使われた銅に制動電流が流れることが問題になる可能性がある。
- 短期間での概念設計、小型モデルコイルの試作と評価を実施し、目標を大きく超える成果を得たことは評価できる。
- 2相流ネオンの実験装置が出来た事は評価できる。
- あくまでも設計上のものであるが、性能、希土類使用量の節約の点で、回転機設計に無理がないことが確認されている。
- 500kW級という実規模の回転機において、希少金属使用量が従来の1/130と、目標値の1/10よりも大幅な低減が可能になることを示した。このような定量的な評価は世界初の成果である。

〈問題点・改善すべき点〉

- 技術面だけでなくコストの面も含めた総合的な検討にはなっていない。このため、実際にイットリウム系線材を用いた回転機で、永久磁石を用いた多くの回転機を置きかえることが可能になるのか、必ずしも明確ではない。
- 現時点では不要ではあるが、将来的には線材性能の改善を考慮した際の回転機の仕様の最適化のポイントを明らかにしていく必要がある。また冷却の問題は効率だけでなく運転技術や設備の維持管理にも影響する。超電導モータの優位性だけでなく不利な点も明らかにしながら、選ばれる技術に

育てていかなければならない。

- 超電導回転機としての設計成立性を否定するものではないが、最適化されているかどうか（されていなければどの点かも含めて）を明確にされると今後の展開のためにも意義がさらに高まると思う。
- バックグラウンド侵入熱の評価を今後すべきである。また、サーモサイフォン冷却の限界熱流束の評価が次の課題として挙げられていない。コイル全体としての検討が行われたが、超電導テープへの要求仕様が検討されていない。
- 高温超電導材料を用いた線材で永久磁石または銅線材に代わる回転界磁を、冷却系を含めて開発することは既に行われていることである。回転界磁に用いられる線材に求められる電氣的、磁氣的及び機械的特性を解析することも既に行われている。解析結果と線材の特性を勘案して界磁を設計することも既に行われている。従って、目標値をクリアされたことは評価するが、高温超電導材料としてモータ等向けに開発されたイットリウム系複合材料を用いられた回転界磁を、冷却系を含めて設計され、試作されたとしても、できなかったことを達成されたというような良い評価することは難しい。

複合材料の異方性を考慮した設計によるイットリウム系超電導回転機の使用希少金属量の定量的評価は世界初、イットリウム系複合材料の機械特性上の課題に対応し、高 I_c （臨界電流）を保ちつつ、回転機用傘型コイル試作、評価は世界初と主張されても、それは他の超電導材料を用いる場合でも普通に行う設計、試作、評価業務の範囲と思う。

- 定量的評価はもちろん重要であるが、PM モータを超電導モータで代替すれば、RM (RE) 使用量が激減するのはある意味自明である。少量であっても使用せざるを得ない現状と、トータルコスト面での得失についての考察があれば、より意義の大きな成果となったと考える。

〈その他の意見〉

- ・ 資料 5-2、ページ III-116 によると界磁巻線の巻枠を熱伝導率が良好な銅で構成したとありますが、銅は 40K 程度の低温では抵抗率が非常に小さく、少しの磁束変化でも大きな渦電流が発生するとともにそれが持続します。これは、界磁巻線電流の変化を見かけ上遅くします。また、電機子巻線が作る回転磁界のうち銅に対して変動する分があると渦電流を発生し、ひいては制動力を発生させます。常電導同期機の制動巻線と同様な働きをするのですが、40K 程度の低温では銅の抵抗率が非常に小さく、それが強すぎるのではないかと考えております。この点について検討されたのでしょうか

か。懸念に終われば問題ありませんが、この問題は深刻になると同期機として成立しない場合もあります。

- 液体 Ne 冷却という方式の妥当性について評価者は知識を持ち合わせないが、その実機における妥当性（コスト面その他で成立するか否か）の検証が今後必要なのではないか、という印象を受けた。
- 知財マネジメント戦略方針は理解したが、当該分野（回転機）に関しては、顕現性などの観点も踏まえて、知財（特許権利化）によるオープン戦略も可能かと思う。
- 電動機向けイットリウム系超長尺線材の開発がターゲットであるので、その線材への要求仕様について触れられているべきである。すなわち、変動応力、リップル電流特性、リップル磁界特性、テープ幅上の J_c （臨界電流密度）特性等についてである。

2) 実用化の見通しについての評価

本プロジェクトで概念設計と小型モデル試作までを終えており、また、実規模試作を主眼とした助成事業が進められているとのことであり、今後の進展に期待する。

超電導回転機は、冷却の問題も含めて実用化までに解決すべき多くの技術的課題がある。希少金属使用量の低減は、超電導回転機にとって有利となる大きな要素であるが、これだけでは、イットリウム系線材を用いた超電導回転機の実用化は進まない。希少金属使用量の低減とともに、やはり線材特性（超電導特性、機械的特性、安定性、等）の向上が、コスト低減の大きな要因となり、実用化の前提条件となる。

〈肯定的意見〉

- 超電導モータの実用化のイメージは、本プロジェクトの有無によらないもので、長尺線材開発が可能になりつつあることを背景とした設計によって、説得力がいくらか増した印象がある。
- 風力発電機など、最近において低炭素化技術として注目されている技術分野への応用の可能性を示すもので、波及効果が認められる。
- 出口イメージは明確になっている。
- プロジェクト実施自体が当該分野の研究開発や人材育成等を促進しているとは言える。広く実用化の可能性を示されている点は評価できる。
- 本プロジェクトで概念設計と小型モデル試作までを終えており、また（後継プロジェクトの位置づけではないものの）、実規模試作を主眼とした助成事業が進められている（IV-3）とのことであり、今後の進展に期待する。
- 回転状態における気液対抗流における気液間の熱流束を評価に進む機運を作った。

〈問題点・改善すべき点〉

- 事業原簿中でも言及されているが（IV-3）、今後の開発の方向性が必ずしも明確ではないようである。得られた成果が有効に活用されるような施策を期待したい。
- 実用化イメージは冷却系を含めて経済性、保守性等が明確にされていないのでわからない。
- 超電導回転機は、冷却の問題も含めて実用化までに解決すべき多くの技術的課題がある。希少金属使用量の低減は、超電導回転機にとって有利となる大きな要素であるが、これだけでは、イットリウム系線材を用いた超電導回転機の実用化は進まないであろう。希少金属使用量の低減とともに、

やはり線材特性（超電導特性、機械的特性、安定性、等々）の向上が、コスト低減の大きな要因となり、実用化の前提条件となるであろう。

- とりあえずの最適設計が提案されたが、モータの設計については世界中に競合相手があり、仕様、用途も多様である。モータ設計、製作技術においても他をリードすることまで視野に入れているのであれば、それは容易ではない。
- 実用化のためのマイルストーン設定の根拠、課題をさらに具体的に示されると、実現性に向けての施策がより明確になってくると思う。
実用化、波及効果の検討で、置き換え需要が基本である場合、コスト優位性もしくは成立性（競合に対する優位性もしくは事業が成立するコスト）も重要であるので、仮定・前提があっても何らかの形で評価結果を示されると、検討内容の価値がより高まると思う。

〈その他の意見〉

- ・ 同期機としての試作、評価が終わっておりませんので、成果についての評価の〈その他の意見〉の1項目に述べた理由により実用化できるかどうかはわからない。

3) 今後に対する提言

線材の特性によって超電導回転機的设计や応用も変化するので、まずは線材の高性能化に研究開発を集中した方が良い。超長尺線材の開発動向に即したモータの設計、開発が行われることから、結果的に超電導モータの普及につながることを期待する。このときに希少元素代替の効果も同時に伴うはずであるが、むしろ、超電導モータならではの高エネルギー密度、軽量、小型という特徴を強くアピールできるという観点からの試作機の開発が望まれる。H23年度からスタートしている他プロジェクト（「希少金属代替・削減技術実用化開発助成事業（イットリウム系超電導回転機用電磁石の開発）」）へ、今回の成果・課題を有効に活かして、より高い成果を実現してほしい。

〈今後に対する提言〉

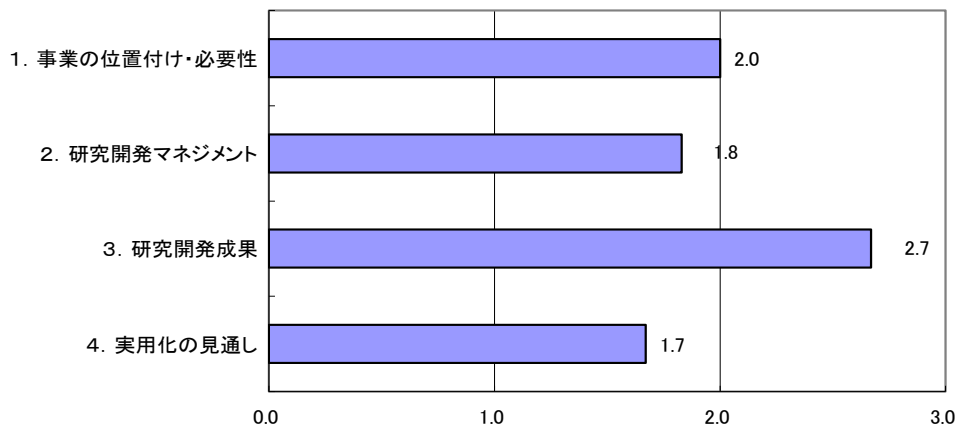
- ・ 同期機として試作、評価ください。
- ・ 実際の応用においては、製作性・信頼性なども重要な指標となるので、今回の開発でのコイル試作開発を通しての課題整理などをされると、今後に向けて意義がより高まると思う。
- ・ 線材の特性によって超電導回転機的设计や応用も変化するので、まずは線材の高性能化に研究開発を集中した方が良いと思われる。
- ・ 線材と実機を結びつける本テーマのような設定は開発の迅速化に有効と考えられる。いわば材料サイドと機器サイドとの協同開発であるが、このような方式は今後のプロジェクトにおいても引き続き検討されるべき方式であると考えます。
- ・ 超長尺線材の開発動向に即したモータの設計、開発が行われることから、結果的に超電導モータの普及につながることを期待する。なお、このときに希少元素代替の効果も同時に伴うはずであるが、数量的に見てその大きな低減を期待するのは酷である。むしろ、超電導モータならではの高エネルギー密度、軽量、小型の特徴を強くアピールできるという観点からの試作機の開発が望まれる。

〈その他の意見〉

- ・ H23年度からスタートしている他プロジェクト（「希少金属代替・削減技術実用化開発助成事業（イットリウム系超電導回転機用電磁石の開発）」）へ、今回の成果・課題を有効に活かして頂き、より高い成果を実現して頂きたいと思う。
- ・ 場合によっては、先に述べた銅を用いることに問題があれば、冷却系を見直す必要があるかもしれません。

3. 評点結果

3. 1 プロジェクト全体



平均値

評価項目	平均値	素点 (注)					
		C	B	A	A	B	C
1. 事業の位置付け・必要性について	2.0	C	B	A	A	B	C
2. 研究開発マネジメントについて	1.8	B	B	B	B	B	C
3. 研究開発成果について	2.7	A	B	A	A	A	B
4. 実用化の見通しについて	1.7	C	B	A	B	C	C

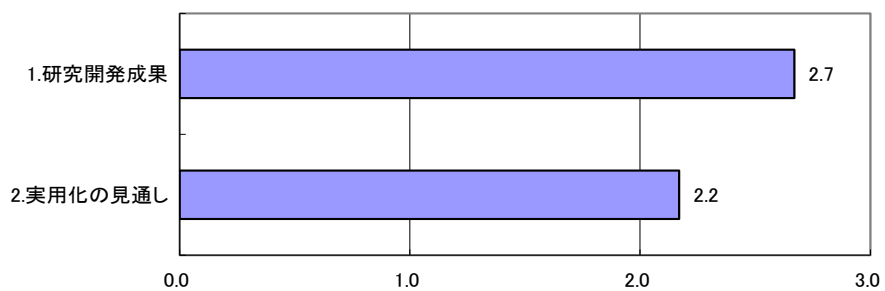
(注) A=3, B=2, C=1, D=0 として事務局が数値に換算し、平均値を算出。

〈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

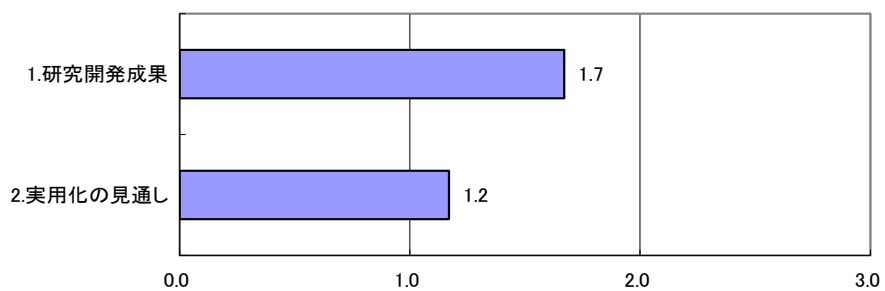
3. 2 個別テーマ

3. 2. 1 超長尺イットリウム系複合材料における希少金属使用量低減技術開発



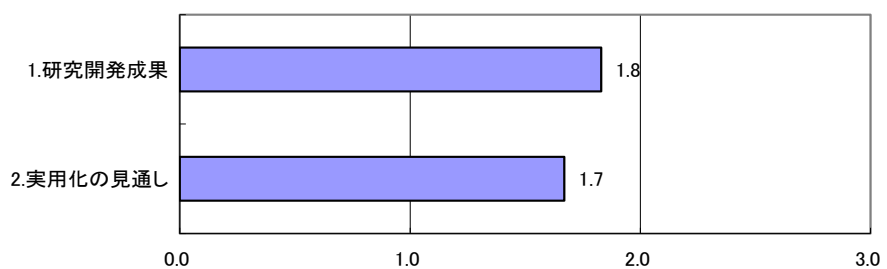
平均値

3. 2. 2 イットリウム系複合材料の製造工程における希少金属利用率等の効率向上技術開発



平均値

3. 2. 3 イットリウム系複合材料を用いた回転機要素技術開発



平均値

個別テーマ名と評価項目	平均値	素点 (注)					
3. 2. 1 超長尺イットリウム系複合材料における希少金属使用量低減技術開発							
1. 研究開発成果について	2.7	A	B	A	A	A	B
2. 実用化の見通しについて	2.2	B	A	A	B	C	B
3. 2. 2 イットリウム系複合材料の製造工程における希少金属利用率等の効率向上技術開発							
1. 研究開発成果について	1.7	B	C	B	B	C	B
2. 実用化の見通しについて	1.2	C	C	C	B	C	C
3. 2. 3 イットリウム系複合材料を用いた回転機要素技術開発							
1. 研究開発成果について	1.8	B	B	B	B	B	C
2. 実用化の見通しについて	1.7	B	B	B	B	C	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

- ・非常によい
- ・よい
- ・概ね適切
- ・適切とはいえない

2. 実用化の見通しについて

- A ・明確
- B ・妥当
- C ・概ね妥当であるが、課題あり
- D ・見通しが不明

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。

「希少金属代替材料開発プロジェクト」

Nd-Fe-B 系磁石を代替する新規永久磁石及び

イットリウム系複合材料の開発

(超軽量高性能モータ等向けイットリウム系複合材料の開発)

事業原簿【公開】

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

—目次—

概 要

プロジェクト用語集

I. 事業の位置付け・必要性について

- 1. NEDOの関与の必要性・制度への適合性 I-1
 - 1.1 NEDOが関与することの意義 I-1
 - 1.2 実施の効果 I-2
- 2. 事業の背景・目的・位置付け I-4

II. 研究開発マネジメントについて

- 1. 事業の目標 II-1
- 2. 事業の計画内容 II-6
 - 2.1 研究開発の内容 II-6
 - 2.2 研究開発の実施体制 II-19
 - 2.3 研究の運営管理 II-21
 - 2.4 開発スケジュールおよび開発予算 II-24
 - 2.5 研究開発成果の実用化に向けたマネジメントの妥当性 II-27
- 3. 情勢変化への対応 II-30
- 4. 中間評価結果への対応 II-31
- 5. 評価に関する事項 II-31

III. 研究開発成果について

- 1. 事業全体の成果 III-1
 - 1.1 開発成果概要 III-1
 - 1.1.1 超長尺イットリウム系複合材料における希少金属使用量低減技術開発 III-1
 - 1.1.2 イットリウム系複合材料の製造工程における希少金属利用率等の効率向上技術開発 III-2
 - 1.1.3 イットリウム系複合材料を用いた回転機要素技術開発 III-3
 - 1.1.4 委員会・連絡会議の設置 III-4
- 2. 研究開発項目毎の成果 III-5
 - 2.1 超長尺イットリウム系複合材料における希少金属使用量低減技術開発 III-5
 - 2.1.1 エキシマレーザ法による複合材料作製プロセス開発 III-5
 - 2.1.1-1 エキシマレーザ PLD 法による複合材料作製プロセス開発 III-5
 - 2.1.1-2 エキシマレーザ PLD 法による複合材料作製プロセス開発のまとめ III-15
 - 2.1.2 TFA-MOD 法による複合材料作製プロセス開発 III-17
 - 2.1.2-1 TFA-MOD 法による複合材料作製プロセス開発 III-17
 - 2.1.2-2 長尺複合材料の評価技術 III-40

2.1.2-3 TFA-MOD 法による複合材料作製プロセス開発のまとめ	III- 44
2.2 イットリウム系複合材料の製造工程における希少金属利用率等の効率向上技術開発	III- 46
2.2.1 レーザ CVD 法による希少金属利用率向上技術開発	III- 46
2.2.1-1 静止基板型レーザ CVD 法による希少金属利用率等の効率向上技術開発	III- 46
2.2.1-2 Reel-to-Reel レーザ CVD 法による希少金属利用率等の効率向上技術開発	III- 52
2.2.1-3 レーザ CVD 法による希少金属利用率向上技術開発のまとめ	III- 57
2.2.2 YAG レーザ PLD 法による希少金属利用率向上技術開発	III- 59
2.2.2-1 YAG レーザ PLD 法による希少金属利用率向上技術開発	III- 59
2.2.2-2 YAG レーザ PLD 法による複合材料の組織評価	III- 68
2.2.2-3 レーザ PLD 法による希少金属利用率向上技術開発のまとめ	III- 70
2.3 イットリウム系複合材料を用いた回転機要素技術開発	III- 72
2.3.1 回転機適正構造の概念設計	III- 72
2.3.2 要素技術開発(1) 界磁巻線技術開発	III- 115
2.3.3 要素技術開発(2) 冷却技術開発	III- 131
2.3.4 イットリウム系複合材料を用いた回転機要素技術開発のまとめ	III- 143
2.4 超電導回転機開発委員会	III- 146
3.成果の総括	III- 154
4.成果の意義	III- 159
IV. 実用化の見通しについて	IV- 1

<添付資料>

- ・ナノテク・部材イノベーションプログラム基本計画
- ・環境安心イノベーションプログラム基本計画
- ・希少金属代替材料開発プロジェクト基本計画
- ・技術戦略マップ(ナノテクノロジー分野)
- ・技術戦略マップ(超電導技術分野)
- ・特許論文等リスト

概 要

	最終更新日	平成23年9月20日	
プログラム(又は施策)名	ナノテク・部材イノベーションプログラム 環境安心イノベーションプログラム(資源制約克服/3R)		
プロジェクト名	「希少金属代替材料開発プロジェクト」 Nd-Fe-B系磁石を代替する新規永久磁石及びイットリウム系複合材料の開発(超軽量高性能モータ等向けイットリウム系複合材料の開発)	プロジェクト番号	P08023
担当推進部/担当者	省エネルギー部 三輪 肇 (平成23年10月現在) エネルギー対策推進部 川上 耕司 (平成22年7月~平成22年12月) 新エネルギー技術開発部 川上 耕司 (平成21年3月~平成22年6月)		
0. 事業の概要	イットリウム系複合材料は、ディスプレイ含有するモータ部材に将来的に代わる可能性があるとして期待されており、当開発を実施することで希少金属使用量の削減を図る。次世代超軽量高性能モータ等を実現するイットリウム系複合材料について、(1)超長尺イットリウム系複合材料における希少金属使用量低減技術開発、(2)イットリウム系複合材料の製造工程における希少金属利用率等の効率向上技術開発 (3)イットリウム系複合材料を用いた回転機要素技術開発、を実施した。		
I. 事業の位置付け・必要性について	<p>【NEDO が関与する意義】 本研究開発は、「ナノテク・材料分野」に列挙されている「戦略重点科学技術」のうち「資源問題解決の決定打となる希少資源・不足資源代替材料革新技術」にあたるものであり、文部科学省の元素戦略プロジェクトと連携し基礎から実用化までの間隙のない支援体制を確立して行うもので、我が国の科学技術力の向上という観点からも極めて意義が高いものである。 よって、政策的な位置付けであること、資源セキュリティに係ること、高度な技術開発が必要であること、更に開発リスクが非常に高いこと等の観点からNEDOが推進すべき研究開発プロジェクトである。</p> <p>【事業の背景・目的・位置付け】 現在及び将来において我が国経済を牽引していく産業分野において、競争力を発揮し世界を勝ち抜いていくために、多様な連携(川上・川下産業の垂直連携、材料創製・加工との水平連携)による研究開発の推進により、当該市場のニーズに応える機能を実現する上で不可欠な高品質・高性能の部品・部材をタイムリーに提供し、又は提案することができる部材の基盤技術を確立することを目的とした「ナノテク・部材イノベーションプログラム」、及び環境・資源制約を克服し循環型経済システムを構築することを目的とした「環境安心イノベーションプログラム」の一環として本プロジェクトを実施する。 希少金属は、我が国産業分野を支える高付加価値な部材の原料であり、近年その需要が拡大している。しかし、途上国における著しい需要の拡大や、そもそも他の金属と比較して、金属自体が希少であり、代替性も著しく低く、その偏在性ゆえに特定の産出国への依存度が高いこと等から、我が国の中長期的な安定供給確保に対する懸念が生じている。これに対する具体的な対策として、平成18年6月、資源エネルギー庁から報告された「非鉄金属資源の安定供給確保に向けた戦略」において、①探鉱開発の推進、②リサイクルの推進、③代替材料の開発、④備蓄、等が整理され、現在それぞれにおける具体的な対策が進められている。 本研究開発は、この総合的な対策の一部として非鉄金属資源の代替材料及び使用量低減技術の確立を目的としている。 その中でも、本研究開発項目では、ディスプレイ含有するモータ部材に将来的に代わる可能性のある次世代モータ部材を実現するイットリウム系複合材料の開発を行う。イットリウムは光学ガラス、赤色蛍光体、自動車の排ガス処理用触媒等に利用されている希少金属である。イットリウムを用いた複合材料は、ディスプレイ含有するモータ部材に将来的に代わる可能性があるとして期待されている。高温超電導材料であるイットリウム系複合材料は、線材形状をしていることから界磁巻線同期回転機への適用が可能であり、超電導材料は電気抵抗が零であることから損失なく電流を流すことができる。約90K以上の臨界温度(Tc)を有し、特に磁場中で高い臨界電流(Ic)特性を示すことから電動機等の回転機の磁場中での応用に適した材料である。 イットリウム系複合材料は、次世代モータ、発電機、医療診断機器等の実現には不可欠な材料であり、この開発を行う必要がある。</p>		

II. 研究開発マネジメントについて

事業の目標	イットリウムを用いた複合材料は、ディスプレイウムを含有するモータ部材に将来的に代わる可能性があると期待されている。このイットリウム系複合材料は、次世代モータ、発電機、医療診断機器等の実現には不可欠な材料であり、当開発を実施することで希少金属使用量の削減を図る。					
事業の計画内容	主な実施事項	H 2 1 fy	H 2 2 fy	H 2 3 fy	総額	
	Nd-Fe-B 系磁石を代替する新規永久磁石及びイットリウム系複合材料の開発（超軽量高性能モータ等向けイットリウム系複合材料の開発）		→		2996 百万円	
	成果とりまとめ			→		
開発予算 (会計・勘定別に事業費の実績額を記載) (単位：百万円)	会計・勘定	H 2 1 fy	H 2 2 fy	H 2 3 fy	総額	
	一般会計	2996			2996	
	特別会計 (電源・需給の別)					
	加速予算 (成果普及費を含む)					
	総予算額				2996	
	契約種類： ○をつける (委託(○) 助成() 共同研究(負担率()))	(委託)				
	(助成) : 助成率△/□					
(共同研究) : 負担率△/□						
開発体制	経産省担当原課	産業技術環境局研究開発課				
	プロジェクトリーダー	産業用超電導線材・機器技術研究組合 特別研究員 和泉輝郎(兼チームリーダー) 東北大学 教授 後藤孝 名古屋大学 准教授 吉田隆 九州大学 准教授 岩熊成卓 早稲田大学 教授 石山敦士				
	委託先(*委託先が管理法人の場合は参加企業数および参加企業名も記載)	産業用超電導線材・機器技術研究組合(参加3社) (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 国立大学法人 東北大学 国立大学法人 名古屋大学 国立大学法人 九州大学 学校法人 早稲田大学				
情勢変化への対応	平成 23 年 3 月に発生した東日本大震災により、研究開発設備およびユーティリティに損壊被害が生じ、加えて震災直後から実施された計画停電により連続運転設備の長時間稼働が不可能になるなどの障害があり、被害状況把握及び復旧には1ヶ月以上の期間を要することとなった。このような状況のため、プロジェクト期間を約2ヶ月延長した。比較的多くの予算を必要とする1km長試験において再度の試験に関して新たな予算措置が困難であることから、「1km長複合材料を作製し、平均 I_c が200A/cm幅以上(@77K, 自己磁場)であることを実証する。」との超長尺イットリウム系複合材料における希少金属使用量低減技術開発での具体的な目標値に関して、1km長のパッチ試験において代用することでこれを証明することとした。					
中間評価結果への対応	中間評価未実施					

評価に関する事項	事前評価	未実施 (H19年度はMETI直執行)																		
	中間評価	本研究開発項目については未実施 (研究開発項目①—⑤については平成21年実施)																		
	事後評価	平成23年度 事後評価実施																		
Ⅲ. 研究開発成果について	<table border="1"> <tr> <th colspan="4">超長尺イットリウム系複合材料における希少金属使用量低減技術開発</th> </tr> <tr> <th>最終目標</th> <th>具体的目標値</th> <th>小項目</th> <th>成果</th> </tr> <tr> <td rowspan="2">300 A/cm 幅 (@77K, 自己磁場) の特性を有し、1 km を超える超長尺線材作製を見通す。</td> <td rowspan="2"> <ul style="list-style-type: none"> 1km 長複合材料を作製し、平均 J_c が 200A/cm 幅以上 (@77 K, 自己磁場) であることを実証する。 同条件で作製した 10m 長以上の複合材料で J_c が 300A/cm 幅 (@77 K, 自己磁場) 以上を実証する。 </td> <td>エキシマレーザ PLD 法による複合材料作製プロセス開発</td> <td> 達成度 100% <ul style="list-style-type: none"> 1050m 長線材—平均 $J_c=534A/cm$ 幅 10m 長—$J_c=300A/cm$ 幅以上 </td> </tr> <tr> <td>TFA-MOD 法による複合材料作製プロセス開発</td> <td> 達成度 100% <ul style="list-style-type: none"> 1000m 長バッチ線材—平均 $J_c \geq 300A/cm$ 幅 10m 長—$J_c=300A/cm$ 幅以上 </td> </tr> </table>				超長尺イットリウム系複合材料における希少金属使用量低減技術開発				最終目標	具体的目標値	小項目	成果	300 A/cm 幅 (@77K, 自己磁場) の特性を有し、1 km を超える超長尺線材作製を見通す。	<ul style="list-style-type: none"> 1km 長複合材料を作製し、平均 J_c が 200A/cm 幅以上 (@77 K, 自己磁場) であることを実証する。 同条件で作製した 10m 長以上の複合材料で J_c が 300A/cm 幅 (@77 K, 自己磁場) 以上を実証する。 	エキシマレーザ PLD 法による複合材料作製プロセス開発	達成度 100% <ul style="list-style-type: none"> 1050m 長線材—平均 $J_c=534A/cm$ 幅 10m 長—$J_c=300A/cm$ 幅以上 	TFA-MOD 法による複合材料作製プロセス開発	達成度 100% <ul style="list-style-type: none"> 1000m 長バッチ線材—平均 $J_c \geq 300A/cm$ 幅 10m 長—$J_c=300A/cm$ 幅以上 		
	超長尺イットリウム系複合材料における希少金属使用量低減技術開発																			
	最終目標	具体的目標値	小項目	成果																
300 A/cm 幅 (@77K, 自己磁場) の特性を有し、1 km を超える超長尺線材作製を見通す。	<ul style="list-style-type: none"> 1km 長複合材料を作製し、平均 J_c が 200A/cm 幅以上 (@77 K, 自己磁場) であることを実証する。 同条件で作製した 10m 長以上の複合材料で J_c が 300A/cm 幅 (@77 K, 自己磁場) 以上を実証する。 	エキシマレーザ PLD 法による複合材料作製プロセス開発	達成度 100% <ul style="list-style-type: none"> 1050m 長線材—平均 $J_c=534A/cm$ 幅 10m 長—$J_c=300A/cm$ 幅以上 																	
		TFA-MOD 法による複合材料作製プロセス開発	達成度 100% <ul style="list-style-type: none"> 1000m 長バッチ線材—平均 $J_c \geq 300A/cm$ 幅 10m 長—$J_c=300A/cm$ 幅以上 																	
<table border="1"> <tr> <th colspan="4">イットリウム系複合材料の製造工程における希少金属利用率等の効率向上技術開発</th> </tr> <tr> <th>最終目標</th> <th>具体的目標値</th> <th>小項目</th> <th>成果</th> </tr> <tr> <td rowspan="2">超電導層の連続形成プロセスにおいて原料収率 40% 以上を見通す。</td> <td rowspan="2"> <ul style="list-style-type: none"> 全成膜領域に対し、静止成膜により原料収率 40% 以上を実証する。 成膜領域の一部を通過する移動成膜により、静止成膜結果から予想される成膜量を実証する。 </td> <td>レーザ CVD 法による希少金属利用率向上技術開発</td> <td> 達成度 100% <ul style="list-style-type: none"> 原料収率 45.7% 超電導特性 $J_c > 3MA/cm^2$, $J_c > 100A/cm$ 幅 </td> </tr> <tr> <td>YAG レーザ PLD 法による希少金属利用率向上技術開発</td> <td> 達成度 100% <ul style="list-style-type: none"> 原料収率 56.1% 超電導特性 $J_c > 1.4MA/cm^2$ </td> </tr> </table>				イットリウム系複合材料の製造工程における希少金属利用率等の効率向上技術開発				最終目標	具体的目標値	小項目	成果	超電導層の連続形成プロセスにおいて原料収率 40% 以上を見通す。	<ul style="list-style-type: none"> 全成膜領域に対し、静止成膜により原料収率 40% 以上を実証する。 成膜領域の一部を通過する移動成膜により、静止成膜結果から予想される成膜量を実証する。 	レーザ CVD 法による希少金属利用率向上技術開発	達成度 100% <ul style="list-style-type: none"> 原料収率 45.7% 超電導特性 $J_c > 3MA/cm^2$, $J_c > 100A/cm$ 幅 	YAG レーザ PLD 法による希少金属利用率向上技術開発	達成度 100% <ul style="list-style-type: none"> 原料収率 56.1% 超電導特性 $J_c > 1.4MA/cm^2$ 			
イットリウム系複合材料の製造工程における希少金属利用率等の効率向上技術開発																				
最終目標	具体的目標値	小項目	成果																	
超電導層の連続形成プロセスにおいて原料収率 40% 以上を見通す。	<ul style="list-style-type: none"> 全成膜領域に対し、静止成膜により原料収率 40% 以上を実証する。 成膜領域の一部を通過する移動成膜により、静止成膜結果から予想される成膜量を実証する。 	レーザ CVD 法による希少金属利用率向上技術開発	達成度 100% <ul style="list-style-type: none"> 原料収率 45.7% 超電導特性 $J_c > 3MA/cm^2$, $J_c > 100A/cm$ 幅 																	
		YAG レーザ PLD 法による希少金属利用率向上技術開発	達成度 100% <ul style="list-style-type: none"> 原料収率 56.1% 超電導特性 $J_c > 1.4MA/cm^2$ 																	
Ⅲ. 研究開発成果について	<table border="1"> <tr> <th colspan="4">イットリウム系複合材料を用いた回転機要素技術開発</th> </tr> <tr> <th>最終目標</th> <th>具体的目標値</th> <th>小項目</th> <th>成果</th> </tr> <tr> <td>500kW 級回転機の概念設計によりイットリウム系の優位性を見通す。</td> <td> <ul style="list-style-type: none"> 希土類元素(RM)量など 500kW 級回転機における Y 系適用の優位性を示す </td> <td>回転機適正構造の概念設計</td> <td> 達成度 100% <ul style="list-style-type: none"> 設計用シミュレータを開発し、RM 使用量が 1/130 に低減できることを示した </td> </tr> <tr> <td>傘型界磁巻線の試作・評価、サーモサイフォン式冷却の特性評価により、回転機の設計に資するデータを得る</td> <td> <ul style="list-style-type: none"> 要素技術(界磁コイル、冷却)の開発を行い、設計・製作の見通しを得る </td> <td>界磁巻線および冷却要素技術開発</td> <td> 達成度 100% <ul style="list-style-type: none"> 劣化なく Y 系傘型界磁モデルコイルを製作でき、回転機設計の見通しがたった 液体 Ne を用い、高速回転時 30K 安定冷却と界面の熱伝達係数を得て、冷却設計の見通しがたった </td> </tr> </table>				イットリウム系複合材料を用いた回転機要素技術開発				最終目標	具体的目標値	小項目	成果	500kW 級回転機の概念設計によりイットリウム系の優位性を見通す。	<ul style="list-style-type: none"> 希土類元素(RM)量など 500kW 級回転機における Y 系適用の優位性を示す 	回転機適正構造の概念設計	達成度 100% <ul style="list-style-type: none"> 設計用シミュレータを開発し、RM 使用量が 1/130 に低減できることを示した 	傘型界磁巻線の試作・評価、サーモサイフォン式冷却の特性評価により、回転機の設計に資するデータを得る	<ul style="list-style-type: none"> 要素技術(界磁コイル、冷却)の開発を行い、設計・製作の見通しを得る 	界磁巻線および冷却要素技術開発	達成度 100% <ul style="list-style-type: none"> 劣化なく Y 系傘型界磁モデルコイルを製作でき、回転機設計の見通しがたった 液体 Ne を用い、高速回転時 30K 安定冷却と界面の熱伝達係数を得て、冷却設計の見通しがたった
	イットリウム系複合材料を用いた回転機要素技術開発																			
	最終目標	具体的目標値	小項目	成果																
	500kW 級回転機の概念設計によりイットリウム系の優位性を見通す。	<ul style="list-style-type: none"> 希土類元素(RM)量など 500kW 級回転機における Y 系適用の優位性を示す 	回転機適正構造の概念設計	達成度 100% <ul style="list-style-type: none"> 設計用シミュレータを開発し、RM 使用量が 1/130 に低減できることを示した 																
傘型界磁巻線の試作・評価、サーモサイフォン式冷却の特性評価により、回転機の設計に資するデータを得る	<ul style="list-style-type: none"> 要素技術(界磁コイル、冷却)の開発を行い、設計・製作の見通しを得る 	界磁巻線および冷却要素技術開発	達成度 100% <ul style="list-style-type: none"> 劣化なく Y 系傘型界磁モデルコイルを製作でき、回転機設計の見通しがたった 液体 Ne を用い、高速回転時 30K 安定冷却と界面の熱伝達係数を得て、冷却設計の見通しがたった 																	
投稿論文	「査読付き」5 件、「その他」22 件																			
特許	「出願済」0 件、「登録」0 件、「実施」0 件 (うち国際出願 0 件)																			
その他の外部発表 (プレス発表等)	「新聞雑誌等」2 件 「展示会」2 件																			
Ⅳ. 実用化の見通しについて	<p>本プロジェクトで超長尺線材製造技術開発に見通しを得たことから、技術研究組合員(線材メーカー)における製造条件のさらなる検討を進め、線材の良品単長改善や歩留改善によるコストダウンを図っていくことで、超電導回転機市場等への 1km 超長級線材供給事業の見通しが得られた。また、希少金属利用率等の効率向上技術については、線材作製プロセス開発をさらに推し進め、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。超電導回転機の実用化に関しては、概念設計による超電導回転機の有用性を証明すると共に要素技術によりそのキーテクノロジーの実現性を確認できたことにより、これらの概念を統合し、実際に超電導回転機の試作、実証を進めて行く。</p>																			

V. 基本計画に関する事項	作成時期	平成20年3月制定
	変更履歴	<p>平成20年 7月 イノベーションプログラム基本計画の制定により、「(1) 研究開発の目的」の記載を改訂。</p> <p>平成21年 3月 新鉱種追加により改訂。</p> <p>平成21年12月 研究開発項目⑥～⑧の委託者決定に伴う詳細目標と事業実施内容の確定による改訂。「明日の安心と成長のための緊急経済対策（平成21年度補正予算（第2号））」に係る研究開発項目⑨の追加。</p> <p>平成22年 3月 研究開発項目⑦-2 目標の細分化に伴い改訂。</p> <p>平成22年 6月 採択条件等反映のため、研究開発項目⑨-1 および⑨-2 の最終目標等を改訂。</p> <p>平成22年12月 「円高・デフレ対応のための緊急総合経済対策（平成22年度補正予算（第1号））」に係る研究開発項目⑩の追加。</p> <p>平成23年 7月 研究開発項目⑨-1 の後続テーマとして研究開発項目⑨-3 を追加</p>

プロジェクト用語集

用語集 (50 音順)

【あ】

アキシシャルギャップ型

円板形状に配置した界磁子と電機子を軸方向に対向させた構造。面対向構造とも呼ばれる。

アモルファス(amorphous)

非晶質。結晶のような長距離秩序はないが、短距離秩序はある物質の状態。熱力学的には自由エネルギーの極小（非平衡準安定状態）にある状態のこと。

安定化銀

銀を用いた安定化層。

安定化材（安定化層）

超電導体に複合化され超電導体の熱的安全性、磁気的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、常伝導転移したときでも電流をバイパスして発熱を抑え、冷媒に熱を伝達して、冷却するので安定化材として用いられる。

【い】

イオンビーム

原子や分子から電子衝撃などによってつくられたイオンを、電場や磁場によって制御して方向性を整えた流れ。イオン源、加速部電磁レンズ、偏向部などから構成される装置を用いる。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。→ IBAD

イットリウム

元素記号 Y、原子番号 39 の元素。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。

イットリウム系複合材料 (Y 系複合材料)

YBa₂Cu₃O_{7-δ} (YBCO)あるいは Y のサイトを希土類元素で置き換えた REBa₂Cu₃O_{7-δ} (RE:希土類元素)の超電導材料を構成層に有する複合材料。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 Coated Conductor 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。

インプラーム法

パルスレーザ蒸着(PLD)法において、ターゲットと基板の距離を小さくすることにより、レーザープルームの中に基板を保持し、単位時間・面積あたりの原料供給量と原料収率を増加させることを目的としたPLD蒸

着法。

【う】

渦電流損失

電磁誘導により発生する渦電流によって生じるジュール損失。

【え】

永久電流モード

超電導体でできたループ状の回路に直流電流を流すと、完全導電性（電気抵抗ゼロ）により電流が減衰することなく流れ続ける。これを永久電流と呼ぶ。通電中の超電導コイル巻線の両端を永久電流スイッチ等を用いて短絡すると超電導コイルに電流が流れ続けることになり永久電流モード（永久電流運転）と呼ぶ。

エキシマレーザ

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

液体窒素

冷却された窒素(N_2)の液体。無色透明、密度 0.81 g/cm^3 沸点 -195.79°C 、蒸発潜熱 47 kcal/kg 。液化空気の一部により工業的に大量に製造される。LN₂とも記述される。

液体ヘリウム

ヘリウム(He)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。

エピタキシャル成長

結晶成長様式のひとつであり、基板、壁面、粒子状など固体に接して核発生した結晶が、その核発生サイトとなった固体の結晶面と同じ方位で成長する様式である。下地と成長する物質が同じである場合をホモエピタキシャル、異なる物質である場合をヘテロエピタキシャルと呼ぶ。

延性

固体の物質の力学的特性（塑性）の一種で、材料が破損せずに塑性変形を生じる性質および程度のこと。

【お】

応力集中

部材の形状が様でない場合、引張りや圧縮の加重が加わった際に応力が一様に分布せず、局所的に集中し高くなる現象。

[か]

界磁巻線 (界磁コイル)

発電機および電動機の固定磁界を発生させるための巻線(field winding)。これに対し、変動磁界又は回転磁界を発生させるための巻線を電機子巻線(armature winding)と呼ぶ。

回転機

モータや発電機など軸を中心として回転する機械の総称。往復型機械に対する総称である。

化学気相蒸着法 (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 種類の固体反応生成物を獲得する手法をいう。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。

ガウス関数

ガウシアン関数、あるいは単にガウシアンとも呼ばれる。正規分布関数 (正規分布の確率密度関数) は、ガウス関数の 1 種である

化学ポテンシャル

熱力学で用いられる示強性状態量。一成分系におけるモル(mol)あたり (あるいは 1 分子あたり) に潜在しているギブズエネルギーを意味し、多成分系では成分ごとに分けて考える。

化学溶液法

溶液の化学反応を用いるプロセス全般を指す。特に MOD 法の別称として使われることがあり、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。→MOD 法

核生成

ある相から異なる相へ変化する際(特に液相→固相)のきっかけとなる過渡状態。融液中には、結晶相に近い構造の小さなクラスターがたえず形成され消滅するといった局所的な揺らぎが存在する。融点以下の融液でも、この揺らぎによって形成されたクラスターが臨界サイズよりも大きければクラスターは消滅することなく成長し、ついには相全体を結晶に変える。このような臨界サイズのクラスターを作る揺らぎのプロセスのこと。核生成には均一核生成と不均一核生成があるが、現実では不均一核生成がほとんどである。

核沸騰

液体の温度が上昇して部分的に沸点に達すると沸騰が始まり急激に熱流束が高まる。沸騰は特定の点(発泡核)から蒸気泡が発生する核沸騰 (Nucleate boiling) と呼ばれる状態になる。

仮焼

原料(粉末、前駆体等)の予備的な熱処理。MOD の前処理も含む。

ガス循環冷却

液相の冷媒を用いず、冷凍機、熱交換器、コントロール用バルブ等を組み合わせた閉ループにより低温冷媒ガスを循環供給する冷却方法。

[き]

希ガス

元素長周期表第 18 族のことで、具体的にはヘリウム(He)、ネオン(Ne)、アルゴン(Ar)、クリプトン(Kr)、キセノン(Xe)、ラドン(Rn)を指す。最外殻電子が閉殻しているため、他の元素とほとんど反応せず化学的に安定している。稀ガス、貴ガスともいう。

基材 (基板)

多層構造(基板、中間層、超電導層)からなるイットリウム系複合材料において、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。

気体媒質レーザー

媒体によるレーザー発振の分類で、媒体にガスを用いるもの(ガスレーザー)。炭酸ガスレーザー(赤外)、ヘリウムネオンレーザー(He-Ne; 赤色)、アルゴンイオンレーザー(Ar-ion; 主に青色または緑色)、エキシマレーザー(励起二量体(Excimer); 主に紫外)などがある。

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。

キャップ層

バッファ層(中間層)の上に格子定数調整と平坦性を持たせるために設けられる層。

キャリアガス

化学気相成長法(CVD)において、複合材料膜の主成分となる材料の原料ガスを反応室に搬送するための例えばアルゴンや酸素を混合したガスを指す。

銀安定化層

銀を用いた安定化層。 → 安定化層

金属系超電導線材

臨界温度が液体窒素温度を越す高温超電導物質を線材の形状に加工した「酸化物超電導線材(高温超電導線材)」に対し、臨界温度が低く、液体ヘリウムなどの極低温の冷媒を用いて冷却する金属系超電導物質を用いた線材を金属系超電導線材と呼ぶ。Nb-Ti 合金や Nb₃Sn 金属間化合物を超電導材料に用いるものが主流である。

【く】

空芯コイル

電線を円、矩形等ある断面を持つ形状に巻き、巻線中に何も入れない、あるいは FRP などの非磁性体で巻線を保持するコイル

鞍型ピックアップコイル法

鞍型ピックアップコイルは、異方性を持つ超電導線材の線材軸に垂直な磁場に対する磁化、交流損失測定に用いられるピックアップコイルの一種。線材端部の影響を排除し、無限長線材としての磁化、交流損失特性を得るために、両端が開いた鞍型形状をしている。磁界印加角度に関係なく、線材全周のポインティングベクトルを検出できるように詳細な形状設計がなされており、外部変動磁界の 1 周期にわたるポインティングベクトルの積算により交流損失を求める。

【け】

結晶粒

多結晶体を構成する、結晶粒界で区分された個々の単結晶をいう。

結晶粒配向

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、他の(*a-b* 面)の配向が面内配向である。YBa₂Cu₃O_{7-δ} の面外配向度($\Delta\omega$)は、(005)または(006)面の X 線回折ロックンブ測定での半値全幅で、面内配向度($\Delta\phi$)は、(103)面の X 線極点図測定を行い、その ϕ スキャンピークの半値全幅で評価する。

原料収率

投入原材料と完成品に利用された原材料の量的な比率。

【こ】

高温超電導体

1986 年以降に発見された酸化物を中心とした超電導材料の総称。それ以前の超電導体の使用が液体ヘリウム温度で行われていたことに対して、高温超電導材料は液体窒素温度以上にて超電導特性を示すことから、相

対的な意味で「高温」と名づけられた。

交流損失

超電導体、超電導導体、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。

固体媒質レーザー

媒体によるレーザー発振の分類で媒体に固体を用いるもの。通常、結晶を構成する原子の一部が他の元素に置き換わった構造を持つ人工結晶が用いられ、代表的なものにクロムを添加したルビー結晶によるルビーレーザーや、YAG 結晶中のイットリウムを他の希土類元素で置換した種々の YAG レーザがある。

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。

コールドボックス

低温となる配管、熱交換器、膨張タービンなどを真空断熱容器に収納し、熱侵入を最小限に抑えた冷凍用コンポーネント。

コンター図

有限要素法において、同じ値を持つ点を結んでできる曲線を示した図。広義には等高線図のことで、天気図や地形図などもコンター図である。

コントロールボリューム

流体解析で多く使われる有限体積法 (finite volume method) において定義されるセルの格子点を中心とする領域。

コンプレッサ

気体を圧縮する流体機械。圧縮機。

[さ]

再結晶

塑性ひずみを受けた多結晶が加熱されると、転位や空孔が減少し内部応力が減少する「回復」過程に続いて、ひずみが残っている元の結晶粒から内部ひずみのない新しい等軸粒が核発生するとともに、各々の核は次第に成長して、元の結晶粒と置き換わっていく現象。再結晶過程に続き結晶粒界移動により結晶粒が成長(粗大化)する。

鎖交磁束

巻線に鎖交する磁束。発電機の場合、ファラデーの法則に従い、この時間微分が発生する誘導起電力を与える。

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。

[し]

磁化法

試料の磁化(M)を測定することで超電導体や磁性材料の電磁気特性を評価する方法。

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。

磁気装荷

電気機械の出力は磁気装荷と電気装荷の積に比例する。磁気装荷は鉄心に磁束を通すために必要な磁気回路に相当する。

自己磁場

導体に通電することにより導体周囲に発生する磁場。

磁束ピン止め点

量子化磁束が第二種超電導体の内部にある非超電導相、ひずみ、不純物などの常電導部分に捕捉され、ピンで止めたように動かなくなる現象を磁束のピン止めと呼び、補足する常電導部をピン止め点と呼ぶ。第二種超伝導体において、外部磁場が臨界磁場 H_{c1} と H_{c2} の間にあるときに起こる。

磁束密度

単位面積当たりの磁束の面密度のこと。単に磁場と呼ばれることも多い。記号 B で表され、透磁率 μ と磁場の強さ H の積である。磁場はベクトル量であるので、磁束密度もまたベクトル量である。単位はテスラ(T)、もしくはウェーバ毎平方メートル (Wb/m^2)。

ジュール損失

電気抵抗 R [Ω] の物体に、 I [A] の電流を t 秒間流したときに発生する損失 Q (発熱)。 $Q=RI^2t$

衝撃波

気体中を伝播する、圧力などの不連続な変化のこと。圧力波の一種。

焼結

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 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ の結晶化処理は本焼という。

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。

蒸発潜熱

物質が蒸発するときに必要とされる熱エネルギーの総量。潜熱には融解に伴う融解熱と、蒸発に伴う蒸発熱（気化熱）がある。潜熱の概念は1750年にジョゼフ・ブラックが導入した。液体から気体に相転移するときには吸熱が起こる。

除害装置

人体や環境に有害な物質成分を除去する装置。

シリンダ巻

円筒状の巻き枠に長尺材料等を螺旋状に巻くこと。

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、特に高温で有効である。

浸漬冷却 (しんしれいきゃく)

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。

伸線

塑性加工法のひとつで、太径線材を線引き加工により細径線材に縮径加工すること。主に丸線のダイス引き抜き加工を指し、圧延加工と区別している。

【す】

スカラーポテンシャル

電磁場に対して、電場をその勾配として導くポテンシャルを、磁場を導くベクトルポテンシャルと区別してスカラーポテンシャルと呼ぶ。

スキュー

磁気回路を軸方向に斜めになるように配置することにより、急激な磁束の変化を抑制すること。

スタイクキャスト™

Emerson & Cuming 社が製造するエポキシ樹脂系の接着剤。特に型番 2850-GT など、絶縁性に優れ、熱伝導率が大きく熱膨張係数が比較的小さいものは低温応用分野で良く利用される。

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。

[せ]

脆性 (ぜいせい)

物質のもろさを意味し、変形をほとんど起こさずに破壊する性質のこと。対語としてじん性(靱性)と展延性がある。

[そ]

走査型電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope、SEM)

電子顕微鏡の一種である。電子線を絞って電子ビームとして対象に照射し、対象物から放出される二次電子、反射電子、透過電子、X線、カソードルミネッセンス(蛍光)、内部起電力等を検出する事で対象を観察する。

相図

物質や系(モデルなどの仮想的なものも含む)の相と熱力学的な状態量との関係を表したもの。状態図とも呼ばれる。

[た]

ターゲット

スパッタリング法やレーザーPLD法においては、プラズマ放電やイオンガンで発生したArイオン等を電界で加速し高エネルギー化して、蒸着したい元素や化合物からなる固体の蒸着原料に照射することで、蒸着粒子を蒸着原料から弾きだし基材上に堆積させる。この固体蒸着原料をターゲットと呼ぶ。

ターゲット機構

レーザー蒸着法等において、ターゲットはレーザー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、レーザー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・並進移動する等の駆動制御機構。

第1次エネルギー

石油、天然ガス、石炭、水力など、自然界にあるままの形状で得られるエネルギー。これに対して、電気、ガソリン、など加工され使いやすしたエネルギーを第二次エネルギーという。

ダンパーシールド

変動磁界により誘起される渦電流を活用して侵入しようとする変動磁界を減衰させ、回転子内部への外部変動磁界の侵入を防ぐ電磁遮蔽シールド。

[ち]

置換

結晶内部に結晶を構成する原子とは異なる種類の原子を添加し、結晶構造を維持したまま元の原子を置き換えること。

窒素

原子番号7の元素、元素記号はN。空気中に約78.08%含まれる。一般に「窒素」という場合は、窒素の単体である窒素分子（窒素ガス、 N_2 ）を指すことが多い。窒素分子は常温では無色無臭の非常に安定な気体。液化した窒素分子（液体窒素）は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。

チャンバー

減圧、酸化性、還元性、不活性ガス等の雰囲気を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の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。

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、希少金属使用料削減や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(T_c)をもつ物質で、主に銅酸化物系材料である。

[つ]

[て]

定常伝熱

ある場所の温度が時間的に変化しない状態での伝熱。

ディスプロシウム

元素記号Dy (dysprosium)、原子番号66、希土類元素の1つ(ランタノイドにも属す)。産出地がきわめて偏在しており、現在ほとんどが中国で産出されている。銀白色の金属で、常温、常圧で安定な結晶構造は六方最密充填構造(HCP)。比重8.56g/cm³、融点1407°C、沸点2562°C。

低温では強磁性を示し強磁性転移温度 T_N は-188°C (85 K) である。近年はネオジム磁石の保磁力を高めるための添加物としての利用が急増しており、安定供給の確保に懸念が生じている

テトラヒドロフラン

Tetrahydrofuran(THF)。飽和の5員環に酸素を1つ含んだ環状エーテル化合物。芳香を持つ無色の液体で、テトラメチレンオキシド、オキサラン、オキサシクロペンタンとも呼ぶ。

転位導体

複数本の平角導体の位置を、長手方向に対し一定ピッチで順次入れ替える構造を持つ導体。転位により、素線となる平角導体間の鎖交磁束を打ち消されるため、平角導体同士の電流が均一になるとともに、遮蔽電流が誘起されないため低損失でもある。

電機子

整流子機や同期機を発電機や電動機として使用するとき、界磁と相互作用させトルク（回転力）を得るための磁界を発生させるものである。現在想定している同期超電導モータの場合、直流一定磁界を発生する回転超電導界磁子に対し、周囲の固定電機子は、3相交流通電により回転磁界を発生させ、界磁子との反発、吸引作用により、超電導界磁子を回転させる。

電気装荷

電気機械の出力は磁気装荷と電気装荷の積に比例する。電気装荷は巻線に電流を通すために必要な電気回路に相当する。

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失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。

電動機

電気エネルギーを機械エネルギーに変換する電気機器、原動機の総称。回転する電動機は、軸を持ち回転する回転子（ロータ）と、回転子と相互作用して回転モーメントを発生させる固定子（ステータ）、回転子の回転を外部に伝える回転軸、回転軸を支える軸受、などから構成される。

伝導冷却

超電導コイルを冷却する際に、液体ヘリウムや液体窒素などの冷媒や冷凍機などで発生した低温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。

デンドライト

複数の枝に分かれた樹の枝のような形状を有する結晶組織。

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。

【と】

トリフルオロアセテート (TFA:Trifluoroacetate)

トリフルオロ酢酸(CF₃COOH)。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。

ドラム

円柱形状の巻棒、巻胴。

トルクリップル

モータ回転の際のトルク変動幅。

[な]

ナノボルトメータ

ナノボルト ($1\text{nV}=1\times 10^{-9}\text{V}=0.001\mu\text{V}$) 領域の微小電圧を測定することができる高分解能精密電圧計。

ナノ粒子

ナノメートル ($1\text{nm}=1\times 10^{-9}\text{m}=0.001\mu\text{m}$) 領域の微細粒の呼称。

[に]

ニュートン・ラフソン法

方程式系を数値計算によって解くための反復法による求根アルゴリズムのひとつ。対象とする方程式系に対する条件は、領域における微分可能性と 2 次微分に関する符号だけであり、線型性などは特に要求しない。

[ぬ]

[ね]

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 CVD

化学気相成長法(CVD 法)の一種で、熱分解による生成物や化学反応によって薄膜を形成する手法。

熱伝達係数

熱伝導において 2 種類の物質間での熱エネルギーの伝熱を表す値で、熱流束密度を温度差で除したもの。

熱流束

ある領域を移動する単位面積・単位時間当たりの熱量 (W/m^2)。

[の]

[は]

バイアス

動作の基準としてあらかじめ回路に付加しておく電圧・電流・磁気のこと

配向金属基板

Ni や Ni 基合金に圧延強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、REBCO 超電導体の結晶格子と格子整合性が高い(100)を優先配向させた組織を作ることができる。

ハステロイ TM

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。析出硬化型のニッケル基合金に属し、耐酸化性の高いものや耐熱性が高い金属であるため、腐食性環境や高温環境での使用に向く。イットリウム系複合材料線材の基板に使用されている。

バッチ式

1 回に 1 ロットのみの処理を行う方法。batch。

パルスレーザー蒸着法

→PLD (Pulsed Laser Deposition) 法

ハロゲン

周期表において第 17 族に属する元素の総称。フッ素、塩素、臭素、ヨウ素、アスタチン、ウンウンセプチウムがこれに分類される。

パンケーキコイル

渦巻き状に単層または多層に巻線した形状のコイル。語源は食品のパンケーキ（ホットケーキ）で、円盤状の外見に由来する。

半値幅（半価幅）

山形の関数の広がりやの程度を表す指標。半値全幅（full width at half maximum, FWHM）と、その半分の値の半値半幅（half width at half maximum, HWHM）とがある。単に半値幅と言うと半値全幅のことが多い。

パンチング加工

金属等の板を金型で打抜加工して多数の穴を開けること。

[O]

ビスマス系複合材料、ビスマス系線材

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

微結晶

微細な結晶粒、またはそのような結晶粒で構成される多結晶体。定量的な定義は無い。

非晶質

→ アモルファス

ビーンモデル

超電導体の臨界状態を電磁氣的に記述するモデルで、臨界電流密度を一定としたもの。C. Bean により提案された。→Magnetization of Hard Superconductors, C.P. Bean, Phys. Rev. Lett. 8, 250 (1962)

[ふ]

プラズマ

気体を構成する分子が部分的に、または完全に電離し、陽イオンと電子に別れて自由に運動している状態

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。

[へ]

ベクトルポテンシャル

磁場に対して定義される位置の関数で、その微分を通して磁場を与えるベクトル量。

ベッド層

IBAD-MgO 法では、MgO 層を配向させるために Y_2O_3 , 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。

[ほ]

飽和磁化

強磁性体に磁場をかけると磁場に沿った磁化を持つ磁区が拡大し、それ以外の磁区が縮小するように磁壁が移動する。その結果磁場に沿った磁化が打ち消されなくなり、物質全体と磁化が生じる。ある程度より強い磁場をかけると物質内がただ 1 つの磁区となるため、それ以上磁化が増えなくなる。この時の磁化を飽和磁化という。

ホール素子

磁界を測定する為の一般的なセンサで、電流に垂直に磁場をかけると電流と磁場の両方に直交する方向に起電力が現れるホール効果を利用して磁界を検出する。

ホール素子法

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、Tapestar™

装置(THEVA 社商標)がある。

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。

保護層

狭義には、イットリウム系複合材料の超電導層の表面に形成する銀などの金属層のこと。この低抵抗金属層は、熱的・電磁気的な「安定化材」の機能と同時に、超電導層の機械的・化学的保護機能を担うことから保護層と呼んでいる。

保磁力

磁化された磁性体を磁化されていない状態に戻すために必要な反対向きの外部磁場の強さをいう。抗磁力とも呼ぶ。

本焼

原料に含まれる炭酸や硝酸を離脱させる「仮焼」に対し、所定の酸化物等を合成するための熱処理を指す。

[ま]

膜沸騰

液体中の伝導面の全面が沸騰した蒸気の膜で覆われ、やがてその蒸気膜と液体との接触面から直接に沸騰を始める状態。

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。

マルチターン・マルチプルーム法 (MTMP 法)

複合材料製造速度の高速化を実現するために、蒸着エリアに複数のプルームを立て、一本の配向中間層付き基材テープを螺旋状に複数回通す方式。

マルチプルーム

Reel-to-Reel を用いた PLD による成膜を行う際、レーザー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、一般的にレーザー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、高いレーザー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。

[み]

[む]

[め]

メッシュ

計算格子（英: **computational mesh**）とも呼ばれ、コンピュータを用いて計算を行う際の分割単位のこと。解析対象をメッシュと呼ぶ細かな要素に分割し、その要素の集まりとして全体の形状を表現する。メッシュの形状は2次元であれば三角形や4角形、3次元であれば4面体や6面体など、数学的に表現できる単純な形である。

[も]

[や]

[ゆ]

有機金属化合物（有機金属塩）

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（金属塩）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)。

有機酸塩堆積法（MOD; 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。イットリウム系複合材料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。

有限要素法

数値解析手法の一つで、解析的に解くことが難しい微分方程式の近似解を数値的に得る方法の一つである。方程式が定義された領域を微小領域（要素）に分割し、各微小領域における方程式を比較的単純で共通な補間関数で近似する。構造力学、流体力学、電磁気、熱伝達などの分野で広く使われている。

誘導機

交流電動機のひとつで、固定子の作る回転磁界により、電気伝導体の回転子に誘導電流を発生させ滑りに対応した回転トルクを発生する回転機。

誘導結合プラズマ分光分析(ICP)

気体に高電圧をかけることによってプラズマ化させ、さらに高周波数の変動磁場によってそのプラズマ内部に渦電流によるジュール熱を発生させることによって得られる高温のプラズマを利用した分光分析。サンプルを原子単位で熱励起し、これが基底状態に戻る際の発光スペクトルから元素の同定・定量を行う方法

[よ]

洋上大型風力発電

海上に風力発電機を設置することを洋上風力発電（オフショア風力発電、海上風力発電、海洋風力発電）と

呼び、地形や建物による影響が少なく、より安定した出力の大きな風力発電が可能となる。

ヨーク

磁気回路を構成する部品で、回転機では外周に配置され適切な磁束分布を形成するとともに、外部への漏れ磁界を遮蔽する。

[ら]

ラジアルギャップ型

電動機の場合、回転子の周囲に固定子を同軸上に配置し、半径一定の両者のギャップ間でトルクを発生させ、回転子を回転させる構造。

ラブチャー強度

クリープ現象において、ある一定の温度と一定のひずみ条件下において、一定の時間で破壊に至る応力。

[り]

リール式

テープ形状の複合材料を巻き枠リール(Reel)に積層巻きし、テープを送出側から巻取側に連続的に移動させる方式。

リニアサーボモータ

回転運動ではなく、直線状に往復運動するモータ(リニアモータ)で、位置や速度等を制御できるサーボ機構を有する。

リボンヒータ

帯状の発熱体を絶縁被覆したヒータ。可とう性があるため形状が複雑な容器などに巻き付けて加熱することができる。

粒界拡散

多結晶体の結晶粒界に沿って原子が拡散する現象。結晶粒界は格子欠陥が結晶粒内より多いため拡散係数が大きい。

リラクタンس機

電磁石の吸引力(磁気エネルギーの位置に対する変化)によって発生する力(リラクタンストルク)を利用する回転機。

臨界温度(T_c)

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

臨界磁場(H_c)

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

臨界電流密度(J_c)

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

[る]

[れ]

レアメタル

→ 希少金属

冷間強加工

塑性変形を利用する加工のうち、常温もしくは再結晶温度未満で行なう塑性加工を冷間加工と呼ぶ。加工度が高く、歪や格子欠陥を内部に多く残留させるものが冷間強加工である。

励起ガス

気体レーザーは、励起物質となるガスを封入した励起管と、封入ガスの中に電流を通す電極から構成される。この気体を励起ガスと呼ぶ。励起されたガスが基底状態および低レベル状態へ戻る際にレーザー光が放出される。N₂、CO₂、F₂など代表的な励起ガスである。

励磁率

電磁石に通電する際の定格電流値に対する通電電流値の比率。あるいは、電磁石に用いた線材の臨界電流値に対する電磁石の通電電流の割合にも使う。

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。

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（レーザー蒸着法）

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。

レーストラック形

真円を二等分し、その半円の端を直線でつないだ二次元形状。競技場のトラック形状に由来する。代表的な超電導コイルの巻線形状である。

レーン

複数のテープを平行に配置する場合の区分。

連成シミュレータ

二つ以上の場合（構造、熱、流体、電場、磁場等）の物理的な連成現象を取り扱い、相互連成場での定常及び過渡の状態を計算によりシミュレーションするプログラムおよび装置システム。

連続成膜

複合材料形成のために長尺金属基板を移動させながら中間層、超電導層、安定化層等を成膜すること。

[ろ]

ロータリポンプ

油回転真空ポンプとも呼ばれる。回転する内部の羽が気体をかき出すように排気する、真空ポンプの一種で、到達真空度は 10^{-1} Pa (10^{-3} Torr) 程度である。

ロードライン

電磁石の励磁における、通電電流と磁束密度の関係を示す一次関数。

ロックインアンプ

増幅機能と特定信号検出(ロックイン)機能を併せ持ったアンプ。特定の周波数の信号を検出して増幅ため、高感度の信号検出が可能である。

[A]

Ag

銀の元素記号。遷移金属元素、原子量 107.9 融点 1235.08K 沸点 2485K。室温における電気伝導率と熱伝導率、可視光線の反射率は、いずれも金属中で最大である。

[B]

Bi 系複合材料

ビスマス(Bi)系超電導材料を用いた複合材料。

[C]

CeO₂

酸化セリウム。超電導線材の中間層(IBAD 法)に用いられる。

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。

[D]

Dy

ジスプロシウム (dysprosium) の元素記号、原子番号 66。希土類元素の 1 つ (ランタノイドにも属す)。産出地がきわめて偏在しており、現在ほとんどが中国で産出されている。銀白色の金属で、常温、常圧で安定な結晶構造は六方最密充填構造 (HCP)。比重は 8.56、融点は 1407 °C、沸点は 2562 °C。空气中で表面が酸化され、高温で燃焼して Dy₂O₃ となる。低温では強磁性を示し強磁性転移温度 T_N は -188 °C (85 K) である。近年はネオジム磁石の保磁力を高めるための添加物としての利用が急増しており、安定供給の確保に懸念が生じている

[E]

[F]

[G]

Gd

ガドリニウム (gadolinium) の元素記号、原子番号 64。希土類元素の 1 つ (ランタノイドにも属す) で単体は銀白色 (白色) の金属、常温、常圧で安定な結晶構造は、六方最密充填構造 (HCP)。密度 7.9g/cm³、融点 1312 °C、沸点は約 3000 °C。室温以下で強磁性も示しキュリー点は 20 °C (292 K) である。ジャン・マリニ

ヤック (J.C.G.de Marignac) が 1880 年に発見。語源は、ガドリニウムを分離した鉱石、イットリア鉱石の主成分イットリウムの発見者である、フィンランドの鉱物学者ヨハン・ガドリン (J.Gadolin, 1760-1852) から。

GdBCO

YBa₂Cu₃O_{7-δ} の Y(イットリウム)を希土類元素である Gd(ガドリニウム)で置き換えたイットリウム系超電導材料。

GM (Gifford-McMahon) 冷凍

GM(G-M)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。

[H]

Hastelloy™

→ ハステロイ

He

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

HF

フッ化水素 (弗化水素、hydrogen fluoride) の分子式。水素とフッ素とからなる無機化合物で、常温では無色の気体で沸点は 19.54 °C。毒物。

[I]

IBAD

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中間層(YSZ、GZO、MgO 等)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。

I_c

→ 臨界電流

[J]

J_c

→臨界電流密度

J_c - B 特性

臨界電流密度(J_c)と磁束密度(B)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(B_{c2})でゼロとなる。

[K]

K 熱電対

温度を測定するセンサ。異なる二種の金属を接合すると、それぞれの熱電能の違いから接合点を異なる温度に応じた電圧が発生し一定の方向に電流が流れる。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。JIS によりアルファベットで識別され、アルメル合金とクロメル合金を接合した熱電対を K 熱電対と呼ぶ。K 熱電対の他に、R 熱電対(白金ロジウム合金（ロジウム 13%）と白金)、T（銅とコンスタンタン合金）などがある。

[L]

LCVD

→レーザー CVD（Laser CVD の略称）。

[M]

Maxwell 方程式

電磁場のふるまいを記述する古典電磁気学の基礎方程式。マイケル・ファラデーが幾何学的考察から見出した電磁力に関する法則から 1864 年にジェームズ・クラーク・マクスウェルが数学的形式として整理し導いた。マクスウェル-ヘルツの電磁方程式、電磁方程式などとも呼ばれる。

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。

Mo

モリブデン（molybdenum）の元素記号。は原子番号 42 の元素でクロム族元素の 1 つ。銀白色の硬い金属（遷移金属）。常温、常圧で安定な結晶構造は体心立方構造で、密度は 10.28g/cm³、融点 2620 °C、沸点 4650 °C。

MOCVD 法

有機金属気相成長法(Metal Organic Chemical Vapor Deposition)。原料として有機金属やガスを用いた CVD(Cheical Vapor Deposition)法。 →CVD 法

MOD 法 (Metal Organic Deposition)

→ 有機酸塩堆積法

mol

国際単位系(SI)における物質量の単位で SI 基本単位の一つで、0.012kgw の炭素 12 の中に存在する原子の数と等しい構成要素を含む系の物質質量である。1 モルに含まれる要素粒子の数は、要素粒子の種類にかかわらず一定 (約 6.02×10^{23} 個 = アボガドロ数) である。

MPa

メガパスカル(1×10^6 Pa)。 → Pa

MRI

Magnetic Resonance Imaging の略称、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。

mT

ミリテスラ(1×10^{-3} T)。 → T

[N]

NAVY

アメリカ海軍(the United States Navy、the U.S.Navy)、語源はラテン語の navis。Office of Naval Research(ONR)はアメリカ政府が長期的視野に立った科学技術政策のもとで海軍省に設置した海軍研究事務所で、海軍研究所(Naval Research Laboratory)を有する。

NbTi

代表的な金属系超電導材料のひとつで、ニオブ(Nb)とチタン(Ti)の比率がほぼ 1:1 の合金。臨界温度 9.3K、臨界磁場@4.2K、11.4T を持つ。NbTi 超電導材料は塑性加工性に優れるため、銅や銅合金の中に NbTi 超電導体の極細フィラメントが多数埋め込まれツイスト(振り)加工された線材として使用される。

Nd

ネオジム (neodymium)。原子番号 60 の金属元素。希土類元素のひとつで、ランタノイドにも属する。銀白色の金属で、常温、常圧で安定な結晶構造は、複六方最密充填構造 (ABAC スタッキング)。密度 7.0g/cm^3 、融点 $1,024\text{ }^\circ\text{C}$ 、沸点 $3,027\text{ }^\circ\text{C}$ 。ネオジムの用途で特に重要なのは、強い磁力を持った永久磁石を生産するために使用されることである。ネオジム、鉄、ホウ素の化合物 ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$) は、大変強力な永久磁石である。ネオジムを含む希土類元素の生産量は中国が約 98 % を占めるが、その埋蔵量は 30 % 程度である。

Nd:YAG レーザ

YAG(yttrium-aluminium-garnet)の結晶を製造する過程でイットリウムを数%のネオジム (Nd) でドーピング(添加)した結晶を用いる YAG レーザー。

Nd-Fe-B 系永久磁石

ネオジム(Nd)、鉄(Fe)、ホウ素(B)を主成分とする希土類永久磁石で、磁束密度が高く、非常に強い保磁力を持つが高温では熱減磁を生じやすい。主相は $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ で、希少金属であるジスプロシウム(Dy)を添加することで熱減磁が改善される。1984 年に日本で発明された。

Ne

ネオン(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℃、沸点-245.9℃。大気圧、0℃での密度は 0.8999kg/m³。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

ニッケル (nickel) 、原子番号 28 の金属元素で鉄族に属する遷移元素のひとつである。銀白色の金属で鉄族に分類され、原子量約 58.69、常温で安定な結晶格子は面心立方構造 (fcc) 。

n 値

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。

[O]

[P]

Pa

パスカル(Pa)、国際単位系(SI)の圧力・応力の単位である。1Pa は 1 平方メートル (m²) の面積につき 1 ニュートン (N) の力が作用する圧力または応力と定義される。1 気圧は約 0.1MPa。

PLD (Pulsed Laser Deposition) 法

パルスレーザー蒸着法。物理気相蒸着法の一つで、真空チャンバー内のターゲット(酸化物の焼結体等)に高出力のパルスレーザー(エキシマレーザー等)を断続的に照射し、ターゲットをアブレーションすることにより爆発的に放出されるイオン、クラスター、分子、原子等を、ターゲットに対向して設置された基板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。

[Q]

[R]

RABiTSTM

Rolling Assisted Bi-axially Textured Substrate の略称。金属テープの結晶粒を 2 軸配向させる手法で、Ni や Ni 合金に圧延加工と熱処理を繰り返し、再結晶過程を利用して金属テープ自体を結晶配向させる方法。配向金属基板参照。

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。リール式。

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

レアアース(Rare Earth)の略。 → 希土類元素

RE 系超電導線材

「次世代高温超電導線材」と呼ばれる $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO)に代表される $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 系(RE: rare earth, 希土類酸化物 Gd, Sm, Er, Nd 等)超電導線材。RE 系超電導体は RE(希土類)元素をイオン半径の大きいネオジウム(Nd)、サマリウム(Sm)等としたもので、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。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 系線材のような貴金属(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、モータ、発電機、超電導ケーブル、変圧器、SMES 等の産業応用に対し極めて有望な高温超電導線材である。

RM

Rare Metal の略語。 → レアメタル。

[S]

Sm-Co 磁石

サマリウム(Sm)元素とコバルト(Co)元素で構成されている 1970 年代に開発された希土類永久磁石。Nd-Fe-B 系永久磁石に次ぐ磁力を持つが、ネオジウム磁石の方が価格が安く磁気特性に優れる。ただし磁性がなくなる温度であるキュリー温度が Sm-Co 磁石では 700 度から 800 度と非常に高く、350°C 程度までの高温用途で使われる。

SrTiO₃

チタン酸ストロンチウム。ストロンチウム(Sr)とチタン(Ti)の複合酸化物で、ペロブスカイト構造をとる化合物。単結晶基板は高温超電導体のエピタキシャル成長用途に使用される

[T]

T(テスラ)

テスラ(tesla)は国際単位系 (SI) の磁束密度の単位で CGS 単位系に基づくガウスを SI 単位系に置き換えるために定められた。1 テスラ(T)は、「磁束の方向に垂直な面の 1 平方メートルにつき 1 ウェーバの磁束密度」と定義され、ウェーバ毎平方メートル(Wb/m²)に等しい。1T=10⁴G (G:ガウス)。

T_c

→臨界温度

TFA-MOD 法

MOD(Metal Organic Deposition)法において、トリフルオロ酢酸塩から得られるトリフルオロ酢酸(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。

THF

→テトラヒドロフラン

[U]

[V]

[W]

[X]

XRD

X線回折 (X-ray diffraction) の略称。X線が結晶格子により回折を示す現象を利用して物質の結晶構造を調べる方法。結晶内部で原子がどのように配列しているかを知ることができる。X線結晶構造解析あるいはX線回折法とも呼ぶ。

[Y]

Y

→イットリウム

Y (Yttrium) 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ー。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。固体レーザーの中で最も幅広く使用されている

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

[α]

α - Al_2O_3

酸化アルミニウム (Al_2O_3 、アルミナ) のうち、菱面体晶のコランダム型構造を有するもの。

[ϕ]

ϕ スキャン

結晶の配向性をX線回折により定量的に測定する手法の一つ。ある α 軸に固定し、 β 角スキャンを行った場合の回折強度の分布をプロットしたものをある極の ϕ スキャンと呼び、面内方向への配向を評価するときに用いる。 α 角を固定するために、特に補正の必要がなく回折強度そのものが、極の密度をあらわす。

用語集(数字順)

[0]

[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倍波

レーザー基本波の2倍の周波数(波長の2分の1)の総称。YAGレーザーの場合は1064nmの1/2で532nmとなる。

[3]

[4]

4倍波

レーザー基本波の4倍の周波数(波長の4分の1)の総称。YAGレーザーの場合は1064nmの1/4で266nmとなる。

[5]

[6]

[7]

[8]

[9]

以上

I 事業の位置付け・必要性について

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

1.1 NEDO が関与することの意義

本研究開発は、「ナノテク・材料分野」に列挙されている「戦略重点科学技術」のうち「資源問題解決の決定打となる希少資源・不足資源代替材料革新技術」にあたるものであり、文部科学省の元素戦略プロジェクトと連携し基礎から実用化までの間隙のない支援体制を確立して行うもので、我が国の科学技術力の向上という観点からも極めて意義が高いものである。

よって、政策的な位置付けであること、資源セキュリティに係ること、高度な技術開発が必要であること、更に開発リスクが非常に高いこと等の観点からNEDOが推進すべき研究開発プロジェクトである。なお、府省連携とNEDOの関係を図 I -1-1 に、NEDOが関与することの意義について、図 I -1-2 に示す。

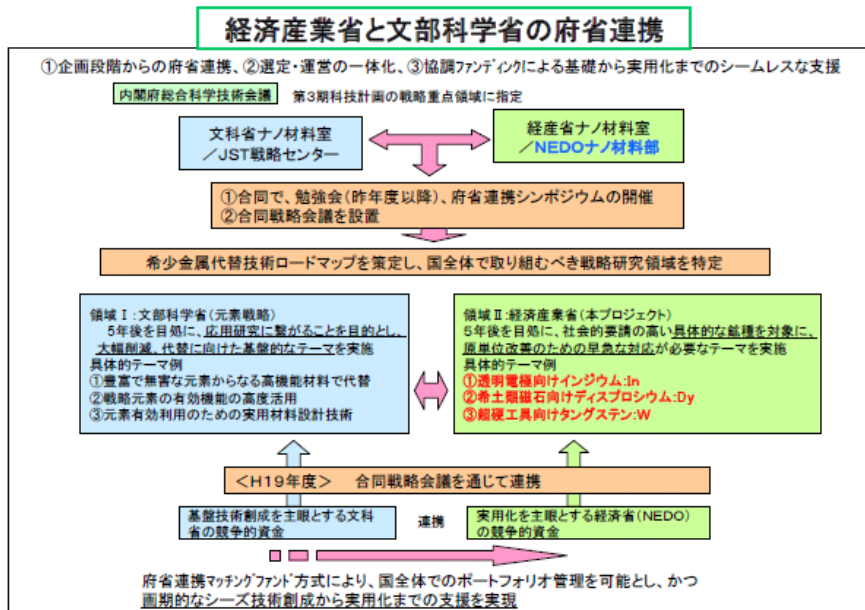
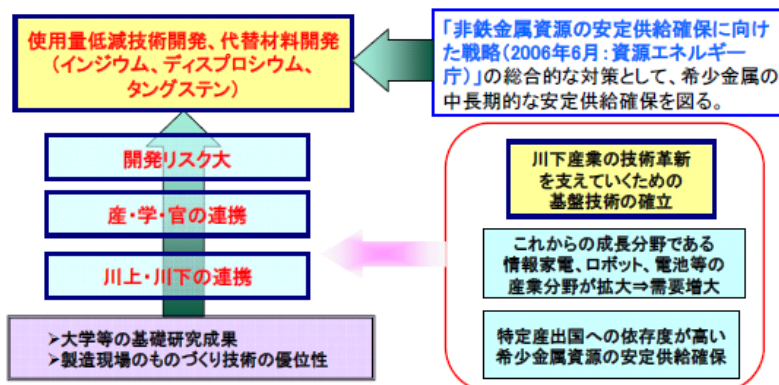


図 I-1-1 府省連携と NEDO の関係

NEDOが関与することの意義



政策的な位置付け・資源セキュリティ・技術開発の開発リスクの観点から NEDOが推進すべき研究開発プロジェクトである。 19FYは、METI直執行

図 I-1-2 NEDO が関与することの意義

また、本研究開発項目の政府予算要求書の開発目的には、「超軽量且つ高性能な次世代電気自動車用モータや、次世代医療診断機器等の実現に向け、イットリウム系複合材料の開発が期待されている。この開発・製造技術、希少金属であるイットリウムの使用量低減技術等の確立に向けた研究開発を行い、革新的部材・機器の実現により国際競争力の強化につなげる」とある。本事業はこの目的に沿ったものである。

1.2 実施の効果

本プロジェクトの対象とする希少金属であるインジウム（In）、タングステン（W）、白金族（Pt）、セリウム（Ce）、および希土類元素に含まれるディスプロシウム（Dy）、テルビウム（Tb）ユウロピウム（Eu）は、日本の基幹産業である自動車、電子・電気機器の開発にとって不可欠なものである。また、日本の資源セキュリティの確保、あるいはハイテク産業を支える高度部材の安定供給による国際競争力の向上の観点からも、これらの代替・低減技術の開発の波及効果は極めて大きい。

これら希少金属は産出国が偏在しており、例えば希少金属の中の希土類元素全般では、一位の中国が93%のシェアを占め、インド、タイをあわせて98%の世界シェアを占めている。また、中国はInで55%、Wで90%のシェアを握っており、近年は中国が自国の産業保護のために資源輸出を制限する傾向にあり、これら希少金属の市場への供給不足と価格高騰を招いている。

一方、省資源および省エネルギー、CO₂排出削減のために普及が促進され、我が国が世界の開発競争の先頭を走っているハイブリッドカーや電気自動車には、駆動用のモータとしてNd-Fe-B系磁石を用いた高性能モータが搭載されており、また、こうした高性能モータは産業用モータとして広く普及することが見込まれている。Ndを使用した高性能磁石では、Ndの結晶粒界への編析により保磁力の低下を招いていたが、少量のDyを添加することにより、Ndの編析を防ぎ保磁力を維持することが出来るようになってきている。Dyは希土類元素の中でも特に希少な元素であり、地殻中のシリコン（Si）の存在量を100万とした場合の各元素の存在割合を示したクラーク数は、わずかに3となっている。（図I-2-1 参照）

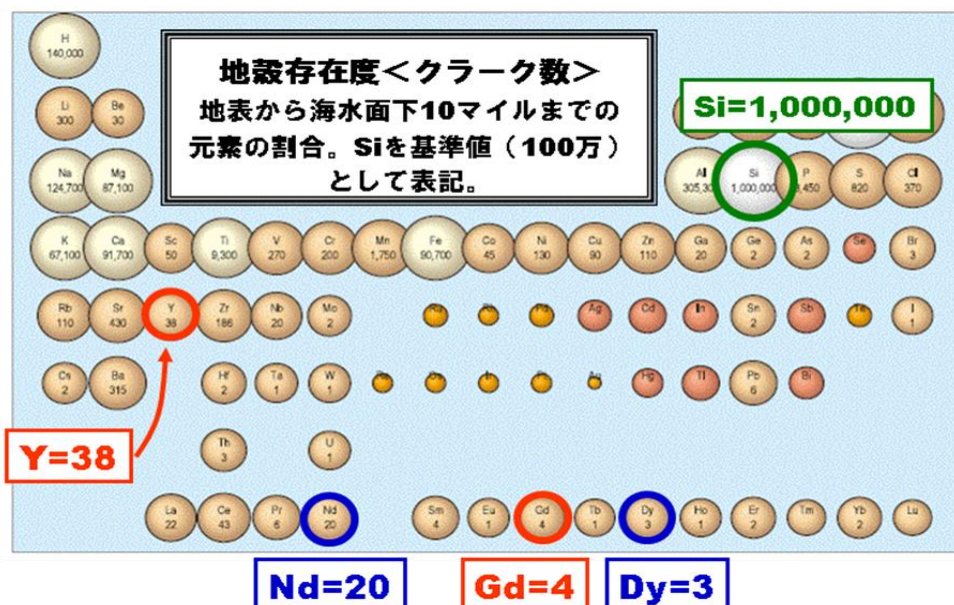


図 I -2- 1 関連各元素の地殻存在度<クラーク数>

本研究開発項目⑨-2「Nd-Fe-B系磁石を代替する新規永久磁石及びイットリウム系複合材料の開発（超軽量高性能モータ等向けイットリウム系複合材料の開発）」では、Nd-Fe-B系磁石を使用する高性能モータを代替する次世代モータの実現のために、イットリウム系複合材料を開発し、これを用いた超電導巻線モータの概念設計を実施することにより、将来的な希土類元素の使用量削減に資するものである。

以下に、本研究開発項目における、イットリウム系複合材料開発による希土類元素使用量を試算する。

・ 500kW 級モータに対する希少金属（希土類元素）使用量の比較

1. 永久磁石モータ

NEOMAX（Nd-Fe-B系）を想定。 残留磁束密度：1.2 T

ギャップにおける磁束密度：0.5 T（現状の永久磁石式モータを参照）

形状：10cm×50cm×3mm（レーストラック型）

[1 極当りの希土類元素使用量] 142.5（体積）×7.4（密度）×0.266（RE比率）
～ 300g（Nd:200g & Dy:100g）

2. 超電導巻線モータ

YBCO（ $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ ）超電導線材による超電導巻線を想定。

最大磁界：～1.3 T、ギャップ磁束密度：0.5 T

超電導線材スペック

厚さ：0.25mm

（超電導層：1.5 μ m、基板：100 μ m、安定化銅層：100 μ m、絶縁：50 μ m）

幅：10mm 線材長 / 1 極：2400m

超電導特性： I_c ：300A(77K, 0T)、300A(45K, 2T)

[1 極当りの希土類元素使用量]

36.0（体積）×6.3（密度）×0.133（RE比率）×0.33（B補正）/0.30（収率）
～ 30g（Y or Gd）

上記のように、現状の永久磁石式モータでは、Nd と Dy をあわせて一極当たり希土類元素を約 300g 使用するが、イットリウム系（Y or Gd）複合材料を用いた超電導巻線モータでは希土類元素の使用量は一極当たり約 30g と試算され、大きな削減効果が見込まれるものである。

2. 事業の背景・目的・位置付け

我が国の国際貢献及び国際競争力維持の国策として、2020年までに1990年比で25%のCO₂削減を目指した地球温暖化防止対策には、風力発電、太陽光発電等の新エネルギーの導入及び各種産業機器のエネルギー消費効率の改善が不可欠であると考えられる。高効率輸送可能なエネルギーとして、電気エネルギーが最も有効な第1次エネルギーとして世界中で期待されている。風力発電に代表されるように発電は回転機である発電機の高効率化が喫緊の開発課題である。

1960年代に開発されたSm-Co(例:Sm₂Co₁₇)焼結型希土類永久磁石、さらに1980年代に開発されたNd-Fe-B系(例:Nd₂Fe₁₄B)焼結型希土類永久磁石は、飽和磁化が他の永久磁石に比して高く(約1.6T強)、回転機への応用研究開発が精力的に進められてきた。2007年にはモータ(電動機)等回転機が日本国内永久磁石応用の46%に達する需要規模となっている。また、Nd-Fe-B系焼結型希土類永久磁石の欠点であった磁気特性(特に保磁力)の向上を目指した研究開発も進められており、Ndを一部Dyに置換すること

(31Nd-68Fe-B→21Nd-10Dy-68Fe-B(wt%))により、保磁力を3倍向上することに成功した成果も報告されている。一方で、Dyが非常に希少であることから永久磁石の微細組織(デンドライト等)の更なる微細化及びDyの結晶粒界への拡散を効率的に利用するなどによりDyの使用量低減を目指した研究も進められている。

しかしながら、希土類永久磁石の主たる構成元素であるNd, Dy等の希土類元素は、その98%強の産出が、中国一国に独占されている希少金属である。今後、地球環境対策、省エネ産業として大いに期待される成長分野である風力発電機、次世代モータ、次世代医療診断器の新たな産業分野の拡大によりさらに需要も増大する見込みである。この希土類元素希少金属の供給リスクは経済成長の制約要因ともなる。そこで、本研究開発は非鉄金属資源の安定供給確保に向けた戦略の一部として希土類元素希少金属の代替/使用量低減を目指すものである。

これまでのモータに代表される回転機の実用化の現状は、リラクタンス機、誘導機、永久磁石機、界磁巻線同期機が主流であった。特に省エネ効果が期待される回転機の最大効率は永久磁石同期機及び界磁巻線同期機で得ることができる。永久磁石同期機は、構造が容易で自動車等の回転機などへの展開が期待されているが、上述の通り希少金属である希土類元素であるNdやDyを使用することや、大型化の際には渦電流大きくなり損失源となることなどが課題とされている。本提案で開発するイットリウム系複合材料は低温(90K以下)で超電導特性を有する高温超電導材料であり、線材形状をしていることから界磁巻線同期回転機への適用が可能である。超電導材料は電気抵抗が零であることからジュール損失なく大電流を流すことができる。NbTi等に代表される金属系超電導材料は超電導特性を発現できる上限温度(臨界温度; T_c)が数K程度と低く、冷却に液体ヘリウム(沸点: 4.2K)が必要であった。これに対して、1986年以降に発見された銅酸化物系の超電導材料の幾つかはT_cが液体窒素温度(77K)を上回り、高温超電導体と呼ばれ、安価に冷却が可能な材料として開発が進められてきている。これらの材料の中で、イットリウム系超電導体(YBa₂Cu₃O_{7-δ}:以下YBCOと略す)は約90K以上のT_cを有し、特に磁場中で高い臨界電流(I_c)特性を示すことから、モータ等の回転機の磁場中での応用に適

した材料である。超電導体は、上述の通り電気抵抗がない状態で通電可能な電流値に限界 (I_c もしくは臨界電流密度 ; J_c) があり、この値は磁場中ではその強さに応じて低下する。この磁場に対する I_c 及び J_c の低下の程度は材料及び微細組織依存が大きく、YBCOは他の高温超電導体に比して低下が格段に小さい。しかしながら、同材料はその結晶構造に起因する特性の異方性が大きいことからその能力を有効に引き出すには結晶粒を揃える、いわゆる結晶粒配向化が必要となる。また、脆性材料である酸化物であるがために機械特性として延性を持たないと考えられていることから金属のように伸線等での線材化加工は困難である。これらの背景からイットリウム系複合材料は金属テープを基板材料とした積層構造を取り、反応抑制を意図して金属基板と超電導層との間に配した中間層と呼ばれる酸化物までに結晶粒配向性を付与し、この配列を利用して超電導層の膜を形成するエピタキシャル成長を利用して線材を作製している。中間層までに結晶粒三次元配向を実現するには大きく分けて二つの方法がある。一つは、基板である金属テープの結晶粒を配向させる手法、もう一方は特殊な成膜方法により結晶粒無配向金属テープ上に結晶粒配向中間層を形成する手法である。前者では、Ni や Ag などに対して冷間で強加工を施し、その後に適切な再結晶化熱処理を与えることで集合組織化による配向組織を得る方法がある

(RABiTSTM ; Rolling Assisted Bi-axially Textured Substrate)。

次に、中間層を配向させる方法としては、IBAD (Ion Beam Assisted Deposition)法を用いた線材開発が主に進められている。IBAD法は、スパッタ法などによる成膜中に基板表面に対してある特定の角度からイオンビームを照射することにより結晶粒配向組織を得る手法で、非常に配向性の高い結晶粒配向組織が得られ、さらに結晶粒が非常に細くなるという長尺化に適した特性を示す手法である。この方法は、産業用超電導線材・機器技術研究組合 (以下、研究組合と略す) の一員である(株)フジクラ (以下フジクラと略す) が世界で初めて開発したもので、現在、日米欧で多くの企業、研究機関が採用している。超電導層に関しては、パルスレーザ蒸着 (PLD; Pulsed Laser Deposition) 法、有機酸塩堆積法 (MOD; Metal OrganIc Deposition) と化学気相法 (MOCVD; Metal OrganIc ChemIcal Vapor Deposition) などでの開発が進んでいる。このイットリウム系複合材料における開発においては、結晶粒の高い配向性を得ることにより高い超電導特性を実現し、これを長尺化することに力が注がれてきた。日本においては平成 15 年度から平成 19 年度にかけて (独) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (以下、NEDO と略す) 事業として実施された「超電導応用基盤技術開発 (第II期)」において500 m長で 300 A/cm 幅 (@77 K, 自己磁場) の I_c 特性を有する線材が実現され、「イットリウム系超電導電力機器技術開発」(平成 20 年度~平成 24 年度) では、200 m長で 200 A/cm 幅 (@77 K, 自己磁場) の線材を機器開発に提供している。一方、米国では SuperPower 社が線材の長尺化技術開発を先行させており 1.3 km 長の線材はできているものの 153 A/cm 幅 (@77 K, 自己磁場) と I_c 特性は低い値に留まっている。300 A/cm 幅 (@77 K, 自己磁場) を超える線材としては日本と同様に 630 m の長さの線材に留まっている。モータ応用などの磁場中応用の観点からは、磁場中での高い超電導特性が求められるが、イットリウム系複合材料の場合、上述の代表的な自己磁場中の特性を有した線材として 300 A/cm 幅 (@77 K, 自己磁場) が得られた場合、超電導のモータ応用で想定されている 2 T 磁場下 (永久磁石以上の磁界強度) での特性は 50 K で 200 A/cm 幅程度、20

Kでは 700 A/cm 幅程度の大電流通電が可能である。また、磁場中での特性を向上すべく人工的に磁束ピン止め点（微細な粒状・針状等の非超電導結晶）を導入した線材では更に高い磁場中超電導特性が期待できる。

上述のイットリウム系複合材料は、希土類元素構成（含有）密度が 13 %と低く、積層型テープ形状で数 μm 厚の非常に薄い超電導層に数百アンペアの大電流が流せることから、これを用いた電磁石により構成されるモータでは、同等の出力を有する希土類型永久磁石モータに比べて希土類元素必要量は 1/6 ~ 1/3（重量比）程度であり、大きくその使用量を低減することが期待できる。さらに、鉄心を使用せずに軽量、高効率等の効果も期待できる。しかしながら、イットリウム系複合材料を用いた超軽量高性能モータを実現するためには以下の課題を解決する必要がある。まず、コンパクトなモータを実現するためには効果的な磁場環境を作り出すことが必要であり、この条件を満たすためには、回転軸にできるだけ沿わせた鞍型、傘型等の異形コイルが効果的である。実際にはこの異形コイルに回転に伴う複雑で強力な電磁力が加わる。イットリウム系複合材料は金属基板に高強度を有する Ni 基合金であるハステロイ TM などを用いていることから線材として非常に高い機械強度を有する。しかしながら、材料間の接続は通常半田接続や拡散接合の手法が取られているが、その機械強度は金属基板自体の特性に比べて低下してしまう。従って、少なくとも構成される 1つのコイルは 1本の線材で作製されることが望まれている。粗設計ではあるもののこれまでの永久磁石モータの代表的な大型モータ規模である 500

kW(1000rpm) 級モータの場合で、イットリウム複合材料を用いた電磁石モータに代替する場合、300 A/cm 幅 (@77 K, 自己磁場) の臨界電流 (I_c) を有した線材で少なくとも 1 km 以上の線材単長が必要となる。また、リニアモーターカーに用いられる電磁石コイル等では永久電流モードで用いられることから、永久電流減衰率を小さくすることが望まれる。以前、NEDO が実施した「超電導応用基盤技術研究開発（第 I 期）」の中で平成 13 年度から 2 年間に亘って行われた「高機能超電導材料技術開発」ではリニアモーターカー用コイル開発をビスマス系超電導 ($\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$) 線材を用いて実施した。このプロジェクトでは、450 m線材を 4 枚束ねて（定格電流 532 A@ 20 K）使用し 0.5 %/日の永久電流減衰率を実現している。しかしながら、実用時には更に小さな減衰率が求められ、例えば、運輸省（現国土交通省）の目標値として挙げられていた 0.1 %/日を実現するためには、上記と同様の特性で 1 km 長以上の線材が必要となる。これらの状況を鑑み、本提案では、まずこれまで国内で 500 m長線材を実現できている線材作製プロセスを選択し、イットリウム系複合材料を用いた電磁石を実現するために必要な 300 A/cm 幅 (@77 K, 自己磁場) を超える高い特性で 1km を超える超長尺線材を実現するための技術開発を効率的に行う。これにより、コイル製造に必要となる大量の線材に対応した高速化量産化技術の開発を目指す。

また、上述の通りイットリウム系複合材料による電磁石モータでは、希少金属である希土類元素使用量を低減させることが可能になるが少量でも希土類元素を使用することになることから、これらの使用量も可能な限り低減することが望まれる。この使用量を低減させるには、原料収率の高い線材作製プロセスの開発が有効である。そこで、本提案プロジェクトでは、原理的に高い原料収率が見込まれる線材作製プロセスに対し線材作製プロセスの開発を行う。

更に、イットリウム系複合材料による電磁石モータで軽量高特性を実現するためには、コイルの形状を含め最適発生磁場分布を実現する巻線構造やこれを用いた回転部位（ロータ）伝導冷却構造の最適化、回転機部材としての機械強度の確保、トルク伝達構造の最適化等の要素技術の検討が必要不可欠である。超電導材料を用いた回転機の開発では、金属系超電導線材を用いて、昭和 63 年度から平成 11 年度まで NEDO 事業として実施された「超電導電力応用技術開発」において 70 MW の発電機の開発が行われている。これは、低温（液体ヘリウム温度）動作であることからコスト的な問題等の課題が残っていた。一方、高温超電導材料を用いた回転機の開発は米国が先行しておりビスマス系超電導線材を用いた 32 MW の船用モータが NAVY によって開発されている。国内では本提案と同様のイットリウム系複合材料を用いた開発で平成 15 年度から平成 19 年度まで NEDO 事業として実施された「超電導応用基盤技術開発（第II期）」内で 2 種類のモータにおいて試作が行われた。ひとつは、ISTEC と JM&G 及び九州大学（岩熊准教授）によるもので、ラジアルギャップ型超電導同期モータの原理検証試験で、もうひとつは、ISTEC、住友電工、IHI、福井大学（杉本教授）によるもので、アキシシャルギャップ型モータの試作・検証である。しかしながら、この事業では何れも磁場を効率的に利用する等の設計の適正化までは至っていなかった。そこで本提案では上述の超長尺イットリウム系複合材料作製プロセスの開発に加えて、これを用いたモータに対する構造最適化のための課題を抽出するための概念設計、巻線技術及び冷却技術等の要素技術開発を実施する。ここでは、構造最適化を行うための磁場、応力等のシミュレータの開発と共にモータ開発の基軸になる傘型等異形コイル作製の要素技術の開発を並行して行う。これにより、本提案の技術開発終了後に速やかに超軽量高性能モータの開発へ繋げることが可能となる。

本事業では、市場のニーズに応える機能を実現する上で不可欠な高品質・高性能の部品・部材をタイムリーに提供し、又は提案することができる部材の基盤技術を確立することを目的とした「ナノテク・部材イノベーションプログラム」、及び環境・資源制約を克服し循環型経済システムを構築することを目的とした「環境安心イノベーションプログラム」の一環として実施する。また、希少金属の安定供給確保に対して生じている懸念に対して、平成 18 年 6 月、資源エネルギー庁から報告された「非鉄金属資源の安定供給確保に向けた戦略」において進められている総合的な対策の一部として非鉄金属資源の代替材料及び使用量低減技術の確立を目的としている。なお、平成 18 年 3 月 28 日に閣議決定された「第 3 期科学技術基本計画」では、「ナノテク・材料分野」を「重点推進 4 分野」の一つとして位置付け、これに優先的に資源配分することとしている。本研究開発は、同分野に列挙されている「戦略重点科学技術」のうち「資源問題解決の決定打となる希少資源・不足資源代替材料革新技術」にあたるものである。

II 研究開発マネジメントについて

II. 研究開発マネジメントについて

1. 事業の目標

イットリウム系複合材料は、希土類元素構成（含有）密度が 13% と低く、積層型テープ形状で数 μm 厚の非常に薄い超電導層に数百アンペアの大電流が流せることから、これを用いた電磁石により構成されるモータでは、同等の出力を有する希土類型永久磁石モータに比べて希土類元素必要量は 1/6～1/3（重量比）程度であり、大きくその使用量を低減することが期待できる。さらに、鉄心を使用せずに軽量、高効率等の効果も期待できる。

超長尺イットリウム系複合材料における希少金属使用量低減技術開発では、イットリウム系複合材料を用いた軽量高性能モータを実現するために必要な高特性を有し、単長が 1 km 以上の超長尺複合材料を実現するために、プロセス開発を実施する。具体的には、超電導層形成技術であるエキシマレーザを用いた PLD 法及び三フッ化酢酸塩（TFA）を用いた TFA-MOD 法を選択し、これまでの実績に基づいて超長尺線材で高特性を実現するためのそれぞれのプロセスに対する課題を整理し、これを解決するための要素技術を導入した装置開発とこれを用いた複合材料作製プロセス条件の適正化を行う。

イットリウム系複合材料の製造工程における希少金属利用率等の効率向上技術開発では、更に希少金属である希土類元素使用量を低減させるために研究項目①で選択したプロセスに比べて現状では長尺作製実績は十分ではないものの原理的に高い原料収率が見込まれる線材作製プロセスの開発を行う。ここでは、原料供給口を基板直上に設置し、レーザのアシストにより反応を促進し、これまで酸化物薄膜等の超高速製造能力が示されているレーザ化学気相蒸着（レーザ CVD）法及び従来実績のあるエキシマレーザに比して原料ターゲットに対して均一性の高い照射が可能になる特徴を有しており、且つ広い領域での成膜が可能になる YAG レーザによる PLD 法を選択し、イットリウム系複合材料プロセスとして高い原料収率を実現する連続成膜プロセスの開発を行う。

イットリウム系複合材料を用いた回転機要素技術開発では、超電導のメリットと希土類元素使用量低減効果の大きな領域として、500 kW（1000 rpm 級）以上の産業用回転機（モータ、発電機）を目標として設定し、新しいイットリウム系複合材料の特性を基に概念設計と要素技術開発を実施する。ここでは、上記 500 kW 級の回転機の概念設計とともに、回転機の主要部分である界磁巻線と冷却システムに関して、軽量化、コンパクト化が可能な方法の要素検討を行う。すなわち、傘型界磁巻線とサーモサイフォン式冷却の 2 つの要素技術に関して実測試験による性能評価を行い、上述の概念設計の基礎データを得る。これらの開発によりイットリウム系複合材料による大容量高速回転機作製のための開発に対する課題と指針を得る。

1.1 超長尺イットリウム系複合材料における希少金属使用量低減技術開発

[最終目標値]

300 A/cm 幅 (@77K, 自己磁場) の特性を有し、1 km を超える超長尺線材作製を見通す。

(具体的目標値)

- ・1km長複合材料を作製し、平均 I_c が 200A/cm 幅以上 (@77 K, 自己磁場) であることを実証する。
- ・同条件で作製した 10m 長以上の複合材料で I_c が 300A/cm 幅 (@77 K, 自己磁場) 以上を実証する。

[目標値設定理由]

本提案はイットリウム系複合材料を用いた電磁石を用いたコイルを実現することで希土類元素希少金属使用量を低減することを目的としている。ここで、Nd(Dy)-Fe-B 系永久磁石を用いた 500 kW 級のモータを想定した場合、界磁用磁石の 1 極のサイズを 10x50x3 mm³ のレーストラック形状電磁石を用いると希土類重量比は約 0.27 ((Nd,Dy)₂Fe₁₄B₇) となり密度を約 7.5 g/cm³ とすると希土類の使用量は約 300 g 程度である。希土類 (Nd 及び Dy) 中の代表的な Dy の比率は 33 % 程度であることから Nd 重量は 200 g, Dy は 100 g 程度となる。一方、イットリウム系複合材料による電磁石を用いた場合には、Nd、Dy は全く使用しないが、代わりに希土類の一種である Y あるいは Gd を使用することになる。しかしながら、薄膜線材であり希土類重量比率も小さい(0.13: Y(Gd)Ba₂Cu₃O₇)ことから、1.5 μm 厚の超電導層線材で使用する Y(Gd)量は 1 極 2400 m の線材として約 10 g である。ここで、関連する希少金属 (希土類) のクラーク数 (地表から界面下 10 マイルまでの元素の割合で Si を基準値 10⁶ としての表記) を比較すると、希土類磁石に用いられている Dy とイットリウム系複合材料に用いる Gd は 3 及び 4 と非常に小さい値をとっている。一方、希土類磁石内の Nd とイットリウム系複合材料に用いられる Y は、それぞれが 20 及び 38 と同程度である。そこで、希少程度の類似した希土類に対し、上記の使用量を比較すると、Dy に対する Gd の使用量を重量比で示すと、イットリウム系複合材料製造時の材料収率が 30% の場合で、希土類元素の使用量は重量で 1/3 (~10 g/0.3/100 g) 程度まで低減できることになる。一方、Nd に対する Y の使用量を重量比で示すと、1/6 (~10 g/0.3/200 g) 程度まで低減できることになる。

次に、このイットリウム系複合材料による電磁石モータを実現するための必要条件となる要素技術は、傘型コイルに代表される異形コイル形状等での効率的な磁場利用となる。この異形コイルが強い電磁力の中で回転することからコイル、線材には強い機械的な応力がかかることになる。この応力に耐えるためには各極の要素コイルを線材間接続なしで作製することが望まれる。ここで代表的なモータ容量として 500 kW の電磁石モータを粗設計すると、4 極構造で 350 kAT (キロアンペアターン) の起磁力が必要となり 77K, 自己磁場で 300 A の特性を有する線材は 45 K, 2 T での特性として 300 A の通電が可能となるため 1200 ターンが必要となり 1 コイルで 2400 m の単長が必要となる。並列導体化により線材単長の短尺化が可能ではあるが、電機子からの交流成分による損失を抑制するためには各線材のインダクタンスを揃える必要があり、この観点から転位を用いない場合は、2 本までに限定される。従って最も短い線材であっても 1200 m (=2400 m/2 本) の単長が求められる。なお、300 A/cm 幅 (@77K, 自己磁場) とは、これまで世界中のイットリウム系複合材料の長尺線材である

500 m 級線材で実現されているチャンピオンデータの I_c である。

また、リニアモーターカーの場合には、永久電流モードで使用する際の永久電流減衰率を低減させるためにコイルでの線材接続数を低減させる必要がある。「超電導応用基盤技術研究開発（第Ⅰ期）」の中で平成 13 年度から 2 年間に亘って実施された「高機能超電導材料技術開発」事業においてリニアモーターカー用コイル開発がビスマス系超電導線材を用いて行われている。このプロジェクトでは、450 m 長線材を 4 枚束ねて使用し 0.5 %/日の永久電流減衰率を実現している。しかしながら、実用時にはさらに小さな永久電流減衰率が求められ、例えば当時運輸省（現国土交通省）目標値として 0.1 %/日という値が挙げられている。ここで永久電流減衰をその主因である常電導接続によるジュール損失から概算すると、減衰率を 1/5 にするためにはコイル内での線材間接続数を 1/5 にすることが求められる。この線材間接続数を低減させるためには「線材特性の向上」と「線材単長の長尺化」が有効である。上記のプロジェクトでは、450 m 単長の線材を用い、定格電流 532 A を 4 枚の線材で通電することで必要となる 740 kAT を実現している。1 枚の線材では 133 A を担っており、負荷率 70 % を想定すると I_c としては 190 A (@20K, 5 T) 相当の線材となる。これに対し、今回の目標としている 77K, 自己磁場で 300 A/cm 幅の I_c を有したイットリウム系複合材料を用いた場合、同じ温度・磁場環境 (20K, 5T) では 350 A の I_c となることから、約 2 倍の特性向上となる。従って、この複合材料を使用して線材間接続数を 1/5 にするためには線材単長として $(5/2) \times 450 \text{ m} = 1125 \text{ m}$ が必要となる。

以上 2 つの回転機応用において高性能軽量モータを実現するために必要となる線材仕様を検討したが、 I_c 特性として長尺線材におけるこれまでの最も高い I_c である 300 A/cm 幅 (@77K, 自己磁場) とした場合にいずれも単長として 1000m を超える超長尺線材が必要となる。そこで、本研究項目においては、300 A/cm 幅 (@77K, 自己磁場) – 1 km を数値目標とし、この仕様を有した線材作製を見通すことを目標とした。

1.2 イットリウム系複合材料の製造工程における希少金属利用率等の効率向上技術開発 [最終目標値]

超電導層の連続形成プロセスにおいて原材料収率 40%以上を見通す。

(具体的目標値)

- ・ 全成膜領域に対し、静止成膜により原材料収率 40%以上を実証する。
- ・ 成膜領域の一部を通過する移動成膜により、静止成膜結果から予想される成膜量を実証する。

[目標値設定理由]

これまで、「イットリウム系超電導電力機器技術開発プロジェクト」（平成 20 年度～平成 24 年度）においては総長 30 km 長を電力機器開発に供給してきており、準量産長尺プロセスとして最も実績を有する PLD 法による超電導層形成時の原料利用率（収率）は 30 %程度である。本研究項目においては、この現状の収率を大きく上回る値として 40 %以上の原材料

利用率（収率）を見通す技術開発を目標とした。これにより、500 kW 級のモータを想定した場合の $(\text{Nd,Dy})_2\text{Fe}_{14}\text{B}_7$ 磁石中の Nd+Dy 量に対して Y+Gd 使用量は原料収率 30 % 時の使用量低減比 1/6 程度を 1/8 程度まで下げることが可能となり資源戦略上より有利になると考えられる。

1.3 イットリウム系複合材料を用いた回転機要素技術開発

(1) 回転機適正構造の概念設計

[最終目標値]

500 kW 級-1000 rpm 級の大容量回転機の概念設計により、イットリウム複合材料による大型回転機の優位性を見通す。

(具体的目標値)

- ・ 磁場—応力—伝熱を連成した回転機評価用シミュレータを開発する。
- ・ 上記シミュレータを用いた総合評価により傘型コイル利用回転機で従来の永久磁石回転機に比べ希少希土類元素使用量が 1/10 となる成立性を示す。

(2) 界磁巻線および冷却要素技術開発

[最終目標値]

傘型界磁巻線の試作とその熱的、電磁氣的、機械的特性評価およびサーモサイフォン式冷却試験とその冷却特性評価により、500 kW 級-1000 rpm 級回転機の設計に資する。

(具体的目標値：傘型界磁巻線試作)

- ・ 傘型界磁巻線工程等における加工劣化を抑制し、巻線状態での特性で複合材料 I_c の 70% 以上を得ることを実証する。

(具体的目標値：サーモサイフォン式冷却装置試作)

- ・ Ne を用いたサーモサイフォン式冷却装置において高速回転時の回転数と冷却能力の関係を明らかにし、回転機の冷却設計を可能にする。

[目標値設定理由]

電力応用機器の市場調査研究報告書((財)国際超電導産業技術研究センター H19 p65) にも報告されているように、産業用超電導回転機においては 1-10 MW 級で経済的なメリットがあり、実用化の可能性が高いといわれている。前述のように、さらに特性改善が進み磁場中臨界電流密度の高いイットリウム系複合材料を用いれば、従来より容量の低い数百 kW 級から採算性が取れ事業性が出てくる可能性が高い。また、前述のように、国家戦略としての希土類元素使用量低減効果の大きい輸送用（大型自動車、列車用）同期モータ、風力発電用発電機としての可能性が出てくると、数百 kW 級回転機でもイットリウム系複合材料による実用化の見通しが高くなる。このため、上述の目標では超電導化のメリットと希土類元素使用量低減効果の大

きな領域として、500 kW 以上の産業用回転機を目標として設定し、新しいイットリウム系複合材料の特性を基に概念設計を行うこととした。また、産業用回転機としては 1000 rpm 級の回転数が要求されるので、1000 rpm を代表値として目標にした。

希土類元素使用量の大きな産業用回転機の例としては、大型輸送用として、JR 東日本の新幹線用モータ (335 kW) や 24 人乗り大型高速エレベータ用モータ (168 kW) などがあり、多量に永久磁石を使っている。また、風力発電機では欧州の Teramagnetica 社により 2 トンの永久磁石を使った MW 機が開発されつつある。すなわち、今回の 500 kW 級機の検討により、イットリウム系複合材料の適用が可能となれば、いずれの場合も永久磁石構成元素である希土類元素使用量低減効果が大きい。風力発電機の場合には、上記回転数が 10・20 rpm 程度と低く、産業用の約 1/100 であるが、界磁巻線の数 (極数) を増やす、あるいは増速機をつけることで同様な界磁巻線により十分 MW 級に適用できる [H18 (財)国際超電導産業技術センターによる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, p.89]。これまでイットリウム系複合材料を用いた効率の高い同期モータなどの回転機の開発例は、非常に少なく、日米とも 1 例ずつであり、しかも容量は 10 kW 級と非常に低い。本提案において、500 kW 級-1000 rpm 級回転機 の概念設計を行うにあたり、上述(2)の界磁巻線と回転子冷却方法に関して、要素技術開発を行う。ここで提案している傘型界磁巻線では、電機子-界磁巻線間の有効鎖交磁束を高めることにより、回転機の高出力を得ることが期待できる。従来の単純レーストラック巻線と異なり軸方向に巻線径が広がり、回転子の形状に整合した配置が可能となり、電機子-界磁巻線間のギャップ間隔を狭くすることなどにより回転トルクを生じさせる鎖交磁束を有効に発生できる。また、サーモサイフォン式冷却は、従来の He ガスあるいは、液体 He の循環式冷却に比べて、回転機システムの軽量化、コンパクト性が見込めるが、実施例は少なく、以前の「超電導応用基盤技術研究開発プロジェクト (第 II 期)」におけるサーモサイフォン式冷却は、液体窒素を使用し、船用モータを目指した低回転数 (140 rpm) での原理検証であった。本提案では、低温運転における臨界電流 (磁場中の臨界電流を含む) 特性の大幅な向上を有効に利用し、希土類元素で構成されたイットリウム系複合材料の使用量低減とともにモータとしてのコンパクト化 (高磁界化) のために、沸点が 27 K と低い液体 Ne などを用いてイットリウム系複合材料の高臨界電流化が見込める 50 K 以下での安定した界磁巻線の冷却を目指す。以上、500 kW 級-1000 rpm 級回転機 の概念設計、傘型界磁巻線、Neなどを冷媒とするサーモサイフォン式冷却の要素試験により、イットリウム系複合材料による大容量高速回転機の作製上の主たる要素技術の課題を明確にし、開発指針を得る。

2. 事業の計画内容

2.1 研究開発の内容

2.1.1 超長尺イットリウム系複合材料における希少金属使用量低減技術開発

イットリウム系複合材料を用いた軽量高性能モータを実現するためには概要でも記した通り、コイル強度の実現及び永久電流モードでの永久電流減衰率を小さくするために高特性（例えば 300 A/cm 幅(@77K, 自己磁場) を有し、単長が 1 km 以上の超長尺線材が必要である。

本項目では、イットリウム系複合材料を用いた電磁石を用いたコイルを実現することで希少金属である希土類元素使用量を低減することを目的とし、高特性で超長尺複合材料作製技術を開発する。ここで、イットリウム系複合材料は、金属基材上に超電導特性の能力を引き出すために反応抑制や結晶粒配向性を付与する目的で酸化物の中間層を配している。希土類元素を含んだ超電導層はこの中間層上に様々な方法で成膜される。この中で、中間層に関しては 1 km 以上の超長尺化が既に実現されているが、超電導層に関しては高性能超長尺化には様々な課題が残されている。本提案においては、平成 15 年度から平成 19 年度にかけて NEDO 事業として実施された「超電導応用基盤技術開発 (第 II 期)」において 500 m 長で 300 A/cm 幅 (@77K, 自己磁場) の I_c 特性を有する複合材料を実現した超電導層形成技術であるエキシマレーザを用いた PLD 法及び TFA-MOD 法を選択した。ここでは、これまでの実績に基づいて超長尺線材で高特性を実現するためのそれぞれのプロセスに対する課題を整理し、これを解決するための要素を導入した装置開発とこれを用いた複合材料作製プロセス条件適正化により目標達成を図る。

2.1.1-1 エキシマレーザ PLD 法による複合材料作製プロセス開発

イットリウム系複合材料の作製方法に関しては、世界中で様々なプロセスの中から現在主として PLD 法、MOCVD、MOD 法で研究が進められている。現在、数百 m 級の長尺分野での世界トップデータはほぼ PLD 法と MOCVD 法で占められている状況である。低コスト化が期待される MOD 法も特性を伸ばしており今後が期待されている。超電導層の下地となる基材に関してはこれまで様々なアプローチがなされてきたが、現状では IBAD 法が最も定着しており、次いで Ni 基合金での結晶粒配向基材が取り入れられている。現在、500m を超える高特性長尺線材の実績はすべて IBAD 中間層を用いたものである。IBAD 法は、1991 年に研究組合の一員であるフジクラにおいて世界で初めて開発された手法であり、安定して高特性複合材料が得られる方法として国内外で採用されてきている。フジクラではこれまでに IBAD/PLD 線材の長さを 200 m → 300 m → 500 m と着実に伸ばしてきている。米国においても SuperPower 社が IBAD/MOCVD 複合材料を作製してきたが、ロスアラモス米国立研究所の技術移管により急速に実績を伸ばしている状況である。

IBAD 法は結晶粒がランダムに配向した金属テープ上に中間層成膜段階で 2 軸結晶粒配向構造(単結晶的に全軸揃った構造)を導入する製法であり、イットリウム系複合線材の構成として

最初に報告され、最も早く $10^5 \sim 10^6$ A/cm² 級の J_c を達成した実績がある。また IBAD 法は RABiTS™ 法と異なり、機械的強度に優れ、また基材の材質を選ばないことから幅広い展開が期待できる。既に 1 km 級 IBAD 中間層が 1 km/h の製造速度での作製が見通せており、本提案の研究対象とはしない。

PLD 法は国内、海外ともにこれまで高特性の超電導薄膜作製法に使われてきた方法のひとつである。PLD 法は他の成膜法と異なり、非熱平衡成膜プロセスであることから、原料ターゲットの成分調整により所望の組成の膜作製が比較的容易であることや、人工ピン止め点導入に関してもピン止め点となる物質を原料ターゲットに仕込むだけで従来通りの成膜が行えるというメリットがある。一方で設備コストが高いとの懸念があるが、PLD 法は MOCVD 法と比較し原料ターゲットの価格が大きく抑えられることや、結晶粒自己配向機構を利用した第二中間層(CeO₂)の成膜にも利用できるというメリットを有している。

これまで平成 16 年度において NEDO 事業として実施された「超電導応用基盤技術研究開発(第 II 期)」において、200 m 長イットリウム系複合材料を PLD 法により作製し、その後平成 19 年度に 500 m 長複合材料の作製に成功してきている。500 m 長イットリウム系複合材料においては 350 A/cm 幅(@77K, 自己磁場)の I_c を有するイットリウム系複合材料を 504 m 長に亘って実現し、当時の $I_c \times L$ 値における世界記録を達成している。また、平成 20 年度より NEDO 事業として実施されている「イットリウム系超電導電力機器技術開発プロジェクト」においては I_c として 200 A/cm 幅(@77K, 自己磁場)を超える 200 m 級の複合材料を総量で 30 km を超電導変圧器開発のために供給してきている。

PLD 法イットリウム系複合材料について、これまでフジクラおよび研究組合の一員である(財)国際超電導産業技術研究センター(以下、ISTEC と略す)において達成した実績を以下に示す。フジクラではこれまで、PLD 法による GdBa₂Cu₃O_y 超電導層を形成する複合材料(以下 PLD-GdBCO 複合材料と略す)で 500 m 級で $I_c = 350$ A/cm 幅(@77K, 自己磁場)以上の高 I_c 長尺複合材料を開発し、平均 $I_c = 440$ A/cm 幅(@77K, 自己磁場)を達成している。また、PLD-GdBCO 複合材料の短尺のサンプルにおいて I_c が ~ 1 kA/cm 幅(@77K, 自己磁場)を超える高 I_c を達成した。さらに世界に先駆けて 300 m および 500 m 長の高結晶粒配向 IBAD 中間層を開発し、2 段階の IBAD 法を用い、結晶粒配向化速度が約 5 倍の中間層構造の開発に成功している。さらに IBAD/PLD 法によるイットリウム系複合材料ソレノイドコイルの開発にも成功し、中心磁界 0.27 T を達成した。一方、平成 16 年度より超電導応用機器開発に向けた線材供給をフジクラと ISTEC で共同して行った。ISTEC においては IBAD/PLD 法により 200 m 以上の線材で $I_c > 200$ A/cm 幅を達成し、PLD 法においては Zr 入り原料ターゲットを用いることで人工ピン導入に成功し、PLD-GdBCO 複合材料における Ba 欠乏組成による臨界電流値の向上を示すことができた。また、PLD-GdBCO 複合材料により短尺厚膜サンプルにて 3 T 磁場中で $I_c = 50$ A/cm 幅(@77K)を達成した。

上述の通り、PLD 法はこれまで 500 m イットリウム系複合材料の製作実績を有している。この複合材料の超長尺化を行うためには、以下に記す課題の解決を行う必要がある。これまで複合材料の作製において長尺化に伴い PLD 法の原料となる YBCO/GdBCO の粉体を焼結した

原料ターゲットを使用している。この原料ターゲットはエキシマレーザによって表面から複合材料に向かって蒸着子を蒸着させる原料源の役割を持つ。長時間のレーザ照射によって原料ターゲットの表面粗度が増加してくるため、超長尺イットリウム系複合材料の開発にあたっては長時間のレーザ照射による原料ターゲット表面粗度の変化の小さい照射条件を見出すかあるいは原料ターゲットを複数個用意して蒸着時間に伴って取り替えることが必要になる。今回の超長尺イットリウム系複合材料の開発にあたっては、必要とするイットリウム系複合材料の膜厚を確保するために複数回蒸着する方式も併用することにより超長尺複合材料を実現するものである。

以上述べたように超長尺イットリウム系複合材料の実現にあたっては、作製する複合材料の長さが長くなるにしたがって特性の低下が生じてしまう課題を解決する必要がある。そのためには長時間のレーザ照射による原料ターゲットから複合材料に向かって蒸着される蒸着子群の密度や方向を常に一定にすることが必要であり、そのためのレーザ照射の走査条件と得られる複合材料の特性、膜厚等との関係を詳細に検討し、1 km 長の複合材料作製時間において開始端と終端との性能比が小さくなる照射方法を見出す。さらに、この蒸着技術を従来の実績である 500 m から 1 km を超える長さの超長尺複合材料に適用する際には、高速移動においても複合線材基材の表面温度差を数度以内に安定して維持できるヒータ構造や加熱方法、雰囲気中の酸素分圧が蒸着子との反応等により長時間において変化することのないように酸素ガスの供給と排気の状態を制御する技術等、安定して蒸着可能な技術を開発する。さらに Reel-to-Reel (RTR)方式により蒸着するためには 1 km を超える長さの中間層複合材料や蒸着済みのイットリウム系複合材料の巻き出し、巻き取りを行う必要がある。このイットリウム系複合材料はテープ状材料であるため、複合材料の品質保持のためにねじれ等が複合材料に作用することなく大口径リールに単層巻きを行う必要がある。大口径のリールの場合、常時複合材料に一定の張力を付与する必要があり、リール軸のトルクを線材の残存径にあわせて変化させる。このトルク制御方式の開発も同時に行う。

2.1.1-2 TFA-MOD 法による複合材料作製プロセス開発

TFA-MOD（三弗化酢酸塩による有機酸塩堆積）法とは、有機溶媒中に三弗化酢酸塩、ナフテン酸塩、オクチル酸塩等の有機金属塩（イットリウム系複合材料を構成する元素）を溶解した原料溶液を中間層付の金属基材上に塗布、乾燥・仮焼する工程を繰り返して一定の膜厚を有する仮焼膜を形成し、その後に結晶化するための本焼熱処理を施して複合材料薄膜を形成する手法である。本焼工程の熱処理において水蒸気を含む反応ガスを仮焼膜表面に吹き付け、水分（ H_2O ）と仮焼膜中の弗化物のフッ素（F）とを反応させて酸化物とし、超電導薄膜を形成させると共に、F を副反応物であるフッ化水素（HF）として系外に排出する。この手法は、活性な弗化物を利用することにより低温での反応が可能となり、また、超電導薄膜の低温結晶成長を著しく阻害する炭酸塩の生成を抑制すると共に、高温で起こりやすい下地の金属基材と超電導層との反応も同時に抑制することが可能である。加えて、上述の水と HF ガスの出入りが膜の厚み方向に行われ、これを制御することにより中間層を形成する結晶粒の配向性を効果的

に引き継いだ厚膜エピタキシャル成長を容易にすることが可能となる。

研究組合の一員である昭和電線ケーブルシステム(株) (以下、昭和電線と略す) は、平成 11 年度より NEDO 事業として実施された「超電導応用基盤技術研究開発 (第 I 期)」に参画し、ISTEC と共同で TFA-MOD 法によるイットリウム系複合材料の線材開発に着手した。続く平成 15 年度からの「超電導応用基盤技術研究開発 (第 II 期)」においても、イットリウム系複合材料の長尺線材作製に適したバッチ式大型本焼炉の開発を行い、長さ 500 m で 300 A/cm 幅 (@77K, 自己磁場) の I_c であるプロジェクトの目標に対し、長さ 500 m で 310 A/cm 幅 (@77K, 自己磁場) の I_c 特性を有する線材の作製に成功し、目標を達成した。バッチ式熱処理の特長は、作製する線材を電気炉の内部に設置して一括で熱処理を行うため、RTR 式の作製プロセスに比して短時間で線材作製が可能であり、工業生産性に優れていることを特長とする。

昭和電線は平成 20 年度から NEDO 事業として実施されている「イットリウム系超電導電力機器技術開発」に参画し、プロジェクトの開発テーマである「高電圧絶縁・低誘電損失ケーブル化技術開発」と「超電導変圧器技術開発」で使用するイットリウム系複合材料線材の供給を担当し、単長 30~200 m で 250~300 A/cm 幅 (@77K, 自己磁場) の通電が可能な線材を平成 21 年度末までの 2 年間で約 8 km 供給し、安定製造技術の検証を行っている。

これまでの研究により高特性を有する長尺イットリウム系複合材料を TFA-MOD 法により作製する技術が開発され、性能は機器開発に適用されるレベルに到達した。しかしながら、超軽量高性能モータ実現には、高性能で 1 km を超える超長尺複合材料が必要であり、これらの技術開発が急務であると考えられる。さらに、米国では 1 km 級の複合材料開発が進んでいる現状を考慮すると、国際競争力の観点からも超長尺化技術の確立を急ぐ必要があると考えられる。

イットリウム系複合材料の超長尺化に当たり、TFA-MOD 法で必要となる開発課題は、バッチ式焼成の場合、主として電気炉の大型化に係わるものである。バッチ式熱処理では熱処理する線材を全て電気炉の中に格納する必要があり、1km 以上の線材の熱処理を可能とするには、現状の炉内容積を倍の大きさにする必要が生じる。しかし、この電気炉の大型化には種々の技術的課題がある。本提案においては、この技術課題を解決し、1km 以上の線材作製を可能とする超長尺対応バッチ式熱処理プロセスの技術開発を実施する。

TFA-MOD 法においては、YBCO の結晶化反応過程において H_2O を消費し、HF ガスが発生することは先述した。このガスの出入りは、上述の通り、低温反応と結晶粒配向組織形成に貢献するが、成膜速度向上には律速段階である HF ガスの排出が速やかに行われなければならない。炉外に排出されることなく仮焼膜表面近傍気相中に滞留して高 HF 濃度化すると、逆に YBCO の結晶化を妨げる方向に作用するためである。これら基礎的な反応プロセス速度論の知見を基に、バッチ式熱処理炉で反応ガスの導入、HF ガス排出機構に種々の工夫を行った。炉の内部構造は、円筒状の炉心管の内部に線材を巻き付けるドラムが同軸配置されており、その表面はパンチング穴加工されている。線材はドラムの表面に螺旋状に巻き付けられ、外周部より膜表面に水蒸気を含む反応ガスを吹き付ける配置となっている。仮焼膜中で発生した HF ガスはドラム表面にパンチング穴加工された細孔を介してドラム内部に挿入された排気管から炉の外へポンプで排気される。

超長尺対応バッチ式熱処理炉の開発に際して従来の熱処理炉と比べて大きく技術革新すべき点は、イットリウム系複合材料を炉内に設置するための巻き枠構造と強度設計、反応ガスを材料表面に均一に吹き付けるためのガス導入システム設計、発生した HF ガスを速やかに炉外へ排出するための排気系設計、大型電気炉全体を均一に加熱するためのヒータ設計、反応条件の適正化等である。

まず、巻き枠構造と強度設計についてであるが、500 m 長線材の巻き枠構造は直径 1 m、長さ 3 m 程度の Hasteloy™ 円筒を片端で支持する構造を採用しており、巻きつけた複合材料が反応ガスに均一に晒されるように Ni 基合金である Hasteloy™ 製の円筒は一定速度で回転している。1 km の線材を熱処理すると仮定するとドラムの重量は 450 kg となり、回転軸にかかる応力は 160 MPa となる。Hasteloy™ の室温での引っ張り強度は 900 MPa 程度であるが、この巻き枠は熱処理中 800°C 近い高温に曝されるため、クリープラプチャー破壊強度は 130 MPa まで低下する。したがって、現状の構造では使用中に支持軸に過大な応力がかかり、大きなたわみを引き起こすだけでなく、稼動を続けると応力が集中することにより支持軸が破損する恐れがある。この危険性を回避するためには、巻き枠に適した材質の選定と厚さの設計、補強構造の設計、回転軸の強度設計と巻き枠との取り合い方法の検討、回転方法の検討等の課題がある。これらの課題に対し、研究組合の一員である昭和電線は各種金属材料の物性データを保有し、これを用いた強度計算、加熱状態でのたわみや応力集中箇所のシミュレーション技術を有していることから、これらを用いてさまざまな巻き枠構造を想定して数値計算を行い、妥当性を検証しながら適性構造を決定することができる。

ガス導入システムと排気系設計はこのプロセスで最も重要な課題である。500 m 用電気炉では巻き枠の外周上 4 箇所にガス導入ノズルを取り付け、ノズルに一定間隔であけた細孔からガスを吹き付ける構造を採用した。また、排気系は巻き枠の軸中心部に設置して真空ポンプとつなぐことで、巻き枠を通過して外周部からドラム中心軸に向かうガスの流れを実現した。しかし、この構造を単純に現状の 2 倍以上の容積をもつ巻き枠で行うとガスの流れは直進性を失い、炉内の空間で滞留することがシミュレーション結果から示されている。本提案では超大型の電気炉の炉内空間に効率よく均一なガス流を形成させる方法について先ず 3 次元ガス流体シミュレーションを用いて検討する。特に、ガスの導入管径、ガス分岐方法、ノズル径、ノズル間隔、ノズル数、ガスの導入管と巻き枠との距離、ガス流速、巻き枠の回転数、巻き枠のガス透過孔の大きさ・数・間隔、排気管と巻き枠との距離、排気管に開けるガス透過孔の大きさ・数・間隔等の因子を変え、必要なガス量で均一な流れを形成させるための適正構造を算出する。さらにこれらの検討を炉設計に反映させて炉の製造を行うだけでなく、これらのガス流条件を結晶成長モデルと連成させることにより焼成条件の適正化を行った。

ヒータ設計に関しては、研究組合の一員である昭和電線はビスマス系複合超電導線材用に大型熱処理炉を設計、作製してきた知見を有効に使うことができると考える。大容積の線材を均一に加熱・冷却するためのヒータ材質、ヒータ構造・密度、温度制御機構等の適正化技術に関してはこれまでの実績から算出が可能であるが、ビスマス系超電導線材の際には重要視していなかったガスの流れを確保した上での炉内温度の均一化に関しては、これまで経験のない技術

であり、シミュレーションを利用して設計の適正化を図る必要がある。また、本提案ではビスマス系超電導線材の熱処理に比べて高速昇温が必要であり、冷却速度も反応上適正な条件とする必要があることから、ヒータ設計時には考慮すべきである。

反応条件の適正化は全長に亘って均一で高い特性を得るために必要である。適正化条件としては、昇温速度、反応温度、水蒸気分圧と水蒸気導入温度、反応時の炉内圧力、反応ガス中の酸素分圧、反応時間、冷却速度等がある。これらの条件は、シミュレーションの結果及びこれまでの実績値を基にそれぞれの条件を少しずつ変化させて適正化することが不可欠であり、多くの実験が必要となってくる。また、同時に、全長に亘っての特性評価・欠陥検出が必須となるが、評価が律速とならないような評価速度と、特性劣化部を mm 以下のサイズで検出できる検出分解能とを両立する必要がある。そこで、これらの条件を満足しうる評価技術として、磁気顕微法を用いた特性及び局所欠陥の評価技術開発を行い、小型装置を用いた原理検証と基礎データの収集により要素技術を開発するとともに、長尺線材評価装置を開発・導入する。開発された評価装置を用いて線材評価を行い、結果を線材作製プロセスにフィードバックすることにより、プロセス開発を促進する。

2.1.2 イットリウム系複合材料の製造工程における希少金属利用率等の効率向上技術開発

イットリウム系複合材料による電磁石モータでは、上述の通り希少金属である希土類元素使用量を低減させることが可能になる。しかし、少量でも希土類元素を使用することになることから、これらの使用量もできるだけ低減することが望まれる。本項では、この使用量低減を目的として、研究項目①で選択したプロセスに比べて現状では長尺作製実績は十分ではないものの原理的に高い原料収率が見込まれる線材作製プロセスの開発を行う。ここでは、これまで酸化物薄膜等の超高速製造能力が示されているレーザ化学気相蒸着（レーザ CVD）法による開発を行う。同法は、原料供給口を基材直上に設置しレーザのアシストにより反応を促進することから高い原材料収率が期待できる。また、YAG レーザによる PLD 法では、従来実績のあるエキシマレーザに比して原料ターゲットに対して均一性の高い照射が可能になる特徴を有しており広い領域での成膜が可能になることから高い原料収率が期待できる。

2.1.2-1 レーザ CVD 法による希少金属利用率向上技術開発

化学気相蒸着（CVD ; Chemical Vapor Deposition）法は、物質として一種あるいは異なる数種の気相原料ガスから化学反応を介して目的の物質を基材上に堆積させる方法である。一方、同様に気相を利用し、対比される方法として物理気相蒸着（PVD ; Physical Vapor Deposition）法があり、現時点において準量産プロセスとして最も実績のある先述の PLD 法は PVD 法の一つである。PVD 法は、熱エネルギーや運動エネルギーなどの物理的プロセスを利用して原料を蒸発、気化させて基材に蒸着させる方法であり、一般に蒸着物質自身が非常に高い（運動）エネルギーをもち、その飛翔形態（方向やエネルギーあるいは活性状態）はレーザやイオンビームなどの気化のためのエネルギー源の種類によって決まってしまう場合が多いため、成膜条件などで制御できる余地はあまり多くない。それに対して CVD 法は、比較的気化が容易な原

料物質を低いエネルギー状態のまま気相状態で基材付近へ輸送して堆積させる方法であるため、PVD 法に比べ物質輸送流束を制御しやすい。また一般に PVD 法は蒸着物質が高い運動エネルギーを持つため高速（つまり短時間）で基材に到達するが、CVD 法は低速であるため成膜チャンバー内での滞在時間がより長く、温度や雰囲気圧力などのパラメータによる成膜過程に関する高い制御性を有する。これらの特徴から CVD 法は原料利用率向上の目的に適った方法であると言える。

本項目において提案するレーザー CVD 法は、上述のような通常の CVD 法（ヒータ加熱による熱エネルギーを利用した熱 CVD 法）にレーザー照射を組み合わせた方法である。レーザー CVD 法における成膜プロセスはいくつかの素過程から構成されるが、その中でレーザー照射の役割は、反応に必要な熱エネルギーの供給とともに、噴射ノズルから基材へ到達する空間（反応場空間）において反応ガスをエネルギー的に活性化し、反応を促進することによって基材への成膜効率を上げる効果を有する。この効果を利用し、これまで高速成膜プロセスとして精力的に開発が行われてきており、東北大学後藤グループにより、YSZ、TiO₂、Al₂O₃、Y₂O₃、SiO₂、ZrO₂ などの各種セラミックス材料の成膜プロセスにおいて 280-28000 μm/h の非常に高い成膜速度が達成されている。これらの成膜速度は、例えば YSZ（イットリア安定化ジルコニア）においては通常の熱 CVD 法に比べ、凡そ 6 倍となっており、レーザー照射によって大幅に成膜効率が上昇していることが分かる。これまで成膜速度の向上に力点を置いて開発が進められてきたが、その中心コンセプトは原料物質の基材上への効率的な堆積という意味で、本項目における研究課題と共通しており、したがって課題解決にレーザー CVD 法を選択することは極めて合理的であると考えられる。また本提案における対象物質である YBCO は、これまでにレーザー CVD 法において実績のある上記物質群と同様の酸化物セラミックス材料の一種である。したがってその意味でもこれまでに培われた多くの知見および技術との連続性は高い。

以上のような理由から、本項目においては、これらレーザー CVD 法を用いて培われてきた酸化物セラミックス材料の高速成膜技術を、イットリウム系複合材料における希少金属の利用率向上を目的とした技術開発へ応用するものである。レーザー CVD 法における原材料利用率（収率）についての情報はあまり多くはないが、YSZ あるいは ZrO₂ においては少なくとも 45% 以上（最大で 80%）の値が得られている。従来技術（PLD、熱 CVD）において 30 %程度であった YBCO 成膜の原料利用率が、レーザー CVD 法を用いることによって、YSZ あるいは ZrO₂ で得られるような 40 %以上という非常に高い値まで向上されることが期待できる。

この目的のためには、まずレーザー CVD 法の YBCO への適用可能性を実証しつつ、収率向上を目的の中心に据えた最適条件の検討を行うことにより 40 %以上の高収率を目指す。同時に、RTR システムを用いた連続成膜プロセスへ適用するための技術開発を併行実施し、レーザー CVD 法による連続成膜プロセスにより 40 %以上の原材料収率で YBCO 成膜が可能であることを実証する。またこれらの研究開発においては、気相ガス供給のための出発原料として昇華反応を利用する固体状原料ではなく、安定性、高速性に有利な蒸発反応を利用する液体状原料を用いることも重要なメリットとして挙げられる。液体状原料は変質などの経時劣化が起こりにくく、高速連続プロセスにおいては国内外で実績があり、産業化を念頭に置いた量産体制の

確立のためには欠かせない技術である。

YBCO への適用可能性と原材料収率向上に関しては、成膜速度向上の技術開発において、堆積速度は温度、雰囲気圧力や酸素分圧、さらに照射エネルギー密度などに大きく依存することが分かっている。これらの条件を原材料収率の向上という目的に特化した形で最適化することにより、従来法において最大で 30 %程度であった収率を大幅に改善することが可能であると考える。より具体的には、単結晶基板等を含む短尺静止基材上において、律速過程を明確にし、収率向上を主眼においたレーザ照射条件、雰囲気ガス条件等の最適化などについて原理検証的実験および基礎データの取得を行い、この結果に基づき線材作製プロセスへの適用性検討として連続成膜に関する技術開発を行う。連続成膜プロセスへの適用に関しては、主に温度制御や長時間運転に際してのプロセス条件等の安定性と均一性の確保が課題となる。温度の均一性、レーザ発振、原料供給、搬送システムなどすべてのシステムの安定性、成膜領域の拡大などを RTR システムに実装した中型装置を用いて実証する。

2.1.2-2 YAG レーザ PLD 法による希少金属利用率向上技術開発

イットリウム系複合材料は、これまで多くの研究開発グループにおいて気体レーザであるエキシマレーザを用いて作製する報告が行われている。エキシマレーザは強力なエネルギーのレーザ光を発振出来る反面、高価な希ガスや有毒なハロゲンガスを使用するため、ランニングコストが高く、ハロゲンガスの除外装置など付帯設備が必要である。一方、YAG レーザは、Nd:YAG 結晶($Y_3Al_5O_{12}$ の Y を一部 Nd に置換)をフラッシュランプなど強力な光源で励起させることで発振される固体レーザである。特徴として電力以外のユーティリティを必要とせず、かつ付帯設備も不要で、装置自体もコンパクトであることが挙げられる。これまでは、レーザエネルギーの時間的な安定性に問題があり、イットリウム系複合材料の作製プロセスとして採用されていなかったが、近年のレーザ技術の進展に伴ってエネルギー安定性が向上し、イットリウム系複合材料の作製プロセスに耐え得るまでに改善されてきている。また、レーザ光の空間的均一性に関しても YAG レーザは上述のエキシマレーザに比べて優れた特徴を有している。エキシマレーザは共振器内にある放電電極部分での乱反射によって指向性の悪いレーザ光が混ざり、原料ターゲットに集光した際にエネルギー密度の弱いサテライトが生じる。加えて、エキシマレーザは共振器内で、ほとんど往復／増幅しないでそのまま励起光が射出されるため、ビームの発散角も大きくなり、集光点、特に長手方向に弱いエネルギー部分が生じてしまうという問題点がある。一方、YAG レーザはフラッシュランプで YAG 結晶を励起の後、共振を繰り返して発振するため、レーザ光の指向性が高く、空間的に均一なレーザ光が得られる。この空間的な均一性は、原料ターゲットから離脱する蒸着子が形成するプルーム内の組成、エネルギー等の均一性につながる。これにより、広い面積での均一蒸着が可能となり、本テーマの目的である高い原材料収率が期待できる。

YAG レーザ光のエネルギーはエキシマレーザに比べるとやや弱いですが、名古屋大学（吉田准教授）における本提案にむけた予備検討の結果、MgO 単結晶基板上に YAG レーザ PLD 法を用いて作製したイットリウム系超電導薄膜は、 $T_c \sim 90$ K、 $J_c \sim 1.5$ MA/cm²(@77K, 自己磁場)を示

すことを確認している。また、高い臨界電流を得るために、膜厚 $2\mu\text{m}$ 程度のイットリウム系超電導体の厚膜を作製した結果、 100 A/cm 幅(@ 77K , 自己磁場)の臨界電流を示した。材料微細組織の観点からも、臨界電流を阻害する a 軸配向結晶粒が混在しにくいという結果を得ている。

さらに、YAG レーザ PLD 法で必要とするユーティリティは電力だけであるため、ランニングコストの低減が期待できる。また、エキシマレーザの場合、定期的に励起ガスの交換を行う必要があり、滞留時間が生じる。しかし、固体レーザである YAG レーザ PLD 法では連続運転が可能である。これによって年間製造量（スループット）の向上も期待できる。また、レーザの励起源である Nd:YAG 結晶は材料強度が高く、熱衝撃耐性に優れるため、結晶にとって理想的な使用環境下では定期的な交換の必要は無い。従って、メンテナンスコストも安価であり、装置寿命も長い。

上記の通り、製造速度、品質の観点においても、YAG レーザのエネルギー均一性がアドバンテージをもたらすことが予想される。例えば、イットリウム系複合材料を作製する際に、原料ターゲット上に集光されるレーザ光にエネルギーが弱い部分が含まれる場合、その部位からの蒸発量は低下するため、製造速度の低下と薄膜組成のずれが懸念される。しかし、YAG レーザは空間的エネルギーの均一性が高いため、原料ターゲットからの蒸発量が多く、製造速度の向上が期待できる。それと同時に、蒸発種の組成ずれが少ないため、蒸着された試料における組成分布も均一であることが期待される。

同程度のエネルギーを出力し、かつ紫外線領域の波長を持つ YAG レーザとエキシマレーザを比較した場合、エネルギーの均一性から、蒸発量（製造速度）は YAG レーザの方が速いことが予想される。しかし、現状で市販されている YAG レーザ機器の最大レーザエネルギーは、エキシマレーザの最大エネルギーよりも低いため、その分だけ蒸発量が低くなる課題が顕在化する可能性がある。この課題に対し、本提案では、以下の手法により解決を図る。i)インプルーム法の採用による成膜速度の向上、ii) 2 倍波 YAG レーザの使用によるレーザエネルギーの向上に関する検討を行う。インプルーム法の採用に関して、PLD 法において蒸発種はレーザが照射された箇所を頂点とした円錐状に飛散する。そのため、原料ターゲットと基材の距離が遠いほど堆積速度が遅くなる。従って、出来るだけこの距離を短くしたインプルーム法を採用することで製造速度の向上を行う。ここで、距離を短くすることで組成ずれやプラズマからのダメージによる特性の低下が懸念されるため、原料ターゲット組成の最適化や雰囲気圧力などの製造条件の最適化に関して検討する。次に、2 倍波 YAG レーザの使用に関して、現在 PLD 法では紫外線領域の波長を持つレーザが使用されており、YAG レーザの場合も基本波(1064 nm)を非線形光学結晶に通して得られる 4 倍波(266 nm)を用いて予備検討を行ってきた。YAG レーザでは 2 倍波(532 nm)を出力することも可能であり、2 倍波は 4 倍波の約 2 倍のエネルギーで出力可能である。そのため、2 倍波 YAG レーザを用いることで、市販機器においてエキシマレーザに比べて YAG レーザのエネルギーが低いという問題点を克服できると期待される。そこで、2 倍波を使用したイットリウム系複合材料作製に関する検討も研究項目として行う。

さらに、長尺のイットリウム系複合材料作製時には、レーザの長時間安定性、原料ターゲッ

トの組成安定性や線材搬送速度が超電導特性や材料微細組織に与える影響など、基礎検討とは違った考慮すべき点が生じることが予想される。そこで、実際にイットリウム系複合材料の連続作製を行い、問題点を抽出すると共に、その解決を図る。

2.1.3 イットリウム系複合材料を用いた回転機要素技術開発

イットリウム系複合材料では、km 級長尺化が進み、量産化が可能になれば、その応用として考えられるモータ、発電機などの回転機から求められる仕様を有した複合材料の提供が可能となる。イットリウム系複合材料は磁場中の I_c 特性がビスマス系複合材料と比べると格段に優れ、モータ、発電機などの回転機に応用すると、鉄心を使うことなく、永久磁石並びに鉄の飽和磁化を超える高磁場を発生でき、すなわち、大容量化を図りながら軽量・コンパクト化が可能で大きなメリットが生じる。

しかしながら、イットリウム系複合材料を用いた回転機の試作例は、これまで非常に少ない。代表的なものは、平成 15 年度から平成 19 年度まで NEDO 事業として実施された「超電導応用基盤技術開発（第 II 期）」で行われた船用応用を目指した超電導モータに関連した開発である。このプロジェクトでは、平成 17 年度から平成 19 年度にかけて、単長数十 m のイットリウム系複合材料を用いて超電導モータの開発が 2 つ行われた。ひとつは、ISTEC と JM&G 及び九州大学（岩熊准教授）によるもので、ラジアルギャップ型超電導同期モータの原理検証試験が行われた。最初に 15 kW 級超電導固定界磁型モータを開発し、巻線製作性やガス冷却方式の基礎技術を開発した。その後、7.5 kW 級超電導回転界磁型モータを開発し、無鉄心の回転界磁方式やレーストラック形状イットリウム系超電導界磁巻線などの原理検証を行った。もうひとつは、ISTEC、住友電工、IHI、福井大学（杉本教授）によるもので、アキシアルギャップ型モータの試作・検証である。ここでは、当時ビスマス系複合材料を用いて実績のあったフラックスコレクターと呼ばれる鉄芯を用いたアキシアルギャップ型モータをイットリウム系複合材料に置き換えてその効果を検証している。結果として、まずイットリウム系複合材料が適用可能であることを確認し、出力に対するモータ容積の関係で、イットリウム系複合材料を用いた方が優れていることがわかったとしている。

また、こうした回転体を冷却する方法として有力なサーモサイフォン冷却方式を並行して検討し、液体窒素を用いた 140 rpm での回転冷却の原理検証を ISTEC 及び大陽日酸が行なった。これらは低速で使う船用モータをターゲットとしたもので、そのため回転数がサーモサイフォン式冷却では 140 rpm、また、回転界磁型モータでは 360 rpm と低速回転であった。また、米国においては Reliance Electric と Rockwell Automation 社による 5.6 kW 小型機として、イットリウム系複合材料を界磁巻線に用いた超電導モータを 2005 年に米国エネルギー省による Superconductivity Partnership Initiative (SPI) 計画でデモ機を試作、開発した。線材は、SuperPower 社の 1.2 cm 幅のイットリウム系複合材料で、単長約 5.9 m の複合材料で界磁巻線 4 個を製作している。すなわち、これまでのイットリウム系複合材料を用いた回転機（モータ、発電機）の開発は、単長が短く、また、量産化途上であったため大容量化されておらず、日米とも 10 kW 級に限られていた。

従来、超電導化して効率、経済性の点でメリットがでる回転機の容量は MW 級と言われていた。特性改善が進み磁場中臨界電流密度の高いイットリウム系複合材料を用いれば、数百 kW 級から採算が取れ、事業性が出てくる可能性がある。また、前述の概要のように希土類元素削減効果の大きい輸送用（大型自動車、列車用）同期モータ、風力発電用発電機としての可能性が出てくると、数百 kW 級回転機でもイットリウム系複合材料による実用化の可能性が高くなる。

希土類元素使用量の大きな産業用回転機の例としては、大型輸送用として、JR 東日本の新幹線用モータ（335 kW）や 24 人乗り大型高速エレベータ用モータ（168 kW）などがあり、大量に永久磁石を使っている。また、風力発電では欧州の Teramagnetica 社により 2 トンの永久磁石を使った MW 機が開発されつつある。すなわち、今回の 500 kW 級機の検討により、イットリウム系複合材料の適用が可能となれば、いずれの場合も永久磁石構成元素である希土類元素使用量低減効果が大きい。風力発電機の場合には、上述の回転数が 10-20 rpm 程度と低く、産業用の約 1/100 であるが、界磁巻線の数（極数）を増やす、あるいは増速機をつけることで同様な界磁巻線により十分 MW 級に適用できる[H18 (財)国際超電導産業技術センターによる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, p.89]。

このため、本提案では超電導のメリットと希土類元素使用量低減効果の大きな領域として、500 kW 以上の産業用回転機（モータ、発電機）を目標として設定し、新しいイットリウム系複合材料の特性を基に概念設計を行うこととした。また、産業用回転機としては 1000 rpm 級の回転数が要求されるので、1000 rpm を代表値として目標にした。

しかしながら、500 kW 級・1000 rpm の仕様は、前記国内外の過去の開発例から比べると、容量、回転数とも 1 桁以上のスケールアップであり、出力を有効に得るための界磁巻線形状の検討や高速回転に耐える構造、また、コンパクト化が容易な超電導のための冷却技術が必要である。

本提案では、NEDO 事業として実施された「超電導応用基盤技術開発（第 II 期）」で行われたイットリウム系複合材料に関する高特性化技術や機器要素技術の成果を活用して、上記 500 kW 級の回転機の概念設計とともに、回転機の主要部分である界磁巻線と冷却システムに関しては、軽量化、コンパクト化が可能な方法の要素検討を行う。すなわち、傘型界磁巻線とサーモサイフォン式冷却の 2 つの要素試験による実測の性能評価を行い、上述の概念設計の基礎データを得る。これらの開発によりイットリウム系複合材料による大容量高速回転機作製のための開発に対する課題と指針を得る。

また、本提案項目に関しては、最終ユーザを含めた調査・検討委員会を設け、超電導による大型回転機（モータ、発電機）に関して市場調査、世界の現状技術開発動向および本提案の主な開発項目に関する検討を行い、本大型高速回転機的设计検討、要素技術開発に活用する。

2.1.3-1 回転機適正構造の概念設計

平成 15 年度から平成 19 年度まで NEDO 事業として実施された「超電導応用基盤技術開発（第 II 期）」で行われた 7.5 kW 級イットリウム系複合材料による回転機開発での知見を基に、

希土類元素使用量低減効果が大きく期待できる大型回転機として 500 kW 級-1000 rpm 級産業用回転機を想定し、主要要素技術である界磁巻線を中心に概念設計を行う。

特に、イットリウム系複合材料に特有な超電導特性、高出力を得るための界磁巻線形状、発生磁界などの電磁気的特性、最大負荷応力などの機械的特性、電磁気的特性（通電、損失）などに起因する熱的特性、さらに、それらの解析結果を用いて、今後の産業用超電導回転機の開発課題を明確にし、開発指針を明らかにする。冷却に関しては、従来のガス循環冷却や過去のサーモサイフォン式冷却による知見を用いて概念設計を検討する。

まず、設計に必要なイットリウム系複合材料に特有な超電導特性を評価、検討する。同期回転機の回転子に格納される界磁巻線には、界磁巻線自身が発生する一定磁界に加えて、電機子が発生する交流変動磁界が重畳されて印加される。その結果、界磁巻線およびこれを構成するイットリウム系複合材料には、印加方向、磁界強度が常に変化する回転交流磁界が印加される。イットリウム系複合材料には、通電特性の異方性、損失特性の異方性があり、このため、回転機の高効率、コンパクト化には、イットリウム系複合材料の通電電磁気・損失特性などの異方性を把握し、回転子に格納する界磁巻線の最適な構造、配置を明らかにしなければならない。よって、まず、高性能複合材料の電磁気特性（通電、損失特性）の温度、磁界、磁界印加角度、周波数依存性を明らかにし、回転機の概念設計に必要なデータを得る。

つぎに、回転機的设计・評価のため、イットリウム系複合材料に特有な電磁気的特性、熱的特性と機械的特性を考慮した解析要素技術を開発する。従来、電磁気特性、熱特性と機械特性を相互に関連させた連成解析はほとんど行われていない。イットリウム系複合材料は薄膜積層型のテーブ形状をしており、磁場、応力、温度により、通電特性が大きく変化し、特に磁場の印可方向に対する特性分布などの異方性が大きく、界磁巻線の特性に影響する。一方、回転機の性能・効率は、回転子の運動、電源リプルなどに起因する回転機内の磁場の時間・空間高調波にも影響を受ける。また、回転機で発生する電磁力（トルク）は、空心界磁型の超電導回転機ではイットリウム系複合材料の巻線部自体が大きな応力を受け、超電導特性が劣化する可能性がある。よって、回転機内の詳細な電磁場分布、電磁力分布を明らかにしなければならない。そこで、本提案では、磁場、応力、損失による熱が複合的に影響する環境下での線材に加わる電磁場分布、電磁力を評価し、回転機の概念設計に必要なイットリウム系複合材料の材料特性を考慮した電磁場・電磁力連成解析シミュレータを開発する。

また、本提案では、50 K 以下の運転温度領域を想定しており、界磁巻線の伝導冷却を検討する必要がある。界磁巻線の通電時には、損失による発熱が生じ、その際、過渡的な発熱・温度分布が生じ、超電導特性に影響を与える。また、温度・磁場強度・磁場角度によって巻線の通電・損失特性が大きく変化するので、過渡的な発熱・温度分布を実験的に正確に測定・評価するのは困難である。さらに、界磁巻線および線材の電磁力支持構造、電気絶縁などは熱伝導・冷却と相互に影響しあうため、回転機的设计に際しては、これらも含めた検討をしなければならない。よって、本提案では、有限要素法に基づく計算機シミュレータを開発し、伝導冷却を想定した界磁巻線の通電・伝熱特性解析技術を開発し、回転機の概念設計に必要なシミュレーションを行う。

以上の要素技術を結集することにより 500 kW 級回転機をターゲットとし、界磁巻線および回転機の形状やコンパクト性（希土類元素使用量低減）を主眼とした、概念設計を進める。ここでは、イットリウム系複合材料の電磁氣的・熱的・機械的各種特性、電機子-界磁巻線の有効鎖交磁束、トルク、損失などに基づいた解析を行う。加えて、ここで提案される界磁コイル、モータ構造において従来のガス循環冷却等の知見に基づく仮定の下にコイルからの発生熱流束の評価も行い、上記の概念設計結果と併せて、イットリウム系複合材料による大型超電導回転機開発の課題を明確にし、今後の開発指針を明らかにする。

2.1.3-2 界磁巻線および冷却要素技術開発

回転機の大容量化においては、界磁巻線と電機子との間の磁場（電機子-界磁巻線鎖交磁束）を有効に使って駆動させ、高出力を効率良く得ることが必要であり、ひいては、小型化、軽量化にも有効である。その結果、希土類元素使用量低減効果が大きく、超電導化のメリットの出る産業用大容量回転機が可能となる。本提案では、この効果が大きな 500 kW 級回転機を想定しているが、そのためには、電機子-界磁巻線鎖交磁束を高めて出力増大がコンパクトな形状でできる傘型界磁巻線が必要であり、ここではその要素試験として傘型モデルコイル巻線を試作し、コイルの巻線技術、成型性、励磁特性、熱的特性を把握し、大容量機への課題（特に、界磁巻線形状と有効鎖交磁束と出力の関係）を検討し、今後の開発指針を得る。

本傘型界磁巻線は、レーストラック形状で巻線厚みを軸方向に当初薄くし、次第に、外周部を外側に大きくしていく形状の異形コイル巻線である。これにより、界磁巻線部が全体として回転子形状に整合させ電機子コイルとのギャップ間隔を狭くすることなどにより、出力発生に有効な電機子との間の磁束密度を高めることができ高出力化が可能となる。傘型界磁巻線の試作においては、まず、(1)における概念設計の知見を反映しつつハステロイ™線材による傘型ダミーコイル巻線を作製し、巻線としての冷却特性を把握する。これらの成果に基づいて、イットリウム系複合材料 200 m を用いてコイル巻線を行い、冷却、励磁試験を通して性能を確認する。これらの開発を通して、大容量回転機においてはコンパクトかつ高効率の無鉄心化を実現するための傘型界磁コイルの巻線技術を開発するとともに、その有効性を確認する。

高速で回転するモータ、発電機等の回転機の冷却方法は、前述「超電導応用基盤技術開発（第 II 期）」で液体窒素（77K）による原理検証試験が行われたように、コンパクト化が見込めるサーモサイフォン式冷却が有望である。このため、本提案では、500 kW 級への大容量化も考慮して、50 K 以下へ冷却できる可能性が高い液体 Ne（沸点 27 K）等を用いた冷却システムに必要な要素技術の見極めを行う。50K 以下での低温動作により、イットリウム系複合材料の高臨界電流化が見込め、大容量化への見通しもつく。他方、Ne に関しては、高速回転下での蒸発、凝集液化に関する熱的データが少なく、サーモサイフォン方式の設計ができる状況にはない。そのため、本提案では、液体 Ne などの冷媒を用いて熱伝達シミュレーションを行うとともにサーモサイフォン式模擬冷却試験装置の試作を行い、回転数に対する熱伝達特性などの冷却基礎特性の評価を行うことにより、大容量高速回転機に対応可能なサーモサイフォン式冷却の開発に対する課題抽出と解決の指針を示す。

2.2 研究開発の実施体制

担当原課を経済産業省研究開発課とし、NEDO の公募により産業用超電導線材・機器技術研究組合、国立大学法人東北大学、国立大学法人名古屋大学、国立大学法人九州大学、学校法人早稲田大学を委託者として、本事業（プロジェクト）「希少金属代替材料開発プロジェクト」研究開発項目⑨-2「Nd-Fe-B 系磁石を代替する新規永久磁石及びイットリウム系複合材料の開発（超軽量高性能モータ等向けイットリウム系複合材料の開発）」を進めた。

本プロジェクトにおいて、NEDO は実施者として、委託先である産業用超電導線材・機器技術研究組合、国立大学法人東北大学、国立大学法人名古屋大学、国立大学法人九州大学、学校法人早稲田大学と連携して研究体を組織し、その進捗状況を管理することによりプロジェクト全体の研究管理を行った。

また、NEDO は研究体を統括するために、和泉輝郎 産業用超電導線材・機器技術研究組合 特別研究員をテーマリーダー（TL）とし、TL との間で密接な連携をとりながらプロジェクトの舵取りを行った。具体的な研究体組織および研究開発項目の分担は図 2.2.1-1 の通りである。

本プロジェクトにおいては、TL を中心として、研究機関、大学の参加を求め、集中管理型のプロジェクト推進を図った。この中で、産業用超電導線材・機器技術研究組合は本プロジェクト研究体の中核として、全項目の研究開発を担った。特に、「超長尺イットリウム系複合材料における希少金属使用量低減技術開発」では開発主体として超長尺線材開発に取り組み、「イットリウム系複合材料を用いた回転機要素技術開発」では複数の大学との連携を取りまとめ、開発推進に中心的な役割を果たした。

委託先である、東北大学では、同大学のオリジナルプロセスであるレーザ CVD 法に関する知見を活かして、「イットリウム系複合材料の製造工程における希少金属利用率等の効率向上技術開発」の中のレーザ CVD 法による希少金属利用率向上技術開発を担当し、特に基礎的なプロセス技術開発を行った。ここでは、同法による連続プロセス開発を担当した産業用超電導線材・機器技術研究組合と密接に連携し、開発を推進した。同様に、名古屋大学では、同大学が以前より取り組んでいた YAG レーザ PLD 法に関する知見を活かして、「イットリウム系複合材料の製造工程における希少金属利用率等の効率向上技術開発」の中の YAG レーザ PLD 法による希少金属利用率向上技術開発を担当し、材料収率向上技術開発を行った。ここでは、産業用超電導線材・機器技術研究組合が微細組織、特性評価を担当し開発を進めた。九州大学では、同大学の強みである、電磁気的評価、解析技術を核として複数のテーマに携わった。まず、「超長尺イットリウム系複合材料における希少金属使用量低減技術開発」では、超長尺線材の高速特性分布評価技術の開発を行い、プロセス開発への貢献を図った。また、「イットリウム系複合材料を用いた回転機要素技術開発」では、回転機の適正構造決定に必要な交流損失評価などでプロジェクト推進に貢献した。早稲田大学では、これまでの熱的解析技術を基に「イットリウム系複合材料を用いた回転機要素技術開発」におけるシミュレータ開発に貢献した。

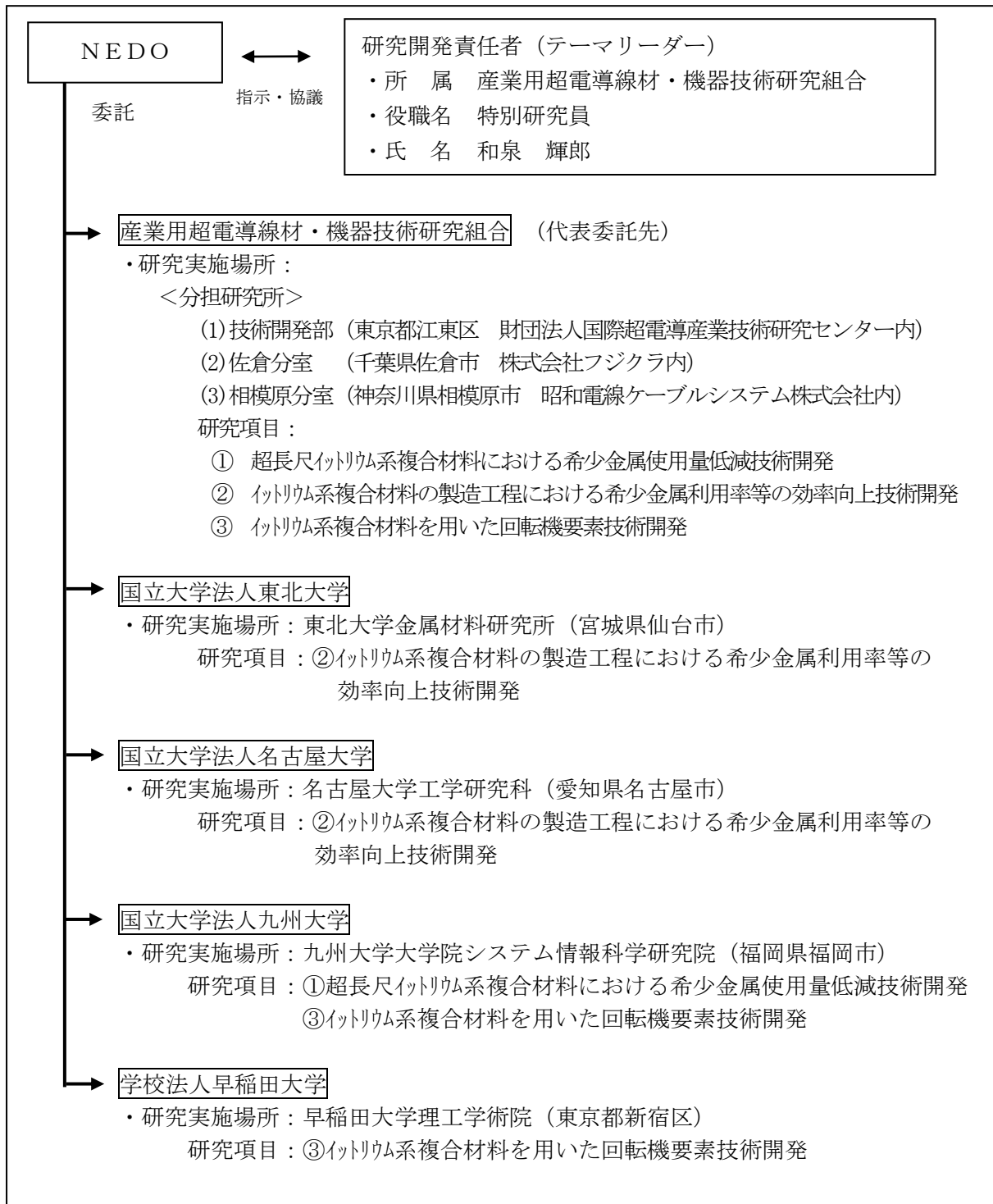


図 2.2.1-1 「希少金属代替材料開発プロジェクト」Nd-Fe-B 系磁石を代替する新規永久磁石及びイットリウム系複合材料の開発（超軽量高性能モータ等向けイットリウム系複合材料の開発）の実施体制

2.3 研究の運営管理

本事業推進のため「リットリウム系複合材料を用いた超電導回転機開発委員会」及び「連絡会議」を設立し、機動的、効率的な研究を推進した。

2.3.1 連絡会議

本事業において、効率的に研究開発を推進するために、各研究項目内及び各研究項目間の実務者レベルで連絡会議を開催し、技術的な報告及び連携のための情報交換を、テーマリーダーが主催者となり実施した。また、連絡会議は各項目に関する進捗管理等を含めたマネジメントの役割も担い、円滑な研究開発を推進する。

具体的には平成 21 年度から平成 23 年度のプロジェクト実施期間に 4 回の連絡会議を以下の内容において開催し、各研究開発テーマの進捗状況の報告に対する議論を行うとともに、タイムスケジュールを明確化することで開発目標の達成に向けた効率的なプロジェクトの運営を行った。

表 2.3.1-1 連絡会議構成員

所属・役職	氏名	特記事項
産業用超電導線材・機器技術研究組合 特別研究員	和泉 輝郎	プロジェクトリーダー (テーマリーダー)
国立大学法人 東北大学金属材料研究所 教授	後藤 孝	プロジェクトリーダー
国立大学法人 名古屋大学 准教授	吉田 隆	プロジェクトリーダー
国立大学法人 九州大学 准教授	岩熊 成卓	プロジェクトリーダー
学校法人 早稲田大学 教授	石山 敦	プロジェクトリーダー
国立大学法人 九州大学 教授	木須 隆暢	
産業用超電導線材・機器技術研究組合 佐倉分室長	齊藤 隆	
産業用超電導線材・機器技術研究組合 相模原分室長	青木 伸夫	
産業用超電導線材・機器技術研究組合 特別研究員	山田 穰	
産業用超電導線材・機器技術研究組合 専務理事	塩原 融	
産業用超電導線材・機器技術研究組合 技術開発部	定方 伸行	事務局

表 2.3.1-2 連絡会議開催実績

	開催日	主な議題
第 1 回	平成 22 年 4 月 21 日	プロジェクト目標の確認、各テーマ研究開発計画、導入設備計画と年度計画、他
第 2 回	平成 22 年 10 月 18 日、20 日	各テーマの進捗状況、設備導入状況報告、今後のスケジュール、等
第 3 回	平成 23 年 1 月 13 日、14 日	各テーマの進捗状況、設備導入状況報告、今後のスケジュール、等
第 4 回	平成 23 年 3 月 7 日	各テーマの進捗状況、設備導入状況報告、今後のスケジュール、報告書作成指針、等

2.3.2 超電導回転機開発委員会

最終ユーザを含めた調査・検討委員会として「超電導回転機開発委員会」を設け、大型回転機（モータ、発電機）に関する技術開発動向および Dy の削減を目的とする本プロジェクトの開発項目に関する検討を行い、リットリウム系複合材料を適用した本大型高速回転機的设计検討、要素技術開発、さらには実用化への課題抽出を実施し、実用化シナリオを明確にした。

表 2.3.2-1 超電導回転機開発委員会委員構成

	氏名	所属・役職
委員長	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
委員	山崎 克巳	千葉工業大学 工学部 電気電子情報工学科 教授
	植田 浩史	大阪大学 核物理研究センター 特任助教
	牧 直樹	東京海洋大学 海洋工学部 博士研究員
	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
	柳本 俊之	川崎重工業（株）技術研究所 機械システム研究部 部長
	井岡 茂	（株）東芝 電力システム社 礫子エンジニアリングセンター 原子力開発設計部 先端システム担当部長
	長谷 吉二	富士電機システムズ（株）鈴鹿製作所 設計部 回転機グループ 担当部長
	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
	鈴木 佳明	大陽日酸（株）つくば事業所 超低温技術部 部長
	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
	齊藤 隆	産業用超電導線材・機器技術研究組合 佐倉分室長
	青木 伸夫	産業用超電導線材・機器技術研究組合 相模原分室長
	和泉 輝郎	産業用超電導線材・機器技術研究組合 特別研究員
山田 穰	産業用超電導線材・機器技術研究組合 特別研究員	
オブザーバー	石山 敦士	早稲田大学 理工学術院 教授
	木須 隆暢	九州大学 大学院システム情報科学研究所 教授
	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
	塩原 融	産業用超電導線材・機器技術研究組合 専務理事
事務局	定方 伸行	産業用超電導線材・機器技術研究組合 技術開発部長代理

表 2.3.2-2 超電導回転機開発委員会開催実績

	開催日	主な議題
第1回	平成 22 年 12 月 16 日	応用分野別常電導回転機・超電導回転機の現状と課題、Y系複合材料開発、超電導回転機開発の現状と計画、Y系複合材料適用の課題とメリット、まとめ及び第2回委員会、報告書案について
第2回	平成 23 年 2 月 22 日	応用分野別常電導回転機・超電導回転機の現状と課題、リットリウム系複合材料の適用検討、総合討論、まとめ及び報告書について

2.4 開発スケジュールおよび開発予算

2.4.1 契約延長前の開発スケジュール

(平成21年3月17日～平成23年3月20日)

研究開発項目①「超長尺イットリウム系複合材料における希少金属使用量低減技術開発」

事業項目	平成21年度～平成22年度				
	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q
(1)エキシマレーザーPLD法による複合材料作製プロセス開発					→
(2)TFA-MOD法による複合材料作製プロセス開発					→

研究開発項目②「イットリウム系複合材料の製造工程における希少金属利用率等の効率向上技術開発」

事業項目	平成21年度～平成22年度				
	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q
(1)レーザーCVD法による希少金属利用率向上技術開発					→
(2)YAGレーザーPLD法による希少金属利用率向上技術開発					→

研究開発項目③「イットリウム系複合材料を用いた回転機要素技術開発」

事業項目	平成21年度～平成22年度				
	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q
(1)回転機適正構造の概念設計					→
(2)界磁巻線および冷却要素技術開発					→

研究開発項目④ 委員会・連絡会議の設置

事業項目	平成21年度～平成22年度				
	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q
(1)連絡会議					→
(2)イットリウム系複合材料を用いた超電導回転機開発委員会					→

2.4.2 東日本大震災による契約延長後の開発スケジュール
(平成21年3月17日～平成23年5月31日)

研究開発項目①「超長尺イットリウム系複合材料における希少金属使用量低減技術開発」

事業項目	平成21年度～平成23年度					
	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q
(1)エキシマレーザーPLD法による複合材料作製プロセス開発	→					
(2)TFA-MOD法による複合材料作製プロセス開発	→					

研究開発項目②「イットリウム系複合材料の製造工程における希少金属利用率等の効率向上技術開発」

事業項目	平成21年度～平成23年度					
	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q
(1)レーザーCVD法による希少金属利用率向上技術開発	→					
(2)YAGレーザーPLD法による希少金属利用率向上技術開発	→					

研究開発項目③「イットリウム系複合材料を用いた回転機要素技術開発」

事業項目	平成21年度～平成23年度					
	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q
(1)回転機適正構造の概念設計	→					
(2)界磁巻線および冷却要素技術開発	→					

研究開発項目④ 委員会・連絡会議の設置

事業項目	平成21年度～平成23年度					
	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q
(1)連絡会議	→					
(2)イットリウム系複合材料を用いた超電導回転機開発委員会	→					

2.4.3 開発予算

	H21	H22	H23	合計
① 超長尺イットリウム系複合材料における希少金属使用量低減技術開発	0.2	2,300	0	2,300
② イットリウム系複合材料の製造工程における希少金属利用率等の効率向上技術開発	0	431	0	431
③ イットリウム系複合材料を用いた回転機要素技術開発	0	259	5.8	265
合 計	0.2	2,990	5.8	2,996

百万円

2.5 研究開発成果の実用化に向けたマネジメントの妥当性

イットリウム系複合材料は、本事業終了後に本プロジェクト成果の展開として超長尺及び高効率複合材料の安定製造、量産化技術開発を経て、早々に実用化に向かうものと考えられる。また、これを用いた超電導回転機に関しては、本プロジェクトで構築した適正概念と要素技術成果を統合し、実際に超電導回転機の試作、実証を行っていくことになる。これらの超電導回転機の実用化は、置き換え対象である希土類永久磁石回転機に用いられる Dy や Nd などの希土類物質の使用量の削減に大きく貢献することになる。さらに、上記の超長尺線材は汎用性が高く、波及効果として電力機器、分析医療機器等の多くの超電導機器への展開が可能であり、導入可能な機器および電力系統から適宜、実用化導入を進めることになる。

2.5.1 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、希少金属削減に貢献できること等の展示を行った。ここでは、研究組合が主体となり本プロジェクト参画している大学とともにパネル展示を実施した。本展示は、ISTEC ブースに近接して出展し、他の超電導関連技術と連携し相乗効果による総合的普及啓蒙を図った。エコプロダクツ 2010 の来場者は 18 万人を超し、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 できたと考えられる。また、アンケート調査では、超電導への期待は高く、産業、エネルギー分野への期待が高いのが特徴的であった。

(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。尚、海外の国際超電導産業サミット加盟の団体は、組合の構成員である ISTEC を始め、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、2011 年には、韓国が新規加盟することになっている。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。2010 年度は 10 月にイタリア（第 19 回会合）で開催された。国際超電導産業サミットにおいては、超電導技術の実用化に向けた各国の動向についての意見交換が行われるほか、実用化に向けた課題やこれに対する取り組みに

ついて議論を深めている。このような議論の中で、第 19 回会合では、本プロジェクトの計画、進捗を紹介し、世界の産業界へ日本におけるイットリウム系複合材料の開発レベルとともにこれを用いた超電導回転機への先進的な概念をアピールすることができた。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掛け、これまで経営幹部、マネージャー等の積極的参加を得ているところである。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。

また、希少金属使用量低減に対する海外との連携に関しては、平成 23 年 10 月 4-5 日に開催されることになっている "EU-Japan-US Workshop on Critical Materials R&D" と題した希少金属に関する研究開発をテーマとしたワークショップに参加し、日本の状況を紹介することなどを通して協調・連携を行うことになっている。ここでは、日米欧の行政担当者とともに各国の主なる研究者が一堂に介し、世界的な問題としてこのテーマが議論される。注目すべきは、このテーマの中に希少金属代替材料として高温超電導回転機が挙げられていることである。

(3) 研究開発成果の実用化に向けた対応

本プロジェクトの成果を所期の目的である、希少金属使用量削減に向けて実用化につなげるために、超電導回転機開発委員会を開催し、ユーザーへのアピール、連携を行った。本委員会は、イットリウム系複合材料、回転機応用の現状を調べ、イットリウム系超電導回転機としてのメリットや今後の課題と進むべき方向性を議論することにより、将来の開発に資することを目的とした委員会ではあるが、委員として大学関係の有識者のみならず、超電導回転機のユーザーとなる各分野のメーカーの方々にも就任してもらったことにより、上記議論が同時に実用化に向けた情報提供でありアピール活動ともなっていた。

具体的には、回転機の調査検討項目として、「船用回転機」、「風力用回転機」、「産業用電動機」を選び、これらの典型的な例に対して、イットリウム系複合材料による検討を行い、従来の常電導回転機、PM 式回転機に対するメリット、RM (レアメタル) 削減量、効率、CO2 排出量などの効果を調べた。また、イットリウム系複合材料では大幅に低コスト化が進められているため、複合材料のコストと機器の経済的成立性も調べた。結果として、船用、産業用、風力発電機の大型回転機にイットリウム系を適用した際のメリットを調べた。これらの検討を通して対象としたいずれの応用分野においても、従来 PM 式回転機に比べ、RM 量を大幅に削減できること、効率が向上 (例: 船用産業用で 2-3%、風力では 5%向上) することがわかった。また、コスト的には少容量機ほど厳しく、500kW 産業用では数倍の初期コストがかかるが、逆に低価格のために、ランニングコストを含めた全体コストは 10 年程度で超電導機が安くなることがわかった。これらの検討を通して広い分野への適用性を確認することができたと共に、ユーザー側の要求仕様の吸い上げとともに有効性のアピールを行い、実用化への関係構築を図ることができた。

2.5.2 実用化につなげる知財マネジメント

プロジェクトの NEDO からの受託者である産業用超電導線材・機器技術研究組合、東北大学、名古屋大学、九州大学、早稲田大学は、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。

プロジェクト実施にあたり、提案時に実施機関の保有する特許のリストアップを行った。このことにより、本プロジェクトの実施にあたり各担当機関が有効な特許を既に保有しており、テーマ遂行に支障がないことを確認している。いっぽう、実用化に近い位置付けとなる超長尺イットリウム系複合材料の開発を目的としているため、プロジェクト成果に結び付くノウハウの流出防止に配慮し、学会や論文投稿による技術開発成果や、展示会展展などの普及啓発活動を進めた。具体的には、実施機関が論文投稿や学会発表を行う際は、プロジェクト代表委託先である産業用超電導線材・機器技術研究組合に所定の書類を提出し、研究組合が一括して管理することとした。このことにより、ノウハウ流出防止を図った。なお、産業用超電導線材・機器技術研究組合では、組合員に対して本プロジェクトにより得られる産業財産権について、試験研究を通して得られた発明、考案その他の工業所有権、開発コード等のプログラム、研究報告書、図面等の著作物、実験データ、技術的知識に係るノウハウ、試作物等一切の成果について、「事実、資料及び情報並びに組合の運営及び事業に関して知り得た他の組合員に関する事実、資料及び情報の一切を秘密として保持し、事前に理事長又は当該他の組合員の書面による同意を得ることなく第三者に開示漏洩してはならない」と定めている。また、「試験研究の内容及びその成果を第三者に発表又は報告する場合は、事前に理事長の書面による承認を得るもの」とし、産業財産権については、「組合員各自が分担する試験研究によって得られた発明、考案等の特許等工業所有権、著作権として出願又は登録することができる」、「組合員間の共同出願の場合は、その持分等は当事者間で協議する」、「権利化したものの組合員以外の者（第三者）への譲渡やライセンス（通常実施権の設定）を可能とする」、「組合員間については、原則としてライセンス（通常実施権設定）するものとし、実施料については無償乃至少なくとも第三者より優遇する」、「組合員は権利化したものを放棄する場合、あらかじめ他の組合員に連絡し、連絡を受けた組合員は、その権利の譲渡を申し出ることが出来る」等を定めている。

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の実施に関し、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。

3. 情勢変化への対応

平成 23 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災により、研究開発実施場所のうち東北大学（宮城県仙台市）、産業用超電導線材・機器技術研究組合（東京都江東区、千葉県佐倉市、神奈川県相模原市）が震度 6 強から震度 5 強の猛烈な揺れに襲われ、その後も強い余震が頻発した。本震発生時、各機関においては目標達成に向けた成膜試験を行っていた。例えば、研究組合の佐倉分室及び相模原分室では、1km 長複合材料の連続成膜試験中であり、東北大学、研究組合技術開発部ではレーザ CVD 法による成膜試験中であり、成膜中の試料は評価困難な状況であった。さらに、研究組合技術開発部からの外注により最終評価を行っていたサーモサイフォン式冷却要素技術開発では、冷却能力評価中に被災し、装置の一部が破損した。いずれも、本プロジェクトにおける最終段階での試験であった。本震災では、研究開発設備およびユーティリティに損壊被害が生じ、加えて震災直後から実施された東京電力管内の計画停電により連続運転設備の長時間稼働が不可能になるなどの障害があり、被害状況把握及び復旧には 1 ヶ月以上の期間を要することとなった。このような状況のため、NEDO と委託先における協議の結果、プロジェクト期間を約 2 ヶ月延長し、委託期間終了日を平成 23 年 3 月 20 日から平成 23 年 5 月 31 日に変更することとした。ここでは、特に比較的多くの予算を必要とする 1km 長試験においては、再度の試験に関して新たな予算措置が困難であることから、「1km 長複合材料を作製し、平均 I_c が 200A/cm 幅以上 (@77 K, 自己磁場) であることを実証する。」との超長尺イットリウム系複合材料における希少金属使用量低減技術開発での具体的な目標値に関して、1km 長のパッチ試験において代用することでこれを証明することとした。

また、希少金属を取り巻く情勢の変化としては、平成 23 年 7 月の新聞報道において、東京大学のグループが太平洋のハワイやタヒチ周辺の海底の泥に希土類物質が含まれていることを発見したとの報道がなされた。この泥からは、陸における通常の希土類物質含有材料に含まれる放射線が殆ど含まれていないだけでなく 800 倍の濃度で希土類物質が含有されているとのことから、これまで、中国に産出を独占されている同物質の供給源としての期待が謳われた。しかしながら、一方で課題として、深海底に広範囲に分布する泥を採取してレアアースを取り出す作業に高いコストが必要であることとともに公海の海底資源は国連海洋法条約で保護されていることから一国が自由に採掘できないことなどが挙げられ、現状における希少金属の供給リスク状況をすぐに解消できる即効性を期待することはできない。従って、依然として希土類物質をはじめとする希少金属の使用量を削減する技術開発に対する必要性は高い状況は続いている。

世界的にも、希少金属対策に関する機運が高まっており、例えば、平成 23 年 10 月 4-5 日には "EU-Japan-US Workshop on Critical Materials R&D" と題した希少金属に関する研究開発をテーマとしたワークショップが開催されることになっている。ここでは、日米欧の行政に携わる方々とともに各国の主なる研究者が一堂に介し、世界的な問題としてこのテーマが議論される。注目すべきは、このテーマの中に希少金属代替材料として高温超電導回転機が挙げられていることである。つまり、本プロジェクトのテーマが世界的な関心の対象となっていることを意味している。

4. 中間評価結果への対応

本研究項目では中間評価は実施されていない。

5. 評価に関する事項

NEDOは、国の定める技術評価に係わる指針及びNEDOが定める技術評価実施要領に基づき、技術的及び実用化の観点から、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事後評価を平成23年度に実施する。

Ⅲ 研究開発成果について

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 超長尺イットリウム系複合材料における希少金属使用量低減技術開発（研究組合、九州大学）

1.1.1-1 エキシマレーザ PLD 法による複合材料作製プロセス開発（研究組合）

本研究開発項目では、長尺線材実績（500 m 長・ $I_c \geq 300$ A/cm 幅（@77 K, 自己磁場））のあるエキシマレーザを用いた PLD 法及び TFA-MOD 法を選択し、超長尺複合材料で高特性を実現するための作製プロセス技術開発を行った。

エキシマレーザを用いた PLD 法における開発では、作製する複合材料の長さが長くなるにしたがって特性の低下が生じる課題を解決する必要がある。そのために、ホットウォール型成膜システムを選定することで高速移動に対応し、さらに複数の原料ターゲットをチャンバー内で交換可能なシステム及び大口径のリールに対して一定の張力を付与するトルク制御システムを導入した PLD 装置を設計、製作及びその装置の線材作製機能の検証を実施した。本プロジェクトの基本計画に記述されている線材性能評価基準に沿った 1050m の長さを有するイットリウム系複合材料の I_c の平均値は 533.9A であった。また、イットリウム系複合材料の長手方向の I_c 分布測定の結果から、10m 長以上で I_c が 300A/cm 幅（@77K、自己磁場）以上という特性も十分満たすことから、「300 A/cm 幅（@77 K, 自己磁場）の特性を有し、1 km を超える超長尺線材作製を見通す」という目標を達成したことが確認された。

1.1.1-2 TFA-MOD 法による複合材料作製プロセス開発（研究組合、九州大学）

TFA-MOD 法における開発では、バッチ式焼成の場合、主として電気炉の大型化において、炉内容積を倍の大きさにするために巻き枠構造と強度設計、反応ガスを材料表面に均一に吹き付けるため及び発生した HF ガスを速やかに炉外へ排出するためのガス制御設計、大型電気炉全体を均一に加熱するためのヒータ設計、反応条件の適正化等の課題がある。これらの課題に対し、機械強度評価、伝熱・流体シミュレーション等を駆使し、大型 MOD 焼成装置を設計、製作及びその装置の線材作製機能の検証を実施した。当該装置を導入後に、装置の基本動作（加熱時温度分布評価、駆動系の動作評価等）を確認し、成膜条件の検討を行った結果、1000m パッチ線材において平均 I_c で 300A/cm 幅（@77K, 自己磁場）を達成し、ガス系統及び熱処理温度に問題ないことが確認された。また、10m 長線材において 300A/cm 幅（@77K, 自己磁場）を実現した。以上の結果より、300A/cm 幅（@77K、自己磁場）の特性を有し、1km を超える超長尺イットリウム系複合材料を作製できることが見通せた。

また、超長尺複合材料プロセス開発に必要な、1)評価が律速とならないような評価速度と、2)特性劣化部を mm 以下のサイズを検出できる検出分解能とを両立させた上で、全長に亘って特性

評価・欠陥検出を行うために、磁気顕微法を用いた特性及び局所欠陥の評価技術開発を行い、小型装置を用いた原理検証を行うとともに、長尺複合材料評価装置を開発した。

1.1.2 イットリウム系複合材料の製造工程における希少金属利用率等の効率向上技術開発

1.1.2-1 レーザ CVD 法による希少金属利用率向上技術開発（東北大学、研究組合）

レーザー CVD 法を用いた酸化物セラミックス材料の高速成膜技術を、イットリウム系複合材料における希少金属の利用率向上を目的とした技術開発へ応用した。まず、複合材料作製に適した液体原料を用いるレーザー CVD 装置の開発を行った。特に、原料輸送システムとして無脈動液体搬送ポンプを用いて液体原料を加熱容器へ搬送し気化させ、反応炉内へ搬送する手法を開発した。同装置を用いて、適正成膜条件の検討を行ない以下の結果を得た。IBAD 基材(20 × 25 mm²) への成膜試験において、成膜温度を 586°C から 643°C へ上昇させると、イットリウム原材料収率は 25.5 から 42.1% へと上昇し、685°C では 43.6% に達した。基板温度 649°C、炉内圧力 600 Pa にて、IBAD 基材(20 × 25 mm²) 上に合成した膜は、ほぼ *c* 軸配向 YBCO 膜であった。そのときの収率は 45.7% であった。加えて、レーザー CVD 法の連続成膜プロセスの開発を行った。ここでは上記の知見を踏まえて長時間安定原料供給が期待できる液体原料を用いる供給系を導入すると共に、複数レーンでの反応を目指したレーザー光学系および広範囲の加熱システムを設計し、Reel-to-Reel 式成膜装置を製作導入した。同装置を用いて、組成、温度等の成膜基本条件の検討を行い、IBAD 基材上で 2 MA/cm² 以上の J_c 特性を実現した。以上の結果より、「超電導層の連続形成プロセスにおいて原材料収率 40% 以上を見通す」という目標を達成したことが確認された。

1.1.2-2 YAG レーザ PLD 法による希少金属利用率向上技術開発（名古屋大学）

YAG レーザはレーザー光の指向性が高く、空間的に均一なレーザー光が得られるため、原料ターゲットから離脱する蒸着子が形成するプルム内の組成、エネルギー等の均一性を実現出来る。これにより、広い面積での均一蒸着が可能となり、高い原材料収率が原理的に期待できる。

基礎検討として、現有の 4 倍波 YAG レーザおよびイットリウム系複合材料膜作製用 YAG-PLD 装置を用いて 10×10 mm² の短尺金属基材上でインプルム法に関する検討を行った。ターゲット-基材間距離を 40 mm から 20 mm まで短縮し、酸素分圧を 40 Pa から 200 Pa まで上昇させた結果、収率は 8% から 19% まで上昇した。次に、複合材料テープ作製用真空装置およびレーザー制御付リール駆動機構(YAG レーザ)を導入し、基礎検討結果のマルチターン/マルチパス法への拡張について検討を行った。ターゲット-基材(金属テープ)間距離が 35 mm、酸素分圧 40 Pa で、シングルターンの場合に収率 15% の収率条件で 3 ターン化した結果、酸素分圧に対して収率は単調に増加し、 $pO_2 = 80$ Pa で 39.1%、 $pO_2 = 160$ Pa では 56.1% の収率が得られた。 $pO_2 = 80$ Pa 条件で成膜した試料で $T_c = 88.2$ K、 $J_c = 1.4$ MA/cm²@77 K が得られた。以上の結果より、「超電導層の連続形成プロセスにおいて原料収率 40% 以上を見通す」という目標を達成したことが確認された。

1.1.3 イットリウム系複合材料を用いた回転機要素技術開発（九州大学、早稲田大学、研究組合）

1.1.3-1 回転機適正構造の概念設計（九州大学、早稲田大学、研究組合）

500 kW -1000 rpm 級を含めた産業用回転機を対象とし、希少金属(RM)使用量低減を主眼にイットリウム系複合材料を用いた概念設計を行なった。

まず、界磁巻線コイルの設計検討のための磁場、温度、応力の 3 要素を連成させた解析シミュレータを開発した。基本的な傘型形状コイルに関して、イットリウム(Y)系複合材料の通電特性と伝導冷却条件下での Y 系コイルの成立性を評価した。液体 Ne サーモサイフォン冷却(27K 以上)で軽量化のため鉄心を使わない(2T 以上)、複合材料の使用量もできるだけ少なくする条件下で検討し、その結果、動作温度 40K、発生磁場 2T の Y 系回転機用傘型形状界磁コイルが可能であることがわかった。次に、最新の量産化イットリウム系複合材料の I_c の温度、磁界、磁界印加角度依存性を実測により把握し、これに基づいて、さらに詳細に界磁巻線の形状、配置とギャップ磁界強度などから、回転機の最終出力特性である回転機出力、効率、トルク特性について検討した。その結果、界磁巻線形状としては、レーストラック型（平面図形状）の菱形傘型、鞍型傘型形状（断面形状）が最適であることを明らかにした。これらの超電導界磁巻線の解析検討に基づき、常電導機子、ヨークなどを含む回転機全体の詳細設計を行ない、常電導機と比較し、Y 系回転機のメリットを具体的に検討した。その結果、500 kW 機では、従来の常電導機に比べて、体格は同程度であるものの、高効率化、軽量化が可能であり、RM 使用量も従来永久磁石常電導回転機の 1/130 と大幅に低減できることを明らかにした。以上の検討を通して、目標である「概念設計によりイットリウム複合材料による大型回転機の優位性を見通す」に対して、RM 使用量など Y 系回転機のメリットを具体的に提示できた。

1.1.3-2 界磁巻線および冷却要素技術開発（九州大学、研究組合）

Y 系回転機開発のために、上記設計を具体化する界磁巻線、冷却システムの製作性に関する技術開発を行った。界磁巻線技術開発では、イットリウム系複合材料の電氣的、機械的特性の異方性を考慮し、上記設計で検討した回転機の性能を最大限引き出す傘型形状のモデルコイル（平傘型、菱形傘型、鞍型コイル）を試作し、冷凍機冷却等により 40~77K で励磁試験を行った。その結果、いずれのコイルも線材の特性を劣化させることなく、設計通りの所定の磁場を発生させることができた。これにより、傘型界磁巻線工程等における加工劣化を抑制し、巻線状態での特性で複合材料 I_c の 70%以上を得ることを実証することができた。

冷却要素技術開発では、回転機の冷却に適した液体 Ne（沸点 27K）によるサーモサイフォン式冷却を選定し、そのための回転冷却装置、液体 Ne 供給装置からなる冷却試験装置を作製し、試験を行った。超電導回転子を模擬した回転体を数百~1000rpm で回転させ、中心部シャフトに液体 Ne を流入させて、回転子への伝導冷却特性および液体 Ne-回転シャフト SUS 界面での熱伝達特性を調べた。その結果、400~1400rpm の回転数の範囲で模擬回転体を 30K 程度まで安定的に冷却することができた。また、設計に必要な液体 Ne-回転シャフト SUS 界面の熱伝達係数とし

て、 $1330 \pm 260(1070 \sim 1590) \text{W/m}^2/\text{K}$ を実験的に確認し、Ne を用いたサーモサイフォン式冷却装置において回転機の冷却設計を可能にすることができた。

1.1.4 委員会・連絡会議の設置

1.1.4-1 イットリウム系複合材料を用いた超電導回転機開発委員会

本事業を推進するにあたり、イットリウム系複合材料を用いた回転機の実用化を目指して開発を効率良く進めるために、仁田教授（明星大学）を委員長に迎え、各分野のユーザ、メーカーおよび学識経験者を含めた委員会を設置し、実用化のためのニーズおよび課題検討を行った。具体的には、平成 22 年 12 月と平成 23 年 2 月に委員会を開催し、既存の常電導及び超電導回転機における現状と課題、イットリウム系複合材料開発の状況と見込み、イットリウム系複合材料の回転機への適用性等の内容について議論し、イットリウム系複合材料を用いた回転機の有効性等について纏めた。

1.1.4-2 連絡会議の設置

本事業において、効率的に研究開発を推進するために、各研究項目内及び各研究項目間の実務者レベルで必要に応じて連絡会議を開催し、技術的な報告及び連携のための情報交換を実施した。また、ここでは各項目に関する進捗管理等を含めたマネージメントの役割も担い、円滑な研究開発を推進した。具体的には 4 回に亘る連絡会議を実施し、プロジェクトの効率的な推進に努めた。

2. 研究開発項目毎の成果

2.1 超長尺イットリウム系複合材料における希少金属使用量低減技術開発（研究組合、九州大学）

2.2.1 エキシマレーザ PLD 法による複合材料作製プロセス開発（研究組合）

2.2.1-1 エキシマレーザ PLD 法による複合材料作製プロセス開発

①背景および目的

産業用超電導線材・機器技術研究組合(以下、研究組合と略す)が研究開発を実施したイットリウム系複合材料作製プロセスは、高強度のハステロイ™ 基材上に研究組合の組合員である株式会社フジクラ(以下「フジクラ」と略す)が世界で初めて開発した IBAD (Ion Beam Assited Deposition) 法により形成した2軸配向した酸化物薄膜上にエキシマレーザ PLD 法により超電導層を形成する積層薄膜として作製される [1-2], [7]。フジクラでは平成 15 年度から平成 19 年度にかけて実施された NEDO プロジェクト「超電導応用基盤技術研究開発(第Ⅱ期)」において 500m 長で 300A/cm 幅(@77K、自己磁場)の I_c 特性を有するイットリウム系複合材料の開発に成功し、「イットリウム系超電導電力機器技術開発」(平成 20 年度～平成 24 年度)では、200m 長で 200A/cm 幅(@77K、自己磁場)のイットリウム系複合材料を機器開発に提供している。

イットリウム系複合材料を用いて永久磁石モータの代表的な大型モータ規模である 500kW 級モータを実現する場合、粗設計による見積もりではあるが、300A/cm 幅(@77K、自己磁場)の臨界電流(I_c)を有し、かつ少なくとも単長 1km 程度の長さが要求される。このような高い特性を有するイットリウム系複合材料を得るためには高い結晶粒配向度を有する超電導層を長尺で形成することが必要であることから、新しいエキシマレーザ PLD 装置の開発が不可欠である。

エキシマレーザ PLD 法は数多く存在する薄膜作製プロセスのうち、物理堆積法(PVD)に分類される。PLD とは Pulsed Laser Deposition の略称であり、その薄膜堆積プロセスの概略図を図 2.1.1-1 に示す[3-5]。

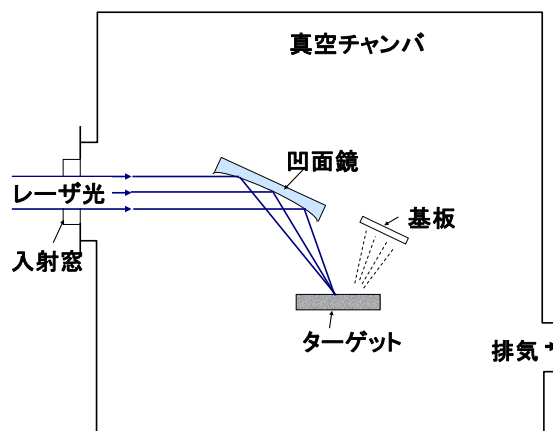


図 2.1.1 - 1 PLD 法概略図

ターゲットと呼ばれる薄膜材料とほぼ同じ組成の焼結体に照射されたパルスレーザーのエネルギーによりターゲットから材料が気化(レーザーアブレーション)される。レーザーにより気化された材料がターゲットに対向して設置された基材に到達し、薄膜を形成する。イットリウム系複合材料では、予め結晶粒方位の2軸が配向(2軸配向)した酸化物積層膜を形成した基材を用いるため、基材上で薄膜はエピタキシャル成長することができる。そのために高い2軸配向度を有するイットリウム系複合材料薄膜を得ることが可能である。

エキシマレーザー PLD 法ではレーザー光源として高出力のエキシマレーザーを採用することで、高いエネルギー密度のレーザー光をターゲット上の任意の箇所に照射することが可能であることから、下記のように理想的な特長を有している[3-5]。

1. チャンバ外部から導入するレーザー光によりターゲットを気化させるため、レーザーのメンテナンスが容易であり、チャンバ内部も清浄雰囲気でも薄膜を蒸着できる。
2. チャンバ外部から導入するレーザー光を加熱源としてターゲットを気化させるため、真空の管理が容易である。
3. ガス雰囲気下での薄膜堆積が可能である。
4. 高エネルギー密度のため、高融点の物質も気化できる。
5. レーザー加熱による拡散などの影響が小さい。
6. 蒸着速度が速い。

エキシマレーザー PLD 法は上記 1.および 2.の特長から、長尺線材作製による長時間成膜の間、チャンバ内を清浄でかつ安定した真空度を保つことが容易である。また、3.の特長から酸素雰囲気下で成膜が可能となり、酸化物であるイットリウム系複合材料の成膜条件の最適化のための選択肢を広くできる。4.および 5.の特長からターゲットとして用いる材料に受ける制限が小さくできる。6.は産業化のために有利である。以上の利点を生かして、線材作製用に開発されたのが図 2.1.1-2 に示したマルチターン PLD 線材作製装置である[6]。

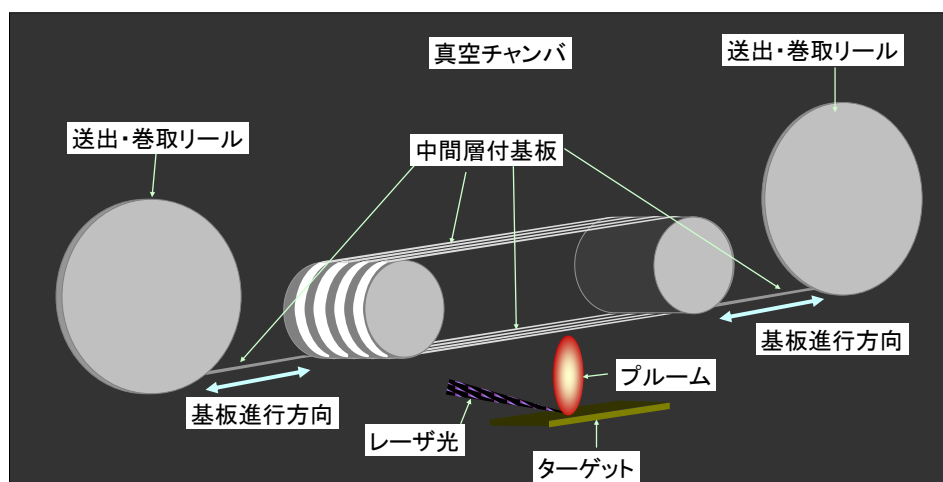


図 2.1.1-2 マルチターン PLD 装置概略図

この装置では真空チャンバ内に送付リールと巻取リールを配置した Reel to Reel (RTR)方式により、線材作製が可能となっている。また、成膜エリアを複数回通過させることで線材作製速度向上が図られている。本方法はレーザーパワーの増大やレーザー照射周波数の増大による成膜速度の向上方法と比較して、薄膜表面の平坦性が高く膜質がよく、ターゲットが受けるダメージが小さいなど高性能かつ長尺の線材成膜に向いている利点がある[6]。

図 2.1.1-3 は図 2.1.1-2 に示した装置の機構を有する装置の外観写真である。フジクラではこの装置を用いて平成 19 年度に 504m長の線材を作製し、 I_c 測定を実施した。測定の基準として、線材全長の $I-V$ 特性を測定し、電圧が $1\mu\text{V}/\text{cm}$ ($50.4\text{mV}/504\text{m}$)となった時の電流値を I_c とした。その結果、当該線材の I_c 値は $349.6\text{A}/\text{cm}$ 幅 (77K, 自己磁場)であり、超電導線材の性能評価の指標である、 I_c と線材長(L)の積である $I_c \times L$ 値において当時の世界記録を達成した[8]。



図 2.1.1-3 エキシマレーザー PLD 装置(マルチターン方式)

PLD 法で作製した超電導層厚 $2.5\mu\text{m}$ のイットリウム系複合材料の I_c-B-T 特性を図 2.1.1-4 に示す。

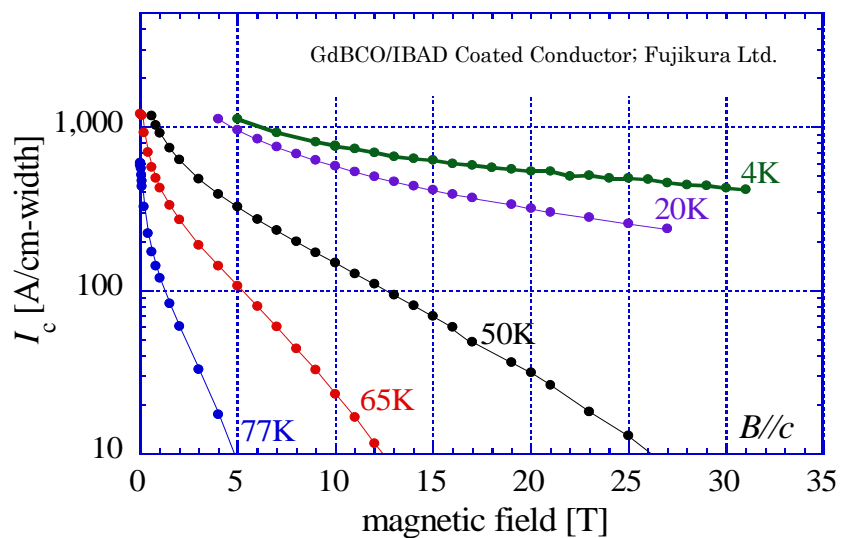


図 2.1.1-4 イットリウム系複合材料 (超電導層膜厚 $2.5\mu\text{m}$) の I_c-B-T 特性($B//c$)

このイットリウム系複合材料は人工ピンを導入していないにもかかわらず、600A/cm 幅(@77K, 自己磁場) 程度の I_c を有している。液体窒素温度以下の 50 K, 5 T においては I_c が 300 A/cm 幅であり、20 K, 5 T においては I_c が 1000 A/cm 幅であり、さらに 4 K では 31 T という強磁場下においても 400 A 程度の高い I_c を有している。

以上に示してきたようにエキシマレーザ PLD 法により作製されたイットリウム系複合材料はこれまでの開発により長尺で高 I_c を実現できる可能性があり、かつ磁場中においても高い特性を示すことから、希少金属、特に Dy を使った永久磁石の代替材料として期待される。

② 開発目標

エキシマレーザ PLD 法による複合材料作製プロセス開発では本プロジェクト終了時点において、1km以上の超長尺イットリウム系複合材料の作製技術を見通すことを目標としているが、本方式では作製する複合材料が長くなるにしたがって特性の低下が生じてしまう課題を解決する必要がある。そのため、長尺線材作製を可能とするための装置のスケールアップに対応した装置の改良が必要である。これら課題を以下の3つに分類整理して開発を進めた。

(1)長尺高速搬送技術、(2)高温加熱技術改良、(3)蒸着源連続供給技術

(1)長尺搬送技術についてはRTR方式により1kmを超える長さのイットリウム系複合材料を均一な状態で作製するために、大口径のリールに単層巻きが可能で、さらに一定の張力で線材を保持し、高速搬送可能なようにトルク等を適正に維持するなどの機構を開発する。また、(2)高温加熱技術の改良においては良質なイットリウム系複合材料を作製するために、常にイットリウム系複合材料からなる膜表面温度を所定の温度に維持する必要がある。これまでの技術では500m長を作製するための条件はほぼ把握できるところまで技術が見通せているため、この技術を改良し、より長時間にわたって温度管理ができるように加熱用ヒータ構造の改良や、雰囲気中の酸素分圧が微粒子との反応等により長時間において変化することのないように酸素ガスの供給と排気の状態を制御する技術等を開発し、安定して長時間の蒸着が可能な技術を開発する。さらに蒸着源となるイットリウム系複合材料ターゲットを長時間にわたる使用においてターゲット状態が変化して均質な蒸着ができなくなることを防ぐようなレーザの照射方法を見いだす。また、(3)蒸着源連続供給技術では、長時間の蒸着が可能なように複数のターゲットを使用できるようにターゲット保持機構を開発する。

これらの開発を実施し、超長尺イットリウム系複合材料開発において最も重要なマクロ均一成膜技術を1km長複合材料作製にて検証する。ここでは、1km長中間層基材上において上記の各要素技術を統合してイットリウム系複合材料を形成し、平均 I_c で 200A/cm 幅以上(@77K, 自己磁場) を実証する。また、同手法における高特性複合材料の成膜能力確認を目的として、結晶粒高配向中間層基材を用いて10m長以上の複合材料において I_c が 300A/cm 幅 (@77K, 自己磁場) 以上を実証する。

③ 開発課題とアプローチ

課題として掲げた3つ技術開発項目について、ホットウォール型エキシマレーザ PLD 装置を基本として、開発目標に対応した新しいエキシマレーザ PLD 装置を設計した。

ホットウォール型 PLD 装置とはエキシマレーザ PLD 装置の成膜部分を均熱に保つことを目的として開発した超電導薄膜の作製方法である。今回開発したホットウォール型 PLD 装置の概略図を図 2.1.1-5(a)に示し、フジクラが所有するホットウォール型エキシマレーザ PLD 装置の外観写真を図 2.1.1-5(b)に示す[7]。

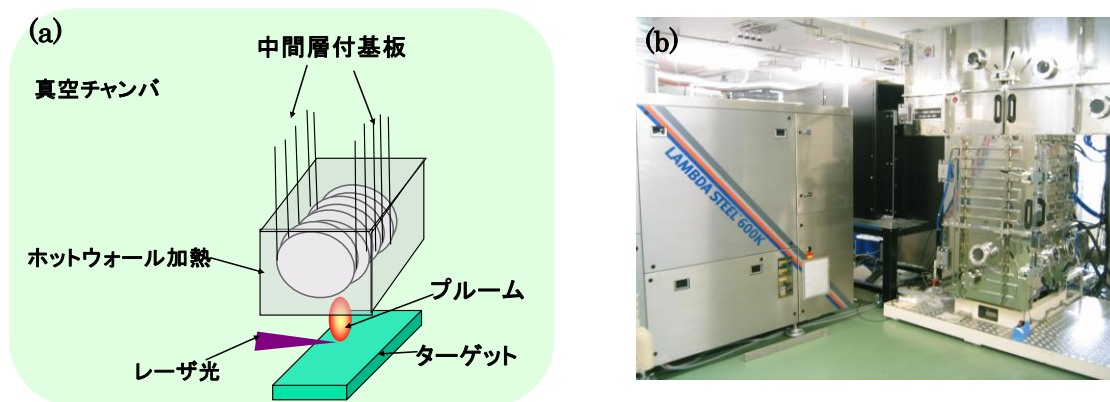


図 2.1.1-5 .ホットウォール型 PLD 装置； (a)概略図、(b)装置写真

ホットウォール型エキシマレーザ PLD 装置では成膜エリアがヒータで囲まれていることが特徴である。そのため、レーザにより気化されたイットリウム系複合材料は基材表面でヒータからの熱で常に一定温度に保たれた状態で結晶が成長することができ、より均質で高品質の薄膜を得ることができることから、技術課題(2)の高温加熱技術を改良に対応することが期待される。技術課題(1)の長尺高速搬送技術については、最大毎時 200mの線速にも追従できるように、補助駆動ロールを導入して、線材にかかる張力と線材の送り出し・巻き取り速度を一定に保ち、成膜時の基材の状態を定常な状態に保つことが期待される。技術課題(3)の蒸着源連続供給技術については、真空を保ったまま、ターゲットの交換を可能にすることにより、成膜雰囲気や温度や圧力などを保ったまま安定して長時間の蒸着が可能となることが期待される。以上に挙げた3つのアプローチを盛り込んだ装置を設計、製作した。以後は本プロジェクトで開発した新しいホットウォール型エキシマレーザ PLD 装置を高磁界長尺イットリウム系複合材料作製装置複合装置と記述する。高磁界長尺イットリウム系複合材料作製装置に搭載された新しい技術を表 2.1.1-1 にまとめた。

表 2.1.1-1 .高磁界長尺イットリウム系複合材料作製装置に導入した新技術

開発課題	課題へのアプローチ
長尺高速搬送技術	補助駆動ロールを導入し、張力と線材速度を制御
高温加熱技術改良	ホットウォール加熱による成膜面加熱
蒸着源連続供給技術	真空度を維持した状態でのターゲット交換機構の導入

④ 成果

④-1 高磁界長尺イットリウム系複合材料作製装置による 1 km 超級イットリウム系複合材料

(1) 中間層付き基材

イットリウム系複合材料は図 2.1.1-6 に示すように金属基材上に形成した複数層のセラミックス薄膜からなる積層構造であるが、超電導特性を有するのは $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (RE: 希土類金属) 層であることから、300A/cm 幅(@77K、自己磁場)の I_c を有する線材を得るためには高い臨界電流密度を有する超電導層を形成することが重要となる。

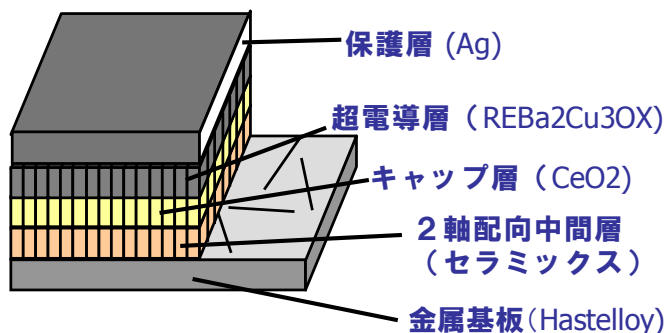


図 2.1.1-6 イットリウム系複合材料構造図

$\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ は異方性が高いことから、薄膜を形成する結晶粒子の同一方位の結晶軸のなす角度が小さいほどその臨界電流密度が向上することが知られている[9]。そのため、下地となる基材にも高い結晶粒配向度が求められる。産業用超電導線材・機器技術研究組合の組合員であるフジクラが開発した Ion Beam Assisted Deposition (IBAD) 法は、高い結晶粒配向度を有する基材の製造方法であり、結晶粒無配向の金属基材上に 2 軸配向したセラミックスの中間層を形成することが特徴である。図 2.1.1-7 に IBAD 装置の概略図を示す。

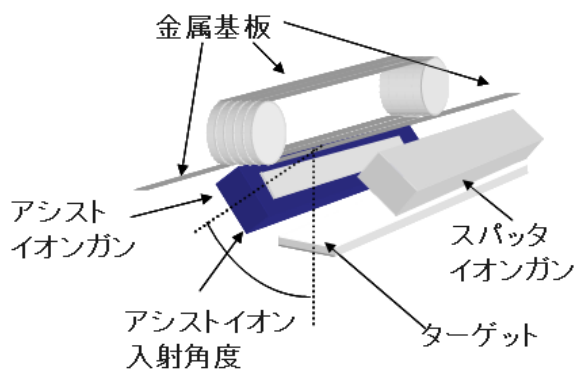


図 2.1.1-7 IBAD 装置概略図

IBAD 装置内には、ターゲットにイオンを照射して薄膜の原料をスパッタするイオン (スパッタイオン) ガンと、薄膜表面に対して特定の角度から薄膜に向けてイオン (アシストイオン) を照射するガンの 2 種類のイオンガンが装備されている。スパッタイオンガン、アシストイオンガンと

も Ar イオンを照射している。ターゲットに用いるセラミックスの結晶構造に応じてアシストイオンの基材への入射角度を最適化 (GZO:55°、MgO:45°) させることにより、2 軸配向した中間層を得る。IBAD 層の成膜には高強度のハステロイTMテープの上に予めベッド層と呼ばれるアモルファスもしくは微結晶からなるセラミックス薄膜が形成された基材が用いられる。IBAD 層の成膜前に基材は装置内に装備された送りリールに巻かれていて、成膜時に基材は順次、図 2.1.1-7 に示した成膜装置内を経由して、巻取りリールに巻き取られる。このことから連続的に、長尺の線材作製が可能となっている。

IBAD 層の上にはさらにキャップ層と呼ばれる層を形成する。超電導層はこのキャップ層上に形成されるため、キャップ層の結晶粒配向が良いことが重要となる。配向の良否は X 線の ϕ スキャンの半値幅 ($\Delta\phi$) で評価される。

超電導層以外の各層は、超電導層と比較して膜厚が薄く、ターゲットの消費が少ないことから、長尺基材製造中のターゲット交換が不要である。また超電導層と比較して、許容される製造温度範囲が広いことから、超長尺化のために必要な技術は超長尺線材成膜における線材搬送中のテンションコントロールのみである。そのため、高磁界長尺イットリウム系複合材料作製装置において開発するテンションコントロールを既存技術に展開することにより、超長尺高磁界長尺イットリウム系複合材料用の基材製造は可能であるといえる。以上の理由により、高磁界長尺イットリウム系複合材料作製装置による 1 km 超長尺複合材料作製検討用基材として 1000m 以上の長さを有する基材を準備することの重要性は低いと判断されることから、350m と 700m の 2 本の基材をつなぎ合わせて 1050m 長の基材を準備した。

使用した基材の ϕ スキャン測定結果を図 2.1.1-8 に示す。

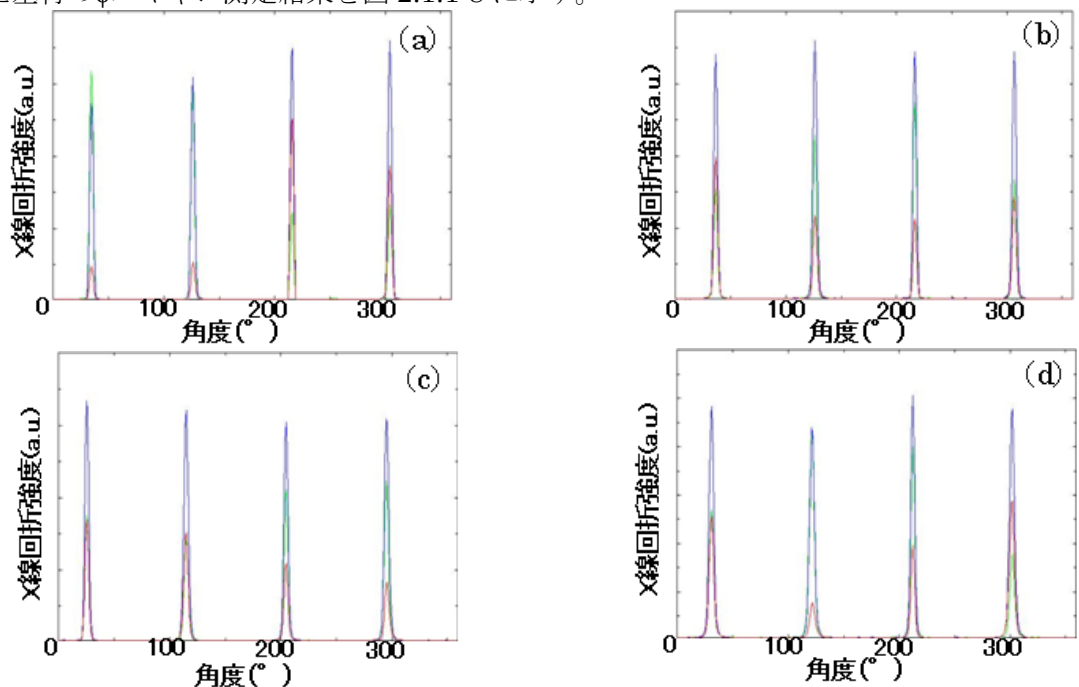


図 2.1.1-8 キャップ層の ϕ スキャン結果

- (a) 350m 基材の S 端、(b) 350m 基材の E 端、
(c) 700m 基材の S 端、(d) 700m 基材の E 端

図 2.1.1-8(a)、(b) が 350m 基材の S 端と E 端の ϕ スキャンの結果であり、図 2.1.1-8(c)、(d) は 700m 基材の S 端と E 端の ϕ スキャン結果である。X 線回折強度のピークはキャップ層である CeO_2 の $\langle 220 \rangle$ 面からの反射に相当している。ピークが 4 箇所現れるのは $\langle 220 \rangle$ 面が 4 回対称性を有していることに由来している。

図 2.1.1-8 の(a)から(d)にそれぞれ示した 4 つのピークの半値幅の平均値から求めた $\Delta\phi$ と線材長手方向の位置関係は図 2.1.1-9 に示すとおりである。

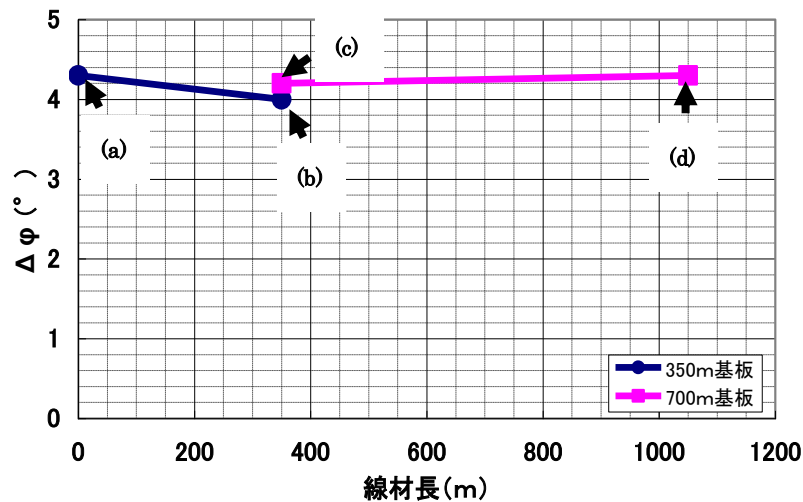


図 2.1.1-9 キャップ層付 1050m 基材の $\Delta\phi$ の長手方向分布

$\Delta\phi$ は $4.0 \sim 4.3^\circ$ であり、品質の高いキャップ層が形成されていることが確認できたことから、本キャップ層付基材をイットリウム系複合材料成膜実験に使用した。

(2) 超長尺イットリウム系複合材料の作製

本プロジェクトで開発した高磁界長尺イットリウム系複合材料作製装置を図 2.1.1-10 に示す。



図 2.1.1-10 高磁界長尺イットリウム系複合材料作製装置

写真中央部分が成膜チャンバであり、その両側に送出・巻取リール用チャンバを配置した。張力と線材速度を制御するために設けた補助駆動ロールと成膜面加熱を可能にするホットウォール加熱機構、真空度を維持した状態でターゲット交換が可能な蒸着源連続供給装置は写真中央部の成膜チャンバ内に配置した。

④-2 超長尺イットリウム系複合材料の特性評価

(1) 磁化法による測定結果

図 2.1.1-10 に示したキャップ層付の 1050m長の基材上に形成したイットリウム系複合材料の特性は液体窒素温度における I_c により評価した。 I_c 測定方法は、一定の外部磁場中におけるイットリウム系複合材料の幅方向の磁化分布を測定し、ビーンモデルにより近似的に I_c を求める方法(磁化法)と、線材を 200mごとにサンプリングして 4 端子法による FV 測定により I_c を求める方法(通電法)の 2 つの方法によって実施した。

磁化法により測定した I_c の長手方向分布を図 2.1.1-11 に示す。約 1mm 間隔で測定した。測定時にはイットリウム系複合材料に垂直に 40mT の外部磁界を印加した。

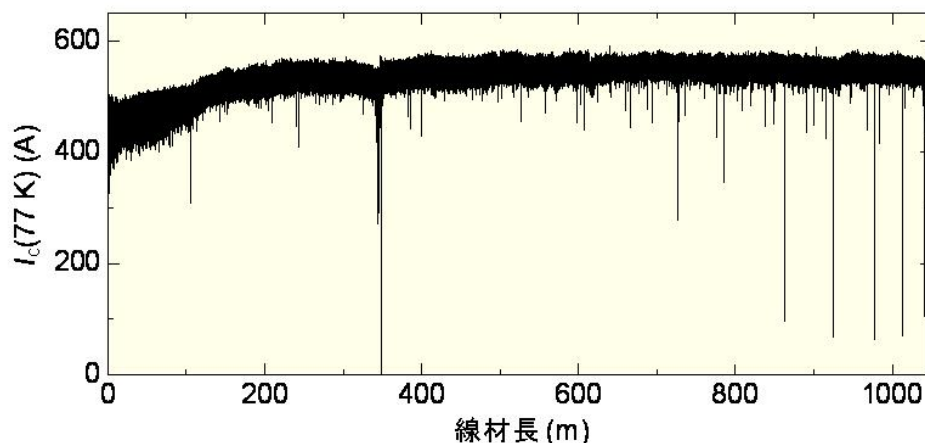


図 2.1.1-11 磁化法により測定したイットリウム系複合材料の I_c の長手方向分布

350m付近に存在する I_c の大きな低下は 2 つの基材の接続点にあたるものであり、成膜による問題ではないものと考えられる。また、その他に I_c の局所的な低下が数か所観察されたが、本測定により得られた全測定点($n= 1,032,963$)の I_c の平均値は 533.9A であった。目標値である 1000m以上の長さを有し、かつ I_c の平均値が 200A/cm 幅以上という目標性能を満足している。

また、図 2.1.1-11 から 10m 以上にわたって 300A 以上の I_c を有することも明らかであることから、磁化法による測定においては目標性能を満足することを確認した。

850mから 1000m付近に I_c の局所的な低下が 5 箇所観察されたが、このような局所的な I_c の低下は数 100m長クラスのイットリウム系複合材料でも観察されており、原因が特定されていることから、今後作製条件のさらなる検討や環境の整理を進めることで改善すること可能なものと推

察される。

(2) 通電法による I_c 測定結果

通電法測定装置の概略図を図 2.1.1-12 に示す。70cm の間隔で配置された電圧端子につながれたナノボルトメータによりイットリウム系複合材料の電圧を測定しながら、電流を 0A から徐々に大きくしていき、電圧が $1\mu\text{V}/\text{cm}$ ($70\mu\text{V}/70\text{cm}$) に達した時点の電流値を I_c とした。 I_c 測定後に線材を 200m 送り出してから、再び測定を実施するということを繰り返して、イットリウム系複合材料を 200m 間隔で 1km 全長に亘って I_c 測定を実施した。

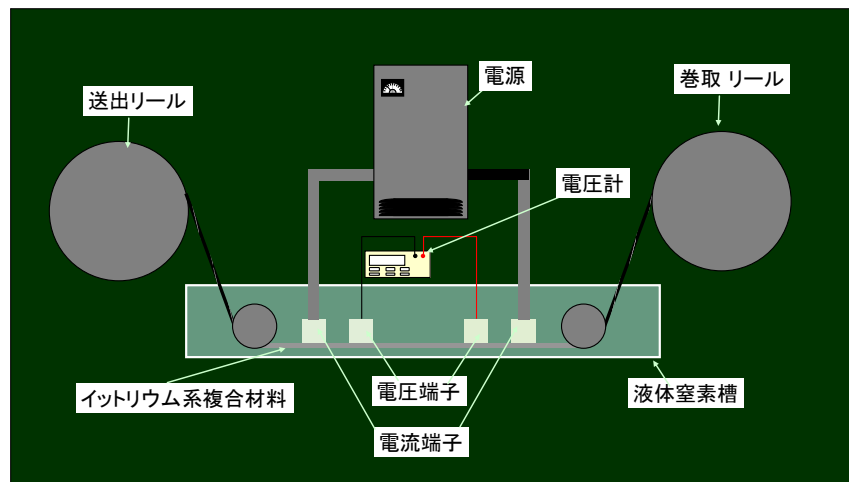


図 2.1.1-12 I_c 測定装置の概略図

本方法により測定したイットリウム系複合材料の長手方向の I_c 分布を図 2.1.1-13 に示す。

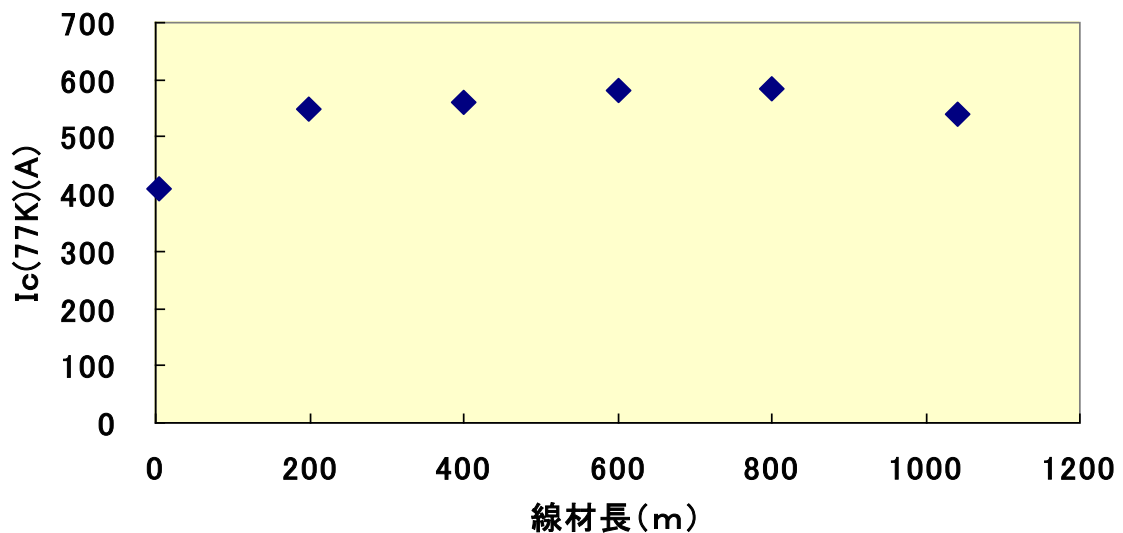


図 2.1.1-13 通電法により測定したイットリウム系複合材料の I_c の長手方向分布
(200m 間隔で 70cm ごとにサンプリング)

I_c の長手方向分布は磁化法による計算値とよく一致していることから、磁化法により求めた I_c の平均値は通電においても適用できると考えられる。このことから、本イットリウム系複合材料は、目標値である 1000m 以上の長さを有し、かつ I_c が 200A/cm 幅以上の特性を満足しており、10m 以上にわたって 300A 以上の I_c を有することも明らかであり、通電による測定においても目標性能を満足する超長尺イットリウム系複合材料を実現したことが確認された。

2.1.1-2 エキシマレーザ PLD 法による複合材料作製プロセス開発のまとめ

- ・超長尺イットリウム系複合材料作製を目的として、ホットウォール型エキシマレーザ PLD 装置を改良した高磁界長尺イットリウム系複合材料作製装置を開発した。

- ・1050m の長さを有するイットリウム系複合材料の I_c の平均値は 533.9A であった。また、イットリウム系複合材料の長手方向の I_c 分布測定の結果から、10m 長以上で I_c が 300A/cm 幅(@77K, 自己磁場) 以上という特性も十分満たすことから、目標である「1km 長で平均 I_c で 200A/cm 幅以上 (@77K, 自己磁場)」および、「10m 長以上にわたって I_c が 300A/cm 幅 (@77K, 自己磁場) 以上」という性能をすべて達成した。

- ・目標に対する達成度 > 100 %

- ・今後の課題、展望

磁化法による I_c 分布測定においては 800m 付近から 1000m 付近に I_c の局所的な低下が数か所観察された。今後の課題としては、これらの局所的な低下の改善による高品質化が重要となる。

イットリウム系複合材料における I_c のこのような局所的な低下は数 100m 長クラスのイットリウム系複合材料でも観察されており、原因が特定されていることから、今後の作製条件のさらなる検討や環境の整理を進めることで改善することが可能である。

エキシマレーザ PLD 法による複合材料作製プロセス開発において開発を進めた高磁界長尺イットリウム系複合材料作製装置は、最終目標である、永久磁石モータの代表的な大型モータ規模である 500kW 級モータを実現するために必要とされる 300A/cm 幅(@77K, 自己磁場)の I_c を有し、かつ少なくとも単長 1km 程度のイットリウム系複合材料作製を実現するための能力を十分に有していることが確認され、実用化に向けた展望を示すことができた。

参考文献

- [1] Y. Iijima *et al*, Appl. Phys. Lett. Vol 60, p.769 (1992)
- [2] S. Hanyu *et al* : Supercond. Sci. Technol. **23** (2010) 014017
- [3] 日本学術振興会薄膜第 131 委員会編 : 薄膜ハンドブック、オーム社、 p.127
- [4] 真下正夫、吉田政次編 : 薄膜工学ハンドブック、講談社サイエンティフィック、 p.3
- [5] 応用物理学会薄膜表面物理分科会編 : 薄膜作製ハンドブック、共立出版、 p.216
- [6] 衣斐頭他 : 低温工学 40(2005)pp.585-590
- [7] K. Kakimoto *et al* : Supercond. Sci. Technol. **23** (2010) 014016
- [8] Kutami H *et al* :2009 Physica C 469 1290
- [9] 塩原融 : 低温工学 39 (2004) pp.511-516

2.1.2 TFA-MOD 法による複合材料作製プロセス開発（研究組合、九州大学）

2.1.2-1 TFA-MOD 法による複合材料作製プロセス開発（研究組合）

① 背景及び目的

産業用超電導線材・機器技術研究組合（以下「研究組合」と略す）が研究開発を実施した TFA-MOD（三弗化酢酸塩による有機酸塩堆積）法とは、有機溶媒中に三弗化酢酸塩、ナフテン酸塩、オクチル酸塩という有機金属塩（イットリウム系複合材料を構成する元素）を溶解した原料溶液を中間層付の金属基板上に塗布、乾燥・仮焼する工程を繰り返して一定の膜厚を有する仮焼膜を形成し、その後に結晶化するための本焼熱処理を施して複合材料薄膜を形成する手法である。

研究組合の一員である昭和電線ケーブルシステム株式会社（以下「昭和電線」と略す）は、平成11年より新エネルギー・産業技術開発機構（NEDO）が実施した「超電導応用基盤技術研究開発（第Ⅰ期）」に参画し、国際超電導産業技術研究センター（ISTEC）と共同でTFA-MOD法によるイットリウム系複合材料の開発を行った。続く平成 15年からの「超電導応用基盤技術研究開発（第Ⅱ期）」においても、イットリウム系複合材料の長尺作製を目的としてバッチ式大型本焼炉の開発を行い、長さ 500m、1cm幅で 310A (@77K, 自己磁場) の特性を有するイットリウム系複合材料の作製に成功し、目標を達成した。バッチ式熱処理の特長は、作製する複合材料を電気炉に設置して一括の熱処理を行うため、比較的短時間で複合材料を作製することが可能であり、工業生産性に優れている事を特徴とする。

昭和電線は平成 20 年よりNEDOが実施する「イットリウム系超電導電力機器技術開発」に参画し、プロジェクトの開発テーマである「高電圧絶縁・低誘電損失ケーブル化技術」と「超電導変圧器技術」で使用するイットリウム系複合材料の供給を担当し、単長 30～200 mで125～150A (5mm幅) の通電が可能なイットリウム系複合材料を平成21年度末までの2年間で約 8km供給し、安定製造技術の検証を行っている。

これまでの研究により高特性を有する長尺イットリウム系複合材料をTFA-MOD法により作製する技術が開発され、性能は機器開発に適用されるレベルに到達した。しかしながら、超軽量高性能モータ実現には、高性能で1kmを越える超長尺イットリウム系複合材料が必要であり、これらの技術開発が急務であると考えられる。更に、米国では1km級のイットリウム系複合材料開発が進んでいる現状を考慮すると、国際競争力の観点からも超長尺化技術の確立が急務であると考えられる。

昭和電線は TFA-MOD 法により500m、310Aを作製したノウハウを保有しており、シミュレーションの技術開発も行っている。1kmのイットリウム系複合材料開発を目指すには反応 HF ガスの流れの問題、炉構造の問題等多くの問題が予想されるが蓄積されたノウハウとシミュレーション技術を駆使することで開発の目標である 1km、300A/cm幅（77K,自己磁場）を見通すことの達成を図った。

② 課題とアプローチ

TFA-MOD法を用いたイットリウム系複合材料の超長尺化に当たり、製造方式としてバッチ式本焼方法とRTR (Reel-to-Reel) 式本焼方法がある。バッチ式本焼方法は高速製造に適しているが、炉の大きさに制限され製造可能長さに限界がある。今後、単長の長い複合材料の要求が高まる可能性があり、本プロジェクトにおいては製造長さに制約の少ないRTR式本焼方法も検討を進める。

バッチ式焼成の場合、長尺化に必要な開発課題は、電気炉の大型化に係わるものである。バッチ式熱処理では熱処理する複合材料を全て電気炉の中に格納する必要があるが、1km以上の複合材料熱処理を可能とするには、現状の炉内容積を倍の大きさにする必要が生じる。しかし、この電気炉の大型化には種々の技術的課題が存在する。本研究においては、この技術課題を解決し、1km以上の複合材料作製を可能とする超長尺対応バッチ式熱処理プロセスの技術開発を目指した。

TFA-MOD法においては、イットリウム系複合材料の結晶化反応過程において H_2O を消費し、HFガスが発生する。このガスの出入りは、低温反応と配向組織形成に貢献するが、成膜速度向上にはHFガスが速やかに排出されなければならない。炉外に排出されることなく仮焼膜表面近傍に滞留し、高HF濃度化するようなことになると、今度は逆に $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (YBCO)の結晶化を妨げる方向に作用するためである。これら基礎的な反応プロセスの知見を基に、バッチ式熱処理炉で反応ガスの導入、排出機構等種々の工夫をこれまでの開発を通し行ってきた。炉の内部構造は、円筒状の炉心管の内部に複合材料を巻き付けるドラムが同軸配置されており、その表面はパンチング加工されている。複合材料はドラムの表面に螺旋状に巻き付けられ、外周部より膜表面に水蒸気を含む反応ガスを吹き付ける配置となっている。仮焼膜中で発生したHFガスはドラム表面にパンチング加工された細孔を介してドラム内部に配置された排気管から炉の外へポンプで排気される。

超長尺対応バッチ式熱処理炉の開発に際して従来の熱処理炉と比べて大きく技術革新すべき点は、イットリウム系複合材料を炉内に設置するための巻き枠構造と強度設計、反応ガスを材料表面に均一に吹き付けるためのガス導入システム設計、反応によって発生したHFガスを速やかに炉外へ排出させるための排気系設計、大型電気炉全体を均一に加熱するためのヒーター設計、反応条件の適正化である。

まず、巻き枠構造と強度設計についてであるが、500m長複合材料用の巻き枠構造は直径1m、長さ3m程度の Hasteloy™ 円筒を片端で支持をする構造を採用しており、巻きつけた複合材料が反応ガスに均一にさらされるように Hasteloy™ 円筒は一定速度で回転している。1kmの複合材料を熱処理すると仮定するとドラムの重量は450kgとなり、回転軸にかかる応力は160MPaとなる。Hasteloy™ の室温での強度は900MPa程度であるが、この巻き枠は熱処理中800°C近い高温に曝されるため、ラプチャー強度は130MPaまで低下する。したがって、現状の構造では使用中に支持軸に過大な応力がかかり、大きなたわみを引き起こすだけでなく、稼動を続けると応力が集中することにより支持軸が破損する恐れがある。この危険性を回避するためには、巻き枠に適した材質の選定と厚さ設計、補強構造の設計、回転軸の強度設計と巻

き棒との取り合い方法の検討、回転方法の検討等の課題がある。これらの課題に対し、昭和電線は各種金属材料の物性データを保有し、これを用いた強度計算、加熱状態でのたわみや応力集中箇所のシミュレーション技術を持っていることから、これを使ってさまざまな巻き棒構造を想定して数値計算を行い、妥当性を検証しながら適性構造を決定することができる。

ガス導入システムと排気系設計はこのプロセスで最も重要な課題である。500m用電気炉では巻き棒の外周上に4箇所ガス導入ノズルを取り付け、ノズルに一定間隔であけた孔からガスを吹き付ける構造を採用した。また、排気系は巻き棒の中心部に設置して真空ポンプとつなぐことで、巻き棒を通過して外周部から中央に向かうガスの流れを実現した。しかし、この構造を現状の2倍以上の容積をもつ巻き棒で行うとガス流は直進性を失い、炉内の空間で滞留することがシミュレーションで明らかである。本研究では超大型の電気炉の炉内空間に効率よく均一なガス流を形成させる方法についてシミュレーションを用いて検討する。特に、ガスの導入管径、ガス分岐方法、ノズル径、ノズル間隔、ノズル数、ガスの導入管と巻き棒との距離、ガス流速、巻き棒の回転数、巻き棒のガス透過穴の大きさ・数・間隔、排気管と巻き棒との距離、排気管に開けるガス透過穴の大きさ・数・間隔などのファクターを変え、反応に適したガス流を形成させるための適正構造を算出する。これを炉設計に反映させて炉の製造を行うだけでなく、反応条件の適正化を行う際にもシミュレーションを用いて効率のよい条件最適化の検討を行う。

ヒーター設計に関しては、研究組合では昭和電線が有するビスマス系複合材料用に大型熱処理炉を設計、作製した知見を有効に使うことができる。大容積を均一に加熱・冷却するためのヒーター材質、ヒーター構造・密度、温度制御機構等の適正化技術に関してはこれまでの実績から算出が可能であるが、ビスマス系複合材料の際には考慮する必要のなかったガス流を確保した上での炉内温度の均一化に関しては、これまで経験のない技術であり、シミュレーションを利用して設計の適正化を図る必要がある。また、本研究ではビスマス系複合材料の熱処理に比べて高速昇温が必要であり、冷却速度も反応上適正な条件とする必要があることから、ヒーター設計時には考慮すべきである。

反応条件の適正化は全長に渡って均一で高い特性を得るために必要である。適正化条件としては、昇温速度、反応温度、水蒸気分圧と水蒸気導入温度、反応時の炉内圧力、反応ガス中の酸素濃度、反応時間、冷却速度等である。これらの条件は、シミュレーションの結果及びこれまでの実績値を元にそれぞれの条件を少しずつ変化させて適正化することが不可欠であり、多くの実験が必要となってくる。

一方、RTR式本焼方式の場合製造速度は遅いが、原理的に長尺複合材料の製造が可能という特徴があり、本プロジェクトにおいて同時に検討を進める。

③成果

③-1 巻棒構造と強度設計

巻き棒構造についてであるが、巻き棒の金属材料として、これまで導入してきたバッチ式炉と同様、ハステロイTM_C-275を採用した。ハステロイTM_C-275は、RE系複合材料の金属基板に

用いられており、熱処理中に、イットリウム系複合材料及び巻き枠が膨張・収縮を起こすため、複合材料及び巻き枠の線膨張係数を合わせる必要があり、その結果、膨張収縮による応力集中を避けることが可能となる。そのような理由から、巻き枠材料をハステロイTMC-275とした。

1,000m 超級の複合材料を処理するにあたり、巻き枠の大型化が必須となり、巻き枠支持方法が課題となる。そこで、これまで採用してきた片持ち支持が可能か否か、応力シミュレーションを用いて検討を行った。図2.1.2-1及び表2.1.2-1に応力シミュレーション結果を示す。

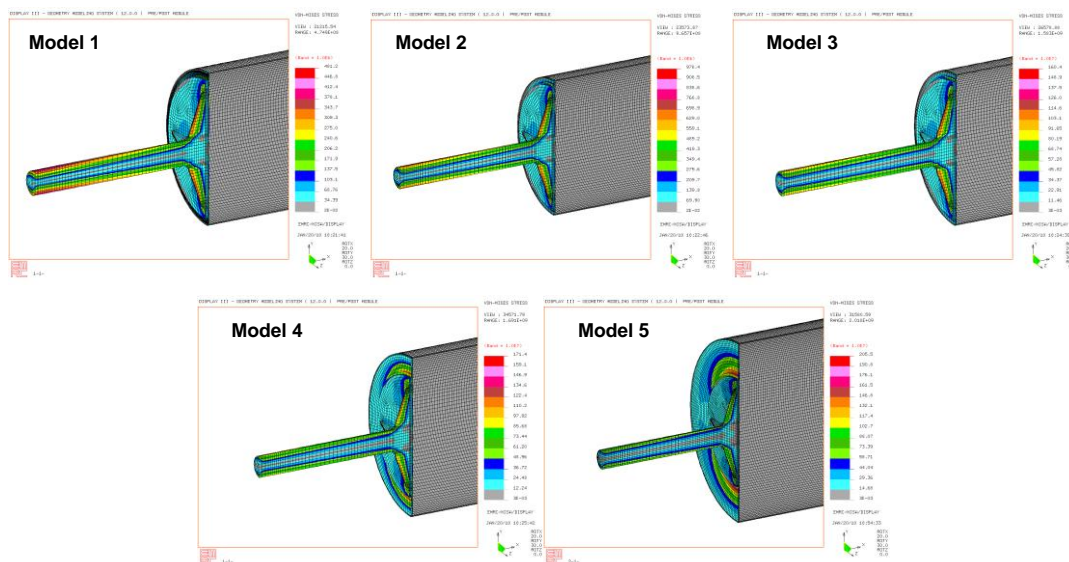


図2.1.2-1 応力シミュレーション結果

表2.1.2-1 巻き枠サイズの応力比較

	Model1	Model2	Model3	Model4	Model5
線材幅 (mm)	5	5	5	5	5
ピッチ (mm)	10	10	10	10	10
線材長 (m)	1000	1500	2000	2000	2000
ドラム径 (m)	1	1	1	1.2	1.5
ドラム長 (m)	3.5	5.3	7	5.8	4.7
最大応力 (MPa)	48	98	160	171	206

* シミュレーションの結果より最大応力は巻き枠の根元に集中

応力シミュレーション結果より、巻き枠の支持を片持ちにした場合、最大応力は巻き枠の根元に集中することが確認された。高温に曝される巻き枠自体に応力集中がないことから、これまでに蓄積された炉設計ノウハウを用いるため、巻き枠は、片持ち支持で設計することとした。

本シミュレーション結果を基に機械設計を行うにあたり、適正な昇温及び冷却速度を実現可能な炉芯管サイズを検討し、巻き枠サイズを割り出したところ、最大径 1,300mm、長さ

4,000mmとなった。本サイズは、5mm幅の複合材料が設計上 1,500m 処理可能なサイズとなる。また、巻き枠を支持するシャフトは、加工性を考慮し耐熱ステンレス(SUS310S)とした。また、本焼温度の高温化に備えてシャフトを水冷構造とした。

図2.1.2-2 に強度計算モデル及び式(1)～(6)に計算式を示す。シャフトは水冷構造であるため、500℃における物性値を用いて計算を実施した。

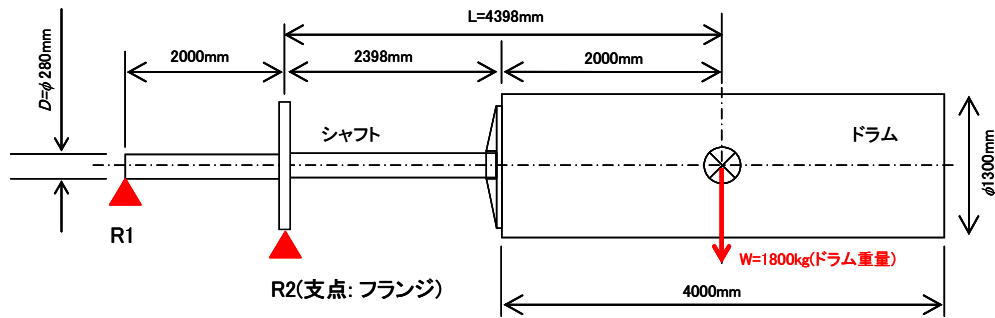


図 2.1.2-2 強度計算モデル

支点でのモーメント(R2)

$$M = 1800\text{kg} \times 439.8\text{cm} = 79.2 \times 10^4 \text{kg} \cdot \text{cm} \quad (\text{式 1})$$

最大たわみ量

* SUS310S のヤング率(500℃) $E = 16,100\text{kg}/\text{mm}^2$

$$\delta = ML^2/6EI = \frac{79.2 \times 10^4 \times 439.8^2}{6 \times 16.1 \times 10^5 \times 30172} = \frac{1.53 \times 10^{11}}{2.91 \times 10^{11}} = 0.53\text{cm} \quad (\text{式 2})$$

断面 2 次モーメント

$$I = \pi D^4/64 = \frac{3.14 \times 28^4}{64} = 30,172\text{cm}^4 \quad (\text{式 3})$$

(1) 巻き枠先端部のたわみ量

$$\frac{4000 + 2,398}{2000 + 2,398} \times 0.53 = 0.77\text{cm} \quad (\text{式 4})$$

(2) 応力計算

$$Z = \pi D^3/32 = (3.14 \times 28^3)/32 = 2155.1 \text{cm}^3 \quad (\text{式 5})$$

$$\delta = M/Z = 79.2 \times 10^4 / 2155.1 = 370 \text{kg}/\text{cm}^2 \quad (\text{式 6})$$

以上の計算結果より巻き枠先端のたわみは 7.7mm、応力は 36MPa となり、SUS310S の 500℃における 0.2%耐力 (143MPa) を下回ることから、巻き枠の片持ち支持は可能となることが確認された。

上述の応力計算等を基に 1,000m 超級本焼炉の設計及び製作を行い、応力シミュレーションを用いて、各温度における実機の巻き枠のたわみ量を確認した。

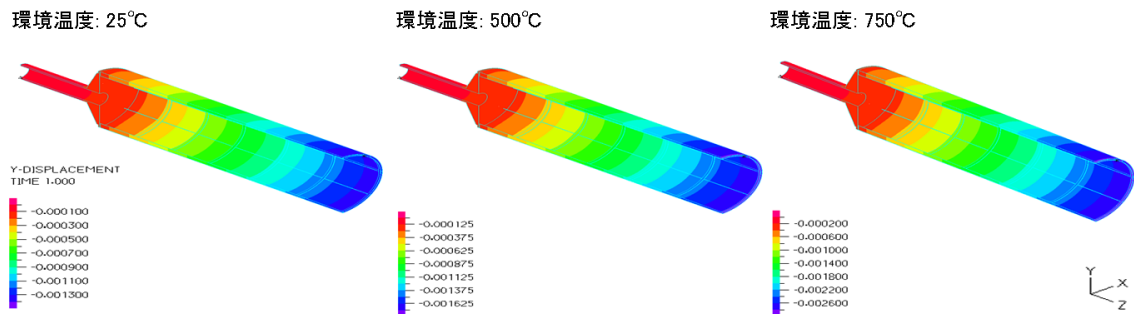


図 2.1.2-3 巻き枠のたわみ量計算モデル

表 2.1.2-2 巻き枠のたわみ量計算結果

環境温度 (°C)	ドラムの厚さ (mm)	シャフト長 (m)	ヤング率 (kg/mm ²)	解析結果 最大たわみ (mm)	実測値 (mm)
25			20,400	2.57	3
500	1.6	2.4	16,100	3.27	—
750			9,874	5.21	—

室温(25℃)でのドラム先端部のたわみ量は 3mm であり、シミュレーション結果とほぼ一致していることから、本焼時(750℃)におけるドラム先端のたわみは 5mm 程度であると考えられる。したがって、今回導入した 1,000m 超級バッチ炉は設計通りの強度でできていることが確認でき、この炉を使用するの運転は問題ないことが確認された。

③-2 ガス導入システムと排気系設計

(1) シミュレーションの方法 (有限体積法の説明)

(1)-1 解析ソフト及び方法

解析では有限体積法を用いた汎用熱流体解析ソフトウェアである FLUENT (ANSYS-Release12.1、ANSYS 社)を使用した。メッシュ作成は GAMBIT(ANSYS 社)を使用した。有限体積法はコントロールボリュームと呼ばれる要素で解析領域を分割し、微分方程式をコントロールボリュームで積分してガウスの発散定理を適用する。

積分形式の保存方程式に基づいている為、衝撃波の様な不連続面で微分が困難な場所でも物理的に矛盾のない解が得られる事や、計算領域の形状に制約がほとんどない事などから流体解析では最も多く利用されている方法である。超長尺大型炉の構造及び各部の名称を図 2.1.2-4 に示す。

(1)-2 解析領域： 超長尺大型炉の概略図を下図に示す。

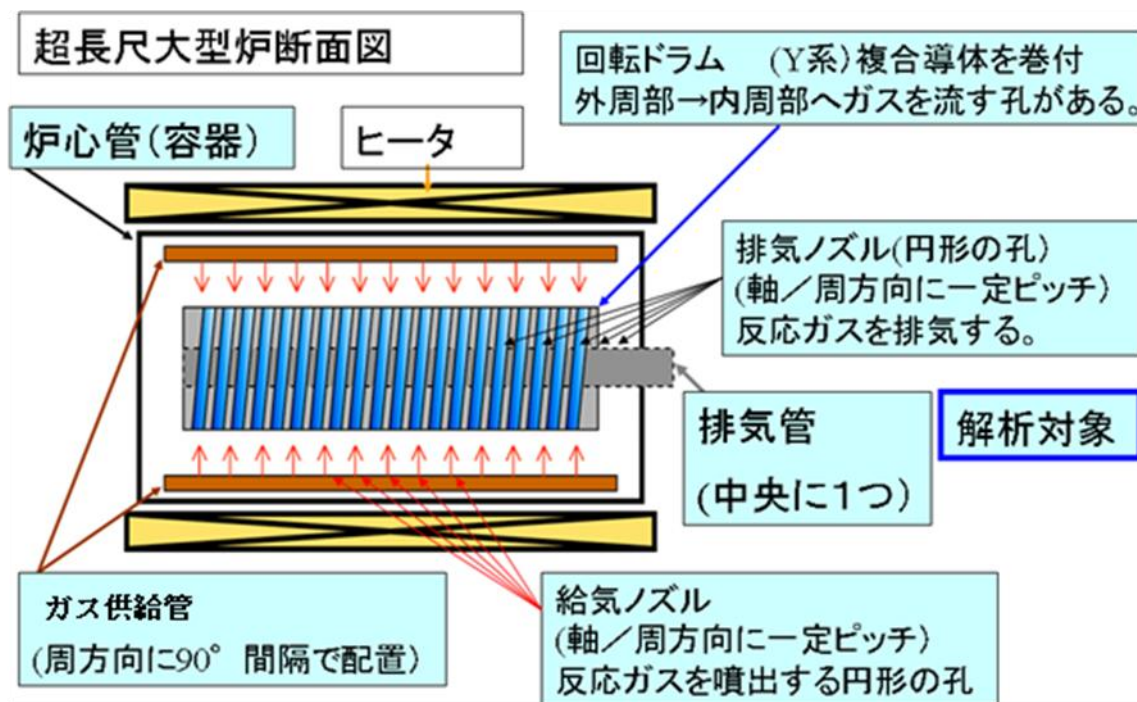


図 2.1.2-4 超長尺大型炉の概略図。

対称性を考慮して出来るだけ小さな領域で解析を実施した。作成したメッシュの例を図 2.1.2-5 に示す。

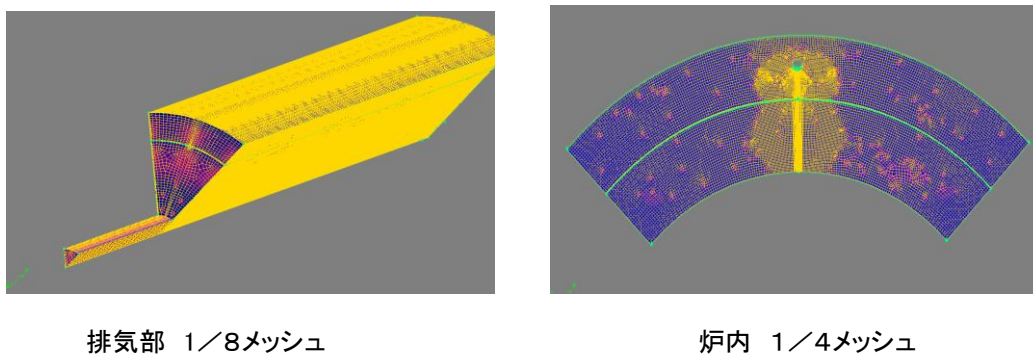


図 2.1.2-5 解析に使用したメッシュの概要

(1)-3 解析条件

解析で使用した標準条件と想定条件は以下の値を採用した

- ・標準条件 圧力 50torr、 流量 500L/Min、 温度 750°C (固定)、
- ・想定条件 圧力 50 ~ 200 torr 、 流量 100 ~ 500 L/Min

(2) ガス供給管形状

(2)-1 実験方法

反応ガスを供給する為に炉内周方向に4つのガス供給管を配置する。ガス供給管の管直径、ノズル直径及びノズルピッチを決定する為に3次元の流れ解析を実施した。

- ・ガス供給管の直径については大きくすれば管内の圧力損失が減少し、ノズルからの噴流速度の均一性が向上するが、空間的な配置上大きすぎることも好ましくない。
- ・ノズル直径については目詰まりのリスク低減等を考慮すると大きい方が望ましいが、一方、噴流の速度や圧力損失を考えるとあまり大きすぎるのも問題がある。
- ・ノズルピッチについても噴流の均一性等を考慮すると適度の間隔が必要である。

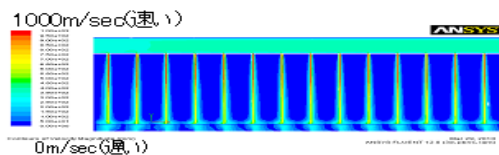
以上の状況を考慮しながら 500m 炉での実績をベースにして検討した。

(2)-2 結果

標準条件でのガスの流速コンター図及び流速グラフを図 2.1.2-6 に示す。

ノズル口から一様にガスが出ている事が確認できる。

・流速コンター図 (拡大)



・ノズル口からの流速分布グラフ

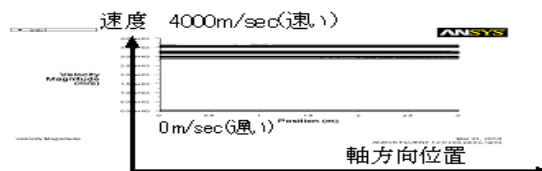


図 2.1.2-6 ガス供給管周辺の流速コンター図

本手法を用いて

ガス管内径 10~40mm、

ノズル径 0.3~1.0mm φ、

ノズルピッチ 10~30mm

の範囲で種々の条件を考慮して検討した結果、

ガス管内径 = 20mm φ、ノズル径 = 0.5mm φ、ノズルピッチ = 15mm に決定した。

(3) ガス供給管と複合材料 (ドラム表面) との距離

(3)-1 実験方法

ガス供給管のノズルから反応ガスが噴流となって複合材料に吹き付けられる。ガス供給管とイットリウム系複合材料の距離が遠いと反応ガスが複合材料に達する前に運動量を失い、反応ガスが複合材料に供給されなくなる。またガス供給管と複合材料が近すぎると、噴流が拡散せず、流れが小さなスポットに集中し、複合材料全体に行き渡らない。ガス供給管と複合材料の距離を変えてガス流速を計算した。

(3)-2 結果

解析結果の一例を図 2.1.2-7 に示す。間隔 80mm 以上になると噴出ガスの運動量が途中で失われ、複合材料に達する際には均一な流れが損なわれる可能性があることがわかった。

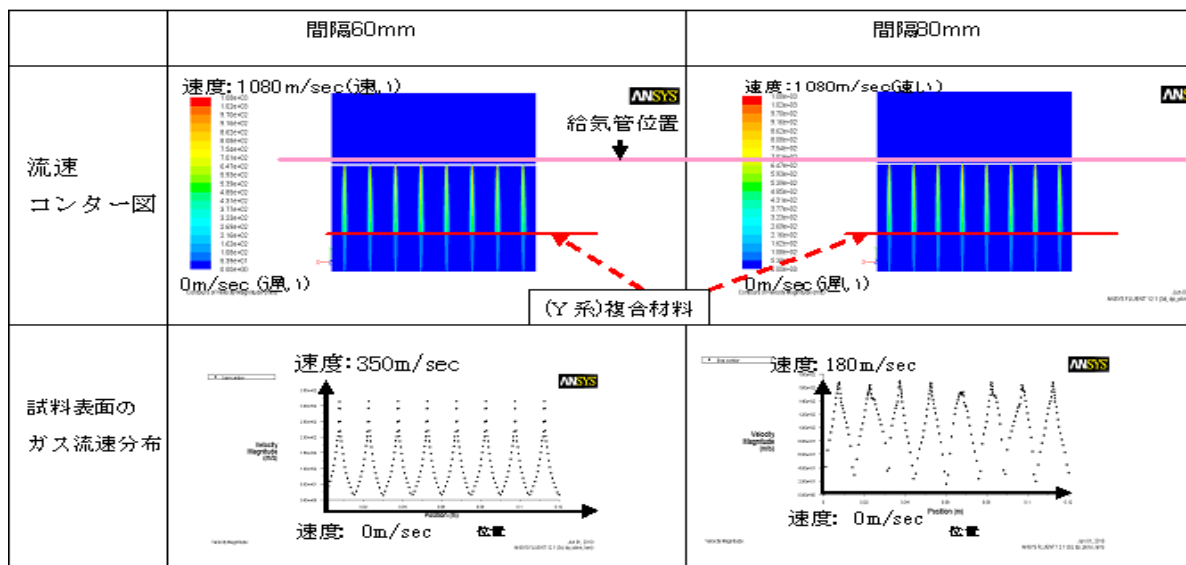


図 2.1.2-7 ガス供給管－複合資料近傍の流速コンター図

本手法を用いて 40～150mm の範囲で検討した結果、間隔は 60mm に決定した。

(4) ドラム開口率と HF ガスの流れ

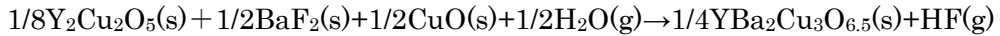
(4)-1 実験方法

・ドラム開口率

供給管からの反応ガスは複合材料に達して一部が化学反応し、HF ガスを発生しながらドラムに開けられた開口部を通って炉の中央部に移動し、排出管から排出される。この様にドラムの開口部はドラム外周部のガスが炉の中央部に移動する流路であると同時に、炉の中央部の相対的に HF リッチなガスが外周部に還流する流路でもある事が解析の結果判明した。ドラム開口率が大きいと炉内のガス流が活発になるが、HF ガスが逆流することにもなり必ずしも好ましくない側面がある。最終的には反応生成ガスである HF 濃度が複合材料の存在するドラム外周部で低いことが望ましい条件である。ドラムの開口率を変えてガスの流れを計算した。

・HF ガスの流れ

供給管から供給される水は複合材料と接触する事で反応し、その結果、HF ガスが発生する。



フィルム表面反応は“野本モデル”を使用して評価した。

(4)-2 結果

シミュレーションの結果を図 2.1.2-8 に示す。

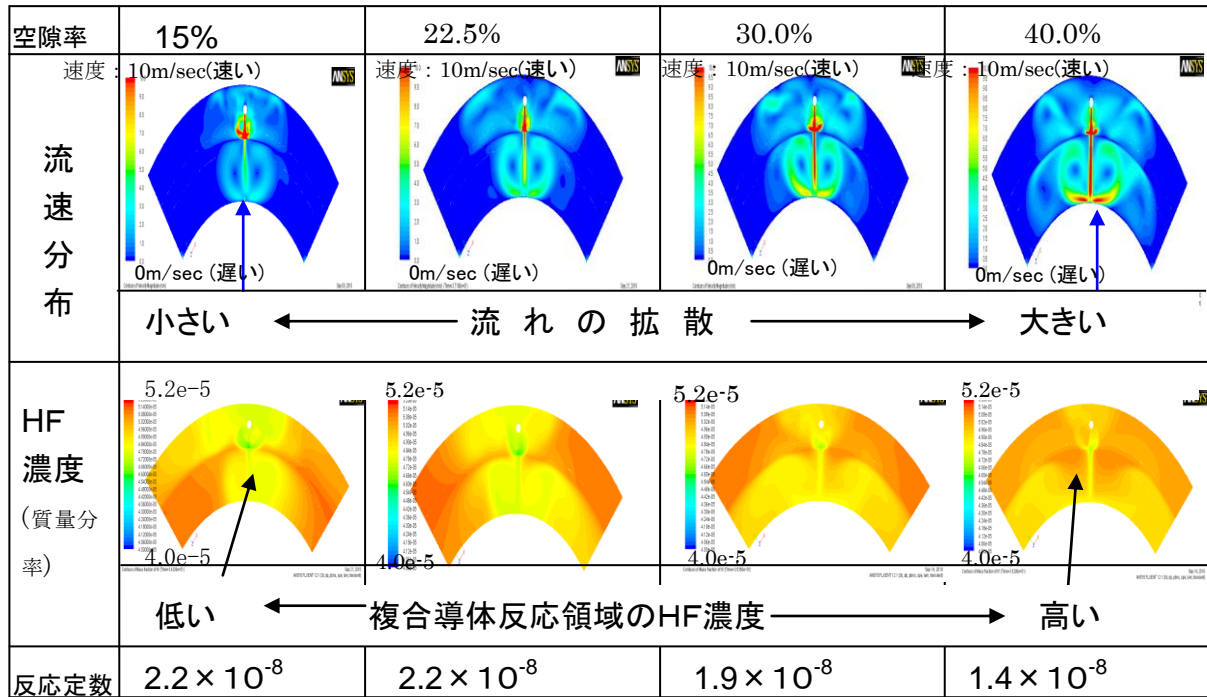


図 2.1.2-8 ドラムの開口率による流速及び HF 濃度分布の違い

ドラムの開口率が大きい場合にノズル直下では効率的に外周部のガスが排出されるが、排気ノズルで排出しきれないガスが還流して外周部の HF ガスの濃度が高くなる傾向が見られる。開口率が小さい場合は外周部の HF ガスの濃度は低くなり、相対的に良好な結果が得られる。ドラムの総合的な開口率はドラムに巻き付けるイットリウム系複合材料の巻付率によっても変化するが、1000mをドラムに巻きつけた場合には、開口率は初期の 67%に減少する。これらの条件を加味して開口率 15~40%の範囲で検討した結果、最終的にイットリウム系複合材料を貼り付けない状態での開口率を 22.5%とした。

(5) ガス排気管と複合材料（ドラム表面）との距離

(5)-1 実験方法

反応ガスが複合材料に吹き付けられた後に反応生成物である HF ガスが発生する。この HF は超電導層の生成を阻害するので速やかに排出されることが望ましい。反応ガスは複合材料が巻きつけられたドラムを通った後、排気管に設けられた排気ノズルから排出される。複合材料

(ドラム表面) と排気管の間隔が長すぎると炉内での滞留が大きくなる。ドラム表面と排気管の間隔が短すぎると排気ノズルで排気しきれないガスが複合材料に跳ね返るので適切な間隔が存在する。ガス排気管と複合材料との距離、すなわち、排気管の外径を 1100mm φ、1000mm φ、900mm φ と変えてガスの流れを計算した。

(5)-2 結果：ガス排気管径を変えた場合のガス流速のコンター図と流線図を以下に示す。

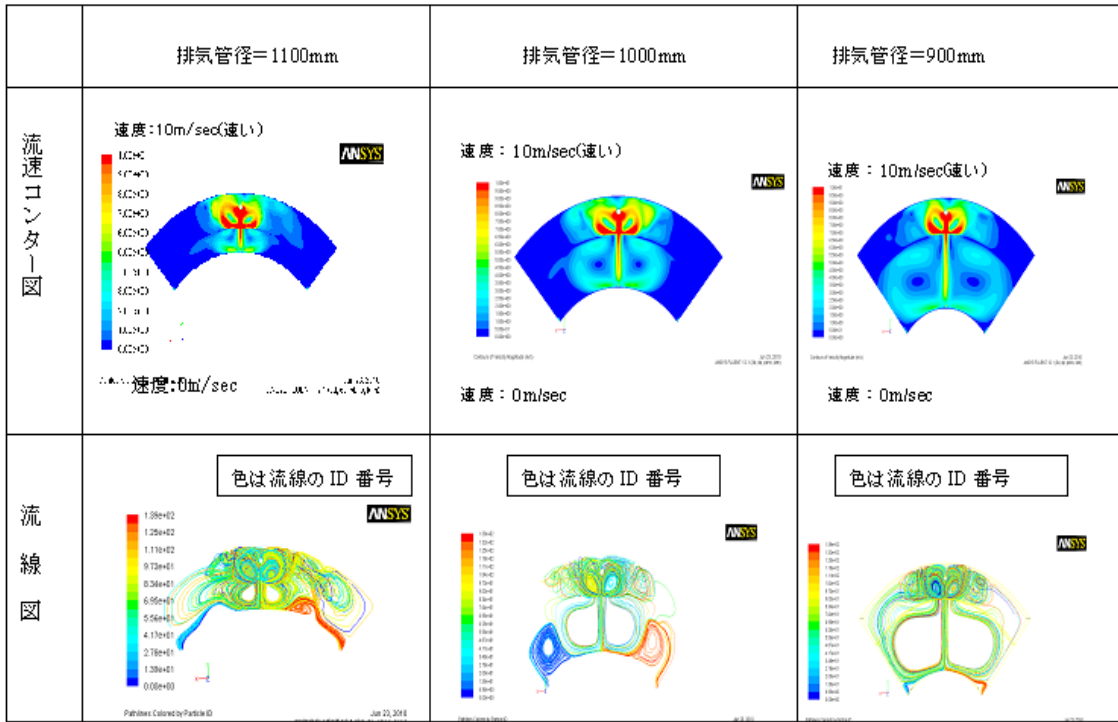


図 2.1.2-9 ガス排気管による流れの変化

900mm φ、1100mm φ とともに複合材料の近傍に HF ガスが滞留する傾向が確認される。もっともガス滞留の少ない 1000mm φ を採用することにした。

(6) 排気管の形状

(6)-1 実験方法

炉の内周側のガスは排気管に周方向、径方向に設けられた排気ノズルを通して均等に排出されることが望ましい。排気の流れが均等でないと複合材料の特性にばらつきが発生する可能性がある。排気ノズルの径が大きすぎるとガスが一部のノズルに集中して流れる事になる。排気管の径、排気ノズルの径及び排気ノズルのピッチを決定する為に、これらの値を変化させて排気部の流れを計算した。

(6)-2 結果

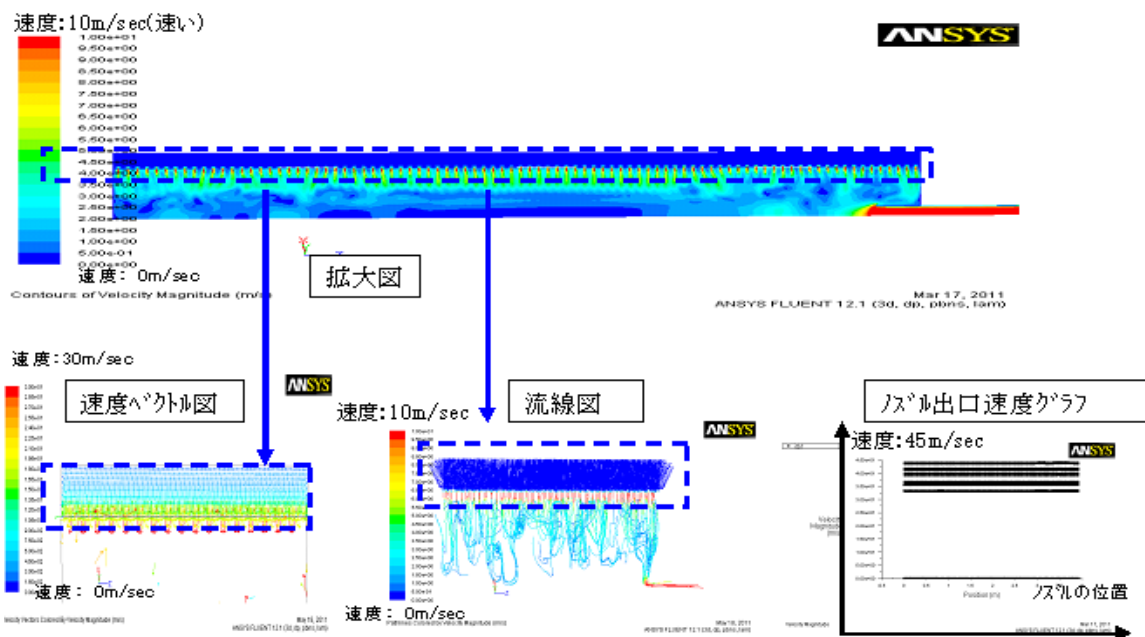


図 2.1.2-10 排気管部のコンター図

本手法を用いて、排気管径 900～1000mm φ、排気ノズル径=3～10mm φ、排気ノズルピッチ 15～60mm 間隔の範囲で、排気量を変化させてガスの流れを検討した結果、排気管径=1000mm φ、排気ノズル径=5mm φ、排気ノズルピッチ 45mm 間隔で周方向に 45° 間隔で 8 箇所ノズルを設けた場合に、ガスが均一に排出される事を確認した。

(7) 炉心管と供給管との距離 (炉心管と複合材料との距離)

(7)-1 実験方法

炉心管と複合材料間 (ドラム表面) の領域は、供給管からの反応ガスが複合材料と反応して発生する HF ガスが混合して存在する領域である。特に炉心管と供給管の間の領域は空間的なデッドスペースである。反応して発生した HF ガスが速やかに排出される事が理想である。炉心管と供給管の距離を変化させた場合の流れの状況を確認する。

(7)-2 結果

炉心管と供給管との距離が長すぎる場合は、炉心管と複合材料間の領域の流れが全周上に拡大する。一方、炉心管と供給管との距離が短くなるにつれて複合材料と排気管の間の領域に速やかに排出される事が確認できる。この結果反応生成ガスである HF ガスが相対的に容易に中心部に排出される事が予想される。

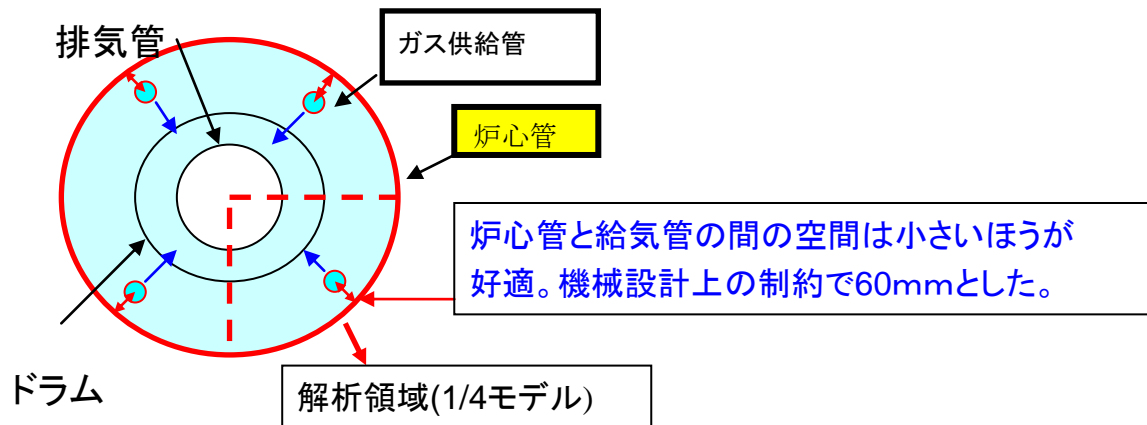


図 2.1.2-11 炉心管径の影響の解析モデル

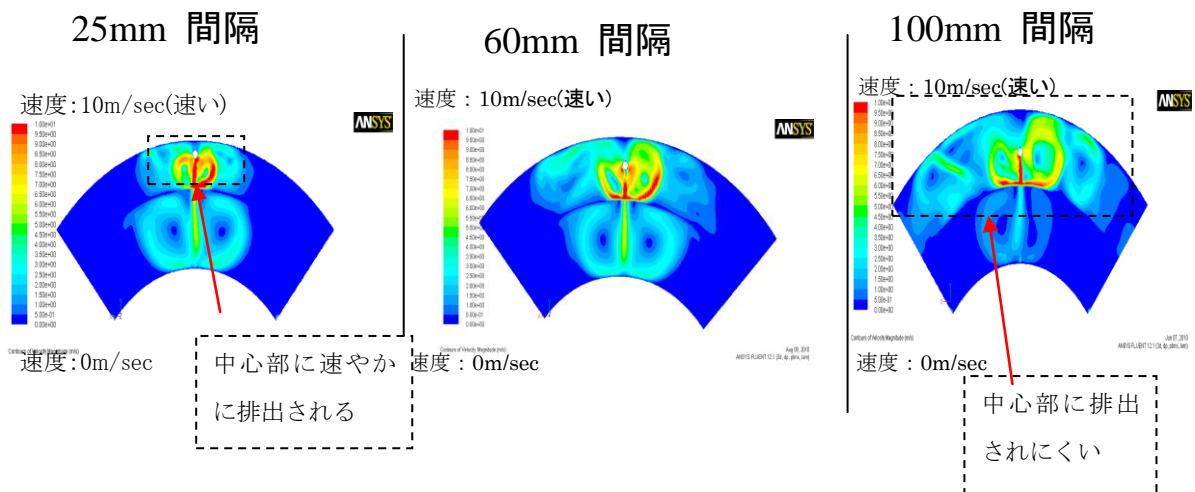


図 2.1.2-12 炉心管径と速度コンター図

解析では 25～100mm 間隔で検討した。炉心管と供給管との距離は短い方が良いが実際には構造や配置等の問題があり、過度に短くする事は出来ない。この様な制約から実際の距離は 60mm とした。

③-3 炉内温度分布

昭和電線が「超電導応用基盤技術研究開発（第Ⅱ期）」において TFA-MOD 法を用いた線材開発を行なってきた中で、これまでに、200m 級、500m 級の長尺複合材料を本焼するために、バッチ式炉を導入した。各々の本焼装置の炉内温度分布は $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ 以内に抑えられており、同程度の温度分布を持った炉であれば、長尺複合材料の本焼が可能であることが実績として分かっている。そこで、本プロジェクトにおいて導入した 1,000m 超級の炉においても炉内温度分布 $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ 以内を目標に、温度制御分割数等を最適化した設計を行った。

設計の結果、ヒータは 26 分割とし、制御を 13 ゾーンとした。図 2.1.2-13 の炉内模式図にヒータ配置を示す。

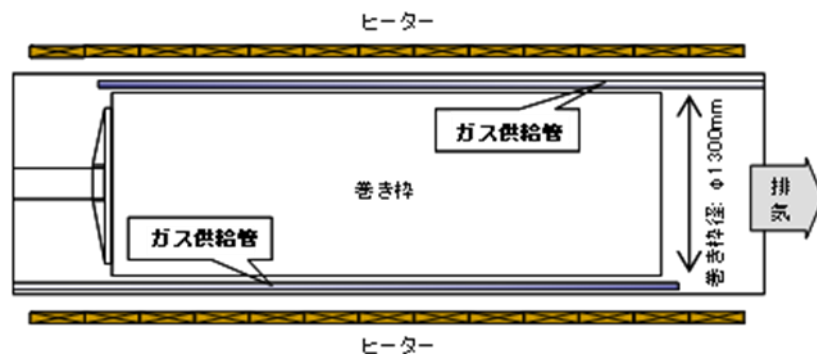


図 2.1.2-13 1,000m 超級バッチ炉炉内模式図

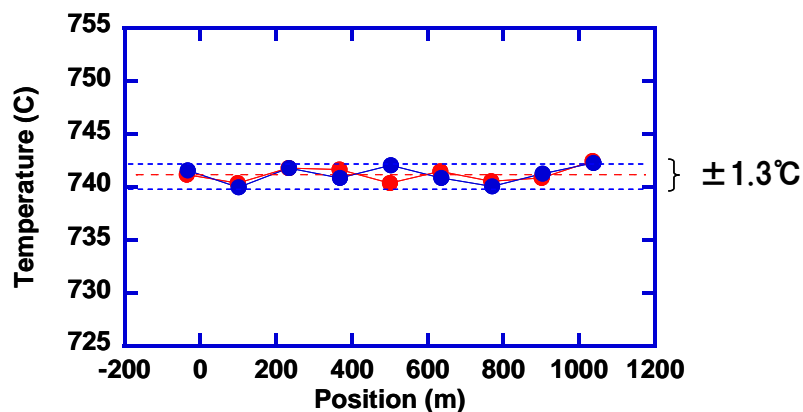


図 2.1.2-14 1000m 超級バッチ炉の炉内温度分布

*図中●は炉上側●は炉下側を示す。

K 熱電対を巻き枠上下表面に設置し、炉内圧力 50 torr、ガス流量 500 L/min、水蒸気分圧 1.7vol%の条件下においてホールド時の炉内温度分布測定を実施した。炉内設定温度は 740°C とした。測温結果を図 2.1.2-14 に示す。図中の横軸「Position」は、複合材料 1,000m を巻き枠に巻いた時の位置を示している。

図から判るように、各位置における巻き枠表面の温度分布は±1.3°Cに抑えられていることが判る。この結果より、本焼成時の炉内温度は設計通りの分布が得られたことが判った。これにより、長尺複合材料本焼時には必須である炉内温度分布について目標が達成された。

③-4 炉内酸化処理

実験方法

バッチ式本焼炉は、ガス導入管、ガス排気管、炉芯管、巻き枠等の各パーツにハステロイ™等の耐熱金属を用いている。そのため、炉運転当初は、雰囲気ガスに含まれる酸素と反応し、酸化皮膜を形成する。併せて、各パーツを構成する元素のうち、Mo は各パーツ表面で酸化皮膜を形成し、安定するまで表面に移動する。一部の酸化皮膜は剥がれて本焼時巻き枠に

接触している複合材料の表面に付着し、絶縁膜を形成するため、安定化銀層と複合材料との間に入り込む形となり、複合材料に電流を流し込むことが出来なくなる現象が起こる。したがって、前述の2点の問題を解決するため、長時間炉内の酸化処理を必要とする。

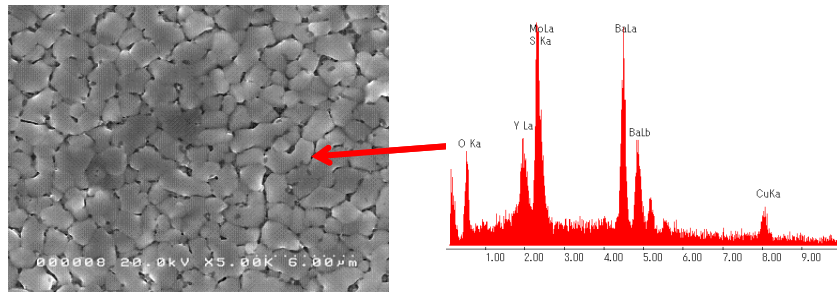
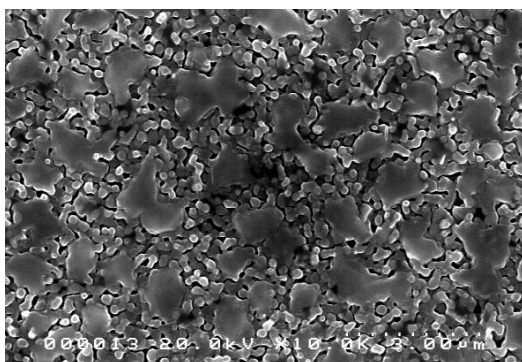


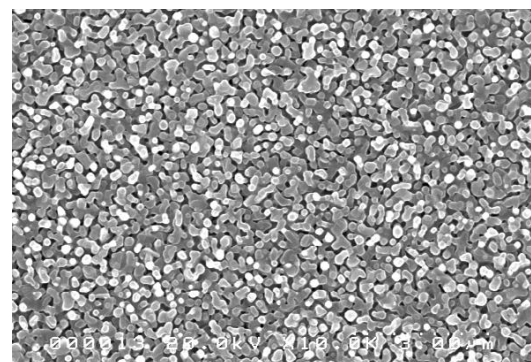
図 2.1.2-15 運転初期の複合材料表面写真(SEM)及び元素分析(EDX)結果

図 2.1.2-15 に運転初期の複合材料表面写真(SEM)及び元素分析(EDX)結果を示す。図から判るように、Mo 元素を含有した結晶粒が複合材料表面に一様に付着していることが判る。

更に、熱処理を実施し、線材表面の経過観察を実施した。図 2.1.2-16 に 100 時間及び 200 時間後における複合材料表面写真を示す。また、図 2.1.2-17 に酸化処理後の巻き枠表面写真を示す。



(1) 酸化処理時間 100 時間



(2) 酸化処理時間 200 時間

図 2.1.2-16 各酸化処理時間における複合材料表面写真(SEM)

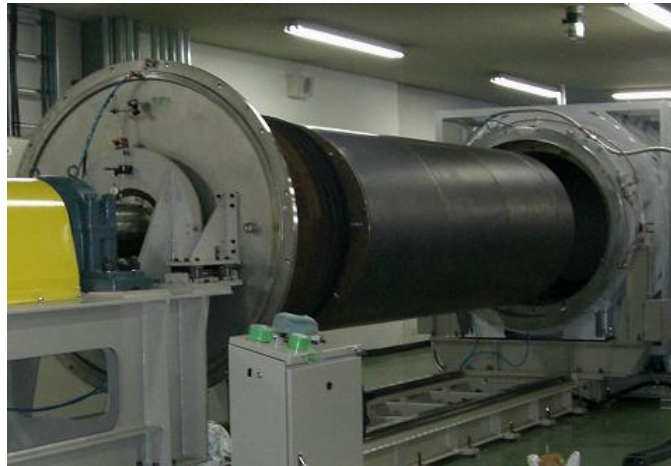


図 2.1.2-17 酸化処理後の巻き枠表面

図 2.1.2-16 から、100 時間熱処理試料では比較的大径の Mo 元素を含有した結晶粒が減少し、200 時間熱処理を実施することにより、Mo 元素を含有した結晶粒の付着は無くなっている。これにより、各パーツの表面が酸化皮膜で覆われ、安定したことが示唆される。併せて、図 2.1.2-17 に示した酸化処理後の巻き枠表面写真からも、巻き枠表面が酸化皮膜で覆われたことが判る。

③-5 本焼試験

試験試料には、Hastelloy™ C-275/MgO-IBAD/CeO₂-PLD/YBCO-MOD(Cu-Oct) を用いた。ダミーテープによる本焼試験においては、ホールド時間及び酸素濃度について最適化を行った。ダミーテープによる 本焼試験結果を図 2.1.2-18 に示す。

実験は、ホールド時間を 3 時間とし、酸素濃度を 2,000、3,000ppm として実施した。本焼温度及び水蒸気分圧については、小型炉で事前に最適化した結果(本焼温度 730℃、水蒸気分圧 1.7vol%)を用いている。また、ガス流量は総量で 500L/min とした。図から判るように、ホールド時間 3 時間、酸素分圧 3,000ppm において、殆どの位置で $I_c = 300\text{A/cm}$ 幅を得ることが確認された。しかしながら、均一性については改善が必要であり、ガス流速増加等の本焼条件の最適化が今後の課題である。

本焼条件の最適化は継続中ではあるが、ダミーテープによる本焼試験の結果、1,000m 超級バッチ炉での本焼が可能と判断されることから、10m 長連続複合材料を用いた本焼試験を実施した。本焼条件についてはその後も試作を繰り返し、最終的に本焼温度 740℃、ホールド時間 7 時間、酸素分圧 2,000ppm、水蒸気分圧 1.7vol% を用いた。図 2.1.2-19 に 10m 長連続複合材料の臨界電流分布を示す。測定は RTR 式連続 I_c 測定装置を用い実施した。図に示すように 10m 長にわたり 300A/cm 幅(@77K、自己磁場)以上の I_c が得られた。最小値は 306A/cm 幅(@77K、自己磁場)、最大値は 335A/cm 幅(@77K、自己磁場)、平均値は 326A/cm 幅(@77K、自己磁場)であり、End-to-End で 308A/cm 幅(@77K、自己磁場)であった。

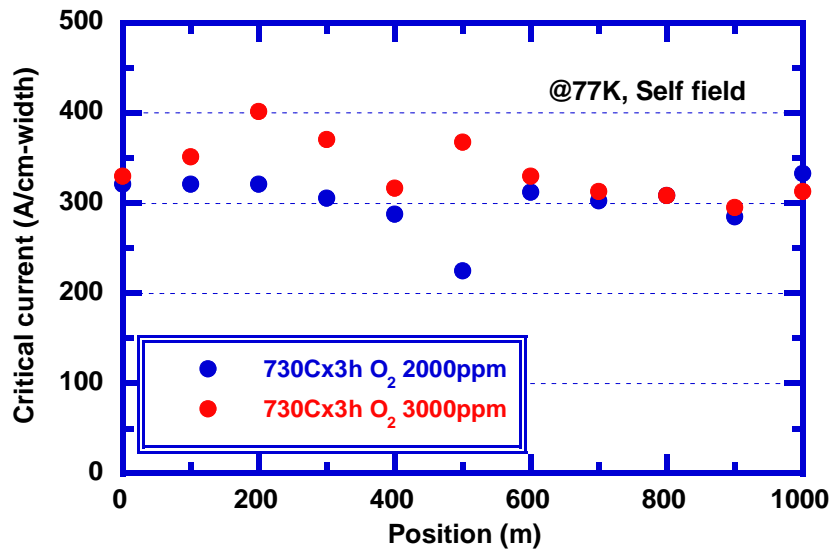


図 2.1.2-18 ダミーテープによる 1,000m 級線材の臨界電流分布

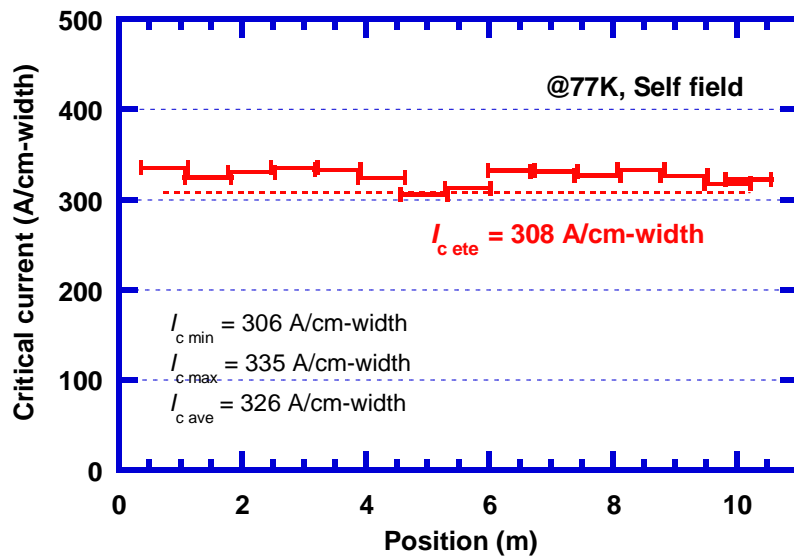


図 2.1.2-19 10m 長連続複合材料の臨界電流分布

③-6 RTR 式本焼検討

上述したバッチ式本焼プロセスは、炉の大きさにより処理可能な複合材料長さが限定される。また、焼成時間の短縮が進んだ場合にも、炉の昇温・降温によりプロセス時間が規定されるため、長尺化の手段の一つとして RTR 式の本焼炉を設計・製作・検討した。

(1) アプローチ

バッチ式焼成炉とほぼ同等の焼成速度が得られることと、十分高い特性が得られること、

今後の技術開発により必要な焼成時間が短縮されることへの対応も可能なように、必要なゾーン数を求め、炉長、ガス流量、圧力、線速など、各種仕様を計算した。仕様に従い、装置を製造し、本焼実験に用いてプロセスの妥当性を検証した。

(2) 結果

線材の焼成速度として、バッチ式と遜色ない 20m/h を多条で達成することを想定し、一本あたりの実線速を 5m/h、必要な焼成時間を、研究組合の一員である ISTEK の RTR 焼成条件から 1 時間とし、炉長を 5m とした。1 時間で焼成が終わる焼成条件を実現するため、ガス流量、ガスの吹き出し／排出の穴径およびピッチを求め、仕様を決定した。主な仕様を下記に示す。

- ・加熱温度 常用 500～800℃ 最高 900℃
- ・温度分布 800℃ ±5℃
- ・炉芯管 100W x 80H x 5392Lmm (ハステロイ™ +SUS310S)
- ・雰囲気ガス N₂+O₂ (1%)、0～50L/min (10 台)
- ・複合材料長さ 1000m 以上
- ・テープ搬送速度 1～20m/h

仕様に基づき作製された RTR 本焼炉の外観写真を図 2.1.2-20 に示す。



図 2.1.2-20 RTR式本焼炉外観

装置の炉内温度分布測定結果を図 2.1.2-21 に示す。炉内 2700mmL の範囲で±4.5℃を達成しており、仕様を満たしていることを確認した。

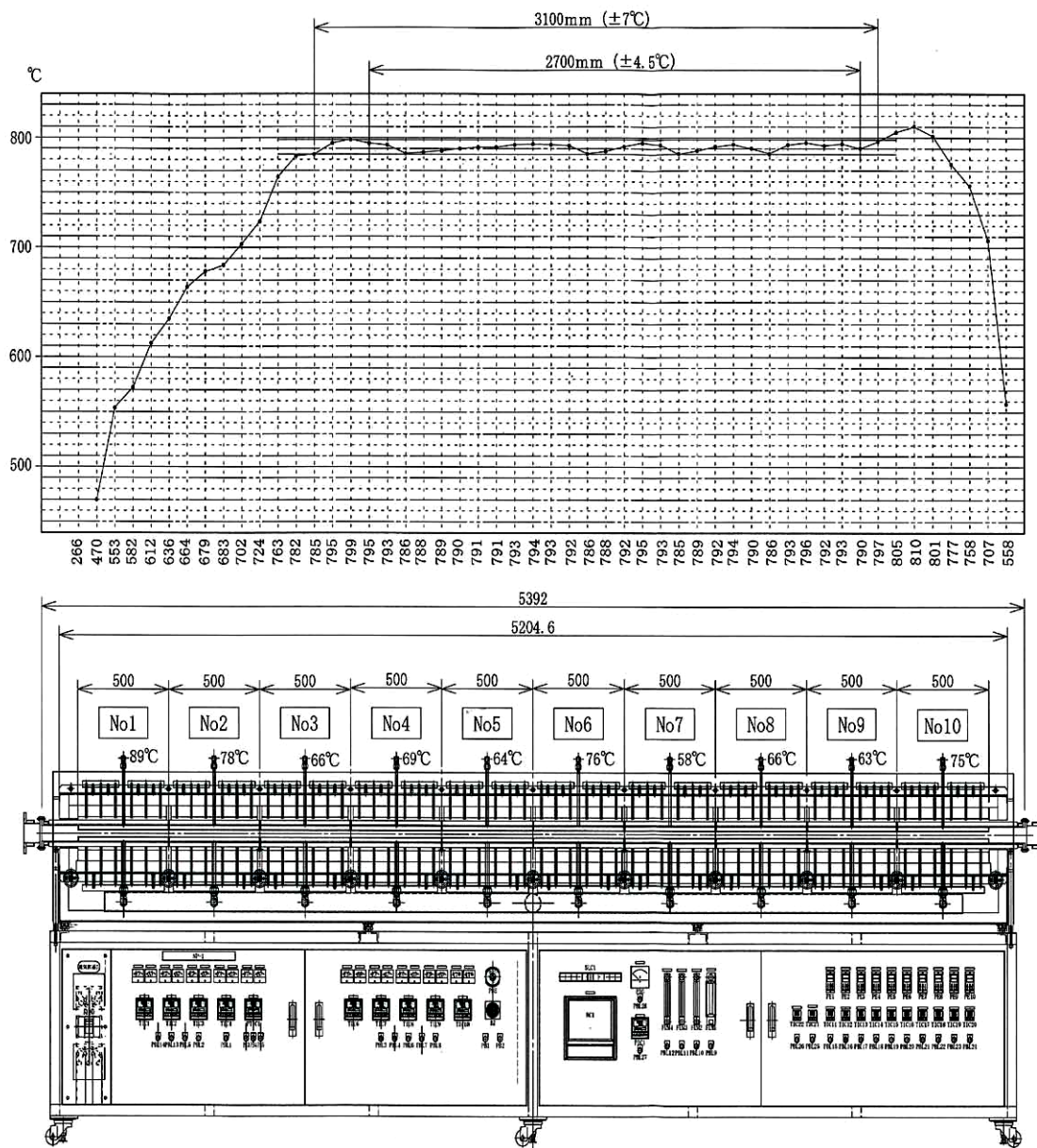


図 2.1.2-21 RTR式本焼炉 炉内温度分布

RTR式本焼炉に別途製作した短尺サンプルを挿入し熱処理した。熱処理条件は以下に示す通りである。

- ・温度 T_{max} 790°C
- ・テープ送り速度 3m/h
- ・圧力 50Torr
- ・ガス流量 200L/min (N_2 :200L/min O_2 : 1L/min)
- ・露点 60°C

焼成したサンプルの XRD 測定結果を図 2.1.2-22 に示す。強い強度でc軸配向した YBCO のピークが検出されており、試料の殆どはエピタキシャル成長した YBCO であることが確認された。検出された BaF₂、a 軸配向相のピーク強度は弱いため、適正な焼成条件に近いと言える。今後、適正な条件で本焼することにより 300A/cm 幅@77K、自己磁場が達成できると考えられる。

長尺化の見通しとしては、装置が小さく、条件の均一化、保持が容易であるため、リーズナブルなプロセス時間内に焼成が終わるための、製造速度の向上が課題となる。今回の結果では 3m/h での実験で焼成が不十分という結果であったが、ガス流量、全圧、露点温度などの最適化により線速の向上が可能である。ガス流量の最大が 50L/min×10ゾーン=500L/min で、今回はそのうち半分にも満たない 200L/min の使用であるなど、装置能力としてはまだ余裕を持っているため、必要な焼成速度と特性を両立する適正な焼成条件の確立は十分可能であると考えられる。

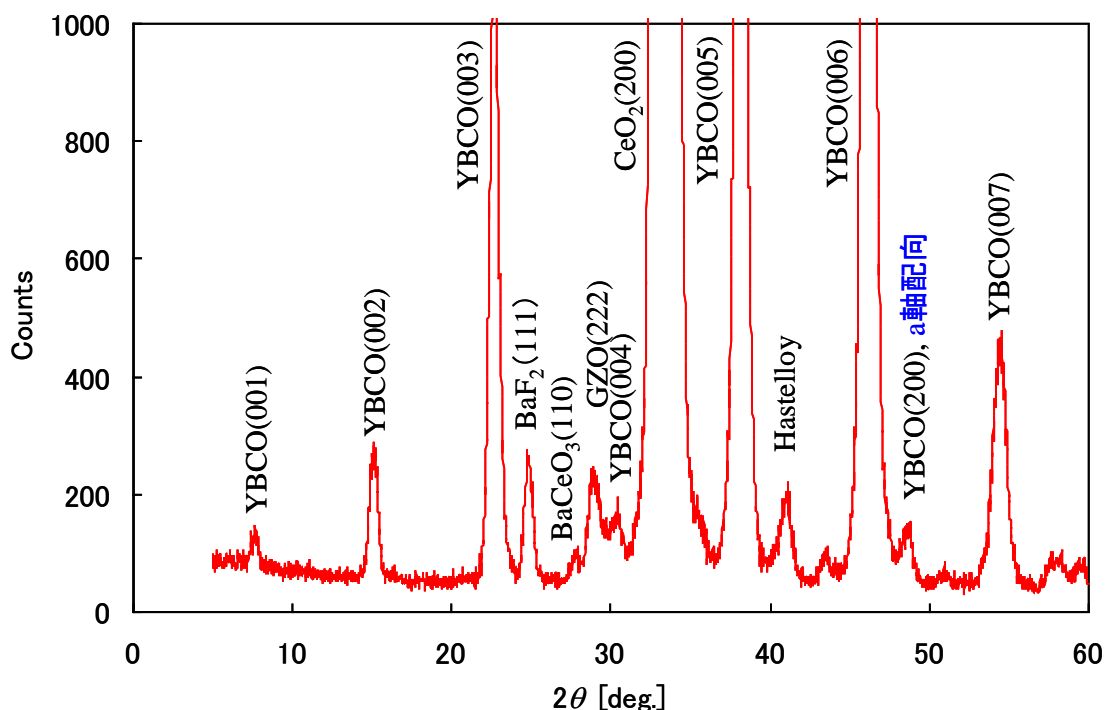


図 2.1.2-22 XRD 測定結果

設計仕様を満足する温度分布、ガス流量を得ることができ、短尺での焼成試験の結果、主にc軸配向超電導層が生成していることを確認できた。今後、本焼条件を適正にすることにより、300A/cm 幅以上 (@77K, 自己磁場) を達成することが可能であると判断でき、且つ、装置能力と今回の結果を併せ、長尺化の見通し (1000m 平均で 200A/cm 幅以上 (@77K, 自己磁場)) を得た。

③-7 臨界電流分布測定装置の開発

九州大学で開発される特性及び局所欠陥評価を行う技術を適用した装置を導入し、この技術も含めて種々の評価を行い、作製プロセス開発を促進する。

(1) アプローチ

九州大学で開発する技術（2.1.2-2 項で詳述）を適用した装置を相模原分室・通電特性評価装置内部に設置し、長尺複合材料全長にわたる特性評価・欠陥検出を行う。

(2) 結果

今回導入した九州大学で開発した技術を適用した装置の主要諸元を以下に示す。また、装置外観を図 2.1.2-23 に示す。

- ・ 解像度
長手方向評価速度と幅方向評価速度と測定周波数により可変
典型例：長手方向評価速度が 36 m/h、
幅方向評価速度が 10 回/秒、
測定周波数が 10000 回/秒の際に
長手方向解像度が 1 mm、
幅方向解像度が 40 μm
- ・ 長手方向評価速度 ~36 m/h
- ・ 幅方向評価速度 ~10 回/秒
- ・ 測定周波数 ~10000 回/秒

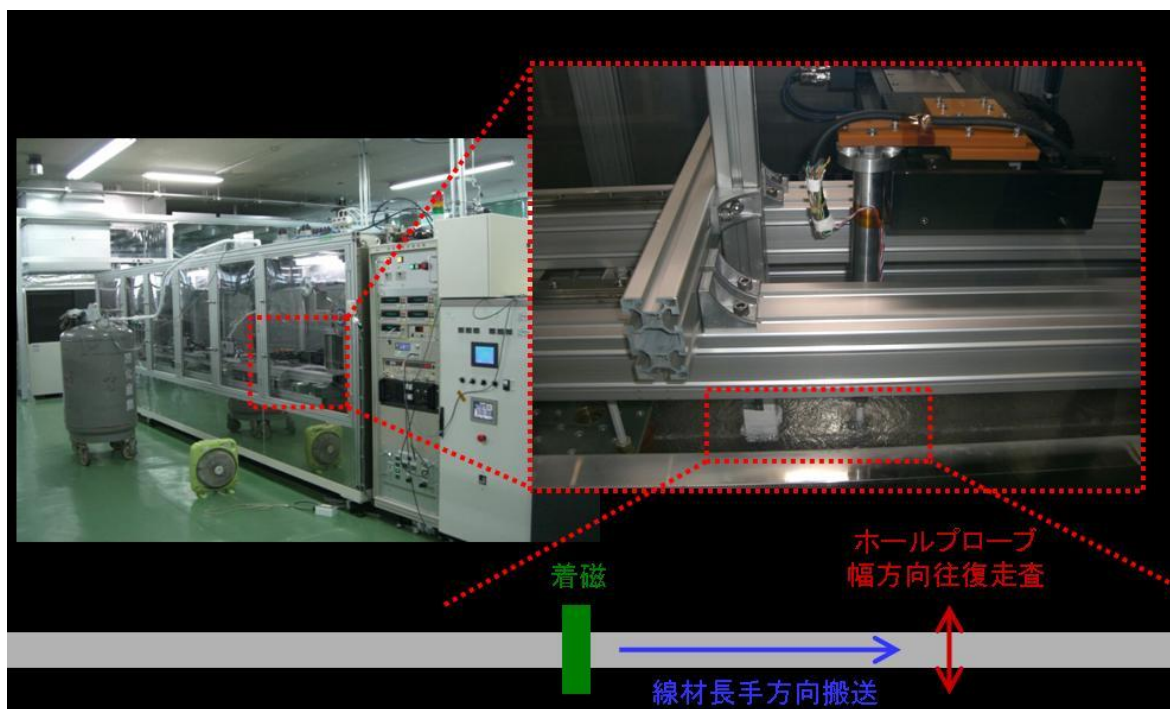


図 2.1.2-23 臨界電流分布測定装置

複合材料開発初期の段階において本装置を用い作製試料の長さ方向、幅方向の特性分布を調査した。その結果を図 2.1.2-24(a)に示す。線幅は 5mm で色の分布は特性の分布を示す。同図において明らかなように、本試料においては全体的に臨界電流密度が低く、比較的大きな分布があることが分かった。分布の状態から仮焼膜を形成する時点で不均一と本焼プロセスでのガス不均一に起因していると推定できたことより、膜厚を一定にするために溶液を塗布仮焼する時点での作製条件を変更（具体的にはライン速度を 10m/h から 8m/h に低減させる等）を施すことに加えて、本焼熱処理における水蒸気ガスの供給条件（圧力、流量等）の検討を施した。これらの検討の結果得られた複合材料を本装置で調査した結果を図 2.1.2-24(b)に示す。開発初期の段階で得られた結果に対し均一で且つ高い電流密度の得られていることが分かる。

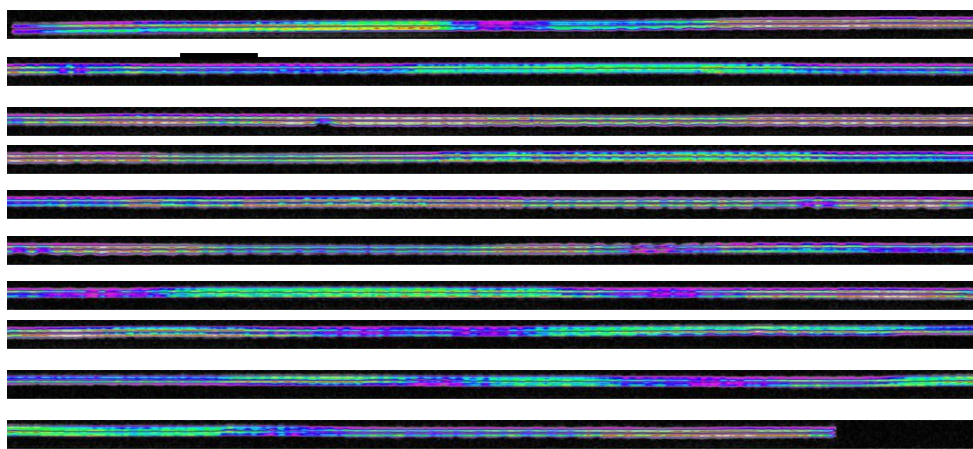


図 2.1.2-24(a) 開発初期に作製した複合材料中の臨界電流密度分布

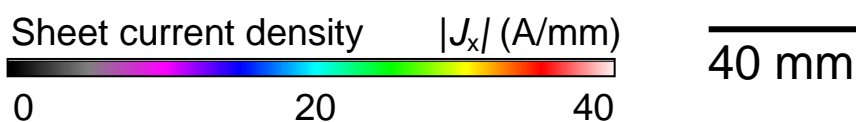
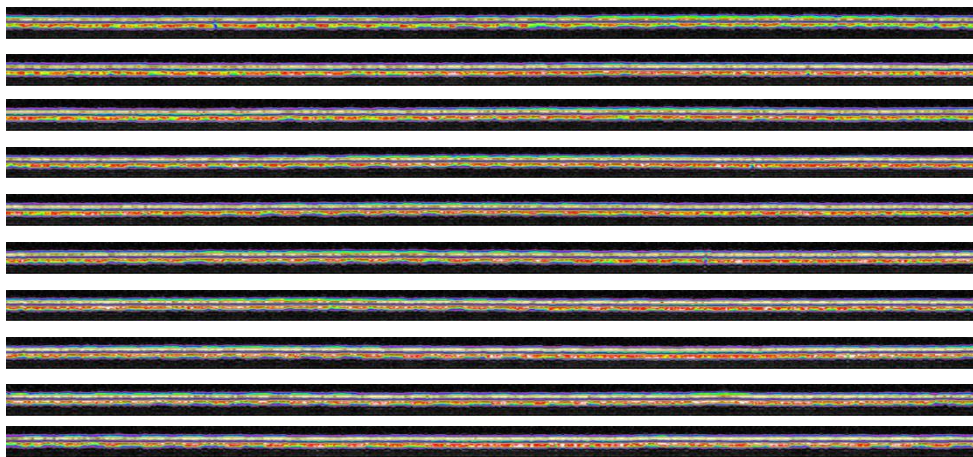


図 2.1.2-24(b) プロセス条件適正化後の複合材料中の臨界電流密度分布

次に、上記プロセス条件適正化の知見を反映させて相模原分室で作製した 10m 長の TFA-MOD 複合材料の評価を行った。測定条件は測定速度 16 m/h、測定周波数 2000 回/sec、空間分解能幅方向 40 μ m、長手方向 2.2 mm で実施し、図 2.1.2-25 に示す結果を得た。同図より全域に亘って均一な臨界電流密度特性が得られていることがわかる。本複合材料は End-to-End 特性で 300 A/cm 幅以上の臨界電流特性を示しており、開発目標を達成しており、本評価技術が目標達成に貢献した。

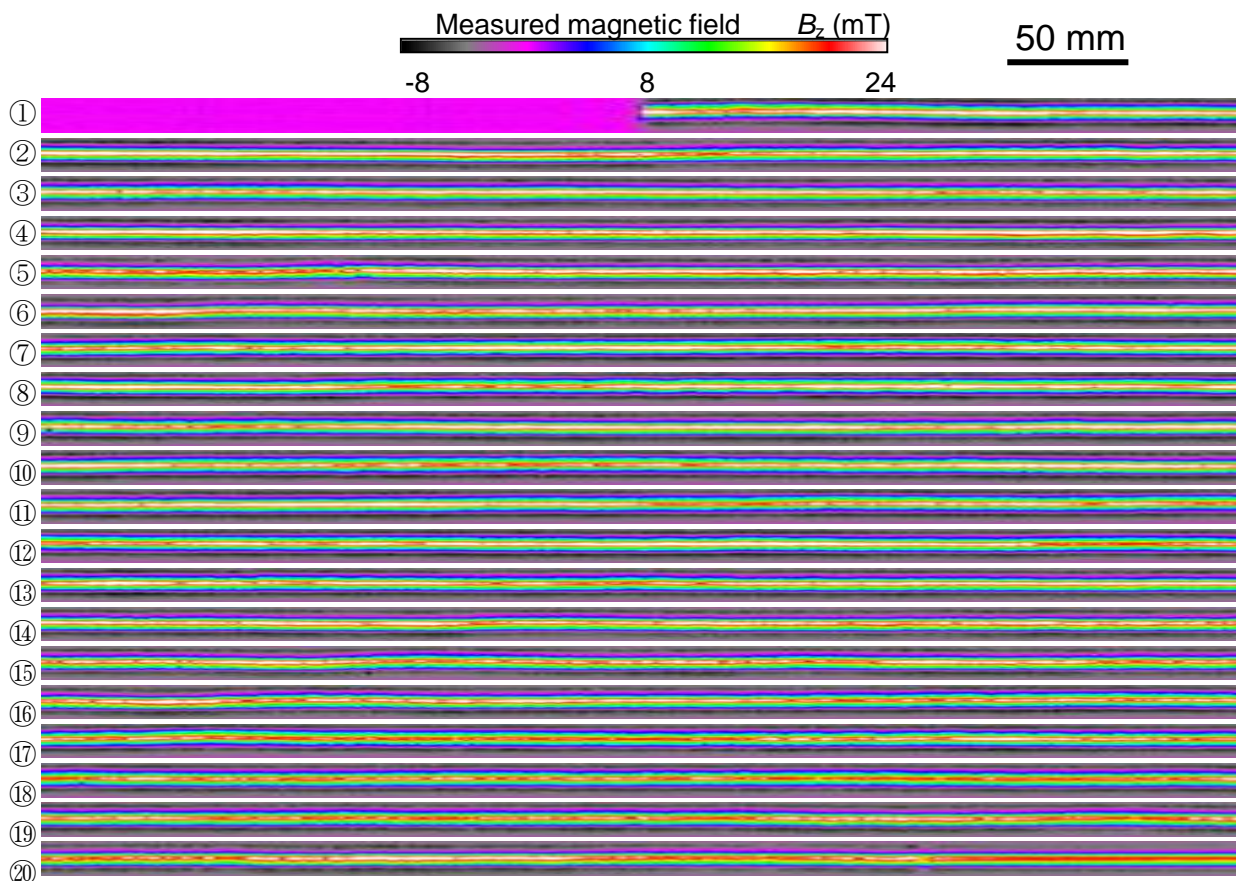


図 2.1.2-25 臨界電流分布測定装置測定結果（10m長試料）

以上により、複合材料から得られる情報を解析することで、原因の究明と対策の検討が可能となり、複合材料作製プロセスに即座にフィードバックでき、更に、対策の実施と効果の相互関係も容易に確認可能となり、作製プロセスの開発が促進された。

2.1.2-2 長尺複合材料の評価技術（九州大学）

①背景及び目的

超長尺複合材料プロセス開発においては、全長に亘る特性評価・欠陥検出が必須となるが、評価が律速とならないような評価速度と、特性劣化部を mm 以下のサイズで検出できる検出分解能とを両立させる必要がある。そこで、これらの条件を満足し得る評価技術として、磁気顕微法を用いた特性及び局所欠陥の評価技術開発を行い、小型装置を用いた原理検証と基礎データの収集により要素技術を開発するとともに、長尺複合材料評価装置を開発する。開発された評価装置により得られる結果を複合材料作製プロセスにフィードバックすることにより、作製プロセス開発を促進することを目的とする。

②課題とアプローチ

ホール素子を用いた磁気顕微法によれば、対象とする複合材料内の電流分布を可視化することができる。特に、同材料に十分に高い磁界を印加した際、あるいはその後に磁界を除去した際には、臨界電流密度分布が得られる[1]。また、典型的な分解能としては 100 ミクロン程度が見込まれる[1]。すなわち、磁気顕微法は、複合材料の特性を非破壊かつ定量的に把握する手法として有効であり、欠陥検出に必要な空間分解能も満足する。

一方、本手法の評価速度は、a)ホール素子の走査速度、b)雑音除去に必要な測定データの平均回数、c)測定データの保存時間によって制限されている。例えば、現状のシステムでは、空間分解能を複合材料の長手方向に 1 mm とした場合、0.18 m/h 程度の評価速度となる。これは、超長尺複合材料の作製速度に比較して 2 桁程度も遅く、また 1 km 長の評価に半年程度も要する評価速度である。従って、同材料の全長に亘る特性評価・欠陥検出のためには、評価速度の飛躍的な（少なくとも 2 桁程度の）向上が必須となる。

そこで、上記の課題を解決すべく、以下のアプローチにより、磁気顕微法の飛躍的な評価速度の向上に挑戦した。

- a) ホール素子の走査速度の飛躍的向上（高速・高推力リニアサーボモータステージの適用）
- b) 雑音除去方式の変更（交流バイアス信号のロックインアンプによる取得）
- c) 測定データ量の低減（項目 2）による低雑音信号の直接記録）

③成果

③-1 長尺複合材料対応評価技術の開発[2]

(1) 実験方法

まず、項目 a)を解決するため、図 2.1.2-26 に示すようなホール素子の走査方式を考案し、走査機構に高速・高推力リニアサーボモータステージを導入した。本ステージは、複合材料の幅方向に関して 1 秒間に 10 回以上も往復可能な仕様となっている。この状態でステージあるいは複合材料を長手方向に連続的に相対移動させることで、長尺複合材料に対して複合材料面内の磁界分布を取得することができる。

また、項目 b) 、c)を解決するために、磁界分布の計測には、交流バイアスしたホール素子の出力電圧を、ロックインアンプを通じて最低限のサンプリング周波数で取得するという方式を採用した。その効果を図 2.1.2-27 に示す。直流バイアスされたホール素子の信号をそのままサンプリングした場合には、同図左上に示すように、かなりの雑音を含んだ信号となる。従来は、その信号に対して 1000 個のデータを使用して移動平均を行うことにより雑音を低減し、同図右上に示すような信号を得ていた。すなわち、有効なデータ量の 1000 倍のデータ量を扱う必要があった。一方、本研究のように評価速度の飛躍的な向上を想定した場合には、信号のサンプリングとそのデータの処理・保存が間に合わなくなる恐れがある。ちなみに、雑音の低減を諦めて有効なデータ量だけサンプリングした結果を同図左下に示す。磁界分布から臨界電流密度分布の変換に耐え得る信号とは言い難い。そこで、ホール素子のバイアスを交流に変更し、ロックインアンプを使用することで、雑音の低減に取り組んだ。その結果を、同図右下に示す。必要なデータ量だけサンプリングしたにも関わらず、従来評価と同等の品質の信号を取得できていることがわかる。すなわち、扱うデータ量を 1/1000 に低減することができ、単位時間当たりに処理可能なデータ量が同じ場合には、少なくとも 1000 倍程度の評価速度までは雑音とデータ処理が評価速度の律速にならないことを意味している。

以上のように、ホール素子の走査方式と磁界信号の取得方式を開発してシステムを構築し、複合材料の面内磁界分布の取得、および臨界電流密度分布の高速評価を行った。また、同システムを搭載可能な複合材料搬送機構を図 2.1.2-28 に示すように製作し、超長尺複合材料の非破壊・高速・高分解能評価システムとした。

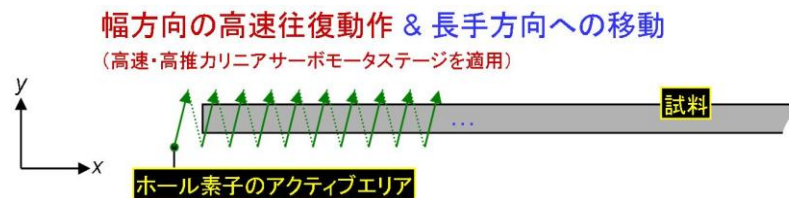


図 2.1.2-26 ホール素子の高速走査方式の説明図

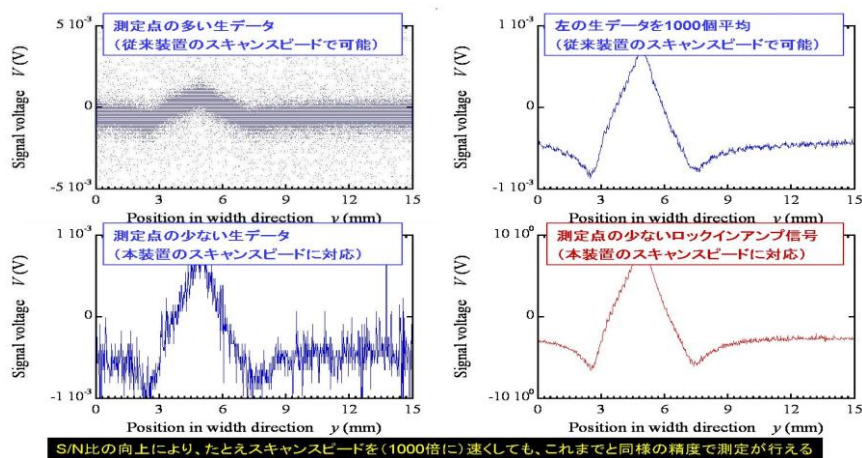


図 2.1.2-27 ロックインアンプを使用した雑音低減方式の効果



図 2.1.2-28 リール式複合材料搬送機構の写真

(2) 結果・考察

5 mm 幅の GdBCO 複合材料を測定対象として得られた結果を図 2.1.2-29 に示す。同図には、液体窒素中で十分な磁界を捕捉させた際に得られた測定磁界 (B_z) 分布と、対応するシート電流密度 (J) 分布を示している。電流は、複合材料の下半分では右方向に、上半分では左方向に流れており、これによって磁界を複合材料内に捕捉すると共に、その絶対値は電流の向きの入れ替わる領域付近を除いては臨界電流密度 (J_c) に対応する。なお、本結果は、複合材料の幅方向に 40 μm 、長手方向に 100 μm の空間分解能でプロットしたものである。本複合材料では、ほぼ均一な特性が得られているものの、全体的には上半分の臨界電流密度がやや高く、また矢印で示すような欠陥が複合材料の幅方向端部に点在している様子がわかる。このような情報は、他の評価手法では定量的に得ることが困難である一方、モータ等の機器設計には、信頼性や交流損失の定量予測の観点から反映させるべき情報となる。以上のように、今回開発したシステムにおいても、従来システムと同等品質の局所特性の評価が長い複合材料に対しても可能となることがわかった。ここで重要なことは、その評価速度である。従来システムの評価速度は、同等の空間分解能では 0.018 m/h であったが、既述の技術開発を通じて開発した今回のシステムでは、その 200 倍にも及ぶ 3.6 m/h の評価速度の達成に成功した。

さらに、上記よりは少し複合材料長手方向の空間分解能を粗く設定し、複合材料の幅方向に 40 μm 、長手方向に 1000 μm の測定分解能で得られた結果を図 2.1.2-30 に示す。同図と図 2.1.2-28 を比較すると、このような測定分解能で得られた結果であっても、不均一性の概観や

欠陥の位置などに関して、ほぼ同等の情報が得られていることがわかる。なお、このときの評価速度は 36 m/h であり、長尺複合材料の評価に十分適用可能な評価速度である。以上により、長尺複合材料プロセス開発において評価が律速とならないような評価速度で特性劣化部を mm 以下のサイズで検出可能なシステムを開発するという当初の目標を十分に達成する成果が得られたと結論付けられる。

最終的には、上記で開発に成功した評価機構を 1 km 長に対応するリール式複合材料搬送機構（図 2.1.2-28）に搭載することで、超長尺複合材料の非破壊・高速・高分解能評価システムとした。

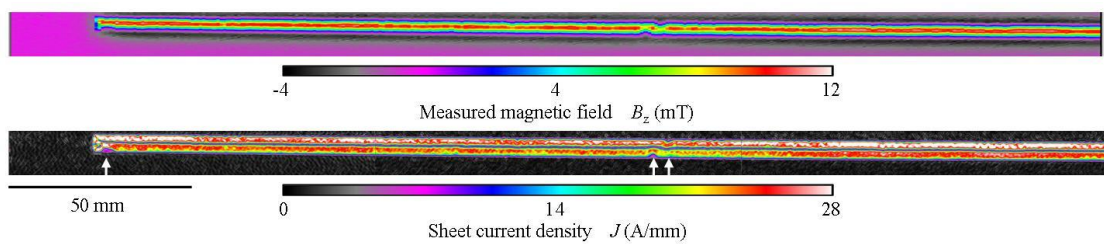


図 2.1.2-29 高解像度測定（幅方向に 40 μm 、長手方向に 100 μm の空間分解能）で得られた測定磁界 (B_z) 分布とシート電流密度 (J) 分布

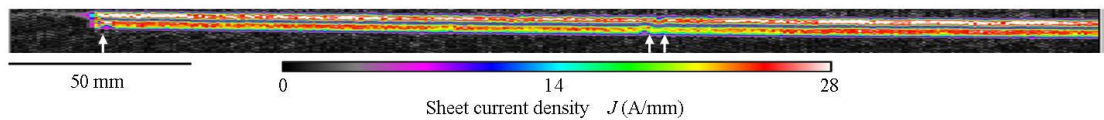


図 2.1.2-30 高速測定（36 m/h の評価速度）で得られたシート電流密度 (J) 分布

2.1.2-3 TFA-MOD 法による複合材料作製プロセス開発のまとめ

- ・シミュレーションに基づき設計した超長尺バッチ式本焼炉は 730°C で運転可能であることが実証され、超長尺複合材料を作製できる装置であることを証明できた。
- ・超長尺バッチ式本焼炉において、シミュレーションに基づき設計したガス導入システムと排気系に関し、実証試験の結果 1000m の平均で 300A/cm 幅以上 (@77K, 自己磁場)、10m 以上で 300A/cm 幅以上 (@77K, 自己磁場) を達成でき、ガス系統及び熱処理温度に問題ないことが実証され、今回の目標値である 1000m 平均で 200A/cm 幅以上、10m で 300A/cm 幅以上 (@77K, 自己磁場) を達成した。
- ・長尺化の手段の一つとして RTR 方式の本焼炉を設計・製作・検討した。設計仕様を満足する温度分布、ガス流量を得ることができ、短尺試験の結果、BaF₂ の生成が抑えられ、c 軸配向超電導層が生成していることを確認できた。この結果、RTR 方式本焼炉は設計が適正に行われ、超長尺複合材料を作製可能な設備であることを実証でき、超長尺目標である 1000m 平均で 200A/cm 幅以上 (@77K, 自己磁場)、10m 以上で 300A/cm 幅以上 (@77K, 自己磁場) を達成することができた。
- ・ホール素子の高速走査方式とデータの低雑音取得方式の開発により、従来と同等の空間分解能 (複合材料の幅方向に 40μm、長手方向に 100μm) で、従来システムの 200 倍の評価速度を達成した。
- ・前項の空間分解能で得られる情報と同等の情報が得られる条件で、長尺複合材料への適用が十分に可能となる 36 m/h という評価速度を達成した。
- ・目標に対する達成度 100%
- ・今後の課題、展望
 - ・バッチ式本焼炉

現状の問題点としては以下の点が考えられる。図 2.1.2-18 に示されるとおり、超電導特性が 300~400A の範囲で分布している。超長尺でコイルとして使用する場合は特性の最も低い値がコイル特性を規定するため、1000m 長にわたり出来る限りばらつきの少ないことが好ましい。このばらつきの原因は炉内部の雰囲気ガス流量の分布が最も大きな原因であることが経験的に分かっており、今後、ガス流量をベースにし、温度、酸素濃度、水蒸気分圧等、微調を施すことで改善できると考えている。
 - ・RTR 式本焼炉

バッチ式本焼炉は設備的に製造長さに限界があり、RTR 式本焼炉でそれ以上の長さをカバーするのが目的である。今回、パッチ試験で長尺の特性を見通すことが出来たが、RTR 式本焼では長尺特性の均一性を期待できると考えており、今後も性能向上試験を実施する中で長手方向の特性均一性も調査していく。

- ・長尺複合材料の評価技術

多チャンネルホール素子の適用による空間分解能あるいは評価速度の更なる向上や、磁界印加方法の工夫による J_c の磁界依存性の評価、電流輸送特性の形を記述する n 値の評価など、超長尺複合材料の機器応用に向けた標準的かつ汎用的な非破壊評価システムとしての展開が見込まれる。

参考文献

- [1] K. Higashikawa et al.: Physica C (2011) in press (presented at ISS2010).
- [2] K. Higashikawa et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 84 (2011) p.36.

2.2 イットリウム系複合材料の製造工程における希少金属利用率等の効率向上技術開発 (東北大学、名古屋大学、研究組合)

2.2.1 レーザ CVD 法による希少金属利用率向上技術開発 (東北大学、研究組合)

2.2.1-1 静止基板型レーザ CVD 法による希少金属利用率等の効率向上技術開発 (東北大学)

① 背景及び目的

本研究開発項目では、レーザ CVD (Laser Chemical Vapor Deposition: LCVD) 法を用いた酸化物セラミックス材料の高速成膜技術を、イットリウム系複合材料における希少金属の利用率向上を目的とした技術開発へ応用する。レーザ CVD のイットリウム系複合材料成膜への適用可能性を実証しつつ、原材料収率向上を中心に置いた最適条件の検討を行うことにより 40% 以上の高収率を見通す技術開発を目的とする。

CVD は、気相からの晶出反応により基板をコーティングする手法である。成膜温度や炉内圧力などの成膜条件を変化させることで、コーティングの微細構造や結晶粒配向制御が可能である。気相の拡散によって、複雑な形状の基板であっても均一に被覆することができるため、工業分野で実用コーティング法として幅広く使用されている。CVD プロセスでは、原料ガスにエネルギーを与えることで、基板上で晶出反応を促す。熱エネルギーを利用した熱 CVD が広く使用されているが、一般的に基板を高温に保持する必要がある。一方、原料ガスをマイクロ波や電場・磁場などを用いてプラズマ化し、CVD 成膜反応を促進させることができるが、プラズマによる膜のダメージや非晶質化が問題となったり、プラズマを維持するために高い濃度の原料を供給できず高速成膜が難しかったりする。

東北大学では耐酸化コーティングの高速合成技術として、CVD プロセスにレーザを導入したレーザ CVD を提唱し、研究開発を行ってきた。これまでも CVD プロセスへのレーザ導入が試みられているが、いずれもパルスレーザビームを局所的に集光するなど、基板の局部加熱や原料ガスの選択的光化学反応に用いている。これらの方法では、従来熱 CVD 法と差別化できるほどの優位性が認められていない。東北大学が開発したレーザ CVD 法は、高強度の連続発振レーザビームをレンズで拡げて原料ガスおよび基板へ照射する方法であり、従来法と全く異なるレーザ励起 CVD である。これまでに、イットリア(Y_2O_3) [1]、アルミナ (Al_2O_3) [2]、シリカガラス (SiO_2) [3] などのセラミックス膜を、従来最大数 1000 倍以上もの成膜速度で高速合成できることを報告してきた。一方、成膜プロセスの低温化は、基材の性能低下を抑制し、成膜効率を向上させるために必要不可欠である。レーザ CVD 法を用いることで、 $\alpha-Al_2O_3$ 膜を従来法と比較して約 350 K 程度の低温かつ最大 100 倍高速に合成できた。[4,5] これは、本提案者らが開発したレーザ CVD 法においては、気相中において原料ガスがレーザ照射によって局所的に高温・非熱平衡下で励起されて強く活性化されるため、成膜反応が低温であっても著しい高速成膜が可能になるからである。これらの高速化および低温化技術を両立することで、高効率コーティングプロセス技術開発の達成が期待される。

イットリウム系複合材料の製造においては、現時点では PLD (Pulsed Laser Deposition) 法が最も実績を有するが、その原材料利用率 (収率) は 30%程度とされている。従って、本研究項目においては 40%以上の収率を達成することを目標とし、レーザー CVD のイットリウム系複合材料成膜への適用可能性の実証および収率向上のための成膜条件の最適化を行い、40%以上の高収率を見通す技術開発を目的とする。

② 課題とアプローチ

イットリウム系複合材料における希少金属の利用率向上プロセスに対するレーザー CVD の適用可能性の実証しつつ目標を達成するためには、出発原料の選定と原料の高効率かつ安定供給手法が課題となる。従来のレーザー CVD においては、主に有機金属化合物 (Metal-Organic compound precursor; MO 原料) の固体原料を出発原料として用いてきた。しかし、固体原料を用いた一般的な手法では、研究室における成膜技術の研究開発には好適だが、長時間の成膜を想定した産業用連続プロセスにおいては、固体原料の経時変化による原料ガスの供給量やガス中の各組成の変化によって、得られる膜の生成相や微細構造を不均一になることが問題となる。一方、液体原料は、変質などの経時劣化が起こりにくい上に、一定量・一定組成の原料を連続的かつ安定に供給することが可能である。このような、液体原料を用いた原料供給手法は、例えば化学溶液法など、国内外の連続製造プロセスにおいて使用実績があり、産業化を念頭においた量産体制の確立のためには欠かせない技術である。このように、原料の安定供給課題については、液体原料を原料として用いることで解決する。

そこで、本研究開発項目では、まず液体原料供給機構を備えたレーザー CVD 装置の技術開発を行う。液体原料を用いたレーザー CVD の研究例はまだないが、CVD 法は気相からの化学的晶出反応であるため、原料が液体であっても原料を効率的に気化させ基板上に搬送させることが出来れば、固体原料を用いた場合と同等の成膜過程が起こるものと推察される。液体原料としては、膜の構成金属元素の化合物液体を用いる方法もあるが、多くの場合は塩化物であり、CVD プロセスの副生成物として塩化水素ガスなど腐食性ガスが発生する問題がある。塩化物以外の炭化水素化合物では、揮発性が高すぎたり、不活性雰囲気では扱わなければならないと、化合物液体は取り扱いに難がある場合が多い。そこで、粉末状の有機金属化合物を、比較的蒸気圧の高い有機系溶媒と混合し、液体状原料として用いる。粉末状の有機金属化合物の取り扱いに関しては、固体原料として用いてきた使用実績が豊富であることから、これまで蓄積してきたレーザー CVD に関する各要素技術を、液体原料供給機構を備えたレーザー CVD 装置開発に転換する際に、円滑に移行できるものと期待される。液体原料を用いた場合、固体原料を気化させた場合に比べて、気相中に含まれる炭化水素化合物成分が多くなることが懸念される。しかし、レーザー CVD ではレーザー照射により反応場が活性化されているため大きな影響はないことが見込める。液体原料の効率的な気化方法については、レーザー CVD 用途に向けた新たな要素技術開発が必要となるが、本研究グループには、これまで液体原料を用いたプラズマ CVD プロセスの研究実績があるため、それらを活用することが出来る。このように、液体原料を用いたレーザー CVD においても、液体原料を効率的に気化・搬送することが出来れば、基本的に

は固体原料を用いたレーザ CVD と同等以上の高効率成膜反応が達成されることが期待される。

③ 成果

③-1 液体原料供給機構を備えたレーザ CVD 装置の開発

図 2.2.1-1 に、本研究開発項目で開発したレーザ CVD 装置の概略図を示す。本 CVD 装置は、縦型のコールドウォール型 CVD 炉を基本とする。一般的に、CVD は反応炉の加熱方法や構成によって幾つかの種類に大別される。ホットウォール型 CVD では、基板を含めた反応炉全体を加熱するが、コールドウォール型 CVD では、炉壁は加熱せず基板あるいは基板ステージを加熱する。ホットウォール型 CVD では、大面積コーティングが可能となるが、反応ガスが基板に到達する前に気相中で核生成を起して粉体を生成しやすいため、一般に成膜速度が低い。また、CVD 炉の配置により、原料ガスを基板と平行に導入する横型 CVD と原料ガスを上方から基板に向けて導入する縦型 CVD がある。縦型 CVD では、横型 CVD のように基板を複数設置するのが難しいが、未反応の原料ガスを基板付近に効率よく導入することができる。つまり、縦型のコールドウォール型 CVD では、高速かつ高効率の成膜が達成されやすい。

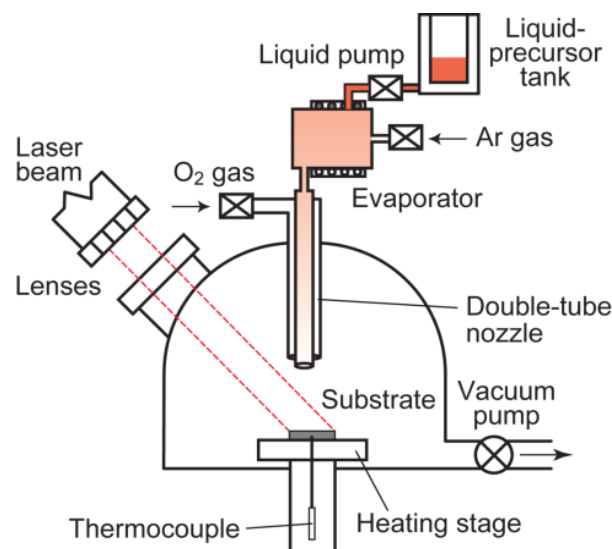


図 2.2.1-1 本研究開発項目で開発した液体原料供給機構を備えたレーザ CVD 装置の概略図。

液体原料は、無脈動液体搬送ポンプを用いて加熱容器へ搬送して気化させる。液体原料の供給・気化方法には、バブリング法、超音波法、直接気化法などが挙げられる。バブリング法は、加熱した液体中にガスを送り込んでバブリングし、液体を気化させる方法であり、装置は簡便となる。しかし、液体のバブリング気化過程においては、気液界面で蒸発が起こるが、バブルの量や大きさを一定にすることは極めて難しいため、気化量を一定に制御し、安定的に原料ガスを供給することは難しい。超音波法は、比較的高出力の超音波振動子を用いて溶液をミスト化する。超音波振動子を用いて生成した微小液滴はドライミストと呼ばれ、原料ガス供給管の内壁を濡らすことなくキャリアガスを用いて CVD 炉内へ搬送することが出来る。しかし、液

相から膜を形成するためには、気相から膜を形成するよりも多くのエネルギーが必要になり、効率向上の面で不利になることが想定される。一方、直接気化法は、液体原料を加熱した容器に直接接触させ、瞬間的に気化させる方法である。装置は簡便であり、液体供給量を精緻に制御することで、一定の気化量が得られ、原理的には多くの原料を気化させることも出来る。そこで、本研究開発項目では、直接気化法を採用した。

液体原料加熱容器内で気化させた原料ガスは、Ar キャリアガスを用いて CVD 炉内へ搬送され、二重ノズル間の出口で O₂ ガスと混合される。原料ガス供給管内で原料が晶出したり、凝集・凝着・付着したりするのを防ぐために、いずれの原料ガス供給管もリボンヒータを用いて加熱保持される。Ar キャリアガスおよび O₂ ガスの流量は、流量計を用いて制御する。CVD 炉内は、ロータリポンプを用いて 10 Pa 以下まで排気される。基板は、加熱機構を備えたステージの上に設置する。レーザーには、連続発振モードの Nd:YAG レーザ（基本波長 1064 nm; 最大出力 200 W）を用いる。レーザービームは、石英窓を通して CVD 炉内に導入され、レンズで拡げて基板全体に照射される。

③-2 静止基板型レーザー CVD 装置を用いたイットリウム系複合材料の成膜

(1) 実験方法

イットリウム系複合材料の成膜には、本研究開発項目で開発したレーザー CVD 装置を用いた。液体原料の溶媒には、安定化テトラヒドロフラン (THF: tetrahydrofuran) を用い、所望の mol 比で秤量した Y, Ba および Cu の有機金属化合物錯体 Y(dpm)₃、Ba(dpm)₂/Ba(tmod)₂、Cu(dpm)₂ (dpm: dipivaloylmethanato, tmod: 2,2,6,6-tetramethyl-3,5-octanedionato) 粉末を混合し、THF 溶媒中に入れ、マグネットスターラーを用いて攪拌して出発原料とした。基材には、(100) 配向 CeO₂ 中間層を備えた IBAD 線材を用いた。収率は、イットリウム原料利用率とし、成膜前後の基材の重量変化から求めた。合成した膜の結晶相は XRD (Rigaku RAD-2C) を用いて同定した。

(2) 結果

開発したレーザー CVD 装置を用いて、イットリウム系複合材料成膜への適用可能性および収率向上を目的とした最適成膜条件の検討を行った。まず、成膜条件がイットリウム系複合材料の生成相に与える影響について調べた。イットリウム濃度 0.034 mol/l、Y:Ba:Cu 組成比 1:1.9:2.7 とした液体原料を調製し、液体原料供給レート 0.3 ml/min で加熱容器内へ供給・気化させ、炉内圧力 800 Pa、レーザー出力 139 W で IBAD 線材基材(10 × 10 mm²) へ成膜した場合、YBa₂Cu₃O_{7-δ} (YBCO; Y123) および YBa₃Cu₂O₅ (Y132) の混相膜となった (図 2.2.1-2)。レーザー出力 101 W では、わずかに第二相の生成が認められるが、ほぼ *c* 軸配向 YBCO 単相膜が得られた (図 2.2.1-3)。

次に、イットリウム系複合材料成膜における収率向上を中心に置いた最適条件を調べた。イットリウム濃度 0.06 mol/l、Y:Ba:Cu 組成比 1:1.9:2.7 とした液体原料を調製し、0.8 ml/min で加熱容器内へ供給・気化させ、炉内圧力 600 Pa、成膜温度 517-696°C(790-969 K)で IBAD 線

材基材 (10 × 10 mm²) へ成膜した場合、成膜温度の上昇とともに、イットリウム収率は 9.0 から 18.8 へと増大した (図 2.2.1-4 白丸)。イットリウム濃度 0.06 mol/l、炉内圧力 600 Pa で合成した場合の収率は、32.1%であった。IBAD 線材基板 (20 × 25 mm²) へ成膜した場合は、成膜温度を 586°C(859K)から 643°C(916K)へ上昇させると、イットリウム収率は 25.5 から 42.1%へと上昇し、685°C(958K)では 43.6%に達した (図 2.2.1-4 黒丸)。基材温度 649°C(922 K)、炉内圧力 600 Pa にて、IBAD 線材基材 (20 × 25 mm²) 上に合成した膜は、第二相を含むものの *c* 軸配向した YBCO 膜であった。そのときの収率は 45.7%であった。

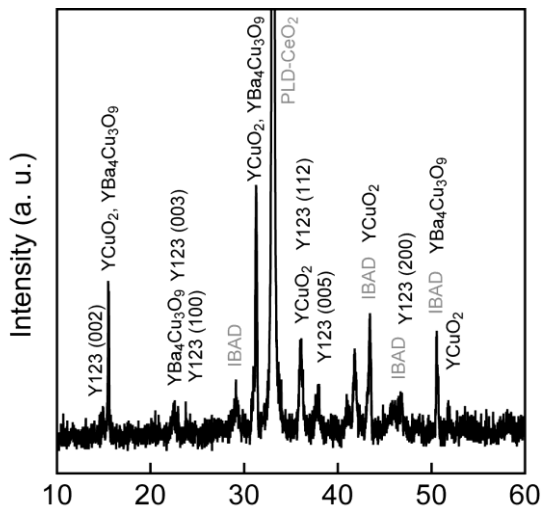


図 2.2.1-2 レーザ出力 139 W で合成した YBCO 膜の XRD 図形.

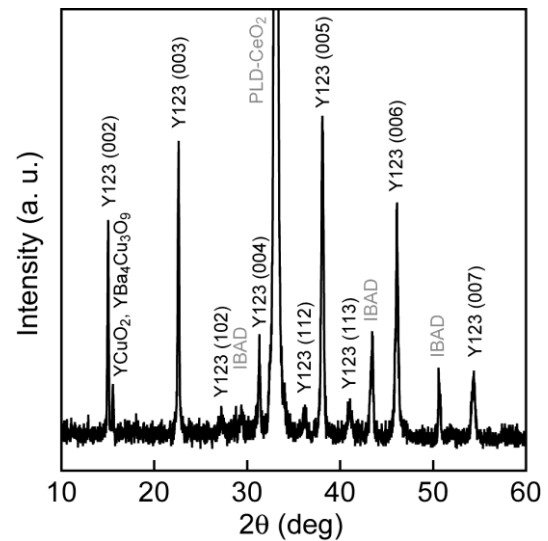


図 2.2.1-3 レーザ出力 101W で合成した YBCO 膜の XRD 図形.

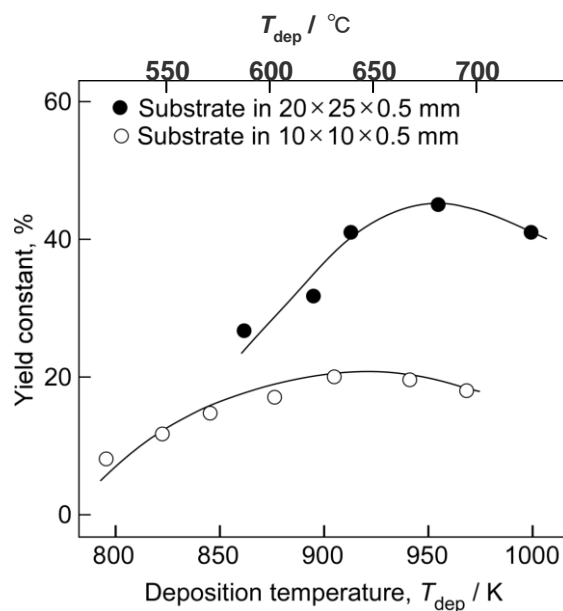


図 2.2.1-4 レーザ CVD を用いた YBCO 膜合成における基板温度と収率の関係.

(3) 考察

本研究開発項目では、レーザー CVD 法を用いた酸化物セラミックス材料の高速成膜技術を、イットリウム系複合材料成膜への適用可能性を実証しつつ、原材料収率向上を中心に置いた最適条件の検討を行うことにより 40%以上の高収率を見通すための研究開発を行った。

まず、研究開発項目 2.2.1③-1「液体原料供給機構を備えたレーザー CVD 装置の開発」においては、これまで主に固体原料を用いてきたレーザー CVD 法において、液体原料供給機構を備えたレーザー CVD 装置の開発を行い、開発したレーザー CVD 装置がイットリウム系複合材料の成膜に適用可能であることを実証した。これは、CVD プロセスは気相からの化学析出反応を利用して成膜するため、原料に液体を用いた場合であっても、原料を効率的に気化させて、基板上に搬送することが出来れば、化学析出反応が起こり、レーザー CVD プロセスにおける高効率成膜が達成されたためであると推察される。

研究開発項目 2.2.1③-2「静止基板型レーザー CVD 装置を用いたイットリウム系複合材料の成膜」においては、開発したレーザー CVD 装置を用いて、イットリウム系複合材料における原料利用効率向上を目的とした最適成膜条件の検討を行った。基材温度 649°C (922 K)、炉内圧力 600 Pa にて、IBAD 線材基材 (20×25 mm²) 上に合成した膜は、ほぼ *c* 軸配向した YBCO 膜であり、そのときのイットリウム収率は 45.7%を達成した。比較のため、固体原料を用いたレーザー CVD によりイットリウム系複合材料を合成した場合、イットリウム収率は 9%前後であった。これは、液体原料を用いて原料ガスを多量かつ安定的に供給することで、液体原料を用いたレーザー CVD プロセスにおいて高い原料利用効率が達成できたものと推察される。

本研究開発項目で得られた結果は、目標とするイットリウム系複合材料における収率 40%を達成するものである。今後、高い原料利用効率とともに、高い結晶粒配向性および優れた超電導電流特性を示すイットリウム系複合材料成膜の合成を両立するため成膜条件の最適化をさらに進めることで、本項目開発手法のイットリウム系複合材料における希少金属の利用率向上への寄与はより一層大きいものとなる。

2.2.1-2 Reel-to-Reel レーザ CVD 法による希少金属利用率等の効率向上技術開発 (研究組合)

①背景及び目的

イットリウム系複合材料の開発に関しては近年著しい進展がみられ、とくに日米を中心に産業レベルの連続成膜プロセス開発における激しい競争が繰り広げられている。そのような状況のなかで研究組合においてはイットリウム系複合材料の製造工程のみならず、長尺試料の評価法や工方法に関しても多くのノウハウが保持され、イットリウム系複合材料の連続成膜プロセスに関しては世界でも最高レベルの技術力を有する。これまで超電導臨界電流特性の向上と長尺化を中心にして開発が進められてきたが、そのなかで培われた技術力を用いて、原料利用率向上が期待できるレーザ CVD プロセスの連続成膜技術の確立に取り組むことが重要である。研究組合においては、レーザ CVD 法のイットリウム系複合材料プロセスへの適用を行うと同時に、とくに産業化を念頭においた移動基材上における連続成膜の実証を目指し、Reel-to-Reel (RTR) 機構を備えた中規模レーザ CVD 装置の開発を行った。最終的には、静止成膜技術開発において得られた知見に基づき、移動基材上への連続成膜においても一定の超電導特性を確保しながら、原料利用率収率 40%以上の高収率プロセスへの見通しを立てることを目標とした。

②課題とアプローチ

レーザ CVD 法のイットリウム系複合材料プロセスへの適用可能性の検討、安定性向上を目指した溶液原料の適用など、同手法の原理的・基礎的技術開発要素については東北大学グループと連携しつつ開発を進めた。研究組合においてはとくに移動基材上への連続成膜に関係した装置設計と技術開発を行った。

回転機などへの応用に必要な複合材料線材の作製には長尺基材上への連続成膜技術の開発が必要であるが、そのためには装置仕様におけるすべての要素に関する大容量化とともに、基材の通過する全領域の成膜プロセス条件制御が必要となる。今回設計を行う装置は基本となる熱分解タイプの CVD 装置にレーザ照射機能を付加したものとなり、さらに安定性向上のために採用した溶液原料の供給装置 (原料気化器) を追加し、将来的な産業プロセスとしての有効性を実証するための長尺移動基材上への連続成膜を可能とするテープ状基材搬送機構 (Reel-to-Reel 機構) を備えている。制御すべきパラメータは多く、またそれらは互いに独立ではなく関連し合っており、さらにはイットリウム系複合材料への適用という意味では未知の要素が含まれることになる。したがって大容量化に関しては、第一に目標達成のための (プロトタイプとしての) 仮想的規模を明確に設定することが肝要となる。具体的には線材作製プロセスとして重要な製造速度に直接結びつく体積速度 ($[m^3/sec]$) は一点における成膜速度 ($[m/sec]$ あるいは $[\mu m/h]$) と成膜面積 ($[m^2]$) の積で表されるが、成膜面積は装置規模によってスケールされ比較的容易にまた連続的に増大させることが可能であるため、その拡大化については今回必ずしも収率 40%を達成する場合に付随する不可欠な要素にはあたらない。その一方で成膜速度は原料利用効率に直接結びつくパラメータであるため不可欠な要素として今回開発する装置に関しては高い性能が要求されることになる。これに、将来的なスケールアップに関して必須でしかも開発的要素の高いマルチ

ターン化を含めると最小限の成膜面積が決定され、原料供給能力、レーザーエネルギーなどが導かれ、さらに RTR システムに要求される搬送速度範囲なども決定されることになる。

一方、連続成膜技術に関しては温度・雰囲気・移動速度などの時間的・空間的安定性と成膜領域の制限機能が必要となる。静止状態の基材上へ成膜する場合には、固定された基材直上にあたる特定の小領域でのみ最適な成膜条件を実現させることになるが、移動基材への成膜では通過する全領域の条件を制御する必要がある。またレーザーの照射領域は特定の面積に限られる一方、原料物質はチャンバー内に平衡濃度として広く存在するため、レーザー照射が行われず適正な温度範囲が保たれていない領域における成膜は制限されなければならない。とくにイットリウム系複合材料プロセスにおいては 2 軸配向構造を達成させるためエピタキシャル成長が鍵となることから、基材が成膜領域に侵入して成膜が開始される際の原子レベルにおける最初期層の成長条件の制御が非常に重要となる。したがって許容できる範囲のみを選択的に抽出し、不適格な最外部における基材上への堆積を回避する仕組みが必要となる。PLD 法など他の RTR 機構を備えた蒸着装置に関する多くの経験と得られた知見を参照しながら、レーザー照射、原料分布、制限領域のバランスを小規模面積から始め、マルチターン機構の導入も含めて計画的に大面積化していく方法で検討を行った。

③成果

③-1 RTR 式基板搬送機構を備えた中規模 LCVD 成膜装置の開発

(1) 実験方法

連続成膜を目的に RTR 機構を備えた中規模 LCVD 装置を以下のような仕様で設計し、作製した。装置の有効性を確認するために以下のような条件を用いてイットリウム系複合材料の作製実験を行った。有機金属化合物 (Metal-Organic compound; MO 化合物) 原料 $Y(dpm)_3$ 、 $Ba(dpm)_2$ 、 $Cu(dpm)_2$ (dpm : dipivaloylmethanato あるいは 2,2,6,6-tetramethyl-3,5-heptanedionato ; $C_{11}H_{19}O_2$)、テトラヒドロフラン (THF : tetrahydrofuran ; C_4H_8O) 溶媒、原料組成 1.0 : 2.0 : 3.0、原料濃度 $Y=0.03\text{mol/L}$ 、原料供給量 0.2 - 0.4g/min、原料気化温度 280°C、レーザーパワー 100 - 400W ($\phi 60 - 80\text{mm}$)、ヒーター制御温度 400 - 1000°C、搬送速度 1.2m/h において、IBAD 基材上への YBCO 複合材料成膜実験を行った。

表 2.2.1-1 装置仕様

レーザータイプ	連続発振半導体レーザー
波長	1025 nm (± 10 nm)
レーザーパワー	2 kW (max)
原料	単一 (カクテル) 溶液原料
原料供給量	2.0 g/min (max)
ヒータ温度	950°C
均熱領域	5cm x 10cm
基材搬送速度	0.1 - 50 m/h

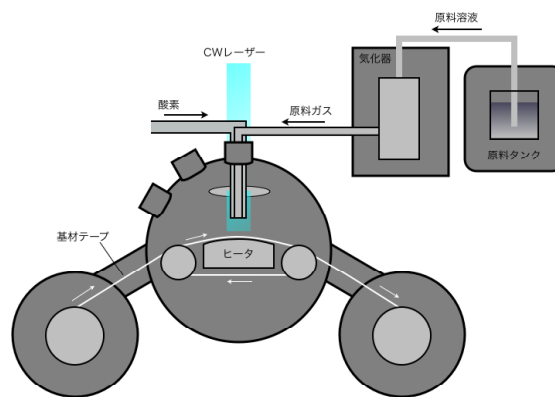


図 2.2.1-5 RTR-LCVD 装置外観および概念図

(2) 結果

RTR テープ状基材搬送システムを備えた LCVD 成膜装置の設計・製作を行い、移動基材上への複合材料膜の連続成膜に成功し $J_c = 1.4 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ ($I_c = 43 \text{ A/cm}$ 幅、膜厚 $0.31 \mu\text{m}$ 、1 レーン、収率(Y)=9.5%) の特性が得られた。主な条件は気化温度 280°C 、経路温度 285°C 、ヒーター設定温度 900°C 、レーザーパワー200W、レーザースポット径約 80mm、プロセス圧 0.67kPa 、ノズル径 3/8 インチなどである。その後さらに条件の最適化を行うことにより $J_c = 3.2 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ ($I_c = 49\text{A}$ 、膜厚 $0.15 \mu\text{m}^*$) などの特性が得られた。(気化温度 260°C 、経路温度 280°C 、ヒーター設定温度 700°C 、レーザーパワー250W、レーザースポット径約 60mm、プロセス圧 0.40kPa 、ノズル径 1/2 インチ。) また、複数回成膜を行うことにより厚膜試料の作製を行い、膜厚 $1.1 \mu\text{m}$ の試料において $I_c = 147 \text{ A/cm}$ 幅 ($J_c = 1.2 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$) の特性が得られた。ここで、 I_c の値はすべて 1cm 幅試料に対する実測値である。

* ICP 分析からの換算膜厚 (その他の膜厚値は SEM あるいは TEM による断面観察より)

表 2.2.1-2 RTR-LCVD 装置を用いた YBCO 薄膜の成膜条件

原料組成	1.0 : 2.0 : 3.0
モル濃度 (total)	0.18 mol/L
原料供給量	0.2 g/min
溶媒流量	1.0 g/min
気化温度	280℃
経路加熱	285℃
ノズル距離	51mm
ヒータ設定温度	600 - 1000℃
レーザーパワー	200 W
スポット径	約 80mm
プロセス圧	0.67kPa
搬送速度	1.2m/h

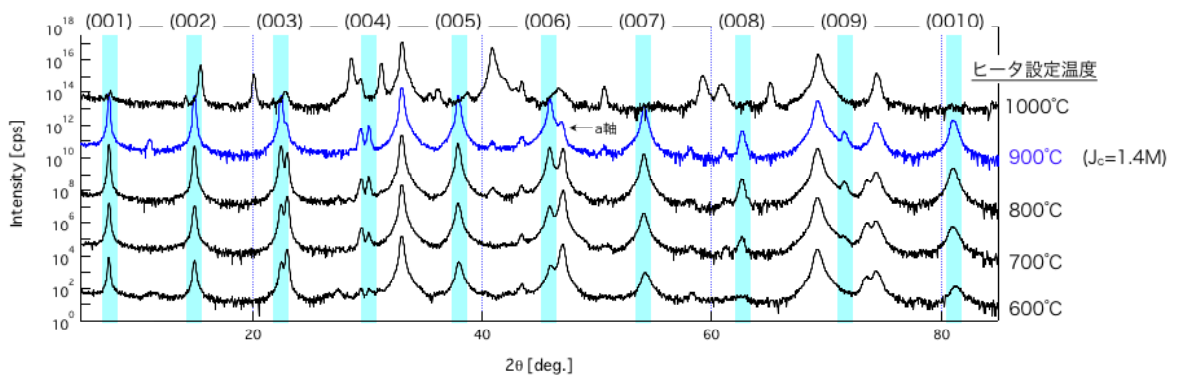


図 2.2.1-6 設定温度を変化させた場合の X 線回折結果。 $P_L=200W$

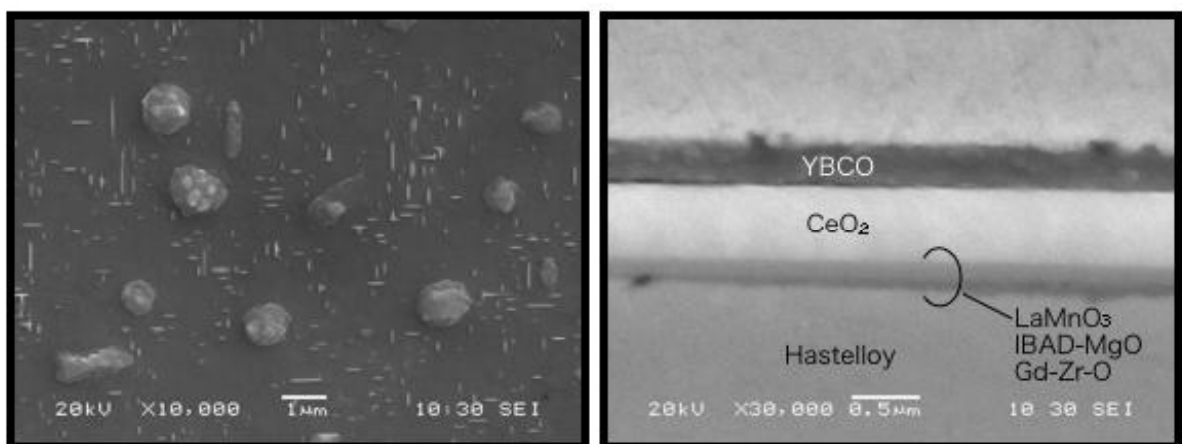


図 2.2.1-7 $J_c = 1.4MA/cm^2$ の特性が得られた LCVD=YBCO 試料 (設定温度 900℃、 $P_L = 200W$) の表面および断面 SEM 観察結果

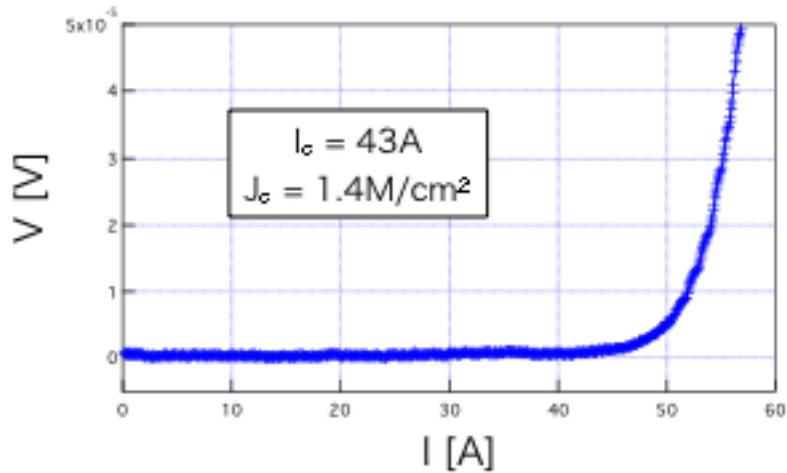


図 2.2.1-8 4 端子法による臨界電流値測定結果。(閾値=1 μ V/cm)

(3) 考察

連続成膜が可能な RTR システムを備えた LCVD 装置を開発した。東北大後藤グループが開発した赤外領域レーザを用いた RTR-LCVD 装置という意味では世界で唯一の装置である。委託業務開始後、およそ半年で設計および製作を完了し、装置稼働後約 1 ヶ月で搬送速度 1.2m/h の移動基材上において 1MA/cm²の臨界電流密度値を有するイットリウム系複合材料の作製に成功した。さらに条件検討を行うことによって、 J_c としては 3MA/cm²以上、 I_c としては 100 A/cm 幅以上の臨界電流特性を達成した。以上はすべてマルチターンを用いない(シングルレーンのみによる)成膜結果であり、原材料収率はいずれも 10%以下であった。以下に、1MA/cm²以上の高い超電導特性を維持しつつ、収率の向上を試みた。

③-2 移動基材上への連続成膜における高収率化プロセス開発

(1) 実験方法

MO 錯体原料 Y(dpm)₃、Ba(dpm)₂、Cu(dpm)₂、テトラヒドロフラン溶媒、原料組成 1.0 : 2.0 : 3.0、原料濃度 Y=0.03mol/L、原料供給量 0.2 - 0.4g/min、原料気化温度 280°C、レーザパワー 250W(φ 60mm)、ヒーター制御温度 700°C、搬送速度 1.2m/h において、IBAD 基材上への YBCO 超電導層成膜を行った。

原材料収率の向上を目指し、マルチターンの利用、成膜領域の拡大とそれに対応した条件の最適化などを行った。マルチターンにより最大 3 レーン、および成膜領域の制限カバーにより 3cm、5cm に制限した場合、さらに制限無しの場合においても収率を比較した。

(2) 結果

成膜領域を 3cm に制限して成膜を行った場合、3 レーンそれぞれにおいて得られた収率は 3.0、8.8、5.0% であり、合計 16.8% であった。前項 2.2.1③-1 における単レーンの結果では 10% を超

えなかったが、マルチターン化によりおよそ 2 倍程度まで収率を改善することができた。またこのとき I_c 値はそれぞれ第 1、第 2、第 3 レーンに対して 41、72、47 A/cm 幅であった。これらの値は J_c 値としては 2.1、1.3、1.5 MA/cm² となりすべてのレーンで 1 MA/cm² を上回った値であった。このとき成膜された YBCO 層の結晶性の目安となる XRD(005) 反射強度はそれぞれ 25223、58345、27323 cps であった。原料利用率を向上させるため成膜領域を 5cm に拡大した場合には XRD 強度は中央レーンで 45348 cps と高い値が得られたが、収率は 3 レーン合計で 17.9% と大幅な改善は見られなかった。成膜領域の制限を取り除き成膜領域を装置仕様の最大限にまで広げた場合には 27.1% (6.2+11.5+9.4%) の収率を得た。この場合 XRD 反射強度はおよそ 1500 cps 程度に減少し (中央レーン) 結晶性は低下したが、四端子直流法による測定で超電導電流の通電は確認された ($I_c=5$ A/cm 幅)。

(3) 考察

超電導特性としては実用可能なレベルを達成しているが、短尺静止成膜の結果に比較すると収率はまだ十分とは言えない。その原因として、Y, Ba, Cu-dpm 原料以外の周辺物質濃度の高さが挙げられる。チャンバー内に導入されるガス状物質のうち、原料濃度はわずか 0.1% (モル濃度) 以下となっている。反応物質である酸素ガスは膜形成に不可欠であるが、気化プロセスに必要なキャリアガスとしてのアルゴン、溶媒としてのテトラヒドロフラン、さらに気化器の安定動作 (閉塞の防止) のために原料溶液以上の純テトラヒドロフラン液を追加せざるを得ない仕様となっている。気体物質における化学ポテンシャルはその分圧に等しいため、チャンバー圧を一定に保った場合、反応に関係しない周辺物質量の増加は原料物質 (反応物質) の分圧の低下を招き、反応を進行させるための駆動力である化学ポテンシャルを目減りさせることになる。さらに、周辺物質の増加により YBCO 相以外の第二相の出現や、a 軸配向粒の増大なども確認されている。実際アルゴンガスを減量することにより収率が上昇する傾向が認められているが、気化器の安定性は著しく低下し最終的には閉塞につながることも判明している。

2.2.1-3 レーザ CVD 法による希少金属利用率向上技術開発のまとめ

- ・液体原料供給機構を備えたレーザ CVD 装置の開発を行った。
- ・Y 系複合材料成膜への適用可能性および収率向上を目的とした成膜条件の最適化を図った。
- ・IBAD 線材基板に c 軸配向 YBCO 膜を合成、Y 収率は最大 45.7% を達成した。
- ・RTR 機構を備えた連続成膜用レーザ CVD 装置を設計、開発した。
- ・移動基板上において $J_c > 3$ MA/cm²、 $I_c > 100$ A の高い超電導特性を達成し、イットリウム系複合材料の連続作製法としての LCVD 法の有効性を証明した。

・達成度 100%

・今後の課題、展望: 高収率と高配向性および優れた電気伝導特性を両立したイットリウム系複合材料を合成するための成膜条件の最適化と液体原料供給機構の改善 (恒温化、大容量化)

参考文献

- [1] Thermal barrier coatings deposited by laser CVD. [Surf. Coat. Technol., 198, (2005), 367-371] T. Goto
- [2] Texture and orientation characteristics of α -Al₂O₃ films prepared by laser chemical vapor deposition using Nd:YAG laser. [Journal of Alloys and Compounds, 489(2), (2010), 469-474] A. Ito, H. Kadokura, T. Kimura, T. Goto
- [3] High-speed Deposition of Dense, Dendritic and Porous SiO₂ Films by Nd:YAG Laser Chemical Vapor Deposition. [Materials Science and Engineering: B, 166, (2010), 225-229] J. Endo, A. Ito, T. Kimura, T. Goto
- [4] Moderate temperature and high-speed synthesis of α -Al₂O₃ films by laser chemical vapor deposition using Nd:YAG laser. [Surface and Coatings Technology, 204(14), (2010), 2302-2306] H. Kadokura, A. Ito, T. Kimura, T. Goto
- [5] Low temperature deposition of α -Al₂O₃ films by laser chemical vapor deposition using a diode laser. [Applied Surface Science, 256(12), (2010), 3906-3911] Y. Yu, A. Ito, R. Tu, T. Goto

2.2.2 YAG レーザーPLD 法による希少金属利用率向上技術開発 (名古屋大学、研究組合)

2.2.2-1 YAG レーザーPLD 法による希少金属利用率向上技術開発 (名古屋大学)

①背景及び目的

これまで、多くの研究開発グループがイットリウム系複合材料の作製にパルスレーザー着 (PLD)法を用いて来た。PLD 法は、真空容器内に置かれた焼結体の固体原料 (ターゲット) に強力な紫外線レーザーを照射することでターゲットを分解・蒸発させ、基材上に薄膜を成長させる手法である。本手法の特徴として、真空容器中の圧力や基材温度が最適化されていれば、ターゲットと薄膜の組成がほぼ同じになる点が挙げられる。このため、PLD 法はイットリウム系超電導材料のように多元素からなる物質の薄膜化に適している。現在、PLD 法におけるレーザー源の主流は、気体媒質レーザーであるエキシマレーザーであり、多くの研究開発グループからエキシマレーザーを用いた PLD 法によるイットリウム系複合材料に関する報告がされている。これは、エキシマレーザーが強力なエネルギーの紫外線レーザー光を発振出来るためである。しかし、エキシマレーザーは強力なエネルギーのレーザー光を発振出来る反面、高価な希ガスや有毒なハロゲンガスを使用するため、ランニングコストが高く、ハロゲンガスの除害装置など付帯設備が必要である。

一方、YAG レーザーは、Nd:YAG 結晶($Y_3Al_5O_{12}$ の Y を一部 Nd に置換)をフラッシュランプなど強力な光源で励起させることで発振される固体媒質レーザーである。特徴として電力以外のユーティリティを必要とせず、かつ付帯設備も不要で、装置自体もコンパクトであることが挙げられる。さらに、エキシマレーザーに比べてレーザー装置自身のコストや維持・ランニングコストが安価である。また、非線形光学結晶を通すことで紫外線レーザーを得ることも可能である。しかし、これまではレーザーエネルギーの時間的な安定性に問題があり、イットリウム系複合材料の作製プロセスとして採用されていなかった。近年、レーザー技術の進展 (良質な非線形光学結晶の開発、周辺電子部品の信頼性向上など) に伴ってエネルギー安定性が向上し、イットリウム系複合材料の作製プロセスに耐え得るまでに改善されてきている。YAG レーザー光のエネルギーはエキシマレーザーに比べるとやや弱い、名古屋大学におけるこれまでの予備検討の結果、MgO や SrTiO₃ 単結晶基板上に YAG レーザー PLD 法を用いて作製したイットリウム系超電導薄膜は、超電導転移温度 $T_c \sim 90$ K、臨界電流密度 $J_c > 1$ MA/cm²(@77 K, 自己磁場)と、エキシマレーザー PLD 法で作製したイットリウム系超電導薄膜と遜色ないことを確認している[1-3]。また、より高い臨界電流 I_c を得るために、膜厚 2 μm 程度のイットリウム系超電導体の厚膜を作製した結果、190 A/cm 幅 (@77 K, 自己磁場)以上の I_c を得た[4]。従って、超電導特性の観点からは従来のエキシマレーザー PLD 法と YAG レーザー PLD 法に大きな差は無いことが明らかになっている。

YAG レーザー PLD 法で必要とするユーティリティは電力だけであるため、ランニングコストの低減が期待できる。また、エキシマレーザーの場合、定期的に励起ガスの交換を行う必要があり、滞留時間が生じる。しかし、固体レーザーである YAG レーザー PLD 法では連続運転が可能で

ある。これによって年間製造量（スループット）の向上も期待できる。また、レーザの励起源である Nd:YAG 結晶は材料強度が高く、熱衝撃耐性に優れるため、結晶にとって理想的な使用環境下では定期的な交換の必要は無い。従って、メンテナンスコストも安価であり、装置寿命も長いことが期待される。また、ターゲット上に集光されるレーザ光にエネルギーが弱い部分が含まれる場合、その部位からの蒸発量は低下するため、製造速度の低下と膜組成のずれが懸念される。しかし、YAG レーザは空間的エネルギーの均一性が高いため、原料ターゲットからの蒸発量が多く、製造速度の向上が期待できる。それと同時に、蒸発種の組成ずれが少ないため、蒸着された試料における組成分布も均一であることが期待される。つまり、同程度のエネルギーを出力し、かつ紫外線領域の波長を持つ YAG レーザとエキシマレーザを比較した場合、組成が均一な領域は YAG レーザの方が広いと見られるため、有効な成膜領域が広がり収率が向上することが期待される。よって、YAG レーザ PLD 法は高収率なイットリウム系複合材料の作製プロセスとなることが期待できる。

以上から、本課題では、YAG レーザ PLD 法による高原材料収率イットリウム系複合材料作製プロセスの実証を目的とした。この目的に対する目標値として、静止基板上において原料収率 40%以上を実証し、また連続形成プロセスにおける原料収率 40%以上の高収率技術の確立を見通すため、静止成膜結果から予想される成膜量が、移動系試料において再現できることを確認する。

②課題とアプローチ

より高い原料収率を得るために、ターゲットから蒸発した成分ができる限り多く基材上に蒸着される必要がある。そこで、インプルーム法を採用し、収率の向上を行う。PLD 法では、強力なレーザの照射によってターゲット構成元素が励起・発光しながら、ろうそくの炎状のプラズマを形成する。この炎状プラズマはブルームと呼ばれている。従来はブルームの先端付近に基材が配置されているが、このブルームの中に基材が入った状態で堆積を行う手法をインプルーム法と呼ぶ。このインプルーム法を採用した根拠は次の通りである。PLD 法において蒸発種はレーザが照射された箇所を頂点として円錐状に飛散するため、ターゲットと基材の距離が遠いほど飛散する領域（円錐の底面積）が増加し、単位面積当たりの堆積速度が遅くなる。また、飛散面積が基材幅よりも広くなると、その分収率が低下する。従って、出来るだけターゲットと基材間の距離(d_{t-s})を短くしたインプルーム法を採用することで収率の向上が期待できる。ただし、インプルーム法の課題として、 d_{t-s} が短いことに起因したターゲットへのレーザ入射角度の制限、基材上の位置による組成のばらつき、組成のばらつきに伴った有効成膜面積の縮小等が挙げられる。上述の通り、YAG レーザ PLD 法は均一なレーザエネルギー分布のために、有効な成膜領域が広がる可能性があるため、エキシマレーザ PLD+インプルーム法よりも YAG レーザ+インプルーム法の方がより広い面積で成膜が出来る分、収率が向上することが期待される。以上より、本検討で行った収率向上のための具体的なアプローチは次の通りである。収率向上のための具体的なアプローチは次の通りである。

インプルーム法による収率向上の基礎検討として、紫外線領域の波長 266 nm を持つ 4 倍波

YAG レーザを用いて 10 mm×10 mm の短尺基板上にイットリウム系超電導薄膜材料を蒸着し、 d_{rs} 、成膜時の酸素分圧に対する超電導特性の変化について検討を行い、インブルーム法による収率、超電導特性の向上に対する指針を得る。次に、マルチターン YAG レーザ PLD 装置を導入し、蒸着面積の増加と基礎検討で得られた知見を用いて静止系で収率 40%以上を実証する。

現在市販されている YAG レーザ機器の最大レーザエネルギーは、エキシマレーザの最大エネルギーよりも低いため、その分だけ蒸発量が低くなる課題が顕在化する可能性がある。この課題に対するアプローチとして、2 倍波 YAG レーザの使用によるレーザエネルギーの向上に関する検討を行う。YAG レーザは、基本波(1064 nm)を非線形光学結晶に通して得られる 2 倍波(532 nm)をさらに非線形光学結晶に通して 4 倍波(266 nm)を得ている。波長変換の効率は波長が短くなるほど悪化するため、4 倍波のエネルギーは基本波の 15~20%まで低下する。一方、2 倍波は基本波の 60~65%と、4 倍波の 3 倍以上のレーザエネルギーを出力可能である。そのため、2 倍波 YAG レーザを用いて良質なイットリウム系超電導膜が作製可能となれば、市販機器においてエキシマレーザに比べて YAG レーザのエネルギーが低いという問題点を克服できると期待される。

③成果

③-1 短尺基材上における YAG レーザ PLD 法の収率向上に関する基礎検討

(1)実験方法

短尺用 YAG レーザ PLD 装置を用いて、様々なターゲット・基材間距離(d_{rs})及び酸素分圧(p_{O_2})条件下で 10 mm×10 mm 短尺基材上にイットリウム系超電導膜を蒸着し、収率と超電導特性を評価した。それ以外の条件は一定とし、波長 266 nm の 4 倍波レーザを用いて、レーザエネルギー密度は 2.0 J/cm²、レーザ繰り返し周波数は 2 Hz そしてヒータ温度は 920°C とした。短尺基材としては、IBAD 法によって MgO 配向中間層を蒸着した IBAD-MgO 短尺基材を用いた。この IBAD-MgO 短尺基材の構造は表面から、CeO₂/LaMnO₃/IBAD-MgO/Gd₂Zr₂O₇/ハステロイである。イットリウム系超電導膜は CeO₂ 上に蒸着する。

収率は、蒸着前後における基材の重量変化(ΔM_{sub})とターゲットの重量変化(ΔM_{target})を測定し、 $100 \times \Delta M_{sub} / \Delta M_{target}$ [%]として見積もった。なお、重量の測定には電子天秤(精度 0.001 mg)を用いたが、 ΔM_{sub} は 0.1 mg オーダーであり、 ΔM_{target} は 1 mg オーダーであるため、重量測定精度は十分である。また、短尺基材はヒータ上に治具を用いて機械的に固定しているため、搬送時の摩擦などによる重量変化を考慮する必要はない。

臨界温度 T_c は直流四端子法を用いて、試料温度に対する電気抵抗率の変化から評価した。 J_c は同様に直流四端子法を用いて、77 K における電流値に対する発生電圧を測定し、電界基準 10 μ V/cm となる電流値から求めた。通常、1 μ V/cm が電界基準として用いられているが、本検討では短尺試料であるため電圧端子間距離が短いという制約上、十分な電圧分解能を得るために 10 μ V/cm を電界基準値として採用した。磁場を印加しない環境下での測定であるため、電流に対する電圧の立ち上がりは急峻であり (n 値~25)、1 μ V/cm と 10 μ V/cm で大きな差はない。

イットリウム系超電導膜の組成は、走査型電子顕微鏡に付随しているエネルギー分散型 X 線分光装置(SEM-EDX)を用いて評価した。

(2)結果

図 2.2.2-1 にレーザ条件（レーザエネルギー、繰り返し周波数、スポット面積等）を一定とした場合の d_{T-S} および pO_2 に対する収率、 T_c および J_c を示す。図 2.2.2-1(a) から、 d_{T-S} を 40 mm から 20 mm まで短縮したところ収率は単調増加し、8%から 12%まで向上した。次に、酸素分圧を 40 Pa から 200 Pa まで上昇させた結果、収率はさらに向上し 19%まで上昇したが、200 Pa 以上では収率は減少した（図 2.2.2-1(c)）。しかし、超電導特性は収率が上昇するにつれて低下し、収率 19%では、 $T_c = 80$ K、 $J_c = 0.2$ MA/cm² (@77 K、自己磁場)であった（図 2.2.2-1(b)、(d)）。膜の組成を評価したところ、イットリウム系超電導体の化学量論比に対して Y が少ない、Y-deficient な組成であった（表 2.2.2-1 上段参照）。つまり、高い J_c が得られる最適組成からずれているために超電導特性が低かったと考えられる。膜組成を最適組成にするために、ターゲット組成を調整した結果、表 2.2.2-1 下段のように膜組成が改善され、 $T_c = 88$ K、 $J_c = 1.8$ MA/cm² (@77 K、自己磁場)が得られた。

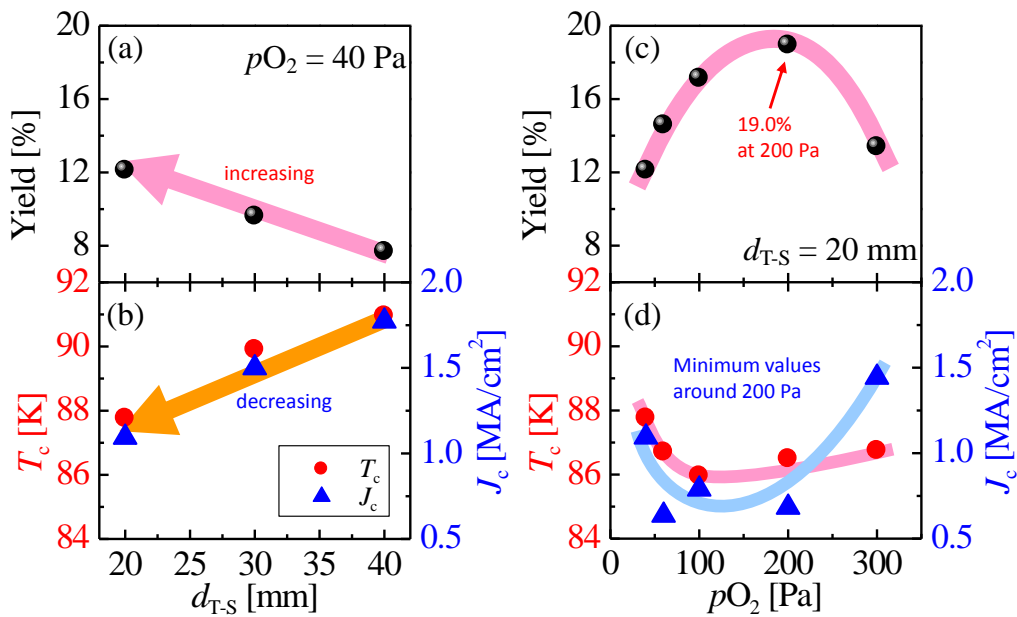


図 2.2.2-1. 10×10mm² 基板上における成膜条件に対するイットリウム系複合材料薄膜の収率および超電導特性。ターゲット-基板間距離(d_{T-S})に対する (a)収率、(b)超電導特性。酸素分圧(pO_2)に対する (c)収率、(d)超電導特性。

表 2.2.2-1 ターゲット組成に対する膜組成と超電導特性

ターゲット組成	膜組成	T_c 、 J_c
Y : Ba : Cu = 1 : 2 : 3	1 : 2.2 : 2.8	$T_c = 80.0$ K $J_c = 0.2$ MA/cm ² (@77 K, 自己磁場)
1 : 1.8 : 2.9	1 : 1.9 : 2.7	$T_c = 88.2$ K $J_c = 1.8$ MA/cm ² (@77 K, 自己磁場)

(3)考察

レーザーによって蒸発したターゲット構成元素はレーザー照射箇所を頂点とした円錐状に広がる。そのため、 d_{rs} が短くなるほど円錐の底面積が減少し、単位面積当たりの堆積量が増加した結果、収率が向上したと考えられる。また、 pO_2 が増加すると蒸発種が雰囲気圧力によって圧縮されるため、 d_{rs} の短縮と同様に円錐底面積を収縮させ、収率が向上したと考えられる。しかし、過剰に高い pO_2 は蒸発種の運動を阻害するために、蒸発種が基材まで到達できず、堆積量が低下する。従って、 pO_2 に対して収率は上に凸の傾向を示し、最適値が存在したと考えられる。

超電導特性は収率の向上に伴って低下したが、これはイットリウム系超電導膜の組成が最適組成からずれたためである。膜が最適組成になるようにターゲット組成を調整することで、高い収率を維持しながら十分な超電導特性を示すイットリウム系超電導膜の作製が可能である。

以上から、収率を向上させるためには、 d_{rs} を短くし、 pO_2 を適度に増加させることが有効であることがわかった。また、ターゲット組成の調整で超電導特性の低下も抑制できることも明らかになった。

③-2 マルチターン YAG レーザ PLD 装置の導入による収率向上

(1)実験方法

収率を向上させるためには、蒸着面積を広くすることが有効である。そこで、幅 10 mm の線材を平行に 3 レーン搬送可能なマルチターン YAG レーザ PLD 装置を導入し(図 2.2.2-2)、収率向上に関する検討を行った。

3 レーンにハステロイ™テープを設置し、酸素分圧 pO_2 に対する収率を評価した。この際、テープは静止させた状態で、ターゲット-基板間距離は 35 mm、波長 266 nm の 4 倍波レーザーを用いて、レーザーエネルギー密度は 2.0 J/cm²、レーザー繰り返し周波数は 2 Hz そしてヒータ温度は 920°C とした。図 2.2.2-3 にイットリウム系複合材料膜蒸着後のチャンバー内の様子を示す。3 レーンの金属テープ上に同心円状に黒いイットリウム系超電導膜が蒸着されていることがわかる。

マルチターンの場合、テープ設置時などの引き回しによってテープが摩耗するなど、測定し難い重量変化を伴う。そのため、短尺試料のように蒸着前後の重量変化測定から正確な収率を求めることは困難である。そこで、誘導結合プラズマ分光分析(ICP)法を用いて膜厚を測定し、体積を求めることで蒸着した重量を求め収率を測定した。収率測定の詳細は次の通りである。それぞれのレーンから 10mm×10mm 程度の大きさで 3 試料ずつ、合計 9 試料を切り出し、ICP 法で膜厚を測定した。測定した 9 点の膜厚をガウス関数 $\exp[-a x^2]$ を用いてフィッティングすることで試料全体にわたる膜厚分布を見積もり、さらにテープ全体に蒸着された膜の体積を計算した。その体積から重量(M_{tape})を計算し、ターゲット重量の変化分(ΔM_{target})から、 $100 \times M_{tape} / \Delta M_{target}$ [%]によって収率を求めた。

超電導特性は、同条件で IBAD-MgO 線材上に蒸着したイットリウム系超電導膜に対して測定を行った。測定の詳細は 2.2.2③-1(1)と同様である。

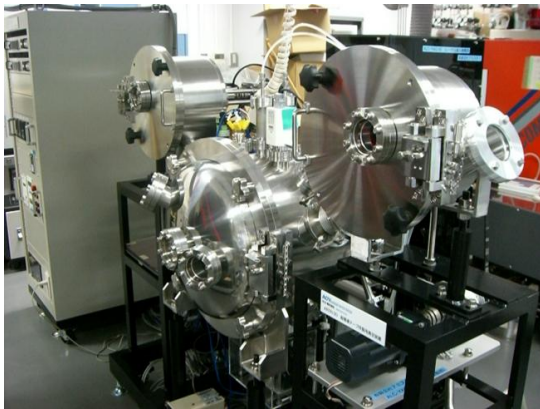


図 2.2.2-2 マルチターン YAG レーザ PLD 装置の外観。

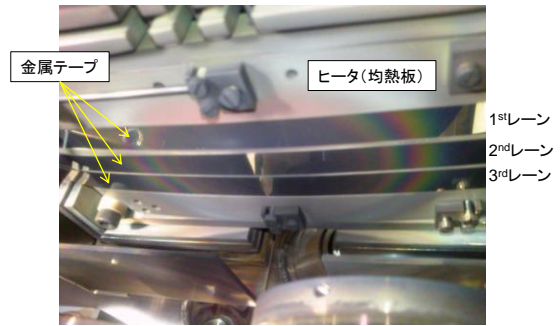


図 2.2.2-3 金属テープ上にイットリウム系超電導薄膜を蒸着した後のマルチターン YAG レーザ PLD 装置内部。3 レーンの金属テープ上に同心円状の模様が見られる。

(2)結果

図 2.2.2-4 に、膜厚分布の典型例として $pO_2 = 80 \text{ Pa}$ で成膜した際のイットリウム系複合材料膜の膜厚分布を示している。プルームの中心軸は 2nd レーンの 0 mm 付近にある。プロット点が ICP の実測データであり、曲線は実測データをガウス関数でフィッティングした結果である。図より、どのレーンもプルームの中心に近い 0 mm 付近で膜厚が最大値を示した。また、2nd レーンが最も膜厚が厚かった。同様の測定を $pO_2 = 40 \sim 160 \text{ Pa}$ の範囲で行い、収率を求めた。図 2.2.2-5 に、 pO_2 に対する収率を示す。酸素分圧に対して収率は単調に増加し、 $pO_2 = 80 \text{ Pa}$ で 39.1% 、 $pO_2 = 160 \text{ Pa}$ では 56.1% の収率が得られた。本課題で目標に設定した収率 40% は、 pO_2 が 80 Pa 以上で実現できることがわかった。次に、酸素分圧に対する超電導特性の評価を行った。図 2.2.2-6 に、 pO_2 に対する T_c と J_c を示す。図から、 pO_2 の増加に伴って超電導特性が単調に低下した。

また、テープを移動させながらイットリウム系超電導膜を蒸着する移動系試料についても膜厚の分布を測定した。図 2.2.2-7 にテープ上の位置に対する膜厚分布の測定結果を示す。静止系のデータから予想した膜厚分布は点線で示している。静止系測定時に比べて、テープに対するプルーム位置などの最適化を行ったため、予想膜厚分布よりも実測値の方が厚いが、傾向は同じである。従って、移動系においても 40% 以上の収率が見込まれる。また、本検討では $d_{t-s} = 35 \text{ mm}$ で固定して成膜を行ったが、さらに短い d_{t-s} としたインプルーム法によって、静止系、移動系共に収率はさらに向上すると考えられる。

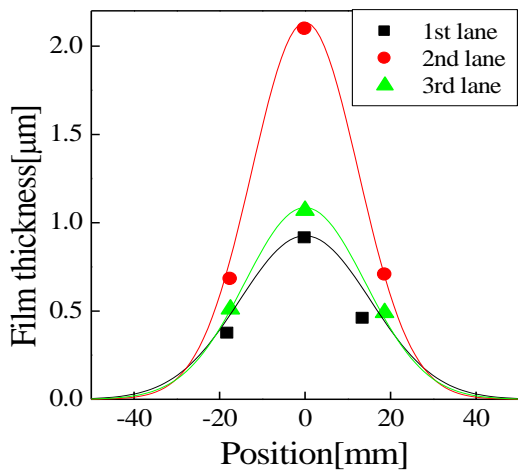


図 2.2.2-4 酸素分圧 80 Pa で成膜したイットリウム系超電導膜の膜厚分布。

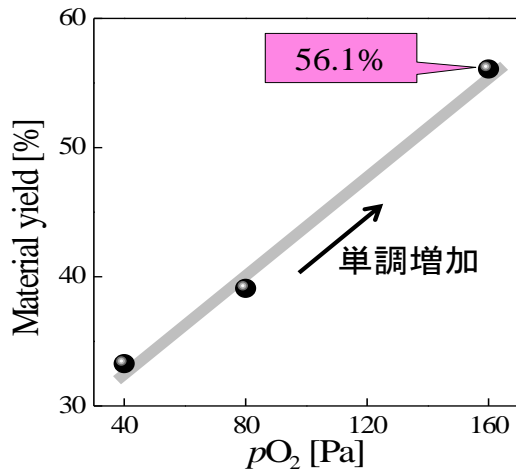


図 2.2.2-5 酸素分圧に対するイットリウム系超電導膜の収率。

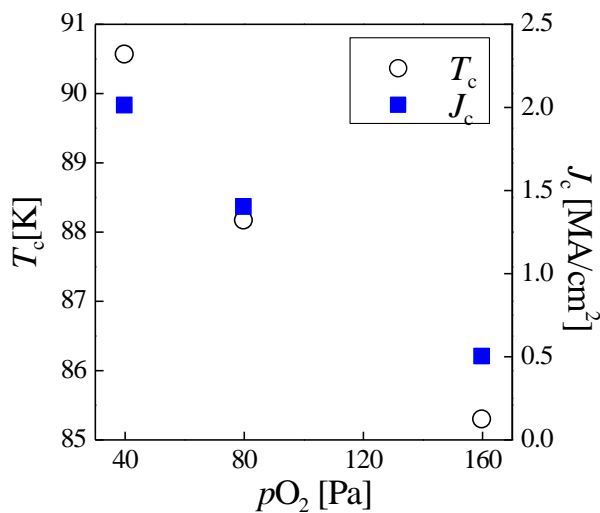


図 2.2.2-6 酸素分圧に対するイットリウム系超電導膜の超電導特性。 J_c は 77 K で測定した。

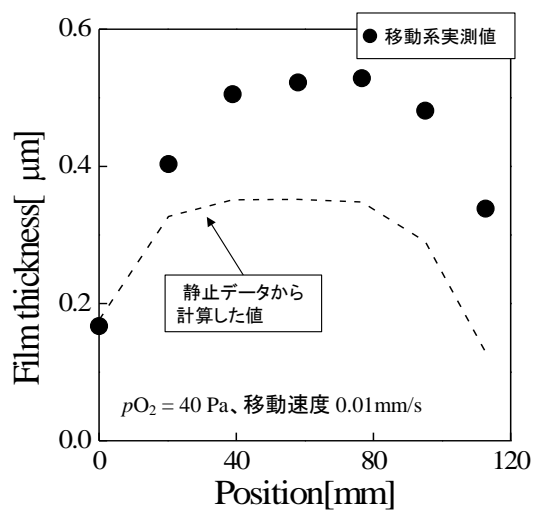


図 2.2.2-7 移動系試料の膜厚分布。 $pO_2 = 40$ Pa、移動速度 0.01 mm/s である。

(3) 考察

酸素分圧に対する収率の傾向は短尺基材上の結果と同じであることから、さらに高い pO_2 で収率は最大値を示すと考えられる。しかし、超電導特性は収率増加に伴って低下している。収率 40% を目指す場合、 $pO_2 = 80$ Pa 強で十分であり、図 2.2.2-6 から、 $T_c = 88.2$ K、 $J_c = 1.4$ MA/cm²(@77 K、自己磁場)と十分な超電導特性が得られている。さらに高い収率かつ高い超電導特性を得るためには、短尺基材上の結果と同様に、ターゲットの組成を最適化することで実現できると考えられる。

③-3 2倍波 YAG レーザ PLD 法によるイットリウム系超電導薄膜の作製

(1)実験方法

短尺用 YAG レーザ PLD 装置において、2倍波 YAG レーザを用いることでイットリウム系複合材料膜を作製した。成膜時のレーザーエネルギー密度は 2.0 J/cm^2 、レーザー繰り返し周波数は 2 Hz 、ヒータ温度は 920°C そして酸素分圧は 40 Pa とした。基材としては、 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ にカットした IBAD-MgO 短尺基材を用いた。

イットリウム系超電導膜の複合材料膜は X 線回折(XRD)法を用いて評価した。また、表面形状は走査型電子顕微鏡(SEM)、組成は SEM-EDX で評価した。超電導特性の測定方法は、2.2.2③-1(1)と同様である。

(2)結果

図 2.2.2-6 に 2倍波 YAG レーザ PLD 法で作製したイットリウム系超電導膜の XRD パターンを示す。図から、IBAD-MgO 短尺基材上でイットリウム系超電導膜が c 軸配向しており、かつ基材表面に平行な面内においても結晶軸方位が整列していることがわかった。この試料の超電導特性を測定した結果、 $T_c=89.0 \text{ K}$ 、 $J_c=1.4 \text{ MA/cm}^2$ (@77 K、自己磁場)を示した。つまり、2倍波 YAG レーザを用いても 2 軸配向し、かつ十分な超電導特性を持ったイットリウム系超電導薄膜の作製が可能であることがわかった。

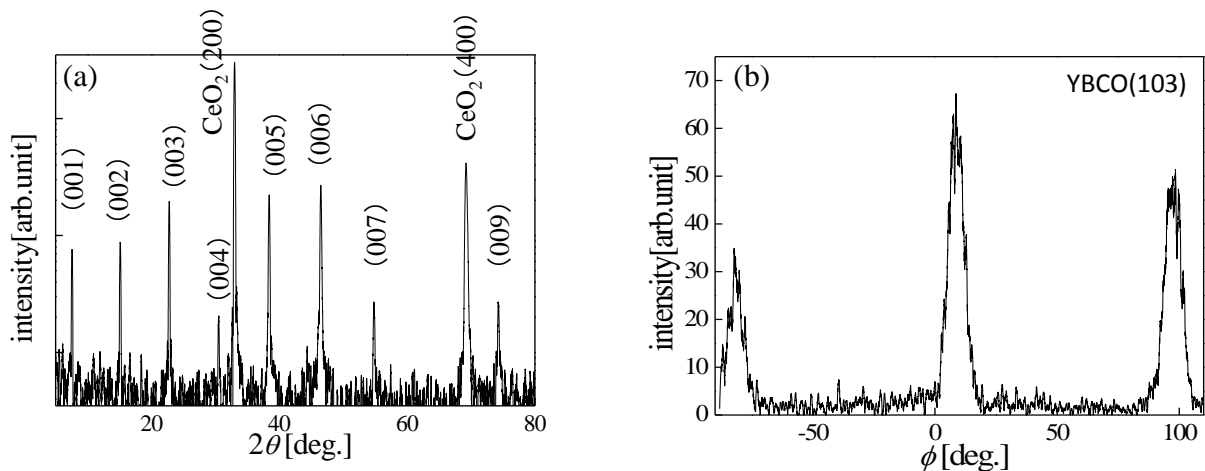


図 2.2.2-8 2倍波 YAG レーザを用いた PLD 法で作製したイットリウム系超電導膜の X 線回折パターン。(a) 2θ スキャン、(b) ϕ スキャン。

しかし、この試料の組成比は $\text{Y} : \text{Ba} : \text{Cu} = 1 : 2.45 : 4.70$ と、Ba と Cu が過剰であった。成膜後のターゲット表面の組成は、 $\text{Y} : \text{Ba} : \text{Cu} = 1 : 1.65 : 2.28$ であり、化学量論比に対して Ba と Cu が欠損している。また、図 2.2.2-7 に試料表面の SEM 像を示す。数ミクロン程度の大きさの液滴状異物が多数見られた。以上から、2倍波 YAG レーザによってターゲット表面が熔融し、生じた Ba-Cu-O 液相が蒸発あるいは飛散し、基材上に付着したと考えられる。これらの付着物の組成は様々であるが、概して Ba や Cu が化学量論比に比してリッチな組成であった。

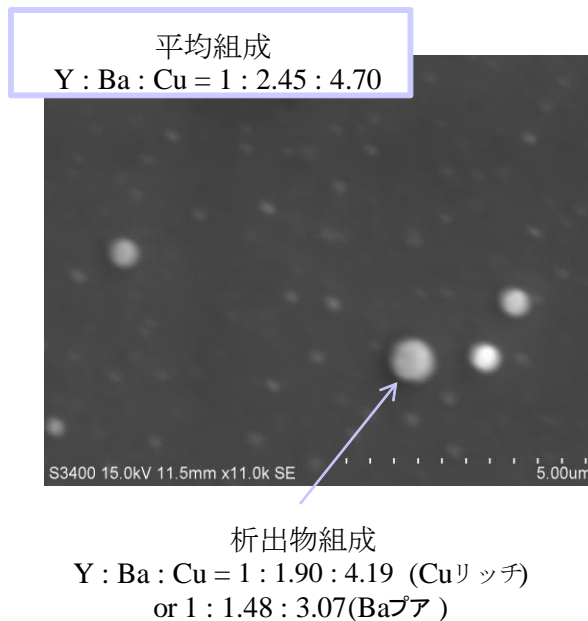


図 2.2.2-7 2倍波 YAG レーザ PLD 法で作製したイットリウム系超電導膜の表面 SEM 像。

(3) 考察

2倍波 YAG レーザ PLD 法を用いても結晶粒が2軸配向し、かつ十分な超電導特性を持ったイットリウム系超電導膜の作製が可能であるが、ターゲット表面の融解に起因すると思われる付着物が試料表面に多く見られた。高い臨界電流を目指して厚膜を作製する場合、これらの付着物の上ではイットリウム系超電導膜が成長し難いと予想される。従って、厚膜の表面近傍ではランダムな結晶が成長し、超電導電流を輸送しないデッドレイヤーが形成されると予想される。また、2倍波 YAG レーザ照射後のターゲット表面組成は Ba と Cu が不足しているため、製造時間が長時間にわたるイットリウム系複合材料の作製においては、ターゲット組成のずれが品質に悪影響を及ぼす恐れがある。

現段階では、2倍波 YAG レーザ PLD 法はイットリウム系複合材料作製プロセスとして適していないと考えられるが、ターゲット組成の変更でこれらのデメリットを解消できる可能性はある。

2.2.2-2 YAG レーザーPLD 法による複合材料の組織評価 (研究組合)

① 背景及び目的

名古屋大学において検討・開発される YAG レーザ PLD 法を用いて作製されたイットリウム系複合材料の実応用においては、長尺化が不可欠であり、そのためには、成膜時間の長時間化、安定化が重要となる。固体レーザーである YAG レーザ PLD 法では発振に伴う消耗品がなく連続運転が可能であるため、エキシマレーザーとは異なり長尺化に際して一回の成膜時間の制約が無く、単純にプロセスを長時間化することで長尺線材作製が可能になる点で、長尺化しやすいプロセスだと言える。一方で、長時間にわたって良好な成膜条件を維持するという安定化においては、レーザーエネルギーの時間的な安定性に依存しており、近年のレーザー技術進展により着実に改善されてきている。

本質的に長尺化しやすいプロセスである YAG レーザ PLD 法の実用化にあたっては、まずは短尺での組成分布や膜厚分布の均一性確保による収率および特性の向上が重要となるため、本開発課題においては、まず名古屋大学において作製された短尺試料の評価を行い、長尺化を含むプロセス開発について検討することを目的とした。

②課題とアプローチ

実用可能なイットリウム系複合材料の作製には、高原材料収率かつ高特性を有する条件で長尺複合材料を作製する必要がある。名古屋大学においては、インブルーム法を採用し、マルチターンプロセスとの併用により収率向上を図ると共に、最適成膜条件の探索を行い、特性向上に努めた。これらの試料評価においては、微細組織の観察、特に膜厚方向の情報が非常に有用であり、成膜された YBCO 層内部の異物の同定や厚みなどを詳細に検討しなければならない。

本研究テーマにおいては、作製された線材評価とその情報フィードバックによるプロセス開発促進のため、研究組合に導入された装置を用いて線材の微細組織分布、特に膜厚方向の断面情報などを評価し、成膜時の結晶成長機構を考察する。

③成果

③-1 短尺基板上における YAG レーザ PLD 法の微細組織観察

(1)実験方法

マルチターン YAG レーザ PLD 装置を用いて、複数のイットリウム系複合材料の位置 (レーン) において、静止状態で同時に成膜された複合材料の断面を観察した。基板は IBAD 法によって MgO 配向中間層を蒸着した IBAD-MgO 短尺基材を用いた。この IBAD-MgO 短尺基材の構造は表面から、CeO₂/LaMnO₃/IBAD-MgO/YSZ/ハステロイ™である。イットリウム系複合材料膜は CeO₂ 上に蒸着した。成膜条件は、酸素分圧 40Pa、テープ表面温度 720℃、ターゲット-基材間距離 35mm であり、収率は約 33%であった。得られた試料から、プルーム中心部を通るレーンの中心部、隣のレーンの中心部の 2 カ所を取り出し、幅方向に切断して断面の組織

観察を行った。試料はイオンビーム切断により、線材の中央部分約 1mm の領域を切断加工し、高分解能 SEM と EDS マッピングにより断面の組織観察、組成評価を行った。

(2)結果

図 2.2.2-8 に成膜中心レーン及び隣接レーンで成膜された試料の断面 SEM 写真を示す。成膜中心レーンで成膜された試料(a)は厚みが約 $0.85\mu\text{m}$ 、隣接レーンで成膜された試料(b)は厚みが約 $0.49\mu\text{m}$ であった。また、中心レーンは均一な組織であったのに対し、隣接レーンでは黒い粒子が多く分散偏在しており、これらの粒子は EDS マッピングの結果から、Cu を多く含んでいることが示唆された。ICP による名古屋大学での評価結果と比較すると、膜厚の分布においては、本観察結果と ICP による質量平均の測定結果との間に大きな違いは見られなかった。しかしながら、組成分布、均一性に関しては、ICP 測定では成膜位置、レーンによる違いは明確には検出されなかったが、断面組織観察においては、中心部はかなり均一性が高く、ほぼ YBCO 単相で構成されているが、隣接レーンでは、YBCO 層中に、主に CuO と考えられる異相粒子が数多く存在しているということが明らかになった。

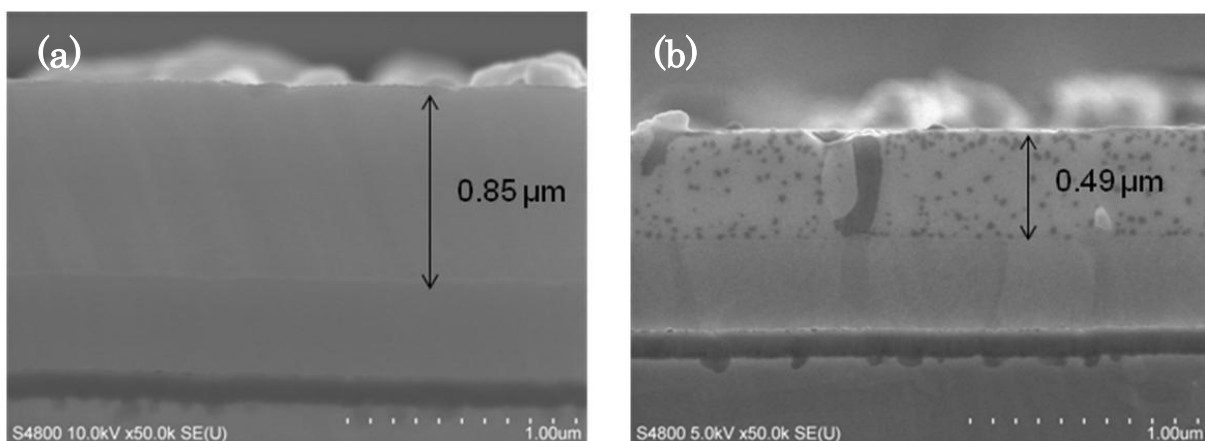


図 2.2.2-8 マルチターン YAG レーザ PLD 法により成膜されたイットリウム系複合材料の断面組織：(a)中心レーン、(b)隣接レーン

(3)考察

レーザによって蒸発したターゲット構成元素はレーザ照射箇所を頂点とした円錐状に広がる。円錐内部はほぼ均一に各元素が飛散すると考えられるが、得られた試料内部は膜厚、組成とも均一ではなく、分布が存在している。これは、実際には飛散が不均一なのか、それとも温度などの成膜条件の不均一に起因する、付着／離脱の不均一に起因するものかの 2 通りが考えられる。前者の場合は、均一であるが故に成膜エリアを非常に広く取ることができ、高い収率が期待できるという YAG レーザ PLD 法の利点の一つ失われることにも繋がる。後者の場合、主に成膜エリアの温度不均一により飛んできた原子／クラスターの付着／離脱挙動が場所によって異なり、組成偏析を生み出していると考えられる。

これらの抑制には、まずは成膜条件の均一化を行った上で、マルチプルーム法の採用など、

エキシマレーザー PLD 法の知見も活用していく必要がある。

2.2.2-3 YAG レーザー PLD 法による希少金属利用率向上技術開発のまとめ

- ・ 10 mm×10 mm 短尺基材上イットリウム系複合材料膜に関する基礎検討から、ターゲット・基材間距離の短縮と酸素分圧の最適化で収率が向上することが明らかとなった。本検討では、ターゲット・基板間距離 20 mm、酸素分圧 200 Pa において最高で 19%の収率を得ることが出来た。
- ・ 収率の増加に対して超電導特性は単調に低下したが、ターゲット組成の最適化で、高い収率を維持しながら $T_c = 88.2$ K、 $J_c = 1.8$ MA/cm²(@77 K、自己磁場)を得ることが出来た。
- ・ 蒸着面積を増加させ収率をさらに向上させるために、マルチターン YAG レーザ PLD 装置を導入し、酸素分圧の最適化(160 Pa)によって、56.1%の収率を得た。
- ・ マルチターン YAG レーザ PLD 装置において収率 40%の条件 (酸素分圧 80 Pa) では、 $T_c = 88.2$ K、 $J_c = 1.4$ MA/cm²(@77 K、自己磁場)が得られた。
- ・ 静止系の膜厚分布から予想した膜厚分布と移動系で実測した膜厚分布は同じ傾向であったことから、移動系においても 40%以上の収率を見込むことが出来た。
- ・ IBAD 基材上にイットリウム系超電導膜を静止状態にて複数位置で成膜し、断面の微細組織観察を高分解能 SEM、EDS マッピングを用いて実施した。中心レーンでは、YBCO ほぼ単相の均一な微細組織が観察され、膜厚は 0.85 μ m であったのに対し、隣接レーンでは、YBCO 結晶中に多数の高 Cu 濃度の粒子が存在し、その膜厚も 0.49 μ m であった。また、組織・組成に関しても成膜位置による違いが見られた。
- ・ 2 倍波 YAG レーザ PLD 法を用いてイットリウム系超電導膜を作製した結果、2 軸配向し、 $T_c = 89.0$ K、 $J_c = 1.4$ MA/cm²(@77 K、自己磁場)を示した。しかし、Ba と Cu が過剰な膜組成であった。
- ・ 達成度 >100%

参考文献

- [1] Y. Ichino, Y. Yoshida, T. Yoshimura, I. Ono, Y. Takai, M. Yoshizumi, T. Izumi and Y.

- Shiohara: IEEE Trans. Appl. Supercond. 21 (2011) 2949.
- [2] Y. Ichino, Y. Yoshida, T. Yoshimura, Y. Takai, M. Yoshizumi, T. Izumi and Y. Shiohara: Physica C 470 (2010) S1003.
- [3] T. Yoshimura, Y. Ichino, Y. Yoshida, Y. Takai, R. Kita, K. Suzuki and T. Takeuchi: to be published in Physica C [DOI: 10.1016/j.physc.2011.05.096].
- [4] Y. Ichino, Y. Yoshida, T. Yoshimura, Y. Takai, M. Yoshizumi, T. Izumi and Y. Shiohara: Physica C 470 (2010) 1234-1237.

2.3 イットリウム系複合材料を用いた回転機要素技術開発（研究組合、九州大学、早稲田大学）

本プロジェクトでは、複合材料の開発から機器応用への開発へつなげるため、イットリウム系複合材料を用いた回転機要素技術開発を行い、超電導のメリットと希土類元素使用量低減効果の大きな領域として、500 kW(1000 rpm 級)以上の産業用回転機(モータ、発電機)を目標として設定し、新しいイットリウム系複合材料の特性を基に概念設計と要素技術開発を実施した。概念設計では、現在のイットリウム系複合材料の特性を使って回転機の設計を行い、イットリウム系複合材料を使うことによるレアメタル(Rare Metal、以下 RM と略す)削減効果、軽量化、コンパクト化を検証した。

要素技術開発は、回転機の主要部分である界磁巻線とサーモサイフォン式冷却システムに関して、界磁巻線コイル、回転冷却試験機を試作し、将来の回転機の製作に生かせる特性を取得した。

これらの実施により、今後のイットリウム系大容量高速回転機(以下、Y系回転機)作製のための開発に対する課題と指針を得た。

また、今後の実用化の見通し、波及効果についてより具体的に可能性を見るために、世界的にビスマス(以下 Bi と略す)系複合材料で開発が検討されている船用回転機の 5MW 機についてもイットリウム系複合材料を用いた概念設計の検討を行なった (Appendix “実用化の見通し検討” 参照)。これにより、これまで Bi 系複合材料で検討されてきた船用回転機についてもイットリウム系適用の効果を具体的に得ることができた。

2.3.1 回転機適正構造の概念設計

①背景及び目的

超電導による回転機の開発は、Siemens、AMSC、Doosan 社[1-3]などの各社で船用、産業用を目指して活発に開発が行われている。しかしながら、これらは Bi 系複合材料によるものだけで、イットリウム系複合材料を用いた回転機の開発例はない。これは、1つには本複合材料の長尺化が遅れていたためであるが、本プロジェクトで示されたように 1km にもなる長尺化、さらに量産化も可能な情勢となってきた。また、臨界電流 I_c などの特性も大幅に向上してきている。

以前から、イットリウム系複合材料は、Bi 系複合材料と比べて磁場中特性に優れ、大きなメリットが期待されるといわれてきた。km 級の長尺が現実のものとなってきた現段階で、 I_c も向上したイットリウム系複合材料を用いた回転機を設計し、その可能性とメリットをより具体化することは、今後のイットリウム系超電導機器の開発に大いに役立つと思われる。

よって、ここでは本プロジェクトの主な目標である RM 削減を軸に、一般的な超電導回転機の効果、重量、サイズ、効率に関してその効果を設計して確かめた。対象とした機器は、まず、産業用として期待できる 500 kW(1000 rpm 級)の回転機とした。

また、さらに、今後の実用化の見通しをつけるために、船用 5MW 級機の検討も行ったので本章の最後に Appendix として記載した。

②課題とアプローチ

上記目的を達成するための Y 系回転機的设计検討には、以下の課題がある。

- ・磁場-応力-伝熱を連成した回転機評価用シミュレータの開発：

イットリウム系複合材料は高特性のため、従来の Bi 系複合材料より高温高磁場で使える。イットリウム系複合材料の特性を考慮して、それを使った界磁巻線(コイル)用の解析ソフトを開発し、基本的なコイル形状での Y 系界磁巻線の成立性を温度、磁場、応力に関して、把握する必要がある。

- ・Y 系回転機的设计とイットリウム系複合材料使用による効果の算出：

これまでに Y 系回転機の例はない。上記解析ソフトにより、現在のイットリウム複合材料特有の特性を反映させた設計検討を行う。回転機として総合的に必要な磁場依存性だけでなく、応力、伝熱の相互に関与する要素を連成させた解析を行う。これにより具体的にその効果を算出することが今後の開発にとって重要である。

- ・対象とする回転機は、一般産業用の 500 kW 級-1000 rpm 級で広い産業用分野でのイットリウム系複合材料回転機の優位性を見通す。

本プロジェクトは 1 年と短い期間であり、本開発項目 2.3.1 概念設計では、効率よく開発を進めるために以下のアプローチにより設計検討を行った。

まず、界磁巻線コイルの設計検討のための磁場、温度、応力の 3 要素を連成させた解析シミュレータを開発する。これを用いて、基本的な傘型形状コイルに関して、イットリウム系複合材料の通電特性と伝導冷却特性を考慮して、Y 系コイルの成立性を評価した。液体 Ne サーモサイフォン冷却(27K 以上)で軽量化のため鉄心を使わない(2T 以上)、複合材料の使用量もできるだけ少なくする条件下で検討した。

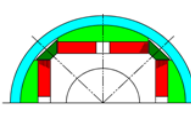
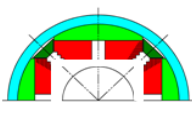
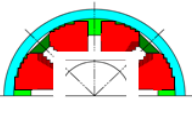
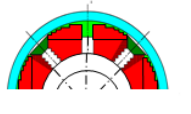
単純矩形 (平型)コイル	平傘型	菱形傘型	鞍型傘型
			
・シンプルな構造 ・応用基盤PJのII 期で試作	・遠心力に対する 保持機構が簡易	・充填率&軽量化 に適する	・最充填。円 筒に沿わせる

図 2.3.1-1 種々の形状の界磁巻線コイル

回転機の界磁巻線の形状としては、図 2.3.1-1 に示す様に 種々の形状が考えられるが、ここでは。界磁巻線コイルの初期検討形状として、製作性の点から、回転機の大きな遠心力に耐える構造、かつ、劣化しやすい接続部が不要なシリンダー巻線を考慮した。すなわち、大きな遠心力のかかる高回転数の 500kW 機は平傘型形状に、回転数の小さな 5MW 機は菱形傘型形状(Appendix)を代表検討例として選んだ。冷却方式には、液体 Ne(沸点 27K)によるサーモサイフォン冷却を想定してい

るので、その沸点以上のできるだけ高温でイットリウム系複合材料使用の効果がある設計を目指した。しかしながら、高温であるほどシステム全体の効率は向上するが、イットリウム系複合材料の I_c は低下するのでバランスが必要である。他方、これまでの類似した検討結果では[2]、界磁コイルの端部温度は 40K 程度になっているので、今回の初期検討としては温度 40K での検討を行った(以上、成果 2.3.1③-1)。

次に、この界磁コイルから成る界磁巻線について、その形状が回転機としての最終出力特性に与える影響を設計検討した。すなわち、量産イットリウム系複合材料の I_c の温度、磁界、磁界印加角度依存性に加え交流損失特性を把握したのち、界磁巻線の形状、配置とギャップ磁界強度などが回転機の最終出力特性である回転機出力、効率、トルク特性に与える影響について検討し、界磁巻線の最適形状化を行った(成果 2.3.1③-2)

さらに、これらの超電導界磁巻線の解析検討に基づき、常電導電機子、ヨークなどを含む回転機全体の詳細設計を行ない、常電導機と比較し、Y 系回転機のメリットを具体的に検討した。すなわち、本開発の主眼である RM 使用量、および従来からの回転機としての効果(高効率化、軽量化、小型化)について Y 系回転機のメリットを数値を上げて具体的に提示する。

設計検討の具体的な目標としては、以下を掲げた。

- ・ RM 量削減効果として、その使用量が従来の永久磁石回転機に比べ 1/10 以下となること
- ・ 汎用的な超電導回転機の効果、重量、サイズの減少、効率向上の程度を明確にすること

③成果

③-1 回転機用連成シミュレータ開発と解析

回転機の設計・評価のため、イットリウム系複合材料に特有な電磁気的特性、熱的特性と機械的特性を同時に考慮した電磁場・電磁力連成解析シミュレータを開発する。イットリウム系複合材料は薄膜積層型のテープ形状をしており、温度・磁場強度・磁場角度によってその特性が大きく変化し、界磁巻線の特性に影響を与える。また、回転機の性能は、回転子の運動、電源リプルなどに起因する回転機内の磁場の時間・空間高調波に影響を受ける。さらに、発生する電磁力(トルク)は、常電導回転機では高強度の鉄心が担っているが、空心界磁型の超電導回転機ではイットリウム系複合材料の巻線部自体が受ける。超電導複合材料は応力分布を経験することとなり、これらの電磁力により巻線が変形し、超電導特性が劣化する可能性がある。

そこで、ここではイットリウム系複合材料の材料特性を考慮した電磁場・電磁力連成解析シミュレータを開発し、磁場、応力、温度が複合的に影響する環境下での回転機、特に界磁巻線コイルについての設計・評価を行ない、その成立性を検討する。

解析は、産業用回転機 500kW-1000rpm 級、より具体的には、産業用で最も良く使われている 4 極 60Hz 相当の 1800rpm とした。また、各々の界磁巻線コイルに関しては、イットリウム系複合材料の複合材料(以下、単に複合材料とも記載する)特性が、1) 現在長尺量産化供給実績がある $I_c=300A/cm$ 幅級、2) さらに特性が向上した $I_c=600A/cm$ 幅級(これもすでに長尺で達成実績がある)の 2 種類を用いた。

(1) 電磁場・伝熱・応力解析連成シミュレータ

(1)-1 電磁場解析

電磁場解析は Maxwell 方程式から、汎用性がある \mathbf{A} - ϕ 法 (ベクトルポテンシャル \mathbf{A} とスカラーポテンシャル ϕ を未知数とする) に有限要素法 (FEM: Finite Element Method) と適用することにより定式化した。

$$\begin{aligned}\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) &= \mathbf{J}_0 - \sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla \phi \right) \\ \nabla \cdot \sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla \phi \right) &= 0\end{aligned}$$

ここで、 \mathbf{A} : 磁気ベクトルポテンシャル、 ϕ : 電気スカラーポテンシャル、 \mathbf{J}_0 : 電流密度、 μ : 透磁率、 σ : 導電率である。磁性体部の透磁率 μ は非線形な \mathbf{B} - \mathbf{H} 特性に従う。また、超電導体部の導電率 σ は非線形な \mathbf{E} - \mathbf{J} 特性に従う。超電導体の \mathbf{E} - \mathbf{J} 特性は、下式の n 値モデルを適用した。

$$\mathbf{E} = E_c \left(\frac{\mathbf{J}}{J_c} \right)^{1/n}$$

ここで、 \mathbf{E} : 電界、 \mathbf{J} : 電流密度、 J_c : 臨界電流密度、 E_c : 臨界電流密度を定義する電界基準である。以上のように、磁性体、超電導体とも非線形特性があるため、有限要素法の定式化の際には、ニュートン・ラフソン法を適用し、線形化して反復計算を行っている。

(1)-2 熱解析

物質の熱伝導現象は次の熱伝導方程式に従う。

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + \dot{Q}$$

ここで、 T : 温度、 C : 熱容量、 k : 熱伝導率、 \dot{Q} : 単位体積当たりの発熱である。発熱項の中身は、

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{transfer} + \dot{Q}_{Joule} + \dot{Q}_{AC}$$

で、 \dot{Q}_{Joule} : 導体部にジュール発熱、 \dot{Q}_{AC} : 超電導体部に発生する交流損失である。有限要素法において境界条件は離散化の過程で現れる。本プロジェクトでは冷媒であるネオンとの熱伝達が境界条件 (第三種境界条件) として与えられる。すなわち、冷媒 (ネオン) と境界面との間の熱流束 $\dot{Q}_{transfer}$ は熱伝達係数 h と冷媒の温度 T_{bath} を用いて、以下の関係でまとめられる。

$$\dot{Q}_{transfer} = h(T - T_{bath})$$

以上の解析において、 C , h , k は温度の関数として非線形計算を行った。

(1)-3 応力解析

応力解析では対象が静的弾性体であれば、以下の平衡方程式が成り立つ。

$$\begin{aligned}\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + F_x &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + F_y &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + F_z &= 0\end{aligned}$$

ここで、 $\tau_{xx}, \tau_{yy}, \tau_{zz}$ は垂直応力 ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ とも記載される)、 $\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yx}, \tau_{yz}, \tau_{zy}, \tau_{zx}$ はせん断応力である。 F_x, F_y, F_z はそれぞれ x, y, z 方向にはたらく外力である。

ひずみは変位と以下の関係がある。

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \\ \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \\ \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \end{cases} \quad \begin{cases} \varepsilon_{xy} = \frac{1}{2}\gamma_{xy} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right) \\ \varepsilon_{yz} = \frac{1}{2}\gamma_{yz} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}\right) \\ \varepsilon_{zx} = \frac{1}{2}\gamma_{zx} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}\right) \end{cases}$$

ここで、 $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ は垂直ひずみ、 $\varepsilon_{xy}, \varepsilon_{yz}, \varepsilon_{zx}$ はせん断ひずみ、 $\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$ は工学的せん断ひずみである。 u, v, w はそれぞれ x, y, z 方向の変位である。

応力とひずみは以下の関係がある。

$$\sigma_{ij} = D_{ijkl}\varepsilon_{kl}$$

具体的に書き下すと、

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left\{ (1-\nu)\varepsilon_x + \nu(\varepsilon_y + \varepsilon_z) \right\}, & \tau_{xy} &= 2G\varepsilon_{xy} = G\gamma_{xy} \\ \sigma_y &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left\{ (1-\nu)\varepsilon_y + \nu(\varepsilon_z + \varepsilon_x) \right\}, & \tau_{yz} &= 2G\varepsilon_{yz} = G\gamma_{yz} \\ \sigma_z &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left\{ (1-\nu)\varepsilon_z + \nu(\varepsilon_x + \varepsilon_y) \right\}, & \tau_{zx} &= 2G\varepsilon_{zx} = G\gamma_{zx}\end{aligned}$$

ここで、 E : ヤング率(縦弾性係数)、 ν : ポアソン比、 G : せん断弾性係数(横弾性係数)である。等方性材料では、ヤング率およびポアソン比との間に次の関係がある。

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

(1)-4 連成解析

連成解析の概念図を図 2.3.1-2 に示す。電磁場・伝熱・応力の連成解析では、共通の有限要素分割を用いて、各解析間で発熱、電磁力などの受け渡しを行っている。

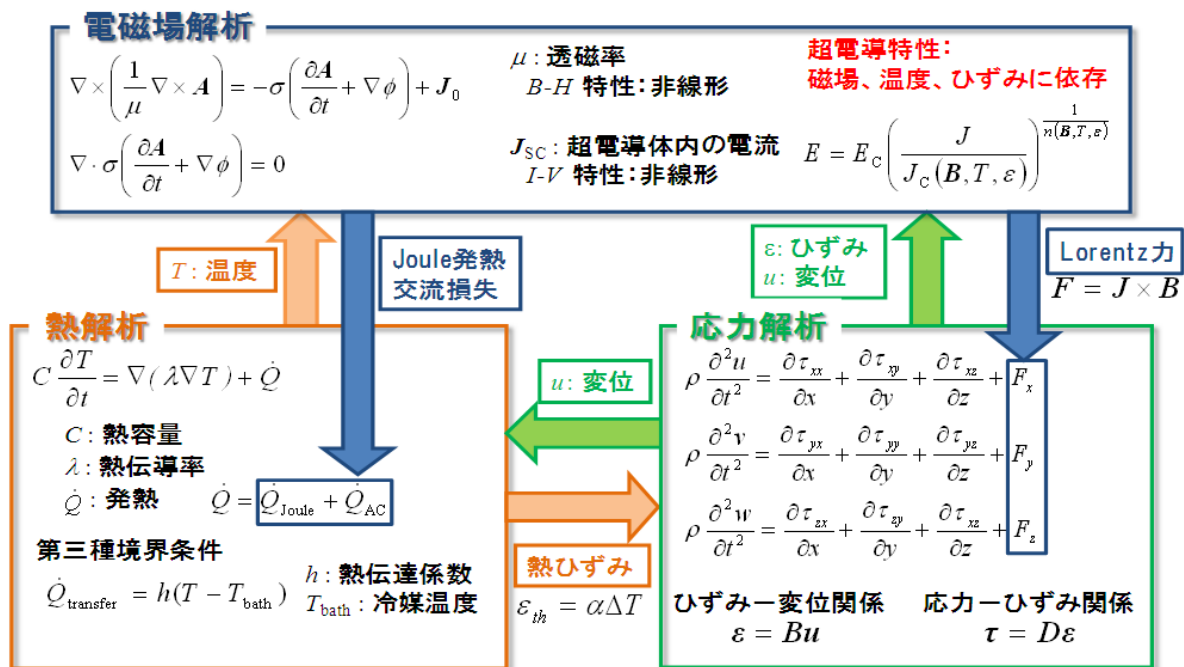


図 2.3.1-2 電磁場・伝熱・応力解析連成シミュレータ

(2) 結果

産業用 500kW-1800rpm 機について、まず、図 2.3.1-3 の特性を持つ複合材料を使い、次に、図 2.3.1-4 の界磁巻線(コイル)の形状、すなわち、平傘型形状および表 2.3.1-1 の仕様を想定して連成解析を行った。これにより、開発した連成シミュレータによる界磁巻線の発生磁場と形状による効果から、界磁巻線の基本設計を行った。以下の仕様に基づき、超電導同期電動機の基本設計を行った。500kW 級機に関しては、 $I_c = 300A/cm$ 幅級の複合材料を用い、また、回転数が 1800rpm と高いことから遠心力の影響を考慮して、平傘型形状の界磁巻線について、検討した。また、運転温度は、2.3.1②で述べたように液体 Ne (沸点 27K) によるサーモサイフォン式冷却を用いた他の検討結果を参考に 40K とした[2]。

方式： 回転界磁型同期電動機(界磁：超電導・無鉄心、電機子：常電導、銅線)

出力： 500 kW、回転数： 1,800 rpm

定格電流：約 750 A、定格電圧：400 V 級

複合材料：幅 5 mm、0.1 mm 厚銅付(半田付け、片面 HTS 側配置)、絶縁付

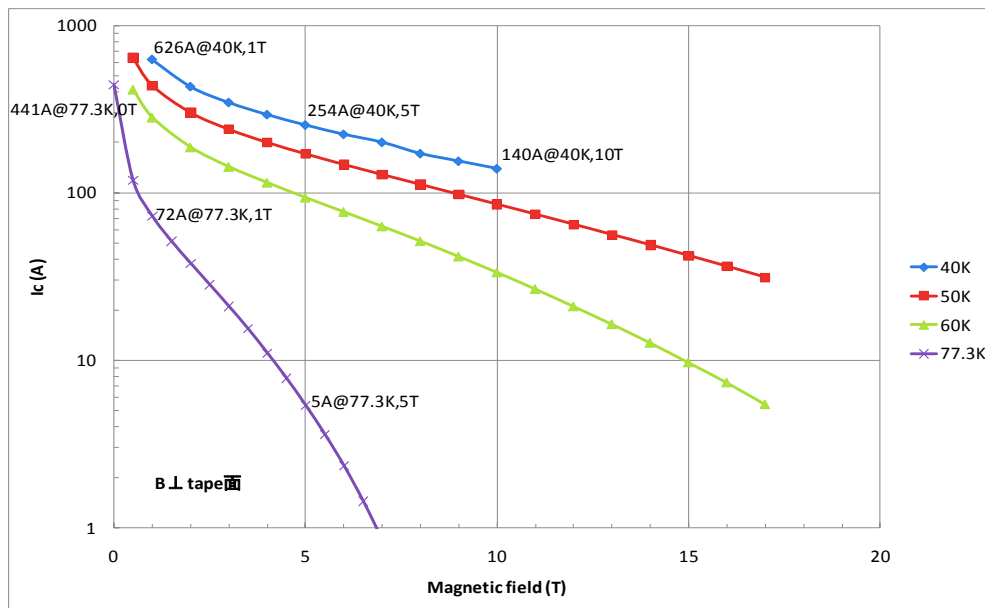


図 2.3.1-3 イットリウム系複合材料の I_c - B - T 特性

表 2.3.1-1 500kW 級回転機の諸元

定格出力	500 kW
定格回転速度	1800 rpm
定格電圧	440 V
定格電流	700 A
固定子外径	580 mm
固定子内径	390 mm
エアギャップ	5 mm
固定子鉄心長	550 mm
固定子スロット数	60
電機子コイル数	60
每溝導体数	6
電機子コイル電流密度	5 A/mm ²
界磁巻数	1170
界磁電流	140 A
複合材料幅	5 mm
複合材料使用量(5mm 幅)	1.6 km/極

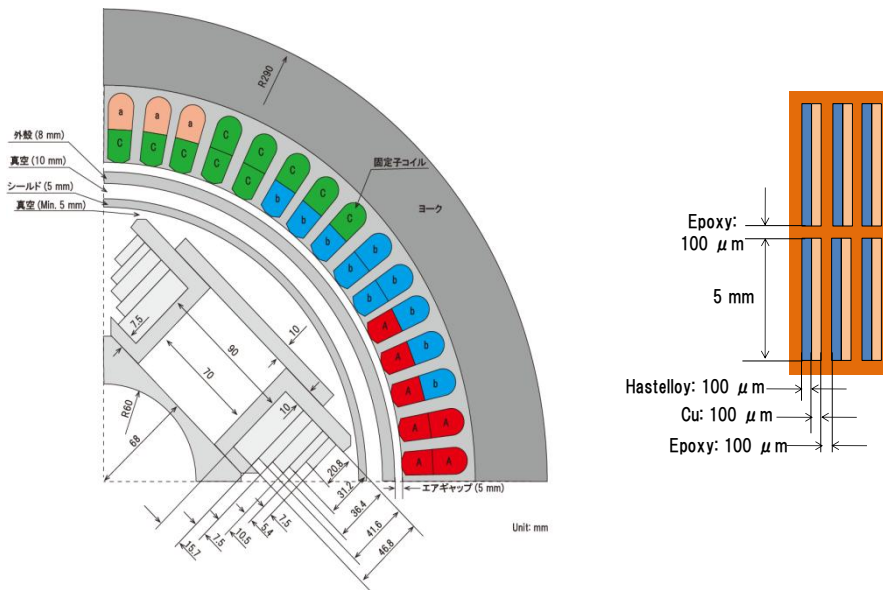


図 2.3.1-4 500kW 級回転機の断面図および巻線部複合材料断面図

以上の基本仕様に基づき、以下の要領で界磁電流を算出して解析を進めた。まず、界磁電流を設計したコイルに流せる最大電流から見積もった。例えば、まず、界磁巻線に使用する複合材料の臨界電流 (I_c) の磁場、温度、角度依存性を評価した。図 2.3.1-3 は代表的な複合材料についての結果である (ここでは磁場はテープ面に垂直)。ただし、この複合材料の 77.3 K, 自己磁場での I_c は 441 A/cm 幅なので、界磁巻線に仕様する複合材料の $I_c = 300$ A/cm 幅 (@77.3 K, 自己磁場) を想定して、図 2.3.1-3 の値をスケールリングして用いた。また、 I_c は磁場角度依存性をもつが、磁場がテープ面に垂直(90°) に印加された場合に特性が悪くなるため、 $B \perp$ テープ面の I_c を基本設計では使用した。本複合材料の I_c の磁場角度依存性は、角度 30-90° で最低値となりほぼ一定である (すなわち、角度 30~90° の範囲で図 2.3.1-3 の値はほぼ同じである)。

次に、検討した各コイルの詳細仕様から出てくるコイルロードライン (運転電流 -発生磁場、分布-角度分布) から、コイルに流せる界磁電流を決めた。

例えば、界磁コイルの運転温度を 40K とし、発生磁場の概略を計算し、さらにその垂直成分も計算し、複合材料の臨界電流特性 (図 2.3.1-3 の 441 A/cm 幅 (@77.3 K, 自己磁場) の特性から使用複合材料 300 A/cm 幅(@77.3 K, 自己磁場) にスケールする) から、運転電流決める。温度 40 K、複合材料経験磁場 2 T(テープ面垂直)の場合、参考データ 431 A/cm 幅 (@40 K, 2 T) に対して、使用複合材料の I_c は次の通りとなる。

$$I_c \text{ (@40 K, 2 T)} = 431 \times 300 / 441 = 293 \text{ A/cm 幅} = 146 \text{ A/5mm 幅}$$

(2)-1 磁場分布

この界磁巻線部の有限要素法による要素分割を図 2.3.1-5 に示す。界磁の巻線部はイットリウム系複合材料の複合材料構造を考慮して要素分割をしている。電磁場・伝熱・応力の連成解析では、共通の要素分割を用いて、各解析間で発熱、電磁力などの受け渡しを行っている。磁場分布を図 2.3.1-6 に示す。界磁巻線に 140 A 通電した状態の磁場分布である。巻線部が経験する最大磁場は 2.2 T であった。

(2)-2 電磁力・遠心力

界磁巻線部の電磁力(ローレンツ力)の分布を図 2.3.1-7 に示す。ローレンツ力は $\mathbf{F}_{elemag} = \mathbf{J} \times \mathbf{B}$ で計算した。ここで、 \mathbf{F}_{elemag} : 電磁力、 \mathbf{J} : 電流密度、 \mathbf{B} : 磁束密度である。電磁力は巻線部(超電導層)に発生する。その最大値は単位体積当たり 6×10^{10} N/m³ となった。鉄心がない空心巻線のため、電磁力はすべて巻線部に働くことになる。

遠心力の分布を図 2.3.1-8 に示す。遠心力は $\mathbf{F}_{centrifugal} = \rho \mathbf{r} \omega^2$ で計算した。ここで、 $\mathbf{F}_{centrifugal}$: 遠心力、 ρ : 密度、 \mathbf{r} : 回転中心からの距離、 ω : 角振動数である。遠心力は巻線部だけでなく、巻枠など回転子を構成するすべての材料に発生する。その最大値は単位体積当たり 5×10^7 N/m³ となった。

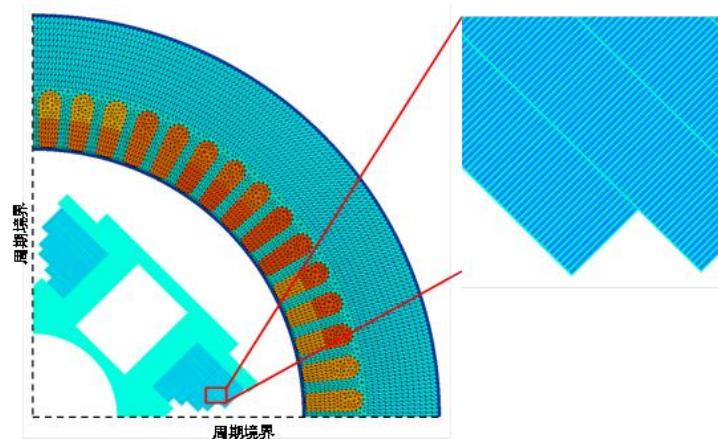


図 2.3.1-5 500kW 級回転機の解析モデル

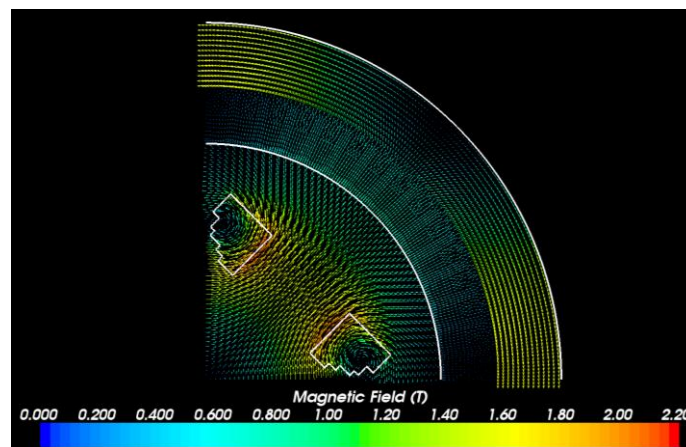


図 2.3.1-6 500kW 級回転機の磁場分布

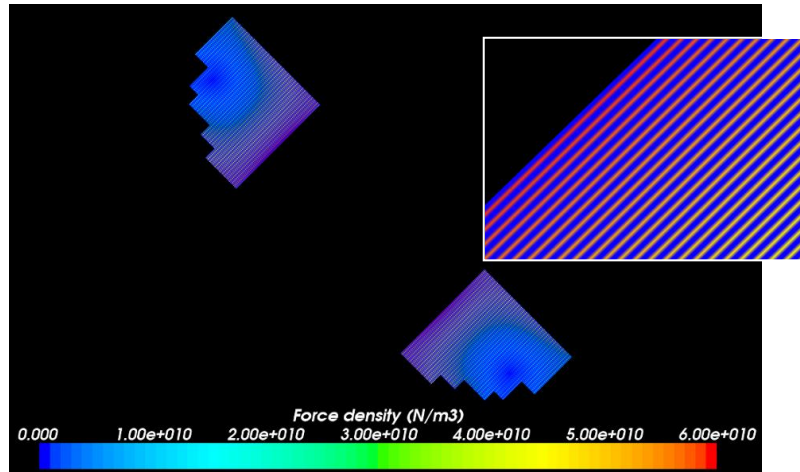


図 2.3.1-7 500kW 級回転機の界磁巻線の電磁力分布(右上:中心拡大図)

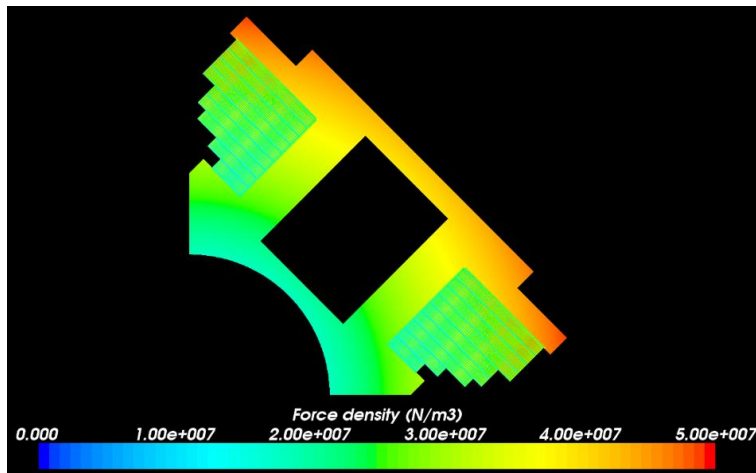


図 2.3.1-8 500kW 級回転機の界磁の遠心力分布

(2)-3 応力分布

2.3.1 (2)-2 で述べた電磁力と遠心力が併せて、巻線にはたらくことにより、応力を発生させる。応力解析においては、弾性変形を仮定した。物性値は表 2.3.1-2 の通りである。

表 2.3.1-2 回転機構成材料の機械特性

	厚さ(μm)	ヤング率(GPa)	ポアソン比	線膨張係数(1/K)
Hastelloy ^{TR}	100	200	0.3	1.28×10^{-5}
YBCO	1	100	0.3	1.31×10^{-5}
Cu	100	100	0.3	1.68×10^{-5}
Epoxy	50 - 100	3	0.3	4.0×10^{-5}

図 2.3.1-9 に複合材料幅広面垂直方向に働く応力分布を示す。この方向の応力は複合材料剥離方向に働く応力である。図 2.3.1-10 に巻線内の各ターンの応力分布を示す。巻線最内層で複合材料幅広面垂直方向に 4.1 MPa の応力が発生している。

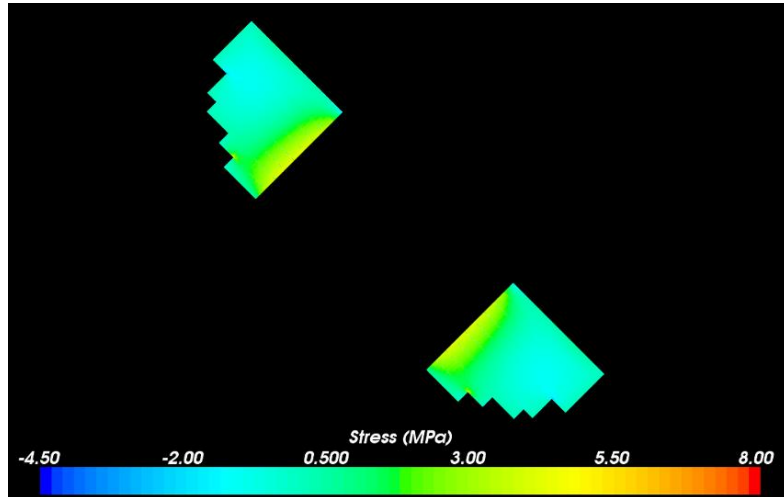


図 2.3.1-9 500kW 級回転機の界磁巻線の複合材料幅広面垂直方向の応力

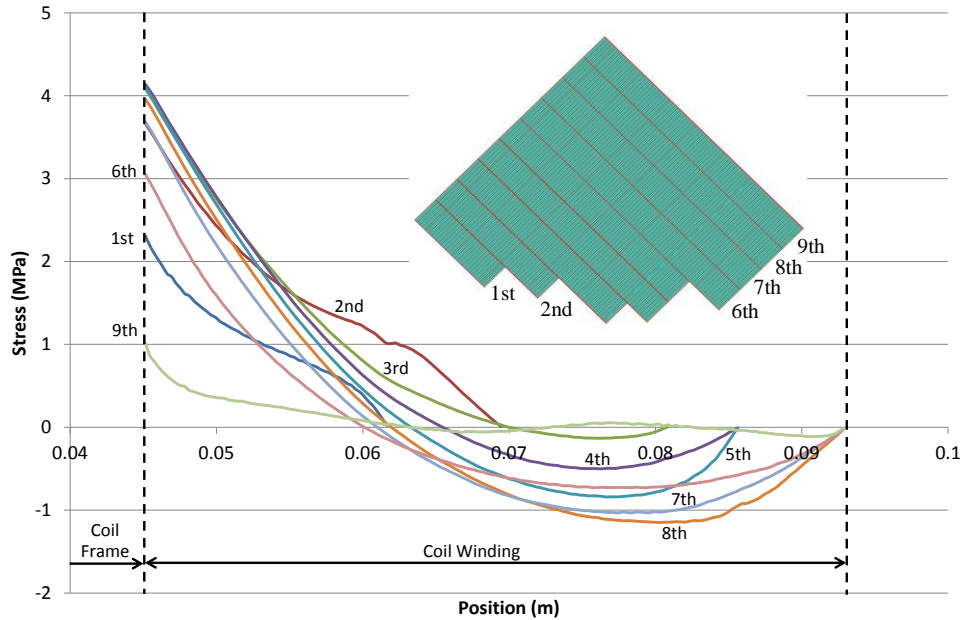


図 2.3.1-10 500kW 級回転機の界磁巻線の各ターンの複合材料幅広面垂直方向の応力

(2)-4 温度分布

ネオンの熱伝達特性に関しては、報告例は極めて少ない。Fuchino らにより最近、図 2.3.1-11 のような結果が報告されている[4]。本開発では、実際に液体 Ne によるサーモサイフォン冷却装置を作製し、本解析と並行して熱伝達係数を明らかにしようとしているが、ここでは、図 2.3.1-11 の熱伝達特性を使用した。データの無い $\Delta T=1\text{K}$ 以下の特性は外挿した値を用いた。発熱は、イットリウム系複合材料の超電導複合材料部で 0.005 、 0.01 、 $0.015 \text{ W/m} = 5$ 、 10 、 15 kW/m^3 (複合材料: 5 mm 幅、 $200 \mu\text{m}$ 厚)が均一に発生しているとした。500 kW 機では一極当たりの複合材料長は 1.6 km であるから、一極当たり 8 、 16 、 24 W の発熱に相当する。ネオンの温度は大気圧中の沸点 27K であるとして、回転子はネオンによって十分冷却された状態で初期温度は 27 K とした。この状態から発熱が発生したとして定常状態になるまで計算を行った。図 2.3.1-12~図 2.3.1-14 に界磁の温度分布を示す。 0.005 、 0.01 、 0.015 W/m の発熱に対して、巻線部の最高到達温度はそれぞれ 27.6 、 28.1 、 28.6 K となった。

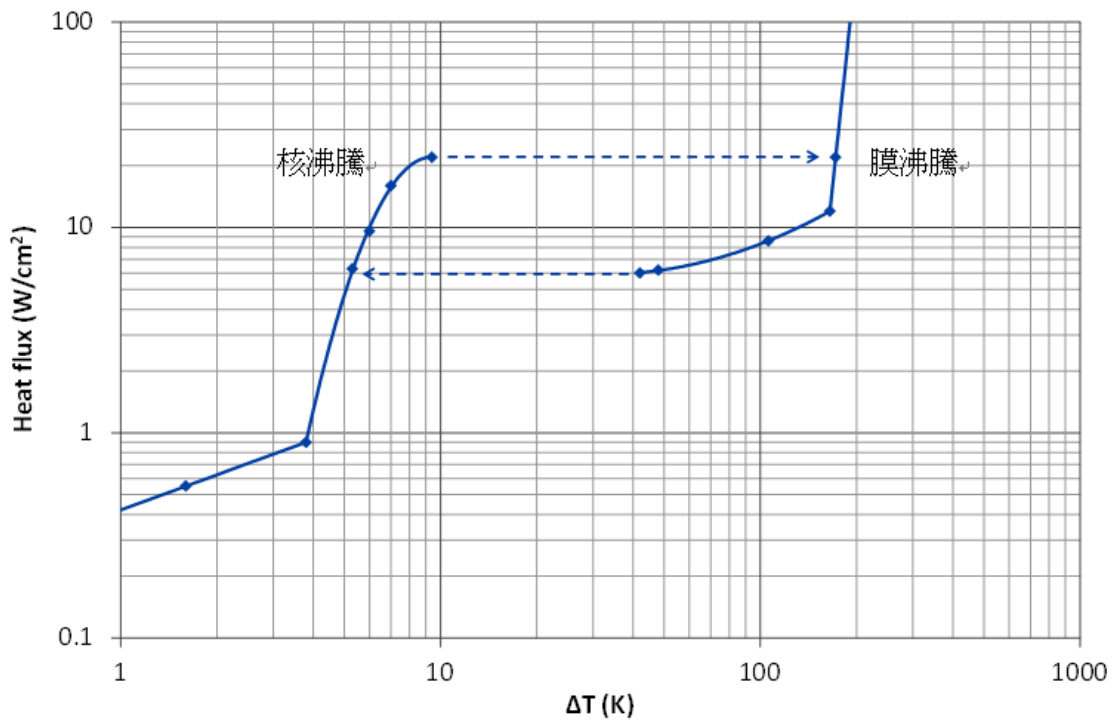


図 2.3.1-11 液体ネオンの熱伝達 [4]

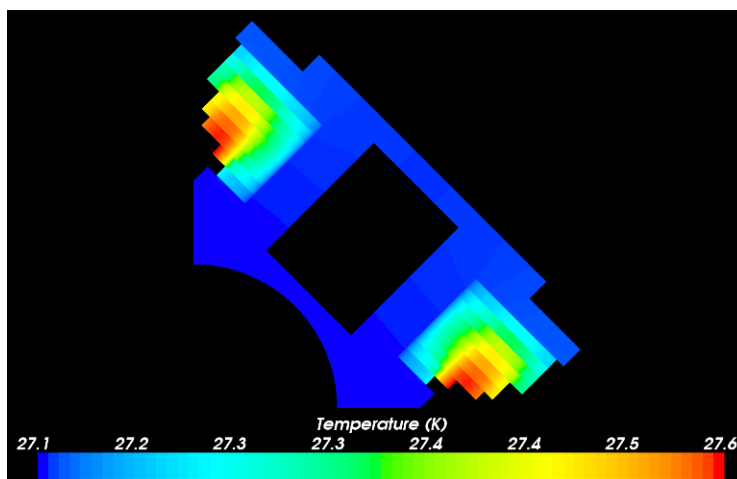


図 2.3.1-12 500kW 級回転機の界磁の温度分布(発熱 0.005 W/m)

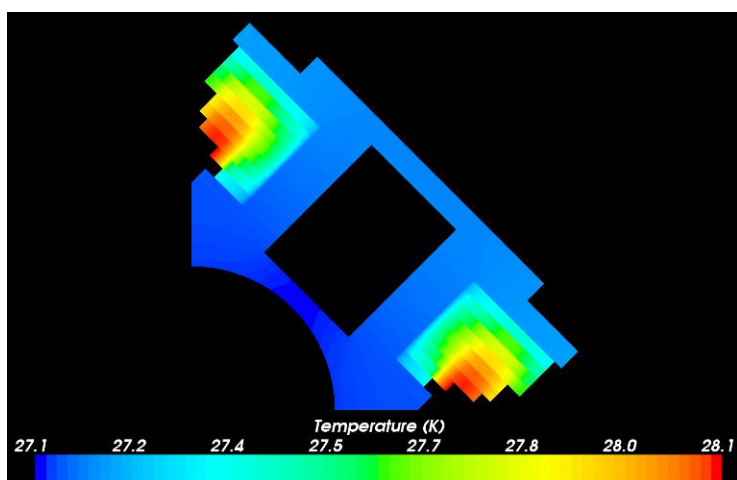


図 2.3.1-13 500kW 級回転機の界磁の温度分布(発熱 0.01 W/m)

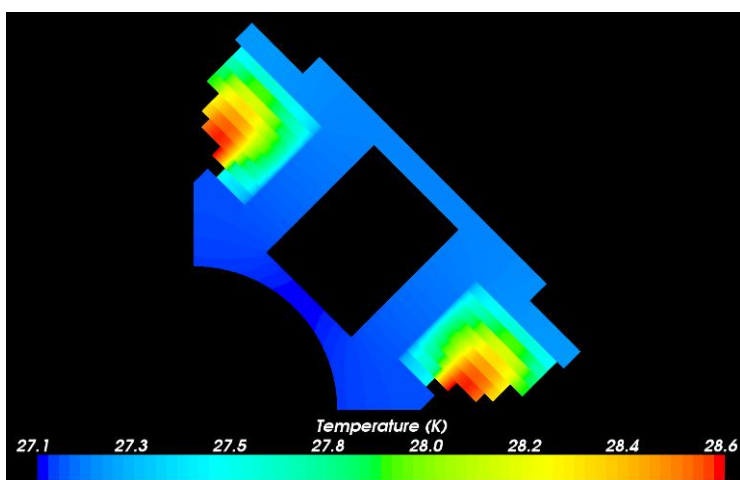


図 2.3.1-14 500kW 級回転機の界磁の温度分布(発熱 0.015 W/m)

(3) 考察

表 2.3.1-3 に電磁場・応力解析の結果をまとめた。複合材料の剥離試験によれば、剥離強度は 40～50 MPa とされる。今回の解析では、電磁力・遠心力により超電導複合材料には 500kW 機で、4.1 MPa の剥離応力が発生することが明らかとなった。これまでの報告から、イットリウム系複合材料の剥離強度は 50MPa 程度であることがわかっている。すなわち、表 2.3.1-3 の今回のコイルで発生する超電導層に垂直にかかり剥離方向に働く力はいずれもこの剥離強度限界内に収まっている。なお、この結果は、電磁力、遠心力だけでなく、各コイル構成部材の冷却温度変化による熱膨張も考慮しており、その意味で磁場、温度、応力で 3 つの要素を連成させた解析検討と言える。

図 2.3.1-15 に 500 kW 機の界磁巻線内の温度の時間変化、図 2.3.1-16 に最高到達温度をまとめた（参考に、Appendix の検討による 5 MW 機の結果もつけた）。界磁巻線の温度は 0.005～0.015 W/m の発熱でも、500 kW 機(8～24W 発熱に相当)で 27.6～28.6 K、5 MW 機(90～270W 発熱に相当)で 30.8～37.7 K となった。また、ネオンと接触している境界面の温度は 27.1 K で 0.1 K の温度上昇で収まっており、膜沸騰領域には達していないため、巻線内に温度差はできる（500kW 機、24W 発熱でコイル端部が 29K 弱。5MW 機では 270W の発熱で 38K 程度、温度差 $\Delta T=10.6$ K）が、冷却は可能と考えられる。

表 2.3.1-3 500kW 級回転機の複合材料に働く最大応力

500 kW 級回転機	
巻線部最大磁場	2.2 T
複合材料幅広面垂直応力	引張り： 4.1 MPa

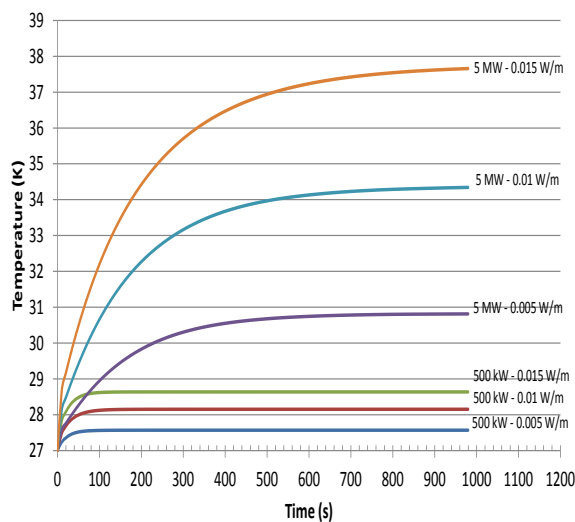


図 2.3.1-15 界磁巻線内の時間変化 (5MW 機は Appendix 参照)

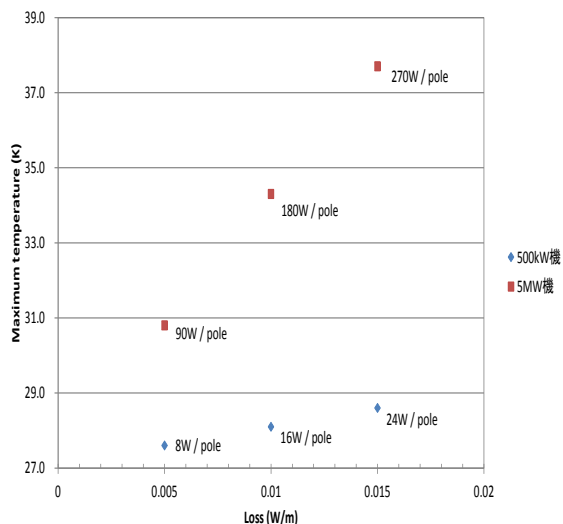


図 2.3.1-16 界磁巻線内の最大温度 (5MW 機は Appendix 参照)

③ - 2 界磁巻線の形状検討

2.3.1③-1 節で基本的な形状の界磁巻線コイルにつき、温度、磁場、応力を同時に考慮した解析検討を行い、その成立性が検証できた。ここでは、その結果をもとに実際の回転機の最終特性(効率、体格、トルクリップル)や使用イットリウム系複合材料(以下、複合材料)の長さなどに対して界磁巻線の最適形状の検討を行なった。対象とした形状は、平面形状がいずれもレーストラック状で、断面形状が 1)通常の矩形(上部、下部半径が同じ)、2)菱形傘型形状(巻線部断面が菱形、すなわち、上端、下端半径が中央に向かい大きくなる。複合材料幅広面は水平軸に平行、3)鞍型傘型(菱形形状であるが、各複合材料が水平軸に傾いている。コイル断面の複合材料充填率を高めたもの)の3種類である。

(1) 方法

解析対象の回転機定格出力は 500kW・1800rpm とし、イットリウム系複合材料の特性としては、ほぼ現状の IBAD・PLD 法 GdBCO(BZO 入り)複合材料のものを想定した。複合材料幅は 5 mm、臨界電流 I_c は 127 A(@77 K、自己磁場)である。すなわち、1cm 幅での I_c は 254A/cm 幅である。超電導層厚は、1.2 μ m、ハステロイ厚は 0.1 mm である。下記のように交流損失まで測った試料としては、この特性のものになるが、他の節で検討している 300A/cm 幅の特性の線と大きな違いはない。絶縁皮覆まで含めた複合材料厚さは 0.2 mm である。図 2.3.1-17 に $I_c(B, T)$ 特性を示した。また、鞍型ピックアップコイルを用いて 35 K、45 K、64 K、77 K において実際に測定したイットリウム系複合材料の GdBCO 複合材料の交流損失の磁界振幅依存性を図 2.3.1-18 に示している。

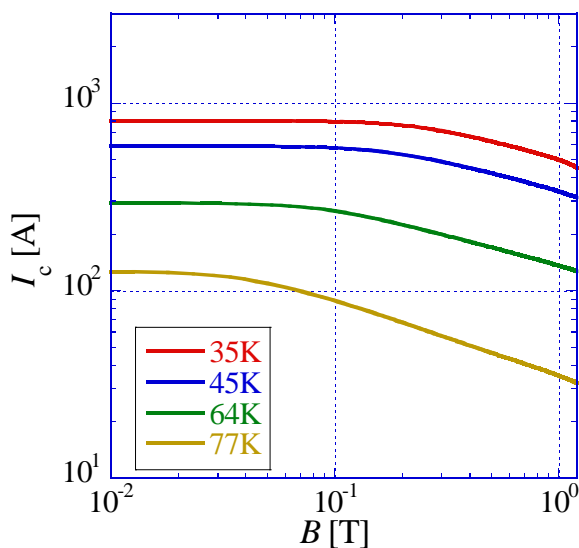


図 2.3.1-17 想定した複合材料の $I_c(B, T)$ 特性

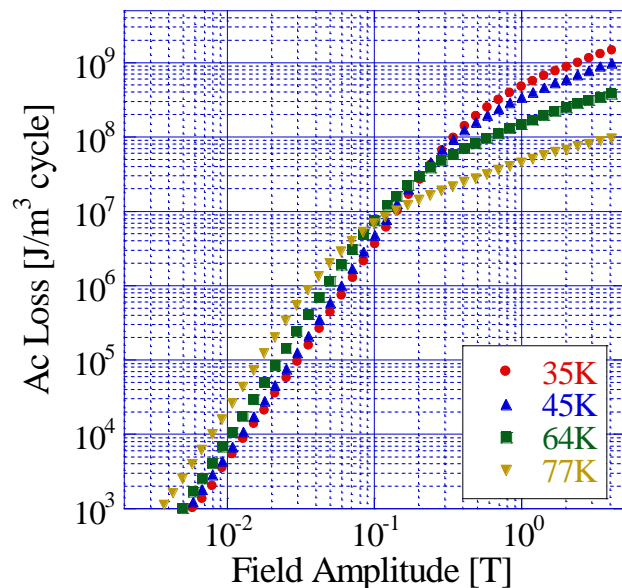


図 2.3.1-18 想定した複合材料の交流損失特性

回転機的设计で、電気装荷と磁気装荷の分配比率等、回転機の基本構造や体格は、従来の常電導機的设计指針通りに决定した。図 2.3.1-19 に设计した回転機の鳥瞰図、図 2.3.1-20 に断面図、表 2.3.1-4 に諸元を示す。従来の指針に則って设计した回転機について数值解析により特性を評価した後、さらに再度设计し直すという手順を踏んで、界磁巻線の最適形状について検討した[5]。

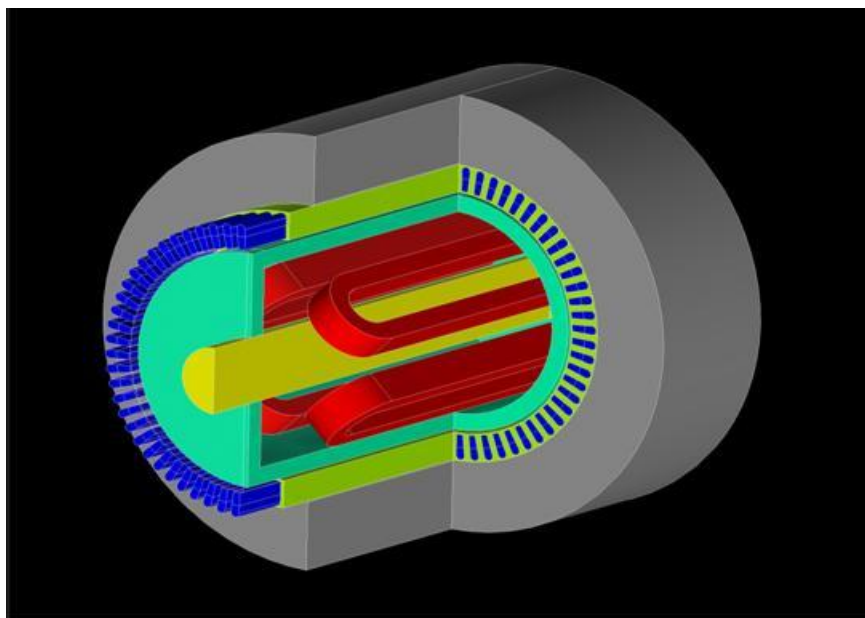


図 2.3.1-19 设计した回転機の概略鳥瞰図

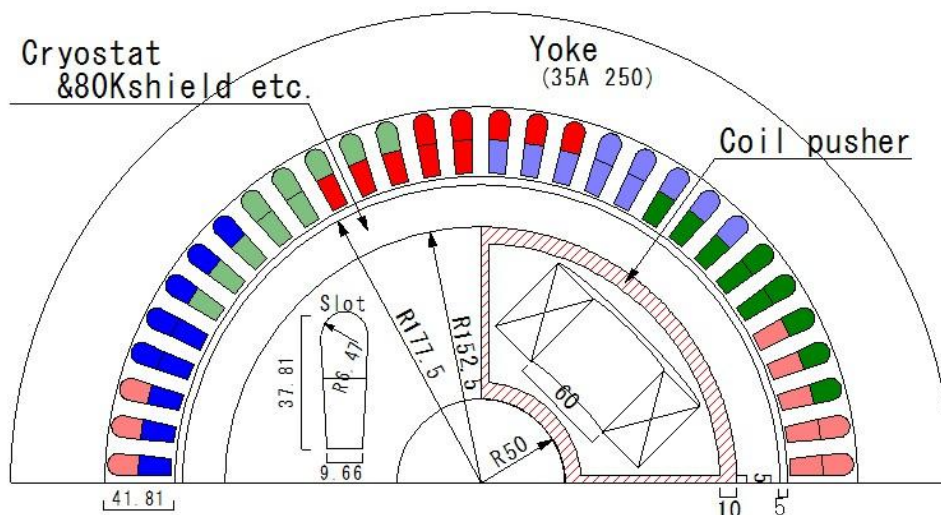


図 2.3.1-20 设计した回転機の断面図

表 2.3.1-4 設計した 500kW-1800rpm 超電導回転機の諸元

Power [kW]	500
Voltage [V]	440
Current [A]	700
Number of pole	4
Frequency [Hz]	60
Loading partition constant	1.5
Standard magnetic loading	0.028
Magnetic loading [Wb]	0.07576
Electric loading [AC]	15750
Electric loading ratio [AC/mm]	55
Magnetic flux density of yoke [T]	1.3
Inner diameter of stator [mm]	365
Field system	
Field winding	REBCO
Operating temperature [K]	40
Load factor of field coil	0.8
Armature system	
Armature winding	Copper
Current density [A/mm ²]	5
Height of yoke [mm]	140
Air gap [mm]	5
Cryostat&80Kshield etc. [mm]	25

本回転機で界磁は4極であり、動作温度は40 Kとした(2.3.1②および[2])。界磁巻線形状としては、図 2.3.1-21 に示すような(1) 単純矩形、(2) 菱形傘型、(3) 鞍型傘型の3種類を考えた。ここでは、超電導複合材料の $I_c(B, T)$ 特性を考慮しつつ、通電電流を I として、超電導巻線の負荷率 II_c が 0.8 以下になるように、また、必要な磁気装荷を持つように界磁巻線の巻数、寸法等を調整した。また、電機子巻線は無鉄心、すなわちシースなしの銅巻線とし、室温空間においた。ただし、界磁巻線の磁界を回転機外部に漏らさないようにシールドのための鉄ヨークは電機子巻線の外側に配置した。それぞれの形状について、市販の電磁界解析ソフトウェア(Ansys)を用いて、数値解析により、定格トルク、出力を満たした上で、発生磁界、トルク等の変動、必要な複合材料長、体格、効率等を算出した。

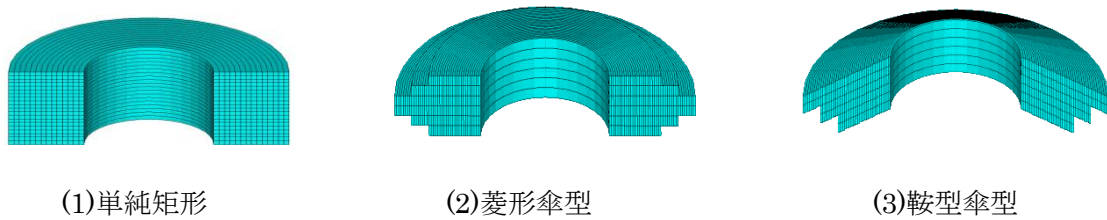


図 2.3.1-21 解析検討した各種界磁巻線の断面形状：左から(1)単純矩形、(2)菱形傘型断面、(3)鞍型傘型(平面形状はいずれもレーストラック型)

(2) 結果と考察

一例として、図 2.3.1-22 (3)の鞍型傘型レーストラック形状の界磁巻線の場合の回転機断面、界磁巻線の形状及び寸法、ターン数、垂直磁界分布、変動磁界振幅分布を示す。この場合のギャップにおける磁束密度 B_g は 2.4 T であった。また、トルク変動を図 2.3.1-23 に示している。スキュー、ダンパーシールド等の対策は施していないが、界磁巻線に印加される変動磁界の振幅は $2 \times 10^{-4} \text{T}$ 以下であり、トルク変動は 0.1% 以下であった。

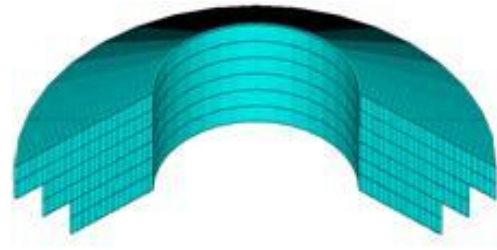
設定した 3 種類の界磁巻線の形状、すなわち(1)単純矩形、(2)菱形傘型断面、(3)鞍型傘型(平面形状はいずれもレーストラック型)について、数値解析で得られた回転機体格、使用複合材料長、トルクリップル、効率を比較してみた。図 2.3.1-24 に結果を示す。(1)、(2)、(3)それぞれの界磁巻線形状の場合のギャップ磁束密度 B_g は、1.5 T、2.35 T、2.4 T である。単純矩形形状の界磁巻線の場合には、ローター内の巻線充填率が低く、ギャップ磁束密度が 1.5 T しか確保できないために、出力 500 W を得るには回転機長を長くせざるを得ず、そのため体格は大きく、また、界磁磁界の周方向分布の正弦波から外れも大きいため、トルクリップル*も大きくなっていることがわかる。体格、トルクリップル、効率の観点からは単純矩形形状より菱形、鞍型形状が適していると判断できる。(*注:トルク $T \propto B$ (界磁磁場) $\times I$ (電機子電流)、また、出力 $P \propto T \times n$ (回転数))

そこで、最初の数値解析結果に基づき、再度、ギャップ磁束密度を $B_g=2\text{T}$ として、3 種類の界磁巻線形状で、使用複合材料長が最小になるように設計をやり直し、数値解析により特性を算出し、比較・検討を行った。

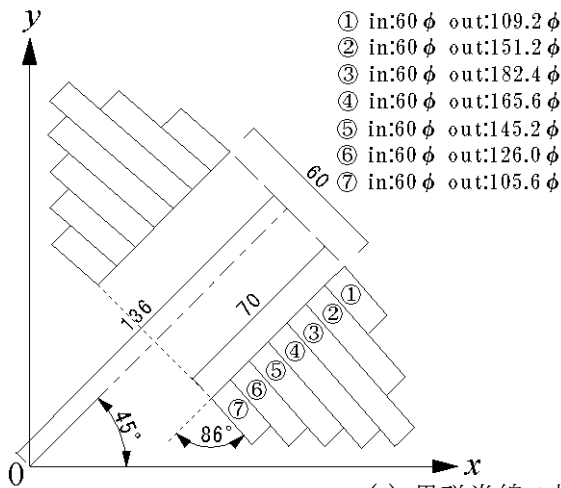
その結果、(1) 単純矩形形状の場合には、現状の複合材料の $I_c(B, T)$ 特性ではギャップ磁束密度 2 T を実現できないことがわかった。ここでは、(2) 菱形、(3) 鞍型の形状を持つ界磁巻線の場合の数値解析結果を示す。図 2.3.1-25、図 2.3.1-26 は、それぞれの場合の回転機断面、界磁巻線の形状及び寸法、ターン数、垂直磁界分布、変動磁界振幅分布である。これら両者の解析結果では、ほとんど回転機特性上の差は見られなかった。唯一、鞍型のほうが、印加磁界角度の観点から $I_c(B, T)$ 特性において有利となり、複合材料長が短くても済むという結果となった。



(a) 回転機断面

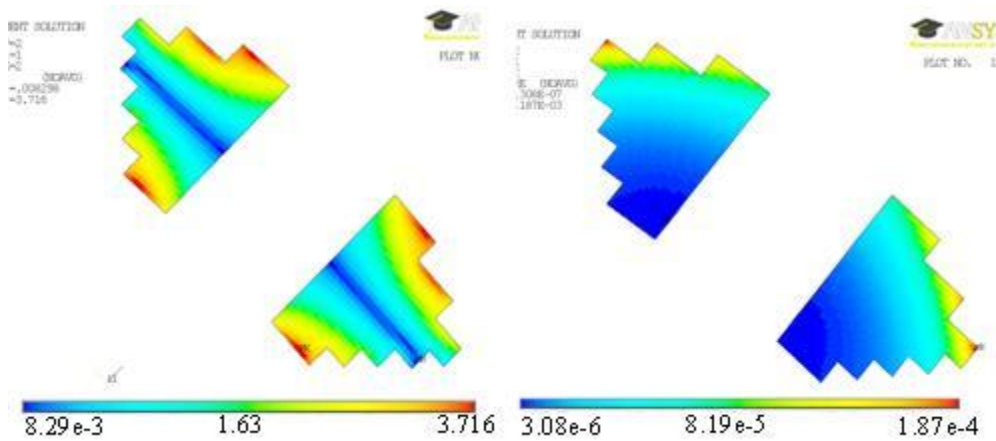


(b) 界磁巻線形状



通電電流 [A]	219
層数①	123
層数②	228
層数③	306
層数④	264
層数⑤	213
層数⑥	165
層数⑦	114
使用複合材料長 [m/pole]	1907
継鉄外径 [mm]	786
有効長 [mm]	173
体積 [ℓ]	83.8

(c) 界磁巻線 1 極の寸法とターン数



(d) 垂直磁界成分 B/c とその変動の大きさ。単位は T

図 2.3.1-22 鞍型傘型形状の界磁巻線 : (a)回転機の断面、(b)界磁巻線形状、(c)界磁巻線 1 極の寸法とターン数、(d)垂直磁界成分と変動磁界成分の大きさ

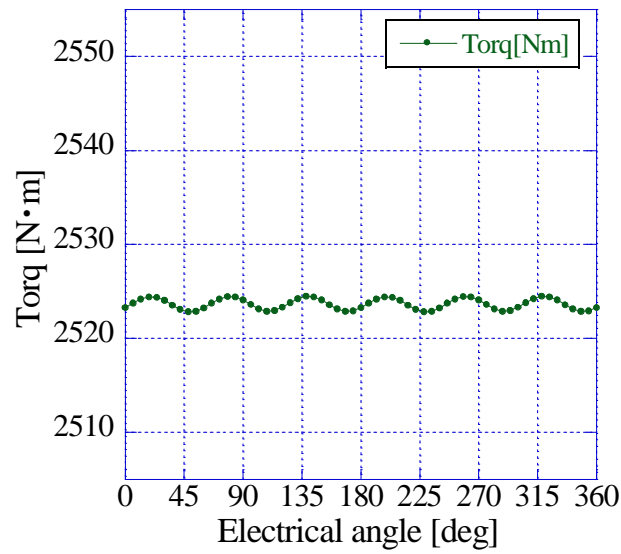


図 2.3.1-23 鞍形状界磁巻線の場合のトルク変動

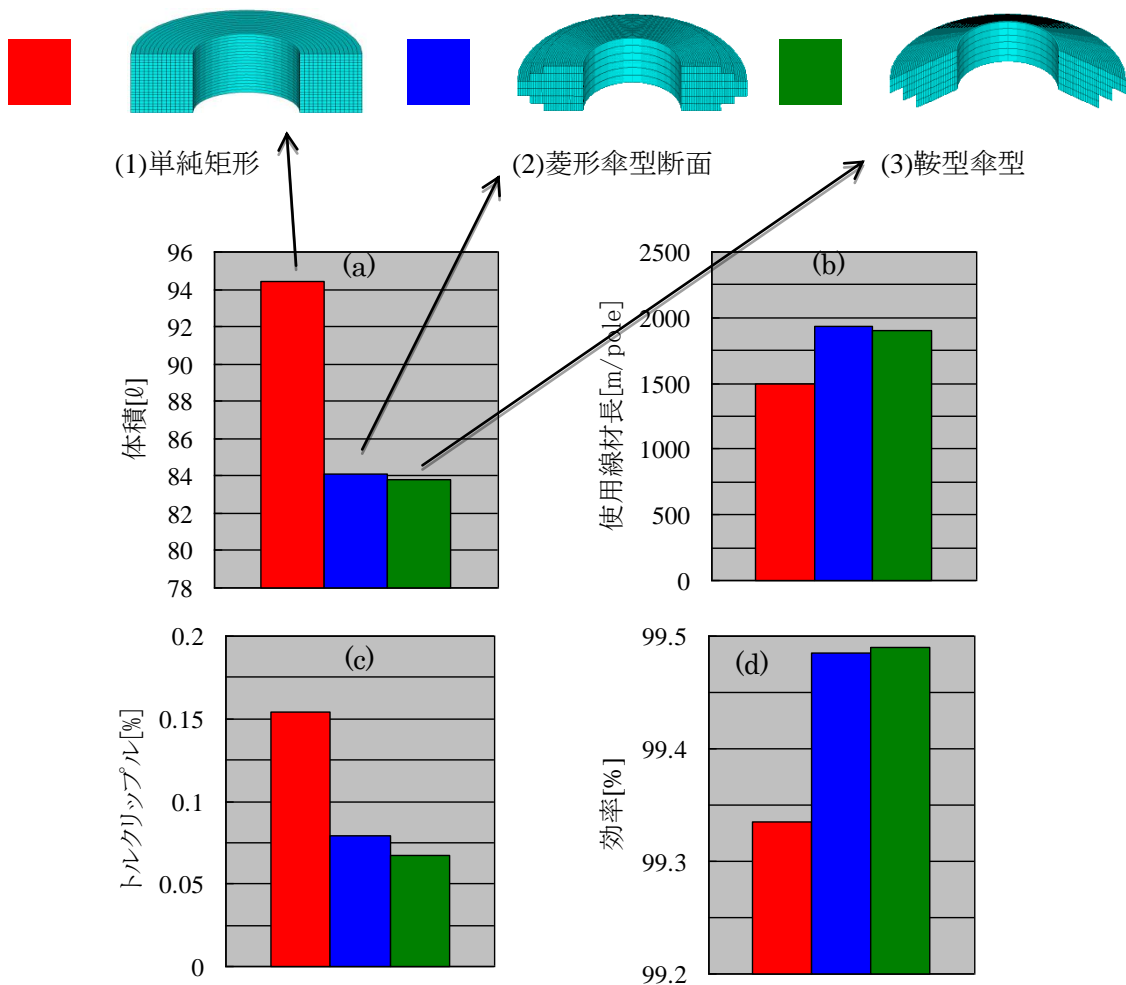
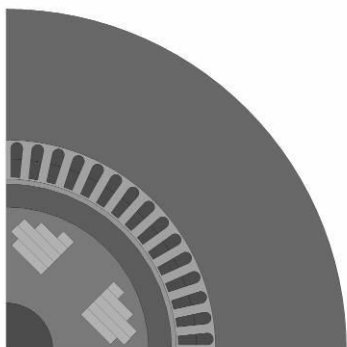
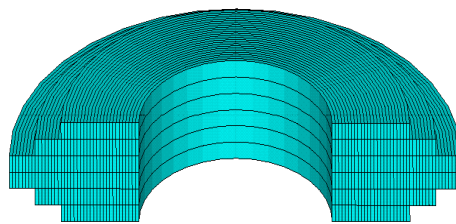


図 2.3.1-24 界磁巻線形状の影響

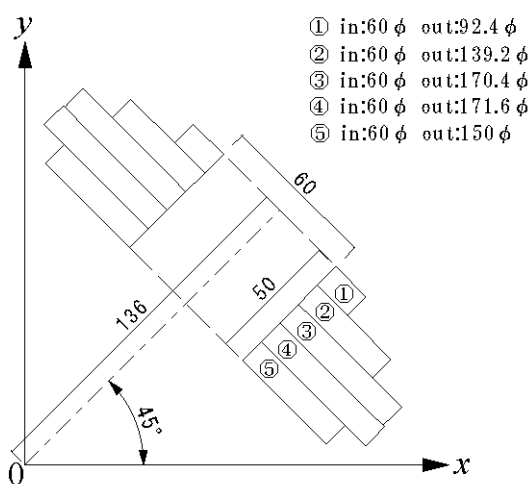
(a)回転機体格、(b)使用複合材長、(c)トルクリップル、(d)効率の比較



(a) 回転機断面

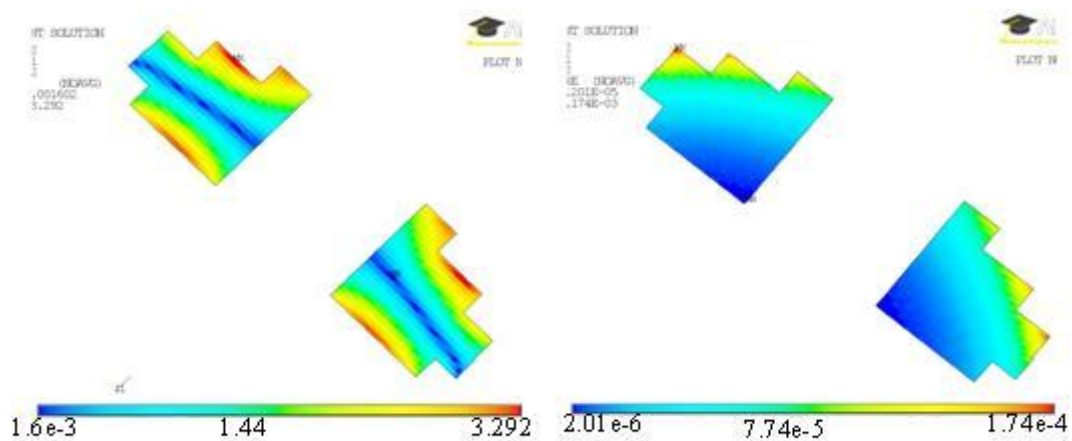


(b) 界磁巻線形状



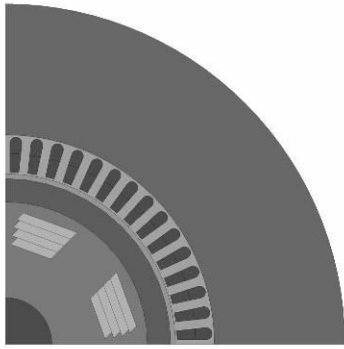
(c) 界磁巻線 1 極の寸法とターン数

通電電流 [A]	228
層数①	81
層数②	198
層数③	276
層数④	279
層数⑤	225
使用複合材料長 [m/pole]	1593
継鉄外径 [mm]	786
有効長 [mm]	208
体積 [ℓ]	86.7

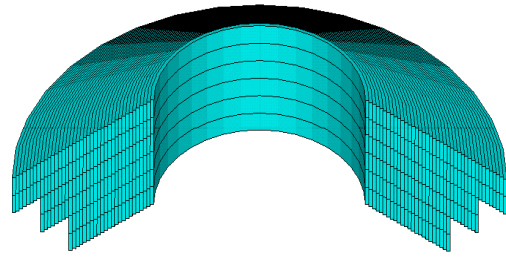


(d) 垂直磁界成分 B/c とその変動の大きさ。単位は T。

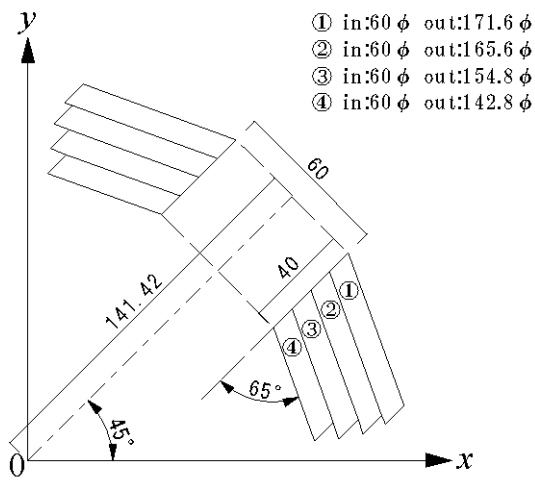
図 2.3.1-25 菱形断面界磁巻線の場合の(a)回転機断面、(b)界磁巻線形状、(c)界磁巻線 1 極の寸法とターン数、(d)垂直磁界成分と変動磁界成分の大きさ



(a) 回転機断面

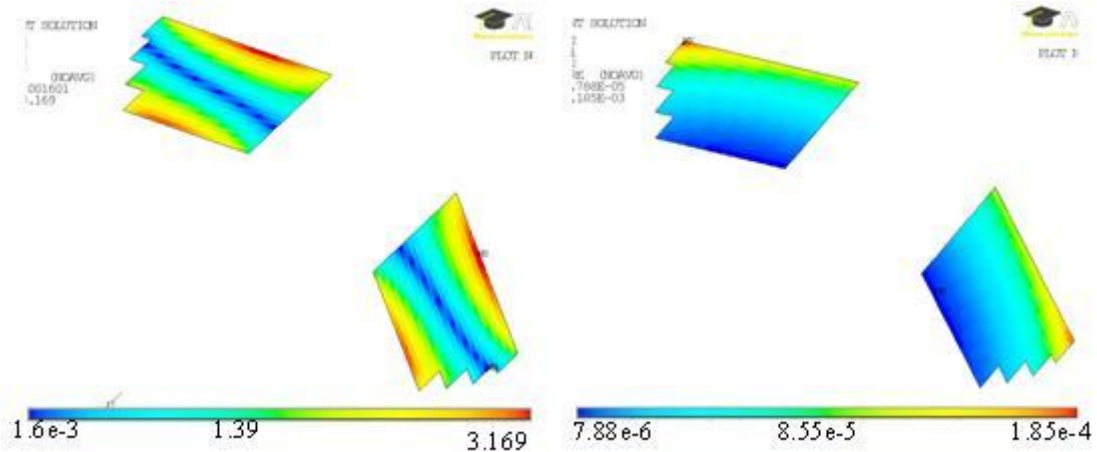


(b) 界磁巻線形状



(c) 界磁巻線 1 極の寸法とターン数

通電電流 [A]	232
層数①	279
層数②	264
層数③	237
層数④	207
使用複合材料長 [m/pole]	1501
継鉄外径 [mm]	786
有効長 [mm]	208
体積 [ℓ]	86.7



(d) 垂直磁界成分 B/c とその変動の大きさ。単位は T。

図 2.3.1-26 鞍形状界磁巻線の場合の(a)回転機断面、(b)界磁巻線形状、
 (c)界磁巻線 1 極の寸法とターン数、(d)垂直磁界成分と変動磁界成分の大きさ

図 2.3.1-27 に本節で検討した各形状のコイルが、回転機体格、使用超電導複合材料長、トルクリップル、効率に与える影響を比較して示した。いずれも回転機出力は 500kW-1800rpm である。

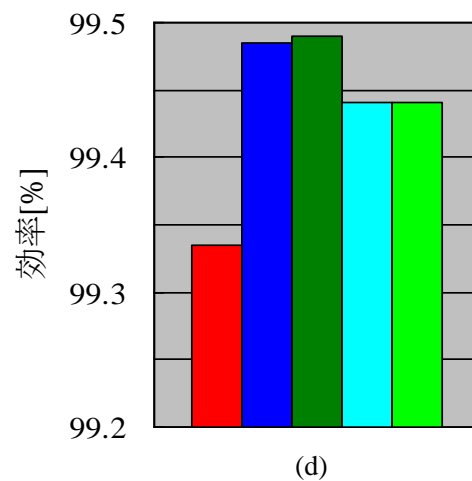
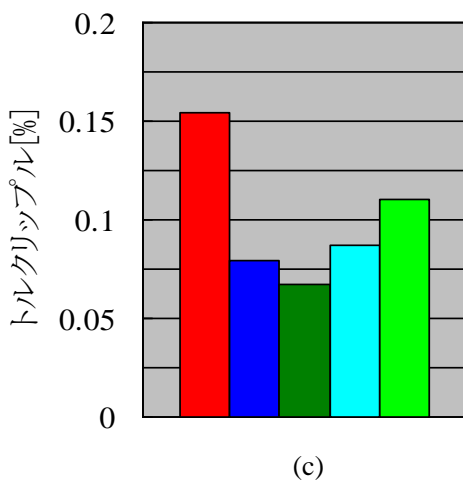
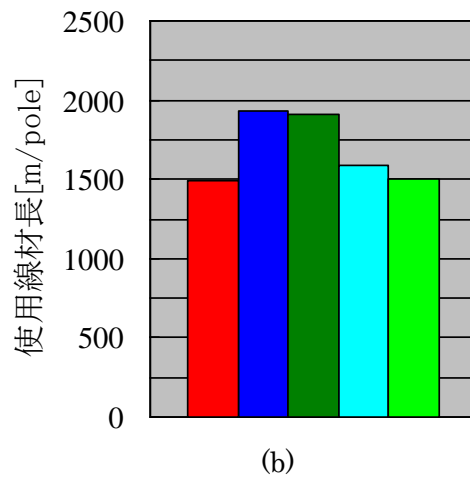
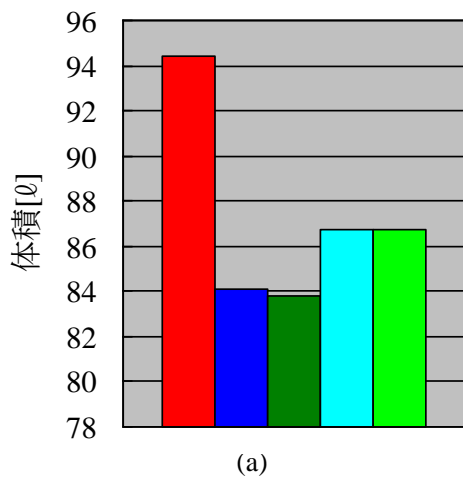
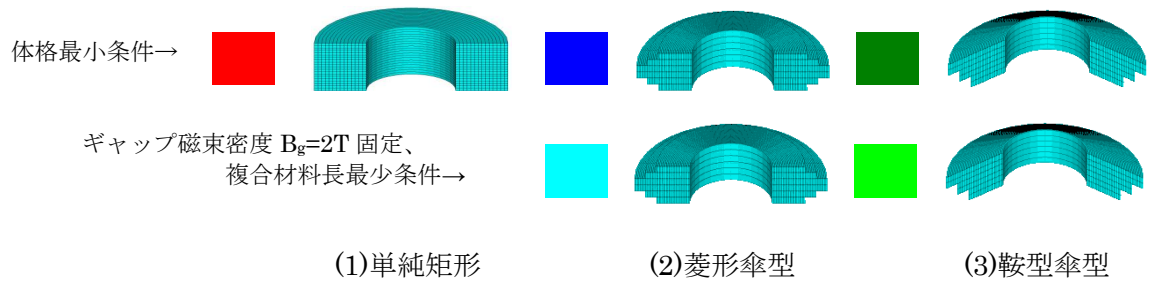


図 2.3.1-27 3 種類の界磁巻線形状に対して数値解析で求めた(a)回転機体格、(b)使用超電導複合材料長、(c)トルクリップル、(d)効率。上段の 3 種類は、ギャップ磁束密度を統一せず、体格最小で設計した場合。下段の 2 種類は、ギャップ磁束密度を 2T に統一し、使用超電導複合材料長を最小にした場合。

③ - 3 500kW 機的设计

前節 2.3.1③-1、2.3.1③-2 で基本的な界磁巻線について、温度、磁場、応力に関する成立性、および最適形状を検討した。ここでは、その結果を受けて、電機子、ヨークなど界磁巻線以外の部分も含む回転機全体の詳細設計を行った。イットリウム系複合材料を使った界磁巻線の固定子に加え、常電導の電機子、ヨークなどを含めた検討により最終的に回転機の体格、重量、効率、RM 使用量を算出し、同出力の常電導機と比較して、Y 系回転機の優位性を論じた。

(1)方法

設計の際の機器、複合材料の条件を以下に示す。

(1)-1 基本構造とコア断面

超電導回転機のシステム構成は超電導回転機とその冷却機で構成され、超電導回転機の方式として現状超電導複合材料の交流損失低減技術が確立されていないため、電機子側(固定子側)コイルの超電導化が難しく、回転子超電導・固定子常電導として回転子を冷却する方式とする。現在最適と考えられる全体構成を図 2.3.1-28 に示す。回転子は回転子軸内を中空にして、その中にネオンを封入し外部よりサーモサイフォン方式で冷却する方法とし、また、液体 Ne の沸点は 27K であるので、想定した冷却温度は界磁コイルの最高温度が 40K として設計した。これは、2.3.1②で述べたように液体 Ne (沸点 27K) の沸点以上で、できるだけ I_c の高い温度でかつ過去の実績を参考に決めた[2]。

この方式はヨーロッパや米国などで採用されている方式であり[1-2]、配管を這わすより簡便であることからこの方式を採用した。回転子は突極構造とし、界磁コイルは小型化、接続部を考慮しパンケーキ形ではなくコイル巻回数を多く出来る傘形形状を中心に設計検討した。

低温時の強度低下およびインバータによる高調波鉄損による冷凍機出力増加を避けるため回転子の鉄心は無しとした。固定子はヨーク・ティース・電機子コイルから成り、ティースはティース磁束密度の大きさによって、磁性/非磁性を使い分けることとした。

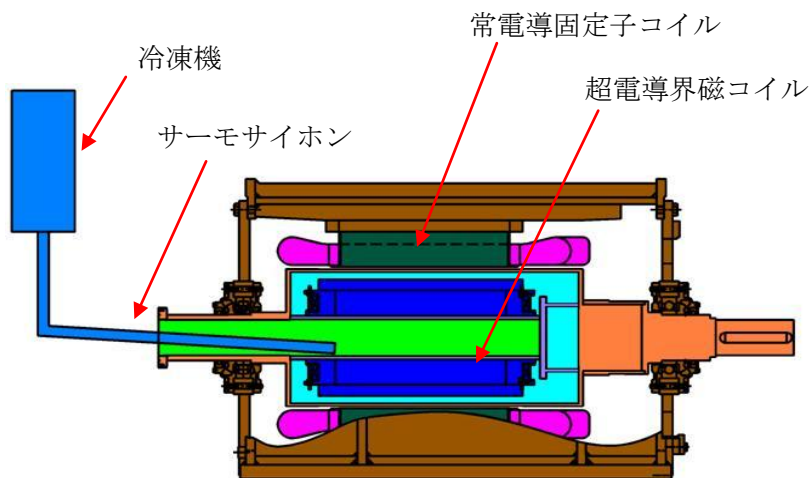


図 2.3.1-28 電導回転機構成

(1)-2 電圧および回転速度

500 kWは産業用を前提としており、最も良く使われている4極60Hz相当の1800rpmとした。一般に500kWクラスの産業用可変速回転機は400V級インバータを適用しており、本設計でも500kWの定格電圧は400V級とした。

(1)-3 複合材料 I_c

イットリウム系複合材料の性能が年々向上しており、500kWに関しては複合材料性能による最適設計として I_c が現状レベルの300A/cm幅(@77K,自己磁場)の場合と将来の複合材料特性の向上を考慮した I_c が600A/cm幅(@77K, 自己磁場)の場合で回転機特性を比較した。

(1)-4 極数

極数を増やすと一極分の回転子断面において巻枠が占める面積が相対的に増えて巻線として使用可能な面積が相対的に減る。イットリウム系複合材料は曲げ加工で I_c 特性が劣化しやすく、 I_c 特性が劣化しない曲げ半径(R)を35mmとして500kWでは2極~6極の間で最適化を検討した。

(1)-5 界磁コイルの形状

500kWは遠心力対応のため平傘型コイル形状を採用した。図2.3.1-29に代表的なコア断面を示す(500kW-1800rpm級)。外殻・真空層・80Kシールドの内側に界磁コイルを配置した。コイル断面において、通常のコイルでは上辺と下辺が同じ矩形であるが、コイルが設置できる空間が限られているため、より効率良く磁場を発生できるように、断面が三角形などの傘型コイル形状としている。後述のように、他の検討例では菱形断面なども検討している。

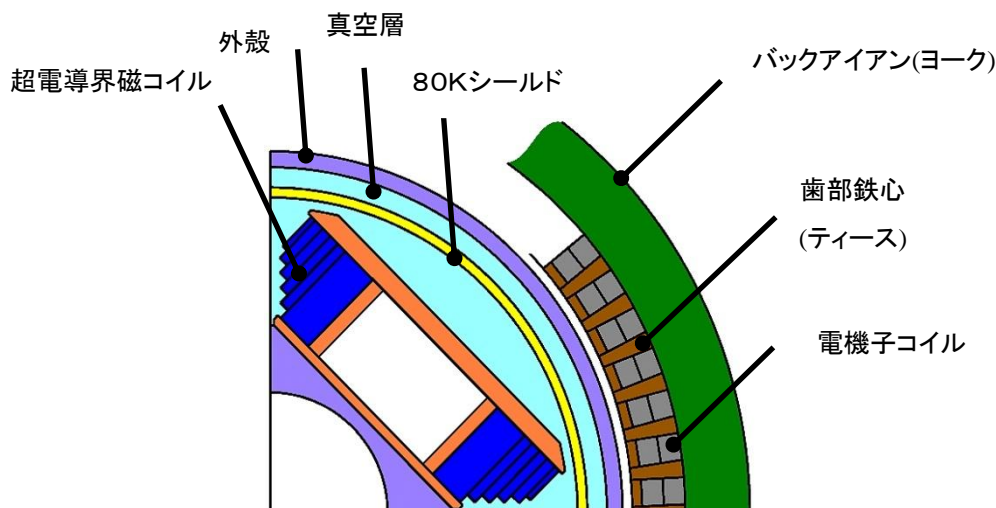


図 2.3.1-29 500kW 回転機のコア断面

(2) 結果

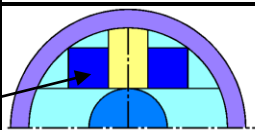
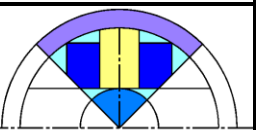
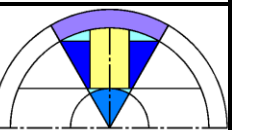
(2)-1 界磁コイル形状、極数比較

本機では回転数が 1800rpm と大きく、界磁巻線にかかる遠心力も相当大きくなると予想され、また、同様な回転数の常電導機の実績から、上部(遠心力がかかる部分)を平型とし、外からの抑えが効く形とした。こうした形状の場合、基本的な表 2.3.1-5 に示す 3 種が基本的なものと考えられる。また、それぞれの形状に適した極数と合わせて、界磁コイルとして利用可能な断面積を表 2.3.1-5 に示すように検討した。形状は、左から矩形、平傘型、三角形である。

図において界磁コイルが磁場を発生し、外側の固定子の電機子へ供給される電力に対応して、回転力を生むが、そのために図の黄色部分の空心部分の面積はいずれも一定とした。また、ロータ外径、中心のシャフト径も同じとした。

巻棒も含まれるのでコイル部断面積を 100%巻線に使えるわけではないが、これらの検討の中で、平傘型の 4 極が最も利用率が高い。2 極の場合は回転子内径周りを巻線に使えないため面積率が低下する。三角形の 6 極は断面がシリンダー状に段々に巻くので面積率は同表より下がる。すなわち、界磁コイル面積率の最も大きい 4 極をこの場合に選んで設計した。

表 2.3.1-5 500kW 回転機の界磁コイルの形状と極数比較

	2 極	4 極	6 極
コイル形状 (界磁コイル)			
界磁コイル部断面積(mm ²)	7540	6539	3629
回転子断面積(mm ² /極)	50894	25447	16965
コイル面積率	14.8%	25.7%	21.3%

(2)-2 I_c による違い

現状、量産化が実施されている 300A 級/cm 幅複合材料と 100m 級で確認された 600A 級/cm 幅複合材料を用いて設計検討を行った。

表 2.3.1-6 に 500kW に I_c 性能による仕様の違いを示す。現状の複合材料性能($I_c=300A/cm$ 幅)ではギャップ磁束密度を充分高く取れないので、固定子鉄心が有りとして、磁束を高し体格的を小さくした。よって、固定子は鉄心有りで設計し、その時ギャップ磁束密度は 0.9T であった。回転子側は超電導コイルが高い磁束を出すため鉄心が磁気飽和して役に立たないことや、軽量化が出来るため鉄心無しとした。

いっぽう、複合材料性能が向上して現状の 2 倍の I_c が取れる($I_c=600A/cm$ 幅)場合は、固定子も回転子と同じ理由で鉄心歯部(ティース)をなくしバックアイアン(固定子ヨーク)のみとする。ギャップ磁束はティース無しでも現状 I_c より 30%以上高い 1.2T となった。コイル固定のためのティースに変わるものとして非磁性材料を使用するとともに、コイル自体の剛性を上げるために平角

線を使用する。本結果を見ると、高 I_c 複合材料を使った設計は、鉄心相当長が約 20%も小さくなりコンパクト化が図れる。また、鉄の量も少なくなるので表にあるように、回転機の効率あがる。

表 2.3.1-6 500kW 機における I_c 特性による比較

項 目		$I_c=300\text{A/cm}$ 幅	$I_c=600\text{A/cm}$ 幅
仕 様	定格出力	500kW	500kW
	定格電圧	440V	400V
	定格回転数	1800rpm	1800rpm
	極数	4 極	4 極
	効率(冷凍機込み)	96.3%	96.8%
固 定 子	固定子外径	$\phi 580$	$\phi 490$
	固定子内径	$\phi 390$	$\phi 370$
	鉄心歯部(ティース)	あり	なし
	エアギャップ	5mm	5mm
	鉄心相当長*	400mm	330mm
	素線仕様	1.4 ϕ 丸線 0-PEW	6 \times 2.8mm マイカ巻角線
回 転 子	磁極鉄心	なし	なし
	界磁電流	135A	230A
	ターン数	1170 ターン	1050 ターン
	界磁コイル複合材料幅	5mm 巾	5mm 巾
	I_c (A/cm 幅@77K,0T)	300	600
	複合材料量(5mm 幅換算)	1.2km/極	1.2km/極
磁 束	界磁コイル磁束密度	2.2T	3T
	ギャップ磁束密度	0.9T	1.2T

*鉄心相当長：空心のものは、コイルの長辺部の内側の長さ。

(2)-3 詳細設計仕様

上記のように最適な形状が 500kW 機では平傘型に決まったところで、界磁コイルの磁場、複合材料の磁場中 I_c 特性を詳細に考慮して設計した。図 2.3.1-30 に 500kW の磁束密度分布を示す。界磁コイル付近の拡大図から超電導複合材料は最大経験磁場の約 3T と約 45°で交差している。

500kW 機の界磁コイルのロードラインと 40-60K における $I_c=600\text{A/cm}$ 幅(300A/5mm 幅)の複合材料の磁場中特性を図 2.3.1-31 に示す。この図から、40K まで冷却できれば所要の界磁電流を流すことができる。後述するように、コイル成形後の I_c 特性については回転子モデルコイル試作試験結果からコイル成形後も複合材料 I_c の電流が流せることを検証している。

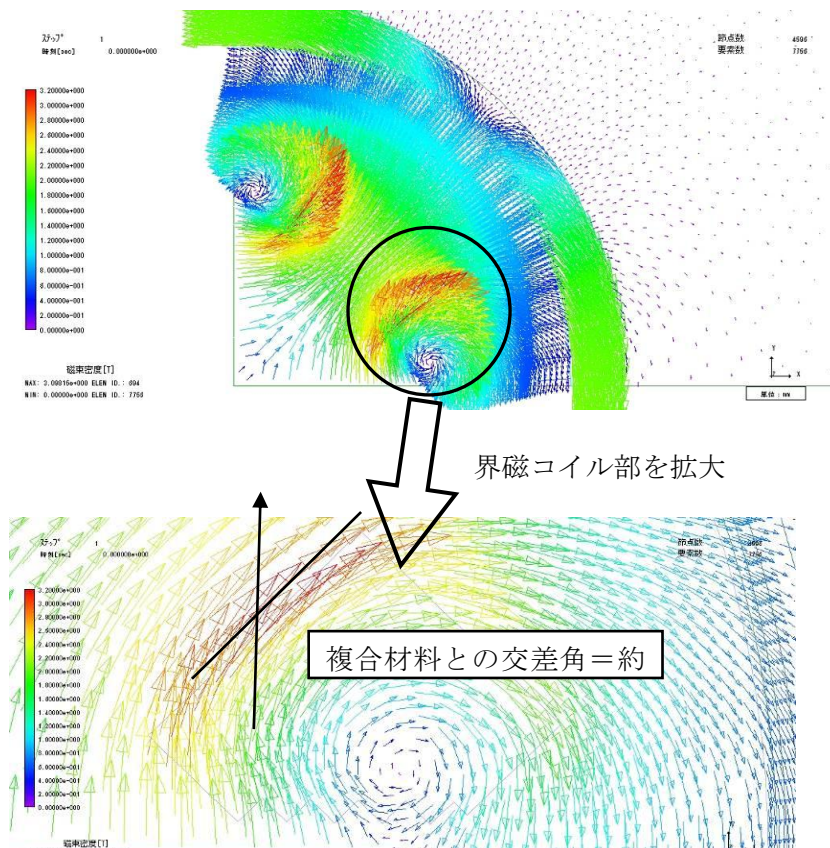


図 2.3.1-30 500kW 機界磁コイルの磁束密度分布

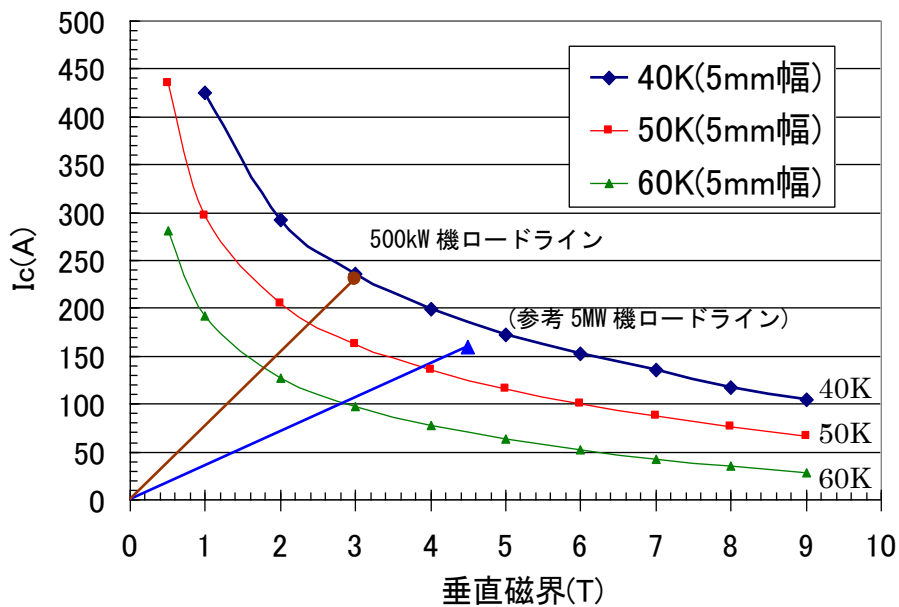


図 2.3.1-31 複合材料の I_c - B - T 特性と各界磁コイルのロードライン (5MW 機は Appendix 参照)

以上の検討に基づき、複合材料 $I_c=600\text{A/cm}$ 幅を使用した時の 500kW 回転機の詳細仕様を表 2.3.1-7 に示す。イットリウム系複合材料に関して重要なのは、500kW 機では $1.2 \times 6 = 4.8\text{km}$ が必要なことである。また、40K 運転を想定しており、記載の各界磁束密度近辺で角度も考慮して運転電流を決める必要がある。さらに、効率を計算すると、各々 96.8% の高い効率が得られた。

表 2.3.1-7 500kW の設計仕様

		500kW	備考
仕様	回転速度(min^{-1})	1800	
	極数	4	
	電圧(V)	440	
	電流(A)	760	
体格	固定子外径(mm)	490	
	鉄心相当長*(mm)	330	
	ヨーク厚(mm)	33	
	エアギャップ(mm)	5	
	回転子内径(mm)	360	
固定子コイル	固定子コイル数	60	
	固定子每溝導体数	6	
	コイルピッチ	#1~#16	
	導体総数	90	
	固定子素線サイズ(mm)	6.0×3.2	マカ巻角線、素線絶縁含まず
	巻線抵抗($\Omega/\text{相 } 20^\circ\text{C}$)	0.0311	
回転子コイル	界磁巻数	1050	段上りの減ターン考慮
	界磁素線サイズ(mm)	5.2×0.3	素線絶縁・ワニス含む
	界磁電流(A)	230	定格
	複合材料 I_c	600	77K 自己磁場
	複合材料長(km/極)	1.2	5mm 幅換算
	総複合材料長(km)	4.8	5mm 幅換算
特性	回転機効率(%)	96.8	冷凍機含む
	ヨーク磁束密度(T)	2.3	
	ギャップ磁束密度(T)	1.2	
	界磁磁束密度(T)	3.0	

* 鉄心相当長：ここでは空心であるので、コイルの長辺部の内側の長さ。

(3) 考察

(3)-1 常電導回転機との比較

前節までに得られた超電導機と代表的な常電導機と体格、重量、効率を比較した。常電導機の界磁コイルは、誘導機はアルミ鋳込みロータ、PM 回転機は永久磁石埋め込み形、電機子(固定子)コイルは両者共銅線コイルである。調べた誘導機、PM 回転機の 500kW の仕様を表 2.3.1-8 に示す。いずれも、500kW、1800rpm、4 極である

表 2.3.1-8 常電導機の仕様

項目		誘導機	PM 回転機
仕様	定格出力	500kW	500kW
	定格電圧	400V	400V
	定格回転数	1800rpm	1800rpm
	極数	4 極	4 極
固定子	固定子外径	φ 600	φ 520
	固定子内径	φ 370	φ 340
	エアギャップ	2.3mm	1.5mm
	鉄心長	420mm	600mm
	コイル仕様	1.3mm 丸線	1.3mm 丸線
回転子	界磁電流	—	—
	ターン数	—	—
	界磁コイル複合材料	アルミロータ	永久磁石
	複合材料使用量	—	—
磁束	界磁コイル磁束密度	—	—
	ギャップ磁束密度	0.9T	0.8T

それらの常電導機の特性と本設計で得られた超電導 500kW 機の特性の比較を表 2.3.1-9 に示す。誘導機と比べると、体格、重量、効率すべての面で超電導機が優れている。効率は 1.8%向上し、体格は 30%向上し、重量は半分になっている。従来から高効率であるといわれている PM 機に比べても効率は多少向上している。しかしながら、体格、重量の点では、超電導機と PM 機ではあまり差が見られず、15%程度の向上にとどまっている。

表 2.3.1-9 500kW 常電導回転機との比較

	超電導回転機	誘導機	PM 回転機
効率	96.8%	95%	96.5%
体格比	0.7	1	0.8
重量比	0.5	1	0.6

(3)-2 希土類元素使用量の比較

一般的に PM 回転機に使用されているネオジウム磁石に含まれる RM の量はメーカーの秘密事項であるため正確には把握できないが、文献等から鉄、ホウ素を除きネオジウムとディスプロジウムの合計の質量比で 32%を RM とした。図 2.3.1-32 に磁石の成分割合のグラフを示す。

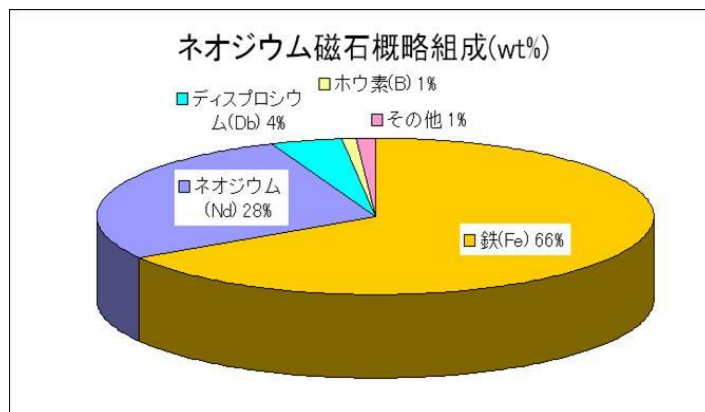


図 2.3.1-32 ネオジウム磁石の概略組成

a) 永久磁石の RM 使用量は次式で表される。

$$\text{永久磁石の RM 使用量(kg)} = \text{磁石使用量(kg)} \times \text{RM 含有率(\%)} / 100$$

b) 超電導複合材料の RM 使用量は次式で表される。なお、中間層および基材に含まれる RM はわずかなため考慮していない。

$$\text{イットリウム系複合材料作製のための RM 使用量(kg)} = (\text{複合材料巾(mm)} \times \text{超電導層厚さ(\mu\text{m})} \times \text{総複合材料長(km)} \times \text{比重(g/cm}^3) \times 10^{-3} \times \text{収率})$$

ここで、超電導層厚さ = 1.3(μm)、超電導層の比重 = 6.3(g/cm³ : Gd₁Ba₂Cu₃O₇ の比重)

今回の超電導複合材料で使用されている RM(=ガドリウム:Gd)の比重は上記比重について夫々の原子量から Gd のみの量を計算する。Gd 比重 = 6.3 × (157/734) = 1.35g/cm³

さらに、この Gd の量は超電導層内に含まれるが、正当に比較するため、超電導層を製造するときの材料歩留りを 33%とした。

表 2.3.1-10 に RM 使用量を示す。500kW 機では、1/130 になった。目標値である PM 回転機における RM 使用量の 1/10 に対して十分な削減量が得られる。

表 2.3.1-10 レアメタル(RM)使用量比較

	500kW	
	超電導回転機	PM 回転機
総複合材料長(km)	4.8	—
磁石量(kg)	—	50
RM 使用量(kg)	0.126	16

Appendix 今後の実用化の見通しについての検討

今回得られた Y 系回転機の成果は、産業用回転機(500kW 級)ばかりでなく、広い波及効果を持つ。例えば、MW 級の船用回転機は、Siemens、Doosan、AMSC 社などが Bi 系複合材料で開発を進めており、実用化に有望な分野と言える[1-3]。この船用回転機に、さらに特性の優れたイットリウム系複合材料を用いれば、より一層の優れた効果が期待される。よって、ここではより広い分野での実用化のイメージとその効果を調べるため、産業用をさらに大型化させた船用 5MW 機の検討結果について述べる。

①5MW 機界磁コイルの概念設計

船用応用として代表的な 5MW-200rpm 機に関して、以下検討を行った。

①-1 解析対象回転機と界磁コイル

本船用回転機の回転数は 200rpm と小さいので、遠心力の影響も小さい。また、全体サイズとしても 500kW と比べて大きくなり、界磁コイル設置部にも余裕がある。このため、平傘型形状からさらに変化させ菱形傘型形状として解析を行い、その成立性を調べた。

設計された 5MW 級超電導同期電動機の諸元を表 App-1 および図 App-1 に示す。なお、大型である本モータに使用した複合材料は、 $I_c=600\text{A/cm}$ 幅級のものである。有限要素法の要素分割は図 App-2 の通りである。界磁の巻線部は複合材料構造を考慮して要素分割をしている。電磁場・伝熱・応力の連成解析では、共通の要素分割を用いて各解析間で発熱、電磁力等の受渡しを行っている。

表 App-1 5MW 級回転機の諸元

定格出力	5000 kW
定格回転速度	200 rpm
定格電圧	3000 V
定格電流	1020 A
固定子外径	1350 mm
固定子内径	950 mm
エアギャップ	5 mm
固定子鉄心長	1000 mm
固定子スロット数	120
電機子コイル数	120
每溝導体数	6
電機子コイル電流密度	3.7 A/mm^2
界磁巻数	6956
界磁電流	200 A
複合材料幅	5 mm
複合材料使用量(5mm 幅)	18 km/極

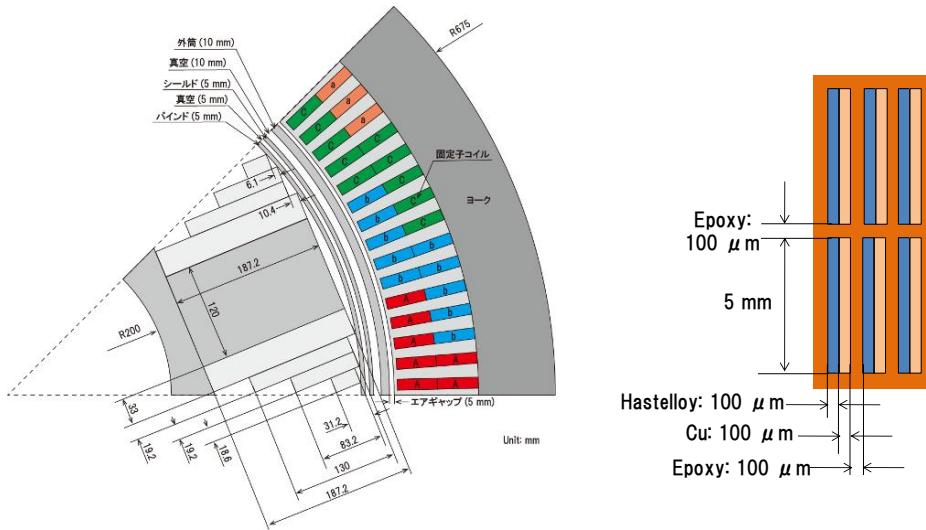


図 App-1 5MW 級回転機の断面図および巻線部複合材

①-2 電磁場分布

磁場分布を図 App-3 に示す。界磁巻線に 200 A 通電した状態の磁場分布である。巻線部が経験する最大磁場は 7.2 T であった。

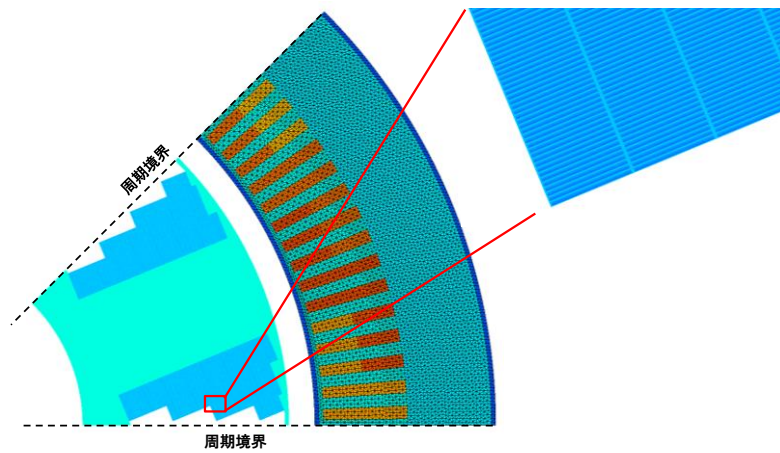


図 App-2 5MW 級回転機の解析モデル

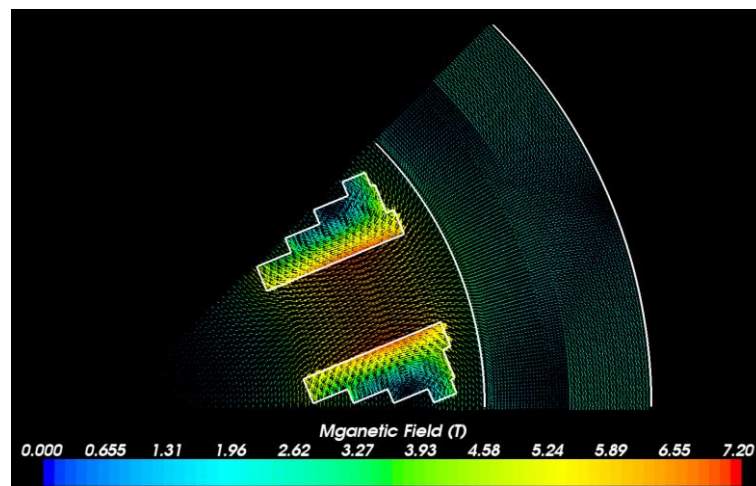


図 App-3 5MW 級回転機の磁場分布

①-3 電磁力・遠心力

電磁力の分布を図 App-4 に示す。電磁力は巻線部(超電導層)に発生する。その最大値は 3×10^{11} N/m³ となった。一方、遠心力の分布を図 App-5 に示す。その最大値は 1.65×10^6 N/m³ となった。500kW 機に比べ、界磁巻線の通電電流が大きくなる一方で、回転数が減っているため、電磁力は大きくなるが、遠心力は小さくなった。

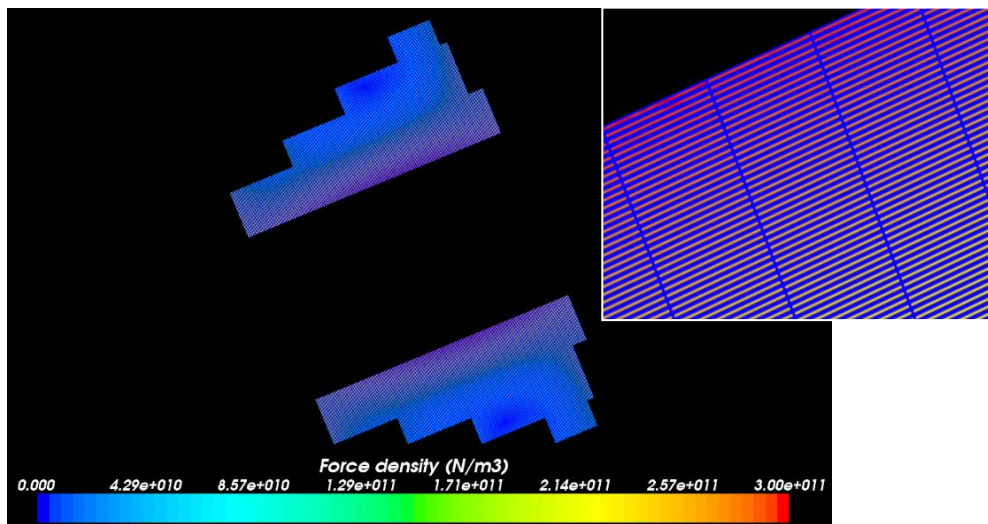


図 App-4 5MW 級回転機の界磁巻線の電磁力分布(右上拡大)

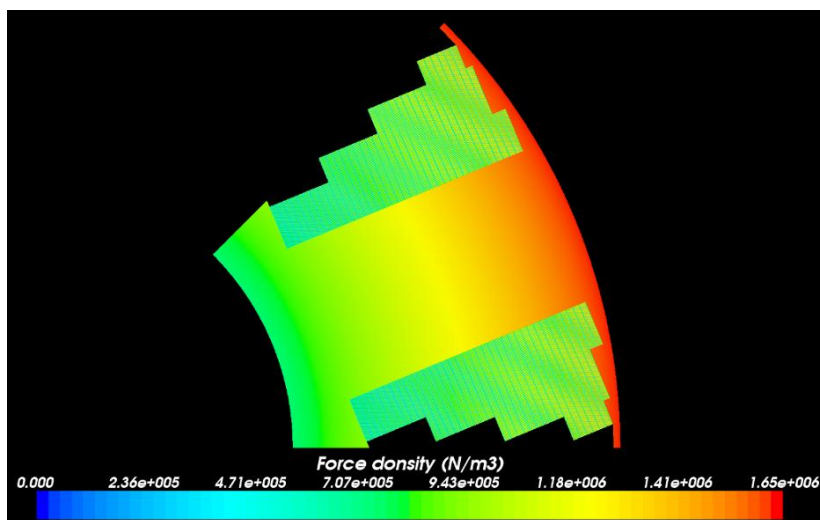


図 App-5 5MW 級回転機の遠心力分布

①-4 応力分布

図 App-6 に複合材料幅広面垂直方向に働く応力分布を示す。この方向の応力は複合材料剥離方向に働く応力である。図 App-7 に巻線内の各ターンの応力分布を示す。巻線最内層で複合材料幅広面垂直方向に 25 MPa の応力が発生している。

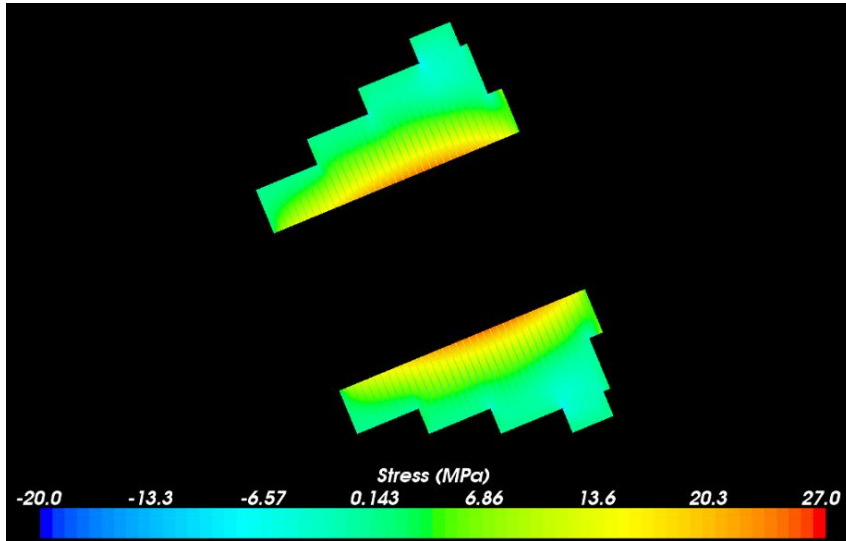


図 App-6 5MW 級回転機の界磁巻線の複合材料幅広面垂直方向の応

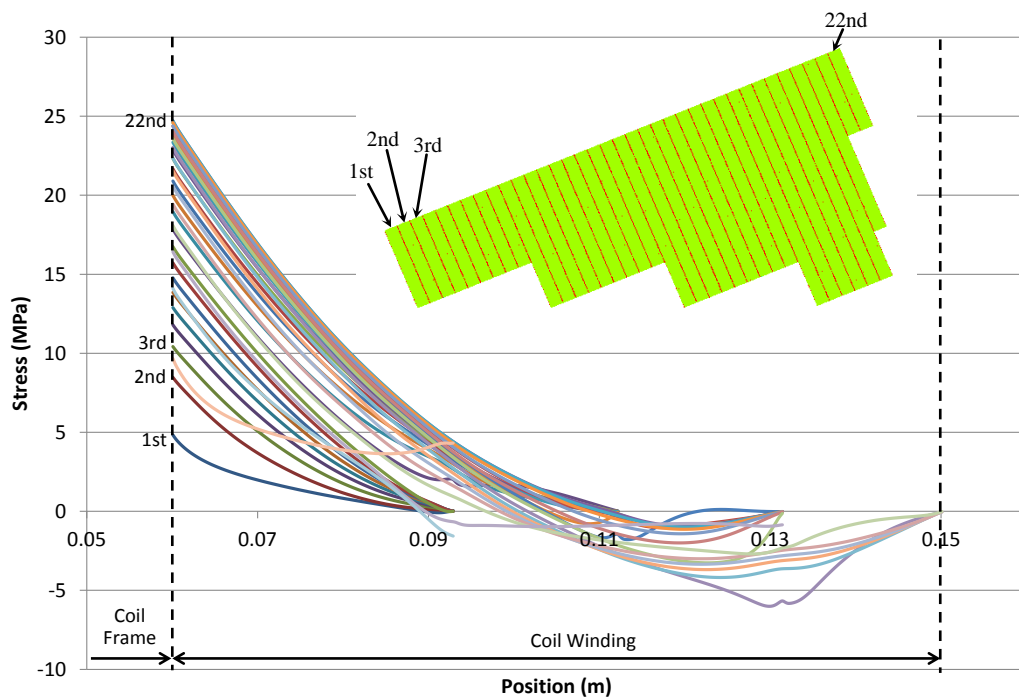


図 App-7 5MW 級回転機の界磁巻線の各ターンの
複合材料幅広面垂直方向の応力

①-5 温度分布

発熱は、超電導複合材料部で 0.005、0.01、0.015 W/m = 5、10、15 kW/m³(複合材料：5 mm 幅、200 μm 厚)とした。5 MW 機では一極当たりの複合材料長は 18 km であるから、一極当たり 90、180、270 W の発熱に相当する。初期温度は 27 K とした。冷却が充分された状態で発熱が発生したとして計算を行った。図 App-8～図 App-10 に回転子の温度分布を示す。0.005、0.01、0.015 W/m の発熱に対して、最高到達温度はそれぞれ 30.8、34.3、37.7 K となった。

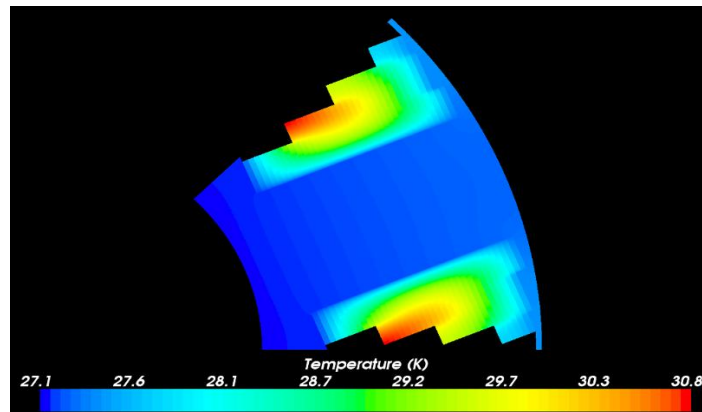


図 App-8 5MW 級回転機の界磁の温度分布(発熱 0.005 W/m)

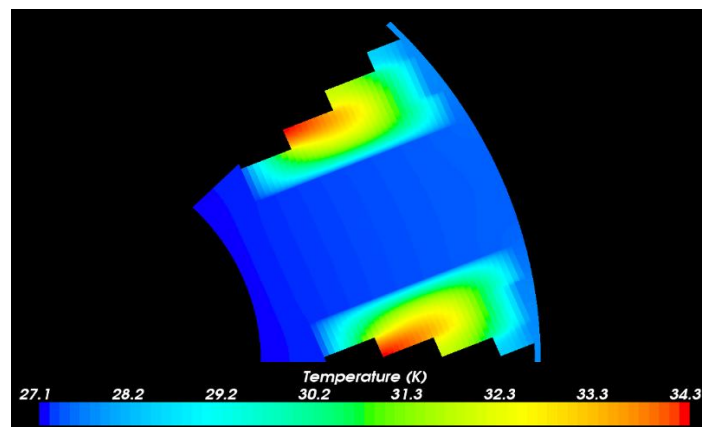


図 App-9 5MW 級回転機の界磁の温度分布(発熱 0.01W/m)

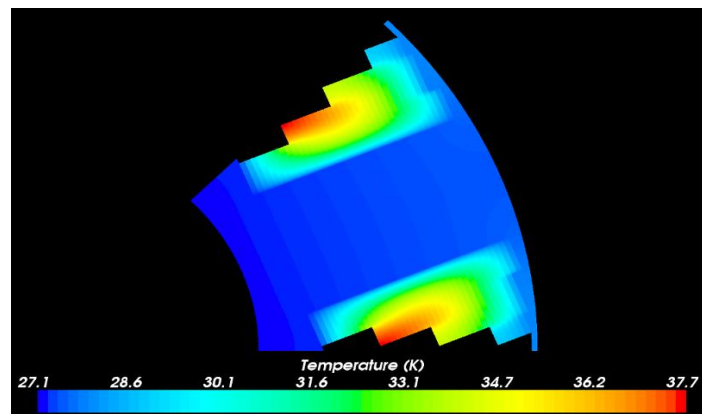


図 App-10 5MW 級回転機の界磁の温度分布(発熱 0.015

①-6 概念設計に関する考察

表 App-2 に示すように、5MW 機で複合材料に 25 MPa の垂直応力=剥離応力が発生する。これまでの報告から、イットリウム系複合材料の剥離強度は 50MPa 程度であることがわかっている。すなわち、今回のコイルで発生する超電導層に垂直にかかり剥離方向に働く力はいずれもこの剥離強度限界内に収まっており、回転機に用いることができることがわかった。

表 App-2 5MW 回転機の複合材料に働く最大応力

	5 MW 級回転機
巻線部最大磁場	7.2 T
複合材料幅広面垂直応力	引張り： 25 MPa

また、5 MW 機の界磁巻線内の温度の時間変化、最高到達温度は、前に示した図 2.3.1-14、図 2.3.1-1415 の通りである。界磁巻線の温度は 0.005~0.015 W/m の発熱でも、5 MW 機(90~270W 発熱に相当)で 30.8~37.7 K となった。また、ネオンと接触している境界面の温度は 27.1 K で 0.1 K の温度上昇で収まっており、膜沸騰領域には達していないため、巻線内に温度差はできるが(最大で 5MW 機で 270W の発熱がある場合、 $\Delta T=10.6$ K)冷却は可能と考えられる。

②5MW 機的设计

上記 5MW の概念設計と 2.3.1③-2 の最適形状を検討結果を受けて、電機子、ヨークを含めた回転機全体の詳細設計を 5MW に対して行った。体格、重量、効率、RM 使用量を算出し、同出力の常電導機と比較して、Y 系回転機の優位性を論じた。

②-1 方法

(1) 設計の際の機器、複合材料の条件は、500kW の場合とほぼ同じである。

- ・基本構造とコア断面：回転子超電導・固定子常電導とした。液体 Ne によるサーモサイフォン方式で冷却し、動作温度は 40K として設計した。回転子の鉄心は無しとした。
- ・電圧および回転速度：5MW は船舶を念頭に、200rpm とした。電気推進船用の MW 級回転機電圧は 3kV 級~6kV 級が標準となっており、5MW 機では定格電圧を 3kV 級とした。
- ・ I_c ：5MW 機では、500kW の複合材料特性の比較結果を受けて、 I_c 性能は 600A/cm 幅 (@77K, 自己磁場)のもので検討した。
- ・極数：6 極~12 極の間で極数の最適化を検討した。イットリウム系複合材料は曲げ加工で I_c 特性が劣化しやすく、 I_c 特性が劣化しない曲げ半径(R)を 35mm として設計した。
- ・界磁コイルの形状：500kW は遠心力対応のため平傘型コイル形状を採用したが、5MW 機は回転速度が低いため遠心力を考慮しなくても良いこと、また、③-2 界磁巻線の形状検討の結果も参考に、菱形傘型形状を選んだ。これを基本に、さらに詳細に回転機特性への影響を検討した。

(2)界磁コイル形状と極数の検討

5MW の設計に関しては、サイズが大きくなるため界磁コイル用のスペース、ロータシャフト-電機子の距離が取れるので、設計の自由度もます。このため、500kW の平傘型を改良して菱形傘型形状で次の通り検討した。

図 App-11 に断面形状を示す。同じ体格で界磁コイルのターン数を変え、平傘型、菱形の 2 種類のモデルを検討した。コイル巻数以外の固定子・回転子の形状は全て同一とし、界磁電流は各コイル磁界から 40K における最適値と、ギャップ磁束密度と回転機出力を解析し、平傘型よりも菱形傘型が優れていることがわかった。1800rpm で高速回転する場合には、上側からコイルをしっかり押える必要があるが、この 5MW 機では 200rpm を想定しており、菱形形状も可能である。すなわち、本 5MW 機では菱形形状が最も有効である。

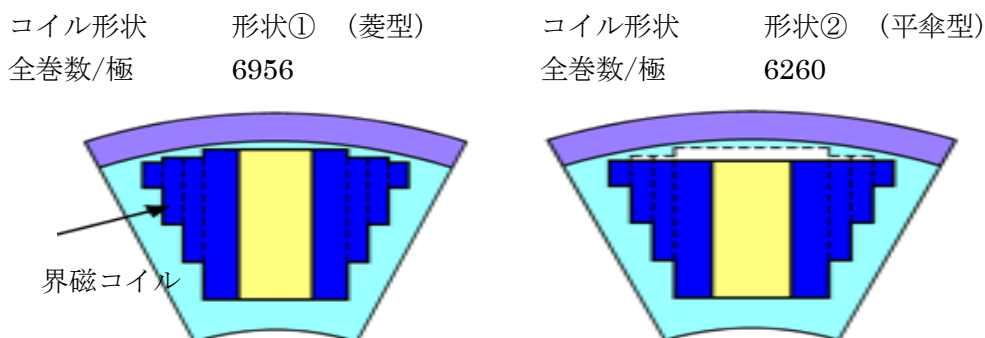


図 App-11 5MW 機の界磁コイル形状の検討

つぎに、この菱形形状を用いて、さらに詳細に 6 極～12 極の最適極数を検討した。また、形状も菱形でありながら、コイル厚みなどが変化する。解析モデルとした各種形状を図 App-12 に示す。各極数とも固定子外径を 1350mm・回転子内径を 400mm・エアギャップ 5mm および界磁コイル巻棒最直径 70mm を統一設計条件とし、回転機出力は界磁コイル長(ここでは界磁コイル内側直線部長さとした)で調整した。

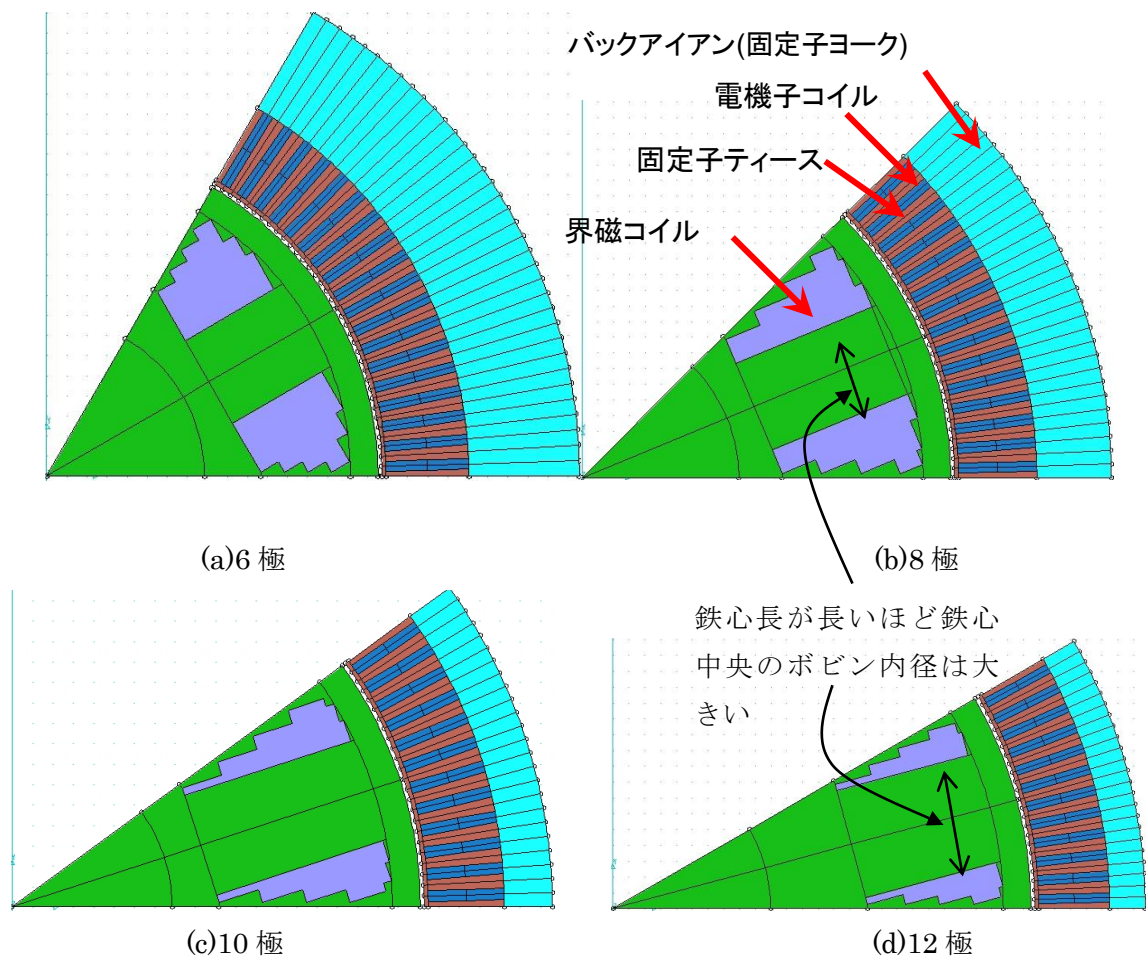


図 App-12 極数と形状を変えた 5MW 機の界磁コイルの形状(1 極分のコア断面図)

図 App-13 に体格比較を示す。鉄心長は極数が増えるほど長くなるが、1 極当たりの発生磁場は小さくなるので、ヨークの厚さが薄くなるり鉄心重量としては極数が増えるほど軽くなる。図 App-14 に界磁コイルの断面積比較を示す。一極当たりの回転子断面積は極数が少ないほど大きいですが、1 極当たりの界磁コイル断面積に対する回転子断面積の比を界磁コイル面積率とすると、8 極が最も面積率が高く、次いで 10 極となっている。

図 App-15 に電磁界解析によるギャップ・ヨークおよび界磁コイルの磁束密度を示す。界磁コイルは最大磁束としており、6 極と 8 極がほぼ同程度の約 5.5T である。ギャップ磁束も 6 極・8 極は 3T 近くとなり、後は極数が大きくなるほど磁束密度は低くなった

図 App-16 に回転機重量・回転機効率の比較を示す。前出の図 App-13 の通り極数が増えるほど鉄心重量は軽くなるが、固定子銅線重量・フレーム等の構造物の重量を加えた全質量では 8 極・10 極が軽くなっている。一方回転機効率は極数が増えるほど低下しており、本仕様においては効率と重量から 8 極が最適である。

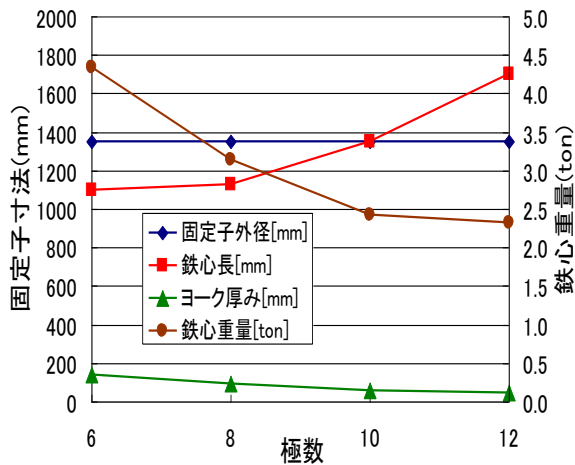


図 App-13 固定子体格比較

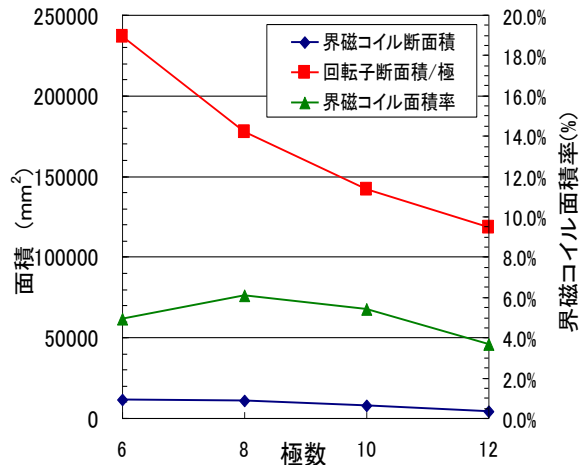


図 App-14 回転子面積比較

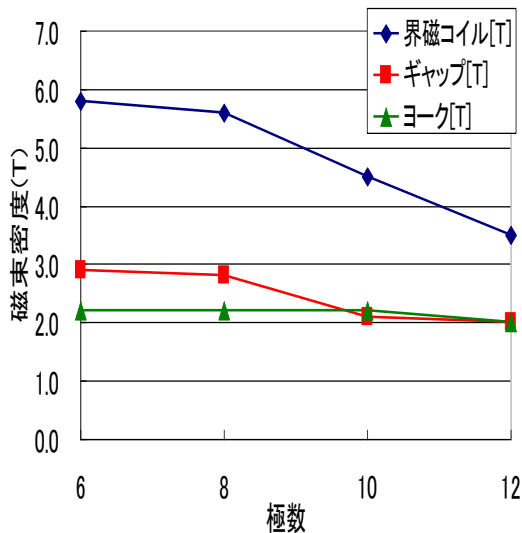


図 App-15 磁束密度の比較

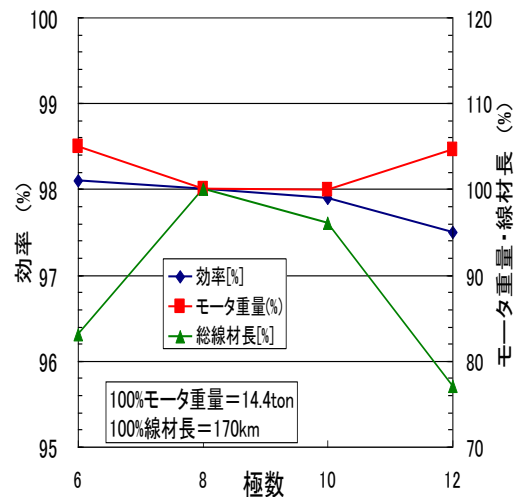


図 App-16 重量・効率比較

(3) 詳細設計仕様

上記のように 5MW 機で菱形の詳細な形が決まったところで、界磁コイルの磁場、複合材料の磁場中 I_c 特性を詳細に考慮して設計した。

図 App-17 に 5MW 機界磁コイルの磁束密度分布を示す。界磁コイル付近の拡大図から超電導複合材料は最大経験磁場 5.3T との交差角はほぼ 10° 以下であるが、界磁コイルのシャフト側端部で約 4.5T の磁場と約 45° で交差している。5.3T における平行磁場特性より 4.5T の垂直磁場特性の方が I_c は低いので、5MW は 4.5T における複合材料の垂直磁場特性で I_c を見積もることとした。

用いた複合材料の 40-60K における $I_c=600A/cm$ 幅(300A/5mm 幅)の磁場中特性と、5MW の界磁コイルのロードライン(図 2.3.1-30)から、5MW も 40K まで冷却できれば所要の界磁電流を流すことができる。後述するように、コイル成形後の I_c 特性については回転子モデルコイル試作試

験結果からコイル成形後も複合材料 I_c の電流が流せることを検証している。

以上の検討に基づき、複合材料 $I_c=600A/cm$ 幅を使用した時の 5MW 回転機的设计詳細仕様を比較して表 App-3 に示す。

5MW 機ではイットリウム系複合材料 $22km \times 8 = 176km$ が必要である。40K 運転を想定しており、記載の各界磁束密度近辺で角度も考慮して運転電流を決める必要がある。また、効率は 98% の高い値が得られた。

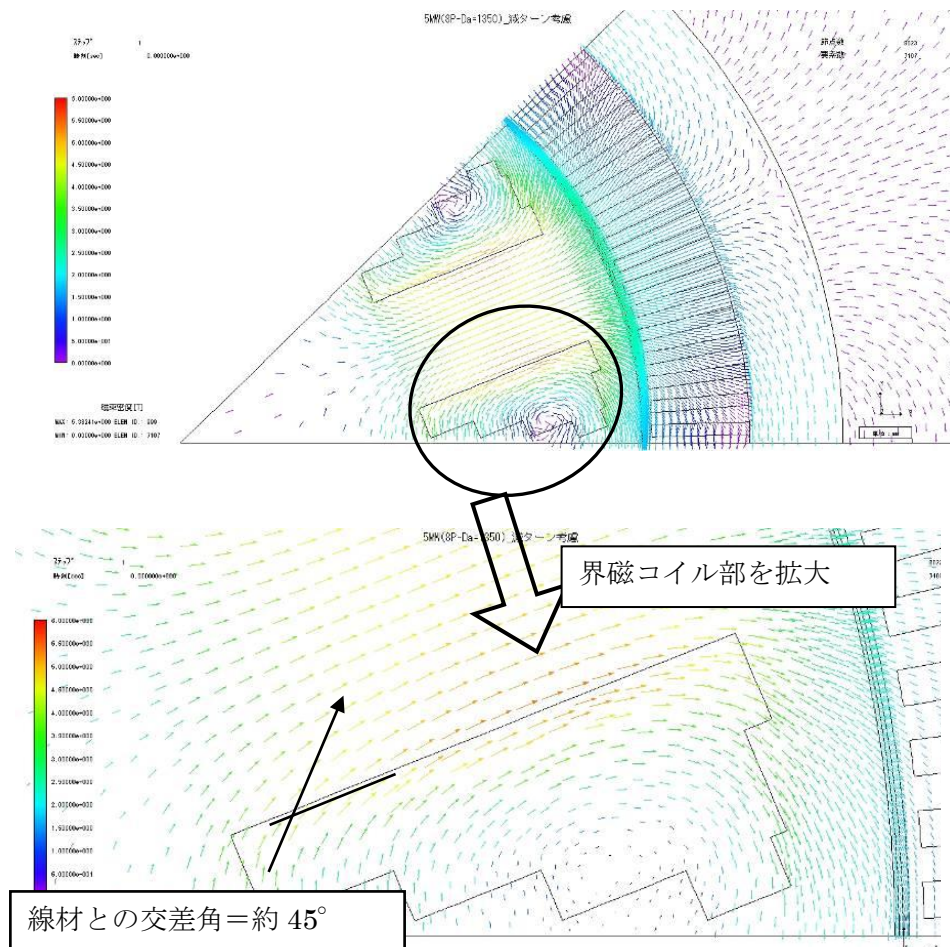


図 App-17 5MW 機界磁コイルの磁束密度分布

表 App-3 5MW の設計仕様

		5MW	備考
仕様	回転速度(min^{-1})	200	
	極数	8	
	電圧(V)	3000	
	電流(A)	1020	
体格	固定子外径(mm)	1350	
	鉄心相当長*(mm)	1200	
	ヨーク厚(mm)	95	
	エアギャップ(mm)	5	
	回転子内径(mm)	940	
固定子コイル	固定子コイル数	120	
	固定子每溝導体数	22	
	コイルピッチ	#1~#13	
	導体総数	330	
	固定子素線サイズ(mm)	5.0×1.8	マカ巻角線、素線絶縁含まず
	巻線抵抗(Ω /相 20°C)	0.0131	
回転子コイル	界磁巻数	6608	段上りの減ターン考慮
	界磁素線サイズ(mm)	5.2×0.3	素線絶縁・ワニス含む
	界磁電流(A)	160	定格
	複合材料 I_c	600	77K 自己磁場
	複合材料長(km/極)	22	5mm 幅換算
	総複合材料長(km)	176	5mm 幅換算
特性	回転機効率(%)	98.0	冷凍機含む
	ヨーク磁束密度(T)	2.2	
	ギャップ磁束密度(T)	2.6	
	界磁磁束密度(T)	5.3	

*鉄心相当長：ここでは空心であるので、コイルの長辺部の内側の長さ。

(4) 考察

常電導回転機との比較

5MW 超電導機と常電導機で体格、重量、効率を比較した。結果を表 App-4 に示す。ただし永久磁石(PM)回転機は、今回の 5MW 機ほど大きいものの実績がないので、それらの体格・重量は参考値である。この結果を見ると、誘導機に対しての圧倒的なメリットがあることがわかる。効率は 2.6% 向上し、体格、重量は約 1/3 に大幅に削減される。また、大型だけに PM 機と比較しても、体格重量は約半分程度と大きな効果が見込まれる。

表 App-4 5MW 常電導回転機との比較

	超電導回転機	誘導機	PM 回転機
効率	98.0%	95.4%	97.5%
体格比	0.29	1	0.65
重量比	0.34	1	0.76

2.3.2 要素技術開発 (1) 界磁巻線技術開発 (九州大学、研究組合)

①背景及び目的

本開発項目では、イットリウム系複合材料の特徴を活かした回転機を実現するために、500 kW (1000 rpm 級) 以上の産業用回転機 (モータ、発電機) を想定して、イットリウム系複合材料を用いた巻線技術とコイル特性の把握、励磁特性(2.3.2③-1)と安定性評価(2.3.2③-2)を行う。特に、回転機に適した種々の傘型形状の界磁巻線の試作を行ない、イットリウム系複合材料傘型界磁巻線の巻線技術、成型性、励磁特性、安定性特性を把握し、大容量機への課題を検討し、今後の開発指針を得る。

②課題とアプローチ

回転機に適した傘型形状をもった界磁巻線の作製を可能にする技術の見通しを得ることが重要な課題である。そのために、最新のイットリウム系複合材料を使い、種々の形状の界磁巻線を試作し励磁特性を評価する。また、交流損失など界磁巻線で生じる発熱要因を評価し、界磁巻線の運転に関する安定性を見通しを得ることも必要である。この両者の検討により、500 kW 級 -1000 rpm 級および大型回転機的设计を見通す。具体的目標としては、以下を掲げた。

- ・傘型界磁巻線工程等における加工劣化を抑制し、巻線状態での特性で複合材料 I_c の 70%以上を得ることを実証する。また、安定性に関しては回転機運転中に生じる交流損失から励磁運転への影響を調べることにした。

すなわち、本節での課題とアプローチは以下の通りである。

課題： イットリウム系複合材料による傘型界磁巻線コイルを作製し、その励磁特性を把握する。また、交流損失からの安定性も検討する。

アプローチ： 回転機で有効な磁束を発生する傘型形状コイルを作製し、これを低温に冷却し励磁試験を行う。その励磁特性とイットリウム系複合材料の I_c - B 特性と比較し、設計が可能となる励磁率を把握する。また、安定性に関してはイットリウム系複合材料の損失評価からコイルとしての損失を計算する。この励磁率、安定性の検討の両者から回転機適用の見通しを立てる。

③成果

③-1 傘型界磁巻線開発

(1) モデルコイルの作製

ここでは、500kW (1000rpm 級) 以上の産業用回転機 (モータ、発電機) への適用のため、イットリウム系複合材料による界磁コイルを模擬した要素モデルコイルを試作し試験評価した。

2.3.1③-2、2.3.1③-3 の界磁コイルの形状検討で述べたように、回転機に有効な形状は平傘型、

菱形傘型、鞍型傘型が解析、設計上の検討では有望であった。しかしながら、界磁コイルに使える長尺イットリウム系複合材料の製造はようやく本格化したばかりで、電流特性、機械特性、それらの均一性なども不明な点が多い。また、イットリウム系複合材料によるコイル化の検討は、少しずつ報告されてきているが、今回のような通常コイルのような単純矩形断面、円筒形状と大きく異なる傘型形状コイルでは、事前のモデルコイルによる作製検討、励磁試験などを行ない、製造技術のデータを蓄積することが必要である。これにより、より確度の高い界磁コイルの設計も可能となる。

よって、ここでは、a) 平傘型コイル、b) 菱形傘型コイル、c) 鞍型傘型コイル、を長尺イットリウム系複合材料により作製した。

巻線方式：短尺イットリウム系複合材料を使う際は、パンケーキ巻が多い[1,2]が、パンケーキコイルでは接続部が多数必要となるため機械強度が弱いなどの弱点が出てくる。今回の傘型形状では、形状から不均一な電磁力、熱収縮力がかかることも予想されるので、シリンダ巻とした。

巻線設計：傘型コイルの巻線方法を検討した。以下、詳細を 500kW 回転機界磁コイルの平傘型コイルについて述べる。

(1)-1 平傘型コイル：以下の条件のもとで設計を行った。

- ・用いたイットリウム系複合材料長は 200m：これは供給されるイットリウム系複合材料量から決まったものである。
- ・ターン数の種類は 500kW 級回転機の界磁巻線と同じとし、層数を減らす。
シリンダ巻線で傘型断面にするためには、層数とターン数を変える必要がある。図 2.3.2-1 に示すように、内径側から順に、9 ターン×14 層、8 ターン×8 層、7 ターン×12 層、6 ターン×6 層、4 ターン×8 層とした。表 2.3.2-1、図 2.3.2-2 に各ブロックのターン数と詳細図を示す。*
- ・巻線内径は 500kW 級回転機の界磁巻線と同じとする。
- ・直線部長さは 150mm とする。本コイルは平面図ではレーストラック形状である。実機と同じ程度の歪がかかるようにした。

*500kW 級回転機の実機設計では、必要な界磁巻線のターン数は内径側から順に、9 ターン×56 層、8 ターン×26 層、7 ターン×38 層、6 ターン×16 層、4 ターン×24 層となった。このため、特に、各ブロック間のわたりで生じる歪から来る劣化の程度の把握が重要であることから、ターン数を実機とモデルコイルで同じとした。

図 2.3.2-1 は、コイルの外形図で層毎にターン数が異なる傘型形状であるが、平面図では長円形のレーストラック形状である。本コイルは伝導冷却するため、巻枠に熱伝導率が良好な材料が望ましいことから、銅で構成することにした。また、巻線の電磁力支持や熱接触を考慮し、線材間にエポキシ樹脂を塗布した。

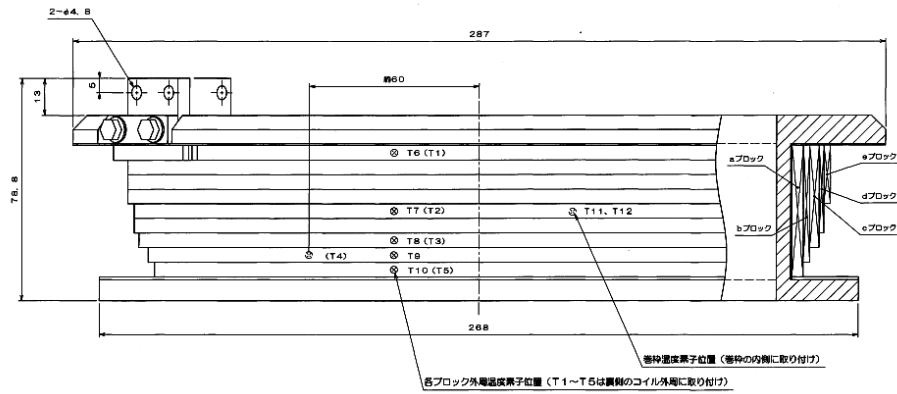


図 2.3.2-1 平傘型界磁巻線モデルコイル外形図

表 2.3.2-1 モデルコイル巻線のブロック毎ターン数

ブロック	層数	ターン数
a	14	9
b	8	8
c	12	7
d	6	6
e	8	4

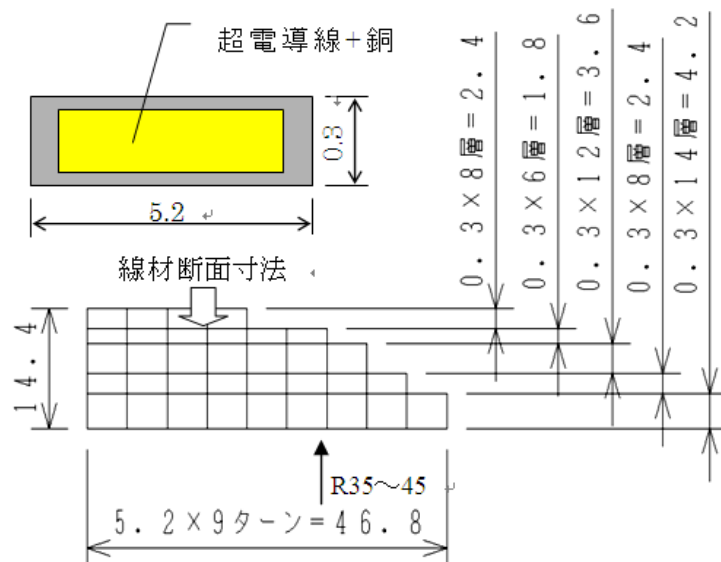


図 2.3.2-2 平傘型モデルコイルの断面図

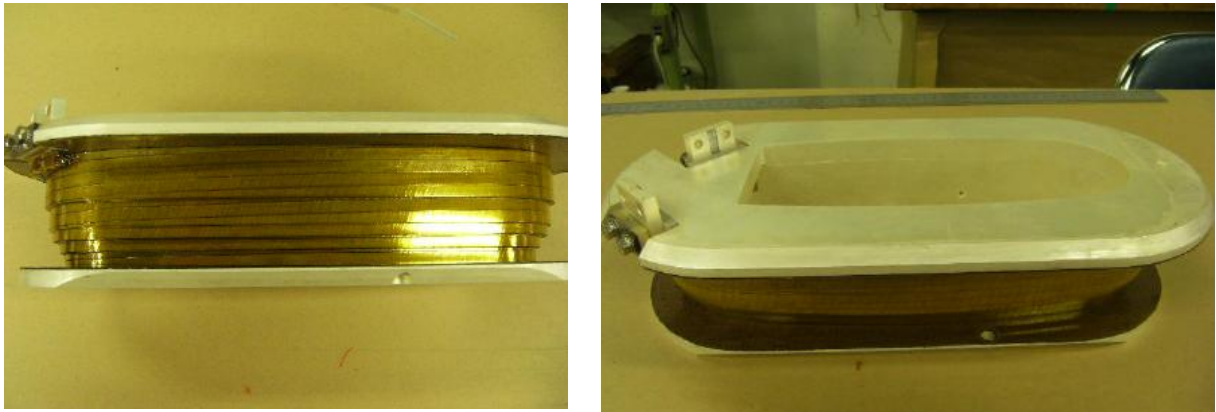


図 2.3.2-3 完成した平傘型モデルコイルの全体写真 左) 断面、右) 平面

(1)-2 菱形傘型コイル：2.3.1③-2、2.3.1③-3 の設計検討で述べたように、5MW 級回転機では、界磁コイルの設置部のスペースに余裕があり、かつ、回転速度も 500kW の 1800rpm に比べ 200rpm と遅く遠心力も小さくなる。このため、形状検討で平傘型よりもより効率の良い菱形傘型モデルコイルを作製した。コイル仕様は次の通りである。本モデルコイルは、5MW 級回転機を想定し、層数、ターン数共に約 1/3 モデルとした。5MW 級回転機コイル断面を図 2.3.2-6 に、ターン数比較を表 2.3.2-2 に示す。用いたイットリウム系複合材料は、500kW 同様幅 5mm のものであるが長さは 300m で 2 本使用した。巻線は 500kW 同様、シリンダ巻とした。完成した菱形傘型モデルコイルの外観を図 2.3.2-7 に示す。

表 2.3.2-2 設計機とモデルコイルのターン数比較

	5MW 機界磁コイル	菱形傘型モデルコイル
総ターン数	9222	938
3 ターン部	3 ターン、148 層	1 ターン、46 層
3 ターン部	3 ターン、334 層	1 ターン、100 層
6 ターン部	6 ターン、360 層	2 ターン、108 層
9 ターン部	9 ターン、294 層	3 ターン、88 層
9 ターン部	9 ターン、230 層	3 ターン、68 層
5 ターン部	5 ターン、180 層	2 ターン、54 層
概算線材長	—	600m
直線状部長さ	800mm	150mm
巻線最小内径	R35mm	

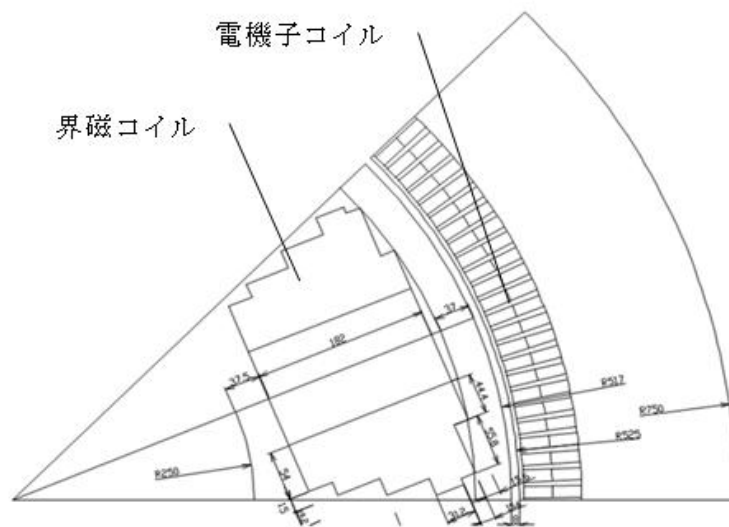


図 2.3.2-4 5MW 回転機 菱形傘型モデルコイル断面図

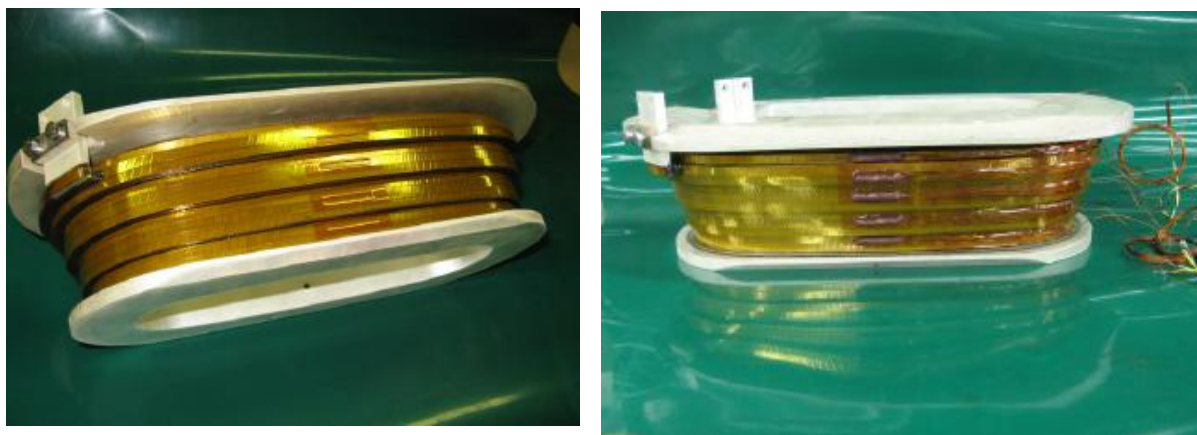


図 2.3.2-5 完成した菱形傘型モデルコイル外観

(1)-3 鞍型傘型コイル

2.3.1 節の形状検討では、鞍型傘型形状も有望であった (2.3.1③-2)。このため、5MW 級回転機のロータ径を想定し、取り付けることを想定して、R270mm の円周に沿った形状とした鞍型傘型モデルコイルを作製した。図 2.3.2-7 にコイル断面を示す。用いたイットリウム系複合材料は、500kW 同様幅 5mm のものであるが、長さは 100m を 1 本使用した。巻線は 500kW 同様シリンダ巻とした。また、励磁試験は、前 2 コイルは冷凍機伝導冷却であったが、これに関しては、3 つ目のコイルで実績も積んだこともあり、また、期間の関係もあり、液体窒素浸漬冷却(77K)のみでの試験とした。

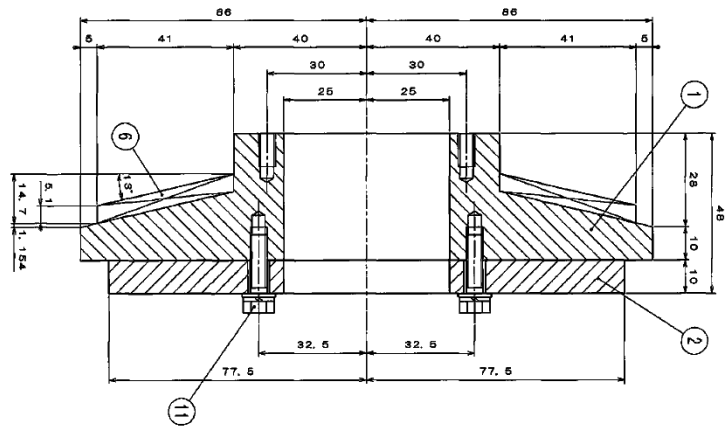


図 2.3.2-6 鞍型傘型コイル断面図



図 2.2.2-7 鞍型傘型モデルコイル

(2) 試験方法

設計した 500kW、5MW 級回転機の界磁巻線コイルの冷却は、液体 Ne を用いたサーモサイフオンを想定した。回転シャフト内に冷媒を導入して回転軸を 40K 程度に冷却し、シャフトに取付けた界磁巻線固定治具を通して伝導冷却する方式とした。このため、前記平傘型、菱形傘型コイルを GM 冷凍機を用いた伝導冷却方式で 40K 程度に冷却し、励磁試験を行うこととした（先述の様に、鞍型傘型コイルは液体窒素浸漬冷却で試験した）。図 2.3.2-8 に試験装置の外観を示す。この装置の外側に輻射シールドを取付け、要素モデルコイル周辺雰囲気は高真空にした。

コイル電圧の測定は、コイルの両端電極に取付けた電圧端子で行っているため、測定電圧には電極の抵抗やイットリウム系複合材料線と電極との接続抵抗を含む値となる。要素モデルコイルの臨界電流測定において、基準となる電圧値は次のように設定した。磁界解析の結果から、コイルの端部の垂直方向磁界が高いことがわかっており、この部分で $0.1\mu\text{V}/\text{cm}$ 発生した場合を臨界電流とした。この理由は、後述の様に n 値が 25・35 と高く、コイルの焼損を防ぐため、通常の I_c 基準の $1\mu\text{V}/\text{cm}$ よりも 1 桁低くしたためである。ただし、前述したように、測定電圧には抵抗成分を含むためこれを差し引く必要がある。

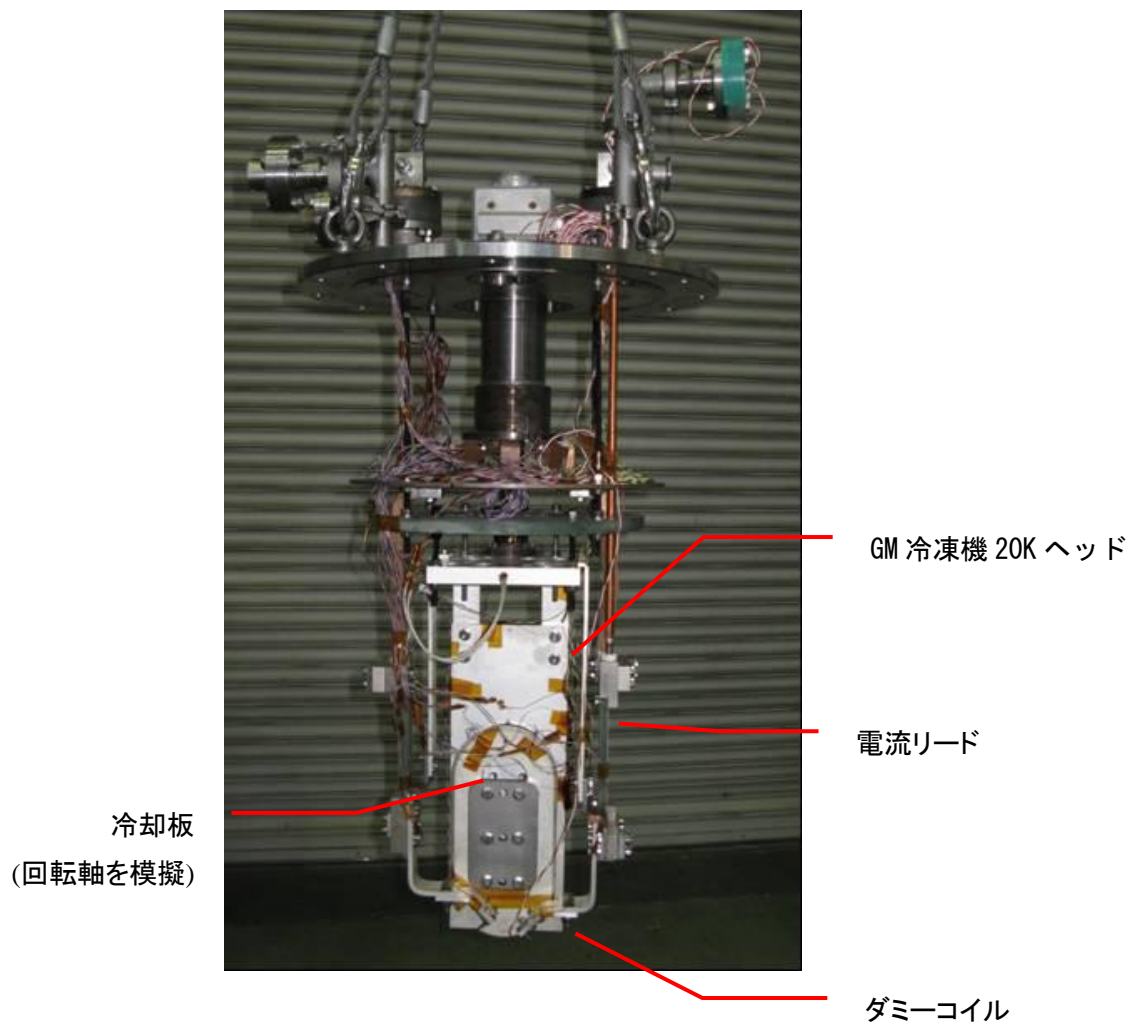


図 2.3.2-8 要素モデルコイルの伝導冷却、励磁試験装置

温度設定は、GM 冷凍機の 20K ヘッド温度を 20K、30K、40K、50K に設定し、巻線部各部温度を測定することを行った。巻線部の温度測定は、巻線の最外周に測温抵抗体を設置して行った。従って測温抵抗体はハステロイTM 基材側に設置した。設置方法はグリースを介在させて行った。図 2.3.2-9 に温度素子配置を示す。磁界測定はホール素子を使用した。図 2.3.2-10 にホール素子取付位置を示す。レーストラック状平面図において、コイル中心と、中心から 60mm 離れた位置の合計 3 箇所とした。この 3 個のホール素子はコイル断面図において、厚さ方向の中心に配置され、図 2.3.2-10 の下図矢印の方向の磁界を測定した。

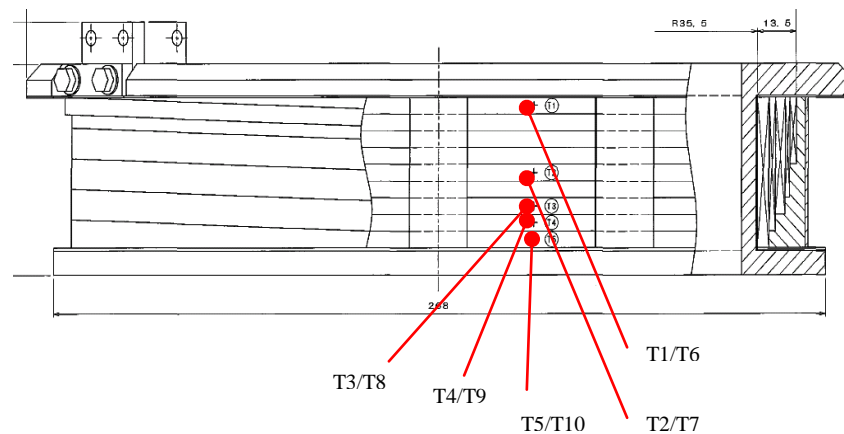


図 2.3.2-9 平傘型コイルにおける温度素子配置

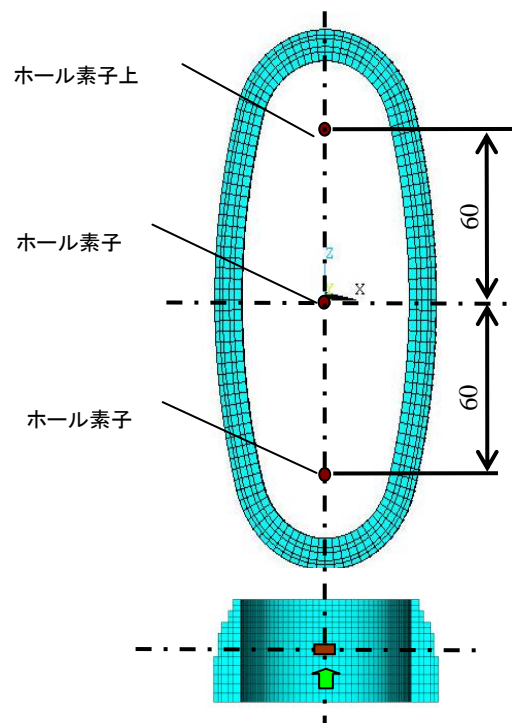


図 2.3.2-10 平傘型コイルにおけるホール素子取付位置

(3) 結果と考察

平傘型モデルコイルに関し、通電試験結果より得られた I_c について、複合材料の I_c - B - T 特性との関係を比較する。図 2.3.2-11 に複合材料の I_c - B - T 特性と要素モデルコイル I_c を示す。50K において、測定された複合材料の I_c - B - T 特性とほぼ一致しており、巻線による低下はなかった。40K においても、ほぼイットリウム系複合材料の I_c 特性と一致しており、すなわち励磁率は 100% であり、コイル化後のイットリウム系複合材料の劣化はなかったものと思われる。

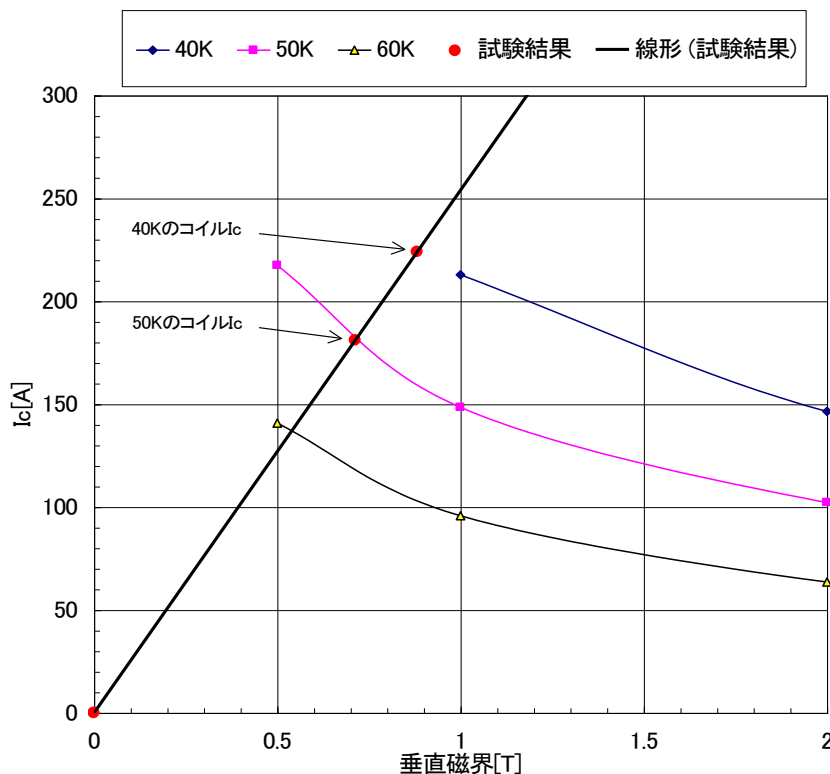


図 2.3.2-11 平傘型モデルコイル励磁結果:イットリウム系複合材料の I_c - B - T 特性とコイルロードライン(77K-150A/5mm 幅線材の I_c - B より換算(300A/cm 幅相当))

次に、菱形傘型モデルコイルに関し、通電試験を行った結果について述べる。コイルの 50K の I - V 特性を図 2.3.2-12 に示す。最大 218A まで通電したが、190A 付近からコイル両端電圧の増加率が増え、磁束フロー電圧が発生した。接続抵抗分を除去した電圧を求め、 I_c 基準を $0.1\mu\text{V}/\text{cm}$ となる値としてコイル I_c を求めると、50K におけるコイルの I_c は 195A であることがわかった。この時、計算では磁場はイットリウム系複合材料テープ面に垂直に 1.2T かかっている。イットリウム系複合材料 I_c - B - T 特性とコイルロードラインの関係を図 2.3.2-13 に示す。交点は約 195A となり、前述のコイル I_c と良く一致しており、イットリウム系複合材料の劣化はなかったものと推察される。すなわち、図 2.3.2-13 で複合材料の I_c とコイル I_c が一致することから、この菱形傘型モデルコイルの励磁率も 100% と言える。すなわち、菱形傘型コイルの巻線、製作性に問題はないと言える。これ以下の低温 40K での I_c 測定も行ったが、200A 以上流しても電圧が発生せず、

焼損の恐れがあるので、励磁試験は中止した。

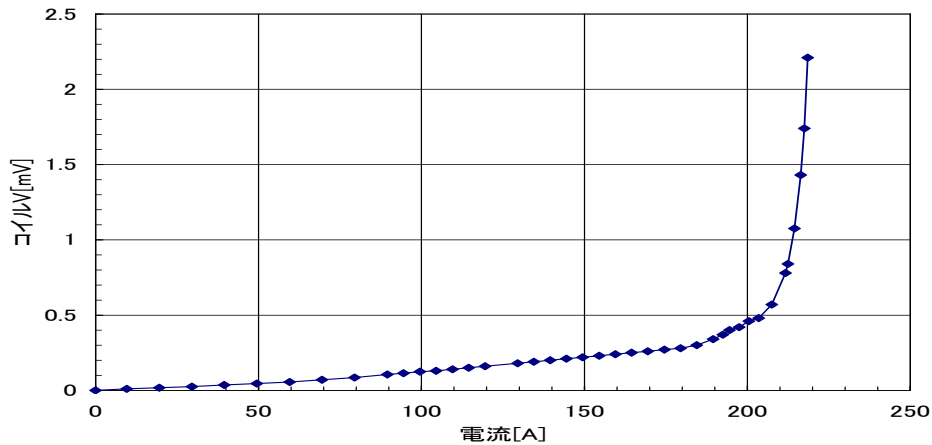


図 2.3.2-12 50Kにおける菱形傘型コイルの I - V 特性

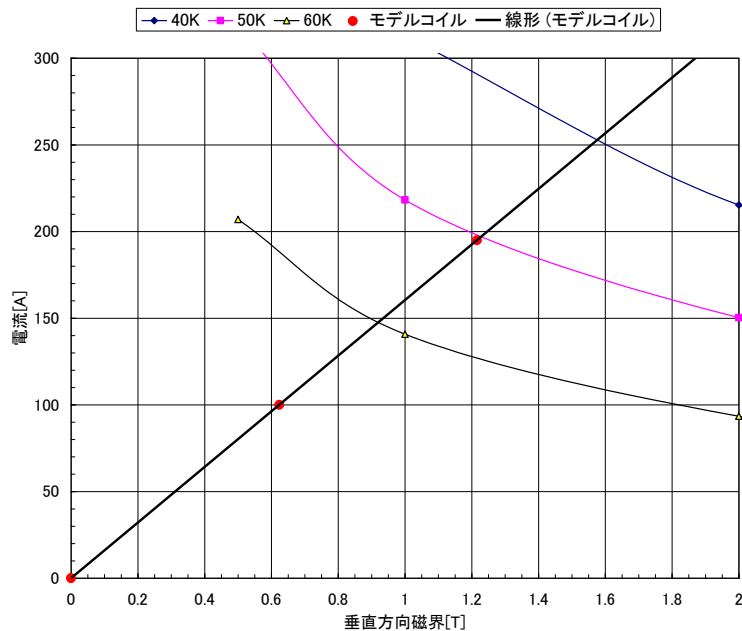


図 2.3.2-13 菱形傘型モデルコイル励磁結果：200A 級(@77K、自己磁場)でのイットリウム系複合材料の I_c - B - T 特性とコイルロードライン

また、50Kにおける超電導成分の電圧は、電流の25乗に比例しており、 n 値が25と高い値であった。元のイットリウム系複合材料の n 値と同程度であり、一般的にも磁場中で高い値である。よって、巻線工程で劣化はないと判断できる。

次に、鞍型傘型モデルコイルの液体窒素(77K)浸漬冷却中励磁試験を行った。コイル I_c とイットリウム系複合材料の I_c - B - T 特性との関係を比較した。図 2.3.2-14 にイットリウム系複合材料の I_c - B - T 特性とコイルの I_c を示す。測定したコイル I_c は81Aであったが、この図から設計のコイルロードラインと複合材料 I_c - B 特性の交点は約100Aであった。すなわち、コイル励磁率は約81%となった。前2コイルはほぼ100%の励磁率であったが、このコイルで目標値70%を超えた

とは言え、値が低かった理由としては、

- ・測定温度が 77K であるので、磁場依存性が大きい。特に、0.1T 程度の低磁場はゼロ磁場の半分近くにもなり、上記線材特性・コイルロードラインからの正確な決定が難しくなる。

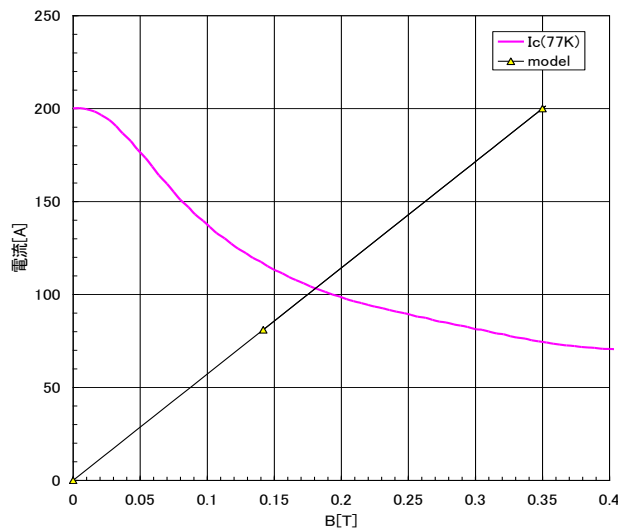


図 2.3.2-14 鞍型傘型要素モデルコイルのロードラインと
イットリウム系複合材料の I_c 特性(77K)

・線材特性は、長手方向では 20-30%程度はばらつく。特に、磁場依存性が強い 77K ではその影響を受けやすい。すなわち、本鞍型傘型コイルの励磁率が 80%であったが、最強磁場の個所で偶然イットリウム系複合材料の長手方向の分布で低い I_c の個所があった可能性もある。

本鞍型傘型コイルの典型的な $I-V$ 測定結果を図 2.3.2-15 に示す。鞍型傘型モデルコイルの液体窒素中での実験結果である。ここに示すように、 I_c は先述の 81A であるが、 n 値は 34 もあり、この点からも巻線工程による特性劣化はないと考えられる。

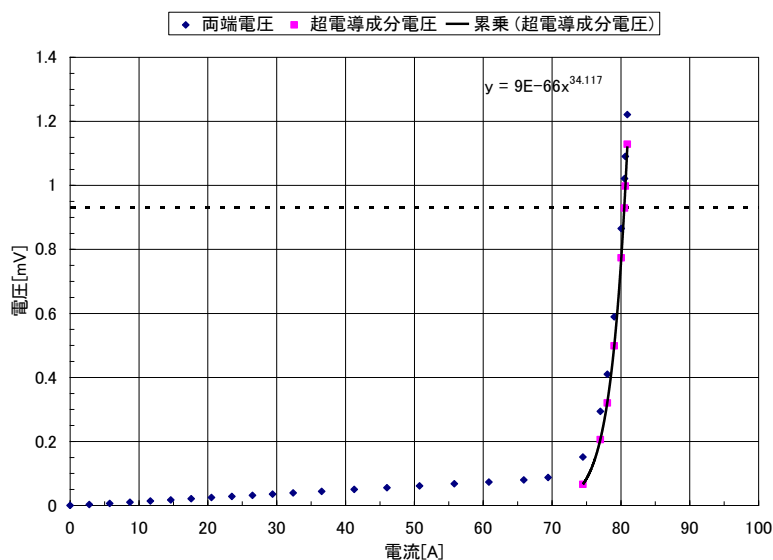


図 2.3.2-15 鞍型傘型要素モデルコイルの液体窒素浸漬冷却中における $I-V$ 特性

③-2 傘型界磁巻線安定性評価

超電導回転機の界磁巻線は、Siemens 社試作機のサーモサイフォン方式で冷却される軸からの伝導冷却方式[1, 2]、あるいは米国での試作機[3]のように界磁巻線を配置した空間を冷媒ガスで満たす間接冷却方式のいずれにおいても、伝導冷却方式である。その際、回転機システムに限られた冷凍能力の中で、界磁巻線で許容できる発熱量を見積もり、全体設計を行う必要がある。これにより、回転機全体としての効率も決まる。よって、ここでは、界磁巻線の発熱、安定性評価の一環として、電機子が発生する交流磁界が界磁巻線に印加されて発生する界磁巻線に生じる交流損失を数値解析により定量的に評価した。

(1) 実験方法

最初に、界磁巻線に用いる GdBCO 超電導複合材料の交流損失を、図 2.3.2-16 に示す鞍型ピックアップコイルを用いて 35K、45K、64K、77K において測定した。図 2.3.2-17 には試料ホルダーの全体を示している。ホルダーの下部面が GM 冷凍機ヘッド面に接触することにより、試料複合材料は伝導冷却される。交流損失の測定結果を図 2.3.2-18 に示す。

この結果を用いて、数値解析より求めた界磁巻線のターン毎の変動磁界振幅に対して発生する交流損失値を求め、全ターンに亘って積算することにより、界磁巻線全体で発生する交流損失を算出した。界磁巻線の動作温度は 40K であり、40K における交流損失値は測定データより、温度スケールリング則を用いて外挿して求めた。

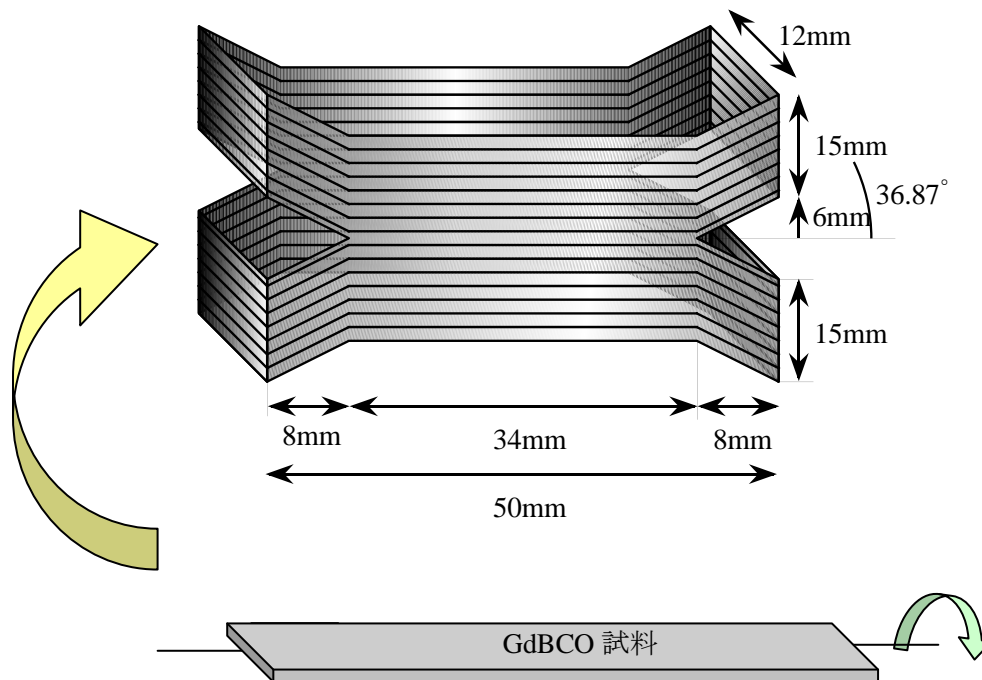


図 2.3.2-16 交流損失測定用の鞍型ピックアップコイル

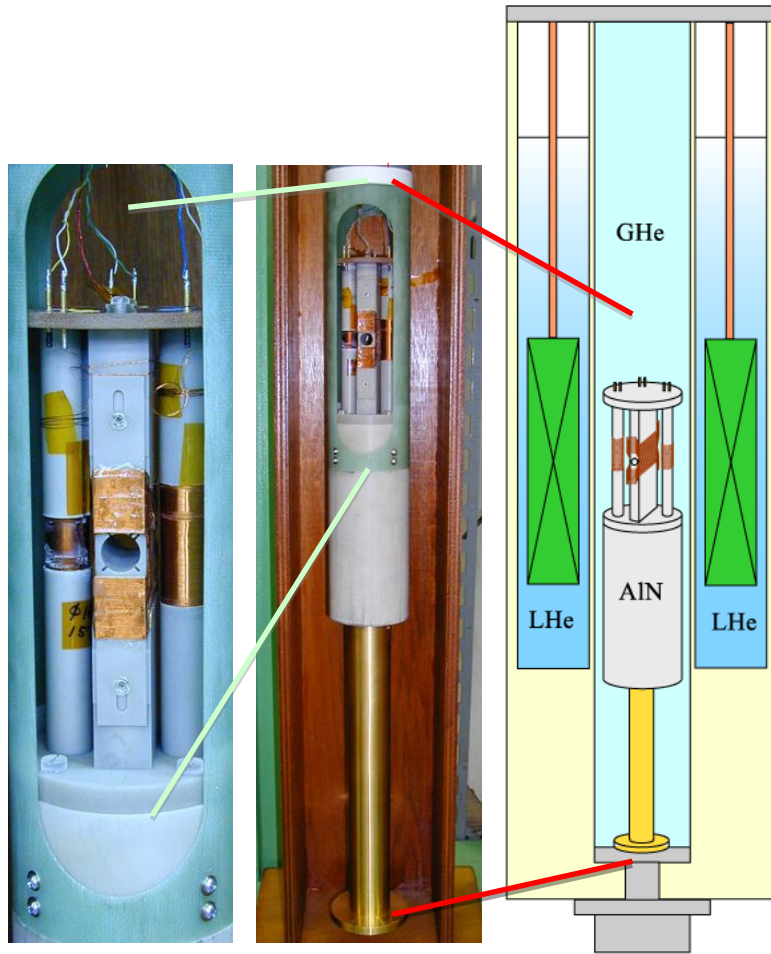


図 2.3.2-17 交流損失測定装置における試料ホルダー全景

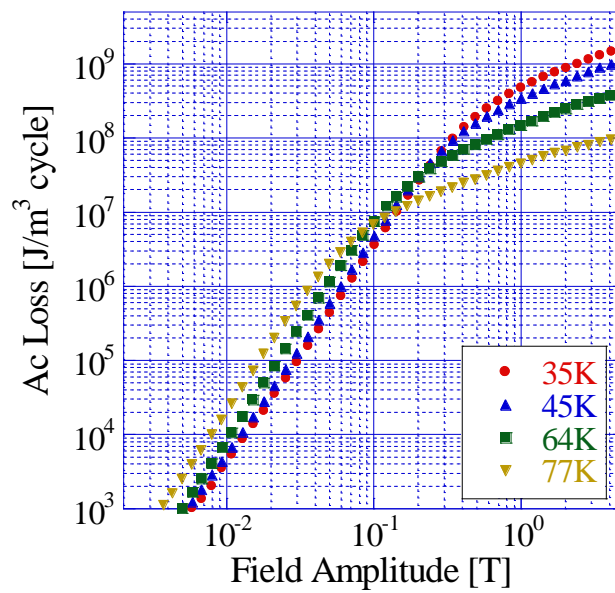


図 2.3.2-18 GdBCO 複合材料の交流損失

(2) 結果と考察

界磁巻線に生じる損失の詳細を、典型例として、ギャップ磁束密度を 2T の鞍型傘型形状の界磁巻線（図 2.3.2-19）について述べる。500kW-1800rpm の回転機では、この界磁コイルを 4 極組み合わせ回転子として使う。

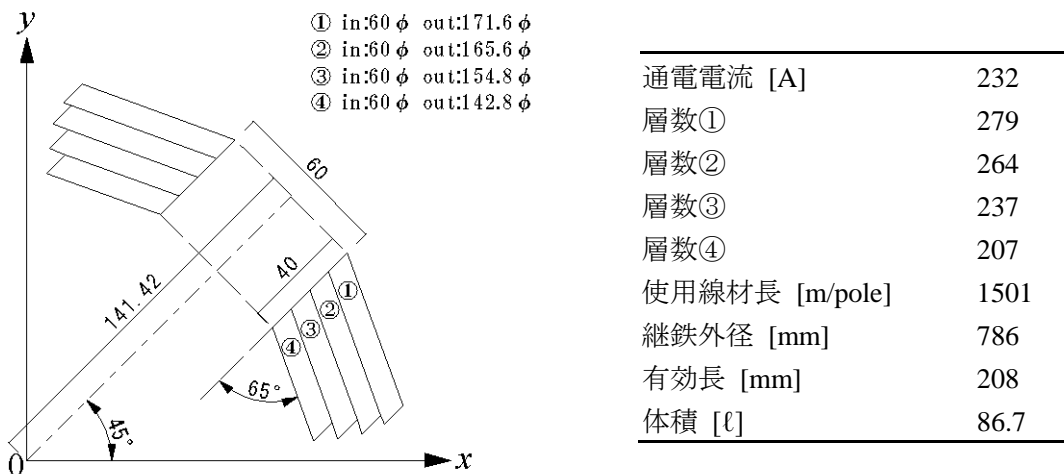


図 2.3.2-19 鞍型傘型形状界磁巻線コイル

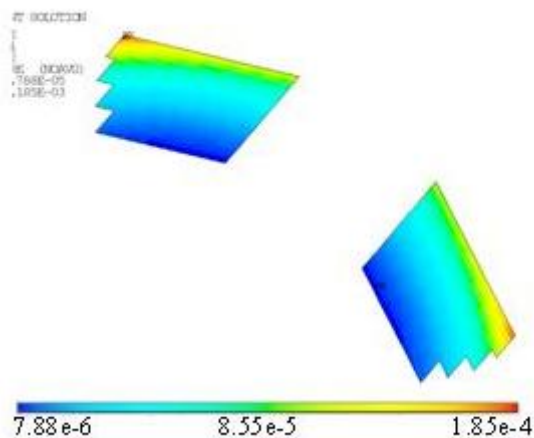


図 2.3.2-20 鞍型傘型形状界磁巻線コイルにおける電機子からの外部磁場変動

この場合の線材面に垂直に印加される磁界成分の振幅は、図 2.3.2-20 に示すように、 $1.85 \times 10^{-4} \text{T}$ 以下である。これに対応する交流損失を図 2.3.2-18 より外挿すると、 $10 \text{ J/m}^3 \text{ cycle}$ 以下である。500kW 機の界磁巻線のターン毎の体積から、界磁巻線における全交流損失を積算すると、その発熱量は 10.4W であることがわかった。これは、シースを持たない電機子巻線が発生する磁界が 0.03~0.04T 程度であり、界磁巻線との距離が 40mm 以上も空いているという超電導機ならではの構造による。結論として、半超電導機では、電機子の変動磁界により界磁巻線で発生する交流損失は無視できることがわかった。

図 2.3.2-21 に他の形状の単純矩形、菱形傘型も含めた各界磁巻線を使った場合の回転機的全損

失を示した。この図から、シールドとなるヨークにおける鉄損と電機子における銅損が損失のほとんどを占めていることがわかる。すなわち、界磁巻線で発生する電機子変動磁界による交流損失は、前述した 10W 程度なので無視できるほど小さい。

最後に、界磁巻線の通電電流をゼロから定格電流まで高速の 1 秒で立ち上げた際に界磁巻線で発生する交流損失を図 2.3.2-22 に示す。界磁巻線の発生磁界自体を変動させたとしても大きな発熱量にはならないことがわかる。

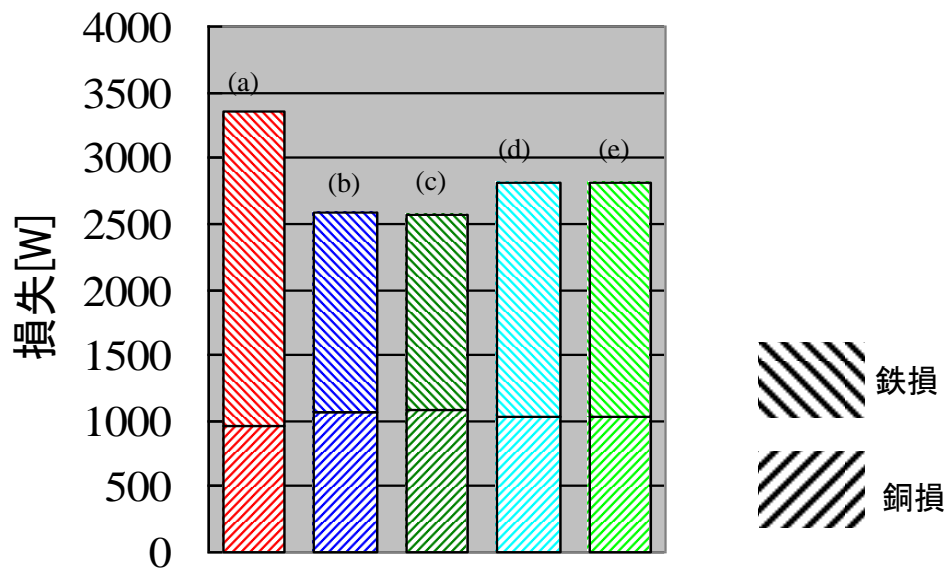
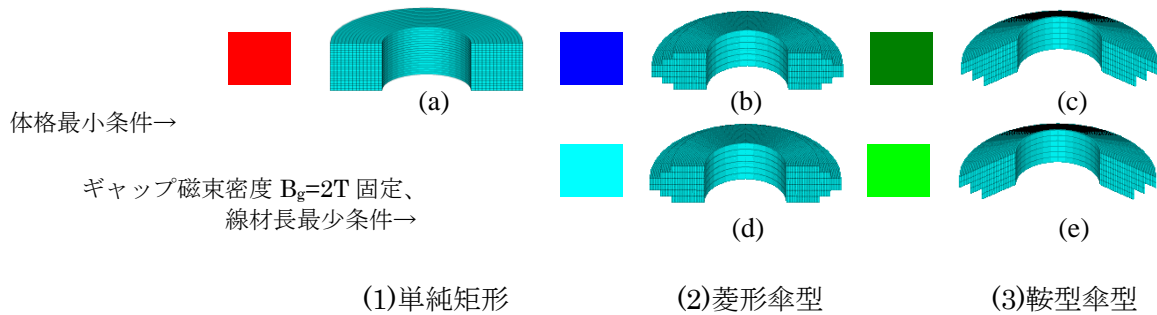


図 2.3.2-21 各傘型形状の各種界磁巻線(上図)を使った 500kW 回転機的全損失

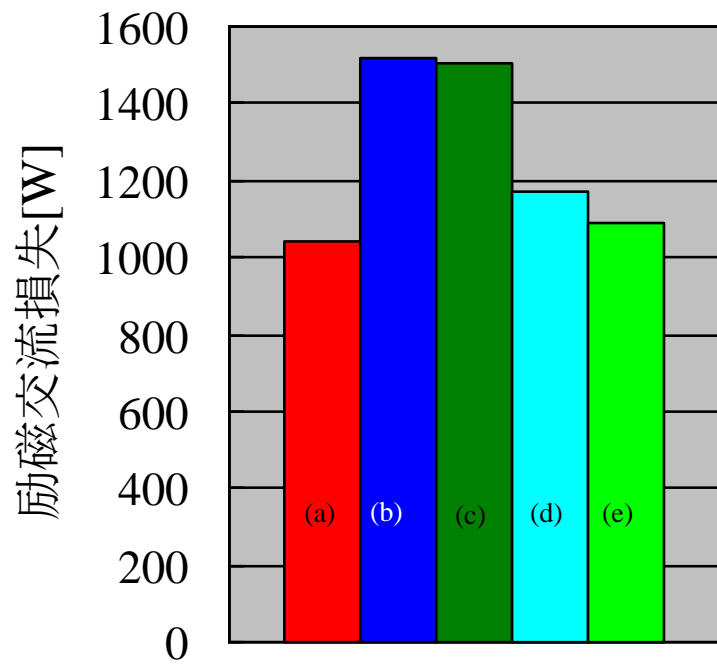


図 2.3.2-22 図 2.3.2-21 (a) ~ (e) の各種界磁巻線を定格電流まで 1 秒で立ち上げた際の交流損失

2.3.3 要素技術開発(2) 冷却技術開発 (九州大学、研究組合)

①目的

高速で回転する回転機の超電導界磁巻線コイル部の冷却に適した液体 Ne によるサーモサイフォン冷却技術を開発する。特に、液体 Ne とコイルを冷却する SUS 製シャフト間(LNe-SUS 間) の界面熱伝達係数のデータを得る。これにより、高性能のイットリウム系複合材料に適したサーモサイフォン冷却による Y 系回転機の実現性を見通す。

②課題とアプローチ

今回採用する回転型サーモサイフォン式冷却法は、図 2.3.3-1 に示す様に回転機の界磁巻線回転子の中心軸である SUS304 製シャフトの中に、沸点が 27K の液体 Ne 冷媒を流し込み、このシャフトからの熱伝導により界磁コイルを冷却する。液体 Ne による回転体の冷却実績は海外で 1-2 例ある[1,2]が、国内ではほとんどないため、将来の回転機設計に支障をきたすのが現状である。特に、回転機の冷却系における熱設計の際には、用いる SUS や FRP(Fiber Reinforced Polymer)などの構成材の熱伝導度や冷媒である液体 Ne と SUS などの容器との界面における熱伝達係数が必要となる。これにより、外部侵入熱並びに界磁コイル発熱に起因した到達温度などを見積もることができ、ひいては界磁コイルの通電電流、発生磁場の想定が可能となる。しかしながら、前者の熱伝導度はこれまでに多数のデータがあるのに対し、後者の液体 Ne に関する熱伝達係数のデータはほとんどないのが現状である。特に、高速回転する液体として使用した場合のデータは皆無である。このため、回転機の詳細熱設計が困難であった。このことから、本項目では以下の課題とアプローチで開発を進めた。

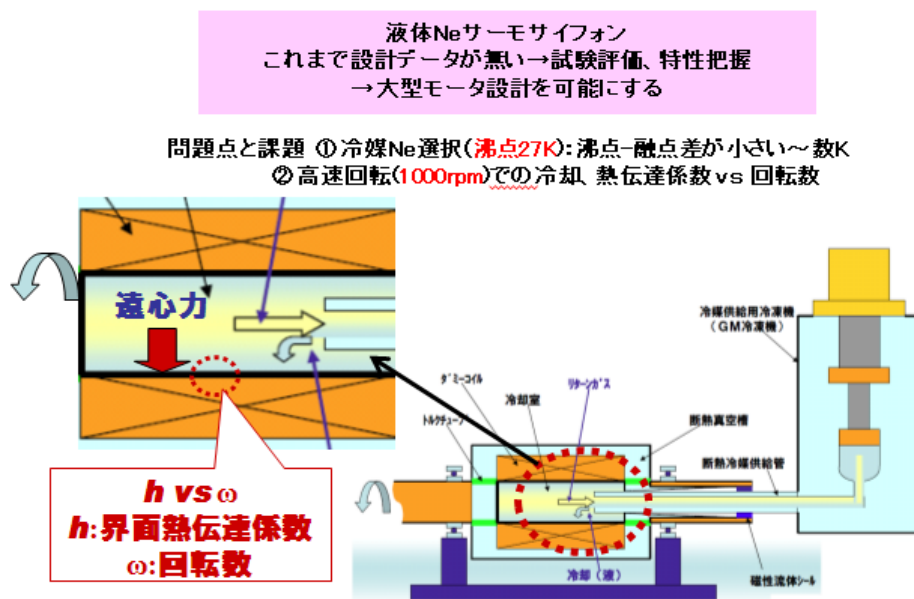


図 2.3.3-1 サーモサイフォン冷却の原理模式図と問題点、課題

課題：高速回転する液体 Ne-回転シャフト (SUS) 間の熱伝達係数を実験的にデータを取得し、今後の液体 Ne によるサーモサイフォン冷却設計を可能にすること。

アプローチ： この課題に対して、以下の手法で検討を行った。

- 500 kW 級回転機を模擬した回転試験装置、液体 Ne 液化装置、冷媒供給システムを製作し、回転冷却試験を行う
- 本装置により、1)Ne の液化、2)液体 Ne の輸送を行い、回転部での 3)液体 Ne、4)界磁コイル取り付け部周辺等の温度を測定し、熱流束を求め、熱伝達係数の値を得る。
- この温度実測データおよび実験系の複雑な熱の侵入と温度分布を考慮した数値解析データの比較により、最終的に液体 Ne-回転シャフト(SUS)間の熱伝達係数を今後の回転機冷却の設計に使えるように回転数との関係を調べる。

③成果

③-1 試験装置と方法

高速で回転する液体 Ne-SUS 界面(回転機における液体 Ne 容器であり、界磁コイルに熱を伝える)の熱伝達係数を調べるため、以下の装置を作製した。(1) 冷却系試験装置： 図 2.3.3-2 に実験装置の全体写真を示す。また、図 2.3.3-3 に装置の全体構成フロー図を示す。回転機外部のコールドボックス内の凝縮器で液化された液体 Ne を断熱配管により、回転機の中心に移送する構造としている。また蒸発した Ne を強制的に循環させることができるように回収用の配管を取り付け、外部のコンプレッサで循環させる構造とした。主な構成機器は、超電導モータを模したモデルロータ、冷却システムの冷却源となるコールドボックス (Ne ガスを液化)、Ne の循環を行うガスハンドリング部である。

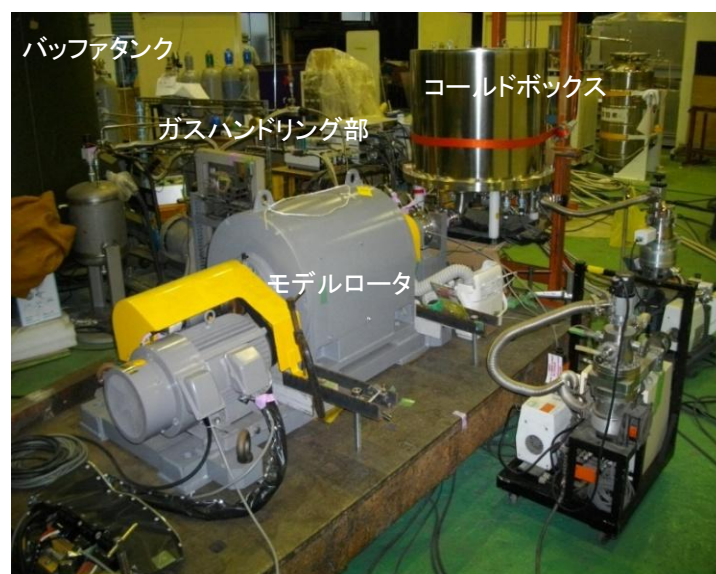


図 2.3.3-2 サーモサイフォン冷却試験装置全景

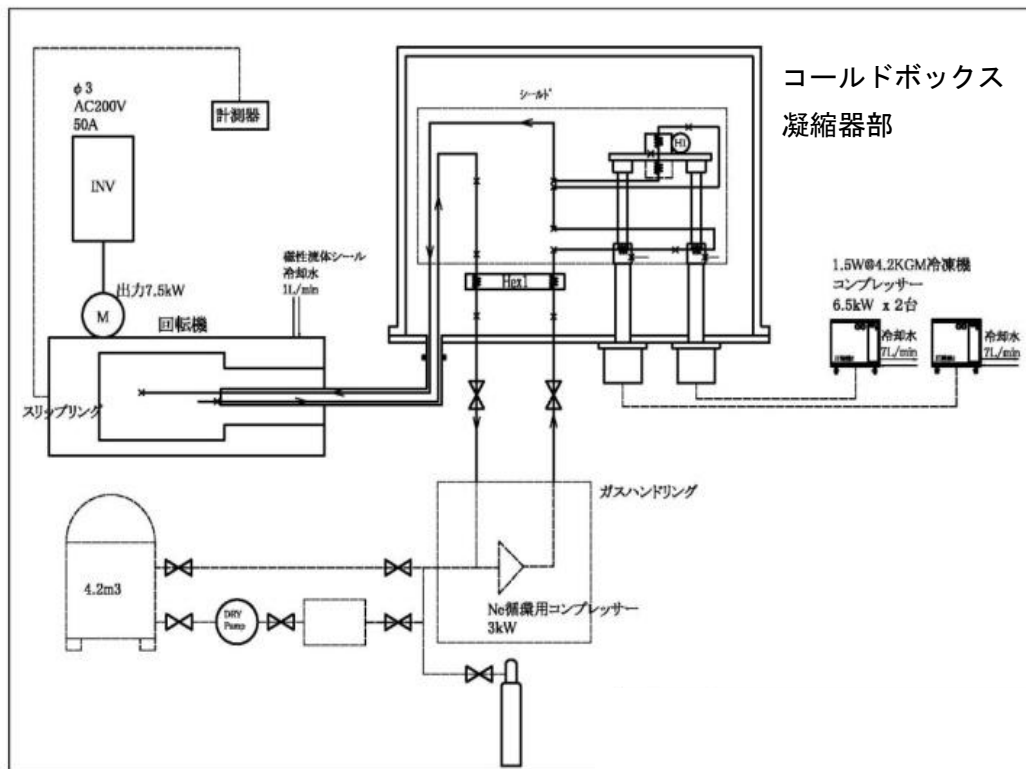


図 2.3.3-3 サーモサーフォン冷却試験装置全体構成フロー図

GM 冷凍機のコンプレッサは 6.5kW(×2 台)の水冷型で、冷凍能力は 4.2K で 1.5W である。Ne はガスハンドリング部のコンプレッサにより循環される。コールドボックスは 2 段の 4K-GM 冷凍機 2 台を使用している。コンプレッサから吐出された Ne は熱交換器 (Hex1) でモデルロータからの戻りのガスと熱交換して 100K 程度まで冷却された後、2 台の GM 冷凍機の 1st ステージ部の交換機で 40K 以下に冷却される。そのあと GM 冷凍機の 2nd ステージの熱交換機で 30K 以下に冷却された後、凝縮器にて液化される。凝縮器の熱交換器は温度差を 2K で約 230W 以上の冷凍能力がとれるものとした。凝縮器には Ne の固化を防ぐためにヒータを取り付けている。Ne は沸点と融点の温度差が小さいため、固化を防ぐ調整が必要である。

(2) 回転系試験装置(モデルロータ) :

図 2.3.1-2 のモデルロータの全体断面を図 2.3.3-4 に示す。モデルロータ(回転機)はインバータにより制御された外部のモータにより回転させることでモータの回転状態を模擬する。最大で 1800 回転/分(rpm)、連続回転は最高で 1500rpm である。

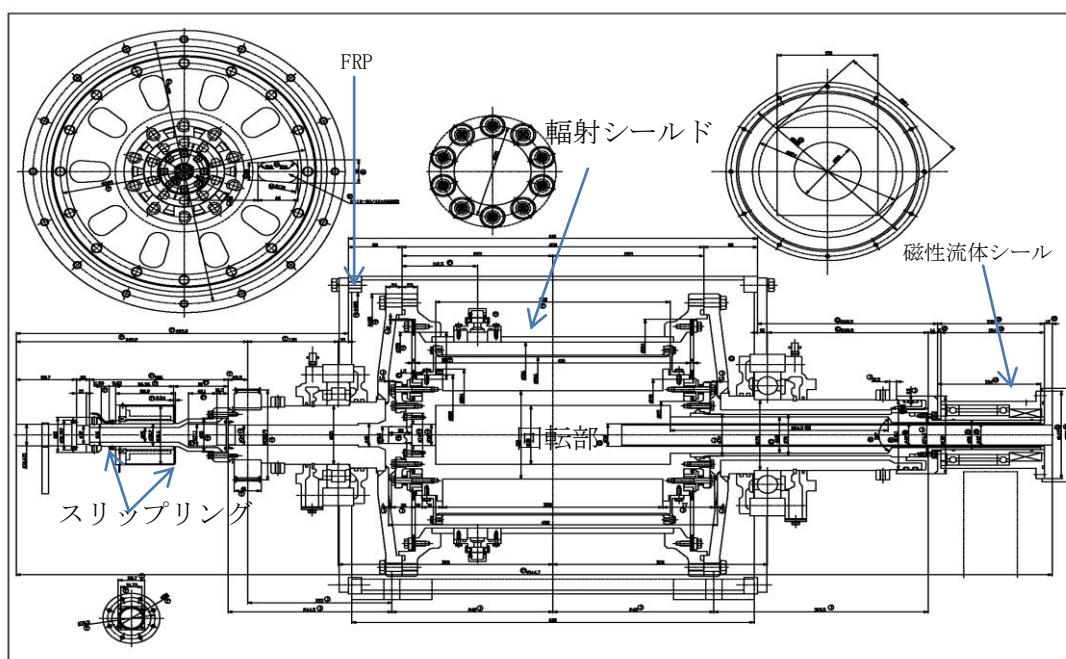


図 2.3.3-4 モデルロータ全体断面図

その中の回転部を図 2.3.3-5 に示す。中心に SUS 製の円管シャフトが通り、その外側に界磁巻線コイルの取り付けが可能なステンレス (SUS304) 製の液体 Ne を貯める液体 Ne 内槽部 ($\phi 100 \times L350\text{mm}$) がある。これは、シャフトとともに回転する。さらに、この外側 4 面に超電導コイル取り付けを想定した 1 辺 150mm の正方形の領域が設けられている。図の右の端部は、断熱のため厚さ 5mm の FRP 製の保持板で外槽に固定し保持している。



図 2.3.3-5 回転部の外観：この中に液体 Ne が流し込まれる。1000rpm 程度で回転させて、これに取り付けた温度計で各部の温度を測定した。

温度計の取り付け位置とその写真を図 2.3.3-6 に示す。温度計はシリコンダイオードを使用し、熱接触をよくするためにスタイキャスト™で張り付けた。液に接する面の近傍の温度計測のため液体に接する面から 3mm まで穴をあけ温度計を取り付けた。ヒータはカプトンシートヒータを使用し、熱接触を良くするために銅板（180×130×5mm）で挟んでスタイキャストで接着した。

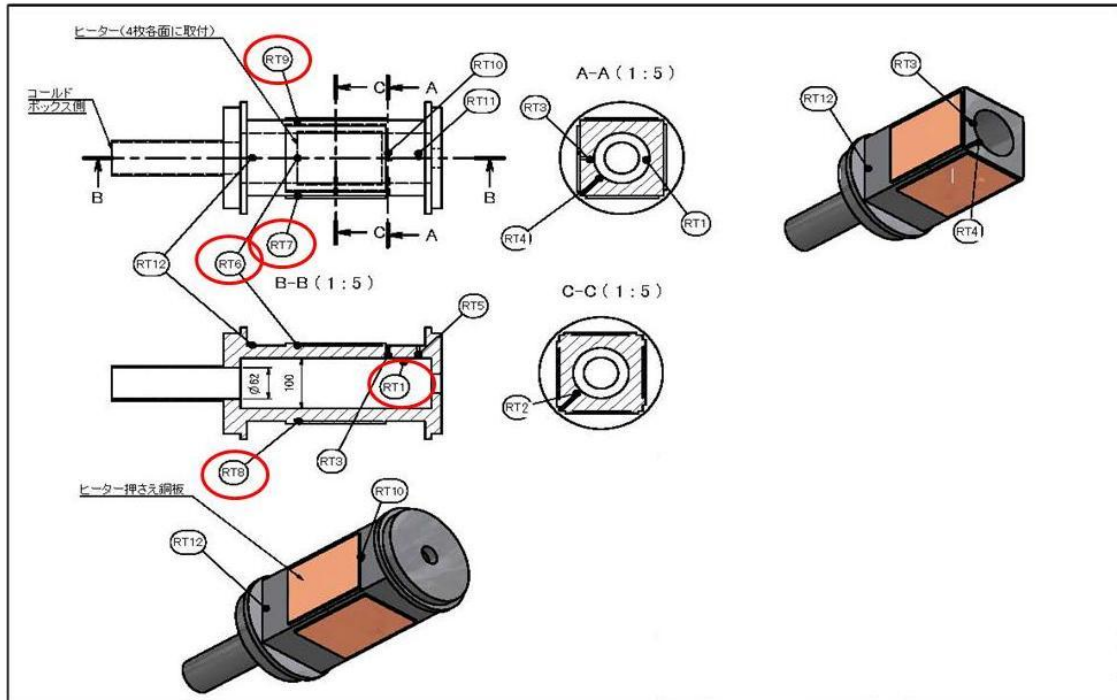


図 2.3.3-6 モデルローターセンサ取り付け位置図（丸印は解析に用いた測定点）

(3) 試験方法：冷却試験は、Ne ガスを循環させ GM 冷凍機を起動する。回転機は停止した状態でコールドボックスにて凝縮された Ne を回転機に導入する。回転機内槽の壁温度が Ne の液温に近くなったら、断熱真空の排気を止めロータを回転させる。回転機内のセンサの温度が液温を示した状態から回転機内に液体が溜まり始めたと考えポンペ(バッファ容器)の圧力を確認しながら回転機に液を導入する。これにより液化された量を求める。計測は、循環量・回転数を固定、ヒータ 0W の状態で温度が安定したところでヒータ負荷を加え温度・圧力を計測する。回転数を変え同様な計測を行った。

(4) 解析方法：液体 Ne とステンレス間の熱伝達係数 h は、

$$Q = hA(T_W - T_L)$$

で定義される。ここで、 Q は界面を通る熱流束、 A は界面の表面積、 T_L は界面近傍の液温、 T_W は壁の温度である。

しかし、実際の試験装置では形状の対称性から熱源からの距離が異なっているため、熱流束の大きさが場所により異なる。仮にヒータ負荷を与え温度差を測定したとしても、正確な熱流束を求めることはできない。さらに輻射、FRP やロッド部からの侵入熱もあり、状況を複雑にしている。そのため測定したデータから直接計算で熱伝達係数を決めることは難しい。そこで実際の計測値の値に近くなるようにシミュレーションのパラメータを合わせ、熱伝達係数をもとめた。シミュレーションでは RT1(図 2.3.3-6)を液温としてヒータ直下部の温度 RT6~RT9(図 2.3.3-6)の位置での計算値が測定値に近くなるようにした。そのシミュレーションの解析方法の概略は以下の通りである。

解析は 3 次元のモデルで行った。シャフト、サポート部を含む回転冷却全体をセル数 120396 個に分割した。伝熱解析は、熱伝導率を使用し定常伝熱解析で行ない、液体 Ne と SUS との接触面では沸騰熱伝達を考慮して熱流束 q を計算する。その際の熱伝達係数 h は実測値、またはそれらの多項式の関数を作り解析に用いた。

沸騰熱伝達係数 h の算出には良く使われる次の Rohsenow の式 [6] を適用した。

$$\frac{h}{\lambda_L} \sqrt{\frac{\sigma_L}{g(\rho_L - \rho_V)}} = \frac{\text{Pr}_L^{-0.7}}{C_{sf}} \left(\frac{q}{L\rho_V\nu_L} \sqrt{\frac{\sigma_L}{g(\rho_L - \rho_V)}} \right)^{0.67} \left(\frac{\rho_V}{\rho_L} \right)^{0.67}$$

式中の g は遠心加速度であり、回転機の回転数 1000rpm、内径 0.1 m で 548.31m/s² となる。

なお、この Rohsenow の式はプール核沸騰熱伝達の整理式として良く使われるものであるが、今回はプール沸騰ではなく、回転体の中の沸騰である。しかしながら、回転体であっても通常の流体のような壁との相対速度を有する流れはないため静止液層と近似できる。システムそのものが回転系であり、液体と内壁に相対速度はないと考えられる。よって、この Rohsenow の式を用いて今回検討した。

表 2.3.3-1 ネオン物性値 [7]

名称	値	名称	値
蒸発潜熱 L	82710 J/kg	気相密度 ρ_V	10.41 kg/m ³
液相密度 ρ_L	1206 kg/m ³	加速度 g	548.31 m/s ²
液相粘性係数 μ_L	0.0001247 Pa·s	液相動粘性係数 ν_L	1.034 × 10 ⁻⁷ m ² /s
液相定圧比熱 $c_{p,L}$	1937 J/(kg·K)	液相プラントル数 Pr_L	1.926
液相熱伝導率 λ_L	0.1254 W/(m·K)	係数 C_{sf}	(0.008) (変数)
液相表面張力 σ_L	0.04784 N/m		

実際の解析では、液体の温度として実験で得た測定値 RT1 を用いる。また、SUS 壁面の温度を実測値 RT6～RT9 の温度から解析で出し、それがさらに各部の温度測定値に近い値になるように熱伝達率を決める。すなわち、上式において $q=hA\Delta T$ (液体・SUS 壁面温度差) で h が出るが、それを使い Rohsenow の式における変数 C_{sf} を変えていき、全体の各部の温度、その分布が実際と解析で一致するようにして h にフィードバックを掛けて値を求める。表 2.3.1-1 には解析に使用した Ne の物性値[7]を示す。

③-2 結果

(1) 初期冷却試験

最初に、GM 冷凍機を起動し、Ne ガスの循環を開始した。Ne 循環量は 50～65 L/min (0℃, 1atm 換算) (以後 SLM) の範囲で調整した。冷却は回転機を停止した状態で開始し、起動後約 18 時間で凝縮器出口の温度が急激に下がり、22 時間以後は循環圧力での沸点温度で一定になった。回転機への液体 Ne の供給が開始され始めたと考えられる。同様に供給側移送管先端部温度計も 22 時間で急激に下がり液温を示し、液体が供給されていることがわかった。その後、モデルロータの回転を開始し約 6 時間後には内部に液体 Ne が溜まり始めた。液体が遠心力により壁に張り付き、全面で液体と壁との熱伝達が良好となり、冷却効率が上がったと考えられる。液化された Ne の量は 600cc～1000cc 程度で液の厚さとしてはこのシャフトの壁面に約 5mm～8mm であった。仮に 54SLM 若しくは 64SLM の流量で液体 Ne が供給されたとすると、蒸発潜熱から求めた冷凍能力はそれぞれ約 68W と 81W となる。

表 2.3.3-2 に流量が 54SLM と 64SLM、回転数 1000rpm で温度が一定になった時のコールドボックス内各部温度の値を参考に示す。表 2.3.3-2 の各温度計は左から循環経路順に並べている。T1～T4：熱交換器 (Hex1) の出入りのガス温度、TA、TB：GM 冷凍機 1 段目熱交換器、TC：GM 冷凍機 2 段目凝縮器、T11：モデルロータに供給される液温、RT1：モデルロータ内の液温、T9:モデルロータからの戻りガス温度である。GM 冷凍機の 2 段目で液体 Ne の沸点になり液化され、ロータ部分までその温度を保ち、すなわち、液が供給循環していることがわかる。

この結果の中で、モデルロータからの戻りのガス温度 T9 が 86～90K とかなり高くなっている。液体の温度が 29K 程度であるのでこの循環量のガスが 29K から 80K 以上まで温度が上昇するには数十 W の熱が必要である。その熱流入の原因として、移送管のポートのウイルソンシールからのリーク、断熱真空層内での脱ガスによる真空劣化 (高速回転対応させるために、真空層に配線等固定用接着剤を使用した。固定の問題もあり真空劣化を防止するための活性炭を封入していない) などが一因と考えられ、今後の装置改善の課題となる。

表 2.3.3-2 コールドボックス、ロータ内各部温度

	流量 MF slm	圧力 P3 kPa	温度 T1 K	温度 T2 K	温度 TA K	温度 TB K	温度 TC K	温度 T11 K	温度 RT1 K	温度 T9 K	温度 T3 K	温度 T4 K
データ	54	64.9	290.4	99.4	52.6	32.5	28.5	28.8	28.7	86.5	90.3	286.6
	64	78.8	294.8	108.1	60.7	38.2	28.8	29.2	29.1	91.4	95.3	292.5

(2) 温度測定結果

熱伝達係数を求めるにあたり、600~1400rpm で回転数を変え、また、外部からのヒータでの過熱を0~4Wで制御して、モデルロータ各部の温度を測定した。その内、代表的な結果について説明する。図2.3.3-7は、回転数1000rpmでヒータ負荷を加えた際の圧力、温度などの変化である。図2.3.3-7の上図には回転機内の圧力P3(kPa)、Ne流量FM(SLM)、ヒータ負荷の値(W)の変化を示す。この測定でのNeの液化量は液の厚さにして約5~8mm(液量500~800cc)であった。ヒータ負荷を4Wより大きくすると、圧力P3の線でわかるように、圧力が大幅に上昇し、定常状態に落ち着かなかった。

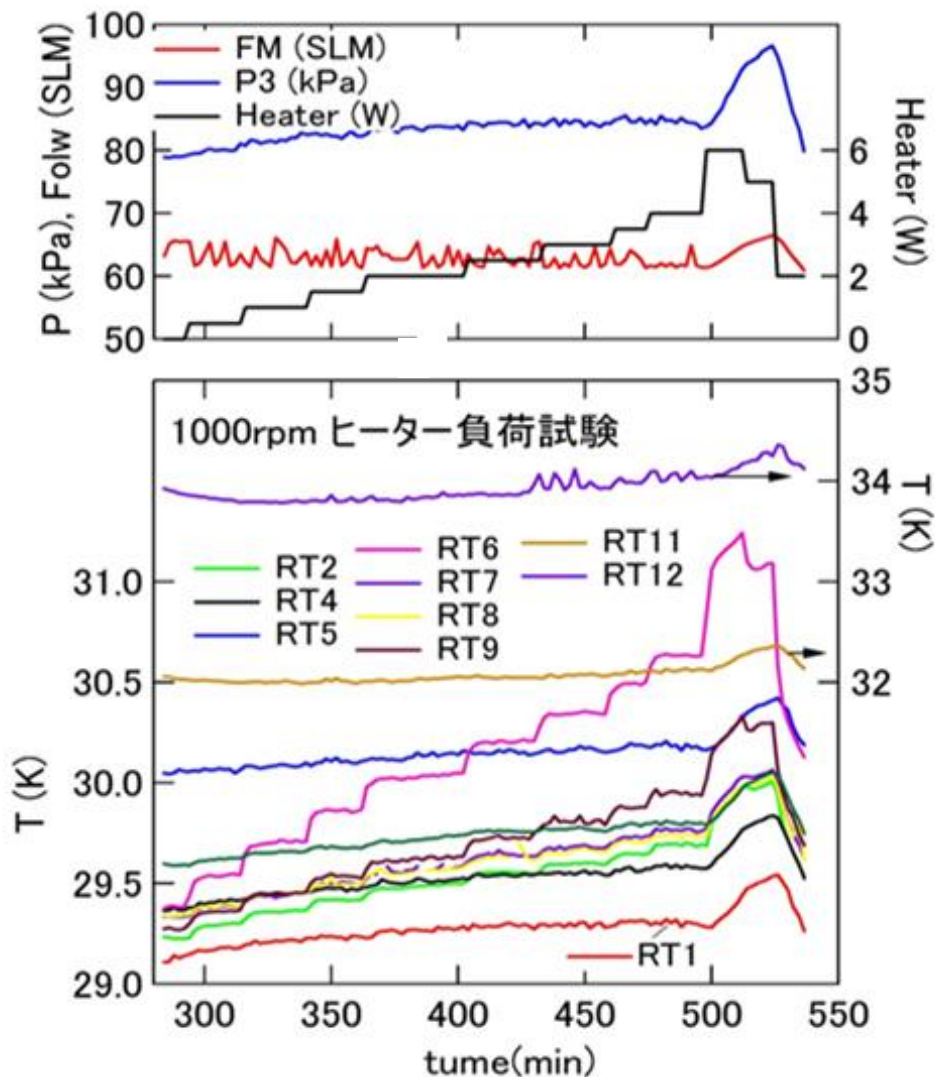


図 2.3.3-7 1000rpm でのヒータ負荷試験時の温度変化(下)
流量、圧力変化とヒータ負荷履歴(上)

図 2.3.3-7 の下図には、回転数 1000rpm でヒータ負荷を加えた際の回転機各部の温度変化を示す。また、RT2~RT12 の温度に関して図 2.3.3-8 にわかりやすく log スケールで表したヒータ負荷と各部の温度変化の関係を示す。縦軸は RT1 との差をプロットしている。この界磁コイル取り付け部を模擬した部分の RT7~9 を見ると、投入熱量に応じて温度が上昇している(RT6 はセンサ固定の不良のため、RT3 は断線のため、データ解析には使っていない)。また、RT2~RT5 は液体に接する壁面の温度であるが、RT5 は RT2、RT4 に比べ温度が 1K ほど高くなっている。RT5 は容器の端側で、端は固定板や輻射など構造からくる侵入熱が大きく温度が高くなっているためと考えられる。

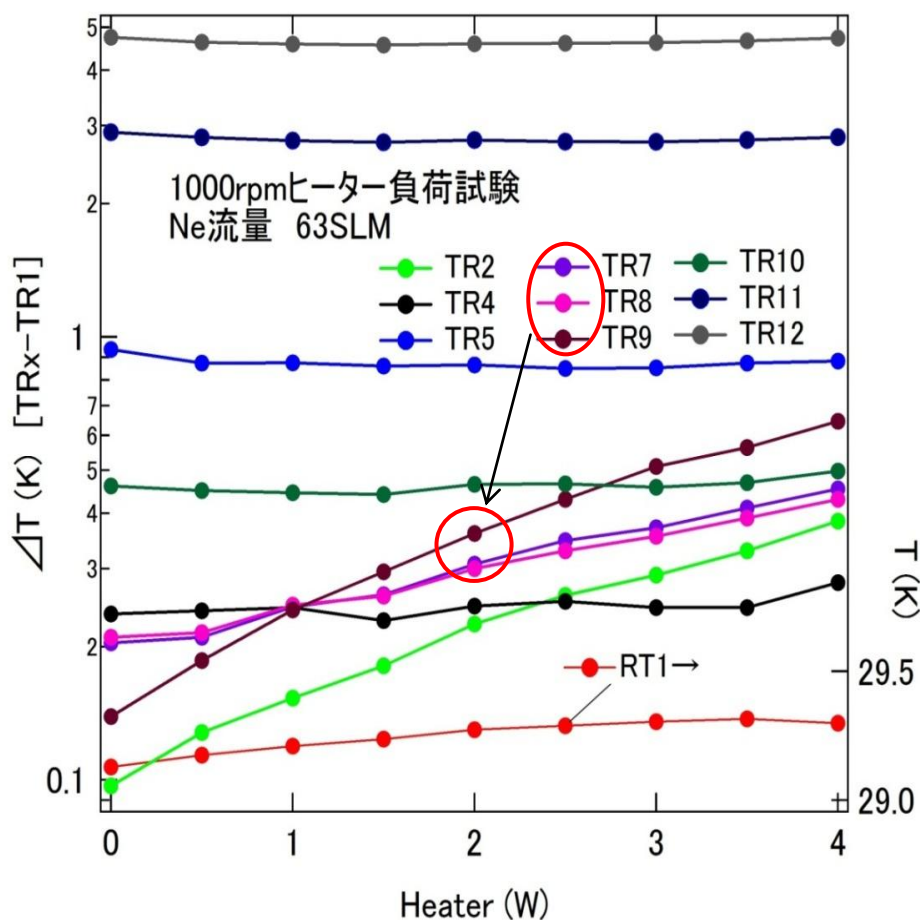


図 2.3.3-8 1000rpm でのヒータ負荷試験時の温度変化

今回、ヒータ負荷を 4W より大きくすると、前記圧力同様、温度も一定状態に落ち着かず上昇傾向になったので、後述の熱伝達係数の解析には 4W 以下のヒータ負荷のデータを使用し

この 1000rpm での試験の他に、600~1400rpm で回転数を変えた回転機各部の温度測定試験も同様に行った。傾向は 1000rpm のときと同じであったが、回転数を 1200、1400rpm まで上げると 2W 程度のヒータ負荷で温度 RT1、圧力 P3 が上昇傾向を示し定常状態にならず、高速回転時の侵入熱が大きくなっていることも考えられた。今回の課題、液体 Ne と SUS 界面での熱伝達係数を求めることには、支障はないが、今後の冷却システム全体を作製する際の課題となる。

(3) 熱伝達係数

前記の各温度の測定結果およびシミュレーションから熱伝達係数を求めた。表 2.3.3-3 にヒータ負荷のない場合のシミュレーションと実測測定値の比較データ、シミュレーションによる内槽への侵入熱の計算値、シミュレーションにより推定された界面に垂直な侵入熱成分、界面の壁側の平均温度、熱伝達係数を示す。ここで、熱伝達係数は h 、RT1 を壁近傍液体温度 T_L とした。計算で求めた液体に接する壁温度の平均値 T_w と侵入熱の界面への垂直成分 Q_{\perp} を用い、接触面積 0.1099 m^2 から、 $h = Q_{\perp} / (T_w - T_L) / 0.1099$ により計算した。

先述したように、3次元の熱の出入りのある実験系では液体 Ne との界面では、ロータ軸垂直方向以外に長手方向にも温度分布があることから、液体 Ne-SUS 界面における熱伝達係数を求めることは単純ではない。このため、シミュレーションにより実際と解析の温度分布を比較し、それに適合させて h を求めた。このヒータ負荷のない場合の h は表に示すように、 $1070 \sim 1120 \text{ W/m}^2/\text{K}$ 程度であった。

また、表 2.3.3-4、5 に同様にヒータ負荷 1W、4W の場合の h の計算結果を示す。1000rpm-1W 負荷時は、 $2600 \text{ W/m}^2/\text{K}$ 台であったが、その 1 点を除き他は概ね $1070 \sim 1590 (1330 \pm 260) \text{ W/m}^2/\text{K}$ の範囲であった。回転数依存性の測定で、ここでは回転数に関する明確な相関関係は見られていない。測定されている温度差も 0.2K 程度と非常に小さく、シミュレーションの結果を併用しての計算であり、定量的な相関性を述べることは難しいが、過去の Fuchino らによるごく最近の報告値[4] (2.3.1 概念設計 図 2.3.1-11) とも概ね合致し、本解析値は妥当と思われる。

表 2.3.3-3 シミュレーションと測定データ(ヒータ負荷無し)

	600rpm		1000rpm		1200rpm	
	測定値	計算値	測定値	計算値	測定値	計算値
温度計 No						
RT1 (K)	28.641	28.863	28.657	28.877	28.76	28.977
測定値 T_L (K)						
RT2 (K)	28.801	28.876	28.797	28.89	28.834	28.989
RT3 (K)	断線	28.888	断線	28.9	断線	28.999
RT4 (K)	29.014	28.974	28.9802	28.986	29.066	29.084
RT5 (K)	30.172	29.169	29.8603	29.174	30.3	29.269
RT6~RT9 (K)	28.987	28.98	28.930	28.993	28.976	29.091
RT10 (K)	29.31	29.043	29.221	29.055	29.328	29.153
RT11 (K)	32.837	30.865	31.8603	30.87	33.223	30.96
RT12 (K)	34.905	31.186	33.5572	31.189	35.088	31.278
接液面壁の平均温度 T_w (K)		28.878		28.888		28.986
圧力 (kPa)	63.52	28.82K	64.39	28.84K	67.9	28.94K
沸点 (K)						
全侵入熱(W)		43.82		43.82		43.82
侵入熱 Q_{\perp} (W) (垂直成分)		27.89		27.89		27.89
熱伝達係数 h ($\text{W/m}^2/\text{K}$)		1070.8		1100.0		1122.4

他の回転数の影響としては、表中の RT11 や RT12 のようなロータシャフト端側の温度に関しては、回転数が増加するほど計算値と実測値の開きが大きくなっている。回転数の増加により振動などによる熱侵入が増加していることも考えられ、今後の実機作製には考慮すべきであろう。

表 2.3.3-4 シミュレーションと測定データ (ヒータ負荷 1W)

温度計No	600rpm, 1 W		1000rpm, 1W		1200rpm, 1 W	
	測定値	測定値	測定値	計算値	測定値	測定値
RT1 (K)						
測定値 T_L (K)	28.666	28.88	29.16	29.260	29.337	29.528
RT2 (K)	28.934	28.903	29.363	29.283	29.505	29.551
RT3 (K)		28.897		29.276		29.544
RT4 (K)	29.066	28.99	29.455	29.368	29.676	29.634
RT5 (K)	30.198	29.17	30.084	29.539	30.973	29.802
RT6~RT9 (K)	29.113	29.083	29.455	29.460	29.717	29.726
RT10 (K)	29.376	29.101	29.655	29.477	29.977	29.743
RT11 (K)	32.719	30.869	31.984	31.218	34.054	31.466
RT12 (K)	34.911	31.19	33.794	31.534	36.125	31.78
接液面壁の平均温度 T_w (K)		28.881		29.259		29.526
圧力 (k Pa) 沸点 (K)	63.255	28.82	81.242	29.208	94.477	29.478
全侵入熱(W)		44.81		44.80		44.79
侵入熱 Q_L (W) (垂直成分)		28.88		28.88		28.88
熱伝達係数 h (W/m ² /K)		1295.6		2653.2		1389.8

表 2.3.3-5 シミュレーションと測定データ (ヒータ負荷 4W 但し 1200rpm は 2W)

表 2.3.3-6 シミュレーションと測定データ (ヒータ負荷 4W 但し 1200rpm は 2W)

	600rpm, 4 W		1000rpm, 4 W		1200rpm, 2 W	
温度計 No	測定値	測定値	測定値	計算値	測定値	測定値
RT1 (K)						
測定値 T_L (K)	28.6782	28.92	28.715	28.931	29.204	29.453
RT2 (K)	29.1041	28.977	29.2031	28.988	29.43	29.487
RT3 (K)	断線	28.921	断線	28.931	断線	29.463
RT4 (K)	29.0837	29.036	29.1075	29.046	29.557	29.561
RT5 (K)	30.2009	29.171	29.9017	29.176	30.764	29.716
RT6~RT9 (K)	29.307	29.385	29.327	29.395	29.605	29.738
RT10 (K)	29.3706	29.271	29.346	29.281	29.837	29.711
RT11 (K)	32.9018	30.881	31.8636	30.886	33.734	31.388
RT12 (K)	35.0948	31.202	33.5192	31.205	35.719	31.702
接液面壁の平均温度 T_w (K)		28.888		28.897		29.440
圧力 (k Pa) 沸点 (K)	63.52		64.39		80.00	29.390
	kPa		kPa			
全侵入熱(W)		47.82		47.82		45.79
侵入熱 Q_L (W) (垂直成分)		31.87		31.87		29.86
熱伝達係数 h (W/m ² /K)		1382.1		1593.2		1151.5

他の回転数の影響としては、表中の RT11 や RT12 のようなロータシャフト端側の温度に関しては、回転数が増加するほど計算値と実測値の開きが大きくなっている。回転数の増加により振動などによる熱侵入が増加していることも考えられ、今後の実機作製には考慮すべきであろう。

また、回転遠心力による界面での液の圧力が上昇、および温度上昇について述べる。今回、回転数を 600~1400rpm に変えたヒータ負荷なしでの実験によれば、600 から 1400rpm の増加で LNe の温度はわずか 0.1K 程度上昇した。しかし、同時に回転系全体の圧力も 5kPa 程度上がり Ne の相図による圧力-沸点の関係と一致した。すなわち、この LNe の温度上昇は遠心力ではなく、むしろ回転数増加による侵入熱の増加による全体の圧力上昇、それによる沸点上昇と思われた。

③-3 考察

図 2.3.3-9 に得られた熱伝達係数と回転数の関係を示す（異常値の 1000rpm-1W ヒータ負荷の場合の 1 点を除いた）。得られた熱伝達係数はおおよそ 1070~1590(1330±260)W/m²/K の範囲であった。現試験機では内槽の表面積は 0.1099m² であるので、得られた熱伝達係数に面積を掛けて、現モデル機では約 120~175W/K 以上の吸熱が可能であることになる。

ここで実際の回転機設計に合わせて冷却能力を考える。2.3.1 の概念設計③-3 で検討したように、実際の 500kW 回転機の界磁コイル面積は上記の値の約 3 倍になる。すなわち、界磁コイル冷却面積は 0.3m² 程度であり、界面での吸熱量は上記 3 倍の 360~525W/K である。この界面での温度差は、実際の界磁コイルの発熱量、界磁コイルと液体 Ne の間に介在する SUS、FRP などの材料の熱伝導度などに依存するが、仮に、今回の実験で見られた温度差 0.5K としても 150-240W の吸熱が可能となる。従来他の高温超電導コイルの実験から、本 500kW 級界磁コイルの発熱は高々 10~20W 程度であり、また、設計では界磁コイルの運転温度を 40K（すなわち、0.5K に対して 9.5K の余裕がある）としているので、今回の回転機の設計に使える十分な冷却能力が取れると思われる。

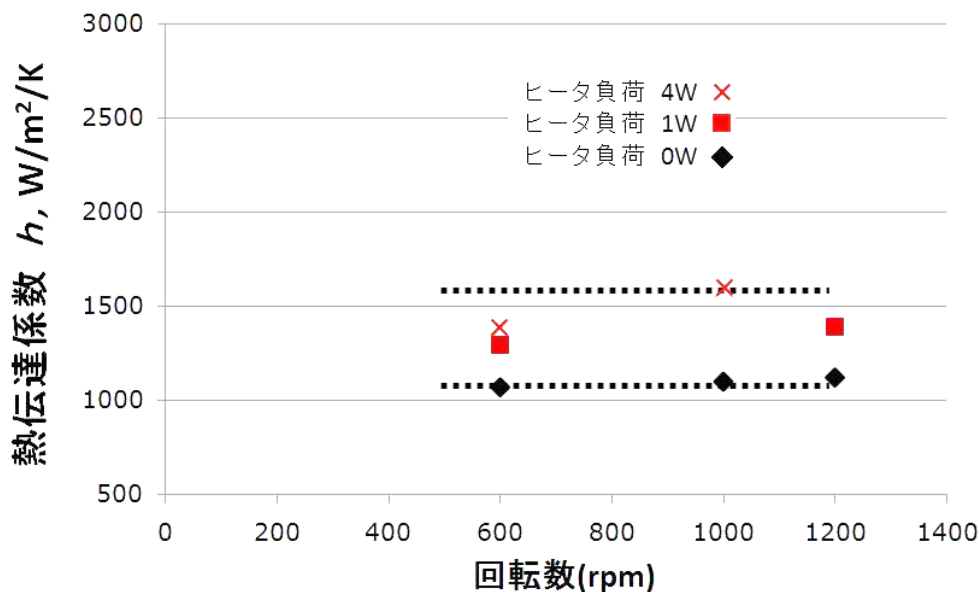


図 2.3.3-9 熱伝達係数と回転数の関係

2.3.4 イットリウム系複合材料を用いた回転機要素技術開発のまとめ

2.3.4-1 回転機適正構造の概念設計

・今回、1)磁場、温度、応力の3要素を考慮した連成シミュレータを開発し、それにより2)イットリウム系複合材料を使った代表的な界磁巻線コイルの成立性を検討し、次に3)界磁巻線コイルの形状を検討し、最後にそれらを統合して、4)電機子、ヨークも含めた500kW機回転機の詳細設計を行った。その結果、本プロジェクトの主目的であるレアメタル(以下RMと略す)使用量に関して、同じ出力の永久磁石回転機に較べて1/130の削減効果があることが分かった。将来PM回転機の需要が伸びればRMの入手性や価格上昇が課題となるが、超電導回転機で使用するRM(Gd)量は微量であるため、RM使用量はかなり抑制される。また、効率、体格、重量も従来の常電導機と比べると改善効果が見られた。

また、Appendixには今回の成果を生かして、今後の実用化の見通し、波及効果をより具体的にするために、船用5MW機の設計検討を行った。その結果、RM削減効果に加え、体格、重量が1/3になるなど、イットリウム系複合材料を使った顕著な効果が見られた。

・目標に対する達成度 100%

・今後の展望と課題

今後の課題として、実機の設計と作製を進めていくために、以下のハード的な検証がある。

- a) イットリウム系複合材料の長尺化と特性安定性
- b) 量産化コイルとしての界磁コイルの作製法、成型性の検討
- c) トルクロッド・熱収縮緩衝技術、高速回転対応技術、振動・衝撃対応技術
- d) 高圧絶縁技術
- e) 回転子冷却技術、熱侵入低減技術など

また、さらなる効率向上には、電機子も超電導化する全超電導回転機の検討も必要である。そのためには、特に線材の損失低減が重要となる。また、回転機本体だけでなく、冷却装置も高効率化、小型化、装置の長寿命化などの課題がある。

2.3.4-2 要素技術開発(1) 界磁巻線技術開発

・500kW級回転機の界磁巻線の開発を目的に、イットリウム系複合材料を使った1)平傘型、2)菱形傘型、および3)鞍型傘型形状の界磁巻線モデルコイルを試作し、40-50Kで冷凍機冷却し、複合材料の各温度の I_c - B と比較して、ほぼ励磁率100%の結果を得た。すなわち、各コイルともイットリウム系複合材料を劣化させることなく、 I_c の特性のほぼ100%までコイルを励磁することができた。すなわち、今後、今回の製作実績をもとにして界磁巻線を作製すれば、イットリウム系複合材料の I_c 特性から、界磁巻線の設計および回転機の設計が可能となる。界磁巻線の安定性検討のため、イットリウム系複合材料の交流損失を測定し、これを代表的な単純矩形、菱形

傘型、鞍型傘型形状の界磁巻線とそれを用いた 500kW 回転機の全交流損失を計算した。特に、外部の常電導固定子からの変動磁場の影響を調べた。その結果、超電導コイルの全イットリウム系複合材料にわたる発熱量は高々10W 程度であり、回転機の全体損失 (2.5kW 以上) に比べると、非常に小さかった。損失の内訳は、シールドとなるヨークにおける鉄損と電機子における銅損がほぼすべてであった。すなわち、界磁巻線で発生する電機子変動磁界による交流損失は無視できることがわかった。

以上、傘型界磁巻線コイルの製作性、交流損失からの成立性を調べたがいずれも回転機の設計、製作には問題ないことがわかった。

- ・ 目標に対する達成度 >100%

- ・ 今後の展望と課題

今後の課題としては、界磁巻線コイルの作製では、イットリウム系複合材料の長尺にわたる事前の I_c の把握が重要である。界磁巻線は磁場分布を持つため、イットリウム系複合材料の長手方向の I_c バラつきをできるだけ少なくすること、およびその分布状況を事前に把握して、安全なコイル設計をすることが必要である。また、n 値、伝導冷却における熱暴走挙動、クエンチ挙動なども調べ、安全な運転基準も検討していく必要がある。

今後、超電導回転機は一層の大型化、高効率化が進むと思われる。その際には、電機子も超電導化するなどの全超電導回転機による一層の高効率化も検討する必要がある。そのために、イットリウム系複合材料の一層の低交流損失化やコイルの安定性の検討が必要である。

2.3.4-3 要素技術開発(2) 冷却技術開発

- ・ 500kW 級回転機を模したモデルロータ部と冷却系からなる回転試験装置を試作し、液体 Ne サーモサイフォン冷却の試験を行った。この試験で回転系での液体 Ne と SUS304 界面での沸騰熱伝達係数を求め、 $1330 \pm 260 \text{ W/m}^2/\text{K}$ の値を得た。回転数 400~1200rpm で試験を行ったが、依存性は見られなかった。実際に設計した 500kW 回転機の界磁コイル部の冷却面積 0.3m^2 から、界面における吸熱量 $360 \sim 525\text{W/K}$ が見込まれ、また、従来報告結果からの同程度のコイルの発熱は 10W 程度であり、界面温度差は 0.2-1K 程度であるので、今回開発した液体 Ne サーモサイフォン冷却法は十分機器に使えるものと思われる。

- ・ 目標に対する達成度 >100%

- ・ 今後の展望と課題

今回、機器の熱設計に重要な液体 Ne-SUS 界面での熱伝達係数を求めることができ、目的を達成することができた。これにより、機器の冷却設計も可能になるが、さらに実機作製については、高速回転するシステム系全体での熱侵入量低減を断熱、真空度などの改善から検討することも必要である。

参考文献

1. H H W Neumüller, et al. Supercond. Sci. Technol. 19 (2006) S114.および W. Nick, "HTS Rotating Machines" European Summer School 発表資料,Pori, Finland(2008)など
2. S.K. Baik et al., "Electrical parameter evaluation of a 1 MW HTS motor via analysis and experiments", Cryogenics 49 (2009) 271. S.K. Baik, et al. Physica C 470 (2010) 1763.
3. AMSC 社ホームページ http://www.amsc.com/pdf/MP_DS_365_0610.pdf
- 4.S.Fuchino, N. Tamada, I. Ishii and M. Okano, .ation of a 1 MW HTS motor via a,Proceedings of the Eighteenth International Cryogenic Engineering Conference (ICEC18), Mumbai, India, (2000).
5. 友田、岩熊ほか 第 84 回 2011 年度春季低温工学・超電導学会予稿集 p53.
6. 西川、藤田 伝熱学 (理工学社) p231.
7. ネオンの物性値『岩波理化学辞典』 岩波書店、1994 年、第四版第九刷など

2.4 超電導回転機開発委員会

①背景及び目的

回転機の応用に関しては、従来、量産、商用化が進んでいた Bi 系線材による機器開発が行われていた。米国エネルギー省による Superconductivity Partnership Initiative など、これまで米国、欧州、韓国において、超電導発電機、船用モータ、風力発電機的设计などの開発が積極的に進められてきた。こうした回転機応用分野は CO₂削減や省エネなど昨今の世界の対環境事情に寄与できるものが多く、超電導の応用先としては有望なものが多い。

他方、最近、イットリウム系複合材料の開発の進展が著しい。本プロジェクトでも 1km の超長尺化が、「イットリウム系超電導電力機器技術開発」プロジェクトでも臨界電流の向上などを含めた特性向上の検討が活発に行われている。さらに、各日米欧の企業においては、数百m級の線材の市販が始まろうとしている。

本委員会は、このような状況に対応し、「希少金属代替材料開発プロジェクト ⑨-2 Nd-Fe-B 系磁石を代替する新規永久磁石及びイットリウム系複合材料の開発（超軽量高性能モータ等向けイットリウム系複合材料の開発）」の中にイットリウム系複合材料を用いた超電導回転機開発調査委員会を組織し、現在のイットリウム系複合材料、回転機応用の現状を調べ、Y 系回転機としてのメリットや今後の課題と進むべき方向性を議論した。これにより、その調査した結果を並行して進める回転機の開発および将来の開発に資することを目的とした。

②調査検討の方法

イットリウム系複合材料の現状、従来の回転機および超電導機の現状、研究、開発例を調査するとともに、イットリウム系複合材料を使った回転機の概略の検討を行い、Y 系回転機のメリット、課題を注出し、今後の有望応用分野の開拓の提言とした。回転機の調査検討項目としては、「船用回転機」、「風力用回転機」、「産業用電動機」を選んだ。これらの典型的な例にたいして、現状のイットリウム系複合材料による検討を行い、従来の常電導回転機、PM 式回転機に対するメリット、RM（レアメタル）削減量、効率、CO₂排出量などの効果を調べた。また、イットリウム系複合材料では大幅に低コスト化が進められているため、複合材料のコストと機器の経済的成立性も調べた。

検討の実施にあたっては、表 2.4-1 の識者からなる委員を選定し、表 2.4-2 の通りの内容で実施した。各担当委員がイットリウム系複合材料、常電導、超電導回転機の開発現状、イットリウム系適用性の検討の結果を報告し、会議で全委員を交えて討論し、後日、委員会報告書としてもまとめた。

表 2.4-1 平成 22 年度イットリウム系複合材料を用いた超電導回転機開発委員会
委員名簿（順不同・敬称略）

	氏名	所属・役職
委員長	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
委員	山崎 克巳	千葉工業大学 工学部 電気電子情報工学科 教授
	植田 浩史	大阪大学 核物理研究センター 特任助教
	牧 直樹	東京海洋大学 海洋工学部 博士研究員
	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
	柳本 俊之	川崎重工業（株）技術研究所 機械システム研究部 部長
	井岡 茂	（株）東芝 電力システム社 磯子エンジニアリングセンター 原子 力開発設計部 先端システム担当部長
	長谷 吉二	富士電機システムズ（株）鈴鹿製作所 設計部回転機グループ 担 当部長
	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
	鈴木 佳明	大陽日酸（株）つくば事業所 超低温技術部 部長
	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
	齊藤 隆	産業用超電導線材・機器技術研究組合 佐倉分室長
	青木 伸夫	産業用超電導線材・機器技術研究組合 相模原分室長
	和泉 輝郎	産業用超電導線材・機器技術研究組合 特別研究員
山田 穰	産業用超電導線材・機器技術研究組合 特別研究員	
オブザーバ ー	石山 敦士	早稲田大学 理工学術院 教授
	木須 隆暢	九州大学 大学院システム情報科学研究所 教授
	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
	塩原 融	産業用超電導線材・機器技術研究組合 専務理事
事務局	定方 伸行	産業用超電導線材・機器技術研究組合 技術開発部長代理

表 2.4-2 平成 22 年度イットリウム系複合材料を用いた超電導回転機開発委員会：テーマと日程

	主なテーマ	開催日
第 1 回	応用分野別常電導回転機・超電導回転機の現状と課題、イットリウム系複合材 料開発、超電導回転機開発の現状と計画、イットリウム系複合材料適用の課 題とリット、まとめ及び第 2 回委員会、報告書案について	平成 22 年 12 月 16 日
第 2 回	応用分野別常電導回転機・超電導回転機の現状と課題、イットリウム系 複合材料の適用検討、総合討論、まとめ及び報告書について	平成 23 年 2 月 22 日

報告者：第 1 回：和泉委員、山田委員、牧委員、柳本委員、長谷委員、岩熊委員、河島委員

報告者：第 2 回：山田委員、山崎委員、川島委員、牧委員、長谷委員

③成果 現状調査

③-1 イットリウム系複合材料の現状

・本複合材料線材に関しては、長尺化の進展著しい PLD、EB、RCE、MOD、MOCVD 法について調査した。その結果、フジクラ、Bruker、住友電工が PLD 法で、KERI、SuNAM が EB 法で、SuperPower 社が MO-CVD 法、AMSC 社、昭和電線が TFA-MOD 法で量産商業化に取り組んでいる。各社とも数百 m 級以上の長尺を数 10~600m/h の速度で作製できるようになっている。図 2.4-1 には代表的な例として、最近のフジクラによる 615m 線の特徴を示す。こうした線が機器応用に使われようとしている。

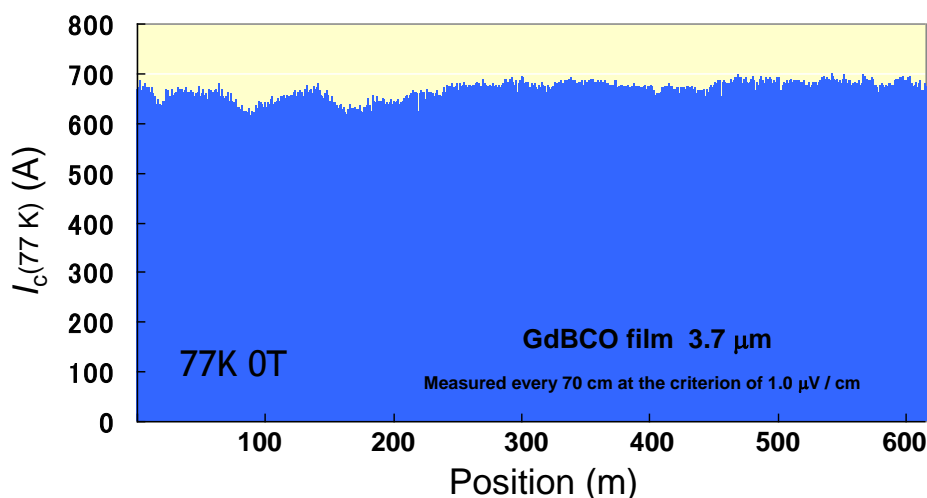


図 2.4-1 フジクラにおける最近の長尺線の 615m 線の I_c 分布特性

・コスト的には、フジクラは 2015 年には 500 A/cm 幅×1000 m 線材をプライス 3,000 円/m とする目標として掲げ、韓国の SuNAM も 2011 年には市場に販売を開始すると発表している (ISS2010)。先行する米国の AMSC 社、SuperPower 社も精力的に販売に取り組んでいる。例えば、SuperPower 社は、2015 年を目標に表 2.4-3 のように低コスト化に取り組む予定と発表している [1]。

表 2.4-1 SuperPower 社が設定したイットリウム系複合材料のプライス目標 [2.3.4-1]

Today	Customer requirement	
\$400/kA·m	<\$100/kA·m	For commercial market entry (small market)
	<\$50/kA·m	For medium commercial market
	<\$25/kA·m	For large commercial market

③-2 回転機の現状（常電導および超電導）

特に、本プロジェクトの目標であるレアメタル（RM）削減のために永久磁石（PM）式同期回転機について現状を調べた。また、超電導応用が期待される大型機の応用分野である風力、船用、産業用について詳細に調査した。その結果、

- ・ いずれの分野でもモータの高効率化、軽量コンパクト化は重要であり、そのため PM 式同期モータが増えている。
- ・ 風力応用では、現在の主流の 2 MW 機からさらに 5 MW 以上の大型化が進みつつあるが、大型化に対応するには発電機を含むナセルのサイズ、重量の軽減が必須である。
- ・ 船用では、時代のニーズにあった環境配慮型の高効率の電気推進船の開発が活発であり、その電気モータでは、数 MW 級のものの高効率化が望まれる。特に、電機推進船はすでに実際に大型ものも建造、販売され広く世界に普及している。日本でもスーパーエコシッププロジェクトが国交省のもとで推進され、環境配慮型の船舶の開発が盛んである。
- ・ 産業用（自動車、電車、工場用など）では、市場競争、コスト低減競争が激しいが、そのためにより高効率、軽量コンパクト化が求められている。

次に、これらに対応した高温超電導応用の回転機の開発状況を調べた。

- ・ 船用、産業用では Bi 系線材によりモデル機がいくつか試験検証されている。これまでに、川崎重工、AMSC、Siemens、Doosan の各社が活発に 400kW から 36.5MW 機の開発を行っている。
- ・ 風力用では設計のみである。Converteam、AMSC 社がこれまでに 8MW、10MW の超電導同期式発電機の設計検討を行っている。
- ・ これらの例では、従来常電導モータに比べ、小型軽量で高効率化（最大で数 % 向上）が可能であるとの結果を得ている。ただし、市場参入にはさらなる低コスト、信頼性向上が必要であるとされている。
- ・ Y 系回転機の例は少なく、回転試験まで行ったのは 7.5kW 機の ISTEK のもののみである。理由は、機器に使用する線材量産化がこれからであるためである。

③-3 イットリウム系複合材料適用性の検討

上記調査内容を踏まえ、現状のイットリウム系複合材料を使って場合の各応用でメリットを検討した。

③-4 船用モータ

- ・ 超船舶推進装置への適用では、モータ効率が 95.4% から 98% に増加する。
- ・ 常電導誘導機に対し体積・重量は 1/3 となり、小型・軽量化が必要な電気推進船に適している。
- ・ RM 使用量は従来の PM モータと比較して、約 1/30 (材料歩留り 33% 考慮) 程度になる。
- ・ 定格時の負荷角が小さく、同期機を使った電気推進船で急激な加減速運行を必要とする海上保安船などの特殊船舶にも適している。
- ・ コストは、常電導の現状機に比べると 1.3~5 倍となった。効率向上でこの初期コストは 12 年

ほどで吸収できるが、低コスト化のためには線材と冷却のコスト低減化の R&D が必要である。

- CO₂ 排出量削減、省エネに関しては、相当大きな効果が見込めた。国内大型モータ年間生産量の半分の 350 台を超電導化するだけで、原油換算で 34,300kl の省エネになる。

③-5 産業用モータ

- 500kW の産業用超電導モータは従来の常電導機より 2-3% の高効率化が図れる(表 2.4-2)。
- 従来の誘導機と比較すると体格で 0.7-0.5、質量で 1/2-1/3 の小型軽量化が図れる。また、PM モータと比較してもある程度の小型軽量化が可能である(表 2.4-2 および図 2.4-2)。

以前は超電導化のメリットが出るのは数MWクラス以上であったが、イットリウム系複合材料の性能が向上し、 $I_c=600A/cm$ 幅クラスの線材を使用することにより、今回 500kW の容量でも小型軽量化のメリットが出せることが分かった。さらに、

- RM 使用量は PM モータと比較し、約 1/130(材料歩留り 33%考慮)程度になり、大きな削減効果が見込まれる。
- コストは、産業用は容量が小さいだけに、厳しく、超電導化で現状機の 3-5 倍となった。しかし、逆に値段が安いだけに、効率向上でこの初期コストは 10 年ほどで吸収できる。
- CO₂ 排出量削減、省エネに関しては、国内大型モータ年間生産量半分の 350 台のみを超電導化する場合原油換算で 5,000kl の省エネになる。

表 2.4-2 各種モータ比較

	Y 系超電導モータ	誘導機	PMモータ
効率	96.8%	95%	96.5%
体格比	0.7	1	0.8
重量比	0.5	1	0.6

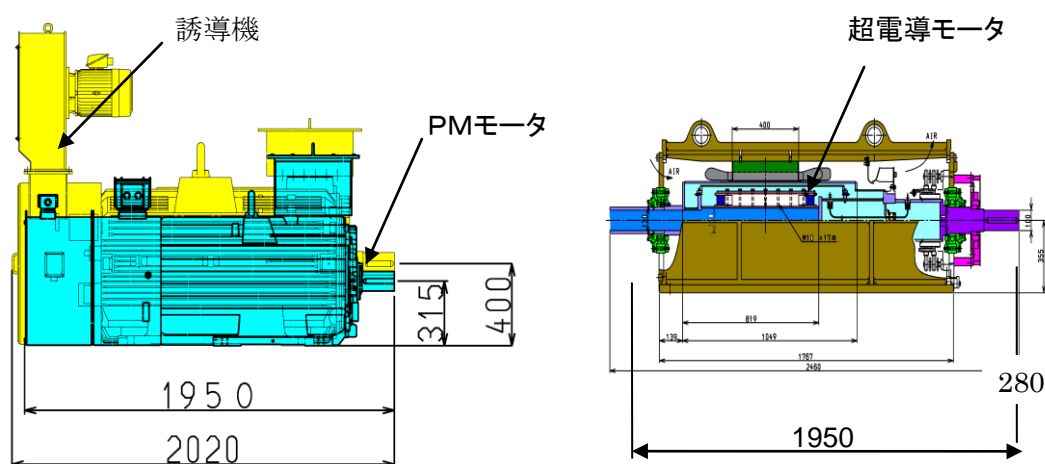


図 2.4-2 500kW モータの体格比較：左 常電導機、右 Y 系超電導機

表 2.4-3 500kW モータの RM 含有量

	超電導モータ	PMモータ
線材／磁石の総量	イットリウム系複合材料 4.8km	磁石 50kg
レアメタル	0.126kg	16kg

③-6 風力用発電機

- ・イットリウム系複合材料の特性と発電機の主な回転数、重量、出力などの基本パラメータとの相関を検討の結果、5MW 級以上で超電導の効果が出ることがわかり、5MW 級機の詳細検討を行った。
- ・運転温度の検討でイットリウム系複合材料であれば 77K でもコスト的に十分成り立つことが分かった。
- ・これを Cu 巻線で作った常電導相当機と比較すると、線材使用量が 1/10 に発電機重量が 1/3 になることが分かった。
- ・効率は、常電導相当機が 90% に対し、本機は 95.8% と大幅に効率向上が見込めた。
- ・Y 系発電機と永久磁石 (PM) を用いた PM 発電機とでレアアースの使用量を比較検討した。PM 機では 1571kg に対し、Y 系機では 0.762 kg と使用量は約 1/660(材料歩留り 33%考慮) となった。
- ・77K 以下の低温動作も検討した。40K になると複合材料の I_c は 77K の 7.8 倍になり複合材料使用量も大幅に削減できる。
- ・Y 系発電機の初期コストを算定した。40-77K いずれの運転方式でも、現状の Cu 巻線発電機と増速器の値段を下回り、コスト的にも Y 系超電導同期機がメリットがあることが分かった。ただし、冷却を含めたより詳細な検討が今後必要である。

③-7 全超電導機

- ・全超電導機についての検討を行った。最新のイットリウム系複合材料で確認された大幅な交流損失低減効果を用いた 400kW-3600rpm 全超電導機概念設計を行い、モータとしての損失低減と効率改善効果を検討した。電機子部の超電導化と交流損失低減により、大幅な効率改善が期待できる。最高で 99% の高効率が得られる。今後、技術的な検討を行って可能性をより具体的に検証していく必要がある。

④まとめ

調査検討の結果、主に以下のことが明確になった。

④-1 複合材料

- ・日米欧韓の各社で線材の販売が活発化し、発表資料からは数百 km/年の生産能力はある。
- ・その特性は、長さは数百 m 級、 I_c は 200-400A/cm 幅程度である。
- ・コストは、SuperPower 社の例では現状\$400/kAm で、2015 年までに\$20-100/kAm にする予定である（価格は発注量による）。フジクラも 500A/cm 幅の線を 3000 円/m で将来販売する予定である。

④-2 回転機の市場現状と超電導化現状

- ・超電導適用可能な数百 kW~MW 級の回転機を調査した。その結果、風力発電機、船用モータ、大型車載用で PM 式同期回転機が使われており、超電導での代替の可能性があることが分かった。
- ・超電導の研究開発は、これまで船用を中心に Bi 系線材で行われてきた。米国 AMSC 社、ドイツ Siemens 社、韓国 Doosan 社が数 100kW 級から 36.5MW 級まで開発した実績がある。
- ・いずれも軽量コンパクト化と数%ほどの効率向上が見込めることが明らかになっている。

④-3 イットリウム系適用検討

- ・上記で有望な船用、産業用、風力発電機の大型回転機に Y 系を適用した際のメリットを調べた。
- ・従来 PM 式回転機に比べ、RM 量は 1/100-1/2000 程度に削減できることが分かった。
- ・いずれの分野でも、効率は船用産業用で 2-3%、風力では 5%向上することが分かった。
- ・コスト的には少容量機ほど厳しく、500kW 産業用では数倍の初期コストがかかるが、逆に低価格のために、ランニングコストを含めた全体コストは 10 年程度で超電導機が安くなる。
- ・風力では、77K 運転も可能であり、かつ、初期コストも従来の常電導機の Cu 巻線発電機と増速器を合わせた値段を下回り、コスト的に大きなメリットが生じることが分かった。

④-4 全超電導

全超電導機、特に交流を流す電機子部の超電導化も検討し、大幅に効率が上がるなどのメリットを確認し、今後の応用が期待できることを確認した。

④-5 課題

検討により、今後の課題として以下のことが考えられた。

- ・コスト的には線材、冷凍機のさらなる低コスト化が求められる。
- ・Y 系機作製の実績と信頼性：これまで 1 機しか作製されたことがない。今後の応用検討には、多くにモデル機作製検討が必要であり、同時に市場化には信頼性試験も必要である。

また、個別の技術では、以下が考えられる。

- Y系導体とマグネット技術：高安定Y系マグネット技術：長期高安定運転が出来る巻線・支持・冷却・絶縁法を協調させたマグネット作製技術の開発。これには、①イットリウム系複合材料の機械特性、 I_c 特性などを考慮した最適コイル形状、②コイル巻き線、成形性の検討、③コイルの冷却と励磁特性の把握、④以上の試験による設計データの積み上げ、信頼性向上が必要である。
- Y系マグネットの安定性解析と保護システム：各種擾乱に対するマグネットの安定性解析並びにクエンチ時にY系コイルが損傷しない保護システムの開発
- 高速回転に対応する耐力特性：特に産業用では1500-3600rpmであり、大きな遠心力も加わる。よって、超電導部分で使用する部材に耐力性、固定法などの検討が必要である。
- その他構成材、構造：コイルを巻き付ける界磁、電機子部のティースの材質、固定方法、冷却構造の検討。特に、電機子や固定子界磁などで鉄製のティースを使わないときには、その固定方法や磁場が散逸するため生じる渦電流への対処などが必要である。
- 船用では、三次元で揺れる(ローリング、ピッチング、ヨーイング)に対しての冷却システム
これまで製作実績のない風力用超電導機の開発では、上記のほかに、
- 最適電気・機械設計：発電機重量や発電機コストなど最適設計手法の開発。特に、風力では頻繁に on, off が起こる (20%の稼働率)。これに対応した最適システム化の検討も必要である。
- 空間・時間高調波を低減するダンパーの最適構造：発電機出力をインバータ制御する際に発生する高調波に伴う渦電流発熱を低減するダンパーの最適構造と製造技術の開発
- 冷凍機冷却システム：通常の超電導対応以外に、大型風力では100m以上の高所に設置される、また、洋上風力などの設置を考えても信頼性、メンテフリー化が重要である。また、通常風力の有効動作時間は、風況によるが20%と言われている。このため、冷凍機の効率化はより一層重要である。

参考文献

[1] V. Selvamanickam et al., Applied Superconductivity Conference, Washington D.C. August1-6, 2010.

III-3 成果の総括

以下に各研究項目の主要成果と目標に対する達成度を総括する。

1. 超長尺イットリウム系複合材料における希少金属使用量低減技術開発

1.1 エキシマレーザ PLD 法による複合材料作製プロセス開発

- ・超長尺イットリウム系複合材料作製を目的として、ホットウォール型エキシマレーザ PLD 装置を改良した高磁界長尺イットリウム系複合材料作製装置を開発した。
- ・1050m の長さを有するイットリウム系複合材料の I_c の平均値は 533.9A であった。また、イットリウム系複合材料の長手方向の I_c 分布測定の結果から、10m 長以上で I_c が 300A/cm 幅 (@77K, 自己磁場) 以上という特性も十分満たすことから、目標である「1km 長で平均 I_c で 200A/cm 幅以上 (@77K, 自己磁場)」および、「10m 長以上にわたって I_c が 300A/cm 幅 (@77K, 自己磁場) 以上」という性能をすべて達成した。
- ・目標に対する達成度 >100 %

1.2 TFA-MOD 法による複合材料作製プロセス開発

- ・シミュレーションに基づき設計した超長尺バッチ式本焼炉は 730°C で運転可能であることが実証され、超長尺複合材料を作製できる装置であることを証明できた。
- ・超長尺バッチ式本焼炉において、シミュレーションに基づき設計したガス導入システムと排気系に関し、実証試験の結果 1000m の平均で 300A/cm 幅以上 (@77K, 自己磁場)、10m 以上で 300A/cm 幅以上 (@77K, 自己磁場) を達成でき、ガス系統及び熱処理温度に問題ないことが実証され、今回の目標値である 1000m 平均で 200A/cm 幅以上、10m で 300A/cm 幅以上 (@77K, 自己磁場) を達成した。
- ・長尺化の手段の一つとして RTR 方式の本焼炉を設計・製作・検討した。設計仕様を満足する温度分布、ガス流量を得ることができ、短尺試験の結果、BaF₂ の生成が抑えられ、c 軸配向超電導層が生成していることを確認できた。この結果、RTR 方式本焼炉は設計が適正に行われ、超長尺複合材料を作製可能な設備であることを実証でき、超長尺目標である 1000m 平均で 200A/cm 幅以上 (@77K, 自己磁場)、10m 以上で 300A/cm 幅以上 (@77K, 自己磁場) を達成することを見通すことができた。
- ・ホール素子の高速走査方式とデータの低雑音取得方式の開発により、従来と同等の空間分解能 (複合材料の幅方向に 40 μ m、長手方向に 100 μ m) で、従来システムの 200 倍の評価速度を達成した。
- ・前項の空間分解能で得られる情報と同等の情報が得られる条件で、長尺複合材料への適用が十分に可能となる 36 m/h という評価速度を達成した。
- ・目標に対する達成度 100%

2. イットリウム系複合材料の製造工程における希少金属利用率等の効率向上技術開発

2.1 レーザ CVD 法による希少金属利用率向上技術開発

- ・液体原料供給機構を備えたレーザ CVD 装置の開発を行った。
 - ・Y 系複合材料成膜への適用可能性および収率向上を目的とした成膜条件の最適化を図った。
 - ・IBAD 線材基板上に c 軸配向 YBCO 膜を合成、Y 収率は最大 45.7%を達成した。
 - ・RTR 機構を備えた連続成膜用レーザ CVD 装置を設計、開発した。
 - ・移動基板上において $J_c > 3\text{M}/\text{cm}^2$ 、 $I_c > 100\text{A}$ の高い超電導特性を達成し、イットリウム系複合材料の連続作製法としての LCVD 法の有効性を証明した。
- ・達成度 100%

2.2 YAG レーザ PLD 法による希少金属利用率向上技術開発

- ・10 mm×10 mm 短尺基材上イットリウム系複合材料膜に関する基礎検討から、ターゲット-基材間距離の短縮と酸素分圧の最適化で収率が向上することが明らかとなった。本検討では、ターゲット-基材間距離 20 mm、酸素分圧 200 Pa において最高で 19%の収率を得ることが出来た。
 - ・収率の増加に対して超電導特性は単調に低下したが、ターゲット組成の最適化で、高い収率を維持しながら $T_c = 88.2\text{ K}$ 、 $J_c = 1.8\text{ MA}/\text{cm}^2$ (@77 K、自己磁場)を得ることが出来た。
 - ・蒸着面積を増加させ収率をさらに向上させるために、マルチターン YAG レーザ PLD 装置を導入し、酸素分圧の最適化(160 Pa)によって、56.1%の収率を得た。
 - ・マルチターン YAG レーザ PLD 装置において収率 40%の条件(酸素分圧 80 Pa)では、 $T_c = 88.2\text{ K}$ 、 $J_c = 1.4\text{ MA}/\text{cm}^2$ (@77 K、自己磁場)が得られた。
 - ・静止系の膜厚分布から予想した膜厚分布と移動系で実測した膜厚分布は同じ傾向であったことから、移動系においても 40%以上の収率を見込むことが出来た。
 - ・IBAD 基材上にイットリウム系超電導膜を静止状態にて複数位置で成膜し、断面の微細組織観察を高分解能 SEM、EDS マッピングを用いて実施した。中心レーンでは、YBCO ほぼ単相の均一な微細組織が観察され、膜厚は $0.85\mu\text{m}$ であったのに対し、隣接レーンでは、YBCO 結晶中に多数の高 Cu 濃度の粒子が存在し、その膜厚も $0.49\mu\text{m}$ であった。また、組織・組成に関しても成膜位置による違いが見られた。
 - ・2 倍波 YAG レーザ PLD 法を用いてイットリウム系超電導膜を作製した結果、2 軸配向し、 $T_c = 89.0\text{ K}$ 、 $J_c = 1.4\text{ MA}/\text{cm}^2$ (@77 K、自己磁場)を示した。しかし、Ba と Cu が過剰な膜組成であった。
- ・達成度 >100%

3. イットリウム系複合材料を用いた回転機要素技術開発

3.1 回転機適正構造の概念設計

- ・ 磁場、温度、応力の 3 要素を考慮した連成シミュレータを開発した。
- ・ 同シミュレータを用い、イットリウム系複合材料を使った代表的な界磁巻線コイルの成立性を確認した。
- ・ 500kW 機回転機の詳細設計を行い、レアメタル(RM)使用量に関して、同じ出力の永久磁石回転機に較べて 1/130 の削減効果があることが分かった。

- ・ 目標に対する達成度 >100%

3.2 界磁巻線および冷却要素技術開発

- ・ イットリウム系複合材料を使った 1)平傘型、2)菱形傘型、および 3)鞍型傘型形状の界磁巻線モデルコイルを試作し、40-50K で冷凍機冷却し、複合材料の各温度の I_c - B と比較して、ほぼ励磁率 100%の結果を得た。
- ・ 界磁巻線の安定性検討のため、イットリウム系複合材料の交流損失を測定し、これを代表的な単純矩形、菱形傘型、鞍型傘型形状の界磁巻線とそれを用いた 500kW 回転機の全交流損失を計算した。その結果、超電導コイルの全イットリウム系複合材料にわたる発熱量は高々 10W 程度であり、回転機の全体損失(2.5kW 以上)に比べると、非常に小さかった。すなわち、界磁巻線で発生する電機子変動磁界による交流損失は無視できることがわかった。
- ・ 500kW 級回転機を模したモデルロータ部と冷却系からなる回転試験装置及び液体 Ne サーモサイフォン冷却試験機を試作した。
- ・ 同装置を用いて冷却試験を行い、回転系での液体 Ne と SUS304 界面での沸騰熱伝達係数を求め、 $1330 \pm 260 \text{ W/m}^2/\text{K}$ の値を得た。回転数 400~1200rpm での試験を行ったが、依存性は見られなかった。

- ・ 目標に対する達成度 >100%

以下には、各項目の成果を下表にまとめる。

超長尺イットリウム系複合材料における希少金属使用量低減技術開発			
最終目標	具体的目標値	小項目	成果
300 A/cm 幅 (@77K, 自己磁場) の特性を有し、1 km を超える超長尺線材作製を見通す。	<ul style="list-style-type: none"> 1km 長複合材料を作製し、平均 I_c が 200A/cm 幅以上 (@77 K, 自己磁場) であることを実証する。 同条件で作製した 10m 長以上の複合材料で I_c が 300A/cm 幅 (@77 K, 自己磁場) 以上を実証する。 	エキシマレーザ PLD 法による複合材料作製プロセス開発	達成度 > 100% <ul style="list-style-type: none"> 1050m 長線材—平均 $I_c=534A/cm$ 幅 10m 長—$I_c=300A/cm$ 幅以上
		TFA-MOD 法による複合材料作製プロセス開発	達成度 100% <ul style="list-style-type: none"> 1000m 長パッチ線材—平均 $I_c \geq 300A/cm$ 幅 10m 長—$I_c=300A/cm$ 幅以上
イットリウム系複合材料の製造工程における希少金属利用率等の効率向上技術開発			
最終目標	具体的目標値	小項目	成果
超電導層の連続形成プロセスにおいて原材料収率 40% 以上を見通す。	<ul style="list-style-type: none"> 全成膜領域に対し、静止成膜により原材料収率 40% 以上を実証する。 成膜領域の一部を通過する移動成膜により、静止成膜結果から予想される成膜量を実証する。 	レーザー CVD 法による希少金属利用率向上技術開発	達成度 100% <ul style="list-style-type: none"> 原料収率 45.7% 超電導特性 $J_c > 3MA/cm^2, I_c > 100A/cm$ 幅
		YAG レーザ PLD 法による希少金属利用率向上技術開発	達成度 > 100% <ul style="list-style-type: none"> 原料収率 56.1% 超電導特性 $J_c > 1.4MA/cm^2$
イットリウム系複合材料を用いた回転機要素技術開発			
最終目標	具体的目標値	小項目	成果
500 kW 級-1000 rpm 級の大容量回転機の概念設計により、イットリウム複合材料による大型回転機の優位性を見通す。	<ul style="list-style-type: none"> 磁場—応力—伝熱を連成した回転機評価用シミュレータを開発する。 上記シミュレータを用いた総合評価により傘型コイル利用回転機で従来の永久磁石回転機に比べ希少希土類元素使用量が 1/10 となる成立性を示す。 	回転機適正構造の概念設計	達成度 > 100% <ul style="list-style-type: none"> 500kW 機設計検討で希少金属使用量が従来の 1/130 に低減できることを示した。 磁場、温度、応力の 3 要素を連成させた解析シミュレータを開発し、上記設計機を評価し成立性を確認した。

<p>傘型界磁巻線の試作とその熱的、電磁氣的、機械的特性評価およびサーモサイフォン式冷却試験とその冷却特性評価により、500 kW 級-1000 rpm 級回転機的设计に資する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・傘型界磁巻線工程等における加工劣化を抑制し、巻線状態での特性で複合材料 I_c の 70%以上を得ることを実証する。 ・Ne を用いたサーモサイフォン式冷却装置において高速回転時の回転数と冷却能力の関係を明らかにし、回転機の冷却設計を可能にする。 	<p>界磁巻線および冷却要素技術開発</p>	<p>達成度 >100%</p> <ul style="list-style-type: none"> ・エッジワイズ歪、段差歪などの Y 系の課題を克服し、劣化なく Y 系傘型界磁モデルコイルの製作に成功し、回転機設計の見通しを得た。 ・液体 Ne を用い、高速回転時に 30K 冷却と界面の熱伝達係数 h を得て、冷却設計の見通しを得た。
---	--	------------------------	---

III-4 成果の意義

以下に各研究項目の成果の意義をまとめる。

1. 超長尺イットリウム系複合材料における希少金属使用量低減技術開発

本項目では、回転機に用いられている永久磁石に含まれる Dy や Nd などの希土類希少金属を削減するための高温超電導磁石を実現するために必要な 1km を超える単長を有する複合材料作製技術の開発を行い、前項でまとめた通り設定された目標を大きく上回る成果を達成した。本プロジェクト開始時には、臨界電流(I_c)と長さ(L)の積では世界最高レベルの技術レベルを有していたものの、内訳として 500m より長い材料を作製することは困難であり、むしろ臨界電流(I_c)の高特性で補っていた。しかしながら、本プロジェクトの成果において得られた 1km 以上の長さで 500A/cm を超える I_c を得たことにより、従来のレベルを大きく凌駕する技術レベルに到達し、世界最高レベルの技術を確立したことになる。図 4-1 には、イットリウム系複合材料の技術開発レベルを示す I_c - L マップ上における本項成果の位置付けを示す。

また、本技術開発において 1km を超える複合材料を作製するための基板から評価までの一連の装置とともにその技術を実証したことは、今後の長尺線材量産化の基盤技術を整えたことになる。

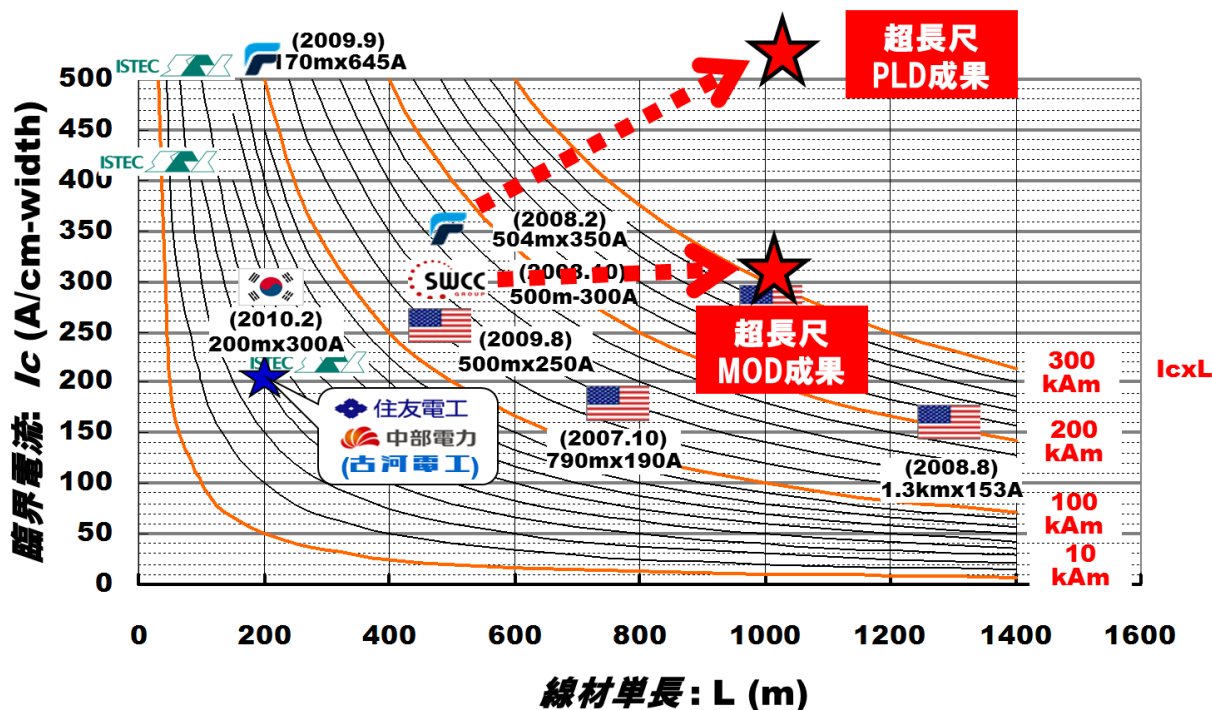


図 4-1 I_c - L マップ上における本項成果の位置付け

2. イットリウム系複合材料の製造工程における希少金属利用率等の効率向上技術開発

本項目では、上述の超長尺材料開発を行ったプロセスに比べて長尺実績は劣るものの、より原料収率が高く、希少金属利用率等の効率向上が見込めるプロセスとしてレーザ CVD 法及び YAG レーザ PLD 法

を選択し、高原料収率の実証を目指した開発を行った。結果として、前項でまとめた通り設定された目標を大きく上回る成果を達成した。高原料収率値として得られた56%は、従来実績値（～30%）に比べて約2倍の値を示しており、これは希少金属使用量をさらに半減できる可能性を示していることを意味する。

更に、本項目で開発したレーザCVD法は、元来レーザ照射による反応促進効果を利用することから、原料収率の増大とともに高速化が期待できるプロセスである。一方、YAGレーザPLD法は、熱源としてレーザがYAGレーザで前項の開発で用いているエキシマレーザに比べて非常に安価に導入可能な装置であると共に、稼働に際して必要とするユーティリティも電機だけでメンテナンスも不要であるなどの特長をもつ。これらは何れも低コスト化を期待できる要素であり、本プロジェクトにおいてこれらのプロセスの有効性を実証したことは将来の低コスト複合材料への可能性を示したことになる。

3. イットリウム系複合材料を用いた回転機要素技術開発

本項目では、高性能で超長尺のイットリウム系複合材料が実現できたことを想定して、高温超電導回転機実用化促進を目的として、同材料の諸特性に適合した回転機の概念設計を行うことにより、希土類希少金属使用量の低減効果の定量化を行うと共に、この回転機を実現するにあたって鍵となる要素技術として、コイル化技術と冷却技術を選択し、その実現性を検証した。結果として、従来実績である単純レーストラック型コイルを用いた回転機に比べて占積率の向上が図られる傘型コイルを導入した概念設計を行い、強度、発生磁場、伝熱等の成立性を確認すると共に、同回転機において同等の永久磁石回転機に比べて希土類希少金属使用量が1/130になることを証明した。さらに、小型ながら傘型コイルを試作し、劣化なく磁場発生が可能であることを確認し、サーモサイフォン型冷却装置での冷却能力を確認したことは、上記の概念設計による回転機の実現性を確認したことになる。また、高温超電導材料を用いた回転機において希土類希少金属使用量を低減させる技術は世界的なトレンド（図4-2参照）ではあるものの、その使用量低減効果を定量的に評価したのは世界でも初めてであり、世界の技術開発を先取りした成果であると考えられる。この定量評価結果を受けて、具体的な希土類希少金属の削減量を試算してみた。信越化学工業(株)の美濃和氏のレポート（2011.1 金属資源レポート p56 レアメタルシリーズ「希土類磁石から見たレアメタルと磁石応用の今後」）によると図4-3に示す通り、2010年で日本国内のNd系永久磁石の製造重量は14,000t程度であり、2005年からの増加率は約11%/年である。この増加率が維持されると仮定して2020年の国内製造重量を予測すると約40,000tとなる。またNd系永久磁石の歩留まりが65%程度であることを考えると原料投入量は約61,500tと見積もることができる。ここで、図4-4に示すNd系永久磁石の用途別比率(25%)に従ってモータ用のNd系永久磁石用投入量を求めると約15,400tになる。Nd系永久磁石の希土類重量比率(～26.6%)より希土類(NdおよびDy)重量を算出すると、約4,100tとなる。2020年におけるイットリウム系超電導磁石回転機の置き換え率は明らかではないが、これを25%と仮定し、置き換えによる希土類使用量低減効果(1/130)による希土類

削減量は約 1,000t となり、これは 2005 年の Nd と Dy の年間輸入総量（約 4,000t）の 1/4 に相当する。

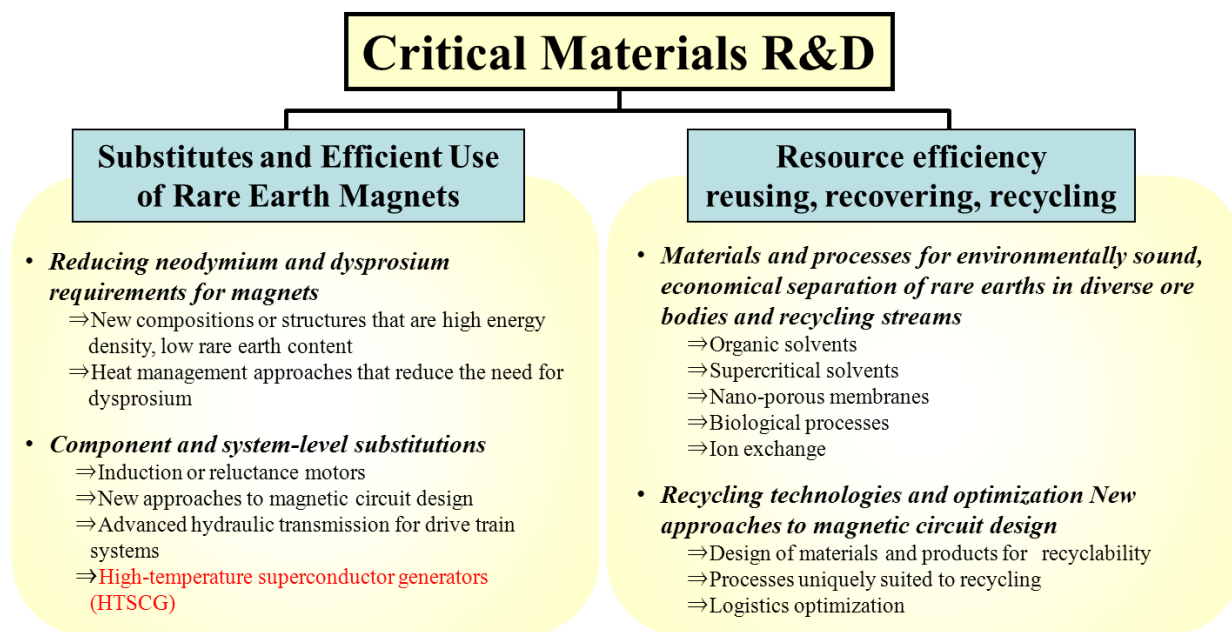


図 4-2 2011 年 10 月に米国ワシントン DC で行われる EU-Japan-US Workshop on Critical Materials R&D におけるセッション構成

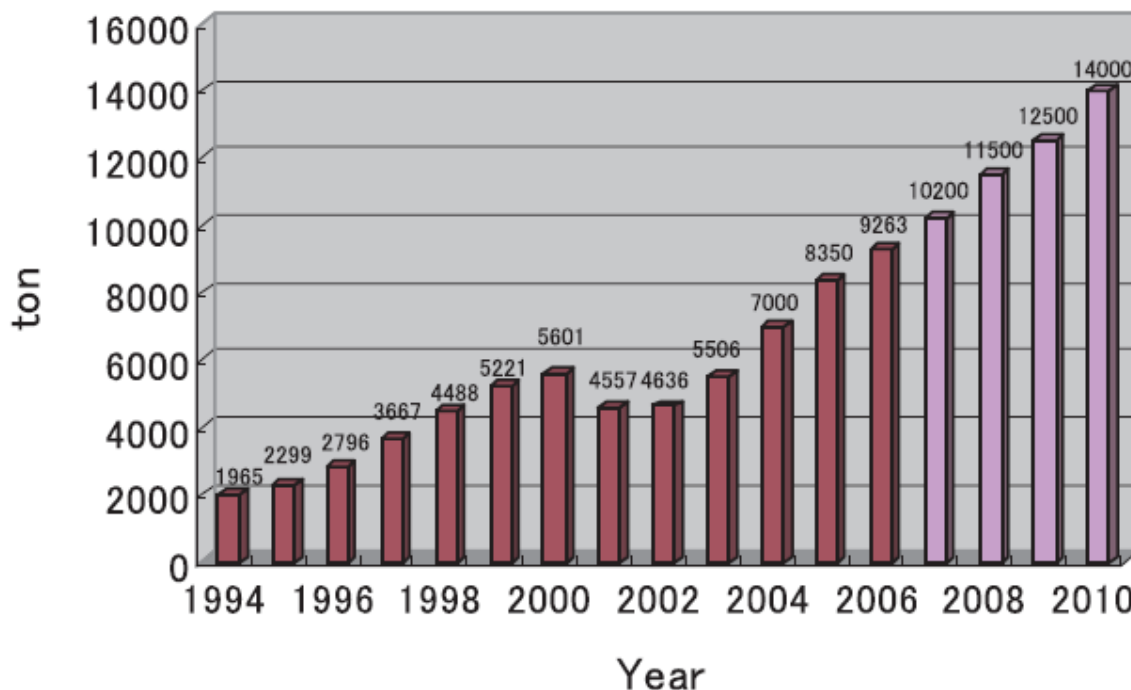


図 4-3 ネオジウム磁石の国内製造重量推移（出典：2011.1 金属資源レポート p56 レアメタルシリーズ「希土類磁石から見たレアメタルと磁石応用の今後」）

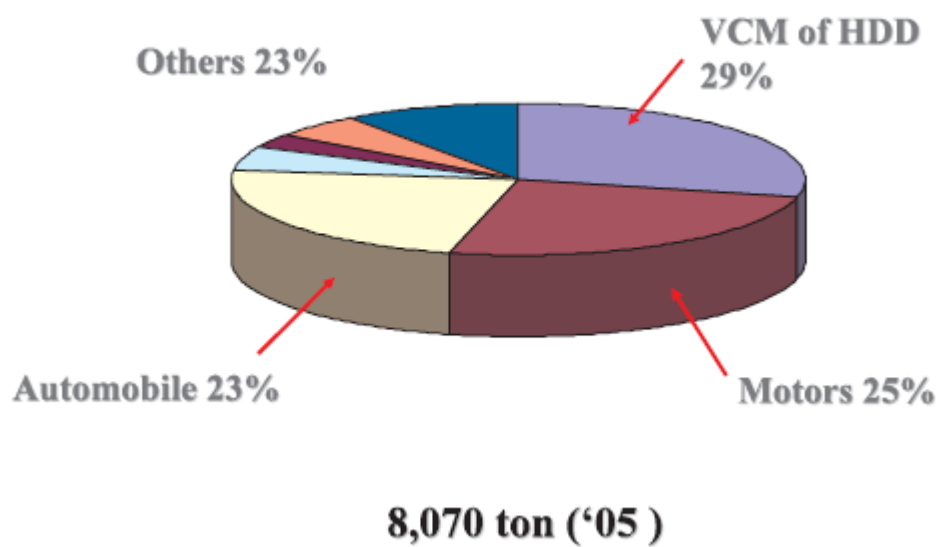


図 4-4 ネオジウム磁石の用途別比率 (出典：2011.1 金属資源レポート p56 レアメタルシリーズ「希土類磁石から見たレアメタルと磁石応用の今後」)

IV 実用化の見通しについて

IV. 実用化の見通しについて

本プロジェクトの中核的役割を果たした産業用超電導線材・機器技術研究組合は、組合員の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として、平成 21 年 9 月 24 日に設立された技術研究組合である。本組合は、(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)により構成され、平成 21 年 4 月 22 日に創設された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)に基づき設立したもので、同制度により研究組合自身が株式会社等に組織変更して、研究成果をそのまま共同で実用化できるようになるとともに、新設分割により会社を設立して、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。本プロジェクトでは、効率的な永久磁石モータの代表的な大型モータ規模である 500kW 級モータをイットリウム系複合材料で代替する場合に必要とされる、300A/cm 幅(@77k, 自己磁場)の臨界電流(I_c)を有し、かつ少なくとも単長 1km 程度を実現する見通しがつくとともに、500 kW 級-1000 rpm 級の大容量回転機に対し、イットリウム複合材料による大型回転機の優位性を見通すことができたことを受けて幾つかの実用化のシナリオが考えられている。一つは、組合の発展系による会社組織により実用化するもので、組合構成メンバーである線材メーカーを中心とした、超長尺イットリウム系複合材料の実用化である。

組合構成メンバーであるフジクラは、超長尺イットリウム系複合材料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。同社は、いち早く長尺化、高特性化に成功し、「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は、 I_c 値で 350A/cm 幅(@77K, 自己磁場)、502m を得るに至った。続いて「イットリウム系超電導電力機器技術開発プロジェクト」においては、歩留り改善、長さ方向の均質性改善に取り組んだ結果、100~300m 長の超電導線材に対して 70%を超える歩留りで製作できる目処が立つようになった。既に平成 20 年には小型ではあるが、超電導線製造装置の自社設備として導入し、実用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、イットリウム系超電導線材の機器応用を検討している研究機関等へ販売・提供している。本プロジェクト内では、上記技術の発展系として、ホットウォール型エキシマレーザ PLD 装置の改良により、超長尺イットリウム系複合材料の製造に成功した。この手法は、高速で安定した成膜条件を特徴としていることから、今後製造条件のさらなる検討を進め、線材の良品単長を改善や歩留改善によるコストダウンを図っていくことで、低コスト・安定製造技術レベルの向上が期待できることより実用化がより促進されると考えられる。さらに、本プロジェクトで見通しを得た超電導回転機市場への線材供給事業以外にも、1km 超える長尺線材は汎用性を有していることより大きな市場を獲得していくことも視野に入ってきたと言える。

同様に、本研究組合の構成機関で線材メーカーである、昭和電線ケーブルシステム(株)においては、平成 11 年より新エネルギー・産業技術開発機構(NEDO)の委託研究である「超電導

応用基盤技術研究開発（第Ⅰ期）」に参画し、国際超電導産業技術研究センター（ISTEC）と共同で TFA-MOD 法によるイットリウム系複合材料の線材開発に着手した。続く平成 15 年からは「超電導応用基盤技術研究開発（第Ⅱ期）」においても、イットリウム系複合材料の長尺線材作製に適したバッチ式大型本焼炉の開発を行い、長さ 500m、1cm 幅で 310A(@77K、自己磁場)の特性を有する線材の作製に成功した。バッチ式熱処理の特長は、作製する線材を電気炉に設置して一括の熱処理を行うため、短時間で線材を作製することが可能であり、工業生産性に優れていることを特長としている。本プロジェクトにおいては、これらの知見に基づいて超長尺イットリウム系複合材料の製造に必要な装置開発を行い、鍵となる技術である、炉設計技術、ガス制御技術等のノウハウを習得し、今回のプロジェクトにおいて平均 300A/cm 幅を有し、1km 以上の超長尺線材作製が見通せる成果を達成することができた。今後は、既に導入した自社設備による実用化を進めるとともにフジクラ同様に 1km 超長尺超電導線の安定製造、極低コスト技術のレベルの向上を図ることで、低コスト・超長尺線材の用途として回転機のみならず広い意味での超電導市場の形成に対し線材を供給すること実用化促進に貢献していくことになる。

一方、希少金属利用率等の効率向上技術開発及び超電導回転機要素技術の実用化に関しては、組合構成機関である(財)国際超電導産業技術研究センター(ISTEC)が中心となった展開が考えられる。同財団は、過去 20 年以上に渡り超電導技術の開発にあたり、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。当財団では、エンドユーザーをはじめとする多くの会員企業との連携により実用化に繋げていくことが考えられる。具体的には、希少金属利用率等の効率向上技術を大学と共に線材作製プロセス開発を推し進め、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、超電導回転機の実用化に関しては、継続的な研究開発を経て実用化に向かうものと考えている。本プロジェクトにおいては、概念設計による超電導回転機の有用性を証明すると共に要素技術によりそのキーテクノロジーの実現性の確認を行ったところである。ここで、イットリウム系超電導回転機が希土類の使用量削減に効果的なだけでなく、容積及び重量低減にも有効であることを定量的に示したことで、今後の開発の意義を与えることになり、実用化を促進したと考えられる。今後は、これらの概念を統合し、実際に超電導回転機の試作、実証を行っていくことになる。経済産業省による技術戦略マップによれば、産業用電動機、船用モータ等で 2011 年ごろには超電導回転機が世の中に出現することになっている。米国では、Bi 系超電導線材を用いて早くから回転機の研究開発が継続しており、この技術戦略マップに大きく遅れることなく高温超電導大型回転機が出現し、長尺イットリウム系超電導線材を用いた回転機も数年後には続いて現れるものと考えられる。一方、日本においては、米国に対し数年の遅れをとることになるが、その時期は継続した研究開発の規模に強く依存し、例えば国家プロジェクト等で精力的に開発を実施することにより実用機導入が促進されるが、民間の自力開発に依る場合は、東日本大震災後の経済状況等も勘案すると、長期間を要することも考えられる。

現在のところ、本プロジェクトの後継プロジェクトの位置付けではないものの、開発ロードの中では不可欠な実用規模コイルの試作（レトロフィット型電磁石の試作）を主眼とした「希少金属代替・削減技術実用化開発助成事業（イットリウム系超電導回転機用電磁石の開発）」が平成23年3月から約1年間の期間で始まっている。ここでは、事業を積極的に意識した開発グループにより助成事業（一部補助）により事業が進められている。このようにおり、大局的には継続的な研究開発は行われている一方で、その後の展開は未だ決まっていない。しかしながら、顧客要求である省エネ、低コスト、小型軽量化に対応し、また近年世界的目標であるCO₂削減に対しても効果があるため現状高効率・小型化が図れる永久磁石回転機が市場に出始めていることから、今後この分野での上記市場要求が高まり物量の拡大が期待される。一方で、具体的な実用化の道筋としては、研究組合及びその構成機関である(財)国際超電導産業技術研究センターが中心となってエンドユーザを含めた企業へさまざまな方策で普及啓蒙活動を行い、組合参画も含めた開発体制構築を図り、上記の継続研究開発を推進し、超電導市場の開拓、拡大に努めるとともに、より実用的な段階の開発を強者連合で実施することにより実用化へつなげる見通しが得られている。

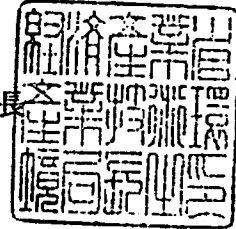
ナノテク・部材イノベーションプログラム基本計画

経済産業省

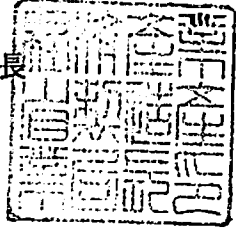
平成 21・03・25 産局第 1 号

平成 2 1 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 1 6 ・ 0 7 ・ 2 7 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、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不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]

I. 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）

①概要

革新的なナノテクノロジーの研究開発を促進し、キーデバイスの早期実現を目指すため、大学や研究機関などの川上と企業などの川下の連携、異業種異分野の連携による提案公募によって、ナノテク実用化に向けたチャレンジを支援する。

②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認し、実用化を図る。

③研究開発期間

2005年度～2011年度

II. 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（運営費交付金）

①概要

従来の半導体は、性能の向上（高速化、低消費電力化、高集積化）を確保するために微細化が進められてきたが、絶縁性、誘電率等の物理的限界、微細化に伴う製造コストの増大など、集積度向上によるメリットが十分達成されなくなっている。

本研究開発では、シリコンで培った微細化技術やデバイス原理を活用しながら、シリコン材料の物理的限界を突破するための“新材料”および“新（デバイス）構造”の開発を行い、次世代の電子デバイス技術を確立する。

②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。

③研究開発期間

2007年度～2011年度

(2) 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）

①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。

②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。

③研究開発期間

2006年度～2010年度

(3) 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）

①概要

窒化物系化合物半導体は、パワーデバイス、高周波デバイス、発光デバイス等、重要なデバイスの飛躍的な性能向上と消費電力削減への貢献を期待されている。このため、従来の半導体材料では実現出来ない領域で動作可能なハイパワー・超高効率の電子素子、超高速電子素子等の作成に必要な窒化物系化合物半導体先進技術の国際競争力を強化すべく、高品質かつ大口径単結晶基板、高品質かつ大口径エピタキシャル成長技術等の開発を行う。

なお、本事業は、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。

②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

③研究開発期間

2007年度～2011年度

(4) 三次元光デバイス高効率製造技術（運営費交付金）

①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。

②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。

③研究開発期間

2006年度～2010年度

(5) 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）

①概要

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。

なお、本事業は、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。

②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。

③研究開発期間

2006年度～2010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）

①概要

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。

なお、本事業は、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。

②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。

③研究開発期間

2006年度～2009年度

(7) 半導体機能性材料の高度評価基盤開発（運営費交付金）（再掲）

①概要

情報通信機器の高機能化や低消費電力化等の要求を満たす半導体集積回路を実現するため、新たな機能性材料開発に貢献する評価基盤技術を開発し、さらに開発した機能性材料を半導体及び半導体集積回路に適用できる統合的なソリューション技術を開発する。

なお、本事業は、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。

②技術的目標及び達成時期

2011年度までに、半導体デバイス性能に直結する接合素子の性能性及び信頼性等、半導体製造プロセス全体を俯瞰しつつ、機能性材料開発が可能となる評価基盤技術を開発し、開発した機能性材料を用いた統合的なソリューションが提案できる材料評価基盤を構築する。

③研究開発期間

2009年度～2011年度

Ⅲ. 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）

①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。

②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。

③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）

①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。

②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。

③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）

i) 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

①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、生活習慣病に起因する血管病変等合併症の早期の診断・治療を図る。

②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。

③研究開発期間

2005年度～2009年度

ii) 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

①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。

②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。

③研究開発期間

2005年度～2009年度

iii) 新規悪性腫瘍分子プローブの基盤技術開発

①「概要

分子イメージングにおいて、病変を可視化する分子プローブの開発を一層強化・促進するため、分子プローブの基盤要素技術と評価システムの開発を行う。

②技術目標及び達成時期

2009年度までに、新規の近赤外蛍光分子プローブ及び小動物用近赤外蛍光イメージングシステムを試作し、同システムを用いて分子プローブのがん特異性を定量的に評価するための条件等を明らかにする。

③研究開発期間

2008年度～2009年度

IV. 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ク関連産業・部材産業の競争力を強化する。

(i) 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）

①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（CFRTP）の開発を行う。

なお、本事業は、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。

②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、高速成形技術、接合技術及びリサイクル技術を開発する。

③研究開発期間

2008年度～2012年度

(2) 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）

①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持つ壁および窓材料を、セラミックスのナノ多孔体構造や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。

なお、本事業は、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。

②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。

③研究開発期間

2007年度～2011年度

(3) 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）

①概要

高純度、高密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、これを用いた従来よりも格段にパワー（電力）と蓄電量が大きなキャパシタを開発する。

なお、本事業は、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。

②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。

③研究開発期間

2006年度～2010年度

(4) 革新的省エネセラミクス製造技術開発（運営費交付金）（再掲）

①概要

小型炉設備で生産可能な小型セラミック中空ユニットを複数組みあわせることで、これまでその製造が難しかった複雑形状かつ大型セラミクス部材を省エネで製作することができる革新的なセラミック部材製造技術を開発する。

なお、本事業は、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。

②技術目標及び達成時期

2013年度までに、高機能化された小さな精密ブロックを立体的に組み上げ、高効率で接合、一体化をし、複雑形状や大型の部材を製造可能とする革新的なプロセス技術の基盤を確立し、高耐性部材、高温断熱部材及び高比剛性部材の試作を行う。

③研究開発期間

2009年度～2013年度

(5) 革新的ガラス溶融プロセス技術開発（運営費交付金）（再掲）

①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。

なお、本事業は、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。

②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。

③研究開発期間

2008年度～2012年度

(6) 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）

①概要

革新的な高効率送電技術を確立して高温超電導ケーブルの実用化を促進するため、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（DIBSCCO等）を活用し、首都圏の系統に接続する実証試験及び評価を行う。

なお、本事業は、発電用施設による電気の供給の円滑化を図る観点から行うものである。

②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。

③研究開発期間

2007年度～2012年度

(7) 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）

①概要

超高純度金属材料を発電設備の蒸気配管等に実用化することを目指し、高純度金属材料の高度化に向けた低コスト・量産化製造技術を開発し、実使用環境における超高純度金属材料の耐久性試験等を行う。

なお、本事業は、発電用施設における電気の供給の円滑化を図る観点から行うものである。

②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。

③研究開発期間

2005年度～2009年度

(8) セラミックリアクター開発（運営費交付金）（再掲）

①概要

低温域かつ高効率なエネルギー変換を可能とする次世代型セラミックリアクターの実現のため、世界最高効率の燃料電池マイクロセルの集積構造技術等の開発を行う。

なお、本事業は、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。

②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。

③研究開発期間

2005年度～2009年度

(ii) 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）

①概要

ハイテク製品の製造に不可欠であり世界的な需給逼迫が懸念されるレアメタル（タングステン、インジウム、ディスプロシウム）について、ナノテクノロジー等の最先端技術を活用して、代替材料開発・使用量削減を行う。なお、平成21年度からは、これまでの対象3鉱種に加えて、白金、セリウム、テルビウム等も研究開発の対象とする。

②技術目標及び達成時期

タングステン、インジウム、ディスプロシウムについては2011年度までに、白金、セリウム、テルビウム等については2013年度までに、使用原単位について現状と比較して削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（試料提供）できる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であることを少なくとも維持することを前提とする。

〔対象元素〕

- ・超硬工具向けタングステン（W）
- ・透明電極向けインジウム（In）
- ・希土類磁石向けディスプロシウム（Dy）
- ・排ガス浄化向け白金族（Pt）
- ・精密研磨向けセリウム（Ce）
- ・蛍光体向けテルビウム、ユーロピウム（Tb、Eu）

③研究開発期間

2007年度～2013年度

(iii) 環境制約の克服

(1) グリーン・サステイナブルケミカルプロセス基盤技術開発

①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・有効利用、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GSC（グリーン・サステイナブルケミストリー）プロセスを開発する。

②技術的目標及び達成時期

2015年度までに、有害な化学物質を削減できる又は使わない革新的な製造プロセス及び化学品の開発、廃棄物、副生成物を削減できる革新的な製造プロセス及び化学品の開発、資源生産性を向上できる革新的な製造プロセス及び化学品の開発を行う。

③研究開発期間

2008年度～2015年度

(2) 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）

①概要

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。

なお、本事業は、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。

②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。

③研究開発期間

2006年度～2010年度

(3) 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）

①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住宅建材分野、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。

②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。

③研究開発期間

2007年度～2011年度

(4) 高感度環境センサ部材開発*

①概要

ダイオキシンをはじめとする極微量有害有機物質を超高感度で安価かつ簡易に計測するために、高感度セラミックセンシング材料を用いた環境センサーを開発する。

②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、0.001ng・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。

③研究開発期間

2006年度～2010年度

(5) 次世代高信頼性ガスセンサ技術開発（運営費交付金）（再掲）

①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（COセンサ・メタンセンサ）を開発する。

なお、本事業は、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。

②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とメタンのセンサを開発する。

③研究開発期間

2008年度～2011年度

V. 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）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）

①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。

なお、本事業は、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。

②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。

③研究開発期間

2007年度～2011年度

（2）超ハイブリッド材料技術開発（運営費交付金）

①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。

②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。

③研究開発期間

2007年度～2011年度

(3) 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)

①概要

電界紡糸や熔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。

②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熔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。

③研究開発期間

2006年度～2010年度

(4) 次世代光波制御材料・素子化技術* (運営費交付金) (再掲)

①概要

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。

なお、本事業は、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。

②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。

③研究開発期間

2006年度～2010年度

(5) 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)

①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。

②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。

③研究開発期間

2007年度～2011年度

(6) 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)

①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ビ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。

②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。

③研究開発期間

2006年度～2010年度

VI. 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、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)

①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。

②技術目標及び達成時期

2010年度までに、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、ナノ粒子のリスク評価及び管理の考え方の提言を行う。

③研究開発期間

2006年度～2010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、ライフサイエンス、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、ナノテクノロジー・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。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している。

〔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。

〔標準化〕

- ・経済産業省では、ナノテクノロジー関連の研究開発成果を社会及び市場等に普及するための環境整備として、ナノテクノロジーの標準化活動（ISO/IEC、JIS）を推進している。

〔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。

〔社会受容〕

- ・ナノテクノロジーの産業化の推進とともに、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等の潜在的な課題に関する知見を蓄積する等のナノテクノロジーの社会受容に対する取組みを推進している。
- ・経済産業省では、2006年度から「ナノ粒子の特性評価手法開発」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。
- ・OECDでは、2006年9月、化学品委員会に工業ナノ材料作業部会（WPMN）が設置され、代表的な14種の工業ナノ材料について、試験計画の合意と試験実施を目的とする「スポンサーシッププログラム」が実施されている。スポンサーシッププログラム対象物質のうち、カーボンナノチューブ（単層、多層）、フラーレンの3物質については日本が中心となって担当し、「ナノ粒子の特性評価手法開発」等の成果で貢献している。

〔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。

（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。

- ・ N E D O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組みを実施している（N E D O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。

〔関係機関との連携〕

- ・ 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においては、文部科学省との合同会議を設置するなど、連携しつつプロジェクトを推進している。

〔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」等が設置され、関係省庁と連携して実施している。

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。
- (15) 平成21年4月1日付け制定。ナノテク・部材イノベーションプログラム基本計画（平成20・03・24産局第1号）は、廃止。

環境安心イノベーションプログラム基本計画

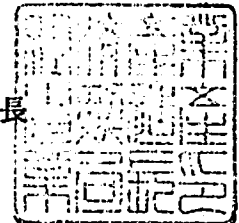
経済産業省

平成21・03・24産局第1号
平成21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。

平成21・03・24産局第1号
平成21年4月1日

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、革新的な技術開発や低炭素社会の構築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、次のとおり位置付けられている。

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。

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。

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 - 社会システムの改革戦略 - 早急に取り組むべき課題「環境・エネルギー等日本の科学技術力による成長と国際貢献」において、「環境・資源・エネルギー等の世界的制約となる課題の解決に貢献し、技術開発や環境整備を通じて持続可能な産業体系・社会基盤・生活を実現することにより世界と日本の経済成長の原動力とするエコイノベーションを実現すべきである。」との方針が示されている。

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。

同じく、今後1、2年で重点的に着手すべき八つの戦略のうち「環境・エネルギー技術の中核とした経済成長 - 環境技術・環境ビジネスの展開」において「環境重視・人間重視の技術革新・社会革新を図る「エコイノベーション」というコンセプトの下、我が国の強みである「ものづくり」と「環境・省エネ」の技術力を梃子に、持続可能な生産システムへの転換、ゼロエミッション型社会インフラ整備、環境価値を重視した持続可能な生活の実現に向けた技術革新と社会システム改革を一体的に推進し、その成果をOECD等を通じて世界に発信する。」との方針が示されている。

「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。

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。

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。

低炭素社会づくり行動計画(2008年7月閣議決定)

「低炭素社会を目指し、長期目標を実現するために重要な革新的技術開発の推進及び既存先進技術の普及促進を行う。」とされている。

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。

ドリームBTジャパン(2008年12月BT戦略推進官民会議取りまとめ)

バイオテクノロジー(BT)を活用して、環境に優しい低炭素社会の実現と環境修復のための技術開発と実用化支援を行うこととしている。

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を達成するため、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するとともに、低炭素社会モデル構築に向けた取り組みを推進。

【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: +1.3~2.3%

非エネルギー起源CO₂: 0.04%

メタン: 0.9%

一酸化二窒素： 0.6%
 代替フロン等3ガス： 1.6%

() 「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月一部改定、平成20年3月全部改定)

・資源制約克服 / 3R

「第2次循環型社会形成推進基本計画(平成20年3月閣議決定)に基づき、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57百万トン)

(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

地球温暖化対策のため、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し、低炭素社会の構築に資する。

() 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な段階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

適切な研究課題等を選定して研究開発を実施。

(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、CTI（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、諸外国の先進的取組との研究協力や、発展途上国への技術普及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

2002年度～2011年度

実施形態

諸外国との連携のもと、テーマ毎に適切な体制を構築し実施。

() 二酸化炭素回収・貯留(CCS)に関する技術開発

(1) 分子ゲート機能CO₂分離膜の技術研究開発

概要

二酸化炭素回収・貯留(CCS)の実用化に向け、最大の課題のひとつであるCO₂分離回収コストの大幅低減を目指し、圧力を有するガスからのCO₂/H₂の分離用に期待されている膜分離技術の実用化のため、分子ゲート機能CO₂分離膜の高圧下におけるCO₂/H₂選択性の向上、分離膜モジュールの大型化等に取り組む。

技術目標及び達成時期

2015年頃において、石炭ガス化複合発電(IGCC)等で発生する圧力ガスから従来の3分の1程度(1,500円/t-CO₂程度)のコストでCO₂を分離回収することを可能とする膜分離技術の確立を目指す。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(2) 二酸化炭素貯留隔離技術研究開発

概要

二酸化炭素回収・貯留(CCS)(地中貯留及び海洋隔離)の実用化に向け、CCS実施における安全性評価・社会的信頼醸成に必要な基盤技術や手法の開発に重点的に取り組む。本事業の実施にあたっては、国内外で実施される実証事業等と必要な連携をしながら取り組む。

また、本事業で獲得した安全性評価等に関する知見を活用し、CCS事業を計画する上での基礎情報である、貯留隔離ポテンシャルの調査を行う。

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・生物影響評価、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。

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

注) 本事業は、平成20年度までの「二酸化炭素地中貯留技術研究開発」(うち実証試験を除く)と「二酸化炭素の海洋隔離に伴う環境影響予測技術開発」を統合したもの。

(参考：「二酸化炭素海洋隔離に伴う環境影響予測技術開発」の研究開発期間)

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

当初単独事業として2011年度まで実施する予定であったが、2009年度

より地中貯留技術研究開発と事業統合。海底下帯水層への地中貯留等に係る、安全性評価・環境影響評価等にこれまでの成果を活用する。

(3) 二酸化炭素削減技術実証試験委託費

概要

二酸化炭素回収・貯留(CCS)技術の実用化に向けた実証試験を行う。具体的には、火力発電所等の大規模発生源から分離回収したCO₂を年間約10万トン規模で地下帯水層(地下1,000m程度)等へ貯留する技術を実証するとともに、長期挙動予測可能な二酸化炭素挙動予測シミュレーション技術、モニタリング技術等の基盤技術の確立を行う。

技術目標及び達成時期

2015年度までに、CCS技術の本格導入となる、100万トン/年規模での地中貯留を実現するために必要な基盤技術を確立する。

研究開発期間

2008年度(補正)~2013年度

() 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2012年頃を目途に開発する。

研究開発期間

2007年度～2011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

2009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

2005年度～2009年度

・資源制約克服/3R

() 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k1/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) 希土類金属等回収技術研究開発

概要

今後、普及拡大が見込まれる製品の製造工程において排出されるレアアースを含む不要物など技術的・経済的に抽出が困難なレアアース含有物について、レアアース等有用金属のリサイクル技術の研究開発を行う。

具体的には、液晶パネル用ガラス、ハードディスク用ガラスの製造工程等で使用された低品位状態のレアアースについて高品位化し再利用するための技術開発を実施する。

技術目標及び達成時期

液晶パネル用ガラス、ハードディスク用ガラスなどの精密な表面処理が必要な製品の研磨に使用されているセリウム等のレアアースを含有する研磨剤について、

研磨廃滓中のレアアース成分と不純物の分離に新たな低温での化学的・物理的プロセスを確立・導入（具体的には低温での効率的な化学処理や、研磨剤成分ではなく不純物を物理的に分離する回収プロセスに変更する等）することでレアアース回収プロセスの低コスト化及びエネルギー使用合理化を目標とする。

研究開発期間

2008年度（補正）～2012年度

（3）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

（ ）水資源制約克服

（1）環境調和型水循環プラント実証事業（運営費交付金）

概要

我が国が強みを持つ、膜技術を始めとする水処理技術を活用し、省水型・環境調和型の水循環システムを開発するとともに、海外展開等を支援する。

技術目標及び達成時期

2013年度までに省水型・環境調和型の水循環システムを確立し、以降、国内外の水不足が深刻な地域へ当該水循環システムを順次普及させる。

研究開発期間

2009年度～2013年度

（2）環境調和型水循環技術開発（運営費交付金）（再掲）

概要

我が国が強みを持つ、膜技術を始めとする水処理技術を強化し、省水型・環境調和型の水循環システムの開発に資する省エネ・省水型の要素技術を開発する。

技術目標及び達成時期

2013年度までに、以下の技術を開発する。

- 革新的膜分離技術の開発：
 - 従来法に比べ膜透過加圧エネルギー等を50%以上削減。

- 省エネ型膜分離活性汚泥法（MBR）技術の開発：
従来法に比べ膜洗浄の曝気（空気気泡）エネルギー等を30%以上削減。
- 有用金属・有害物質の分離・回収技術の開発：
従来法に比べ汚泥の削減により汚泥処理・処分エネルギーを80%以上削減。
- 高効率難分解性物質分解技術の開発：
従来法に比べ窒素処理に係るエネルギーを50%以上削減。
オゾン酸化法等のエネルギーを50%以上削減。

研究開発期間

2009年度～2013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）

概要

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

食料と競合しないセルロース系バイオマスからバイオ燃料を製造する革新的技術の開発を軸に、バイオ燃料生産に有用な遺伝子組み換えによる植物・微生物の開発等、バイオ燃料のコスト競争力強化に資するバイオリファイナリーの一環として、ブタノール、プロピレン等の製造技術の実用化を目指した開発を行う。

技術目標及び達成時期

2013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～2013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)(再掲)

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

2010年度までに、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、ナノ粒子のリスク評価及び管理の考え方の提言を行う。

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、既知の毒性情報を整備したデータベースを基に、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、それらを統合して毒性判断に必要な情報を効率的に抽出する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

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、大量の排出が予測されるアスベスト含有建材等の廃棄物を対象として、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ばく露を最小化し、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

. その他

エコイノベーション推進・革新的温暖化対策技術発掘・実証プログラム（運営費交付金）

概要

エコイノベーション（環境重視・人間重視の技術革新・社会革新）の創出および、低炭素社会の構築のため、それに資するテーマを公募し、その実現可能性調査や地域実証試験を実施する。発掘された技術シーズや実証された有望な社会システムモデルは広く国民に示し、民間におけるエコイノベーション推進や低炭素社会構築に関する研究や取組を加速させる。

技術目標及び達成時期

F S 結果や実証モデルから生み出された公的機関の実施する研究開発件数や民間主導の取り組みモデル件数を事業のアウトカムとしてモニタリングする。

また、O E C D において、エコイノベーション・ロードマップとともに、その進捗を測る指標の2010年を目処にした作成が検討されているところ。こうした指標を参考とし、エコイノベーションが進展する度合いの数値化を可能にした上で調査段階でこれらの指標を設定し国際比較を行う。

研究開発期間

2008年度～2012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。

石油精製物質等簡易有害性評価手法開発については、開発された簡易有害性評価手法等を2014年度を目途に経済開発協力機構（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行う。

物質生産用に関与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子資源保有国（途上国）の遺伝子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子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】

CO₂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、低炭素社会モデルの構築に資する効果的なCO₂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

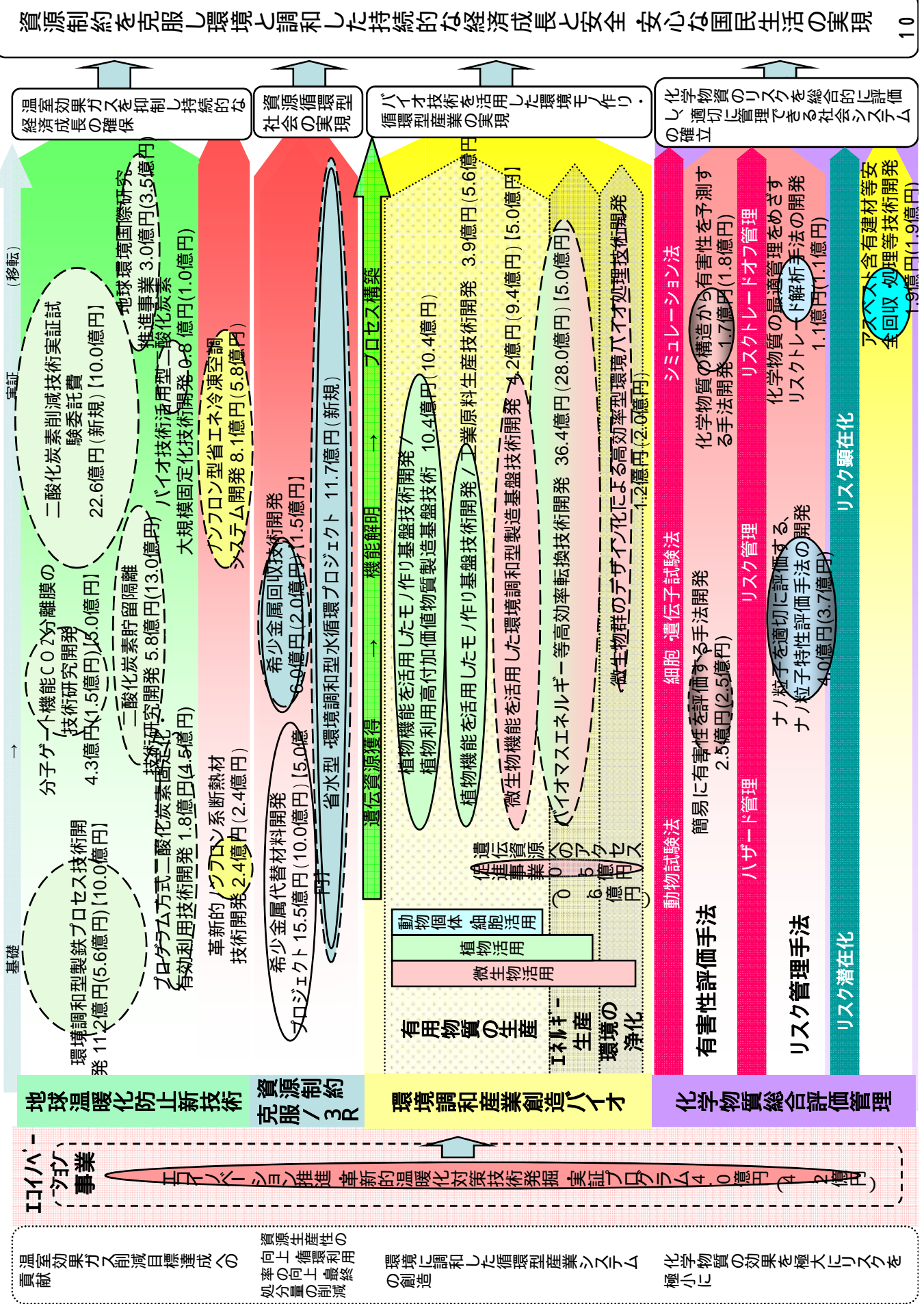
- (1) 平成12年12月28日付け、生物機能活用型循環産業システム創造プログラム基本計画、化学物質総合評価管理プログラム基本計画制定。
- (2) 平成14年2月27日付け、生物機能活用型循環産業システム創造プログラム基本計画制定。生物機能活用型循環産業システム創造プログラム基本計画（平成12・12・27工総第15号）は、廃止。平成14年2月28日付け、革新的温暖化対策技術プログラム基本計画、3Rプログラム基本計画、化学物質総合評価管理プログラム基本計画制定。化学物質総合評価管理プログラム基本計画（平成12・12・27工総第14号）は、廃止。
- (3) 平成15年3月10日付け制定。革新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。
- (9)平成21年4月1日付け制定。環境安心イノベーションプログラム基本計画(平成19・03・25産局第7号)は、廃止。

5. 環境安心イノベーションプログラム

[平成21年度予算額: 165億円]

各プロジェクト毎の予算額は21年度予算(20年度予算)[20年度補正予算]



希少金属代替材料開発プロジェクト基本計画

(ナノテク・部材イノベーションプログラム・環境安心イノベーションプログラム)
「希少金属代替材料開発プロジェクト」基本計画

電子・材料・ナノテクノロジー部
新エネルギー部

1. 研究開発の目的・目標・内容

(1) 研究開発の目的

現在及び将来において我が国経済を牽引していく産業分野において、競争力を発揮し世界を勝ち抜いていくために、多様な連携（川上・川下産業の垂直連携、材料創製・加工との水平連携）による研究開発の推進により、当該市場のニーズに応える機能を実現する上で不可欠な高品質・高性能の部品・部材をタイムリーに提供し、又は提案することができる部材の基盤技術を確立することを目的とした「ナノテク・部材イノベーションプログラム」、及び環境・資源制約を克服し循環型経済システムを構築することを目的とした「環境安心イノベーションプログラム」の一環として本プロジェクトを実施する。

希少金属は、我が国産業分野を支える高付加価値な部材の原料であり、近年その需要が拡大している。しかし、途上国における著しい需要の拡大や、そもそも他の金属と比較して、金属自体が希少であり、代替性も著しく低く、その偏在性ゆえに特定の産出国への依存度が高いこと等から、我が国の中長期的な安定供給確保に対する懸念が生じている。これに対する具体的な対策として、平成18年6月、資源エネルギー庁から報告された「非鉄金属資源の安定供給確保に向けた戦略」において、①探鉱開発の推進、②リサイクルの推進、③代替材料の開発、④備蓄、等が整理され、現在それぞれにおける具体的な対策が進められている。

本研究開発は、この総合的な対策の一部として非鉄金属資源の代替材料及び使用量低減技術の確立を目的としている。

なお、平成18年3月28日に閣議決定された「第3期科学技術基本計画」では、「ナノテク・材料分野」を「重点推進4分野」の一つとして位置づけ、これに優先的に資源配分することとしている。本研究開発は、同分野に列挙されている「戦略重点科学技術」のうち「資源問題解決の決定打となる希少資源・不足資源代替材料革新技術」にあたるものであり、文部科学省の元素戦略プロジェクトと連携し基礎から実用化までの間隙のない支援体制を確立して行うもので、我が国の科学技術力の向上という観点からも極めて意義が高いものである。

(2) 研究開発の目標

最終目標では、以下希少金属元素の使用原単位（一製品当たり）について現状と比較して以下の低減が見込まれ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。また、製品の機能や製造コストは少なくとも現状と同等を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	最終目標年度
透明電極向けインジウム (In)	現状から50%以上低減	平成23年度末
希土類磁石向けジスプロシウム (Dy)	現状から30%以上低減	
希土類磁石向けネオジウム (Nd)	現状から100%低減(代替)	平成27年度末
超硬工具向けタングステン (W)	現状から30%以上低減	平成23年度末
排ガス浄化向け白金族 (Pt)	現状から50%以上低減	平成25年度末
精密研磨向けセリウム (Ce)	現状から30%以上低減	
蛍光体向けテルビウム・ユウロピウム (Tb・Eu)	現状から80%以上低減	
排ガス浄化向けセリウム (Ce)	現状から30%以上低減	平成23年度末

(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。なお、研究開発項目⑩については、委託者選定後に具体的に設定する。

[委託事業]

- ①透明電極向けインジウム使用量低減技術開発
- ②透明電極向けインジウム代替材料開発
- ③希土類磁石向けジスプロシウム使用量低減技術開発
- ④超硬工具向けタングステン使用量低減技術開発
- ⑤超硬工具向けタングステン代替材料開発
- ⑥排ガス浄化向け白金族使用量低減技術開発及び代替材料開発
- ⑦精密研磨向けセリウム使用量低減技術開発及び代替材料開発
- ⑧蛍光体向けテルビウム・ユウロピウム使用量低減技術開発及び代替材料開発
- ⑨Nd-Fe-B系磁石を代替する新規永久磁石及びイットリウム系複合材料の開発
- ⑩排ガス浄化向けセリウム使用量低減技術及び代替材料開発、透明電極向けインジウムを代替するグラフェンの開発

本研究開発項目は、実用化まで長期間を要するハイリスクな「基盤的技術」に対して、産学官の複数事業者が互いのノウハウ等を持ちより協調して実施する事業であり、委託事業として実施する。

2. 研究開発の実施方式

(1) 研究開発の実施体制

研究開発項目①～⑤は、経済産業省により、企業、民間研究機関、独立行政法人、大学等（委託先から再委託された研究開発実施者を含む）から公募によって研究開発実施者が決定され、共同研究契約等を締結する研究体が構築され、平成19年度より委託により実施されている。平成20年度より、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下、「NEDO」という。）が本事業を運営・管理するに当たっては、外部有識者から構成される技術評価委員会等を設置し、平成19年度の進捗状況を踏まえた事業内容・計画及び実施体制の妥当性についての審議に基づいた評価を行った上で委託して実施する。研究開発項目⑥～⑩はNEDOが単独ないし複数の原則、本邦の企業、大学等の研究機関（原則、国内に研究開発拠点を有していること。ただし、国外企業の特別な研究開発能力、研究施設等の活用あるいは国際標準獲得の観点からの国外企業との連携が必要な場合はこの限りではない。）から公募によって研究開発実施者を選定後、共同研究契約等を締結する研究体を構築し委託して実施する。

また、各研究体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、各研究体には研究開発責任者（テマリーダー）を置き、その下に研究者を可能な限り結集して効果的な研究開発を実施する。

(2) 研究開発の運営管理

研究開発全体の管理・執行に責任を有するNEDOは、経済産業省及び研究開発責任者と密接な関係を維持しつつ、プログラムの目的及び目標、並びに、本研究開発の目的及び目標に照らして適切な運営管理を実施する。具体的には、必要に応じて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、研究開発責任者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。

また、本研究開発プロジェクトは、文部科学省の元素戦略プロジェクトと研究開発推進にあたり、お互いの研究開発成果・課題等について議論する。さらに、得られた研究開発成果については、合同シンポジウム等により積極的に公開する。

3. 研究開発の実施期間

研究開発項目①～⑤については、平成20年度から平成23年度までの4年間とする。平成19年度に経済産業省が実施した「希少金属代替材料開発プロジェクト」事業について、平成20年度よりNEDOの事業として実施するものである。

研究開発項目⑥～⑧については、平成21年度から平成25年度までの5年間とする。

研究開発項目⑨-1及び⑨-2については、平成21年度から平成22年度までの約1年間とする。
研究開発項目⑩については、平成22年度から平成23年度までの約1年間とする。
研究開発項目⑨-3については、平成23年度から27年度までの5年間とする。

4. 評価に関する事項

NEDOは、技術的及び政策的観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義並びに将来の産業への波及効果等について、外部有識者による研究開発の評価として、研究開発項目①～⑤については、中間評価を平成21年度、事後評価を平成24年度に、研究開発項目⑥～⑧については、中間評価を平成23年度、事後評価を平成26年度に、研究開発項目⑨-1及び⑨-2については、事後評価を平成23年度に、研究開発項目⑩については、事後評価を平成24年度に、研究開発項目⑨-3については、中間評価を平成25年度、事後評価を平成28年度に実施する。また、中間評価結果を踏まえ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状況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) 研究開発成果の取扱い

①成果の普及

研究開発成果については、NEDO、実施者ともサンプル提供等普及に努めるものとする。

②知的基盤整備事業又は標準化等との連携

得られた研究開発の成果については、知的基盤整備事業又は標準化等との連携を図るため、必要に応じてデータベースへのデータの提供、標準案の提案等を積極的に行う。

③知的財産権の帰属

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、すべて委託先に帰属させることとする。

(2) 基本計画の変更

NEDOは、研究開発内容の妥当性を確保するため、社会・経済的状況、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、第三者の視点からの評価結果、研究開発費の確保状況、当該研究開発の進捗状況等を総合的に勘案し、達成目標、実施期間、研究開発体制等、基本計画の見直しを弾力的に行うものとする。

(3) 根拠法

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2号に基づき実施する。

(4) その他

本研究によって得られたあらゆる知的財産、また本研究の過程又は成果に基づき開発したプログラム、サンプル若しくは装置などの成果物について、本プロジェクト外（国内外）への供試・開示については、事前に研究開発責任者とNEDOに連絡する。その際に、NEDOが申請書の提出を求めた場合は、これに応じ速やかに提出する。

6. 基本計画の改訂履歴

(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、新鉱種追加により改訂。

(4) 平成21年12月

・研究開発項目⑥～⑧の委託者決定に伴う詳細目標と事業実施内容の確定による改訂。

・「明日の安心と成長のための緊急経済対策（平成21年度補正予算（第2号）」に係る研究開

発項目⑨の追加。

- (5) 平成22年3月、研究開発項目⑦-2 目標の細分化に伴い改訂。
- (6) 平成22年6月、採択条件等反映のため、研究開発項目⑨-1 および⑨-2 の最終目標等を改訂。
- (7) 平成22年12月、「円高・デフレ対応のための緊急総合経済対策（平成22年度補正予算（第1号）」に係る研究開発項目⑩の追加。
- (8) 平成23年7月
 - ・研究開発項目⑨-1 の後続テーマとして研究開発項目⑨-3 を追加

研究開発項目①「透明電極向けインジウム使用量低減技術開発」

1. 研究開発の必要性

現行のFPD用ITOターゲットは抵抗値、可視光領域での光透過性、良好なエッチング特性、アルカリ溶液中での安定性の観点から In_2O_3 -90wt%+ SnO_2 -10wt%の組成比が主に利用されている。したがって、ITO製造におけるIn原単位を40%以上低減するために、従来のITO組成の In_2O_3 量を40%以上低減しても従来同等の導電性、エッチング性を維持する新規組成の開発を行う必要がある。 SnO_2 成分が増加すると抵抗率の上昇(高抵抗化)、難エッチング等の課題が予想されるため、抵抗率の上昇を解決する手段として低電圧スパッタ技術の導入、第4元素の添加を実施する。また、難エッチングの課題には H_2O 添加法の導入と第4元素の添加等を実施する。また、その後大型ターゲットの作製と工業化技術の開発を行うためには、第一原理計算による組成の適正化とそれらを基にした小型装置による省In組成のITO膜の実験的立証が必要である。

また、In量の使用原単位を10%以上改善するため、インジウムの使用効率をほぼ100%に高めることができ、さらに真空装置を使わず、エッチング工程が不要でエネルギー削減が可能なITOナノインクを使用した直接基板に描画する方法を開発する。

2. 研究開発の具体的内容

(1)「スパッタリング法における透明電極向けインジウム使用量低減化技術開発」

第4元素を添加することにより、ITO中のIn量を削減する新規組成ITOの開発を行い、かつ別途薄膜化技術を開発し、従来のITO組成で現状の薄膜のトータル厚さを削減する。これらの研究開発によりITO中のIn使用原単位の40%以上の削減を目標とする。

1) 新規ターゲット組成並びにその大型ターゲット焼成技術の開発

(a) 新規ターゲット組成開発

第一原理計算プログラムにより、超大規模シミュレーションをおこない、安定構造、状態密度、電荷密度分布等の解析を行う。得られた結果を用い、新組成ITO薄膜をコンビナトリアル実験手法により作製し、低抵抗、エッチング性、光透過度、高屈折率を向上した新規ターゲットを開発する。

計算機を用いた第一原理計算による手法とコンビナトリアル手法を用いた実験的検証の組み合わせにより、効率的に新規組成の省In組成のITO薄膜の開発を行う。基本的に第4元素は、できるだけ資源的に問題がないものを実施することとする。

(b) 新規ターゲット組成のスパッタプロセスでの支援技術開発

当初、新組成が確定するまでは、 SnO_2 含有量を増やしたITOターゲット(SnO_2 含有量がMax. 50wt%)を作製し、基板上への成膜と薄膜評価を進める。第4元素を添加した新規組成を受け、本プロセスで薄膜測定を行い、プロセスの効果を明らかにする。

(c) 新規ターゲットの開発(新規組成ターゲットの工業化技術開発)

ターゲットの大型化の問題点として、割れ、反り、低密度化がある。これらを解決するために、新規組成ターゲットの工業化技術開発を行う。

2) 透明電極膜の薄膜化スパッタ技術開発

1)の第4添加元素含有新組成の検討をするのと並行して、薄膜化(現状のITO膜構成よりも薄い膜厚)スパッタ技術によるInの省資源化を目指す。

(2)「非スパッタリング法による透明電極向けインジウム使用量低減技術開発」

ITOナノインク塗布法の導入により、装置内壁付着とエッチングでロスしている分をなくし、従来ターゲットとして大量に循環していたInの削減を目指す。これらにより、製造工程で使用しているIn使用原単位の10%を削減する。

1) インクジェット法塗布用ナノインク開発

現在広く実施されている液相法により得られるITO粒子は一次粒子径10~50nmの凝集粒子で、

その粉末抵抗値は $\sim 0.1\Omega\text{cm}$ である。インクジェット法にて薄膜（膜厚 $< 200\text{nm}$ ）、低表面粗さ（ $R_a < 10\text{nm}$ ）の要求を達成するためにインク化工程で強力な分散処理を行うが、完全に分散することは出来ず、歩留まりも悪く、さらにITO粒子表面の酸化等により抵抗値が急激に上昇してしまうと言った問題がある。これを解決するために、ゾルゲル法を主流とした、現行法を改良又は全く新規に開発する新規単分散ITOナノ粒子合成法の開発を行い、インクジェット法に適した工業化技術開発を実施する。

2) 静電塗布用ナノインク開発

粒子合成では、大量生産の指標である、合成系の金属イオン濃度が 0.1mol/L 以上となる濃厚系での液相反応について、特に形態制御と単分散を実現するために、単分散粒子合成の一般的手法である、ゲルゾル法をさらに発展させて、ITO単分散ナノ粒子合成技術の完成を目指す。また、形態制御された比較的大型のナノ粒子（数十nm）とその大型ナノ粒子を結合させるための数nmの粒子を合成し、最密充填を実現するための分布とその分布を実現するための静電塗布法を開発する。

3) シミュレーション

ナノ粒子の形状及びその集合分布を様々に変化させる事が可能なプログラムを開発する。それを用いて、さまざまなナノ粒子形状についてのシミュレーションを行い、表面充填率とナノ粒子量との関係から、塗布剤の最適な充填率を決定する。得られた結果を実験にフィードバックする。

3. 達成目標

中間目標：平成21年度

(1) 新規ターゲット組成では、小型スパッタリングの実験装置でシート抵抗 $50\Omega/\text{sq}$ を実現する。

薄膜化スパッタ技術開発では、ITO膜厚を 100nm 以下で透過率 85% 以上（測定波長 550nm ）を達成する。

以上の結果からInの使用原単位を 40% 以上削減できることを実験的に立証する。

(2) ナノインクによる電導膜について、透過率 80% 以上、ヘイズ 2% 以下、表面抵抗率 $1000\Omega/\text{sq}$ 以下を達成可能な塗布法の開発を目標とする。

以上の結果からInの使用原単位を 6% 以上削減できることを実験的に立証する。

最終目標：平成23年度

(1) 新規ターゲット組成では、所定の諸特性（体積抵抗率 $200\sim 250\mu\Omega\text{cm}$ 、透過率は波長 550nm で 85% 以上、エッチング性、高屈折率）を満足する材料を開発する。また、新規組成ターゲット作製工程の最適化を行い高密度（ 99.5% 以上）ターゲットの工業化技術を完成させる。

薄膜化スパッタ技術開発では、スパッタリング法における大型FPD用のITO膜の厚さを両面合せて現状値 220nm から 100nm 以下とし、シート抵抗 $16\Omega/\text{sq}$ （ $160\mu\Omega\text{cm}$ ）以下、透過率 85% 以上（測定波長 550nm ）とする製造技術を開発することを目標値とする。

以上の技術を確認しInの使用原単位を 40% 以上削減できる工業化・製造技術を確認する。

(2) インクジェット法では、焼成温度 $200\sim 300^\circ\text{C}$ 、膜厚 $< 150\text{nm}$ （ $R_a < 10\text{nm}$ ）、抵抗値 $< 5 \times 10^{-3}\Omega\text{cm}$ 、透明性 $> 96\%$ （ $450\sim 800\text{nm}$ ）、耐擦性 $> 3\text{H}$ を満足するITOインクの確立を目指し、In使用原単位削減率 10% を達成可能なインクジェット用ナノインクの開発を目標とする。

静電塗布法では、塗布プロセスと条件の最適化により、焼成温度 200°C 以下で、膜厚 200nm 以下、透過率 90% 以上、ヘイズ 1% 以下、表面抵抗 $100\Omega/\text{sq}$ 以下を目指し、In使用原単位削減率 10% を達成可能な塗布法の開発を目標とする。

以上の技術を確認しInの使用原単位を 10% 以上削減できる工業化・製造技術を確認する。

上記(1)、(2)の目標達成により、現在のITO薄膜で使用されているIn使用原単位の 50% 削減を達成する。

研究開発項目②「透明電極向けインジウム代替材料開発」

1. 研究開発の必要性

現状では、フラットパネルディスプレイ用透明電極は、ほぼ全面的にマグネトロンスパッタ製膜にて蒸着されたITO透明導電膜が採用されている。酸化亜鉛系材料は、その優れた光学的・電気的特性によって、従来からITO代替材料として最も有力な候補の一つであるが、製膜の均一性、光学的・電気的特性、耐熱性、耐薬品性等の特性値について所定の目標値を満足する必要がある。

したがって、酸化亜鉛系材料を対象にITO代替材料として利用可能な材料開発を実施する。

2. 研究開発の具体的内容

(1) 酸化亜鉛系混晶材料による高性能透明電極用材料の開発

酸化亜鉛の構成元素を他の様々な元素で置換した新しい混晶半導体を開発し、酸化亜鉛系材料の電気的特性及び化学的安定性を、液晶ディスプレイ用透明電極材料として実用に耐え得る水準にまで向上させる。

(2) 酸化抑制型マグネトロンスパッタ製膜技術(材料技術を含む)の開発

1) 酸化抑制型マグネトロンスパッタ製膜技術の開発

- ・酸化抑制製膜条件の最適化
- ・製膜初期制御技術の開発

2) 低酸素含有 ZnO 系焼結体ターゲットの開発

- ・最適 ZnO 系焼結体ターゲットの開発

(3) 酸化亜鉛系液晶ディスプレイの開発

- 1) 「大型基板対応製膜技術の開発」として、大型基板（第8世代-2, 160mm × 2,460mm）に対応した製膜技術及び製膜装置の実現の見通しを得る。
- 2) 「透明導電膜部材（ZnO 薄膜）の開発」として、耐熱・耐湿性、耐薬品性などの実使用条件を満足する条件にて抵抗率変化10%以下を達成する。
- 3) 「大型液晶パネルの応用開発」として、大型液晶ディスプレイを試作し、ITO透明導電膜と同等以上の表示信頼性を確保しつつ、紫色領域・青色領域・緑色領域において、透過率最大2%増大を達成する。

3. 達成目標

中間目標：平成21年度

スパッタ技術開発及び不純物の共添加等の材料開発により、化学的安定性、均一性に優れる成膜技術を開発し、4インチレベルのパネル試作を実施する。

最終目標：平成23年度

抵抗率、透過率、耐熱性、耐湿性、耐薬品性等の透明電極として使用に耐えうる諸特性を満足し、酸化亜鉛系材料及びその成膜技術を確立する。酸化亜鉛系材料を例えば液晶ディスプレイのカラーフィルター側の透明電極に適用することにより、インジウム使用原単位の50%以上低減を達成する。

- ・抵抗率： $4.5 \times 10^{-4} \Omega \text{cm}$ 以下
- ・透過率：可視光平均透過率85%以上
- ・耐熱性：抵抗変化率 $\leq 10\%$ (230°C、大気中30分)
- ・耐湿性：抵抗変化率 $\leq 10\%$ (60°C、95%、500時間)
- ・耐薬品性：可視光透過率の変化率 $\leq 2\%$ (NaOH(5%)又はH₂SO₄(5%)室温10分浸漬)

研究開発項目③「希土類磁石向けジスプロシウム使用量低減技術開発」

1. 研究開発の必要性

現状の商用焼結磁石の保磁力は、理論値である異方性磁場（90kOe）の10%程度の値に留まっている。これはNd₂Fe₁₄B主相の結晶粒界で結晶磁気異方性が小さくなるウィークポイントが存在し、そこを起点として逆磁区が核生成するためと考えられている。よって、永久磁石の保磁力を上昇させるには、(1) 逆磁区の発生頻度を下げするために磁石粒子のサイズを小さくすること、及び(2) Nd₂Fe₁₄B相と粒界相との界面の状態を制御することが必要である。そこで、この2点を実現するための技術と指導原理を追求し、保磁力の向上を目指す。

2. 研究開発の具体的内容

(1) 「結晶粒の微細化・原料粉末最適化による保磁力向上技術の開発」

焼結磁石における結晶粒を数マイクロンサイズになるよう微細化することで、ジスプロシウム添加量を低減しても高保磁力が得られる焼結磁石の作製プロセスを確立する。

1) 次世代焼結磁石用原料合金の研究開発

結晶粒径と元素分布を制御することにより、高い保磁力が引き出せる原料合金を開発する。

2) 超微細結晶粒焼結磁石作製プロセスの開発

結晶粒径制御により高保磁力焼結磁石の作製プロセスを開発する。

3) 高保磁力磁石の焼結組織最適化に関する研究

Nd-rich相などの組織形態制御により焼結組織の最適化を図る。

(2) 「界面ナノ構造制御による保磁力向上技術の開発」

強磁場プロセス、薄膜プロセス、組織制御等を検討してNd-Fe-B系焼結磁石の界面ナノ構造を制御し、主相界面の格子整合性を向上させてジスプロシウム添加量の低減と高保磁力の実現の指針を得る。さらに、これらの指針をもとにジスプロシウムを磁石試料中で保磁力増加に効果的な部位に必要量のみを添加するジスプロシウム有効活用技術を開発し、ジスプロシウム添加量の削減を図る。

1) 強磁場を用いた界面構造制御による保磁力向上の研究

強磁場熱処理による粒界相の結晶配向を用いて、この界面構造をより均一にして高保磁力化を目指す。

2) 薄膜プロセスで制御した理想界面による保磁力向上の研究

理想的な磁石薄膜と粒界相物質を成膜し、磁化反転のモデル実験を行うことにより、保磁力のメカニズムを解明する。

3) 焼結磁石の組織制御による界面ナノ構造最適化の研究

ジスプロシウムの拡散制御技術の検討により結晶粒表面にジスプロシウムを優先偏析させる技術を開発する。

(3) 「界面構造解析と保磁力発現機構解明による指導原理の獲得」

Nd-Fe-B系焼結磁石の界面ナノ構造や磁化過程の詳細な解析をすることによって、現状の保磁力が異方性磁場（90kOe）の10%程度の値に留まっていること、従来の研究から結晶粒を小さくしても保磁力がある結晶粒径で急激に低減すること、などの理由を解明し、さらには計算科学を駆使することによって保磁力向上の指導原理を獲得する。得られた情報は上記項目(1)、(2)の製造プロセスへ還元する。

1) ナノ組織解析・原子レベル元素分析による界面構造評価

焼結磁石の粒界ナノ構造を原子レベルで解析し、粒界構造と保磁力の因果関係を解明する。

2) 中性子小角散乱法による平均界面構造評価と保磁力

中性子小角散乱測定により、保磁力の起源となる磁石内部の平均界面構造を明らかにする。

3) 微小結晶粒子集団における磁化反転機構と制御法の研究開発

磁化反転機構解析により保磁力の決定要因を解明する。

4) 希土類磁石の保磁力機構に関する理論研究

第一原理計算に基づく微視的立場から焼結磁石の保磁力の発現機構を明らかにする。

(4) 「自動車用磁石への応用」

自動車用磁石、特にハイブリッド自動車の駆動モータは、現在ジスプロシウム添加Nd-Fe-B系磁石

の大きな応用先である。本研究の遂行によって高保磁力高性能な Nd-Fe-B 系磁石を開発できれば、ジスプロシウム使用量の削減が最も効果的に実施できると考えられることから、例えば開発磁石の耐久性評価、モータ適用時の磁石の最適形状設計等といった当該分野への応用について検討を行う。得られた情報は、各製造プロセスへ還元するとともに更なる高性能化への指針とする。

3. 達成目標

中間目標：平成 21 年度

結晶粒径の微細化、強磁場プロセスによる界面ナノ構造制御技術等の開発により、ジスプロシウム使用量原単位 20%削減を達成する。

最終目標：平成 23 年度

下記の各項目について目標を達成し、ジスプロシウム使用原単位を 30%以上削減可能な技術を確立する。

(1) 結晶粒径 $2\mu\text{m}$ で元素濃度分布を最適化した原料合金、並びにジスプロシウムフリーで結晶粒径 $2\mu\text{m}$ 以下の焼結磁石、における量産化技術の確立。

(2) 強磁場プロセスやジスプロシウム有効活用技術の導入等によって、高保磁力化の実現 (10kOe 増加)。

(3) 内部又は界面の微細・平均構造と保磁力との相関や磁化反転機構を明らかにし、高保磁力省ジスプロシウム磁石開発における指導原理の確立。

(4) モータ出力密度 3 倍のための開発要素の明確化。

研究開発項目④「超硬工具向けタングステン使用量低減技術開発」

1. 研究開発の必要性

本研究開発では超硬工具（切削工具）のタングステン使用原単位を30%以上低減するため、切削工具の基材部分をタングステン使用量の少ない材料に置きかえる「硬質材料のハイブリッド化」、及び工具の刃先近傍や表面以外について炭窒化チタンを主成分とする「複合構造硬質材料化」を図るための技術開発を行う。

2. 研究開発の具体的内容

(1)「ハイブリッド切削工具の開発」

焼き入れ鋼用切削工具向けに、炭窒化チタン系硬質材料基材に切削チップの先端部として cBN（立方晶窒化ホウ素）を接合し、ロウ付け cBN 切削工具と同等の切削性能を達成すると同時に、接合部には 1000℃の耐熱性をもたせる。

1) 異種材料のソリッド接合技術及びインサート材料の開発

切削工具の切刃部に要求される特性を有する硬質材料と基材となる材料を接合する技術を開発する。

2) ハイブリッド切削工具の実用化技術の開発

工業化に対応するため、実用工具における被接合材及び基材の形状設計、被接合材と基材の高精度位置決め技術等を開発する。

(2)「複合構造硬質切削工具の開発」

一般鋼及び鋳鉄用切削工具向けに、複数の硬質材料粉末を用いて粉末複合化成形した3次元ブレーカ付きM級切削チップを開発し、超硬合金工具と同等の切削性能を達成する。

1) 多相組織硬質材料の開発

多成分からなる多相組織硬質材料の焼結技術等を開発し、その特性を明らかにして超硬合金工具の機能代替を達成する。

2) 複合構造硬質切削工具の実用化技術の開発

多相組織硬質材料に3次元ブレーカが形成可能な複合構造硬質切削工具の実用化技術を開発する。

3. 達成目標

中間目標：平成21年度

(1)「ハイブリッド切削工具の開発」

従来よりもタングステン使用原単位を20%以上低減した硬質基材を開発し、先端部 cBN との接合技術を開発する。

(2)「複合構造硬質切削工具の開発」

粉末複合化成形技術の開発により、タングステン使用原単位を15%以上低減する。

最終目標：平成23年度

下記の各項目について目標を達成し、超硬工具（切削工具）のタングステン使用原単位を30%以上低減する。

(1)「ハイブリッド切削工具の開発」

1) 焼き入れ鋼用 cBN 切削工具におけるタングステン使用原単位を40%削減する。

2) 焼き入れ鋼に対する高負荷連続切削試験でロウ付けチップと同等の切削性能を達成する。

(2)「複合構造硬質切削工具の開発」

1) 一般鋼又は鋳鉄用被覆超硬工具におけるタングステン使用原単位を30%削減する。

2) 3次元ブレーカつきM級精度の複合構造硬質工具による一般鋼の断続切削試験で、コーティングを有する超硬合金と同等の切削性能を達成する。

研究開発項目⑤「超硬工具向けタングステン代替材料開発」

1. 研究開発の必要性

本研究開発は、超硬工具（切削工具、耐摩耗工具）のタングステン使用原単位を30%以上低減するため、WC基超硬合金に代わる硬質材料として有望な炭窒化チタン（Ti(C,N)）基サーメットについて、新規サーメット基材の開発及び新規サーメットを基材とした新規コーティング技術の開発を行い、切削工具及び耐摩耗工具に適用するサーメット及びコーティング技術を開発する。

2. 研究開発の具体的内容

（1）「サーメット及びコーティングの基盤研究」

サーメットの解析技術及び設計技術の開発、及び新規サーメット材料を開発するとともに、新規コーティング技術を開発する。具体的には以下の3項目を実施する。

1) 「サーメットの解析及び設計技術の開発」

組織、特性及び焼結性などに関する基盤技術を確立する。

2) 「新規サーメット材料の開発」

サーメットの組織や焼結収縮をより均一化し材料特性を改良するために、原料粉末として従来の単純な混合粉末ではなく、あらかじめ固溶体化した粉末を用いてサーメットを製造し、組織や特性を評価する。

3) 「コーティング技術の開発」

サーメット基材上への安定したコーティングを可能とするために、コーティング時の加熱温度を低温化した新規CVDコーティング技術の開発を行う。

（2）「切削工具用サーメット及びコーティング技術の開発」

上記（1）の成果を活用して、切削工具としてスローアウェイ切削工具や軸物切削工具（穴あけドリル）用のサーメットを対象とし、強度、靱性、熱衝撃性等の材料特性の最適化、成形・焼結プロセス技術の確立、コーティング向け積層化・傾斜組成化技術の確立、切削工具向けコーティング技術の確立等をおこなう。開発したサーメット及びコーティングにより切削工具を作製し、これにより、鋼やアルミニウム合金等の総合的切削性能を達成する。

（3）「耐摩耗工具用サーメット及びコーティング技術の開発」

上記（1）の成果を活用して、耐摩耗工具として線引きダイス・プラグ等用の高硬度型サーメット及び製缶工具・圧粉金型等の高靱性型サーメットを対象とし、強度、靱性、熱衝撃性等の材料特性の最適化、サーメット大型部材の成形・焼結技術の確立、被研削性・放電加工性等の改良、耐摩耗工具向けコーティング技術の開発等をおこなう。開発したサーメット及びコーティングによりダイス・プラグ用及び金型用耐摩耗工具を作製し、これにより、ダイス・プラグ及び金型としての総合的耐摩耗工具性能を達成する。

3. 達成目標

中間目標：平成21年度

下記の各項目について技術を確立する。

- ・サーメットの組織形成シミュレーション技術
- ・新規固溶体粉末を用いたサーメット合成技術
- ・新規コーティング技術

最終目標：平成23年度

下記の各項目について目標を達成し、新規炭窒化チタン（Ti(C,N)）基サーメット材料を開発することで、WC基超硬工具（切削工具、耐摩耗工具）よりもタングステン使用原単位を30%以上低減する。

（1）「サーメット及びコーティングの基盤研究」

1) 「サーメットの解析及び設計技術の開発」

積層体焼結（共焼結）のシミュレーション技術の確立と耐熱衝撃性や高温強度の機構を解明する。さらに、組織形成と破壊メカニズムを解明する。また、成形体構造評価技術を確立し、最終的に設計に必要なデータベースを構築する。

2) 「新規サーメット材料の開発」

下記の特性値を満足する新規サーメット材料を開発する。

- ・抗折力：3GPa
- ・破壊靱性値：15MPa・m^{1/2}
- ・耐熱衝撃抵抗：75W・m^{-1/2}

3) 「コーティング技術の開発」

サーメット基材上への安定したコーティングを可能とするために、コーティング時の加熱温度を低温化（800℃）した新規CVDコーティング技術の開発を行う。

（2）「切削工具用サーメット及びコーティング技術の開発」

切削工具用サーメットの成形・焼結技術、傾斜組成化技術等を確立し、下記の特性値を達成する。

- ・破壊靱性値：13MPa・m^{1/2}
- ・熱伝導率：30W/m・K
- ・サーメット工具による鋼等の総合的切削性能

このことで、軽切削用スローアウェイ工具で約70%、穴明けドリル用（軸物）切削工具で約70%のタングステン使用原単位の低減を実現する。

（3）「耐摩耗工具用サーメット及びコーティング技術の開発」

耐摩耗工具用サーメットの成形・焼結技術、研削・放電加工技術等を確立し、下記の特性値を達成する。

- ・硬さHV \geq 1400 で破壊靱性 13MPa・m^{1/2} 以上の高硬度型サーメット
- ・硬さHV \geq 1200 で破壊靱性 15MPa・m^{1/2} 以上の高靱性型サーメット
- ・サーメット工具によるダイス及び金型の総合的耐摩耗工具性能

このことで、ダイス・プラグ用耐摩耗工具で100%、金型用耐摩耗工具で約94%のタングステン使用原単位の低減を実現する。

研究開発項目⑥-1「排ガス浄化向け白金族使用量低減技術開発及び代替材料開発」
(遷移元素による白金族代替技術及び白金族の凝集抑制技術を活用した白金族低減技術の開発)

1. 研究開発の必要性

白金族は、自動車排ガス触媒を中心とする各種触媒、電気電子機器等に用いられており、排ガス触媒向けを中心に世界的に需要が増加している。白金の新地金生産は年間約 210 t であり、その 90%以上を南アフリカとロシアが担っている。白金の国内需要はおよそ 36 t、うち 27 t が自動車触媒向けであるが、供給の 80%を南アフリカに依存している。一方、南アフリカにおいては、近年設備や安全上の問題による鉱山閉鎖、電力不足による操業停止など、供給懸念が顕在化している。

今後、世界的な自動車需要の増加、及び特に日本・欧州を中心としたディーゼル排ガス規制の強化により、排ガス触媒向け白金族の需要が拡大すると見込まれる白金生産の 90%を南アフリカとロシアが担っていることから、将来の排ガス触媒等の需要拡大に対する供給不足が発生し、わが国の産業において成長阻害の懸念がある。

本研究開発は、自動車排ガス触媒等の白金族使用原単位を 50%以上低減するため、以下の基盤技術及び製造技術を開発する。

2. 研究開発の概要

本プロジェクトは、ディーゼル車両の排気ガス浄化触媒中の白金族使用量を 50%以上低減するために、遷移元素による白金族代替技術及び白金族凝集抑制技術を軸として、白金族使用量を低減した酸化触媒 (DOC : Diesel Oxidation Catalyst)、リーンNO_xトラップ触媒 (LNT : Lean NO_x Trap Catalyst)、ディーゼルパーティキュレートフィルター (DPF : Diesel Particulate Filter) 用触媒を実現するとともに、プラズマによる触媒活性向上技術、酸化触媒と DPF 用触媒といった異なる触媒の機能統合化技術を組合せたディーゼル向け排ガス浄化触媒システムを実現化することを目的とする。

(1) 遷移元素による白金族代替に関する研究開発

遷移元素化合物の活性点の活性原理を明らかにするとともに、DOC、LNT、DPFに必要な機能を明確化し、遷移金属化合物を使った活性点候補を決定する。また、DOC、LNT、DPFに対し、白金族使用量を減らした時に不足する機能を明確化し、遷移金属に置き換えた時の助触媒など活性向上策を決定する。

(2) 白金族凝集抑制手段に関する研究開発

低温時の活性が高い白金、ロジウム、パラジウムの各最適粒子サイズ、最適担体を明確化する。また、耐久試験後に触媒活性の低下が小さい最適粒子サイズを保てる凝集 (シンタリング) 抑制手法を開発する。

(3) DPFの反応向上要素とその実現に関する研究開発

PM (パーティキュレート・マター) の反応モデルの決定、DPFの触媒担持モデルの構築と、DPFへの触媒担持位置の明確化を行う。また、DPFの触媒担持における制御因子、PMの酸化特性を明確化し、耐熱試験後に触媒特性が確保できる触媒担持位置を特定する。

(4) プラズマによる活性向上に関する研究開発

プラズマによる触媒の反応性向上原理の解明、触媒設計指針の明確化と触媒の改良、プラズマ反応を受けやすい触媒構造と組成の決定を行う。

(5) 排気触媒統合化に関する研究開発

現行の触媒システム (「DOC」+「LNT」+「DPF」の3つの触媒からなるシステム) の機能統合化 (「DOC+DPF」+「LNT」等からなるシステム) のために、DOC機能の明確化、PM浄化に対する課題の明確化、触媒システムの機能を統合化した時の課題を明らかにして、解決方法を確立し、システムの構成を決定する。

(6) 遷移元素化合物の実触媒化、量産化に関する研究開発

DOC、LNT、DPFそれぞれの触媒について、実触媒化、量産化技術を確立するために、使用量低減に対する課題の明確化と課題の解決方法の立案、耐久試験後 (触媒入口温度 700℃で 100 時間後) の特性が保たれる触媒仕様の明確化と仕様決定を行う。

3. 達成目標

ディーゼルエンジンの排ガス浄化向け触媒の白金族使用原単位を50%以上低減する基盤技術及び製造技術を開発することを目標とする。

中間目標：平成23年度

- (1) 遷移元素による白金族代替に関する研究開発
 - ・遷移元素酸化物によるTG測定法（TG：Transient Grating Method 過渡回折格子法）を開発する
 - ・DOC、LNT、DPF触媒用として触媒活性の向上策を決定し耐熱性向上技術の確立を行う
 - ・DOC、LNT、DPF触媒用として遷移元素活性点候補を3つ以上決定する
- (2) 白金族凝集抑制手段に関する研究開発
 - ・TGを用い低温活性に最適なPdの最適サイズ、最適担体を明確化する
 - ・Pt、Rhを使い最適な担体で耐久試験後の貴金属サイズを実現する
- (3) DPFの反応向上要素とその実現に関する研究開発
 - ・反応モデルの妥当性を検証し、PM反応モデルを決定する
 - ・DPFの反応性を向上させる触媒担持位置を明確にする
 - ・DPFの触媒担持における重要な制御因子を明らかにする
 - ・PMの酸化特性を明らかにする
- (4) プラズマによる活性向上に関する研究開発
 - ・触媒に必要な機能を列挙し、試作・評価により触媒設計指針を明確にする
 - ・常温にて酸素共存下で十分に機能するNO_x分解触媒を絞り込む
 - ・ハニカム、繊維等の構造やアルミナ等材料組成を検討し、プラズマに効果的な支持体構造と組成を選定する
- (5) 排気触媒統合化に関する研究開発
 - ・白金族、白金族代替を用いた統合化した触媒システム全体での課題を明らかにする
 - ・解決方策の具体案の検証を行い、耐久試験前で白金族使用量を85%低減可能な統合化システムを決定する
- (6) 遷移元素化合物の実触媒化、量産化に関する研究開発
 - ・耐久試験前において、DOCの白金族使用量60%低減を可能とする触媒仕様を決定する
 - ・耐久試験前において、LNTの白金族使用量75%低減を可能とする触媒仕様を決定する
 - ・耐久試験前において、DPFの白金族使用量65%低減を可能とする触媒仕様を決定する

最終目標：平成25年度

- (1) 現行の触媒システム（「DOC」＋「LNT」＋「DPF」の3つの触媒からなるシステム）について、平成21年10月に施行される排出ガス規制（ポスト新長期対応ディーゼル排気ガス基準）をクリアした、耐久試験後の触媒特性が確保できる触媒仕様を決定する。
 - ・ディーゼルシステム全体：白金族使用量50%以上低減（自主目標70%低減）
 - ・DOC単体：白金族使用量50%以上低減（自主目標60%低減）
 - ・LNT単体：白金族使用量50%以上低減（自主目標75%低減）
 - ・DPF単体：白金族使用量50%以上低減（自主目標65%低減）
- (2) 触媒機能を統合化した触媒システム（「DOC＋DPF」＋「LNT」等からなるシステム）について、平成21年10月に施行される排出ガス規制（ポスト新長期対応ディーゼル排気ガス基準）をクリアした、耐久試験後の触媒特性が確保できる触媒仕様を決定する。
 - ・ディーゼルシステム全体：白金族使用量50%以上低減（自主目標85%低減）

研究開発項目⑥-2「排ガス浄化向け白金族使用量低減技術開発及び代替材料開発」
(ディーゼル排ガス浄化触媒の白金族使用量低減化技術の開発)

1. 研究開発の必要性

白金族は、自動車排ガス触媒を中心とする各種触媒、電気電子機器等に用いられており、排ガス触媒向けを中心に世界的に需要が増加している。白金の新地金生産は年間約 210 t であり、その 90%以上を南アフリカとロシアが担っている。白金の国内需要はおよそ 36 t、うち 27 t が自動車触媒向けであるが、供給の 80%を南アフリカに依存している。一方、南アフリカにおいては、近年設備や安全上の問題による鉱山閉鎖、電力不足による操業停止など、供給懸念が顕在化している。

今後、世界的な自動車需要の増加、及び特に日本・欧州を中心としたディーゼル排ガス規制の強化により、排ガス触媒向け白金族の需要が拡大すると見込まれる白金生産の 90%を南アフリカとロシアが担っていることから、将来の排ガス触媒等の需要拡大に対する供給不足が発生し、わが国の産業において成長阻害の懸念がある。

本研究開発は、自動車排ガス触媒等の白金族使用原単位を 50%以上低減するため、以下の基盤技術及び製造技術を開発する。

2. 研究開発の概要

本プロジェクトは、ディーゼル排ガス浄化触媒システムにおいて、大量の白金族が使用されている酸化触媒 (DOC : Diesel Oxidation Catalyst) と触媒付ディーゼルパーティキュレートフィルター (DPF : Diesel Particulate Filter) を対象とし、白金族金属の使用量を 50%以上低減するための技術開発を実施する。基盤からプロトタイプ触媒製造までの必要な技術をシームレスにバランス良く取り組むことにより、大型ディーゼル車を主たる対象として白金族金属の使用量を低減し、かつ高い浄化性能を持つディーゼル排ガス浄化触媒システムの開発を目的とする。

(1) 白金族使用量を低減したディーゼル酸化触媒の開発

ディーゼル酸化触媒を対象として、以下の検討を相互補完的に実施し、HC/CO浄化性能、軽油燃焼性能、NO酸化性能を有する高活性・高耐久性触媒を開発する。

1) 触媒活性種の探索と高度設計

触媒活性種である白金族金属と担体、白金族金属間および添加物との相互作用を制御することにより、協奏的な効果により高い活性・安定性を有する触媒活性種組成や構造を明らかにする。

2) 触媒種複合化技術の開発

触媒性能を最大限に発現させるために、複数の触媒活性種および触媒担体をナノスケールで精密に合成し、それらを複合化する触媒調製技術の開発研究を行う。

3) 担体の設計と高度化

白金粒子の凝集の抑制と燃料や潤滑油ミストによる細孔閉塞を回避できる細孔構造を階層的に多元構造化した、硫黄分に対する化学的耐性を有する担体の開発を行う。

4) 要素技術統合による実用候補触媒材料の抽出

各要素技術を相互補完ならびに技術統合することにより、白金族使用量低減につながる触媒設計・合成技術を確立し、高性能な実用候補触媒の抽出を行う。

(2) 白金族代替DPF用触媒の開発

触媒付ディーゼルパーティキュレートフィルターを対象として、粒子状物質を直接酸化できる白金族代替触媒の開発を行う。具体的には、これまで高いスス燃焼性能を有することが見出されている銀触媒の実用条件における活性を向上させ、白金触媒の活性へ近づけることで白金族代替銀触媒を開発する。また、銀触媒のスス燃焼作用機構を解明するためのキャラクタリゼーションを実施する。

(3) 触媒の部材化技術とシステム構築

項目(1)および(2)で開発された新触媒材料について以下の検討を実施し、部材化の観点から白金族金属の使用効率向上を図る。

1) ハニカム基材へのコート技術の最適化

多層化、機能分離あるいは機能傾斜コート技術により、白金族使用量を低減した高性能新規酸化触媒及び高性能の白金族代替DPF触媒を開発する。

2) 触媒システム構築

開発した酸化触媒及び触媒付DPFの実用性評価を実施し、これらを白金族低減という観点で最も効率的に組み合わせる排ガス処理触媒システムの設計を行う。

(4) 実用触媒製造技術の確立

項目(1)～(3)で得られた成果を統合し、実用化のための開発として以下の検討を実施し、プロトタイプ触媒の試作と評価を行い、実用化の目途をつける。

1) 触媒の改良

確立した各要素技術のブラッシュアップを図り、抽出した有望な実用候補触媒群の実用性能改良を実施する。

2) 触媒大量調製技術の開発

プロトタイプ触媒の試作に向けて有望な実用候補触媒を大量に調製するための技術開発を行う。

3) プロトタイプ触媒の試作・評価

実機サイズのハニカム及びDPFにコーティングした触媒を試作し、実機を用いたベンチ評価を行う。

3. 達成目標

ディーゼルエンジンの排ガス浄化向け触媒の白金族使用原単位を50%以上低減する基盤技術及び製造技術を開発することを目標とする。

中間目標：平成23年度

(1) 白金族使用量を低減したディーゼル酸化触媒の開発

・活性種・複合化・担体高度化技術：活性・安定性が高く、実用的な反応条件の変動にも対応できる触媒活性種を開発する。複合ナノ粒子を担体に固定化する技術を開発する。担体の長期性能改良の指針を得るとともに、触媒活性種を効果的に担持する技術を開発する。

・担体設計実用化技術：担体用粉末粒子の試作規模をパイロットレベルに高めて実証試験を行うと共に、実排ガス試験用の担体用粉末を提供する。

・触媒機能高度化技術：解明された触媒活性の制御因子に基づいた白金族使用量低減につながる触媒設計指針を提案する。

・複合ナノ粒子調製技術：解明された触媒成分金属の複合化に関する知見に基づき、白金族使用量低減につながる触媒設計指針を提案する。

・実用候補触媒の抽出：以上の技術に基づき、模擬排ガスを用いた条件で白金族使用量を従来より40%低減した酸化触媒を開発する。

(2) 白金族代替DPF用触媒の開発

・非白金族系DPF用触媒のスス燃焼温度400℃以下を達成し、白金族使用量を40%低減したDPF触媒を開発する。

(3) 触媒の部材化技術とシステム構築

・従来と比較して白金族使用量を10%低減できる機能分離コート技術を開発するとともに、各研究項目を総合した実用的なディーゼル排ガス触媒システムを提案する。

最終目標：平成25年度

(1) 実用触媒製造技術の確立

平成21年10月に施行される排出ガス規制(ポスト新長期対応ディーゼル排気ガス基準)をクリアし、白金族使用量を50%以上低減した触媒システムを開発する。

・750℃、50時間の耐久に耐えるディーゼル酸化触媒を開発する。

・800℃、50時間の耐久に耐えるDPF用触媒を開発する。

・プロトタイプ触媒の試作に向けて有望な実用候補触媒を大量に調製するための技術を確立する。

・開発した触媒について、実機サイズのハニカムとDPFを用いた触媒システムでトラックエンジンを用いたベンチ評価を行い、課題を確認する。この課題を解決し、実用性をもった触媒システムを開発する。

研究開発項目⑦-1「精密研磨向けセリウム使用量低減技術開発及び代替材料開発」
(代替砥粒及び革新的研磨技術を活用した精密研磨向けセリウム低減技術の開発)

1. 研究開発の必要性

セリウムは、フラットパネルディスプレイのパネルガラス、パソコン用ハードディスクドライブ内のガラスディスクの研磨材として用いられている。世界最大のレアアース供給国である中国からの輸出統計によれば、わが国は世界最大のセリウム消費国である(内需データが不明な中国を除く)。わが国におけるセリウム需要の過半(5割以上)は、研磨材向けの需要によって占められており、その消費量は平成19年現在9,000t(酸化物換算)ほどと推計されている。

今後、テレビのフラット化進行などにより、全世界でフラットパネルディスプレイの主要用途である薄型テレビの生産拡大が見込まれること、また新興国等におけるIT化進行などによりハードディスクドライブの主要用途であるパソコンの生産拡大が見込まれることなどから研磨材料向けセリウムの需要も拡大するものと思われる。

希土類元素(レアアース)であるセリウムは、全世界における供給の9割強を中国が担っていることから、将来の研磨材料等の需要拡大に対する供給不足が発生し、わが国の産業において成長阻害の懸念がある。

本研究開発は、研磨材料等のセリウム使用原単位を30%以上低減するため、以下の基盤技術及び製造技術を開発する。

2. 研究開発の概要

本プロジェクトは、精密研磨向けセリウム使用原単位を30%以上低減するために、代替砥粒の要求特性解明と代替砥粒の開発、革新的研磨技術を活用した研磨要素技術と研磨プロセス技術開発を行うことを目的とする。財団法人三重県産業支援センター高度部材イノベーションセンター(AMIC)に集中研究室を設置して研究開発を実施する。

(1) 研磨メカニズムの解明と代替砥粒の設計

量子分子動力学シミュレーションと実験による研磨メカニズムの解明を行うことで、研磨に対する詳細なメカニズム解明を迅速に進めるとともに、精密な代替砥粒の設計を実現する。

(2) 代替砥粒の研究開発

ペロブスカイト複合酸化物と既存砥粒改良型酸化物の両開発を迅速に行い有用な代替砥粒を得る。

(3) 革新的な遊離砥粒研磨メカニズムに基づく酸化セリウム使用量削減要素技術開発

フェムト秒レーザーなどを使用したガラス研磨前処理技術の確立と砥粒による研磨速度向上技術の確立、酸化セリウム砥粒使用量削減遊離砥粒研磨技術を確立するために電界砥粒制御技術・トライボケミカル研磨技術の開発、ラジカル環境場を考える革新的融合研磨技術とその開発、研磨副資材の研究開発を実施することにより、酸化セリウム使用量を削減する革新的な研磨メカニズムに基づく精密研磨の要素技術を開発する。

(4) 革新的オングストロームオーダー表面創製技術の開発

(1)～(3)の研究開発を統合し、フラットパネルディスプレイのパネルガラス向け電界砥粒制御技術融合研磨技術を導入する片面大型迅速精密研磨の開発、及びハードディスクドライブ向けガラスディスク用両面超精密研磨技術の開発並びに省酸化セリウム遊離砥粒研磨技術を確立するための電界砥粒制御技術融合研磨技術の確立を行う。

3. 達成目標

精密研磨向けセリウムの使用原単位を30%以上低減する基盤技術及び製造技術を開発することを目標とする。

中間目標：平成23年度

(1) 研磨メカニズムの解明と代替砥粒の設計

- 量子分子動力学シミュレーションによる酸化セリウムによる研磨プロセスの電子論的メカニズムの解明及び、既存砥粒と単純ペロブスカイト酸化物をモデル材とした研磨メカニズムの解析によるモデル材の組成・構造と研磨特性の関連性を明らかにする。

(2) 代替砥粒の研究開発

- 既存砥粒の研磨性能の把握・改良及び、複合酸化物を用いた代替砥粒構築プロセスの開発に

- より、ラボレベルで酸化セリウム使用量の5%の代替を達成する。
- (3) 革新的な遊離砥粒研磨メカニズムに基づく酸化セリウム使用量削減要素技術開発
 - ・電界配置制御された砥粒とガラス試料面における摩擦摩耗による化学反応を援用する研磨技術の創出及びガラス基板と砥粒もしくはその分散媒が活発なラジカル反応場を醸成あるいはフェムト秒レーザーなどによるガラスの前処理の導入検討し、革新的な研磨技術を組み合わせた高度な精密研磨要素技術として従来研磨効率の30%向上を達成する。
 - (4) 革新的オングストロームオーダー表面創製技術
 - ・要素技術を、高速電界トライボ片面研磨技術及び革新的な前処理技術を導入する両面研磨技術に適応することにより、ラボレベルで酸化セリウム使用量を10%削減する精密研磨システム技術を実験的に確立する。

最終目標：平成25年度

- (1) 研磨メカニズムの解明と代替砥粒の設計
 - ・研磨プロセスシミュレータとコンビナトリアル計算化学手法を融合による酸化セリウム代替砥粒の理論的最適化及び、既存砥粒と単純ペロブスカイト酸化物をモデル材とした研磨メカニズムの解析による材料特性とその特性が研磨に関与する機構を明らかにする。
- (2) 代替砥粒の研究開発
 - ・代替砥粒と研磨パットの最適化及び、複合酸化物を用いた代替砥粒の開発により、ラボレベルで酸化セリウム使用量の10%代替を達成する。
- (3) 革新的な遊離砥粒研磨メカニズムに基づく酸化セリウム使用量削減要素技術開発
 - ・酸化セリウム代替砥粒で構成したスラリーによる高効率な研磨要素技術開発及びガラス基板表面にフェムト秒レーザーやラジカル場を醸成しつつ研磨を試行し、要素技術として従来研磨効率の40%向上を達成する。
- (4) 革新的オングストロームオーダー表面創製技術
 - ・要素技術開発の成果を、高速電界トライボ片面研磨技術及び革新的な前処理技術を導入する両面研磨技術に適応し、最適化することで、ラボレベルで酸化セリウム使用量を20%削減する精密研磨システム技術を開発する。

研究開発項目⑦-2「精密研磨向けセリウム使用量低減技術開発及び代替材料開発」
(4 B O D Y 研磨技術の概念を活用したセリウム使用量低減技術の開発)

1. 研究開発の必要性

セリウムは、フラットパネルディスプレイのパネルガラス、パソコン用ハードディスクドライブ内のガラスディスクの研磨材として用いられている。世界最大のレアアース供給国である中国からの輸出統計によれば、わが国は世界最大のセリウム消費国である(内需データが不明な中国を除く)。わが国におけるセリウム需要の過半(5割以上)は、研磨材向けの需要によって占められており、その消費量は平成19年現在9,000t(酸化物換算)ほどと推計されている。

今後、テレビのフラット化進行などにより、全世界でフラットパネルディスプレイの主要用途である薄型テレビの生産拡大が見込まれること、また新興国等におけるIT化進行などによりハードディスクドライブの主要用途であるパソコンの生産拡大が見込まれることなどから研磨材料向けセリウムの需要も拡大するものと思われる。

希土類元素(レアアース)であるセリウムは、全世界における供給の9割強を中国が担っていることから、将来の研磨材料等の需要拡大に対する供給不足が発生し、わが国の産業において成長阻害の懸念がある。

本研究開発は、研磨材料等のセリウム使用原単位を30%以上低減するため、以下の基盤技術及び製造技術を開発する。

2. 研究開発の概要

本プロジェクトは精密研磨における酸化セリウムの使用量を30%以上低減するため、(a)従来と同等以上の研磨特性を有し酸化セリウムの成分比を30%削減した研磨材を開発すること、および(b)従来と同等の酸化セリウムの使用量で研磨能率を40%以上向上することを目指す。従来の遊離砥粒研磨技術では研磨能率が向上すると、それに呼応して仕上げ面粗さも悪化する。これに対して新しい研磨技術である4 B O D Y 研磨技術の複合粒子研磨法ではこうしたトレードオフの関係が打破され、高い研磨能率と優れた仕上げ面粗さをともに達成することができる。こうした観点から4 B O D Y 研磨技術の4つの要素である、砥粒、メディア粒子、工具(研磨パッド)、プロセス技術に注目し、それぞれに関した開発を実施することで総合的にガラス質工作物の精密研磨における酸化セリウムの使用量低減に関する基盤技術の開発を行うことを目的とする。

(1) 複合砥粒の研究開発

酸化セリウムの成分比を30%以上削減し、従来研磨と同等以上の研磨特性を達成する無機複合砥粒を開発する。その条件を満足する無機複合砥粒の構造や成分、化学的表面特性、幾何学的特徴を見出す研究開発を実施する。また、コア部に有機物や空孔、シェル部に酸化セリウム(あるいは代替酸化物)を配置したコアシェル構造を有し、かつ従来研磨と同等以上の研磨特性を達成する有機無機複合砥粒を開発する。この際、最適な有機物の材質や機械的特性、コア部の比重等を探索する研究開発を実施する。

(2) メディア粒子を用いた研磨技術の研究開発

研磨能率と仕上げ面粗さなど従来研磨のトレードオフの関係を打破し、従来研磨と同等以上の仕上げ面粗さで高研磨能率を達成するため、加工域に砥粒、工具(研磨パッド)、工作物、メディア粒子の4種類の固体(4 B O D Y)が存在する立命館大学谷が新たな概念として提案した複合粒子研磨技術の概念を適用し、その4番目の要素であるメディア粒子について、最適の物質を探索する研究開発を実施する。メディア粒子としては親水性無機粒子と親水化処理を施した有機粒子の適用を検討し、最適の親水化処理についても検討する。

(3) 研磨特性を向上させる研磨パッドの研究開発

化学的作用を活性化し研磨能率を高める可能性のある新しい素材からなる研磨パッドに関する研究開発、およびフラットパネルディスプレイ基板のように大型工作物に関しても工作物中央部の加工域へのスラリーの侵入を容易にし、工作物全面にわたって高能率に均質な研磨を実現する新しい構造を持った研磨パッドに関する研究開発を実施する。この際、研磨パッドに含有させる物質の作用メカニズムの明確化、工具に要求される物理的因子を明確化し、その物質の材質や幾何学的特性を最適化する。

(4) プロセス技術の研究開発

水和膜の生成機能が高い軟質ガラス質工作物に対して全く砥粒を使用しない加工技術としてパッドエッチング法の適用を検討するための研究開発、および水和膜の生成機能がきわめて低い硬質の水晶に対して水晶独自の特性である圧電効果を利用し研磨中に共振状態を実現して研磨能率を高める技術に関する研究開発を実施する。本研究項目ではそれぞれの装置開発と本技術に適した研磨パッドの開発およびプロセス技術の確立を目指す。

3. 達成目標

精密研磨向けセリウムの使用原単位を30%以上低減する基盤技術及び製造技術を開発することを目標とする。

中間目標：平成23年度

(1) 複合砥粒の研究開発

1) 無機複合砥粒の開発

- ・酸化セリウムの成分割合を30%以上減じ、代表的なガラス素材であるソーダガラスに対して従来の酸化セリウム砥粒と同等の研磨特性(研磨能率と仕上げ面粗さの比が同一)を実現する無機複合砥粒を見出す。

2) 有機無機複合砥粒の開発

- ・代表的なガラス素材であるソーダガラスに対して従来の酸化セリウム砥粒の研磨特性(研磨能率と仕上げ面粗さの比)の1.4倍以上の研磨特性を実現する有機無機複合砥粒を見出し、サンプルが提供できる状態にする。

(2) メディア粒子を用いた研磨技術の研究開発

1) 有機メディア粒子を用いた研磨技術の研究開発

- ・代表的なガラス素材であるソーダガラスに対して従来の酸化セリウム砥粒の研磨特性(研磨能率と仕上げ面粗さの比)の1.2倍の研磨特性を実現する有機メディア粒子を見出し、サンプルが提供できる状態にする。

2) 無機メディア粒子を用いた研磨技術の研究開発

- ・代表的なガラス素材であるソーダガラスに対して従来の酸化セリウム砥粒の研磨特性(研磨能率と仕上げ面粗さの比)の1.4倍の研磨特性を実現する無機メディア粒子を見出し、サンプルが提供できる状態にする。

(3) 研磨特性を向上させる研磨パッドの研究開発

1) 多孔質熱硬化性樹脂研磨パッドの研究開発

- ・代表的なガラス素材であるソーダガラスに対して従来の多孔質ウレタン研磨パッドあるいはセリアパッドと比較して、1.4倍以上の研磨特性(研磨能率と仕上げ面粗さの比)を実現する多孔質研磨パッドを見出し、サンプルが提供できる状態にする。

2) 隙間調整型研磨パッドの研究開発

- ・直径200mmのソーダガラスの工作物に対してうねりを発生させることなく均質に研磨することが可能な研磨パッドを見出し、サンプルが提供できる状態にする。

(4) プロセス技術の研究開発

1) パッドエッチング技術の研究開発

- ・代表的なガラス素材であるソーダガラスに対して従来の酸化セリウムを用いた研磨の研磨特性(研磨能率と仕上げ面粗さの比)と同等の研磨特性を実現するパッドエッチング技術を確立する。

2) 共振研磨技術の研究開発

- ・水晶の研磨特性(研磨能率と仕上げ面粗さの比)を従来の1.1倍以上にする研磨技術を実現する。

最終目標：平成25年度

(1) セリウム使用量低減に寄与する複合砥粒の開発

- ・酸化セリウム使用量低減率30%の無機複合砥粒を開発する
- ・酸化セリウム使用量低減率30%の有機無機複合砥粒を開発する

(2) セリウム使用量低減に寄与する複合粒子研磨法のメディア粒子の開発

- ・研磨能率40%以上向上できる有機メディア粒子を開発する
- ・研磨能率40%以上向上できる無機メディア粒子を開発する

(3) セリウム使用量低減に寄与する研磨パッドの開発

- ・研磨能率40%以上向上できる研磨パッドを開発する

- ・大型工作物の均一研磨を実現する
- (4) セリウム使用量低減に寄与するプロセス技術の開発
 - ・軟質工作物に対して砥粒フリーの研磨技術を開発する
 - ・水晶の研磨能率を20%以上向上する

研究開発項目⑧「蛍光体向けテルビウム・ユウロピウム使用量低減技術開発及び代替材料開発」
(高速合成・評価法による蛍光ランプ用蛍光体向け Tb、Eu 低減技術の開発)

1. 研究開発の必要性

テルビウムは、照明用三波長ランプ（蛍光灯）や液晶テレビのバックライトの蛍光体（緑色蛍光体の付活体）として用いられている。ユウロピウムも同様に照明用三波長ランプや液晶テレビのバックライト用蛍光体（赤色蛍光体の付活体）として用いられている。世界最大のレアアース供給国である中国からの輸出統計によれば、わが国は世界最大のテルビウム、ユウロピウム消費国である（内需データが不明な中国を除く）。わが国におけるテルビウム需要の過半（7～8割）は蛍光粉向けの需要によって占められており、その消費量は平成19年現在100t（酸化物換算）ほどと推計されている。また、ユウロピウム需要のほぼ全量は蛍光粉向けの需要によって占められており、その消費量は平成19年現在70t（酸化物換算）ほどと推計されている。

今後、地球温暖化対策及び省エネルギー対策の進展を受けた白熱電灯から蛍光灯への切替拡大により、全世界で照明用三波長ランプの生産拡大が見込まれること、またテレビのフラット化進行などにより、全世界で液晶テレビのバックライトの生産拡大が見込まれることなどから蛍光粉向けテルビウム・ユウロピウムの需要も拡大するものと思われる。

希土類元素（レアアース）であるテルビウム・ユウロピウムは、全世界における供給の9割強を中国が担っていることから、将来の蛍光粉等の需要拡大に対する供給不足が発生し、わが国の産業において成長阻害の懸念がある。

本研究開発は、蛍光灯等のテルビウム・ユウロピウム使用原単位を80%以上低減するため、以下の基盤技術及び製造技術を開発する。

2. 研究開発の概要

本プロジェクトは、蛍光ランプの蛍光体に含まれる Tb、Eu の使用量を80%以上低減するために蛍光ランプ用の材料及び新規製造プロセスの開発を行う。最新の高速理論計算手法、材料コンビナトリアルケミストリを用いて Tb、Eu 低減型蛍光体の開発、ランプの光利用効率を高めるガラス部材の開発を行う。また、これらの材料のランプシステムの適合性を高速で評価する基盤技術を確認する。製造プロセスとしては、製造工程の低温化技術の開発、蛍光体種別分離再利用技術の開発を行う。

(1) 蛍光体の Tb、Eu 使用量低減技術の開発

本項目では、高速量子化学計算による組成設計指針を利用しつつ、融解合成および粉体流動合成コンビナトリアルケミストリという蛍光体に適したコンビナトリアル合成を用いて、実用的なレベルの発光効率を持ち Tb、Eu の使用を30%低減した新規蛍光体、熱・光照射に対して安定な希土類代替蛍光体を見出す。また、これらの新規蛍光体の量産技術の開発を行う。

(2) ランプ部材の開発

本項目では、ランプ中の保護膜部材として使用する発光シリカガラス粉末等の開発とランプ中で発生した可視光を効率よく外部に取り出すためのガラス管の表面処理技術の開発を行う。これらによってランプ光束を向上させ、Tb、Euの使用を30%以上低減する。また、開発されたガラスの量産方法について検討し、適切な量産方法について目処をつける。

(3) ランプシステムにおける最適化・蛍光体省使用製造技術の開発

本項目では項目(1)及び(2)で開発された材料についてランプでの適合性を高速で評価する技術を開発することで材料開発を加速する。また、開発された部材の光学的特性等をシミュレーション技術によって光利用効率等を最適化し、ランプ試作を行い、最終的な目標である蛍光ランプにおける Tb、Eu の使用量を低減する。また製造工程における蛍光体のロスをも20%以上低減するために、蛍光体塗布プロセスの低温化と蛍光体種別分離再利用技術の開発を行う。

3. 達成目標

蛍光体向け Tb、Eu の使用原単位を現状から80%以上低減する基盤技術及び製造技術を開発することを目標とする。

中間目標：平成23年度

(1) 蛍光体の Tb、Eu 使用量低減技術の開発

- ・ X線構造解析シミュレーターの開発による蛍光体構造の決定、高速化量子化学計算を利用して蛍光体の発光効率を予測するまでの手法を確立し、少なくとも一つ実証例を示す。
 - ・ ランプでの適合性、量産性に問題のない Tb、Eu の使用を 20% 低減できる蛍光体の組み合わせを提示する。
 - ・ 蛍光体の励起発光メカニズム、劣化メカニズムの組成依存性を明らかにする。
この見出された蛍光体の量産技術について目途をつける。
- (2) ランプ部材の開発
- ・ 従来のガラス・蛍光体と組み合わせて 15% 以上高い光束を実現できるシリカ皮膜を開発する。
 - ・ 全方位光に対して従来のガラス管より 10% 以上の取り出し効率を有するガラスを開発する。
量産化の方法について目途をつける。
- (3) ランプシステムにおける最適化・蛍光体省使用製造技術の開発
- ・ 蛍光体等の高速評価法を実際の材料に適用し、改良した上で方法論として確立する。
 - ・ 開発された材料を用いて実ランプ試作を行い性能試験を行い最終目標に向けての問題点を明確にする。
 - ・ 各材料の光束向上への寄与を定量的に明らかにする。
 - ・ ハロリン酸と 3 波長蛍光体の分離が可能になっていること。
 - ・ 100℃ 程度低温化できるプロセス技術を開発する。また新材料に適用する場合の指針を得る。
- (1) ~ (3) で開発された技術をあわせて Tb、Eu の使用量を 45% 以上低減することを目標とする。

最終目標：平成 25 年度

- (1) 蛍光体の Tb、Eu 使用量低減技術の開発
- ・ ランプでの適合性、量産性に問題のない Tb、Eu の使用を 30% 以上低減できる蛍光体の組み合わせを提示する。
 - ・ この蛍光体の量産技術を確立する。
- (2) ランプ部材の開発
- ・ 従来のガラス・蛍光体と組み合わせて 20% 以上高い光束が得られるシリカ保護膜を開発する。
 - ・ 全方位光に対して従来のガラス管より 10% 以上の取り出し効率を有するガラスを開発する。
 - ・ このガラス部材の量産方法について適切な方法を確立する。
- (3) ランプシステムにおける最適化・蛍光体省使用製造技術の開発
- ・ ランプ構成の最適化により Tb、Eu の使用を 5% 低減できる蛍光体の使用量低減技術を開発する。
 - ・ ランプ製造工場内で現在廃棄されている蛍光体が再利用できる技術を開発し、10% 以上の蛍光体の使用量を低減する。
 - ・ ランプ製造プロセスの改善により、蛍光体のロスを 10% 程度改善する。

最終的には細管ランプなどの技術を併用し、(1) ~ (3) で開発された技術をあわせて従来のものより製造時の Tb、Eu の使用量を 80% 以上低減することが可能なランプを提示する。

研究開発項目⑨-1「Nd-Fe-B系磁石を代替する新規永久磁石及びイットリウム系複合材料の開発」
(Nd-Fe-B系磁石を代替する新規永久磁石の研究)

1. 研究開発の必要性

我が国の低炭素社会実現に必要な電気自動車等の製品においては焼結永久磁石がキーデバイスであり、高保持力を得るためにレアメタルを使用している。これらレアメタルは一部の外国に供給を依存しているため研究開発項目③でジスプロシウムの使用量低減技術を開発しているところである。しかし昨今の世界的な環境意識の高まりから今後、これら製品の需要増加が見込まれるため、中長期的な視点から抜本的な対策が求められる。

このため、我が国の強みであるナノテク技術や新素材・部材の開発力を生かし、レアメタルに依存しない低炭素社会の実現を可能とする新規永久磁石の研究開発を促進する必要がある。

2. 研究開発の概要

資源枯渇に脅かされない至極ありふれた元素である鉄と窒素を主原料とすることにより脱希少金属化を可能とさせ、現行のNd-Fe-B系磁石の特性を凌駕するポテンシャルを持つ高飽和磁束・高磁気異方性新規磁石材料の探索を行う。鉄-窒素系化合物として窒化鉄系材料と希土類(R)-Fe-Nに着目し、モータ用途への応用展開をにらみつつ、ナノレベルの微細構造・形成解析と磁気特性評価を通し、窒化鉄の所望相の合成技術指針の獲得とR-Fe-Nのバルク化技術の構築を図る。

(1)「窒化鉄系材料の合成とその基礎特性把握」

これまで蓄積してきた窒化鉄薄膜に関する豊富な知見をもとに、これまで獲得してきたナノ粒子化技術を援用し、所望相である $Fe_{16}N_2$ 相が実現可能な直接合成あるいは間接合成技術の獲得を目指す。

(2)「R-Fe-N系磁石の高性能化に向けた要素技術開発」

R-Fe-N系化合物の優れた磁気特性に着目し、これらを高充填でバルク化して高性能磁石とするための要素技術を開発するため、磁性粉末やバインダ材料などの材料とパルス通電焼結法、低温せん断圧縮法、超高压法などのバルク化技術を検討する。また、非平衡相を作製できる薄膜法や超高压を用いて新たなR-Fe系化合物を探索する。

(3)「新規磁石材料の高特性化に向けた指導原理獲得」

アトムプローブなどの微細構造解析技術および電子顕微鏡観察によるナノ粒子の微構造観察技術を上記(1)項および(2)項で作製した新規磁石材料に適用し、粒子の粒径・形態や焼結状態、結晶配向性、組成分布等の構造情報を得て、新規磁石材料の高特性化に向け、それら構造的知見を合成・プロセス条件にフィードバックする。

(4)「モータの評価・解析」

新規磁石および希土類磁石を用いたモータの特性比較および新規磁石に適したモータ構造に関する検討で得られた知見を実証するため、実際に磁石モータを試作し、試験を行う。まずは先行して希土類磁石を用いたモータの試作・試験を行うことで、シミュレーションから実証試験までを一貫して行える態勢を作る。

3. 達成目標

最終目標：平成22年度

(1) 窒化鉄系材料の開発

- ・出来る限り早期に80%以上の $Fe_{16}N_2$ 相からなる微粒子を作製し、高性能磁石化に資する基本特性を確認する。
- ・磁石化に向けて、より保磁力を高める磁性粉末の開発指針を得る。

(2) R-Fe-N系材料の開発

- ・モータ用磁石としての実用を考え、保磁力20kOe程度を目標とする。

研究開発項目⑨-2 「Nd-Fe-B 系磁石を代替する新規永久磁石及びイットリウム系複合材料の開発」
(超軽量高性能モータ等向けイットリウム系複合材料の開発)

1. 研究開発の必要性

超軽量かつ高性能な次世代モータ、発電機やMRI等の次世代医療診断機器等の実現のためには、高い磁場を発生させることのできるコイル（電磁石）が必要となる。

イットリウムは光学ガラス、赤色蛍光体、自動車の排ガス処理用触媒等に利用されている稀少金属である。イットリウムを用いた複合材料は、ジスプロシウムを含有するモータ部材に将来的に代わる可能性があるとして期待されている。イットリウム系複合材料は、次世代モータ、発電機、医療診断機器等の実現には不可欠な材料であり、この開発を行う必要がある。

2. 研究開発の概要

本プロジェクトは、ジスプロシウムを含有するモータ部材に将来的に代わる可能性のある次世代モータ部材を実現するイットリウム系複合材料の開発を行う。イットリウム系複合材料は高温超電導材料であり、線材形状をしていることから界磁巻線同期回転機への適用が可能である。超電導材料は電気抵抗が零であることから損失なく電流を流すことができる。特に、イットリウム系超電導体（ $YBa_2Cu_3O_y$ ）は約 90 K 以上の臨界温度（ T_c ）を有し、特に磁場中で高い臨界電流（ I_c ）特性を示すことから、電動機等の回転機の磁場中での応用に適した材料である。しかしながら、コンパクトなモータを実現するためには効果的な磁場環境を作り出すことが必要であり、この条件を満たすためには、強力な電磁力に耐え得る機械的な強度と共に接続損失低減のために単長の長い線材が必要となる。そこで、本研究開発では、まず、必要な特性を有した超長尺イットリウム系複合材料を作製するプロセスを開発する。並行して、更に希少金属の利用率の低減が期待できるプロセス開発を行うと共に、イットリウム系複合材料を用いたモータに対する構造最適化のための課題を抽出することを目的とした概念設計、巻線技術及び冷却技術等の要素技術開発を実施する。

(1) 超長尺イットリウム系複合材料における希少金属使用量低減技術開発

本項目では、これまで国内で 500 m 長複合材料を実現できている作製プロセスを選択し、イットリウム系複合材料を用いた電磁石を実現するために必要な I_c を超える高い特性を有した超長尺複合材料を実現するプロセス開発を行う。

(2) イットリウム系複合材料の製造工程における希少金属利用率等の効率向上技術開発

本項目では、研究項目（1）で選択したプロセスに比べて現状では長尺作製実績は十分ではないものの原理的に高い原料収率が見込まれる作製手法において複合材料プロセスの開発を行うことで、イットリウム利用率向上技術の開発を行う。

(3) イットリウム系複合材料を用いた回転機要素技術開発

本項目では超長尺イットリウム系複合材料を用いたモータに対する構造最適化のための課題抽出を目的として、磁場、応力等のシミュレータの開発とこれを用いた構造評価を行なうと共にモータ開発の基軸になる傘型等異形界磁巻線、サーモサイフォン式冷却方式の要素技術の開発を並行して行う。

3. 達成目標

最終目標：平成 22 年度

(1) 300 A/cm 幅 (@ 77 K、自己磁場) の特性を有し、1 km を超える超長尺複合材料作製を見通す。

(具体的目標値)

- ・1km 長複合材料を作製し、平均 I_c が 200A/cm 幅以上 (@77 K、自己磁場) であることを実証する。
- ・同条件で作製した 10m 長以上の複合材料で I_c が 300A/cm 幅 (@77 K、自己磁場) 以上を実証する。

(2) 超電導層の連続形成プロセスにおいて、原料収率 40% 以上を見通す。

(具体的目標値)

- ・全成膜領域に対し、静止成膜により原料収率 40% 以上を実証する。
- ・成膜領域の一部を通過する移動成膜により、静止成膜結果から予想される成膜量を実

証する。

- (3) 大容量回転機（500kW級－1000rpm級）概念設計により、イットリウム系複合材料による大型回転機の優位性を見通す。また、傘型界磁巻線の試作とその熱的、電磁氣的、機械的特性評価およびサーモサイフォン式冷却試験とその冷却特性評価により、500kW級－1000rpm級回転機的设计に資する。

（具体的目標値）

- ・ 磁場－応力－伝熱を連成した回転機評価用シミュレータを開発する。
- ・ 上記シミュレータを用いた総合評価により傘型コイル利用回転機で従来の永久磁石回転機に比べ希少希土類元素使用量が 1/10 となる成立性を示す。
- ・ Ne を用いたサーモサイフォン式冷却装置において高速回転時の回転数と冷却能力の関係を明らかにし、回転機の冷却設計を可能にする。

研究開発項目⑨-3 Nd-Fe-B系磁石を代替する新規永久磁石の実用化に向けた技術開発

1. 研究開発の必要性

ハイブリット自動車や電気自動車、情報家電、産業機器等のモータの高能率化においては永久磁石がキーデバイスであり、日本で開発され最強の磁石と言われるネオジム磁石(Nd-Fe-B系磁石)は高保磁力を得るためにジスプロシウム(Dy)を使用しているが、ネオジム(Nd)やDyは一部の外国に供給を依存しており、研究開発項目③でDyの使用量低減技術を開発しているところである。しかし昨今の世界的な環境意識の高まりから今後、これら製品の需要増加が見込まれるため、中長期的な視点から抜本的な対策が求められる。

このため、我が国の強みであるナノテク技術や新素材・部材の開発力を生かし、Nd、Dyに依存しない新規永久磁石の研究開発を促進する必要がある。

これまでにネオジム磁石そのものの代替として研究開発項目⑨-1で窒化鉄系やR-Fe-N系(Rは希土類元素)の磁性材料の研究開発を行ったが、実用化までには至っていない。

従って、ネオジム磁石を代替する新規永久磁石の実用化に向けた技術開発を行う必要がある。

2. 研究開発の概要

資源枯渇に脅かされない元素を主原料とし、現行のNd-Fe-B系磁石と同等の性能を有する新規磁石の開発を行う。開発にあたっては、モータ用途への応用展開をにらみつつ、ナノレベルの微細構造・形成解析と磁気特性評価を通し、新たな磁性材料の成型技術の構築を図る。

(1) さらなる磁性材料の探索

窒化鉄(Fe₁₆N₂)以外の磁性材料で、現行のNd-Fe-B系磁石と同等の性能を有する磁性材料の探索を行う。

(2) 磁石化技術の開発

- ・「窒化鉄(Fe₁₆N₂)または上記2.(1)で探索された磁性材料」(以下、「新規磁性材料」と言う。)の大量合成に向けたスケールアップ技術の開発
- ・新規磁性材料の実用化に則した成型技術の開発
等

(上記は例示であり、公募により優れた提案があった場合は、これ以外についても実施するものとする。)

3. 達成目標

【中間目標】 平成25年度

(1) さらなる磁性材料の探索

新規磁性材料の候補を複数選定し、その材料の合成を行う。また、磁石化に向けた表面処理等の最適化検討に着手する。

(2) 磁石化技術の開発

- ・磁石化の検討を行うために必要な量の新規磁性材料を合成する。
- ・実用化に則した成型化の要素技術開発
- ・新規磁性材料を簡易的に成型し、成型化技術の開発指針を獲得する。

【最終目標】 平成27年度

(1) さらなる磁性材料の探索

調査した全ての材料について、その物性値、磁性材料としての特性値等の情報を取得し、新規磁性材料の選定を終える。

(2) 磁石化技術の開発

- ・選定した新規磁性材料を磁石とするための製造技術等を確立する。
- ・選定した新規磁性材料を用いて製造した磁石によりモータを試作し、その性能を評価する。

中間目標及び最終目標の詳細については採択者が決定した後、NEDO、テーマリーダー及び採択者との間で協議の上、当該目標の設定時期までの間において実施可能な目標を定めるものとする。

研究開発項目⑩-1「排ガス浄化向けセリウム使用量低減技術及び代替材料開発、透明電極向けインジウムを代替するグラフェンの開発」
(排ガス浄化向けセリウム使用量低減技術及び代替材料開発)

1. 研究開発の必要性

セリウムは、フラットパネルディスプレイやハードディスク向けガラス、デジタルカメラ等のレンズの研磨剤、排ガス浄化用助触媒、紫外線カットガラス、蛍光体向け等の材料として用いられている。世界最大のレアアース供給国である中国からの輸出統計によれば、わが国は世界最大のセリウム消費国である（内需データが不明な中国を除く）。わが国におけるセリウム需要（平成21年）では、研磨材向けが約79%、触媒向けが約13%、紫外線カットガラス向けが約8%になっており、その消費量は平成21年度現在約9,300t（酸化物換算）ほどと推計されている。排ガス浄化向けには、中国やインドをはじめとした世界的な自動車需要の増加、ガソリン車やディーゼル車の排出ガス基準値の強化への対応、白金触媒の材料コスト削減のための助触媒としての使用量増、などにより引き続き使用量が増えることが想定される。セリウムは、この半年で、急激な価格上昇、供給の大幅減に直面しているが、わが国が成長を期待する産業において成長を阻害する要因として懸念され始めている。

本研究開発は、排ガス浄化向けのセリウム使用原単位を30%以上低減するため、以下の基盤技術及び製造技術を開発する。

2. 研究開発の概要

本プロジェクトは、自動車排ガス浄化触媒システムにおいて、助触媒としての役割をもつセリウムの使用量を30%以上低減することを目標とする。

- (1) 排ガス浄化に対するセリウムの作用原理の獲得
- (2) セリウムを代替・使用量を低減する材料の開発
- (3) セリウムの使用を低減した触媒付きフィルターの開発
- (4) 触媒付きフィルター製造時のセリウムの省使用技術の開発
- (5) 触媒付きフィルター製造工程内からのセリウム回収システムの開発
- (6) セリウムを使用しない排ガス浄化触媒システムの開発
- (7) セリウム回収技術の開発

等

(上記は例示であり、公募により優れた提案があった場合は、(1)～(7)以外にも実施するものとする。)

3. 達成目標

排ガス浄化向けセリウム使用原単位を30%以上低減する基盤技術及び製造技術を開発することを目標とする。

最終目標：平成23年度

本研究テーマは希少金属安定供給確保に資するものとして、「円高・デフレ対応のための緊急総合経済対策（平成22年度補正予算（第1号）」の一環で実施するため、詳細な目標については採択者が決定した後、NEDO、テーマリーダー及び採択者との間で協議の上、実施期間において実現可能な目標を定めるものとする。

研究開発項目⑩-2「排ガス浄化向けセリウム使用量低減技術及び代替材料開発、透明電極向け
インジウムを代替するグラフェンの開発」
(透明電極向けインジウムを代替するグラフェンの開発)

1. 研究開発の必要性

インジウムは、液晶テレビやパソコンモニター等のフラットパネルディスプレイのガラス上の透明導電用にITO（インジウムと錫の複合酸化物）として使用されている。この用途向けの消費量は国内消費量の約90%を占めているが、その他にも高効率の太陽電池として注目されているCIGS系太陽電池や、化合物半導体、蛍光体向けなどに使われている。ここ数年、鉱山開発や、フラットパネルディスプレイ製造工程からのリサイクル化も進んでいるが、引き続き需要の拡大が見込まれている。

このような中、インジウムの使用量低減技術の開発、ZnOによる代替材料開発を本プロジェクトでは平成19年度より行っているが、インジウムの供給不安定による影響がなく、さらに新たな機能を備えた代替材料の開発も進められ成果が発表され始めている。グラフェン等のナノ炭素材料を用いた透明導電フィルムの開発は、炭素というありふれた材料を用いることから材料コスト低減や、フレキシブル用途への展開も可能であることから、我が国の産業競争力の向上が期待できる。一方でグラフェンをITO代替材料として実用化するためには、諸外国との開発競争に勝ち、透明電極開発の優位性を確保することが重要な課題となっている。

本研究開発は、ITO代替を実現するため、グラフェンによる透明電極の基盤技術及び製造技術を開発する。

2. 研究開発の概要

本プロジェクトは、グラフェンによる透明電極の実用化に向け、以下の技術を開発することを目標とする。

- (1) 透明電極用途の特性を満足するグラフェンを開発する
- (2) 透明電極用途の特性を満足するグラフェンの大量合成技術を開発する
- (3) 透明電極の使用に供する透明フィルムの製造技術（ロールtoロール製造技術等）を確立する

等

(上記は例示であり、公募により優れた提案があった場合は、(1)～(3)以外にも実施するものとする。)

3. 達成目標

グラフェンによる透明電極の実用化に向け、基盤技術及び製造技術を開発することを目標とする。

最終目標：平成23年度

本研究テーマは希少金属安定供給確保に資するものとして、「円高・デフレ対応のための緊急総合経済対策（平成22年度補正予算（第1号）」の一環で実施するため、詳細な目標については採択者が決定した後、NEDO、テーマリーダー及び採択者との間で協議の上、実施期間において実現可能な目標を定めるものとする。

技術戦略マップ

ナノテクノロジー分野

ナノテクノロジー分野

ナノテクノロジーは、物質の原子・分子レベルでの微細かつ緻密な制御により表面積効果や量子効果など、新たな現象や効果が期待できる究極のものづくり技術である。ものづくり国家を標榜する我が国にとっては、ナノテクノロジーは今後の産業技術の発展を担うキーテクノロジーとして不可欠なものであり、第3期科学技術基本計画（2006年3月）、イノベーション25（2007年6月）等でも重要分野として位置づけられている。

経済産業省では、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こと、ナノテクノロジーの活用により情報通信、ライフサイエンス、環境、エネルギーなど、多くの産業分野に資する高機能部材を数多く開発し、我が国産業の国際競争力の強化や解決困難な社会的課題を克服することなどを目標とした研究開発を推進している。

また、「新成長戦略(基本方針)」(2009年12月)においては、「グリーン・イノベーション」、「ライフ・イノベーション」が成長戦略として挙げられており、特にナノテク等の先端技術は、「グリーン・イノベーション」の推進に広く貢献できる技術として今後も注目される。

技術戦略マップ（ナノテクノロジー分野）は、ナノテクノロジー政策を推進する一つの施策として、ナノテクノロジーの技術を俯瞰し、2020年さらにはその先を見据え、応用が期待できる出口（製品等）を意識したロードマップを策定している。

ナノテクノロジー分野の技術戦略マップ

I. 導入シナリオ

(1) ナノテクノロジー分野の目標と将来実現する社会像

経済産業省におけるナノテクノロジーの推進に当たっては、我が国の経済社会にとって大きな課題である「安全・安心社会」、「環境調和型社会」等の実現のため、ナノテクノロジーにより“ナノテクで豊かな暮らし”“ナノテクで安全安心な社会”“ナノテクで持続可能な社会”“ナノテクで無駄のない生産”という4つの目標を掲げている（経済産業省：ナノテクノロジーによる価値創造実現のための処方箋（4つの国家目標と7つの推進方策）（2005年3月））。

同報告書で掲げられる、ナノテクノロジーで実現する社会像のイメージは、参考資料1のとおりである。【添付資料1：ナノテクノロジーで実現する2020年の社会像】

さらに、2008年3月には、これまでのナノテクノロジーに関する取組や現在の状況等を国内外と比較検討するとともに、前述の4つの目標を実現するため、今後特に重点をおくべき技術分野とそれらの推進方策を取りまとめたところである（経済産業省：ナノテクノロジー政策研究会報告書（2008年3月））。【添付資料2：ナノテクノロジー政策研究会報告書のポイント】

2009年12月30日に閣議決定された「新成長戦略（基本方針）」において、「グリーン・イノベーション」、「ライフ・イノベーション」が成長分野として挙げられている。多くの産業分野に広く貢献するナノテクノロジーは、両分野においても重要な役割を果たす。

(2) 研究開発の取組

経済産業省では、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こと、ナノテクノロジーの活用により情報通信、ライフサイエンス、環境、エネルギーなど、多くの産業分野に資する高機能部材を数多く開発し、我が国産業の国際競争力の強化や解決困難な社会的課題を克服することなどを目標とした研究開発を推進している。さらに、知的財産、標準化、社会受容等において国際的なリーダーシップを発揮することを目標とした研究開発及び関連施策を推進している。

(3) 関連施策の取組

ナノテクノロジーは、情報通信、ライフサイエンス、環境、エネルギーなど、多くの産業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。したがって、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。NEDO、経済産業省等では、技術戦略マップを策定、毎年改訂し、ナノテクノロジー・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。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している。その他、主な関連施策を、以下に示す。

[サンプル提供・実用化促進]

・NEDO では、実施する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を実施している(サンプルマッチング事業)。ナノテクノロジー分野は特にシーズ技術とユーザーニーズとの組み合わせが重要であり、この制度による支援が有効に機能すると期待される。

[基準・標準化]

・経済産業省では、ナノテクノロジー関連の研究開発成果を社会及び市場等に普及するための環境整備として、ナノテクノロジーの標準化活動(ISO/IEC、JIS)を推進している。

・欧米では、積極的な標準化活動の推進により、ビジネスモデルの構築の基盤を固めており、韓国・中国も標準化活動に対する国際ビジネスの優位性を図る活動を開始している。

・これまでの標準化の主な取組は、次のとおり

-2005年5月にナノテクノロジーの国際標準化推進に向けてISO/TC229が設立がされ、「用語・命名法」、「計測・キャラクタリゼーション」、「健康・安全・環境」の3つのWGが設立。うち日本は「計測・キャラクタリゼーションWG」の主査に就任。

-2006年9月にナノエレクトロニクスに関する国際標準化推進に向けてIEC/TC113が設立され、「JWG1:用語・命名法※」、「JWG2:計測・キャラクタリゼーション※」、「JWG3:性能評価」の3つのWGが設立。うち日本は「計測・キャラクタリゼーション」の主査、及び「性能評価」の副主査に就任。(なお、※はISO/TC229とのジョイントWGとなっている。)

TC113主体のWG3において、現状産業界からの積極的な提案は見られないが、幹事国ドイツから将来スコープ拡大の提案があり、議長国米国からはナノコンタクト規格検討の提案があり、タスクグループが設置された。

-2008年5月には、ISO/TC229の4つ目のWGとして、中国提案により「材料規格」が設立。

-上記活動の中でにおいて、我が国としては、測定法を中心とする規格の提案を実施。

[広報・啓発]

・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「nanotech」が毎年日本で開催されている。

[ガイドライン整備]

・ナノテクノロジーの産業化の推進とともに、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等の潜在的な課題に関する知見を蓄積する等のナノテ

クノロジーの社会受容に対する取組を推進している。

・経済産業省では、2006年度から「ナノ粒子の特性評価手法開発」を開始し、工業ナノ粒子のリスク評価管理手法の確立を目標としたプロジェクトを開始し、2009年10月に「ナノ材料リスク評価書」（中間報告書）を公表した。また、政策的対応として、2009年3月に取りまとめた「ナノマテリアル製造事業者等における安全対策のあり方研究会」報告書に基づき、ナノマテリアルの製造事業者等における自主的な安全対策を促進するための情報収集・開示プログラムを実施している。

・OECDでは、2006年9月、化学品委員会に工業ナノ材料作業部会（WPMN）が設置され、代表的な14種の工業ナノ材料について、試験計画の合意と試験実施を目的とする「スポンサーシッププログラム」が実施されている。スポンサーシッププログラム対象物質のうち、カーボンナノチューブ（単層、多層）、フラーレンの3物質については日本が中心となって担当し、「ナノ粒子の特性評価手法開発」等の成果で貢献している。

〔人材育成〕

・独立行政法人産業技術総合研究所は、産学官連携による波及効果の高い人材育成プログラムの開発を目的として実施された「製造中核人材育成事業」（経済産業省（2005～2007年度））において、ナノテクノロジー関連の人材育成プログラムを開発、実施を行っている。

（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・技術を統括できる人材」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組を実施している（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。

〔関係機関との連携〕

・ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発、希少金属代替材料開発プロジェクトにおいては、文部科学省との合同会議を設置するなど、連携しつつプロジェクトを推進している。

・経済産業省・文部科学省が協力のもと、2009年6月より産業技術総合研究所、物質・材料研究機構、筑波大学が中核となり、茨城県つくば市において世界的なナノテク研究

拠点を形成するための「つくばイノベーションアリーナ (TIA nano)」構想が推進されている。ナノエレクトロニクス、カーボンナノチューブ、ナノ材料安全評価などの研究領域、ナノデバイス実証・評価ファウンドリーなどのインフラを生かし、主要企業・大学との連携網を広げ、産学官に開かれた融合拠点として、ナノテクの産業化と人材育成を一体的に推進することとしている。

(4) 海外での取組

諸外国においては、ナノテクノロジーに関する国家戦略を発表、それに基づき予算配分等がされており、研究開発拠点形成などのインフラ整備、人材育成・教育等にも戦略的な投資がなされている。

[米国]

・2000年に国家ナノテクノロジー計画 (NNI:National Nanotechnology Initiative) が開始、2003年にはこれを強化するために「21世紀ナノテクノロジー研究開発法」を制定している。2007年12月には、NNI 戦略プラン (2004年) を改訂した新 NNI 戦略プランを発表し、2008年に PCAST (大統領科学技術諮問会議) による3年に1度の NNI に対する評価レポートを発表した。2009年においても NNI に従って、基礎・応用研究、分野横断的な研究拠点の構築等を継続している。

・ニューヨーク州オルバニーでは、州資金援助の下、IBM が中核となり、日本企業の資金・人材協力を得た、LSI 開発を中心としたナノエレクトロニクス拠点を形成している。

[欧州]

・第7次欧州研究開発フレームワークプログラム (FP7:2007-2013年) が開始され、ナノサイエンスから新生産技術にいたるまで FP6 (2001-2006) の2倍近くの予算が投入される。また、各国は独自の国家計画に基づき、投資が行われている。

・フランスでは、国立電子情報技術研究所と国立工科大学グルノーブル校が連携し、“MINATEC” が2006年6月に開設され、ST マイクロ社等と一体となってナノテク・ナノエレクトロニクス研究拠点を形成している。

・ベルギーは、州政府の支援の下、日本を含め、世界の500社超が連携している世界最大のナノテク研究所“IMEC”を擁しており、2000年以降に規模が倍増している。

・また、ロシアにおいても、2007年に8カ年の国家科学技術計画を発表し、2008年からはナノテク研究インフラ整備のため、NNN (国家ナノテクノロジーネットワーク) 計画を開始した。

[アジア]

・韓国、中国、台湾、シンガポールなど、各国が基礎から産業化に至るまで、ナノテクノロジーの重点化を継続している。韓国では、第2次科学技術基本計画 (2008-2012) により、重点化を図っている。

・2004年5月に「アジアナノフォーラム」がアジア13カ国で発足。フォーラムサミットの開催、人材交流等の活動を行い、各国が推進するナノテクノロジー政策の後押しを

することを役割の一つとしている。

・シンガポールでは、情報通信・材料工学関係の7つの国立研究所を一カ所に集約。50社を超える外国企業、ハーバード大等海外の大学とも連携するなど、2011年までに約6000億円を投資する。

(5) 民間での取組

ナノテクノロジービジネス推進協議会(NBCI)では、ナノテクノロジーの技術開発及びビジネス化のための情報交流や人的交流、大企業・ベンチャー企業・ベンチャーキャピタルなどの会員間でのビジネスマッチング、ナノテク各分野の情報共有および分野間のテクノロジーマッチング、政府への要望・提言などに関わり、ナノテクノロジーによる我が国の産業競争力の強化と国民生活の向上を目指す取組などを実施している。具体的には、市場の要求(出口)と技術(シーズ)のマッチングを図るためのナノテク製品や研究開発成果の発表・展示、ビジネス化に向けた情報交換等のための国際展示会やセミナーの開催、海外ベンチマーク調査、ビジネスロードマップの作成、社会受容・標準化活動などを推進している。

(6) 改訂のポイント

今回は、改訂を行っていない。

II. 技術マップ

(1) 技術マップ

ナノテクノロジーは、情報通信、ライフサイエンス、環境、エネルギーなど、多くの産業分野における科学技術の進歩や課題解決に貢献し、産業の振興や人間の豊かな暮らし、安全・安心で快適な社会などを実現する重要な技術シーズである(第3期科学技術基本計画より)。

技術戦略マップ2009におけるナノテクノロジー分野の改訂に当たり、同分野のユーザーフレンドリー性の向上と独自の付加価値を供するため、これまでのニーズプル型(ある出口に対してどのようなナノテクノロジーが活用されているか)から、シーズプッシュ型(どのようなナノテクノロジーが重要か)の観点での改訂を検討することとした。(※第24回産業構造審議会産業技術分科会研究開発小委員会資料6より。)

(2) 重要技術の考え方

技術戦略マップ2009におけるナノテクノロジー分野の改訂に当たり、有識者へのヒアリング及び委員会を設置することによる検討を行った。今回の改訂は、上述のとおり、新たにシーズプッシュ型の観点での改訂を行ったところである。

重要技術の考え方は、技術戦略マップ2008において重要技術として取り上げられているもの、現在、経済産業省が実施している研究開発プロジェクトにおいてキーテクノロジーとなっているもの、産業応用展開への波及効果が高く基盤的技術であるものを基準として選定した。

重要技術として位置づけた技術については、技術マップにおいて赤字で記載した。
今後、ナノテクノロジー分野における重要技術については、随時追加を伴う改訂をする予定である。

(3) 改訂のポイント

技術戦略マップ 2009 におけるナノテクノロジー分野の技術マップでは、ユーザーフレンドリー性の向上と独自の付加価値を供するため、これまでのニーズプル型（ある出口に対してどのようなナノテクノロジーが活用されているか）から、シーズプッシュ型（どのようなナノテクノロジーが重要か）の観点での改訂を行った。

技術マップ 2010 におけるナノテクノロジー分野改訂に当たっては、前年の方針を踏襲し、以下の 6 つの重要技術の追加を行った。

グラフェン、ナノクラスター、機能性ゲル、超微細インクジェット、光触媒、メタマテリアル

Ⅲ. 技術ロードマップ

(1) 技術ロードマップ

技術マップにおいて重要技術として位置づけた技術について、技術ロードマップを作成した。技術ロードマップの作成に当たっては、研究開発課題の解決のための研究開発シナリオを、さらに、当該技術がどういった出口（製品等）に応用が期待されるかを記載した実用化シナリオを、それぞれ時間軸上に示した。

また、技術ロードマップと合わせて、当該技術シーズの技術解説及び研究開発課題の概要等を記載する補足資料を、各シーズにおいて作成した。

(2) 改訂のポイント

技術戦略マップ 2009 におけるナノテクノロジー分野の技術マップでは、次の点を改訂した。

- ユーザーフレンドリー性の向上と独自の付加価値を供するため、これまでのニーズプル型（ある出口に対してどのようなナノテクノロジーが活用されているか）から、シーズプッシュ型（どのようなナノテクノロジーが重要か）の観点での改訂を行った。
- 研究開発課題の解決のための研究開発シナリオ及び当該技術がどういった出口（製品等）に応用が期待されるかを記載した実用化シナリオを、それぞれ時間軸上に示した技術ロードマップを作成した。
- 重要技術については、当該技術シーズの技術解説及び研究開発課題の概要等を記載する解説資料を作成した。

技術戦略マップ 2010 におけるナノテクノロジー分野の技術マップ改訂においては、技術マップにおいて追加した重要技術 6 件について、ロードマップを作成した。

IV. その他の改訂ポイント

○標準化シナリオの改訂

- ISO/TC229 及び IEC/TC113 の動向等を踏まえ、改訂を行った。

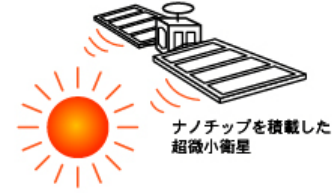
○ベンチマーキングの策定

- ナノテクノロジー政策研究会報告書（2008 年 3 月）から、ナノテクノロジーの国際競争力比較に該当する部分を抜粋したものを掲載した。
- 特許庁が実施する重点 8 分野の特許出願状況調査（ナノテクノロジー・材料分野）（平成 21 年 3 月）において、取り上げられているデータの一部を加工したものを掲載した。【ナノテクノロジー分野の国際競争ポジション】
- トムソン・ロイター社のデータベース Essential Science Indicators(2010.01.01 更新)に基づく日本の論文被引用数の分野別比較を掲載。
- EPO PATSTAT 2009 April のデータに基づく世界と日本でのナノテクノロジー関連特許の出願分野別割合を掲載。

ナノテクノロジーで実現する2020年の社会像



カーボンナノチューブを用いた革新的軽量高強度構造材



ナノチップを積載した超微小衛星

高エネルギー変換素子の実現による色素増感型太陽電池

ナノファイバーを用いた高性能防護服

超高感度ナノセンサーを活用した防犯システム

ナノレベル材料シミュレーションにより発見された常温超電導材料によるリニアモーターカー

マイクロプラントによる省スペース・高効率生産システム

自己組織化を利用した超高速度量子ドットコンピュータの実現

導電性高分子アクチュエータを用いた低侵襲治療機器の超小型化

リアルタイム治安管理

超衝撃吸収材による耐震構造材

ナノ構造制御による高効率熱電変換素子による

高選択性ナノフィルタを利用したon site型水素ステーション

カーボンナノホーンで触媒を担持した燃料電池の普及

カーボンナノチューブによる薄型省エネテレビ

ナノ粒子化粧品によるアンチエイジング

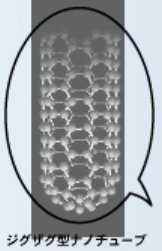
光触媒を用いたセルフクリーニング建材

有機ELを用いたユビキタスネットワーク

ナノフィルタによる大気汚染浄化

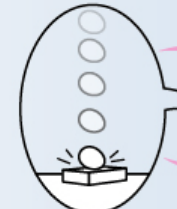
カーボンナノチューブを用いた耐震構造材の実現居住空間の拡大

カーボンナノチューブの構造



ジグザグ型ナノチューブ

ナノ複合材料による超衝撃吸収耐震構造材



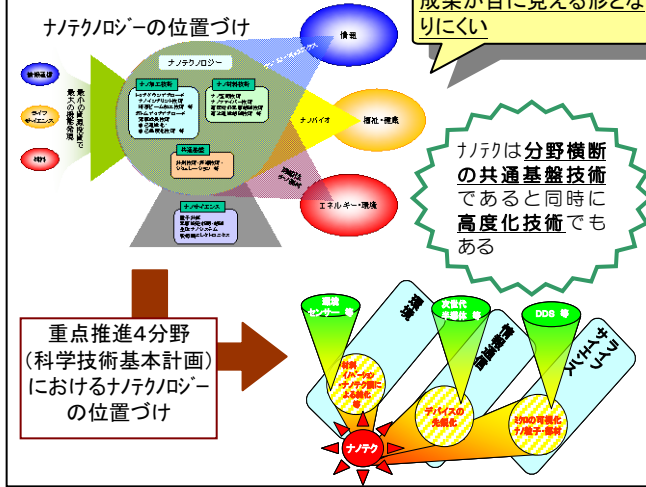
ナノセンサーによるアレルギー反応検知

極微量の汚染物質除去フィルターによる土壌汚染の無害化

花粉等微小物質を除去する室内空気浄化システム

ナノテクノロジー政策研究会報告書のポイント

ナノテクノロジーの位置づけ



ナノテクノロジーの現状と潜在力

ナノテックは既に身近に使われており 2020年におけるナノテック関連国内市場は約13兆円

磁気記録装置の記憶密度の推移

ナノテックの世代 ~2010-2020

- 第1世代: 受動的ナノ構造
 - a. 分散と接触のナノ構造 例: エロゾル, コロイド
 - b. ナノ構造を内包した製品 例: コーティング, ナノ粒子強化
- 第2世代: 能動的ナノ構造
 - a. ハイブリッドによる医療 例: DDS, ハイブリッド
 - b. 物理化学活性 例: 3次元ナノ構造, 増幅器, フォトニクス, 環境応用型構造
- 第3世代: ナノシステムを統合したシステム
 - 例: 超導量子回路, 3次元構造と新しい層構造, DQD
- 第4世代: 分子ナノシステム
 - 例: 分子ナノヒス, 層構造

ナノ針による遺伝子操作

- シリコンナノフォトニクス
- 超大容量メモリチップ
- 超格子構造熱電変換素子
- 太陽エネルギー変換材料
- ストレス計測チップ
- 心疾患マーカーセンサー等の実用化が期待される

液晶ディスプレイに活用されるナノテクノロジー

我が国の戦略・拠点

我が国の戦略・拠点

先駆的な取組み例も多く既存のリソースを体系化

ナノテクノロジー政策体系図(経産省・文科省)

ナノテクノロジー・ネットワーク構成13拠点とナノテクノロジー関連知的クラスター4地域

反映

総合科学技術会議「第3期科学技術基本計画」ナノテクノロジー・材料分野の戦略重点体系図等

諸外国の戦略・拠点

諸外国の戦略・拠点

国際競争力の強化を図るため投資増大策や国家戦略を続発

米国 国家ナノテクノロジーイニシアティブ [NNI] (2000年)
21世紀ナノテクノロジー研究開発法(2003年)
NNI 戦略プラン(2004年)

欧州 リスボン戦略(2000年)
第7次フレームワークプログラム [FP7] (2007年)

中国 国家中長期科学技術発展計画要綱(2006年)

韓国 ナノテクノロジー促進法(2002年)
第2期ナノテクノロジー総合発展計画(2006年) 等

諸外国が勢いを増す中で日本だけが現状維持傾向

唯一横這い

最下位

論文数の伸び率

技術水準の傾向

開発予算の増加率

積極的な拠点整備

米 NSF の研究拠点ネットワーク

欧州のナノテック研究拠点

目標とする社会の未来像と必要な技術分野

国際競争力の維持のために実現すべき目標と推進すべき技術開発

4つの目標と10の技術開発

「豊かな生活」・「安心・安全な社会」
「持続可能な社会」・「無駄のない生産」

3つの障害と8つの推進方策

目標実現に立ち及ぶ障害と、それを乗り越えるための推進方策

① ナノエレクトロニクス技術分野
② 医療関連技術分野
③ 構造ヘルスマonitoring技術分野
④ 太陽電池・熱電変換関連技術分野
⑤ 超電導送電技術分野
⑥ パワーエレクトロニクス技術分野
⑦ 希少金属代替技術分野
⑧ 動的計測・シミュレーション技術分野
⑨ ミニマル・マニファクチャリング技術分野
⑩ 環境センシング・環境浄化技術分野

「魔の川」 研究 → 「死の谷」 開発 → 「ダーウィンの海」 事業化 → 産業化

企業内組織: 研究所(研究プロジェクト) → 開発センター(開発プロジェクト) → 事業開発部(事業化プロジェクト) → 事業部(工場)

推進内容: 新規技術シーズ創出・製品化のための要素技術 → 試作品開発・マーケティング・量産技術開発 → 開発製品の市場投入・コストダウン・販路開拓 → 販売生産体制整備・事業拡大戦略・商品ラインアップ・量産コストダウン

推進策: 課題設定型ナノテックチャレンジ, 世界水準の拠点整備, 経産省・文科省の連携強化, 予算配分の考え方, ベンチャーファンド活用, ナノテック関連団体, 社会受容への対応, 教育・人材育成

ナノテクノロジー分野の導入シナリオ

2010年

2020年

2030年

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達成し、ナノテクノロジーによる世界最先端のものづくり国家を目指す。
- ナノテクノロジーを活用し、多くの産業分野に資する高機能部材を数多く開発し、我が国産業の国際競争力の強化や解決困難な社会的課題を克服する。
- 知財、標準化等の国際的な枠組みで我が国のリーダーシップを発揮する。

民間での取り組み

- ・ナノテクノロジー研究開発の活性化とイノベーションの創出
- ・ナノテクノロジーによる既存産業の製造プロセス、製品等の高度化
- ・ナノテクノロジーによる高付加価値産業の立ち上げ

市場環境の整備：ナノテクノロジービジネス推進協議会（NBCI）

- ・ビジネス委員会（シーズとニーズのマッチング活動）
- ・テクノロジー委員会（NBCIビジネスロードマップの作成）
- ・社会受容・標準化委員会（社会受容活動、国内・国際標準化活動）
- ・ネットワーキング活動（イベント、フォーラム、国際会議）
- ・政策提言、調査

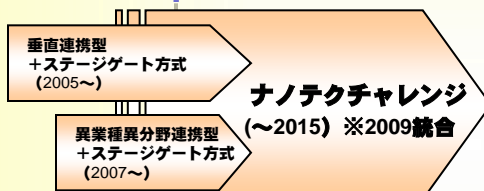
国際競争力の強化

「ナノテク・部材イノベーションプログラム」の推進

革新的機能を発現するナノスケールの構造制御技術・物質の開発

ナノテクを活用した非連続な技術革新を加速・促進する

垂直連携型・異業種異分野連携型＋ステージ方式研究開発の推進



出口となる産業分野（情報通信、医療、エネルギー、環境など）を念頭に置いたナノテクノロジー研究開発、高機能部材開発

ナノテクノロジーの確立に必要な共通基盤技術（加工、計測、解析など）の開発

ナノ粒子の特性
評価手法開発

知的基盤・
環境整備等

研究開発の取り組み

関連施策の取り組み

普及促進・
推進施策

環境整備等

人材育成に向けた取り組み（製造中核人材育成事業、NEDO特別講座など）

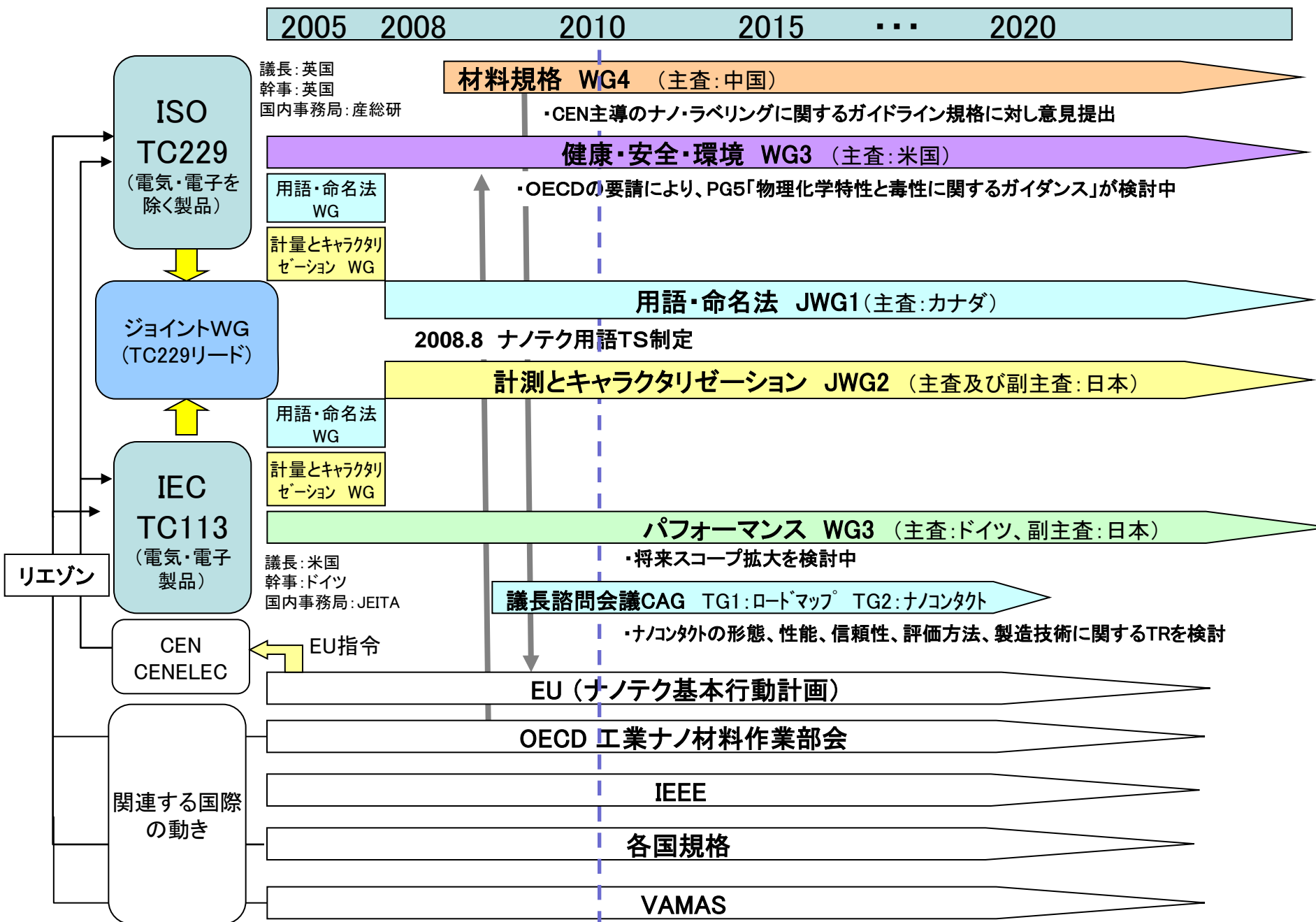
実用化促進に向けた取り組み（NEDO-NBCIサンプルマッチング事業など）

関連機関・他省庁との連携（総合科学技術会議連携施策群など）

標準化（ISO/TC229、IEC/TC113など）に向けた取り組み
→「標準化シナリオ」参照

社会受容に向けた取り組み（ナノ粒子の特性評価手法開発など）

ナノテクノロジー分野の国際標準化シナリオ (2010年3月)

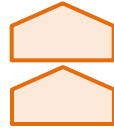
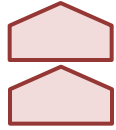


豊かな生活

安心・安全な社会

持続可能な社会

無駄のない生産



超精密製造加工分野

ナノプロセス

ナノ安全
ナノ標準化

ナノ計測・
ナノシミュレーション

計測評価装置分野

環境・エネルギー分野

グリーンナノテク

ナノエレクトロニクス

触媒・塗装・材料分野

ライフサイエンス分野

IT・情報通信分野

ナノバイオ

ナノデバイス

量子ドット、フォトニック結晶、ナノマシン、分子モーター、ナノ触媒、ナノピンセット、メタマテリアル

ナノプロパティ

スピントロニクス、近接場光、ナノフルイデイクス、ハリスティック伝導、量子効果材料、トンネル効果、電子干渉効果、プラズモニクス

ナノマテリアル

カーボンナノチューブ(CNT)、フラーレン、グラフェン、ナノダイヤモンド、ナノホーン、ナノ粒子、ナノポーラス材料、ナノ空間、ナノファイバー、ナノワイヤー、ナノシート、ナノクラスター、ナノカプセル、ナノコンポジット、ナノエマルジョン、ナノ磁性体、ナノゼオライト、ナノメタル、ナノガラス、ナノ結晶シリコン、ナノ結晶合金、 dendリマー、ナノセラミックス、ナノ高分子、ナノコンパウンド、ナノクリスタル、機能性ゲル、ピーボッド、光触媒

電子顕微鏡
走査型プローブ顕微鏡
放射光計測
1分子蛍光顕微鏡

ナノシミュレーション
Ab-initio計算
分子動力学法
マルチスケール法等

超微細インクジェット
精密ビーム加工
ナノインテグレーション
ナノエッチング

ナノマニピュレーション
結晶成長技術
自己組織化
薄膜形成技術
(薄膜成長、ナノコーティング)

ボトムアップ手法
トップダウン手法

研究者の着想

※赤字＝重要技術として技術ロードマップを作成しているもの
下線のものは2010版で追加したもの

技術戦略マップ

超電導技術分野

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。

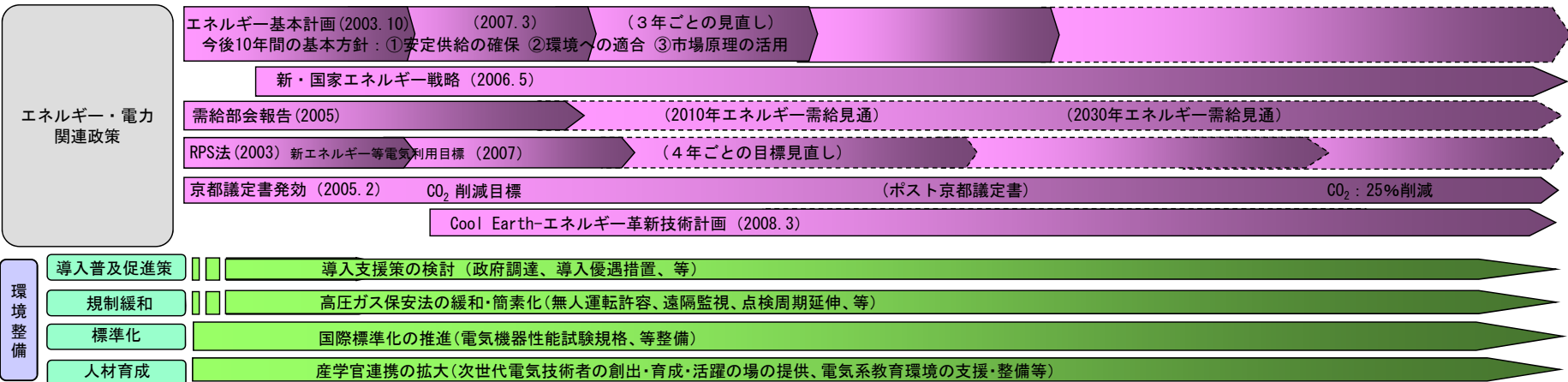
Ⅳ. その他の改訂のポイント

○ 特許の出願動向

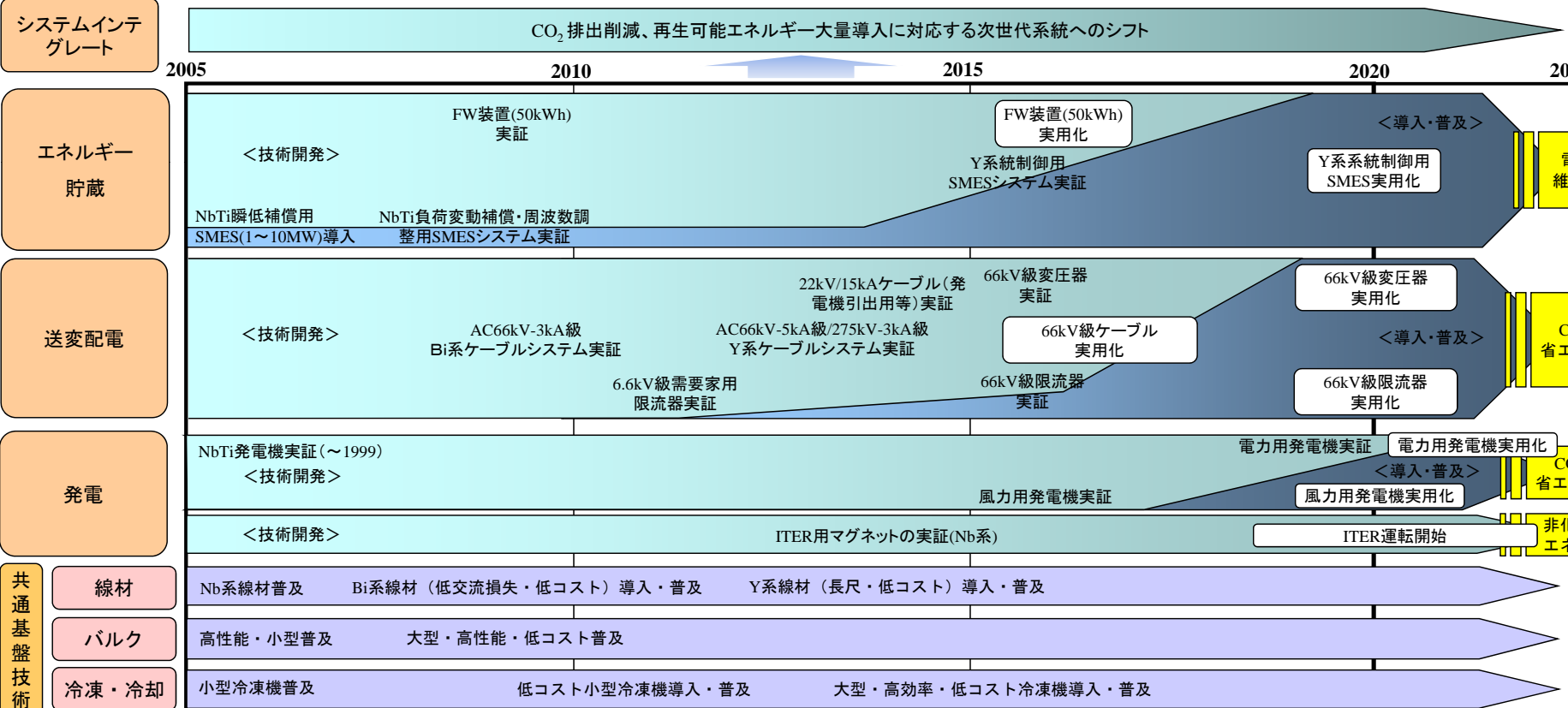
- 超電導技術に関する特許出願動向について、【参考資料7：超電導技術に関する国際特許出願動向】を新たに追加した。
- 日本、中国、韓国の超電導関連の国際特許出願件数とその世界に占める割合は、2000年代前半から後半にかけて大きく増加している。一方、米国、欧州は前半から後半にかけて減少している。ただし直近の動きを見ると、日本は2005年（国際出願件数）、2007年（世界に占める割合）をピークに減少傾向にある一方で、米国は2008年に国際出願件数を大きく増加させている。
- 世界平均と比べた場合の超電導分野への力の入れ方を示す超電導特化度は、日本が最も高く、かつ2000年代前半から後半にかけて上昇している。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)

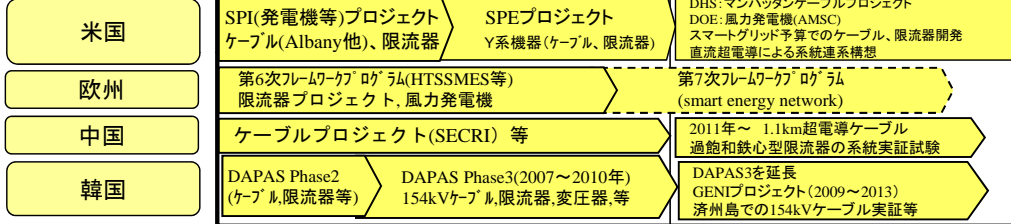
関連施策



技術開発



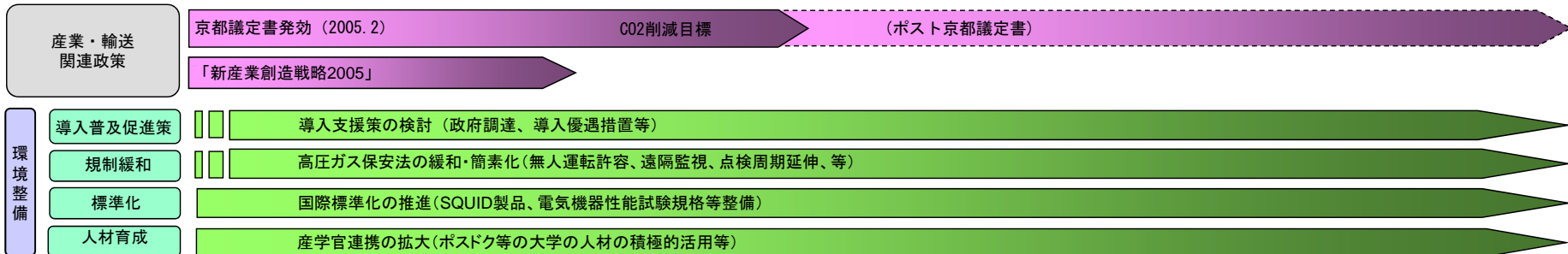
海外での取り組み



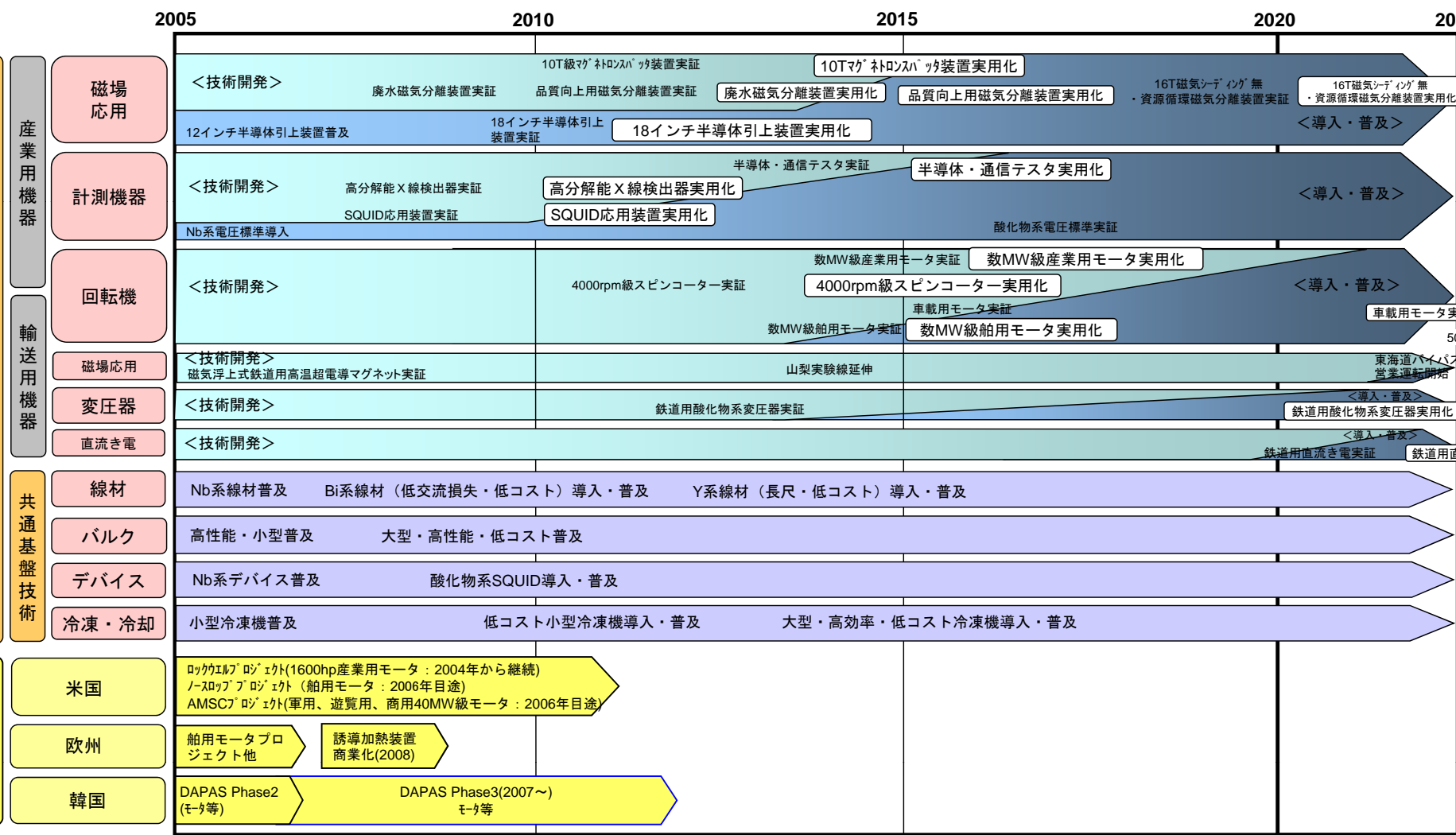
環境・エネルギー調和型社会の構築
 多様化する電源ニーズに対応する高信頼かつ高品質電力の供給・運用

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

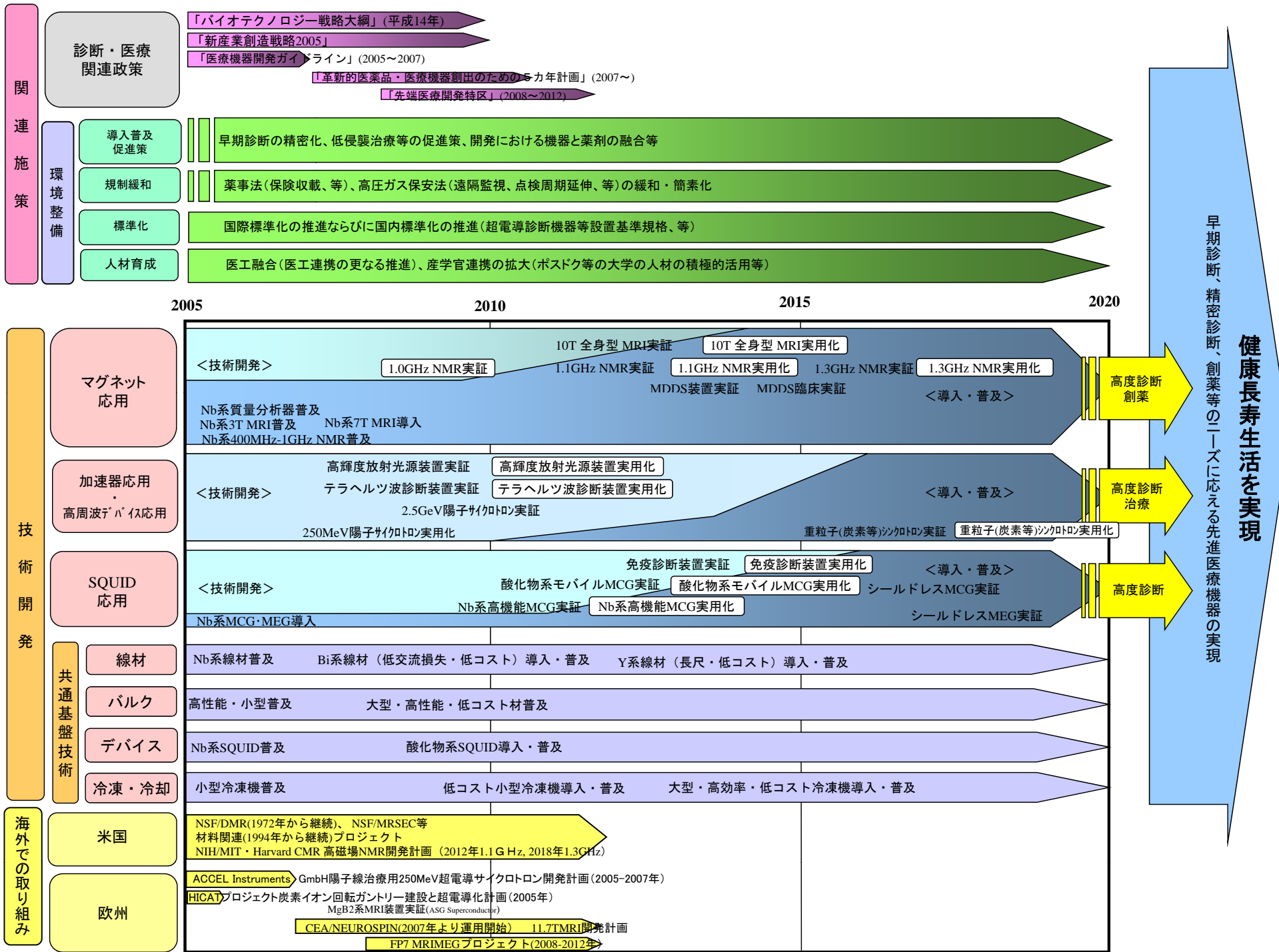
高度生産性 小型化

高度生産性 高信頼性

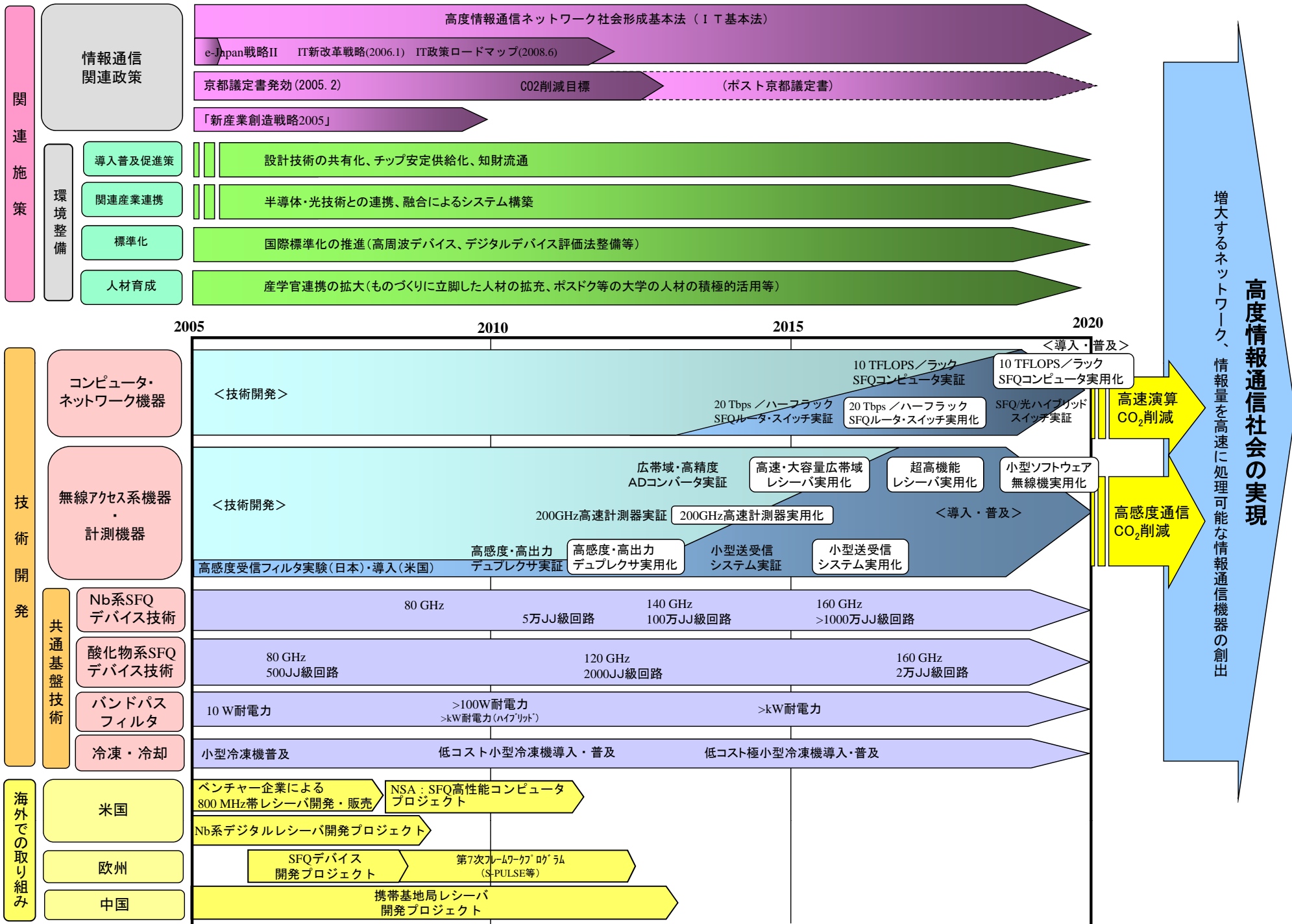
小型化 軽量化 CO₂削減

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	スピニングター *		219	・高速回転化 ・高載荷力化	
		産業用モータ *		220	・高速回転、大容量化 ・小型軽量化 ・効率向上 ・低速回転、大容量化	
	輸送用機器	回転機	船用モータ *		221	・低速回転、大容量化 ・小型軽量化 ・効率向上 ・高速回転、大容量化
			車載用モータ *		222	・小型軽量化 ・可変速駆動に対して高効率 ・高トルク密度化
		磁場応用	磁気浮上式鉄道用マグネット		223	・信頼性向上、低コスト化
		変圧器	鉄道用変圧器 *		224	・大容量化 ・低損失化 ・小型軽量化
		直流き電	鉄道用直流き電		225	・システム化 ・省エネ

* 印は、「エネルギー・電力分野」の機器と関連する技術であり、環境・エネルギー調和型社会の構築にとっても重要である。

 重要技術

超電導技術分野の技術マップ(診断・医療分野)

(3/5)

ニーズ	シーズ			
	技術大分類	技術中分類	技術番号	技術小分類
健康長寿生活の実現	マグネット 応用	MRI	301	・大口径、短軸化 ・高磁場化 ・線材高特特性化 ・磁場安定化技術
		NMR	302	・超高磁場化 ・磁場安定化技術
		質量分析器	303	・高磁場化 ・高均一化
		MDDS (磁気誘導薬物配送)	304	・高磁場化 ・高磁気勾配化 ・小型・軽量化 ・低消費電力化 ・ナノ磁性粒子薬剤開発
		磁気誘導カテーテル	305	・高磁場化 ・高磁気勾配化
		細胞・タンパク磁気分離	306	・小型化 ・短時間励減磁
	加速器 応用	高輝度放射光源 (アンジュレータ・ ウイグラー)	307	・高輝度化 ・磁石ギャップ長可変技術
		テラヘルツ波 診断装置(光源)	308	・高機能化
		医療用粒子線 加速器	309	・高機能化 ・コンパクト化
	高周波 デバイス応用	MRI/NMR (高周波プローブ)	310	・高感度化 ・低損失化
		質量分析器 (イオン検出器)	311	・分解能向上 ・測定時間短縮 ・高機能化
		テラヘルツ波 診断装置(検出器)	312	・高機能化
	SQUID 応用	SQUID 免疫診断装置	313	・システム高感度化 ・高機能化(多検体処理) ・操作性向上 ・低コスト化
		MCG (心磁計)	314	・高感度化 ・磁気シールド簡易化 ・高機能システム化
		神経磁気診断装置 (MEG(脳磁計)、脊髄・末 梢神経磁場計測装置)	315	・磁気シールド簡易化 ・多チャンネル化 ・高機能化 ・低コスト化
		超低磁場NMR/MRI	316	・複合化 ・新機能化 ・分解能向上

 重要技術

超電導技術分野の技術マップ(情報・通信分野)

(4/5)

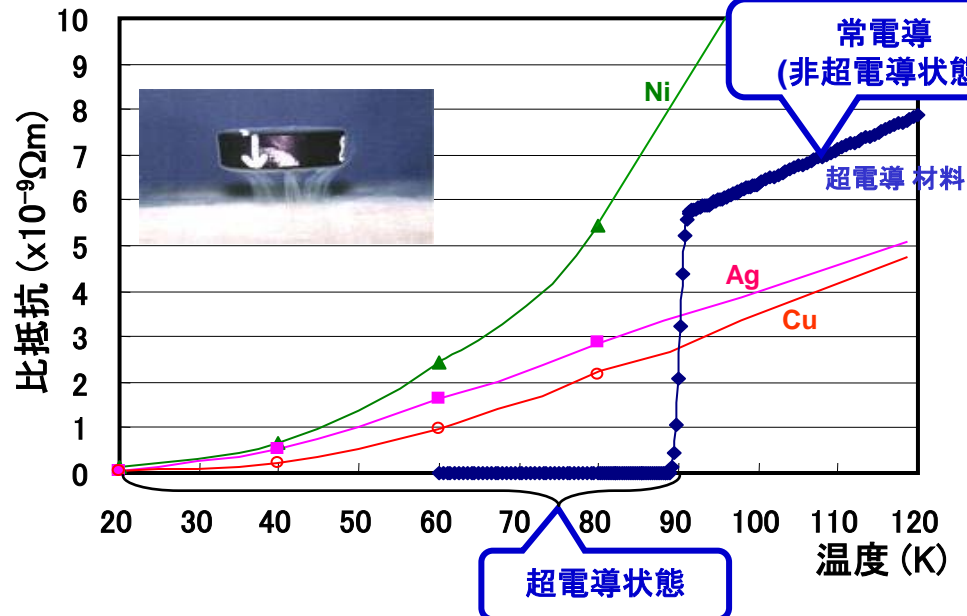
ニーズ	シーズ			
	技術大分類	技術中分類	技術番号	技術小分類
高度情報通信社会の構築	コンピュータ・ネットワーク機器	SFQルータ・スイッチ	401	<ul style="list-style-type: none"> ・大容量化 ・方式、アーキテクチャ ・ラック当たりスループット向上 ・低コスト化
		SFQコンピュータ、サーバ	402	<ul style="list-style-type: none"> ・SFQプロセッサの大規模化 ・高速超電導メモリ大容量化 ・処理能力/ラック向上 ・低消費電力化 ・アーキテクチャ
		量子コンピュータ	403	<ul style="list-style-type: none"> ・回路規模(対応量子ビット数)拡大 ・回路消費電力低減 ・高速化
	無線アクセス系機器	高精度・広帯域ADコンバータ(無線用)	404	<ul style="list-style-type: none"> ・方式 ・帯域・ビット精度向上 ・低コスト化 ・モジュール小型化
		受信フィルタ	405	<ul style="list-style-type: none"> ・高機能化 ・小型化 ・モジュール低コスト化 ・周波数調整技術
		送信フィルタ	406	<ul style="list-style-type: none"> ・耐電力特性向上 ・高調波歪み低減 ・送受信複合化 ・低コスト化
		衛星用通信機器(フィルタ、マルチプレクサ)	407	<ul style="list-style-type: none"> ・小型化、軽量化 ・高信頼化 ・高機能化 ・送受信複合化 ・冷却技術
		超電導アンテナ	408	<ul style="list-style-type: none"> ・指向性、効率向上 ・アレイ化 ・冷却技術 ・環境ノイズ影響低減技術
	計測機器	広帯域ADコンバータ(計測用)	409	<ul style="list-style-type: none"> ・帯域、ビット精度向上 ・モジュール小型化、低コスト化
		高速計測機器(サンブラ)	410	<ul style="list-style-type: none"> ・方式(入力、被測定対象) ・広帯域化 ・小型化、低コスト化 ・高感度化

 重要技術

超電導技術分野の技術マップ(共通基盤技術) (5/5)

技術大分類	技術中分類	技術番号	技術小分類
超電導線材技術	加工熱処理法技術 (含ブロンズ法技術)	501	・NbTi
			・Nb ₃ Sn
			・その他(Nb ₃ Al等)
	パウダーインチューブ法技術	502	・Bi2212
			・Bi2223
			・MgB ₂
			・その他
	薄膜線材技術	503	・Y(RE)系
			・その他
	導体化技術	504	・歪特性改善技術
・素線接続技術			
コイル化技術	505	・巻線技術	
		・絶縁技術	
		・コイル保護技術	
超電導バルク技術	溶融凝固バルク技術	506	・RE123系
			・Bi2212系
			・その他
	焼結バルク技術	507	・RE123系
・Bi系			
その他			・その他
超電導デバイス技術	デジタルデバイス技術	508	・Nb集積回路プロセス技術
			・NbN集積回路プロセス技術
			・酸化物集積回路プロセス技術
			・Nb系SFQデバイス
			・NbN系SFQデバイス
			・酸化物系SFQデバイス
			・入出インターフェイス技術
	・低温実装技術		
	SQUID応用技術	509	・Nbプロセス技術
			・酸化物プロセス技術
			・Nb系SQUID
			・酸化物系SQUID
	高周波デバイス技術	510	・実装技術
・MgB ₂ 薄膜技術			
・RE123系薄膜技術			
・バンドパスフィルタ			
・アンテナ			
冷凍・冷却技術	パワー機器用冷凍機技術	511	・4K冷凍機
			・20K～50K冷凍機
			・65K冷凍機
	デバイス機器用冷凍機技術	512	・4K冷凍機(1～3W)
			・4K冷凍機(0.1～0.5W)
			・50K、70K冷凍機
	大容量冷却技術	513	・LNG冷熱利用技術
			・サブクール冷却技術
			・LH ₂ 冷熱利用技術
	伝導冷却技術	514	・高効率冷却技術
			・薄肉断熱技術
	クライオスタット技術	515	・封止化技術
			・低熱侵入化
	電流リード技術	516	・機械的強度
			・耐高電圧化
			・大電流化

重要技術

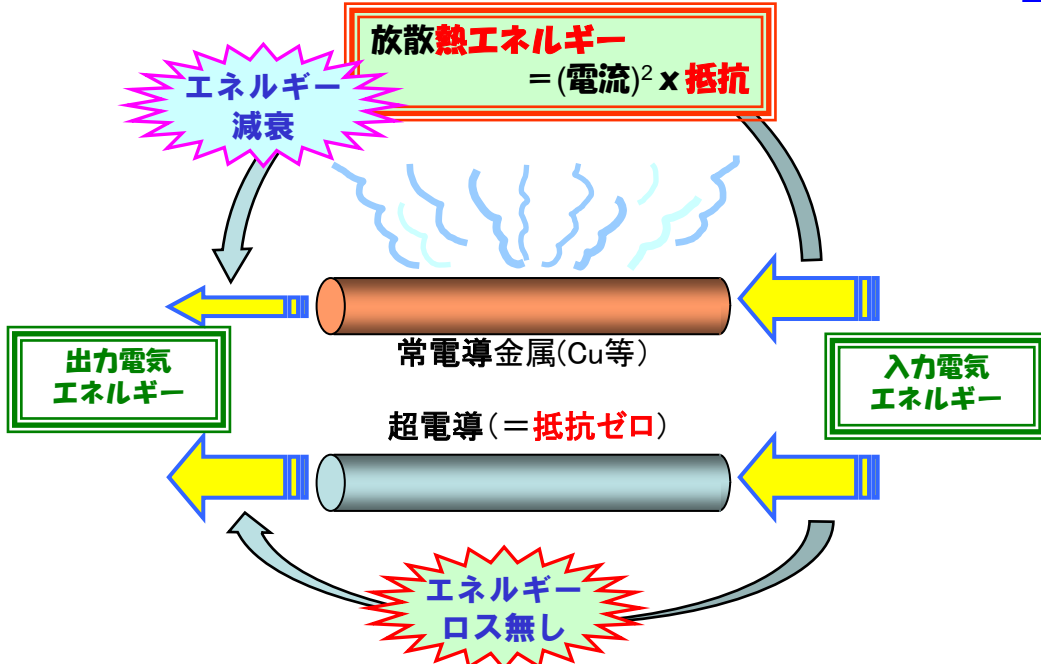
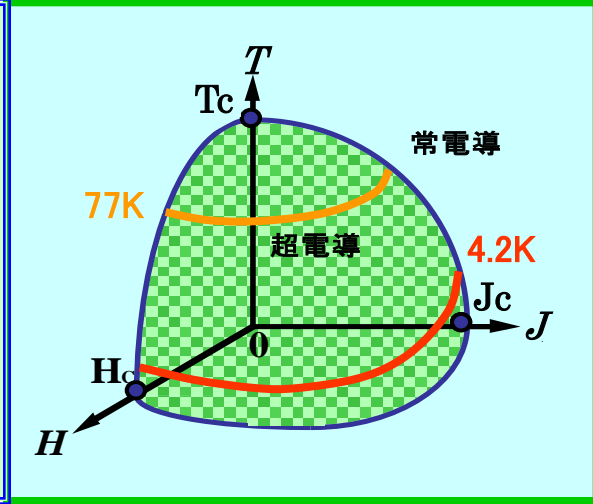


3つの臨界値

臨界温度 (T_c)
超電導を示す温度の上限

臨界電流 (J_c)
超電導を維持できる電流の上限

臨界磁場 (H_c)
超電導を維持できる磁場の上限



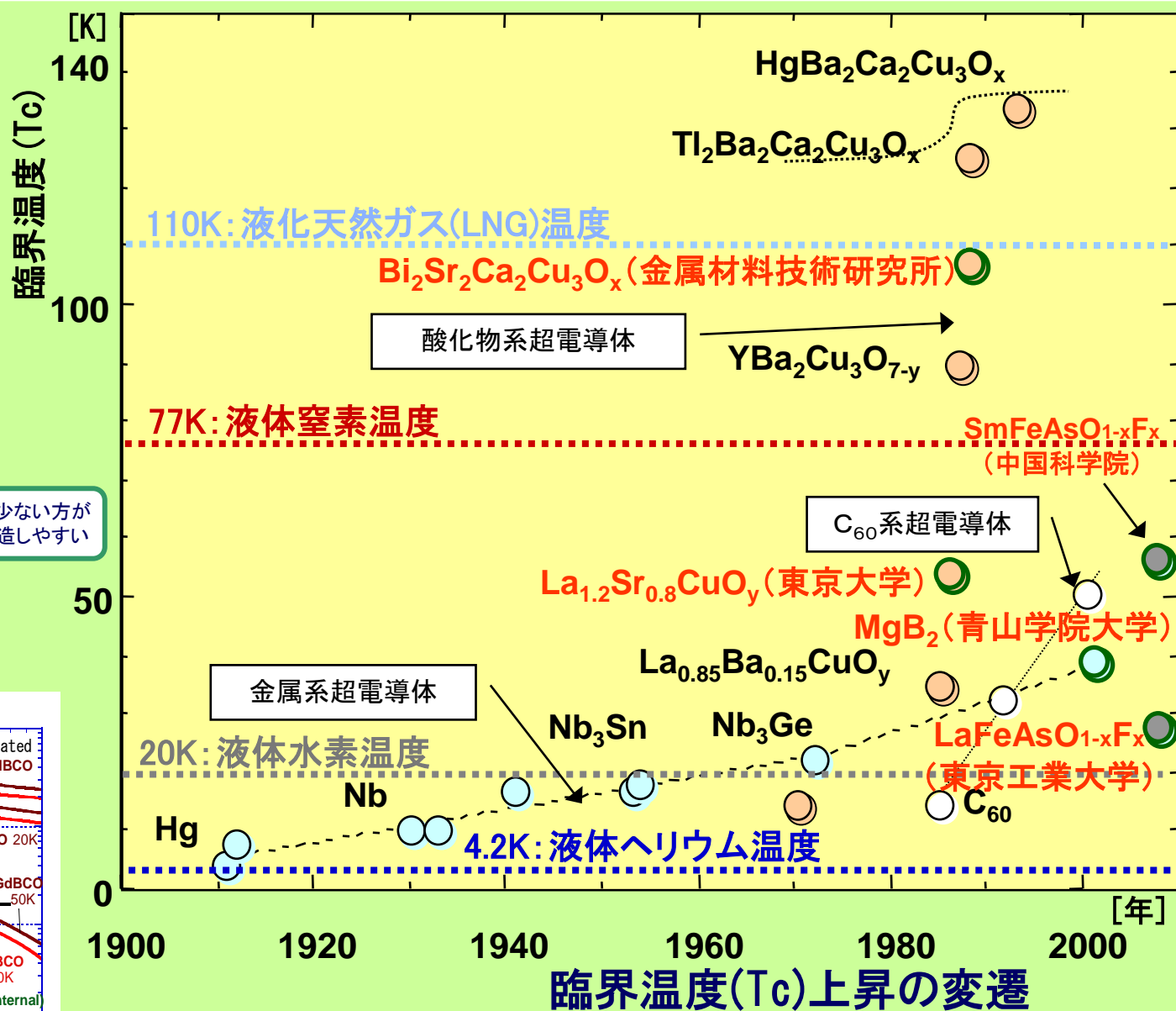
超電導の4条件 (田中の基準)

以下の4条件を全てクリアして、初めて超電導体と認定される。
(東京大学の田中昭二教授が1987年に提唱した客観的条件)

- 結晶構造およびその物質の何が超電導体であるのか
- マイスナー効果を示すか
- 電気抵抗が転移点付近で急激に消失するか
- 実験結果に十分再現性があるか

系 (代表物質)	元素数	T _c
Hg系 (HgBa ₂ Ca ₂ Cu ₃ O _x)	5	>110
Tl系 (Tl ₂ Ba ₂ Ca ₂ Cu ₃ O _x)	5	
Bi系 (Bi ₂ Sr ₂ Ca ₂ Cu ₃ O _x)	5	>77
Y系 (YBa ₂ Cu ₃ O _{7-y})	4	
Fe系 (SmFeAsO _{1-x} F _x)	5	>20
La系 (La _{0.9} Sr _{0.1}) ₂ CuO _y)	4	
MgB ₂ (MgB ₂)	2	
Nb系 (Nb ₃ Sn, NbTi)	2	>4.2

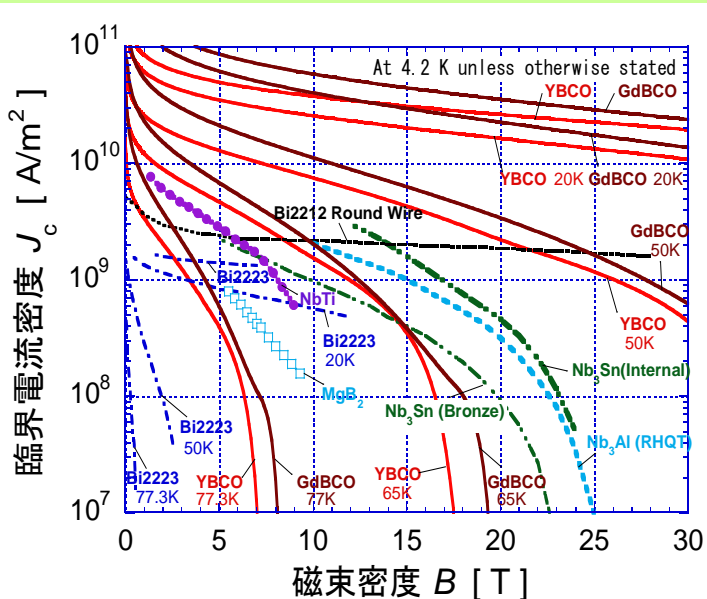
元素数が少ない方が
比較的製造しやすい



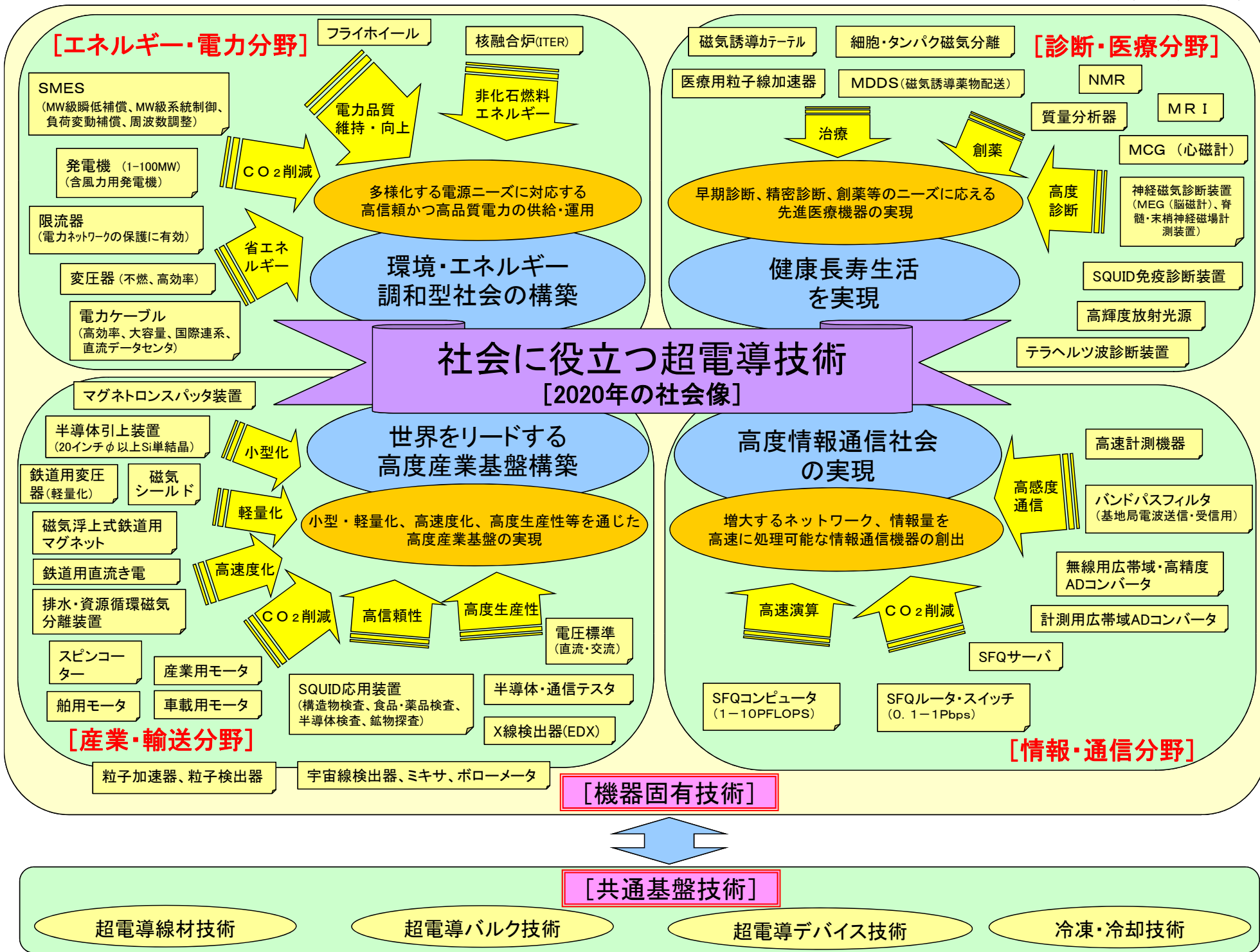
臨界温度(T_c)上昇の変遷

各種超電導線材の臨界電流密度

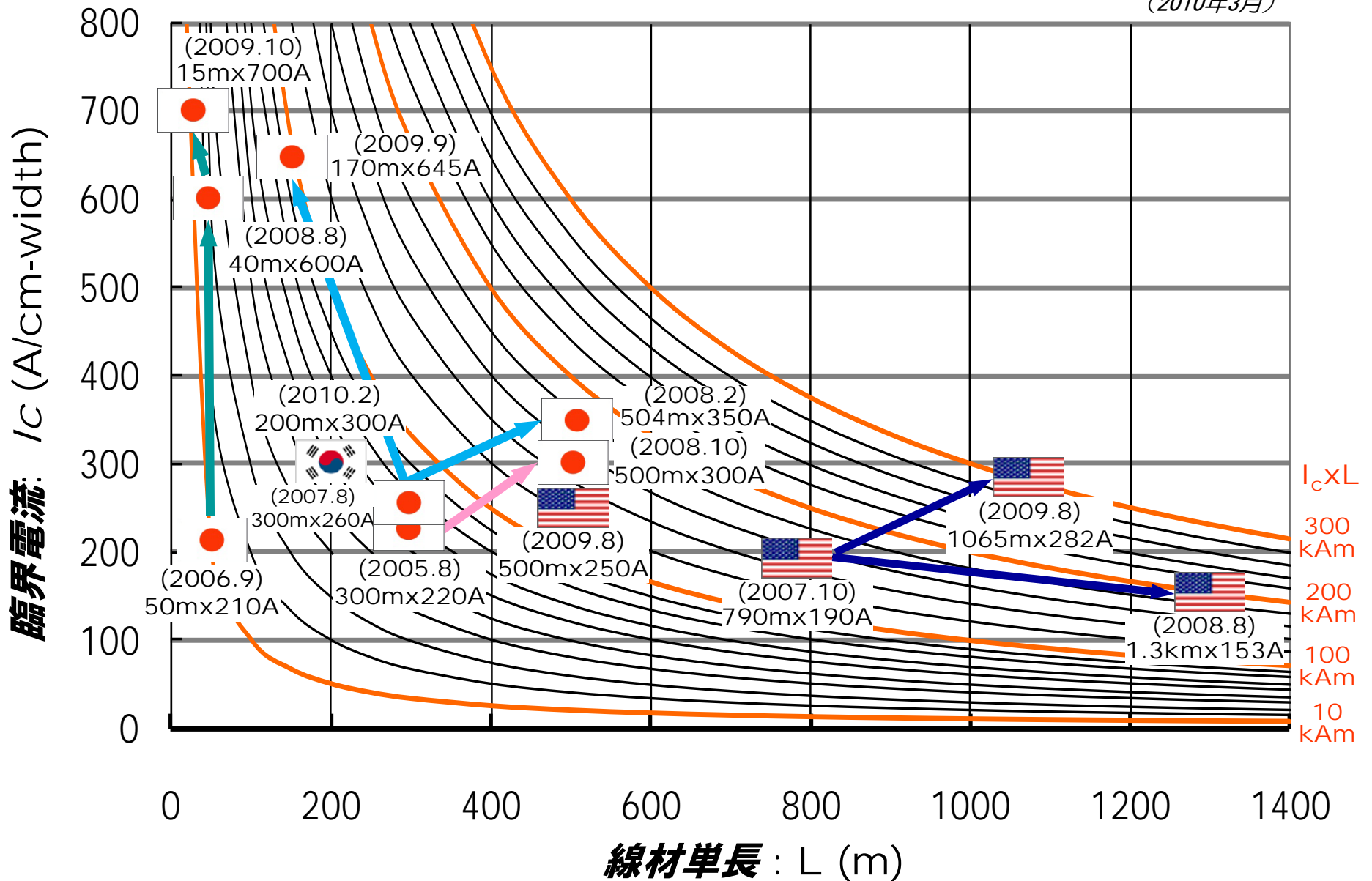
(九州大学 木須教授 作成)



(参考資料2：超電導物質の探索)



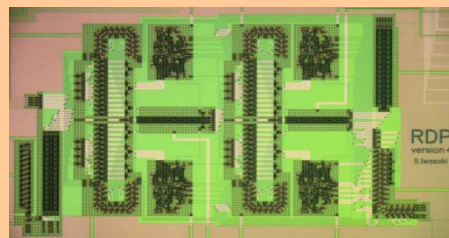
(2010年3月)



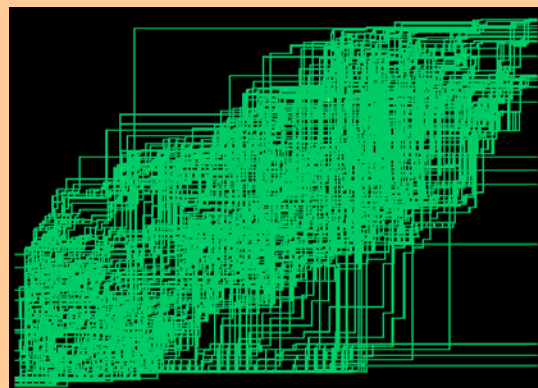
参考資料4：世界のY系超電導線材開発状況

(参考資料5：SFQ技術の国際評価)

名古屋大学がSRL標準プロセスで作製した11,000接合からなる20GHz動作再構成可能なデータパスを持つプロセッサ
(高性能計算機のアクセラレータとして使用) (2008.8)



超電導工学研究所及び名古屋大学が作製した自動配線ツールでレイアウトした大規模SFQ回路(16x16 switch circuit) (2005.3)



名古屋大学がSRL-ADPで作製した90GHz動作2x2 SW (2008.10)

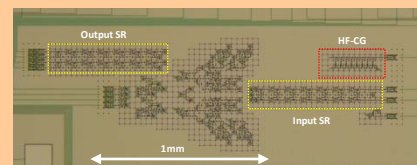


TABLE E-1. REASONS TO DEVELOP SUPERCONDUCTIVE COMPUTER TECHNOLOGY

Technological	Financial
NSA's computing needs are outstripping conventional technology.	Market forces alone will not drive private industry to develop SC technology.
RSFQ technology is an excellent candidate for higher-performance computing capability.	The federal government will be the primary end user of SC computer technology.
RSFQ technology has a clear and viable roadmap.	Other federal government missions will benefit from advances in SC technology.

TABLE E-2. RSFQ SUMMARY

Technical Advantages	Technical Challenges
The most advanced alternative technology.	Providing high-speed and low-latency memory.
Combines high speed with low power.	Architecting systems that can tolerate significant memory access latencies.
Ready for aggressive investment.	Providing very high data rate communications between room temperature technology and cooled RSFQ.

TABLE E-3. DIGITAL RSFQ TECHNOLOGY'S CURRENT STATE OF THE INDUSTRY

Country	Entity	Status
	ISTEC/SRL	- 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	- Private company focused entirely on SC digital electronics. - Has operated the only full-service commercial foundry in the U.S. since 1983.
	Northrop Grumman	- 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	- Currently conducting academic research.
	Chalmers U of Technology	- Currently conducting academic research.
	NSA, NIST	- 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

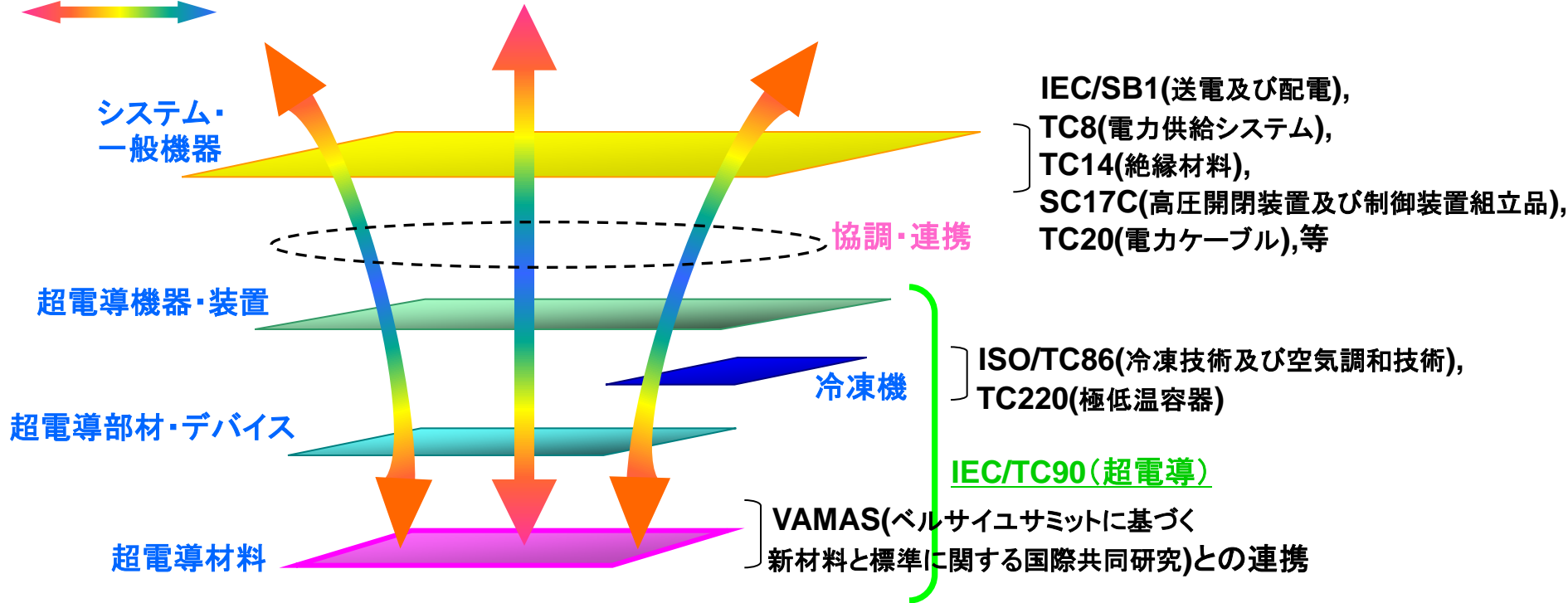


National Security Agency
Office of Corporate Assessments

AUGUST 2005

(参考資料6:超電導標準化マップ)

活発 将来活動



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)

	臨 界 電 流	残 留 抵 抗 比	機 械 強 度	表 面 抵 抗	臨 界 温 度	交 流 損 失	捕 捉 磁 場	
済								Nb-Ti
								Nb ₃ Sn
		検討						酸化物
							未定	MgB ₂

規格化進捗状況

※ 1性能ごとの規格ではないため、規格数と項目数は一致していない。

研究発表・講演、文献、特許等の状況

1. 研究発表・講演

産業用超電導線材・機器技術研究組合

発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者	査読
H22年10月30日	講演(招待講演) International Workshop on Coated Conductors for Applications	Development of High-Rate Laser-CVD System for Long-Length Coated Conductor Fabrication	T.Izumi(ISTERA), Y.Shiohara(ISTERA), A.Ibi (ISTEC), A.Ito (Tohoku-Univ.), T. Goto (Tohoku-Univ.)	無
H22年10月5日	講演(招待講演) International Superconductivity Industry Summit(ISIS)-19	Challenges in Development of Coated Conductor in Japan	T.Izumi (ISTERA)	無
H23年3月4日	(ポスター) 元素戦略/希少金属代替材料開発 第5回合同シンポジウム	超軽量高性能モータ等向イットリウム系複合材料の開発	T.Izumi (ISTERA)	無

東北大学

発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者	査読
H22年12月8日	(国際会議・招待講演) International Workshop on Advanced Materials and Technologies for Global Energy and Environmental Challenges	High-Speed Growth of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ Film by Laser Chemical Vapor Deposition	Takashi Goto, Pei Zhao, Akihiko Ito (Tohoku-Univ.)	無
H22年5月27日	(ポスター) 第119回東北大学金属材料研究所講演会	Effects of laser power on (100)-oriented CeO_2 and $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ film prepared on MgO single crystal substrate by laser chemical vapor deposition	Pei Zhao, Akihiko Ito, Rong Tu, Takashi Goto (Tohoku-Univ.)	無
H22年9月19日 ~26日	(ポスター) Tohoku・Novosibirsk Research Student Workshop	High-speed growth of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ film with high critical temperature on MgO single crystal substrate by laser chemical vapor deposition	Pei Zhao, Akihiko Ito, Rong Tu, Takashi Goto (Tohoku-Univ.)	無
H22年10月28日	(ポスター) 平成22年度セラミックス協会東北北海道支部研究発表会	Fast epitaxial growth of a-axis- and c-axis-oriented $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ films on (100) LaAlO_3 substrate by laser chemical vapor deposition	Pei Zhao, Akihiko Ito, Rong Tu, Takashi Goto (Tohoku-Univ.)	無

H22年11月24日	(ポスター) 第120回東北大学金属材料研究所講演会	High-speed epitaxial growth of (100)-oriented CeO ₂ film on <i>r</i> -cut sapphire by laser chemical vapor deposition	Pei Zhao, Akihiko Ito, Rong Tu, Takashi Goto (Tohoku-Univ.)	無
H22年12月2日	(ポスター) KINKEN-WAKATE 2010	High-speed growth of YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} film with high critical temperature on (100) SrTiO ₃ single crystal substrate by laser chemical vapor deposition	Pei Zhao, Akihiko Ito, Rong Tu, Takashi Goto (Tohoku-Univ.)	無
H23年1月11日	(講演) 第49回セラミックス基礎科学討論会	High-speed preparation of <i>a</i> -axis- and <i>c</i> -axis-oriented YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} film on Hastelloy C276 tape by laser chemical vapor deposition	Pei Zhao, Akihiko Ito, Rong Tu, Takashi Goto (Tohoku-Univ.)	無
H23年3月1日	(ポスター) 平成22年度GCOE若手研究者研究報告会	High-speed growth of YBCO films on (100) MgO, LaAlO ₃ and SrTiO ₃ single crystal substrates by laser CVD	Pei Zhao, Akihiko Ito, Rong Tu, Takashi Goto (Tohoku-Univ.)	無
H22年11月10日	(論文) Superconductor Science and Technology 23 (12) pp. 125010 (2010).	High-speed growth of YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} film with high critical temperature on MgO single crystal substrate by laser chemical vapor deposition	Pei Zhao, Akihiko Ito, Rong Tu, Takashi Goto (Tohoku-Univ.)	有
H22年2月15日	(論文) Applied Surface Science, 257 (9) (2011) pp. 4317-4320.	Fast epitaxial growth of <i>a</i> -axis- and <i>c</i> -axis-oriented YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} films on (100) LaAlO ₃ substrate by laser chemical vapor deposition	Pei Zhao, Akihiko Ito, Rong Tu, Takashi Goto (Tohoku-Univ.)	有
H23年3月15日	(論文) Surface and Coatings Technology 205 (16) (2011) pp. 4079-4082	High-speed epitaxial growth of (100)-oriented CeO ₂ film on <i>r</i> -cut sapphire by laser chemical vapor deposition	Pei Zhao, Akihiko Ito, Rong Tu, Takashi Goto (Tohoku-Univ.)	有

名古屋大学

発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者	査読
H22年8月2日	(ポスター) Applied Superconductivity Conference 2010	Possibility of Nd:YAG- PLD method for fabricating REBCO coated conductor	Yusuke Ichino (Nagoya Univ.), Yutaka Yoshida (Nagoya Univ.), Takuya Yoshimura (Nagoya Univ.), Ikuo Ono (Nagoya Univ.), Yoshiaki Takai (Nagoya Univ.), Masateru Yoshizumi (ISTERA), Teruo Izumi (ISTERA), Yuh Shihara (ISTERA)	無
H22年9月15日	(講演) 2010年秋季第71回 応用物理学学会学術講演会	Nd:YAG-PLD 法によるコー テッドコンダクター作製プ ロセスの検討	一野祐亮(名大)、吉田隆 (名大)、吉村拓也(名大)、 小野郁朗(名大)、高井 吉 明(名大)、吉積正晃 (ISTERA)、和泉輝郎 (ISTERA)、 塩原融(ISTERA)	無
H22年10月28日	(ポスター) International Workshop on Coated Conductors for Applications 2010	Rapid Screening of New Pinning Materials by Using Nd:YAG-PLD method	Y. Ichino (Nagoya Univ.), Y. Yoshida (Nagoya Univ.), T. Yoshimura (Nagoya Univ.), I. Ono (Nagoya Univ.), Y. Takai (Nagoya Univ.), M. Yoshizumi (ISTERA), T. Izumi (ISTERA), Y. Shiohara (ISTERA)	無
H22年11月1日	講演 (招待講演) 23th International Symposium on Superconductivity2010	Development of coated conductor process by means of Nd:YAG-PLD method	Y. Ichino (Nagoya Univ.), Y. Yoshida (Nagoya Univ.), T. Yoshimura (Nagoya Univ.), I. Ono (Nagoya Univ.), Y. Takai (Nagoya Univ.), M. Yoshizumi (ISTERA), T. Izumi (ISTERA), Y. Shiohara (ISTERA)	無
H22年12月1日	(講演) 2010年度秋季低温工学・ 超電導学会	インプラーム Nd:YAG-PLD 法による IBAD-MgO 基板 上への YBa ₂ Cu ₃ O _y 膜作製	小野郁朗(名大)、一野祐亮 (名大)、吉田隆(名大)、高 井吉明(名大)、吉積正晃 (ISTERA)、和泉輝郎 (ISTERA)、塩原融 (ISTERA)	無
H23年5月27日	(論文) IEEE Transactions on Applied Superconductivity	Possibility of Nd:YAG- PLD method for fabricating REBCO coated conductor	Y. Ichino (Nagoya Univ.), Y. Yoshida (Nagoya Univ.), T. Yoshimura (Nagoya Univ.), I. Ono (Nagoya Univ.), Y. Takai (Nagoya Univ.), M. Yoshizumi (ISTERA), T. Izumi (ISTERA), Y. Shiohara (ISTERA)	有

発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者	査読
H22年10月27日	(講演) The 2nd Japan-Korea Superconductivity Workshop 2010	IMAGING OF LOCAL CURRENTS IN TFA-MOD PROCESSED COATED CONDUCTORS	K. Shiohara (Kyushu Univ.), K. Higashikawa (Kyushu Univ.), T. Kawaguchi (Kyushu Univ.), M. Inoue (Kyushu Univ.), T. Kiss (Kyushu Univ.), M. Yoshizumi (ISTERA), T. Izumi (ISTERA)	無
H22年10月28日	(講演) International Workshop on Coated Conductors for Applications 2010	Imaging of Two-Dimensional Distribution of Hall Probe-Microscopy	K. Shiohara (Kyushu Univ.), K. Higashikawa (Kyushu Univ.), T. Kawaguchi (Kyushu Univ.), M. Inoue (Kyushu Univ.), T. Kiss (Kyushu Univ.), T. Machi (ISTEC), N. Chikumoto (ISTEC), K. Nakao (ISTEC), K. Tanabe (ISTERA), M. Yoshizumi (ISTERA), T. Izumi (ISTERA), Y. Shioha (ISTERA)	無
H22年10月31日	(講演) 超電導材料若手研究会	走査型 Hall 素子磁気顕微鏡による TFA-MOD 法 YBCO 線材の臨界電流分布評価	塩原敬(九大), 東川甲平(九大), 川口鉄平(九大), 井上昌睦(九大), 木須隆暢(九大), 吉積正晃(ISTERA), 和泉輝郎(ISTERA)	無
H22年11月1日	(講演) 23rd International Symposium on Superconductivity	MEASUREMENT OF LOCAL CRITICAL CURRENTS IN TFA-MOD PROCESSED COATED CONDUCTORS BY USE OF SCANNING HALL-PROBE MICROSCOPY	K. Shiohara (Kyushu Univ.), K. Higashikawa (Kyushu Univ.), T. Kawaguchi (Kyushu Univ.), M. Inoue (Kyushu Univ.), T. Kiss (Kyushu Univ.), M. Yoshizumi (ISTERA), T. Izumi (ISTERA)	無
H23年5月18日	(講演) 2011年春季低温工学・超電導学会	長尺 RE-123 線材の面内臨界電流密度分布の非破壊評価に向けた走査型ホール素子顕微鏡システムの高速度化	東川甲平(九大), 今村和孝(九大), 塩原敬(九大), 井上昌睦(九大), 木須隆暢(九大), 飯島康裕(ISTERA), 斉藤隆(ISTERA), 吉積正晃(ISTERA), 和泉輝郎(ISTERA)	無
印刷中	(論文) Physica C: Superconductivity	MEASUREMENT OF LOCAL CRITICAL CURRENTS IN TFA-MOD PROCESSED COATED CONDUCTORS BY USE OF SCANNING HALL-PROBE MICROSCOPY	K. Shiohara (Kyushu Univ.), K. Higashikawa (Kyushu Univ.), T. Kawaguchi (Kyushu Univ.), M. Inoue (Kyushu Univ.), T. Kiss (Kyushu Univ.), M. Yoshizumi (ISTERA), T. Izumi (ISTERA)	有

2. 特許等

なし

3. その他の公表 (プレス発表等)

発表年月日	発表媒体	発表タイトル
H22年4月14日	鉄鋼新聞	超伝導線材で「研究組合」大型設備導入長尺線材を製造
H22年11月1日 ～3日	(パネル展示) 23rd International Symposium on Superconductivity	Development of Yttrium-based Composite Material for Ultra-light and High-performance Motors. (Rare Metal Substitute Materials Development Project)
H22年12月9日 ～11日	(パネル展示) エコプロダクツ 2010	超軽量高性能モーター等向イットリウム系複合材料の開発 (希少金属代替材料開発プロジェクト)
H23年2月1日	レアメタルニュース	[イットリウム系超伝導線材] 送電ケーブル開発、ネオジム磁石代替研究線材の超長尺化、コストダウンなどの課題克服しライバルのビスマス系を追撃、超伝導線材「スマートグリッド」送電ケーブルの本命めざし実用化開発が加速ネオジム鉄ボロン代替を目的に電磁石向けの研究も同時進行中

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。

ナノテク・部材イノベーションプログラム 環境安心イノベーションプログラム 「希少金属代替材料開発プロジェクト」

Nd-Fe-B系磁石を代替する新規永久磁石及びイットリウム系複合材料の開発
超軽量高性能モータ等向けイットリウム系複合材料の開発（事後評価）
（2010年3月17日～2011年5月31日）

プロジェクトの概要（公開）

NEDO 省エネルギー部

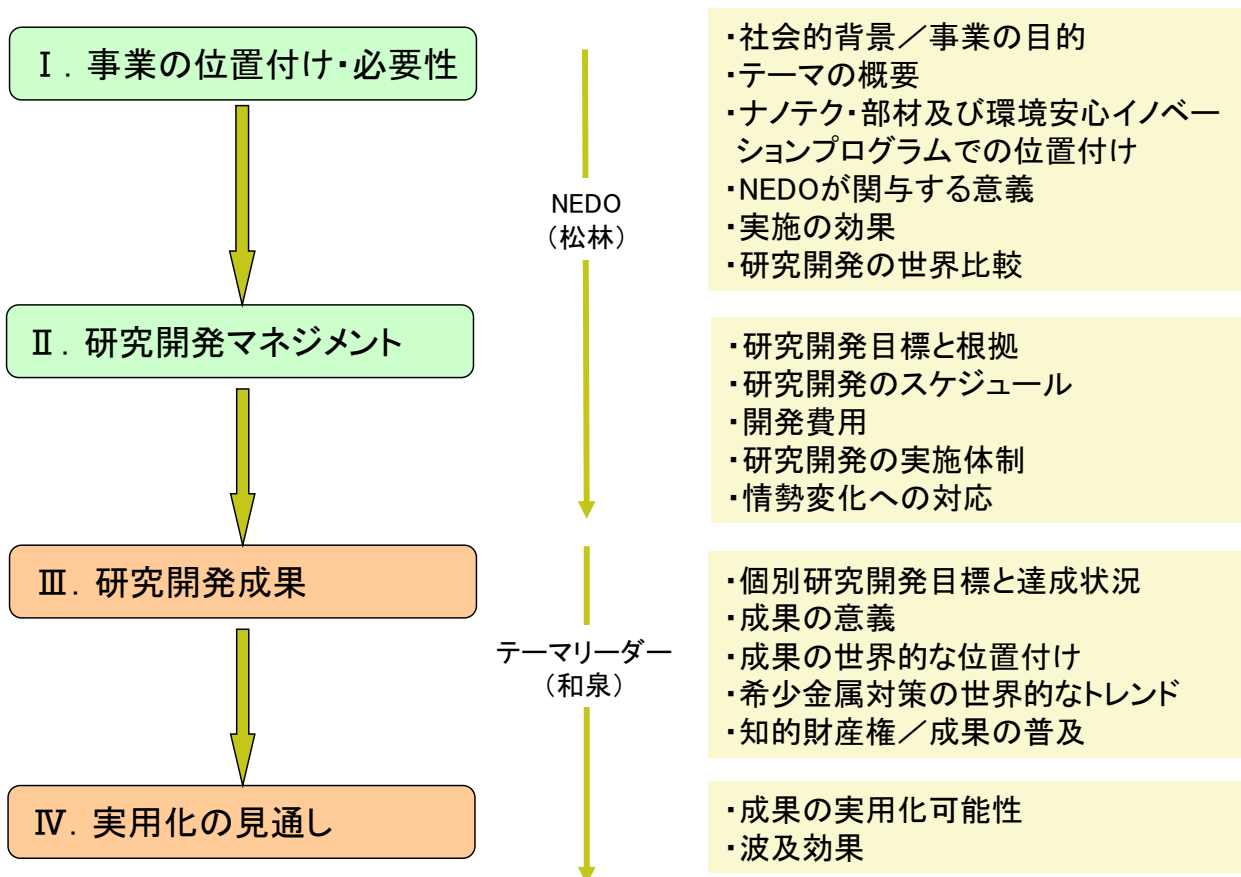
テーマリーダー 産業用超電導線材・機器技術研究組合
和泉輝郎

2011年 10月18日

1/38

概要説明 報告の流れ

公開



2/38

社会的背景

① 希少金属は、我が国の産業を支える高付加価値な部材の原料であり、近年その需要が拡大している。しかし、途上国における著しい需要の拡大や、そもそも他の金属と比較して希少であり、代替性も低く、また、その偏在性ゆえに特定の産出国への依存度が高い。

我が国の中長期的な安定供給確保に対する懸念が生じている。

② 国内の電力消費総量の半分以上、産業部門の約7割をモータが消費しており、モータの高効率化が喫緊の課題である。

軽量かつ高性能な次世代モータが求められている。

事業の目的

背景①に対応

背景②に対応

今後普及の見込まれるディスプロシウム(Dy)を含有する高効率永久磁石モータ部材に対して、将来的に代替の可能性のある次世代モータ部材を実現するイットリウム(Y)系複合材料を開発し、それを用いた軽量かつ高性能な次世代超電導モータを実現するために必要な設計さらには線材の巻線技術等の要素技術を開発

テーマの概要

本プロジェクトでは、ディスプロシウム(Dy)を含有するモータ部材に将来的に代わる可能性のある次世代モータ部材を実現するイットリウム(Y)系複合材料の開発を行う。

(1) 超長尺イットリウム(Y)系複合材料における希少金属使用量低減技術開発

これまで国内で500 m長複合材料を実現できている作製プロセスを選択し、イットリウム系複合材料を用いた電磁石を実現するために必要な(Ic)を超える高い特性を有した超長尺複合材料を実現するプロセス開発を行う。

(2) イットリウム(Y)系複合材料の製造工程における希少金属利用率等の効率向上技術開発

(1)で選択したプロセスに比べて現状では長尺作製実績は十分ではないものの原理的に高い原料収率が見込まれる作製手法において複合材料プロセスの開発を行うことで、イットリウム利用率向上技術の開発を行う。

(3) イットリウム(Y)系複合材料を用いたモータ要素技術開発

超長尺イットリウム系複合材料を用いたモータに対する構造最適化のための課題抽出を目的として、磁場、応力等のシミュレータの開発とこれを用いた構造評価を行なうと共にモータ開発の基軸になる傘型等異形界磁巻線、サーモサイフォン式冷却方式の要素技術の開発を並行して行う。

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

ナノテク・部材イノベーションプログラム及び
環境安心イノベーションプログラム での位置付け

ナノテク・部材
イノベーションプログラム

- I. ナノテクノロジーの加速化領域
- II. 情報通信領域
- III. ライフサイエンス・健康・医療領域
- IV. エネルギー・資源・環境領域
- V. 材料・部材領域

環境・安心
イノベーションプログラム

- I. 地球温暖化防止新技術
- II. 資源制約克服/3R
- III. 環境調和産業創造バイオ
- IV. 化学物質総合評価管理

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ク関連産業・部
材産業の競争力を強化する。

資源制約の克服

希少金属代替材料
開発プロジェクト

社会的制約を乗り越える！！

エネルギー制約

資源制約

環境制約

〔対象元素〕

- ・超硬工具向けタングステン(W)
- ・透明電極向けインジウム(In)
- ・希土類磁石向けジスプロシウム(Dy)
- ・排ガス浄化向け白金族(Pt)
- ・精密研磨向けセリウム(Ce)
- ・蛍光体向けテルビウム、ユーロピウム(Tb, Eu)
- ・排ガス浄化向けセリウム(Ce)

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

希少金属代替材料開発プロジェクト

概要: ハイテク製品の製造に不可欠であり世界的な需給逼迫が懸念されるレアメタル(タングステン(W)、インジウム(In)、ジスプロシウム(Dy)、白金(Pt)、セリウム(Ce)、テルビウム(Tb)等)について、ナノテクノロジー等の最先端技術を活用して、代替材料開発・使用量削減を行う。

研究開発項目

本事業

① 透明電極向けインジウム(In)使用量低減技術開発	
② 透明電極向けインジウム(In)代替材料開発	
③ 希土類磁石向けジスプロシウム(Dy)使用量低減技術開発	
④ 超硬工具向けタングステン(W)使用量低減技術開発	
⑤ 超硬工具向けタングステン(W)代替材料開発	
⑥ 排ガス浄化向け白金(Pt)族使用量低減技術開発及び代替材料開発	1 遷移元素による白金族代替技術及び白金族の凝集抑制技術を活用した白金族低減技術の開発 2 ディーゼル排ガス浄化触媒の白金族使用量低減化技術の開発
⑦ 精密研磨向けセリウム(Ce)使用量低減技術開発及び代替材料開発	1 代替砥粒及び革新的研磨技術を活用した精密研磨向けセリウム低減技術の開発 2 4BODY研磨技術の概念を活用したセリウム使用量低減技術の開発
⑧ 蛍光体向けテルビウム・ユーロピウム使用量低減技術開発及び代替材料開発/高速合成・評価法による蛍光ランプ用蛍光体向けTb, Eu低減技術の開発	
⑨ Nd-Fe-B系磁石を代替する新規永久磁石及びイットリウム(Y)系複合材料の開発	1 Nd-Fe-B系磁石を代替する新規永久磁石の研究 2 超軽量高性能モータ等向けイットリウム系複合材料の開発 3 Nd-Fe-B系磁石を代替する新規永久磁石の実用化に向けた技術開発
⑩ 排ガス浄化向けセリウム(Ce)使用量低減技術及び代替材料開発、透明電極向けインジウム(In)を代替するグラフェンの開発	1 排ガス浄化向けセリウム使用量低減技術及び代替材料開発 2 透明電極向けインジウムを代替するグラフェンの開発

NEDOが関与する意義

- 本研究開発は、「ナノテク・材料分野」に列挙されている「戦略重点科学技術」のうち「資源問題解決の決定打となる希少資源・不足資源代替材料革新技術」にあたるものであり、文部科学省の元素戦略プロジェクトと連携し、基礎から実用化までの間隙のない支援体制を確立して行うもので、我が国の科学技術力の向上という点からも極めて意義が高いものである。
- 高温超電導材料は新しい材料であり、産業化のためには優れた特性を維持しつつ材料の低コスト・量産化等に検討課題が多く存在し、開発には大きなリスクを伴う。

政策的位置付けであること、資源セキュリティに係ること、高度な技術開発が必要であること、更に開発リスクが非常に高いこと等の観点からNEDOが関与して進めていく必要がある。

H21年度二次補正予算要求書 - 開発目的 -

「超軽量且つ高性能な次世代電気自動車用モータや、次世代医療診断機器等の実現に向け、イットリウム系複合材料の開発が期待されている。この開発・製造技術、希少金属であるイットリウムの使用量低減技術等の確立に向けた研究開発を行い、革新的部材・機器の実現により国際競争力の強化につなげる」

本事業はこの目的に沿ったものである。

実施の効果 (使用量削減効果)

500kW級モータに対する希少金属 (希土類元素) 使用量の比較

永久磁石モータ

NEOMAX(Nd-Fe-B系)を想定。 残留磁束密度:1.2 T
 ギャップにおける磁束密度:0.5 T(現状の永久磁石式モータを参照)
 形状:10cmx50cmx3mm(レーストラック型)
 [1極当りの希土類の重量] $142.5(\text{体積}) \times 7.4(\text{密度}) \times 0.266(\text{RE比率})$

~300g (Nd:200g & Dy:100g)

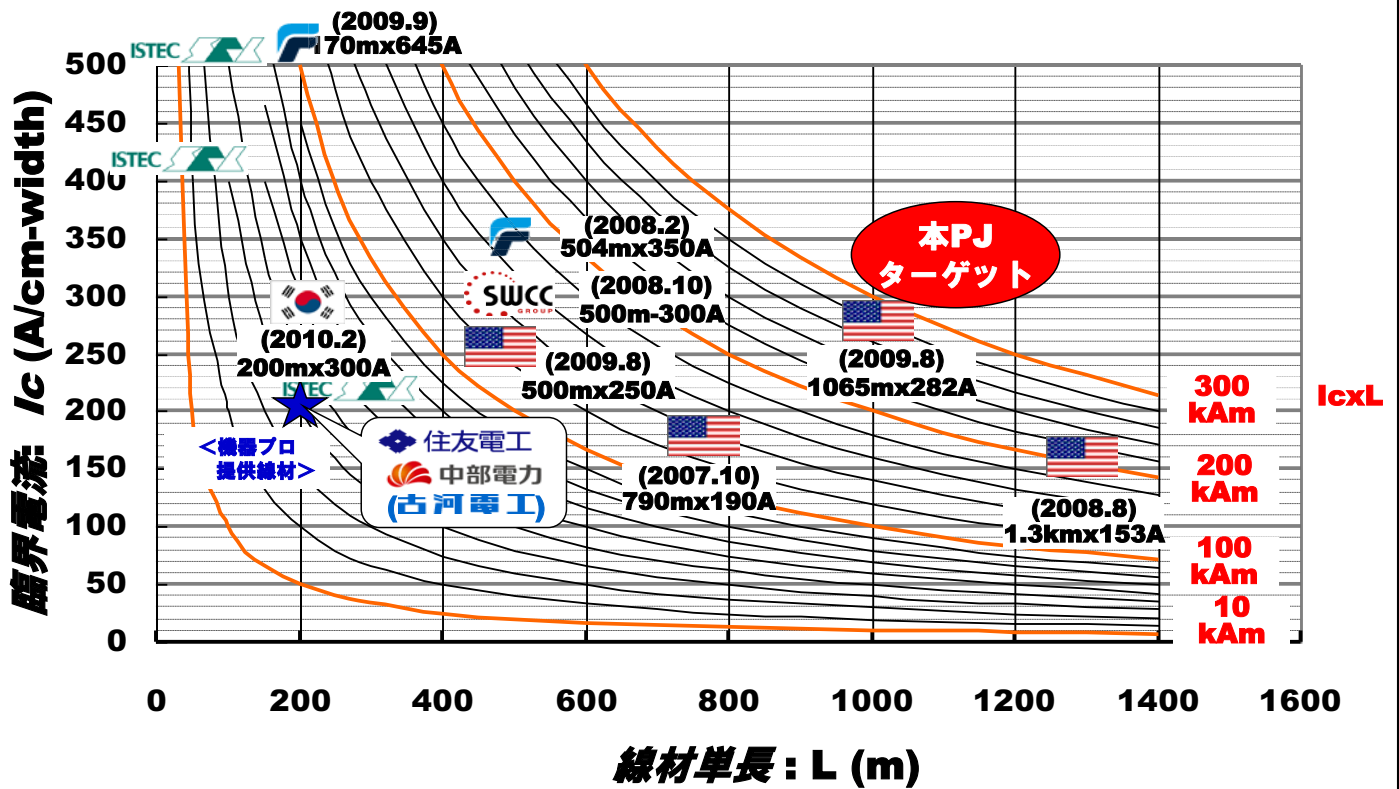
超電導巻線モータ

YBCO超電導線材による超電導巻線。最大磁界:~1.3 T、ギャップ磁束密度:0.5 T
 超電導線材スペック
 厚さ:0.25mm(超電導層:1.5 μ m、基板:100 μ m、安定化銅層:100 μ m、絶縁:50 μ m)
 幅:10mm 線材長/1極:2400m 超電導特性:lc:300A(77K, 0T)、300A(45K, 2T)
 [1極当りの希土類の重量]

$36.0(\text{体積}) \times 6.3(\text{密度}) \times 0.133(\text{RE比率}) \times 0.33(\text{B補正}) / 0.30(\text{収率})$

~30g (Y or Gd)

研究開発の世界比較



研究開発目標と根拠

	研究開発目標	設定根拠
①超長尺イットリウム系複合材料における希少金属使用量低減技術開発	<ul style="list-style-type: none"> ・300 A/cm 幅 (@77K, 自己磁場) の特性を有し 1 km を超える超長尺線材作製を見通す 	<ul style="list-style-type: none"> ◆500kW級産業用回転機用コイルの粗計算 (希土類使用量の低減効果 ~ 1/10) ⇒1極コイル製作に必要な線材単長 > 1km (低損失かつ高強度を維持する条件)
②イットリウム系複合材料の製造工程における希少金属利用率等の効率向上技術開発	<ul style="list-style-type: none"> ・超電導層の連続形成プロセスにおいて原料収率 40% 以上を見通す 	<ul style="list-style-type: none"> ◆イットリウム系超電導電力機器技術開発における提供線材での原料収率実績 ~ 30% (現状) ⇒希土類使用量の更なる低減として原料収率 ≥ 40% (目標)
③イットリウム系複合材料を用いた回転機要素技術開発	<ul style="list-style-type: none"> ・希土類元素(RM)量など 500kW級回転機におけるY系適用の優位性を示す ・要素技術(界磁コイル、冷却)の開発を行い、設計・製作の見通しを得る 	<ul style="list-style-type: none"> ◆500kW級産業用回転機用コイルの粗計算 (粗計算は単純レストラックコイル想定。構造適正化は未検討。) ⇒Y系超電導回転機実用化を促進させるために必要な開発項目として ・回転機構造の適正化を通じた希土類使用量低減効果の定量化 ・適正構造に対応した要素技術の実証

研究開発のスケジュール

【変更前】

研究項目	FY21 4Q	FY22/1Q	2Q	3Q	4Q	
①超長尺イットリウム系 複合材料技術開発	大型装置の設計・製作 要素技術開発(自社設備)				プロセス 開発	1km 300A
②効率向上技術開発	装置の設計・製作		プロセス開発			収率40%
③回転機 要素技術開発	粗設計	概念設計 要素技術(コイル・冷却)				Y系回転機 優位性

3/11 東日本大震災

約2ヶ月の延長

【変更後】

研究項目	FY21 4Q	FY22/1Q	2Q	3Q	4Q	FY23 4-5月	
①超長尺イットリウム系 複合材料技術開発	大型装置の設計・製作 要素技術開発(自社設備)				プロセス開発 (1kmはバッチ試料)		1km 300A
②効率向上技術開発	装置の設計・製作		プロセス開発				収率40%
③回転機 要素技術開発	粗設計	概念設計 要素技術(コイル・冷却)					Y系回転機 優位性

開発費用

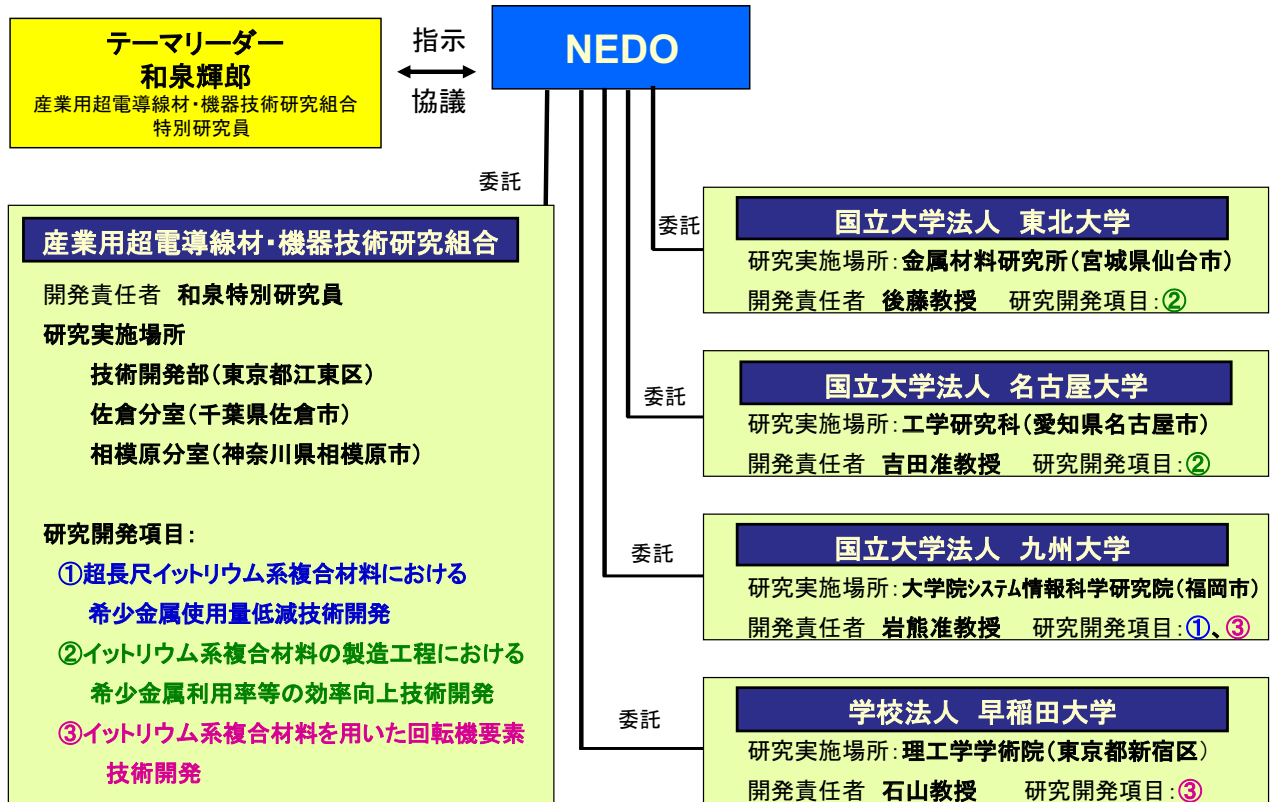
希少金属代替材料開発プロジェクト

Nd-Fe-B系磁石を代替する新規永久磁石及びイットリウム系複合材料の開発

超軽量高性能モータ等向けイットリウム系複合材料の開発		'09	'10	'11	合計
①	超長尺イットリウム系複合材料における 希少金属使用量低減技術開発	0.2	2,300	0	2,300
②	イットリウム系複合材料の製造工程にお ける希少金属利用率等の効率向上技術 開発	0	431	0	431
③	イットリウム系複合材料を用いた回転機 要素技術開発	0	259	5.8	265
合計		0.2	2,990	5.8	2,996

(単位:百万円)

研究開発の実施体制



1. 「イットリウム系複合材料を用いた超電導回転機開発委員会」

委員長 仁田教授 (明星大学) 委員15名

- ・ユーザーを交えた専門家による委員構成
- ・現在のイットリウム系複合材料、回転機応用の現状を調べ、Y系回転機としてのメリットや今後の課題と進むべき方向性を議論
- ・調査結果を回転機の開発および将来の開発に資することを目的とする
- ・平成22年度に委員会を2回開催

2. 知財マネジメント

- ・実施者の保有特許リストアップ(提案時)
- ・提案段階での実施者以外のプロジェクト関連特許調査実施
- ・学会発表・外部発表の集中管理(研究組合で管理)
- ・特許出願・論文発表等におけるノウハウ流出防止

プロジェクト実施

情勢変化への対応

1. テーマリーダー主催による「連絡会議」を開催（年4回／H22年度）

- ・研究内容の進捗状況確認とディスカッション
- ・今後の方針とスケジュールの協議調整

	開催日	主な議題
第1回	平成22年 4月21日	プロジェクト目標の確認、各テーマ研究開発計画、導入設備計画と年度計画、他
第2回	平成22年10月18日、20日	各テーマの進捗状況、設備導入状況報告、今後のスケジュール、等
第3回	平成23年1月13日、14日	各テーマの進捗状況、設備導入状況報告、今後のスケジュール、等
第4回	平成23年3月7日	各テーマの進捗状況、設備導入状況報告、今後のスケジュール、報告書作成指針、等

2. 東日本大震災の影響

情 勢	対 応
<p>研究期間終了直前、平成23年3月11日の東日本大震災により東北大学、産業用超電導線材・機器技術研究組合の研究開発設備およびユーティリティに損壊被害が生じた。加えて震災直後から実施された計画停電により連続運転設備の長時間稼働が不可能になるなどの障害があり、被害状況把握及び復旧に1ヶ月以上の期間を要することとなった。</p>	<p>プロジェクト期間を約2ヶ月延長し、比較的多くの予算を必要とする1km長試験において再度の試験に関して新たな予算措置が困難であることから、「1km長複合材料を作製し、平均I_cが200A/cm幅以上(@77 K, 自己磁場)であることを実証する。」との超長尺イットリウム系複合材料における希少金属使用量低減技術開発での具体的な目標値に関して、1km長のパッチ試験において代用することでこれを証明することとした。</p>

個別研究開発目標と達成状況

目標	成果	達成度	
①超長尺イットリウム系複合材料における希少金属使用量低減技術開発	<ul style="list-style-type: none"> ・300 A/cm 幅 (@77K, 自己磁場) の特性を有し 1 km を超える超長尺線材作製を見通す 	<ul style="list-style-type: none"> ・1km長以上の平均I_cが534 A/cm幅であることを実証した。 ・10m長以上でI_cが400A/cm幅以上を実証した。 	◎
②イットリウム系複合材料の製造工程における希少金属利用率等の効率向上技術開発	<ul style="list-style-type: none"> ・超電導層の連続形成プロセスにおいて原料収率40%以上を見通す 	<ul style="list-style-type: none"> ・全成膜領域の静止成膜により原料収40%以上を実証した。 ・移動成膜により、成膜量を実証した。 	◎
③イットリウム系複合材料を用いた回転機要素技術開発	<ul style="list-style-type: none"> ・希土類元素(RM)量など500kW級回転機におけるY系適用の優位性を示す ・要素技術(界磁コイル、冷却)の開発を行い、設計・製作の見通しを得る 	<ul style="list-style-type: none"> ・500 kW機設計検討で希少金属使用量が従来の1/130に低減できることを示した。 ・磁場、温度、応力の3要素を連成させた解析シミュレータを開発し、上記設計機を評価し成立性を確認した。 ・Y系の課題を克服し、劣化なくY系傘型界磁モデルコイルの製作に成功し、回転機設計の見通しを得た。 ・液体Neを用い、高速回転時に30K冷却と界面の熱伝達係数hを得て、冷却設計の見通しを得た。 	◎

◎ 大幅達成、○達成、△達成見込み、×未達

①超長尺イットリウム系複合材料における希少金属使用量低減技術開発

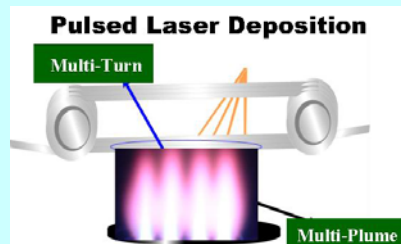
目標

300A/cm幅 (@77 K、自己磁場) の特性を有し、**1 km**を超える超長尺複合材料作製を見通す。

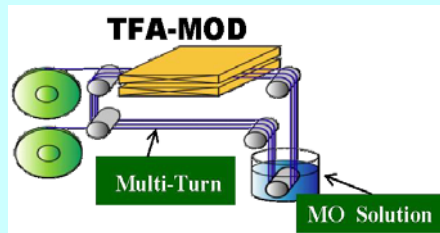
(具体的目標値)

- ・ 1km - 平均 $I_c \geq 200A/cm$ 幅以上 (@77 K、自己磁場)
- ・ 同条件 \Rightarrow 10m長以上 - $I_c \geq 300A/cm$ 幅 (@77 K、自己磁場)

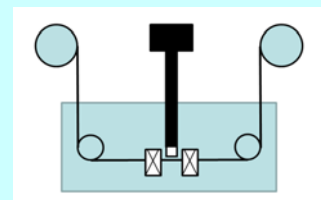
アプローチ



エキシマレーザーPLD法



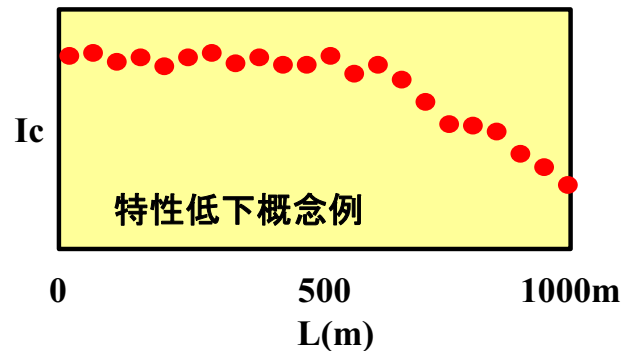
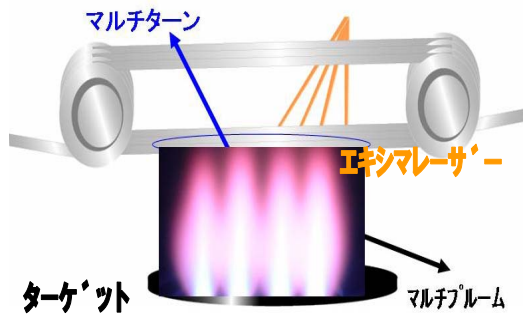
有機酸塩堆積 (TFA-MOD) 法



超長尺評価技術開発

①超長尺イットリウム系複合材料における希少金属使用量低減技術開発

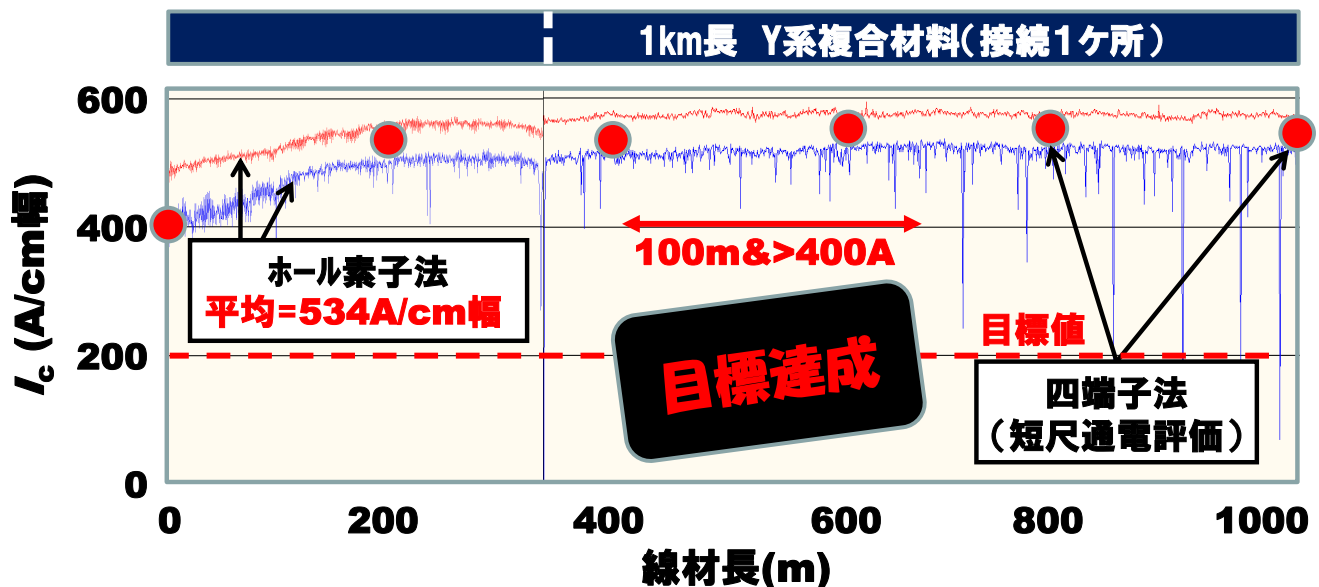
課題	対策
①長尺にわたる性能の均一化 (機械系における安定搬送技術確立)	トルク制御方式 (リール軸のトルクを線材の残存径にあわせて制御)
②高速移動&長時間成膜時の 成膜温度均一性の更なる改善	ホットウォール型PLD成膜方法の利用 (均熱ボックスの構造改良+温度監視方法の改善)
③長時間に亘る蒸着源の定常状態の維持 (ターゲット表面形状変化によるブルーム揺動 ⇒成膜条件変化)	レーザー照射パターンの改善 複数個原料ターゲットを利用した成膜技術



①超長尺イットリウム系複合材料における希少金属使用量低減技術開発

超長尺 & 高性能複合材料成膜結果

1km長線材の連続成膜(GdBCO/IBAD-MgO)



①超長尺イットリウム系複合材料における希少金属使用量低減技術開発

研究項目	目標	成果	達成度
①-1 エキシマレーザーPLD 法による複合材料作製プロセス開発	300 A/cm幅(@77K, 自己磁場)の特性を有し、1 kmを超える超長尺線材作製を見通す	・1050m長線材 平均 $I_c=534A/cm$ 幅	◎
①-2 TFA-MOD 法による複合材料作製プロセス開発		・10m長 $I_c=400A/cm$ 幅以上	
		・1000m長パッチ線材 平均 $I_c \geq 300A/cm$ 幅	○
		・10m長 $I_c=300A/cm$ 幅以上	

◎ 大幅達成、○達成、△達成見込み、×未達

達成度の基準(具体的な目標値)

- ・1km長複合材料を作製し、平均 I_c が200A/cm幅以上(@77 K, 自己磁場)であることを実証
- ・同条件で作製した10m長以上の複合材料で I_c が300A/cm幅(@77 K, 自己磁場)以上を実証

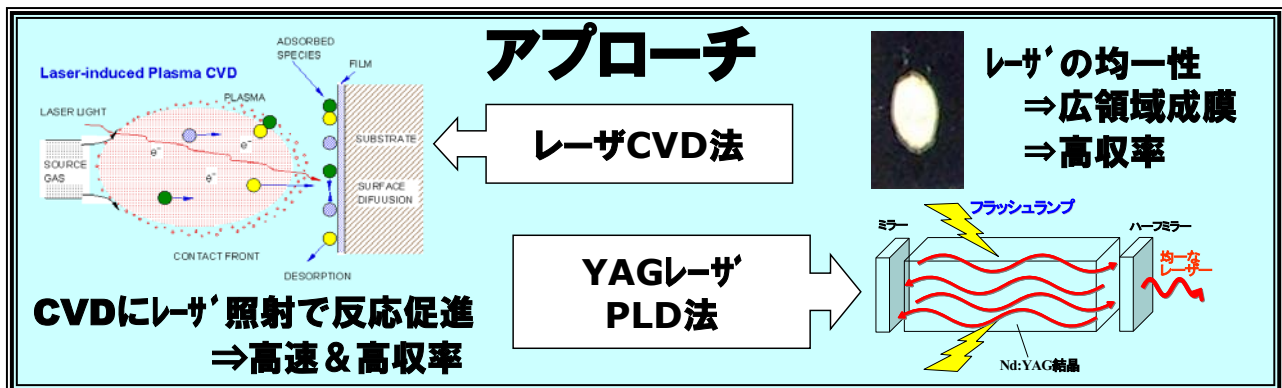
②イットリウム系複合材料の製造工程における希少金属利用率等の効率向上技術開発

目標

超電導層の連続形成プロセスにおいて**原料収率40%以上**を見通す。

(具体的な目標値)

- ・全成膜領域に対し、静止成膜により原料収率40%以上を実証する。
- ・成膜領域の一部を通過する移動成膜により、静止成膜結果から予想される成膜量を実証する。

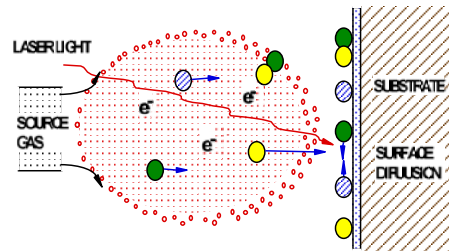


② イットリウム系複合材料の製造工程における希少金属利用率等の効率向上技術開発

プロセス開発上の課題と対策

＜従来の技術レベル＞
固体原料、固定成膜で超電導相を形成を確認

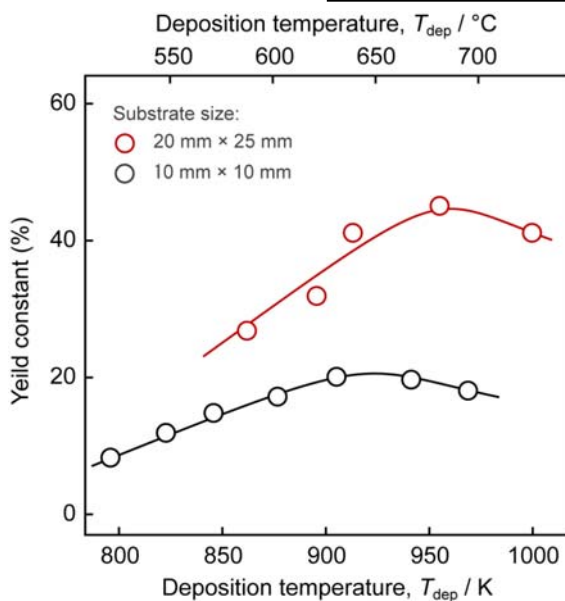
レーザーCVD法



課題	対策
長尺安定成膜	液体原料の適用 (従来は固体原料で表面積等の経時変化があり、長時間安定供給が困難)
超電導材料への適用 (YBCO or GdBCO等)	成膜条件 (温度、酸素分圧、組成等) の適正化
連続成膜への適用	成膜領域の拡大 ← 適正レーザー条件の把握 ← 移動系システムの開発

② イットリウム系複合材料の製造工程における希少金属利用率等の効率向上技術開発

静止成膜試験主要結果



予備加熱温度	673 K
レーザー出力	139 W
Y:Ba:Cu 仕込組成	1:1.9:2.7
液体供給量	0.3 ml/min
Arキャリア流量	150 sccm
成膜時間	5 min
炉内圧力	800 Pa
IBAD 基板大きさ	20 mm x 25 mm
Y収率 (%)	45.7

液体原料供給法 + 組成・温度制御

目標達成

② イットリウム系複合材料の製造工程における希少金属利用率等の効率向上技術開発

研究項目	目標	成果	達成度
②-1 レーザーCVD法による希少金属利用率向上技術開発	超電導層の連続形成プロセスにおいて原料収率40%以上を見通す。	・原料収率 45.7% ・超電導特性 $J_c > 3\text{MA/cm}^2$, $I_c > 100\text{A/cm幅}$	○
②-2 YAGレーザーPLD法による希少金属利用率向上技術開発		・原料収率 56.1% ・超電導特性 $J_c > 1.4\text{MA/cm}^2$	◎

◎ 大幅達成、○達成、△達成見込み、×未達

達成度の基準(具体的な目標値)

- ・全成膜領域に対し、静止成膜により原料収率40%以上を実証する。
- ・成膜領域の一部を通過する移動成膜により、静止成膜結果から予想される成膜量を実証する。

③ イットリウム系複合材料を用いた回転機要素技術開発

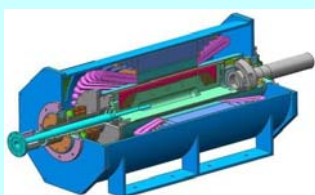
目標

イットリウム複合材料による500kW級-1000rpm級回転機の優位性を見通す。

(具体的目標値)

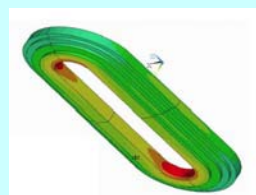
- ・磁場一応力伝熱を達成した回転機評価用シミュレータを開発する。
- ・シミュレータを用いた総合評価により希少希土類元素使用量が1/10となる成立性を示す。
- ・傘型界磁巻線状態での特性で複合材料 I_c の70%以上を得ることを実証する。
- ・Neを用いたサーモサイフォン式冷却装置で高速回転時の回転数と冷却能力の関係を明らかにし、回転機の冷却設計を可能にする。

アプローチ



モータ概念設計

軽量・コンパクト性等の優位性を有したモータ



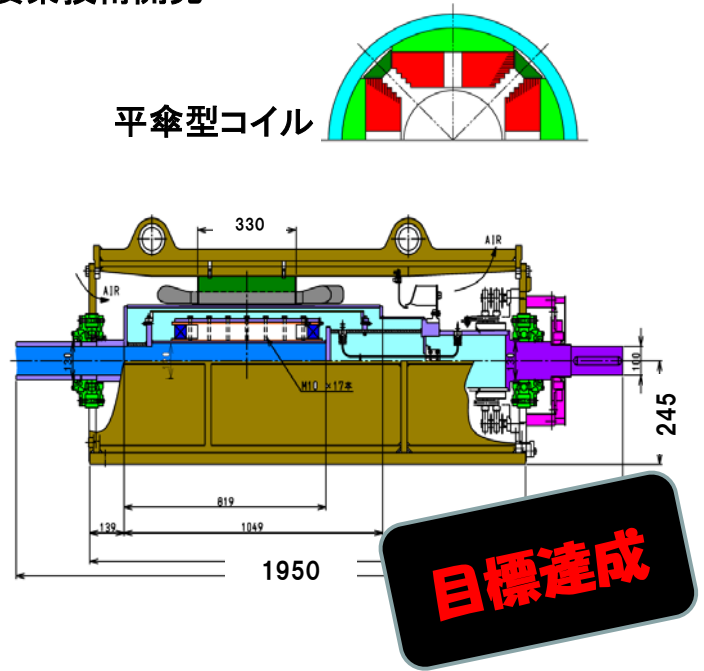
要素技術開発

界磁巻線及び冷却技術に関する試作検討

③イットリウム系複合材料を用いた回転機要素技術開発

仕様	出力	500kW
	電圧	440V
	回転数	1800rpm
	極数	4
固定子	外径	490mm
	鉄心相当長	330mm
	内径	370mm
	エアギャップ	5mm
回転子 (40K)	界磁電流*	230A
	ターン数	1050
	起磁力	241.5kAT
	線材量(極)	1.2km
	界磁コイル磁束密度	3.0T
	ギャップ磁束密度	1.2T

*600A/cm幅(77K,自己磁場)線材での設計



**希土類使用重量比:<1/130
(対永久磁石モータ)**

③イットリウム系複合材料を用いた回転機要素技術開発

	目標	成果	達成度
③-1 回転機適正構造の概念設計	500kW級回転機の概念設計によりイットリウム系の優位性を見通す。	・500 kW機設計検討で希少金属使用量が従来の1/130に低減できることを示した。 ・磁場、温度、応力の3要素を連成させた解析シミュレータを開発し、上記設計機を評価し成立性を確認した。	◎
③-2 界磁巻線および冷却要素技術開発	傘型界磁巻線の試作・評価、サーモサイフォン式冷却の特性評価により、回転機の設計に資するデータを得る。	・エッジワイズ歪、段差巻などのY系の課題を克服し、劣化なくY系傘型界磁モデルコイルの製作に成功し、回転機設計の見通しを得た。 ・液体Neを用い、高速回転時に30K冷却と界面の熱伝達係数hを得て、冷却設計の見通しを得た。	◎

◎ 大幅達成、○達成、△達成見込み、×未達

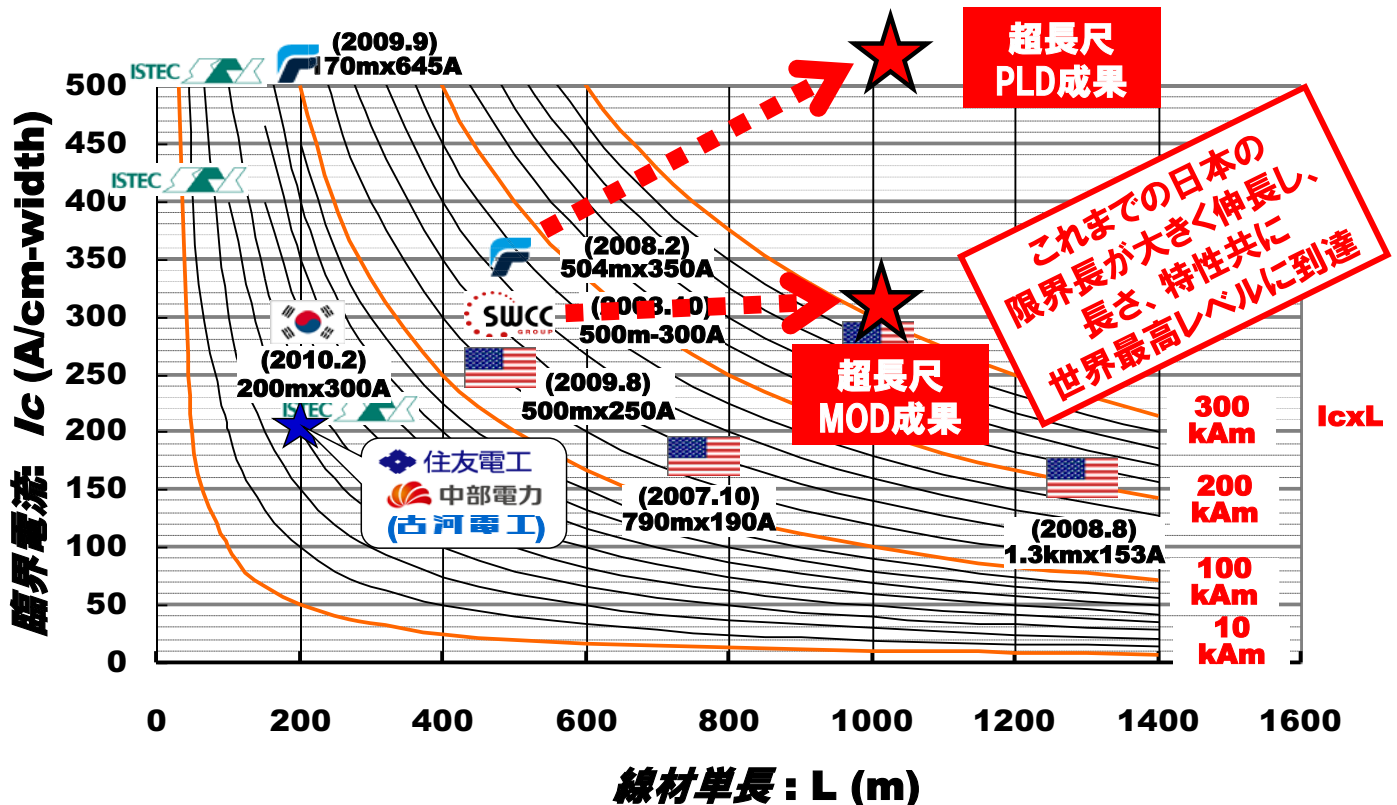
達成度の基準(具体的な目標値)

- ③-1 ・回転機評価用シミュレータを開発する。
・概念設計により、希少希土類元素使用量が従来の1/10以下になることを示す。
- ③-2 ・複合材の臨界電流の70%以上の界磁巻線コイル励磁特性(励磁率70%)を得、界磁コイル設計の見通しをつける。
・液体Neサーモサイフォン式冷却における高速回転時の回転数と冷却能力の関係を明らかにし、回転機の冷却設計の見通しを得る。

成果の意義

	成果	成果の意義
①超長尺イットリウム系複合材料における希少金属使用量低減技術開発	<ul style="list-style-type: none"> ・1km以上の平均I_cが500A/cm幅以上であることを実証した。 ・10m長以上でI_cが400A/cm幅以上を実証した。 	<ul style="list-style-type: none"> ○世界最高レベル $I_c \times L$ の技術 (次頁参照) ○超長尺複合材料の量産化基盤確立
②イットリウム系複合材料の製造工程における希少金属利用率等の効率向上技術開発	<ul style="list-style-type: none"> ・全成膜領域の静止成膜により原料収率55%以上を実証した。 ・移動成膜により、成膜量を実証した。 	<ul style="list-style-type: none"> ○より省希少金属複合材への可能性 (~1/2) ○コスト低減効果も大きく期待
③イットリウム系複合材料を用いた回転機要素技術開発	<ul style="list-style-type: none"> ・500 kW機設計検討で希少金属使用量が従来の1/130に低減できることを示した。 ・磁場、温度、応力の3要素を連成させた解析シミュレータを開発し、上記設計機を評価し成立性を確認した。 ・エッジワイズ歪、段差巻などのY系の課題を克服し、劣化なくY系傘型界磁モデルコイルの製作に成功し、回転機設計の見通しを得た。 ・液体Neを用い、高速回転時に30K冷却と界面の熱伝達係数hを得て、冷却設計の見通しを得た。 	<ul style="list-style-type: none"> ○複合材料の異方性を考慮した設計による、Y系超電導回転機の使用希少金属量の定量的評価は世界初 (次々頁参照) ○Y系複合材料の機械特性上の課題に対応し、高I_cを保ちつつ、回転機用傘型コイル試作、評価は世界初

成果の世界的な位置付け



希少金属対策の世界的なトレンド

Critical Materials R&D

Substitutes and Efficient Use of Rare Earth Magnets

- **Reducing neodymium and dysprosium requirements for magnets**
 - ⇒ New compositions or structures that are high energy density, low rare earth content
 - ⇒ Heat management approaches that reduce the need for dysprosium
- **Component and system-level substitutions**
 - ⇒ Induction or reluctance motors
 - ⇒ New approaches to magnetic circuit design
 - ⇒ Advanced hydraulic transmission for drive train systems
 - ⇒ **High-temperature superconductor generators (HTSCG)**

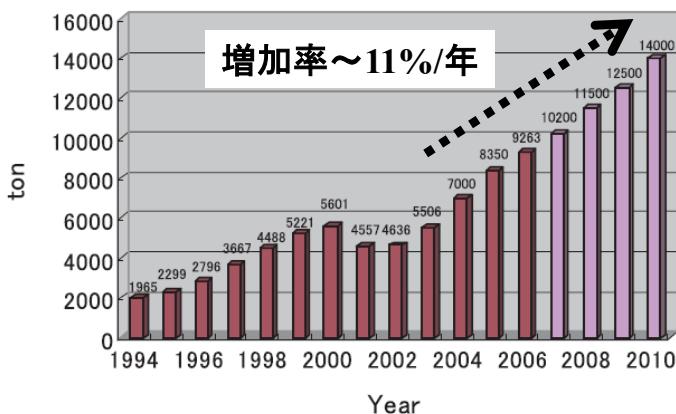
Resource efficiency reusing, recovering, recycling

- **Materials and processes for environmentally sound, economical separation of rare earths in diverse ore bodies and recycling streams**
 - ⇒ Organic solvents
 - ⇒ Supercritical solvents
 - ⇒ Nano-porous membranes
 - ⇒ Biological processes
 - ⇒ Ion exchange
- **Recycling technologies and optimization New approaches to magnetic circuit design**
 - ⇒ Design of materials and products for recyclability
 - ⇒ Processes uniquely suited to recycling
 - ⇒ Logistics optimization

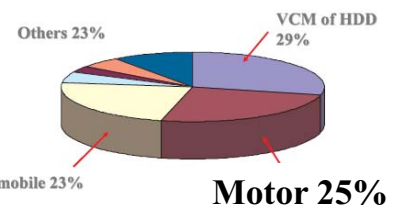
EU-Japan-US Workshop on Critical Materials R&D
Washington, DC, 4-5 October 2011

希土類使用重量 <1/130 の意義 (永久磁石モータ → Y系超電導モータ 置換効果)

ネオジウム磁石の国内製造重量推移



2020年
40,000t/年
(予測)



投入量(歩留65%) モータ用磁石重量
61,500t/年 → 15,400t/年

モータ向希土類重量 = 15,400t/年 x 希土類比率(0.266) = 4,100 t/年

超電導磁石置換効果(2020年予測)

4,100 t x 導入比率(仮定0.25) x (1-1/130) ~ 1,000 t/年

知的財産権／成果の普及

	H21	H22	H23	計
特許出願 (ノウハウ流出防止)	0	0	0	0件
論文(査読付き)	0	4	1	5件
研究発表・講演	0	21	1	22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	0	2	0	2件

新聞発表

鉄鋼新聞 平成22年4月14日
超電導線材で研究組合
大型設備導入 長尺線材を製造

レアメタル・ニュース 平成23年2月1日
希少金属代替材料プロジェクト Dy使用量削減へ
Nd-Fe-BをY系超電導磁石に置き換えで希土類使用量1/10へ

展示会

23rd International Symposium on Superconductivity H22年11月1～3日
Development of Yttrium-based Composite Material for Ultra-light
and High-performance Motors. (パネル展示)

エコプロダクツ2010 H22年12月9～11日
超軽量高性能モーター等向イットリウム系複合材料の開発(希少金属代替
材料開発プロジェクト) (パネル展示)

成果の実用化可能性

[研究組合の実行能力]

- ・ 複合材料の実績：機器開発に数十kmを提供
- ・ 多くの重電、ユーザー会社とのネットワーク

[実用化のシナリオ]

本PJ成果

複合材料安定
製造技術開発

量産・事業化
への基盤

HTS回転機
産業
拡大・創出
(船用、風力発電等)

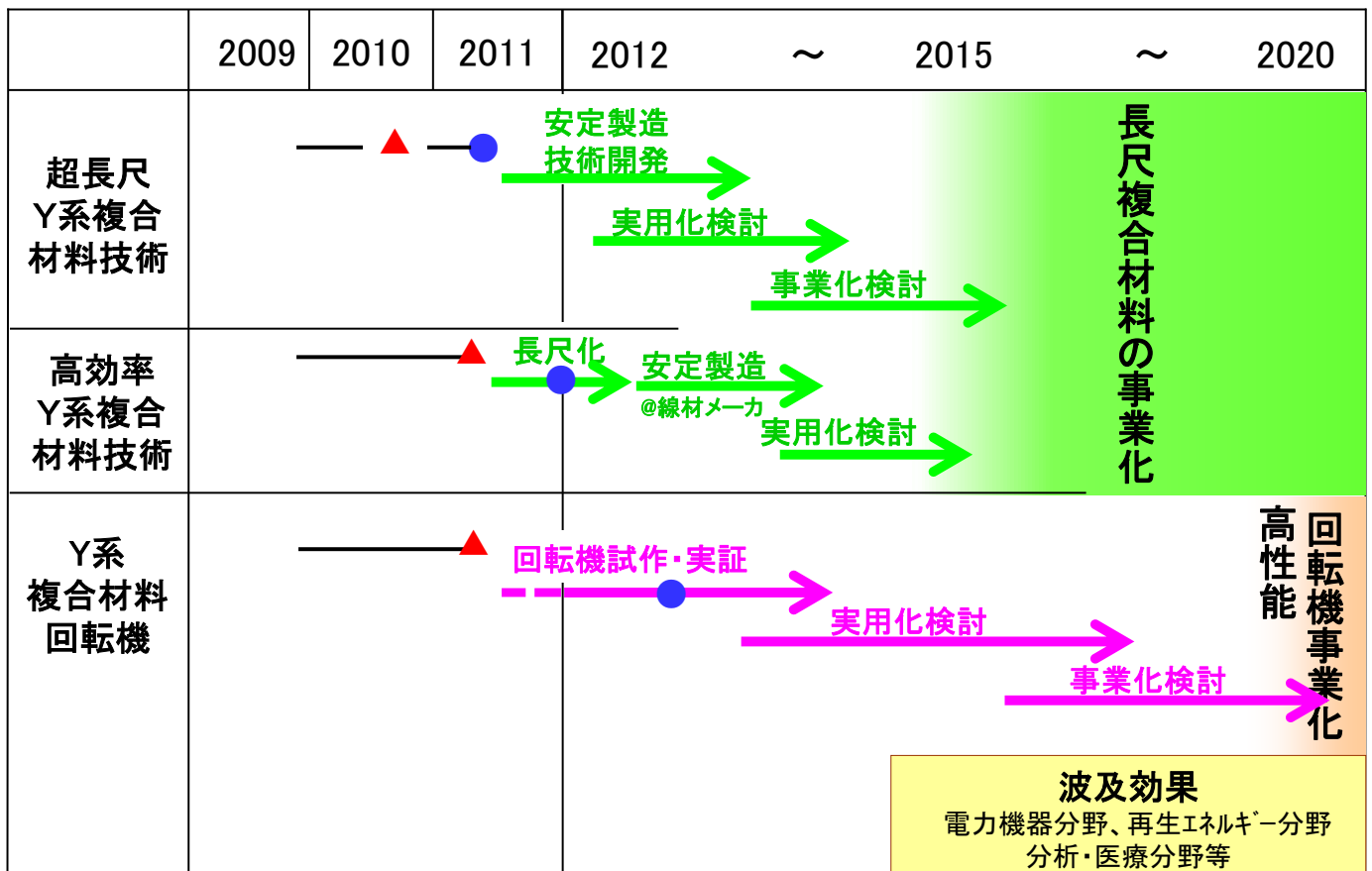
モータ試作等
継続研究
(含冷却系)

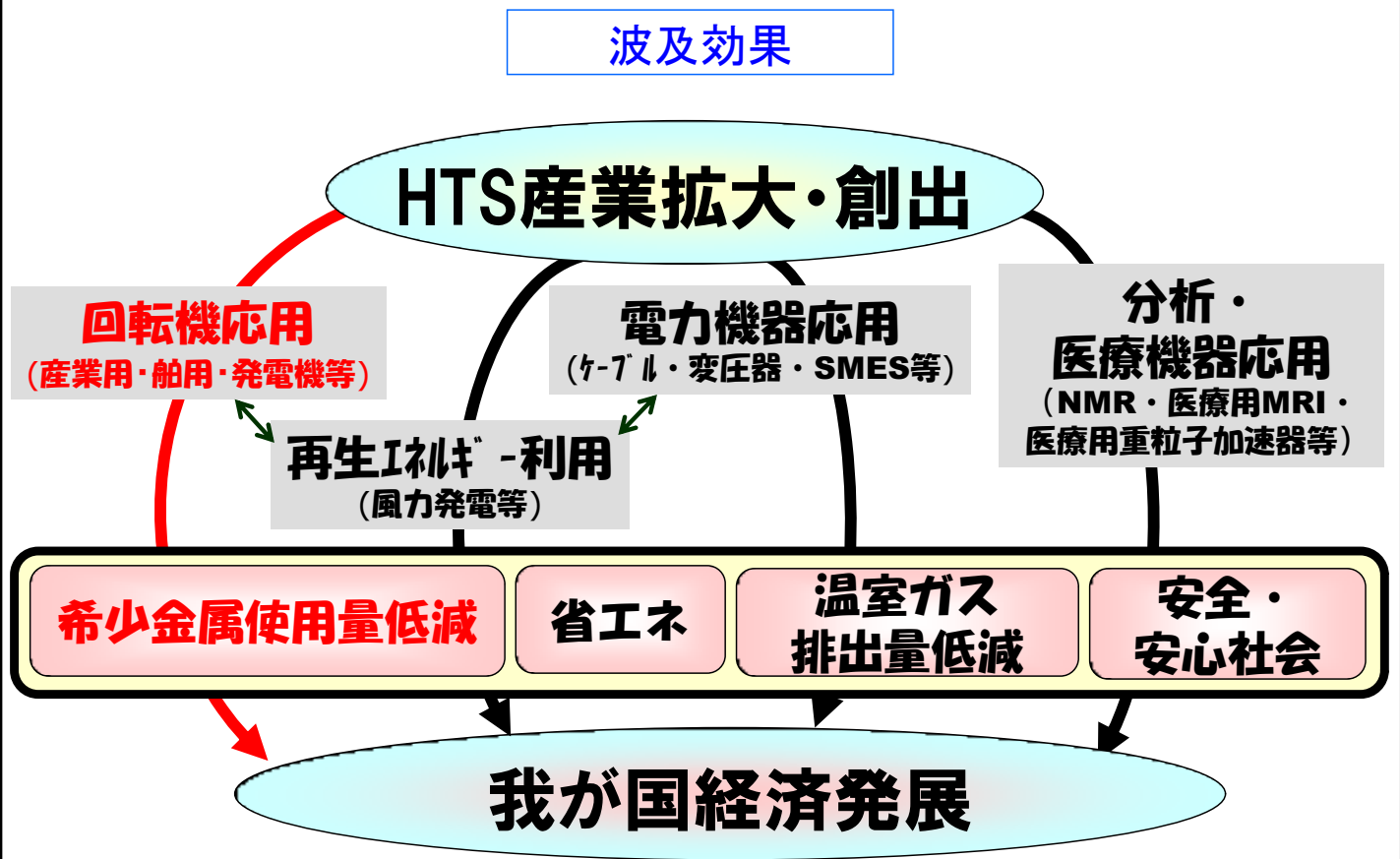
超電導モータ
実用化
(産業用、自動車等)

「希少金属代替・削減技術実用化開発
助成事業(イットリウム系超電導回転機
用電磁石の開発)」(H23.3~H24.2)

[波及効果] 永久電流モード用途
⇒ 分析用NMR、医療用MRI、リニアモータ、
医療用重粒子加速器等

安全安心な社会&低CO₂社会





	2010	2015	2020	2025
複合材料分野 Y系	超長尺Y系複合材料	実用化・事業化		
	高効率Y系複合材料	実用化検討		
産業用 回転機分野	Y系回転機要素技術	試作・実証	実用化事業化検討	実用化・事業化
	船用モータ技術	試作・実証	実用化検討	実用化・事業化
その他 回転機分野	風力発電技術	試作・実証	実用化検討	実用化・事業化
	NMR技術	試作・実証	実用化検討	実用化・事業化
分析・医療分野	医療用加速器技術	試作・実証	実用化検討	実用化・事業化
	ケーブル、変圧器、SMES技術	実用化検討		実用化・事業化
電力機器分野				実用化・事業化

波及効果

ナノテク・部材イノベーションプログラム
環境安心イノベーションプログラム

「希少金属代替材料開発プロジェクト」

Nd-Fe-B系磁石を代替する新規永久磁石及びイットリウム系複合材料の開発
超軽量高性能モータ等向けイットリウム系複合材料の開発（事後評価）

(2010年3月17日～2011年5月31日)

プロジェクトの詳細説明 (公開)

(1) 超長尺イットリウム系複合材料における
希少金属使用量低減技術開発

テーマリーダー

産業用超電導線材・機器技術研究組合

和泉輝郎

2011年 10月18日

1 / 30

1. 事業の位置付け・必要性（事業目的の妥当性）

公開

希少(希土類)金属削減期待効果

500kW級モータ界磁磁石

永久磁石

NEOMAX(Nd-Fe-B系)を想定。 残留磁束密度: 1.2 T
ギャップにおける磁束密度: 0.5 T(現状の永久磁石式モータを参照)
形状: 10cmx50cmx3mm(レーストラック型)
[1極当りの希土類の重量] $142.5(\text{体積}) \times 7.4(\text{密度}) \times 0.266(\text{RE比率})$

~300g (Nd:200g & Dy:100g)

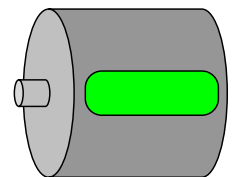
超電導電磁石

YBCO超電導線材による超電導巻線。最大磁界: ~1.3 T、ギャップ磁束密度: 0.5 T
超電導線材スペック
厚さ: 0.25mm(超電導層: 1.5 μ m、基板: 100 μ m、安定化銅層: 100 μ m、絶縁: 50 μ m)
幅: 10mm 線材長/1極: 2400m 超電導特性: I_c : 300A(77K, 0T)、300A(45K, 2T)

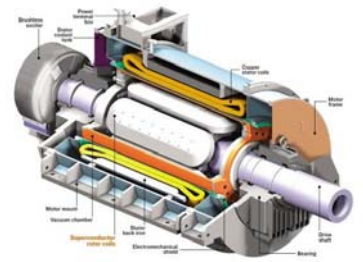
[1極当りの希土類の重量]

$36.0(\text{体積}) \times 6.3(\text{密度}) \times 0.133(\text{RE比率}) \times 0.33(\text{B補正}) / 0.30(\text{収率})$

~30g (Y or Gd)



位置付け・必要性



500 kW級回転界磁超電導モータの粗設計

モータ仕様 極数:4 起磁力:180 kAT 鉄芯:なし

線材仕様 臨界電流特性:300 A/cm幅(@77 K,自己磁場)
⇒300 A/cm幅(@~50 K,2 T)
線材幅:5mm

ターン数:1200ターン(180 kAT/150 A)⇒2400m/極
バンドル数:2 (転位を用いず損失低減を実現する条件)
⇒ 2400 m/2枚 = **1200 m/本/極**

位置付け・必要性

超軽量かつ高性能な次世代モータの実現へ

ジュール損失低減
(線材自体は損失無)

モータ強度確保
(線材自体は高強度)

線材接続数の低減

単長の長い線材の実現 (1km以上)

目標及びアプローチ

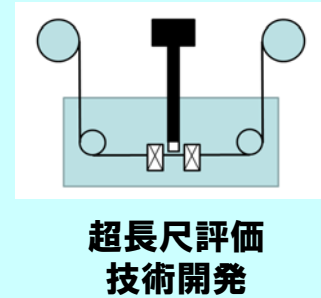
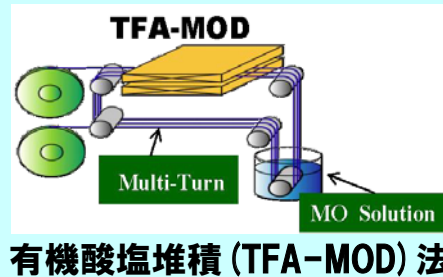
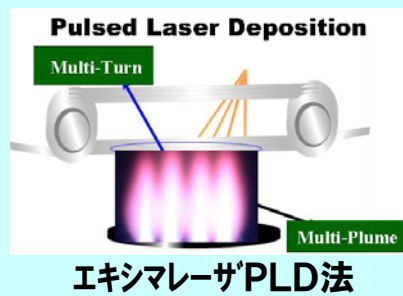
目標

300A/cm幅（@77 K、自己磁場）の特性を有し、**1 km**を超える超長尺複合材料作製を見通す。

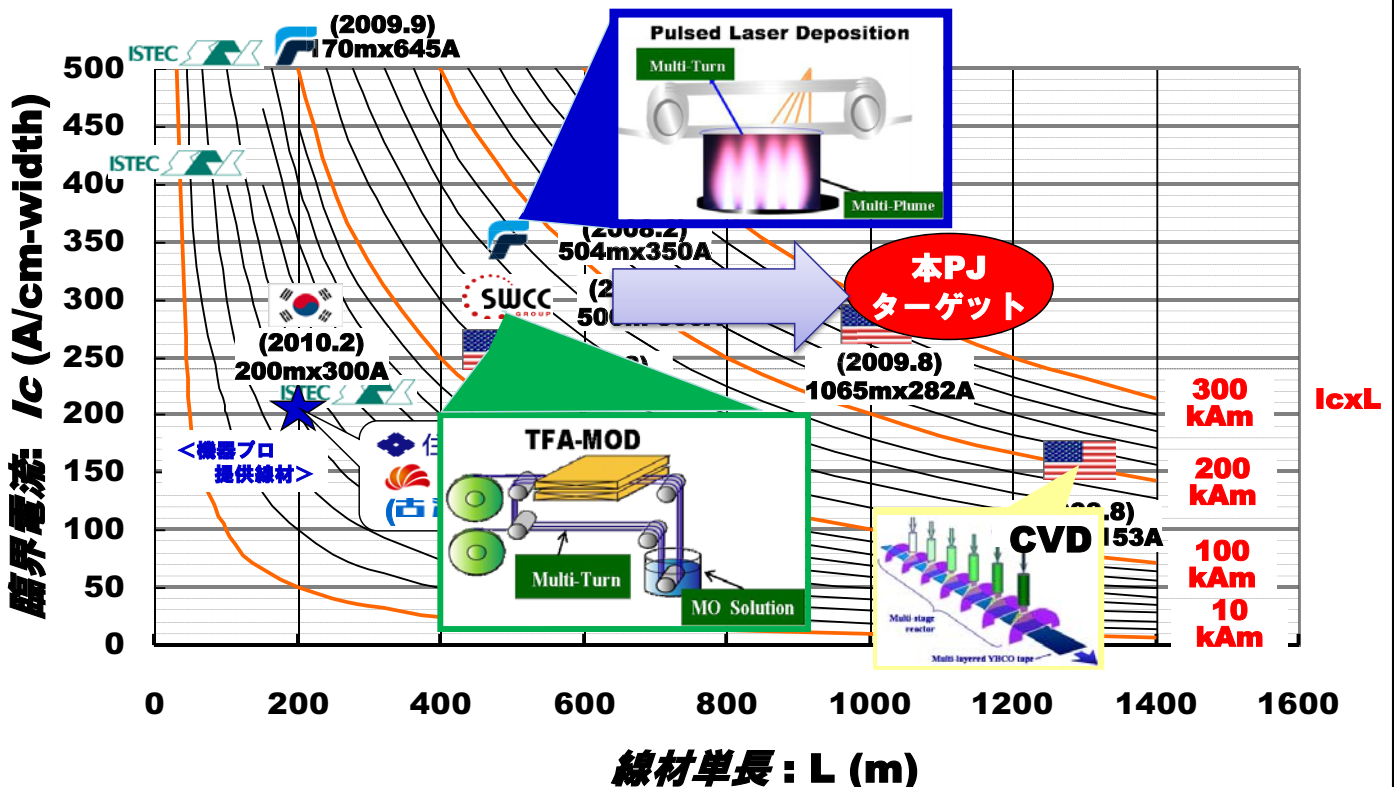
（具体的目標値）

- 1km—平均 $I_c \geq 200\text{A/cm}$ 幅以上（@77 K、自己磁場）
- 同条件⇒10m長以上— $I_c \geq 300\text{A/cm}$ 幅（@77 K、自己磁場）

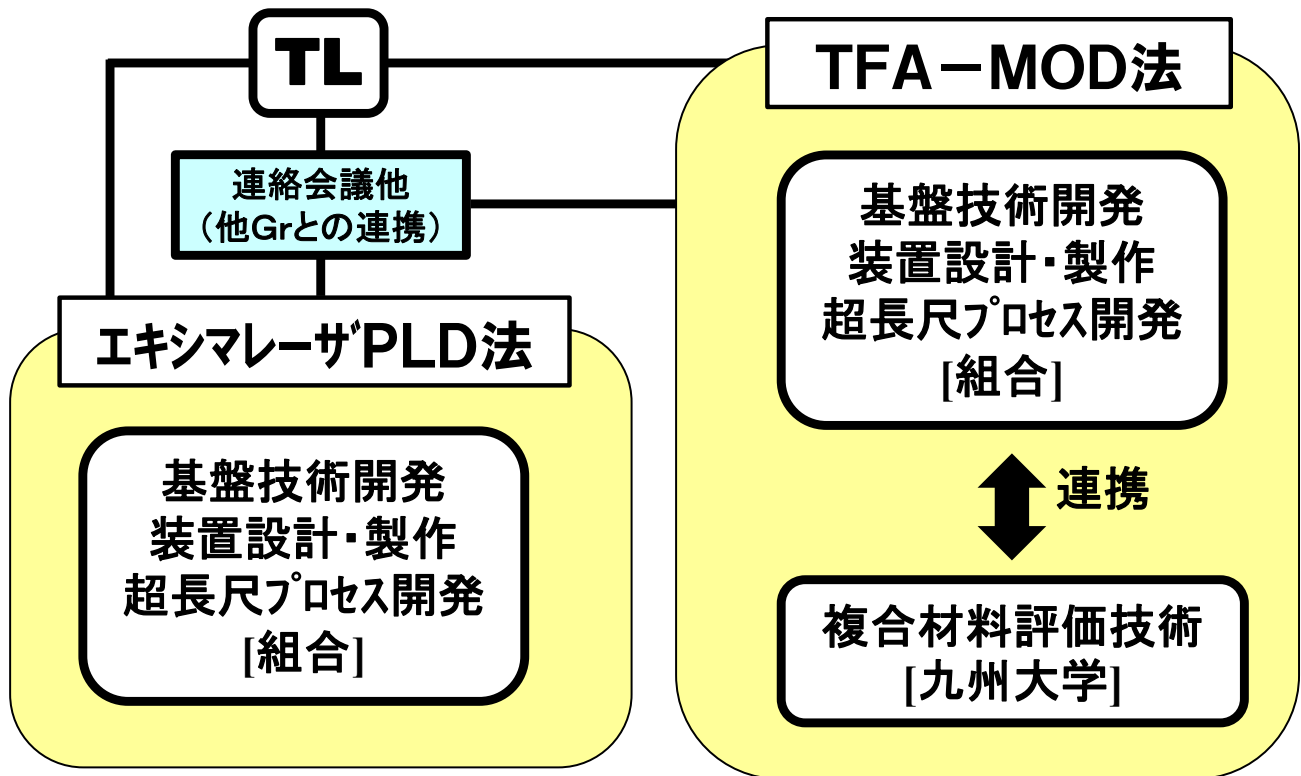
アプローチ



アプローチの妥当性



開発体制



目標達成状況

①超長尺イットリウム系複合材料における希少金属使用量低減技術開発

研究項目	目標	成果	達成度
①-1 エキシマレーザPLD 法による複合材料作製プロセス開発	300 A/cm幅(@77K, 自己磁場)の特性を有し、1 kmを超える超長尺線材作製を見通す	・1050m長線材 平均 $I_c=534A/cm$ 幅	◎
①-2 TFA-MOD 法による複合材料作製プロセス開発		・10m長 $I_c=400A/cm$ 幅以上	
		・1000m長パッチ線材 平均 $I_c \geq 300A/cm$ 幅	○
		・10m長 $I_c=300A/cm$ 幅以上	

◎ 大幅達成、○達成、△達成見込み、×未達

達成度の基準(具体的な目標値)

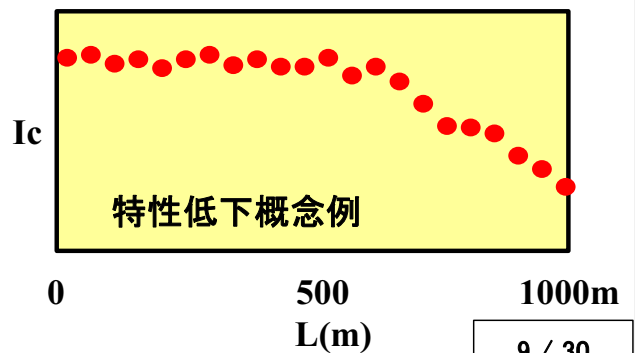
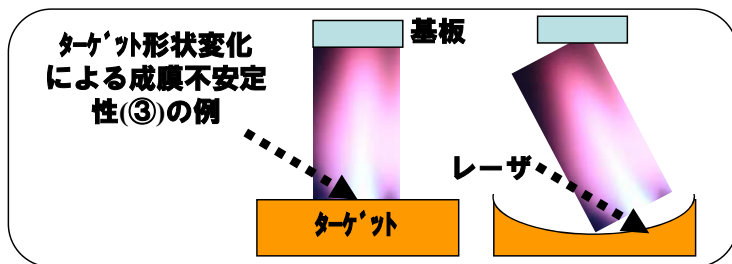
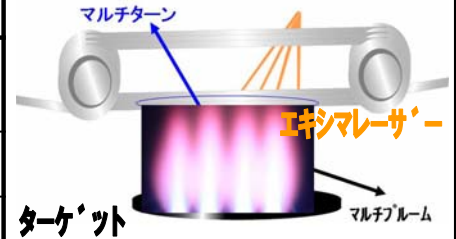
- ・1km長複合材料を作製し、平均 I_c が200A/cm幅以上(@77 K, 自己磁場)であることを実証
- ・同条件で作製した10m長以上の複合材料で I_c が300A/cm幅(@77 K, 自己磁場)以上を実証

エキシマレーザーPLD法による複合材料作製プロセス開発

超長尺への課題

課題

- ①長尺にわたる性能の均一化
(機械系における安定搬送技術確立)
- ②高速移動&長時間成膜時の成膜温度均一性の更なる改善
- ③長時間に亘る蒸着源の定常状態維持
(ターゲット表面形状変化によるブルーム揺動⇒成膜条件変化)



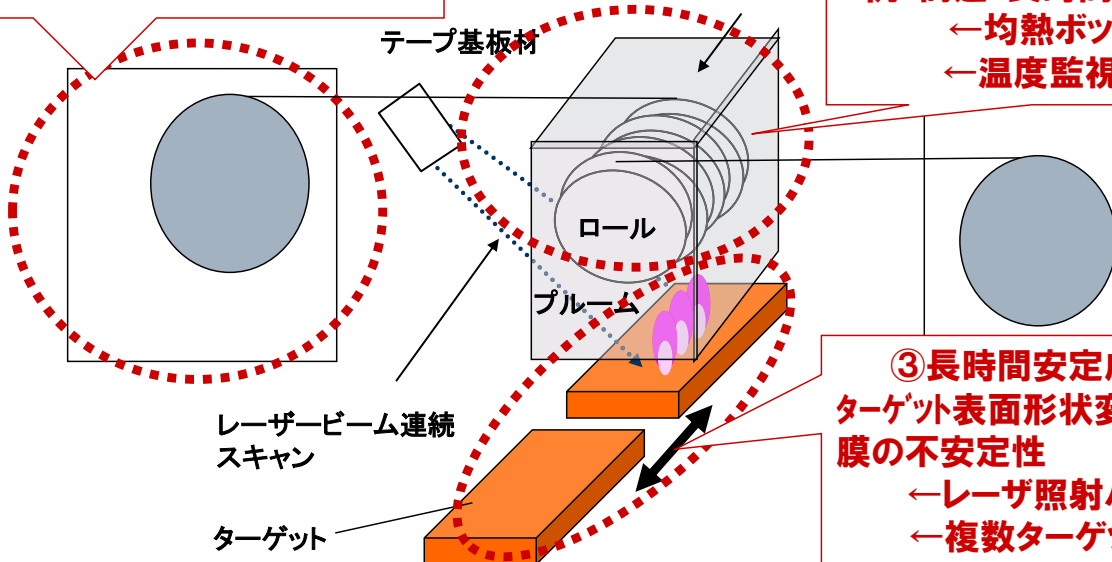
エキシマレーザーPLD法による複合材料作製プロセス開発

課題への対策

- ①長尺安定高速搬送技術
例:巻締め ← トルク制御方式

- ②ホットウォール型PLD法
例:高速・長時間安定
←均熱ボックス構造
←温度監視方法等改善

- ③長時間安定成膜技術
ターゲット表面形状変化による成膜の不安定性
←レーザー照射パターン改善
←複数ターゲット利用



エキシマレーザPLD法による複合材料作製プロセス開発

研究開発スケジュール

研究項目	FY21 /4Q	FY22/1Q	2Q	3Q	4Q
長尺高速搬送技術		自社設備による 基礎検討	●	装置設計・製作	導入
恒温加熱改良技術		自社設備による 基礎検討	●	装置設計・製作	
蒸発源連続供給技術				装置設計・製作	
長尺成膜試験					

エキシマレーザPLD法による複合材料作製プロセス開発

高磁界長尺イットリウム系複合装置導入



加熱方式：ホットウォールタイプ
 対応線材長：**1000～3000m**
 ターゲット数：ターゲット交換機構付
 張力調整機構：
 補助駆動ロールを導入し
 張力と線材速度を制御
 移動速度：最高速 **200m/h**

エキシマレーザーPLD法による複合材料作製プロセス開発

東日本大震災の影響と対応

〔影響〕 1km 線材作製中に被災。

〔対応〕 (NEDO殿指導) パッチ試料でも可。

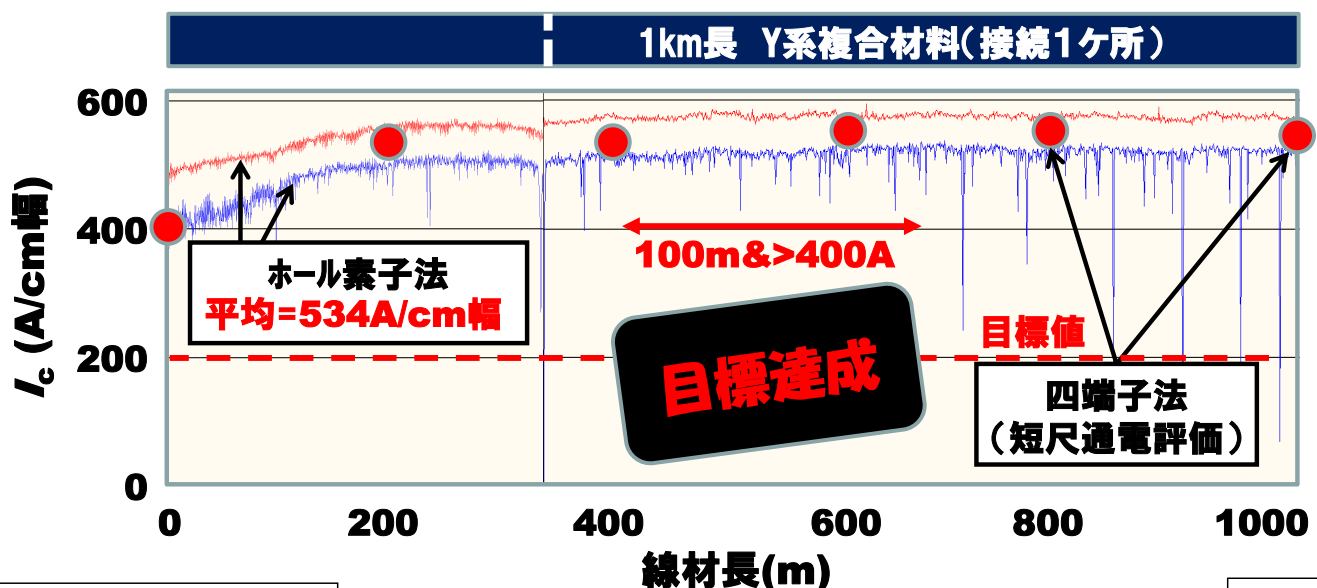
(実施者対応) 手持ち基板の接続で実施。



エキシマレーザーPLD法による複合材料作製プロセス開発

超長尺 & 高性能複合材料成膜結果

1km長線材の連続成膜(GdBCO/IBAD-MgO)



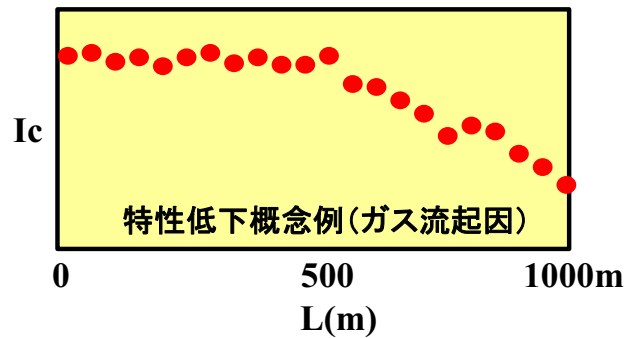
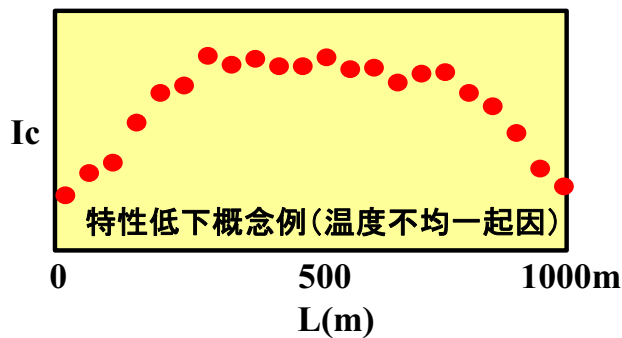
TFA-MOD法による複合材料作製プロセス開発

超長尺への課題

課題

焼成装置の大型化⇒巻枠構造・強度

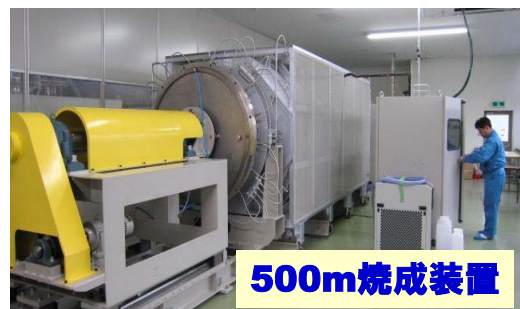
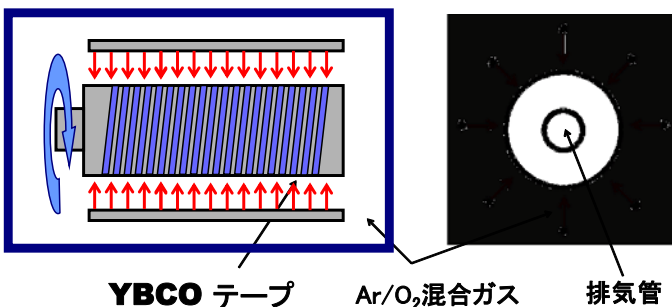
焼成装置の大型化⇒温度の不均一、ガス流



TFA-MOD法による複合材料作製プロセス開発

課題への対策

課題	対策
①焼成装置の大型化 ⇒巻枠構造・強度	各種金属材料の物性データを用いたシミュレーション ⇒材質の選定と厚さの設計 ⇒補強構造、回転軸強度、巻枠との取合方法
②焼成装置の大型化 ⇒ガス流、温度の不均一	シミュレーションによるガス流制御及び温度制御構造の設計 ガス流：ノズル径、間隔及び数、ガス導入流速、巻き枠の回転数等 温度：ヒータ材質、ヒータ構造・密度、温度制御機構等



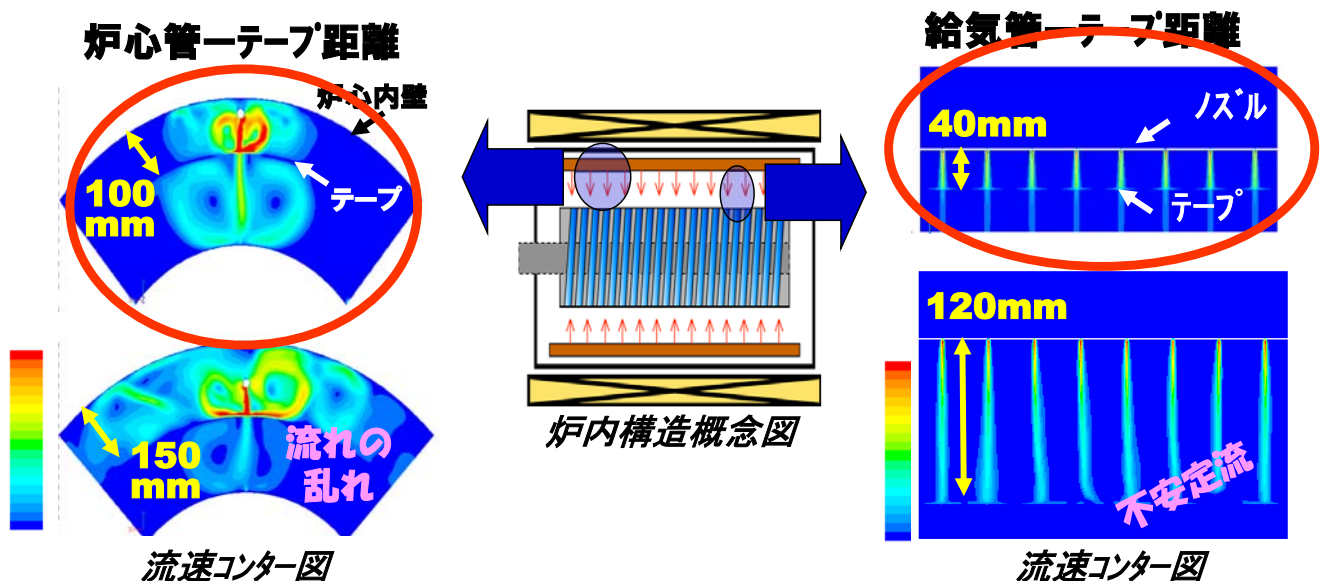
TFA-MOD法による複合材料作製プロセス開発

研究開発スケジュール

研究項目	FY21/4Q	FY22/1Q	2Q	3Q	4Q
線材製造装置	シミュレーション・設計		作製 立上げ・検証		導入
線材特性向上検討					
線材評価技術開発		磁気顕微鏡連続基盤技術		長尺評価技術	

TFA-MOD法による複合材料作製プロセス開発

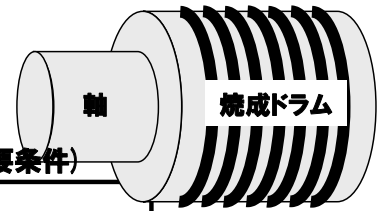
ガス流に関わるシミュレーション例



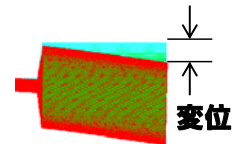
TFA-MOD法による複合材料作製プロセス開発

巻枠構造検討結果

・最大変位 20mm以下 ・最大軸応力 150 MPa 以下（装置メーカー必要条件）



	500m級	1000m級装置検討内容				
		Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5
有効処理長 (m)	500	1500	1500	2000	2000	2000
ドラム径 (m)	1.0	1.0	1.3	1.0	1.2	1.5
ドラム長 (m)	3.5	5.3	4.0	7.0	5.8	4.7
ドラム重量 (kg)	655.6	992.8	974.0	1311.0	1303.7	1320.6
最大変位 (mm)	13.2	36.8	21.4	78.4	63.2	65.8
最大軸応力 (MPa)	48	98	104	160	171	206
ヒーターゾーン数	11	16	13	-	-	-
装置価格	-	高	低	-	-	-



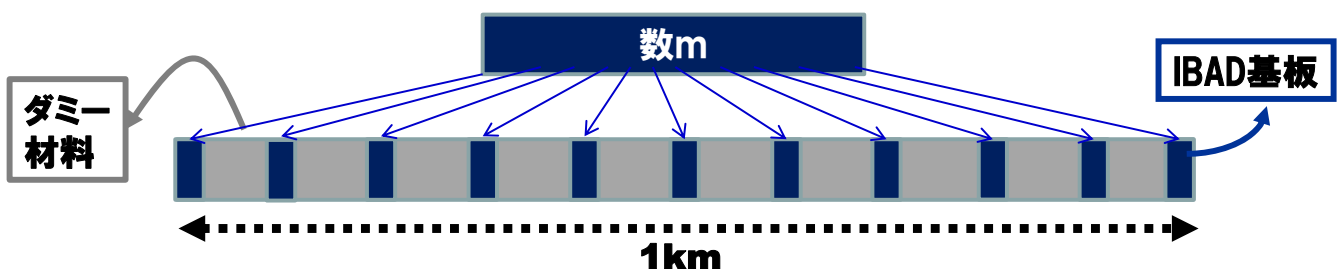
TFA-MOD法による複合材料作製プロセス開発

東日本大震災の影響と対応

【影響】 1km 線材作製中に被災。

【対応】 (NEDO殿指導) パッチ試料でも可。

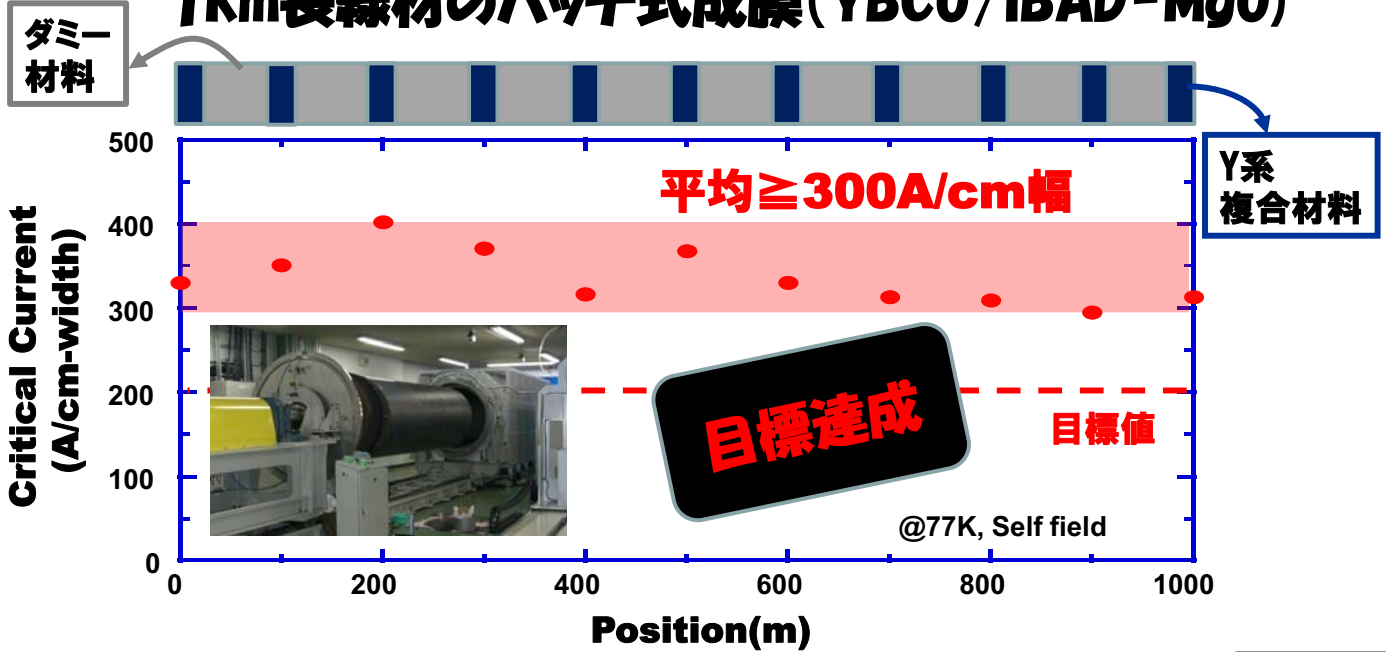
(実施者対応) 手持ち基板を分割しパッチ試料で実施。



TFA-MOD法による複合材料作製プロセス開発

超長尺複合材料成膜結果

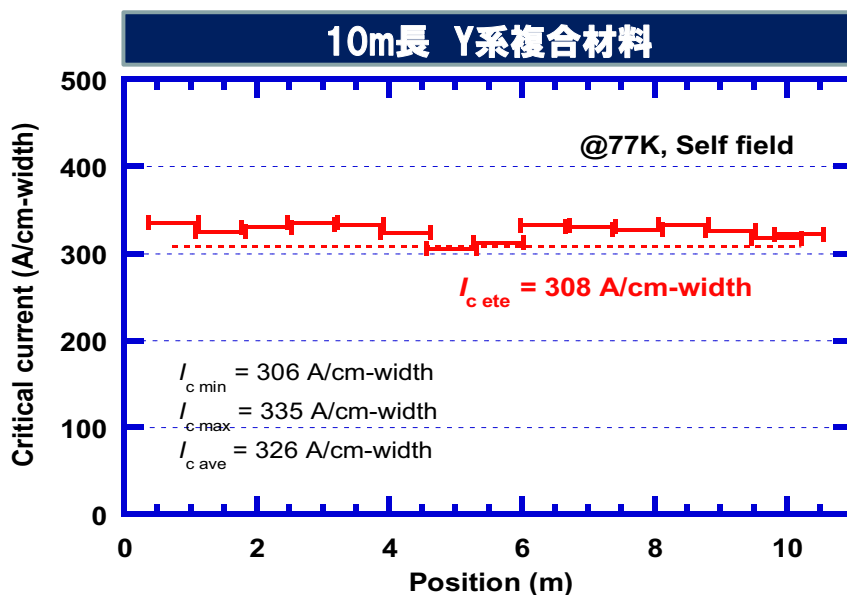
1km長線材のパッチ式成膜(YBCO/IBAD-MgO)



TFA-MOD法による複合材料作製プロセス開発

高性能複合材料成膜結果

10m長線材の通電特性(YBCO/IBAD-MgO)

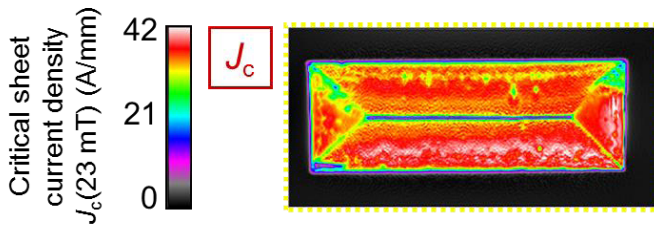
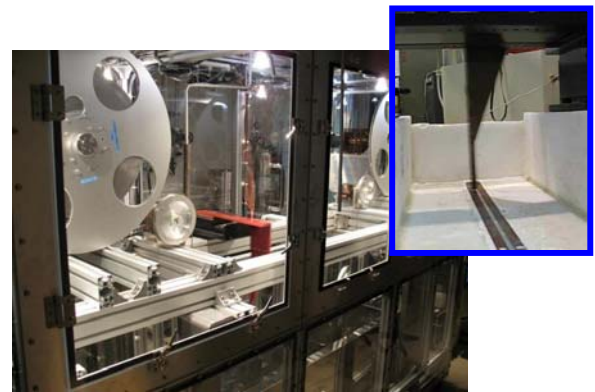
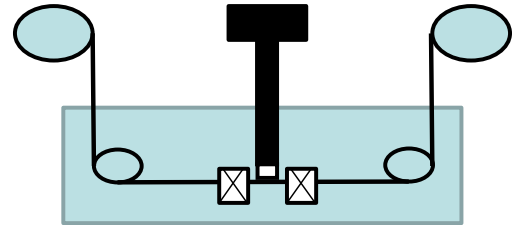
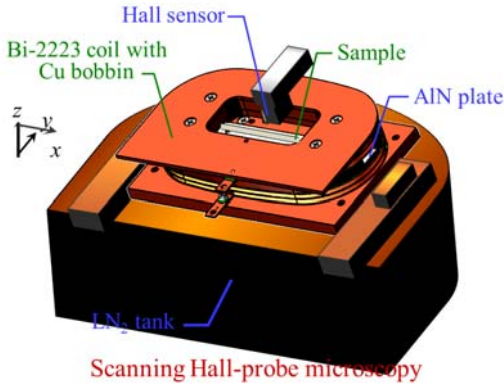


目標達成



超長尺複合材料評価技術開発

走査型ホール素子顕微鏡 長尺・高速対応技術開発



超長尺複合材料評価技術開発

装置立上当初の線材

長さ方向、幅方向共に
特性分布(右図中色の分布)
が存在

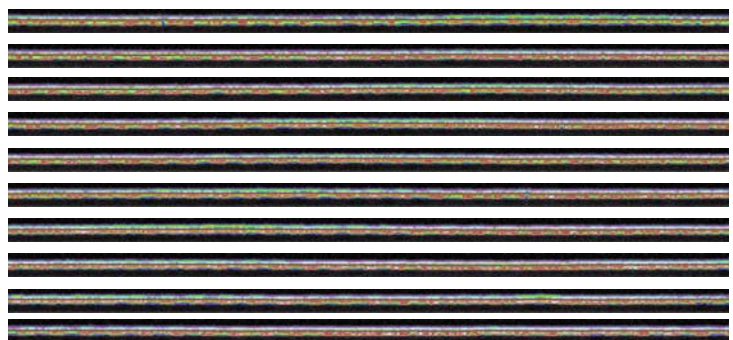
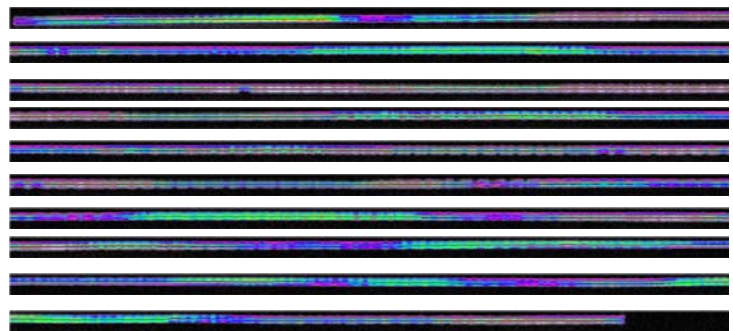


製造条件調整後線材

ガス流の条件、温度分布の
調整による特性均一性向上



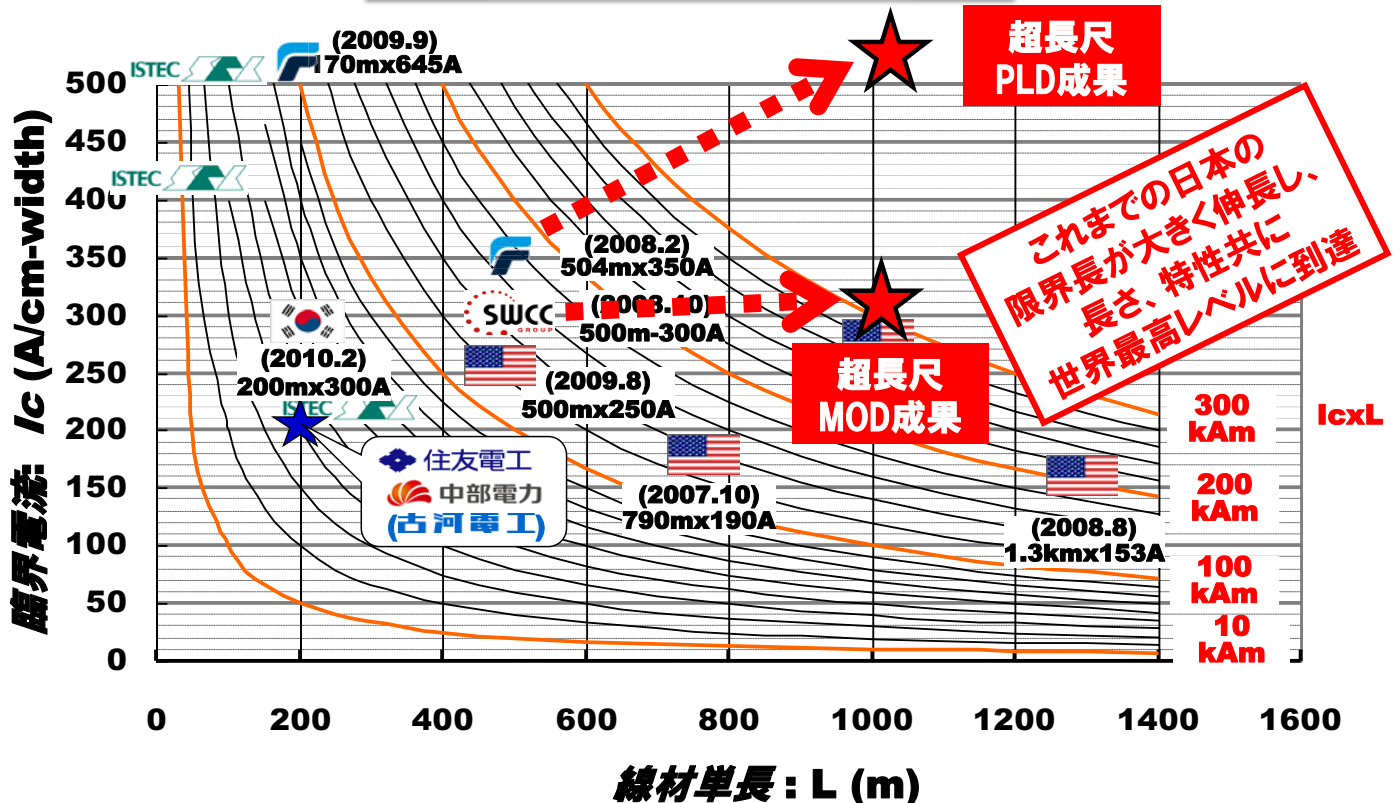
超長尺プロセス条件へ反映



成果の意義

研究項目	成果	成果の意義
①-1 エキシマレーザPLD 法による複合材料作製プロセス開発	<ul style="list-style-type: none"> ・1050m長線材 平均$I_c=534A/cm$幅 ・10m長 $I_c=300A/cm$幅以上 	<p>○世界最高レベル $I_c \times L$ の技術 (次頁参照)</p>
①-2 TFA-MOD 法による複合材料作製プロセス開発	<ul style="list-style-type: none"> ・1000m長パッチ線材 平均$I_c \geq 300A/cm$幅 ・10m長 $I_c=300A/cm$幅以上 	<p>○超長尺複合材料 量産化基盤確立</p>

成果の意義



実用化の見通し

[研究組合の実行能力]

- ・ 複合材料の実績：機器開発に数十kmを提供
- ・ 多くの重電、ユーザー会社とのネットワーク

[実用化のシナリオ]

本PJ成果

複合材料安定製造技術開発

量産・事業化への基盤

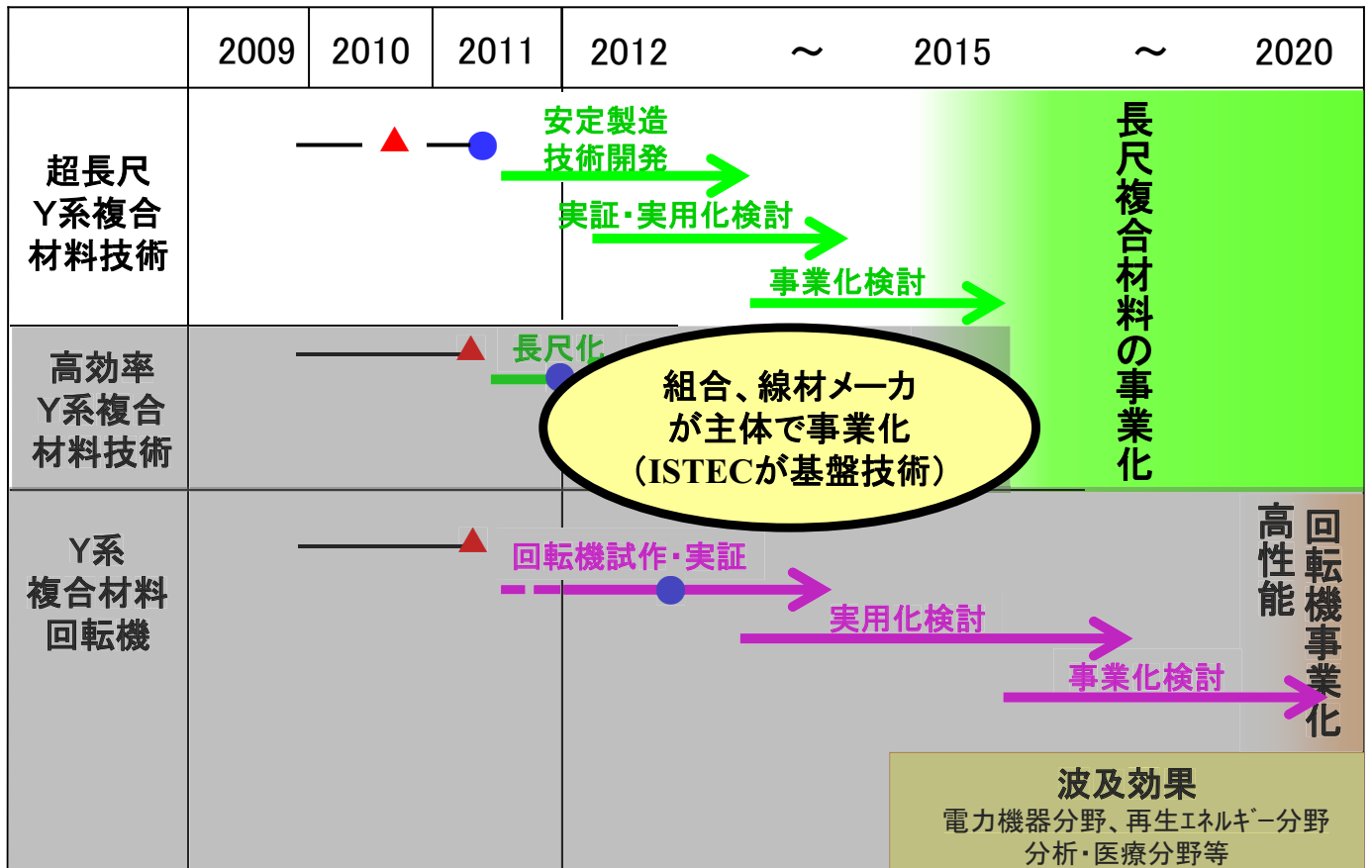
HTS回転機産業
拡大・創出
(船用、風力発電等)

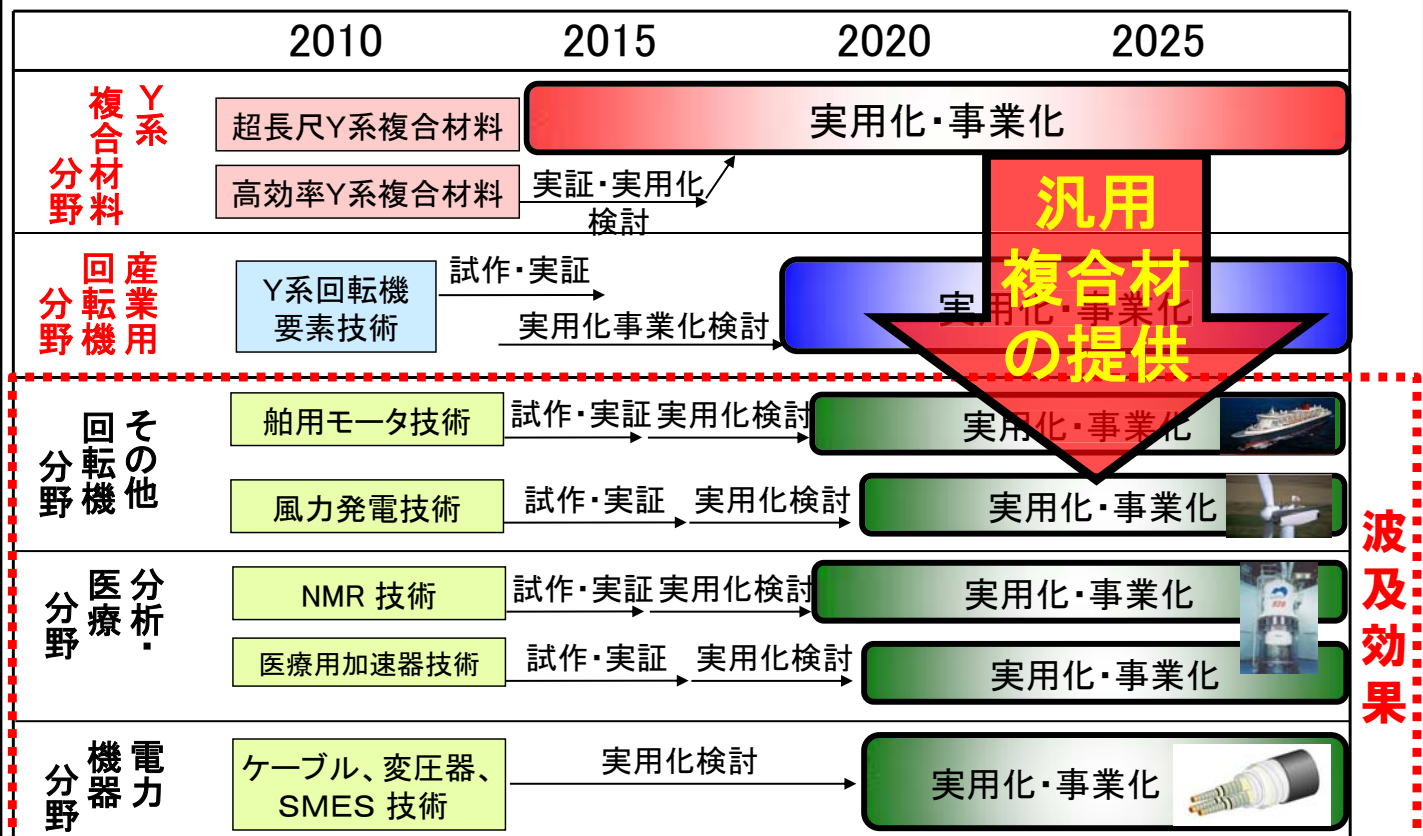
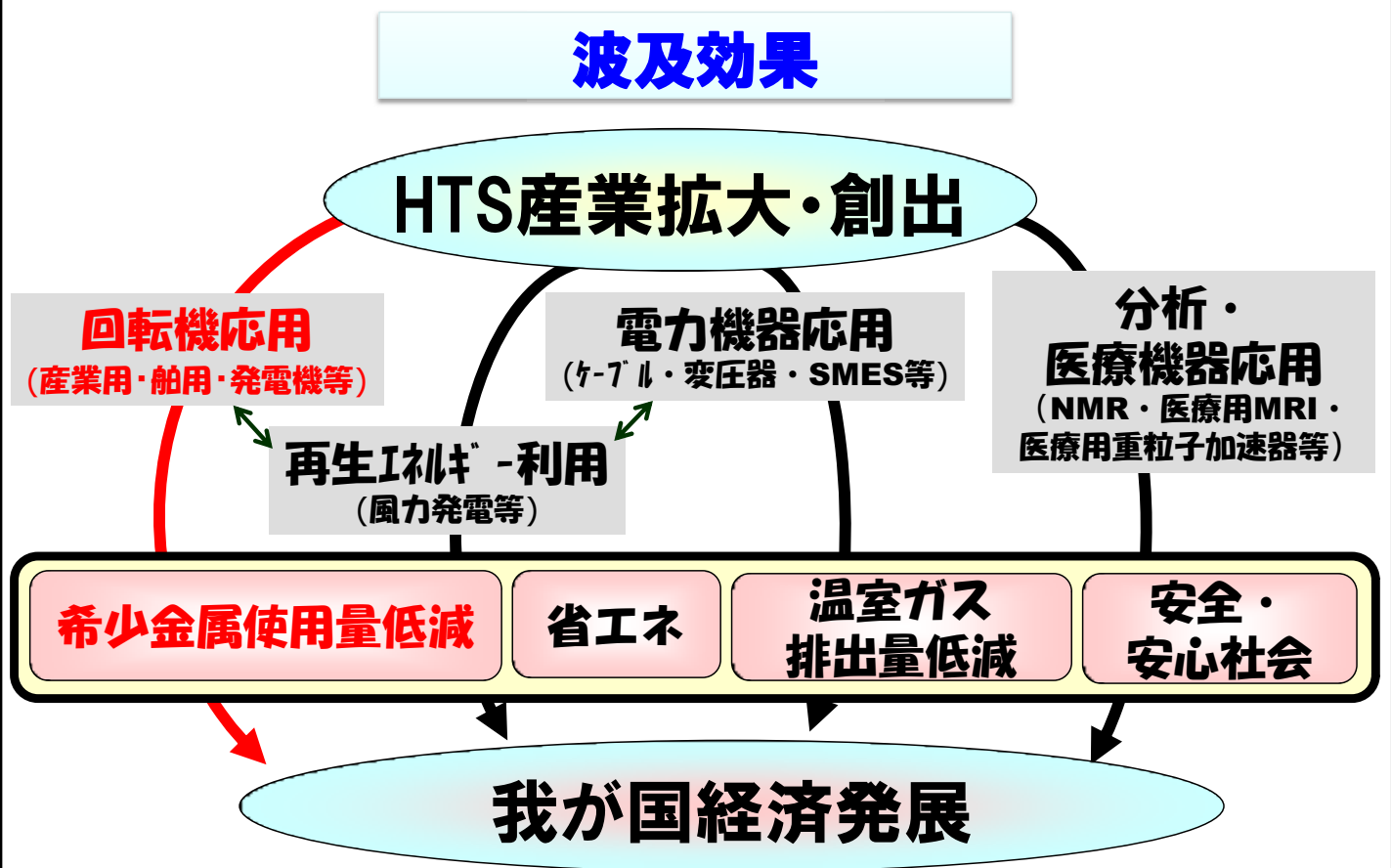
モータ試作等
継続研究
(含冷却系)

超電導モータ
実用化
(産業用、自動車等)

「希少金属代替・削減技術実用化開発助成事業(イットリウム系超電導回転機用電磁石の開発)」(H23.3~H24.2)

[波及効果] 永久電流モード用途
⇒ 分析用NMR、医療用MRI、リニアモータ、医療用重粒子加速器等
安全安心な社会&低CO₂社会





ナノテク・部材イノベーションプログラム
環境安心イノベーションプログラム

「希少金属代替材料開発プロジェクト」

Nd-Fe-B系磁石を代替する新規永久磁石及びイットリウム系複合材料の開発
超軽量高性能モータ等向けイットリウム系複合材料の開発（事後評価）

（2010年3月17日～2011年5月31日）

プロジェクトの詳細説明（公開）

（2）イットリウム系複合材料の製造工程における
希少金属利用率等の効率向上技術開発

テーマリーダー

産業用超電導線材・機器技術研究組合

和泉輝郎

2011年 10月18日

1 / 23

1. 事業の位置付け・必要性(事業目的の妥当性) 2. 研究開発マネジメント(研究開発目標の妥当性) **公開**

位置付け・必要性

現状実績

「超電導応用基盤技術開発」及び「イットリウム系超電導電力機器技術開発」において機器開発への提供で最も実績のあるエキシマレーザPLD法での提供線材作製における原料収率

～30%

本テーマ
設定目標値

原料収率

≥40%

期待できる効果 ⇒ 希土類使用量の低減

500kWモータ想定

Y or Gd使用量 30g(収率30%) ⇒ 23g(同40%)

参考：同容量 永久磁石モータ中 Nd:200g Dy:100g

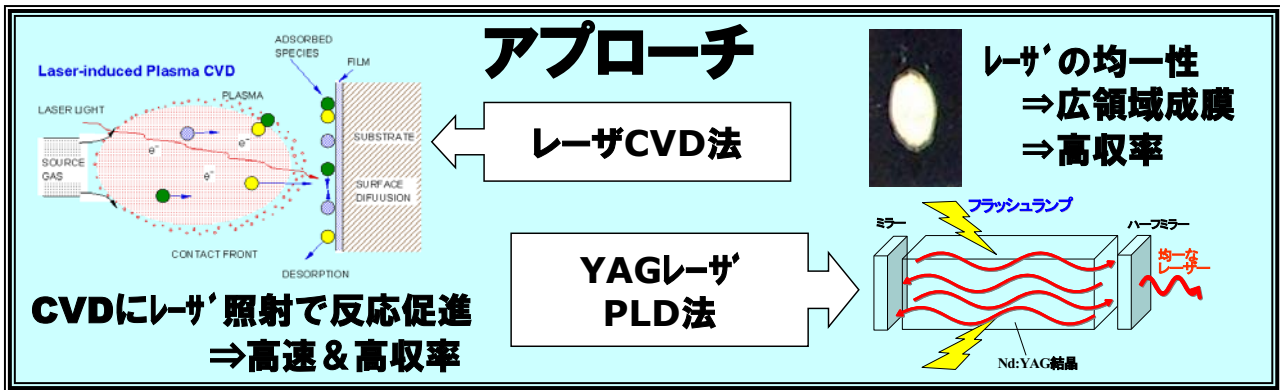
目標及びアプローチ

目標

超電導層の連続形成プロセスにおいて**原料収率40%以上**を見通す。

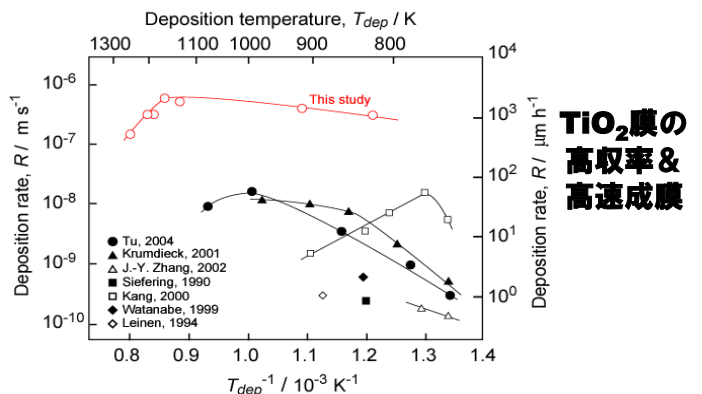
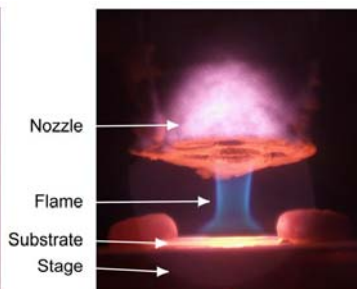
（具体的目標値）

- ・ 全成膜領域に対し、静止成膜により原料収率40%以上を実証する。
- ・ 成膜領域の一部を通過する移動成膜により、静止成膜結果から予想される成膜量を実証する。



アプローチの妥当性

レーザーCVD法の特長



レーザーエネルギーは、蒸着子の励起、反応に使用され原料(ターゲット等)からの離脱エネルギーには不要

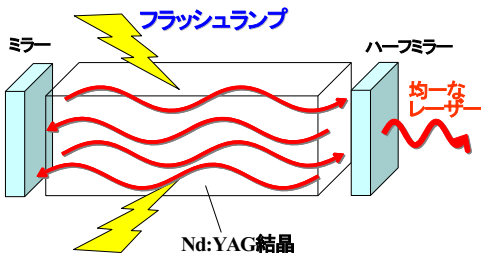
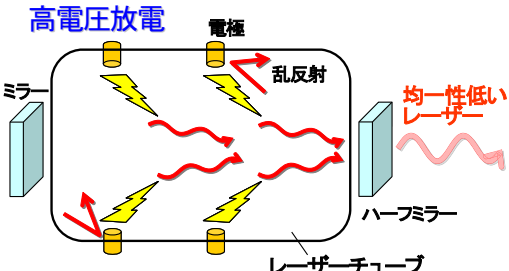
⇒ 低コスト

レーザー照射によるプラズマ発生が反応を促進し、基板への付着率を向上

⇒ 高速 & 高収率

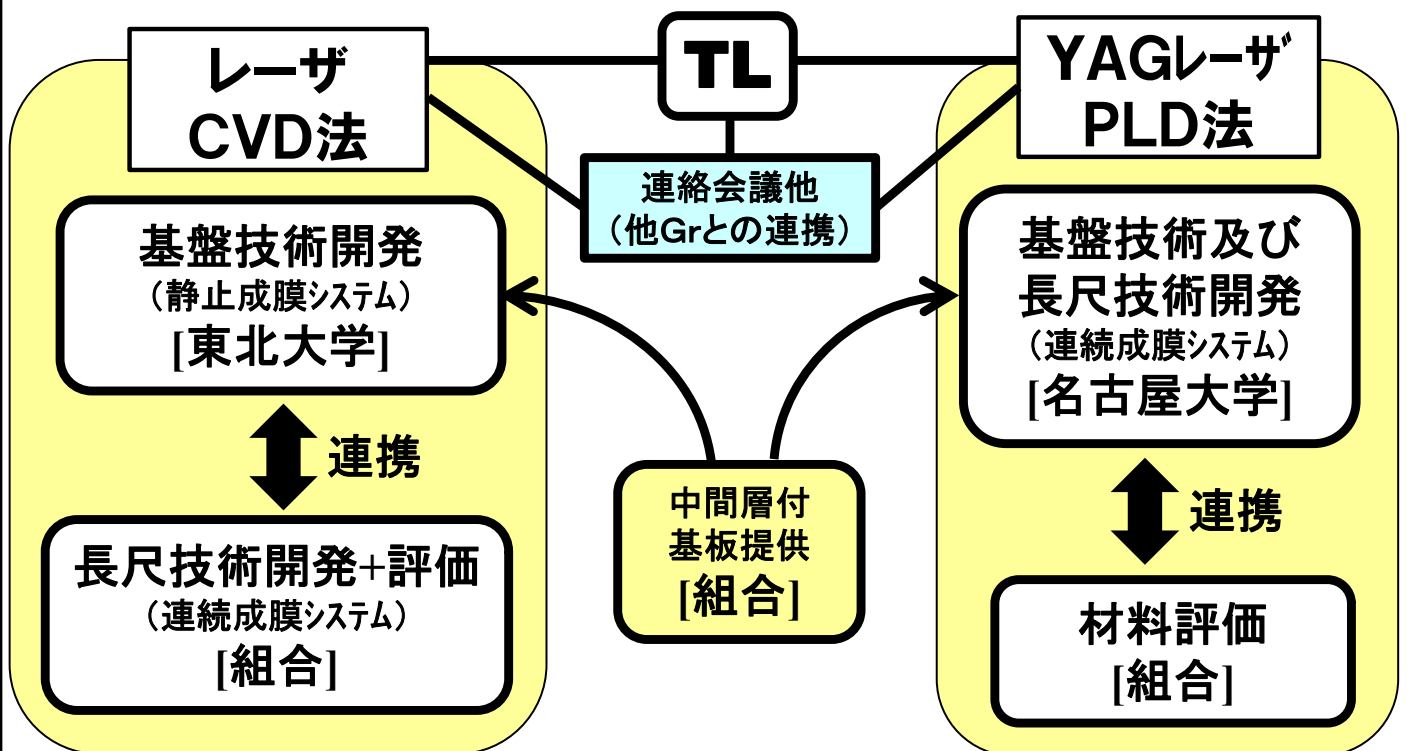
アプローチの妥当性

YAGレーザーPLD法の特長

Nd:YAGレーザー	エキシマレーザー
<ul style="list-style-type: none"> ・低ランニングコスト(電力のみ) & 小環境負荷 ・空間的均一性が高い  <ul style="list-style-type: none"> ・エネルギー安定性と出力が低 	<ul style="list-style-type: none"> ・大出力可・Y系超電導膜実績多数  <ul style="list-style-type: none"> ・高価な希ガスや有毒ガスの使用



開発体制



目標達成状況

②イットリウム系複合材料の製造工程における希少金属利用率等の効率向上技術開発

研究項目	目標	成果	達成度
②-1 レーザーCVD法による希少金属利用率向上技術開発	超電導層の連続形成プロセスにおいて原料収率40%以上を見通す。	・原料収率 45.7% ・超電導特性 $J_c > 3\text{MA/cm}^2$, $I_c > 100\text{A/cm幅}$	○
②-2 YAGレーザーPLD法による希少金属利用率向上技術開発		・原料収率 56.1% ・超電導特性 $J_c > 1.4\text{MA/cm}^2$	◎

◎ 大幅達成、○達成、△達成見込み、×未達

達成度の基準(具体的な目標値)

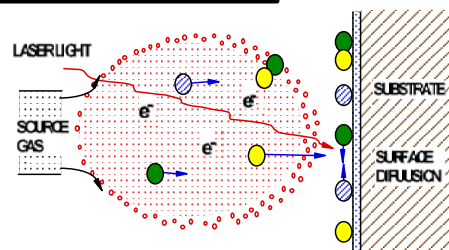
- ・全成膜領域に対し、静止成膜により原料収率40%以上を実証する。
- ・成膜領域の一部を通過する移動成膜により、静止成膜結果から予想される成膜量を実証する。

開発費用 431百万円

レーザーCVD法による希少金属利用率向上技術開発

プロセス開発上の課題と対策

<従来の技術レベル>
固体原料、固定成膜で
超電導相を形成を確認



課題	対策
長尺安定成膜	液体原料の適用 (従来は固体原料で表面積等の経時変化があり、長時間安定供給が困難)
超電導材料への適用 (YBCO or GdBCO等)	成膜条件(温度、酸素分圧、組成等)の適正化
連続成膜への適用	成膜領域の拡大 ←適正レーザー条件の把握 ←移動系システムの開発

レーザCVD法による希少金属利用率向上技術開発

アプローチ法(液体原料の利用)

■ 長尺安定成膜

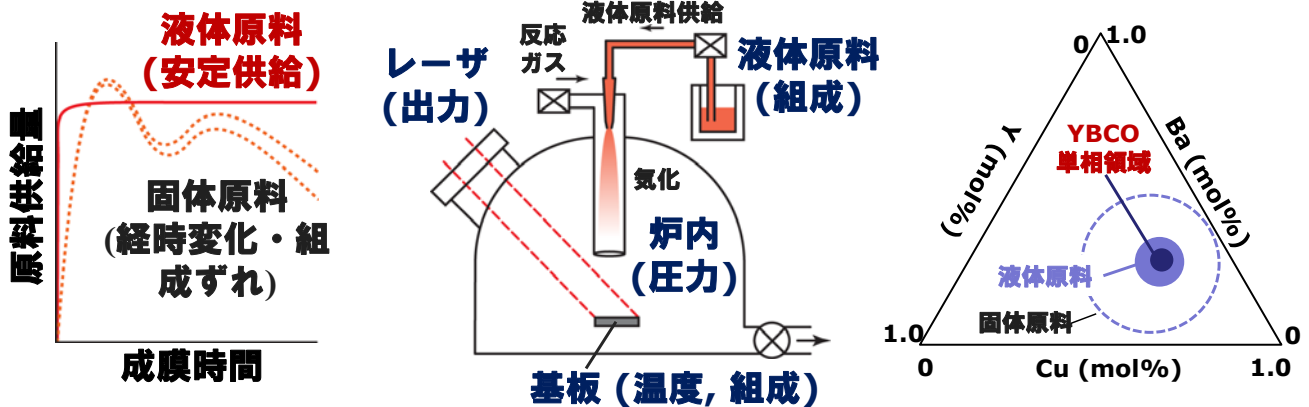
液体原料の適用

- ・長時間の安定連続供給

■ 超電導材料 (YBCO, GdCBO) への適用

成膜条件の適正化

- ・レーザ出力, 基板温度, 圧力, 組成



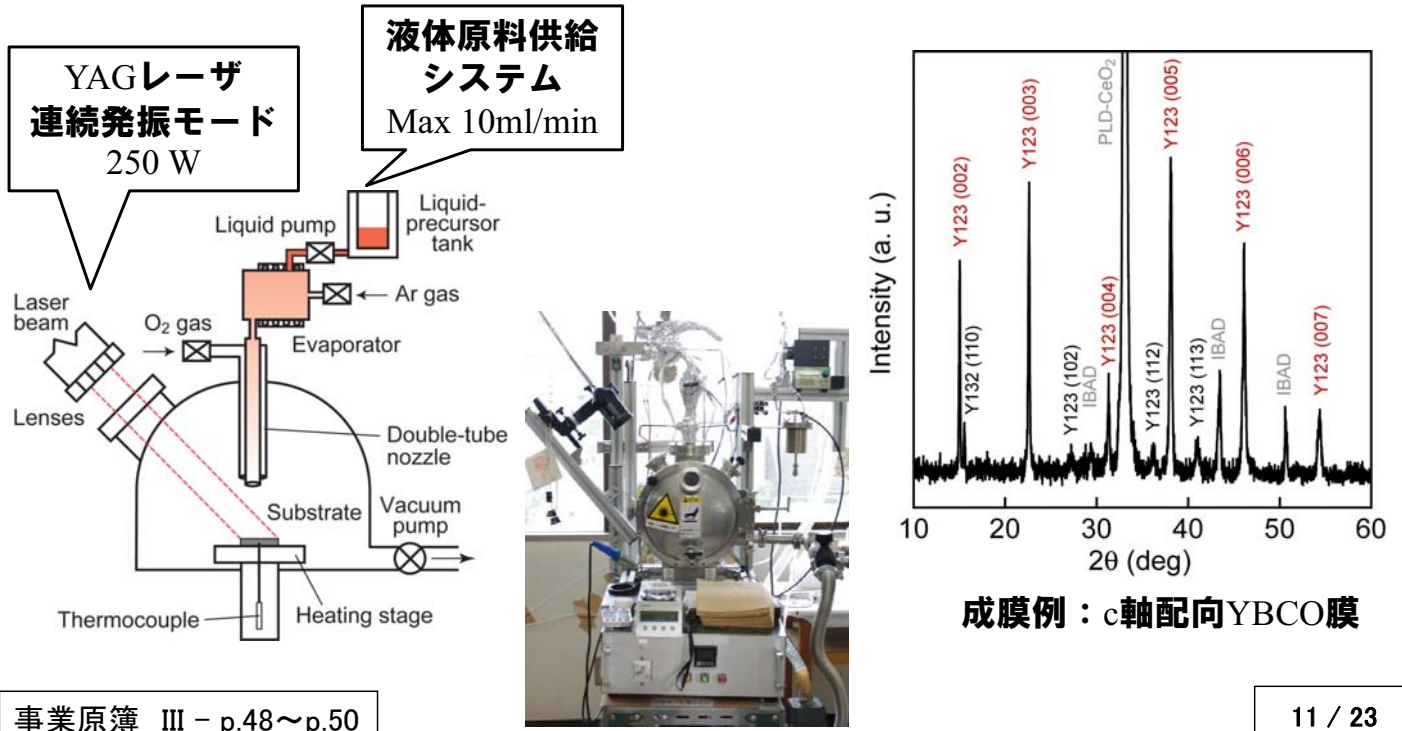
レーザCVD法による希少金属利用率向上技術開発

研究開発スケジュール

	研究項目	FY21/4Q	FY22/1Q	2Q	3Q	4Q
東北大	装置（小型）の導入と立上げ	設計・製作・立上		導入		
	超電導材料への適用性の 実証と基礎データの取得			YBCO成長基礎データ取得		
組合	装置（中型）の導入と立上げ		設計・製作	導入	取得データ適用	
	RTRプロセス確立のための 基礎データの取得			連続化技術		取得データ適用
	収率および線材特性向上へ 向けた条件の最適化				収率向上	長尺化検討

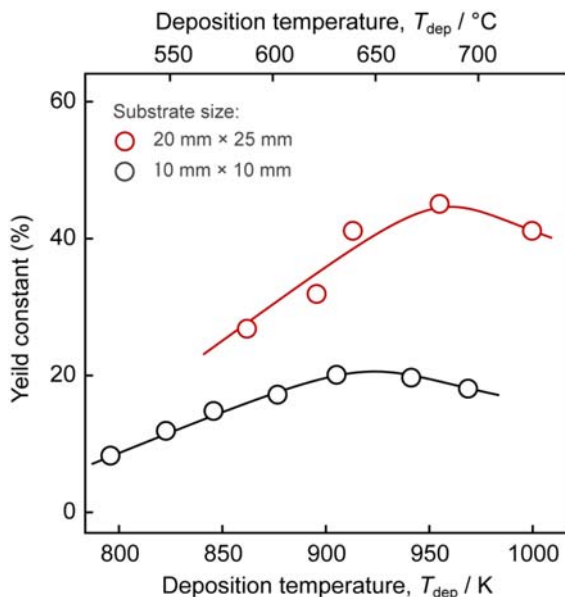
レーザーCVD法による希少金属利用率向上技術開発

液体原料供給型レーザーCVD装置開発



レーザーCVD法による希少金属利用率向上技術開発

静止成膜試験主要結果



予備加熱温度	673 K
レーザー出力	139 W
Y:Ba:Cu 仕込組成	1:1.9:2.7
液体供給量	0.3 ml/min
Arキャリア流量	150 sccm
成膜時間	5 min
炉内圧力	800 Pa
IBAD 基板大きさ	20 mm × 25 mm
Y収率 (%)	45.7

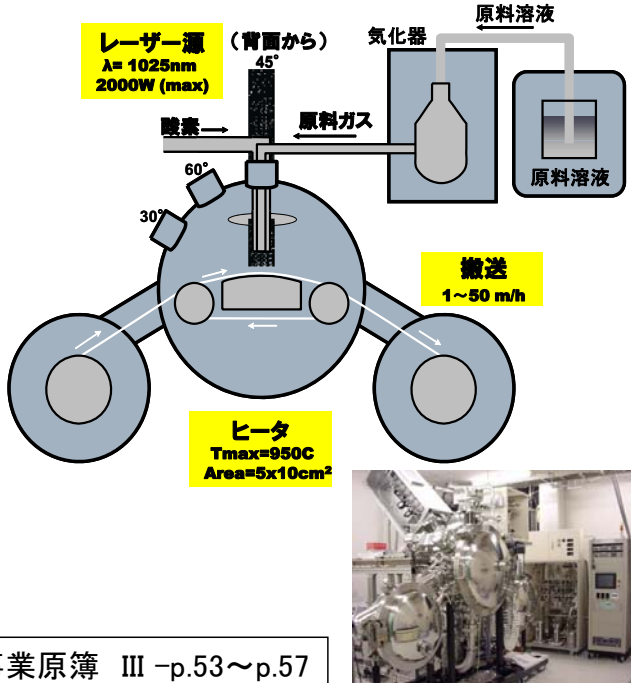
液体原料供給法 + 組成・温度制御

目標達成

レーザーCVD法による希少金属利用率向上技術開発

RTR成膜試験主要結果

RTR式レーザーCVD装置概念図



成膜条件	
原料組成	1.0 : 2.0 : 3.0
膜組成	1.0 : 2.0 : 3.1
気化温度	280℃
経路加熱	285℃
ヒーター設定温度	900℃
レーザーパワー	200 W
スポット径	約80mm
搬送速度	1.2m/h

移動成膜結果 (IBAD-MgO基板)

	Ic (A)	Jc (MA/cm²)	t (μm)
Ic-max	147	1.3	1.1
Jc-max	49	3.2	0.15

YAGレーザーPLD法による希少金属利用率向上技術開発

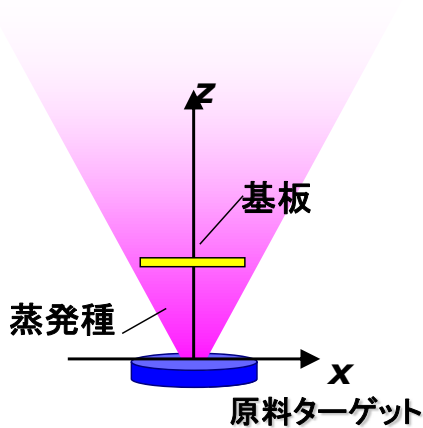
プロセス開発上の課題と対策

課題	対策
超電導材料への適用 (YBCO等) ⇒特性向上 (現状:Jc=2MA/cm² on STO:4倍波)	成膜条件(温度,酸素圧力,ターゲット組成,レーザーエネルギー等)の適正化
連続成膜への適用 (金属基板,移動系システムへの適用性)	(高速高収率成膜技術) 移動系温度制御技術開発+ 適正過飽和度制御技術開発 (インプルーム、マルチパス、マルチターン)
YAGレーザーの最大パワー(4倍波)がエキシマレーザーの最大パワーより小	2倍波による成膜技術開発

YAGレーザーPLD法による希少金属利用率向上技術開発

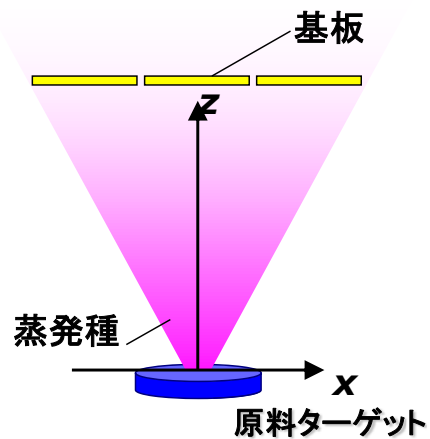
アプローチ法(ブルーム均一性の利用)

インブルーム法



高過飽和成膜 + 単純装置構造

マルチターン/パス法



低過飽和成膜 + 複雑装置構造
(マルチパスは層毎の温度制御可)

YAGレーザーPLD法による希少金属利用率向上技術開発

研究開発スケジュールと予算

研究項目	FY21/4Q	FY22/1Q	2Q	3Q	4Q
短尺IBADテープを用いたY系複合材の検討		自主設備を用いた基礎検討			
連続YAGレーザー導入		設計・製作・立上		導入	
Y系複合材高収率高速化検証				高収率・高速技術開発	
				長尺化検討	

YAGレーザーPLD法による希少金属利用率向上技術開発

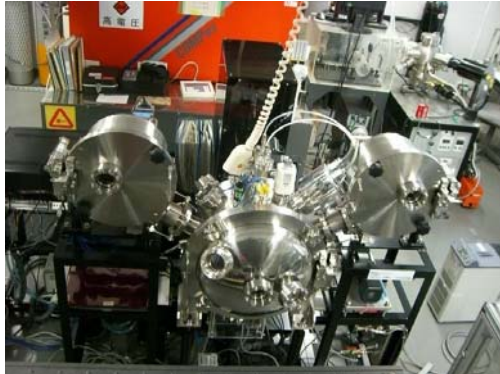
RTR式YAGレーザーPLD装置開発

リール式YAGレーザーPLD装置

均一な
レーザースポット

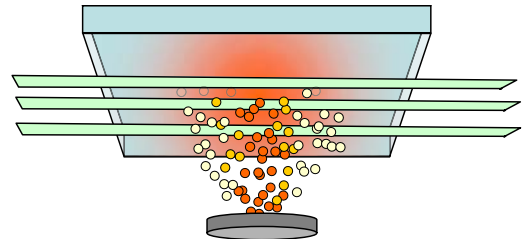


area = 2-3 mm²
2.0 J/cm²



- ・3レーンマルチターン
- ・最高線速 10 m/h
- ・リール内径80、外径160(最大線材長 100 m)
- ・4倍波Nd:YAGレーザー(90 mJ/pulse)
- ・2インチターゲット×3個

インフリューム法+組成制御



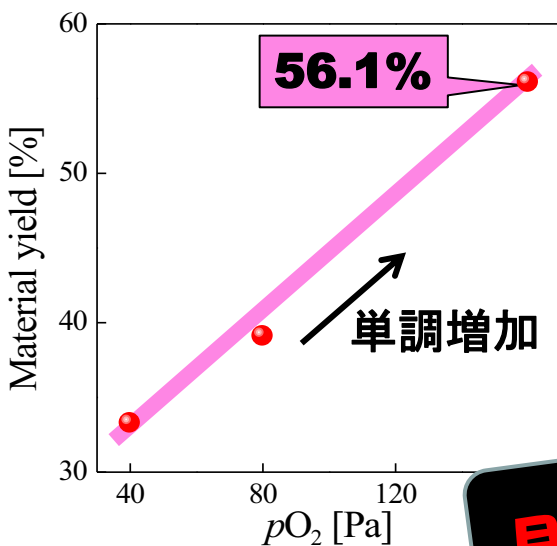
＜主要検討項目＞

- ◆ 基板-ターゲット間距離
- ◆ 酸素分圧
- ◆ 基板制御温度
- ◆ ターゲット組成 等

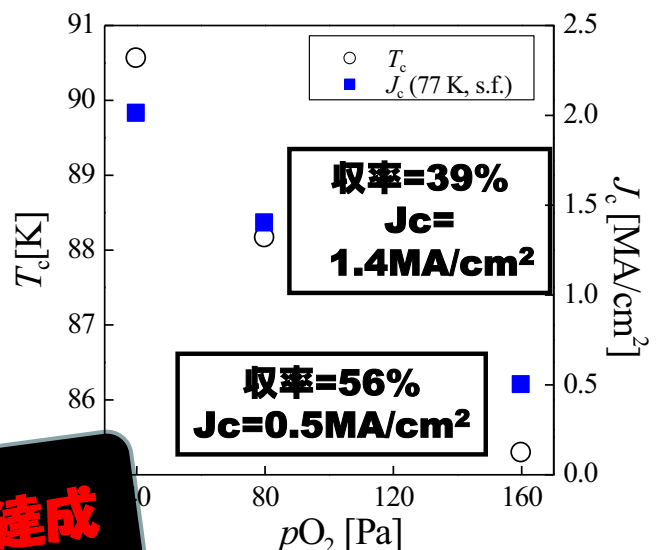
YAGレーザーPLD法による希少金属利用率向上技術開発

RTR成膜試験主要結果

＜酸素圧力に対する収率＞



＜酸素圧力に対する超電導特性＞

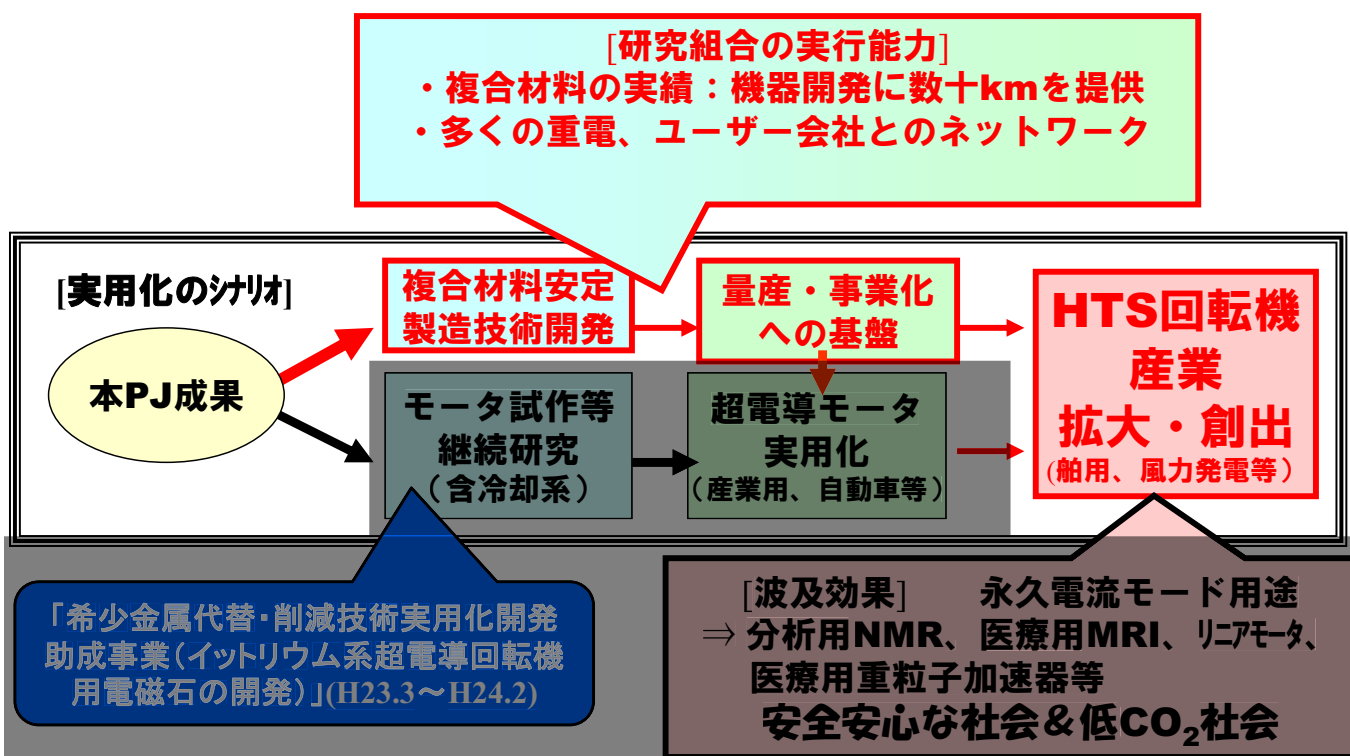


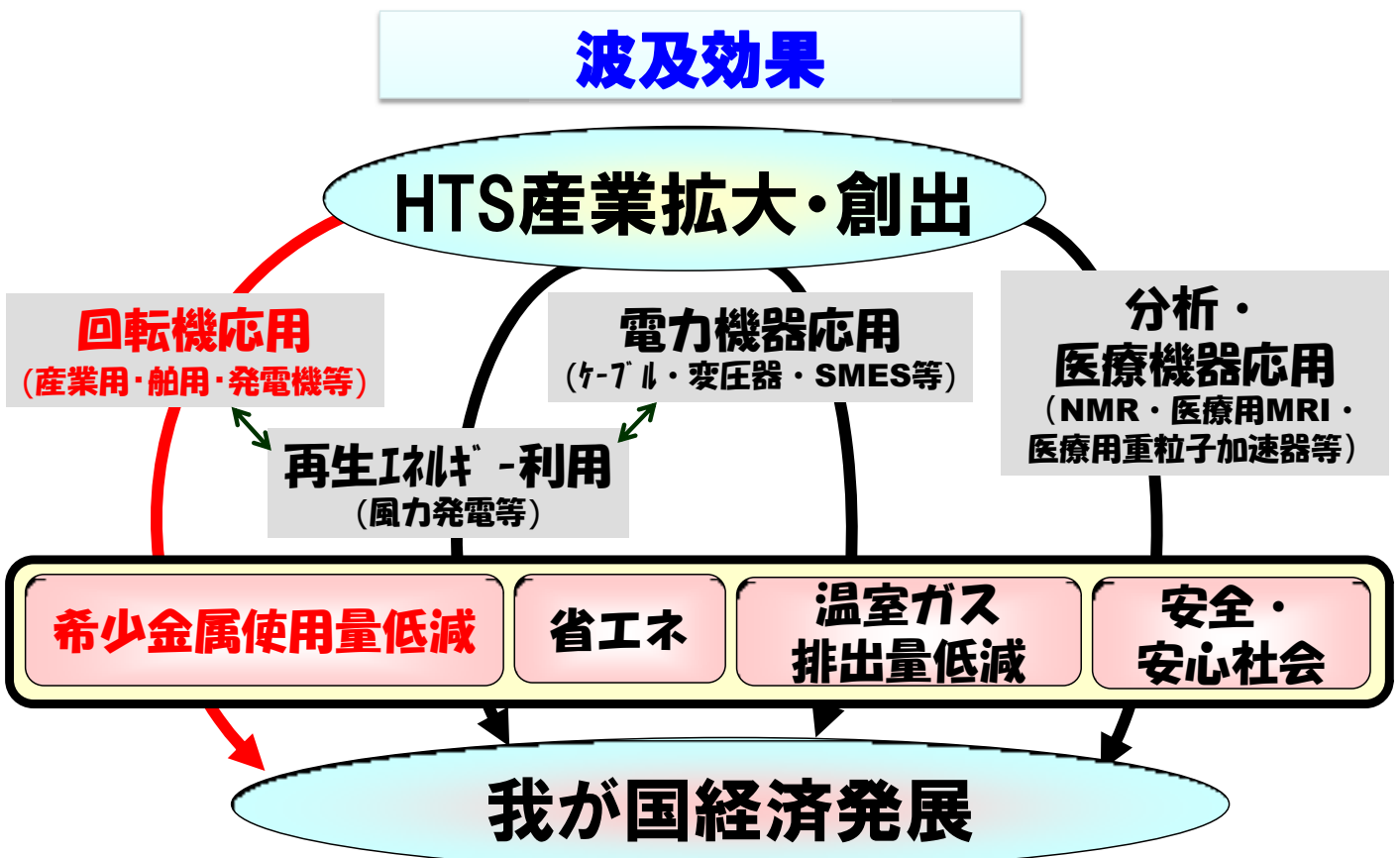
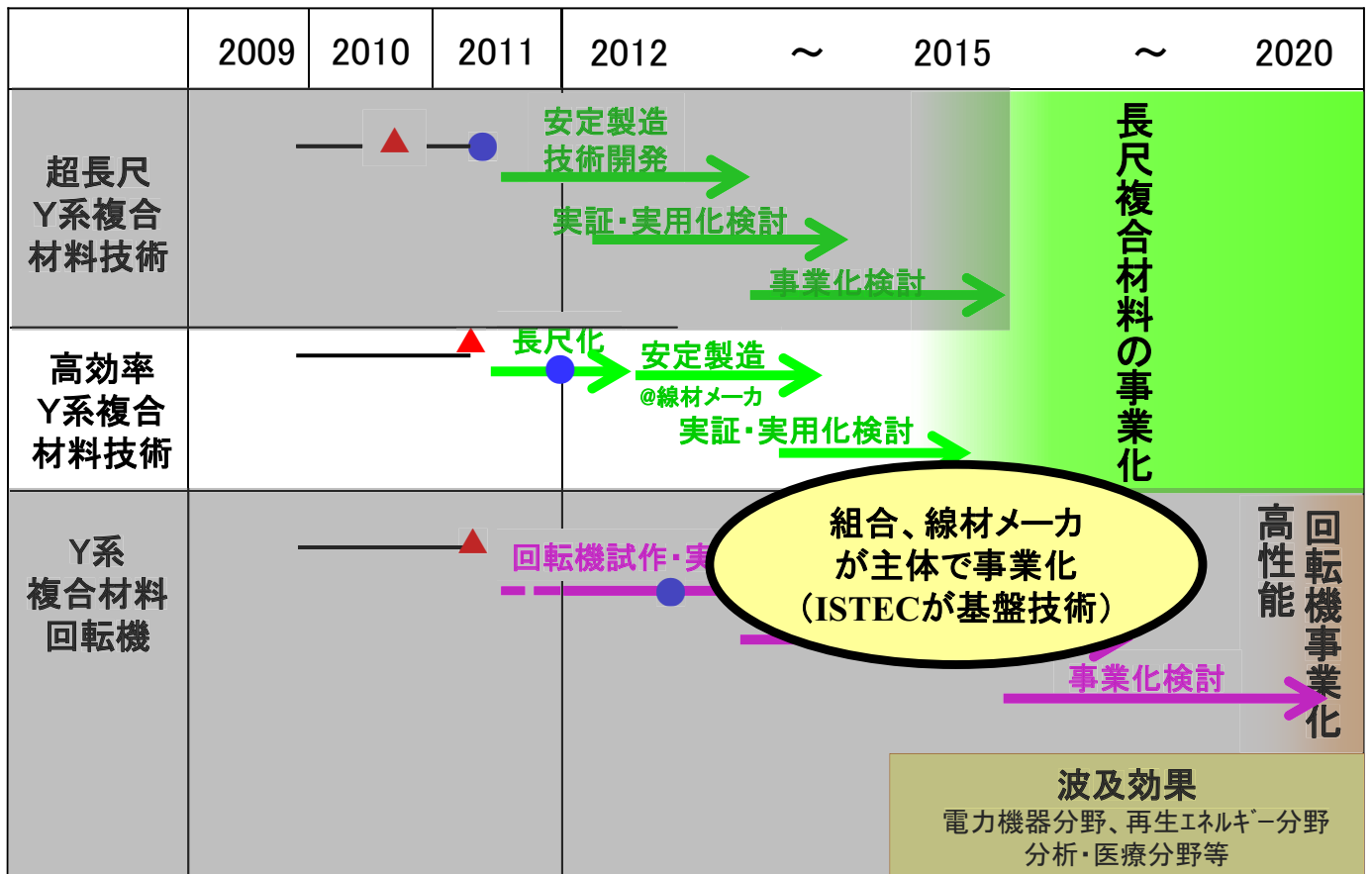
目標達成

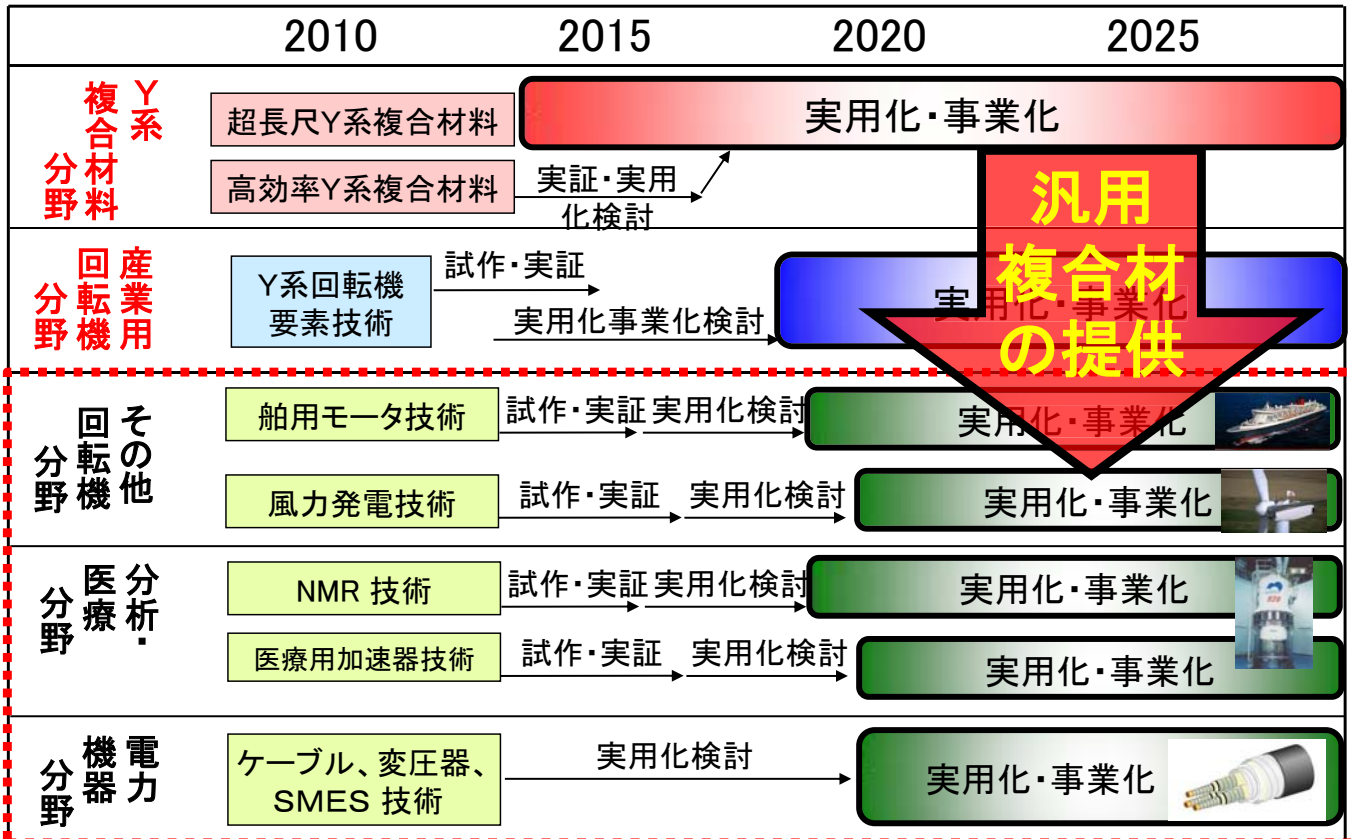
成果の意義

研究項目	成果	成果の意義
②-1 レーザーCVD法による希少金属利用率向上技術開発	<ul style="list-style-type: none"> 原料収率 45.7% 超電導特性 $J_c > 3\text{MA/cm}^2$, $I_c > 100\text{A/cm幅}$ 	<p>○より省希少金属複合材への可能性 (~1/2)</p> <p>○コスト低減効果も大きく期待</p>
②-2 YAGレーザーPLD法による希少金属利用率向上技術開発	<ul style="list-style-type: none"> 原料収率 56.1% 超電導特性 $J_c > 1.4\text{MA/cm}^2$ 	

実用化の見通し







波及効果

ナノテク・部材イノベーションプログラム
環境安心イノベーションプログラム

「希少金属代替材料開発プロジェクト」

Nd-Fe-B系磁石を代替する新規永久磁石及びリットリウム系複合材料の開発
超軽量高性能モータ等向けリットリウム系複合材料の開発（事後評価）

(2010年3月17日～2011年5月31日)

プロジェクトの詳細説明（公開）

(3) リットリウム系複合材料を用いた回転機要素技術開発

産業用超電導線材・機器技術研究組合
山田 穰

2011年 10月18日

1/23

1. 事業の位置づけ・必要性（事業目的の妥当性）

公開

位置付け・必要性

永久磁石
(PM)モータ

・RM資源難
・モータ=高効率化の要請
→近年、多くの分野で需要増

Y系線材の進展
(長さ、 I_c)
RM削減効果大の期待
(事前粗計算~1/10)

RM削減に対する産業用モータの重要性

消費電力の大勢を占めるモータ

全消費電力中のモータの割合
国内電力総消費量
99.96億kWh(2005年)の 57%
および産業部門の 70%



より効率的なPMモータ
を求める世界情勢

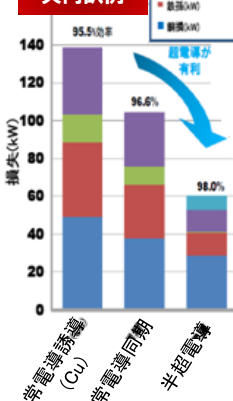
世界各国で最低エネルギー効率規制
(MEPS)を定め法規制化

低効率 各国の効率規制(JEMA機関紙からの抜粋)

IE1	中国、ブラジル、コスタリカ、イスラエル、台湾、アメリカ(*)、カナダ、メキシコ、オーストラリア
IE2	EU(2011~2014)、中国(2011~)
IE3	アメリカ(2011~)、EU(2015~) 日本
IE4	-

高効率

各種モータ
の効率と損失内訳



超電導の効果 高効率、
コンパクト
+RM使用量極少

導入促進

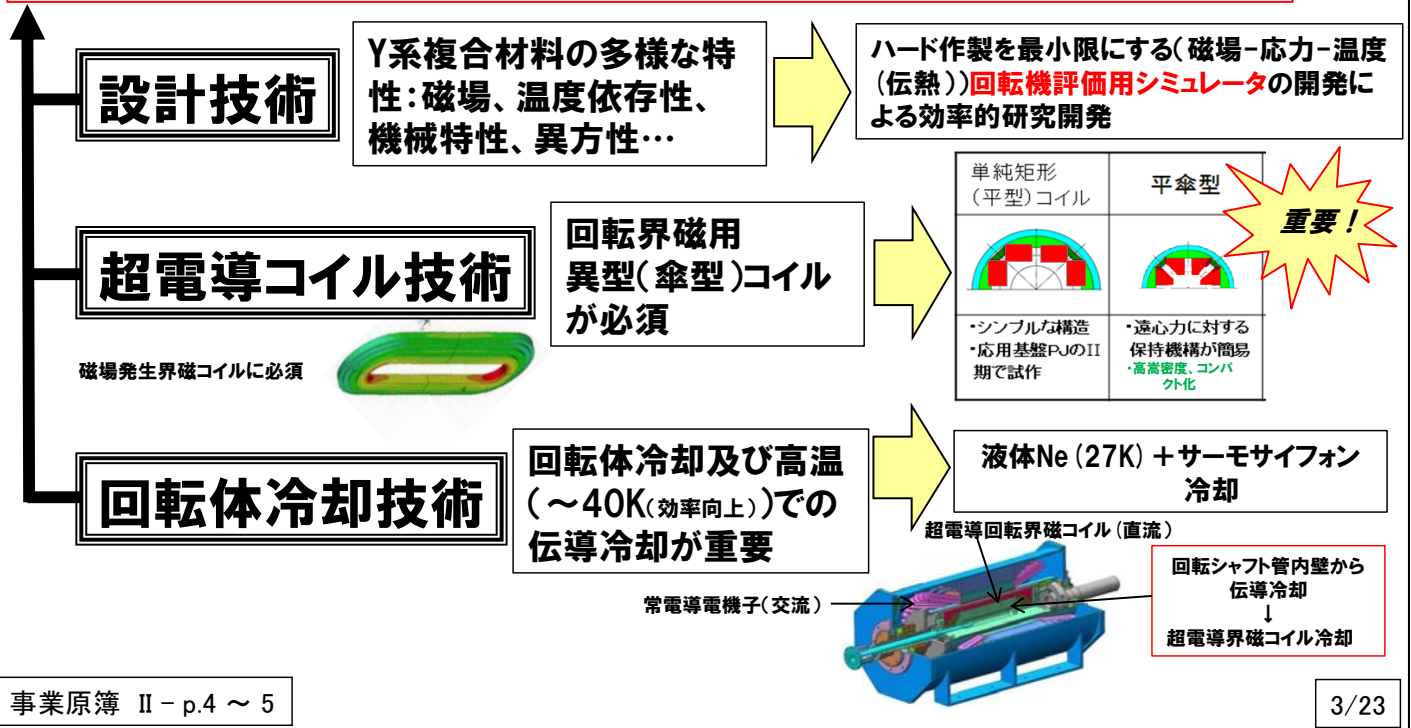
超電導による産業用モータ
のコンパクト化



半超電導=回転界磁超電導

技術的位置付け・必要性

- ・希土類永久磁石を代替しRMの大幅な削減を可能とする技術開発
- ・超軽量かつ高効率次世代モータの実現、導入促進によるRM削減量増大



目標及びアプローチ

目標

イットリウム複合材料による500kW級-1000rpm級回転機の優位性を見通す。

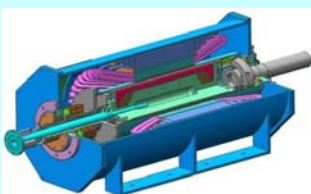
(具体的目標値)

- ・磁場-応力-温度(伝熱)を連成した**回転機評価用シミュレータ**を開発する。
- ・シミュレータを用いた総合評価により希少希土類元素使用量が**1/10**となる成立性を示す。
- ・**傘型界磁巻線**状態での特性で複合材料 ρ_c の70%以上を得ることを実証する。
- ・**Neを用いたサーモサイフォン式冷却**装置で高速回転時の回転数と冷却能力の関係を明らかにし、回転機の冷却設計を可能にする。

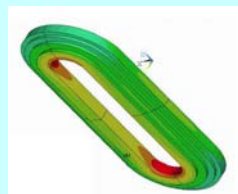
開発項目1.モータ概念設計

アプローチ

開発項目2.要素技術開発



- ・軽量、コンパクト性等の優位性を有したモータ設計
- ・RM削減率の試算
- ・モータの成立性評価等

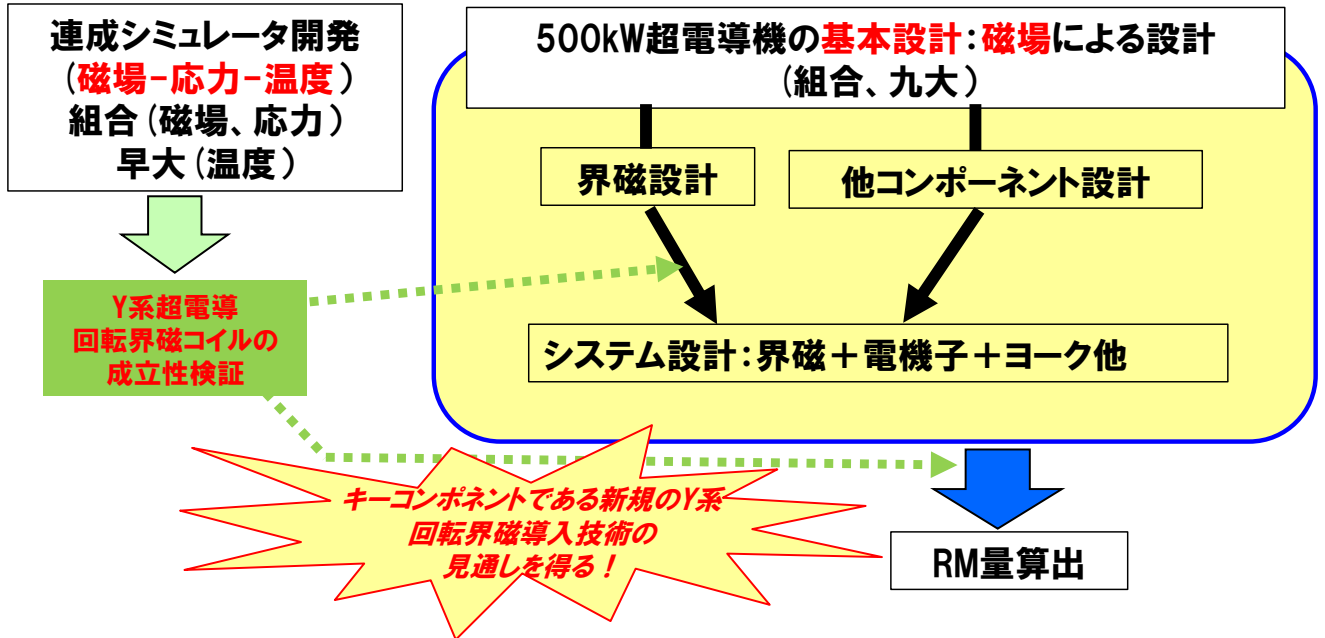


- ・異形コイル界磁巻線技術
- ・冷却技術に関する試作検討

目標、アプローチの妥当性

開発項目1.モータ概念設計

設計手順とシミュレータ



目標、アプローチの妥当性

開発項目2.要素技術開発

界磁巻線技術

回転界磁用異形(傘型)コイルが必須

界磁巻線及び冷却技術

磁場発生界磁コイルに必須



単純矩形(平型)コイル	平傘型
<ul style="list-style-type: none"> ・シンプルな構造 ・応用基盤PJのII期で試作 	<ul style="list-style-type: none"> ・遠心力に対する保持機構が簡易 ・高密度、コンパクト化

超電導→回転界磁を選定(直流使用)→傘型形状検討(高高密度)

目標基準: 傘型界磁巻線状態での特性で複合材料 I_c の70%以上

想定される劣化要因

- ・巻線層間の段差、半円形部曲げ: 曲げ歪、エッジ歪ほか
- ・電磁力、熱収縮など

機械特性(過去報告値、内部実績) フラットワイス曲げ歪特性、 ϵ_{irr} (不可逆歪、元へ戻る限界) エッジワイス対策: 従来の作製実績、予備試験から

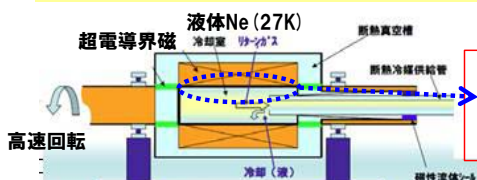
回転体冷却技術

液体Ne (27K) + サーマサイフォン冷却

界磁コイルを ~40Kに冷却

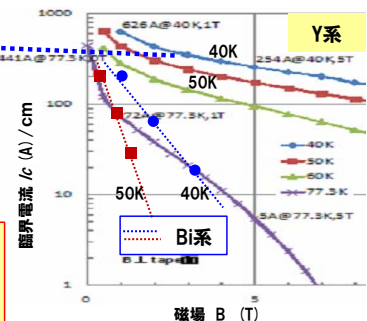
- 低温: 高 I_c
- 高温: 冷却損が小さく、高効率になる

目標基準: Neを用いたサーモサイフォン式冷却装置で高速回転数と冷却能力の関係を評価



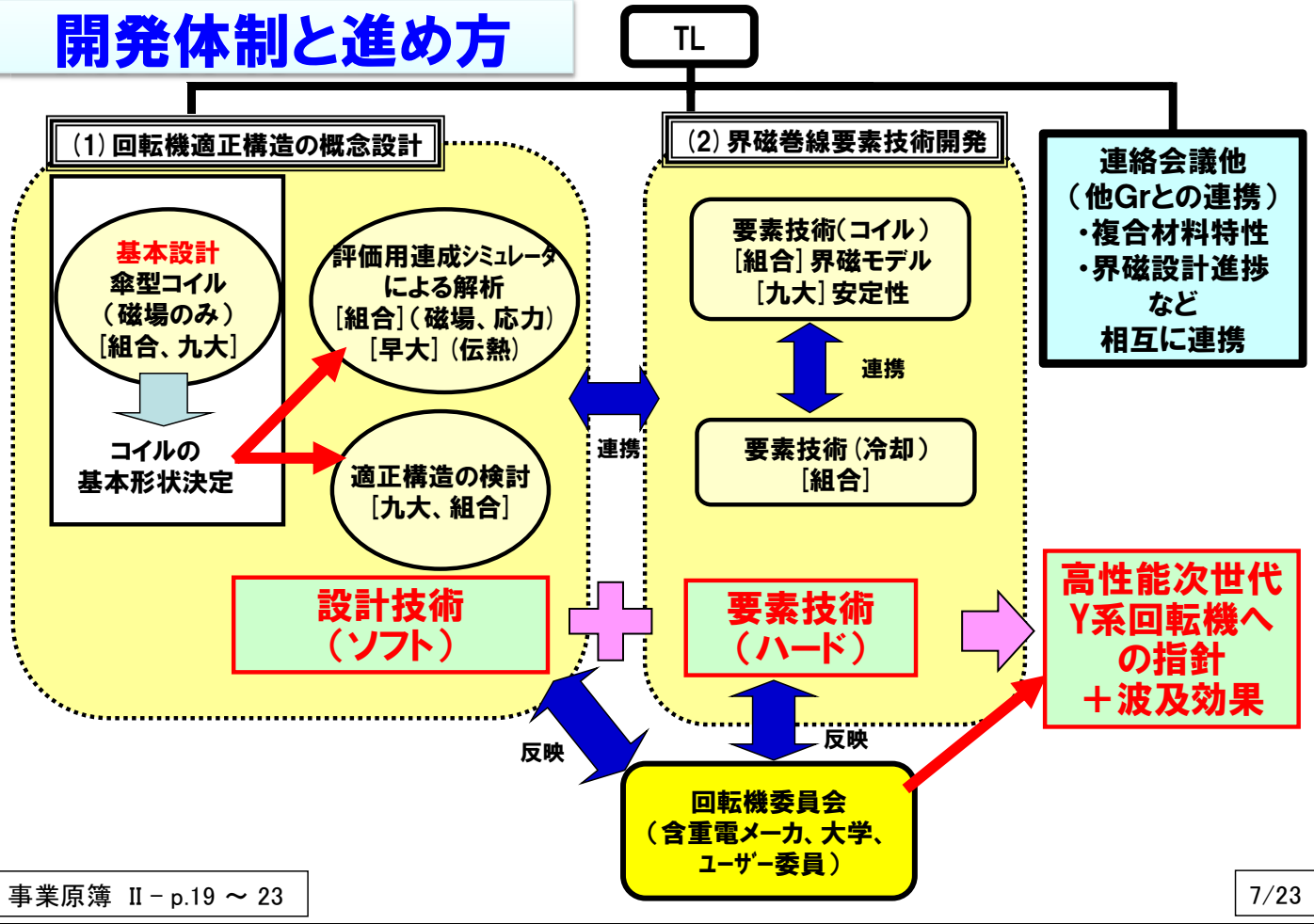
冷却液が壁面に密着→伝導により外側の界磁コイルを冷却

しかし、過去に回転界面での液体Neの熱データ(特に、熱伝達係数)無し。実機、大型機設計に必須



~40K: モータ使用磁場 (2-3T) で高い I_c が可能

開発体制と進め方



目標達成状況

③ イットリウム系複合材料を用いた回転機要素技術開発

	目標	成果	達成度
③-1 回転機適正構造の概念設計	500kW級回転機の概念設計によりイットリウム系の優位性を見通す。	<ul style="list-style-type: none"> 500 kW機設計検討で希少金属使用量が従来の1/130に低減できることを示した。 磁場、温度、応力の3要素を連成させた解析シミュレータを開発し、上記設計機を評価し成立性を確認した。 	◎
③-2 界磁巻線および冷却要素技術開発	傘型界磁巻線の試作・評価、サーモサイフォン式冷却の特性評価により、回転機の設計に資するデータを得る。	<ul style="list-style-type: none"> エッジワイズ歪、段差巻などのY系の課題を克服し、劣化なくY系傘型界磁モデルコイルの製作に成功し、回転機設計の見通しを得た。 液体Neを用い、高速回転時に30K冷却と界面の熱伝達係数hを得て、冷却設計の見通しを得た。 	◎

◎ 大幅達成、○達成、△達成見込み、×未達

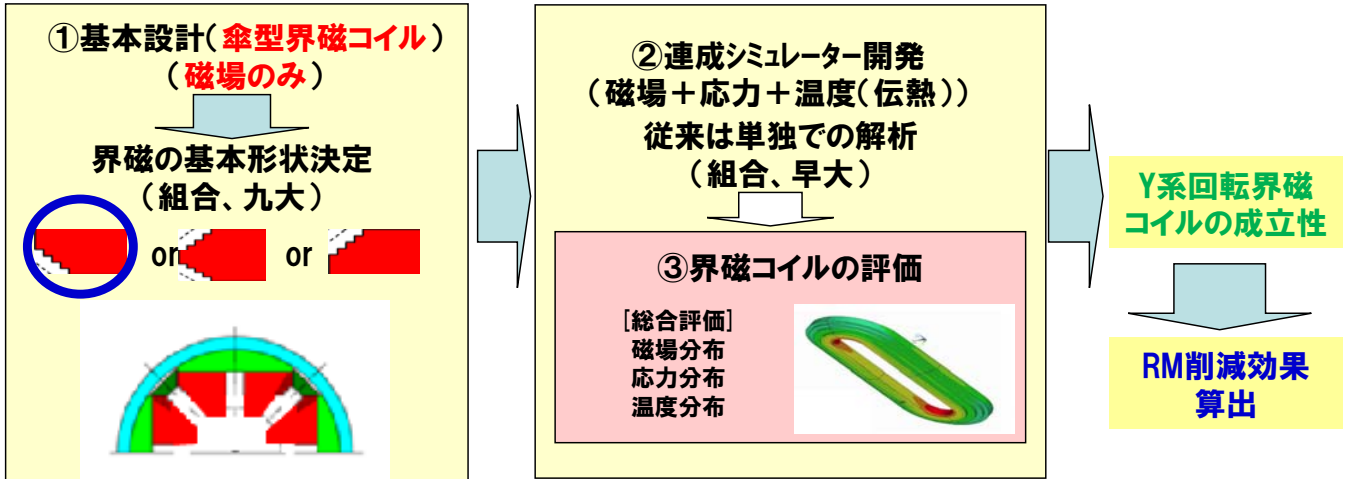
達成度の基準(具体的な目標値)

- ③-1 ・回転機評価用シミュレータを開発する。
・概念設計により、希少希土類元素使用量が従来の1/10以下になることを示す。
- ③-2 ・複合材の臨界電流の70%以上の界磁巻線コイル励磁特性(励磁率70%)を得、界磁コイル設計の見通しをつける。
・液体Neサーモサイフォン式冷却における高速回転時の回転数と冷却能力の関係を明らかにし、回転機の冷却設計の見通しを得る。

③-1 回転機適正構造の概念設計

課題と対策

課題	対策
Y系複合材料の 特徴を活かした回転界磁コイル構造の適正化	Y系複合材料に特有な 超電導特性 を評価（電磁的特性（通電 I_c など）の温度、磁界依存性ほか）
	磁場、応力及び温度（伝熱）を連成した 回転機評価用シミュレータの開発 、これを用いた回転機界磁コイルの評価



事業原簿 II-I- p.73 ~ 74

9/23

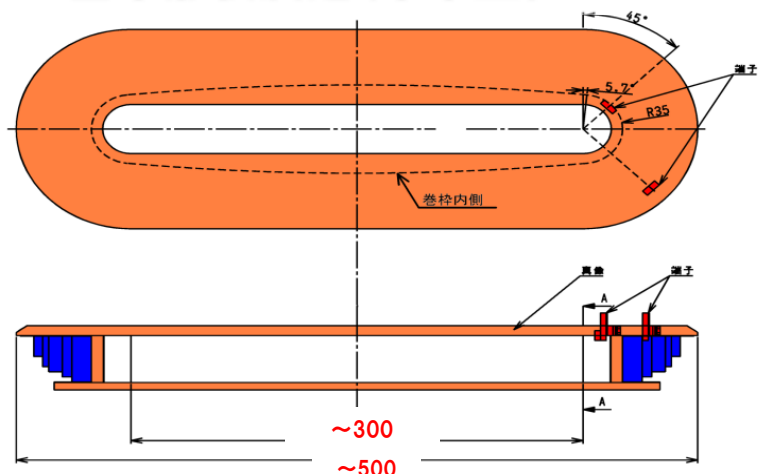
① 基本設計 傘型界磁コイル

主な仕様
 出力 500kW
 回転数 1800rpm-4極
 (産業用 1000rpm級)
 ギャップ磁束密度 ~1T
 界磁磁束密度 2-3T
40K動作



上記仕様、形状のもと具体的設計へ

基本形状決定 (平傘型)



・曲げ径、各層の段差などY系の機械特性を考慮

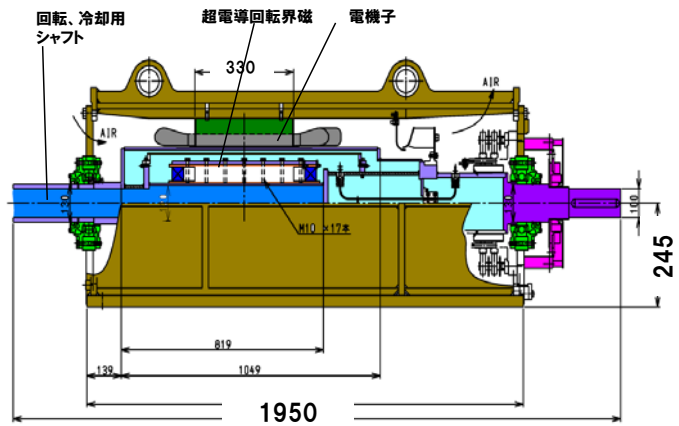
磁場 + 応力 + 温度
 評価用連成シミュレーションへ
 → Y系超電導回転界磁コイルの成立性検証

事業原簿 III - p.77 ~ 79, p.95 ~ 102

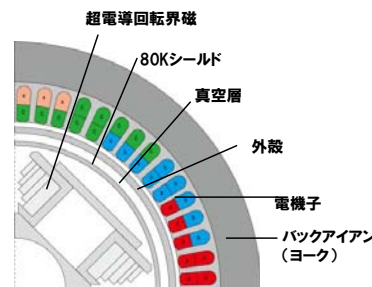
10/23

①基本設計 回転機全体

仕様	出力	500kW
	電圧	440V
	回転数	1800rpm
	極数	4
固定子	外径	490mm
	鉄心相当長	330mm
	内径	370mm
	エアギャップ	5mm
回転子 (40K)	界磁電流*	230A
	ターン数	1050
	起磁力	241.5kAT
	線材量(極)	1.2km
	界磁コイル磁束密度	3.0T
	ギャップ磁束密度	1.2T



全体断面



界磁、電機子部断面

*600A/cm幅(77K,自己磁場)線材での設計

界磁コイル→電機子、ヨークなどを含めて
モータ全体システム設計→RM削減効果等の試算

②評価用連成シミュレータの開発

Y系傘型界磁の成立性の検討

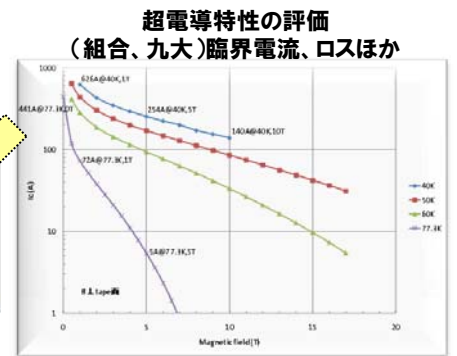
電磁場解析

超電導特性:
磁場、温度、ひずみに依存

超電導臨界電流密度 J_c 、 n 値の特性式

$$E = E_c \left(\frac{J}{J_c(B, T, \epsilon)} \right)^{\frac{1}{n(B, T, \epsilon)}}$$

J_{SC} : 超電導体内の電流
 $I-V$ 特性: 非線形



Y系複合材料の J_c-B-T 特性

熱解析

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) + \dot{Q}$$

C: 熱容量
 λ : 熱伝導率
 \dot{Q} : 発熱・抜熱

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{transfer} + \dot{Q}_{Joule} + \dot{Q}_{AC}$$

$$\dot{Q}_{transfer} = h \Delta T \quad h \text{熱伝達係数} \quad \Delta T: \text{界面温度差}$$

Joule発熱
交流損失

T: 温度

u: 変位

熱ひずみ

$$\epsilon_{th} = \alpha \Delta T$$

α : 線膨張率

応力解析

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + F_x &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + F_y &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + F_z &= 0 \end{aligned}$$

応力-ひずみ関係 $\tau = D\epsilon$
T: 応力
D: 弾性係数行列
 ϵ : ひずみ

電磁力
 $F = J \times B$

遠心力
 $F = mr\omega^2$
 ω : 回転数

*形状効果 (九大)

界磁コイルの形状検討
平傘型界磁コイル

平傘型

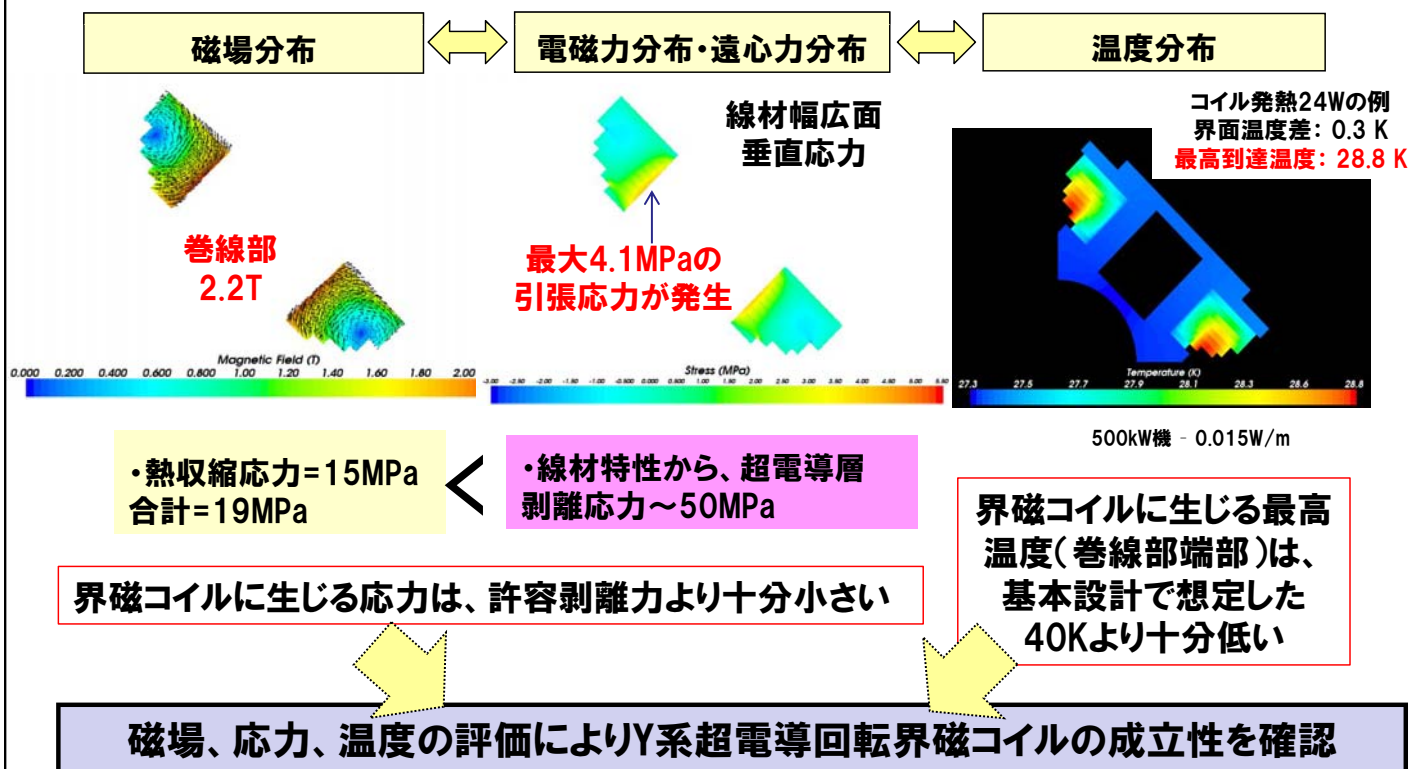


- ・遠心力に対する保持機構が簡易
- ・高傘密度、コンパクト化

液体Ne、構成材料の比熱、熱伝導率、熱伝達係数等の熱物性
*交流ロス評価(九大)

Y系複合材料,界磁コイルの構成材料の強度特性

③回転機評価用連成シミュレータによる界磁コイルの解析例



Y系500kWモータにおけるRM削減効果

- ①500kWモータ基本設計
- ②Y系界磁コイルの形状検討
- ③評価用シミュレータによるY系成立性検証→OK

目標(RM削減量 1/10以下)達成

④RM削減効果計算

RM量: 従来永久磁石機に対し
1/130

	超電導モータ	永久磁石 (PM) モータ
全体量(複合材料 (km), 永久磁石 (kg))	4.8km	50kg
希土類元素使用量 (kg)	126g	16kg

(Gd in $Gd_1Ba_2Cu_3O_{7-x}$) vs (Nd,Dy in PM)

希土類元素使用量 (Gd)
=線材幅 (mm) x 超電導層厚さ (μm) x 比重 (g/cc)
x Gd比 x 線材長/極 (km) x 4極 / (材料歩留り33%)
= 5 (mm) x 1.3 (μm) x 6.3 (g/cc)
x (157/734) x 1.2 (km/極) x 4 (極) / 0.33 = **126g**

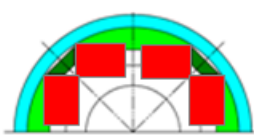

*事前検討値1/10との差
・今回Y系さらに特性向上
→モータ軽量コンパクト化
(線材量2.4kmが半減の1.2km)
・他方、ギャップ磁場0.5T→1.2Tへ
・PM同期機の磁石量増加

③-2界磁巻線および冷却要素技術開発

課題と対策

①要素技術開発 界磁コイル（組合、九大）

回転機用傘型界磁コイル形状

単純矩形 (平型)コイル	平傘型
	
・シンプルな構造 ・応用基盤PJのII期で試作	・遠心力に対する保持機構が簡易 ・高嵩密度、コンパクト化

傘型界磁コイルの課題

- ①Y系材料の実績なし
- ②巻線径、導体渡り部などでの機械的特性の影響

施策:

応力歪特性などを考慮した巻線+励磁率(コイル I_c /線材 I_c)の把握

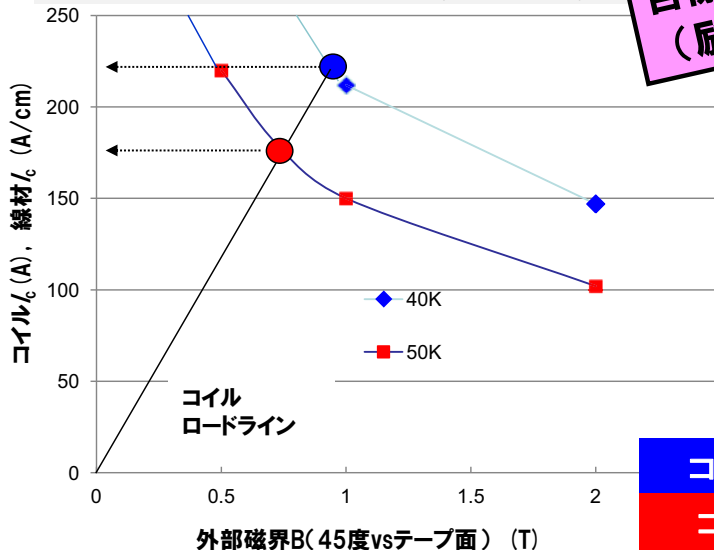
I_c -フラットワイズ曲げ歪、エッジワイズ曲げ歪特性などを事前に把握して、段差巻など巻線、製作実施

界磁巻線および冷却要素技術開発

平傘型モデルコイルの励磁試験(冷凍機冷却)

Y系傘型界磁コイル試験:
冷凍機冷却により40, 50Kで
励磁率~100% (コイル I_c /線材 I_c)

目標達成
(励磁率>70%)



平傘型

・遠心力に対する保持機構が簡易 ・高嵩密度、コンパクト化



課題: 段差巻き、エッジワイズ歪

コイル I_c @40K >220A

コイル I_c @50K=180A

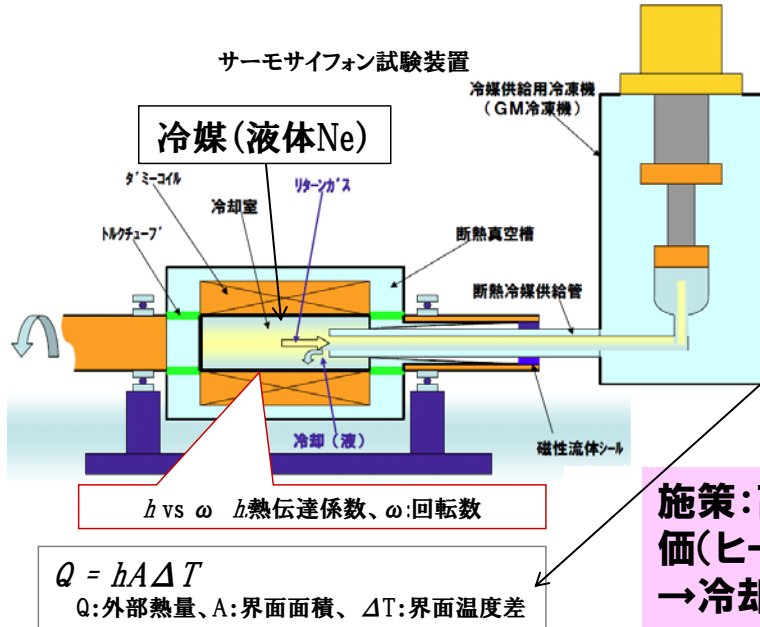
I_c 基準 1 μ v/cm

コイルロードライン: I_c が最小になる磁場印加角度で計算

③-2界磁巻線および冷却要素技術開発

課題と対策

②要素技術開発 冷却(組合)



課題

- ①温度制御性
冷媒Ne: 沸点-融点差
~2.5K (大気圧)と小さい
- ②高速回転 (1000rpm) での熱伝達係数 h などの熱設計データなし

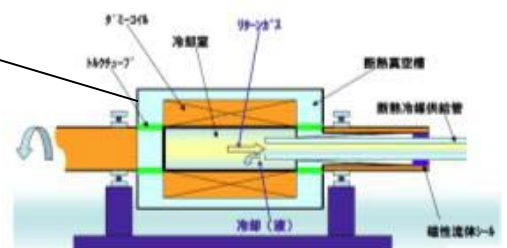
施策: 高速回転で、温度制御、熱侵入量評価(ヒータ加熱)を考慮した試験装置作製
→冷却特性、熱伝達係数 h など評価

界磁巻線および冷却要素技術開発

サーモサイフォン回転冷却試験装置の作製



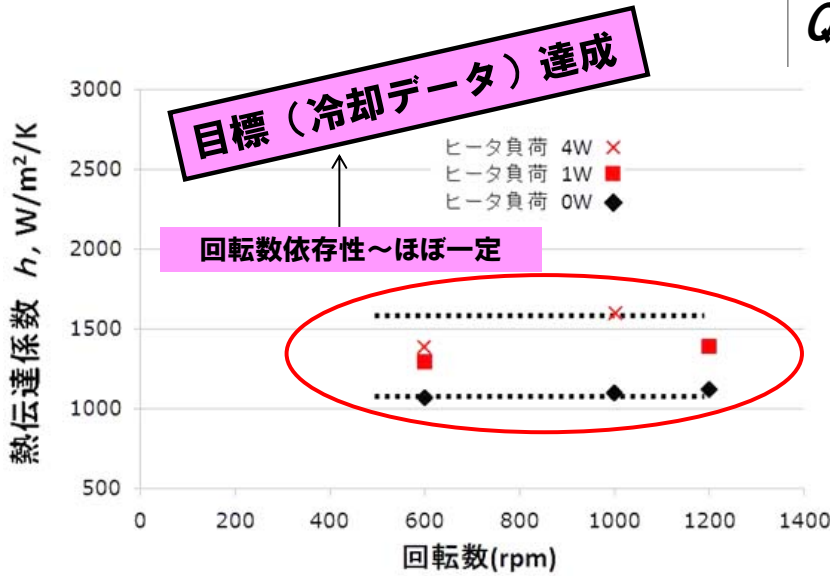
回転遠心力により冷媒(液体Ne)をシャフト壁面全体に接触させ、コイルを伝導冷却する。



液体Ne冷却 + ~1000rpmで回転

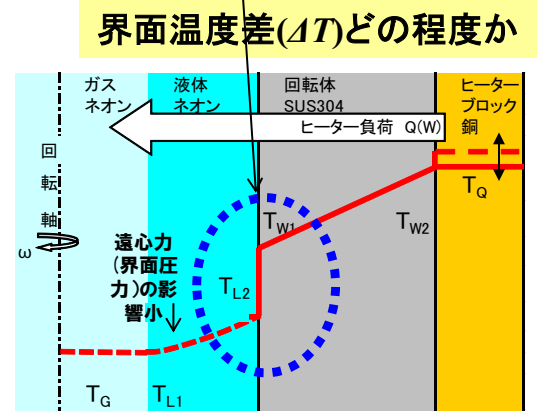
液体Ne沸点 (27K) 近傍の冷却において伝熱・温度データ取得 (次頁)

熱伝達係数 h と回転数の関係の検討



$$Q = hA\Delta T \quad (\Delta T = (T_{W1} - T_{L2}))$$

Q 外部熱量、 A 界面面積、 T 各温度



今回、界面温度差 $\Delta T = 0.1 - 0.3K$ 小さかった。

回転する液体Ne界面 十分な抜熱能力あり
 * 大きなコイル発熱があっても界面に大きな温度差が生じることはない。SUS熱伝導率などは、従来データあり。

~1000rpmで回転する液体Ne界面での熱伝達係数 $h = 1330 \pm 260 W/m^2/K$ を初めて得ることができた。回転数依存性 = 一定 → 回転機の冷却設計が可能に

成果の意義

	成果	成果の意義
③イットリウム系複合材料を用いた回転機要素技術開発	<ul style="list-style-type: none"> 500 kW機設計検討で希少金属使用量が従来の1/130に低減できることを示した。 磁場、温度、応力の3要素を連成させた解析シミュレータを開発し、上記設計機を評価し成立性を確認した。 エッジワイズ歪、段差巻などのY系の課題を克服し、劣化なくY系傘型界磁モデルコイルの製作に成功し、回転機設計の見通しを得た。 液体Neを用い、高速回転時に30K冷却と界面の熱伝達係数 h を得て、冷却設計の見通しを得た。 	<ul style="list-style-type: none"> ○複合材料の異方性を考慮した設計による、Y系超電導回転機の使用希少金属量の定量的評価は世界初 ○Y系複合材料の機械特性上の課題に対応し、高 h_c を保ちつつ、回転機用傘型コイル試作、評価は世界初

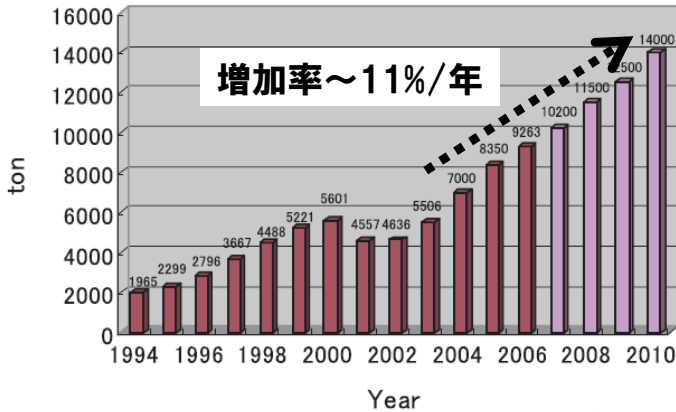
成果の意義

1. モータ概念設計

**RM使用量
1/130の効果**

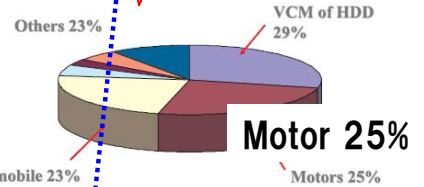


ネオジウム磁石の国内製造重量推移



2020年
40,000t/年
(予測)

投入量 (歩留65%)
61,500t/年



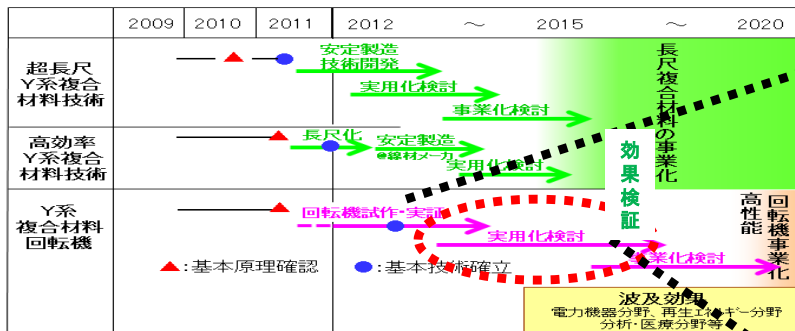
モータ用磁石重量
→ 15,400t/年

モータ向希土類重量 = 15,400t/年 x 希土類比率 (0.266) = 4,100t/年

超電導磁石置換効果 (2020年予測)
4,100 t x 導入比率 (仮定0.25) x (1-1/130) ~ 1000 t/年

出典: 2011.1 金属資源レポート p56 レアメタルシリーズ

実用化の見通し



- ・大型化実機対応技術
線材100km級の界磁コイル
大型コイル作製技術
超電導安定性試験
(クエンチ対策を含む)
- ・大型対応冷却技術
熱侵入量低減
効率向上

・有望分野の見極め
(vsコスト、利益、情勢)

・市場規模、ニーズの詳細検討
(RM, CO₂, 省エネ)

・実用化

大型実機を想定した詳細検討

- ・全体での高効率化
- ・コスト試算、検討 (線材値段含む)
- ・RM量、CO₂量 (情勢変化へ対応)

産業用500kW超電導モータによる省エネ効果試算例

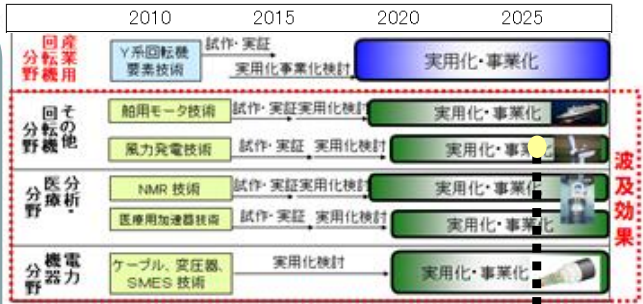
年度	2025	2030
HTS機代替率 (予測)*	2018年から3%づつ	
導入台数*	10,080	25,480
年間電力削減量 [GWh]	229	581
CO ₂ 削減量 [千ton-CO ₂]	78	198
原油換算量 [kL]	58,000	146,000

* 2010年JEMA国内生産統計から、過去の調査を基に超電導電動機の導入、代替率 (年率) を3%/年として算出

4. 実用化の見通し（波及効果）

Y系回転機の効果検討(回転機委員会)

- ・製品イメージ: 船用モータ、風力発電機
- ・市場やユーザのニーズとの合致性
RM削減、軽量コンパクト、高効率
低CO₂で顕著な効果
- ・具体的な数値上の効果
モータ、発電機: 永久磁石機に対して、
1/100程度のRM削減量
風力発電機: 大きな省エネ効果量→表



風力発電の効果試算例
(国内で5MW機導入として)

年度	2025	2030
日本の風力発電導入予想 [GW]*	10	12
HTS機の導入比率(予測)	5%	30%
5MW機の導入台数	100	720
効率向上による省電力量/年 [GWh]	44.3	318.8
CO ₂ 削減量 [千ton-CO ₂] ^{***}	15.7	113.1**
原油換算量 [kL]	10,978	79,045
世界の風力発電導入予想 [GW]*	520	600

世界は50倍の規模

表中は、風力発電機の超電導による効率向上分(5%)
CO₂削減量 **11万トン****
原油換算 **8万kl**

5MW機では常電導風力機の導入実績無し。
超電導化で大型風力可能

* World Energy Outlook 2009 (IEA) による予測

** 2009年日本の排出量 11.5億トン

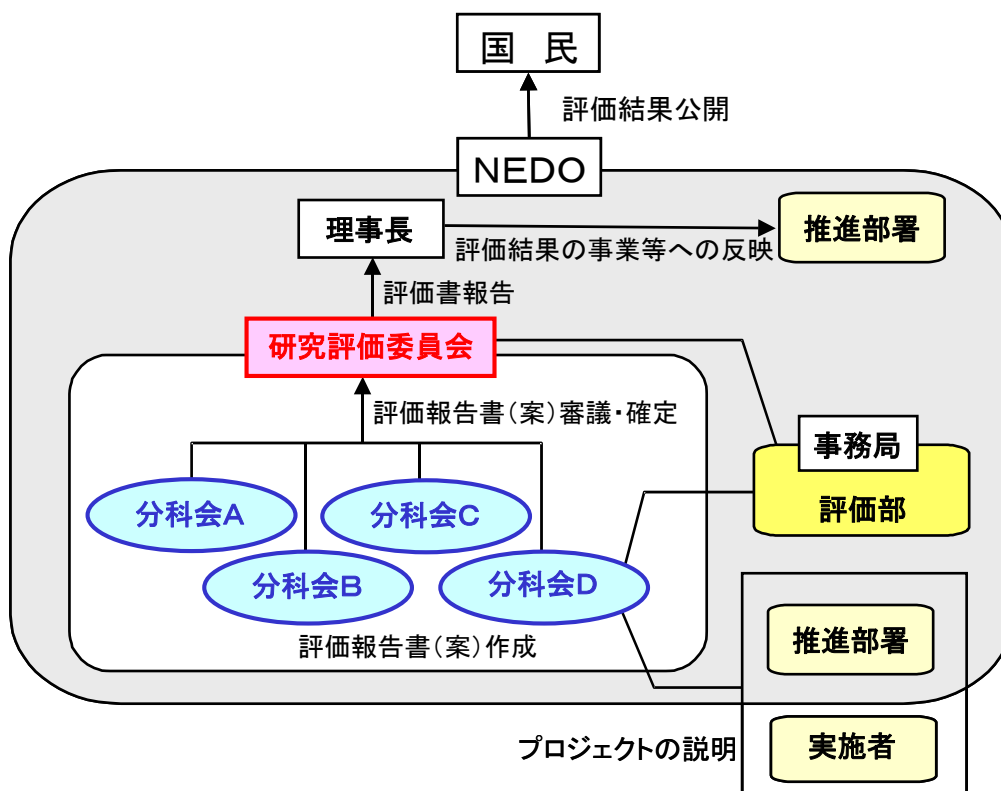
***超電導の効率向上=5%(90→95%)。5%のみを省エネ効果量として試算。また、使用したCO₂排出原単位は、360g/kWh。

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6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評価部が担当した。

3. 評価対象

平成21年度に開始された「希少金属代替材料開発プロジェクト／Nd-Fe-B系磁石を代替する新規永久磁石及びイットリウム系複合材料の開発／超軽量高性能モータ等向けイットリウム系複合材料の開発」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1-7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

- ・ 「ナノテク・部材イノベーションプログラム」および「環境安心イノベーションプログラム」の下で、当該施策・制度の目標達成のために寄与しているか。または、補正予算による事業の場合、その目的に合致しているか。
- ・ 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。

(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) 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。

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。

(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（事後評価）

2010. 3. 26

【事後評価 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事後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、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)目標の達成度

- ・ 成果は目標値をクリアしているか。（※）

（※事後評価前倒し実施の場合は、「成果は目標値をクリアする見込みか。」）

- ・ 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。

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

- ・ N E D O 後継プロジェクト、N E D O 実用化助成、企業内研究等、プロジェクト終了後の事業化までの道筋は明確か。
- ・ 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)目標の達成度

- ・ 成果は目標値をクリアしているか。（※）
（※事後評価前倒し実施の場合は、「成果は目標値をクリアする見込みか。」）
- ・ 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。

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) 目標の達成度

- ・ 成果は目標値をクリアしているか。（※）
（※事後評価前倒し実施の場合は、「成果は目標値をクリアする見込みか。」）
- ・ 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。

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。

参考資料 2 評価に係る被評価者意見

研究評価委員会（分科会）は、評価結果を確定するにあたり、あらかじめ当該実施者に対して評価結果を示し、その内容が、事実関係から正確性を欠くなどの意見がある場合に、補足説明、反論などの意見を求めた。研究評価委員会（分科会）では、意見があったものに対し、必要に応じて評価結果を修正の上、最終的な評価結果を確定した。

評価結果に対する被評価者意見は全て反映された。

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）評価部が委員会の事務局として編集しています。

平成24年3月

NEDO 評価部

部長 竹下 満

主幹 三上 強

担当 室井 和幸

* 研究評価委員会に関する情報は NEDO のホームページに掲載しています。

(http://www.nedo.go.jp/introducing/iinkai/kenkyuu_index.html)

〒212-8554 神奈川県川崎市幸区大宮町1310番地

ミュージアム川崎セントラルタワー20F

TEL 044-520-5161 FAX 044-520-5162