

研究成果展開事業
ー戦略的イノベーション創出推進プログラムー
(S-イノベ)

研究開発テーマ
「超伝導システムによる先進エネルギー・
エレクトロニクス産業の創出」

研究開発テーマ中間評価用資料

平成25年3月1日

1. 研究開発テーマ

「超伝導システムによる先進エネルギー・エレクトロニクス産業の創出」

(平成 21 年度発足)

本テーマは超伝導の持つ低損失、高密度電流、高磁場、高速性、高感度などの特性に基づいた新しい機器、システムの生まれる可能性を考慮し、これまでのさまざまな研究開発プロジェクト成果を最大限活用するとともに、長期的視点のもとで実用機器・システムにつながる研究開発とあわせて超伝導応用の学術的・技術的基盤の着実な構築を目指すことにある。

アプリケーションとしては、エネルギー・環境、産業・輸送、医療・バイオ、センシング、情報・通信の各分野を含む。具体的な例としては、直流電力ケーブル（再生可能エネルギーとの連系、都市内・ビル内・鉄道用、水素利用との連携など）、回転機（風力発電機、船舶用、自動車用や産業用モータなど）、磁気分離、加速器、MRI や NMR などの高磁場応用、SQUID、エレクトロニクス回路、などの機器・システムおよびそれに必要な材料高度化を対象としている。

エネルギー・環境、産業・輸送分野では、低炭素時代の実現を目指した電力・エネルギー基盤技術や世界規模の再生可能エネルギー利用のための基盤技術および超伝導の持っている省エネルギー基盤技術からアプリケーション技術への転換を目指す。

医療・バイオ、センシング、情報・通信分野では、高齢化社会や地域の医療を支える超伝導医療機器の基盤技術や生命科学者が容易にアプローチできる情報技術を駆使した超伝導科学基盤計測技術の構築、実現を目指す。いずれも新しいコンセプトに基づいた超伝導応用のフロンティアを切り開くものが期待される。

期待される 10 年後の姿としては、材料基礎研究から実用機器研究開発をつなぐ実用基盤研究および学術研究の高度化を狙い、成果としては、2050 年超伝導社会の実現が見通せる高温超伝導応用システムの実用基盤技術の確立とプロトタイプ製作・試験である。例えば、マーケット競争力のある機器開発につながる研究成果、システムに最適な実用材料の研究成果、ターゲットシステムを想定しながらもさまざまな機器・システムに共通となる実用技術基盤となる研究成果がある。

また各課題共通となる冷却技術などについても検討の場を設けるとともに、複数課題の研究開発の成果を共有し、より効果的・効率的な開発が可能な場も設けていく。

プロジェクト終了後の成果として、2050 年超伝導社会の実現が見通せる高温超伝導応用システムの実用基盤技術の確立を目指し、応用基礎研究から産業の礎となる要素技術開発、アプリケーションの研究開発まで、着実な進展を得ていく。

(1) 高温超伝導 SQUID を用いた先端バイオ・非破壊センシング技術の開発

SQUID は超伝導を利用した磁気センサである。従来は低温超伝導が用いられてきたが、応用分野の拡大を目指して、高温超伝導による SQUID センサの高性能化と高信頼性を実現する。また、医療診断や再生医療のためのバイオセンシング技術、電池の分析・評価

のための非破壊検査技術、農業分野での水分検査技術などの応用システム技術の開発を行う。

(2) 大出力超伝導回転機器に向けたキーハードの開発

海運でのCO₂削減を実現するため、従来のディーゼルエンジンに代わり、超伝導モーターを用いた電気推進システムの研究開発を行い、大型船舶への応用を目指す。高効率な20MW 級大型回転機の実現へ向けて、交流損失の少ない超伝導コイル、回転機ロータと一体の冷却システムなどの要素開発を行い、応用のための基盤技術を確立する。

(3) 高温超伝導を用いた高機能・高効率・小型加速器システムへの挑戦

医療用・産業用粒子加速器のマグネットの多くは銅線で作られている。加速器の小型化・省電力化・高機能化に向けて、マグネットの高温超伝導化に挑戦する。要素技術の研究開発を行い、プロトタイプマグネットを試作し加速器ビームラインで機能実証し、将来の小型・高機能粒子線がん治療装置、加速器駆動未臨界炉などの基盤技術を確立する。

(4) 高温超伝導材料を利用した次世代 NMR 技術の開発

NMR（核磁気共鳴）装置への高温超伝導材料の導入により、検出プローブの高感度化と超伝導磁石の小型化を実現し、スループットの飛躍的向上と NMR の普及拡大を目指す。そのために高温超伝導磁石とプローブの要素技術開発と、高磁場でのシステム実証を行い、物質・生命科学、材料評価、創薬などの分野への波及効果を生み出す。

(5) 次世代鉄道システムを創る超伝導技術イノベーション

超伝導を活用した次世代鉄道システムの基盤技術開発を行う。主に鉄道の電化区間向けへの送電ケーブルの超伝導線化を研究対象として取り上げ、材料、直流送電ケーブル、冷却システムの要素技術開発に加え、既存鉄道システムとの融合を進め、実験線での検証を行う。

2. プログラムオフィサー（PO）

氏名：佐藤謙一

（所属：住友電気工業株式会社 役職：フェロー、
材料技術研究開発本部 超伝導担当技師長）

3. 採択課題

採択年度	プロジェクト マネージャー	中間評価時 所属・役職	研究課題
平成 21年度	圓福 敬二	九州大学 教授	高温超伝導 SQUID を用いた先端バイオ・非破壊センシング技術の開発 (略称：SQUID)
	柳本 俊之	川崎重工業株式会社 技術 開発本部 技術研究所 副所長	大出力超伝導回転機器に向けたキーハードの開発(略称：モータ)
	雨宮 尚之	京都大学 教授	高温超伝導を用いた高機能・高効率・小型加速器システムへの挑戦 (略称：加速器)
	末松 浩人	JEOL RESONANCE 統括部長	高温超伝導材料を利用した次世代 NMR 技術の開発(略称：NMR)
	富田 優	鉄道総合技術研究所 室長	次世代鉄道システムを創る超伝導技術イノベーション(略称：鉄道)

4. 研究開発テーマのねらい（目標）

1911年に超伝導現象発見があったが、1986年の高温超伝導材料の報告により、高温超伝導に関する材料開発が一気に熱を帯びてきた。しかしながら産業上の応用という面では、大きなイノベーションを起こすに至っていないのが現状である。

そこで、本テーマの超伝導関連技術では、産業上の利用を基軸に据え、次の特徴を持つ課題を進めてきた。

- ①従来の技術では不可能であったことを可能とする
- ②従来の技術では壁にあたっている事業者の持っている課題を解決する
- ③従来のコンセプトを大幅に転換する新しいコンセプトを可能とする

採択された五つの研究課題には重みは少しずつ異なるがこれらの三つの特徴が含まれている。

また五つの研究課題は、21世紀の最大の課題である地球環境の改善やエネルギー供給問題の解決、医療をはじめとした社会生活の改善、リニア・電気推進船・超伝導電気自動車などの交通・輸送ネットワークの変革、工場など生産現場における高い磁場を応用した新プロセスなど、私たちの社会に深く関わる技術を含んでいる。

本テーマの狙いは、高温超伝導材料という今までになかった材料を用いて、上記の①②③の特徴を持つ各アプリケーション技術を実証レベルにまで研究開発を進め、プロトタイプを社会に提示することにより、超伝導システムの応用可能性を広くアピールし、実用化へ進めることにある。

(1) SQUID

バイオセンシング技術および非破壊検査技術の両方とも、高感度な磁気センサを用いることによって非接触での高精度な検出が可能である。この磁気による非接触検査では、自発的に発する磁場検出や磁気特性を利用した検出などが可能であり、従来の電位計測やX線計測では不可能な新しい製品分野の創生が期待できる。

具体的な磁気による非接触検査の応用として、今後培養細胞などを傷つけずに管理する再生医療の質の管理技術への展開や、高信頼性の電池の内部検査などへの展開が予想される。これらの再生医療・電池の市場は今後10年で約数兆円規模の市場へと膨らむと試算されており、これらの信頼性の管理技術は極めて重要な課題であり、社会インパクトは計り知れない。我々の安全な社会（医療や自動車応用など）を築く上でも、本研究開発は重要なミッションを担うことになる。

①産業創出の核となる基盤技術

高性能素子作製技術、センサ実装技術、バイオ・非破壊センシングシステム

②イノベーションに資する成果

低温超伝導 SQUID(4.2K)に匹敵する感度を有する高温超伝導 SQUID(77K)で実現するバイオ・非破壊センシングシステム

③社会・経済に対するインパクト

医療・工業用センシングシステムでの優位性確保

(2) モーター

環境と経済の両立のもと、地球温暖化問題に対応するため、物流部門においても2010年までに約140万トンの二酸化炭素削減が求められ、トラック輸送から内航海運輸送への転換を促進する海運グリーン化総合対策が国土交通省を中心に実施されている。

電気推進船はその環境特性・省力性・操縦のしやすさから普及が期待され、現在、スーパーエコシップの普及が進んでいるが、一層の二酸化炭素の排出削減と安全・安心な海上輸送を構築するにはモーターや発電機などパワーデバイスの高効率化、小型化が必要である。このため、世界最高水準を抜く高出力推進用超伝導モーターを開発することにより、広く国内および国際社会に貢献する。

欧米共に超伝導線材・コイルを含めモーターは自国製品を用いて完成させている。一方、中国・韓国・インド等の新興国も開発を進めているが自国製超伝導線材を持たない。このような観点から、日本としても自国製品で大出力の高温超伝導モーター技術を早急に完成させることが必要であるばかりか、わが国がこのような地球に優しい高効率船舶推進システムの開発を先導することは海洋国家としての義務である。また、最終ユーザのひとつである国内有数の海運会社では2030年に先端的なスーパーエコシップの実現を考えており、そのシステムでは超伝導モーターを構想している。本課題の開発技術はこれにも寄与する。

この研究成果で培われた技術は、商用船舶のみならず、大出力風力発電機や海潮流発電機の小型・軽量化、海洋開発や海底資源探査ビークルの発電機や推進機関、海洋調査船、砕氷船、大陸棚調査船舶、米国で構想されている100MW級大型漁船等の推進システムに応用できるものであり、我が国の海上輸送と海洋にかかわる安全保障にとって、また来るべき海洋における国際連携社会にとって大いに裨益するものである。

①産業創出の核となる基盤技術

大出力超伝導回転機設計技術、超伝導界磁コイル設計・製作技術、回転子一体型コイル冷却技術

②イノベーションに資する成果

銅モーターと比べモーター径を1/2、重量を1/5に小型・軽量化可能で効率6%以上改善できる20MWモーター（冷却を含め総合効率99%）

③社会・経済に対するインパクト

造船業界の国際的な競争力強化

(3) 加速器

1980年以降、がんは日本での死亡原因の第一位であり、現在、年間の罹患数は約50万人、2020年には80万人に達すると予想されている。その内、粒子線がん治療が有効とされる割合は6.5%と推定されており、2020年には、年間5万人以上のがん患者の治療が粒子線がん治療装置で行われることが予想される。

一方、粒子線がん治療施設の処理能力は年間1000人程度であることから、国内だけでも50施設が必要となる。がん発生の割合は人口に比例することから、世界では、2500施設が必要とも試算される。このように粒子線がん治療装置の市場性は大変高い。

しかしながら、重粒子線（炭素線）がん治療装置は大型で建屋コストもいれるとその導入コストは150億円とも見積もられており、普及の妨げとなっている。超伝導技術の導入により、全体の装置サイズ、建屋サイズが現在の半分程度に小型化できれば、コストも比例して下げられることになる。また、ランニングコストも10億円を超えるがその半分以上はマグネットや建屋空調の電気使用料であり、超伝導技術の導入により、マグネットに関わるランニングコストは約半分に圧縮され（冷凍機の電気使用料は残る）、空調負荷も劇的に圧縮されるために、トータルのランニングコストも1/3程度に圧縮できると見積もられる。

以上、まとめると、市場規模 2500 施設 x 150 億円=37.5 兆円のうち、超伝導技術の導入によりその約半分（19 兆円）のコストインパクトと 20 年のランニングコストである 50 兆円の 2/3 の 34 兆円のコスト圧縮が可能であり、トータル 70 兆円を超える経済的インパクトが期待できる（電気使用料の圧縮は CO₂ 排出量削減にもつながる）。このように、重粒子線がん治療装置の超伝導化の経済的インパクトは大きく事業性も高い。

加速器駆動未臨界炉については、低炭素社会実現のためには、現在も含めて今後 100 年にわたって原子力エネルギーの利用は不可欠である。自然エネルギーの導入は重要であるが、今後のアジア、アフリカ諸国等の経済発展を考えると世界のエネルギー需要は急速に伸び続け、炭酸ガスをほとんど放出しない基幹エネルギー源としての原子力の重要性は高まりこそすれ低下することはない（競合技術との比較）。

原子力エネルギー利用の主流は軽水炉であるが、軽水炉と比較して、加速器駆動未臨界炉は未臨界の燃料体系しかもっていないため、本質的に暴走が起こらないという安全面での優位性をもっている（競合技術との比較）。

また、原子力エネルギー利用における大きな課題に、その安全性とあわせて原子炉運転で作られる超長寿命高放射能廃棄物の処理問題がある。数万年～百万年の寿命を有する MA (Minor Actinide) 等の高レベル放射能核廃棄物問題について、将来の人類に大きなつけを残さずに、これに対してきちんとした処理の方策を見つけることは原子力時代を生きる我々にとっての責務である。

現在は、これらの核廃棄物は長期間・安全に保管するという方法をとることになっ

ているが、加速器駆動未臨界炉による長寿命核種の短寿命核種への変換は、核廃棄物処理問題を根本的に解決できる可能性を持っており、その意義は極めて大きい（社会的インパクト、競合技術との比較）。当然ながら、加速器駆動未臨界炉のような安全性が高く、核廃棄物処理の可能な原子炉が実用化されれば、市場性は高く、経済へのインパクトも大きく、未来の産業としての事業性も高い。すなわち、加速器駆動未臨界炉を日本発の技術である FFAG 加速器によって実用化し、世界に送り出す価値は大変大きいと考えられる。

①産業創出の核となる基盤技術

機能結合型・高効率加速器用高温超伝導マグネット技術、高精度磁場発生技術、高精度三次元巻線技術、高効率伝導冷却マグネット技術、放射線環境対応技術、高温超伝導加速器システム技術

②イノベーションに資する成果

銅マグネットを用いた加速器の 1/2 の直径による小型化・低価格化、および省電力(年間数億円)可能な重粒子線癌治療用加速器

③社会・経済に対するインパクト

癌治療の更なる前進によるライフイノベーションの実現。将来の核廃棄物処理への布石（加速器駆動未臨界炉）

(4) NMR

NMR 装置の世界市場は金額ベースで年間 600 億円、台数ベースでは年間 700 台に達する。この内、

- ① 約 97%の台数は普及機の 9.4~14.1 T 程度の中・低磁場 NMR システム
- ② 残りの約 2~3 %の台数は 18.8 T 近辺の高磁場 NMR システム
- ③ 極少数であるが年間数台程度、研究用に 20 T を超える超高磁場 NMR システム

が出荷されている。本計画で開発する汎用小型高感度 NMR システムはこの内①②の市場の置き換えを狙う。さらに、新規応用先の開発によるイノベーションの創出により、従来市場と同等の規模を持つマーケット開拓を狙う。

NMR 装置は、単なる工業製品ではなく、分析・開発機器であり、市場へのインパクトは上記の NMR 装置マーケットのみにとどまらない。NMR を用いた研究・分析・診断を用いたマーケットは 1 兆円に達すると推定される。本計画で開発する汎用小型高感度 NMR システムは、その装置のマーケットのみならず、周辺マーケットに大きなインパクトを与える。特に分析・診断の分野においては、NMR の低い感度が問題となり、これまで NMR が十分に利用されてこなかった。本計画の汎用小型高感度 NMR システムは、このような分野への技術普及により新産業を創出する。

NMR 法は、測定試料に特別な調製は不要であり、そのままの状態ですべての構造

情報が得られる唯一の測定法である。原子レベルの構造解析が可能な競合手法として、X線結晶回折などがあるが、測定感度以外の部分ではNMRの情報量が上回る。このNMRが本質的に持っている低感度という問題を克服することで、産業界・学术界に有用な高スループットの解析手法を提供することができる。

①産業創出の核となる基盤技術

汎用可能な小型・高磁場NMRマグネット設計・製作技術、超高感度プローブ技術

②イノベーションに資する成果

金属系超伝導を用いた汎用500MHz/NMRと同じ大きさで高温超伝導800MHz/NMRを実現し、さらに超高感度プローブとの組合せで従来比1,000倍の測定スループット向上

③社会・経済に対するインパクト

NMR業界の国際的な競争力強化

(5) 鉄道

都市圏を中心として鉄道輸送への需要と期待は今後も増大すると見込まれ、ターミナル駅等では必要電力の増大に対応するには、立地の制約から電力伝送密度を上げる必要がある。銅やアルミの常伝導ケーブルによる伝送では限界に近づいている事例も多々あることから、コンパクトな超伝導ケーブルは十分に従来の常伝導技術に対する競争力をもつ。

日本の新幹線やリニアモーターカー、超伝導関連機器に代表される技術は世界有数と言える。しかし海外展開を行うには技術だけでなく国際規格に選ばれなければ無駄である。鉄道総研は「国際規格」の取得を進めようと「鉄道国際規格センター準備室」を発足させ、世界市場に乗り遅れないように努力している。国内の鉄道市場は飽和状態だが、海外では米オバマ政権が総額80億ドルの高速鉄道網整備計画を打ち出すなど活況を呈していて、世界の鉄道市場は17兆にも及ぶと言われている。今回開発を進める超伝導ケーブルは国際規格になることが期待でき、日本の鉄道メーカーなどは輸出攻勢をかけられるようになるだろう。

本課題で開発する要素技術は、鉄道分野のみならずエネルギー・電力応用分野など様々な分野で広く活躍できるアプリケーションへとつながる可能性を有している。その中でも、とりわけ直流超伝導ケーブルの社会に与える影響は計り知れないものがある。超伝導直流ケーブルは送電時の伝送損失、CO₂排出量は共に1/40にでき、「2020年までに1990年比25%削減」を目標に掲げている日本にとっては切り札とも言える。さらに直流超伝導ケーブルは超遠距離無損失送電を可能にする技術であり、この技術は様々な分野との融合が可能である。近年、地球温暖化によりCO₂の削減が強く叫ばれており、クリーンで豊かな地球を実現するために自然エネルギーの導入が進められている。しかしながら、太陽や風力からの発電はコスト高でお天気まかせ（間歇型）であるという弱

点がある。そこで砂漠などの太陽の照る地帯、不毛な風の強い地帯、そして消費地、地球の東西・南北を超伝導ケーブルで繋ぎ、超伝導地球電力ネットワークを構成することで（GENESIS 計画）、電力網にとって昼夜がなくなり、夏冬もなくなり、晴天や雨、風の吹く所、吹かない所も平均化され、自然エネルギーの泣き所である「お天気まかせ」が完全に解消される。つまり、超伝導遠距離送電がベストミックス（地域にあった発電形態）を可能にし、自然エネルギー時代の幕を拓いてくれるのである。21世紀の技術は、人類と地球との共生を可能にするためにこそ存在し、この超伝導ケーブルはその切り札になれるのである。

①産業創出の核となる基盤技術

電力用超伝導ケーブルより小型な直流超伝導ケーブル技術、高信頼度冷却システム技術、超伝導材料評価技術

②イノベーションに資する成果

変電所の負荷平準化・集約、送電ロス・回生失効の低減が可能な大容量鉄道用ケーブルを用いた直流超伝導電化

③社会・経済に対するインパクト

鉄道先進国日本としての更なる優位性確保

5. 研究課題の選考について（3年程度経過後のみ）

本テーマは、超伝導の持つ低損失、高密度電流、高磁場、高速性、高感度などの特性に基づいた新しい機器、システムの生まれる可能性を考慮し、これまでのさまざまな研究開発プロジェクト成果を最大限活用するとともに、長期的視点のもとで実用機器・システムにつながる研究開発とあわせて超伝導応用の学術的・技術的基盤の着実な構築を目指す。アプリケーションとしては、エネルギー・環境、産業・輸送、医療・バイオ、センシング、情報・通信の各分野を含むものである。具体的な例としては、直流電力ケーブル（再生可能エネルギーとの連系、都市内・ビル内・鉄道用、水素利用との連携など）、回転機（風力発電機、船舶用、自動車用や産業用モータなど）、磁気分離、加速器、MRIやNMRなどの高磁場応用、SQUID、エレクトロニクス回路、などの機器・システムおよびそれに必要な材料高度化を対象とした。

先進エネルギー・エレクトロニクス産業の創出に関する研究提案を広く募り、新しいコンセプトに基づいた超伝導応用のフロンティアを切りひらくものを期待した。その結果、電力・エネルギーシステム、回転機、加速器、医療や先進分析機器、などテーマに相応しい多岐にわたる優れた応募があった。

本テーマでは、関連の多様な分野の専門家であるアドバイザー8名に協力いただき、採択課題の選考を行った。応募の15件を対象に、書類選考により面接選考対象として

9 件を選び、最終的に 5 件の採択に至った。

その結果、新しいコンセプトに基づいた超伝導応用のフロンティアを切りひらくことが期待できる提案として、船舶用回転機に関する提案が 1 件、鉄道分野に関する提案が 1 件、加速器に関する提案が 1 件、NMR に関する提案が 1 件、SQUID に関する提案が 1 件を採択とした。結果として、移動体分野、医療応用、センシングからエレクトロニクス分野までのバランスのとれた構成になったと考える。

6. アドバイザーの構成について

アドバイザー名	現在の所属	役職	任期
岡部洋一	放送大学	学長	平成 21 年 11 月～現在
上岡泰晴	Cold Tech Associates	代表	平成 21 年 11 月～現在
木村錫一	愛媛大学	名誉教授	平成 21 年 11 月～現在
谷口治人	東京大学	特任教授	平成 21 年 11 月～現在
塚田啓二	岡山大学	教授	平成 21 年 11 月～平成 23 年 9 月
濱島高太郎	八戸工業大学	教授	平成 21 年 11 月～現在
藤巻朗	名古屋大学	教授	平成 23 年 10 月～現在
堀上徹	株式会社テクノリサーチ研究所	上席客員 研究員	平成 21 年 11 月～現在
山田忠利	マグネットテクノロジー	代表	平成 21 年 11 月～現在

<人選にあたっての考え方>

人選にあたって、超伝導エレクトロニクス、超伝導マグネット、超伝導電力技術、超伝導冷却技術の分野における第 1 人者をお願いするとともに、企業の研究開発のトップマネジメントの御経験を持つ方も含まれるよう考慮した。

放送大学の岡部洋一学長は日本学術振興会の「超伝導エレクトロニクス委員会」の役員を勤めておられた経験や日本生体磁気学会理事の経験から、幅広く超伝導技術全般、ならびに SQUID センサの生体応用などへのコメントを期待した。

Cold Tech Associates 上岡泰晴代表は、前職の低温技術開発の経験から、超伝導の基盤技術である冷凍技術関連のコメントを期待した。

愛媛大学木村錫一名誉教授は電気試験所（現 産総研）での低温技術開発、エネルギー技術開発の経験をもとに超伝導の省エネルギーに関するコメントを期待した。

東京大学の谷口治人特任教授は、長年の電力技術開発の経験から超伝導送電全般につきコメントを期待した。

八戸工業大学濱島高太郎教授には企業における長年の重電技術研究の経験と NEDO 超伝導技術委員、電動車両・交通システム系分科会委員の経験から主に超伝導の鉄道応用へのコメントを期待した。

また、退任された岡山大学の塚田啓二教授に代わり、就任いただいた名古屋大学藤巻朗教授は学会等の超伝導関連専門委員会の委員長、主査を歴任されており、超伝導技術全般、ならびに超伝導エレクトロニクス関連のコメントを期待した。

テクノロジーの堀上徹上席客員研究員は企業におけるエネルギー機器の研究開発経験と国際超伝導工学研究センターにおける超伝導技術研究の経験をもとにコメントしていただくことを期待した。

マグネットテクノロジー山田忠利様は産業界でのパワーエレクトロニクス関連の研究開発とパワーエレクトロニクス学会役員経験などから、超伝導のマグネット技術に関するコメントを期待した。

7. 研究開発テーマのマネジメントについて

(1) PO の運営方針

人類社会の発展や地球規模のさまざまな問題の解決に資するため、高温超伝導のポテンシャルを最大限引き出し、超伝導システムとして新しい産業創成の礎を築き、さらにその技術の普及による新産業の創出を望みうる地平を切り開く。

エネルギー・環境、産業・輸送分野では、低炭素時代の実現を目指した電力・エネルギー基盤技術や世界規模の再生可能エネルギー利用のための基盤技術および超伝導の持っている省エネルギー基盤技術からアプリケーション技術への転換を目指す。医療・バイオ、センシング、情報・通信分野では、高齢化社会や地域の医療を支える超伝導医療機器の基盤技術や生命科学者が容易にアプローチできる情報技術を駆使した超伝導科学基盤計測技術の構築、実現を目指す。いずれも新しいコンセプトに基づいた超伝導応用のフロンティアを切り開くものを期待している。

期待される 10 年後の姿としては、材料基礎研究から実用機器研究開発をつなぐ実用基盤研究および学術研究の高度化を狙い、成果としては、2050 年超伝導社会の実現が見通せる高温超伝導応用システムの実用基盤技術の確立とプロトタイプ製作・試験である。例えば、マーケット競争力のある機器開発につながる研究成果、システムに最適な実用材料の研究成果、ターゲットシステムを想定しながらもさまざまな機器・システムに共通となる実用技術基盤となる研究成果を目指す。表 1 に本テーマの位置づけを示す。

各課題共通となる冷却技術などについても検討の場を設けるとともに、複数課題の研究開発の成果を共有しより効果的・効率的な開発が可能な場も設けてゆくことにしている。

また高温超伝導システムの研究開発フロンティアを日本が主導して切り拓くことを

実現するため、特許出願および学会などでの発表を積極的に実施する(表2)。

表1 本テーマの位置づけ



表2 特許・外部発表の成果(2012年11月時点)

項目	成果	
特許(件数)	17 (海外:4)	
学会発表(件数)	国内	178
	海外	81
論文発表(件数)	和文	4
	英文	35
新聞、TV など	17	

(2) 研究開発テーマの進捗状況の把握・評価

① 研究開発テーマ推進会議(年1回/初夏): P0、アドバイザー全員、JSTの出席のもと、各チームリーダーからの発表と質疑による進捗状況の把握と評価(研究開発担当者は全員参加可能、またチーム間連携推進の役割も持つ)

② サイトビジット(年1回/秋) : P0、JST の出席のもと、各チーム個別にそのチームの研究参画機関全員からの進捗状況の把握と評価、研究開発施設・設備視察

③ 開発実施計画書ヒアリング(年1回/春) : P0、JST の出席のもと、各チーム個別に両リーダーからその年の開発実施計画書を聴取と評価

(3) 研究開発テーマの研究開発計画の見直し

特にスタートにあたって留意したことは、全体計画のステージ I (モータではステージ II からスタート) では、それぞれの目標とするシステムのユーザーニーズ明確化、基盤要素技術への要求仕様の明確化、それを実現する課題の明確化、システムコンセプトの確立である。

例えば、SQUID においては、基本 SQUID システムの定量的な要求仕様を明確化した。モータにおいては、全体概念設計による基盤要素技術への要求仕様の明確化と熱損失の全体像の把握、加速器においては、加速器システム概念設計とマグネット概念設計を連携し、基盤要素技術への要求仕様の明確化と加速器システムとマグネットの概念確立、NMR においては、本テーマの中では最も高磁場マグネットを狙うことからコイル電流密度と最大応力の見極め、コイル保護の新しい観点からの提案、鉄道については、超伝導ケーブル適用時の新しいコンセプトの確立をお願いした。

(4) ステージアップのマイルストーン (ステージ I からステージ II、ステージ II からステージ III) と評価基準 (数値目標)、および、ステージアップの根拠

① SQUID

高温超伝導 SQUID の高性能素子作製技術およびセンサ実装技術を開発し、ステージ I での目標 (磁束雑音特性など) を達成した。また、SQUID センサをモジュール化して参加機関へ配布し各機関での応用研究に供する仕組みを構築し、チーム全体の研究進捗を加速させた。その結果、バイオセンシング計測や非破壊検査等の応用技術に関しても、計測手法の新規開発などに進展が見られ、ステージ目標を達成した。高温超伝導 SQUID において低温超伝導並みの雑音特性が得られたのは大きな成果である。また応用技術においても重要な成果が出ている。(総合評価 : A)

② モータ

20MW 級回転機概念設計を行い、総合効率 99%の回転機が実現可能であることを示し、そのための超伝導界磁コイル、ロータ冷却システム等に対する要求仕様を明確にした。界磁コイルについては、交流損失を目標値に抑え込める技術的な見通しを得た。また、回転子一体型冷却システムについても、予備実験により熱負荷下での冷却安定性を確認しており、ステージ II の目標は達成されたと認められる。ステージ II において、20MW

級回転機概念設計と効率見積を通して、界磁コイルや冷却システム等への要求仕様を明確に出来たことは評価できる。(総合評価：A)

③ 加速器

加速器とマグネットの概念設計を連携して進め、そのプロセスを通して要素技術(3次元巻線技術、遮蔽電流効果の抑制など)への要求仕様を明確化した。さらに抽出された要素技術について予備実験を進め、解決の糸口となる成果も得ており、ステージIの目標を達成した。加速器とマグネットの概念設計を両者間のフィードバックを取りつつ進め、「多極展開+積分磁場」という解析的手法によって仕上げたことは高く評価する。また、要素技術については、3次元コイルやネガティブベンドコイルにおいて良好な超伝導特性を確認し、遮蔽電流効果に関しても詳細な検討を進めるなど、着実に成果を挙げている。(総合評価：A)

④ NMR

高温超伝導マグネットについては、高温超伝導線材の基礎特性評価と含浸方法の検討などを行った後、中規模コイルの設計、試作と磁場中での評価試験を行った。また、検出プローブに関しては、金属プローブの低温化による感度向上を実証すると共に、高温超伝導プローブの予備実験を行った。以上のように、マグネット技術、プローブ技術の両面においてステージIの当初目標を達成した。試作した高温超伝導コイルを低温超伝導コイルの内層に設けたハイブリットマグネットにおいて、24.0Tの世界最高磁場を4.2Kで確認したことは高温超伝導マグネットのポテンシャルを示すものとして高く評価する。また、遮蔽電流磁場の問題については解決の方向を見出したことなども評価する。(総合評価：A)

⑤ 鉄道

鉄道システムへ高温超伝導を適用するための導入効果について、種々の検討を行い、超伝導ケーブルを適用することで、回生電流を効率よく回収できることを確認した。このことで首都圏等の過密路線に対して変電所負荷の平準化、変電所数の削減、輸送力の増強などが期待できる。また、鉄道システムに適合する線材を評価し、冷却材循環路を内包する10kA級ケーブル試作の目処を得た。冷却システムについては設置が容易なコンパクト一体冷却システムを提案した。さらに、H24度内に試作ケーブルを製作し、実験線での検証準備を進めている。(総合評価：A)

(5) 課題内・課題間の連携の推進

①課題内では、それぞれで定期的な全体会議、リーダ会議、WG会議を開催して、情報共有、進捗把握に努めている。

②課題間では、推進会議でチーム間連携の推進を行うとともに共通技術に関わる事項について、年1回の分科会を開催。研究開発担当者は全員参加可能としている。また、外部有識者を招聘し、該当分野での最新情報の把握に努めている。

③分科会開催実績

- ・H22(2010)／冷却技術分科会 「冷却技術開発の現状と今後の展望」:外部講師として、KEK 研究者1名および冷凍機メーカー6社招聘
- ・H23(2011)／超伝導線材技術分科会：外部講師として、線材メーカー2社招聘
- ・H24(2012)／マグネット技術分科会：外部講師として、MIT 研究者1名および先端計測分析技術・機器開発プロジェクトから2名招聘

④YBCO 線材剥離およびマグネット保護の技術課題について、関連チーム間での情報交換も実施

(6) 研究課題の指導 (研究課題の指導・助言と、研究の拡大・縮小・転換・支援等の方針、及びその経過)

① SQUID

応用技術については、ほかのセンサ技術との比較検証も行い、ステージ II 中間時点での絞り込みや重点化を考慮予定。

② モータ

高温超伝導線評価という材料研究の存在もあり、研究開発方向が幅広いため、モータシステムの課題解決型研究開発に重点化をお願いした。

③ 加速器

加速器として多くの種類があるので、それらのメリット・デメリットの比較検証をお願いした。

④ NMR

ステージ I で開発した低温金属プローブの実用化をお願いした(平 24. 11. 19 に実用化ニュースリリース)。

⑤ 鉄道

コンセプト確立と超伝導ケーブルシステムへの絞り込みをお願いした。

(7) 研究費の配分について

スタートからのこの3年間は申請額を基本に考慮し、特に重点配分は不要と判断してきたが、加速予算については予算調整、重点配分を行ってきた。今後ステージ II における成果などにより、重点配分の可能性は残る。

(8) 今後の取り組み

① SQUID

接合や SQUID 素子の更なる高性能化、低周波数領域での雑音低減などの技術課題を解決していくと共に、世界をリードする研究開発を、ユーザーニーズをしっかりと把握し事業化を視野に入れて進める。

② モータ

20MW 級回転機の基本設計を完了させ、冷却システム付きロータ模擬モデルとモデルコイルの作製と検証を行う。

③ 加速器

高温超伝導マグネットの工学設計と製造技術の確立、及びその性能検証を目指し、(a) ステージⅢのプロトタイプマグネットへうまく繋がる形でのモデルマグネットの製作と検証、(b) 産業用マグネットとしての異常モード保護の考え方、などを考慮しつつ研究開発を進める。

④ NMR

低温超伝導/高温超伝導ハイブリッドマグネットの試作と高分解能計測の実証を行うと同時に、高温超伝導プローブの製作と評価を行い、(a) 最終ターゲットへ向けてのコイル電流密度や最大応力の検討、(b) 4.2K、磁場中での異常モード時の保護に関する検討、などを継続して行う。特に、磁場均一度制御、クエンチ保護なども含めて、ステージⅢでの実証試験を見据えた「使える技術」の確立が望まれる。

⑤ 鉄道

試作ケーブルの実験線での検証と冷却システムの構築と評価項目などの具体化、および敷設方法、ケーブルの製造検査方法、振動対策などを考慮した鉄道システムへの適合可能性の検討、他方式との比較、また電気回路としての評価、など鉄道事業者が明確に導入効果を認められるよう検討を進める。

8. 研究開発テーマとしての産業創出の核となる技術の確立に向けた状況

(1) 課題評価の結果を踏まえた研究開発テーマの達成状況

① SQUID

高温超伝導 SQUID の高性能素子作製技術およびセンサ実装技術を開発し、ステージ I での目標（磁束雑音特性など）を達成した。また、SQUID センサをモジュール化して参加機関へ配布し各機関での応用研究に供する仕組みを構築し、チーム全体の研究進捗を加速させた。（図 1）

1 基本SQUIDシステムの開発

- (a) 集積型SQUID: LTS SQUIDに匹敵する $10 \text{ fT/Hz}^{1/2}$ の高感度を実現
- (b) 分離型SQUID: 応用に必要な $M=0.5\sim 2 \text{ nH}$ をフリップチップ構造により初めて実現
共振結合型で $1 \text{ fT/Hz}^{1/2}$ の高感度を初めて実現
- (c) SQUIDモジュール: 汎用性の高いSQUIDパッケージとFLL回路の開発
各機関で応用システムに使用中

2 先端バイオ・非破壊センシング技術

2.1 バイオセンシングシステム

- (a) 磁気イメージング: 臨床診断に適用可能な心磁イメージング法を初めて開発
- (b) バイオセンサ: BF分離無しでのアトモレベルの高感度検査の実証
- (c) 低磁場NMR/MRI: FID信号のOne-shot計測、T1緩和時間の高精度計測

2.2 非破壊センシングシステム

- (a) 磁化率測定: 従来装置(VSM) に比べて一桁高感度を達成
反磁性を利用した水分の高感度検出を実証
- (b) 太陽電池評価: 電池パネルの電気特性の可視化

図 1 SQUID の主要な成果

② モータ

20MW 級回転機概念設計を行い、総合効率 99%の回転機が実現可能であることを示し、そのための超伝導界磁コイル、ロータ冷却システム等に対する要求仕様を明確にした。界磁コイルについては、交流損失を目標値に抑え込める技術的な見通しを得た。また、回転子一体型冷却システムについても、予備実験により熱負荷下での冷却安定性を確認した。

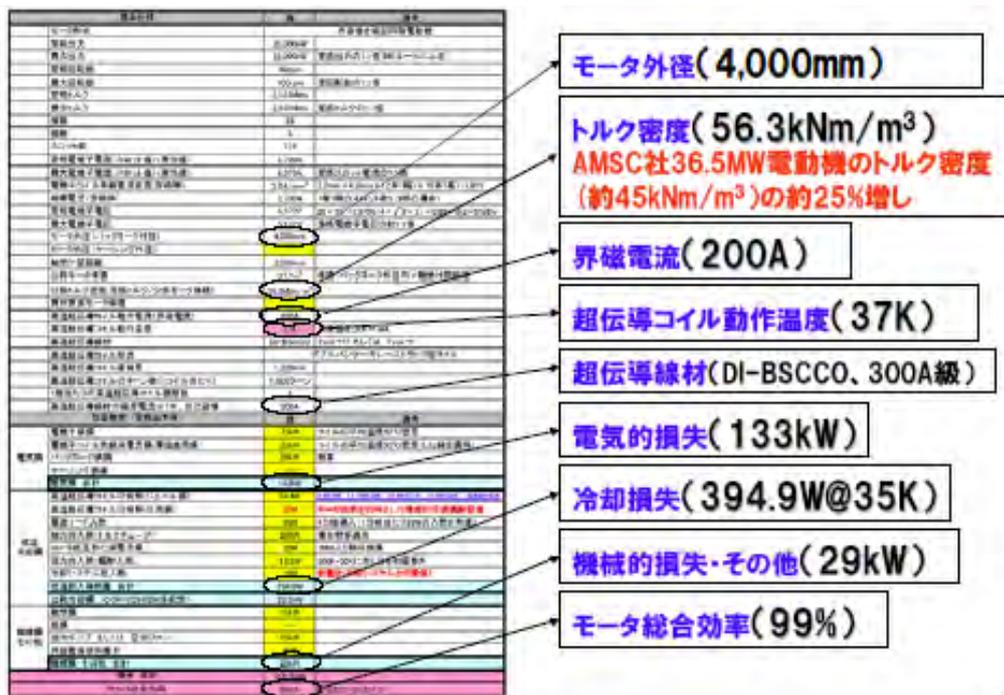


図2 20MW モータの概念設計結果

③ 加速器

加速器とマグネットの概念設計を連携して進め、そのプロセスを通して要素技術（3次元巻線技術、遮蔽電流効果の抑制など）への要求仕様を明確化した。さらに抽出された要素技術について予備実験を進め、解決の糸口となる成果も得た。（図3）

要素技術(共通基盤技術)	数値目標
高温超伝導による機能結合型マグネット技術	ビーム偏向機能と集束機能を結合し、相対精度 10^{-4} の磁場発生
高精度磁場発生技術	
高精度3次元巻線技術	曲げ半径25 mm、最大90度のひねりの入った3次元巻線
高効率伝導冷却マグネット技術	加速器システム全体で冷却用電力100 kW
放射線環境対応技術	10 MGy, 10^{22} neutron/m ²
高温超伝導加速器システム技術	力学的アクセプタンス(ビーム光学上の許容領域) $10^3 \pi$ mm.mrad

図3 高温超伝導加速器の概念設計結果

④ NMR

高温超伝導マグネットについては、高温超伝導線材の基礎特性評価と含浸方法の検討などを行った後、中規模コイルの設計、試作と磁場中での評価試験を行った。また、検出プローブに関しては、金属プローブの低温化による感度向上を実証すると共に、高温超伝導プローブの予備実験を行った。以上のように、マグネット技術(図4)、プローブ技術(図5)の両面において当初目標を達成した。

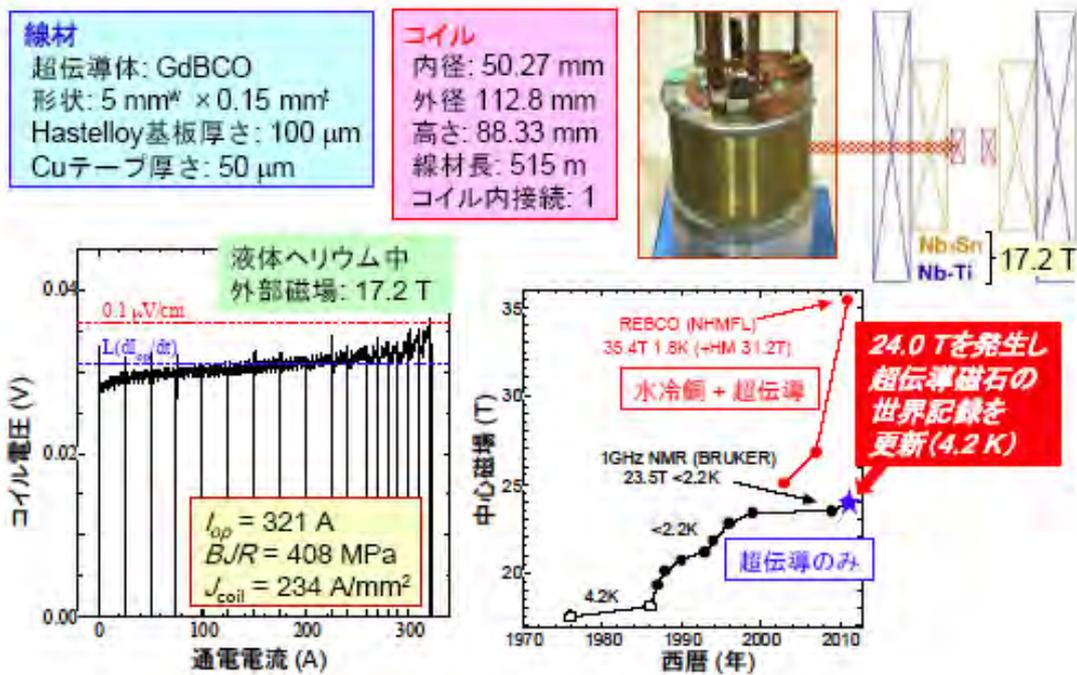


図4 強磁場実証コイルの試験結果

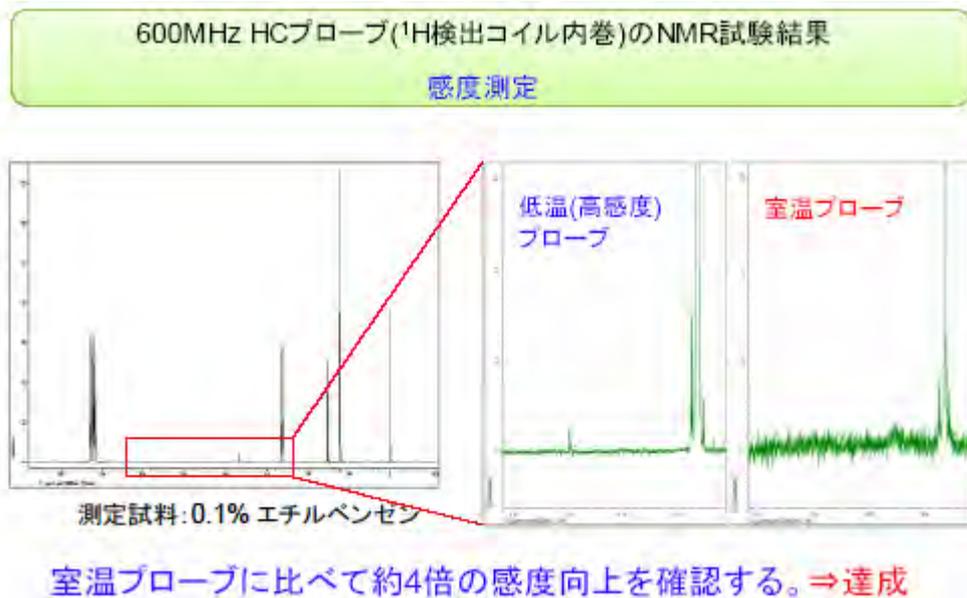


図5 低温金属プローブによる感度向上実証結果

⑤ 鉄道

鉄道システムへ高温超伝導を適用するための導入効果について、種々の検討を行い、

超伝導ケーブルを適用することで、回生電流を効率よく回収できることを確認した。このことで首都圏等の過密路線に対して変電所負荷の平準化、変電所数の削減、輸送力の増強などが期待できる(図6, 7)。

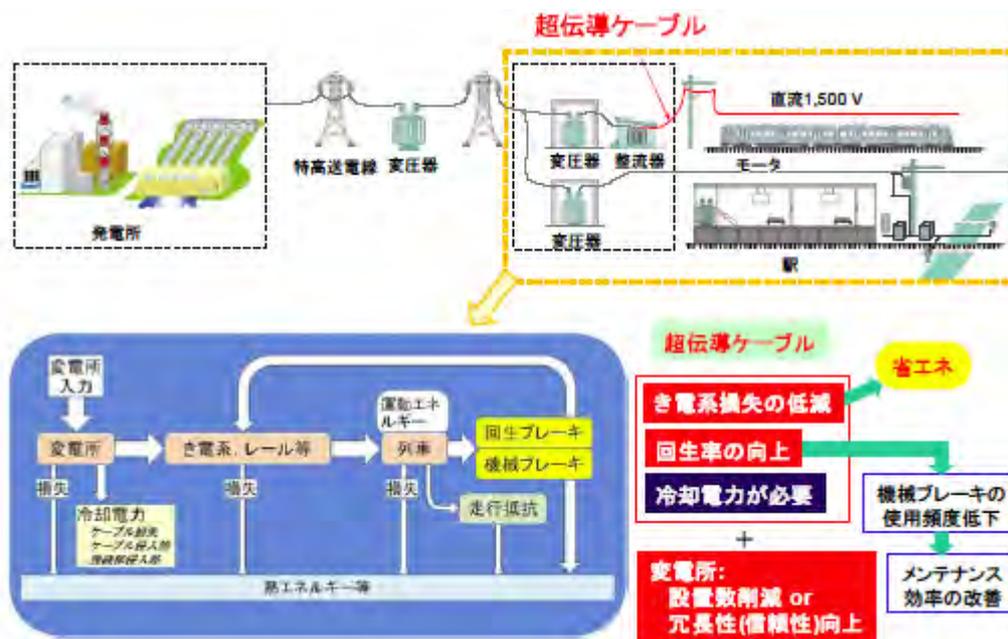


図6 鉄道用直流超伝導ケーブルの導入効果(I)

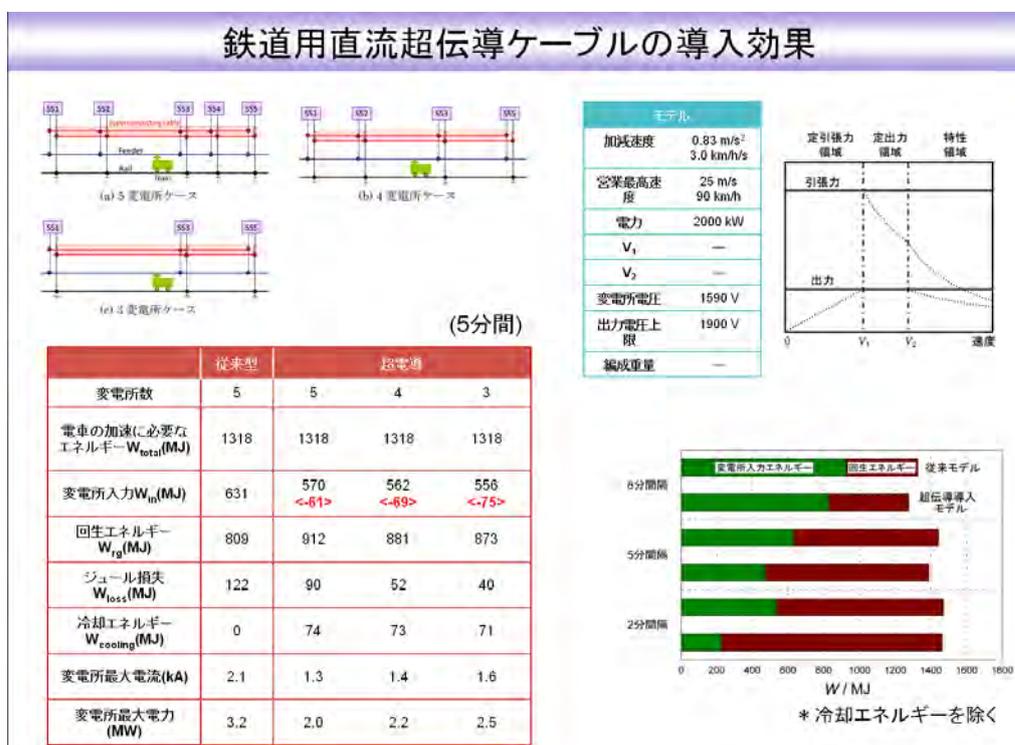


図7 鉄道用直流超伝導ケーブルの導入効果(II)

(2) 産業創出の核となる技術の確立に資する成果

① SQUID

バイオセンシング計測や非破壊検査等の応用技術に関して、計測手法の新規開発などに進展が見られ、ステージ目標を達成した。高温超伝導 SQUID において低温超伝導並みの雑音特性が得られたのは大きな成果である。また応用技術においても重要な成果が出ている。図 8 には、バイオセンシング計測や非破壊検査における成果を示す。

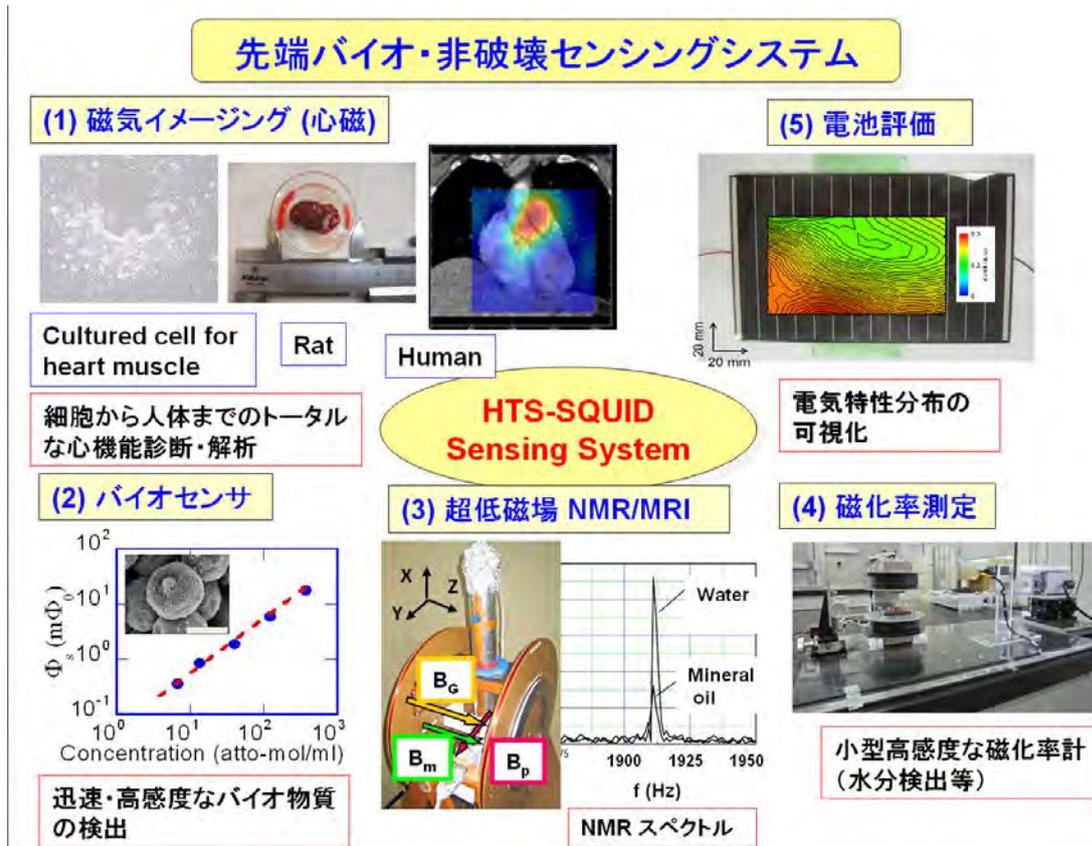


図 8 バイオセンシング計測や非破壊検査の成果

② モーター

20MW 級回転機概念設計と効率見積を通して、界磁コイルや冷却システム等への要求仕様を明確に出来た。大型・変動磁界低損失界磁コイルの設計・作成・評価技術、回転子一体型冷却システムに大きな成果が得られた。

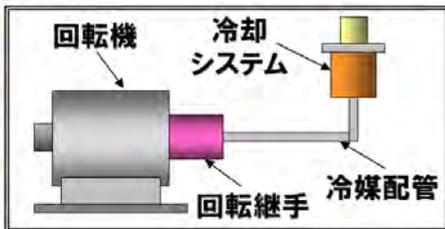
図 9 には、回転子一体型冷却システムを示す。

超伝導コイル冷却技術

～回転子一体型混合ガスサーモサイフォン冷却システム～

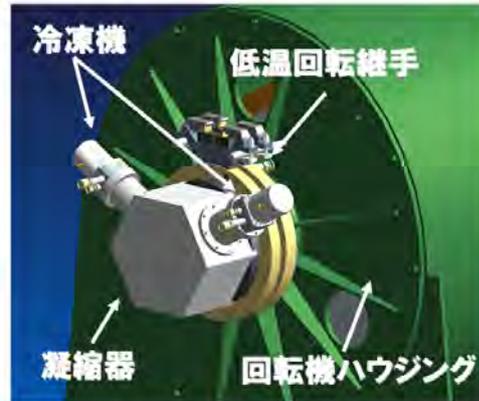
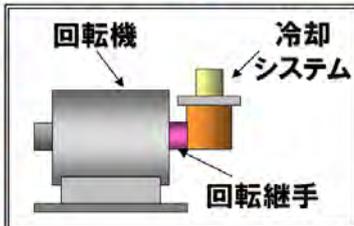
超伝導回転機の冷媒輸送に関する損失をゼロとする

従来のシステム



コンパクト ↓ 低冷却損失

新しいシステム



- 回転機ロータに一体化した、オンボード型冷却システムにより、冷媒輸送距離を短縮する。
- シーズ技術である極低温回転継ぎ手(ロータリージョイント)を最適化して、熱輸送による損失を限りなくゼロとする。

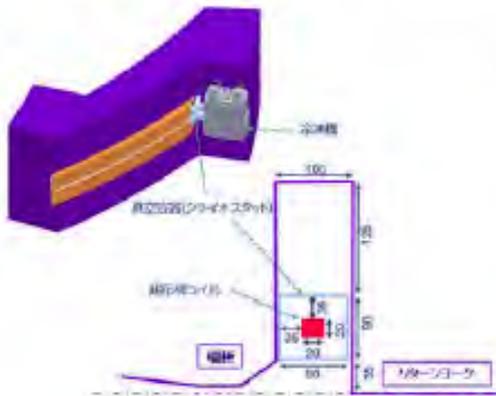
図9 回転子一体型冷却システム

③ 加速器

加速器とマグネットの概念設計を両者間のフィードバックを取りつつ進め、「多極展開+積分磁場」という解析的手法によって仕上げた。また、要素技術については、3次元コイルやネガティブバンドコイルにおいて良好な超伝導特性を確認し、遮蔽電流効果に関しても詳細な検討を進めるなど、着実に成果を挙げている。

図10には、ネガティブバンドコイルを有する鉄心を用いたマグネットの設計結果を、図11には、開発された3次元コイル自動巻線機を、図12にはこの巻線機を用いたネガティブバンドコイルの試作結果を示す。

- ・鉄の形状で所望の磁場分布を形成
- ・ネガティブバンドのある平面コイル



起磁力	22400 AT
コイル断面	20 mm × 20 mm
線材断面	5 mm × 0.2 mm
ターン数	132 ターン/1コイル (セクタ片側)
	66 ターン × 2/パンケーキ
通電電流	170 A
電流密度	56 A/mm ² (コイル断面)
	170 A/mm ² (線材断面)
	39% @ 20 K
負荷率	58% @ 40 K
	72% @ 50 K
線材使用量	2.2 km/1 マグネット(両極)

図 10 ネガティブバンドコイルを有する鉄支配型マグネットの設計結果

3次元形状コイル用巻線機

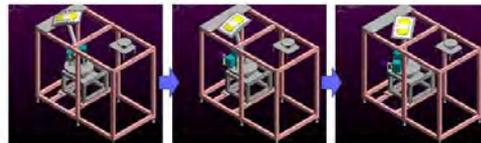
巻線前の線材 巻線機ヘッドと巻枠



振り



回転



- ・設計したラディアルセクタコイルの一番条件の厳しい部分コイルを巻線可能
- ・コンピュータ制御で、巻枠を固定したヘッドが振り+回転



Head with mandrel

図 11 開発された三次元自動巻線機

ネガティブバンド含浸コイル

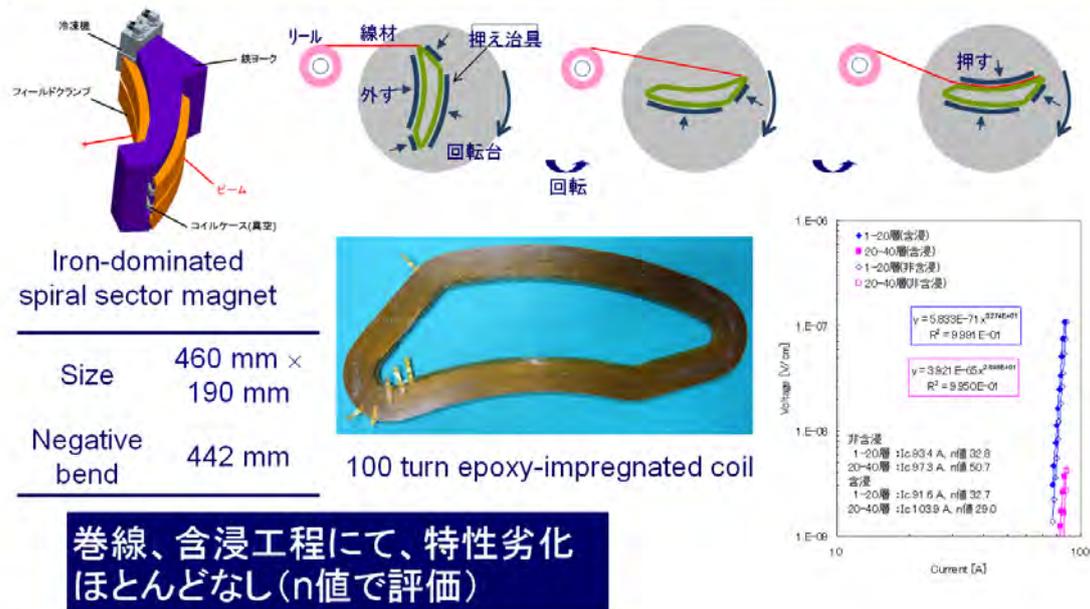


図 12 ネガティブバンドコイルの試作結果

④ NMR

試作した高温超伝導コイルを低温超伝導コイルの内層に設けたハイブリットマグネットにおいて、24.0Tの世界最高磁場を4.2Kで確認したことは高温超伝導マグネットのポテンシャルを示すものである。さらに低温金属プローブについても実用化し、遮蔽電流磁場の問題については解決の方向を見出した。

図 13 には、遮蔽電流が原因となる磁場のドリフトを抑制する手法を示す。

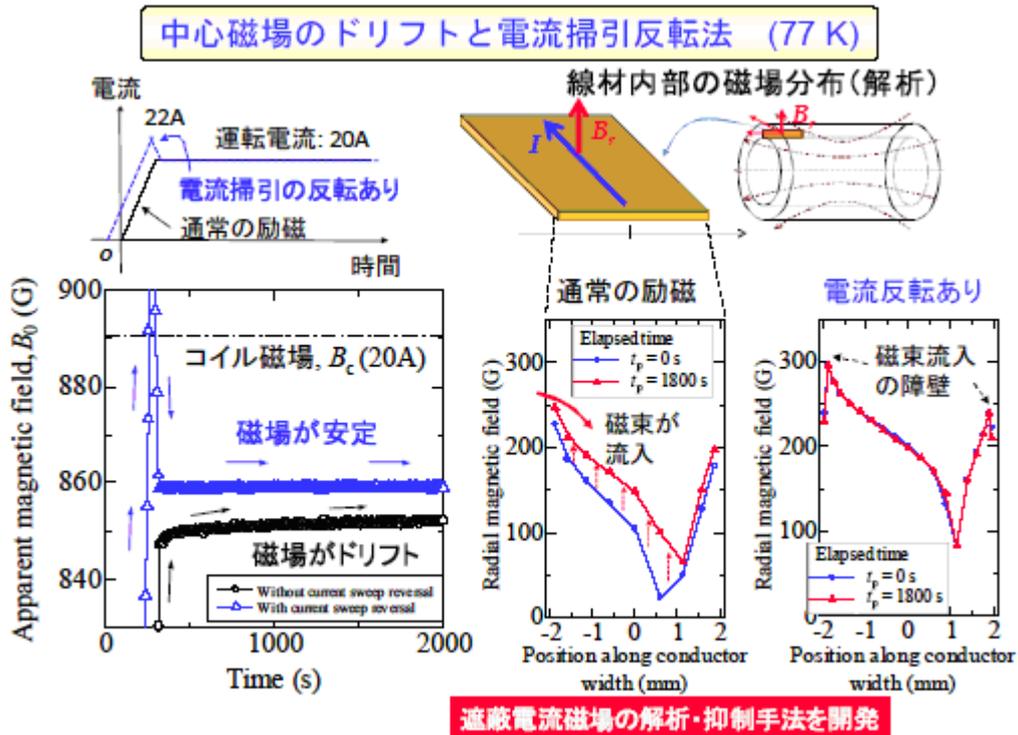


図 13 遮蔽電流による磁場ドリフトの抑制手法

⑤ 鉄道

鉄道システムに適合する高温超伝導線を評価し、冷却材循環路を内包する 10kA 級ケーブル試作の目処を得た。冷却システムについては設置が容易なコンパクト一体冷却システムを提案した。さらに、H24 度内に試作ケーブルを製作し、実験線での検証準備を進めている。

図 14 には、試作ケーブルが敷設される鉄道総合研究所内のループ線の概観を示す。

所内ループ線への敷設



図 14 試作ケーブルが敷設される鉄道総合研究所内のループ線

(3) 最終目標達成の可能性

前記 4. 項の「研究開発テーマのねらい」における各課題の技術の特徴、市場性等に則して、各課題毎の評価を以下にまとめた。

「競合優位性：技術の特徴、競合技術との比較、特許戦略、等」について

① SQUID

心臓シミュレータや心臓CT画像と心磁図画像との合成技術を世界で初めて開発した。心臓内部の電気現象を正確に場所も非侵襲検査で実現できる装置はなく、画期的な技術である。磁氣的免疫検査システム、低磁場NMRおよび非破壊検査応用は、使える技術までのブラッシュアップと応用における他方式との差別化が課題である。

② モータ

概念設計による超伝導化メリットとして銅モータに比べ体積 1/4、総合効率 99%を確認した。

③ 加速器

概念設計による超伝導化メリットとして銅マグネット使用の加速器に比べ、加速器の径として 1/2 を確認した。

④ NMR

概念設計により金属系超伝導を用いた 500MHz/NMR と同一の大きさで 800MHz/NMR を実現可能なことを確認。また、実用化した低温金属プローブは、従来の 5 倍以上の感度を達成した。

⑤ 鉄道

鉄道用変電所間を超伝導直流ケーブルで連系することにより、約 16%の省エネを確認した。開発する機器単体の特許のみでなく、システムとしての包括的な特許戦略を期待する。

「市場性：ターゲット市場、市場規模と成長性、市場の特徴（収益構造、参入障壁、規制動向）、等」について

① SQUID

不整脈部位を描画する技術としての適用。今後未だ基礎研究段階である生体組織の磁氣的検出技術が進展すれば再生医療に関連して培養心筋細胞の評価技術への適用。また非破壊検査用センシングシステムへの適用。

② モーター

内航船への適用から、長期的には LNG 船、ばら積運搬船への適用。

③ 加速器

癌治療用重粒子線加速器やその治療用ガントリーに適用。長期的には、加速器駆動未臨界炉への適用。

④ NMR

従来は NMR 全体の数%しか占めなかったハイエンドの NMR を部屋の改造無しに設置可能。世界市場は 600 億円 (700 台/年)。

⑤ 鉄道

日本の鉄道システムの内、約 64% (11,000km) を占める直流電化への適用。長期的には、海外の鉄道システムへの適用。

「企業戦略適合性：事業の魅力度（事業規模、収益性）、事業戦略適合性（コアコンピタンス・製品群・人的資源の適合性）、他事業への波及効果、等」について

① SQUID

参画メーカーは医療機器ビジネス・高度分析装置ビジネスを手がけており、企業戦略にあっている。

② モーター

参画メーカーは造船業を主要ビジネスの一つとしており、年間 65 万総トン数の船舶竣工実績を持ち、企業戦略にあっている。

③ 加速器

参画メーカーは医療機器、超伝導機器を主要ビジネスの一つとしており、企業戦略に

あっている。

④ NMR

(株)産業革新機構からの出資も得て設立された、日本で唯一の NMR システムメーカーが参画機関であり、企業戦略にあっている。

⑤ 鉄道

参画機関は日本の鉄道事業者(JR、民鉄、地下鉄などを含む)の新技术開発拠点であり、鉄道技術の基礎から応用までの技術革新を担っており、JR系各社、民間鉄道会社との連携も密に行っている。

9. 総合所見

- ・ 研究開発テーマとしての産業創出の核となる技術の確立に向けた状況（課題の中間評価等も総合して）

ステージ I において、システム概念設計、要求仕様の明確化、技術開発課題の明確化を実施しながら、基本的な基盤要素技術の確立へ向けて着実な成果が得られた、と考えている。超伝導基幹技術のみにとどまらず、システムの応用時に必要な周辺要素技術も含めて進展が見られ、一部は実用化できたことは心強い結果である。

- ・ 研究開発テーマのマネジメントについて（課題選考、研究開発テーマ運営）

強力なアドバイザー陣による課題選考、テーマ推進会議での評価・助言は大きな役割を果たしている。課題内の運営はPMおよび研究・開発リーダーによる所が大きい。課題間の情報共有やチーム間の連携については、テーマ推進会議への研究開発担当者の出席を可能としたり、共通技術課題についての分科会（冷却技術分科会、超伝導線材技術分科会、マグネット技術分科会）開催など、このテーマ独自の取組を行っている。

- ・ 本研究開発テーマを設定したことの意義（研究開始以前と現時点との比較を念頭ににして）

省エネルギーの必要性や我が国における創造的な技術開発の必要性は、ますます高まっており、本テーマの設定は大いに意義があったと思われる。2012年8月に開催した公開シンポジウムにはこの分野に直接関わってこなかった方も含め100名近くの参加者を得たことはその一つの証しと考えられる。

- ・ 今後への期待や展望

これからは、ユーザーニーズに基づいたシステム開発へ向け、基盤要素技術の確立を行う重要なフェイズにあたる。日本を代表する参画機関がその実力を発揮できる運営を心がけたい。

- ・ 感想、その他

3年間の初盤を終え、本テーマがこの分野における世界への情報発信基地となっていることは参画機関各位の御努力のたまものである。記して感謝したい。気がかりは予算が当初予定の約7割になっていることである。各課題の進展具合により、ほかの制度や他省庁のプログラムの利用なども考え、基盤要素技術の有効性の実証、プロトタイプ実証のより現実化に向けての探索についても考えていきたい。