

# 研究成果展開事業

－戦略的イノベーション創出推進プログラム－  
(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（Ⅱ）用資料

平成29年3月8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 (平成 25 年度で終了)

海運での CO<sub>2</sub> 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：元・住友電気工業株式会社 研究開発本部 フェロー)

### 3. 採択課題

採択年度	プロジェクト マネージャー	中間および事後評価時 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) (平成 25 年度で終了)
	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（医療やインフラ劣化診断など）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 (平成 25 年度で終了)

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。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×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CO<sub>2</sub>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、そのままの状態で原子レベル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600MHz/NMRと同じ大きさで高温超伝導を応用した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、海外では米では総額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17兆円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、CO<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub>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【参考】

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	特任上席 研究員	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	東北大学	名誉教授	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	元 低温工学・超電導 学会	副会長	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。

東北大学濱島高太郎名誉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。

元 低温工学・超電導学会の副会長の堀上徹氏は企業におけるエネルギー機器の研究

開発経験と国際超電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の経験などから、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。図1に本テーマの位置づけを示す。基礎研究と応用開発研究を橋渡しする産学連携の研究開発である。

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1に論文・発表・知財・広報など成果の一覧を示す。

さらに、H25(2013)の研究開発テーマ中間評価結果を踏まえ、低温工学・超電導学会、ASC、EUCAS、ISSなど超電導や低温工学をテーマとする学会等に加え、開発しているアプリケーションのユーザが参加する学会や会合での開発成果の発表をお願いした。その結果、プレス発表、新聞・TVでの報道、計量計測展2016でのSQUIDシステムの展示、ユーザが参加する学会や会合での多くの成果発表が出来ている。



表1 論文・発表・知財・広報など成果の一覧

	論文		学会				プレス発表		知財	
	国内	海外	招待・口頭		ポスター		国内	海外	国内	海外
			国内	海外	国内	海外				
SQUID	19	68	116	46	11	71	0	6	4	
加速器	5	28	42	48	9	31	0	4	0	
NMR	7	29	20	15	5	21	3	7	3	
鉄道	20	8	44	26	14	16	2	6	0	
<b>合計</b>	<b>51</b>	<b>133</b>	<b>222</b>	<b>135</b>	<b>39</b>	<b>139</b>	<b>5</b>	<b>23</b>	<b>7</b>	

知財(登録)	国内	海外	受賞	テレビ	新聞	書籍	他制度への展開		展示会出展	プロトタイプ プ/製品 化、販売
							JST	他法人等		
	3	2	7	0	1	0	1	0	1	0
	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
	2	1	5	0	17	1	0	0	0	1
	0	0	12	3	31	1	0	1	10	0
<b>5</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>24</b>	<b>3</b>	<b>49</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>11</b>	<b>1</b>

## (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/夏):PO、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～冬):PO、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):PO、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。

またステージⅡからⅢでは、SQUIDにおいては、目指す開発目標を明確化し、また医療検査関係者、医師などとの情報交換を積極的に実施し、要望・意見などを聴取することをお願いした。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、試作実験を行うモデルマグネット、ビーム試験用マグネットと実機マグネットとの差異による磁場の影響、疲労特性を含む力学的影響などを評価し実用化への道筋を検討しておくことをお願いした。NMRにおいては、製品化に向けて未解決の技術要素があるが、早期解決に向けて研究開発を進めていただくこと、鉄道については、各研究機関の役割と試験の具体的評価項目を明確にすることをお願いした。

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

### ① SQUID

ステージⅡの中間時点での評価結果を踏まえ、開発目標を絞り込んだ結果、それぞれの開発項目に対して、ほぼ目標を達成しているか、その目処が立っており順調に研究開発が進んでいると認められる。また、磁気的免疫検査装置の普及と市場開拓を目的として追加した「MR センサを用いた小型装置の開発」においても有効な結果が得られており、今後の技術開発が期待できる。

## ② モータ（事後評価）（平成 25 年度で終了）

ステージⅡでの概念設計の結果を踏まえて立案されたステージⅢの研究計画は、20MW 級 超伝導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レーストラック 1 極分モデルコイルの製作と検証を行うものである。20MW 超伝導回転機の基礎特性を得て、実用化の計画を明確にし、新規開発した一体型 冷却システムや界磁コイルなどの基本的な構成の要素技術の開発は、ほぼ目標を達成したと評価できる。

## ③ 加速器

FFAG 加速器について高精度磁場を実現するためのマグネット基本設計を進め、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、磁場精度、冷却システム、異常モード対策など）への要求仕様を明確化し、その実現方法を明確にした。さらに、3次元巻線機を試作し、ネガティブベンドを含む複雑な形状のコイルを精度良く製作可能なことを実証した。モデルマグネットについては、今後磁場測定を実施し、磁場精度の確認と、磁場補正技術の有効性を確認する。合わせて、実機相当のマグネット設計も進めており、ステージⅡで計画した研究開発項目は達成できた。

## ④ NMR

HTS マグネットについては、今までの研究成果と実用性の面から LTS/HTS ハイブリッド型 800MHz 級磁石を開発することし、内層コイル線材の耐応力特性などの確認を行い、磁場の補正技術を含め最終的な磁石構成を決定した。また、HTS 線材の NMR 磁石を製作し、400MHz 級 NMR を用いて世界で初めてたんぱく質の高分解能 NMR 計測に成功したことは大いに評価できる。検出プローブに関しては、既に上市した低温金属プローブの改良に加え HTS 検出コイルの試作を行い、NMR データの取得に成功した。さらなる感度向上のために HTS 検出コイルの形状改良などにより  $^1\text{H}$  感度 10,000 を達成できる見通しが得られた。

## ⑤ 鉄道

いくつかの細かな技術的課題は残しているものの全体的にはよく検討されており、着々と課題を解決している。ケーブル構造と冷却システムの設計、評価などを行い、導入時の省エネルギー効果をシミュレーションにより確認した。さらに構内実験線、私鉄営業線を使って研究成果の実証と評価を積極的に行ってきたことは評価できる。

#### (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
- ・H25(2013)／マグネット技術分科会：外部講師として、早稲田大研究者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1名、本プロジェクトから2名の講師を招聘
- ・H26(2014)／冷凍・冷却技術分科会 「」：外部講師として、東京工業大研究者1名および冷凍機メーカー5社招聘

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

#### ⑤成果発表公開シンポジウム

- ・H26(2014)：「戦略的イノベーション創出推進プログラムシンポジウム」、五つのチームから発表
- ・H28(2016)：「ALCA・S-イノベ 超伝導関連研究開発テーマ 合同シンポジウム」、四つのチームから発表

(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中間時点でステージⅢに向けたアプリケーションとして磁気ナノマーカを用いたバイオ検査装置への絞り込みを実施。ユーザとの情報交換や共同研究をお願いした。

#### ② モータ (平成 25 年度で終了)

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

実際適用時の磁場に対する検討や疲労なども含めた機械的特性の検討をお願いした。

#### ④ NMR

他社が容易にキャッチアップできないよう、ノウハウを含めた知的財産権の確保を鋭意進めていただくことをお願いした。

#### ⑤ 鉄道

鉄道事業者からの評価が最も重要であり、そのためには経済性の検討を継続し具体的なニーズに対応できるように準備を行うことをお願いした。

#### (7) 研究費の配分について

スタートからの当初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、ステージが進むに従い、加速予算については予算調整、重点配分を行ってきた。

## (8) 今後の取り組み

### ① SQUID

ステージⅢの研究開発計画では、「磁氣的免疫検査装置の試作と実証実験」、「磁気ナノ粒子イメージング法の高度化」、「磁気マーカの評価技術の確立」を重点的に実施することとなるとともに、医学部関係者との協力研究も進んでおり、実用化に向けて前進するものと期待できる。

### ② モータ (平成 25 年度で終了)

実船搭載に向けて、更なる問題解決に向けた研究開発の継続・強化を実施し、知的財産確保についても検討することを期待する。(S-イノベ終了後もモータ用高温超伝導コイルのクエンチ保護について、継続研究を実施している)

### ③ 加速器

ステージⅢでは試作するビーム試験用マグネットの性能検証、機能検証を実施することに加え、高温超伝導マグネット技術の応用展開を目指すものであり、計画として妥当なものである。

### ④ NMR

マグネット、検出プローブの両者とも一部積み残し事項はあるが、概ね計画通りの進捗であり、ステージⅢの小型 800MHz プロトタイプ NMR の製作・機能確認が期待される。

### ⑤ 鉄道

今後は、ステージⅢにおける、各研究機関の役割と試験の具体的評価項目を明確にすることが必要である。

## 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

SQUID チップの配線構造解析や製作方法の改善により低周波雑音の低減と安定性の向上に目処がついたことは大きな成果である。その他の開発項目についても、磁気粒子イメージングの空間分解能を向上し、計測信号処理用の「多機能回路装置」の試作や「MR センサを用いた小型装置の開発」などを通じて、より実用化に近い成果を上げていることは評価できる。

#### ② 加速器

RFAG 加速器とマグネットの設計技術を融合し、順調に研究開発を進めていることは高く評価できる。製作する高温超伝導ビーム試験用マグネットを用いたビーム誘導試験を世界に先駆けて実施することにより、加速器技術の発展に波及効果が大きいと期待される。

#### ③ NMR

各ステージにおいて、製品開発に結びつく成果をあげ、情報を公開していることは高く評価できる。ステージⅢにおいては製品化に向けた研究開発を期待できる。

#### ④ 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。

### (2) 産業創出の核となる技術の確立に資する成果

#### ① SQUID

- ・高温超伝導 SQUID により低温金属超伝導に匹敵する  $10 \text{ fT/Hz}^{1/2}$  の高感度を実現、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
- ・洗浄工程なしで磁氣的バイオ検査技術を実証
- ・体内深さ 50mm で磁気粒子の 3D イメージングの可能性を実証
- ・磁気マーカ評価技術

#### ② 加速器

- ・偏向機能・集束機能を合わせ持った複合磁場を発生するコイルの設計、遮蔽電流の磁場精度への影響把握、数値制御による高精度三次元自動巻線システムの製作
- ・実機を想定したモデルマグネットの製作・試験
- ・3次元非線形電磁場解析技術の開発

#### ③ NMR

- ・超伝導マグネットの世界最高磁場を達成 (27.6 テスラ、4.2K)、Bi-2223 および YBCO 線材のコイル化技術(電磁気的特性、機械的特性—遮蔽電流、磁場補正、クエンチ対策、劣化防止)
- ・超高感度プローブの商品化
- ・小型 800MHz/NMR 磁石の構成を決定し、設計における耐電磁力、磁場の均一性を確認

#### ④ 鉄道

- ・直流超伝導ケーブルの鉄道への適用メリットを明確化、鉄道用超伝導ケーブルおよび冷却システムの要求仕様策定・設計・運転
- ・高温超伝導線およびケーブル内超伝導線の評価技術
- ・シミュレーションにより超伝導き電ケーブルの導入効果を検証および電力系統シミュレータ技術
- ・構内で超伝導き電ケーブルによる車両走行試験を実施
- ・商用実路線にて超伝導き電ケーブルによる車両走行試験を実施

#### (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

製品化に向けたアプリケーションも絞り込まれたことと、商品化に向けた試作機の開発、SQUID センサの安定性向上などの成果が得られている。既に普及が進んでいる光を用いたイメージング技術に対して、磁氣的免疫検査装置の優位性を競争力として、市場を確保できるかどうかの検討も必要である。

##### ② 加速器

重粒子線照射はがん治療に有効な方法であり、日本国内でも治療施設の新設が進められている。装置小型化による建設費の低減などにより、一層の普及拡大の恩恵を受ける患者は数多く社会的ニーズは高い。現在、小型といわれている普及型加速器に比較して、さらに小型化を狙う本課題の意義は大きい。

##### ③ NMR

超高磁場NMR装置は海外メーカーが優位な状態となっているが、小型高磁場NMR装置の社会的ニーズは、今後も引き続き高いと考えられる

##### ④ 鉄道

東日本大震災によって、わが国のエネルギー基盤の脆弱性が露呈し、環境・エネルギー問題の重要性が増してきている。世界的には直流、交流の超伝導送電プロジェクトがいくつか稼動しており、スマートグリッドなどの計画も進められているが、本課題のような鉄道の直流送電に特化したコンパクトな対向流型超伝導ケーブルは唯一のものである。

「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

医療診断や再生医療のためのバイオセンシング技術を開発し、免疫検査、培養心筋細胞検出、および心臓磁気検出、および超低磁場 MRI への応用展開を図る。さらに分析・評価のための非破壊検査技術、エネルギー分野で重要となる電池や農業分野で重要となる水分検査などへの展開が可能である。

② 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。

③ 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。世界市場は約600億円(700台/年)。

④ 鉄道

日本の鉄道システムの内、約43%(11,846km)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、企業戦略に合っている。

② 加速器

参画メーカーは、超伝導機器を含む加速等を主要ビジネスの一つとしており、企業戦略に合っている。

③ 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、企業戦略に合っている。

④ 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Ⅱにおいて、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）

アドバイザー陣による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。課題内の運営はプロジェクトマネージャーおよび研究・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への出席を可能とする、また、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）を開催するなど、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月および2016年12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80～100名近くの参加者を得た。このことはその証しの一つと考えられる。

- 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基にしたアプリケーションにより具体例を示す重要な最終フェイズにあたる。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

8年間という中盤を終え、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。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推奨してきたが、SQUID、加速器、鉄道の課題でそれが実現できていることは今後の実用化にとって大きな力となってくれることを期待している。