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」
事後評価報告書

総合評価　　A

総合所見

（1）10年間のプログラムであることに関して

まずは10年間に及ぶ長期間のプログラムを終えるにあたり、プログラムオフィサー(PO)のご苦労に敬意を表したい。10年間という長きにわたる基盤技術からプロトタイプに至る本研究開発テーマのコンセプトは、将来の超伝導を用いた高度な省エネルギー社会実現において非常に有益だったのではないか。特に、超伝導に関連したテーマとは言え、その研究開発課題は多岐にわたっていることや、高温超伝導の応用の難しさからすれば、応用を目指した10年間の研究開発テーマを企業も巻き込んで成功裏に終わらせたことは、簡単ではなかったと想像できる。これらは、ひとえにPOのマネジメント能力に追うところが大きい。すべての報告書にPOへの謝意が記されているのはその証拠であろう。

一方で、10年という長い期間の間に社会や他の技術開発の状況の変化もあり、スタート当時にもっていた「2050年超伝導社会」のイメージが、10年経ても変わらないものであったかどうかに関しては検証が必要であろう。今後、このような長期プログラムが実施されるときの運営の参考として、POの立場からの見解を取りまとめておくことも重要ではないか。

また長期プログラムにおいては、一つのゴールに向けて着実に開発をすすめていくことは重要ではあるものの、技術のブレークスルーのためには、開発ルートから外れたような着想や発見も必要かと思う。特に、「従来の技術では不可能であったものを可能とする」「新しいコンセプトを可能にする」を標榜している本研究開発テーマにおいては、単に新材料である高温超伝導を利用するだけではなく、システムの構築の過程において、新しい着想が必要な場面が多々あったと思われる。それらを生かすためのPOとしてのマネジメントの工夫があったのであれば是非とも明記しておくべきではないか。

（2）プログラム運営について

本研究開発テーマでは期待される成果として「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とプロトタイプの製作・試験」を掲げているが、それぞれの研究開発課題について、「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の製作・試験」という目標に関して概ね達成され、技術的完成度は一定の水準を超

えていると判断できる。また、市場化を踏まえてステージごとに研究計画が柔軟かつ大胆に修正されてきたことを評価したい。

さらに、ここで取り扱っている研究開発課題はいずれも未開拓の分野を切り開くものであり、技術的な完成度を高めるだけではなく社会にその技術を認知させる必要があるものばかりである。また、PO が掲げる基礎と応用の架け橋として企業と大学が組んで成し遂げるスタイルは、今後のイノベーション創出に大きな影響をもたらすと予想される。そのため、課題の採択に関しては難しい部分もあったと思われるが、概ね成功であったと評価したい。

（３）個別の課題について

個別の研究開発課題に関しての追記事項は下記の通りである。

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」

競合技術である光学的手法でできない試料への適用性を生かせることが重要である。

②　「大出力超伝導回転機器に向けたキーハードの開発」

要素技術で終了した感があるので、実際のプロトタイプの開発と船舶に載せた実証まで繋げてほしい。

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」

FFAG の設計を行い、ラジアルセクターFFAG およびスパイラルセクターFFAG 用要素コイルの製作を行い、コイル製作技術を確立したことは実用化に進む上で重要である。また、加速器用超伝導磁石で起こるであろうビームによる常伝導転移の試験を行い、コイルの挙動に関する知見を得たことは有意義である。

④　「高温超伝導材料を利用した次世代 NMR 技術の開発」

当初計画とは異なるが Bi-2223 導体による小型 NMR の実用化に関する知見を得たことは重要である。しかしながら、REBCO の今後の発展を念頭においてさらに高磁場を利用した NMR の開発を想定しておく必要があると考える。トラブルで最終試験が間に合わなかった部分もあるが、その結果は成果報告書に追記しておくべきではないか。

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」

市場導入に関して信頼性を要求される課題である。長期間、実路線長に相当する設備での信頼性、耐久性試験が必要であろう。それによって、鉄道関係者の導入に関心が集まるものと考える。

これらの高温超伝導応用では、実用超伝導材料の信頼性、コイル保護、超伝導接合など共通の技術課題があり、共有できるよう管理していくことも重要である。

（４）今後について

一部の研究開発課題では様々なトラブルにより十分な結果が得られていないものの、自

己評価ではあるがA評価以上が5件中3件というのは、一般的な技術開発との比較において高く評価できる。優れた評価結果となっている課題はもとより、評価がBとなった課題についても、今後のフォローアップが必要と考えられる。企業が産業化するにあたっての支援が必要な課題もあるので、国としての支援も検討されるべきではないか。POがプログラム初期から言い続けているとした、本研究開発テーマ終了後の実用化へのサポートを期待したい。

この研究開発テーマで取り上げられた各課題の実用化時期が2050年頃に設定されており、そのために現時点でできることを着実に推進してきたことは評価できる。一方、今後どのような研究開発戦略で長期にわたる実用化に結び付けていくかの青写真が必ずしも明確になっていないのではないか。一部の課題では、未来社会創造事業に引き継がれているが、他の課題については今後の研究開発への支援が良く見えていない。モータは船舶だけで無く航空機にも利用できる技術であり、医療用加速器はがん治療に有効であることが分かっているので、超伝導によって普及が促進できると予想される。

また、今後重要となると思われるのは人材の育成である。このような観点からは、10年の長期ということで、研究開発の最前線に関わった多くの技術者、研究者、学生がその後その経験を生かして、超伝導技術開発の広がりや進展に貢献していることが実感できる。POの采配により研究開発テーマ横断的に開催した研究会等も、技術開発の進展のみならず、人材育成という側面からも効果的であったと感じられる。一方、例えば、SQUIDではメインプレイヤーの何人かがここ数年で引退していくが、その代わりとなる人材が見えて来ていない。2050年頃を考えれば他の課題でも同様の問題が起こってくると思われる。若手の育成と中堅人材に活躍の場を与えることが重要になると考えられるが、超伝導業界全体の問題として長期的視野に立った人材の育成が心もとない印象がある。人材の育成は本プログラムの最大の目標である各課題の技術を実用化していくためには避けて通れないことと思われる。この件に対して何らかの提言があっても良かったのではないか。

最後に、将来の社会実装に向け超伝導専門家以外も巻き込めるよう、本技術の優位性が一般社会に認識されるよう、本研究開発テーマの成果の広報活動、一般社会へのアピールにも力をいれていただきたい。

（5）その他

特にテーマ事後評価では言及されなかったが、PO自身が国際会議等で本研究開発テーマを紹介することが多数あり、日本の超伝導応用プロジェクトとしての認知度はPOの発表によって向上した点は、評価されるべきである。本テーマ遂行によって培われたチームワークを元にさらに広範な技術を吸収して技術の完成度を高め、製品を世に出していくための仕組みの構築に期待する。

一方、テーマ事後評価においてこれだけ多岐に渡る成果の説明を受けるには、POによるプレゼンテーションの時間が足りなかったと言わざるを得ない。このため、成果が十分に理解できない部分があったようにも思われ残念である。もう少し具体的な数値を出してまとめて戴き、紹介を受けることが出来れば良かったのではと考える。

１．研究開発テーマのねらい（目標）について

1.1　全体評価

PO が「研究開発テーマのねらい」として掲げた３つの特徴は重要で疑う余地がない。超伝導のような新規技術の実用においては、特にこれらの観点の重要性が高い。報告書にあるように研究開発を進め「プロトタイプを社会に提示し、超伝導システムの応用可能性を広くアピールすること」が重要である。問題は、限られた予算で実用が見通せる成果を挙げられるかどうかである。特に、ステージⅢでは、企業がマッチングファンドにより事業化を目指した開発が行われたはずであり、いかに世間に成果をアピールできたか、実用が見渡せるかが求められる。その点で、PO が①産業創出の核となる基盤技術、②イノベーションに資する成果、③社会・経済に対するインパクトを課題毎に設定した点も、マネジメントとして評価できる。特に、②の設定が重要と考えられ、PO として各課題に対しどのように具体的な目標を求めたかが重要である。

本研究開発テーマ全体としては、各々の課題はエネルギー・環境、産業・輸送、医療、センシングなどの分野で実用化が期待されるものであり、高温超伝導材料を核とする機器を将来産業化するという目標が強く感じられる構成となっている。選ばれた 5 件の課題は、これまでと一線を画する機器を現実のものとすることによって産業界に大きなインパクトを与えるという意味においていずれも魅力的なものであり、十分な選考がなされたことが伺われる。どの課題も超伝導技術を最大限に利用するものであり、技術課題を解決することにより目標とするものが実現され、それによって市場が開けるものと予想でき、開始時点での選択は的を射ていたと思われる。

一方、高温超伝導技術を駆使して、超伝導でなければ実現できない技術を開発し、イノベーションにより我が国に新しい産業を創出するという研究開発テーマの目標はプログラムが開始された平成 21 年当時においては時宜を得た内容であったと評価できるが、10 年間の情勢変化等に対して、例えば「マーケット競争力のある機器開発」「システムに最適な実用材料」「さまざまな機器・システムに共通となる実用技術基盤」といったキーワードについて、中間評価を経て最終ステージで明確化されたのかが重要である。明確化されているのであれば、それがわかるように記載するべきではなかったか。

特に、本プログラムは 10 年という他には例をみない長期にわたる研究開発期間が設けられている。そのような期間を設定した戦略的イノベーション創出推進プログラムに対して、高温超伝導という共通材料を用いながらもこれだけ多岐にわたる研究開発課題に展開した実施者である PO としての評価が、具体例をあげるなど、明確に述べられていても良かったのではないか。

1.2　個別評価

その後の我が国の内外を取り巻く脱炭素化の動き、世界的な産業の動向なども加味し、個別の技術開発に関しては下記のようにコメントしたい。

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 を利用した検査技術は、まさに超伝導を利用しなければ実現しない技術であり、高

温超伝導技術を適用することにより更なる応用の拡大を図ろうとする意図は理解できるものである。ただし、高温超伝導による SQUID の特徴を活用し、従来の液体ヘリウム温度への冷却に伴う応用の広がりの停滞を打破するところまでは研究の進捗を測ることが出来なかったように見受けられる。

センサの開発にとどまらず、実際の応用先を見据えた目標を複数上げている点は評価できるが、そのための戦略が具体的でないように見える。1つでも良いので、プロトタイプを実際の応用機器に実装した試験を最終目標とすることが重要と考えられる。センサ開発の目標は「低温超伝導 SQUID に匹敵」とあり、センサの数値目標 $10fT/Hz^{1/2}$ がある程度クリアできたことは評価できるが、産業創出の核となり得たかは微妙に見える。応用先を磁気的免疫検査法に絞ったことにより、その有用性が実証できたことは高く評価できるが、PO が実施したユーザーコミュニティとの交流の効果が十分でなかったようにも見える。ユーザに有用性を理解してもらう努力が引き続き必要と考えられる。

② 「大出力超伝導回転機器に向けたキーハードの開発」

超伝導技術の回転機への応用は、超伝導の発見の初期から試み続けられているが現在まではかばかしい進展がみられていない。これは、従来の鉄による磁気回路と銅による電気回路の組み合わせという技術がそもそも高効率であり、近年はこれに半導体技術を組み合わせた可変速化による高効率化が進展し、凌駕すべき従来技術が極めて高い技術レベルにあることが理由の一つである。今回の課題では海上輸送用船舶への適用を想定して技術開発を進めたが、船舶用モータ開発の重要性は理解できるものの船舶では超伝導モータが有する軽量であるとの特徴が発揮しにくく十分なメリット創出に至らなかったものと判断される。船舶用モータを超伝導化する際の技術的メリットを示すシナリオが明確でなく、さらに実施項目の目的や内容が理解しがたいところもある。一方で、設定として 20MW モータとその効率(99%)など、具体的な目標を挙げたのは理解しやすい。ただし、主題が「キーハード」に限られているので、具体的な課題目標がここに示されていると良かった。

現在は、洋上風力発電機、航空機用モータなど軽量であることのメリットを発揮しやすい技術をターゲットとした技術開発が進められており、今回の課題で開発された要素技術が活用されることを期待したい。

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」

医療用加速器は今後の設置台数の増加が世界的にも期待できる超伝導応用機器であり、高温超伝導化により設置スペースの削減が可能となれば、その技術の広がりと設置コスト削減への効果が大いに期待できる。加速器の研究開発では、実規模の装置を開発することが予算的に難しいので、要素技術開発とならざると得ない。本課題では、加速器として必要な機能を設定し、高温超伝導特有の問題点について、シミュレーションと実験を用いて解決することとしており、目標としては概ね的確と思われる。常伝導の 1/2 サイズかつ省電力の重粒子線癌治療用加速器の目標に対して、その設計を完了すること、超伝導ガントリーを見据えて実際の装置に組み込んだ試験を課題目標とした点は、理解しやすい。

加速器応用が必要とする技術レベルまで、高温超電導技術、特にマグネット設計と製作技術が今回の課題の実施期間では十二分に成熟するところまでは進展しなかったが、技術開発

の方向性は正しかったものと判断でき、今後、他のプログラムや事業で今回の技術開発内容を引き継いで実用化までつながることを期待したい。

一方、加速器駆動未臨界炉への応用に関しては、高レベル放射性廃棄物処分への適用に関する言及があったとしても本課題の適用先として取り上げたことに関しては疑問符が付くのではないか。

④ 「高温超伝導材料を利用した次世代 NMR 技術の開発」

NMR は既に汎用の解析技術として広い学術範囲で活用されており、高温超電導技術の適用による小型化により導入機器数の増加が見込まれれば、確実な産業創出につながることが期待できる。課題開始時に期待したほどの高温超伝導線材技術の進展がなく、課題終了時点でも Y 系線材の超伝導接続技術など、今後の線材開発に期待することとなったことは残念であるが、検出コイル技術など本課題の成果が一部は実用化されており、技術開発の方向性は正しかったものと判断できる。

一方、研究開発目標に関する記述はシンプルでわかりやすいものの記載が少なく十分ではないのではないか。成果欄に記載されている 600MHz/NMR サイズで 800MHz/NMR の実現と、超高感度プローブ開発が目標となっているが、その効果や実現性についての検討が必要である。さらに、ユーザの立場から見た場合のコスト試算や永久電流運転、ソフトの問題などを検討しておく必要がある。

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」

車両ではなくき電線の超伝導化をターゲットとしており、直流送電の応用先として現実性の観点から評価できる。実際のき電線への適用も想定されていて目標は的確である。なお、説明にある「国際規格」の重要性においては、き電線の寄与についての記載が必要ではないか。また、低炭素に関して ALCA との相違や連携について気になるところである。難しいかもしれないが数値目標が有ると良かった。

一方、直流電化区間のき電線に高温直流超伝導ケーブルを適用することは、これまでの超伝導ケーブル技術開発成果を適用すればさほどの技術的困難性は想定できず、鉄道会社における受容性をどのように高めるかが技術開発の中心であると判断できる。また、適用場所は直流電化区間に限られるため、世界的に見ても数多くの導入個所は想定が難しく、ニッチな適用先を前提とする産業創造の課題と判断できる。このような観点から技術開発内容を子細に分析すると、NEDO における長距離冷却技術開発内容と類似の技術開発内容があるなど、一見ではそれぞれの課題における技術開発内容の役割分担が理解しがたい点がある。それぞれの課題の役割を図示する、あるいは技術開発のフロー図の中にそれぞれの課題の分担を記載するなど、PO として研究開発内容の精査に踏み込むことも可能であったのではないか。

1.3 アドバイザーの構成

アドバイザーの構成に関しては、研究開発テーマのスタート時点からの交替が 1 名のみということであったが、本プログラムが 10 年の長きにわたっていたものであり、研究開発が要素技術の開発から実際のプロトタイプの製造、デモンストレーションとフェーズが進

展することに応じたメンバー構成の見直しがあっても良かったのではないか。テーマ中間評価では「超伝導の専門家に人選が偏っていることから、ステージⅢにおいては、マーケット競争力、また実社会への導入シナリオの妥当性といった観点でアドバイスできる人間や、またユーザの立場の人間など、別の視点をもった人物を入れる必要があるのでは」という指摘がされているが、最終のメンバーでも超伝導の専門家が多く占めており、各課題に対する的確な助言を得る観点では十分ではあるが、実際に産業化を目指す意味では、医療・鉄道・船舶などの応用分野の専門家を加えることが必要であったのではないか。実用化を目指すステージⅢにおいては、特に重要であったと予想される。最終的に見直しがされなかったことは残念であるが、各課題の実施者からも謝意が寄せられているようであり、十分な体制であったものと判断したい。なお、JST の他事業等との連携によってカバーすることも可能であったのではないか。

2．研究開発テーマのマネジメントについて

2.1　PO としてのマネジメントについて

10 年に亘り適切な判断と運用がされ、それぞれの研究課題の初期の目的を達成できたと評価できる。各実施課題の「完了報告書」から、各課題とも課題内のチームワークが非常によく取れていることが判断できる。課題内で頻繁にミーティングが行われており、意思疎通も十分なように見受けられる。これも PO の指導力によることが大きいと考えられる。今回取り上げられた研究課題はいずれも開発に長期間を必要とするものであり、このような長期に亘る取り組みはこれからも我が国の研究開発において重要なことと考える。今回得られた成果を今後どのように実用化していくかが今後の課題であろう。

PO として、各実施課題間の情報交換を推奨するとともに、全体会議、推進会議、分科会、ヒアリング、公開シンポジウム、サイトビジットを適宜開催しており、研究開発の進行状況を把握するとともに課題内、課題間での情報交換が的確に行われていたと考える。テーマ事後評価会における PO のプレゼンテーションからは、課題間の連携は、共通問題である保護や劣化などに関して効果があったと判断できる。したがって、PO として課題内及び課題間の情報共有や議論を適宜できるように配慮した点は高く評価できる。研究開発テーマ事後評価用資料を見ると、PO のマネジメントに関して、各課題間の連携と応用を見据えたアドバイス等が効果的に機能したことが見受けられる。この点はテーマ中間評価で述べられた通りであり、課題間の連携強化には PO として意を尽くしたものと判断できる。また、SQUID などの課題に関しては研究開発内容を大胆に見直すなど、PO としての任務を十分に果たしている。研究費配分も妥当なものと考える。

一般論として、一つの技術を世に出すためには、基礎となる技術そのものの高度化、他の先端技術とのインテグレーションによるシステム化、最適なアプリの選択の 3 点が必須となると考えられる。本研究開発ではこの 3 点が計画された時系列に沿って効果的に進められてきたのではないか。SQUID を例にとると、高温超伝導作製技術の高度化と SQUID とピックアップコイルのインテグレーションにより、低温超伝導 SQUID に匹敵する高感度の SQUID を実現し、様々な技術を取り入れた各種検査システムを開発している。応用では磁

気的免疫検査法への絞り込みを行い、後半はそこに資源を集中している。また、デファクトとなっている光学的免疫検査手法と比較した磁気的免役検査手法の優位性を世の中に認知させるために、超伝導を使わない MR センサを使った検査手法を取り入れるといった一見回り道とも思われる手法を敢えて採用している。簡便な MR センサにより磁気的免役検査手法が光学的手法より優れていると認知されれば、さらに性能が高い SQUID センサの導入に道が拓けるという戦略だと推察され、非常に効果的なやり方だと思われる。事前に決められた計画に沿って開発が進められる課題の中でこのような手法を取りうるのは、期間が長い S-イノベの長所であるとともに PO の指導力の賜物であろう。

2.2　テーマ中間評価結果への対応について

研究開発状況が的確に把握され、また PO およびアドバイザーによる各課題中間評価で指摘された事項に関してもステージゲートで各々の課題の開発すべき技術課題を指摘し、適切な指導が行われたと考える。また、課題「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」および「次世代鉄道システムを創る超伝導技術イノベーション」の完了報告書には「10. 中間評価を踏まえての対応、改善点、実用化に向けた取り組みなど」欄がもうけられており、対応が良く分かるようになっている。これにより、アドバイザー等の指摘が反映された結果が良く分かる内容となっている。

一方、平成 29 年 3 月に実施をしたテーマ中間報告書の「２．研究開発テーマのマネジメントについて」の「２．１全体評価」において、以下の（１）から（３）の指摘をしたが、指摘した以下の点についてどのような対応がされたのか、特に、（２）と（３）について研究開発テーマ事後評価用資料からは、具体的実施事例として明瞭には読み取りきれなかった。特に、（３）は本テーマの狙いの根幹ともいえる「プロトタイプを社会に提示し、実用可能性をアピール」に関わるものであり、全チームが一体となって実行するために PO が率先して音頭をとるべきものと思われる。もし、今後に向けてもなんらかのプランがあるのであれば、それを明示するべきではないか。関連して、（１）については、公開シンポジウム等を実施しているが、成果の社会的アピールという点から、本テーマの関係者以外にどのぐらいの人が参加したかのデータも記載が必要であったのではないか。

（１）「超伝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ーが参加する学会や会合での開発成果の発表や投稿を進めることに関しては、取り組みの跡が認められる。ただし、取り組みの成果を定量的に示すことが出来れば一層の高い評価が可能である。」

（２）「開催テーマを材料高度化、冷凍技術、電磁解析法、HTS マグネットの保護、材料評価法等、各課題で共有できる知見についてのテーマ内の情報共有、固有の課題と共通課題の区別の明確化などに一層絞り込むことにより、具体的な要素技術に関する新しい知見の水平展開と共有が可能ではないか。」

（３）「個別研究開発課題による発表に加えて、高温超伝導に関わる多岐の分野にまたがっているという本テーマの特色を生かして、一体となっての社会的アピールをすることにより、将来の社会実装に向けた一般社会への「高温超伝導」というキーワードの浸透を図って欲しい。」

2.3　「研究開発テーマ事後評価用資料」の記載内容について

今回の「研究開発テーマ事後評価用資料」のなかで「7.研究テーマのマネジメントについて」の「（５）課題内・課題間の連携の推進」以降では、マネジメントの効果についての記述が不十分で評価することが難しい点もあった。例えば「（５）課題内・課題間の連携の推進」では、様々な会合を企画することで情報共有や議論を推進した点については評価できるが、その結果どのような情報が得られたのか、それがプロジェクト推進においてどういう効果があったのかの記載が必要ではないか。また、「（６）研究課題の指導」も指導内容の記述があるのみであり、サイトビジット等による聴取と指導に関して、何を助言したのかは記述されているが、それに対してどのようなレスポンスがあったのかも明記できたのではないか。「（７）研究費の配分について」も予算の調整・重点配分がどのように行われたのかも、その効果も含めての情報が必要ではないか。「（８）今後の取り組み」に関して、①SQUIDは実際にユーザが使えるシステム構築へとどのように繋げるのか、②モータも１極コイルを作製したことにとどまっているので、小型でも実際のモータを作るなど実用に向けた考え方、③加速器は、加速器本体に至るまでは開発費が大幅にかかることを考えると、次のファンドに繋げる見通しが必要であり、ガントリーに関しては企業主導で継続して開発が進められるべきではないか、④NMR と⑤鉄道に関して JST 未来社会創造事業でさらなる発展が期待できるが、NMR に関しては未来社会事業で取り組む 1.3GHz-NMR とは異なっており、当初の目的であるコンパクト 800MHz の製品化に関する参画企業の見解などに関して、参画企業との協議により、評価用資料に記載できる内容があったのではないか。

３．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状況

3.1　全体評価

各課題で設定した技術開発は 10 年の年月を経て着実に進歩した点は高く評価できる。特に初期に設定した「イノベーションに資する成果」に関し、PO の指導によって適切に修正できた点は評価できる。産業創出の核となる技術の確立に資するという視点からは一定の成果は上がっており、また、応用に際しての技術課題が明確化され、その一部は、新しく研究プロジェクトで集中的に技術課題の解決にむけての技術開発が行われるなど、実用化に向けての流れが着実に大きくなっていることが読み取れる。一方で、成果が産業創出の核となり得るかどうかは課題毎に異なっているが、報告書の記載が曖昧で理解しにくい部分もあるのではないか。

3.2　個別評価

それぞれの課題ごとに産業創出の核となる技術の確立状況に関するコメントを記載する。

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」

高温超伝導 SQUID は、応用分野において競合技術に無い特徴を有しており、磁気的測定手法の実用性を実証している。特に、高温超伝導 SQUID として 77K で目標の 10fT/Hz$^{1/2}$

が実現できた点は高く評価できる。SQUID センサは高感度磁気センサとして多くの応用が考えられるので、センサ単体の事業化も望まれる。

本プロジェクトでは、磁気的免疫検査に集中することで成果が得られた点は評価できる。一方で、磁気的免疫検査における光学的手法との比較においては、得られた性能が「再現できた」となっており SQUID の高感度性のメリットが明確ではない。高感度による高速化は重要なメリットではないかと思われる。このような点を明確化することにより、産業の核として磁気的免疫検査が広くユーザに浸透できる様、一層の努力に期待したい。その過程において、実用化されている競合技術との優位さを示すためのさらなる研究開発が必要と考える。例えば、低温超伝導 SQUID との比較による優位性を明確化する必要があるのではないか。

② 「大出力超伝導回転機器に向けたキーハードの開発」

今回は平成 29 年 3 月に実施したテーマ中間評価以降の研究開発活動がないため、評価対象外とする。

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」

加速器に必要な 3 次元巻線技術を完成させ、実際のモデルコイルを作製、その性能の確認ができたことは高く評価できる。さらに実際にビームラインに導入し、その性能を実証できたことや、懸念であったビームロスに対す高い安定性を示せたこともすばらしい結果と判断できる。モデルコイルの焼損は残念であるが、その後の試験で固定方法が確立できた点で、ガントリー用高温超伝導マグネットの基盤技術は確立できたと考えられる。

重粒子線治療用加速器は、今後の需要が増えると考えられ、そのためには小型、低価格の加速器開発が必要である。研究グループが提案している FFAG 型加速器は直流励磁であり、HTS による超伝導化、小型化に適しており、開発によって市場の拡大が期待できると考える。常伝導 FFAG では加速器としての基本的な開発はされており、小型化が期待できる超伝導 FFAG の実用化が待たれる。本事業による加速器用超伝導磁石の開発手法は理にかなっており、実用化に必要な巻線技術、電磁力支持方法など基本的な技術開発の目処が立っていると考える。また、ビーム照射試験、ビームラインでの試験実施やコイル保護など、加速器開発に必要な基本的な情報も把握されている。

今回の技術開発成果が、今後、高温超伝導加速器の産業化において核となる技術につながることは確実であるが、今後の道のりも長いものと予想される。例えば、高温超伝導導体の信頼性、機械特性、コイル保護、価格など他テーマ（NMR）と共通の技術課題があり、継続した開発研究が必要である。このような観点からは、今回の技術開発により最終的に必要とされる技術のどの程度までを達成しているかのコメントも必要ではないか。

④「高温超伝導材料を利用した次世代 NMR 技術の開発」

当初目標である HTS を用いた NMR 装置を小型化する技術的な目処がたったことは大いに評価できる。HTS 検出プローブにおいても感度向上が期待できる。コイル保護や超伝導接合など HTS-NMR を市場化するためには技術的にさらなる検討を進めていく必要があるものの、低温金属プローブの市場への供給と高温超伝導プローブの実証は高く評価でき、今

後の事業化に期待したい。800MHz-NMR マグネットはトラブルで残念な結果であるが、その後の結果の成果報告書への追記が望まれる。引き続き修繕とテストを実施するとのことなので、NMR 信号取得による実証まで継続することが望まれる。プロジェクトが未来社会創造事業へと繋がるのは評価できるが、コンパクト 800MHz-NMR の実証結果は成果報告書への追記等で正確に記録に残すべきではないか。

このプロジェクトでは HTS として Bi-2223 を用いた小型 NMR の開発が行われたが、将来のことを考えるとより機械強度の高い REBCO の適用を視野に入れておく必要があると考える。NMR の高温超伝導化においては、一般的には Y 系線材の超伝導接続技術の開発による永久電流モードマグネットの NMR 応用が期待されている。今回の技術開発内容はこのような期待に応える方向の技術開発とはなっているが、プローブ技術以外は核となる技術につながる一歩手前の内容との評価もあり得るのではないか。一方、加速器と同じ技術課題があるので、情報を共有しながら開発を進めることが肝要である。NMR は市場の競争が激しいが、本課題で得られた HTS の採用による装置本体（磁石）の小型化によって優位性が確立されていくものと考える。

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」

目標の 10kA ケーブルを開発し、実際の鉄道路線での列車走行テストを成功させるなど今回の研究によって鉄道き電系の損失低減効果が実証できたことは評価できる。また、試験線だけでなく営業路線での試験を実施したことはユーザへのアピールという点で大いに評価できる。まさに産業創出の核となると考えられる。今後の実用へ期待したい。

一方で、本課題による装置が営業路線に採用されていくためには高い信頼性が必要であり、長期の信頼性試験が必要である。また、P0 のねらいの中で国際規格をとるといった記載もあり、準備室も立ち上げたとあるが、現状に関する記載がないようである。国際展開のために非常に重要な事柄であるため、国際規格取得にむけてのシナリオも含めた検討がなされているのであれば記載すべきであったのではないか。

今後、鉄道用超伝導ケーブルが国際的視点を含めてどのような産業になるのか、それに対して今回の技術開発内容が核になりうるのかどうかも含めて、自己評価があいまいとの指摘もあり得るのではないか。

3.3　今後の展開について

上記のように各課題とも最終目標の達成度は高い一方で、各課題とも 2050 年の実用化を睨んだ先の長い開発であるため、今後どうやって技術を発展させ、市場に浸透していくかが極めて重要である。このため、S-イノベ終了後の展開が重要である。NMR や鉄道は、JST の未来社会創造事業につながっていくとのことであり期待が持てるが、その他の課題についても製品化にまでにはさらなる研究開発が必要となると考えられ、具体的な道筋が必ずしも明確ではない。メンバーの企業が製品化への努力を続けるにしても何らかのサポートは必須であると考えられる。このための提言を報告書に盛り込むことも可能であったのではないか。

今回の技術開発は国内においては当然トップを行くものであるが、世界の中での位置づけが明確ではない。海外との比較において開発された技術がどういう位置を占めるのか、海

外からの評価はどうかなどの記述があれば成果の意義がさらにわかりやすかったと思われる。特に、近年中国での超伝導応用技術の進展が著しい状況もあり、競合優位性、市場性等については、国際競争力という視点でどう評価されるか、実際にどのような検討がなされたのかが報告書から読み取れない。もし既になされているのであれば、その点についての記載があるべきではないか。もしなされていないのであれば、国際優位性を得るための戦略の検討を提言すべきではないか。

４． その他

加速器課題では、S-イノベ終了後、文部科学省国家課題対応型研究開発推進事業、日本学術振興会の科学研究費補助金と国際共同研究加速基金、日米科学技術協力事業によって研究を引き続き実施しており、このような研究開発活動が産業化に向けて極めて重要である。他の課題でも同様であると考える。

また、実用化された時を想定し、今回の各々の課題における研究開発成果の貢献が世の中で理解されるような情報の発信ができるように備えておく必要がある。

以上

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」
テーマ事後評価会　評価委員名簿

（注：◎印は委員長）

氏名 （敬称略）	所属・役職
◎　秋田　調	一般財団法人電力中央研究所 専務理事
淡路　智	国立大学法人東北大学 金属材料研究所 教授
新冨　孝和	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構 名誉教授
筑本　知子	中部大学 教授
日高　睦夫	国立研究開発法人産業技術総合研究所 招聘研究員