

平成21年度経済産業省委託調査

平成21年度追跡評価調査事業
(超電導材料・超電導素子研究開発プロジェクトの
追跡評価のための調査)

報告書

平成22年3月

株式会社 日鉄技術情報センター

はじめに

研究開発の評価は、研究開発活動の効率化・活性化、優れた成果の獲得や社会・経済への還元等を図るとともに、国民に対して説明責任を果たすために、極めて重要な活動であり、このため、経済産業省では、「国の研究開発評価に関する大綱的指針」（平成20年10月31日、内閣総理大臣決定）等に沿った適切な評価を実施すべく「経済産業省技術評価指針」（平成21年3月31日改正）を定め、これに基づいて研究開発の評価を実施している。

高温超電導に関する研究開発は、1986年の液体窒素温度を超える高温で超電導現象が発現する酸化物超電導体（高温超電導体）の発見を発端とする、いわゆる「超電導フィーバー」が巻き起こったことが大きな契機となった。この高温超電導現象は非常に幅広い分野への波及効果が期待され、これ以降、世界中で非常に多くの研究開発が行われた。

今回の超電導材料・超電導素子研究開発追跡評価は、酸化物超電導体（高温超電導体）発見以降に、経済産業省で実施した超電導材料・超電導素子関係の主要研究開発プロジェクト（今回対象は11プロジェクト）を対象とした、超電導分野の追跡評価であり、対象とした研究開発プロジェクトが産業や社会に与えたインパクトについて明らかにするとともに、超電導分野の施策の在り方の妥当性を評価することによって、今後実施される研究開発プロジェクトや研究開発施策の戦略性を持った企画、運営方法、フォローアップ体制等の改善に資することを目的として行ったものである。

本書は、これらの調査結果を取りまとめたものである。

平成22年3月

株式会社 日鉄技術情報センター

目 次

第 I 章 超電導材料・超電導素子研究開発追跡評価報告書（案）

はじめに

評価小委員会委員名簿

追跡評価WG委員名簿

審議経過

評価結果の概要

第 1 章 評価の実施方法	1
1. 追跡評価の目的	1
2. 評価者	2
3. 評価対象	2
4. 評価方法	3
5. 評価項目・評価基準	3
第 2 章 研究開発プロジェクトの概要	10
第 3 章 評価	37
（施策評価関係）	37
1. 施策（超電導研究開発）の目的・政策的位置付けの妥当性	37
（1）施策（超電導研究開発）の目的の妥当性	37
（2）施策（超電導研究開発）の政策的位置付けの妥当性	41
（3）国の施策で行われるべき研究開発としての妥当性はあったか。国の関与が必要とされる研究開発施策であったか。	44
2. 施策（超電導研究開発）の構造及び目的実現見通しの妥当性	48
（1）現時点までにおいて得られた成果は妥当か。	48
（2）施策（超電導研究開発）の目的を実現するために研究開発プロジェクトを含む技術に関する事業が適切に配置されてきたか。それぞれの事業間での連携は適切に取られてきたか。	51
（3）個々の研究開発プロジェクト終了後のフォローアップの状況	53
3. 総合評価	55
（事業評価関係）	59
（超電導材料分野）	59
①産業科学技術開発「超電導材料・超電導素子」（昭和 63 年度～平成 9 年度）	59
②-1 産業科学技術開発「超電導応用基盤技術研究開発（I）」（平成 10 年度～平成 15	

年度)	62
②-2 産業科学技術開発「超電導応用基盤技術研究開発(Ⅱ)」(平成15年度～平成19年度)	64
③大型省エネルギー技術研究開発・ニューサンシャイン計画「超電導電力応用技術」(昭和63年度～平成11年度)	66
④ニューサンシャイン計画「超電導発電機基盤技術研究開発」(平成12年度～平成15年度)	68
⑤「超電導電力貯蔵システム要素技術開発調査」(平成3年度～平成10年度)	70
⑥「超電導電力貯蔵システム技術開発調査」(平成11年度～平成15年度)	72
⑦「超電導電力ネットワーク制御技術開発」(平成16年度～平成19年度)	74
⑧ニューサンシャイン計画「高温超電導フライホイール電力貯蔵研究開発」(平成7年度～平成11年度)	77
⑨ニューサンシャイン計画「フライホイール電力貯蔵用超電導軸受技術研究開発」(平成12年度～平成16年度)	80
⑩ニューサンシャイン計画「交流超電導電力機器基盤技術研究開発」(平成12年度～平成16年度)	82
(超電導素子分野)	85
①産業科学技術開発「超電導材料・超電導素子」(昭和63年度～平成9年度)	85
②-1 産業科学技術開発「超電導応用基盤技術研究開発(Ⅰ)」(平成10年度～平成15年度)	90
⑪「低消費電力型超電導ネットワークデバイスの開発」(平成14年度～平成18年度)	94

参考資料

1. 超電導材料・超電導素子研究開発の技術・産業・社会へのインパクトに関する追加調査 報告書
2. 同上報告書の概要

第Ⅱ章 実用化への進展度合についての調査	2-1

第Ⅲ章 プロジェクト成果からの技術的広がり具合及び経済効果の調査	3-1

第Ⅳ章 研究開発力向上効果	4-1

第Ⅴ章 追跡評価の審議を円滑にするための調査等	5-1

第 I 章

超電導材料・超電導素子研究開発

追跡評価報告書（案）

超電導材料・超電導素子研究開発
追跡評価報告書（案）

平成22年2月

産業構造審議会産業技術分科会

評 価 小 委 員 会

超電導材料・超電導素子研究開発追跡評価 WG

超電導材料・超電導素子研究開発
追跡評価報告書（案）

平成22年3月

産業構造審議会産業技術分科会

評 価 小 委 員 会

はじめに

研究開発の評価は、研究開発活動の効率化・活性化、優れた成果の獲得や社会・経済への還元等を図るとともに、国民に対して説明責任を果たすために、極めて重要な活動であり、このため、経済産業省では、「国の研究開発評価に関する大綱的指針」（平成20年10月31日、内閣総理大臣決定）等に沿った適切な評価を実施すべく「経済産業省技術評価指針」（平成21年3月31日改正）を定め、これに基づいて研究開発の評価を実施している。

高温超電導に関する研究開発は、1986年の液体窒素温度を超える高温で超電導現象が発現する酸化物超電導体（高温超電導体）の発見を発端とする、いわゆる「超電導フィーバー」が巻き起こったことが大きな契機となった。この高温超電導現象は非常に幅広い分野への波及効果が期待され、これ以降、世界中で非常に多くの研究開発が行われた。

今回の超電導材料・超電導素子研究開発追跡評価は、酸化物超電導体（高温超電導体）発見以降に、経済産業省で実施した超電導材料・超電導素子関係の主要研究開発プロジェクト（今回対象は11プロジェクト）を対象とした、超電導分野の追跡評価であり、対象とした研究開発プロジェクトが産業や社会に与えたインパクトについて明らかにするとともに、超電導分野の施策の在り方の妥当性を評価することによって、今後実施される研究開発プロジェクトや研究開発施策の戦略性を持った企画、運営方法、フォローアップ体制等の改善に資することを目的として行ったものである。

評価は、評価小委員会の下に当該分野の専門家や有識者から成る「超電導材料・超電導素子研究開発追跡評価WG」（座長：菊池 純一 青山学院大学教授。以下、「追跡評価WG」という。）を設置し、審議する体制で行った。

追跡評価WGでは、超電導材料・超電導素子研究開発の参加者や当該技術分野の動向に詳しい専門家へのインタビュー調査、更に文献調査等で得られた最新の情報も参考にして審議を行い評価報告書案を作成した。

本書は、これらの評価結果を取りまとめたものである。

平成22年3月

産業構造審議会 産業技術分科会 評価小委員会

産業構造審議会産業技術分科会評価小委員会
委 員 名 簿

委員長	平澤 治	東京大学 名誉教授
委 員	池村 淑道	長浜バイオ大学バイオサイエンス学部 教授
委 員	伊澤 達夫	東京工業大学 理事・副学長
委 員	大島 まり	東京大学大学院情報学環 教授 東京大学生産技術研究所 教授
委 員	菊池 純一	青山学院大学法学部・大学院法学研究科 ビジネス法務専攻 教授
委 員	鈴木 潤	政策研究大学院大学 教授
委 員	辻 智子	日本水産株式会社 生活機能科学研究所長
委 員	富田 房男	放送大学北海道学習センター 所長
委 員	中小路 久美代	株式会社S R A先端技術研究所 取締役 東京大学先端科学技術研究センター 特任教授
委 員	山地 憲治	東京大学大学院工学系研究科 教授
委 員	吉本 陽子	三菱UFJリサーチ&コンサルティング株式会社 経済・社会政策部 主任研究員

(敬称略、五十音順)

事務局：経済産業省 産業技術環境局 技術評価室

産業構造審議会産業技術分科会評価小委員会
超電導材料・超電導素子研究開発追跡評価WG委員名簿

座 長	菊池 純一	青山学院大学法学部・大学院法学研究科ビジネス法務専攻 教授
委 員	岸尾 光二	東京大学 大学院工学系研究科 応用化学専攻 教授
委 員	熊倉 浩明	独立行政法人 物質・材料研究機構 超伝導材料センター センター長
委 員	齊藤 隆	株式会社フジクラ 超電導プロジェクト室 室長
委 員	高木 一正	独立行政法人 科学技術振興機構 研究振興支援業務室 上席主任調査員
委 員	田島 進	日経BP社 電子・機械局 主任編集委員
委 員	早川 尚夫	名古屋大学 名誉教授
委 員	原 築志	東京電力株式会社 技術開発研究所 所長

(敬称略、五十音順)

事務局：経済産業省 産業技術環境局 技術評価室

超電導材料・超電導素子研究開発追跡評価
審議経過

○第1回超電導材料・超電導素子研究開発追跡評価WG（平成21年12月25日）

- ・追跡評価WGの公開について
- ・追跡評価の実施について
- ・評価対象研究開発プロジェクトについて
- ・評価項目の設定について
- ・追跡調査結果の報告について
- ・追跡評価の検討について
- ・評価コメント票の検討について
- ・評価報告書の構成について
- ・今後の予定について
- ・質疑応答

○第2回超電導材料・超電導素子研究開発追跡評価WG（平成22年2月24日）

- ・追跡評価報告書（案）について
- ・質疑応答

○産業構造審議会産業技術分科会評価小委員会（平成22年3月25日）

- ・追跡評価報告書（案）について
- ・質疑応答

目 次

はじめに

評価小委員会委員名簿

追跡評価WG委員名簿

審議経過

評価結果の概要

第1章 評価の実施方法	1
1. 追跡評価の目的	1
2. 評価者	2
3. 評価対象	2
4. 評価方法	3
5. 評価項目・評価基準	3
第2章 研究開発プロジェクトの概要	10
第3章 評価	37
(施策評価関係)	37
1. 施策（超電導研究開発）の目的・政策的位置付けの妥当性	37
(1) 施策（超電導研究開発）の目的の妥当性	37
(2) 施策（超電導研究開発）の政策的位置付けの妥当性	41
(3) 国の施策で行われるべき研究開発としての妥当性はあったか。国の関与が必要とされる研究開発施策であったか。	44
2. 施策（超電導研究開発）の構造及び目的実現見通しの妥当性	48
(1) 現時点までにおいて得られた成果は妥当か。	48
(2) 施策（超電導研究開発）の目的を実現するために研究開発プロジェクトを含む技術に関する事業が適切に配置されてきたか。それぞれの事業間での連携は適切に取られてきたか。	51
(3) 個々の研究開発プロジェクト終了後のフォローアップの状況	53
3. 総合評価	55

(事業評価関係)	59
(超電導材料分野)	59
①産業科学技術開発「超電導材料・超電導素子」(昭和 63 年度～平成 9 年度)	59
②-1 産業科学技術開発「超電導応用基盤技術研究開発 (Ⅰ)」(平成 10 年度～平成 15 年度)	62
②-2 産業科学技術開発「超電導応用基盤技術研究開発 (Ⅱ)」(平成 15 年度～平成 19 年度)	64
③大型省エネルギー技術研究開発・ニューサンシャイン計画「超電導電力応用技術」(昭和 63 年度～平成 11 年度)	66
④ニューサンシャイン計画「超電導発電機基盤技術研究開発」(平成 12 年度～平成 15 年度)	68
⑤「超電導電力貯蔵システム要素技術開発調査」(平成 3 年度～平成 10 年度)	70
⑥「超電導電力貯蔵システム技術開発調査」(平成 11 年度～平成 15 年度)	72
⑦「超電導電力ネットワーク制御技術開発」(平成 16 年度～平成 19 年度)	74
⑧ニューサンシャイン計画「高温超電導フライホイール電力貯蔵研究開発」(平成 7 年度～平成 11 年度)	77
⑨ニューサンシャイン計画「フライホイール電力貯蔵用超電導軸受技術研究開発」(平成 12 年度～平成 16 年度)	80
⑩ニューサンシャイン計画「交流超電導電力機器基盤技術研究開発」(平成 12 年度～平成 16 年度)	82
(超電導素子分野)	85
①産業科学技術開発「超電導材料・超電導素子」(昭和 63 年度～平成 9 年度)	85
②-1 産業科学技術開発「超電導応用基盤技術研究開発 (Ⅰ)」(平成 10 年度～平成 15 年度)	90
⑪「低消費電力型超電導ネットワークデバイスの開発」(平成 14 年度～平成 18 年度)	94

参考資料

1. 超電導材料・超電導素子研究開発の技術・産業・社会へのインパクトに関する追加調査 報告書
2. 同上報告書の概要

評価結果の概要

(施策評価関係)

1. 施策（超電導研究開発）の目的・政策的位置付けの妥当性

(1) 施策（超電導研究開発）の目的の妥当性

1986 年（昭和 61 年）の高温超電導体の発見は、幅広い技術分野でのパラダイムシフトを起こすと信じられ、学術面のみならず、応用面からも学会や産業界から、この物質に対する大きな期待が膨らんだ。この高温超電導という新たな性質を持つ新規物質を工業的に利用可能なものとして、新たな産業を生み出すための基盤技術を確立するというプロジェクト開始時の施策の目的は妥当であった。昭和 63 年度という高温超電導体の黎明期の、その発展の方向性を明確にするための研究開発プロジェクトとして施策を展開したことは、特にエネルギーや環境問題に関連する超電導材料の持つ大きなポテンシャルを踏まえておりおおむね妥当なものであった。実際に、産学官の多くの研究者を動員して、短期間に基本的なプロセス技術、課題、開発の方針などを整理し、多くの成果を得た。具体的にはセラミックス材料である高温超電導体を柔軟な線材に適用する基礎技術や、高温超電導の物性を評価する上で重要な単結晶の育成技術、電子デバイス用の高品質な薄膜の合成技術、強い磁界を捕捉するバルク超電導体の開発など、数々の成果を生み出し、我が国の高温超電導研究を短期間に世界最高レベルにすることができた。

超電導現象に基づいて動作する各種大型機器や小型素子デバイスは、自然エネルギーの有効利用、環境保全と高度情報社会を支える応用基盤技術として期待される。また、研究成果の進展に合わせて研究目的を材料開発、機器開発へと順次移行してきており、省エネルギー化を目指し、電力・エネルギー分野の社会的ニーズに適合した開発目標を立てている。

これらの研究開発プロジェクトは金属系超電導材料、機器の開発プロジェクトにおいては具体的な技術展開、目標が定められており、また高温超電導材料においては拡張性を有する目的となっており、その後のプロジェクトへ内容の整理がなされた上で継承されている。同様に、素子分野に関しては、超電導三端子素子開発を目標に掲げたことは間違っていないが、酸化物超電導体の高品質薄膜形成および接合形成の難しさから SFQ 素子に目標を変えて継承されたことは適切であった。

一方、結果論であるが、高温超電導体の実用化を急ぎすぎたきらいがあったと思う。物質（材料）の実用化のためには、性能面だけではなく、コストや信頼性、耐久性など、多くの関門をクリアしなければならない。例えば、超電導発電機や SMES、超電導フライホイールなどでは、超電導機器の高いコストの問題、SFQ 回路では集積度に見合った応用対象設定などが挙げられる。

着手から20年を越えてもなお、政策主導の研究開発が進められている。総合施策として全体を俯瞰的に眺め、個々の課題が有機的かつ流動的に実施されて来たか個々の研究開発プロジェクトに係る中間的評価、事後的評価にとどまることなく、蓄積された技術的成果が作り出す可能性（技術的な鉅脈）について再点検をする必要があったといえる。

（２）施策（超電導研究開発）の政策的位置付けの妥当性

1986年の高温超電導物質発見後、我が国がすぐさま産学官による議論と検討を始め、いち早く我が国の重要施策・国家プロジェクトとして立ち上げたことは高く評価できる。これは、1980年代当時の我が国が米国との研究競争を繰り広げており、その影響を受けた政府としての判断だったと推測されるが、超電導応用の全分野を対象に大規模な研究開発の拠点を構築することにより、我が国が超電導研究開発のリーダーとして最新の研究成果を発信し続け、国際的に先導するポジションを明確に維持していたのであり、このことは施策の大きな成果であった。また、高温超電導発見以前から世界的に問題となっていた環境・エネルギー問題に対して、特に省エネルギーの観点から研究開発を進める本施策はおおむね妥当であった。

後継のプロジェクトで、目的が具体的になり、実用性も見えてきた点でも政策的妥当性は高かった。中でも超電導ケーブルは実証研究が主体であり、我が国でも実証プロジェクトを開始したことは評価できる。また、超電導素子の高速特性と低消費電力特性は、当初からプロジェクト推進の要因である。その中で、低消費電力特性が現在の省エネルギー政策の目的に合致している。

以上のとおり超電導研究開発の政策的妥当性は適切とあると考えられ、超電導研究開発を着実に推進してきたことにより、我が国の超電導技術は世界最高水準に達しており、それが他国の政策決定の指標にもなっている。しかしながら、実用化にはより多くの技術力の成熟化とコストダウンが必要であり、引き続き研究開発を推進することが重要である。

一方、超電導素子は、単体のトランジスタ性能では優れているものの、システム技術の進歩が著しいSi半導体との間で、システム性能の差は歴然としてしまった。このような競争軸の変化への対応の遅れは国家プロジェクトのマイナス面であったと思われる。プロジェクトの推進体制において再委託型の予算配分組織編成がなされているが、研究開発の成果に係る利用関係を構築するという視点からして、例えば、基礎理論の成果と応用開発の成果のフェーズを合わせることが困難であったことからして、何らかの新たな推進機能を付与すべきであった。例えば高温超電導材料の粒界弱結合などの材料としての難しさが早い段階で認識されていた面もあり、基礎研究にシフトすべきテーマもあった。

（３）国の施策で行われるべき研究開発としての妥当性はあったか。国の関与が必要とされる研究開発施策であったか。

超電導はその物理的発現機構がいまだに不明で複雑な現象であり、これを応用した画期

的、先端的なエンジニアリングを実現し社会に貢献するためには、新物質探索から始まって、材料化（高特性化）、デバイス化、機器への実際の組み込み、意図する基本設計動作の検証、実証試験、実際の製品化等を繰り返し、長期間にわたるさまざまな角度からの研究が行なわれなければならない。高温超電導体のプロジェクトが始まった当時は、この材料についての基礎的理解ができていないのに応用面の期待だけが膨らみ、研究フィーバーが発生、国際競争が激しい状態であった。このような状況下、多くの企業間の協力を得て、共通する材料探索、薄膜技術など基盤技術開発を国がリードして行ったことは国として妥当であったと考える。限られた民間企業のみにより開発を実施するには、開発リスクも含めた経済的負担が極めて大きく、国が主導する長期的な総合プロジェクトとして実施しなければ実現し得ない。この点、我が国の科学技術政策の重要な研究課題の一つとして、超電導研究の推進を選んだことは誠に意義深かった。

超電導には低温環境が必要であり、システムも巨大になるという点でも国が主導で研究開発を推進する必要があった。

上記の種々の要因から、超電導分野は、国の関与が必要な分野であったと評価する。むしろ、産業政策としてどこまで国が関与すべきかの視点に着目した場合、例えば、素子分野の研究開発ステージは、産業技術という発展プロセスから見て **SQUID** や **SFQ** のケースが典型であるように、必ずしも良好な見通しであるとは言えない。しかし、材料分野での、米国 **Albany** における日米共同での超電導ケーブル実証プロジェクトの展開に見られるような動きも勘案すると、今後、中国や韓国等を含めたグローバルな展開も必要であると考ええる。

超電導技術は、技術的にも社会を大きく変える可能性を秘めているが、超電導線材、超電導機器組立、冷凍技術等広範囲かつ高度な技術の集積が必須であり、国が積極的に関与したことが世界的な成果につながっている。超電導素子に関しては、文部科学省の **SFQ** 素子の研究がネットワークデバイスのプロジェクトで生きている。その点からも国の関与は妥当であった。

一方、超電導技術の応用分野に関連する省庁は多数あり、経済産業省ほか、文部科学省や国土交通省等の省庁間の協力と連携は、一部で見られるものの必ずしも十分ではなかった。また、プロジェクトの中盤以降、開発すべき応用機器の対象が絞られて来た時点で、プロジェクトの発足前に、実用化や産業化の可能性を評価すべきであった。国家プロジェクトであるがために経済原理が働かない、という弊害がなかったかどうか、今後のためにも検証していく必要がある。

2. 施策（超電導研究開発）の構造及び目的実現見通しの妥当性

（１）現時点までにおいて得られた成果は妥当か。

超電導線材の開発においては、「超電導材料・超電導素子」プロジェクトや「超電導電力応用技術」プロジェクトの成果が、その後の「交流超電導電力機器基盤技術研究開発」プロジェクトや「超電導応用基盤技術研究開発」プロジェクトなどの次のプロジェクトに活かされている。超電導発電機開発成果はその後のY系モーター、超電導電力貯蔵研究開発では金属系超電導システム、高温超電導システムに有効に活かされている。

具体的には、線材・ケーブル技術は、電力送電ケーブル、電力貯蔵（SMES）装置、産業用マグネット、冷凍機の製品に繋がり、また、低温工学の発展に寄与した。

高温超電導線材開発に関しては、世界的にも最高レベルを維持し、機器開発に必要な性能が実現できるレベルにまで来ており、プロジェクト間での技術継承も適切に行われてきたと考えられる。

高温超電導素子の分野では、フィルターや SQUID で実用に供されている。これらの素子作製にはこれまで集積回路作成を目的に実施されたプロジェクトで蓄積された材料技術が活かされている。

一般的に新しい材料を実用化にまで持っていくためには多くの関門をクリアする必要があることを考慮すると、現在の高温超電導体の開発状況は、実用化とは言えないレベルではあるが、おおむね妥当な成果であると思われる。

一方、単なる費用対効果という評価指標をもって判断すべきではないが、20数年間に渡り、約1000億円相当の研究開発プロジェクトを展開してきたという努力に比べて、その経済的価値を有した自立的市場は必ずしも顕在化していない。これは、技術そのものが実用化段階にまで到達していない、技術はあっても現在ではコスト的に引き合わない、また技術が巨大であって技術を実現化するにはその時が来っていないなどの理由が挙げられよう。実用化できない理由の多くが、経済性、冷却技術、超電導以外の競合技術だとすると、国家プロジェクトでも、ニーズ志向を強くすることも必要である。いわゆる、超電導ブーム時代を越えた現時点においては、より一層、技術の融合領域を開拓すべく、施策の構造をバックキャスト型（将来の社会的与益を見定めて現在の技術開発を戦略的に展開する方法）に転換することも検討すべきであろう。

実用化が難しいと認識されて実用化研究が先送りされたプロジェクトもあったが、このような見極めを早めて、選択と集中をもう少し早期に実施しても良かった。

また、SFQ ロジック素子などは動作原理についての実証（検証）はされたが期待されたほどの集積度と性能の実現に至っていないと感じられる。ただ単にこれまでの開発スタイルを延長するだけでなく、別視点からの検討も含んだ将来のプロジェクトが提案されることが望ましい。また、IT分野での実用化には、SFQ 素子・回路の一層の高集積化と周辺技術の高度化が必要であるが、市場規模が小さいが実用性のある開発研究のサポートも必要

である。

（２）施策（超電導研究開発）の目的を実現するために研究開発プロジェクトを含む技術に関する事業が適切に配置されてきたか。それぞれの事業間での連携は適切に取られてきたか。

高温超電導が発見された当初において、全体として研究開発の目的を明確にして、いくつかの特化したテーマを設定して進めたことは評価できる。また、平成 10 年度以降のプロジェクトも実用化が期待できるテーマに絞って研究開発を進めた点も評価でき、設定された目的の範囲において、関連する事業展開は適切に行われてきた。線材開発プロジェクトで超電導線を開発し、それを超電導ケーブルプロジェクトへ提供するなどの事業間の連携も適切になされた。超電導素子の分野では目標の変遷があったが、プロジェクトが重複することではなく、事業の配置や、事業間での連携に、特に大きな問題はなかったといえよう。複数のプロジェクトにおいて高温超電導線材の研究開発を推進した結果、世界トップレベルの技術力を確立することにつながった面もある。

一方、個々のプロジェクトの目的を越えた連携を可能にするような弾力的な体制が、予算管理の面からも必要であった。他の国家プロジェクトや民間での研究も含めて、プロジェクト間の連絡・調整が必ずしも十分ではなかったケースもあった。文部科学省などと連携して国の超電導研究を総合的に考える必要があったのではないかと考えられる。

なお、個別の研究課題ごとにはロードマップは作られていたが、超電導技術全体を俯瞰的に見たロードマップは技術戦略マップ作成前は作られていなかった。施策全体に対する俯瞰的な観点から、当時において超電導技術全体を俯瞰するロードマップが作成されていれば、研究開発プロジェクトのより適切な配置が可能であったのではないかと考えられる。

（３）個々の研究開発プロジェクト終了後のフォローアップの状況

高温超電導材料に関して、発見初期の物質探索、機構解明により、実用化が有望な材料として B i 系および Y 系を選択し、線材化、高性能化を経て機器開発へと研究開発プロジェクトを引き継いできている。

例えば、Y 系高温超電導線材は「超電導電力応用技術」プロジェクトにおける基礎的な研究成果が、その後「超電導応用基盤技術研究開発」へと継承されⅠ期に 50m 長、Ⅱ期において 500m 長への成果と継承された。

実用化されたものはまだないが、Y 系線材は、これまでのプロジェクトの成果が適切に引き継がれて実用化に近いレベルにまで来た。フォローアップ体制が適切であったためである。

このようにプロジェクト終了後のフォローアップ体制が不適切であったという事例は、超電導材料分野、超電導素子分野のいずれでもとくに確認できない。

一方、途中で中断したプロジェクトの総括、研究開発再開の是非などの議論が必要では

ないか。

なお、プロジェクトのフォローアップは、技術的可能性が高いと判断した領域に傾斜している。効率的な資金配分という視点からすれば、妥当であるといえる。しかし、ある程度の技術的蓄積がなされているはずであるから、特に、用途開発探索型の後継プロジェクトを立案すべきであった。今後は、課題の選択と集中を行い、わが国の戦略産業として開発に取り組むべきである。

3. 総合評価

高温超電導発見という突発的な出来事に迅速に対応して、産学官連携の大規模な研究開発プロジェクトを構築し、基盤研究のレベルで多くの成果を上げたという意味で、一連の超電導プロジェクトは高く評価する。多くの研究者が参加し、論文や特許などの知的財産を蓄積した。なにより、このプロジェクトを通じて得た超電導の科学や技術に関する知見は、我が国だけでなく、これからの世界の科学技術発展に大きく貢献するだろう。

超電導材料分野では、これまで実用化時の効果や波及効果が大きい電力機器の開発を主体として実施されてきており、成果も計画策定時の想定を上回るものも多く得られてきている。超電導素子分野では、20数年に及んで継続してきた超電導素子プロジェクトはその当時の社会的要請に合わせた目標を設定し、プロジェクト間の技術的な継続が行われてきたので、施策的には妥当であったと言える。

今後、慎重に議論すべきであるが、超電導技術は（電力応用、デバイスも）、地球温暖化対策に非常に重要になるもので、この実用化は国家戦略として取り組む必要がある技術であると考ええる。

しかし、20年強の超電導研究開発を概括して見ると、一連の高温超電導体が発見されて、いわゆる超電導フィーバーが起こり、超電導応用について多くの期待が持たれたが、現実の高温超電導体は従来の金属系超電導体とはかなり違っており、実用化のためには多くの課題を克服する必要があること、そのためには時間がかかることは、早い時期から専門家の間では認識されていたと思う。このような点を十分に踏まえて、長期的な展望に立った計画の下で時間をかけて超電導プロジェクトを推進すべきであったと思う。超電導に限らず新しい材料を実用化するためには、多くの関門があり、長期的な展望に立ってこれらを一つ一つ解決していくことが必要であり、そのためには時間がかかることを国民にも理解してもらう必要があると思う。

また、各プロジェクトを概括して見た場合、基礎・応用・開発という単線的なモデル図式に基づく、プロジェクトの展開が長年続いてきたといえる。したがって、産業技術としての利用分野は、かなり限定的になっている面があり、派生技術の広がりについても必ずしも体系的にはなされていない。今後は、「安全・安心の分野」「グリーン・テクノロジーの融合分野」などを含め、より一層、複線的なモデル図式に基づく、研究開発プロジェクトを立案すべきである。複数の研究開発プロジェクトの研究開発の成果が具体化した場合には、技術マップの図面上に展開して、更なる展開の可能性について、あるいは、利益相反の可能性等についての検討が市場予測に役立つと考えられる。

超電導材料分野では、今後、冷却システムの高性能化および低コスト化研究や、開発した機器の長期信頼性評価研究など、機器の実用化に不可欠な技術開発項目の継続推進を期待する。一方、機器開発段階にある研究開発については、線材の技術レベル（シーズ面）、事業化の見通し（ニーズ面）の両面からの精査を節目ごとに実施し、シーズ面、ニーズ面

での乖離がある場合には、研究開発の機動的な見直しや改善を図ることが望ましい。さらに実社会へ早期に技術を展開するためには、電力機器のみならず一般機器へも、この超電導技術を普及させるための技術開発の促進を行い、ここで得られた研究開発成果を再度、電力機器の実用化に反映させることが出来れば、より早期に実用化が見込まれるとともに相乗効果が期待できる。加えて、標準化戦略を引き続き推進していただきたい。

超電導素子分野では、成果としては着々と積み上げてきたが、研究成果を実用に供する点に関しては、長期間にわたる研究開発を考えると十分とはいえないのも事実である。低温超電導素子と高温超電導素子の開発は車の両輪のように並行して実施し、それぞれの特徴を活かす出口を探るべきものとする。

研究開発プロジェクトの実用化への運営面の観点からみると、まったく新しい分野である高温超電導研究は、実用化に結びつくかどうかが見えにくく、純粋に技術的な問題ではなく、コストなど経済的な理由で実用化しなかったテーマもあった。工業化と新しい産業分野の育成を目指す研究開発プロジェクトとしては、プロジェクトの運営システムのどこかに問題があったと言わざるを得ない。

経済産業省では、研究開発プロジェクトの運営も、新規の産業を作り出し、雇用を創出することに基準を置いている。研究者の雇用確保や知財の蓄積ももちろん極めて重要なことではあるが、これからの活力ある新産業の創出に結びつく研究プロジェクトの立案に、この超電導プロジェクトの経験をぜひ生かしてほしい。

今回の追跡評価は、20数年の間に展開されてきた研究開発施策の中間評価的な位置づけにあたると考える。今求められていることは、国の発展すべき方向の先にどのような社会の姿を描こうとしているのか、そのグランド・デザインを支える技術的基盤は確保されているのかを知ることである。超電導の科学的知見と技術的蓄積は膨大なものであり、これからのオープンイノベーション施策の核となることを期待する。

第 1 章 評価の実施方法

追跡評価は、「経済産業省技術評価指針」(平成 14 年 4 月 1 日経済産業省告示第 167 号、平成 21 年 3 月 31 日改正。以下、「評価指針」という。)に基づいて以下のとおり行われた。

1. 追跡評価の目的

経済産業省が実施してきた研究開発プロジェクトは多数存在しているが、近年、それらの研究開発成果の迅速な実用化や、それに伴う日本企業の競争力強化及び市場創出等が重要とされている。

このため、本追跡評価では研究開発プロジェクトが技術・産業・社会に与えたインパクトについて明らかにすることに加え、研究開発プロジェクトの成果の実用化へ向けた推進体制や学会等における研究開発プロジェクト終了後の動向をフォローアップし、現在の視点から総合的に評価することにより、今後実施される研究開発プロジェクトの戦略性を持った企画、予算、運営方法、フォローアップ体制等の改善に資することを目的とする。

なお、評価指針において評価の目的は

- ・評価を適切かつ公正に行うことにより、研究者の創造性が十分に発揮されるような、柔軟かつ競争的で開かれた研究開発環境の創出など、より良い政策・施策の形成等につなげること。
- ・評価を支援的に行うことにより、研究開発の前進や質の向上、独創的で有望な優れた研究開発や研究者の発掘、研究者の意欲の向上など、研究開発を効果的・効率的に推進すること。
- ・高度かつ専門的な内容を含む技術に関する施策・事業の意義や内容について、一般国民にわかりやすく開示すること。
- ・評価の結果を技術に関する施策・事業の継続、拡大・縮小・中止など資源の配分へ反映させることにより資源の重点化及び効率化を促進すること。また、研究開発をその評価の結果に基づく適切な資源配分等通じて次の段階に連続してつなげることなどにより、研究開発成果の国民・社会への還元効率化・迅速化に資すること。

とされている。

また、経済産業省では、平成 21 年 3 月 31 日に評価指針を改正し、「技術に関する施策の評価」を導入した。この改正に伴い、同様の目標を有する複数の研究開発事業の評価を束ねることにより、各事業(研究開発プロジェクト)ごとの評価に加えて、事業のまとまりを俯瞰した評価も実施することとした。これは、ある技術分野全体の方向性を勘案しつつ、同様の目的を有する研究開発プロジェクトのまとまりを俯瞰し、個々の事業評価では

見ることでできなかった各研究開発プロジェクトの相互関係の明確化、他省庁の研究開発プロジェクトとの役割分担の明確化等を目的としたものである。

今回の「超電導材料・超電導素子研究開発追跡評価」は、1986年の酸化物超電導体（高温超電導体）の発見以降、超電導現象の実用化に向けて多くの研究開発プロジェクトが実施されており、研究開発プロジェクトの成果を後継プロジェクトで更に深化させていく過程が随所に見られることから、単独の研究開発プロジェクトで評価することは困難と判断し、施策評価の視点から超電導分野の研究開発施策の評価を追加することとした。

2. 評価者

本追跡評価WGは、産業構造審議会産業技術分科会評価小委員会において、同評価小委員会の下に新たに設置することが了承された。評価指針で評価者は、分野の専門性をバックグラウンドに持つ専門家、経済社会のニーズ、研究開発の波及等について指摘できる有識者等の外部評価者と定められている。これに基づき、8名が選任された。なお、本追跡評価WGの事務局については技術評価指針に基づき、経済産業省産業技術環境局産業技術政策課技術評価室が担当した。

3. 評価対象

「超電導材料・超電導素子研究開発追跡評価」では、1986年の酸化物超電導体（高温超電導体）の発見以降、昭和63年から平成19年度にかけて経済産業省で実施された超電導関係の主要研究開発プロジェクトである11プロジェクトを対象に追跡評価を行った。なお、超電導材料分野と超電導素子分野では、開発目標等が大きく異なることから、施策評価でも必要な場合には、超電導材料と超電導素子について分けて記述し、研究開発プロジェクトの評価でも分けて評価した。（同一研究開発プロジェクト内に材料分野と素子分野の両方が含まれる場合には、それぞれ別々に評価した。）

対象研究開発プロジェクト

（超電導材料分野）

- ①産業科学技術開発「超電導材料・超電導素子」（昭和63年度～平成9年度）
- ②-1 産業科学技術開発「超電導応用基盤技術研究開発（Ⅰ）」（平成10年度～平成15年度）
- ②-2 産業科学技術開発「超電導応用基盤技術研究開発（Ⅱ）」（平成15年度～平成19年度）
- ③大型省エネルギー技術研究開発・ニューサンシャイン計画「超電導電力応用技術」（昭和63年度～平成11年度）
- ④ニューサンシャイン計画「超電導発電機基盤技術研究開発」（平成12年度～平成15年度）

- ⑤「超電導電力貯蔵システム要素技術開発調査」（平成 3 年度～平成 10 年度）
- ⑥「超電導電力貯蔵システム技術開発調査」（平成 11 年度～平成 15 年度）
- ⑦「超電導電力ネットワーク制御技術開発」（平成 16 年度～平成 19 年度）
- ⑧ニューサンシャイン計画「高温超電導フライホイール電力貯蔵研究開発」（平成 7 年度～平成 11 年度）
- ⑨ニューサンシャイン計画「フライホイール電力貯蔵用超電導軸受技術研究開発」（平成 12 年度～平成 16 年度）
- ⑩ニューサンシャイン計画「交流超電導電力機器基盤技術研究開発」（平成 12 年度～平成 16 年度）

（超電導素子分野）

- ①産業科学技術開発「超電導材料・超電導素子」（昭和 63 年度～平成 9 年度）
- ②-1 産業科学技術開発「超電導応用基盤技術研究開発（Ⅰ）」（平成 10 年度～平成 15 年度）
- ⑪「低消費電力型超電導ネットワークデバイスの開発」（平成 14 年度～平成 18 年度）

4. 評価方法

対象プロジェクトの評価を実施するに際して、対象プロジェクトに関する文献調査や、実施当時の参加者等へのインタビュー調査を中心に、超電導分野の技術開発施策や研究開発活動・研究開発成果が技術、経済及び社会に及ぼした波及効果を調査・分析・整理し、その追跡調査結果に基づいて、追跡評価項目に沿った評価コメントをとりまとめ、審議を行うといった手順で評価作業を進めた。

当該追跡調査は、中立性・客観性を確保するため、第三者機関である（株）日鉄技術情報センターに委託し実施された。

5. 評価項目・評価基準

本追跡評価WGにおいては、「1. 追跡評価の目的」で述べたように、多くの研究開発プロジェクトを俯瞰的に評価する施策評価と研究開発プロジェクトの追跡評価を併せて実施することとしたため、経済産業省産業技術環境局産業技術政策課技術評価室において平成 21 年 6 月に改正した「経済産業省技術評価指針に基づく標準的評価項目・評価基準について」（以下、「標準的評価項目・評価基準」という。）を修正して使用することとした。具体的には、標準的評価項目・評価基準の「Ⅰ. 技術に関する施策評価」の中間・事後評価の評価項目並びに「Ⅲ. 追跡評価」の「Ⅰ. 波及効果に関する評価」及び「Ⅱ. 現在の視点からのプロジェクトの評価」の評価項目を合わせ、「Ⅲ. 追跡評価」の評価項目中で施策評価で実施した方が適切な項目を移動させる等の修正を行った。新たに作成した評価項目・評価基準案を第 1 回の WG で承認を受け、これを使用して評価した。

以下の枠内は、WGで承認された評価項目・評価基準である。

追跡評価項目・評価基準

- ・ は評価の視点、丸囲み数字（①、②・・・）は評価基準の例を示す。

（施策評価関係）

1. 施策（超電導研究開発）の目的・政策的位置付けの妥当性

（1）施策（超電導研究開発）の目的の妥当性

- ・ 超電導研究開発の目的が波及効果、時期、主体等を含め、具体化されているか。
- ・ それぞれの超電導研究開発プロジェクト又は後継プロジェクトの移行時において、技術的課題は適切に取捨選択・整理され、目的に至る具体的目標は立てられていたか。
- ・ 実施された超電導研究開発プロジェクトの目的は、社会的ニーズに適合し、出口（事業化）を見据えた内容になっていたか。また、研究開発プロジェクトの目的は、時代の進行とともに、より具体的な内容が設定されるよう見直されてきたか。

（2）施策（超電導研究開発）の政策的位置付けの妥当性

- ・ 施策（過去に実施されてきた超電導研究開発）の政策的位置意義（上位の政策との関連付け、類似施策との関係等）は高かったか。また、時代の進行とともに施策の目的が修正されてきた場合には、引き続き施策の目的の政策的妥当性は高かったか。
- ・ 国際的な超電導研究開発の動向に適合していたか。

（3）国の施策で行われるべき研究開発としての妥当性はあったか。国の関与が必要とされる研究開発施策であったか。

- ・ 国として取り組む必要のある研究開発施策であったか。当省の関与が必要とされる研究開発施策であったか。
- ・ 必要に応じ、省庁間連携は組まれてきたか。

2. 施策（超電導研究開発）の構造及び目的実現見通しの妥当性

（1）現時点までにおいて得られた成果は妥当か。

- ・ 現在実施されている超電導研究開発は、過去の研究開発成果を適切に活用しているか。
- ・ 過去に終了した研究開発プロジェクトで実用化に至らなかったプロジェクトであっても適切な波及効果が得られているか。

（2）施策（超電導研究開発）の目的を実現するために研究開発プロジェクトを含む技術に関する事業が適切に配置されてきたか。それぞれの事業間での連携は適切に取られてきたか。

（3）個々の研究開発プロジェクト終了後のフォローアップの状況

- ・個々の研究開発プロジェクトの成果の実用化や普及に対して、プロジェクト終了後のフォローアップ体制は適切であったか。
- ・後継のプロジェクトに引き継ぐ際には、適切な引き渡しが行われていたか。
- ・個々の研究開発プロジェクトの成果の実用化や研究開発基盤の構築等によって、その後の産業戦略、技術戦略等への影響があったか。

3. 総合評価

(事業評価関係)

I. 波及効果に関する評価

I-1. 技術波及効果

(1) 実用化への進展度合

- ・個々のプロジェクトの直接的及び間接的な成果は、製品やサービスの実用化にどのように寄与したか、あるいは寄与する可能性があるか。特許取得やその利用の状況、市場環境の変化、競合技術の台頭等を踏まえて評価する。
 - ①個々のプロジェクト終了後に実用化した製品やサービスは数多くあったか。
 - ②個々のプロジェクトの成果から今後実用化が期待される製品やサービスはあるか。
 - ③多額の実施料収入を生み出す等、インパクトのある技術が得られたか。
 - ④外国での特許取得が行われたか。
 - ⑤基本特許を生み出したか。

(2) 個々のプロジェクト成果からの技術的な広がり具合

- ・個々のプロジェクトの成果により直接的に生み出された技術は、関連技術分野に技術面でのインパクトを与えたか。派生技術には、個々のプロジェクト（特に「超電導材料・超電導素子研究開発」）実施当時（1980年代後半）に想定されていたもの、想定されていなかったものを含めてどのようなものがあり、それらはどのように利用されているかを踏まえて評価する。
 - ①数多くの派生技術を生み出したか。
 - ②派生技術は多くの種類の技術分野にわたっているか。（当該技術分野、他の各種技術分野）
 - ③直接的に生み出された技術又は派生技術を利用した研究主体は数多くあるか。
 - ④直接的に生み出された技術又は派生技術を利用する研究主体は産業界や学会に広がりを持っているか。（参加企業、大学等、不参加の同業種の企業、その他産業等）

⑤参加企業等が自ら実施する研究開発の促進効果や期間短縮効果はあったか。

(3) 国際競争力への影響

・直接的に生み出された技術の成果技術や派生技術により、国際競争力はどのように強化されたか。

①我が国における当該分野の技術レベルは向上したか。

②外国と技術的な取引が行われ、それが利益を生み出しているか。

③個々のプロジェクトの技術分野に関連した外国での特許取得は積極的になされているか。

④国際標準の決定に対し、個々のプロジェクトはメリットをもたらしたか。

⑤国際標準等の協議において、我が国がリーダーシップをとれるようになったか。

⑥外国企業との主導的な技術提携は行われたか。

⑦個々のプロジェクトが外国の技術政策に影響を与え、その結果技術交流が促進されたり、当該分野で我が国がイニシアチブをとれるようになったか。

I－2．研究開発力向上効果

(1) 知的ストックの蓄積度合

・特許や、研究者のノウハウ・センス・知識等の研究成果を生み出す源となる知的ストックはどのような役割を果たしたか。それらは個々のプロジェクト終了後も継承され、次の研究の芽になる等、今後の影響を持ち得ることができるか。

①当該分野における研究開発は続いているか。

②個々のプロジェクト終了後にも、プロジェクトに参加した研究者が派生技術の研究を行っているか。

③個々のプロジェクトの終了時から現在までの間に、知的ストックが将来的に注目すべき新たな成果（画期的な新製品・新サービス等）を生み出す可能性は高まっているか。

(2) 研究開発組織の改善・技術戦略への影響

・個々のプロジェクト又は一連の超電導研究開発プロジェクトでは、研究開発組織の強化・改善に対してどのように役立ったか。あるいは、実施企業の技術戦略に影響を与えたか。

①企業を超える研究開発のインフラとして、学会、フォーラム、研究者間交流等の公式・非公式の研究交流基盤は整備され、活用されているか。

②企業間の共同研究の推進等、協力関係、良好な競争的關係が構築されたか。

③顧客やビジネスパートナーとの関係の変化が、経済性を向上させたか。

④技術の管理組織を再編成する契機となったか。

- ⑤研究開発部門の再構成等、社内の組織改編は積極的に行われたか。
- ⑥研究開発の予算規模が増減する契機となったか。
- ⑦プロパテント等の特許戦略に対する意識が高くなったか。
- ⑧知的ストックは、企業の技術戦略にどのような影響を与えたか。

(3) 人材への影響

- ・個々のプロジェクト又は一連の超電導研究開発プロジェクトでは、研究者の効率的・効果的配置や能力の向上にどのように寄与したか。
 - ①国内外において第一人者と評価される研究者が生まれたか。
 - ②論文発表、博士号取得は活発に行われたか。
 - ③プロジェクト従事者の企業内での価値は高まったか。
 - ④研究者の能力向上に結び付くような研究者間の人的交流が行われたか。
 - ⑤関連分野の研究者増員が行われたか。
 - ⑥国内外から高く評価される研究機関となったか。

I-3. 経済効果

(1) 市場創出への寄与

- ・新しい市場を創造したか。また、その市場の拡大に寄与したか。

(2) 経済的インパクト

- ・生産波及、付加価値創出、雇用創出への影響は大きかったか。
 - ①直接的に生み出された技術や派生技術の実用化により、製品の売り上げと利益は増進したか。
 - ②直接的に生み出された技術や派生技術の実用化により、雇用促進は積極的に図られたか。

(3) 産業構造転換・活性化の促進

- ・個々のプロジェクト又は一連の超電導研究開発プロジェクトが産業構造の転換や活性化（市場の拡大や雇用の増加等）にどのような役割を果たしたか。
 - ①個々のプロジェクト又は一連の超電導研究開発プロジェクトが、各関連産業における市場の拡大や雇用の増加等に寄与したか。
 - ②個々のプロジェクト又は一連の超電導研究開発プロジェクトが新たな産業の勃興や、既存市場への新規参入、あるいは既存市場からの撤退等をもたらしたか。また、それらが市場全体における雇用に影響したか。
 - ③個々のプロジェクト又は一連の超電導研究開発プロジェクトが生産業の改善や更新に結びついたことにより生産性・経済性は向上したか。

I－4．国民生活・社会レベルの向上効果

- ・個々のプロジェクト又は一連の超電導研究開発プロジェクトによって新たな製品・サービスが実用化されたこと、プロジェクトの成果の応用による生産性の向上や顕著なコストダウン、デファクトを含めた規格化を促進したこと等の事例がある場合、それらは、例えば下記に挙げる項目にそれぞれどのような影響をもたらしたか。

(1) エネルギー問題への影響

- ・エネルギー問題の解決に寄与した効果としてどのようなものが考えられるか。

(2) 環境問題への影響

- ・環境問題の解決に寄与した効果としてどのようなものが考えられるか。

(3) 情報化社会の推進

- ・情報化社会の推進に寄与した効果としてどのようなものが考えられるか。

(4) 安全、安心、生活の質

- ・国民生活の安全、安心、生活の質の向上に寄与した効果としてどのようなものが考えられるか。
 - ①国民生活の利便性を向上させた事例が存在するか。
 - ②国民生活の安全性の向上に寄与したか。
 - ③個々のプロジェクト又は一連の超電導研究開発プロジェクトの成果は、身障者や高齢者の多様な生活を可能にしたか。また、個の自立を支援するものであるか。

II．現在の視点からの個々のプロジェクトの評価

個々のプロジェクトの概要及びI．に示した効果から総合的に評価する。

II－1．国家プロジェクトとしての妥当性

- ・国のプロジェクトとしてどのような効果があったか。
- ・現在（追跡評価時点）から見て、国が関与する必要があるか。また、関与の方法や程度は妥当であったか。
 - ①多額の研究開発費、長期にわたる研究開発期間、高い技術的難度等から、民間企業のみでは十分な研究開発が実施されない場合。
 - ②環境問題への先進的対応等、民間企業には市場原理に基づく研究開発実施イン

センティブが期待できない場合。

③標準の策定、データベース整備等のうち社会的性格が強いもの（知的基盤）の形成に資する研究開発の場合。

④国の関与による異分野連携、産学官連携等の実現によって、研究開発活動に新たな付加価値をもたらすことが見込まれる場合。

⑤その他国が主体的役割を果たすべき特段の理由がある場合。

Ⅱ－２．目標設定

- ・当時の技術動向、市場動向、社会環境、政策目的等から見て、目標設定の方向性とそのレベルは妥当であったか。

Ⅱ－３．プロジェクト実施方法

- ・個々のプロジェクトの計画策定、スキーム（予算制度）、実施体制、運営方法等の実施方法が現在の視点から見て妥当であったか。

第2章 研究開発プロジェクトの概要

(1) 超電導材料分野

①産業科学技術開発「超電導材料・超電導素子」

a.実施期間

昭和 63 年度～平成 9 年度(10 年間)

b.研究開発費総額

約 269 億円 (材料・素子両分野の合計)

c.研究開発の目的

超電導物質の電力、エレクトロニクス等の分野における工学的利用を可能とするため、超電導材料及び超電導新機能素子の開発に係る基盤技術を確立することを目的とする。

超電導材料関連では、新超電導材料の探索及び材料化のための基礎技術の確立並びに工学的利用が可能な高臨界温度、高臨界電流密度、高臨界磁場を持つ超電導材料の開発を行なう。

d.主な研究開発成果

新物質の発見、物質の改良、また単結晶、バルク材、配向性材料、薄膜、フィラメントなど材料の作製法、特性の著しい向上、基礎物性に関する新しい発見、高性能素子の創製等、世界的にみても一流の研究成果が多く、学術的にも優れ、この分野の発展に大きく貢献した。

OCMG 法 (酸素制御溶融法) による Nd123 系超電導バルク材の高臨界電流密度化 (高 J_c 化) の開発は技術的ブレークスルーを達成した。これは高性能磁石、フライホイール電力貯蔵、超電導モータ、磁気浮上などへの新分野への展開の途を拓いた。各種 RE123 系の大型単結晶育成の成功は、素子基板その他の応用への適用が期待された。

新物質探索については発足期の室温超電導の期待は実現できなかったが、Hg 系で高圧下 $T_c \approx 150K$ に達した。その他 Cu1234 系、Tl 系など各シリーズの合成と測定をおこなった。

超電導発現機構の解明 (磁束相図や d 波対称性の研究、ピン止め機構の研究や 123 系単結晶での a、c 軸方向の電導特性・光学特性の研究) は学術的に評価された。

材料・素子関係で合わせて、原著論文数: 2274 件、特許出願件数 696 件の成果があった。

e.研究開発機関

(財) 国際超電導産業技術研究センター (ISTEC)

国立研究所 (電子技術総合研究所、物質工学工業技術研究所、計量研究所、名古屋工業技術研究所、大阪工業技術研究所)

(財) 宇宙環境利用推進センター、(財) ファインセラミックスセンター、宇宙科学研究所、東京大学、東京商船大学、九州大学、九州工業大学

f.事後評価結果概要

後継プロジェクト「超電導応用基盤技術研究開発」が平成 10 年度より発足している。超

電導バルク材、超電導線材、超電導素子の 3 本柱とした超電導バルク材のさらなる性能向上と多様なシステム化への展開がなされている。

超電導線材：RE123 系線材の開発が後継プロジェクトに次世代線材として引き継がれている。

超電導電力応用技術開発等の関連プロジェクトとの連携の緊密化や相互の情報交換がなされている。

線材から応用へつなぐ部分は低温超電導線材の専門家等の知見を活用する RE123 系線材を中心として、製造プロセス技術をスピード化、長尺化、断面形状の工夫、交流損失等の諸問題に今後も継続して取り組む必要がある。

基礎的研究としては、高温超電導体特有の磁束の振舞いはピン止め機構・交流損失など引き続いて研究が必要である。

新材料探索も長期的課題として継続すること。

線材と素子に関しては、技術的課題が大きいため、集中管理方式の研究管理体制が適切であった。

g. 追跡評価のためのベース資料

産業科学技術研究開発制度「超電導材料・超電導素子」最終評価報告書および別冊（平成 11 年 3 月）

平成 20 年度技術評価調査「超電導材料・超電導素子研究開発プロジェクトの技術・産業・社会へのインパクトに関する調査」（平成 21 年 3 月）

②-1 産業科学技術開発「超電導応用基盤技術研究開発（Ⅰ）」

a.実施期間

平成 10 年度～平成 15 年度(6 年間)

b.研究開発費総額

約 159 億円（材料・素子両分野の合計）

c.研究開発の目的

超電導技術は電力応用や情報通信応用等幅広い分野において従来技術では実現しえない革新的機器や従来機器の飛躍的な性能向上を可能とし、エネルギーの高効率利用等に資するものと見込まれる。前フェーズの「超電導材料・超電導素子研究開発」（昭和 63 年度～平成 9 年度）で得られた成果をベースに超電導応用に向けた基盤技術の確立を目指す。本事業では、高温超電導バルク材要素技術の開発、超電導線材要素技術の開発、超電導素子要素技術の開発、高機能超電導材料の技術開発及びそれらを遂行するための超電導材料基礎技術の開発を推進する。

d.主な研究開発成果

バルク材では OCMG 法（酸素制御溶融法）で、臨界電流密度 3T で 10^5A/cm^2 、捕そく磁場 77K で 3T という目標を達成できた。高機能超電導材料では、銀比の低減と臨界電流密度 J_e の向上では目標値を上回っている。特に、Bi（ビスマス）系マグネットの開発により電流減衰率 0.5%/日を達成した。

超電導材料の基礎研究では、キャリア濃度調整の重要性、ナノスケールのピン止め中心の有用性、粒界弱結合が d 波に起因して粒界構造制御に有用であることの知見は、今後の超電導技術に広く波及する。

原著論文数：837 件、特許出願件数：261 件の成果があった。（材料・素子両分野の合計）

e.研究開発機関

（財）国際超電導産業技術研究センター(ISTEC)、（財）ファインセラミックスセンター、住友電気工業（株）、東京電力（株）、（株）フジクラ、中部電力（株）、古河電気工業（株）、昭和電線電纜（株）、（株）東芝、東海旅客鉄道（株）、SRI インターナショナル、東京大学、（独）産業技術総合研究所

f.事後評価結果概要

高温超電導の実用化に向けて広範な基盤要素技術の研究開発を精力的に展開し国家プロジェクトとしての役割を十分果たしたと言える。

個々のテーマは、実用化の観点からおおむね妥当な目標が設定され、全体的に当初の目標値を十分達成し、成果の外部発信も積極的に行っており、国内外から高い評価を受けている。中には、すでに民間企業への技術移転が可能なレベルに達しているテーマもあり、製品が想定できる段階まで推進できたことは高く評価できる。

しかし、プロジェクトの中で、高機能超電導材料や材料基礎のテーマがバルク材、線材、素子の研究開発とどのように関わっていくのかやや不明確であった。また、実用化に向け

た基盤はほぼ確立されたが、今後、製造コスト、市場ニーズ、既存技術に対する優位性などを明確にし、超電導技術分野以外の研究者とも協力しあい、課題解決を図り実用化を推進してほしい。

なお、応用研究が中心であるのはやむをえないが、メカニズムの解明や新規超電導体の探索など基礎的な研究についても、継続的な研究が望まれる。

高温超電導技術は、エネルギー、環境保全、医療、情報通信などの領域で、画期的な技術を誕生させる可能性をもっており、多くの国々で研究開発が活発に進められていること、しかし、容易に市場に受け入れられるとは限らないことを考えると、短期的な成果に終始することなく、今回確立した基盤技術の成果を実用化に結びつける新たな研究開発を継続して欲しい。

しかしながら、今回の開発により実証段階に入った技術も見受けられるため、国家プロジェクトとして支援する際には、必要性、経済性を含め既存技術と総合的に比較検討し、次段階への進展を考える必要がある。具体的には、イットリウム系線材や素子は、引き続き国が主体となった体制で研究開発を実施していくことが望ましい一方、バルク材料や高機能材料（ビスマス系）は、民間が主体となって商業化の可能性を検討していく必要があると考えられる。さらに、本研究開発からの派生技術について、超電導以外の技術分野への展開も考えるべきである。

g. 追跡評価のためのベース資料

産業科学技術研究開発制度「超電導応用基盤技術研究開発プロジェクト評価(中間報告書)」(平成 14 年 2 月)

「超電導応用基盤技術研究開発プロジェクト(第 I 期分)」事後評価報告書(平成 17 年 3 月)

②-2 産業科学技術開発「超電導応用基盤技術研究開発（Ⅱ）」

a.実施期間

平成 15 年度～平成 19 年度(5 年間)

b.研究開発費総額

約 170 億円

c.研究開発の目的

超電導技術は、電力・エネルギー分野のみならず、産業応用、情報通信、運輸、医療福祉等幅広い分野において従来技術では実現し得ない革新的機器の実現や従来機器の飛躍的な性能向上が可能となるとともに、省エネルギー、CO₂ 排出量削減等環境保全等にも貢献することが期待されている。特に、イットリウム（Y）系及びその他希土類（Nd、Sm 等）の高温超電導材料は、低温超電導材料（金属系超電導材料）に比べて極めて高い優位性を持つものであり、次世代超電導材料として世界的に重要視されている。

本研究開発は、「超電導応用基盤技術研究開発（Ⅰ）」（平成 10 年度～平成 15 年度）で得られた Y 系線材作製要素技術をベースに、線材作製の実用化が見通せる技術を開発することを目的としている。

d.主な研究開発成果

第Ⅰ期で得られた線材作製要素技術の研究開発成果をベースに有望な作製プロセスを選択し、開発を進めた。Y 系超電導線材は液体窒素温度において磁界中での臨界電流が高いことから、基本計画目標である線材長 500m、臨界電流 300A/cm・幅、線材作製速度 5m/h、線材コスト ¥8~12/Am、の Y 系線材作製技術が開発され、低温超電導や Bi 系超電導線材では実現出来ない高温運転で、電力機器をはじめとした幅広い産業分野にわたる機器に酸化銅高温超電導線材の適用可能性が示された。このことにより、各種機器のコンパクト化、軽量化、大出力、高効率、低コスト化が実現され、各種産業機器適用への波及効果も大きく、エネルギー高効率化による省エネルギー効果及び CO₂ 削減効果が大いに期待できるようになった。また、同時に、線材作製実用化・事業化が見通せることから、日米欧での高温超電導技術の応用研究開発競争において、大きくリードすることになり、国際競争力も大いに増強され、線材産業、機器製造産業界への経済効果も期待出来るようになった。

原著論文数：442 件、特許出願件数：117 件の成果があった。

e.研究開発機関

（財）国際超電導産業技術研究センター(ISTEC)、（株）フジクラ、住友電気工業（株）、（財）ファインセラミックスセンター、中部電力（株）、古河電気工業（株）、昭和電線ケーブルシステム（株）、（株）IHI、九州電力（株）、（株）東芝、大陽日酸（株）、ジャパンモータアンドジェネレータ（株）

f.事後評価結果概要

超電導応用技術の開発は、電力、輸送、医療など広い分野に関連する重要な研究課題である。本事業はエネルギーの効率的使用、ひいては CO₂ 等の温暖化ガスの発生削減のため

に欠かせないとされている超電導機器の早期の実用化のため、性能、コストの面から有望とされる Y 系高温超電導線材の開発、さらに開発された線材を用いて機器に適用する場合の加工技術、また幾つかの機器について要素技術の開発を行ったものである。

これらいずれの研究開発項目とも、挑戦的とも言えるかなり高い目標であったにもかかわらず、適切な戦略による研究マネジメントに基づき、設定した目標をすべてクリアし、世界最高水準の優れた成果を挙げたことは、極めて高く評価できる。特に、将来の超電導応用を見据えた極低コスト線材の開発を中間評価後設定して、短い期間の中で技術の選択と集中を行い、その目標を達成していることは、高く評価できる。

一方、既存の電力機器の置き換えを目指した取り組みであったが、既存機器の成熟度は高く、置き換えのためには更なる高い目標を設定した取り組みが必要である。また、更なるコスト削減のための技術の開発や、応用する機器に適合した線材の開発といった多くの課題克服が望まれる。線材製造コストは需要によっても左右されるはずであり、市場予測の精度が重要と考えられ、現在の事業化イメージはどの程度実現可能な数値なのか判断できない。今後は、実用機器導入の時期や規模をより具体化し、実用化促進に資して頂きたい。

本事業により、Y 系の高温超電導線材開発において非常に大きい成果が得られており、次段階の研究開発を進めるための基礎はできたと考えられる。しかし、線材開発はまだ世界的な競争段階にあり、これを民間企業単独で行うことや、既存機器置き換えを目指すには、開発リスクは依然として大きく、着実に実用化研究開発を進展させるためには、引き続き国の支援の下での研究開発推進が望まれる。

今後は、より具体的な機器応用開発を加速させ、Y 系線材の特徴を活かした応用機器を少しでも早く実現し、まずは一種類の機器のみでも良いので、Y 系線材の信頼性を実証し、従来機器に比した優位性を例証していくことが望まれる。また、早期の事業化を促進するためにも、これまで以上に産業界を巻き込んだ展開が望まれる。

g.追跡評価のためのベース資料

「超電導応用基盤技術研究開発（第Ⅱ期）中間評価報告書」（平成 17 年 9 月）

「超電導応用基盤技術研究開発（第Ⅱ期）事後評価報告書」（平成 21 年 2 月）

③大型省エネルギー技術研究開発・ニューサンシャイン計画「超電導電力応用技術」

a.実施期間

昭和 63 年度～平成 11 年度(12 年間)

b.研究開発費総額

約 320 億円（昭和 63 年度～平成 10 年度合計）

c.研究開発の目的

超電導技術は、一定の条件下で電気抵抗が無くなるという超電導現象を利用するものであり、これにより電力機器における損失の低減、高磁界化及び高電流密度化が可能なことから、機器の高密度化、高性能化をもたらす、省エネルギー効果が大いに期待できる。一方経済の安定成長下にあっても増大を続ける電力需要に対処するため、発電設備や送変設備の増設あるいは拡充が進められているが、電源の大容量化、遠隔化に伴い、送電線の用地確保難、電力システムの安定度等の問題が顕在化しつつあり、また、電力損失の一層の低減をはかる必要がある。このような問題に効果的に対処するためには超電導技術を電力機器に導入し、電力系統の高安定化、高密度化及び高効率化を図る必要がある。このため、超電導電力応用技術の研究開発を行う。研究開発項目は、①超電導線材の研究開発、②超電導発電機の研究開発、③トータルシステム等の研究、④冷凍システムの研究開発、⑤実証試験、⑥評価技術の研究、である。

d.主な研究開発成果

超電導発電機界磁巻線用 3,000A 級導体として高安定型、高電流密度型、低損失型の 3 種類を開発し 7 万 kW 級モデル機に適用した。

低損失な 10kA 級 NbTi 線材を開発し、これにより、基幹系電力用機器への超電導線材適用の見通しを得た。また、5kA 級 Nb₃Sn 線材の開発の見通しを得た。

Bi 系酸化物超電導線材は、電力機器対応の可能な高臨界電流密度(10^8A/m^2)、大電流化(kA 級)および長尺化(km 級)の見通しを得た。

Y 系、Tl 系酸化物超電導線材は、短尺ではあるものの、高臨界電流密度(10^{10}A/m^2)に成功した、これらの技術を活用して、Y 系酸化物薄膜で 10A/400V、100A/200V の限流素子を開発した。

世界最大、世界最長の 1,000kW、814 時間の負荷運転や 44 回の DSS 運転、これらを合わせ連続運転時間 1500 時間に成功した。

冷凍システムの研究開発では、7 万 kW 級超電導発電機用冷凍システムの開発に成功し、高効率、高信頼性で、コンパクトなオイルレス圧縮機を採用した超電導発電用ブレイトンサイクル冷凍機システムの開発に目処を得た。

論文数：483 件、特許出願件数：372 件の成果があった。

e.研究開発機関

超電導発電関連機器・材料技術研究組合(Super-GM：(株) IHI、関西電力 (株)、(株) 神戸製鋼所、昭和電線電纜 (株)、住友電気工業 (株)、中部電力 (株)、(財) 電力中央研

研究所、東京電力（株）、（株）東芝、（株）日立製作所、日立電線（株）、（財）ファインセラミックスセンター、（株）フジクラ、古河電気工業（株）、（株）前川製作所、三菱電機（株）

国立研究所（計量研究所、物質工学工業技術研究所、機械技術研究所、電子技術総合研究所）、（株）テクノバ

f.事後評価結果概要

超電導発電機の研究開発については、7万kWモデル機の運転に成功することによって、既に20万kW級発電機の実現可能性は確認されている。実用化の前段階までの道筋は立てられているといえるが、実用機を数10万～100万kW程度と想定した場合の道筋はまだ明確になっていない。

実用化に向けては、開発した7万kWモデル機で得られた種々な成果をもとに、低コスト化と大容量化を目指した基盤技術を開発していく必要がある。

超速応ロータの実証試験など研究計画どおり研究開発を遂行され、成果は今後に広く活用されるべきである。

超電導発電機については、数10万～100万kW級の現用機との比較優位性を明らかにすること、その実用に不可欠な技術的課題を明らかにしておくこと。

今後、実用機の前段階として、民間資金の導入も視野に入れて一桁上の規模のプロトタイプ機の開発に取り組む必要がある。

経済性の視点では、発電機の規模として60万～100万kW級において経済的に優位性あると考えられる。このような大容量化を目指した場合には、低コスト化を踏まえ各要素技術の一層の高度化も必要となる。

大容量化を目指した実用化では、3種類のロータについて、その種類を絞ったうえで、現状のテスト機で設計・製作技術を既に示した20kW級の実証機を建設しなくても、現状ではカバーできない低コスト化・大容量化のための要素技術研究を中心に取り組むことが効率的である。

技術的課題としては、超電導発電機本体では出力密度のさらなる向上や熱収縮対策、振動バランスの問題等がある。

交流用金属系超電導線材については、これまでの研究成果を基礎に、用途に適した、大容量・低交流損失かつ低コストの革新的な線材を実現するべく研究開発を進展させる必要がある。

酸化物系超電導線材では大電流かつ長尺の導体開発が課題となる。他の超電導関連プロジェクトにおいて開発が可能なものもあり、連携して波及効果が期待される。

g.追跡評価のためのベース資料

ニューサンシャイン計画「超電導電力応用技術」プレ最終評価報告書（平成11年3月）

④ニューサンシャイン計画「超電導発電機基盤技術研究開発」

a.実施期間

平成 12 年度～平成 15 年度(4 年間)

b.研究開発費総額

約 23 億円

c.研究開発の目的

超電導発電機は、電力系統安定度の向上、電圧安定性向上等の優れた特徴を有しており、導入による電力の低廉かつ安定した供給が期待されている。また、従来の発電機に比べて発電効率が高いため、燃料消費量の削減、ひいては CO₂ 排出量削減が可能となり、地球環境面への貢献も期待される。

本技術開発では、第 1 フェーズとして実施された超電導電力応用技術開発プロジェクトでの成果をベースにその第 2 フェーズとして、ニーズの高い 20 万 kW～60 万 kW 級超電導発電機の実用化を目指し、20 万 kW 級機を対象にした超電導発電機の低コスト化が可能となる高密度化基盤技術、及び 60 万 kW 級機の実現のための大容量化基盤技術を確立する。

発電機を超電導化することにより効率向上とともに電力系統の安定度や電圧安定性の向上が図れるので、各種分散電源の増加による系統安定性低下に対応するために、超電導の特性を活用した電力機器を採用することにより既存電力設備等の有効活用が可能になる。さらに、超電導電力機器の実用化には、①交流損失の低減技術、②高速回転場での運転、③大電流による電磁力対策技術、④冷却技術などの基盤技術の確立が不可欠であり、本プロジェクトでは、これら機器側から求められる超電導発電機の基盤技術の確立を目的とする。

d.主な研究開発成果

高密度化基盤技術の研究開発では、20 万 kW 級発電機導体で世界トップクラスの電流密度を達成し、基本目標値である界磁巻線電流密度 80A/mm²、電機子電流密度 140A/cm² を達成し、さらに、界磁巻線取付軸に磁性体の 13%Ni 鋼を使用できることを検証し、従来の非磁性取付軸に比べ、さらに高密度化できることを明確にした。

大容量化基盤技術の研究開発では、60 万 kW 級発電機用導体で世界トップクラスの大電流・高電流密度、および、電機子電流 15,000A 級、界磁電流 6,000A 級、回転子径 1,100mm 級を達成し、目標の大容量化を達成した。冷凍機では、可変容量型、高負荷軸受型の膨張タービンを開発し、高効率化と高信頼化による高性能化を達成した。

設計技術の研究開発では、高密度化、大容量化を可能とする超電導発電機の基本設計技術を確立し、高密度化、大容量化基盤技術により超電導発電機の製造コストを、従来の技術に比較して 2 割低減できる見通しを得た。また、系統側、運転側からの超電導発電機の導入シナリオを作成した。

原著論文数：33 件、特許出願件数：7 件の成果があった。

e.研究開発機関

超電導発電関連機器・材料技術研究組合(Super-GM：関西電力（株）、東京電力（株）、日立電線（株）、（株）日立製作所、古河電気工業（株）、三菱電機（株）、（株）IHI、（株）前川製作所、（財）電力中央研究所）

（独）産業技術総合研究所

f.事後評価結果概要

電力会社が自力で超電導発電機の導入に踏み切るところはないと思われる。本研究開発で得られた技術を継承し発展させるための仕組みができることが望まれる。

本研究開発では波及効果にも見るべきものがあり、それが適切に活用されることが期待される。具体的には、コンバインドサイクルへの応用を想定し、20～30 万 kW 級のパイロット機の開発を進め、系統に導入して今回の成果を実証すること、また、残された課題である製作技術を検証すること、運転・保守などの経験を蓄積することが望まれる。電機子歯へ FRP ティースを採用し、電力系統全体としての効率を高める可能性も検討することが必要である。

本研究に続く実用化プロジェクトが実現できない場合、国内需要のみでなく世界的な技術開発戦略も視野に入れ、本技術の特徴を PR して売りこみ方を工夫することが望ましい。

研究開発で得た種々の技術は霧散しないよう維持・継承できる仕組みを考え、技術レベルの維持に留意する必要がある。

g.追跡評価のためのベース資料

「超電導発電機基盤技術研究開発」事後評価報告書（平成 16 年 8 月）

⑤「超電導電力貯蔵システム要素技術開発調査」

a.実施期間

平成 3 年度～平成 10 年度(8 年間)

b.研究開発費総額

約 60 億円

c.研究開発の目的

負荷変動補償や系統安定化などの多用途の運転に対して、SMES システムとしての系統からの要求仕様を明確にし、安定性・効率・経済性・運転制御性能・保護性能・環境影響などの実用性を評価できる 100kWh 級パイロットプラントの開発に必要な要素技術を確立する。

d.主な研究開発成果

コイル用の短尺導体、要素コイルの試作・試験において、電流 20kA、電圧 2kV、耐電圧 3kV 以上のコイル設計、製作・試験技術、および、CuNi 被覆素線による改良導体の損失時定数を測定し、交流損失は 1/10 以下となることと導体の安定性を確認した。

電流リードおよび直流母線に関しては、15kA 級 YBCO 線材で耐電圧 3kV 以上の HTS 電流リードを設計・製作し、熱侵入量は 2W/lead を達成した。

クエンチ保護対策として、ブリッジ法の検出器として、耐電圧 3kV 以上で検出感度 10mV、10ms 以下となる設計技術、流体法では差圧が 20%以下で検出し、30ms 以下で判定する手法を実験的に確認した。

交直変換装置については、高効率な直接多重化方式交直変換装置の実規模ブリッジを試作し、電圧 2kV、電流 20kA、変換器効率 96.6%を達成した。

永久電流スイッチについては、球面接点形状、メッキなし、超電導フィラメント径が約 1mm φ の電極が最も優れた特性を示し、通電容量も更に向上する可能性があることがわかった。

e.研究開発機関

(財) 国際超電導産業技術研究センター (ISTEC)、中部電力 (株)、九州電力 (株)、(財) 電力中央研究所

f.事後評価結果概要

日本原子力研究所で、CuNi 被覆素線による改良導体の損失時定数を測定した結果、要素コイル用導体の改良で約 150ms を約 10ms になり、交流損失は 1/10 以下となることを確認できた。また、素線間のインピーダンスは、従来の要素コイル用導体より 2～3 倍増えるが、導体の安定性は満たすと考えられている。コイル試験は日本原子力研究所や米国 LL 研究所など外部研究機関で実施したものである。他の技術も含めて、産官学共同プロジェクトや国際的プロジェクトを推進することの必要性が示唆されるものである。

g.追跡評価のためのベース資料

「超電導技術の実用化戦略に資する調査」報告書 (平成 18 年 3 月)

⑥「超電導電力貯蔵システム技術開発調査」

a.実施期間

平成 11 年度～平成 15 年度(5 年間)

b.研究開発費総額

約 38 億円

c.研究開発の目的

超電導技術の電力分野への応用の中で、超電導電力貯蔵システム (SMES) は、従来のエネルギー貯蔵機器と比べて、貯蔵効率が高い、エネルギーの出し入れ速度が早い、繰り返し使用に強いなどのほか、電力系統との間の有効電力・無効電力の授受を独立に制御できるなどの特長を有している。このような優れた機能を持つ SMES は、電力系統の安定化および電力品質維持など非常に広範囲の効果が期待できる。本技術開発では前フェーズの超電導電力貯蔵システム要素技術開発調査での成果をベースに、市場ニーズがあり実用化の可能性が見込まれる小規模な系統制御用 SMES にターゲットを絞って電力システムでの実用化を目指し、コスト要因の大半を占める超電導コイルのコスト低減要素技術開発を行う。また、高温超電導コイルを SMES に適用すると、高磁場実現によるコンパクト化、冷却負荷の低減、過負荷耐量があることなどにより、更なるコスト低減が期待されるため、高温超電導 SMES の技術調査を合わせて実施する。

電力品質向上ニーズに伴う電力系統制御技術の高度化要請を背景に、市場ニーズがあり、実用化の可能性が見込まれる小規模な系統制御用 SMES にターゲットを絞り、低コスト化の技術開発を行うとともに、さらなるコスト低減の可能性のある高温超電導材料を用いた SMES の技術調査を行う。系統制御用 SMES が実用化され、質の高い電力の安定供給が確保されるようになると、産業界の生産性向上などを通じ、国民経済の安定的発展に貢献することができる

d.主な研究開発成果

コスト低減技術の開発では、実用化の目標コスト設定として、系統安定化用 SMES 及び負荷変動補償・周波数調整用の 2 用途を対象に、SMES の各要素機器及びシステムを検討し、系統安定化 7.0 万円/kW、発電所設置、負荷変動補償・周波数調整 27～31 万円/kW、負荷近接設置、30.5 万円/kW を試算した。負荷変動補償・周波数調整用のコイルでは、1 万回の繰り返し通電試験での健全性及び大幅な低損失性、系統安定化用のコイルでは、5kA/s 級×4パルス高速通電特性を確認した。

高温超電導 SMES の技術では、Bi2212 導体は 26K の伝導冷却で 4kA 通電を検証し、世界記録を達成し、SMES 実現に十分であることを確認した。マグネット技術では、伝導冷却技術、真空断熱条件での電気絶縁技術、電流リードなどを小型のモデルを試作して検討した結果、Bi2223 線材の小型コイルでは伝導冷却技術で、臨界電流の約 1.5 倍の電流で短時間通電が可能であること、熱的現象の時定数が数十分から数時間と長いこと、電気絶縁と伝導冷却が両立する高温超電導コイル用電流リードが可能であることを確認した。

高温超電導 SMES の概念設計では、負荷変動補償・周波数調整用 15kWh～500kWhSMES の電磁氣的、機械的解析を行い、Bi 系線材では運転温度が 10K 程度で、Y 系線材では 10K～50K で、金属系 SMES よりも低コストの SMES 用コイルが実現可能であることを明らかにした。特に、Y 系線材での冷凍機コストを考慮して 30K 程度でコストが最小になる見通しを得た。

原著論文数：31 件、特許出願件数：6 件の成果があった。

e.研究開発機関

(財) 国際超電導産業技術研究センター (ISTEC)、九州電力 (株)、中部電力 (株)、(財) 電力中央研究所

f.事後評価結果概要

本 SMES が最終的に実用化、事業化できるかどうかは、トータルシステムとしての低コスト化が実現できるかどうかである。今後、機器の長期間運転での安定性や信頼性の実証研究とともに、トータルシステムの低コスト化の実証研究が必要である。

瞬低補償用等、他の用途についても、実用化の可能性を検討し、SMES の市場性をさらに明確化し、SMES の事業化のシナリオをさらに具体化することが望まれる。

高温超電導 SMES は、革新性が大きい点で魅力的であり、今後も NEDO が支援するのにふさわしいテーマである。

高温超電導 SMES の製造技術力の維持、知的所有権の取得、広報活動の強化などの課題にも引き続いて注力するべきである。

g.追跡評価のためのベース資料

「超電導電力貯蔵システム技術開発」事後評価報告書 (平成 17 年 3 月)

⑦「超電導電力ネットワーク制御技術開発」

a.実施期間

平成 16 年度～平成 19 年度(4 年間)

b.研究開発費総額

約 64 億円

c.研究開発の目的

地球環境対策に伴う風力、太陽光発電などの再生可能エネルギーの活用や、電力市場の自由化の進展による分散型電源の導入拡大、短時間に大きく変動する負荷の増加等により、電力ネットワークの安定性や品質の低下が懸念されている。このため、これらの要因に柔軟に対応できる制御システムが必要となっている。このような背景を受け、本事業では超電導電力貯蔵技術を活用した電力ネットワーク制御技術の開発・検証を行い、今まで以上に電力ネットワークの安定化を図るために、以下の項目を実施する。

超電導電力貯蔵 (SMES) システム開発

大電力を瞬時に出し入れでき、有効・無効電力の同時制御が可能で繰り返し使用に強い特長を有する SMES (超電導コイルに電気エネルギーを磁気エネルギーとして蓄える電力貯蔵装置) は、電力ネットワークの安定化および電力品質維持など非常に広範囲の効果が期待できる。本研究開発では、実用化を目指した SMES システムの低コスト化に向け、高効率な電力変換システムや高磁界化によりコンパクト化が可能な酸化物超電導コイル、従来の冷凍機のメンテナンス性を大きく上回る高信頼性極低温冷凍機、大出力を可能とする高性能電流リードの要素技術開発を行うとともに、システムとしての運用性や信頼性を検証するため 10MVA/20MJ 級 SMES を製作し、実系統に連系して繰り返し充放電試験などを行う。

超電導フライホイールシステム開発

SMES に比べエネルギーを高密度で貯蔵できるフライホイール (はずみ車に電気エネルギーを回転エネルギーとして蓄える電力貯蔵装置) に関しては、従来の機械式フライホイールに比べて損失が少なく、かつコンパクトな特長を有する超電導フライホイールを開発し、ネットワーク制御システムの高度化を図る。

わが国では、電力品質が非常に高いレベルに維持されてきたが、再生可能エネルギーの導入促進や分散電源の導入拡大、変動の大きな負荷の増加等により、電力ネットワークが今後ますます複雑な構成となり、電力品質や供給信頼度へ影響が及ぶことが懸念されている。SMES や超電導フライホイールが実用化され、電力品質の維持や電力の安定供給が確保されると、産業界の生産性向上などを通じ、国民経済の安定的発展に貢献することができる。また、エネルギーの利用効率の向上や再生可能エネルギーの導入促進により地球環境対策としての CO₂ 削減効果も期待できる。

d.主な研究開発成果

SMES システムの開発については、①システム構成技術の開発では、低コスト大容量電

力変換システム、高磁場酸化物系 SMES コイル、高信頼性極低温冷凍機、高耐電圧伝導冷却電流リードシステムを開発、②実系統連系運転試験によるシステム性能検証では、負荷変動補償性能、系統安定化性能を検証した。

システムコーディネーション技術の開発では、①負荷変動補償・周波数調整用 SMES コーディネーション技術、②系統安定化用 SMES コーディネーション技術、③10MVA／20MJ 級 SMES システム設計・製作、④イットリウム系小規模 SMES システムの変換器用制御装置の製作・検証、⑤解析用負荷モデル装置設計・製作、⑥超電導フライホイールシステムのトータルシステムの性能試験を実施した。

SMES システムの適用技術標準化研究では、用途別標準 SMES システム、SMES システムの試験法・評価法、国際標準化について検討した。

原著論文数：27 件、特許出願件数：5 件の成果があった。

e.研究開発機関

(財) 国際超電導産業技術研究センター (ISTEC)、中部電力 (株)、九州電力 (株)、(財) 電力中央研究所、JR 東海

f.事後評価結果概要

本プロジェクトの研究成果は、地球温暖化対策や原油高騰などエネルギー環境対策に解決に貢献するので継続すべきである。また、常に社会情勢に合わせて研究内容を柔軟に変更すべきである。

SMES については、大型化によるコストダウン及び Y 系線材の開発動向を把握し、Y 系線材を用いた超電導コイルの開発を早急に推進することが重要である。

Y 系線材の特性は、これまでの NbTi や Nb₃Sn 線材と多くの点で異なるので、その特性を十分に把握し超電導コイルの基盤技術開発を進めることが重要である。

今後、次期フェーズでの Y 系線材をベースにした研究開発や SMES システムを、実際の電力系統に連系してシステム性能の向上や長期の実績を積むことが早期の実用化のための課題である。

超電導 SMES を国際プロジェクトとして、日本とアジアの共同プロジェクトにすることも有効である。

フライホイールシステムについては、50kWh 機のフィールドテスト継続により、回転特性および入出力特性データの蓄積・評価、運転時の地震等を考慮した安全性の立証などのシステムの信頼性検証、コスト低減を指向した要素研究やユーザ側が主体となった研究が重要である。

g.追跡評価のためのベース資料

「超電導電力ネットワーク制御技術開発」事後評価報告書（平成 21 年 3 月）

⑧ニューサンシャイン計画「高温超電導フライホイール電力貯蔵研究開発」

a.実施期間

平成 7 年度～平成 11 年度(5 年間)

b.研究開発費総額

約 28 億円

c.研究開発の目的

電力需要の増加に伴い、昼夜間の電力格差が広がっていることから、電力系統の負荷平準化対策が重要な課題となっており、電力需要地に近接した配電用変電所に分散配置して効果的な日負荷平準化を行う電力貯蔵装置の導入が求められている。これまで、フライホイールによるエネルギー貯蔵は、機械式軸受等による回転損失の関係から短時間貯蔵のものに利用されているが、近年の高温超電導材料の研究の進展及び高度複合材料の技術開発に伴い、超電導による磁気浮上を利用した小型かつ回転ロスが少ない高温超電導フライホイールの実現可能性が高まり、配電用変電所への導入の可能性が出てきた。このため、10MWh 級の高温超電導フライホイール電力貯蔵システムについて、回転制御を含めたフライホイール及び高温超電導材と永久磁石を組み合わせた高温超電導磁気軸受に関する要素技術研究を行い、5 年間でシステムの実現可能性及び実現に向けての課題を明らかにする。

高温超電導磁気軸受にかかわる基礎的特性を評価するため、直径 400mm の FRP フライホイールシステムモデル機を設計・試作・試験し、その結果を直径 1,000mm のフライホイールシステムの要素技術研究及び大型システムの設計・評価に反映するとともに、電力系統へのシステム導入調査を行う。システム設計技術開発では、①フライホイールの本体、回転制御技術、②高温超電導磁気軸受について、高温酸化物超電導材、永久磁石、高温超電導磁気軸受の試作試験、高温超電導磁気軸受の特性解析、③システム設計・評価、を行う。

d.主な研究開発成果

フライホイールに関しては、①直径 400mm フライホイール本体の設計・製作・回転試験結果、破壊周速最大 1,310m/s が得られ、高エネルギー密度のフライホイール実現の可能性が確かになった。②直径 400mm 小型モデルシステムを製作し、回転振動シミュレーションおよび試験結果、30,000rpm (0.5kWh) までの回転に成功したが、これは、超電導軸受を利用したシステムでは最高のものであり、このシミュレーション技術により大型システムを安定に回転させることができる見通しを得た。③回転制御のための磁気軸受の方式を、一般に使用されているヘテロポーラ型（電磁石の磁束が回転軸と直角方向）からホモポーラ型（電磁石の磁束が軸方向）にした結果、損失が 1/5 程度にまで低減することを確認した。

高温超電導磁気軸受に関しては、①アキシアル型（円盤型）およびラジアル型（円筒型）の超電導磁気軸受を製作、試験した結果、載荷力密度にあまり差はないことがわかり、ラ

ジアル型が成立する見込みが得られた。②長時間使用により、載荷力が落ちる現象（磁束クリープ）があるが、これに対して、初めに一旦荷重をかけ解放する手法により、磁束クリープを抑えられることが実験的に確かめられ、超電導磁気軸受の課題が解決できた。③永久磁石については、直径 180mm の回転磁石体で目標値の破壊周速 280m/s を越える補強構造を開発した。④プロジェクトの初期には低温特性が良く、機械的強度の高い Pr 磁石を採用していたが、永久磁石部が思ったほど低温にならないこと、リング体での機械的強度が Nd 磁石と Pr 磁石であまり変わらないことが判明し、磁力が大きく、ムラの少ない Nd 磁石の使用が可能となったため、載荷力が大きくまた、磁束ムラによる超電導磁気軸受の損失が低減し、実用化に向け大きく前進した。

原著論文数： 23 件、特許出願件数： 26 件の成果があった。

e.研究開発機関

（財） 国際超電導産業技術研究センター（ISTEC）、（株）IHI、光洋精工（株）、新日本製鐵（株）、セイコーエプソン（株）、（株）四国総合研究所、日本精工（株）、三菱電機（株）、（財）電力中央研究所、東京電力（株）

国立研究所（機械技術研究所、大阪工業技術研究所、電子技術総合研究所）

f.事後評価結果概要

実用化までには、まだ、数ステップの研究開発が必要である。次期フェーズでは、高温超電導材料の応用を研究開発の主眼として、超電導磁気軸受の剛性の向上、低損失化、載荷力の向上等の性能の高度化を図ることが第一である。

これらの高性能化を実証するために、本プロジェクトでは実施されない 10kWh 級中型モデルの超電導化によるラジアル型超電導軸受の検証も必要である。

超電導磁気軸受は、その高性能化によって、フライホイール以外の用途の可能性も十分あり、将来の幅広い応用分野が期待される。

今後の研究開発においては、フライホイールシステムを例題に超電導材料を応用した超電導磁気軸受単体の高機能化・実用化に主眼を置いて、他の超電導関連プロジェクトの進捗状況も見つつ効率的な体制で推進することが望まれる。

フライホイールを用いた電力貯蔵技術の開発を主眼とした展開も考えられる。超電導軸受を用いない他の形式のフライホイールシステムも含めた最適な電力貯蔵システムを目指した高性能化やディーゼル等他のシステムとの組合せも検討に値する。この場合、負荷平準化を目標とする一方で、瞬時電圧低下対応電源のほかに、無停電電源用等、短期的に実用化も可能なテーマも明確にする必要がある。

研究体制としては、より実用化の段階に近づくために、プロジェクトリーダーによる集中管理型プロジェクト運営を導入すること、また、計画見直しの機動性を確保するために、このプロジェクトリーダーに「柔軟な計画変更」の権限が与えられることが肝要である。

g.追跡評価のためのベース資料

ニューサンシャイン計画「高温超電導フライホイール電力貯蔵研究開発」プレ最終評価

報告書（平成 11 年 3 月）

⑨ニューサンシャイン計画「フライホイール電力貯蔵用超電導軸受技術研究開発」

a.実施期間

平成 12 年度～平成 16 年度(5 年間)

なお、本研究開発は平成 15 年度中間評価において事業を中止した。(平成 16 年度は一部運転研究を民間負担で実施した。)

b.研究開発費総額

約 13 億円

c.研究開発の目的

電力分野で実現期待度の大きいフライホイール電力貯蔵システムの実用化には、高荷重の高速回転体を非接触かつ低損失で支持できる高温超電導バルク材を用いた超電導軸受技術の確立が必要である。本プロジェクトでは、フライホイール電力貯蔵システム用として大型化に適したラジアル型超電導軸受に関し、載荷力向上、回転損失低減、軸降下低減等の技術開発に取り組み、100kWh 級フライホイール電力貯蔵システム用超電導軸受の技術的見通しを得るとともに、フライホイール電力貯蔵システムに必要な技術課題を明らかにする。

実施項目は、①軸受用 Y 系超電導バルクの開発、②RE 系超電導バルクの超電導軸受への適用可能性研究、③磁気回路の高磁場化及び最適化、④回転損失低減技術の研究、軸降下低減技術、⑤超電導軸受評価試験である。

また、超電導軸受応用技術開発として、超電導軸受運転試験、フライホイール軸制振技術開発、フライホイール本体の高性能化・高品質化のための設計・製作技術開発を行う。同時に、フライホイール電力貯蔵装置の用途別要求仕様、国内外の開発状況等に関する調査を実施する。

d.主な研究開発成果

超電導軸受要素技術については、①載荷力 10kWh 級軸受モデルで 目標の載荷力密度 10N/cm^2 を達成し、②100kWh 級軸受モデルにおいて最終目標を達成するためには過冷却法が有効であることの確認、③回転損失が 10kWh 級軸受モデルで 2.5mW/N を達成し、100kWh 級モデルでは解析により 2.3mW/N の値を求めることができたこと、回転損失の低減には渦電流の抑制と超電導バルク体の配置が重要であることの確認、④軸降下では、軸降下に対する過冷却法、予荷重法の有効性を確認し、軸降下量は 3 時間後で $100\mu\text{m}$ を達成した。

超電導軸受応用技術では、①10kWh 級運転試験装置では、装置の詳細構造図及び運転試験施設の計画図を作成し、平成 15 年 に 10kWh 級運転試験装置を完成させる見通しを得た。②軸制振とフライホイールについては、本体、軸制振において非線型方式、パワー制御、安定化フィルター採用によりローターの弾性振動を安定化させる技術を開発したこと、フライホイール本体のフィラメントワインディング作成技術の最適化により、高速回転可能な均一なフライホイールを製作した。

技術調査では、①フライホイール関連の国内外動向、②フライホイール事業の市場調査により、市場の急拡大が判明した。また、超電導フライホイールの当面の適用分野としてデータセンターUPSが有力であることが判明した。

原著論文数： 27 件、特許出願件数： 2 件の成果があった。

e.研究開発機関

(財) 国際超電導産業技術研究センター (ISTEC)、(株) 四国総合研究所、(株) IHI、
(株) イムラ材料開発研究所、住友特殊金属 (株)、光洋精工 (株)

(独) 産業技術総合研究所

f.事後評価結果概要

今後、経済・社会環境の変化と環境・エネルギー技術の進歩を踏まえて見極めるべきである。

大容量の負荷平準化用は重要であるが、導入には時間がかかる。UPS 等一般産業用として有用であり、当面、小規模フライホールの開発を期待する。

超電導が最有力ということではなく、超電導技術の他の用途を視野に入れた展開も必要である。

本技術のニーズについて広い視点からの調査が必要であり、無接触軸受の応用範囲の拡大も期待され、今後も基礎研究の継続が重要である。

社会的ニーズが不透明なまま、大規模な次期フェーズに進むべきではなく、将来の可能性の見極めが必要である。

g.追跡評価のためのベース資料

「フライホイール電力貯蔵用超電導軸受技術研究開発」中間評価報告書 (平成 15 年 8 月)

「NEDO 技術開発機構におけるプロジェクト研究開発評価について」 (平成 16 年 2 月)

⑩ニューサンシャイン計画「交流超電導電力機器基盤技術研究開発」

a.実施期間

平成 12 年度～平成 16 年度(5 年間)

b.研究開発費総額

約 72 億円

c.研究開発の目的

電力自由化に伴い、各種分散電源の増加に対応するために、「超電導現象」を応用した電力機器を採用することにより既存電力設備等の有効活用が可能になる。また、超電導電力機器の実用化には、i) 交流損失の低減技術、ii) 高電圧絶縁技術、iii) 大電流による電磁力対策技術、iv) 冷却技術などの基盤技術の確立が不可欠であり、本プロジェクトでは、これら機器側から求められる交流超電導電力機器の基盤技術の確立を目的とする。

そのための、実施項目は、① 超電導送電ケーブル基盤技術の研究開発、② 超電導限流器基盤技術の研究開発、③ 電力用超電導マグネットの研究開発、④ トータルシステム等の研究開発、である。

d.主な研究開発成果

超電導送電ケーブル基盤技術では、① 単心構造で長さ 3 m の超電導ケーブルにより、3 kA の通電、交流損失 1W/m を確認、② 断熱管のモデルの試作・検討から、最適化を行い 10m の断熱管直線部で 0.3W/m を実現、③ 500m ケーブルの構造、仕様、試験項目、布設レイアウト等を検討し、平成 16 年度から公開試験を実施するための技術課題を明確化。500 m 長ケーブルと同等の構造を持つ短絡試験用導体を作製、短絡試験を実施し、77kV 系統の短絡容量耐量 31.5kA、0.5 秒に耐えることを確認、⑤ Y 系線材で 1 m の単尺導体を作製し、通電容量 1 kA の交流損失を評価。

超電導限流器基盤技術の研究開発では、① 2次元揺動 PLD 法で、最高値 $I_c=148\text{A/cm}$ 幅、 $J_c=330$ 万 A/cm^2 (通電法)を確認、② 2次元揺動 PLD 法で、大きさ $30\text{cm}\times 10\text{cm}$ を模擬した条件で、平均 $I_c=76\text{A/cm}$ 幅、 I_c 均一性 $\pm 8\%$ 、平均 $J_c=240$ 万 A/cm^2 (誘導法)を確認、③ 40 枚素子を直列化した 6.6kV/50A 級限流モジュールにより限流試験を実施し、電圧ピーク値 11.9kV を確認、④ 20、30、40 直列素子の限流動作時の破壊電圧を試験し、素子直列数と破壊電圧の関係が比例しており、再現性も良い事を確認、⑤ 1 cm 幅の超電導膜を多角形配置した 6 並列素子を製作し、連続通電試験特性試験を行い、380Arms の通電を確認、⑥ 3 cm 幅の超電導膜を多角形配置した 8 並列 2 直列の 1 kA 級素子を製作し、連続通電試験特性試験を行い、1 kArms の通電を確認し、200Vrms、3.5 サイクルの限流試験を実施。⑦ 66kVA 級限流器用リアクトルを 5 直列構成とし整流器と組合せ、整流器型限流器の限流試験を行い、電圧 20kVrms、3 サイクルを確認。

電力用超電導マグネットの研究開発では、① 66kV/6.9kV-10MVA 変圧器の概念設計を反映した各部分要素モデルにより電圧 77kV まで確認し、電流 800A の通電を確認、② 66kV/6.9kV 級 2MVA 単相の超電導モデル変圧器を製作し性能評価試験を行い、290Arms

の通電を確認、③ 高温超電導変圧器のコスト検討を行い、イニシャルコストが現用機の 1.68 倍になれば、導入のメリットがあることなどを解析、④ 要素研究開発を活かした 66kV/700A 級限流器用モデルコイルを製作し、6 並列構成で、交流 140kVrms 1 分間と雷インパルス両極性 350kV の耐電圧をクリアするなど、66kV 電力機器としての仕様を満たし、さらに電圧 38kVrms 電流 500A の課通電および 750A/5 ms のパルス通電を確認。

トータルシステム等の研究では、① 都市部地中系統に超電導ケーブルや限流器が導入された時の解析モデルを作成し、算定された超電導ケーブル定数を用いてこの系統モデルで導入効果を解析し、限界送電電力で現状の 1.3 倍あることなど経済性を検証、②超電導ケーブル、限流器の実現可能性、ケーブルと現用試験方法、遮断器、ヒューズ、変圧器、リアクトルの試験方法を調査し、超電導ケーブル、限流器、変圧器の試験項目の抽出を実施。

原著論文数：131 件、特許出願件数：35 件の成果があった。

e.研究開発機関

超電導発電関連機器・材料技術研究組合(Super-GM：東京電力（株）、中部電力（株）、関西電力（株）、住友電気工業（株）、古河電気工業（株）、（株）フジクラ、日立電線（株）、財）ファインセラミックスセンター、（株）前川製作所、三菱電機（株）、（株）東芝、富士電機（株）、（財）電力中央研究所）

（独）産業技術総合研究所

f.事後評価結果概要

実用化のためには、超電導ケーブルでは、より大きい電流容量と長い線路長での研究開発、高電流密度線材及び中間接合部の開発、高効率冷凍機の開発、電力系統での実証試験等、技術課題を解決する必要がある。

経済性の検討を含め、ニーズ・オリエンテッドな研究開発が望まれる。

こうした研究開発を進めるには、事業化、産業化に結びつける施策、開発戦略が必要である。

g.追跡評価のためのベース資料

「交流超電導電力機器基盤技術研究開発」事後評価報告書（平成 17 年 8 月）

(2) 超電導素子分野

①産業科学技術開発「超電導材料・超電導素子」

a.実施期間

昭和 63 年度～平成 9 年度(10 年間)

b.研究開発費総額

約 269 億円 (材料・素子両分野の合計)

c.研究開発の目的

超電導物質の電力、エレクトロニクス等の分野における工学的利用を可能とするため、超電導材料及び超電導新機能素子の開発に係る基盤技術を確立することを目的とする。超高速素子等超電導材料を利用することにより可能となる超電導新機能素子に必要な技術及び実証素子の開発を行う。

d.主な研究開発成果

三端子素子については、高利得・高速性を目指して各種のタイプが試みられ、トランジスタ利得の確認はおこなわれたが、実用化への途は遠いことが判明した。

SFQ 素子による高速サンプリング技術の実証に成功し、後継プロジェクトに引き継がれた。

e.研究開発機関

(財) 国際超電導産業技術研究センター (ISTEC)、(財) 新機能素子研究開発協会、(株) 日立製作所、(株) 東芝、三洋電機 (株)、沖電気工業 (株)、日本電気 (株)、三菱電機 (株)、富士通 (株)、住友電気工業 (株)、(独) 産業技術総合研究所

f.事後評価結果概要

超電導素子については、高温超電導ジョセフソン接合の特性バラツキの低減、SFQ 素子を中心に回路設計技術の確立、半導体回路との整合性が課題である。

素子に関しては、技術的課題が大きいため、集中管理方式の研究管理体制が適切であった。

g.追跡評価のためのベース資料

産業科学技術研究開発制度「超電導材料・超電導素子」最終評価報告書および別冊 (平成 11 年 3 月)

平成 20 年度技術評価調査「超電導材料・超電導素子研究開発プロジェクトの技術・産業・社会へのインパクトに関する調査」(平成 21 年 3 月)

②-1 産業科学技術開発「超電導応用基盤技術研究開発（Ⅰ）」

a.実施期間

平成 10 年度～平成 15 年度(6 年間)

b.研究開発費総額

約 159 億円（材料・素子両分野の合計）

c.研究開発の目的

超電導技術は電力応用や情報通信応用等幅広い分野において従来技術では実現しえない機器や従来機器の飛躍的な性能向上を可能とし、エネルギーの高効率利用等に資するものと見込まれる。前フェーズの「超電導材料・超電導素子の研究開発」（昭和 63 年度～平成 9 年度）で得られた成果をベースに超電導応用に向けた基盤技術の確立を目指す。高温超電導材料はエレクトロニクス産業分野にインパクトを与えるものと期待されている。

本プロジェクトは、高温超電導技術を実用機器に利用するためには未だ解決すべき課題が多いため、これら課題の解決による高温超電導材料の実用化を目指し超電導素子を作製するための基盤技術を確立することを目的としている。

d.主な研究開発成果

SFQ 集積回路に必要な要素技術を取得し、 $I_c R_n$ 積及び 1000 接合アレイにおけるバラツキの目標値を上回った。

原著論文数：837 件、特許出願件数：261 件の成果があった。（材料・素子両分野の合計）

e.研究開発機関

（財）国際超電導産業技術研究センター(ISTEC)、日本電気（株）、（株）日立製作所、（株）東芝、富士通（株）、三菱電機（株）、デュポン（株）、三洋電機（株）、（独）産業技術総合研究所

f.事後評価結果概要

接合特性の制御性向上、入出力インターフェイスなどの実装技術、大規模 SFQ 回路作製のための接合の臨界電流値の制御は今後の課題である。

g.追跡評価のためのベース資料

産業科学技術研究開発制度「超電導応用基盤技術研究開発プロジェクト評価(中間報告書)」(平成 14 年 2 月)

「超電導応用基盤技術研究開発プロジェクト（第Ⅰ期分）」事後評価報告書（平成 17 年 3 月）

⑪「低消費電力型超電導ネットワークデバイスの開発」

a.実施期間

平成 14 年度～平成 18 年度(5 年間)

b.研究開発費総額

約 36 億円

c.研究開発の目的

半導体と異なる原理で動作する超電導 SFQ デバイスは、クロックレート 100GHz 以上という超高速性およびゲート当たり $1\mu\text{W}$ 以下の低消費電力性という点で、半導体を大きく凌駕する性能を併せ持っているが、機器開発には回路の集積度向上が課題である。

本プロジェクトでは、超電導回路における低消費電力高性能デバイスを実現するため、ニオブ系低温超電導デバイス開発および酸化物系高温超電導デバイスの開発を行う。

ネットワーク社会が高度化するにつれて、誰もが快適かつ安全に情報を入手・共有・発信できるようにするための情報通信基盤技術の開発を行うことが、ますます重要となっている。しかし、半導体の動作限界とシステムの消費電力の増加のため、年々指数関数的に増加している情報量を処理することが困難になりつつある。この危機的状況を打破するために、超電導 SFQ デバイスを用いて、超高速・低消費電力の情報通信機器を開発する道筋をつけることを目的として本プロジェクトを実施する。

d.主な研究開発成果

ニオブ系低温超電導デバイス開発では、① ニオブ系 LSI プロセス開発で新平坦化法などの要素技術開発に成功し、ニオブ 9 層構造を可能にした新プロセス技術を開発、② SFQ 回路設計基盤技術開発で、PTL (Passive Transmission Line)配線法という回路高速化技術を SFQ 回路に適用する、各種非同期設計法を開発しその効果を確認、③ SFQ ルータ用スイッチモジュールの基盤技術開発で SFQ スイッチと CMOS ラインカードを用いたルータアーキテクチャを提案し、スケジューラつき 4×4 スイッチ、 16×16 スイッチ等の開発と高速動作に成功し、さらにシステム化技術、実装技術を開発し、SFQ スイッチプロトタイプシステムの開発とパソコン間画像転送実験にも成功、④ SFQ サーバ用プロセッサモジュールの基盤技術では、SFQ に適した 4 ビットシリアル ALU など数多くの要素回路の開発し、これらを用いた同期および非同期プロセッサの動作確認に成功。

酸化物系高温超電導デバイス開発では、①酸化物系集積回路プロセスでは超電導 4 層の積層構造の作製技術と最小線幅 $1\mu\text{m}$ の回路加工技術を確立、②交差配線形成を可能とする新積層構造作製プロセスとプロセス中に酸素抜けをモニタリングする技術を開発し、回路歩留まりの向上に成功、③回路設計・製作基盤技術開発では熱雑音等の高温超電導回路特有の課題を考慮した回路設計技術を開発し、種々の SFQ 要素回路に対し $\pm 20\%$ 以上のマージンが得られるような設計の最適化、④新しい回路レイアウト法を開発し、さらに、寄生容量等を低減するレイアウトにより従来比 3 倍以上動作周波数を実現、⑤SFQ-dc 変換回路を開発し、SFQ 要素回路の高温 ($>20\text{K}$) での動作を実証、⑥実装基盤技術開発および

回路システム実証では、小型冷凍機冷却を可能とする電気信号用軽量化モジュール（25g）や、光信号用の広帯域 PD 一体型非磁性モジュールを開発し、サンプラー回路への 50-100 GHz 高周波信号の導入の可能化、⑦回路システム実証では、アナログ - デジタル変換回路（AD コンバータ）とサンプラー計測回路の 2 つの回路システムの性能実証を実施、⑧AD コンバータについては、酸化物系高温超電導プロセスで作製可能な比較的集積規模の小さな（500 接合以下）超電導フロントエンド回路と半導体信号処理回路（バックエンド回路）を組み合わせた AD コンバータの開発を進め、低温フロントエンド回路を利用したシステムで、10 MHz 帯域に対し 13.7 ビットという世界最高性能を実証、⑨酸化物系高温超電導材料を用いた主要な AD コンバータ要素回路の開発、⑩軽量（4 kg 以下）の冷却系と、トリガージッタを約 1ps に改良した高さ 200mm 弱のラックサイズ制御系から構成されるサンプラー波形計測デモシステムを開発し、50 GHz 以上の広帯域特性の実証に成功。

原著論文数：105 件、特許出願件数：32 件の成果があった。

e.研究開発機関

（財）国際超電導産業技術研究センター（ISTEC）、名古屋大学、横浜国立大学、（株）日立製作所、（株）アドバンテスト研究所

f.事後評価結果概要

わが国はジョセフソン・コンピュータ開発プロジェクトで超電導デバイスに関する豊富な知識と経験を有しており、本プロジェクトで、その知識と経験に最新の半導体プロセス技術や自動設計技術を融合して、SFQ 回路に基づく新しい超電導デバイスの実用化に挑戦した。

Si 半導体の性能限界が見え、加えて高速・大容量のネットワーク・ルータの処理性能向上の要求は高まりつつある現在において、省エネルギーや高速性の観点からポスト Si デバイスの有力候補である超電導 SFQ の開発プロジェクトは、国家戦略としても長期的視野に立って継続投資すべき分野である、

超電導 SFQ ルータは、将来の超大容量ルータ実現に向けたブレークスルー技術となる可能性があり、戦略的に重要な技術であると考えられる。この分野における日本のメーカーの役割を果たすためにも、次のステップとして総合的なプログラムを推進し、製品化前の基礎分野に対し研究支援を継続すべきである。

今後、低温系と高温系の位置づけを明確にし、微細化技術を含めて、短期的なターゲットと長期的なものを明らかにし、ネットワークデバイスユーザーとの連携を強化して関連分野の人材育成にも取り組むべきである。

既存技術との競争を考える場合、材料よりも機能やアプリケーションの優劣を考慮するのが適切である。

超電導デバイスのさらなる大規模集積化を実現するには、超電導ルータの研究成果の宣伝・広報活動に力を入れ、現状の集積規模のものを市場に提供し、徐々に超電導 SFQ ルータの評価を高めていくシナリオが重要である。

g.追跡評価のためのベース資料

「低消費電力型超電導ネットワークデバイスの開発」事後評価報告書（平成 19 年 9 月）

第3章 評価

(施策評価関係)

1. 施策（超電導研究開発）の目的・政策的位置付けの妥当性

(1) 施策（超電導研究開発）の目的の妥当性

1986年（昭和61年）の高温超電導体の発見は、幅広い技術分野でのパラダイムシフトを起こすと信じられ、学術面のみならず、応用面からも学会や産業界から、この物質に対する大きな期待が膨らんだ。この高温超電導という新たな性質を持つ新規物質を工業的に利用可能なものとして、新たな産業を生み出すための基盤技術確立するというプロジェクト開始時の施策の目的は妥当であった。昭和63年度という高温超電導体の黎明期の、その発展の方向性を明確にするための研究開発プロジェクトとして施策を展開したことは、特にエネルギーや環境問題に関連する超電導材料の持つ大きなポテンシャルを踏まえておりおおむね妥当なものであった。実際に、産学官の多くの研究者を動員して、短期間に基本的なプロセス技術、課題、開発の方針などを整理し、多くの成果を得た。具体的にはセラミックス材料である高温超電導体を柔軟な線材に適用する基礎技術や、高温超電導の物性を評価する上で重要な単結晶の育成技術、電子デバイス用の高品質な薄膜の合成技術、強い磁界を捕捉するバルク超電導体の開発など、数々の成果を生み出し、我が国の高温超電導研究を短期間に世界最高レベルにすることができた。

超電導現象に基づいて動作する各種大型機器や小型素子デバイスは、自然エネルギーの有効利用、環境保全と高度情報社会を支える応用基盤技術として期待される。また、研究成果の進展に合わせて研究目的を材料開発、機器開発へと順次移行してきており、省エネルギー化を目指し、電力・エネルギー分野の社会的ニーズに適合した開発目標を立てている。

これらの研究開発プロジェクトは金属系超電導材料、機器の開発プロジェクトにおいては具体的な技術展開、目標が定められており、また高温超電導材料においては拡張性を有する目的となっており、その後のプロジェクトへ内容の整理がなされた上で継承されている。同様に、素子分野に関しては、超電導三端子素子開発を目標に掲げたことは間違っていなかったが、酸化物超電導体の高品質薄膜形成および接合形成の難しさからSFQ素子に目標を変えて継承されたことは適切であった。

一方、結果論であるが、高温超電導体の実用化を急ぎすぎたきらいがあったと思う。物質（材料）の実用化のためには、性能面だけではなく、コストや信頼性、耐久性など、多くの関門をクリアしなければならない。例えば、超電導発電機やSMES、超電導フライホイールなどでは、超電導機器の高いコストの問題、SFQ回路では集積度に見合った応用対象設定などが挙げられる。

着手から20年を越えてもなお、政策主導の研究開発が進められている。総合施策とし

て全体を俯瞰的に眺め、個々の課題が有機的かつ流動的に実施されて来たか個々の研究開発プロジェクトに係る中間的評価、事後的評価にとどまることなく、蓄積された技術的成果が作り出す可能性（技術的な鉱脈）について再点検をする必要があったといえる。

＜肯定的意見＞

○昭和 63 年度という時期は技術的に見て黎明期であり、その発展の方向性を明確にするための研究開発プロジェクトとして施策を展開するには、極めて妥当な時期であり、かつ、施策目的であった。（菊池座長）

○超電導現象に基づいて動作する各種大型機器や小型素子デバイスは、本 21 世紀以降における自然エネルギーの有効利用、環境保全と高度情報社会を支えるべき不可欠な応用基盤技術として期待され、その研究開発が世界的な規模において急務の課題であることは言うまでもない。本技術評価調査で取り上げられた各研究課題のそれぞれはいずれも、開発目標が具体的に達成されれば、その波及効果は我が国のみならず国外に対しても著しいと期待され、本調査報告にある様々な課題を、国の重要な施策として選択したことは極めて妥当なものであった。（岸尾委員）

○液体窒素温度冷却で超電導を示す一連の高温超電導体が発見され、学術面のみならず、応用面からも学会や産業界で、この物質に対する大きな期待が膨らんだ。特にエネルギーや環境問題に関連して、超電導材料の持つ大きなポテンシャルを踏まえて策定された本施策はおおむね妥当なものであった。（熊倉委員）

○高温超電導体の発見は電子デバイスに限らず、幅広い技術分野でのパラダイムシフトを起こすと信じられた。低温超電導体で進められていた二端子素子の JJ 素子での課題と社会の主流であった Si の FET 素子を背景に、超電導三端子素子が目標に掲げられた。この目標設定は間違っていなかったが、三端子素子を実現するには酸化物超電導体の高品質薄膜形成および接合形成のための界面制御が余りにも高い障壁になった。そのため、後継プロジェクトへの移行では、超電導素子の特徴である高速性を活かす SFQ 素子に目標を変えた。このことと低温超電導体を用いた集積回路の作製を先行させて SFQ 回路の設計技術を高めたことは適切な選択であったと言える。なお、酸化物超電導体の薄膜形成・加工技術はその後のセンサーなどの素子開発に活用されている。（高木委員）

○1986年に発見された高温超電導物質を工業材料にするために、その基盤技術や新規超電導物質の探索などを目的として「超電導材料・超電導素子プロジェクト」が1988年に開始されている。これらは高温超電導物質の発見を機に計画がなされたと考えられる。また既存の金属超電導材料を使った超電導発電機を初めとする超電導電力機器の開発やこれらに使うことを目的とした金属系、酸化物系超電導材料の線材化研究開発も1989年には開始されている。これらの研究開発プロジェクトは金属系超電導材料、機器の開発プロジェクトにおいては具体的な技術展開、目標が定められており、また高温超電導材料においては拡張性を有する目的となっており、その後のプロジェクトへ内容の整理がなされ

た上で継承されている。また実用化時期や社会のニーズも適宜行われており時間の経過とともにより具体的な目標等が設定されている。(齊藤委員)

○高温超電導体という新規に登場した物質を、工業的に利用可能なものとし、新たな産業を生み出すための基盤技術を確立するという、プロジェクト開始時の施策の目的は妥当であった。実際に、産官学の多くの研究者を動員して、短期間に基本的なプロセス技術、課題、開発の方針などを整理し、多くの成果を得た。例えば、1988年から始まった最初のプロジェクト「超電導材料・超電導素子」では、セラミックス材料である高温超電導体を柔軟な線材に適用する基礎技術や、高温超電導の物性を評価する上で重要な単結晶の合成技術、電子デバイス用の高品質な薄膜の合成技術、強い磁界を捕捉するバルク超電導体の開発など、数々の成果を生み出し、日本の高温超電導研究を短期間に世界最高レベルにした。

(田島委員)

○超電導プロジェクト全般を通して、おおむね波及効果、時期等に関して具体化されていたと思う。また、プロジェクト移行時においても技術課題は取捨選択されてきたように思う。超電導プロジェクトの目的はおおむね妥当であった。(早川委員)

○高温超電導物質の発見後ただちに高温超電導材料探索等を目的とした研究開発を開始し、研究成果の進展に合わせて研究目的を材料開発、機器開発へと順次移行してきている。また省エネルギー化を目指した電力・エネルギー分野の機器開発研究という、社会的ニーズに適合した開発目標を立てている。(原委員)

<問題点・改善すべき点>

●着手から二十年を越えてもなお、政策主導の研究開発が進められている。個々の研究開発プロジェクトに係る中間的評価、事後的評価にとどまることなく、蓄積された技術的成果が作り出す可能性(技術的な鉤脈)について再点検をする必要があったといえる。(菊池座長)

●個々の課題における研究開発の目的とその意義に関しては総じてまったく問題は無かったが、総合施策として全体を俯瞰的に眺め、個々の課題が有機的かつ流動的に実施されて来たかを、対費用効果(将来のマーケットも含む)を含めて再度慎重に分析し直す必要があり、今後の施策として生かして行く必要がある。(岸尾委員)

●結果論であるが、高温超電導体の実用化を急ぎすぎたきらいがあったと思う。物質(材料)の実用化のためには、性能面だけではなく、コストや信頼性、耐久性など、多くの関門をクリアしなければならない。この点を考慮して、もう少し長期的な視点に立った施策があった方が良かった。当時の雰囲気の流れによって、比較的早期に実用化できると考えたのではないかと。(熊倉委員)

●後からだから言えることであるが、三端子素子から SFQ 素子への転換を早くするべきであった。(高木委員)

●しかし、基盤技術開発ではなく、特定の機器の開発を目指したプロジェクトでは、所期

の技術的目標をほぼ達成しておきながら、実用化に結びつかない案件が続いた。これは、各プロジェクトを立案した研究者側の目的（成果イメージ）と、実際の社会ニーズとの間にずれがあったためだと考える。例えば、超電導発電機や SMES、超電導フライホイールなどは、超電導機器の高いコストや冷却運転による使い勝手の悪さなどの問題を認識した上で、それでも導入したいという強いニーズが需要者側にあったかどうか疑問視される。今日、さまざまな競合技術や代替技術がある中で、冷静に考えれば超電導機器の市場での競争力は高くない。各プロジェクトは、超電導機器の市場競争力を高める技術的挑戦であったことは認めるが、それぞれ技術的目標を達成していながら結果として実用化・産業化に至っていないのは、事業化に対する社会的・経済的分析が不足していたためであり、施策の目的に問題が合ったと言わざるを得ない。（田島委員）

●最初のプロジェクト「超電導材料・超電導素子」は高温超電導体が発見されてまもなくであったために探索的課題が多かった。課題の中には、開発を進めてゆく間に課題を変更したくても柔軟にできなかった。この点はもっと柔軟さが必要であった。（早川委員）

<その他の意見>

・現在、省エネルギーと高速特性の観点から SFQ 回路が研究開発されているが、半導体回路に比較すると集積度はまだまだ低い。集積度が低い間は省エネルギーの効果は大きくない。そのため、集積度のロードマップのマイルストーンごとに集積度に見合った応用対象を設定することが、長期的な超電導素子の開発を進めるために必要であろう。（高木委員）

（２）施策（超電導研究開発）の政策的位置付けの妥当性

1986 年の高温超電導物質発見後、我が国がすぐさま産学官による議論と検討を始め、いち早く我が国の重要施策・国家プロジェクトとして立ち上げたことは高く評価できる。これは、1980 年代当時の我が国が米国との研究競争を繰り広げており、その影響を受けた政府としての判断だったと推測されるが、超電導応用の全分野を対象に大規模な研究開発の拠点を構築することにより、我が国が超電導研究開発のリーダーとして最新の研究成果を発信し続け、国際的に先導するポジションを明確に維持していたのであり、このことは施策の大きな成果であった。また、高温超電導発見以前から世界的に問題となっていた環境・エネルギー問題に対して、特に省エネルギーの観点から研究開発を進める本施策はおおむね妥当であった。

後継のプロジェクトで、目的が具体的になり、実用性も見えてきた点でも政策的妥当性は高かった。中でも超電導ケーブルは実証研究が主体であり、我が国でも実証プロジェクトを開始したことは評価できる。また、超電導素子の高速特性と低消費電力特性は、当初からプロジェクト推進の要因である。その中で、低消費電力特性が現在の省エネルギー政策の目的に合致している。

以上のとおり超電導研究開発の政策的妥当性は適切とあると考えられ、超電導研究開発を着実に推進してきたことにより、我が国の超電導技術は世界最高水準に達しており、それが他国の政策決定の指標にもなっている。しかしながら、実用化にはより多くの技術力の成熟化とコストダウンが必要であり、引き続き研究開発を推進することが重要である。

一方、超電導素子は、単体のトランジスタ性能では優れているものの、システム技術の進歩が著しい Si 半導体との間で、システム性能の差は歴然としてしまった。このような競争軸の変化への対応の遅れは国家プロジェクトのマイナス面であったと思われる。プロジェクトの推進体制において再委託型の予算配分組織編成がなされているが、研究開発の成果に係る利用関係を構築するという視点からして、例えば、基礎理論の成果と応用開発の成果のフェーズを合わせることが困難であったことからして、何らかの新たな推進機能を付与すべきであった。例えば高温超電導材料の粒界弱結合などの材料としての難しさが早い段階で認識されていた面もあり、基礎研究にシフトすべきテーマもあった。

<肯定的意見>

○超電導研究開発の拠点を構築することによって、国際的なポジショニングを明確に維持できたことは施策の大きな成果であった。（菊池座長）

○超電導材料・超電導素子は、各種の超電導応用技術（工学）を実現するための最も基本となる基本構成要素であることは言うまでもなく、1986 年の高温超電導物質発見後、我が国がすぐさま産学官による議論と検討を始め、いち早く 1987 年に我が国の重要施策・国家プロジェクトとして立ち上げたことは高く評価できる。国際的な研究開発動向に適合していたかではなく、我が国がリーダーとして最新の研究成果を発信し続け国際的に先導し

てきたのが事実で、このことは大いに評価される。(岸尾委員)

○環境・エネルギー問題は、高温超電導発見以前から世界的に大きな問題となっており、高温超電導の発見に際して、特に省エネルギーの観点から本超電導開発を進める本施策は概ね妥当であった。また世界の先進各国で高温超電導の研究開発がスタートしようとしていた時期であり、この点からも本施策は妥当であった。(熊倉委員)

○超電導研究開発プロジェクトは1988年に省エネルギー技術を開発する目的で開始され、その後連携をもって複数の超電導プロジェクトが行われた。これらはその後の二酸化炭素削減の重要技術として実施されてきている。また我が国の超電導研究開発プロジェクトの成果は世界をリードしてきている。これらのことから政策的妥当性は高かったといえる。(齊藤委員)

○超電導素子の高速特性と低消費電力特性は、当初からプロジェクト推進の要因である。その中で、低消費電力特性が現在の省エネルギー政策の目的に合致している。(高木委員)

○超電導開発は、後のプロジェクトは、より目的が具体化し、実用性もはっきりとして来た。これを見ても研究開発の政策的妥当性は高かったと思う。また、国際的に見ても超電導開発は時期にあったものであった。(早川委員)

○超電導研究開発を着実に継続して推進してきたことにより、我が国の超電導技術は世界最高水準に達しており、我が国の研究開発動向が他国の政策決定における指標となっていると考えられる。現在の国際的な超電導機器開発動向をみると、技術の完成度が高い超電導ケーブルの実証研究が主体であり、我が国においても超電導ケーブルの実証プロジェクトを開始したことは評価できる。その実用化のためには、より多くの実証研究を通じた技術力の成熟化とコストダウンが必要であり、引き続き研究開発を推進していくことが重要である。(原委員)

○1980年代の日本は、半導体や自動車分野で米国との技術覇権競争を繰り広げていた。本高温超電導研究プロジェクトも少なからずその影響を受けて立案されたと推測できる。実際、当時の米国では、レーガン大統領の政権下で国家プロジェクトとしての超電導開発法案が成立している。我が国でも、超電導応用の全分野を対象に大規模な研究体制を構築しようとしたのは、当時の政府としては妥当な判断だったと思う。(田島委員)

<問題点・改善すべき点>

●プロジェクトの推進体制において再委託型の予算配分組織編成がなされているが、研究開発の成果に係る利用関係を構築するという視点からして、例えば、基礎理論の成果と応用開発の成果のフェーズを合わせることが困難であったことからして、何らかの新たな推進機能を付与すべきであった。(菊池座長)

●この25年弱の研究期間の中で、個々の研究課題の連続性、内容の修正、投入研究費や研究期間が妥当であったかは、個々の課題について再精査・検証する必要がある。印象として総じて言えば、いずれの研究課題も研究期間がほぼ同じ(約5年間)で、一つの課題

が終わると次年度より新課題が始まるといった研究期間に緩急のないスケジュールを単調に歩んで来たように感じられる。(岸尾委員)

● 高温超電導の研究が開始されて、早い段階で粒界弱結合などの材料としての難しさが認識された。このような点を考慮して、早い段階でもっと基礎研究にシフトすべきであったと思う。(熊倉委員)

● しかし、1990年代以降は、技術覇権の対象がパソコンやインターネットなど情報技術に急速にシフトし、超電導による電力機器の開発は相対的にその重要性を失いつつあった。また、電子デバイス分野においても、活発な企業間競争の結果として Si 半導体の微細化技術が進歩し、集積度が向上し続けた。その結果、高集積論理 LSI の並列処理による利用技術の蓄積が進み、Si 半導体をプラットフォームとするコンピュータ・システムは飛躍的な演算性能の向上を果たした。超電導素子は、単体のトランジスタ性能では優れているものの、システム技術の進歩が著しい Si 半導体との間で、性能の差は歴然としてしまった。このような競争軸の変化が起きている中で、超電導プロジェクトはあまり影響を受けずに継続された。20 年以上のプロジェクトを通して、実用化に至った案件が非常に少ないのは、経済原理の影響を受けにくい国プロのマイナス面が現れてしまったためだと思われる。(田島委員)

<その他の意見>

・ 課題の提案時、開始時に立てられた研究予定期間は実際に行なわれた実施期間に等しいのだろうか？ 課題研究各年度終了時において、当初目的の達成度や連続性を勘案した延長あるいは短縮を、十分検討したのかが明確でない。さらに、年度ごとの投入研究費の増額あるいは減額が適切に行なわれたのかが、本調査報告では読み取れない。とくに、各課題ごとのスタート時でのロードマップ、終了時での達成度の確認が必要である。(岸尾委員)

(3) 国の施策で行われるべき研究開発としての妥当性はあったか。国の関与が必要とされる研究開発施策であったか。

超電導はその物理的発現機構がいまだに不明で複雑な現象であり、これを応用した画期的、先端的なエンジニアリングを実現し社会に貢献するためには、新物質探索から始まって、材料化（高特特性化）、デバイス化、機器への実際の組み込み、意図する基本設計動作の検証、実証試験、実際の製品化等を繰り返し、長期間にわたるさまざまな角度からの研究が行なわれなければならない。高温超電導体のプロジェクトが始まった当時は、この材料についての基礎的理解ができていないのに応用面の期待だけが膨らみ、研究フィーバーが発生、国際競争が激しい状態であった。このような状況下、多くの企業間の協力を得て、共通する材料探索、薄膜技術など基盤技術開発を国がリードして行ったことは国として妥当であったと考える。限られた民間企業のみにより開発を実施するには、開発リスクも含めた経済的負担が極めて大きく、国が主導する長期的な総合プロジェクトとして実施しなければ実現し得ない。この点、我が国の科学技術政策の重要な研究課題の一つとして、超電導研究の推進を選んだことは誠に意義深かった。

超電導には低温環境が必要であり、システムも巨大になるという点でも国が主導で研究開発を推進する必要があった。

上記の種々の要因から、超電導分野は、国の関与が必要な分野であったと評価する。むしろ、産業政策としてどこまで国が関与すべきかの視点に着目した場合、例えば、素子分野の研究開発ステージは、産業技術という発展プロセスから見て SQUID や SFQ のケースが典型であるように、必ずしも良好な見通しであるとは言えない。しかし、材料分野での、米国 Albany における日米共同での超電導ケーブル実証プロジェクトの展開に見られるような動きも勘案すると、今後、中国や韓国等を含めたグローバルな展開も必要であると考えられる。

超電導技術は、技術的にも社会を大きく変える可能性を秘めているが、超電導線材、超電導機器組立、冷凍技術等広範囲かつ高度な技術の集積が必須であり、国が積極的に関与したことが世界的な成果につながっている。超電導素子に関しては、文部科学省の SFQ 素子の研究がネットワークデバイスのプロジェクトで生きている。その点からも国の関与は妥当であった。

一方、超電導技術の応用分野に関連する省庁は多数あり、経済産業省ほか、文部科学省や国土交通省等の省庁間の協力と連携は、一部で見られるものの必ずしも十分ではなかった。また、プロジェクトの中盤以降、開発すべき応用機器の対象が絞られて来た時点で、プロジェクトの発足前に、実用化や産業化の可能性を評価すべきであった。国家プロジェクトであるがために経済原理が働かない、という弊害がなかったかどうか、今後のためにも検証していく必要がある。

<肯定的意見>

○超電導分野は、国の関与が必要な分野であったと評価する。むしろ、産業政策としてどこまで国が関与すべきかの視点に着目した場合、例えば、素子分野の研究開発ステージは、産業技術という発展プロセスから見て SQUID や SFQ のケースが典型であるように、必ずしも良好な見通しであるとは言えない。しかし、日米共同プロジェクトの展開に見られるような目的課題の設定も勘案すると、今後、中国や韓国等を含めたグローバルな展開も必要であると考ええる。(菊池座長)

○超電導はその物理的発現機構がいまだに不明で複雑な現象であり、これを応用した画期的、先端的なエンジニアリングを実現し社会に貢献するためには、新物質探索から始めて、材料化(高特性化)、デバイス化、機器への実際の組み込み、意図する基本設計動作の検証、実証試験、実際の製品化等を繰り返し、長期間にわたるさまざまな角度からの研究が行なわれなければならない。学問分野の分類で言えば、物理、化学、材料工学、機械工学、電気工学、エネルギー工学、医療工学、その他に跨るまさに学際工学である。これには、産学の叡智を結集した総合研究組織の構築と管理運営がされなければならない。とくに限られた民間企業群のみによりこのことを実現するには、開発リスクも含めた経済的負担が極めて大きく、国が主導する長期的な総合プロジェクトとして実施しなければ、実現し得ない。この点、我が国の科学技術政策の重要な研究課題の一つとして、超電導研究の推進を選んだことは誠に意義深かった。実際、この一連のプロジェクトで得られた具体的な研究成果の数々は、常に世界のトップレベルを維持して来たとし、逆に、このような先端技術開発分野に短期的な予算措置しか出来なかった諸外国では、目標を達成できずに挫折した例が多いのが現状である。(岸尾委員)

○高温超電導体は技術的にも大きな可能性を秘めている材料であり、社会を大きく変える可能性を持っていると考えられるが、その実用化には大きな研究開発投資が必要であり、また開発リスクも大きいという認識であった。このため、国が主体的に取り組むべき研究開発であった。高温超電導の持つ社会的意義からもこれは言える。最終的な目標は産業化であり、経産省の関与が必要であった。(熊倉委員)

○超電導機器開発にあたっては超電導線材、超電導機器組立、冷凍技術等広範囲かつ高度の技術の集積を必要とするため多くの企業や研究機関が関わるのが必須であり、国の関与がなければなしえない。また新物質を工業材料にするなどの基礎的な研究開発を行うには個々の企業等に委ねるのではなく国が積極的に関与したことが、今日の多くの世界的な成果につながっている。さらに実用化を見通す研究開発を実施していくためには経済産業省の牽引に負うところが大きい。大学等とも共同研究開発体制を組み実施するなど省庁間の連携も有効に作用している。(齊藤委員)

○高温超電導体のプロジェクトが始まった当時は、この材料についての基礎的理解ができていないのに応用面の期待だけが膨らみ、研究フィーバーが発生、国際競争が激しい状態であった。このような状況下、多くの企業間の協力を得て、共通する材料探索、薄膜技術など基盤技術開発を国がリードして行ったことは国として妥当であったと考える。超電導

素子に関しては経済産業省のプロジェクトを繋ぐ形で、低温超電導体を用いた SFQ 素子の研究が現文部科学省のプロジェクトにより行われたことが現在のネットワークデバイスのプロジェクトに生きている。一方、SFQ 素子の開発は長期的観点から進める必要があり、企業のみで実施するには困難である。これらの点からも国の関与は妥当であった。(高木委員)

○超電導関係は低温環境が必要でありリスクが大きく、またシステムも巨大なものが多い。こうした課題を企業が独自で行うのは、リスクがありどうしても国が受け持たなければならない。また、課題が省エネルギーなどに関連するので経済産業省の課題である。(早川委員)

○高温超電導物質発見当初は、超電導物質の内部構造や超電導発現機構などが不明であったことから、各国ともその解明や線材化研究に着手し始めていた。そのような状況のもと、我が国がこの分野での技術優位を確立するためには、国が主導して研究開発を強力に推進することが必要不可欠だったと考える。国が主導した結果、多くの大学・研究機関が超電導研究開発に参画できる土壌が形成され、多くの若手研究者を育成することにもつながり、国全体の技術レベルの向上に繋がったといえる。(原委員)

○(2)で触れたように、プロジェクト創設当時の国際環境では、国の主導で取り組まれたことは妥当であった。(田島委員)

<問題点・改善すべき点>

●超電導機器やデバイスの実現は、各種産業分野、たとえばエネルギー、運輸、機械、通信、医療分野における革新的な先端技術を通じてグローバルな社会に貢献し、経済効果をもたらす。このため、経済産業省(旧通商産業省)が国としてのプロジェクトを立ち上げてこれまで主導して来たことは、当然であり大きく評価できる。しかしその一方、開発される超電導技術が適用出来る応用用途に関わる、我が国の関連省庁は極めて多数あり、これら省庁間の連携は乏しかったと言わざるを得ない。本施策が機器・素子開発に特化し、応用(ユーザー)側からのフィードバックが必ずしも十分で無かった。各種応用機器の心臓部となる超電導コンポーネントに期待される特性につきターゲット値を定量的に評価し、開発目標が達成出来たのか?省庁間の連携をさらに推進するべきである。(岸尾委員)

●高温超電導の研究は、経産省ほか、文部科学省や国土交通省、等でも積極的に行われていたが、これらの省庁間の協力、連携は必ずしも十分ではなかった。例えば、本プロジェクトには多くの大学が参加したが、そこでの研究が文科省の超電導の施策に活かされた(反映した)形跡はあまりない。(熊倉委員)

●他省庁と連携した活動は一部で見られるが、十二分になされたか否か、また連携によってより良い成果、より実用に近づく成果に結びつくかについては今後、検討が必要であろう。(齊藤委員)

●ただし、プロジェクトの中盤以降、目的が特定の応用機器の開発に絞られて来た時点で、

プロジェクトの設置前に、実用化や産業化の可能性を厳しく評価すべきだった。国プロであるために経済原理が働かない、という弊害がなかったかどうか、今後のためにも検証する必要がある。(田島委員)

<その他の意見>

- ・たとえば、超電導材料の開発や機器の応用に関連する省庁を挙げる。

文科省：新物質開発、メカニズム解明、核融合用強力電磁石、NMR 用強力磁石、
宇宙天文学観測電磁波センサー など

厚労省：医療工学（MRI、生体磁気測定、免疫診断） など

国交省：運輸（磁気浮上列車、自動車モーター、船舶推進） など

総務省：通信（移動体通信、固定基地局） など

(岸尾委員)

- ・省庁との関連は、特に大学との関係が重要であると思われるので、文部科学省ともっと連携すべきであろう。(早川委員)

2. 施策（超電導研究開発）の構造及び目的実現見通しの妥当性

（1）現時点までにおいて得られた成果は妥当か。

超電導線材の開発においては、「超電導材料・超電導素子」プロジェクトや「超電導電力応用技術」プロジェクトの成果が、その後の「交流超電導電力機器基盤技術研究開発」プロジェクトや「超電導応用基盤技術研究開発」プロジェクトなどの次のプロジェクトに活かされている。超電導発電機開発成果はその後のY系モーター、超電導電力貯蔵研究開発では金属系超電導システム、高温超電導システムに有効に活かされている。

具体的には、線材・ケーブル技術は、電力送電ケーブル、電力貯蔵（SMES）装置、産業用マグネット、冷凍機の製品に繋がり、また、低温工学の発展に寄与した。

高温超電導線材開発に関しては、世界的にも最高レベルを維持し、機器開発に必要な性能が実現できるレベルにまで来ており、プロジェクト間での技術継承も適切に行われてきたと考えられる。

高温超電導素子の分野では、フィルターや SQUID で実用に供されている。これらの素子作製にはこれまで集積回路作成を目的に実施されたプロジェクトで蓄積された材料技術が活かされている。

一般的に新しい材料を実用化にまで持っていくためには多くの関門をクリアする必要があることを考慮すると、現在の高温超電導体の開発状況は、実用化とは言えないレベルではあるが、おおむね妥当な成果であると思われる。

一方、単なる費用対効果という評価指標をもって判断すべきではないが、20数年間に渡り、約1000億円相当の研究開発プロジェクトを展開してきたという努力に比べて、その経済的価値を有した自立的市場は必ずしも顕在化していない。これは、技術そのものが実用化段階にまで到達していない、技術はあっても現在ではコスト的に引き合わない、また技術が巨大であって技術を実現化するにはその時が来ていないなどの理由が挙げられよう。実用化できない理由の多くが、経済性、冷却技術、超電導以外の競合技術だとすると、国家プロジェクトでも、ニーズ志向を強くすることも必要である。いわゆる、超電導ブーム時代を越えた現時点においては、より一層、技術の融合領域を開拓すべく、施策の構造をバックキャスト型（将来の社会的与益を見定めて現在の技術開発を戦略的に展開する方法）に転換することも検討すべきであろう。

実用化が難しいと認識されて実用化研究が先送りされたプロジェクトもあったが、このような見極めを早めて、選択と集中をもう少し早期に実施しても良かった。

また、SFQ ロジック素子などは動作原理についての実証（検証）はされたが期待されたほどの集積度と性能の実現に至っていないと感じられる。ただ単にこれまでの開発スタイルを延長するだけでなく、別視点からの検討も含んだ将来のプロジェクトが提案されることが望ましい。また、IT分野での実用化には、SFQ 素子・回路の一層の高集積化と周辺技術の高度化が必要であるが、市場規模が小さいが実用性のある開発研究のサポートも必要である。

<肯定的意見>

○過去の研究成果を適切に活用した研究開発が行なわれて来たかは個々の課題による。たとえば、線材・ケーブル技術は本施策を通じて着実に進歩を遂げ、電力送電ケーブル実証試験、電力貯蔵（SMES）装置の実証試験、産業用マグネットの市販化などに繋がっている。冷凍機の開発と市販化は、超電導応用に限らず広く低温工学の発展に寄与している。

（岸尾委員）

○高温超電導体は従来の超電導体とは全く新しい超電導体であり、その理解に時間がかかったことや、一般的に新しい材料を実用化にまで持っていくためには多くの関門をクリアする必要があることを考慮すると、現在の、たとえばコーテッドコンダクタの開発状況は、実用化とは言えないレベルではあるが、おおむね妥当であると思われる。（熊倉委員）

○超電導線材の開発においてはそれまで実施された超電導材料・超電導素子プロジェクトや超電導電力応用技術開発プロジェクトがその後の交流超電導電力機器プロジェクトや超電導応用基盤技術開発プロジェクトの研究開発成果が次のプロジェクトに生かされ、より高度な目標設定の下に研究開発が実施されてきている。また超電導発電機開発成果はその後の Y 系モーターに、また超電導電力貯蔵研究開発では要素技術から金属系超電導システム、高温超電導システムへとそれぞれ成果が有効に活用されている。（齊藤委員）

○高温超電導素子の分野での実用化状況のレベルは高くはないが、フィルターや SQUID のようなものは実用に供されている。これらの素子作製にはこれまで集積回路作成を目的に実施されたプロジェクトで蓄積された材料技術が活かされている。低温超電導素子には 1981 年に始まった科学技術用高速計算システムから蓄積された技術が使われ、ブラッシュアップされている。（高木委員）

○超電導研究開発プロジェクトは今なお実用化されていないプロジェクトが多い。ほとんどそうであるといってよい。これは、技術はあっても現在ではコスト的に引き合わない、また技術が巨大であって技術を実現化するにはその時が来ていないなどの理由が挙げられよう。しかし、今までに行われたプロジェクトはおおむね適切に引き継がれ発展してきたと思う。（早川委員）

○高温超電導線材開発に関しては、世界的にも最高レベルの技術力を維持し、機器開発に必要な性能が実現できるレベルにまで来ており、プロジェクト間での技術継承も適切に行われてきたと考える。（原委員）

<問題点・改善すべき点>

●単なる費用対効果という評価指標をもって判断すべきではないが、20 数年間に渡り、約 1000 億円相当の研究開発プロジェクトを展開してきたという努力に比べて、その経済的価値を有した自立的市場は必ずしも顕在化していない。（菊池座長）

●SFQ ロジック素子などは動作原理についての実証（検証）はされたが期待されたほどの

集積度と性能の実現に至っていないと感じられる。ただ単にこれまでの開発スタイルを延長するだけでなく、別視点からの検討も含んだ将来のプロジェクトが提案されることが望ましい。(岸尾委員)

●実用化が難しいと認識されて実用化研究が先送りされたプロジェクトもあったが、このような見極めを早めて、選択と集中をもう少し早期に実施しても良かった。(熊倉委員)

●本命である IT 分野での実用化には、SFQ 素子・回路の一層の高集積化と周辺技術の高度化が必要であり、時間がかかると考える。そのため、本流の開発を継続することに加えて開発された技術を市場規模が小さいが実用性のある応用に活かす開発研究をサポートする必要がある。(高木委員)

●プロジェクトを通して、実現見通しに妥当性は感じられない。20 年を超えるプロジェクトを通して、広い波及効果を持った形で実用化した技術がほとんどない。超電導は先端技術であり未踏領域なので不確実性は高い。しかし、プロジェクトの多くは、技術的にはほぼ所期の目標を達成したと述べている。実用化できない理由の多くが、経済性であったり、冷却に伴う使い勝手の悪さであったり、あるいは有力な競合技術の台頭であったりと、そもそも超電導技術以外の要素が多い。これからは、国プロと言えども、シーズ志向よりニーズ志向を強くして、実用化につながらない技術開発を減らしていかなければならない。(田島委員)

●機器開発段階においては、線材が要求レベルに達しているか(シーズ面)、事業化の見通しはどうか(ニーズ面)の両面を、節目ごとに精査し、これらが達成されていないものはプロジェクトの見直しを機動的に行っていくべきである。(原委員)

<その他の意見>

・複数の後継プロジェクトが展開される過程において、その主たる技術成果を継承し、かつ、新たな応用領域を模索したことが散見される。しかし、いわゆる、超電導ブーム時代を越えた現時点において、より一層、技術の融合領域を開拓すべく、施策の構造をバックキャスト型(将来の社会的与益を見定めて現在の技術開発を戦略的に展開する方法)に転換すべきである。(菊池座長)

・超電導機器の実用化に必要な不可欠な冷却システムの高性能化およびコストダウン化のためには、量産化効果が期待できる産業・輸送分野での市場拡大が重要であることから、この分野の研究開発も積極的に推進していくことが望ましい。(原委員)

(2) 施策(超電導研究開発)の目的を実現するために研究開発プロジェクトを含む技術に関する事業が適切に配置されてきたか。それぞれの事業間での連携は適切に取られてきたか。

高温超電導が発見された当初において、全体として研究開発の目的を明確にして、いくつかの特化したテーマを設定して進めたことは評価できる。また、平成10年度以降のプロジェクトも実用化が期待できるテーマに絞って研究開発を進めた点も評価でき、設定された目的の範囲において、関連する事業展開は適切に行われてきた。線材開発プロジェクトで超電導線を開発し、それを超電導ケーブルプロジェクトへ提供するなどの事業間の連携も適切になされた。超電導素子の分野では目標の変遷があったが、プロジェクトが重複することではなく、事業の配置や、事業間での連携に、特に大きな問題はなかったといえよう。複数のプロジェクトにおいて高温超電導線材の研究開発を推進した結果、世界トップレベルの技術力を確立することにつながった面もある。

一方、個々のプロジェクトの目的を越えた連携を可能にするような弾力的な体制が、予算管理の面からも必要であった。他の国家プロジェクトや民間での研究も含めて、プロジェクト間の連絡・調整が必ずしも十分ではなかったケースもあった。文部科学省などと連携して国の超電導研究を総合的に考える必要があったのではないかと。

なお、個別の研究課題ごとにはロードマップは作られていたが、超電導技術全体を俯瞰的に見たロードマップは技術戦略マップ作成前は作られていなかった。施策全体に対する俯瞰的な観点から、当時において超電導技術全体を俯瞰するロードマップが作成されていれば、研究開発プロジェクトのより適切な配置が可能であったのではないかと考えられる。

<肯定的意見>

○設定された目的の実現という範囲において、関連する事業展開は適切に行われてきたといえる。(菊池座長)

○高温超電導が発見された当初において、全体として研究開発の目的を明確にして、いくつかの特化したテーマを設定して進めたことは評価できる。また、平成10年度以降のプロジェクトも実用化が期待できるテーマに絞って研究開発を進めた点も評価できる。(熊倉委員)

○高温超電導物質であったY系超電導材料は素子への可能性、線材への可能性等多くの可能性を秘めて1980年代後半にスタートしている。その後の技術の進展とともに例えばY系超電導線材においては超電導電力応用技術開発から超電導応用基盤技術研究開発へと継承される等、各プロジェクトの目的等に照らし合わせて適切に配置されてきたといえる。また線材開発プロジェクトで超電導線を開発、作製し超電導ケーブルプロジェクトへ提供するなど事業間の連携も適切になされている。(齊藤委員)

○超電導素子の分野では目標の変遷があったが、プロジェクトが重複することはない。

他庁の関連プロジェクトも補完する内容であった。(高木委員)

○事業の配置や、事業間での連携に、特に大きな問題はなかったと思う。(田島委員)

○高温超電導物質発見直後から、複数のプロジェクトにおいて高温超電導線材の研究開発を推進した結果、世界トップレベルの技術力を確立することにつながった。(原委員)

<問題点・改善すべき点>

●研究開発プロジェクトは、本来、その立案時とその後の経過時の比較において、何らかの新たな技術的知見に基づく可能性と不可能性を見つけ出すものである。超電導材料分野の展開は、その典型例である。しかし、プロジェクトの目的を越えた連携を可能にするような弾力的な体制は、予算管理の面からしても、構築されていない。(菊池座長)

●研究開発プロジェクトを含む技術に関する事業が適切に配置されてきたとは、残念ながら賛成できない。施策全体に対する俯瞰的な観点からの個々の課題達成結果の分析評価が十分でない。ロードマップの作り方が曖昧であったことによるように思われる。(岸尾委員)

●各プロジェクト間(他の国プロや民間での研究も含めて)の連絡・調整が必ずしも十分ではなかったケースもあったと思われる。また高温超電導体の材料としての困難が明らかとなった時点で、基礎的な材料研究をもっと重視すべきであった。このような観点からも、例えば文科省と連携して国の超電導研究を総合的に考える必要があったのではないかと。(熊倉委員)

●並行して進められたプロジェクト間に内容の重複はなかったが、連携を強める必要があった。(高木委員)

(3) 個々の研究開発プロジェクト終了後のフォローアップの状況

高温超電導材料に関して、発見初期の物質探索、機構解明により、実用化が有望な材料としてBi系およびY系を選択し、線材化、高性能化を経て機器開発へと研究開発プロジェクトを引き継いできている。

例えば、Y系高温超電導線材は「超電導電力応用技術」プロジェクトにおける基礎的な研究成果が、その後「超電導応用基盤技術研究開発」へと継承されⅠ期に50m長、Ⅱ期において500m長への成果と継承された。

実用化されたものはまだないが、Y系線材は、これまでのプロジェクトの成果が適切に引き継がれて実用化に近いレベルにまで来た。フォローアップ体制が適切であったためである。

このようにプロジェクト終了後のフォローアップ体制が不適切であったという事例は、超電導材料分野、超電導素子分野のいずれでもとくに確認できない。

一方、途中で中断したプロジェクトの総括、研究開発再開の是非などの議論が必要ではないか。

なお、プロジェクトのフォローアップは、技術的可能性が高いと判断した領域に傾斜している。効率的な資金配分という視点からすれば、妥当であるといえる。しかし、ある程度の技術的蓄積がなされているはずであるから、特に、用途開発探索型の後継プロジェクトを立案すべきであった。今後は、課題の選択と集中を行い、わが国の戦略産業として開発に取り組むべきである。

<肯定的意見>

○プロジェクトの成果が真に実用化されたものはまだないが、現在進められているY-123線材開発プロジェクトは、これまでのプロジェクトが適切に引き継がれて発展してきたものであり、実用化に近いレベルにまで来ている。フォローアップ体制は適切であった。

(熊倉委員)

○超電導線材のうちY系高温超電導線材は超電導電力応用技術開発プロジェクトにおいて基礎的な研究成果が得られた。その後超電導応用基盤技術研究開発へと継承されⅠ期においては50m長の成果をあげ、さらにⅡ期において500m長への成果と継承されてきている。また、超電導電力貯蔵においては金属系超電導線材を主体にした要素技術開発や高温超電導材料をつかった電流リード等をスタートに金属系超電導線材を使った電力貯蔵システムの実証試験、さらに高温超電導材料を使ったより低コストな電力貯蔵システムの研究開発へと継承されている。これらの成果は出口戦略に重要な指針を与えた。(齊藤委員)

○超電導素子：後継プロジェクトへの引き継ぎは適切に行われた。(高木委員)

○プロジェクト終了後のフォローアップ体制が不適切であったという事例は、とくに確認できない。後継のプロジェクトへの引き継ぎに大きな問題があったとも思われない。(田島委員)

○まだ実用化するに至っているプロジェクトがほとんどない状態ではフォローアップ体制を云々する段階ではない。しかし後継のプロジェクトへは適切な引渡しが行われて技術の発展がなされた。(早川委員)

○高温超電導材料に関して、発見初期の物質探索、機構解明により、実用化が有望な材料としてBi系およびY系を選択し、線材化、高性能化を経て機器開発へと研究開発プロジェクトを引き継いできている。(原委員)

<問題点・改善すべき点>

●途中で中断したプロジェクトについては、プロジェクトの総括や研究開発再開の是非などの議論がないのではないか。(熊倉委員)

<その他の意見>

・プロジェクトのフォローアップは、技術的可能性が高いと判断した領域に傾斜している。効率的な資金配分という視点からすれば、妥当であるといえる。しかし、ある程度の技術的蓄積がなされているはずであるから、特に、用途開発探索型の後継プロジェクトを立案すべきであった。(菊池座長)

・プロジェクトで得られた技術をプロジェクト終了後に具体的な製品に活用してゆくことに対する支援が必要である。(高木委員)

・今後は、課題の選択と集中を行いわが国の戦略産業として開発を行うべきである。(早川委員)

3. 総合評価

高温超電導発見という突発的な出来事に迅速に対応して、産学官連携の大規模な研究開発プロジェクトを構築し、基盤研究のレベルで多くの成果を上げたという意味で、一連の超電導プロジェクトは高く評価する。多くの研究者が参加し、論文や特許などの知的財産を蓄積した。なにより、このプロジェクトを通じて得た超電導の科学や技術に関する知見は、我が国だけでなく、これからの世界の科学技術発展に大きく貢献するだろう。

超電導材料分野では、これまで実用化時の効果や波及効果が大きい電力機器の開発を主体として実施されてきており、成果も計画策定時の想定を上回るものも多く得られてきている。超電導素子分野では、20数年に及んで継続してきた超電導素子プロジェクトはその当時の社会的要請に合わせた目標を設定し、プロジェクト間の技術的な継続が行われてきたので、施策的には妥当であったと言える。

今後、慎重に議論すべきであるが、超電導技術は（電力応用、デバイスも）、地球温暖化対策に非常に重要になるもので、この実用化は国家戦略として取り組む必要がある技術であると考ええる。

しかし、20年強の超電導研究開発を概括して見ると、一連の高温超電導体が発見されて、いわゆる超電導フィーバーが起こり、超電導応用について多くの期待が持たれたが、現実の高温超電導体は従来の金属系超電導体とはかなり違っており、実用化のためには多くの課題を克服する必要があること、そのためには時間がかかることは、早い時期から専門家の間では認識されていたと思う。このような点を十分に踏まえて、長期的な展望に立った計画の下で時間をかけて超電導プロジェクトを推進すべきであったと思う。超電導に限らず新しい材料を実用化するためには、多くの関門があり、長期的な展望に立ってこれらを一つ一つ解決していくことが必要であり、そのためには時間がかかることを国民にも理解してもらう必要があると思う。

また、各プロジェクトを概括して見た場合、基礎・応用・開発という単線的なモデル図式に基づく、プロジェクトの展開が長年続いてきたといえる。したがって、産業技術としての利用分野は、かなり限定的になっている面があり、派生技術の広がりについても必ずしも体系的にはなされていない。今後は、「安全・安心の分野」「グリーン・テクノロジーの融合分野」などを含め、より一層、複線的なモデル図式に基づく、研究開発プロジェクトを立案すべきである。複数の研究開発プロジェクトの研究開発の成果が具体化した場合には、技術マップの図面上に展開して、更なる展開の可能性について、あるいは、利益相反の可能性等についての検討が市場予測に役立つと考えられる。

超電導材料分野では、今後、冷却システムの高性能化および低コスト化研究や、開発した機器の長期信頼性評価研究など、機器の実用化に不可欠な技術開発項目の継続推進を期待する。一方、機器開発段階にある研究開発については、線材の技術レベル（シーズ面）、事業化の見通し（ニーズ面）の両面からの精査を節目ごとに実施し、シーズ面、ニーズ面

での乖離がある場合には、研究開発の機動的な見直しや改善を図ることが望ましい。さらに実社会へ早期に技術を展開するためには、電力機器のみならず一般機器へも、この超電導技術を普及させるための技術開発の促進を行い、ここで得られた研究開発成果を再度、電力機器の実用化に反映させることが出来れば、より早期に実用化が見込まれるとともに相乗効果が期待できる。加えて、標準化戦略を引き続き推進していただきたい。

超電導素子分野では、成果としては着々と積み上げてきたが、研究成果を実用に供する点に関しては、長期間にわたる研究開発を考えると十分とはいえないのも事実である。低温超電導素子と高温超電導素子の開発は車の両輪のように並行して実施し、それぞれの特徴を活かす出口を探るべきものとする。

研究開発プロジェクトの実用化への運営面の観点からみると、まったく新しい分野である高温超電導研究は、実用化に結びつくかどうかが見えにくく、純粋に技術的な問題ではなく、コストなど経済的な理由で実用化しなかったテーマもあった。工業化と新しい産業分野の育成を目指す研究開発プロジェクトとしては、プロジェクトの運営システムのどこかに問題があったと言わざるを得ない。

経済産業省では、研究開発プロジェクトの運営も、新規の産業を作り出し、雇用を創出することに基準を置いている。研究者の雇用確保や知財の蓄積ももちろん極めて重要なことではあるが、これからの活力ある新産業の創出に結びつく研究プロジェクトの立案に、この超電導プロジェクトの経験をぜひ生かしてほしい。

今回の追跡評価は、20数年の間に展開されてきた研究開発施策の中間評価的な位置づけにあたると思う。今求められていることは、国の発展すべき方向の先にどのような社会の姿を描こうとしているのか、そのグランド・デザインを支える技術的基盤は確保されているのかを知ることである。超電導の科学的知見と技術的蓄積は膨大なものであり、これからのオープンイノベーション施策の核となることを期待する。

○ 超電導研究開発プロジェクト、及び、後継プロジェクトの実施資料を概括して見た場合、基礎・応用・開発という単線的なモデル図式に基づく、プロジェクトの展開が長年続いてきたといえる。したがって、産業技術としての利用分野は、短期的な企業戦略に影響されかなり限定的になっている。同様に、派生技術の広がりについても必ずしも体系的にはなされていない。今後は、「安全・安心の分野」「グリーン・テクノロジーの融合分野」などを含め、より一層、複線的なモデル図式に基づく、研究開発プロジェクトを立案すべきである。複数の研究開発プロジェクトが進行している場合、プロジェクト期間中の連携は不要であったとしても、その研究開発の成果が具体化した場合には、技術マップの図面上に展開して、更なる展開の可能性について、あるいは、利益相反の可能性等について、検討する機会を設ける必要がある。むしろ、そのことが、将来の市場編成に関わることになるのであれば、独禁法に基づくガイドラインを遵守すべきであろう。

今回の追跡評価は、20数年の間に展開されてきた研究開発施策の中間評価的な位置づけ

にあたるを考える。今求められていることは、国の発展すべき方向の先にどのような社会の姿を描こうとしているのか、そのグランド・デザインを支える技術的基盤は確保されているのかを知ることである。超電導の科学的知見と技術的蓄積は膨大なものであり、これからのオープンイノベーション施策の核となることを期待する。(菊池座長)

○一連の高温超電導体が発見されて、いわゆる超電導フィーバーが起こり、超電導応用について多くの期待が持たれた。一部には超電導応用がすぐにでも実現する、というような論調もあったが、現実の高温超電導体は従来の金属系超電導体とはかなり違っており、実用化のためには多くの課題を克服する必要があること、そのためには時間がかかることは、早い時期から専門家の間では認識されていたと思う。このような点を十分に踏まえて、長期的な展望に立った計画の下で時間をかけて超電導プロジェクトを推進すべきであったと思う。研究開発の進捗状況を正しく把握しないで応用に先走り、過大な応用テーマを掲げてプロジェクトを推進した面が無かったとはいえないであろう。そのために、国民は超電導に対して過大な期待をよせ、それが実現しないために、一時期、超電導に対してネガティブな印象を与えてしまったのは残念であった。超電導に限らず新しい材料を実用化するためには、多くの関門があり、長期的な展望に立ってこれらを一つ一つ解決していくことが必要であり、そのためには時間がかかることを国民にも理解してもらう必要があると思う。(熊倉委員)

○これまで実用化時の効果や波及効果が大きい電力機器の開発を主体として実施されてきており、成果も計画策定時の想定を上回るものも多く得られてきている。今後、さらに実社会へ早期に技術を展開するためには電力機器のみならず一般機器へも、この超電導技術を普及させるための技術開発の促進を行い、ここで得られた研究開発成果を再度、電力機器の実用化に反映させることが出来れば、より早期に実用化が見込まれるとともに相乗効果が期待できる。(齊藤委員)

○20 数年に及んで継続してきた超電導素子プロジェクトはその当時の社会的要請に合わせた目標を設定し、プロジェクト間の技術的な継続が行われてきたので、施策的には妥当であったと言える。しかし、研究成果を実用に供する点に関しては、長期間にわたる研究開発を考えると十分とはいえないのも事実である。超電導素子の分野は低温超電導体の製品が離陸したとはいえない状況であり、低温超電導素子の次に高温超電導体素子が続く形にはなっていない。開発は車の両輪のように低温と高温を並行して実施、それぞれの特徴を活かす出口を探るべきものとする。経済産業省だけでなく他省庁も含めた超電導素子の研究開発関連のプロジェクトを設定するに際して、この分野を俯瞰的に見て調整する必要があるとともに、プロジェクト進捗にあたっては連携を図る必要がある。(高木委員)

○高温超電導発見という突発的な出来事に迅速に対応して、産官学連携の大規模な研究開発プロジェクトを構築し、基盤研究のレベルで多くの成果を上げたという意味で、一連の超電導プロジェクトは高く評価する。多くの研究者が参加し、論文や特許などの知的財産を蓄積した。なにより、このプロジェクトを通じて得た超電導の科学や技

術に関する知見は、我が国だけでなく、これからの世界の科学技術発展に大きく貢献するだろう。ただし、まったく新しい分野である高温超電導研究は、実用化に結びつくかどうかが見えにくく、工業化と新しい産業分野の育成を目指す研究開発プロジェクトとしては、成功率が総じて低かった。中には純粋に技術的な問題ではなく、コストなど経済的な理由で実用化しなかったテーマもあり、それらはプロジェクトの運営システムのどこかに問題があったと言わざるを得ない。このプロジェクトを主導した経済産業省の目的が、1) 国際競争力のある技術を育て、2) 新規の産業を作り出し、3) 雇用を創出することだとすれば、超電導プロジェクトは、1) だけしか満たしていない。それとても、実際に世界中で産業化が起きないことには、無意味である。今後、地球温暖化を防ぐための CO2 削減技術が強く求められて来る。超電導はその有力な技術になるという論調も多いが、本プロジェクトを通じて得た教訓を元に、慎重に議論すべきである。我が国は深刻な不況にさらされており、それは一時的な景気循環ではなく、国の基本的な産業構造に問題があるとも指摘されている。経済産業省は、新規の産業を作り出し、雇用を創出することに責任があり、研究開発プロジェクトの運営も、その点に基準を置いている。研究者の雇用確保や知財の蓄積ももちろん極めて重要なことではあるが、これからの活力ある新産業の創出に結びつく研究プロジェクトの立案に、この超電導プロジェクトの経験をぜひ生かしてほしい。(田島委員)

○超電導研究開発は 20 年の長きにわたって行われてきた。プロジェクトの継続もほぼ適切になされてきた。しかし、実用化されたものはほとんどまだない。まだ発展途上にあるということである。超電導技術は(電力応用、デバイスも)、これからは地球温暖化対策に非常に重要になるもので、この実用化は国家戦略として取り組む必要がある。(早川委員)

○高温超電導物質の発見以来、国が主導して超電導研究開発を推進してきた結果、世界の最先端を行く技術力の確立につながった。今後は実用化を念頭において、標準化戦略を引き続き推進していただきたい。また冷却システムの高性能化および低コスト化研究や、開発した機器の長期信頼性評価研究など、機器の実用化に不可欠な技術開発項目の継続推進を希望する。一方、機器開発段階にある研究開発については、線材の技術レベル(シーズ面)、事業化の見通し(ニーズ面)の両面からの精査を節目ごとに実施し、シーズ面、ニーズ面での乖離がある場合には、研究開発の機動的な見直しや改善を希望する。(原委員)

(事業評価関係)

(超電導材料分野)

①産業科学技術開発「超電導材料・超電導素子」(昭和 63 年度～平成 9 年度)

本プロジェクトは、高温超電導物質の探索、機構解明に大きな役割を果たしており、現在の世界トップクラスの技術力の確立への貢献は非常に大きい。本プロジェクトで得られたデータの蓄積は後継プロジェクトの方向性を定めるものであり、その後の高温超電導研究の発展への基盤となった。我が国の高温超電導研究を世界のトップレベルにし、参加研究機関、企業の研究開発力の向上に大きく寄与した。

具体的には、高温超電導物質の改良や単結晶育成技術は、その後の超電導線材開発やフライホイール開発、超電導モーター開発へと発展した。研究活動の拠点となった ISTEK での多くの論文発表や博士号の取得にも貢献し、多くの若手研究者の輩出にも貢献した。本プロジェクトは、基盤技術の研究であり、実用化に結びつかなかったが、以後の高温超電導研究の基盤となるさまざまなプロセス技術や評価技術が確立し、研究開発力向上効果は大きなものがあつた。このプロジェクトを通じて、酸化物の合成、構造解析、薄膜成長などの基礎技術が画期的に向上した。高温超電導研究によって得られた酸化物絶縁体の電子物性に関する知見が、最近の Li イオン二次電池の電極材料開発などに波及したことの意義は大きい。

現在の視点から見ると、高温超電導が発見された直後であり、室温超電導の可能性も論じられる中で、官民の研究開発リソースを早急に組織化し、材料の基礎から線材や素子の開発まで総合的な研究開発プロジェクトを立ち上げたのは、国家プロジェクトとして妥当であつた。また、本プロジェクトは科学的知見よりも産業技術としての研究開発を試みたものであつた。昭和63年当時、省エネルギーなどの技術革新が期待されていたので、技術的な壁以外にコストのハードルも高かつた。地球環境改善への対応や安全・安心の分野、さらには、健康維持に係る分野等にその接点があれば、グローバルな技術基盤を提供することができる。

ISTEKを中心とした研究開発拠点を構築したことは、国際的に見ても意義があつた。

提言として以下の意見が寄せられた。

線材化のための基礎研究を早期に実施すべきであつた。重大な新発見の直後のプロジェクトでは浅く広くプロジェクトを推進し、その後重点化し、研究開発期間の途中でも、他省庁や他のプロジェクトと連携するのが効果的である。

< I . 波及効果に関するご意見 >

○本プロジェクトによって示された「技術的なハードル」に係るデータの蓄積は、後継プロジェクトの方向性を定めるものであつた。(菊池座長)

○その後の高温超電導研究の発展への基盤となった。特にバルク材では、研究が進みその後の研究開発につながった。また、いち早く研究に取り組んだことから、高温超電導研究では世界のトップレベルに位置することができた。さらに参加研究機関、企業の研究開発力の向上に大きく寄与した。ただし、経済効果では、実用化はまだ先であり、経済効果や国民生活や社会レベルでの効果はほとんど無いに等しい。(熊倉委員)

○高温超電導物質の改良や単結晶育成技術等はその後の超電導線材開発やフライホイール開発、超電導モーター開発へと発展した。また超電導発現機構の研究成果はその後の高性能超電導線材実現のためのピン止め機構の導入等に展開された。活動の拠点となったISTECでは多くの論文発表や博士号の取得がなされた。(齊藤委員)

○基盤技術研究であり実用化に結びつかなかったため、産業界への技術波及効果は少なかった。経済効果や国民生活・社会レベルの向上効果も、特にない。しかし、以後の高温超電導研究の基盤となるさまざまなプロセス技術や評価技術が確立し、研究開発力向上効果は大きなものがあつた。このプロジェクトを通じて、酸化物の合成、構造解析、薄膜成長などの基礎技術が画期的に向上した。このプロジェクトを含めた高温超電導研究全般によって酸化物絶縁体の電子物性に関する知見が深まり、最近ではLiイオン2次電池の電極材料開発など、超電導以外の分野にまで波及したことの意義は大きい。(田島委員)

○高温超電導物質の探索、機構解明に大きな役割を果たしており、現在の世界トップクラスの技術力の確立への貢献は非常に大きい。多くの大学・研究機関がプロジェクトに参画した結果、多くの若手研究者が輩出されており、我が国の技術水準の更なる向上に貢献した。高温超電導線材の性能が向上してきた結果、複数の線材メーカーが線材販売を開始しており、今後市場が広がっていくと期待される。(原委員)

<Ⅱ.現在の視点から見たプロジェクトに関するご意見>

○科学的知見を得るためのプロジェクトではなく、産業技術としてのコアとなる、線材と素子の研究開発を試みたものである。したがって、昭和63年当時、省エネルギーを核とした産業構造の革新の担い手として期待されていたことは確かである。しかし、技術的な壁のみならず、コストパフォーマンスのハードルは高かったといえる。超電導分野の研究開発が、今後、地球環境改善への対応や安全安心の分野、さらには、健康維持に係る分野等にその接点を持ち得るのであれば、日本国内の産業技術という視点を越えて、電力の輸出などという新需要を視座に入れた上で、よりグローバルな技術基盤を提供することができるものとする。(菊池座長)

○高温超電導が発見されて最初のプロジェクトであり、高温超電導が社会に及ぼすと考えられる大きな影響、ならびに研究開発のリスク、等から見て、民間企業では限界があり、国家プロジェクトとしての本プロジェクトは概ね妥当であつた。また、この段階で物質探索や基礎物理的な研究を含めたことも、これに続くプロジェクトに役立つもので、適切で

あった。(熊倉委員)

○高温超電導物質の発見から間もない時期に開始したプロジェクトであったが、多くの学術的成果を生み、その後の実用化を目指した超電導機器開発プロジェクトへそれらの成果が生かされてきている。(齊藤委員)

○高温超電導が発見された直後であり、室温超電導の可能性も論じられる中で、官民の研究開発リソースを早急に組織化し、材料の基礎から線材や素子の開発まで総合的な研究開発プロジェクトを立ち上げたのは、国家プロジェクトとして妥当であった。目標設定はコンセンサスのとれたものであり、当時の高温超電導に対する関心の高さもあって、多くの研究者が精力的に成果を出した。プロジェクトの実施方法についても、とくに問題はない。

(田島委員)

○高温超電導物質発見直後という時期であったことを考えると、国際的な開発競争の中で我が国が技術的優位を築くためには、多額の研究費の集中投資が必要であったといえ、国家プロジェクトとしての実施が不可欠であった。研究開発により、線材の異方性やピン止め機構が解明されるなど、その後の技術開発に大きな貢献を果たしている。I S T E Cを中心とした研究体制を構築した結果、超電導研究開発の国内での起点ができ、国際的なプレゼンスの確立に貢献した。(原委員)

<Ⅲ.提言等その他ご意見>

○電力応用の観点からは、バルク材よりも線材が重要であると考えられるので、線材化のための基礎研究を早期に実施すべきであった。この高温超電導体の発見のように、重大な新発見があった直後のプロジェクトでは、内容は浅くても広くプロジェクトを推進し、その後精査して重点化をするのが良いと思われる。また、その時は他省庁との連携が効果的であると思われる。(熊倉委員)

○10年間におよぶ研究開発であったため、その研究開発期間の途中で他のプロジェクトと有機的な連携や、部分的な統合、さらには新たな取り組みができる仕組みが構築されればさらに研究マネジメントに有効に作用したのではないか。(齊藤委員)

②-1 産業科学技術開発「超電導応用基盤技術研究開発（Ⅰ）」（平成 10 年度～平成 15 年度）

本プロジェクトでは、Bi 系テープ線材や Y 系線材の基盤技術が確立し、バルク材における捕捉磁場で大きな成果が得られ、これらは将来の超電導マグネットや超電導電力ケーブル実用化につながる成果であることから、研究レベルでは波及効果は認められる。これらの成果は電力ケーブルの実用化に向けた技術基盤の形成に貢献し、水浄化の分野への応用を可能にした技術成果が得られているが、実用化はまだまだ先であり、経済効果や国民生活・社会レベルの向上効果はこの段階ではまだ期待すべきでない。

中心的に活動した ISTE C には、国内主要線材メーカーが参画し、オールジャパンでの研究体制がとられ世界的も高く評価される研究機関の位置を一層高めるとともに、多くの大学・研究機関がプロジェクトに参画した結果、多くの若手研究者が輩出されており、我が国の技術水準の更なる向上に貢献した。また、大学・研究機関と企業とが結集して問題解決にあたるという方法を確立したといえる。これはその後のプロジェクトにも引き継がれ、さらなる成果をあげている。

現在の視点から見ると、国内外の研究開発の動向を精査し、「ナンバーワンかつオンリーワン」という目標の設定を行ったことから「世界最高水準」の成果が多く得られており、プロジェクト・マネジメントは適切であったといえる。

線材については、我が国の Y 系超電導線材開発を一体化させ、それまで数 m 長であった作製長を飛躍的に増大させ、目標となる 50m 長線材を達成した意義は大きく、世界をリードする成果を上げた。バルク超電導体は、結果的に、新市場を開拓するほどには発展しなかったが、当時としては十分に挑戦すべき研究プロジェクトであった。

以上を鑑み、線材化の研究を含めた本プロジェクトの判断は正しい方向であったといえる。

< I . 波及効果に関するご意見 >

○電力ケーブルの実用化に向けた技術基盤の形成に貢献したといえる。水浄化の分野への応用を可能にした技術成果が得られている。（菊池座長）

○Y 系線材における基礎的研究、ならびにバルク材における捕捉磁場で大きな成果が得られ、これがこの後の研究開発につながった。ただし、実用化はまだまだ先であり、経済効果や国民生活・社会レベルの向上効果はこの段階ではまだ期待すべきでない。（熊倉委員）

○中心的に活動した I S T E C は世界的も高く評価される研究機関の位置を一層高めた。多くの論文発表や博士号の取得がなされた。（齊藤委員）

○このプロジェクトも基盤技術研究であり、具体的な製品の実用化には結びつかなかった。産業界への技術波及効果は線材メーカーなど一部に限られ、経済効果、国民生活・社会レベルの向上効果には特に影響していない。Bi 系テープ線材や Y 系線材の基盤技術が確立し、これらは将来の超電導マグネットや超電導電力ケーブル実用化につながる成果であること

から、研究レベルでは波及効果は認められる。バルク超電導体の基礎技術が確立し、応用への期待が高まった。水浄化用磁気分離装置などが試作されたが、新しい市場を開くほどの勢いはなかった。(田島委員)

○バルク材、Y系線材の性能向上は、その後の線材開発、機器開発に大きく貢献している。多くの大学・研究機関がプロジェクトに参画した結果、多くの若手研究者が輩出されており、我が国の技術水準の更なる向上に貢献した。高温超電導線材の性能が向上してきた結果、複数の線材メーカーが線材販売を開始しており、今後市場が広がっていくと期待される。(原委員)

<Ⅱ.現在の視点から見たプロジェクトに関するご意見>

○「世界最高水準」の成果が多く得られている。これは、国内外の研究開発の動向を精査し、「ナンバーワンかつオンリーワン」という目標の設定を行ったことから得られた結果であると考える。プロジェクト・マネジメントは適切であったといえる。(菊池座長)

○この段階においても、高温超電導はまだ実用化の見通しが立っておらず、また高温超電導のインパクトの大きさを考えると国家プロジェクトとして実施するのは極めて妥当である。(熊倉委員)

○我が国のY系超電導線材開発を一体化させ、それまで数m長であった作製長を飛躍的に増大させ、目標となる50m長線材を達成した意義は大きく、世界をリードする成果を上げるとともに研究機関と企業とが結集して問題解決にあたるという方法を確立したといえる。これはその後のプロジェクトにも引き継がれ、さらなる成果をあげている。(齊藤委員)

○バルク超電導体は、その物性がきわめて特異であり、また製造プロセス面でも改良の余地が多く、研究対象としては興味深いものであった。結果的に、新市場を開拓するほどには発展しなかったが、当時としては十分に挑戦すべき研究プロジェクトであった。(田島委員)

○高温超電導材料の基礎研究段階であり、多額の研究開発費用も必要であったことから、国家プロジェクトとしての実施は妥当であった。バルク材、Y系線材に的を絞って研究開発を進めており、妥当である。ISTECを中心に、国内主要線材メーカーが参画しており、オールジャパンでの研究体制がとられている。(原委員)

<Ⅲ.提言等その他ご意見>

○線材化の研究を含めたのは正しい方向であった。(熊倉委員)

②-2 産業科学技術開発「超電導応用基盤技術研究開発（Ⅱ）」（平成 15 年度～平成 19 年度）

本プロジェクトでは、先行プロジェクトを継承して、Y系線材に特化した研究開発を進め、世界最高レベルの線材開発など成果をあげた。世界的にみても卓越した成果を生かすべく「イットリウム系超電導電力機器技術開発」プロジェクトへ継承されており、より実用に近づけるための方策がなされている。本プロジェクトで開発したY系線材は依然として実用レベルからは遠く、経済効果を議論できるレベルではないが、送電ケーブルでの有効性は具体的に見えてきた。高温超電導線材が実用化すれば、電力会社や機器メーカーでの導入が活発化し、高温超電導産業の立ち上げに貢献するであろう。高温超電導線材の性能が向上してきた結果、複数の線材メーカーが実証試験向けに高温超電導線材の販売を開始しており、今後の市場拡大が期待される。

現在の視点から見ると、開発したY系線材は、実用化に遠いが、米国や欧州の追い上げもあり、国家主導で進めるのがふさわしいプロジェクトであった。また、具体的な数値目標設定がなされており、米国、欧州との比較の上からも適切であった。それに加えて、到達が困難といわれる目標を掲げ、プロジェクト参加者が意欲的に取り組むように、プロジェクトの推進リーダー達が有機的に機能したことは高い成果につながった。複数の有望な線材の製法に取り組むことが出来たのは国家プロジェクトであったためである。

ISTEC を中心に有力な企業、大学が参加した本プロジェクトの研究体制は効率的に機能した。しかし、参加する企業や大学の選定方法については透明性が欲しかったという意見もあった。

< I . 波及効果に関するご意見 >

○本プロジェクトでは、先行プロジェクトを引き継いで、Y系線材に特化した研究開発を進め、世界最高レベルの線材開発など成果をあげ、国内ばかりでなく世界のY系線材開発に大きな影響を与えた。依然として開発したY系線材は実用レベルからは遠く、経済効果を議論できるレベルではない。ただし、送電ケーブルの有効性（経済効果）がかなり具体的になってきて、高温超電導の最も重要な応用の一つと認識されるようになったと考えられる。（熊倉委員）

○このプロジェクトで得られた成果は世界の開発競争で大きくリードし、海外にも大きな影響を与えた。これにより国際競争力も増大し今後の産業化に明るい見通しを得、経済効果も期待できる。世界的にみても卓越した成果を生かすべくイットリウム系超電導電力機器プロジェクトへ継承されており、より実用に近づけるための方策がなされている。（齊藤委員）

○今後の研究で高温超電導線材が実用化すれば、電力会社や機器メーカーでの導入が活発化し、高温超電導産業の立ち上げに貢献する。しかし、今の時点では、まだ波及効果は小さいと言わざるを得ない。（田島委員）

○線材の長尺化、高性能化など、実用化を目指した技術力の向上が着実に行われている。多くの大学・研究機関がプロジェクトに参画した結果、多くの若手研究者が輩出されており、我が国の技術水準の更なる向上に貢献した。高温超電導線材の性能が向上してきた結果、複数の線材メーカーが線材販売を開始しており、今後市場が広がっていくと期待される。(原委員)

＜Ⅱ.現在の視点から見たプロジェクトに関するご意見＞

○開発した Y 系線材は、依然として実用からは遠いレベルにあり、また、米国や欧州との開発競争も激しくなってきたので、国家主導で進めるのがふさわしいプロジェクトであった。また、具体的な数値目標設定がなされており、米国、欧州との比較の上からも適切であった。(熊倉委員)

○プロジェクト発足時には到達が困難といわれる目標を掲げ、プロジェクト参加者が意欲的にその解決に臨んだ。またこれらを適切にリードするプロジェクト推進リーダーが有機的に機能し、高い成果へとつながったと思われる。(齊藤委員)

○おもに、高温超電導線材の製造技術を開発し、実用化に必要な最終的な仕様や特性の実現に貢献した。①、②のプロジェクトからの継続で、日本の高温超電導線材技術を世界トップレベルにした。(田島委員)

○有望な線材製法が複数あり、実用化を目指して各々の特徴を伸ばすという技術的に難度の高い研究開発を行っていて、民間のみでは十分な開発が実施できなかったと考えられ、国家プロジェクトとしての実施は妥当であった。線材の長尺化研究など、実用化を見据えた目標が設定されていた。I S T E Cを中心に、国内主要線材メーカーが参画しており、オールジャパンでの研究体制がとられている。(原委員)

＜Ⅲ.提言等その他ご意見＞

○ISTEC を中心に有力な企業、大学が参加した本プロジェクトの研究体制は効率的に研究開発を進めるうえで有効に機能したと認めるが、参加する企業や大学の選定方法が、形の上ではともかく、実際には必ずしも公平なものになっていなかったのではないかと。(熊倉委員)

③大型省エネルギー技術研究開発・ニューサンシャイン計画「超電導電力応用技術」（昭和63年度～平成11年度）

低温超電導材料を使った発電機開発では、7万kW級の試作に成功し、超電導発電機の実用化可能性を明確に示して、その後の研究に波及していくが、真の実用化のためには酸化物線材の使用と、その高性能化が不可欠であることも同時に示すことになったと思う。一方、Bi系ならびにY系線材化技術開発ではそれぞれに成果をあげ、後継プロジェクトに引き継ぐことができた。超電導発電機は実用化に至っていないが、回転機器での冷却技術は、超電導モーターの冷却技術にも応用される。実系統連系試験が初めて我が国で行われたが、このときの関係法令対応などの運用ノウハウは、その後の九州電力や中部電力によるSMESの系統連系試験や、現在の超電導ケーブル実証プロジェクトに反映されている。

現在の視点から見ると、超電導発電機の実現は低温系超電導技術者にとって大きな目標であり、世界最大規模の超電導発電機の開発、および系統試験で、技術難度が高く、国家プロジェクトとしてオールジャパンでの実施は妥当であった。技術的にはさまざまな課題に挑戦し、超電導発電機、冷凍機、超電導線材等広範囲な技術を開発しており、その後に行われた多くの超電導プロジェクトの基礎となったプロジェクトである。

一方、社会的なニーズに適合していたかどうか、高温酸化物に人と資源を集中しても良かったという意見もあった。

提言として、機器開発段階では、シーズ面、ニーズ面の両面で、立ち上げ段階を含めた節目ごとの精査が重要であるとの意見があった。

< I. 波及効果に関するご意見 >

○従来材料を使った発電機開発では、7万kW級の試作に成功し、超電導発電機の実用化可能性を明確に示して、その後の研究に波及していくが、真の実用化のためには酸化物線材の使用と、その高性能化が不可欠であることも同時に示すことになったと思う。一方、Bi系ならびにY系線材化技術開発ではそれぞれに成果をあげ、後継プロジェクトに引き継ぐことができた。（熊倉委員）

○Y系超電導線の基礎技術が確立し、その後の超電導応用基盤研究開発プロジェクトにおいて長尺、高性能化の研究開発に継承された。企業が合同して開発にあたる体制が構築され、その後の超電導プロジェクトでの円滑な実施に反映された。（齊藤委員）

○実用化しておらず、産業界や国民生活への波及効果は得られていない。（田島委員）

○超電導発電機は実用化に至っていないが、回転機器での冷却技術は、その後の超電導モーターでの冷却技術などに応用が検討されている。我が国で初めての実系統連系試験であり、このときの運用ノウハウ（関係法令対応など）は、その後の九州電力や中部電力によるSMESの系統連系試験や、現在の超電導ケーブル実証プロジェクトに反映されている。（原委員）

＜Ⅱ.現在の視点から見たプロジェクトに関するご意見＞

○発電機開発プロジェクトは、高温超電導が発見された後であり、中止して高温酸化物に人と資源を集中しても良かった。高温超電導については発見されて間もないころであり、①産業科学技術開発「超電導材料・超電導素子」（昭和 63 年度～平成 9 年度）の場合と同様に、国家主体で推進すべきプロジェクトであったといえる。また、まだ経済効果を論ずる段階ではないことも同様である。（熊倉委員）

○超電導発電機、冷凍機、超電導線材等広範囲な技術を開発しており、その後に行われた多くの超電導プロジェクトの基礎となったプロジェクトといえる。特に超電導線は他のプロジェクトへと継承され、世界的に見てもトップクラスの成果を上げるまでに育った。（齊藤委員）

○本プロジェクトおよび、④の「超電導発電機基盤技術研究開発」は、高温超電導とは直接的な関係がない。超電導発電機の実現は低温系超電導技術者にとって大きな目標であったのだろうが、社会的なニーズに適合していたかどうか、疑問である。結果的に、実用化の動きがないまま、プロジェクトが終了した。技術的にはさまざまな課題に挑戦し、線材やシステム、冷凍システムで進歩があった。しかし研究成果だけが残って産業界や国民生活への寄与はほとんど得られなかった。（田島委員）

○世界最大規模の超電導発電機の開発および系統試験で、技術難度が高く、国家プロジェクトとしての実施は妥当であった。国内主要メーカー、ユーザーが参画しており、オールジャパンでの実施体制を敷いていたことは、国内技術水準の向上に有益であった。（原委員）

＜Ⅲ.提言等その他ご意見＞

○発電機開発については、従来材料では経済性等から実用化は困難であることが最初からわかっていたのではないだろうか。上述のように高温超電導が発見された後にスタートしたプロジェクトであり、プロジェクトを見直して高温酸化物に集中した方が良かったと思う。このように国家プロジェクトにおいても臨機応変な対応が重要ではないか。（熊倉委員）

○超電導発電機開発は、使用線材の性能や機器開発技術（シーズ面）は実用段階に達しており、実際に世界最高出力での運転に成功したが、ニーズ面、とくに経済性の観点から実用化には至らなかった。機器開発段階では、シーズ面、ニーズ面の両面で、節目ごとの精査が重要である。（原委員）

④ニューサンシャイン計画「超電導発電機基盤技術研究開発」（平成 12 年度～平成 15 年度）

60 万 kW 級の発電機用導体を試作し、世界トップクラスの大電流・高電流密度を達成して、超電導の電力分野への応用可能性を示した。この試作を通して、超電導発電機の設計や冷却技術、その他の周辺技術の開発が進展した。このプロジェクトで開発された要素技術は、超電導線の高性能化、交流損失の低減技術等広く超電導機器開発、あるいは実用機器の改良等に反映される技術である。ただし、冷却コストの問題等で実用化の見通しは立たず、超電導発電機における低温超電導材料（LTS）の限界が示された。

現在の視点から見ると、LTS の限界は「超電導電力応用技術」で明らかになっていたのではないと思われる。前フェーズの技術成果を受け、20 万 kW および 60 万 kW の設計技術の確立を行い、適切な技術保存が行われた。

提言としては、「超電導電力応用技術」プロジェクト（昭和 63 年度～平成 11 年度）から続く後継プロジェクトを展開し、超電導発電機設計技術が確立したのであれば、その技術的成果が散逸しないように、その後の組織対応の体制を図るべきであること、回転機の技術を展開し電動機への研究開発等につなぐ等、回転機への適用を考えた技術継承も検討すべきではなかったかとの意見があった。

< I . 波及効果に関するご意見 >

○60 万 kW 級の発電機を試作し、世界トップクラスの大電流・高電流密度を達成して、超電導の電力分野への応用可能性を示した。またこの試作を通して、超電導発電機の設計や冷却技術、その他の周辺技術の開発が進展した。ただし、冷却コストの問題等で実用化の見通しは立たず、超電導発電機における従来の超電導材料（LTS）の限界を示すことにもなったと思う。経済効果や国民生活・社会レベルの向上も期待できるレベルではない。（熊倉委員）

○このプロジェクトで開発された種々の要素技術は、超電導線の高性能化、交流損失の低減技術等広く超電導機器開発あるいは実用機器の改良等に反映される技術であり、多くの技術的波及効果を生んだ。また回転機の電気、機械的な設計手法等は超電導電動機の開発に反映出来る技術が多く開発された。（齊藤委員）

○③の項で述べた通り。（田島委員）

○前フェーズの技術成果を受け、20 万 kW および 60 万 kW の設計技術の確立を行い、適切な技術保存が行われた。（原委員）

< II . 現在の視点から見たプロジェクトに関するご意見 >

○超電導発電機に限って言えば、LTS を用いることの限界は前期のプロジェクト「超電導電力応用技術」で明らかになっていたのではないと思われる。LTS を使うプロジェクトを中止して、高温超電導の研究に切り替える方が良かったのではないか。その場合は、当

時の高温超電導材料の開発レベルから判断して、発電機などの機器開発ではなくて、高温超電導材料の基礎的な研究が中心にならざるを無いと思うが。(熊倉委員)

○超電導電力応用技術開発プロジェクトで実施された超電導発電機の試験結果等を反映し、より実用に近づけるための研究開発を丁寧に行っている。(齊藤委員)

○③の項で述べた通り。(田島委員)

○前フェーズの技術成果を受け、実用レベルである20万kW級および60万kW級の設計技術の確立を行ったことで、前フェーズの開発技術の散逸の防止を図っており、妥当である。(原委員)

<Ⅲ.提言等その他ご意見>

○「超電導電力応用技術」プロジェクト(平成元年度～平成10年度)から続く後継プロジェクトを展開し、超電導発電機設計技術が確立したのであれば、その技術的成果が散逸しないように、その後の組織対応の体制を図るべきである。かつ、設計技術の保全に係る助成施策を拡充すべきである。(菊池座長)

○上述したように、それまでの研究開発の結果から、LTSの限界がある程度は明確になっていたと思われる。LTS線材の性能の飛躍的な向上は望めない以上、この時点で高温超電導に研究開発をシフトすべきであったと思う。プロジェクトの内容や目標設定においても、これまでの経緯にとらわれない臨機応変の対応が必要ではないか。(熊倉委員)

○超電導電力応用技術開発プロジェクトや本プロジェクトで得られた成果を元に実用機の開発、実証には続かなかったが、回転機の技術を展開し電動機への研究開発等につなぐ等、回転機への適用を考えた技術継承も検討すべきではなかったか。(齊藤委員)

○超電導発電機開発は、使用線材の性能や機器開発技術(シーズ面)は実用段階に達しており、実際に世界最高出力での運転に成功したが、ニーズ面、とくに経済性の観点から実用化には至らなかった。機器開発段階では、シーズ面、ニーズ面の両面で、節目ごとの精査が重要である。(原委員)

⑤「超電導電力貯蔵システム要素技術開発調査」(平成3年度～平成10年度)

SMESの要素技術として、LTS(低温超電導体)を用いた超電導コイルのSMESの可能性を実際に示した点は成果であり、LTS-SMESのフィールド試験(中部電力・東芝、シャープ)に活用された。本研究の成果は、HTS(高温超電導体)-SMESに関する次期プロジェクトにつながった。負荷変動補償等の開発もなされ、その後のプロジェクトに反映されている。まだ、実用化はしておらず、産業界や国民生活への波及効果こそ評価できないが、試作機が液晶工場に納入され、実証試験を行う段階に達しており、技術は完成したと思われる。系統安定化のような大規模なSMESに関して、2020年時点での実用化は不透明であり、経済効果の評価は困難である。

現在の視点から見ると、小型SMESという概念は、太陽電池、風力発電等の出力変動の吸収、データセンターや半導体工場等の瞬時停電対策など、近未来の社会的ニーズに合った用途を想定したものである。落雷などに対する電力系統の安定化は工場などの生産現場では重要な技術であり、SMESはその最有力候補の技術であるが、開発には多額の費用がかかり、国家プロジェクトとして推進したのは妥当であった。対雷技術による経済的損出補償効果は大きく、SMESの適用は合理的である。今後、小型化指向のニーズも含め、諸外国への技術輸出を可能にする研究開発が望まれる。

提言として以下の意見が寄せられた。

将来的にはSMESは高温超電導を使うことになる。本プロジェクトにおけるLTS-SMESの開発が、HTS-SMESの開発に活かされるように検証が必要である。

< I. 波及効果に関するご意見 >

○システム開発を指向したことにより要素技術の蓄積が図られ、後継プロジェクトの展開の方向性を明確にしたといえる。(菊池座長)

○SMESの要素技術として、LTSを用いた超電導コイルの安定な繰り返し運転に成功し、SMESの可能性を実際に示した点で、後の研究につながる成果であると思われる。また、ここで得られた研究成果が、LTS-SMESのフィールド試験(中部電力・東芝、シャープ)に活用された。また、本研究の成果は、HTSを用いたSMES開発に関する次期プロジェクト「超電導電力貯蔵システム技術開発調査」につながった。(熊倉委員)

○負荷変動補償等に目的を絞って開発がなされ、その後のプロジェクトに効果的に反映されている。(齊藤委員)

○実用化しておらず、産業界や国民生活への波及効果はほとんど得られていない。ただし、2003年には試作機が液晶工場に納入され実証試験を行う段階に達しており、技術は完成したと思われる。(田島委員)

○SMESの構成要素の研究開発成果は後継プロジェクトにおける実証研究へと引き継がれている。系統安定化のような大規模なSMESは、現在の技術レベルから考えて2020年時点での実用化は極めて不透明であり、経済効果の評価は困難である。(原委員)

<Ⅱ.現在の視点から見たプロジェクトに関するご意見>

○雷対応の技術基盤は、日本のお家芸ともいえる分野である。対雷技術による経済的損出補償効果は極めて大きいものであるといえる。SMES の適用は合理的な判断であったといえる。今後、小型化指向のニーズ分野も含め、諸外国への技術輸出を可能にする研究開発が望まれる。(菊池座長)

○落雷などに対する電力系統の安定化は工場などの生産現場では重要な技術であり、SMES はその最有力候補の技術であるが、開発には多額の費用がかかり、民間企業だけでは開発が困難であるので国家プロジェクトとして推進したのは妥当であった。(熊倉委員)

○後継プロジェクト実施にあたって後戻りのないよう、着実な要素技術開発がなされた。(齊藤委員)

○小型 SMES という概念は従来なかったもので、高温超電導の発見に触発されて発想されたものと思う。このように新しい概念の構築と技術的な手段について研究するプロジェクトを立ち上げたことは評価できる。太陽電池、風力発電等の出力変動の吸収、データセンターや半導体工場等の瞬時停電対策など、現在および近未来の社会的ニーズに合った用途を想定しており、実用化すれば波及効果が期待できるプロジェクトであった。残念ながら、プロジェクトを通じて、実用化には経済性の面で障壁があることが実証的に確認されたかたちになった。(田島委員)

○SMES システムとしての要求仕様の明確化と要素技術研究を目標としたことは、SMES の成立性・経済性等の評価に必要なものであり、妥当であった。(原委員)

<Ⅲ.提言等その他ご意見>

○将来的には SMES は高温超電導を使うことになるのではないかと。現在、高温超電導体を使った SMES の開発が進んでいるが、本プロジェクトにおける LTS-SMES の開発が、どのように高温超電導 SMES の開発に生かされているのか、十分な検証が必要であろう。(熊倉委員)

⑥「超電導電力貯蔵システム技術開発調査」(平成 11 年度～平成 15 年度)

B i 系線材では高磁場下での特性に難があり、Y 系線材が有望であることがわかった。Y 系線材を使用した HTS (高温超電導体) -SMES は、運転温度が 30K レベルでも LTS (低温超電導体) -SMES よりも経済性に優れることがわかり、これは後継の「超電導電力ネットワーク制御技術開発」における Y 系コイルの開発、ならびに現在の Y 系 SMES の開発につながる成果である。高温超電導マグネット技術の構築や 1 万回の繰り返し通電試験等を行い、健全性を明らかにし、以後の機器開発に資するところが大きい。九州電力、中部電力で実証試験が行われ、その運用ノウハウは、後継プロジェクトでの 20MJ の SMES 実証試験にも反映されている。民間企業の工場にて実証試験が行われたことは、社会的に SMES への認知度を高める効果があった。系統安定化のような大規模な SMES は、2020 年時点での実用化は不透明であり、経済効果の評価は困難である。

現在の視点から見ると、電力系統の安定化は工場だけでなく、一般の国民生活においても重要であるが、開発には多額の費用がかかり、国家プロジェクトとして推進したのは妥当であった。また、電力系統安定化のための小型 SMES は用途が広く、これに絞って、システム化技術確立を目標に、コスト試算なども行なったことは妥当であった。

これからは L i イオン二次電池のような競合技術の進歩や価格低下が進むので、市場での競争環境はさらに厳しくなる。将来、高温超電導線材の進歩に伴い、再び小型 SMES の研究が提案されるかもしれないが、その時には、はじめからニーズ志向で、需要者の意見を反映してプロジェクトを進めるべきである。

提言として、現在進められているプロジェクト「リットリウム系超電導電力機器技術開発」の商用機器としての実現時期を、目標に掲げるべきであろうとの意見があった。

< I . 波及効果に関するご意見 >

○Bi 系線材では高磁場下での特性に難があり、Y 系線材が有望であることがわかった。Y 系を使うと、運転温度が 30K レベルでも LTS-SMES よりも経済性に優れることがわかり、これは後継の「超電導電力ネットワーク制御技術開発」における Y 系コイルの開発、ならびに現在の Y 系 SMES の開発につながる成果である。SMES はまだ実用化されていないので現在における経済効果はゼロであるが、将来の経済効果については試算されている。

(熊倉委員)

○要素技術として高温超電導マグネット技術の構築や 1 万回の繰り返し通電試験等行い、超電導技術の健全性を定量的に明らかにしており、以後の開発機器に資するところが大きい。(齊藤委員)

○小型 SMES の低コスト化を研究したプロジェクトであり、高温超電導線材の適用可能性を調べた基盤技術研究が中心で、経済効果や国民生活への影響はほとんどない。(田島委員)

○研究開発成果をもとに、九州電力、中部電力で実証試験が行われ、その運用ノウハウは、後継プロジェクトでの 20MJ の SMES 実証試験や超電導ケーブル実証プロジェクトに

反映されている。民間企業の工場にて実証試験が行われたことにより、社会的にSME Sや超電導技術への認知度を高める効果があった。系統安定化のような大規模なSME Sは、現在の技術レベルから考えて2020年時点での実用化は極めて不透明であり、経済効果の評価は困難である。(原委員)

＜Ⅱ.現在の視点から見たプロジェクトに関するご意見＞

○電力系統の安定化は工場だけでなく、一般の国民生活においても重要である。SMESはこの電力系統安定化のための有力な技術であるが、開発には多額の費用がかかり、民間企業だけでは開発が困難であるので国家プロジェクトとして推進したのは妥当であった。また、SMESには多くの応用が提案されているが、電力系統安定化のためのSMESが小型でもっとも実現性が高く、これに絞った本プロジェクトは妥当な選択であった。(熊倉委員)

○超電導電力貯蔵装置のコスト試算を行い、システム全体のコストを明らかにして機器仕様に反映するなど実用を強く意識した開発が行われた。高温超電導線を使った貯蔵装置の設計や小型モデルの開発等将来を見た開発も同時に行われている。(齊藤委員)

○これからはLiイオン2次電池のような競合技術の進歩や価格低下が進むので、市場での競争環境はさらに厳しくなるだろう。将来、高温超電導線材の進歩に伴い、再び小型SMESの研究が提案されるかもしれないが、その時には、はじめからニーズ志向で、需要者の意見を反映してプロジェクトを立案してほしい。(田島委員)

○小規模SME Sを対象とした研究開発により、システム化技術確立を目標としたことは妥当である。(原委員)

＜Ⅲ.提言等その他ご意見＞

○本プロジェクトの研究は、現在進められているプロジェクト「リットリウム系超電導電力機器技術開発」に発展しているが、実証試験ではなくて、商用機器として実際にSMESが電力系統に使われるのは何時ごろになるのかを明確に（希望的観測ではなく）示すべきであろう。(熊倉委員)

⑦「超電導電力ネットワーク制御技術開発」(平成 16 年度～平成 19 年度)

Y系コイルについては、250A安定通電に成功し、現在のプロジェクト「イットリウム系超電導電力機器技術開発」につながっている。LTS（低温超電導体）-SMESにおける実系統の連系試験も今後の研究開発に有用である。補機も含めたシステム全体の低コスト化を推進し、実用機器としての位置づけを明確にしている。高温超電導線材を用いたSMESの設計検討は、Y系線材の開発目標設定へと反映されている。鉄道車両用フライホイールの用途とニーズの検証データを提供したことも成果である。

現在の視点から見ると、SMESを含む超電導電力機器はエネルギー・環境問題を解決するキーテクノロジーの一つと考えられ、その開発には社会的意義がある。いずれの超電導機器の研究開発費も多大であり、国の関与が必要である。それまでに得られた要素技術を集大成し実系統と連系し長期試験を実施しており、超電導機器の信頼性の向上に大きく寄与している。このプロジェクトは、太陽電池や風力発電など不安定な分散電源が増加する電力ネットワークの安定化に寄与できる研究であり、今後の社会ニーズに合っている。Liイオン二次電池を利用したスマートグリッドによる負荷平準化システムなどの競合技術もあり、コストや性能を予測し、早めに競合技術に勝る製品仕様を企画してほしい。電力品質に係る技術蓄積は、超電導技術に依拠しないまでも、多様なものである。研究開発の目標として世界トップレベルが設定されているが、その実用化を重視するのであれば、応用分野における技術基盤と整合する技術スペックを加味した目標設定が必要であったと考える。

提言として以下の意見が寄せられた。

Nb系コイルの軸受を使った 200MJ 級車両用フライホイールは、企業で実用化に向けた継続試験が実施されており、その知見を、次期の超電導プロジェクトの企画に生かすべきであろう。高磁場下での高温超電導線材の開発で、2GJ の系統安定化用 SMES は機械応力などの技術レベルは ITER に必要な技術レベルに相当する。実用化には年数が必要と思われるので、シーズとニーズを考慮しつつ、研究開発目標を改めて評価することも必要である。

< I . 波及効果に関するご意見 >

○鉄道車両用フライホイールの開発は、その用途ニーズの検証データを提供した。(菊池座長)

○Y系コイルについては、250A 安定通電に成功し、現在のプロジェクトである「イットリウム系超電導電力機器技術開発」につながっている。LTS-SMES においても実系統に連系して試験を実施し、今後の研究開発に有用なデータを得ている。(熊倉委員)

○超電導機器部分のみならず補機の開発もなされシステム全体の低コスト化を推進している。また高温超電導システムの制御装置も検証も合わせて行い、実用機器としての位置づ

けを明確にしている。(齊藤委員)

○高温超電導線材を用いたSME Sの設計検討は、Y系線材の開発目標設定へと反映されている。系統安定化のような大規模なSME Sは、現在の技術レベルから考えて2020年時点での実用化は極めて不透明であり、経済効果の評価は困難である。(原委員)

<Ⅱ.現在の視点からのプロジェクトの評価>

○電力品質に係る技術蓄積は、超電導技術に依拠しないまでも、多様なものである。研究開発の目標として世界トップレベルが設定されているが、その実用化を重視するのであれば、応用分野における技術基盤と整合する技術スペックを加味した目標設定が必要であったと考える。(菊池座長)

○SMESを含めて超電導電力機器はエネルギー・環境問題を解決するキーテクノロジーの一つと考えられ、その開発には大きな社会的意義があると考えられるが、いずれの超電導機器も研究開発費が多額で民間企業だけでは対応できない。国の関与が必要となる分野である。(熊倉委員)

○それまで行ってきた要素技術を集大成し実系統と連系し長期試験を実施しており、超電導機器の信頼性の向上に大きく寄与している。(齊藤委員)

○このプロジェクトは、太陽電池や風力発電など不安定な分散電源が増加する電力ネットワークの安定化に、SMESやフライホイールなどの超電導機器がどのように寄与できるかを研究したもので、現在及び近未来の社会ニーズに合った研究である。とくに、高温超電導を利用することでSMESの低コスト化を目指すなど意欲的な研究テーマを掲げている。しかし、最近では電気自動車に搭載したLiイオン2次電池を利用したスマートグリッドによる負荷平準化システムなど、有力な競合技術も提案されつつある。高温超電導SMESの試作や実証試験にこだわると、さらに多くの時間と開発費がかかるので、シミュレーション技術を多用してコストや性能を予測し、早めに競合技術に勝る製品仕様を企画してほしいと思う。(田島委員)

○本プロジェクトは高温超電導線材をSME Sに適用することで低コスト化を目指すものであったが、20MJ級SME S開発試験は、高温超電導線材ではなくNbTi線材を使用して実施されており、その位置づけが不明である。(原委員)

<Ⅲ.提言等その他ご意見>

○Nb系コイルの軸受を使った200MJ級車両用フライホイールの開発については、実用化はされておらず、また後継のプロジェクトも無い様であるが、何が問題なのか、高温超電導を使っても実用化の可能性は無いと判断しているのか、等をよく調査をして、次期の超電導プロジェクトの企画に生かすべきであろう。(熊倉委員)

○現在進行中の超電導機器開発プロジェクトにおけるSME Sの研究開発では、低コスト化を図るため、金属系超電導線材にかわり高温超電導線材によるSME S開発へと研究開

発目標を変更しているが、高磁場下でも高性能な高温超電導線材の開発が課題となっている。また、2 G J の系統安定化用 S M E S に求められる機械応力などの技術レベルは I T E R 開発に必要な技術レベルに相当するものであり、その実用化にはかなりの年数が必要と思われる。シーズとニーズを考慮しつつ、研究開発目標を改めて評価することも必要である。(原委員)

⑧ニューサンシャイン計画「高温超電導フライホイール電力貯蔵研究開発」（平成 7 年度～平成 11 年度）

Y系バルク超電導体を使った軸受のフライホイールによる 1MJ 級の電力貯蔵の研究開発は次期プロジェクトの「フライホイール電力貯蔵用超電導軸受技術研究開発」に継承され、また、「超電導電力ネットワーク制御技術開発」のNb系コイルの軸受開発にも役立っている。本研究から得られたY系バルクへの要求仕様は、Y系バルクの研究開発目標へ反映されている。超電導バルク材料はフライホイール以外にも超電導モーターへの技術波及効果が見込まれる。

現在の視点から見ると、本プロジェクト開始当時は、他の超電導応用機器と同様に、フライホイールも有望な超電導応用の一つと考えられていたので、国家プロジェクトとして研究開発を進めるのが妥当であったと考えるべきである。10MWh 級のエネルギー貯蔵装置を高温超電導フライホイールで実現しようという意欲的な研究であるが、シーズ志向が強すぎたのかもしれない。性能要求やコスト要求を正確に把握し進めていれば、プロジェクトの成果はもっと違っていたと思われる。超低損失の超電導磁気軸受や、高速回転に耐える高強度ローターなどは、将来、何らかの派生技術を生むかもしれない。

超電導フライホイール市場は不透明のまま、「フライホイール電力貯蔵用超電導軸受技術研究開発」、「超電導電力ネットワーク制御技術開発」プロジェクトに引き継がれてきたが、それらの技術的成果と市場について検証が必要である。

提言として以下の意見が寄せられた。

産業技術を蓄積するという施策においては、研究開発プロジェクトを実施することによって事後的に得られる諸処の成果を再編成するという「判断のステージ」が必要である。探索型の研究開発調査は必要である。しかし、その後継のプロジェクトにおいては、「判断のステージ」に立脚したプロジェクト・フォーメーションを立案すべきであろう。

< I. 波及効果に関するご意見 >

○軸受に Y系バルク超電導体を使ったフライホイールで、1 MJ 級の蓄積エネルギーを持ち、ここで得られた知見が次期プロジェクトの「フライホイール電力貯蔵用超電導軸受技術研究開発」に引き継がれた。また、「超電導電力ネットワーク制御技術開発」のNb系コイルの軸受開発にも役立っている。ただし、経済性の点で実用化の見通しは立っていない。

（熊倉委員）

○超電導バルク材料を使った応用にはフライホイールの他にも超電導モーターへの展開も考えられ、それらへの技術波及効果が見込まれる。（齊藤委員）

○本研究から得られたY系バルクへの要求仕様は、Y系バルクの研究開発目標へ反映されている。（原委員）

< II.現在の視点から見たプロジェクトに関するご意見 >

○超電導フライホイール市場という設定は、現在においても未知数である。「フライホイール電力貯蔵用超電導軸受技術研究開発」（平成 12 年度～平成 16 年度）、「超電導電力ネットワーク制御技術開発」（平成 16 年度～平成 19 年度）プロジェクトに引き継がれてきたが、改めて、それらの技術的成果を明確にし、かつ、この市場分野の可能性についても再点検する必要がある。（菊池座長）

○本プロジェクト開始当時は、他の超電導応用機器と同様に、フライホイールも有望な超電導応用の一つと考えられていたので、国家プロジェクトとして研究開発を進めるのが妥当であったと考えるべきである。また、着磁性能などから、Y-系バルクを使用する計画も妥当であった。（熊倉委員）

○超電導軸受けという裏方の技術に焦点をあてて、フライホイールの開発がなされた。実現可能性を明らかにするという判りにくい目標よりは実用レベルに対してどの位置かがわかるような数値目標をもってプロジェクトを推進すれば実社会によりアピール出来る成果がえられたのではなかろうか。（齊藤委員）

○10MWh 級のエネルギー貯蔵装置を高温超電導フライホイールで実現しようという意欲的な研究であるが、実用化に至らなかった。次の⑨「フライホイール電力貯蔵用超電導軸受技術研究開発」にも言えることだが、ここでもシーズ志向が強すぎたのかもしれない。もし、需要者側の性能要求やコスト要求をもっと精密に把握していれば、プロジェクトの成果はもっと違ったものになったのではないか。超低損失の超電導磁気軸受や、高速回転に耐える高強度ローターなど、国プロでなければ挑戦できないユニークな技術開発が盛り込まれており、これらは将来、何らかの派生技術を生むかもしれない。予算規模も比較的小さいので、研究プロジェクトとしては無意味ではなかった。（田島委員）

○電力貯蔵ができるフライホイールは、Y-系バルクの一つの適用例であり、高温超電導技術の応用研究の一環として国が実施したことは妥当である。（原委員）

＜Ⅲ.提言等その他ご意見＞

○産業技術を蓄積するという施策においては、研究開発プロジェクトを実施することによって事後的に得られる諸処の成果を再編成するという「判断のステージ」が必要である。仮に、技術の応用領域が未知であったとしても、ニューサンシャイン計画に盛り込まれた探索型の研究開発調査は必要である。しかし、後継のプロジェクトにおいては、「判断のステージ」に立脚したプロジェクト・フォーメーションを立案すべきであろう。（菊池座長）

○Y-系バルクの特性やこれに対する期待から考えて、本プロジェクトを開始したことは、妥当であったが、Y-系バルクフライホイールは現時点においても実用化されておらず、また実用化の見通しも立っていない現状から判断して、5 年間にわたってプロジェクトを完遂する必要があったのか、について検証するべきではないかと思う。（熊倉委員）

○フライホイールの研究開発が終了となった理由、例えば実施体制の問題なのか、技術的ハードルの問題か、ニーズ面の問題か、などについて失敗事例の一つとして検討・整理し

ておくことが必要ではないか。(原委員)

⑨ニューサンシャイン計画「フライホイール電力貯蔵用超電導軸受技術研究開発」（平成12年度～平成16年度）

40MJ 級の高温超電導体軸受を使用したフライホイールを試作し、運転試験を行って世界最高レベルの蓄積エネルギーを実現した。この成果は「超電導電力ネットワーク制御技術開発」のNb系コイルの軸受開発に引き継がれている。ただし、この成果を持ってしても実用化の見通しは立たなかった。

現在の視点から見ると、「高温超電導フライホイール電力貯蔵研究開発」からの継続プロジェクトであるが、未だに実用化の見通しは立っていない。民間企業の独自開発の動きも無い。後継の国家プロジェクトも無いことを考慮すると、本プロジェクト自体への疑問も残る。前期プロジェクトが終了した時点で予想できたのではないかと考えられる。前期プロジェクトから貯蔵容量を10倍にした目標値でスタートしたが、事前に想定される技術課題を明らかにし、それらの解決のための研究開発を推進するべきであった。この研究もシーズ志向が強く、中間評価でも社会的なニーズとのずれが厳しく指摘されている。

提言として、フライホイールの研究開発が終了となった理由、例えば実施体制の問題なのか、技術的ハードルの問題か、ニーズ面の問題か、などについて検討・整理しておくことが必要ではないかとの意見もあった。

<Ⅰ.波及効果に関するご意見>

○40MJ 級のフライホイールを試作し、運転試験を行って世界最高レベルの蓄積エネルギーを実現した。この成果は「超電導電力ネットワーク制御技術開発」のNb系コイルの軸受開発に引き継がれている。ただし、この成果を持ってしても実用化の見通しは立たなかった。（熊倉委員）

<Ⅱ.現在の視点から見たプロジェクトに関するご意見>

○前期プロジェクト「高温超電導フライホイール電力貯蔵研究開発」からの継続プロジェクトであるが、未だに実用化の見通しは立っておらず、民間企業による独自開発の動きも無い様である。また継続の国家プロジェクトも無いことを考えると、本プロジェクトを推進したことについては疑問も残る。現在の状況を、前期プロジェクトが終了した時点で予想できたのではないかと。（熊倉委員）

○前期プロジェクトから貯蔵容量を10倍にした目標値でスタートしたが、事前に想定される技術課題を明らかにし、それらの解決のための研究開発を推進すべきではなかったか。（齊藤委員）

○⑧の「高温超電導フライホイール電力貯蔵研究開発」でも触れたが、この研究もシーズ志向が強く、事後評価でも社会的なニーズとのずれが厳しく指摘されている。（田島委員）

<Ⅲ.提言等その他ご意見>

○高温超電導フライホイールが実用化しない理由を突き詰めて解明してほしい。Y系バルクの特性に問題があるのか？ Y系超電導バルクの特性は初期に比べてかなり向上していると思われるが、さらに特性を向上させる必要があるのか。もしそうならば、なぜ特性向上の研究を継続しないのか？ バルク体の特性が多少向上しても経済性の問題等をクリアできないのか？（熊倉委員）

○フライホイールの研究開発が終了となった理由、例えば実施体制の問題なのか、技術的ハードルの問題か、ニーズ面の問題か、などについて失敗事例の一つとして検討・整理しておくことが必要ではないか。（原委員）

⑩ニューサンシャイン計画「交流超電導電力機器基盤技術研究開発」（平成 12 年度～平成 16 年度）

500m の Bi 系ケーブルを試作し、運転試験に成功している。これは現在実施中の「高温超電導ケーブル実証」プロジェクトに引き継がれている。また、Y 系線材で 1m の短尺導体を試作し、通電容量 1kA の交流損失を評価した。これは現在の「イットリウム系超電導電力機器技術開発」に引き継がれている。超電導ケーブルの開発の他、限流器及び変圧器の開発が行われ、その後の超電導ケーブルプロジェクトや「超電導応用基盤技術研究開発」で行われた限流器開発、超電導電力機器プロジェクト等に反映され、後継プロジェクトにおける設計技術に反映されている。

超電導ケーブルについてはその後標準化が進められており、我が国はこれまでのプロジェクトで得られた成果を元に先導的立場にある。得られた成果は実験室規模では得難いデータが多く、その後の超電導ケーブルプロジェクトに反映され、我が国の開発力をアピールするものとなった。

超電導送電の経済効果はかなり大きいと試算されており、また昨今の環境・エネルギー問題を考えると超電導送電が実用化した場合の波及効果は大きい。我が国で開発が進められているコンパクトな超電導ケーブルは、CO₂削減効果に加え、コンパクト化による大幅な建設コスト削減効果が期待できる。

現在の視点から見ると、多様な目標を集めた設定ではあったが、事業化能力を参酌して産業技術総合研究所との共同体制を指向するなど、研究開発の戦略的目標を明確にしたことは適切であった。超電導電力機器は実用化への期待が大きい反面、高い信頼性が要求される機器であり、中でも超電導送電は超電導応用のなかでも最も重要なものの一つと認識されており、社会に貢献出来るテーマとして適切な集中が行われた。しかしながら研究開発には多大な資金が必要で民間企業では到底不可能であったので、国家プロジェクトとして推進したのは妥当であったと考えられる。

提言として以下の意見が寄せられた。

超電導送電の実用化は決して容易ではないと考えられるので、研究開発の長期的なビジョンが必要であろう。また、長期的には交流送電だけでなく、直流超電導送電も視野に入れて良いと思う。

機器開発段階においては、シーズとニーズの両面から、節目ごとのプロジェクト評価を継続すべきである。

< I . 波及効果に関するご意見 >

○Bi 系超電導ケーブルの実証への手かかりが得られ、かつ、Y 系超電導ケーブルの基礎データが得られている。(菊池座長)

○500m の Bi 系ケーブルを試作し、運転試験に成功している。これは現在実施中の「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」に引き継がれている。また、Y 系線材で 1m の短尺導

体を試作し、通電容量 1kA の交流損失を評価した。これは現在の「イットリウム系超電導電力機器技術開発」に引き継がれている。超電導送電の経済効果については、かなり大きいと試算されており、また昨今の環境・エネルギー問題を考えると超電導送電が実用化した場合の波及効果は大きいと期待される。(熊倉委員)

○超電導ケーブルの開発および限流器等の開発が行われ、その後の超電導ケーブルプロジェクトや超電導応用基盤技術研究開発で行われた限流器開発、超電導電力機器プロジェクト等に反映されている。超電導ケーブルについてはその後標準化が進められており、我が国はこれまでのプロジェクトで得られた成果を元に先導的立場にある。得られた成果は実験室規模では得難いデータが多く、その後の超電導ケーブルプロジェクトに反映され、我が国の開発力をアピールするものとなった。(齊藤委員)

○このプロジェクトには、コメントはありません。(田島委員)

○高温超電導ケーブル、限流器、変圧器の開発技術は、後継プロジェクトにおける設計技術に反映されている。高温超電導ケーブルは世界各国で実証試験が進められており、実用化に最も近い電力機器の一つである。日本で開発が進められているコンパクトな超電導ケーブルは、CO₂削減効果に加え、コンパクト化による大幅な建設コスト削減効果が期待できる。(原委員)

<Ⅱ.現在の視点から見たプロジェクトに関するご意見>

○多様な目標を寄せ集めた設定ではあったが、事業化能力を参酌して産業総合研究所との共同体制を指向するなど、研究開発の戦略的目標を明確したことは適切であったといえる。(菊池座長)

○超電導送電は超電導応用のなかでも最も重要なものの一つと認識されており、また環境・エネルギー問題に対して大きく貢献することが期待される。しかしながら研究開発には多大な資金が必要で民間企業では到底不可能であったので、国家プロジェクトとして推進したのは妥当であったと考えられる。また、超電導体として Bi-系と Y-系を選んだのも妥当である。(熊倉委員)

○プロジェクトとして高温超電導機器開発の取りかかりとして世界でも開始されあるいは始まろうとしていた超電導ケーブルの開発に重点をおき行われた。社会に貢献出来るテーマとして適切な集中が行われた。(齊藤委員)

○超電導電力機器は実用化への期待が大きい反面、高い信頼性が要求される機器である。また超電導機器は既存機器と特性が大きく異なることから、その実用化までには多くの期間と投資が必要である。このため、民間企業のみでの研究開発は困難であり、国家プロジェクトとしての実施が必要である。(原委員)

<Ⅲ.提言等その他ご意見>

○超電導送電は、環境・エネルギー問題を解決する有力な手段の一つとなり得る技術と考

えられる。しかしながらこの技術も他の超電導応用技術と同様に、その実用化は決して容易ではないと考えられるので、研究開発の長期的なビジョンが必要であろう。また、長期的には交流送電だけでなく、直流超電導送電も視野に入れて良いと思う。(熊倉委員)

○機器開発段階においては、シーズとニーズの両面から、節目ごとのプロジェクト評価を継続すべきである。(原委員)

(超電導素子分野)

①産業科学技術開発「超電導材料・超電導素子」(昭和 63 年度～平成 9 年度)

このプロジェクトは高温超電導体が発見されてまもなく立ち上がり、期間が 10 年と長いものであった。新型超電導が発見されてすぐに出来たものでどうしても課題は探索的な課題になった。したがって、この材料の製作技術などにおいて、技術的波及効果は大いにあったが、経済的波及効果等を云々するプロジェクトではなかった。ただし、プロジェクト終了直後に実用化した製品はないが、プロジェクト期間中に開発された薄膜形成・加工技術などの基盤技術をもとに、高温超電導 SQUID が作られ、検査装置に適用されており、プロジェクトで蓄積された技術、ノウハウは研究者とともに次のプロジェクトに継続された。人材面では、ISTEC への研究者の出向により、研究者の能力向上と企業を越えた研究者の交流が図れた。

知的ストックの面から見て、プロジェクト成果の波及を系統的に把握することが重要である。特許発明のデータを部分的ではあるが検索してみると、多くのプロジェクト成果は技術課題に応じて分散しており、系統的な技術開発に基づいて研究開発が遂行されたのかは不明である。したがって、国家プロジェクトの成果(例えば、特許発明)による波及効果を評価する場合には、直接の委託先のみならず、再委託先も含めて、その技術発明の成果を俯瞰する必要がある。さらに、バイドール制度導入以前の特許を含む研究成果の利用関係については、参加企業の経営判断に依存することがないように、第三者を含む検討委員会が必要なのではないだろうかと考える。

現在の視点から見ると、突発的な高温超電導発見を受けて、酸化物材料に対する研究設備がなかった状態では、民間企業だけでは研究初期投資を行うことはできなかった。国が主導して早急に研究体制を構築したことは妥当であり、素子研究の分野でも基盤技術面でさまざまな成果を得た。

このプロジェクトの課題は『三端子素子の開発』におかれた。これは極めて挑戦的なものであり、出来ない危険性もあったが、トンネル接合作製の困難さが予想されていたこと、エレクトロニクス主流であるシリコン素子との対比から、三端子素子を選択したのは間違っていなかったと考える。しかしながら、薄膜形成、加工技術、界面制御の困難さが次第に明確になってきた時点で、それぞれの目標をより早期に見直すことが必要であったと考える。ただし、新型超電導体の薄膜技術等基盤的技術の開発がなされたことには意義がある。

結果的に、本プロジェクトは、後継プロジェクトの目的が SFQ ロジック回路の研究開発へ傾斜する契機となったが、産業技術としての実用化を目指すのであれば、少なくとも、明確な需要想定を行う必要がある。仮に、民間企業による新規市場を創成するために、国による予算措置が求められているのであれば、その想定根拠と制約条件を明確にする必要があるだろう。

＜Ⅰ．波及効果に関するご意見＞

○プロジェクト成果の波及を系統的に把握することが重要である。例えば、特許 3596643 は、必ずしも超電導技術を主軸としないが、極めて、広い技術である。つまり、「液体窒素温度から 400℃以上の広い温度範囲にわたって高い熱電変換特性を有し、しかも安価で且つ毒性もない熱電変換材料及びこれらを用いてなる熱電変換素子を得る。」という技術課題を解決するための発明である。平成 8 年 5 月に出願され、平成 16 年 9 月に特許となり、ISTEC と東京瓦斯が共有している。仮に、このような技術範囲をコア領域の一つと見なすことができるのであれば、後継プロジェクトの成果範囲もそれに付随した特許発明が隣接しているはずである。しかし、特許発明のデータを部分的ではあるが検索してみると、多くのプロジェクト成果は技術課題に応じて分散しており、系統的な技術開発に基づいて研究開発が遂行されたのかは不明である。したがって、国家プロジェクトの成果(例えば、特許発明)による波及効果を評価する場合には、直接の委託先のみならず、再委託先も含めて、その技術発明の成果を俯瞰する必要がある。さらに、この特許の場合、国際出願はなされていない。ISTEC の委員会は国際出願を考えたようであるが、共願となっている会社の判断にてそれはなされなかったようである。とすれば、国際的な視座から国家プロジェクトがなされ、その研究成果については、民間の経営判断にゆだねられたことになる。特許を含む研究成果の利用関係については、第三者を含む検討委員会が必要なのではないだろうか。(菊池座長)

○

1. 技術波及効果

(1)実用化の進展具合

- ・プロジェクト終了直後に実用化した製品はないが、プロジェクト期間中に開発された薄膜形成・加工技術などの基盤技術をもとに、高温超電導 SQUID が作られ、検査装置に適用されている。SQUID の応用対象の開拓により、製品分野が広がる可能性大である。
- ・フィルターも作られているが日本の移動体通信の環境から普及していないが、ポテンシャルはある。
- ・外国特許も含め多くの特許が出願されたが、出願から 20 年が経過し、特許の効果が下がっている。

(2)技術的な広がり

- ・レーザアブレーションなどの酸化物薄膜形成技術は、他の材料への適用が広がった。
- ・低温超電導体を用いた SQUID、電圧標準は本プロジェクトよりも以前のプロジェクトの技術をベースにしており、本プロジェクトの期間中に成熟したものとする。
- ・生み出された技術を利用する研究主体に関しては、素子作製などは減少し、応用分野では新しい研究主体が加わっている。

- ・学会に関してはブーム時に比べて大きく減少している。研究プロジェクト数に比例することもあり、致し方ないところ面がある。

(3)国際競争力への影響

- ・開発された高温超電導体に関連する技術は世界と互角レベルである。
- ・海外との技術取引や標準化協議などは、まだ、製品化がそこまで達していない。

2. 研究開発力向上効果

(1)知的ストックの蓄積

- ・プロジェクトで蓄積された技術、ノウハウは研究者とともに次のプロジェクトに継続された。いくつかの参加企業は後継プロジェクトへの参画を断念した。

(2)技術戦略

- ・ISTEC が主催するシンポジウム、ワークショップと通して研究交流の基盤が形成された。
- ・プロジェクトに参加するメンバーが各企業の超電導研究組織および予算の中核となった。

(3)人材への影響

- ・論文発表は活発に行われ、学位取得も他の分野に比べて多い。
- ・ISTEC/SRL への研究者の出向により、研究者の能力向上と企業を越えた研究者の交流が図れた。

3. 経済効果

(1)市場創出

- ・まだ、市場を創出するには至っていない。

(2)経済的インパクト

- ・まだ、市場が作られていない。

(3)産業構造転換

- ・まだ、市場が作られていない。

4. 国民生活の向上

(1)エネルギー問題への影響

- ・超電導素子は省電力であることが特長であるが、まだ、実用化できていないので評価できない

(2)環境問題への影響

- ・まだ評価できない。

(3)情報化社会の推進

- ・まだ評価できない。

(4)安全・安心

- ・まだ評価できない。(高木委員)

○このプロジェクトは高温超電導体が発見されてまもなく立ち上がり期間が 10 年と長い

ものであった。新型超電導が発見されてすぐに出来たものでどうしても課題は探索的な課題になった。したがって、技術的波及効果、すなわちこの材料の製作技術などにおいては多いにあったが、経済的波及効果等を云々するプロジェクトではなかった。（早川委員）

＜Ⅱ.現在の視点から見たプロジェクトに関するご意見＞

○本プロジェクトは、後継プロジェクトの目的が **SFQ** ロジック回路の研究開発へ傾斜する契機となった。例えば、**SFQ** ルータは、最近のフラッグシップ領域である「グリーン IT」においても期待されている。産業技術としての実用化を目指すのであれば、少なくとも、明確な需要想定を行う必要がある。しかし、マクロ的な枠組みに基づく市場予測はなされているようであるが、技術的可能性と制度的受容性を勘案した想定需要の積み上げ試算はなされていないのではないだろうか。仮に、民間企業による新規市場を創成するために、国による予算措置が求められているのであれば、その想定根拠と制約条件を明確にする必要があるだろう。（菊池座長）

○同じプロジェクトの超電導材料の項でも述べたが、突発的な高温超電導発見を受けて、国が主導して早急に研究体制を構築したことは妥当であり、素子研究の分野でも基盤技術面でさまざまな成果を得た。高温超電導体の物性を評価し、低温系/高温系それぞれで、どのようなデバイスを実現すべきかの指針を示した。**Nb**系デバイスでは3端子素子から**SFQ**素子への転換を行い、目標と技術課題を整理した。（田島委員）

○

1. 国家プロジェクトとしての妥当性

突然に高温超電導体の発見であったこと、酸化物材料に対する研究設備がなかった状態では、民間企業だけでは研究初期投資を行うことはできなかった。国の関与により研究が短期間で立ち上がった。この材料の性質が全く不明の状態、研究開発が始まった。多くの機関の連携を深める観点からも **ISTEC** のような第三機関の果たした役割は大きかった。以上の点から国家プロジェクトを発足させたことは妥当であった。

2. 目標設定

酸化物高温超電導体の性質が不明な状況のもと、目標とする素子として三端子素子を選択した。トンネル接合作製の困難さが予想されていたこと、エレクトロニクス主流であるシリコン素子との対比から、三端子素子を選択したのは間違っていなかったと考える。薄膜形成、加工技術、界面制御の困難さがだんだん明確になってきた時点で、それぞれの目標を見直すことが必要であったと考える。

3. プロジェクトの実施方法

集中研と分散研での研究実施は、競争の中で種々の素子と技術を試み、要素技術を高めるのに効果があった。（高木委員）

○このプロジェクトの課題は『三端子素子の開発』におかれた。これはきわめて挑戦的なものであったが、出来ない危険性もあった。材料の複雑性、表面海面の制御の難しさから

プロジェクトの前半にはこの課題はあきらめるべきだという考えが出てきたがプロジェクトは遂行された。このプロジェクトの期間が 10 年と長い場合には、途中で見直しをかけるべきであろう。アメリカの研究者がこのプロジェクトを見て、『人材の大いなる浪費だ』といったのが頭を離れない。しかし、新型超電導体の薄膜技術等基盤的技術の開発がなされたことには意義がある。(早川委員)

②-1 産業科学技術開発「超電導応用基盤技術研究開発（Ⅰ）」（平成 10 年度～平成 15 年度）

本プロジェクトでは高温超電導 SFQ 素子が主要課題で、前の「超電導材料・超電導素子研究開発」プロジェクトの知的ストックを活かして遂行され、特に基盤技術の習得に力点を置いたプロジェクトであった。要素技術の有効性を確認することに大きく貢献し、次の「低消費電力型超電導ネットワークデバイスの開発」プロジェクトにつながるものであった。

前プロジェクトの薄膜形成・加工技術の向上を図るとともに、接合作製技術が達成され、接合数が少ない SQUID などに適用されて心磁計などのプロトタイプ開発が行われた。SFQ 素子・回路の基盤を築き、国際的に見ても高温超電導体の接合技術はトップレベルであり、その後の SFQ 研究の基礎ができた。現在の視点から見ると、高温超電導体の三端子素子は極めて実現困難なターゲットであり、目標を磁束量子素子（SFQ）に変えたことは当時の研究動向からみて適切であったが、高温超電導素子を実現するには目標の再設定と、前プロジェクトで開発した薄膜形成・加工技術を活かした長期的な挑戦が必要であることが明らかになった。このため、国の支援が長期的課題に対して必要であった。

このプロジェクトでは、高温超電導体接合の集積化技術についてのさまざまな努力がなされたが、集積回路を作るほどには向上しなかった。次の「低消費電力型超電導ネットワークデバイスの開発」プロジェクトにも引き継がれたが、結果として大きな集積度の向上は見られなかった。

以上のように、本プロジェクトでの主要研究課題であった高温超電導体 SFQ 素子・回路については、経済効果、国民生活・社会レベルの向上等の効果を云々する段階には至っていない。また、本プロジェクトではないが、並行して実施された科学技術振興調整費「単一磁束量子を担体とする極限情報処理機能の研究」では、全参画機関のデバイス作製を NEC の Nb プロセスラインで一括して行う体制をとった。これは企業・大学間の壁を越えた画期的な体制で、その後の SFQ 回路の研究開発のインフラとなった。

超電導をエレクトロニクスに応用する上では、集積化が可能な低温超電導体の有用性にもっと着目した方がよく、次の「低消費電力型超電導ネットワークデバイスの開発」では、高温超電導体素子と低温超電導体 SFQ 集積回路の役割分担を明確にして開発が進められた。そこでは、上記の「単一磁束量子を担体とする極限情報処理機能の研究」の成果が生かされ低温超電導体（Nb）の集積技術が進化した。

<Ⅰ．波及効果に関するご意見>

○要素技術の有効性を確認することに大きく貢献したといえる。（菊池座長）

○

1. 技術波及効果

(1)実用化の進展具合

前プロジェクトの薄膜形成・加工技術の向上を図るとともに、接合作製技術が達成され、接合数が少ない **SQUID** などに適用されて心磁計などのプロトタイプ開発が行われた。**SFQ** 素子・回路の基盤を築き、その後の **SFQ** 研究の基礎ができた。外国特許も含めて多くの特許が出願された。

(2)技術的な広がり

後継プロジェクトへの技術的な貢献は非常に大きいものがあったが、他の分野への広がりには「超電導材料・超電導素子研究開発」に比べて少ない。目標を **SFQ** 素子に絞り、そのための技術を蓄積した時期に相当したためと考える。

(3)国際競争力への影響

研究対象が **SFQ** 素子になって、海外と同じ土俵に立つての競争となった。その中では対等のレベルであった。高温超電導体の接合技術はトップレベルであった。フィルターに関してはニーズが米国に比較して弱く、遅れた。

2. 研究開発力向上効果

(1)知的ストックの蓄積

本プロジェクトでは高温超電導 **SFQ** 素子が主要課題で、前の「超電導材料・超電導素子研究開発」プロジェクトの知的ストックを活かして遂行された。一方、本プロジェクトの前年に開始された振興調整費「単一磁束量子極限情報処理」が低温超電導体 Nb を用いて **SFQ** 素子・回路の先行研究を進めている。これらのプロジェクトが後継プロジェクト「低消費電力型超電導デバイス」に引き継がれて、現在の研究の基盤になっている。

(2)技術戦略

本プロジェクトではないが、並行して実施された振興調整費「単一磁束量子極限情報処理」では、全参画機関のデバイス作製を NEC の Nb プロセスラインで一括して行う体制をとった。これは企業・大学間の壁を越えた画期的な体制で、その後の **SFQ** 回路の研究開発のインフラとなった。

(3)人材への影響

全参画機関のデバイス作製を NEC の Nb プロセスラインで一括して行う体制の中で、**SFQ** 回路設計者の育成と人的交流が図れた。

3. 経済効果

(1)市場創出

まだ、市場を創出するには至っていない。

(2)経済的インパクト

まだ、市場を創出するには至っていない。

(3)産業構造転換

まだ評価できない。

4. 国民生活の向上

(1)エネルギー問題への影響

超電導素子は省電力であることが特長であるが、まだ、実用化できていないので評価できない。

(2)環境問題への影響

まだ評価できない。

(3)情報化社会の推進

(4)安全・安心

まだ評価できない。(高木委員)

○このプロジェクトは次のネットワークデバイスにつながるもので特に基盤技術の習得に力点を置いたプロジェクトであった。したがって、次へつながるものとして、特に SFQ に関する技術的波及効果はあった。だが、経済効果、国民生活・社会レベルの向上等の効果を云々することは出来ない。(早川委員)

<Ⅱ.現在の視点から見たプロジェクトに関するご意見>

○

1. 国家プロジェクトとしての妥当性

前プロジェクトで目標とした三端子素子は極めて実現困難なターゲットであること、超電導素子を実現するには目標の再設定と、前プロジェクトで開発した薄膜形成・加工技術を活かした長期的な挑戦が必要であることが明らかになった。国の支援が長期的課題に対して必要であった。

2. 目標設定

目標を磁束量子素子に変えたことは当時の研究動向からみて適切であったと考える。

3. プロジェクトの実施方法

ISTEC を中心にした体制になったことはプロジェクト全体の管理を行う上で効率的であった。(高木委員)

○このプロジェクトは高温超電導体を応用することに力点が置かれ、より具体的なデバイスを作ることを目指した。デバイスを作るには接合の集積化が不可欠である。しかし高温超電導体接合の集積技術はさまざまな努力がなされたが、デバイスを作るほどには向上しなかった。次のネットワークデバイスプロジェクトに引き継がれたが、結果としてうまくいかなかった。現在の時点で考えれば、高温超電導体接合の集積化技術は失敗であったといわざるを得ない。(早川委員)

<Ⅲ.提言等その他ご意見>

○超電導をエレクトロニクスに応用しようとしたとき、集積化が可能な低温超電導体の有用性にもっと着目した方がよい。次のネットワークデバイスにはこの点が生かされ低温超

電導体 (Nb) の集積技術が進化した。(早川委員)

⑪「低消費電力型超電導ネットワークデバイスの開発」(平成 14 年度～平成 18 年度)

SFQ 分野の技術的可能性を高めるために具体的目標を掲げ、貢献したプロジェクトであった。実際に、通信回線に入れるスイッチを目指しシステムを構成し実験までを行った。高温超電導 SFQ 素子については、まだプロトタイプができたレベルであるが、低温超電導体 SFQ 回路については、LSI 作製プロセスおよび回路設計技術の高度化により、ルーター用 SFQ 実証回路が実現しており世界レベルである。具体的には、Nb 系 LSI での 9 層構造まで可能な平坦化プロセス、SFQ の回路設計技術、ルーター用スイッチの基盤技術、またサーバー用プロセッサモジュール向けの各種要素回路を開発するなど、多くの成果を上げ、技術的波及効果、研究開発力向上効果は大いにあったが、まだまだ解決しなければならない課題が多く、実用化まで行けなかった。関連研究者が関心を持つレベルに達しているが、当時の通信業界には興味深い実験としか写らなかったようだ。したがって、経済効果、国民生活の向上というところまでには至っていない。

現在の視点から見ると、本プロジェクトで開発した要素技術をもとに、例えば、高速の AD 変換器やそれらを利用した計測器などはすぐにでも実現できるだろう。しかし、SFQ 分野への期待は、動画像トランザクションなどの高速、高感度デバイスのニーズに加え、現在の情報通信の周波数帯の不足に対して、その技術開発へのインセンティブを高くするものであり、国家プロジェクトとしては、より大きな市場を目指す必要がある。また、プロジェクトの実施からの観点から見ると、このプロジェクトは大学、他省庁の研究所との連携が比較的うまくいったといえる。

提言としては、以下の意見が寄せられた。

SFQ 回路をルーターのような大きな市場に導入するには、関連研究者数を日米で増やすことが必須である。そのため、超電導研究者間の競争と協力に加えて、半導体回路設計者を取り込む施策が必要である。

エレクトロニクスは集積技術が重要になる。高温超電導体の集積技術は、これまでやってきたが、うまく行っておらず、高温超電導体デバイスは、集積デバイスではなく個別のデバイスに取り組むべきである。一方、SFQ 論理デバイスは、低消費電力性に着目すると、ハイエンドコンピュータなど今問題となっている半導体デバイスを用いるコンピュータの発熱の問題を解決する技術になるかも知れない。このような研究開発は、国家戦略として取り組む必要があり、国のプロジェクトとして考えなければならない。

< I. 波及効果に関するご意見 >

○SFQ 分野の技術的可能性を高めるために貢献した。しかし、特許出願件数は、他のプロジェクトに比べて少なく、実用化研究開発プロジェクトというよりも、研究基盤構築に軸足がおかれていたといえる。(菊池座長)

○

1. 技術波及効果

(1)実用化の進展具合

LSI 作製プロセスおよび回路設計技術の高度化により、ルーター用 SFQ 実証回路が実現している。実用化にはまだまだ解決しなければならない課題が多いが、関連研究者が関心を持つレベルに達している。高温超電導 SFQ 素子については、まだプロトタイプができたレベルである。

(2)技術的な広がり

超電導論理回路の応用としてルーター用スイッチに広がった点は評価できる。研究主体数が増える段階にはまだない。

(3)国際競争力への影響

SFQ 回路に関しては世界レベルである。ただし、競争プラス協力が市場を創出するためにこれから必要であろう。

2. 研究開発力向上効果

(1)知的ストックの蓄積

これまでに実施されたプロジェクトの知的ストックを活かして遂行され、現行のプロジェクト「次世代高効率ネットワークデバイス技術開発」に引き継がれている。高温超電導体を用いた小規模回路はセンサーなどの特定用途への利用が期待される。

(2)技術戦略

ISTEC/SRL がプロセス、回路設計技術などの基盤を築き、応用に関しては共同研究で実施するような体制になっていると見受けられる。

(3)人材への影響

3. 経済効果

(1)市場創出

市場創出というところまでは至っていないが、応用を議論できる段階になった。

(2)経済的インパクト

具体的な製品売り上げや雇用促進を議論することはできない。

(3)産業構造転換

まだ、評価できない。

4. 国民生活の向上

(1)エネルギー問題への影響

超電導素子は省電力であることが特長である。まだ、実用化できていないので、数量的な評価できないが、低 CO2 社会のために必要な技術として重要な位置を占めている。

(2)環境問題への影響

上記とおなじ。

(3)情報化社会の推進

まだ評価できない。

(4)安全・安心

まだ評価できない。(高木委員)

○SFQを中心とした具体的目標を掲げたプロジェクトであった。実際に、通信回線に入れるスイッチを目指しシステムを構成し実験までを行った。技術的波及効果、研究開発力向上効果は多いにあったが、実用まで行けなかった。通信業界には興味深い実験としか写らなかったようだ。したがって、経済効果、国民生活の向上というところまで行かなかった。(早川委員)

<Ⅱ.現在の視点から見たプロジェクトに関するご意見>

○SFQ分野への期待は、動画像トランザクションなどの高速、高感度デバイスのニーズに加え、現在の情報通信の周波数帯が不足することが見込まれるのであれば、より一層、その技術開発へのインセンティブは高くなる。(菊池座長)

○Nb系LSIでは9層構造まで可能な平坦化プロセスを確立した。SFQの回路設計技術を確立し、ルーター用スイッチの基盤技術を開発、またサーバー用プロセッサモジュール向けの各種要素回路を開発するなど、多くの成果を上げた。低温デバイス特有の実装技術や冷却技術なども洗練された。こうした要素技術をもとに、特定の分野で産業化を目指すことは可能であろう。例えば、高速のAD変換器やそれらを利用した計測器などはすぐにも実現できるだろう。しかし、国プロとしては、より大きな市場を目指す必要があるが、そこへの道のりは遠い。(田島委員)

○このプロジェクトは大学、他省庁の研究所との連携が比較的うまくいったといえる。大学はハイエンドコンピュータの基礎技術を磨いた。これは、低温超電導体(Nb)の集積技術の向上があったからである。この技術はわが国の世界的成果である。(早川委員)

<Ⅲ.提言等その他ご意見>

○SFQ回路をルーターのような大きな市場に超電導素子を導入するには、関連研究者数を日米で増やすことが必須である。そのため、超電導研究者間の競争と協力に加えて、半導体回路設計者を取り込む施策が必要である。(高木委員)

○エレクトロニクスは集積技術が重要になる。高温超電導体の集積技術は、これまでやってきたが、うまく行っていない。このようなことを考えると高温超電導体デバイスは、集積デバイスではなく個別のデバイスに取り組むべきである。一方、SFQ論理デバイスは、低消費電力性に注目すると、ハイエンドコンピュータなど今問題となっている半導体デバイスを用いるコンピュータの発熱の問題を解決する技術になるかも知れない。このような研究開発は、国家戦略として取り組む必要があり、国のプロジェクトとして考えなければならない。(早川委員)

**超電導材料・超電導素子研究開発の
技術・産業・社会へのインパクトに関する追加調査
報告書**

平成 2 2 年 2 月

株式会社 日鉄技術情報センター

はじめに

超電導材料・超電導素子研究開発プロジェクトは、産業科学技術研究開発プロジェクトの一環として昭和 63 年度から平成 9 年度までの 10 年間の計画で実施されたものである。

「超電導材料・超電導素子」は超電導物質の超電導電力応用技術、エレクトロニクス等の分野における工学的利用を可能とするため、超電導材料及び超電導新機能素子の開発に係る基盤技術を確立することを目的としている。平成 8 年度に実施したプレ最終評価の結果を踏まえ、産業技術審議会評価部会超電導材料・超電導素子評価委員会において最終評価が実施されている。本委員会では、プレ最終評価での指摘事項への対応を中心に、プロジェクトの実施の意義、研究開発計画の妥当性、研究成果の意義や今後の超電導の研究の在り方等に関して評価されている。

今回の調査は、上記プロジェクトの他、このプロジェクトの後継プロジェクト等、経済産業省関係で実施された超電導関係研究開発プロジェクトを対象に、効率的で効果的な追跡評価を目的として、1980 年代から現在に至るまでの関係する各分野の研究開発活動、あるいは研究開発成果を調査し、それらが関連技術等の進歩や発展、さらには産業界や社会に及ぼした効果等について情報を収集し、分析を行った。

本書は、これらの追跡調査の結果をとりまとめたものである。

なお、本調査の遂行にあたっては、本プロジェクトに当時関係された方をはじめ、当該技術に造詣の深い有識者にヒアリング調査を行い、貴重な情報を提供していただいた。ご協力いただいた関係者各位には、厚く御礼を申し上げます。

平成 22 年 2 月

株式会社 日鉄技術情報センター

目 次

はじめに

1. 調査の概要	1
1. 1 調査の背景及び目的	1
1. 2 調査の内容	1
1. 3 調査の方法	6
2. 追跡調査の結果	8
2. 1 研究開発の背景	8
2. 2 調査対象プロジェクトの概要	11
2. 3 追跡調査結果	38
(施策評価関係)	38
I. 施策（超電導研究開発）の目的・政策的位置付けの妥当性	38
(1) 施策（超電導研究開発）の目的の妥当性	38
(2) 施策（超電導研究開発）の政策的位置付けの妥当性	41
(3) 国の施策で行われるべき研究開発としての妥当性はあったか。国の関与 が必要とされる研究開発施策であったか。	44
II. 施策（超電導研究開発）の構造及び目的実現見通しの妥当性	46
(1) 現時点までにおいて得られた成果は妥当か。	46
(2) 施策（超電導研究開発）の目的を実現するために技術に関する事業が適	

切に配置されてきたか。それぞれのプロジェクト間での連携は適切に取られてきたか。	58
(3) 個々のプロジェクト終了後のフォローアップの状況	59
III. 総合評価（施策）	62
(事業評価関係)	64
A. 総論	64
I. 波及効果に関する調査	64
I－1. 技術波及効果	64
(1) 実用化の進展度合	64
(2) プロジェクト成果からの技術的な広がり具合	88
(3) 国際競争力への影響	99
I－2. 研究開発力向上効果	101
(1) 知的ストックの蓄積度合	101
(2) 研究開発組織の改善・技術戦略への影響	103
(3) 人材への影響	104
I－3. 経済効果	106
(1) 市場創出への寄与	106
(2) 経済的インパクト	123
(3) 産業構造転換・活性化の促進	123
I－4. 国民生活・社会レベルの向上効果	124
(1) エネルギー問題への影響	124

(2) 環境問題への影響	126
(3) 情報化社会の推進	128
(4) 安全、安心、生活の質	129
B. 個別プロジェクト関係	130
(1) 超電導材料分野	130
①産業科学技術開発「超電導材料・超電導素子」(昭和 63 年度～平成 9 年度)	130
②-1 産業科学技術開発「超電導応用基盤技術研究開発 (Ⅰ)」(平成 10 年度～平成 15 年度)	134
②-2 産業科学技術開発「超電導応用基盤技術研究開発 (Ⅱ)」(平成 15 年度～平成 19 年度)	137
③大型省エネルギー技術研究開発・ニューサンシャイン計画「超電導電力応用技術」(昭和 63 年度～平成 11 年度)	140
④ニューサンシャイン計画「超電導発電機基盤技術研究開発」(平成 12 年度～平成 15 年度)	143
⑤「超電導電力貯蔵システム要素技術開発調査」(平成 3 年度～平成 10 年度)	146
⑥「超電導電力貯蔵システム技術開発調査」(平成 11 年度～平成 15 年度)	149
⑦「超電導電力ネットワーク制御技術開発」(平成 16 年度～平成 19 年度)	152
⑧ニューサンシャイン計画「高温超電導フライホイール電力貯蔵研究開発」(平成 7 年度～平成 11 年度)	155
⑨ニューサンシャイン計画「フライホイール電力貯蔵用超電導軸受技術研究開発」(平成 12 年 度～平成 16 年度)	157
⑩ニューサンシャイン計画「交流超電導電力機器基盤技術研究開発」(平成 12 年度～平成 16 年 度)	159
(2) 超電導素子分野	162
①産業科学技術開発「超電導材料・超電導素子」(昭和 63 年度～平成 9 年度)	162

②-1 産業科学技術開発「超電導応用基盤技術研究開発（Ⅰ）」（平成 10 年度～平成 15 年度）	165
⑪「低消費電力型超電導ネットワークデバイスの開発」（平成 14 年度～平成 18 年度）	167

1. 調査の概要

1. 1 調査の背景及び目的

経済産業省では、経済産業省技術評価指針に基づき、研究開発プロジェクトが終了して数年経った事業を対象に追跡評価を実施している。追跡評価は、当該研究開発プロジェクトの研究開発活動や研究開発成果が技術・産業・社会へ与えたインパクトについて事前に行った調査結果を基に現在の視点から総合的に当該研究開発プロジェクトの評価を行うものである。当該研究開発プロジェクトに対する国民への説明責任を果たすこと、及び今後実施される研究開発プロジェクトの大局的な戦略のためのテーマ設定、予算、運営方法、フォローアップ体制等の検討を行うことは、極めて重要である。

本調査では、昭和63年度から平成9年度にかけて実施された「超電導材料・超電導素子研究開発」の他、当該研究開発プロジェクトの後継プロジェクト等経済産業省関係で実施された超電導関係研究開発プロジェクトを対象に、効率的で効果的な追跡評価を目的として、1980年代から現在に至るまでの関係する各分野の研究開発活動、あるいは研究開発成果を調査し、それらが関連技術等の進歩や発展、さらには産業界や社会に及ぼした効果等について情報を収集し、分析を行った。

1. 2 調査の内容

本調査では、「経済産業省技術評価指針に基づく標準的評価項目・評価基準」（平成21年6月改訂）を基本として情報収集・分析を行ったが、多数に渡る対象プロジェクトの目的、成果、相互関係等に着目し、俯瞰的に評価する必要があると判断されたため、施策評価の観点も追加し、標準的評価項目・評価指針に所要の修正を加えて評価項目を設定し、その視点から対象プロジェクトの追跡評価に必要となる情報の収集・分析等を行った。

（施策評価関係）

1. 施策（超電導研究開発）の目的・政策的位置付けの妥当性

（1）施策（超電導研究開発）の目的の妥当性

- ・超電導研究開発の目的が波及効果、時期、主体等を含め、具体化されているか。
- ・それぞれの超電導研究開発プロジェクト又は後継プロジェクトの移行時において、技術的課題は適切に取捨選択・整理され、目的に至る具体的目標は立てられていたか。
- ・実施された超電導研究開発プロジェクトの目的は、社会的ニーズに適合し、出口（事業化）を見据えた内容になっていたか。また、研究開発プロジェクトの目的は、時代の進行とともに、より具体的な内容が設定されるよう見直されてきたか。

（2）施策（超電導研究開発）の政策的位置付けの妥当性

- ・施策（過去に実施されてきた超電導研究開発）の政策的位置意義（上位の政策との関連付け、類似施策との関係等）は高かったか。また、時代の進行とともに施策の目的が修正されてきた場合には、引き続き施策の目的の政策的妥当性は高かったか。
 - ・国際的な超電導研究開発の動向に適合していたか。
- （３）国の施策で行われるべき研究開発としての妥当性はあったか。国の関与が必要とされる研究開発施策であったか。
- ・国として取り組む必要のある研究開発施策であったか。当省の関与が必要とされる研究開発施策であったか。
 - ・必要に応じ、省庁間連携は組まれてきたか。
- ２．施策（超電導研究開発）の構造及び目的実現見通しの妥当性
- （１）現時点までにおいて得られた成果は妥当か。
- ・現在実施されている超電導研究開発は、過去の研究開発成果を適切に活用しているか。
 - ・過去に終了した研究開発プロジェクトで実用化に至らなかったプロジェクトであっても適切な波及効果が得られているか。
- （２）施策（超電導研究開発）の目的を実現するために研究開発プロジェクトを含む技術に関する事業が適切に配置されてきたか。それぞれの事業間での連携は適切に取られてきたか。
- （３）個々の研究開発プロジェクト終了後のフォローアップの状況
- ・個々の研究開発プロジェクトの成果の実用化や普及に対して、プロジェクト終了後のフォローアップ体制は適切であったか。
 - ・後継のプロジェクトに引き継ぐ際には、適切な引き渡しが行われていたか。
 - ・個々の研究開発プロジェクトの成果の実用化や研究開発基盤の構築等によって、その後の産業戦略、技術戦略等への影響があったか。
- ３．総合評価
- （事業評価関係）
- Ⅰ．波及効果に関する評価
- Ⅰ－１．技術波及効果
- （１）実用化への進展度合
- ・個々のプロジェクトの直接的及び間接的な成果は、製品やサービスの実用化にどのように寄与したか、あるいは寄与する可能性があるか。特許取得やその利用の状況、市場環境の変化、競合技術の台頭等を踏まえて評価する。
- ①個々のプロジェクト終了後に実用化した製品やサービスは数多くあったか。

②個々のプロジェクトの成果から今後実用化が期待される製品やサービスはあるか。

③多額の実施料収入を生み出す等、インパクトのある技術が得られたか。

④外国での特許取得が行われたか。

⑤基本特許を生み出したか。

(2) 個々のプロジェクト成果からの技術的な広がり具合

・個々のプロジェクトの成果により直接的に生み出された技術は、関連技術分野に技術面でのインパクトを与えたか。派生技術には、個々のプロジェクト（特に「超電導材料・超電導素子研究開発」）実施当時（1980年代後半）に想定されていたもの、想定されていなかったものを含めてどのようなものがあり、それらはどのように利用されているかを踏まえて評価する。

①数多くの派生技術を生み出したか。

②派生技術は多くの種類の技術分野にわたっているか。（当該技術分野、他の各種技術分野）

③直接的に生み出された技術又は派生技術を利用した研究主体は数多くあるか。

④直接的に生み出された技術又は派生技術を利用する研究主体は産業界や学会に広がりを持っているか。（参加企業、大学等、不参加の同業種の企業、その他産業等）

⑤参加企業等が自ら実施する研究開発の促進効果や期間短縮効果はあったか。

(3) 国際競争力への影響

・直接的に生み出された技術の成果技術や派生技術により、国際競争力はどのように強化されたか。

①我が国における当該分野の技術レベルは向上したか。

②外国と技術的な取引が行われ、それが利益を生み出しているか。

③個々のプロジェクトの技術分野に関連した外国での特許取得は積極的になされているか。

④国際標準の決定に対し、個々のプロジェクトはメリットをもたらしたか。

⑤国際標準等の協議において、我が国がリーダーシップをとれるようになったか。

⑥外国企業との主導的な技術提携は行われたか。

⑦個々のプロジェクトが外国の技術政策に影響を与え、その結果技術交流が促進されたり、当該分野で我が国がイニシアチブをとれるようになったか。

I-2. 研究開発力向上効果

(1) 知的ストックの蓄積度合

・特許や、研究者のノウハウ・センス・知識等の研究成果を生み出す源となる知的スト

ックはどのような役割を果たしたか。それらは個々のプロジェクト終了後も継承され、次の研究の芽になる等、今後の影響を持ち得ることができるか。

- ①当該分野における研究開発は続いているか。
- ②個々のプロジェクト終了後にも、プロジェクトに参加した研究者が派生技術の研究を行っているか。
- ③個々のプロジェクトの終了時から現在までの間に、知的ストックが将来的に注目すべき新たな成果（画期的な新製品・新サービス等）を生み出す可能性は高まっているか。

（２）研究開発組織の改善・技術戦略への影響

・個々のプロジェクト又は一連の超電導研究開発プロジェクトでは、研究開発組織の強化・改善に対してどのように役立ったか。あるいは、実施企業の技術戦略に影響を与えたか。

- ①企業を超える研究開発のインフラとして、学会、フォーラム、研究者間交流等の公式・非公式の研究交流基盤は整備され、活用されているか。
- ②企業間の共同研究の推進等、協力関係、良好な競争的關係が構築されたか。
- ③顧客やビジネスパートナーとの関係の変化が、経済性を向上させたか。
- ④技術の管理組織を再編成する契機となったか。
- ⑤研究開発部門の再構成等、社内の組織改編は積極的に行われたか。
- ⑥研究開発の予算規模が増減する契機となったか。
- ⑦プロパテント等の特許戦略に対する意識が高くなったか。
- ⑧知的ストックは、企業の技術戦略にどのような影響を与えたか。

（３）人材への影響

・個々のプロジェクト又は一連の超電導研究開発プロジェクトでは、研究者の効率的・効果的配置や能力の向上にどのように寄与したか。

- ①国内外において第一人者と評価される研究者が生まれたか。
- ②論文発表、博士号取得は活発に行われたか。
- ③プロジェクト従事者の企業内での価値は高まったか。
- ④研究者の能力向上に結び付くような研究者間の人的交流が行われたか。
- ⑤関連分野の研究者増員が行われたか。
- ⑥国内外から高く評価される研究機関となったか。

I－３．経済効果

（１）市場創出への寄与

・新しい市場を創造したか。また、その市場の拡大に寄与したか。

(2) 経済的インパクト

- ・生産波及、付加価値創出、雇用創出への影響は大きかったか。
 - ①直接的に生み出された技術や派生技術の実用化により、製品の売り上げと利益は増進したか。
 - ②直接的に生み出された技術や派生技術の実用化により、雇用促進は積極的に図られたか。

(3) 産業構造転換・活性化の促進

- ・個々のプロジェクト又は一連の超電導研究開発プロジェクトが産業構造の転換や活性化（市場の拡大や雇用の増加等）にどのような役割を果たしたか。
 - ①個々のプロジェクト又は一連の超電導研究開発プロジェクトが、各関連産業における市場の拡大や雇用の増加等に寄与したか。
 - ②個々のプロジェクト又は一連の超電導研究開発プロジェクトが新たな産業の勃興や、既存市場への新規参入、あるいは既存市場からの撤退等をもたらしたか。また、それらが市場全体における雇用に影響したか。
 - ③個々のプロジェクト又は一連の超電導研究開発プロジェクトが生産業の改善や更新に結びついたことにより生産性・経済性は向上したか。

I－4. 国民生活・社会レベルの向上効果

- ・個々のプロジェクト又は一連の超電導研究開発プロジェクトによって新たな製品・サービスが実用化されたこと、プロジェクトの成果の応用による生産性の向上や顕著なコストダウン、デファクトを含めた規格化を促進したこと等の事例がある場合、それらは、例えば下記に挙げる項目にそれぞれどのような影響をもたらしたか。

(1) エネルギー問題への影響

- ・エネルギー問題の解決に寄与した効果としてどのようなものが考えられるか。

(2) 環境問題への影響

- ・環境問題の解決に寄与した効果としてどのようなものが考えられるか。

(3) 情報化社会の推進

- ・情報化社会の推進に寄与した効果としてどのようなものが考えられるか。

(4) 安全、安心、生活の質

- ・国民生活の安全、安心、生活の質の向上に寄与した効果としてどのようなものが考えられるか。

られるか。

- ①国民生活の利便性を向上させた事例が存在するか。
- ②国民生活の安全性の向上に寄与したか。
- ③個々のプロジェクト又は一連の超電導研究開発プロジェクトの成果は、身障者や高齢者の多様な生活を可能にしたか。また、個の自立を支援するものであるか。

Ⅱ．現在の視点からの個々のプロジェクトの評価

個々のプロジェクトの概要及びⅠ．に示した効果から総合的に評価する。

Ⅱ－１．国家プロジェクトとしての妥当性

- ・国のプロジェクトとしてどのような効果があったか。
- ・現在（追跡評価時点）から見て、国が関与する必要があったか。また、関与の方法や程度は妥当であったか。
 - ①多額の研究開発費、長期にわたる研究開発期間、高い技術的難度等から、民間企業のみでは十分な研究開発が実施されない場合。
 - ②環境問題への先進的対応等、民間企業には市場原理に基づく研究開発実施インセンティブが期待できない場合。
 - ③標準の策定、データベース整備等のうち社会的性格が強いもの（知的基盤）の形成に資する研究開発の場合。
 - ④国の関与による異分野連携、産学官連携等の実現によって、研究開発活動に新たな付加価値をもたらすことが見込まれる場合。
 - ⑤その他国が主体的役割を果たすべき特段の理由がある場合。

Ⅱ－２．目標設定

- ・当時の技術動向、市場動向、社会環境、政策目的等から見て、目標設定の方向性とそのレベルは妥当であったか。

Ⅱ－３．プロジェクト実施方法

- ・個々のプロジェクトの計画策定、スキーム（予算制度）、実施体制、運営方法等の実施方法が現在の視点から見て妥当であったか。

１．３ 調査の方法

（１）プロジェクト参加者等へのヒアリング調査による現状把握

本調査では、関連文献の調査及びプロジェクト参加者や関連分野の有識者へのヒアリン

グ調査により、追跡評価に必要な情報の収集と現状把握を行った。

（２）追跡評価に必要な情報の詳細の整理と分析

本調査では、文献調査、プロジェクト参加者等へのヒアリング調査結果をもとに、評価項目・評価基準の項目に従って、追跡評価に必要な情報の詳細を項目別に整理分析した。

2. 追跡調査の結果

2. 1 研究開発の背景

- オランダのライデン大学の低温物理学者であるカマリン・オンネス博士が 1908 年にヘリウムガスの液化に成功し、液体ヘリウムを使用した低温実験を行っていた中で 1911 年に水銀の電気抵抗がゼロになる現象を発見した。この超電導現象の発見がなされて以来、来年（2010 年）で一世紀を迎える。この一世紀の間のうち、当初約 50 年間は液体ヘリウム温度での低温超電導材料の開発や理論的解明の努力がなされたが、1957 年のバーディーン、クーパー及びシュリーファール（米）による BCS 理論が提案されるまで、超電導材料の開発や応用技術の開発にさしたる成果は見られなかった。
- しかし、その後 1950 年代後半から 1960 年代前半にジョセフソン（英）によるジョセフソン効果の発見（1962 年）、 Nb_3Sn 化合物、 NbTi 合金（第二種超電導体）などの多くの低温超電導物質の発見がなされた。ただし、 Nb_3Sn 化合物、 NbTi 合金などが安定化超電導技術の確立とともに実用的線材として普及し始めたのは 1970 年代後半であった。1970 年代からは冷却コストを負担しても低温超電導体の高い性能を活用できる超電導加速器、SQUID センサー、MRI 診断装置などの開発、実用化が行われた。この間の研究は、超電導発電機や大型電子計算機の開発などの研究においても低温超電導の範疇（液体ヘリウム温度）での開発が行われていた。

（材料分野）

- このような状況の中で、1986 年に液体窒素温度を超える高温で超電導現象を発現する酸化物超電導体（高温超電導体）が発見され、いわゆる「超電導フィーバー」が巻き起こった。世界中で新たな高温超電導材料の探索が行われたが、その中で、経済産業省でも高温超電導体の探索、理論解明、素子開発等をターゲットとした産業技術開発「超電導材料・超電導素子」が 1988 年に開始された。
- しかしながら、この時期に経済産業省で開始した超電導関係の研究開発は、高温超電導に関するものばかりではなく、低温超電導体による電力関係製品の開発を行うことメインテーマとする（研究テーマの中には高温超電導材料の開発も含まれていた）、ニューサンシャイン計画「超電導電力応用技術」（1988 年～1999 年）、「超電導電力貯蔵システム要素技術」（1991 年～1998 年）が開始されている。
- このようにして見ると、1980 年代末から 1990 年代の間は、高温超電導体の探索、線材等の開発と並行して、低温超電導体による電力系統用製品の開発が行われていた状況であった。なお、1980 年代から 1990 年代を通して、 Nb_3Sn 化合物、 NbTi 合金に関する特許は継続して出願されており（出典：日本国特許庁 技術分野別特許マップ「超電導技術」（1999 年））、この点からも低温超電導体及びその応用の研究が行われていたことが裏付けられる。
- 材料探索主体のプロジェクトは産業技術開発「超電導材料・超電導素子」で一応終結し、

その後の材料探索・機構解明の研究は、文部科学省主体で進められることとなった。経済産業省では、2000 年代前半で低温超電導体の製品開発については、「超電導電力応用技術」で開発された NbTi 線材技術を活用した民間プロジェクトにおけるシャープ株式会社 亀山工場での瞬低対策 SMES の実証運転などの成果を上げて、低温超電導体の研究成果を高温超電導体研究に活かしている。また、高温超電導体の工業製品開発の研究は、徐々に統合化され、現在のイットリウム系材料による電力系統製品の開発とビスマス系材料による送電ケーブル実証試験に至っている。

- 1990 年代に行われた高温超電導体の材料探索、線材化等の加工技術研究で判明したのは、多くの金属元素を含有する酸化物超電導体の工業製品化の難しさであった。いわゆる「超電導フィーバー」の際に多くの材料の探索が行われたが、現在、市場において実用化までを視野に入れて期待されている高温超電導材料は Bi 系材料 (BSCCO) と Y 系材料 (YBCO) の二種類だけである。酸化物系超電導材料の工業材料化への克服には多大な時間を要したのである。

(素子分野)

- 超電導現象をエレクトロニクスへ応用しようという試みは、1950 年代中期のクライオトロロンに端を発する。超電導材料で薄膜を作り、その膜が超電導状態にある時は電圧を発生しないが、常電導状態に転移した後は電圧が発生する性質を利用してスイッチとして使うというものであったが、トランジスタの進歩に押され、この時点では敗れた。1963 年に超電導電子のトンネル効果を利用したジョセフソン素子が現れ、1980 年代末まではほとんどニオブ(Nb)が用いられた。動作温度は液体ヘリウム温度(4.2K)程度の低温に限定されていた。1986 年に高温超電導体が発見され、素子の動作温度が液体窒素温度(77K)で実現できる可能性が生まれ、超電導エレクトロニクスへの期待が高まった。
- 超電導エレクトロニクス素子は大きく受動素子と能動素子の二種類に分けられる。受動素子は、抵抗器やコンデンサーなどのように外部からエネルギーを与えなくても作動する素子であり、現在すでに実用化されているのは超電導フィルタである。携帯電話基地局で超電導フィルタが使われ、米国では実際に数千箇所の基地局に超電導フィルタが導入されている。能動素子は、トランジスタのように外部からエネルギーを供給することで作動する。超電導体の場合はジョセフソン素子が能動素子の典型であり、超電導電子のトンネル効果を利用する。ジョセフソン効果は 1962 年にケンブリッジ大学の B.D.Josephson によって理論的に予測された効果である。
- ジョセフソン素子を組み込んだ SQUID は、極めて微弱な磁界の計測が可能な素子で、人体に触れることなく、心臓の鼓動に伴い発生する磁界や、脳活動時に電流によって生じる磁界を検出できる。そのため、医療分野など応用分野が広い。SQUID にはニオブなどの低温超電導材料の他に、YBCO などの高温超電導材料を使用できる。低温超電導材料で作った SQUID のほうが感度は良いが、高温超電導材料の SQUID は冷却が簡便であり、応

用性広い。

- ジョセフソン素子は正確な電圧を発生することも可能であり、電圧の国家標準に採用しているところが多い。
- ジョセフソン接合のスイッチング速度が半導体に比べて数十倍速く、消費電力も一桁以上少なくてすむことから、各種デジタル回路への応用も可能である。Si 半導体に替わる高速演算素子として期待され、1970 年代前半から研究開発が始まった。最近は磁束の最小単位を信号に利用する単一磁束量子(SFQ) 素子が開発されている。
- 経済産業省は、「低消費電力型超電導ネットワークデバイスの開発」プロジェクトを、2002 年 9 月に立ち上げ、(財) 国際超電導産業技術研究センター(ISTEC)に委託した。プロジェクトの目的は、急増する情報量を処理する IT 技術の高速化と、ルータやサーバの膨大な電力使用量を低減させることで、単一磁束量子 (SFQ) 素子のネットワークデバイスが開発されている。初期には低温超電導材料であるニオブを用いた超電導デバイスが対象であったが、後に酸化物系高温超電導デバイスも含まれることになった。2003 年度からは、経済産業省から NEDO に引き継がれている。

2. 2 調査対象プロジェクトの概要

(1) 超電導材料分野

①産業科学技術開発「超電導材料・超電導素子」

a.実施期間

昭和 63 年度～平成 9 年度(10 年間)

b.研究開発費総額

約 269 億円（材料・素子両分野の合計）

c.研究開発の目的

超電導物質の電力、エレクトロニクス等の分野における工学的利用を可能とするため、超電導材料及び超電導新機能素子の開発に係る基盤技術確立することを目的とする。

超電導材料関連では、新超電導材料の探索及び材料化のための基礎技術の確立並びに工学的利用が可能な高臨界温度、高臨界電流密度、高臨界磁場を持つ超電導材料の開発を行なう。

d.主な研究開発成果

新物質の発見、物質の改良、また単結晶、バルク材、配向性材料、薄膜、フィラメントなど材料の作製法、特性の著しい向上、基礎物性に関する新しい発見、高性能素子の創製等、世界的にみても一流の研究成果が多く、学術的にも優れ、この分野の発展に大きく貢献した。

OCMG 法（酸素制御溶融法）による Nd123 系超電導バルク材の高臨界電流密度化（高 J_c 化）の開発は技術的ブレークスルーを達成した。これは高性能磁石、フライホイール電力貯蔵、超電導モータ、磁気浮上などへの新分野への展開の途を拓いた。各種 RE123 系の大型単結晶育成の成功は、素子基板その他の応用への適用が期待された。

新物質探索については発足期の室温超電導の期待は実現できなかったが、Hg 系で高圧下 $T_c \approx 150K$ に達した。その他 Cu1234 系、Tl 系など各シリーズの合成と測定をおこなった。

超電導発現機構の解明（磁束相図や d 波対称性の研究、ピン止め機構の研究や 123 系単結晶での a、c 軸方向の電導特性・光学特性の研究）は学術的に評価された。

材料・素子関係で合わせて、原著論文数：2274 件、特許出願件数 696 件の成果があった。

e.研究開発機関

（財）国際超電導産業技術研究センター（ISTEC）

国立研究所（電子技術総合研究所、物質工学工業技術研究所、計量研究所、名古屋工業技術研究所、大阪工業技術研究所）

（財）宇宙環境利用推進センター、（財）ファインセラミックスセンター、宇宙科学研究所、東京大学、東京商船大学、九州大学、九州工業大学

f.事後評価結果概要

後継プロジェクト「超電導応用基盤技術研究開発」が平成 10 年度より発足している。超電導バルク材、超電導線材、超電導素子の 3 本柱とした超電導バルク材のさらなる性能向

上と多様なシステム化への展開がなされている。

超電導線材：RE123 系線材の開発が後継プロジェクトに次世代線材として引き継がれている。

超電導電力応用技術開発等の関連プロジェクトとの連携の緊密化や相互の情報交換がなされている。

線材から応用へつなぐ部分は低温超電導線材の専門家等の知見を活用する RE123 系線材を中心として、製造プロセス技術をスピード化、長尺化、断面形状の工夫、交流損失等の諸問題に今後も継続して取り組む必要がある。

基礎的研究としては、高温超電導体特有の磁束の振舞いはピン止め機構・交流損失など引き続いて研究が必要である。

新材料探索も長期的課題として継続すること。

線材と素子に関しては、技術的課題が大きいため、集中管理方式の研究管理体制が適切であった。

g. 追跡評価のためのベース資料

産業科学技術研究開発制度「超電導材料・超電導素子」最終評価報告書および別冊（平成 11 年 3 月）

平成 20 年度技術評価調査「超電導材料・超電導素子研究開発プロジェクトの技術・産業・社会へのインパクトに関する調査」（平成 21 年 3 月）

②-1 産業科学技術開発「超電導応用基盤技術研究開発（Ⅰ）」

a.実施期間

平成 10 年度～平成 15 年度(6 年間)

b.研究開発費総額

約 159 億円（材料・素子両分野の合計）

c.研究開発の目的

超電導技術は電力応用や情報通信応用等幅広い分野において従来技術では実現しえない革新的機器や従来機器の飛躍的な性能向上を可能とし、エネルギーの高効率利用等に資するものと見込まれる。前フェーズの「超電導材料・超電導素子研究開発」（昭和 63 年度～平成 9 年度）で得られた成果をベースに超電導応用に向けた基盤技術の確立を目指す。本事業では、高温超電導バルク材要素技術の開発、超電導線材要素技術の開発、超電導素子要素技術の開発、高機能超電導材料の技術開発及びそれらを遂行するための超電導材料基礎技術の開発を推進する。

d.主な研究開発成果

バルク材では OCMG 法（酸素制御溶融法）で、臨界電流密度 3T で 10^5A/cm^2 、捕そく磁場 77K で 3T という目標を達成できた。高機能超電導材料では、銀比の低減と臨界電流密度 J_e の向上では目標値を上回っている。特に、Bi（ビスマス）系マグネットの開発により電流減衰率 0.5%/日を達成した。

超電導材料の基礎研究では、キャリア濃度調整の重要性、ナノスケールのピン止め中心の有用性、粒界弱結合が d 波に起因して粒界構造制御に有用であることの知見は、今後の超電導技術に広く波及する。

原著論文数：837 件、特許出願件数：261 件の成果があった。（材料・素子両分野の合計）

e.研究開発機関

（財）国際超電導産業技術研究センター(ISTEC)、（財）ファインセラミックスセンター、住友電気工業（株）、東京電力（株）、（株）フジクラ、中部電力（株）、古河電気工業（株）、昭和電線電纜（株）、（株）東芝、東海旅客鉄道（株）、SRI インターナショナル、東京大学、（独）産業技術総合研究所

f.事後評価結果概要

高温超電導の実用化に向けて広範な基盤要素技術の研究開発を精力的に展開し国家プロジェクトとしての役割を十分果たしたと言える。

個々のテーマは、実用化の観点からおおむね妥当な目標が設定され、全体的に当初の目標値を十分達成し、成果の外部発信も積極的に行っており、国内外から高い評価を受けている。中には、すでに民間企業への技術移転が可能なレベルに達しているテーマもあり、製品が想定できる段階まで推進できたことは高く評価できる。

しかし、プロジェクトの中で、高機能超電導材料や材料基礎のテーマがバルク材、線材、素子の研究開発とどのように関わっていくのかやや不明確であった。また、実用化に向け

た基盤はほぼ確立されたが、今後、製造コスト、市場ニーズ、既存技術に対する優位性などを明確にし、超電導技術分野以外の研究者とも協力しあい、課題解決を図り実用化を推進してほしい。

なお、応用研究が中心であるのはやむをえないが、メカニズムの解明や新規超電導体の探索など基礎的な研究についても、継続的な研究が望まれる。

高温超電導技術は、エネルギー、環境保全、医療、情報通信などの領域で、画期的な技術を誕生させる可能性をもっており、多くの国々で研究開発が活発に進められていること、しかし、容易に市場に受け入れられるとは限らないことを考えると、短期的な成果に終結することなく、今回確立した基盤技術の成果を実用化に結びつける新たな研究開発を継続して欲しい。

しかしながら、今回の開発により実証段階に入った技術も見受けられるため、国家プロジェクトとして支援する際には、必要性、経済性を含め既存技術と総合的に比較検討し、次段階への進展を考える必要がある。具体的には、イットリウム系線材や素子は、引き続き国が主体となった体制で研究開発を実施していくことが望ましい一方、バルク材料や高機能材料（ビスマス系）は、民間が主体となって商業化の可能性を検討していく必要があると考えられる。さらに、本研究開発からの派生技術について、超電導以外の技術分野への展開も考えるべきである。

g. 追跡評価のためのベース資料

産業科学技術研究開発制度「超電導応用基盤技術研究開発プロジェクト評価(中間報告書)」(平成 14 年 2 月)

「超電導応用基盤技術研究開発プロジェクト(第 I 期分)」事後評価報告書(平成 17 年 3 月)

②-2 産業科学技術開発「超電導応用基盤技術研究開発（Ⅱ）」

a.実施期間

平成 15 年度～平成 19 年度(5 年間)

b.研究開発費総額

約 170 億円

c.研究開発の目的

超電導技術は、電力・エネルギー分野のみならず、産業応用、情報通信、運輸、医療福祉等幅広い分野において従来技術では実現し得ない革新的機器の実現や従来機器の飛躍的な性能向上が可能となるとともに、省エネルギー、CO₂ 排出量削減等環境保全等にも貢献することが期待されている。特に、イットリウム（Y）系及びその他希土類（Nd、Sm 等）の高温超電導材料は、低温超電導材料（金属系超電導材料）に比べて極めて高い優位性を持つものであり、次世代超電導材料として世界的に重要視されている。

本研究開発は、「超電導応用基盤技術研究開発（Ⅰ）」（平成 10 年度～平成 15 年度）で得られた Y 系線材作製要素技術をベースに、線材作製の実用化が見通せる技術を開発することを目的としている。

d.主な研究開発成果

第Ⅰ期で得られた線材作製要素技術の研究開発成果をベースに有望な作製プロセスを選択し、開発を進めた。Y 系超電導線材は液体窒素温度において磁界中での臨界電流が高いことから、基本計画目標である線材長 500m、臨界電流 300A/cm 幅、線材作製速度 5m/h、線材コスト ¥8~12/Am、の Y 系線材作製技術が開発され、低温超電導や Bi 系超電導線材では実現出来ない高温運転で、電力機器をはじめとした幅広い産業分野にわたる機器に酸化銅高温超電導線材の適用可能性が示された。このことにより、各種機器のコンパクト化、軽量化、大出力、高効率、低コスト化が実現され、各種産業機器適用への波及効果も大きく、エネルギー高効率化による省エネルギー効果及び CO₂ 削減効果が大いに期待できるようになった。また、同時に、線材作製実用化・事業化が見通せることから、日米欧での高温超電導技術の応用研究開発競争において、大きくリードすることになり、国際競争力も大いに増強され、線材産業、機器製造産業界への経済効果も期待出来るようになった。

原著論文数：442 件、特許出願件数：117 件の成果があった。

e.研究開発機関

（財）国際超電導産業技術研究センター(ISTEC)、（株）フジクラ、住友電気工業（株）、（財）ファインセラミックスセンター、中部電力（株）、昭和電線ケーブルシステム（株）、（株）IHI、九州電力（株）、（株）東芝、大陽日酸（株）、ジャパンモータアンドジェネレーター（株）、古河電気工業（株）

f.事後評価結果概要

超電導応用技術の開発は、電力、輸送、医療など広い分野に関連する重要な研究課題である。本事業はエネルギーの効率的使用、ひいては CO₂ 等の温暖化ガスの発生削減のため

に欠かせないとされている超電導機器の早期の実用化のため、性能、コストの面から有望とされる Y 系高温超電導線材の開発、さらに開発された線材を用いて機器に適用する場合の加工技術、また幾つかの機器について要素技術の開発を行ったものである。

これらいずれの研究開発項目とも、挑戦的とも言えるかなり高い目標であったにもかかわらず、適切な戦略による研究マネジメントに基づき、設定した目標をすべてクリアし、世界最高水準の優れた成果を挙げたことは、極めて高く評価できる。特に、将来の超電導応用を見据えた極低コスト線材の開発を中間評価後設定して、短い期間の中で技術の選択と集中を行い、その目標を達成していることは、高く評価できる。

一方、既存の電力機器の置き換えを目指した取り組みであったが、既存機器の成熟度は高く、置き換えのためには更なる高い目標を設定した取り組みが必要である。また、更なるコスト削減のための技術の開発や、応用する機器に適合した線材の開発といった多くの課題克服が望まれる。線材製造コストは需要によっても左右されるはずであり、市場予測の精度が重要と考えられ、現在の事業化イメージはどの程度実現可能な数値なのか判断できない。今後は、実用機器導入の時期や規模をより具体化し、実用化促進に資して頂きたい。

本事業により、Y 系の高温超電導線材開発において非常に大きい成果が得られており、次段階の研究開発を進めるための基礎はできたと考えられる。しかし、線材開発はまだ世界的な競争段階にあり、これを民間企業単独で行うことや、既存機器置き換えを目指すには、開発リスクは依然として大きく、着実に実用化研究開発を進展させるためには、引き続き国の支援の下での研究開発推進が望まれる。

今後は、より具体的な機器応用開発を加速させ、Y 系線材の特徴を活かした応用機器を少しでも早く実現し、まずは一種類の機器のみでも良いので、Y 系線材の信頼性を実証し、従来機器に比した優位性を例証していくことが望まれる。また、早期の事業化を促進するためにも、これまで以上に産業界を巻き込んだ展開が望まれる。

g.追跡評価のためのベース資料

「超電導応用基盤技術研究開発（第Ⅱ期）中間評価報告書」（平成 17 年 9 月）

「超電導応用基盤技術研究開発（第Ⅱ期）事後評価報告書」（平成 21 年 2 月）

③大型省エネルギー技術研究開発・ニューサンシャイン計画「超電導電力応用技術」

a.実施期間

昭和 63 年度～平成 11 年度(12 年間)

b.研究開発費総額

約 320 億円（昭和 63 年度～平成 10 年度合計）

c.研究開発の目的

超電導技術は、一定の条件下で電気抵抗が無くなるという超電導現象を利用するものであり、これにより電力機器における損失の低減、高磁界化及び高電流密度化が可能なことから、機器の高密度化、高性能化をもたらす、省エネルギー効果が大いに期待できる。一方経済の安定成長下にあっても増大を続ける電力需要に対処するため、発電設備や送変設備の増設あるいは拡充が進められているが、電源の大容量化、遠隔化に伴い、送電線の用地確保難、電力システムの安定度等の問題が顕在化しつつあり、また、電力損失の一層の低減をはかる必要がある。このような問題に効果的に対処するためには超電導技術を電力機器に導入し、電力系統の高安定化、高密度化及び高効率化を図る必要がある。このため、超電導電力応用技術の研究開発を行う。研究開発項目は、①超電導線材の研究開発、②超電導発電機の研究開発、③トータルシステム等の研究、④冷凍システムの研究開発、⑤実証試験、⑥評価技術の研究、である。

d.主な研究開発成果

超電導発電機界磁巻線用 3,000A 級導体として高安定型、高電流密度型、低損失型の 3 種類を開発し 7 万 kW 級モデル機に適用した。

低損失な 10kA 級 NbTi 線材を開発し、これにより、基幹系電力用機器への超電導線材適用の見通しを得た。また、5kA 級 Nb₃Sn 線材の開発の見通しを得た。

Bi 系酸化物超電導線材は、電力機器対応の可能な高臨界電流密度(10^8A/m^2)、大電流化(kA 級)および長尺化(km 級)の見通しを得た。

Y 系、Tl 系酸化物超電導線材は、短尺ではあるものの、高臨界電流密度(10^{10}A/m^2)に成功した、これらの技術を活用して、Y 系酸化物薄膜で 10A/400V、100A/200V の限流素子を開発した。

世界最大、世界最長の 1,000kW、814 時間の負荷運転や 44 回の DSS 運転、これらを合わせ連続運転時間 1500 時間に成功した。

冷凍システムの研究開発では、7 万 kW 級超電導発電機用冷凍システムの開発に成功し、高効率、高信頼性で、コンパクトなオイルレス圧縮機を採用した超電導発電用ブレイトンサイクル冷凍機システムの開発に目処を得た。

論文数：483 件、特許出願件数：372 件の成果があった。

e.研究開発機関

超電導発電関連機器・材料技術研究組合(Super-GM：(株) IHI、関西電力 (株)、(株) 神戸製鋼所、昭和電線電纜 (株)、住友電気工業 (株)、中部電力 (株)、(財) 電力中央研

研究所、東京電力（株）、（株）東芝、（株）日立製作所、日立電線（株）、（財）ファインセラミックスセンター、（株）フジクラ、古河電気工業（株）、（株）前川製作所、三菱電機（株）

国立研究所（計量研究所、物質工学工業技術研究所、機械技術研究所、電子技術総合研究所）、（株）テクノバ

f.事後評価結果概要

超電導発電機の研究開発については、7万kWモデル機の運転に成功することによって、既に20万kW級発電機の実現可能性は確認されている。実用化の前段階までの道筋は立てられているといえるが、実用機を数10万～100万kW程度と想定した場合の道筋はまだ明確になっていない。

実用化に向けては、開発した7万kWモデル機で得られた種々な成果をもとに、低コスト化と大容量化を目指した基盤技術を開発していく必要がある。

超速応ロータの実証試験など研究計画どおり研究開発を遂行され、成果は今後に広く活用されるべきである。

超電導発電機については、数10万～100万kW級の現用機との比較優位性を明らかにすること、その実用に不可欠な技術的課題を明らかにしておくこと。

今後、実用機の前段階として、民間資金の導入も視野に入れて一桁上の規模のプロトタイプ機の開発に取り組む必要がある。

経済性の視点では、発電機の規模として60万～100万kW級において経済的に優位性あると考えられる。このような大容量化を目指した場合には、低コスト化を踏まえ各要素技術の一層の高度化も必要となる。

大容量化を目指した実用化では、3種類のロータについて、その種類を絞ったうえで、現状のテスト機で設計・製作技術を既に示した20kW級の実証機を建設しなくても、現状ではカバーできない低コスト化・大容量化のための要素技術研究を中心に取り組むことが効率的である。

技術的課題としては、超電導発電機本体では出力密度のさらなる向上や熱収縮対策、振動バランスの問題等がある。

交流用金属系超電導線材については、これまでの研究成果を基礎に、用途に適した、大容量・低交流損失かつ低コストの革新的な線材を実現するべく研究開発を進展させる必要がある。

酸化物系超電導線材では大電流かつ長尺の導体開発が課題となる。他の超電導関連プロジェクトにおいて開発が可能なものもあり、連携して波及効果が期待される。

g.追跡評価のためのベース資料

ニューサンシャイン計画「超電導電力応用技術」プレ最終評価報告書（平成11年3月）

④ニューサンシャイン計画「超電導発電機基盤技術研究開発」

a.実施期間

平成 12 年度～平成 15 年度(4 年間)

b.研究開発費総額

約 23 億円

c.研究開発の目的

超電導発電機は、電力系統安定度の向上、電圧安定性向上等の優れた特徴を有しており、導入による電力の低廉かつ安定した供給が期待されている。また、従来の発電機に比べて発電効率がいため、燃料消費量の削減、ひいては CO₂ 排出量削減が可能となり、地球環境面への貢献も期待される。

本技術開発では、第 1 フェーズとして実施された超電導電力応用技術開発プロジェクトでの成果をベースにその第 2 フェーズとして、ニーズの高い 20 万 kW～60 万 kW 級超電導発電機の実用化を目指し、20 万 kW 級機を対象にした超電導発電機の低コスト化が可能となる高密度化基盤技術、及び 60 万 kW 級機の実現のための大容量化基盤技術を確立する。

発電機を超電導化することにより効率向上とともに電力系統の安定度や電圧安定性の向上が図れるので、各種分散電源の増加による系統安定性低下に対応するために、超電導の特性を活用した電力機器を採用することにより既存電力設備等の有効活用が可能になる。さらに、超電導電力機器の実用化には、①交流損失の低減技術、②高速回転場での運転、③大電流による電磁力対策技術、④冷却技術などの基盤技術の確立が不可欠であり、本プロジェクトでは、これら機器側から求められる超電導発電機の基盤技術の確立を目的とする。

d.主な研究開発成果

高密度化基盤技術の研究開発では、20 万 kW 級発電機導体で世界トップクラスの電流密度を達成し、基本目標値である界磁巻線電流密度 80A/mm²、電機子電流密度 140A/cm² を達成し、さらに、界磁巻線取付軸に磁性体の 13%Ni 鋼を使用できることを検証し、従来の非磁性取付軸に比べ、さらに高密度化できることを明確にした。

大容量化基盤技術の研究開発では、60 万 kW 級発電機用導体で世界トップクラスの大電流・高電流密度、および、電機子電流 15,000A 級、界磁電流 6,000A 級、回転子径 1,100mm 級を達成し、目標の大容量化を達成した。冷凍機では、可変容量型、高負荷軸受型の膨張タービンを開発し、高効率化と高信頼化による高性能化を達成した。

設計技術の研究開発では、高密度化、大容量化を可能とする超電導発電機の基本設計技術を確立し、高密度化、大容量化基盤技術により超電導発電機の製造コストを、従来の技術に比較して 2 割低減できる見通しを得た。また、系統側、運転側からの超電導発電機の導入シナリオを作成した。

原著論文数：33 件、特許出願件数：7 件の成果があった。

e.研究開発機関

超電導発電関連機器・材料技術研究組合(Super-GM：関西電力（株）、東京電力（株）、日立電線（株）、（株）日立製作所、古河電気工業（株）、三菱電機（株）、（株）IHI、（株）前川製作所、（財）電力中央研究所）

（独）産業技術総合研究所

f.事後評価結果概要

電力会社が自力で超電導発電機の導入に踏み切るところはないと思われる。本研究開発で得られた技術を継承し発展させるための仕組みができることが望まれる。

本研究開発では波及効果にも見るべきものがあり、それが適切に活用されることが期待される。具体的には、コンバインドサイクルへの応用を想定し、20～30 万 kW 級のパイロット機の開発を進め、系統に導入して今回の成果を実証すること、また、残された課題である製作技術を検証すること、運転・保守などの経験を蓄積することが望まれる。電機子歯へ FRP ティースを採用し、電力系統全体としての効率を高める可能性も検討することが必要である。

本研究に続く実用化プロジェクトが実現できない場合、国内需要のみでなく世界的な技術開発戦略も視野に入れ、本技術の特徴を PR して売りこみ方を工夫することが望ましい。

研究開発で得た種々の技術は霧散しないよう維持・継承できる仕組みを考え、技術レベルの維持に留意する必要がある。

g.追跡評価のためのベース資料

「超電導発電機基盤技術研究開発」事後評価報告書（平成 16 年 8 月）

⑤「超電導電力貯蔵システム要素技術開発調査」

a.実施期間

平成 3 年度～平成 10 年度(8 年間)

b.研究開発費総額

約 60 億円

c.研究開発の目的

負荷変動補償や系統安定化などの多用途の運転に対して、SMES システムとしての系統からの要求仕様を明確にし、安定性・効率・経済性・運転制御性能・保護性能・環境影響などの実用性を評価できる 100kWh 級パイロットプラントの開発に必要な要素技術を確立する。

d.主な研究開発成果

コイル用の短尺導体、要素コイルの試作・試験において、電流 20kA、電圧 2kV、耐電圧 3kV 以上のコイル設計、製作・試験技術、および、CuNi 被覆素線による改良導体の損失時定数を測定し、交流損失は 1/10 以下となることと導体の安定性を確認した。

電流リードおよび直流母線に関しては、15kA 級 YBCO 線材で耐電圧 3kV 以上の HTS 電流リードを設計・製作し、熱侵入量は 2W/lead を達成した。

クエンチ保護対策として、ブリッジ法の検出器として、耐電圧 3kV 以上で検出感度 10mV、10ms 以下となる設計技術、流体法では差圧が 20%以下で検出し、30ms 以下で判定する手法を実験的に確認した。

交直変換装置については、高効率な直接多重化方式交直変換装置の実規模ブリッジを試作し、電圧 2kV、電流 20kA、変換器効率 96.6%を達成した。

永久電流スイッチについては、球面接点形状、メッキなし、超電導フィラメント径が約 1mmφ の電極が最も優れた特性を示し、通電容量も更に向上する可能性があることがわかった。

e.研究開発機関

(財) 国際超電導産業技術研究センター (ISTEC)、中部電力 (株)、九州電力 (株)、(財) 電力中央研究所

f.事後評価結果概要

日本原子力研究所で、CuNi 被覆素線による改良導体の損失時定数を測定した結果、要素コイル用導体の改良で約 150ms を約 10ms になり、交流損失は 1/10 以下となることを確認できた。また、素線間のインピーダンスは、従来の要素コイル用導体より 2～3 倍増えるが、導体の安定性は満たすと考えられている。コイル試験は日本原子力研究所や米国 LL 研究所など外部研究機関で実施したものである。他の技術も含めて、産官学共同プロジェクトや国際的プロジェクトを推進することの必要性が示唆されるものである。

g.追跡評価のためのベース資料

「超電導技術の実用化戦略に資する調査」報告書 (平成 18 年 3 月)

⑥「超電導電力貯蔵システム技術開発調査」

a.実施期間

平成 11 年度～平成 15 年度(5 年間)

b.研究開発費総額

約 38 億円

c.研究開発の目的

超電導技術の電力分野への応用の中で、超電導電力貯蔵システム (SMES) は、従来のエネルギー貯蔵機器と比べて、貯蔵効率が高い、エネルギーの出し入れ速度が早い、繰り返し使用に強いなどのほか、電力系統との間の有効電力・無効電力の授受を独立に制御できるなどの特長を有している。このような優れた機能を持つ SMES は、電力系統の安定化および電力品質維持など非常に広範囲の効果が期待できる。本技術開発では前フェーズの超電導電力貯蔵システム要素技術開発調査での成果をベースに、市場ニーズがあり実用化の可能性が見込まれる小規模な系統制御用 SMES にターゲットを絞って電力システムでの実用化を目指し、コスト要因の大半を占める超電導コイルのコスト低減要素技術開発を行う。また、高温超電導コイルを SMES に適用すると、高磁場実現によるコンパクト化、冷却負荷の低減、過負荷耐量があることなどにより、更なるコスト低減が期待されるため、高温超電導 SMES の技術調査を合わせて実施する。

電力品質向上ニーズに伴う電力系統制御技術の高度化要請を背景に、市場ニーズがあり、実用化の可能性が見込まれる小規模な系統制御用 SMES にターゲットを絞り、低コスト化の技術開発を行うとともに、さらなるコスト低減の可能性のある高温超電導材料を用いた SMES の技術調査を行う。系統制御用 SMES が実用化され、質の高い電力の安定供給が確保されるようになると、産業界の生産性向上などを通じ、国民経済の安定的発展に貢献することができる

d.主な研究開発成果

コスト低減技術の開発では、実用化の目標コスト設定として、系統安定化用 SMES 及び負荷変動補償・周波数調整用の 2 用途を対象に、SMES の各要素機器及びシステムを検討し、系統安定化 7.0 万円/kW、発電所設置、負荷変動補償・周波数調整 27～31 万円/kW、負荷近接設置、30.5 万円/kW を試算した。負荷変動補償・周波数調整用のコイルでは、1 万回の繰り返し通電試験での健全性及び大幅な低損失性、系統安定化用のコイルでは、5kA/s 級×4パルス高速通電特性を確認した。

高温超電導 SMES の技術では、Bi2212 導体は 26K の伝導冷却で 4kA 通電を検証し、世界記録を達成し、SMES 実現に十分であることを確認した。マグネット技術では、伝導冷却技術、真空断熱条件での電気絶縁技術、電流リードなどを小型のモデルを試作して検討した結果、Bi2223 線材の小型コイルでは伝導冷却技術で、臨界電流の約 1.5 倍の電流で短時間通電が可能であること、熱的現象の時定数が数十分から数時間と長いこと、電気絶縁と伝導冷却が両立する高温超電導コイル用電流リードが可能であることを確認した。

高温超電導 SMES の概念設計では、負荷変動補償・周波数調整用 15kWh～500kWh SMES の電磁氣的、機械的解析を行い、Bi 系線材では運転温度が 10K 程度で、Y 系線材では 10K～50K で、金属系 SMES よりも低コストの SMES 用コイルが実現可能であることを明らかにした。特に、Y 系線材での冷凍機コストを考慮して 30K 程度でコストが最小になる見通しを得た。

原著論文数：31 件、特許出願件数：6 件の成果があった。

e.研究開発機関

(財) 国際超電導産業技術研究センター (ISTEC)、九州電力 (株)、中部電力 (株)、(財) 電力中央研究所

f.事後評価結果概要

本 SMES が最終的に実用化、事業化できるかどうかは、トータルシステムとしての低コスト化が実現できるかどうかである。今後、機器の長期間運転での安定性や信頼性の実証研究とともに、トータルシステムの低コスト化の実証研究が必要である。

瞬低補償用等、他の用途についても、実用化の可能性を検討し、SMES の市場性をさらに明確化し、SMES の事業化のシナリオをさらに具体化することが望まれる。

高温超電導 SMES は、革新性が大きい点で魅力的であり、今後も NEDO が支援するのにふさわしいテーマである。

高温超電導 SMES の製造技術力の維持、知的所有権の取得、広報活動の強化などの課題にも引き続いて注力するべきである。

g.追跡評価のためのベース資料

「超電導電力貯蔵システム技術開発」事後評価報告書 (平成 17 年 3 月)

⑦「超電導電力ネットワーク制御技術開発」

a.実施期間

平成 16 年度～平成 19 年度(4 年間)

b.研究開発費総額

約 64 億円

c.研究開発の目的

地球環境対策に伴う風力、太陽光発電などの再生可能エネルギーの活用や、電力市場の自由化の進展による分散型電源の導入拡大、短時間に大きく変動する負荷の増加等により、電力ネットワークの安定性や品質の低下が懸念されている。このため、これらの要因に柔軟に対応できる制御システムが必要となっている。このような背景を受け、本事業では超電導電力貯蔵技術を活用した電力ネットワーク制御技術の開発・検証を行い、今まで以上に電力ネットワークの安定化を図るために、以下の項目を実施する。

超電導電力貯蔵 (SMES) システム開発

大電力を瞬時に出し入れでき、有効・無効電力の同時制御が可能で繰り返し使用に強い特長を有する SMES (超電導コイルに電気エネルギーを磁気エネルギーとして蓄える電力貯蔵装置) は、電力ネットワークの安定化および電力品質維持など非常に広範囲の効果が期待できる。本研究開発では、実用化を目指した SMES システムの低コスト化に向け、高効率な電力変換システムや高磁界化によりコンパクト化が可能な酸化物超電導コイル、従来の冷凍機のメンテナンス性を大きく上回る高信頼性極低温冷凍機、大出力を可能とする高性能電流リードの要素技術開発を行うとともに、システムとしての運用性や信頼性を検証するため 10MVA/20MJ 級 SMES を製作し、実系統に連系して繰り返し充放電試験などを行う。

超電導フライホイールシステム開発

SMES に比べエネルギーを高密度で貯蔵できるフライホイール (はずみ車に電気エネルギーを回転エネルギーとして蓄える電力貯蔵装置) に関しては、従来の機械式フライホイールに比べて損失が少なく、かつコンパクトな特長を有する超電導フライホイールを開発し、ネットワーク制御システムの高度化を図る。

わが国では、電力品質が非常に高いレベルに維持されてきたが、再生可能エネルギーの導入促進や分散電源の導入拡大、変動の大きな負荷の増加等により、電力ネットワークが今後ますます複雑な構成となり、電力品質や供給信頼度へ影響が及ぶことが懸念されている。SMES や超電導フライホイールが実用化され、電力品質の維持や電力の安定供給が確保されると、産業界の生産性向上などを通じ、国民経済の安定的発展に貢献することができる。また、エネルギーの利用効率の向上や再生可能エネルギーの導入促進により地球環境対策としての CO₂ 削減効果も期待できる。

d.主な研究開発成果

SMES システムの開発については、①システム構成技術の開発では、低コスト大容量電

力変換システム、高磁場酸化物系 SMES コイル、高信頼性極低温冷凍機、高耐電圧伝導冷却電流リードシステムを開発、②実系統連系運転試験によるシステム性能検証では、負荷変動補償性能、系統安定化性能を検証した。

システムコーディネーション技術の開発では、①負荷変動補償・周波数調整用 SMES コーディネーション技術、②系統安定化用 SMES コーディネーション技術、③10MVA／20MJ 級 SMES システム設計・製作、④イットリウム系小規模 SMES システムの変換器用制御装置の製作・検証、⑤解析用負荷モデル装置設計・製作、⑥超電導フライホイールシステムのトータルシステムの性能試験を実施した。

SMES システムの適用技術標準化研究では、用途別標準 SMES システム、SMES システムの試験法・評価法、国際標準化について検討した。

原著論文数：27 件、特許出願件数：5 件の成果があった。

e.研究開発機関

(財) 国際超電導産業技術研究センター (ISTEC)、中部電力 (株)、九州電力 (株)、(財) 電力中央研究所、JR 東海

f.事後評価結果概要

本プロジェクトの研究成果は、地球温暖化対策や原油高騰などエネルギー環境対策に解決に貢献するので継続すべきである。また、常に社会情勢に合わせて研究内容を柔軟に変更すべきである。

SMES については、大型化によるコストダウン及び Y 系線材の開発動向を把握し、Y 系線材を用いた超電導コイルの開発を早急に推進することが重要である。

Y 系線材の特性は、これまでの NbTi や Nb₃Sn 線材と多くの点で異なるので、その特性を十分に把握し超電導コイルの基盤技術開発を進めることが重要である。

今後、次期フェーズでの Y 系線材をベースにした研究開発や SMES システムを、実際の電力系統に連系してシステム性能の向上や長期の実績を積むことが早期の実用化のための課題である。

超電導 SMES を国際プロジェクトとして、日本とアジアの共同プロジェクトにすることも有効である。

フライホイールシステムについては、50kWh 機のフィールドテスト継続により、回転特性および入出力特性データの蓄積・評価、運転時の地震等を考慮した安全性の立証などのシステムの信頼性検証、コスト低減を指向した要素研究やユーザ側が主体となった研究が重要である。

g.追跡評価のためのベース資料

「超電導電力ネットワーク制御技術開発」事後評価報告書（平成 21 年 3 月）

⑧ニューサンシャイン計画「高温超電導フライホイール電力貯蔵研究開発」

a.実施期間

平成 7 年度～平成 11 年度(5 年間)

b.研究開発費総額

約 28 億円

c.研究開発の目的

電力需要の増加に伴い、昼夜間の電力格差が広がっていることから、電力系統の負荷平準化対策が重要な課題となっており、電力需要地に近接した配電用変電所に分散配置して効果的な日負荷平準化を行う電力貯蔵装置の導入が求められている。これまで、フライホイールによるエネルギー貯蔵は、機械式軸受等による回転損失の関係から短時間貯蔵のものに利用されているが、近年の高温超電導材料の研究の進展及び高度複合材料の技術開発に伴い、超電導による磁気浮上を利用した小型かつ回転ロスが少ない高温超電導フライホイールの実現可能性が高まり、配電用変電所への導入の可能性が出てきた。このため、10MWh 級の高温超電導フライホイール電力貯蔵システムについて、回転制御を含めたフライホイール及び高温超電導材と永久磁石を組み合わせた高温超電導磁気軸受に関する要素技術研究を行い、5 年間でシステムの実現可能性及び実現に向けての課題を明らかにする。

高温超電導磁気軸受にかかわる基礎的特性を評価するため、直径 400mm の FRP フライホイールシステムモデル機を設計・試作・試験し、その結果を直径 1,000mm のフライホイールシステムの要素技術研究及び大型システムの設計・評価に反映するとともに、電力系統へのシステム導入調査を行う。システム設計技術開発では、①フライホイールの本体、回転制御技術、②高温超電導磁気軸受について、高温酸化物超電導材、永久磁石、高温超電導磁気軸受の試作試験、高温超電導磁気軸受の特性解析、③システム設計・評価、を行う。

d.主な研究開発成果

フライホイールに関しては、①直径 400mm フライホイール本体の設計・製作・回転試験結果、破壊周速最大 1,310m/s が得られ、高エネルギー密度のフライホイール実現の可能性が確かになった。②直径 400mm 小型モデルシステムを製作し、回転振動シミュレーションおよび試験結果、30,000rpm (0.5kWh) までの回転に成功したが、これは、超電導軸受を利用したシステムでは最高のものであり、このシミュレーション技術により大型システムを安定に回転させることができる見通しを得た。③回転制御のための磁気軸受の方式を、一般に使用されているヘテロポーラ型（電磁石の磁束が回転軸と直角方向）からホモポーラ型（電磁石の磁束が軸方向）にした結果、損失が 1/5 程度にまで低減することを確認した。

高温超電導磁気軸受に関しては、①アキシアル型（円盤型）およびラジアル型（円筒型）の超電導磁気軸受を製作、試験した結果、載荷力密度にあまり差はないことがわかり、ラ

ジアル型が成立する見込みが得られた。②長時間使用により、載荷力が落ちる現象（磁束クリープ）があるが、これに対して、初めに一旦荷重をかけ解放する手法により、磁束クリープを抑えられることが実験的に確かめられ、超電導磁気軸受の課題が解決できた。③永久磁石については、直径 180mm の回転磁石体で目標値の破壊周速 280m/s を越える補強構造を開発した。④プロジェクトの初期には低温特性が良く、機械的強度の高い Pr 磁石を採用していたが、永久磁石部が思ったほど低温にならないこと、リング体での機械的強度が Nd 磁石と Pr 磁石であまり変わらないことが判明し、磁力が大きく、ムラの少ない Nd 磁石の使用が可能となったため、載荷力が大きくまた、磁束ムラによる超電導磁気軸受の損失が低減し、実用化に向け大きく前進した。

原著論文数： 23 件、特許出願件数： 26 件の成果があった。

e.研究開発機関

（財） 国際超電導産業技術研究センター（ISTEC）、（株）IHI、光洋精工（株）、新日本製鐵（株）、セイコーエプソン（株）、（株）四国総合研究所、日本精工（株）、三菱電機（株）、（財）電力中央研究所、東京電力（株）

国立研究所（機械技術研究所、大阪工業技術研究所、電子技術総合研究所）

f.事後評価結果概要

実用化までには、まだ、数ステップの研究開発が必要である。次期フェーズでは、高温超電導材料の応用を研究開発の主眼として、超電導磁気軸受の剛性の向上、低損失化、載荷力の向上等の性能の高度化を図ることが第一である。

これらの高性能化を実証するために、本プロジェクトでは実施されない 10kWh 級中型モデルの超電導化によるラジアル型超電導軸受の検証も必要である。

超電導磁気軸受は、その高性能化によって、フライホイール以外の用途の可能性も十分あり、将来の幅広い応用分野が期待される。

今後の研究開発においては、フライホイールシステムを例題に超電導材料を応用した超電導磁気軸受単体の高機能化・実用化に主眼を置いて、他の超電導関連プロジェクトの進捗状況も見つつ効率的な体制で推進することが望まれる。

フライホイールを用いた電力貯蔵技術の開発を主眼とした展開も考えられる。超電導軸受を用いない他の形式のフライホイールシステムも含めた最適な電力貯蔵システムを目指した高性能化やディーゼル等他のシステムとの組合せも検討に値する。この場合、負荷平準化を目標とする一方で、瞬時電圧低下対応電源のほかに、無停電電源用等、短期的に実用化も可能なテーマも明確にする必要がある。

研究体制としては、より実用化の段階に近づくために、プロジェクトリーダーによる集中管理型プロジェクト運営を導入すること、また、計画見直しの機動性を確保するために、このプロジェクトリーダーに「柔軟な計画変更」の権限が与えられることが肝要である。

g.追跡評価のためのベース資料

ニューサンシャイン計画「高温超電導フライホイール電力貯蔵研究開発」プレ最終評価

報告書（平成 11 年 3 月）

⑨ニューサンシャイン計画「フライホイール電力貯蔵用超電導軸受技術研究開発」

a.実施期間

平成 12 年度～平成 16 年度(5 年間)

なお、本研究開発は平成 15 年度中間評価において事業を中止した。(平成 16 年度は一部運転研究を民間負担で実施した。)

b.研究開発費総額

約 13 億円

c.研究開発の目的

電力分野で実現期待度の大きいフライホイール電力貯蔵システムの実用化には、高荷重の高速回転体を非接触かつ低損失で支持できる高温超電導バルク材を用いた超電導軸受技術の確立が必要である。本プロジェクトでは、フライホイール電力貯蔵システム用として大型化に適したラジアル型超電導軸受に関し、載荷力向上、回転損失低減、軸降下低減等の技術開発に取り組み、100kWh 級フライホイール電力貯蔵システム用超電導軸受の技術的見通しを得るとともに、フライホイール電力貯蔵システムに必要な技術課題を明らかにする。

実施項目は、①軸受用 Y 系超電導バルクの開発、②RE 系超電導バルクの超電導軸受への適用可能性研究、③磁気回路の高磁場化及び最適化、④回転損失低減技術の研究、軸降下低減技術、⑤超電導軸受評価試験である。

また、超電導軸受応用技術開発として、超電導軸受運転試験、フライホイール軸制振技術開発、フライホイール本体の高性能化・高品質化のための設計・製作技術開発を行う。同時に、フライホイール電力貯蔵装置の用途別要求仕様、国内外の開発状況等に関する調査を実施する。

d.主な研究開発成果

超電導軸受要素技術については、①載荷力 10kWh 級軸受モデルで 目標の載荷力密度 10N/cm^2 を達成し、②100kWh 級軸受モデルにおいて最終目標を達成するためには過冷却法が有効であることの確認、③回転損失が 10kWh 級軸受モデルで 2.5mW/N を達成し、100kWh 級モデルでは解析により 2.3mW/N の値を求めることができたこと、回転損失の低減には渦電流の抑制と超電導バルク体の配置が重要であることの確認、④軸降下では、軸降下に対する過冷却法、予荷重法の有効性を確認し、軸降下量は 3 時間後で $100\mu\text{m}$ を達成した。

超電導軸受応用技術では、①10kWh 級運転試験装置では、装置の詳細構造図及び運転試験施設の計画図を作成し、平成 15 年 に 10kWh 級運転試験装置を完成させる見通しを得た。②軸制振とフライホイールについては、本体、軸制振において非線型方式、パワー制御、安定化フィルター採用によりローターの弾性振動を安定化させる技術を開発したこと、フライホイール本体のフィラメントワインディング作成技術の最適化により、高速回転可能な均一なフライホイールを製作した。

技術調査では、①フライホイール関連の国内外動向、②フライホイール事業の市場調査により、市場の急拡大が判明した。また、超電導フライホイールの当面の適用分野としてデータセンターUPSが有力であることが判明した。

原著論文数： 27 件、特許出願件数： 2 件の成果があった。

e.研究開発機関

(財) 国際超電導産業技術研究センター (ISTEC)、(株) 四国総合研究所、(株) IHI、
(株) イムラ材料開発研究所、住友特殊金属 (株)、光洋精工 (株)

(独) 産業技術総合研究所

f.事後評価結果概要

今後、経済・社会環境の変化と環境・エネルギー技術の進歩を踏まえて見極めるべきである。

大容量の負荷平準化用は重要であるが、導入には時間がかかる。UPS 等一般産業用として有用であり、当面、小規模フライホールの開発を期待する。

超電導が最有力ということではなく、超電導技術の他の用途を視野に入れた展開も必要である。

本技術のニーズについて広い視点からの調査が必要であり、無接触軸受の応用範囲の拡大も期待され、今後も基礎研究の継続が重要である。

社会的ニーズが不透明なまま、大規模な次期フェーズに進むべきではなく、将来の可能性の見極めが必要である。

g.追跡評価のためのベース資料

「フライホイール電力貯蔵用超電導軸受技術研究開発」中間評価報告書 (平成 15 年 8 月)

「NEDO 技術開発機構におけるプロジェクト研究開発評価について」 (平成 16 年 2 月)

⑩ニューサンシャイン計画「交流超電導電力機器基盤技術研究開発」

a.実施期間

平成 12 年度～平成 16 年度(5 年間)

b.研究開発費総額

約 72 億円

c.研究開発の目的

電力自由化に伴い、各種分散電源の増加に対応するために、「超電導現象」を応用した電力機器を採用することにより既存電力設備等の有効活用が可能になる。また、超電導電力機器の実用化には、i) 交流損失の低減技術、ii) 高電圧絶縁技術、iii) 大電流による電磁力対策技術、iv) 冷却技術などの基盤技術の確立が不可欠であり、本プロジェクトでは、これら機器側から求められる交流超電導電力機器の基盤技術の確立を目的とする。

そのための、実施項目は、① 超電導送電ケーブル基盤技術の研究開発、② 超電導限流器基盤技術の研究開発、③ 電力用超電導マグネットの研究開発、④ トータルシステム等の研究開発、である。

d.主な研究開発成果

超電導送電ケーブル基盤技術では、① 単心構造で長さ 3 m の超電導ケーブルにより、3 kA の通電、交流損失 1W/m を確認、② 断熱管のモデルの試作・検討から、最適化を行い 10m の断熱管直線部で 0.3W/m を実現、③ 500m ケーブルの構造、仕様、試験項目、布設レイアウト等を検討し、平成 16 年度から公開試験を実施するための技術課題を明確化。500 m 長ケーブルと同等の構造を持つ短絡試験用導体を作製、短絡試験を実施し、77kV 系統の短絡容量耐量 31.5kA、0.5 秒に耐えることを確認、⑤ Y 系線材で 1 m の単尺導体を作製し、通電容量 1 kA の交流損失を評価。

超電導限流器基盤技術の研究開発では、① 2次元揺動 PLD 法で、最高値 $I_c=148\text{A/cm}$ 幅、 $J_c=330$ 万 A/cm^2 (通電法)を確認、② 2次元揺動 PLD 法で、大きさ $30\text{cm}\times 10\text{cm}$ を模擬した条件で、平均 $I_c=76\text{A/cm}$ 幅、 I_c 均一性 $\pm 8\%$ 、平均 $J_c=240$ 万 A/cm^2 (誘導法)を確認、③ 40 枚素子を直列化した 6.6kV/50A 級限流モジュールにより限流試験を実施し、電圧ピーク値 11.9kV を確認、④ 20、30、40 直列素子の限流動作時の破壊電圧を試験し、素子直列数と破壊電圧の関係が比例しており、再現性も良い事を確認、⑤ 1 cm 幅の超電導膜を多角形配置した 6 並列素子を製作し、連続通電試験特性試験を行い、380Arms の通電を確認、⑥ 3 cm 幅の超電導膜を多角形配置した 8 並列 2 直列の 1 kA 級素子を製作し、連続通電試験特性試験を行い、1 kArms の通電を確認し、200Vrms、3.5 サイクルの限流試験を実施。⑦ 66kVA 級限流器用リアクトルを 5 直列構成とし整流器と組合せ、整流器型限流器の限流試験を行い、電圧 20kVrms、3 サイクルを確認。

電力用超電導マグネットの研究開発では、① 66kV/6.9kV-10MVA 変圧器の概念設計を反映した各部分要素モデルにより電圧 77kV まで確認し、電流 800A の通電を確認、② 66kV/6.9kV 級 2MVA 単相の超電導モデル変圧器を製作し性能評価試験を行い、290Arms

の通電を確認、③ 高温超電導変圧器のコスト検討を行い、イニシャルコストが現用機の 1.68 倍になれば、導入のメリットがあることなどを解析、④ 要素研究開発を活かした 66kV/700A 級限流器用モデルコイルを製作し、6 並列構成で、交流 140kVrms 1 分間と雷インパルス両極性 350kV の耐電圧をクリアするなど、66kV 電力機器としての仕様を満たし、さらに電圧 38kVrms 電流 500A の課通電および 750A/5 ms のパルス通電を確認。

トータルシステム等の研究では、① 都市部地中系統に超電導ケーブルや限流器が導入された時の解析モデルを作成し、算定された超電導ケーブル定数を用いてこの系統モデルで導入効果を解析し、限界送電電力で現状の 1.3 倍あることなど経済性を検証、②超電導ケーブル、限流器の実現可能性、ケーブルと現用試験方法、遮断器、ヒューズ、変圧器、リアクトルの試験方法を調査し、超電導ケーブル、限流器、変圧器の試験項目の抽出を実施。

原著論文数：131 件、特許出願件数：35 件の成果があった。

e.研究開発機関

超電導発電関連機器・材料技術研究組合(Super-GM：東京電力（株）、中部電力（株）、関西電力（株）、住友電気工業（株）、古河電気工業（株）、（株）フジクラ、日立電線（株）、（財）ファインセラミックスセンター、（株）前川製作所、三菱電機（株）、（株）東芝、富士電機（株）、（財）電力中央研究所）

（独）産業技術総合研究所

f.事後評価結果概要

実用化のためには、超電導ケーブルでは、より大きい電流容量と長い線路長での研究開発、高電流密度線材及び中間接合部の開発、高効率冷凍機の開発、電力系統での実証試験等、技術課題を解決する必要がある。

経済性の検討を含め、ニーズ・オリエンテッドな研究開発が望まれる。

こうした研究開発を進めるには、事業化、産業化に結びつける施策、開発戦略が必要である。

g.追跡評価のためのベース資料

「交流超電導電力機器基盤技術研究開発」事後評価報告書（平成 17 年 8 月）

(2) 超電導素子分野

①産業科学技術開発「超電導材料・超電導素子」

a.実施期間

昭和 63 年度～平成 9 年度(10 年間)

b.研究開発費総額

約 269 億円 (材料・素子両分野の合計)

c.研究開発の目的

超電導物質の電力、エレクトロニクス等の分野における工学的利用を可能とするため、超電導材料及び超電導新機能素子の開発に係る基盤技術を確立することを目的とする。超高速素子等超電導材料を利用することにより可能となる超電導新機能素子に必要な技術及び実証素子の開発を行う。

d.主な研究開発成果

三端子素子については、高利得・高速性を目指して各種のタイプが試みられ、トランジスタ利得の確認はおこなわれたが、実用化への途は遠いことが判明した。

SFQ 素子による高速サンプリング技術の実証に成功し、後継プロジェクトに引き継がれた。

e.研究開発機関

(財) 国際超電導産業技術研究センター (ISTEC)、(財) 新機能素子研究開発協会、(株) 日立製作所、(株) 東芝、三洋電機 (株)、沖電気工業 (株)、日本電気 (株)、三菱電機 (株)、富士通 (株)、住友電気工業 (株)、(独) 産業技術総合研究所

f.事後評価結果概要

超電導素子については、高温超電導ジョセフソン接合の特性バラツキの低減、SFQ 素子を中心に回路設計技術の確立、半導体回路との整合性が課題である。

素子に関しては、技術的課題が大きいため、集中管理方式の研究管理体制が適切であった。

g.追跡評価のためのベース資料

産業科学技術研究開発制度「超電導材料・超電導素子」最終評価報告書および別冊 (平成 11 年 3 月)

平成 20 年度技術評価調査「超電導材料・超電導素子研究開発プロジェクトの技術・産業・社会へのインパクトに関する調査」(平成 21 年 3 月)

②-1 産業科学技術開発「超電導応用基盤技術研究開発（Ⅰ）」

a.実施期間

平成 10 年度～平成 15 年度(6 年間)

b.研究開発費総額

約 159 億円（材料・素子両分野の合計）

c.研究開発の目的

超電導技術は電力応用や情報通信応用等幅広い分野において従来技術では実現しえない機器や従来機器の飛躍的な性能向上を可能とし、エネルギーの高効率利用等に資するものと見込まれる。前フェーズの「超電導材料・超電導素子の研究開発」（昭和 63 年度～平成 9 年度）で得られた成果をベースに超電導応用に向けた基盤技術の確立を目指す。高温超電導材料はエレクトロニクス産業分野にインパクトを与えるものと期待されている。

本プロジェクトは、高温超電導技術を実用機器に利用するためには未だ解決すべき課題が多いため、これら課題の解決による高温超電導材料の実用化を目指し超電導素子を作製するための基盤技術を確立することを目的としている。

d.主な研究開発成果

SFQ 集積回路に必要な要素技術を取得し、 $I_c R_n$ 積及び 1000 接合アレイにおけるバラツキの目標値を上回った。

原著論文数：837 件、特許出願件数：261 件の成果があった。（材料・素子両分野の合計）

e.研究開発機関

（財）国際超電導産業技術研究センター(ISTEC)、日本電気（株）、（株）日立製作所、（株）東芝、富士通（株）、三菱電機（株）、デュポン（株）、三洋電機（株）、（独）産業技術総合研究所

f.事後評価結果概要

接合特性の制御性向上、入出力インターフェイスなどの実装技術、大規模 SFQ 回路作製のための接合の臨界電流値の制御は今後の課題である。

g.追跡評価のためのベース資料

産業科学技術研究開発制度「超電導応用基盤技術研究開発プロジェクト評価(中間報告書)」(平成 14 年 2 月)

「超電導応用基盤技術研究開発プロジェクト（第Ⅰ期分）」事後評価報告書（平成 17 年 3 月）

⑪「低消費電力型超電導ネットワークデバイスの開発」

a.実施期間

平成 14 年度～平成 18 年度(5 年間)

b.研究開発費総額

約 36 億円

c.研究開発の目的

半導体と異なる原理で動作する超電導 SFQ デバイスは、クロックレート 100GHz 以上という超高速性およびゲート当たり $1\mu\text{W}$ 以下の低消費電力性という点で、半導体を大きく凌駕する性能を併せ持っているが、機器開発には回路の集積度向上が課題である。

本プロジェクトでは、超電導回路における低消費電力高性能デバイスを実現するため、ニオブ系低温超電導デバイス開発および酸化物系高温超電導デバイスの開発を行う。

ネットワーク社会が高度化するにつれて、誰もが快適かつ安全に情報を入手・共有・発信できるようにするための情報通信基盤技術の開発を行うことが、ますます重要となっている。しかし、半導体の動作限界とシステムの消費電力の増加のため、年々指数関数的に増加している情報量を処理することが困難になりつつある。この危機的状況を打破するために、超電導 SFQ デバイスを用いて、超高速・低消費電力の情報通信機器を開発する道筋をつけることを目的として本プロジェクトを実施する。

d.主な研究開発成果

ニオブ系低温超電導デバイス開発では、① ニオブ系 LSI プロセス開発で新平坦化法などの要素技術開発に成功し、ニオブ 9 層構造を可能にした新プロセス技術を開発、② SFQ 回路設計基盤技術開発で、PTL (Passive Transmission Line)配線法という回路高速化技術を SFQ 回路に適用する、各種非同期設計法を開発しその効果を確認、③ SFQ ルータ用スイッチモジュールの基盤技術開発で SFQ スイッチと CMOS ラインカードを用いたルータアーキテクチャを提案し、スケジューラつき 4×4 スイッチ、 16×16 スイッチ等の開発と高速動作に成功し、さらにシステム化技術、実装技術を開発し、SFQ スイッチプロトタイプシステムの開発とパソコン間画像転送実験にも成功、④ SFQ サーバ用プロセッサモジュールの基盤技術では、SFQ に適した 4 ビットシリアル ALU など数多くの要素回路の開発し、これらを用いた同期および非同期プロセッサの動作確認に成功。

酸化物系高温超電導デバイス開発では、①酸化物系集積回路プロセスでは超電導 4 層の積層構造の作製技術と最小線幅 $1\mu\text{m}$ の回路加工技術を確立、②交差配線形成を可能とする新積層構造作製プロセスとプロセス中に酸素抜けをモニタリングする技術を開発し、回路歩留まりの向上に成功、③回路設計・製作基盤技術開発では熱雑音等の高温超電導回路特有の課題を考慮した回路設計技術を開発し、種々の SFQ 要素回路に対し $\pm 20\%$ 以上のマージンが得られるような設計の最適化、④新しい回路レイアウト法を開発し、さらに、寄生容量等を低減するレイアウトにより従来比 3 倍以上動作周波数を実現、⑤SFQ-dc 変換回路を開発し、SFQ 要素回路の高温 ($>20\text{K}$) での動作を実証、⑥実装基盤技術開発および

回路システム実証では、小型冷凍機冷却を可能とする電気信号用軽量化モジュール（25g）や、光信号用の広帯域 PD 一体型非磁性モジュールを開発し、サンプラー回路への 50-100 GHz 高周波信号の導入の可能化、⑦回路システム実証では、アナログ - デジタル変換回路（AD コンバータ）とサンプラー計測回路の 2 つの回路システムの性能実証を実施、⑧AD コンバータについては、酸化物系高温超電導プロセスで作製可能な比較的集積規模の小さな（500 接合以下）超電導フロントエンド回路と半導体信号処理回路（バックエンド回路）を組み合わせた AD コンバータの開発を進め、低温フロントエンド回路を利用したシステムで、10 MHz 帯域に対し 13.7 ビットという世界最高性能を実証、⑨酸化物系高温超電導材料を用いた主要な AD コンバータ要素回路の開発、⑩軽量（4 kg 以下）の冷却系と、トリガージッタを約 1ps に改良した高さ 200mm 弱のラックサイズ制御系から構成されるサンプラー波形計測デモシステムを開発し、50 GHz 以上の広帯域特性の実証に成功。

原著論文数：105 件、特許出願件数：32 件の成果があった。

e.研究開発機関

（財）国際超電導産業技術研究センター（ISTEC）、名古屋大学、横浜国立大学、（株）日立製作所、（株）アドバンテスト研究所

f.事後評価結果概要

わが国はジョセフソン・コンピュータ開発プロジェクトで超電導デバイスに関する豊富な知識と経験を有しており、本プロジェクトで、その知識と経験に最新の半導体プロセス技術や自動設計技術を融合して、SFQ 回路に基づく新しい超電導デバイスの実用化に挑戦した。

Si 半導体の性能限界が見え、加えて高速・大容量のネットワーク・ルータの処理性能向上の要求は高まりつつある現在において、省エネルギーや高速性の観点からポスト Si デバイスの有力候補である超電導 SFQ の開発プロジェクトは、国家戦略としても長期的視野に立って継続投資すべき分野である、

超電導 SFQ ルータは、将来の超大容量ルータ実現に向けたブレークスルー技術となる可能性があり、戦略的に重要な技術であると考えられる。この分野における日本のメーカーの役割を果たすためにも、次のステップとして総合的なプログラムを推進し、製品化前の基礎分野に対し研究支援を継続すべきである。

今後、低温系と高温系の位置づけを明確にし、微細化技術を含めて、短期的なターゲットと長期的なものを明らかにし、ネットワークデバイスユーザーとの連携を強化して関連分野の人材育成にも取り組むべきである。

既存技術との競争を考える場合、材料よりも機能やアプリケーションの優劣を考慮するのが適切である。

超電導デバイスのさらなる大規模集積化を実現するには、超電導ルータの研究成果の宣伝・広報活動に力を入れ、現状の集積規模のものを市場に提供し、徐々に超電導 SFQ ルータの評価を高めていくシナリオが重要である。

g.追跡評価のためのベース資料

「低消費電力型超電導ネットワークデバイスの開発」事後評価報告書（平成 19 年 9 月）

2. 3 追跡調査結果

(施策評価関係)

I. 施策（超電導研究開発）の目的・政策的位置付けの妥当性

(1) 施策（超電導研究開発）の目的の妥当性

超電導現象の持つ実用的な特長は、材料面から見ると直流領域において、電気抵抗がないため損失なく大電流が流せ、永久電流が可能なことと、強い磁界が発生させられることである。また、交流領域においても損失が少ない状態で大電流が流せ、比較的強い磁界が発生させられることである。また、エレクトロニクス分野における実用的な特長は、磁束量子化とジョセフソン効果により磁束の出し入れが任意にでき、非常に高感度な磁気検出が行えることや、非常に高速かつ低電力なコンピューターデバイスになることである。

この超電導現象の波及効果は、技術戦略マップにまとめられているが、①エネルギー電力分野での「環境・エネルギー調和型社会の構築」、②産業・輸送分野での「世界をリードする高度産業基盤の構築」、③診断・医療分野での「健康長寿社会の実現」、④情報・通信分野での「高度情報通信社会の実現」と非常に幅広い分野への大きな波及効果が期待できるものである。

しかし、そのトレードオフとして、非常に低温の熱的安定状態を維持する必要があるため、冷凍技術なしには成立しないという問題点があり、高温超電導体（酸化物超電導体）が発見される前までは、液体ヘリウム温度（4.2K）以下の温度領域を維持するコストが経済的負担として存在していた。

このため、この代償コスト負担してもなお既存技術を圧倒的に凌駕することが求められる限られた分野での実用化が進められ、電力分野や計算機分野での開発も行われていたが、外界からの熱侵入対策の不完全さによる失敗や、圧倒的な冷却コストの高さから実用化できないでいた。

1986年に液体窒素温度を超える温度で超電導状態を発現する酸化物超電導体が発見されたことは、世界的に産出量が少なく高額であり、かつ、蒸発潜熱が小さいこともあり冷却剤供給システムに非常にコストがかかる液体ヘリウムから、空気からの深冷分離で容易かつ安価に入手でき、かつ、蒸発潜熱が大きく冷却剤の使用量が少なく済む液体窒素で超電導現象の実用的価値が利用できることが示されたものである。このインパクトは極めて大きなものであり、世界中で「高温超電導フィーバー」が起こった。この1980年代後半の時期は、高温超電導の発現機構が解明されておらず、どのような物質が高温超電導体となるか分からなかったため、世界中で物質探索が行われていた時期であった。

1988年度（昭和63年度）から開始された産業科学技術開発「超電導材料・超電導素子」研究開発が材料探索、発現機構解明、素子開発、単結晶膜等の製作技術などに特化した目的を設定して開始されたのは、当時の環境として妥当なものであったし、その成果は、そ

の後のプロジェクトの技術的基盤を果たすこととなった。当該プロジェクトの後継プロジェクトでは、後述する低温超電導関係製品の開発の中で行われていた高温超電導材料研究も統合して、高温超電導材料の工業材料化を目的とした研究が本格化し、現在に至っている。

このように高温超電導の研究目的は、当初の物質探索からスタートして広い波及効果を狙った工業材料化の研究に収斂されてきた経緯があるが、その目的は、常に、超電導現象の社会利用を目的としたものであり、その目的は妥当であったと言える。

この高温超電導の研究と同時期に、経済産業省では大型省エネルギー技術開発・ニューサンシャイン計画「超電導電力応用技術」（1988年度（昭和63年度）～）や「超電導電力貯蔵システム要素技術開発調査」（1991年度（平成3年度）～）といったプロジェクトで、電力・エネルギー分野に特化して低温超電導材料を使用した電力用製品の開発が開始された。これは増大し続けていた電力需要に対応するため、冷却コストを低減させつつ、性能を向上させた低温超電導材料による高効率の電力系統用の製品を開発して、電力系統の安定化や燃料消費量の削減、排出CO₂の削減を図ることを目的としたものであった。

この低温超電導による製品開発は一部を除き、実機導入にまでは至らなかったが、その後の高温超電導材料の工業材料化の進展に伴い、現在は、高温超電導材料での製品化を目的とした研究が継続されている。これらの電力・エネルギー分野での超電導製品の開発目的は超電導現象の持つ高い性能を電力・エネルギー分野の効率化に使用することが目的であり、その目的は妥当であったと言える。

超電導素子分野に関しては、既に低温超電導素子で見いだされていた高速かつ低消費電力のコンピューターデバイスを念頭においた素子構築の研究からスタートした。当初の「超電導材料・超電導素子」プロジェクトでは、材料探索、素子構築の段階で、仮想比較対象としてSiFET回路を強く意識したため、非常に野心的なテーマとして三端子素子の構築を目標に掲げてスタートしたが、NbTi合金や化合物半導体に較べて非常に複雑な構造を持つ酸化物超電導体の界面制御に苦しみ、結局は三端子素子の利得確認までで終了させ、SFQによるロジック回路構築に軌道修正し、これが基本となって後継プロジェクトに引き継がれていった。後継プロジェクトである「超電導応用基盤技術研究開発（Ⅰ）」、「低消費電力型超電導ネットワークデバイスの開発」では、やはり複雑な構造の高温超電導材料の材料制御に苦しみつつも、集積度を徐々に上げ、更に低温超電導素子と高温超電導素子の役割分担（用途分担）を図りつつ、最新の半導体製造技術を導入しつつ機能検証を進めてきた。これらの超電導素子分野の研究でも、材料探索からスタートして軌道修正を図りつつ膨大な情報通信に対応した高速・低消費電力の製品を作ることを目的としてきており、その目的は妥当であったといえる。

図1に国内超電導関連プロジェクトと超電導技術を示す。

国内超電導関連プロジェクトと超電導技術

HTS発見

切れ目なくプロジェクトが
実施されてきた。

現在

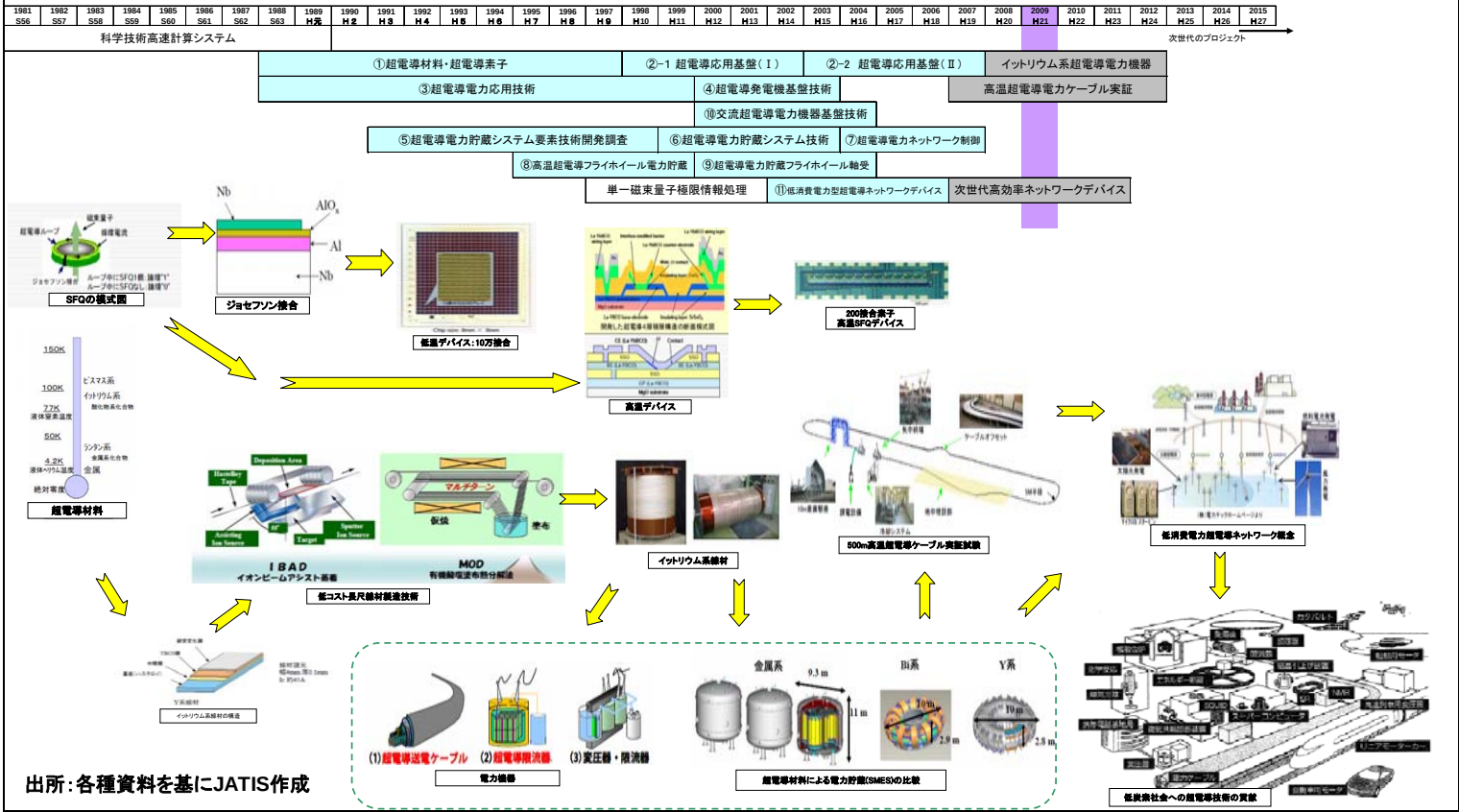


図1 国内超電導関連プロジェクトと超電導技術

(出所：JATIS 作成)

（２）施策（超電導研究開発）の政策的位置付けの妥当性

超電導研究開発は当初、産業科学利用開発プロジェクトや大型省エネルギー技術研究開発・ニューサンシャイン計画の一環として位置づけられ、また、革新的温暖化対策技術プログラム、地球温暖化防止新技術プログラム・電力技術開発プログラム、エネルギーイノベーションプログラム、エネルギー・ナノテク・部材イノベーションなどに継承されて現在に至っている。

経済産業省で実施された超電導研究開発では、多くのプロジェクトが実施され現在に至っているが、材料分野では、超電導現象特有の低電気抵抗、高い磁界発生能力を活用した電力貯蔵に重点が置かれており、素子分野では高速処理だけでなく、そのずば抜けた低消費電力の活用が目的となっている。従って、いずれの分野においても、超電導現象の持つ省エネルギー性の活用がその目的となっている。

「国家エネルギー戦略（2006 年 5 月経済産業省）」では、図 2 に示すように省エネルギーとして 2030 年までに 30%の効率改善、「新エネルギーイノベーション計画」では、新たなエネルギーの貯蔵・輸送技術など、革新的なエネルギー高度利用技術の開発が実施されている。

【図19:我が国のGDP当たりエネルギー利用効率指数と目標値】

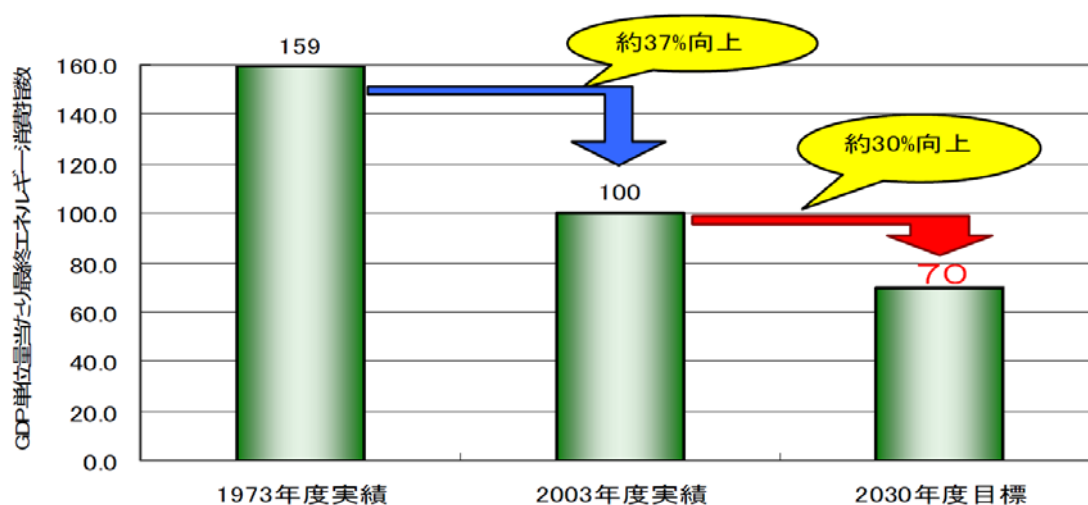


図 2 国家エネルギー戦略における省エネルギー目標

（出所：国家エネルギー戦略（2006 年 5 月経済産業省））

省エネルギーは我が国の重要な政策目的であり、「Cool Earth-エネルギー革新技术計画（2008 年 3 月経済産業省制定）」では、21 のエネルギー革新技术の一つに「超電導高効率送電技術」が選定されている。また、新政府方針では、CO₂排出量を 1990 年比 25%削減との方針が出されたが、超電導現象の持つ低電流抵抗のもたらす省エネルギー性は引き続き重要技術であり、現在も材料・製品の両面での性能向上が進められており、超電導研究開発による貢献が引き続き期待される

図 3 に、クールアース 50 における「超電導高効率送電」のロードマップを示す。電力ケーブルを中心として、超電導変圧器、超電導 SMES から構成されるシステムになっている。

本ロードマップにも示されているように、時代の進行とともに導入・普及範囲を拡大していくことが省エネルギー・温暖化対策上重要であるため、これまでの研究開発を更に継続して今後とも性能向上、普及範囲の拡大を図っていく必要がある。

経済産業省で実施してきた超電導研究開発は、我が国の重要な政策目的である省エネルギーに大きく貢献する技術であり、その政策的位置づけは妥当であると考えられる。

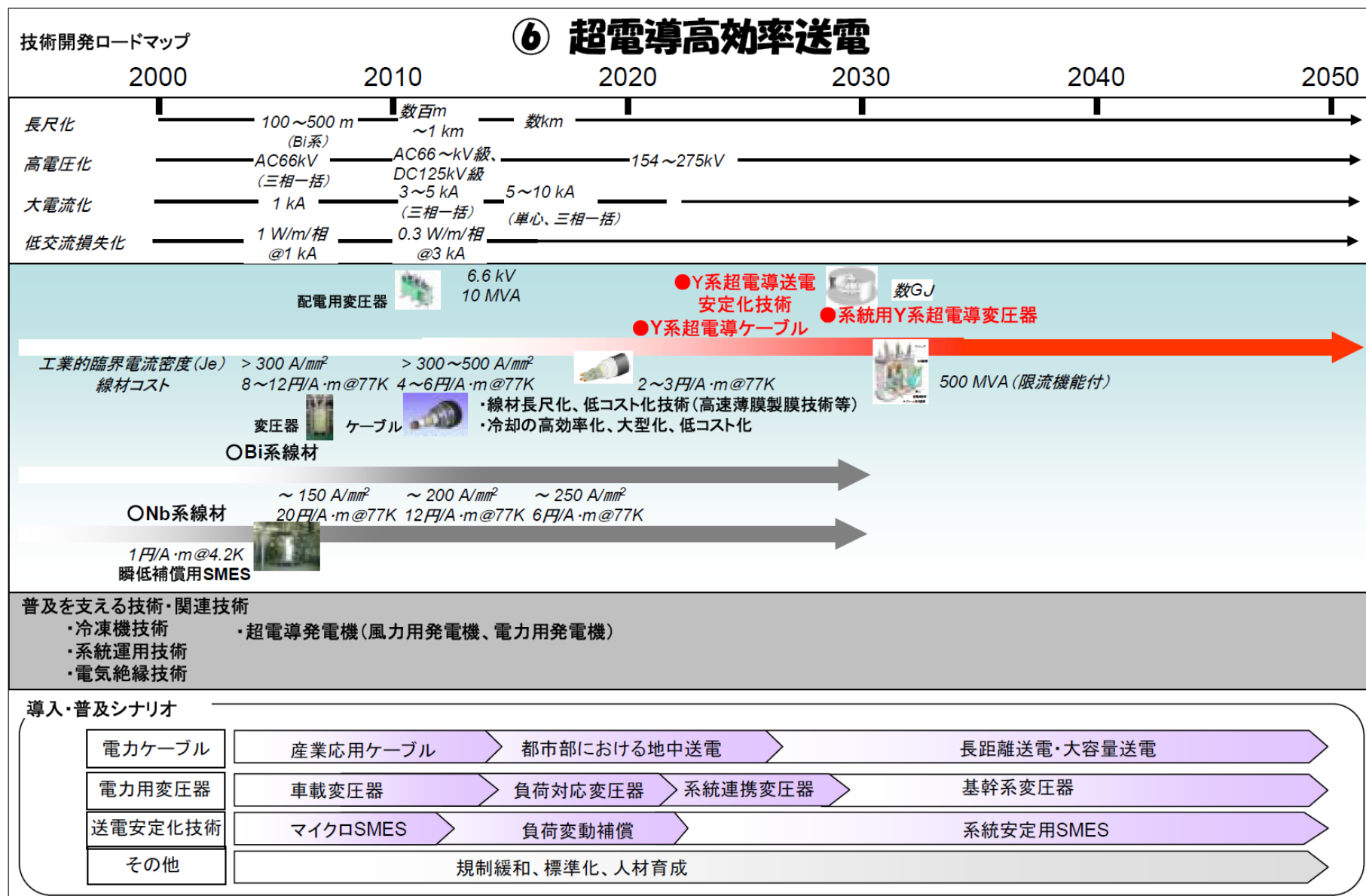


図3 クールアース50における超電導高効率送電技術

（３）国の施策で行われるべき研究開発としての妥当性はあったか。国の関与が必要とされる研究開発施策であったか。

高温超電導の研究が開始された 1980 年代後半の状況では、高温超電導現象そのものが発見されて間もない時期であり、その発現機構解明、物質探索などの基礎的研究を行うことが主体であったこと、期待は非常に大きかったが実用化への見通しがはっきりしていなかったため、企業のみで研究を行うことは困難であった。この時期の高度に基礎的な研究は、国として研究開発を行うことは妥当であったと考えられる。

また、同時期に開始された電力・エネルギー分野の製品開発を目指した低温超電導関係製品の開発研究では、超電導線材の開発、ローターの開発、冷凍システムの開発等、非常に多くの企業の協力が必要な技術的難度の高い研究開発であった。また、省エネルギー、CO₂ 負荷量低減は非常に重要な政策的課題であったことから、国として研究開発を行うことは妥当であったと考えられる。

以上のように超電導研究開発は、技術的難度、多くの企業の協力、政策的意義付けの高さからも、国の研究開発としての実施は妥当性があると考えられる。そのような中でも、低温超電導製品の研究で開発された NbTi の製造技術を活用した SMES 開発や Bi 系線材の開発、高温超電導バルク体を使用した水質浄化装置の製品化、などは企業主体のプロジェクトに移行し企業フェーズへの移転も行われるなど、国としての研究開発対象は、適切に選択されてきたと考えられる。

図 4 に現時点から見た「超電導研究開発の推進と実施に関する概要図」を示す。参画機関・企業の多さ、多様さ、出口想定製品群の多様さからみても国の関与が必要であったといえよう。

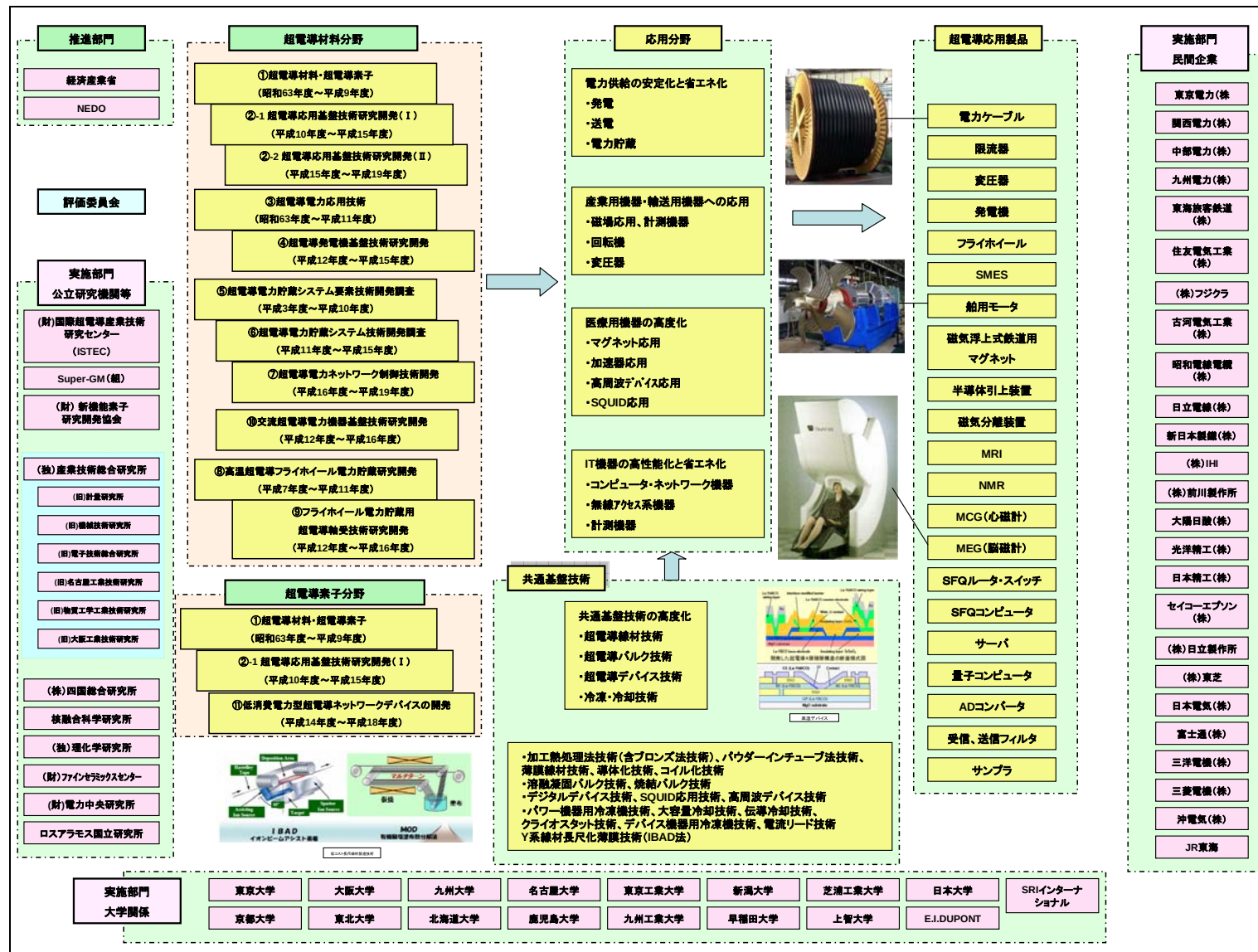


図4 超電導研究開発の推進と実施に関する概要図

(出所：JATIS 作成)

Ⅱ．施策（超電導研究開発）の構造及び目的実現見通しの妥当性

（１）現時点までにおいて得られた成果は妥当か。

超電導に関する研究開発は、各プロジェクトでは、当初の目的・目標をほぼ達成している。しかしながら、社会的環境の変化、競合技術の進歩により投入時期を失い、実用化への導入が先送りされた技術が多く存在する。その中で、電力ケーブル技術はテーマが整理されて実用化段階に達しており、また、超電導電力貯蔵（SMES）も実証段階に達している。また、素子分野では単一磁束量子（SFQ）素子がプロトタイプ段階である程度の性能が得られるようになった。

酸化物超電導物質が発見されて 23 年が経過し、長い研究開発の末によりやく超電導電力ケーブルが Bi 系で実用化を目の前にし、超電導電力貯蔵設備（SMES）も Y 系で実証化の段階を迎えている。電力網を構成する変圧器・限流器なども実証段階に達した。この超電導高効率送電技術は前述のように、「クールアース 50」の 21 プロジェクトの一つになっている。

超電導電力ケーブルに関する実施プロジェクトからのアウトプットとそれらの継承の関係を図 5 に示す。

超電導電力ケーブルは、1991 年に民間で 5m のケーブルが開発された。その後、東京電力と住友電工が精力的に開発を進め、2002 年には、100m の Bi 系超電導電力ケーブルを開発した。平成 12 年からの「交流超電導電力機器基盤技術」では、古河電工と電中研が 500 m の単心 Bi 電力ケーブルで系統連系はしなかったが実証試験を実施した。この成果は、「高温超電導ケーブル実証」に引き継がれ、30m の実証試験を経て、今後約 300m の系統連系試験が計画されている。

一方、Y 系超電導ケーブルは平成 12 年からの「交流超電導電力機器基盤技術」で 1 m の単心ケーブルの要素試験を経て、「超電導応用基盤（Ⅱ）」で、10m の三心ケーブルの試験を実施している。その成果は「イットリウム系超電導電力機器」において 15m 三心ケーブルで課通電試験が計画されている。

このように、超電導ケーブル開発においては、先行するプロジェクトの成果が吟味され、その成果を後継のプロジェクトに継承し、その成果がさらに次の後継プロジェクトへ継承されるといった正のスパイラルが形成されたといえよう。

次に、SMES に関する実施プロジェクトからのアウトプットとそれらの継承の関係を図 6 に示す。

SMES に関しては、「超電導電力貯蔵システム要素技術」で Nb 系の要素技術開発が実施された。その成果を基に、「超電導電力貯蔵システム技術」では負荷変動補償用として 10MJ 級のモデルコイル試験が、また、系統安定化用としては 3MJ 級のモデルコイル試験が実施された。この成果を基に、「超電導電力ネットワーク制御」では 20MJ 級の系統連系試験が実施されている。

一方、高温超電導（HTS）である Y 系 SMES としては、「イットリウム系超電導電力機器」で 2MJ 級の動作試験と 2GJ 級のコイル設計が実施される計画である。

このように、SMES 開発においては Nb 系で実証試験を行い、その後低コスト化が期待できる Y 系 SMES 開発へと移行するという開発のシナリオに沿っており、後継プロジェクトの成果が期待されている。

次に、特に一連の超電導プロジェクトの成果が最も活用されている電力・エネルギー分野について、SMES、電力ケーブル、基盤技術である冷凍・冷却技術の主要な項目について概観したものを図 7 に示す。

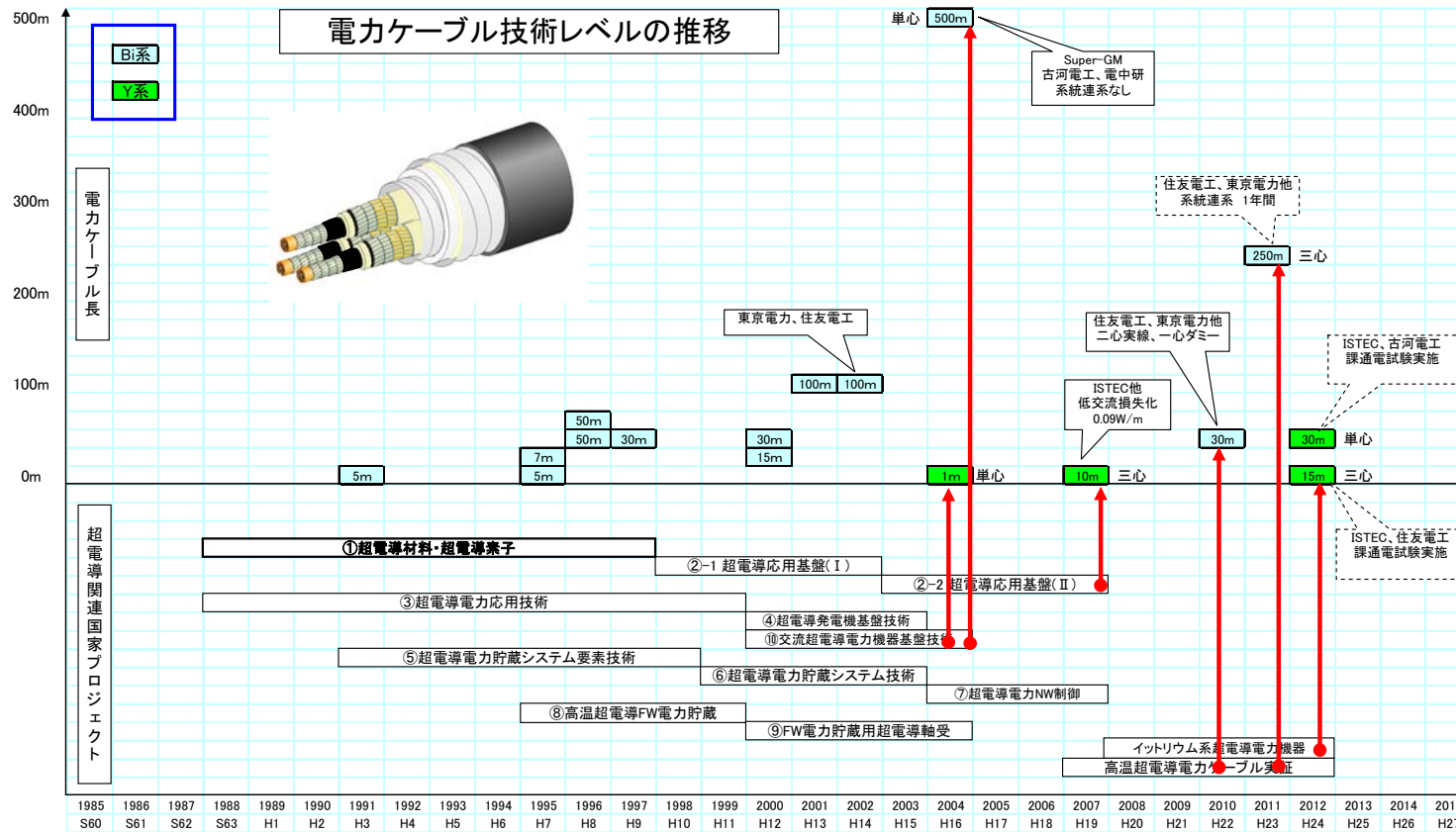
まず、SMES では、既に加速器や MRI 用に開発されていた Nb 系線材が利用され、実証が終了している。一方、HTS に関しては Bi 系でも一時コイル開発を実施したが、現在では高磁場下の性能に勝る Y 系コイルが開発中である。

次に、HTS 超電導線材と電力ケーブルを一括してみると、Bi 系では現在実証段階にあり、Y 系ではケーブル開発の段階にあることがわかる。

また、冷凍・冷却技術に関しては、パルス管冷凍機が実証段階にあり、タービン式冷凍機は要素開発から冷凍機開発の段階を迎えている。

なお、超電導発電機や超電導フライホイールは基本的な研究開発が実施され、経済性などの課題が整理されて、次のブレークスルーを待っている状況である。

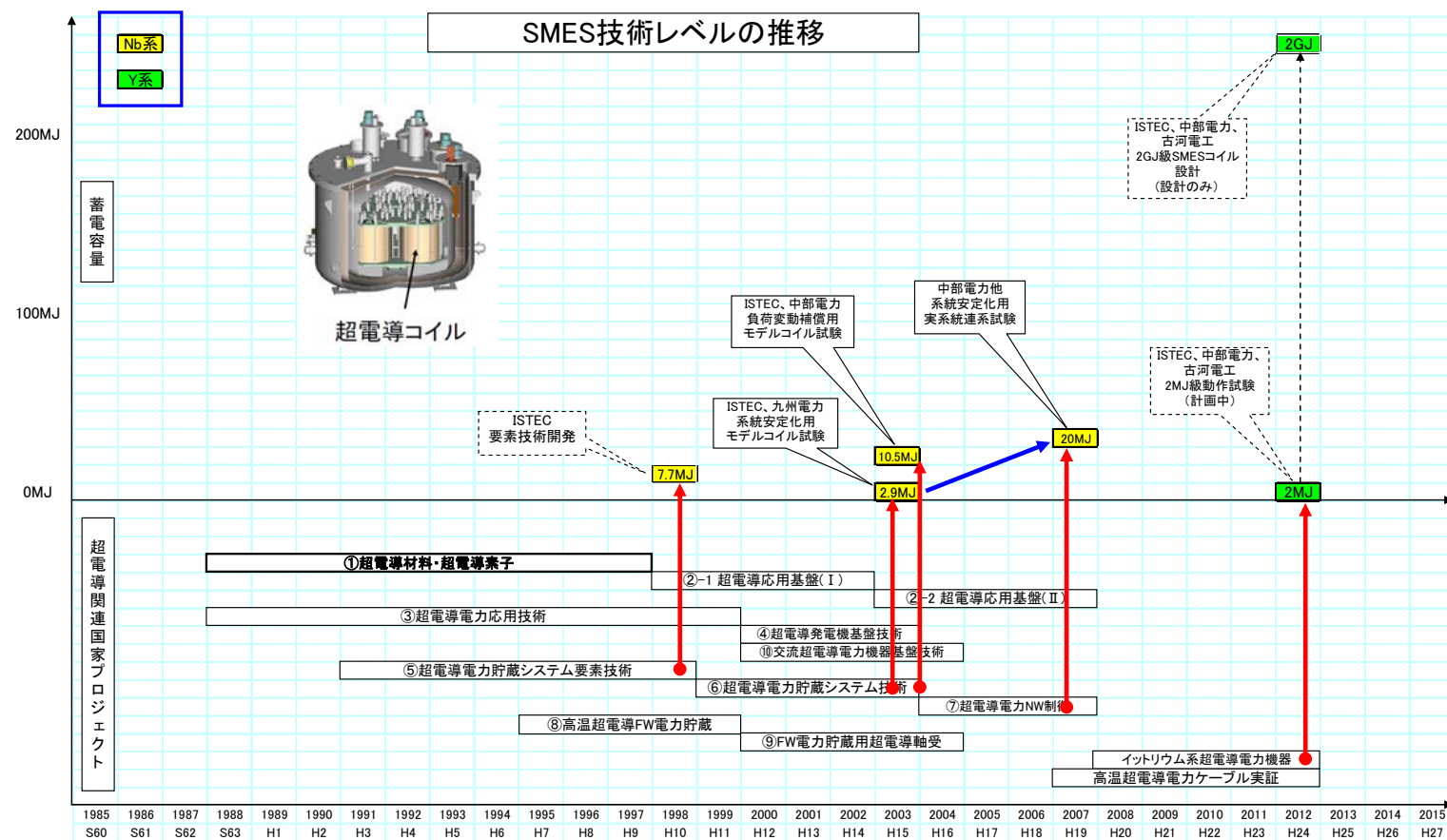
超電導電力ケーブル技術開発の推移とプロジェクトの関係



出所:各種資料を基にJATIS作成

図5 超電導電力ケーブル技術開発の推移とプロジェクトの関係

SMES技術開発の推移とプロジェクトの関係

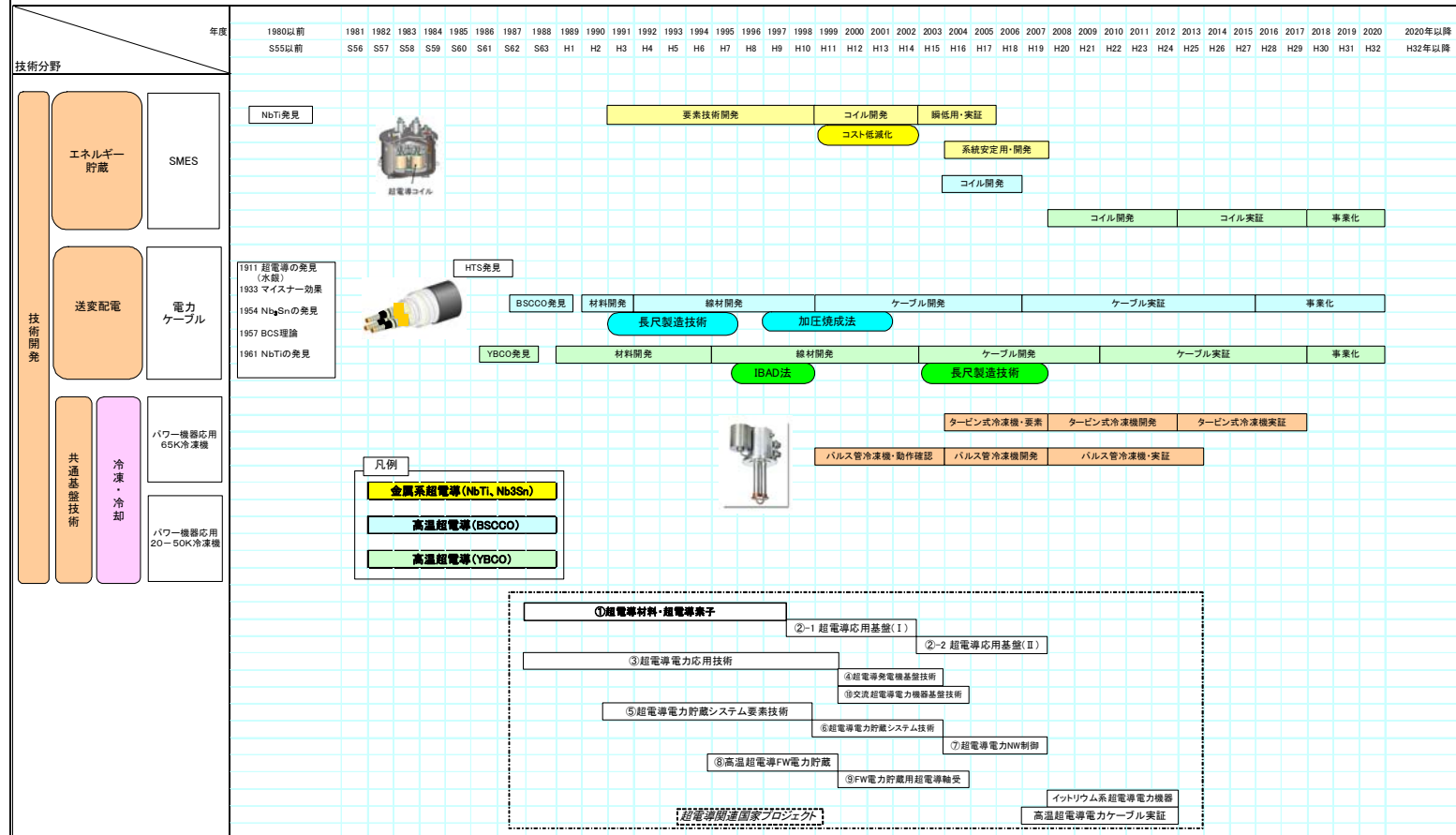


出所:各種資料を基にJATIS作成

図6 SMES 技術開発の推移とプロジェクトの関係

エネルギー・電力分野の技術開発推移

12



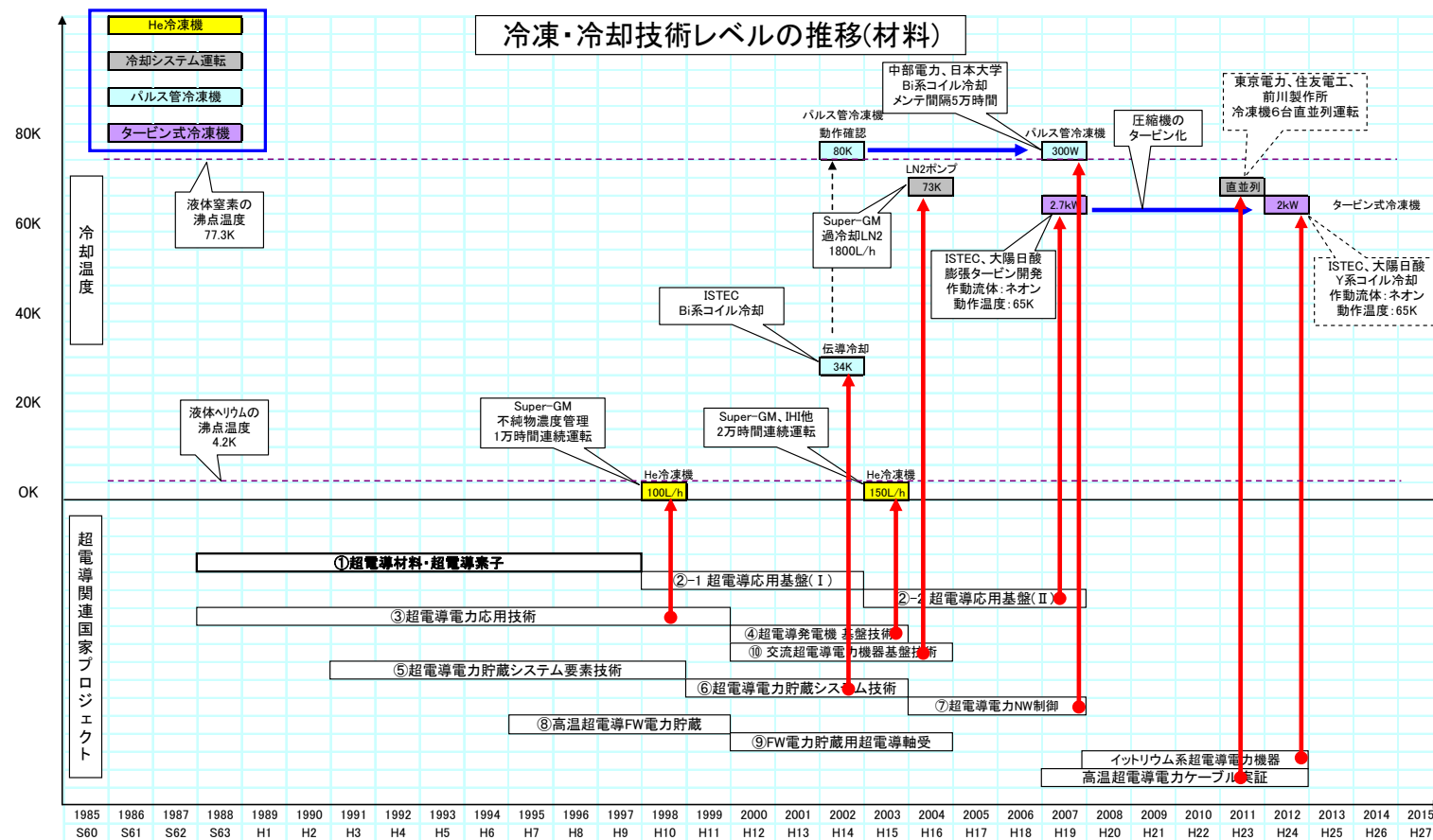
出所:各種資料を基にJATIS作成

図7 エネルギー・電力分野の技術開発推移

次に、超電導技術の基盤技術である冷凍・冷却に関して、冷凍・冷却技術の推移とプロジェクトの関係を図8に示す。超電導関連プロジェクトの開始当初では、発電機のNb系線材冷却用ヘリウム液化機の改良が進められた。対象がHTSによる電力ケーブルやSMESに変わってくると、冷凍能力も数kW級が必要ことが判明し、それに向かってパルス管式冷凍機とタービン式冷凍機の開発が行われるようになってきた。現在ではまず電力ケーブルの実用化が視野に入ってきたため、タービン式冷凍機の小型化で冷凍能力をまかなう方向の開発が行われている。作動流体もネオンが想定された開発となっている。

図9に関連する冷凍機開発の状況をまとめた。Bi系超電導ケーブルでは、現在既存の1kW級スターリング冷凍機を複数台設置して冷凍負荷をまかなうが、システムの最適化を考えた際にはもう少し冷凍能力の高い数kW級冷凍機が必要とされ、この冷凍機開発なしには経済性に優れた超電導電力ケーブルシステムは成立しないと考えられている。すなわち、高性能冷凍機の開発が必要であり、「イットリウム系超電導電力機器」プロジェクトで開発中である。

冷凍・冷却技術開発(材料)の推移とプロジェクトの関係

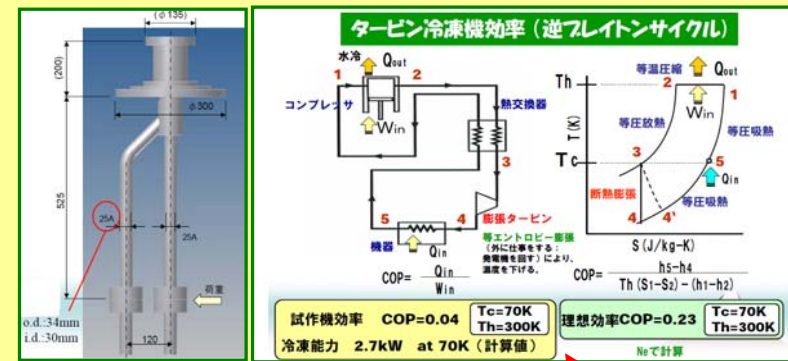
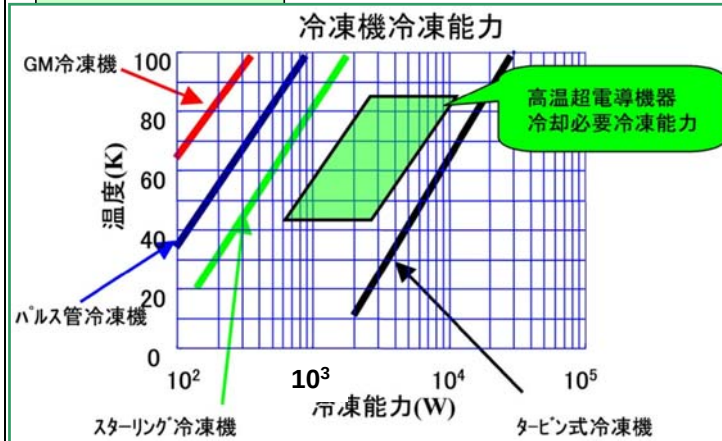


出所: 各種資料を基にJATIS作成

図8 冷凍・冷却技術の推移とプロジェクトの関係

高温超電導普及を目指した特定用途向け冷凍機開発状況

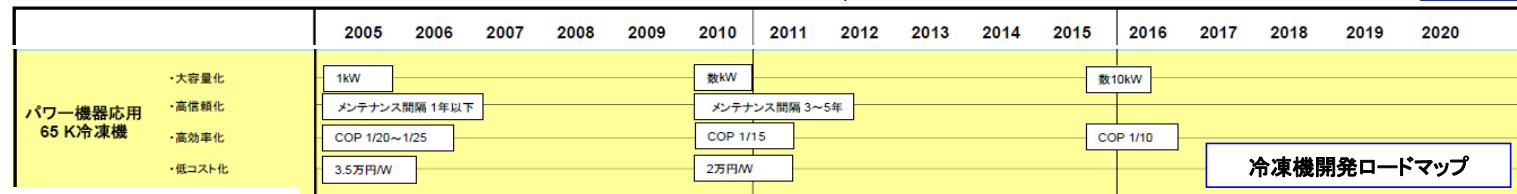
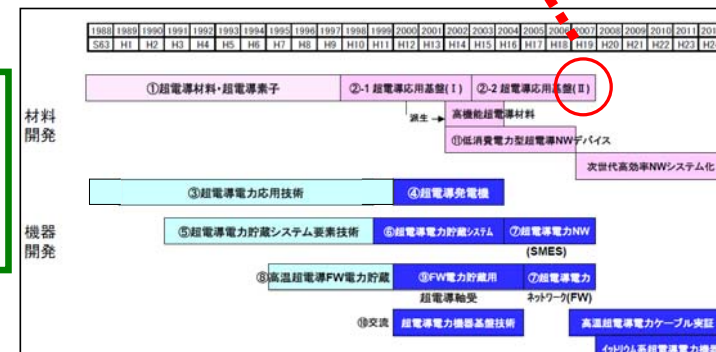
冷凍機目標性能



開発目標70Kで冷凍能力2.7kW



- 課題・問題点
- ・低コスト化
 - ・コンパクト化
 - ・高信頼性
 - ・安全・安心
 - ・低環境負荷
 - ・省エネルギー



出所:各種資料を基にJATIS作成

図9 冷凍機の開発状況

一方超電導エレクトロニクスに関しては、従来技術のシリコン半導体に比べ集積度の低さが課題であるが、携帯電話基地局のフィルタが実用化されている。研究開発により、SFQ（単一磁束量子）論理回路の適用が検討されているがまだプロトタイプ段階にあり、課題が明確になってきている。

図 10 に SFQ 技術開発の推移とプロジェクトの関係を示す。「超電導材料・超電導素子」では、SFQ の動作確認がなされ、後継プロジェクトを経由して、接合数で見ると Nb 系では 10 万接合、Y 系で 200 接合を達成している。

以上のような現時点までに得られた成果を見ると、超電導技術には多額の資金と時間が投入され、これまで積み重ねてきた成果によりようやく実用化を迎えつつある段階にあることがわかる。ぜひとも継続して研究開発を実施し、超電導技術を実用化へと持っていくべきであろう。

今後の超電導技術の実用化、普及に向けたロードマップは、技術戦略マップにまとめられているが、その実現に当たっては、効率的な研究開発が進められなければならない。このため、技術戦略マップで求めている要求水準の達成のために、産学官でどのような役割分担で進めるのかを検討し、道筋を具体化することが重要であると考ええる。今後の技術政策の検討の中で、是非とも具体的に検討されることが望まれる。

図 11 に超電導技術のロジックツリーを示す。ここでは、まず左側に実施されたプロジェクトを配置しそれを分野別に分け、各々のプロジェクトの研究開発段階を識別し、関連が深いプロジェクト同士を近くにまとめた。各プロジェクトの現在の実用化過程に至る主要成果を抜き出してプロジェクトの右に配置し、プロジェクトと線で結合した。

図の右側には技術戦略マップから抜き出した製品、応用分野、産業分野、基本施策を配置してある。

製品は次のように分類してある。プロジェクトを実施することにより直接開発された製品、副次的開発製品、独自開発製品の3群である。プロジェクトの主要成果と製品の間に関連付けができるものは線で結合してある。製品群は応用分野と結ばれ、さらに応用分野と産業分野、産業分野と基本政策が関連付けられている。

このロジックツリーから判るように、これまでに実施されたプロジェクトの成果は主に電力・エネルギー分野に集中しており、まずこの分野から市場が創生されることが予測される。

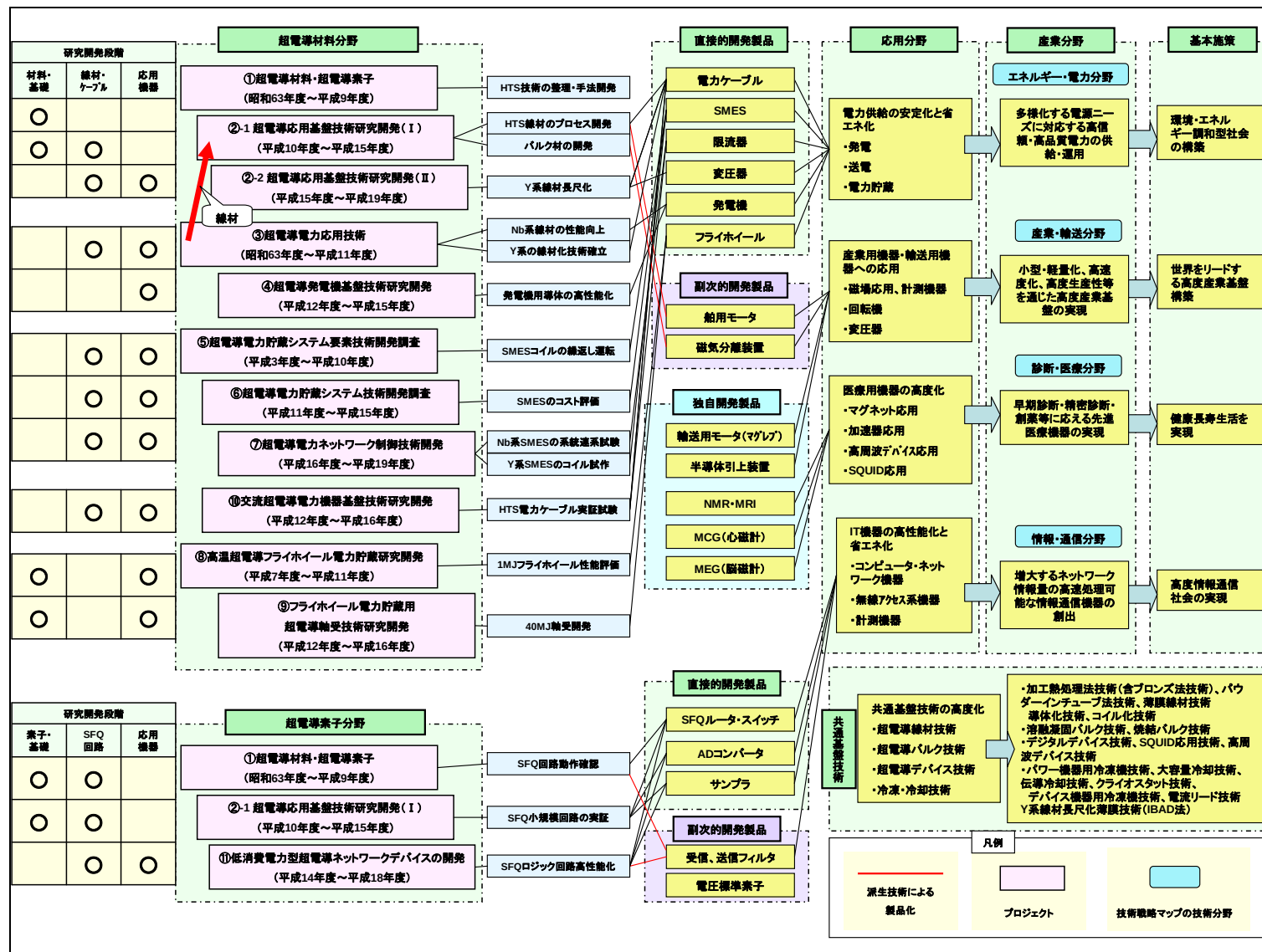


図 11 超電導関連国家プロジェクトのロジックツリー

出所：各種資料を基に JATIS 作成

（２）施策（超電導研究開発）の目的を実現するために技術に関する事業が適切に配置されてきたか。それぞれのプロジェクト間での連携は適切に取られてきたか。

上記で述べたように 1986 年に液体窒素温度を超える温度で超電導状態を発現する酸化物超電導体が発見されたことは、冷却コストが飛躍的に小さくなる液体窒素で超電導現象の実用的価値が利用できることが示されたものである。このインパクトは極めて大きなものであったが、この物質探索、発現機構の解明への努力の真最中であった時期である 1988 年度（昭和 63 年度）から開始された産業科学技術開発「超電導材料・超電導素子」研究開発が材料探索、発現機構解明、素子開発、単結晶膜等の製作技術などに特化した目的を設定して開始されたのは、当時の環境として妥当なものであったし、その成果は、その後のプロジェクトの技術的基盤を果たすこととなった。

しかしながら、高温超電導線材の開発を同時期に行っていたニューサンシャイン計画「超電導電力応用技術」の技術が、「超電導材料・超電導素子」の後継プロジェクトに移行するなど、1980 年代から 1990 年代に実施されていたプロジェクトは、個々のプロジェクトが独自に進んでおり、必ずしも研究の内容、フェーズの整理がなされていたとは言い難い部分がある。

一例として挙げると「超電導電力応用技術」のプレ最終評価報告書で、「超電導発電機の開発に関わるテーマと、酸化物系超電導材の開発に関わるテーマなど、超電導発電機以外の応用を視野に入れた基礎研究的テーマが混在していることから、プロジェクト全体として対象とするテーマの範囲が広すぎ、全体像がやや把握しにくい面がある。」（同報告書 1 頁）との指摘がなされたり、「超電導材料・超電導素子」最終評価報告書で「超電導線材を本プロジェクトでもっと早く強力に取り上げるべきであったとの意見もあるが、Bi 系線材を民間電線メーカーが早期に開発を進めていた状況や他の国プロジェクトとの競合関係を考慮して本プロジェクトのなかでの取り組みが遅くなったと判断され、やむを得なかったと言える。」とする指摘がなされていた。後者の「他の国プロジェクトとの競合関係」については、「超電導電力応用技術」であることが推測される点から、並行して走っているプロジェクト間での相互調整の必要性があったのではないかと考えられる。

この他にも、各プロジェクトは着手前に入念な検討がなされ、開発中には中間評価が実施され、終了後には事後評価が実施され、成果と開発課題が明確化されたが、各プロジェクトの中間評価・事後評価では他のプロジェクトとの連携を進めることを指示する評価コメントが多く見られたことから、プロジェクト間の相互関係をよく把握しておくことが重要であると考えられる。

研究開発を有効に進めるためには、関係するプロジェクトをまとめて俯瞰的に見て、プロジェクト間の研究開発の内容を取捨選択したり、移行させたりすることが有効であると考えられる。このため、「施策評価」の見方を早くから導入して整理することが大事である。特にブームになっているものについては類似の研究開発テーマが多数並行的に実施される傾

向があるため、横断的に見る必要があるとあり、これまでの研究開発を歴史的に見ても「施策評価」の観点から早期に研究開発内容の確認・整理を行うことによる研究開発資源の集中化を図ることが必要であると考えられる。

超電導素子分野については、「超電導材料・超電導素子」で非常に大胆な三端子素子の構築を目標に掲げたが、複雑な酸化物超電導体の界面制御に苦しみ三端子素子の機能検証までで軌道修正し、その後は SFQ 素子による回路構築に移行して、後継プロジェクトで更なる高集積度化の努力がなされてきた。超電導素子分野については、並行して進められたプロジェクトは経済産業省内のプロジェクトでは存在せず、プロジェクト間の研究内容の整理の問題は特に見られなかった。また、プロジェクト間の成果の引き継ぎも適切に行われていたものと考えられる。

（３）個々のプロジェクト終了後のフォローアップの状況

個々のプロジェクトの成果の実用化に際しては、プロジェクト間の連携やプロジェクトをまたぐ事業整理が必要である。現在、超電導材料分野においては、実用化に近い位置にいる線材技術は、もともと「超電導電力応用技術」プロジェクトにおいて開発された技術であり、「超電導材料・超電導素子」プロジェクトの後継プロジェクトである「超電導応用基盤技術研究開発（Ⅰ）」の線材開発の部分にプロジェクトを越えて継承された。さらに「超電導応用基盤技術研究開発（Ⅱ）」では線材開発に注力することになり、開発項目の選択と集中がなされた。現在開発テーマとして残っている Y 系（あるいは Bi 系も）線材は、こういった経緯で実用化に向かった。図 12 に Y 系高温超電導材料を電力ケーブルに適用する際の俯瞰図を示す。

一方超電導素子分野においては、SFQ ロジック回路が挙げられる。「超電導材料・超電導素子」プロジェクトから「超電導応用基盤技術研究開発（Ⅰ）」プロジェクトへ、またその成果を「低消費電力型超電導ネットワークデバイス」へと継承することにより、SFQ ロジック回路をプロトタイプ段階まで進めることができた。図 13 に高温超電導 SFQ 技術の俯瞰図を示す。

このように現在有力テーマとして残っている技術については、適切なプロジェクト間の移動により後継プロジェクトへの移管が行われていることがうかがえる。

Y系超電導電力機器俯瞰図

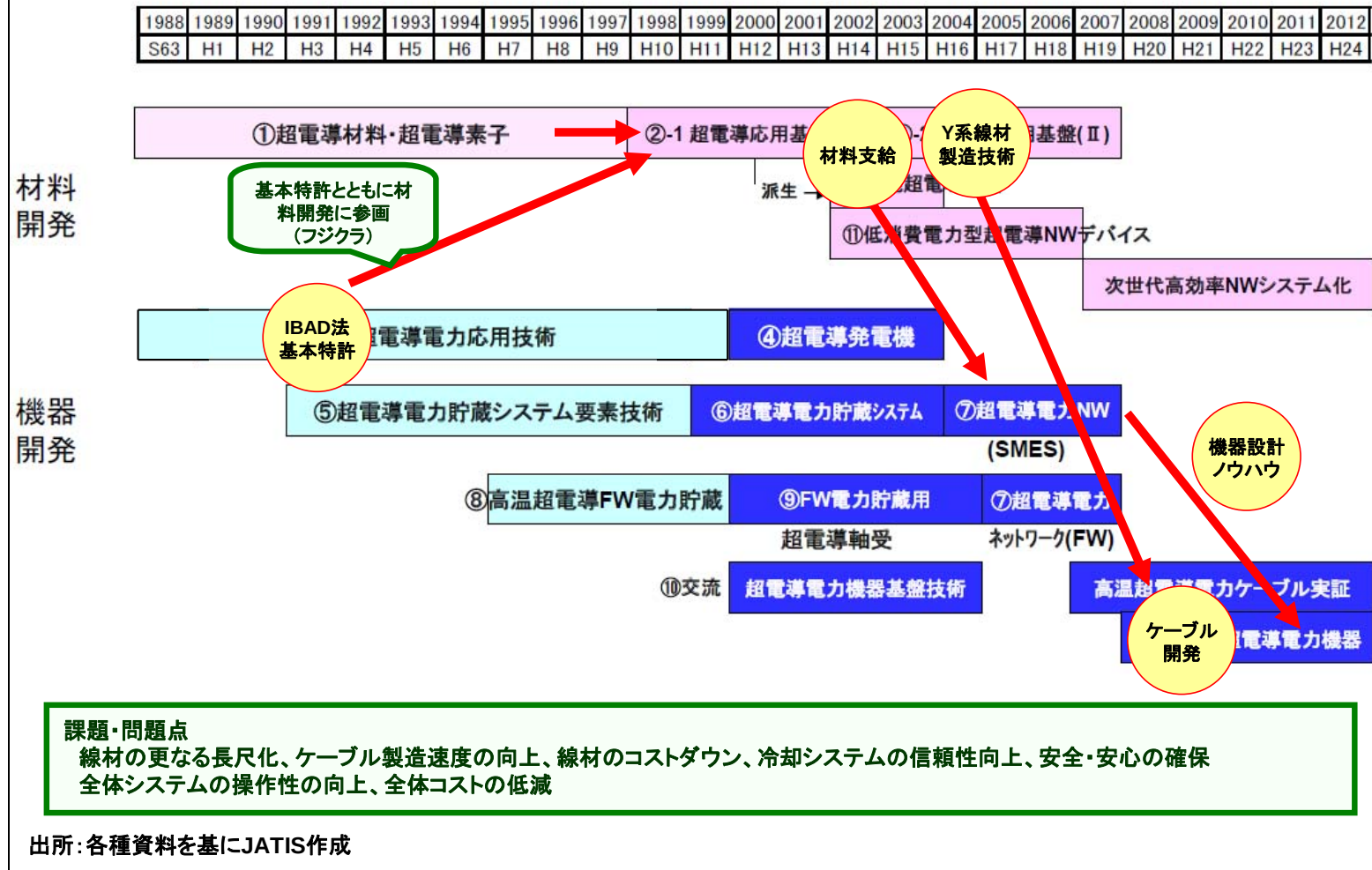
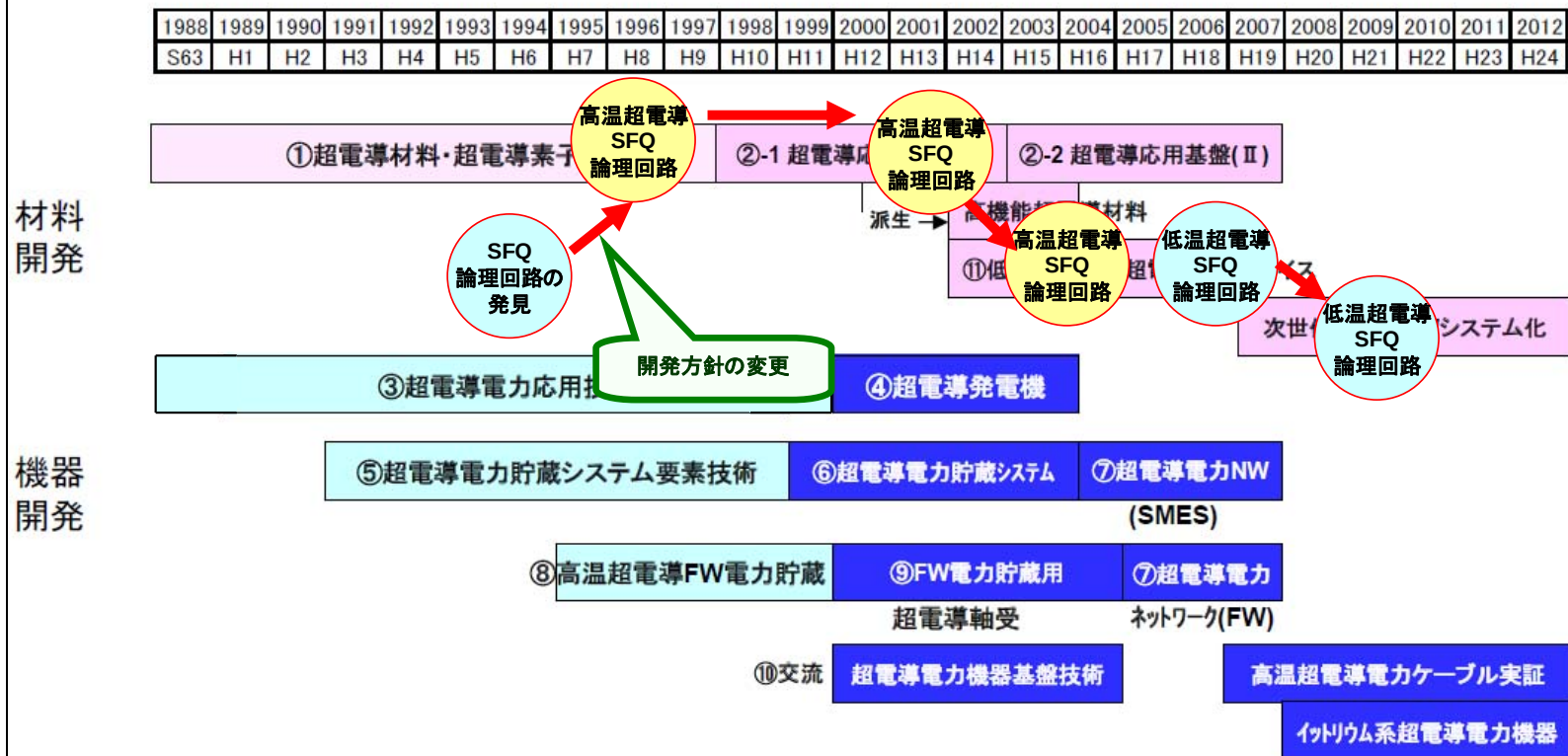


図 12 Y系高温超電導材料を電力ケーブルに適用する際の俯瞰図

超電導SFQ技術の俯瞰図



出所: 各種資料を基にJATIS作成

図 13 超電導 SFQ 技術の俯瞰図

Ⅲ．総合評価（施策）

高温超電導（HTS）を発現する酸化物超電導物質の発見により、液体窒素温度レベルにおいて超電導現象を利用した機器・設備の実現が期待され、省エネルギー、環境保全や CO₂ 低減といった社会要請に応えるため、新技術の見極めとその後の展開を着実に進めることを目的として、経済産業省は超電導研究開発に着手した。まず、超電導材料・超電導素子の基礎・応用の両面で並行的に実施され、将来技術の見極めと方向付けがなされた。その結果、従来から研究開発がなされていた低温超電導（LTS）と新発見の HTS の特徴が整理され、材料・素子の分野に関する各々の技術の研究開発方向が明確化された。このように高温超電導材料分野の研究目的は、当初の物質探索からスタートして広い波及効果を狙った工業材料化の研究に収斂されてきた経緯があり、また、超電導素子分野の研究でも、材料探索からスタートして軌道修正を図りつつ膨大な情報通信に対応した高速・低消費電力の製品を作ることを目的としてきており、おのおのその目的は妥当であったといえる。ぜひとも継続して研究開発を実施し、超電導技術を実用化へと持っていくべきであろう。

超電導研究開発は当初、産業科学利用開発プロジェクトや大型省エネルギー技術研究開発・ニューサンシャイン計画の一環として位置づけられて開発され、超電導研究開発の貢献が期待された。現在では、「Cool Earth-エネルギー革新技术計画（2008 年 3 月経済産業省制定）」において、21 のエネルギー革新技术の一つに「超電導高効率送電技術」が選定されており、新しい政府の方針としては、CO₂ 排出量を 1990 年比 25%削減との方針が出され、経済産業省で実施してきた超電導研究開発は、我が国の重要な政策目的である省エネルギーに大きく貢献する技術と引き続き位置付けられると考えられ、その政策的位置づけは妥当であったと考えられる。

省エネルギー、環境保全や CO₂ 低減といった社会要請に貢献するためには、当時世界規模で熾烈な開発競争が続けられており、民間企業で行うには開発リスクが大きく、経済的負担も大きすぎることに、また、超電導研究開発は、技術的難度、多くの企業の協力、政策的意義付けの高さが必要であることから、国の研究開発としての実施は妥当性があったと考えられる。

現時点までに得られた成果をみると、酸化物超電導物質が発見されて 23 年が経過し、長い研究開発の末にようやく超電導ケーブルが実システムでの連系試験の段階に達し、超電導電力貯蔵（SMES）も実証研究が行われている。これまで積み重ねてきた成果の多くがようやく実用化段階を視野に入れており、また、船用モータや磁気分離装置などの副次的製品が得られ、SFQ ロジック回路もプロトタイプ段階にあり、得られた成果は妥当であったといえる。

現在、実用化に近い位置にいる線材技術は、もともと発電機開発を目指したプロジェクトにおいて開発された技術であり、応用基盤プロジェクトにおいてプロジェクト間の垣根を越えて本格的に継承され、さらに線材開発に注力することになり、開発項目の「選択と

集中」がなされた。現在開発テーマとして残っている Y 系（あるいは Bi 系も）線材は、こういった経緯で実用化に向かい、SMES 等その他の電力用製品についても、プロジェクト間の垣根をこえて、現在の高温超電導製品の開発に至っている。一方超電導素子分野においては、SFQ ロジック回路が「超電導材料・超電導素子」プロジェクトから「超電導応用基盤技術研究開発（I）」プロジェクトへ、またその成果を「低消費電力型超電導ネットワークデバイス」へと継承することにより、SFQ ロジック回路をプロトタイプ段階まで進めることができた。このように現在有力テーマとして残っている技術については、初期の段階では、プロジェクト間での開発テーマ等の整理が必要と考えられた面もあったが、「選択と集中」により、適切なプロジェクト間の移動により後継プロジェクトへの移管が行われていることがうかがえ、個々のプロジェクト終了後のフォローアップがうまく進み現在に至っているといえる。ぜひとも継続して研究開発を実施し、超電導技術の早期実用化を確実なものとするべきである。

1990 年代の研究開発プロジェクトを概観すると、同時並行的に実施されていた個々のプロジェクトは独自に進んでおり、研究の内容、フェーズの整理がなされていたとはいえない部分があったため、相互調整の必要があったと考えられる。個々のプロジェクトはその目標を達成したが、研究開発を有効に進めるためには、関係するプロジェクトをまとめて俯瞰的に見て、プロジェクト間の研究開発の内容を取捨選択したり、移行させたりすることが有効であると考えられ、「施策評価」の見方を早くから導入して整理することが大事である。特にブームになっているものについては類似の研究開発テーマが多数並行的に実施される傾向があるため、横断的に見る必要があるとあり、これまでの研究開発を歴史的に見ても「施策評価」の観点から早期に研究開発内容の確認・整理を行うことによる研究開発資源の集中化を図ることが必要であったと考えられる。

更に今後の課題としては、技術戦略マップに描かれている実用化普及の促進を図る上でも、その過程で産学官がどのような役割分担で進めていくのかを検討し、具体化させていくことが望ましいと考える。

（事業評価関係）

A. 総論

I. 波及効果に関する調査

I－1. 技術波及効果

（1）実用化の進展度合

ここでは、これまでの超電導研究開発の直接的、間接的な成果が、製品やサービスの実用化にどのように寄与したか、あるいは寄与する可能性があるかについてまとめた。

①超電導材料分野

■エネルギー・電力分野

SMES（超電導エネルギー貯蔵装置：Superconducting Magnetic Energy Storage）

【実用化への進展度合 低温超電導（LTS）：製品化段階、高温超電導（HTS）：研究段階】

SMES の用途は、負荷変動補償用（瞬低用）と電力系統安定化用に分かれ、技術的には後者のほうがより難しい。

低温超電導（LTS）に関しては、1991 年から開始した「超電導電力貯蔵システム要素技術」で国際超電導産業技術研究センター（ISTEC）は数 MJ 級 SMES の要素技術の開発を実施した。この成果は 1999 年からの「超電導電力貯蔵システム技術」へ継承されて、2003 年までに ISTEC・中部電力が瞬低用 10MJ 級のモデルコイル試験を実施し、ISTEC・九州電力が系統安定化用 3MJ 級のモデルコイル試験を実施した。これらの成果を基に中部電力は落雷時の瞬低対策用としてシャープ亀山工場に、2003 年に瞬低用 SMES を納入し、実証試験を実施して良好な成績を得ている。

系統安定化用 SMES としては、引き続き 2004 年からの「超電導電力ネットワーク制御技術」で、中部電力などが電力系統制御用 SMES の実証試験を 2007 年 6 月にスタートさせ、古河日光発電の細尾発電所構内で古河電工の協力の下に 20MJ 級の系統連系試験を実施した。

一方、高温超電導（HTS）に関しては、コストダウンとスケールダウンを目的として、高磁場下での性能の良いイットリウム（Y）系 SMES を開発するために、2008 年から開始された「イットリウム系超電導電力機器」の中で、ISTEC、中部電力、古河電工が 2MJ 級の動作試験と 2GJ 級のコイル設計を実施する計画になっている。この中では、2GJ 級 SMES の開発を見通す高磁界かつコンパクトなコイル設計技術の開発並びにメンテナンスを容易とするコイルの伝導冷却技術開発を行い、2012 年度までに Y 系 SMES 対応線材の

製造と 2MJ 級モデルコイルを用いた SMES の動作試験と伝導冷却技術開発を行う計画である。

フライホイール

[実用化への進展度合 LTS：技術開発段階、HTS：技術開発段階]

フライホイールの用途としては電車用と電力貯蔵用があり、超電導は軸受部分に適用する。

LTS としては、電車の加速用として、2007 年に JR 東海が Nb 系コイルで世界最大級の 200MJ 級の装置を開発している。今後は信頼性の向上が課題である。

HTS としては、電車用に、鉄道総研が、永久磁石側の磁場の発生を超電導コイルで行うフライホイールを開発中である。電力貯蔵用としては、1995 年から開始した「高温超電導フライホイール電力貯蔵研究開発」で、四国総研などが Y 系材料軸受を使って 1MJ 級のフライホイールの性能試験を実施した。これに続いて、2000 年からは「フライホイール電力貯蔵用超電導軸受」として四国総研などが Y 系バルク材の軸受で 60MJ 級の性能試験を実施した。

電力ケーブル

[実用化への進展度合 HTS：製品化段階]

電力ケーブルへの適用は全て HTS で実施されている。

1988 年にわが国で発見されたビスマス (Bi) 系高温超電導材料の線材開発は線材への成形性の良さもあり、これまでの超電導研究開発の成果などにより、比較的順調に進み、現在商品化されて、海外の電力ケーブルプロジェクト等に提供されている。1987 年に米国で発見された Y 系材料は加工が難しい材料であるが、イオンビームを使った IBAD 法による線材の成形に成功し開発が加速された。Y 系線材は高磁場下での性能が優れ、線材を構成する材料全体での価格が廉価なため、コストダウンも期待されている。

これらの HTS 線材を使った電力ケーブルの開発は、まず企業中心で進んだ。東京電力と住友電工は 1991 年に 5m の Bi 系電力ケーブルを開発した。この開発は継続され 2002 年には東京電力と住友電工が 100m 級の電力ケーブルを開発している。国プロとしては 2000 年から「交流超電導電力機器基盤技術」として、Super-GM (研究開発組合) が古河電工・中部電力とともに、単心の 500m 級 Bi 系電力ケーブルの通電試験を実施した。

Bi 系電力ケーブルの開発はその後も継続され、2007 年からの「超電導電力ケーブル実証」で、住友電工・東京電力がまず 30m 級の試験を 2010 年に実施し、その後 2011 年から 1 年間の系統連系試験を実施する計画になっている。このプロジェクトでは冷却技術なども含めた高温超電導ケーブルシステムを構築し、線路建設、運転、保守を含めたトータルシステムの実証試験が実施される。

一方、Y 系電力ケーブルについては、2003 年からの「超電導応用基盤技術 (II)」にお

いて、ISTEC などが 10m 級の Y 系三心電力ケーブルで機能試験を実施し、0.09W/m の低交流損失化を確認している。これに引き続き、2008 年から開始した「イットリウム系超電導電力機器」において、2012 年までに三心で ISTEC・住友電工が 15m の Y 系電力ケーブルの、単心で ISTEC・古河電工が 30m の Y 系ケーブルの課通電試験を実施する計画になっている。

電力ケーブルの実用化のためには、コストと信頼性が課題であり、Y 系ケーブルのコストダウンと、接続部の絶縁破壊対策による信頼性向上が開発課題になっている。

限流器

[実用化への進展度合 HTS：製品化段階]

電力系統の事故電流を瞬時に制御するために使われる限流器には、HTS が使われる。

Bi 系としては 2000 年から開始した「交流超電導電力機器基盤技術」で、単相 66kV-500A の Bi 系コイルを開発し、東芝が機能試験を実施した。

Y 系限流器としては同じ「交流超電導電力機器基盤技術」で単相 6.6kV-1000A の Y 系薄膜を使った限流器の機能試験を東芝が実施した。これと並行して 2003 年からの「超電導応用基盤技術（Ⅱ）」では、三相 6.6kV-72A の Y 系コイルの系統連系試験を東芝が実施した。2008 年時点では、電圧、電流容量ともトップレベルにある。日本の場合、基幹系統が 275kV であることから、それに適合する高圧化技術の開発が必要である。

電力用変圧器

[実用化への進展度合 HTS：技術開発段階]

電力用変圧器には HTS が使われる。

2000 年に九大と九電が 22kV-1MVA の Bi 系線材を使った電力用変圧器で系統接続試験を実施した。2000 年からの「交流超電導電力機器基盤技術」では、66kV-2MVA の Bi 系変圧器の機能試験を実施した。

一方、Y 系電力用変圧器については、2008 年からの「イットリウム系超電導電力機器」で、66kV-2MVA の電力用変圧器開発を ISTEC、九州電力が実施する計画である。

■産業・輸送分野

輸送用モータ（マグレブ）

[実用化への進展度合 LTS：製品化段階、HTS：技術開発段階]

LTS としては、磁気浮上列車用として JR 東海による Nb 系のマグネットが実証試験を終了している。

HTS としては、JR 東海が超電導磁気浮上式鉄道のリニアモータ用に Bi 系銀シース線を採用し、山梨実験線の 3 両編成列車の先頭車両に搭載して機能試験を実施している。

輸送用モータ（回転機）

[実用化への進展度合 HTS：製品化段階]

HTS 線材を使った輸送用モータが開発中である。

船舶推進用には 400kW 級 Bi 系モータがプロトタイプ段階にある。IHI は、Bi 系 400kW 級のモータシステムを販売すると発表しており、技術としての完成度は高い。世界で初めて交流部分を超電導コイルにすることに成功している。

自動車用では 60kW 級 Bi 系モータが開発中である。通常の自動車のエンジンルームに、超電導モータと鉛バッテリーを置いたシンプルな構成で、住友電工大阪製作所内にて実際に走行した。船舶用に開発されたものと同様に、超電導モータ特有の低速、大トルクの性質により、シフトギアが不要になり駆動力への変換ロスが低減できる。

鉄道用変圧器

[実用化への進展度合 HTS：技術開発段階]

HTS 線材を使った鉄道用変圧器が開発中である。

Bi 系 25kV・3MVA 級鉄道車載用変圧器の試作研究が鉄道総研で実施された。

■診断・医療分野

NMR・MRI

[実用化への進展度合 LTS：上市段階、HTS：技術開発段階]

LTS に関しては、核磁気共鳴（NMR）現象を利用した核磁気共鳴画像法（MRI）による診断装置用に、LTS 線材が使用されている。例えば、強磁場 NMR スペクトロメータは現在、プロトン（水素原子）の共鳴周波数である 950 MHz（磁場 22.3 T）まで市販されており、長年の夢とされてきた 1 GHz（23.5 T）まで後一步に迫っている。Nb₃Sn による金属系超電導線材の強磁場領域での臨界電流密度の向上で、1 GHz NMR スペクトロメータが、金属系超電導線材による永久電流モードで実現する見通しを得ており、数年のうちに開発される可能性が高い。

一方、HTS は、将来の高磁場化に向けて基礎研究が実施されている。物材機構、神戸製鋼、理研、日本電子は、600 MHz NMR マグネットの最内層コイルを Bi 系超電導コイルに交換し、磁場の均一性と安定性を比較する計画である。

タンパク質の高次構造解析の感度の向上に必要な 25.85 T（1.1 GHz）磁石の実現には高温超電導線材が期待されている。高価な液体ヘリウムを使用することなく安価な維持費で利用できる NMR 装置や世界最高水準の研究のための高磁場 NMR 装置は高温超電導体で可能になると考えられている。2009 年には、ISTEC が 48K で 60T（77K で 5T 相当）の高磁場で通電可能な Y 系線材を開発し MRI などへの適用が期待されている。

SQUID（超高感度磁気センサ：Superconducting Quantum Interference Device）

【実用化への進展度合 LTS：上市段階、HTS：製品化段階】

LTS に関しては、心臓疾患検査用（MGC）などの製品が販売されている。日立は LTS64chMCG システムを開発した。また、SII では、SQUID 顕微鏡を製品化した。

HTS に関しては、日立が HTS16chMCG システムを開発した。豊橋技術科学大学はアドバンスフードテック、住友電気ハイテックスと共同で、高温超電導（ガドリニウム（Gd）系）SQUID を用いた本格的な食品内金属異物検査装置“マイクロディテクター”を開発した。超高感度の SQUID センサを用いる方式で、被検査物を磁石で磁化し、その残留磁化を高感度磁気センサで計測するという非常にシンプルな方法である。

②超電導素子分野

■情報・通信分野

SFQ 回路（単一磁束量子：Single Flux Quantum）

【実用化への進展度合 LTS：製品化段階、HTS：技術開発段階】

SFQ 回路は超高速応答速度と極低消費電力を同時に実現できる回路であり、スイッチング時間は数 ps、消費電力は、 $1\mu\text{W}$ （論理ゲート当たり）と想定されている。日本では、フィルタ等の受動素子より能動素子の研究が盛んである。

LTS に関しては、Nb 系で現在 JJ 素子として 10 万接合を達成している。ISTEC は、9 層の Nb 層の積層が可能な超電導デジタル集積回路(LSI)製造プロセスを開発した。2002 年からの「低消費電力型超電導ネットワークデバイス」として NEDO の委託により実施したものである。超電導体を用い、半導体素子と異なる原理で動作する SFQ 素子は、最先端の微細化技術なしに 100 GHz 以上の超高速動作が可能であり、またゲートあたり $1\mu\text{W}$ 以下の低消費電力を実現できる可能性をも合わせ持つ。SFQ 素子は LSI を実現し得ることが半導体以外で唯一の素子でもある。このため、SFQ 集積回路は半導体の限界を超えた高いクロックレートで動作する LSI を実現する第一の候補として期待されている。

HTS に関しては、高集積化が難しく 200 接合を達成した段階である。ISTEC では、2002 年からの「低消費電力型超電導ネットワークデバイス」で、Y 系薄膜を用いた SFQ 回路の開発を進め、SFQ 回路の中で超電導接合の臨界電流密度(J_c)を解析し、 J_c の均一化可能なレイアウトを考案した。4.2 K で 360 GHz、40 K 近い温度で 110 GHz の高速分周動作を実現できた。SFQ(単一磁束量子)回路技術の応用として、同じ、2002 年からの「低消費電力超電導ネットワークデバイス」で Y 系材料によるアナログ-デジタル (AD) 変換回路の開発が日立、ISTEC で実施された。また、計測回路への応用として、Y 系材料による ISTEC・アドバンテストで 100GHz サンプラーの開発が実施された。

フィルター（受動素子）

[実用化への進展度合 HTS：上市段階]

携帯電話基地局用などに HTS フィルターが開発されている

米国では HTS 薄膜を使ったフィルター（受動素子）が携帯電話基地局用として実用化され、従来の床置型フィルターシステムの更新需要の下で 7000 基以上を米国 STI 社が納入している。

日本では、1999 年にパナソニックが移動体通信基地局用に HTS フィルターの開発を実施し、2002 年には富士通が無線基地局用に HTS フィルターの開発を実施した。2006 年には東芝が NHK と地上デジタル放送中継局用として Y 系フィルターの共同研究を実施した。

③超電導共通基盤分野

■冷凍・冷却分野

[実用化への進展度合 LTS：上市段階、HTS：技術開発段階]

LTS 用のヘリウム冷凍機の連続運転時間の長期化の開発が行われた。1988 年からの「超電導電力応用技術」で IHI が 100L/h のヘリウム冷凍機の運転時間を 1 万時間にできる目途をつけ、続く 2000 年からの「超電導発電機基盤技術」では Super-GM と IHI が 150L/h のヘリウム冷凍機の運転時間を 2 万時間にできる目途をつけた。

HTS 用の冷凍機として小型のパルス管式冷凍機については、1999 年からの「超電導電力貯蔵システム技術」で Bi 系コイル冷却のために ISTECH が 80K で動作確認を実施した。引き続き、2004 年からの「超電導電力ネットワーク制御」では、中部電力・日本大学が 300kW 級のパルス管式冷凍機でメンテナンス間隔 5 万時間の目途をつけた。液体窒素温度より低い 60K レベルでの電力ケーブルの冷却のためにネオンガスを使ったタービン式冷凍機の開発が行われている。2004 年からの「超電導応用基盤技術（Ⅱ）」では、要素技術として ISTECH・大陽日酸が 65K の温度レベルで作動する 2.7kW 級膨張タービンを開発し、続いて 2008 年からの「イットリウム系超電導電力機器」では、ISTECH・大陽日酸が 2kW 級のタービン式冷凍機を開発する計画である。電力ケーブル用には液体窒素冷凍機が必要であり、2000 年からの「交流超電導電力機器基盤技術」では、古河電工・前川製作所が 1800L/h の過冷却液体窒素（73K）を流せる冷凍機の機能試験を実施した。2007 年からの「高温超電導電力ケーブル実証」では、前川製作所が 3kW の液体窒素冷凍機システムの開発を計画している。

■エネルギー・電力分野

SMES

LTS である Nb 系の開発が先行し落雷時の瞬低対策用として 10MJ 規模の設備が実用化されている。系統安定用 SMES は、より高度の制御が必要であり、20MJ クラスの開発を実施中である。これより大きな設備についてはコストダウンが課題となっている。HTS としては高磁場下での性能が良い Y 系 SMES が開発中である。信頼性の向上も課題で今後実施される系統連系試験を通じての技術力向上が必要である。

国内では電力系統の安定化や瞬低対策を目的に研究開発が進められており、NEDO 及び中部電力は、電力系統制御用 SMES の実証試験が、2007 年 6 月にスタートした。本実証試験は、経済産業省資源エネルギー庁の電力技術プログラムの一環として、中部電力と国際超電導産業技術研究センターが共同受託し実施しているもので、2004 年から 4 ヶ年のプロジェクトである。大電力を瞬時に出し入れ、有効・無効電力の同時制御、繰り返し使用を可能にし、さらに低コスト化と実系統連系試験により実用化を目指したものである。実証試験は変動負荷源である金属圧延工場への供給線路であり、発電設備も有する場所として、古河電工の協力で古河日光発電所細尾発電所構内で実施した。この試験の成功をもとに NEDO は 2008 年度の超電導 NEDO プロジェクトとして、2GJ 級の SMES の開発を予定している。このプロジェクトでは 2010 年度までに、2GJ 級 SMES の開発を見通す高磁界かつコンパクトなコイル設計技術の開発並びにメンテナンスを容易とするコイルの伝導冷却技術開発を行い、2012 年度までに SMES 対応線材の製造と 2MJ 級モデルコイルを用いた SMES の動作試験と伝導冷却技術開発を行う。

海外においては、1990 年代後半に米国の B&W 社がアラスカで 1.8GJ の大型 SMES の計画が中断された後、MJ 級のマイクロ SMES の開発が米国とヨーロッパで行われてきた。米国のマイクロ SMES は、AMSC 社 や IGC 社で商品化している。韓国、中国でも、高温超電導線を用いた小規模な SMES の開発が進められている。

表 1 に SMES の実施状況を示す。

表 1 SMES の実施状況

No	実施機関	実施年	蓄積 エネルギー MJ	定格 出力 MW	線材
1	九州電力今宿変電所	1998	3.6	1	NbTi
2	GE,AMSC	2000	3	3	NbTi
3	KERI	2002	3	0.75	NbTi
4	九州電力今宿変電所	2002	2.85	5	NbTi
5	中部電力、東芝	2003	5	5	NbTi
6	中部電力寛政変電所	2003	10.5	5	NbTi
7	シャープ亀山工場	2005	10	5	NbTi
8	KERI	2006	0.6		Bi2223
9	NEDO、中部電力、東芝	2007	20	10	NbTi
10	IEE(CAS)	2007	1	0.5	HTS
11	NEDO,中部電力(要素)	2012	2		YBCO
	NEDO,中部電力(設計)	2012	2000		YBCO
12	KEK,原研	2015	100	550	NbTi
13	核融合科学研究所、 テクノバ、鹿児島大、 九大	2015	1	1	NbTi

出所：「超電導分野における技術開発状況に関する調査」（平成 20 年 3 月）に JATIS 加筆

フライホイール

電車の加速用として Nb 系の 200MJ 規模の装置が開発されており、今後は信頼性の向上が課題である。また、電力貯蔵用には、Y 系で 40MJ 級のプロトタイプ段階の開発が行われた。フライホイールにおける超電導の利用は軸受が課題である。高速で回転するフライホイールの軸受けは、従来の軸受（ベアリング）ではエネルギーの摩擦損失が大きいため、非接触支持が求められ、そのためにバルクの超電導体が用いられる。YBCO バルクと永久磁石の組み合わせによる軸受けが開発されている。鉄道総研のフライホイールは、永久磁石側の磁場の発生を超電導コイルで行うのが特徴である。JR 東海の 50kWh の蓄積エネルギーは世界で最大であるが、出力では海外のフライホイールのほうが比較的大きい。

表 2 に超電導フライホイールの実施状況を示す。

表 2 超電導フライホイールの実施状況

実施機関	国	実施年	出力 kW	蓄積エネルギー kWh	材料	用途
Boeing(SPI)	米国	2006	100	5	YBCO バルク	UPS
ATZ	ドイツ	2007	250	10	YBCO バルク	UPS
鉄道総研	日本	2007	FW 重量 500 kg 回転数 3000rpm		GdBCO バルク /NbTi コイル	電鉄用
JR 東海	日本	2007	9	50	NbTi コイル	電鉄用
四国電力	日本	2007	15	10	YBCO バルク	電力貯蔵

出所：「超電導分野における技術開発状況に関する調査」（平成 20 年 3 月）

電力ケーブル

Bi 系の線材を使用する実証試験が 2010 年度から予定されている。200m 規模の系統連系試験を 1 年間で実施する予定である。Y 系電力ケーブルについては、現在 10m のケーブルによる機能試験が行われている。コストと信頼性が課題であり、Y 系ケーブルのコストダウンと、接続部の絶縁破壊対策による信頼性向上が開発課題になっている。

1988 年にわが国で発見された Bi 系高温超電導材料の線材開発は比較的順調に進み、現在商品化されて、海外の電力ケーブルプロジェクト等に提供されている。1987 年に米国で発見された Y 系材料は加工が難しい材料であるが、イオンビームを使った IBAD 法による線材の成形に成功し開発が加速された。Y 系線材は高磁場下での性能が優れているため、SMES などへの応用が期待されている。

古河電工は交流損失を低減する技術の開発に成功し、現用の電力ケーブルの 11 分の 1 の世界最小の交流損失を記録している。この研究は、NEDO から ISTEK が受託した「超電導応用基盤技術研究開発プロジェクト」で実施されたものである。中部電力、古河電工、横浜国立大学が参加し、ISTEK が全体を取りまとめている。

NEDO は、2007 年 6 月に「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」を住友電工に委託している。このプロジェクトでは冷却技術なども含めた高温超電導ケーブルシステムを構築し、線路建設、運転、保守を含めたトータルシステムを、実系統に連系して実証試験を行う。

海外では、米国、韓国、中国で研究開発が進められている。これまでは 100kV 以下で 1kA 級のデモンストレーションが主流であったが、最近は大電流、高電圧の傾向がある。

2008 年時点では AEP や LIPA プロジェクトに日本は遅れているが、2008 年度からスタートしたリットリウム系高電圧超電導ケーブルの技術レベルは高い。日本の 2 つのプロジェクトは、2012 年の時点で、米国、韓国を抜いて、電流、電圧（容量）においてそれぞれ

世界でトップレベルになると予想される。米国の高温超電導ケーブルプロジェクト(オルバニープロジェクト)で、住友電工が参画し、同社が製造したビスマス系高温超電導ケーブルによる送電試験が 2006 年に開始している。高温超電導ケーブルは、世界で初めて実用地下送電路に布設されたもので、超電導ケーブルシステムの実証実験が行われている。

米国 National Grid 社はリバーサイドとメナズの変電所間約 3 km の実用送電線の途中に、350 m の超電導ケーブル線を敷設し実証試験を行っている。この超電導ケーブルは、三心一括型超電導ケーブルであり、冷却時の収縮や室温と液体窒素温度の間の熱サイクルへの耐久性、コンパクトさを兼ね備えているが、これにも同社の加圧焼成法で製造されたビスマス系超電導線、DI-BSCCO、が使用されている。ケーブル中間ジョイントも採用されている。2007 年 5 月には AMSC 社のプロジェクトでは住友電工から 30m の YBCO ケーブルが 1G ケーブル部分と交換され、2008 年 2 月より試験が始まっている。

欧州では 2007 年 9 月にベルギー ブリュッセルで開催された EUCAS2007 で、アムステルダム の 6km 超電導ケーブルプロジェクトが公表されている。2 変電所間を結ぶ既設 3 回線のうち 1 回線を 50kV 超電導ケーブルに張り替える。NKT cables 社の 3 相同軸 Triaxal ケーブルを、Praxiar 社のパルス管冷凍機で冷却し、2010～2011 年の運転開始を目指している。あくまで商用ニーズであると主張している。

韓国では、KERI と LS ケーブル社は、100m ケーブルを製造し、どちらも仕様は同じで、22.9kV、1,250A、50MVA、低温絶縁方式の 3 心一括型ケーブルである。KERI・LS ケーブルの試験は、DAPAS プログラムの第 2 フェーズで超電導ケーブル自身の開発を目的としている。KEPRI (Korea Electric Power Research Institute) では、現在 2 つの 100m 超電導ケーブルが布設されて試験されている。1 つは KEPCO/KEPRI が実施しているケーブルプロジェクトで 100m ケーブルは住友電工が製造したものである。また、2 端末、冷却システムも住友電工により提供されたものである。この試験のプロジェクトの目的は、超電導ケーブルの運用性の観点で見るものであり、すでに 1 年以上の試験を実施して多くのデータを蓄積している。もう 1 つは KERI と LS ケーブルが実施している。100m ケーブルを KERI と LS ケーブルが同時に製造した。ケーブルの仕様は同じで、22.9kV、1,250A、50MVA、長さ 100m、低温絶縁方式の 3 心一括型ケーブルである。KERI・LS ケーブルの試験は、DAPAS プログラムの第 2 フェーズの試験である。

中国の Innopower Superconductor Cable 社は中国政府の支援で 35kV、35m 長の BSCCO・3 相長超電導ケーブルを開発し、2004 年 3 月に、中国昆明南部電力グリッドの Puji 変電所で運転を開始している。送電容量は 2kA、120MVA で約 25,000 戸の家と四つの工場に 40-60MVA の電力を供給できる。終端接続部などの設計及び組立は中国科学院等離子体物理研究所により実施された。

表 3 に超電導ケーブルの実施状況を示す。

表 3 超電導ケーブルの実施状況

No	プロジェクト 実施機関	試験年	国	電圧 kV	電流 A	容量 MVA	長さ m	形態	線材	系統 連系
1	東電・住電	1991	日本		2000		5		Bi	
2	東電・古河	1995	日本	66	2000		5		Bi	
3	東電・住電	1995	日本	66	1000		7	三心	Bi	
4	東電・古河	1996	日本				50		Bi	
5	東電・住電	1996	日本		2000		50	交流	Bi	
6	東電・住電	1997	日本	66	1000		30		Bi	
7	東電・住電	2000	日本				30		Bi	
8	中電・フジクラ ・昭和電線	2000	日本		1000		15		Bi	
9	NKT-Research	2001	EU	36	2000		30	単心	Bi	
10	東電・住電	2001	日本	66	1000		100		Bi	
11	住友東電	2002	日本	66	1000		100	三心	Bi	
12	DetroitEdison	2002	米国	24	2400		120	単心		
13	SouthWire	2002	米国	12.5	2000		30	単心	Bi	
14	EdF/Pirelli	2002	EU	90	2600		50	単心	Bi	
15	Super-ACE	2005	日本	77	1000	133	500	単心	Bi	×
16	Albany	2006	米国	34.5	800	48	330	三心	Bi+Y	O
住友電工製										
17	AEP	2006	米国	13.2	3000	69	200	tri-axial	Bi	O
18	KEPCO/KEPRI	2006	韓国	22.9	1250	50	100	三心	Bi	×
住友電工製										
19	SuperPower	2006	米国	66	1000		300	三心		
20	DAPAS2	2007	韓国	22.9	1250	50	100	三心	Bi	×
21	LIPA	2008	米国	138	2400	574	600	単心	Bi	O
22	LIPA2	2010	米国	138	2400	574	600	単心	Y	O
23	Hydra	2010	米国	13	4000	90	300	単心	Y	O
24	DAPAS3	2010	韓国	154	4000	1067	100	三心	?	×
25	実証試験	2011	日本	66	2000	229	200	三心	Bi	O
26	現行プロジェクト	2012	日本	66	5000	572	15	三心	Y	×
27	現行プロジェクト	2012	日本	275	3000	1429	30	単心	Y	×
28	Entergy	2013	米国	13.8	2500	60	1700	三心	Y?	O

(25 実証試験はケーブル断面積あたりの送電容量が世界最高)

出所：「超電導分野における技術開発状況に関する調査」（平成 20 年 3 月）に JATIS 加筆

限流器

電力系統の事故電流を瞬時に制御するために使われるもので、Y 系材料を使った限流器は現在フィールド試験段階にある。国内では Super-ACE プロジェクトでの東芝のデモンストレーションのデータが、2008 年時点では、電圧、電流容量とも現在トップレベルにある。日本の場合、基幹系統が 275kV であることから、それに適合する高圧化技術の開発が必要である。

国外では、米国、韓国においては今後、主要送電系統の 150kV 級の限流器開発が主になるが、日本の Super-ACE で 66kV を達成しているので高い目標ではない。

米国・カリフォルニア・エネルギー委員会(CEC)は、電力系統中に 13.8 kV の飽和磁心型限流器(FCL)を設置し、試験は、2007 年末までに完了している。この限流器は、米国の Delta Star 社が Trithor 社(Zenergy のドイツに在る子会社)から供給された第 1 世代ビスマス系線材を用いて製作したものである。

シーメンス社と AMSC 社は、2 MVA 超電導限流器(FCL)向けスイッチング・モジュールの試験に成功した。研究所の試験では、第 2 世代 高温超電導体とステンレス・スチールを積層した AMSC 社の線材を用いてシーメンス社が製作した単相超電導スイッチング・モジュールを使用している。試験では、限流器は事故電流を 25 分の 1 に抑制した。

AMSC 社はまた、3 相 115 kV 限流器(FCL)を開発し、系統中試験に選定されている。この限流器の Siemens 社が開発した低インダクタンスコイル技術は限流器が抵抗性に転移するまでは系統に対して影響を及ぼさないという特徴を持つ。

表 4 に超電導限流器の実施状況を示す。

表 4 超電導限流器の実施状況

プロジェクト	国	実施年	電圧	電流	容量	相数	形態	線材	系統 連系
Super-ACE	日本	2005	66	500	57	1	コイル	Bi	×
Super-ACE	日本	2005	6.6	1000	11	1	薄膜	Y	×
応用基盤	日本	2008	6.6	72	0.8	3	コイル	Y	O
Curl10	ドイツ	2004	12	600	10	3	バルク	Bi2212	O
Curl100	ドイツ	2010	10	600	10	1	バルク	Bi2212	O
DAPAS2	韓国	2007	13.2	630	8.3	1	コイル	Y	×
DAPAS2	韓国	2007	22.9	630	25	3	薄膜	Y	×
SP1	米国	2007	13.5	96	2.25	1	コイル	Y	×
AEP	米国	2010	138	1200	287	3	直線導体	Y	O
South California	米国	2010	115	1200	239	3	コイル	Y	O
ConEdison	米国	2010	138			3	リアクトル	Bi	
DAPAS3	韓国	2010	22.9	3000	119		コイル?	Y	
DAPAS3	韓国	2010	154	4000	1067		コイル?	Y	

出所：「超電導分野における技術開発状況に関する調査」（平成 20 年 3 月）

変圧器

鉄道用変圧器の開発が進んでおり、Bi 系で 3MVA 級の試作研究が実施されている。現時点では、鉄道総研の鉄道車載用の変圧器は最も進んでいる。計画中の韓国の DAPAS プロジェクトではイットリウム系電力機器として開発されるが目標値は現状レベルからすると高い。日本の次期プロジェクトでは、これまでの 22kV-1MVA 変圧器、66kV-2MVA 変圧器の実績から、Super-ACE と同じ 66kV 級であることから、66kV-20MVA のターゲットは妥当である

表 5 に超電導変圧器の実施状況を示す。

表 5 超電導変圧器の実施状況

実施機関	国	実施年	一次 電圧 kV	二次 電圧 kV	容量 MVA	相数	線材	系統接続
九大/九電	日本	2000	22	16.9	1	1	Bi	対応
SuperACE	日本	2003	66	16.9	2	1	Bi	
鉄道総研	日本	2007	25	1.2	3.5	1	Bi	鉄道車載用
鉄道総研	日本	2007	25	0.4	3.5	1	Bi	鉄道車載用
ABB	スイス	1997	18.7	10.42	0.63	3	Bi	対応
Siemence	ドイツ	2003	25	1.4	1	1	Bi	鉄道車載用
WAUKESHA(SP1)	米国	2004	24.9	4.2	10	3	Bi	中断
IEE、TBEA	中国	2007	10.5	0.4	0.63	3	Bi	対応
DAPAS3	韓国	2010	154		25	1	?	
次期プロジェクト	日本	2012	66	6	2		Y	

出所：「超電導分野における技術開発状況に関する調査」（平成 20 年 3 月）

■産業・輸送分野

産業用マグネット

フジクラは Y 系線材によるソレノイド型超電導マグネットの励磁試験を行い、実用化の目安である 1 T(テスラ)を超える磁場発生に成功している。近年 100 m 級の Y 系線材が IBAD 法等の気相法で製造されるようになり、ケーブルやマグネット等の実証試験が行われている。同社は、Y 系線材を用いた巻線による応用機器を想定して、10 mm 幅の線材を用いてソレノイド方式の検証用コイルの開発を進めて、2004 年において液体窒素浸漬で励磁試験を成功させ、10 mm 幅の線材であっても特性の劣化なく同方式の巻線が可能であることを実証している。小型冷凍機による伝導冷却が可能なコイルを作製し、77 K から 30 K までマグネットを冷却したマグネット単体の励磁試験と、LTS(金属系超電導体)マグネットと組み合わせることで外部磁界を 1 T から 3 T 加えた励磁試験を行っている。マグネットには 77 K で $I_c = 100$ A 級の 110 m 超電導線材を用いており、マグネットを均一に冷却するため高い熱伝導特性を有する窒化アルミニウム(AIN)を巻線の層間に挿入する等、熱的安定性向上を図っている。35 K にマグネットを冷却した状態では 400 A の電流を 10 分間にわたって通電し、マグネット中心部に 1.2 T の磁場を安定して発生させることができた。3 T の外部磁界下においても 1 T の磁界発生に成功し、Y 系線材を用いたソレノイド巻線で実用的な伝導冷却磁場発生コイルの実現可能性が検証された。

マグネオ技研と芝浦工業大学のグループは、完全非接触型の超電導ミキサーの開発に成

功し、医療やバイオ分野で期待されている。ゲノム創薬や遺伝子治療、再生医療といった次世代の医療技術の進展にともない、製薬、製剤機械、医療品設備も大きく進化している。中でも製造工程をいかにクリーンにするかが、医薬品設備に求められ、高度なクリーン環境が要求される医薬品の製造においては、攪拌時に容器が密閉されている必要がある。この非接触で密閉容器内に回転を伝える手段としては、磁気カップリング方式のミキサーに対する需要が高まっている。

マグネオ技研と芝浦工業大学は、超電導のピンニング特性を利用すると、非接触で完全に安定な浮上が可能となることに注目し、超電導浮上を利用した完全非接触型超電導ミキサーの開発に成功した。永久磁石の間に超電導体が挿入されている。この状態で、超電導体を液体窒素で冷却すると、下の磁石と上の磁石が超電導体を通して磁気カップリングされる。つぎに、下の磁石を上方に移動すると、上側の超電導体と磁石がともに上昇し、非接触で超電導浮上した状態になる。しかも、超電導であるので、この浮上は無制御で安定している。この状態で、下側の磁石を回転すると、超電導体は液体窒素中で回転し、同時に上側の磁石も回転する。磁石回路は、直径が約 100mm のステンレス製外枠に N 極及び S 極を交互に埋め込むような構造をとっている。これはピン止め効果によって回転トルクを伝達するためである。また、超電導体としては、直径 110mm および 140mm の Gd-Ba-Cu-O 超電導体を使用している。トルクは初期ギャップに依存するが、超電導体と磁石回路 15mm の場合に、300Ncm が得られている。100Ncm が容量 30l の攪拌に必要とされており、実用レベルの値が得られている。今後、実用機を試作して、性能評価を行う予定である。

磁気分離法は、溶液中から汚染物や有用物質を磁場を利用して分離・回収するプロセスである。対象物質が強磁性体でない場合、通常の永久磁石を利用して分離することは困難である。大阪大学は、常磁性や反磁性物質に強磁性粒子を付着（担磁）させて超電導磁石を用いて分離・回収する経済的に可能な技術を開発した。油滴が水に分散しているエマルションに強磁性粒子に担磁する実験を行った。バルク超電導磁石(GdBaCuO)の上に設置したガラス容器内でエマルションが凝集し約 1 分程度で急速に沈降させることができた。バルク超電導磁石の磁力が磁石表面から数 cm 離れた位置まで働くことが分かった。この技術を製紙排水処理設備に応用し実用化している。アジアやヨーロッパ地域でも注目されている。2005 年 8 月にスタートし、MS エンジニアリングが設立され事業化している。

スーパーパワー(SP)社とフロリダ州立大学の国立高磁界研究所(NHMFL)は、YBCO 線材高温超電導マグネットの実証試験を行っている。高磁界を発生させる工夫をした小型のマグネットで 9.5 T を発生させた。

産業用モータ・輸送用モータ

磁気浮上列車用では Nb 系のマグネットが実証試験段階、船舶推進用には 400kW 級 Bi 系モータがプロトタイプ段階、自動車用では 60kW 級 Bi 系モータが開発中というのが現状である。具体的には、高温超電導磁石については、JR 東海が超電導磁気浮上式鉄道のリニ

アモータ用に Bi2223 系銀シース線を採用し、山梨実験線の 3 両編成列車の先頭車両に搭載されている。2005 年に実施した走行試験では安定した励磁性能を確認し、高温超電導磁石搭載車両としての最高速度 553.9 km/h を記録した。

開発した高温超電導磁石のコイルは、Bi2223 系銀シース線 4 本と絶縁テープを束ねたものをレーストラック形状にパンケーキ巻きし、それを 12 枚積層してステンレス製のコイルケースに組み込んだものである。4 個のコイルにはそれぞれ YBCO 薄膜を用いた高温超電導熱式永久電流スイッチを取り付けている。

船用モータは、海外においては海軍等の軍用が牽引となっていると言われているが、国内においても、米国に比べて出力的には小さいが 2006 年頃から開発が進められてきている。IHI は、400kW 級のモータシステムを販売すると発表しており、技術としての完成度は高い。IHI を取りまとめ役とする産学グループ(IHI、住友電工、大陽日酸、ナカシマプロペラ、新潟原動機、日立製作所、福井大学、富士電機システムズ)は、液体窒素冷却によるものとしては世界最大出力となる 365 kW 超電導モータの開発に成功した。世界で初めて交流部分を超電導コイルにすることに成功した。

海外では、さらなる大型モータの開発が計画されており、特に回転機の応用として風力発電機の開発がスタートしている。超電導発電機を用いる事で、発電機自身を小型化できコストダウンになるということである。国内では風力発電機用回転機の開発は立ち上がっていないが、注目する機器である。

超電導モータで走る電気自動車の開発も行われている。通常の自動車のエンジンルームに、超電導モータと鉛バッテリーを置いたシンプルな構成で、住友電工大阪製作所内にて実際に走行したビデオが紹介されている。自動車の重量は 1200 kg、界磁コイルに 240 m の Bi2223 線材(DI-BSCCO)使われ、液体窒素浸漬で冷却されている。船舶用に開発されたものと同様に、超電導モータ特有の低速、大トルクの性質により、シフトギアが不要になり駆動力への変換ロスが 5-6 %低減できる。

京都大学のグループは、ビスマス系高温超電導テープ材を適用したかご型誘導モータを試作し、従来の常電導誘導モータでは得られない特異な回転特性を観測している。同種類のモータについては、唯一、韓国の Soonchunhyang 大学のグループが基礎研究を行っている。

米国テキサス州の TECO-Westinghouse モータ工業(TWMC)は、Y 系バルク高温超電導(HTS)モータの実証試験を行っている。TWMC 社は、2010 年までに HTS バルクモーター・シリーズを市場に導入することを望んでいる。

米国 AMSC 社は風力発電所の電圧制御用 D-VAR システムに関し、米国、オーストラリア、カナダ、ニュージーランド、英国、スコットランド、中国、韓国などの風力発電所から数多くの受注を受けている。

表 6 に超電導モータの実施状況を示す。

表6 超電導モータの実施状況

実施機関	国	実施年	出力 kW	回転数 rpm	トルク kN・m	用途	線材
IHI、住友他	日本	2007	365	250	14	船舶	Bi
住友	日本	2007	62			自動車	Bi
応用基盤	日本	2007	15	360	0.4	船舶	Y
鉄道総研 産学研究グループ	日本	2008	100	230	4.15		Bi
DAPAS2	韓国	2007	1,000	3,600	2.65	産業用	Bi
Rockwell、 AMSC	米国	2001	736	1,800	3.9	産業用	Bi
Rockwell、 Superpower	米国	2005	55	1,800	0.29	産業用	Y
AMSC、 Alstom	米国	2004	5,000	230	208	船舶	Bi
AMSC	米国	2008	36,500	120	2,906	軍用	Bi
Siemens	ドイツ	2007	4,000	3,600	11	産業用	Bi
Zenergy、 Converteam	英国	2010	8,000	15	5,096	風力	Y
ASC、TWM	米国	2010	8,000	15	5,096	風力	Y
Siemens	ドイツ	2010	4,000	120	319	船舶	
IHI、住友他	日本	2010	2,500			船舶	Bi
DAPAS3	韓国	2010	5,000			海軍船舶	

出所：「超電導分野における技術開発状況に関する調査」（平成 20 年 3 月）

核融合炉

核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(LHD)は、磁場閉じ込めのためのすべてのコイルを超電導化したヘリカル型核融合プラズマ実験装置である。1998 年 3 月のプラズマ点火から 8 年間に 9 回の長期連続運転を実施し、2005 年度に実施された LHD 第 9 サイクル実験では、プラズマに入力したエネルギー値が 1.6 GJ に達し、LHD が 2004 年度に達成した世界記録 1.3 GJ を更新している。極低温に保った定常運転時間は 3,470 時間、LHD 低温システムの圧縮機起動から停止までは 5,035 時間の安定な連続運転を行った。1998 年の

実験開始から、第 9 サイクル終了までの LHD 低温システムの積算運転時間は 41,788 時間、超電導状態を維持した定常運転の時間は 28,501 時間、コイル励磁回数は 985 回、プラズマショット数は 66,053 回に達しており、LHD 超電導システムの信頼性の高さを実証している。

JT-60 は銅コイルを用いていたが、JT-60SA 計画では全面的に超電導コイルを採用する改造が進められている。直径約 14 m の球状のクライオスタット内に、超電導コイルやプラズマを閉じ込める真空容器などを収納している。クライオスタットを含む主要装置の総重量は、2500 トン程度と見積もられる。最大プラズマ電流は 5.5 MA、プラズマ加熱入力 41 MW(100 秒間)を予定している。超電導コイルの特性を活かした 8 時間程度の連続運転の将来計画を予定している。超電導コイルは、すべてケーブルインコンジットタイプの強制冷却である。トロイダル磁場コイルではプラズマ中心 3.0 m で 2.7 T の磁場を発生させるため NbTi 導体を採用し、中心ソレノイドコイルの最大経験磁場はそれぞれ 10 T であることから、Nb₃Sn 導体を採用している。計画は 2007 年前半に開始し、2013 年までにすべての超電導コイルを完成させ、2014 年までにトカマク装置を組み立てて、2015 年から本格的なプラズマ実験を開始する予定である。

ITER は超電導コイル、真空容器、中性粒子ビーム入射加熱装置、高周波加熱装置、遠隔保守機器、ダイバータ、ブランケット第一壁、トリチウムプラント、計測装置などの主要機器で構成され、これら本体建設費として約 5,000 億円が予定されている。日本は、本体機器の約 20%の調達を分担することになっている(このうち半分の 10%は日本・EU 間の役割分担に関する共同文書に基づく EU からの割譲分)。TF コイル用導体の調達を分担する日本、EU、ロシア、米国、韓国、中国の 6 極の中で、日本が一番乗りで署名した。TF コイルは磁場 11.8 T、蓄積エネルギー 41 GJ の下で運転される。TF コイルに使用される導体は、直径 8.1 mm の Nb₃Sn 素線 900 本と銅線 522 本を 5 段階で撚り合わせた構造で、定格 68 kA のケーブル・イン・コンジット導体である。Nb₃Sn 素線の量は 400 トンを超え、6 極で導体約 90 km を製作する。このような大規模な超電導導体の製作は超電導技術史上、前例がなく、日本はこのうちの 1/4 を分担する。

TF コイル導体に加え、日本は中心ソレノイド(CS)用導体の全量の調達を担当し、Nb₃Sn 素線として約 120 トンを製造する。また、日本は TF コイル製作にも大きく貢献し、コイル構造物を 100%(19 個分)担当すると共に、コイル巻線 9 個分を担当し、TF コイル 9 個を完成させる。残りのコイル構造物 10 個分は欧州に引き渡され、そこでコイルとして完成する。原子力機構はこれらについても実規模での技術実証を進めるとともに、順次、ITER 機構と調達取決めを締結する準備を進めている。

プラズマ閉じ込め装置 RT-1 実験装置は、東京大学新領域創成科学研究科のグループが、先進核融合を目指して建設したものである。この実験装置 RT-1 の核となる部分に高温超電導マグネットが使われている。本プロジェクトの目的を達成するためのポイントは、ダイポール磁場を発生されるリング導体を真空中に浮かせるということ、およびリング導体を

超電導マグネットにするということである。超電導マグネットを永久電流運転すれば、外部からの通電回路を切り離すことが可能である。さらに、高温超電導ならば、冷却が失われても運転温度範囲が広いので、より長い実験時間がとれるようになる。RT-1 運転手順は、プラズマ真空容器の下部で、循環ヘリウムガスでマグネット内部を冷却し、高温超電導コイルが 20 K 以下になったところで、永久電流スイッチを使って励磁し、永久電流モードにする。その後、冷却配管、励磁に用いた電流リード、計測フィードスルーをマグネットから切り離す。全てが切り離された高温超電導マグネットは昇降機でプラズマ真空容器の中心に移動され、プラズマ真空容器上部に設置された吊り上げコイル(水冷銅コイル)により、磁気浮上される。予定された 8 時間の実験が終了すれば、昇降機で迎えにいて、高温超電導マグネットを再びプラズマ真空容器の下部に戻す。消磁、再冷却されて次の試験に備える。プラズマ真空容器内に組み込まれた高温超電導マグネットは、まずは永久電流性能、断熱性能が確認された。電流減衰率は 8 時間あたり 1%であり、良好な結果であった。一方、冷却を止めた後の温度上昇は、19.5 K からスタートし、8 時間後に 31.5 K になるというペースであった。温度上昇率は設計よりも若干大きかったが、永久電流モード運転を 8 時間維持することは可能である。

加速器

欧州合同原子核研究機関(CERN、ジュネーブ)における大型ハドロンコライダー(LHC)は、1994 年に計画が定められ、建設が進められてきた。2006 年 11 月には、主要な超電導磁石の製作が完了し、試験を経て、トンネルへの設置が急ピッチで進んでいる。2007 年末には入射エネルギー(450 GeV)でビームの周回を開始し、2008 年の夏には、最高エネルギー(7 TeV)での物理実験開始を目標としている。

LHC は、周長 27 km の地下トンネル内に建設され、超電導技術を駆使した世界最大の加速器となる。1232 台の主偏向磁石、386 台の主収束電磁石、5000 台を越える多重極、補正磁石および超電導高周波加速装置等により構成される。超流動ヘリウム温度(1.9 K)まで冷却することで、NbTi 超電導体内電流密度 2 kA/mm²(@ 9 T, 1.9 K)を達成し、中心磁場 8.3 T (コイル内最大磁場~9 T)の超電導偏向磁石等を加速器定常運転で用いる。四極超電導磁石(合計 32 台)の開発を Fermilab(米)と KEK(日)が分担し、製作には東芝、古河電工の両社が協力した。

2007 年 4 月に、加速器を構成する 1700 以上のマグネット全ての据付が基本的完了し、LHC の第 1 セクターを 1.9K まで成功裏に冷却した。このセクターは全 LHC の 1/8 であるが、いままで世界最大超電導装置である。LHC を構成する全部で 8 つのセクター 27km リングが冷却され、まず 80K まで冷却する。装置の損傷が生じてないことを確認試験完了後、主マグネットが液体 He で満たされ 4.5K まで冷却する。最後にポンプシステムにより He を加圧し、1.9K まで冷却する。

CERN は LHC の運転開始は 2008 年 5 月になると発表した。

理化学研究所・播磨研究所(理研)では、高温超電導体を利用したアンジュレータの開発を試みている。バルク超電導永久磁石をアンジュレータに利用するためには、その場着磁の手法を確立することが重要である。理研ではこれまでに 2 つの手法を提案している。1 つは、従来の希土類永久磁石列に取り付けられたリング状超電導バルクを磁石列のギャップを開閉して着磁する方法と、他の 1 つは一系列に配置された超電導バルクを一様外部磁場によって着磁する方法である。いずれの手法においても、従来の超電導アンジュレータの磁場性能を上回るためには臨界電流密度 10^5 A/cm^2 程度が必要だが、これは超電導バルクを 40~50 K 程度に冷却することにより十分可能な値である。上記 2 つの手法の検証実験が GdBaCuO 系バルクを用いて行われた。

■診断・医療分野

NMR・MRI

核磁気共鳴 (NMR) 現象を利用した核磁気共鳴画像法 (MRI) による診断装置用には、LTS 線材が多く使用されている。この分野ではコストの制約がゆるいこともあり、LTS が利用されているが、将来の高磁場化に向けて HTS の基礎研究が行われている。

例えば、強磁場 NMR スペクトロメータは現在、プロトンの共鳴周波数で 950 MHz (磁場 22.3 T)まで市販されており、長年の夢とされてきた 1 GHz (23.5 T)まで後一步に迫っている。Nb₃Sn による金属系超電導線材の強磁場領域での臨界電流密度の向上で、1 GHz NMR スペクトロメータが、金属系超電導線材による永久電流モードで実現する見通しを得ており、数年のうちに開発される可能性が高い。

物材機構、神戸製鋼、理研、日本電子は、科学技術振興機構による先端計測分析技術・機器開発事業「超 1GHz NMR システムの開発」では、酸化物系超電導線材の超強磁場 NMR への適用に取り組んでいる。市販 600 MHz NMR マグネットを使用した基礎実験を開始している。通常の NMR マグネットの場合、電流リードを経由して通電した状態ではヘリウムの蒸発量が大きく長時間に渡る通電が困難なため、電流リードに酸化物系超電導線材を使用し、クライオスタットを GM 冷凍機で冷却する再凝縮型に改造している。これにより、磁場変動を約 5 ppm 以内に抑制し、磁場安定度を平均値で約 0.0001 ppm/h を達成している。現在、金属系超電導コイルを使用しているが、600 MHz NMR マグネットの最内層コイルを酸化物系超電導コイル(Bi-2223 線材のコイル)に交換し、磁場の均一性と安定性を比較する予定である。最終的には物材機構が所有する 920 MHz-NMR マグネットの最内層コイルを酸化物系超電導コイルに置き換え、1.05 GHz(24.7 T)を目標にしている。

理化学研究所とイムラ材料開発研究所のグループは、バルク高温超電導体(Sm-Ba-Cu-O)を用いた磁石(3 T(126 MHz))による NMR 信号の確認に成功している。

最近の NMR 用磁石は、ほとんど超電導磁石を使用している。理由は磁場安定性(0.02ppm/hour 以下)の良さであり、超電導磁石以外ではこのように突出した安定性が望めないためである。高温超電導体が発見されて以来、液体窒素で動作する超電導磁石 NMR が

渴望されている。また、低温超電導の線材で得られる磁場強度は限界があり(現在は物質・材料研究機構の開発した 21.86 T(930 MHz)が最高である)、タンパク質の高次構造解析の感度の向上に必要な 25.85 T(1.1 GHz)磁石の実現には高温超電導線材が期待されている。高価な液体ヘリウムを使用することなく安価な維持費で利用できる NMR 装置や世界最高水準の研究のための高磁場 NMR 装置は高温超電導体で可能になる。

SQUID

日立製作所は九州大学と連携し、磁気微粒子で標識された検査試薬(磁気マーカ)を用い SQUID で信号を検出する、新しい方式の免疫検査システムの開発を進めている。このシステムでは、抗原(被測定物質)に磁気マーカを反応させ、続いて外部磁場を印加し磁気マーカを一方向に磁化した後、磁気マーカから発生する磁気信号を SQUID で検出する。従来の光学方式より、迅速、高感度な免疫検査が可能になると期待される。

磁気信号による免疫検査技術を確立するため、高温超電導 SQUID を使用した検出システム、磁気マーカ、及び非磁性反応容器開発を行い、1pg 以下の極微量タンパク質(IgE:免疫グロブリン E)の検出を行った。現在 2.4pg の IgE まで検出が可能であり、さらに洗浄処理を行った場合、0.3pg を検出した。

雑物が多く含まれるヒト血清中の IgE を測定し、血清中でも測定できることも確認できている。本研究の一部は経済産業省地域新生コンソーシアム研究開発事業により研究委託を受けて実施した。

豊橋技術科学大学はアドバンスフードテック、住友電工ハイテックスと共同で、高温超電導 SQUID を用いた本格的な食品内金属異物検査装置“マイクロディテクター”を開発した。これは、平成 14-16 年度文科省 都市エリア産学官連携促進事業(豊橋エリア)の助成を受けて推進されたものである。ドイツ、オーストラリアなどでも同様の研究開発が進められているが、実用機の開発は世界初である。超高感度の SQUID センサを用いる方式では被検査物を磁石で磁化し、その残留磁化を計測するという非常にシンプルな方法である。

■情報・通信

SFQ (単一磁束量子) 回路

SFQ 回路は超高速応答速度と極低消費電力を同時に実現できる回路であり、スイッチング時間は数 ps、消費電力は、 $1\mu\text{W}$ (論理ゲート当たり)と想定されている。このため、現在の半導体回路より数十倍速い 100 GHz で動作した場合でもゲート当たり 0.1W 程度の電力しか消費せず、発熱を殆ど生じないことから、情報処理に革命的な進歩をもたらす超高速かつ大規模な回路を実現する技術として期待されている。LTS では Nb 系で現在 JJ 素子として 10 万接合を達成している。一方、HTS では高集積化が難しく 200 接合を達成

した段階である。

「低消費電力型超電導ネットワークデバイスの開発の研究」として NEDO の委託により実施したものの中で、超電導工学研究所は、9 層の Nb 層の積層が可能な超電導デジタル集積回路(LSI)製造プロセスを開発した。既存の NEC の 標準プロセスをもとに開発された上記プロセスは、最先端の微細化技術なしに 100 GHz 以上の超高速動作が可能であり、またゲートあたり $1\mu\text{W}$ 以下の低消費電力を実現できる可能性をも合わせ持つ。ジョセフソン接合の臨界電流密度を従来の 4 倍の 10 kA/cm^2 に高め、素子動作の高速化を図っている。同時に、当該製造プロセスは、10 万接合規模の LSI を想定しており、接合特性のばらつきは 2%以下に抑えている。

同研究所では、また、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 系薄膜を用いた SFQ 回路の開発を進め、SFQ 回路の開発の中で超電導接合の臨界電流密度(J_c)を解析し、 J_c の均一化可能なレイアウトを考案した。その結果、4.2 K で 360 GHz、40 K 近い温度で 110 GHz の高速分周動作を実現できた。

超電導工学研究所では、さらに、液体ヘリウム温度($\sim 4\text{ K}$)で動作する超電導 SFQ(単一磁束量子)回路と室温環境にある半導体機器との間で、多数(32 本)の高速信号(10 Gbps)をやり取りできる装置を世界に先駆けて開発した。ニオブを用いた低温 SFQ 回路は、数十 GHz 以上のクロックで動作する LSI を実現できる技術として期待されているが、SFQ 回路が動作するためには $\sim 4\text{ K}$ の極低温環境が必要であり、半導体の情報通信機器と簡単に組み合わせ使用出来る様に、室温で接続できる形に装置化することが望まれていた。

SFQ 回路は、現在の半導体回路より数十倍速い 100 GHz で動作した場合でもゲート当たり 0.1W 程度の電力しか消費せず、発熱を殆ど生じないことから、情報処理に革命的な進歩をもたらす超高速かつ大規模な回路を実現する技術として期待されている。このため超電導工学研究所では、ネットワークルータ用スイッチをターゲットとした SFQ 回路の開発を進めており、これまでに 4×4 (4 入力、4 出力)SFQ スwitchの開発や、その制御回路である SFQ スwitchスケジューラが半導体スitchの約 100 倍にあたる 40 GHz で動作することの実証等を行っている。このような装置の開発は世界で初めての試みであり、この成果により SFQ 回路を容易に使える条件が整い、ネットワークルータ用スitchなどへの応用に向けた開発が加速されるものと期待される。超電導工学研究所は、NEDO 低消費電力型超電導ネットワークデバイス開発プロジェクトの一環として単一磁束量子(SFQ)回路を用いた超高速サンプラシステムを開発した。高温超電導デバイスは小型冷凍機での冷却が可能でシステム全体を小型化できることから近い将来の実用的な小規模システム実現への期待が高い。今回、高温超電導サンプラチップを搭載した小型の冷却システムと計測制御システムを含む全システムをポータブルなデスクトップサイズで実現した。このシステムを用いてプロジェクトの最終目標であった 50 GHz の外部信号をクリアに観測することに成功した。

名古屋大学と横浜国立大学は、SFQ 回路を用いた高性能マイクロプロセッサを開発し、

演算性能を従来の 10 倍に向上させることに成功した。開発したマイクロプロセッサは、最高 25GHz という高いクロック周波数で動作しながら、消費電力は 3.4 mW と極めて低い。1400MOPS(MOPS は 1 秒間に 10^6 回の演算を行う能力)のピーク性能を持ち、1 W あたりの処理能力は、 4.1×10^5 MOPS と半導体に比べて 3 桁程度優れた性能を持つ。本マイクロプロセッサは、約 1 万個のジョセフソン素子で構成され、世界最大の SFQ マイクロプロセッサである。本成果により、次世代のスーパーコンピュータの性能を飛躍的に高める新しい技術に向けて、大きな進歩が得られた。

海外では、ドイツのアウグスブルク大と米国スタンフォード大の科学者チームが強磁性材料を使用する新型の超電導メモリー用プロトタイプチップを作製した。従来のコンピュータに比較して格段の改良を約束するものである。試作したメモリーチップは幾つかの Nb ジョセフソン接合列のパターンを含んでいる。

受動素子（フィルター）

HTS 薄膜を使ったフィルター(受動素子)が米国で携帯電話基地局用として実用化され、7000 基以上が導入されている。日本国内では超電導フィルタシステムについて、実用化例はあまり聞かれないが、東芝が気象庁、NHK と 5 GHz 帯気象レーダーシステムの狭帯域化のための共同研究を実施し、富士通等が開発を行っている。東芝では、5 GHz 帯無線 LAN の周波数帯域拡大を想定し、5 GHz 帯気象レーダーシステムの狭帯域化のための研究を進めている。今回開発した技術は、受信用の狭帯域超電導フィルタで、これを使用することにより、狭帯域化された信号を高密度に周波数軸上に配置した場合にも、目的の信号のみを混信なく受信することが可能となる。従来金属導体と比較して高周波領域でも 1/100 以下の低損失が期待でき、従来 4 倍の信号密度(2.5MHz 間隔)でシステム運用したときでも、目的とする信号のみを分離し、隣接混信波を 30dB 以上抑制することが可能である。現在、この受信フィルタ開発と並行して、送信側にも適用可能な kW オーダーの高耐電力特性を持つ送信用狭帯域フィルタ技術の開発も進めている。

海外では、ドイツでは Cryoelectra 社や、デルフト工科大学の Kavli ナノサイエンス研究所と SRON オランダ宇宙研究所の研究者達は、THz 周波数帯の宇宙線を検出するために超電導ヘテロダイン・ボロメータを開発し、それを用いて 1.5 THz 以上の周波数を検出している。

現在中国市場が世界のホットな関心となっており、清華大学のグループが HTS バンドパスフィルタの実証実験を行っている。China Unicom と共同で、携帯電話基地局に HTS バンドパスフィルタを導入し、現在 5 基の基地局が稼働している。ここで用いられているシステムは、830 MHz、CDMA 方式用である。このフィルタシステムは、約 20 cm×50 cm×60 cm のケースの中に納められている。この中に 6 個の HTS フィルタを冷やす冷凍機系、増幅器、温度調節器などが配置されている小型のスターリング型パルス管冷凍機で HTS フィルタ、低温アンプを冷却している。動作温度 70 K である)。HTS フィルタがもし稼働

しなくなった場合は、自動的に通常のセラミックフィルタに移動する機能がある。そのために、通常の基地局よりも多くのケーブルがアンテナに接続しているのである。したがって、万が一の場合も補償できる。1 年半無事故で HTS フィルタを使用しているとのことである。

一方、大学においても単独で曹教授のグループは基地局に使用する HTS フィルタシステムの試運転、フィルタのチューニング評価、小型の低ノイズ増幅器の作製等、ほとんど企業と同じ内容の研究を行っている。また 2006 年秋に、曹教授の技術を生かしたベンチャー企業・綜藝超導科学有限公司を開設した。まだスタッフは 5~6 名と少ないが、クリーンルームも備えた近代的な企業であり、今後の進展が期待できる。

韓国ではベンチャー企業 RFtron が超電導フィルタシステムを手がけ、実用機はないがその技術は高い。

■冷凍・冷却分野

パルス管式冷凍機は 300kW 級、また、60K の温度レベルで作動するタービン式 2kW 級冷凍機がプロトタイプ段階にある。例えば、2006 年度に実施された CERN の LHD 第 10 サイクル実験で、超電導ヘリカルコイルの冷却安定性を向上させている。閉じ込め磁場の強度を増加するために、温度 3K のサブクールヘリウムを発生するサブクールユニットを追加する改造を実施した。

プラズマ実験では、内部拡散障壁 (IDB) による超高密度プラズマ生成の最適化、プラズマの磁場に対する圧力比の更新、水素プラズマのイオン温度の更新などを目標として開発した装置「広帯域低温サブシステム」は、別置きのコンプレッサが必要ではあるが、冷凍機込みで 36×36×90 cm のコンパクトなサイズに収まっている。

SFQ 回路に入出力を行う装置の最も重要なパーツは、複数の SFQ チップを搭載した超電導マルチチップモジュール(MCM)に 32 本の 10 Gbps 電気ケーブルを用いてデータの入出力を行うプローブの冷却システムである。

高温超電導サンプラーの実用化を進めるためには、冷却システムを含めて全体のシステムをポータブルなサイズにすることが必要である。そのために開発された冷却システムでは、信号ラインやサンプラーチップを実装する高周波モジュールの材料や形状などを適切に設計することで熱流入と熱容量を最小限に抑え、小型の一段スターリングタイプのクライオクーラー(冷却能力: 80K で 1 W 以上、消費電力: 60 W)を採用、起動後 60 分以内で 45 K の冷却に成功している。高周波モジュールは初期バージョンでは 100 g 以上あったが最終バージョンでは約 25 g と軽量化され、このサンプラーモジュールを組み込んだ冷却システムは、140 mm(幅)×150 mm(高さ)× 200mm(奥行き)で重量 4 kg 以下と小型軽量化が実現された。

(2) プロジェクト成果からの技術的な広がり具合

ここでは、これまでの超電導研究開発の成果により直接的に生み出された技術が、関連技術分野に技術的インパクトを与えたか、派生技術にはどのようなものがあり、どのように利用されているかについてまとめた。

①超電導材料分野

■エネルギー・電力分野

線材技術

[実用化への進展度合 HTS : 製品化段階]

電力ケーブルや SMES へ提供される線材は Bi 系の開発が先行した。その過程で、「加圧焼成技術」を確立することにより、いわゆる「魔の川」を乗り越えることができた。

住友電工では、Bi2223 線材の性能向上を目指したプロセスとして加圧焼結法の適用を検討し、2003 年に成功することができた。このプロセスでは線材の焼結工程にガス媒体による加圧焼結法を適用することで超電導フィラメントがほぼ 100%に達して、高密度で異相が減少することにより I_c が約 30%向上し、耐引張応力特性も 50%以上向上した。住友電工では長尺線材へ適用可能な大型設備の開発も並行して進めた。

一方、Y 系は開発が難航したが、高性能の Y 系超電導線の実現には、結晶が規則正しく線材の長さ方向に揃っていることが必要であり、そのため超電導層の下層にある中間層の結晶を規則正しく並べる IBAD 法がフジクラで 1991 年に開発された。将来低コストの線材を実現するためには、IBAD 法中間層の低コスト化が大きく寄与することから、高速成膜法の開発が必要である。新しい中間層構造の採用により従来 3~5m/H であった成膜速度を 5 倍以上に大幅に高速化を可能とする中間層が開発された。

■産業・輸送分野

磁気分離装置

[実用化への進展度合 HTS : 製品化段階]

大阪大学は NEDO 助成を受けることにより水溶液中の浮遊性物質や可溶性物質に対する担磁プロセスを開発し、磁気分離システムと組み合わせることで実用レベルの廃水処理可能なシステムの開発研究を行ってきた。バルク超電導磁石を用いて、小型で可搬型の磁気分離の可能性を確認している。磁気分離法は、溶液中から汚染物や有用物質を、磁場を利用して分離・回収するプロセスである。対象物質が強磁性体でない場合、通常の永久磁石を利用して分離することは困難である。大阪大学は、常磁性や反磁性物質に強磁性粒子を付着（担磁）させて超電導磁石を用いて分離・回収する経済的に可能な技術を開発した。油滴が水に分散しているエマルジョンに強磁性粒子に担磁する実験を行った。バルク超電導磁石(GdBaCuO)の上に設置したガラス容器内でエマルジョンが凝集し約 1 分程度で急速に

沈降させることができた。バルク超電導磁石の磁力が磁石表面から数 cm 離れた位置まで働くことが分かった。この技術を製紙排水処理設備に応用し実用化している。アジアやヨーロッパ地域でも注目されている。2005 年 8 月にスタートし、MS エンジニアリングが設立され事業化した。1 年間の工場内運転終了後に、製糸工場に譲り渡され運転を実施した。

また、日立製作所は ISTECH とともに NEDO からの助成を得、「高温超電導バルク体を適用した環境水浄化装置用超電導膜磁気分離機の実用化技術開発」を実施した。これは高温超電導バルク体磁石および回転ろ過膜を組み合わせた高濃度汚泥回収型の超電導膜磁気分離機(HTS バルク磁石とろ過膜を組み合わせたためこう名づけられた)である。試作機の処理容量は 100m³/日であった。

これと同様の動作原理の装置を用いて、九州電力は「湖沼・ダムのアオコ除去用高温超電導体利用の磁気分離処理装置の開発」を実施している。

単結晶の引き上げ装置

[実用化への進展度合 LTS：上市段階、HTS：製品化段階]

LTS に関しては、超電導コイルを用いた大径シリコン結晶の引き上げ装置がすでに実用化されている。1990 年代の初頭に 8 インチ・シリコン引き上げ用超電導電磁石が開発され、1990 年代中頃から製造ラインに適用された。12 インチ・シリコン引き上げ用超電導電磁石は 1990 年代の後半に開発され、2000 年以降から製造ラインへの適用が始まった。当初の電磁石は、液体ヘリウムの浸漬冷却方式であったが冷凍機搭載の伝導冷却型電磁石や液体ヘリウムを再凝縮する GM-JT 冷凍機付の電磁石が開発されるなどの進展があった。

HTS に関しては、2001 年に東芝、住友重工、信越半導体の 3 社が経済産業省の省エネ補助金により、Bi 系高温超電導線を用いた単結晶引き上げ装置用高温超電導マグネットを開発している。この高温超電導マグネットの特徴は、運転温度を 20K にすることで、クエンチが起こらず、定格磁場まで 1 分で励磁できること、ランニングコストを従来の超電導マグネットの 1/3 にしたことである。

■診断・医療分野

NMR・MRI

[実用化への進展度合 HTS：技術開発段階]

将来の高磁場化に備え HTS の基礎研究が行われている。最終的には物材機構が所有する 920 MHz の NMR マグネットの最内層コイルを酸化物系超電導コイルに置き換え、1.05 GHz(24.7 T)を目標にしている。開発したスペクトロメータとしての有効性は生体高分子中の ¹⁷O 計測によって実証する予定である。バルク体の大きさを外径 36 mm から外径 60 mm に大型化することにより、スペクトルの分解能を 1445 ppm から 4.85 ppm に向上させており、分析用 NMR の次世代磁石として期待されている。

SQUID

[実用化への進展度合 HTS：製品化段階]

超高感度の磁気センサーである SQUID を応用した心磁計、脳磁計、免疫診断装置の開発が行われており、さらに、超電導マグネットを用いた磁気誘導カテーテル、磁気誘導薬物配送についての研究も基礎段階であるが行われている。

食肉内金属異物検査装置用 SQUID の実用機開発における技術課題はシールド性能の改善である。これが不十分であると、環境からの磁気ノイズや携帯電話などの電磁波の影響を受けやすく、誤動作の原因となる。試作の段階では磁気シールドは 3 層構造で形状は逆 T 型であったが、最終的には試作段階で必要とされていた 3 層のシールド層数が、実は 2 層で十分であることがわかり、さらにシールドの長さも短くでき、設置スペースやコストの低減に結びついた。

その他の応用

[実用化への進展度合 HTS：技術開発段階]

超電導コイルを用いた医療用の重イオン粒子加速器、その他の超電導応用の診断・医療装置の開発への関心が高い。

適量の薬品を患部へ正確に搬送するシステム(DDS :Drug Delivery System)は、投薬量や副作用の軽減化などに対して、高い効果が期待できる。また、外科的アプローチの困難な部位への治療が可能であり、難治性疾患に対する有効な治療法になり得る。そこで磁気力による粒子制御の技術を応用することに着目し、マグネタイト等の強磁性微粒子で磁気種付けした薬剤を用い(以後、磁性薬剤)、体外に配置した超電導磁石の磁気牽引力を利用し、血管に投入した担磁薬剤を患部まで到達させる能動的標的指向型磁気標的 DDS(MDDS)を提案している。

②超電導素子分野

■情報・通信分野

ジョセフソン電圧標準素子

[実用化への進展度合 LTS：製品化段階、HTS：製品化段階]

産業技術総合研究所では、物理標準（国家標準）を作っており、その一環として、電圧標準がある。1990 年から、電圧（V：ボルト）を、ジョセフソン効果を利用して決定している。

ジョセフソン効果（Josephson Effect）は、超伝導金属間におけるトンネル効果の一つである。1962 年に、当時ケンブリッジ大学の大学院生だったブライアン・ジョセフソンによって導かれた。厚さ 2nm 程度の極めて薄い絶縁体の層を挟んで弱く結合した 2 つの超伝導

体の間に、超伝導電子対のトンネル効果によって、絶縁層を通して電流が流れる現象である。これを応用した素子はジョセフソン素子と呼ばれる。

LTS に関しては、2008 年産業技術総合研究所は、商用電源さえあれば、液体ヘリウムを用いることなく 10 V の基準電圧が発生可能なデスクトップ型量子化電圧発生装置の開発に世界で初めて成功した。10 V の量子化電圧を、簡単な操作によって基準電圧として発生させることができる装置である。具体的には、約 30 万個の窒化ニオブジョセフソン素子 (NbN/TiNx/NbN ジョセフソン素子) を集積したアレーチップ 2 個を直列に接続し (“デュアルチップ” と呼ぶ)、これによって 10 V の量子化電圧の発生に成功した。この窒化ニオブジョセフソン素子は、ヘリウムガスの液化温度より高い温度域 (10 K) での動作が可能なため、従来型のジョセフソン素子では不可欠であった液体ヘリウムを必要とせず、小型の冷凍機で簡単に量子化電圧を発生できる特徴がある。今回開発したデスクトップ型量子化電圧発生装置は、国家標準と同等の電圧安定度を有することから、現在電圧標準として産業界に広く普及しているツェナーダイオード電圧発生装置に代わって利用されることが期待される。

HTS に関しては、産業技術総合研究所では電圧標準素子 (日本標準) として HTS を使ったジョセフソン電圧標準素子を採用している。ジョセフソン素子に外部から周波数 f の電波を照射しながら直流的な電流電圧特性を測定するとこれに比例した定電圧ステップが観測される。原子時計で精度よく校正できるので、電流電圧特性に現れるステップは高精度の電圧目盛りとみなすことができる。

■エネルギー・電力分野

エネルギーシステムは、情報通信システムと並んで非常に複雑なシステムである。特に、電力システムは個々には予測不可能な需要の変動に対して瞬時に供給が対応しなければならない、すなわち、電力供給と電力消費が瞬時でバランスを取らなければならない。供給と消費のバランスが崩れると広域の大停電という事態にもなる。このような大規模で複雑な電力システムにおいて、近年の情報化社会の進展、CO₂ 削減など環境問題が深刻化している中、それを取り巻く種々困難な課題が顕在化してきている。すなわち、情報通信量の急速な増大に伴う大都市地区での電力需要の大幅増と、電力設備の増強のための用地確保、コスト増の深刻化、ペーパーレス、電子マネー、e-コマースなどの IT 技術の日常生活への浸透により、IT 機器を動かすための電力の高品質化・高信頼度化に対する要求は増えている。さらに、地球温暖化対策のための分散電源、自然エネルギー電源の導入量の増加は電力システム運用への不安定要因にもなる。これらの問題の対応にはこれまでの技術の延長では困難である。その解決手段として超伝導技術に対する期待が大きい。超伝導技術を電力機器に応用することにより、機器の高効率化、軽量・コンパクト化、高容量高密度化、さら

には、従来にない新機能を持つ機器の実現が可能となる。特に液体窒素温度領域で超電導になる高温超電導体は、冷却に対する負担が少なく、超電導応用機器の本格的な実用化に貢献できる。米国では電力業界の規制緩和が広域停電の頻発という事態になったことを受け、エネルギー省の送配電局が米国の将来の送電配電の長期ビジョン「Grid2030」を発表した。この中で、超電導技術は重要技術として位置づけられており、超電導応用機器開発に関する開発費の政府半額補助プロジェクト（SPI）では、ケーブル、限流器、回転機などの機器開発が戦略的に行われている。日本でも、超電導技術の電力機器への応用の重要性は早くから認識され、NEDO のプロジェクトを主体としてここ 20 年以上にわたって超電導電力機器の開発が続けられてきている。また、欧州、中国、韓国でも継続的に国および公的な支援の下に種々の研究開発が行われている。特にヨーロッパでは一時、超電導機器開発が停滞気味であったが、CO₂ 削減、また、エネルギーリスクの回避のため、自然エネルギーの一層の利用を目指し、風力、水力発電機の超電導化に大きな関心が持たれるようになり、具体的な機器開発プロジェクトが行われている。例えば、SMES に関しては、LTS である Nb 系の開発が先行し落雷時の瞬低対策用として 10MJ 規模の設備が実用化されている。系統安定用 SMES はより高度の制御が必要であり、20MJ クラスの開発を実施中である。これより大きな設備についてはコストダウンが課題となっている。HTS としては高磁場下での性能が良い Y 系 SMES が開発中である。信頼性の向上も課題で今後実施される系統連系試験を通じての技術力向上が必要である。フライホイールは電車の加速用として Nb 系の 200MJ 規模の装置が開発されており、今後は信頼性の向上を目指している。また、電力貯蔵用には、Y 系で 40MJ 級のプロトタイプ段階の開発が行われた。

エネルギー・電力分野の電力ケーブルに関しては、Bi 系の線材を使用した実証試験、Y 系電力ケーブルでは、現在 10m のケーブルで機能試験が実施中されている。電力ケーブル導入では、コストと信頼性向上が課題であるが、コストは Y 系ケーブルのコストダウンで、信頼性向上では接続部の絶縁破壊対策に取り組んでいる。1988 年にわが国で発見されたビスマス(Bi)系材料は線材への成形性の良さもあり、これまでの超電導技術基盤などにより線材開発が順調に進み、現在商品化されて、海外プロジェクトの電力ケーブルなどへ提供されている。Bi 系材料の発見の前年（1987 年）に米国で発見されたイットリウム（Y）系材料は加工性の難しさがあったが、イオンビームを使った IBAD 法による線材成形に成功し、開発が加速された。将来のコスト低減に向けて、高磁場下でも性能が劣化しないメリットを SMES などに活かすことが期待されている。限流器は電力系統の事故時に生じる過大な事故電流を瞬時に制御するために使われる。Y 系材料を使った限流器も現在フィールド試験段階にある。変圧器については鉄道用変圧器の開発が進んでおり、Bi 系で 3MVA の試作研究が実施されている。

■産業・輸送分野

産業・輸送分野では、超電導を利用した磁気浮上鉄道（MAGLEV）は、将来の高速輸送

手段として重要な役割を果たすものと期待されている。超電導磁気浮上は米国で発明されたが、日本で独自に発展させてきた技術である。2025 年度までに世界最速の鉄道となるリニアモーターカーの導入計画が発表されており、今後の開発が期待される。また、鉄道関係の超電導利用としては、日本では電車の車載用超電導主変圧器、電力回生装置としてのフライホイールの開発など、省エネ、CO₂ 削減に貢献する技術開発も行われている。また、ドイツでも車載用超電導主変圧器の開発が行われている。海上輸送では、操船性、推進効率に優れたポッド推進船への適用を目指した超電導モータの開発が米欧日ですすめられている。従来の船舶の駆動では、ディーゼルエンジンにクラッチやギアを介してスクリューを回していたが、そのときのエネルギー損失は大きい。推進船はディーゼルやガス・タービンなどの発電機で電気を起こし、電気モータでスクリューを回し推進するものであり、超電導モータを採用することが試みられている。また、船用の超電導発電機の開発も米欧で進められており、「全超電導電気推進システム」が採用されれば、これまで推進システムを小型化・軽量化することができ、省エネ、CO₂ 削減に効果があると期待されている。

その他、産業用回転機、SQUID を用いた非破壊検査装置、異物混入検出装置、超電導コイルを用いた金属材料誘導加熱装置、さらには磁気分離排水、污水处理装置など、超電導応用産業機器、装置の開発が主として日欧で進められている。また、超電導コイルを用いた大径シリコン結晶の引き上げ装置は日本においてはすでに実用化されている。

九州工業大学と住友電気工業は、Bi-2223 超電導テープを用いた超電導マグネットを試作し、液体窒素中(77 K)で 50 A 通電時に 0.5 T を発生できることを確認している。大きさは外径 132 mm、高さ 120 mm であり、ボア径は 52 mm である。また重さは 3.5 kg である。この超電導マグネットはすでに量産されている DI-BISCCO を用いており、巻線技術も特別なことは行っていないので、安価で地方大学レベルの予算で実現できている点でも注目される。

産業用モータ・輸送用モータ分野では、磁気浮上列車用に Nb 系のマグネットが実証試験段階にあり、船舶推進用には 400kW 級 Bi 系モータが試作段階にある。自動車用には 60kW 級 Bi 系モータが開発中である。設計・製作に際しては、製作の各段階および完成後の使用条件において超電導線に加わる歪を想定し、I_c に悪影響を及ぼさない大きさとなるような構造設計と製作方法上の工夫をこらしている。この高温超電導磁石の電流リードとしては低温側に YBCO バルク高温超電導電流リード、高温側に超音波モータ駆動の着脱式電流リードを設置し侵入熱の軽減を図っている。IHI は、400kW 級のモータシステム年間販売台数、市場規模については、初期の 400 kW クラスは内航船(国内の港から国内の港を運航する船)で、年間最大で 20 セット(モータとしては 40 個)程度と見ているが、大型化を含めれば市場規模としては国内外、陸上用の市場も視野に入り相当数が出回ると期待している。産学グループは今後、2008 年内に 400 kW クラス超電導モータの市場投入を目指し、また 2,500 kW 大型化への開発も継続して行き、船用機器市場における省エネ化への期待に応えて行くことにしている。電気自動車への超電導モータへの取り組みでは、カーブでの左右

の車輪の経路差を調整するギアが不要なダイレクトドライブモータ車の実現が可能になるという、実質的なメリットがある。今後の展開として、リチウムバッテリー使用やディーゼルエンジンとのハイブリッドといった電源面の改良が挙げられ、さらに冷媒にも併用できる液体水素式の燃料電池も有望である。超電導モータは通常の直流モータの界磁コイルを超電導コイルに置き換えただけの構造であることから、今後は目標性能として直流モータのトルクが 130 Nm、最高出力が 62 kW で本来の軽量、コンパクトといった特長を活かした超電導モータの開発も進むと期待される。京都大学のグループは、これまで非線形等価回路解析に基づく基礎的な検討を行い、超電導誘導モータの詳細かつ定量的な特性予測を行っているが、それらの知見は超電導モータの改良・改善に寄与すると思われる。TWMC 社は、バルク超電導材料コストは永久磁石コストと競合可能であり、どの型より遥かに高い磁界を発生できることを示した。実証したモーターは、3 馬力のモーターハウジングとステーター巻線を用いて開発されたものである。Bi 系線材等 HTS 線から成るモーターコイルもまた高磁界を発生するが、TWMC 社はこの HTS バルクのコストは数分の一と予想している。同社は又、モーターマグネットの磁界強度が増加するに従ってトルクを発生するのに必要な電流は減少し、従って損失は減少するという原理に基づいて、もっと高い効率を期待している。バルクでは、磁束を捕捉して 77 K で 2.1 T の磁界を発生するが、この値は永久磁石を用いて達成出来る磁界の 7 倍である。YBCO バルクは、TWMC 社がヒューストン大の電気力学センターとテキサス大のビーム粒子動力学研究所と共同して開発したものである。TECO 社は、温度を 77 K 付近で温度制御を行い、YBCO バルク材料が in-situ で磁化される技術開発を行った。韓国の斗山重工業モータでは、3 相 3.3 kV の電機子を持つ 150 A-DC ステーターを備え、5000m の Bi-HTS 線材が使われている。CryoMECH 社から供給された極低温冷凍機で冷却されており、ビスマス系 HTS 線は American Superconductor 社から供給されている。1 MW モータは、2008 年まで長期安定性試験を続ける予定である。さらに斗山重工は、2010 年か 2011 年に軍用並びに商業市場向けにモータの製造を開始する計画である。1 MW モータは工業的応用を目標にしており、5 MW モータ海軍の船舶用を目指している。

■診断・医療分野

診断・医療分野では、医療診断機器として MRI があるが、それには強力な磁場を発生させる超電導マグネットが使用され、頭部や人体内の異常部位を精密に観察できるので、癌や脳疾患などの診断装置として威力を発揮している。現在、すでに国内の病院だけでも、5000 台以上の MRI が設置されている。MRI の技術動向としては、脳機能を観察するフアンクショナル MRI (fMRI) が世界的に普及している。そのため高磁場マグネットを持つシステムの販売が増加している。最近の世界での MRI の販売実績でも、1990 年台で主流であった 0.5T マグネットが、600 台／年とここ数年ほぼ横這いであるのに対して、1.5T 機が 2200 台／年と 1996 年より直線的に増大し、fMRI の機能をもつ 3T 機が 200 台／年

と 1999 年より直線的に増大している。これらの市場に出回っている MRI は低温超電導を用いているのに対して、低コスト化を目指した MgB_2 コイルの適用、オープンアクセスができる装置に HTS コイルを適用するなどの開発も世界では行われている。

また、超高感度の磁気センサーである SQUID を応用した心磁計、脳磁計、免疫診断装置の開発が行われており、さらに、超電導マグネットを用いた磁気誘導カテーテル、磁気誘導薬物配送についての研究も基礎段階であるが行われている。また、超電導コイルを用いた医療用の重イオン粒子加速器、その他の超電導応用の診断・医療装置の開発への関心が高い。NMR・MRI 関連では、NMR を利用した MRI による診断装置用に LTS 線材の電磁石が多く施設に設置されている。この分野ではコストの制約が比較的少ないこともあり、LTS が有利であるが、将来の高磁場化に備え HTS の基礎研究が行われている。開発したスペクトロメータとしての有効性は生体高分子中の ^{17}O 計測によって実証する予定である。バルク体の大きさを外径 36 mm から外径 60 mm に大型化することにより、スペクトルの分解能を 1445 ppm から 4.85 ppm に向上させており、分析用 NMR の次世代磁石として期待されている。

高分解能 NMR の仕様は磁場の安定性と磁場の均一性(0.5 ppm/mm)で、バルク磁石では求められたことのなかった高精度の磁場の均一性が求められる。分析用の高分解 NMR は、例えば 4.7T(200 MHz)の装置でも試料空間が $2.35 \mu\text{T}$ 以内という微弱な磁場勾配にしなければならない。均一性を出すためにバルク体の表面磁場を使うのではなく、バルク試料に穴をあけてその穴の中に均一な磁場空間を求めたことと、NMR 用の超電導磁石を用いた静磁場着磁の技術が鍵であった。オレゴン健康・科学大学(OHSU)では最近、先進的 MRI システムを取り入れている。既に設置されている設備に第 2 の 3 T 機器を追加し、現在新しい大型 7 T システムを設置中であり、12 T の動物研究システムの導入も計画中である。3 台の MRI 装置は OHSU キャンパスのバイオ研究棟内に収容される予定であり、3 システムは、概算 1,400 万ドルであるが、シーメンス・メディカルソリューションから供給された。最近搬入された 7 T 全身 MRI マグネットは、重さが 30 トン、長さが 360 cm の Nb-Ti 超電導線を用いている。90 cm の孔径を持つ 3.4 m 長の非シールドマグネットは、シーメンス社向けに Magnex 社により製作された。従来形式の MRI、勾配磁界運転装置、患者台はシーメンス社が供給している。当システムは高性能の勾配磁界セットを持ち、100nm より良好な解像力がある。7 T 機器は、20 インチ厚の 500 トン鉄シールドの中に、指定された位置から 2~3 mm の精度で設置している。この OHSU への設置により、米国内の 7 T システム設置数は 4 件になった。シーメンス社は、世界の潜在的市場性は 15~20 台と考えている。

食肉内金属異物検査装置用 SQUID の実用機開発における技術課題はシールド性能の改善である。これが不十分であると、環境からの磁気ノイズや携帯電話などの電磁波の影響を受けやすく、誤動作の原因となる。試作の段階では磁気シールドは 3 層構造で形状は逆 T 型であったが、最終的には試作段階で必要とされていた 3 層のシールド層数が、実は 2 層

で十分であることがわかり、さらにシールドの長さも短くでき、設置スペースやコストの低減に結びついた。開発したものはベルトコンベアを用いる方式であるが、果肉ジュースやミンチ肉など、粘度が高くストレーナによるフィルタリングが困難な食品に対応できる製品開発の要望が多くあることが、ユーザ情報からわかり、現在、その開発に取り組んでいる。

適量の薬品を患部へ正確に搬送するシステム(DDS :Drug Delivery System)は、投薬量や副作用の軽減化などに対して、高い効果が期待できる。また、外科的アプローチの困難な部位への治療が可能であり、難治性疾患に対する有効な治療法になり得る。そこで磁気力による粒子制御の技術を応用することに着目し、マグネタイト等の強磁性微粒子で磁気種付けした薬剤を用い(以後、磁性薬剤)、体外に配置した超電導磁石の磁気牽引力を利用し、血管に投入した担磁薬剤を患部まで到達させる能動的標的指向型磁気標的 DDS(MDDS)を提案している。MDDS の磁性薬剤誘導の方法として以下の手法を考えている。磁性薬剤を血管内に投入し、血流にのせる。血管分岐近傍の体外に磁石を配置し、その磁気力によりその薬剤を患部に向かう流線に乗せて、望む方向に誘導を行う。これを 4~5 回 繰り返すことによって、目的患部まで誘導し集積を行うか、あるいは患部近傍の薬剤濃度を向上させる。システム実現のために、実際に標的となる患部の位置を体表面に設置した磁石から体内に約 20~50 mm の部位と想定し、将来的には 100 mm も視野に入っている。実際に HTS バルクを用いて、体内深層部 25 mm に位置する臓器内の分岐した血管モデルにブタの血液を流して強磁性粒子を誘導する実験を試みた。磁石仕様は外寸直径 45 mm、高さ 15 mm である。Z 軸上の真空容器表面での最大磁束密度は Z 軸上で 2.4 T である。ヒト循環器系の中でも直径 2 mm 平均流速 200 mm/sec 程度の動脈を模擬した。血液を流した状態で平均粒子径 100 nm の Fe_3O_4 粒子の懸濁液(濃度 0.1 mg/ml)を 4 ml 導入し、配置した HTS バルクの磁気牽引力により、分岐部で意図する方向への誘導を試みている。

加速器、核融合分野では、超電導を用いた大型直流マグネットとして加速器用マグネット、核融合用マグネットがある。加速器用ではヨーロッパの CERN の LHC は 10 年の建設期間を終えて、全ての超電導マグネットの据付を完了して、運転が始まろうとしている。また、国際協力で行われる熱核融合装置プロジェクト ITER 計画も始まった。これらは実験装置であるとはいえ、用いられる超電導導体(金属系)の量は多大で、産業規模といえるほどである。

■情報・通信分野

情報・通信分野では、10Tbps 級のハイエンドルータのスループットが比較的近い将来には必要と予測されている。現在の半導体ルータ技術の延長では、パケット処理能力と実装の限界があり実現困難と考えられている。SFQ デバイス技術は 100Gbps を超える信号処理を可能とするものであり、高速処理の特徴を本質的に持つ超電導は半導体回路の処理速度の限界をブレイクスルーする有望な技術と考えられている。日本では NEDO のプロジェ

クトでスケジューラ、クロック回路を含む 4×4 のスイッチチップが開発され 4K において 40GHz のクロック周波数で動作することが確かめられている。また、HTS 素子サンプラーを用いたサンプリングオシロスコープが開発され、50GHz の波形を観測されている。このように、超電導素子の高速性は実証されつつある。

SFQ(単一磁束量子)回路技術の海外動向は、SFQ 素子を用いた HEC(ハイエンドコンピュータ)開発の必要性和開発プロジェクト案がある。NSA 長官の命を受けて専門家による委員会メンバーが評価し、具体的な最終目標として次のような結論を得ている。

(1) 50 GHz で動作する約 100 万ゲートの SFQ マイクロプロセッサの完成

(2) 設計技術の完成

- ・ SFQ 論理セルライブラリを用いた完全な CAD 設計技術
- ・ 超電導エレクトロニクス知識のない ASIC(特定用途向け IC)設計者でも、高性能 SFQ プロセッサユニットの設計が可能な技術

(3) 高歩留まりで安定に作製することが可能な SFQ 作製施設の完成

SFQ 回路の性能を十分に引き出すには 40 Gbps 以上の入出力を行うことが重要である。電気ケーブルでは 10 Gbps までの信号伝送が可能だが、それ以上の伝送レートでは光ファイバを用いる必要がある。また、冷凍機冷却能力のほとんどは電気ケーブルからの熱流入対策として消費されている。国際超電導産業技術研究センターが NEDO の委託を受けて、ネットワークデータの行き先を高速に切り替える超電導スイッチプロトタイプシステムを開発し、このシステムを用いた LAN において複数機器間での画像転送実験に成功した。

SFQ スイッチへ入出力される信号を室温で 40 Gbps の光信号に変換し、光コネクタでネットワークに接続することもできた。LAN システムの動作実験の成功は熱侵入対策としても意義がある。

同センターでは冷凍機で冷却し、室温からの高速電気信号線を実装した超電導スイッチを、周辺機器を含めて標準の 19 インチラックにシステム化することにも成功した。このシステムと 4 台のパソコンで LAN を構成し、イーサフレームによる画像転送実験を行った。この結果、1 台のパソコンから同時に複数のパソコンに対して画像転送要求を出した場合でも、超電導スイッチの制御機能によりきちんと画像が送られることを確認した。この成果により、超電導スイッチを誰もが使用できるようになり、実用化に向けて大きく前進することができた。画像交換を行ったシステムはスケジューラと呼ばれる制御機能のついた 4 入力、4 出力(4×4)スイッチを使用しており、各入出力ポートあたり毎秒 100 億ビットのデジタル信号が伝送される経路の切り替えを、スケジューラが出力する信号で行うことができる。

別システムでは、10 Gbps の入力 4 本を SFQ の MUX 回路で 40 Gbps にスピードアップした後、SFQ の 2×2 スイッチで経路切り替えを行い、SFQ の DEMUX 回路で 10 Gbps の信号 4 本に戻して出力することに成功した

これら二つの実験から、スケジューラ付きの SFQ 4×4 スイッチが、入出力を 40 Gbps にスピードアップしても動作する見通しが得られた。この場合スイッチの処理能力は、40 Gbps が 4 入力なので、160Gbps となり、全二重通信を考えると 320 Gbps のハイエンドルータに対応する値となる。このような大容量スイッチであっても、データパスとスケジューラを合わせた消費電力は僅か 0.7 mW であった。

HTS 薄膜を使ったフィルター(受動素子)が米国で携帯電話基地局用として実用化され、7000 基以上が導入されている。能動素子であるジョゼフソン結合素子 (JJ 素子) を使った単一磁束量子 (SFQ) 論理回路は、超高速応答速度と極低消費電力が期待され、ルータなどへの適用が期待されている。SFQ 回路は超高速応答速度と極低消費電力を同時に実現できる回路であり、スイッチング時間は数 ps、消費電力は、 $1\mu\text{W}$ (論理ゲート当たり) と想定されている。LTS では Nb 系で現在 JJ 素子として 10 万接合を達成しており、HTS では高集積化が難しく 200 接合を達成した段階である。

(3) 国際競争力への影響

ここでは、これまでの超電導研究開発によって直接的に生み出された技術の成果技術や派生技術により、国際競争力がどのように強化されたかについてまとめた。

①超電導材料分野

これまでの超電導研究開発によって、わが国の高温超電導の技術レベルは向上し、特に線材作製技術は、世界で1、2位を争うレベルになった。外国企業との技術提携は特に行われていないが、共同開発は実施している。技術的な取引が行われるような市場は未だない。

超電導電力ケーブルは世界レベルに達し、Bi系では米国に電力ケーブルを販売するようになった。国内でも現在Bi系電力ケーブルの実証プロジェクトが実施されており、系統連系なしでは既に500mの実証試験を完了し、平成24年には東京電力の旭変電所に長さ250m規模のBi系電力ケーブルを設置して系統連系試験を実施する計画になっている。

Y系電力ケーブルは、その線材化の難しさから開発が難航したが、IBAD法の開発により、線材化が可能となり、現在長さ10mの電力ケーブルでの実証試験を終了し、平成24年には長さ30mの課電通電試験が計画されている。Y系電力ケーブルは大電流化とコストダウンのポテンシャルがあり、いずれはBi系電力ケーブルとの役割分担が期待されている。

また、LTS-SMES技術も世界最高レベルに達し、シャープの液晶工場でのフィールド試験では瞬低対策として性能を発揮した。現在、工場に導入され、稼動中である。Y系線材を使ったSMESは高磁場下でも性能を発揮できるため、開発実施中で2MJ級の動作試験と2GJ級のコイル設計を実施中である。

Y系線材については最近ISTECが米ロスアラモス研究所と共同で高磁場磁石に線材を入れ、48Kで60Tまで通電することを確認した。この成果を活用して77Kで5Tの磁石が製作でき、液体窒素冷却により、冷却が容易に出来、機器構造が単純なMRIへと適用することが期待されている。

わが国の超電導技術は、外国の技術政策にも影響を与えている。例えば、国際連携プロジェクトに繋がり、DOEの審査員のかたちで重点テーマの策定にも協力している。

ASC (Applied Superconductive Conference) のボードのメンバーにISTECから二人になっており、パワーデバイス関係でもわが国の大学関係者が選ばれている。

国際標準化、規格化にも寄与している。素案作りの段階から参加し、超電導関連用語、電流リードについては、IEC/TC 国際標準化への提案を終了し、長尺超電導線、SMESシステム等に関しては素案作成中である。

外国の技術政策への影響は国際的な招待講演の増大というかたちでも表れている。イニシアティブという観点では、日、米、欧の3極で刺激し合って発展している。

材料技術に関しては、インドにも技術輸出され、担当部門はインドの国プロジェクトで指導的役割を果たしている。また、イタリア(ローマ)、インド、パキスタン、中国の大学とも、交流が続いている。

②超電導素子分野

超電導素子分野では、これまでの超電導研究開発により、わが国の高温超電導の技術レベルは向上し、特に物理、材料、プロセスの分野での発展が著しい。薄膜技術も外国に影響している。低温超電導の素子技術を日本が続けていることが逆に外国の研究者に影響を与えている。

国際標準化に関しては、産業技術総合研究所の当時の研究者の仕事が評価され経済産業省から表彰されている。JJ素子の組成の評価法では国際的にも認められているがISOのレベルにはなっていない。

また、アメリカでは携帯電話の基地局用の超電導フィルタが実用化されているなど、超電導デバイスの市場は、潜在的な市場規模が大きく、早期の実用化が期待されている。基礎的な研究が各所で始まっている。

I-2. 研究開発力向上効果

(1) 知的ストックの蓄積度合

ここでは、これまでの超電導研究開発による知的ストックの蓄積度合についてまとめた。

①超電導材料分野

これまでの超電導研究開発の知的ストックが新たな成果を生み出す可能性は大である。理由は、超電導電力機器の部材であるとともに、電力系統の安定化、CO₂削減への貢献が期待できるためであり、超電導送電、限流器などへの応用が有望である。

超電導フィーバー時に発足した「超電導材料・超電導素子」プロジェクトの後継プロジェクトとして、経済産業省および NEDO のプロジェクトが成果を引き継ぐ形で継続されている。

ISTEC でプロジェクトに参加した研究者は、プロジェクト終了後でも、当該技術、派生技術の研究を継続しており、実質的には約 100 名から約 50 名と半減しているが、派遣研究員等を含めると総人員はほぼ同じである。

プロジェクト間では「超電導応用基盤技術開発 (II)」プロジェクトから「交流超電導電力機器基盤技術」プロジェクトへ Y 系線材を提供していることなど、知的ストックが活かされている。

派生技術としての知的ストック、例えば、超電導物性物理分野、および、酸化物結晶成長、作製プロセス分野の知見は超電導技術開発に大いに貢献している。超電導プロジェクト全体の成果は、経済産業省の技術戦略マップにも反映されており、今後の活用も期待できる。

基本特許としては、高温超電導材料ばかりでなく、構造、中間層、新機能、基板、単結晶等の材料特許に関するものも多く、基本的なプロセス特許になっている。線材の場合には超電導材料ばかりでなく、中間層、結晶粒の配向性の制御などが重要であり、IBAD 法も重要な特許である。

知的財産権（特許など）による収入はまだまだ少額である。取得特許は周辺特許として活用しており、活用場面も増えている。

超電導関連のデータベースの蓄積業務は産業技術総合研究所で継続されており、基礎研究の論文掲載や国際会議の開催の増加というかたちで貢献している。データベースへのアクセス数も多い。

②超電導素子分野

高温超電導素子分野では、当面は SQUID 素子と SFQ ロジック回路が有望である。半導体関連の国際学会「ISSCC 2007」では、ISTEC 等が開発した AD 変換器は世界最高

性能として採択されていることは評価される。

人材的に見ると、素子分野技術、派生技術の研究を継続している研究員数は減少しているが、関連プロジェクトで培った技術は関連分野で大いに役立っている。特に結晶成長技術、冷凍機などのプロセス技術の知的ストックは貴重である。素子冷却用冷凍機に関しては、GM、住重、岩谷、CTI などがあり各々一長一短がある。

特許出願数、登録数も多いが、出願数がゼロの分野もある。その理由は特許出願が、国際協力の疎外要因になっているケースが多いことを鑑み、意識的に出願していないケースがあるためである。過去 10 年間で見ても、MIT やスタンフォード大学、UCLA の有能な研究者の半数は同様な考え方をもち、特許出願に積極的でない傾向もある。

（２）研究開発組織の改善・技術戦略への影響

ここでは、これまでの超電導研究開発が、研究開発組織の強化・改善に対してどのように役立ったか、実施企業の技術戦略に影響を与えたかについてまとめた。

①超電導材料分野

これまでの超電導研究開発では、企業間の研究交流が極めて充実して行われた。産学官の連携強化、新たな共同研究の推進に寄与していた。

超電導ケーブルに関しては、線材開発が進んだことにより、住友電工やフジクラで組織強化が行われている。

プロジェクトの実行中、終了後に、研究機関（企業、大学など）の研究開発部門の再編成、組織改変などプラス方向に進んでいる。例えば、ISTEC 盛岡研究所の設置、材料から機器に重点をおく機器研究開発部門の設置などを行っている。

技術戦略的には、金属酸化物原料で膜をつくる技術などに、各機関は力を入れるようになった。海外研究機関との研究交流に関しては、マックスプランク研究所、アルゴンヌ研究所などとの共同研究など国際協力も行われている。

産業技術総合研究所には、強相関電子技術研究センターが設置されているが、設置に際しては、関連プロジェクトの存在の影響がかなりあったようである。

②超電導素子分野

ISTEC では SFQ ロジック回路関連で LTS 分野と HTS 分野に組織を分けて効率的な開発を実施している。

企業間の確執を超え、フォーラム、学会などにおける当該技術の研究交流基盤が整備され、充実した面もある。例えば、企業間の連携、産学間の連携、共同研究の推進などである。特に理論面では、現在でも個人的に研究を継続している人もいる。

プロジェクト終了後は、研究開発に参画した企業が開発を中止したため、研究者が減員され、予算が減少したところも多い。逆に、大学と企業間の連携の契機になったところもある。科学振興調整費のプロジェクトでは、大手電気関連企業各社間の研究者の交流に役立っている場合があった。

産業技術総合研究所での研究者はプロジェクト終了後、超電導以外の各分野に再配置されて活躍している例もある。

(3) 人材への影響

ここでは、これまでの超電導研究開発が、研究者の効率的・効果的配置や能力の向上にどのように寄与したかについてまとめた。

①超電導材料分野

高温超電導材料分野では、ISTEC の塩原所長が、米国の Superconductor Week 社の [Person of the Year 2005] を日本人で初めて受賞し、国内外の第 1 人者と評価されている。

研究成果に対する、学協会からの受賞も多い。例えば、

①米国 Superconductive Week 社の [Person of the Year 2005]

②未踏科学技術協会

③科学技術賞

④日本金属学会学術功労賞

⑤日本金属学会論文賞

など多数ある。

ISTEC の田中前所長が紫綬褒章を受章していることも、これまでの超電導研究開発によるものだといえる。

これまでの超電導研究開発への従事者の所属機関内での評価は高まっており、後継プロジェクトも立ち上がっている。超電導プロジェクト全体の遂行により、ISTEC は国内外から高く評価される機関となり、超電導研究のメッカとなっている。

ISTEC における当初プロジェクトに関連した研究者で博士号を取得した数は 114 人になっている。プロジェクトの終了後も、海外の著名な研究所との交流、交換留学は継続している。例えば、米国ロスアラモス研究所の幹部は ISTEC の客員研究員の経歴の持ち主である。超電導材料の理論分野ではイタリアとの日伊科学技術協力、マックスプランク研究所との交流などで人的交流は盛んになっている。

産業技術総合研究所での国際シンポジウムも日本で開催され、ノーベル賞受賞者など一流研究者が参加しレベルの高いものになっている。

②超電導素子分野

超電導素子の分野で NEC の研究者の業績が評価され、スタンフォード大学で IEEE のフェローになっていることなど、人材育成には十分貢献している。

超電導素子の分野での海外著名研究所との交流・交換留学等が継続されている。例えば、オランダの Twente 大学、イタリアの Naples 大学、CNR とはポスドクの交流などが行われている。

産業技術総合研究所における高温超電導体の STM 観察は、当初評価されなかったが、その結果が高温超電導体の構造そのものを表すことが分かり、米国で評価されて IBM 賞を受

賞している。それを機会に第一人者としても評価されている。産業技術総合研究所における高温超電導で育成された多くの優秀な人材は、電圧標準などの組織の要員として活躍している。特に最近では量子物理の分野で、量子コンピュータなどにも進出している。

I－3．経済効果

(1) 市場創出への寄与

ここでは、これまでの超電導研究開発による新しい市場の創造やその市場の拡大についてまとめた。

超電導製品市場のポテンシャルは高温超電導・低温超電導を併せて 2020 年に 1 兆 4,000 億円と予測されている。現時点ではほとんどが低温超電導製品である。

①超電導材料分野

■エネルギー・電力分野

SMES

[実用化への進展度合 低温超電導 (LTS) : 製品化段階、高温超電導 (HTS) : 研究段階]

2020 年には LTS、HTS 併せて SMES の市場規模は 142 億円と試算され、潜在的ポテンシャルは 4,740 億円と試算されている。

現状の蓄電池などのエネルギー貯蔵装置と比べて貯蔵効率が 80～90%と高く、エネルギーの出し入れが極めて早いのが特徴である。これが導入されると、単にエネルギーを貯蔵するだけではなく、電力系統安定化、負荷変動補償、周波数調整などの電力の安定化や品質維持などに対する効果もあることから、わが国においてもプロジェクトとして開発が進められている。一方、IT の発展によるデータセンタの設立や半導体、液晶等のハイテク産業の発展に伴い、電力の質(瞬間的な電圧の低下等)の維持や更なる安定性が求められている。ここへの SMES の適用も進められている。すでに中部電力(株)がシャープ(株)の液晶工場に SMES を設置し、落雷などによる瞬時電圧低下(瞬低)を未然に防ぐという具体例も出てきている。

電力ケーブル

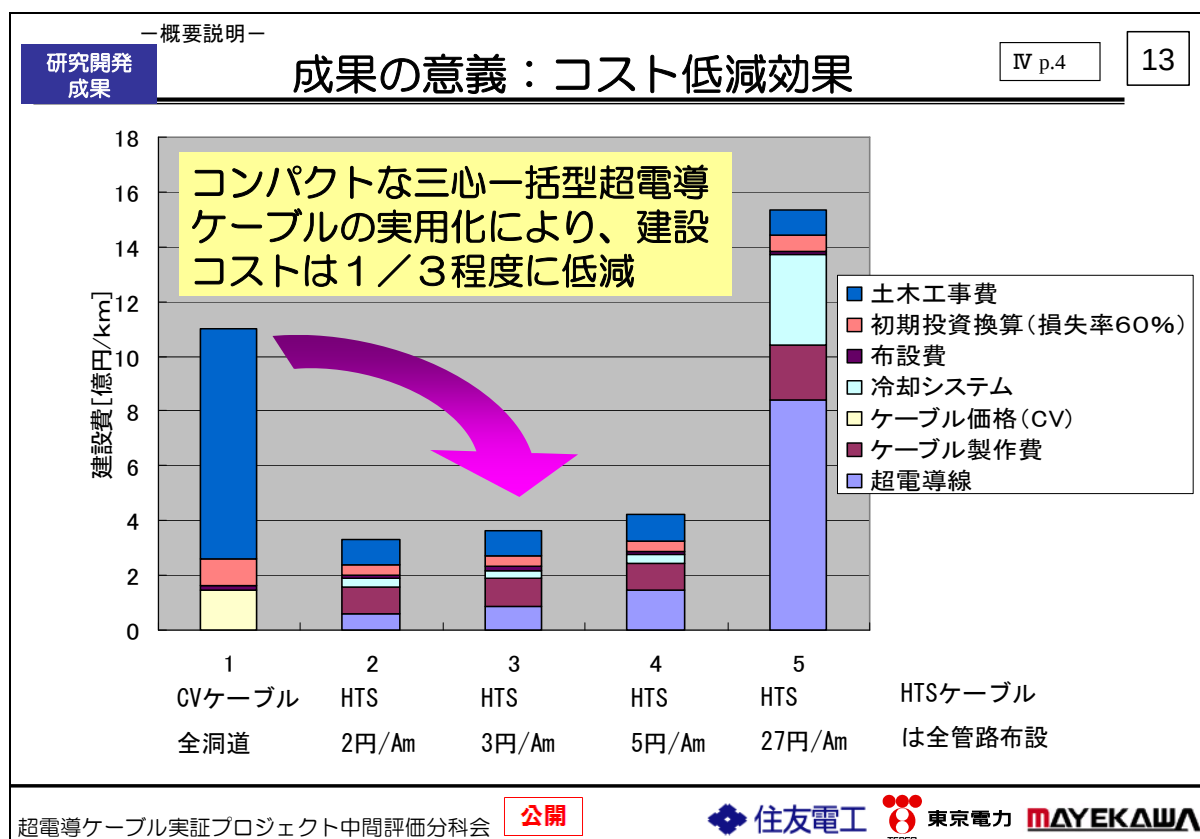
[実用化への進展度合 HTS : 製品化段階]

2020 年には 52 億円、潜在的ポテンシャルは 3,303 億円と試算されている。

超電導材料を電力ケーブルに適用しようという考えが現実味を帯びてきたのは、高温超電導体の出現があったからである。以前にも日米で低温超電導線を用いた電力ケーブルの開発は行われたが、液体ヘリウム冷却や電気絶縁等の課題のために途中で断念したという経緯がある。高温超電導体の出現により、液体窒素温度での冷却が可能になったために開発が進むようになった。現状の送電ケーブルは、発電所から需要家まで電力を送るのに 7～10%の損失があるといわれている。これを超電導化することにより大幅に損失を減らすことができ、さらに、電圧を上げずに電流を増やすだけで大容量化できるため、変電所の変圧器の数を減らすことができるという利点もあるというのが開発に拍車をかけている理由である。すでに、わが国では、東京電力(株)と住友電気工業(株)が共同で、Bi 系線材を用いた長さ 100m のケーブルを製作し、実験を成功裏に終了

している。また、古河電工と電力中央研究所が Bi 系線材を用いて 500m 長のケーブルを製作し、通電実験に成功している。平成 20 年度からスタートしているプロジェクトでは、高電圧型ケーブルは 275kV/単相/3kA30m（中間接続部有り）を製作し、高電圧設計・製造の検証を行っている。大電流型ケーブルは、66kV/三相/5kA 15m を製作し、大電流設計・製造技術の検証を行い、長期課通電性能試験(6 ヶ月)を通じて超電導ケーブルの実用性検証を行っている。今後、500m 級（500MVA 級で 3～5kA）の三相一括型 Y 系超電導ケーブルで、布設、冷却時の応力、歪などの機械特性、信頼性が十分確認されれば HTS ケーブルの市場は大きい。

電力ケーブル導入のコスト試算例を次に示す。ケース 1 は現在の CV ケーブル（架橋ポリエチレン絶縁ビニルシースケーブル：Crosslinked polyethylene PVC）のコスト、ケース 5 は現状の冷凍機を採用し、現在の Bi 系超電導線を布設した場合のコストになっている。今後の技術開発の進展や量産化によるコストダウンの余地は非常に大きいと予測されている。（プロジェクト開始時点の数値）



限流器

[実用化への進展度合 HTS：製品化段階]

市場規模は 2020 年時点で 120 億円と予測されている。

これも高温超電導体の発見以後、活発に開発が進められるようになったものの一つである。電力自由化の進展とともに多数の電源が電力網に接続され、1 箇所の電源事故でも全体の故障に繋

がある可能性がある。限流器は、電力系統で事故が起こった時に発生する事故電流を遮断する際に、事故電流を減衰させる役目を果たすもので、遮断器などの系統のスイッチ要素の定格を軽減するとともに、電力系統に導入されれば大きな系統運用効果がある。

未だ基幹電力系統の高電圧(66kV 以上)に適用できる技術レベルにないが、電力自由化により拡大している分散電源の電圧レベル(6.6kV クラス)用ではかなり開発が進んでいる。

先の調査報告書によると、2003 年度の国内総発電量は 1 兆 kWh であり、2005 年 4 月には 6,000 億 kWh の電力取引が自由化される。電力系統に連系される電圧階級として 6.6kV 系統があり、ここに 4,000 箇所以上の中規模分散電源が連系されることが予想され、この系統に限流器を導入して事故時の過電流を抑制することが期待されている。国内市場規模として年間 40～60 億円あると推測されている。国内市場のみならず、電力網が必ずしも充実していない海外での導入が実現すれば大きな市場になると期待されている。

変圧器

[実用化への進展度合 HTS : 技術開発段階]

市場規模は 2020 年時点では 269 億円と予測されている。

超電導を使うことにより効率が 0.5%程度向上するというものの他、現在ガス変圧器の冷却媒体として用いている SF₆が環境負荷に影響を与えることや油入変圧器の可燃性が懸念されること等により、環境負荷がなく不燃性の液体窒素を冷却媒体として用いることの利点が超電導変圧器開発の動機となっている。

鉄道用車載機器にはとにかく小型・軽量化が望まれる。軽量化は運行の効率向上と密接に関係するからである。鉄道用変圧器については銅線のアルミ線への代替などで今まで相当軽量化の努力がなされてきた。東海道・山陽新幹線に用いられている主変圧器の容量当たりの重量は当初 2kg/kVA 程度であったものが、現在では 0.75kg/kVA となっている。これらを超電導変圧器に代えた場合、冷凍機を含めても軽量化が可能であるということから、(財)鉄道総合技術研究所が中心となって研究開発が進められている。

現状の市場規模はそう大きくはなく、年平均 69 台、金額にして年間 6 億円程度になる。車載用の変圧器が市場に出ると、一般産業用に展開される可能性は大きく期待できる。

Y 系超電導線材を用いた 66kV 20MVA クラスの超電導変圧器実用化のために、巻線加工モデルコイルを作製して低交流損失化が更に進み、既存の 66kV クラスの変圧器の耐電圧規格を満足し、かつ二次巻線の通電量が十分であることが検証されれば市場は大きい。

■産業・輸送分野

産業用マグネット

[実用化への進展度合 LTS : 上市段階]

年間 30 億円規模の市場があるといわれている。

半導体シリコン単結晶引き上げ装置(半導体産業)への超電導マグネットの応用は、最近、シリコン・ウェハの直径が段々と大きくなるに伴い進んだ分野である。既に直径 8 インチから 12 インチに移行しつつあり、そのうち 20 インチウェハが登場すると予測されている。

半導体シリコン(以下 Si)単結晶引き上げに超電導マグネットが必要な理由は、多結晶 Si を磁場の中で溶かし、種結晶を用いて作製されるが、熔融 Si の温度が高いために酸素が溶解し、これが対流している熔融 Si に溶け込み、Si 純度が低下するのを避けるのに磁場で対流を抑制するためである。中心磁場は約 0.3 テスラとそう高くはないが、単結晶の直径が大きくなればなるほど、磁場空間が大きくなるため、結局超電導を使わざるを得なくなる。銅線で作ったマグネットでは容積、重量共に大きくなり、また消費電力も増える。そのために冷却負荷も大きくなる。過去に何台の装置がどのメーカーに納入されているかは企業秘密で把握できないが、年間 30 億円規模の市場があるといわれている。今後 20 インチウェハが市場に出回ると市場規模はさらに拡大することが予想される。

磁気分離装置

[実用化への進展度合 HTS : 製品化段階]

超電導磁気分離装置は環境分野で市場が拡大している。この装置には、超電導線をコイル状に巻いたマグネットタイプと永久磁石の機能を有する超電導バルクタイプの二つの方式がある。現状では、廃水浄化用としての市場が開拓されている。線材を用いたマグネットを磁気分離装置に適用する技術は、大阪の二葉商事(株)が大阪大学等と共同開発中で、平成 13 年度より 3 力年間 NEDO の基盤技術研究促進事業に採択され、このほど 2000 トン/日の処理実験に成功している(実用化には 5000 トン/日が必要とされている)。これは製紙工場から出る廃水処理を目的としたもので、今後食品工場、化学工場からの廃水処理用にも展開できる。

産業用、輸送用モータ、発電機

[実用化への進展度合 LTS: 製品化段階、HTS : 製品化段階]

市場規模としては、産業・電力用、船舶用を合わせると 2020 年時点で 483 億円と予測されている。

電力用回転機には電動機(モータ)と発電機とがあるが、原理的にはほとんど同じなので、基本的な技術開発はほぼ共通と見ていい。電動機の超電導化については、船舶用電動機を IHI が販売している。鉄道車両用変圧器と同様、小型・軽量化という特徴が電気推進船に適しているので市場が拓けそうである。産業用電動機の中でも出力 1,000kW 以上のものは、現時点の世界市場で、年間で 1 千億円規模である。発電機においては、現状のものよりは発電効率と発電の安定性が向上すること及びロータの短軸化と軽量化等の特徴が出せる。わが国でもプロジェクトで低温超電導を用いた出力 7 万 kW の製作・試験に成功した。

米国では、ゼネラルエレクトリック社が米国 DOE の補助を受けて Bi 系高温超電導線材を使って 10 万 kW 級の超電導発電機を開発している。その背景には、現在米国の電力会社が有する約

10,000 台の既存の発電機を今後 10 年から 15 年間にオーバーホールする必要があるため、この機会にロータ部分のみを超電導化して特長を出すという狙いがあるようである。単純に計算すると年間 1,000 台程度の市場が拓けることになる。欧州では、風力発電に軽量・小型化が可能な超電導発電機を適用しようという動きがある。

磁気浮上列車用に Nb 系のマグネットが実証試験段階にあり、船舶推進用には 400kW 級 Bi 系モータがプロトタイプ段階にある。自動車用には 60kW 級 Bi 系モータが開発中である。

■診断・医療分野

NMR・MRI

[実用化への進展度合 LTS：上市段階、HTS：技術開発段階]

市場規模は 2020 年で 346 億円、潜在的ポテンシャルは 5,483 億円と予測されている。

核磁気共鳴（NMR）現象を利用した核磁気共鳴画像法（MRI）による診断装置用に LTS 線材の電磁石が多く施設に設置されている。この分野ではコストの制約がゆるいこともあり、LTS が有利であるが、将来の高磁場化を視野に、HTS の基礎研究が行われている。

MRI は癌細胞などの早期発見に有効であり、X 線 CT では実現し得ない機能を持っており、電離放射線被爆のない安全な検査装置で、この 15 年ほどで国内でも急速に普及してきた。超電導市場の半分近くが MRI で占められている。発生磁場は 0.5T から 3T の範囲が主流である。この市場は今後も堅調に伸び、年率 8～10%の伸びが予想されている。世界で年間 2500 台程度の市場で、装置売り上げは 3500 億円程度、そのうち超電導マグネットが 900 億円程度である。しかし、低価格化が進み市場拡大という点からは新しい技術開発が必要である。既に設置されている病院等では買い替えという需要が期待されるが、新規市場を開拓するには、使い易さの改良、運転コストの低減等の技術開発が必要である。それにより、地方の病院や発展途上国への市場が拓けることが期待される。高温酸化物超電導線材（主に Y 系線材）の実用化が進めば冷凍機の運転コストも低減し、クエンチの心配もなくなるので市場が格段に大きくなることが期待される。

SQUID 応用製品

[実用化への進展度合 LTS：上市段階、HTS：製品化段階]

市場規模は 2020 年時点で、63 億円、潜在的ポテンシャルは 635 億円と予測されている。

心磁計は最近発売された超電導を用いた診断装置の一つであり、今後市場が期待される。人体から出る微弱な電流を調べる心電計とは異なり、心磁計は微弱な電流が生ずる極微弱な磁場を測定し、心臓の状態等を心電計よりも正確に測定できる。心臓から出る磁場は、地磁気の約百万分の一の微弱なものであるため、その測定には、超高感度磁気センサ SQUID（超電導量子干渉デバイス）が活用されている。虚血部位や不整脈信号源の高精度な測定が非侵襲で可能となり、心電図では分からなかった心臓の不整脈も早期に発見できる。装置は地磁気の影響を避けるための磁気シールド等が必要となるため、現状では 1 億円程度と高価であり、限られた病院にしか導入でき

ないが、これも低価格化が進めば市場が拓けると期待されている。

人間の脳が活動するときには非常に小さな電気や磁気を発生する。この磁気を測定する検査が脳磁計(MEG)である。これを用いれば従来脳波で見つけられなかった異常を見つけれられる可能性がある。また、脳波で電気を見るよりも脳磁計で磁気を見た方がより正確な場合がある。例えば、てんかんの患者では脳の中のでんかん源が正確にわかる可能性も高く、また脳外科手術を受ける患者では手術前に脳の機能を正確に評価しておくことができるので、手術をより安全に受けることができる。

②超電導素子分野

■情報・通信分野

SFQ 回路 (単一磁束量子 : Single Flux Quantum)

[実用化への進展度合 LTS : 製品化段階、HTS : 技術開発段階]

市場規模は算出するには至っていない。

超電導工学研究所では、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 系薄膜を用いた SFQ(単一磁束量子)回路の開発の中で、以下の成果を上げている。

- ①超電導接合の臨界電流密度(J_c)を解析し、 J_c の均一化可能なレイアウトを考案した。
- ②4.2 K で 360 GHz、40 K 近い温度で 110 GHz の高速分周動作を実現できた。
- ③液体ヘリウム温度(~4 K)で動作する超電導 SFQ(単一磁束量子)回路と室温環境にある半導体機器との間で、多数(32 本)の高速信号(10 Gbps)をやり取りできる装置を世界に先駆けて開発した。

ニオブを用いた低温 SFQ 回路は、数十 GHz 以上のクロックで動作する LSI を実現できる技術として期待されているが、SFQ 回路が動作するためには~4 K の極低温環境が必要であり、半導体の情報通信機器と簡単に組み合わせて使用出来る様に、室温で接続できる形に装置化することが望まれていた。

SFQ 回路は、前記の通り、現在の半導体回路より数十倍速い 100 GHz で動作した場合でもゲート当たり 0.1W 程度の電力しか消費せず、発熱を殆ど生じないことから、情報処理に革命的な進歩をもたらす超高速かつ大規模な回路を実現する技術として期待されている。このため超電導工学研究所では、ネットワークルータ用スイッチをターゲットとした SFQ 回路の開発を進めており、これまでに 4×4 (4 入力、4 出力)SFQ スwitchの開発や、その制御回路である SFQ スwitchスケジューラが半導体スitchの約 100 倍にあたる 40 GHz で動作することを実証した。これは世界で初めての試みであり、この成果により SFQ 回路を容易に使える条件が整い、ネットワークルータ用スitchなどへの応用が加速されるものと期待される。

超電導工学研究所はさらに、NEDO 低消費電力型超電導ネットワークデバイス開発プロ

プロジェクトの一貫として単一磁束量子(SFQ)回路を用いた超高速サンプラーシステムを開発した。高温超電導デバイスは小型冷凍機での冷却が可能でシステム全体を小型化できることから近い将来の実用的な小規模システム実現への期待が高い。

今回、高温超電導サンプラーチップを搭載した小型の冷却システムと計測制御システムを含む全システムをポータブルなデスクトップサイズで実現した。これによりプロジェクトの最終目標であった 50 GHz の外部信号をクリアに観測することに成功した。

フィルター（受動素子）

【実用化への進展度合 HTS：上市段階】

市場規模は算出するには至っていない。

情報・通信分野では、HTS 薄膜を使ったフィルター（受動素子）が米国で携帯電話基地局用として実用化され、7000 基以上が導入されている。フィルターは国内ではまだ需要が少なく、民間での要素研究が実施されている段階である。

③超電導共通基盤分野

■冷凍・冷却分野

【実用化への進展度合 LTS：上市段階、HTS：技術開発段階】

市場規模は算出するには至っていない。

パルス管式冷凍機で 300kW 級がプロトタイプ段階にあり、また、60K の温度レベルで作動するタービン式冷凍機の 2kW 級機もプロトタイプ段階にあるが、市場の調査データはまだない。

JR 東海の超電導磁気浮上式鉄道冷凍機は 2 段 GM 型パルス管冷凍機であり、コイルを 20 K レベル以下に冷却する。

Y 系超電導実用機器に必要な冷却能力は、GM 冷凍機やスターリング冷凍機など既存の小型冷凍機の冷凍能力では不十分である。また大型 He 液化器などで用いられる膨張タービン方式は冷凍能力や耐久性では実績があるが、Y 系線材を用いる機器用としては大型で能力も過大すぎる。必要十分な冷却能力として 70K で 2kW を満足し、30,000 時間以上の長寿命化が可能な小型膨張タービン冷凍機の市場は大きい。

■エネルギー・電力分野

SMES

これは、超電導エネルギー貯蔵装置(Superconducting Magnetic Energy Storage)のことである。現状の蓄電池などのエネルギー貯蔵装置と比べて貯蔵効率が 80～90%と高く、エネルギーの出し入れが極めて早いのが特徴である。これが導入されると、単にエネルギー

を貯蔵するだけでなく、電力系統安定化、負荷変動補償、周波数調整などの電力の安定化や品質維持などに対する効果もあることから、わが国においてもプロジェクトとして開発が進められている。一方、IT の発展によるデータセンタの設立や半導体、液晶等のハイテク産業の発展に伴い、電力の質(瞬間的な電圧の低下等)の維持や更なる安定性が求められている。ここへの SMES の適用も進められている。すでに中部電力(株)がシャープ(株)の液晶工場に SMES を設置し、落雷などによる瞬時電圧低下(瞬低)を未然に防ぐという具体例も出てきている。このような用途だけにかぎっても 300 億円程度の市場があると見込まれている。

電力ケーブル

超電導材料を電力ケーブルに適用しようという考えが現実味を帯びてきたのは、高温超電導体の出現があったからである。以前にも日米で低温超電導線を用いた電力ケーブルの開発は行われたが、液体ヘリウム冷却や電気絶縁等の課題のために途中で断念したという経緯がある。高温超電導体の出現により、液体窒素温度での冷却が可能になったために開発が進むようになった。現状の送電ケーブルは、発電所から需要家まで電力を送るのに 7 ～10%の損失があるといわれている。これを超電導化することにより大幅に損失を減らすことができ、さらに、電圧を上げずに電流を増やすだけで大容量化できるため、変電所の変圧器の数を減らすことができるという利点もあるというのが開発に拍車をかけている理由である。すでに、わが国では、東京電力(株)と住友電気工業(株)が共同で、Bi 系線材を用いた長さ 100m のケーブルを製作し、実験を成功裏に終了している。

古河電気工業(株)と電力中央研究所が Bi 系線材を用いて 500m 長のケーブルを製作し、通電実験に成功している。米国や中国は日本と異なり送電容量不足ということもあり、超電導を用いることにより大容量化を図りたい考えである。外国での実用化が進み、実績を積み、日本での普及も促進されるものと期待される。市場規模に関する報告は殆どないが、わが国における既存の 275kV 地中送電ケーブルの 3%が置き換わるだけで 700 億円規模になると試算されている。Bi 系の線材を使用した実証試験として、平成 22 年度から 200m 規模の系統連系試験を 1 年間実施予定である。Y 系電力ケーブルについては、現在 10m のケーブルの機能試験を実施中である。電力ケーブル導入に際しては、コストと信頼性が課題であり、コストは Y 系ケーブルのコストダウンで対応し、信頼性では接続部の絶縁破壊対策が必要で今後の開発課題である。

中部電力と古河電気工業は、CVD 法により 10 mm 幅の YBCO 線材を製作して、レーザーを用いて 2 mm 幅に細線化して、有効長 30 cm の超電導ケーブルを作成し、横浜国立大学のグループにより交流損失の評価が行われ、世界最小の交流損失を達成している。5 年間の総事業規模は、27 億円と予定され、200 MVA 級の中間接続部を有する三心一括型高温超電導ケーブルを、冷却装置や保護装置などの付帯設備とともに 66 kV の実系統に接続して 12 ヶ月以上の長期連系試験を行う。

住友電工は、線材寸法のスリム化とフィラメントを撚る技術で、交流損失を従来の 1/3～1/4 へと大幅に低減させたビスマス系超電導線を既に開発しているが、それにより、実規模のケーブルとして、低ロスで大容量・コンパクトなケーブルの実現は間近である。

平成 20 年度からスタートしているプロジェクトでは、高電圧型ケーブルは 275kV/単相/3kA30m（中間接続部有り）を製作し、高電圧設計・製造の検証を行っている。大電流型ケーブルは、66kV/三相/5kA 15m を製作し、大電流設計・製造技術の検証を行い、長期化通電性能試験(6 ヶ月)を通じて超電導ケーブルの実用性検証を行っている。

1988 年にわが国で発見されたビスマス(Bi)系材料は線材への成形性の良さもあり、これまでの超電導研究開発の成果などにより、線材開発が順調に進み、現在商品化されて、海外プロジェクトの電力ケーブルなどへ提供されている。Bi 系材料の発見の前年（1987 年）に米国で発見されたイットリウム (Y) 系材料は加工性の難しさがあったが、これまでの超電導研究開発の直接的成果であるイオンビームを使った IBAD 法による線材成形に成功し、開発が加速された。将来、コスト低減が期待されており、また、高磁場下での性能が優れているため、SMES などへの適用が期待されている。

米国では Ultera 社 (Southwire 社とデンマークの NKT 社の合弁会社)が 200 m 長の 13.2 kV/3 kA (69 MW)HTS ケーブルをオハイオ州コロンブス市の米国電力会社の Bixby 変電所に設置し送電を開始している。2 年間で 9 百万ドルのこのプロジェクトは、予定通り費用で設置されたようである。プロジェクトの目的は、地下式 HTS ケーブルを実証することである。これまでで最もコンパクトな配電システムは、“Triaxial”設計という革新的なもので、3 相が互いに同軸型に配置され、Cu シールドで囲まれている。このようなコンパクト設計は、HTS 線材の重量を減らすと同時に冷却表面積と冷却必要量を低減できる。このプロジェクトには、Southwire 社、NKT ケーブル社、AEP 社、AMSC 社、冷却技術の Praxair 社、及びオークリッジ国立研究所が参加している。AMSC 社は、49 km の Bi 系 HTS 線を供給している。このケーブルは、18 本の Cu ケーブルと同等の、小都市では十分な電力を送電できる。このケーブルは、DOE の HTS ケーブルプロジェクトの中では最も高い連続運転電流定格値を実現している。HTS ケーブルは低い電圧で長距離あるいは短距離でも送電できるので、大きな変圧器を都心から遠く離れたところに置くことが可能であり、都市計画の点でも有利である。

韓国では、前記のように低温絶縁方式の 3 心一括型超電導ケーブルの実用化を目指している。KEPRI の 2 つのプロジェクトには住友電工が製造した超電導ケーブルと冷却システムが提供されている。

中国でも前記のように中国政府の支援で 35kV、35m 長の BSCCO・3 相長超電導ケーブルを開発し、2004 年 3 月に、中国昆明南部電力グリッドの Puji 変電所で運転を開始している。送電容量は 2kA、120MVA で約 25,000 戸の民家と四つの工場に 40-60MVA の電力を供給できる。終端接続部などの設計及び組立は中国科学院等離子体物理研究所により実施されたものである。広大な面積の中国での超電導ケーブルの市場は大きい。

今後、500m 級（500MVA 級で 3～5kA）の三相一括型 Y 系超電導ケーブルで、布設、冷却時の応力、歪などの機械特性、信頼性が十分確認されれば HTS ケーブルの市場は大きい。

限流器

これも高温超電導体の発見以後、活発に開発が進められるようになったものの一つである。電力自由化の進展とともに多数の電源が電力網に接続され、1 箇所の電源事故でも全体の故障に繋がる可能性がある。限流器は、電力系統で事故が起こった時に発生する事故電流を遮断する際に、事故電流を減衰させる役目を果たすもので、遮断器などの系統のスイッチ要素の定格を軽減するとともに、電力系統に導入されれば大きな系統運用効果がある。未だ基幹電力系統の高電圧(66kV 以上)に適用できる技術レベルにないが、電力自由化により拡大している分散電源の電圧レベル(6.6kV クラス)用ではかなり開発が進んでいる。

先の調査報告書によると、2003 年度の国内総発電量は 1 兆 kWh であり、2005 年 4 月には 6,000 億 kWh の電力取引が自由化される。電力系統に連系される電圧階級として 6.6kV 系統があり、ここに 4,000 箇所以上の中規模分散電源が連系されることが予想され、この系統に限流器を導入して事故時の過電流を抑制することが期待されている。国内市場規模として年間 40～60 億円あると推測されている。国内市場のみならず、電力網が必ずしも充実していない海外での導入が実現すれば大きな市場になると期待されている。

限流器の世界市場は年間 50 億ドルと見積もられている。実証試験は、参加メンバーの Southern California Edison が運営する場所で行われる予定である。AMSC 社がプロジェクトマネージャーを務め、チームには Siemens 社(ドイツ)、Nexans 社(フランス)、ヒューстон大学、ロスアラモス国立研究所が含まれる。DOE は、この 25 M\$ のプロジェクトに対して、12.7 M\$ を負担している。

韓国では、現代重工業が延世大学と共同で第二世代 線材を用いて単相超電導限流器(FCL)を開発し、実証試験を行っている。この単相器は 13.2 kV、630 A で動作し 8.3 MVA の容量を持ち、22.9 kV の 3 相電力機器電圧クラスに対応する。この第二世代線を用いた FCL は 2006 年 12 月、韓国電気技術研究所(KERI)で試験が行われた。当限流器はこのプロジェクトの目標電圧 50 kV よりほぼ 3 倍高い 143 kV を達成した。13 kV の FCL コイルは、American Superconductor 社から供給された約 2.6 km のステンレス・スチール積層第二世代 HTS 線で構成されている。

変圧器

超電導を使うことにより効率が 0.5%程度向上するというものの他、現在ガス変圧器の冷却媒体として用いている SF₆ が環境負荷に影響を与えることや油入変圧器の可燃性が懸念されること等により、環境負荷がなく不燃性の液体窒素を冷却媒体として用いることの利点が超電導変圧器開発の動機となっている。

鉄道用車載機器にはとにかく小型・軽量化が望まれる。軽量化は運行の効率向上と密接に関係するからである。鉄道用変圧器については銅線のアルミ線への代替などで今まで相当軽量化の努力がなされてきた。東海道・山陽新幹線に用いられている主変圧器の容量当たりの重量は当初 2kg/kVA 程度であったものが、現在では 0.75kg/kVA となっている。これらを超電導変圧器に代えた場合、冷凍機を含めても軽量化が可能であるということから、(財)鉄道総合技術研究所が中心となって研究開発が進められている。

現状の市場規模はそう大きくはなく、年平均 69 台、金額にして年間 6 億円程度になる。車載用の変圧器が市場に出ると、一般産業用に展開される可能性は大きく期待できる。

Y 系超電導線材を用いた 66kV 20MVA クラスの超電導変圧器実用化のために、巻線加工モデルコイルを作製して低交流損失化が更に進み、既存の 66kV クラスの変圧器の耐電圧規格を満足し、かつ二次巻線の通電量が十分であることが検証されれば市場は大きい。

■産業・輸送分野

産業用マグネット

半導体シリコン単結晶引き上げ装置(半導体産業)への超電導マグネットの応用は、最近、シリコン・ウエハの直径が段々と大きくなるに伴い進んだ分野である。既に直径 8 インチから 12 インチに移行しつつあり、そのうち 20 インチウエハが登場すると予測されている。

半導体シリコン(以下 Si)単結晶引き上げに超電導マグネットが必要な理由は、多結晶 Si を磁場の中で溶かし、種結晶を用いて作製されるが、熔融 Si の温度が高いために酸素が溶解し、これが対流している熔融 Si に溶け込み、Si 純度が低下するのを避けるのに磁場で対流を抑制するためである。中心磁場は約 0.3 テスラとそう高くないが、単結晶の直径が大きくなればなるほど、磁場空間が大きくなるため、結局超電導を使わざるを得なくなる。銅線で作ったマグネットでは容積、重量共に大きくなり、また消費電力も増える。そのために冷却負荷も大きくなる。過去に何台の装置がどのメーカーに納入されているかは企業秘密で把握できないが、年間 30 億円規模の市場があるといわれている。今後 20 インチウエハが市場に出回ると市場規模はさらに拡大することが予想される。

超電導磁気分離装置は環境分野で市場が拡大している。この装置には、超電導線をコイル状に巻いたマグネットタイプと永久磁石の機能を有する超電導バルクタイプの二つの方式がある。現状では、廃水浄化用としての市場が開拓されている。線材を用いたマグネットを磁気分離装置に適用する技術は、大阪の二葉商事(株)が大阪大学等と共同開発中で、平成 13 年度より 3 力年間 NEDO の基盤技術研究促進事業に採択され、このほど 2000 トン/日の処理実験に成功している(実用化には 5000 トン/日が必要とされている)。これは製紙工場から出る廃水処理を目的としたもので、今後食品工場、化学工場からの廃水処理用にも展開できる。年間 300 億円程度の市場が見込まれている。

産業用、輸送用モータ、発電機

電力用回転機には電動機(モータ)と発電機とがあるが、原理的にはほとんど同じなので、基本的な技術開発はほぼ共通と見ていい。電動機の超電導化については、船舶用電動機を IHI が販売を予定している。鉄道車両用変圧器と同様、小型・軽量化という特徴が電気推進船に適しているのも市場が拓けそうである。産業用電動機の中でも出力 1,000kW 以上のものは、現時点の世界市場で、年間で 1 千億円規模である。発電機においては、現状のものよりは発電効率と発電の安定性が向上すること及びロータの短軸化と軽量化等の特徴が出る。わが国でもプロジェクトで低温超電導を用いた出力 7 万 kW の製作・試験に成功した。

米国では、ゼネラルエレクトリック社が米国 DOE の補助を受けて Bi 系高温超電導線材を使って 10 万 kW 級の超電導発電機を開発している。その背景には、現在米国の電力会社が有する約 10,000 台の既存の発電機を今後 10 年から 15 年間にオーバーホールする必要があるため、この機会にロータ部分のみを超電導化して特長を出すという狙いがあるようである。単純に計算すると年間 1,000 台程度の市場が拓けることになる。欧州では、風力発電に軽量・小型化が可能な超電導発電機を適用しようという動きがある。

磁気浮上列車用に Nb 系のマグネットが実証試験段階にあり、船舶推進用には 400kW 級 Bi 系モーターがプロトタイプ段階にある。自動車用には 60kW 級 Bi 系モーターが開発中である。世界風力エネルギー協会(GWEC)よれば、2005 年現在の全世界風力発電所既設置量は 59,084MW であり、更に 2005 年には 11,531 MW が設置中である。2006 年には、13,100 MW の設置が予定されている。GWEC は、マーケットサイズが 2010 年までに 2 倍以上の 134,800 MW になると推定している。2007 年 8 月の時点で、AMSC 社製品が使われている風力発電所の延べ発電量は 5,700MW に達している。

AMSC は 2006 年 12 月に Windtec 社の買収契約に調印した。風力発電市場を同社の成長のための強力な支えにするために収益性の強化を図っている。AMSC は、2007 年 7 月にペンシルバニア州に本拠を置く PowerQuality Systems, Inc. の買収により商品群に加わった Power Quality Static VARCompensator(PQ-SVC)について、何件かの新規受注を受けた。無効電力の補償装置の世界市場を年間 2 億 5 千万ドルと見積もっている。(出典：超電導 Web21)

ZenergyPower 社は、Converteam 社(以前の ALSTOM 電力変換)と風力及び水力用発電機を共同開発し、製造してマーケティングするために 5 年間の独占的共同契約を結んだ。Zenergy 社は、今後この分野の Converteam 社の商用活動にかかわるすべての HTS 線材及びコイルの独占的供給者になることを目指している。

Converteam 社は、UK 通産省から資金援助を受ける 1 つの風力発電のプロジェクトを計画しており、Zenergy 社の HTS 技術に基づいて 8MW 直接駆動の超電導風力発電機的设计を行っている。Zenergy 社によれば、従来のモーターに対する HTS モーターの有利な点は、サイズと重量が小さいこと、オーバーロードを扱う能力が高いこと、損失が従来

の 50%と低くなること等である。

Zenergy 社によれば、HTS 風力タービン発電機のコストは 1.2 M ユーロ(1.6 M ドル)であり、対して従来技術によるものは 2.3 M ユーロ(3 M ドル)である。HTS 方式のものは直径が 3 m、重量が 120 トンに過ぎないのに対して、従来方式は直径が 9 m、重量が 450 トンになる。同社は、HTS 発電機は風力タワーと基礎の重さが半分以下に軽減され、設置の全体コストが 5.1 M ユーロ(6.7 M ドル)から 2.4 M ユーロ(3.2 M ドル)に削減されると期待している。

Zenergy 社は、風力及び水力発電市場は年当たり 20~30 億ユーロ(26~39 億ドル)になり得ると見積もっている。比較の為同社は、HTS 船舶推進とケーブルの市場は夫々年当たり 4 億ユーロ(5 億ドル)と 10 億ユーロ(13 億ドル)と見積もっている。

Zenergy 社と Converteam 社は、ドイツの E.ON 電気・水力ダムに設置される HTS 水力発電機を開発するため公的基金で支援された水力発電セクターを運営実行している。

米国の AMSC 社と TECO-Westinghouse Motor 会社は、研究ジョイントベンチャー会社を設立して、海岸型風力発電機の高電力・直結駆動式風力発電機向けに HTS 及び関連技術を開発すると発表した。両社はまた NIST の先進技術プログラムから資金援助を受けることも明らかにした。これは、6.8 M ドルの研究プロジェクトを実施するために 3.4 M ドルの資金を両社に提供するものである。

当プロジェクトには、プロトタイプ発電機の製造は含まれていない。目標とする超低速、高トルク発電機は毎分 11 回転、6 kV でフルパワーを産出すると期待されている。現在 5 MW までの風力発電機は市場で販売されており、10 MW 級機は今後 3~5 年以内に実証試験を実施した後、商用化する事が期待されている。超電導を用いた 10 MW 級直結駆動発電機を従来発電機の約 3 分の 1 の重量約 120 トンで製造出来ると見積もっている。12 MW 級海岸風力タービンの科学的基礎を調査中である。

Zenergy 社は HTS 誘導ヒーターの注文を、ドイツのミンデン市所在の Weser アルミニウム社から受注した。当ヒーターは、Zenergy 社子会社の Trithorshaniyotte により開発された Bi-2223 コイルを使用し、大きなアルミのビレットを加熱するために特別に設計されたものである。

Weser アルミニウム社は、ドイツのミンデン市製造工場の既存銅コイルに基づくアルミニウムヒーターを代替すべく HTS 機の設置を計画している。HTS 機は、1 トンのアルミニウムを加熱するのに要するエネルギーを 280 kWh から 160 kWh と約半分に削減できる。エネルギー効率は 90%以上。誘導ヒーターの現在年間市場規模は 20 億ユーロと見積もられている。誘導ヒーターを開発した Trithor 社は、以前に従来システムとほぼ同じ価格で HTS 誘導ヒーターを売り出す計画であった。その当時、同社は 1 MW 級誘導ヒーターの全コストは、パワーエレクトロニクス、キャパシター、コイル及び機械的ハンドリングを含めて 400~700 k\$と見積もっていた。Trithor 社製のヒーターは、DC コイル/回転ビレットの設計方式で自社製の Bi-2223 HTS 線材を使用し、冷凍機を用いて冷却するものである。

金属ビレット周囲に一定の磁界を発生させるために、DC 式 HTS コイルを使用する。ビレットは磁界中を回転し、アルミ材料中に磁束を発生して渦電流により加熱する方式である。

韓国電気技術研究所(KERI)と斗山重工業(株)は、最近ビスマス系(1G)線材を用いて 1 MW、1300 馬力、3 相の同期モーターを開発した。2004 年に始まった斗山重工(株)/KERI HTS モータープロジェクトは、韓国科学技術省から資金援助を受けている。1 MW モーターは、約 7 M ドルの予算により実施された。従来の同期モーターに比べて高効率、小型(約 1/2)、軽量(2,500 kg)と報道されている。

中国では、2006 年に 1347MW の風力発電量の増加があったと推定され、2007-2010 年の間にさらに 8,000MW の発電能力の増強があると考えられる。

加速器、核融合炉

核融合原型炉としての ITER がフランスに建設されることが決まった。総額 6 千億円以上といわれるこの巨大装置には超電導が不可欠である。このうち 1/3 が超電導関連機器で占められる。今後約 10 年間の建設期間を経て完成する予定であるが、それに続く実証炉、商用炉と息の長い開発期間があり、超電導市場の安定な成長が見込める分野である。

2005 年 6 月にモスクワで開催された第 2 回 6 極(日本、中国、欧州、韓国、ロシア連邦、米国)閣僚級会合において、ITER 本体施設のカダラシュヘ(仏)への設置が正式に決定された。その後、さらにインドの参加を承認し、ここに 7 極体制となった。

ITER 本体建設費は約 5,000 億円、約 10 年間にわたる建設期の運営費は合計約 700 億円。運転期間は約 20 年を予定し、年間約 300 億円の運転、運営費が見込まれる。

核融合エネルギー研究開発を加速するために、ITER と並行し補完する幅広い核融合研究のアプローチに日・欧の共同出資(それぞれ 460 億円)を行うことも合意されている。

■診断・医療分野

NMR・MRI

MRI は癌細胞などの早期発見に有効であり、X 線 CT では実現し得ない機能を持っており、電離放射線被爆のない安全な検査装置で、この 15 年ほどで国内でも急速に普及してきた。超電導市場の半分近くが MRI で占められている。発生磁場は 0.5T から 3T の範囲が主流である。この市場は今後も堅調に伸び、年率 8~10%の伸びが予想されている。世界で年間 2500 台程度の市場で、装置売り上げは 3500 億円程度、そのうち超電導マグネットが 900 億円程度である。しかし、低価格化が進み市場拡大という点からは新しい技術開発が必要である。既に設置されている病院等では買い替えという需要が期待されるが、新規市場を開拓するには、使い易さの改良、運転コストの低減等の技術開発が必要である。それにより、地方の病院や発展途上国への市場が拓けることが期待される。高温酸化物超電導線材(主に Y 系線材)の実用化が進めば冷凍機の運転コストも低減し、クエンチの心配もなくなるの

で市場が格段に大きくなることが期待される。

米国の保健省(NIH:National Institute of Health)が力を入れているのが、10T 以上の高磁場を用いた MRI である。米国の保健省(NIH:National Institute of Health)が力を入れているのが、10T 以上の高磁場を用いた MRI である。磁場強度が上がると共鳴周波数が高くなり、より微細な構造が画像化できるようになる。とくに脳の局所的な働きをしらべる機能的 MRI(functional MRI、fMRI)や MR による血管撮影、脳の局所の代謝をしらべるスペクトロスコーピーなどでは超高磁場装置が圧倒的に有利であると報告されている。

米国、ヨーロッパ諸国、韓国などでも臨床応用が始まっているが、わが国では、アメリカ製頭部専用装置の薬事承認がなされただけで、全身での使用がまだ認められていない。高磁場特性の優れた高温酸化物超電導線材の実用化を待たなければならない。

心磁計は最近発売された超電導を用いた診断装置の一つであり、今後市場が期待される。人体から出る微弱な電流を調べる心電計とは異なり、心磁計は微弱な電流が生ずる極微弱な磁場を測定し、心臓の状態等を心電計よりも正確に測定できる。心臓から出る磁場は、地磁気の約百万分の一の微弱なものであるため、その測定には、超高感度磁気センサ SQUID(超電導量子干渉デバイス)が活用されている。虚血部位や不整脈信号源の高精度な測定が非侵襲で可能となり、心電図では分からなかった心臓の不整脈も早期に発見できる。装置は地磁気の影響を避けるための磁気シールド等が必要となるため、現状では 1 億円程度と高価であり、限られた病院にしか導入できないが、これも低価格化が進めば市場が拓けると期待されている。

人間の脳が活動するときには非常に小さな電気や磁気を発生する。この磁気を測定する検査が脳磁計(MEG)である。これを用いれば従来脳波で見つけられなかった異常を見つけられる可能性がある。また、脳波で電気を見るよりも脳磁計で磁気を見た方がより正確な場合がある。例えば、てんかんの患者では脳の中のでんかん源が正確にわかる可能性も高く、また脳外科手術を受ける患者では手術前に脳の機能を正確に評価しておくことができるので、手術をより安全に受けることができる。

この分野に参入している企業は未だ少なく価格も高価であるため市場は大きくはないが、今後普及することが期待される。

重粒子線がん治療装置は、わが国の癌患者は年間 50 万人の治療において外科手術の 22% に次いで放射線の併用治療が 18%などで実績が上がってきてはいる。しかし、周辺の正常組織への影響もあり十分な線量を投与できないという課題があった。炭素イオン線のような重荷電粒子を用いると腫瘍周辺の正常組織をほとんど傷めることなく患部に必要線量を短時間に集中照射できる。そのために、ヘリウムからアルゴンまでの重イオンを核子あたり数 MeV～数百 MeV に加速する必要がある。荷電粒子を曲げたり収束させたりするためには電磁石が必要で、現在は常電導の電磁石が用いられている。一般医療の中で日常的に用いられるためには装置の小型化が必要となり、そのためには強い磁場が発生できる超電導マグネットが必要となる。この装置の設置面積を現在の放医研の加速器施設の面積(70m

四方)より小型化すれば、各地方都市にも設置されるものと考えられる。

NMR(Nuclear Magnetic Resonance:核磁気共鳴)分析装置は、 ^1H や ^{13}C などの原子核の持つ「核スピン」と呼ばれる量子数の核磁化の情報から分子情報を得るというものである。タンパク質の構造解析は生命解明に不可欠なものである。タンパク質の分子量が大きくなればなるほどその構造解析には強い磁場が必要とされる。現在 23T の磁場発生により共鳴周波数 1GHz を達成寸前であるが、今後は更なる高磁場化が望まれている。あるいは、磁場の低い(16T 程度)の NMR 装置が低価格化すれば市場が更に膨らむことが期待される。

■情報・通信

SFQ 回路

超電導工学研究所では、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 系薄膜を用いた SFQ(単一磁束量子)回路の開発の中で、以下の成果を上げている。

- ①超電導接合の臨界電流密度(J_c)を解析し、 J_c の均一化可能なレイアウトを考案した。
- ②4.2 K で 360 GHz、40 K 近い温度で 110 GHz の高速分周動作を実現できた。
- ③液体ヘリウム温度(~4 K)で動作する超電導 SFQ(単一磁束量子)回路と室温環境にある半導体機器との間で、多数(32 本)の高速信号(10 Gbps)をやり取りできる装置を世界に先駆けて開発した。

ニオブを用いた低温 SFQ 回路は、数十 GHz 以上のクロックで動作する LSI を実現できる技術として期待されているが、SFQ 回路が動作するためには~4 K の極低温環境が必要であり、半導体の情報通信機器と簡単に組み合わせて使用出来る様に、室温で接続できる形に装置化することが望まれていた。

SFQ 回路は、前記の通り、現在の半導体回路より数十倍速い 100 GHz で動作した場合でもゲート当たり 0.1W 程度の電力しか消費せず、発熱を殆ど生じないことから、情報処理に革命的な進歩をもたらす超高速かつ大規模な回路を実現する技術として期待されている。このため超電導工学研究所では、ネットワークルータ用スイッチをターゲットとした SFQ 回路の開発を進めており、これまでに 4×4 (4 入力、4 出力)SFQ スwitchの開発や、その制御回路である SFQ スwitchスケジューラが半導体スitchの約 100 倍にあたる 40 GHz で動作することを実証した。これは世界で初めての試みであり、この成果により SFQ 回路を容易に使える条件が整い、ネットワークルータ用スitchなどへの応用が加速されるものと期待される。

超電導工学研究所はさらに、NEDO 低消費電力型超電導ネットワークデバイス開発プロジェクトの一貫として単一磁束量子(SFQ)回路を用いた超高速サンプラーシステムを開発した。高温超電導デバイスは小型冷凍機での冷却が可能でシステム全体を小型化できることから近い将来の実用的な小規模システム実現への期待が高い。

今回、高温超電導サンプラーチップを搭載した小型の冷却システムと計測制御システム

を含む全システムをポータブルなデスクトップサイズで実現した。これによりプロジェクトの最終目標であった 50 GHz の外部信号をクリアに観測することに成功した。

■冷凍・冷却分野

パルス管式冷凍機で 300kW 級がプロトタイプ段階にあり、また、60K の温度レベルで作動するタービン式冷凍機の 2kW 級機もプロトタイプ段階にあるが、市場の調査データはまだない。

JR 東海が超電導磁気浮上式鉄道冷凍機は 2 段 GM 型パルス管冷凍機であり、コイルを 20 K レベル以下に冷却する。

Y 系超電導実用機器に必要な冷却能力は、GM 冷凍機やスターリング冷凍機など既存の小型冷凍機の冷凍能力では不十分である。また大型 He 液化器などで用いられる膨張タービン方式は冷凍能力や耐久性では実績があるが、Y 系線材を用いる機器用としては大型で能力も過大すぎる。必要十分な冷却能力として 70K で 2kW を満足し、30,000 時間以上の長寿命化が可能な小型膨張タービン冷凍機の市場は大きい。

（２）経済的インパクト

ここでは、これまでの超電導研究開発による生産波及、付加価値創出、雇用創出への影響が大きかったかどうかについてまとめた。

①超電導材料分野

これまでの超電導研究開発の成果により、Bi 系線材と電力ケーブルの販売が始まり、わずかではあるが雇用創出効果に繋がっている。

また、LTS による SMES はフィールド試験を経て、液晶工場へ導入されており、市場創設の第一歩となっている。

産業技術総合研究所内ではベンチャー創設を支援するシステムがあり、冷凍機のベンチャー企業が設立された。

②超電導素子分野

これまでの超電導研究開発の成果が雇用創出効果に繋がったかどうかはまだ分からない。

（３）産業構造転換・活性化の促進

ここでは、これまでの超電導研究開発が産業構造の転換や活性化（市場の拡大や雇用の増加など）にどのような役割を果たしたかについてまとめた。

①超電導材料分野

超電導電力ケーブルが実用化を迎え、Bi 系線材製造事業が立ち上がりつつある。

②超電導素子分野

産業構造の転換や活性化への寄与はまだである。

I-4. 国民生活・社会レベルの向上効果

(1) エネルギー問題への影響

ここでは、これまでの超電導研究開発がエネルギー問題の解決に寄与した効果についてまとめた。

①超電導材料分野

超電導電力ケーブルが実用化を迎え、電力・エネルギー分野での省エネルギー量が ISTECC で試算されている。これによれば、2020 年に、変圧器、電力ケーブル、モータ、限流器の合計で 735GWh/年となっている。

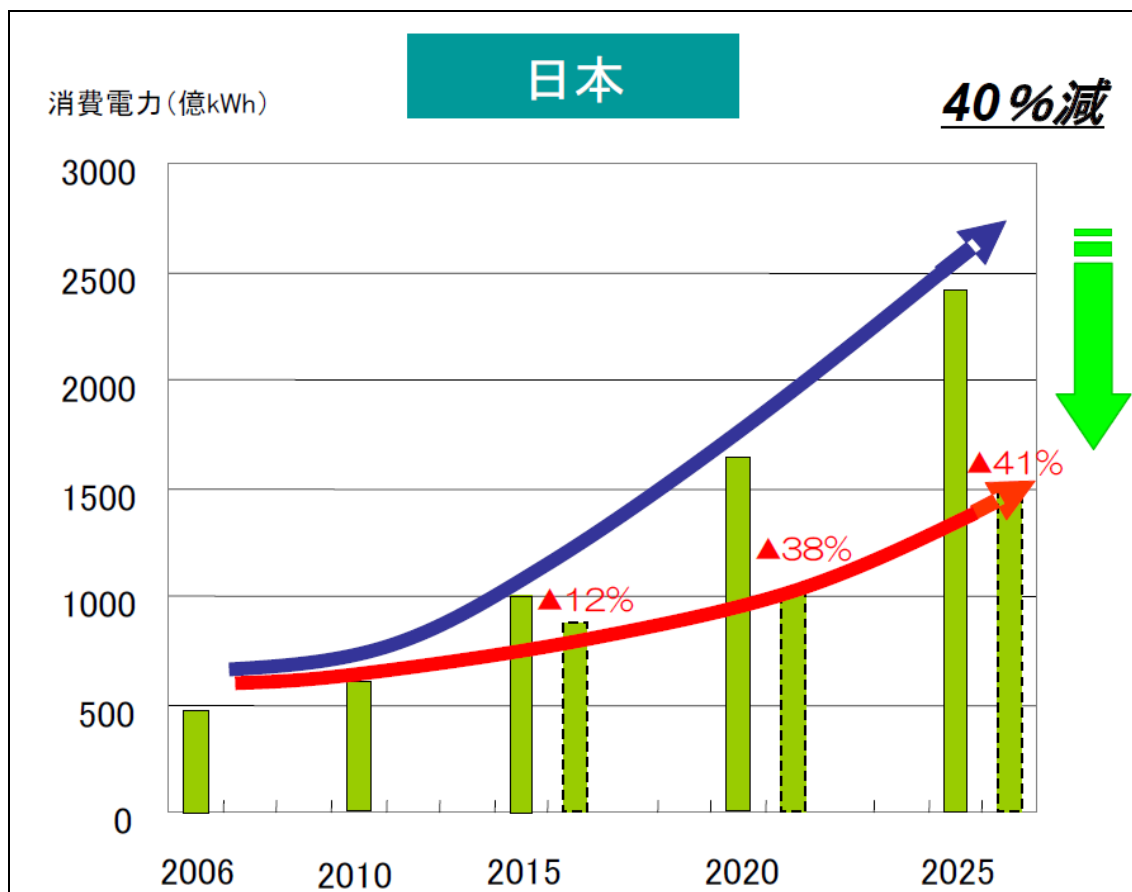
機器名	省エネ量		備考
	年度	電力削減量 (GWh/年)	
変圧器	2015	4	・系統変圧器への展開 ・海外主要国の市場
	2020	94	
	2030	518	
電力ケーブル	2015	13	・海外市場(米国、中国、韓国等有 望) ・架空線や直流配電への展開
	2020	82	
	2030	279	
モータ (船舶用)	2010	53	・ポッド推進船への展開(現在 70 数隻)
	2015	333	
	2020	638	
モータ (産業・電力用)	2010	7	・電気自動車への搭載も視野に
	2015	150	
	2020	490	
限流器	2011～ 2030 まで の累計	76	・短絡容量抑制用 ・基幹系統連系まで展開

出所：「超電導応用基盤技術研究開発プロジェクト（第Ⅱ期）」（事後評価）分科会（第1回）資料（平成20年11月）から JATIS 作成

②超電導素子分野

IT 機器の消費電力量の増加が 2020 年には、1600 億 kWh と想定されており、グリーン IT プロジェクトでは、38%のエネルギー削減を掲げている。

SFQ ロジック回路の適用が期待されるが、現在のところ、まだ評価するには至っていない。



出所：グリーン IT イニシアティブ（第2回）資料 平成 20 年 5 月

(2) 環境問題への影響

ここでは、これまでの超電導研究開発が環境問題の解決に寄与した効果についてまとめた。

①超電導材料分野

ISTEC では二酸化炭素削減量を試算している。超電導機器の採用により、2020 年時点で変圧器、電力ケーブル、モータ、限流器の合計で CO₂ 削減量は 257,000 トン/年となっている。

機器名	CO ₂ 削減量		備考
	年度	CO ₂ 削減量 (千 ton- CO ₂ /年)	
変圧器	2015	2	・系統変圧器への展開 ・海外主要国の市場
	2020	32	
	2030	176	
電力 ケーブル	2015	5	・海外市場(米国、中国、韓国等有 望) ・架空線や直流配電への展開
	2020	28	
	2030	95	
モータ (船舶用)	2010	19	・ポッド推進船への展開(現在 70 数隻)
	2015	117	
	2020	217	
モータ (産業・電力用)	2010	3	・電気自動車への搭載も視野に
	2015	54	
	2020	172	
限流器	2011～ 2030 まで の累計	26	・短絡容量抑制用 ・基幹系統連系まで展開

出所：「超電導応用基盤技術研究開発プロジェクト（第Ⅱ期）」（事後評価）分科会（第1回）資料（平成20年11月）から JATIS 作成

また超電導ケーブルのみの CO₂ 削減量は 2020 年時点で、28,000 トン/年となっている。

- 三心一括型超電導ケーブルシステムにより、同容量の既存ケーブルと比較して、送電ロスが1/2～1/3に
- 2030年の省エネ効果は279GWh/年：8万世帯分の消費電力量

年	超電導化による 損失低減量 (Lf=1.0)	累積 導入量	損失率 (Lf)	1年間の低減電力量 A×B×C×(24× 365)	1年間の CO ₂ 削減量
単位	kW/km	km		GWh/年	千t-CO ₂ /年
	A	B	C	D	E
2015年	50	30	0.7	10	3.5
2020年	70	190	0.7	82	28
2025年	70	400	0.7	172	58
2030年	70	650	0.7	279	95

②超電導素子分野

グリーンITプロジェクトでは、CO₂削減量は2020年時点で200,000トン/年の計画になっている。

SFQ ロジック回路の適用が期待されるが、現在のところ、まだ評価するには至っていない。

(3) 情報化社会の推進

ここでは、これまでの超電導研究開発による情報化社会の推進に寄与した効果についてまとめた。

①超電導材料分野

電力供給システムの安定化が、データセンターなどの運用を安定的に支えることが期待され、情報化社会の推進に貢献することが期待されるが、評価するまでには至っていない。

②超電導素子分野

SFQ ルータの省エネ効果はグリーン IT の中でも大いに期待されている。その実現は 2015 年を想定しているが、その効果を評価するまでには至っていない。

(4) 安全、安心、生活の質

ここでは、これまでの超電導研究開発による国民生活の安全、安心、生活の質の向上に寄与した効果についてまとめた。

①超電導材料分野

電力系統の安定化は、生活の安全、安心、生活の質の向上に寄与すると期待される。工場の安定操業にも貢献が期待される。

また、超電導リニアによる高速新幹線は東京など大都市一極化社会を分散させて、地方の活性化が可能になれば、すべての国民生活の安心、生活の質の向上に寄与することは確実である。

健康な生活を送るために、医療分野では MRI 等による診断技術が国民の健康を支えている。

②超電導素子分野

情報化社会の推進に貢献することが期待され、生活の安全、安心、生活の質の向上に寄与すると期待される。

B. 個別プロジェクト関係

(1) 超電導材料分野

①産業科学技術開発「超電導材料・超電導素子」(昭和 63 年度～平成 9 年度)

I. 波及効果に関する調査

I-1. 技術波及効果

(1) 実用化の進展具合

世界的な高温超電導フィーバーの中で、高温超電導に関する基礎・応用の両面で並行的に研究・開発が実施され、将来技術の見極めと方向付けがなされた結果、高温超電導技術の技術基盤が整理され、物質探査効率が向上し、現在の超電導技術へとつながっている。この成果は、超電導線材技術開発への足がかりとなるとともに、現在の超電導バルク材の用途へとつながった。

超電導発現機構の解明のための、単結晶育成法の開発とその基礎となる高温超電導材料の状態図作製方法は基本的ツールとして活用されている。新超電導物質の探索では、水銀系超電導体や Cu-1234 の発見があったが、実用化には至らなかった。高電流・高磁界超電導材料の開発のための、MPMG 法、OCMG 法の開発は現在でも材料開発の手法として活用されている。

(2) プロジェクト成果からの技術的な広がり具合

派生技術により新規事業が見込まれるものは、産業用マグネット、船用モータなどがある。それらに使われる技術分野は、マグネット、電力、エネルギー産業、医療(MRI)、科学分野(NMR)がある。派生技術を利用する主たる機関は、本プロジェクトに参加した企業、大学、独立行政法人研究所などである。本プロジェクトに参加した各機関においては、本分野で実施する研究開発の促進効果はあったと思われる。

本プロジェクトの派生技術として、プロジェクト実施中に想定していなかった使われ方をした技術もある。例えば、湖水に発生するアオコを高温超電導材料のバルク材料のマグネットで分離回収する装置(中部電力、日立)やサウジアラビアでの磁気分離による水の浄水設備への応用がある。

酸化物誘電体技術として技術が広がり、統一的な取組みがなされている。強相関電子系技術が創出され物性研究に貢献している。

材料評価技術、薄膜技術は新材料の評価等に活用され、現在に至っている。X線吸収分光法が開発され、高温超電導物質の構造解析に活用された。

(3) 国際競争力への影響

わが国の高温超電導の技術レベルは向上し、特に線材作製技術に繋がり、世界で1、2位を争うレベルになった。本プロジェクトを起点とする超電導プロジェクト全体への寄与も大きい。

国際標準化、規格化にも寄与している。素案作りの段階から参画し、電流リードの技術分野の標準化に関しては日本主導で行われた。

I－2．研究開発力向上効果

(1) 知的ストックの蓄積度合

材料・素子関係で合わせて、原著論文数：2274 件、特許出願件数 696 件の成果があった。

本プロジェクトの成果を基に、高温超電導バルク材要素技術の開発、超電導線材要素技術の開発、高機能超電導材料の技術開発及びそれらを遂行するための超電導材料基礎技術の開発を推進することを目的に、「超電導応用基盤技術研究開発（Ⅰ）」（平成 10 年度～平成 15 年度）プロジェクトが後継プロジェクトとして実施された。この後継プロジェクトには、本プロジェクトと並行して実施されていた「超電導電力応用技術」（昭和 63 年度～平成 11 年度）の Y 系線材技術の成果を継続して開発することが盛り込まれ、現在の Y 系線材技術に継承されていることは特筆すべきことである。

さらに、この後継プロジェクトの成果のうち Y 系線材技術に特化して開発を進めることを目的に、「超電導応用基盤技術研究開発（Ⅱ）」（平成 15 年度～平成 19 年度）が実施された。

(2) 研究開発組織の改善・技術戦略への影響

本プロジェクトは、企業間の研究交流が極めて充実して行われた。産学官の連携強化、新たな共同研究の推進に寄与していた。本プロジェクトの実行中、終了後に、研究機関（企業、大学など）の研究開発部門の再編成、組織改変などプラス方向に進んでいる。

産業技術総合研究所には、強相関電子技術研究センターが設置された。

(3) 人材への影響

高温超電導材料分野では、本プロジェクトを契機に、ISTEC の塩原所長が、米国の Superconductor Week 社の[Person of the Year 2005]を日本人で初めて受賞し、国内外の第一人者として評価された。

ISTEC の田中前所長が紫綬褒章を受章していることも、本プロジェクトなどの貢献が評価されたものと思われる。

I－3．経済効果

(1) 市場創出への寄与

本プロジェクトは、世界的な超電導フィーバーの中で、市場化できる技術を模索することを遂行し、有望技術の識別を実施した。今日、超電導ケーブル市場創出が視野

にあることを鑑みれば、それは、本プロジェクトもその起点の一つになっているともいえる。

（２）経済的インパクト

現在の超電導分野の世界市場は 5000 億円規模であり、LTS は 98.5%、HTS は 1.5% となっている。内訳は、MRI が 80%を占め、研究開発用が 16%、新規大型応用、素子応用がそれぞれ 2%となっている。

本プロジェクトを起点とする超電導技術による市場規模は、2020 年度に国内で 603 億円、潜在ポテンシャルは 1.4 兆円と試算されている。

（３）産業構造転換・活性化の促進

2015 年時点で高温超電導による市場が立ち上がると期待されているが、本プロジェクトを起点とする超電導プロジェクト全体の、産業構造転換・活性化の促進に果たす役割も重要であったと考えられる。

I-4. 国民生活・社会レベルの向上効果

（１）エネルギー問題への影響

本プロジェクトを起点として開発されている超電導応用製品は、電力・エネルギー分野に応用されることが期待される。本プロジェクトによる技術の交通整理が果たした役割は大きい。

（２）環境問題への影響

本プロジェクトを起点とする技術開発により、省エネ効果による CO₂ 削減が期待されるため、地球温暖化対策など環境問題と密接に関係すると考えられる。

また、本プロジェクトの成果である超電導バルク材料の派生技術として、磁気分離（水質浄化）による環境負荷低減効果、あるいは水処理の分野で、当初、予想していなかった成果も出ている。

（３）情報化社会の推進

本プロジェクトを起点とする技術開発により、データセンターなどへの電力安定供給が期待されるため、情報化社会の推進に寄与するものと考えられる。

その効果はまだ評価するまでには至っていない。

（４）安全、安心、生活の質

本プロジェクトを起点とする技術開発により、電力の安定供給が期待される。また、超電導リニアによる大都市一極化社会を分散させて、地方の活性化が可能になること

が期待される。これらは国民生活の安心、生活の質の向上に寄与すると期待されるが、その効果を評価することは尚早である。

②-1 産業科学技術開発「超電導応用基盤技術研究開発（Ⅰ）」（平成 10 年度～平成 15 年度）

I．波及効果に関する調査

I－1．技術波及効果

（1）実用化の進展具合

バルク材では Gd 系で OCMG 法（酸素制御溶融法）により、臨界電流密度 3T で 10^5A/cm^2 、捕そく磁場 77K で 3T という目標を達成し、この結果を基に、社内研究などを経て、水浄化用磁気分離装置などへの適用がなされた。

Bi 系線材では、銀比の低減と臨界電流密度の向上により、Bi 系マグネットで電流減衰率 0.5%/日を達成した。浮上式鉄道のリニアモータ用として企業が独自に実応用を進めている。

Y 系線材では酸素濃度の精密制御が必要であること、キャリアドープとして Ca を、ピン止めセンターとして Zn を導入することが臨界電流の向上に有効であることを見出し、材料高度化の指針を与えたこと、また、臨界電流密度と粒界傾角の関係において傾角が 10 度を越えると臨界電流密度が急激に低下することを見出し、線材開発へ大きな指針を与えたこと、などで現在の Y 系線材技術へと大きな影響を与えた。

（2）プロジェクト成果からの技術的な広がり具合

Bi 系線材は当初想定していなかった船用モータへと適用され、プロトタイプ段階にある。またバルク材は水浄化用磁気分離装置などへの適用がなされている。

本プロジェクトの成果を反映した Bi 系線材は、浮上式鉄道のリニアモータ用として搭載された。

（3）国際競争力への影響

電力ケーブル技術は世界最高レベルにある。本プロジェクトで開発した Bi 系線材、Y 系線材が大きく貢献している。

I－2．研究開発力向上効果

（1）知的ストックの蓄積度合

原著論文数：837 件、特許出願件数：261 件の成果を出している。

先行した「超電導電力応用技術」（昭和 63 年度～平成 11 年度）で開発された Y 系線材に関する成果を本プロジェクトで継続開発した。本プロジェクトの Y 系線材作製要素技術の成果のうち、Y 系線材技術に特化して開発を進めることを目的に、「超電導応用基盤技術研究開発（Ⅱ）」（平成 15 年度～平成 19 年度）が実施された。

（2）研究開発組織の改善・技術戦略への影響

HTS 線材技術開発に関連し住友電工やフジクラで研究開発組織の拡充が進んだと思

われる。

(3) 人材への影響

HTS 線材技術開発者が育成された。

I-3. 経済効果

(1) 市場創出への寄与

現在の超電導分野の世界市場は 5000 億円規模であり、LTS は 98.5%、HTS は 1.5% となっている。内訳は、MRI が 80%を占め、研究開発用が 16%、新規大型応用、素子応用がそれぞれ 2%となっている。

超電導電力ケーブルの市場規模は、まだ立ち上がっていないが、電力ケーブルの代替需要で 2016 年ごろから立ち上がると想定されている。本プロジェクトの貢献も大きい。

(2) 経済的インパクト

超電導ケーブルの市場はまだ立ち上がっていないが、2020 年時点で国内では 52 億円と予測されている。また、超電導ケーブルによる従来ケーブル代替時には、従来のインフラ（既設管路、冷却設備設置場所）の流用などによる建設コストを半減するポテンシャルがあり、経済的メリットが大きいと想定されている。

(3) 産業構造転換・活性化の促進

このプロジェクトで開発された Bi 系線材、Y 系線材を応用した製品はまず電力ケーブルで実用化され则认为られる。現在の電力ケーブルの低電圧・大電流化により、従来のインフラが活用でき、工事費の低減化が期待されているが、現在実証中であり、経済的インパクトは現在のところ不明である。

I-4. 国民生活・社会レベルの向上効果

(1) エネルギー問題への影響

超電導電力ケーブルは送電損失を削減することが期待されている。また、電力系統に設置する電力機器の損失低減、高磁界化及び高電流密度化が可能になり、機器の高密度化、高性能化をもたらし、省エネルギー効果が大いに期待される。

(2) 環境問題への影響

省エネルギー効果による地球温暖化対策に貢献する。

(3) 情報化社会の推進

情報化社会の基盤となる電力安定供給は、情報化社会推進に大きく寄与することができる。

（４）安全、安心、生活の質

超電導電力技術は電力システムの効率向上、運用性の向上およびコンパクト化に貢献することで、電力の安定供給、品質保持にも貢献する。電力の安定供給は生活の質、安全、安心にとって重要な条件の一つである。

本プロジェクトの成果を反映した Bi 系線材は、浮上式鉄道のリニアモータ用として搭載され、国民の快適な移動手段として期待されている。

②-2 産業科学技術開発「超電導応用基盤技術研究開発（Ⅱ）」（平成 15 年度～平成 19 年度）

I. 波及効果に関する調査

I－1. 技術波及効果

（1）実用化の進展具合

先行研究の成果を基に開発された Y 系超電導線材は、液体窒素温度において磁界中での臨界電流が高いため、線材長 500m、臨界電流 300A/cm・幅、線材作製速度 5m/h、線材コスト ¥8~12/Am という成果があった。これは、LTS や Bi 系超電導線材では実現出来ない高温運転で、電力機器をはじめとした幅広い産業分野にわたる機器に有用な成果で、現在も継続して研究開発が実施されている。

各種機器のコンパクト化、軽量化、大出力、高効率、低コスト化が期待され、各種産業機器適用への波及効果も大きく、エネルギー高効率化による省エネルギー効果及び CO₂ 削減効果が大いに期待できる様になった。

（2）プロジェクト成果からの技術的な広がり具合

2009 年 11 月に ISTECH は、77K で 5 T の磁場を発生することのできる Y 系線材を開発したと発表した。これは 48K で 60T の電磁石をつくれることに相当し、液体窒素冷却が適用できるようになると、冷却が容易で機器構造が単純になるため、廉価な MRI の製造が視野に入ってきている。

（3）国際競争力への影響

先行プロジェクトの成果を継承した本プロジェクトなどで開発された Y 系線材を含む成果により、線材作製実用化・事業化が見通せることから、日米欧での高温超電導技術の応用研究開発競争において、日本が大きくリードすることになり、国際競争力も大いに増強した。

I－2. 研究開発力向上効果

（1）知的ストックの蓄積度合

原著論文数：442 件、特許出願件数：117 件の成果があった。

先行した「超電導電力応用技術」（昭和 63 年度～平成 11 年度）の Y 系線材技術は、同時並行的に実施されていた「超電導材料・超電導素子」の後継プロジェクトである「超電導応用基盤技術（Ⅰ）」へ引き継がれた。このプロジェクトの成果を基に、本プロジェクトで、Y 系線材開発に特化して実用化への道が探られた。本プロジェクトの成果を基に、後継プロジェクトで大電流・低交流損失ケーブルの開発などを目的に「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）が実施されている。

（２）研究開発組織の改善・技術戦略への影響

本プロジェクトに参画したフジクラは Y 系電力ケーブルの開発を継続しており、ISTEC との連携も密接に実施されている。

（３）人材への影響

Y 系線材開発に関連した技術者が育成されている。

I－３．経済効果

（１）市場創出への寄与

現在の超電導分野の世界市場は 5000 億円規模であり、LTS は 98.5%、HTS は 1.5% となっている。内訳は、MRI が 80%を占め、研究開発用が 16%、新規大型応用、素子応用がそれぞれ 2%となっている。

線材作製実用化・事業化が見通せることから、線材産業、機器製造産業界への経済効果も期待出来る様になった。超電導電力ケーブルの市場規模は、まだ立ち上がっていないが、電力ケーブルの代替需要で 2016 年ごろから立ち上がると想定されている。本プロジェクトの貢献も大きい。

（２）経済的インパクト

超電導ケーブルの市場はまだ立ち上がっていないが、2020 年時点で国内では 52 億円と予測されている。また、超電導ケーブルによる従来ケーブル代替時には、従来のインフラ（既設管路、冷却設備設置場所）の流用などによる建設コストを半減するポテンシャルがあり、経済的メリットが大きいと想定されている。

（３）産業構造転換・活性化の促進

Y 系線材は高磁場下での特性に優れ、量産効果によるコスト低減も期待されており、HTS 線材製造という新たな事業が立ち上がると期待されている。先行プロジェクトの成果を継承し、Y 系線材の高性能化、量産化のステージを高めた本プロジェクトの果たした役割は大きい。

I－４．国民生活・社会レベルの向上効果

（１）エネルギー問題への影響

Y 系電力ケーブルによる省エネルギーへの貢献は大きいと想定されるが、冷凍機の効率向上に依存する側面があり、まだ、未確定の部分が多い。2020 年時点で、省エネルギー量として、電力ケーブル全体で 82GWh/年という試算例がある。

（２）環境問題への影響

Y系電力ケーブルによる省エネルギーへの貢献は大きいと想定されるが、冷凍機の効率向上に依存する側面があり、まだ、未確定の部分が多い。2020年時点で、CO₂削減量が電力ケーブル全体で28,000トン/年という試算例がある。

（3）情報化社会の推進

電力の安定供給はデータセンターなどの運用に貢献し、情報化社会の推進に寄与すると期待されるが、まだ、評価する段階にはない。

（4）安全、安心、生活の質

電力の安定供給は、社会の安全、安心、生活の質向上にも直接・間接的に寄与するが、まだ導入されていないので、評価するまでには至らない。

③大型省エネルギー技術研究開発・ニューサンシャイン計画「超電導電力応用技術」(昭和63 年度～平成 11 年度)

I. 波及効果に関する調査

I-1. 技術波及効果

(1) 実用化の進展具合

低損失である 10kA 級 NbTi 線材と 5kA 級 Nb₃Sn 線材を開発するとともに、超電導界磁巻線を使った発電機で当時世界最高出力である 7 万 kW 級の発電に成功したが、経済性の観点から実用化に至っていない。

Bi 系酸化物超電導線材は、電力機器対応の可能な高臨界電流密度(10⁸A/m²)、大電流化(kA 級)および長尺化(km 級)の見通しを得た。Bi 系線材はその後住友電工の独自開発を経て、現在 Bi 系超電導電力ケーブルシステムへと発展し、実用化段階を迎えている。

Y 系酸化物超電導線材は、短尺ではあるものの、高臨界電流密度(10¹⁰A/ m²)に成功した。これらの技術を活用して、Y 系酸化物薄膜で 10A/400V、100A/200V の限流素子を開発した。課題として大電流化かつ長尺化が挙げられ、後継プロジェクトで克服することにより、現在の Y 系線材技術へと継承されている。

冷凍システムの研究開発では、7 万 kW 級超電導発電機用冷凍システムの開発に成功し、高効率、高信頼性で、コンパクトなオイルレス圧縮機を採用した超電導発電用ブレイトンサイクル冷凍システムの開発に目処を得た。この技術はヘリウム液化機の長時間運転技術として活用されている。

(2) プロジェクト成果からの技術的な広がり具合

ここで開発された NbTi 線材技術により、仕様に応じた線材設計が可能となった。古河電工による後継プロジェクトや社内開発を経て、中部電力・東芝がシャープの液晶工場において 2003 年に実施したフィールド試験 SMES へと適用された。

Bi 系線材は住友電工の独自開発を経て、400kW 級船用モータに適用されプロトタイプ段階にある。

(3) 国際競争力への影響

超電導界磁巻線を使った発電機で当時世界最高出力である 7 万 kW 級の発電に成功し、当該技術分野の技術レベルは向上したが、まだ実用化には至っていない。

I-2. 研究開発力向上効果

(1) 知的ストックの蓄積度合

論文数：483 件、特許出願件数：372 件の成果をだしている。

このプロジェクトの成果を基に、20 万 kW 級超電導発電機の設計技術確立と電機子電流の大電流化を目的としたニューサンシャイン計画「超電導発電機基盤技術研究開

発」(平成 12 年度～平成 15 年度)が後継プロジェクトとして実施された。

(2) 研究開発組織の改善・技術戦略への影響

ISTEC は昭和 63 年(1988 年)に第 1 回国際超電導シンポジウム (ISS '88)を開催し、現在まで毎年継続的に開催している。

(3) 人材への影響

HTS 線材 (Bi 系線材、Y 系線材) 開発に際し、材料技術のブレークスルーを若手研究者が体験し、関連する人材が育成され、超電導電力ケーブル開発の加速化につながった。

I-3. 経済効果

(1) 市場創出への寄与

現在の超電導分野の世界市場は 5000 億円規模であり、LTS は 98.5%、HTS は 1.5% となっている。内訳は、MRI が 80%を占め、研究開発用が 16%、新規大型応用、素子応用がそれぞれ 2%となっている。

本プロジェクトは、目標値はクリアしたが、大型化による技術開発の費用増大の懸念、LTS 線材を使うことによる冷凍負荷コストなどが克服できず、超電導発電機としての製品化はまだである。

一方、既存の NbTi 線材に「超電導電力応用技術」での開発技術をベースに更に改良した NbTi 線材が、中部電力・東芝がシャープの液晶工場で 2003 年に実施したフィールド試験 SMES へと適用され、SMES 市場立上げの起点となった。

(2) 経済的インパクト

NbTi 線材の線材設計において仕様に応じた線材設計が可能となった。

このプロジェクトで萌芽のあった Bi 系線材、Y 系線材を応用した製品はまず電力ケーブルで実用化され则认为られる。現在の電力ケーブルの低電圧・大電流化により、従来のインフラが活用でき、工事費の低減化が期待されているが、現在実証中であり、経済的インパクトは現在のところ不明である。

船舶用超電導モータ開発に関しては IHI に「船舶用超電導推進事業室」が平成 17 年に設立された。

(3) 産業構造転換・活性化の促進

超電導電力ケーブル開発の起点として大きな意義があった。特にこのプロジェクトで開発された Y 系線材の技術が、Bi 系線材と並んでエネルギー・電力分野における産業構造転換・活性化の促進に対して大きな役割を果たすことが期待される。

超電導電力ケーブルによる既存のケーブルの代替に際しては、従来のインフラを最大限に活用し、建設コストの削減が期待されている。

I－4．国民生活・社会レベルの向上効果

(1) エネルギー問題への影響

超電導電力ケーブルは送電損失を削減することが期待されている。また、電力系統に設置する電力機器の損失低減、高磁界化及び高電流密度化が可能になり、機器の高密度化、高性能化をもたらし、省エネルギー効果が大いに期待される。

(2) 環境問題への影響

省エネルギー効果による地球温暖化対策に貢献することが期待される。

(3) 情報化社会の推進

情報化社会の基盤となる電力安定供給は、情報化社会推進に大きく寄与することができる。

(4) 安全、安心、生活の質

超電導電力技術は電力システムの効率向上、運用性の向上およびコンパクト化に貢献することで、電力の安定供給、品質保持にも貢献する。電力の安定供給は生活の質、安全、安心にとって重要な条件の一つである。

シャープの液晶工場において、落雷によるラインの停止を回避することができたように、工場の操業が安定して行えることは、社会的な安全・安心に役立っている。

④ニューサンシャイン計画「超電導発電機基盤技術研究開発」(平成 12 年度～平成 15 年度)

I. 波及効果に関する調査

I-1. 技術波及効果

(1) 実用化の進展具合

20 万 kW 級発電機導体で世界トップクラスの電流密度を達成し、60 万 kW 級発電機用導体で世界トップクラスの大電流・高電流密度を達成したが、経済性の観点から実用化に至っていない。

冷凍機では、可変容量型、高負荷軸受型の膨張タービンを開発し、ヘリウム液化機へと活用されている。

(2) プロジェクト成果からの技術的な広がり具合

「超電導電力応用技術」(昭和 63 年度～平成 11 年度)で開発された NbTi 線材技術を基に開発を継続し、性能を向上させた。この線材が、中部電力・東芝がシャープの液晶工場において 2003 年に実施したフィールド試験 SMES へと適用された。

(3) 国際競争力への影響

20 万 kW 級発電機導体、60 万 kW 級発電機用導体で、世界トップクラスの電流密度を達成し、当該技術分野の技術レベルは向上したが、まだ実用化には至っていない。

I-2. 研究開発力向上効果

(1) 知的ストックの蓄積具合

原著論文数：33 件、特許出願件数：7 件の成果を出している。

「超電導電力応用技術」(昭和 63 年度～平成 11 年度)の成果を基に、20 万 kW 級超電導発電機の設計技術確立と電機子電流の大電流化を目的とした本プロジェクトで超電導発電機関連開発プロジェクトは終了した。

(2) 研究開発組織の改善・技術戦略への影響

LTS 線材設計技術は企業へと引き継がれ、SMES へと適用された。

(3) 人材への影響

LTS 線材の設計技術者は企業で開発を継続し、その成果は SMES 用線材に適用された。

I-3. 経済効果

(1) 市場創出への寄与

現在の超電導分野の世界市場は 5000 億円規模であり、LTS は 98.5%、HTS は 1.5%

となっている。内訳は、MRI が 80%を占め、研究開発用が 16%、新規大型応用、素子応用がそれぞれ 2%となっている。

本プロジェクトは、目標値はクリアしたが、大型化による技術開発の費用増大の懸念、LTS 線材を使うことによる冷凍負荷コストなどが克服できず、超電導発電機としての製品化はまだである。

一方、「超電導電力応用技術」（昭和 63 年度～平成 11 年度）で開発された NbTi 線材技術は、本プロジェクトで実用化段階に達し、この線材が、中部電力・東芝がシャープの液晶工場において 2003 年に実施したフィールド試験 SMES へと適用された。

（２）経済的インパクト

本プロジェクトによる派生的な NbTi 線材は SMES へと適用されているが、まだ大きな製品売上へとは至っていない。

（３）産業構造転換・活性化の促進

NbTi 線材の売上に寄与したが、産業構造転換・活性化の促進という観点では特段、特記すべき事項は見当たらない。

I－４．国民生活・社会レベルの向上効果

（１）エネルギー問題への影響

SMES は電力供給安定、瞬低対策として有用であり、エネルギー・電力分野への貢献は大きい。省エネルギー効果も期待できる。

（２）環境問題への影響

発電機の発電効率の高効率化を目指したが、実用化に至らず、特記すべき事項は見当たらないが、NbTi 線材改良による SMES の実用化に貢献しており、将来の省エネルギー効果も期待できる。

（３）情報化社会の推進

データセンターなど情報化社会でのインフラにとって、電力安定供給の技術は不可欠である。

（４）安全、安心、生活の質

超電導電力技術は電力システムの効率向上、運用性の向上およびコンパクト化に貢献することで、電力の安定供給、品質保持にも貢献する。電力の安定供給は生活の質、安全、安心にとって重要な条件の一つである。

NbTi 線材技術の改良が貢献した SMES を設置したシャープの液晶工場において、

落雷によるラインの停止を回避することができたように、工場の操業が安定して行えることは、社会的な安全・安心に役立っている。

⑤「超電導電力貯蔵システム要素技術開発調査」(平成3年度～平成10年度)

I. 波及効果に関する調査

I-1. 技術波及効果

(1) 実用化の進展具合

20MW/100kWh 級 SMES の要素技術として、超電導コイルの安定な繰り返し運転に成功するとともに、Y 系電流リードの開発などを実施し、現在実用化されている LTS-SMES の原点として歴史的意義がある。

LTS の SMES は工場の瞬低対策用として、導入が開始されている。

(2) プロジェクト成果からの技術的な広がり具合

このプロジェクトで得られた LTS-SMES の要素技術(コイル損失改善、クエンチ保護、交直変換、永久電流スイッチ)が、中部電力・東芝がシャープの液晶工場において 2003 年に実施したフィールド試験 LTS-SMES において活用された。

(3) 国際競争力への影響

我が国で開発されている LTS-SMES の蓄積エネルギーは現在世界一の水準に達しており、このプロジェクトがその起点となっている。

I-2. 研究開発力向上効果

(1) 知的ストックの蓄積度合

論文、特許等のデータは未入手である。

このプロジェクトの成果を基に、市場ニーズがあり、実用化の可能性が見込まれる小規模な系統制御用 SMES にターゲットを絞り、低コスト化の技術開発を行うとともに、さらなるコスト低減の可能性のある HTS を用いた SMES の要素開発を目的に、「超電導電力貯蔵システム技術開発調査」(平成11年度～平成15年度)が、後継プロジェクトとして実施された。さらに、その後継プロジェクトとして、要素技術(酸化物超電導コイル、高信頼性極低温冷凍機、高性能電流リード)の開発と 10MVA/20MJ 級 SMES の製作と実系統連系運用を目的として「超電導電力ネットワーク制御技術開発」(平成16年度～平成19年度)が実施された。また、現在、Y 系線材を使った 2GJ 級 SMES のコイル構成の設計を目的として「リ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)が実施されている。

(2) 研究開発組織の改善・技術戦略への影響

このプロジェクトに参画した ISTEK、中部電力、九州電力、電力中央研究所は、このプロジェクトで技術を蓄積し、さらに後継プロジェクトにも参画し、現在 LTS-SMES 技術分野のトップランナーとなっている。

（３）人材への影響

中部電力、九州電力、電力中央研究所などで、SMES 技術の人材が育成された。

I－３．経済効果

（１）市場創出への寄与

現在の超電導分野の世界市場は 5000 億円規模であり、LTS は 98.5%、HTS は 1.5% となっている。内訳は、MRI が 80%を占め、研究開発用が 16%、新規大型応用、素子応用がそれぞれ 2%となっている。

現在のところ国内では LTS の SMES が液晶工場に導入されているが、まだ、市場形成には至っていない。今後開発が進むものとして、2020 年時点での SMES の国内市場規模は、142 億円と試算されている。

（２）経済的インパクト

SMES 製品の売上はまだわずかであるが、製品として市場へ投入された意義は大きい。

（３）産業構造転換・活性化の促進

SMES 製品の市場投入が始まったが、まだ、産業構造転換・活性化の促進という観点では特段、特記すべき事項は見当たらない。

I－４．国民生活・社会レベルの向上効果

（１）エネルギー問題への影響

SMES は電力系統の安定化へとつながり、また、太陽光発電や風力発電などの新エネルギー特有の電力変動を緩和できるため、有用な技術であり、その導入促進はエネルギー問題の解決のキー技術の一つであるといえる。

また、瞬低対策にもなるため、既に工場に導入され、安定操業に貢献している。

（２）環境問題への影響

太陽光発電や風力発電などの新エネルギー特有の電力変動を緩和できるため、温暖化ガスの排出削減に有用である。

（３）情報化社会の推進

負荷変動補償や系統安定化のための SMES システムは、データセンターの運用安定に貢献できるため、情報化社会の推進にとっても今後不可欠のインフラとなるが、まだ導入されていない。

（４）安全、安心、生活の質

太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーは変動があるため系統連系が難しかったが、**LTS-SMES** の導入により電力系統安定化に貢献できるため、再生エネルギーの活用が進み、生活の質の向上に効果がある。

⑥「超電導電力貯蔵システム技術開発調査」(平成 11 年度～平成 15 年度)

I. 波及効果に関する調査

I-1. 技術波及効果

(1) 実用化の進展具合

実用化が見込まれる小規模系統制御用 SMES のコスト削減を目的として LTS 線材を使ったシステムのコスト評価を実施し、その成果は現在の瞬低用 LTS-SMES へと反映されている。

Bi 系線材の 4kA 通電に成功し HTS-SMES 実現に十分であることを確認したが、高磁場下の性能に制約があるため、HTS-SMES としては実用化されていない。

Y 系線材を使った HTS-SMES の概念設計とコスト評価を実施し、30K レベルで金属系 SMES よりも経済性に優れることを明確化し、現在の Y 系 SMES 開発へとつながっている。

(2) プロジェクト成果からの技術的な広がり具合

このプロジェクトで得られた SMES のコスト評価手法は、中部電力・東芝がシャープの液晶工場において 2003 年に実施したフィールド試験 LTS-SMES において活用された。

(3) 国際競争力への影響

LTS-SMES の蓄積エネルギーは現在世界的水準、先行プロジェクトの成果を継承したこのプロジェクトも貢献している。

I-2. 研究開発力向上効果

(1) 知的ストックの蓄積度合

原著論文数：31 件、特許出願件数：6 件の成果を出している。

「超電導電力貯蔵システム要素技術開発調査」(平成 3 年度～平成 10 年度)プロジェクトの成果を基に、本プロジェクトが遂行された。本プロジェクトの成果を基に、後継プロジェクトとして、要素技術(酸化物超電導コイル、高信頼性極低温冷凍機、高性能電流リード)の開発と 10MVA/20MJ 級 SMES の製作と実系統連系運用を目的として「超電導電力ネットワーク制御技術開発」(平成 16 年度～平成 19 年度)が実施された。また、現在、Y 系線材を使った 2GJ 級 SMES のコイル構成の設計を目的として「リ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)が実施されている。

(2) 研究開発組織の改善・技術戦略への影響

このプロジェクトに参画した ISTEK、中部電力、九州電力、電力中央研究所は、先

行プロジェクトで蓄積した技術を基に、本プロジェクトでさらに技術を蓄積し、後継プロジェクトにも参画し、現在 SMES 技術分野のトップランナーとなっている。

（３）人材への影響

中部電力、九州電力、電力中央研究所などで、SMES 技術の人材が育成された。

I－３．経済効果

（１）市場創出への寄与

現在の超電導分野の世界市場は 5000 億円規模であり、LTS は 98.5%、HTS は 1.5% となっている。内訳は、MRI が 80%を占め、研究開発用が 16%、新規大型応用、素子応用がそれぞれ 2%となっている。

現在のところ国内では LTS の SMES が液晶工場に導入されているが、まだ、市場形成には至っていない。今後開発が進むものとして、2020 年時点での SMES の国内市場規模は、142 億円と試算されている。

（２）経済的インパクト

LTS-SMES 製品の売上はまだわずかであるが、製品として市場へ投入された意義は大きい。

（３）産業構造転換・活性化の促進

LTS-SMES 製品の市場投入が始まったが、まだ、産業構造転換・活性化の促進という観点では、評価できる段階にはない。

I－４．国民生活・社会レベルの向上効果

（１）エネルギー問題への影響

SMES は電力系統の安定化へとつながり、また、太陽光発電や風力発電などの新エネルギー特有の電力変動を緩和できるため、有用な技術であり、その導入促進はエネルギー問題の解決のキー技術の一つであるといえる。

また、瞬低対策にもなるため、既に工場に導入され、安定操業に貢献している。

（２）環境問題への影響

太陽光発電や風力発電などの新エネルギー特有の電力変動を緩和できるため、温暖化ガスの排出削減に有用である。

（３）情報化社会の推進

負荷変動補償や系統安定化のための SMES システムは、データセンターの運用安定

に貢献できるため、情報化社会の推進にとっても今後不可欠のインフラとなるが、まだ導入されていない。

（４）安全、安心、生活の質

太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーは変動があるため系統連系が難しかったが、**LTS-SMES** の導入により電力系統安定化に貢献できるため、再生エネルギーの活用が進み、生活の質の向上に効果がある。

⑦「超電導電力ネットワーク制御技術開発」(平成 16 年度～平成 19 年度)

I. 波及効果に関する調査

I-1. 技術波及効果

(1) 実用化の進展具合

SMES の電力系統制御システムとしての機能検証を目的とし、LTS 線材を使った 10MVA/20MJ 級 SMES を製作し、実系統に連系して充放電試験を完了し、コスト削減の課題を残すものの、実証段階に達しているといえる。

Bi 系コイルの試作・特性評価を実施したが、Bi 系の高磁場下での性能発揮が難しいため、実用化には至っていない。

Y 系コイルの試作・特性評価を実施し、250A 安定通電に成功し、今後の Y 系 SMES 開発の基礎データとなった。

Nb 系コイルの軸受を使った 200MJ 級車両用フライホイールの開発が JR 東海・東芝で実施されたが、まだプロトタイプ段階である。

(2) プロジェクト成果からの技術的な広がり具合

このプロジェクトで製作した LTS 線材を使った 10MVA/20MJ 級 SMES を、実系統に連系して充放電試験を実施した成果は、中部電力・東芝がシャープの液晶工場において 2003 年に実施したフィールド試験 LTS-SMES において活用された。

(3) 国際競争力への影響

LTS-SMES の蓄積エネルギーは現在世界的レベルにあり、先行するプロジェクトの成果を継承したこのプロジェクトも貢献している。

I-2. 研究開発力向上効果

(1) 知的ストックの蓄積度合

原著論文数：27 件、特許出願件数：5 件の成果を出している。

「超電導電力貯蔵システム要素技術開発調査」(平成 3 年度～平成 10 年度)プロジェクトの成果と、「超電導電力貯蔵システム技術開発調査」(平成 11 年度～平成 15 年度)の成果を基に、本プロジェクトが遂行された。本プロジェクトの成果を基に、現在、Y 系線材を使った 2GJ 級 SMES のコイル構成の設計を目的として「リ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)が実施されている。

(2) 研究開発組織の改善・技術戦略への影響

このプロジェクトに参画した ISTEK、中部電力、九州電力、電力中央研究所は、このプロジェクトで技術を蓄積し、さらに後継プロジェクトにも参画し、現在 SMES 技術分野のトップランナーとなっている。

（３）人材への影響

中部電力、九州電力、電力中央研究所などで、SMES 技術の人材が育成された。

I－３．経済効果

（１）市場創出への寄与

現在の超電導分野の世界市場は 5000 億円規模であり、LTS は 98.5%、HTS は 1.5% となっている。内訳は、MRI が 80%を占め、研究開発用が 16%、新規大型応用、素子応用がそれぞれ 2%となっている。

現在のところ国内では LTS の SMES が液晶工場に導入されているが、まだ、市場形成には至っていない。今後開発が進むものとして、2020 年時点での SMES の国内市場規模は、142 億円と試算されている。

（２）経済的インパクト

SMES 製品の売上はまだわずかであるが、製品として市場へ投入された意義は大きい。

（３）産業構造転換・活性化の促進

SMES 製品の市場投入が始まったが、まだ、産業構造転換・活性化の促進という観点では特段、特記すべき事項は見当たらない。

I－４．国民生活・社会レベルの向上効果

（１）エネルギー問題への影響

SMES は電力系統の安定化へとつながり、また、太陽光発電や風力発電などの新エネルギー特有の電力変動を緩和できるため、有用な技術であり、その導入促進はエネルギー問題の解決のキー技術の一つであるといえる。

また、瞬低対策にもなるため、既に工場に導入され、安定操業に貢献している。

（２）環境問題への影響

太陽光発電や風力発電などの新エネルギー特有の電力変動を緩和できるため、温暖化ガスの排出削減に有用である。

（３）情報化社会の推進

負荷変動補償や系統安定化のための SMES システムは、データセンターの運用安定への貢献もできるため、情報化社会の推進にとっても今後不可欠のインフラとなると期待されている。そのためには大幅な技術性能の向上とコストダウンが必須である。

（４）安全、安心、生活の質

太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーは変動があるため系統連系が難しかったが、**LTS-SMES** の導入により電力系統安定化に貢献できるため、再生エネルギーの活用が進み、生活の質の向上に効果がある。

⑧ニューサンシャイン計画「高温超電導フライホイール電力貯蔵研究開発」（平成 7 年度～平成 11 年度）

I. 波及効果に関する調査

I-1. 技術波及効果

(1) 実用化の進展具合

軸受に高温超電導材（Y 系）を使ったエネルギー貯蔵用 1MJ 級フライホイールによる性能評価を実施したが、経済性の観点から、まだプロトタイプ段階にある。

(2) プロジェクト成果からの技術的な広がり具合

フライホイールの技術開発はまだプロトタイプ段階であり、波及効果に関しては、特段の特記事項はない。

(3) 国際競争力への影響

Y 系バルク材を軸受に使ったフライホイールの蓄積エネルギーは、世界レベルであり、本プロジェクトはその起点となっている。

I-2. 研究開発力向上効果

(1) 知的ストックの蓄積度合

原著論文数：23 件、特許出願件数：26 件の成果が得られている。

本プロジェクトの成果を基に、後継プロジェクト「フライホイール電力貯蔵用超電導軸受技術研究開発」（平成 12 年度～平成 16 年度）が実施された。

(2) 研究開発組織の改善・技術戦略への影響

このプロジェクトに参画した ISTEK、四国総研、IHI、光洋精工などは、本プロジェクトで技術を蓄積し、後継プロジェクトにも参画した。

フライホイール技術の基本的知見は、「超電導電力ネットワーク制御技術開発」（平成 16 年度～平成 19 年度）プロジェクトの Nb 系コイルの軸受を使った 200MJ 級車両用フライホイールの開発にも活用されている。

(3) 人材への影響

フライホイール研究開発者は育成されたが、プロジェクトの停滞もあり、現状については特段の特記事項はない。

I-3. 経済効果

(1) 市場創出への寄与

超電導フライホイールの市場はまだ立ち上がっていない。

(2) 経済的インパクト

超電導フライホイールの市場はまだ立ち上がっていないので、経済的インパクトについての特段の特記事項はない。

(3) 産業構造転換・活性化の促進

超電導フライホイールの市場はまだ立ち上がっていないので、産業構造転換・活性化の促進についての特段の特記事項はない。

I－4．国民生活・社会レベルの向上効果

(1) エネルギー問題への影響

潜在的ポテンシャルは存在するが、エネルギー問題への貢献は未知数である。

(2) 環境問題への影響

潜在的ポテンシャルは存在するが、環境問題への貢献は未知数である。

(3) 情報化社会の推進

IT 関連設備の信頼性向上への潜在的ポテンシャルは存在するが、情報化社会の推進に寄与するかどうかは未知数である。

(4) 安全、安心、生活の質

電力エネルギーの安定供給と IT 関連インフラ設備の信頼性向上へのポテンシャルは存在するが、現時点では未知数である。

⑨ニューサンシャイン計画「フライホイール電力貯蔵用超電導軸受技術研究開発」(平成 12 年度～平成 16 年度)

I. 波及効果に関する調査

I-1. 技術波及効果

(1) 実用化の進展具合

軸受に高温超電導材 (Y 系) を使ったエネルギー貯蔵用 40MJ 級フライホイールの軸受技術に特化し、運転試験装置を製作した。経済性の観点から、まだプロトタイプ段階にある。

(2) プロジェクト成果からの技術的な広がり具合

フライホイールの技術開発はまだプロトタイプ段階であり、波及効果に関しては、特段の特記事項はない。

(3) 国際競争力への影響

Y 系バルク材を軸受に使ったフライホイールの蓄積エネルギーは、世界レベルであり、本プロジェクトも貢献している。

I-2. 研究開発力向上効果

(1) 知的ストックの蓄積度合

論文 27 件、特許出願件数：2 件の成果が得られている。

先行した「高温超電導フライホイール電力貯蔵研究開発」(平成 7 年度～平成 11 年度) の成果を基に、本プロジェクトが後継プロジェクトとして実施された。

(2) 研究開発組織の改善・技術戦略への影響

このプロジェクトに参画した ISTEK、四国総研、IHI、光洋精工などは、先行プロジェクトで技術を蓄積し、本プロジェクトにも参画した。

フライホイール技術の基本的知見は、「超電導電力ネットワーク制御技術開発」(平成 16 年度～平成 19 年度) プロジェクトの Nb 系コイルの軸受を使った 200MJ 級車両用フライホイールの開発にも活用されている。

(3) 人材への影響

フライホイール研究開発者は育成されたが、プロジェクトの停滞もあり、現状については特段の特記事項はない。

I-3. 経済効果

(1) 市場創出への寄与

超電導フライホイールの市場はまだ立ち上がっていない。

(2) 経済的インパクト

超電導フライホイールの市場はまだ立ち上がっていないので、経済的インパクトについての特段の特記事項はない。

(3) 産業構造転換・活性化の促進

超電導フライホイールの市場はまだ立ち上がっていないので、産業構造転換・活性化の促進についての特段の特記事項はない。

I－4．国民生活・社会レベルの向上効果

(1) エネルギー問題への影響

潜在的ポテンシャルは存在するが、エネルギー問題への貢献は未知数である。

(2) 環境問題への影響

潜在的ポテンシャルは存在するが、環境問題への貢献は未知数である。

(3) 情報化社会の推進

IT 関連設備の信頼性向上への潜在的ポテンシャルは存在するが、情報化社会の推進に寄与するかどうかは未知数である。

(4) 安全、安心、生活の質

電力エネルギーの安定供給と IT 関連インフラ設備の信頼性向上へのポテンシャルは存在するが、現時点では未知数である。

⑩ニューサンシャイン計画「交流超電導電力機器基盤技術研究開発」（平成 12 年度～平成 16 年度）

I．波及効果に関する調査

I－1．技術波及効果

（1）実用化の進展具合

単心構造で長さ 3m の Bi 系超電導ケーブルを製作し 3kA の通電、交流損失 1W/m を実証し、現在実用化目前の超電導ケーブルの原点となった。

Bi 系 500m ケーブルの構造、仕様、試験項目、布設レイアウト等を検討し、系統連系はしなかったものの、Bi 系 500m ケーブルによる実証試験に成功した。

Y 系線材で 1 m の単尺導体を作成し、通電容量 1kA の交流損失を評価し、現在開発中の Y 系超電導ケーブルの基礎データとなった。

40 枚素子を直列化した 6.6kV/50A 級限流モジュールで電圧ピーク値 11.9kV を確認し、現在開発中の限流器の基礎データとなった。

66kV/6.9kV-10MVA 変圧器の要素モデルにより電圧 77kV、電流 800A の通電を確認し、現在開発中の変圧器の基礎データとなった。

（2）プロジェクト成果からの技術的な広がり具合

2 次元揺動 PLD 法など製造プロセスへの技術的な広がりがあった。都市部地中系統に超電導ケーブルや限流器を導入する解析モデルは汎用性がある。超電導ケーブル、限流器、遮断器、ヒューズ、変圧器、リアクトルなどの試験方法の技術は広く応用されている。

（3）国際競争力への影響

電力機器（電力ケーブル、限流器、変圧器など）は世界レベルにある。本プロジェクトの貢献も大きい。

I－2．研究開発力向上効果

（1）知的ストックの蓄積度合

原著論文数：131 件、特許出願件数：35 件の成果がある。

先行した「超電導電力応用技術」（昭和 63 年度～平成 11 年度）の成果の一部を継承し、本プロジェクトが実施された。本プロジェクトの成果は、現在実施中の、Bi 系電力ケーブルの実証を目的とした後継プロジェクト「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」（平成 19 年度～平成 24 年度）、および、Y 系電力機器の開発を目的とした後継プロジェクト「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）」へと継承されている。

（２）研究開発組織の改善・技術戦略への影響

本プロジェクトに参画した住友電工は、自社開発も併用しながら Bi 系線材開発を精力的に行っており、社内的組織の改編につながっている。また、東京電力との連携も緊密に行われており、現行プロジェクトの超電導電力ケーブル実証試験が順調に遂行されている。

また、フジクラも Y 系電力ケーブルの開発を継続しており、ISTEC との連携も密接に実施されている。

（３）人材への影響

Bi 系線材開発、Y 系線材開発、電力系統への接続技術、冷凍機運用の基本技術に関連した技術者が育成されている。

I－３．経済効果

（１）市場創出への寄与

現在の超電導分野の世界市場は 5000 億円規模であり、LTS は 98.5%、HTS は 1.5% となっている。内訳は、MRI が 80%を占め、研究開発用が 16%、新規大型応用、素子応用がそれぞれ 2%となっている。

超電導電力ケーブルの市場規模は、まだ立ち上がっていないが、電力ケーブルの代替需要で 2016 年ごろから立ち上がると想定されている。本プロジェクトの貢献も大きい。

（２）経済的インパクト

超電導ケーブルの市場はまだ立ち上がっていないが、2020 年時点で国内では 52 億円と予測されている。また、超電導ケーブルによる従来ケーブル代替時には、従来のインフラ（既設管路、冷却設備設置場所）の流用などによる建設コストを半減するポテンシャルがあり、経済的メリットが大きいと想定されている。

（３）産業構造転換・活性化の促進

Bi 系線材は米国・韓国の電力ケーブルへも輸出されており、HTS 線材製造という新たな事業が立ち上がってきている。本プロジェクトの果たした役割は大きい。

I－４．国民生活・社会レベルの向上効果

（１）エネルギー問題への影響

交流電力機器による省エネルギーへの貢献は大きいと想定されるが、冷凍機の効率向上に依存する側面があり、まだ、未確定の部分が多い。2020 年時点で、省エネルギー量として、電力ケーブルで 82GWh/年、変圧器で 94GWh/年という試算例がある。

（２）環境問題への影響

交流電力機器による省エネルギーへの貢献は大きいと想定されるが、冷凍機の効率向上に依存する側面があり、まだ、未確定の部分が多い。2020年時点で、CO₂削減量が電力ケーブル全体で 28,000 トン/年、変圧器で 32,000 トン/年という試算例がある。

（３）情報化社会の推進

電力の安定供給はデータセンターなどの運用に貢献し、情報化社会の推進に寄与すると期待されるが、まだ、評価する段階にはない。

（４）安全、安心、生活の質

電力の安定供給は、社会の安全、安心、生活の質向上にも直接・間接的に寄与するが、まだ導入されていないので、評価するまでには至らない。

（２）超電導素子分野

①産業科学技術開発「超電導材料・超電導素子」（昭和 63 年度～平成 9 年度）

I．波及効果に関する調査

I－１．技術波及効果

（１）実用化の進展具合

世界的な高温超電導フィーバーの中で、高温超電導に関する基礎・応用の両面で並行的に研究・開発が実施され、将来技術の見極めと方向付けがなされた結果、高温超電導技術の技術基盤が整理され、物質探査効率が向上し、現在の超電導技術へとつながっている。

高温超電導材料の高集積度の困難さが判明したが、SFQ ロジック回路開発に方向転換し、現在の SFQ 技術開発の起点として大きな意味を持っている。

（２）プロジェクト成果からの技術的な広がり具合

派生技術として、フィルタ関係などデバイス用に必要な、小型冷凍機(数ワット級)が生まれた。超電導素子デバイスが増えれば、比例して膨大な市場になると期待される。

ARPES（角度分解光電子分光、低温物性測定）は派生技術として想定外のものであった。プロジェクトで開発された薄膜技術は分子線エピタキシー法とパルスレーザデポジションに分かれて進化し、国内外で高く評価されている。

HTS と LTS の技術で共通するものに実装技術があり、両者の技術の進歩はお互いに役に立っている。

薄膜技術が進展した。

（３）国際競争力への影響

フィルタは米国が先行している。本プロジェクトを起点とする超電導プロジェクト全体で見ると、SFQ ロジック回路は世界的レベルにあり、三端子回路から路線転換した影響は大きい。

I－２．研究開発力向上効果

（１）知的ストックの蓄積度合

本プロジェクトの成果を基に、高温超電導技術を実用機器に利用するためには未だ解決すべき課題が多いため、これら課題の解決による高温超電導材料の実用化を目指し超電導素子を作製するための基盤技術を確立することを目的として、後継プロジェクト「超電導応用基盤技術研究開発（Ⅰ）」（平成 10 年度～平成 15 年度）が実施された。さらに、この後継プロジェクトの成果を基に、後継プロジェクト「低消費電力型超電導ネットワークデバイスの開発」（平成 14 年度～平成 18 年度）が実施された。

（２）研究開発組織の改善・技術戦略への影響

ISTEC では、HTS 分野と LTS 分野に分かれて SFQ ロジック回路の開発研究を行う体制が構築された。

（３）人材への影響

超電導素子の分野で NEC の研究者が本プロジェクトでの仕事が評価され、スタンフォード大学で IEEE のフェローになっており、人材育成には十分貢献している。

産業技術総合研究所における高温超電導の STM 観察は、当初評価されなかったが、その結果が高温超電導の構造そのものを表すことが分かり、米国で評価されて IBM 賞を受賞している。それを機会に第一人者としても評価されている。

産業技術総合研究所における高温超電導で育成された多くの優秀な人材は、電圧標準などの組織の要員として活躍している。

I－３．経済効果

（１）市場創出への寄与

経済効果、市場性を評価する段階には入っていない。派生技術として成膜装置メーカーに影響があったとは考えられる。

（２）経済的インパクト

後継プロジェクトを含め、フィルタなどのごく一部を除き、製品化されていないので、評価できる段階にはない。

（３）産業構造転換・活性化の促進

後継プロジェクトを含め、フィルタなどのごく一部を除き、製品化されていないので、評価できる段階にはない。

I－４．国民生活・社会レベルの向上効果

（１）エネルギー問題への影響

HTS は高集積化が難しいが、低集積度ですむフィルタが、携帯電話地上基地局に導入されている。SFQ ルータの省エネ効果はグリーン IT の中でも大いに期待されている。その実現は 2015 年を想定している。省エネルギー効果は未知数である。

（２）環境問題への影響

グリーン IT に寄与すると期待されているが、評価できる段階にない。

(3) 情報化社会の推進

グリーン IT に寄与すると期待されているが、評価できる段階にない。

(4) 安全、安心、生活の質

評価するまでに至っていない。

②-1 産業科学技術開発「超電導応用基盤技術研究開発（Ⅰ）」（平成 10 年度～平成 15 年度）

I. 波及効果に関する調査

I-1. 技術波及効果

（1）実用化の進展具合

SFQ 集積回路に必要な要素技術を取得した。IcRn 積及び 1000 接合アレイにおけるバラツキの目標値を上回り、現在の SFQ ロジック回路のベースが確立された。

AD コンバータや SFQ サンプラー回路など小規模実証回路を試作した。夫々 100GHz 高速動作の実証、20GHz までの高速波形の観測に成功し、消費電力については 90nW を達成し、現在の SFQ ロジック回路技術へとつながっている。

（2）プロジェクト成果からの技術的な広がり具合

接合特性の制御性向上、入出力インターフェイスなどの実装技術、大規模 SFQ 回路接合の臨界電流値の制御などの研究開発が今後進展することにより超電導エレクトロニクス技術の応用分野は広がると期待されるが、現在では未知数である。

（3）国際競争力への影響

フィルタは米国が先行している。SFQ ロジック回路は世界レベルであり、本プロジェクトも貢献している。

I-2. 研究開発力向上効果

（1）知的ストックの蓄積度合

原著論文数：837 件、特許出願件数：261 件の成果があった。（材料・素子両分野の合計）

先行した「超電導材料・超電導素子」（昭和 63 年度～平成 9 年度）の成果を基に、本プロジェクトが実施された。本プロジェクトの成果を基に、超電導回路における低消費電力高性能デバイスを実現することを目的として、後継プロジェクト「低消費電力型超電導ネットワークデバイスの開発」（平成 14 年度～平成 18 年度）プロジェクトが実施され、ニオブ系低温超電導デバイス開発および酸化物系高温超電導デバイスの開発が行われた。また、後継プロジェクトの成果を基に、「次世代高効率ネットワークデバイス共通基盤技術の開発」の一環として、「超電導回路技術開発」で「超電導リアルタイムオシロスコープ用高速 AD コンバータの開発」を目的とする後継プロジェクト「次世代高効率ネットワークデバイス技術開発」（平成 19 年度～平成 23 年度）が実施中である。

（2）研究開発組織の改善・技術戦略への影響

ISTEC では、HTS 分野と LTS 分野に分かれて SFQ ロジック回路の開発研究を行う

体制が構築された。

(3) 人材への影響

ISTEC で SFQ ロジック回路技術者が育成された。

I－3．経済効果

(1) 市場創出への寄与

経済効果、市場性を評価する段階には至っていない。派生技術として成膜装置メーカーに影響があったとは考えられる。

(2) 経済的インパクト

フィルタなどを除けば、先行プロジェクト及び本プロジェクトの成果が雇用創出効果に繋がったかどうかはまだ分からない。コンピュータなどの製品化はなされていないので、評価する段階にはない。

(3) 産業構造転換・活性化の促進

後継プロジェクトを含め、フィルタなどのごく一部を除き、製品化されていないので、評価できる段階にはない。

I－4．国民生活・社会レベルの向上効果

(1) エネルギー問題への影響

高集積化が難しいが、低集積度ですむフィルタが、携帯電話地上基地局に導入されている。SFQ ルータの省エネ効果はグリーン IT の中でも大いに期待されている。その実現は 2015 年を想定している。省エネルギー効果は未知数である。

(2) 環境問題への影響

評価する段階に至っていない。

(3) 情報化社会の推進

グリーン IT に寄与すると期待されているが、特段の特記事項はない。

(4) 安全、安心、生活の質

評価するまでに至っていない。

⑪「低消費電力型超電導ネットワークデバイスの開発」(平成 14 年度～平成 18 年度)

I. 波及効果に関する調査

I-1. 技術波及効果

(1) 実用化の進展具合

Nb 系 LSI プロセス開発で新平坦化法などの要素技術開発に成功し、ニオブ 9 層構造を可能にした新プロセス技術を開発し実用化した。これは、現在の SFQ ロジック回路開発に活用されている。

SFQ 回路設計基盤技術である PTL (Passive Transmission Line)配線法という回路高速化技術を SFQ 回路に適用した非同期設計法は実用化している。

酸化物系集積回路プロセスである超電導 4 層の積層構造の作製技術と最小線幅 1 μ m の回路加工技術を実用化している。

酸化物系高温超電導プロセスで作製可能な比較的集積規模の小さな (500 接合以下) 超電導フロントエンド回路と半導体信号処理回路 (バックエンド回路) を組み合わせた AD コンバータの開発は実用化可能である。

(2) プロジェクト成果からの技術的な広がり具合

交差配線形成を可能とする新積層構造作製プロセスとプロセス中に酸素抜けをモニタリングする技術を開発し、回路歩留まりの向上は広く応用できる。超電導 SFQ ルータは、将来の超大容量ルータ実現に向けたブレークスルー技術となる可能性があり、戦略的に重要な技術であると考えられるが、効果は未知数である。

(3) 国際競争力への影響

フィルタは米国が先行している。SFQ ロジック回路は世界レベルであり、本プロジェクトも貢献している。

I-2. 研究開発力向上効果

(1) 知的ストックの蓄積度合

原著論文数：105 件、特許出願件数：32 件の成果が出ている。

先行した「超電導材料・超電導素子」(昭和 63 年度～平成 9 年度)と「超電導応用基盤技術研究開発 (I)」(平成 10 年度～平成 14 年度)の成果を基に、本プロジェクトが実施された。本プロジェクトの成果を基に、「次世代高効率ネットワークデバイス共通基盤技術の開発」の一環として、「超電導回路技術開発」で「超電導リアルタイムオシロスコープ用高速 AD コンバータの開発」を目的とする後継プロジェクト「次世代高効率ネットワークデバイス技術開発」(平成 19 年度～平成 23 年度)が実施中である。

(2) 研究開発組織の改善・技術戦略への影響

ISTEC では、HTS 分野と LTS 分野に分かれて SFQ ロジック回路の開発研究を行う体制が構築された。

(3) 人材への影響

ISTEC で SFQ ロジック回路技術者が育成された。

I-3. 経済効果

(1) 市場創出への寄与

経済効果、市場性を評価する段階には入っていない。派生技術として成膜装置メーカーに影響があったとは考えられる。

(2) 経済的インパクト

本プロジェクトの成果が雇用創出効果に繋がったかどうかはまだ分からない。素子回路のための基礎研究であり、直接的な雇用創出効果は時間を経なければ分からない。

(3) 産業構造転換・活性化の促進

産業構造の転換や活性化に寄与したかどうかについては、評価できる段階にはない。

I-4. 国民生活・社会レベルの向上効果

(1) エネルギー問題への影響

高集積化が難しいが、低集積度ですむフィルタが、携帯電話地上基地局に導入されている。SFQ ルータの省エネ効果はグリーン IT の中でも大いに期待されている。その実現は 2015 年を想定している。省エネルギー効果は未知数である。

(2) 環境問題への影響

評価する段階に至っていない。

(3) 情報化社会の推進

グリーン IT に寄与すると期待されているが、評価できる段階にはない。

(4) 安全、安心、生活の質

本プロジェクトの成果が果たした役割は現状では明確ではないが、派生技術も含めて貢献していくと思われる。

超電導材料・超電導素子研究開発の
技術・産業・社会へのインパクトに関する追加調査

報告書の概要

平成22年2月24日

株式会社 日鉄技術情報センター

目次

1. 超電導プロジェクト全体の概要	p.3
2. 実用化への進展度合	p.10
3. 個別プロジェクトの概要	p.26
4. 施策評価項目に関する調査概要	p.41

1. 超電導プロジェクト全体の概要

1-1. 超電導プロジェクト全体概観 p.4

1-2. ロジックツリーと技術戦略マップ p.8

超電導プロジェクト全体概観

4

- 高温超電導(HTS)を発現する酸化物超電導物質の発見により、液体窒素温度レベルにおいて超電導現象を利用した機器・設備の実現が期待され、省エネルギー、環境保全等社会的要請に応えるため、新技術の見極めとその後の展開を着実に進めることを目的として、経済産業省は超電導研究開発に着手した。
- 当時世界規模で熾烈な開発競争が続けられており、民間企業で行うには開発リスクが大きく、経済的負担も大きすぎることに、また、超電導研究開発は、技術的難度、多くの企業の協力、政策的意義付けの高さが必要であることから、国の研究開発として実施する必要があった。
- 1990年代の研究開発プロジェクトを概観すると、同時並行的に実施されていた個々のプロジェクトは独自に進んでおり、その目標を達成したが、研究の内容、フェーズの整理がなされていたとは言い難い部分があったため、相互調整の必要があったと考えられる。
- 研究開発を有効に進めるためには、関係するプロジェクトをまとめて俯瞰的に見て、プロジェクト間の研究開発の内容を取捨選択したり、移行させたりすることが有効であると考えられ、「施策評価」の見方を早くから導入して整理することが大事である。
- これまでの開発の結果、現在では、CO₂低減の社会要請に応えるため、「Cool Earth-エネルギー革新技術計画」において、「超電導高効率送電技術」が一つのテーマとして選定されており、超電導研究開発は、省エネルギーに大きく貢献する技術となっている。これまでの成果を生かして研究開発を継続し、超電導技術を実用化へと持っていくべきと考える。

国内超電導関連プロジェクトと超電導技術

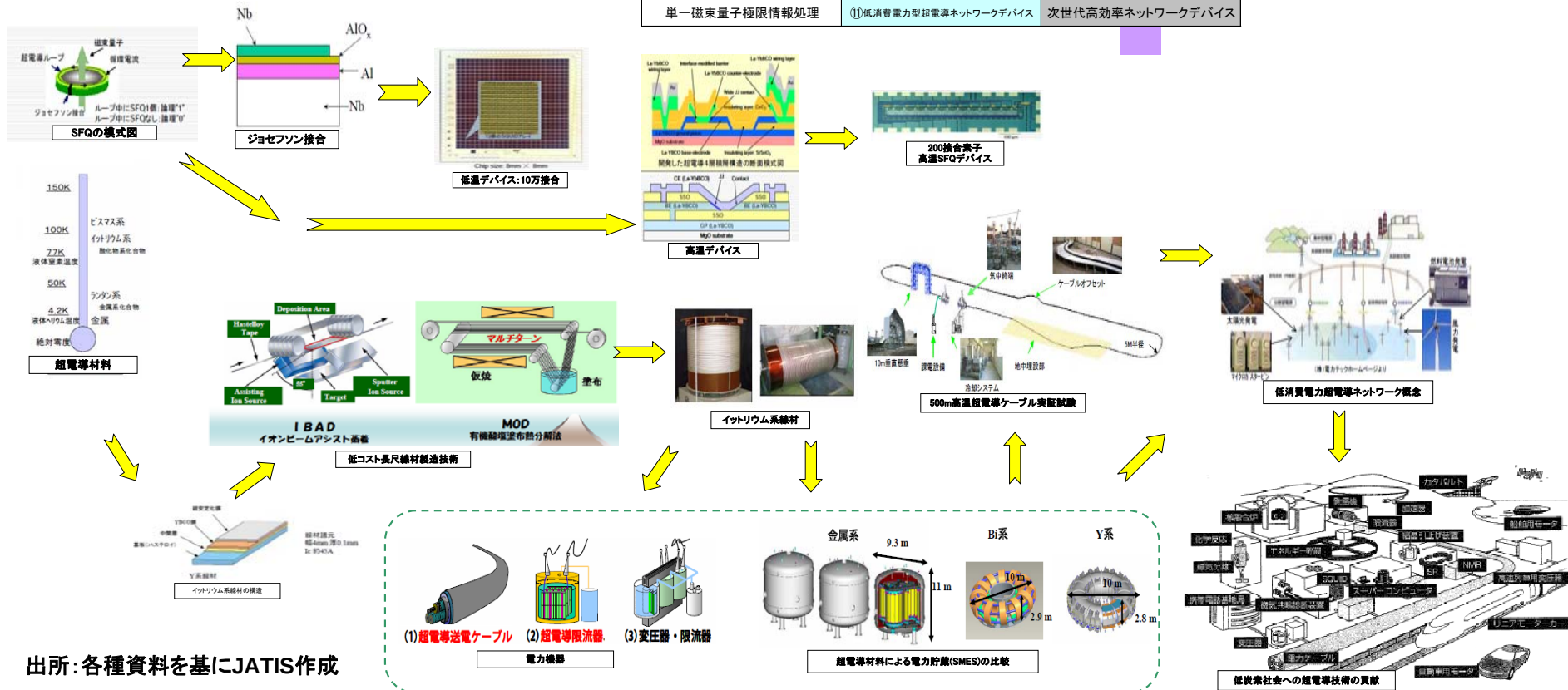
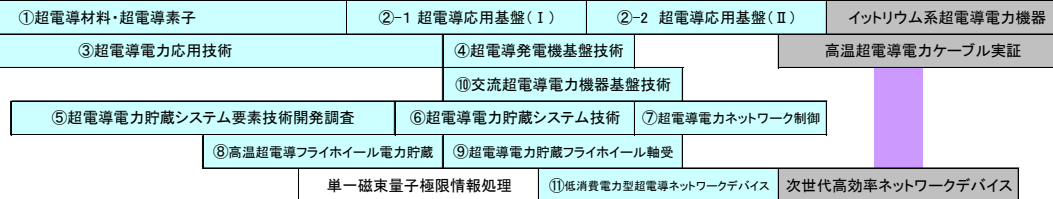
5

HTS発見

切れ目なくプロジェクトが
実施されてきた。

現在

1981 S56	1982 S57	1983 S58	1984 S59	1985 S60	1986 S61	1987 S62	1988 S63	1989 H元	1990 H2	1991 H3	1992 H4	1993 H5	1994 H6	1995 H7	1996 H8	1997 H9	1998 H10	1999 H11	2000 H12	2001 H13	2002 H14	2003 H15	2004 H16	2005 H17	2006 H18	2007 H19	2008 H20	2009 H21	2010 H22	2011 H23	2012 H24	2013 H25	2014 H26	2015 H27
科学技術高速計算システム									次世代のプロジェクト																									

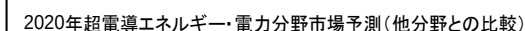
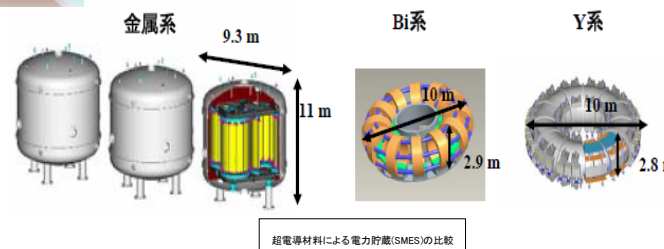
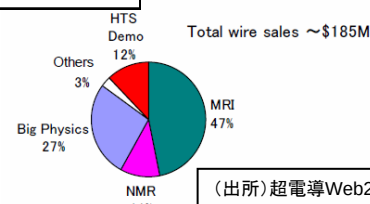


6

①、②-1は素子と重複

研究開発の経緯と今後の見通し

- ・液体窒素温度での冷却で良いHTSが1986年に発見され、およそ20年が経ち、省エネ効果の大きい送電ケーブルの分野で実証研究が着実に進んでいる。
- ・米国と日本が実用化及び商用化において先行している。HTS 線材としては1988 年に日本で発見されたBSCCO (第1 世代:1-G)と、1987 年に米国で発見されたRare Earth 系YBCO (第2 世代:2-G)の2種類が生き残り、国のPJでは現在2-Gに注力している。
- ・BSCCO 線材については、米国向け(Albany Project)・韓国向け(KEPRI Project)のHTS ケーブル向けに住友電工が線材を商用生産し供給している。
- ・今後、日本が2020年までに25%のCO₂ 削減するためには、発電効率向上ばかりでなく、送電におけるエネルギー損失を最小限に抑える技術も不可欠である。そのためには低価格が期待されるYBCO線材の役割が大きく、早急な線材性能の向上が期待されている。



超電導素子分野 技術開発の推移と実用化の状況等

7

1980以前 S55以前	1981 S56	1982 S57	1983 S58	1984 S59	1985 S60	1986 S61	1987 S62	1988 S63	1989 H1	1990 H2	1991 H3	1992 H4	1993 H5	1994 H6	1995 H7	1996 H8	1997 H9	1998 H10	1999 H11	2000 H12	2001 H13	2002 H14	2003 H15	2004 H16	2005 H17	2006 H18	2007 H19	2008 H20	2009 H21	2010 H22	2011 H23	2012 H24	2013以降 H25以降

科学技術用高速計算システム

①超電導材料・超電導素子
(269億円)

②-1 超電導応用基盤(I)
(159億円)

単一磁束量子極限情報処理

①①消費電力型超電導NWデバイス
(36億円)

次世代高効率型NWデバイス

予算総額:464億円

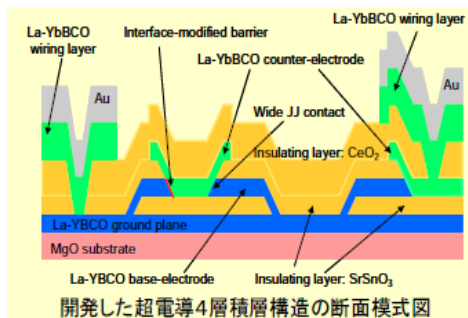
①、②-1は材料と重複

超電導エレクトロニクス技術の要素技術と研究機関

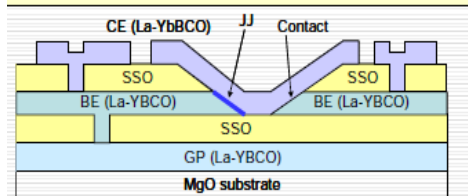
対象	要素技術	研究機関
超電導薄膜	フィルタ(携帯電話基地局) 超高周波デバイス、X線検出器	産総研、ISTEC、電機、NEC、日本電気、富士通、住友電工、三菱電機、東芝
超電導厚膜 バルク	磁気シールド、超電導アンテナ、 超電導共振器	ISTEC、日立製作所、東芝、沖電気、NEC、富士通、住友電工、三菱電機
ジョセフソン 素子	SQUID(心臓磁場検出、非破壊検査、脳検診など)、 電磁波検出器(オゾン計測、星間分子検出)、 標準電圧発生器(電圧校正機器)	ISTEC、産総研、日立製作所、東芝、三洋電機、沖電気、NEC、富士通、三菱電機
超電導 集積回路	SFQ回路 超電導サンプラー 超電導ADコンバータ	ISTEC 名古屋大学、横浜国立大学、日本女子大学

研究開発の経緯と今後の見通し

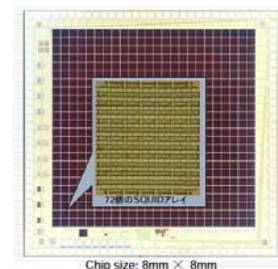
- 超電導現象をエレクトロニクスに応用する試みは1950年代のクライオトロンから始まったが、1963年に超電導のトンネル効果を利用したジョセフソン素子が誕生し、超電導エレクトロニクスの主役になっている。
- 1986年に高温超電導(HTS)が発見され、素子の動作温度が液体窒素温度(77K)で実現できる可能性が出てきたことで普及が期待されていた。
- しかし、HTSによる素子の集積度は現状では数百個程度であり、コンピュータ素子などの高度な論理回路への応用ではLTSが主流になっている。
- HTSは携帯電話基地局のフィルタ、磁界や電磁波のSQUIDセンサー、電圧標準などへの応用は着実に進んでいる。



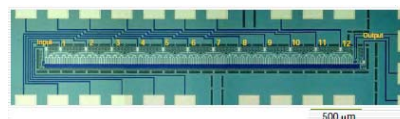
開発した超電導4層積層構造の断面模式図



高温デバイス



低温デバイス:10万接合



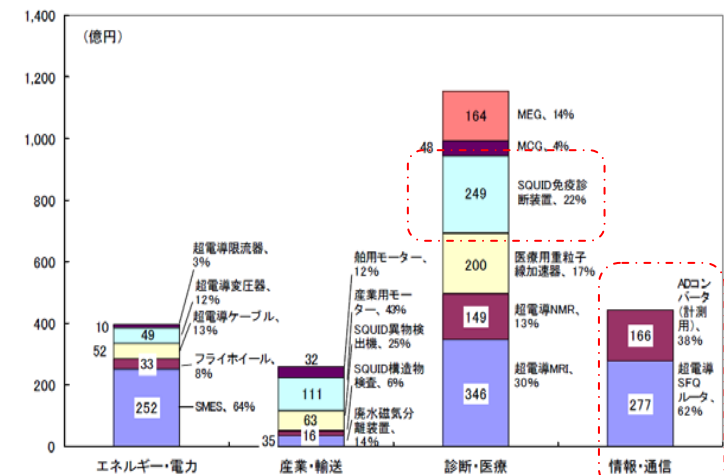
200接合
高温SFQデバイス



超電導フィルタ受信増幅装置



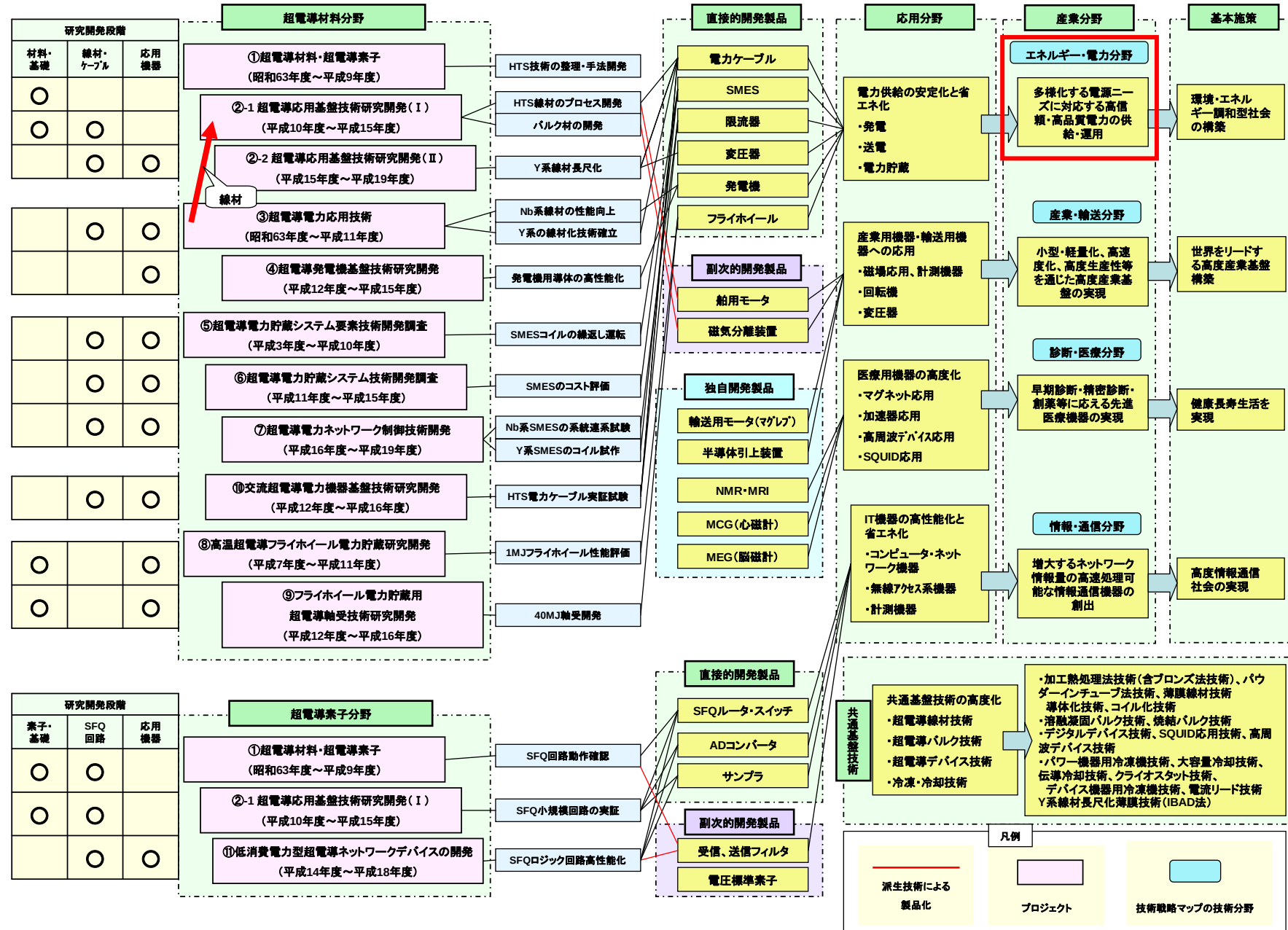
高温超電導サンプラー観測装置



2020年の超電導エレクトロニクス市場予測(他分野との比較)

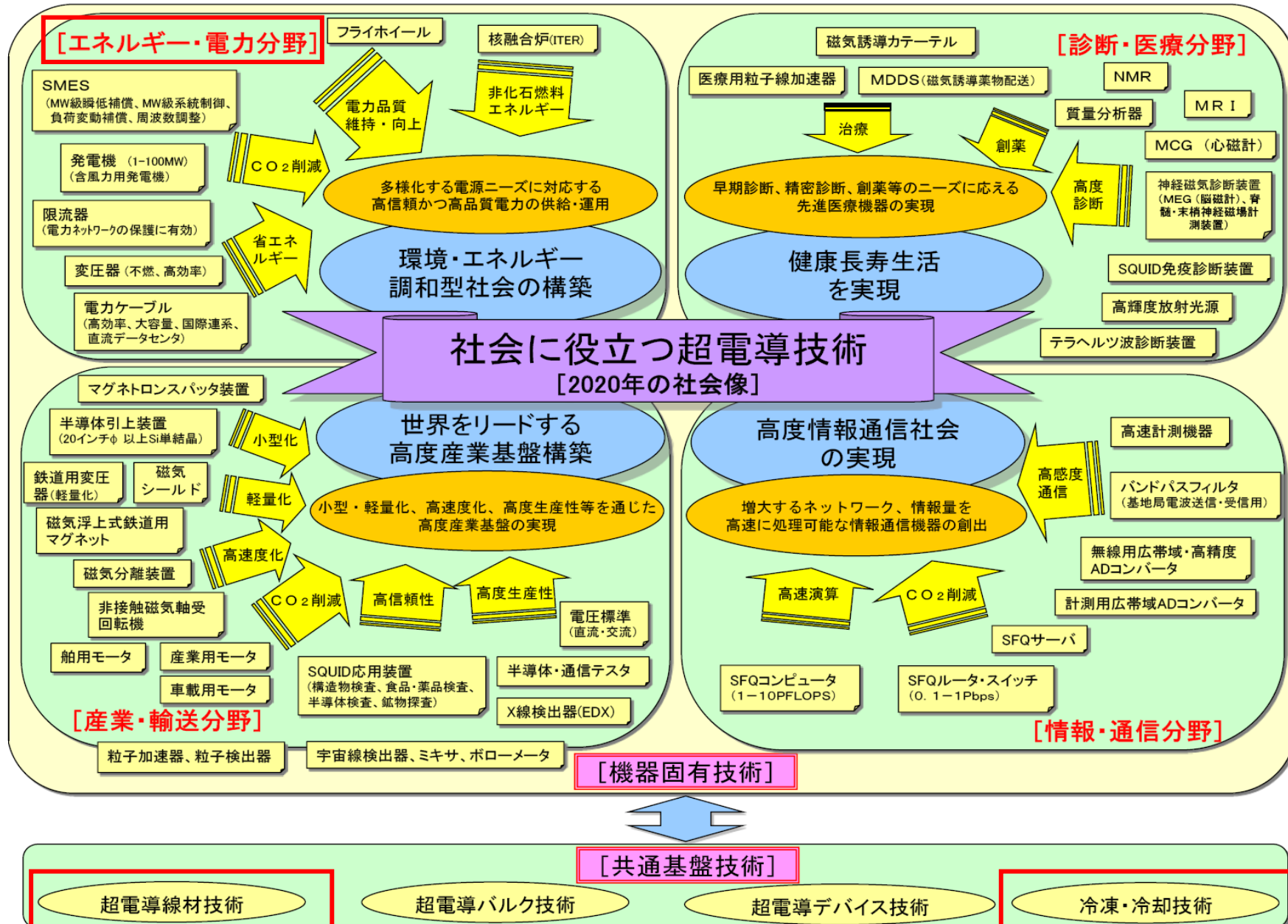
超電導技術のロジックツリー

8



技術戦略マップ2009における超電導技術

9



2. 実用化への進展度合

2-1. 主要製品の進展度合	p.11
2-2. エネルギー電力分野の技術開発推移	p.12
2-3. 電力ケーブルの実用化への進展度合	p.13
2-4. SMESの実用化への進展度合	p.18
2-5. SFQ回路の実用化への進展度合	p.21
2-6. 冷凍・冷却技術の進展度合	p.24

主要製品の実用化への進展度合

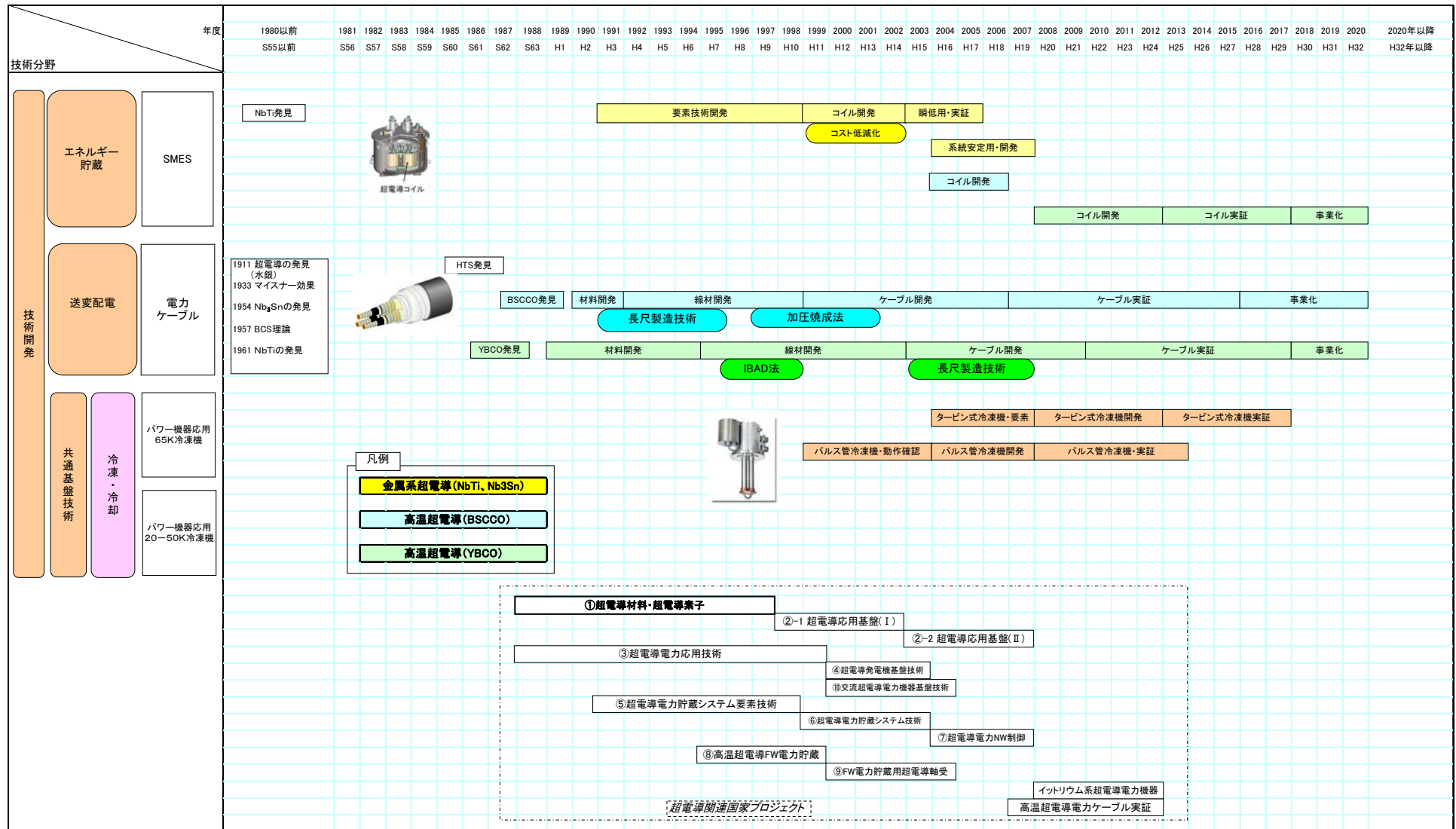
11

直接的開発製品		副次的開発製品		独自開発製品	
製品名称	区分	上市段階	製品化段階	技術開発段階	研究段階
電力ケーブル	HTS		Bi系30m試験(東京電力・住友電工) Bi系350m(住友電工@米国Albany)	Bi系単相500m(電中研・古河電工)	
SMES	LTS		Nb系液晶工場(中部電力)		
	HTS				Y系SMES(ISTEC、電線各社)
フライホイール	LTS			Nb系磁気軸受(JR東海)	
	HTS			磁気軸受(四国総研)	
限流器	HTS		Y系コイル・系統連系(東芝)	Bi系コイル(東芝)	
変圧器	HTS			Y系変圧器(ISTEC)	
輸送用モータ	LTS		Nb系磁気浮上列車用リニアモータ(JR東海)		
	HTS		Bi系船用モータ(IHI)	Bi系自動車用(住友電工)	
産業用マグネット	LTS	Nb系単結晶引上装置			
	HTS		廃水処理用磁気分離装置(MSエンジン)	水浄化用磁気分離器(日立、九州電力) Bi系単結晶引上装置(東芝・住友電工・信越化学)	
SQUID応用	LTS	心磁計、脳磁計			
	HTS		食品内金属異物検査装置(アドバンスフードテック)		
NMR・MRI	LTS	NMR、MRI			
	HTS			Y系線材開発(ISTEC・フジクラ)	
SFQ回路	LTS		超電導デジタル集積回路(LSI)製造プロセス(ISTEC)	マイクロプロセッサ(名大、横国大)、ネットワークルータ用SFQスイッチ(ISTEC)	
	HTS			SFQサンプラーシステム(ISTEC)	

研究段階: 基礎的/要素的な研究開発、技術開発段階: 製品化/上市を視野に入れた研究開発、製品化段階: 製品化、量産化技術の確立、上市段階: 市場での取引

エネルギー・電力分野の技術開発推移

12

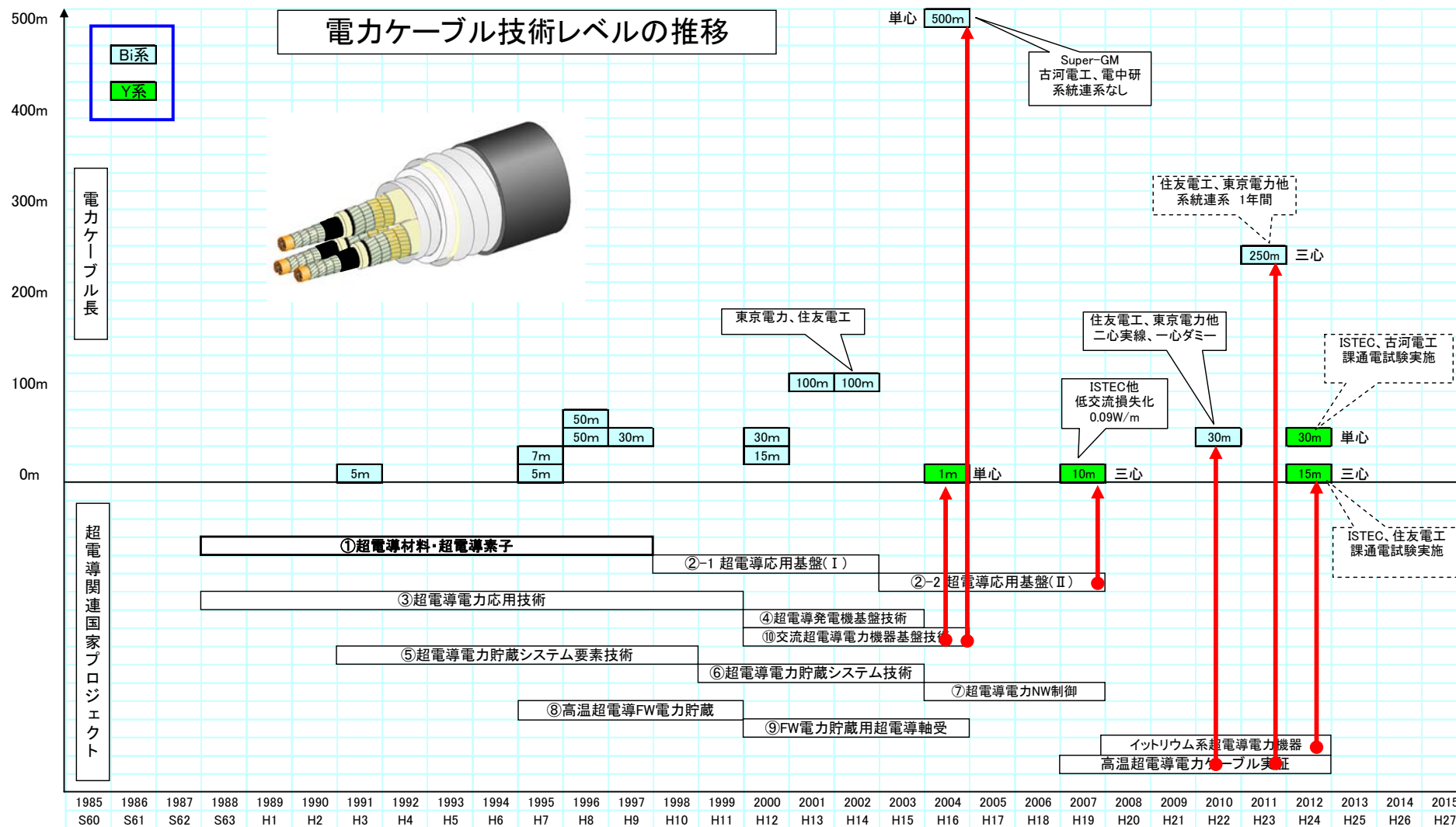


電力ケーブル [実用化への進展度合 HTS:製品化段階]

- Bi系高温超電導材料の線材開発は線材への成形性の良さもあり、これまでの超電導研究開発の成果などにより、比較的順調に進み、現在商品化されて、海外の電力ケーブルプロジェクト等に提供されている。
- 東京電力・住友電工は1991年に5m のBi系電力ケーブルを開発。さらに、2002年には100m級の電力ケーブルを開発。2000年から「交流超電導電力機器基盤技術」として、Super-GM(研究開発組合)が電中研・古河電工とともに、単心の500m級Bi系電力ケーブルの通電試験を実施。
- Bi系電力ケーブル開発はその後も継続。2007年からの「超電導電力ケーブル実証」で、東京電力・住友電工が30m級の試験を2009年に実施し、その後2011年から1年間の系統連系試験を実施する計画。
- Y系材料は加工が難しい材料であるが、イオンビームを使ったIBAD法による線材の成形に成功し開発が加速。Y系線材は高磁場下での性能が優れ、線材を構成する材料全体での価格が廉価なため、コストダウンも期待されている。
- Y系電力ケーブルについては、2003年からの「超電導応用基盤Ⅱ」において、ISTECなどが10m級のY系三心電力ケーブルで機能試験を実施。
- これに引き続き、2008年から開始した「イットリウム系超電導電力機器」において、2012年までに三心でISTEC・住友電工が15mのY系電力ケーブルの、単心でISTEC・古河電工が30mのY系ケーブルの課通電試験を実施する計画。

超電導電力ケーブル技術開発の推移とプロジェクトの関係

14



超電導ケーブル技術の現状

15

国内外の超電導ケーブルプロジェクト

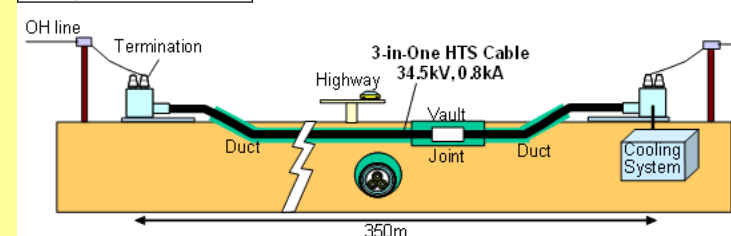
No	プロジェクト 実施機関	試験年	国	電圧 kV	電流 A	容量 MVA	長さ m	形態	線材	系統 連系
1	東電・住電	1991	日本		2000		5		Bi	
2	東電・古河	1995	日本	66	2000		5		Bi	
3	東電・住電	1995	日本	66	1000		7	三心	Bi	
4	東電・古河	1996	日本				50		Bi	
5	東電・住電	1996	日本		2000		50	交流	Bi	
6	東電・住電	1997	日本	66	1000		30		Bi	
7	東電・住電	2000	日本				30		Bi	
8	中電・フジクラ ・昭和電線	2000	日本		1000		15		Bi	
9	NKT-Research	2001	EU	36	2000		30	単心	Bi	
10	東電・住電	2001	日本	66	1000		100		Bi	
11	住友東電	2002	日本	66	1000		100	三心	Bi	
12	Detroit Edison	2002	米国	24	2400		120	単心		
13	SouthWire	2002	米国	12.5	2000		30	単心	Bi	
14	EdF/Pirelli	2002	EU	90	2600		50	単心	Bi	
15	Super-ACE	2005	日本	77	1000	133	500	単心	Bi	×
16	Albany	2006	米国	34.5	800	48	330	三心	Bi+Y	O
住友電工製										
17	AEP	2006	米国	13.2	3000	69	200	tri-axial	Bi	O
18	KEPCO/KEPRI	2006	韓国	22.9	1250	50	100	三心	Bi	×
住友電工製										
19	SuperPower	2006	米国	66	1000		300	三心		
20	DAPAS2	2007	韓国	22.9	1250	50	100	三心	Bi	×
21	LIPA	2008	米国	138	2400	574	600	単心	Bi	O
22	LIPA2	2010	米国	138	2400	574	600	単心	Y	O
23	Hydra	2010	米国	13	4000	90	300	単心	Y	O
24	DAPAS3	2010	韓国	154	4000	1067	100	三心	?	×
25	実証試験	2011	日本	66	2000	229	200	三心	Bi	O
26	現行プロジェクト	2012	日本	66	5000	572	15	三心	Y	×
27	現行プロジェクト	2012	日本	275	3000	1429	30	単心	Y	×
28	Entergy	2013	米国	13.8	2500	60	1700	三心	Y?	O

(25実証試験はケーブル断面積あたりの送電容量が世界最高)

出所: NEDO「超電導分野における技術開発状況に関する調査」(H20年3月)にJATIS加筆



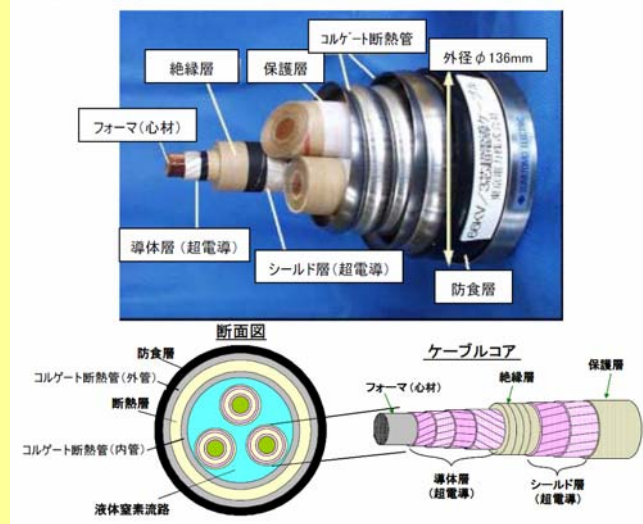
System Schematic



出所: 住友電エプレスリリース2006.8.1

米国Albanyプロジェクト

2. 高温超電導ケーブルの断面構造



出所: 東京電力プレスリリース2008.2.13

高温超電導電力ケーブル実証プロジェクト

—概要説明—

研究開発
成果

成果の意義：CO₂削減効果

I p.2-3,
IV p.1-4

12

- 三心一括型超電導ケーブルシステムにより、同容量の既存ケーブルと比較して、送電ロスが1/2～1/3に
- 2030年の省エネ効果は279GWh/年：8万世帯分の消費電力量

年	超電導化による 損失低減量 (Lf=1.0)	累積 導入量	損失率 (Lf)	1年間の低減電力量 A×B×C×(24× 365)	1年間の CO ₂ 削減量
単位	kW/km	km		GWh/年	千 t-CO ₂ /年
	A	B	C	D	E
2015年	50	30	0.7	10	3.5
2020年	70	190	0.7	82	28
2025年	70	400	0.7	172	58
2030年	70	650	0.7	279	95

超電導ケーブル実証プロジェクト中間評価分科会

公開



東京電力



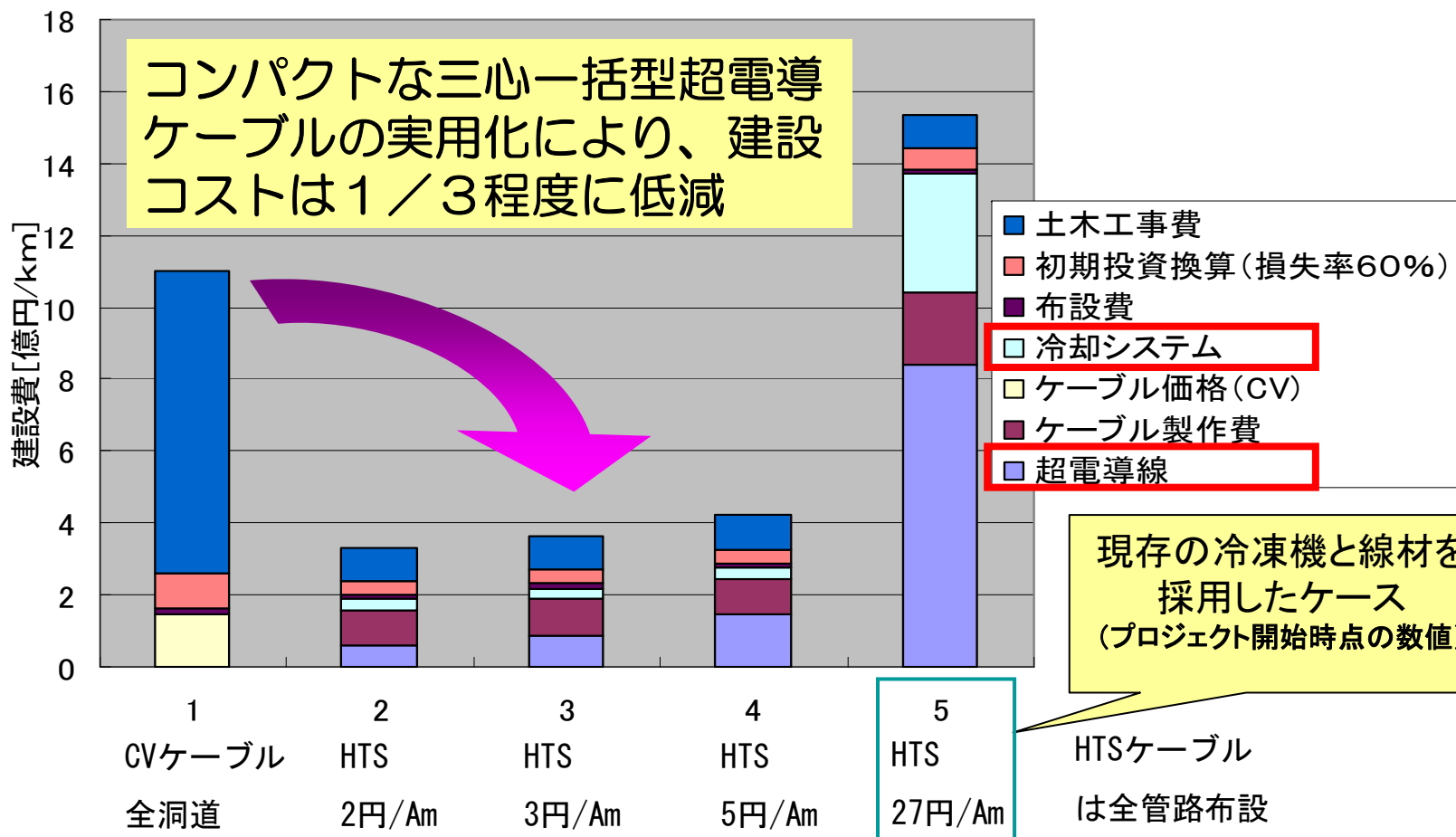
—概要説明—

研究開発
成果

成果の意義：コスト低減効果

IV p.4

13



超電導ケーブル実証プロジェクト中間評価分科会

公開

住友電工



東京電力

MAYEKAWA

SMES[実用化への進展度合 LTS:製品化段階、HTS:研究段階]

•低温超電導(LTS)に関しては、1991年から開始した「超電導電力貯蔵システム要素技術」で国際超電導産業技術研究センター(ISTEC)は数MJ級SMESの要素技術の開発を実施。この成果は1999年からの「超電導電力貯蔵システム技術」へ継承されて、2003年までにISTEC・中部電力が瞬低用10MJ級のモデルコイル試験を実施し、ISTEC・九州電力が系統安定化用3MJ級のモデルコイル試験を実施。これらの成果を基に中部電力は落雷時の瞬低対策用としてシャープ亀山工場に、2003年に瞬低用SMESを設置し、実証試験を実施して良好な成績を取得。

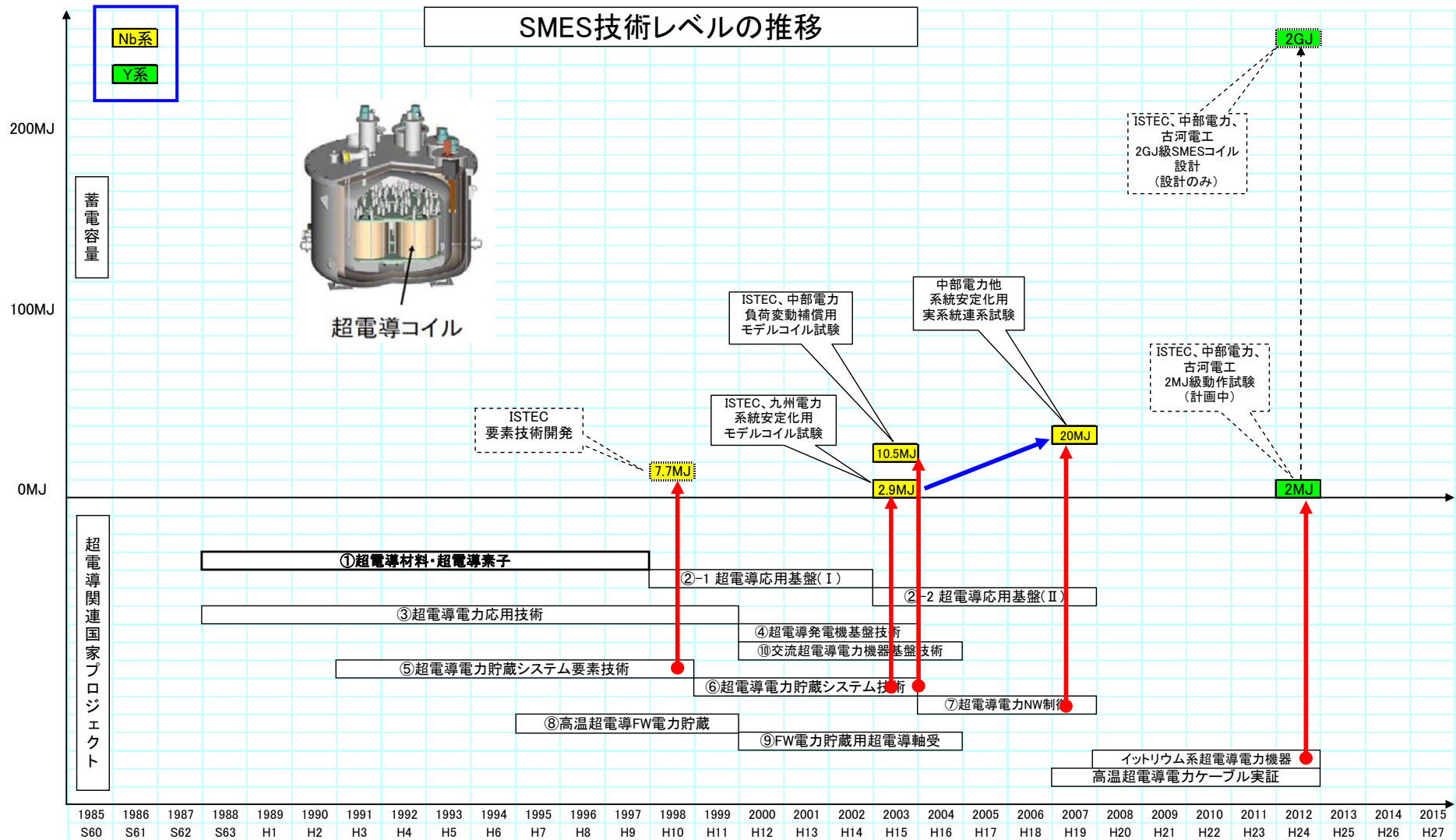
•系統安定化用SMESとしては、引き続き2004年からの「超電導電力ネットワーク制御技術」で、中部電力などが電力系統制御用SMESの実証試験を2007年6月にスタートさせ、古河日光発電の細尾発電所構内で古河電工の協力の下に20MJ級の系統連系試験を実施。

•高温超電導(HTS)に関しては、コストダウンとスケールダウンを目的として、高磁場下での性能の良いイットリウム(Y)系SMESを開発するために、2008年から開始された「イットリウム系超電導電力機器」の中で、ISTEC、中部電力、古河電工が2MJ級の動作試験と2GJ級のSMESコイル設計を実施する計画。

•この中では、2GJ級SMESの開発を見通す高磁界かつコンパクトなコイル設計技術の開発並びにメンテナンスを容易とするコイルの伝導冷却技術開発を行い、平成24年度までにY系SMES対応線材の製造と2MJ級モデルコイルを用いた20KでのSMESの動作試験と伝導冷却技術開発を行う計画。

SMES技術開発の推移とプロジェクトの関係

19



国内外のSMESプロジェクト

No	実施機関	実施年	蓄積エネルギー MJ	定格出力 MW	線材
1	九州電力今宿変電所	1998	3.6	1	NbTi
2	GE,AMSC	2000	3	3	NbTi
3	KERI	2002	3	0.75	NbTi
4	九州電力今宿変電所	2002	2.85	5	NbTi
5	中部電力、東芝	2003	5	5	NbTi
6	中部電力寛政変電所	2003	10.5	5	NbTi
7	シャープ亀山工場	2005	10	5	NbTi
8	KERI	2006	0.6		Bi2223
9	NEDO、中部電力、東芝	2007	20	10	NbTi
10	IEE(CAS)	2007	1	0.5	HTS
11	NEDO,中部電力(要素)	2012	2		YBCO
	NEDO,中部電力(設計)	2012	2000		YBCO
12	KEK,原研	2015	100	550	NbTi
13	核融合科学研究所、 テクノバ、鹿児島大、 九大	2015	1	1	NbTi

出所: NEDO「超電導分野における技術開発状況に関する調査」(H20年3月)にJATIS加筆



出所: 超電導Web2005年2月号

シャープ瞬低用SMESの概要

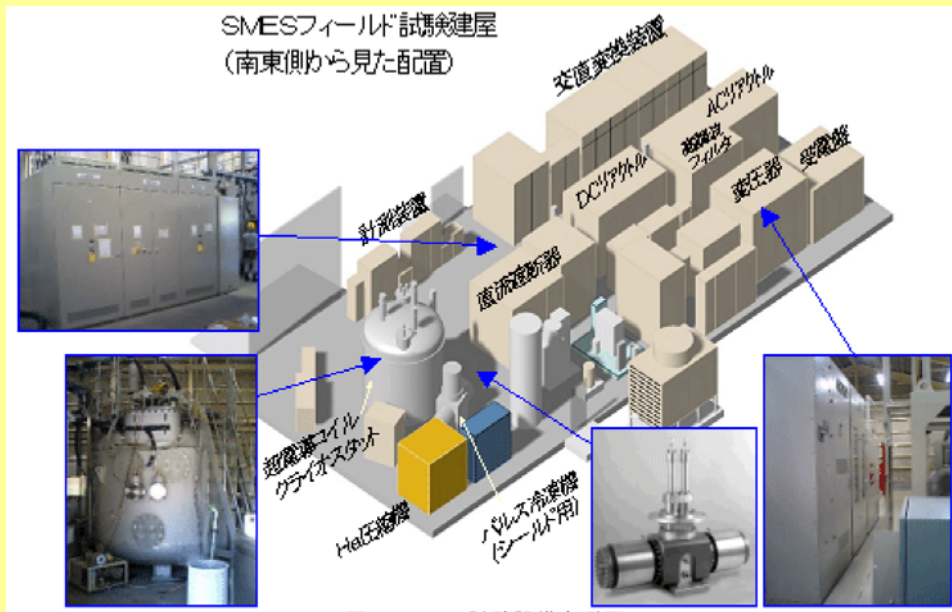
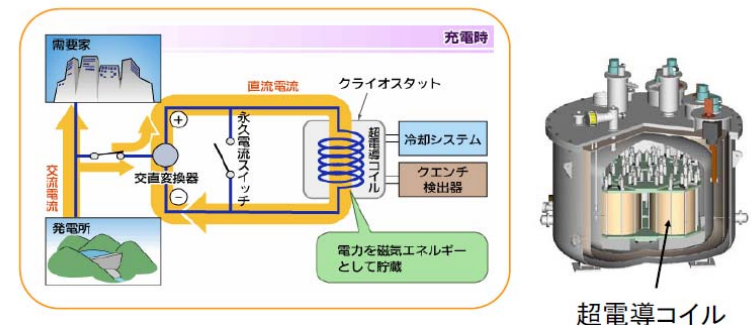


図3 SMES試験設備鳥瞰図

(出所: 中部電力プレスリリース、平成19年6月15日)

古河電工でのSMES実証試験



- ・大電力の迅速な入出力が可能
- ・目的に合わせたシステム設計が可能
- ・高出力化が容易

(出所: 「超電導電力ネットワーク制御技術開発」事後評価分科会資料)

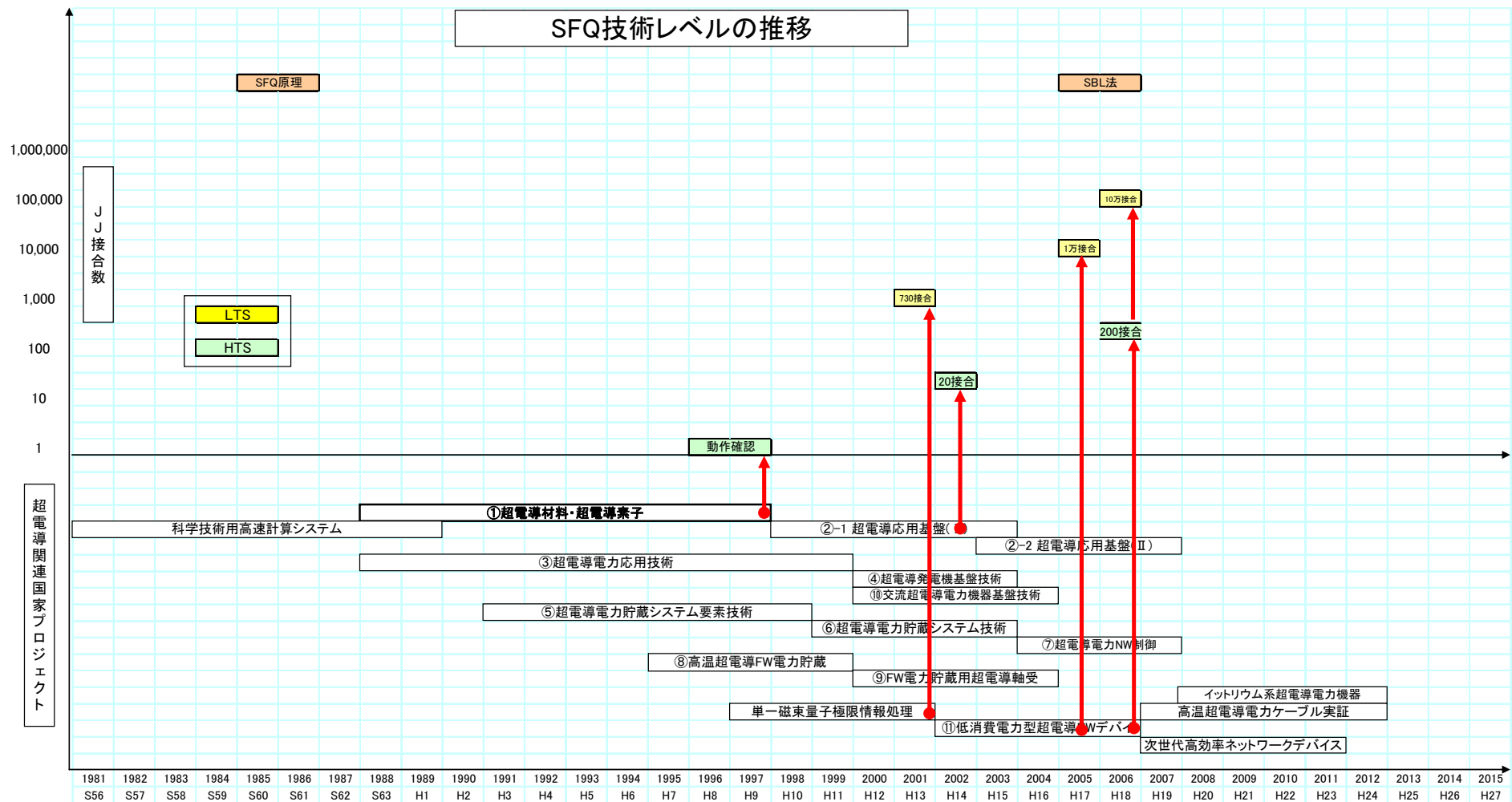
SMESの概要

SFQ回路 [実用化への進展度合 LTS:製品化段階、HTS:技術開発段階]

- SFQ回路は超高速応答速度と極低消費電力を同時に実現できる回路であり、スイッチング時間は数ps、消費電力は、 $1\mu\text{W}$ (論理ゲート当たり)と想定されている。日本では、フィルタ等の受動素子より能動素子の研究が盛んである。
- LTSに関しては、Nb系で現在JJ素子として10万接合を達成。ISTECは、9層のNb層の積層が可能な超電導デジタル集積回路(LSI)製造プロセスを開発。
- 2002年からの「低消費電力型超電導ネットワークデバイス」としてNEDOの委託により実施。超電導体を用い、半導体素子と異なる原理で動作するSFQ素子は、最先端の微細化技術なしに100 GHz以上の超高速動作が可能であり、またゲートあたり $1\mu\text{W}$ 以下の低消費電力を実現できる可能性をも合わせ持つ。
- HTSに関しては、高集積化が難しく200接合を達成した段階である。ISTECでは、2002年からの「低消費電力型超電導ネットワークデバイス」で、Y系薄膜を用いたSFQ回路の開発を進め、SFQ回路の開発の中で超電導接合の臨界電流密度(J_c)を解析し、 J_c の均一化可能なレイアウトを考案した。4.2 Kで360 GHz、40 K近い温度で110 GHzの高速分周動作を実現。
- SFQ(単一磁束量子)回路技術の応用として、同じ、2002年からの「低消費電力超電導ネットワークデバイス」でY系材料によるアナログ-デジタル(AD)変換回路の開発を日立、ISTECで実施。また、計測回路への応用として、Y系材料によるISTEC、アドバンテストで100GHzサンプラーの開発を実施。

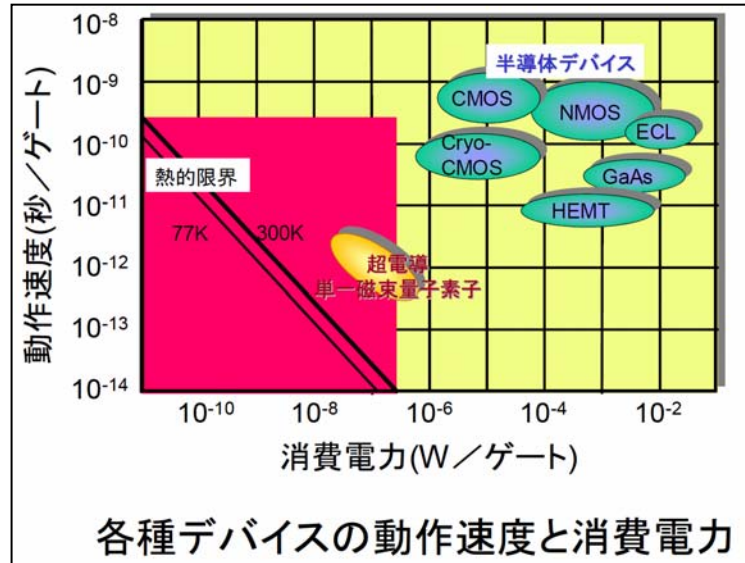
SFQ技術開発の推移とプロジェクトの関係

22

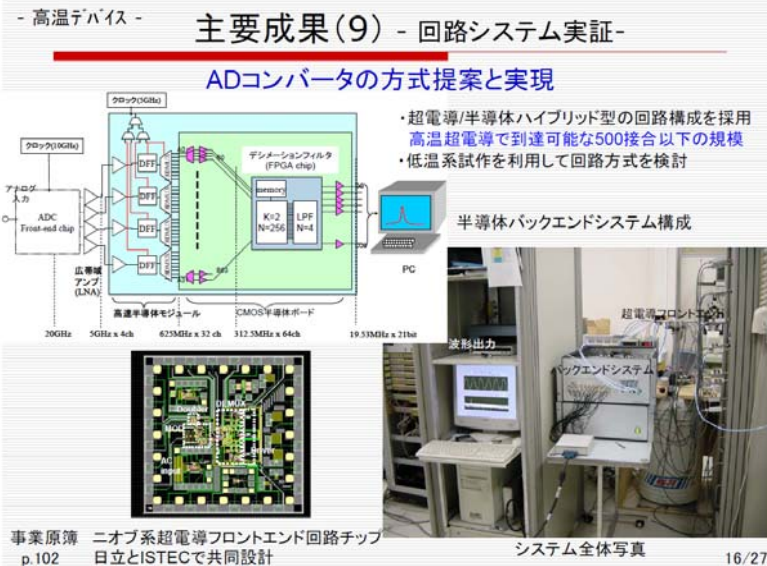


SFQ回路技術の現状

23



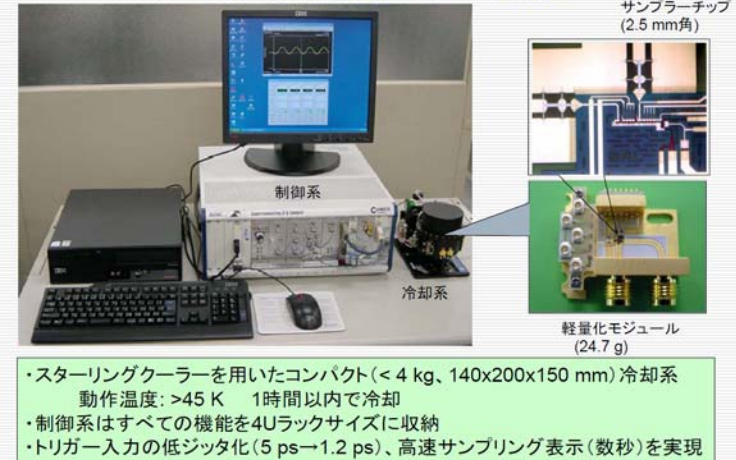
出所: SFQスイッチを用いた大容量ルータ検討会 (平成16年6月)



ADコンバータ開発の概要

- 高温デバイス - 主要成果(13) - 回路システム実証-

サンプラー波形計測システムの開発

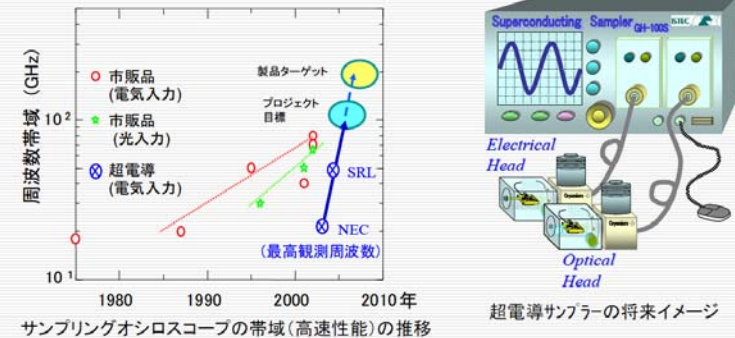


事業原簿 p.116

21/27

- 高温デバイス - 開発の位置付け・必要性(3)

高速光通信 (40 Gbps、160 Gbps) の研究開発には
超高速計測機器が必須 (40 Gbps→120 GHz帯域必要)



サンプラーチップ最適設計
高速実装技術開発
(アドバンテスト再委託)

目標: 100 GHz信号計測実証
(電気信号および光信号入力)

事業原簿 基本 p.7-9

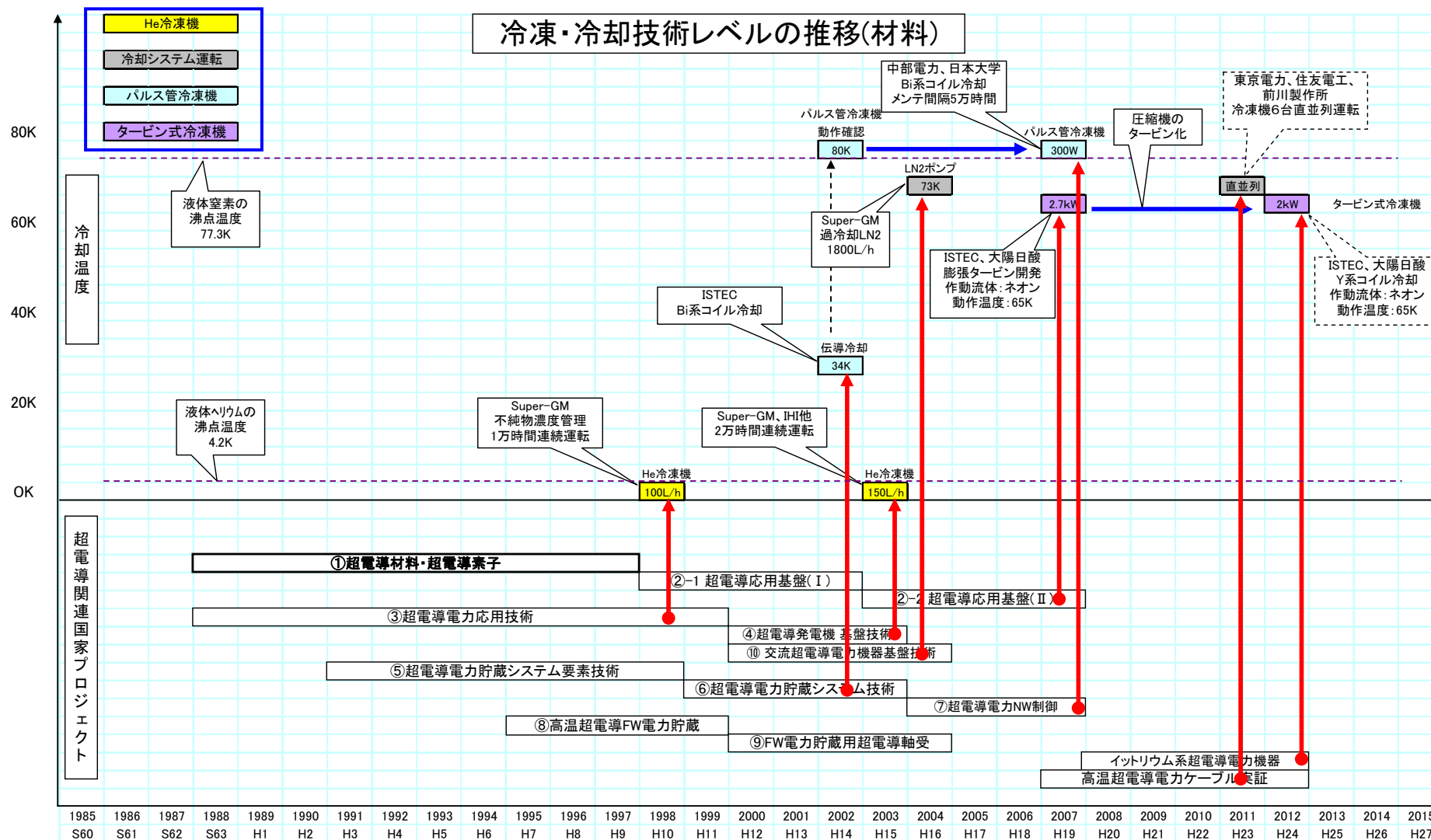
3/27

出所: 「低消費電力型超電導ネットワークデバイスの開発」(事後評価) 分科会資料

サンプラー開発の概要

冷凍・冷却技術開発(材料)の推移とプロジェクトの関係

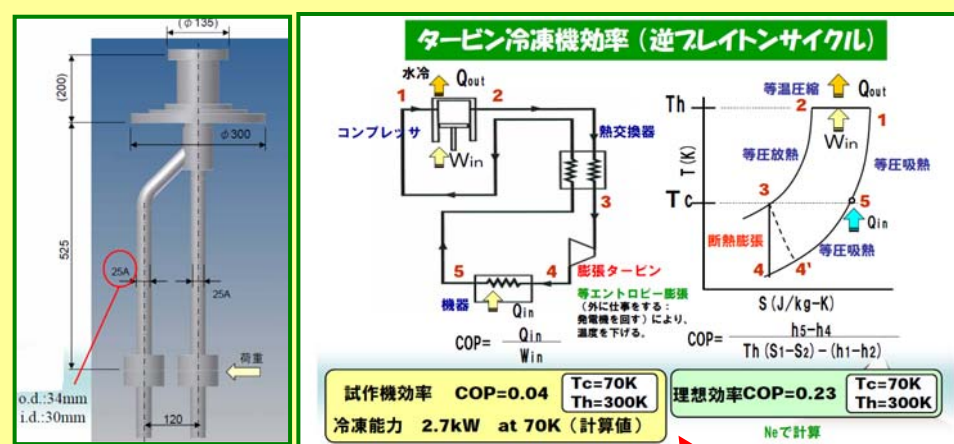
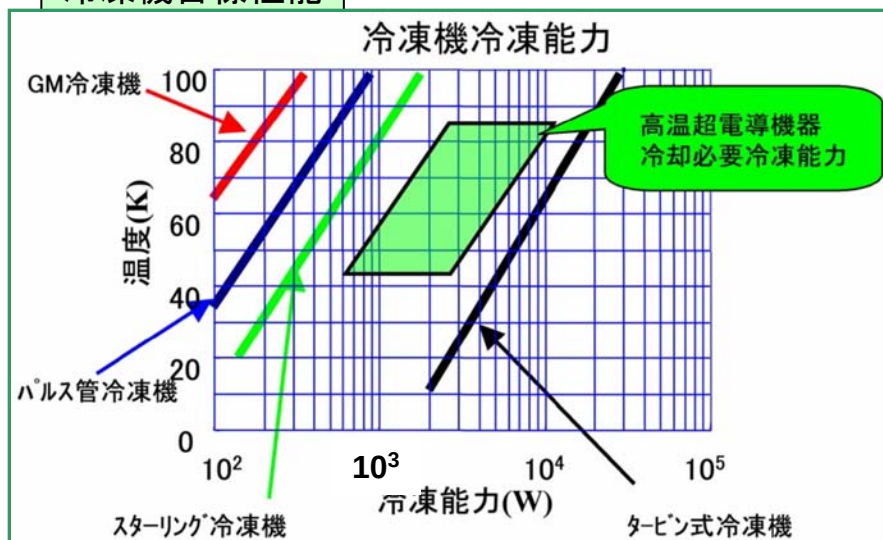
24



高温超電導普及を目指した特定用途向け冷凍機開発状況

25

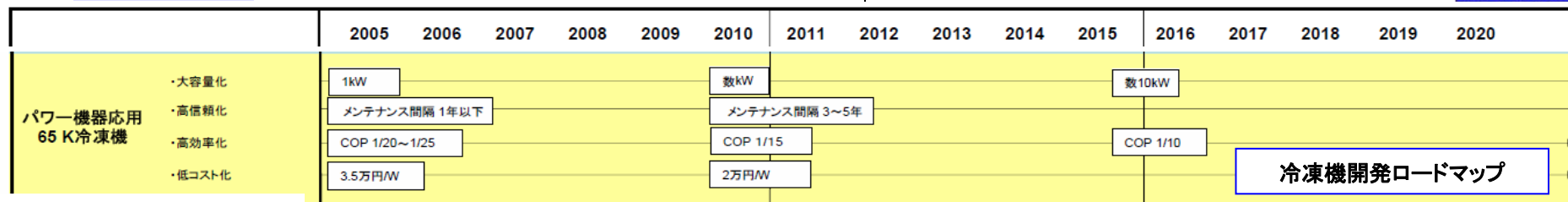
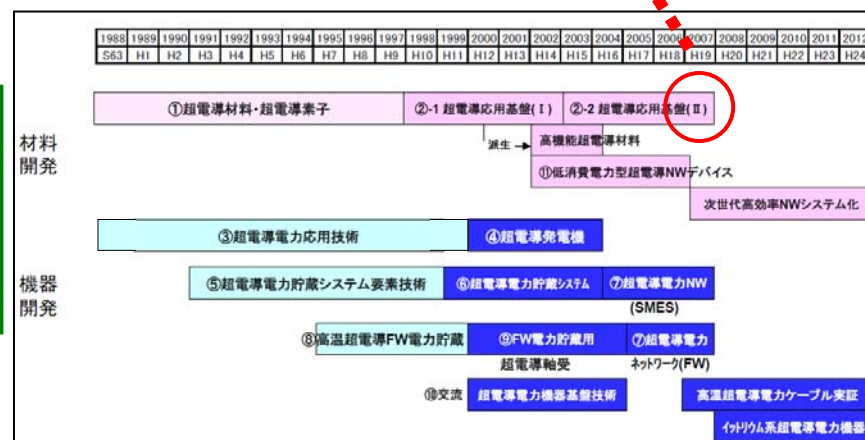
冷凍機目標性能



開発目標70Kで冷凍能力2.7kW



課題・問題点
・低コスト化
・コンパクト化
・高信頼性
・安全・安心
・低環境負荷
・省エネルギー



出所: 各種資料を基にJATIS作成

3. 個別プロジェクトの概要

超電導材料分野

- ①「超電導材料・超電導素子」(昭和63年度～平成9年度) p.27
- ②-1「超電導応用基盤技術研究開発(Ⅰ)」(平成10年度～平成15年度) p.28
- ②-2「超電導応用基盤技術研究開発(Ⅱ)」(平成15年度～平成19年度) p.29
- ③「超電導電力応用技術」(昭和63年度～平成11年度) p.30
- ④「超電導発電機基盤技術研究開発」(平成12年度～平成15年度) p.31
- ⑤「超電導電力貯蔵システム要素技術開発調査」(平成3年度～平成10年度) p.32
- ⑥「超電導電力貯蔵システム技術開発調査」(平成11年度～平成15年度) p.33
- ⑦「超電導電力ネットワーク制御技術開発」(平成16年度～平成19年度) p.34

- ⑧「高温超電導フライホイール電力貯蔵研究開発」(平成7年度～平成11年度) p.35
- ⑨「フライホイール電力貯蔵用超電導軸受技術研究開発」(平成12年度～平成16年度) p.36
- ⑩「交流超電導電力機器基盤技術研究開発」(平成12年度～平成16年度) p.37

超電導素子分野

- ①「超電導材料・超電導素子」(昭和63年度～平成9年度) p.38
- ②-1「超電導応用基盤技術研究開発(Ⅰ)」(平成10年度～平成15年度) p.39
- ⑪「低消費電力型超電導ネットワークデバイスの開発」(平成14年度～平成18年度) p.40

I. 波及効果に関する調査

I-1. 技術波及効果

・高温超電導技術の技術基盤が整理され、物質探査効率が向上し、現在の超電導技術へとつながり、超電導線材技術開発への足がかりとなるとともに、現在の超電導バルク材の用途へとつながった。

・わが国の高温超電導の技術レベルは向上し、特に線材作製技術に繋がり、世界で1, 2 位を争うレベルになった。本プロジェクトを起点とする超電導プロジェクト全体への寄与も大きい。

I-2. 研究開発力向上効果

・本プロジェクトの成果を基に、「超電導応用基盤技術研究開発(Ⅰ)」(平成10年度～平成15年度)を後継プロジェクトとして実施。

・原著論文数: 2,274件、特許出願件数: 696件 (材料・素子の合計)

I-3. 経済効果

・本プロジェクトを起点とする超電導技術による市場規模は、2020年度に国内で603億円、潜在ポテンシャルは、1.4兆円と試算されている。

I-4. 国民生活・社会レベルの向上効果

・本プロジェクトを起点とする技術開発により、データセンターなどへの電力安定供給が期待されるとともに、情報化社会の推進に寄与するものと考えられる。

・また、超電導リニアにより大都市一極化社会を分散させ、地方活性化が可能になることが期待される。

II. 現在の視点からのプロジェクトの評価のための参考情報

II-1. 国家プロジェクトとしての妥当性

・高温超電導が発見されて間もない時期の研究開発であり、実用化の見通しを明確に予測できなかったこと、技術的難度は高いが、産業面への広範囲な応用の可能性が想定できたことから、国のプロジェクトとすることは妥当であった。さらに、高度に基礎的な材料開発にまで踏み込んだ研究は、国主導以外の方式では実行困難であった。

II-2. 目標設定

・研究目標をプロセス基礎から、実用への高臨界電流密度化、大型単結晶の育成等へ変更するなど、2期と3期に目標設定の変更、目標水準の見直しをおこない、世界一流の業績を上げて当初目標を達成した。

II-3. プロジェクトの実施方法

・工業技術院傘下の5つの国立研究所、ISTEC他で実施。PLは有効に機能し、研究グループ間相互の連携／競争は十分で、国際的連携や産学官連携体制構築の効果も十分発揮され、運営管理体制の整備状況等は妥当であった。

I. 波及効果に関する調査

I-1. 技術波及効果

- Bi系線材では、銀比の低減と臨界電流密度の向上により、Bi系マグネット電流減衰率の低減を達成した。
- Y系線材では、臨界電流向上の有効要素を見出し、材料高度化の指針を与えたこと、臨界電流密度への粒界傾角の影響を見出し、Y系線材開発へ大きな指針を得た。
- バルク材ではGd系でOCMG法(酸素制御溶融法)により、臨界電流密度と捕そく磁場の向上を達成した。波及効果として、水浄化用磁気分離装置などへの適用。

I-2. 研究開発力向上効果

- 先行した「超電導電力応用技術」(昭和63年度～平成11年度)で開発されたY系線材に関する成果を本プロジェクトで継続開発した。

II. 現在の視点からのプロジェクトの評価のための参考情報

II-1. 国家プロジェクトとしての妥当性

- 超電導技術は、エネルギー産業への貢献および周辺産業への経済波及効果はきわめて大きく未来を開くキーテクノロジーの一つと期待され、その開発は国家の重要課題と考えられる。実用化には長期間の多岐にわたる研究開発が必要で、民間企業ではリスクが大きいため、国の事業として実施したことは極めて妥当であった。

- 本プロジェクトのY系線材作製要素技術の成果のうち、Y系線材技術に特化して開発を進めることを目的に、「超電導応用基盤技術研究開発(Ⅱ)」(平成15年度～平成19年度)が後継プロジェクトとして実施された。

•原著論文数837件、特許出願件数261件(材料・素子の合計)

I-3. 経済効果

- 超電導電力ケーブルの市場は、電力ケーブルの更新需要で2016年ごろから立上ると想定されている。本プロジェクトの貢献も大きい。

I-4. 国民生活・社会レベルの向上効果

- 電力系統に設置する電力機器の損失低減、高磁界化及び高電流密度化が可能になり、機器の高密度化、高性能化をもたらし、省エネルギー効果が大いに期待される。

II-2. 目標設定

- 個々のテーマの当初目標は十分に達成されており、テーマによっては目標値を遥かに上回るものもあり、既に実用化に近いものも見受けられる。得られた成果の多くが世界最高水準のものであり高い評価を受けている。

II-3. プロジェクトの実施方法

- 国内外の研究動向の情報を広く収集して、重複なく個別テーマを選択し具体的な数値目標を設定したことは妥当であった。また、進捗状況や新規発見にあわせ研究テーマや目標を適宜修正しており、よくマネジメントされていたことも評価できる。

I. 波及効果に関する調査

I-1. 技術波及効果

- Y系超電導線材は、液体窒素温度において磁界中での臨界電流が高いため、世界最高レベルの線材長500m、臨界電流300A/cm-幅、線材作製速度5m/h、線材コスト¥8~12/Amという成果があった。
- 各種機器のコンパクト化、軽量化、大出力、高効率、低コスト化が期待され、各種産業機器適用への波及効果も大きく、エネルギー高効率化による省エネルギー効果及びCO2削減効果が大きいに期待できる様になった。

I-2. 研究開発力向上効果

- 先行した「超電導電力応用技術」(昭和63年度～平成11年度)のY系線材技術は、同時並行的に実施されていた「超電導材料・超電導素子」の後継プロジェクトである「超電導応用基盤技術(Ⅰ)」へ引き継がれた。

II. 現在の視点からのプロジェクトの評価のための参考情報

II-1. 国家プロジェクトとしての妥当性

- 省エネルギー、環境保全やCO₂低減といった社会要請に大きく貢献するために、Y系高温超電導線材は、早急に実用化研究を進める必要があるが、世界規模で熾烈な開発競争が続けられており、開発リスクも大きく、民間企業で行うには負担が大きすぎるため、国のプロジェクトとして実施したことは妥当であった。

- 先行プロジェクトの成果を基に、本プロジェクトで、Y系線材開発に特化して実用化への道が探られた。

- 本プロジェクトの成果を基に、後継プロジェクトで大電流・低交流損失ケーブルの開発などを目的に「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)が実施されている。
- 原著論文数442件、特許出願件数117件

I-3. 経済効果

- 超電導ケーブルの市場は、2020年時点で国内では52億円と予測されている。また、超電導ケーブルによる従来ケーブル更新時には、建設コストを半減するポテンシャルがあり、経済的メリットが大きいと想定。

I-4. 国民生活・社会レベルの向上効果

- 電力の安定供給はデータセンターなどの運用に貢献し、情報化社会の推進に寄与すると期待される。

II-2. 目標設定

- 国内外の技術の現状や動向を詳細に調査して、実用化を視野に入れた戦略的な研究開発目標の設定がなされており、またその目標水準も高く設定されており妥当と考える。

II-3. プロジェクトの実施方法

- ISTEKが中心となり、技術力と事業力をもつ企業、大学、研究機関が多数参画し、世界をリードしていくに適した体制が構築されている。また、プロジェクトリーダーのリーダーシップと各研究開発分担者間のチームワークを計る研究開発連絡会議が良く機能し、研究マネージメントが非常に優れていたと高く評価できる。

I. 波及効果に関する調査

I-1. 技術波及効果

- 低損失である10kA級NbTi線材と5kA級Nb₃Sn線材を開発するとともに、超電導界磁巻線を使った発電機で当時**世界最高出力**である7万kW級の発電に成功した。
- Bi系酸化物超電導線材は、電力機器対応可能な**高臨界電流密度・大電流化・長尺化**の見通しを得た。
- Y系酸化物超電導線材は、短尺ではあるものの、高臨界電流密度化に成功した。**後継プロジェクト**で課題を克服することにより、現在のY系線材技術へと継承されている。

I-2. 研究開発力向上効果

- 本プロジェクトで開発された**発電機関連**の成果を基に「超電導発電機基盤技術研究開発」(平成12年度～平成15年度)が**後継プロジェクト**として実施された。

II. 現在の視点からのプロジェクトの評価のための参考情報

II-1. 国家プロジェクトとしての妥当性

- 新しくかつ高度な技術を必要とするため、多額の研究開発費および長期にわたる研究開発期間の必要性ならびに高い技術的難度を考えると、これを民間企業のみで実施するには無理がある。また、異なる分野の企業や研究機関の間の協力も必要であるため、**国のプロジェクトであることが妥当**である。

- 本プロジェクトで開発された**Y系線材に関する成果**は「超電導応用基盤技術研究開発(I)」(平成10年度～平成15年度)で**継続開発**した。これが現在のY系線材へと発展した。
- 原著論文数483件、特許出願件数:372件

I-3. 経済効果

- 本プロジェクトは、**目標値はクリア**したが、大型化による技術開発の費用増大の懸念、LTS線材を使うことによる冷凍負荷コストなどが克服できず、超電導発電機としての製品化はまだである。
- **HTS電力ケーブルの実証研究**に反映されている。

I-4. 国民生活・社会レベルの向上効果

- 超電導電力技術は電力システムの効率向上、運用性の向上およびコンパクト化に貢献することで、**電力の安定供給、品質保持**にも貢献する。
- 電力の安定供給は**生活の質、安全、安心**にとって重要な条件の一つである。

II-2. 目標設定

- 超電導発電機の開発における7万kW級モデル機の試作については、**実用化の可能性**を技術的に見極めるために必要な基本的な指標を設定しており妥当である。

II-3. プロジェクトの実施方法

- 研究組合(Super-GM)は、テーマごとの研究開発進捗と成果を見ながら、ある程度の評価を行うとともに、基礎データの収集および超電導複合特性試験装置をはじめ線膨張率測定装置等の標準化の設備を整えるなど、**その運営は概ね妥当**である。

I. 波及効果に関する調査

I-1. 技術波及効果

- 20 万kW 級発電機導体で世界トップクラスの電流密度を達成し、60 万kW 級発電機用導体で世界トップクラスの大電流・高電流密度を達成した。
- 冷凍機では、可変容量型、高負荷軸受型の膨張タービンを開発し、ヘリウム液化機へと活用されている。

I-2. 研究開発力向上効果

- 「超電導電力応用技術」(昭和63年度～平成11年度)の成果を基に、20万kW級超電導発電機の設計技術確立と電機子電流の大電流化を達成し、本プロジェクトで超電導発電機関連開発プロジェクトは終了した。
- 原著論文数33件、特許出願件数:7件

I-3. 経済効果

- 本プロジェクトは、目標値はクリアしたが、大型化による技術開発の費用増大の懸念、LTS線材を使うことによる冷凍負荷コストなどが克服できず、超電導発電機としての製品化はまだである。
- 一方、既存のNbTi線材に「超電導電力応用技術」での開発技術をベースに更に改良したNbTi線材が、中部電力・東芝がシャープの液晶工場で2003年に実施したフィールド試験SMESへと適用され、SMES市場立上げの起点となった。

I-4. 国民生活・社会レベルの向上効果

- 超電導電力技術は電力システムの効率向上、運用性の向上およびコンパクト化に貢献することで、電力の安定供給、品質保持にも貢献する。

II. 現在の視点からのプロジェクトの評価のための参考情報

II-1. 国家プロジェクトとしての妥当性

- 高効率で、系統安定化・電圧安定化性能が高く、コンパクト性など優れたものを開発することは、電力システムの高度化に貢献するため、公共的な意義が十分認められる。短期的な経済効果は期待できないが、リソースを必要とする当該技術開発は、民間活動のみで進めるにはリスクが大きく、国が関与したことは妥当である。

II-2. 目標設定

- 研究開発目標等について妥当な計画が立てられており、制約された予算の下で、高密度化基盤技術と大容量化技術の開発ならびに設計技術的検討という目標にブレークダウンし、具体的な技術開発に注力したことは評価できる。

II-3. プロジェクトの実施方法

- 実施者の事業体制も妥当であったと判断される。学識経験者による専門的知識が開発実施に良く反映されており、産・学の協調体制はよく機能したと思われる。プロジェクトリーダーの下で適切な研究管理と実施努力がなされたことは評価される。

I. 波及効果に関する調査

I-1. 技術波及効果

・20MW/100kWh級SMESの要素技術として、超電導コイルの安定な繰り返し運転に成功するとともに、Y系電流リードの開発などを実施し、現在実用化されているLTS-SMESの原点として歴史的意義がある。

・このプロジェクトで得られたLTS-SMESの要素技術(コイル損失改善、クエンチ保護、交直変換、永久電流スイッチ)が、中部電力・東芝がシャープの液晶工場において2003年に実施したフィールド試験LTS-SMESにおいて活用された。

I-2. 研究開発力向上効果

・このプロジェクトの成果を基に、「超電導電力貯蔵システム技術開発調査」(平成11年度～平成15年度)が、後継プロジェクトとして実施された。

・さらに、その後継プロジェクトとして、「超電導電力ネットワーク制御技術開発」(平成16年度～平成19年度)が実施された。また、現在、Y系線材を使った2GJ級SMESのコイル構成の設計を目的として「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)が実施されている。

I-3. 経済効果

・現在のところ国内ではLTSのSMESが液晶工場に導入されているが、まだ、市場形成には至っていない。今後開発が進むものとして、2020年時点でのSMESの国内市場規模は、142億円と試算されている。

I-4. 国民生活・社会レベルの向上効果

・負荷変動補償や系統安定化のためのSMESシステムは、データセンターの運用安定に貢献できるため、情報化社会の推進にとっても今後不可欠のインフラとなると期待されている。

II. 現在の視点からのプロジェクトの評価のための参考情報

II-1. 国家プロジェクトとしての妥当性

・安定な電力供給の確保、地球環境の保全等といった社会的要請の中で、有用なエネルギー貯蔵システムであるSMESパイロットプラント建設の要素技術を開発することの意義は大きい。SMESの開発は多額の資金を要するため、民間の一企業による実施は困難であることから、国の事業として実施したことは妥当であった。

II-2. 目標設定

・コイル試作、クエンチ保護、交直変換装置、永久電流スイッチなどに開発目標を絞ったことは適切であった。

II-3. プロジェクトの実施方法

・ISTEC、電力会社、電中研と関連する機関・企業の組合せも適切で、開発能力のあるプロジェクト実施体制を確立し、着実に開発推進してきた点は評価できる。

I. 波及効果に関する調査

I-1. 技術波及効果

- LTS線材を使ったシステムのコスト評価を実施し、その成果は現在の瞬低用LTS-SMESへと反映されている。
- Bi系線材の4kA通電に成功しHTS-SMES 実現に十分であることを確認したが、高磁場下の性能に制約があるため、HTS-SMESとしては実用化されていない。
- Y系線材を使ったHTS-SMESの概念設計とコスト評価を実施し、30Kレベルで金属系SMESよりも経済性に優れることを明確化し、Y系SMES開発へとつながっている。

I-2. 研究開発力向上効果

- 本プロジェクトの成果を基に、後継プロジェクトとして、「超電導電力ネットワーク制御技術開発」(平成16年度～平成19年度)が実施された。

- また、現在、Y系線材を使った2GJ級SMESのコイル構成の設計を目的として「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)が実施されている。
- 原著論文数31件、特許出願件数:6件

I-3. 経済効果

- 現在のところ国内ではLTSのSMESが液晶工場に導入されているが、まだ、市場形成には至っていない。今後開発が進むものとして、2020年時点でのSMESの国内市場規模は、142億円と試算されている。

I-4. 国民生活・社会レベルの向上効果

- 負荷変動補償や系統安定化のためのSMESシステムは、データセンターの運用安定に貢献できるため、情報化社会の推進にとっても今後不可欠のインフラとなると期待されている。

II. 現在の視点からのプロジェクトの評価のための参考情報

II-1. 国家プロジェクトとしての妥当性

- 有用なエネルギー貯蔵システムとして市場性がある小型のSMES の実用化を目指し、最大の課題である低コスト化を目的に技術開発を行った意義は大きい。SMES の開発は多額の資金を要しリスクの高い革新的な技術開発を伴うため、民間の一企業による実施は困難であることから、国の事業として実施したことは妥当であった。

II-2. 目標設定

- 開発ターゲットを小規模系統制御用SMES に絞り、既存技術との競合性を踏まえて目標コストを設定した上で、コスト低減効果が大きい導体・コイルシステムを主体として設計・試作およびコスト評価、性能評価を行ったことは、妥当であった。

II-3. プロジェクトの実施方法

- コスト低減技術開発ではニーズや要求仕様を把握している電力会社が参画し、高温超電導技術では超電導の先端研究を行っている研究機関と電力技術を熟知した研究機関が参画した実施体制は妥当であった。

I. 波及効果に関する調査

I-1. 技術波及効果

- LTS線材を使った10MVA/20MJ 級SMESを製作し、実系統に連系して充放電試験を完了し、コスト削減の課題を残すものの、実証段階に達しているといえる。
- Bi系コイルの試作・特性評価を実施した。
- Y系コイルの試作・特性評価を実施し、250A安定通電に成功し、今後のY系SMES開発の基礎データとなった。
- Nb系コイルの軸受を使った200MJ級車両用フライホイールの開発がJR東海・東芝で実施された。

I-2. 研究開発力向上効果

- 先行するプロジェクトの成果を基に、本プロジェクトが遂行された。

- 本プロジェクトの成果を基に、現在、Y系線材を使った2GJ級SMESのコイル構成の設計を目的として「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)が実施されている。
- 原著論文数27件、特許出願件数5件

I-3. 経済効果

- 現在のところ国内ではLTSのSMESが液晶工場に導入されているが、まだ、市場形成には至っていない。今後開発が進むものとして、2020年時点でのSMESの国内市場規模は、142億円と試算されている。

I-4. 国民生活・社会レベルの向上効果

- 負荷変動補償や系統安定化のためのSMESシステムは、データセンターの運用安定への貢献もできるため、情報化社会の推進にとっても今後不可欠のインフラとなると期待されている。そのためには大幅な技術性能の向上とコストダウンが必須である。

II. 現在の視点からのプロジェクトの評価のための参考情報

II-1. 国家プロジェクトとしての妥当性

- 電力の品質低下の課題の対策手段の一つとして、公共性が高い。実用化までには長期間の莫大な研究開発費が必要となるため、民間が単独で行うにはリスクが高く、国レベルの投資があつて初めて可能になる。このような大規模プロジェクトこそ、国が積極的に関与すべきものと考えられ、国プロとしての取り組みは評価できる。

II-2. 目標設定

- SMESシステムでは、技術動向・市場動向を踏まえ、技術向上とコスト削減について、世界のトップレベルの目標設定がなされた。超電導フライホイールの開発では、主に鉄道への用途展開を前提にして、コストや信頼性など実用化を強く意識したことは評価できる。

II-3. プロジェクトの実施方法

- よくマネジメントされたプロジェクトと高く評価でき、日本の世界に対するこの分野での優位性を一層高めた。開発チームは民間企業だけでなく多くの学術機関とも連携して開発能力のあるプロジェクト実施体制を確立し、着実に開発推進してきた点も評価できる。

I. 波及効果に関する調査

I-1. 技術波及効果

- 軸受に高温超電導材(Y系)を使ったエネルギー貯蔵用1MJ級フライホイールによる性能評価を実施したが、経済性の観点から、まだプロトタイプ段階にある。
- フライホイール技術の基本的知見は、「超電導電力ネットワーク制御技術開発」(平成16年度～平成19年度)プロジェクトのNb系コイルの軸受にも活用されている。

I-2. 研究開発力向上効果

- 本プロジェクトの成果を基に、後継プロジェクト「フライホイール電力貯蔵用超電導軸受技術研究開発」(平成12年度～平成16年度)が実施された。
- 原著論文数23件、特許出願件数:26件

I-3. 経済効果

- 超電導フライホイールの市場は、まだ立ち上がっていない。

I-4. 国民生活・社会レベルの向上効果

- 電力エネルギーの安定供給とIT関連インフラ設備の信頼性向上へのポテンシャルは存在するが、現時点では未知数である。

II. 現在の視点からのプロジェクトの評価のための参考情報

II-1. 国家プロジェクトとしての妥当性

- 長期に亘る研究開発期間が必要であり、開発費も多額にのぼることを考えると、これを民間企業のみで実施するには無理がある。高温超電導フライホイール電力貯蔵装置は、高性能化研究が求められるので国の研究機関の応援も必要である。異分野の企業や研究機関の間の協力も必要であり国プロとして組織されたことは妥当である。

II-2. 目標設定

- 本プロジェクトにおける指標設定は、高温超電導フライホイールが必要とする重要機能がよく考慮されており、要素技術を統合した実験的検証も行われたことは、概ね妥当である。要素技術については、具体的数値目標を掲げて取り組んでおり、概ね妥当である。

II-3. プロジェクトの実施方法

- プロジェクトの運営において、10 個所に亘る委託企業先の研究内容を把握し取りまとめることが十分でなかった。これらの連携不足等は、プロジェクト全体を統括するリーダーの存在が明確でないことに起因すると考えられる。

I. 波及効果に関する調査

I-1. 技術波及効果

•軸受に高温超電導材(Y系)を使ったエネルギー貯蔵用40MJ級フライホイールの軸受技術に特化し、運転試験装置を製作した。経済性の観点から、まだプロトタイプ段階にある。

•フライホイール技術の基本的知見は、「超電導電力ネットワーク制御技術開発」(平成16年度～平成19年度)プロジェクトのNb系コイルの軸受にも活用されている。

I-2. 研究開発力向上効果

•先行した「高温超電導フライホイール電力貯蔵研究開発」(平成7年度～平成11年度)の成果を基に、本プロジェクトが後継プロジェクトとして実施された。
•原著論文数27件、特許出願件数2件

I-3. 経済効果

•超電導フライホイールの市場は、まだ立ち上がっていない。

I-4. 国民生活・社会レベルの向上効果

•電力エネルギーの安定供給とIT関連インフラ設備の信頼性向上へのポテンシャルは存在するが、現時点では未知数である。

II. 現在の視点からのプロジェクトの評価のための参考情報

II-1. 国家プロジェクトとしての妥当性

•増大する電力負荷変動の吸収等に対応する超電導フライホイール電力貯蔵技術への期待は高い。開発課題は、極めて挑戦的で、また大きな研究投資を必要とするリスクの高いものであり、民間の研究開発努力に委ねることは未だ適切ではない。基礎技術確立までの間、国が政策的かつ戦略的に研究開発を推進すべきである。

II-2. 目標設定

•研究開発計画については前フェーズにおいて得られた成果をもとに達成目標を掲げており、妥当な計画であったと評価できる。情勢変化に伴う中長期的な開発目標の見直しにより、負荷平準化用だけでなく早期実用化可能なUPS等にも目標を据えたことは致し方ないが、目標については今後ともより一層議論を深めるべき。

II-3. プロジェクトの実施方法

•各参加主体との開発分担も適切であり、社会・経済環境の変化に応じて中間目標設定や開発目標を見直す等の柔軟な対応をとっており、円滑にマネジメントされていて高く評価できる。

I. 波及効果に関する調査

I-1. 技術波及効果

- 単心構造で長さ3mのBi系超電導ケーブルを製作し3kAの通電、交流損失1W/mを実証し、現在実用化目前の超電導ケーブルの原点となった。
- Bi系500mケーブルの構造、仕様、試験項目、布設レイアウト等を検討し、系統連系はしなかったものの、Bi系500mケーブルによる実証試験に成功した。
- Y系線材で1mの単尺導体を作成し、通電容量1kAの交流損失を評価し、現在開発中のY系超電導ケーブルの基礎データとなった。

I-2. 研究開発力向上効果

- 先行した「超電導電力応用技術」(昭和63年度～平成11年度)の成果の一部を継承し、本プロジェクトが実施された。

- 本プロジェクトの成果は、現在実施中の、Bi系電力ケーブルの実証を目的とした後継プロジェクト「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」(平成19年度～平成24年度)、および、Y系電力機器の開発を目的とした後継プロジェクト「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) へと継承されている。
- 原著論文数131件、特許出願件数35件

I-3. 経済効果

- 電力ケーブルの市場は2016年ごろから立ち上がると想定されている。本プロジェクトの貢献も大きい。

I-4. 国民生活・社会レベルの向上効果

- 電力の安定供給は生活の質、安全、安心にとって重要な条件の一つである。

II. 現在の視点からのプロジェクトの評価のための参考情報

II-1. 国家プロジェクトとしての妥当性

- 質の高い電力の安定供給、電力コストの低減、エネルギー利用効率改善による炭酸ガス排出抑制効果が期待される。エネルギーの安定供給や省エネルギーに貢献するだけでなく、着実にわが国の技術力の向上に寄与することから、我が国として実施する事業として相応しく、事業の位置付け・必要性は明瞭である。

II-2. 目標設定

- 各研究項目に対して、国際的にも高い技術水準の戦略的目標が設定され、実用化に向けての考え方も明確になっている。また、目標達成に必要な要素技術の設定は適切なものであり、分散型電源の利用拡大を見据えた研究計画及び予算も妥当である。

II-3. プロジェクトの実施方法

- 研究開発の実施体制は、事業化能力を有する企業が選定され、有識者の客観的意見を反映させる仕組みや産業技術総合研究所との共同研究体制も含めて、高度な開発目標に挑む本プロジェクトにふさわしい事業体制となっている。

I. 波及効果に関する調査

I-1. 技術波及効果

- 世界的な高温超電導フィーバーの中で、高温超電導に関する基礎・応用の両面で並行的に研究・開発が実施され、将来技術の見極めと方向付けがなされた結果、高温超電導技術の技術基盤が整理され、物質探査効率が向上し、現在の超電導素子技術へとつながっている。
- 高温超電導材料の高集積度の困難さが判明したが、SFQロジック回路開発に方向転換し、現在のSFQ技術開発の起点として大きな意味を持っている。

I-2. 研究開発力向上効果

- 本プロジェクトの成果を基に、「超電導応用基盤技術研究開発(Ⅰ)」(平成10年度～平成15年度)を後継プロジェクトとして実施。
- 原著論文数:2,274件、特許出願件数:696件 (材料・素子の合計)

II. 現在の視点からのプロジェクトの評価のための参考情報

II-1. 国家プロジェクトとしての妥当性

- 高温超電導が発見されて間もない時期の研究開発であり、実用化の見通しを明確に予測できなかったこと、技術的難度は高いが、産業面への広範囲な応用の可能性が想定できたことから、国のプロジェクトとすることは妥当であった。さらに、高度に基礎的な材料開発にまで踏み込んだ研究は、国主導以外の方式では実行困難であった。

I-3. 経済効果

- フィルタなどのごく一部は製品化されている。

I-4. 国民生活・社会レベルの向上効果

- HTSは高集積化が難しいが、低集積度ですむフィルタが、携帯電話地上基地局に導入されている。
- IT機器の消費電力量の増加は2020年には、1600億kWhと想定されており、グリーンITプロジェクトでは、38%のエネルギー削減を掲げている。SFQ ルータの省エネルギー効果も大いに期待されている。その実現は2015年を想定している。

II-2. 目標設定

- 当初野心的に採り上げていた三端子素子からジョセフソン接合に基づくSFQ素子への目標転換は妥当であった。

II-3. プロジェクトの実施方法

- 新機能素子研究開発協会からの再委託による民間企業8社を含む研究組織により実施された。プロジェクトの運営・評価さらに研究計画の見直しや追加が適切におこなわれた。例えば、超電導素子では、第3期にジョセフソン素子ハイブリッドシステムのテーマを追加設定した。

I. 波及効果に関する調査

I-1. 技術波及効果

•SFQ集積回路に必要な要素技術を取得した。IcRn 積及び1000 接合アレイにおけるバラツキの目標値を上回り、現在のSFQロジック回路のベースが確立された。

•AD コンバータやSFQサンプラー回路など小規模実証回路を試作した。各々100GHz高速動作の実証、20GHzまでの高速波形の観測に成功し、消費電力については90nWを達成し、現在のSFQロジック回路技術へとつながっている。

I-2. 研究開発力向上効果

•先行した「超電導材料・超電導素子」(昭和63年度～平成9年度)の成果を基に、本プロジェクトが実施された。

•本プロジェクトの成果を基に、超電導回路における低消費電力高性能デバイスを実現することを目的として、後継プロジェクト「低消費電力型超電導ネットワークデバイスの開発」(平成14年度～平成18年度)が実施され、ニオブ系低温超電導デバイス開発および酸化物系高温超電導デバイスの開発が行われた。

•原著論文数837件、特許出願件数261件 (材料・素子の合計)

I-3. 経済効果

•フィルタなどのごく一部は製品化されている。

I-4. 国民生活・社会レベルの向上効果

•IT機器の消費電力量の増加は2020年には、1600億kWhと想定されており、グリーンITプロジェクトでは、38%のエネルギー削減を掲げている。SFQ ルータの省エネルギー効果も大いに期待されている。

II. 現在の視点からのプロジェクトの評価のための参考情報

II-1. 国家プロジェクトとしての妥当性

•超電導技術は、エネルギー産業への貢献および周辺産業への経済波及効果はきわめて大きく未来を開くキーテクノロジーの一つと期待され、その開発は国家の重要課題と考えられる。実用化には長期間の多岐にわたる研究開発が必要で、民間企業ではリスクが大きいため、国の事業として実施したことは極めて妥当であった。

II-2. 目標設定

•SFQ 回路の開発ターゲットとして、サンプラーとAD 変換器を想定し、その試作を通して、要素技術の有効性を実証したことは評価できる。

II-3. プロジェクトの実施方法

•国内外の研究動向の情報を広く収集して、重複なく個別テーマを選択し具体的な数値目標を設定したことは妥当であった。また、進捗状況や新規発見にあわせ研究テーマや目標を適宜修正しており、よくマネジメントされていたことも評価できる。

I. 波及効果に関する調査

I-1. 技術波及効果

- Nb系LSI プロセス開発で新平坦化法などの要素技術開発に成功し、ニオブ9層構造を可能にした新プロセス技術を開発し実用化し、現在のSFQロジック回路開発に活用。
- 酸化物系集積回路プロセスである超電導4層の積層構造の作製技術と最小線幅の回路加工技術を実用化。
- 酸化物系超電導フロントエンド回路と半導体信号処理回路(バックエンド回路)を組み合わせたADコンバータの開発は実用化可能。

I-2. 研究開発力向上効果

- 先行した「超電導応用基盤技術研究開発(I)」(平成10年度～平成15年度)の成果を基に、本プロジェクトが実施された。

II. 現在の視点からのプロジェクトの評価のための参考情報

II-1. 国家プロジェクトとしての妥当性

- SFQデバイスは、市場を形成する前段階にあり、昨今の厳しい経済状況および国内外での競争環境にさらされている個々の民間企業等の努力だけでは実現困難であるため、国の予算と公的研究リソースを投入する意義は大きく、産学協同で開発体制を牽引できる国の事業として妥当である。

•本プロジェクトの成果を基に、「次世代高効率ネットワークデバイス共通基盤技術の開発」の一環として、「超電導回路技術開発」で「超電導リアルタイムオシロスコープ用高速ADコンバータの開発」を目的とする後継プロジェクト「次世代高効率ネットワークデバイス技術開発」(平成19年度～平成23年度)が実施中である。(LTSのみ。)

•原著論文数105件、特許出願件数32件

I-3. 経済効果

•フィルタなどのごく一部は製品化されている。

I-4. 国民生活・社会レベルの向上効果

•IT機器の消費電力量の増加は2020年には、1600億kWhと想定されており、グリーンITプロジェクトでは、38%のエネルギー削減を掲げている。SFQルータの省エネルギー効果も大いに期待されている。

II-2. 目標設定

•実用化応用を念頭に置き、プロセスの高度化から始めてルータ、ADコンバータ、サンプラーなど技術動向、市場動向等を踏まえて、戦略的な目標が設定されている。具体的かつ明確な開発目標を定量的に設定しており、適切な指標も設定されていた。

II-3. プロジェクトの実施方法

•ISTECを中心とし、研究内容に応じ最適な企業・大学への再委託を行っており、短期間に成果を上げることができたことから、プロジェクトリーダーを中心に研究マネジメントが正しく機能したと考えられる。情勢変化への対応も適切である。

4. 施策評価項目に関する調査概要

4-1. 施策(超電導研究開発)の目的・政策的位置付けの妥当性

- 1. (1) 施策(超電導研究開発)の目的の妥当性 p.42
- 1. (2) 施策(超電導研究開発)の政策的位置付けの妥当性 p.43
- 1. (3) 国の施策で行われるべき研究開発としての妥当性はあったか。国の関与が必要とされる研究開発施策であったか。 p.44

4-2. 施策(超電導研究開発)の構造及び目的実現見通しの妥当性

- 2. (1) 現時点までにおいて得られた成果は妥当か。 p.45
- 2. (2) 施策(超電導研究開発)の目的を実現するために技術に関する事業が適切に配置されてきたか。それぞれのプロジェクト間での連携は適切に取られてきたか。 p.49
- 2. (3) 個々のプロジェクト終了後のフォローアップの状況 p.50

4-3. 総合評価(施策)

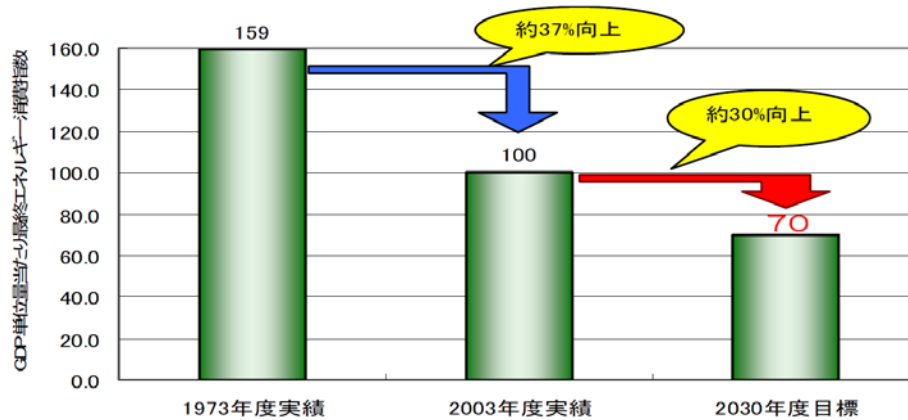
- 3. 総合評価(施策) p.53

- 高温超電導の研究目的は、当初の物質探索からスタートして広い波及効果を狙った工業材料化の研究に収斂されてきた経緯があるが、その目的は、常に、超電導現象の社会利用を目的としたものであり、その目的は妥当であったと言える。
- また、高温超電導の研究に並行して実施されていた、電力・エネルギー分野での低温超電導製品の開発目的は、超電導現象の持つ高い性能を電力・エネルギー分野の効率化に使用することが目的であり、その目的は妥当であったと言える。
- 超電導素子分野に関しては、高速かつ低消費電力のコンピューターデバイスを念頭においた素子構築の研究からスタートした。その後、SFQによるロジック回路構築に軌道修正し、材料制御に苦しみつつも、集積度を徐々に上げていった。更に低温超電導素子と高温超電導素子の役割分担(用途分担)を図りつつ、機能検証を進めてきた。
- これらの超電導素子分野の研究では、膨大な情報通信に対応した、半導体では実現不可能な高速・低消費電力の製品を作ることが目的としてきており、その目的は妥当であったといえる。
- 以上を概括すると、施策の目的は妥当だったといえる。

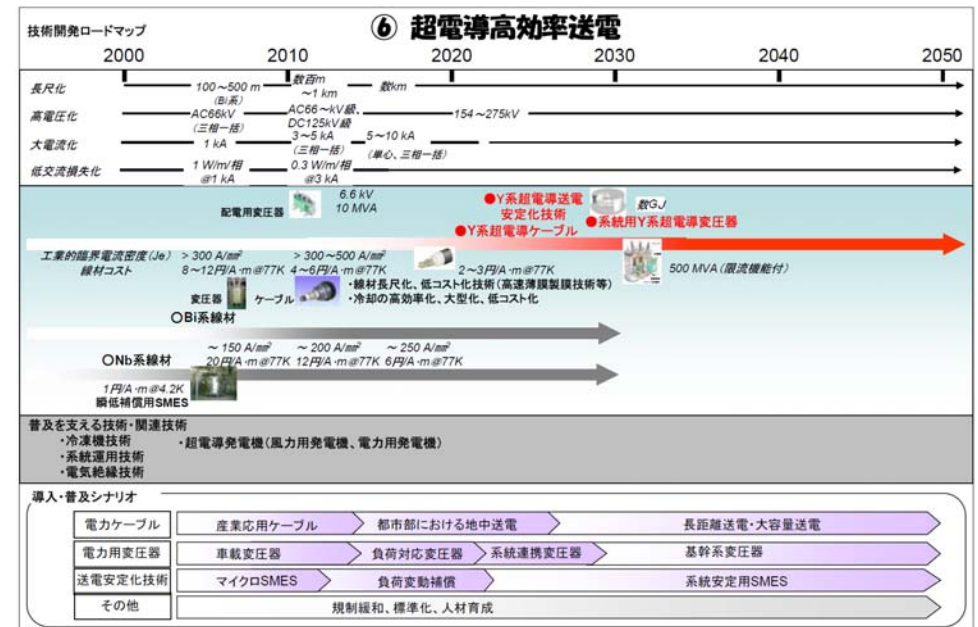
・「国家エネルギー戦略」では、下図に示すように省エネルギーとして2030年までに30%の効率改善、「新エネルギーイノベーション計画」では、新たなエネルギーの貯蔵・輸送技術など、革新的なエネルギー高度利用技術の開発が実施されている。省エネルギーは我が国の重要な政策目的であり、「Cool Earth-エネルギー革新技術計画」では、21のエネルギー革新技術の一つに「超電導高効率送電技術」が選定されている。

・経済産業省で実施してきた超電導研究開発は、我が国の重要な政策目的である省エネルギーに大きく貢献する技術であり、その実用化・普及拡大が重要である。したがって、その政策的位置づけは妥当であると考えられる。

【図19: 我が国のGDP当たりエネルギー利用効率指数と目標値】



国家エネルギー戦略



クールアース50

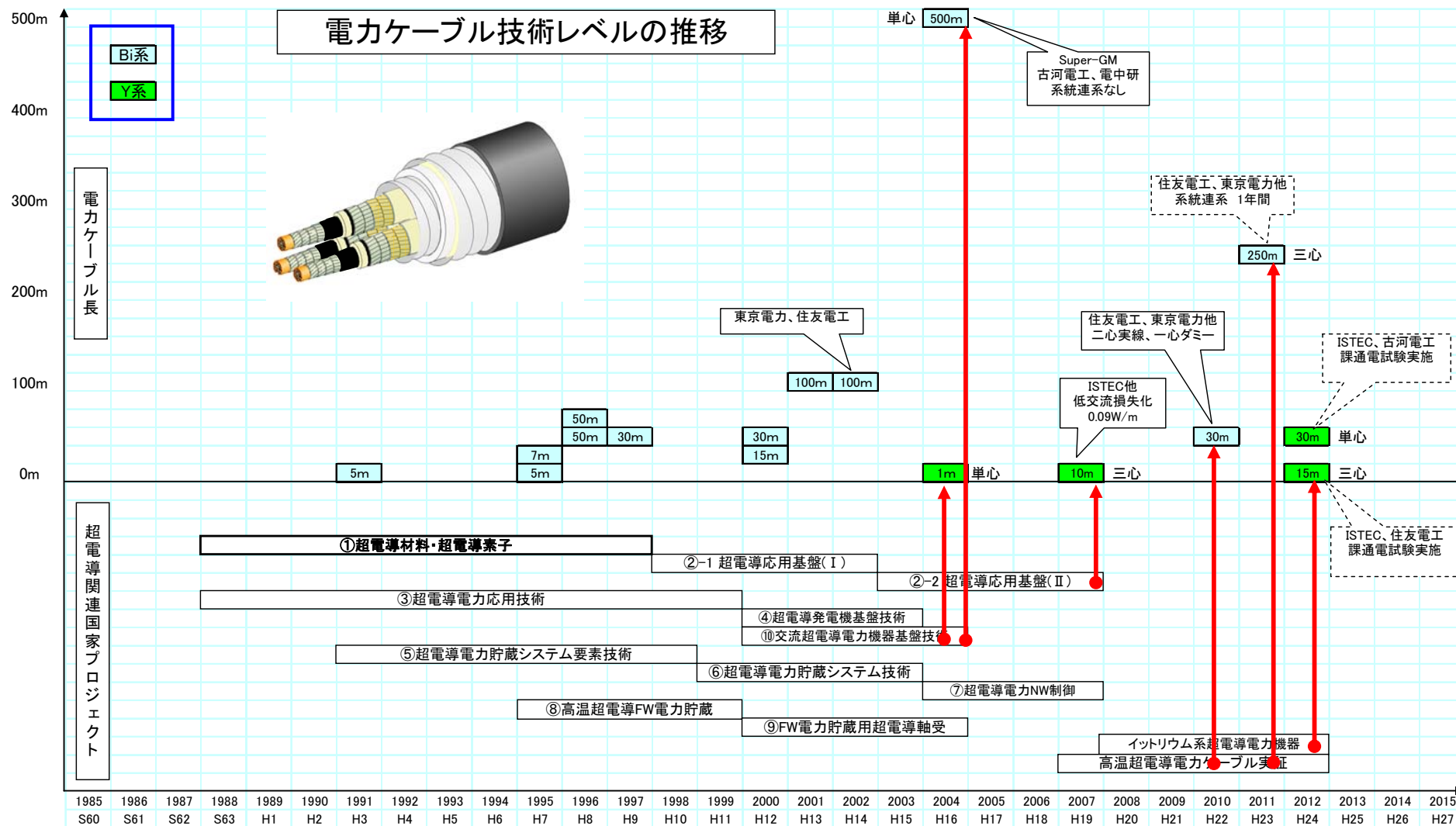
1. (3) 国の施策で行われるべき研究開発としての妥当性はあったか。
国の関与が必要とされる研究開発施策であったか。

- 高温超電導の研究が開始された1980年代後半の状況では、高温超電導現象そのものが発見されて間もない時期であり、その発現機構解明、物質探索などの基礎的研究を行うことが主体であったこと、期待は非常に大きかったが実用化への見通しははっきりしていなかったため、企業のみで研究を行うことは困難であった。この時期の高度に基礎的な研究は、国として研究開発を行うことは妥当であったと考えられる。
- また、同時期に開始された電力・エネルギー分野の製品開発を目指した低温超電導関係製品の開発研究では、超電導線材の開発、ローターの開発、冷凍システムの開発等、非常に多くの企業の協力が必要な技術的難度の高い研究開発であった。また、省エネルギー、CO₂負荷量低減は非常に重要な政策的課題であったことから、国として研究開発を行うことは妥当であったと考えられる。
- 超電導研究開発は、技術的難度、多くの企業の協力、政策的意義付けの高さからも、国の研究開発としての実施は妥当性があると考えられる。そのような中でも、NbTiの製造技術を活用したSMES開発やBi系線材の開発、高温超電導バルク体を使用した水質浄化装置の製品化などは企業主体のプロジェクトに移行し企業フェーズへの移転も行われるなど、国としての研究開発対象は、適切に選択されてきたと考えられる。
- 以上を概括すると、超電導研究開発には、国の適切な関与が必要であったといえよう。

- Bi系超電導電力ケーブルは、「交流超電導電力機器基盤技術」で、500mの単心Bi電力ケーブルで系統連系はしなかったが実証試験を実施。この成果は、「高温超電導ケーブル実証」に引き継がれ、今後約300mの長さの系統連系試験が計画されている。
- Y系超電導ケーブルは「超電導応用基盤(Ⅱ)」で、10mケーブルの試験を実施。その成果を基に「イットリウム系超電導電力機器」において15mケーブルで課通電試験を計画中。
- 超電導ケーブル開発においては、先行するプロジェクトの成果が吟味され、その成果を後継のプロジェクトに次々に継承されるといった正のスパイラルが形成されたといえよう。
- SMESに関しては、「超電導電力貯蔵システム要素技術」でのNb系の要素技術開発の成果を基に、「超電導電力貯蔵システム技術」ではモデルコイル試験が実施された。これを基に、「超電導電力ネットワーク制御」では20MJ級の系統連系試験が実施された。
- 高温超電導(HTS)であるY系SMESとしては、「イットリウム系超電導電力機器」で2MJ級の動作試験と2GJ級のSMESコイル設計が実施される計画である。
- SMES開発においてはNb系で実証試験を行い、その後低コスト化が期待できるY系SMES開発へと移行するという開発のシナリオに沿っており、後継プロジェクトの成果が期待されている。
- 超電導素子に関しては、SFQ(単一磁束量子)の動作確認・論理回路への適用がなされた。集積度向上が課題であるが、接合数で見るとNb系では10万接合、Y系で200接合を達成している。現状では、プロトタイプ段階まで到達しており、課題が明確になってきている。
- 以上を概括すると、得られた成果は、実用化がターゲットとなる段階まで達しており、妥当だといえる。

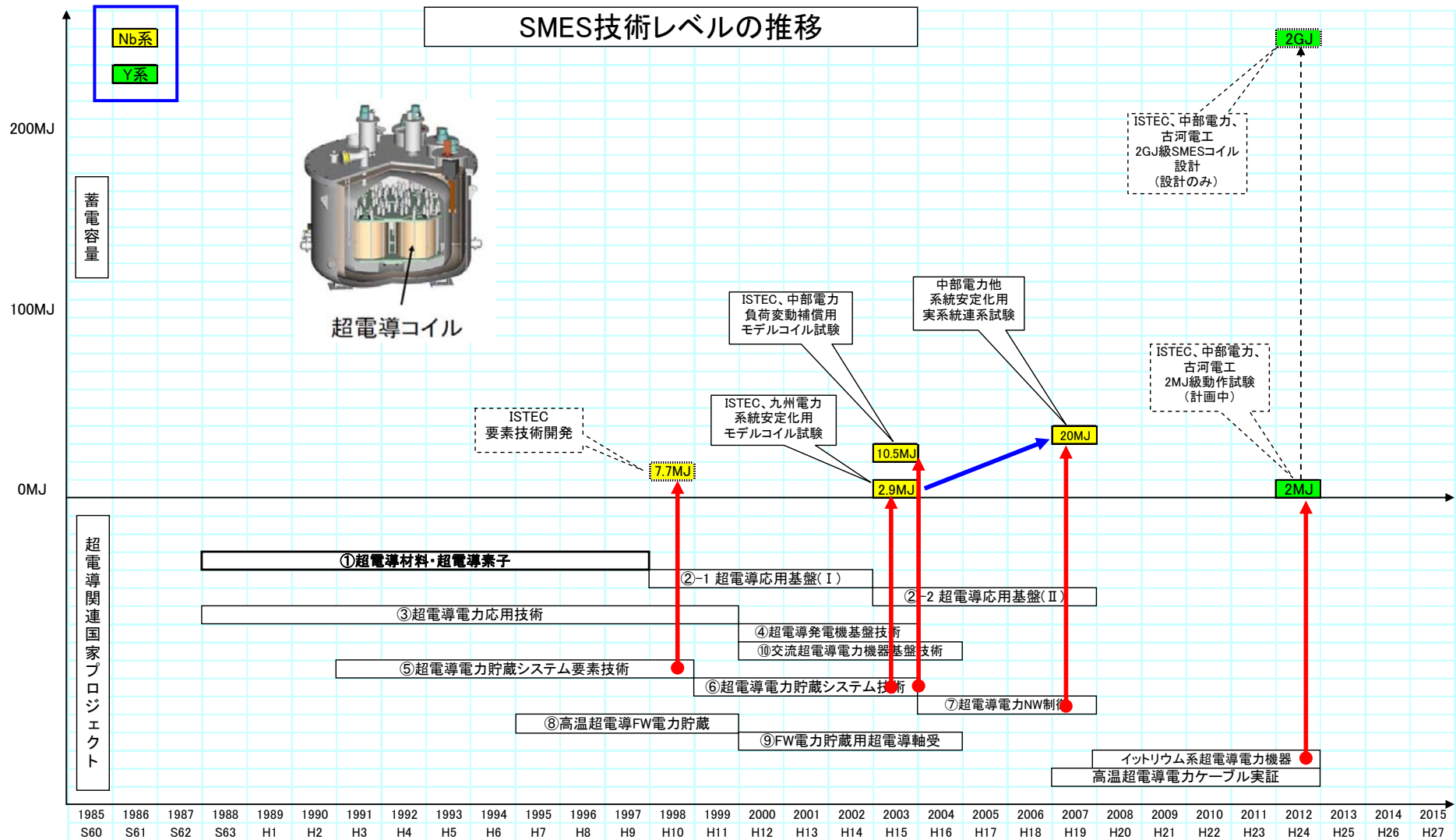
超電導電力ケーブル技術開発の推移とプロジェクトの関係

46



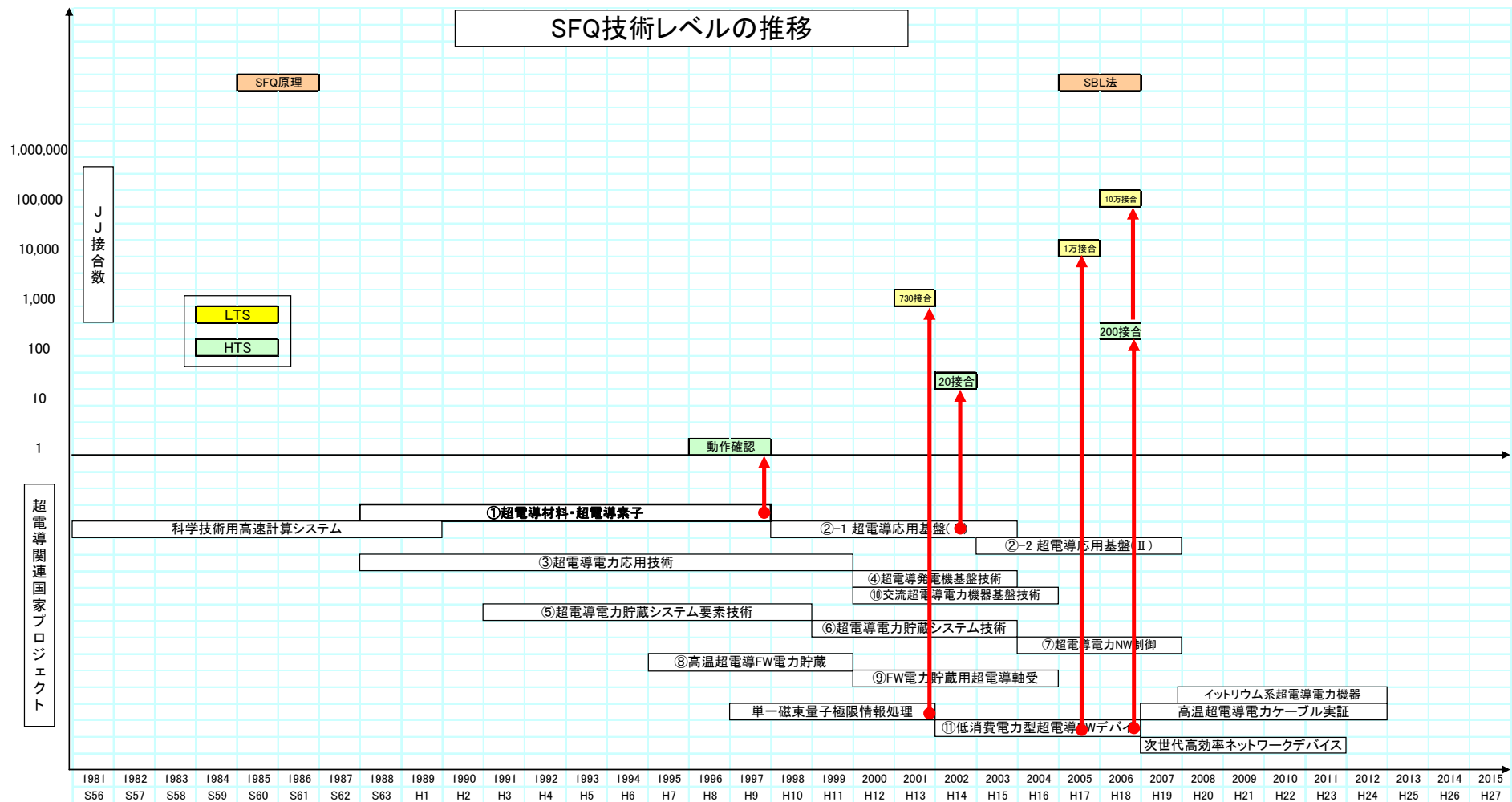
SMES技術開発の推移とプロジェクトの関係

47



SFQ技術開発の推移とプロジェクトの関係

48



出所: 各種資料を基にJATIS作成

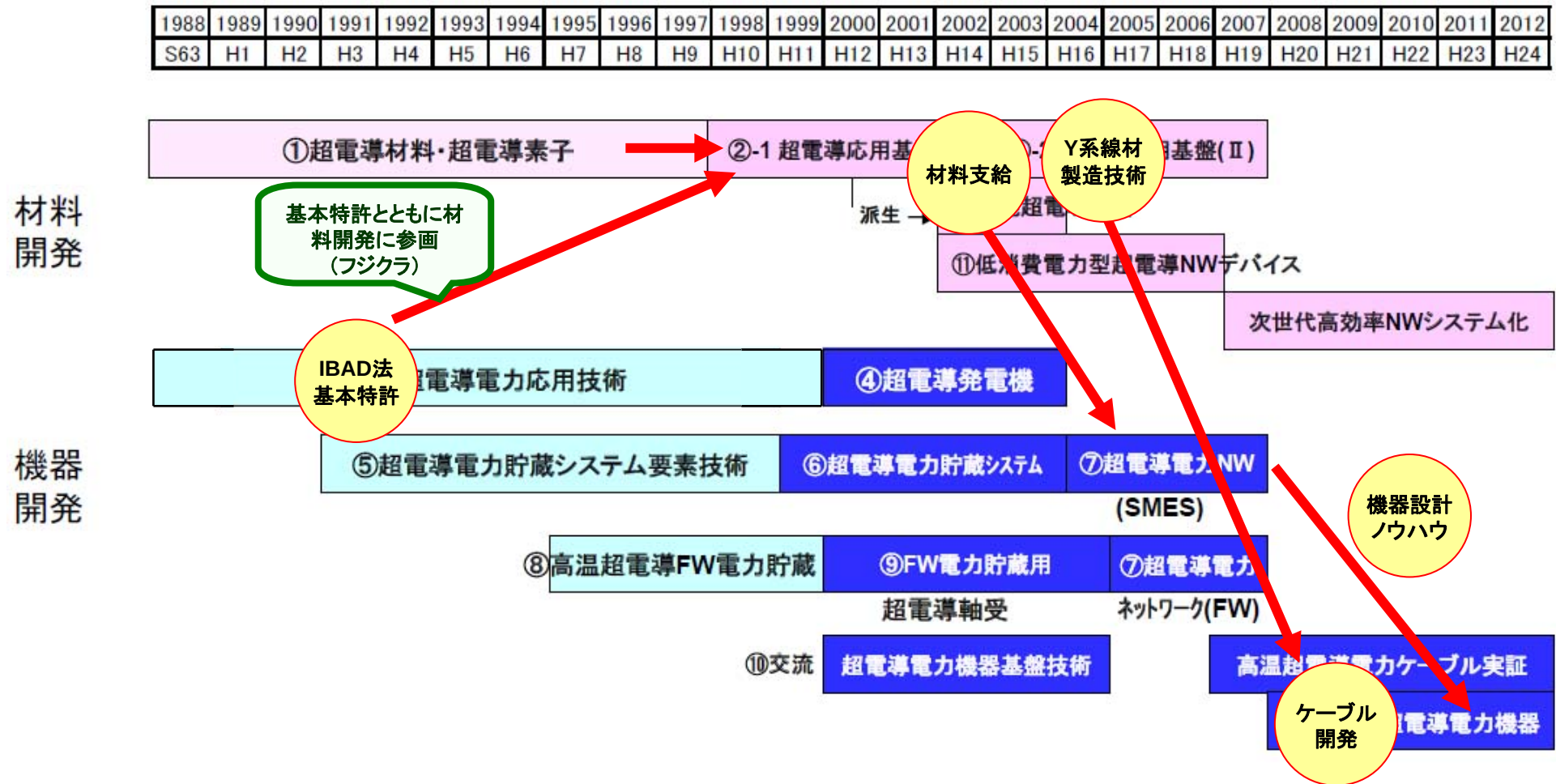
2. (2) 施策(超電導研究開発)の目的を実現するために技術に関する事業が適切に配置されてきたか。それぞれのプロジェクト間での連携は適切に取られてきたか。

- 超電導材料分野では、高温超電導線材の開発を同時期に行っていた「超電導電力応用技術」の技術が、「超電導材料・超電導素子」の後継プロジェクトに移行するなど、1980年代から1990年代に実施されていたプロジェクトは、個々のプロジェクトが独自に進んでおり、必ずしも研究の内容、フェーズの整理がなされていたとは言い難い部分があったが、その後は、成果が適切に引き継がれた。
- 超電導素子分野では、「超電導材料・超電導素子」で非常に大胆な三端子素子の構築を目標に掲げたが、複雑な酸化物超電導体の界面制御に苦しみ三端子素子の機能検証までで軌道修正し、その後はSFQ素子による回路構築に移行して、後継プロジェクトで更なる高集積度化の努力がなされてきた。超電導素子分野については、経済産業省内のプロジェクトには並行して進められたプロジェクトは存在せず、プロジェクト間の研究内容の整理の問題は特に見られなかった。また、プロジェクト間の成果の引き継ぎも適切に行われていたものと考ええる。
- 研究開発を有効に進めるためには、関係するプロジェクトをまとめて俯瞰的に見て、プロジェクト間の研究開発の内容を取捨選択したり、移行させたりすることが有効であると考ええる。このため、「施策評価」の見方を早くから導入して整理することが大事である。
- 特にブームになっているものについては類似の研究開発テーマが多数並行的に実施される傾向があるため、横断的に見る必要があるとあり、これまでの研究開発を歴史的に見ても「施策評価」の観点から早期に研究開発内容の確認・整理を行うことによる研究開発資源の集中化を図ることが必要であると考えられる。

- 個々のプロジェクトの成果の実用化に際しては、プロジェクト間の連携やプロジェクトをまたぐ事業整理が必要である。
- 現在、超電導材料分野においては、実用化に近い位置にいる線材技術は、もともと「超電導電力応用技術」プロジェクトにおいて開発された技術であり、「超電導材料・超電導素子」プロジェクトの後継プロジェクトである「超電導応用基盤技術研究開発(Ⅰ)」の線材開発の部分にプロジェクトを越えて継承された。
- さらに「超電導応用基盤技術研究開発(Ⅱ)」では線材開発に注力することになり、開発項目の選択と集中がなされた。現在開発テーマとして残っているY系(あるいはBi系も)線材は、こういった経緯で実用化に向かった。Y系高温超電導材料を電力ケーブルに適用する際の俯瞰図を次に示す。
- 一方超電導素子分野においては、SFQロジック回路が挙げられる。「超電導材料・超電導素子」プロジェクトから「応用基盤(Ⅰ)」プロジェクトへ、またその成果を「低消費電力型ネットワークデバイス」へと継承することにより、SFQロジック回路をプロトタイプ段階まで進めることができた。高温超電導SFQ技術の俯瞰図をその次に示す。
- このように、現在有力テーマとして残っている技術については、適切なプロジェクト間の移動により後継プロジェクトへの移管が行われていることがうかがえる。

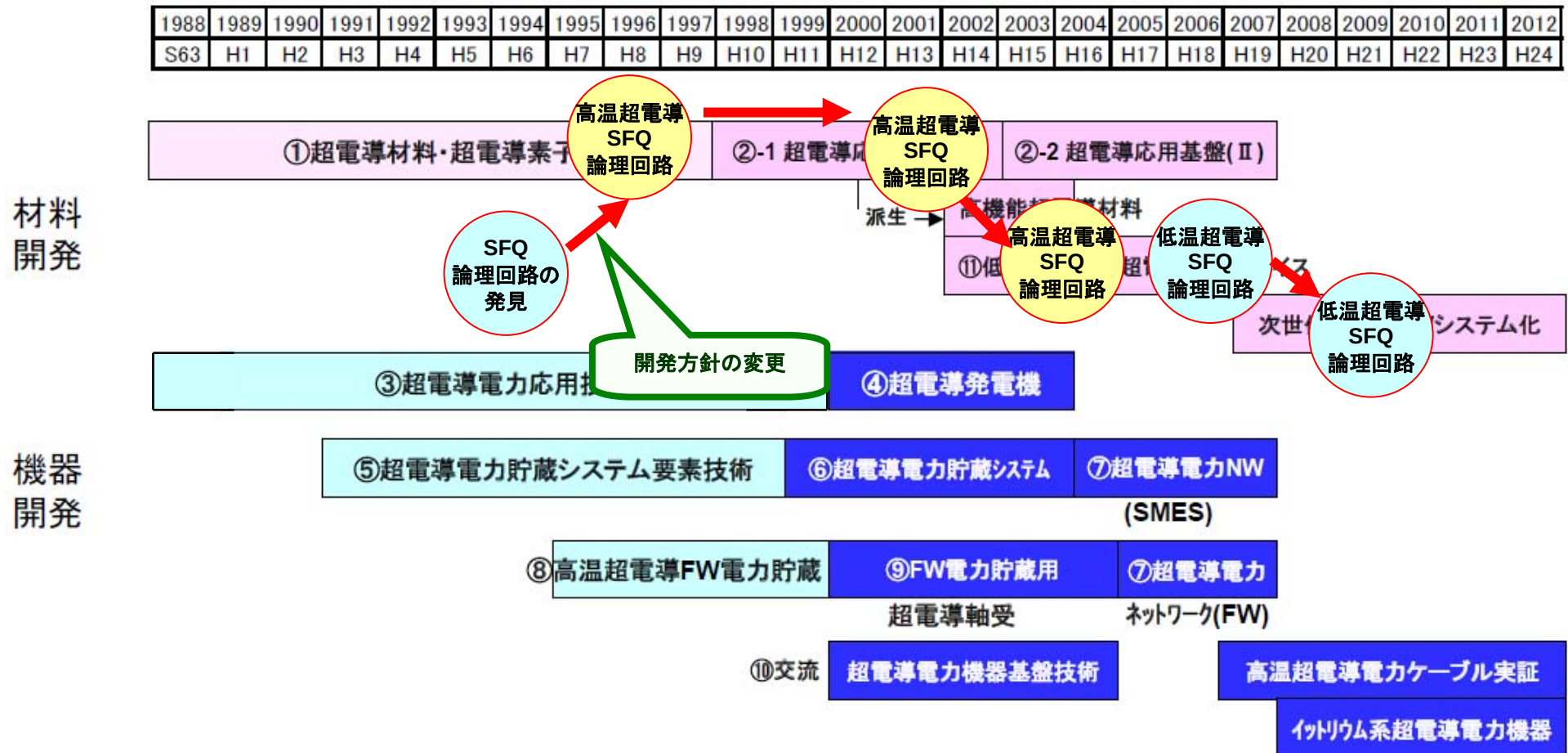
Y系超電導電力機器俯瞰図

51



超電導SFQ技術の俯瞰図

52



課題・問題点
高集積化、実装技術の改良、コンパクト冷却装置の不足、低コスト化

- 酸化物超電導物質が発見されて23年が経過した。長い研究開発の末にようやく超電導ケーブルが実システムでの連系試験の段階に達し、超電導電力貯蔵(SMES)も実証研究が行われている。これまで積み重ねてきた成果の多くがようやく実用化段階を視野に入れており、また、船用モータや磁気分離装置などの副次的製品が得られ、SFQロジック回路もプロトタイプ段階にある。
- 現在得られている成果は、研究内容の「選択と集中」が進められた結果であり、この成果を次々に継続して研究開発を実施し、超電導技術の早期実用化を確実なものとするべきであろう。
- 初期の段階では、プロジェクト間での開発テーマ等の整理が必要と考えられた面もあったが、適切なプロジェクト間の移動により後継プロジェクトへの移管が行われていることがうかがえ、個々のプロジェクト終了後のフォローアップがうまく進み現在に至っているといえる。
- 今後も研究開発を有効に進めるためには、関係するプロジェクトをまとめて俯瞰的に見て、プロジェクト間の研究開発の内容を取捨選択したり、移行させたりすることが有効であると考えられ、「施策評価」の見方を早くから導入して整理することが大事である。
- 今後の課題としては、技術戦略マップに描かれている実用化・普及の促進を図る上でも、その過程で産学官がどのような役割分担で進めていくのかを検討し、具体化させていくことが望ましいと考える。

第Ⅱ章

実用化への進展度合についての調査

（１）関連するプロジェクトと全体俯瞰図

1988 年度（昭和 63 年度）から 2007 年度（平成 19 年度）までに実施された経済産業省関連の超電導材料・超電導素子関連プロジェクト計 11 件に関し、年表形式で表わし、関連する超電導技術を図示化した全体の俯瞰図を図 2-1 に示す。

また、超電導材料分野の技術開発の推進と実用化の状況等に関する俯瞰図を図 2-2 に示す。また、同様に超電導素子分野の技術開発の推進と実用化の状況等に関する俯瞰図を図 2-3 に示す。

図 2-4 に現時点から見た「超電導研究開発の推進と実施に関する概要図」を示す。参画機関・企業の多さ、多様さ、出口想定製品群の多様さからみても国の関与が必要であったといえよう。

超電導材料分野 技術開発の推進と実用化の状況等

1987年以前 S62年以前	1988 S63	1989 H1	1990 H2	1991 H3	1992 H4	1993 H5	1994 H6	1995 H7	1996 H8	1997 H9	1998 H10	1999 H11	2000 H12	2001 H13	2002 H14	2003 H15	2004 H16	2005 H17	2006 H18	2007 H19	2008 H20	2009 H21	2010 H22	2011 H23	2012 H24	2013年以降 H25年以降
①超電導材料・超電導素子 (269億円)										②-1 超電導応用基盤(I) (159億円)					②-2 超電導応用基盤(Ⅱ) (170億円)					イットリウム系超電導電力機器						
③超電導電力応用技術 (320億円)										④超電導発電機基盤技術 (23億円)					高温超電導電力ケーブル実証											
										⑩交流超電導電力機器基盤技術 (72億円)																
⑤超電導電力貯蔵システム要素技術 (60億円)										⑥超電導電力貯蔵システム技術 (38億円)					⑦超電導電力NW制御 (64億円)					予算総額: 1216億円						
										⑧高温超電導FW電力貯蔵 (28億円)					⑨FW電力貯蔵用超電導軸受 (13億円)					①、②-1は素子と重複						

電力・エネルギー関連の技術基盤・応用分野と主要参加機関

対象	要素技術	主要参加機関	
技術基盤	1)線材	Nb系線材、Bi系線材、Y系線材 超電導材成膜、長尺線材製造	ISTEC、住友電気工業、フジクラ、古河電気工業、 昭和電線電纜
	2)バルク	酸化物高温超電導材料、 高臨界電流密度、バルクマグネット MPMG、OCMG法	ISTEC、産総研
	3)冷凍・冷却	パルス管冷凍機、タービン小型冷凍機	前川製作所、太陽日産
応用分野	1)エネルギー貯蔵	SMES、フライホイール、系統安定化	ISTEC、中部電力、九州電力、電力中央研究所 東海旅客鉄道、四国鉄研、IHI、イムラ研究所、 住友特殊金属、光洋精工
	2)送電・配電	Bi系ケーブル、Y系ケーブル、 長尺化(500m)、限流器、変圧器	ISTEC、住友電気工業、フジクラ、古河電気工業、 昭和電線電纜
	3)発電機	20万~60万kW級、交流損失の低減、 高速回転運転、電磁力対策、冷却技術	産総研、東京大学、電力中央研究所 Super-GM、関西電力、東京電力、日立電線、 日立、古河電気、三菱電機、IHI、前川製作所

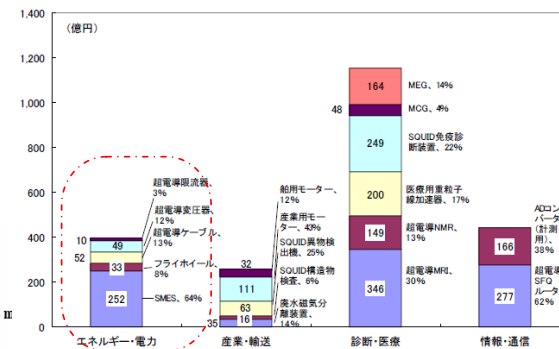
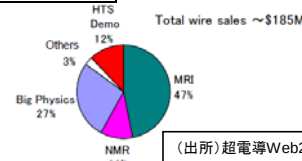
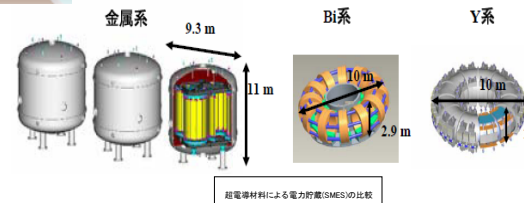
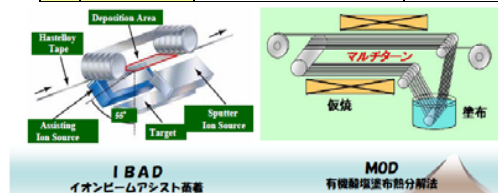


図 2-2 超電導材料分野の技術開発の推進と実用化の状況等に関する俯瞰図

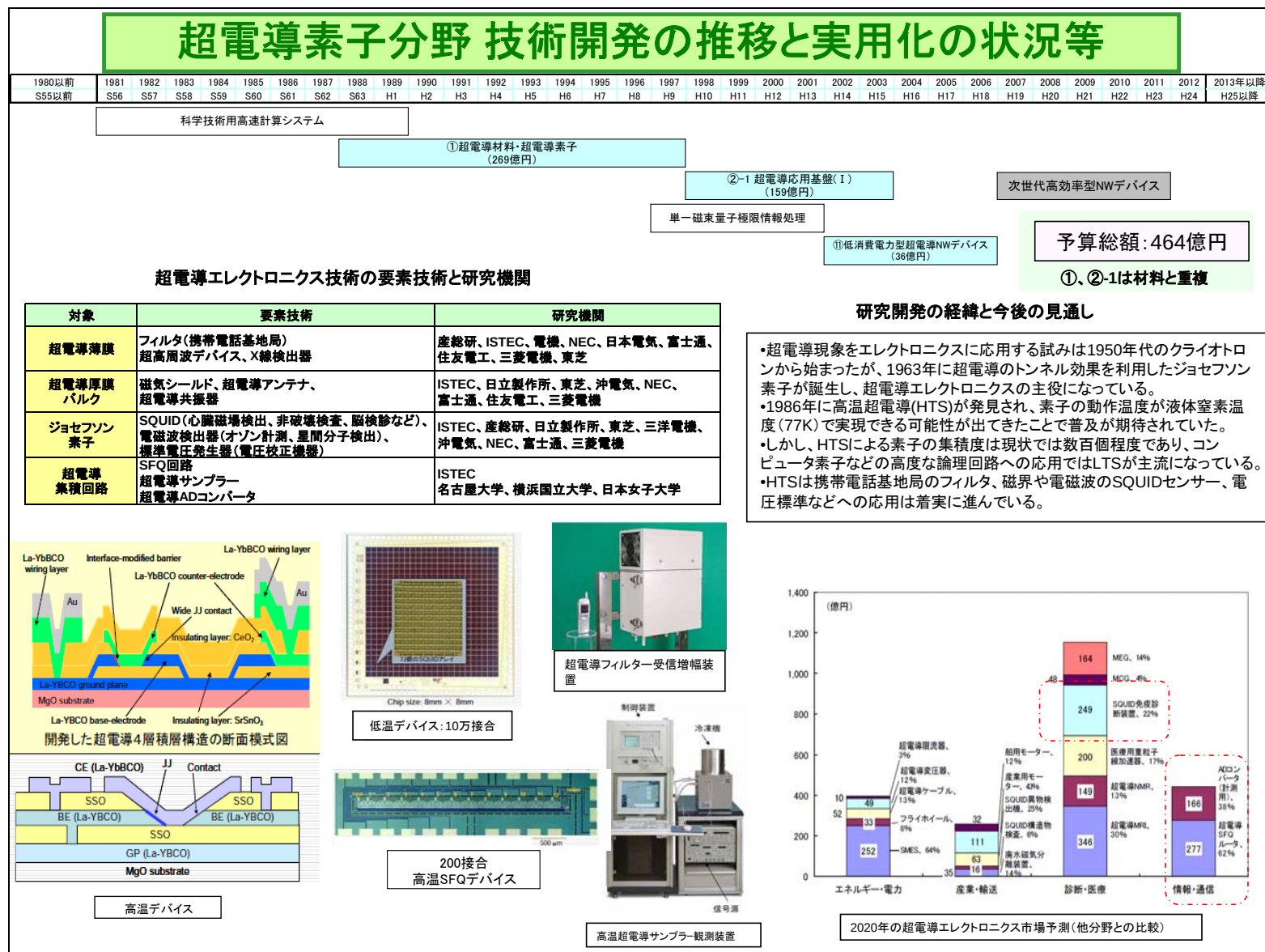


図 2-3 超電導素子分野の技術開発の推進と実用化の状況等に関する俯瞰図

（２）技術開発とプロジェクトの関係

まず、超電導材料分野として、各種高温超電導材料の実用化に向けた技術開発の流れとプロジェクトの関係を整理した。

超電導電力ケーブルに関する実施プロジェクトからのアウトプットとそれらの継承の関係を図 2-5 に示す。

超電導電力ケーブルは、1991 年に民間で 5m のケーブルが開発された。その後、東京電力と住友電工が精力的に開発を進め、2002 年には、100m の Bi 系超電導電力ケーブルを開発した。平成 12 年からの「交流超電導電力機器基盤技術」では、古河電工と電中研が 500 m の単心 Bi 電力ケーブルで系統連系はしなかったが実証試験を実施した。この成果は、「高温超電導ケーブル実証」に引き継がれ、30m の実証試験を経て、今後約 300m の系統連系試験が計画されている。

一方、Y 系超電導ケーブルは平成 12 年からの「交流超電導電力機器基盤技術」で 1 m の単心ケーブルの要素試験を経て、「超電導応用基盤（Ⅱ）」で、10m の三心ケーブルの試験を実施している。その成果は「イットリウム系超電導電力機器」において 15m 三心ケーブルで課通電試験が計画されている。

このように、超電導ケーブル開発においては、先行するプロジェクトの成果が吟味され、その成果を後継のプロジェクトに継承し、その成果がさらに次の後継プロジェクトへ継承されるといった正のスパイラルが形成されたといえよう。

次に、SMES に関する実施プロジェクトからのアウトプットとそれらの継承の関係を図 2-6 に示す。

SMES に関しては、「超電導電力貯蔵システム要素技術」で Nb 系の要素技術開発が実施された。その成果を基に、「超電導電力貯蔵システム技術」では負荷変動補償用として 10MJ 級のモデルコイル試験が、また、系統安定化用としては 3MJ 級のモデルコイル試験が実施された。この成果を基に、「超電導電力ネットワーク制御」では 20MJ 級の系統連系試験が実施されている。

一方、高温超電導（HTS）である Y 系 SMES としては、「イットリウム系超電導電力機器」で 2MJ 級の動作試験と 2GJ 級のコイル設計が実施される計画である。

このように、SMES 開発においては Nb 系で実証試験を行い、その後低コスト化が期待できる Y 系 SMES 開発へと移行するという開発のシナリオに沿っており、後継プロジェクトの成果が期待されている。

次に、特に一連の超電導プロジェクトの成果が最も活用されている電力・エネルギー分野について、SMES、電力ケーブル、基盤技術である冷凍・冷却技術の主要な項目について概観したものを図 2-7 に示す。

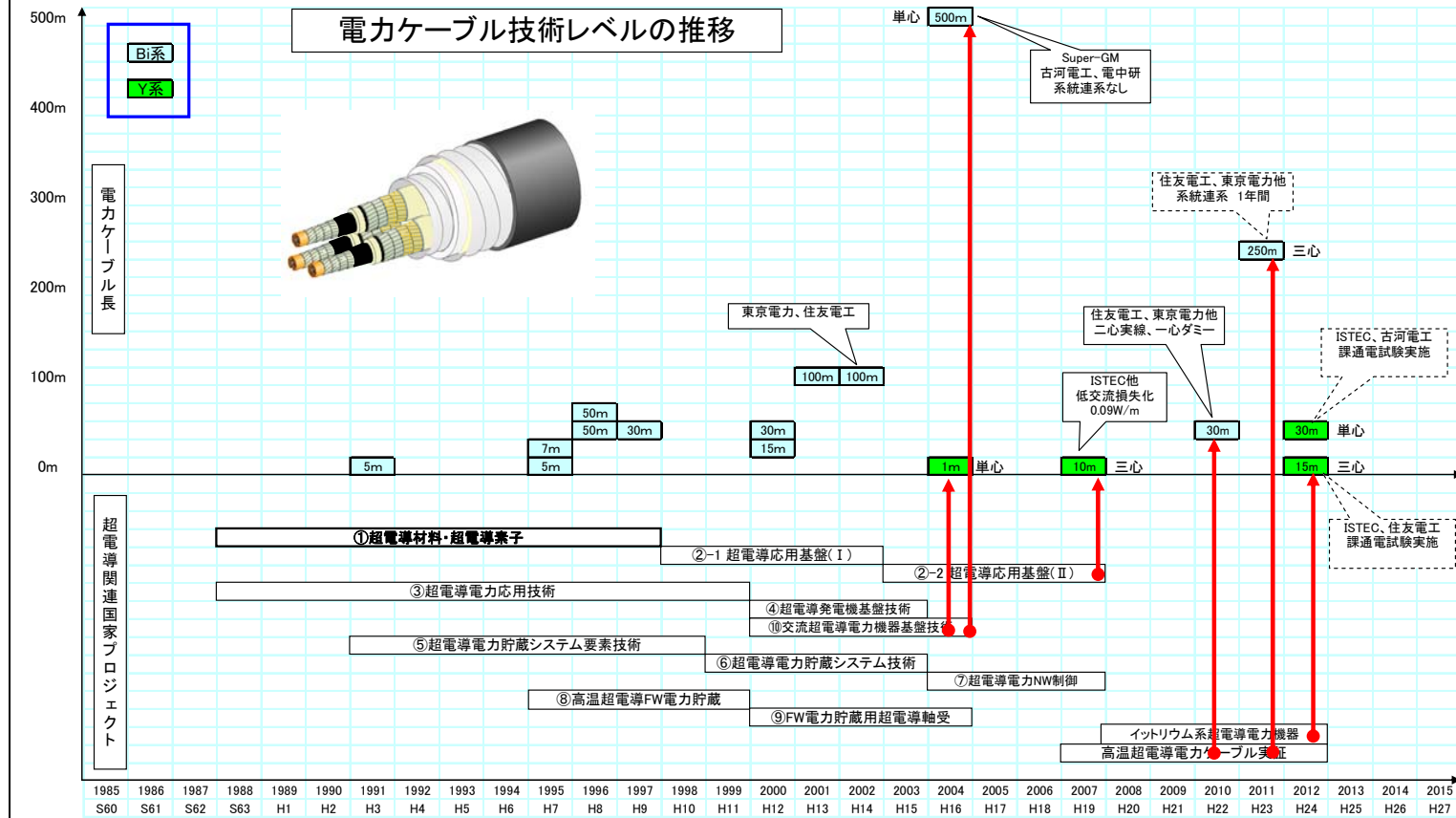
まず、SMES では、既に加速器や MRI 用に開発されていた Nb 系線材が利用され、実証が終了している。一方、HTS に関しては Bi 系でも一時コイル開発を実施したが、現在では高磁場下の性能に勝る Y 系コイルが開発中である。

次に、HTS 超電導線材と電力ケーブルを一括してみると、Bi 系では現在実証段階にあり、Y 系ではケーブル開発の段階にあることがわかる。

また、冷凍・冷却技術に関しては、パルス管冷凍機が実証段階にあり、タービン式冷凍機は要素開発から冷凍機開発の段階を迎えている。

なお、超電導発電機や超電導フライホイールは基本的な研究開発が実施され、経済性などの課題が整理されて、次のブレークスルーを待っている状況である。

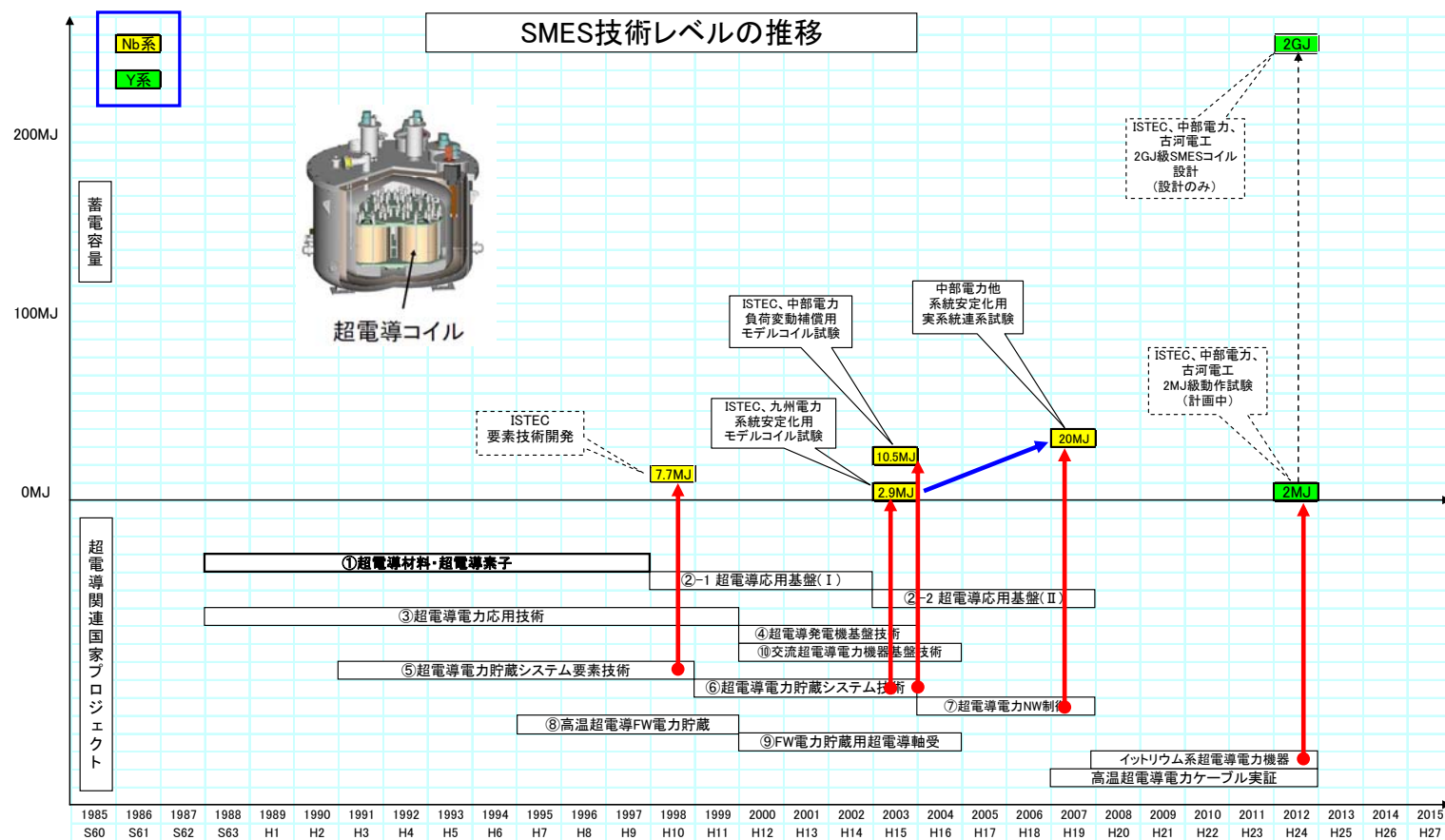
超電導電力ケーブル技術開発の推移とプロジェクトの関係



出所: 各種資料を基にJATIS作成

図 2-5 超電導電力ケーブル技術開発の推移とプロジェクトの関係

SMES技術開発の推移とプロジェクトの関係

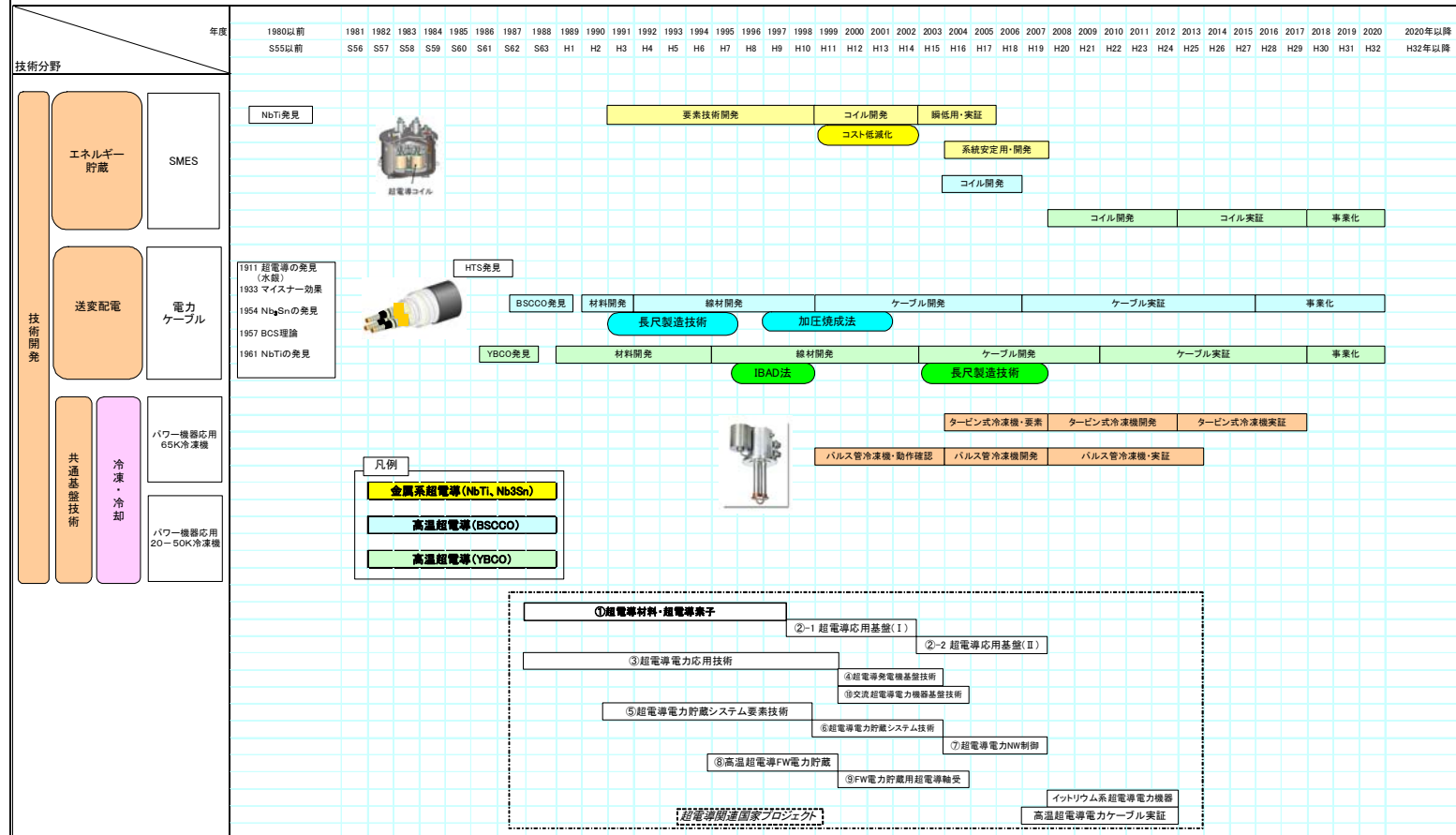


出所:各種資料を基にJATIS作成

図 2-6 SMES 技術開発の推移とプロジェクトの関係

エネルギー・電力分野の技術開発推移

12



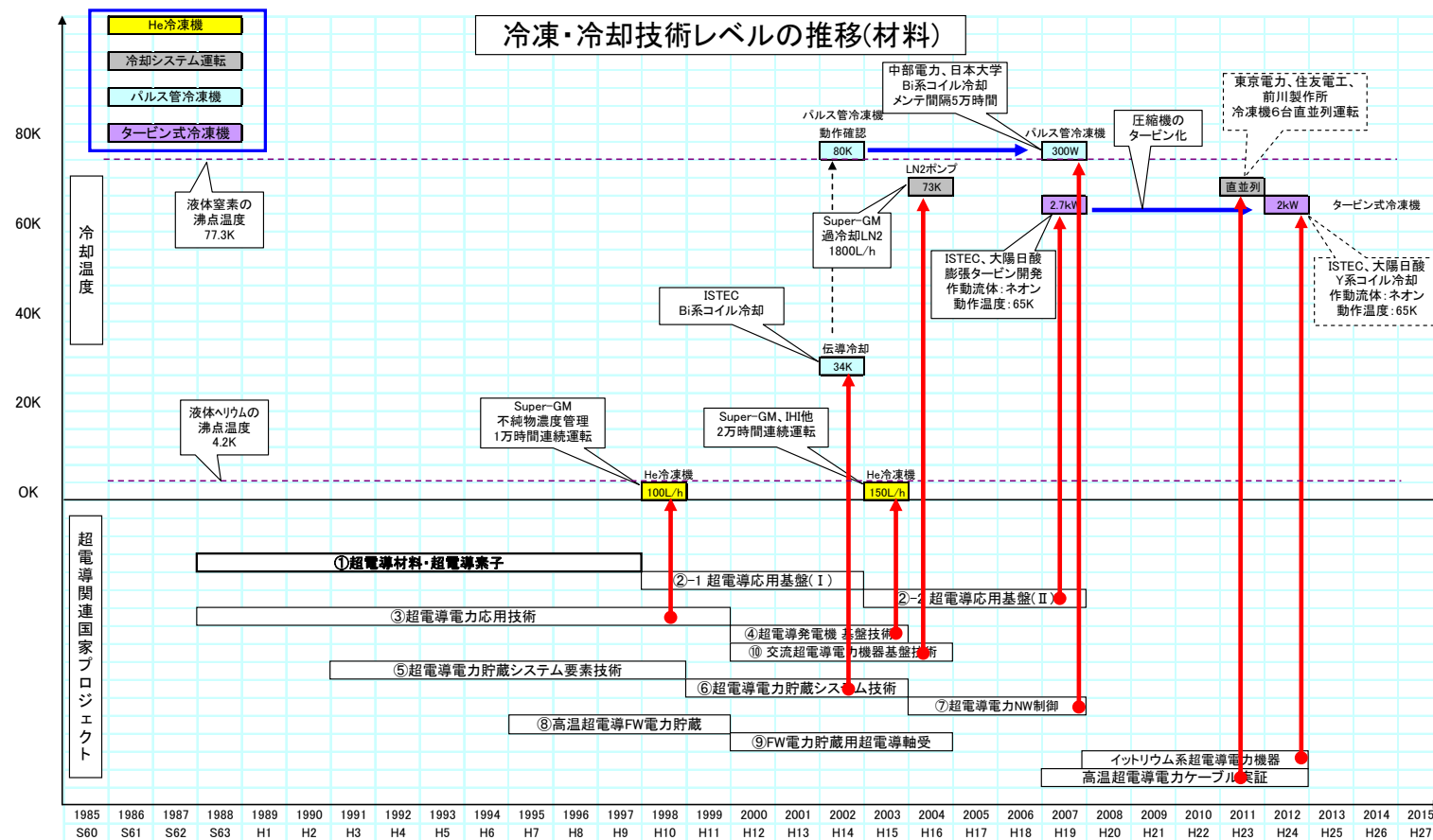
出所:各種資料を基にJATIS作成

図 2-7 エネルギー・電力分野の技術開発推移

次に、超電導技術の基盤技術である冷凍・冷却に関して、冷凍・冷却技術の推移とプロジェクトの関係を図 2-8 に示す。超電導関連プロジェクトの開始当初では、発電機の Nb 系線材冷却用ヘリウム液化機の改良が進められた。対象が HTS による電力ケーブルや SMES に変わってくると、冷凍能力も数 kW 級が必要ながことが判明し、それに向かってパルス管式冷凍機とタービン式冷凍機の開発が行われるようになってきた。現在ではまず電力ケーブルの実用化が視野に入ってきたため、タービン式冷凍機の小型化で冷凍能力をまかなう方向の開発が行われている。作動流体もネオンが想定された開発となっている。

図 2-9 に関連する冷凍機開発の状況をまとめた。Bi 系超電導ケーブルでは、現在既存の 1kW 級スターリング冷凍機を複数台設置して冷凍負荷をまかなうが、システムの最適化を考えた際にはもう少し冷凍能力の高い数 kW 級冷凍機が必要とされ、この冷凍機開発なしには経済性に優れた超電導電力ケーブルシステムは成立しないと考えられている。すなわち、高性能冷凍機の開発が必要であり、「イットリウム系超電導電力機器」プロジェクトで開発中である。

冷凍・冷却技術開発(材料)の推移とプロジェクトの関係

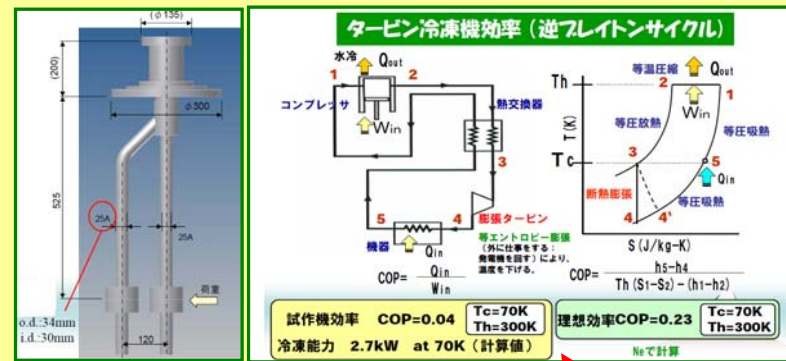
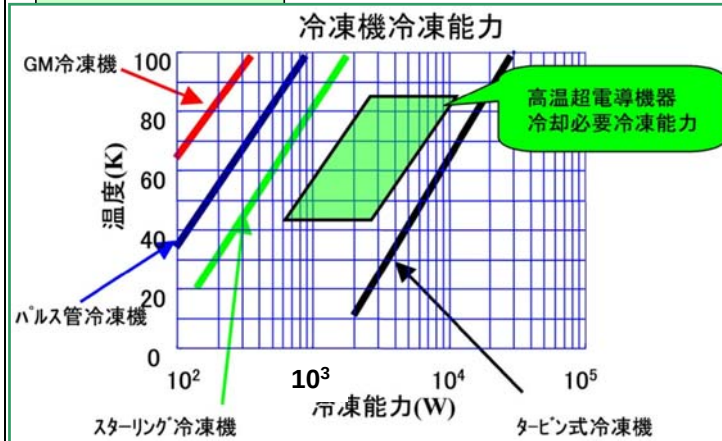


出所: 各種資料を基にJATIS作成

図 2-8 冷凍・冷却技術の推移とプロジェクトの関係

高温超電導普及を目指した特定用途向け冷凍機開発状況

冷凍機目標性能

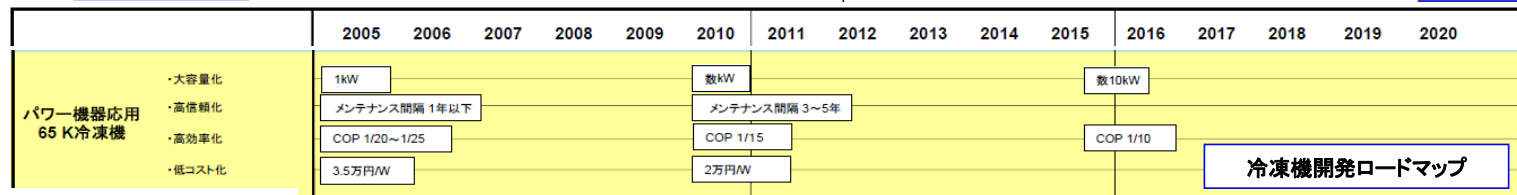
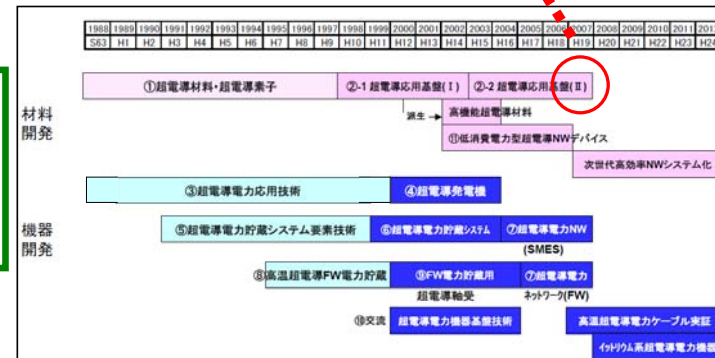


開発目標70Kで冷凍能力2.7kW



課題・問題点

- ・低コスト化
- ・コンパクト化
- ・高信頼性
- ・安全・安心
- ・低環境負荷
- ・省エネルギー



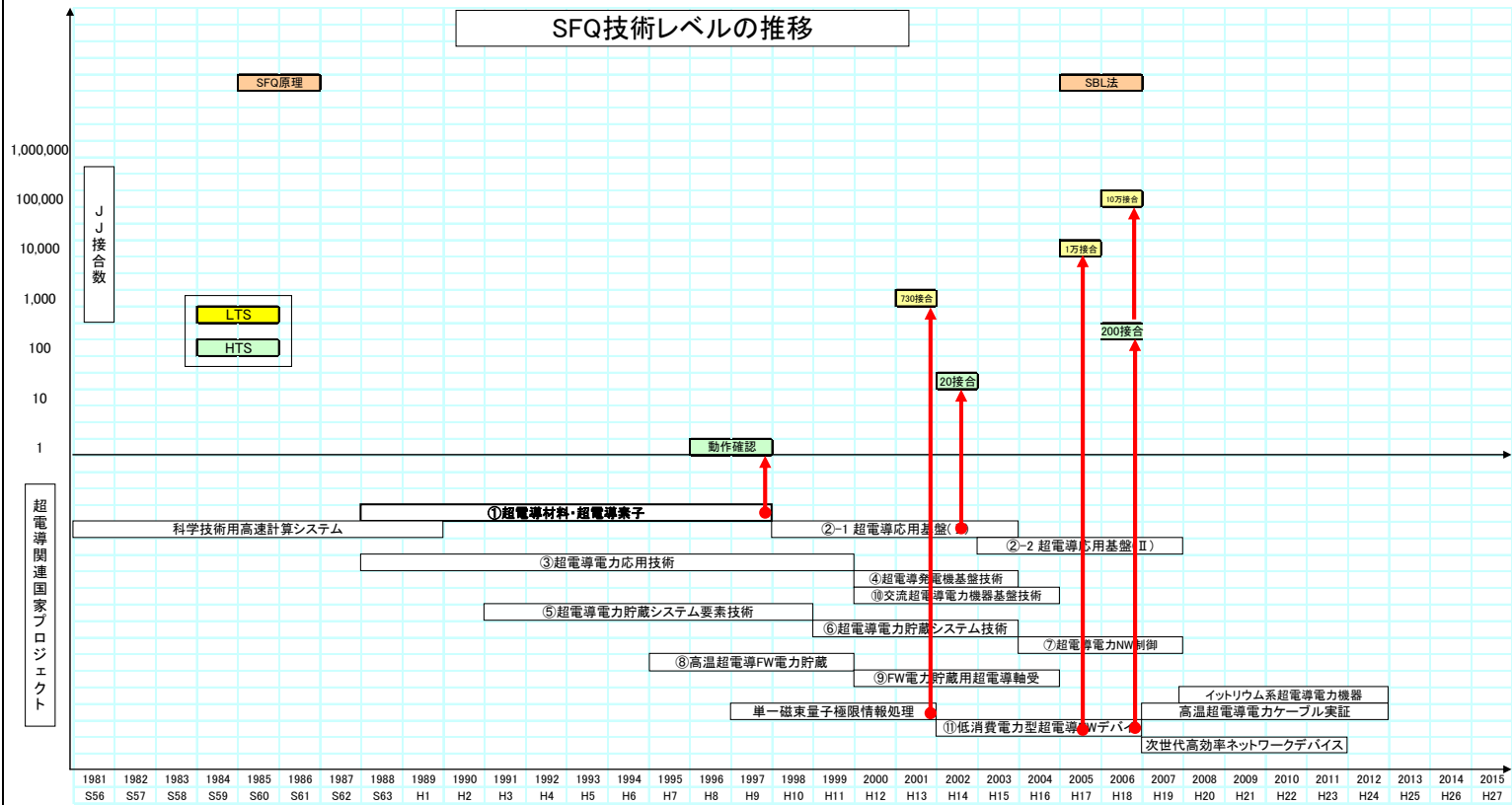
出所:各種資料を基にJATIS作成

図 2-9 冷凍機の開発状況

一方超電導エレクトロニクスに関しては、従来技術のシリコン半導体に比べ集積度の低さが課題であるが、携帯電話基地局のフィルタが実用化されている。研究開発により、SFQ（単一磁束量子）論理回路の適用が検討されているがまだプロトタイプ段階にあり、課題が明確になってきている。

図 2-10 に SFQ 技術開発の推移とプロジェクトの関係を示す。「超電導材料・超電導素子」では、SFQ の動作確認がなされ、後継プロジェクトを経由して、接合数で見ると Nb 系では 10 万接合、Y 系で 200 接合を達成している。

SFQ技術開発の推移とプロジェクトの関係



出所:各種資料を基にJATIS作成

図 2-10 SFQ 技術開発の推移とプロジェクトの関係

（３）超電導関連国家プロジェクトのロジックツリー

図 2-11 に超電導技術のロジックツリーを示す。ここでは、まず左側に実施されたプロジェクトを配置しそれを分野別に分け、各々のプロジェクトの研究開発段階を識別し、関連が深いプロジェクト同士を近くにまとめた。各プロジェクトの現在の実用化過程に至る主要成果を抜き出してプロジェクトの右に配置し、プロジェクトと線で結合した。

図の右側には技術戦略マップから抜き出した製品、応用分野、産業分野、基本施策を配置してある。

製品は次のように分類してある。プロジェクトを実施することにより直接開発された製品、副次的開発製品、独自開発製品の３群である。プロジェクトの主要成果と製品の間に関連付けができるものは線で結合してある。製品群は応用分野と結ばれ、さらに応用分野と産業分野、産業分野と基本政策が関連付けられている。

このロジックツリーから判るように、これまでに実施されたプロジェクトの成果は主に電力・エネルギー分野に集中しており、まずこの分野から市場が創生されることが予測される。

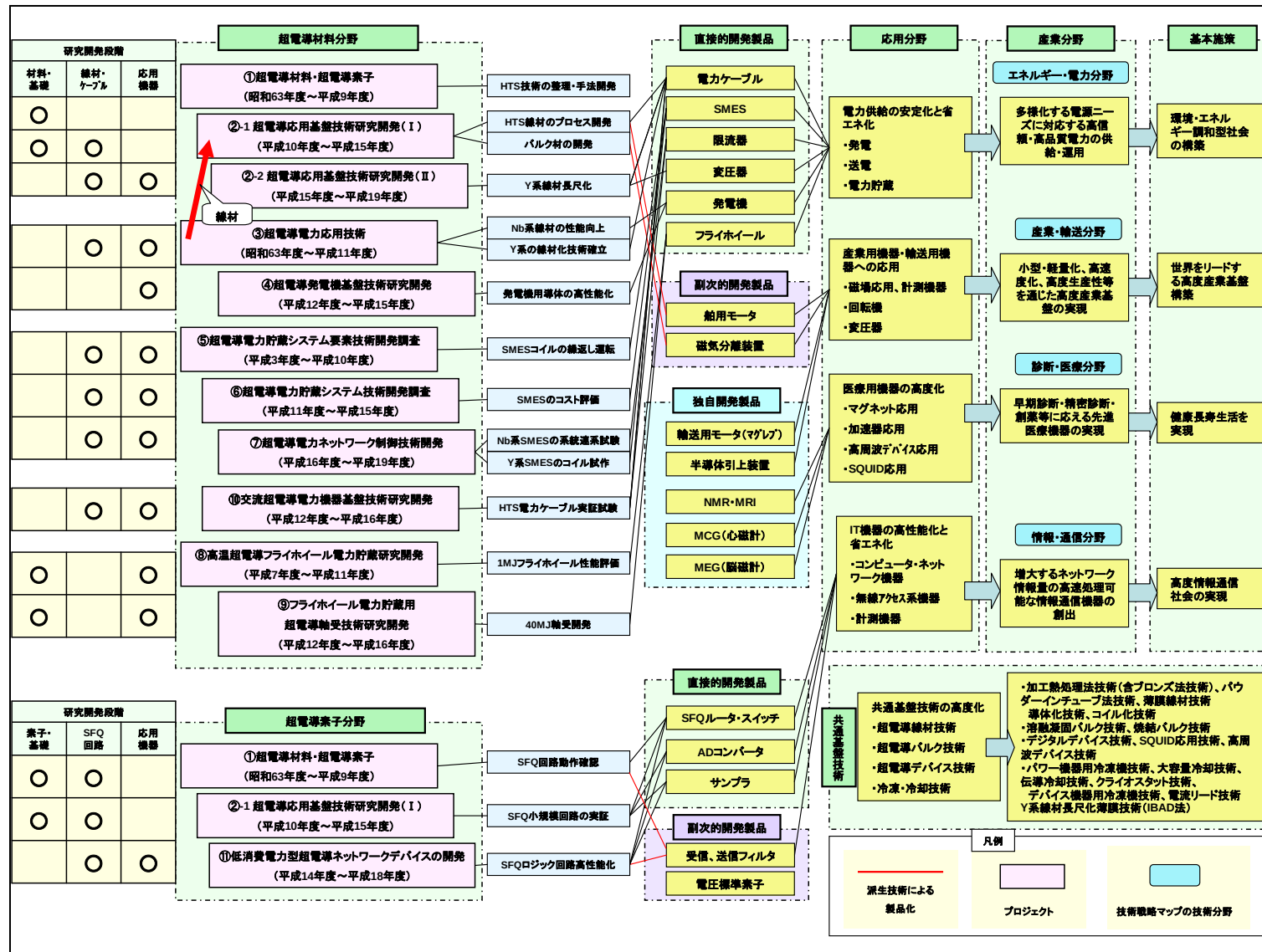


図 2-11 超電導関連国家プロジェクトのロジックツリー

（４）個々のプロジェクトの終了後のフォローアップの状況

個々のプロジェクトの成果の実用化に際しては、プロジェクト間の連携やプロジェクトをまたぐ事業整理が必要である。現在、超電導材料分野においては、実用化に近い位置にいる線材技術は、もともと「超電導電力応用技術」プロジェクトにおいて開発された技術であり、「超電導材料・超電導素子」プロジェクトの後継プロジェクトである「超電導応用基盤技術研究開発（Ⅰ）」の線材開発の部分にプロジェクトを越えて継承された。さらに「超電導応用基盤技術研究開発（Ⅱ）」では線材開発に注力することになり、開発項目の選択と集中がなされた。現在開発テーマとして残っている Y 系（あるいは Bi 系も）線材は、こういった経緯で実用化に向かった。図 2-12 に Y 系高温超電導材料を電力ケーブルに適用する際の俯瞰図を示す。

一方超電導素子分野においては、SFQ ロジック回路が挙げられる。「超電導材料・超電導素子」プロジェクトから「超電導応用基盤技術研究開発（Ⅰ）」プロジェクトへ、またその成果を「低消費電力型超電導ネットワークデバイス」へと継承することにより、SFQ ロジック回路をプロトタイプ段階まで進めることができた。図 2-13 に高温超電導 SFQ 技術の俯瞰図を示す。

このように現在有力テーマとして残っている技術については、適切なプロジェクト間の移動により後継プロジェクトへの移管が行われていることがうかがえる。

Y系超電導電力機器俯瞰図

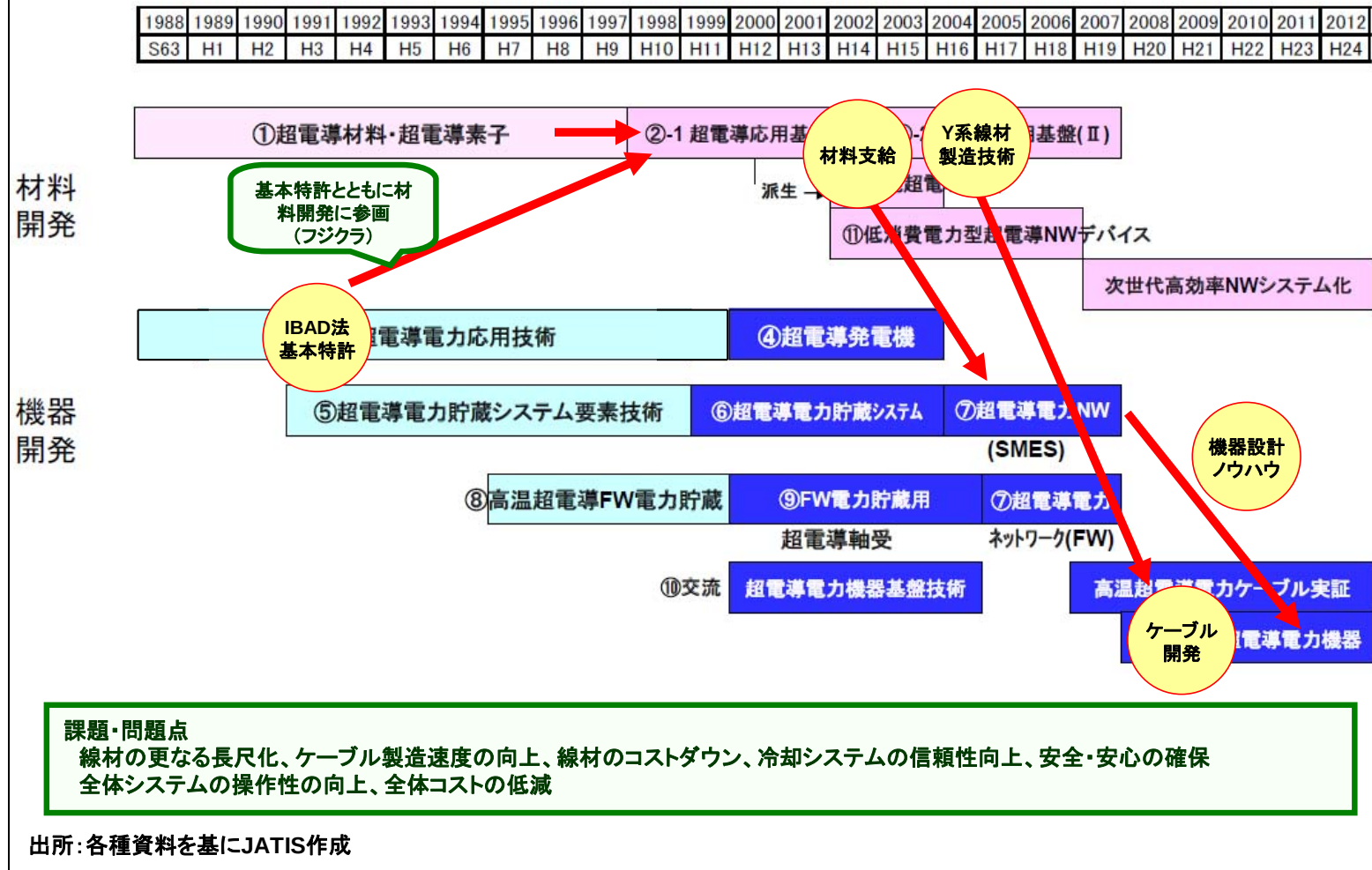


図 2-12 Y系高温超電導材料を電力ケーブルに適用する際の俯瞰図

超電導SFQ技術の俯瞰図

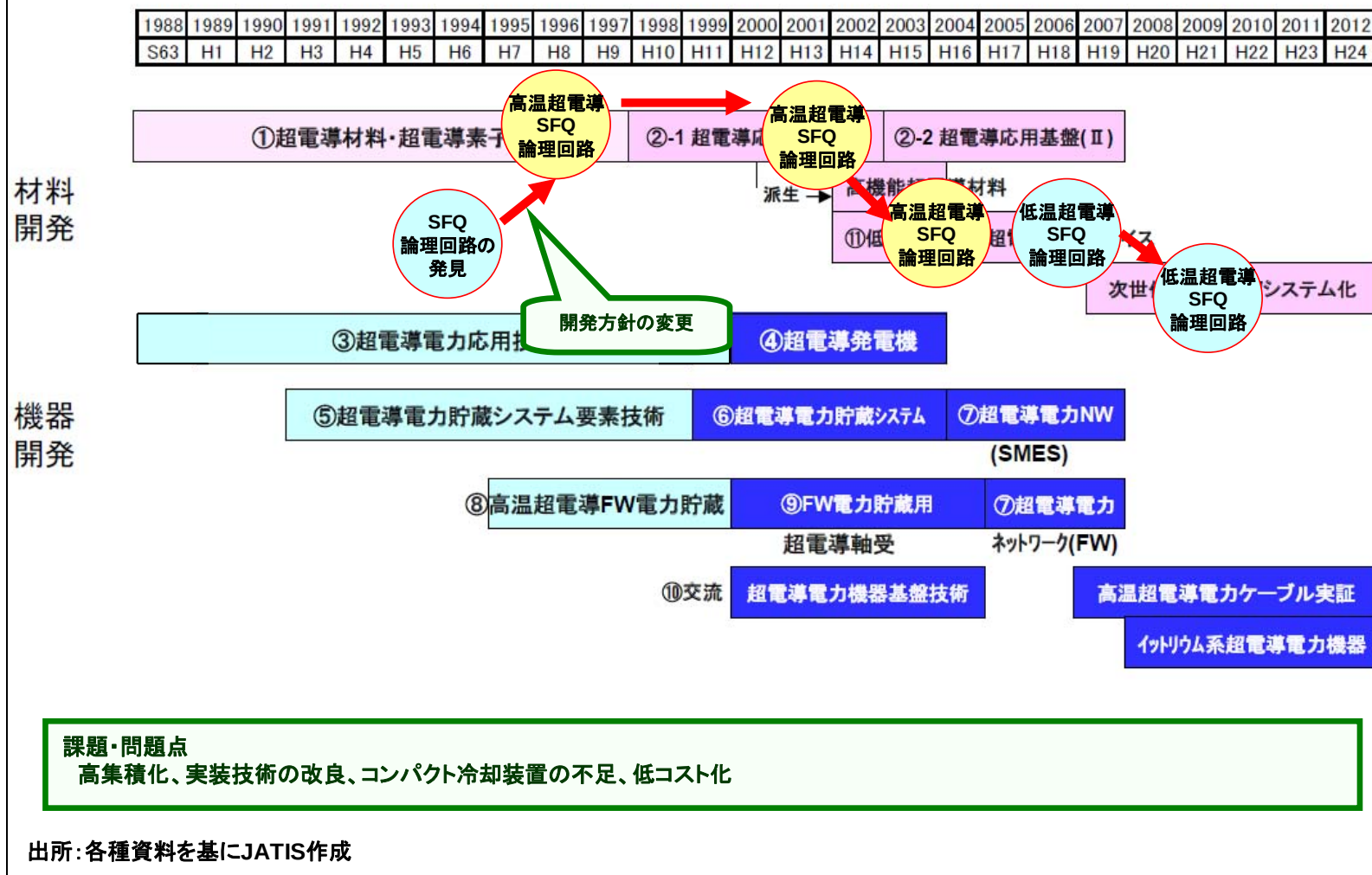


図 2-13 超電導 SFQ 技術の俯瞰図

（５）実用化の状況

ここでは、これまでの超電導研究開発の直接的、間接的な成果が、製品やサービスの実用化にどのように寄与したか、あるいは寄与する可能性があるかについてまとめた。

①超電導材料分野

■エネルギー・電力分野

SMES（超電導エネルギー貯蔵装置：Superconducting Magnetic Energy Storage）

〔実用化への進展度合 低温超電導（LTS）：製品化段階、高温超電導（HTS）：研究段階〕

SMES の用途は、負荷変動補償用（瞬低用）と電力系統安定化用に分かれ、技術的には後者のほうがより難しい。

低温超電導（LTS）に関しては、1991 年から開始した「超電導電力貯蔵システム要素技術」で国際超電導産業技術研究センター（ISTEC）は数 MJ 級 SMES の要素技術の開発を実施した。この成果は 1999 年からの「超電導電力貯蔵システム技術」へ継承されて、2003 年までに ISTEC・中部電力が瞬低用 10MJ 級のモデルコイル試験を実施し、ISTEC・九州電力が系統安定化用 3MJ 級のモデルコイル試験を実施した。これらの成果を基に中部電力は落雷時の瞬低対策用としてシャープ亀山工場に、2003 年に瞬低用 SMES を納入し、実証試験を実施して良好な成績を得ている。

系統安定化用 SMES としては、引き続き 2004 年からの「超電導電力ネットワーク制御技術」で、中部電力などが電力系統制御用 SMES の実証試験を 2007 年 6 月にスタートさせ、古河日光発電の細尾発電所構内で古河電工の協力の下に 20MJ 級の系統連系試験を実施した。

一方、高温超電導（HTS）に関しては、コストダウンとスケールダウンを目的として、高磁場下での性能の良いイットリウム（Y）系 SMES を開発するために、2008 年から開始された「イットリウム系超電導電力機器」の中で、ISTEC、中部電力、古河電工が 2MJ 級の動作試験と 2GJ 級のコイル設計を実施する計画になっている。この中では、2GJ 級 SMES の開発を見通す高磁界かつコンパクトなコイル設計技術の開発並びにメンテナンスを容易とするコイルの伝導冷却技術開発を行い、2012 年度までに Y 系 SMES 対応線材の製造と 2MJ 級モデルコイルを用いた SMES の動作試験と伝導冷却技術開発を行う計画である。

表 2-1 に SMES の実施状況をまとめた。

表 2-1 SMES の実施状況

No	実施機関	実施年	蓄積 エネルギー MJ	定格 出力 MW	線材
1	九州電力今宿変電所	1998	3.6	1	NbTi
2	GE,AMSC	2000	3	3	NbTi
3	KERI	2002	3	0.75	NbTi
4	九州電力今宿変電所	2002	2.85	5	NbTi
5	中部電力、東芝	2003	5	5	NbTi
6	中部電力寛政変電所	2003	10.5	5	NbTi
7	シャープ亀山工場	2005	10	5	NbTi
8	KERI	2006	0.6		Bi2223
9	NEDO、中部電力、東芝	2007	20	10	NbTi
10	IEE(CAS)	2007	1	0.5	HTS
11	NEDO,中部電力(要素)	2012	2		YBCO
	NEDO,中部電力(設計)	2012	2000		YBCO
12	KEK,原研	2015	100	550	NbTi
13	核融合科学研究所、 テクノバ、鹿児島大、 九大	2015	1	1	NbTi

出所：「超電導分野における技術開発状況に関する調査」（平成 20 年 3 月）に JATIS 加筆

フライホイール

[実用化への進展度合 LTS：技術開発段階、HTS：技術開発段階]

フライホイールの用途としては電車用と電力貯蔵用があり、超電導は軸受部分に適用する。

LTS としては、電車の加速用として、2007 年に JR 東海が Nb 系コイルで世界最大級の 200MJ 級の装置を開発している。今後は信頼性の向上が課題である。

HTS としては、電車用に、鉄道総研が、永久磁石側の磁場の発生を超電導コイルで行うフライホイールを開発中である。電力貯蔵用としては、1995 年から開始した「高温超電導フライホイール電力貯蔵研究開発」で、四国総研などが Y 系材料軸受を使って 1MJ 級のフライホイールの性能試験を実施した。これに続いて、2000 年からは「フライホイール電力貯蔵用超電導軸受」として四国総研などが Y 系バルク材の軸受で 60MJ 級の性能試験を実施した。

電力ケーブル

[実用化への進展度合 HTS：製品化段階]

電力ケーブルへの適用は全て HTS で実施されている。

1988 年にわが国で発見されたビスマス（Bi）系高温超電導材料の線材開発は線材への成

形性の良さもあり、これまでの超電導研究開発の成果などにより、比較的順調に進み、現在商品化されて、海外の電力ケーブルプロジェクト等に提供されている。1987年に米国で発見された Y 系材料は加工が難しい材料であるが、イオンビームを使った IBAD 法による線材の成形に成功し開発が加速された。Y 系線材は高磁場下での性能が優れ、線材を構成する材料全体での価格が廉価なため、コストダウンも期待されている。

これらの HTS 線材を使った電力ケーブルの開発は、まず企業中心が進んだ。東京電力と住友電工は 1991 年に 5m の Bi 系電力ケーブルを開発した。この開発は継続され 2002 年には東京電力と住友電工が 100m 級の電力ケーブルを開発している。国プロとしては 2000 年から「交流超電導電力機器基盤技術」として、Super-GM（研究開発組合）が古河電工・中部電力とともに、単心の 500m 級 Bi 系電力ケーブルの通電試験を実施した。

Bi 系電力ケーブルの開発はその後も継続され、2007 年からの「超電導電力ケーブル実証」で、住友電工・東京電力がまず 30m 級の試験を 2010 年に実施し、その後 2011 年から 1 年間の系統連系試験を実施する計画になっている。このプロジェクトでは冷却技術なども含めた高温超電導ケーブルシステムを構築し、線路建設、運転、保守を含めたトータルシステムの実証試験が実施される。

一方、Y 系電力ケーブルについては、2003 年からの「超電導応用基盤技術（Ⅱ）」において、ISTEC などが 10m 級の Y 系三心電力ケーブルで機能試験を実施し、0.09W/m の低交流損失化を確認している。これに引き続き、2008 年から開始した「イットリウム系超電導電力機器」において、2012 年までに三心で ISTEC・住友電工が 15m の Y 系電力ケーブルの、単心で ISTEC・古河電工が 30m の Y 系ケーブルの課通電試験を実施する計画になっている。

電力ケーブルの実用化のためには、コストと信頼性が課題であり、Y 系ケーブルのコストダウンと、接続部の絶縁破壊対策による信頼性向上が開発課題になっている。

表 2-2 に超電導ケーブルの実施状況を示す。

表 2-2 超電導ケーブルの実施状況

No	プロジェクト 実施機関	試験年	国	電圧 kV	電流 A	容量 MVA	長さ m	形態	線材	系統 連系
1	東電・住電	1991	日本		2000		5		Bi	
2	東電・古河	1995	日本	66	2000		5		Bi	
3	東電・住電	1995	日本	66	1000		7	三心	Bi	
4	東電・古河	1996	日本				50		Bi	
5	東電・住電	1996	日本		2000		50	交流	Bi	
6	東電・住電	1997	日本	66	1000		30		Bi	
7	東電・住電	2000	日本				30		Bi	
8	中電・フジクラ ・昭和電線	2000	日本		1000		15		Bi	
9	NKT-Research	2001	EU	36	2000		30	単心	Bi	
10	東電・住電	2001	日本	66	1000		100		Bi	
11	住友東電	2002	日本	66	1000		100	三心	Bi	
12	DetroitEdison	2002	米国	24	2400		120	単心		
13	SouthWire	2002	米国	12.5	2000		30	単心	Bi	
14	EdF/Pirelli	2002	EU	90	2600		50	単心	Bi	
15	Super-ACE	2005	日本	77	1000	133	500	単心	Bi	×
16	Albany	2006	米国	34.5	800	48	330	三心	Bi+Y	O
住友電工製										
17	AEP	2006	米国	13.2	3000	69	200	tri-axial	Bi	O
18	KEPCO/KEPRI	2006	韓国	22.9	1250	50	100	三心	Bi	×
住友電工製										
19	SuperPower	2006	米国	66	1000		300	三心		
20	DAPAS2	2007	韓国	22.9	1250	50	100	三心	Bi	×
21	LIPA	2008	米国	138	2400	574	600	単心	Bi	O
22	LIPA2	2010	米国	138	2400	574	600	単心	Y	O
23	Hydra	2010	米国	13	4000	90	300	単心	Y	O
24	DAPAS3	2010	韓国	154	4000	1067	100	三心	?	×
25	実証試験	2011	日本	66	2000	229	200	三心	Bi	O
26	現行プロジェクト	2012	日本	66	5000	572	15	三心	Y	×
27	現行プロジェクト	2012	日本	275	3000	1429	30	単心	Y	×
28	Entergy	2013	米国	13.8	2500	60	1700	三心	Y?	O

(25 実証試験はケーブル断面積あたりの送電容量が世界最高)

出所：「超電導分野における技術開発状況に関する調査」(平成 20 年 3 月)に JATIS 加筆

限流器

[実用化への進展度合 HTS：製品化段階]

電力系統の事故電流を瞬時に制御するために使われる限流器には、HTS が使われる。

Bi 系としては 2000 年から開始した「交流超電導電力機器基盤技術」で、単相 66 kV-500A の Bi 系コイルを開発し、東芝が機能試験を実施した。

Y 系限流器としては同じ「交流超電導電力機器基盤技術」で単相 6.6 kV-1000A の Y 系薄

膜を使った限流器の機能試験を東芝が実施した。これと並行して 2003 年からの「超電導応用基盤技術（Ⅱ）」では、三相 6.6kV-72A の Y 系コイルの系統連系試験を東芝が実施した。2008 年時点では、電圧、電流容量ともトップレベルにある。日本の場合、基幹系統が 275kV であることから、それに適合する高圧化技術の開発が必要である。

電力用変圧器

[実用化への進展度合 HTS：技術開発段階]

電力用変圧器には HTS が使われる。

2000 年に九大と九電が 22kV-1MVA の Bi 系線材を使った電力用変圧器で系統接続試験を実施した。2000 年からの「交流超電導電力機器基盤技術」では、66kV-2MVA の Bi 系変圧器の機能試験を実施した。

一方、Y 系電力用変圧器については、2008 年からの「イットリウム系超電導電力機器」で、66kV-2MVA の電力用変圧器開発を ISTEK、九州電力が実施する計画である。

■産業・輸送分野

輸送用モータ（マグレブ）

[実用化への進展度合 LTS：製品化段階、HTS：技術開発段階]

LTS としては、磁気浮上列車用として JR 東海による Nb 系のマグネットが実証試験を終了している。

HTS としては、JR 東海が超電導磁気浮上式鉄道のリニアモータ用に Bi 系銀シース線を採用し、山梨実験線の 3 両編成列車の先頭車両に搭載して機能試験を実施している。

輸送用モータ（回転機）

[実用化への進展度合 HTS：製品化段階]

HTS 線材を使った輸送用モータが開発中である。

船舶推進用には 400kW 級 Bi 系モータがプロトタイプ段階にある。IHI は、Bi 系 400kW 級のモータシステムを販売すると発表しており、技術としての完成度は高い。世界で初めて交流部分を超電導コイルにすることに成功している。

自動車用では 60kW 級 Bi 系モータが開発中である。通常の自動車のエンジンルームに、超電導モータと鉛バッテリーを置いたシンプルな構成で、住友電工大阪製作所内にて実際に走行した。船舶用に開発されたものと同様に、超電導モータ特有の低速、大トルクの性質により、シフトギアが不要になり駆動力への変換ロスが低減できる。

鉄道用変圧器

[実用化への進展度合 HTS：技術開発段階]

HTS 線材を使った鉄道用変圧器が開発中である。

Bi 系 25kV・3MVA 級鉄道車載用変圧器の試作研究が鉄道総研で実施された。

■診断・医療分野

NMR・MRI

[実用化への進展度合 LTS：上市段階、HTS：技術開発段階]

LTS に関しては、核磁気共鳴（NMR）現象を利用した核磁気共鳴画像法（MRI）による診断装置用に、LTS 線材が使用されている。例えば、強磁場 NMR スペクトロメータは現在、プロトン（水素原子）の共鳴周波数である 950 MHz（磁場 22.3 T）まで市販されており、長年の夢とされてきた 1 GHz（23.5 T）まで後一步に迫っている。Nb₃Sn による金属系超電導線材の強磁場領域での臨界電流密度の向上で、1 GHz NMR スペクトロメータが、金属系超電導線材による永久電流モードで実現する見通しを得ており、数年のうちに開発される可能性が高い。

一方、HTS は、将来の高磁場化に向けて基礎研究が実施されている。物材機構、神戸製鋼、理研、日本電子は、600 MHz NMR マグネットの最内層コイルを Bi 系超電導コイルに交換し、磁場の均一性と安定性を比較する計画である。

タンパク質の高次構造解析の感度の向上に必要な 25.85 T（1.1 GHz）磁石の実現には高温超電導線材が期待されている。高価な液体ヘリウムを使用することなく安価な維持費で利用できる NMR 装置や世界最高水準の研究のための高磁場 NMR 装置は高温超電導体で可能になると考えられている。2009 年には、ISTEC が 48K で 60T（77K で 5T 相当）の高磁場で通電可能な Y 系線材を開発し MRI などへの適用が期待されている。

SQUID（超高感度磁気センサ：Superconducting QUantum Interference Device）

[実用化への進展度合 LTS：上市段階、HTS：製品化段階]

LTS に関しては、心臓疾患検査用（MGC）などの製品が販売されている。日立は LTS64chMCG システムを開発した。また、SII では、SQUID 顕微鏡を製品化した。

HTS に関しては、日立が HTS16chMCG システムを開発した。豊橋技術科学大学はアドバンスフードテック、住友電工ハイテックスと共同で、高温超電導（ガドリニウム（Gd）系）SQUID を用いた本格的な食品内金属異物検査装置“マイクロディテクター”を開発した。超高感度の SQUID センサを用いる方式で、被検査物を磁石で磁化し、その残留磁化を超高感度磁気センサで計測するという非常にシンプルな方法である。

②超電導素子分野

■情報・通信分野

SFQ 回路（単一磁束量子：Single Flux Quantum）

[実用化への進展度合 LTS：製品化段階、HTS：技術開発段階]

SFQ 回路は超高速応答速度と極低消費電力を同時に実現できる回路であり、スイッチング時間は数 ps、消費電力は、 $1\mu\text{W}$ （論理ゲート当たり）と想定されている。日本では、フィルタ等の受動素子より能動素子の研究が盛んである。

LTS に関しては、Nb 系で現在 JJ 素子として 10 万接合を達成している。ISTEC は、9 層の Nb 層の積層が可能な超電導デジタル集積回路(LSI)製造プロセスを開発した。2002 年からの「低消費電力型超電導ネットワークデバイス」として NEDO の委託により実施したものである。超電導体を用い、半導体素子と異なる原理で動作する SFQ 素子は、最先端の微細化技術なしに 100 GHz 以上の超高速動作が可能であり、またゲートあたり $1\mu\text{W}$ 以下の低消費電力を実現できる可能性をも合わせ持つ。SFQ 素子は LSI を実現し得ることが半導体以外で唯一の素子でもある。このため、SFQ 集積回路は半導体の限界を超えた高いクロックレートで動作する LSI を実現する第一の候補として期待されている。

HTS に関しては、高集積化が難しく 200 接合を達成した段階である。ISTEC では、2002 年からの「低消費電力型超電導ネットワークデバイス」で、Y 系薄膜を用いた SFQ 回路の開発を進め、SFQ 回路の中で超電導接合の臨界電流密度(J_c)を解析し、 J_c の均一化可能なレイアウトを考案した。4.2 K で 360 GHz、40 K 近い温度で 110 GHz の高速分周動作を実現できた。SFQ(単一磁束量子)回路技術の応用として、同じ、2002 年からの「低消費電力超電導ネットワークデバイス」で Y 系材料によるアナログ-デジタル (AD) 変換回路の開発が日立、ISTEC で実施された。また、計測回路への応用として、Y 系材料による ISTEC・アドバンテストで 100GHz サンプラーの開発が実施された。

フィルター（受動素子）

[実用化への進展度合 HTS：上市段階]

携帯電話基地局用などに HTS フィルターが開発されている

米国では HTS 薄膜を使ったフィルター（受動素子）が携帯電話基地局用として実用化され、従来の床置型フィルターシステムの更新需要の下で 7000 基以上を米国 STI 社が納入している。

日本では、1999 年にパナソニックが移動体通信基地局用に HTS フィルターの開発を実施し、2002 年には富士通が無線基地局用に HTS フィルターの開発を実施した。2006 年には東芝が NHK と地上デジタル放送中継局用として Y 系フィルターの共同研究を実施した。

③超電導共通基盤分野

■冷凍・冷却分野

[実用化への進展度合 LTS：上市段階、HTS：技術開発段階]

LTS 用のヘリウム冷凍機の連続運転時間の長期化の開発が行われた。1988 年からの「超電導電力応用技術」で IHI が 100L/h のヘリウム冷凍機の運転時間を 1 万時間にできる目途をつけ、続く 2000 年からの「超電導発電機基盤技術」では Super-GM と IHI が 150L/h のヘリウム冷凍機の運転時間を 2 万時間にできる目途をつけた。

HTS 用の冷凍機として小型のパルス管式冷凍機については、1999 年からの「超電導電力貯蔵システム技術」で Bi 系コイル冷却のために ISTECH が 80K で動作確認を実施した。引き続き、2004 年からの「超電導電力ネットワーク制御」では、中部電力・日本大学が 300kW 級のパルス管式冷凍機でメンテナンス間隔 5 万時間の目途をつけた。液体窒素温度より低い 60K レベルでの電力ケーブルの冷却のためにネオンガスを使ったタービン式冷凍機の開発が行われている。2004 年からの「超電導応用基盤技術（Ⅱ）」では、要素技術として ISTECH・大陽日酸が 65K の温度レベルで作動する 2.7kW 級膨張タービンを開発し、続いて 2008 年からの「イットリウム系超電導電力機器」では、ISTECH・大陽日酸が 2kW 級のタービン式冷凍機を開発する計画である。電力ケーブル用には液体窒素冷凍機が必要であり、2000 年からの「交流超電導電力機器基盤技術」では、古河電工・前川製作所が 1800L/h の過冷却液体窒素（73K）を流せる冷凍機の機能試験を実施した。2007 年からの「高温超電導電力ケーブル実証」では、前川製作所が 3kW の液体窒素冷凍機システムの開発を計画している。

第Ⅲ章

プロジェクト成果からの技術的広がり具合 及び経済効果の調査

(1) プロジェクト成果からの技術的広がり具合

第Ⅱ章の「実用化への進展度合」の追加調査で作成するマップ等を踏まえ、超電導材料分野での実用化分野である産業用マグネット、モータや送電線、SMES、限流器等の電力ネットワーク用製品などの製品分野に対して、現在、どのような段階にあるのかを再整理した。また、素子分野においても「実用化への進展度合」の追加調査で作成したマップ等を踏まえ、低温超電導素子によるロジック回路、高温超伝導素子によるロジック回路を含めて実用化を想定する製品分野に対して、現在、どのような段階にあるのかを再整理した。特に本プロジェクトの第三期頃に実機検証がなされた SFQ (単一磁束粒子)原理を用いたロジック回路の進展については、後継プロジェクトで研究が進んでいること、かつ、高温超電導でのロジック回路についても、再整理した。

これらをまとめて、表 3-1 に「主要製品の実用化への進展度合」として示した。

表 3-1 主要製品の実用化への進展度合

主要製品の実用化への進展度合					
直接的開発製品		副次的開発製品		独自開発製品	
製品名称	区分	上市段階	製品化段階	技術開発段階	研究段階
電力ケーブル	HTS		Bi系30m試験(東京電力・住友電工) Bi系350m(住友電工@米国Albany)	Bi系単相500m(電中研・古河電工)	
SMES	LTS		Nb系液晶工場(中部電力)		
	HTS				Y系SMES(ISTEC、電線各社)
フライホイール	LTS			Nb系磁気軸受(JR東海)	
	HTS			磁気軸受(四国総研)	
限流器	HTS		Y系コイル・系統連系(東芝)	Bi系コイル(東芝)	
変圧器	HTS			Y系変圧器(ISTEC)	
輸送用モータ	LTS		Nb系磁気浮上列車用リニアモータ(JR東海)		
	HTS		Bi系船用モータ(IHI)	Bi系自動車用(住友電工)	
産業用マグネット	LTS	Nb系単結晶引上装置			
	HTS		廃水処理用磁気分離装置(MSエンジニア)	水浄化用磁気分離器(日立、九州電力) Bi系単結晶引上装置(東芝・住友電工・信越化学)	
SQUID応用	LTS	心磁計、脳磁計			
	HTS		食品内金属異物検査装置(アドバンスフードテック)		
NMR・MRI	LTS	NMR、MRI			
	HTS			Y系線材開発(ISTEC・フジクラ)	
SFQ回路	LTS		超電導デジタル集積回路(LSI)製造プロセス(ISTEC)	マイクロプロセッサ(名大、横国大)、ネットワークルータ用SFQスイッチ(ISTEC)	
	HTS			SFQサンプラーシステム(ISTEC)	

研究段階:基礎的/要素的な研究開発、技術開発段階:製品化/上市を視野に入れた研究開発、製品化段階:製品化、量産化技術の確立、上市段階:市場での取引

次に、これまでの超電導研究開発の成果により直接的に生み出された技術が、関連技術分野にどのような技術的インパクトを与えたか、派生技術にはどのようなものがあり、どのように利用されているかについてまとめた。

①超電導材料分野

■エネルギー・電力分野

線材技術

[実用化への進展度合 HTS：製品化段階]

電力ケーブルや SMES へ提供される線材は Bi 系の開発が先行した。その過程で、「加圧焼成技術」を確立することにより、いわゆる「魔の川」を乗り越えることができた。

住友電工では、Bi2223 線材の性能向上を目指したプロセスとして加圧焼結法の適用を検討し、2003 年に成功することができた。このプロセスでは線材の焼結工程にガス媒体による加圧焼結法を適用することで超電導フィラメントがほぼ 100%に達して、高密度で異相が減少することにより I_c が約 30%向上し、耐引張応力特性も 50%以上向上した。住友電工では長尺線材へ適用可能な大型設備の開発も並行して進めた。

一方、Y 系は開発が難航したが、高性能の Y 系超電導線の実現には、結晶が規則正しく線材の長さ方向に揃っていることが必要であり、そのため超電導層の下層にある中間層の結晶を規則正しく並べる IBAD 法がフジクラで 1991 年に開発された。将来低コストの線材を実現するためには、IBAD 法中間層の低コスト化が大きく寄与することから、高速成膜法の開発が必要である。新しい中間層構造の採用により従来 3~5m/H であった成膜速度を 5 倍以上に大幅に高速化を可能とする中間層が開発された。

■産業・輸送分野

磁気分離装置

[実用化への進展度合 HTS：製品化段階]

大阪大学は NEDO 助成を受けることにより水溶液中の浮遊性物質や可溶性物質に対する担磁プロセスを開発し、磁気分離システムと組み合わせることで実用レベルの廃水処理可能なシステムの開発研究を行ってきた。バルク超電導磁石を用いて、小型で可搬型の磁気分離の可能性を確認している。磁気分離法は、溶液中から汚染物や有用物質を、磁場を利用して分離・回収するプロセスである。対象物質が強磁性体でない場合、通常の永久磁石を利用して分離することは困難である。大阪大学は、常磁性や反磁性物質に強磁性粒子を付着（担磁）させて超電導磁石を用いて分離・回収する経済的に可能な技術を開発した。油滴が水に分散しているエマルジョンに強磁性粒子に担磁する実験を行った。バルク超電導磁石(GdBaCuO)の上に設置したガラス容器内でエマルジョンが凝集し約 1 分程度で急速に沈降させることができた。バルク超電導磁石の磁力が磁石表面から数 cm 離れた位置まで

働くことが分かった。この技術を製紙排水処理設備に応用し実用化している。アジアやヨーロッパ地域でも注目されている。2005 年 8 月にスタートし、MS エンジニアリングが設立され事業化した。1 年間の工場内運転終了後に、製糸工場に譲り渡され運転を実施した。

また、日立製作所は ISTECH とともに NEDO からの助成を得、「高温超電導バルク体を適用した環境水浄化装置用超電導膜磁気分離機の実用化技術開発」を実施した。これは高温超電導バルク体磁石および回転ろ過膜を組み合わせた高濃度汚泥回収型の超電導膜磁気分離機(HTS バルク磁石とろ過膜を組み合わせたためこう名づけられた)である。試作機の処理容量は 100m³/日であった。

これと同様の動作原理の装置を用いて、九州電力は「湖沼・ダムのアオコ除去用高温超電導体利用の磁気分離処理装置の開発」を実施している。

単結晶の引き上げ装置

[実用化への進展度合 LTS：上市段階、HTS：製品化段階]

LTS に関しては、超電導コイルを用いた大径シリコン結晶の引き上げ装置がすでに実用化されている。1990 年代の初頭に 8 インチ・シリコン引き上げ用超電導電磁石が開発され、1990 年代中頃から製造ラインに適用された。12 インチ・シリコン引き上げ用超電導電磁石は 1990 年代の後半に開発され、2000 年以降から製造ラインへの適用が始まった。当初の電磁石は、液体ヘリウムの浸漬冷却方式であったが冷凍機搭載の伝導冷却型電磁石や液体ヘリウムを再凝縮する GM-JT 冷凍機付の電磁石が開発されるなどの進展があった。

HTS に関しては、2001 年に東芝、住友重工、信越半導体の 3 社が経済産業省の省エネルギー補助金により、Bi 系高温超電導線を用いた単結晶引き上げ装置用高温超電導マグネットを開発している。この高温超電導マグネットの特徴は、運転温度を 20K にすることで、クエンチが起こらず、定格磁場まで 1 分で励磁できること、ランニングコストを従来の超電導マグネットの 1/3 にしたことである。

■診断・医療分野

NMR・MRI

[実用化への進展度合 HTS：技術開発段階]

将来の高磁場化に備え HTS の基礎研究が行われている。最終的には物材機構が所有する 920 MHz の NMR マグネットの最内層コイルを酸化物系超電導コイルに置き換え、1.05 GHz(24.7 T)を目標にしている。開発したスペクトロメータとしての有効性は生体高分子中の ¹⁷O 計測によって実証する予定である。バルク体の大きさを外径 36 mm から外径 60 mm に大型化することにより、スペクトルの分解能を 1445 ppm から 4.85 ppm に向上させており、分析用 NMR の次世代磁石として期待されている。

SQUID

[実用化への進展度合 HTS：製品化段階]

超高感度の磁気センサーである SQUID を応用した心磁計、脳磁計、免疫診断装置の開発が行われており、さらに、超電導マグネットを用いた磁気誘導カテーテル、磁気誘導薬物配送についての研究も基礎段階であるが行われている。

食肉内金属異物検査装置用 SQUID の実用機開発における技術課題はシールド性能の改善である。これが不十分であると、環境からの磁気ノイズや携帯電話などの電磁波の影響を受けやすく、誤動作の原因となる。試作の段階では磁気シールドは 3 層構造で形状は逆 T 型であったが、最終的には試作段階で必要とされていた 3 層のシールド層数が、実は 2 層で十分であることがわかり、さらにシールドの長さも短くでき、設置スペースやコストの低減に結びついた。

その他の応用

[実用化への進展度合 HTS：技術開発段階]

超電導コイルを用いた医療用の重イオン粒子加速器、その他の超電導応用の診断・医療装置の開発への関心が高い。

適量の薬品を患部へ正確に搬送するシステム(DDS :Drug Delivery System)は、投薬量や副作用の軽減化などに対して、高い効果が期待できる。また、外科的アプローチの困難な部位への治療が可能であり、難治性疾患に対する有効な治療法になり得る。そこで磁気力による粒子制御の技術を応用することに着目し、マグネタイト等の強磁性微粒子で磁気種付けした薬剤を用い(以後、磁性薬剤)、体外に配置した超電導磁石の磁気牽引力を利用し、血管に投入した担磁薬剤を患部まで到達させる能動的標的指向型磁気標的 DDS(MDDS)を提案している。

②超電導素子分野

■情報・通信分野

ジョセフソン電圧標準素子

[実用化への進展度合 LTS：製品化段階、HTS：製品化段階]

産業技術総合研究所では、物理標準（国家標準）を作っており、その一環として、電圧標準がある。1990 年から、電圧（V：ボルト）を、ジョセフソン効果を利用して決定している。

ジョセフソン効果（Josephson Effect）は、超伝導金属間におけるトンネル効果の一つである。1962 年に、当時ケンブリッジ大学の大学院生だったブライアン・ジョセフソンによって導かれた。厚さ 2nm 程度の極めて薄い絶縁体の層を挟んで弱く結合した 2 つの超伝導体の間に、超伝導電子対のトンネル効果によって、絶縁層を通して電流が流れる現象である。これを応用した素子はジョセフソン素子と呼ばれる。

LTS に関しては、2008 年産業技術総合研究所は、商用電源さえあれば、液体ヘリウムを用いることなく 10 V の基準電圧が発生可能なデスクトップ型量子化電圧発生装置の開発に世界で初めて成功した。10 V の量子化電圧を、簡単な操作によって基準電圧として発生させることができる装置である。具体的には、約 30 万個の窒化ニオブジョセフソン素子 (NbN/TiNx/NbN ジョセフソン素子) を集積したアレーチップ 2 個を直列に接続し (“デュアルチップ” と呼ぶ)、これによって 10 V の量子化電圧の発生に成功した。この窒化ニオブジョセフソン素子は、ヘリウムガスの液化温度より高い温度域 (10 K) での動作が可能のため、従来型のジョセフソン素子では不可欠であった液体ヘリウムを必要とせず、小型の冷凍機で簡単に量子化電圧を発生できる特徴がある。今回開発したデスクトップ型量子化電圧発生装置は、国家標準と同等の電圧安定度を有することから、現在電圧標準として産業界に広く普及しているツェナーダイオード電圧発生装置に代わって利用されることが期待される。

HTS に関しては、産業技術総合研究所では電圧標準素子 (日本標準) として HTS を使ったジョセフソン電圧標準素子を採用している。ジョセフソン素子に外部から周波数 f の電波を照射しながら直流的な電流電圧特性を測定するとこれに比例した定電圧ステップが観測される。原子時計で精度よく校正できるので、電流電圧特性に現れるステップは高精度の電圧目盛りとみなすことができる。

（２）経済効果

（２－１）市場創出への寄与

ここでは、これまでの超電導研究開発による新しい市場の創造やその市場の拡大についてまとめた。

超電導製品市場のポテンシャルは高温超電導・低温超電導を併せて 2020 年に 1 兆 4,000 億円と予測されている。現時点ではほとんどが低温超電導製品である。

①超電導材料分野

■エネルギー・電力分野

SMES

[実用化への進展度合 低温超電導 (LTS) : 製品化段階、高温超電導 (HTS) : 研究段階]

2020 年には LTS、HTS 併せて SMES の市場規模は 142 億円と試算され、潜在的ポテンシャルは 4,740 億円と試算されている。

現状の蓄電池などのエネルギー貯蔵装置と比べて貯蔵効率が 80～90%と高く、エネルギーの出し入れが極めて早いのが特徴である。これが導入されると、単にエネルギーを貯蔵するだけではなく、電力系統安定化、負荷変動補償、周波数調整などの電力の安定化や品質維持などに対する効果もあることから、わが国においてもプロジェクトとして開発が進められている。一方、IT の発展によるデータセンタの設立や半導体、液晶等のハイテク産業の発展に伴い、電力の質(瞬間的な電圧の低下等)の維持や更なる安定性が求められている。ここへの SMES の適用も進められている。すでに中部電力(株)がシャープ(株)の液晶工場に SMES を設置し、落雷などによる瞬時電圧低下(瞬低)を未然に防ぐという具体例も出てきている。

電力ケーブル

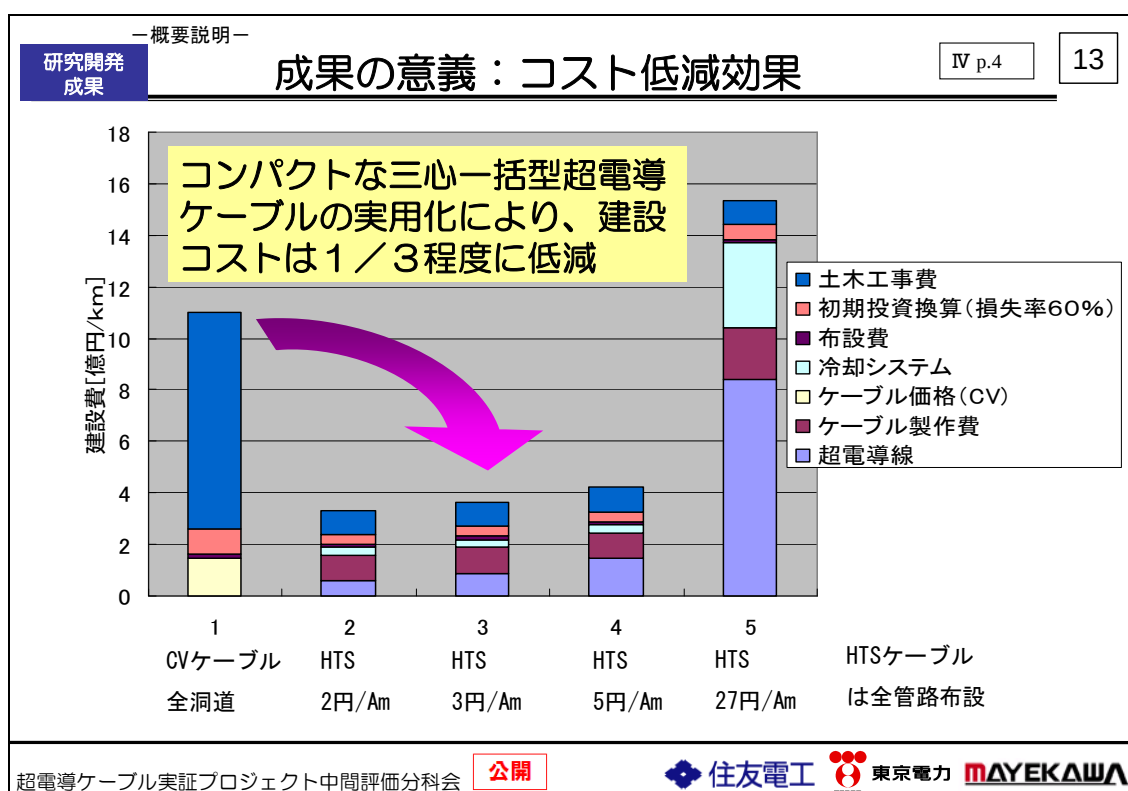
[実用化への進展度合 HTS : 製品化段階]

2020 年には 52 億円、潜在的ポテンシャルは 3,303 億円と試算されている。

超電導材料を電力ケーブルに適用しようという考えが現実味を帯びてきたのは、高温超電導体の出現があったからである。以前にも日米で低温超電導線を用いた電力ケーブルの開発は行われたが、液体ヘリウム冷却や電気絶縁等の課題のために途中で断念したという経緯がある。高温超電導体の出現により、液体窒素温度での冷却が可能になったために開発が進むようになった。現状の送電ケーブルは、発電所から需要家まで電力を送るのに 7～10%の損失があるといわれている。これを超電導化することにより大幅に損失を減らすことができ、さらに、電圧を上げずに電流を増やすだけで大容量化できるため、変電所の変圧器の数を減らすことができるという利点もあるというのが開発に拍車をかけている理由である。すでに、わが国では、東京電力(株)と住友電気工業(株)が共同で、Bi 系線材を用い

た長さ 100m のケーブルを製作し、実験を成功裏に終了している。また、古河電工と電力中央研究所が Bi 系線材を用いて 500m 長のケーブルを製作し、通電実験に成功している。平成 20 年度からスタートしているプロジェクトでは、高電圧型ケーブルは 275kV/単相/3kA30m（中間接続部有り）を製作し、高電圧設計・製造の検証を行っている。大電流型ケーブルは、66kV/三相/5kA 15m を製作し、大電流設計・製造技術の検証を行い、長期課通電性能試験(6 ヶ月)を通じて超電導ケーブルの実用性検証を行っている。今後、500m 級（500MVA 級で 3～5kA）の三相一括型 Y 系超電導ケーブルで、布設、冷却時の応力、歪などの機械特性、信頼性が十分確認されれば HTS ケーブルの市場は大きい。

電力ケーブル導入のコスト試算例を次に示す。ケース 1 は現在の CV ケーブル（架橋ポリエチレン絶縁ビニルシースケーブル：Crosslinked polyethylene PVC）のコスト、ケース 5 は現状の冷凍機を採用し、現在の Bi 系超電導線を布設した場合のコストになっている。今後の技術開発の進展や量産化によるコストダウンの余地は非常に大きいと予測されている。（プロジェクト開始時点の数値）



限流器

[実用化への進展度合 HTS：製品化段階]

市場規模は 2020 年時点で 120 億円と予測されている。

これも高温超電導体の発見以後、活発に開発が進められるようになったものの一つである。電力自由化の進展とともに多数の電源が電力網に接続され、1 箇所の電源事故でも全体

の故障に繋がる可能性がある。限流器は、電力系統で事故が起こった時に発生する事故電流を遮断する際に、事故電流を減衰させる役目を果たすもので、遮断器などの系統のスイッチ要素の定格を軽減するとともに、電力系統に導入されれば大きな系統運用効果がある。未だ基幹電力系統の高電圧(66kV 以上)に適用できる技術レベルにないが、電力自由化により拡大している分散電源の電圧レベル(6.6kV クラス)用ではかなり開発が進んでいる。

先の調査報告書によると、2003 年度の国内総発電量は 1 兆 kWh であり、2005 年 4 月には 6,000 億 kWh の電力取引が自由化される。電力系統に連系される電圧階級として 6.6kV 系統があり、ここに 4,000 箇所以上の中規模分散電源が連系されることが予想され、この系統に限流器を導入して事故時の過電流を抑制することが期待されている。国内市場規模として年間 40～60 億円あると推測されている。国内市場のみならず、電力網が必ずしも充実していない海外での導入が実現すれば大きな市場になると期待されている。

変圧器

[実用化への進展度合 HTS : 技術開発段階]

市場規模は 2020 年時点では 269 億円と予測されている。

超電導を使うことにより効率が 0.5%程度向上するというものの他、現在ガス変圧器の冷却媒体として用いている SF₆ が環境負荷に影響を与えることや油入変圧器の可燃性が懸念されること等により、環境負荷がなく不燃性の液体窒素を冷却媒体として用いることの利点が超電導変圧器開発の動機となっている。

鉄道用車載機器にはとにかく小型・軽量化が望まれる。軽量化は運行の効率向上と密接に関係するからである。鉄道用変圧器については銅線のアルミ線への代替などで今まで相当軽量化の努力がなされてきた。東海道・山陽新幹線に用いられている主変圧器の容量当たりの重量は当初 2kg/kVA 程度であったものが、現在では 0.75kg/kVA となっている。これらを超電導変圧器に代えた場合、冷凍機を含めても軽量化が可能であるということから、(財)鉄道総合技術研究所が中心となって研究開発が進められている。

現状の市場規模はそう大きくはなく、年平均 69 台、金額にして年間 6 億円程度になる。車載用の変圧器が市場に出ると、一般産業用に展開される可能性は大きく期待できる。

Y 系超電導線材を用いた 66kV 20MVA クラスの超電導変圧器実用化のために、巻線加工モデルコイルを作製して低交流損失化が更に進み、既存の 66kV クラスの変圧器の耐電圧規格を満足し、かつ二次巻線の通電量が十分であることが検証されれば市場は大きい。

■産業・輸送分野

産業用マグネット

[実用化への進展度合 LTS : 上市段階]

年間 30 億円規模の市場があるといわれている。

半導体シリコン単結晶引き上げ装置(半導体産業)への超電導マグネットの応用は、最近、シリコン・ウエハの直径が段々と大きくなるに伴い進んだ分野である。既に直径 8 インチから 12 インチに移行しつつあり、そのうち 20 インチウエハが登場すると予測されている。

半導体シリコン(以下 Si)単結晶引き上げに超電導マグネットが必要な理由は、多結晶 Si を磁場の中で溶かし、種結晶を用いて作製されるが、熔融 Si の温度が高いために酸素が溶解し、これが対流している熔融 Si に溶け込み、Si 純度が低下するのを避けるのに磁場で対流を抑制するためである。中心磁場は約 0.3 テスラとそう高くはないが、単結晶の直径が大きくなればなるほど、磁場空間が大きくなるため、結局超電導を使わざるを得なくなる。銅線で作ったマグネットでは容積、重量共に大きくなり、また消費電力も増える。そのために冷却負荷も大きくなる。過去に何台の装置がどのメーカーに納入されているかは企業秘密で把握できないが、年間 30 億円規模の市場があるといわれている。今後 20 インチウエハが市場に出回ると市場規模はさらに拡大することが予想される。

磁気分離装置

[実用化への進展度合 HTS : 製品化段階]

超電導磁気分離装置は環境分野で市場が拡大している。この装置には、超電導線をコイル状に巻いたマグネットタイプと永久磁石の機能を有する超電導バルクタイプの二つの方式がある。現状では、廃水浄化用としての市場が開拓されている。線材を用いたマグネットを磁気分離装置に適用する技術は、大阪の二葉商事(株)が大阪大学等と共同開発中で、平成 13 年度より 3 力年間 NEDO の基盤技術研究促進事業に採択され、このほど 2000 トン/日の処理実験に成功している(実用化には 5000 トン/日が必要とされている)。これは製紙工場から出る廃水処理を目的としたもので、今後食品工場、化学工場からの廃水処理用にも展開できる。

産業用、輸送用モータ、発電機

[実用化への進展度合 LTS:製品化段階、HTS : 製品化段階]

市場規模としては、産業・電力用、船舶用を合わせると 2020 年時点で 483 億円と予測されている。

電力用回転機には電動機(モータ)と発電機とがあるが、原理的にはほとんど同じなので、基本的な技術開発はほぼ共通と見ていい。電動機の超電導化については、船舶用電動機を IHI が販売している。鉄道車両用変圧器と同様、小型・軽量化という特徴が電気推進船に適しているので市場が拓けそうである。産業用電動機の中でも出力 1,000kW 以上のものは、現時点の世界市場で、年間で 1 千億円規模である。発電機においては、現状のものよりは発電効率と発電の安定性が向上すること及びロータの短軸化と軽量化等の特徴が出せる。わが国でもプロジェクトで低温超電導を用いた出力 7 万 kW の製作・試験に成功した。

米国では、ゼネラルエレクトリック社が米国 DOE の補助を受けて Bi 系高温超電導線材

を使って 10 万 kW 級の超電導発電機を開発している。その背景には、現在米国の電力会社
が有する約 10,000 台の既存の発電機を今後 10 年から 15 年間にオーバーホールする必要が
あるため、この機会にロータ部分のみを超電導化して特長を出すという狙いがあるよう
である。単純に計算すると年間 1,000 台程度の市場が拓けることになる。欧州では、風力発
電に軽量・小型化が可能な超電導発電機を適用しようという動きがある。

磁気浮上列車用に Nb 系のマグネットが実証試験段階にあり、船舶推進用には 400kW 級
Bi 系モータがプロトタイプ段階にある。自動車用には 60kW 級 Bi 系モータが開発中であ
る。

■診断・医療分野

NMR・MRI

[実用化への進展度合 LTS：上市段階、HTS：技術開発段階]

市場規模は 2020 年で 346 億円、潜在的ポテンシャルは 5,483 億円と予測されている。

核磁気共鳴（NMR）現象を利用した核磁気共鳴画像法（MRI）による診断装置用に LTS
線材の電磁石が多くの施設に設置されている。この分野ではコストの制約がゆるいことも
あり、LTS が有利であるが、将来の高磁場化を視野に、HTS の基礎研究が行われている。

MRI は癌細胞などの早期発見に有効であり、X 線 CT では実現し得ない機能を持ってお
り、電離放射線被爆のない安全な検査装置で、この 15 年ほどで国内でも急速に普及してき
た。超電導市場の半分近くが MRI で占められている。発生磁場は 0.5T から 3T の範囲が主
流である。この市場は今後も堅調に伸び、年率 8～10%の伸びが予想されている。世界で年
間 2500 台程度の市場で、装置売り上げは 3500 億円程度、そのうち超電導マグネットが 900
億円程度である。しかし、低価格化が進み市場拡大という点からは新しい技術開発が必要
である。既に設置されている病院等では買い替えという需要が期待されるが、新規市場を
開拓するには、使い易さの改良、運転コストの低減等の技術開発が必要である。それによ
り、地方の病院や発展途上国への市場が拓けることが期待される。高温酸化物超電導線材(主
に Y 系線材)の実用化が進めば冷凍機の運転コストも低減し、クエンチの心配もなくなるの
で市場が格段に大きくなることが期待される。

SQUID 応用製品

[実用化への進展度合 LTS：上市段階、HTS：製品化段階]

市場規模は 2020 年時点で、63 億円、潜在的ポテンシャルは 635 億円と予測されている。

心磁計は最近発売された超電導を用いた診断装置の一つであり、今後市場が期待される。
人体から出る微弱な電流を調べる心電計とは異なり、心磁計は微弱な電流が生ずる極微弱
な磁場を測定し、心臓の状態等を心電計よりも正確に測定できる。心臓から出る磁場は、
地磁気の約百万分の一の微弱なものであるため、その測定には、超高感度磁気センサ

SQUID(超電導量子干渉デバイス)が活用されている。虚血部位や不整脈信号源の高精度な測定が非侵襲で可能となり、心電図では分からなかった心臓の不整脈も早期に発見できる。装置は地磁気の影響を避けるための磁気シールド等が必要となるため、現状では 1 億円程度と高価であり、限られた病院にしか導入できないが、これも低価格化が進めば市場が拓けると期待されている。

人間の脳が活動するときには非常に小さな電気や磁気を発生する。この磁気を測定する検査が脳磁計(MEG)である。これを用いれば従来脳波で見つけられなかった異常を見つけれられる可能性がある。また、脳波で電気を見るよりも脳磁計で磁気を見た方がより正確な場合がある。例えば、てんかんの患者では脳の中のでんかん源が正確にわかる可能性も高く、また脳外科手術を受ける患者では手術前に脳の機能を正確に評価しておくことができるので、手術をより安全に受けることができる。

②超電導素子分野

■情報・通信分野

SFQ 回路 (単一磁束量子 : Single Flux Quantum)

[実用化への進展度合 LTS : 製品化段階、HTS : 技術開発段階]

市場規模は算出するには至っていない。

超電導工学研究所では、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 系薄膜を用いた SFQ(単一磁束量子)回路の開発の中で、以下の成果を上げている。

①超電導接合の臨界電流密度(J_c)を解析し、 J_c の均一化可能なレイアウトを考案した。

②4.2 K で 360 GHz、40 K 近い温度で 110 GHz の高速分周動作を実現できた。

③液体ヘリウム温度(~4 K)で動作する超電導 SFQ(単一磁束量子)回路と室温環境にある半導体機器との間で、多数(32 本)の高速信号(10 Gbps)をやり取りできる装置を世界に先駆けて開発した。

ニオブを用いた低温 SFQ 回路は、数十 GHz 以上のクロックで動作する LSI を実現できる技術として期待されているが、SFQ 回路が動作するためには~4 K の極低温環境が必要であり、半導体の情報通信機器と簡単に組み合わせて使用出来る様に、室温で接続できる形に装置化することが望まれていた。

SFQ 回路は、前記の通り、現在の半導体回路より数十倍速い 100 GHz で動作した場合でもゲート当たり 0.1W 程度の電力しか消費せず、発熱を殆ど生じないことから、情報処理に革命的な進歩をもたらす超高速かつ大規模な回路を実現する技術として期待されている。このため超電導工学研究所では、ネットワークルータ用スイッチをターゲットとした SFQ 回路の開発を進めており、これまでに 4×4 (4 入力、4 出力)SFQ スwitchの開発や、その制御回路である SFQ スwitchスケジューラが半導体スitchの約 100 倍にあたる 40 GHz で動作することを実証した。これは世界で初めての試みであり、この成果により SFQ

回路を容易に使える条件が整い、ネットワークルータ用スイッチなどへの応用が加速されるものと期待される。

超電導工学研究所はさらに、NEDO 低消費電力型超電導ネットワークデバイス開発プロジェクトの一貫として単一磁束量子(SFQ)回路を用いた超高速サンプラーシステムを開発した。高温超電導デバイスは小型冷凍機での冷却が可能でシステム全体を小型化できることから近い将来の実用的な小規模システム実現への期待が高い。

高温超電導サンプラーチップを搭載した小型の冷却システムと計測制御システムを含む全システムをポータブルなデスクトップサイズで実現した。これによりプロジェクトの最終目標であった 50 GHz の外部信号をクリアに観測することに成功した。

フィルター（受動素子）

[実用化への進展度合 HTS：上市段階]

市場規模は算出するには至っていない。

情報・通信分野では、HTS 薄膜を使ったフィルター（受動素子）が米国で携帯電話基地局用として実用化され、7000 基以上が導入されている。フィルターは国内ではまだ需要が少なく、民間での要素研究が実施されている段階である。

③超電導共通基盤分野

■冷凍・冷却分野

[実用化への進展度合 LTS：上市段階、HTS：技術開発段階]

市場規模は算出するには至っていない。

パルス管式冷凍機で 300kW 級がプロトタイプ段階にあり、また、60K の温度レベルで作動するタービン式冷凍機の 2kW 級機もプロトタイプ段階にあるが、市場の調査データはまだない。

JR 東海の超電導磁気浮上式鉄道冷凍機は 2 段 GM 型パルス管冷凍機であり、コイルを 20 K レベル以下に冷却する。

Y 系超電導実用機器に必要な冷却能力は、GM 冷凍機やスターリング冷凍機など既存の小型冷凍機の冷凍能力では不十分である。また大型 He 液化器などで用いられる膨張タービン方式は冷凍能力や耐久性では実績があるが、Y 系線材を用いる機器用としては大型で能力も過大すぎる。必要十分な冷却能力として 70K で 2kW を満足し、30,000 時間以上の長寿命化が可能な小型膨張タービン冷凍機の市場は大きい。

（２－２）経済的インパクト

ここでは、これまでの超電導研究開発による生産波及、付加価値創出、雇用創出への影響が大きかったかどうかについてまとめた。

①超電導材料分野

これまでの超電導研究開発の成果により、Bi 系線材と電力ケーブルの販売が始まり、わずかではあるが雇用創出効果に繋がっている。

また、LTS による SMES はフィールド試験を経て、液晶工場へ導入されており、市場創設の第一歩となっている。

産業技術総合研究所内ではベンチャー創設を支援するシステムがあり、冷凍機のベンチャー企業が設立された。

②超電導素子分野

これまでの超電導研究開発の成果が雇用創出効果に繋がったかどうかはまだ分からない。

（２－３）産業構造転換・活性化の促進

ここでは、これまでの超電導研究開発が産業構造の転換や活性化（市場の拡大や雇用の増加など）にどのような役割を果たしたかについてまとめた。

①超電導材料分野

超電導電力ケーブルが実用化を迎え、Bi 系線材製造事業が立ち上がりつつある。

②超電導素子分野

産業構造の転換や活性化への寄与はまだである。

(3) 実用化への障害の整理

高温超電導製品の市場創出には乗り越えなければならない二つの壁がある。一つは従来技術の壁であり、もう一つは低温超電導の壁である。

まず、低温超電導の製品で上市されているものを表 3-1 から抽出したものを表 3-2 に示す。この表を見ても判るように、従来技術では実現できない製品が実用化されている。

表 3-2 既に実用化されている製品

製品名称	区分	製品化段階			
		上市段階	製品化段階	技術開発段階	研究段階
産業用 マグネット	LTS	Nb 系単結晶 引上装置			
SQUID 応用	LTS	心磁計、脳磁計			
NMR・MRI	LTS	NMR、MRI			

直接的開発製品	副次的開発製品	独自開発製品

また、表 3-1 を基にして、まだ実用化されていない製品の製品化段階とその実用化への障害について整理した結果を、表 3-3 に示す。

表 3-3 まだ実用化されていない製品の製品化段階とその実用化への障害

製品名称	区分	製品化段階				実用化への 障害・対策
		上市 段階	製品化段階	技術開発段階	研究段階	
電力 ケーブル	HTS		Bi 系 30m 試験	Bi 系単相 500m		設備更新時期が未 到
SMES	LTS		Nb 系液晶工場			信頼性の向上
	HTS				Y 系 SMES	性能向上
フライ ホイール	LTS			Nb 系磁気軸受		用途が不明確
	HTS			磁気軸受		
限流器	HTS		Y 系コイル・ 系統連系	Bi 系コイル		系統連系による実 証
変圧器	HTS			Y 系変圧器		性能向上
輸送用 モータ	LTS		Nb 系磁気浮上 列車用 リニアモータ			長期耐久性の実証 コスト低減
	HTS		Bi 系船用モータ	Bi 系自動車用		実証試験の実施
産業用 マグネット	HTS		廃水処理用 磁気分離装置	水浄化用 磁気分離器		処理能力の向上
				B i 系単結晶 引上装置		性能向上
SQUID 応用	HTS		食品内金属異物 検査装置			信頼性の向上
NMR ・ MRI	HTS			Y 系線材開発		性能向上
SFQ 回路	LTS		超電導デジタル 集積回路(LSI)製 造プロセス	マイクロプロセ ッサ、ネットワー クルータ用 SFQ スイッチ		実証試験の実施
	HTS			SFQ サンプラー システム		性能向上

直接的開発製品	副次的開発製品	独自開発製品

第Ⅳ章

研究開発力向上効果

（１）特許動向調査

公開されている報告書に記載されている特許全 1,349 件について、被引用回数を調査した。最多は 14 件の被引用のあったフジクラによる「酸化物超電動体およびその製造方法」であった。この特許は Y 線材製造の基本的な手法である IBAD 法に関する特許である。

1,349 件の特許のうち、被引用件数が 4 件以上の特許を整理したものを、表 4-1 に示す。

表 4-1 被引用回数の多い順に並べた超電導関連特許

出願番号	公開番号	登録番号	登録年月日	発明者(筆頭者) または機関名	発明の名称	被引用件数	PJ-NO
特願平3-205551	特開平5-24996	登録3251034号	平成13年11月16日	(株)フジクラ、飯島康裕	酸化物超電導導体およびその製造方法	14	③
US 09/517.444		US 特6,242,939号	2001年6月5日	日本電気(株)、永沢秀一	SUPERCONDUCTING CURCUIT HAVING SUPERCONDUCTIVE CIRCUIT DEVICE OF VOLTAGE-TYPE LOGIC AND SUPERCONDUCTIVE CIRCUIT DEVICE OF FLUXOID-TYPE LOGIC DEVICE SELECTIVELY USED THEREIN	9	②
特願平03-285621	特開平05-102543	登録3216089	平成13年8月3日	三洋電機 (株)	超電導デバイスの製造方法並びにそれを用いた超電導トランジスタ	9	①
特願平2-184195	特開平05- 9100	登録2653003	平成9年5月23日	日本電気 (株)	酸化物超電導薄膜合成方法	8	①
		US.No.4836678	1989年6月6日	産業技術総合研究所	DOUBLE-PATH INTERFEROMETER	8	①
特願平8-65596	特開平09-255333	登録3962107号	平成19年5月25日	(財) 国際超電導産業技術研究センター (財) 鉄道総合研究所	酸化物超電導複合体及びその作製方法並びに酸化物超電導磁石及び超電導コイル装置	7	①
特願平9-237477	特開平11-86647	登録3771012号	平成18年2月17日	(株)フジクラ	酸化物超電導導体	7	③
特願平1-331725	特開平3-192611	登録2876667号	平成11年1月22日	住友電気工業(株)	アルミニウム安定化超電導線	7	③
特願平04-100701	特開平05-275760	登録3102948号	平成12年8月25日	三洋電機 (株)	超電導トランジスタ及びその製造方法	7	①
特願平5-278791	特開平07-131082	登録2624148号	平成9年4月11日	日本電気 (株)	超伝導サンプリング回路	7	①
特願平1-143759	特開平3-11505	登録2583311号	平成8年11月21日	超電導発電関連機器・材料技術研究組合 古河電気工業(株)	酸化物超電導導体の製造方法	6	③
特願平4-76740	特開平5-279140			超電導発電関連機器・材料技術研究組合 住友電気工業(株)	酸化物超電導体の接合方法	6	③
特願平8-158920	特開平09-321346	登録3596643号	平成16年9月17日	国際超電導産業技術研究センター	熱電変換材料及び熱電変換素子	6	①
特願平4-152408	特開平06- 17248			国際超電導産業技術研究センター	スパッタリング装置	6	①
		US5472934	1995年12月5日	産業技術総合研究所	ANISOTROPIC SUPERCONDUCTING DEVICE AND FLUXON DEVICE	5	①
特願平1-236988	特開平03-103308			産業技術総合研究所	酸化物超電導体薄膜用多元イオンビームスパッタ装置	5	①
		US. 4956334	1990年9月11日	産業技術総合研究所	METHOD FOR PREPARING A SINGLE CRYSTAL OF LANTHANUM CUPRATE	5	①
特願平1-97313	特開平02-277276	特公平06-34420	平成6年5月2日	日立製作所:(株)	酸化物超電導トランジスタ装置の作製方法	5	①
US 10/142.932		US 6724216	2004年4月20日	ISTEC、富士通、NEC 鈴木秀雄	RAPID SINGLE-FLUX-QUANTUM LOGIC CIRCUIT AND RAPID SINGLE-FLUX-QUANTUM OUTPUT CONVERSION CIRCUIT	5	②
特願平1-291751	特開平03-153558	特公平07-115924		国際超電導産業技術研究センター、新日本製鐵(株)、鉄道総合研究所、四国電力	酸化物超電導体の製造方法	5	①
特願平1-231193	特開平3-93608	登録2854623号	平成10年11月20日	(株)東芝	酸化物超電導体薄膜の製造方法	5	③
特願平9-208104	特開平11-53967	登録4033945号	平成19年11月2日	(株)フジクラ	配向性多結晶基材と酸化物超電導導体およびその製造方法	5	③
特願平6-74309	特開平07-260594	登録2545740号	平成8年8月8日	産業技術総合研究所	温度センサ	5	①
特願平3-208552	特開平5-24806			超電導発電関連機器・材料技術研究組合 (株)フジクラ	酸化物超電導体	5	③
特願平7-069560	特開平8-264312			超電導発電関連機器・材料技術研究組合 住友電気工業(株)	電流リード	5	③

表 4-1 被引用回数の多い順に並べた超電導関連特許（続）

出願番号	公開番号	登録番号	登録年月日	発明者(筆頭者) または機関名	発明の名称	被引用件数	PJ-NO
特願平5-60188	特開平6-271393			(株)フジクラ	薄膜積層体と酸化物超電導導体およびそれらの製造方法	4	③
特願2000-260777	特開2002-76457	登録4065653号	平成20年1月11日	シャープ(株) 国際超電導産業技術研究センター	ペロブスカイト酸化物積層膜及びその製造方法	4	②-1
特願2000-260777	特開2002-76457	登録4065653号	平成20年1月11日	シャープ(株) 国際超電導産業技術研究センター		4	02
特願平7-30420	特開平08-228029	登録2730502号	平成9年12月19日	(株)日立製作所	超電導トランジスタ	4	①
特願平5-60187	特開平6-271400	登録3444917号	平成15年6月27日	(株)フジクラ	多結晶薄膜の製造方法と製造装置および多結晶薄膜を備えた酸化物超電導導体の製造方法	4	③
特願2000-360648	特開2002-163944	登録3646059号	平成17年2月10日	中部電力(株)、日立電線(株)	アルミ安定化超電導線および超電導体	4	06
特願昭和63-310003	特開平2-291611	登録2516251号	平成8年4月30日	超電導発電関連機器・材料技術研究組合 (株)日立製作所	酸化物超電導膜の製造方法	4	③
特願平5-264945	特開平07-122927	登録3022098号	平成12年1月14日	国際超電導産業技術研究センター 日本電気(株)	アレイアンテナとその製造法	4	①
特願平2-21984	特開平03-228381	特公平7-101759	平成7年11月1日	(株)日立製作所	超電導素子	4	①
特願平10-42617	特開平11-243233	登録2909455号	平成11年4月2日	(株)東芝	超電導素子	4	①
特願平9-44512	特開平10-236821	登録3289134号	平成14年3月22日	産業技術総合研究所	不確定性原理に基づく低異方性高温超伝導体とその製造方法	4	①
特願平6-173184	特開平08- 12422	登録2821568号	平成10年9月4日	産業技術総合研究所	超電導ウイスキー複合体の製造方法	4	①
特願平8-247087	特開平10- 74989	登録2908346号	平成11年4月2日	(株)東芝	超電導構造体	4	①
特願平2-202428	特開平4-89378	登録2856859号	平成10年11月27日	三菱電機(株)	有機金属化学気相蒸着法による酸化物超電導体の製造方法	4	③
特願平7-253365	特開平9-97637			超電導発電関連機器・材料技術研究組合 住友電気工業(株)	酸化物超電導体と金属端子との接合部およびその形成方法	4	③
特願平10-1898	特開平11-204845	登録2954124号	平成11年7月16日	(株)東芝	超電導限流素子	4	③
特願昭62-109519	特開昭63-274697	特公平4-71877	平成4年11月16日	産業技術総合研究所	銅酸ランタン単結晶の製造方法	4	①
特願平2-236962	特開平04-118977	特公平7-14079	平成7年2月15日	(株)日立製作所	酸化物超電導三端子素子	4	①
特願平2-172428	特開平04- 59606			富士通 (株)	超伝導薄膜作成装置	4	①
特願平2-312037	特開平04-182303	登録3021621号		日本電気 (株)	活性酸素発生器	4	①
特願昭63-112277	特開平1-309956			超電導発電関連機器・材料技術研究組合 (株)フジクラ	酸化物系超電導体の製造方法	4	③
特願昭63-263957	特開平2-243519			超電導発電関連機器・材料技術研究組合 (株)日立製作所	酸化物超電導体及びその製造方法	4	③
特願平2-123679	特開平4-21597	登録2968557号		(株)フジクラ	酸化物超電導導体用基材	4	③

(2) 知的ストックの蓄積度合

ここでは、これまでの超電導研究開発による知的ストックの蓄積度合についてまとめた。

①超電導材料分野

これまでの超電導研究開発の知的ストックが新たな成果を生み出す可能性は大である。理由は、超電導電力機器の部材であるとともに、電力系統の安定化、CO₂ 削減への貢献が期待できるためであり、超電導送電、限流器などへの応用が有望である。

超電導フィーバー時に発足した「超電導材料・超電導素子」プロジェクトの後継プロジェクトとして、経済産業省および NEDO のプロジェクトが成果を引き継ぐ形で継続されている。

ISTEC でプロジェクトに参加した研究者は、プロジェクト終了後でも、当該技術、派生技術の研究を継続しており、実質的には約 100 名から約 50 名と半減しているが、派遣研究員等を含めると総人員はほぼ同じである。

プロジェクト間では「超電導応用基盤技術開発 (Ⅱ)」プロジェクトから「交流超電導電力機器基盤技術」プロジェクトへ Y 系線材を提供していることなど、知的ストックが活かされている。

派生技術としての知的ストック、例えば、超電導物性物理分野、および、酸化物結晶成長、作製プロセス分野の知見は超電導技術開発に大いに貢献している。超電導プロジェクト全体の成果は、経済産業省の技術戦略マップにも反映されており、今後の活用も期待できる。

基本特許としては、高温超電導材料ばかりでなく、構造、中間層、新機能、基板、単結晶等の材料特許に関するものも多く、基本的なプロセス特許になっている。線材の場合には超電導材料ばかりでなく、中間層、結晶粒の配向性の制御などが重要であり、IBAD 法も重要な特許である。

知的財産権（特許など）による収入はまだまだ少額である。取得特許は周辺特許として活用しており、活用場面も増えている。

超電導関連のデータベースの蓄積業務は産業技術総合研究所で継続されており、基礎研究の論文掲載や国際会議の開催の増加というかたちで貢献している。データベースへのアクセス数も多い。

②超電導素子分野

高温超電導素子分野では、当面は SQUID 素子と SFQ ロジック回路が有望である。半導体関連の国際学会「ISSCC 2007」では、ISTEC 等が開発した AD 変換器は世界最高性能として採択されていることは評価される。

人材的に見ると、素子分野技術、派生技術の研究を継続している研究員数は減少しているが、関連プロジェクトで培った技術は関連分野で大いに役立っている。特に結晶成長技

術、冷凍機などのプロセス技術の知的ストックは貴重である。素子冷却用冷凍機に関しては、GM、住重、岩谷、CTI などがあり各々一長一短がある。

特許出願数、登録数も多いが、出願数がゼロの分野もある。その理由は特許出願が、国際協力の疎外要因になっているケースが多いことを鑑み、意識的に出願していないケースがあるためである。過去 10 年間で見ても、MIT やスタンフォード大学、UCLA の有能な研究者の半数は同様な考え方をもち、特許出願に積極的でない傾向もある。

（３）研究開発組織の改善・技術戦略への影響

ここでは、これまでの超電導研究開発が、研究開発組織の強化・改善に対してどのように役立ったか、実施企業の技術戦略に影響を与えたかについてまとめた。

①超電導材料分野

これまでの超電導研究開発では、企業間の研究交流が極めて充実して行われた。産学官の連携強化、新たな共同研究の推進に寄与していた。

超電導ケーブルに関しては、線材開発が進んだことにより、住友電工やフジクラで組織強化が行われている。

プロジェクトの実行中、終了後に、研究機関（企業、大学など）の研究開発部門の再編成、組織改変などプラス方向に進んでいる。例えば、ISTEC 盛岡研究所の設置、材料から機器に重点をおく機器研究開発部門の設置などを行っている。

技術戦略的には、金属酸化物原料で膜をつくる技術などに、各機関は力を入れるようになった。海外研究機関との研究交流に関しては、マックスプランク研究所、アルゴンヌ研究所などとの共同研究など国際協力も行われている。

産業技術総合研究所には、強相関電子技術研究センターが設置されているが、設置に際しては、関連プロジェクトの存在の影響がかなりあったようである。

②超電導素子分野

ISTEC では SFQ ロジック回路関連で LTS 分野と HTS 分野に組織を分けて効率的な開発を実施している。

企業間の確執を超え、フォーラム、学会などにおける当該技術の研究交流基盤が整備され、充実した面もある。例えば、企業間の連携、産学間の連携、共同研究の推進などである。特に理論面では、現在でも個人的に研究を継続している人もいる。

プロジェクト終了後は、研究開発に参画した企業が開発を中止したため、研究者が減員され、予算が減少したところも多い。逆に、大学と企業間の連携の契機になったところもある。科学振興調整費のプロジェクトでは、大手電気関連企業各社間の研究者の交流に役立っている場合があった。

産業技術総合研究所での研究者はプロジェクト終了後、超電導以外の各分野に再配置されて活躍している例もある。

(4) 人材への影響

ここでは、これまでの超電導研究開発が、研究者の効率的・効果的配置や能力の向上にどのように寄与したかについてまとめた。

①超電導材料分野

高温超電導材料分野では、ISTEC の塩原所長が、米国の Superconductor Week 社の [Person of the Year 2005] を日本人で初めて受賞し、国内外の第 1 人者と評価されている。

研究成果に対する、学協会からの受賞も多い。例えば、

①米国 Superconductive Week 社の [Person of the Year 2005]

②未踏科学技術協会

③科学技術賞

④日本金属学会学術功労賞

⑤日本金属学会論文賞

など多数ある。

ISTEC の田中前所長が紫綬褒章を受章していることも、これまでの超電導研究開発によるものといえる。

これまでの超電導研究開発への従事者の所属機関内での評価は高まっており、後継プロジェクトも立ち上がっている。超電導プロジェクト全体の遂行により、ISTEC は国内外から高く評価される機関となり、超電導研究のメッカとなっている。

ISTEC における当初プロジェクトに関連した研究者で博士号を取得した数は 114 人になっている。プロジェクトの終了後も、海外の著名な研究所との交流、交換留学は継続している。例えば、米国ロスアラモス研究所の幹部は ISTEC の客員研究員の経歴の持ち主である。超電導材料の理論分野ではイタリアとの日伊科学技術協力、マックスプランク研究所との交流などで人的交流は盛んになっている。

産業技術総合研究所での国際シンポジウムも日本で開催され、ノーベル賞受賞者など一流研究者が参加しレベルの高いものになっている。

②超電導素子分野

超電導素子の分野で NEC の研究者の業績が評価され、スタンフォード大学で IEEE のフェローになっていることなど、人材育成には十分貢献している。

超電導素子の分野での海外著名研究所との交流・交換留学等が継続されている。例えば、オランダの Twente 大学、イタリアの Naples 大学、CNR とはポスドクの交流などが行われている。

産業技術総合研究所における高温超電導体の STM 観察は、当初評価されなかったが、その結果が高温超電導体の構造そのものを表すことが分かり、米国で評価されて IBM 賞を受賞している。それを機会に第一人者としても評価されている。産業技術総合研究所におけ

る高温超電導で育成された多くの優秀な人材は、電圧標準などの組織の要員として活躍している。特に最近では量子物理の分野で、量子コンピュータなどにも進出している。

第 V 章

追跡評価の審議を円滑にするための調査等

（１）WG の事務局支援作業

追跡評価は、第 1 ステップとして産業構造審議会産業技術分科会評価小委員会(以下、「評価小委員会」という。)の下に設置される追跡評価 WG (以下「WG」という。)で追跡評価報告書(案)について審議を行い、WG で了承された追跡評価報告書(案)を第 2 ステップとして評価小委員会に諮り、了承されたものが最終的な追跡評価報告書となる手順で行われる。

本調査では、この WG 開催の事務局支援作業を実施した。WG 開催に際しては、配布資料の準備支援、資料印刷・資料配布の支援、会場設営支援、議事録作成支援等を実施した。作業に当たっては、産業技術環境局産業技術政策課技術評価室の指示に従った。

WG は 2 回開催され、開催日程は次のとおりであった。

平成 21 年 12 月 25 日（金）

第 1 回超電導材料・超電導素子研究開発追跡評価 WG

平成 22 年 2 月 24 日（水）

第 2 回超電導材料・超電導素子研究開発追跡評価 WG

なお、第 1 回 WG 開催後、評価 WG 委員から 1 月 8 日までに受領した質問票に対し、問い合わせ内容の調査、資料の修正などを行い、「ご質問票への対応一覧表」を作成した。

（２）追跡評価報告書(案)作成支援

上記評価小委員会における追跡評価の審議に供する追跡評価報告書(案)を作成するために下記の調査を実施した。

- ・ 評価コメント票フォーマット作成支援
- ・ 評価コメントの回収支援
- ・ 追跡評価報告書(案)用のベースとなる評価コメントの整理・分析
- ・ 追跡評価報告書(案)作成支援

第 1 回 WG 開催後、評価 WG 委員から 1 月 18 日までに受領した評価コメント票をもとに、追跡評価報告書(案)の作成支援を行った。

なお、2 月 15 日に、技術評価室が菊池座長へ追跡評価報告書(案)の内容を説明するにあたり、陪席して支援した。