

# 第13回国際超電導産業サミット

ISIS-13

米国フロリダ州ジャクソンビル

2004年10月8日

コミュニケ(和訳 \* [\[1\]](#))

## エグゼクティブ・サマリー(要旨)

第13回国際超電導産業サミットが2004年10月8日にフロリダ州ジャクソンビルで開催された。超電導体業界の約50名の世界的なリーダー達が集まったこの年次会議では、主な成果とこの業界が直面している継続的課題が話し合われ、各国政府が未来技術を支援する必要性に関する問題と過去10年間に渡る超電導への政府支出レベルが吟味され、又日本、ヨーロッパ及び米国における超電導に基づく国家的なインフラストラクチャープロジェクトの状況が検討された。

2004年の超電導、特に材料及び製造技術の進歩を大規模プロトタイプ機器の実証・実用試験へ応用すること、低温工学などの他の技術を超電導システムへ統合することに関する主要な動きが報告された。特に注目すべきは、超電導ケーブルを国内の電力グリッドに組み入れることが可能かどうかを実証するための世界中で行われているプロジェクトである。超電導ケーブルは、従来のケーブルと同一サイズのケーブル・トレーで従来ケーブルの5～10倍の電力を通すことができ、既存のインフラストラクチャーの制約内で電力需要の継続した増加に対応する手段となる。同様に、産業と船舶推進の両方の用途のための設置面積が小さく、より高効率のモータと発電機に対して行われたいくつかの実証試験では満足のいく性能が実証されており、大型超電導磁石も非常に効果的なエネルギー貯蔵装置であることが示された。医療の研究分野では、超電導体技術の進歩により更に強力なMRI及びNMRの製造が可能になった。これは、国際熱核融合実験炉(ITER)の建設を通じて核融合エネルギーコンセプトを実証・開発するための50億ドルの国際プログラムに対してもよいニュースである。

新しい超電導材料、プロセス、加工技術においても大きな進歩が報告された。単一磁束量子(SFQ)電子回路は、超電導体技術により数桁高速になる可能性を持った超電導を基礎とした技術である。SFQは低い電圧で作動し、消費電力はほとんどない。大きな課題は常に加工技術であった。昨年の大きな進歩は、SFQ回路用基本ビルディングブロックからなる10,000個規模のジョセフソンジャンクションを6層構造としてインテグレートし、10 GHz以上の回路速度を実証したことである。この技術を高速計算やデジタルコミュニケーションに組み込むためにはまだ多くの重要な課題が残されているが、報告されている進歩は素晴らしいものであり、大いに励みになるものである。製造

技術において大幅な進歩を示すもう一つの分野は電力ケーブル用の第二世代、即ち「2G」線材である。高性能化と製品製造の低コスト化を目指したより長尺かつより均一な線材の進捗状況が報告された。

特に新素材を使用した製品の市場投入までにはこれまで長い開発期間が必要であったことを考えると、新しい技術に対する政府の資金提供は重要である。このことは、発電・配電、コミュニケーション、運輸、及び医療分野・科学研究用の大型機器などの政府規制を受けることが多い主要インフラストラクチャーにそれらの技術が適用される場合には特に当てはまる。新技術導入に際してはこれらの産業のすべてが必然的に保守的になる。従って、超電導は、学術的段階、研究開発段階から商業的プロトタイプ実証の成功まで政府支援に大きく依存している。過去10年間の日本、ヨーロッパ及び米国における政府の超電導への資金提供に関し詳細に調べた結果、超電導技術の大きな進歩が継続的に実証されているにもかかわらず、研究開発のいくつかの分野での各国政府による支援が著しく低下していることを知り、ISISへの会議参加者は残念に思った。これらの予算削減によるこれまでの全体的影響は、大幅なプログラム削減であり、その結果、能力の高い人材を有する先端超電導産業でのレイオフや損失、小規模ベンチャー会社の閉鎖があり、また、超電導技術により利益を生み出す時間が必要以上に先に伸びた。

会議から導かれた主要な結論は次の通りである。:(1) 過去1年以内にプロトタイプ機器の実証が行われ及び新素材・製造技術が進展したことは大きな進歩である。(2) 最近、政府資金提供援助が減少したために超電導産業内に大幅な混乱と問題が発生してきている。

超電導産業が直面している重要な課題は、この技術の商業化を速いペースで進めること及び、政府に対して資金提供援助をこの目標に合ったレベルに維持するように強く働きかけることである。

ISIS-13の詳細は、「導体」、「電力」、「エレクトロニクス」、「高エネルギー物理学」、「医療と産業」、「輸送」及び「超電導への政府資金提供(1995年～2004年)」を取り扱う添付セクションを参照願いたい。

次回の会議であるISIS-14は、2005年10月27日～28日に日本の東京で開催されることが予定されている。

[1] 本文は和訳であり、正文は英文である。

---

# 第13回国際超電導産業サミット

ISIS-13

米国フロリダ州 ジャクソンビル

2004年10月8日

コミュニケ

## 序文

第13回国際超電導産業サミットが2004年10月8日にフロリダ州 ジャクソンビルで開催された。超電導体業界の世界的なリーダー達が集まったこの年次会議では、主な成果とこの業界が直面している継続的課題が話し合われ、各国政府が未来技術を支援する必要性と過去10年間に渡る超電導への政府支出レベルが議論され、又日本、ヨーロッパ及び米国における超電導に基づく国家的なインフラストラクチャープロジェクトの状況がレビューされた。

一日のサミットで会議参加者は、技術のいくつかの分野において自分達の国内(域内)で昨年起的大きな動きを報告した。商品化に向けた大幅な進歩、実証試験で示された超電導技術プロトタイプ製品の実現可能性とそのメリット、研究に裏打ちされた将来の更なる可能性が報告された。進歩のあった分野の例としては、エレクトロニクス、電力、輸送及び高エネルギー物理学における超電導体用途の開発と実証があった。昨年は、これら用途の実現に不可欠なLTS及びHTSチップ及び線材等のコア技術の開発と工業化両面で継続的な進歩が見られた。今年の討議の多くは、予算が制限され優先順位が競合する時代における長期研究開発に対して政府援助を維持することの難しさ等業界が直面している多くの課題にも焦点が合わされた。主要なプレゼンテーションのより詳細な要約は、以下に分野と用途毎に示されている。

## ISISの背景及び参加者

国際超電導産業サミット(ISIS)は、日本の国際超電導産業技術研究センター(ISTEC)と米国のCSAC(Council on Superconductivity for American Competitiveness)の間の共同イニシアチブとして1992年に組織された。1993年にはヨーロッパの超電導開発を代表するCONNECTUS(CONsortium of European Companies determined To Use Superconductivity)がISTECとCSACに加わった。1992年以降、世界の超電導産業は、超電導技術を使用した迅速な製品開発を進展させることを目的として、世界中の産業界、政府及び大学の間での国際協力と情

報交換を促進するために年次会議を開催してきた。本年度のジャクソンビルでの会議はCCASにより主催された。

CCAS(旧CSAC)は、コストパフォーマンスがよく、環境にもやさしい、広範な社会的利益をもたらす超電導技術に基づく製品の商業化を促進する米国の非営利団体である。

ISTECは、日本の民法に基づき日本の経済産業省の認可を得て1988年1月に財団法人として設立された。その目的は、超電導研究の進展と超電導関連産業の健全な発展に貢献することである。

CONNECTUSは、イギリスの民間機関として1994年に設立された非営利組織である。CONNECTUSの主要な目的は、ヨーロッパにおける超電導の商業用途の基盤を強化することである。

## 次回のサミット

ISIS-14はISTECが主催する予定であり、2005年10月27日～28日に日本の東京で開催されることが予定されている。

## コンダクター

### Opportunity

低温超電導体(LTS)の使用は、高エネルギー物理学及び医療産業において経済的に磁場を作り出すための標準的な方法である。LTS導体は、体内の軟組織を映像化するために使用される磁気共鳴画像診断(MRI)装置、研究室用マグネット、及びITERなどの熱核融合プロジェクトに主として用いられる。3 T MRI磁石や900 MHz NMRなどの能力向上は価値のあるものであり、ユーザーはこれらの利点に対してより多くのお金を支払うことに同意するであろう。高温超電導体(HTS)線材は、10年以上に渡り継続して性能が上がり続けてきており、臨界電流は1993年の10アンペアから2004年の130アンペア以上までになっている。現在、第一世代HTS線材は商業的長さとも言える500 m以上の長さが入手可能である。第二世代HTS線材(「被覆導体」)は、既に第一世代BSCCO線材の性能と同等であり、この10年間の終わりまでにはより低コストで、商業的に意味のある数量が入手可能になるものと期待されている。HTS線材には発電、送電、配電から電気の使用に至るまでの電力インフラストラクチャーの全体に渡り広い産業用途の可能性がある。

HTS線材を使用する装置は、より強力でコンパクトになり、より環境に優しくなるだろう。それらの装置は、グリッドの拡張と最新化を可能にする運転上の利点を電気供給業者に与えることになる。会議参加者は、商業的に利用可能なHTS線材は20 K及び25 Tでの臨界電流密度が $1 \times 10^6$  A/cm<sup>2</sup> 以上であり、これらの線材は多くの高磁場用途でも興味深いものであると考える。

## 進歩、マイルストーン及び課題

NbTiの価格について引き続き引下げの圧力がある。低温超電導体Nb<sub>3</sub>Snの性能は向上し続けている。MRIとNMRの市場は年間約5%の成長率で着実に拡大しており、LTS導体の重要な市場となっている。物理学的側面としては、ITERはLTS導体の次の大きなプロジェクトになるものと予想されており、LTSの性能は更なる向上が図られている。新しいプロジェクト及び用途がこの産業にとって重要な課題である。

高温超電導体Bi-2223線材は現在市販されており、研究室施設や現場のエンドユーザ機器に使われている。1.4 kmまでの長さの高性能なBi-2223 HTS線材が商業的に入手できるようになったという昨年の大きな進歩について報告があった。日本では、機械的強度が高くバルーニングの無い高密度BSCCO線材の生産を可能にする新しいプロセスが既に開発されている。米国で生産されているBi-2223線材でそれに匹敵する性能が報告されている。米国、日本、中国及びドイツは線材製造設備を持ち、これらにより現在世界市場で線材が供給されている。これら設備は今後数年に渡って更に拡大されることになると思われる。また各種用途で現在実地試験が行われており、その有用性が実証されている。Bi-2212バルクは電流リードとして商業利用されており、また、抵抗型限流器のコンポーネントとして成功裏に試験を終えている。現在行われているこの技術実証において、超電導コンポーネントをグリッドに組み込むこと及び極低温冷凍を適用することについても、これが可能であることが実証されている。

会議参加者は、第二世代(「2G」)YBCO被覆導体線材の性能(長さ及び電流密度)の進歩に関する情報交換を行った。現在、プロセス・スケラビリティに対する取組みが行われており、その結果100 A以上の臨界電流を持つ100メートルの長さの多数の被覆導体の連続的な製造が報告された。日本では被覆導体を開発するための新5ヵ年国家プログラムが2003年度に始まった。このプログラムの目標は、臨界電流が300A/cm-w以上の500 m YBCO線材を2007年度までに開発することである。目標生産コストは70~100ドル/kAmである。今までのところでは日本は、長さ-I<sub>c</sub>の積が13,000 A-m以上の線材を製造している。米国は100 mプロトタイプ「2G」線材を使って10,000 A-m以上の記録を達成した他、電流密度でも、10 mの長さのBSCCO線材のチャンピオン・データと同等の記録を達成している。米国の目標は、100 mの300 A 2G線材を2006年度までに作ることである。被覆導体は超電導における更なるコストダウンに対する有望な解決法である。今後数年間を考えると、5年以内には、被覆導体線材によりHTS市場が拡大し、これらの新しい市場で被覆導体線材が徐々にBi-2223線材に取って替わる商業的な「クロスオーバー」点に近づく可能性がある。

MgB<sub>2</sub>線材は、開発が進められているものの中では最も新しい超電導材料である。長尺線材に向けての進歩が報告された。ヨーロッパでは商業化に向けて新しい会社が数社設立されている。米国は、その有望な経済性と共に、キロメートル長の線材を報告した。

## Recommendation

LTSにとっての次の大きな目標はITERである。医療市場での成長が持続しても、ヨーロッパのLTS市場をドライブしているLHCが終了した後の需給ギャップを埋めることはないだろう。現在、世界のLTSの生産能力は実際の市場需要よりも大きい。ITERはこれを補うものと予想されている。電力用途でのHTSの現在の標準はBi-2223線材である。電気グリッド技術のシステム面での開発を進め、また、船上などの厳しい条件での信頼性を確認するためには更に実証試験が必要である。超電導によるインフラストラクチャー改善から得られる社会的恩恵を最大限にするためには、国内及び国際プロジェクトに対する強い政府支援の継続が不可欠である。ISISの枠組みの中で、将来のLTS及びHTS線材市場に関する有益な意見の交換が継続して行われることを期待する。

## 電力

### Opportunity

電力は長い間、HTS技術を使用する機会がある最も重要な分野の1つとみなされてきたが、これにはいくつかの理由がある。総電力需要は世界中で着実に増加し続けている。電力消費量は国内総生産に密接に関連している。しかし送電に利用可能な土地は、資源として不足している。これは電力需要が集中する過密化した都市地域に特に当てはまる。国によっては、また大都市圏地域によっては、電力需要の増加が老朽化した電力網インフラストラクチャーの能力を超える危険性がある。

これらの要素に鑑みて、専門家達は送電網の能力、信頼性、効率及び制御性を改善する新しい技術が緊急に必要であると考えている。これらの新しい解決法が地域に受け入れられたり商業的に成功するためには、従来の場合よりも物理的に小さな面積の土地で全てをまかなわなくてはならない。これは先進国世界の全体が、土地利用や環境問題に対してより敏感になってきているためである。近年、いくつかの国は大規模な停電を何回か経験している。これらの出来事により、経済的観点とセキュリティの観点の両方から新しいグリッド技術ソリューションを実行することの重要性への認識が高まってきている。

## 進歩、マイルストーン及び課題

ISIS-13会議参加者は、現在行われている広範囲な電力関連のプロジェクトと活動に関する情報交換を行った。これらの取組みは、HTS線材及び技術における最近の進歩を上述されている問題に対する実用上実施可能な解決法として適用することを目指している。

現在世界的な規模で行われているか、又は計画されているいくつかのHTS配電ケーブルの実証プロジェクトについて詳細なプレゼンテーションが行われた。ヨーロッパで行われている短期実証プロジェクトに加え、3つの大規模なHTSケーブル実証が昨年、米国で正式に立ち上げられた。これらのプロジェクトは国際的なチームにより支援されている。これらの3つの実証プロジェクトは、オハイオ州コンバスでの13.2 kV、200 m、3 kA「3軸」送電ケーブルプロジェクト、ニューヨーク州アルバニーでの34.5 kV、350 m、800 A「トリプレックス」ケーブルプロジェクト及びニューヨーク州イーストガーデンシティでの138 kV、660 m、2.4 kA送電ケーブルプロジェクトである。後者はこれまでに世界で行われた中で最も大規模なHTSケーブル実証である。日本では現在、電力中央研究所横須賀サイトにおいて、大規模な77 kV、500 m、1 kAの単相HTSケーブル実証の後期にある。これらのプロジェクトの重要な技術面には、ケーブル曲げ、加熱・冷却サイクルに必要とされるケーブルの膨張と収縮の調整、及び冷却システムの稼動の問題等がある。これらのプロジェクトやこれら以外のHTSケーブルの実証プロジェクトは、商業化のために不可欠な役割りを果たすことになるであろう。このような実証プロジェクトは、HTSケーブルの信頼性を確かなものにし、グリッドへ組み込む場合の問題の解決を促進するための手助けとなる。従ってこのような実証プロジェクトは、実用化に向けた問題解決のためHTSケーブルが広範囲にユーザーに受け入れるという面できわめて重要な役割りを果たすであろう。

モータ及び発電機についても幅広い報告が行われた。日本は、20万 kW級の発電機に必要な基本的な高電流密度技術、及びより規模の大きな60万 kW級の発電機に必要な技術基盤を確立した。開発プログラムはその所定の目標を達成した後を終了した。

米国において昨年は、超電導ダイナミック同期コンデンサー、即ち「SuperVAR」の試験に成功した。輸送目的の超電導回転機械装置における最近の開発成果も考え合わせれば、この装置は、グリッドの信頼性や電力品質の問題に対する新しい種類の解決法たりうる。このプロトタイプは来年、テネシー溪谷開発公社(米国南東部)のグリッドでテストを行う予定である。

ヨーロッパではシーメンス社がBSCCO 2223線材の巻線を有する同期モータ/発電機の開発に着手した。コンパクトな超電導モータの適切な用途は、主として、船舶上や石油プラントホーム上などでの省スペース・省エネ機械を必要とする用途である。この技術はガスタービンにも適しており、ギアボックスを必要としないでタービンに直接接続できる非常に高速な発電機の製造を可能にする。400 kWモータの実証は3年以上に渡って非常に良好に行われ、これにより将来の顧客にその存在が気にならない冷却システムのコンセプトを証明した。現在、4 MVAモータ/発電機のプロトタイプの

製造が行われている。HTS発電機は、船舶上や石油プラントホーム上で要求に応じた柔軟なエネルギー供給を可能にする非常にコンパクトで軽量なガスタービン駆動式装置の実現にも繋がる。

超電導体は、これまでエネルギー貯蔵として2つの形態で使用されてきた。つまり低摩擦フライホイールにおける運動エネルギー貯蔵とSMES装置における真の電力貯蔵である。日本も100 kWhフライホイールシステム用の超電導ベアリングの開発に焦点を合わせてフライホイール開発プログラムを実施している。小規模システムで機能性を確認するための試験が現在行われている。

また、日本はSMES技術の開発において、特により高温で作動する、より低コストでより高性能なSMES技術の開発にも焦点を合わせている。このようなシステムは大型電力システムを安定化させ、連続的な負荷変動を補うために使用されることになろう。日本は、2004年度にSMESシステムのコストダウンとモデルコイル作動試験を完了した後、次世代(HTS)SMESシステム技術と実際のグリッドに設置される完全なLTS-SMESシステムの実証を目指した新4ヵ年プログラムを開始した。このような取組みは、産業ユーザー及び電力会社に影響を与える瞬時電圧低下問題を解決するために、これまで数年間、小規模な低温システムに適用されてきたSMESの適用範囲を拡大する可能性を生み出す。

電流制御装置は、依然として熱心な商業的関心の焦点であり続けている。需要が高まり既存のネットワークで送るべき電力が増加し、より多くの発電機が既存のネットワークに接続されているので、グリッド運用者によっては、従来の遮断機器の定格ぎりぎりか、またはそれを上回る障害電流レベルに直面している。限流器(FCL)は、既存のグリッドが遮断機器の大規模な交換や性能向上を必要としないでこれらの高まる需要を満たすことができるようにする上できわめて重要な役割を果たす可能性がある。このような装置は、より広範囲な電力運用上の問題を解決するために、よりコンパクトでよりコスト競争力のあるHTSケーブルを設計する上でもその実現に向け重要な役割を果たす可能性がある。

日本は大きさ10cm×30cmで臨界電流密度100万A/cm<sup>2</sup>以上の超電導膜を形成する技術の開発、限流素子の直並列接続による6.6kVの高電圧化技術および1kAの大電流化技術の開発、限流器用超電導機器の研究開発に取り組んでいる。

ヨーロッパでの最近の進歩には、北ドイツにあるRWEの変電所で稼動した12 kV 10 MVA FCLのデモンストレーションが含まれる。これは、公営グリッドに組み込まれたFCLの先行的デモンストレーションとしての初めての成功例である。このFCLはバルク材料を使って製造されているが、薄膜手法によりAC及びDCの両用のFCL装置が技術的に可能になるであろう。100 kAの固有障害電流を1ミリ秒以内に約1 kA(公称電流付近)に制限した1 kV 1MVA DC限流器の再現性のあるテストは非常に印象的である。概して、セラミック基材に基づくスイッチング素子は、経済性も考え合わせれば電力システムのニーズに対応できないと言える。第二世代導体が利用可能になると、超高速薄膜FCLの可能性が大幅に高くなる。

変圧器も現在評価されている。2003年度、日本は日本国内で一般的に使用されている配電用変圧器の部分モデルとして66kV/6.6kV 2MVA単相変圧器を試作、工場試験を実施し良好な結果を得た。

これらの用途のすべてが、公益性の高い研究開発に対する今日の緊縮財政状況の下、重大な問題に直面している。更に、送電部門に対する規制体制が現在変わりつつあることにより、投資が極めて不透明である状況が生まれている。これは特に米国の場合に当てはまり、米国では発電事業者、送電事業者及び配電企業の役割りは変わりつつある。最近までグリッド信頼性に対する責任を定めた明瞭な法的強制力のある規則はなかった。その結果、送電とグリッド関連の研究開発の両方の投資が長期に渡り低調であった。これにより新しい解決法に対する需要がいよいよ高まり、今日の土地利用及び環境的価値に合致した形でコストと性能の目標を達成する新技術の「チャンス」が広がってきた。

## Recommendation

超電導体の電力応用技術に向けた開発は、世界中の電力部門の大幅な構造改革の時期及び電力研究開発に対する公的資金提供の一般的な減少傾向の時期と一致してきた。産業界で構造改革が行われているにもかかわらず、電力は現代の経済においては依然として生活の不可欠な基盤である。電力産業、特に配電部門は、今後とも強い規制を受けるものと考えられる。規制を受けている電力会社は伝統的に新しい技術による解決法に対しては保守的な態度を取ってきたが、業界は緊急なニーズに直面している。政府の規制・財政政策は、これらの新しい技術が採用される速度に影響を与え、また、これを加速する可能性がある。

世界中の国々が抱えているエネルギーと配電の大きな課題及び超電導グリッド技術に固有な前提条件に対して、各国政府は、開発、展開及び商業的受入れに対する障害を取り除くために何段階かのステップを踏むことができよう。ISIS-13サミットの参加者は、規制政策や研究開発予算に対する責任を負う政府機関に対してトータルとしてそれらの政策の影響を調べることを希望する。各国政府は、技術実証の取組みに対してよりロバストで予測可能な複数年度に渡る資金提供を行うことが可能であろう。規制改革は、グリッド過密や信頼性の問題に対する技術解決法の真の価値をより明瞭に示すことを目指すことが望ましい。料金改革を含む刺激策、資産減価償却計画及びその他の税法改革も、改革的な解決法の採用を促進するのに役立つかもしれない。

## エレクトロニクス

エレクトロニクスにおける超電導の応用には受動部品と能動素子の両方が含まれる。フィルタなどの受動部品は、主として無線通信基地局を対象として、サービスエリアの拡大、能力の強化及び通話品質の改善を目的として製作された最初のHTS装置の内の1つである。従来のフィルタシステムに対して高性能レベルなHTS系レシーバフロントエンドは、小型化及び軽量化されているため、衛星用途及び軍用途への拡大も検討されている。HTS受動素子の市場用途は、これまでは主として急成長している商業用無線(携帯電話)に焦点を合わせてきた。

能動超電導素子は、単一磁束量子(SFQ)回路を基礎としている。SFQは、2値論理の「0」と「1」の状態を定義するために超電導の量子特性を利用する超電導体系論理回路である。超電導ジョゼフソンジャンクション(JJ)同士は、結合して、論理回路の基礎要素である超電導量子干渉素子(SQUID)を形成する。JJ素子はスイッチングタイムが非常に速く、半導体のボルト単位に対してミリボルトのレベルで作動し、電力はほとんど消費・散逸しない。LTS SFQ素子は、シリコンの3 GHzに対して100 GHzの速度を達成するポテンシャルを持っている。他方、HTS SFQ技術では理論的にはTHz速度を達成できる可能性がある。論理回路は、使用価値が非常に高いマイクロプロセッサやデジタルシグナルプロセッサ(DSP)チップの基礎をなすものである。高速マイクロプロセッサは、サーバ、ワークステーション及び高性能ビジネスPCには不可欠なものであり、他方、高速DSPはデジタル通信には本質的なものである。従って超電導SFQ素子は、現行の半導体システムの理論的限界をはるかに超えた性能をもたらすことができるかもしれない。

### 進歩、マイルストーン及び課題

無線通信基地局用のHTSレシーバフロントエンドシステムは現在、米国、日本、ヨーロッパ、中国及び韓国で、開発又は少数の会社により商業生産が行われている。目標とする性能が既に実証され、4,000台以上が主として米国の商業用無線(携帯電話)ネットワークで既に稼働している。信頼性と性能が実証された、より低コストの製品に対する要求を満たすことは継続的な課題である。

米国では、JJ素子に関連したほとんどの仕事はこれまでは、米国国防総省により資金提供された小企業と大企業で行われてきた。ヨーロッパではこの活動は、主として学術機関及びこれらの研究機関と強い結びつきがある外注企業により行われており、又非常に少数の民間企業でも行われている。逆に日本では超電導デジタル技術は、大学及び産業界との密接な連携で開発を行うISTECにより技術的に推進されている。研究開発が基本的なものであるということと商品化までに長い時間がかかる可能性があるために、すべての場合にそれぞれの政府から資金提供を受けている。LTSとHTS SFQの両方の技術における大きな課題は素子加工である。ニオブ系システムの研究を数十年間も行った後でさえ、大面積である多層の材料を作り、数十万の小さな統合SQUID素子を組み込み、又厳しい均一性の仕様を満たし、しかも歩留まりを上げるという課題は極めて困難なものである。HTS技術の実行面での課題は更に大きい。それにもかかわらず、究極的には利

点があるために引き続き大きな努力が必要である。世界の代表的なプログラムは日本で行われている。「超電導ネットワーク素子プロジェクト」は、経済産業省の「ITインフラストラクチャー高度プログラム」の一環として2002年度に始められた。このプロジェクトの下で、5か年のLTS素子開発プログラムが2002年度に始められ、2003年度には、A/Dコンバータ及びサンプラー技術に関する4か年のHTS素子開発プログラムが始められた。これらのプログラムには、超電導装置の設計・製作技術に対する研究開発が含まれている。超電導ネットワーク装置に必要な基礎技術は2006年度までに確立される計画である。プログラムの現状としては、6層ニオブ構造、10,000個規模のJJのインテグレーション、及び10 GHz以上で作動する回路が既の実証されている。100個規模のHTS JJを組み込んだ回路も既の実証されている。統合戦術無線、スイッチング及びコンピューティングのためのLTSデジタルエレクトロニクスにおける大きな取組みも、米国では既に1988年に1億ドルを超える資金提供総額で開始されている。資金提供支援は1990年代後半に減少した後、過去2年間は再度増加してきている。

## Recommendation

通信トラフィックの量は以前の予想よりも早いペースで増加している。このような成長の要求を満たすためには、超電導ネットワーク装置の早期商品化が早急に求められる。このような状況では、潜在的ユーザーに超電導ネットワーク装置技術を実際の用途に採用するように促すために、製作技術を開発し、プロトタイプシステムを実現し、又その高速システムの性能を実証する必要がある。これらの目標を達成するためには、継続した政府の強力な支援が不可欠である。

## 高エネルギー物理学

### Opportunity

高エネルギー物理学(HEP)とそれに伴う機器の研究は、低温超電導体(LTS)磁石があって初めて実現できる。他の技術では、必要な高い磁場強度を得ることはできないし、磁場を正確に制御することもできない。従って、すべての粒子加速器でNbTi及び/又はNb<sub>3</sub>Sn磁石が使用されている。HEPにおいては世界中で新しい装置や性能を向上させた設備に対する需要が引き続きあるために、今後も十分に成長を続けていくものと予想されている。現在承認段階の最中にある最も大きい単独のチャンスは、核融合エネルギーのコンセプトの実証と開発のための国際熱核融合実験炉(ITER)である。ITERは50億ドルのコストがかかるものと予想され、又最終報告書によれば517トンのNb<sub>3</sub>Snと244トンのNbTiで合計6億5000万ドルのNb系材料が必要になるものと見込まれる。

## 進歩、マイルストーン及び課題

2003年9月のISIS-12以降、HEPにおいては国際的にも国家的にも大幅な進歩があった。LTS材料の品質は、非常に厳しいITER仕様により後押しされて継続して大幅な向上を示してきており、又商業生産能力も拡大されている。いくつかの国は、それぞれ約5億ドルのレベルでITERプロジェクトへの資金提供を既に約束している。ITERの現在の大きな課題はその物理的な場所である。可能性のある用地は2ヶ所に絞られてきている。日本の六ヶ所村への立地は日本、米国及び韓国に支持されており、一方、フランスのカダラッシュへの立地はEU、中国及びロシアに支持されている。立地についての行き詰まりは2005年に解決されるものと期待されている。

国際リニアコライダー(ILC)プログラムに関する発表が最近行われた。この発表はILCが“Cold”になるというものであったが、これは約2万個の高純度ニオブ超電導RFキャビティが必要になることを意味する。この事業のスケジュールは、米国エネルギー省科学局20年計画部門によれば、中期的なものである。

米国では高純度ニオブ超電導RFキャビティを使用した「核破碎中性子源(SNS)」プロジェクトの建設が現在順調に進められている。SNSプロジェクトは、エネルギー省科学局により建設される最後の大型施設である。しかしエネルギー省は2003年11月、実質的にHEP及び核融合エネルギープロジェクトのロードマップとなる20ヵ年科学開発プランを発表した。このプランでは28ヶ所の新しい大型科学研究施設の優先順位が設定されている。これらのプロジェクトの中で主要なものとしては、希少種同位体加速器(RIA)及びトマスジェファソン研究所での期待度の高い12GeVのCEBAFへの性能向上があがっている。

もう一つの課題はHTS技術を利用した将来の核融合反応炉である。YBCOの上部臨界磁場強さはニオブ系LTS材料の場合よりもっと高いことが既に示されているので、この特長は将来の核融合のための非常に強力な磁石を含め、期待できる新しい用途への扉を開くものとなる可能性を秘めている。ITERの建設に必要な国際的な取組みと平行して性能がより高い超電導材料を開発すれば、将来の商業的核融合反応炉の実現を容易にすることができる可能性がある。

## Recommendation

各国政府は、主要な科学プロジェクトの重要性と国際的な性格を認識し、優先順位設定、資金提供認可及び国際協定履行に向けて迅速に動くことが望ましい。用地選定も非常に重要であるが、同時に、関係する政府機関は、プロジェクトにゴー・サインを出す場合にはHEPの「国際的」側面を認識することが望ましい。

### Opportunity

MRIの市場は年間8～10%成長するものと考えられている。これは、臨床応用が拡大したこと（例えば、機能的なMRI及びMRIガイダンス・イメージング）や、継続した技術進歩によりシステムが高性能化、小型化、効率化及び低価格化したことによる。超電導体と低温工学の両方の進歩は、より強力なNMR分光システムを可能にしている。より高性能なNb<sub>3</sub>Sn及びBSCCO-2212超電導体も、高エネルギー物理学分野で宇宙の基本的理解を進める高磁場・高エネルギー粒子加速器を実現するための道を開いている。

### 進歩、マイルストーン及び課題

設置されたMRIは現在、システムの数が増え2万台を超えており、また、現在の課題はヘリウムの使用量、機器のサイズ及びコストを引き続き安価にし、同時に性能（磁場）を上げることである。日本は改善されたNb<sub>3</sub>Snを使用して930 MHzでNMR分光を実現した。又1 GHz 以上へ向けた課題については、現在開発中の更に性能の高い導体を使用し、積極的な取り組みが行われている。超電導磁石で記録的な25 Tを達成した高磁場インサートマグネットでBSCCO-2212 テープが使用されたことがその例として挙げられる。HEPのための新開発Nb<sub>3</sub>Sn線材は、12 Tで3000 A/mm<sup>2</sup>を達成し、世界記録の16 T双極子磁石を可能にした。ITERは建設が今にも行われる段階にある一方で、用地選定における新しいレベルの国際協力の課題に直面している。もう一つの大きな課題が、コストと性能の目標を維持しつつ世界のNb<sub>3</sub>Sn 生産速度を1桁上げることである。導体の高磁場性能を改善し、特にHTS材料のコストを下げるための取り組みが引き続き行われるであろう。潜在的に非常に低コストの超電導体MgB<sub>2</sub> はこれまでに急速に特性改善が図られ、その結果、長尺と有用な電流密度を達成している。

### Recommendation

NbTiとNb<sub>3</sub>Snを使用した現在のLTSの市場は、商業的価値と将来の見通しの間の確固としたバランスを示し続けている。LTSが特にMRIとNMR分光の重要性の高まりを通して超電導体市場と公共の福祉に大いに貢献し続けることは明らかである。これらのLTS材料が高エネルギー物理学と核融合科学・技術における将来の進歩を可能にするためには、引き続き支援を必要とする。継続した政府資金提供は、NMR、高エネルギー物理学及び研究所用途のためのより高磁場な超電導磁石性能を実現する大きな見込みのある、より新しいHTS材料にとって特に重要である。政府支援はこれらの材料の新しい用途のためのパートナーシップを可能にし、育てるためにも必要なものである。ITERのような大規模プロジェクトを可能にするには新しいレベルの国際協力が必要であ

る。

## 輸送

### Opportunity

世界中の輸送インフラストラクチャーは、これまでよりも多くの人と商品を移動させ、かつそれを費用効率が高く環境的に受け入れられる方法で行う必要があり、このため、空路、海路及び陸路において大きな課題に直面している。超電導体技術を使えば、効率を改善し、又輸送システムの物理的に占有すべき土地の面積を小さくすることができる。陸路輸送の場合には、電力が高速輸送サービスを引き続き利用可能であることを確実にするための道を提供する。海路では、HTS船舶推進モータにより、小型化と軽量化、効率改善、低ノイズ化及び有効貨物スペース増加という利点が提供される。

### 進歩、マイルストーン及び課題

会議参加者は、輸送分野においてすでに達成され、課題として残っている数多くの重要な事項に関する情報交換を行った。日本はLTS-MAGLEV技術を開発するための取組みを続けている。MAGLEVシステムで使用するための新しいHTSレーストラック型超電導磁石も開発され、この磁石の優れた性能が2003年度に実証された。ドイツでは1 MVA HTS鉄道変圧器が既に試験されているが、この変圧器は、最高45%まで重量と体積を削減し、同時に、地域列車などで使用できる可能性のある変圧器についてその効率を93% から99% 以上まで引き上げた。昨年米国においても船舶推進のHTS技術分野で著しい進歩があった。最近、米国海軍研究所はフロリダ州立大学の高度電力システムセンターにおいて、100% 負荷条件下の5 MW HTS船舶推進モータの試験を行い成功した。この試験は次世代の米国海軍戦闘用艦艇に適切なHTS船舶推進システムの実証を目指した開発プログラムにおける重要なマイルストーンである。また、このプログラムは広範囲な商業用船舶用途に適合した技術へも波及効果を持つものと期待されている。

### Recommendation

大規模輸送プロジェクトは大きな公益性を持つが、その性格により高い開発コストと長い開発期間を必要とする。従って、これらの初期の実現可能性実証期間においては、これらのプロジェクトがきちんとした形で、かつ、費用効率が高い方法でその目標を実現することを確実にするため、継続的で多年に渡る政府のコミットメントと支援が必要である。

## 超電導に対する政府資金提供(1995年～2004年)

### 要約

日本、ヨーロッパ及び米国における過去10年間の政府の資金提供を調べるといくつかの傾向が明らかになる:

- ・ 研究レベルとプロトタイプ実証の両面で技術的成功の実証をしてきており、これまで大幅な進歩が見られる。
- ・ 超電導体をベースとしたシステムの稼動がもたらす大きな恩恵が実証されているにもかかわらず、また、技術が開発の中で最もコストのかかるプロトタイプ実証段階に向かって進んでいるという事実があるにもかかわらず政府資金提供はこれまでに確実に減少してきている。
- ・ 資金提供は、より一般的な研究開発の調査から特定用途に明確に焦点を合わせた実証プロジェクトへと既に比重が移ってきている。
- ・ 資金提供削減によるこれまでの全体的影響は、大幅なプログラム削減であり、その結果、能力の高い人材を有する先端超電導産業でのレイオフや損失、小規模ベンチャー会社の閉鎖があり、また、超電導技術により利益を生み出す時間が必要以上に先に伸びた。

この議論には含まれていないが、中国と韓国においても同様に大規模で急速に拡大する超電導に対する取組みが過去5年間に渡ってなされてきているようであり、これらの2つの国の超電導に対する関与のありかたを見ることも興味深いものがある。

### 日本

新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の新エネルギー技術開発部により管理されている1988年度から2004年度までの超電導研究開発予算が提示された。これは日本政府が超電導に対して行った全支出のうちの大きな割合を占めているが、これは電力とエレクトロニクス用途の

研究開発に割り当てられた予算に対して大きく焦点を合わせており、他部門の予算は含んでいない。しかし、NEDOの支出は、プログラムセグメントの重要性、資金提供の傾向及び将来の方向をうまく示している。また、これは時間軸から見てもよい描像である。

過去10年間に超電導に対するNEDOの予算は、合計約626億円に達している。材料とデバイスの開発は314億円で総額の約半分を占めている。残りは主として以下の大型プロジェクトに向けられた。発電機：124億円、SMES：87億円、フライホイール：39億円、及び交流機器：62億円。過去の研究開発は広範囲な機器を対象としてきたにもかかわらず、用途によって研究が既に完了しているものもある。1988年度～2003年度の間、フルモデル70MW LTS発電機等に約312億円が投じられた。この発電機は1500時間の連続運転を実証した。また、200 MW及び600 MW発電機に対する研究開発でのコストダウン検討を行った後、このプロジェクトは終了した。フライホイールプロジェクトは2004年度に完了する予定であるが、ケーブル導体、FCL及びHTS磁石の開発プログラムも同様に完了の予定である。逆に線材と素子に対する関心は強く、第二フェーズ(2003年度～2007年度)に入り、2003年度と2004年度に71億円程度の予算がついている。このプログラムの焦点は、より効率が良く、より長く、より安価なYBCO線材を開発することであり、また、LTSとHTSの両方の材料でより大規模な単一磁束量子(SFQ)素子を開発することである。同様に超電導電力貯蔵(SMES)プロジェクトは新しいフェーズ(2004年度～2007年度)に入り、2004年度は7億円のレベルで資金提供を受けた。新しいSMESプログラムは、完全なSMESシステムの性能を実証し、又HTS SMES技術を開発することを目指している。

## ヨーロッパ

ブリュッセルの欧州連合は、超電導に対しては特定の専門プログラムは持っていないが、様々なプログラム分野内で超電導に対して若干の限られた資金提供を行っている。超電導における主要なプロジェクトはこれまでは常に、主としてドイツ、イタリア、スペイン、オランダ及びイギリスにおける国家プログラムの範囲内で資金提供が行われてきており、また、他のEU諸国内でもそれよりも小規模に行われてきている。しかしイタリアは例外として、これらの諸国のほとんどで政府が大幅に支援を削減している。例えばドイツでは、過去5年～10年に渡る工業開発プロジェクトに対する年間政府資金提供は500万ユーロ～1000万ユーロの間であったが、これは2006年までに段階的に廃止される。このようなことが、プロトタイプ開発・実証のためのより大きなコストに対応して資金規模を増やす必要がある重要な時期に発生している。国の研究所に対する資金提供は現在のところ引き続き安定している。カールスルーエ研究所では、高電流導体とデモンストレータの開発に対して年間100万ユーロが、また、核融合に対して年間150万ユーロ(EURATOMを通して)が予算に計上されている。但しこれはITERの将来に依存している。

欧州委員会による6つのHTSプロジェクトへの資金提供は、1998年～2002年の間に「フレームワークプログラム」の下で行われてきた。これは620万ユーロの規模であり、参加者による50%のコスト分担も必要であった。2003年～2006年のフレームワークプログラムの範囲内で、今日までに930万ユーロが4つのプロジェクトに与えられた。又その他の提案も準備中である。資金提供されるプロジェクトは次の通りある。短尺YBCO送信ケーブル(Nexans社)へ250万ユーロ、ホウ化マグネシウム

超電導開発プログラム(トゥウェンテ大学)へ250万ユーロ、2G超電導開発(Trithor社)へ200万ユーロ、また、同様の金額がTrithor社をリーダー会社とした25T磁石の開発に与えられた。

欧州委員会はまた、上記フレームワーク・プログラムの継続期間中に200万ユーロの予算レベルで超電導エクセレンス・ネットワーク(SCENET)にも資金提供を行っている。以前のフレームワーク・プログラムの継続期間は1996年～2001年までであり、現在のプログラムの期間は2002年～2006年である。SCENETは約65の大学と研究センター及び25の生産会社が参加し、夏期講習会、若い研究者の交換会、ワークショップ及びワーキンググループといった面で活発に活動しており、超電導の素晴らしい部分をさらに際立たせ、新しいプロジェクトをガイドしていくことを目指している。

ヨーロッパ全体での資金提供がかなり断片的であるために、政府支出の合計を定量的に評価するのは困難である。しかし推定によれば、約1億5000万ユーロの資金が1998年～2003年の間に提供された。この金額の内、約4300万ユーロつまり29%が材料開発に使用された。

## 米国

1994年以前は、歴史的な米国政府の超電導に対する資金提供に関する情報のほとんどは、集められて、「連邦政府超電導研究プログラム」と題した報告書で発表されていた。しかしそれ以降、米国エネルギー省(DOE)以外では、超電導という項目では集計されてきていない。従って過去10年間に渡るHTS研究に関する情報は複数の情報源からの発表情報に基づいており、それらの数字は良い推定値であると思われる反面、それらの正確さを確認することはできない。いくつかのプログラムが集計からみれば全体的な数字は低くなる。逆にDOEの数字は、「イヤマーキング」として知られているプロセスのために超電導プログラムの実際の支出を反映しない承認済み段階での予算の数字である。つまりこのイヤマーキングでは、個々の議員が超電導予算の約35%までを超電導には関係ない自分の地元選挙区でのプログラムの資金提供に向け直してしまう。

過去10年(1995年～2004年)に渡り、米国政府の超電導に対する資金提供は、主として国防総省(DOD)、エネルギー省(DOE)、国立科学財団(NSF)、商務省(DOC)及びNASAから行われてきたが、その総額が約11億ドルに達した。この期間の大きな予算は、DOD(約3億5000万ドル)、DOE(約3億ドル)及びNSF(約1億7000万ドル)である。1990年代前半においては米国連邦政府の予算は年間約1億4000万ドルであった。しかしこのレベルは、1990年代後半及び2000年代前半において全政府機関で着実に減少し、現在は年間約9000万ドルである。唯一の例外は2003年と2004年の両年におけるDODの予算の増額であり、これは米国海軍の船舶推進プログラムからのものである。このプログラムでは2003年と2004年の年間予算総額のレベルが約1億1000万ドルに引き上げられた。1つの明らかな傾向は、予算がより基礎的な研究開発から製品開発・実証プロジェクトへ移動していることである。2004年は米国政府の全予算の約半分が、米国エネルギー省の超電導ケーブルプロジェクトと米国海軍の電気船舶推進プログラム(2006年に完了予定)のわずか2つのプログラムに向けられた。