

超電導技術はすでに医療の現場で磁気共鳴イメージング（MRI）装置として身近に使われていることは周知のとおりである。また，一般にはあまり知られていないが，シリコンの良質な単結晶を成長させるために超電導磁石が使われている。これは産業への適用例の一つである。このように，超電導技術は直接・間接的に徐々にわれわれの生活に浸透し始めている。

11年前に高温超電導体が発見されたことも刺激になり，従来の低温超電導の開発も活発に行われている。特に，最近技術進歩の目覚ましいものとして，この特集で紹介している直冷式超電導磁石は，超電導応用にとって画期的なもので，今後大きな広がりをもつものと期待している。

ここでは，エネルギーからエレクトロニクスまで，超電導技術開発の現状を応用の観点から概観するとともに，当社の超電導技術開発への取組みの実績の一端を紹介する。

The application of superconductivity technologies in the medical field is already well known. Superconducting magnets are also being used for growing high-quality silicon single crystals. This is one of the examples of the industrial application of superconductivity, illustrating the fact that superconductivity technologies are now permeating daily life. Conductive-cooled magnet systems have been developed which make it possible to eliminate the use of liquid helium, and these are strongly expected to open up widespread applications.

This paper provides an overview of applied superconductivity technologies encompassing fields from energy to electronics, and describes Toshiba's activities in this area.

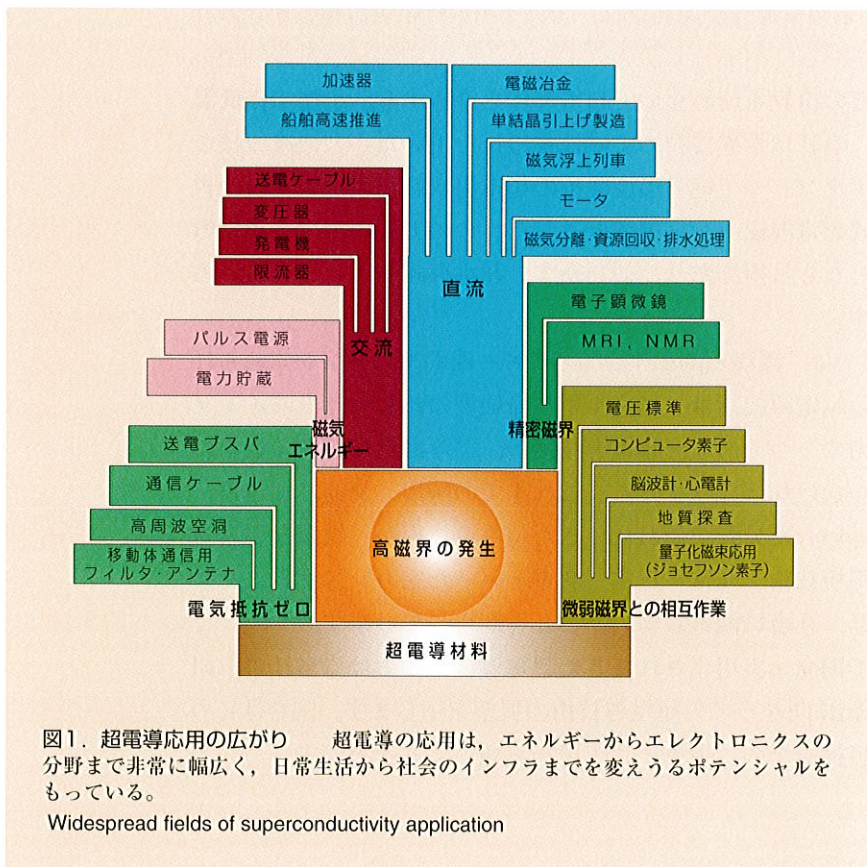


図1. 超電導応用の広がり 超電導の応用は，エネルギーからエレクトロニクスの分野まで非常に幅広く，日常生活から社会のインフラまでを変えうるポテンシャルをもっている。

Widespread fields of superconductivity application

■ 着実に実用化が進む超電導 応用

「21世紀にも安全・快適な生活を維持するためには，資源に乏しいわが国において活発な産業活動は不可欠で，この社会的な要請を一つの技術への挑戦と考へて，大きな技術革新の導入を考へる必要がある。この課題に対する技術的な解決策として，電気工学の分野において一つの可能性として考へられているのが，超電導技術である」というのが，昨年電気学会の会長に就任された正田東大教授の就任演説の一節である⁽¹⁾。

超電導技術の実社会への適用が，特に高温超電導体が発見されて以来とりわけ熱い期待となって現れてきている。超電導のもつ応用の広がりを図1に示した。

86年に高温超電導体が発見されてから11年が経過した。91年に東芝レ

ビューで超電導特集を組んでから6年が経つ。この間に、超電導技術者の地道な努力により、堅実に低温・高温ともに応用分野は広がり、すでに実用化されていたり、実用化にはいまだ至っていないものも、その可能性の確度は着実に高いものになってきている。当社は、60年代から超電導の研究を開始した。当時ヘリウム液化機を設置したのはわが国で3番目、民間企業での設置は最初という輝かしい歴史をもっており、以後脈々とその技術は受け継がれ、研鑽（さん）されて今日に至っている。最近の成果を、昨年3月に開催された“東芝技術展”で展示し、多数の方々に見ていただいた。

ここでは、超電導技術とその応用について、現状を概観するとともに、当社の現状を紹介する。

産業としての超電導 (予測市場と政府関連研究予算)

電力ロスのない超電導現象が各種機器に適用され社会に浸透すれば、社会に新しい環境調和型エネルギーインフラが形成できる。また電子デバイスの面からもSiをベースとした現状から大きなブレークスルーが図られることは周知のとおりである。

超電導産業という観点から市場を眺めるとどうなるか。ここでは超電導に取り組んでいる、米国、欧州、日本の産業グループの集まりである国際超電導サミット(ISIS)が予測している今後の市場を紹介する。ISISを構成するのは、米国では“超電導関連米国競争力評議会(CSAC)”，欧州は“超電導利用のための欧州企業連合(CONECTUS)”，そして日本は“国際超電導産業技術研究センター(ISTEC)”で、それぞれの国の有力な超電導企業が参加している。

96年に日本の山梨で開かれたISIS-5では、現在世界全体で年間5,700億円程度の超電導市場が2020

表1. 日米の超電導関係開発の国家予算
Government funding for superconductivity development in Japan and U.S.A.

日本		
	平成8年度(予算額)	平成9年度(要求額)
通商産業省	10,757	11,309
科学技術庁	3,451	2,753
文部省	1,261	1,175
運輸省	4,540	4,075
郵政省	126	135
合計	20,135	19,447

単位：百万円

米国		
	93年度	94年度
DOE(エネルギー省)	79.3	79.4
DOD(国防省)	80.6	87.7
NSF(全米科学財団)	24.4	24.0
DOC(商務省)	5.5	5.8
その他(*)	3.5	3.7
合計	193.5	200.6

(*) NASA(航空宇宙局), DOI(内務省), HHS(厚生省), DOT(運輸省)の合計 単位：百万ドル

年には10兆円規模に発展する可能性があると予測している。なかでもエレクトロニクス市場が全体の約半分を占めると予測している。

予想されるべく大きな市場を形成するために日米政府が投入している超電導研究開発資金を表1に示した。米国は92年からほぼ年間\$200M程度の政府資金を継続している。わが国の予算は、平成8、9年度とも約200億円程度で推移している。ここからその実用化促進への強い期待感がうかがわれる。

技術としての超電導 (主に応用開発の視点から)

ここでは、線材技術、冷却技術、機器開発技術に分けて簡単に現状を紹介する。

線材技術

低温用超電導線材 直流やパルス応用機器に適用するためのNbTiやNb₃Snの製造技術はほぼ完成している。課題として残るのは、電磁氣的に安定な線材の開発である。本

来超電導線は磁気ヒステリシスをもっているため交流使用では損失が生じる。交流損失低減のために、線材は銅とニッケルの合金の母材中に、多数の超微細超電導フィラメントを配し、それらフィラメントをお互いに撚り合わせた構造となっているが、撚り合わせたために生じる電磁氣的な不安定性が課題である。

高温超電導線材 図2に現在線材化開発が行われている材料の特性を示す。ビスマス系線材の長尺化はメーカーの努力によりすでに数km程度の長尺加工が可能となったが、図2にみるように臨界電流密度や臨界磁場が不十分であり、この点での改善が強く望まれる。Bi系線材に関しては、温度20Kレベルでの運転用としてなら実用化の可能性はある。運転温度が液体窒素温度以上が可能な材料としてY系、Ti系等の材料があるが、長尺化が課題である。

MIT(マサチューセッツ工科大学)教授の籍を投げ打ってASCというベンチャー企業を設立したYurek社長の予測によれば、Bi系超電導線の製造実績の経緯とコスト

ーゲットは図3のようになり、臨界電流密度の発展は着実に進み、図4のようになる⁽²⁾。図から明らかなように、技術の進展は着実であり、高温超電導応用が可能となる時がかならず訪れるという確信をもたせてくれる。

■冷却技術

極低温・超電導技術開発者の究極の目的は、超電導機器を扱うユーザーが、極低温機器を扱っているという意識なしに機器を操作できるようにすることである。最近の数年間で小型超電導磁石に対してはこれが可能となった。すなわち、電源を入れるだけで冷凍機が作動し、冷凍

機先端（コールドヘッドと呼ぶ）がほぼ4.2Kまで冷却される。コールドヘッドと被冷却物（超電導磁石など）とを銅などの良好な熱伝導性材料で結合しておくことにより、被冷却物が4.2Kまで冷却される。これを冷凍機直冷式と呼んでいる。冷凍機の著しい発達によりこのようなことが可能となった。MRIや産業用マグネットに適用され始めている。

冷却技術に関しては、被冷却物の重さや構造により種々の冷却方法が考えられている。もっとも広く使われてきたのが液体ヘリウムに超電導コイルを直接浸す浸漬冷却法である。特に浮上式鉄道の場合は、こ

れに小型冷凍機を搭載し蒸発する分だけ冷凍機でヘリウムガスを再凝縮させている。当社が納入した核融合科学研究所の大型ヘリカル装置のポロイダルコイルのように、コイル形状が大型で複雑な場合には超臨界圧ヘリウムを強制的に超電導体内部に流し込む強制冷却方式が採用されている。

このように、適用する機器に応じて冷却技術も進展してきたが、今後は高温超電導が実用になったとしても常温使用でないかぎり、多くの機器には直冷式が主流となるだろう。さらに、可搬型の超小型冷凍機（PC：ポータブルクライオクーラとも呼べるもの）の出現が必要となるだろう。これは液体ヘリウム温度でなく、むしろ液体窒素程度の冷却温度の方が普及するように思える。超高速パソコンなどへの応用である。

■超電導応用技術

応用を(1)高磁界直流、(2)低磁界直流、(3)低磁界交流および(4)エレクトロニクスに分類する。低磁界交流は、(3-1)商用周波数運転と(3-2)パルス運転とに分ける。

一応8T(テスラ)程度で高磁界と低磁界を分けることにする。以下それぞれの分類ごとに代表的な機器の開発現状を紹介する。

分類(1)；核融合炉　日・米・EU・ロシアの4極が協力して、国際熱核融合実験炉(ITER)の建設を計画している。大型の磁石に適したNb₃Sn強制冷却超電導体を用いる。高剛性超電導体を用いた高精度巻線が要求されるので、コイル製造技術が非常に難しい。

分類(2)；浮上式鉄道　低温超電導線を使って本格的に開発しているのは日本だけである。列車走行中の振動が超電導磁石特性に及ぼす影響が課題であったが、現在ではこれを克服し、総延長18kmの山梨実験線で実用化に向けた走行試験を進め

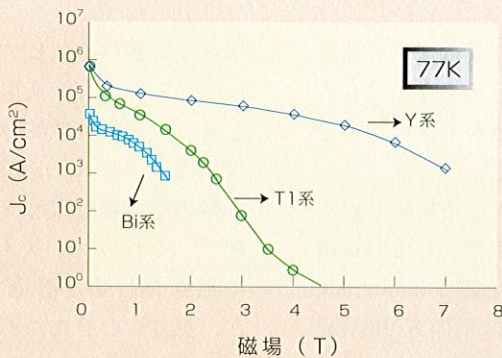


図2. 線材開発が行われている高温超電導材料の磁場と臨界電流密度Jc。線材化開発の進んでいるBi系超電導材料は磁場の増加とともに臨界電流密度の低下が激しいのが欠点。Y系の長尺線材化が望まれる。

Applied magnetic field vs. critical current density for high-temperature superconductors

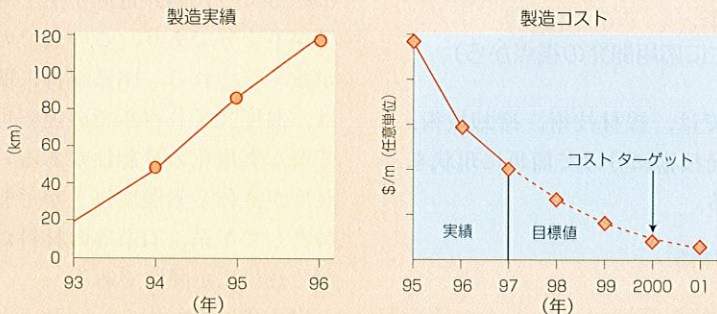


図3. 米ASC社におけるBi系線材の製造実績とコストターゲット。高温超電導線材ベンチャー企業である米国ASC社のBi系線材の製造実績。2000年におけるコスト目標を現在の数分の一にしている。

Production achievement and cost target for Bi-based superconductors

ている。

米国ではASC社が高温超電導を用いて小型モデル磁石を製作し、良好な浮上特性を得ている。

分類(3-1)：電力ケーブル 地中送電電力ケーブルを超電導化すると、電流密度が高いため、地中送電コストの大部分を占める洞道の代わりに管路で代用できるので建設コストを抑え、地下空間の有効利用を図ることができる。低温超電導でこれを実現しようとする、冷却コストがばく大となり、現実的ではなくなる。高温超電導の場合、冷却システムの効率が液体ヘリウムの場合の30倍以上改善されるので、侵入熱の影響を低減できる。日本では、東京電力(株)が中心となって開発が進められており、単相66kV/1kAで3相一括型の7m長モデルケーブルの試験が行われている。50m長の導体も製作されている。米国では15kV、30mケーブル用導体が試作されている。欧州ではSiemens社らが2mのテープ状導体を開発している。

分類(3-1)：限流器 限流器は電力系統を連結して系統間で電力を融通する際に事故点に流れ込む事故電流を超電導線のクエンチ^(注1)現象を利用して制御するものである。国内では、東京電力(株)と当社が開発を進めており、これまでに6.6kV/1kA単相限流器の開発に成功している。国外ではABB社が高温超電導を用いた限流器の開発に成功し、発電所の励磁電源でフィールド試験を進めている。

分類(3-2)：発電機 日本では工業技術院のニューサンシャイン計画の一環として進められており、7万kW級モデル機を1998年までの予定で開発することになっている。

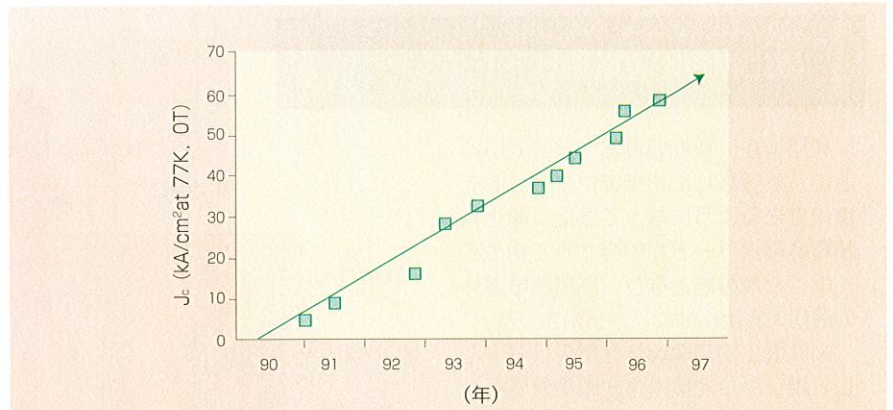


図4. Bi系線材の臨界電流密度の向上 磁場の印加がない場合の臨界電流密度は着実に向上している。臨界電流密度を決めるピンニング機構のさらなる理解と導入方法がわかれば、臨界電流密度のさらなる向上が期待できる。

Progress of critical current density of Bi-based superconductors

当社では超速応励磁型ロータを開発している。界磁コイルを超電導化することにより、発電機効率を0.5~1%向上、質量と寸法の約半減などが特長である。要素技術開発はほとんど終了し、関西電力(株)大阪発電所で最初のロータの評価試験が開始されたところである。全体システムで長期信頼性などを得るための開発が進められている。NbTi線が使われている。

米国ではDOEの資金も加え、高温超電導を用いて、2万kW、温度20K運転を目ざしてGE社が中心となって進めており、プロトタイプコイル試験が終わった。

分類(4)：エレクトロニクス 医療用として心磁計や脳磁計に使用されるマルチチャンネルSQUID^(注2)システム、NMR(核磁気共鳴装置)やMRIの受信プローブ、数10GHzのクロックで動作するジョセフソンデジタル回路など国内外で開発されている。最近では、移動体通信の発達を受けて、基地局の送受信フィルタへの応用が注目されており、

特に米国のベンチャー企業を中心に急速な展開を見せている。

このほか、前述の冷凍機直冷式超電導磁石は、高磁場・低磁場を問わず直流应用到に活発に使用され始めてきた。後続の論文にその一例を紹介している。

東芝における超電導技術

当社は60年代から極低温・超電導の研究を開始し、わが国におけるこの分野での草分け的役割を演じるとともに、事業部門と研究所が一体となって継続的に製品化の努力をしてきた。

過去の開発経緯を簡単に見てみると、60年代は通商産業省からの受託で進めたMHD^(注3)発電機の開発に続き、運輸省の補助金を得て、鉄道総合技術研究所(当時)と共同で浮上式鉄道開発を推進し、宮崎県での実験線を経て現在東海旅客鉄道(株)が開発を進めている山梨実験線につながっている。ここで開発された超電導線材製造技術、極低温冷

(注1) クエンチ(Quench)

超電導状態から常電導状態になること。

(注2) SQUID(Superconductive Quantum Interference Device)

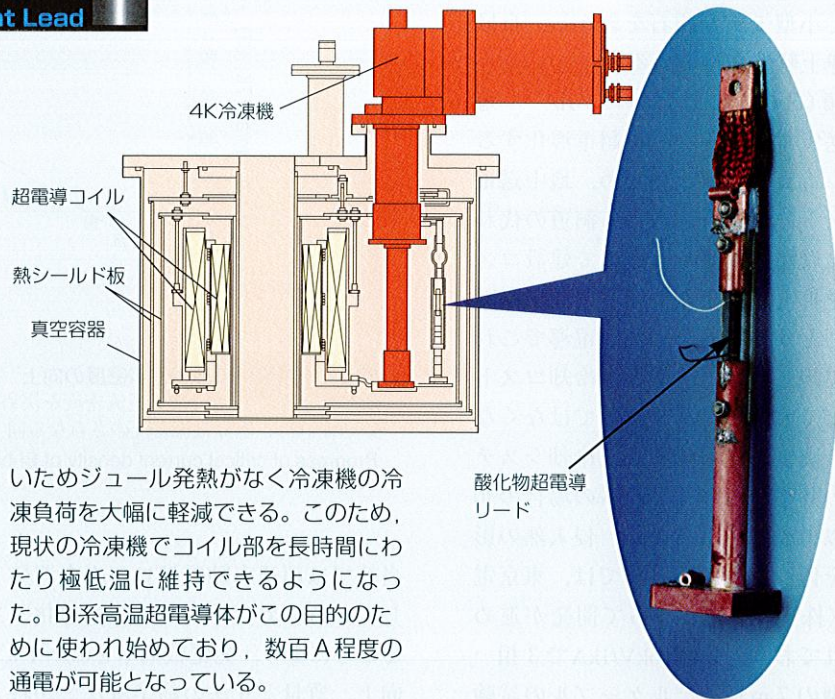
超電導量子干渉デバイス。非常に弱い磁場を検出したり測定するのに使われるデバイス。

(注3) MHD(Magneto Hydro Dynamics) 発電

電磁流体的発電。高温高速の導電性流体を磁場中を通すことにより、ファラデーの電磁誘導の法則により発電する。

利用者が、極低温機器を扱っているという意識なしに超電導マグネットを操作できるようになってきた。酸化物超電導電流リードが開発されて初めてこのことが可能となり、高温超電導体の最初の実用化はここから始まった。

図は酸化物超電導体を電流リードとして用いた冷凍機直冷式超電導磁石システムを表す。超電導コイルを励磁するには、常温環境に設置された電源から銅線などの良導電体を通して電流をコイルに供給する。この時、極低温部に設置された超電導コイルの巻線端部（超電導線）と銅線との間に酸化物超電導リードをある適切な温度領域で介在させる。酸化物超電導リードはセラミックス材であり熱伝導がきわめて低いため常温部からの伝導熱の侵入を遮断でき、しかも電気抵抗がほとんどな



いためジュール発熱がなく冷凍機の冷凍負荷を大幅に軽減できる。このため、現状の冷凍機でコイル部を長時間にわたり極低温に維持できるようになった。Bi系高温超電導体がこの目的のために使われ始めており、数百A程度の通電が可能となっている。

却技術やコイル製作技術が超電導の他機器への応用を促進させた。並行して核融合用大型コイルの製造技術も日本原子力研究所や核融合科学研究所の指導を得ながら技術の確立を図ってきた。その間、超電導MRIの開発も着実に進め、当社の医用機器事業の一つとして成長した。一方、産業応用の観点からは、Si単結晶引上げ用の超電導磁石システムに早期の段階から着手し、今では継続的な生産ができるまでになっている。最近では、通商産業省やISTECの指導を得て、超電導発電機やエネルギー貯蔵用コイル、高温超電導線材や薄膜デバイスの開発も行っている。

この特集では、産業応用に特に効果のある直冷式超電導システム、核融合、発電機など電力用大型磁石、さらには高エネルギー粒子加速器のような科学分野、また来るべき時代に必要となる高温超電導線材技術や高温超電導デバイス技術について当社の活動内容を紹介した。

新しい産業の創出をめざして

超電導技術はエレクトロニクスからエネルギーまで社会のインフラを大きく変える可能性に満ちている。事業という観点からは未成熟な分野であるが、技術が確立した際の産業への影響は計り知れないものがある。超電導技術の発展と実用化のためには、超電導機器を、例えばMRIや単結晶引上げ用磁石のようにスタンダードな分野で実績を積み、信頼性や経済性を確立することが重要である。それと並行して、国家プロジェクトのような形で社会インフラを形成する大型機器やシステムの開発が進められるべきであろう。

新しい産業の創出という観点から、じっくりと基礎技術を固めながら進展させることが肝要である。そのためにも世界レベルでの協調と官・学・民が一体となった開発が必要である。

この特集では、当社の超電導技術開発成果の一端を紹介した。当社の超電導技術に対する実績および果敢なる挑戦姿勢を理解していただければ幸いである。

参考文献

- (1) 正田 英介：電気学会誌、177, 8, p.505 (1997)
- (2) G.J.Yurek：新超電導材料研究会 第23回シンポジウム (97年4月16日)



堀上 徹

Osamu Horigami, D.Eng.

研究開発センター 機械・エネルギー研究所所長、工博。

超電導研究およびエネルギー機器開発に従事。電気学会、低温工学協会会員。

Energy & Mechanical Research Labs.