

ポピュラーサイエンス

超伝導体の利用例と高温化の影響

堀上 徹

(株)東芝総合研究所 〒210 川崎市川崎区浮島町4の1

(1988年6月1日 受理)

Superconductor Application

Osamu HORIGAMI

Toshiba R & D Center

4-1, Ukishima-cho, Kawasaki-ku, Kawasaki 210

(Received June 1, 1988)

This article introduces a couple of actual superconductor applications such as the magnet systems for magnetically levitated trains. The method for the persistent current switching, which is pertinent in the practice of the persistent current mode operation of superconducting magnets, is explained. Finally the requirements for oxide superconductors from the users are described.

1. はじめに

今までの超伝導体応用は、電気抵抗が零であるという性質を利用して電気機器に適用しようとするものがほとんどである。電気抵抗が零であるから、ジュール発熱を伴わないで大きな電流を流すことができ、その結果超伝導線で巻線したコイルを用いて大きな空間に、高い磁場を発生させることが可能となる。

さらに、このコイルに1度電流を供給すれば、接続の方法をうまくさえすれば電流減衰なしで非常に長い時間磁場を発生させ続けることが出来る。したがって、超伝導磁石という形で機器のコンポーネントを構成することが主な使われ方である。

本稿では、超伝導コイルに永久電流を流す方法を紹介した後、現在開発の進んでいる超伝導機器のいくつかを述べ、最後に酸化物超伝導体の応用上の問題点について説明する。高温超伝導体が発見されて以来、世の中に与えるインパクトが議論され、やれ1兆円産業だ10兆円産業だと騒がしいが、残念ながら、応用という点からは今まで金属系超伝導材料で考えられてきた発想以外未だ何も新しいものが現れていない。

2. 永久電流状態実現の方法

超伝導線で巻線したコイルを超伝導コイルと呼んでい

るが、巻線材料として主に Nb と Ti の固溶合金または Nb と Sn の金属間化合物が用いられている。3000種類以上の物質が超伝導性を示すことが知られているが、上記の他では V と Ga の化合物くらいしか超伝導コイルには使われていないという事実をきっちり認識しておくことが大切である。すなわち、超伝導性を示すことと使えることは別のことなのである。

さて、超伝導コイルに電流を流し、磁場を発生させることを、励磁するというが、コイルを励磁するときの回路は一般的に Fig. 1 に示すようになっている。回路は、超伝導コイル(A)、電流電源、保護抵抗および永久電流スイッチ(B)とから構成される。スイッチの機能としては、本来 ON, OFF の働きをすればよい訳で Fig. 1 の様に電源から見て、超伝導コイルとスイッチとを並列につなぎ、先ず、スイッチ OFF の状態にしておいて電源から電流を供給する。所定の電流がコイルに流れたところでスイッチを ON 状態にすると、いままで電源とコイルが作る回路を流れていた電流が今度は、コイルとスイッチが作る閉回路で流れる。これは、Fig. 1 の③に相当する。この後、電源電流を零まで下ろして回路から切り離すと、超伝導コイルは永久磁石として用いることが出来る。これが永久電流状態実現の1方法であるが、次にこのスイッチの構成について簡単に紹介しよう。

通常このスイッチの動作は、機械的接触で行うものと、熱式に行うものとの2方式がある。スイッチは本来 ON と OFF の機能をもてばよいから、機械式スイッチの場合は、コイル巻線と電源からのリード線とを機械的

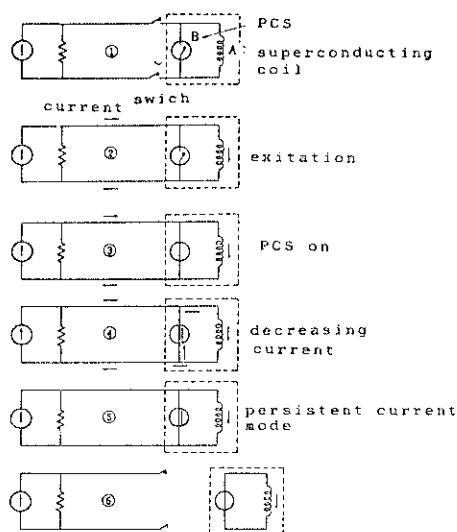


Fig. 1 Operation procedure for Persistent Current Switch (PCS).

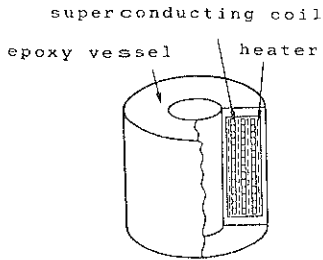


Fig. 2 The structure of thermal type PCS.

に接触することにより、ON の状態を、両者を離すことにより OFF の状態を実現するものである。この場合、OFF の状態はスイッチ抵抗が無限大に近くスイッチ機能としては優秀であるが、ON の状態のときは、接触される両者の表面の状態に大きく依存するので信頼性に乏しいのが欠点である。したがって、最近ではこの機械式スイッチはほとんど用いられていないのが実状である。

一方、熱式スイッチは、Fig. 2 に示した様に超伝導線とヒータとから構成されており、これは液体ヘリウムの中に組み込まれている。スイッチ OFF の状態を作るには、ヒータを通電加熱することにより超伝導線を常伝導状態にする。すなわち、超伝導線の常伝導抵抗がスイッチ OFF 抵抗となる。また、スイッチ ON の状態を作るには、ヒータへの通電加熱をしなければスイッチは超伝導状態が保たれスイッチ抵抗は零となる。熱式スイッチの特徴は、ON 状態では抵抗が零で本来の機能を発揮するが、OFF の状態では、抵抗が有限であるので、励磁の過程で電流がコイルとスイッチの両方に流れるという欠点がある。特に、励磁速度を速くしようとすると、超伝導コイルのインダクタンスの大きさによりスイッチへの電流分が流れる。そのため、OFF 抵抗を大きくしないと、高速励磁が困難となる。熱式スイッチは、Fig. 2 に示す様に無誘導に巻いた超伝導線に沿わせてヒータを巻き、それらをエポキシ樹脂で含漬する。通常、超伝導線は無酸素銅などの低抵抗金属（母材）に埋め込まれた形で使用するが、上に説明したように常伝導状態での抵抗が大きい方が望ましいため、スイッチ用の超伝導線の母材は銅とニッケルの合金を用いて抵抗を高めている。

3. 超伝導の応用例

昭和 63 年 5 月 10 日の日経産業新聞によると、“超伝導時代の主役は輸送、準主役はエレクトロニクス”という見方をしており、応用の分野を(1)電力、(2)輸送・産業機器、(3)医療、(4)エレクトロニクス、(5)研究・その他としている。液体窒素温度で超伝導になる材料が実用化できれば、期待生産額は 1 兆 1500 億円、これが

室温になると 6.9 倍にもなると予想している。いままで考えられている超伝導の応用製品は、高温超伝導体の出現があって初めて発想されたものは何もない。確かに高温超伝導体は産業的に魅力はあるが、今日明日というものではない。もう少し地道に、今の金属系超伝導の機器への応用をしっかりと発展させることが必要である。

先にも述べた様に、超伝導の特徴はジュール損失無しに大きな電流を流せること、したがって高い磁場を大きな空間に発生させることができる。さらに、永久電流状態を実現することによって、時間的に安定な磁場を得ることが可能である。この様な特徴を活かして、応用には在来技術を拡張、展開する方向と超伝導でなければ成立しない新しい技術への展開とがある。在来技術の拡張の例としては、超伝導発電機、変圧器、大形粒子加速器、浮上式鉄道や超伝導推進船などへの応用が考えられる。

一方、超伝導でなければ成立しないというような新しい技術への応用例には、核融合発電、MHD 発電、電力貯蔵、さらに人体用 MRI や単結晶引上げ装置などが考えられ、その中のいくつかは既に市場に出ていたり、R & D ビジネスとして成立しているものもある。

以下に、具体的な例としていくつかを紹介する。

(1) 磁気共鳴イメージング装置 (MRI)

人間の体も原子や原子核から構成されていることは他の物質と変わらない。一般に原子核は固有の核磁気モーメントを持っており棒磁石のように振舞うので、これを静磁場の中に置くとモーメントは磁場の方向に向く。静磁場をかけた状態でこの磁場に直交する方向からある周波数の高周波磁場を加えると磁気モーメントは共鳴を起こして歳差運動を行う。この共鳴周波数は物質によって異なる。MRI は磁気モーメントの振舞いを電気信号に変えて画像化している。人体にもっとも多く含まれているのは水素の原子核であるので、臨床の場では水素の原子核を用いた MRI がもっとも多く利用されている。さて、この様な使われ方をする超伝導マグネットに要求される性能は、磁場均一性と磁場安定度である。発生磁場の大きさは、0.5 テスラから 1.5 ないし 2 テスラが普通であるが、体内のリンなどを診断の対象とするときには、4 テスラ以上の磁場強度を必要とする。磁場が撮影空間内で不均一であると診断画像が劣化するので、水素原子核のイメージングには直径 300 mm の球状空間内で約 10 ppm、スペクトロスコピーには 0.1 ppm 以下の均一性が要求される。磁場の時間的安定度では、診断中に画像が劣化しないために、1 時間あたり 0.1 ppm 以下の安定度が要求されている。

磁場の均一性を確保するために、超伝導コイルの配置に工夫を凝らすとともに、補助コイル（シムコイル）を

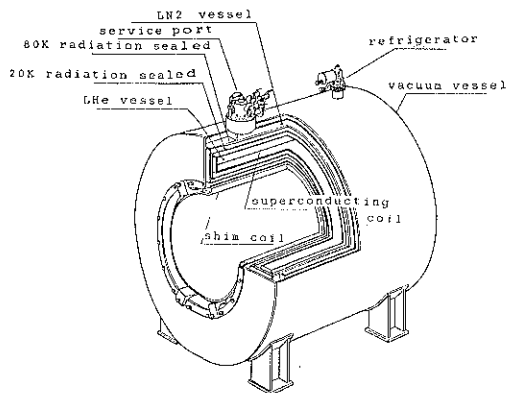


Fig. 3 Over-view of MRI magnet.

用いて微小な磁場の調整をして要求に応じている。また、磁場の時間的安定性に関しては、永久電流モードで運転してはいるものの、超伝導コイルの両端と永久電流スイッチの両端との接続抵抗に依存する。この接続抵抗をいかにして小さくするかが技術的課題となっている。

Fig. 3 には、MRI 用超伝導マグネットの鳥かんと図を示した。磁場に関する仕様の他に、コイルを常に極低温に保って置くための低温容器に関する仕様もまた厳しい。

超伝導マグネットの使用者には、液体ヘリウムを使っているという意識を出来るだけ与えたくないの、液体ヘリウムの蒸発量を極力少なくする必要がある。低温断熱真空容器に種々の工夫をこらしていることは当然のことながら、小形のヘリウム冷凍機を設置する方法やヘリウムの蒸発ガスを効率良く利用して断熱を維持しようというような方法が考えられ実施されている。さらに、病院に設置されるのであるから、磁場の漏洩にも十分注意を払う必要がある。現在5 Gaussの磁場強度が周囲に対する影響を与えるかどうかの基準になっている。その為に、磁場のシールド技術が重要となってきている。

この種マグネットの市場はすでに年間数 10 億円の規模になっている。

(2) 浮上式鉄道

先に紹介した日経産業新聞での調査で、もっとも実現確立が高く、かつ期待生産額の大きいのが磁気浮上列車への超伝導の応用である。もし液体窒素温度で使える超伝導材料が実現した場合、10年後の実用確立は100%で、期待生産額は5000億円と予測している。実現確立が100%というのは、先に紹介した磁気共鳴イメージングも同じである。この根拠は、液体窒素温度で使える超伝導材料を待って開発を進めるというのではなく、すでに液体ヘリウム温度で使用するこれらの機器の開発が十分に行われているからである。

さて、浮上式鉄道の浮上方式には、誘導反発式と吸引

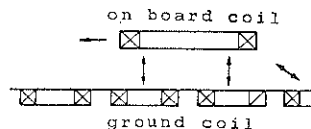


Fig. 4 The principle of magnetic levitation.

式とがある。HSST は吸引式、JR は誘導反発式である。誘導反発式磁気浮上の原理を Fig. 4 に示した。浮上式鉄道の技術的検討が始められたのは昭和 40 年代の半ばであった。昭和 46 年 10 月には、国鉄 100 周年を記念して ML-100 と名づけた超伝導マグネットの公開走行実験が行われている。その後、昭和 52 年に宮崎県の日向市に浮上式鉄道実験センターを設立して以後の実験走行を行っている。その間、昭和 54 年 12 月には 7 km のテストラインを用いて時速 517 km の走行に成功した。さらに、昭和 57 年には軌道をより現実的な U 形へ変更して、MLU-001 という 3 両連結の走行車で有人走行実験を行い、昭和 62 年からは、実車に近い大きさのプロトタイプ車 (MLU-002) で走行実験を繰返している。

さて、MLU-001 (3 両連結) の先頭車および後尾車の長さは約 10 m、中間車は 8 m でそれぞれの車両におよそ 10 人分程の座席が設置されている。Fig. 5 に 3 両編成図を示した。車体の下に点線でレールストラック状に描かれているのが超伝導マグネットである。浮上式鉄道用超伝導マグネットの概念図を Fig. 6 に示した。1つのクライオスタットの中に2個の超伝導コイルが収納されており、クライオスタットの上部には、液体ヘリウムの貯液タンクと小形のヘリウム液化機が装備されている。超伝導コイルは長さ 1.7 m、高さ 50 cm で、材料は NbTi 合金と銅の複合材料が使用されている。この



Fig. 5 Cross sectional view of MLU-001 (3cars).

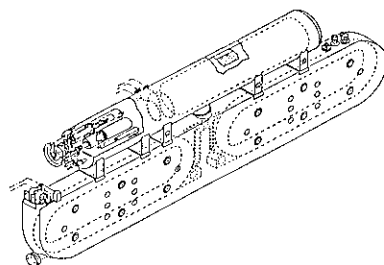


Fig. 6 Conceptual drawing of the magnet for the magnetically levitated train.

コイルに超伝導永久電流スイッチが用いられている。走行前に地上で液体ヘリウムをクライオスタットおよび貯液タンクに注液し、その後電源で所定の電流までコイルに通電し、熱式永久電流スイッチを用いて永久電流モードに切替える。このような方式を用いると、車上には電源も大形のヘリウム液化機も搭載しなくてもよいので、軽量化が計られる。

(3) 半導体引上げ装置

シリコンが半導体デバイスの基本材料となっていることは周知のことである。シリコンを用いて種々の IC を作成する際、その原材料としてシリコンの単結晶を作る必要がある。良質の単結晶バルクを薄く切出し、表面をラッピングしてウェハとし、それを用いて IC 加工をする。単結晶バルクの製造方法としては、主に CZ (Czochralski) 法とよばれる Fig. 7 (a) に示すような方法が使われている。すなわち、石英ルツボの中にシリコンのフレークを入れ、ルツボの外に設置したヒータで加熱溶解する。あらかじめルツボ内に入れてあるシリコン単結晶の種結晶を核として、結晶が成長していく。この際、シリコン融液の対流が、石英ルツボからわずかに溶け出す酸素を融液全体に運び、結局シリコン中の酸素濃度を制御することができなくなる。さらに、熱対流による成長界面の不安定性も問題となっていた。

ところが、この熱対流はシリコン融液に磁場を印加することにより、抑制されることが分り、磁場印加の手段として超伝導マグネットが用いられるように成りつつある。磁場を印加する方法を MCZ (Magnetic Czochralski) 法といわれている。Fig. 7 (b) には磁場を印加したときの対流の様子を示した。MCZ 法で作った単結晶は CZ 法でのそれと比べて酸素制御も良好で、抵抗率のバラツキも小さく、微小欠陥、積層欠陥共に少ないとい

う結果が得られている。

(4) その他の応用

いちいち応用の例を挙げているときりがないので、具体的なものとしては上記 3 件にとどめておく。先にも述べたように超伝導の応用としては、在来技術を拡張・展開する方向と、新しい技術への発展とがある。前者の例として、最近では通産省のムーンライト計画の 7 万 kw の超伝導発電機のプロジェクトや、大形粒子加速器ではアメリカの SSC 計画などの話題が賑やかになっている。一方、超伝導でなければという応用として、核融合炉やエネルギー貯蔵がある。核融合炉については、トカマク炉を想定して大形のトロイダルコイルを国際協力のもとで 6 個製作し、昨年アメリカのオークリッジ国立研究所で成功裡に全ての試験を終了した。これは、大きな点では、実際の核融合炉に用いるものよりも小さいが、それでも今まで経験しているマグネットサイズに比べれば相当大きく、大形マグネット製作に関して大きな前進がみられた。

いままで説明してきたように、超伝導の利用例という点から見れば、非常に広い分野で使われたり使われようとしている。MRI 装置を除けば、残念ながらまだビジネスの段階に達していない。これは超伝導の技術が未熟であるということに起因するのではなく、応用されるシステムの R & D がまだ十分でないとか、採算面で見通しが立たないとかに起因することの方が多い。

4. 高温超伝導体への応用側からの要求

本特集では、酸化物超伝導体の物理、化学、分析評価等について詳しく解説されているので、ここでは簡単に応用の立場から高温超伝導体への要求について触れる。

1) 物質の安定性

Y 系の場合、特に水と反応し易いことが指摘されている。表面を何かでコーティングするというような方法で反応を避けることができる可能性はあるが、本質的な解決方法ではない。Bi 系の場合は 80 K 相と 110 K 相を分離して単相抽出することが困難といわれている。これも応用上大きな制約を与えるものと考えられる。

2) 臨界電流密度およびその磁場依存性

これは、超伝導コイル応用という点から特に重要である。よく知られているように酸化物超伝導体の線材形状試料での臨界電流密度 (j_c) は精々 2,000 A/cm² (77 K) 程度で、金属系のそれに比べて極めて低いことは度々指摘されている通りである。勿論このことは改善されなければならない大課題ではあるが、その他に磁場を印加すると j_c が急激に低下するという深刻な問題がある。Y 系酸化物の j_c の磁場依存性に関する 1 例を Fig. 8 に

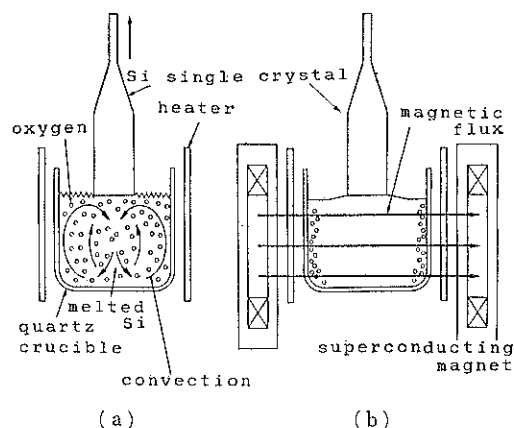


Fig. 7 Manufacturing equipment for single crystal semiconductor.

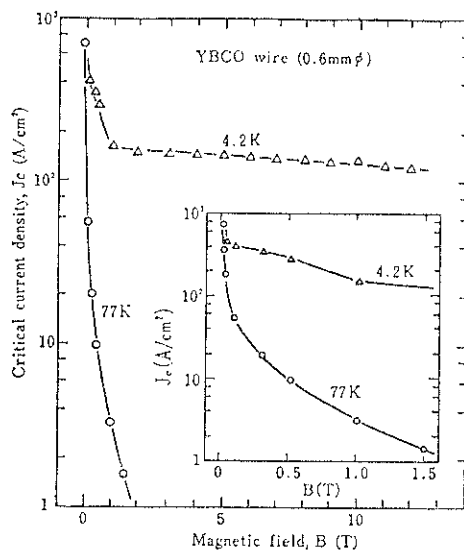


Fig. 8 Critical current density vs magnetic field for YBCO wire.

示した。この傾向は、Y系に限らず Bi 系酸化物についても同じ様である。

3) 機械的特性

セラミックスであるということだけで脆いというイメージをもつが、金属系の Nb₃Sn 化合物も結構脆く、そのためコイル製造工程が複雑になる。したがって、応用は限定される。酸化物超伝導体を用いてコイルを製作する場合、Nb₃Sn コイル製作の経験を活かすことが出来る。Y系酸化物の場合、曲げ歪が j_c に与える影響を Fig. 9 に示した。これによると、歪が 0.5% 加わっただけで j_c はほぼ半分に減ってしまうことがわかる。

この他にも実際の応用にとって好ましくない性質もあるが、特にコイル応用という点から心配になることを取りあげた。誕生して間もないので、色々と心配ではあるが今後のブレークスルーを期待するしかない。

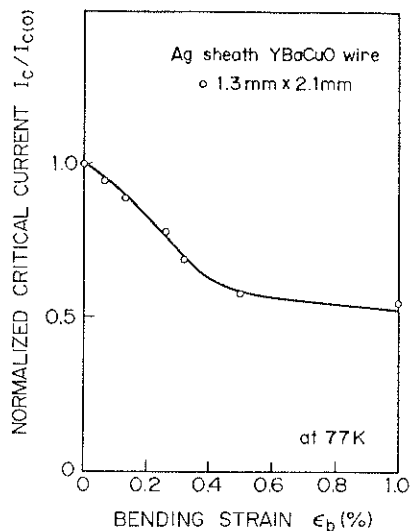


Fig. 9 Critical current density vs bending strain for YBCO wire.

5. おわりに

はなはだ雑記ではあったが駆足で超伝導について、特に応用に視点を据えて解説した。

まがりなりにも超伝導の応用が現在のような状況になり得ているのは、材料の開発に負う所大である。NbTi が安心して使われるようになったのはこの数年間で、発見から 20 年経っている。Nb₃Sn はまだまだ改良の余地がある。物質が発見されてから使えるようにするまでにエンジニアリングともいうべき期間が必要であるということを認識することが大切である。誕生して間もない物質であるので、今後はじっくりとこの物質の本性、素性を見極めて、それなりの応用を考えていくことが重要となろう。