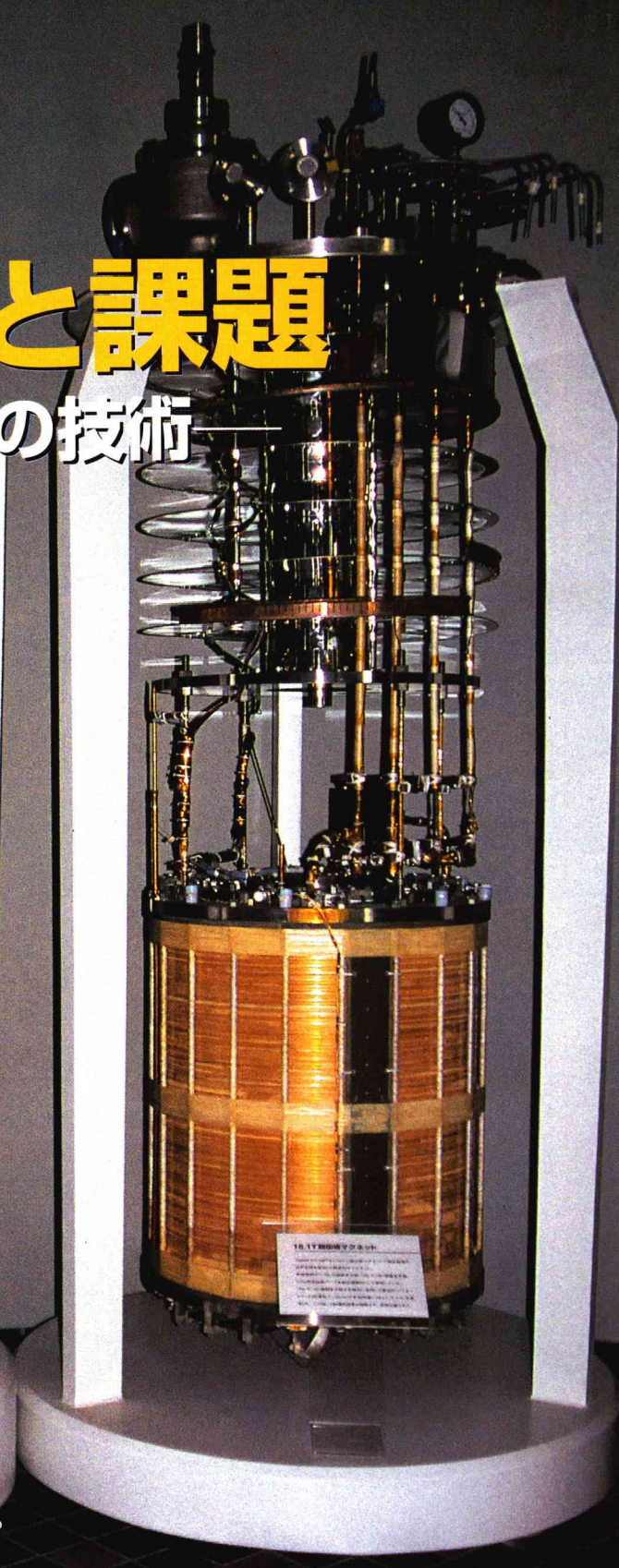


超電導 その可能性と課題

— 応用へと向かう夢の技術 —



電流がまったくロスなしに
流れる超電導現象は、
人類が発見したひとつの奇跡だった。
そしてその奇跡が、比較的高温でも
おこせるかもしれないことが分かったと
期待感はブームへとつながり、
研究開発に多くの人材と資金とが投入された。
やがてブームはおさまったが、
播かれた種のいくつかは、芽を出し、
あるものはすでにつぼみをつけているかに見える。
この先、超電導の畑には
どんな花が咲くことになるのだろうか。
全体像を概観してみる。



写真：世界最強の磁場施設を誇る金属材料技術研究所の超電導磁石。

金属合金系はすでに一部実用化、酸化物系はより高温での安定化と生産技術が鍵

液体ヘリウム温度で使用可能な金属合金系の超電導体の応用技術がさまざまな形で研究され、実用まであと一歩というところまできている。その一方で高温超電導体といわれる酸化物系の素材をいかに実用化していくかの模索が、素材研究や生産技術などの面から地道に続けられている。電気抵抗をゼロにできる超電導技術は、エネルギーの効率利用という側面からも、産業全体のブレイクスルーにもつながるキーテクノロジーであると見ることもできよう。

超電導リニア、時速550kmを達成

平成9年4月に開通した超電導リニアモーターカー山梨実験線は昨年末、初年度の目標であった最高時速550kmを達成した。今年度からは運行のためのより実用的な試験が行われ、来年度には耐久試験などを経て超電導リニアモーターカーの建設基準を設定するためのデータ収集が行われる予定になっている。

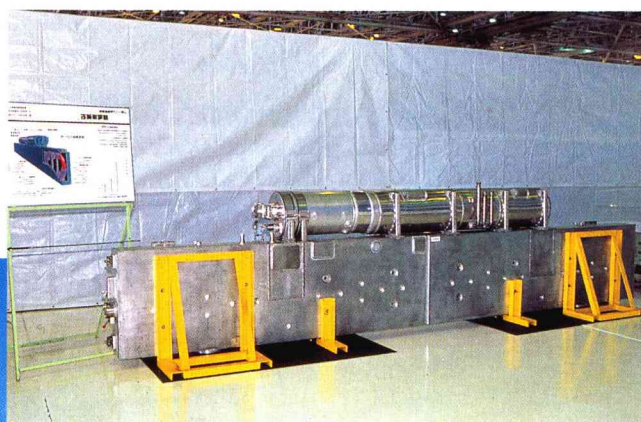
「夢の技術」だと思われてきた超電導による磁気浮上列車が実験段階とはいえ、いよいよ現実のものとなりつつある。その心臓部ともいべき超電導マグネットには、液体ヘリウムと小型冷凍機によって冷却されるニオブ・チタン製の超電動コイルが使用されている。これはおおざっぱな分類でいうと「液体ヘリウム温度」で使用できる「金属合金系」の超電導体の技術ということになる。液体ヘリウムの温度は4K（絶対温度）、つまり摂氏ならマイナス269℃。この極低温が現在のところ超電

導の応用技術を支えている。

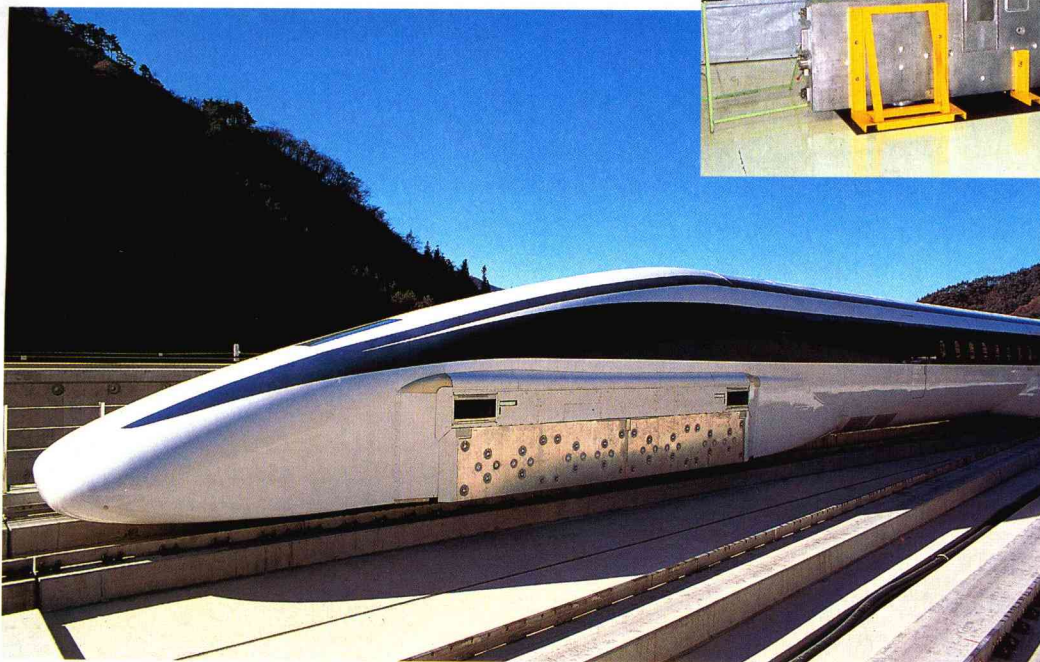
超電導物質には金属合金系以外に、酸化物系（化合物系）のものがある。この酸化物系が、いわゆる「高温超電導」を担う物質として研究開発が行われているものだ。磁気浮上列車は、超電導技術の応用例としてもっとも有名なもののひとつであり画期的なものではあるが、今のところ高温超電導技術を応用する段階には達していないようである。

高温超電導物質の発見が生んだブーム

超電導とは、物質を極低温にした時に電気抵抗がゼロにな



山梨実験線車両に装備された超電導マグネット。



る現象だと一般的には説明されている。電気抵抗がゼロになるということは、電流がロスなしに流れることを意味する。少々粗暴な比喻を用いるとするならば、ごくふつうの常電導状態は、おんぼろバスが走る田舎のデコボコ道のようなもので、エンジンを吹かし続けなければ（電圧をかけ続けなければ）、車——つまり電流は走らない。超電導状態とは、このデコボコ道を舗装したハイウェイのようなものと考えたとイメージとしてとらえやすいかもしれない。さらにいえばデコボコ道の表面に氷がはって、ソリに反動をつけてやるとどこまでも走っていつてしまう状態に譬えられるだろうか。

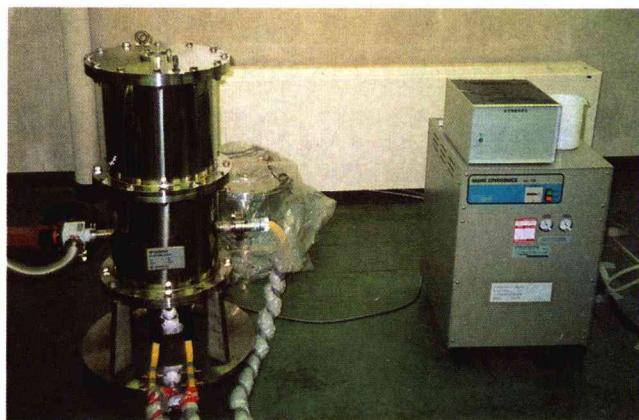
エネルギーロスがないため、最初に流した電流が減衰することなく流れ続けるのである。このような性質を利用してはじめて、磁気浮上列車の小型軽量で強力な磁石が製造可能になる。もしリニアの電磁石を常電導でつくったとすると、とんでもなく巨大なものになってしまい、とても実用に耐えるものではなくなくなってしまったはずである。

山梨実験線は順調な滑り出しをみせているが、超電導研究そのものは少し引いた視点から眺めてみると、一時ほどのフィーバーぶりはなくなってきた感がある。1980年代なかば、世界的な超電導ブームといえるような風潮が確かにあった。そのきっかけとなったのは、高温超電導体の発見である（1986年／チューリッヒ）。先に述べたように超電導リニアモーターカーに使用されているのは液体ヘリウム温度で使用する金属合金系の超電導コイルである。だが高温超電導を可能にする素材は、金属酸化物系——つまり陶磁器やセラミックに近いものだった。しかも超電導をえるためには結晶レベルでの微妙な制御を必要とされたり、試料作成に高度な技術やアイデアが求められるなど、解決しなければならない課題は山積みだった。

とはいえ絶対零度（ -273°C ）に近い領域でしか起こらないと考えられていた超電導現象が、より高温でも起こせるという期待は研究者や企業を煽り立て、その高揚感が一種のブームへと導いたといっているだろう。

だが「高温」とはいうものの、その温度は35K（ -238°C ）と一般の感覚からすれば極低温であることには変わりがない。この温度の上限をいかに高くできるかが高温超電導物質開発のひとつの焦点になった。さらにその先には加工法や生産技術も含めたさまざまな困難が待ち受けていた。

超電導が持続するぎりぎりの上限温度を「臨界温度」というが、超電導状態を持続するには、温度以外にも、磁界（磁力）の上限や、電流密度の上限があって、ある値をこえると、超電導状態は破綻してしまう。そうした「臨界温度」「臨界磁界」「臨界電流密度」はそれぞれに相関しあっていて、バランスの中で実用域を模索するという作業が必要とされた。より臨界温度の高い新物質を探すだけでは即実用につながるというわけにはいかなかったのである。最初の高温超電導物質発見以



冷凍機を使って直冷するタイプの超電導磁石。

来、「臨界温度」のみの記録は単純に上がっていったが、実用的な臨界値のバランスをもち、製造技術というハードルもクリアすることはさすがに難しく、やがて景気の低迷とともに撤退する企業も増えてゆき、ブームはいまや沈静化したかにみえる。

目標は -196°C で使える高温超電導体

高温超電導の臨界温度を考える場合、ひとつの目安になるのが77K（ -196°C ）という値である。これは液体窒素の沸点であり、77Kで使用できる超電導装置の実現は冷却用に液体窒素が使用できるようになることを意味している。窒素はヘリウムより比熱が100倍も大きいので、冷却がしやすくなるうえ、空気的主要成分であることから資源量もきわめて豊富である。ヘリウムは現状、天然ガスから分離して得ていることから量的に限りがあることは容易に想像がつく。液体窒素なら資源は、ほとんど無限といっている。液体酸素製造時の副産物として得ることもできる。

酸化物による高温超電導物質の有力候補としては、その後ビスマスを含む化合物（ビスマス・ストロンチウム・カルシウム・銅・酸素）が110K（ -163°C ）という臨界温度を記録し、有望視されるようになってきた。ビスマス系の化合物超電導体には化合のパターンによって多種のものがあるが、そのいくつかは臨界温度のみでならば、90～110Kと、たやすく77Kをクリアする。ところがビスマス系は、77K付近で磁界がかかると雪崩式に流せる電流（臨界電流密度）が激減するという弱点をもっている。超電導の主要な技術のひとつとして電磁石という用途があることを考えると、ビスマス系の磁界に弱いという性質は、見過ごすことができない。そこでビスマス系に代わるものとしてイットリウム系の酸化物超電導体が研究されているが、製造技術などの面で、まだ解決されていない問題は多いようだ。

またビスマス系も77Kまで温度を上げず、20K（ -252°C ）付近でなら安定した特性を示すことが分かっており、ヘリウム

や窒素などを使うのではなく、冷凍機を使って直接20Kに冷却して実用化しようという発想も出てきているようである。20Kでも、4Kの液体ヘリウム温度に比べれば、かなり高温域での超電導が実現することになり、応用上、かなり使いやすいものになることが期待される。

こうした20K／ピスマス系超電導材料を用いた超電導マグネットの産業への応用例としては、半導体用のシリコン単結晶の製造設備用のものが計画されており、2年後の完成をめざして開発が進んでいる。

半導体チップの原材料であるシリコン単結晶は、結晶引上げの際に強磁界をかけて制御するノウハウが一般化している。シリコン単結晶は今のところ8インチ径のものが主流だが、ここへきて12インチへの需要が高まっており、大型のウエハー製造のための強力な電磁石が必要とされてきている。これまでは大量の電力を使用して常電導の電磁石を使用してきたが、12インチの製造設備となると、ムダが大きい。そこで超電導磁石を用いた小型で強力な電磁石が求められている。この半導体製造設備用の超電導磁石がピスマス系酸化物超電導体の産業への応用例第一号になるという。

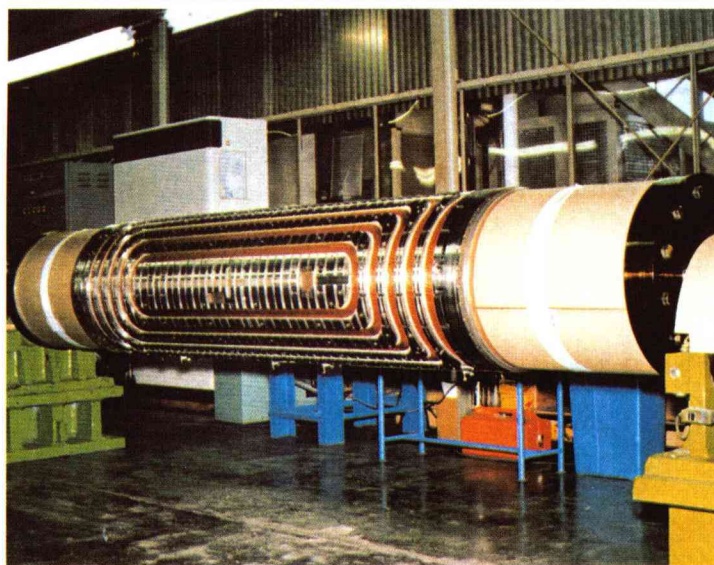
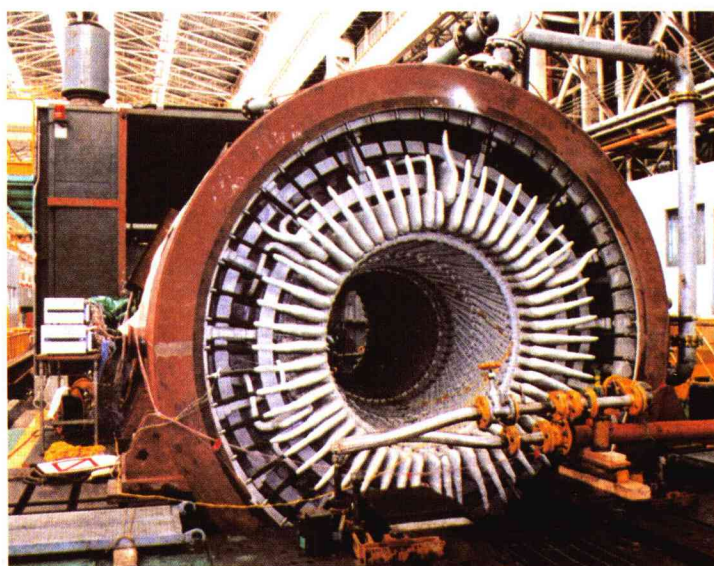
次世代の発電機は超電導に？

金属合金系と酸化物系とを対比する都合上、一気に高温超電導体の応用例にまで飛んでしまったが、現在までのところでは超電導リニアモーターカーにも採用されているように液体ヘリウム温度で利用される金属合金系超電動体を用いた技術がより使いやすく、それを用いた実験や研究開発例も多い。それらの実例は超電導が「何に使えるのか」をイメージとして描くうえでの具体的な手がかりと考えられるので、実例を見てゆくことにしよう。

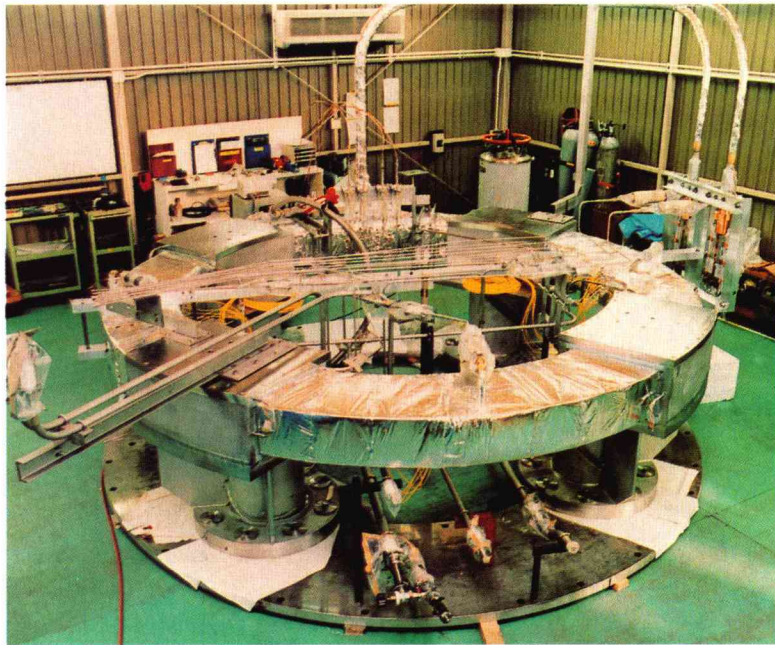
超電導リニア同様、ニオブ・チタンを使った超電導技術で、実用化のための研究開発例として規模が大きいのは工業技術院のニューサンシャイン計画の一環としてNEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）が委託推進するプロジェクトで、89年度から11年計画で行われている超電導発電機の開発である。発電所などで用いる発電機のロータの界磁巻線には、現用では常電導線を水素ガス冷却して使用するものが主となっている。この部分を液体ヘリウム冷却による超電導磁石で代替することでさまざまなメリットが期待できるといふ。プロジェクトではまず第一段階として超電導磁石を用いた7万kW級の実証試験機が開発され、現在、関西電力大阪発電所構内にある試験センターで実証試験が行われている。20万kW級のパイロット機の開発



7万kW級超電導発電機（モデル機）。



超電導発電機のステータ部（上）とロータ部界磁巻線（下）。



100kWh級のSMES試作要素コイル。この要素コイル12個で100kWhの装置構成となる。



中部電力の1kWhフライホイール・ユニット実験機。

に反映されることになっている。最終目標は100万kW級を可能にすることだという。

超電導発電機のメリットは、設備が小型軽量化できるため設備の建設コストを縮減できることをはじめ、単機あたりの最大容量をこれまでの2倍にできること、電力システムの安定度が向上すること、そして発電機効率が向上し省エネ効果が期待できることなど。超電導発電機では、約1%の発電効率アップが期待され、小幅とはいえ直接CO₂の削減にもつながる。電力というおもとでの話だけに全体量としてはけっして小さくないだろう。

研究が進む電力貯蔵の技術

エネルギーという視点では、「電力の貯蔵」にも超電導は大きな可能性を秘めている。電気はためておくことができないとはよくいわれることであるが、安定した電力供給のためには、なんとか電気を蓄えておける技術が欲しい。そこで現在は夜間の揚水発電や高性能蓄電池開発などといった形で「電力貯蔵」の技術が模索されている。だがもし超電導コイルに流れる「永久電流」の性質をうまく生かせれば、電気を電気のままで貯蔵しておくことが可能になる。電気抵抗がない超電導コイルなら、一度通電すれば、外部に取り出されるまで、ずっと同じ電流が流れ続けることになるからだ。

こうした超電導コイルによる電力貯蔵装置はSMES（スミス／Superconducting Magnetic Energy Storage system）と呼ばれ、超電導の比較的初期の頃から研究が行われてきたが、1991年から資源エネルギー庁のプロジェクトとして8年計画で、100kWh級パイロットプラントの要素技術の開発調査

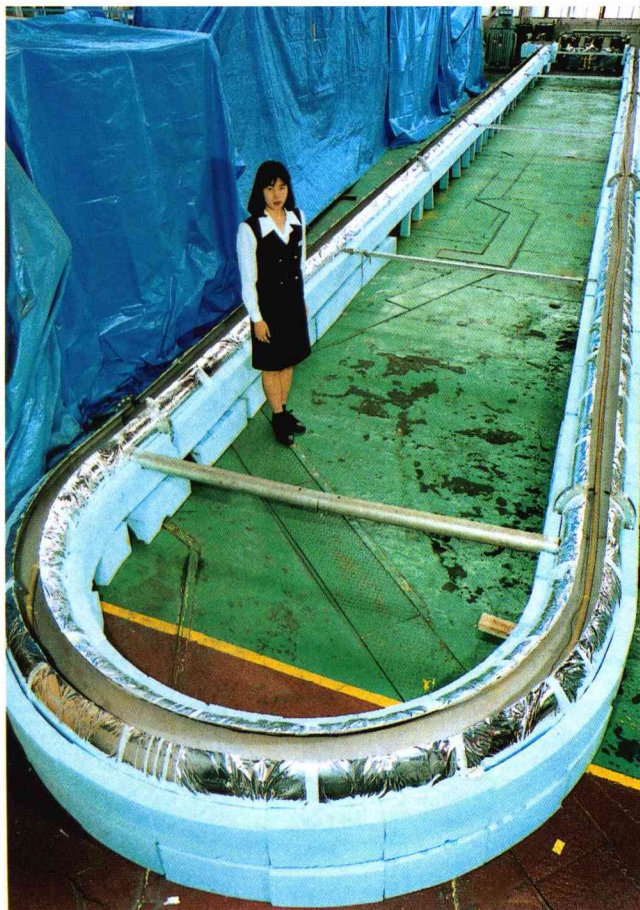
を目的とする試作要素コイルがつくられ、通電実験によってデータ収集が行われている。この試作コイルに使われているのもニオブ・チタンである。

資源エネルギー庁のプロジェクトで開発が進む、もうひとつの有望な電力の貯蔵技術に、フライホイールシステムといわれるものがある。フライホイールとはいわゆる「はずみ車」のことで、電力をホイールの回転運動エネルギーに変換して保存しようというものだ。通常ならば「はずみ車」の運動エネルギーは、軸受けの摩擦抵抗を受けて減衰してしまうが、超電導の特性を生かしてフライホイールを浮上させてしまえば、摩擦抵抗はゼロになる。摩擦によるロスをなくしておいたうえで、必要に応じホイールの軸を発電機にコンタクトできるようにしておけば、運動として貯えたエネルギーを自由に電力として取り出せる。

プロジェクトでは、0.5kWhの実験機がつくられ、またプロジェクトとは別に中部電力では1kWhのユニット実験機が製作され現在は課題抽出作業が行われている。

フライホイールには大きな遠心力がかかることが予想されるため、軽く丈夫な素材が求められる。中部電力の実験機ではCFRP（炭素繊維強化プラスチック）製の外径60cmのホイールが使用されている。将来的には10MWhのシステムがめざされているが、これは単体のフライホイールを5層に積み上げたシステムを、さらに10基ならべようというもの。遠心力の問題から単体を大きくするには限界があるため、こうしたシステム構成にすることが考えられている。

SMESやフライホイールシステムなどの電力貯蔵装置の使いみちだが、現在のところ、たとえばコージェネシステム（使用

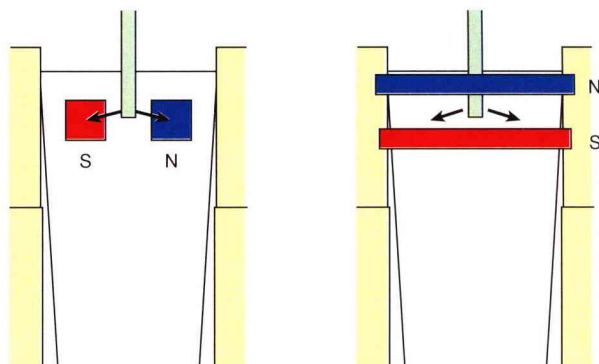


液体窒素を用いた超電導送電実験用ユニット。

地密着型発電)のような小規模な発電設備からの電力を安定化させるために有効だと考えられているようだ。エネルギーの利用効率を高めるうえでコージェネはきわめて効果的だとされているが、貯蔵システムを緩衝装置として組み込んでおけば安定供給の点からもより安心と考えられる。

エネルギー問題という切り口からさらにつけ加えておくと、究極のエネルギーといわれる核融合発電も、実用的なものにできるかどうかの鍵は超電導技術にかかっているといわれる。研究が進められている核融合炉には、いくつかの方式があるが、強力な磁界を使ってプラズマを封じ込める点は、ほぼ共通している。この強磁界を得るためには、どうしても超電導マグネットが欠かせない。現在ある実験設備は強磁界を常電導の磁石によって得ているが、この場合、必要な磁界を得るために大量の電力を投入せねばならず、出力よりも入力の方が大きくなってしまふ。実験設備ならデータさえ得られればよいが、実用プラントとなればそれでは意味がない。少ない電力で強磁界が得られる超電導マグネットと組み合わせることで、はじめて実用的な核融合への可能性が出てくるというわけだ。

そのほかに電力関連では、液体窒素温度での超伝導送電の研究も進展している。送電時の電力ロスをなくせれば、省エネにも大きな効果が期待できる。



鑄造時に磁界をかけて湯流れを制御するノウハウの模式図。

鉄鋼分野に応用される超電導

交通、エネルギーなど、インフラの根幹で大きな働きが期待できる超電導の技術だが、今後は産業の各分野でも続々と応用例が出てくることが期待されるだろう。先述の半導体引上げ用の超電導マグネットもその一例であるが、鉄鋼分野のプラントでも超電導関連技術を使った新たな技術のシーズは、すでに提案されている。

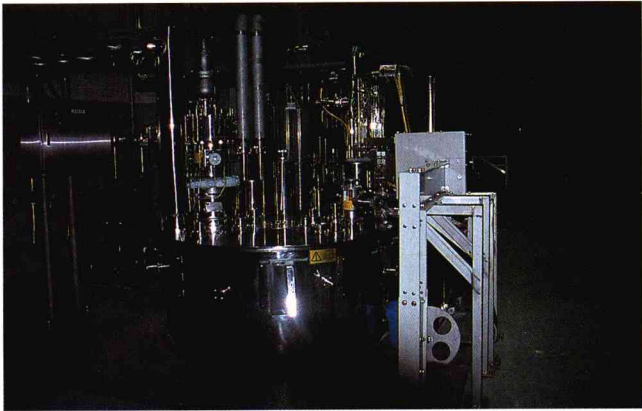
科学技術庁・金属材料技術研究所では、20Kで使える鉄鋼廃水の磁気分離用マグネットの開発プロジェクトが進行している。現行では、むしろ常電導の装置が存在しているが、高温超電導磁石を使ったものができればよりコンパクトで電力消費量の少ないものが可能になるという。こうした磁気分離装置は、湖などのアオコを分離するのに使用できる可能性があり、環境ビジネス方面にも応用の可能性が考えられるという。

また近年は連続鑄造で磁界をかけて湯流れを制御したり、モールドに離型用のスラグを使わずに磁界をかけて軟接触状態を確保するノウハウが研究されてきており、そのための強力な磁界を与えるためにも超電導磁石が好適だと考えられている。連続鑄造から冷間圧延の工程での歩留まりや表面キズを減らし、品質向上やキズ処理のためのエネルギーコスト削減などが期待できるという。また同様にニアネットシェイプでも超電導磁石によって磁界をかけるモールドレスのノウハウが研究されるなど、鉄鋼製造技術のイノベーションにも超電導が役立てられそうな気配を見せている。

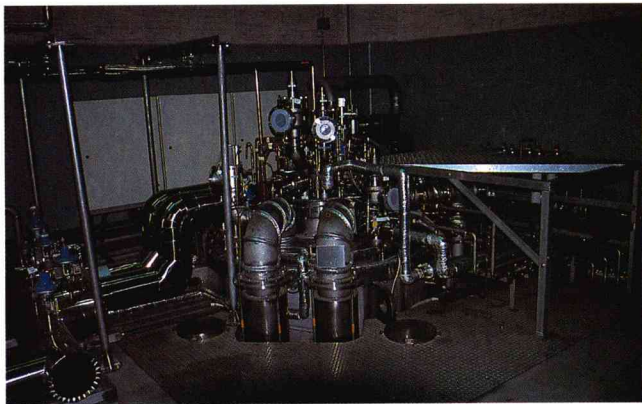
鉄鋼の例を中心にピックアップしたが、超電導関連技術は直接に間接に、基礎産業分野でさまざまな応用されていくことが期待されている。ただし必然的に新たな設備投資が必要と考えられることから、業種によって導入の時期にタイムラグが出ることは予想されそうだ。

極限の強磁界を可能にする

産業への応用という視点以外に、研究目的で強磁界が必要とされる場合にも超電導の技術が欠かせないものとなっている。



超電導磁石の内側に水冷銅磁石を組み合わせた金属材料技術研究所のハイブリッド・マグネット。世界最高の定常的高磁界40テスラの実現をめざす。

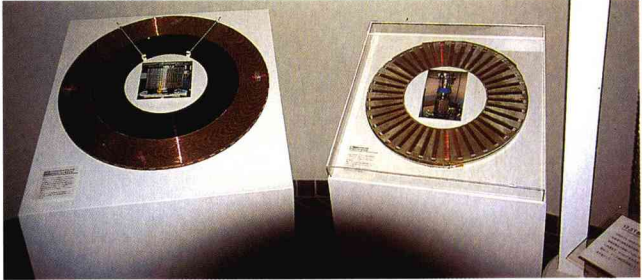


超電導磁石のみで構成されたものとしては世界最高磁界を誇る装置。

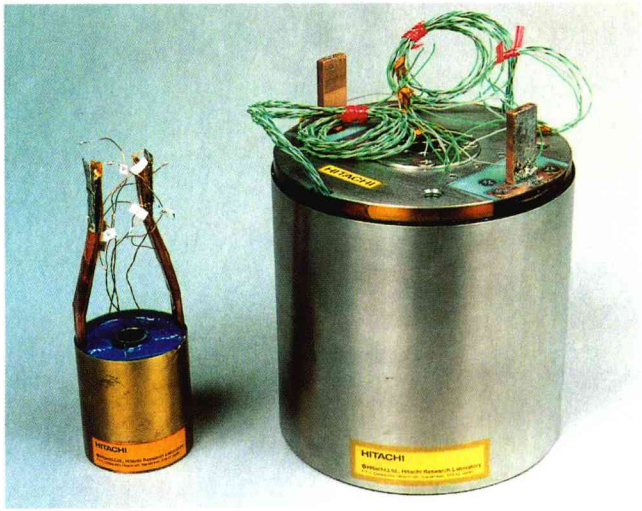
その代表的な例がNMR（Nuclear Magnetic Resonance／核磁気共鳴装置）である。これは強力な磁界を与えることで原子に起こる共鳴現象をコンピュータで画像などの情報に変換するもので、近ごろ医療分野の先端技術として注目されているMRI（Magnetic Resonance Imaging／核磁気共鳴映像法）もこの応用である。理化学研究用に用いられるNMRは、とくに強力な磁場が必要とされ、より高度な超電導磁石が欠かせないものになっている。

金属材料技術研究所の極限場研究センターにある強磁場ステーションでは、数種の超電導磁石の組み合わせによって、これまでに22.8テスラという強磁場の世界記録を作っている。この超電導磁石には外層部にニオブ・チタン、その内側にチタンを含むニオブ3スズ、最内層部にビスマス系の酸化物という数層の超電導コイルが使用されており、金属系超電導磁石で21テスラ、酸化物超電導磁石で1.8テスラ、合計で22.8テスラが出せるようになっている。同ステーションには、この超電導磁石をはじめとして強力な磁場を可能にする世界有数の装置があり、強磁場を必要とする世界の研究者に対しオープンにされている（共同利用型研究施設としてテーマを公募している）。

金属材料技術研究所では、新たなプロジェクトとして世界



「パンケーキ」と呼ばれる超電導磁石の本体。これを重ねて大きな磁石にする。



コイルの中心部分に置かれる酸化物超電導体による磁石。

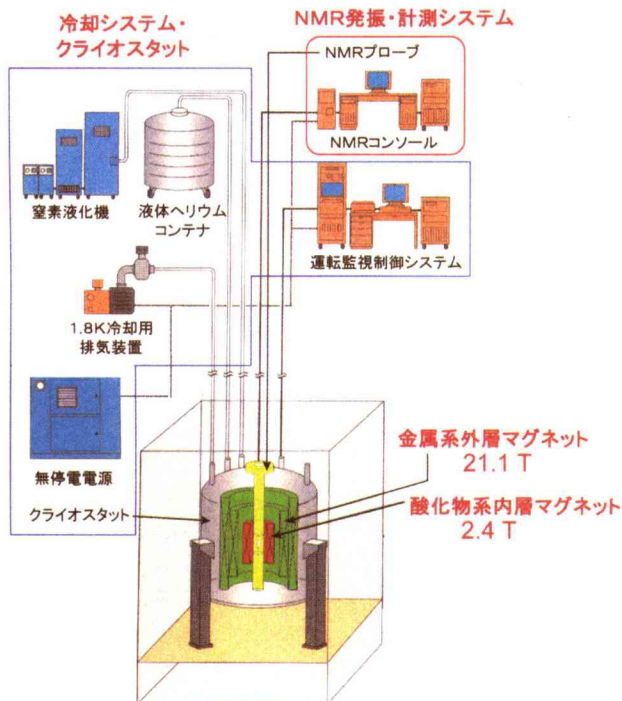
記録を作った超電導磁石をさらに上回る23.5テスラの装置と、それを中心とする1GHz（ギガヘルツ）級の高磁界NMRシステムの開発に着手している。こうした高磁界NMRの用途例としては、ライフサイエンスの分野での重要テーマである蛋白質構造の解明などがあげられる。蛋白質は遺伝子とその発現の結果である生物固体とをつなぐブラックボックスの部分であり、高磁界NMRはそうした未知の部分に光を当てるうえでの有効な手段になると考えられる。

その他、学術関連では高エネルギー物理の分野で、大型粒子加速器やレールガンなどに強力な電磁石が求められており、超電導磁石が有効だと考えられているようだ。

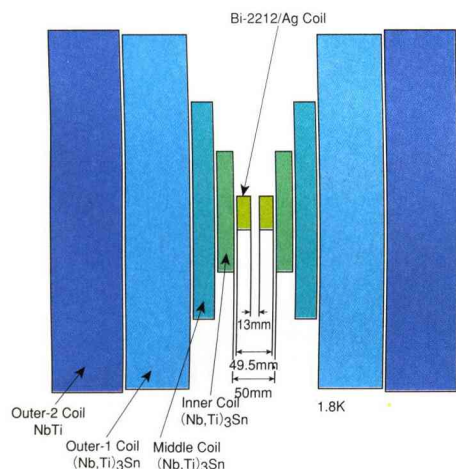
夢へむけ研究が進む超電導素子

超電導の可能性として最後に忘れてはならないのが、コンピュータ素子への応用である。超電導によるジョセフソン素子がコンピュータの処理速度を飛躍的に高めることは、過去さまざまなメディアでとりあげられ、話題を呼んだ。だが開発で先行していた米国の大手コンピュータメーカーが撤退するなど、産業化への見通しは、なかなか立たない状況が続いている。

その一方でそろそろ半導体の限界も見えはじめている。急激な高密度化をくりかえしてきた半導体による集積回路だが、通



1GHz級NMRシステム全体構成図。



22.8テスラを出した超電導磁石の概念図。

電（スイッチング）による発熱の問題などから、これ以上の集積化が苦しくなりはじめてきているというのだ。

超電導素子を用いたジョセフソン接合集積回路が可能になれば、消費電力を劇的に減少させることが可能になる。電力コストを削減できるのはもちろん熱による誤作動の心配がなくなるため、さらに高度な集積化が可能になると期待されており、国のプロジェクトとしていくつかの研究が進められている。

コンピュータのデバイス中では論理回路がもっとも通電の頻度が高く、熱を発生しやすいため、この部分をまず超電導化することがめざされているようである。超電導コンピュータ（ジョセフソン・コンピュータ）は半導体とはまったく異なるアルゴリズム（作動手順）で組み立てられることから、そのための回路設計が具体化のためには必要とされ、現在そのための研

究が推進されている。

しかし実のところジャンクション（素材の接合部分の機能）の特性安定の問題がまだ解決されねばならない課題として残っており、素材面からも超電導コンピュータの実現にはしばし時間がかかりそうである。しかしもしこの技術が実用化されれば、現在の半導体コンピュータとは別の体系をもつコンピュータ技術が成立する可能性も考えられ、より高速で、しかも高密度なチップが製造できるようになる。これはコンピュータ関連分野で日本が遅れをとっているCPUなどでの巻き返しのチャンスにもつながるかもしれない。

超電導素子の省エネルギー効果は画期的といえるもので、たとえば米国が2004年までの完成をめざして開発中のペタフロップ・コンピュータ（スーパー・コンピュータの1000倍の処理機能をもつ）は、約30MW（メガワット）の電力を消費するが、もしこれと同様のものを超電導素子でつくりえたとすると消費電力は数10kWですむことになる。今のところあくまでも「夢物語」の段階ではあるというが、研究の進展に期待したい技術である。

2005年には超電導産業成立か？

より高温で機能する超電導素材の開発は、現在もひとつのフロンティアであり続けており、ビスマス系、イットリウム系などの先には、より臨界温度の高いタリウム系、水銀系などの酸化物超電導体といったものも浮上している。しかし実のところ、それらの実用化までにはまだしばしの時間が必要とされるというのが実情のようだ。それでも「酸化物超電導体が発見されてから10年でここまでできたというのは、かなり速い進展」（金属材料技術研究所・熊倉浩明氏）という意見もある。

またそうした比較的現実的で冷静な意見に対して「2005年には超電導産業の目鼻がはっきりしてくる」（超電導工学研究所・田中昭二所長）という力強い見方もある。「大量の電力を消費している半導体工場では超電導を使えば電力コストをかなり削減できるはずだ。どんどんと新しい設備をつくっている業界ですから、この分野からまず広がっていく可能性は高いはず」（同・田中所長）。省エネルギーをはじめとした環境対応への社会的要求も高まっていくことが予期されるが、「そうした動きを規制ととらえるのではなく、新たなビジネスチャンスととらえる」（前に同じ）ところから超電導の応用技術は普及していく可能性があるという。

超電導の技術は今、「夢」から「現実」へという、ちょうど境界線のあたりにある時期なのかもしれない。

取材・写真協力：科学技術庁・金属材料技術研究所、
（財）国際超電導産業技術研究センター・超電導工学研究所、
超伝導発電関連機器・材料技術研究組合、東海旅客鉄道㈱、
東京電力㈱、中部電力㈱