

## 超伝導 — 応用の観点から —

京都大学 大学院工学研究科 教授 雨宮 尚之

### 1. 超伝導の初めての発見と

#### その後の新超伝導物質発見の歴史

1911年にオランダのライデン大学のオネスにより、水銀を液体ヘリウム(4.2K)で冷やすと電気抵抗が零になることが発見された。これが超伝導の発見である。これに先立つ1908年にヘリウムの液化に成功したことが、彼をこの発見に導き、オネスは1913年にノーベル物理学賞を受賞している。その後、さまざまな金属が超伝導状態になることが発見されたが、1980年代にいたるまで、超伝導状態になることが発見された物質の臨界温度、すなわち、超伝導状態になる温度は、せいぜい20-30K程度であった。

ところが、1986年にIBMチューリッヒ研究所のベドノルツとミュラーがランタン・バリウム・銅酸化物が30Kで超伝導状態になることを示し、それ以降、高い温度で超伝導状態になる酸化物系の材料が続々と発見された。これらの発見は、マスコミにも大きく取り上げられ、世界中の科学界を巻き込んだ超伝導フィーバーとよばれる騒ぎとなった。これらの新しい種類の超伝導材料は、

- ・臨界温度が高いこと
  - ・金属や金属間化合物ではなく酸化物であること
- といった点で、それまでの超伝導材料と極めて異質なものであり、酸化物(系)超伝導体/高温超伝導体などと呼ばれる。これに対し、それまでに見つかった金属系の超伝導体を、金属(系)超伝導体/低温超伝導体と呼ぶ。

高温超伝導フィーバーのときにも、東京大学の田中、北沢らが重要な役割を果たし、その後も、新超伝導物質の発見においては、日本人の活躍は顕著である。すなわち、酸化物系高温超伝導体の発見以降、現代にいたるまでに発見された新超伝導物質のうち、もっとも重要なものと考えられる二硼化マグネシウムと鉄系超伝導体は、それぞれ、青山学院大学の秋光らと東京工業大学の細野らによって2001年、2006年に発見された。

### 2. 超伝導による高磁界発生への応用

工学的な見地からの超伝導のメリットは、

- ・無損失での電流の輸送
- ・高磁界の発生

の2つであるが、応用という点では後者の方が先行している。これらのメリットのうち、前者については、電気抵抗が零であることの直接的応用であるので理解しやすいが、後者については若干説明が必要かもしれない。

ある程度、大きな空間に磁界を発生してこれを利用するためには、永久磁石よりも電磁石が用いられることが多い。いわゆる「電磁石」以外にも、例えば、発電機の中では、界磁巻線と呼ばれる電磁石が高速で回転し、その周囲の静止した電機子巻線に交流の電気を電磁誘導により発生している。銅線に流すことのできる電流の密度はジュール発熱により制限され、特別な冷却を施さない場合では、1mm<sup>2</sup>あたり数A程度である。このため、銅線を用いてコイルを巻いて電磁石を作っても発生できる磁界には限りがある。ところが、超伝導状態では、電気抵抗が零であるのでジュール発熱による電流密度の制約はない。実際には、臨界電流密度と呼ばれる、超伝導状態で流すことのできる電流密度には上限があるが、例えば、もっとも広く用いられているニオブチタン合金(NbTi)の超伝導線の場合、臨界電流密度は1mm<sup>2</sup>あたり数千Aと、ジュール発熱により制約された銅線の電流密度よりも格段に大きい。電流と電流が発生する磁界の関係を表すビオサバルの法則やアンペールの法則から明らかのように、コイルを構成する電線に流す電流を大きくできれば電磁石はより強い磁界を発生することができる。

オネスは、既に、超伝導を使えば強力な電磁石を作ることができるだろうと考えたが、実際に、実用的な超伝導電磁石が登場したのは1960年代のことで、超伝導の発見から、その実用化には50年の年月を要したことを忘れてはならない。現在、もっとも広く用いられている超伝導線であるニオブチタン合金の超伝導線が1960年代に商用化され、これが

超伝導電磁石の実用化に大きく貢献している。1966年には、超伝導電磁石を用いたNMR(核磁気共鳴)装置が登場している。

今日、もっとも広く用いられている超伝導電磁石は病院のMRI(磁気共鳴イメージング)用のものであろう。現在、MRIで主流となっている1.5Tから3Tという磁界を人体が入れるほどの大空間に安定して発生することは、永久磁石でも銅線を用いた電磁石でも不可能であり、超伝導電磁石のみによって可能である。現在、世界で年間3000台以上の超伝導MRIが新規に導入され、これらには、ニオブチタン超伝導線に巻いたコイルを液体ヘリウムに浸けて冷やした超伝導電磁石が用いられている。

最近の日本で超伝導に関する話題といえば、JR東海が2027年東京・名古屋間営業運転開始を目指し建設を進めている超電導リニアであろう<sup>1</sup>。磁気浮上式鉄道には、電磁吸引支持方式(Electromagnetic suspension:EMS)、電磁誘導浮上支持方式(Electrodynamic suspension:EDS)の2つの方式がある。上海のものは銅電磁石を用いた前者、JR東海のものは超伝導電磁石を用いた後者である。電磁誘導浮上方式は、前者より一桁大きい10cm程度車両を浮上させることができ、地震国である日本ではメリットが大きい、強力な電磁石を必要とする。そのために、日本の超電導リニアにおいては、液体ヘリウムによって冷却された超伝導電磁石が用いられている。

現在に至るまで、高性能な超伝導電磁石の研究開発をけん引してきた二大応用が核融合と粒子加速器である。次に、これら2つの応用について概説したい。

核融合とは、重水素や三重水素を高温プラズマ状態にして、それらの原子核が融合しヘリウム原子核になる際に出てくるエネルギーを利用しようというもので、将来的には、化石燃料や軽水炉を用いた発電に代わる基幹エネルギー源として期待され、国際協力のもと研究開発が進められている。高温プラズマを金属等の固体容器で閉じ込めることはできないので、荷電粒子が磁力線の周りをサイクロトロン運動し磁力線に巻き付くという性質を利用して、磁界によって高温プラズマを閉じ込める。そのためには高磁界を大空間に発生する必要があり、超伝導コイルの利用が必須である。

※1 「超伝導」と「超電導」はまったく同義である。学界では前者を、産業界では後者を用いることが多い。本稿では、「超伝導」を主に用いているが、「超電導リニア」は固有名詞なので「超電導」を用いる。

核融合装置用の超伝導コイルの本格的な研究開発は、トカマク型核融合炉のトロイダル磁界コイルの技術開発プロジェクトであるクラスターテスト計画/LCT計画(1977-1987年)に始まる。これに実証トロイダルコイル計画(1985-1992年)、ITER工学設計活動(1991-2002年)と国際協力による大掛かりな研究開発が続けられ、その成果を踏まえ、現在、南フランスのカラダッシュにITER(国際熱核融合炉)という実験装置が建設中である。この装置では実際の発電こそ行わないものの、50万kWの核融合反応を起こさせる計画である。

高エネルギー物理学研究用の粒子加速器にも超伝導電磁石が用いられてきた。高エネルギー物理学研究用の粒子加速器の多くはシンクロトロンと呼ばれる円形加速器で、円形加速器においては荷電粒子の軌道をローレンツ力により偏向し円軌道にするために電磁石が用いられる。電磁石の磁界が大きいほど荷電粒子を大きく偏向し円形加速器を小型化できるので、超伝導電磁石が用いられる。小型化のほか、電磁石の超伝導化は消費エネルギーの低減効果も大きい。これまで、米国のフェルミ国立加速器研究所のTevatron、ドイツ電子シンクロトロン(研究所)のHERA、米国のブルックヘブン国立研究所のRHIC、欧州原子核研究機構のLHCといったシンクロトロンが超伝導電磁石を用いて建設された。なかでも2008年に完成したLHCには8.3Tの磁界を発生するビーム偏向電磁石が1200台以上用いられており、LHCを用いた実験ではヒッグス粒子が発見されノーベル物理学賞の受賞につながっている。なお、日本でも高エネルギー加速器研究機構のJ-PARCと呼ばれるシンクロトロンのニュートリノビームラインに超伝導電磁石が用いられているほか、理化学研究所では超伝導サイクロトロンが建設された。

### 3. 高温超伝導線

2で説明したような、これまでの超伝導電磁石には、ニオブチタン超伝導線やニオブスズ合金を用いた超伝導線(ニオブチタン超伝導線より高磁界で用いることができる)のような低温超伝導線が用いられてきた。低温超伝導線は、製造技術も確立し安価で高性能ではあるが、臨界温度が低いために、多くの場合、液体ヘリウムを用いて、4.2K程度以下まで冷やして使わなければならない。冷却のためにはなんらかの冷却装置が必要であるが、冷却装置の効率は、熱力学の原理から、温度が低くなるほど低下してしまう。例えば、4.2Kまで冷やす冷却装置(液体ヘリウムを作る液化機)の効率は0.2%程度と言われている。これに対して、77Kであれば冷却装置の効率は5%程度まで向上するといわれている。従って、臨界温度が高く、より高い温度で用いることができる高温超伝導線は実用上、大変魅力的である。

1986年の高温超伝導の発見以降、様々な高温超伝導材料が発見され、これらのうち、以下の2つの材料を用いた高温超伝導線が実用化され、市販されるに至っている。高温超伝導材料は、いずれも脆いセラミックス(いわば焼きもの)であるが、金属と複合することにより柔軟性をもった電線が実現されている。

1つ目は、ビスマス—ストロンチウム—カルシウム—銅酸化物( $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (Bi-2223)や $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_x$ (Bi-2212))である。これらについては、銀を母材とし、その中に数十本のBi-2223やBi-2212のフィラメントを埋め込んだ多芯線材が実用化されている。

2つ目は、希土類—バリウム—銅酸化物( $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (RE-123):REはイットリウム(Y)、ガドリニウム(Gd)、サマリウム(Sm)などの希土類)である。これについては、金属テープの上に酸化マグネシウムなどの中間層を形成し、さらにその上にRE-123の薄膜を形成した薄膜線材が実用化されている。

図1に筆者が購入した市販の高温超伝導線の写真を示す。筆者は、超伝導材料の研究ではなく、超伝導線をいかに上手に用いて超伝導を応用した機器・システムを構成するかという研究を行っているが、1990年ころに初めて高温超伝導物質やBi-2223超伝導線を見たときのことを今でも覚えている。その

当時見た高温超伝導物質は、まさに、焼き物の「かけら」であり、Bi-2223超伝導線も、わずかの長さの数Aしか電流を流せない代物であった。また、RE-123薄膜線材にしても、2000年代の初めころまでは、数cmの試料を貴重品のように扱って様々な実験を行ったことをよく覚えている。それらのことを思い起こしながら図1の超伝導線を見ると隔世の感がある。ここに至るまでには、材料科学者、プロセス技術者による地道な努力があったことを忘れてはならない。また、高温超伝導の発見から30年が経過しているが、オネスによる超伝導発見から実用的な超伝導線の商用化まで50年かかったことを考えると、高温超伝導の発見から高温超伝導線に実用化までの歩みも決して遅いとは思われない。

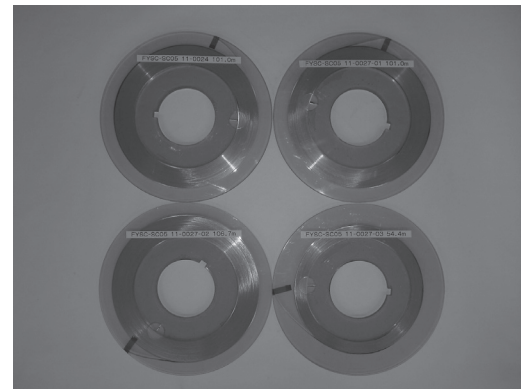


図1 市販のRE-123薄膜線材(4つのリールに巻かれた全部で350mの超伝導線)

### 4. 高温超伝導線の応用に向けた研究開発

高温超伝導線が実用レベルに近づいてきた10年ほど前から、それを応用した各種機器・システムの研究開発が進められてきた。本節では、それらについて概説したい。

低温超伝導線の応用については、「無損失での電流の輸送」と「高磁界の発生」という超伝導の工学的メリットのうち、後者を用いた応用がほとんどであった。これは、低温超伝導線が4.2K程度まで冷やさなければならず、冷却装置の効率が低くならざるを得ないという点が影響していたためである。これに対して、高温超伝導線においては、「無損失での電流の輸送」という特徴をストレートに生かした超伝導送電ケーブルの研究開発が様々な応用機器・システムの研究開発の中でも先行している。送電

ケーブルは、主に都市部において地下のトンネルや管路に敷設して電力を送る送電線の一種であるが、これを超伝導化することによって、送電途中の電力の損失を低減し、かつ、細いケーブルで多くの電力を送ることができる。高温超伝導送電ケーブルの研究開発は、日本、米国、欧州、韓国、中国などで進められてきており、各国で、試験段階ではあるが、実際に、これを通した、家庭や工場への送電も実現されている。超伝導線は臨界電流と呼ばれる限界値を超える電流が流れると常伝導状態に転移し電気抵抗を発生する。この特有の性質を利用した限流器も高温超伝導を応用した電気機器の中で特に期待が高いものである。限流器を送電線に直列に入れておけば、平常時は抵抗が零で送電に影響を与えないが、落雷等の事故により、送電線に過大な電流が流れると限流器が常伝導状態に転移し電気抵抗を発生し、過大な電流を抑制する。限流器は、送電線につながれた様々な電力機器の保護に役立つほか、送電網の構成の柔軟性を増し、再生可能エネルギーの導入増大にも役立つと言われている。このほか、モータ、風力発電用の発電機などに高温超伝導を用いる研究も進められており、省エネや、機器のコンパクト化に役立つと期待されている。

高温超伝導電磁石の医療応用に向けた研究開発も近年、活発になってきている。例えば、重粒子線がん治療装置において、がん病巣に照射する炭素イオンを高速に加速する円形加速器に高温超伝導電磁石を用いてこれを小型化・省エネ化する研究や、重粒子線を患者に多方向から照射するための回転ガントリーと呼ばれる装置に軽量・高磁界の高温超伝導電磁石を用いてこれを小型・軽量化するための研究開発が進められている。

#### 実用的な超伝導線はマイスナー状態ではない

ここで、よくある誤解をひとつ正しておきたい。超伝導の特徴のひとつとしてマイスナー状態(完全反磁性状態)が挙げられるが、実用的な超伝導線は完全反磁性状態ではないことに注意を要する。このことは、以下のように簡単に理解できる。

超伝導体といえども一種の導体であり、その内部の磁束密度 $B$ と電流密度 $i$ の間には次式(アンペールの法則の微分形)で与えられる関係が成り立つ。

$$\nabla \times B = \mu_0 i \quad (1)$$

完全反磁性状態では、至るところ $B=0$ である。従って、その回転も零で、 $i=0$ となってしまう。これでは、電流を輸送することはできず、電線としては役に立たない。

実用的な超伝導体は第二種超伝導体と呼ばれる超伝導体で、完全反磁性を示す限界である下部臨界磁界は大変小さく、通常、使用される状態では内部に磁束が侵入している。磁束は、磁束量子線という形で量子化して侵入しており、磁束密度の空間分布の非一様性に応じて、(1)式に従って与えられる電流密度で電流が流れている。この様子を図2に概念的に示した。このような状態を第二種超伝導体の混合状態と呼ぶ。磁束密度が大きくなり、上部臨界磁界という限界を超えると第二種超伝導体は完全に常伝導状態となる。

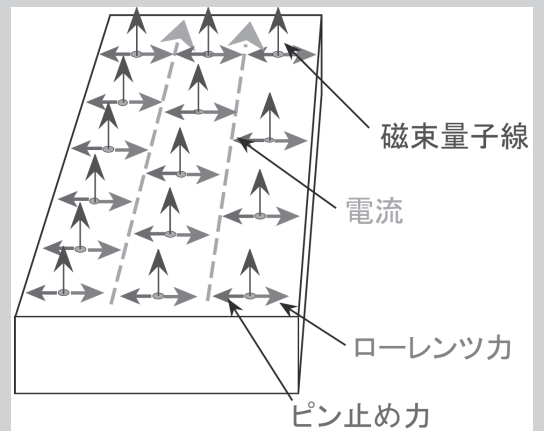


図2 第二種超伝導体の混合状態