

超 電 導 材 料

Super Conducting Materials

安 河 内 昂*
Ko Yasukochi

1. ま え が き

—260—270度という極低温で電気抵抗ゼロという超電導現象が発見されたのが、1911年、オランダのK. オンネスによってである。以後約半世紀、この現象はその物理学的機構が未解決のまま、難問題とされた。1956年、BCS理論によってその本質が解明された。丁度その後、高い磁場まで超電導性を保つことのできるすなわち高い臨界磁場をもつ高磁場超電導が発見され、1961年、はじめて超電導マグネットが成功した。電力消費がゼロで強磁場を発生できる超電導マグネットはそれ以来、大きな可能性をもつ技術として研究・開発され、その応用も広がってきている。現在、国鉄がおこなっている超高速のリニアモーターカーや核融合につかわれるマグネットも超電導の有力な応用として今日新聞等にあらわれ、そのため超電導という言葉も社会的によく知られるようになって来ている。特に石油危機以来、代替エネルギー、省エネルギーの研究開発は活発化しているが、ここにおいても、大型で強い磁場を発生できる超電導マグネットは重要な技術として注目されている。以下において、超電導の応用とそれに使用される超電導材料についてのべよう。

2. 超電導物質

電気抵抗ゼロの超電導は、それ以下の温度で超電導となる転移温度 T_c 、とそれ以上の磁場では超電導性を失う臨界磁場 H_c で特徴づけられる。

超電導を示す物質は、今日までに分っているもので元素で25、化合物や合金で幾種類かある。その内、超電導マグネットとしての応用にとって興味のあるものは、この T_c 、や H_c の高い物質である。表1にこれのいくつかの例を示した。現在最高の転移温度をもつもの

のは Nb_3Ge の23.2Kであり、最高の臨界磁場をもつものは $PbMo_{0.5}S_6$ の54T(4—2K)である。このような高い転移温度や臨界温度をもつものは、化合物ではいくつかの結晶型をもつものに多い、表1にそれを示している。その中で、特にA—15型の結晶構造をもつものが実用化されており、 Nb_3Sn と V_3Ga がある。化合物の他にもつとき使用されている超電導物質としては、合金系超電導材料があり。(表1参照)、この内ではNb—Ti合金が最も普及している。

表1 各種超伝導材料の結晶構造、転移温度および4.2Kでの上部臨界磁場

材 料 名	結晶構造	T_c [K]	$H_{c2}(4.2K)$ [T]
Nb—Ti	A 2	10.7	17
Nb—Zr	A 2	10.8	11
V_3Ga	A 15	16.5	22
Nb_3Sn	A 15	18.3	22
Nb_3Al	A 15	18.9	32
$Nb_3(Al, B, Be)$	A 15	20.0	
Nb_3Ga	A 15	20.3	34
Nb_3Ge	A 15	23.2	
$Nb_3(Al, Ge)$	A 15	20.5	41
NbCN	B 1	17.8	12
$V_2(Hf, Zr)$	C 15	10.1	23
$PbMo_{0.5}S_6$	Rhomb	14.4	60

c. c. 臨界電流密度 j_c 。ここでの臨界電流とは、 H_{c1} 以上の磁場の下で流しうる電流の

現在使用されている超電導材料は、ほとんど4.2K附近で用いるが、もし転移温度のより高いものが発見できれば、その使用ははるかに楽になる。たとえば、図—1に各種低温液体の沸点を示したが、30Kの転移温度をもつ超電導物質が見付かれれば、液体水素(20.05K)が使用でき、ヘリウムという貴重な資源を使わなくて済み、また冷凍に用いる電力も少なくて済み、さらに、より高い転移温度となれば望ましいことはいうまでもない。したがって、より高い転移温度の超電導物質を発見する研究が盛んである。これには2つの途が

* 日本大学理工学部 教授

あり1つは、現在、分っている物質の延長上を研究する方向で、現在最高温度の Nb_3Ge (23.2K) と同じ A-15 型の研究である。理論的には Nb_3Si で A-15 型で化学量論比 (3 : 1) のものが出来れば 30 K となるといわれているが、今のところ成功していない。超高压を用いて超電導物質をつくる方法があり、最近 CdS が高い Tc をもつ超電導になったという報告があるが未だ確実になっていない。

また有機物の超電導の研究も盛んで、非金属のものとして SN_x の超電導があり、また、有機物の超電導も噂されているが未確認である。図-1 に超電導物質の臨界温度向上の年表を示した。

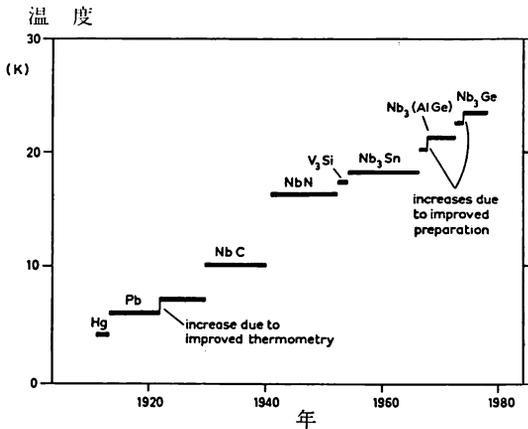


図-1 臨界温度向上の様子

3. 超電導線材

超電導の応用のためには、超電導物質はたとえばマグネット用線材として加工できるものをえらばなければならない。このように容易に線材加工できるためには超電導材料は伸線加工が可能な延性をもっていなければならない。このため合金が望ましい。Nb-Zr、や Nb-Ti はこのためマグネット線材となった。後でのべるように、現在使用されている線材は安定化線材でこれは銅の中に埋込まれた多数の超電導線からできている。このためには銅と一緒に伸線出来ることを要し、このため現在は合金系超電導線材としては Nb-Ti および Nb-Ti を土台として少量の Ta 等をいれた Nb-Ti 系合金となった。前にあげた金属間化合物はもともと硬くてもろい、いわゆる脆性を有するために合金線のように伸線加工は出来ない。したがって、現在これは拡散法によって線材に加工している。Nb のテープを溶融した Sn につけて表面をコートし、これを 900 °C 付近で熱処理すると Sn と Nb が拡散反応により Nb_3Sn を生

成し Nb_3Sn のテープ材となる。現在のこの方法でマグネット用線材となっているものに、 Nb_3Sn 、 V_3Ga がある表 1 に示すように NbTi 線材はそのマグネット線材としての特性、臨界磁場、臨界温度は化合物の Nb_3Sn 、 V_3Ga より悪いが線材製造の容易さとテープ材でない円形断面の線材であることから、多く使用されている。NbTi 線材でつくられるマグネットの最高磁場は、ふつう 8 T で、限界設計が 10 T が最近実現している。Nb₃Sn テープで 16.5 T、 V_3Ga テープと Nb_3Sn テープで 17.5 T を実現している (いずれも 3 ~ 5 cm 内径) 後者のマグネットは金材技研に設置されたもので、超電導マグネットとしては最高の磁場を発生している。図-2 にこれら実用線材の特性を示した。

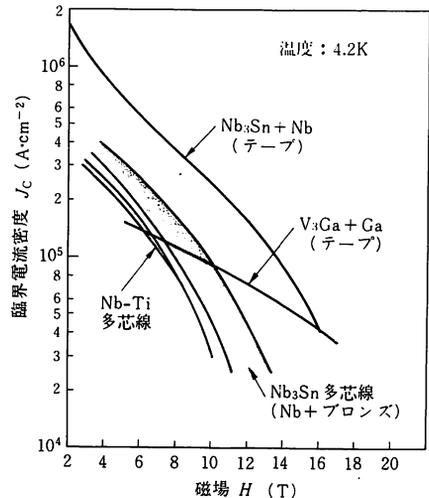


図-2 実用超伝導線材の代表的な J_c - H 特性 1) 臨界電流密度 J_c の算出には安定化の Cu を除外してある。

現在使用されている超電導線材は上へのべた単純に超電導の線材、テープ状になったものではない。それは、安定化された線材にするため複合的導体となっている。ここでいう安定化には 2 つの意味がある。それは、

i) 超電導線材の示す磁気不安定性を安定する事、その詳細ははぶくが、超電導マグネット線材になるような高い臨界温度、臨界磁場の超電導は、超電導物理としては不均質第 2 種超電導という。この不均質第 2 種の磁化過程に生ずる磁束ジャンプにより磁気不安定性が発生する。磁束ジャンプは発熱を伴うので、これが大きい場合、その部分の超電導が消失し常電導となる。現在、超電導線材は何等の形で銅と組合わされている。

ふつうは銅マトリックス中に極細の線が多数本埋込まれた極細多心線の複合線となっており、この超電導の多心は振られている。このような方法により磁気不安定性を小さくしたのを安定化という。

ii) 第2の安定化は超電導マグネットの一部に常電導領域が発生し、線材に電流が流れている場合、その部分のジュール熱により、発生した常電導領域が拡がり、最後に全体が常電導となる。これを常電導転移クエンチとよぶ。小型のマグネットの場合、(i)でのべた銅マトリックスをもった多心線では、銅の効果で、この常電導領域の伝播はゆるめられる。更にコイルが大型になった時は、クエンチを有害にしないためには、線材にさらに銅の部分を增加する。銅と超電導との断面比が10~20にもなるようにする。さらにコイルの巻線構造において、間隙をつくり、ここに液体ヘリウムが入り、線材の表面は必ず部分的に液体ヘリウムに接触するようにする。このようになったコイルでは、常電導領域を生じても、それが破局的に拡がることはなく、コイルの端子間の電圧をみて、電流を下げて、クエンチを防ぐことが出来る。このようになされたコイルを安定化コイルといい、銅比の大きい、液体ヘリウムと表面の一部で触れるようにされた線材を安定化導体という。

現在、上にのべたように、実用化された超電導導体は極細線(数 μm ~数10 μm の直径)が銅に埋込まれた多心線であり、大型用マグネット用導体では、この多心線を色々な方法で多数集め、銅を余分に組合せて安定化線材を形成している。図-9、図-4

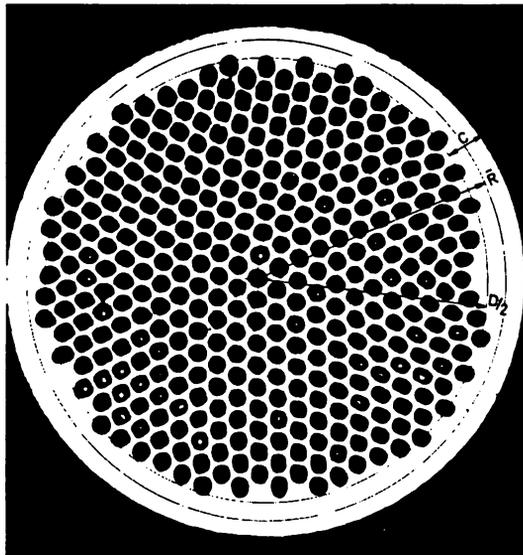


図-3 多心線の断面

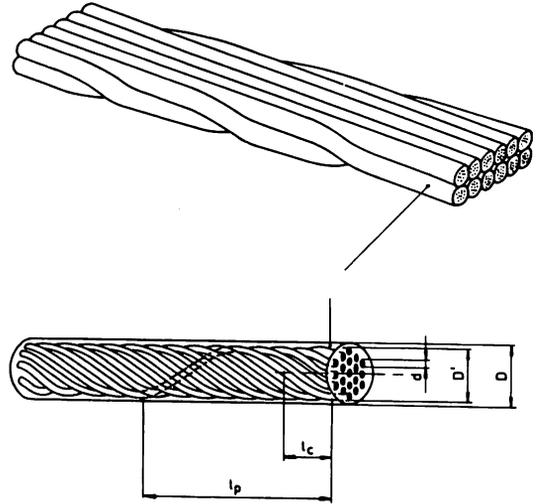


図-4 多心線のtwistの様子とケーブルにした線材

このような線材の進歩により小型より大型にいたる超電導マグネット技術が完成し、実用化した。

4. マグネットの冷却の問題

安定化のところでのべたように、何等の原因で生じた常電導領域の拡をゆるやかにする。又は収縮させて元の超電導状態に回復するために、安全化線材を用いさらに大型コイルでは巻線内にヘリウムの通路をつけ導体の一部を直接冷却するようになった。ここに、コイルの冷却が、単に極低温にして超電導線を超電導状態に保つようにするというだけでなく、もっと積極的に、内部に生じる磁束ジャンプや常電導の芽での発熱を冷やすことが重要となった。このために、超電導導体の冷却の技術が発展した。

i) 液体ヘリウムと導体との熱伝達

導体を液体ヘリウムで冷却することは導体とヘリウム液との間の熱伝達が問題とされた事になる。1年体4.2 Kのヘリウム液での熱伝達は沸騰現象によって生じており、したがってその伝熱曲線の膜沸騰より核沸騰に復する最小熱量が重要になる。しかしこの値は平の粗さや、向、導体のある場所でのヘリウム通路の間隔というものにより変り一義的にきめられない。しかし粗くいってしまけば0.1~0.2 w/cm²の値が用いられる。この伝熱量を正確に決めることが、安定化マグネット設計にとって重要となり、またこの値をあげることが望まれる。導体表面に溝をつけたり、粗面にしたり、被覆することにより、実効的な伝熱量を上げることが試みられている。また、最近、2.2K以下でヘリウム液が示す超流動状態を冷却に使用する事が発展させ

られているが、これも伝熱量を10倍位上昇す点を利用している。

ii) 強制冷却

i) でのべたのは、冷媒の液にマグネットをつける、浸漬冷却の場合をのべた。しかし沸騰現象では伝熱を一義的に決めないために、最近では、何等から中空導体の内部に冷媒を強制的に流す冷却方式が発展している。この場合冷媒の状態として加圧されたヘリウムガス—超臨界ヘリウムガスを用いる場合と、一気圧のヘリウム液を用いる場合がある。前者では沸騰現象は生じない。このような強制冷却方式は、導体は中空導体で外部にヘリウムの通路をつくる必要がないため、コイルの強度は向上し、また外部にヘリウム液がないことからコイルの容器が簡単になる。一方導体内部を冷却するため超電導導体の構造が複雑になる。また冷却システムも複雑になる。

5. 超電導マグネットのパルスの使用

今までの話はすべて、定常磁場発生用のマグネットであった。それというのも、超電導が電気抵抗ゼロで使用できるのは、静的な使用条件においてであり、動的な使用、すなわち、変動する磁場で使用においては、電気抵抗がゼロではない。これは一種の磁気履歴による損失で、これにより、発熱を生ずるからである。しかし、前にのべたような最新の超電導導体である極細多心線では、超電導線の径を細くすることにより、交流損失を下げることに成功し、超電導マグネットの交流的使用を考えられるようになった。しかし、この極細多心線においては、超電導線の損失を小さくできたが、銅マトリックスでの誘導電流による渦損失が発生する。これを小さくするために、種々の方式が開発されている。極細多心線をさらに縮線する方法(図-5)や銅マトリックス中にNiCuを層を入れて大きな渦電流のループを切断し交流損失を下げるのが実用化している。このようにして、現在、加速器に使用されるパルコマグネット等に使用されようとしている。

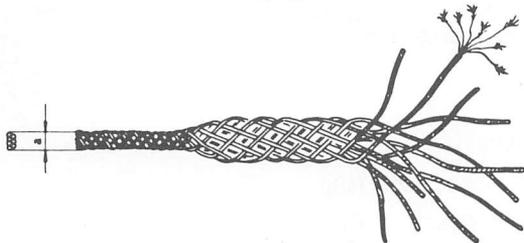


図-5 パルスマグネット用編線

6. エネルギー技術への超電導マグネットの応用

損失ゼロで、高磁場あるいは大容量の磁場を発生できることが、いろいろな分野への応用をうながし、研究、開発がすすめられている。以下若干の例を示そう。

i) MHD

石炭や重油を燃焼する火力発電において、この燃焼するほのほを強い磁場中に噴出さす。ほのほは低温のプラズマとして高い電気伝導性をもっているために、プラズマを走らせるダクトにつけられた電極に起電力が発生する。この直接発電をMHD発電という。火力発電とMHD発電を組合せる複合発電とすると、現在の火力の38%という発電効率が55%にも上昇し、大きな省エネルギー効果をもつ。特に今日、石油危機以後、石炭が再登場し、目下石炭の見直しが進んでいるが、MHDはその最有力技術の一つとして、米ソにおいて活発に開発が進められている。1990年のはじめには実用化段階には入るとされている。MHDには上にのべたように大容量の強磁場がある。実用機段階になると最高磁場6Tで20mの長をもつくら型のマグネットという巨大なものになる。図-6にこれを示した。

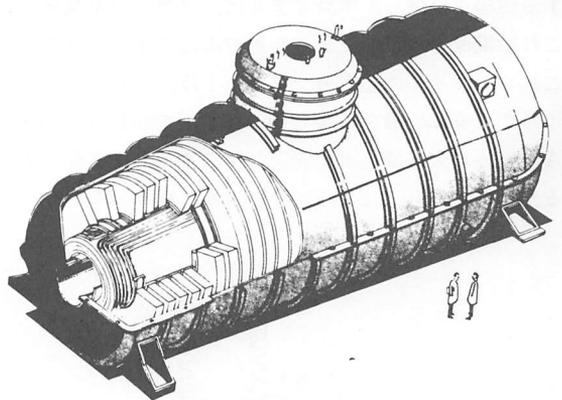


図-6 実用化されたMHDマグネットの図

ii) 核融合

現在使用しているウランの原子力も、いずれは他の化石燃料と同様に消費し尽されるが、核融合反応を使用する核融合発電は、重水素—重水素の反応が成功すれば、ほとんど無限といえるエネルギーを供給することが出来、人類のエネルギー問題は最終的に解決する。そのため、核融合の研究・開発が盛んである。核融合の方式の内、高温のプラズマを磁場で閉じ込める方式を磁気核融合といい、これの実現には大容量の強磁場を必要とし超電導マグネットは不可欠となる。このた

め核融合のための超電導マグネットの研究開発が活発におこなわれるようになった。

磁気核融合のうちもっとも進んでいるのがトカマク方式である。図-7にその概観を示した。トカマクに使はれるマグネットには2種類ある。

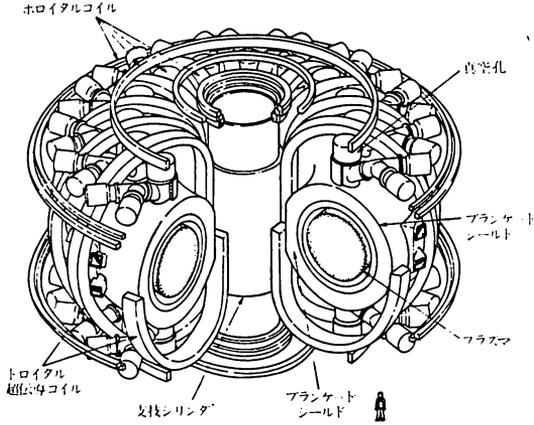


図-7 実験炉の概念図

トロイダルコイル

ポロイダルコイル

である。トロイダルコイルはプラズマを磁氣的に保持する磁場を提供し、ポロイダルは、プラズマを発生しこれに電流を流してジュール熱で温度を上昇させる。これらのコイルの超電導マグネットは、トロイダルコイルで、導体の最高磁場で10~12T、で20KA~50KAといった大電流を流す安定なマグネットを必要とする。この冷却も、4.2Kのヘリウム液に浸けるものや、

超流動ヘリウム液で冷却するもの、加圧した超臨界状態を中空の導体の内部に強制的に循環させるものといろいろあるがどれが有利かはまだ決定されていない。目下は現在建設されているトカマク装置（日本では原研のJT-60）の次の装置に使用するために研究が進められている図-7はその導体の一例である。ポロイダルコイルはパルス磁場を発生するコイルでより難しい、これも次期装置を目指しているが、使用されるかどうかは分からない。核融合の実用化は次の世紀には入るため、今後より進んだ超電導線材が開発され使用されるようになることが期待できる。

iii) その他

磁場は多くの電気機械に使用されており、したがってその磁場の発生にマグネットを超電導に置きかえれば省エネルギーとなる。勿論超電導マグネットを使用するのは省エネルギーだけの理由でなく、一般に高磁界化し大容量化するとコスト、技術の面で超電導マグネットを使用せざるをえなくなることが主な理由であり、同時にそれは省エネルギー実現する。

目下開発されてきている超電導マグネットの応用分野は、同期発電機、単極電動機、磁気浮上超高速列車、シンクロトロン加速器、サイクロトロン加速器、船舶推進、等多くのものがあり、この他に石炭の脱硫のための磁気分離に使用する開発も進められている。しかしいずれも開発中で、現在、実用化しているものはない。今後の開発と実現が期待される。

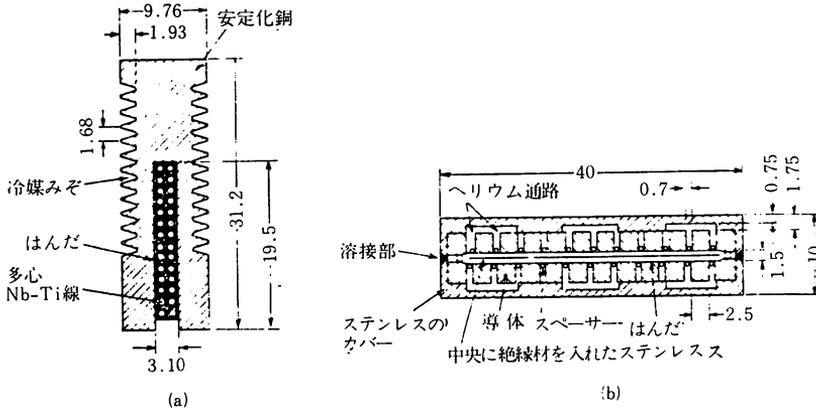


図-8 大型コイル計画用導体例(a)
ジェネラル・ダイナミクス社の導体(b)
カールスルール研究所の導体
(長さの単位: mm)