超電導マグネットの問題点

安河内 昂*

(昭和41年6月14日受理)

Superconducting Magnets

Kō YASUKŌCHI

(Department of Physics College of Science and Engineering, Nihon Univ., Kanda-Surugadai, Chiyoda-ku Tokyo, Japan)

(Recived June 14, 1966)

1. はじめに

1961年11月に MIT においておこなわれた、高磁場国際会議の席で、Nb-Zr, Nb₃Sn線材を用いた約60KGの磁場を発生する超電導マグネットが報告¹⁾されて以来、5年余の年月がたった。この間にみられた超電導マグネットの技術開発の速度はまったく驚異的なものであった。一方1956年のBCS理論²⁾による超電導現象の基本的解明で結着がついたかにみえた超電導の基礎研究も、この超電導マグネットという応用に力をえて、新たな段階に入り、硬超電導、表面超電導等のようなめざましい成果をえて発展している。現在超電導マグネットの有用性が実証されたことは、誰も疑いをはさむ余地はなく

なったが、問題はそこで終わったのではなく、さらにより大きな可能性に向ってその基礎的解明を深め、技術の展開がすすめられていることは注目に値しよう。

この5年余間に蓄積された、超電導マグネットの知識は膨大なもので、これを超電導からでなくて、超電導マグネット材料の基礎である硬超電導体の物理からときおこしてさえも、与えられた枚数におさめることは不可能である³⁾。また、増大する超電導マグネットの応用全体にわたって、その現状を報告することは、現在急激な段階にあるだけに適当な時期でないと考えられる。そこで本稿においては、問題のある狭い範囲にしぼって、もっぱら超電導線材、およびマグネットの安定化に関する最

表1 超導元素 (枠中の数字は $T_c(^{\circ}\text{K})$ をあらわす)

II										He									
Li Be										B C N O F Ne									
遷 移 元 素																			
Na Mg										Al 1 20									
K Ca										Cu Zn Ga 0 87 1 10									
Rb Sr										Ag Cd In Sn 0 56 3 40 3 72									
Cs Ba										Au Hg Tl Pb 4 152 2 38 7 20									
Fr Ra										Bi Po At Rn									
Ac																			
Th																			
Pa																			
U																			
Np																			
Pu																			
Am																			
Cm																			

電子	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8
----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	---	---	---	---	---	---	---	---

近の成果とその現況を報告することにした。筆者は、この問題こそは、現在の超電導技術の核心であり、またこの問題のより完全な解明と技術的発展が、今後を支配するものであることを信じているからである。上にも述べたように、超電導マグネットの応用といったような他の aspect については、また別な機会にゆずりたい。

2. 超電導マグネット線材

いうまでもないことであるが、超電導とはある種の物質を極低温にもっていくと、その電気抵抗が零となる現象である。このような性質を示す物質、超電導物質は現在元素で25種類(表1)、合金や化合物をあわせると、約500種類もある⁴⁾。超電導マグネットは、この電気抵抗零という特性を利用したものである。さて、超電導物質、超電導線材は次の3つの特性であらわされる。すなわち、臨界温度 T_c (その温度以下で超電導となる温度)、臨界磁場 H_{c2} (その磁場以上を加えると超電導がこわれる磁場)、臨界電流 I_c または臨界電流密度 J_c (線材にしたとき、それ以上の電流を流すと超電導がこわれる電流値)。超電導マグネットでこの3つのパラメーターを考えれば、 T_c の温度以下でマグネットを運転しなければならず、したがって、 T_c は4.2°K(液体ヘリウム温度)以下であることが必要である。 H_{c2} 、 I_c については、線材にしてコイルをまいた場合に、超電導マグネットとして流しうる最大の電流値が I_c でおさえられ、発生する磁場は I_c の磁場依存性 $I_c \sim H$ 曲線に依存し、その上限は H_{c2} である。したがって、これらの T_c 、 I_c 、 H_{c2} ができるだけ高い物質であることが線材として必要なのである。

現在、超電導マグネットに使用されている線材は合金線材と化合物線材に分けられる。

2.1 合金線材

Nb-Zr 系、Nb-Ti 系の2種類が使用されており、商品としても発売されている。これらの性質はその合金濃度によって変化する。また加工と熱処理によっても特性が変わり、これらを組合せてよりよい線材をえている。合金線材のもう一つの長所は線材加工が容易であることである。これらの線材の特性を表2に示し、 $I_c \sim H$ 曲線を図1に示した。

2.2 化合物線材

化合物線材は、 Nb_3Sn 一種類だけしか使用されていない。これは β -W 型構造をもつ金属間化合物であり、それ故線材化は困難で、そのためにいろいろな特殊方法で線材化が行なわれている。商品化に成功し使用されているものは次の2種類である。

表2 超電導線材の特性 $T_c \sim H_{c2}$ 。

線 材	H_{c2}	T_c
Nb — (25%) Zr	~70 (KG)	11 (°K)
Nb — (33%) Zr	~75	10.5
Nb — (48%) Ti	~120	9.5
Nb — (60%) Ti	~110	8.5
Nb_3Sn	210	18

図1 超電導線の $I_c \sim H$ 曲線

(a) Vapour deposit法 (RCAリボン)

ステンレス・スチールの薄いリボン(0.07mm厚、2.3mm巾)を900°C以上の炉中におき、同時にリボン自身にも電流を流して加熱する。この炉中に Nb と Sn の塩化物の蒸気を通し、これを高温で水素で還元する。このときステンレス・スチールの表面に Nb_3Sn が生成される。これは RCA の Hanak によって考案された方法⁵⁾で、きわめてすぐれた Nb_3Sn 線材を提供している。

(b) 拡散法 (NRC, GEリボン)

Nb の薄いリボンを熔解した Sn 中に dip し、その表面に Sn をつける。その後、930°C 以上にまで加熱し、固体反応(拡散)によって Nb の表面に Nb_3Sn の層をつくる。

Nb_3Sn 線材は表2に示されているように、臨界温度 ($T_c \approx 18^\circ K$)、臨界磁場 ($H_{c2} \approx 220 KG$) が現在発見されている超電導物質のなかで最も高いという、きわめてすぐれた特性をもっている。

3. 線材の安定化

超電導線材は、これによってコイルをつくり、 T_c 、 H_{c2} 、 I_c 以下の状態で使用すれば、超電導マグネットとして働くわけである。しかし、実は超電導線材・超電導マグネットは、ただ単に電気抵抗零の線とそのコイルと

図2 銅メッキ線

いったものではなく、それに特有のいろいろな性質をもっている。そのうちのいくつかのものが、マグネットとしての性質に悪い影響を与える。

磁場中におかれた超電導線材は、その内部に磁束を入れることができる。この場合磁束は量子磁束として不連続な糸状の状態であり、超電導マグネット用線材の、このような磁場中でのふるまいは、第2種超電導体または硬超電導体の基本的性質である⁶⁾。(Pb, Snのような第1種超電導体—軟超電導体では、磁場は試料表面のごくうすい層にしか入りえない)。線材中に分布している量子磁束線には線材中に流れている電流によって力(ローレンツ力)をうけているが、線材中の結晶粒界、不純物、析出物といった不均質点によるピン止め力と釣合っている。しかし、何等かの原因—この機構は現在のところ明確でない—でこの釣合が破れたとき、磁束は線材内を運動する。これを flux flow というが、この運動が激しくなったとき、これを flux jump という。

励磁された超電導マグネットでは、この flux jump がひんぱんに生じている。したがって flux jump はコイルの中心で磁場のノイズとなり、またコイルの端子間には電圧のノイズとなって観測される。この flux jump は熱発生をともない、激しい flux jump は、ついにはその発生部分の温度を T_c 以上に上げ超電導を破壊してしまう(flux jump による normal 領域の芽の発生)。超電導線には電流が流れているので、この normal 部分では電流によるジュール熱が発生し、この normal 領域はたちまちにしてひろがっていく。定電圧電源でコイルが励磁されているときは、normal 領域の発達に抵抗の増大となり、したがって電流は急激に減少し、normal 領域でのジュール熱が外部よりの冷却にまけるところで、normal 部分の伝播が停止する。以上が超電導マグネットが super→normal に転移する(quenching)様子である。

このような flux jump による部分的な quenching は、超電導コイルにいろいろの特異な現象を引起す。たとえば、単線の $I_c \sim H$ 曲線よりは、コイルにまくとずっと I_c が劣化する劣化現象 degradation 効果や、励磁回数が増すにつれて、コイルの I_c が増加する training

効果のようなコイルにとって迷惑な効果がある。今日、flux jump の物理的機構は、まだ判明していないのであるが、次に示すような2つの方法で、上のべた flux jump による影響を小さく、あるいは場合によってはなくすることができた。

3.1 normal 金属を接着させる方法

Cu または Ag といった normal 金属を材料表面に着ける方法である。図2に示すように、今高純度の Cu が線材の表面に接着しているときのこの効果をのべよう。

高純度の Cu の電気抵抗は、極低温では非常に小さい。そこで (1) flux jump は、この Cu に生ずる渦電流のために運動を緩やかにさせられる。(2) また局所的な normal 領域が発生しても、電流を、表面につけた Cu の方にバイパスさせて、超電導線材の normal 領域には電流が殆んど流れなくなる。したがってそこでのジュール熱の発生は小さくされる。(3) 高純度 normal 金属は非常に低い電気抵抗をもつとともに、高い熱伝導性を有する(超電導物質の熱伝導性はよくない)。そこで液体ヘリウム中で Cu は線材の冷却効果を増大させ、それによって flux jump によって発生した熱をすみやかに取り去る効果をもつ。以上の3つの効果により flux jump の発生を減少させ、また flux jump による normal 領域のひろがりをおさえ、かくして上でのべた flux jump に原因をもつ劣化効果(degradation)等の悪い現象を小さくさせ、あるいは完全に消すことができる。このことを線材の安定化という⁷⁾。この考えによってつくられたものには次の3つの線材がある。

図3 種々の Strand cable

図 4 うめこみ線 (AVCO社 SG-700)

(a) メッキ線

Cu または Ag を線材の表面に電気メッキする。その厚さは普通 10mil の線で 0.75mil~1.5mil である。この単線は完全な意味で安定化はしないが、flux jump による雑音はほとんどなくなり、また後でのべるコイルの quenching 速度を小さくできるために、コイルの高電圧の発生をおさえ保護としての作用をもつ。現在、小型コイル用線材として用いられる。

(b) より線 (Strand cable)

(a) の Cu メッキ線を数本より合せてつくる。各線材の Cu はたし合わさって線材の安定化に役立つ。この方法は C. Laverick によって考案された⁸⁾。さらに銅線と一緒により合わせることで、normal 金属の効果を増大することができる。図 3 にこの種々の例を示す。Cu 線がある程度以上になると線材は完全に安定化し、劣化効果や Trainning 効果はなくなる。適当な種類の線をえらぶことにより、より線は中型コイル (内径 2"~10") をつくるのに適している。

(c) うめ込み線

銅のやや厚いリボンの中に数本 (3~9 本) の超電導線をうめ込んだもの (図 4) である。これは AVCO の J. Z. Stekly によってつくられた⁹⁾。この線材は完全に安定化している。現在同方向の試みがいろいろの処でなされている。この線材は大型用コイル (内径数 10 cm~数 m) のものに適する。

以上の線材にみられる normal 金属の接着の効果は断面でのその量が多いほど安定化の効果は増大する。すなわち、単線、より線、うめ込み線の順序で安定度が高くなる。

3.2 多数の線の協力効果

線材の安定化をはかるもう一つの方法は、単線で使用しないで多数の線を平行して使用することである。上にあげた、より線やうめ込み線ではこれは実現されている。たとえば、いま N 本の線でより線をつくるとする。そしてこの線に流す電流を単線の I_c の N 倍でなくて、 $(N-1)$ 倍までにする。こうすれば、いま N 本のうち 1

(a) 並列抵抗そう入法 (b) 二次コイル抵抗回路法

図 5 保護回路

本のある点で、flux jump 等で局所的な normal 領域が発生しても、電流はその部分を流れないで、Cu を通って $(N-1)$ 本の他の線に分配されてバイパスされる。したがって線材は安定化する。線材の劣化の原因としては、今迄 flux jump のみを言及してきたが、この他にも加工による機械的な傷といったものも線材のウィークポイントを形成する。特に長尺物やうめ込み線の場合にはこれらの効果は無視できない。しかし、この点も多数の線の協力効果でその影響をなくすることができる。

以上のべた (A) (B) の安定化を兼ねそなえているものは、より線と、うめ込み線である。これらの線材では、その安定度が高いことを利用して、 I_c の増加を可能にしている。Nb-Zr, Nb-Ti 線では線引後数百度の熱処理によって I_c が増加するが、同時にその不安定さを増加し、 I_c の劣化効果もまた大きくなる。そこでせつかくの単線での I_c の増大もコイルとしては役立たない。しかし、この線をより線や、うめ込み線にすることにより、この不安定性を消し、高い I_c をもつ線材を製作している。また、とくに強調しておかねばならぬことは、次にのべるように、このような線材の安定化は同時にコイルの安定化という重要な役割を果たすことである。

4. 小型超電導マグネットとその保護法

現在、内径数 cm で約 50KG までの磁場を発生する超電導マグネットは、商品化しており容易に手に入る。あるいはこのようなコイルは実験室においてそれ程の困難もなく作製することができる。

超電導コイルの、初期の最大の問題は、コイルの super→normal 遷移 (quenching) のときに生ずる困難であった。前にものべたように quenching では normal 領域の急激な成長と、それにともなう電流の急激な減少がある。これはコイルの高いインダクタンスと結んで、 $-L \frac{dI}{dt}$ なる高電圧を内部的に発生する。この高電圧がコイル中の層間にアーク放電を生じ、線材を

破壊する。さらにまた、急激な normal 領域の発生は、ジュール熱の発生であり、それは液体ヘリウムの暴発をともなう。このような障害を防ぐ方法 保護 が、超電導マグネット技術の中心問題であったのである。その後保護として次の2つの方法が考案された。

(i) multi Section(多分割化)にして、各セクションに並列に抵抗を入れる(図 5a)。quenching 時の高電圧は、それが生じた section だけに限定でき、小さくすることに成功した。(ii) 図 5b のような二次コイルをつけることより、超電導コイルの quenching 速度を遅くすることができた。しかし、現在は前述したように、すべての線材はメッキその他で normal 金属が附着されている。小型コイル用線材は、必ず Cuメッキをした単線を使用する。この normal 金属の効果により quenching による normal 部分の発生、保護はおさえられて、quenching 時間は非常に長くなり、電圧の発生はさほど深刻ではなくなった。またこの normal 金属は同時に二次コイルの役割も果すことは容易に分る。このように normal 金属はコイルの quenching での 保護となった。もちろん、上にあげた multi section や並列に抵抗を入れる方法は、補助的に使用されることもある。かくして小型コイルに関しての quenching 時の 困難をさけることができ、その作製技術が完成したのである。

5. 大型超電導マグネットとその安定化

3でのべた小型コイルでの quenching 時の保護は、大型コイルにおいてもより一層重要となる。それは大型化するためにコイルのインダクタンスが増大するからである。したがってコイル保護からいって大型化につれて、より高い安定性をもった線材、すなわち、normal 金属の量を増加した線材を、使用しなければならないことは容易に理解されよう。また同時に電圧を下げるには、インダクタンスを小さくすることが必要となる。現在、大型コイルはすべて、大電流量(数百アンペア)の線材を使用して、低インダクタンスにしている。

しかし、大型コイルの安定化はこれだけにとどまらない。後述するように、すでに Argonne 国立研究所で、高エネルギー物理に使用される泡箱に用いられる大型マグネット⁸⁾や、AVCO 社で MHD 研究用の大型マグネットに成功をみているが、これらの成功において、コイルの安定化は新しい段階に入った。それはコイルが quenching を起しても、電流を切ることなく、少し減ずるのみでコイル全体の超電導性が回復するということを可能にしたのである。したがって、急激な電圧の発

(a) Stekly の解析

(b) 安定化線材

(c) 不安定な線材

図 6 安定化の原理

生や、normal 部分による抵抗の増大をみることなく、電流を減らすだけでマグネットの継続運転が可能となったのである。別な言葉でいえば、現象的に「不可逆な

qgenching のないコイル」といってもよい。

この安定化コイルは、やはり前にのべた線材の安定化を最大限に強化したものに他ならない。完全に安定化した線材を使用し、その機能が発揮できるような構造をもったコイルである。いま、超電導線材に接着されている normal 金属の量が強化され、まわりからの線材の冷却が十分になるようにつくられたコイルを考えよう。線材の一部に normal 領域が発生して、そのために電流が normal 金属に移り変わり、ジュール熱が発生する。しかし、このジュール熱がまわりからの液体ヘリウムによる冷却とつりあった場合には、それ以上 normal 領域の増大はおさえられるわけである。さらに、コイル電流を少し減らせば、ジュール熱は減少し冷却がまさり、normal 領域は消滅して、再びコイル全体が超電導状態で運転が継続される。AVCO の Stekly⁹⁾ はこの機構を解析して

$$\alpha = \frac{\rho I_c^2}{h p A (T_c - T_b)}$$

であらわされるパラメーター α を導き、

$\alpha \gg 1$ joule 熱 > 冷却 normal 領域拡大

$\alpha < 1$ joule 熱 < 冷却 normal 領域消滅

のように、上でのべた様子を表わした。図 6 a は彼の解析結果の 1 つである。縦軸はコイルの両端にあらわれる電圧で、横軸はコイル電流である。曲線上の数値は α の値である。実際には $\alpha < 1$ の場合は、図 6 b のような様子を示す。電流が I_c を越えると電圧が発生する。(normal 領域の発生)しかし、 I を下げれば、電圧は曲線の上を可逆的に戻り、 I_c で再び超電導状態となる。ところが、 $\alpha > 1$ では、図 6 a の点線で示す不安定領域がある。これは実際には、図 6 c のように I を上昇し、 I_c までは超電導状態が保たれるが、いったん I_c を越えると、大きな電圧が不連続的に発生し、しかも電流を下げて、もとに戻らないで normal 領域に流れつづけ、電流が大巾に減少した時にはじめて、超電導状態に復帰する。したがって電圧—電流曲線は大きく履歴を示す。

安定化コイルは、まず前にもふれたように、Argonne 国立研究所の Laverick によって、内径 7" で 67KG のコイルの作製において実現した。このコイルはより線を用いている。次に AVCO の Stekly によって、うめ込リボンによる、中型コイル (内径 12 cm) によって実現された。これらのコイルは、安定化線材を用いるだけでなく、コイル構造において線材のまわりになるべく大きな間隔をつくり、液体ヘリウムによる冷却をよくしたのである。そこでパッキングファクター 25% 以下といった小さい値となっている。

これらの結果により、大型コイルの可能性の道が開か

れたのである。しかし、現在この安定化コイルの技術に関してはまだほんの入口に立っている状態である。というのは、どのような線材が最もよいか、またどのようなコイル構造がよいか、ということに関しては全く経験的である。normal 金属はなにがよいか、またその抵抗は磁場によっても変るし、コイルになったときに加わる張力によっても大きく変る。このようにデータは不十分である。また冷却の問題にいたっては、まだなにも解析の手がかりもないといえよう。また線材段階での安定化の試験方法についても、Cornish, Laverick, Stekly といろいろな方法が提案され、そのいずれがよいかということに関しては、最終的結論に達していない。このように安定化コイルの技術確立に関しては、今後の研究の発展にまつところが大きい。

6. まとめと今後の問題点

はじめに断ったように、この報告においては、問題を安定化にしばったために、超電導マグネット技術に関するその他の技術的諸問題、たとえば、Dewar、冷却系と導線の液体ヘリウムへの導入、電源にふれることができなかったが、これらも重要な問題であることはいうまでもない。ここでは、これ以外の 2, 3 の点について補足しておきたい。

6.1 高磁場

現在、100 KG のコイルの作製はさほど困難ではなくなっている。100KG に達したのは、Hulm など¹⁰⁾ の NbTi 線材を用いたもののほかは、すべて Nb₃Sn を用いている。発生しえた最高磁場は、GE における 130 KG である。RCA リボンを用いて、150 KG のコイルの作製が NASA, RCA の協力ですすめられている。高磁場コイル材料として、Nb₃Sn 以外のものが使用されていないことは残念である。

6.2 大型化の問題点

大型化開発の中心となっている分野は、MHD 発電、核融合、高エネルギー物理である。これらの分野においては、大型超電導マグネットの開発が緊急の課題となっている。しかも大型化の実用性が高まるにつれて、超電導マグネットの経済性が問題となり、その点についての議論が活発になされている。

6.3 AC 的使用

上にのべたように、現在の超電導マグネットは、DC 的にしか用いられない。直流磁場の発生しかできない。しかし、磁場を用いた電力機器の多くは、AC 機器であることはいうまでもない。そこで AC で使用できる超電導材料が強く望まれる。超電導線材の磁化におい、履

歴をもつことが、AC的使用において、履歴損失となり、これがDCでの成果を、ACにおいて保持できない原因である¹¹⁾。しかし、超電導のAC効果の基礎現象に立ち戻って、あらためてその可能性を追求すること、および工学的アプローチの両方により、必ずや超電導のAC的使用の可能となる時期が来ることを期待してもよいであろう。

終るに当たって、一言つけ加えておきたいことは、超電導マグネットといった、いわば新技術の開発においてはともすれば、ただ単に先進国の後を追うだけに力を入れるにとどまって、自分自身の技術—自分自身で得た結果と、その拡大強化を疎んじがちになるようである。しかし、やはり最後のところは、どれだけ自分自身の科学や技術をもち、それを深められるかにかかっていることを強調しておきたい。

〔文 献〕

- (1) *High Magnetic Fields*, The MIT Press (1962)
- (2) J. Bardeen, L. N. Cooper, and J. R. Schrieffer : *Phys. Rev.* 108 (1957) 1175.

- (3) 超電導マグネットの解説 ; 菅原 : 物性 7 (1966) 272.
安河内 : 電気学会誌 85 926号 (1793).
- (4) B. W. Roberts : *Progress in Cryogenics* (ed. K. Mendelssohn) 4 (1964) 159
- (5) *RCA Review* 25 (1964)
- (6) 硬超電導体の解説 ; J. D. Livingston and H. W. Schadler : *Progress in Materials Science* (ed. B. Chalmers) 12 No. 3 (1964)
- 中嶋 : 日本物理学会誌 19 (1964) 13, 110.
大塚, 安河内 : 物性 5 (1964) 391, 599.
安河内, 小笠原 : 金属物理 10 (1964) 137, 197.
- (7) Z. J. J. Stekly and J. L. Zar. : *AVCO- Everette Research Laboratory, Research Report* 210 (1965)
- (8) C. Laverick and G. Lobell : *Rev. Sci. Instrum.* 36 (1965) 825.
- (9) A. Kantrowitz and Z. J. J. Stekly : *Appl. Phys. Letters* 4 (1965) 56.
- (10) J. K. Hulm et al : *J. Appl. Phys.* 36 (1965) 128.
- (11) 小笠原, 安河内 : 応用物理 35 (1966) 2.

海外ニュース

大気中で使える Portable Electron Beam Welder

宇宙船 Saturn V の建造用に、Westinghouse Electric Corp で作ったもので、Electron Beam を不活性ガスと共に、大気中に出して、welding に使う。これはまた、大気圏外で使えるように、蓄電池で働くようにもしてある。垂直状態でも、水平状態でも使える。 $\frac{1}{4}$ " 厚の Al 板を 140"/min の速さで、 $\frac{1}{2}$ " 厚の Al 板を 50"/min の速さで、 $\frac{4}{8}$ " 厚のステンレス Al スチール板を 15"—20"/min の速さで熔接できる。価格は \$ 100,000 である。Saturn V では 3600 inch の welding が行われた。容量は 13000 watts で、150,000 volts, 80ma から 100,000 volts, 20ma である。

今までの Electron Beam Welder では、真空容器内で扱うので、熔接する品物の大きさに制限があったが Westinghouse の Electron Beam Welder では、品物の大きさの制限がないことである。Electron Beam

Welder の利点は、小さい面積に集中加熱ができるので、歪が起りにくいことである。

Wight Martindale JR, Portable Electron Beam Welding Unit For Out of Vacuum Operation, *Electronic News*, No. 542, May 2 (1966) 38