エネルギー革新における超電導の利用とその材料

太刀川 恭 治*

1. 緒 言

超電導線材を用いると電力消費なしに、大電流を流したり、強い磁界を発生することができる。そのため図1に示した回路で、超電導コイルに電流を流したのち超電導スイッチBをとじると、スイッチAを開いて外部電源をきり離してもコイル内の電流が減衰しないで流れ、いわゆる永久電流の状態では磁界を発生することができる。このような超電導現象は、(1)強磁界の発生、(2)大電流の輸送、(3)素子、の3分野に大別される用途に利用される。第1の分野はこれまで最も強い関心が払われており、電気回転機械、エネルギー貯蔵、MHD発電、核融合炉、磁気浮上列車、磁気分離、物性あるいは高エネルギー物理研究用マグネットなどへの利用がはかられている。その利点は鉄心電磁石の数倍強い磁界が発生できて機器が小型、軽量化できること、磁界発生にほとんど電力を消費しないことなどである。たとえば直径5 cmの空間に15 T†の磁界を発生するには、銅コイルでは約5 MWの電力を要するが、超電導マグネットではリード線部分などで1 kW程度の電力を消費するにすぎない。さらに銅マグネットでは、電力消費により発生するジュール熱を除去するため、莫大の量の冷却水を必要とする。核融合炉を例にとると、このような強磁界を直径数 mの大きい空間に必要とするため磁界発生に要する

図1 永久電流による磁界発生。

* 金属材料技術研究所電気磁気材料研究部長
Application of Superconductivity in Future Energy
Developments; Kyoji Tachikawa (Electric and Magnetic
Materials Division, National Research Institute for Metals,
Tokyo)
1978年2月15日受理

電力が核融合反応の出力を上まわり、発電手段として成立しなくなるので超電導の利用が不可欠となる。本文ではエネルギーの開発、有効利用あるいは省エネルギーに大きい貢献をする、前記(1)および(2)の分野における超電導の利用の現状と問題点についてのべる。超電導の利用は臨界値の高い超電導材料の発見に伴い1960年頃から開発に着手され、現在すでに小型、中型の超電導マグネットが広く用いられ実用化への道が開かれているが、その大規模利用技術の完成には今後なお10~20年を要するであろう。

さて、すぐれた性能をもつ材料の開発は超電導の利用を容易にする。超電導状態はT-H-Jの3次元の臨界面により限定され、それぞれ、 T_c (臨界温度)、 H_{c2} (上部臨界磁界)、および J_c (臨界電流密度)の3つの臨界値が存在する。超電導材料の特性、製法の詳細については文献を参照されたい⁽¹⁾。 H_{c2} および J_c は一般に温度が低くなるほど大きくなるが、図2には液体ヘリウム温度4.2 Kにおける超電導線材のH-J_c特性を示した。強い磁界まで大きい J_c を示す線材ほど、強磁界の発生が容易となる。Nb-Tiなどのbcc合金は塑性加工が容易であるとともに、4.2 Kで8 T程度の磁界発生ができる(通常の鉄心電磁石の発生磁界は2~3 T)。Nb₃SnなどのA-15型化合物は T_c 、 H_{c2} がNb-Ti合金の約2倍あり、Nb₃Snで15 T、V₃Gaで18 Tの磁界発生ができる。しかし、この型の化合物はきわめて硬く脆いためその線材化に技術

図2 実用超電導線材の磁界による臨界電流密度の変化。
(臨界温度: Nb 9.2 K, Nb-Ti 9.7 K, Nb₃Sn 18.0 K, V₃Ga 15.1 K)。

† 1 T (tesla) = 10⁴ G (Gauss)

を要し、大規模の利用にはさらに研究開発を必要とする。その他、A-15 型の Nb_3Ga , $\text{Nb}_3(\text{Al}, \text{Ge})$, Nb_3Ge 化合物では 20 K をこす T_c と 30 T をこす H_{c2} (4.2 K) がえられているが、まだ線材化されるに至っていない。

実用の超電導線材は、早い磁界変化に対して超電導状態を安定に保つため、超電導部分をきわめて細い芯に分割したいわゆる極細多芯形式の線に加工される⁽²⁾。また、蓄積エネルギーの大きい大型超電導マグネットでは、たとえ線材に局部的な常電導遷移が生じて、マグネット全体の超電導性が破られないよう大量の Cu あるいは Al を被覆して常電導遷移部分の伝播を防いだいわゆる完全安定化方式の線材が用いられる⁽³⁾。超電導材料の特性は基本的にその構造と組織に著しく左右されるので、線材の製造に当っては処理条件と特性の関連を充分明らかにしておかねばならない。また、超電導材料は Nb, V, Ta, Ti, Zr, Hf などの遷移金属を構成元素としているが、超電導の大規模利用のためにはこれら原料の大量供給の態勢をととのえておく必要がある。

2. 発電機、電動機における超電導の利用

(1) 利 点

電気機械の界磁を超電導化すると磁界強度が増し、また、鉄心が不要になるため容量の増大、小型化、軽量化が可能となるほか、界磁損失の減少による効率の改善がえられる。現在、発電機の単機の最大容量は約 1300 MVA で、これ以上の大容量化は、構造上の強度や組立てと輸送の制限から困難になっている。超電導化すると容積、重量とも常電導機械の 1/10 程度に減少するので、大容量、高効率の超電導電気機械の開発がはかられている⁽⁴⁾。超電導機には、静止した超電導界磁の中を単極導体を回転させる直流機と、静止した電機子コイルと回転超電導界磁コイルからなる交流機とがある。

(2) 現状と問題点

超電導交流機では、超電導界磁コイルを高速で回転させ、回転子がクライオスタットを兼ねるため種々の新しい技術の開発が必要となる。現在、各国で 5~6 MVA 級の超電導交流機が製作されているが、写真 1 にわが国で製作された 3600 rpm, 6.25 MVA 超電導発電機の外観を示した⁽⁵⁾。界磁コイルはくら型で回転子周辺部に固定され、液体ヘリウムは回転子の一端から中心軸を通して界磁コイル部に導入され、これを冷却後、熱シールドと界磁電流リードの冷却を行って排出される。液体ヘリウムの連続供給のため、移送管の固定部と回転部の間のシールに工夫がなされている。このような交流機は 1000 MVA 級大容量発電機の予備段階として、また、航空機塔

写真 1 6250 kVA 超電導交流発電機の外観⁽⁵⁾。

載用軽量発電機として開発されている。後者の目的では米国で 12000 rpm, 5 MVA の発電機が完成し、20 MVA 級の機械が開発中で、その重量は常電導機の 1/10 程度に設計されている⁽⁶⁾。超電導直流機の応用では船舶の高速電気推進が注目され、低回転数で出力が大きい。ギアなどの変速機構が不要、運転制御が容易、推進系の配列が容易、燃料消費の節減、騒音の減少などの長所があり、米国を中心に開発が進められている⁽⁷⁾。

(3) 電気機械に使用される超電導線材

電気機械の超電導線材は、高安定度と軽量なことが必要で極細多芯形式の Nb-Ti 合金線材が用いられる。この形式の線材は、まず数十本の Nb-Ti 合金棒を Cu マトリックスに挿入した複合体を線材に加工したのち切断し、再び数十本束ねて Cu 管に挿入、再複合して加工される。この方法で直径 10 μm 程度の Nb-Ti 芯を数百~数万本含む極細多芯線が加工される。さらにこの極細多芯線をよじったり、編組して電流分布を均等化し、安定性を増した線材が製造されている。写真 2 にこのような極細多芯線の例を示した。今後、界磁の強さを増したり、大型回転子の遠心力による液体ヘリウムの温度上昇に対処するため、 H_{c2} および T_c の高い化合物系極細多芯線材の実用化が期待される。

写真 2 Nb-Ti 極細多芯線。(左) 0.50 mm ϕ 線断面, 1045 芯 (IMI 社製), (右) 編組線 (VAC 社製)。

3. 電力輸送における超電導の利用

(1) 利 点

電力需要の増大にともない電力輸送量が増加し、現在の架空線による送電方式が送電容量の限界に近づきつつあるため種々の新しい送電技術が研究されている。超電導線を用いた大容量地下送電は、従来方式より約2桁高い高密度で送電でき、送電線用地難の解消、環境および美観の保全に役立つとともに、送電損失を減少させることができる。超電導送電の系統は図3に示すように管状クライオスタットの中に超電導ケーブルを通し、数十km間隔に配置された冷却ステーションから加圧された過冷却液体ヘリウムまたは超臨界ヘリウムガスを送りこんでケーブルを冷却する。その経済面からの検討では超電導送電は2000 MVA以上の大電力輸送の場合に最も有利になるとされている⁽⁸⁾。

図3 超電導地下送電系統.

(2) 現状と問題点

超電導送電には直流方式と交流方式が検討されている。直流方式では抵抗損失が全くないため冷却が容易になり、さらに、材料に必要とされる特性も現用の超電導線ではほぼ満足させることができる。しかしながら大容量の交直変換機を必要とするため、経済的には長距離送電に適している。一方、交流方式では超電導体の交流損失や絶縁体の誘電損失のため冷却用電力を余分に必要とするが、端末での交直変換機が不必要なため数十kmの短距離送電に有利と考えられる。

超電導ケーブルについては概念設計や経済計算の域にとどまらず、最近では短尺モデルケーブルを試作して実証的な研究が進められている。アメリカのブルックヘブン研究所(BNL)での250 MVA, 300 mのモデル送電実験のほか、各国で1000 MVAをこす容量のケーブルが数m~数十m試作され、その通電試験が行われている。

超電導ケーブルの冷却は液体ヘリウムよりも5~7 Kの超臨界ヘリウムガスによる冷却の方が実用的と考えられている。今後、冷却技術、端末技術、線材技術、絶縁技術などの開発が進み、実験のスケールアップがはかれるだろう。

(3) 超電導送電用材料

送電用超電導材料は超電導特性のほか可撓性、安定化材との接合性、価格などを考慮する必要がある。直流送電の場合、導体表面の磁界は2~3 T以下と考えられ、価格と可撓性の点からNb-Ti線材が有望である。一方、交流送電用超電導材料では交流損失が少ないことが必要条件となる。第2種超電導体には導体表面磁界が下部臨界磁界 H_{c1} を越えると周波数に比例する交流損失が発生するが、その損失量はCuに比べれば数桁小さい⁽⁹⁾。第2種超電導体の交流損失は組織や表面状態にも強く依存する。現在線材化されている超電導材料ではNbとNb₃Snが交流損失が小さい。Nbは可撓性の点ですぐれているが T_c が低い。Nb₃Snは T_c が高いので使用温度が高められ冷却費が安くなるが、脆いため可撓性のあるケーブルを作るのに技術を要する。アメリカのBNLやソビエトでは写真3に示すようなNb₃Snテープを並列にならべてらせん状に巻き込んだ構造のケーブルを試作している⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。また、このケーブルではインダクタンスを少なくするため、Nb₃Snテープを重ねて逆方向に巻き込む2層構造をとっている。このような構造にすると化合物系材料でもある程度可撓性をもたせることが可能となる。

今後の材料としてはNb₃Ge化合物は T_c が約22 Kと高いため直流あるいは交流送電用材料として有望であろう。Nb₃Geは平衡状態では組成がGeに乏しくなり T_c

写真3 Nb₃Snテープを用いた超電導送電ケーブル⁽¹¹⁾。

が低い、スパッター、同時真空蒸着、化学蒸着(CVD)法などの方法で強制的に化学量論組成で下地上に付着させると高い T_c を示す。そのため膜の生成速度の大きい連続的な蒸着法が研究されている。この内、CVD 法ではガス状の $NbCl_5$ と $GeCl_4$ を所定の比で混合し、水素で還元してハステロイ下地上に Nb_3Ge 膜を付着させる⁽¹²⁾。この方法は実用的な製造法としては最も有望であり、今後の改良が期待される。

4. エネルギー貯蔵における超電導の利用

(1) 利 点

超電導エネルギー貯蔵(SCES)の用途は、電力系統の出力の平均化のためと、大型加速器あるいは核融合炉のパルス電源があり、放電時間は前者で数時間、後者でミリ秒～数秒となる。消費電力の平均化には、余剰時の電力を利用して下方のダムから上方のダムにポンプで揚水し、ピーク時に水力発電を行なう揚水発電方式が現用されており、電力の有効利用のためその増設が必要とされている。しかし、この方式では、貯蔵と放電時に2回、電気エネルギーと力学的エネルギーの変換が行われるため、効率が低く、また、立地が困難になりつつある。SCES では電気エネルギーのまま電力を貯蔵できるのでエネルギーの利用効率を高めることができる。

SCES の原理は、図1でのべた永久電流を利用し、揚水発電のダムの代りに巨大な超電導コイルに $\frac{1}{2}LI^2$ の形で電力を貯蔵する。ここに L はコイルのインダクタンス、 I は電流である。SCES では、サイリスターを電力系統と超電導コイルの間の交直変換のため使用する。表1にSCESと他のエネルギー貯蔵方式との比較の一例を示した⁽¹³⁾。SCESの特長は効率が高いことのほか、作動が速い、静止機器で寿命が長い、大都市の近くに設置でき環境に与える影響が少ないことなどがあげられる。

表1 各種エネルギー貯蔵方式の特性比較⁽¹³⁾。

方 式	経済的大きさ (MW または MWH)	電力系統 資本コスト (\$/kW)	貯蔵系統 資本コスト (\$/kWh)	寿 命 (年)	効 率 (%)
揚 水 発 電	200~2000 MW	70~120	3~12	50	70
圧 縮 空 気	200~2000 MW	90~150	3~20	20~25	70
改 良 蓄 電 池	50~200 MW	100~170	20~50	25~30	70
は ず み 電 車	20~50 MWH	65~100	20~40	10~20	70
水 素 貯 蔵	10~50 MWH	50~65	70~150	20~25	80
超 電 導 磁 石	20~50 MW	300~500	4~12	10~25	50
	>1000 MWH	40~60	30~70	50	90

(2) 現状と問題点

さきにアメリカなどで電力貯蔵用に 10^5 J、パルス電源用に 3×10^6 J の容量の SCES 装置が製作され、わが国でも $10^5 \sim 10^6$ J 級の装置を用いた実験が行われている。さらにロスアラモス研究所などでは中間規模の開発装置

として 10^8 J 級装置の製作計画を発表している⁽¹⁴⁾。実用 SCES では、揚水発電設備容量との比較や、大容量になるほど単位エネルギー当りの貯蔵コストが低下することからその容量は 10^{12} J 級になると予想される。ところで図4に年代順の超電導マグネットの蓄積エネルギーの増加を示したが、この図から外挿して実用規模の SCES の開発には今後少くとも10年の期間が必要と予想される。実用規模の SCES に対しては超電導コイル、クライオスタット、冷却系、サイリスター、スイッチなどの電気系について設計とコスト計算が行われており⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾、超電導コイルは Nb-Ti 線材を用いた場合直径 100 m 近くに達

図4 大型超電導マグネットの年代順の蓄積エネルギーの変化。

する。コイルの巻線には一般に外側に膨張する電磁力が加わり、このような巨大なコイルでは電磁力を支えるステンレスなどの補強材のコストが莫大になる。そのため、電力貯蔵コイルを地下に設置し、岩盤でこの電磁力を支える考案がなされている。

(3) エネルギー貯蔵用超電導線材

SCES のエネルギー貯蔵密度は磁界強度の2乗に比例し、 H_{c2} および J_c の大きい超電導線材ほど有利である。

しかし、価格が低廉なことからストレスに強いため現在の計画はすべて Nb-Ti 合金材を使用する設計になっている。SCES、とくにパルス電源用には、速い磁界変化が可能な高安定度線材を用いる必要があり、Nb-Ti/Cu-Ni/Cu の3層構造の極細多芯編組線が試験され、30 kA

級の導体が設計されている⁽¹⁶⁾。また、大容量 SCES コイルでは安全のため完全安定化方式にする必要があり、Nb-Ti 極細多芯線の Al による完全安定化や高抗張力 Al 合金による補強が研究されている⁽¹⁷⁾。さらに、高エネルギー密度の SCES 開発の目的には、将来、化合物系超電導線材の使用も検討されるであろう。

5. MHD 発電における超電導の利用

(1) 必要性

MHD 発電は磁界中で導電性をもつプラズマが高速で通過する時に発生するファラデー起電力を利用して電気出力を取り出す発電法で、燃焼ガスの持つ熱エネルギーを直接電気エネルギーに変換することができる。さらに MHD 発電終了後の排ガスの熱エネルギーで通常の汽力発電が可能になる。このような MHD-汽力発電をおこなうことにより従来の火力発電の効率 40% を大幅に上まわる 50~60% の効率で発電が可能と考えられている。とくに最近では石炭を燃料とした MHD 発電が注目されている。

MHD 発電の発電出力密度は $\sigma(vB)^2$ に比例する。ここで σ と v はそれぞれプラズマの導電率と流速、 B は磁束密度である。したがって B が高いほど MHD 発電に有利になるが、現在のところ 5~8 T の磁界の使用が目標とされている。このような強磁界を銅マグネットが発生すると莫大な電力を消費して発電方式として成立しなくなるので、MHD 発電の経済性は超電導マグネットの利用によりはじめて保証される。

(2) 現状と問題点

MHD 発電システムはすでに実験室規模の研究を終了し、パイロットプラントの建設とその運転実験の段階となっているが、超電導マグネットと組合わせた長時間試験運転はまだ今後の課題になっている。MHD 発電用に作られた最大の超電導マグネットは、工技院大型プロジ

ェクトにより電子技術総合研究所に建設されたレーストラック型マグネット⁽¹⁸⁾で、中心磁界 4.7 T、最大磁界(線材経験磁界)6.7 T、蓄積エネルギー 6×10^7 J のものである⁽¹⁸⁾。このマグネットを Mark V に組合わせると 1 MW 級の発電機となる。一方最近、米ソの MHD 発電の共同研究が軌道にのり、ソビエトの MHD 発電プラント U-25 (25 MW) に組込む超電導マグネットがアメリカの Argonne 国立研究所で製作された。このマグネットは図 5 に示すようにくら型をしており、その磁界分布に、発電チャンネル入口で強く、出口で弱くなる傾斜をつけるため、超電導線を片側に集中して巻き込んでいる。このマグネットは中心磁界 5.0 T、最大磁界 6.3 T、蓄積エネルギー 2×10^7 J である⁽¹⁹⁾。

実用段階の MHD 発電プラントに用いられる超電導マグネットははるかにスケールが大きくなり、蓄積エネルギー 5×10^9 J と試算されている。このマグネットは巨大であるばかりでなく形状が非円型であることから、強い電磁力が線材にかかるため設計と製作にさらに高度の技術開発が必要となる。

(3) MHD 発電用超電導材料

MHD 用超電導マグネットは磁界を変動させて使うことがないため、かならずしも極細多芯形式の線材を使う必要はないが、リップル分として交流が重畳することを考えると極細多芯線の使用がのぞましい。また安全のため多量の Cu または Al を複合した完全安定化に近い線材にする必要がある。一方、強い電磁力に対する対策も必要であり、超電導線材と補強材の組合わせ方がマグネット設計上のポイントとなる。使用される超電導材料は現時点では Nb-Ti 線が最も経済的と考えられている。ただし、8 T 程度の磁界を使用する場合には、今後の開発により Nb₃Sn 線材が使われる可能性もある。

6. 核融合炉における超電導の利用

(1) 必要性

超高温のプラズマを強磁界によりとじこめるトカマク型、ミラー型などの装置が核融合炉の開発を目指して大型化されつつある。前者ではトラス状プラズマにパルス的なポロイダル磁界を加えて誘導加熱電流を流し、この電流による磁界とトロイダル磁界を合成したらせん状磁界によりプラズマをとじこめる。さらに、リミターや垂直平衡磁界の作用でプラズマを安定に保持し、中性粒子入射によりプラズマ温度を上昇させる。この装置の概念図を図 6 に示した⁽²⁰⁾。一方、ミラー型では直線型装置の両端に強磁界コイルをおいてプラズマを反射してとじこめ、高エネルギー粒子を入射して加熱する。

トカマク型装置では、現在、各国で臨界プラズマ試験装置の建設が進められ、その後わが国では炉心モックア

図5 MHD 発電用くら型マグネットの断面と磁界分布⁽¹⁹⁾。

図6 トカマク型核融合炉, (a) 原理, (b) 概念図⁽²⁰⁾. 図7 核融合炉電気出力とトロイダルマグネットの電力消費⁽²¹⁾.

ップ試験装置, 実験炉, 原型炉の順に核融合の実用化が進められる。これらの装置では必要なトロイダル磁界の発生に銅マグネットを使用すると, 図7に示したように核融合出力を上まわる莫大な電力を消費する⁽²¹⁾。したがって MHD 発電同様, 超電導の利用なしには核融合炉のエネルギー収支を成立させることができない。

(2) 現状と問題点

実用炉のトロイダルマグネットの規模は, 平均コイル半径 5~7 m, トーラス半径 7~10 m, 中心磁界 4~8 T, 最大磁界 8~15 T, 総蓄積エネルギー $10^{11} \sim 10^{12}$ J になると考えられている。トロイダルマグネットの問題点としては, 図4に示した従来の実績に比べてはるかに規模が大きく, また, 磁界強度が強い上, 磁界強度がトーラス半径方向で減少するため強い電磁応力が加わる, パルスのポロイダル磁界の影響をうける, 中性子照射の影響をうけるなどの点があげられる。次段階の試験装置からの超電導の利用にそなえて現在各国で予備実験計画が進められているが, アメリカオークリッジ国立研究所では OECD 国際協力によるコンパクトトーラス試験が着手されている。これは6個のコイルをできるだけ中心に近づけてトーラス状に配置し, トロイダルコイルに類似した磁界分布および擬似ポロイダルコイル磁界の下でのコイ

ル特性の試験を行なうものである。コイル直径は平均 3 m, 最大磁界 8 T, 励磁電流 10 kA と予定されている⁽²²⁾。その後さらに実規模に近いマグネット試験や強磁界化が進められるであろう。

一方, ポロイダルコイルではプラズマの発生および消滅時に立上り時間 1~10 秒のパルスの磁界を発生するため, さらに高度なパルスマグネットの製作技術が必要となる。その直径は 20 m 程度となるが, 蓄積エネルギーはトロイダルコイルの 10% 程度, 最大磁界は 6~7 T である。巻線材の電流容量はコイルインタクタンズが小さいためトロイダルコイルより大きく数十 kA に達する。ポロイダルコイルの運転では短時間にきわめて大きい電力の注入と放出を行なうので, その電源と電力移送装置の開発が困難な課題となる。そのため効率のよい超電導エネルギー貯蔵装置や超電導単極機の利用が検討されている。

(3) 核融合炉用超電導線材

ポロイダルコイルはもとよりトロイダルコイルにも変動磁界の影響が加わるのでその線材は極細多芯型式で, さらに安全のため完全安定化に近い型式とされる。ポロイダル用線材の開発には, 超電導シンクロトロンにおけるパルスマグネット用線材の製造技術が有用になろう。核融合炉をはじめとする超電導の大型利用では, 線材断面積 ($\sim 5 \text{ cm}^2$), 単長 ($\sim 1 \text{ km}$), 総重量 ($\sim 1000 \text{ t}$) とぼう大になるので, 合金線材の溶解, 加工設備の大型化と能率化が必要となろう。また, 10 T 以上の最大磁界を用いるには大容量の化合物極細多芯線材の開発が必要になる。

Nb_3Sn および V_3Ga 化合物の極細多芯線は, Sn または Ga を含む Cu 基合金と Nb または V 芯との複合体を加工後熱処理することにより製作される⁽²³⁾。すでにより線形式の小容量 V_3Ga 極細多芯線が小型マグネットの製作に実用されたが, この線材は安定性もきわめてすぐれている⁽²⁴⁾。現在主として, 安価な Nb_3Sn について種々の形式の大容量導体の開発が進められている。容量の大きい化合物導体では, Cu 基合金との間に, Ta, Nb などの拡散障壁を挿入して安定化のための Cu を接着した構造の線材とされる。また, 線径が大きくなった場合の曲げに伴う歪みによる特性の劣化をさけるため, テープ状につぶした大容量極細多芯線材も製造されている。写

写真4 Cu-Sn 合金マトリックス, Nb 芯, 安定化 Cu(中心部)より構成された Nb₃Sn 極細多芯線断面の例(古河電工社製)。

真4にこのような化合物極細多芯線の例を示した。さらに, Nb₃Sn 極細多芯線を束ねてステンレス管に挿入し, その空隙に超臨界ヘリウムガスを流して冷却する強制冷却方式の Nb₃Sn 大容量導体(バンドル導体)も開発中である⁽²⁵⁾。

化合物線材の超電導特性に対する応力の影響については最近多くの測定がなされており, Nb₃Sn 線材の場合 0.1~0.3% の歪みで J_c が劣化すると報告されている⁽²⁶⁾。今後その劣化の機構や対策について詳細な研究がなされよう。さらに, 核融合炉マグネットでは超電導特性に対する中性子照射の影響を検討する必要がある。核融合炉を稼働率 50% で 20 年間運転するとマグネットの被曝量は最大 3×10^{22} n/m² になると計算されている。A-15 型の Nb₃Sn や V₃Ga では照射による T_c の低下がかなり著しい。これに対し V₂Hf 基の C-15 型化合物では T_c の低下が小さく, 上記の照射量ではその低下は無視しうる⁽²⁷⁾。V₂(Hf, Zr) などの化合物は H_{c2} が Nb₃Sn より高く, しかも機械的性質の脆さが少ない⁽²⁸⁾。この型の化合物も V と Hf-Zr 合金との複合加工により極細多芯線に加工することが可能であり, 核融合炉に適した新超電導材料として注目されている。

7. 超電導装置の冷却技術

マグネットなどの超電導装置は通常クライオスタット内で 1 気圧の液体ヘリウム中(4.2 K)に浸漬して冷却され, その内部まで液体ヘリウムが浸透するようスペーサーが挿入される。さらに 1.8 K 程度の温度の超流動ヘリウム中に浸漬すると, 温度の低下により線材の H_{c2} が増加し, たとえば Nb-Ti 合金で約 10 T の磁界発生が可能となる。また超流動状態では熱伝導率が大きく, 細い空隙にも粘性なく浸透するため高い冷却効率がえられる。この超流動ヘリウム冷却法は超電導線型加速器や小型マグネットに用いられているが, 大型のエネルギー貯蔵あるいは核融合炉マグネットでもその使用が検討されている。

一方, 5~7 K, 3~10 気圧の超臨界ヘリウムガスを中空導体に流し, 外側を真空断熱する冷却方式もすでに大型超電導マグネットに実用されている⁽²⁹⁾。この領域の

ヘリウムも定圧比熱が大きく, 密度が高い上, 動粘性係数が小さく冷却効率が高いとされている。超臨界ヘリウムガス冷却も超電導送電や核融合マグネットへの適用が計画されており, マグネットの場合はスペーサーが不要で強度が増す上, クライオスタットを含めた容積が小さくなる利点がある。この方式の冷却を行う中空導体として, (1) Cu の管壁の内に超電導線を埋めこんだもの, (2) Cu 管の外側に超電導線をまきつけはんだ付けしたもの, (3) ステンレス管の内側に超電導線を挿入し, すき間に高圧ヘリウムを流すもの, の 3 つの形式の導体が開発されている。超臨界ヘリウムガス冷却では T_c の高い化合物系線材の使用が有利である。今後さらに詳細な冷却技術の研究が進められ, 超電導の大型利用では用途に応じ, 技術的, 経済的な面から適当な冷却方式が採択されるだろう。超電導装置の冷却に必要なヘリウム液化冷凍機も近年, 長足の進歩をとげた。今後, 大規模な超電導の利用に関連して, 液化冷凍容量の増大, 制御性, 信頼性の向上がはかられ, 循環系, 計測系, 精製系などを含めた総合的な大型冷却システムの開発が進められるであろう。また一方では船舶, 列車などの塔載用に小型で高能率の液化冷凍機も開発されつつあり, 冷却技術の一層の進歩を期待することができる。

文 献

- (1) “強誘電体と超伝導体” 金属物性基礎講座, 日本金属学会編, 丸善, (1974)。
- (2) J.D.Lewin, *et al.*: J.Phys.D, **3**(1970), 1517。
- (3) Z.J.J.Stekly and J.L.Zar: IEEE Trans. Nuclear Sci., (1965), 367。
- (4) A.D.Appleton and A.F.Anderson: IEEE Pub. No.72 CHO 682-5-TABSC, (1972), 136。
- (5) 岩本雅民, 藤野治之: 低温工学, **10**(1975), 169。
- (6) R.D.Blaugher and J.H.Parker, Jr.: IEEE Trans. on Magnetics, **MAG-13**, (1977), 755。
- (7) G.R.Fox and B.D.Hatch: IEEE Pub. No.72 CHO 682-5-TABSC, (1972), 33。
- (8) E.B.Forsyth, *et al.*: *ibid.*, 202。
- (9) 田畑稔雄他: 電気学会雑誌, **94**(1974), 478。
- (10) J.F.Bussiere: IEEE Trans. on Magnetics, **MAG-13**(1977), 131。
- (11) G.I.Meschanov, *et al.*: *ibid.*, 202。
- (12) H.Kawamura and K.Tachikawa: Jap. J. Appl. Phys., **16**(1977), 2037。
- (13) Electric Power Res. Inst. (USA) の資料による。
- (14) W.V.Hassenzahl: IEEE Trans. on Magnetics, **MAG-11**(1975), 482。
- (15) R.W.Boom, *et al.*: *ibid.*, 475。
- (16) R.I.Schermer and W.V.Hassenzahl: IEEE Trans. on Magnetics, **MAG-13**(1977), 825。
- (17) H.R.Segal: *ibid.*, 109。
- (18) Y.Aiyama, *et al.*: Proc. ICEC-5, IPC Sci. and Tech. Press, (1975), 300。

- (19) R.C.Nieman, *et al.* : IEEE Trans. on Magnetism, **MAG-13**(1977), 632.
- (20) “核融合研究開発の現状”, 日本原子力研究所, (1976), p.77.
- (21) “核融合会議超電導磁石分科会報告書”(安河内 昂他), 科学技術庁, (1977), p.8.
- (22) P.N.Haubenreich, J.N.Luton and P.B.Thompson : 7th Symposium on Engineering Problems of Fusion Research, (Knoxville, 1977) に発表.
- (23) 太刀川恭治 : 低温工学, **10**(1975), 124.
- (24) 田中靖三他 : 低温工学, **11**(1976), 212.
- (25) C.J.Heyne and J.L.Young : 7th Symposium on Engineering Problems of Fusion Research, (Knoxville, 1977) に発表.
- (26) C.C.Koch and D.S.Easton : Cryogenics, **17**(1977), 391.
- (27) B.S.Brown, J.W.Hafstrom and T.E.Klippert : J.Appl.Phys., **48**(1977), 1759.
- (28) 井上 廉, 太刀川恭治 : 日本金属学会誌, **39**(1975), 1266, 1274.
- (29) 平林洋美 : 低温工学(超臨界ヘリウム特集号), **9**(1974), 53.

「ノート」から

Science indicators, 1974 (1975, p. 21) による
1953~1973 年間の各国の技術革新の内容 (NSF)
(生産研究 29, No.2 より)