

星野 昌幸

M.Hoshino

山本 恵一

K.Yamamoto

浦田 昌身

M.Urata

近年の超電導技術進歩は目覚ましいものがある。実用化された超電導応用製品として、磁気共鳴イメージング装置(MRI)用超電導マグネットや、単結晶引上げ装置用超電導マグネット、高磁界マグネット、プラズマ磁場閉込め用超電導マグネット、粒子計測用超電導マグネットを中心に、冷却方式別に開発経緯と超電導技術について紹介する。浸漬冷却タイプは、冷凍機の搭載などにより液体ヘリウム蒸発量を大幅に低減し、液体ヘリウム注液間隔を延長することにより実用台数の増大をもたらした。強制冷却タイプの技術開発により、大型超電導コイルが実現された。また、間接冷却タイプの実現により超電導応用範囲が拡大された。さらに、小型4K冷凍機の開発によつて実現された冷凍機直冷タイプは、スイッチ操作だけで強磁界が得られるこれからの超電導マグネットで、一般用途への広範な普及が期待される。

Remarkable progress has been made in superconducting technology recently. This paper describes the details and technical features of every cooling type of practical superconducting magnet (SCM), including the SCM for magnetic resonance imaging (MRI), SCM for semiconductor pulling devices, high-field SCM, SCM for magnetically confined plasma devices, and SCM for particle detectors.

Commercial production of pool-boil-cooled SCMs has been realized by reducing helium evaporation and decreasing the frequency of helium pouring. The development of forced-cooled SCMs has made it possible to build large SCMs. Moreover, the development of the 4 K-GM refrigerator has enabled liquid-helium-free SCMs to be introduced. Since this type of SCM can be operated merely by turning on a switch, SCMs are expected to come into more widespread use.

### まえがき

超電導の応用は、物性物理学、高エネルギー物理学、および、核融合研究のように超電導技術の導入が不可欠であり、超電導および低温工学の研究部門をもっていた分野に限られていた。ところが、それまで超電導にまったく縁のなかった医学の世界でMRI用超電導マグネットが広く使われるようになり、超電導開発が大きな展開を見せた。さらに、1986年に始まった高温超電導フィーバーが収まった後も、酸化物超電導は実用化への着実な歩みを見せている。

ここでは、実用化された超電導製品を冷却タイプ別に紹介し、用途に応じて柔軟に対応できるようになった超電導技術の現状と将来について紹介する。

## 2 超電導の実用化

### 2.1 浸漬冷却タイプ

現在、もっとも実用化台数が多い超電導応用機器は、浸漬冷却タイプのマグネットであり、その代表はMRI用超電導マグネットである。MRIは磁気共鳴イメージング装置の略

称で、人体細胞に含まれる水素などの原子核の磁気共鳴現象を利用して人体の断層画像を映し出す医療用画像診断装置である。コイルの超電導化にあたって次のような課題があった。①液体ヘリウムと液体窒素の注液を頻繁に行わなければならぬ。これら冷媒の取扱いには低温工学の知識を必要とし、また、注液はかなり煩わしい作業である。②外部への漏洩(えい)磁界が大きい。ペースメーカーの使用者が多い医療機関では漏洩磁界の影響が深刻である。③冷媒を貯液する空間を確保するためマグネットが大きくなる。

冷媒の問題は、小型冷凍機の搭載、永久電流モードでの運転と着脱電流リードの使用、断熱の改善により、液体ヘリウムの消費量を極限まで減少させ、液体ヘリウム注液を年に1回程度とし、さらに液体窒素を不要にすることができた。さらに、液体窒素の貯液する空間がなくなったことと、断熱スペースを縮小する設計によりコンパクト化された。また、漏洩磁界の問題は磁気シールドを装備することによりペースメーカーに影響のある5ガウス以上の磁界領域をMRI装置から2m以内にすることができた。

この結果、ほとんどメンテナンスフリーな超電導マグネットが開発された。

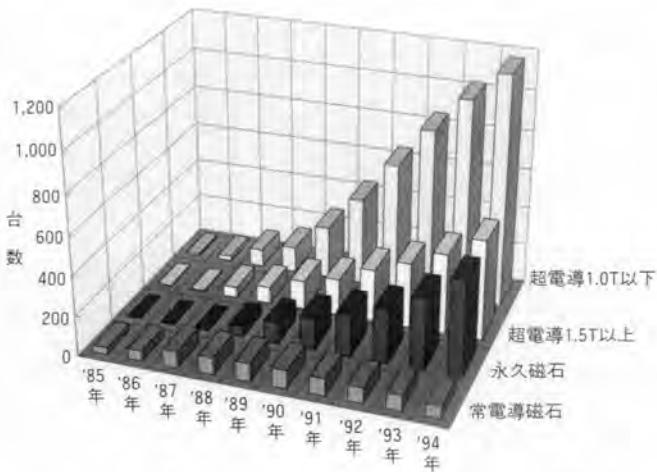


図1. 国内MRI機種別稼働台数推移(1985～1994年) 超電導タイプはMRIに適した特長をもつため、稼働台数が着実に増加している。

Changes in MRI units for each type of superconducting magnet

MRI機種別の稼働台数推移を図1に示すが、超電導タイプの稼働台数が着実に増加している。これは、超電導機器としての煩わしさがなくなったことに加え、超電導タイプが、①磁界均一性が時間的にも空間的にも高い、②磁界が高いため、画像解像度が良く、外部磁界擾(じょう)乱の影響も受けにくい、といったMRIに適した特長をもつためである。

したがって、今後も引き続き需要が伸びると予想される。

MRIに続き量産化が進んでいるのが、単結晶引上げ装置用超電導マグネットである。単結晶引上げ装置は、シリコンやガリウムひ素の結晶を石英製るつぼ内の融液から引き上げる装置である。超電導マグネットは、融液中に磁界を印加して結晶品質を低下させる熱対流を抑制するために用いられる。図2に単結晶引上げ用超電導マグネットの外観を示す。MRIと同様に液体ヘリウムの蒸発量を抑えるため永久電流モードで用いられるが、るつぼのセットアップのため励消磁が頻繁に行われるのがこのマグネットの特徴である。そこで、低熱侵入短時間定格型の電流リードを開発し設置した。この電流リードは通電時の電流リードの抵抗発熱による温度上昇と非通電時の熱侵入が最適になるように設計した。

15 T～21 Tの小型高磁界マグネットや水冷の銅マグネット



図2. 単結晶引上げ装置用超電導マグネット シリコンやGaAsなどの単結晶のるつぼに磁界を印加するための超電導マグネット。

Superconducting magnet for semiconductor pulling devices

トと組み合わせて30 T以上の磁界を発生するハイブリッドマグネット用超電導マグネットも古くから実用化されている。ハイブリッド用超電導マグネット(HM)では、水冷マグネットからの相互誘導を含め種々の外乱にさらされる。これら擾乱によって超電導が破れないために、熱的安定化条件を満たす高い超電導安定性をもつマグネットが製作されている。図3に超電導マグネットの蓄積エネルギーと最大磁界を示すが、ハイブリッド用マグネットは、両方の値ともに大きく、高い技術力が必要であったことがわかる。

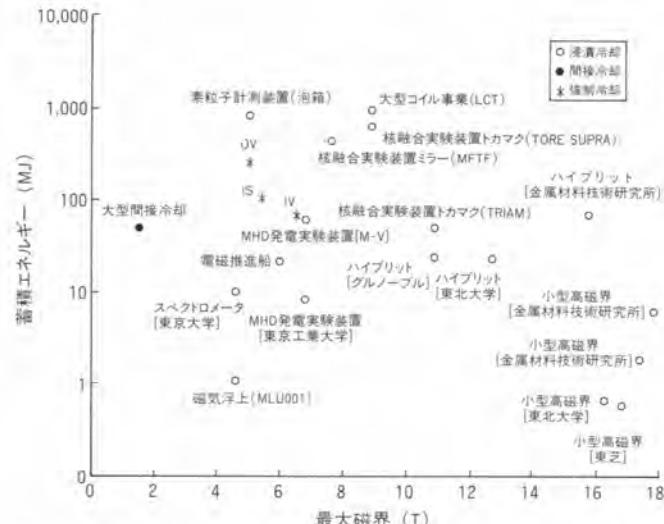


図3. 大型超電導マグネットの最大磁界と蓄積エネルギー 最大磁界と蓄積エネルギーいずれもが大きいほうが技術的に困難である。

Maximum magnetic field and stored energy of large superconducting magnets

## 2.2 強制冷却タイプ

強制冷却タイプは超電導導体中に極低温ヘリウムを流して冷却する方式であり、主に核融合炉のプラズマ磁場閉込め用コイルとして開発してきた。プラズマ磁場閉込めには広い空間に高磁界を発生することが必要で、超電導コイルが不可欠である。近年、常電導コイルを用いることのできるプラズマ実験装置での研究から、実用規模サイズでの研究に進展したため、炉心プラズマ実験装置コイルの超電導化が進んでいる。核融合炉用コイルは、巨大で高磁界であるために、超電導コイルに発生する電磁力が強大なものとなる。

当社では核融合炉用R&Dコイルを受注し、電磁力に対して有利な強制冷却コイルの研究開発を進めてきた。この一例が実証ボロイダルコイル(DPC)計画により、高磁界かつ高電流密度の強制冷却コイルを日本原子力研究所と当社で共同開発を行ったDPC-TJコイルである。超電導線に高電流密度・高臨界磁界のNb<sub>3</sub>Snを用いているが、Nb<sub>3</sub>Sn超電導線はひずみによる超電導特性の低下が大きい、そのためコイル巻線後に超電導線材の熱処理を行う。超臨界ヘリウム気密を

受け持ち巻線と熱処理がされる薄肉コンジットと電磁力を支持する厚肉コンジットに機能分離した二重コンジット導体を開発した。二重コンジット導体は、熱処理時には薄肉コンジットであるため、Nb<sub>3</sub>Sn導体のひずみが小さくなり、また、厚肉コンジットは曲げおよび熱処理を受けないため、特性の劣化がないといった特長が得られる。図4に二重コンジット導体の外観を示す。



図4. 二重コンジット導体 二重コンジット構造をもつ強制冷却用超電導導体。

Double-conduit superconductor

文部省核融合科学研究所で1990年から建設中の大型ヘリカル装置の3種類のポロイダルコイル、Inner Vertical coil(IV), Inner Shaping coil(IS), Outer Vertical coil(OV)も強制冷却タイプである。すでに当社からIV, ISの2種類コイルが納入され、冷却および通電の検証が開始されている。コイルの諸元を表1に示す。ISコイルは現時点で直径が世界最大の超電導コイルであるが、OVコイルはこれをしのぐ大きさで輸送限界を超えており、現地で巻線が進められている。これらのコイルは巨大であるにもかかわらず、磁界精度を確保するために $5 \times 10^{-4}$ 以下の寸法精度で製作されている。図5にISコイルの外観を示す。これらのコイルでは強大な電磁力を支えるとともに初期冷却特性を良くするため扇型のスリーブがコイルに設置されており、初期冷却特性の

表1. 大型ヘリカル装置用ポロイダルコイルの諸元  
Specifications of poloidal coils for large helical device

コイル	IV	IS	OV
内径	3.24 m	5.33 m	10.85 m
外径	3.96 m	5.96 m	11.42 m
高さ	0.46 m	0.46 m	0.53 m
最大磁界	6.5 T	5.4 T	5.0 T
定格電流	20.8 kA	21.6 kA	31.25 kA
蓄積エネルギー	68 MJ	104 MJ	256 MJ



図5. ISコイル 大型ヘリカル装置の二番目に大きなポロイダルコイル。

IS coil

向上が確認されている。強制冷却タイプは電磁力に強いほかに、コンジット間で強固に絶縁され、絶縁部にヘリウムがないため高い耐電圧が得られる。このことは、蓄積エネルギーの大きなコイルでは必要不可欠な要件であり、現在設計検討の進む国際熱核融合実験炉(ITER)をはじめ大型の超電導エネルギー貯蔵(SMES)も強制冷却タイプで設計が進められている。

### 2.3 間接冷却タイプ

間接冷却タイプの超電導コイルは、超電導線と液体ヘリウムが直接接することなく熱伝導だけで冷却されるコイルである。液体ヘリウムは蒸発潜熱をもつ極低温で他の物質より大きな比熱をもつため、超電導コイルの安定性およびクエンチ発生時の温度上昇を抑える点で大きな働きをしている。間接冷却コイルでは液体ヘリウムと導体の接触がないため、超電導コイルの安定性およびクエンチ発生後の超電導コイルの保護が重要課題となる。

間接冷却タイプは、高エネルギー物理の粒子計測装置で超電導コイルの粒子の透過性を良くするために、超電導コイル部の物質量を少なくする要請から開発された。超電導コイル部に液体ヘリウムがないため、マグネットとしての自由度が高く特殊用途に応用される可能性の高いタイプである。

当社は、文部省高エネルギー物理学研究所に宇宙粒子線観測スペクトロメータ用超電導マグネットを納入している。超電導マグネットを気球により打ち上げ、約30 kmの上空で宇宙線を観測するため、超電導マグネットに、超軽量化、耐衝撃性などの課題が間接冷却タイプ共通の課題に追加される。極低温で高熱伝達特性をもつ純アルミニウムを利用することで、超電導コイルの冷却安定性、および、クエンチバック機能を増強し軽量なコイル全体でクエンチ後のエネルギーを吸収することでこれらの課題を解決した。気球での打ち上げに成功し、宇宙粒子線観測結果がすでに報告されている。

間接冷却タイプで大型のコイルの開発にも成功している。大型間接冷却薄肉超電導マグネット(図6)は、コイル直径が3.68 mもある粒子計測用の間接冷却タイプ薄肉ソレノイド



図6. 大型間接冷却超電導マグネット 薄肉内巻を特徴とした、大型粒子検出器用超電導マグネット。

Thin superconducting solenoid magnet

コイルである。強大な電磁力を支えるため、アルミニウム合金巻枠の内側にコイル巻線されている。困難な内側巻線は専用巻線機の開発によって行われた。冷却は巻枠に張り巡らされた冷却配管によって行われるが、コイル内側に純アルミニウムを軸方向に張ることにより、コイル安定性とクエンチ時の局所的な温度上昇を防いでいる。これにより、コイル重量あたりの蓄積エネルギーが7.5 kJ/kgと大きな値を達成した。

#### 2.4 研究開発

SMES、電磁推進船、超電導限流器、超電導発電機、磁気浮上式鉄道、超電導変圧器など多くの分野で実用化に向けて研究が行われている。

SMESの一例をあげると、現在、資源エネルギー庁と国際超電導産業技術センターの主導のもとに、100 kWh級のパイロットプラントに向けての要素技術を進めている。

また、東京電力株式会社と共同研究を進めている超電導限流器は、6.6 kV-1,000 A級限流素子を開発し、連続通電と低交流損失および限流動作を実証した。現在、システムの開発を進めている。

### 3 新しい超電導応用機器の開発

最近の技術進歩によって液体ヘリウム蒸発量が非常に少なくなったとはいえ、従来の超電導マグネットは液体ヘリウムが不可欠であった。しかし、磁性蓄冷材を使用した4K-ギフォードマクマホン(GM)冷凍機の開発により、液体ヘリウムをまったく使用しない冷凍機直冷型超電導マグネットの製品化に成功した。

GM冷凍機は、MRI用超電導マグネットの輻射シールド用冷凍機としての実績と高い信頼性がある。しかし、極低温では蓄冷材の比熱が小さくなるため、4Kまで冷却することが不可能であった。極低温における磁気比熱の高い磁性蓄冷材の開発によって、液体ヘリウム温度の4K(-269°C)でも0.5 W以上の冷凍能力が安定して得られるGM冷凍機の開発が可能になった。

開発した冷凍機直冷式超電導マグネットを図7に示す。このマグネットは、直径50 mmの円筒状の常温空間に10 Tの磁界を発生させることができる。超電導マグネットは合金系NbTi超電導コイルと、化合物系Nb<sub>3</sub>Sn超電導コイルの2個のコイルからなる。このほかに、NbTi超電導コイルだけで120 mmの円筒空間に5 Tの磁界を発生させる冷凍機直冷式超電導マグネットも製品化している。

直冷式では冷却安定性は小さくなるが、超電導コイルを巻枠のないエポキシ含浸とすることで、構造的に十分な超電導安定性を確保した。現在の4K冷凍機の冷凍能力は1W以下のため、ビスマス系の酸化物超電導体電流リードを採用し、最適化された銅の電流リードの1/10以下の熱侵入量に



図7. 冷凍機直冷式超電導マグネット 液体ヘリウムを必要としない超電導マグネット。

Liquid-helium-free superconducting magnet

抑えることにより、冷凍機の熱負荷に収まるシステムを可能とした。

さらに、酸化物超電導体によるコイルを用いれば、従来のGM冷凍機による20 K冷却により実用的な直冷式超電導マグネットを構成できる。酸化物超電導体の臨界電流特性は4 Kから20 Kに温度が高くなることによる劣化が少なく、また、20 KのGM冷凍機の冷凍能力が約20倍あるため、より安定な超電導マグネットを構成することができる。冷凍機直冷式超電導マグネットにより、スイッチ操作だけで超電導を意識することなく強磁界を利用できるようになる。

### 4 あとがき

超電導コイルに必須(す)であった液体ヘリウムの使用が、MRI用超電導コイルでは、液体ヘリウムの補給回数を年一回以下に減少することで広く使われることになった。冷凍機の性能向上と酸化物超電導体の技術開発により、近い将来に一般電気機器と同様に超電導機器が電源につなぎさえすれば運転できるようになれば、超電導機器の用途は大きく広がると考えられる。

また、夢のエネルギー源である核融合も超電導コイルが組み込まれたことで現実性が強まった。

当社は超電導応用機器の向上にたゆまぬ努力を続けていく所存である。



星野 昌幸 Masayuki Hoshino, D.Eng.

1986年入社。超電導機器の開発設計に従事。現在、京浜事業所機器装置部主務、工博。  
Keihin Product Operations



山本 恵一 Keiichi Yamamoto

1976年入社。核融合機器、加速器の開発設計に従事。現在、京浜事業所機器装置部課長。  
Keihin Product Operations



浦田 昌身 Masami Urata

1983年入社。超電導マグネットの研究・開発に従事。現在、電力事業部新エネルギー技術開発部主務。  
Power Systems Div.