

# 超電導を身近にした冷凍機直冷方式の超電導磁石

Conductive-Cooled Superconducting Magnets and Their Applications

栗山 透  
T. Kuriyama

佐々木 高士  
T. Sasaki

浦田 昌身  
M. Urata

特集  
II

液体ヘリウムなどの極低温冷媒をまったく使用せず、冷凍機だけで超電導コイルを冷却する冷凍機直冷方式の超電導磁石を開発し、実用化した。この磁石は、当社が独自に開発した磁性蓄冷材を用いた4K冷凍機と、酸化物超電導体を用いた電流リードをキー技術として実現した。液体ヘリウムを使用しないために、従来の超電導磁石に比べて操作性が格段に簡便となり、大幅な小型化を達成した。このような特長を生かし、これまで研究用途や特殊な産業用途だけに使用されていた超電導磁石が、広く一般産業用に普及しようとしている。

A conductive-cooled superconducting magnet, which is cooled only by a cryocooler and which does not use any coolant such as liquid helium or nitrogen, has been developed and manufactured. The technical points of this type of magnet are a 4K cryocooler, which uses magnetic regenerator materials, and a high- $T_c$  superconductor current lead. These were originally developed by Toshiba.

Since the conductive-cooled superconducting magnet features high compactness and easy operation, it is anticipated that this type of magnet will expand the fields of industrial application.

## 1 まえがき

超電導磁石は、広い空間に均一で高い磁界を長時間安定して発生することができるという特長をもっており、医療用のMRI (Magnetic Resonance Imaging) や理化学分析用の核磁気共鳴分析装置 (NMR) などの製品として実用化されている。ところが、これらの超電導磁石は液体ヘリウムを用いて超電導コイルを絶対温度4.2 K ( $-269^{\circ}\text{C}$ ) の極低温まで冷却しなければならない。したがって、超電導磁石の運転前あるいは長期の運転の際にはある一定の期間ごとに液体ヘリウムを注液する作業を必要とする。煩雑で専門の技術を要する液体ヘリウムの取扱いを伴うことが、超電導磁石の一般への普及を妨げる一つの要因であった。

当社では、自主開発した極低温小型冷凍機 (4 K 冷凍機) を用いて、液体ヘリウムをまったく使用せずに冷凍機だけで直接超電導コイルを冷却する冷凍機直冷方式の超電導磁石を開発した<sup>(1)</sup>。

冷凍機に対する電気の供給だけで長期の連続運転が可能な直冷方式の超電導磁石は、従来の液体ヘリウムを使用する超電導磁石に対して操作性を簡便にただけでなく、小型・軽量化も達成している。このような直冷式超電導磁石の特長を生かし、近年では超電導磁石がシリコン単結晶引上げ装置や磁気分離装置などの一般産業の分野で利用されるようになってきた。

ここでは、直冷式超電導磁石の概要と磁石を構成するためのキー技術について述べるとともに、その応用分野についても紹介する。

## 2 直冷式超電導磁石の概要

### 2.1 直冷式超電導磁石の構成と運転方法

図1に冷凍機直冷式超電導磁石の断面を示す。当社はこれまでに0.3~10 T (1 Tは10,000 ガウス) までの磁界が発生可能な種々のタイプの直冷式超電導磁石を商品化してきた。図1に示した磁石は直径300 mmの室温空間 (水平方向) 内に最大5 Tの磁界が発生可能である。この磁石は主に超電導コイル、4 K 冷凍機、超電導電流リード、熱シールド板、サポート、真空容器から構成されており、これらの構成要件は他の直冷式超電導磁石においてもほぼ同じである。

次に直冷式超電導磁石の運転について簡単に述べる。超

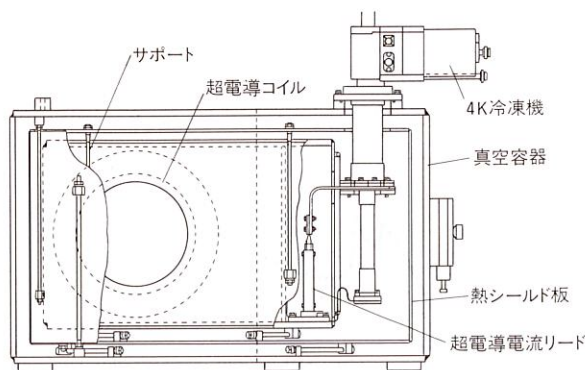


図1. 冷凍機直冷式超電導磁石の断面 真空中に設置された超電導コイルは、4 K 冷凍機によって熱伝導だけで冷却される。

Cross-sectional outline of conductive-cooled superconducting magnet

超導コイルの冷却は4 K冷凍機の運転を開始することで始まる。室温から所定の温度(約4.2 K)までのクールダウン時間は超導コイルの大きさにより異なり、2日から1週間程度を要する。その間ユーザーは超導磁石に対して手をくだす必要はない。超導コイルが所定の温度になった時点で、コイルに通電して励磁し、磁界を発生させる。長期の連続運転に対しては、4 K冷凍機を運転するだけで超導コイルを所定の温度に保つことができる。約1年に1回、4 K冷凍機のメンテナンスを行う以外には、まったく手を加える必要がないことがこの磁石の特長である。また、停電に備え、励磁電源には緊急電源が備えられている。停電により冷凍機が停止しても、緊急電源により超導コイルに通電が続けられるため、コイルの温度が上昇するまでの10~30分の間、超導コイルは磁界を発生し続けることが可能である。

以下に、この磁石のキーコンポーネントである4 K冷凍機、超導電流リードについて述べる。

## 2.2 4K 冷凍機

超導コイルを4 Kレベルまで冷却するために、この直冷超導磁石では、当社が世界に先駆けて開発した磁性蓄冷材方式の4 K冷凍機を使用している<sup>(2)</sup>。

従来の極低温冷凍機では、熱交換器に使用される蓄冷材と呼ばれる材料に鉛が使用されていた。鉛は他の金属に比べて極低温における比熱が大きいことが、鉛が使用されてきた理由である。ところが、鉛の比熱も約10 K以下では非常に小さい値となり、熱を貯える能力が失われてしまう。そのため、従来の極低温冷凍機では冷却可能な温度が約10 Kであり、超導コイルを直接冷却するのは不可能であった。当社では、極低温における磁性体の磁気相転移に伴う磁気異常比熱に着目し、磁気比熱を利用した磁性蓄冷材を開発した<sup>(3)</sup>。従来の鉛蓄冷材を開発した磁性蓄冷材に変えることによって、4 Kレベルの冷却が可能となった。

図2に4 K冷凍機で使用されている磁性蓄冷材の比熱を

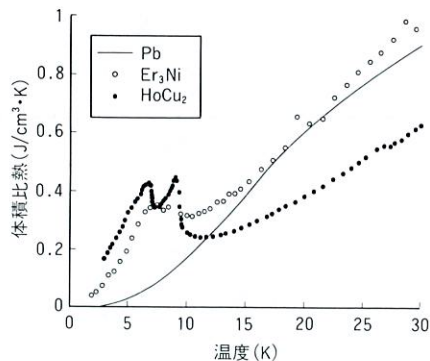


図2. 磁性蓄冷材と鉛の比熱 磁性蓄冷材( $\text{Er}_3\text{Ni}$ ,  $\text{HoCu}_2$ )は、磁気比熱効果により低温で鉛に比べて高い比熱をもつ。

Specific heat of magnetic regenerator materials and lead

鉛の比熱と比較して示す<sup>(4)</sup>。ここで使用されているエルビウム3ニッケル( $\text{Er}_3\text{Ni}$ )とホロミウム・銅2( $\text{HoCu}_2$ )は、反磁性材料であるため磁界の影響を受けにくい。したがって、直冷式超導磁石のように強い磁界中で使用される冷凍機には非常に適した材料である。当社では、磁性蓄冷材を球状化することにより、冷凍機の運転中に磁性蓄冷材が破砕することを防ぐとともに、冷凍機内での熱交換性能を高めることを可能とした。

## 2.3 超導電流リード

直冷式超導磁石を構成するうえで、4 Kレベル(超導コイル)への熱の流入を極力減らすことは、4 K冷凍機に対する熱負荷を軽減させるうえからも重要な要件の一つである。

超導コイルへの熱流入経路でもっとも支配的なものは、超導コイルへ通電するための電流リードからの熱流入であった。そこで、直冷式超導磁石では、80 K以下の温度レベルで使用される電流リードに酸化物超導体を材料として使用した超導電流リードを採用した。超導電流リードを使用することにより、従来の銅を材料とした電流リードを使用した場合に比べて約1/10に熱の流入を抑ええることが可能となった<sup>(5)</sup>。

## 3 直冷式超導磁石の応用

直冷式超導磁石は、当初大学などの研究機関で使用されることが多かったが、近年では操作の簡便さや小型であることの特長を生かし、一般産業の分野で使用されるようになってきた。

シリコン単結晶製造法の一つであるCZ(CZochralski)法は、多結晶シリコンを石英のつぼに入れて加熱溶解し、種結晶を溶融部に浸して回転させながら引き上げることにより単結晶を育成する。単結晶の大直径化が進むと、るつぼ中のシリコン融液内の温度差が大きくなる。そのため、シリコン融液対流が強くなり融液温度の不安定性を招いて、単結晶化が困難になってくる。また、大型化に伴い、石英るつぼの温度上昇と融液対流強度の増加によりるつぼの溶解速度が増加し、シリコン融液内の酸素濃度の増大を招く。したがって、単結晶引上げ中の融液対流の制御が大直径のシリコン単結晶育成のキー技術とされている<sup>(6)</sup>。この融液対流の制御を目的とした引上げ法として、CZ法に強磁場をかけたMCZ(Magnetic field applied CZochralski)法が実用化されている。図3にMCZ法の一例を示す。

当社は、これまでも液体ヘリウムを利用した方式の単結晶引上げ装置用の超導磁石を製作してきたが、超導磁石の小型化、操作の簡便化が図れる直冷方式へと移行しつつある。図4に、シリコン単結晶引上げ装置用に開発した冷凍機直冷式超導磁石を示す。

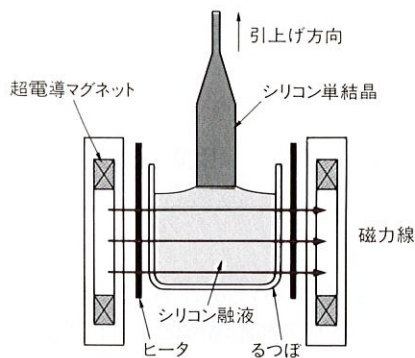


図3. MCZ法を用いたシリコン単結晶引き上げ装置 溶融シリコンに強磁界をかけて対流を防ぎ、品質の高いシリコン単結晶を製造する。  
MCZ method for silicon single-crystal fabrication



図4. 単結晶引き上げ装置に使用される冷凍機直冷式超電導磁石 直冷方式により、超電導磁石の小型化、操作性の簡便化が実現した。  
Conductive-cooled superconducting magnet for silicon single-crystal fabrication

#### 4 あとがき

液体ヘリウムを使用せず、冷凍機だけを用いて超電導コイルを冷却する冷凍機直冷式超電導磁石の概要とそのキー技術となった4K冷凍機、超電導電流リードなどについて詳細を述べた。また、直冷式磁石が産業分野に応用されて

いる例として、単結晶引き上げ装置について紹介した。

超電導磁石は、その優れた特性が理解されているにもかかわらず、ごく一部の例を除いて一般産業に普及することは少なかった。ところが、直冷式超電導磁石は広い空間に高い磁界が得られる超電導磁石固有の特長に加え、常電導磁石の使いやすさも併せもっている。ここで紹介した例だけでなく、今後医療や鉄鋼、輸送などの分野においても広く利用されていくものと期待されている。

#### 文献

- (1) 栗山 透, 他: 冷凍機直冷方式の10 T超電導磁石, 東芝レビュー, 50, 9, pp.699-702 (1995)
- (2) T. Kuriyama, et al: Development of 1 watt class 4 K GM refrigerator with magnetic regenerator materials, Advances in Cryogenic Engineering, 39, pp.1335-1342 (1994)
- (3) M. Sahashi, et al: New magnetic material R<sub>3</sub>T system with extremely large heat capacities used as heat regenerator, Advances in Cryogenic Engineering, 35, pp.1175-1182 (1990)
- (4) Y. Ohtani, et al: Development of a 2 W class 4K-GM refrigerator, presented at CEC/ICEC97, Portland, (1997)
- (5) K. Yamamoto, et al: High-Tc superconducting current lead for a 6 T refrigerator-cooled NbTi magnet, Proc. Of the 6th US-Japan Workshop on High-Tc Superconductors, pp.59-63 (1994)
- (6) 長澤 繁: 強磁場中での高品質半導体シリコン単結晶の製造, 1997年度第5回冷凍部会資料, 低温工学協会, (1997)



栗山 透 Toru Kuriyama, D.Eng.

研究開発センター 機械・エネルギー研究所主任研究員, 工博。超電導機器の冷却および極低温冷凍機の研究開発に従事。日本機械学会, 低温工学会, 日本伝熱学会, 米国低温工学会会員。  
Energy & Mechanical Research Labs.



佐々木 高士 Takashi Sasaki

京浜事業所 機器装置部主査。  
超電導磁石の設計・製造に従事。  
Keihin Product Operations



浦田 昌身 Masami Urata

電力事業部 新エネルギー技術開発部主査。  
超電導応用機器の開発に従事。電気学会, 低温工学会会員。  
Power Systems Div.