

栗山 透
T. Kuriyama

山本 一生
K. Yamamoto

浦田 昌身
M. Urata

液体ヘリウムなどの冷媒をまったく使用せず、極低温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、10 Tの磁界を直径10 cmの室温空間に発生させることに成功した。この磁界は、冷媒を使用しない超電導磁石としては世界最高の値である。

この方式の超電導磁石は、大空間に高磁界が得られる超電導磁石の特徴と鉄心を用いた常伝導磁石の使いやすさを併せもっている。小型で簡便な高磁界磁石として、超電導磁石が使用されていた分野だけでなく、常伝導磁石を使用している分野においても利用できるものと期待される。

We have developed an innovative superconducting magnet which has generated a high magnetic field of up to 10 T in a room-temperature bore of 100 mm. This superconducting magnet is cooled only by a cryocooler; there is no need for cryogenes such as liquid helium and liquid nitrogen. The magnet is only one-third the size of a conventional magnet, and its magnetic field of 10 T is presently the world record for cryocooler-cooled type magnets.

This compact superconducting magnet provides a high magnetic field in a large bore and ensures easy operation. It is anticipated that this type of magnet will expand the fields of application by replacing conventional electromagnets.

1 まえがき

超電導磁石は、均一で高い磁界を広い空間に発生させることが可能である。現在、医療用の磁気共鳴診断装置(MRI)や理化学分析用のNMR(Nuclear Magnetic Resonance)スペクトロメータなどの製品として実用化されている。これらの超電導磁石は、液体ヘリウムによって超電導コイルを絶対温度4.2 K(-269°C)の極低温に冷却しなければならない。煩雑で高度な技術を要する液体ヘリウムの供給を伴うことが、超電導磁石の一般への普及を妨げる一つの要因となっていた。

これに対して、近年、液体ヘリウム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、冷凍機直冷式の超電導磁石が盛んに開発されるようになってきた¹⁾。当社では、自社開発した超電導電流リードと4 K冷凍機をキー技術として冷凍機直冷式超電導磁石の開発を進め、直径10 cmの室温空間に10 Tの磁界を発生させることに成功した。この磁石は、冷凍機のスイッチ一つで運転でき、電気の供給だけで長期の連続運転を行うことができるという簡便さを備えている。これまでの液体ヘリウム冷却による超電導磁石に置き換わるだけでなく、超電導磁石を使用しなかった分野にも普及するものと期待されている。

ここでは、開発した冷凍機直冷式超電導磁石の性能と、キーコンポーネントである超電導コイル、超電導電流リードおよび4 K冷凍機について述べる。

2 冷凍機直冷式超電導磁石の性能

今回開発した、超電導磁石を図1に示す。この磁石は、直径10 cmの円筒形の室温空間に磁界を発生させることができる。磁石全体の概略の寸法は、幅650 mm、奥行き500 mm、フランジまでの高さ490 mmで、質量は約250 kgである。従来の液体ヘリウムを用いた超電導磁石に対し、約1/3の大きさとなっている。また、鉄心を用いた常伝導の電磁石と比較しても、磁界強度・磁界空間ともに数倍以上ありながら、質量は数分の1となっている。

この磁石のクールダウン、すなわち超電導コイルを室温から所定の温度まで冷却するには、冷凍機だけの場合約80時間を必要とする。冷却に液体窒素を併用した場合、約24時間を短縮できる。クールダウンが終了した時点で超電導コイルの温度は約3.4 Kに保たれ、設計温度である4.2 K(液体ヘリウム温度)を十分下回っていた。

超電導コイルへ通電を開始すると、直径10 cmの室温空間に磁界が発生する。この磁石では、通電開始から15分で



図1. 冷凍機直冷式10 T超電導磁石 極低温冷凍機だけで超電導コイルを冷却し、直径10 cmの室温空間に10 Tの高磁界が発生する。
Cryocooler-cooled 10 T superconducting magnet

8 Tの中心磁界(通電電流104 A)を得ることができた。さらに、通電電流を130 Aまで増加させて、冷凍機直冷方式の超電導磁石が発生する中心磁界としては世界最高の10 T(従来の最高値は7.7 T)を達成した。

この磁石は液体ヘリウムの補給という煩雑な作業を不要とすることで、常伝導磁石の簡便さを併せもつ。現在、物性測定などの理化学用実験装置としての応用が見込まれているが、一般産業用の超電導機器への適用や、これまで超電導磁石を使用していなかった分野への応用も期待されている。

3 冷凍機直冷式超電導磁石の構成

3.1 全体構成

ここでは、開発した超電導磁石の構成について述べる。今回開発した冷凍機直冷式の超電導磁石の断面を図2に示す。この磁石は主に、①超電導コイル、②超電導電流リード、③4 K冷凍機、④熱シールド板、⑤真空容器、などから構成されている。

以下に、この超電導磁石のキーコンポーネントである①、②、および③について詳述する。

3.2 超電導コイル

超電導コイルは、ニオブチタン(NbTi)超電導線を用いたコイル(内径216 mm×外径279 mm×高さ240 mm)と、ニオブ3スズ(Nb₃Sn)超電導線を用いたコイル(内径131 mm×外径196 mm×高さ190 mm)を同軸同心上に配置して構成されている^[2]。両コイルとも小型化と高安定化のため

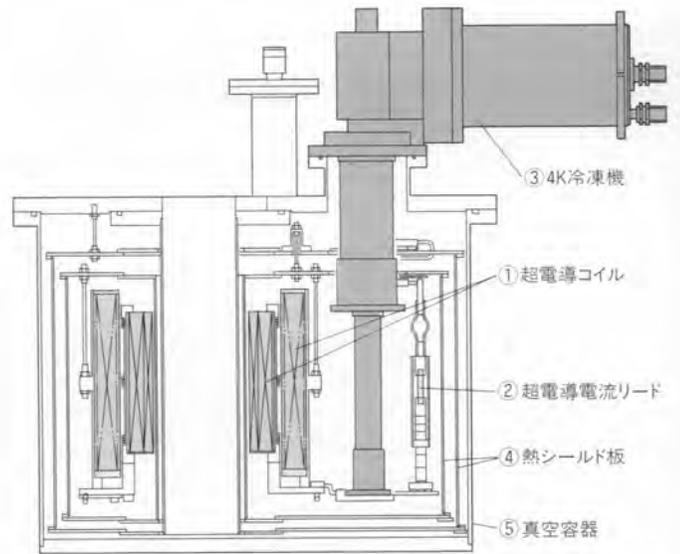


図2. 冷凍機直冷式超電導磁石の断面 真空中に設置された超電導コイルは、4 K冷凍機によって熱伝導だけで冷却される。
Cross section of cryocooler-cooled superconducting magnet

に、巻棒のないエポキシ含浸構造を採用している。また、高速励磁を可能とするために、交流損失(励磁時の発熱)を極力少なくした超電導線を使用した。

このコイルの特徴はコイルの冷却構造にある。従来の超電導コイルは液体ヘリウム中で冷却されているが、このコイルの場合、真空中で熱的に結合された4 K冷凍機によって、熱伝導だけで冷却される。そのため、4 K冷凍機と超電導コイル間の熱抵抗を極力小さくし、両者の間の温度差を小さくすることが重要となる。

そこで、それぞれのコイルの外周を銅で作られた二つのコイル冷却板で挟み込み、さらにその外側からステンレス線を巻いて締め付けた。コイル冷却板と超電導コイルとの間の熱伝導性を高めるために、両者の間にインジウムを挟んで接触熱抵抗の低減を図っている。コイル冷却板はフレキシブルな伝熱板を介して冷凍機の4 Kステージと結合した。以上のような構造により、超電導コイルと4 K冷凍機間の温度差を、0.1 K以下に抑えることができた^[3]。図3に、コイル冷却板が取り付けられた状態のNbTi超電導コイルを示す。

3.3 超電導電流リード

超電導コイルへの熱の侵入経路としてもっとも大きな割合を占めるのは、コイルに電流を流すために設けられた電流リードである。従来は、電流リードを銅で構成していたため熱侵入が大きく、冷凍機に対する熱負荷が増大して冷凍機直冷式の超電導磁石を構成することが困難であった。

ところが、1980年代後半に酸化物超電導体が発見されると、伝導による熱侵入が小さく、しかもジュール発熱のない超電導電流リードが可能となり、冷凍機に対する熱負荷を大



図3. ニオブチタンコイルとコイル冷却板 接触熱抵抗低減のために、ニオブチタンコイルの外周をコイル冷却板で挟んだ。

NbTi coil with metal conductor wall

幅に減少できるようになった。超電導電流リードには、酸化物超電導体の組成や製法によっていくつかの種類があり、使用条件によって使い分けられている。この磁石では、超電導コイルが高磁界を発生するため、超電導電流リードも高い漏れ磁界中におかれる。したがって、磁界中でも性能低下の小さい超電導電流リードを使用することが、この磁石の実現に不可欠であった。

このようなリードとして、ここでは、当社で独自に開発した $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ 組成 (以下、Bi2212 と略記) の酸化物超電導体を用いた。図4に使用した Bi2212 (直径5 mm) のリード材を示す。このリード材は炭酸ガスレーザを用いたレーザ



図4. 超電導電流リード レーザ溶融法で作製した Bi2212 超電導電流リードで、1,500 A 以上の通電が可能である。

Superconducting current lead

溶融法で作製したもので、温度77 K、0 T の磁界中で150 A の電流を流すことができる。この磁石の中では、超電導電流リードは20 K 以下の温度で、約0.35 T の磁界中に置かれるが、この使用条件下では1,500 A 以上の通電が可能である⁽⁴⁾。一般的な焼結法の酸化物超電導体では、たとえ20 K 以下であっても、磁界が印加されると通電可能な電流値は77 K の値に比べて減少するが、上記の値は10 倍以上に向上している。このことから、Bi2212 リードがこの磁石のリードのように磁界中で使用される場合に、特に優れていることが明らかになった。このリードにより、従来の銅製の電流リードに比べて熱侵入を1/10 以下に減らすことができ、4 K 冷凍機に対する熱負荷を大幅に低減できた。

3.4 4 K 冷凍機

超電導コイルを4 K レベルまで冷却するには、小型で信頼性の高い4 K 冷凍機が必要である。今回の直冷方式の超電導磁石では、当社が世界に先駆けて開発した磁性蓄冷材を用いた4 K 冷凍機を使用している。

従来の極低温冷凍機では、蓄冷材と呼ばれる熱交換器用材料に鉛を使用していた。ところが鉛の比熱は温度の低下とともに減少し、超電導コイルが動作するような極低温域(約10 K 以下)では、蓄冷材としての機能が果たせない。そのため、従来の到達温度は10 K 程度であり、4 K レベルでの冷凍は不可能であった。そこで、当社は磁性体の磁気相転移に伴う異常比熱に着目し、磁気比熱を利用した磁性蓄冷材の開発と、それを用いた4 K 冷凍機の開発に着手した。

図5に、当社で開発した磁性蓄冷材エルビウム3ニッケル (Er_3Ni) と従来の蓄冷材の鉛の比熱を示す⁽⁵⁾。約15 K 以上の温度では Er_3Ni と鉛の比熱はほぼ等しいが、15 K 以下では Er_3Ni の比熱は鉛に比べて十分大きい。 Er_3Ni を使用するこ

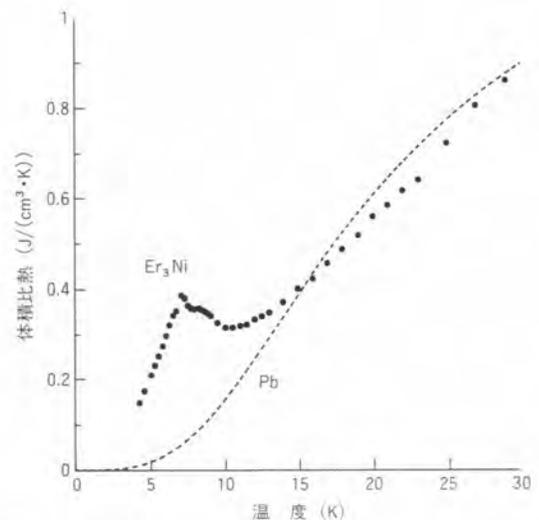


図5. 磁性蓄冷材 (Er_3Ni) と鉛の比熱 磁性蓄冷材 (Er_3Ni) は磁気比熱の効果により、鉛に比べて15 K 以下で高い比熱をもつ。

Specific heat of Er_3Ni and Pb

とによって、従来不可能であった4 Kレベルの冷凍に世界で初めて成功した。

図6に、この磁石の超電導コイル冷却に使用した4 K冷凍機を示す。この冷凍機は、到達温度が3.3 K、液体ヘリウム温度(4.2 K)における冷凍能力は約500 mWである。この冷凍機の冷凍能力は、熱侵入の計算値(140 mW)に比べて十分大きく、超電導コイルを液体ヘリウム温度以下に冷却できる。



図6. 磁性蓄冷材を用いた4 K冷凍機 超電導コイルの冷却に使用した4 K冷凍機。4.2 Kにおいて500 mWの冷凍能力をもつ。
4 K cryocooler using magnetic regenerator material

4 あとがき

液体ヘリウムをまったく使用せずに冷凍機だけで超電導コイルを冷却する冷凍機直冷式の超電導磁石を開発し、直径10 cmの室温空間に最大10 Tの磁界を発生することに成功した。10 Tの発生磁界は、直冷方式の超電導磁石としては

世界最高の値であり、当社が独自に開発した超電導コイルの冷却構造、超電導電流リード、4 K冷凍機などによって達成された。

冷凍機直冷式超電導磁石は、大空間に高磁界が得られる超電導磁石の特徴に加え、常伝導磁石の使いやすさを併せもっている。この磁石の開発により、このタイプの超電導磁石が従来の超電導磁石に置き替わるだけでなく、これまで常伝導磁石を使用していた分野においても利用されると考えられる。

文 献

- (1) 浦田昌身：冷媒のいらぬ超電導マグネット，電気学会誌，114,12,pp.817-821(1994)
- (2) K. Koyanagi, et al :A 10 T Cryocooler-cooled superconducting magnet with 100 m room temperature bore, Proc. of the 9th US-Japan Workshop on High Field Superconducting Materials, Wires and Conductors, to be published
- (3) T. Yazawa, et al :Cooling structure for 6 T superconducting magnet directly cooled by cryocooler, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, to be published
- (4) 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)
- (5) M. Sahashi, et al :New magnetic material R_2T system with extremely large heat capacities used as heat regenerator. Advances in Cryogenic Engineering, 35, pp.1175-1182(1990)
- (6) 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)



栗山 透 Tôru Kuriyama, D. Eng.

1984年入社。超電導機器、極低温冷凍機の研究・開発に従事。現在、研究開発センター 機械エネルギー研究所研究主務，工博。

Energy & Mechanical Research Labs.



山本 一生 Kazutaka Yamamoto

1988年入社。高温超電導体の線材・バルク材の研究・開発に従事。現在、研究開発センター 機械エネルギー研究所研究主務。

Energy & Mechanical Research Labs.



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、エネルギー事業本部新エネルギー技術開発部主務。

Energy Systems Group