開発・製造された冷凍機冷却型超電導マグネット

長谷部 次 教*

住友重機械工業㈱総合技術研究所 平塚市夕陽ヶ丘 63-30

Cryocooled Superconducting Magnets

Tsuginori HASEBE*

Research & Development Center, Sumitomo Heavy Industries, Ltd., 63-30 Yuhigaoka, Hiratsuka 254-0806

1. はじめに

我々は1992年に東北大学との共同研究において酸化物高温超電導体の電流リードと小型GM冷凍機を適用することにより、液体ヘリウムや液体窒素などを必要としない、冷凍機冷却型の Nb_3Sn 超電導マグネットの実用化を世界で始めて実現した¹⁾。その後GM冷凍機の性能向上を図ることによってこのような超電導マグネットの定常運転温度は初期の10 K台から4 K程度までに低下させることが可能となり、 NbTi コイルを用いた廉価な超電導マグネットや、 Nb_3Sn と NbTi のハイブリッドコイルを用いて最大15 Tの強磁場²⁾を発生することのできる超電導マグネットを開発してきた。

現在、このような超電導マグネットの技術的進歩に伴い、その簡便性なども広く世の中に知られるようになりつつあり、強磁場中における磁気科学の新たな研究も、特別な運転技術を必要としない、この種の超電導マグネットを用いて活発化してきている。様々な磁場応用、磁気科学の研究などのマグネット利用者からは、磁場の強度、磁場空間の大きさはもとより、磁場掃引速度、磁場勾配、磁場空間の方向、貫通した空間など様々な要求がある。我々はそれらを満足するマグネット装置として強磁場タイプ、大口径タイプ、スプリットタイプなどの同種の超電導マグネットをこれまでに開発、製作してきた。これらの超電導マグネットには、2段側蓄冷材に HoCu_2 を適用し4 Kにおいて1 Wの冷凍能力を持つ2段式GM冷凍機³⁾を採用している。この4 K-GM冷凍機は冷凍能力に姿勢依存性

が少ないので、冷凍機ごと縦横自在に配置して使用できるタイプのマグネットが製作可能である。また、酸化物高温超電導電流リードには直径20 mm、長さ140 mmの薄肉円筒型の $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ 焼結バルク体で、77 K、自己磁場下における臨界電流が1,000 A以上⁴⁾のものを使用している。ここではそれら約40台の製作実績の中からTable 1に示すいくつかの代表的な冷凍機冷却型超電導マグネット装置を紹介する。

2. 強磁場タイプ冷凍機冷却型超電導マグネット

2.1 10 T 室温ボア径 100 mm (HF10-100VHT)

Nb_3Sn コイルを NbTi コイルでバックアップするハイブリッド型の超電導コイルにより10 Tの磁場を直径100 mmの室温空間に発生させることのできる冷凍機冷却型超電導マグネットは1996年に開発された⁵⁾。様々な磁気科学の研究に使用できるようにマグネット装置を回転することによって磁場空間の方向を縦横自在に設置可能な構造としたことが本機の特徴である。Fig. 1にその外観を示す。4 K-1 Wの2段式小型GM冷凍機1台によって室温状態から4 Kまで約60時間で冷却される。GM冷凍機の2段ステージと1段ステージとを熱的に接続、切り離し可能な機械式の熱スイッチを用いることによって、室温からの冷却時間を約3割短縮し40時間以内にすることも可能である。165 Aの電流を流したときに Nb_3Sn コイルで4.8 T、 NbTi コイルで5.2 Tの合計10 Tを発生する。10 Tまでの励磁時間は最短で13分である。

2.2 11 T 室温ボア径 52 mm 高速励磁型 (HF11-52VHT)

磁場空間は直径52 mmであるが最大11 Tの中心磁場を最短8分で発生することのできる高速励磁可能なマグネットである。HF 10-100 VHTと同様に縦横、

*E-mail : tgn-hasebe@shi.co.jp
1999年3月10日受理

Table 1 Parameters of cryocooled superconducting magnets.

Type	Model	B_0 (T)	d_v (mm)	d_h (mm)	I (A)	D (mm)	H (mm)	W (kg)
High-field type	HF10-100VHT	10.0	ϕ 100	—	165	ϕ 555	665	250
	HF11-52VHT	11.0	ϕ 52	—	150	ϕ 510	640	175
Large-bore type	HF3.5-450VT	3.5	ϕ 450	—	240	ϕ 890	1,030	570
	HF0.1-1600VT	0.1	ϕ 1,600	—	150	ϕ 2,300	945	6,200
Split-type	HF5-90VT-50HT	5.0	ϕ 90	ϕ 50	125	ϕ 510	730	255
	HF10-50VT-20H	10.0	ϕ 50	20	150	ϕ 600	755	285

B_0 is central field, d_v is bore diameter, d_h is gap size, I is operating current for specific central field, D is outer diameter, H is height and W is weight of each magnet system.

Fig. 1 A 10 T cryocooled superconducting magnet with a room temperature bore of 100 mm in diameter. The magnet is set vertically and horizontally.

自由な方向に設置して磁場を利用することが可能である。励磁、消磁中に超電導コイル巻線部で発生する交流損失を低減することと、冷凍機による冷却の効率を向上することにより、励磁速度の高速化が可能となった。150 Aの通電時に Nb_3Sn コイルで 5.8 T, $NbTi$ コイルで 5.2 Tの合計 11 Tの中心磁場を発生する。装置外径 510 mm, 回転式架台を除いた高さ 640 mm, 重量 175 kg というように小型軽量化が実現されている点も本機の特徴である。

3. 大口径タイプ冷凍機冷却型超電導マグネット

3.1 3.5 T 室温ボア径 450 mm (HF3.5-450VT)

直径 450 mm の大きな室温空間を有し、励磁消磁速

度の速いタイプのマグネットで、産業応用を目指して開発された。Fig. 2 にその外観を示す。グレーディングされた $NbTi$ コイルにより構成されており、内層に 1.65 mm $\times$ 0.85 mm の $NbTi$ 線、外層に ϕ 1.0 mm の $NbTi$ 線をそれぞれ使用し 240 A 通電時で最大中心磁場 3.5 T を発生させることができる。3.5 T までの励磁時間は最短で 5 分であり、この速度での連続繰り返しの励磁、消磁も問題なく行うことができる。磁場を印加する対称物や治具等に磁性体を使用される場合を想定し、超電導マグネットに作用する磁気力を 2,000 kgf まで許容する設計とした。このための強度を備えた上で 4 K に冷却されている超電導コイルへの熱侵入量を最小限にする荷重支持構造を備えている点が特徴である。

Fig. 2 A 3.5 T cryocooled superconducting magnet with a room temperature bore of 450 mm in diameter.

3.2 カスプ磁場室温ボア径 1,600 mm (HF0.1-1600 VT)

半径 450 mm の円周上で径方向磁界が 0.12 T のカスプ磁場を発生するマグネットで周辺への漏洩磁場を低減するための磁気シールドをマグネット装置の周囲に取り付けている。室温ボア径は 1,600 mm で磁気シールドを含めた総重量は 6,200 kg である。装置の大型化に伴う輻射侵入熱量の増大や固体熱伝導経路の長大化及び熱収縮による歪みなどの問題点を考慮した設計を施した。4 K-1 W の GM 冷凍機を 2 台用いて冷却することにより 4 K 台のコイル温度を実現している。また、本装置はコイルおよび巻棒などの冷却重量が大きいのでマグネット本体が冷却されたままの状態では冷凍機を取り外して、メンテナンス作業や交換作業が可能となっている。このように、メンテナンスによるマグネットの稼働時間の圧縮を回避するなど産業応用へ適用する際の経済性も考慮されている。

4. スプリットタイプ冷凍機冷却型超電導マグネット

4.1 5 T 縦ボア径 90 mm 横ボア径 50 mm (HF5-90VT-50HT)

観測用の横方向ボアを有するスプリット型冷凍機冷却型超電導マグネットで磁場方向と平行な直径 90 mm の磁場発生室温空間に加えて、磁場中心において直行する直径 50 mm の横方向室温空間を持つことが特徴である⁶⁾。横方向の室温空間を作るために超電導マグネットは上下 2 つの NbTi コイルからなるスプリットタイプとなっている。上下コイル間に作用する電磁圧縮力を支持するステンレス製部材も超電導コイルと共に 4 K レベルに冷却する構造となっている。

4.2 10 T ボア径 50 mm ギャップ 20 mm (HF10-50VT-20H)

ボア径 50 mm の空間に最大 10 T 中心磁場を発生させることができる中性子散乱実験用の冷凍機冷却型超電導マグネットでスプリットタイプ超電導マグネットのギャップ空間に中性子線が通過する空間を設けている⁷⁾。Fig. 3 にその外観を示す。上下 2 つの超電導コイルは各々が Nb₃Sn コイルと NbTi コイルのハイブリッド構造となっており、150 A 通電時に中心磁場 10 T を発生する。上下コイル間には中心磁場 10 T 発生時に約 80 トンの電磁圧縮力が作用するがギャップには中性子線の経路を確保する必要があるためマグネットギャップの電磁力支持体は中性子線透過率の高い

Fig. 3 A 10 T split-pair cryocooled superconducting magnet for a neutron-scattering experiment.

高強度アルミニウム合金製リングで構成されている。中性子線が通過可能な空間は 318 度の開口角を持って設けられている。

5. おわりに

我々は冷凍機冷却型超電導マグネットの実用化を世界で初めて果たした後も、本稿に述べたように数多くの磁場応用に使用可能な装置を開発、製作してきた。これにより、超電導マグネットの広い範囲への応用を推進するとともに、新しい磁気科学の進展にも寄与することができたことは非常に大きな喜びである^{8,9)}。今後とも、磁場応用と磁気科学のさらなる発展に向けて、冷凍機冷却型超電導マグネットの技術を高めるべく開発に注力し、より良いマグネット装置を世の中に提供していきたい。

参考文献

- 1) 櫻庭順二ら：低温工学 28 (1993) 519
- 2) 三上行雄ら：低温工学 34 (1999) 200
- 3) A. Onishi, et al. : Proc. of JSJS-5 (1997) 95
- 4) 山田 豊ら：低温工学 28 (1993) 526
- 5) T. Hasebe, et al. : Adv. Cryog. Eng. 43 (1998) 291
- 6) K. Jikihara, et al. : IEEE Trans. Appl. Supercond. 7, No. 2 (1997) 423
- 7) K. Jikihara, et al. : Proc. of the Applied Superconductivity Conference (1998)
- 8) K. Watanabe, et al. : Adv. Cryog. Eng. (Mater.) 44 (1998) 747
- 9) 北澤宏一：新しい強磁気効果，技術予測シンポジウム予稿集 No. 26 (1998) 45