試作 Bi 系高温超電導パンケーキ コイルの冷却・励磁

下畑 賢司, 横山 彰一, 稲口 隆, 藤田 重人
中村 史朗, 宮下 章志*, 樋熊 弘子*
梅村 敏夫*, 江川 邦彦*, 内川 英興*

三菱電機中央研究所 尼崎市塚口本町 8-1-1

* 三菱電機材料デバイス研究所 相模原市宮下 1-1-57

(1993 年 12 月 3 日受理)

Field Operation and Cooling Test of Bismuth-Based Pancake Coil

Kenji SHIMOHATA, Shouichi YOKOYAMA, Takashi INAGUCHI, Shigeto FUJITA,
Shirou NAKAMURA, Shouji MIYASHITA,* Hiroko HIGUMA,*
Toshio UMEMURA,* Kunihiro EGAWA and Fusaoki UCHIKAWA*

Central Research Lab., Mitsubishi Electric Co., 8-1-1 Tsukaguchi-Honmachi, Amagasaki 661

* Materials and Electronic Devices Lab., Mitsubishi Electric Co., 1-1-57 Miyashimo, Sagami-hara 229

(Received December 3, 1993)

Synopsis :

Field operation and cooling test of high T_c coil made of Bi-based pancake coil were carried out. By the measurement of critical current distribution inside the high T_c coil, we found that the critical current of the edge pancake coil is lower than that of the center pancake coil. This result is explained quantitatively in consideration of field and field angle dependence of critical current for the tape-shaped conductor and field distribution inside the coil. Magnet system assembled GM-refrigerator, high T_c current lead and the high T_c coil was tested. As a result, it was found that thermal load into the coil was low and field operation up to 90 % of critical current of the high T_c coil was stable.

Keywords : superconducting magnet, pancake coil, critical current, oxide superconductor, refrigerator

1. はじめに

我々は、高温超電導コイルの 20 K 応用として、ギフォード・マクマフオンサイクル(GM)冷凍機による伝導冷却型高温超電導マグネットを提案し、磁気浮上列車用超電導マグネットの概念設計を行った¹⁾。この概念設計の結果から以下のメリットを見いだした。20 K 運転における冷凍機の効率は 4 K 冷却に比べ約 5 倍向上し、GM 冷凍機を用いることにより 10,000 時間以上の長期連続運転が可能になる。超電導コイルを高温超電導とすることにより 20 K での運転が可能に

なるだけでなく、20 K における比熱が 4 K に比べ約 100 倍、熱伝導率が約 10 倍向上するので、超電導線の臨界電流 I_c の 90 % でも相当量 (NbTi の 4 K で I_c の 25 % 通電時に比べ約 1,000 倍) の熱擾乱が加わらないとクエンチしない。

今回、Bi 系 2223 相テープ線材を用いてシングルパンケーキコイルを 8 個試作し、それらを積層した高温超電導コイルを作製した。そして、このコイルの冷却および励磁試験を行った。コイルに使用した線材は、臨界電流の温度・磁界依存性から Bi 系 2223 相テープ線材を選定した。

Table 1 Parameters of the high- T_c coil.

Conductor	
Superconducting material	$(\text{BiPb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$
Stabilizer	Silver
Size [mm^2]	$0.15 \times 4.5 \text{ mm}^2 \times 3 \text{ pieces}$
Silver ratio	2
Pancake coil	
Inner diameter	20 mm
Outer diameter	74 mm
Number of turns	31
Insulation for conductor	Alumina fiber tape (0.4 mm thickness)
Coil	
Number of pancake coils	8
Joint	Soldering of copper plate
Field constant	0.00474 T/A

NbTi, Nb₃Sn 等の金属系超電導線材を用いたコイルでは、最大磁界位置での臨界電流が最も低い。一方、臨界電流に磁界方向の依存性がある高温超電導テープ線材を用いた高温超電導コイルでは、コイル端部付近の臨界電流が最も低い可能性がある²⁾。以下、この現象を端部磁界効果とよぶ。これは、以下の理由による。一般に Bi 系高温超電導テープ線材は、テープ面方向に結晶の ab 面が配向する³⁾。そこで、高温超電導テープ線材においては、 ab 面に垂直な磁界が加わると臨界電流は大きく低下する。しかし、 ab 面に平行に磁界が加わっても臨界電流の低下は比較的小さい。臨界強度の最大値はコイル中心部付近にあるが、この磁界の向きはテープ面と平行 ($B//ab$ 面) である。一方、コイルの軸方向の端部付近では磁界強度は弱くなるものの、 ab 面に垂直な磁界成分が生じる。このため、コイル巻線部の臨界電流が最も低い位置が、端部付近に存在する可能性がある。

そこで、今回の研究においては試作した高温超電導コイルの臨界電流をパンケーキコイルごとに測定し、端部磁界効果を実験的に検証した。また、高温超電導コイル内の磁界分布と、短尺線材の臨界電流密度の外部磁界および角度依存性 ($I_c(B, \theta)$) を考慮し高温超電導コイル内の臨界電流分布を推定し、実験結果との比較を行った。

また、概念設計における高温超電導コイルおよび冷却系の安定性を確認するために、実際に 2 段型 GM 冷凍機、高温超電導電流リード⁴⁾、そしてこの高温超電導コイルを組み合わせて冷却、励磁を行い評価した。

Fig.1 Field and field angle dependence of critical current for short silver sheathed tape at 5 K.

2. 実験結果および考察

2.1 コイルの仕様

Table 1 に、試作した高温超電導コイルの主な仕様を示す。テープ線材は、 $(\text{BiPb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ 組成の仮焼粉末を銀パイプに入れ、押出し、伸線および圧延加工でテープ状とし、プレスと熱処理を繰り返すことにより作製した。プレスと熱処理の繰り返しにより、テープ線材の垂直方向に結晶の c 軸が配向する。Fig.1 に、試作した高温超電導コイルと同一仕様の短尺テープ線材の、5 K における臨界電流の外部磁界角度依存

Fig. 2 Cross section of experimental high T_c coil made of pancake coil. Each pancake coil is named A to H sequentially.

性を示す。外部磁界とテープ線材のなす角度により臨界電流に異方性があることがわかる。磁界がテープ線材に平行な場合と垂直な場合の臨界電流の比は0.5程度である。テープ線材を3本束ねて導体とした。アルミナ繊維を同時に巻き込みパンケーキ状とし、最終熱処理を施しパンケーキコイルを作製した。8個のパンケーキコイルを重ね、パンケーキコイル間をはんだづけで直列に接続し、試作高温超電導コイルとした。Fig. 2 に、コイルの断面図を示す。積層したパンケーキコイルの順に、A～Hの番号付けをした。パンケーキコイル間を接続する前に、パンケーキコイルごとに液体窒素中で測定した臨界電流を図中に示した。パンケーキコイルごとの特性のばらつきは20%程度である。

2.2 コイルの励磁試験

Fig. 3 に、液体ヘリウム温度におけるパンケーキコイルごとの臨界電流の外部磁界依存性を示す。高温超電導コイルは直列に励磁し、臨界電流は各パンケーキコイルごとに取付けた電圧タップにより測定した。パンケーキコイルごとの臨界電流測定では、高温超電導コイルの臨界電流値を越えた電流まで通電する必要がある。本測定において、高温超電導コイル内の温度分布、時間的溫度変化による臨界電流への影響を考慮し、液体ヘリウムまたは液体窒素を用い冷却した。臨界電流は、抵抗率基準 $\rho = 10^{-11} \Omega \cdot \text{cm}$ で決定した。 B_{ex} は、バイアスコイルによる外部磁界を示し、今回の試作コイルに対してはほぼ均一磁界である。パンケーキコイルE、Gに関しては、詳細に臨界電流分布を測定した結果、他の部分と比べ極端に臨界電流が低い部分が存在することがわかった。パンケーキコイルE、Gを除くと、外部磁界ゼロの場合、端部のパン

Fig. 3 Critical current distribution of each pancake coil at 4.2 K.

ケーキコイルの臨界電流が低い現象（端部磁界効果）がみられる。

線材の特性は作製条件に敏感に左右される。このため、パンケーキコイルE、G以外にも特性のばらつきがある。5 Tの外部磁界中では、高温超電導コイルの自己磁界の影響は無視でき、外部磁界5 Tでの臨界電流はパンケーキコイルごとの特性のばらつきを反映していると考えられる。特性のばらつきを補正するため、各パンケーキコイルごとの臨界電流を、対応するパンケーキコイルの外部磁界5 Tでの臨界電流で規格化した。規格化した結果を、Fig. 4 に示す。パンケーキコイルE、Gのデータは上記理由により省いた。外部磁界ゼロの場合、端部（A、H）のパンケーキコイルほど、中心のパンケーキコイルより規格化した臨界

Fig. 4 Normalized critical current distribution of each pancake coil at 4.2 K. Dashed line is estimated result using the field and field angle dependence of critical current and field distribution inside the coil.

電流が低く、端部磁界効果が明確にみられる。中心部のパンケーキコイルの規格化臨界電流と、端部のパンケーキコイルの規格化臨界電流の差は、30%程度である。外部磁界が1 Tの場合でも端部磁界効果はわずかにみられる。外部磁界が2 T以上ではコイル間の規格化臨界電流の差はなく、外部磁界5 Tでの規格化に問題がないことを示している。

高温超電導コイルが臨界電流に達した場合の磁界分布と、短尺線材の $I_c(B, \theta)$ 特性からパンケーキコイルごとの臨界電流分布を推定した。Fig. 4 中に、外部磁界がゼロおよび1 テスラの場合の推定結果を点線で示した。実験結果と推定結果は、よく一致している。

また、63 K および 77 K において、同様の測定を行った。4.2 K における結果と同様に端部磁界効果がみられた。中心部と端部のパンケーキコイルの規格化臨界電流の差は、63 K, 77 K いずれの場合も 30% 程度であり、4.2 K の場合と同様の傾向であった。

2.3 伝導冷却試験

2.3.1 伝導冷却型マグネットの構成

次に、前記高温超電導コイルを用いて、伝導冷却型マグネットを試作した。伝導冷却型マグネットの写真を Fig. 5 に、その構成図を Fig. 6 に示す。また本マグネットの諸元を Table 2 に示す。冷凍機は、2 段式 GM 型である。電流リードは、常温から 1 段ステ

Fig. 5 Photograph of high- T_c magnet system.

Fig. 6 Assembly of high- T_c magnet system.

ジまでは断面積 10 mm²、長さ 250 mm の銅リードを用いた。1 段と 2 段ステージの間は、厚さ 1 mm、幅 10 mm、長さ 200 mm の Bi 系高温超電導電流リードを 2 枚並列したものを用いた。低温端（2 段ステージ）における高温超電導コイルの銅リードとの接続は編組線を用いてはんだづけした。GM 冷凍機の各段と電流リードは、MgO 焼結板（厚さ 1 mm、幅 10 mm、長さ 50 mm）の電気絶縁を介して接続し電流リードの温度定点とした。高温超電導コイルは、GM 冷凍機の 2 段ステージに支持固定され、銅板の伝導冷却部材を通して冷却される。高温超電導コイルの表面形状が複雑なため、カプトンテープで電気絶縁を施し、In シートおよび MgO グリースを用いて熱伝導部材と熱接

Table 2 Parameters for the high- T_c magnet.

High- T_c coil	
Inner diameter	20 mm ϕ
Outer diameter	74 mm ϕ
Height	47 mm
Current lead	
High- T_c current lead	
Material	$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$
Width	10 mm
Thickness	1 mm
Length	200 mm
Copper lead	
Width	10 mm
Thickness	1 mm
Length	250 mm
Refrigerator	
Type	2-stage Gifford-MacMahon type
Refrigeration capacity	(1st stage) 60 K—60 W
	(2nd stage) 20 K—10 W

触させた。今回用いた MgO グリースは、粒径が数十 μm 程度の MgO 粉に真空ポンプ用のオイルを混合したものである。

高温超電導コイルの重量は 1.5 kg であり、GM 冷凍機の 2 段ステージの冷却重量はこのコイルを含め約 3.2 kg である。

2.3.2 熱負荷の見積り

銅の電流リードからの 1 段ステージへの熱侵入量を計算した結果、100 A 通電時 1 本当たり 8 W 程度であり、往復で 16 W 程度である。

高温超電導電流リードは単体試験を行った結果、熱侵入量は、1 枚当たり非通電時で約 0.01 W、100 A 通電時で約 0.02 W であり、通電時の熱侵入量の増加分は主に接続リードによるものであった。したがって、リード材 2 枚では、非通電時で約 0.02 W、100 A 通電時で約 0.025 W（往復で約 0.05 W）程度である。参考までに銅リードで構成した場合、最適化設計した結果、直径 2.5 mm ϕ 、長さ 200 mm で 100 A 通電時 1.5 W/本（往復で 3 W）である。したがって、本高温超電導リードの熱侵入量は、最適化した銅リードの約 1/60 である。すなわち、ガス冷却がない真空中の電流リードは、銅等の金属で構成すると非常に熱侵入量が大きいことがわかる。

高温超電導コイルの発熱は主に、高温超電導コイルの銅リードのジュール発熱と、パンケーキコイル間の

接続抵抗によるものである。接続抵抗は、通電測定の結果から約 23 $\mu\Omega$ であり、100 A 時の発熱は 0.23 W である。また、高温超電導コイルに取り付けられた銅リードと編組線の抵抗値は、約 20 $\mu\Omega$ で 100 A 通電時の発熱は 0.2 W である。

2.3.3 冷却・通電特性

初期冷却について、大まかな冷却時間を計算した。冷却部の重量は 3.5 kg であり、平均比熱を 0.2 J/g $\cdot$ K、高温超電導コイルを考慮した平均熱伝導度を 1 W/K として 10 K の温度差で冷却した場合、300 K から 10 K までの熱容量は 203 kJ であり、冷却能力を 10 W とすると、冷却時間は 5.6 h となる。冷凍機を室温から起動した後、約 3.3 時間で高温超電導電流リードが高温端、低温端、中央部の順に超電導状態になり、約 4.4 時間で高温超電導コイルが超電導状態になった。初期冷却時の高温超電導コイルと 2 段ステージの温度差は 10~20 K であった。高温超電導コイルの到達温度は非通電時において約 3.5 K であり、高温超電導電流リードの低熱侵入が確認できた。到達温度の熱平衡状態の所要時間は約 6 時間であった。冷却を約 1 日間行ったが、各部の温度は特に大きな変化はなく非常に安定していた。また、冷却過程において、初期は 1 段ステージの方が 2 段ステージに比べ温度が低く、超電導コイルが 100 K 近くになったところで温度が逆転した。これは、2 段ステージの熱容量が大き

Table 3 Thermal load to refrigerator at $I=100$ A.

Experimental result		Calculation	
1st stage	40 K, 20 W	Copper lead	16 W
2nd stage	5 K, 0.5 W	Superconducting lead	0.05 W
		Connection of pancake coil	0.23 W
		Copper lead of coil	0.20 W
		Total	0.48 W

く、また2段ステージの冷凍能力が1段ステージに比べ小さいためである。このことから、1段と2段ステージに熱伝導スイッチを設けると冷却時間が短縮できる可能性がある。

高温超電導コイル温度が5 Kでの臨界電流は112 Aであった。電流値100 Aで、1時間以上の連続通電を行ったが、各部の温度および電圧に変化はみられず安定していた。超電導電流リードの高温端、中央部、低温端の温度は各々43 K, 37 K, 18 Kであった。通電時の1段ステージ温度は32 Kであり、超電導電流リードの高温端の温度と温度差が大きい。これは、MgO板による熱伝導が期待したほど良くなかったためと考えられる。

連続通電の結果から各ステージの熱侵入量を算定した結果をTable 3に示す。電流リードの熱解析および高温超電導コイルの電圧から熱侵入を計算した結果、これらの結果はほぼ一致した。

種々の温度における高温超電導コイルの通電試験を2段ステージを加熱して行った。高温超電導コイルの温度が11.5 K, 16 K, 20 Kでの臨界電流 I_c は各々100 A, 95 A, 84 Aであり、発生最大磁界は各々0.47 T, 0.45 T, 0.40 Tである。また、16 K, 20 Kの各温度にて100 Aで通電を維持した。16 Kでの100 A通電においては、通電電流が I_c を越えているにもかかわらず、10分間経過しても高温超電導コイル電圧および温度は変化しなかった。しかし、20 Kにおいて100 A通電した場合、高温超電導コイル電圧、温度は安定せず、15分の間に徐々に上昇した。また、高温超電導コイルの温度20 Kにおいて、80 Aの4時間以上の連続通電を行った結果、電圧および温度ともに安定してコイルに通電ができることを確認した。

3. 結 論

Bi系2223相銀シーステープ線材を用いた、8個のシングルパンケーキコイルからなる高温超電導コイルの超電導特性、および伝導冷却型マグネットの冷却・通電特性を評価した。その結果、以下のことを見いだした。

1) 高温超電導コイルの抵抗の発生は、最大磁界位置ではなく、高温超電導コイル端部から起こること（端部磁界効果）を実験的に確認した。この実験結果は、短尺テープ線材の $I_c(B, \theta)$ 特性と、高温超電導コイル内の磁界分布を考慮することにより、定量的に説明できた。高温超電導テープ線材を用いたコイルを設計する場合、端部磁界効果を考慮する必要がある。

2) 2段型GM冷凍機、高温超電導電流リード、高温超電導コイルを組み合わせた結果、低熱侵入でかつ安定した冷却、励磁ができた。また、真空中における伝導冷却において、高温超電導コイルは I_c の90%以上でも連続通電が可能であった。

参 考 文 献

- 1) K. Shimohata, et al.: Proceedings of the 4th International Symposium on Superconductivity (ISS '91) (1991) 1081
- 2) 下畑賢司ら：第44回低温工学・超電導学会講演概要集(1990) 7
- 3) K. Sato, et al.: Proceedings of the 2nd International Symposium on Superconductivity (ISS '89) (1989) 335
- 4) K. Egawa, et al.: Proceedings of the 5th International Symposium on Superconductivity (ISS '92) (1992) 783