冷凍機冷却型超電導マグネットの開発

—Bi 系超電導バルク電流リードの適用—

山田 豊, 櫻庭 順二, 長谷部次教, 端 文 昭
張 振 坤, 石 原 守, 渡 辺 和 雄*

住友重機械工業株式会社 平塚研究所 平塚市夕陽ヶ丘 63-30

* 東北大学金属材料研究所 仙台市青葉区片平 2-1-1

(1993 年 3 月 29 日受理)

Cryocooler Cooled Superconducting Magnet

—Application of Bi-Based Oxide Superconducting Current Leads for the Magnet—

Yutaka YAMADA, Junji SAKURABA, Tsuginori HASEBE, Fumiaki HATA,
Chin Kung CHONG, Mamoru ISHIHARA and Kazuo WATANABE*

Hiratsuka Research Laboratories, Sumitomo Heavy Industries, Ltd., Yuhigaoka 63-30, Hiratsuka 254

* Institute for Materials Research, Tohoku University, Katahira 2-1-1, Aoba-ku, Sendai 980

(Received March 29, 1993)

Synopsis:

We applied Bi-based superconducting bulk for current leads in a cryocooler cooled superconducting magnet using no liquid helium: The bulk has a composition of (Bi+Pb): Sr: Ca: Cu = 2:2:2:3 and is utilized in the form of thin-walled sintered cylindrical tube. Critical current and critical current density of the bulk under self magnetic field at 77 K are at 1,100 A and 1,200 A/cm², respectively. At a current of 400 A, this magnet can generate a steady magnetic field of 4 T in a room temperature 38 mm bore. Heat leakage through Bi (2223) bulk leads when passing a current of 400 A is slight at about 0.2 W. Thereby, the resulting total heat load on the coil is less than 0.4 W, within cooling capacity of the G-M cryocooler.

1. はじめに

各種超電導機器に電流を供給する電流リードに、酸化物超電導体を適用¹⁻⁹⁾する試みが注目されている。これは酸化物超電導体が、臨界温度以下でジュール発熱が全くなく、また熱伝導度が極めて低いために、極低温下におかれる超電導機器への熱侵入を大幅に低減できる可能性があるためである。

著者らは、これまでに粉末焼結法の一つである中間 C. I. P. 法を用い、Bi 系酸化物超電導体のバルクを作製し、その特性と熱侵入量を評価して報告^{9,10)}した。それによれば、バルクの臨界電流密度として、77 K, 自己磁場下において、1,000 A/cm² を越える値が得られ、直流 800 A 通電時のバルク一対当たりの熱侵入量は、約 0.16 W と従来のガス冷却型銅製リードの 1/10 以下であることが判明した。

そこで著者らは、近年性能向上の著しい G-M 冷凍機を用いて、液体ヘリウム等の冷媒を全く必要としない冷凍機冷却型の超電導マグネットを開発^{11,12)}し、その電流リード部分に酸化物超電導体を用いた。前報¹³⁾では、同マグネットの構造・システム等について報告するので、本報では電流リードについて記述する。

2. 実験方法

電流リードに用いたバルクは、既報^{9,10)}の如く、(Bi+Pb): Sr: Ca: Cu = 2:2:2:3 の組成比で、焼結と冷間静水圧プレス (C. I. P.) を繰り返す中間 C. I. P. 法により作製した。

Fig. 1 にバルクリードの外観を示す。外径 22.8 mm, 内径 20 mm, 長さ 140 mm の薄肉円筒状をしており、両端 20 mm に、銀溶射を行って電極を形成した。

Fig. 2 は今回開発した冷凍機冷却型超電導マグネッ

Fig. 1 A Bi(2223) bulk lead pair.

トの概略図である。バルクリードの一端を、G-M 冷凍機の 2 段冷却ステージに電氣的な絶縁を施して固定し、他端を 1 段冷却ステージより電氣的に絶縁したフレキシブルな伝熱部材に取り付け、冷凍機の冷却ステージからの熱伝導のみによって冷却した。その結果、バルクリード両端の温度は、各ステージ温度近傍、すなわち 2 段冷却ステージに固定された低温端で約 10 K、1 段冷却ステージに取り付けられた高温端で約 50 K に冷却された。このように、バルクリードの一端を固定し、他端を自由端とする片持ち梁構造としたのは、冷却時に生ずる熱応力を緩和するためである。

また、ここで、低温端側を固定したのは、後述するように、低温端側のほうが、励磁時の漏れ磁場が大きいので、バルクリードに働く電磁力、特に固定端にかかる曲げモーメントを軽減するには、低温端側を固定するほうが有利なためである。バルクリードの両端 20 mm は、このように銅電極に接続されるので熱侵入の低減に寄与する実質的なリード長さは、100 mm となる。

3. 実験結果および考察

3.1 バルクリードの特性

電流リードとして用いた一対のバルク（サンプル A および B）の 77 K 自己磁場下における V-I 曲線を、Fig. 3 に示す。1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ を基準としたバルクの臨界電流 (I_c) は、それぞれ 1,180 A と 1,130 A、したがって、臨界電流密度 (J_c) は、1,250 A/cm² と 1,200 A/cm² となる。一方、銅キャップを施した電極部の抵抗は、両サンプルの両端ともほぼ一定で 0.13~0.14 $\mu\Omega$ と良好な値が得られた。なお、通電電流が 1,000 A 付近より、非オーミックな電圧が電極部に生ずるが、これは銅の導線やキャップ、半田、銀溶射部等のジュール発熱による電極内部特にバルク近傍の温度上昇に

Fig. 2 Schematic illustration of the cryocooler cooled superconducting magnet system.

Fig. 3 Voltage-current characteristics of Bi(2223) bulk and electrodes at 77 K.

起因するものと思われる。

Fig. 4 に、電流と外部磁場が成す角度： θ を変えた時の 77 K におけるバルクの J_c の磁場依存性を示す。電流と外部磁場が成す角度： θ が大なる程、磁場下の J_c の低下は大きく、 J_c が半減する磁場は $\theta=0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ の時、それぞれ 33, 25, 19, 18 mT であった。なお、Fig. 4 においては自己磁場の影響を無視しているが、周回積分則より概算すると、バルクの外周部には 1,100 A 通電時約 20 mT の自己磁場が生じており、 J_c 値への影響を考慮した評価が今後必要と思われる。一方、4.2 K における磁場依存性については、 $\theta=90^\circ$ の場合を示した。同図中には 400 A 通電し、

Fig. 4 Magnetic field dependence of the critical current density at 77 K and 4.2 K.

4 T の磁場を励磁した時にバルクリードの高温端および低温端に印加される漏れ磁場の強さを、矢印で示している。後述するように、400 A 通電時、高温端の温度は、最高 74 K になり、電流と約 30° の角度で 36 mT ($B_z=30, B_r=20$) の漏れ磁場が印加される。この時の J_c 値は、77 K の場合、510 A/cm² で、 I_c 値は 480 A となるので、約 80 A の余裕をもって通電していたものと推測される。一方、低温端では、温度 13 K で、電流と約 60° の角度を成して 160 mT ($B_z=80, B_r=140$) の漏れ磁場が印加される。Fig. 4 の 4.2 K, $\theta=90^\circ$ のデータより J_c 値は 6,200 A/cm², I_c 値は 5,800 A と推算され、 J_c の値として 9 K の温度

上昇分を考慮しなければならないが、通電電流と臨界電流の差は大きく、なお十分余裕があるものと推測される。このように本システムのパルクリードは、高温端側でより厳しい条件となることが予想されるので、今後コイルの高磁場化を進める際には、磁気シールドの必要性が高まるものと思われる。

バルクリードの高温端と低温端の温度および電極部の電圧と 1 A/s のスイープ速度で電流を上げた時の通電電流との関係を、Fig. 5 に示す。ここで、温度センサーは、低温端にはカーボングラス抵抗温度計、高温端には白金抵抗温度計を用い、それぞれ熱伝導性ワ

Fig. 5 The relation of voltage, temperature of warm and cold ends of bulk leads and operating current.

Fig. 6 The relation of voltage, temperature of warm and cold ends of bulk leads and holding time at 400 A.

Fig. 7 Temperature dependence of the thermal conductivity and the thermal conductivity integral of Bi(2223) bulk.

ニスを塗布して電極部に固定した。また、電圧タップは、77 K における I_c 測定時に使用した銅キャップを取り外し、熱侵入量を最小にするよう考慮した銅リードに改めて取り付けた。Fig. 5 によれば、各部の温度および電圧は、通電電流とともに上がり、400 A では非通電時に比べ高温端で約 4 K、低温端で約 1.5 K の温度上昇が認められた。また、電極部の電圧は、電圧タップ取付け位置の変更や改めて半田付けをしたこと等により、77 K における I_c 測定時に比べ約 1 桁高い電圧となった。

Fig. 6 は、同様に各部の温度および電極部の電圧と 400 A 通電時の保持時間との関係である。バルクリードの高温端の温度は、400 A に保持後、約 1.6 時間で初期温度よりも約 20 K 上昇し、正負極ともに定常値

Fig. 8 Temperature profiles in bulk leads.

74 K となった。また、この時の電極部の電圧は、サンプル A を使用した正極側が、サンプル B を使用した負極側に加べ約 2 倍高くなったが、これは、 I_c 測定時には両者にはほとんど差がなかったことから、Fig. 5 において見られたように、リード取付け時のハンダ操作等によるものと思われる。一方、低温端では 400 A 1 時間保持後、初期温度より約 2.5 K 上昇して平均 13 K とほぼ一定値に達し、バルクリードの有効長さ 100 mm 間で約 60 K の温度差が生じた。また電極部の電圧は、74 および 94 μ V と低く、高温端に比べ、1/10~1/20 の値であった。

3.2 バルクの熱伝導率と侵入熱

バルクの熱伝導率の温度依存性¹⁴⁾および熱伝導率の積分値を Fig. 7 に示す。熱伝導率は、定常熱流法により測定し、熱伝導率の積分値は、付録に示す式を用いて算出した。

これらの式を用いて計算したバルクリードの高温端-低温端間の温度分布を、非通電時および 400 A 定常通電時について、Fig. 8 に示す。バルクの熱伝導率は低温側でより低いため、バルクの温度勾配は低温端近傍で最も大きくなる。

ここで、低温端への全侵入熱を Q_T とすれば、 Q_T は高温端からの熱伝導による侵入熱： Q_C と低温端の電極部のジュール発熱： Q_J の和で表される。

$$Q_T = Q_C + Q_J \quad (1)$$

また、

Table 1 Cold end heat load [mW].

Operating current		0 A		400 A	
Conduction heat flow : Q_C	+Lead	56	118	110	221
	-Lead	62		111	
Heat generation contact : Q_J	+Lead	0	0	38	68
	-Lead	0		30	
Heat load : Q_T		118		289

Fig.9 SEM micrographs and EPMA image of Bi(2223) bulk and silver contact.

$$Q_C = \frac{A}{L} \int_{T_1}^{T_2} \lambda(T) dT \quad (2)$$

A : パルクの断面積 (0.94 cm^2), L : パルクの長さ (10 cm), T_1 および T_2 : 低温端および高温端の温度 (K), $\lambda(T)$: 熱伝導率 ($\text{W/cm}\cdot\text{K}$) である。

Q_J は、通電電流と電極部の電圧の積で表される。非通電時および 400 A 定常通電時の低温端への熱侵入量を、Table 1 に示す。

非通電時、低温端への侵入熱は、バルクリードの熱伝導のみであり、約 120 mW である。一方、 400 A 定常通電時では、伝導熱は約 2 倍となり、それに電極部のジュール発熱が加わるため、全体として約 2.4 倍の 290 mW となったが、これは 400 A 通電時の絶対値としては、極めて小さな熱侵入量といえる。ここで、 400 A 通電時の伝導熱が、非通電時に比べ約 2 倍となったのは高温端における約 20 K の温度上昇によるものである。2 段冷却ステージへの熱侵入には、電流リードに起因するもののほかに、放射熱および計測線等からの熱侵入が約 80 mW 程度あるが、 10 K - 0.4 W の冷凍機能力において、充分熱バランスが成立していることが理解できる。

一方、高温端では、電極部の電圧が相対的に高くジュール熱が 0.8 W 程度発生するが、 60 K - 40 W の冷凍機能力からすればほとんど問題にはならない。ただし、高温端における温度上昇により、低温端への伝導熱が大幅に増加するので、銅リードおよび熱シールド等の熱負荷低減や 1 段冷却ステージにおける絶縁部を介した熱抵抗の低減が望まれる。

Fig.9 は、銀溶射電極部のバルクと溶射銀界面近傍の SEM および EPMA 写真である。バルクと銀溶射電極部は、すでに述べたように電氣的に低抵抗接続状態にあるが、バルク表面に銀溶射部が食い込んだいわゆるアンカー効果により、機械的にも強固な接合状態にあることがわかる。

3.3 パルクに働く電磁力

Fig.10 は、 400 A 定常通電時にバルクにかかる漏れ磁場の通電電流に垂直な成分の分布と、それによって生ずるせん断力および曲げモーメントの分布である。低温端を固定した片持ち梁構造となっているので、せん断力および曲げモーメントともに低温端の銅電極との境界のバルク部で最大となり、それぞれ 2.3 N と $0.1 \text{ N}\cdot\text{m}$ である。

Fig.10 Shearing force and bending moment of bulk leads under stray field.

したがって、最大せん断応力は、 2.5×10^{-2} MPa、円筒の断面係数より算出した最大曲げ応力は、約 0.2 MPa と極めて小さい。円柱の 3 点曲げ試験¹⁵⁾においては、77 K で 60~80 MPa であるから、少なくとも静的な電磁力によるせん断および曲げに関しては、本マグネットの場合、ほとんど問題ないものと推測される。

本システムは、現在冷凍機の稼働積算時間で 2,000 時間を越え、組立て・試験時を含めれば、300~10 K の熱サイクルを 10 回程度、コイルの高温動作特性試験のためのクエンチを 50 回以上経験しているが、バルクリードおよび電極部について劣化は認められていない。

本マグネットシステムを今後さらに高磁場化あるいは大口径化する際には、バルクリードにかかる漏れ磁場も高くなるので、磁気シールド対策、バルクの磁場印加時の J_c の向上、あるいは機械的補強等が重要になるものと思われる。

4. 結 論

Bi 系超電導バルクを電流リードに用いた冷凍機冷却型超電導マグネットシステムを開発し、以下の結論を得た。

1) 77 K、自己磁場下における臨界電流密度 $1,200$ A/cm²、臨界電流 $1,000$ A の Bi 系超電導バルクリー

ドを用いた冷凍機冷却型超電導マグネットに 400 A 通電して、室温ボア $\phi 38$ mm 内に 4.0 T の磁場を得た。

2) 400 A 定常通電時の低温端への熱侵入量は、電流リード一対について熱伝導により約 220 mW、電極部のジュール熱により約 70 mW、計 290 mW と極めて小さい。この時、バルクリード両端の温度は、低温端で 13 K、高温端で 74 K であった。

3) 4 T 励磁時、バルクリードに働く漏れ磁場による電磁力は、本マグネットシステムの場合、最大せん断応力および最大曲げ応力ともに、1 MPa 以下と極めて小さく、静的な電磁力による機械的強度については、ほとんど問題ない。

Bi 系超電導バルクの熱伝導率の温度依存性に関してご指導いただいた岩手大学能登教授、松川助教授に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Y. Yamada, T. Yanagiya, T. Hasebe, K. Jikihara, M. Ishizuka, S. Yasuhara and M. Ishihara: IEEE Trans. Appl. Supercond. **3**(1993) 923
- 2) J. R. Hull: IEEE Trans. Appl. Supercond. **3** (1993) 869
- 3) P. F. Herrmann, C. Albrecht, J. Bock, C. Cotteville, S. Elschner, W. Herkert, M.-O. Lafon, H. Lauvray, W. Nick, E. Preisler, H. Salzburger, J.-M. Tourre and T. Verhaege: IEEE Trans. Appl. Supercond. **3** (1993) 876
- 4) R. C. Niemann, Y. S. Cha and J. R. Hull: IEEE Trans. Appl. Supercond. **3** (1993) 392
- 5) J. L. Wu: IEEE Trans. Appl. Supercond. **3** (1993) 396
- 6) K. Ueda, T. Bohno, K. Takita, K. Mukae, T. Ueda, I. Itoh, M. Mimura, N. Uno and T. Tanaka: IEEE Trans. Appl. Supercond. **3** (1993) 400
- 7) J. Bock, H. Bestgen, S. Elschner and E. Preisler: IEEE Trans. Appl. Supercond. **3** (1993) 1659
- 8) 山本 寛, 小沢 進, 佐野雅彦, 田中正一, 松原洋一, 小笠原武: 日本応用磁気学会誌 **15** (1991) 709
- 9) 山田 豊, 柳谷知之, 櫻庭順二, 石原 守: 低温工学 **26** (1991) 495
- 10) 山田 豊, 長谷部次教, 柳谷知之, 直原和哲, 石塚正之, 安原征治, 石原 守: 低温工学 **28** (1993) 86
- 11) K. Watanabe, Y. Yamada, J. Sakuraba, F. Hata,

- C. K. Chon, T. Hasebe and M. Ishihara : Jpn. J. Appl. Phys. **32** (1993) L 488
- 12) K. Watanabe, Y. Yamada, J. Sakuraba, F. Hata, C. K. Chon, T. Hasebe and M. Ishihara : Proc. 8th US-Japan Workshop on High Field Superconducting Materials for Fusion, Madison (1993)
- 13) 櫻庭順二, 山田 豊, 端 文昭, 張 振坤, 長谷部次教, 石原 守, 渡辺和雄 : 低温工学 **28** (1993) 519
- 14) 松川倫明ら : 1993 年度春季低温工学・超電導学会講演概要集 E 2-18, 228
- 15) 直原和哲ら : 1991 年度春季低温工学・超電導学会講演概要集 A 3-4, 158

付 録

1. 熱伝導率の温度依存性を示す近似式を以下に記す。

$$\lambda_1 = -0.413 + 0.443T \quad T < 32$$

$$\lambda_2 = -14.8 + 1.13T - 7.24 \times 10^{-2}T^2$$

$$32 \leq T < 99$$