高温超電導電流リードを用いた 液体ヘリウムを使わない 超電導マグネットの開発

山田 豊¹⁾ 櫻庭 順二¹⁾ 渡辺 和雄^{**}
石原 守²⁾ 森 弘之³⁾

1. はじめに

極低温下に置かれる超電導機器に電流を供給する電流リードは、通常銅製の細線等をヘリウムの蒸発ガスで冷却することによって、極低温域への熱侵入を最小にするよう設計されている。しかしながら、最適化された電流リードにおいても通電時の熱侵入量は1 mW/Aと大きく、高価な液体ヘリウムの消耗の主因を成しており、取扱い上の不便さとも相まって超電導機器の普及・発展を阻害する一因となっていた。

1986年発見された高温超電導体は、Y系、Bi系、Tl系等が液体窒素温度以上の臨界温度(T_c)を持ち、セラミックス特有の低熱伝導性を有することから、ヴィーデマン-フランツ則に従う金属では不可能な“電気は良く通すが、熱は伝え難い”材料としてその応用が期待されていた。

そこで著者らは、 T_c が比較的高く、加工性・安全性等の点で優れているBi系を選びバルク材を作製して電流リードへの適用を試みた。その結果、液体窒素温度下で十分な輸送電流が得られ、また熱侵入量は従来のガス冷却型電流リードに比べ、一桁以上低いことが確認できた。さらに、開発したBi系バルクリードと近年性能向上の著しい小型冷凍機を用いることにより液体ヘリウム等の冷媒を全く使わない超電導マグネットを世界で初めて実用化したので以下に紹介する。

2. Bi系酸化物高温超電導電流リード⁽¹⁾⁽²⁾

(1) バルク電流リードの製造方法と超電導特性

Bi系酸化物超電導バルク材の製造プロセスを、図1に示す。(Bi+Pb):Sr:Ca:Cu=2:2:2:3組成とした仮焼粉

図1 Bi系酸化物超電導バルクの製造方法。

末を冷間静水圧プレス(CIP)で中空円筒状に成形後、焼結する。焼結後、さらにCIPと焼結を繰り返すいわゆる中間CIP法によりバルクを作製した後、バルク両端に銀を溶射して電極を形成する。

バルクの外観を、図2に示す。内径10~30 mm、肉厚1.2~1.4 mm、長さ200 mmの中空円筒状で、両端20 mmが銀溶射電極部である。

これらバルクの液体窒素温度: 77 K、自己磁場下における臨界電流(I_c)および臨界電流密度(J_c)を、表1に示す。各バルクの I_c は断面積にほぼ比例して増加し、最大1600 Aが、また J_c はバルクの断面積によらずほぼ一定で、輸送電流の J_c としては高い1000 A/cm²を越える値が平均して得られている。

図2 Bi系酸化物超電導バルクの外観。

* 住友重機械工業株式会社平塚研究所

1)主任研究員 2)主席研究員 3)研究所長

** 東北大学金属材料研究所助教授

Development of High- T_c Superconducting Current Leads and Superconducting Magnet free from Liquid Helium; Yutaka Yamada*, Junji Sakuraba*, Kazuo Watanabe**, Mamoru Ishihara*, Hiroyuki Mori* (*Sumitomo Heavy Industries, Ltd. **Tohoku University)

1994年1月31日受理

表 1 77 K, 自己磁場下における臨界電流および臨界電流密度.

No	寸 法(mm)	I_c (A)	J_c (A/cm ²)
1	内径10.0×外径12.6×200	520	1130
2	内径15.0×外径17.6×200	730	1100
3	内径20.0×外径22.4×200	990	1240
4	内径25.0×外径27.8×200	1250	1080
5	内径30.0×外径32.8×200	1600	1160

(2) Bi(2223)バルクの特徴

バルク表面の X 線回折パターンを, 図 3 に示す. 粉末焼結法により作製される Bi 系バルクは, 低 T_c 相と高 T_c 相の混相になり易いが, 本バルクの組成は(2223)高 T_c 相ほぼ単相であること, C 軸に垂直な(00 l)結晶面の配向が極めて強いことがわかる. また, 図 4 に示すバルクの横断面 SEM 写真によれば, 本バルクは薄い板状結晶が, CIP 加圧面に対して平行に, すなわち中空円筒の長手方向(通電方向)に平行に積層した異方性の大きい組織を呈しており, 密度も比較的高いことが認められる. 77 K における高 I_c および J_c は, 中間 CIP 法の導入により高 T_c 相の単相化, 高密度化, 高配向化が図られたためと思われる.

バルクを電流リードとして用いる時の重要な指標は, 低温における熱伝導率であるが, 定常熱流法により測定した熱伝導率の積分値⁽⁶⁾を図 5 に示す. Bi 系バルクは, 熱伝導率が極めて低く, 77~4 K 間の熱導率の積分値は約 1 W/cm とステンレス鋼の約1/3, 電解銅の約1/500である.

本バルクを電流リードの低温側に用いた場合の熱侵入量を

図 3 Bi 系バルクの表面 X 線回折パターン.

図 4 Bi 系バルクの断面 SEM 像.

図 5 低温における熱伝導率の積分値.

試算すると, 超電導状態においては電気抵抗によるジュール発熱は当然零であるから, 熱侵入量: Q は, 伝導熱のみとなる. 77~4 K 間の Q は, 77~4 K 間の熱伝導率の積分値: I と電流リードの断面積: A と長さ: L の比との積で表される ($Q=I \times A/L$). 開発したバルクリードは, $I=1$ W/cm, $J_c \approx 1000$ A/cm² であるから, 1000 A の通電に対して A は 1 cm² で済み, $L=10$ cm とすれば 1000 A 通電時の熱侵入量: Q は, 約 0.1 W すなわち 0.1 mW/A である. これは, 従来の最適化されたガス冷却型電流リードの熱侵入量 1 mW/A の 1/10 と極めて小さい値である.

3. 液体ヘリウムを使わない超電導マグネットへの Bi 系酸化物電流リードの適用⁽³⁾⁻⁽⁵⁾

(1) 超電導マグネットの構造

開発した Bi(2223)バルクを電流リードとして用いることにより, 液体ヘリウム等の冷媒を全く使わず冷凍機のみで冷却する超電導マグネットを世界で初めて実用化した. 外観を図 6 に, 鳥瞰図を図 7 に示す. 本マグネットシステムでは, Nb₃Sn コイルを用い, ギフォード-マクマホン(G-M)冷凍機の 2 段冷却ステージ上に置いたコイルを熱伝導によってのみ約 10 K レベルに冷却し, 超電導状態に保つ. 電流リードは, 室温より一段冷却ステージ(60 K)までは銅リードを, 一段と二段冷却ステージ間に Bi 系バルクリードを用いコイルへの熱侵入を大幅に抑制している. コイルおよび電流リード等は, 真空断熱されたクライオスタット内に納められており, 直径 38 mm の室温空間を有している. 本マグネットは, 従来の液体ヘリウム浸漬冷却型超電導マグネットに比べて極めて軽量・コンパクトで高さ・重量とも約1/2である.

図 8 に, 本マグネットに 400 A 通電し, 室温ボアに 4 T の磁場を励磁した時のコイル・電流リード各部の温度を示す. 400 A 通電時, 電流リード高温端温度は銅リードからの侵入熱の増大により上昇するが, 1.5 時間後にはほぼ定常状態になる. 一方低温端およびコイル温度は 1~2 K 程度の温度上昇に止まり, Bi 系酸化物リードの使用が熱侵入の低減に極めて効果的であることが理解できる. この時コイルへの熱侵入は, 電流リードからの伝導熱の他, クライオスタットの輻射熱や計測線等の伝導熱を加えても 0.4 W 以下で G-M 冷凍機二段冷却ステージの冷却能力の範囲内である. 因に, Bi

図6 液体ヘリウムを使わない超電導マグネットの外観。

図7 液体ヘリウムを使わない超電導マグネットの鳥瞰図。

図8 4テスラ励磁時の各部の温度変化。

系バルクリードの代わりに銅リードを用いた場合には、400 A 通電時約 8 W の熱侵入が予測され、10 K における冷凍機の冷却能力をはるかに越え、システムとして成立しない。

本マグネットに 465 A 通電し、4.6 T でクエンチした時の各部の温度変化を図 9 に示す。クエンチ後、コイルの温度は約 10 K 上昇するが、約 40 分後には 10 K 台に戻り、再励磁が可能になる。このように、本マグネットはクエンチ時も冷媒の急激なガス化がなく安全であるばかりでなく、1 時間以内に再励磁が可能となる。

以下に、本マグネットの特徴を略記する。

図9 4.6テスラでクエンチした時の各部の温度変化。

- (1) ボタン一つで超電導状態まで冷却でき、取扱いが容易。
 - (2) 液体ヘリウムの継ぎ足しが無いので連続運転できる。
 - (3) コイルのクエンチに対して安全性が高い。
 - (4) ランニングコストが安い。
 - (5) 小型/軽量であるため設置場所を選ばず、移動も容易。
- 等の特徴・利点がある。

4. 実用化および将来性

本装置の 1 号機は、東北大学金属材料研究所附属強磁場超伝導材料研究センターに設置され、既に 1 年以上、冷凍機の稼働積算時間では 5000 時間以上、コイルの高温動作試験等のクエンチテスト回数は 50 回以上を経験しているが、酸化物電流リードおよび超電導マグネットシステムに問題はなく、順調に各種実験に供されている。現在、国公立および民間研究機関より多数の引き合いをいただいている。今後は、材料物性分野に止まらず、医学・生物・農学・薬学分野への磁気科学の応用のため室温空間の拡大や 10 T を越える強磁場化に取り組んでいきたいと考える。

5. 特 許

特開平4-258103他，国内特許約30件出願中．外国特許は，米・英・仏・独4ヶ国に出願中である。

文 献

- (1) 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。
- (2) Y. Yamada, T. Hasebe, T. Yanagiya, K. Jikihara, M. Ishizuka S. Yasuhara and M. Ishihara: IEEE Trans. Appl. Super., **3**(1993), 923.
- (3) K. Watanabe, Y. Yamada, J. Sakuraba, F. Hata, C. K. Chong, T. Hasebe and M. Ishihara: Jpn. J. Appl. Phys., **32**(1993), L488.
- (4) 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。
- (5) 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：低温工学，**28**(1993)，526。
- (6) M. Matsukawa, K. Noto, H. Fujishiro, T. Todate, K. Mori, Y. Yamada and M. Ishihara: Physica B, in press.