

0.5 T-77 K で動作可能な 250 A 級 Y 系高温超電導バルク電流リード

手嶋 英一[†], 平野 芳生, 藤代 博之*

新日本製鉄(株)先端技術研究所 富津市新富 20-1 ([†]E-mail: hteshima@re.nsc.co.jp)

* 岩手大学工学部 盛岡市上田 4-3-5

(2002 年 7 月 2 日受理)

250 A-Class Y-Ba-Cu-O Bulk Current Leads Usable in 0.5 T-77 K

Hidekazu TESHIMA, Hosei HIRANO and Hiroyuki FUJISHIRO*

Advanced Technology Research Laboratories, Nippon Steel Corporation, 20-1 Shintomi, Futtsu 293-8511

* Faculty of Engineering, Iwate University, 4-3-5 Ueda, Morioka 020-8551

(Received July 2, 2002)

Synopsis: A prototype of 250 A-class Y-Ba-Cu-O bulk current leads usable in magnetic fields has been fabricated and studied for transport, mechanical and thermal properties. In this current lead, a melt-processed bulk superconductor 5 mm wide and 0.8 mm thick was reinforced by a support made of glass fiber-reinforced plastic (GFRP). The current leads could carry 300 A in liquid nitrogen for 10 min without a rise in voltage, although the bulk superconductor was under thermal stress due to the difference in thermal expansion between the bulk superconductor and GFRP. In the bending test, the bulk superconductor was not broken although the copper electrode was plastically deformed. Thermal input of the current lead was estimated to be 0.12 W under the condition that the high-end temperature was 77.3 K and the low-end temperature was 4.2 K. Furthermore, using the numerical method, it was possible to visualize distribution of the temperature and the heat flux inside the current lead.

Keywords: YBaCuO, bulk superconductor, current lead

1. はじめに

高温超電導バルク材の応用としては、ピンニング効果を利用した軸受や磁石応用が知られているが、高温超電導バルク材は大電流通電可能という超電導本来の特長を活かした通電応用分野にも適用できる。通電応用の 1 つに電流リードがある。電流リードとは、極低温にある超電導磁石と室温にある電源とを結ぶ導体のことであるが、大電流を通電でき、熱侵入を抑制する機能が求められる。ジュール発熱がなく、熱伝導の低

い酸化物である高温超電導体は、電流リードの理想的な材料であると言える。高温超電導体を用いた電流リードの実用化という点では、Bi 系リードが先行し、液体 He を使用しない冷凍機冷却型超電導磁石の実現を可能にした¹⁻³⁾。Bi 系リードの普及により超電導磁石の使い易さという点では格段に進歩したが、よりコンパクトな超電導磁石装置に対する要望から、高温 (77.3 K) 磁場中で動作可能な高温超電導体電流リードへの期待が大きくなっている。

溶融法で作製した Y 系高温超電導バルク材は、磁

場中での臨界電流密度 (J_c) が高い^{4,5)}ので、磁場中動作可能な電流リードの候補材料である。Y系バルク電流リードに関しては、富田らはY系バルク材を真空樹脂含浸させることで機械的強度を向上させた電流リードを開発している⁶⁾。また、渡辺らはガラス繊維強化プラスチック (GFRP) でY系バルク材を補強した1500 A級電流リードを開発している⁷⁾。

現在普及している冷凍機冷却型超電導磁石は主に300 A以下の低電流容量のものであるが、これらにY系バルク電流リードを適用することを考えてみる。我々は、簡便なGFRP補強方式に着目しているが、低電流容量に対しては高 J_c 特性を有するY系バルク材では断面積が非常に小さくなるので、GFRPとの熱膨張率の差に起因する熱応力の影響を受けやすくなり、その結果リードとしての機械的強度低下が懸念される。また、GFRP補強方式の電流リードに対して、渡辺らは液体He蒸発ガス流量から侵入熱を評価し、銅製リードに比べて侵入熱が1/8程度に低下することを実証している⁷⁾が、液体Heフリーの冷凍機冷却型超電導磁石では電流リードは真空中で使用されるので、液体He蒸発ガスによる冷却効果の影響を考慮して電流リード侵入熱を評価する必要がある。

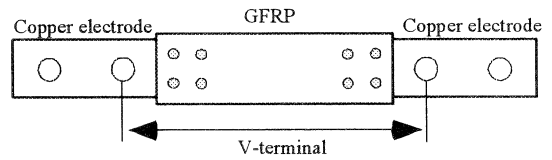
そこで本論文では、①GFRP補強方式が小断面積のY系バルク材を用いた電流リードにも有効であることを実証すること、および②液体He蒸発ガス流量測定において蒸発ガス冷却効果を分離して電流リード侵入熱を評価することを目的とし、GFRPで補強した250 A級Y系バルク電流リードの試作品を製作し、通電特性、機械的特性および熱的特性に関して調べたので、その結果について報告する。

2. 電流リードの構造

電流リードの設計においては、その使用条件・動作環境等を想定する必要があるが、本研究に用いた電流リードでは、電流容量250 A、動作磁場0.5 T以下、高温端温度77.3 K、低温端温度4.2 Kを想定して設計した。Fig. 1は、本研究で用いたY系高温超電導バルク電流リードの外観と構造図である。本電流リードは、主にY系バルク材と電極端子、補強支持体とからなる。Y系バルク材は改良型QMG法⁸⁾で作製された直径46 mmの円盤形状試料から切り出した、幅5 mm×厚さ0.8 mm×長さ40 mmの板形状のものを用いた。

電極端子は無酸素銅製で、外形寸法で幅20 mm×

(a) Appearance



(b) Structure

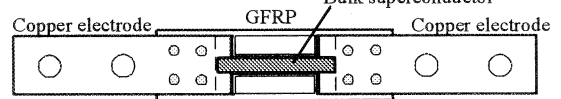


Fig.1 (a) Appearance and (b) structure of the Y-Ba-Cu-O bulk current lead.

厚さ4 mm×長さ75 mmのものを用い、接触抵抗を下げるために銀被覆したY系バルク材に半田付けにて接続した。補強支持体はGFRP製で、外形寸法で幅24 mm×厚さ8 mm×長さ80 mmのものを用い、エポキシ系樹脂による樹脂接着とステンレス製ボルトによる機械式固定とを併用して固定した。Fig. 1の基本構造は渡辺らによって開発されたもの⁷⁾と同じであるが、主な相違点は、Y系バルク材において、形状がI型形状から板形状に、厚さが4 mmから0.8 mmになった点である。バルク材形状変更は、形状を単純化してバルク材加工時における損傷の可能性を極力低減するためである。しかし、単純にI型形状の横棒部をなくしただけでは電極端子との接触面積が小さくなるので、電流容量当たりの接触面積を従来型と同程度確保するため、厚さを薄くした。

Fig. 2に、Y系高温超電導バルク材のa-b面方向とGFRPの繊維方向に対する熱膨張率の測定結果を示す。本データは、3 mm×3 mm×15 mmの試料に歪みゲージを貼付し、冷凍機で冷却しながら歪み量を測定することから求めたものである。Fig. 2から、例えば300 Kから77.3 Kまで冷却した場合、熱膨張率はY系バルク材では-0.16%であるのに対して、GFRPでは-0.26%であることが分かる。符号が負であるのは、低温において収縮することを意味している。GFRPの方が収縮率が大きいことから、低温ではY系バルク材に圧縮応力が作用している状態であると予測される。渡辺らの報告による⁷⁾と、Y系バルク材とGFRPでは熱膨張率が近いから、内部に熱応力を緩和するフレキシ構造が必要ないFig. 1のような構造が可能になったとのことであったが、本電流リードでは

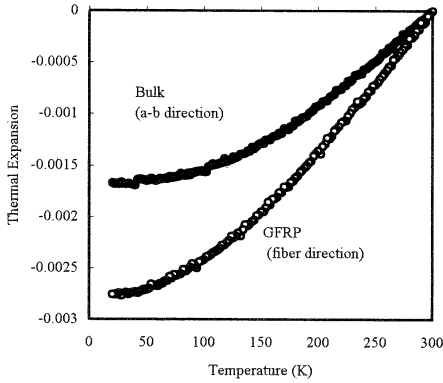


Fig. 2 Thermal expansion of a Y-Ba-Cu-O bulk superconductor and GFRP.

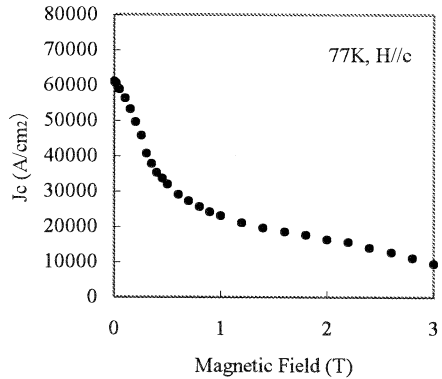


Fig. 3 J_c - B curves of a Y-Ba-Cu-O bulk superconductor.

Y系バルク材断面積が渡辺らのものと比べて1/5に小さくなっているため、GFRPとの熱膨張率差による熱応力の影響を受けやすくなっている可能性がある。

Fig. 3に、Y系バルク材の77.3 Kでの J_c - B 特性を示す。本データは、2.5 mm×2 mm×1 mmの試料の磁化測定からBeanモデルを仮定して求めたものである。Fig. 3から、Y系バルク材自身の J_c は77.3 K、0.5 Tでは2~3×10⁴ A/cm²程度であるが、上述したような熱応力が作用しており、 J_c 特性への熱応力の定量的な影響度合いが明らかになっていないことや、Y系バルク材と電極端子との接触抵抗に伴うジュール発熱による温度上昇によって J_c が低下する可能性があることなどから、電流リードの設計電流容量はY系バルク材自身の臨界電流に対してマージンを持たせることが必要である。さらに、小断面積試料の場合には、Y系バルク材の加工性も考慮する必要がある。本電流リードの場合、断面積は5 mm×0.8 mmで、Y系バルク材の J_c を2×10⁴ A/cm²とすると、想定電流容量250 Aに対して臨界電流は約3倍の800 Aになる。

Fig. 4に、Y系高温超電導バルク材の熱伝導率の温度依存性を示す。Fig. 4のデータは定常熱流法^{b)}により測定したものである。試料サイズは、a-b面方向の場合で3 mm×3 mm×15 mm、c軸方向の場合で3 mm×3 mm×10 mmであり、どちらも長手方向を測定方向とした。Fig. 4のデータを用いて、幅5 mm、厚さ0.8 mm、長さ40 mmのY系バルク材を伝わる熱流量を計算すると、想定使用温度条件(77.3 K-4.2 K)では、約0.1 Wになる。

3. 電流リードの通電特性

本節では、補強材GFRPによる熱応力存在下でも小断面積Y系バルク材が所定の通電特性を有するかどうか調べるために、Fig. 1の電流リードを6本(試料番号A~F)製作し、液体窒素および液体He浸漬状態にて磁場中通電試験を行った結果について報告する。磁場は、直径36 mmのPr-Fe-B系永久磁石を電流リード表面に密着させることで印加した。永久磁石の表面磁束密度は77.3 Kや4.2 Kの低温では0.55 T程度であった。電圧は、Fig. 1のV-terminalと記した間で測定を行った。すなわち、電圧の測定値には、Y系バルク材と電極端子間の接触抵抗だけでなく、銅製電極端子の一部の抵抗を含む。

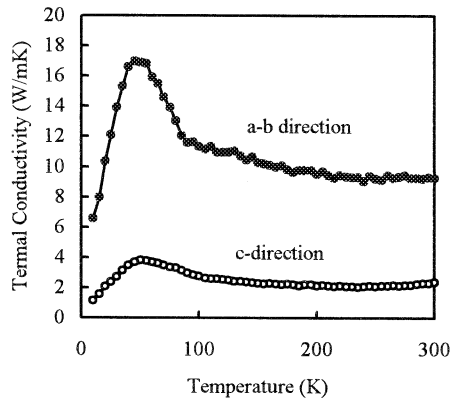


Fig. 4 Thermal conductivity of a Y-Ba-Cu-O bulk superconductor.

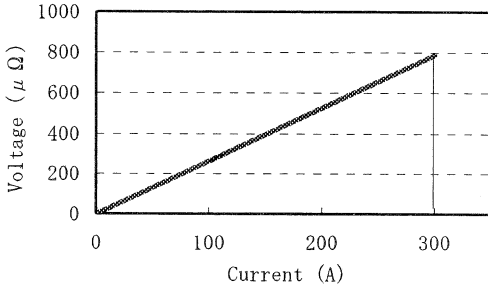


Fig. 5 *I-V* characteristics of the Y-Ba-Cu-O bulk current lead at 77.3 K and 0.55 T.

液体窒素中通電試験では、想定電流容量の 1.2 倍の 300 A まで通電した。Fig. 5 に、試料番号 A に対する液体窒素温度での *I-V* 特性の測定例を示す。*I-V* 特性が線形であることから臨界電流が 300 A 以上であることが分かる。液体窒素中通電試験は全 6 本に対して行い、全て同様の結果であった。Table 1 に、各試料の測定抵抗値を示す。全ての試料に対して、*I-V* 特性が線形で溶断なく通電できたことから、小断面積 Y 系バルク材に対しても GFRP 補強方式は有効であることが分かった。

液体窒素中通電試験においては、5 分間の連続通電も行った。Fig. 6 に試料番号 A に対する測定結果を示す。Fig. 6 から分かるように、測定時間内では電圧値が一定であった。本結果から、電極端子との接触抵抗によるジュール発熱の影響は小さいと考えられる。

液体 He 中での通電試験は、試料番号 A と B の 2 本の電流リードに対して行った。実験装置の制約から液体 He 中では 100 A までしか通電できなかったが、測定した範囲内では、液体窒素中と同様に *I-V* 特性は線形であった。Table 1 には、液体 He 中でのリード両端抵抗の測定結果も併せて示してある。本実験結果から、本電流リードの低温端でのジュール発熱量は約 0.01 W であると推測される。

上述した通電試験では、電流リードを液体窒素に浸漬する前に、液体窒素の蒸発ガスにより 60 分程度電流リードを予冷することで、急激な熱衝撃が作用することを極力避けるようにしたが、試料番号 B の電流リードに対しては、別途、室温状態から直ちに液体窒素に浸漬する急冷試験を 10 回行った。電流リードを液体窒素中に投入してから液体窒素の煮沸が終了するまでの時間は 1 分強であった。急冷試験ごとに液体窒素中のリード両端抵抗を測定した。その結果を

Table 1 Measured resistance between V-terminal in the Y-Ba-Cu-O bulk current lead

Sample No.	at 77.3K ($\mu\Omega$)	at 4.2K ($\mu\Omega$)
A	2.62	0.21
B	2.85	0.27
C	2.60	—
D	2.62	—
E	2.56	—
F	2.57	—

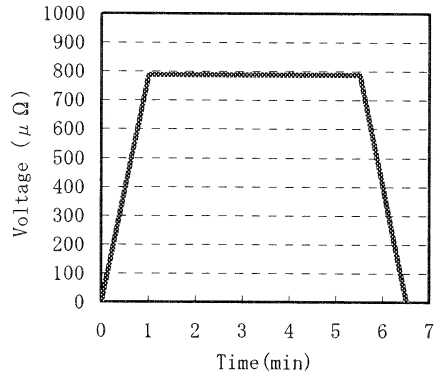


Fig. 6 Results of a continuous transport test of the Y-Ba-Cu-O bulk current lead at 77.3 K and 0.55 T.

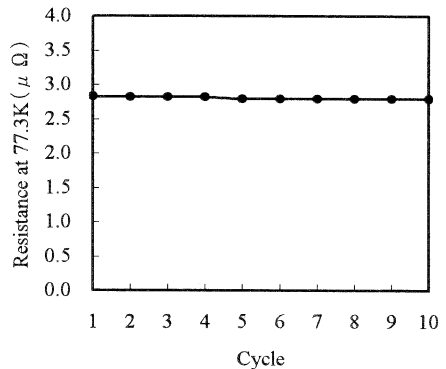


Fig. 7 Results of a rapid cooling heat-cycle test of the Y-Ba-Cu-O bulk current lead.

Fig. 7 に示す。Fig. 7 から分かるように、10 回の急冷ヒートサイクルではリード両端抵抗に変化は見られなかった。

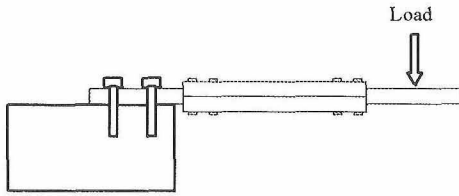


Fig. 8 Schematic of the bending test of the Y-Ba-Cu-O bulk current lead.

4. 電流リードの機械的特性

本節では、0.8 mm 厚と非常に薄い Y 系バルク材に対して GFRP 補強方式が有効に作用するかどうかを調べるために、製作した電流リードに対して機械的特性を評価した結果について報告する。電流リードの取り付けは、電流リードへの熱応力を緩和するため片端をフレキシ構造にすることが多いと考えられるので、電流リードの機械的特性は、Fig. 8 に示すように、電極端子の片側を固定し、反対側の電極端子の中央部に荷重を印加するという片持ち状態での曲げ試験により評価した。固定端と荷重点との距離は 95 mm、荷重速度は 0.2 mm/min という条件で行った。

本測定は、試料番号 E の電流リードに対して行った。Fig. 9 に、荷重-変位曲線の測定例を示す。Fig. 9 から分かるように、荷重 10 kgf、変位 2 mm までは弾性的な挙動を示したが、その後電極端子固定部で塑性変形が始まり、荷重は 18 kgf でほぼ飽和したので、変位 10 mm になった時点で試験を終了した。Fig. 10 に、塑性変形した電極端子の写真を示す。塑

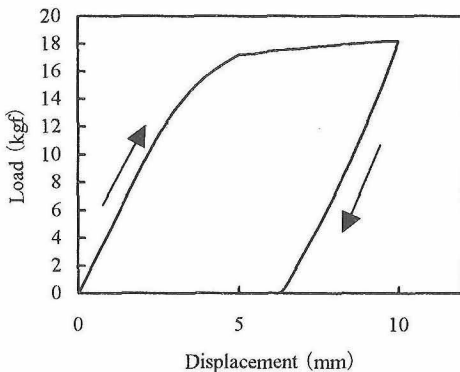


Fig. 9 Load-displacement curve of the bending test of the Y-Ba-Cu-O bulk current lead.

性変形した電流リードに対して、液体窒素中通電試験を実施した結果、電流リード両端抵抗は $2.47 \mu\Omega$ であった。測定値が $2.55 \mu\Omega$ から $2.47 \mu\Omega$ に変化した。この変化は測定用リード線の取り付け位置の差に起因すると考えている。また 300 A 10 分間の連続通電試験では、測定時間内では電圧上昇は観測されなかった。以上の曲げ試験による評価において、銅製電極端子は塑性変形したが、GFRP で補強された小断面積 Y 系バルク材は割れなかったことから、GFRP 補強方式は機械的強度を改善していることが実証できた。

5. 電流リードの熱的特性

本節では、GFRP 補強した Y 系バルク電流リードの侵入熱を実験的に評価した結果について報告する。電流リード侵入熱を評価する簡便な手法として、電流リード片端を液体 He に浸漬させ、蒸発ガス流量から見積もる方法がある。液体 He 冷却型超電導磁石に用いられる電流リードでは実際的な評価方法であるが、液体 He フリー冷凍機冷却型超電導磁石用電流リードでは、蒸発ガスによる冷却効果を考慮し、侵入熱を過小評価しないように注意する必要がある。

Fig. 11 は、本研究で電流リード侵入熱評価のために用いた液体 He 蒸発ガス流量測定装置の概略図である。この実験系の熱流量の関係として次の式①が成り立つと仮定して、電流リード侵入熱の評価を行った。

$$Q_M = Q_L + Q_{BG} - Q_{gas} \quad \text{①}$$

Q_M : ガス流量から求められる侵入熱

Q_L : 測定温度条件での電流リード侵入熱

Q_{BG} : バックグラウンド侵入熱

Q_{gas} : 蒸発ガスによる奪われる熱流量

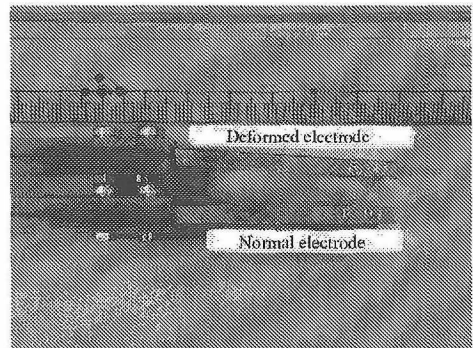


Fig. 10 Photograph of a deformed Cu electrode.

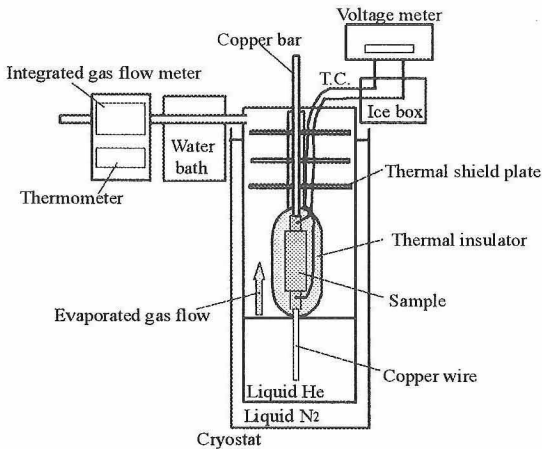


Fig. 11 Schematic of the apparatus for the evaporated gas flow measurement of liquid He.

ここで Q_{gas} が蒸発ガスによる冷却効果である。この蒸発ガス冷却効果は非常に大きく、銅製リードではこの効果を積極的に活用し、熱伝導率が高い銅の侵入熱を 1/45 まで低下させている⁹⁾。本実験では、Fig. 10 に示したように、電流リードを断熱材で覆うことで蒸発ガスに触れないようにして、蒸発ガス冷却効果を抑制した。バックグラウンド侵入熱は、主にガラスデュア壁面からの侵入熱や輻射熱である。なお本実験装置では、電流リードに対する温度制御機構は設けておらず、電流リードの高温側および低温側の電極端子に金-鉄クロメル熱電対を取り付け、温度を測定した。He ガス流量は、ガス導入チューブを熱浴(水槽)を通してから積算式流量計に繋ぐことでガス温度が一定になるようにして測定した。

蒸発ガス冷却効果を抑制 ($Q_{gas}=0$) できれば、 Q_M と Q_{BG} を測定すれば Q_L が分かるはずである。Fig. 12 に、試料番号 A の電流リードに対して行った結果について示す。電流リードの高温端および低温端の温度は、Fig. 12 の横軸において 30 分から 60 分の間ではほぼ一定で、それぞれ 117 K、4.7 K であり、この間の平均ガス流量は 0.029 L/sec で、ガス温度は 291.55 K であった。本結果から $Q_M=0.11$ W となる。また、電流リードを装入していない状態での同様の実験から、 $Q_{BG}=0.02$ W が得られた。従って、本実験結果から高温端温度 117 K、低温端温度 4.7 K の温度条件では、電流リード侵入熱 $Q_L=0.09$ W と見積もられる。

次に、本実験系で蒸発ガス冷却効果が抑制されていることを確認するため、解析的に侵入熱の計算が可

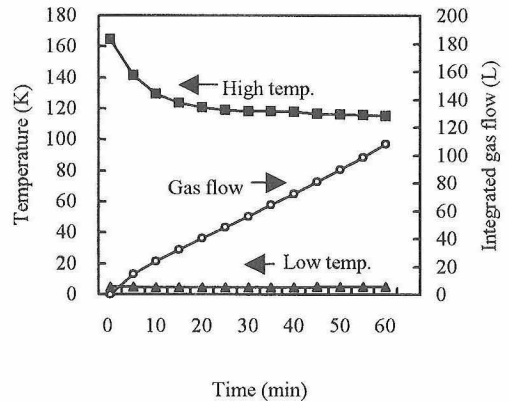


Fig. 12 Experimental results of the evaporated gas flow measurement of liquid He.

能である断面が一樣な単一材料からなる試料を用いて同様の実験を行った。断面が一樣な単一材料として、幅 3 mm、厚さ 0.5 mm、長さ 65 mm の無酸素銅を使用した。無酸素銅での実験では、実験から見積られる侵入熱の値は解析的に計算できる侵入熱の値の約半分であった。すなわち、式①が、

$$Q_L = K \times (Q_M - Q_{BG}) \quad (2)$$

と変形できるとした場合において、 $K=2$ となった。ここで、式①で $Q_{gas}=0$ の場合には $K=1$ となることから、 K は蒸発ガスの冷却効果 Q_{gas} を繰り込んだ補正係数の意味合いを持つものである。この補正係数が生じる原因としては、液体 He の蒸発ガスが極僅か断熱材の隙間に侵入し、その結果蒸発ガス冷却効果が完全には抑制されていないためと考えられる。厳密には補正係数 K は実験系の断熱方法や蒸発ガス流量に影響を受けるものと予想されるが、式②で $K=2$ の関係が電流リード実験にも成り立つと仮定すると、電流リード侵入熱は $Q_L=0.18$ W になる。

この Q_L は測定温度条件における電流リード侵入熱であるので、次に本電流リードの想定使用温度条件とした、高温端温度 77.3 K、低温端温度 4.2 K での電流リード侵入熱 Q_{lead} を見積もった。見積もるに当たって、GFRP の熱伝導率は低く¹⁰⁾、電流リード侵入熱の大部分は Y 系バルク材を伝わるものと考え、温度条件の違いによる侵入熱の違いは Y 系バルク材の熱伝導率を各温度条件で積分した値に比例すると仮定した。Fig. 4 のデータを用い、上述した仮定に基づいて想定使用温度条件 (77.3 K-4.2 K) での電流リー

ド侵入熱を見積もると、 $Q_{\text{lead}}=0.12\text{ W}$ となる。

6. 電流リードの熱的モデルの検討

本節では、電流リードの熱的モデルに関して検討した結果について報告する。Fig. 13 は、GFRP 補強方式の Y 系バルク電流リードの熱的モデルである。ここで、 R_{Bulk} 、 R_{Cu} 、 R_{GFRP} はそれぞれ Y 系バルク材、電極端子、GFRP 補強支持体の熱抵抗、 $R_{\text{C1}} \sim R_{\text{C5}}$ は各部材間の接触熱抵抗である。

まず Fig. 13(a) のような Y 系バルク材と GFRP を通る独立の熱流路があるモデルを考えた。2 節で示したように、 $Q_{\text{BULK}}=0.1\text{ W}$ である。一方、文献値¹¹⁾のデータを用いれば $Q_{\text{GFRP}}=0.03\text{ W}$ と推測できる。従って、総侵入熱は 0.13 W となり、5 節で得られた実測値 0.12 W とほぼ一致する。

次に、電流リードの熱的挙動についてより詳細に把握するために、数値解析を用いて評価した。計算は、高温端温度 77.3 K 、低温端温度 4.2 K の温度条件にて、汎用解析コード Marc を用いて行った。Fig. 14 は、数値計算により得られた電流リードと Y 系バルク材の温度分布図である。Fig. 14(c) は、Fig. 14(a) に記号 A-B で印した電流リードの中心線上の通電方向に沿っての温度分布のグラフである。Fig. 14 から、Y 系バルク電流リードでは、電極端子部分では温度勾配は非常に小さく、Y 系バルク材内に大きな温度勾配が生じていることが分かる。このことは、Y 系バルク材の熱伝導率が銅の熱伝導率に比べて著しく小さいことを反映しているものと考えられる。

Fig. 15 は、数値計算により得られた電流リードと Y 系バルク材の熱流束分布図である。Fig. 15(a) から、Y 系バルク材内で熱流が大きくなっていることが分かる。さらに、Fig. 15(b) から、Y 系バルク材を通る熱流は、通電方向（長手方向）に様に流れているのではなく、低温側になるにつれて減少していることが分かる。このことは、熱流が最も流れやすい経路を選択して流れようとしているために生じていると考えられる。すなわち、Fig. 4 から分かるように、 $70 \sim 40\text{ K}$ の間では Y 系バルク材の熱伝導率が增大しているの、Y 系バルク材内を流れる熱流が大きくなるが、低温になるにつれて Y 系バルク材の熱伝導率が急激に減少するので、熱流が周囲の補強支持材にも分流するためと考えられる。

本熱流束分布から電流リード侵入熱を見積もると 0.25 W 程度になり、5 節で実験的に求めた値よりも

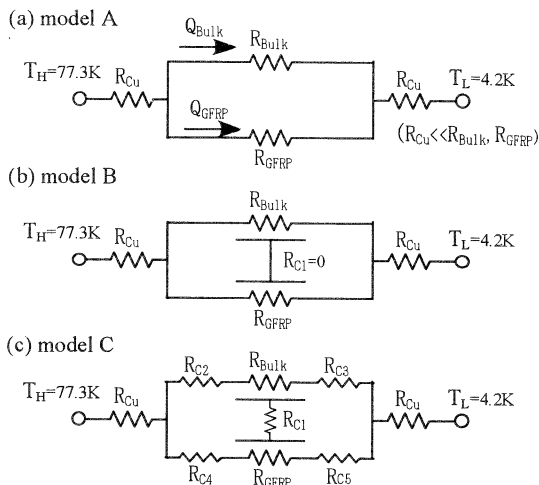


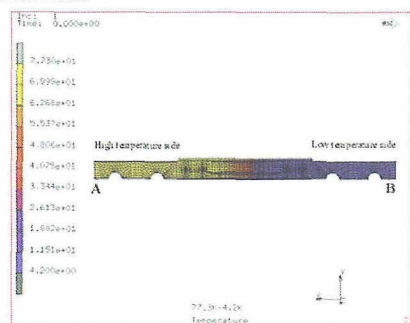
Fig. 13 Thermal model of the Y-Ba-Cu-O bulk current lead.

2 倍程度大きい値になった。この差異の原因として、本数値解析では接触熱抵抗を考慮していなかったためと考えている。すなわち、接触熱抵抗を考慮しないと、Fig. 13(a) のモデルではなく、Fig. 13(b) のモデルで数値計算を行うことになる。ここで R_{C1} は Y 系バルク材と GFRP との接触熱抵抗で、長手方向に連続の分布していることを表している。 $R_{\text{C1}}=0$ のため、Fig. 15 のような熱流の分流が顕著に起こる。しかし、接触熱抵抗は Y 系バルク材と GFRP 間だけでなく、各部材間でも存在し、従って電流リードの熱的モデルは Fig. 13(c) のようになる。これらの接触熱抵抗を考慮しないと、電流リード侵入熱を過大評価する可能性がある。電流リード設計において数値解析手法を定量的に活用していくためには、各部材間の接触熱抵抗の評価が今後の課題と考える。

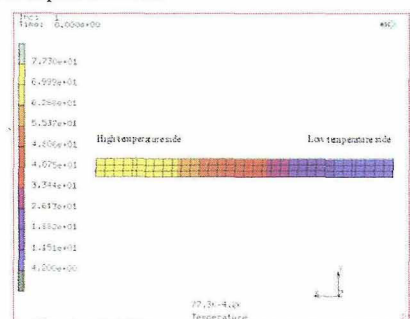
7. まとめ

0.5 T-77 K で動作可能な Y 系バルク電流リードに関して、GFRP 補強方式の 250 A 級試作品を製作し、通電特性、機械的特性および熱的特性を評価した。GFRP による熱応力存在下でも、 300 A まで問題なく通電できた。片持ち状態での曲げ試験において、荷重を 18 kgf まで印加しても、電極端子は塑性変形したものの、GFRP 補強の Y 系バルク材は割れなかった。 77.3 K 、 4.2 K の条件での電流リード侵入熱は 0.12 W になることが見積もられた。以上の実験的評価により、GFRP 補強方式の電流リ

(a) Current lead



(b) Bulk superconductor



(c) Center line

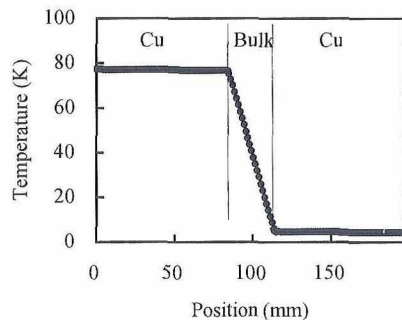
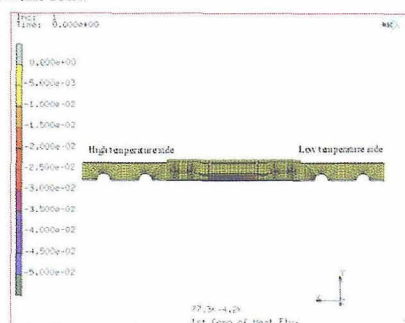


Fig.14 Temperature distribution of the Y-Ba-Cu-O bulk current lead.

ードが低電流量の 250 A 級 Y 系バルク電流リードとして有望であることが分かった。また、接触熱抵抗ゼロの単純化したモデルで数値解析を行い、電流リードの熱的挙動を定性的に把握することができた。

本研究で用いた Y 系高温超電導バルク材の熱膨張率と熱伝導率のデータは、財団法人いわて産業振興センターとの共同研究にて測定したものであることを記して、関係者への謝辞とする。

(a) Current lead



(b) Bulk superconductor

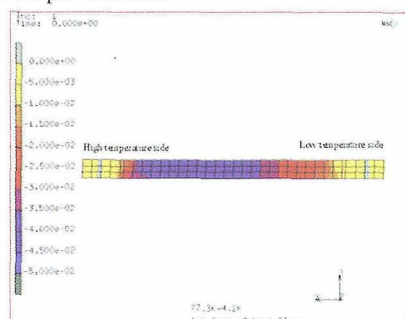


Fig. 15 Heat flux distribution of the Y-Ba-Cu-O bulk current lead.

参考文献

- 1) 山本一生ら：低温工学 30 (1995) 572
- 2) 直原和哲ら：低温工学 30 (1995) 583
- 3) 金太炫ら：低温工学 30 (1995) 590
- 4) M. Morita, et al. : Physica C 172 (1990) 383
- 5) M. Morita, et al. : Physica C 235-240 (1994) 209
- 6) M. Tomita, et al. : Physica C 357-360 (2001) 832
- 7) K. Watanabe, et al. : Advances in Superconductivity X(ISS97) (1997) 1389
- 8) 藤代博之ら：低温工学 28 (1995) 533
- 9) 荻原宏康：低温工学概論，東京電機大学出版局 (1999) 275
- 10) (社)低温工学協会編：超電導・低温工学ハンドブック，オーム社 (1993) 1090
- 11) 荻原宏康：低温工学概論，東京電機大学出版局 (1999) 272