

# ■ イットリウム系高温超電導電流リード

## ■ Development of Y-Based High- $T_c$ Superconducting Current Lead

柵木 玉樹  
T. Masegi

木村 信一  
S. Kimura

山田 穰  
Y. Yamada

超電導磁気エネルギー貯蔵、粒子加速器などの大型超電導機器への応用が可能な大容量酸化銅系高温超電導電流リードを開発した。一方向凝固法で臨界電流密度を高めた、イットリウム系酸化銅超電導体をリード材として採用することにより、熱侵入量を従来の銅製リードの約1/2に低減しつつ、従来の2倍以上の5,560 Aまでの安定通電を行うことができた。

この報告の成果は、高価な冷媒である液体ヘリウムの消費を低減できる5 kA級の大容量酸化銅系高温超電導電流リードが実証されたことを示す。

A high- $T_c$  oxide superconducting current lead has been developed for application to large-scale superconducting devices such as superconducting magnetic energy storage. A current lead test model was fabricated by the unidirectional solidification method, with a Y-based oxide superconductor having a high critical current density. The stable DC current of this test model reached 5,560 A, which is more than twice the value previously obtained for a high- $T_c$  oxide superconducting current lead. Heat leakage through the current lead was also reduced to about half the value of a conventional metal current lead.

These results show that high- $T_c$  oxide superconducting current leads can be used for 5 kA-class superconducting devices to reduce liquid helium consumption.

### 1 まえがき

超電導機器では、液体ヘリウム槽に挿入された超電導マグネットに通電するための、常温部と極低温部をつなぐ電流リードが必要になる(図1)。従来、電流リードとして銅製のリードが用いられてきたが、最適設計されたものでも1kA当たり1Wの熱侵入があり、高価な冷媒である液体ヘリウムが、蒸発によって多量に消費されるという問題点があった。

酸化銅系高温超電導体を用いた電流リードはジュール発熱がなく、熱伝導率も低いことから銅製リードと比較して熱侵入量を低減できる。特に、超電導磁気エネルギー貯蔵、粒子加速器などの大型機器では5~10kA級の電流が要求され、液体ヘリウム消費量の少ない酸化銅系超電導電流リードの開発が望まれている。

これに対し、酸化銅系超電導体を用いた電流リードモデルの通電容量は、Bi系銀シース線材を多数本並列化したタイプで得られた2,500 A<sup>(1)</sup>が最高である。

ここでは、一方向凝固法で作製されたイットリウム系酸化銅系高温超電導体を用いて、大幅な通電容量の向上と熱侵入量の低減を図って開発した電流リードについて述べる。

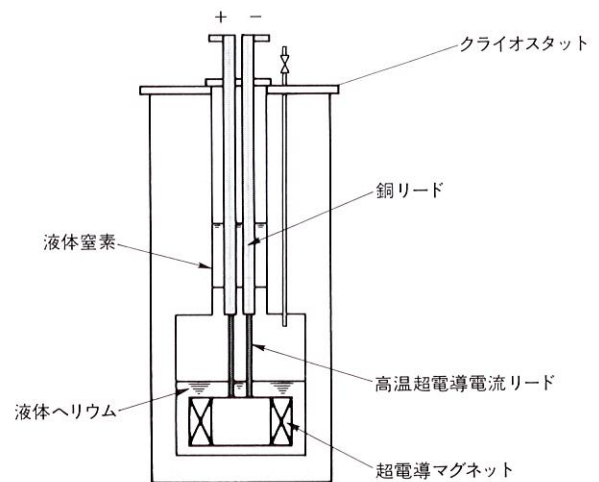


図1. 超電導機器の模式図 超電導機器では常温部と極低温部を結ぶ電流リードが必要とされる。

Schematic view of superconducting device

### 2 リード材の作製

リード材としては一方向凝固法<sup>(2),(3)</sup>によるイットリウム系試料((Y,Ho)Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub>)を採用した。従来の粉末焼結法で

は結晶粒の方向がランダムで、密度の低いバルク材しか得られない。それに対して一方向凝固法試料は緻(ち)密で高度に配向しているため、粒界の影響がほとんどなく、高い臨界電流密度が得られる。試料は円筒状で、外径9.5 mm, 内径6.5 mm, 長さ150 mmである。試料作製方法は以下のとおりである。

成型された焼結体を温度こう配(150°C/cm)をもつ電気炉の中で1時間当たり1 mmの速度で移動させる。電気炉の中央部は1,030°Cから1,080°Cであり試料は部分熔融している。試料が再び凝固する際に結晶成長が起こる。イットリウム系酸化物超電導体の結晶成長方向には顕著な異方性があり、選択的に結晶のa-b面が成長する。この成長方向は試料の溶融部と凝固部の界面に垂直な方向、すなわち試料の長手方向に相当するため、長手方向に高配向したバルク材を得ることができる。得られた試料の両端20 mmに銀ペーストによる電極処理を施した。

### 3 リード材の基礎特性

超電導電流リードの熱侵入量は低温端(4.2 K)から高温端(77 K)までの熱伝導積分値に比例し、臨界電流密度( $J_c$ )に反比例する。したがって熱伝導積分値が低く、 $J_c$ が高いほど電流リードとして優れた特性をもつ。そこでリード材の熱伝導特性、臨界電流特性を検討した。

#### 3.1 熱伝導特性

今回採用したリード材の熱伝導積分値を定常熱流束法で測定することによって評価した。測定結果およびそれを微分することによって得られる熱伝導率を表1に示す。

表1. 熱伝導特性の比較  
Comparison of thermal conductive properties

	一方向凝固法によるY系超電導材料	Y系単結晶	銅材料
熱伝導積分(77 K-4.2 K)	3.5 W/cm	4.6 W/cm	700 W/cm
熱伝導率(77 K)	76 mW/cm·K	100 mW/cm·K	5 W/cm·K

表1には、イットリウム系単結晶の文献値<sup>(4)</sup>と代表的銅材料の値も併せて示した。このリード材の熱伝導積分値および熱伝導率は、銅と比較して約二桁(けた)低いことがわかる。一方、単結晶との比較でこれらの値が20~30%程度低くなっているのは、理論密度比の相違、およびそれに伴う材料中の空げきによる格子振動の散乱に基づくものと考えられる。

このリード材の熱伝導積分値と、形状(長さ、断面積)から伝導による熱侵入量を算出したところ、リード1本当たり110 mWとなり、電流リードとして十分低い値をもつことがわかった。

#### 3.2 臨界電流特性

このリード材の臨界電流特性を調べた。測定は磁化法とトランスポート法の両者について行った。磁化法は試料の磁化のヒステリシスから臨界電流密度を算出する方法である。また、トランスポート法は試料全体に直流電流を流し、試料両端に1  $\mu$ V/cmの電場が発生した点を臨界電流密度とする方法である。

臨界電流密度 $J_c$ の温度依存性を磁化法によって40 Kから86 Kの温度範囲で測定した。測定には振動試料型磁力計を用いた。印加磁場は試料の結晶c軸方向に平行とし、実際に通電電流が流れる方向と同一方向に遮蔽(へい)電流が流れるようにした。ゼロ磁場下における $J_c$ の温度依存性を図2に示す。この結果から、77 K, 0 Tにおける $J_c$ は $1.26 \times 10^4$  A/cm<sup>2</sup>であり、従来報告されている酸化物超電導バルク材( $\sim 10^3$  A/cm<sup>2</sup>)よりも約一桁高いことがわかる。

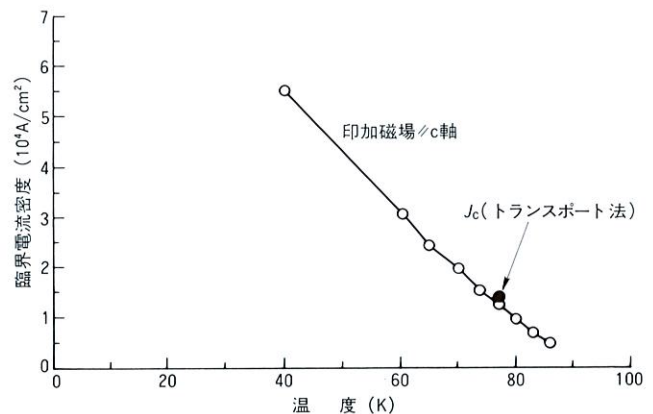


図2. 臨界電流密度の温度依存性 一方向凝固法試料の臨界電流密度は77 Kで $10^4$  A/cm<sup>2</sup>を超える高い値を示す。

Critical current density as function of temperature

バルク全体の臨界電流( $I_c$ )をトランスポート法により評価した。その結果、直径5.5 mm, 長さ60 mmの試料で、77 K, 0 Tにおいて $I_c=3,350$  Aが得られ、実効的な $J_c$ は $1.41 \times 10^4$  A/cm<sup>2</sup>と評価される。この値は、前述の磁化法の結果と良好に一致している(図2)。これは臨界状態モデルの適用が有効であったことを示しており、磁化測定用に切り出した試料中の結晶粒界などの弱結合の影響が少なく、遮蔽電流が試料全体にわたってループしていたためと考えられる。

磁化法およびトランスポート法による $J_c$ の評価により、このリード材は従来の酸化物超電導バルク材よりも約一桁高い $J_c$ があることがわかり、電流リードとして良好な特性をもっていることが示された。

### 4 電流リードモデルの構成

電流リードモデルの模式図を図3に示す。酸化物電流リー

ドの低温端は液体ヘリウム(4.2 K)に浸され、高温端は液体窒素槽(77 K)で冷却されている。リード全体は下部の液体ヘリウム槽から流出したヘリウムガスにより冷却される構成とした。このリード材は機械的強度が弱いため、繊維強化型プラスチック(FRP)円筒によって補強した。低い熱伝導率と良好な絶縁性をもつFRP円筒による伝導熱侵入量は1本当たり129 mWである。正極、負極リードの低温端は、従来の金属系超電導線により短絡されている。

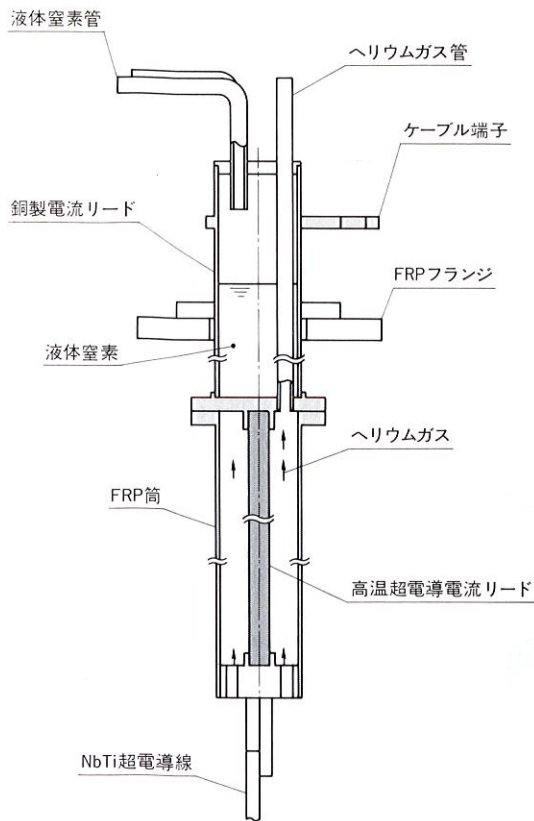


図3. 電流リードモデルの構成 電流リードモデルは蒸発ヘリウムにより冷却されるガス冷却型であり、実用的な補強も施されている。  
Schematic view of current lead model

## 5 通電試験

4章で述べた電流リードモデルの直流通電試験を行った。通電試験装置の概略を図4に示す。電流リードモデルはクライオスタットに挿入され、液体ヘリウムを酸化物リードの低温端の高さ程度まで注入する。通電試験では直流20 kA電源を用いて、自然対流条件下による通電と強制冷却条件下による通電を行った。

自然対流条件とは、電流リード自身に起因する蒸発ヘリウムの自然対流によってリード全体が冷却される条件を指す。その熱侵入量は、酸化物自体のジュール発熱がないため、熱伝導分、酸化物-銅ブロック間の接続抵抗などに起因する

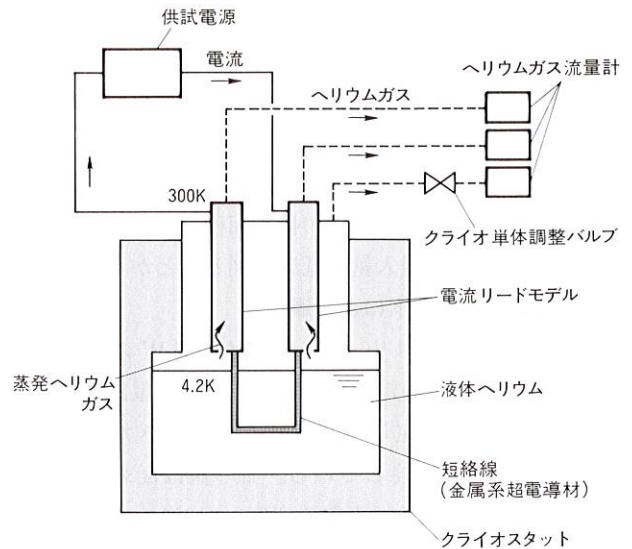


図4. 通電試験装置の概略 直流通電試験時では、液体ヘリウム蒸発量を測定することにより熱侵入量を求める。

Experimental transporting apparatus for current lead model

ジュール発熱分、輻(ふく)射などに分けられる。一方強制冷却条件下では、液体ヘリウム中にヒータを投入するなどの方法で通電を行う。この場合、付加的な蒸発ヘリウムの流れによって、リード高温端の温度を低下させることができ、通電容量をより向上させることができる。

### 5.1 自然対流条件下による通電

自然対流条件下で直流通電試験を行った。実験では所定の電流値に保持して蒸発ヘリウムガス流量を測定することにより5,560 Aまでの安定通電下で熱侵入量を求めた。5,560 Aの通電容量は、従来の最高値2,500 A<sup>(1)</sup>を2倍以上更新するものである。この際の酸化物リードの高温端温度は60 Kであった。

熱侵入量と通電電流値の関係を図5に示す。比較のため最適設計銅製リードの値を図中に示した。測定した熱侵入量は3,055 Aで1.0 W/本、5,560 Aで3.1 W/本であり、おの

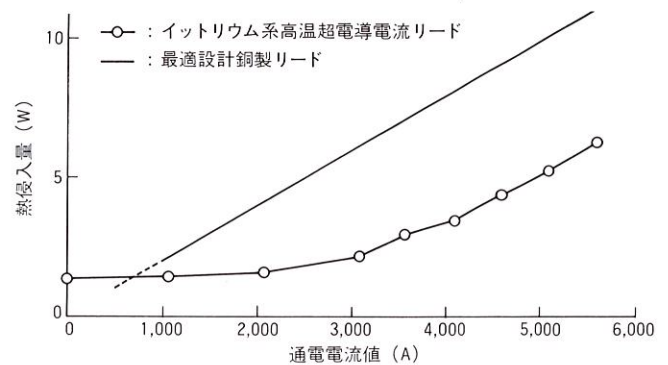


図5. 熱侵入量と通電電流値の関係 電流リードによる熱侵入量は、5,560 A 通電時で従来の最適設計銅製リードの約1/2に低減されている。

Heat leakage vs. transporting current

おの最適設計銅製リードと比較して約 1/3 および 1/2 に低減されている。5,560 A 通電時における熱侵入量の内訳は酸化物, FRP, 計測線などの伝導分が 0.4 W/本, 酸化物-銅ブロックの接続抵抗分が 1.9 W/本, NbTi-銅ブロック接続部などその他の抵抗発熱分および輻射分が 0.8 W/本であった。酸化物-銅ブロックの接触面積を大きく取るなどの方法によりさらに熱侵入量の低減を図ることが可能である。

### 5.2 強制冷却条件下による通電

強制冷却条件下ではリード 1 本当たり 5 W の付加的な熱入力を行いつつ直流通電試験を実施した。通電試験の結果, 最高で 7,550 A の安定通電を行うことができた。電流密度は  $2.0 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$  に達している。この値は従来の粉末焼結法バルク材で得られている電流密度 ( $\sim 10^3 \text{ A/cm}^2$ ) と比較して一桁高い。この条件下でより高い通電容量および電流密度が得られたのは, 酸化物電流リードの高温端が自然対流条件下よりもさらに低い約 50 K まで冷却され,  $J_c$  が 77 K と比較して 3.2 倍に向上したことによる。

この結果は, 電流リードの高温端を効率良く冷却できれば, さらに高い通電容量が得られることを示す。

## 6 あとがき

一方向凝固法で作製したイットリウム系酸化物高温超電導体の熱伝導特性, 臨界電流特性などを評価し, 他の超電導材料と比較して電流リードとして優れた特性をもつことを示した。この材料を採用して実用的な電流リードモデルを構成し, 直流通電試験を行った。その結果, 自然対流条件下で従来の値を 2 倍以上更新する 5,560 A の安定通電を行うことができた。このとき, 電流リードからの熱侵入量は 3.1

W/本で, 従来の最適設計銅製リードと比較して約 1/2 に低減されている。

この開発により高価な冷媒である液体ヘリウム消費量を低減し, かつ大型超電導機器に適用可能な酸化物高温超電導電流リードの実現に向けて大きく前進することができた。

## 文 献

- (1) 加藤武志, 他: 高温超電導線材を用いた 2kA 級電流リードの開発, 第 50 回低温工学・超電導学会, B3-4(1993).
- (2) E. Yanagisawa, et al: Fabrication and Properties of Long (Y,Ho)-Ba-Cu-O Rods Prepared by Unidirectional Solidification Technique, Proc. Int. Symp. on Supercond, p.593 (1993)
- (3) J. Kase, et al: Observations of Structure, Phase and Composition on Unidirectional Solidified Y-Ba-Cu-O Samples, Jpn. J. Appl. Phys. **33**, p.3424 (1994)
- (4) S. J. Hagen, et al: Anisotropy of the Thermal Conductivity of  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ , Phys. Rev. **B40**, p.9389 (1989)



柵木 玉樹 Tamaki Masegi, D. Eng.

1991 年入社。超電導材料の研究・開発に従事。現在, 研究開発センター 機械・エネルギー研究所, 工博。  
Energy & Mechanical Research Labs.



木村 信一 Shin'ichi Kimura

1974 年入社。超電導, 極低温の研究・開発に従事。現在, 重電技術研究所電磁応用装置技術開発担当主務。  
Heavy Apparatus Engineering Lab.



山田 穰 Yutaka Yamada, D. Eng.

1981 年入社。超電導材料の研究・開発に従事。現在, 研究開発センター 機械・エネルギー研究所主任研究員, 工博。  
Energy & Mechanical Research Labs.