

nPAD-YBCO[®] 線材を用いた超電導電流リードの開発

Development of HTS Current Leads Prepared by nPAD-YBCO[®] Tape

高橋 亨
Kyo TAKAHASHI

木村一成
Kazunari KIMURA

引地康雄
Yasuo HIKICHI

箕輪昌啓
Masahiro MINOWA

小泉 勉
Tsutomu KOIZUMI

長谷川隆代
Takayo HASEGAWA

山田 豊*
Yutaka YAMADA

超電導電流リードは極低温で運転される超電導応用機器に必須のデバイスである。これまでの当社が販売してきたBi系超電導電流リードは多くの実績があるが、ハンドリングや磁場中での通電特性に課題があった。一方、我々は磁場中の通電特性に優れ、高強度な、nPAD-YBCO[®] 線材の開発に成功した。そこで、今回我々はこの線材を用いて、ハンドリング性に優れ、かつ、高磁場中でも使用可能なY系電流リードの開発を行った。本報ではこの開発品の試作評価結果について報告する。

The HTS (high temperature superconductor) current lead is an essential device for superconducting apparatus which is operated at cryogenic temperatures. We have provided a number of Bi bulk current leads for several years, but there are rooms for improvement in magnetic field properties and handling. On the other hand, we have succeeded in the development of nPAD-YBCO[®] wire with high strength and excellent transport performance in the magnetic field. In this study, we have developed the new HTS current lead by using the nPAD-YBCO[®] wire. It will be excellent handling properties and even available in a high magnetic field.

In this paper, we will report evaluation results of the prototype.

1. はじめに

マグネット、モーター、ケーブル、変圧器など超電導線材を利用した応用機器開発が近年活発に行われているが、超電導応用機器を経済的に稼働させるためには機器を低温に保持するためのコストを低く抑える必要がある。この為に、より効率の良い冷凍機の開発や断熱性能に優れた低温容器の開発が進められている。また、通常室温に設置される電力の供給部と極低温下にある機器を電氣的に接続する導体部分からの熱侵入量の低減は、通電容量が大きくなるほど重要な課題となる。超電導機器用の電流リードはこの電力供給部と超電導応用機器との間に設置され、電源（室温）から超電導機器（極低温）に電力を供給する機能と、室温から極低温への温度勾配により伝導する熱量をできるだけ低減する機能を担っている。

電流リードには銅のような電気抵抗率の小さい材料が用いられるが、電気抵抗率が小さい材料は一般的に熱伝導率が大きく、熱侵入量が多い。更に、機器の通電容量が大きくなるほど導体断面積も大きくなり、熱侵入が大きくな

るという問題がある。

この問題を解決するために現在利用されているものが導体に高温超電導体を用いた「超電導電流リード」である。

高温超電導体のひとつである酸化物超電導体は、熱伝導率が非常に小さいという特徴がある。また、超電導臨界温度 (T_c) 以下においては電気抵抗が“ゼロ”であることから、通電時にも発熱しないという理想的な特性を有している。10 K 以下の極低温で稼働する超電導機器においては、電流リード設置部分にも 77 K 以下の温度になる領域が存在する。この領域に超電導電流リードを用いることにより、銅リードよりも大幅に熱侵入量を低減した電流リードが実現可能となる。

我々は、酸化物超電導体であるBi系超電導バルク体を用いた電流リードの製造販売を行っているが、機械的強度や磁場環境での通電特性に課題を残していた^{1, 2)}。そこで、バルク体よりも高強度である、ニッケル基合金を基板とするYBCO線材^{3, 4)}を用いた電流リードの開発を進めてきた^{5, 6, 7)}。また昨今、人工ピン導入技術の応用により、世界最高性能の磁場中通電特性を有する、有機酸塩塗布熱分解法 (MOD)

* 東海大学

人工ピン導入型 YBCO 線材を開発した^{9, 10)}。この人工ピン導入型 YBCO 線材（以降 nPAD-YBCO 線材と表記する）を用いることで高磁場中でも使用可能な電流リードの設計が可能となった。そこで、nPAD-YBCO 線材を用いた電流リードの開発を進め、表 1 に示すラインナップで販売を開始した。今回は、ラインナップのうち 500 A 級電流リードの試作・通電試験結果、さらに熱侵入量を検討した結果について報告する。

表 1 nPAD-YBCO 電流リードの製品ラインナップ

項目	250 A 仕様	500 A 仕様	1500 A 仕様	
通電容量 (@77 K, 自己磁場中)	A	250	500	1500
温度範囲	K	77 - 4.2		
熱侵入量	W	≤ 0.03	≤ 0.06	≤ 0.15
サイズ	mm	220 L×14 W×14 T	220 L×14 W×14 T	220 L×23 W×16 T

2. 実験方法

今回試作した nPAD-YBCO 電流リードの仕様は、表 1 に示した通電容量 500 A のタイプである。nPAD-YBCO 線材は幅が 5 mm、厚さ約 0.12 mm であり、厚さ 1.5 μm の超電導層、 $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ (GZO) と CeO_2 の 2 層から成る厚さ 1.5 μm の中間層、そして 100 μm 厚のニッケル合金基板で構成されている。そして超電導層の表面には厚さ約 20 μm の銀層が、蒸着されている。

500 A 級 nPAD-YBCO 電流リードには、4 本の nPAD-YBCO 線材を使用した。線材の両端を銅電極にはんだを用いて接続した。さらに、G-FRP 製支持部材で補強して超電導電流リードとした。作製した電流リードの外観を図 1 に示す。通電性能の評価のため、nPAD-YBCO 線材上に電圧測定用の端子を設置した。端子間距離は 50 mm とし、各線材毎に 1 組設置した。また、全体の電圧は電極両端につけた電圧端子で測定し、電圧端子間距離を 100 mm とした。電圧端子位置を図 2 に示す。電流リードを液体窒素に浸漬冷却し、 I_c 測定を行った。測定は 4 端子法を用いて評価し、1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ の電圧発生時の電流値を I_c として定義した。これにより、全体の I_c 基準は 10 μV 発生時、nPAD-YBCO 線材上での I_c 基準は 5 μV 発生時とした。

さらに、冷却方法により I_c 値が異なるか確認するため、伝導冷却でも測定を行った。ただし、設備の都合上、500 A 級 nPAD-YBCO 電流リードの 1/4 モデルで実施した。1/4 モデルは、1 本の nPAD-YBCO 線材を使用したもので、他は同様とした。伝導冷却により電極両端を 77 K に制御し I_c 測定を行った。



図 1 nPAD-YBCO 電流リードの外観

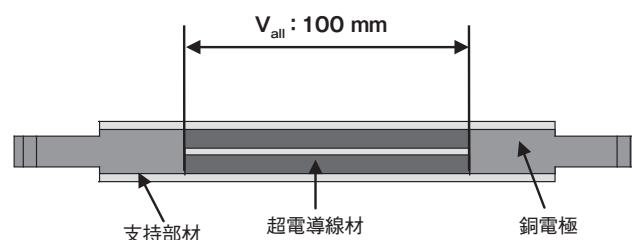


図 2 電圧端子計測位置

3. 結果

3.1 500 A 級 nPAD-YBCO 電流リードの通電特性

500 A 級 nPAD-YBCO 電流リードには $I_c \geq 175 \text{ A/本}$ の nPAD-YBCO 線材を 4 本使用しており、設計 I_c 値は 700 A 以上である。

図 3 に 500 A 級 nPAD-YBCO 電流リードの 77 K, 自己磁界中における通電電流特性を評価した結果を示す。電極間電圧 (V_{all}) は両電極の接続抵抗を差し引いた電圧を示しており、全体の I_c は 780 A となった。設計通りの I_c 値が得られ、500 A 級 nPAD-YBCO 電流リードとして十分な特性を有していることを確認した。

電流リードの低温端側のジュール発熱はそのまま冷却機器に侵入するため、この部分の接続抵抗を低く抑える必要がある。そこで、今回の nPAD-YBCO 電流リードでは低温端側の接続抵抗を 1.0 $\mu\Omega$ 以下となるように設計した。

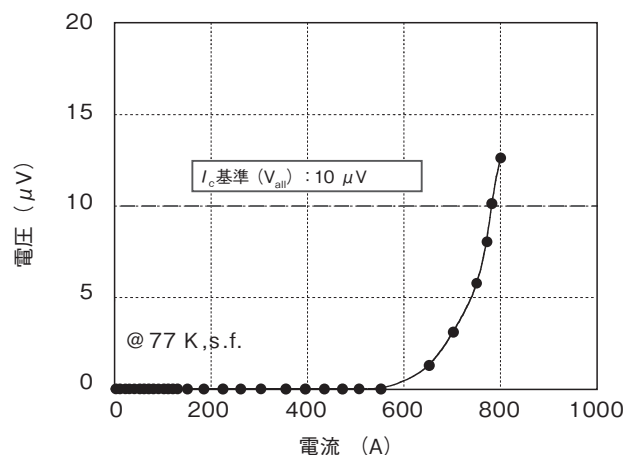


図 3 500 A 級電流リードの通電特性

通電試験結果より接続抵抗を求めたところ、低温端側の接続抵抗は $0.71 \mu\Omega$ であり設計値を充分満たしていることを確認した。

図4に77 K、自己磁界中における nPAD-YBCO 電流リードの連続通電試験の結果を示す。試験では定格通電容量 500 A の 1.2 倍に相当する 600 A の電流を 30 分間通電した。この結果、通電中、電極間の発生電圧は一定で、クエンチなど異常な挙動は認められず、問題の無いことを確認した。

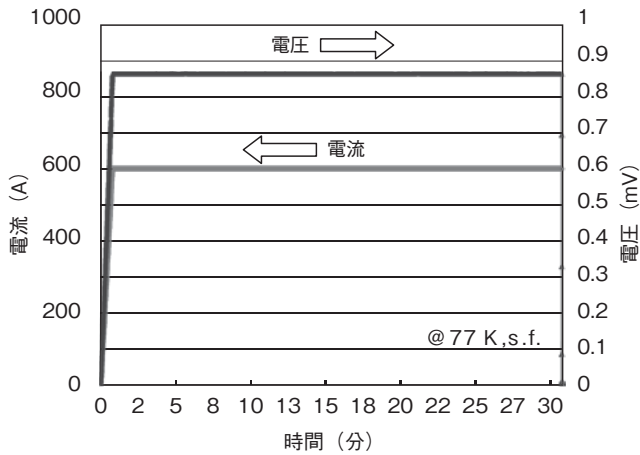


図4 500 A 級電流リードの連続通電特性

3.2 伝導冷却下での nPAD-YBCO 電流リードの通電特性

図5に77 K、自己磁界中における 500 A 級 nPAD-YBCO 電流リードの 1/4 モデル液体窒素中と伝導冷却での通電試験の比較結果を示す。

この時、液体窒素中での I_c は 200 A であり、伝導冷却での I_c は 206 A とほぼ一致していることを確認した。冷媒浸漬冷却と同等の性能を確認出来たことから、500 A 級電流リードを伝導冷却下で使用しても設計通りの I_c が得られると考えられる。

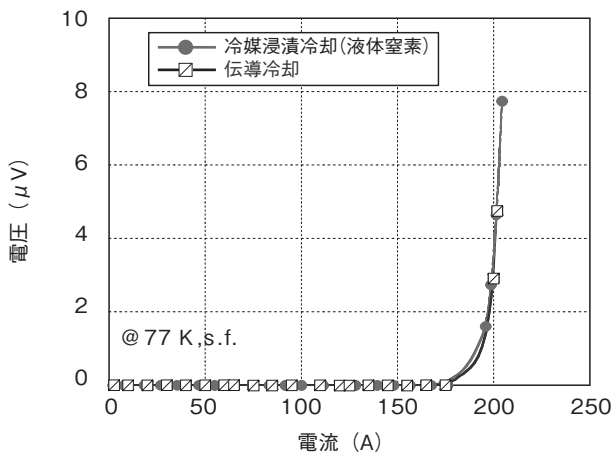


図5 500 A 級電流リード 1/4 モデルの通電特性の比較

3.3 nPAD-YBCO 電流リードの熱侵入量

電流リードの熱負荷には、電流リードを通して伝導する熱と電気抵抗によって発生するジュール熱の二つの要因がある。超電導電流リードの熱侵入量 Q は、次の方程式 (1) によって記述される。

$$Q = \frac{S}{L} \int_{T_L}^{T_H} \lambda(T) dT + I_{op}^2 R_L \quad (1)$$

S: 電流リードの断面積

L: 電流リードの高温端と低温端の間の距離

T_H : 高温端側の温度 T_L : 低温端側の温度

λ : 超電導線材と構成部材の熱伝導率

I_{op} : 通電量 R_L : 低温側の接続抵抗

式 (1) を用いることによって nPAD-YBCO 電流リードの T_H (77 K) から T_L (4.2 K) の間における熱侵入量 Q を計算し、従来品である Bi 系超電導電流リードと比較した結果を図6に示す。

同じ通電量で比較した場合、nPAD-YBCO 電流リードでは Bi 系電流リードの熱侵入量の約 60% を削減できた。これは、人工ピンを導入することによって、磁場中での特性が向上したことから、77 K での I_c も向上し、使用する超電導体の総量を低減することができたためと考えられる。

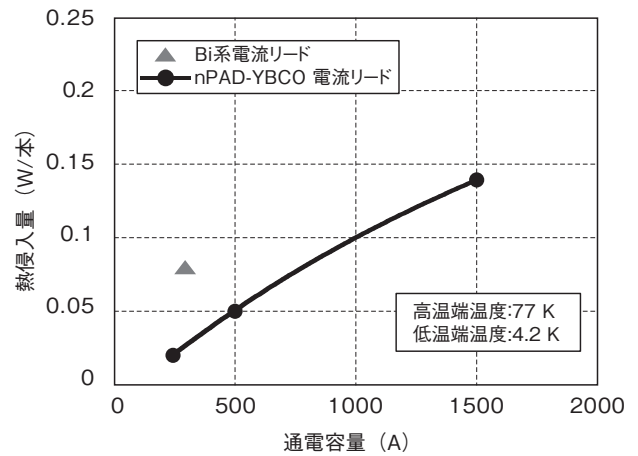


図6 通電容量に対する熱侵入量の比較

4. ま と め

nPAD-YBCO 線材を用いた電流リードの設計と試作を行った。500 A 級 nPAD-YBCO 電流リードの I_c は 780 A と、通電容量に対して十分な特性を有していることを確認した。連続通電試験では 600 A の電流を 77 K、自己磁界中において 30 分間安定して通電できることを確認した。さらには、伝導冷却においても冷媒浸漬冷却と同等の通電性能を確認した。nPAD-YBCO 電流リードの 77 K から 4.2 K の熱侵入量は、従来品の Bi 系超電導電流リードより約 6 割低減できた。今回開発した nPAD-YBCO 電流リードは低熱

侵入量であり、磁場中での臨界電流密度を向上させた nPAD-YBCO を適用していることから高磁場環境で運転される超電導応用機器への応用も期待される。

謝 辞

電流リードの測定におきまして、公益財団法人鉄道総合技術研究所殿にご協力頂きました。心より感謝致します。

参考文献

- 1) 本庄哲吏, 他: 昭和電線レビュー, Vol.44, p.108 (1994)
- 2) T. Honjo, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol.5, p.1486 (1995)
- 3) A. Kaneko, et al.: Abstracts of CSSJ conference, Vol.5, p.1486 (1995)
- 4) Y. Yamada, et al.: Cryo.Soc.Jpn. Vol.45, p.246 (2010)
- 5) Y. Yamada, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol.3, p.1051 (2011)
- 6) 小泉勉, 他: 昭和電線レビュー, Vol.58, p.17 (2008)
- 7) K. Takahashi, et al.: Abstracts of CSSJ conference, Vol.87, p.133 (2013)
- 8) K. Kimura, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol.21, 6601704 (2013)
- 9) T. Yokomizo, et al.: Abstracts of CSSJ conference, Vol.88, p.183 (2013)
- 10) K. Kimura, et al.: Abstracts of CSSJ conference, Vol.88, p.184 (2013)

昭和電線ケーブルシステム(株)
高橋 亨 (たかはし きょう)
超電導テクノロジーセンター
デバイス開発グループ
電流リードの研究・開発に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)
木村 一成 (きむら かずなり)
超電導テクノロジーセンター
線材開発グループ
超電導線材の研究・開発に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)
引地 康雄 (ひきち やすお)
超電導テクノロジーセンター
デバイス開発グループ 主査
電流リードの研究・開発に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)
箕輪 昌啓 (みのわ まさひろ)
超電導テクノロジーセンター
デバイス開発グループ長

昭和電線ケーブルシステム(株)
小泉 勉 (こいずみ つとむ)
超電導テクノロジーセンター
線材開発グループ長

昭和電線ケーブルシステム(株)
長谷川 隆代 (はせがわ たかよ)
工学博士
取締役 超電導テクノロジーセンター長

東海大学
山田 豊 (やまだ ゆたか)
工学博士
工学部材料科学科 教授