

nPAD-YBCO[®] 線材を用いた超電導電流リードの開発 (第2報)

Development of a HTS Current Lead Prepared by nPAD-YBCO[®] Tape - Part 2 -

高橋 亨 Kyo TAKAHASHI	中村達徳 Tatsunori NAKAMURA	引地康雄 Yasuo HIKICHI	箕輪昌啓 Masahiro MINOWA
小泉 勉 Tsutomu KOIZUMI	長谷川隆代 Takayo HASEGAWA	木村一成 Kazunari KIMURA	山田 豊* Yutaka YAMADA

超電導マグネットに電流を供給する電流リードは、外部からの熱侵入を抑えることが求められている。酸化物超電導体が発見されてから、イットリウム系超電導体 (YBCO バルク)、ビスマス系超電導体 (BSCCO バルク)、BSCCO 線材を使用した電流リードが商品化されてきた。我々は、77 K, 3 T 中で $I_c = 55$ A/cm 幅を有する、TFA-MOD 法により作製された人工ピン止め点導入型 YBCO 線材 “nPAD-YBCO[®]” の開発に成功し、これを用いた nPAD-YBCO[®] 電流リードの開発に着手した。

電流リードは外部磁場の影響を受ける場所に設置されるため、磁場中特性に優れた超電導材料を用いることが必須となる。また、超電導材料に磁場中特性に優れた超電導線材を用いた場合、用いられる線材量が少量となり、同時に、熱侵入量が低減される構造が実現可能となる。

本報では、定格 500 A 仕様 nPAD-YBCO[®] 電流リードの基本特性や熱履歴に対する影響、磁場中特性の評価結果を報告する。

High temperature superconducting (HTS) current lead is a device which supplies high current to superconducting magnet, and the most important property thereof is minimizing heat leakage to the cryostat. Since discovery of High-Tc superconductors, HTS current leads have been developed in many organizations and commercialized using superconducting materials such as BSCCO-bulk, YBCO-bulk and BSCCO-tape. Recently, we successfully developed high performance YBCO superconducting tapes in field which has the I_c values of 55 A/cm-width at 77 K in 3 T, named nPAD-YBCO[®] (nano-Particle Artificial-pinning-center Distributed YBCO tape). And we started development of newly HTS current leads using nPAD-YBCO[®].

HTS current lead using superconducting tapes with high magnetic properties, is possible to reduce the number of tapes for the current lead, therefore it can reduce the heat leakage.

In this paper, we report the evaluation results on basic properties of the 500 A class current leads, such as magnetic field properties and influence on heat cycles.

1. はじめに

マグネット、モーター、電力ケーブル、変圧器など超電導線材を利用した超電導応用機器の開発が、活発に行われている。中でも、ヘリウムの枯渇、冷凍機の性能向上・低価格化に伴い、無冷媒冷却超電導マグネットの開発が促進されている。超電導マグネットを省エネルギー且つ経済的に運転するには、極低温下にある超電導マグネットに電流を供給する際、電流リードからのジュール発熱及び外部か

らの熱侵入量を低減させることが求められている。

一般に、電流リードには、電気抵抗率の低い銅などが用いられているが、超電導マグネットの運転電流の増加に伴い導体断面積が大きくなり、外部からの熱侵入量が大きくなるため、超電導マグネットの冷却能力が低下するという問題が生じる。

そこで、超電導転移温度 (臨界温度: T_c) 以下において、ジュール発熱が無く、熱伝導率が非常に低い酸化物超電導電流リードを用いることで、超電導マグネットの冷却能力を向上させることができる (図 1 参照)。

* 東海大学

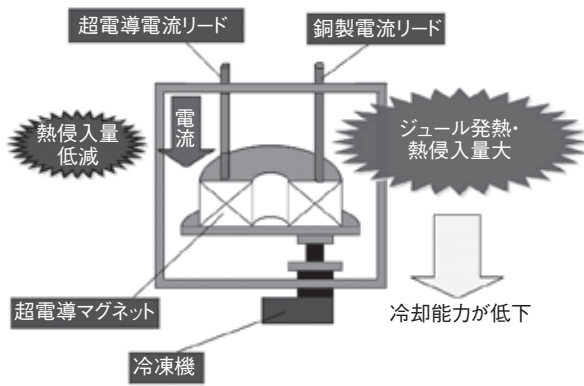


図1 電流リードの課題

このような背景から我々は、酸化物超電導電流リードの開発・製品化を行ってきた。これまで開発してきた酸化物超電導電流リードの比較を表1に示す。

表1 酸化物超電導電流リードの特性比較

超電導導体	Bi-2223 バルク体	YBCO 線材	nPAD-YBCO [®] 線材
導体断面積*	22 mm ²	3 mm ²	1.8 mm ²
熱侵入量	○	△	◎
大電流化	△	◎	◎
磁場に強い	×	△	◎
強度	×	◎	◎
可とう性	×	◎	◎
コンパクト性	○	△	◎

*定格電流 300 A で設計した場合

表1に示すビスマス系超電導体 (Bi-2223 バルク) は、磁場中において臨界電流密度 (J_c) が著しく低下することに加え、機械強度が弱く破損しやすいという問題があった^{1), 2)}。そこでまず、電流リードの機械特性向上を図るため、高強度金属であるNi合金を基板としたイトリウム系超電導体 (YBCO 線材)^{3), 4)}を用いた超電導電流リードの開発を進めてきた^{5)~7)}。しかしながら、YBCO 線材を用いた場合においても、磁場中において J_c が低下するため、定格電流特性を満たすためには、使用線材本数を多くすることで対応せざるを得ない。さらに、熱侵入量を低減させるために、電流リードの長さを長く設計する必要があった。

これまで当社において、有機金属塩塗布熱分解法 (TFA-MOD) で作製される YBCO 線材の開発を行ってきたが、その線材の磁場中における J_c 向上を目指すため、人工ピン止め点導入型 YBCO 線材の開発を実施した。図2に示すように、磁場中における J_c 及び磁場異方性が改善された線材を作製することに成功した^{8)~10)}。この人工ピン止め点導入型 YBCO 線材 (nPAD-YBCO[®]) を超電導電流リードに用いることにより、使用する線材量を大幅に削減したコンパクトな nPAD-YBCO[®] 電流リードの開発に成功した¹¹⁾。

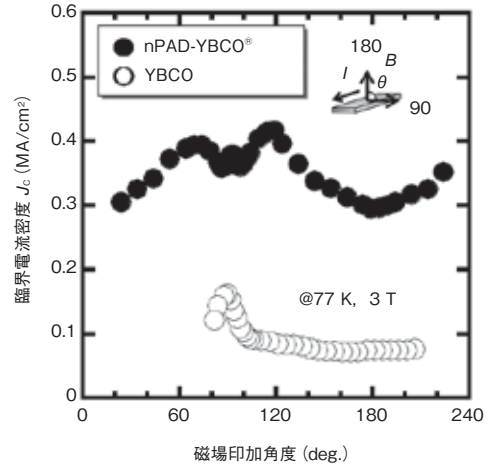


図2 nPAD-YBCO[®]の印加磁場角度依存性

表2に、これまで開発を進めてきた nPAD-YBCO[®] 電流リードの評価項目を示す。

前報¹²⁾では、表2に示す評価項目のうち、定格 500 A の nPAD-YBCO[®] 電流リードについて、液体窒素自己磁場中における臨界電流 (I_c) 測定結果に加え、熱侵入量を算出し⁹⁾、詳細設計を行い、伝導冷却下において通電試験を行い、定格値を満たすことを報告した。

表2 評価項目一覧

特性試験区分	試験項目	試験内容	
通電特性	I_c	液体窒素冷却	液体窒素浸漬、自己磁場中にて測定
		伝導冷却	伝導冷却、自己磁場中にて測定
	伝導冷却、外部磁場 0.5 T にて測定		
	連続通電	液体窒素浸漬、自己磁場中にて定格電流を 30 分間連続通電し、電圧・接続抵抗 (R_c) の上昇がないことを確認	
ヒートサイクル試験	300 K (室温) -77 K (液体窒素) のサイクルを繰り返し、接続抵抗 (R_c)・定格電流 (I_{op}) に変化がないことを確認		
機械的特性	引張試験	室温にて所定の応力を加え、除荷後に接続抵抗 (R_c)・臨界電流 (I_c) 測定	
	片持ち曲げ試験	曲げ荷重を加え、除荷後に接続抵抗 (R_c)・臨界電流 (I_c) 測定	
	加振試験	所定の加速度で振動を経験させ、加振後に接続抵抗 (R_c)・定格電流 (I_{op}) に変化がないことを確認	
	ローレンツ力の影響把握	応力解析により外部磁場 0.5 T 中で通電した際のローレンツ力を算出し、その値を基に線材に繰り返し引張応力 (疲労試験) を印加し健全性を確認	

本報では、シミュレーションによる応力解析により算出した電流リードの通電時に発生するローレンツ力による影響を確認した。さらに、実際に nPAD-YBCO[®] 電流リードを試作し、外部磁場 0.5 T 中において、定格値を満たすことを確認した。また、機器の運用方法によっては、室温から極低温への冷却が繰り返されることから、ヒートサイクルに対する問題を改善した nPAD-YBCO[®] 電流リード (改良型) を開発し、ヒートサイクルによる特性への影響についても従来型と比較を行った。

2. ローレンツ力の影響

多くの電流リードは、磁場環境下で使用されるため、通電時に発生するローレンツ力の影響を把握する必要がある。特に、nPAD-YBCO[®]電流リードは、テープ線材を用いていることから、線材に対する応力集中を考慮した機械設計を行う必要がある。そこで、磁場中通電時におけるローレンツ力の影響について、有限要素法によるシミュレーションにて、応力解析を行った。

2.1 解析条件

nPAD-YBCO[®]電流リードの応力解析は、図3に示す簡易モデル（定格500 A仕様の1/4モデル）を用いて行った。銅電極端部を完全固定として、テープ線材のテープ面に対して平行及び垂直に各々磁場を印加した場合について応力解析を行った。また、超電導マグネット運転時に印加される磁場は、0.5 Tとした。表3に解析条件を示す。

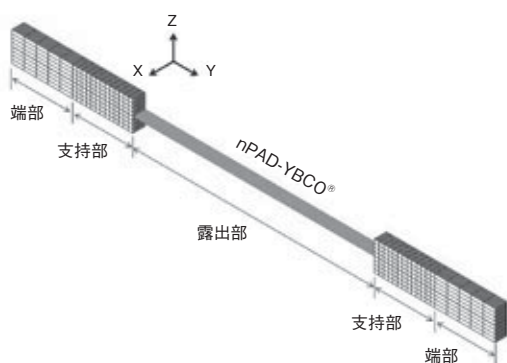


図3 nPAD-YBCO[®]電流リードの応力解析モデル

表3 応力解析条件（有限要素法）

項目	解析ファクター	
線材	幅	5.0 mm
	厚さ	0.12 mm
	長さ	150 mm
電極間距離	100 mm	
磁場印加方向	(a) テープ面に対して垂直 (b) テープ面に対して平行	
外部磁場	0.5 T	
通電電流	125 A	

2.2 応力解析結果

表3に示した条件にて応力解析を行った結果を図4に示す。図4(a)にテープ面に対して垂直に磁場が印加された場合、(b)にテープ面に対して平行に磁場が印加された場合の結果を示す。この結果から、印加磁場方向に関わらずテープ線材と電極との接続部近傍に最も大きな引張応力がかかることがわかる。これらの最大引張応力は図4(a)では0.12 GPa、図4(b)では0.10 GPaであった。

この応力解析結果から、外部磁場0.5 T中で定格運転時に、テープ線材に最大0.12 GPaの引張応力が加わることが予想される。その値を基に電流リードに使用される線材に繰返し引張応力を印加（疲労試験）し健全性を確認している¹³⁾。

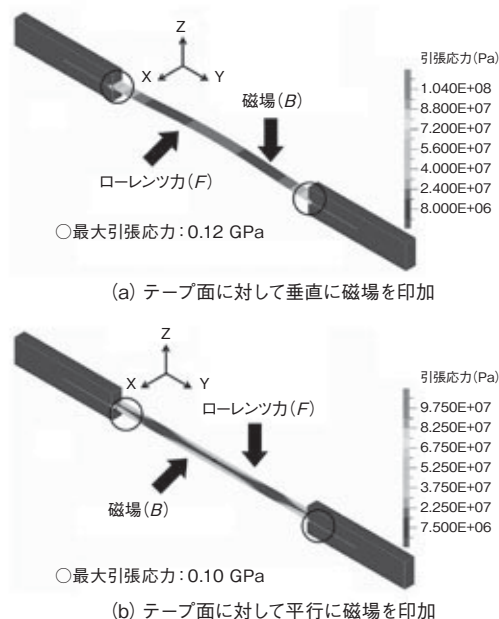


図4 nPAD-YBCO[®]電流リードの応力解析結果

3. 磁場中での通電特性

2章にて得られた応力解析結果を検証するため、外部磁場0.5 T中で通電試験を行った。本試験においては、伝導冷却により冷却を行った。nPAD-YBCO[®]電流リードの設計値は、電流リードに使用したnPAD-YBCO[®]の臨界電流の磁場、温度依存性 (I_c - B - T 特性) を基に算出した。

3.1 縮小モデル nPAD-YBCO[®]電流リード作製

超電導線材は、図5に示す構造の、TFA-MOD法で作製された、幅5 mm、厚さ約0.12 mmのnPAD-YBCO[®]とし、線材の両端を銅電極にはんだを用いて接続し、GFRP製支持部材で電極間を補強した。

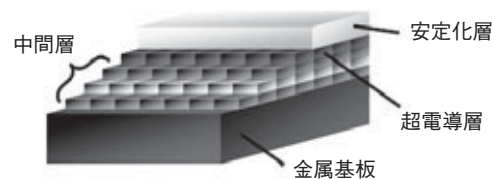


図5 nPAD-YBCO[®]の構造

3.2 測定方法

3-1項で作製したnPAD-YBCO[®]電流リードの I_c 値は、直流4端子法を用い、電圧基準 1×10^{-6} V/cmで定義した。電圧は銅電極両端で測定し、電圧端子間距離を62 mmとした。実験では、2段GM冷凍機を使用し伝導冷却を行った。測定時の温度制御は、温度制御ヒーターにより、高温端温度を80 K、77 K、70 K、65 Kとし、低温端温度を35 K以下とした。さらに、永久磁石により外部磁場0.5 TをnPAD-YBCO[®]のテープ面に対して垂直に印加させ通電試験を行った。

3.3 通電特性

図6にnPAD-YBCO[®] 電流リードの臨界電流の磁場、温度依存性 (I_c - B - T 特性)を示す。○は液体窒素中 (77 K)にて測定を行ったnPAD-YBCO[®] の I_c - B - T 特性から導いた設計値、■, ▲, ●, ◆は実測値を示した。77 Kにおいて設計値と実測値が一致しており、定格電流値に対して十分な特性を有していることを確認した。また、液体窒素中での接続抵抗値 (R_c) は $7 \times 10^{-6} \Omega$ であり、伝導冷却による高温端 77 K, 0.5 T 中においても $7 \times 10^{-6} \Omega$ と一致していることから、磁場中においても接続抵抗に変化がないことが確認された。これらの結果より、外部磁場 0.5 T 中通電時に発生するローレンツ力にも充分耐え得ることが確認された。

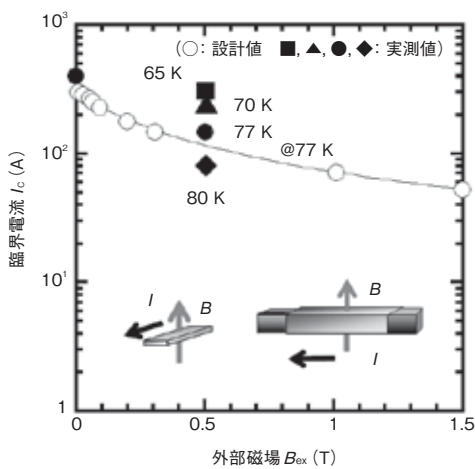


図6 nPAD-YBCO[®] 電流リードの I_c - B - T 特性

4. ヒートサイクルによる影響

実使用環境下では、定期的なメンテナンスに加え、超電導機器によっては、冷却-昇温が繰り返されることが想定されるため、ヒートサイクルによる影響を把握する必要がある。そこで、液体窒素中から室温への昇温、冷却を繰り返し経験させ、nPAD-YBCO[®] 電流リードの通電特性に対する影響を調査した。

4.1 測定方法

測定は、従来型と改良型の定格 500 A 仕様の nPAD-YBCO[®] 電流リードを用いた。液体窒素中での 500 A 通電及び銅端子との初期の接続抵抗 (R_{c0}) を確認した後、室温に昇温し、冷却-昇温 (77 K \leftrightarrow 300 K) を繰り返した。10 回ごとに通電試験を行い、定格通電の可否と接続抵抗値の変化を確認した。

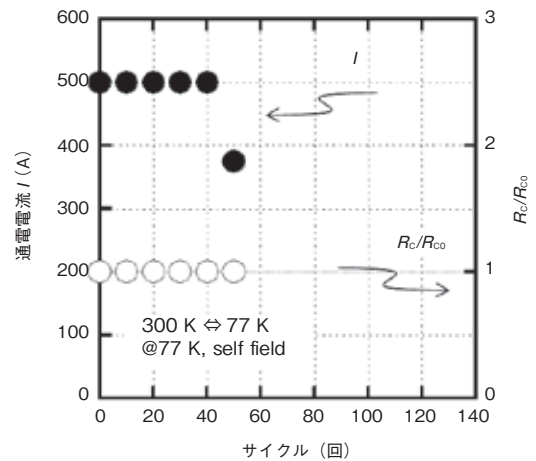
4.2 測定結果

ヒートサイクル経験後の通電結果と初期接続抵抗値で規格化した接続抵抗値を図7に示す。図7(a)に従来型で実施した試験結果、(b)に改良型で実施した試験結果をそれぞれ示す。

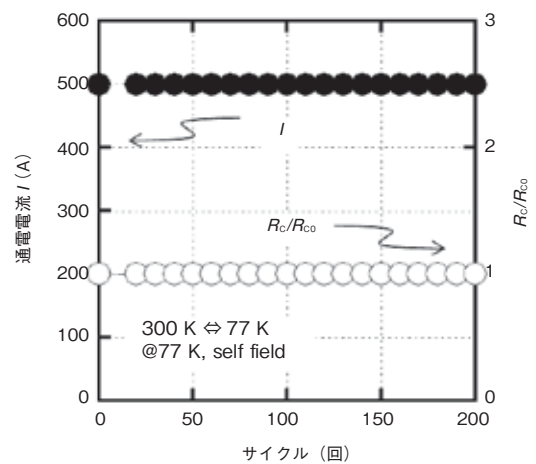
従来型は、ヒートサイクルを 40 回経験しても電圧・接

続抵抗の増大がないことが確認されているが、50 回冷却後から定格電流値到達前に電圧上昇がみられ、 I_c の低下が確認された。

そこで、ヒートサイクルに対する問題を改善した nPAD-YBCO[®] 電流リードを開発し、同様の試験を実施した。図7(b)に示すように、改良型はヒートサイクルを 200 回経験しても電圧・接続抵抗の増大がないことが確認された。今後、回数を重ねて行く予定である。



(a)従来型



(b)改良型

図7 nPAD-YBCO[®] 電流リードのヒートサイクル試験結果

5. まとめ

磁場中通電時に発生するローレンツ力が nPAD-YBCO[®] 電流リードに及ぼす影響を把握するため、今回は、伝導冷却により冷却を行い、外部磁場 0.5 T 中において通電試験を行い、設計検証を行った。77 K において、設計値と実測値がほぼ一致し、定格電流に対して十分な通電特性が得られた。

ヒートサイクル評価では、従来型は冷却-昇温 (77 K \leftrightarrow 300 K) を 40 回まで繰り返しても定格電流値及び接続抵抗値に変化がないことが確認されたが、50 回冷却後に定格電

流到達前に電圧の上昇が認められた。そこで、ヒートサイクルに対する問題を改善した nPAD-YBCO® 電流リード(改良型)を開発し、200回冷却-昇温(77 K ⇄ 300 K)を繰り返しても定格電流値・接続抵抗ともに変化が見られなかった。これらのことから、nPAD-YBCO® 電流リードは想定される設置環境下で、設計通りの通電性能と耐久性を有することが確認された。

参考文献

- 1) 本庄哲吏, 他: 昭和電線レビュー, 44 (1994) 108
- 2) T. Honjo, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. 5 (1995) 1486
- 3) A. Kaneko, et al.: Abstracts of CSSJ confenence, 74 (2006) 184
- 4) Y. Yamada, et al.: Cryo. Soc. Jpn. 45 (2010) 246
- 5) Y. Yamada, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. 3 (2011) 1054
- 6) 小泉勉, 他: 昭和電線レビュー, 58 (2008) 17
- 7) K. Takahashi, et al.: Abstracts of CSSJ confenence, 87 (2013) 133
- 8) K. Kumura, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. 21 (2013) 6601704
- 9) T. Yokomizo, et al.: Abstracts of CSSJ confenence, 88 (2013) 183
- 10) K. kimura, et al.: Abstracts of CSSJ confenence, 88 (2013) 184
- 11) 箕輪昌啓: 超電導 Web21, 6月号, 1 (2013)
- 12) 高橋亨, 他: 昭和電線レビュー, 60 (2014) 25
- 13) K. Takahashi, et al.: Abstracts of CSSJ confenence, 90 (2014) 157

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 線材開発グループ
RE系超電導電流リードの研究・開発に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)
中村 達徳 (なかむら たつのり)
博士 (工学)
超電導テクノロジーセンター 線材開発グループ
RE系超電導線材の研究・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 線材開発グループ
RE系超電導電流リードの研究・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)
技術開発センター 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

昭和電線ホールディングス(株)
長谷川 隆代 (はせがわ たかよ)
工学博士
取締役 技術企画室長
兼 昭和電線ケーブルシステム(株)
超電導テクノロジーセンター長

昭和電線ケーブルシステム(株)
木村 一成 (きむら かずなり)
博士 (工学)
超電導テクノロジーセンター 線材開発グループ
兼 産業用超電導線材・機器技術研究組合 (iSTERA)
公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター
超電導工学研究所 出向
RE系超電導線材の研究・開発に従事

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