

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 13 日現在

機関番号：13904

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760257

研究課題名(和文) 電磁設計に基づく高抵抗バリア入り低損失銀シース高温超電導線材の開発

研究課題名(英文) Design and Development of Ag-Sheathed Bi-Based High-Tc Superconducting Wires with Low AC Losses by Introducing Oxide Resistive Barriers

研究代表者

稲田 亮史 (INADA, Ryoji)

豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：30345954

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：銀シースビスマス系高温超電導線材の低交流損失化に向けて、高抵抗材料をバリア層として超電導芯間に導入した低損失線材(バリア線材)の開発を目的とした。特にSrZrO₃(SZO)をバリア材として選択し、超電導芯をツイスト(撚り線)した線材作製に注力し、液体窒素温度下での通電特性および線材幅広面に垂直な交流横磁界下での損失特性を評価した。SZOバリアの導入厚、線材寸法の包括的な制御により、20kAcm⁻²程度の高臨界電流密度と、芯間電磁結合が生じる目安となる結合周波数270Hzを同時に達成し、市販線材と同等な4mm幅線材と比較して商用周波数域での垂直磁界損失損失を1/4程度に低減することに成功した。

研究成果の概要(英文)：The aim of this study is development of Ag-sheathed Bi-based (Bi2223) high-Tc superconducting wires with low-AC loss by introducing interfilamentary oxide resistive barriers. In order to suppress the side effect on the phase formation and properties of Bi2223 superconductor, Ca₂CuO₃ (CCO) and SrZrO₃ (SZO) were selected as barrier materials. From the examination of transport properties and transverse matrix resistivity, SZO was found to be more effective to suppress the deterioration of critical current density (J_c) and also to suppress the interfilamentary electromagnetic coupling under an AC external field. Finally, J_c around 20 kAcm⁻² at 77 K and self-field and coupling frequency f_c of 270 Hz at 77 K and AC external field perpendicular to the broader face of tape could be achieved simultaneously. According to these achievements, perpendicular field losses around 50 Hz for barrier tape were 70-80% lower than those for conventional 4 mm-width tape with fully coupled filaments.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：銀シース 高温超電導線材 交流損失 高抵抗バリア 多芯構造

1. 研究開始当初の背景

臨界温度 110 K を有するビスマス系酸化物超電導体 ($\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$, Bi2223) を銀母材に埋め込んだ構造を有する銀シース高温超電導線材は、液体窒素温度 (77 K) において良好な超電導特性を有し、km 級で高い均質性を有する長尺線が市販されるに至っている。また、線材開発研究と並行して、銀シース線材を用いた送電ケーブル、モーター、変圧器等のプロトタイプ機器の試作・性能評価に関する国家プロジェクトが国内外にて精力的に進められている。しかしながら、各試作機器の交流損失は目標値の数倍以上と非常に大きく、実用に向けては、線材の電流輸送特性(臨界電流密度 J_c) の向上だけでなく、実際の機器内において線材が晒される運転電磁環境を踏まえて、線材自身の交流損失を少なくとも現状の 1/4~1/5 程度に低減するための技術開発が必要不可欠とされている。

2. 研究の目的

銀シース線材は、高い臨界電流密度を実現するために、横断面の扁平率が 10~20 程度のテープ形状を有している。このため、損失特性ならびにその低減化の難易度は、線材幅広面に対する交流外部磁界の方向に依存して大きく異なる。変圧器、モーター等を構成する巻線においては、線材幅広面に垂直な交流横磁界にさらされた環境での使用が想定されるが、平行横磁界下の場合と比較して、線材形状の異方性と反磁界効果により、同一磁界振幅における損失の絶対値は一桁以上増大する。平行横磁界下での損失は、シース材が抵抗率の低い純銀 ($0.27 \times 10^{-8} \Omega \text{ m}$) であっても、超電導芯を撚り線 (ツイスト) 構造とすることで、ある程度の損失低減効果を得ることが可能だが、垂直横磁界下では超電導芯のツイストのみでは商用周波数域での損失低減効果は殆ど得ることができず、母材部分の高抵抗化が必須となる。

本研究では、芯間に酸化物を高抵抗バリアとして導入した低損失線材 (バリア線材) を作製し、バリア導入に伴う線材の電流輸送特性 (臨界電流特性) の劣化抑制に向けた要素技術の確立と共に、特に垂直横磁界下での損失を、既存線材の 1/4~1/5 程度に低減するための方策を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 超電導特性の劣化抑制に向けた酸化物バリア材の選択 (平成 23~24 年度前半)

Ca_2CuO_3 (CCO) および SrZrO_3 (SZO) をバリア材として超電導芯間に導入した銀シース線材 (芯数: 19) をパウダー・イン・チューブ (PIT) 法により作製し、焼成時における結晶相同定ならびに臨界電流密度 (J_c) 測定を行い、超電導特性の劣化抑制に向けた酸化物バリア材の選択に関して検討した。更に、異なるバリア材を用いて、超電導芯を撚り線 (ツイスト) 構造としたときの J_c のツイ

スト長依存性を比較・検討した。

(2) バリア材による横断抵抗率向上効果の検証 (平成 24 年度後半)

(1) の結果を踏まえて、各バリア線材の交流垂直磁界下での損失の周波数依存性を測定し、芯間電磁結合が生じ損失増大が顕著となる目安となる結合周波数 f_c (損失に含まれる結合電流に起因して生じる結合損失 (1 周期あたり) が極大を示す周波数) を評価した。非バリア線材で別途評価した f_c との比較から、横断抵抗率の向上効果を考察した。

(3) 交流垂直横磁界下でのバリア線材の損失特性評価 (平成 25 年度)

(2) の結果を踏まえて、高 f_c が得られたバリア線材において、交流垂直磁界下での損失の磁界振幅依存性を複数の固定周波数で測定した。電磁気学的考察に基づいて、商用周波数域でのバリア線材の損失発生メカニズムを精査すると共に、市販線材と同一寸法 (線幅 4 mm) の非バリア・非ツイスト線材に対する損失低減効果を考察した。

4. 研究成果

(1) バリア線材の結晶相同定、臨界電流密度および断面構造の評価

図 1 に、CCO および SZO バリアを導入した線材の X 線回折 (XRD) 測定結果を示す。測定は、シース材である銀をエッチングにより除去した状態で行っている。前駆体に含まれる $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ (Bi2212) に加えて、エッチングで除去しきれなかった銀やバリア材に由来する回折ピークも検出されているが、主相は目的物である Bi2223 相であることが分かる。なお、Bi2212 相の残留は、SZO バリア線材よりも CCO バリア線材の方が若干多い傾向が見られた。

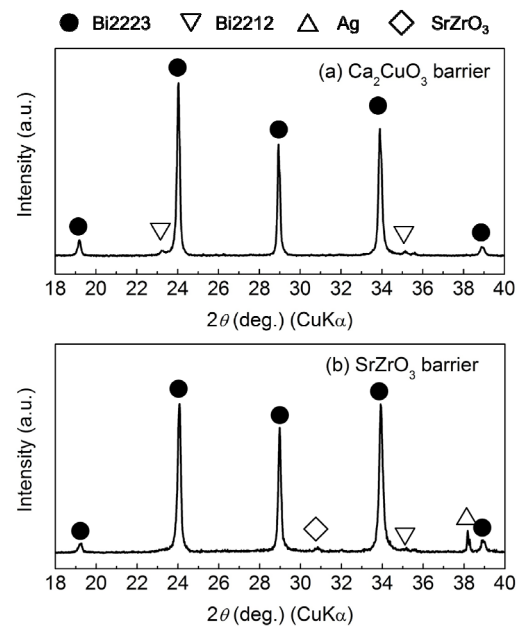


図 1 バリア線材の XRD 測定結果
(a) CCO バリア線材, (b) SZO バリア線材

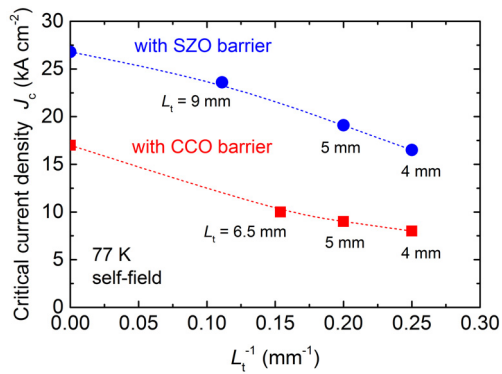


図2 バリア線材の臨界電流密度のツイスト長依存性の比較

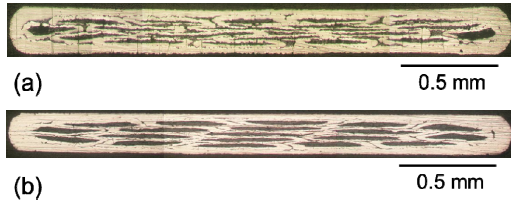


図3 バリア線材 ($L_t = 4$ mm) の横断面写真 (a)CCO バリア線材, (b)SZO バリア線材

図2に、CCO バリア線材および SZO バリア線材の臨界電流密度 J_c (77 K, 自己磁界下) のツイスト長 (L_t) 依存性の比較を示す。各線材の横断面寸法は、線幅が 2.6~2.7 mm 程度、厚さが 0.25~0.26 mm 程度である。ツイストを施していない試料と比較した場合、CCO バリア線材の J_c は 17 kA cm⁻² であったのに対し、SZO バリア線材では 27 kA cm⁻² の高い J_c を得ることができた。後者の J_c 値は、研究室で作製した非バリア線材とほぼ同等の特性である。CCO バリア線材における J_c 低下は、図1で示した通り、超電導芯内での Bi2212 相の残留が多いことが一因として挙げられる。また、いずれのバリア線材においても、 L_t の狭小化と共に J_c は単調に減少しているが、非ツイスト試料の J_c 値を基準としたときに L_t 狭小化に伴う J_c 低下の度合いは、CCO バリア線材の方が顕著であった。

L_t を 4~5 mm 程度まで狭小化したバリア線材の横断面写真を図3に示す。SZO バリア線材は、超電導芯の形状の乱れが少なく、バリア層が芯間に薄く介在した構造が得られているのに対し、CCO バリア線材は超電導芯の平坦性が悪く、バリアと超電導芯が物理的に接触している箇所が多数観測された。これに起因して、前述したような J_c の L_t 依存性の違いが現れたものと考えられる。

以上の結果を踏まえて、より高い通電特性が得られる SZO バリア線材において、交流電磁特性の測定・評価に注力することにした。

(2) バリア導入による横断抵抗率および結合周波数向上効果の検証

交流磁界中に置かれた銀シース線材の磁化損失は、超電導体自身の磁化に伴い発生するヒステリシス損失 (Q_h)、母材を介してフィラメント間を流れる結合電流による損失

(Q_c) およびシースにおいて発生する渦電流損失 (Q_e) の総和で表される。このうち、1 周期あたりに換算した結合損失 Q_c と磁界振幅 B_0 および運転周波数 f には、一般に、

$$Q_c \propto B_0^2 \frac{2\pi f \tau_c}{1 + (2\pi f \tau_c)^2} \quad (1)$$

で表される関係がある。ここで、 τ_c は結合電流の減衰時定数 (結合時定数) である。(1) 式より明らかなように、 Q_c は特定の磁界振幅下において

$$f_c = \frac{1}{2\pi \tau_c} \quad (2)$$

で表される結合周波数にて極大を示す。線材の横断面形状および印加磁界方向が等価な場合、 τ_c とツイスト長 L_t および横断抵抗率 ρ_t には

$$\tau_c = \frac{1}{2\pi f_c} \propto \frac{L_t^2}{\rho_t} \quad (3)$$

の関係があるため、 f_c の変化から ρ_t の大小関係を間接的に評価することができる。更に、運転周波数が f_c よりも高い条件において結合損失は減少するが、母材を介した超電導芯同士の電磁氣的結合に起因してヒステリシス損失が増大するため、多芯化の効果は実質的に失われる。このため、フィラメント間結合を分断し損失低減効果を得るための条件の一つとして、 f_c は運転周波数よりもできるだけ高いことが要求される。

図4に、垂直横磁界の振幅値 B_0 を 0.5 mT に固定し、77 K にて測定した SZO バリア線材 ($L_t = 4, 5$ および 9 mm) の損失の周波数依存性を示す。図において、各試料の損失値 Q_m は、測定周波数範囲における極大値 Q_{m-max} で割った値でプロットしており、 $Q_m = Q_{m-max}$ となる周波数が f_c に対応する。図から明らかなように、 f_c は L_t の減少と共に単調に増加し、最もきついツイストを施した $L_t = 4$ mm 試料において最も高い $f_c = 270$ Hz が得られた。我々の知る限り、本研究で得られた $f_c = 270$ Hz は、 $J_c > 15$ kA/cm² (77 K, 自己磁界下) を有する銀シース線材での報告値としては最も高い値である。

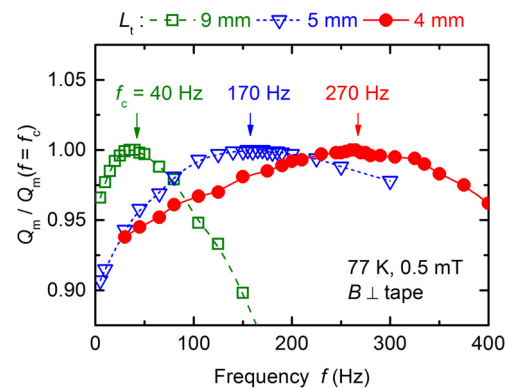


図4 SZO バリア線材の損失の周波数依存性

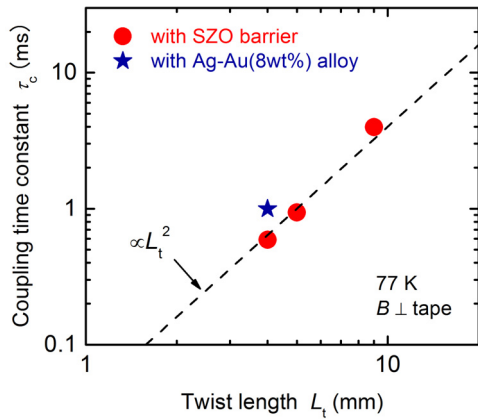


図5 SZOバリア線材の結合時定数のツイスト長依存性

得られた f_c を用いて、(2)式で算出したバリア線材の結合時定数 τ_c の L_t 依存性を図5に示す。図から明らかなように、 τ_c は L_t の2乗に概ね比例して増減しており、(3)式で示す関係より、横断抵抗率 ρ_t は L_t の異なる試料間で大きく変動していないことが示唆される。横断抵抗率は、超電導フィラメントと母材部分を結合電流が横断する際の等価的な抵抗率であり、バリアとして使用する材料だけでなく、バリア層の連続性に依存して増減すると考えられる。完成試料において4 mmのツイスト長を得るためには、圧延前の段階で2 mm以下のツイスト加工を施す必要があり、その際にSZOバリア層の連続性が変化し、 ρ_t が L_t に依存して変化する可能性が懸念されたが、本研究で作製したバリア線材においては、その影響はほとんどないことが確認できた。

なお予備検討として、SZOバリア線材とほぼ等価な断面形状(線幅2.5 mm、厚さ0.23 mm)を有する銀—金(8 wt.%)合金をシース材とする多芯ツイスト線材($L_t = 4$ mm)において同条件で f_c を測定した結果、160 Hz($\tau_c = 1$ msに相当)程度であった。同じ L_t を有するSZOバリア線材の f_c (= 270 Hz)の結果との比較より、バリア線材の ρ_t は銀—金合金シース線材の1.6倍程度と見積もられる。銀—金合金の77 Kにおける抵抗率(= 2.1×10^{-8} Ω m)は純銀の7~8倍程度であることを考慮すると、作製したバリア線材の ρ_t は、純銀シース線材と比較して少なくとも一桁以上高抵抗化されていると予測される。

(3) 交流垂直横磁界下でのバリア線材の交流損失特性の評価

最も高い f_c (= 270 Hz)が得られたSZOバリア線材($L_t = 4$ mm)について、45 Hzおよび125 Hzで測定した試料単位長さ・1周期当たりの垂直磁界損失 Q_m の磁界振幅依存性を図6に示す。比較のために、フィラメント占有領域を楕円近似し、フィラメント同士が完全に結合していると想定したときのヒステリシス損失の計算値(臨界状態モデル使用)を破線で示す。商用周波数より十分に高い f_c が得られたことを反映して、45 Hzにおける

Q_m は10 mT以上において結合時の計算値の1/2以下に低減されていることが確認できる。125 Hzにおける Q_m は、測定磁界範囲全域において45 Hzの場合よりも増加しているが、結合時の計算値よりは依然として低い。図7には、市販線材とほぼ同一の形状である線幅4.2 mmの非バリア・非ツイスト線材(芯数61、厚さ0.25 mm、 $J_c = 27$ kA cm $^{-2}$ (77 K、自己磁界下))とSZOバリア線材($L_t = 4$ mm、 $J_c = 17$ kA cm $^{-2}$)の65 Hzにおける垂直磁界損失 Q_m の比較を示す。形状および臨界電流が異なる試料間での損失を直接比較するために、各試料の1周期・単位長さ当たり損失値を臨界電流値 I_c (77 K、自己磁界下)で割った値でプロットしている。線幅を2.7 mmまで狭小化した効果が重畳することで、SZOバリア線材の損失は、フィラメント同士が電磁氣的に強く結合した4.2 mm幅線材と比較して、1/4程度と大きく低減されている。

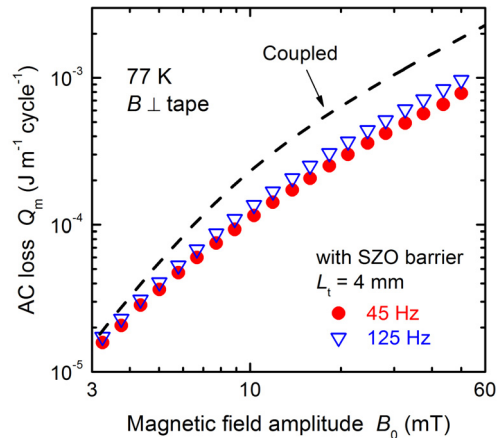


図6 SZOバリア線材($L_t = 4$ mm)の損失の垂直磁界振幅依存性

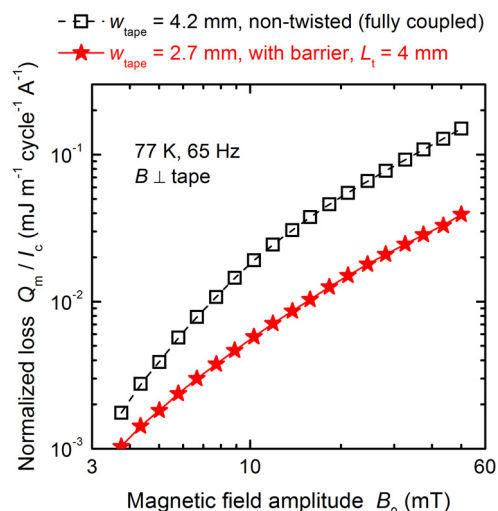


図7 非バリア線材(線幅4.2 mm、ツイストなし)とSZOバリア線材(線幅2.7 mm、 $L_t = 4$ mm)の損失の比較(周波数65 Hz)

SZOバリア線材の損失発生メカニズムを精査するために、同線材の無次元損失ファクタ q_m (= $\mu_0 Q_m / (2B_0 2S_{\text{tape}})$ 、 S_{tape} : 線材横断面積)の B_0 依存性を図8に示す。 q_m に換算した場

合、測定損失中に含まれるヒステリシス損失 Q_h は中心到達磁界近傍で極大を示すため、超電導芯間の電磁結合状態を評価する際に有効である。図から明らかなように、30~125 Hz における q_m はいずれも 3 mT 付近で極大を示し、破線で示す結合時の値 (8 mT) と比較して低磁界側にシフトしている。この結果より、SZO バリア導入と L_t の狭小化によりフィラメント間の電磁結合は十分に抑制され、超電導芯内で発生する Q_h (1 周期あたり) は 125 Hz 以下では同程度に低減されていると解釈できる。一方、 q_m (および Q_m) の絶対値は測定磁界範囲全域において周波数増加と共に単調に増加している。測定範囲内において、母材で発生する渦電流損失 Q_e の寄与は十分に小さいことを確認しており、図 6 および図 8 で観測された損失の周波数依存性は結合損失 Q_c の寄与によるものと考えられる。

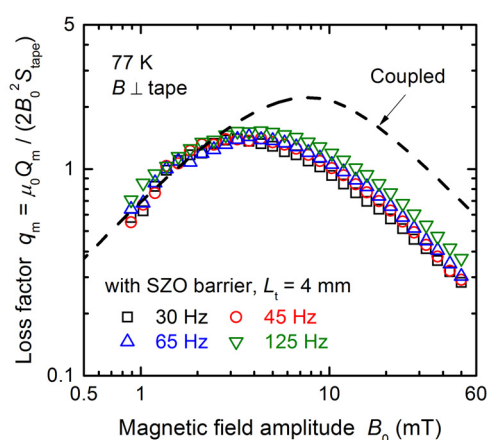


図 8 SZO バリア線材の損失ファクタの垂直磁界振幅依存性

SZO バリア線材の f_c ($= 270$ Hz) を(1)式に代入した場合、運転周波数が 45 Hz から 125 Hz に増加した際に、 Q_c は 2.5 倍程度増加すると見積もられるが、図 6 に示す 50 mT における Q_m の増加は、1.3 倍程度にとどまっている。この結果から、本バリア線材における 50 Hz, 50 mT での Q_c の大きさは Q_h の 1/5~1/6 程度と予測され、商用周波数域での損失の主要発生要因は、電磁結合が分断された超電導芯内で発生する Q_h であることが示唆される。

今後の研究の進展により、線材幅・厚さを維持したまま芯数の増加により個々の超電導芯の幅を 3 割程度狭小化した上で、本線材と同等以上の J_c と f_c が達成できれば、超電導芯同士が強く電磁結合した 4.2 mm 幅線材と比較して、1/5 以下とより顕著な損失低減効果が期待できる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

- ① 稲田亮史, 奥村康裕, 大津良介, 太田昭男, 酸化物バリアを導入した銀シース Bi2223 線材の作製と評価 — 交流垂直横磁界下における低交流損失化 —, 低温工学, 査読有, 49 巻 2 号, 2014, pp.62-68 DOI: 10.2221/jcsj.49.62
- ② R. Inada, Y. Okumura, R. Ohtsu, A. Oota, C.S. Li, P.X. Zhang, Development of low AC loss Bi2223 tapes with interfilamentary oxide barriers, Proceedings of ICEC 24-ICMC 2012, 査読有, 2013, pp.857-860
- ③ T. Makihara, R. Inada, A. Oota, S. Sakamoto, C.S. Li, P.X. Zhang, Evaluation of self-field distributions for Bi2223 tapes with oxide barriers carrying DC transport current, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 査読有, 21, 2011, pp.2820-2823 DOI: 10.1109/TASC.2010.2091241
- ④ R. Inada, S. Baba, R. Ohtsu, T. Makihara, S. Sakamoto, A. Oota, Longitudinal uniformity of commercial Bi2223 tapes characterized by scanning Hall-probe microscopy, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 査読有, 21, 2011, pp.2816-2819 DOI: 10.1109/TASC.2010.2091615
- ⑤ R. Inada, Y. Okumura, A. Oota, C.S. Li, P.X. Zhang, Progress in reducing AC losses of Bi2223 tapes with interfilamentary resistive barriers, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 査読有, 21, 2011, pp.2779-2782 DOI: 10.1109/TASC.2010.2078433
- ⑥ R. Inada, Y. Okumura, A. Oota, C.S. Li, P.X. Zhang, Study for AC loss reduction in Bi2223 tapes by introducing oxide barriers, Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 査読有, 24, 2011, pp.1027-1032 DOI: 10.1007/s10948-010-0875-9

[学会発表] (計 8 件)

- ① K. Yoshitomi, E.S. Otabe, V.S. Vyatkin, M. Kiuchi, T. Matsushita, M. Hamabe, S. Yamaguchi, R. Inada, AC loss of ripple current in superconducting DC power transmission cable, 26th International Symposium on Superconductivity (ISS 2013), 2013 年 11 月 18 日~20 日, 東京
- ② 吉富邦和, 小田部荘司, Vyatkin Vladimir, 木内勝, 松下照男, 浜辺誠, 山口作太郎, 稲田亮史, 超電導直流送電ケーブルにおけるリップル電流による交流損失, 第 87 回 2013 年度春季低温工学・超電導学会, 2013 年 5 月 13 日~15 日, 東京
- ③ R. Inada, Y. Okumura, R. Ohtsu, A. Oota, C.S. Li, P.X. Zhang, Development of low AC loss Bi2223 tapes with interfilamentary oxide barriers, International Cryogenic Engineering Conference 24 - International Cryogenic Materials Conference 2012

(ICEC 24-ICMC 2012), 2012年5月14日～18日, 福岡

- ④ R. Inada, T. Makihara, Y. Okumura, A. Oota, C.S. Li, P.X. Zhang, Influence of twist pitch lengths on transport properties and AC losses in Bi2223 tapes with resistive barriers, 24th International Symposium on Superconductivity (ISS 2011), 2011年10月24日～26日, 東京
- ⑤ 酒井宏彰, 稲田亮史, 太田昭男, 李成山, 張平祥, 銀シース Bi2223 高温超電導線材の臨界電流通電時の自己磁界分布の評価, 平成 23 年度電気関係学会東海支部連合大会, 2011年9月26日～27日, 三重
- ⑥ 奥村康裕, 稲田亮史, 太田昭男, 李成山, 張平祥, SrZrO₃バリア導入 Bi2223 高温超電導ツイスト線材の垂直磁界下での交流損失特性, 平成 23 年度電気関係学会東海支部連合大会, 2011年9月26日～27日, 三重
- ⑦ 大津良介, 稲田亮史, 太田昭男, 李成山, 張平祥, Ca₂CuO₃バリア導入 Bi2223 高温超電導線材の断面構造が結合周波数におよぼす影響, 平成 23 年度電気関係学会東海支部連合大会, 2011年9月26日～27日, 三重
- ⑧ A. Oota, R. Inada, C.S. Li, P.X. Zhang, Developments of low-loss Bi2223/Ag superconducting tapes by introducing interfilamentary oxide barriers 5th International Conference on Advanced Computational Engineering and Experimenting (ACE-X 2011), 2011年7月3日～6日, Algarve, Portugal

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.tut.ac.jp/teach/main.php?mode=detail&article=141>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

稲田 亮史 (INADA, Ryoji)

豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・
准教授

研究者番号：30345954

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし