

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 3 月 31 日現在

機関番号：13904  
 研究種目：基盤研究(C)  
 研究期間：2010～2012  
 課題番号：22560270  
 研究課題名（和文） 電磁設計に基づく低損失銀シース高温超電導線材の開発：パワーケーブル応用に向けて  
 研究課題名（英文） Developments of low-loss Ag-sheathed high-temperature superconducting tapes and wires using the electromagnetic design: For applications to power transmission cables  
 研究代表者  
 太田 昭男 (OOTA AKIO)  
 豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・教授  
 研究者番号：10124728

## 研究成果の概要（和文）

銀シース高温超電導線材を素線とする超電導ケーブルの開発が国内外で精力的に進められている。しかし現状では、試作ケーブルの定格運転時における交流損失は目標値と比較して非常に大きい。超電導ケーブルの実用化には、超電導素線内で発生する交流損失を大幅に低減することが急務であるが、具体的方策は全く確立していない。本報告では、酸化バリヤを導入した低損失銀シース高温超電導線材の開発に関する研究（3年間）の総括を行う。

## 研究成果の概要（英文）

Ag-sheathed high-temperature superconducting tapes used as strands of superconducting power cables are exposed to magnetic fields and transport currents under AC operation, so that both of magnetization losses and transport losses generate therein simultaneously. The former contribution to total AC losses becomes predominate with increasing magnetic field, and it should be reduced by suppression of electromagnetic coupling among superconducting filaments in the tapes. We report here the developments of Ag-sheathed superconducting tapes with low magnetization losses by introduction of inter-filamentary oxide barriers.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、電力工学・電気機器工学

キーワード：銀シース高温超電導線材、交流損失、電磁設計、ツイスト構造、高抵抗バリヤ、臨界電流密度、結合周波数、超電導ケーブル

## 1. 研究開始当初の背景

銀シース高温超電導線材を素線とする超電導ケーブルの開発が国内外で精力的に進

められている。しかし現状では、試作ケーブルの定格運転時における交流損失は目標値の3倍以上と非常に大きい。超電導ケーブル

の実用化には、超電導線材内で発生する交流損失を大幅に低減することが急務であるが、具体的方策は全く確立していない。

## 2. 研究の目的

本研究では、事前の電磁設計に基づいて、線材の断面構造制御と超電導芯間への高抵抗バリア層導入との複合化によりバリア入り低損失銀シース線材を開発する。作製した線材に対して、超電導ケーブルの動作電磁条件（電流振幅・磁界振幅及び方向・周波数）を考慮した交流損失特性の評価を行い、得られた知見を線材の設計・作製工程にフィードバックし、バリア導入を施さない従来線材と比較して大幅な交流損失の低減を実現する。

## 3. 研究の方法

超電導ケーブル応用を念頭に置き、銀シース加工法により、高抵抗バリア材の導入と線材断面構造の制御を組み合わせることで低損失銀シース線材を開発する。まず、高抵抗バリア材の探索とバリア層導入方法に関する基礎的検討を行い、バリア入り線材における通電特性の劣化を抑制するための技術開発に注力する。次に、事前の電磁設計に基づいて、高抵抗バリア層の導入方法を決定し、全交流損失の低減に有効な線材断面構造（特にバリア厚、線幅およびツイストピッチ等）の制御方法を調査検討し、これを踏まえてバリア入り低損失線材を開発し線材の製作に係る技術指針を構築する。更に、超電導ケーブル内の運転電磁条件を考慮して、バリア入り低損失線材の交流損失特性の系統的な評価を行い、損失発生メカニズムを解明する。加えて、低損失超電導ケーブルの実現に不可欠な低損失銀シース線材の製作に係る技術的指針の検討を行う。

## 4. 研究成果

(1) 銀シース超電導線材の交流磁界下における損失（磁化損失）低減のためには、超電導フィラメントをツイストして母材抵抗を向上させ、線材の結合周波数 $f_c$ を超電導ケーブルの運転周波数（商用周波数50Hz又は60 Hz）よりも十分高くする必要がある。そこで、 $f_c$ と商用周波数域での損失低減効果の関連を明らかにするため、純銀と比較して一桁程度高い抵抗率を有する銀一金（16wt%）合金を母材とする非ツイスト多芯線材を試作し、試料長を変化させながら線材幅広面に垂直な横磁界下での磁化損失特性の77Kにて測定・評価した。その結果、 $f_c > 100\text{Hz}$ に向上させることで、50Hz近傍における損失低減効果が得られ始め、 $f_c$ の向上とともにフィラメント間の電磁結合が完全に遮断されたレベルまで損失が低減されることを確認した。

(2) しかし銀一金合金は非常に高価なため、母材は純銀とし、超電導芯間に酸化物等の高抵抗層をバリア材として導入した線材（バリア線材）を開発する必要がある。超電導体との焼成時反応が少なく、芯間抵抗向上に有効な $\text{SrZrO}_3$ をバリア材とする線材を作製し、ツイスト長 $L_t$ を変化させたときの通電特性（臨界電流密度 $J_c$ ）と $f_c$ （垂直磁界下）を77Kにて評価した。 $L_t < 10\text{mm}$ において、 $f_c$ は100Hz以上（ $L_t = 5\text{mm}$ にて約400Hz）に増加し、横断抵抗は $L_t$ によらず純銀シース線材の15~20倍程度に向上していることが確認された。しかし、 $L_t < 10\text{mm}$ とした際に $J_c$ は4~8kA/cm<sup>2</sup>と大きく低下した。その一方、 $L_t$ の狭小化に伴い、外層シース材の破損や線材内の超電導芯の湾曲・断線が発生していることが確認された。

(3) バリア入り銀シース高温超電導線材における湾曲・断線の抑制に向けての線材構造・加工成型パラメータ等の検討を行うとともに、線材全長にわたる均質性の評価、及び通電特性（臨界電流密度 $J_c$ ）の向上に関する研究を行った。 $\text{SrZrO}_3$ は延性に乏しく、バリア材として使用した際の線材加工性の低下による超電導芯の変形不良や断線、シース材の破損が課題であることを確認しており、その克服に向けて、超電導フィラメント間に導入する $\text{SrZrO}_3$ バリア層の厚さ、線材の加工成型パラメータ、超電導相形成のための焼結条件（なかんずく温度と時間）の最適化に注力した。その結果、低交流損失化の際に必要なとなるツイスト（撚り線）構造を導入していない線材（非ツイスト線材）において $J_c = 25\text{--}26\text{kA/cm}^2$ （77K、自己磁界下）を得ることができた。この $J_c$ 値は、同一条件で作製したバリアを導入していない通常非ツイスト線材とほぼ同じレベルである。

(4) ツイスト構造と複合化した際の $J_c$ 劣化を抑制するために、線材幅を一般的な4 mmから2.7 mmにスリム化することを試みた。4 mm幅線材では超電導フィラメントの断線やシース材破損等により完成線材でのツイスト長を8 mm以下に低減することが不可能であったが、2.7 mm幅線材では、ツイスト長を4~7 mm程度まで狭小化した場合でも $J_c = 12\text{--}14\text{kA/cm}^2$ （77K、自己磁界下）を得ることができた。作製した $\text{SrZrO}_3$ バリア線材の結合周波数 $f_c$ を線材面に垂直な横磁界下において評価した結果、 $f_c > 250\text{ Hz}$ となることを見出した。バリアを導入しない銀シース線材の横磁界下での $f_c$ が数Hz以下と非常に低いことを考慮する

と、この成果は、バリア導入により $f_c$ が1~2桁も向上することを意味するとともに、バリア入り銀シース線材において高 $J_c$ 化と高 $f_c$ 化が両立できることを示している。

(5) パワーケーブルの運転電磁条件を考慮して、垂直磁界下で $f_c > 250$  Hzを有するバリア入り線材の交流損失特性を系統的に評価した。その結果、バリア入り線材の垂直磁界下での交流損失は、同一寸法でフィラメント同士が完全に電磁結合した超電導線材と比べて、商用周波数域で60-70%程度に低減することを示した。加えて、電磁気学的考察に基づいて、フィラメント間結合特性および商用周波数域での損失低減の阻害因子を調査検討した。また評価結果を踏まえて、低損失超電導ケーブルの実現に不可欠な低損失銀シース線材の製作に係る技術的指針の検討を行った。

#### 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9件)

- ① 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巻、2011、1027-1032  
DOI: 10.1007/s10948-010-0875-9
- ② 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巻、2011、2779-2782  
DOI: 10.1109/TASC.2010.2078433
- ③ 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巻、2011、2816-2819  
DOI: 10.1109/TASC.2010.2091615
- ④ 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巻、2011

、2820-2823

DOI: 10.1109/TASC.2010.2091241

- ⑤ S. Baba, R. Inada, T. Makihara, Y. Nakamura, A. Oota, S. Sakamoto, C. S. Li, P. X. Zhang, Evaluation of remanent field distributions on Bi2223 tapes with oxide barriers by using scanning Hall-probe microscopy, Journal of Physics Conference Series, 査読有、234巻、2010年、022004  
DOI: 10.1088/1742-6596/234/2/022004
  - ⑥ R. Inada, A. Oota, C. S. Li, P. X. Zhang, Progress in reducing AC magnetization loss of Bi2223/Ag tapes by introducing interfilamentary oxide barriers, Progress in Natural Science: Materials International, 査読有、20巻、2010、104-110  
www.elsevier.com/locate/pnsc
  - ⑦ R. Inada, T. Makihara, Y. Araki, S. Baba, Y. Nakamura, A. Oota, S. Sakamoto, C. S. Li, P. X. Zhang, Non-destructive evaluation of longitudinal uniformity for twisted Bi2223 tapes using scanning Hall-probe microscopy, Physica C, 査読有、470巻、2010、1392-1396  
DOI: 10.1016/j.physc.2010.05.121
  - ⑧ Y. Nakamura, Y. Fujiwara, A. Nagaoka, T. Machida, R. Inada, A. Oota, Effect of filament twist and high resistive barriers on the properties of Ag-sheathed Bi2223 tape, Physica C, 査読有、470巻、2010、1369-1372  
DOI: 10.1016/j.physc.2010.05.115
  - ⑨ R. Inada, A. Oota, C. S. Li, P. X. Zhang, Development of low-loss (Bi, Pb)-2223 tapes with interfilamentary resistive barriers, Advances in Science and Technology, 査読有、75巻、2010、181-186  
DOI: 10.4028/www.scientific.net./AST75.181
- [学会発表] (計20件)
- ① A. Oota, R. Inada, C. S. Li, P. X. Zhang, Progress in reducing AC magnetization losses of Bi2223/Ag tapes with interfilamentary oxide barriers, 6<sup>th</sup> international conference on advanced computational engineering and experimenting (ACEX2012)、2012年7月4日、イスタンブール、トルコ

- 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, 24<sup>th</sup> International cryogenic engineering conference and international cryogenic materials conference (ICEC24-ICMC2012)、2012年5月17日、福岡
- ③ A. Oota, R. Inada, C. S. Li, P. X. Zhang, Developments of low-loss Bi2223/Ag superconducting tapes by introducing interfilamentary oxide barriers, 5<sup>th</sup> international conference on advanced computational engineering and experimenting (ACEX2011)、2011年7月6日、アルガルベ、ポルトガル
- 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 (ポスター)、24th International Symposium on Superconductivity (ISS 2011)、2011年10月25日、東京
- ⑤ 奥村康裕, 稲田亮史, 太田昭男, 李成山, 張平祥, SrZrO<sub>3</sub>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、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、三重大学
- ⑥ 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、三重大学
- ⑦ 大津良介, 稲田亮史, 太田昭男, 李成山, 張平祥, Ca<sub>2</sub>CuO<sub>3</sub>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、三重大学
- ⑧ 酒井宏彰, 渋川憲太, 稲田亮史, 太田昭男, 圧延条件の異なるBi2223超電導線材の自己磁界分布の評価、平成23年度電気学会全国大会、2011年3月18日、大阪大学 (東日本大震災のため学会中止、CD版のみ配布)
- ⑨ 稲田亮史, 大津良介, 合田武史, 太田昭男, 両面曲げを施したDI-BSCCO線材の残留磁界分布の評価、平成23年度電気学会全国大会、2011年3月18日、大阪大学 (東日本大震災のため学会中止、CD版のみ配布)
- ⑩ 奥村康裕, 稲田亮史, 太田昭男, 李成山, 張平祥, SrZrO<sub>3</sub>バリア導入Bi2223ツイスト線材の垂直磁界下での交流損失特性、平成23年度電気学会全国大会、2011年3月18日、大阪大学 (東日本大震災のため学会中止、CD版のみ配布)
- ⑪ 稲田亮史, 奥村康裕, 太田昭男, 李成山, 張平祥, Bi2223バリア線材の交流垂直磁界下でのフィラメント間結合特性の評価、第83回2010年度秋季低温工学・超電導学会、2010年12月1日、鹿児島
- ⑫ 牧原知秀, 稲田亮史, 太田昭男, 李成山, 張平祥, メートル級Bi2223バリア線材の作製と均質性評価、第83回2010年度秋季低温工学・超電導学会、2010年12月1日、鹿児島
- ⑬ R. Inada, A. Oota, C. S. Li, P. X. Zhang, A progress in reducing AC magnetization loss of Bi2223/Ag tapes by introducing interfilamentary oxide barriers (招待講演)、11<sup>th</sup> IUMRS International Conference in Asia (IUMRS-ICA 2010)、2010年9月28日、青島、中国
- ⑭ 稲田亮史, 馬場翔平, 太田昭男, 坂元周作, 走査ホール素子磁気顕微鏡による市販Bi2223線材の残留磁界分布の評価、平成22年度電気関係学会東海支部連合大会、2010年8月31日、中部大学
- ⑮ 奥村康裕, 稲田亮史, 太田昭男, 李成山, 張平祥, フィラメント間にSrZrO<sub>3</sub>バリアを導入したBi2223多芯ツイスト線材の作製と評価、平成22年度電気関係学会東海支部連合大会、2010年8月31日、中部大学
- ⑯ T. Makihara, R. Inada, S. Sakamoto, A. Oota, C. S. Li, P. X. Zhang, Evaluation of self-field distributions for Bi2223 tapes with oxide barriers carrying DC transport current, Applied Superconductivity Conference (ASC 2010)、2010年8月4日、ワシントンDC、米国
- ⑰ R. Inada, S. Baba, T. Makihara, R. Ohtsu, S. Sakamoto, A. Oota, Excellent longitudinal uniformity of commercial Bi2223 tapes characterized by scanning Hall-probe microscopy, Applied Superconductivity Conference (ASC 2010)、2010年8月4日、ワシントンDC、米国
- ⑱ R. Inada, Y. Okumura, T. Makihara, A. Oota, C. S. Li, P. X. Zhang, Progress in reducing AC losses of Bi2223 tapes with interfilamentary resistive barriers, Applied Superconductivity Conference (ASC 2010)、2010年8月4日、ワ

シントン、米国

- ⑱ R. Inada, Y. Nakamura, A. Oota, C.S. Li, P.X. Zhang, Development of low-loss (Bi,Pb)-2223tapes with interfilamentary resistive barriers, International Conferences on Modern Materials & Technology (CIMTEC 2010)-5th Forum on New Materials, 2010年6月16日、モンテカチーニ・テルメ、イタリア
- ⑳ 稲田亮史、奥村康裕、牧原知秀、太田昭男、李成山、張平祥、バリア入りBi2223線材における垂直磁界下での交流損失低減化、第82回2010年度春季低温工学・超電導学会、2010年5月12日、川崎市、神奈川県

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

太田 昭男 (OOTA AKIO)  
豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：10124728

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：