

平成 21 年 5 月 26 日現在

研究種目：基盤研究 (c)  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19560305  
 研究課題名 (和文) 超電導ケーブルの実用化に資する多芯金属バリア超電導テープの作製と評価  
 研究課題名 (英文) Fabrication and characterization of multifilamentary Bi-2223 tapes with inter-filament Ni barrier for the practical application to HTS cable.  
 研究代表者  
 野地 英樹 (NOJI HIDEKI)  
 都城高専・電気情報工学科・准教授  
 研究者番号：30280340

研究成果の概要：7 芯 Ni バリア超電導テープを作製したが、既存の機器では Ni バリアを十分薄くすることができず、臨界電流値はゼロであった。一方、作製方法の改善で 7 芯バリア無し超電導テープの臨界電流値は 6.4 A まで向上した。超電導テープの通電損失を評価するため、LabVIEW により自動計測システムを構築した。住友電工および古河電工が作製した超電導ケーブルを対象として交流損失を計算し、測定値と一致する結果を得た。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2008 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：超電導線材、Bi-2223 超電導体、超電導ケーブル

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 電力系統は架空線と地中ケーブルで構成されており、現用 CV ケーブルに用いられる銅は 1 mm<sup>2</sup> 当り約 1 A の電流が流せる。それに対して、数年前から日米欧では約 50～100 A 流せる超電導テープが商用化され、地中送電のコンパクト化によるコストダウンを目的に超電導ケーブルが研究開発されている。超電導ケーブルは電気抵抗による交流損失が極小化できるため、運転コストを低減し多量の CO<sub>2</sub> 削減効果が期待できる。

日本では、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) が 2004 年に「交流超電導電力機器基盤技術研究開発 (Super-ACE)」プロジェクトにおいて、世界最長である 500 m 長の超電導ケーブル実証試験に成功している。2005 年には試験結果が公開され、500 m 超電導ケーブルの交流損失測定結果が明らかにされている。

(2) 超電導ケーブルの交流損失は運転コストの低減と CO<sub>2</sub> 削減効果に直接かかわるため、その解析は非常に重要となる。そのため、い

くつかの交流損失計算法が提案されている。しかし、実際に製造された超電導ケーブルの構成パラメータを取り込んで計算し、測定結果と一致することを証明しているのは本研究代表者の交流損失計算法のみである。

本研究代表者は、1997年に超電導ケーブルの交流損失算出の基礎となる電気回路モデルを発表して以来、交流損失解析法の研究を行ってきた。同時に、多芯超電導テープの開発とその評価を行ってきた。その結果、2003年には、東京電力㈱と住友電気工業㈱が共同で開発した100 m長の超電導ケーブルの交流損失解析に成功している。2005年には古河電気工業㈱が開発した5 m長の超電導モデルケーブルの交流損失解析に成功している。さらに2006年、Super-ACEプロジェクトにおける500 m超電導ケーブルの交流損失解析に成功している。その結果、全交流損失の75%が通電損失、20%が磁化損失であることを明らかにした。

(3) Super-ACEプロジェクトでは、500 m超電導ケーブルの試験結果を基に、次に5 km長の超電導ケーブルの試験計画を立案している。5 km超電導ケーブルでは、磁化損失を低減する目的で多芯バリア超電導テープが使用される。現在主流になっているバリア材料には炭酸ストロンチウム ( $\text{SrCO}_3$ ) などのセラミックスが使用されているが、加工良好性によるフィラメントの極細線化から考えると、バリア材料にはニッケル (Ni) 等の金属を酸化したものが望ましい。しかし、高い電流値をもつ多芯金属バリア超電導テープの成功には至っていないのが現状である。5 km超電導ケーブルの開発を成功させるためには、①多芯金属バリア超電導テープの開発、②超電導ケーブルの交流損失の解析、の2つの側面から研究・開発を進めることが必須となる。

## 2. 研究の目的

(1) Super-ACEプロジェクトにおける多芯バリア超電導テープの磁化損失の測定および解析結果を見ると、 $\text{SrCO}_3$ バリアが有効に作用しているとはいえない。一方、金属バリアなどの加工良好性の高いバリア材料を使用した多芯バリア超電導テープでは、実用化できるような高い電流値が得られていないのが現状である。長尺化・極細多芯化に有効であり、交流損失を極小化できる多芯金属バリア超電導テープの作製方法を最適化することを目的とする。

(2) 超電導テープの通電損失を自動計測するシステムを構築して通電損失を評価することにより、金属バリアが与える影響を調査する。バリア無しの超電導テープの測定結果と比較することにより、測定結果を超電導テープの作製方法にフィードバックし、作製方

法を最適化することを目的とする。

(3) Super-ACEプロジェクトで立案されている5 km超電導ケーブルの構造に電気回路モデルを適用し、各構成パラメータを入れ込んで超電導ケーブルの交流損失を算出する。その結果から、多芯金属バリア超電導テープに必要な特性を検討する。この計算法は、実際に作製された超電導ケーブルの交流損失を算出することに唯一成功しているものであり、本研究代表者が独自に開発したものである。超電導ケーブルの交流損失算出とともに各電気特性も算出することで、超電導ケーブルへの応用の観点から多芯金属バリア超電導テープに必要な特性を明らかにすることを目的とする。

## 3. 研究の方法

(1) 多芯金属バリア超電導テープの作製は、基本的にパウダー・イン・チューブ法に従う。外径5 mmの銀 (Ag) パイプにBi-2223超電導 ( $(\text{Bi, Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ ) 粉末を充填する。これを外径5.5 mmのニッケル (Ni) パイプに挿入し、さらに外径6 mmの銀パイプに挿入する。この複合体を角溝圧延機で外径3 mmまで伸線する。スウェーピングマシンと線引き機を使って先付け・線引きの作業を繰り返し、平角1.5 mmの6角単芯線を作製する (図1)。工程中には、適宜焼きなまし ( $300^\circ\text{C} \times 0.5 \text{ h}$ ) を入れる。

外径6 mmの銀パイプに単芯線を7本詰める (図2)。この多芯線を角溝圧延機、スウェ

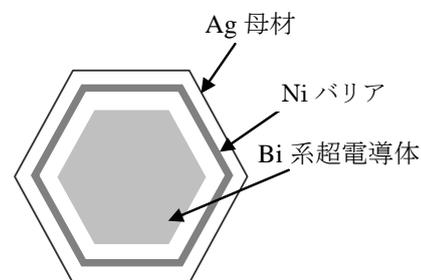


図1 単芯線の断面

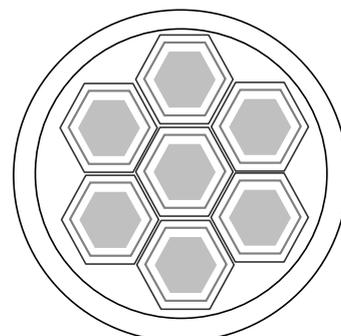


図2 加工前の多芯線断面図

ージングマシン、線引き機を使って外径 2.5 mm に伸線する。さらに、圧延機でテープ形状にし、最終的に厚さ 0.25 mm、幅 4.0 mm のテープを作製する。工程中と最後に 2 回の焼結（焼結温度  $x_1$  [°C] × 焼結時間 100 h（基本として  $x_1 = 840$  °C））を行い、多芯金属バリア超電導テープとする。

外径 5 mm の銀パイプに Bi-2223 超電導粉末を充填した後、これを外径  $x_2$  [mm]（基本として  $x_2 = 5.5$  mm）の Ni パイプに挿入することでバリア厚さをパラメータとする。それを外径 6 mm の銀パイプに挿入して単芯線を作製する。決定された最適温度で焼結を行って多芯金属バリア超電導テープを作製する。

(2) 多芯金属バリア超電導テープの評価を行う。作製した多芯バリア超電導テープの断面を光学顕微鏡および走査型電子顕微鏡 (SEM) で観察し、テープ断面を評価する。また、直流通電特性自動計測システムにより、液体窒素中における臨界電流値を測定する。これらの結果より、超電導テープの作製パラメータである焼結温度  $x_1$  [°C] と Ni パイプの外径  $x_2$  [mm] のそれぞれの最適値の決定に反映させる。

(3) 通電損失自動計測システムの構築を行う。スパイラル電圧リードループによる交流四端子法により、多芯金属バリア超電導テープの交流通電電流による通電損失を測定する装置を組み上げる。各装置を GP-IB 接続し、計測ソフト LabVIEW により自動計測を行う。通電損失自動計測システムにより、液体窒素中における通電損失を評価することで、Ni パイプの外径  $x_2$  [mm] の最適値の決定に反映させる。

(4) 5 km 超電導ケーブルの交流損失の算出を行う。Super-ACE プロジェクトで計画された 5 km 超電導ケーブルについて電気回路モデルを適用し、構成パラメータを入れ込むことにより 5 km 超電導ケーブルの交流損失を算出する。この結果から、多芯金属バリア超電導テープに必要なとされる特性 (1 mm<sup>2</sup> 当りに必要な電流値、目標とされる通電損失・磁化損失の値、バリアの抵抗値など) を検討する。

#### 4. 研究成果

(1) 多芯超電導テープの作製と評価について 2007 年度に得られた成果を記す。16 芯 Ni バリア超電導テープの作製を行ったところ、①超電導テープ内部の Ni バリア層に破断が生じる、②フィラメントの超電導層が無い部分が生じる、③超電導層に対して Ni バリア層が厚い、という問題が生じた (図 3)。臨界電流密度を評価した結果、値はゼロであった。また、臨界温度を評価した結果、超電導状態を示す反磁性の値が非常に弱いことが分かった。これは、Ni バリア層が厚すぎて、テープを焼結する際に Bi-2223 超電導前駆体が外部の酸素

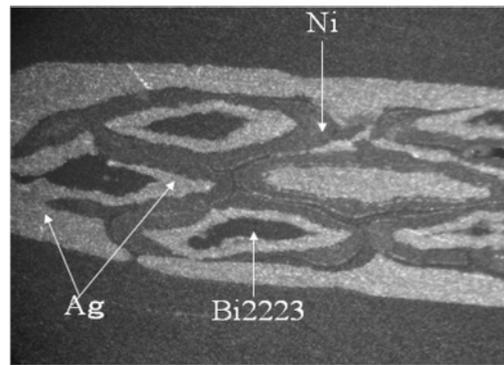


図 3 16 芯 Ni バリア超電導テープの断面写真 (2007 年度作製)

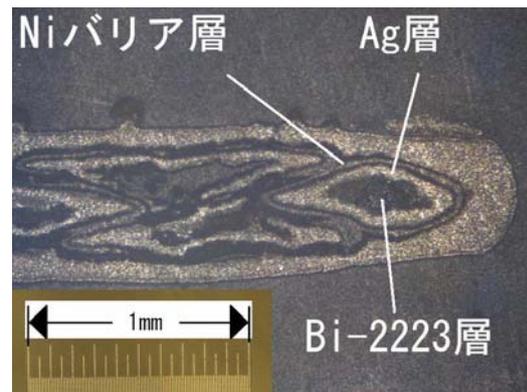


図 4 7 芯 Ni バリア超電導テープの断面写真 (2008 年度作製)

を十分に取り込めずに前駆体が十分に成長できないためと考えられる。この問題を解決するため、①フィラメント数を 19 本から 7 本に減らして Ni バリア層を薄くする、②圧延機の動力にインバータを取り付けて回転速度を調整できるようにする、の 2 つの改善方法を取り入れてさらにテープ作製を行った。

また、標準となるテープ作製方法の改善を目指して、多芯バリア無し超電導テープについても作製と評価を行った。フィラメント作製時に丸ダイスから六角ダイスに変更することで、完成した多芯テープのフィラメント断面がより平滑なテープが作製できるようになった。その結果、臨界電流値が 1.1 A から 2.8 A (臨界電流密度で  $5 \times 10^7$  A/m<sup>2</sup>) まで向上した。

(2) 多芯超電導テープの作製と評価について、2008 年度に得られた成果を記す。①線材の芯数を 19 芯から 7 芯と減らす、②圧延機に速度可変機を追加して線材の加工速度を 3 m/min から 0.2 m/min と遅くする、③線材圧延時のテープ減厚率を 3 % 以下になるように加工する、の 3 つの修正を加えた。この加工方法によって、加工途中に線材の長さ方向に曲がったり、フィラメント間でひび割れたりする線材の欠陥・欠損は解消された。2007 年度に作製した線材の断面は、Ni バリア層の厚

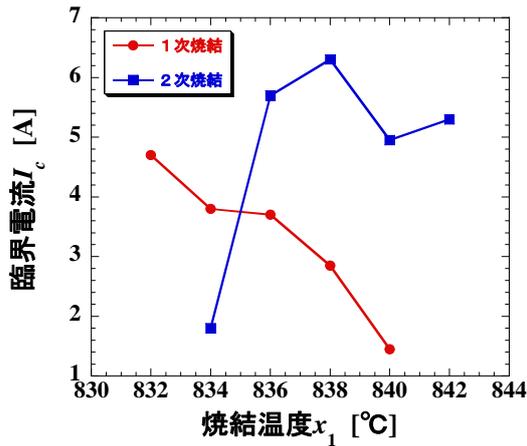


図5 多芯バリア無し超電導テープの臨界電流値に対する焼結温度特性

さが  $10\sim 150\ \mu\text{m}$  と不均一で、超電導層は歪んだ構造になっていた。それに対して、2008年度作製した線材断面は、Niバリア層の厚さが約  $50\ \mu\text{m}$  と均一であった。ただし、超電導層はラグビーボール状になっており、薄板状をしたBi-2223相の結晶粒を配向させるのは困難であることが予測された(図4)。作製した線材の臨界電流値はゼロであり、また反磁性のシグナルが非常に弱いことから、超電導相が十分に形成されていないことが分かった。以上の結果より、①フィラメント作製に用いる金属パイプは、より外径の大きな肉薄のパイプを使用する必要がある、②Agパイプに充填するフィラメント断面は丸状のまままで充填した方が、超電導相の幅広面がより平滑な構造になる、ことが分かった。

また、多芯バリア無し超電導テープでは臨界電流値に対する焼結温度特性を得ることができた(図5)。この結果、臨界電流値が  $2.8\ \text{A}$  から  $6.5\ \text{A}$  に向上した。

(3) 通電損失測定システムの構築については、LabVIEWにより自動計測システムを作成した。より精度良く通電損失を測定できるようにするため、①ロックインアンプで測定した電圧の虚数値が小さくするためキャンセルコイルを利用する、②2位相のロックインアンプを導入する、の2つの改善を行う必要がある。

(4) 超電導ケーブルの交流損失解析では3つのケーブルを対象に計算を行った：①Bi-2223超電導テープを使って住友電工が作製した30m超電導ケーブル(図6)、③YBCOテープを使って古河電工が作製した1m超電導モデルケーブル、④YBCOストリップ線を使って古河電工が作製した0.3m超電導モデルケーブル(図7)。いずれのケーブルでも、電気回路モデルにより計算した交流損失は測定値と一致する結果が得られた。Super-ACEプロジェクトで計画している5km超電導ケ

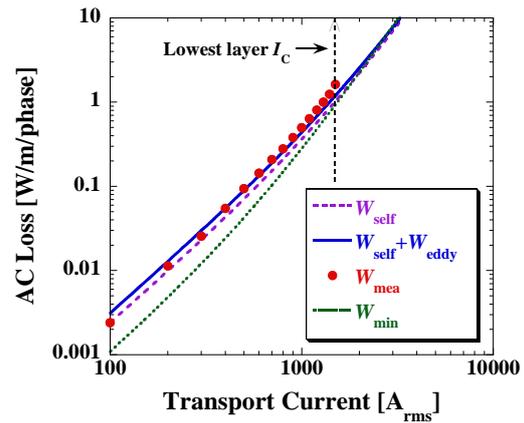


図6 Bi-2223テープにより構成された30m超電導ケーブルの交流損失特性

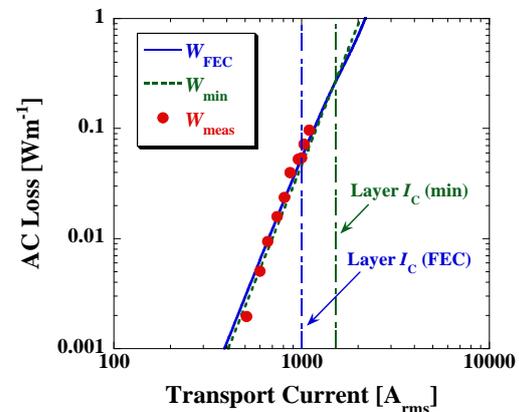


図7 YBCOストリップ線で構成された0.3m超電導モデルケーブルの交流損失特性

ーブルは①の超電導ケーブルと同一構造であるので、これより交流損失解析および低減のための基礎データが得られたことになる。また、国際超電導シンポジウム(ISS2008)において③の研究成果を発表したところ、超電導ケーブルを構成している超電導テープの相互作用による交流損失への影響を考慮すべきとの指摘を受けた。今後、モデルケーブルを作製し、計算方法について再考する必要がある。以上の結果より、超電導ケーブル実用化のための重要な基礎データが得られた。

## 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 3件)

① H. Noji, "Numerical study on self-field losses of 30 m BSCCO HTS transmission cable", *Cryogenics*, **49** (2009) 34-38 : 査読有

② H. Noji, "Self-field losses in 1 m HTS

conductor consisted of YBCO tapes”, *Cryogenics*, **47** (2007) 343-347 : 査読有

③H. Noji, “Numerical analysis of the AC losses of 500-m HTS power cable in Super-ACE project”, *Cryogenics*, **47** (2007) 94-100 : 査読有

〔学会発表〕(計 3 件)

①H. Noji, “Numerical study on self-field losses of HTS model cable comprising strips of YBCO tapes”, *International Symposium on Superconductivity*, 28 October 2008, Tsukuba (Japan)

②中山祐輔、野地英樹、「Bi-2223 超電導テープの作製と評価」、高専シンポジウム、2008 年 1 月 26 日、久留米市石橋文化センター

③H. Noji, “Calculation of self-field losses of YBCO HTS cable conductor by electric-circuit model”, *International Symposium on Superconductivity*, 6 November 2007, Tsukuba (Japan)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

野地 英樹 (NOJI HIDEKI)

都城高専・電気情報工学科・准教授

研究者番号 : 30280340