

鉄道応用に向けた高温超電導線材の特性向上

富田 優* 福本 祐介* 鈴木 賢次*

Improvement of the Superconducting Properties of High Temperature Superconducting Wires for Railway System

Masaru TOMITA Yusuke FUKUMOTO Kenji SUZUKI

High Temperature Superconducting (HTS) wire has significant potential for railway system applications. RE-123 coated conductors such as YBCO tape have made progress in many institutes towards the industrialization. Bi-2223 tape is currently a promising candidate for various engineering applications such as HTS cable, motors and transformer for railway. For improvement of the superconducting properties, performance characterization of HTS wire was conformed. HTS DC cable is ideal for transmitting between substation and electric train. We completed the prototype DC cable of 2 meter length of Bi-2223 tapes for trial purposes.

キーワード：超電導, ビスマス, イットリウム / 高温超電導, 超電導ケーブル, 超電導変圧器

1. はじめに

高温超電導線材は現在、イットリウム系 (YBCO) に代表される RE-123 系 (RE: rare earth, 希土類酸化物) とビスマス (Bi-2223) 系の酸化物超電導材を中心に研究開発が進められている。動作温度 (臨界温度) 領域で一般の銅線と同じように使用でき、電気抵抗がゼロのため、送電線に活用すれば、送電距離にかかわらず、損失なく電気を運べる。これまで実用的に使われてきた金属系の超電導材の臨界温度は、比較的高いニオブ系 (Nb3Sn) で 18.3K である¹⁾。それに対し、酸化物の高温超電導材の臨界温度は 90K 以上である。そのため、液体窒素の使用等、実用化における冷却システムの簡素化ができること言った利点がある。

RE-123 系線材は、図1に示すようにニッケル系等の基板を用いて製作した薄膜状線材である。磁場中で高い臨界磁場特性を有するといった特徴があり、将来の低コスト化の期待とともに、その材料開発が進められている。しかしながら RE-123 系線材は複合材料であるため、その構造上、もし層間で剥離が発生した場合、超電導線材として機能できなくなる。さらに、超電導コイルや超電導主変圧器²⁾等の鉄道車載の応用では、鉄道特有の外乱の振動を受けることから、剥離の挙動が超電導特性に直接的に関与する可能性が高いと言える。ところが、これまでに線材の剥離特性の評価基準はなく、測定方法の開発はなされていない。国内外の RE-123 系線材の研究機関においては、その定量的評価法の早期の確立が求めら

れている³⁾。

そこで、半導体の評価で使用されている m-ELT (Modify Edge Lift-off Test) 法⁴⁾を改良し、RE-123 系線材の剥離に対する定量的評価法を開発した。実験により、RE-123 系線材の最も弱い剥離層を特定することができた。

一方、Bi-2223 系線材は銀をシース材としているため、材料の強度や耐久性で、既に高い信頼性がある。現在、巻線手法の工夫による通電特性向上や交流損失の軽減対策等、より実用向けの研究が進められている。鉄道車載用超電導主変圧器の開発においては、幅狭化、ツイストの導入、バリア層の導入などにより、交流損失低減の対策を施した。しかし、線材1本あたりの臨界電流 (Ic) は低下し、並列導体を構成する素線数が増加する新たな課題が発生した。そこで、電流容量の低下や交流損失の増加を防ぐため、転位手法の工夫による新たな巻線方法を開発した。試作したコイルの実験結果から、臨界電流の低下や交流損失はなく、コンパクトで効率的な設計、製作が可能であることがわかった。

高温超電導線材の鉄道への応用例として、超電導ケー

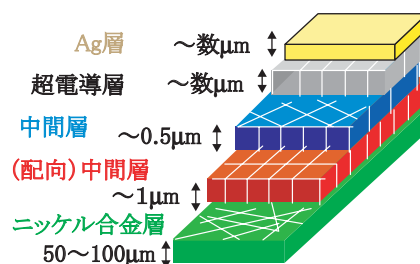


図1 RE-123系 (YBCO) 線材の構造

* 材料技術研究部 (超電導応用)

特集：材料技術

ブル、超電導変圧器、浮上式鉄道用の超電導コイル、超電導モーター等が考えられる。これらの応用に必要な線材の巻線化の現状と超電導ケーブルの巻線部試作の取り組みについても紹介する。

2. RE-123系線材の剥離評価

2.1 RE-123系線材の研究課題

図2に各種応用で想定される0.5テスラ以下の磁場領域でのRE-123系(YBCO)線材の臨界電流値を示す。RE-123系線材はBi-2223線材と比較し、磁場中でも高い臨界磁場を保持できる特徴があることから、超電導ケーブル、変圧器、モーター等、次世代の線材として研究開発が進められている。しかしながら、実用化への課題と言える、複合材料特有の剥離についての定量的評価は、未だなされていない現状がある。早期に線材の剥離特性の定量的評価の確立が求められている。剥離強度の定量的評価法としてm-ELT法を活用し、RE-123系線材の剥離特性を評価する。

2.2 剥離の評価方法

本評価方法では、剥離時に放出されるエネルギーが、エポキシ樹脂層に保存されたひずみエネルギーに等しいと仮定し、剥離面の密着強度を次式で求めることとする。

$$K_{ic} = \sigma_0 \sqrt{h/2} \text{ (MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}) \quad \dots\dots(1)$$

ここで、 $\sigma_0(T)$: 残留応力 (温度Tの関数), h : 樹脂厚さ (mm)

使用した樹脂に関して残留応力と温度の関係が既知であれば最終的に密着強度値を算出することができる。この評価方法と概念図を図3に示す。はじめに、銀安定化層側にエポキシ系樹脂を塗布し、温度170℃で1時間硬化させ、マイクロメータにより膜厚を測定する。その後、約10mm角に加工をしたのち、サンプル片(10mm角×20個)を低温室で-3℃/minで温度降下させる。並行してCCDモニターでサンプルの状態を監視しながら、剥離が発生した時の温度を確認する。エポキシ系樹脂と超電導線材の膨張率の違いから、剥離に耐えうる強度の評価をする。実験に使用したRE-123系(YBCO)線材の仕様を表1に示す。

2.3 剥離の評価方法の検証結果

図4に樹脂厚さと剥離発生温度の関係を示す。赤の点線はその近似を示す。樹脂厚さと剥離温度には比例の傾向が見られる。また、式(1)で算出した平均の K_{ic} は、図4から0.20 (MPa・√m)である。これにより、線材の多層構造中で弱い層間の密着強度を定量的に得ることが可

能である。図5には剥離面(最も弱い層間)の外観写真を示す。図中の○印は剥離の起点と推測できる点である。

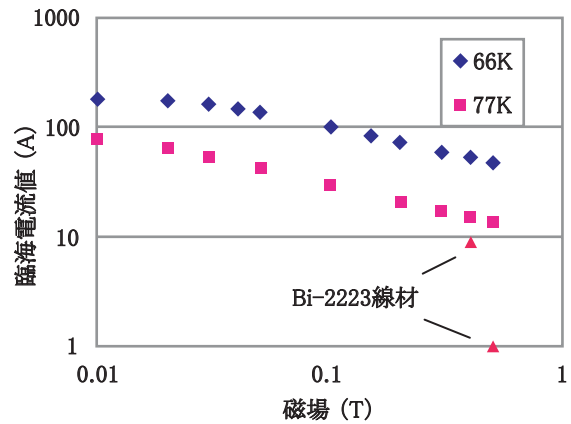


図2 RE-123系(YBCO)線材の臨界電流特性(77K及び65K, c軸//B, 4mm幅10cm長, 比較のためBi-2223線材(77K)の0.4Tと0.5Tを表示)

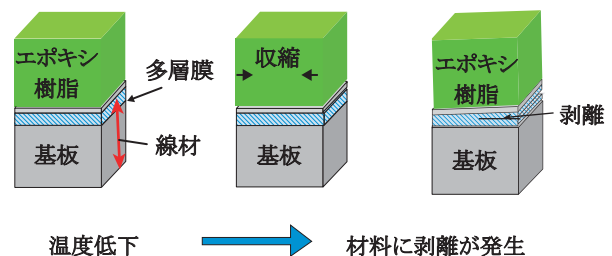
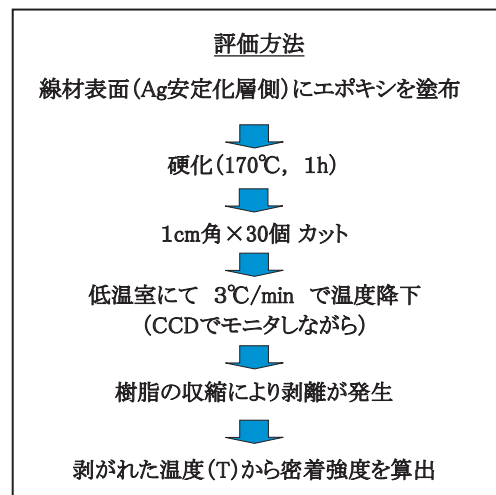


図3 剥離の評価方法と概念図

表1 RE-123系(YBCO)線材の仕様

項目	仕様
寸法	0.1mm × 12mm 幅
I_c	> 300 A (77 K, 0 T)
線材構造	Ag/超電導層/中間層/ニッケル合金層
使用本数	4本
長さ	10 cm

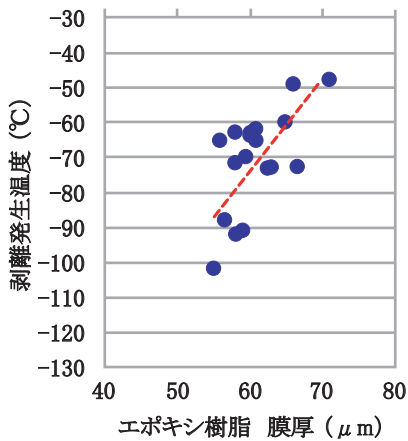


図4 エポキシ樹脂の厚さと剥離発生温度の関係

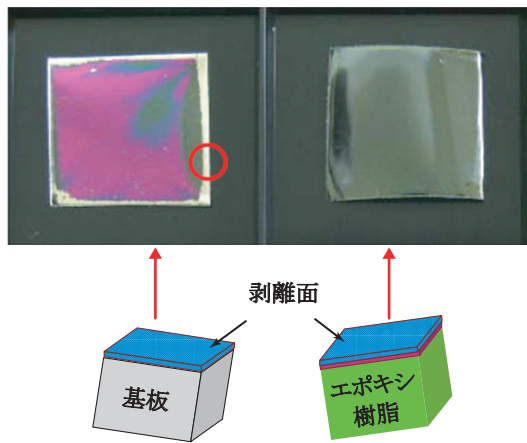
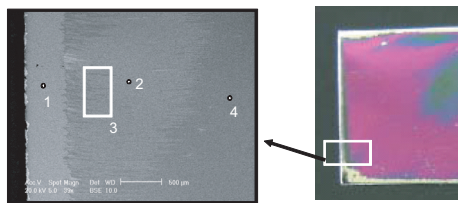


図5 剥離面の外観写真（赤○は剥離の起点）



位置	表面	外観色
1	ニッケル合金	銀色
2	超電導層	濃紫
3	超電導層	濃紫
4	ランタンマンガナイト (LaMnO) 中間層	薄紫

図6 エネルギー分散型元素検出器（EDX）による剥離面（位置に示す番号は写真内の番号の観察場所）

図6には、走査型電子顕微鏡に付設されたエネルギー分散型元素検出器（SEM-EDX）によって観察した剥離面を示す。これらの結果から、YBCO線材のランタンマンガナイト（LaMnO）でできた中間層は、界面の接着力が弱い傾向にあることが推察できる。このようなことか

ら、本評価法は、RE-123系線材の剥離の定量的評価方法として、有効性が確認されたと言える。

3. Bi-2223 線材のコイル最適化

3.1 線材の巻線方法の改良と課題

変圧器等の交流機器への応用で、Bi-2223 線材を使用した場合、外部変動磁場に依存する交流損失が発生する。そのため、近年では、①超電導線の形状の幅狭化②フィラメント構造のツイスト化（交差化）③フィラメントの周囲へのバリア層の導入等、ビスマス系線材の開発で交流損失の低減対策がなされている。しかしながら、幅狭化、ツイスト化、バリア層の導入などによる交流損失低減の対策により、線材1本あたりの臨界電流値（Ic）は低下し、並列導体を構成する素線数が増加する課題も顕在化している。そのため、線材の特性向上には、線材そのものの改良に加え、巻線法の改良とコイルの最適化を要している。

3.2 巻線方法の改良と試作

Bi-2223 線材等は矩形断面形状のため、大電流量化のために、数枚を多層に重ねて並列導体が構成される。この並列導体を用いて巻線とする場合、各素線間の自己及び相互インダクタンスを等しくしなければ遮蔽電流が流れ、電流量の低下や付加的交流損失の増加といった問題が発生する。この問題を解決するため、コイル巻線部を効率化し、特性を維持したコイルの巻線方法の改良と試作を行った。

電流量の低下や付加的交流損失の増加を防ぐために、図7に示すような、巻線工程において素線の位置を入れ替える転位方法を用いた。遮蔽電流が誘起されないようにするため、素線間のインダクタンスのバランスを取り、Bi-2223 線材の形状を扁平にし、大電流量化のた

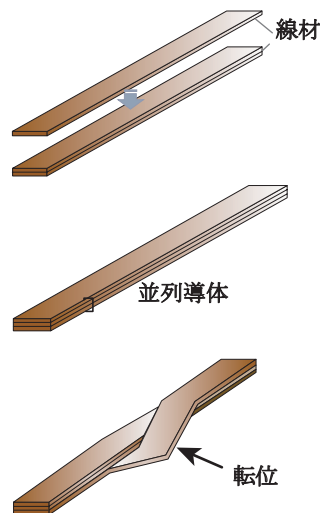


図7 線材の巻線工程の転位法

特集：材料技術

めに線材を重ねた並列導体に構成する。これまでの一般的な転位法の加工例を図8 (a) に示す。各所で外側の素線を内側に持ってくる転位を施し、真中で全ての素線を入れ替える全転位を施している。この方法では転位部で1ターン分のスペースを必要とするため、素線数が多くなるほどコイルが縦長になり、コイル寸法が制限されてしまう問題がある。

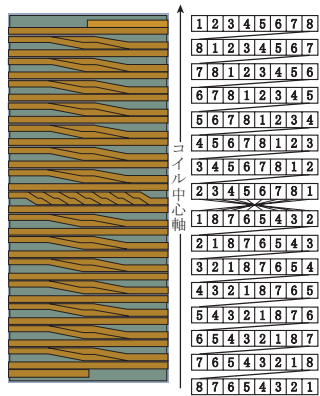
そこで、多並列導体になった場合でもコイル高さを小さくできるよう、転位数を少なくした新たな転位法を考案した。従来の試作器の仕様のBi-2223線材と、低交流損失線材の比較を表2に示す。従来の線材を低交流損失線材に置き換えた場合、Icの違いにより、素線数は3倍となり、1次巻線は1本から3本、2次巻線は8本から24本に増加した並列導体となる。そこで、巻線の作業性を改善するため、2つの導体を並べる配置に改良した。

この転位法により、全ての素線が内径方向の全ての位置を通り、コイルの上部、下部で対称となり、転位数を半減できた(図8 (b))。1次および2次巻線を模擬したモデルコイルの仕様を表3に、その外観写真を図9に示す。

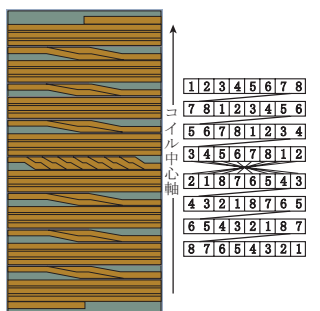
3.3 モデルコイルの特性評価

モデルコイルの最適化では、並列導体を構成する素線に流れる分流比を均一とする必要があり、そのための交流損失特性と電流分流の特性を知ることが重要である。

そこで、1次、2次のモデルコイルの電流分流特性と交流損失特性の評価を行った。



(a) これまでの転位法



(b) 考案したグループ転位法

図8 コイルの転位例 (8並列, 32ターン)

表2 Bi-2223線材の比較

	従来の線材	低交流損失線材
幅	4.2mm	2.6mm
厚	0.25mm	0.19mm
ツイストピッチ	—	8mm
Ic	120A	43A

表3 模擬コイル巻線の仕様

	1次モデルコイル	2次モデルコイル
導体構成	2並べ2重ね (4並列)	2並べ8重ね (16並列)
ターン数	80ターン	64ターン
内径	240mm	240mm
コイル高さ	448.2mm	407.9mm
転位	3回(20ターン毎)	7回(8ターン毎) グループ転位

モデルコイルの通電試験による臨界電流値(Ic)の評価結果を表4と図10に示す。考案した転位法と巻線によるIcの低減が認められず、設計値と同等の結果が得られた。1次、2次コイルの電流分流は、1次、2次ともに、±10%程度内である。図10 (b) に示す2次コイルでは、350Armsを境に、電流分流率の様相が変化している。これは350ArmsでIcを超過したため、磁束フロー電圧が高くなり、電流分流に影響したものと考えられる。

次に1次、2次モデルコイルの交流損失特性を、図11

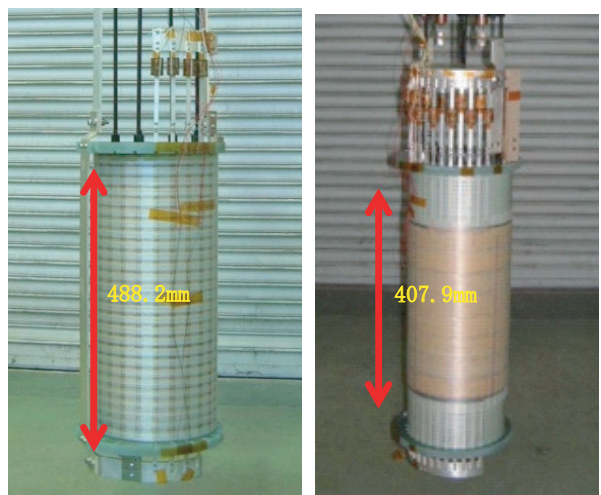
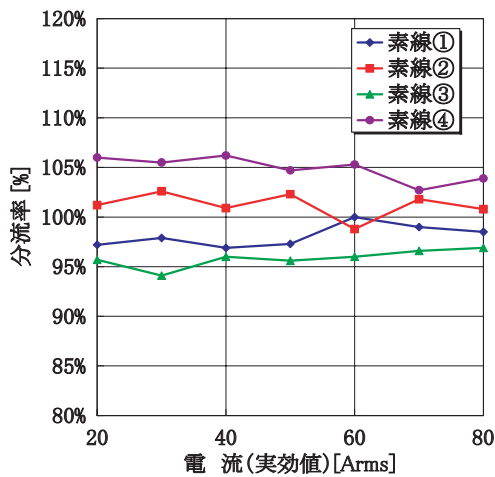


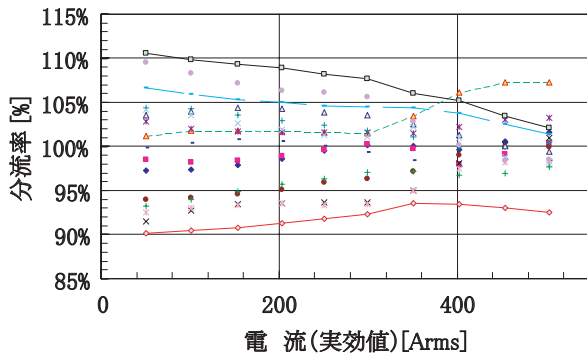
図9 モデルコイルの外観
(左：1次モデルコイル, 右：2次モデルコイル)

表4 臨界電流値測定結果

	1次モデルコイル	2次モデルコイル
設計値 Ic (@ 77K)	118A	271A
実測値 Ic (@ 77K)	117A	270A
実測値 Ic (@ 66K)	—	455A



(a) 1次モデルコイル (@77K, 50Hz)

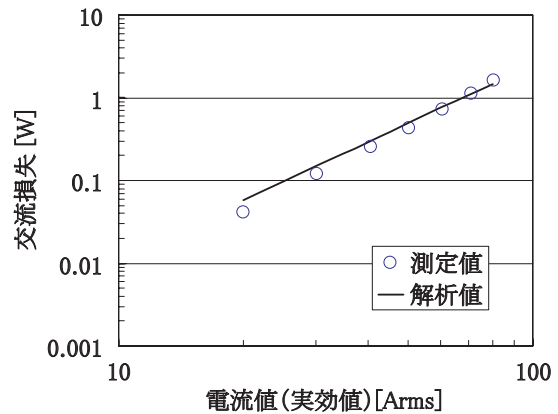


(b) 2次モデルコイル (@66K, 50Hz)

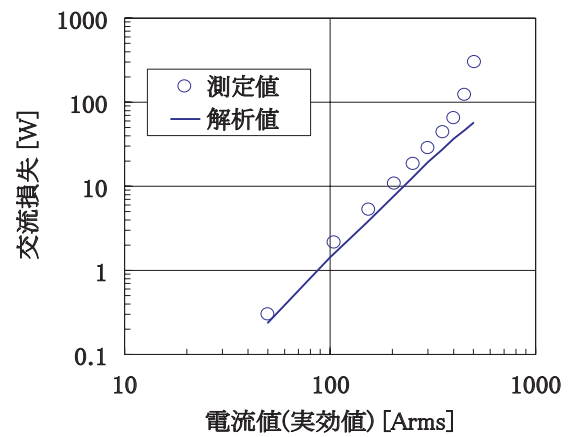
図10 電流分流通特性

に示す。図中に示した解析値とは、通電した際の各素線にかかる磁界を計算し、使用した超電導線材の交流損失データと算出した磁界を照合し、各素線の交流損失 [J/m³・cycle] を得、(線材断面積) × (1ターン分の長さ) × (周波数) より、1ターンあたりの交流損失 [W/ターン] を得たものであり、コイル全体の交流損失として示される。1次、2次ともに、交流損失の測定値は解析値とほぼ一致し、遮蔽電流などによる付加的損失の影響はないと考えられる。また、図11 (b) の2次モデルコイルの場合、300Armsを超えるが、電流分流通特性の結果と同様、磁束フロー電圧が高くなったためと考えられる。

以上の結果から、線材の巻線工程の新たな転位法によって、臨界電流の低下や交流損失のない、コンパクトで効率的な設計、製作に技術的可能性が見出された。



(a) 1次モデルコイル (@77K, 50Hz)



(b) 2次モデルコイル (@66K, 50Hz)

図11 交流損失特性

4. 高温超電導線材の応用への取組み

4.1 巻線化技術への取組み

超電導線材を鉄道用の超電導ケーブル、超電導変圧器、超電導モーター、超電導コイル等に応用する場合、コイル製作のための巻線化の技術開発が必要となる。そこで、パンケーキコイルや、小型ソレノイドコイルの開発のため、図12に示すような、超電導コイル巻線機を試作した。

巻線に可能なコイル寸法は、内径80～300mm、高さ10mm～200mmであり、ACインバーターにより2.7～32rpmの範囲で巻線することができる。また、締付を調整するために、ドラム架台に摩擦板を取り付け、線材に掛かる張力を調整する工夫を施した。

4.2 超電導ケーブル開発への取組み

一般的な在来線の架線では、直流電化区間の電圧が1500Vあり、変電所間隔が2～3km程度を超えると送電ロスが顕在化する課題がある。一方、超電導材料は電気抵抗が無いため、直流で高い定格電流値が得られる可能性がある。また、変電所の数の削減も期待できる。

特集：材料技術

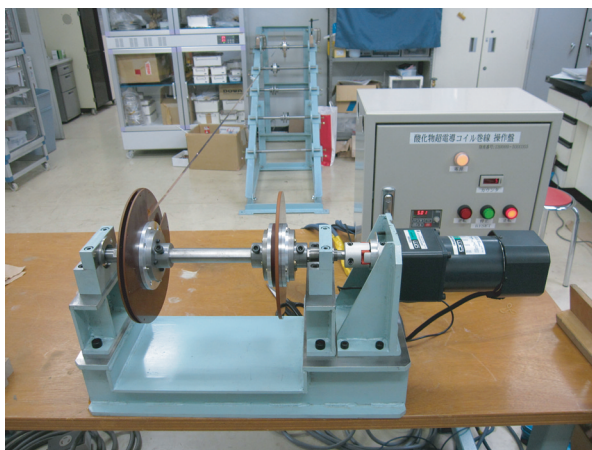


図12 超電導コイル巻線機

そこで、直流き電線への応用を想定し、通常時連続運転で使用できる1500V、5kA級を当面の目標とする通電電流1.5kAクラスのプロトタイプの超電導ケーブル設計と試作を行った。図13に試作した超電導ケーブル（巻線部）の写真と断面図を示す。使用した高温超電導材料はBi-2223線材で、巻線数は導体層10本、シールド層14本であり、それぞれ往復の電流経路とした。Bi-2223線材の形状は扁平で、幅4.5mm、厚0.35mmとした。フォーマの外径は16mmとし、線材間のギャップを0.5mmと仮

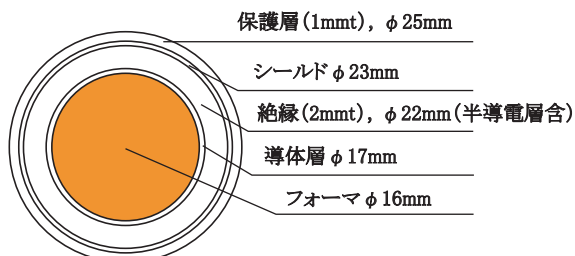
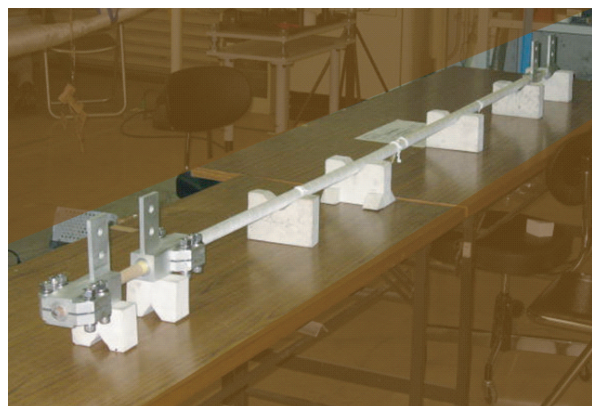


図13 高温超電導線材を使用した超電導ケーブルの巻線部（上）と断面図（下）

定し、導体層に1層巻10本の線材で巻かれている。1本当りの臨界電流値 (I_c) は温度 77K において 160A 程度で、通電容量は 1600A に相当する。シールド層は 14 本の線材を巻線化する。240A の容量を構成したことから、1.5kA クラスのケーブルの仕様を満たすものと考えられる。巻線単体の通電実験の結果、いずれも設計目標値を上回り、導体層で 1.72kA、シールド層で 2.2kA の許容通電電流値が得られた。

5. おわりに

本研究において、以下の知見を得た。

- (1) RE-123系線材の剥離強度の定量的な評価法を開発した。YBCO線材とエポキシ樹脂との線膨張係数の違いによる剥離実験により、RE-123系線材の最も弱い剥離層を特定することができた。その結果、中間層(LaMnO)の界面が弱く、剥離が起きやすいことがわかった。本評価法は、RE-123系線材の剥離の定量的評価として、有効性が確認された。
- (2) 電流容量の低下や付加的交流損失の増加を防ぐために、素線の位置を入れ替えて転位をさせる巻線方法を開発した。実験結果より、電流分流率は±10%程度内で、交流の付加的損失もなく、本手法によりコンパクトで効率的な設計及び製作が可能であることがわかった。
- (3) 鉄道の線材応用に必要な巻線化における研究開発の取組みと超電導ケーブルの巻線部試作の現状について示した。

文献

- 1) M. Tomita, K. Nemoto, M. Murakami, K. Sugawara; Sching Reaction of Nb₃Sn Persistent Current Switch with a high Current Capacity, Physica C Vol.357-360, pp.1336-1341, 2001.
- 2) 秦広, 上条弘貴, 藤本浩之, 長嶋賢, 池田和也, 岩熊成卓, 船木和夫, 山田尚生, 上森賢悦, 吉田茂; 車両用超電導主変圧器の試作, 鉄道総研報告, Vol.19, No.5, pp.5-10, 2005
- 3) D.C. van der Laan, J.W. Ekin, C.C. Clickner, T.C. Stauffer; Delamination strength of YBCO coated conductors under transverse tensile stress, Supercond. Sci. Technol. Vol.20, pp.765, 2007.
- 4) E.O. Shaffer II, F.J. McGarry, L. Hoang. Poly; Designing reliable polymer coatings, Sci & Eng., Vol.36, pp.2375, 1996.