

多層転位セグメント型超電導ケーブル

中部電力株式会社 鹿島直二・長屋重夫
材料技術研究所 後藤謙次*1・鈴木知史*1・味村彰治*2・斎藤 隆*3
河野 宰*4
電力技術開発センタ 大野 光一
産業電線事業部 英 久仁夫*5
鈴鹿事業所 加藤 一*6

High-Tc Superconducting Cable with Bi-2223 Transposed Segment Conductors

N. Kashima, S. Nagaya, K. Goto, C. Suzuki, S. Ajimura,
T. Saitoh, O. Kohno, K. Ohno, K. Hanabusa & H. Kato

われわれは15m長の2.6kA級新型超電導ケーブル導体を開発した。本導体は中心フォーマであるフレキシブルSUS管の周囲に複数本の転位セグメントを巻き付けた構造を有している。転位セグメントは5本撚り構造であり、絶縁処理を施した強化銀シーステープ線を採用して、線材の強度を確保するとともに低交流損失化をはかった。導体は3層構造を有しており、各層のインピーダンスが等しくなるよう巻き付けピッチが層ごとに調整されている。通電試験の結果、同一セグメント内のテープ線に流れ込む電流は、 $\pm 5\%$ 以内に均流化されていることを確認した。また、3層の各層に流入する電流を通電電流200~2,800Aの範囲で $\pm 6\%$ 以下に均流化させることができた。これらの電流均流化を達成することにより、1,000Aの交流電流通電時において0.1W/mの交流損失であるという低交流損失型高温超電導ケーブルの開発に成功した。

We developed the 15m-long, 2.6kA-class and new type superconducting cable conductor, which was made by winding a number of transposed segments around a stainless steel flexible former. The transposed segment was consisted of 5 Bi-2223 tapes, which strengthen with Ag alloy sheath and insulated with resin individually, to realize high strength and low A.C. loss of the tape. The conductor had the 3-layer structure, which was taken a method of equalizing impedance of each layer by adjusting spiral pitches. In the results of transport current tests, current distributions in the same segments for the conductor were unified below changing rate of $\pm 5\%$. Further, current distribution in 3 layers was homogenized below $\pm 6\%$ in the range from 200A to 2,800A. As the results, we successfully carried out a development of the low A.C. loss high-Tc superconducting (HTS) cable, for which A.C. loss was 0.1W/m at flowing 1,000A.

1. ま え が き

電力分野において超電導はその応用面で大変魅力的な技術である。超電導ケーブルは大電流密度送電が可能であることから、過密化した大都市において管路に敷設できるコンパクトノ大容量タイプの次世代ケーブルとして注目を集めている。近年、 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ 相 (Bi2223) 銀シース線から構成される大電流容量の超電導ケーブル

の概念設計が提案されている。われわれは各種の構造を有する超電導ケーブルの提案を行う¹⁾²⁾とともに、超電導ケーブルを応用する際に重要な冷却管による液体窒素送液試験を実施して、ケーブルシステム設計に向けた検討を進めてきた³⁾。

超電導ケーブルの開発に関して、設計に基づいたプロトタイプ超電導ケーブルが実際に製作され、諸特性が評価されている⁴⁾⁵⁾。これらの超電導ケーブルは線材を複数本束ねた集合体として構成されるが、このような構造のケーブルでは各線材間の磁氣的結合のアンバランス等により、導体中の線材には電流が均一に流れないという偏流の問題が生じてしまうことが知られている。この問題を解決するために、超電導ケーブルに多層構造を採用し

*1 金属材料開発部
*2 金属材料開発部主席部長
*3 金属材料開発部長
*4 所長
*5 鈴鹿製造部製作課
*6 設備管理課主管部長

た導体の場合には、スパイラル状に巻き付けるテープ線のピッチを各層のインピーダンスが同等になるように調整する方法が採られてきた⁴⁾⁵⁾。これに対してわれわれは、あらかじめテープ線表面に絶縁処理を施した銀シース線材から構成される平角転位セグメント型導体を開発した⁶⁾⁷⁾。このタイプの導体では各テープ線間の磁氣的結合がすべて同等になることから、各線には均等な電流が流れ、かつ素線絶縁を施してあることから交流損失も低減できるという特徴を有する。

これに対して、純銀シース線材を用いて転位セグメントを作製する場合には、平角線を転位撚線化することから、そのエッジワイズ方向へ曲げ歪が加わることにより超電導特性の劣化が生じてしまうという問題が生じていた。この問題に対応するため、われわれは通常のテープ線と厚さは同等(0.2~0.3mm)でも幅方向を約半分(1.5mm程度)にして、より小さい径までエッジワイズ方向に曲げられるようにし、さらにシース材に銀合金を用いることでテープ線を強化した転位セグメント用テープ線を採用した。純銀シース線の場合には30MPa以上の引張応力が印加されると臨界電流は70%以上低下したのに対して、強化銀シース線では150MPaの応力印加時においても臨界電流は低下しないことを確認している。

今回、5本の強化銀シーステープ線からなる転位撚線を用いて、SUS製フレキシブルフォーマの周りに多数本撚り合わせた構造を有する15m長で直流臨界電流が2.6kAの大容量低損失導体を開発した⁸⁾。この導体には大容量化のため、スパイラルピッチ調整を施した転位撚り3層構造を採用した。導体内に流入する電流の均流化評価、および交流損失測定を行った結果について報告する。

2. 素線の機械的特性

導体に用いた超電導線材はアスペクト比の小さい強化銀シースBi2223線材である。諸元を純銀シース線とともに表1に示す。シース材の異なる両テープ線について、臨界電流特性の引張応力依存性を図1に比較した。測定はあらかじめ臨界電流を測定した試料に室温で歪を印加して、歪除去後に液体窒素中で臨界電流測定を行うという方法を採用した。測定に用いた試料数(n)はn=3である。純銀シース線の場合には20MPa以上の引張応力では臨界電流特性の極端な低下が見られたのに対して、強化銀シース線の場合は破断する直前の荷重である150MPaまで特性低下は見られていない。このことから、シース材の強度増強が線材の耐引張応力特性の飛躍的向上につながる事が明らかとなった。

転位撚線化時において、転位渡り部分のエッジワイズ曲げ歪(図2)は、純銀シース線を用いた場合には超電導特性の顕著な低下を引き起こしていた。これに対して強化銀シース線では耐エッジワイズ歪特性が飛躍的に向上し、臨界電流特性を低下させることなく100mm以下の渡りピッチにおける転位セグメントの製作が可能となった。エッジワイズ曲げ歪と臨界電流特性の関係についてシ-

ス材の違いにより比較した結果を図3に示した。純銀シース線ではエッジワイズ曲げ歪が0.12%を超えると臨界電流は低下し始めるのに対して、銀合金シース線では0.5%まで特性は低下していないことがわかる。純銀シース線の場合、熱処理によりフルアニールされた純銀がセラミックコアの周りに張り付いているような状態になっており、コアの弱い部分(形状により応力集中しやすい箇所や微細なクラックが存在する部分等)に対して局所的に応力集中しやすい複合状態であると考えられる。これに対して銀合金シースでは、シースによる補強効果が働いて、局所的な応力集中が発生し難い複合状態が実現できたものと判断される。

3. 導体構造

表1 銀合金シース線と純銀シース線の諸元
Characteristics of tapes for segment conductors

超電導材	Bi2223相	
	純銀	銀合金
シース材		
サイズ	1.60 × 0.25mm	
コア数	7	61
絶縁材	あり	

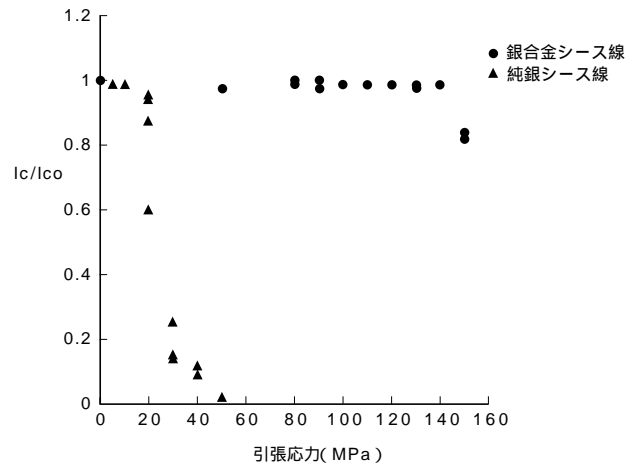


図1 臨界電流特性の引張応力依存性
(シース材の違いによる比較)
Critical current property for tapes as a function of tensile load
--- Comparison in difference of a sheath material ---

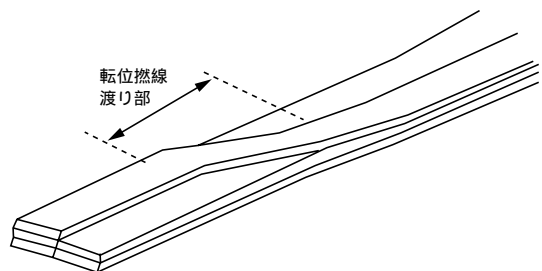


図2 転位撚線の渡り部分(エッジワイズ曲げ歪印加部)
Schematic of a transposed segment conductor

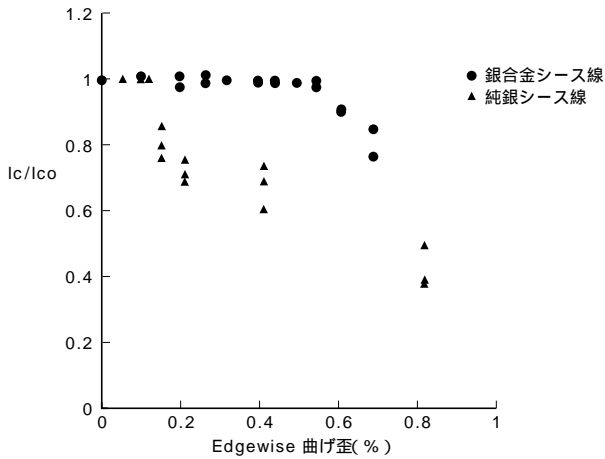


図3 エッジワイズ曲げ歪と臨界電流特性の関係
Critical current property as a function of edgewise bending strain

あらかじめ表面に絶縁処理を施したBi2223強化銀シース線から構成される5本撚り平角転位セグメントを開発した。転位セグメントは5本のテープ線をS方向に渡り長95mm、ピッチ950mmで撚り合わせた構成である。表2に転位撚りセグメントの諸元を、図4に試作した平角転位撚りセグメントの断面をそれぞれ示す。

導体は図5に示したように、表面に絶縁テープを巻き付けたステンレス製フレキシブルフォーマの周りにテープ線を5本撚りしたセグメントを複数本スパイラル状に3層に分けて巻き付けた構造を有する。このとき各層に流れる電流を均流化するため、層間には絶縁テープを巻き付けるとともに、各層のインダクタンスが同等になるよう巻き付け方向およびピッチを調整するスパイラルピッチ調整法を採用した⁹⁾。各層に巻き付けたセグメント数は第1層：32本、第2層：36本、そして第3層：36本であり、それぞれZ方向に805mm、440mm、そして255mmのピッチでフォーマ周囲に巻き付けた構成となっており、導体

表2 転位撚りセグメントの諸元
Characteristics of a transposed segment conductor

素線	銀合金シース線
素線数	5
転位撚りピッチ	950mm
撚り方向	S

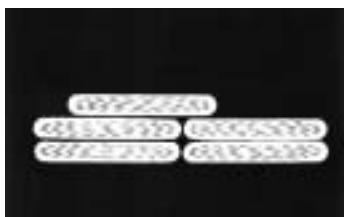


図4 転位撚り線断面
Cross-section of a transposed segment conductor

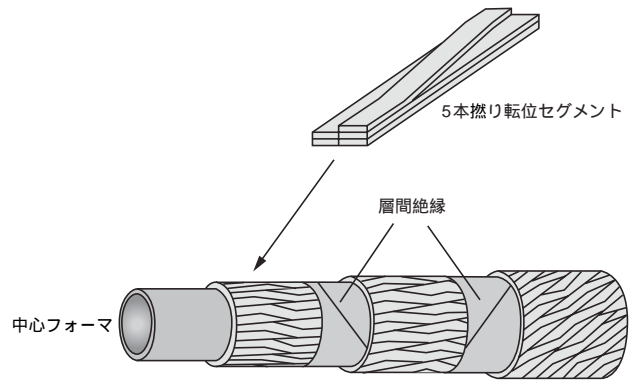


図5 ケーブル導体部概略図
Schematic of cable with transposed segment conductors

表3 多層転位セグメント型導体諸元
Characteristics of cable with transposed segment conductors

導体内径	37mm		
導体外径	48mm		
層数	3		
	1層	2層	3層
セグメント数	32	36	36
スパイラルピッチ	805mm	440mm	255mm
巻き付け方向	Z	Z	Z



図6 開発導体外観
Outlook of the developed cable conductor

の最終外径は48mm である。導体諸元を表3に示すとともに、開発した導体の外観写真を図6に示した。

4. 通電試験

(1) 直流通電試験

本導体の直流通電時における電圧 - 電流特性を図7に示す。臨界電流を1μV/cmの定義とすると、電圧 - 電流特性測定結果より導体の臨界電流値は2.6kAで、このときのn値は7.4であった。

(2) 交流通電試験

転位撚線化による均流化効果を評価するため、15m長導体の片端を図8に示すように末端処理して計測素子を設置するとともに、他端を一括半田付けして電流計測を行った。このとき、電極部分の抵抗成分による測定誤差は2%以内であった。1,000Arms, 2,000Armsの電流を通電したときの任意のセグメント内におけるテープ電流波形計測結果を図9に示す。どの測定結果も各テープ線に流れる電流は±5%以内に均流化されていることがわかる。他のセグメントについても同等に均流化されていることが確認された。

3層構造を採用した本導体の層間の電流分布について調査するため、計測側電極は図10に示すように末端処理を行った。このとき、電極部分の抵抗成分による測定誤差は2%以内であった。層間の電流分布調査結果を図11に示す。これらの結果は各層の電流が200~2,800Aの範囲にわたって±6%以内に均流化されていることを示している。

(3) 交流損失測定

本導体の交流損失を交流4端子法により測定した。測定周波数は60Hzとし、導体の損失成分による電圧を図12に示す回路を用いて計測した。このとき電極は両端とも導体全体を一括して半田付けする末端処理を施した。交流損失測定結果を図13に示す。同じ図にNorrisの式¹⁰⁾である(1)式より求めた値を示した。

$$W = (\mu_0 \cdot f \cdot I_c^2 / \pi) \cdot [(I_p / I_c) - (I_p / I_c)^3] / 2 \cdot \pi (1 - I_p / I_c) \pi (1 - I_p / I_c) \dots (1)$$

W: 導体の交流損失
f: 通電電流の周波数, I_p: 通電電流のピーク値
I_c: 臨界電流, μ₀: 真空の透磁率

この式は円筒状導体の交流損失(W)とうまく一致する結果を示すと考えられるが、今回の測定結果はこの式よりかなり低い値を示した。転位セグメント構造を採用

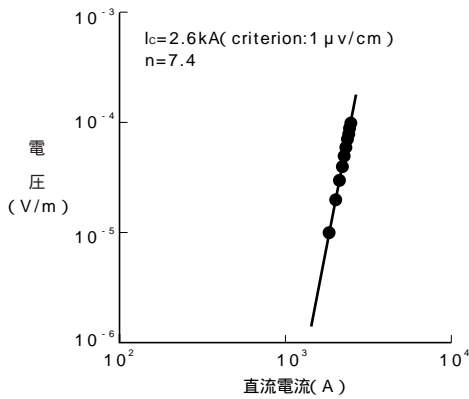


図7 導体の直流通電時における電圧電流特性
Voltage-current property at the introduction of D.C. current

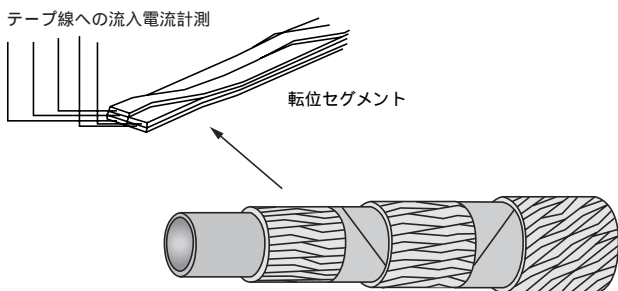


図8 導体に取り付けた電極部概略図(計測側端子:テープ電流計測)
Schematic of terminal on measured side for a current distribution of tapes in the same segment

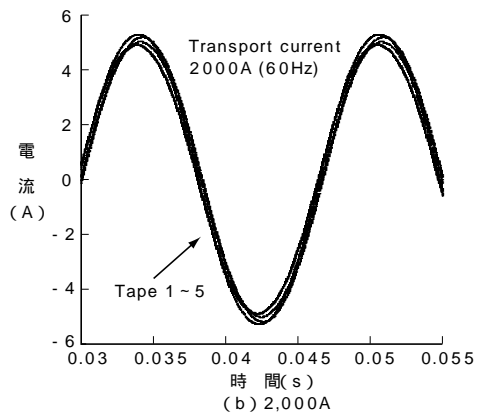
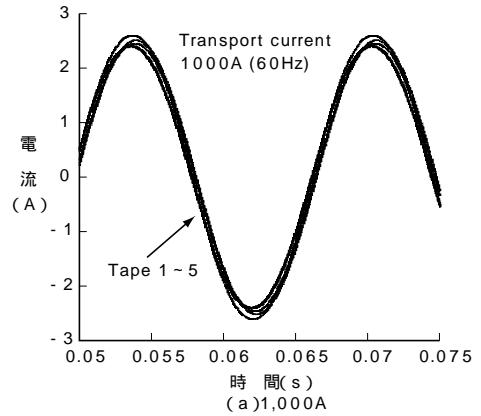


図9 任意セグメント内におけるテープ電流
Comparison of flowing currents for wires, which is at the same segment in the first layer, at flowing 1000A, upper, and 2000A, lower.

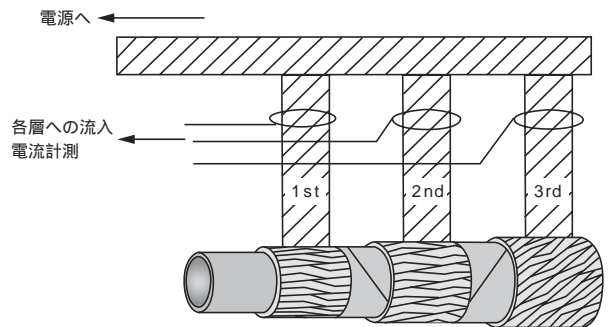


図10 導体に取り付けた電極部概略図(計測側端子:各層電流計測)
Schematic of terminal on measured side for a current distribution of each layer, 1st, 2nd and 3rd

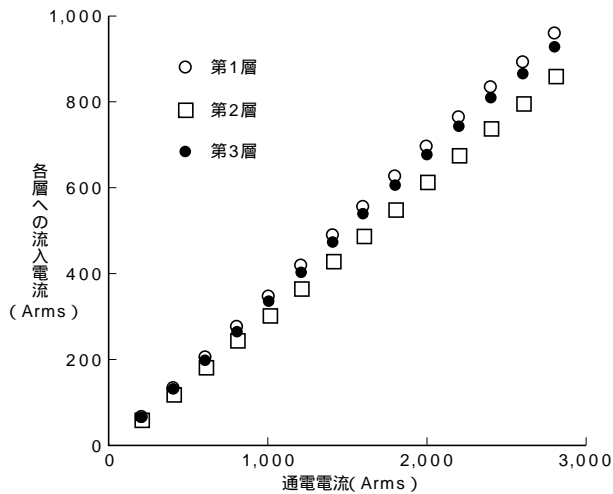


図11 各層に流入する電流

Introducing current properties for first, second and third layer, respectively

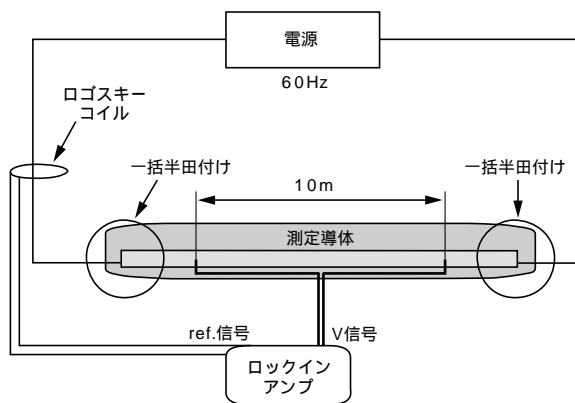


図12 交流損失測定回路

Schematic circuit for measurement of A.C. loss

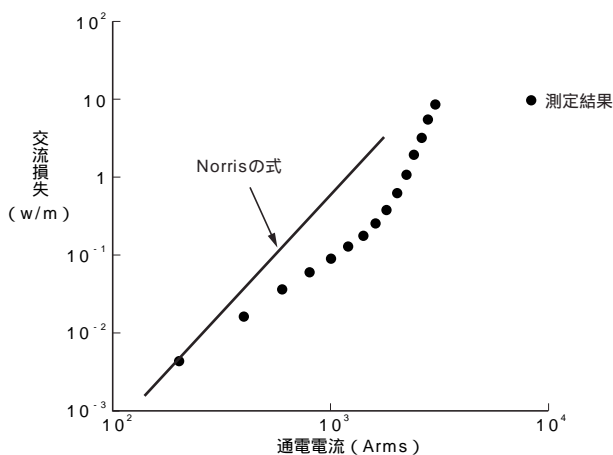


図13 导体交流損失測定結果

A.C. loss characteristics of the cable with transposed segment conductors

--- Comparison of the measured value with the calculated value ---

したことにより导体全体の電流分布が均流化し、結果として交流損失が低減したものと考えられる。この結果、1,000Armsの電流通電時の交流損失を0.1W/mまで低減することができた。

5.むすび

超電導ケーブルはフォーマの周りにテープ材を層間絶縁しながらスパイラル状に積層する構造を採るため、交流通電時においては層間のインダクタンス等の違いにより各テープ線に流れる電流に偏流が生じ、交流損失が大きく増大してしまうという問題が存在する。われわれはこの問題を解決すると同時に交流損失の低減をはかるため、Bi2223銀シーステープ線から構成される転位撚りセグメントを可とう性のあるフォーマに巻き付けるタイプの导体を考案し、開発を行ってきた。シース材に銀合金を採用することにより、転位セグメント化時に線材に加わるエッジワイズ曲げ歪等による超電導特性の低下を防止することが可能となり、今回15m長、2.6kA級超電導导体を開発した。本导体は大容量化のためにスパイラルピッチ調整を施した転位撚り3層構造を採用し、导体に流入する電流の均流化評価、および交流損失測定を行った。この結果、セグメント内の各テープ線に流入する電流は±5%以内に均流化されていること、および各層に流れる電流は±6%以内に均流化されていることを確認するとともに、导体の交流損失が1,000Armsの交流電流通電時に0.1W/mであるという測定結果を得ることができた。これらの結果を通じて、本导体構造が大容量低損失超電導ケーブル開発に非常に有効であることを実証した。

7.参考文献

- 1) 長屋重夫ほか：平成7年電気学会全国大会予稿集，No.7, p.243
- 2) 中島武憲ほか：平成8年電気学会全国大会予稿集，No.7, p.218
- 3) K. Ohno, et al. : Adv. in Supercond. XII Vol.1, p.833, 1999
- 4) J. Fujikami, et al. : Adv. in Supercond. XI Vol.2, p.903, 1999
- 5) S. Mukuyama, et al. : Adv. in Supercond. XI Vol.2, p.1373, 1999
- 6) A. Kume, et al. : Adv. in Supercond. VIII Vol.2, p.1307, 1995
- 7) N. Futaki, et al. : Adv. in Supercond. XII Vol. 1, p.736, 1999
- 8) 後藤謙次ほか：電気学会研究会資料ASC-01-17, 2001
- 9) 近藤潤次ほか：電気学会研究会資料ASC-99-30 / RM-99-41, 1999
- 10) W. T. Norris : J. Phys. D, Vol.3, p.489, 1970