66 kV 級高温超電導ケーブルの開発

向山 晋一, 坪内 宏和, 三好 一富, 吉田 俊朗,
一柳 直隆, 三村 正直*, 宇野 直樹*, 田中 靖三*,
池田 長*, 石井 英雄**, 本庄 昇一**, 岩田 良浩**

古河電気工業(株)超電導開発部 市原市八幡海岸通り 6

* 古河電気工業(株)超電導開発部 日光市清滝 500

** 東京電力(株)電力技術研究所 横浜市鶴見区江ヶ崎町 4-1

(1997 年 12 月 10 日受理)

The Development of a 66 kV-class High- T_c Superconducting Cable

Shinichi MUKOYAMA, Hirokazu TSUBOUCHI, Kazutomi MIYOSHI,
Toshirou YOSHIDA, Naotaka ICHIYANAGI, Masanao MIMURA,* Naoki UNO,*
Masaru IKEDA,* Hideo ISHII,** Shoichi HONJO** and Yoshihiro IWATA**

Superconductivity Research Department, The Furukawa Electric Co., Ltd.,
6 Yawata-kaigandori, Ichihara 290-8555

* Superconductivity Research Department, The Furukawa Electric Co., Ltd.,
500 Kiyotaki, Nikko 321-1442

** Power Engineering R&D Center, Tokyo Electric Power Company,
4-1 Egasaki-cho, Tsurumi-ku, Yokohama 230-0002

(Received December 10, 1997)

Synopsis:

Tokyo Power Company and The Furukawa Electric Co., Ltd. are advancing development in the base, element and system aiming at the achievement of a compact high- T_c superconducting cable of the 66 kV class. The HTS wire used for the HTS cable must have a high critical current density (J_c), be flexible and easy to make in long lengths. The most advanced wire is Bi2223 silver sheath multi-filamentary wire judging from these requirements. We developed a Bi2223 silver sheath wire that has $J_c > 20 \text{ kA/cm}^2$ when long in length. Moreover, a wire with a filament twist, aiming at AC loss reduction, was developed, and a decrease in AC loss was confirmed. To improve the mechanical properties of the wire, a multi-filamentary wire was made using Ag-Mg 0.2 wt% alloy for the outside sheath. Concerning important AC losses for the HTS cable, a 50 m-long conductor was manufactured and the AC losses were measured. As a result, it was confirmed that AC losses could be decreased by making the current distribution of the each layer uniform. We newly proposed the UCD (Uniform Current Distribution) model, and succeeded in analyzing the AC losses of the UCD conductor by this model. Concerning the electrical insulation, which is an important cable component, the design data of an insulating paper impregnated by liquid nitrogen was able to be obtained by executing an electric insulation test using a model-cable. We manufactured a 66 kV class-2 kA_{peak} prototype cable 5 m long, and succeeded in making a load test. This prototype cable consisted of one HTS conductor that had electric insulation, a thermal insulated tube and two terminals that connected to both ends to do the load test.

Keywords: HTS power cable, Bi2223 wire, AC loss, UCD model, electric insulation.

1. はじめに

高温超電導体が1986年に発見されて以来、高温超電導線材の開発が精力的に進められている。近年においては、電気的特性の良好な数kmの長さの高温超電導線材が生産されるようになってきており、電力機器分野においても多様な応用が考えられている。特に、高温超電導線材を用いた電力ケーブルは、超電導線材の断面積あたりに流れる電流（臨界電流密度）が銅などの通常の金属に比べて1,000倍以上大きくとれ、コンパクトでかつ高い効率のエネルギー伝送手段となりうる可能性を持っている。

古河電工は、東京電力と共同で、将来の大都市部での電力需要の増加に対応し、断面の小さい管路に設置できるような、コンパクトな高温超電導ケーブルの開発を進めている。本稿では、東京電力と古河電工で共同研究を行っている66kVコンパクト高温超電導ケーブルの研究の進捗を紹介する。

2. 高温超電導ケーブル用高温超電導線材

高温超電導ケーブルに用いられる高温超電導線材には、臨界電流密度（ J_c ）が高く、フレキシブルで長尺化が容易であることが要求される。これらの要件から判断して最も開発が進んでいるのはBi2223銀シース多芯テープ線材である。この銀シース多芯テープ線材はpowder in tube method (PIT法)と呼ばれる製法で作製される。これは超電導原料粉を銀パイプに充填して減面加工し、得られた線材を数十本集合化して再度銀パイプに挿入した後減面加工し、さらにテープ状に圧延して多芯フィラメントを有する銀シース線材とするものである。今回用いた線材の基本構造はFig. 1に示すように、銀比（銀シースの体積/超電導相の体積）が3.5、幅3.3mm、厚さ0.185mmで芯数が55芯の銀シース多芯テープ線材である。

Fig. 1 Cross section of the Bi2223 Ag-sheath wire.

Fig. 2 J_c distribution of the 50 m-long Bi2223 Ag-sheath wire.

2.1 J_c 特性と均一性

長尺のBi2223系銀シース多芯テープ線材の J_c 特性を評価するため、50m長の線材を製作して、直流四端子法により $10^{-13}\Omega\text{m}$ の定義で J_c 測定を行った。Fig. 2に、50m全長の J_c 測定結果と、電圧端子距離 $d_{V-V}=0.5\text{m}$ で測定した J_c 分布を示す。長さ方向に J_c の僅かな変動があるが50m全長で $J_c=21.6\text{kA/cm}^2$ が得られ、長尺線材として J_c の均一性が確認された。

次に J_c 測定で得られた電界-電流密度（ E - J ）特性を2回微分した d^2E/dJ^2 を局所的な J_c 分布 $F(J_{CL})$ と見なして、これをワイブル関数 f_w で近似した¹⁾。すなわち

$$\frac{d^2E}{dJ^2} = \rho_F \cdot f_w(j) = \frac{m}{J_w} j^{m-1} \exp(-j^m) \quad (1)$$

$$j = (J_{CL} - J_{CA}) / J_w$$

である。ここで、 ρ_F はフラックスフロー抵抗、 J_{CL} は理想的な臨界電流密度、 m は形状母数、 J_w は分布の幅に対応する値である。

Fig. 3 J_{CL} distribution and J_c histogram of the 50 m-long Bi2223 Ag-sheath wire.

E - J 解析から得られた J_{CL} 分布は Fig. 3 で示したように平均 $\langle J_{CL} \rangle$ が 28.28 kA/cm^2 にも達し、 $10^{-13} \Omega \text{m}$ 定義により測定される J_c 分布とは完全には一致しない。そこで、 J_c に対応した分布を推定するためフロー抵抗、 ρ_f を J_c 近傍の dE/dJ の値であると仮定し、 J_c 以下の J_{CL} をワイブル関数で近似させることを試みた。 J_{CL} 分布はまだ $d_{V-V}=0.5 \text{ m}$ で得られた J_c のヒストグラムと完全な一致は示していないが、この手法により J_{CL} と J_c は定性的な対応付けが可能となった。

2.2 ツイスト線の交流特性

交流損失の低減を目的としてツイストピッチ $L_p=4\sim 21 \text{ mm}$ まで変化させた線材を作製し、 J_c 特性と交流損失を評価した。交流損失の測定は、50 Hz のサイン波形の条件下で磁化法により求めた。得られた交流損失から臨界長さ L_c に対して、 $L_p < 2L_c$ ではフィラメント間結合が切れている状態で履歴損失とフィラメン

Fig. 4 AC loss and J_c dependence on the twist pitch of the Bi2223 Ag-sheath wires.

Fig. 5 AC loss of the twisted and untwisted tapes.

ト間結合損失が発生し、 $2L_c < L_p$ ではフィラメントが一体化した群として振る舞い履歴損失が増大することが予想される²⁾。

Fig. 4 には交流損失と J_c 特性に及ぼすツイストピッチの影響を示す。 $L_p=9 \text{ mm}$ で $J_c=14.3 \text{ kA/cm}^2$ が得られ、 $L_p=10 \text{ mm}$ 程度までは J_c の低下がほとんどなかった。また外部磁界振幅 9 mT での損失は $L_p=9 \text{ mm}$ で 12 J/m^3 、ツイストなしで 24 J/m^3 であった。 $L_p=9 \text{ mm}$ の線ではツイストなしのそれと比較して J_c を低下させることなく、損失を 50% 低減する効果が得られた。Fig. 5 に $L_p=9 \text{ mm}$ の線とツイストなしの線における損失の磁場振幅依存性を示す。図中の実線はフィラメントが完全に電磁氣的に結合している状態の履歴損失の計算値を、点線はフィラメントが結合していない状態の履歴損失の計算値を示す。実際には、臨界長さに相当する磁場で急激にフィラメント間結合が起きるのではなく、徐々に結合していくことがわかった。

2.3 AgMg 合金シース線の機械的特性

機械的強度の向上を目的として外シースに Ag-Mg 0.2 wt% 合金を用いた多芯テープを作製した。外シースの AgMg 合金の銀比が 1.8 で、内シースの純銀の銀比が 1.7 (線材全体での銀比 3.5)、厚さが 0.14 mm 、幅 2.5 mm 、長さ 50 mm の短尺線材で $J_c=30 \text{ kA/cm}^2$ が得られた。 J_c の引張り応力依存性は、室温で引張り応力 (σ) を加えた後で応力を解放し、液体窒素で J_c を測定した。

また、荷重なしで曲げ歪みによる J_c の劣化も調べた。ここで J_c の定義は $1 \mu\text{V/cm}$ とした。Fig. 6 に示すように、AgMg 合金シース線材では $\sigma_c=90 \text{ MPa}$ 、 $\epsilon_c=0.25\%$ 程度でも J_c はほとんど劣化しないことが

Fig. 6 J_c dependence on mechanical stress.

わかった。また、AgMg 合金シース線材の J_c は曲げ歪み 0.5 % 程度でもほとんど劣化せず、曲げに対しても改善されている。このように AgMg シース線材の J_c 特性が歪みに対しても改善されたことは、フィラメントの圧縮残留歪みの増大によると考えられる³⁾。

3. 66 kV 級コンパクト高温超電導ケーブルの構造

外径 130 mmφ の 66 kV 級コンパクト高温超電導ケーブルの構造図を Fig. 7 に示す。1 本の断熱管の中に、3 本のケーブルコアが収納されて、液体窒素で冷却される。各ケーブルコアを見ると、Bi 系多芯銀シーステープ線材が、可とう性を有するフォーマ上に螺旋状に多層巻きした構成で導体層を構成している。Bi2223 銀シーステープの臨界電流密度は、磁界依存性を持ち、高い磁界環境下に置かれると低下する。ただし、その磁界による低減率は、磁界の方向による依存性が高いことが知られている。

超電導体では、導体自身が発する磁界に超電導線材は曝されることになる。磁界による導体臨界電流の低下を小さくするためには、導体を構成するテープ線材を磁界に対して平行になるような配置にする必要がある。Fig. 8 に示すように、銀シーステープをスパイラル状に巻線することで、テープ線材に対して導体の

Fig. 7 Cross section of the 66 kV-class HTS cable.

Fig. 8 Conductor of HTS cable.

自己磁界が、テープ面に平行とすることができ、導体の臨界電流の磁界による低下が少ない導体を得ることができる。

66 kV 高温超電導ケーブルを運転する場合、導体間で 66 kV、導体-アース間で $66 \text{ kV} / \sqrt{3}$ の高電圧がかかる。そこで、多層スパイラル導体の外側に絶縁紙を数 mm 厚さに巻き絶縁層を形成する。この絶縁層は、紙の内部に液体窒素を浸透させた複合絶縁である。さらに、この絶縁層の外側には、導体層と同じ電流量の銀シーステープでできた磁気シールド層が形成されている。この磁気シールド層は 3 相短絡され、導体電流により遮蔽電流が誘導される設計である。これより、通電電流の作る自己磁界による他相の導体の臨界電流の低下や交流損失の増大、および断熱管への渦電流の誘導を防止している。

ところで、コンパクト高温超電導ケーブルの導体外径は、絶縁と冷却の兼ね合いから決まる。絶縁厚さの観点からは、電圧の低い方が絶縁層が薄くなり、ケーブルの外径は小さくなるが、一方電圧を低くすると、一定の送電容量を確保するためには電流を増やす必要がある。電流が増えると、ケーブルの交流損失が増大するために、ケーブルを冷却するために大量の液体窒素を流す必要が生じる。その結果断熱管を太くする必要があり、結果的にケーブル径が大きくなる。従って、ケーブル外径を最小にする最適電圧がある。冷却間隔 5 km の高温超電導ケーブルについて、送電容量をパラメータとして、電圧階級とケーブルの外径の関係を Fig. 9 に示す。その結果、送電容量 300~1,000 MVA では、66 kV の送電電圧が最適電圧となることがわかった。

Fig. 9 Relations between line voltage and cable outer diameter for each cable capacity.

4. 50 m 導体の製作⁴⁾

超電導ケーブルの交流損失の低減は、ケーブルのコンパクト化に必須であり、かつ従来の電力ケーブルに比べ送電コストを低減するためにも非常に重要である。長尺導体の製造可能性の検証のため、Fig. 10 に示す 50 m 導体を作成し、この導体に 2 kA_{rms}までの通電試験を行い交流損失の測定を行った。

スパイラル導体の場合、各層の電流分布を均一化することで交流損失を低減できるとの予測のもと、各層の電流分布を強制的に均一化して交流損失の測定を行った。各層の電流を均流化した 50 m 導体の交流損失の測定結果を、Fig. 11 に示す。従来、スパイラル導体の交流損失は、臨界状態モデルで説明され、電流の 3 乗に比例すると言われていた。しかしながら、各層の電流を均流化した 50 m 導体は、高電流領域で交流損失の電流依存性が 3 乗から傾きが小さくなり 1 乗に比例するようになった。その結果、高電流領域で交流損失を低減することができた。

Fig. 10 50 m-long HTS conductor.

Fig. 11 AC losses of 50 m-long HTS conductor.

この均流化した導体の交流損失の発生機構として、我々は UCD モデル（電流均一化モデル）を提唱して、理論的に解析することに成功した。UCD モデルによると、各層の電流分布を均一化した場合、それぞれの層内の電流は、トランスポート・カレントと内層で発生する磁界に対する遮蔽電流の合成となり、超電導層内の磁界は、トランスポート・カレントによる磁界 (I_m) と外部磁界 (H_m) による合成磁界となる。磁界が小さく、内部に完全に磁界が侵入していない層 ($2H_m + I_m < J_c d$) の交流損失は、ビーンモデルの $H_m < H_p$ の条件でのヒステリシス損失の式を変形して、次の式で示すことができる。

$$P = \frac{2}{3} \mu_0 f \frac{H_m^2}{J_c} + \frac{2}{3} \mu_0 f \frac{(H_m + I_m)^3}{J_c} \quad (2)$$

一方、磁界が完全に侵入した層 ($2H_m + I_m > J_c d$) では、ビーンモデルの $H_m > H_p$ の条件でのヒステリシス損失の式を変形して、次の式で交流損失を示すことができる。

$$P = 2 \mu_0 t_1^2 J_c f (H_m - \frac{2}{3} J_c t_1) + 2 \mu_0 t_2^2 J_c f (H_m + I_m - \frac{2}{3} J_c t_2) \quad (3)$$

(3) 式で、 t_1, t_2 は Fig. 12 に示すように層内の磁界分布で磁界が最小となる位置の深さ厚さである。導体の通電電流値が低い場合には、ほとんどの層で侵入磁界が層全体まで侵入しないために、(2) 式で示す交流損失を生ずる。通電電流が大きくなるほど、磁界が完全に侵入する層が増えて、(3) 式で示す交流損失の割合が大きくなる。その結果、電流に対する交流損失の傾きが小さくなる傾向となる。

(a) The magnetic field pattern of each layer
 I_m : transport current H_m : external field

(b) The current pattern of each layer

Fig. 12 The UCD model.

このUCDモデルの交流損失の式を用いた解析値を、Fig. 11に実線で示した。その結果、1.3 kA_{rms}程度まで実験値と解析値が非常に良く一致していることが分かる。ただし、それ以上の電流領域では、実験値が大きくなるが、これは導体に流れる交流電流が導体の臨界電流を越えるための電圧発生によるものと考えている。このことは、あらかじめ測定しておいた導体の直流臨界電流 $I_c = 1.7 \text{ kA}_{dc}$ (I_c 定義: $10^{-12} \Omega \text{m}$) と整合する。

5. 液体窒素含浸紙複合絶縁⁵⁾

5.1 電気絶縁試験

電気絶縁は高温超電導ケーブルを実現させるための重要な開発課題の1つである。そこで、我々は、高温超電導ケーブルの絶縁方式としてその安定性、信頼性から最も有望とされている過冷却液体窒素を含浸させた多層絶縁紙の絶縁特性について調査した。実験は、絶縁紙の種類として、OPPL紙、クラフト紙について、液体窒素を加圧して電気絶縁性能を確認した。

試料としてクラフト紙 (125 μm 厚)、OPPL 120 (120 μm 厚) を絶縁体とするモデルケーブル (導体径 ϕ 20 mm, 有効長さ 160 mm, 絶縁厚さ 1 mm, 2 mm) を使用した。試料を加圧可能なクライオスタット内に設置して、液体窒素に浸漬した後、ガス窒素で加圧した。

5.2 実験結果

Fig. 13に絶縁部を絶縁紙と液体窒素の混成と見た場合の部分放電開始電圧 (オーバーオール) を示す。図には過去に行った PE Film (厚み 96 μm)、PE Paper (厚み 106 μm) を使用したモデルケーブルのデータを付加してある。

すべての材料に当てはまるが、液体窒素の圧力が増

Fig. 13 Starting voltage of partial discharge of various insulation papers/films.

Table 1 Characteristics of AC breakdown (50 Hz, LN₂: 0.6 MPa abs).

Insulation paper	Break-down stress
OPPL 150	Over 50 kV/mm
Craft paper	62 kV/mm

Table 2 Characteristics of impulse breakdown (LN₂: 0.6 MPa abs).

Insulation paper	Break-down stress
OPPL 150	156 kV/mm
Craft paper	126 kV/mm

加すると部分放電開始電圧は高くなるが、0.4 MPaを越えると大きな増加は見られなくなる。材料的に見るとクラフト紙試料の部分放電開始電界が大きく、ついでOPPL, PE Paper, PE Filmとなっている。OPPLについては絶縁厚みが1 mmと2 mmの両方で試験を行ったところ部分放電開始電界はほぼ同じ値になり、このクラスの厚みでの絶縁厚依存性がないことが分かった。

次にTable 1, Table 2に液体窒素圧力0.6 MPaにおけるOPPLおよびクラフト紙の交流破壊特性、インパルス破壊特性を示す。OPPLの交流破壊電界は50 kV/mm以上あり、過去の測定結果と適合している。また、クラフト紙の交流破壊電界は60 kV/mmであり、従来の結果より大きなものとなっており、これは先の部分放電特性が優れていたことと適合する。

一方、インパルス破壊特性については、クラフト紙は126 kV/mm、OPPLは156 kV/mmとなった。クラフト紙の破壊値は過去の測定の最大レベルとなっている。OPPLのインパルス破壊値は従来材料の測定結果より大きく、絶縁厚みを薄くできる要因になる。

これらOPPLの絶縁データを用いて、実際に4 mm厚、有効長さ5 mのモデルケーブルを試作し、過冷却液体窒素中での電気絶縁試験を行った。その結果、3 kg/cm²の加圧液体窒素中でAC 75 kV-1時間の課電に成功した。このときの交流ストレスは21.4 kV/mmとなる⁶⁾。

6. 66 kV級-2 kA_{peak} 5 m プロトタイプ試験⁷⁾

66 kV級のケーブルの実現可能性を確認するために、5 m長さの66 kV級-2 kA_{peak}プロトタイプ・ケ

Fig. 14 Structure of the 2 kA_{peak}, 66 kV-class prototype cable.

ケーブルの課通電試験を行った。このプロトタイプ・ケーブルは、電気絶縁を施した1本の導体を断熱管に収納し、課通電が可能なように両端に2本の終端部を接続した構成となっている。

6.1 ケーブルの構造

モデルケーブルの構造を Fig. 14 に示す。導体は Bi 系多芯銀シーステープ線材をフォーマー上に多層交互巻きしたスパイラル導体である。電気絶縁は液体窒素含浸紙絶縁方式を採用し、絶縁、機械特性共に優れる半合成紙 (OPPL) を用いた。さらに、断熱には多層真空断熱方式を採用した。

このモデルケーブルでは、冷却に用いる液体窒素は大気圧の飽和液体窒素を用いたため、電気絶縁に対して高ストレスを得ることができず、絶縁厚さが 10 mm と比較的厚いものとなっている。

6.2 気中端末の開発

高温超電導ケーブル・プロトタイプモデルとして、Aタイプ、Cタイプと呼ぶ2種類の気中端末を試作した。Aタイプは低温部に液体窒素含浸による絶縁、温度傾斜部には高真空とブッシング型の固体絶縁を併用する方法を採用している。この方式のメリットは外部からの熱侵入を最小にできること、および装置のコンパクト化が図れることにある。Cタイプは、低温部はAタイプと同様に液体窒素含浸による絶縁を用い、温度傾斜部には窒素ガス絶縁方式を採用して高電圧リードを常温まで導いている。常温部では通常の油浸絶縁方式を用いている。この方式はAタイプに比べ外部からの熱侵入が多いが、電気絶縁性能が非常に安定していることが特徴である。

同時課通電試験は、Cタイプの気中端末を5mプロトタイプケーブルの両端に接続して実施した。このプロトタイプケーブルの断面図を Fig. 15 に示す。

Fig. 15 Cross section of the 2 kA_{peak}, 66 kV-class prototype cable that connected 2 terminals.

Fig. 16 Test setup of 2 kA_{peak}, 66 kV-class prototype cable.

6.3 同時課通電試験

同時課通電試験装置を Fig. 16 に示す。開発した2本の気中端末を接続した高温超電導ケーブルと、66 kV 級の CV ケーブルでループ回路を形成した。このループ回路に、通電トランスで交流電流を誘導通電させた。電圧は、100 kV トランスより印加した。液体窒素は、超電導ケーブルの片端より、0.05 kg/cm² のゲージ圧力で流し込み、他端より大気中に放出した。

66 kV 級-2 kA_{peak}同時課通電試験のテスト・チャートを Fig. 17 に示す。電圧は、5 kV ステップで昇圧して、対地電圧 38.1 kV (線間電圧 66 kV) まで課電した。38.1 kV 課電後、電流を 500 A ステップで 2 kA_{peak} まで増加させ、その状態で 15 分間維持し、課通電試験の成功を確認した。

Fig. 17 66 kV-2 kA_{peak} load test result of the prototype cable.

7. ま と め

現在、66 kV 級のコンパクト高温超電導ケーブルの実現に向けて、基礎、要素、システムの開発研究を進めている。現在までに得られた成果を以下にまとめる。

1) 長尺で J_c が 2 kA/cm^2 以上の高い J_c を持つ Bi2223 銀シース線材を開発した。

2) 線材の交流損失低減や機械的特性の向上を図ることができた。

3) 長尺導体の実現可能性を確認するために 50 m 導体の製作を行い、2 kA までの通電に成功した。また、この実験で多層スパイラル導体の交流損失に関し、各層の電流分布を均一化することで交流損失を低

減できることを確認した。また、均流化した導体の交流損失について、新たに UCD モデルを提案し定量化することができた。

4) ケーブルの電気絶縁方式として、液体窒素含浸の絶縁紙積層方式を採用し、クラフト紙や半合成紙 (OPPL) などの各種材料の電気絶縁特性を確認した。

5) OPPL を絶縁材料とした 4 mm 厚、有効長さ 5 m のモデルケーブルを試作し、過冷却液体窒素中での電気絶縁試験を行った。その結果、 3 kg/cm^2 の加圧液体窒素中で AC 75 kV-1 時間の課電に成功した。

6) 実用化の確認として、5 m 長の 66 kV 級-2 kA_{peak} プロトタイプモデルを試作し、課通電試験に成功した。

参 考 文 献

- 1) M. Mimura, et al.: 8th International Workshop on Critical Currents in Superconductors (1996) 455
- 2) M. Sugimoto, et al.: Physica C **279** (1997) 225
- 3) M. Mimura, et al.: ISS '97 Proceedings (1997) WBP-45
- 4) S. Mukoyama, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. **7** (1997) 1069
- 5) 坪内宏和ら：平成 9 年電気学会全国大会論文集 (1997) 7-213
- 6) 坪内宏和ら：平成 9 年電気学会電力・エネルギー部門大会論文集 (1997) 535
- 7) O. Miura, et al.: Cryogenics **36** (1996) 589