

# AC 35 kV 600 A 超電導ケーブルシステムの開発

## Development of AC 35 kV 600 A Superconducting Cable System

足立和久 Kazuhisa ADACHI 北村 祐 Tasuku KITAMURA 中西達尚 Tatsuhisa NAKANISHI 青木裕治 Yuji AOKI

小泉 勉 Tsutomu KOIZUMI 三堂信博 Nobuhiro MIDO 長谷川隆代 Takayo HASEGAWA

発電された電力をできる限り低損失で送電できる方法として、YBCO系線材を使用した超電導ケーブルシステムを開発した。超電導ケーブルと終端部を開発し、それらを組み合わせてCIGRE TB538に基づく形式試験を行い、十分な性能を有することを確認した。

We developed superconducting cable system using YBCO superconducting tape in order to provide a means of low transmission loss of energy power. We developed superconducting cable and sealing end, performed the type testing based on CIGRE TB538, and confirmed that the system met all requirements.

### 1. はじめに

東日本大震災以降、電力供給事情の厳しい状況が続く中、今後東京オリンピック開催やリニアモーターカーの稼働等、大量の電力を必要とする施設が多くなる。このため、電力送電、配電において省エネルギー化が強く求められている。

電力発電においては洋上風力発電やメガソーラー等の自然エネルギーを利用した発電が相次いでいるため、発電所から需要家までの送電によるロスの低減は省エネルギーに対して非常に重要である。

高温超電導体（HTS）線材は、銀を多く使用するピスマス系の第1世代線材に対して、近年 $YBa_2Cu_3O_y$ の組成で貴金属を使用しない低コストなイットリウム（Y）系の第2世代線材（YBCO）が開発されており、当社はYBCO線材を製造販売している<sup>1), 2)</sup>。また、以前、極低温ケーブルとして液体窒素で冷却したケーブルシステムを開発している<sup>3)</sup>。この線材の技術と極低温ケーブル技術を融合することで、YBCO線材を使用した超電導ケーブルシステムを開発した。

超電導線は極低温下の直流では電気抵抗が0になるが、交流では磁界等の影響により交流損失が発生する<sup>4)</sup>。本ケーブルは従来よりも膜厚が薄いYBCO線材を使用しているため、交流損失の低減が可能であり、送電ロスを大幅に低減可能である。

本報では、定格35 kV - 600 Aの超電導ケーブルシステムを開発した結果を報告する。

### 2. 超電導ケーブル開発

超電導ケーブルの開発にあたり、ケーブルの重要品質性能を決定する超電導導体と絶縁紙の性能検証試験を行った。

#### 2.1 超電導ケーブルの通電特性の最適化

超電導ケーブルの重要性能である、超電導線材の撚線プロセスの検討を行った。超電導線材の仕様を表1に示す。

超電導線材は金属基板であるニッケル合金テープ上にY系超電導体を形成したもので、その周囲に保護層として銅メッキ層が形成されており、厚さ0.2 mm幅4または5 mmのテープ状の導体となっている。これを液体窒素温度に冷却することによって超電導層が超電導状態になることでゼロ抵抗となり、臨界電流と呼ばれる値までゼロ抵抗状態で電流を流すことができる。

表1 超電導線材の仕様

項目	単位	値
厚さ	mm	0.2
幅	mm	4または5
臨界電流	A	> 100

超電導線材1本だけではケーブルとしての必要な電流を得られないために、複数本の超電導線材をバンドルして一つのケーブルにする必要がある。筆者らは、従来の電力ケーブルの製造に使用されている撚線機を使用して、フォーマと呼ばれる銅導体に複数本の超電導線材を撚り合わせることを検討した。フォーマには通常の電力ケーブルの導体に

使用されている円形圧縮導体を採用した。これは素線径 2.3 mm の銅導体を撚り合わせた後圧縮成形したもので仕上り外径は約 19 mm である。このフォーマの周囲に内層導体として幅 4 mm の超電導線材を 12 本撚り合わせた。この時、超電導線材の超電導層は撚り合わせの内側に配列した、**図 1** に超電導線材をフォーマに撚り合わせた後の状態を示す。

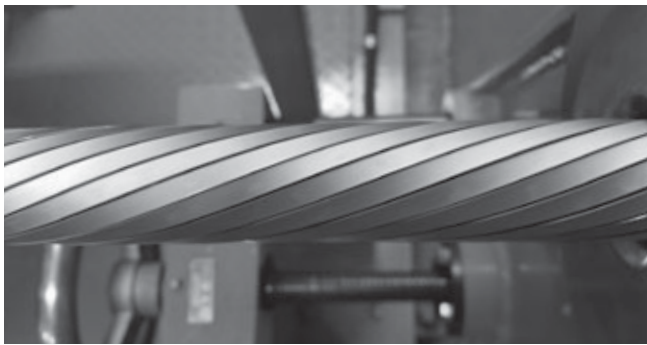


図 1 超電導線材の撚り合わせ状態

使用した YBCO 線材の特性から、上記の構造の超電導ケーブルの臨界電流はおおよそ 1200 A と見積もられる。製造したケーブルから長さ 1000 mm のサンプルを切り出し、両端に銅の通電端子を接続して、四端子法を用いて臨界電流値を求めた。臨界電流のクライテリオンは電界基準  $1 \mu\text{V}/\text{cm}$  とした。**図 2** に臨界電流計測時の I-V 曲線を示す。

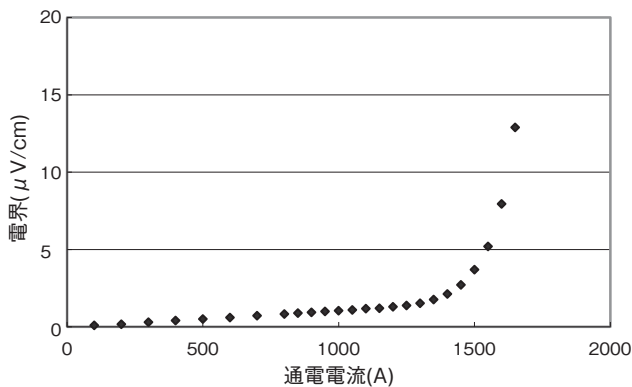


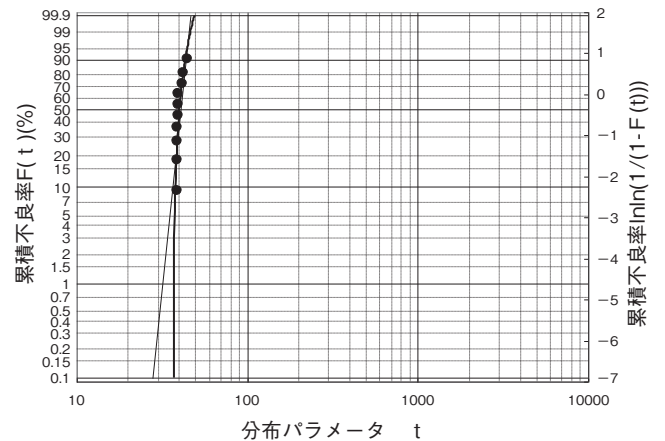
図 2 超電導導体の電流-電界 (I-V) 曲線

銅電極および接続抵抗分を差し引いた臨界電流値は設計値通りであることが確認された。

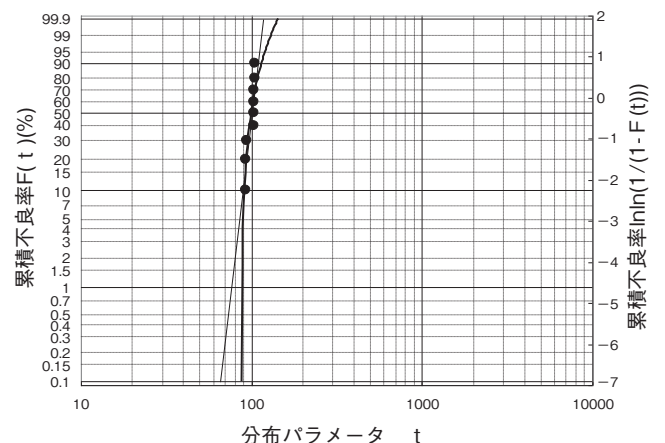
2.2 絶縁紙の紙巻きプロセスの検討

超電導ケーブルは液体窒素に浸漬した状態で所定の電圧下で使用するため、通常の電力ケーブルと同様に絶縁層を形成するが、液体窒素中の低温環境下で絶縁性能を得る必要がある。筆者らは、絶縁紙に半合成紙である PPLP-C (クラフト紙とポリプロピレンシートの積層) を採用した。本材料 (幅約 20 mm 厚さ約 0.13 mm) を所定枚数導体上に巻くことで、所定の耐電圧性を持たせる。検証試験用として、外径約 19 mm の銅パイプ上に厚さ 1 mm の絶縁層を

形成した模擬ケーブルを作製した。これから長さ 1000 mm のサンプルを 10 本切り出し、液体窒素下での耐圧試験を行った。各試料の破壊電圧のワイブルプロットを**図 3** に示す。ワイブルプロットの結果から、液体窒素中の PPLP-C 絶縁層の耐圧性能は商用周波電圧が 36.9 kV/mm、雷インパルス電圧が 87.4 kV/mm であることがわかった。



(a) PPLP AC破壊



(b) PPLP Imp破壊

図 3 PPLP-C ケーブルの耐圧試験ワイブルプロット

2.3 超電導ケーブル設計

上記の絶縁性能検証結果をもとに超電導ケーブルの設計を行った。**表 2** に示す要求性能を満たすケーブルの構造と仕様を決定した。主要緒元を**表 3**、断面図を**図 4** に示す。

表 2 超電導ケーブルの要求性能

項目	単位	値
定格電圧	kV	交流 35
定格電流	A	600
臨界電流	A	1200
導体温度	K	< 77.3

表 3 超電導ケーブルの主要緒元

項目	単位	値
フォーマ外径	mm	19.0
内部超電導線材	mm	厚さ 0.2, 幅 4.0
	本	12
内部半導電層厚	mm	約 0.3
絶縁厚	mm	3.8
外部半導電層厚	mm	約 0.6
外部超電導線材	mm	厚さ 0.2, 幅 5.0
	mm	厚さ 0.5, 幅 4.0
遮へい層銅条	本	36
	mm	約 34
内コルゲート管外径	mm	約 72
外コルゲート管外径	mm	約 118
防食層外径	mm	130

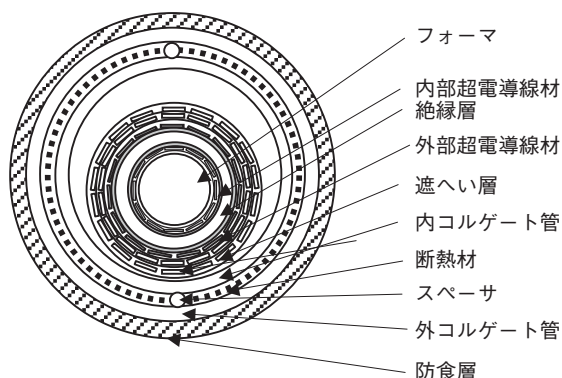


図 3 超電導ケーブルの断面構造

フォーマには、断面積  $240 \text{ mm}^2$  の円形圧縮銅導体を採用した。このフォーマは超電導線材の巻枠としての機能に加えケーブル運転時の事故時に発生する短絡電流による超電導線材の焼損を防ぐための補償導体としての機能を持つ。外部超電導層の外側に、遮へい層を形成した。この遮へい層も短絡時の補償導体としての機能を有するため、 $72 \text{ mm}^2$  の断面積の銅が配置されている。断熱用の 2 層のコルゲート管の間にはスーパーインシュレーションと呼ばれる断熱材料を配置した。これにより断熱層を真空にすることで、ケーブル周囲からの熱侵入が遮断できる。外部コルゲート管の周囲には厚さ約  $5 \text{ mm}$  の防食層を形成した。

### 3. 終端接続部の設計

超電導ケーブルシステムを開発する上で重要な開発要素である終端接続部の構造について説明する。

開発した終端接続部はケーブルと同様に二重管構造である。内管内部に液体窒素を入れ、内外管の間を真空にて断熱することで熱侵入を防いでいる。

ケーブルの電界緩和は OF ケーブルと同様に紙巻きのストレスコーンを用いた。また、超電導線材ははんだ付けにより通電端子と接続し、貫通ブッシングを介して外部の通電端子と接続した。

貫通ブッシングの導体サイズは大きければジュール発熱

が小さいが、熱侵入が大きくなる。このため、熱解析を行うことにより、貫通ブッシングの導体サイズを決定した。終端接続部の外観を図 4 に、熱解析結果を図 5 に示す。

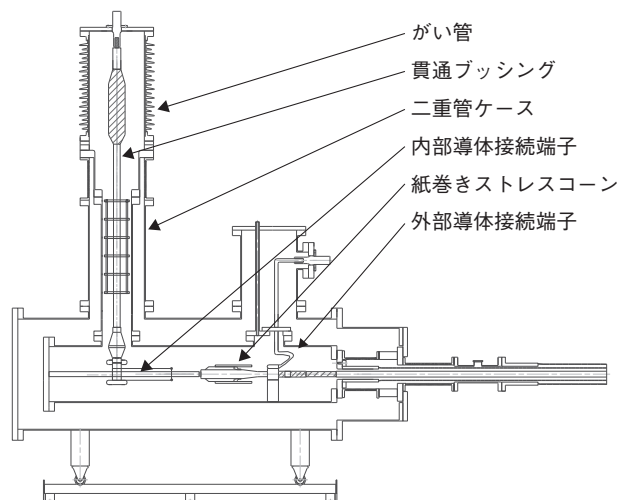


図 4 35 kV600 A 超電導ケーブル終端接続部

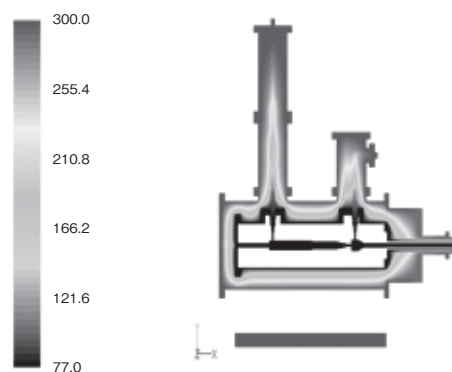


図 5 終端接続部の熱解析結果

### 4. 終端接続部モデル試験

超電導ケーブル終端を開発するために実際の紙巻き絶縁のストレスコーンと同じ大きさの終端接続モデルを試作し、電気試験を行った。

ステンレス製の真空二重管構造のクライオスタットに液体窒素を注入し、その中に試料を入れて電気試験を行った。試験状況を図 6 に、試験結果を表 4 に示す。



図 6 終端接続部のモデル試験



表4 終端接続部のモデル試験結果

項目	性能	結果
商用周波耐電圧	52 kV 30分	良
雷インパルス耐電圧	±200 kV 10回	良
商用周波部分放電	37 kV10秒後 31.5 kVにて発生しないこと	良

## 5. ケーブルシステム試験

開発した超電導ケーブルと終端接続部を組み合わせ、試験を行った。

組み合わせ後、内管の圧力試験を行い、0.5 MPaGにて漏れが無いことを確認したのち、外管を組立てしてHeリークディテクタにて $10^9$  Pa・m<sup>3</sup>/secのレベルでリークが無いことを確認した。

リークテスト後、終端に過冷却システムによる冷却装置および循環ポンプの配管を接続した。

初期冷却の際には、まず窒素ガスにより173 K程度まで冷却し、その後液体窒素を注入することで77 Kまで冷却した。

液体窒素冷却では循環ポンプで過冷却状態にした液体窒素を強制循環することでケーブルシステム全体を冷却させた。このシステムを用いて、液体窒素の温度は65 K～70 Kに制御されている。

試験は最初5 mのケーブルを用いて、各種の初期試験を行った。結果を表5に示す。

表5 5 m ケーブルでの初期試験結果

	要求性能	試験結果
圧力試験	0.5 MPaGにて漏れなきこと	良
通電試験	600 A 通電にて異常発熱が発生しないこと	良
臨界電流測定	1200 A	良
絶縁抵抗	2000 MΩ	良
商用周波耐電圧試験	53 kV 30分に耐えること	良
雷インパルス耐電圧試験	±200 kV 各10回に耐えること	良
部分放電試験	37 kV10秒後 31.5 kVにて発生しないこと	良

次に、15 mのケーブルを用いて超電導ケーブルの試験推奨案であるCIGRE TB538に規定された試験を行った。

試験結果を表6に、試験状況を図7および図8に示す。

表6 CIGRE TB538による試験結果

	要求性能	試験結果
曲げ試験	180° 3回曲げを行い、試験に用いる	良
圧力試験	0.5 MPaGにて漏れなきこと	良
長期課通電試験	42 kV 連続課電 600 A 通電 8時間 on/16時間 off 20回	良
商用周波耐電圧試験	53 kV 30分に耐えること	良
雷インパルス耐電圧試験	±200 kV 各10回に耐えること	良
部分放電試験	37 kV10秒後 31.5 kVにて発生しないこと	良
臨界電流測定	1.0 μV/mm以上の電圧となる電流が1200 A以上であること	良

これらの結果より、CIGRE TB538に規定された各種試験に対しても十分な性能を有することが確認された。



図7 曲げ試験状況

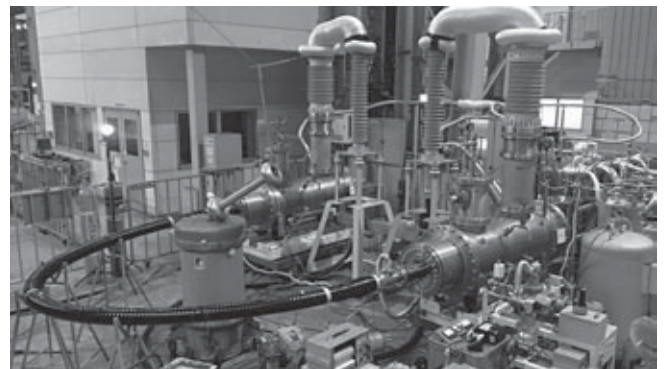


図8 長期課通電試験状況

## 6. ま と め

省エネルギーに有効な技術である超電導ケーブルシステムを開発した。開発したケーブルシステムは定格 35 kV, 600 A である。

社内で作製した YBCO 線材を用いて撚線導体を作製し、設計どおりの通電特性が得られることを確認した。また、絶縁に用いる PPLP-C の耐圧特性を評価し、導体設計に反映させた。これを開発した終端と接続し、冷却装置に接続して、CIGRE TB538 に準拠した試験を行い、十分な性能を有することを確認した。

## 参考文献

- 1) 中西達尚, 他: 昭和電線レビュー, Vol. 58, No.1 (2008)
- 2) 木村一成, 他: 昭和電線レビュー, Vol. 60, No.1, P20 (2014)
- 3) 芳賀薫, 他: 昭和電線レビュー, Vol. 23, No.1, P32 (1973)
- 4) Y. Ohtsubo, M. Iwakuma, S. Sato, K. Sakaki, A. Tomioka, T. Miyayama, M. Konno, H. Hayashi, H. Okamoto, Y. Gosho, T. Eguchi, T. Saitoh, T. Izumi, Y. Shiohara: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 25,3, Article number 6966725, 2015.06.

昭和電線ケーブルシステム(株)  
足立 和久 (あだち かずひさ)  
超電導テクノロジーセンター  
ケーブルシステム開発グループ 主査  
超電導ケーブルシステムの研究・開発に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)  
北村 祐 (きたむら たすく)  
工学博士  
超電導テクノロジーセンター  
ケーブルシステム開発グループ 主幹  
超電導ケーブルシステムの研究・開発に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)  
中西 達尚 (なかにし たつひさ)  
超電導テクノロジーセンター  
ケーブルシステム開発グループ 主査  
超電導ケーブルシステムの研究・開発に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)  
青木 裕治 (あおき ゆうじ)  
超電導テクノロジーセンター  
ケーブルシステム開発グループ 主幹  
超電導ケーブルシステムの研究・開発に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)  
小泉 勉 (こいずみ つとむ)  
超電導テクノロジーセンター  
線材開発グループ長  
超電導線材の研究・開発に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)  
三堂 信博 (みどう のぶひろ)  
超電導テクノロジーセンター  
ケーブルシステム開発グループ長  
超電導ケーブルシステムの研究・開発に従事

昭和電線ホールディングス(株)  
長谷川 隆代 (はせがわ たかよ)  
工学博士  
取締役 技術企画室長  
兼 昭和電線ケーブルシステム(株)  
超電導テクノロジーセンター長  
超電導線材, ケーブルシステムの研究・開発に従事