

三相同軸超電導ケーブルの開発

Development of tri-axial superconducting cable

北村 祐
Tasuku KITAMURA

足立和久
Kazuhisa ADACHI

菅根秀夫
Hideo SUGANE

中西達尚
Tatsuhisa NAKANISHI

青木裕治
Yuji AOKI

三堂信博
Nobuhiro MIDOU

長谷川隆代
Takayo HASEGAWA

岩熊成卓*
Masataka IWAKUMA

定格電圧 22 kV, 定格電流 3 kA の三相同軸超電導ケーブルを開発した。過冷却液体窒素で超電導ケーブルと終端を冷却するシステムを設計した。導体は専用の生産設備を使用して自社製 Y 系酸化物超電導 (YBCO) 線材を撚り線加工し各相 3800 A 以上の臨界電流を有する超電導ケーブルを設計した。導体コアの外径は約 50 mm, ケーブルの外径は約 130 mm とした。終端の長さは約 4000 mm, 外径は 450 mm, 質量は 600 kg とした。絶縁材料は (Polypropylene Laminated Paper (PPL paper)) を採用した。絶縁厚はモデルケーブルの破壊試験結果のワイブル解析結果から求めた最小破壊電圧から決定した。ケーブルシステムの冷却については過冷却液体窒素を用いて行い, 終端の入り口での液体窒素の温度は 70 K, 出口での温度は 73 K とした。長さ 20 m の三相同軸ケーブルを製造し, 抜き取り検査として液体窒素温度で臨界電流測定試験と耐電圧試験を実施した。要素試験の結果に基づきケーブルと終端で構成される超電導ケーブルシステムの型式試験を, 「超電導ケーブル試験推奨案 (CIGRE Technical Brochures 538)」¹⁾ に基づき実施した。

We developed a tri-axial superconducting cable system with the rated voltage of 22 kV and operating current of 3 kA at liquid nitrogen temperature. We designed the superconducting cable and the termination that was cooled subcooled liquid nitrogen. We used in-house YBCO tapes and a winding machine to prepare the conductor that the I_c -value of 3800 A or more per phase at liquid nitrogen temperature. The outer diameters of the conductor and the cryostat were approximately 50 mm and 130 mm, respectively. The length, the diameter and weight of each termination were approximately 4000 mm, 450 mm and 600 kg. The thickness of the insulation layer, which was made from PPL paper, was determined by estimation of minimum break down electrical field from Weibull distribution analysis of results, which were obtained by break down tests of the model cables. Regarding the cooling condition of the cooling system, the liquid nitrogen temperatures of the inlet and the outlet of cable system were designed to be 70 K and 73 K, respectively. We manufactured a 20 m tri-axial superconducting cable, and cut out it to get 2 m samples for the I_c test and voltage test at liquid nitrogen temperature. We performed type test of cable system including the superconducting cable and the termination, based on “Recommendations for Testing of Superconducting cables (CIGRE Technical Brochures 538)”

1. はじめに

超電導ケーブルはアジア, ヨーロッパ, アメリカを中心に世界各国で開発が進められている。超電導ケーブルの開発の技術課題として, 低交流損失化, 低熱侵入量が挙げられる。これに対して三相同軸超電導ケーブルは交流損失, 熱侵入量は同スペックの三心超電導ケーブルや単心超電導ケーブルと比較して優れた性能を有していることを前報で

報告した²⁾。公称電圧 22 kV × 定格電流 3 kA の三相同軸ケーブル試験がアメリカのオハイオで実施された³⁾。公称電圧 13.2 kV × 定格電流 3 kA の三相同軸ケーブル試験がドイツのエッセンで実施された⁴⁾。本論文では発電機と昇圧変圧器をつなぐ公称電圧 22 kV × 定格電流 3 kA 相分離母線を開発ターゲットとして本システムを開発した。開発にあたり絶縁材料の選定, 生産設備でのケーブル製造, 終端の設計と製造, 製品の性能検証を行った。

* 九州大学

2. コンポーネントの設計、試作と検証

2.1 三相同軸超電導ケーブルの構造

YBCO 線材はトリフルオロ酸塩塗布熱分解 (TFA-MOD) 法により製作した。線材の仕上がり外形は幅が 4 mm, 厚さは 0.2 mm とした。三相同軸超電導ケーブルの構造を 図 1, 寸法を表 1 に示す。

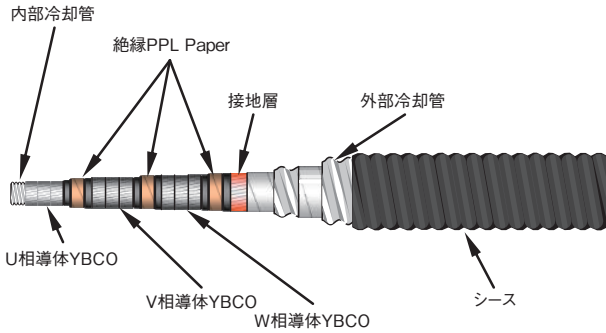


図 1 三相同軸超電導ケーブルの構造

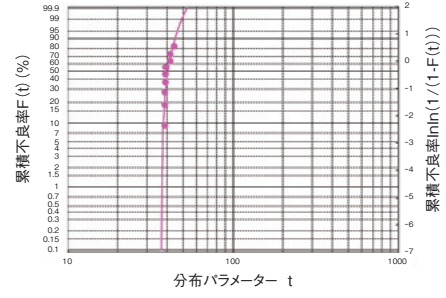
表 1 三相同軸超電導ケーブルの構造寸法

項目	外径 (mm)
SUS コルゲート内部冷却管	24
U 相 YBCO 導体	25
U 相 PPLP 絶縁	32
V 相 YBCO 導体	34
V 相 PPLP 絶縁	41
W 相 YBCO 導体	42
W 相 PPLP 絶縁	49
接地相 銅テープ	52
内部アルミコルゲート	83
スーパーインシュレーション	85
外部アルミコルゲート	121
シース	131

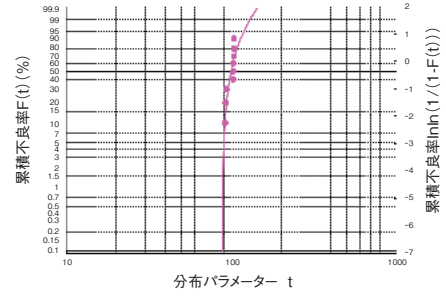
ケーブルの中心に内部冷却管としてステンレス製のコルゲート管を配置した。コルゲート管の上に三相 (UV, W 相) の超電導線材及び絶縁層を形成した。この構造の超電導ケーブルが低交流損失であるのは、ケーブルの構造が同軸構造であるために通電時に導体に生じる漏洩磁界が小さいことによるものである。また、ケーブル線路に液体窒素を流すことについても、中心部分のフォーマに銅導体が使われていると、復路の冷却管が必要になるが、中心部分の SUS コルゲート管が往路の冷却管、外部冷却管と導体コアの間の空間部分を復路の冷却管として使用できるので、ケーブルのみで液体窒素の往復冷却が可能になるというメリットを有する²⁾。

2.2 絶縁材料の基礎試験

ケーブルの絶縁材料には PPLP (Polypropylene Laminated Paper) 紙を採用した。PPLP 紙は OF ケーブルの絶縁材料としての実績、類似構造の超電導ケーブルでの採用実績がある²⁾。まず、絶縁厚 1.2 mm のモデルケーブルを製作し、AC 交流破壊試験と雷インパルス破壊試験を実施した。測定結果をワイブルプロットして最小破壊電圧を求めた。ワイブルプロットデータを 図 2 に示す。



(a) AC破壊試験



(b) 雷インパルス破壊試験

図 2 モデルケーブル破壊試験ワイブルプロット

これらの結果から、AC 破壊試験の最小破壊電圧 EL は 36.9 kV/mm, 雷インパルス破壊試験の最小破壊電圧 EL は 87.4 kV/mm であることがわかった。これらの結果から、公称電圧 22 kV の三相同軸ケーブルに必要な絶縁厚さは約 2.0 mm とした。

2.3 短絡電流試験

三相同軸超電導ケーブル単体には外部からの事故などにより発生する短絡電流に対する保護機能は有していないため、三相同軸ケーブルに保護機能を付与する必要がある。我々は超電導ケーブルと電氣的に並列な常電導 CV ケーブルを配置して各相超電導導体に接続した。各相の CV ケーブルの銅導体の断面積は 250 mm² とした。三相の CV ケーブルは常温の空間に配置する。超電導ケーブルに導体の臨界電流値を超える数 10 kA の大電流が流れ込んでも、大電流は CV ケーブルに分流し、超電導ケーブルに大電流が流れることを抑制しケーブルが保護されることを事前のシミュレーションで確認した。三相同軸超電導ケーブル短絡試験の回路図を 図 3 に示す。

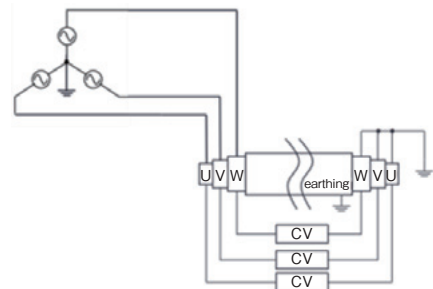


図 3 短絡試験回路図

各相に流れた電流を計測するために、超電導ケーブルとCVケーブルに電流計測用のCTを取り付けた。200 MVAの短絡電流発電機を超電導ケーブルの片側三相に接続し、もう片側は三相短絡した上でケーブルに交流 26 kA×1.5 秒の短絡電流を印加した。図4に短絡電流印加後のW相の超電導ケーブル、CVケーブル、分岐前の導体に流れた電流の測定結果を示す。

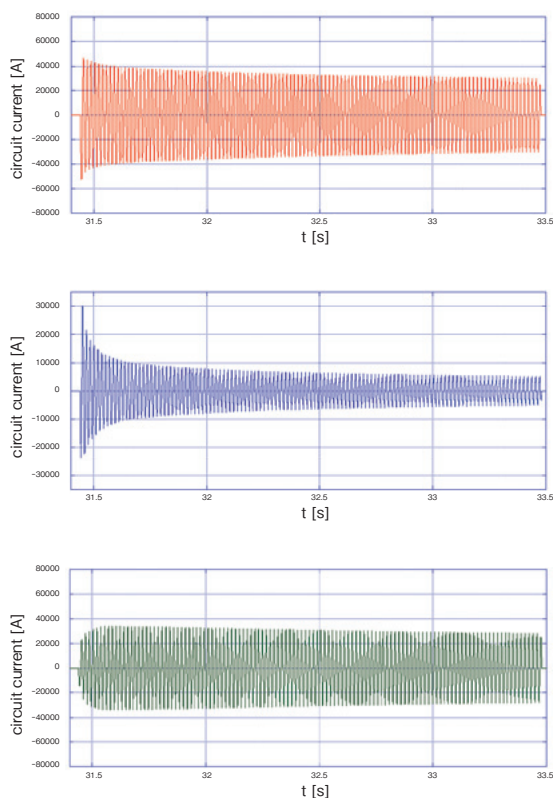


図4 短絡電流波形

図中、赤色の波形が回路全体の電流、青色が超電導ケーブルの電流、緑色が常電導ケーブルに分流した電流を示す。超電導ケーブルに流れる電流は時間に対して非線形の挙動を示しながら減衰していることがわかる。このことから超電導ケーブルの臨界電流値を大きく上回る短絡電流が流れたとしても、超電導ケーブルは超電導状態を維持しながら通電電流を減衰し、常電導ケーブル側に電流が転流していると考えられる。しかし臨界電流 $I_c(B, T)$ を超過する電流が流れている。この時超電導ケーブルのYBCO線材では、電流によって生じた磁束線がピンニングセンターから一定の確率で外れてしまう磁束クリープ状態から更に大きな電流を流すことで生じるローレンツ力が生じ、すべての磁束線が連続的に運動しているフラックスフロー状態と呼ばれる状態で電流が流れている。我々は同様の結果をU、V相超電導導体の通電試験結果でも確認した。

2.4 熱侵入量の計測

超電導ケーブルの外部冷却管の熱侵入量を計測した。超電導ケーブルを実フィールドで運用するためには、超電導導体を冷却する液体窒素の消費量を低減する必要がある。外部冷却管は二重のアルミコルゲート管で構成される。コルゲート管同士の空間を $10^3 \sim 10^4$ Pa オーダーの真空状態として断熱層とする。また、内側のコルゲート管の周囲にスーパーインシュレーション層を形成することで輻射による熱侵入を抑制し、超低熱侵入を実現している。外側のコルゲート管上にシース層を形成しカバーとする。我々は外部冷却管を表1に示す構造寸法のとおり設計し、長さ5 mの試作品を作製して熱侵入量を評価した。図5に熱侵入計測装置の概略図を示す。

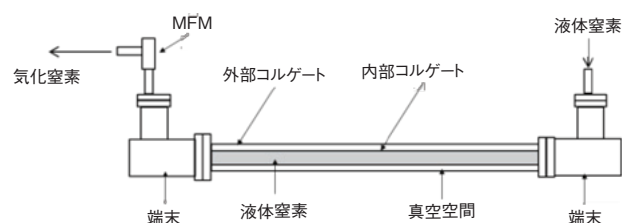


図5 熱侵入量計測装置概略図

まず片側の端末から液体窒素を注入する。冷却管の内部コルゲートと端末の内部クライオスタットが冷却され、液体窒素温度まで冷却されると内部に液体窒素が溜まる。液体窒素の液面が内部コルゲート管の上部まで達した時点で超電導ケーブルの運転時の状況と等価になるので、この段階で熱侵入量を計測する。気化窒素ガスの放出側でMFM (Mass Flow Meter) により気化窒素の流量を計測し、蒸発した液体窒素に与えられた熱侵入量を計算により求めた。計測した熱侵入量に対し、予め両端末のみの熱侵入量を測定し、その値を計測結果から引くと、長さ5 mの外部冷却管の部分の熱侵入量は8.5 Wであった。故に単位長さ当りのその熱侵入量は1.7 W/mであることがわかった。

2.5 終端の設計と開発

超電導ケーブルに接続する終端部品の設計を行った。超電導ケーブルの各相の導体を終端内において電流リードに接続して外部に取り出す。各相の絶縁層は絶縁紙によって形成したストレスコーンによって電界を制御する。クライオスタットは二重構造を取り、内部は極低温での絶縁性能に優れたFRPパイプを使用した。内部と外部のクライオスタットの熱絶縁は固体断熱材を使用した。図6に示すように終端のモデルサンプルを製作し絶縁性能を検証した。

終端テストサンプルの内管と外管の間の空間には固体断熱材を充填し、内管内部に液体窒素を充填した。所定の交流電圧を印加して合格することを確認した。

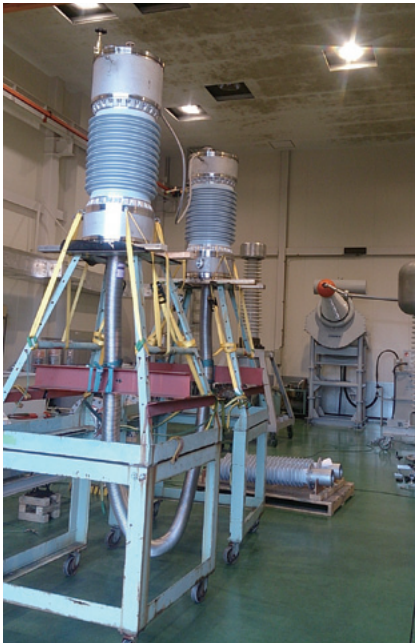


図6 端末テストサンプルの絶縁性能検証

3. 型式試験

超電導ケーブル及び終端を製造し、これらを接続して超電導ケーブルシステムを構築した後、型式試験を実施した。型式試験は「超電導ケーブル試験推奨案 (CIGRE Technical Brochures 538) ¹⁾」に基づいて実施した。

3.1 超電導ケーブルの曲げ試験及び電気性能評価試験

製作した長さ 20 m の超電導ケーブルは推奨案の「3.0 ケーブルシステムの型式試験」にもとづき曲げ試験を実施した。所定の直径の巻枠に超電導ケーブルを巻きつけた。巻枠の規格値は 4675 mm であるが、今回はこれより曲げ歪みの大きい 3200 mm の巻枠を用いた。曲げ試験は図 7 に示すように製造工場の設備を用いて行った。



図7 曲げ試験実施状況

ケーブル 20 m 全長を巻枠に巻き付ける。これを一度引出した後、ケーブルを 180 度反転させてケーブルを巻き枠に巻き付ける。これを 3 回繰り返した。曲げ試験後ケーブルを 2 m 切り出し、推奨案の「3.4 ケーブルの型式試験」に基づき電気試験を実施した。図 8 に示すように超電導ケ

ーブルの U 相、V 相、W 相にそれぞれ通電用電極を接続し、電極間に電圧端子を取り付けた。導体部分を液体窒素に浸漬し直流四端子法で I-E 測定を実施した。臨界電流値のしきい値は $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ とした。

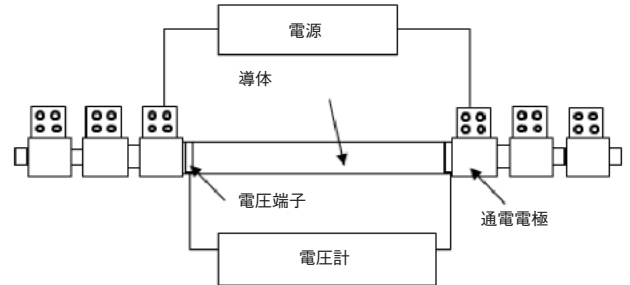


図8 電気試験回路図

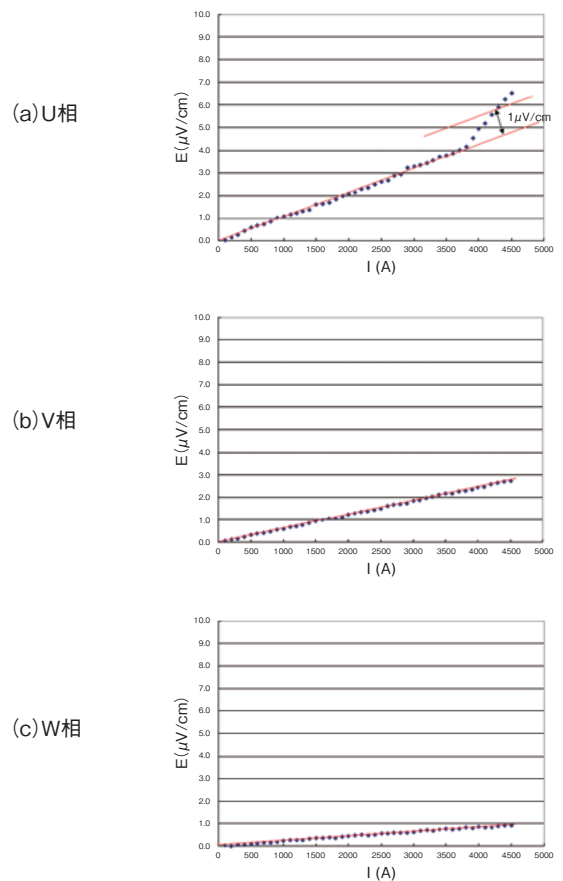


図9 超電導導体の I-E 曲線

ーブルの U 相の直流臨界電流値は 3800 A であった。V 相、W 相の臨界電流値は $> 4300 \text{ A}$ であった。規格値は超電導ケーブルの臨界電流 3000 A の 95%，すなわち 2850 A であるので、計測値は要求規格を満たすことがわかった (図 9)。

3.2 超電導ケーブル試験線路構築

超電導ケーブルが規格の要求値を満たすことが確認できたので、長さ 18 m のケーブルと終端を接続して型式試験線路を構築した。図 10 に試験線路の概要を示す。

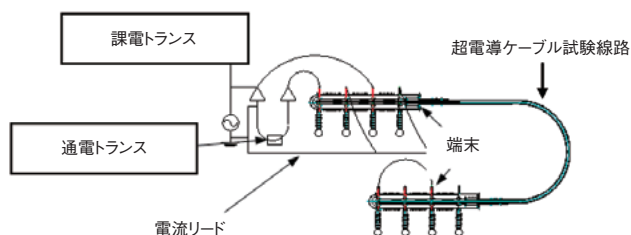


図10 型式試験線路概要

超電導ケーブルをUベンドに半径3 mに曲げ、末端に終端を2つ取り付けた。終端のU, W相に課電トランスを接続し、V相と遮蔽層に通電トランスを設置した。ケーブル及び末端の圧力試験を行い、気密性の確認後に過冷却液体窒素を注入し循環させた。その後、課電と通電を同時に行い、ヒートサイクル試験を行う。図11に試験状況を示す。

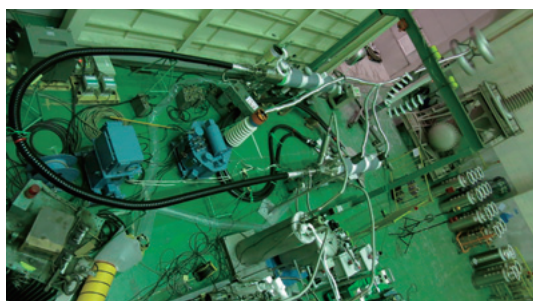


図11 型式試験線路状況

72時間をかけて超電導ケーブル及び末端の内部を室温から液体窒素温度まで冷却した。その後、過冷却液体窒素を循環させ、末端の液体窒素導入部分の温度を70 K、排出部分の温度を73 Kに維持した後、耐圧試験を行った。

4. まとめ

我々はAC22 kV×3 kA 三相同軸超電導ケーブルシステムを開発した。過冷却液体窒素で超電導ケーブルと末端を冷却するシステムを構築した。ケーブル及び末端の要素試験を実施した。

本研究は新エネルギー産業技術開発機構（NEDO）の支援のもと実施した。

参考文献

- 1) Recommendations for Testing of Superconducting cables", CIGRE Technical Brochures 538, 2013
- 2) Kazuhisa Adachi, Hideo Sugane, Tianlong Wang, Hiroki Ohnishi, Shigeki Sano, Kei Shiohara, Tasuku Kitamura, Nobuhiro Mido, Tsutomu Koizumi, Takayo Hasegawa, Masayuki Konno, and Masataka Iwakuma, "Development of 22 kV HTS Triaxial Superconducting Bus" 2017
- 3) Mark Stemmler, Frank Merschel, Mathias Noe, Achim Hobl, "AmpaCity— Advanced superconducting medium voltage

system for urban areapower supply" 2014 IEEE PES T&D Conference and Exposition 10.1109/TDC.2014.6863566

- 4) J. A. Demko, I. Sauers, D. R. James, M. J. Gouge, D. Lindsay, M. Roden, J. Tolbert, D. Willen, C. Traeholt, C. T. Nielsen, "Triaxial HTS Cable for the AEP Bixby Project" IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2007, Volume: 17, Issue: 2, 10.1109/TASC.2007.897842 IEEE

昭和電線ケーブルシステム(株)

北村 祐 (きたむら たすく)

技術開発センター 超電導応用製品開発グループ 主幹 工学博士
超電導ケーブルの研究・開発に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)

足立 和久 (あだち かずひさ)

技術開発センター 超電導応用製品開発グループ 主査 工学博士
超電導ケーブル端末部品の開発に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)

菅根 秀夫 (すがね ひでお)

技術開発センター 超電導応用製品開発グループ
超電導ケーブル端末部品の開発に従事

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)

技術開発センター 超電導応用製品開発グループ 主査
超電導ケーブル端末部品の開発に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)

青木 裕治 (あおき ゆうじ)

技術開発センター 超電導応用製品開発グループ長
超電導線材及び超電導ケーブルの開発に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)

三堂 信博 (みどう のぶひろ)

電力システムユニット 主幹
電力ケーブルシステムの開発に従事

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)

取締役 工学博士
超電導線材及び超電導ケーブルの開発に従事

九州大学

岩熊 成卓 (いわくま まさたか)

大学院システム情報化学研究員 教授 工学博士
超電導電力機器の開発に従事