

6 kV 3000 A 三相同軸超電導ケーブル用中間接続部の 開発および実証試験開始

Development of Cable Joint for 6 kV 3000 A Tri-Axial Superconducting Cable System and Start Actual Test

足立 和久
Kazuhisa ADACHI

中西 達尚
Tatsuhisa NAKANISHI

塩原 敬
Kei SHIOHARA

三堂 信博
Nobuhiro MIDO

青木 裕治
Yuji AOKI

筆者らは交流損失が少なくコンパクトな三相同軸超電導ケーブルを開発してきた。この度、三相同軸超電導ケーブル用の中間接続部を新たに開発し、BASF ジャパン株式会社殿戸塚工場に全長約 200 m の 6 kV 3000 A 三相同軸超電導ケーブルを敷設し、実証試験を開始した。

本論文では三相同軸超電導ケーブル用中間接続部の設計コンセプト、検証試験、型式試験および実証試験の工事状況、初期冷却状況について報告する。

We had developed tri-axial superconducting cable that is low AC loss and compact. In this time, we have newly developed a cable joint for tri-axial superconducting cable. Recently, this newly joint and 6 kV 3000 A tri-axial superconducting cable with a total length of about 200 m, have been installed to the Totsuka site of BASF Japan Ltd, for the actual test of superconducting cable system.

This paper is scribed to the concept of cable joint of tri-axial superconducting cable, factory test of joint, type test of cable, and situation of setup cable system.

1. はじめに

高温超電導ケーブルシステムは液体窒素温度で抵抗が 0 になる超電導現象を利用する事により、送電ロスを大幅に低減する事が可能となる特長を有している。そのため世界各国で精力的に研究開発が進められている。我々は高温超電導線材の第 2 世代と呼ばれる $YBa_2Cu_3O_y$ (YBCO) 線材を他の製造プロセスと比較して低コストの製造が可能な Metal Organic Deposition (MOD) 法の線材を開発、製造している^{1), 2)}。この線材を使用して 35 kV 600 A 超電導ケーブルを開発し、KEMA の認証試験に合格した^{3), 4)}。その後、三相同軸ケーブルの開発に着手、22 kV および 11 kV 3000 A 三相同軸超電導ケーブルとその終端接続部を開発した^{5), 6)}。

三相同軸超電導ケーブルは冷却管として機能するステンレスフォーマーの上に U, V, W 相の超電導線材と絶縁層を交互に同軸状に三相重ねて配置、更にその上に遮蔽層を設けた最もコンパクトな超電導電力ケーブルである (図 1)。

三相同軸超電導ケーブルの開発は、世界を見渡すとフランスの Nexans S.A. 社が開発を行い、Ampacity プロジェクトで試験を行った。このプロジェクトでは、三相同軸超電

導ケーブルを市内の変電所を繋ぐケーブルとして使用し、3 年間の実証試験を無事に終了した⁷⁾。韓国でも韓国電力が主体となり、同様の開発を進めている⁸⁾。

三相同軸超電導ケーブルは以下の特長を有している。

1. 外部導体に超電導線材を使用しないため、超電導線材の使用量を減らすことができる。
2. 同軸構造にすることで形状的に大幅なコンパクト化が可能となる。
3. 三相同軸構造とすることにより磁場が打ち消しあい漏れ磁界が発生しない。
4. 内部流路と外部流路の往復により液体窒素を循環することが可能であり、液体窒素のリターン管を別に用意する事が不要となる。
5. 上記の要因が積算される事により大幅に低コスト化できる。

今回、私たちは BASF ジャパン株式会社殿のご協力により同社戸塚工場に三相同軸ケーブル、中間接続部、終端接続部を敷設して、1 年間の実証試験を開始した。YBCO 線材を使用した民間プラント内の三相同軸超電導ケーブルの実証試験は世界で初めてであり、非常に重要な試験である。

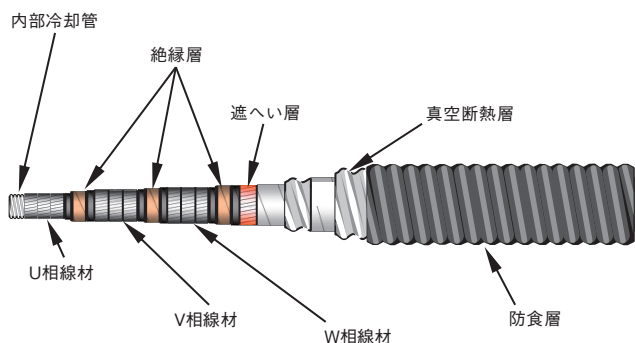


図1 三相同軸超電導ケーブルの模式図

2. 三相同軸超電導ケーブル 中間接続部開発

2.1 設計コンセプト

今回開発した三相同軸超電導ケーブル用中間接続部は、接続する双方のケーブルの中心に位置する内部冷却管をスリーブで接続し、その上にU相、V相、W相、各相の線材と絶縁層を交互に同軸状に配置し、その上に遮へい層を配置した。超電導層は接続用の線材を渡して接続した。各相の外径は、ケーブルと同じ外径となるように設計した。中間接続部の絶縁外径をケーブルと同じにすることで液体窒素の流れを阻害する事や流れの乱れを低減し、冷却時の熱収縮による位置ずれの影響も無くした。

また、ケースはスライド式とする事により、中間接続部全体をコンパクト化する事に成功した。設計した中間接続部の外観図を図2に示す。

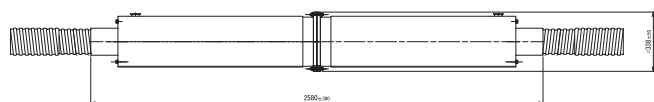


図2 三相同軸超電導ケーブル用中間接続部外観図

2.2 中間接続部 工場内試験

設計した中間接続部の性能を確認するために、単相接続した1.2 m長の中間接続部モデルを試作した。試作したモデルを図3に示す。

絶縁性能確認のために中間接続部モデルをブッシングに吊るし、クライオスタット内に配置した。クライオスタットを一晩真空引きし、その後液体窒素で4時間以上浸漬して冷却した後、商用周波耐電圧試験、雷インパルス耐電圧試験と部分放電試験を行った。試験時の状況（機材配置）を図4に、結果を表1に示す。

通電性能の確認のために、図5に示す様に、50 cm程度の単相中間接続部モデルを作った。この試料をオープンバスタイプの容器を用いて液体窒素浸漬冷却を行い、直流四端子法により臨界電流 (I_c) 測定を行った。

試作した中間接続部モデルは表1に示す様に全ての試験を満足した。

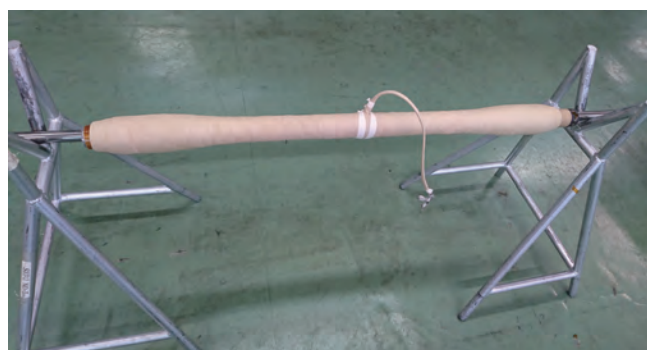


図3 中間接続部モデル

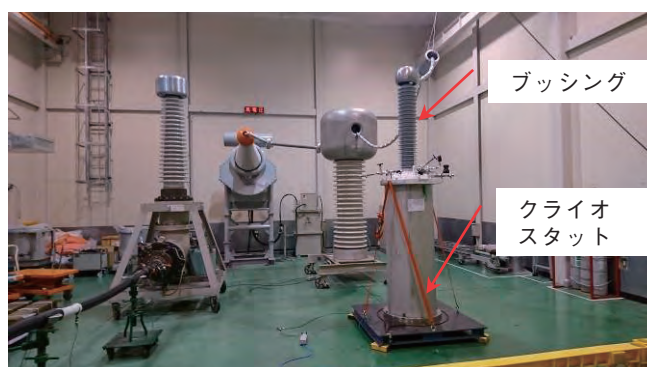


図4 中間接続部単体耐電圧試験形態

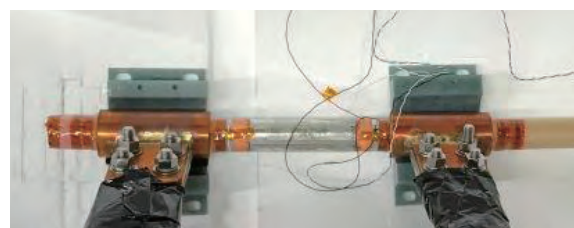
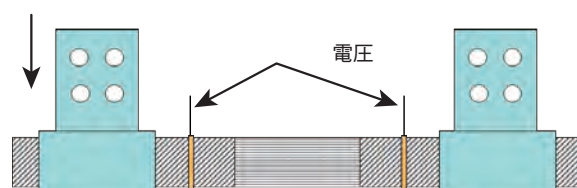


図5 中間接続部 直流通電試験モデルの形態

表1 中間接続部単体検証結果

No.	試験	規格	結果
1	商用周波耐電圧試験	26 kV 30分	良
2	雷インパルス耐電圧試験	± 75 kV/ 各10回	良
3	商用周波部分放電試験	19 kV にて発生せず	良
4	単体モデル通電試験	臨界電流 (I_c) 3000 A 以上	良

2.3 中間接続部を含めた CIGRE TB538 型式試験

型式試験のために30 m長の三相同軸超電導ケーブルを試作した。2つの終端接続部と1つの中間接続部を含めたループを作り、CIGRE TB538に準拠した型式試験を実施した。試験状況を図6に示す。表2に示す通り全ての試験を満足し、問題ないことを確認した。

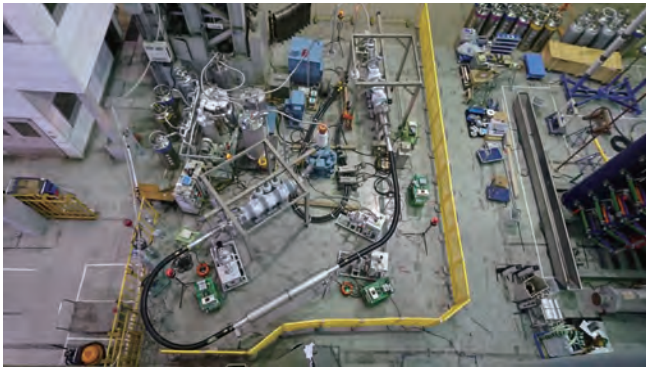


図6 CIGRE TB538 型式試験の状況

表2 型式試験結果

項目	要求性能	結果
圧力試験	設計値圧力×10分保持、漏れが無い事	合格
課電試験	AC21 kVの電圧を印加、8時間通電と16時間の非通電を20回繰り返す	合格
交流耐電圧	AC26 kVの電圧負荷に耐えること	合格
雷インパルス耐電圧試験	AC11 kV×30分の電圧印加後、±60 kV×10回のインパルス電圧を印加し、其の後AC26 kV×30分の電圧に耐えること	合格
部分放電試験	AC19 kVの電圧印加に対して部分放電を発生しないこと	合格

3. 実証試験（戸塚プロジェクト）

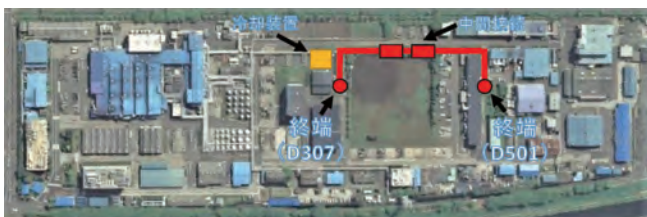
BASF ジャパン株式会社殿のご協力により、同社戸塚工場内で実証試験を行う為の構内配線の提供を受けた。この線路は約200 m離れた2つの建屋を接続し、電力を供給する線路であり、約1年間に亘る実証試験を計画した。

変電設備や終端接続部は地上に配置されているが、化学系のプラントである為、構内のユーティリティは地上高5 mのラック上に配置する事が求められており、超電導ケーブルも同様に敷設する必要が生じた。そのため、超電導ケーブルは地上から5 m上まで、限られた敷地内で立ち上がる必要がある。

中間接続部は2か所、地上高5 mの位置に配置した。

なお、今回の課電電圧は6 kVである。

概略図を図7に示す。



出典：国土交通省 国土地理院

図7 BASF ジャパン株式会社殿戸塚工場内 三相同軸超電導実証試験概略図

3.1 ケーブル回路

今回敷設する超電導ケーブルは従来使用してきた常電導ケーブル6 kV CVT3×60 sq 200 mと並行して敷設する回路とし、既設のCVTケーブルを保護回路として利用した(図13参照)。

万が一短絡事故等が発生した場合、瞬間的(数波程度)に超電導ケーブルに大電流が流れるが、超電導ケーブルはフラックスフロー状態(磁束に働くローレンツ力がピンニング力を超えて磁束が動き出す状態)となる為に抵抗が発生、限流作用を示す事が以前実施した短絡試験で分かっている。本回路は、超電導ケーブルの臨界電流(Ic)を超える電流を常電導ケーブル側に分流し、超電導ケーブルはケーブル独自の限流作用により通電電流を限流する為にクウェンチから保護されることを意図したものになっている⁹⁾。

3.2 ケーブル敷設

ケーブル敷設のために地上高5 mの既設ガス配管の上にトラフを設置した。トラフ形状としたのは、事故時に漏れ出した液体窒素を受ける為の安全上の配慮である。

敷設のために地上から地上高5 mの位置に至る緩いステージを作り、ケーブルを設置するトラフに平行に足場を設置した。製造した三相同軸超電導ケーブルを低床トレーラーにてBASF ジャパン株式会社殿戸塚工場に搬入した。敷設の際にはキャタピラを用いてケーブルを引き込んだ。ケーブルは送電側と受電側の両側から各々敷設し、中央部で2か所の中間接続部により両側のケーブルを接続した。2か所の中間接続部の間隔は約10 mであり、この間のケーブルにはBASF社の関連会社が製造した超電導線材を使用した¹⁰⁾。

冷却時の熱収縮を緩和する事を考慮して、敷設後にスネーク処理を施した。ケーブル敷設方法を図8に、敷設状況を図9に示す。

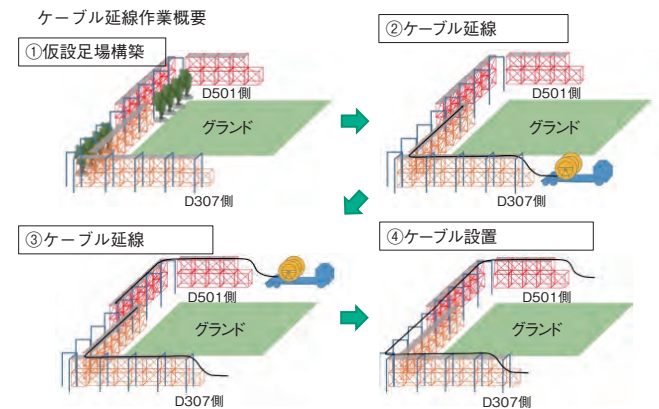


図8 ケーブル敷設方法



図9 BASF ジャパン株式会社殿戸塚工場 ケーブル敷設状況

3.3 中間接続部組み立て

地上高 5 m の位置に組み立てブースを作製し、中間接続部の組み立てを実施した。ケース端部はアルミコルゲートに現地で溶接した。完成した中間接続部を図 10 に示す。



図 10 三相同軸超電導ケーブル中間接続部

3.4 終端接続部組み立て

終端接続部は変電設備付近の地上に設置した。ケーブルは、終端接続部の第 1 クリートに固定された位置からすぐに 5 m 上まで立ち上がる構造とした。

冷却時の熱収縮対策として 800 mm 収縮可能なベローズを準備し、終端接続部本体は車輪により収縮方向に移動可能な構造とした。終端接続部先端にケーブル側の温度、圧力、液面レベルセンサーを配置し、終端接続部の状況がわかる構造とした。

加えて、終端接続部には放出弁と安全弁を設置し、万一終端接続部やケーブル内部の液体窒素が気化して内圧が上昇した場合にも安全を維持する為に対応可能な機構を付与した。

図 11 に完成した終端接続部を示す。



図 11 三相同軸超電導ケーブル終端接続部

3.5 冷却装置

冷却装置は本プロジェクトの再委託研究先である株式会社エア・ウォーター殿が開発したサブクールシステムを使用した。

サブクーラー容器内部の液体窒素から気化した窒素ガスを真空ポンプで排気する事により、更に液体窒素を蒸発させる。この時生じる蒸発潜熱を利用してサブクーラー内部の液体窒素を冷やしてサブクール状態にする機構である。ケーブル内を循環する液体窒素は、サブクーラー内部に設置された熱交換器を通過する際に冷却されるシステムとなっている。また、液体窒素を圧送する循環ポンプも本プロジェクト内で株式会社エア・ウォーター殿が開発したものであり、連続 10000 時間、メンテナンスフリーで運転する事を狙ったものである。

冷却装置を図 12 に示す。



図 12 戸塚工場に設置したサブクール冷却装置

3.6 監視システム

超電導ケーブルシステム各部の温度、圧力、液面、真空度、及び冷却システムで管理する各部の温度、圧力、液面、流量を常時監視して記録するシステムを導入した。サンプリングタイムは 1 秒間に 1 回とし、各データを記録できるシステムとした。記録したデータは戸塚工場外部からも参照可能となるようにした。

各データが管理値を超えた場合には超電導ケーブルを系統から切り離し、既設の常電導ケーブルによる通電に切り替え、予め登録した担当者に自動的にメールが届くようにした。

監視システム系統図を図 13 に示す。

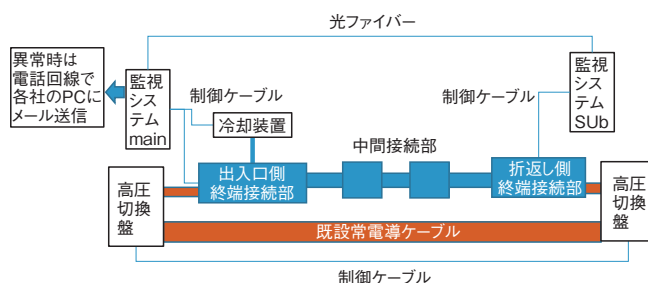


図 13 監視システム系統図

3.7 ケーブル側初期冷却

完成した超電導ケーブルシステムに乾燥窒素ガスを吹き流して内部を乾燥させて、露点を -60°C 以下とした。

その後、初期冷却用に準備した液体窒素槽の中に設置した

熱交換機内部を通すことで冷やした窒素ガスを作り、ケーブルに吹き流してケーブルを4 K/hのスピードで徐々に冷却した。途中、ガス窒素から液体窒素に冷媒を変更し、液体窒素温度まで冷却後、折り返し側終端の先端のバルブを閉じることで、液体窒素がケーブル中心のコルゲート冷却管とケーブル内管を行き来させる go/return 方式で循環冷却させた。

初期冷却時の温度変化を図14に、終端接続部の移動量を図15に示す。終端の温度が液体窒素温度になった状態で収縮量が増えて、設計通りの収縮量であることを確認できた。

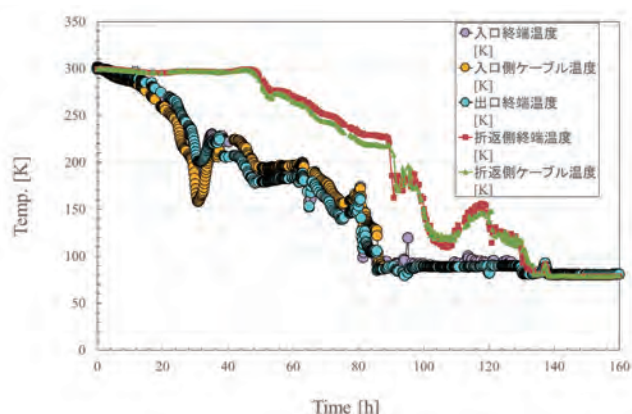


図14 初期冷却時の各部の温度変化

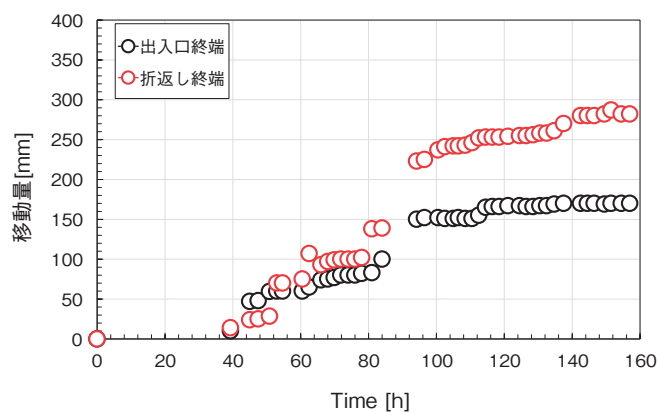


図15 初期冷却時の終端接続部移動量

3.8 冷却装置との接続

冷却装置単体で液体窒素温度まで冷却し、超電導ケーブルと接続し、液体窒素を循環させた。今後、1年間実証試験を継続する。

4. まとめ

我々は、第2世代と呼ばれる YBCO 超電導線材を使用した三相同軸型超電導ケーブルシステムの開発を実施しており、今回その中間接続部の開発を行い、本論文において設計コンセプトと工場内試験の結果について紹介した。また、BASF ジャパン株式会社殿戸塚工場内の構内配線の提供を受け、全長約 200 m の超電導ケーブルの敷設、冷却シ

ステムを含めた設備の構築を行った経過と初期冷却の結果についても報告を行った。

初期冷却では、5 m の高低差も超えて反対側まで順調に冷却が進んだ。サブクール窒素を使用して、1 年間の実証試験を継続する。

謝 辞

この論文作成に当たり、冷却システム技術について各種ご教授頂いた株式会社エア・ウォーター殿、試験場所を提供いただき、多大なるご支援を頂いている BASF ジャパン株式会社殿に心から感謝いたします。

この成果の一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の助成金事業として得られたものです。

参考文献

- 1) 中西達尚, 他: 昭和電線レビュー, Vol. 58, No. 1, P12-16 (2008)
- 2) 木村一成, 他: 昭和電線レビュー, Vol. 60, P20-24 (2014)
- 3) 足立和久, 他: 昭和電線レビュー, Vol. 61, P15-19 (2015)
- 4) 菅根秀夫, 他: 昭和電線レビュー, Vol. 62, P5-8 (2015)
- 5) K. Adachi, et, al: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 26, 4, Article number 5400604, 2016. 06.
- 6) K. Adachi, et, al: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 27, 4, Article number 5401105, 2017. 06.
- 7) Mark Stemmler, et, al: *IEEE Xplore*: DOI: 10. 1049/cp. 2013. 0905.
- 8) Eun Young Ko, et, al: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 29, 5, DOI: 10. 1109/TASC. 2019. 2908611
- 9) K. Adachi, et, al: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 28, 4, DOI: 10. 1109/TASC. 2018. 2798058
- 10) S. C. Hopkins, et, al: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 26, 5, DOI: 10. 1109/TASC. 2016. 2542001

昭和電線ケーブルシステム(株)

足立 和久 (あだち かずひさ)

基盤技術商品開発部 超電導応用製品開発課

博士 (工学)

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)

基盤技術商品開発部 超電導応用製品開発課

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)

塩原 敬 (しおはら けい)

基盤技術商品開発部 超電導応用製品開発課

博士 (工学)

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)

三堂 信博 (みどう のぶひろ)

基盤技術商品開発部 超電導応用製品開発課

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)

基盤技術商品開発部 超電導応用製品開発課

課長

超電導ケーブルシステムの研究・開発に従事