

# 超電導き電ケーブルの敷設方法と冷却時の応力緩和手法

赤坂 友幸\* 福本 祐介\* 石原 篤\*  
鈴木 賢次\* 小林 祐介\* 富田 優\*

## Superconducting Feeder Cable Laying and Stress Relaxation Method for Cooling

Tomoyuki AKASAKA Yusuke FUKUMOTO Atsushi ISHIHARA  
Kenji SUZUKI Yusuke KOBAYASHI Masaru TOMITA

The superconducting feeder cable shrinks by thermal stress during cooling process. When a long superconducting feeder cable is constructed along a railway line, it is needed to take countermeasures against the cable shrink. In this paper, we introduce a suitable method of laying a 300-m class superconducting feeder cable along the test track. We also report that the method is suitable for this cable, because no buckling and rupture points are observed in the X-ray radiograph taken over the whole length of the cable after its installation and transmission test was able to be conducted successfully with the cable.

キーワード：超電導き電，冷却応力，X線透過撮影，電気特性評価

### 1. はじめに

超電導とは、特定の物質をある温度以下に冷却すると、その電気抵抗がゼロになる現象のことを指す。上記の物質である超電導材料を、線材やバルク材の形態に加工して、応用機器に用いる<sup>1)</sup>。超電導線材を送電ケーブルとして用いれば、電気抵抗がゼロのため送電距離による損失をなくすることができる。鉄道総研では、超電導ケーブルを鉄道き電線に適用することを想定した開発を始め<sup>2)</sup>、超電導線材の製作および特性評価<sup>3)</sup>、それらの結果に基づいた超電導ケーブルのプロトタイプを製作し、各種の特性評価試験を行ってきた<sup>4)</sup>。き電線に超電導ケーブルを導入すると、回生効率の向上、電力損失の低減、変電所間の負荷平準化や電圧降下抑制による変電所の集約化等が期待できる<sup>5) 6)</sup>。また、レールから大地への漏れ電流がなくなり、レール電位の抑制が可能であることから、レールの電食の問題も解決できると期待されている。

超電導き電ケーブルを極低温に冷却すると、温度変化によりケーブル自体が収縮する。特に長尺の超電導き電ケーブルを敷設する際には、これによる応力発生を考慮し冷却、運用する必要がある。本稿では、長尺の超電導き電ケーブルの最適な敷設方法の検討を行い、実際に300m級の超電導き電ケーブルの敷設試験を行った結果についてまとめる。さらに、敷設した超電導き電ケーブルに対し、X線による透過撮影や、通電試験を通して、健全性の確認を行った。

### 2. 超電導き電ケーブルの冷却応力緩和手法

長尺の超電導き電ケーブルについて、応力緩和方法の検討を行った<sup>7)</sup>。超電導き電ケーブルの構造を図1に示す。超電導き電ケーブルは、フォームの周りに、銅保護層、超電導層、絶縁層、コア保護層が巻かれたケーブルコアが、真空断熱管に収められた構造となる。超電導き電ケーブルは、室温から液体窒素温度への冷却過程において、0.3%程度収縮する。つまり、300m級のケーブルにおいては、ケーブルは0.9m収縮し、変電所間を結ぶための2kmのケーブルでは6m収縮することになる。

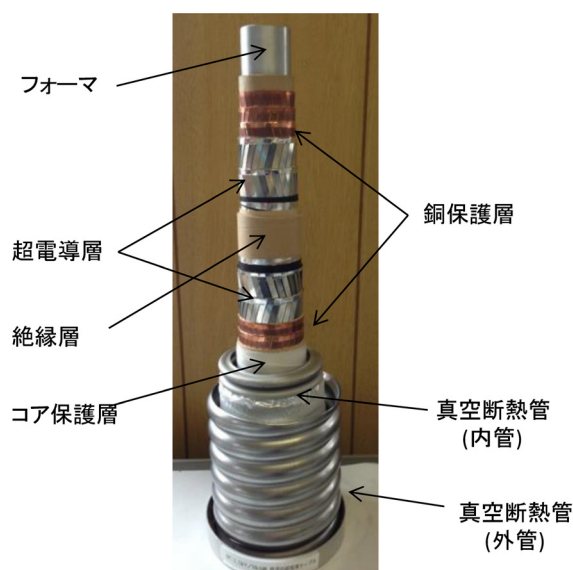


図1 超電導き電ケーブルの構造

\* 材料技術研究部 超電導応用研究室

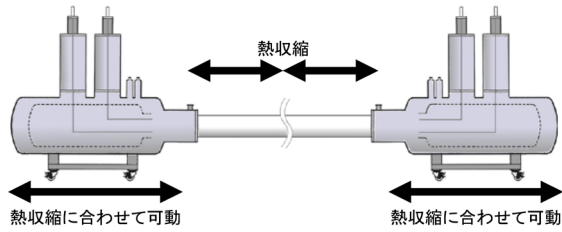


図2 可動式電流端末による熱収縮対策

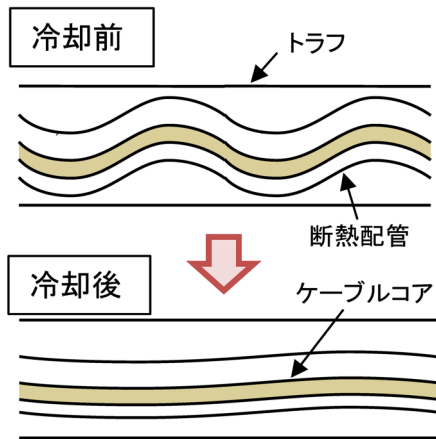


図3 スネークによる熱収縮対策

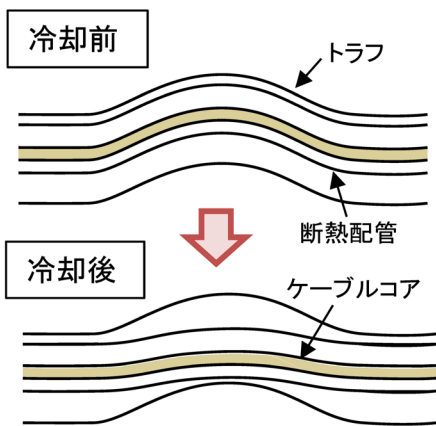


図4 オフセットによる熱収縮対策

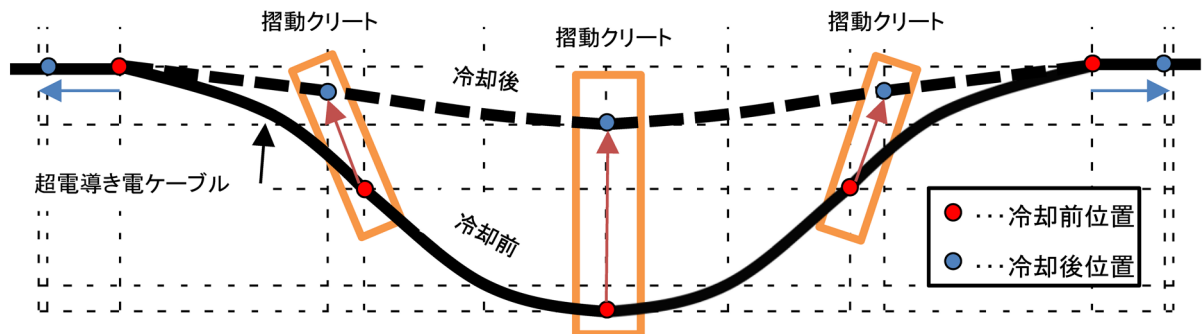


図5 300m級超電導き電ケーブルのオフセット部の構造

この場合、超電導き電ケーブルには熱応力が加わるため、ケーブルコアや電流端末が損傷する恐れがある。そこで、熱収縮対策として、以下の3つの方法を検討した。

1つ目として、電流端末を可動式とする方法である。電流端末下部に移動可能なように車輪を付け、熱収縮に合わせて電流端末が移動することでケーブルに損傷を与えないことが可能となる(図2)。ただし、この方法だけでは、電流端末の可動距離が設置時の環境により制限されるため、km級の長尺超電導ケーブルには対応が難しいという欠点がある。2つ目として、超電導ケーブルを蛇行させて敷設する方法が考えられる。熱収縮量分の小さなうねり(スネーク)をケーブルに与えながら敷設することで、ケーブルを冷却した際にスネーク箇所が収縮しケーブルが直線状になることで、熱収縮量を吸収することができるようになる(図3)。3つ目として、オフセット部分を設けて敷設する方法がある。部分的に円弧状のオフセット部分を設けて敷設することで、ケーブルが冷却されると直線状に変位して収縮量を吸収することができるようになる(図4)。超電導き電ケーブルを導入する路線に応じて、これらの熱収縮対策を適切に選択し、導入することが重要となる。

### 3. 超電導き電ケーブルの敷設および評価試験

#### 3.1 超電導き電ケーブルの敷設試験

超電導き電ケーブルの検証のため、約310m長の超電導き電ケーブルを所内試験線に設置した。今回用いた超電導き電ケーブルの敷設においては、実際の鉄道路線を想定したため、敷設経路上に線路跨ぎや踏切跨ぎ箇所を有している。そのため、複数の曲がり箇所があり、それがスネークとなり熱収縮を吸収することが予想された。それに加えて、オフセット部を設けるとともに、両端の電流端末も可動式とした。オフセット部の構造は図5とし、超電導き電ケーブルをクリートで固定し、それが摺動する構造とした。

この構造は、ケーブルが冷却時の収縮を吸収した後、昇温時にケーブル長が増加して、想定外の位置で変形し、



図6 300m 級超電導き電ケーブルの敷設箇所



図7 敷設後の300m 級超電導き電ケーブル

ケーブルに過剰な応力が加わることを避けるため、線路の中央付近を固定し、両側に均等に伸ばすことを目的としたものである。

超電導き電ケーブルの試験線への敷設は、あらかじめ敷設ルート上にトラフ橋を設置し、キャタピラやケーブルローラーを用いてケーブルを送り出した。曲げ半径は2.5m以上を確保し、踏切横断部のほか、高低差2.4mの軌道横断部を設けた。なお、軌道横断部および電流端末直前においては、クリートを使用せずにガイドのみ取り付けすることで可動状態とし、簡易的なオフセットとなっている。図6に300m 級超電導き電ケーブルの敷設箇所を、図7に敷設後の超電導き電ケーブルを示す。東側電流端末と西側電流端末の距離は310m程度である。ケーブルを繰り出す方法で、問題なく試験線沿いに敷設できることを確認した。

### 3.2 超電導き電ケーブルの冷却応力評価

敷設した超電導き電ケーブルの冷却試験を行った。冷却には液体窒素を用いた。冷却時には、超電導き電ケーブル内部に取り付けている光ファイバーにて計測した温度を図8に示す。超電導き電ケーブルに急激な熱応力を加えないように、液体窒素をガス化させ、冷却ガス温度を調節しながら徐々に冷却を行った。ある程度冷却されたところで、液体窒素の充填を行った。約80時間かけて、超電導き電ケーブルの全長にわたり液体窒素温度になったことを確認した。冷却後、超電導き電ケーブルを目視にて確認し、特に大きく変位した箇所や、ケーブルに無理な応力がかかっている箇所がないことを確認した。また、冷却前後におけるケーブルの変位量について詳細に計測を行った。図9に超電導ケーブルの長手方向の変位量を示す。冷却前の状態でもわずかに変位のある箇所は、真空断熱管の真空排気を行ったためである。冷却後は各所で変位が見られ、踏切横断部、線路横断部などで変位方向が逆となり、固定点となっていることが分かる。また、オフセット部についてはクリート固定としているため長手方向の変位量はゼロとなっているが、径方向には27mmの変位量が確認できた(図10)。超電導き電ケーブル全長の伸縮をオフセット部のみで吸収することを考

慮し設計したが、実際には敷設の際のカーブや簡易オフセット部でほとんど吸収したため、オフセット部における変位量はわずかだった。

また敷設後の、断熱管内の超電導ケーブルコアの挙動および健全性を確認するために、X線発生装置を用いて、ケーブル内部の透過撮影を行った<sup>8)</sup>。撮影に使用したX線発生装置の写真を図11に示す。また、ケーブルのX線撮影結果の一例を図12に示す。透過撮影により、断熱管外管、断熱管内管、ケーブルコアが観測できる。また、ケーブルコア内部にらせん状に巻線されている超電導線材も確認できる。冷却応力により、ケーブルコア内部に無理な力が働いた形跡や、超電導線材の断裂や座屈などの現象は見られず異常がないことがわかった。

また、同様の撮影方法にて、代表的な位置であるオフセット部で透過撮影を行った結果を図13に示す。透過撮影により、ケーブルコアや各管の相対的な位置が判別できる。曲がり部であるオフセット部では、ケーブルコアが、断熱管内の最短経路に位置しており、曲がり部の

前後では、一部ケーブルコアと内管が接触していることが分かる。こうした接触は、熱侵入の増加を招くため、接触しても熱の侵入を抑えられる熱絶縁層の工夫が重要となる。また、オフセット部に限らず、同様の撮影をケーブル全域にわたり行ったが、断裂などはなく内部のケーブルコアなどに異常がないことが確認できた。

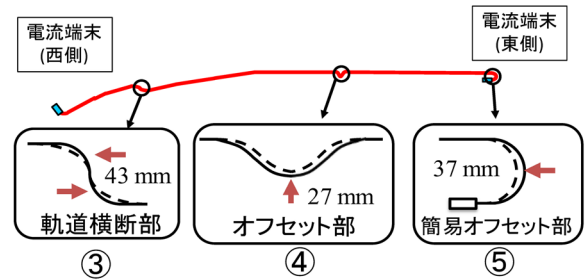


図10 超電導き電ケーブルの冷却時の変位

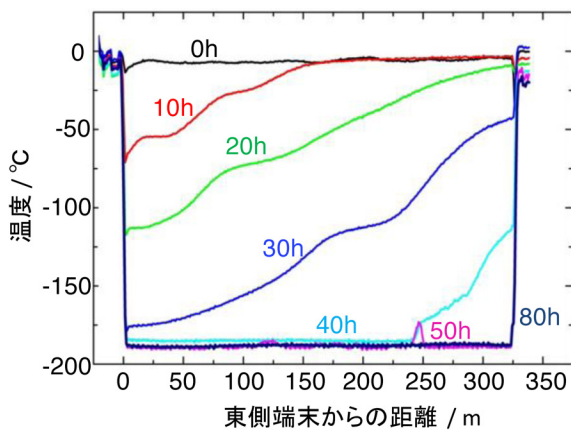


図8 超電導き電ケーブルの冷却試験

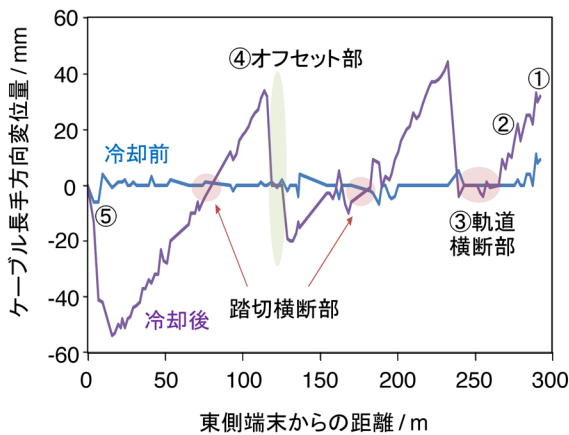


図9 超電導き電ケーブルの冷却時の変位量測定



図11 X線発生装置

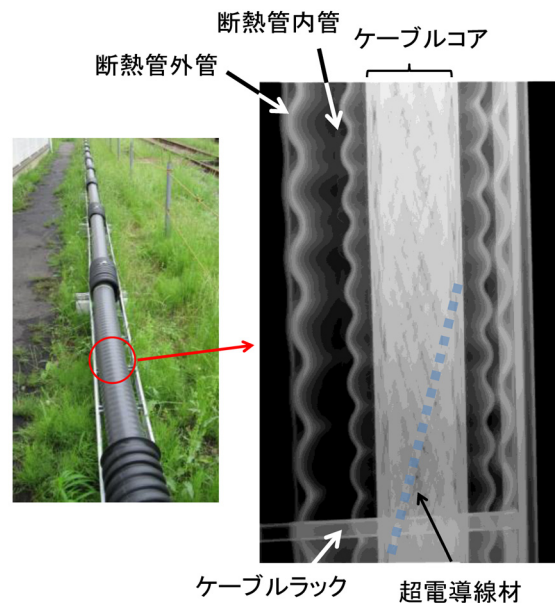


図12 超電導き電ケーブルのX線撮影

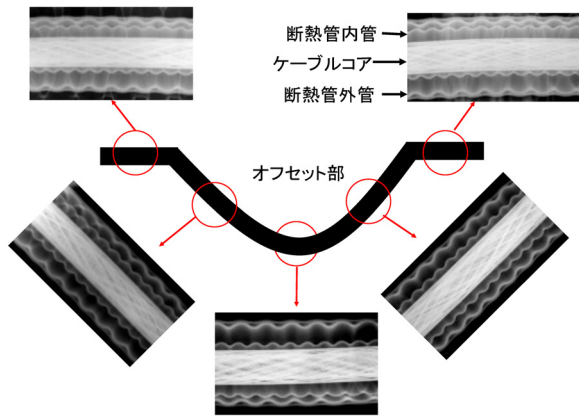


図 13 オフセット部における X 線撮影

### 3.3 超電導き電ケーブルの電気特性評価

前節の X 線透過撮影により、視覚的にケーブルに異常がないことが確認できた。次に、敷設した超電導き電ケーブルに電氣的に異常がないことを確認するため、耐電圧試験および送電試験を行った。超電導き電ケーブルと電流端末の模式図を図 14 に、耐電圧試験の写真を図 15 に示す。超電導き電ケーブルにおいて電流が流れる箇所は、変電所から電車へ送電するための P 層と、レールから変電所への戻り電流を送電するための N 層に分かれている。超電導き電ケーブルの耐電圧試験では、P - N 間、P - アース間、N - アース間のそれぞれの耐電圧の評価を行った。直流の電圧印加装置を用いて、各層間に直流電圧を印加した。DC1000, 2000, 3000, 4000, 5000V を順に印加したが、いずれの層間においても、最大の 5000V まで耐電圧がとれていることを確認した。導入した超電導き電ケーブルは、各層間の耐電圧が 5000V 以上であり、上記電圧では超電導き電ケーブルの PN 両層に対し短絡や放電などがないことを確認した。

次に、敷設した超電導き電ケーブルおよび冷却システムを用い、液体窒素による循環冷却を行った。冷却システムは図 16 に示すように、冷凍機、ポンプユニット、流量計から構成される。冷却後、超電導き電ケーブルを所内試験線のき電回路に接続を行い、鉄道車両への送電試験を行った<sup>9)</sup>。試験の結果を図 17 に示すが、電車の速度の増加とともに、超電導き電ケーブルを流れる電流値の上昇を確認した。すなわち、超電導き電ケーブルを介して電車へ送電することができ、所内試験線へ導入した 300m 級の超電導き電ケーブルは、健全に敷設が出来ていることを確認した。

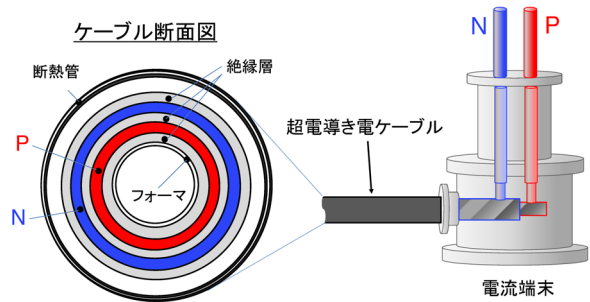


図 14 超電導き電ケーブルと電流端末の模式図



図 15 耐電圧試験の様子（西側端末）

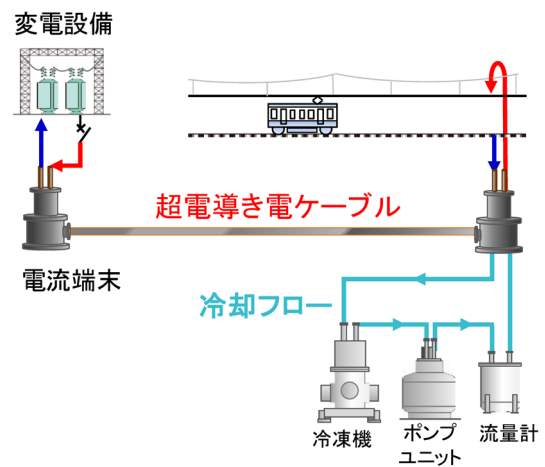


図 16 送電試験時の超電導き電ケーブルシステム

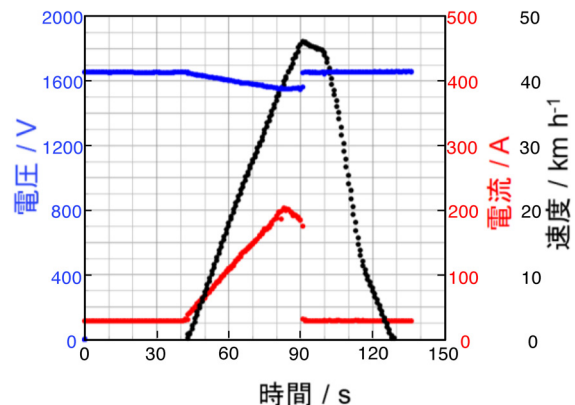


図 17 超電導き電ケーブルを用いた車両への送電試験

## 4. まとめ

長尺の超電導き電ケーブルを敷設する際には、冷却時にかかる冷却応力を考慮して運用する必要がある。本稿では、長尺の超電導き電ケーブルの最適な敷設方法を検討するとともに、300m級の超電導ケーブルの敷設試験を行った。敷設の際には、実際の線路を想定し、軌道横断部や踏み切り横断部などを設けるほか、熱収縮対策として、可動式電流端末、スネーク部、オフセット部を設けた。敷設後、液体窒素により冷却試験を行った結果、ケーブルの位置が大きく変位した箇所や、ケーブルに無理な応力がかかっている箇所は見られず、異常がないことを確認した。また、超電導ケーブルの電気的な健全性を確認するため、耐電圧試験および車両への送電試験を行った。その結果、耐電圧試験から絶縁性能に問題がないことを確認した。車両への送電試験では、電車の加速とともに超電導き電ケーブルに流れる電流値の上昇が見られ、導入した300m級の超電導き電ケーブルの敷設に問題がなかったことが確認できた。

今後は超電導き電ケーブルの耐久性試験、走行試験を進め、運用上の課題、問題点を抽出し、鉄道事業用として、費用対効果も含め十分に適用可能な超電導き電ケーブルを実現して、営業線への導入を目指していく。

本研究の一部は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した。

## 文 献

- 1) 富田優, 鈴木賢次, 福本祐介, 石原篤, 赤坂友幸, 小林裕介, 超電導材料の現状と応用, 鉄道総研報告, Vol.30, No.6, pp.49-52, 2016
- 2) M. Tomita, Y. Fukumoto, K. Suzuki, M. Muralidhar, Development of prototype DC superconducting cable for railway system, Physica C, vol. 470, S. 1007-1008 (2010).
- 3) 福本祐介, 鈴木賢次, 石原篤, ミリアラムラリダ, 富田優: 鉄道き電線用超電導ケーブルの線材特性評価, 低温工学・超電導学会概要集, Vol.83, p.138, 2010
- 4) M. Tomita, M. Miryala, K Suzuki, Y. Fukumoto, A. Ishihara, T. Akasaka, Y. Kobayashi, Design and construction of a high temperature superconducting power cable cryostat for use in railway system applications, Supercond. Sci. Technol. Vol.26 (2013) 105005.
- 5) M. Tomita, K Suzuki, Y. Fukumoto, A. Ishihara, T. Akasaka, Y. Kobayashi, Energy-saving railway systems based on superconducting power transmission, Energy, Vol.122 (2017) 579-587.
- 6) Superconductors drive trains, Nature, Vol.542 (2017) 275.
- 7) M. Tomita, T. Akasaka, Y. Fukumoto, A. Ishihara, K. Suzuki, Y. Kobayashi, Laying method for superconducting feeder cable along railway line, Cryogenics, Vol.89 (2018) 125-130.
- 8) 赤坂友幸, 福本祐介, 石原篤, 小林祐介, 恩地大紀, 鈴木賢次, 富田優: 超電導き電ケーブルの敷設方法の検討, 低温工学・超電導学会概要集, Vol.97, p.165, 2018
- 9) 富田優, 鈴木賢次, 福本祐介, 石原篤, 赤坂友幸, 小林裕介, 前田淳, 鉄道用超電導き電システムの開発, 低温工学・超電導学会概要集, Vol.90, p.25, 2014