

- 鉄道一般
- 車両
- 施設
- 電気
- 運転・輸送
- 防災
- 環境
- 人間科学
- 浮上式鉄道

# 超電導き電ケーブルの冷却時の内部変化を解明する

電圧降下の問題や電力損失の解決を目指し、超電導き電システムの開発を進めています。開発中の超電導き電ケーブルは、冷媒により冷却して運用することから、敷設の際に冷却応力を考慮する必要があります。ここでは、超電導き電ケーブルの開発状況を解説するとともに、敷設後の超電導き電ケーブルのX線透過観察を行い、冷却が内部構造に与える影響について考察した結果を紹介します。

## はじめに

現在、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、超電導線材の材料研究から、それらの結果に基づき超電導ケーブルを設計・製作し、各種の特性評価試験を行っています<sup>1)2)</sup>。超電導ケーブルをき電線へ導入すると、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などが期待できます。また、レールから大

地への漏れ電流もなくなりレール電位上昇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ことが期待できます<sup>3)</sup>。

超電導ケーブルを極低温に冷却すると、熱応力によりケーブル自体が収縮するため、とくに長尺の超電導ケーブルを敷設する際には、このことを考慮し冷却、運用する必要があります。ここでは、長尺の超電導ケーブルの最適な敷設方法の検討を行い、実際に

300m級の超電導ケーブルの敷設試験を行った結果について紹介します。また、敷設したケーブルについて、透過X線により内部構造を評価した結果についても報告します。

## 超電導き電ケーブルの冷却応力緩和手法

長尺超電導ケーブルの冷却時の応力緩和方法についての検討を行いました。超電導き電ケーブルの構造例を図1に示しますが、超電導き電ケーブルは、室温から液体窒素温度(-196℃)への冷却過程に



**赤坂 友幸**  
Tomoyuki Akasaka  
材料技術研究部  
超電導応用研究室  
研究員  
[専門分野] 超電導材料



**福本 祐介**  
Yusuke Fukumoto  
材料技術研究部  
超電導応用研究室  
副主任研究員  
[専門分野] 超電導工学



**石原 篤**  
Atsushi Ishihara  
材料技術研究部  
超電導応用研究室  
副主任研究員  
[専門分野] 超電導材料



**鈴木 賢次**  
Kenji Suzuki  
研究開発推進部  
超電導き電ケーブル課  
副主査  
[専門分野] 超電導工学



**小林 祐介**  
Yusuke Kobayashi  
材料技術研究部  
超電導応用研究室  
研究員  
[専門分野] 超電導工学



**富田 優**  
Masaru Tomita  
研究開発推進部  
担当部長  
[専門分野] 超電導工学

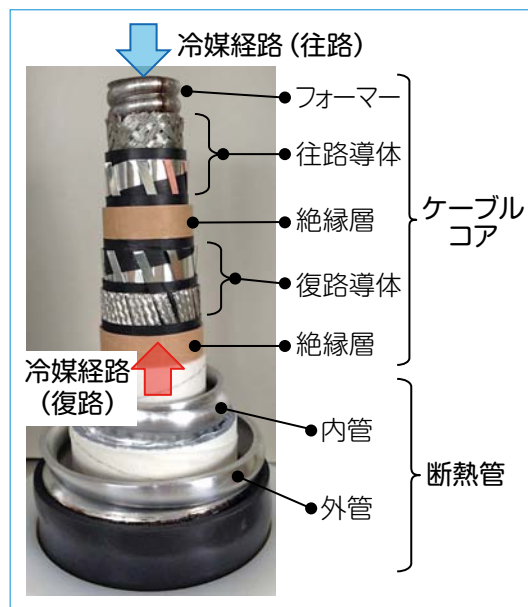


図1 超電導き電ケーブルの構造

において、0.3%程度収縮します。つまり、300m長のケーブルにおいては、ケーブルは0.9m収縮することになります。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末端が破損するおそれがあります。超電導ケーブルの冷却時の挙動を評価するため、短尺のケーブルにて、X線透過装置を用いて冷却時の内部構造の観察を行いました(図2)。X線透過撮影により、ケーブルコア、断熱管外管、断熱管内管の相対的な位置が判別できます。冷却時において、曲がり部では、ケーブルコアが断熱管内の最短経路に位置していることがわかります。また、昇温時には、冷却前と同じ位置にケーブルコアが動いていることがわかります。

長尺ケーブルの冷却応力の緩和手法として、以下の3方法が考えられます。1つ目として、電流末端を可動式とする方法です。電流末端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末端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ります(図3上)。この方法だけでは、電流末端の可動距離が設置場所の環境により制限されるため、さらに長尺のkm級の超電導ケーブルには対応が難しいという課題があります。2つ目として、超電導ケーブルをスネークして敷設する方法があげられます(図3中)。スネークとは、熱収縮量の小さな複数のうねりをケーブルに与えながら敷設する方法で、ケーブルを冷却すると収縮し、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ます。3つ目として、ケーブルが直線にならないようにずらして敷設する方法(オフセット)があります。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、ケーブルを冷却すると直線的に変位して収縮量を吸収することができます。今回の300m級

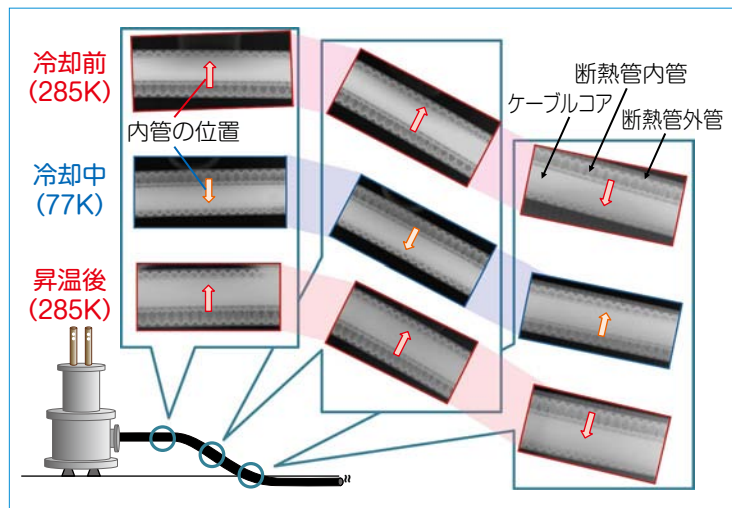


図2 超電導き電ケーブルの冷却時の内部観察

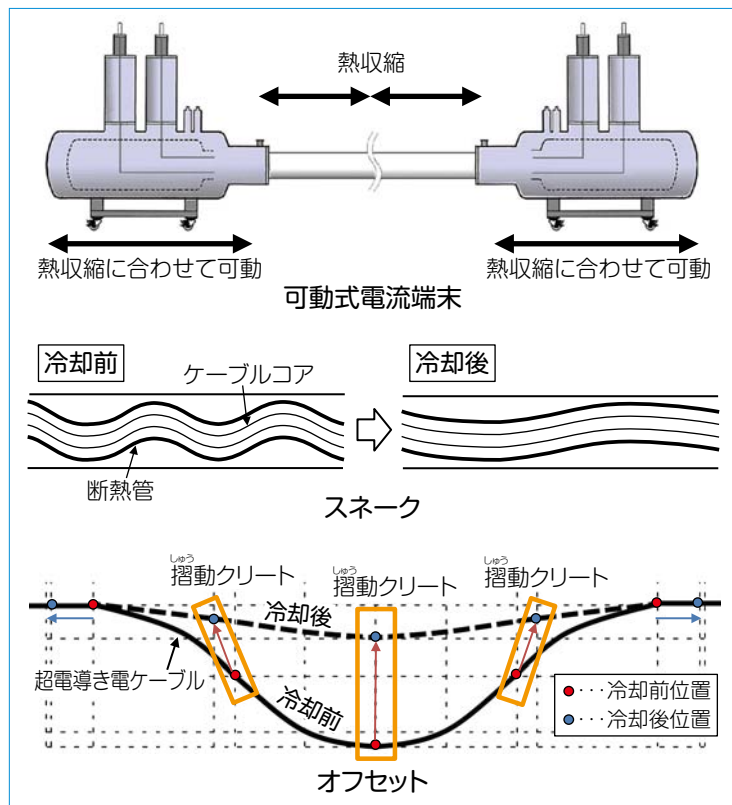


図3 冷却応力緩和手法

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設けており、複数の曲がり箇所を有しています。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ましたが、それに加えて、オフセット部を設けるとともに、電流末端も可動式としました。オフセット部の形状は図3下とし、

超電導き電ケーブルを敷設経路上の固定具(クリート)に固定して、それが摺動する構造としました。これは、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する際に、想定外の位置で伸び、ケーブルに過剰な応力が加わることを避けるため、敷設区間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ています。



図4 敷設した300m級超電導き電ケーブル

### 超電導き電ケーブルの敷設試験

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、キャタピラーやケーブルローラーを用いてケーブルを送り出すことによって行いました。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ました。なお、軌道横断部および電流端末直前においては、クリートは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ます。

図4に敷設後の超電導き電ケーブル

を示します。東側電流端末と西側電流端末の距離は310m程度となっています。線路横断部や、道路横断部分の箇所においても、ケーブルを繰り出す方法で敷設することができ、問題なく敷設を行うことができました。次に、敷設した超電導ケーブルの冷却試験を行いました。冷却は、急激な熱応力を加えないようにし、冷却ガス温度を調節しながら、徐々に冷却を行いました。初期冷却には、約80時間かけて全長の温度が液体窒素温度になったことを確認し、その後、液体窒素を充填させ冷却を完了しました。冷却後、超電導

ケーブルを目視にて確認しましたが、とくに大きく変位した箇所や、ケーブルに過大な応力がかかっている箇所がないことを確認しています。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いました(図5)。冷却前でもわずかに変位のある箇所は、断熱管の真空排気によるものです。冷却後は各所で変位が見られ、道路横断部、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わかります。また、オフセットも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ますが、径方向に

は27mmの変位量が確認できました(図6)。超電導き電ケーブルの全長をオフセット部のみで吸収することを考慮し設計しましたが、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がわずかとなっていることがわかります。

また敷設後の、断熱管内の超電導ケーブルコアの挙動を観察するために、X線発生装置を用いて、ケーブル内部の透過撮影を行いました。代表的な位置として、オフセット部で透過撮影を行った結果を図7に示します。曲がり部であるオフセット部では、ケーブルの内管が、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、一部断熱管外管と内管が接触していることがわかります。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を設けるような工夫が重要となります。また、ケーブルの敷設後において、同様の撮影をケーブル全域にわたり行いましたが、座屈や断裂などはなくケーブルに異常がないことが確認できました。

## おわりに

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運用する必要があるため、最適な敷設方法の検討を行い、実際に300m級の超電導ケーブルの敷設試験を行いました。実際の線路を想定した敷設をした後、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、ケーブルに過大な応力がかかっている箇所は見られず、300m級の超電導ケーブルの敷設には問題がないことを確認しました。またX線によるケーブル内部の透過撮影を行った結果、ケーブルコア、断熱管の

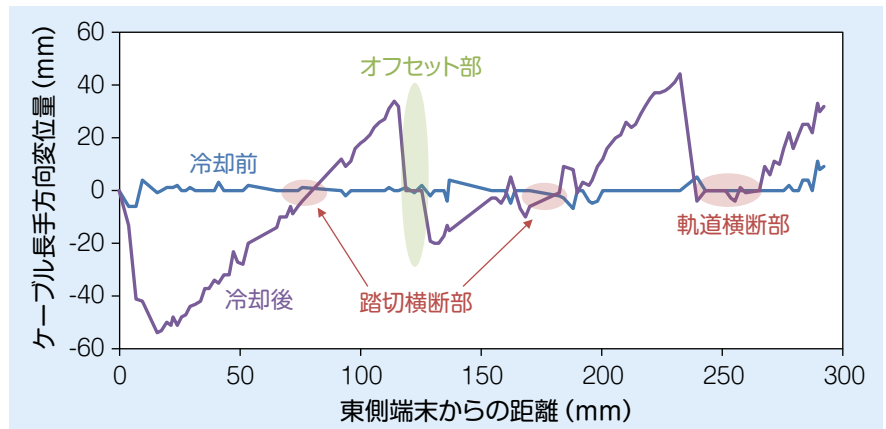


図5 300m級超電導き電ケーブルの冷却前後での変位量

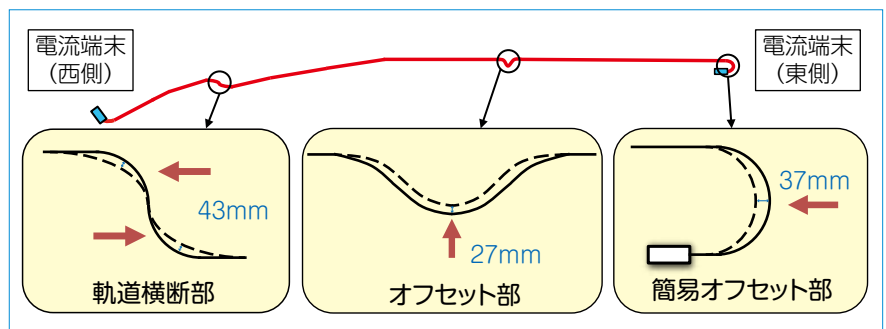


図6 300m級超電導き電ケーブルの変位

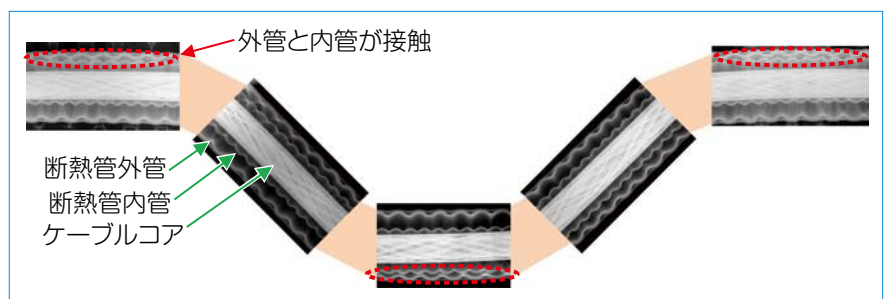


図7 300m級超電導き電ケーブルの内部観察 (オフセット部)

相対位置が判別でき、ケーブル内部の挙動を確認することができました。

なお、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ています。また、科学技術振興機構(JST)の研究課題「次世代鉄道システムを創る超伝導技術イノベーション」の支援を受けて行っています。[RRR]

## 文献

- 1) Superconductors drive trains, Nature, Vol.542, No.7641, p.275, 2017
- 2) 富田優：超電導ケーブルで電力供給を効率化する, RRR, Vol.72, No.10, pp.8-11, 2015
- 3) Masaru Tomita, Kenji Suzuki, Yusuke Fukumoto, Atsushi Ishihara, Tomoyuki Akasaka, Yusuke Kobayashi: Energy-saving railway systems based on superconducting power transmission, Energy, Vol.122, pp.579-587, 2017