

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をつないで長くする

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を目指し、超電導き電システムの開発を進めています。超電導き電ケーブルは道路交通法などの制約から、長さ500m程度までしか運搬できません。そのため、これよりも長い超電導き電ケーブルとするためには、超電導き電ケーブル同士の接続技術が必須となります。ここでは、超電導線材同士の接続部の電氣的・機械的特性を明らかにするとともに、それらを活用したケーブル同士の接続試験を実施したので、紹介します。

はじめに

現在、高温超電導ケーブルを直流電気鉄道のき電線に適用すること（以下、超電導き電ケーブルとよぶ）を目指し、高温超電導線材の材料研究から、それらの結果に基づく、高温超電導ケーブルの設計・試作・特性評価を進めています¹⁾²⁾。超電導き電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などが期待できます³⁾。

変電所間に超電導き電ケーブルを導入するためには、キロメートル級の超電導き電ケーブルが必要になりますが、断熱管に収納された超電導き電ケーブルを鉄道現場へ輸送するには、道路法、道路交通法、道路運送車両法の制限から、特別な許可を得ない限りは積載状態で幅2.5m、高さ3.8m以内に収める必要があるため、ケーブルの長さは約500mが限界であり、超電導き電ケーブル同士を現場で接続する必要があります。なお、超電導き電ケーブルを鉄道沿線で製作できれば、運搬の必要なくなるため、海底ケーブル（「海底ケーブルの運搬・敷設」⁴⁾参照）のように長尺ケー

ブルの敷設を実現できますが、立地的な問題から困難といわざるをえません。

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を接続するためには、ケーブルコアと断熱管の接続をする必要があることがわかります。さらにケーブルコアは、フォーマ（芯材）、銅保護層、超電導層から構成されるため、それぞれを接続する技術が必要とされます。ここでは、超電導線材や超電導ケーブルコアの接続手法の検討や、接続実験とその結果について紹介します。

高温超電導線材の接続手法

高温超電導線材の接続部に要求される主な特性としては、高温超電導線材の一つであるビスマス系高温超電導線材においては、これまでの超電導き電ケーブルの巻線実績から、許容引張張力：300N、許容曲げ直径：150mm、

☞ 海底ケーブルの運搬・敷設

海底ケーブルは、製造工場から岸壁の専用船(数千km以上積載可能)に直接ケーブルを積み込むことにより長尺ケーブルの運搬・敷設を実現しています。



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



赤坂 友幸
Tomoyuki Akasaka
材料技術研究部
超電導応用研究室
副主任研究員



恩地 太紀
Taiki Onji
材料技術研究部
超電導応用研究室
研究員



鈴木 賢次
Kenji Suzuki
材料技術研究部
超電導応用研究室
副主任研究員



富田 優
Masaru Tomita
材料技術研究部
超電導応用研究室長



図1 超電導き電ケーブルの構造例

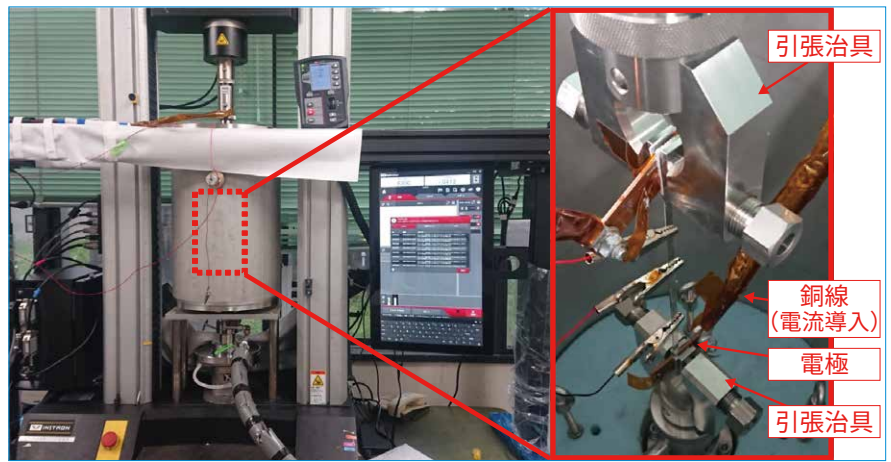


図3 開発した液体窒素中引張試験装置の外観

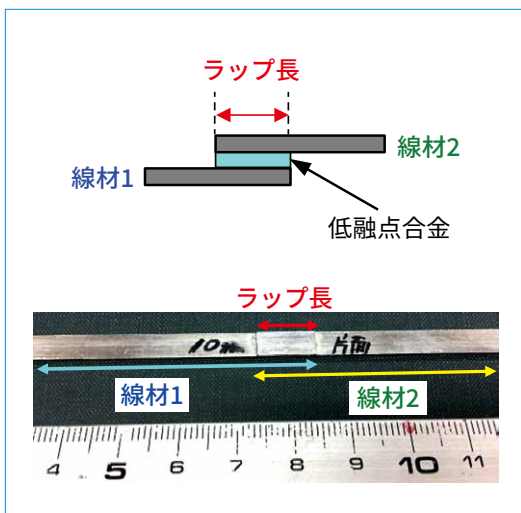


図2 低融点合金による接続例

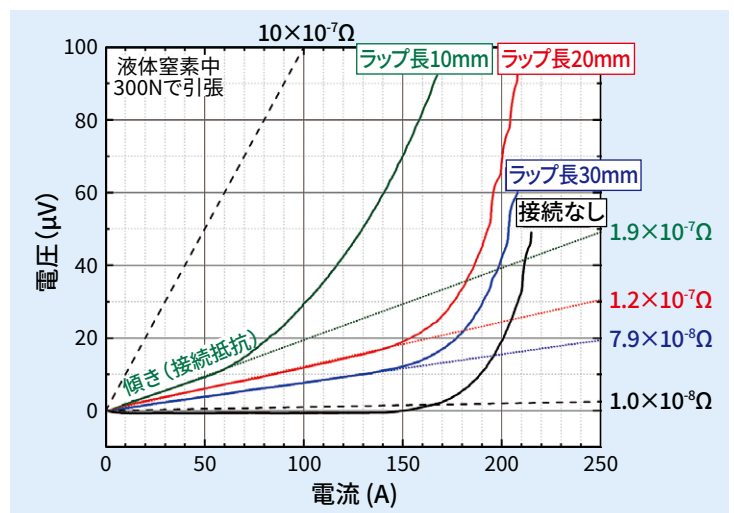


図4 液体窒素中引張試験の電流—電圧特性の一例

接続抵抗： $10^{-7} \sim 10^{-8} \Omega$ 台という値が一つの目標となります。

高温超電導線材の接続手法としては、接続抵抗がゼロとなるゼロ抵抗接続（超電導接続）と、接続抵抗が一定値発生する低抵抗接続の大きく2つがあります。前者は究極的な理想形ではありますが、現時点では特殊な環境下でしか成功しておらず⁴⁾、現場で実現するにはまだまだいくつものブレークスルーが必要とされるのが現状です。後者に関しては、現場で施工できるような簡便な接続手法として、はんだなどの低融点合金による接続、低温熱処理の機械的接続、（超）音波接続、などが候補にあげられますが、ここでは、低融点合金による接続技術について紹

介します。低融点合金による接続例を図2に示しますが、超電導線材間に低融点合金を挟み、加熱することで接続する方法であり、簡便に施工できるのが特徴です。

線材接続部の電氣的・機械的特性

現場で接続する超電導き電ケーブルの線材接続部は、運用時の液体窒素温度での電氣的・機械的特性がきわめて重要となります。そこで、超電導線材同士を重ね合わせる長さ（ラップ長）をいくつにすれば必要とされる諸特性を満たすかを知るために、液体窒素温度で各種特性の評価を行いました。

図3に開発した液体窒素中引張試験

装置の外観を示します。本装置は市販されている室温の引張試験装置に、液体窒素容器を組み合わせ、液体窒素中で超電導線材の引張強度を測定できるように改良したものです。

図4に接続なしの線材と、ラップ長10、20、30mmで接続した4種類の線材に対し、液体窒素中で300Nで引張試験を行った際の電流—電圧特性の結果の一例を示します。低電流領域で発生している電圧が接続部の低融点合金により発生している電圧を示しており、グラフの直線の傾きが、接続部の低融点合金の接続抵抗となります。すべてのラップ長において $10^{-7} \sim 10^{-8} \Omega$ 台という目標値を達成していることがわかります。

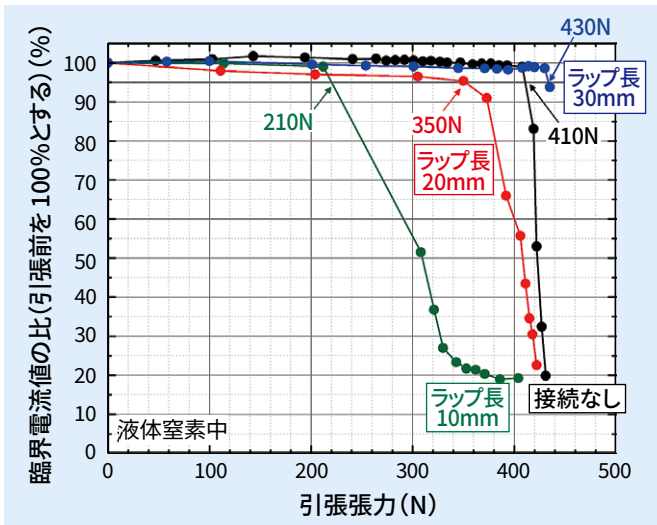


図5 I_c の引張張力依存性の一例

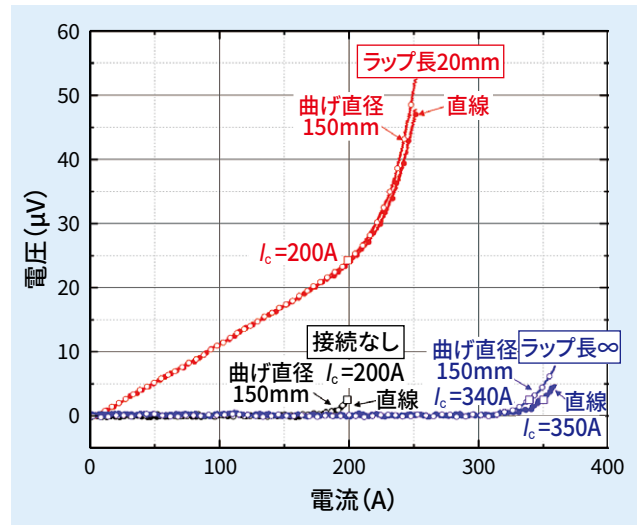


図7 液体窒素中曲げ試験の電流—電圧特性の一例

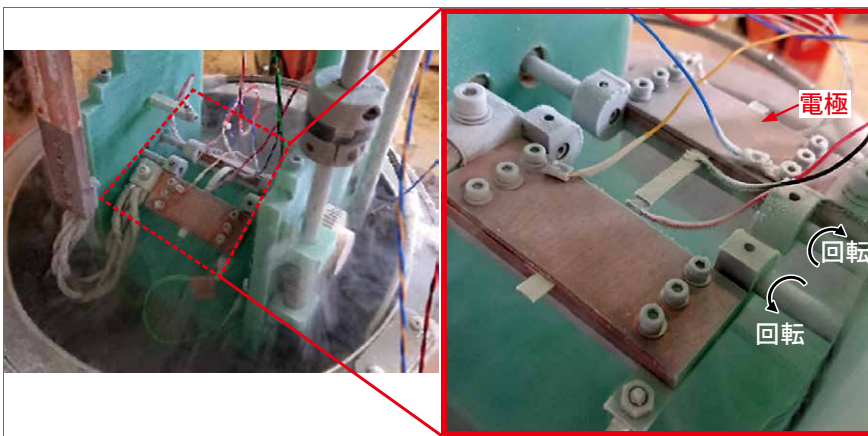


図6 開発した液体窒素中曲げ試験装置の外観

図5に、引張張力を細かく変化させ、上記4種類の線材の、電気抵抗ゼロで流すことのできる最大の電流値（臨界電流値 I_c とよび、JIS H7305:2010により $1\mu\text{V}/\text{cm}$ の電圧が発生する電流値と定義されています）の引張張力依存性をまとめた図を示します。引張張力が一定値を超えると、 I_c が低下し始めることがわかります。これは超電導線材内の超電導を担う組織に歪みが発生し、特性が低下するためです。 I_c の5%の低下まで許容すると、接続なしの試料は410Nまで、ラップ長10mmの試料は210Nまで、ラップ長20mmの試料は350Nまで、ラップ長30mmの試料は430Nまで引張張力に耐えられることがわかります。すなわち、ラップ長を20mm以上にすれば、許容引張張力：300N、接続抵抗： $10^{-7}\sim 10^{-8}\Omega$ 台の

目標を達成できることがわかります。

次に接続部の曲げ特性ですが、図6に開発した液体窒素中曲げ試験装置の外観を示します。本装置は超電導線材の両端を電極で固定し、両電極をギアにより左右対称に回転させることで、超電導線材に一定の曲率を与えることができるようになっています。

図7に接続なしの線材と、ラップ長20mmの線材、ラップ長 ∞ （ラップ長=線材長）の線材の3種類の線材に対し、直線から曲げ直径150mmの歪みを印加した際の、電流—電圧特性の結果の一例を示します。なお、ラップ長 ∞ の線材は、線材が2枚完全に重なっている状態なので、 I_c が1枚に比べ約2倍になっています。接続なしの線材では150mmの曲げ歪みの印加の有無によらず、 I_c は200Aを維持しているこ

とがわかります。ラップ長20mmの線材も同様に、150mmの曲げによる I_c の劣化は確認されず、また接続抵抗も変化しないことがわかります。一方でラップ長 ∞ の線材は、直線状態では I_c は350Aあったものが、150mmの曲げ歪みにより340Aにやや低下していることがわかります。これはラップ長 ∞ の線材は、低融点合金により2本の線材が一体化しているため固くなり、曲げづらくなっていることを反映しています。

図8に、曲げ直径を細かく変化させ、上記3種類の線材の I_c の曲げ直径依存性をまとめた図を示します。引張歪み同様、超電導線材内の超電導を担う組織に曲げ歪みが印加されると、特性が低下していくことがわかります。 I_c の5%の低下まで許容すると、接続なしの試料は40mmまで、ラップ長20mmの試料は75mmまで、ラップ長 ∞ の試料は120mmまで I_c に劣化がみられないことがわかります。すなわちラップ長にかかわらず、許容両曲げ直径：150mmの目標を達成できることがわかります。

以上のことから引張試験と曲げ試験結果をあわせて考えると、高温超電導線材間の接続はラップ長を20mm以上にすれば必要な目標を達成できることがわかります。

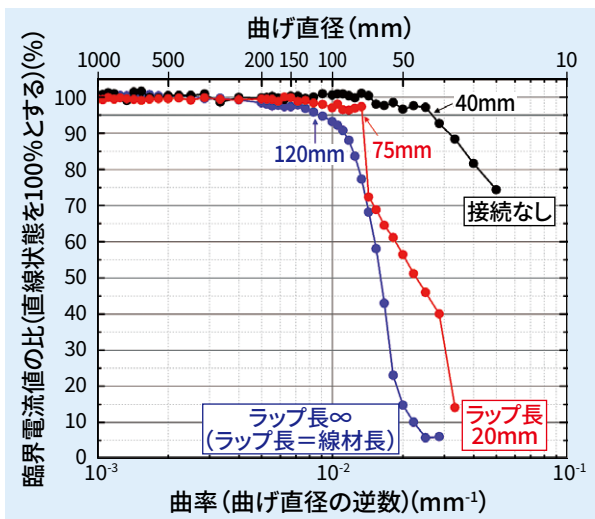


図8 I_c の曲げ直径依存性の一例

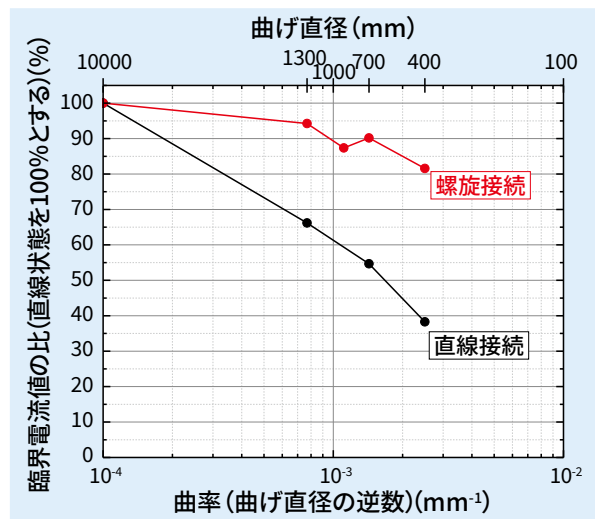


図10 超電導ケーブルコア接続部の I_c の曲げ直径依存性

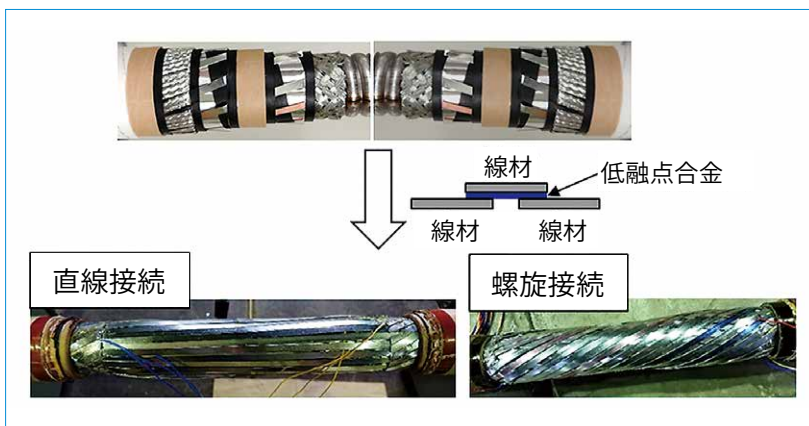


図9 超電導ケーブルコアの接続方法の一例

超電導ケーブルコアの接続

上記検討を踏まえ、ラップ長を20mmに固定して、超電導ケーブルコアの接続を実施しました。また超電導電ケーブルを接続して長尺化する場合、運用上は1本のケーブルとして取り扱える、すなわち接続部が存在するのがわからないように接続するのが理想です。この場合、ケーブルコア接続部が移動しないように固定することができないため、断熱管の敷設ルートに応じた曲げが印加される可能性があります。そこで、図9に示すように、超電導ケーブルコアの両端を直線で接続する直線接続と、ケーブル内部構造と同様に、一定のスパイラルピッチで巻き付けて接続する螺旋接続の2種類の手法で試作を行い、ケーブル接続部に対し曲げ試験を実施し、曲げ歪みに対

する臨界電流値の依存性を評価しました。結果を図10に示しますが、直線接続の場合、直径1300mmのドラムに巻き付けた状態でも I_c が65%まで減少する一方で、螺旋接続の場合は、 I_c は95%以上の値を維持することがわかります。これは螺旋接続の場合には、1ピッチで内側と外側を通ることによって、1つの線材に対し引張と圧縮歪みが印加されたため、1本あたりのかかる歪みが緩和され、劣化が抑えられたと考えられます。

おわりに

キロメートル級の超電導電ケーブルの実現には、超電導電ケーブル同士の接続技術が必要となります。ここでは超電導線材の接続部に関する基礎特性評価の結果を示すとともに、それ

らを活用したケーブルコア接続試験の結果を示しました。高温超電導線材間の接続はラップ長が20mm以上必要であり、ケーブルコア同士の接続では、螺旋状に接続するのが機械特性の観点から優れていることを示しました。

なお本研究の一部は科学技術振興機構(JST)の未来社会創造事業(JPMJMI17A2)、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)の委託・助成事業(JPNP16006)の支援を受けて実施しました。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, Eberg, Vol.122, pp.579-587, 2017
- 4) 例えば、理化学研究所：広い温度と磁場の領域で電気抵抗ゼロを示す超電導接合, https://www.riken.jp/press/2017/20171219_2/ (入手日：2020/11/10)