

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

超電導ケーブルで 電力供給を効率化する

鉄道総研では直流電気鉄道に応用可能な超電導ケーブルの開発を進めています。超電導ケーブルを現在の直流き電システムへ適用することによって、変電所の削減や電食の問題を解決することができます。超電導き電ケーブルの開発について、最近の研究開発状況と課題について解説するとともに、今後の技術開発の方向性を紹介します。



富田 優
Masaru Tomita
研究開発推進部
担当部長
兼 超電導き電ケーブル課
課長
兼 材料技術研究部
超電導応用研究室
室長
[専門分野]超電導工学

はじめに

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、超電導線材の製作および特性評価、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います。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、レールに流れる帰線電流を超電導ケーブルに流すことで双方向通電となり、漏えい磁場が低減できるとともに、レールから大地への漏れ電流も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ます。

本稿では、プロトタイプの評価結果をもとに、超電導き電ケーブルを製作して鉄道総研所内の試験線へ敷設を行い、冷却・通電試験などの基礎評価により健全性を確認したのち、鉄道車両を用いた走行実験を行った結果を紹介し

超電導き電ケーブルの導入効果

直流き電回路のエネルギーフローを**図1左**に示します。通常は、変電所からき電回路（帰線としてのレールも含めて）を通じて列車に電力が供給され、電気エネルギーが列車の駆動エネルギーに変換されます。その運動エネルギーの一部は制動時に回生エネルギーとしてき電回路に回生され、残りは機械ブレーキによって熱となります。また、走行抵抗も特に高速時には無視できなく、変電所やき電線、列車の中ではジュール損失などのエネルギー損失があります。一方、超電導き電ケーブルを導入した場合には、**図1右**に示すように、き電線のジュール損失の低減、回生率の向上（回生失効の抑制）というエネルギー上のメリットと、機械ブレーキの使用頻度の低下によりブレーキのメンテナンスコストの低減が期待されます。また、超電導ケーブルの導入方法によっては、変電所設置数の削減や冗長性（信頼性）の向上なども期待できます。一方、超電導ケーブルの損失、端末や接続部、配管からの熱侵入などに対して、超電導ケーブル温度をほぼ一定に保つための冷却電力が必要

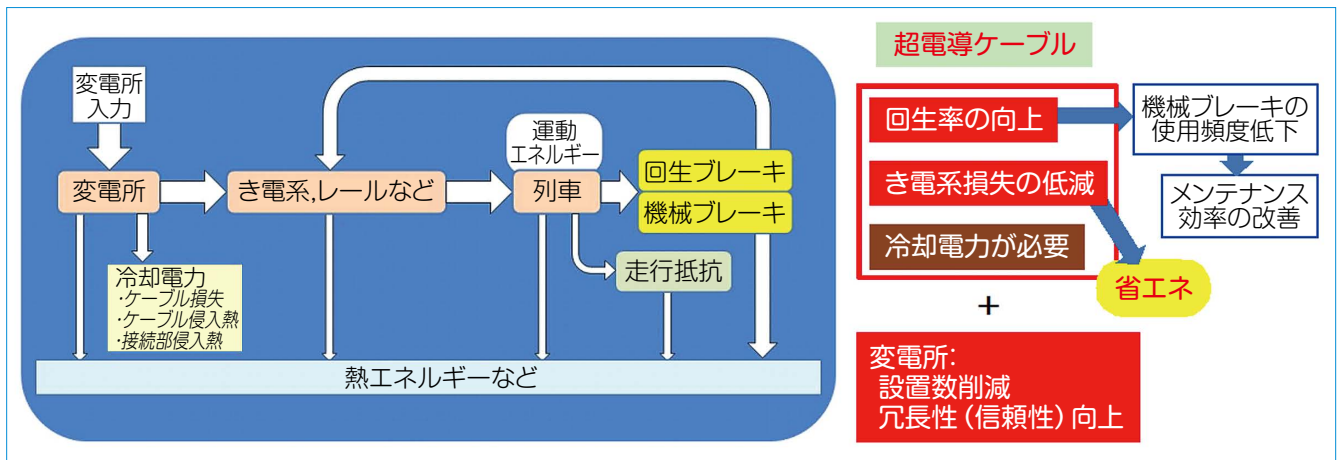


図1 直流き電回路のエネルギーフローと超電導き電ケーブルの導入効果

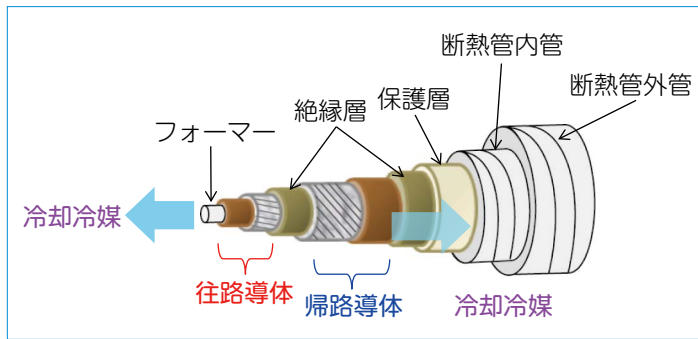


図2 超電導き電ケーブルの構造

表1 30m級超電導き電ケーブルの内部構造

項目	構造	詳細
フォーマー	SUS*	内径 21mm
往路導体	Bi系線材 + 保護導体	超電導 2層 銅テープ 4層
絶縁体	絶縁紙	2.5mm 厚
帰路導体	Bi系線材 + 保護導体	超電導 2層 銅テープ 4層
保護層	絶縁紙 + 布テープ	2mm 厚
断熱管内管	SUS*	
断熱層	SI**	
断熱管外管	SUS*	
防食層	PVC***	外径 97mm

* SUS: ステンレス鋼
 ** SI: スーパーインシュレーター
 *** PVC: ポリ塩化ビニル

であり、変電所などから供給することになります。

鉄道用超電導ケーブルの試作

2007年、鉄道への応用に向け、臨界電流値が1.5kA級の超電導ケーブルの試作を行いました。超電導ケーブル1本でP相およびN相が通電可能とするため同軸構造とし、P層にき電電流、N層に帰線電流を通電することを想定しています。通電試験を行った結果、P層で1.7kA、N層で2.2kAの電流を超電導状態で流せることを確認し、また、通電時の漏えい磁場について測定した結果、実用上の通電方向となる双方向通電の場合に、漏えい磁場を抑制できることを確認しました。

超電導ケーブルは低損失で大電流を送電することができる一方で、液体窒素温度付近までの冷却が必要となります。そのため、超電導ケーブルは真空断熱配管内に設置されるものの、多少の熱侵入により温度上昇が生じ、超電導状態の維持が困難となります。これに対しては、冷却した液体窒素を循環することで温度上昇を防ぎます。循環させるためには冷媒経路を確保する必要があるため、中空パイプ(フォーマー)内部に冷媒経路を設け、見かけ上1本の配管で冷媒の行き帰りを行う方式を採用しました。2010年には、実路線においても使用可能な8kA級の鉄道用超電導ケーブルを製作し、臨界電流値を測定した結果、10kA以上

の臨界電流値を確認しました¹⁾。この値は都心部の主要幹線の遮断容量に相当する必要電流容量となります。

30m級超電導き電ケーブルの開発

プロトタイプの評価試験結果を設計に反映し、鉄道車両を用いた実証試験向けの鉄道用超電導ケーブルの仕様を決定し、製作をしました。超電導き電ケーブルの構造を図2に、製作したケーブルの内部構造を表1に示します。製作した30m級超電導き電ケーブルは、鉄道総研の構内試験線に敷設しました。敷設したケーブルに対して仕様を満たしているか、各種の性能試験を実施して確認しました。まず、冷却し



図3 電流末端部に設置した応力測定装置

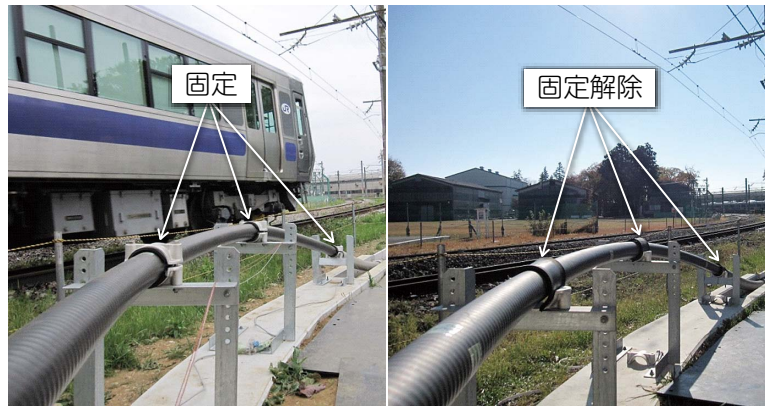


図4 超電導ケーブルのクリート

表2 300m級超電導き電ケーブルの概要

項目	概要
定格電圧	1.5kV
定格電流	1kA
フォーマー	SUS コルゲート管
断熱管	アルミ製
ケーブル長	310m



図5 300m級超電導き電ケーブルの搬送の様子

ているときにケーブルに作用する応力について、電流末端部にロードセルを設置し測定を行いました(図3)。初期冷却は冷却ガス温度を管理しながら、往路と復路に同方向で流す並流式で冷却を行い、ケーブルをクリート固定した場合と、固定しない場合のそれぞれについて測定を行いました(図4)。クリート固定した場合には、最大張力は約700kgfでしたが、クリートを外すことで200kgf以下まで低減し、超電導ケーブルにかかる応力は許容範囲内であることを確認しました。



図6 300m級超電導き電ケーブルの延線の様子

次に、通電試験を行い、発生電圧が電界基準(1 μ V/cm)に達した電流値をIcとした結果、77KにおけるIcは、約6960Aであることを確認しました。一連の超電導ケーブル敷設・試験の過程を経て、当初の超電導線材の許容電流値に変化がないことが分かりました。冷却・通電試験により健全性を確認したのち、30m級超電導ケーブルを

用いて、鉄道車両の走行試験を行いました。超電導き電ケーブルを介し、2両編成の車両に電力を供給し走行試験を行った結果、車両の速度の増加とともに、超電導き電ケーブルに流れる電流値の上昇を確認し、最大速度約45km/hで走行しました。超電導ケーブルを介して電車に電力を送る、国内外で初めての試験に成功しました。

300m級超電導き電ケーブルの開発

次に、より実用に近い、長尺の300m級超電導ケーブルを製作しました²⁾。製作したケーブルの概要を表2に示します。製作した300m級超電導き電ケーブルは、図5に示すドラムに巻いた状態で搬送し、図6に示すケーブル延線機を用いて構内試験線に敷設

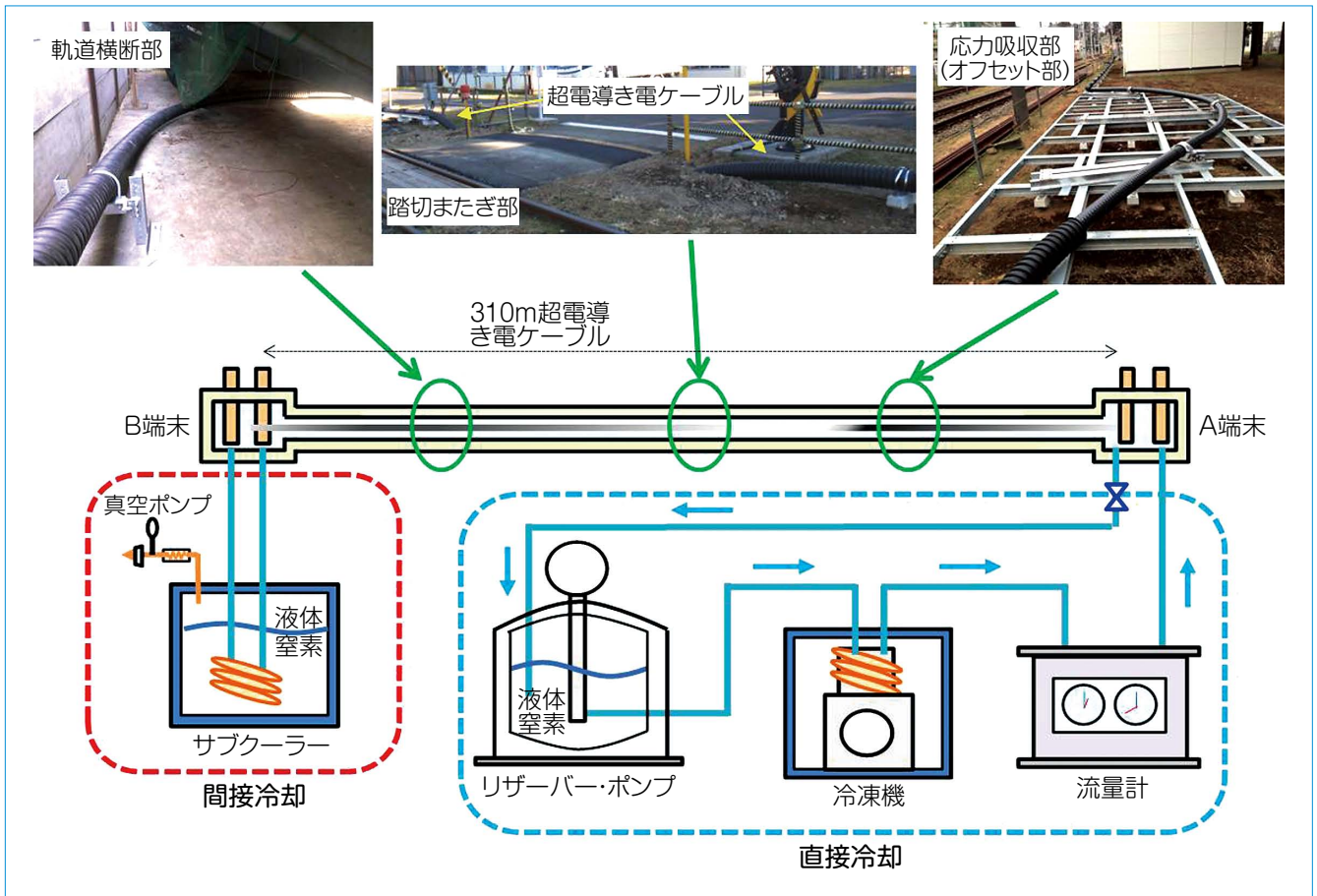


図7 敷設した300m級超電導き電ケーブル

しました。300m級超電導き電ケーブルの敷設においては、実路線を想定し、敷設経路上に線路またぎや踏切またぎ箇所を設け、また、複数の曲がり箇所を有しています(図7)。このため、冷却方式は、従来の直接冷却方式に加え、軌道横断面部、踏切横断面部といった曲線箇所における熱侵入の増加が予想されたため、間接冷却方式であるサブクーラーも設置しました。

次に、敷設した300m級超電導ケーブルの性能確認のため、冷却試験を行いました。冷媒の注液は直接冷却システム側から行い、急激な温度変化を与えないよう、蒸発器により液体窒素をガス化して温度調整し、徐々に温度を低下させました。内蔵する光ファイバーにより冷却過程の温度分布を測定

したところ、約60時間で初期冷却が完了し、その後16日間にわたって冷却状態を安定に維持しました。次に、超電導き電ケーブルの通電試験を行った結果、仕様をこえる臨界電流値1110Aを確認し、問題なく超電導ケーブルが敷設できていることを確認しました。

おわりに

現在は、超電導き電ケーブルを用い、冷却・通電の繰り返し試験や実車両を用いた実証試験を行っています。また、実証試験と並行し、実路線を対象としたシミュレーションの確認を進めており、実証試験の結果と合わせて導入効果について明らかにし、鉄道事業用として適用可能な超電導ケーブルの実現を目指していきます。

なお、本研究の一部は、国土交通省の補助金を受けて実施しています。また、国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)の研究成果展開事業「戦略的イノベーション創出推進プログラム」における研究課題「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) M.Tomita et.al.: JOURNAL OF APPLIED PHYSICS 111, 063910, 2012
- 2) 富田優 他: 低温工学・超電導学会概要集, Vol.90, p.25, 2014