

- 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

超電導技術で鉄道車両への電力供給のロスを低減する

省エネにつながる超電導技術として、送電応用の超電導き電ケーブルや、蓄電応用の超電導磁気エネルギー貯蔵装置などがあります。ここでは、おもに鉄道の送電線として使われる超電導き電ケーブルについて紹介します。超電導き電ケーブルは、電気抵抗がゼロであるため、送電時の電力ロス低減による省エネ、電圧降下を抑えることによる変電所の集約化などの効果が期待できます。超電導き電ケーブルによる鉄道車両への電力供給において、走行実験を行いました。



富田 優
Masaru Tomita
浮上式鉄道技術研究部長

はじめに

鉄道の送電時におけるエネルギー損失は約5%程度ですが、世界の鉄道線路を合計するとかなりのエネルギーをロスしていることとなります。鉄道において電力の送電技術の果たす役割は大きく、エネルギーに関しては、いまだ改善の余地があります。鉄道応用に向けた超電導技術には、電力応用の変圧器、電流リード、限流器、磁場応用の超電導リニア、モーターなどがあります(表1)。その中でもおもに省エネを目的とした技術としては、超電導磁気エネルギー貯蔵装置と超電導き電ケーブルなどがあり、電力供給ロスを低減することができます。ここではそれらの技術を中心に紹介します。

超電導磁気エネルギー貯蔵装置の開発

電気鉄道においては、回生効率向

上、電力負荷平準化に向けて電力貯蔵装置が注目されています。しかしながら、一般的な貯蔵媒体であるリチウムイオン電池は急速充電に課題があります。そこで、急速な充放電が可能な超電導磁気エネルギー貯蔵装置(SMES: Superconducting Magnetic Energy Storage)の開発を進めています(図1)。SMESは超電導線材で作られたコイルに電気エネルギーを磁気として直接保存する装置であり、ゼロ抵抗により電気がロスなく流れ続けることができるため、必要時には瞬時の充放電が可能です。リチウムイオン電池は電気エネルギーを化学エネルギーとして貯蔵するのに対し、SMESは電気エネルギーを直接電気エネルギーとして貯蔵するため、高効率、長寿命、高入出力といった特徴があります。昨今ではヘリウム枯渇問題が深刻となっているため、次世代に向け、冷却に液体ヘリウ

表1 鉄道応用に向けた超電導技術

種類	超電導技術
電力応用	超電導き電ケーブル, 超電導変圧器, 超電導磁気エネルギー貯蔵装置, 電流リード, 限流器
磁場応用	超電導リニア, 超電導モーター, 超電導磁気軸受

青太字はおもに省エネを目的とした技術

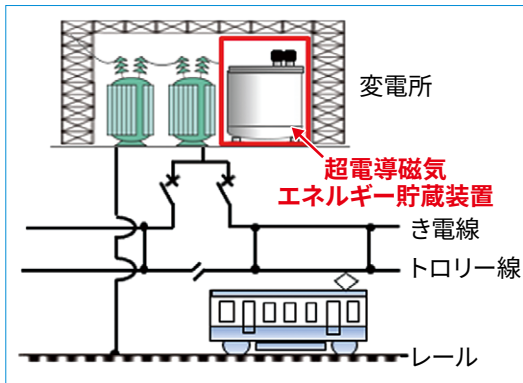


図1 超電導磁気エネルギー貯蔵装置の導入例

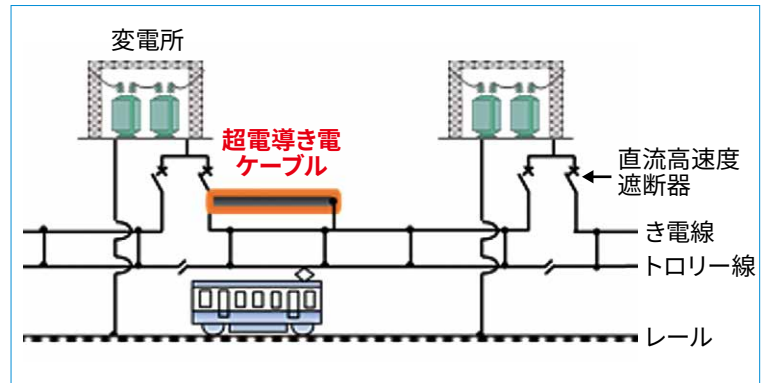


図2 超電導き電ケーブルの導入例(変電所間の一部を結んだ場合)

ムを必要としない二ホウ化マグネシウム (MgB_2) 線材を用いたコイルの研究開発を行っています¹⁾。 MgB_2 コイルは冷媒を用いず冷凍機の伝導冷却のみで冷却が可能のほか、液体水素を用いた冷却も可能であるため、二酸化炭素を排出しない将来の水素社会とも適合します。

表2 一般的な鉄道路線を例とした超電導き電システム導入時の解析結果

	必要となるエネルギー [kW]		
	変電所出力	冷却エネルギー	合計
超電導き電システム	9,080	1,238	10,318 (95)
従来システム	10,856	—	10,856 (100)

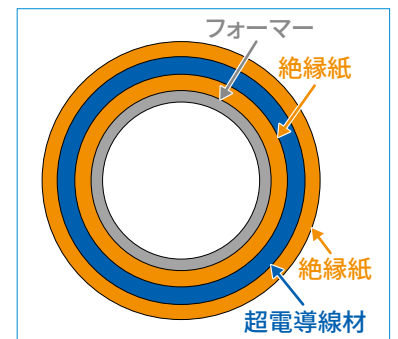


図3 超電導ケーブルコアの断面図

超電導き電ケーブルの開発

次に、超電導技術を用いたき電ケーブルについて紹介します。日本の鉄道路線においては、多くの直流電化区間を有し、前述の課題を抱えています。また、ヨーロッパの高速鉄道においても、都市近郊区間は直流電化区間を走行しており、同様の問題をもっています。超電導による送電は、送電ロスや電圧降下の問題を解消し、走行の安定性を高める技術として国内外で期待されています。こうした背景を踏まえ、次世代の鉄道システムに向けた、超電導き電ケーブルによる送電ロスを低減できる技術開発を行っています。

超電導き電ケーブル開発においては、これまで材料試験から、システム設計の検討などを経て、構内試験線および営業線での実証試験まで進んでいます²⁾。

超電導き電の導入モデル

図2に超電導ケーブルを鉄道路線へ導入したモデルの一例を示します。図

は、変電所間の一部を超電導き電ケーブルで結んだモデルです。変電所と変電所の区間で一部では、変電所から供給できる電圧値が低下するという問題があるため、その問題を解消することを目的としたものです。また、超電導き電ケーブルの導入方法は、変電所間の一部ではなく、変電所間のすべてを結ぶ形で導入する場合や、き電線と超電導き電ケーブル間に接続箇所を設けたき電分岐を用いる場合など、ニーズに応じてさまざまな形が取れます。変電所間をすべて超電導き電ケーブルで結んだ場合では、電圧降下の抑制効果が向上するとともに、各変電所からの給電が可能となるため、変電所最大電流は減少し、変電所間の電力負荷のばらつきを緩和することができます。また、ブレーキをかけることで発生した回生電力を、架線を通じて遠くを走行するほかの電車に送ることが可能となります。

超電導き電ケーブルの導入効果を定

量的に評価するために、き電線と並列に変電所間を超電導き電ケーブルで結ぶ方法について、解析を実施しました³⁾。一般的な鉄道路線を例として、1日のエネルギーを解析した結果、超電導き電システムを導入した場合、必要なエネルギーが従来の10,856kWから10,318kWに低減しており、約5%の省エネ効果があることがわかりました(表2)。

超電導き電ケーブルの試験

超電導ケーブルは、図3に示すようにフォーマーに超電導線材、絶縁紙などを螺旋状に巻線することで作製します。フォーマーは部材を巻くための中空のパイプ、超電導線材は送電を担う高温超電導体からなる部材、絶縁紙は絶縁用の耐電圧特性が優れた部材です。巻線する際に、超電導線材には機械的な応力がかかるため、曲げた状態で電流がどの程度まで流すことができるかの評価試験を行っています。また、通電

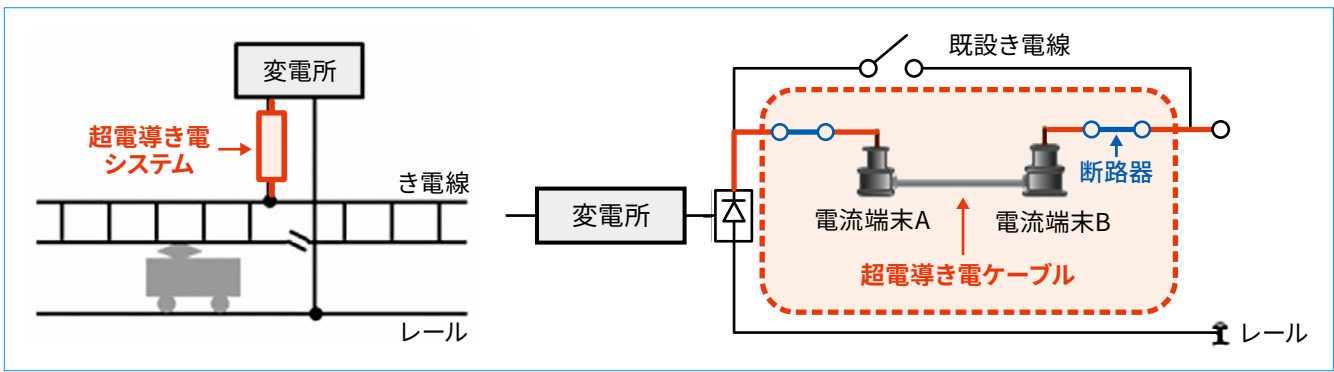


図4 超電導き電システムの回路図

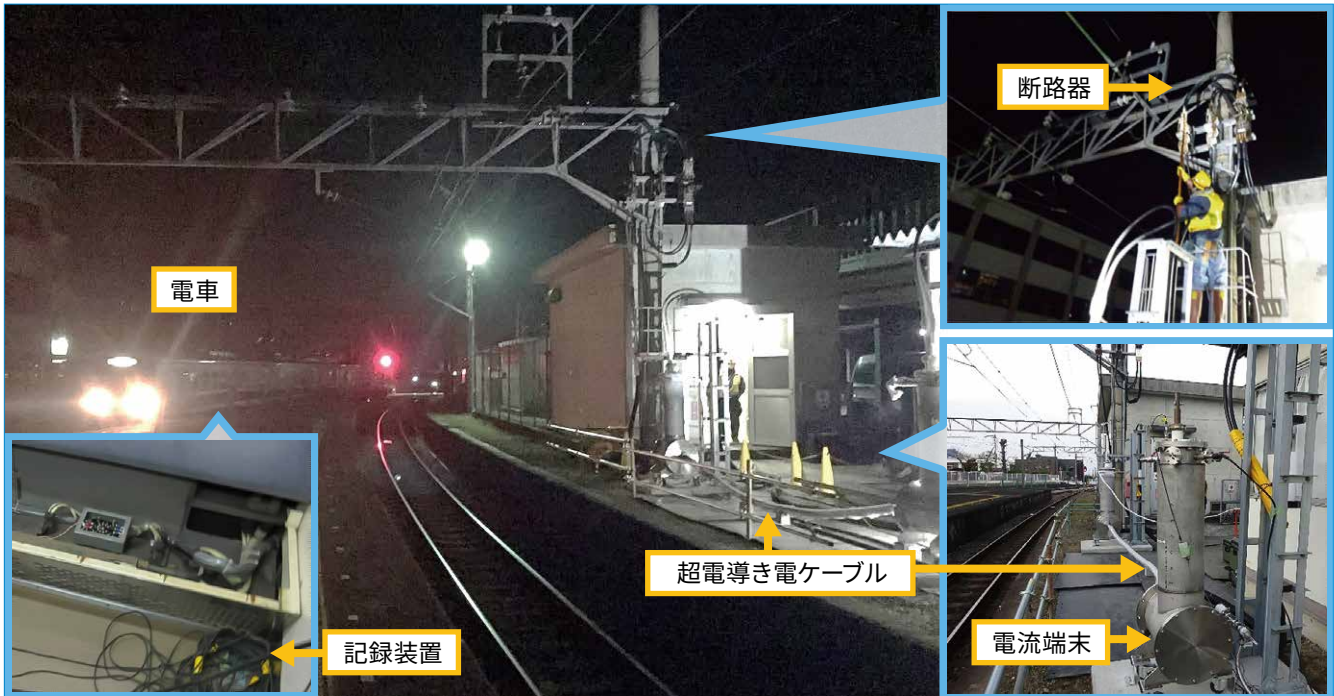


図5 敷設した超電導き電ケーブルと走行試験の状況

の際には超電導線材自身から発生する磁場の影響により、線材に流すことのできる電流値に変化があるため、磁場をかけた状態での通電試験も行っています。これら一連の超電導材料試験によりケーブル化の設計指針を得ることで、超電導ケーブルを作製しています。

次に、営業線における実際の設備への接続や超電導き電システムとしての動作確認など、実用化に向けた基礎的な技術検証を目的とし、超電導き電ケーブルを用いた列車走行試験を実施しました⁴⁾。本試験では、電車の加速・減速のためのノッチの入り切りにより、超電導き電ケーブルに急激な電流変化を与えた際、電力ロスが生じていない

かを評価しました。試験用短尺6mのケーブルを用意し、電圧1,500V、電流容量2,000Aとしました。また、超電導き電ケーブルの接続箇所は、変電所出力とき電線入力との間としました。作製した超電導き電ケーブルを用いて、図4に示す単純回路を構成しました。超電導き電ケーブルの両端には、電流の取り出し口となる電流端末を設置しました。断路器とよばれるスイッチを操作することで、従来の既設き電線の回路から、超電導き電システムから車両に送電できる回路に切り替えました。

敷設した超電導き電ケーブルと走行試験の様子を図5に示します。超電導

き電ケーブルの冷却は液体窒素の浸漬冷却により行っています。電流端末BよりAに向けて、液体窒素を充填し冷却を行った結果を、図6に示します。充填開始から約80分で2つの電流端末が液体窒素温度となり、初期冷却が完了していることがわかります。冷却後に、電車を用いた走行試験を行いました。電車に取り付けた記録装置にて、車両に流れる電流や速度を測定しました。走行試験の結果を図7に示します。田京～修善寺間(5.6km)を往復する電車(3両編成)に超電導き電ケーブルを通して最大で約880Aの電流を供給し、超電導送電による走行試験に成功しました。駅での発進・停車にともな

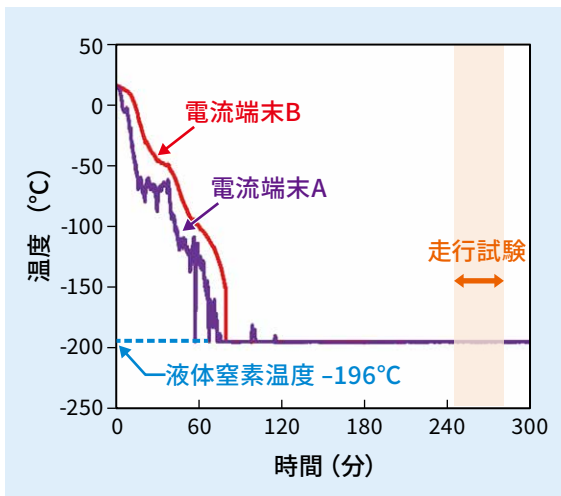


図6 超電導き電システムの温度

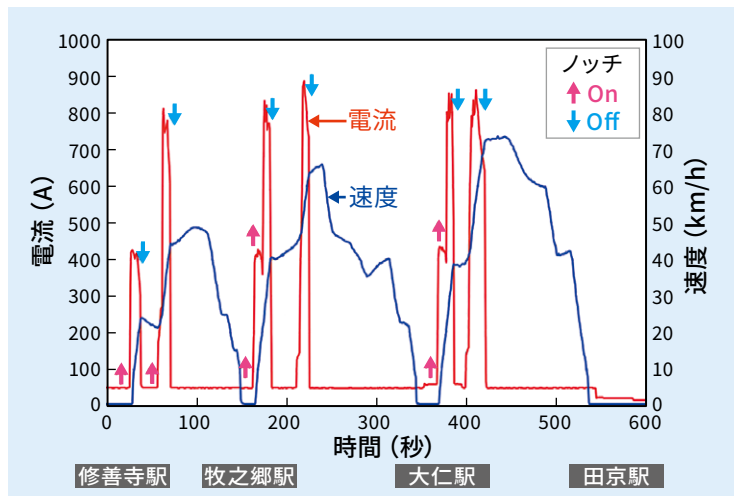


図7 超電導き電ケーブルを用いた走行試験の結果

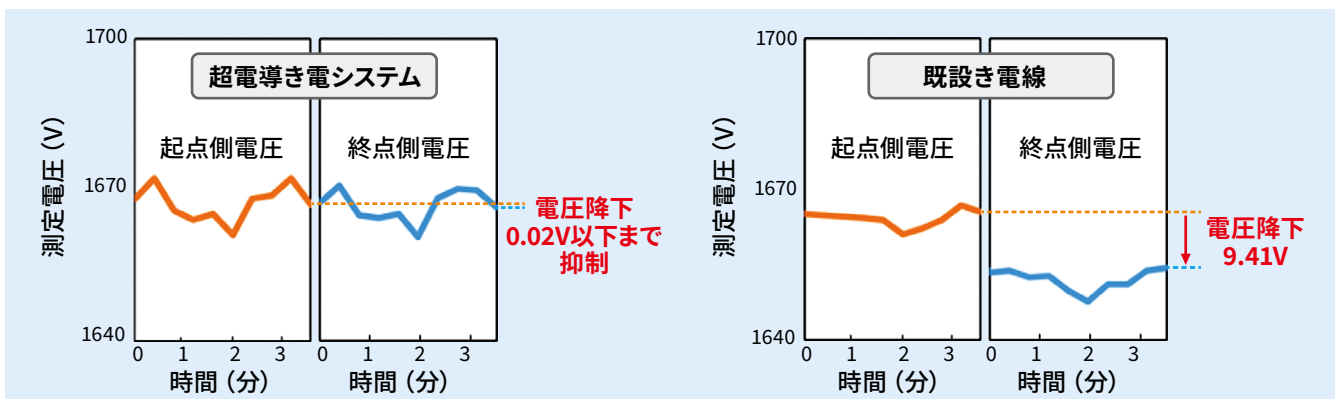


図8 超電導き電による電圧降下の比較

うノッチの入り切りによる超電導き電ケーブルの急激な電流変化に対し、温度監視によるシステムの発熱などはみられず(図6)、電力ロスが発生していないことが確認できました。

次に、超電導き電ケーブルの省エネ効果を調べるため、408m級の超電導き電システムを用いて、送電試験を行いました。超電導き電システムを、路線沿いにて既設き電線と平行に設置し、変電所から超電導き電ケーブルを介して車両基地への送電を実施しました。車両基地に留置した電車(10両)10編成に対して、全車両の空調、照明などのために、電流を約1,250A流しました。その結果、超電導き電システム接続時にシステム両端(起点側と終点側)の電圧はほぼ一致し、既設き電線接続時に通電した時に測定された9.41Vの電圧降下が、0.02Vまで抑制されて

いることを確認しました(図8)。超電導き電システムで送電することにより、この408mの区間で、送電線での電力損失量は約7kW低減できることがわかりました。

おわりに

これらの実験結果をもとに、実路線を対象としたシミュレーションを進め、適正となる路線の選定を進めています。また、変電所間に使用することを前提とした長距離システムについても検討しています。今後も、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、これらの研究の一部は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金、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」および先端的低炭素化技

術開発(ALCA)の支援を受けて行いました。また、現地試験において、伊豆箱根鉄道株式会社、東日本旅客鉄道株式会社に協力をいただきました。

RRR

文献

- 1) 恩地太紀, 石原篤, 小林祐介, 福本祐介, 富田優, 濱島高太郎: 二ホウ化マグネシウム超電導線材を用いた蓄電用超電導コイルの基礎検討, 鉄道総研報告, Vol.32, No.10, pp.41-46, 2018
- 2) Superconductors drive trains, Nature, Vol.542, No. 7641, p275, 2017
- 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