

特集：浮上式鉄道の技術と超電導の実用に向けた研究

# 超電導き電ケーブルの冷却方式

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

Cooling Methods of Superconducting Feeder Cables

Yusuke KOBAYASHI Atsushi ISHIHARA Kenji SUZUKI

Yusuke FUKUMOTO Masaru TOMITA

When superconducting cables are installed in feeder cables, it is expected to improve regenerative efficiency, reduce power loss, level the load between substations and consolidate substations by suppressing voltage drops. On the other hand, it is needed to cool superconducting cables by a refrigerant such as liquid nitrogen for keeping a superconducting state. In this paper, the design concept of superconducting cables and cooling systems which constitute superconducting feeder systems is introduced, and the efficient circulation method of refrigerants is discussed. Also, the result of cooling tests performed after constructing a cooling system is reported.

キーワード：超電導き電，冷却システム，熱負荷，液体窒素，循環方式

## 1. はじめに

直流電気鉄道における変電所間隔は、き電方式、線路条件、電気車電流、運転条件、電源事情等によって異なり、車両に電気を送るためのき電は、電気抵抗があるため、流れる電流に応じて電圧が変動（電圧降下・上昇）する<sup>1)</sup>。「鉄道に関する技術上の基準を定める省令」では、「電車線の電圧は、列車の適正な運行を確保するため十分な値に保たなければならない」と規定されており、電車線の電圧降下は許容し得る範囲内（直流 1500V き電方式では、例えば最低電圧 1100V）としなければならない。このため、変電所間隔は、都市間を結ぶ路線では 10～15km、より多くの電力を必要とする大都市圏の路線では 3～5km 程度であり、多数の変電所が設置されている。

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、超電導き電システムの開発を始め<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)5)</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>6)7)</sup>。また、レール電位の抑制が可能であることから、レールから大地への漏れ電流がなくな

り電食の問題も解決できると期待されている。

超電導ケーブルは上記のような魅力的な特徴を持つ一方、超電導状態を維持するために冷媒を用いて冷却する必要がある。そこで本稿では超電導き電システムを構成する、超電導ケーブル、冷却システムの設計思想について概説するとともに、効率的な冷媒の循環方式について検討し、冷却システムを構築、冷却基礎試験を実施した結果についてまとめる。

## 2. 冷却システムの検討

### 2.1 超電導ケーブル冷却方式の検討

一般に、超電導応用機器の冷却方法は大きく分けて、冷凍機による伝導冷却と、冷媒による浸漬冷却の 2 つがある。

伝導冷却は冷媒を用いず、物質の熱伝導を利用して冷凍機の冷熱により冷却する方法で、主に超電導マグネットなど、冷凍機から被冷却物までの距離が短い応用機器で使用される。超電導ケーブルは km オーダーに及ぶ機器であるので、伝導冷却により全体を超電導状態にまで冷却することが困難であり、また、局所的な発熱が生じた場合はその除去が困難で周りに影響が出てしまうため、復旧に時間がかかる恐れがある。

一方、冷媒による浸漬冷却においては、被冷却物周りに存在する冷媒の熱容量が大きいため、局所的な発熱は冷媒が吸収し周りへの影響が少ないが、常に飽和状態であるので、熱侵入などにより冷媒が気化し、絶縁性能などに悪影響を及ぼす問題がある。

\* 浮上式鉄道技術研究部 超電導・低温研究室  
\*\* 旧 材料技術研究部 超電導応用研究室  
\*\*\* 浮上式鉄道技術研究部

これらを踏まえ、超電導ケーブルの冷却方法として、伝導冷却と浸漬冷却を組み合わせ、冷凍機などにより冷媒を過冷却状態とし循環させる方式を提案した。各所に冷却ステーションを設け、冷媒を過冷却状態とし、送液ポンプにて循環させることにより、熱侵入などによる気化を防ぎ、超電導ケーブルを冷却することができる。また、冷媒は圧力により沸点が変化するため、圧力および冷却温度を制御することで、沸点までの温度マージンを大きくとることが可能となる。なお、冷媒は主要な高温超電導材料の臨界温度（超電導状態を保つことができる最高の温度：Bi系-約110K、RE系-約92~96K）を考慮し、安価で安全な窒素（大気圧下沸点：77K）を選定した。

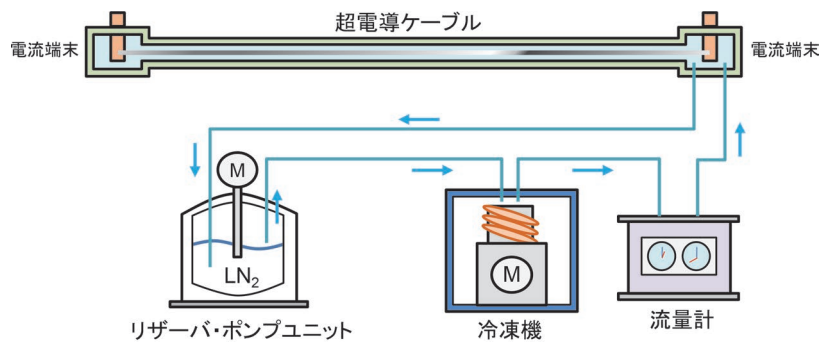
## 2.2 液体窒素冷却方式の検討

液体窒素（LN<sub>2</sub>）の冷却方式としては、直接冷却方式と間接冷却方式が考えられる（図1）。

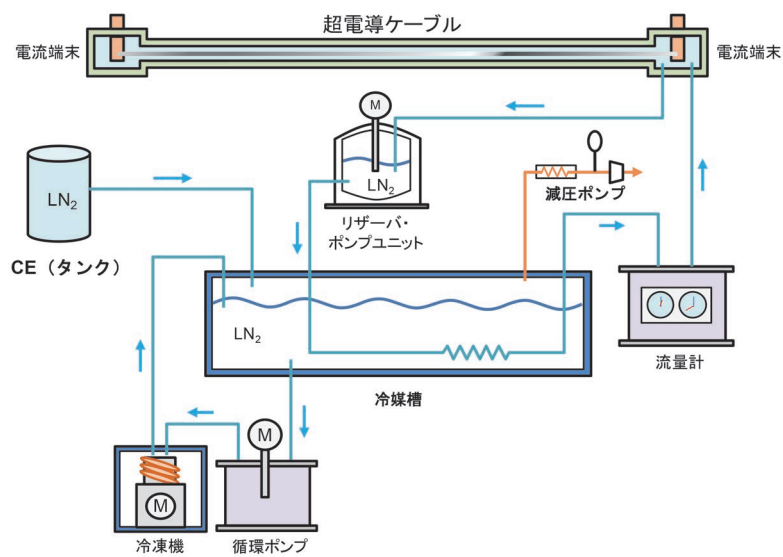
直接冷却方式とは超電導ケーブルの液体窒素を冷凍機などで「直接」冷却する方式であり、冷却効率がよく、冷凍機の出力調整により冷媒の温度制御に対する応答性がよい、などのメリットがある。

一方で、間接冷却方式とは冷凍機などを用いてある冷媒を冷やし、その冷媒で「間接」的に超電導ケーブルの液体窒素を冷やす方式であり、直接冷却方式に比べ冷却効率は劣るが、冷凍機などの故障により冷媒経路が閉塞されても、超電導ケーブル側の液体窒素が遮断されず、また大きな冷媒槽を有しているため、冷媒槽に蓄えられている冷媒の熱容量的に許容できる時間は冷却を継続できるといったメリットも有している。さらに冷媒槽を減圧することで冷媒を冷却することが可能であり、バックアップ機能を減圧ポンプで保証できるメリットもある。

本稿では機器構成がシンプルな直接冷却方式で冷却システムを構築、冷却基礎試験を実施した結果についてま



(a) 直接冷却方式



(b) 間接冷却方式

図1 液体窒素（LN<sub>2</sub>）の冷却方式

とめる。

### 3. 熱負荷の検討

一般に、超電導機器の実用化を考える場合、常に冷却コストを念頭に置く必要がある。超電導き電システムにおける熱侵入としては主に①超電導ケーブル部の熱侵入、②電流の出入り口となる電流リードからの熱侵入、③冷却システムからの熱侵入が挙げられる。超電導ケーブルの導入の方法に依存するが、電流端末は数百～数千mの間隔で、メインの冷却システムは数千m以上の間隔での配置が考えられることから、単位長あたりで考えれば①、②の熱侵入を低減することが効果的である。

#### 3.1 超電導ケーブル部の熱侵入

超電導ケーブル部の熱侵入の大部分は超電導ケーブルを覆う真空断熱配管部の熱侵入であり、大きく分けて (a) 内管と外管が接触することによる伝熱、(b) 内管と外管の間の残留気体による伝熱、(c) 外管からの輻射熱に分類できる。

(a) の対策には、FRP（繊維強化プラスチック）やテフロンなどの熱伝導率の低い材料をスペーサーとして用い、内管と外管が同軸構造を保ちつつ、外管との接触面積を減らす方法や、(c) の輻射熱侵入を抑えるために用いられる真空多層断熱材（スーパーインシュレーション、SI：マイラーシート等にアルミを蒸着したものを多層に巻く事によって反射率を上げ、スペーサーとしてガラス繊維布等をはさんだサンドイッチ構造の断熱材）を多数巻くことにより、可能な限り同軸構造を保つ方法などが用いられる。(b) の対策としては、真空ポンプにより、伝熱の原因となる残留気体を排気し、断熱層の真空度を可能な限り高めることが有効である。つまり上記の対策を施すことで、真空断熱配管の熱侵入は(c) が支配的になる。

輻射熱の対策としては内管と外管の間にSIを巻く方法が用いられ、1~2W/mのレベルまで抑えることが可能となっているが、根本的に熱侵入を低減するには真空断熱配管の距離自体を短くすることが最も効果的である。つまり、液体窒素の循環系を考えた場合、鉄道においては上り線と下り線を用いて循環する方法が考えられるが、それぞれを1本の真空断熱配管に収納することができれば距離が半分になり、熱侵入を大幅に低減することが可能である。真空断熱配管を1本で導入することを前提に考えれば、空芯フォームを用いてその内側を液体窒素の往路とし、超電導ケーブルと真空断熱配管の内管との間を液体窒素の復路とする、Go-Return（対向流循環）方式が非常にコンパクトなケーブルとなる（図2）。

このGo-Return方式においては、Go Flow（冷媒往路）

とReturn Flow（冷媒復路）がケーブルを介して熱交換するため、この熱交換率が温度分布に大きな影響を与える。伝熱方程式を解くと式(1)によりある地点xの冷媒往路温度( $T_{inner}$ )と冷媒復路温度( $T_{outer}$ )が得られ、全体として図3、図4に示すような温度分布を形成する。ここでhは往路と復路の熱伝達係数、cは2つの流れの境界円周、qは単位長当り熱侵入量、Lはケーブル長さ、 $T_0$ はケーブル入口温度、 $C_p$ は液体窒素の定圧比熱、mは流量、Qは折り返し端末部の熱侵入量である。ケーブル入口(0m地点)から折り返し端末(300m地点)まで往路を液体窒素が流れる過程で、復路の液体窒素より熱が入り、温度が徐々に上昇する。折り返し端末部の熱侵入によりさらに高温になった液体窒素は、折り返し端末(300m地点)からケーブル出口(0m地点)まで復路を液体窒素が流れる過程で、真空断熱配管部より熱が入る影響と往路の液体窒素へ熱が出ていく影響を受ける。図3、図4から、ケーブルの入口・出口温度は変わらないが、熱伝達係数が大きくなるほど、熱交換の影響が大きくなり、折り返し端末の温度が高くなる傾向が見て取れる。また、流量をあげるほど、熱交換の影響が小さくなることも分かる。

$$\begin{cases} T_{inner}(x) = -\frac{chq}{2(C_p m)^2} x^2 + \frac{chqL + chQ}{(C_p m)^2} x + T_0 \\ T_{outer}(x) = -\frac{chq}{2(C_p m)^2} x^2 + \frac{chqL + chQ - qC_p m}{(C_p m)^2} x + T_0 + \frac{qL + Q}{C_p m} \end{cases} \quad (1)$$

以上のことから、Go-Return方式のケーブルを成立させるには、①ケーブルの熱伝達係数を下げる、②冷媒の流量を上げる、③温度が高くなる折り返し端末部を冷却することなどが有効な手段であると考えられる。

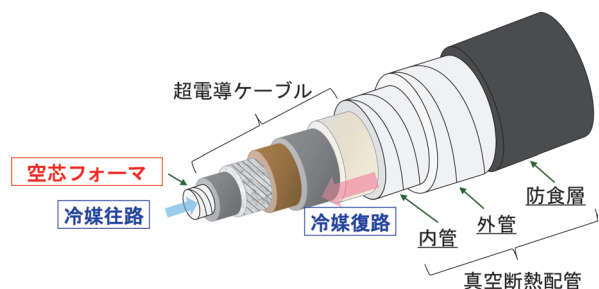


図2 冷媒の流路

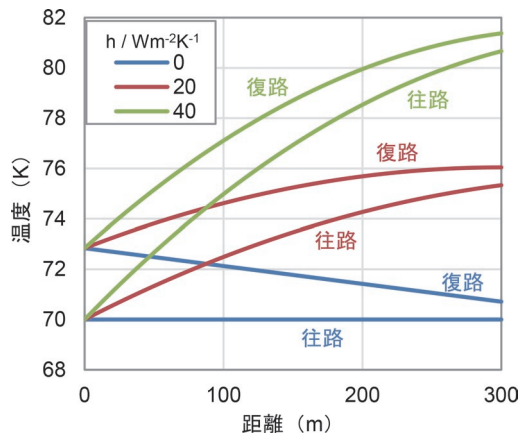


図3 超電導ケーブルの温度分布  
(長さ300m, 流量10L/min)

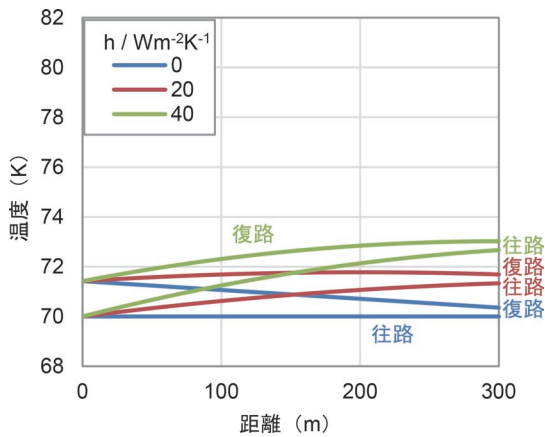


図4 超電導ケーブルの温度分布  
(長さ300m, 流量20L/min)

### 3.2 電流リードからの熱侵入

電流リード (図5) は外部から超電導ケーブルへ電流を出し入れする機能を有しており、直流遮断器やき電線、レールなどの接続箇所が必要となる。

電流リードは電気の出入り口となるため、導電率が高い材料を選定するが、導電率が高い材料は一般に熱伝導率も高く、常温の熱を極低温の超電導ケーブル部に伝えてしまうため、検討が必要となる。

そこで、常時通電の円筒型電流リードを仮定して、平衡状態における伝導による熱侵入と抵抗による発熱の和が最小となるように設計する場合を考える。具体的には、 $C$ を比熱、 $\rho$ を密度、 $A$ を伝面積、 $T$ を長さ $L$ の電流リードにおける軸方向の位置 $z$ と時間 $t$ での温度、 $\kappa$ を熱伝導率、 $\sigma$ を電気抵抗率、 $I$ を電流値として、一次元熱拡散方程式

$$C\rho A \frac{\partial T}{\partial t} = \kappa A \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\sigma I^2}{A} \quad (2)$$

において定常状態を考えると、 $A$ 、 $\kappa$ 、 $\sigma$ を一定とすると熱侵入は

$$Q = \frac{\sigma I^2}{2A} L + \frac{\kappa A \Delta T}{L} \quad (3)$$

で表され、電流リード長さの最適値は

$$\frac{LI}{A} = \sqrt{\frac{2\kappa \Delta T}{\sigma}} \quad (4)$$

で決まる。円筒型銅電流リードの場合おおよそ

$$\frac{LI}{A} = 5 \times 10^6 [\text{A/m}] \quad (5)$$

である。電流リード長さと熱侵入の関係を図6に示す。無通電の場合は電流リード長さが長いほど熱侵入は少なくなるが、通電した場合は下に凸の関係を示し最小値が決まることから、導入する線区に応じて個別の検討が必要となる。



図5 電流リードの例

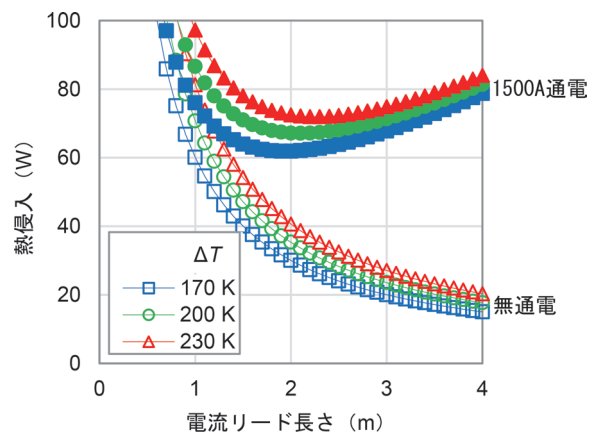


図6 電流リード長さと熱侵入の関係

#### 4. 冷媒循環試験

検討を行ったGo-Return方式の冷却特性を検証するために、鉄道用超電導ケーブル冷却システムを構築し、5mの超電導ケーブルと組み合わせ、冷媒循環試験を行った。システムの外観とフロー図を図7に示す。リザーバー・ポンプユニットは冷媒の増減を吸収するものであり、また、内部に循環ポンプを有し、冷媒を送り出している。送り出された冷媒は冷凍機により冷却され、電流端末よりフォーマ内部へ送液される。その後、逆端で超電導ケーブル外部へ送りだされ、再びリザーバー・ポンプユニットへ戻ってくる、という循環システムとなる。なお、冷凍機はスターリング冷凍機を採用し、冷凍能力は1kW (@77K) である。

流量 5L/min で冷却循環試験を行った際の各部の温度

変化の様子を図8に示す。窒素の循環経路としては、冷凍機出口→①（電流端末Aフォーマ内）→②（ケーブル中央フォーマ内）→③（電流端末Bフォーマ内）→④（電流端末Bケーブル外）→⑤（ケーブル中央ケーブル外）→⑥（電流端末Aケーブル外）である。

超電導ケーブル全長にわたって、大気圧下液体窒素沸点(77K)以下の過冷却温度まで冷えており、提案した冷媒循環方式を用いることで超電導ケーブルを冷却可能であることが確認できた。また、熱交換の影響により、液体窒素往路(0m→5m)においては徐々に温度が上がっていく様子が、液体窒素復路(5m→0m)においては徐々に温度が下がっていく様子が確認でき、検討を行ったGo-Return方式の冷却特性を検証することができた。

図8(a)においてところどころ温度が上昇している

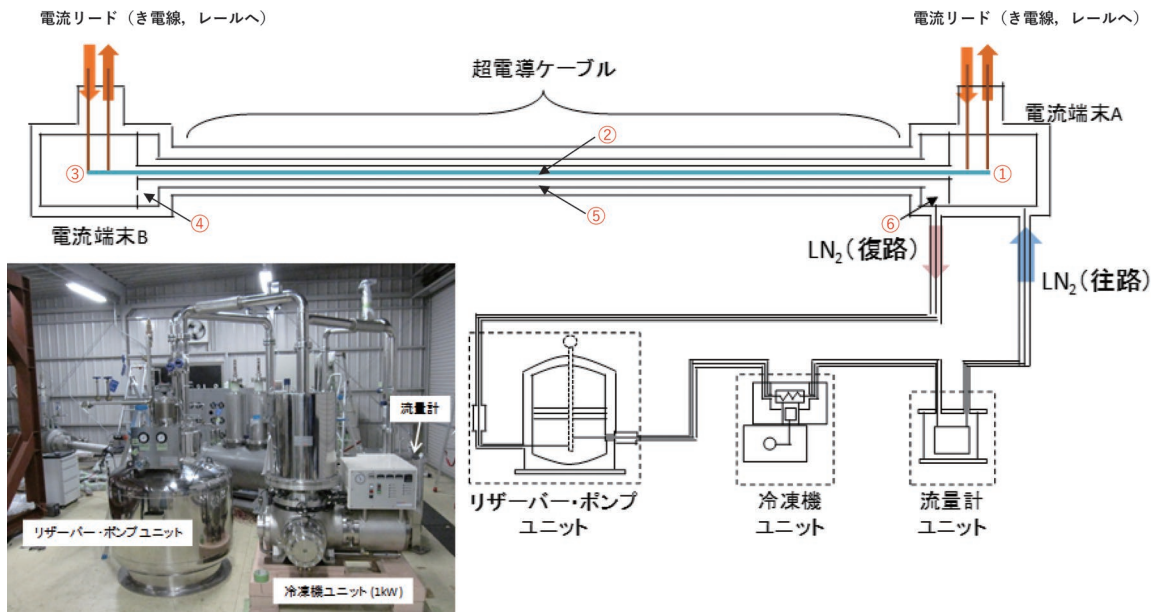


図7 冷却システムの外観とフロー図

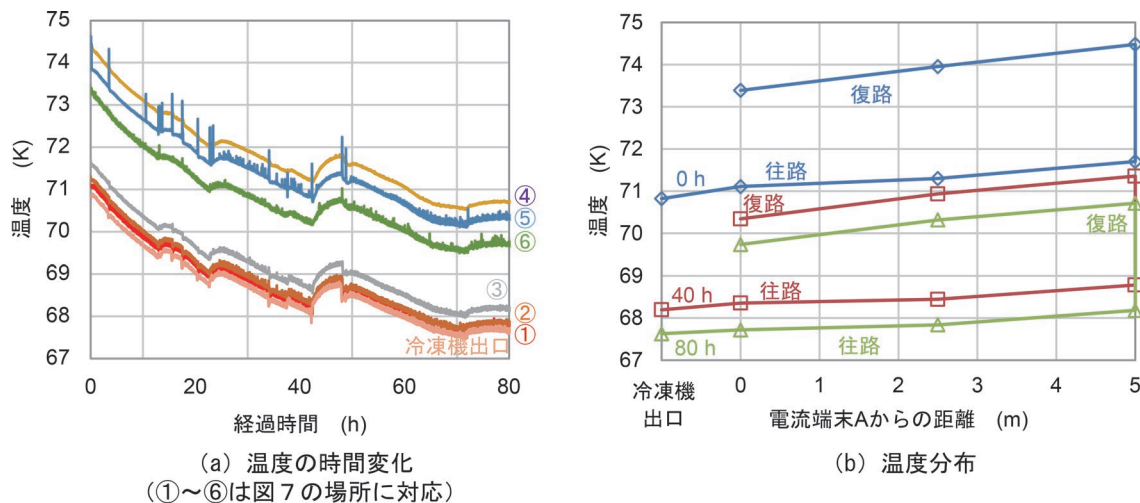


図8 冷却循環試験時の各部の温度変化

のは、試験的に冷凍機内部のヒーターを動作させたため、温度差はあるもののシステム全体の温度応答性もよいことが確認された。

## 5. まとめ

超電導ケーブルは回生効率の向上、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一方、超電導状態を維持するために冷媒を用いて冷却する必要がある。そこで本稿では、超電導き電システムを構成する、超電導ケーブル、冷却システムの設計思想について概説するとともに、効率的な冷媒の循環方式について検討し、冷却システムの冷媒の循環方式として、熱侵入低減のため見かけ上1本で冷媒の行き帰りをを行う Go-Return 方式を提案した。また、各検討結果をもとに、77Kにおいて1kWの冷却能力を有する冷却システムを構築し、冷却循環試験を行った結果、事前検討の通り超電導ケーブルを冷却可能であることを確認した。

今後は km 級超電導き電ケーブルの冷却試験を進め、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) 長谷伸一：直流電気鉄道の電圧降下を低減する, RRR, Vol. 60, No.3, pp.22-25, 2003
- 2) M. Tomita, Y. Fukumoto, K. Suzuki, M. Miryala, "Development of prototype DC superconducting cable for railway system," Physica C, Vol.470, Supplement, pp.S1007-S1008, 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, 105005, 2013.
- 5) M. Tomita, K. Suzuki, Y. Fukumoto, A. Ishihara, T. Akasaka, Y. Kobayashi, T. Torii, K. Ogose, A. Maeda, H. Caron, T. Matsumoto, H. Ito, "Development of superconducting feeder cable systems and conducted running test," Proceedings of 12th World Congress on Railway Research, PB027791, 2019.
- 6) M. Tomita, K. Suzuki, Y. Fukumoto, A. Ishihara, T. Akasaka, Y. Kobayashi, "Energy-saving railway systems based on superconducting power transmission, Energy," Vol.122, pp.579-587, 2017.
- 7) Superconductors drive trains, Nature, Vol.542, p.275, 2017.