

鉄道総研報告

▶ 特集：浮上式鉄道の技術と超電導の実用に向けた研究 ◀

第36巻 第6号

2022年6月

展望解説

- 浮上式鉄道技術と超電導の研究動向
..... 富田優 (1)

特集論文

- リニアレールブレーキに向けたインバータレス励磁方法の開発
..... 坂本泰明, 浮田啓悟 (5)
- 車上集電電力密度を向上した鉄道車両用非接触給電システム
..... 依田裕史, 浮田啓悟 (13)
- 浮上案内コイルの電磁加振試験による耐振動特性評価
..... 池田遼平, 水野克俊, 田中実 (21)
- 超電導き電ケーブルの電気特性評価
..... 福本祐介, 赤坂友幸, 荒井有気, 富田優 (27)
- 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 (33)
- ニホウ化マグネシウム線材を用いた超電導コイルの開発
..... 恩地太紀, 小林祐介, 富田優 (39)
- 高磁場特性を有する高温超電導材料の製作と特性評価
..... 赤坂友幸, 石原篤, 鈴木賢次, 富田優 (45)

特集：浮上式鉄道の技術と超電導の実用に向けた研究

浮上式鉄道技術と超電導の研究動向

富田 優*

Maglev Technology and Research Trends on Superconductivity

Masaru TOMITA

Railway Technical Research Institute has conducted research and development of superconducting Maglev railways and superconductivity. In this paper, we introduce evaluation technology of the ground coils, wireless power transfer technology and linear rail brake technology as applied Maglev technology. In addition, we introduce outlines of our recent research such as the science of high-temperature superconductors, superconducting feeder cables, and superconducting magnetic energy storage.

キーワード：浮上式鉄道，超電導磁石，高温超電導，き電ケーブル，電力貯蔵

1. はじめに

鉄道総研では、超電導磁気浮上式鉄道に関し、基礎技術としての地上コイルの評価、それらの応用としてリニアレールブレーキや架線を必要としない非接触給電技術などの研究を進めている。また、超電導技術に関しては、浮上式鉄道に限らず幅広い研究開発に力を注いできた。鉄道総研における高温超電導研究の歴史は長く¹⁾、基礎研究における超電導材料製作、評価技術、巻線化技術、コイル化技術を進め、送電、エネルギー貯蔵、電力変換器などの鉄道への応用研究に取り組んできた。世界のエ

ネルギー戦略においては、超電導の研究開発が競争化しており、超電導送電における開発では鉄道総研の技術も注目を受けている（図1）。

2. 浮上式鉄道の技術

鉄道総研の構内で浮上式鉄道が1972年に初めて走行し、その後、宮崎実験線における基本走行実験を経て、1997年以降はJR東海と共同で山梨実験線にて走行試験を進めている。現在では、浮上式鉄道の地上コイルや車両運動といった基礎研究や、浮上式鉄道の研究開発で得られた知見を活用した在来方式鉄道向けのリニアレールブレーキや非接触給電などの応用研究に取り組んでいる（図2）。

IEA Technology Collaboration Programme on High-Temperature Superconductivity **2020 ANNUAL REPORT**

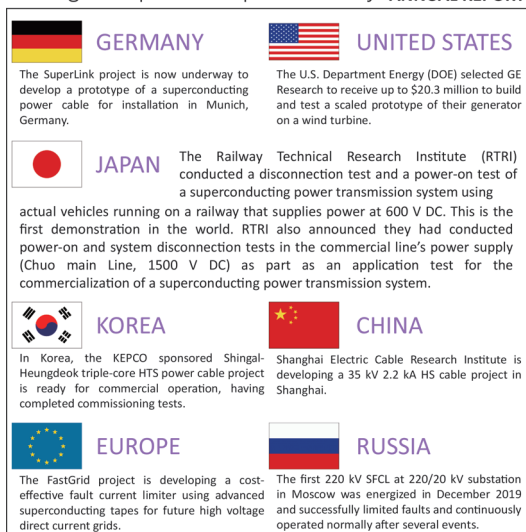


図1 高温超電導研究の世界動向 (IEAのannual report²⁾より。日本では鉄道総研の超電導送電の開発状況が示されている。)

2.1 地上コイル

浮上式鉄道において、ガイドウェイに多数設置される地上コイルは耐久性が重要となる。電磁加振試験装置は、超電導磁石の前に評価対象の地上コイルを設置し、磁場中で交流を通電することにより、走行時とほぼ等価な電磁力で加振する装置で、これを用いて実振動に対する耐久性が評価できる。その他、環境試験、高電圧試験等の各種耐久性試験により故障の予兆検出手法や余寿命の推

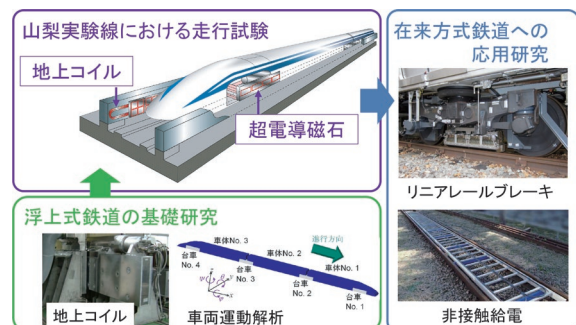


図2 浮上式鉄道の技術

* 浮上式鉄道技術研究部長

定手法を明らかにすることで、保守作業等への貢献を目指している。

2.2 リニアレールブレーキ

高速域におけるブレーキ力の確保を目的とし、リニアモータ技術を応用した粘着力に依存しないリニアレールブレーキの開発に取り組んでいる³⁾。従来の渦電流方式レールブレーキは直流励磁によるもので、停電時には使えず、動作時は走行中の運動エネルギーが渦電流によるジュール発熱となってレールの温度上昇を引き起こす課題があった。そこで、リニア誘導モータ (LIM) の発電制動の原理を応用したリニアレールブレーキを考案し、その研究開発を行っている。ブレーキ動作に必要な電力を装置自体が自己発電で賄うことを特徴としており、レール温度上昇も抑制可能であったが、インバータを使用することからコスト面で課題があった。この解決に向け、コンデンサ自己励磁を適用することで低コスト化を実現するインバータレス励磁方法を提案し、実用性を確認、大幅な低コスト化の見込みを得ている。

2.3 非接触給電システム

近年導入が進んでいるディーゼルハイブリッド車両や、非電化区間での走行が可能なバッテリー搭載車など、走行バッテリーを搭載した鉄道車両への間欠的な給電方法の一つとして、変圧器方式の非接触給電システムの開発に取り組んでいる⁴⁾。一般的なパンタグラフ等による給電方式に対し、非接触で摩擦がないためメンテナンス性に優れ、充電部の露出がないことから安全性も高い。また、集電電力密度を高くできれば車両に搭載するバッテリーの容量も小さくでき、車両軽量化にも寄与するといった利点がある。これまでに車上搭載の集電コイルやレール間に設置する給電コイルを設計・試作し、150kW/m²の集電電力密度を確認している。

3. 超電導の研究と開発

3.1 超電導の基礎研究

超電導とは、ある温度以下に冷却することで電気抵抗がゼロになる現象 (完全導電性) のことを言う。一般の物質中にある電子は、原子核の振動や不純物などにより散乱させられ、これが電気抵抗となる。超電導状態では2つの電子が対の状態を (クーバー対) を組む。電子が移動してくると、原子核を引き付けるが、電子が飛び去った後も原子核は直ぐに元の位置までは戻らない。これにより、電子が飛び去った後に正に帯電した領域ができ、別の電子が引き付けられ、対を作るという仕組みである (図3)。対としてみれば、電流を意味するクーバー対の動きを阻害するものは存在せず、電気抵抗はゼロとなる。

通常の物質では原子核と電子間の相互作用が強すぎるためクーバー対をなさないが、特定の物質においては冷却により相互作用が弱まることでクーバー対をなし、超電導を発現する。この完全導電性はこれまでの電気抵抗に起因する課題を解決する唯一の手段であり、鉄道総研ではこれらの特性を最大限発揮できる材料研究を進めてきた。この成果によって機器の革新的な高特性化、高効率化が実現可能となる。

高温超電導材料の代表的な形態として、磁場応用として円柱状のバルク (塊という意味) 材、送電応用として長手方向に伸びた線材がある。それぞれ形は異なるが使用する材料や、原料粉末を混合、成型、焼成する工程は同じである。そのため、高温超電導線材の開発においてもバルク材を製作し、その特性を評価する必要がある。主な高温超電導材料の結晶構造を図4に示すが、超電導電流はCuO₂面を流れるため、結晶の方位を揃えることが非常に重要となる。

バルク材は、成型機に粉末を詰め、プレス機で円盤状に成型した後、電気炉で焼結し、作製する。焼結の際に結晶方位を揃えるため、単結晶を用いた溶融凝固法による結晶育成を行っている。この溶融凝固法は、中心に置いた単結晶から円周方向に向けて結晶方位を揃えていく。そのため、大型化をする際には温度や組成の調整が重要であり、図5に示すように、合成する粉末の粒径、組成制御や、電気炉で焼成する際の温度条件の最適化などについての研究を進めている。

超電導の性能は、指標として臨界電流値が示され、線材においては通電容量に相当するが、バルク材では発生磁場より臨界電流値を算出する。発生磁場が強いということは、それだけ材料に多くの電流を流すことができる

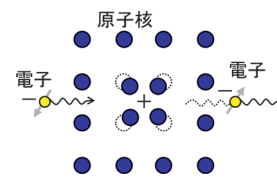


図3 クーバー対

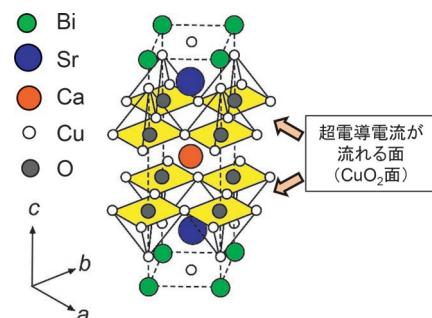


図4 高温超電導材料 (Bi系) の結晶構造

ことになる。これまで高温超電導材における高磁場発生の国際間競争は激しいものがあつた。2000年以降、オーストリア、ドイツ、日本が競い合い、2003年に鉄道総研は17.24Tという世界最高値を記録した¹⁾。発生磁場値は大きくなるに伴い、超電導材料が受ける電磁力も増大するため、材料強度の負担が大きくなる。また、高磁場下では、磁束が動く時の発熱により、その部分を流れる電流が少なくなる。この機械強度と熱的不安定性の課題に取り組み、低融点金属と樹脂を使った製造手法により、世界最高の発生磁場を実現した。その後11年5カ月の間、日本はこの記録を維持したが、米国と英国の国際共同チームがこの研究に力を注ぎ、世界最高値は17.6Tに更新されている⁵⁾(図6)。17Tの磁場発生によって、直径1mmの超電導線材に1000Aもの高い電流が通電出来ることを示した。これらの成果により大電流容量化を実現し、高温超電導の各種応用に活路を開いた。

高温超電導線材は、長手方向に結晶方位を揃える必要があり、シース線材と薄膜線材に分類されが、ここでは前者についての研究を紹介する。Bi系超電導材料は金属パイプに粉末を詰め、圧延機で線状に引き伸ばすことで結晶方位を揃えることができる。走査型電子顕微鏡により観察したBi系超電導線材の微細組織を図7に示す。左右に走る線状コントラストはBi系結晶のものであり、Bi系結晶面の方向が長手方向に対応する。結晶面は場所により緩やかに曲がったり、途中で中断したりしている様子が見られる。図の矢印で示した箇所では粒状のコントラストが観察され、Bi系結晶の方位が局所的に変化している。また不純物Aの周りでは、結晶が回り込むように緩やかに曲がっている一方で、不純物Bの左右では、明らかにBi系結晶が途中で途切れている。結晶面が途切れることは、超電導電流路を絶つことになるため、こうした不純物相の生成を抑制する必要がある。そのため、焼成温度や印加圧力を調整することで、不純

物相の低減や、結晶方位の制御を行っている。このように、作製した材料を分析・評価することで、高性能な材料の実現を目指している。

3.2 超電導の応用研究

基礎研究から得られた材料などの成果をもとに、評価技術、巻線化およびコイル化技術(図8)による開発を進めている。試作したケーブルやコイルを用いて冷媒中における評価試験などを行い、送電、エネルギー貯蔵などの鉄道応用へ向けた超電導機器の実現を目指している。

3.2.1 超電導き電システム

電気鉄道は変電所から車両に電気を送る送電線の電気抵抗によって、送電損失や電圧降下が生じる。運行に必要な電力を確保するように変電所の位置が決められており、特に都市圏路線では多くが設置されている。これらの電気抵抗に起因する課題に向け、超電導き電システムの開発を進めている。電気抵抗ゼロの超電導で送電することで、送電損失の低減ならびに回生効率の向上による省エネ効果、変電所の集約化などが期待できる⁶⁾。このシステムは、送電のための超電導き電ケーブル、それを冷却する冷却装置、鉄道への接続に必要な保護回路から構成される。これまで、高温超電導材の研究から始まり、

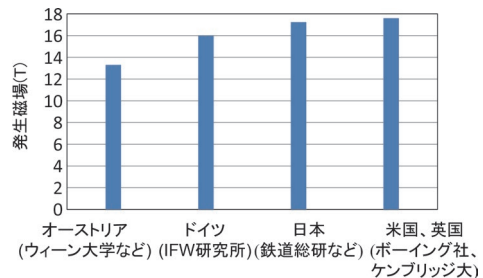


図6 高温超電導研究の国際間競争
バルク磁石の発生磁場

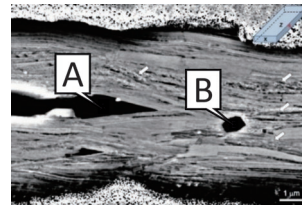


図7 高温超電導線材の微細組織観察

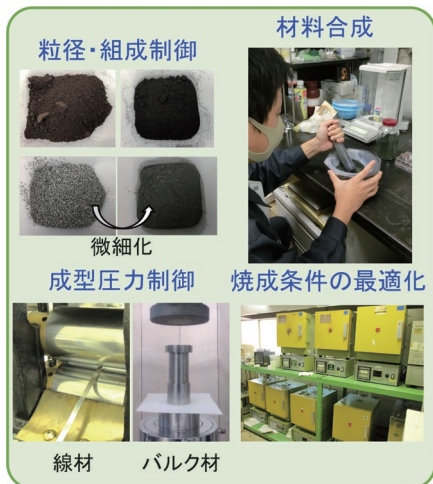


図5 高温超電導材料の製作

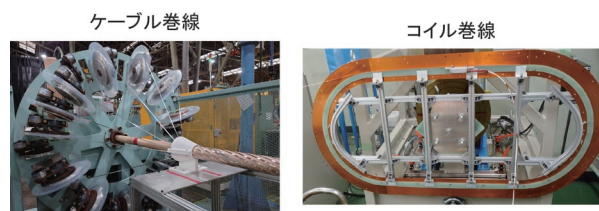


図8 高温超電導材の巻線化(コイル化)

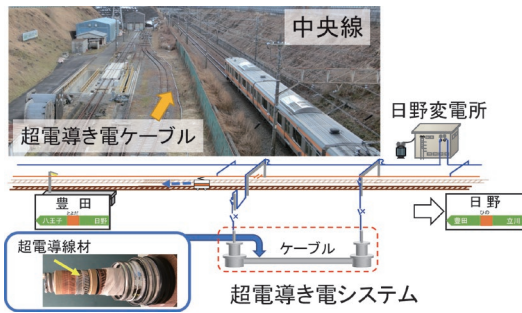


図9 408m 長超電導き電システムの開発



図11 超電導磁気エネルギー貯蔵システム



図10 長距離超電導き電システムの開発

ケーブル構造の最適化、システムの実験などを経て、所内試験線で実証した後、JR中央線の日野駅・豊田駅間の一部において、開発した408mの超電導き電ケーブルを路線へ接続、E233系車両（10両編成）を走行させ、実路線による電圧降下の抑制を確認した（図9）。その他、伊豆箱根鉄道駿豆線（3000系車両）、都電荒川線（8900形車両）、東京メトロ丸ノ内線（02系車両）においても、超電導き電ケーブルの送電試験を実施している。さらに、旧リニア実験線である宮崎実験センターにおいて、変電所間への導入を想定した長距離（km級）システムの構築を進めており、実用的なシステムの実現に向けた研究開発に取り組んでいる（図10）。

3.2.2 超電導磁気エネルギー貯蔵

電力貯蔵を鉄道路線に導入する場合、鉄道負荷に対応した高入出力化および長寿命化が求められる。従来の電池は化学反応を利用しているため、急速な充放電は難しく、回数に制約があるといった課題を有する。そこで、超電導材料で作られたコイルに直接電気を蓄える、超電導磁気エネルギー貯蔵システムの開発に取り組んでいる。超電導コイルに流れている電気を直接取り出すため、短時間の出し入れに強く、大電流が流れても発熱しないことから繰り返しの充放電回数も多く取れ、長寿命であるなど、従来の電池と比べて優位性が高い。次世代の超電導コイルとして、冷却に液体ヘリウムを必要としない二ホウ化マグネシウム（ MgB_2 ）線材を用いた研究開発を行っている⁷⁾（図11）。 MgB_2 コイルは冷媒を用いず冷凍機による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する。

4. まとめ

超電導磁気浮上式鉄道と超電導技術に関する最近の研究開発の取り組み、成果について紹介した。今後も浮上式鉄道の基礎技術を進め、超電導分野においては、これまで培ってきた高温超電導の成果を活かし基礎から応用、実証に至るまで一体的かつ効率的な研究を進め、鉄道分野での技術革新を目指す。

本研究の一部は、これまで科学技術振興機構（JPM-JSV0921, JPMJMI17A2）、NEDOの委託・助成、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) M.Tomita, M.Murakami, "High-temperature superconductor bulk magnets that can trap magnetic fields of over 17 tesla at 29K," Nature, Vol.421, pp.517-520, 2003.
- 2) International Energy Agency, "IEA Technology Collaboration Programme on High Temperature Superconductivity 2020 Annual Report," <https://ieahts.org/downloads/2020-HTS-TCP-Annual-Report-Final.pdf> (参照日：2022年5月13日)
- 3) 坂本泰明, 浮田啓悟, 笹川卓：励磁用インパータによるリニアレールブレーキの状態監視方法, 鉄道総研報告, Vol.34, No.11, pp.25-30, 2020
- 4) 依田裕史, 坂本泰明, 柏木隆行, 笹川卓：高電力密度非接触給電システム用コイルの設計, 鉄道総研報告, Vol.33, No.5, pp.17-22, 2019
- 5) J.H. Durrell et al., "A trapped field of 17.6 T in melt-processed, bulk Gd-Ba-Cu-O reinforced with shrink-fit steel," Supercond. Sci. Technol. 27, 2014082001, 2017.
- 6) Superconductors drive trains, Nature, Vol.542, p.275, 2017.
- 7) 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池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

特集：浮上式鉄道の技術と超電導の実用に向けた研究

リニアレールブレーキに向けた インバータレス励磁方法の開発

坂本 泰明* 浮田 啓悟*

Development of Inverter-less Excitation Method for a Linear Rail Brake

Yasuaki SAKAMOTO Keigo UKITA

Studies have been carried out on rail brakes applying linear induction motor technology. This brake is capable of generating braking force without contact. In addition to the aspect of non-contact brakes, no on-board power supply for energizing this brake is required by using dynamic braking. This dynamic braking is performed with an excitation inverter, however another method without using one is desired in order to reduce the cost. Therefore, an inverter-less excitation method using the self-excitation phenomenon of induction generators was devised and tested on a track wheel testing machine. We clarified that the method devised is useful as a low-cost excitation system.

キーワード：レールブレーキ，リニアモータ，励磁システム，コンデンサ自励現象

1. はじめに

鉄道車両における渦電流方式のレールブレーキは、車輪とレールの間の摩擦力（粘着力）に依らないブレーキ力を非接触で発生でき、粘着力が速度の増加と共に減少傾向を示すのに対して、高速域でのブレーキ力の減少が小さいなどの特長を持つ。この非接触のブレーキ力を粘着ブレーキ力に加えることで、走行中の車両をより短距離・短時間で停止させることが可能となるため、緊急事態における安全性を高める手段として期待される。このブレーキについて、筆者らはこれまでの課題であった停電などの電源喪失時の対応策として、リニア誘導モータ（LIM）の発電制動の原理を応用したリニアレールブレーキを考案し、その研究開発を行っている¹⁾²⁾。ブレーキ動作に必要な電力を装置自体の自己発電で賄うことを特長としており、所期の性能を既に確認している。

リニアレールブレーキは、基本的な構成要素として、ブレーキ動作に必要な電力を発電するとともにブレーキ力を発生する電機子、電機子を台車下部にて昇降支持するための搭載機構、電機子に交流を通電するための励磁システム（インバータ）から成る。ここで、リニアレールブレーキの実用性を高めるために低コスト化を図る場合、抜本的な技術置換による低コスト化の可能性のあるのは、上記の3つの構成要素のなかで励磁システムと考えられる。交流電流と自己発電を所定の状態に保つことができる他の励磁方法があれば、高価なインバータを用いる必要がなくなる。

ここで、インバータを用いない励磁方法の候補として、「誘導機におけるコンデンサ自己励磁現象」が挙げられる。これは、外部から動力を与えられた誘導機にコンデンサを接続すると、誘導機内のコイルとコンデンサで発電作用を伴う共振が起こり、自発的な交流の通流（自己励磁）がなされるものである。リニアレールブレーキは電気機器上の分類では誘導機に該当するため、原理的にはコンデンサ自己励磁現象を起こせると考えられる。しかしながら、一般の回転型の誘導機におけるコンデンサ自己励磁現象は、無電源からの始動に回転子の残留磁化（磁界を受けた履歴のある回転子鉄心に残る微弱な着磁）を用いるが、リニアレールブレーキでは回転子に相当するレールに残留磁化があることが期待できない。そのため、コンデンサ自己励磁現象の利用は停電時の始動に課題があり、不適と考えられてきた。また、リニアレールブレーキに限らず、筆者らが調べた限りでは、LIMにコンデンサ自己励磁を適用した事例は、残留磁化を使うことが可能な往復運動タイプを除いて無い。

そこで、本稿ではリニアレールブレーキにおいてコンデンサ自己励磁現象を用いる励磁方法を検討した。具体的には、共振コンデンサを予め直流で充電しておき、始動時にこれを放電させることで、回転型の誘導機においては残留磁化が担っている「始動のきっかけ」に利用する方法を考案した。次にこの方法について、始動や停止などの基本動作の検証と速度特性の調査を行った。これらの結果を従来のインバータ励磁と比較評価し、提案方法が低コスト化を実現するインバータレス励磁方法として有用であることを確認したので報告する。

* 浮上式鉄道技術研究部 電磁気研究室

2. リニアレールブレーキの概要

2.1 電機子と搭載機構

リニアレールブレーキは、渦電流方式のレールブレーキの直流電磁石を3相の交流電磁石に置き換え、これをレールと対向するLIMの電機子として用いるものである。図1にその構成例を示す。電機子は台車前後の車輪間の限られた空間に設置され、その長さは最大で1.2~1.5m程度となる。これに対して幹線区間で使用されるレールの頭部幅は65mmであり、LIMとしては非常に細長い形状となる。また、二次側が鉄塊レールであるため、表皮効果によって、比較的低い滑り周波数から磁束や渦電流がレールの内部に侵入し難い状態となる。これらに起因して、リニアレールブレーキをLIMとして見た場合には、漏れリアクタンスや二次抵抗が大きいこと、電流の大きさに対してインピーダンスの非線形性が強いことなどの特徴を示すことになる。

搭載機構は、ブレーキ非動作時は電機子を台車枠直下に上昇させておき、電機子とレールの電磁気的な相互作用が無い状態を保つ。ブレーキ動作時は降下させて、レールとのギャップを所定の値に保持する。

2.2 励磁システム

励磁システムは車体に搭載され、電機子を使って発電制動を行う。ここで、この発電制動のための動作電力や発電電力の吸収を車上の主回路に依存する構成にすると、電系故障や回生失効などの影響が励磁システムに波及する可能性を排除できなくなり、ブレーキシステムとしての信頼性を損なう。そこで、ブレーキ時には主回路から

完全に分離され、独立して動作できる構成としている。

2.3 従来のインバータ励磁

従来の励磁システムはインバータを用いる。図2に1台車当たりの構成例を示す。車両起動時に制御回路電圧(DC100V)などで予め平滑コンデンサを充電しておき、それを初期励磁に利用することで、停電時でも発電制動の始動を可能としている。インバータは始動時に平滑コンデンサの充電電力で3相励磁を開始すると共に、励磁開始直後から得られる発電電力を利用して平滑コンデンサの電圧を上昇させる。この電圧の上昇により、3相励磁の交流電圧が増加し、ブレーキ力が増加する。所定の平滑コンデンサ電圧に到達した後はブレーキ力を保ちつつ、高い滑り周波数(低いインバータ周波数)を動作点として発電電力と回路全体の損失を平衡させ、制動抵抗器などを用いずに平滑コンデンサ電圧を一定に保ち続ける。これを零出力発電制動と呼ぶ。高い滑り周波数を動作点としている理由は、所定のブレーキ力に対するインバータ容量を低減するためである。

上記の零出力発電制動の動作点(滑り周波数)は、一般的な誘導機の可変速制御に用いられるベクトル制御や滑り周波数制御における動作点とは大きく異なり、電機子の入力端子から見たインピーダンス特性もそれとは様相が異なる。特に所定の走行速度を超える高速領域におけるインピーダンスの速度依存性や滑り周波数依存性が小さいことを特徴としている。これらの特徴より、速度情報を用いずに、出力電流*I*のみをブレーキ力指令のパラメータと見なし、それと別個に周波数*f_{ref}*^{*}で発電電力を制御して平滑コンデンサ電圧*V_{dc}*^{*}を整定するという単純な基本制御則を採っている²⁾(図3)。

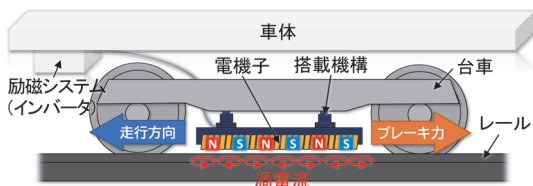


図1 リニアレールブレーキの構成例

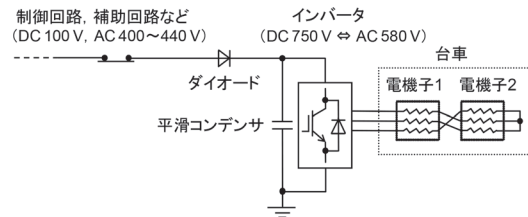


図2 従来のインバータを用いた励磁システム

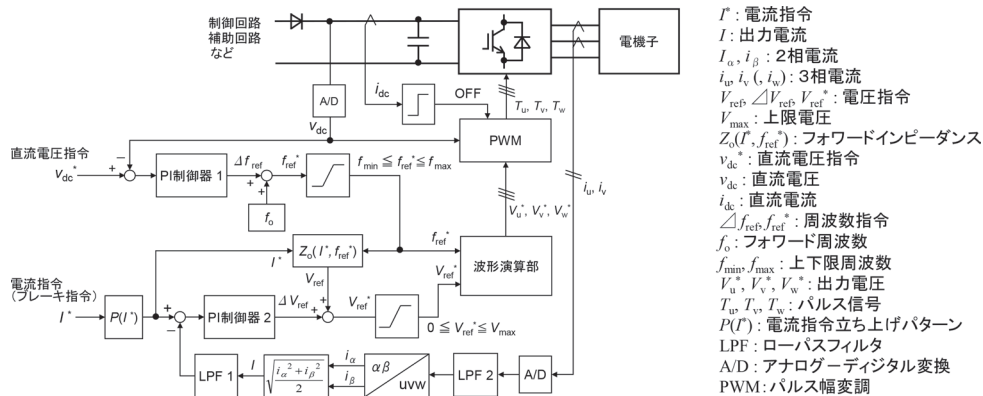


図3 従来のインバータ励磁の基本制御ブロック

- I^* : 電流指令
- I : 出力電流
- I_{α}, I_{β} : 2相電流
- i_u, i_v, i_w : 3相電流
- $V_{ref}^*, \Delta V_{ref}^*, V_{ref}^*$: 電圧指令
- V_{max}^* : 上限電圧
- $Z_o(I^*, f_{ref}^*)$: フォワードインピーダンス
- V_{dc}^* : 直流電圧指令
- V_{dc} : 直流電圧
- I_{dc} : 直流電流
- $\Delta f_{ref}^*, f_{ref}^*$: 周波数指令
- f_o : フォワード周波数
- f_{min}^*, f_{max}^* : 上下限周波数
- V_{u}^*, V_v^*, V_w^* : 出力電圧
- T_u, T_v, T_w : ハルス信号
- $P(I^*)$: 電流指令立ち上げパターン
- LPF: ローパスフィルタ
- A/D: アナログ→デジタル変換
- PWM: ハルス幅変調

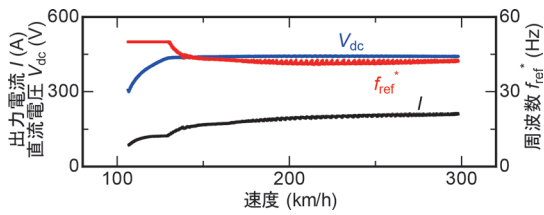


図4 従来のインバータ励磁の速度特性例

このコンデンサ電圧 V_{dc} の整定を行う周波数 f_{ref}^* の変化は、所定の走行速度を超える高速領域では、前述のインピーダンスの速度依存性が小さいことに起因して、速度変化に対して大きなものではない(図4)。

ここで、実用上はブレーキ力を極力大きくするように要求される場合が多く、出力電流指令 I^* は自己発電で流通可能な最大値が指令される場合が多い。この時、交流電圧は最大変調率に固定されて出力されるので、出力電流 I は平滑コンデンサ電圧 V_{dc} を周波数 f_{ref}^* で除した値に概ね比例するようになる。通常、平滑コンデンサ電圧 V_{dc} は一定の指令値 V_{dc}^* に整定されており、周波数 f_{ref}^* は発電電力を調整するように指令されるので、結局、「発電能力が低下(向上)すると周波数 f_{ref}^* が増加(減少)し、出力電流 I が減少(増加)する」のような挙動となる。

3. 低コスト励磁システムの検討

3.1 コンデンサ自己励磁の原理と新たな始動方法

一般の回転型の誘導機におけるコンデンサ自己励磁現象は下記のようなものである。

- (1) 電動機や発電機として使用された履歴のある回転子鉄心には微弱な残留磁化がある。外部動力によりその回転子が回転された場合、磁化が回転することによって電機子回路に交流電圧が誘起される。
- (2) 上記の交流電圧により電機子回路に微弱な交流電流が流れる。ここまでの動作は、永久磁石を用いた同期発電機と同じような原理に依っている。
- (3) 電機子回路にコンデンサが接続されていると、上記の微弱な交流電流は、電機子コイルとコンデンサの共振周波数で誘導機を励磁するように流れ(進み電流)、誘導発電機として動作し始める。
- (4) 発電電力により電流が漸次増加するが、やがて、鉄心の磁気飽和が起り、電流の増加に対して発電電力の増加が伴わなくなる。
- (5) 最終的に、電流は、発電電力と回路全体の損失が平衡する大きさに収束し、それが維持される。

インバータを用いたリニアレールブレーキの零出力発電制動においても、定常動作時に発電電力と回路全体の損失が平衡する点は上記(5)と同じである。この時、インバータは電機子に無効電力を供給する役割を担って

いる。このことから、インバータはコンデンサに置き換えることが可能であり、原理上は上記の自己励磁現象による誘導発電ができると考えられる。しかしながら、リニアレールブレーキにおいては「回転子鉄心の残留磁化」という「始動のきっかけ」がないため、コンデンサを接続しただけでは、自己励磁現象を起こせない。

そこで、共振用のコンデンサを予め直流で充電しておく、励磁開始時に電機子コイルにその充電電力を放出することで、自己励磁現象を誘発する始動方法を考案した(図5)。その手順は、車両起動時に「接触器1投入、接触器2開放」としてコンデンサを充電した後、「接触器1開放」で待機し、励磁開始時に「接触器2投入」とする。ここで、コンデンサ容量については、発電電力と回路全体の損失が平衡する周波数(インバータ励磁における零出力発電制動の平衡周波数と概ね同じ)に、コンデンサと電機子コイルの共振周波数が一致するように選択する。

「接触器2投入」の直後は、コンデンサ充電電力の放出によって、図5の α 軸上で単相交流のように電流が流れる。この単相の交流電流により、電機子とレールのギャップに交番磁界(N極とS極の定在波)が発生する(図6)。ここで、この定在波は、電機子から見てレールの進行方向と同方向に移動する進行波(正相成分)と、逆方向に移動する後退波(逆相成分)が重ね合わされたものである。そして、進行波により誘導発電機としての発電作用が働くため、 β 軸上にも電流が誘導され、3相

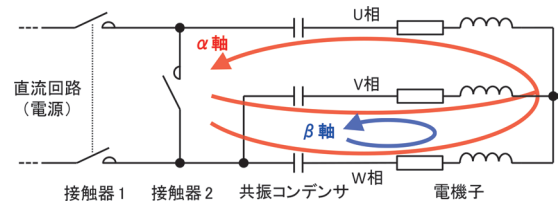


図5 考案したコンデンサ自己励磁の始動方法

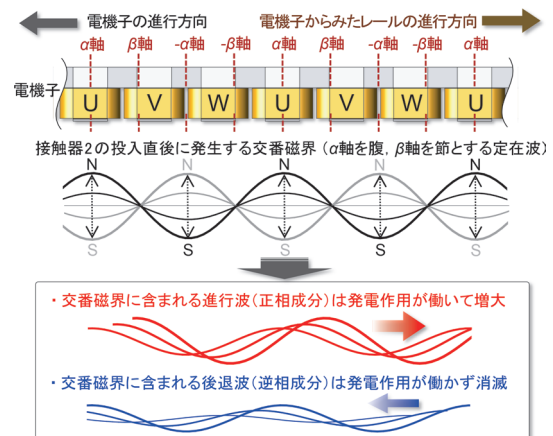


図6 始動時の磁界分布の概念

の正相電流（相順 UVW）が増大する。この増大する正相電流は前記（3）と（4）の電流と同じものであり、最終的に（5）のようになる。一方、後退波には発電作用が働かないため、3相の逆相電流（相順 WVU）は減衰し、最終的には消滅する。

以上、考案した方法は前記（1）～（5）のうち、（1）と（2）の同期発電機と同様な原理の始動プロセスによらずに、（3）のプロセスを逆相電流が重畳された状態で開始するものとなる。コンデンサの充電電圧を高めることによって、「接触器2投入」の直後に流れる電流を大きくすることができるので、（4）の電流増加のプロセスの時間を短縮できる利点がある。即ち、コンデンサ自励現象を用いるブレーキ装置において、空走時間の短縮に有効な始動方法と言える。また、車両起動後にコンデンサの充電を実施し、コンデンサが放電しないように待機すれば、この始動方法はバッテリーなどを用いずに停電時に対応できる。

3.2 励磁の停止と自己保護作用

励磁を停止する場合は図5の接触器2を開放する。これにより、 α 軸の電流は通流できなくなる。一方、 β 軸の電流は通流可能な状態のままであるが、単相交流として通流されるため、発電電力を得られず、減衰して消滅する。このように α 軸と β 軸が別々に励磁を停止する。

また、接触器2にスナバ回路が併設されている場合（後述）は、 α 軸の電流はスナバコンデンサを加えた共振周波数に遷移し、 β 軸の電流と共振周波数が異なるようになる。この場合、2つの周波数の交番磁界が各々の軸上に発生するようになり、発電電力を得られずに減衰して消滅することになる（後述の Δ 接続の場合も同様）。

以上は能動的に接触器を操作する場合について説明したものである。ここで、コンデンサ自己励磁は、電機子コイルとコンデンサで構成される3相の共振回路において、正相成分が所定の状態で通流される場合のみに持続するものなので、地絡や短絡などの不具合によってその共振状態が維持できなくなると、自動的に通流が停止する。即ち、自己保護作用がある。特に地絡について、励磁中は接触器1が開放されているので、電機子回路の中性点を接地しておけば、自己保護作用で停止するまでの間に流れる地絡電流は必ず電機子コイルを通過するようになり、そのインダクタンスで幾分の限流効果を付与できる。

3.3 基本回路構成

前出の図5は、考案したコンデンサ自己励磁の始動方法を説明したものであった。ここでは、低コストを目的として、下記の条件を満たす回路構成を検討する。

- ・接触器の個数を2（最小）とする。

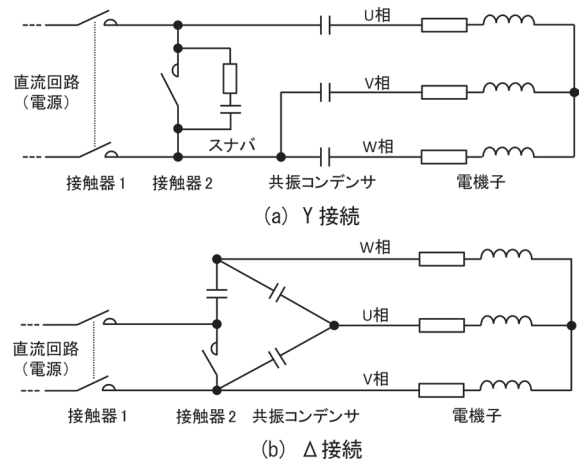


図7 基本的な回路構成例

- ・コンデンサ充電の初期に必要な充電抵抗を、電機子インピーダンスを用いて省略できる可能性がある構成とする。
 - ・自己励磁中に接触器2を開放することにより、自己励磁を停止できるようにする。この際、スナバ回路が不要であることが望ましいが、必要に応じて併設する。
- 以上の条件を考慮すると基本的な回路構成の例として、図7の2案が挙げられる。

図7(a)は、コンデンサをY接続したものである。長所として、コンデンサの初期充電電圧を電機子の定格電圧まで高めて、始動時間を短縮することが可能である。短所として、通流中に接触器2を開放した場合に比較的大きなアークを発生する可能性があるため、スナバ回路の併設が必要である。

図7(b)は、コンデンサを Δ 接続したものである。長所として、通流中に接触器2を開放した場合も、電流の迂回路があるためアークが小さく抑えられ、スナバ回路が不要である。短所として、この構成で初期充電されるコンデンサは1つのみであるが、コンデンサ充電後、始動時に接触器2を投入すると、電機子側へ放電する直前の短時間に、3つのコンデンサの Δ 結線回路内に循環電流が流れ、コンデンサ電圧の分配が起きる。この循環電流は、 Δ 結線回路の寄生インダクタンスでしか限流されないため、その電流値が過大とならないように、コンデンサの初期充電電圧を適当な大きさに制限する必要がある。

以上のように、コンデンサの初期充電電圧を高めて始動時間を極力短くする場合は図7(a)が適しており、他方、スナバ回路の省略により、簡易な回路構成とする場合は図7(b)が適すると考えられる。

3.4 インバータ励磁とコンデンサ自己励磁の特徴比較

従来のインバータ励磁と考案したコンデンサ自己励磁

表1 インバータ励磁とコンデンサ自己励磁の比較

	インバータ励磁	コンデンサ自己励磁
始動時の動作	・平滑コンデンサの直流の充電電力を使って、3相回路に正相電流を通流	・共振コンデンサの直流の充電電力を使って、3相回路に正相と逆相が重ね合わされた単相交流を通流
定常時の動作	・平滑コンデンサ電圧を一定に維持するように周波数を制御 ・周波数の増加(減少)で発電電力が増加(減少) ・周波数の増加(減少)で電流が減少(増加)(最大変調率出力時)	・共振周波数において、発電電力と損失が平衡するように電流の大きさが自然収束 ・電流が減少(増加)することで、損失に対して発電電力が相対的に増加(減少) ・電流が減少(増加)すると、磁気飽和状態が変化し、共振周波数が減少(増加)
長所	・ブレーキ力制御などの高度な制御が可能 ・停車中の試通電や走行中の電機子の状態監視などの機能付加が可能	・システム構成の簡素化とコスト低減に有利 ・質量低減の可能性がある ・無制御なので信頼性が高い ・スイッチングによる EMC ノイズが無い ・インバータより損失が少なく、ブレーキ性能が高い
短所	・コスト最小化には不利 ・スイッチングによる EMC ノイズに留意する必要がある	・停車中の試通電(コンデンサから電機子への放電)で確認できる事柄が限定的 ・電機子の状態監視には工夫が必要(要検討)

について比較した結果を表1に示す。同表より、「始動時の動作」は、逆相成分の有無があることを除けば、両者で似ていることが分かる。他方、「定常時の動作」については、電流の大きさ、周波数、発電電力の因果関係が両者で異なっている。特に周波数の増減と発電電力の増減の関係が両者で逆になっていることが特徴的である。即ち、速度の大幅変化やギャップ変化のような発電能力に直接影響するような状態変化が生じた場合においては、インバータ励磁とコンデンサ自己励磁の挙動は異なることになる。

4. 検証試験

4.1 試験機材

前章のコンデンサ自己励磁の動作を軌条輪試験¹⁾で検証した。リニアレールブレーキ電機子は、軌条輪試験のために円弧形状とした試作機(図8(a))を用いた。これは防護カバーなどを含めて直線形状換算で長さ1500mm以下、幅125mm以下、高さ130mm以下で設計された実機大のプロトタイプである。磁極ピッチは約200mm、標準ギャップは約8mmである。また、試験に用いたコンデンサの容量は、インバータ励磁による零出力発電制動と性能比較できるように、その交流電圧、交流電流、周波数から求められる等価キャパシタンスに合わせ1相当たり6mF(Y接続)または2mF(Δ接続)とした。また、この供試コンデンサは、インバータ励磁の電圧を上回る電圧によって、ブレーキ力増強と容量低減に対応させた試作品である。その仕様においては、1相当たり0.5mF(Δ接続)となり、3相分をまとめた外

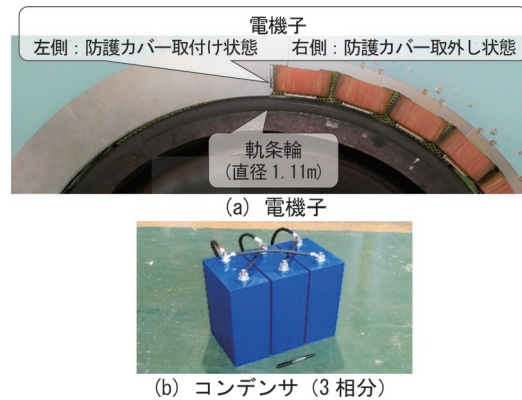


図8 試験機材の外観

寸法は約350mm×200mm×300mm、質量は約40kgである。その外観を図8(b)に示す。

基本的な試験方法は、軌条輪の速度を回転軸に直結されたモータで所定値に設定し、ブレーキ動作が開始されたら、同モータで軌条輪の速度を停止まで下げた。その間、コンデンサ励磁の起動特性と速度特性を取得した。

4.2 始動試験

コンデンサを初期充電した後、軌条輪を停止した状態(0km/h)と300km/hで回転させた状態で接触器2を投入した場合の電流波形を図9に示す。停止状態では、放電電流はα軸上で減衰する単相交流のように流れ、消滅している。一方、300km/hでは、接触器2を投入した直後はα軸上で単相交流のように流れているが、すぐにβ軸上でも流れ始めて3相交流のようになり、振幅が増加している。これより前述のように逆相成分が減衰し、正相成分が増大していることが確認できる。同様の始動

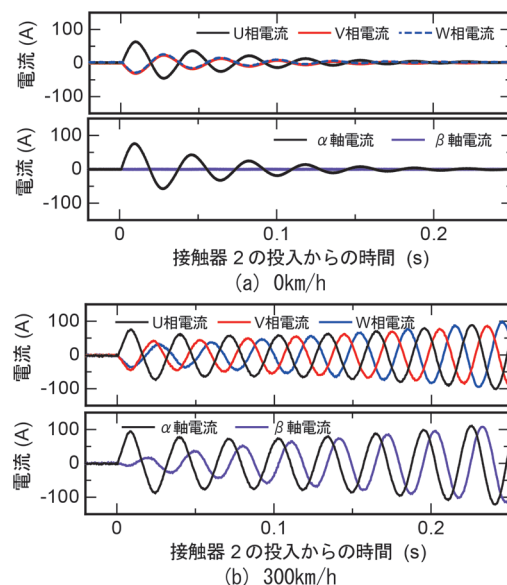


図9 始動時の電流波形(Y接続, 初期充電DC100V)

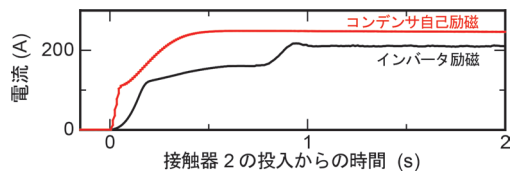


図 10 始動時の電流立ち上がり (Y 接続, 初期充電 DC300V)

試験における電流実効値の立ち上がりをインバータ励磁と比較したものを図 10 に示す。ここでは共振コンデンサと平滑コンデンサの初期充電電圧を揃えている。同図より、コンデンサ自己励磁の電流は約 0.3 秒 (0-90%) で立ち上がり、その後は一定値となることから分かる。コンデンサ自己励磁の立ち上がりが実用上十分に速いことが確認できる。なお、インバータ励磁の立ち上がりの速さは、平滑コンデンサ容量などが関係するため、一般論として評価できないが、コンデンサ自己励磁の立ち上がりの速さは概ねインバータ励磁と同等かそれ以上であると言える。

4.3 停止試験および自己保護試験

速度 300km/h において、コンデンサ自己励磁 (Δ 接続) で通流中に接触器 2 を開放した時の電流波形を図 11 に示す。接触器 2 の開放直後、2 つの周波数が混在した後、約 0.4 秒で電流が減衰、消滅している。前述のように α 軸と β 軸の共振周波数が異なることで、2 つの単相交流となり、自己励磁が継続不能となって停止している。なお、接触器 2 の開放時のアークが小さいことを複数試番で確認した。また、コンデンサ Y 接続にスナバ回路を設けた場合の停止試験の結果も、図 11 と同様であった。

図 12 に、コンデンサ自己励磁 (Δ 接続) で通流中に、接触器 2 を投入したままで電機子の入力端子 (対地電位が最も高い部分) の 1 箇所 (W 相) を人工的に地絡させた場合の電流波形を示す。ここでは、最も厳しい条件として、接地抵抗と地絡抵抗を用いずに、直接接地で完全地絡としている。同図より、地絡直後に定常電流の最大 250% 程度の地絡電流が 3 サイクル以内 (約 20ms) だけ流れるが、すぐに消滅していることが分かる。その後、地絡発生から約 0.3 秒までに励磁が停止している。このことから、万一の地絡発生時に、保護動作である接触器 2 の開放が仮に何らかの原因で遅れた場合でも、この自己保護作用によって、速やかに励磁が停止されることが分かる。

4.4 速度特性

図 13 に速度 300km/h で励磁を開始した場合の速度特性をインバータ励磁と比較して示す。コンデンサ自己励磁は無制御でありながら、能動的な制御を行っているイ

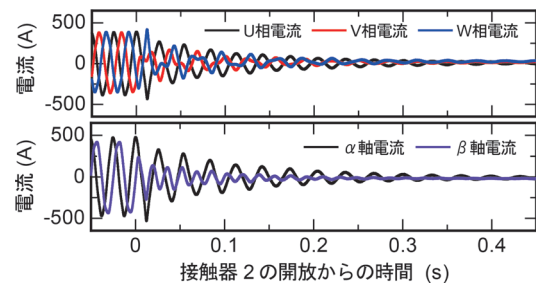


図 11 停止試験 (Δ 接続)

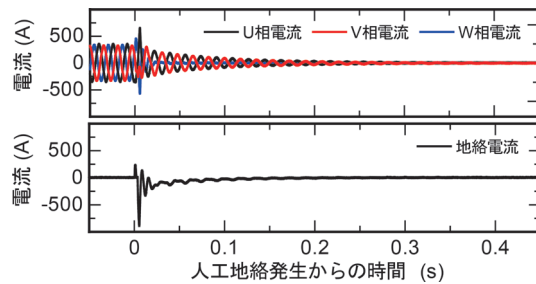


図 12 人工地絡に対する自己保護試験 (Δ 接続)

ンバータ励磁より広範の速度域で励磁できている。高い滑り周波数を動作点としているため、発電の調整において速度変化に伴う周波数の調整が少なく済むことが、共振周波数で動作するコンデンサ自己励磁に好適であることが分かる。詳細には、速度低下に伴い、発電能力が低下して電流が徐々に減少しているが、その程度は発電能力の低下を周波数の増加で補うインバータ励磁と同等である。また、電流の減少に伴い、磁気飽和が緩和されて共振周波数が低下している。これはインバータ励磁の周波数の動きと逆であるが、特に低速領域 (約 110km/h 以下) では滑り周波数が低下し過ぎないように働くため、より低速まで励磁するのに好都合となっている。また、コンデンサ自己励磁のほうが全体的に大きな電流が流れ、大きなブレーキ力を発生している。これはコンデンサ自己励磁では、通電時の損失が小さく、発電電力を通流のための電力として効果的に利用できるためである。

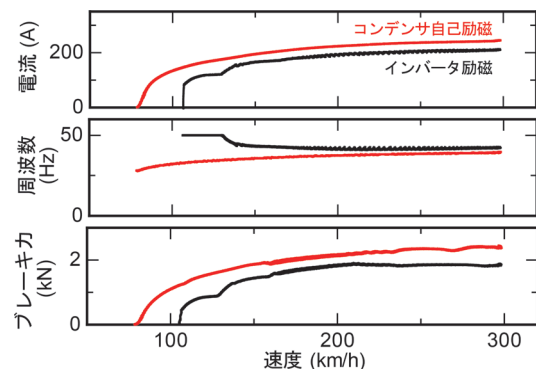


図 13 速度特性 (Δ 接続, 最大交流電圧 300V)

以上より、励磁可能な全速度領域において、コンデンサ自己励磁のブレーキ性能がインバータ励磁のそれを上回ることが確認された。

5. まとめ

リニアレールブレーキの低コスト化を目的として、コンデンサ自己励磁現象を用いた新たな励磁方法を考案し、軌条輪試験で性能を検証した。従来のインバータ励磁と比較して、始動が同等かそれ以上に速く、速度特性についてもより広範の速度域において励磁が可能であった。また、励磁可能な全ての速度において、インバータ励磁よりも大きなブレーキ力を発生した。これらより、

始動、停止、速度特性の何れも実用に適うことを確認した。従来の励磁システムにおけるインバータをこの方法で代替することで、大幅な低コスト化を実現できると見込まれる。

文 献

- 1) 長谷川均, 柏木隆行, 坂本泰明, 笹川卓, 狩野泰: 軌条輪を用いたリニアモータ型レールブレーキの性能試験, 鉄道総研報告, Vol.25, No.3, pp.35-40, 2011
- 2) 坂本泰明, 柏木隆行, 米山崇, 嵯峨信一: リニアモータ型レールブレーキの開発, 鉄道総研報告, Vol.27, No.7, pp.23-28, 2013

車上集電電力密度を向上した 鉄道車両用非接触給電システム

依田 裕史* 浮田 啓悟**

Wireless Power Transfer System for Railway Vehicles with Improved Power Density of Onboard Coil

Hiroshi YODA Keigo UKITA

To enhance the flexibility of installation of wireless power transfer (WPT) system on railway vehicles, we modified WPT to increase the power per unit opposing area of ground and onboard coil up to $150\text{kW}/\text{m}^2$ by setting mechanical gap between coils at 150-mm. In this paper, we describe the design of improved WPT system capable of collecting 150kW with a single onboard coil and the results of bench test using a reduced model to verify the system.

キーワード：非接触給電，8の字コイル，バッテリー，ハイブリッド，充電

1. はじめに

非接触給電（WPT：Wireless Power Transfer）技術は、スマートフォン等の充電に用いられる Qi や電動歯ブラシ等、小容量の製品は広く普及している。近年ではより大容量の応用として、電気自動車の充電装置としての普及を目指し、国際規格が整理されつつある。一方、鉄道分野への適用については、以前より磁気浮上式鉄道における車上電源への給電装置として開発が進められてきたほか、この 10 年の間に在来方式鉄道への適用を目指してヨーロッパや韓国において基礎的な実証試験が行われており¹⁾、近年では EU における革新的鉄道技術の創出を目指すプロジェクトである Shift2Rail の課題の一つとして取り上げられている。鉄道総研においても、以前より走行用バッテリー搭載車両向けの簡易な充電設備としての導入を目指し、技術開発を進めている。2014 年には 50kW 級システムを試作し、レール間に設置した地上給電コイルから車両床下に搭載された車上集電コイルへの非接触給電を実証した。本稿では、この実証システムの基本思想を踏襲しつつ、主に車上集電コイル搭載性の向上を図った改設計システムについて、試験による設計検証と性能評価の結果を報告する。

2. 鉄道車両用非接触給電（WPT）システム

2.1 変圧器方式非接触給電の概要

開発している鉄道車両用 WPT システムにおいて、非接触給電の方式には変圧器方式（電磁誘導方式、磁界結合方式と呼称される場合もある）を採用している。これ

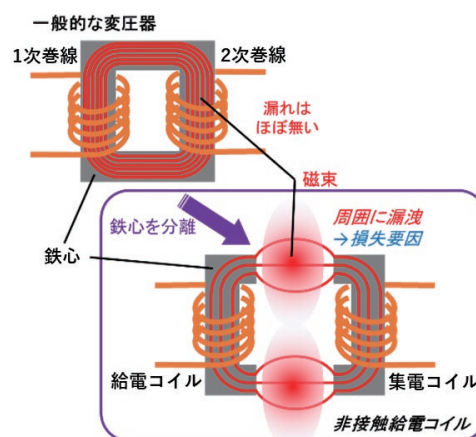


図1 変圧器方式による非接触給電

は図1に示す通り、一般的な変圧器の鉄心を分離し、1次側と2次側が互いに自由に移動できるようになったものと考えられる。変圧器は1次巻線と2次巻線の間で磁束を介して電力を伝送しており、鉄心はその磁束の経路を形成し、確実に互いの巻線を鎖交できるように用いられている。鉄心を分離しても、鉄心の間の空間を介して電力伝送が可能であるが、磁気結合に寄与する1次巻線と2次巻線を互いに鎖交する磁束は空間を広げるほど減少し、誘導起電力が大きく低下してしまう。その低下を補い、十分な電力伝送を行うためには周波数を高める必要がある。また、結合に寄与しない磁束は周囲に広がり、大きな無効電力を生じる。これを補償するために回路にコンデンサを挿入し、LC共振周波数で動作させることにより力率を1に調整することで、電源の皮相容量を最小化する手法が一般的に用いられている。

導体には、高周波電流を効率的に送電するため、リッツ線と呼ばれる極細のエナメル線を多数の束ねた撚り線を使用する。極細の線を束ねているのは、高周波電流が

* 浮上式鉄道技術究部 磁気浮上研究室

** 浮上式鉄道技術究部 電磁気研究室

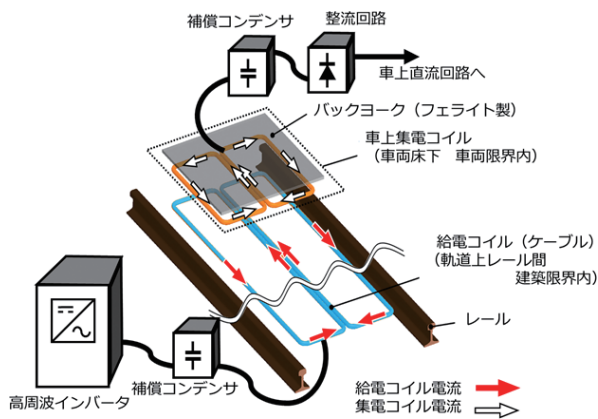


図2 鉄道用 WPT システム構成の概要

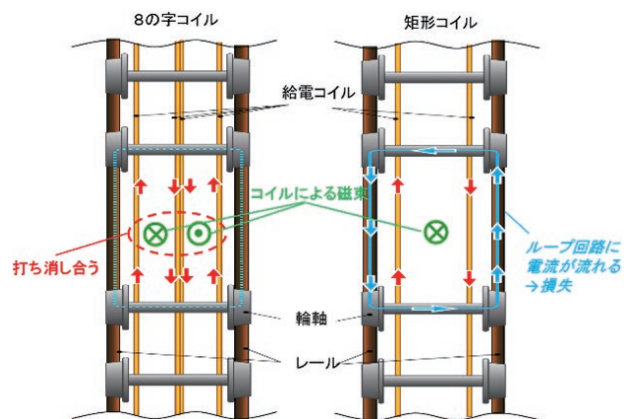


図3 8の字結線コイル

導体周縁部に集中して流れようとする表皮効果によって、太さのある導体では大部分が電路として機能しなくなるためである。また、コイルから周囲に広がった高周波磁束が導体に鎖交すると渦電流を生じ、損失を発生させる。特にレールや車両機器に使用される鉄のような強磁性体では表皮効果が強く、導体表面のごく浅い領域に渦電流が集中することから大きな損失が発生する。この損失の抑制は、レールがコイルの近傍に存在する鉄道への WPT 適用における一つの課題である。

2.2 鉄道車両用 WPT システムの構成

図2に鉄道用 WPT システムの全体構成の概要を示す。これは左右レール間に、リッツ線ケーブルからなる8の字ループ形状の地上給電コイルを敷設し、同じく8の字形リッツ線巻き線による車上集電コイルを対向させ、電力伝送を行うものである。また、走行中給電に用いる地上給電コイルについては、ケーブル1条のみからなる空芯の簡素な構成とすることで、敷設コストの抑制、地上コイルの長尺化に対応し、また保線作業への影響を抑制している。ここで、コイルを8の字形としていたのは、鉄道への適用において重要な意味を持つ。

レール間に地上コイルを敷設する場合、図3に示すように、左右レールと2本の輪軸によって構成されるループ回路に対し、単純な矩形コイルでは発生する磁束により電流が誘導され、損失要因となってしまう。これに対し、8の字形であれば、左右のコイルが発生する磁束が打ち消しあうため、理想的にはループ回路に電流は流れず、これによる損失は生じない。また、地上コイル磁束が鎖交することによるレール損失も、強磁場領域が軌道中心部に位置することになるため、低減が可能となる。

2.3 鉄道車両用 WPT システムの適用イメージ

鉄道車両用 WPT システムには、一般的な架線-パンタ系や第三軌条を用いた集電に対して、以下のような特長がある。

- ① 摩擦がなくメンテナンス低減を図れる
- ② 課電部露出がなく安全性が向上するだけでなく飛来物等による事故の恐れがない
- ③ 機械的な操作なしに停車中・走行中を問わずシームレスな給電を行える

近年、バッテリー電車やハイブリッド気動車等、走行用バッテリーを搭載した車両が相次いで導入されている。特に、国内で導入されているバッテリー電車はパンタグラフを搭載し、電化区間の走行中や、剛体架線設備を設けた折返し駅での停車中にバッテリーへの充電を行う運用を行っている。このような方式では一定の距離を走破し、また異常時の長時間停車に備えるため、大容量のバッテリーが搭載される。これに対し、例えば、線区走行中に小容量の充電を高頻度に行うことができれば、走行に伴い消費された容量をすぐに充電することができ、異常時の長時間停車時でも至近の充電設備で充電が可能であることから、バッテリー搭載量を抑制することが可能である。また、折返し駅でのみ充電する場合と比較して、充電電流が小さくなり、バッテリーへの負荷が軽減され、性能劣化の抑制が期待できる。また、このような充電設備はハイブリッド車両の長時間停車時の補機電力供給や、ディーゼルエンジン等主機での連続走行となる急こう配区間での補助的な給電等に使用することも可能である。

上記のような小容量・高頻度充電のための設備として、鉄道車両用 WPT システムは適合性が高い。WPT システム導入イメージを図4に示す。バッテリー搭載車両は地方閑散線区を中心に導入されることが予想されることから、特長①および②による維持管理コストの低減効果は重要である。架線-パンタ系で高頻度の充電を行う場合、パンタグラフ昇降操作を確実にするための停車時間延長や、上昇状態で充電区間から逸脱しない措置の導入が必要になるなどが考えられるが、特長③を有する WPT システムはこれらの対策が不要で、充電が有効な箇所へ地上設備を導入するだけで、充電を行うことがで

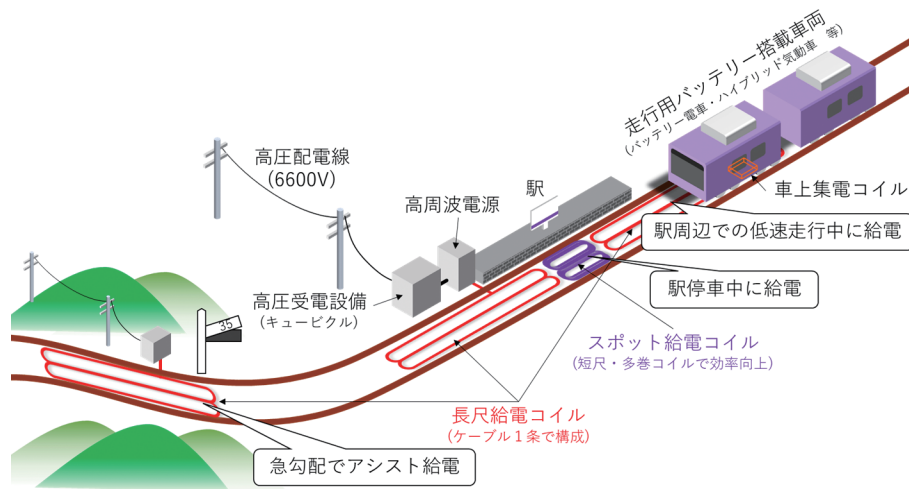


図4 鉄道車両用 WPT システムの導入イメージ

きる。

3. 高電力密度非接触給電システムの開発

3.1 原理実証システムの概要

新たに設計した高電力密度非接触給電システムは、2014年に製作した原理実証システム²⁾の基本構成を踏襲しつつ、性能向上を図っている。原理実証システムでは車上コイルを低圧の範囲で設計しており、車上コイルの搭載スペースとして、一般的な車体長約20mの在来線車両1両の前後台車間の床下機器の底面全てを使用することで、最大300kWを集電可能なシステムとなっている。通電周波数については、高周波とするほどシステムの小型化、軽量化を図ることができるが、先に述べた交流抵抗や、機器耐圧、また国内の電波法における制限などを考慮し、10kHz弱を基本としている。本システムは、地上コイル車上コイル間の離隔（メカニカルクリアランス）を建築限界―車両限界間で許容される最小値に設定している。その結果、車上集電コイルの薄型化と車上補償コンデンサの小型化を図ることができ、床下機器箱の底面に装着することで、その他機器に支障せずに台車間スペース全面を無理なく使用できる構造となっている。また、1台16.7kW集電可能なパネルの搭載台数により総集電電力を容易に調整可能なモジュラー設計を採用している。図5に実際に製作した、地上給電コイル（ケーブル）と集電コイル（パネル）3台による給電試験用50kW級システムを示す。

この原理実証システムの製作と給電試験において、鉄道への非接触給電技術の適用可能性が実証された。一方で、実用化を見据えた場合、以下の点を改善する必要がある。ひとつは床下スペース全面を使用する前提の設計であり、これはシステム搭載を前提とした車両設計が必

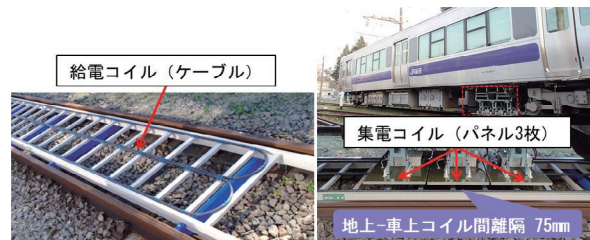


図5 試作した原理実証システム

要となること、また、走行用バッテリー搭載車両は床下スペースに余裕が少ないことから、改善が必要である。もうひとつは地上コイル車上コイル間の離隔であり、これは営業用車両では余裕を見て75mmより大幅に大きく設定されていることから、改善が必要となる。

3.2 改設計の指針とシステム全体構成

車上集電コイルの占有スペース縮小を目指し、単位面積当たりの集電電力、すなわち集電電力密度を原理実証システムの3倍となる150kW/m²以上に向上することを目標に、システムの改設計を行った。同時に、地上コイル車上コイル間の離隔についても、2倍となる150mmへの拡大を試みた。改設計では、原理実証システムの基本構成を踏襲しつつ、離隔拡大に伴う性能低下を補い、かつ集電電力密度を向上する。これは電気設計上厳しい条件を要求されることを意味しており、WPTシステムにおいては有効電力密度の増大以上に、無効電力の大幅な増大³⁾に対応する必要がある。したがって、地上ケーブル、車上コイルの導体量増加と耐圧向上を図ることが改設計における基本的な方策となる。

この方策により、原理検証システムにおける車上コイルは、単一コイル出力電圧が600V_{DC}になるようコイルの進行方向の寸法を制限し、多数のコイルを車両に搭載

する設計思想であったのに対し、改設計システムでは、単一のコイルで大きな電流・電圧を扱う設計となる。これに伴い、補償コンデンサが大型化するため、原理実証システムで採用した、コンデンサとパネルを一体とする構成から、コイルとコンデンサを分離した構成に変更した。また基本構造としてエポキシモールドとし、巻線構成は、コイル端子間電圧を抑制しつつ、導体占積率を高めるため、平巻き構成可能な巻き数・リッツ線外径を設定した。その上で、電磁界解析によりバックヨーク量・配置の適正化を図った⁴⁾。また、伝熱解析により想定した通電・冷却サイクル条件にて運用可能な電流密度を設定した。以上のプロセスで、車上コイルのまくらぎ方向断面の設計が定まる。次に、モールド機器としての製作性、車載振動条件に対する機械強度を考慮してコイルのレール方向長を定めた。以上より、1台のパネルで、定

格電流 600A にて 150kW の集電が可能なコイルを設計した。表 1 に改設計システムと原理実証システムの主要諸元を示す。ここで、コイル有効面積は幅のある巻線の中心線により作られる矩形の面積として定義している。また、図 6 に設計した車上集電コイルを示す。改設計における車上集電パネル 1 台は原理実証システムのパネル 9 台分の定格集電電力となるが、皮相容量は約 67 倍と大幅に増加していることがわかる。

4. 規模縮小試作と試験による性能評価

設計したシステムの製作性、および設計の妥当性を確認するため、試験用のシステムを製作した。以下に概要を示す。

4.1 試作システムの概要

4.1.1 地上給電コイル

地上給電コイルを構成する高圧リッツ線ケーブルは、一般的な定格 6.6kV 定格 PV ケーブルの構造を踏襲しつつ、誘導電圧が生じてしまうシールド層を省略し、芯線を導体量 100mm² のリッツ線としたものである。図 7 に軌道に敷設した状況を示す。

表 1 改設計システムと原理実証システムの主要諸元

		原理実証システム	改設計システム
通電周波数 [kHz]		10.0 (未満)	
地上給電コイル	構造	リッツ線ケーブル1条 8の字ループコイル	
	まくらぎ方向幅 [mm]	800	700
	素線総断面積 [mm ²]	80	100
	定格電流 [A _{rms}]	400	500
	定格電圧 [V _{rms}]	1500	6600
地上コイル車上コイル 離隔 [mm] (メカニカルクリアランス)		75	150
車上集電コイル (単位: パネル)	本体構造	薄型 GFRP フレーム	エポキシモールド
	補償コンデンサ 整流回路	パネル毎に 一体化	パネルと 別体
	パネル外寸 [mm] (レール方向×まくらぎ方向)	500×900	1470×930
	パネル質量 [kg]	42	162
	定格集電電力 [kW]	16.7	150
	コイル有効面積 [m ²]	0.32	0.89
	集電電力密度 [kW/m ²]	52.2	168.5
	コイル巻き数	4	8
	素線総断面積 [mm ²]	30	82.4
	定格電流 [A _{rms}]	160	600
	端子間電圧 [V _{rms}]	440	7850
	皮相容量 [kVA]	70.4	4710
	出力仕様 (電圧・電流) [V _{DC} ・A _{DC}]	600・27.8	250・600

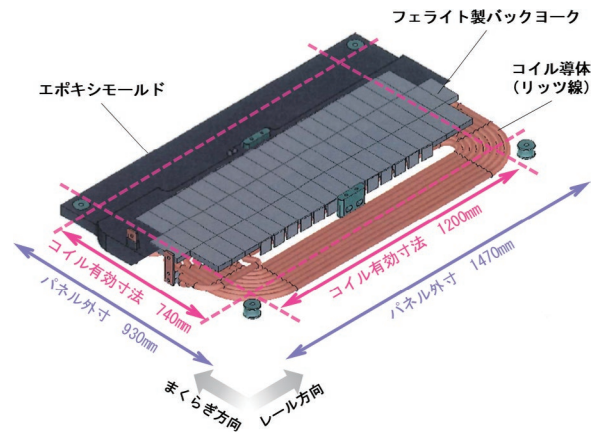


図 6 150kW 級車上集電コイルの概要



図 7 高圧リッツ線ケーブルによる地上コイル

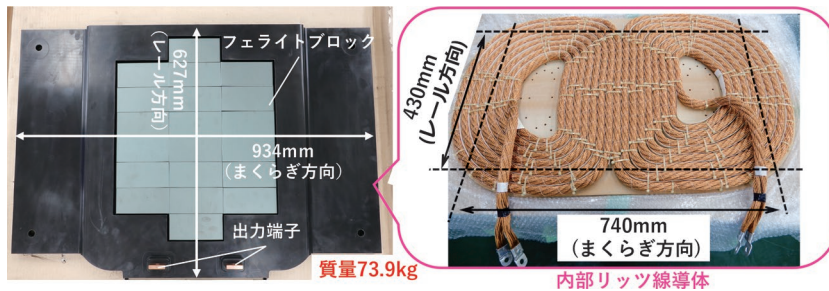


図8 規模縮小 50kW 級車上集電コイル

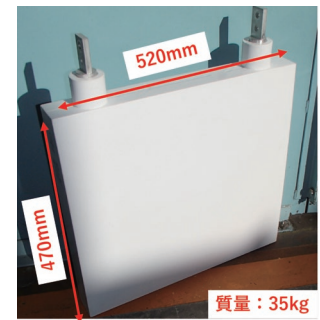


図9 車上補償コンデンサ

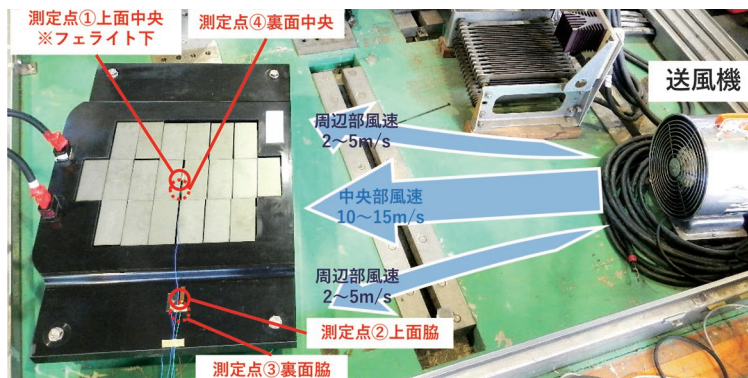


図10 車上コイル熱負荷試験

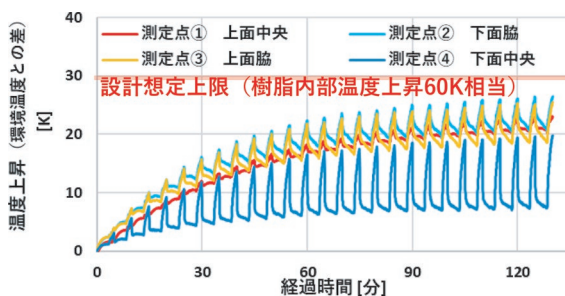


図12 表面温度測定結果

4.1.2 車上集電コイル

給電試験用の電源として 50kW 級の高周波インバータを使用することから、設計した 150kW 級車上集電コイルでは定格条件での試験が実施できない。そのため、150kW 級コイルの基本構造をそのままに、中央部のレール方向寸法を短縮することで、50kW 級に規模を縮小した試験用車上集電コイルを製作した。製作したコイルを図 8 に示す。なお、これは高圧機器としての製作性の確認と性能評価を目的とし、定格電圧 6.6kV 仕様で設計している。

4.1.3 車上補償コンデンサ

図 9 に製作した試験用高圧モールドコンデンサを示す。これを車上コイル 1 台に対し 2 台並列で用いる。

4.2 車上コイル熱負荷試験

車上コイルの実使用時の温度上昇を確認するため、設



図11 設定した通電・冷却サイクル

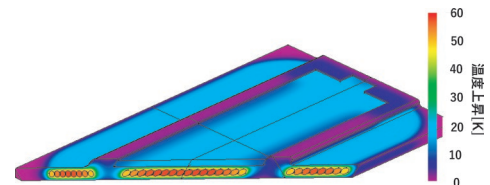


図13 伝熱解析結果

計時に考慮した、実使用を想定した通電パターンと走行風を模擬した冷却条件で熱負荷試験を実施した。図 10 に試験環境と風速分布、表面温度の測定点を示す。本試験における送風機を使用した冷却は、その風速から 40km/h 程度での走行風に相当するものと考えられる。試験時の通電サイクルと冷却条件を図 11 に示す。これは各駅で WPT システムによる充電を行うパターンを想定し、90 秒 600A 通電（駅停車中及び低速区間での充電を想定）、210 秒待機（駅間高速走行を想定）とするサイクルを繰り返すものである。

図 12 に各測定点での温度測定結果を示す。設計時に実施した伝熱解析（図 13）では、モールド樹脂内部が温度上昇限度値 60K 程度（初期温度を 40℃ とした際モールド樹脂許容温度である 100℃ までの上昇に相当）で飽和した際、表面温度上昇は 30K 以下となる結果が得られており、本試験の結果はそれを満足している。従って、車上コイル熱設計は妥当であることが本試験により確認できた。

4.3 長尺地上コイルと車体搭載車上コイルによる試験

電磁界解析を用いた設計の妥当性を検証するため、図 7 で示した地上コイルを敷設した所内試験線にて、床下

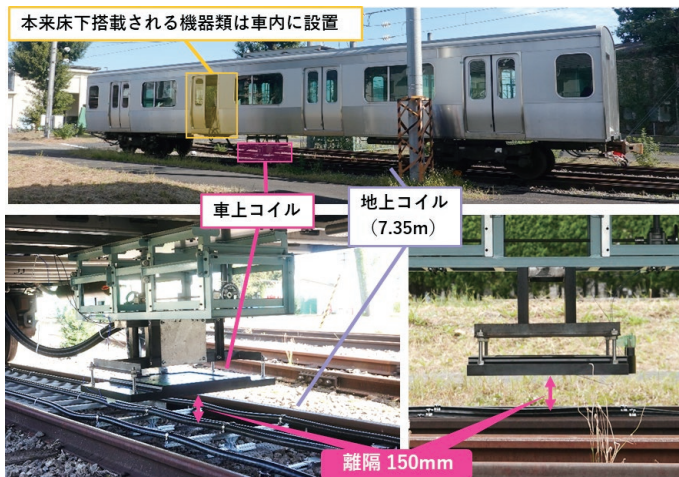


図 14 長尺地上コイルと車体搭載車上コイルによる試験

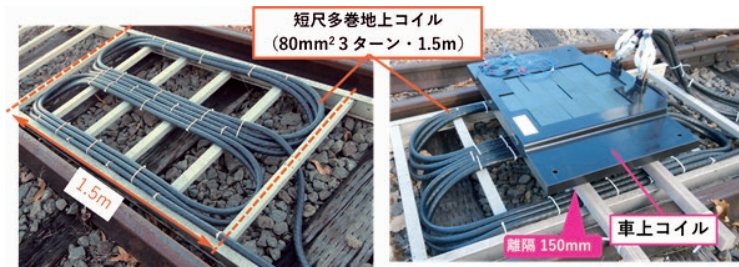


図 15 短尺多巻地上コイルを用いた試験

に車上コイルを取り付けた試験車両を留置し、給電試験を行った。図 14 に試験の状況を、表 2 試験結果を示す。表 2 より、本試験条件において実測値と解析値はよく一致しており、車上コイル設計における電磁界解析が十分な精度を有することが確認できた。

4.4 短尺多巻地上コイルを使用した高効率給電試験

本システムは走行中給電を行うための長尺地上コイルの使用を前提としている。このため地上コイルは簡素な構造とする必要があり、伝送効率向上が難しい一因となっている。一方で、停車中に限った給電であれば、地上コイルは最小限の長さで、かつより多くの導体を使用できる。これにより電流密度を低下させ、損失を抑制すれば、より高効率な電力伝送が実現できる。本試験は図 15 に示すように、3 ターンの短尺地上コイルと車上コイルを離隔 150mm で対向させ実施した。電源最大出力時の電力伝送効率の測定結果を表 3 に示す。伝送効率上有利な設定ではあるものの、前述の長尺地上コイルを用いた試験では 86%であったのに対し、90%以上のコイル間効率にて、目標とした集電電力密度 150kW/m²での電力伝送を実証した。

表 2 試験結果と解析結果の比較

	試験結果 (実測)	試験条件での解析結果
通電周波数 [kHz]	9.50	←(入力条件)
地上コイル電流 [A _{rms}]	559	←(入力条件)
車上コイル端子間電圧 [V _{rms}]	2157	2043
車上コイル電流 [A _{rms}]	481	←(入力条件)
車上コイル集電電力 [kW]	36.2	34.0
コイル間伝送効率 [%]	85.8	84.0

表 3 電源最大出力時の測定結果

	試験結果
通電周波数 [kHz]	9.93
地上コイル電流 [A _{rms}]	338.6
地上コイル端子間電圧 [V _{rms}]	1003
車上コイル端子間電圧 [V _{rms}]	1002
車上コイル電流 [A _{rms}]	285.1
車上コイル集電電力 [kW]	49.4
集電電力密度 [kW/m ²]	155.2
コイル間伝送効率 [%]	92.0

5. まとめ

鉄道車両用非接触給電システムは、バッテリー電車に対し小容量の充電を高頻度に行うことでバッテリー搭載量を抑制する、あるいはハイブリッド車両の長時間停車時の補機への電力供給や、急こう配区間での補助的な給電等に使用する等の用途に適した、走行中・停車中を問わず使用できる簡素な給電システムである。これまでの開発で、課題となっていた車上集電コイルの占有スペース縮小と地上一車上コイル間の離隔拡大を目指し、集電電力密度を原理実証システムの3倍となる 150kW/m²以上に向上すると同時に、離隔についても2倍となる 150mmへ拡大できる改設計システムについて、150kW級車上集電コイルの設計を行った。また、この設計の妥当性を、基本構造をそのままに50kW級に縮小し製作した試験用コイルにて検証した。その結果、電気設計、熱設計の妥当性を確認できた。なお、設計したコイルの実用にあたっては、コイルの高圧化と高周波通電長期耐久性の検討が必要と考えられる。また、停車中の高効率給電に特化した短尺多巻地上コイルを使用した給電試験においては、90%以上のコイル間効率にて、

目標集電電力密度での電力伝送を実証した。

本研究の一部は、早稲田大学との共同研究として実施した。

文 献

- 1) Liming Shi, Zhenggang Yin, Longbin Jiang, Yaohua Li, "Advances in inductively coupled power transfer technology for rail transit," CES TEMS, pp.383-396, 2017.
- 2) 柏木隆行, 浮田啓悟, 坂本泰明, 加藤佳仁：鉄道車両用非接触給電装置の電力供給性能検証, 鉄道総研報告, Vol.29, No.11, pp.35-40, 2018
- 3) 依田裕史, 坂本泰明, 柏木隆行, 笹川卓：高電力密度非接触給電システム用コイルの設計, 鉄道総研報告, Vol.33, No.5, pp.17-22, 2019
- 4) 浮田啓悟, 坂本泰明, 柏木隆行, 近藤圭一郎, 若尾真治：鉄道車両用非接触給電装置の集電コイルにおけるフェライトコア削減の検討, 日本 AEM 学会誌, 28 巻 4 号, pp.276-281, 2020

浮上案内コイルの電磁加振試験による耐振動特性評価

池田 遼平* 水野 克俊** 田中 実*

Evaluation of Vibration Resistance of Levitation and Guidance Ground Coils
by Electromagnetic Excitation Tests Using a Superconducting Magnet

Ryohei IKEDA Katsutoshi MIZUNO Minoru TANAKA

During superconducting Maglev vehicles running, ground coils vibrate due to the reaction force of levitation force and guidance force. In electromagnetic excitation tests, a ground coil is vibrated under the strong magnetic field of a superconducting magnet. In this paper, we describe an examination of test conditions based on numerical analysis, a processing method for energizing only an unit coil to be evaluated, and the electromagnetic excitation test results of the levitation and guidance coil. We have evaluated the vibration resistance of levitation and guidance ground coils by electromagnetic excitation tests.

キーワード：地上コイル，電磁加振，超電導磁石，機械加工

1. はじめに

超電導磁気浮上式鉄道のリニア車両には鉄車輪やパンタグラフがなく、地上とは完全非接触の状態です。これを可能にしているのが地上コイルである。浮上式鉄道の基本構成を図1に示す。地上コイルは、リニア車両に対して、推進力、浮上力、案内力を与えるためにガイドウェイ側壁に取り付けられた電磁石である。地上コイルには、推進コイルと浮上案内コイルの2種類があり¹⁾、図2に示す浮上案内コイルは、超電導磁石との相互作用によって車両に浮上力と案内力を与えている。浮上案内コイルは、車両通過毎に浮上力や案内力の反力を受けて加振されるため、機械的強度や振動に対する動的耐久性が要求される。

地上コイルの耐久性検証の一つに、超電導磁石を用いた電磁加振試験²⁾³⁾がある。超電導磁石磁場中で地上コイルに交流を通电することで、繰り返し加振する試験である。機械的载荷とは異なり、地上コイル導体に直接電磁力が加わる点が大きな特徴である。

浮上案内コイルは超電導磁石の通過により浮上電流が誘起される仕組みであり、ケーブル接続端子から浮上電流を直接通电できない回路構成となっている。そのため、電磁加振試験は上側単位コイルと下側単位コイルに別々の通电ができる専用設計²⁾の浮上案内コイル（試験用コイル）を用いて実施してきた。しかし、保守作業において重要な交換時期の推定には、実際の浮上案内コイルを用いて電磁加振試験を行い、振動に対する余寿命を評価する必要があると考えられる。

本研究では、実際の浮上案内コイルの電磁加振試験を実現するため、電磁界解析と構造解析により試験条件の検討を行った。また、ケーブル接続端子から浮上案内コイルの評価対象箇所のみに通電するため、機械加工による回路変更を行い、実際に電磁加振試験による耐振動特性の評価を行ったので報告する。

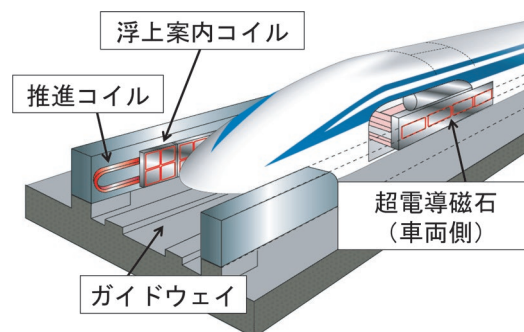


図1 浮上式鉄道の基本構成

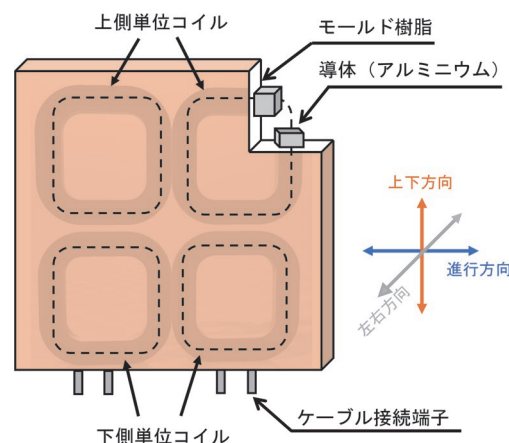


図2 浮上案内コイルの構造

* 浮上式鉄道技術研究部 磁気浮上研究室

** 元 浮上式鉄道技術研究部 旧低温システム研究室

2. 浮上案内コイル

2.1 浮上案内コイルの構造

浮上案内コイルは、鉄心のない空芯コイルである。上下に矩形の単位コイルを組み合わせ、それを左右に2組まとめて1個のコイルとなっている。車上の超電導磁石との間に繰り返し働く電磁力を負担するために、アルミ導体の巻線コイルをモールド樹脂で一体成形することで剛性を高めている。なお、浮上案内コイルは、ガイドウェイの両壁にボルト・ナットで締結される仕組みになっている。

2.2 浮上案内コイルに作用する電磁力

浮上案内コイルに浮上電流が通電されると、図2に示す上下方向に浮上力の反力が加わる。また、左右方向にも電磁力が加わり、上側単位コイルにはガイドウェイから引き剥がされる方向、下側単位コイルにはガイドウェイに押し付けられる方向に力が作用する。特に上側単位コイルに作用する引き剥がし力は締結部のボルトだけで荷重を支えているため、締結部付近に応力が集中する⁴⁾。一方、下側単位コイルに発生する押し付け力は、コイル背面等で荷重を受けることができる。従って、実際の浮上案内コイルの耐振動特性評価では、上側単位コイルに作用する引き剥がし力を模擬する必要がある。

2.3 浮上案内コイルの回路構成

実際の浮上案内コイルは、上側単位コイルと下側単位コイルが並列接続となっているため、外部から通電すると、上下単位コイルに同じ向き案内電流が流れる。そのため、現状の回路構成のままでは、上下単位コイルに逆向きの電流が流れる浮上電流を模擬できない。そこで、実際の浮上案内コイルのうち、引き剥がし力が加わる上側単位コイルを評価対象として、必要な電磁力が加わるように、数値解析に基づく試験条件や回路構成を検討した。

3. 数値解析に基づく試験条件検討

実際の浮上案内コイルの電磁加振試験を実現するには、上側単位コイルに対して、試験用コイルに働く左右方向の電磁力を再現する必要がある。ここでは、実際の浮上案内コイルに500km/h走行時の電磁力相当の負荷を与える試験条件を検討した。浮上案内コイルの通電条件として、回路構成を変更して上側単位コイルのみに通電した場合と、下側単位コイルのみとした場合の電磁力と応力を計算した。また、試験用コイル（上下異極）に浮上電流を通電した場合の結果（目標とする応力）と比較し、電磁力を強化する方法を検討した。

3.1 均衡変位における応力予測

初めに電磁界解析により電磁力の計算を行った。ただし、電磁加振試験における浮上案内コイルの変形量は微小であるため連成解析は省略した。次に構造解析では、電磁界解析で得られた電磁力を各単位コイルに設定することで応力分布を計算した。

(1) 電磁界解析

電磁界解析の解析モデルを図3に示す。ここでは、浮上案内コイルの導体部と超電導コイルのみをモデリングした。浮上案内コイルと超電導コイルは進行方向に対して変位をゼロとし、対称性を考慮した1/2モデルで計算した。通電条件は、超電導コイルを250A（起磁力700kA）、浮上案内コイルを2000Aとした。上下変位は、43.9mm（時速500km/hにおける均衡変位）として計算を行った。

浮上案内コイルに働く電磁力（荷重）を図4に示す。上下単位コイルではそれぞれコイル巻線の向きが異なる。そのため、左右方向の荷重を見ると、上側単位コイルは吸引力（負）、下側単位コイルは反発力（正）となっている。試験用コイル（上下異極）の荷重は、上下単位コイルの荷重の合計となっている。

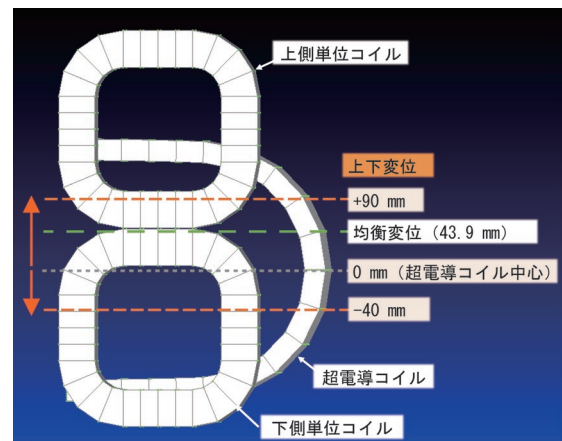


図3 電磁界解析モデル

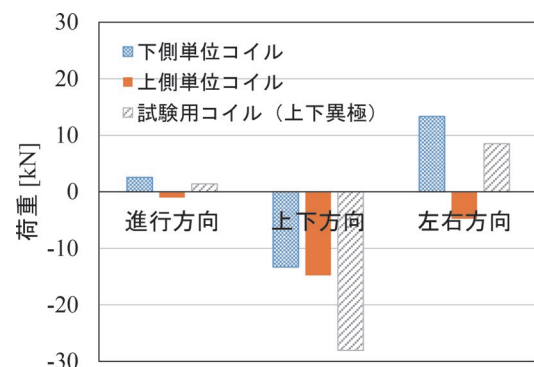


図4 浮上案内コイルに働く電磁力（均衡変位時）

(2) 構造解析

構造解析では、電磁界解析で得られた電磁力を各单位コイルに設定することで応力分布の予測を行った。浮上案内コイルの構造解析モデルを図5に示す。ここでは、コイル導体部だけでなく、モールド樹脂や背面の支持構造、締結ボルトまで再現している。締結ボルトはビーム要素、それ以外はソリッド要素とし、締結部接触面の摩擦もモデル化した。要素数は約33000である。なお、別途行ったモーダル解析では、浮上案内コイルの1次共振周波数は240Hzであった。これに対して電磁加振試験での加振周波数は100Hz程度と十分に低く、振幅倍率は1に近いことが予想される。従って、構造解析による応力分布の予測は静荷重で行っている。

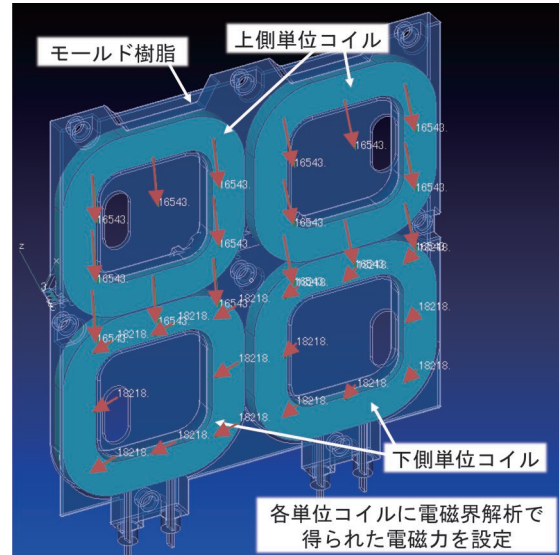
例として、浮上力を模擬した試験用コイルの電磁加振時のミーゼス応力分布と変形形状を図6に示す。変位は拡大して図示している。上側単位コイルの変形形状は、吸引力が働く軌道中心方向に膨らんでいる。下側単位コイルの変形形状は、超電導磁石からの反発力でガイドウェイ側に押し付けられている。次に応力集中は、ボルト締結部周辺で発生しており、単位コイルの周辺などその他の位置ではミーゼス応力が極めて小さくなっている。

各条件における最大ミーゼス応力は、上側単位コイル：19MPa、下側単位コイル：15MPa、試験用コイル：25MPaとなっている。上側単位コイルと下側単位コイルの最大ミーゼス応力を比較すると、上側単位コイルの方が大きくなっている。これは、支持構造に由来すると考えられる。下側単位コイルは、コイル背面で押し付けられる荷重を受け持つのに対し、上側単位コイルは、締結部のボルト頭だけで引き剥がされる荷重を支えているためである。しかしながら、目標には達していないので上側単位コイルを評価対象として、試験用コイルにおける500km/h走行時の電磁力相当の負荷を再現するには、試験条件の変更による電磁力の強化が必要である。

3.2 電磁力の強化

上側単位コイルのみを評価対象とし、試験用コイルにおける電磁加振試験と同等の負荷を与えるための試験条件について検討した。図3に示すように、超電導コイルの上下辺と上側単位コイルの上下辺の距離を調整することで、電磁力の強化を試みた。上下変位を-40mmから+90mmの範囲で変化させた際に上側単位コイルに働く電磁力を図7に示す。進行方向および上下方向の電磁力はほぼ一定であるのに対して、左右方向の電磁力のみが上下変位と比例して変化している。図7における緑線は均衡変位(43.9mm)、赤線は試験装置の限界(-20mm)を示している。上下変位を-20mmまで下げると吸引方向に10kNを超える電磁力が働くことになり、均衡変位と比較すると2倍以上の電磁力を加えることができる。

構造解析で得られた左右方向の最大ミーゼス応力の比較を図8に示す。上下変位を-20mmとした時の上側単位コイルの最大ミーゼス応力は25MPa程度となり、目標とする応力とほぼ等しくなっている。浮上案内コイルの変形形状という点では、下側単位コイルが加振されな



(a) 浮上案内コイルモデルと電磁力の設定



(b) ボルト締結部

図5 浮上案内コイル構造解析モデル

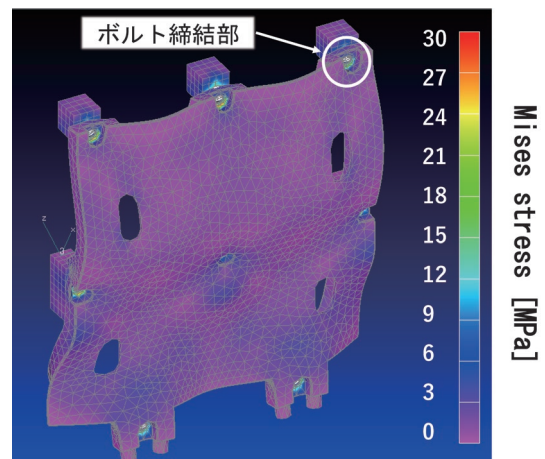


図6 ミーゼス応力分布と変形形状 (500km/h 走行時の電磁力相当)

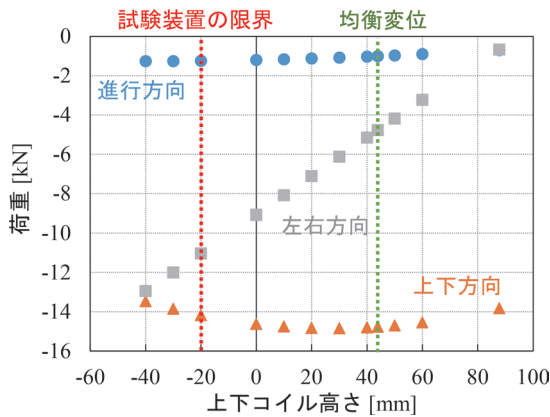


図7 上側単位コイルに働く電磁力

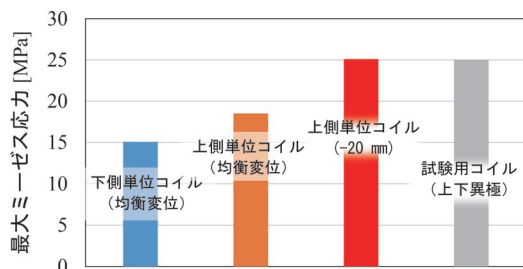


図8 最大ミーゼス応力の比較 (左右方向)

いものの、ボルト締結部に応力集中することは再現されている。

以上より、実際の浮上案内コイルに500km/h走行時の電磁力相当の負荷を与える試験条件として、上側単位コイルのみに通電を行い、上下変位を-20mmに設定する方法が有効と考えられる。

4. 回路変更のための機械加工方法

上側単位コイルのみを加振対象とし、評価対象の単位コイルのみに通電するための回路変更方法を検討した。回路変更のための機械加工方法を図9に示す。下側単位コイル導体の一部に機械加工を施して回路を切断した。機械加工にはディスクグラインダーを使用し、ミリオームハイテスタで抵抗を測定して回路の切断を確認した。なお、ディスクグラインダーによる切削箇所は、加振中に導体が短絡する懸念や機械的強度が低下している可能性がある。そのため、エポキシ樹脂を用いて切削箇所の穴埋めを行い、絶縁処理と補強を行った。

回路変更のために機械加工した浮上案内コイルについて、ケーブル接続端子より通電を行った結果、下側単位コイルには電流が流れず、上側単位コイルのみに通電されたことをサーモカメラで確認した(図10)。また、機械加工による局所的な発熱などの異状は見られなかった。

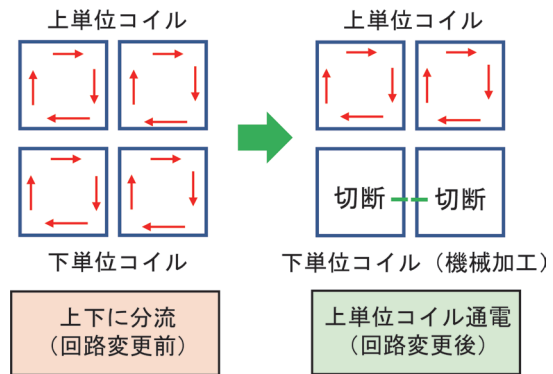


図9 回路変更のための機械加工方法

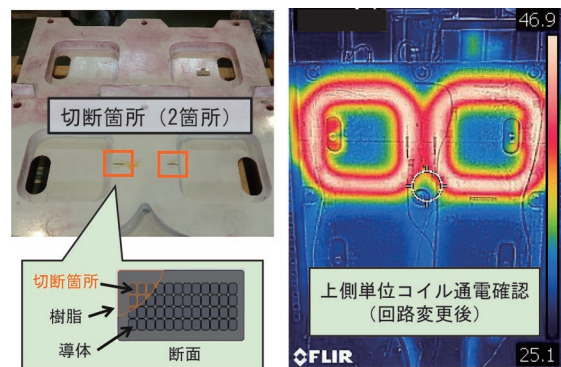


図10 通電確認 (回路変更後)

5. 浮上案内コイルの電磁加振試験

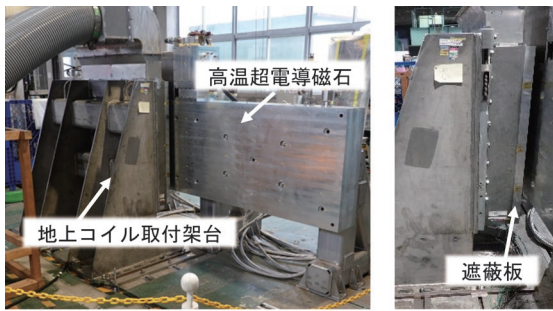
浮上案内コイルの上側単位コイルのみを対象として、500km/h走行時の電磁力相当の負荷を与える電磁加振試験を実施した。

5.1 電磁加振試験方法

試験構成を図11、供試体の外観を図12に示す。供試体は、前記の機械加工を施した浮上案内コイルである。上下変位は、地上コイル取付用架台で高さを調整し、図13に示すように43.9mm(均衡変位)と-20mm(電磁力強化)の2パターンとした。超電導磁石⁵⁾は起磁力700kAの直流励磁とした。浮上案内コイルの加振周波数は100Hzとし、直流電流990A、交流電流990A(100Hz)を上側単位コイルに通電した。

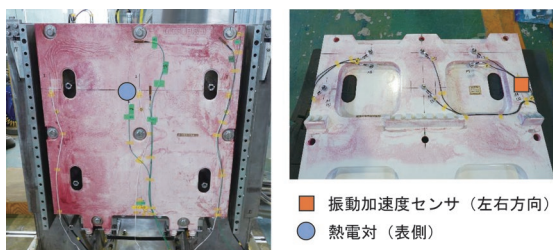
5.2 試験結果

電磁加振で取得した浮上案内コイルの振動波形を図14に示す。また、振動加速度センサの設置位置を図12(b)に示す。どちらの設置位置でも上側単位コイルに加振力が与えられていることを確認した。振動加速度の基本波成分の振幅値の比較を図15に示す。上下変位43.9mm(均衡変位)の振動加速度の振幅は20m/s²程度となったの



(a) 試験状況 (b) 側面

図 11 電磁加振試験の構成



(a) 表側 (b) 裏側

図 12 供試体の外観

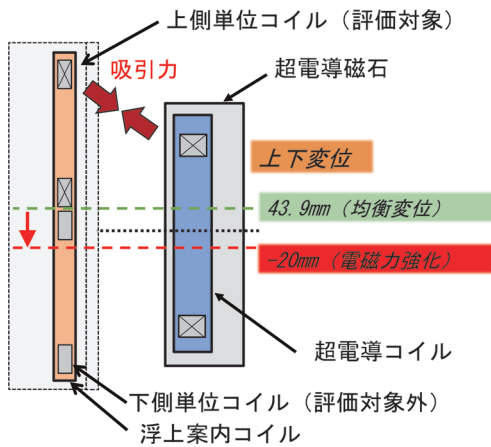
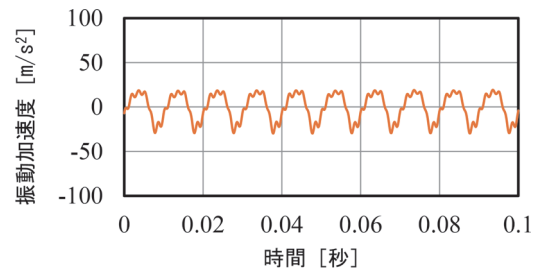


図 13 上下変位の高さ調整 (断面図)

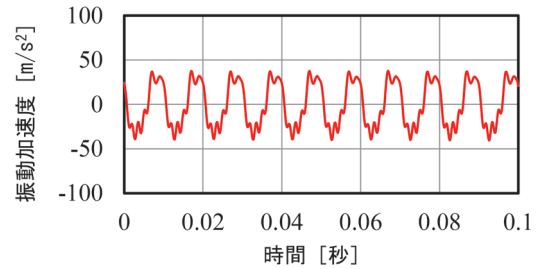
に対して、上下変位 -20mm (電磁力強化) は 35m/s^2 程度となり、位置の変更により振動加速度が約 1.7 倍大きくなり、電磁力が強化されていることを確認した。

6. 電磁加振試験による耐振動特性評価

機械加工を施して上側単位コイルのみに通電可能とした浮上案内コイルに対し、耐振動特性評価のための電磁加振試験を実施した。



(a) 上下変位 43.9mm (均衡変位)



(b) 上下変位 -20mm (電磁力強化)

図 14 電磁加振試験の振動波形 (左右方向)

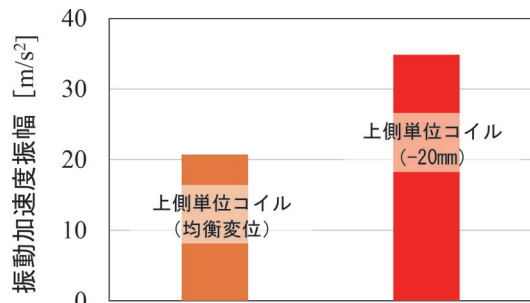


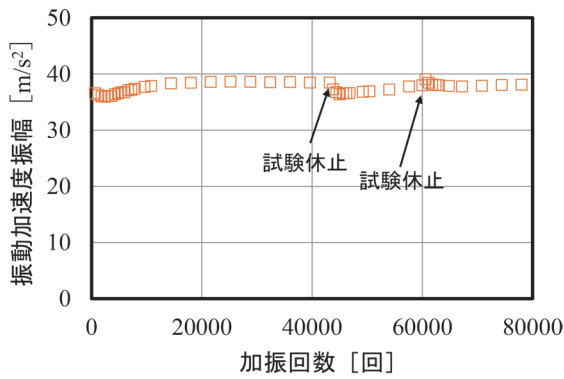
図 15 振動加速度振幅の比較
(基本波成分：左右方向)

6.1 試験条件

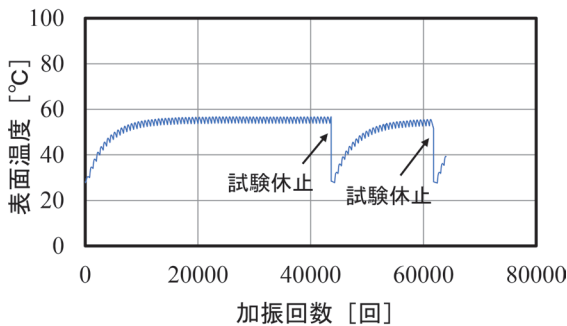
上下変位は -20mm (電磁力強化) として、通電電流の大きさは 5.1 節と同一とした。通電パターンはコイルの温度上昇を考慮して、300 秒間の中で、6 秒間通電、294 秒間休止のサイクルとした。このサイクルを 130 セット行ったため、総加振回数は 78000 回となる。電磁加振試験中に、図 12(b) に示す位置の振動加速度と温度の各データを取得した。

6.2 試験結果

電磁加振時に取得した振動波形に対して基本波成分の振幅値の経時変化を確認した。浮上案内コイルの振動加速度と温度を図 16 に示す。図 16(a) に示すように、試験開始時と試験休止後の再開のタイミングで振動加速度が変化したものの、その後は一定値となった。図 16(b)



(a) 振動加速度振幅



(b) 温度

図 16 耐振動特性評価

の温度データより、振動加速度の変化は、通電に伴う温度変化の影響によるものと考えられる。

また試験前後にモールド樹脂の表面状態を確認するため、カラーチェックを行った。今回の加振回数では、クラック等の異状は検出されなかった。また、加振中においても切削した箇所での局所的な発熱などの異状は見られなかった。以上により、実際の浮上案内コイルにおいても耐振動特性を評価できる見通しが得られた。

7. まとめ

実際の浮上案内コイルの振動に対する余寿命評価手法を確立するため、機械加工により回路構成を変更した浮上案内コイルと高温超電導磁石を対向させ、評価対象の上側単位コイルのみを通電して加振する電磁加振試験を実施した。

数値解析と取得した振動データより、高温超電導磁石と浮上案内コイルの上下変位を調整することで、上側単位コイルに500km/h走行相当の電磁力が加えられることを確認し、耐振動特性を評価できる見通しを得た。今後は長期間の電磁加振試験により、振動に対する余寿命評価を実施する予定である。

文献

- 1) 藤本健, 饗庭雅之, 鈴木裕之, 梅木健, 中村誠一: 山梨実験線浮上案内コイルの電磁力特性, 鉄道総研報告, Vol.13, No.9, pp.15-18, 1999
- 2) 饗庭雅之, 村井敏昭, 鈴木正夫, 藤本健, 戸来年樹, 長嶋賢: 超電導磁石磁界を利用した地上コイル電磁加振試験, 鉄道総研報告, Vol.14, No.11, pp.33-38, 2000
- 3) 田中実, 饗庭雅之, 鈴木正夫: 地上コイル耐久性評価用電磁加振試験装置の開発, 鉄道総研報告, Vol.20, No.8, pp.17-22, 2006
- 4) 松江仁, 饗庭雅之, 鈴木正夫: FRP プッシュを適用した推進浮上案内兼用コイルの応力評価, 鉄道総研報告, Vol.22, No.11, pp.17-22, 2008
- 5) 水野克俊, 田中実, 小方正文: 希土類系高温超電導磁石を用いた地上コイル電磁加振試験, 鉄道総研報告, Vol.34, No.11, pp.5-10, 2020

超電導き電ケーブルの電気特性評価

福本 祐介* 赤坂 友幸* 荒井 有気** 富田 優***

Evaluation of Electrical Characteristics of Superconducting Feeder Cables

Yusuke FUKUMOTO Tomoyuki AKASAKA Yuuki ARAI Masaru TOMITA

DC electric railway systems are widely used in Japan. However, they have some problems, such as voltage drops, limited use of regenerative brakes and energy transmission losses. We have been developing superconducting feeder cables for DC feeder systems as a next-generation railway system without transmission losses solving these problems. In order to apply this to railway systems, it is necessary to develop the method of connecting a superconducting feeder cable to a feeder circuit, and to meet the required specifications from railway systems. In this paper, we introduce R&D for the application of superconducting feeder systems to commercial lines.

キーワード：超電導き電システム，電圧降下，省エネ，回生エネルギー，送電損失

1. はじめに

直流電気鉄道では、数 MW の運転電力を 3000V, 1500V, 750V, 600V といった電圧で電送するため、電流は数千 A と大きく、都市圏の過密線区では特にその傾向が顕著である。そのため、き電回路を構成するき電線（銅やアルミ）や帰線（レール）などの電気抵抗に起因する電圧降下や、これに伴う送電損失が発生するなどの課題がある。特に架線電圧の降下が大きい場合は安定運行の妨げになるため、これを確保するために狭い間隔で変電所が設置されている。これら課題の解決に向け、電気抵抗ゼロで送電が可能な超電導き電システムの開発に取り組んでいる¹⁾。

超電導き電システムは、液体窒素温度で動作する高温超電導材料とこれを冷却する冷媒流路を一本のケーブルとして構成した超電導き電ケーブルと、冷媒である液体窒素の循環ポンプと冷凍機などで構成した冷却設備で構成される（図 1）。超電導き電ケーブルを図 2 のように変電所から鉄道路線沿いに敷設し従来のき電線と接続した場合、ほとんどの電流が電気抵抗ゼロである超電導き電ケーブルに流れることから、変電所の送り出し電圧を維持し、接続点を疑似的な変電所と見なすことができる。これにより架線電圧の変動を抑制し、安定運行に寄与する。また、き電回路の長さが見かけ上短くなることから、その分だけ送電損失を低減できるとともに、近接車両との電氣的距離が短くなるため、回生電力の融通を効率よく行うことができるといった省エネルギー効果も期待できる。さらに、導入を進めることで変電所の集約化や、

変電所新設の代替手段としても期待されている。

鉄道は、人々の移動手段や貨物の輸送手段として日常的に利用される公共交通機関であることから、高い安全性、信頼性が求められる。そのため、鉄道システムに組み込まれる設備、機器は各鉄道事業者が規定する実施基準、性能を満足する必要がある。また、何らかの故障が

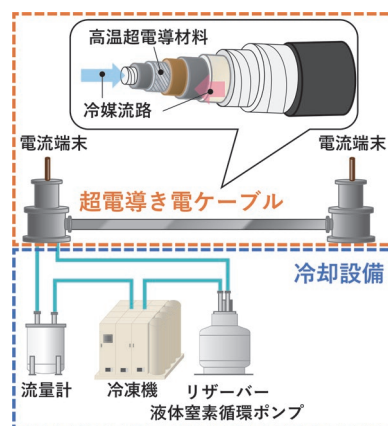


図 1 超電導き電システムの構成

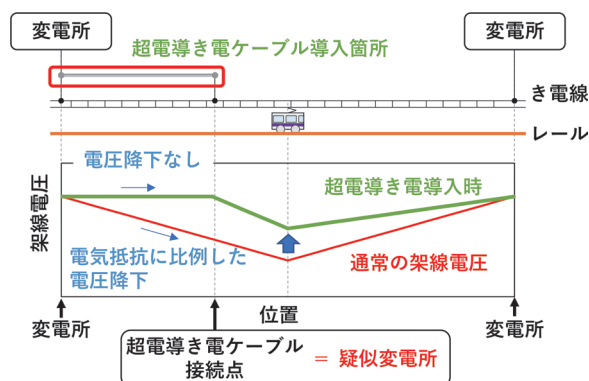


図 2 超電導き電ケーブルによる架線電圧の安定化

* 浮上式鉄道技術研究部 超電導・低温研究室
 ** 浮上式鉄道技術研究部 電磁気研究室
 *** 浮上式鉄道技術研究部

生じた場合には、その影響範囲を限定的とするための処置が講じられている。超電導き電システムもまた、鉄道システムに適用するためには、異常時に設備を保護するための保護回路を構築するとともに、鉄道システムからの要求仕様を満足し、鉄道の故障に耐える性能を有する必要がある。本報告では、高密度線区における実使用を想定して開発した400m級の超電導き電システム²⁾を対象に、鉄道システムへの導入に向け、超電導き電システムの保護回路と鉄道システムからの要求仕様並びに鉄道における過電圧や過電流を想定した試験について報告する。

2. 超電導き電システムの保護回路

直流電気鉄道の基本的なき電回路の例を図3に示す。整流器用変圧器により降圧された交流1200Vをシリコン整流器により直流1500Vへ変換し、直流母線と接続されている。直流母線には各方面へ電気を送る回線が並列に接続され、回線ごとにき電回路を保護するための設備が組み込まれている。特に保護継電器は、異常や故障が発生した場合に電圧や電流などの異常状態を検出し、その部分を速やかに系統から切り離す指令を出す役割を担う装置で、短絡選択継電器や地絡過電圧継電器などがある。短絡選択継電器は、直流変流器により変換された計測用電流の時間変化を監視することでき電回路の短絡故障を検出し、地絡

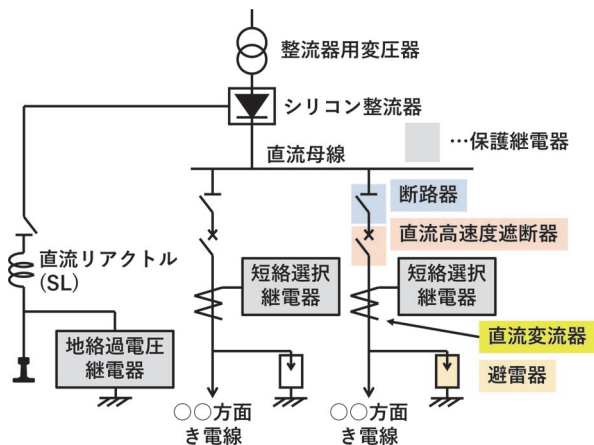


図3 き電回路の一例

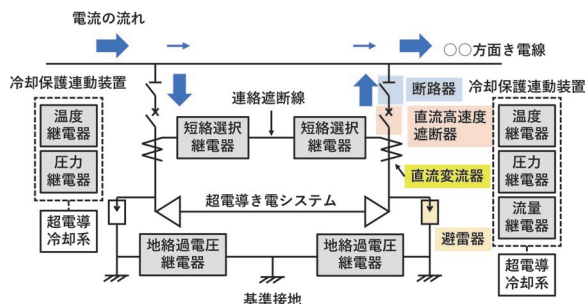


図4 400m級超電導き電システムの保護回路

過電圧継電器は、レール電位と変電所の接地電位を比較することで、変電所の構内における地絡故障を検出する。これら保護継電器により異常を検出した場合は、直流高速度遮断器へ信号を送りき電回路を開放することで、設備や電車を保護する。

超電導き電システムを鉄道システムへ適用する場合も、同様の保護回路が必要となる。例として、実証試験に向けて構築した400m級超電導き電システムの保護回路を図4に示す。既設のき電線と並列に超電導き電システムを接続しており、通常時には電気抵抗ゼロの超電導き電システム側にはほとんどの電流が流れる。超電導き電システム内で故障が発生した場合は速やかに切り離すこと、および既設き電線側の短絡故障時の過電流から超電導き電システムを保護することを目的としている。図3で示した設備とほぼ同じ構成であるが、通常の地絡故障検出がレールと変電所の接地との電位差を監視し検出するのに対し、400m級超電導き電システムは近くに本線レールがないため基準接地を設け、それと両端に設けた接地の電位差を監視した。このほか特有の保護として、冷却保護運動装置を開発した。超電導き電ケーブルを冷却する冷媒の温度、圧力、流量といったパラメーターの正常範囲を設定し、それから逸脱した場合には直流高速度遮断器を開放する。また、片側の保護回路が動作した際には、完全に本線と切り離すため逆側の直流高速度遮断器も開放する連絡遮断を設けて構成した。これら保護回路の構築後は、鉄道事業者のしゅん功検査に準じた内容の確認試験を実施し、機能の正常動作を確認した。

3. 鉄道システムからの要求仕様

鉄道システムを構成する各機器は、所要の性能を持っていることが必要である。例えば、電力ケーブルでは、導体抵抗、絶縁抵抗、耐電圧などの項目があり、確認試験の方法までが仕様書に定められている。しかし、超電導き電システムは新しい技術であるため、鉄道へ導入するためにどのような項目に対してどのような性能が必要であるか整理されていない。そこで既存設備の仕様を参考に、仕様書に規定すべき項目、性能について検討を行っ

表1 超電導き電システムの仕様書に規定すべき項目

○ 送電ケーブルに関する項目
電圧降下*, 臨界電流値*
雷インパルス耐電圧*, 耐電圧*, 絶縁抵抗*
断熱管防食層: 常温(引張強さ, 伸び),
耐加熱性(引張強さ, 伸び), 耐加熱変形性
○ 冷却に関する項目
圧力範囲, 液体窒素流量, 温度範囲

*超電導状態(77.3K)における仕様

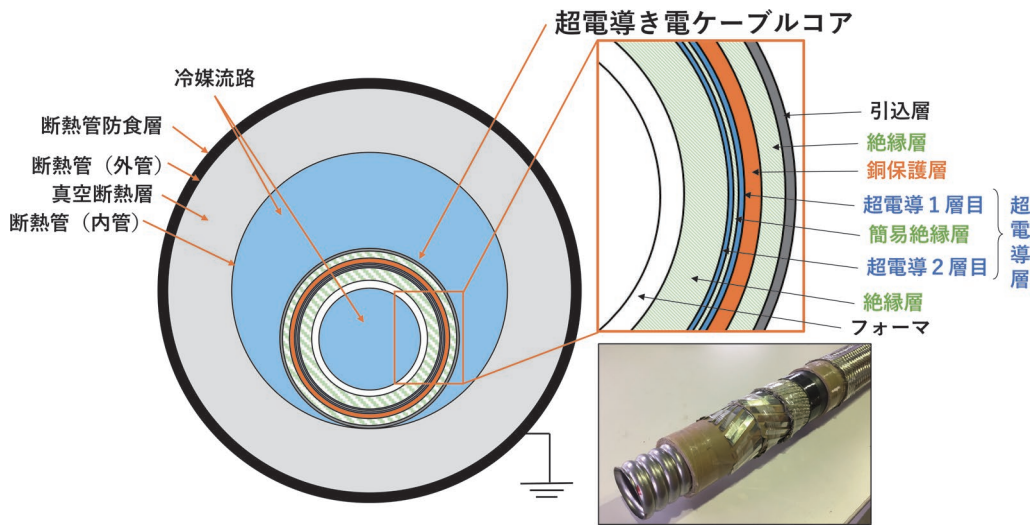


図5 超電導き電ケーブルの構造図

た。整理した項目を表1に示す。通常のケーブルであれば通電性能として電気抵抗が規定されるが、超電導状態では電気抵抗がないため、通電性能を示す代わりの項目として、超電導状態における電圧降下と臨界電流値について規定した。断熱管防食層の項目は、超電導き電ケーブル内で絶縁破壊が生じ断熱管が課電された場合、人体が接触し感電する可能性があることから、通常のケーブルに絶縁として使用されているポリエチレンなどと同等の項目とした。また、超電導状態で送電するためには冷却が必要になることから、冷却に関する項目として冷媒の圧力、温度、流量について規定した。これらの項目については、既存のJIS規格などがあるものはそれを適用し、JIS規格のない一部の試験については、高压ガス保安法ならびに一般高压ガス保安規則関係例示基準を適用した確認試験を実施し、すべての項目について、その性能を有することを示した。

3.1 400m級超電導き電ケーブルの通電性能

400m級超電導き電ケーブルの構造を図5に示す。超電導き電ケーブルコアは、フォームにSUSコルゲート管を用い、その外周に絶縁層（半合成紙）と超電導層（高温超電導線材）、銅保護層（銅編素線）を巻き付け、冷却のため真空断熱層を有する断熱管に内包する構造である。常規電流を通電するのは超電導層であり、短絡電流などの故障電流から超電導層を保護する目的で、銅保護層を設けている。

常規電流の通電を担う超電導層は、路線状況に合わせた電流容量とする必要がある。高温超電導材料は電気抵抗ゼロで流せる電流容量が決まっており（臨界電流値）、その基準として電界基準 $1\mu\text{V}/\text{cm}$ が定められている。都市圏路線の導入に必要な電流容量から臨界電流値は8000A以上として設計・製作した。現在の超電導線材1

本あたりの臨界電流値が180A程度であることから、超電導層を2層構造とし、1層目に22本、2層目に23本の超電導線材を巻線した。なお通電評価に向け、層間には簡易絶縁を設けている。

製作した超電導き電ケーブル切り取ったテストピースに対して、JIS H 7305³⁾を準用した下記手順による通電試験を実施した。

- (1) テストピースに電流導入端子と電圧タップを取り付ける。
- (2) 電流導入端子を直流電源に接続する。
- (3) テストピースを液体窒素容器（解放容器）に入れ、大気圧液体窒素（77.3K）を充填する。
- (4) テストピースが十分に冷却されたことを確認し、通電を開始する。
- (5) 電圧タップ間の電圧が電界基準 $1\mu\text{V}/\text{cm}$ を超えたら通電を止め、電界基準時の電流値を臨界電流値とする。

図6に2層同時通電時の結果と、参考として各層毎の通電試験結果を示す。各層の臨界電流値の和は9315A、2層同時通電時の臨界電流値は8740Aであり、設計値である8000Aを越える臨界電流値を確認した。双方の

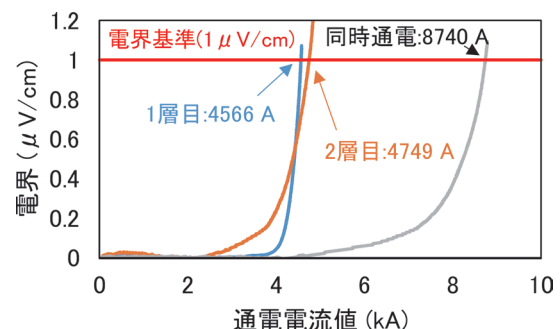


図6 通電試験結果（77.3K）

差については、2層同時通電時には構成する超電導線材に印加される磁場が大きくなることや、各層の電極と超電導層の接続抵抗の差が影響していると考えられる。

一方、営業設備への導入を想定した場合、長期間にわたって大きな負荷電流が通電し続けられることになる。そこで、400m級超電導き電システムに負荷電流を模擬した直流電源を接続し、1ヶ月程度の連続通電試験を実施した。試験回路を図7に示す。片側の端末では、簡易絶縁層を挟んで2層構造となっている超電導層のそれぞれに対し引き出し線（電流リード）を取り付け、もう片側の端末において1層目と2層目を1つの電極で短絡することで、電流は1層目を通り逆側で2層目へ移って戻る回路を構成した。これにより、1本の超電導き電ケーブルに対して、直流電源出力の2倍の電流に相当する熱的・機械的なストレスを与えた。今回の試験では、5000A相当の電流値を通電（直流電源出力で2500A）した。1ヶ月にわたる通電波形及び電流リード間電圧の測定結果を図8に示す。通電電流値は一定とし、電流リードの抵抗により0.08V程度の抵抗が発生しているが安定しており、継続的な通電による電気抵抗の上昇等はなく、連続的な負荷電流に対しても正常であることを確認した。

3.2 400m級超電導き電ケーブルの耐電圧性能

超電導き電ケーブルを鉄道システムへ適用するために

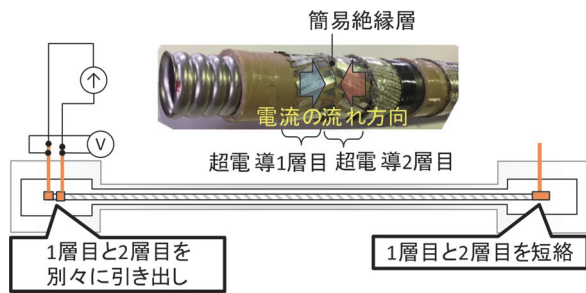


図7 連続通電試験の電気回路

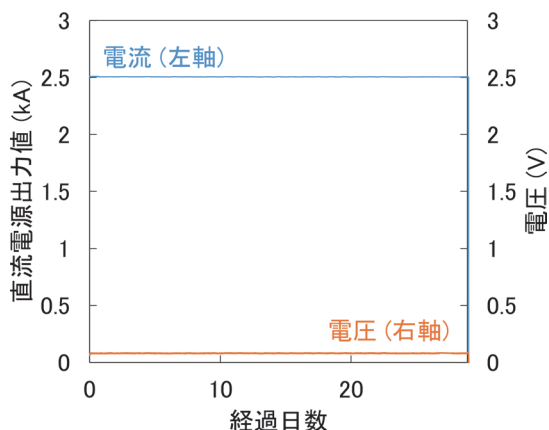


図8 直流電源の出力値および電流リード間電圧

は、既存の1.5kV電力ケーブルと同等の耐電圧性能として、周波数耐電圧5.5kV、インパルス耐電圧20kVを満足する必要がある。周波数耐電圧に対しては部分放電フリー、インパルス耐電圧に対しては破壊しない設計とした場合、使用している絶縁紙の性能（部分放電フリーに対する設計ストレス22kV/mm⁴⁾、インパルス電圧に対する設計ストレス83kV/mm⁵⁾）から、必要な絶縁厚は0.3mm以下となり、これは絶縁紙3枚分の厚みとなる。これに対し、絶縁層は巻線工程における平滑層としての役割や、冷媒の往路と復路の熱交換を妨げる熱絶縁としての役割を担うことから、内側の絶縁層（フォーマと超電導層間）で4mm、外側の絶縁層（超電導層と引込層間）で2mmの厚さとしているため、鉄道の要求仕様に対して十分な耐電圧性能を有していることになる。システム組み立て後には実際に耐電圧試験を実施し、異常のないことを確認した。

4. 過電圧や過電流への対応

超電導き電ケーブルを直流電気鉄道へ適用した際には、雷などによる過電圧や短絡故障などによる過電流が印加される可能性がある。日常的に生じるこれらの現象により絶縁破壊や焼損、性能低下が生じてはならないため、絶縁や銅材による保護を設計している。しかしながら、実際に超電導き電ケーブルを用いた確認試験はこれまでに実施されていないため、400m級超電導き電システムから切り出した短尺サンプルを製作し、雷インパルス耐電圧試験および短絡電流通電試験を実施した。

4.1 雷インパルス耐電圧試験

電力設備や車両の高圧機器は、常規使用電圧に耐えることはもちろんであるが、ある程度のサージ電圧にも耐える必要がある。電気鉄道における過電圧は、雷によるもの（雷サージ電圧）のほか、スイッチ開閉時の過渡的な過電圧（開閉サージ電圧）などがあり、それらに対して機器の耐電圧性能や避雷器の設置など絶縁協調が図れている⁶⁾。超電導き電システムは変電所同等の絶縁協調と見なし、インパルス耐電圧20kVを目標とし、試験を実施した。

試験回路を図9に示す。直線状のテストピースに対して、液体窒素浸漬冷却下において導体層（超電導層と銅保護層）と金属遮へい層との間に、インパルス発生器により20kVの雷インパルス耐電圧を印加し、これに耐えるかどうか調べた。なお、JIS C 3005⁷⁾を適用し、波形の裕度は、波頭長において0.5μs以上5μs以下、波尾長において40μs以上60μs以下の範囲を許容するものとした。また、特に規定がない限り導体側を負極性とし、電圧印加回数を3回とした。

試験結果を表2に、インパルス波形を図10に示す。すべての印加電圧は20kV以上で規定範囲内の波形で

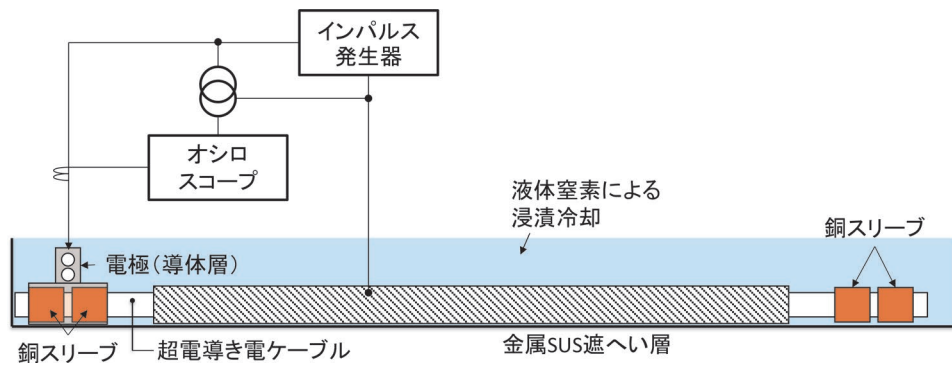


図9 雷インパルス耐電圧試験回路

表2 雷インパルス耐電圧試験結果

試験番号	充電電圧 (kV)	印加電圧 (kV)	波頭長 (μs)	波尾長 (μs)	試験結果
1-1	-22.0	-20.1	1.7	54.9	良
1-2	-22.0	-20.3	1.8	54.7	良
1-3	-22.0	-20.3	1.7	54.3	良

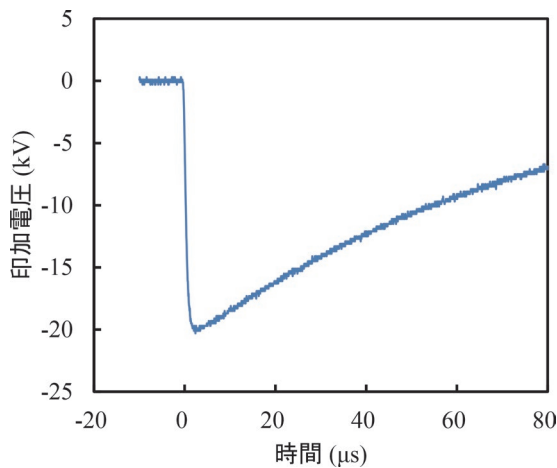


図10 インパルス波形

あった。印加後に絶縁破壊が確認されなかったことから、十分な耐電圧性能を有することを確認した。

4.2 短絡電流通電試験

超電導き電システムと既設設備との接続には保護のため直流高速度遮断器を介する。遮断器の性能上、直流遮断の限度は推定短絡電流：50kA、実遮断電流：25kA、突進率： 3×10^6 A/sと定められている。よって、実遮断電流25kA以上で超電導および絶縁の性能を維持することを目標とし、超電導き電ケーブルの短絡電流通電試験を実施した。

短絡電流通電試験回路を図11に示す。整流器で直流1500Vに整流した電力を、抵抗および空芯リアクトルを介して液体窒素により浸漬した超電導き電ケーブルに

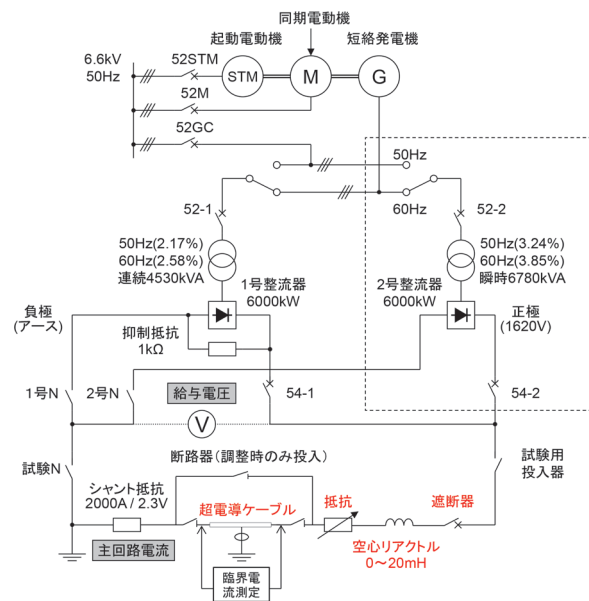


図11 短絡電流通電試験回路

表3 短絡電流通電試験条件

試番	推定短絡電流値 (目標)	リアクトル (L)	備考
1	10 kA	あり	—
2	20 kA	あり	—
4	30 kA	あり	—
3	30 kA	なし	高突進率

通電した。抵抗 R とリアクトル L を調整し、推定短絡電流値および突進率を調整した。なお、短絡電流は直流高速度遮断器により遮断した。

表3に試験条件を示す。短絡電流通電中は、実通電電流値を測定し、短絡電流通電後に超電導き電ケーブルの絶縁抵抗測定（メガーチェック）および臨界電流測定を実施した。なお、推定短絡電流値は30kAを上限とし、段階的に調整した。

通電した短絡電流の波形を図12に示す。超電導き電

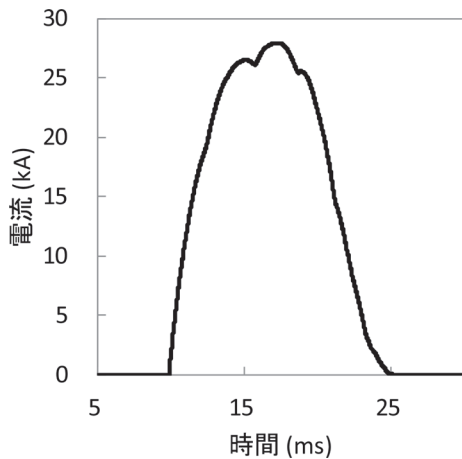


図 12 短絡電流波形（試番 4）

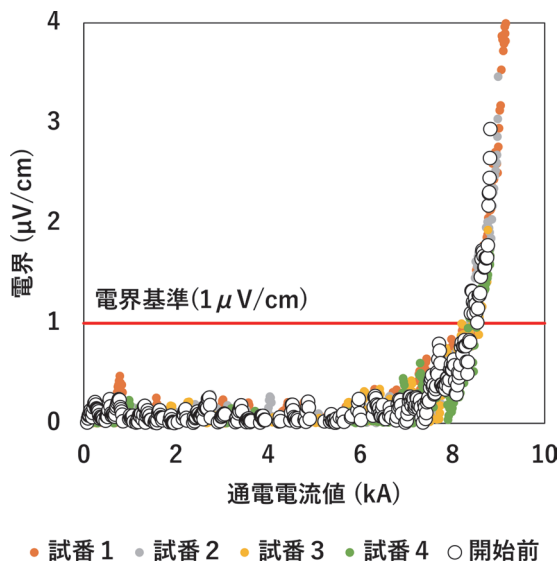


図 13 短絡電流印加前後の電流－電圧特性

ケーブルに通電された最大電流値は 27.94kA、最大突進率は $11.5 \times 10^6 \text{A/s}$ であった。短絡電流通電前後で超電導き電ケーブルの絶縁抵抗および臨界電流値に変化がない（図 13）ことから、短絡電流通電による発熱、およびそれに伴う電磁力による性能の低下はないといえる。

5. まとめ

超電導き電ケーブルは、従来の電気抵抗に起因する課題を解決できる技術として期待されているが、これまで

にない新しい技術であるため、その特性が鉄道システムへ適合することを示す必要がある。本報告では実用化に向けた取り組みの一例として、超電導き電ケーブルの電気特性について検討、評価試験を実施し、以下の知見を得た。

- (1) 鉄道システムへの接続に必要な超電導き電システムの保護回路について、従来の保護継電器などを用いて構築し、正常に動作することを確認した。
- (2) 超電導き電ケーブルに必要な仕様について整理し、確認試験により電気的性能を満たすことを確認した。また、営業運転を想定し、直流電源による 5kA 相当の通電試験を約 1ヶ月間、連続的に実施し、連続運転に対する安定性を確認した。
- (3) インパルスによる過電圧や短絡故障による過電流を想定した試験を実施し、絶縁抵抗や超電導特性の低下がなかったことから、想定される異常状態に耐えられる見通しを得た。

なお、保護や仕様の考え方は鉄道事業者により異なるため、導入箇所に応じて検討する必要がある。様々な状況に対応できるよう、今後も技術開発を進める。

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) Masaru Tomita, et al., "Energy-saving railway systems based on superconducting power transmission," Energy, 122, pp.579-587, 2017.
- 2) 鉄道総合技術研究所：超電導き電システムの電気鉄道（直流 1500V）への適用試験を実施しました, News Release 2019年 8月 6日
- 3) JIS H 7305：2010：超電導—臨界電流の試験方法— 銀シースビスマス 2212 及びビスマス 2223 酸化物超電導線の直流臨界電流
- 4) M. Yagi, et al., "Design and Evaluation of 275 kV - 3 kA HTS Power cable," Physics Procedia, Vol.45, pp.277-280, 2013.
- 5) 露木和彦, 他：超電導直流ケーブルの電気絶縁に関する研究, 低温工学, 35 巻 7号, pp.350-356, 2000
- 6) 電気鉄道ハンドブック編集委員会：電気鉄道ハンドブック, コロナ社, p.568, 2007
- 7) JIS C 3005：2014：ゴム・プラスチック絶縁電線試験方法

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¹⁾。「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²⁾、超電導線材の製作および特性評価³⁾、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⁴⁾⁵⁾。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⁶⁾⁷⁾。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。

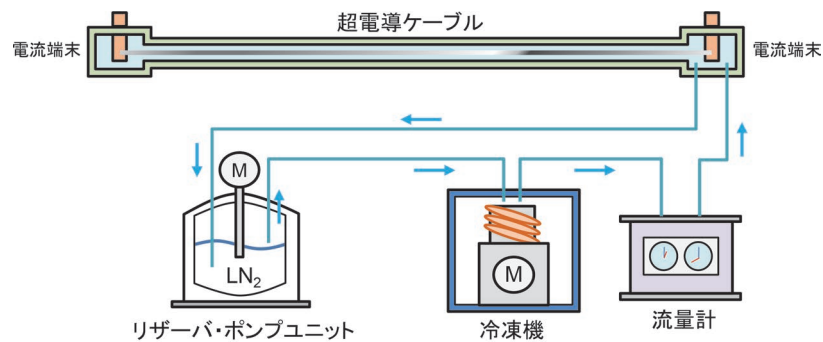
2.2 液体窒素冷却方式の検討

液体窒素（LN₂）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）。

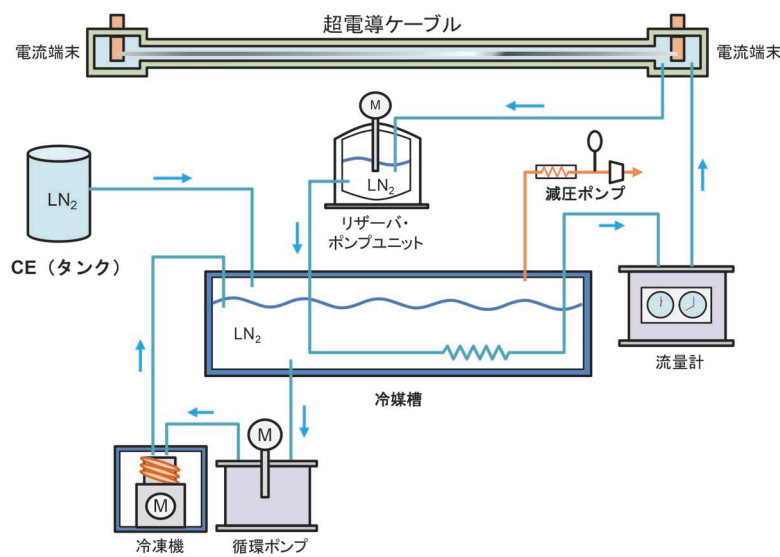
直接冷却方式とは超電導ケーブルの液体窒素を冷凍機などで「直接」冷却する方式であり、冷却効率がよく、冷凍機の出力調整により冷媒の温度制御に対する応答性がよい、などのメリットがある。

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（LN₂）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。

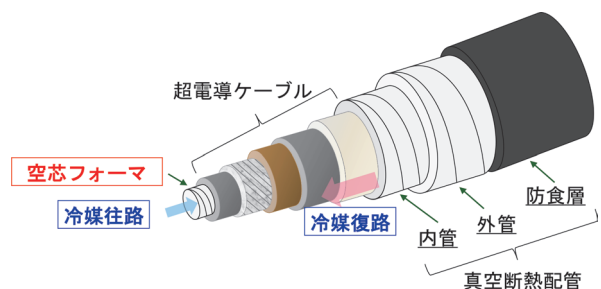


図2 冷媒の流路

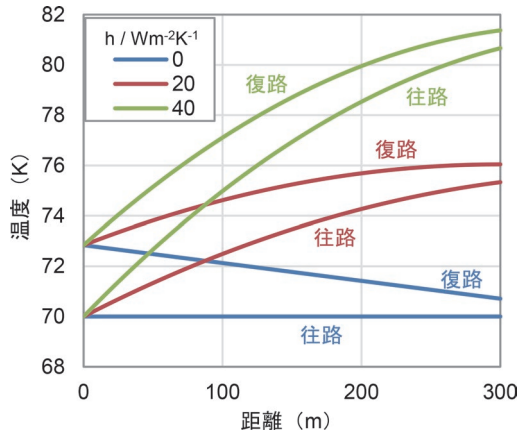


図3 超電導ケーブルの温度分布
(長さ300m, 流量10L/min)

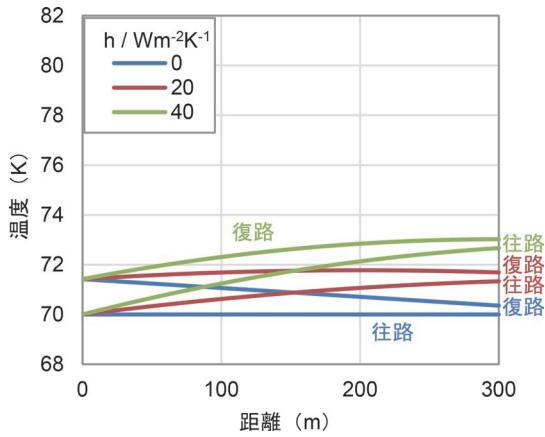


図4 超電導ケーブルの温度分布
(長さ300m, 流量20L/min)

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に必要となる。

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、 ρ 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、 κ を熱伝導率、 σ 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 、 κ 、 σ 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

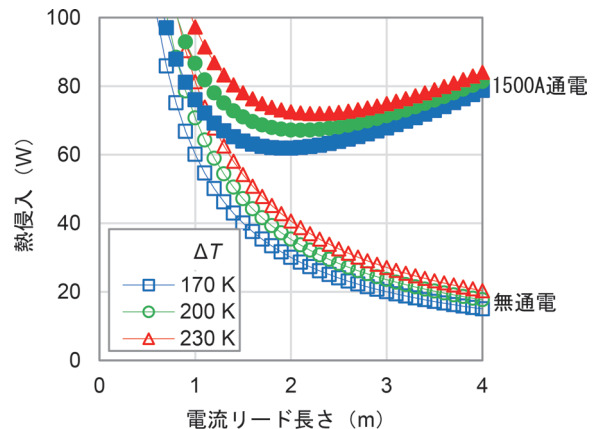


図6 電流リード長さと熱侵入の関係

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

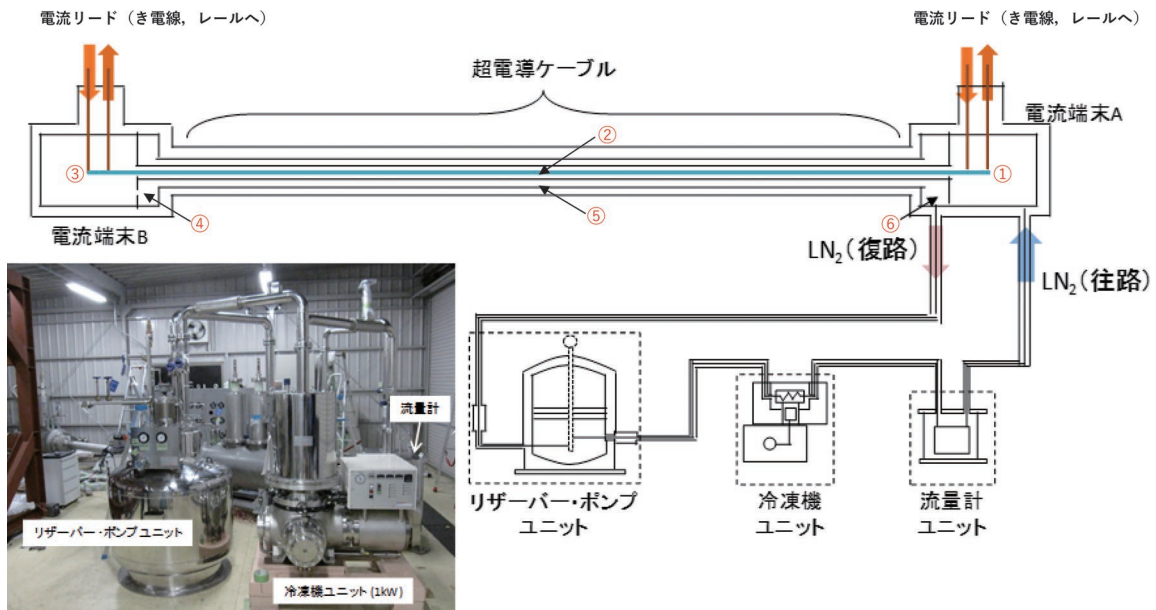


図7 冷却システムの外観とフロー図

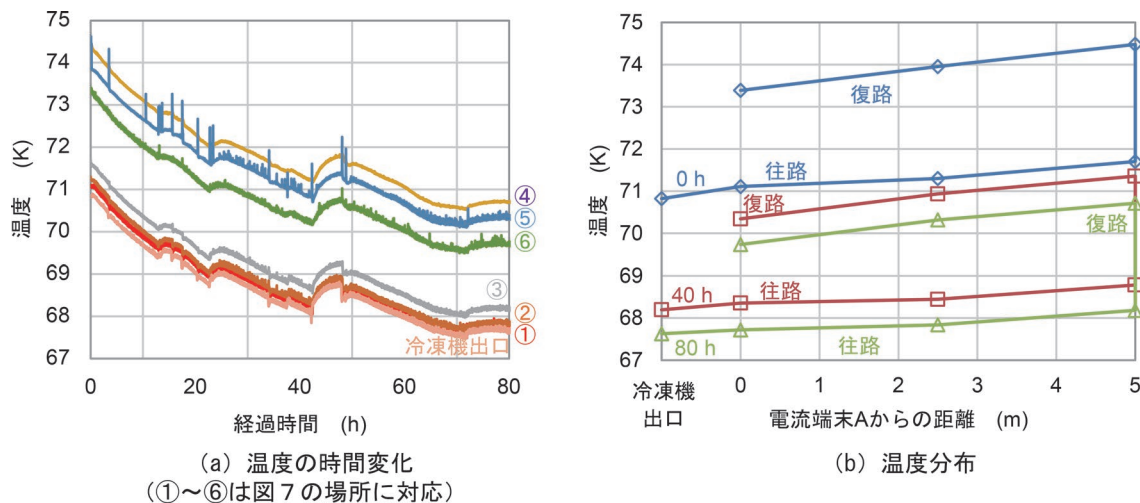


図8 冷却循環試験時の各部の温度変化

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.

特集：浮上式鉄道の技術と超電導の実用に向けた研究

二ホウ化マグネシウム線材を用いた超電導コイルの開発

恩地 太紀* 小林 祐介* 富田 優**

Development of Superconducting Coils Using MgB₂ Wires

Taiki ONJI Yusuke KOBAYASHI Masaru TOMITA

To realize carbon neutrality, we are developing energy storage technology. In the railway field, superconducting magnetic energy storage (SMES) has an advantage assuming a unique power load that frequently changes by train powering and braking. So, we have been developing superconducting coils for SMES using MgB₂ superconducting wire which has low cooling cost and manufacturing cost. It has been reported that MgB₂ superconducting wire is sensitive to bending strain and MgB₂ wire deteriorates under certain bending strain. Therefore, we evaluated superconducting characteristics of superconducting stranded conductors. Also, the deterioration due to the dent was investigated. As a result, it was clarified that not only bending strain but also dents due to compression lead to deterioration of superconducting characteristics.

キーワード：超電導, 二ホウ化マグネシウム, 電力貯蔵装置, 曲げ歪み, 超電導コイル

1. はじめに

近年、多くの国でカーボンニュートラルが掲げられ、温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする脱炭素社会の実現に向け、活発な取り組みがなされている。日本の二酸化炭素総排出量は2020年度で11億4900万 ton-CO₂であり、エネルギー転換部門の直接排出量は約4割を占める¹⁾。このほとんどは発電に伴うものであり、その中でも石炭や石油といった発電燃料の燃焼による火力発電が大半を占めている。そのため、電源の脱炭素化のカギとして、再生可能エネルギーの導入拡大による主要電力化が検討されている。しかしながら、太陽光や風力といった再生可能エネルギーは自然条件によって出力が変動するため、この調整力として、電力貯蔵装置や水素、デマンドレスポンスの活用といった取り組みがなされ、特に電力貯蔵では大容量化や数時間の連続充放電の実現に向けた技術開発が望まれている。

一方、鉄道分野においても再生可能エネルギーに関する取り組みがなされている。主に駅や駅ビル等の照明やバリアフリー設備に係る電力の補助として活用されているが、調整力としての電力貯蔵技術開発が進展すれば、今後運転用電力として賄うことも十分に想定される。

現在、鉄道分野における電力貯蔵は、他の車両で消費しきれない回生電力を一時的に蓄えるものとして、リチウムイオン電池やニッケル水素電池を用いた電力貯蔵が主に使用されている。鉄道車両の駆動電力は力行とブレーキを繰り返すことから、充放電の頻度が高い特有の

負荷である。しかしながら、従来の電池は化学反応を利用しているため、急速な充放電は難しく、回数に制約があるといった課題を有する。

そこで鉄道総研では、超電導技術を用いた電力貯蔵の研究開発を進めている²⁾。超電導とは、物質をある温度まで冷却することで電気抵抗が突然ゼロになる現象（完全導電性）のことを指し、この現象が生じる物質を超電導体と呼ぶ。超電導となる温度を超電導転移温度 (T_c) といい、この T_c が比較的高い (25K 以上) 超電導体は一般に高温超電導体と呼ばれる。冷媒に従来の超電導体で必要とされた液体ヘリウム (沸点 4.2K) を使用せずに超電導状態となることから、実用的な材料として応用に向けた研究開発が活発に進められている。

本報告では、完全導電性を利用し、超電導体によるコイルに電力を磁気エネルギーとして直接保存する電力貯蔵装置である超電導磁気エネルギー貯蔵装置 (以下、SMES) について概略を述べ、超電導コイルへの適用を想定した新しい超電導体である二ホウ化マグネシウム (MgB₂) の特性評価について報告する。

2. 超電導磁気エネルギー貯蔵装置 (SMES)

SMES とは、超電導線材をコイル状に巻いた超電導コイルに直流電流を流すことでエネルギーを貯蔵する装置である。超電導の完全導電性により、超電導コイルに電流を流し続けても発熱せず、また、超電導コイルのインダクタンス L [H] と抵抗 R [Ω] に依存する電流の減衰時定数 ($\tau = L/R$) が無限大となるため、半永久的にエネルギーの貯蔵が可能となる。一方、銅などの一般的な金属材料を使用した場合は、電気抵抗を有するため時間と

* 浮上式鉄道技術研究部 超電導・低温研究室

** 浮上式鉄道技術研究部

もに電流が減衰，貯蔵エネルギーも減少する。つまり，超電導体を使用することで初めて成立する装置である。

2.1 SMES の原理

SMES は，電力を貯蔵する超電導コイル，永久電流スイッチから構成される。図1に SMES の原理を示す。充電時は永久電流スイッチを開放し，外部から超電導コイルへ通電する。電流が流れている状態で永久電流スイッチを投入することで閉回路が構成され，電流は超電導コイル内を流れ続け，磁気エネルギーとして電力を貯蔵する。放電時には，永久電流スイッチを開放することで外部に電流を放出する。SMES の貯蔵エネルギー E [J]は，超電導コイルのインダクタンス L [H]と通電電流 I [A]の二乗に比例し，式(1)で表される。そのため，貯蔵エネルギーの増加は，超電導コイルのインダクタンス，または電流の増加によって制御でき，大容量化が容易である。

$$E = \frac{1}{2} LI^2 \quad (1)$$

2.2 SMES の特徴

SMES は他の電力貯蔵装置と異なり，電気エネルギーを化学エネルギーや運動エネルギーなどに変換することなく，超電導コイルに電流を流したまま貯蔵するため変換の損失がなく，貯蔵効率が高い。また，1秒程度の短時間で貯蔵エネルギーをすべて放出できるほど入出力時の応答性が早く，さらに，化学変化や摩擦部が存在しな

いため，繰り返しの充放電に対して機器の寿命が長いことが特徴として挙げられる。これらの理由により，力行やブレーキによる短時間での電流の出し入れが想定される鉄道負荷に適した貯蔵装置であるといえる。

3. ニホウ化マグネシウム (MgB₂)

MgB₂ は 2001 年に発見された比較的新しい超電導体である³⁾。従来の超電導コイルやマグネットには，Nb-Ti (T_c : 9.5K) や Nb₃Sn (T_c : 18.3K) といった金属系超電導体を使用されており，液体ヘリウム温度まで冷却する必要があったが，MgB₂ は金属系超電導体として 39K という最も高い T_c を有し，液体ヘリウムを必要としない温度領域で動作可能な超電導体である。冷凍機による冷却も可能となることから，冷却コストの低減が期待できる。以上のことから，鉄道総研では，MgB₂ 線材を用いた超電導コイルの設計・試作に取り組んでいる。

4. MgB₂ を用いた超電導コイルの開発

MgB₂ 線材を用いた 30kJ 級の超電導コイルについて設計・検討を行った(表1)。5つのダブルパンケーキコイル (SDP) から構成し，定格電流 600A 通電時に，最大磁場 1.7T，貯蔵エネルギー 30kJ となる。

4.1 MgB₂ 線材

MgB₂ 線材 (図2) は，一般的に Powder In Tube (PIT) 法で製作される。PIT 法は，材料粉末を金属管に充填して加工・焼成する方法であり，MgB₂ 線材の場合は焼成時に他の元素との反応を防ぐため金属管にはニオブ (Nb) や鉄 (Fe)，タンタル (Ta)，ステンレスが使用される。さらに，ある程度加工した線材を束ねて金属管に挿入し，これを加工して得られる多芯線も製作される。MgB₂ 線材は焼成により超電導特性を示すが，焼成が曲

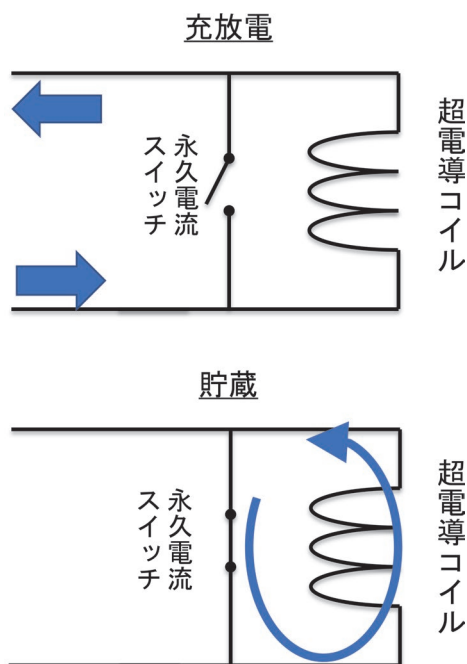


図1 SMES の原理

表1 30kJ 級 SMES コイルの仕様

使用コイル	5 ダブルパンケーキコイル (SDP)	
定格電流 [A]	600	
最大磁場 [T]	1.7	
貯蔵エネルギー [kJ]	30	



図2 MgB₂ 線材の外観

げ歪みなどの機械特性を低下させる要因となっている。

本開発では、PIT法とよく似たCTFF (Continuous Tube Filling and Forming) 法で製作された未焼成 MgB_2 線材を使用した。CTFF法とは、金属テープを水平方向に送りながら半円状に成型し、MgとB粉末を充填した後、円形に成形するとともに継ぎ目を閉じ、連続的な金属パイプとし、さらに圧延加工や伸線加工を加えて単芯線とする方法である(図3)。これを複数本束ねて多芯線とし、 MgB_2 線材が構成されている。

図4にCTFF法で製作した MgB_2 線材の断面図を示す。線材径は0.83mmであり、安定材としての銅(Cu)を中心部とし、その周りに30本のニオブ(Nb)で覆われた MgB_2 フィラメントを配置、最外層をニッケル銅(CuNi)とした。また、許容曲げ歪みは焼成前で約4%となっている。

直線状で焼成した MgB_2 線材に対して、冷凍機による伝導冷却下で通電し、磁場中の超電導特性(臨界電流値:超電導状態で流すことができる最大電流値)を評価した。結果を図5に示す。20Kゼロ磁場で約240Aの臨界電流値を示し、磁場を印加するほど、また、温度が高いほど臨界電流値が低下する。30kJ級の超電導コイルを構成する場合、1.7Tの磁場下で600Aの臨界電流値が必要となるが、 MgB_2 線材1本では不足するため、複数の線材を熱線導体化する必要がある。

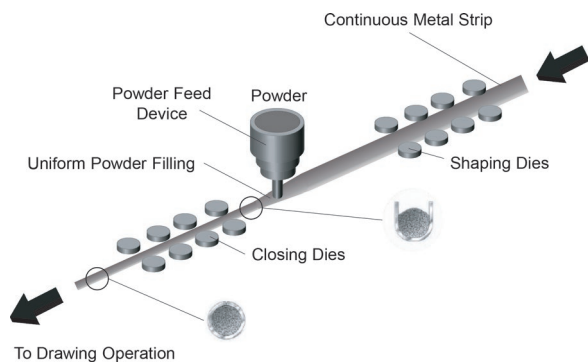


図3 CTFF法による製法過程

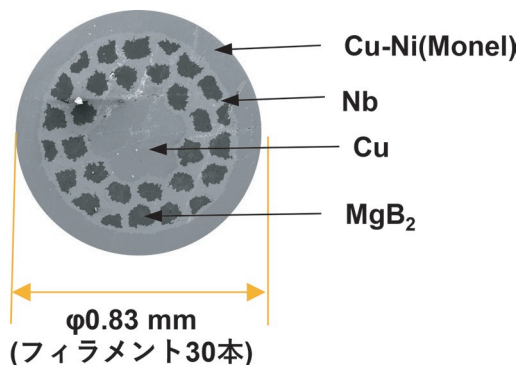


図4 MgB_2 線材の断面図

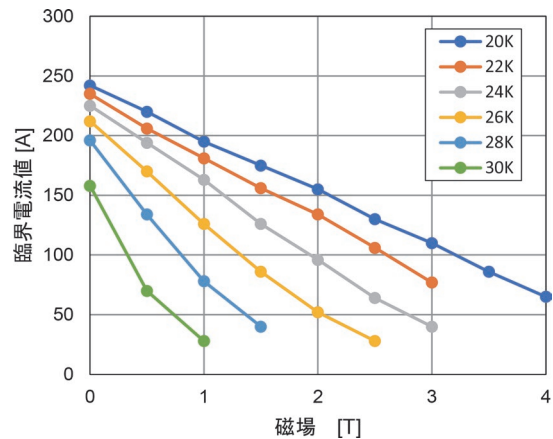


図5 伝導冷却下での臨界電流値の磁場依存性

4.2 MgB_2 線材を使用した超電導コイル

前述の通り MgB_2 線材1本では必要な電流容量が不足するため、複数の MgB_2 線材を用いて熱線導体を構成し、それを用いて超電導コイルを試作した。 MgB_2 線材は、焼成により超電導特性を示すが、この焼成により機械特性が低下する。コイルを構成する方法として、焼成を施した線材を用いて巻線するReact & Wind (R&W)法と、巻線後に焼成を施すWind & React (W&R)法の2つの方法がある。巻線する際には線材に機械的応力が加わるため、W&R法が適しているが、コイルが収まる大きな焼成炉が必要となるため、大型コイルを製作するには、R&W法を適用せざるを得ない場合がある。本開発では、W&R法でコイルを製作し、超電導特性を評価した。

構成した MgB_2 導体の断面図を図6に示す。中心のコアにはCuNi被膜のCuを使用し、その周りに MgB_2 線材8本と同径のCu線を4本、合わせて12本の線材を撚りピッチ52mmで巻き付けた形状とした。

この MgB_2 導体を用いて超電導コイルを構成した場合

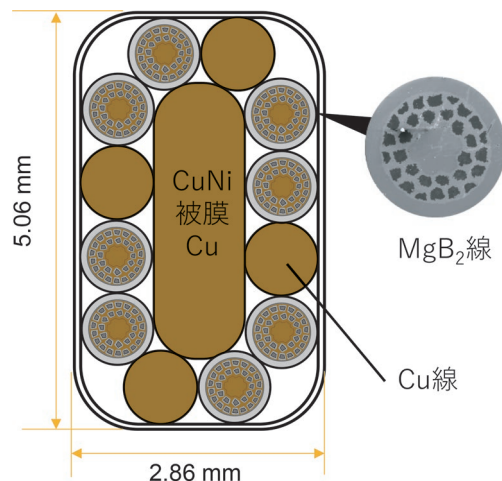


図6 MgB_2 導体の断面図

の MgB_2 線材が受ける複合曲げ歪みについて、微分幾何学に基づき解析を実施した(図7)。 MgB_2 線材の許容曲げ歪みが4%であることから、裕度をとり最大曲げ歪みが2%以下となるよう設計し⁴⁾、W&R法で MgB_2 超電導コイルを試作した(図8)。試作した超電導コイルの仕様を表2に示す。内径200mm、10ターンのシングルパンケーキコイル(SP)形状で、実機としては2つのSPが合わさったDPを複数個積層することを想定している。

冷凍機による伝導冷却下で実機を想定した外部磁場中における通電試験を実施した⁵⁾。結果を図9に示す。印加磁場1.7Tで定格電流600Aを通電させるためには、26Kより低温に冷却する必要があることを確認し、30kJ級の超電導コイルへの適用が可能であることを示した。

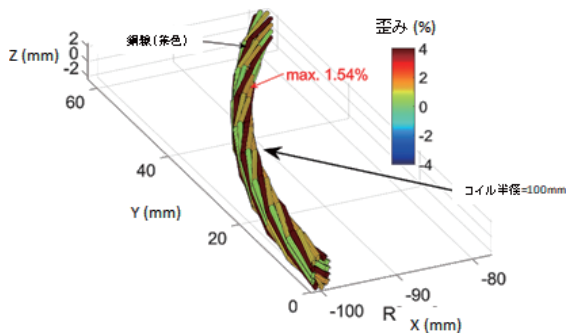


図7 MgB_2 超電導コイルの曲げ歪み解析の一例

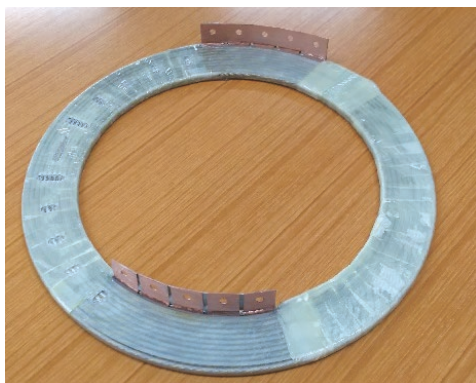


図8 試作した MgB_2 超電導コイルの写真

表2 試作した MgB_2 超電導コイルの仕様

製法	W&R	
内径	[mm]	200
外径	[mm]	269
ターン数	[-]	10
定格電流	[A]	600
高さ	[mm]	5.06
最大磁場	[T]	0.168

しかしながら、撚線導体化およびコイル化加工を施した超電導コイルの超電導特性を、コイル化の際に使用した線材8本分の超電導特性と比較すると(図10)、コイル化した状態では最大で65%程度まで超電導特性が低下していることがわかる。そこで、 MgB_2 線材単体の許容曲げ歪み以内で製作したにもかかわらず、特性が低下した原因について調査を行った。

5. 超電導コイル加工による劣化原因の調査

5.1 MgB_2 線材の撚線導体

撚線導体加工に伴う MgB_2 線材の特性変化を調べるため、 MgB_2 線材を10本使用した撚線導体(図11)を製作した。製作した撚線導体は表3に示す様に撚りピッチを変化させ、撚線状態における超電導特性と、撚りほぐした線材における超電導特性の両方を評価できる構造とし、撚線加工後に焼成を施した。撚りピッチは導体形状が維持できるよう、82mm、69mm、58mmとし、ローラーによって大きく圧縮されない程度に固定した。圧縮

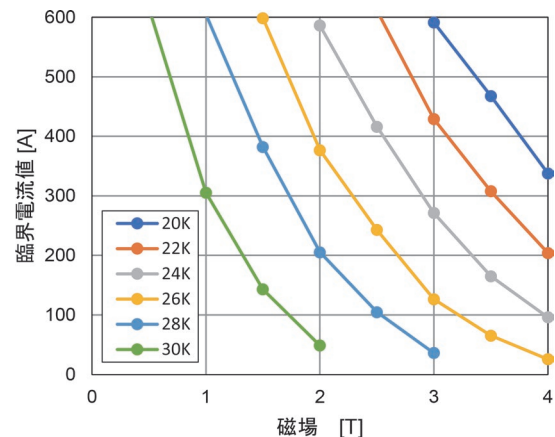


図9 超電導コイルの臨界電流値の磁場依存性

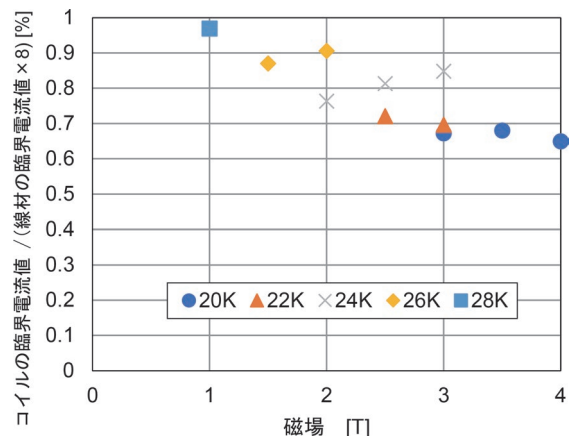


図10 コイル加工後の超電導特性と線材での超電導特性の比較図

された撚線導体は撚線前と比較し、導体幅が最大で3%程度減少した。厚み、幅はそれぞれ準備したサンプルごとにばらつきがあるが、平均値を示した。また、比較対象として、直線の線材を Original とした。

Original の臨界電流値との比較を図 12 に示す。撚線導体は Original の 10 本分の値と比較した。いずれの撚りピッチにおいても直線線材 (Original) と比較すると臨界電流値が低下していることが分かる。さらに、撚りほぐし線材より撚線導体の方が大きく低下している。これは、撚線導体で加わる曲げ歪みは塑性変形と弾性変形の両方の領域における力が印加しており、撚りほぐした際には、弾性変形領域の歪みが緩和されるためだと考えられる。

5.2 MgB₂ 線材の圧縮歪み加工

撚線導体化するには、機械的に密着してまとまりが確保できるよう、導体の厚み方向および幅方向から 2 組のローラーダイスによって圧縮する必要がある (図

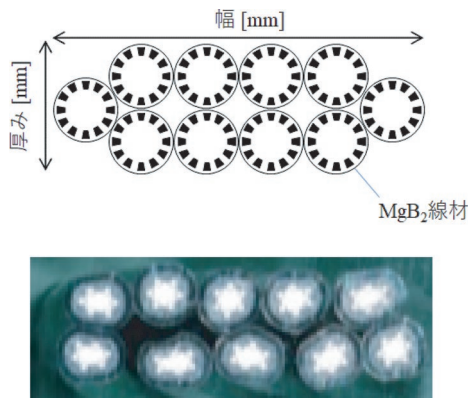


図 11 撚線導体の断面模式図および断面写真

表 3 製作した撚線導体の諸元

ID	厚み [mm]	幅 [mm]	形状	ピッチ [mm]	数
Original	-	-	-	0	2
10-S82	1.62	4.82	撚りほぐし線材	82	3
10-R82			撚線導体		4
10-S69	1.60	4.82	撚りほぐし線材	69	4
10-R69			撚線導体		3
10-S58	1.61	4.81	撚りほぐし線材	58	4
10-R58			撚線導体		2

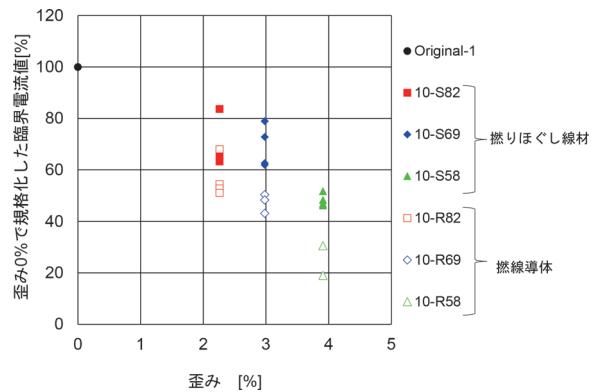


図 12 直線線材 (Original) と撚線導体および撚りほぐし線材との臨界電流値の比較

13)。この圧縮によって線材が変形し、超電導特性に影響を及ぼしている可能性がある。そこで、この圧縮に対する耐力を確認するため、撚りピッチに対応する交差角度をつけた MgB₂ 線材 2 本を上下から圧縮 (交差圧縮荷重) させて臨界電流値を測定することで、MgB₂ 線材の交差圧縮荷重依存性を測定した。例として、撚りピッチを 82mm (交差角度 14 度) とした場合の評価結果を図 14 に示す。

交差圧縮荷重が 400N を超えると臨界電流値の低下が見られたことから、撚線導体化する場合は 400N 未満の荷重で成型する必要がある。また、撚線加工によって線材が変形することで、許容曲げ歪み以内の範囲であっても、超電導特性が低下する可能性があることを明らかにした。

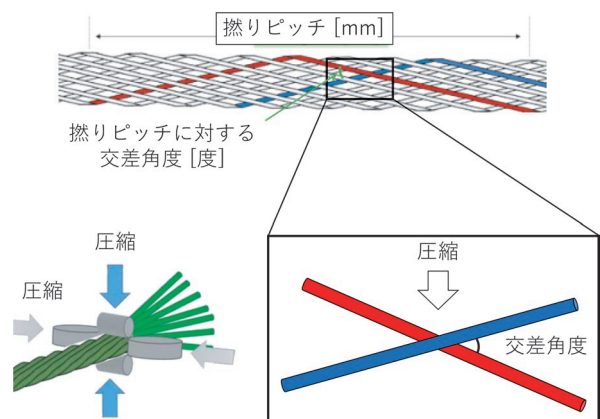


図 13 成型時の交差圧縮荷重のイメージ図

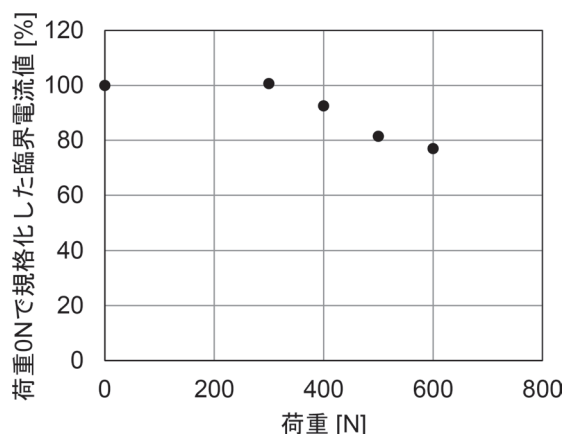


図 14 撚りピッチ 82mm の時の交差圧縮荷重依存性

6. まとめ

回生電力を一時的に蓄える電力貯蔵装置として、従来の Nb-Ti や Nb₃Sn といった金属系超電導体と異なり、冷却コストの低減が期待できる MgB₂ 線材を用いた超電導コイルの開発を進めている。

MgB₂ 線材は製造過程で焼成が必要であるが、焼成が曲げ歪みなどの機械特性を劣化させる要因となっている。特に焼成後のほうが劣化しやすいが、焼成前においても一定の曲げ歪み以上で超電導特性が劣化することが知られている。一方で、許容曲げ歪み以内で超電導コイルを試作したにもかかわらず、超電導特性の低下を確認した。その原因究明として、複数の撚りピッチで試作した撚線導体を用いた超電導特性の評価、及び、撚線導体製作時に加わる圧縮凹みによる劣化の調査を実施した結果、曲げ歪みによる超電導特性の劣化以外にも、導体化する際

の交差圧縮荷重の影響が大きいことを明らかにした。

本研究は国立研究開発法人 科学技術振興機構 (JST) の戦略的創造研究推進事業・先端的低炭素化技術開発 (ALCA) JPMJAL1002 の助成を受けて実施した。

文献

- 1) 国立環境研究所 2020 年度 (令和 2 年度) の温室ガス排出量 (速報値) について: <https://www.nies.go.jp/whatsnew/20211210/20211210.html> (参照日: 2022 年 3 月 11 日)
- 2) 恩地太紀, 石原篤, 小林祐介, 福本祐介, 富田優, 濱島高太郎: ニ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
- 3) J. Nagamatsu, N. Nakagawa, T. Muranaka, I. Zenitany and J. Akimitsu, "Superconductivity at 39 K in magnesium diboride," Nature, Vol.410, p.63, 2001.
- 4) S. Mizuno, T. Yagai, T. Okubo, S. Kamibayashi, M. Jimbo, T. Takao, Y. Makida, T. Shintomi, N. Hirano, T. Komagome, K. Tsukada, T. Onji, Y. Arai, M. Tomita, D. Miyagi, M. Tsuda, T. Hamajima, "Feasibility Study of MgB₂ Cable for Pancake Coil of Energy Storage Device," IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol.28, No.3, 4602505, 2018.
- 5) M. Tomita, T. Onji, A. Ishihara, Y. Kobayashi, Y. Fukumoto, S. Mizuno, T. Yagai, T. Takao, T. Komagome, K. Tsukada, T. Hamajima, "Superconducting Properties of a Prototype Pancake Coil Using a MgB₂ Rutherford-Type Stranded Conductor," IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol.28, No.3, 5700604, 2018.

高磁場特性を有する高温超電導材料の 製作と特性評価

赤坂 友幸* 石原 篤** 鈴木 賢次**
富田 優***

Fabrication and Characterization of High-temperature Superconducting Materials with High Magnetic Field

Tomoyuki AKASAKA Atsushi ISHIHARA Kenji SUZUKI
Masaru TOMITA

Since superconducting bulk material is compact and can generate a strong magnetic field, it is expected to be applied to various devices as a magnetic field generation source. High magnetic field strength, magnetic field uniformity, and magnetic field stability are required so as to apply superconducting bulk material to magnets. In order to realize these high characteristics, we fabricated and evaluated MgB_2 and RE-based superconducting bulk material.

キーワード：高温超電導，超電導バルク，臨界電流，磁場

1. はじめに

超電導材料は、形状、使用法の違いから、バルク体と線材に分けられ、その実用化に向けて活発に研究開発が進められている。これまでに開発されてきた超電導バルク体は、イットリウムやガドリニウム等のレアアース（RE：希土類元素）系バルク体が主流であり、主に磁場応用を目的として開発されている。一般的な永久磁石が1T以下の磁力であるのに対し、これまでに開発された超電導バルク体の発生磁場は17Tにも達し¹⁾、これは1平方センチメートルあたり重さ1トンの鉄を持ち上げることができる磁力に相当する。この超電導バルク体は、分析器の磁場発生源や薬剤の磁気搬送、電流リード、磁気軸受部等に应用することで各種機器の大幅な性能向上が期待されている。

超電導バルク体は、それ自身が超電導材料の結晶であるため、高磁場中でも電流密度が高い、コンパクトで強い磁場を発生できる、といった特徴がある。これを磁石として用いた場合、他の磁石と比較して、超電導バルク体は、超電導コイルマグネットよりもコンパクトでローコストであり、永久磁石や電磁石よりも強磁場を発生することができる。また、RE系超電導バルク体においては、実用上使用可能な低温と言われている液体窒素温度（77.3K）においても高い電流密度を有するため、超電導バルク体の持つ特徴を、冷凍機を使用しない液体窒素

による冷却でも十分に活かすことができる。

しかしながら、RE系超電導バルク体は製作プロセスにおいて結晶成長の過程を経るため、製作に長時間かかるという制約を持つ。この点を解消できる新材料として、鉄道総研では二ホウ化マグネシウム（ MgB_2 ）に注目し開発を進めてきた²⁾³⁾⁴⁾。 MgB_2 は金属系高温超電導体の中で最高の臨界温度を有する物質であり、高い臨界磁場、臨界電流密度をもつ特徴がある。この物質は、製作が容易で、非常に軽量であり様々な形状に加工が可能で、新しい超電導バルク体として期待されている。すなわち、強力磁石として、輸送・医療等への応用が期待でき、特に、高い磁場均一性が求められるMRI（核磁気共鳴画像法）、NMR（核磁気共鳴）などの計測機器への応用に適すると考えられる。本稿では、 MgB_2 およびRE系超電導バルク体の評価や高特性化に向けた開発について記述する。

2. 超電導材料の製作と評価

超電導バルク体をマグネット等に应用するためには、高い磁場強度、均一な磁場空間が要求される。本章では、これらの高特性化に向け、製作や特性評価などの取り組みについて述べる。

2.1 MgB_2 超電導バルク体の製作

出発原料であるマグネシウム（Mg）とホウ素（B）を、乳鉢を用いて乾式混合にて混合後、1軸プレスにて $9.8 \times 10^7 N/m^2$ の圧力でペレット状に成形を行った。ペレット成型後、多結晶体での焼成条件を参考に、 $850^\circ C$ 、3

* 浮上式鉄道技術研究部 超電導・低温研究室

** 元 材料技術研究部 旧超電導応用研究室

*** 浮上式鉄道技術研究部

時間、アルゴン気流中で焼成を行い、 MgB_2 バルク体を製作した。作製した MgB_2 バルク体 ($20mm\phi \times 10mm$) を図 1 に示す。試料表面にクラック等の不均一性はみられず、均一な組織を得ることができた。



図 1 製作した MgB_2 超電導バルク体 ($20mm\phi \times 10mm$)

2.2 MgB_2 超電導バルク体の微細組織評価

2.1 節で製作した MgB_2 超電導バルク体について、顕微鏡による微細組織観察を行った。焼成前後の反応性を評価するため、レーザー顕微鏡にて光学観察を行った結果を、図 2 に示す。ペレットに成形後、電気炉で焼成する前の試料の微細組織には、原料粉であるホウ素（赤茶色）とマグネシウム（銀色）が確認でき、色ムラもなく均一に混合できていることが分かる。850℃、3時間の焼成を行った後の試料では、原料粉末同士の反応が進み、 MgB_2 （青みがかった黒色）が確認できる。

より高倍率での組織観察として、走査型電子顕微鏡により焼成後の MgB_2 超電導バルク体の二次電子像を撮影した（図 3）。その結果、粒径数 μm の MgB_2 粒子が確認でき、粒子同士は接触面で結合していることから、超電導電流の経路として働くと考えられる。また、 $1\mu m$ 程度の空隙が確認できるが、これは焼成時にマグネシウムが拡散した際に残されたものである。

MgB_2 超電導バルク体内部の材料均一性を評価するため、内部の空隙のばらつきの評価を行った。焼成後の MgB_2 超電導バルク体の X 線 CT スキャン像を図 4 に示す。図 4 (a) の黒い部分が空隙を表している。また図 4 (b) に空隙のみを表した像を示すが、空隙が比較的均

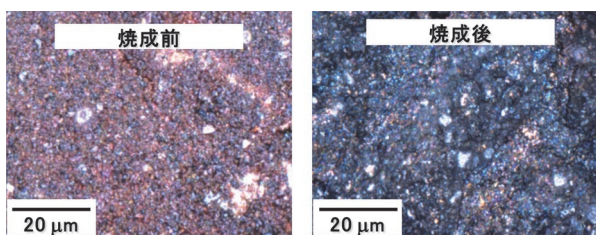


図 2 MgB_2 超電導バルク体の焼成前後における光学顕微鏡像

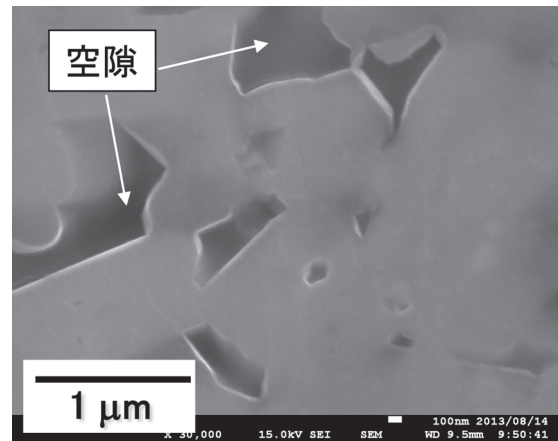
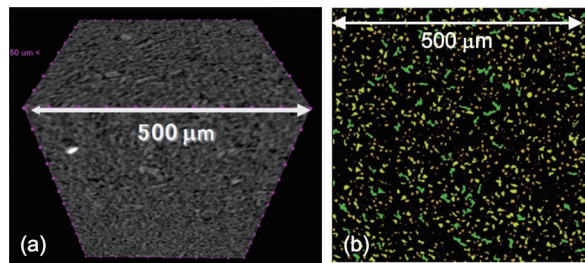


図 3 焼成後の MgB_2 超電導バルク体の二次電子像



(a) : CT スキャン像, (b) : 空隙のみを示した像

図 4 焼成後の MgB_2 超電導バルク体の X 線 CT スキャン像

直径 $20\mu m$ 以下の空隙を黄色、 $20\mu m$ 以上の空隙を緑色で表す

一に分散して試料内に存在している。焼成前の混合でマグネシウムがムラなく試料内に分布し、焼成により拡散してムラなく反応していると推察される。試料のいずれの観測位置においても同様の傾向が見られ、試料内で均一に反応が進んでいたと考えられる。

2.3 MgB_2 超電導バルク体の加工特性

超電導バルク体を応用する際には、応用形態に沿った形状加工が必要である。例えば、磁気分離等の強力磁石として用いる場合は、磁石をある範囲にわたり敷き詰めるためタイル形状であることが、放射光の加速装置（アンジュレータ）用磁石として用いる場合は半円の形状であることが望まれる。 MgB_2 超電導バルク体は様々な場面で用いられることを考え、その機械加工性について評価を行った。

円盤状の MgB_2 超電導バルク体を精密切断機により、四角形状、および三角形状へ加工した加工後の写真を図 5 (左) に示す。充填率が 50% 程度であり、比較的硬度が小さいということから、試料表面に加工時の振動によるクラック、欠け等は見られなかった。四角形状の角の部分電子顕微鏡で観察したところ、ひび等は見られず、不具合なく加工を施すことができた。

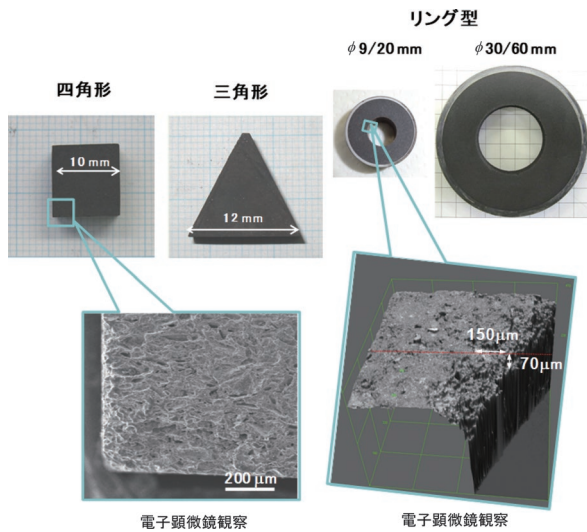


図5 MgB₂超電導バルク体の加工性評価

次に、20mmφと60mmφの円盤状のMgB₂超電導バルク体の中心部に、ボール盤を用いて、それぞれ9mmφ、30mmφの穴あけ加工を行った(図5(右))。穴あけ加工部分の微細組織をレーザー顕微鏡にて観察した結果、幅150μm、深さ70μm程度の欠けが確認できたが、試料全体の磁場特性に影響を及ぼす程ではない。以上から、MgB₂超電導バルク体は任意形状への加工性に優れ、応用を考える上で有利な材料であることが分かった。

2.4 MgB₂超電導バルク体の超電導特性評価

前節では、製作における加工性などの特性評価を行ったが、この章では磁石での特性として、MgB₂超電導バルク体の超電導特性の評価を行った。MgB₂は金属系高温超電導体の中で最高の臨界温度 $T_c = 39\text{K}$ が記録されているが、製作したバルク体においてもその臨界温度を有しているかを調べた。30mmφのMgB₂超電導バルク体内部の各位置から小試料片を切り出し、磁化率の温度依存性を評価した結果を図6に示す。MgB₂超電導バルク体の表面や中心など場所による差異はほとんど見られず、試料全体で均一な臨界温度を有していることが確認できた。また、いずれの位置も臨界温度は38K程度であることが確認できた。

超電導バルク体の捕捉磁場特性は、バルク体の直径と臨界電流密度に比例する傾向にある。したがって捕捉磁場特性の向上を図るには、試料サイズの大型化か臨界電流密度の向上に取り組む必要がある。本研究では、超電導量子干渉計を用いてMgB₂超電導バルク体の臨界電流密度特性の評価を行った。臨界温度の測定と同様に、30mmφのMgB₂超電導バルク体の各試料位置から小試料片を切り出し、臨界電流密度測定を行った。いずれの試料においても、外部磁場ゼロで約 $2.5 \times 10^5 \text{A/cm}^2$ の高い臨界電流密度を示すことが確認できた(図7)。各位

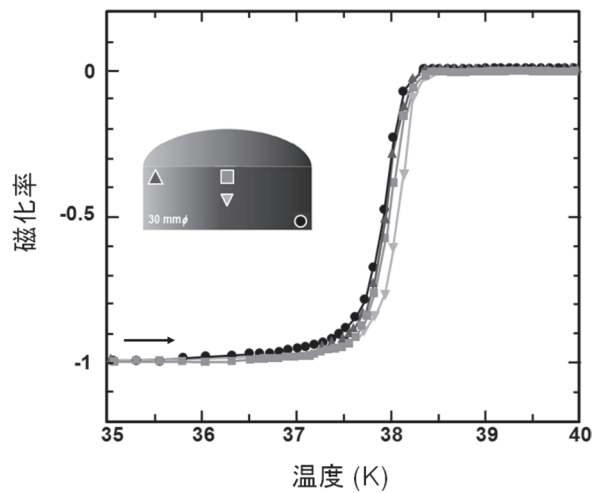


図6 MgB₂超電導バルク体の臨界温度特性
(磁化率が0になった温度が臨界温度)

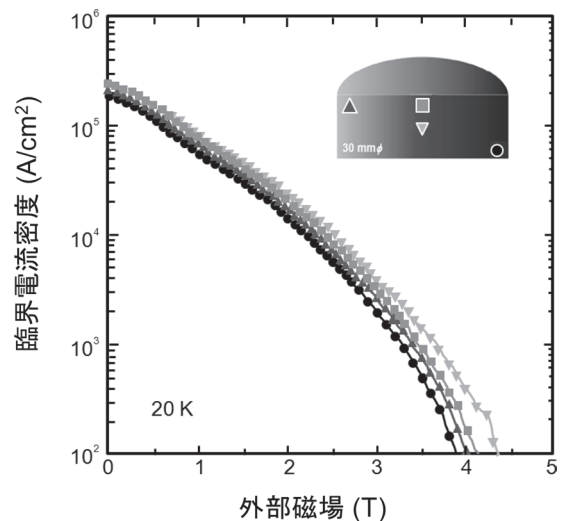


図7 MgB₂超電導バルク体の臨界電流密度

置での臨界電流密度のばらつきが比較的小さく、全体が均質な試料を製作できたと考えられる。

次に、製作したMgB₂超電導バルク体の磁石特性を評価するため、捕捉磁場特性の評価を行った。製作したMgB₂超電導バルク体試料を冷凍機で10Kまで冷却し、超電導マグネットを用いて磁場中冷却により6Tの磁場下で着磁を行った。バルク体の捕捉磁場特性に関してはバルク体表面に配置したホール素子により計測を行った。なお、試料温度はバルク体底面の温度とした。30mmφのMgB₂超電導バルク体2つを対向して配置し、2つのバルク体の中心とバルクの上表面でホール素子により磁場測定を行った結果を図8に示す。NMRへの応用などを想定したバルク体の中心部では、11Kにおいて4Tを超える強力な磁場を確認した。また、20Kでの捕捉磁場は3T程度、25Kでの捕捉磁場は2T程度であった。さらに低温に冷却することで、より強力な磁場

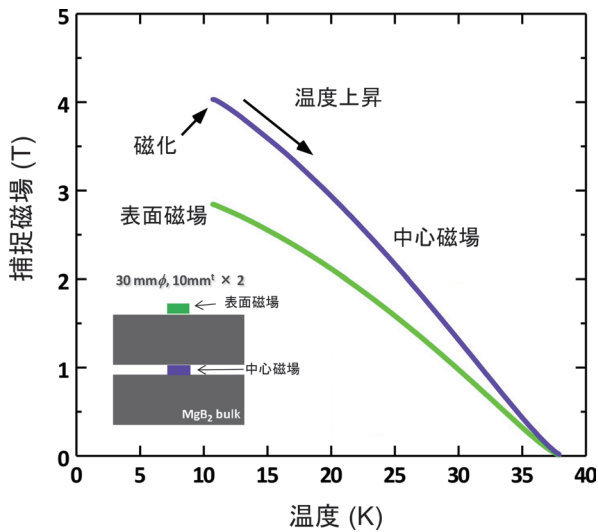


図8 MgB₂ 超電導バルク体の捕捉磁場の温度依存性

を発生できると考えられる。

2.5 MgB₂ 超電導バルク体の磁場均一性評価

MgB₂ バルク体の磁場の均一性を評価するため、走査型ホールプローブを用いてバルク体表面の二次元スキャンを行った。30mmφのMgB₂ 超電導バルク体の表面から高さ方向に3mm離れた位置で、捕捉磁場分布を測定した結果を図9に示す。試料内の臨界電流密度特性が均一であることから、理想的な円状の磁場分布を示した。また、図9の空間分布特性の断面図を図10に示すが、どの角度の断面図でも捕捉磁場の値にばらつきがなく、動径方向に均一な磁場値を有していることが分かった。このように、MgB₂ 超電導バルク体は磁場均一性に優れていることから、NMR等の分析機器への応用に有望であると考えられる。

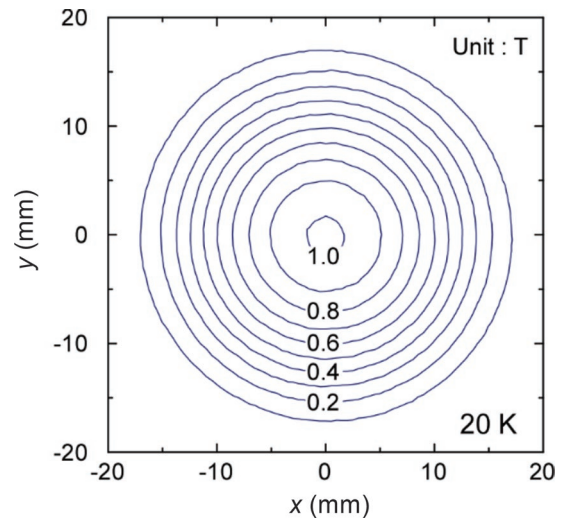


図9 MgB₂ 超電導バルク体の磁場強度の位置依存性

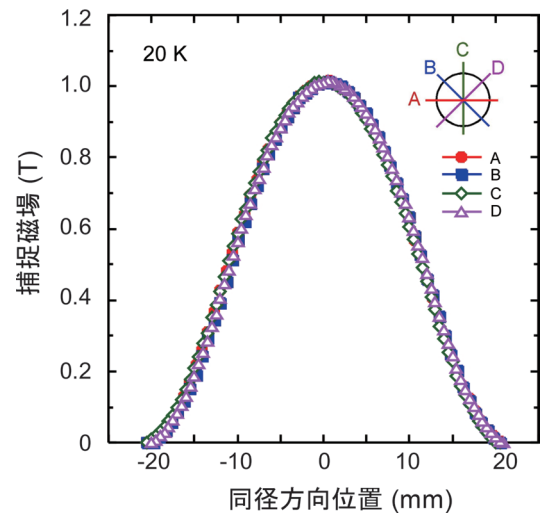


図10 MgB₂ 超電導バルク体の捕捉磁場分布の断面図

2.6 磁場均一性の可視化技術の構築

次に、超電導バルク体の磁場均一度を可視的に評価するため、磁気光学センサーを用いた手法を考案し、バルク体全体の捕捉磁場特性の可視化を試みた⁵⁾。構築した磁気光学像評価装置を図11に示す。着磁したリング状のRE系超電導バルク体に対し、磁気光学像の観察を行った結果、センサーが磁場を感知している箇所が発光しており、超電導バルク体が同心円状に均一な磁場を発生していることを視覚的に確認できた(図12左)。また、ゼロ磁場で冷却した後に着磁して観察を行った結果、バルク部分が黒色となり発光していないことから、反磁性特性を確認することができた(図12右)。磁気光学センサーを用いた磁場の可視化技術により、バルク体全体の瞬時の磁場分布の評価が可能となる。

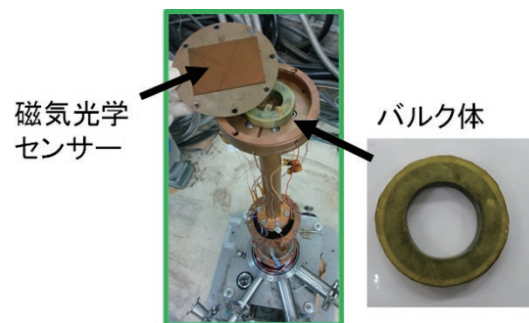


図11 磁気光学像評価装置の構成

2.7 金属含浸による磁場安定性の改善

超電導バルク体は昇温とともに特性が低下し、ある温度以上では捕捉磁場が失われてしまうことが知られており、同様の現象が外乱に伴う局所的な発熱によっても観測されている。この局所的な発熱に対応するために、超電導バルク体の放熱特性の向上を目的とし、合金溶射法

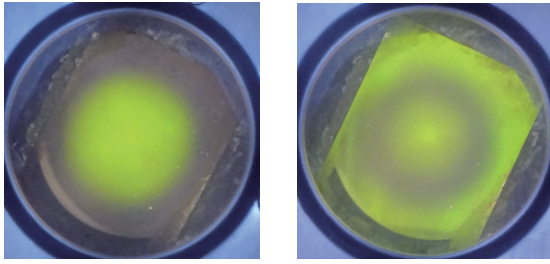


図 12 リング状 RE 系超電導バルク体の磁気光学像
(左：着磁特性, 右：反磁性特性)

による金属皮膜処理を行った。合金溶射法は、合金を加熱して溶融し、対象物に吹き付けることで金属皮膜を形成する方法である。製作した RE 系超電導バルク体に対し、低融点合金を用いて合金溶射を行った様子を図 13 に示す。溶融した合金が RE 系超電導バルク体に衝突し、比熱の差から急冷、凝固されることで表面に金属皮膜が形成される様子が確認できる。この合金溶射法を繰り返した超電導バルク体の断面を図 14 に示す。合金溶射法を繰り返すことで、バルク体の表面全体に金属皮膜が形成された。また、バルク体に対し、液体窒素中でヒーターにより熱を加えた。バルク体の温度の時間履歴を図 15 に示す。合金溶射を行ったバルクは温度上昇が小さいことが分かる。このことから、合金溶射法によってバルク体の放熱特性を改善できることが分かった。

次に、超電導バルク体の放熱特性を向上させるための別の手法として、真空含浸法により金属含浸を行った。真空含浸法は、空隙の多い材料に対し、真空下で溶融させた金属や樹脂などを含浸させる方法である。製作した MgB_2 バルク体に対し、真空含浸法により低融点合金を

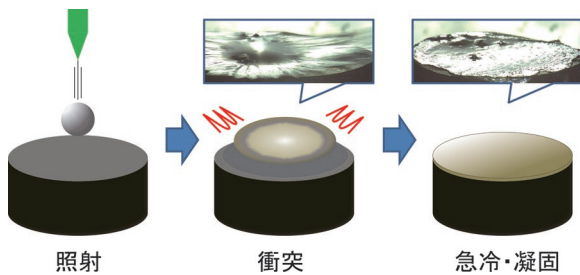


図 13 RE 系超電導バルク体への合金溶射法の様子

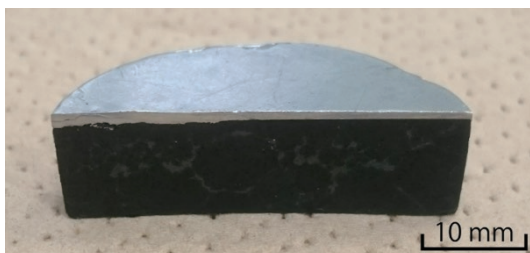


図 14 合金溶射法を行った RE 系超電導バルク体

含浸させた。真空含浸装置を図 16 に、低融点合金を含浸させた MgB_2 バルク体の断面部を図 17 に示す。平均

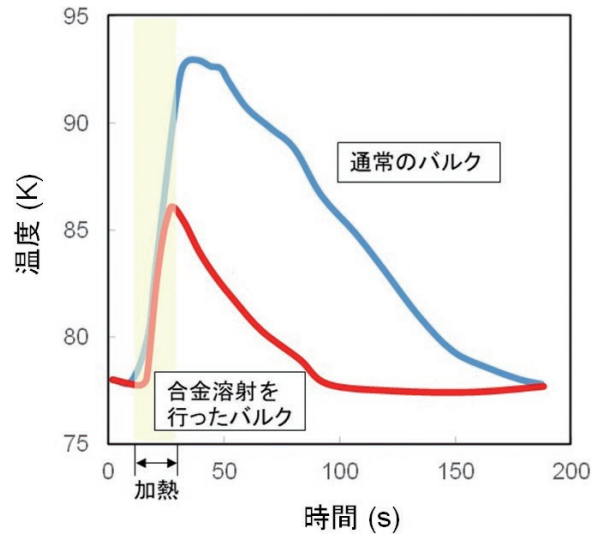


図 15 RE 系超電導バルク体の表面温度の時間履歴

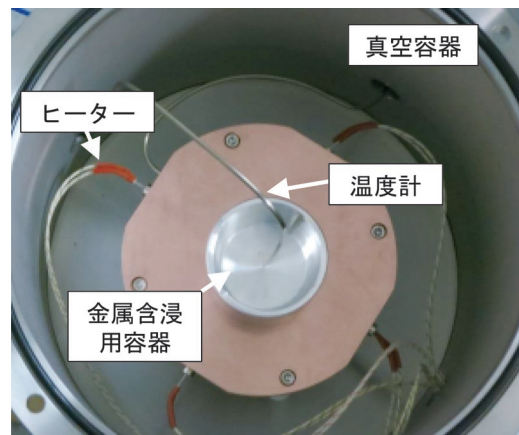


図 16 超電導バルク体用真空含浸装置

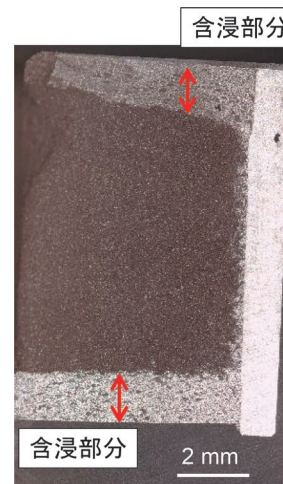


図 17 真空含浸法を行った MgB_2 超電導バルク体の断面図

空孔直径が50 μm 程度の試料に対し、表面から2mm程度まで金属が浸透していることが確認でき、合金溶射法と同様に放熱特性の改善が期待できることが分かった。

3. まとめ

超電導バルク体は、コンパクトで強磁場を発生できることから、磁場発生源として各種機器への応用が期待されている。超電導バルク体をマグネット等に応用するためには、高い磁場強度、磁場均一性、磁場安定性が要求される。これらの高い特性を実現するための、 MgB_2 およびRE系超電導バルク体の製作、評価や高特性化に向けた開発を実施した。超電導バルク体を製作し、その微細組織、加工性、超電導特性の評価を行った。また、磁場均一度の可視的評価のため、磁気光学センサーを用いた装置を構成し、バルク体全体の捕捉磁場特性の可視化を行った。さらに、磁場安定性の改善のため、超電導バルク体へ合金溶射法および真空含浸法による金属含浸を行い、放熱特性の改善を行った。今後も、各種応用開発を進めとともに、必要となる材料開発に取り組む。

本研究の一部は、JSPS 科学研究費助成事業 (16H01860)

および (17H01127) の助成を受けて実施した。

文 献

- 1) M. Tomita, M. Murakami, "High-temperature superconductor bulk magnets that can trap magnetic fields of over 17 tesla at 29K," *Nature*, Vol.421, 517-520, 2003.
- 2) 富田優, 原篤, 赤坂友幸, 山本明保, 岸尾光二: MgB_2 超電導バルク磁石の開発, 第87回2013年度春季低温工学・超電導学会概要集, p.180, 2013
- 3) 赤坂友幸, 石原篤, 富田優, 山本明保, 杉野翔, 岸尾光二: MgB_2 超電導バルク体の加工性能, 第89回2014年度春季低温工学・超電導学会講演概要集, p.119, 2014
- 4) A. Ishihara, T. Akasaka, M. Tomita, K. Kishio, "Superior homogeneity of trapped magnetic field in superconducting MgB_2 bulk magnets," *Supercond. Sci. Technol.*, Vol.30, 035006, 2017.
- 5) 赤坂友幸, 恩地太紀, 石原篤, 福本祐介, 富田優, 関野正樹, 大崎博之, 岸尾光二: MOセンサーによる高温超電導バルク磁石の捕捉磁場分布評価, 第94回2017年春季低温工学・超電導学会, p.117, 2017

鉄道総研報告 監修スタッフ

■監修責任者

芦谷公稔

■編集責任者

谷村幸裕 富田 優

■企画・監修

鈴木浩明	川崎邦弘	長倉 清	日比野有
伊積康彦	石毛 真	神田政幸	重枝秀紀
桃谷尚嗣	布川 修	新井英樹	福田光芳
上田 洋	上半文昭	斉藤実俊	水上直樹
小島謙一			

鉄道総研報告 第36巻 第6号

2022年6月1日 発行

監修・発行所：公益財団法人 鉄道総合技術研究所

〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38

©2022 Railway Technical Research Institute

本誌に関するお問い合わせ先
総務部広報 電話 042-573-7219

RTRI REPORT

► Special Features: Technology of Maglev Systems and Superconductivity Research ◀

Vol. 36 No. 6

Jun. 2022

PERSPECTIVE

- Maglev Technology and Research Trends on Superconductivity
.....M.TOMITA (1)

PAPERS

- Development of Inverter-less Excitation Method for a Linear Rail Brake
.....Y.SAKAMOTO, K.UKITA (5)
- Wireless Power Transfer System for Railway Vehicles with Improved Power Density of Onboard Coil
.....H.YODA, K.UKITA (13)
- Evaluation of Vibration Resistance of Levitation and Guidance Ground Coils
by Electromagnetic Excitation Tests Using a Superconducting Magnet
.....R.IKEDA, K.MIZUNO, M.TANAKA (21)
- Evaluation of Electrical Characteristics of Superconducting Feeder Cables
.....Y.FUKUMOTO, T.AKASAKA, Y.ARAI, M.TOMITA (27)
- Cooling Methods of Superconducting Feeder Cables
.....Y.KOBAYASHI, A.ISHIHARA, K.SUZUKI, Y.FUKUMOTO, M.TOMITA (33)
- Development of Superconducting Coils Using MgB₂ Wires
.....TONJI, Y.KOBAYASHI, M.TOMITA (39)
- Fabrication and Characterization of High-temperature Superconducting Materials
with High Magnetic Field
.....TAKASAKA, A.ISHIHARA, K.SUZUKI, M.TOMITA (45)

