

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**

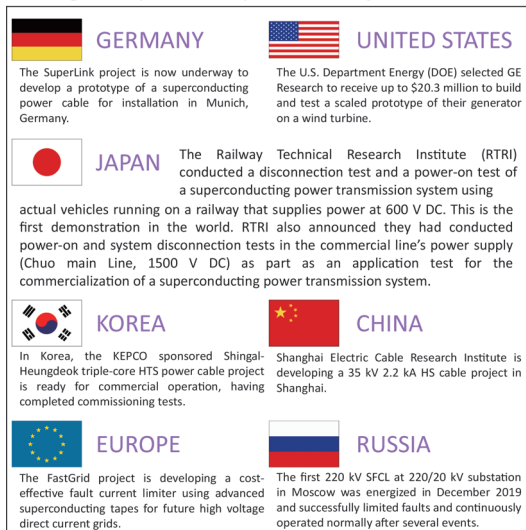


図1 高温超電導研究の世界動向 (IEAのannual report²⁾より。日本では鉄道総研の超電導送電の開発状況が示されている。)

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

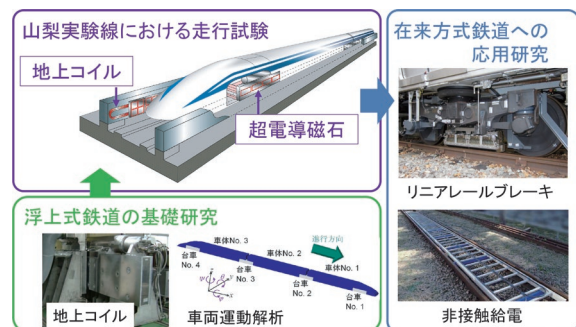


図2 浮上式鉄道の技術

* 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 (クーパー対) 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パ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パー対をなさないが、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パー対をなし、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

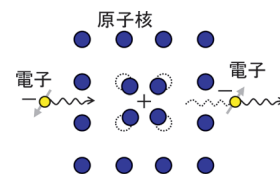


図3 クーパー対

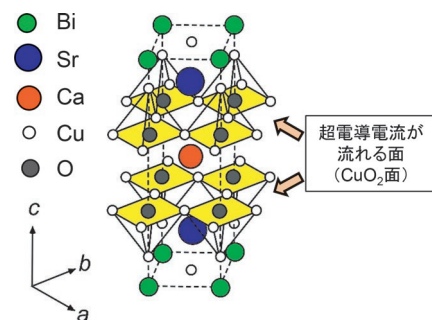


図4 高温超電導材料 (Bi系) の結晶構造

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、

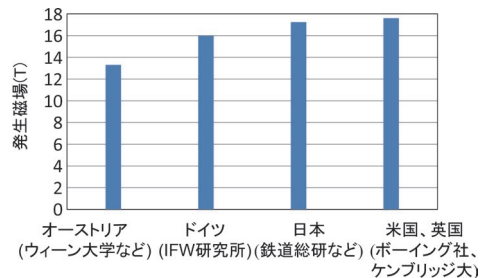


図6 高温超電導研究の国際間競争
バルク磁石の発生磁場

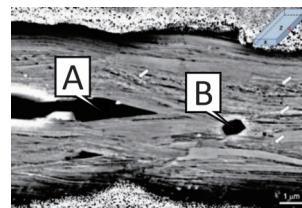


図7 高温超電導線材の微細組織観察

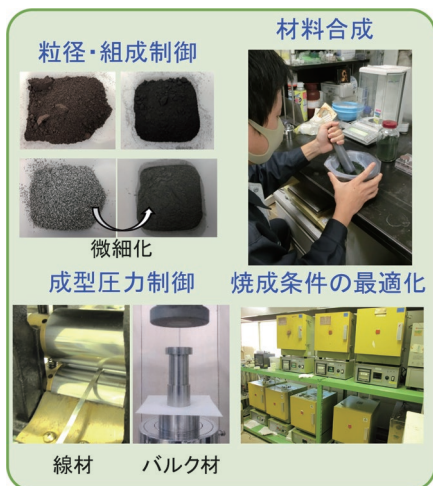


図5 高温超電導材料の製作

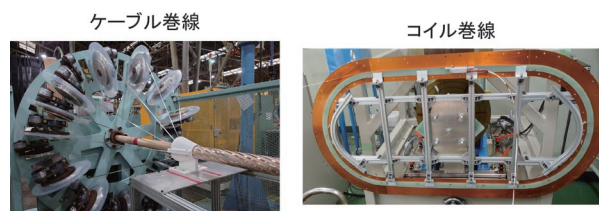


図8 高温超電導材の巻線化(コイル化)

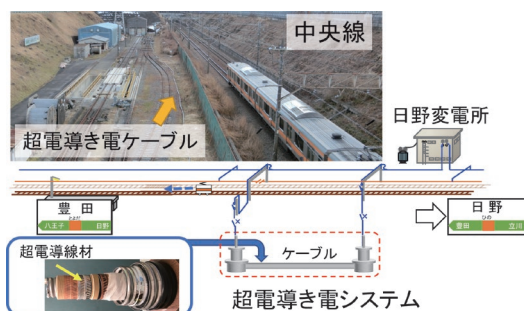


図9 408m 長超電導き電システムの開発



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：励磁用インバ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