

超電導材料の開発と 応用研究の取り組み



富田 優
Masaru Tomita

研究開発推進部 担当部長
(超電導き電ケーブル)

高温超電導は近年高性能な材料が開発されるようになったことから、エネルギー、環境、ナノテクノロジーなど多岐にわたる分野において応用研究が進められています。鉄道総研では、超電導材料の製作から各種応用へ向けた一貫した研究開発に取り組んでいます。各種機器に適応した形状や性能に合わせ、超電導材料の製作や改良を行うことにより、機器の高性能化の実現を目指しています。ここでは、高温超電導材料と応用開発の動向について鉄道総研の取り組みを含め概説します。

はじめに

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のことをいい、一般的には、超電導材料を線材や円盤状のバルク（塊という意味）材などの形態に加工して、応用機器に用います。超電導の応用機器開発は輸送、電力、医療、環境、エネルギーなどさまざまな分野にわたっており、鉄道総研では、機器応用に向けた線材やバルク材などの材料開発を進めるとともに、強磁場応用、送電・電力応用の分野を中心に研究開発を進めています。

超電導材料の開発

ここでは、鉄道総研の応用に向けた超電導材料の製作技術について紹介します。図1の右側に超電導送電および超電導蓄電の図と目標となる性能をあげています。実用に向けては、こちらに記載した電流値や、曲げ径など機械的特性に対応する必要があります。これらを達成するため、基礎から応用に至る一貫した研究に取り組んでいます。超電導材料は、原料粉末を混合、成型、

焼成して作られます。線材とバルク材は、一部、成型過程が異なりますが、製作における基本工程は同じです。バルク材は、成型機に粉末を詰め、一軸プレスで円盤状に成型した後、電気炉で焼結します。一方、線材は、金属パイプに粉末を詰め、圧延機で線状に引き伸ばして、焼結します。図1の左上に示すように、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探求し、超電導材を試作しています。超電導材の性能は、通電容量と発生磁場に関わるパラメーターとして、臨界電流が指標として示されます。この臨界電流は、超電導材の中に電流を流して、発生した外部磁場を測定します。発生磁場が強いということは、それだけ材料内部に多くの電流を流すことができることになります。

これまで国内では、鉄道総研と超電導工研や名古屋大学において、超電導材における高磁場発生の研究が進められてきました。国外に目を向けると、臨界電流を示す高磁場発生値については国際間の競争は激しく、2000年以

降、オーストリア、ドイツ、日本が高磁場発生を競い合い、2003年、鉄道総研は17.24テスラ（磁場強度の単位）という世界最高の発生磁場を記録しました¹⁾。超電導バルク材は、発生磁場値が大きくなるにともない、超電導材料が受ける電磁力も増大し、材料強度の負担が大きくなります。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ってしまう。この熱的不安定性と機械強度の対策として、低融点金属と樹脂を使った含浸処理法を考案しました。この製造処理により、非常に大きな磁場をかけても破壊されず、世界最高の発生磁場を実現しました。その後の11年間5か月の間、日本はこの記録を維持し続けました。しかし近年、これらの記録に力をそそぐ米国と英国が国際共同チームを作り、世界最高発生磁場値は17.6テスラに更新されています²⁾（図2）。

発生磁場値の源は超電導材内部に流れている電流値にあります。ちなみに、17テスラの磁場発生時、超電導材に流れている電流は大きく、直

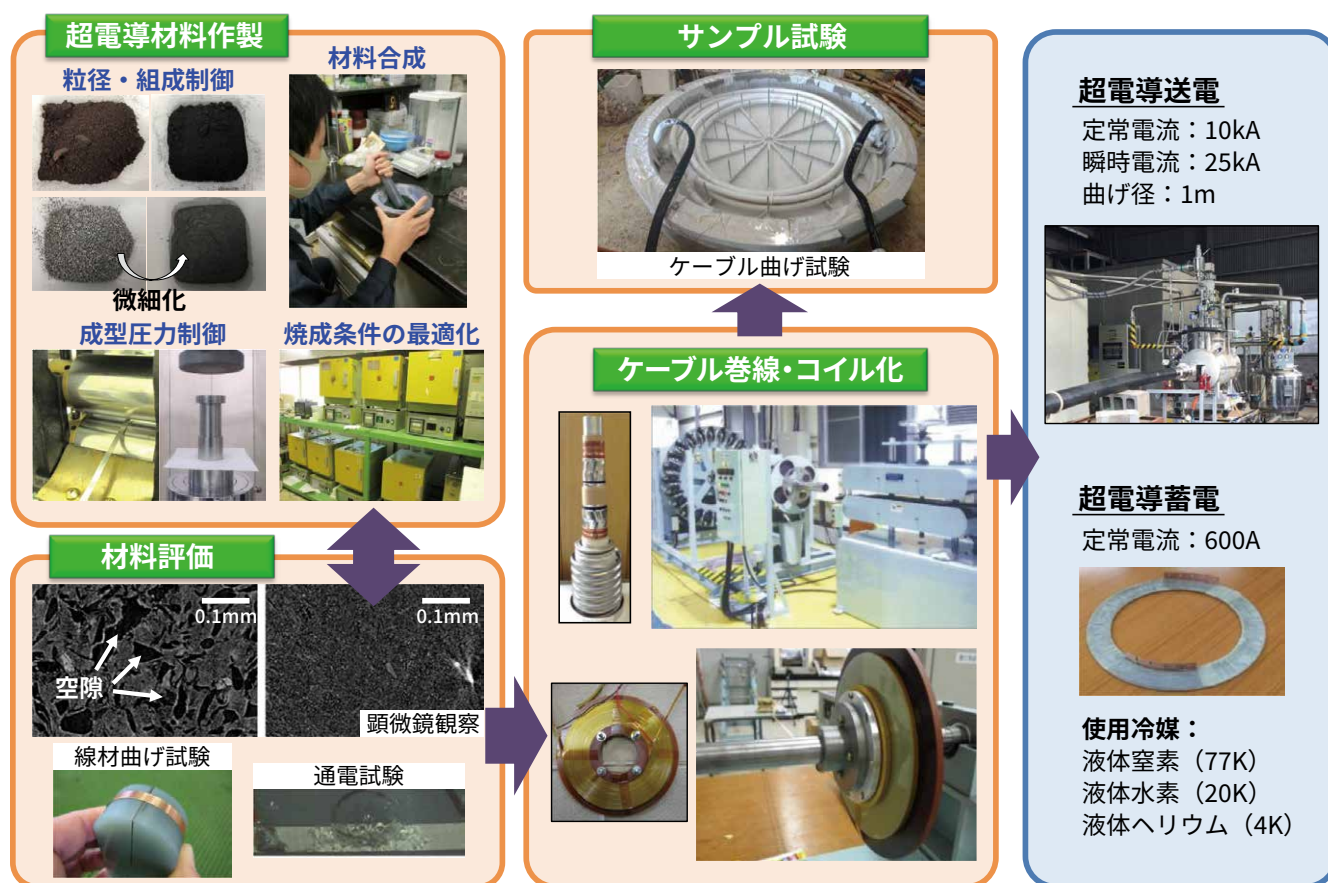


図1 応用に向けた超電導材料の開発

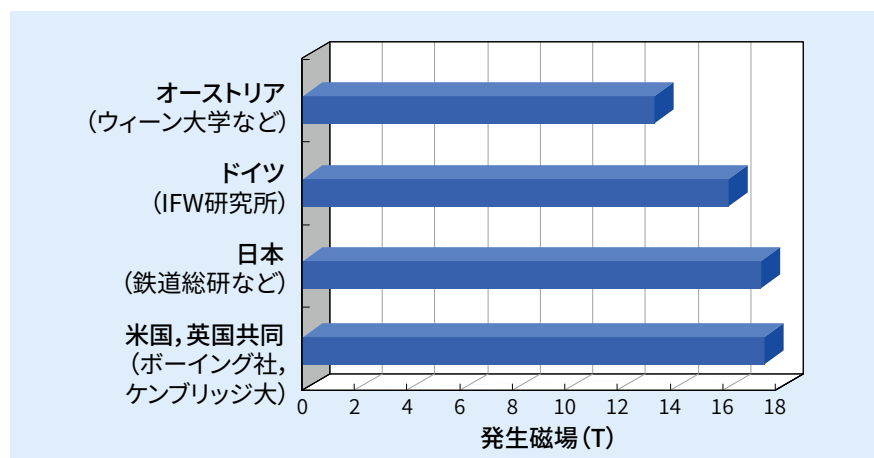


図2 超電導研究の国際間競争 超電導材(バルク)の発生磁場

径1mmの超電導線材を液体窒素に浸して1000Aもの電流を流すことができます。これらを送電応用に活用すれば、直流の大電流送電が可能となります。このように超電導材の研究成果を生かし、応用研究や機器開発に取り組んでいます。開発した材料について

は、図1の左下に示すように、顕微鏡観察により欠陥となる空隙の有無の評価、材料の曲げ試験、および通電試験などを行い、評価結果を材料製作側へフィードバックしています。完成した超電導材を用い、ケーブル巻線やコイル化の技術開発を進めています。ケー

ブルの巻きピッチの調整や、曲げ試験の結果を反映することで、鉄道用のケーブルやコイル設計を行い、試作を実施しています。このサンプルを用いて冷媒中における曲げ試験などを行い、鉄道応用のための超電導機器の実現を目指しています。

超電導き電システムの開発

現在、送電線に使うための超電導ケーブルの開発を進めています³⁾⁴⁾。これらを鉄道用の送電線(き電線)に使用するため、鉄道仕様にあった各種評価試験を行っています。都市部の列車の多くは2~5kmおきに設けられた変電所で、電気を交流から直流に変えて運転されています。変電所間の距離が長いと、変電所から架線に電気を送る電線の電気抵抗によって、送電損失や変電所間の電圧降下が生じま

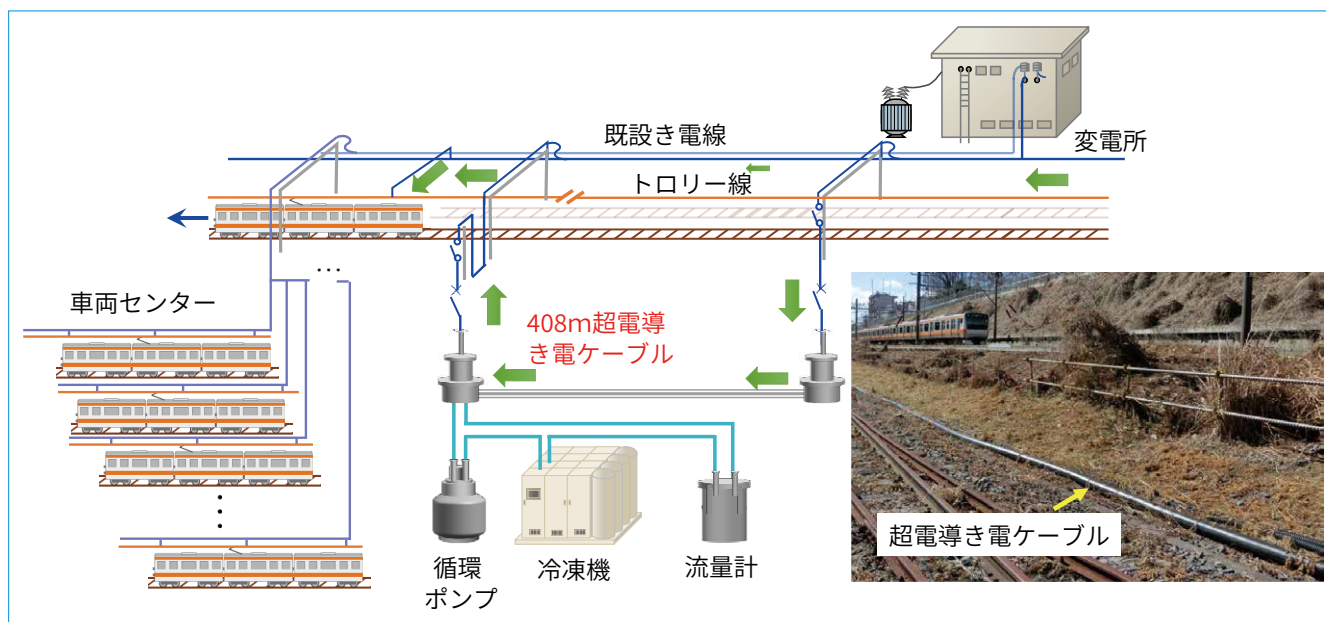


図3 鉄道路線に導入した超電導き電システム

す。運行に必要な電力を確保するためには、変電所を細かく設置しなければなりません。費用や用地の制約があり増設は難しいという問題があります。超電導き電ケーブルを導入することで、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が可能となります。また、電車ではブレーキをかけることで発生した回生電力を、架線を通じて近くを走行する他の電車に送ることができますが、電車の距離が離れている場合は、回生失効が起こりエネルギーを伝達できません。超電導ケーブルをき電線に導入した場合、送電にロスがなく遠くまで電力を送ることができるため、回生失効の抑制が可能となります。また、日中を走行する旅客列車と、夜間を走行する貨物列車が併走している都市間の路線もあり、日中と夜間で電力需要が大きく異なります。超電導き電ケーブルを用いれば、この電力の需要が多い箇所においても変電所の増設を必要とせず、列車に電力を供給することができます。また、地下鉄などで使用される直流600Vの比較的電圧の低い路線

では、電流が多く必要になり、電圧降下の影響が顕著になる場合があります。こうした路線にも超電導き電ケーブルの導入が期待されています。

前項で示した基礎的な超電導材料研究をもとに超電導が動作できるための周辺技術を構築し、鉄道仕様に適合したシステム設計を行うことにより、図3に示すような超電導き電システムの原型が完成しました。現在、構内試験線での試験走行を経て、営業線における走行実証段階まで進んでいます。直流1500Vの路線である中央本線(JR東日本)のき電回路に、ケーブル長408mの超電導き電システムを接続し、システムの片側にのみ、冷凍機、循環ポンプなどの冷却システムを配置しました。液体窒素を用いて冷却することで、超電導状態として使用し、電気抵抗ゼロのき電回路を構築しました。

車両センターに留置した車両(E233系、10両編成)に対して、全車両の空調、照明などのために電流を流しました。結果、超電導き電システム接続時にシステム両端の電圧はほぼ一致し、既設き電線に通電した時に測定された

電圧降下が抑制されていることを確認できました。また、超電導き電システムで送電することにより、送電線での電力損失量が減少することを確認しました。

次に、通常運転ダイヤに、臨時列車(E233系、10両編成)を加え走行させるとともに、車両センターでは回生電力を消費するために留置車両10編成の補機運転を行いました。走行試験の結果、加速時には、最大で2200Aを超える電流が、変電所から本システムを通じて走行列車へ流れました。また、ブレーキ時には走行列車からの回生電流が本システムから逆方向に流れ、車両センター内の車両などへ送電されていることを確認できました。

これからの超電導研究

今後、超電導き電システムについては、超電導材の研究とともに、鉄道き電用のケーブル長尺化へ向けた冷凍機、循環ポンプ、断熱管の開発を進めます。また、超電導材を用いた電力貯蔵装置の開発も進めています。蓄電機器の一つとして、超電導線材で作られたコイ

超電導基礎研究

応用研究

超電導送電技術

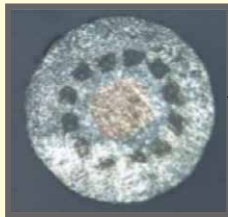


超電導蓄電技術



未来型研究

水素冷却に適した線材 (MgB₂)



コイル化に成功

水素冷却による基礎実験



図4 これからの超電導研究の取り組み

ルを用いた、超電導磁気エネルギー貯蔵装置 (SMES) があります。最大の特徴は、瞬時の充放電が可能となることです。ただし、鉄道路線で使用するためには、超電導の電流制御技術が必要となります。これまでにこの技術が構築されておらず、この課題の研究に取り組み始めています。

未来型研究として、二酸化炭素を排出しないエネルギー源である水素の活用に向け、液体水素温度 (20 ケルビン) に対応した新しい超電導素材の研究を進めています。経済性に優れた新素材である二ホウ化マグネシウム (MgB₂) 材の開発とコイル化技術を進め⁵⁾、液体水素を冷媒として用いた基礎実験も開始しています (図4)。

本号では、超電導き電ケーブルのシステムの実路線への接続方法とケーブルの長尺化に必要な接合技術、超電導

磁石の異常検知手法、関連する研究としてリニア技術に応用したレールブレーキ、推進コイルの電磁波による診断手法について紹介します。

おわりに

超電導の応用技術開発においては、要素技術の向上が直接応用機器の性能に反映されます。そのため、超電導の基礎研究が重要となり、今後も材料の製作から応用へ向けた一貫した研究開発に取り組んでいきたいと考えています。

なお、これらの研究の一部は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金、科学技術振興機構 (JST) の研究課題「次世代鉄道システムを創る超伝導技術イノベーション」および先端的低炭素化技術開発 (ALCA) の支援を受けて行いました。[RRR]

文 献

- 1) M.Tomita, M.Murakami: High-temperature superconductor bulk magnets that can trap magnetic fields of over 17 tesla at 29 K, Nature, Vol. 421, No. 6922, pp. 517-520, 2003
- 2) J.H.Durrell, A.R.Dennis, J.Jaroszynski, M.D.Ainslie, K.G.B.Palmer, Y-H.Shi, A.M.Campbell, J.Hull, M.Strasik, E.E.Hellstrom, D.A.Cardwell: A trapped field of 17.6T in melt-processed, bulk Gd-Ba-Cu-O reinforced with shrink-fit steel, Superconductor Science and Technology, Vol. 27, No. 8, 2014
- 3) 富田優: 超電導き電システムによる列車走行試験, JREA, Vol. 63, No. 1, 2020
- 4) Superconductors drive trains, Nature, Vol. 542, No. 7641, p. 275, 2017
- 5) 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, 2018