

表1 超電導体の転移温度と冷媒の沸点温度

転移温度 (°C)	材料	分類	備考
-135	Hg ₁₂ Tl ₃ Ba ₃₀ Ca ₃₀ Cu ₄₅ O ₁₂₇	銅酸化物系	物質発見レベル
-162	液化メタンの沸点		
-163	Bi ₂ Sr ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀	銅酸化物系	主に液体窒素で応用
-181	YBa ₂ Cu ₃ O ₇	銅酸化物系	
-196	液体窒素の沸点		
-218	SmFeAs	鉄系	主に液体ネオン・液体水素で応用
-232	CeFeAs	鉄系	
-234	MgB ₂	金属系	
-246	LaFeAs	鉄系	
-246	液体ネオンの沸点		
-250	Nb ₃ Ge	金属系	
-253	液体水素の沸点		主に液体ヘリウムで応用
-255	Nb ₃ Sn	金属系	
-257	NbN	金属系	
-264	NbTi	金属系	
-266	Pb	金属系	
-269	Hg	金属系	
-269	液体ヘリウムの沸点		
-272	Al	金属系	

超電導材料の開発

超電導材料は、形状、使用法の違いからバルク材と線材に分けられ、その実用化に向けて活発に研究開発が進められています。材料によって超電導状態になる温度（超電導転移温度）が異なるため（表1）、応用先に応じて、適切な材料が選択されます。超電導転移温度の比較的低い金属系超電導体では、液体ヘリウム、液体ネオン、液体水素を冷媒として用いることが多く、転移温度の比較的高い銅酸化物系超電導体では、主に液体窒素が使われます。液化メタンの沸点よりも高い超電導体も存在しますが、物質発見レベルにとどまり応用は難しいというのが現状です。昨今、安価な液体窒素で動作可能な、ビスマス (Bi) 系、レアアース (RE: 希土類元素) 系の高温超電導体の応用が主に期待されています。

超電導バルク材には、イットリウム (Y) などの RE 系元素を含む酸化物からなる RE 系バルクと、マグネシウ

ム (Mg) とホウ素 (B) からなる二ホウ化マグネシウム (MgB₂) バルクがあり、いずれもかたまり状の材料で主に磁場応用として開発されています。一般的な永久磁石が1T (テスラ) 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材の発生磁場は17T にも達します¹⁾。この超電導バルク材は、分析器の磁場発生源や薬剤の磁気搬送、電流リード、磁気軸受部などに応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ます。材料開発として、高い磁場特性を得るための焼成条件の探索や、強度向上のための樹脂含浸などが行われています（図2）。

一方、高温超電導線材はBi系とRE系を中心に研究開発が進められており、冷却することで、いずれも一般の銅線と同じように使用できます。電気抵抗がゼロとなるため、送電線に利用できれば送電距離による損失がなく電気を運べることから、冷却を考慮してもメリットが活かせる電流値の高い大都市



図2 樹脂含浸した超電導バルク体¹⁾

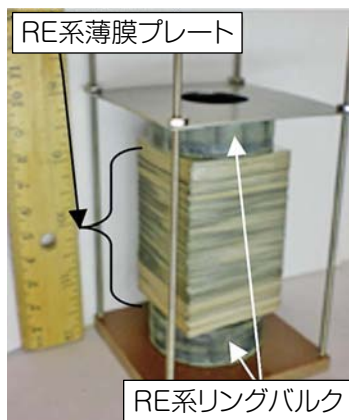


図3 小型超電導マグネットの磁場均一化

圏などの直流電化線区への活用²⁾、および回転機器や磁場発生装置の巻線への応用が期待されています。

強磁場応用における研究開発の動向

超電導バルク材は、冷凍機による冷却で強力な磁場を発生する小型な超電導磁石として活用が可能であり、超電導線材をコイル状に巻線した超

電導コイルマグネットよりも、システムの小型化や低コスト化が期待できます。核磁気共鳴 (NMR) /MRI 応用に向けた超電導バルク磁石の開発については、磁場の高特性化と大口径ポア化に向けた研究が進められています。鉄道総研では、リング形状に加工した RE 系超電導バルク材や MgB₂ 超電導バルク材を用いた小型超電導マグネットの高品質磁場化、大口径ポア化を進めるとともに、マサチューセッツ工科大学と共同で RE 系薄膜プレートと組み合わせることによる磁場均一化に取り組んでいます（図3）³⁾。とくに大口径ポア化が実現できると、従来の大型超電導コイルマグネットとは異なり、高温超電導バルク材を使った可搬性を有した小型な超電導マグネットが実現でき、必要な場所に任意の磁場空間を自由に移動させることが可能となります。これまで、樹脂で含浸した RE 系リング状超電導バルク体を用いて、冷凍機で冷却可能な小型超電導マグネッ

トを開発しました(図4)。また、超電導バルク体を用いたドラッグデリバリーシステム(DDS)の開発を医学系の大学と共同で行い、5T級のRE系超電導バルク体を用いた試作機を製作し(図5)、磁気応答薬剤の誘導集積効果を評価しました⁴⁾。

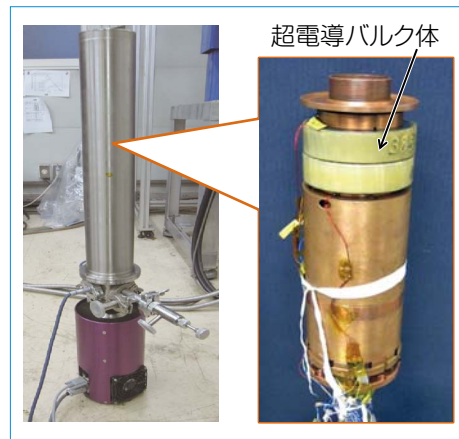


図4 小型超電導マグネットの開発

送電応用における研究開発の動向

2007年から直流区間用超電導送電の研究開発に着手し、2010年には、過密路線で使用可能な10kA以上の通電容量を有する超電導ケーブルを製作しました。2011年には、冷却システムとして直接冷却方式、対向流循環方式を採用した超電導き電ケーブルシステムを製作し、屋内において試験を実施しました。2012～2013年には、冷却システムの全てのユニットを一体化した一体型冷却システムを開発し、超電導き電ケーブルを鉄道総研所内試験線に敷設し、通電、冷却、課電試験などの試験結果から、

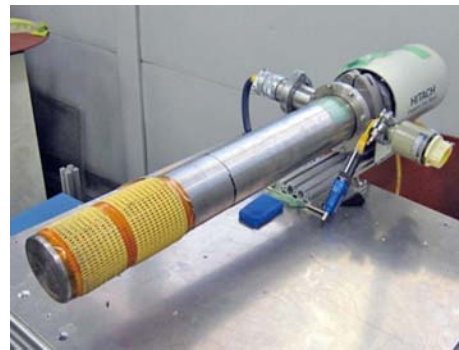


図5 超電導バルクを用いたドラッグデリバリーシステム

鉄道現場に設置する超電導き電ケーブルシステムとしての健全性を確認した後、超電導き電による電車の走行試験に世界で初めて成功しました(図6)。2013～2014年には、き電分岐一區間に相当する300m級の超電導き電ケーブルシステムを製作し、鉄道総研所内試験線において線路^{また}踏切^{また}踏ぎの箇所を組み入れ、鉄道現場を模擬し、ケーブルドラムから実敷設を行いました。X線透過撮影によりケーブル内部の品質評価を行った後、電車の走行試験を実施しました。2015年には、営業線である伊豆箱根鉄道駿豆線にお

いて、超電導き電ケーブルを用いた電車走行試験を実施し、超電導き電におけるき電回路への接続方法を確立しています⁵⁾。

き電ケーブルのほかに、超電導技術の在来鉄道への応用として、車両用超電導変圧器の開発が行われています。Bi系超電導線材を用いた新幹線の架線電圧25kVに対応する超電導主変圧器を試作し、その基本特性の評価を行ってきました。低交流損失型超電導線を用いた巻線と、冷凍機や圧縮機などを組み込んだ冷却システムを導入し、超電導主変圧器を組み上げています(図7)。冷却容器内に液体窒素を注液して冷却後、通電試験による損失の評価を行っており、交流損失低減対策を取り入れた低交流損失超電導線を用いた巻線による効率の向上、大容量で軽量な冷凍機を含む冷却システムの見通しを得ています。

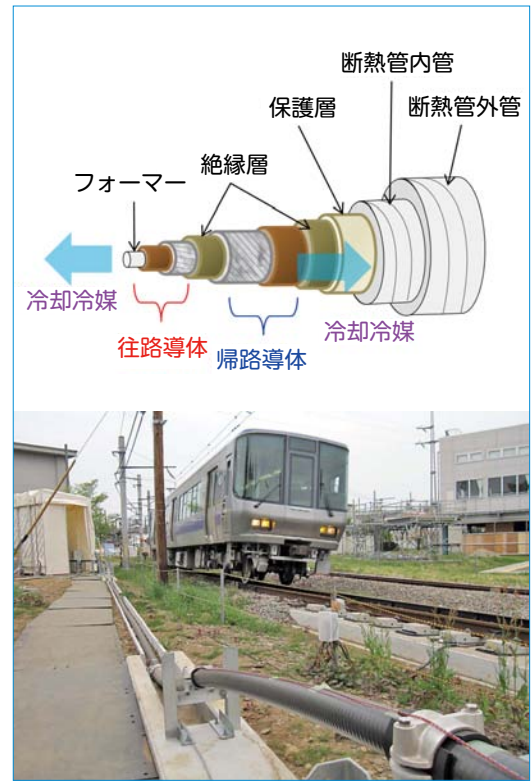


図6 超電導き電ケーブルの開発

デバイス応用における研究開発の動向

超電導材料を用いた検査機器として、高感度磁界計測用の超電導量子干渉計の開発が進められています。高感度な超電導量子干渉計素子を製作し、高感度磁界計測に使用するため、システムを組み上げ動作を確認し、磁場計測を行っています(図8)。ピコテスラ(pT)オーダーのテスト信号を用いて計測を行い、1ナノテスラ(nT)以下の磁場が計測可能であることを確認しています。

電力貯蔵における研究開発の動向

超電導を使った蓄電システムとしてフライホイールがあります。特徴として、円盤状の部材を回転させ運動エネルギーとして貯蔵し、回転力と電力を相互に変換させるシステムであり、装置の回転軸と軸受部分に超電導材料を使用しています(図9)。



図7 超電導主変圧器

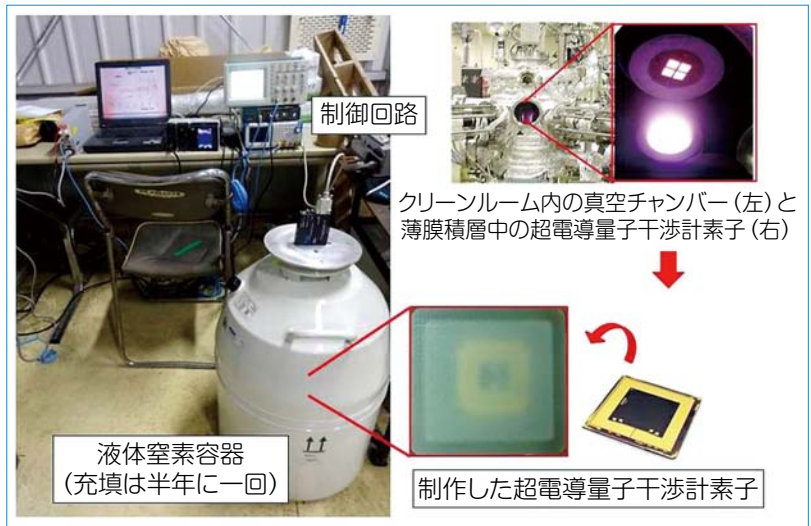


図8 超電導量子干渉計



図9 超電導フライホイール

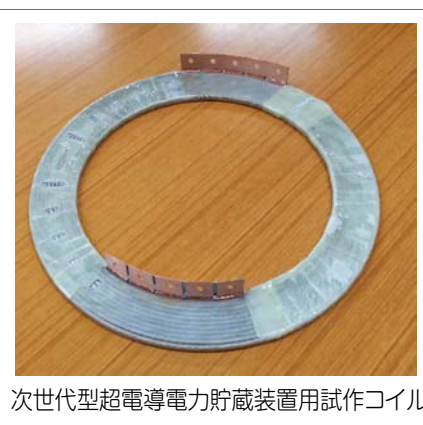


図10 超電導電力貯蔵装置の開発

また、超電導線材を用い、負荷平準化を目的とした電力貯蔵装置 (SMES) があります。超電導線材で作られたコイルに電気エネルギーを直接貯蔵し電気がロスなく流れ続けることができ、瞬時の充放電が可能となります (図10)。これまで、ニオブ系などの金属超電導体が使われていますが、次世代に向け MgB₂線材を使ったコイルの研究開発が昨今、始められています。

おわりに

高温超電導体が発見され約30年が経ち、いくつかの分野で産業応用が開花しようとしています。その中でも近年、鉄道分野での期待が大きく、鉄道の将来に向け、基礎的な材料の製作から応用に至る研究を行っています。応用研究では、主に超電導き電ケーブル

が実証フェイズへと進むところであり、その他応用も含め産業応用につながる研究開発を進めていきます。

なお、これらの研究の一部は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金、科学技術振興機構 (JST) の研究課題「次世

代鉄道システムを創る超伝導技術イノベーション」および先端的低炭素化技術開発 (ALCA) の支援、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の助成を受けて行っています。 [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) Superconductors drive trains, Nature, Vol.542, No.7641, p.275, 2017
- 3) Y.Iwasa, Seung-yong Hahn, M.Tomita, Haigun Lee, J.Bascunan : A "persistent-mode" magnet comprised of YBCO annuli, IEEE Transaction on Applied Superconductivity, Vol.15, Issue.2, pp.2352-2355, 2005
- 4) 入澤覚, 村垣善浩, 伊関洋, 富田優, 西嶋茂宏 : バルク高温超電導磁石を用いた磁気誘導ドラッグデリバリスシステムの集積制御の可能性検討, 東京女子医科大学雑誌, Vol.82, No.4, pp.208-215, 2012
- 5) Masaru Tomita, Kenji Suzuki, Yusuke Fukumoto, Atsushi Ishihara, Tomoyuki Akasaka, Yusuke Kobayashi : Energy-saving railway systems based on superconducting power transmission, Energy, Vol.122, pp.579-587, 2017