

# 高温超電導材料の研究と 鉄道へ向けた応用

富田 優  
材料技術研究部(超電導応用 研究室長)



とみた まさる

## はじめに

現在、高温超電導材料は、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。高温超電導材料は形状、使用法の違いからバルク材と線材に分けられます。

超電導バルク材は、イットリウム等の希土類元素、バリウム、銅の酸化物からできたかたまり状の材料です。一般的な永久磁石が1テスラ以下の磁力であるのに対し、今までに開発された超電導バルク材で最も強力な磁石の発生磁場は17テスラにもなり、これは1平方センチメートルあたり重さ1トンの鉄をも持ち上げることができる力に相当します。

超電導線材はビスマス系とイットリウム系を中心に研究開発が進められています。いずれも一般の銅線と同じように使用できますが、電気抵抗がゼロのため、送電線に活用すれば、送電距離による損失がなく、どこまでも損失なく電気を運べます。ビスマス系線材は銀をシース材料として製作するのに対し、イットリウム系線材はニッケル系等の基板を用いて製作する薄膜状線材です。ビスマス系線材は高い信頼性とともに入業化が進んでおり、イットリウム系線材は将来の低コスト化が期待されています。

現在、鉄道総研では、これら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。超電導材の標準品を応用機器に使用する限りだけでなく、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、超電導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の応用開発における在来方式鉄道と浮上式鉄道に向けた研究開発の取組みを紹介します。

## 超電導バルク材の製作・改良

超電導バルク材が永久磁石よりも高い磁場を発生できるのは、材料内に磁束を閉じ込め

ることができるメカニズムがあるからです。この現象をピン止め効果といいます。超電導はもともと磁場を嫌い排除する性質があります。超電導材料の中に微細なピン止めセンターと呼ばれる超電導でない不純物の常電導相を分散することによって、磁力線がこのピン止めセンターに集まります。非常に微細な常電導相を多く分散するなどの工夫をすることにより、ピン止め点が増え永久磁石よりはるかに高い磁場を発生できるようになります。同時にこの原理で材料にゼロの抵抗で流せる電流の限界値(臨界電流)も上がり、高い通電電流を得ることができます。超電導バルク材を活用した応用機器としては、フライホイール、電流リード、NMR(核磁気共鳴)分析器、磁気分離装置、永久電流スイッチ素子、超電導モーター等があります。

電気鉄道では再生電力の発生やダイヤピーク時の電力供給等、変動する電力の平準化が必要とされています。超電導バルク磁石の磁気浮上を応用することによって、フライホイールといわれる浮上した円板を摩擦なく回転させて、エネルギーを効率よく貯蔵することができ、電力使用の平準化を図ることができます。電鉄用のフライホイールへの超電導バルク材応用として、図1に示すようなガドリニウム系超電導バルク材を試作し、材料の特性評価を行っています。この開発では、材料の大型化を目指した製作プロセ

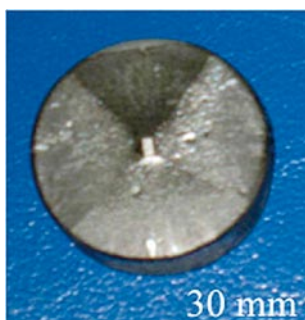


図1 磁気浮上用ガドリニウム系超電導バルク材料

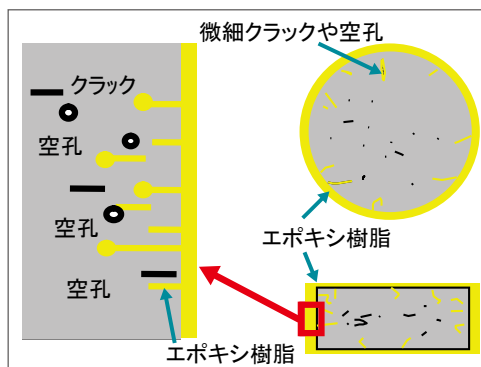


図2 超電導バルク材への樹脂含浸技術

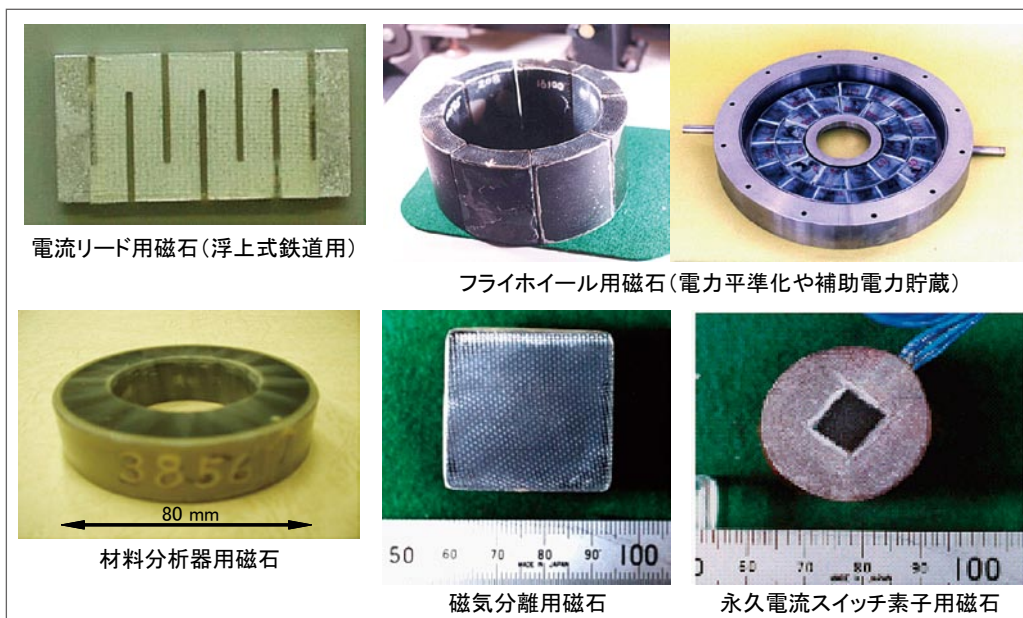


図3 樹脂含浸を施した超電導バルク磁石の応用例

スの研究を進め、フライホイールを用いた鉄道用電力貯蔵装置に必要な直径60mmの超電導バルク材の実現を目指しています。

浮上式鉄道の超電導コイルを磁石として使用するためには、まず外部から電気を供給しなければなりません。外部の常温域から超電導コイルのある低温域までは、リード線(電流リード)による電流の通り道が必要となります。現在、浮上式鉄道で使われている超電導磁石の電流リードは、銅合金製のため、熱伝導率が高く、低温域への熱の侵入を抑制するために、断熱距離を大きくとる必要があり、全長が長くなっています。また、超電導磁石の励磁時、すなわち電流リード通電時はジュール発熱を多くのヘリウムガスによって冷却するため、過渡的にヘリウム再液化用冷凍機的能力が低下し、通常の冷凍能力の状態に復活するまでは1～2時間を要することとなり、運転効率が低下するといった問題もあります。超電導バルク材は熱伝導率が低く、通電時にジュール発熱がない利点があることから、電流リードへの適用が期待されています。しかし、実際の使用時には冷却時の熱応力をはじめ、コイルの磁場によって受ける力や浮上式鉄道の走行振動などによる力が加わるため、機械的強度において厳しい要求があります。さらに、超電導バルク磁石はセラミックス材料であり、製造過程で一方に強度の異なる面(へきかい面)ができ、金属に比べて機械的特性が劣ってしまうといった問題がありました。そこで、図2に示すようなエポキシ系樹脂を真空中で超電導バルク材に含浸し、機械的特性を向上する技術を開発しました。この樹脂含浸技術は形状によらない材料マトリックス

そのものを強化できるため、超電導バルク材の電流リードやフライホイールへの応用の他、小型の材料分析器、磁気分離装置、永久電流スイッチ素子や超電導モーター等への応用、将来の鉄道への応用にもつながる幅広い技術分野に活用されています(図3)。

### ビスマス系線材の評価・改良

変圧器等の交流機器への応用では、ビスマス線材を使用した場合、外部変動磁場に依存する交流損失が発生するため、交流損失の低減が課題となっています。そこで、ビスマス系線材を試作し、交流損失特性及び臨界電流特性について評価しました。<sup>1)</sup>交流損失の低減対策として、以下の内容が効果的であることが知られています。

- (1) 幅の狭い超電導線の形状
- (2) 直線でない交差したツイスト状のフィラメント構造
- (3) フィラメントの周囲へのバリア層の導入

ここでは、(1)、(2)について、その臨界電流特性、交流損失特性について評価しました。その結果、垂直磁界印加時の交流損失は、幅が狭いほど低減されており、平行磁界印加時の交流損失は線材の厚さが薄いほど低減されることがわかりました。

一般に超電導線は、多数本の超電導フィラメントを常電導母材に埋め込んだ形状をしており、軸の周りに直線ではなくツイスト状に交差されています。ツイストを導入することにより、フィラメント間を流れる遮蔽電流を速やかに減衰させることができます。今回の実験でツイストピッチが短いほど、垂直磁化損は低減されることもわかりました。

表1 低交流損失線材の仕様

	低交流損失線材	従来の線材
幅 [mm]	2.6	4.2
厚 [mm]	0.19	0.25
ツイストピッチ [mm]	8	∞
臨界電流値 [A]	43	120
Je [kA/cm <sup>2</sup> ]	8.7	11.4



図4 従来の線材(上)と低交流損失線材(下)

これらの実験を受けて、交流損失、臨界電流密度に加え量産性を考慮した、表1に示すような低交流損失のビスマス線材を製作しました(図4)。

### イットリウム系線材の評価

ビスマス線材と比較して、イットリウム系線材は、高磁界中での臨界電流が大きく、線材の分割加工による低交流損失化と将来的には低コスト化が図れると考えられ、超電導機器への適用が期待されています。しかしながら、現在のところ工業材料としては十分な信頼性が得られていないのが実情です。

実用化への課題の一つとして、複合材料の剥離の問題があります。イットリウム系線材は、セラミックスの多層薄膜と金属テープの複合材であるため、使用の際、層間で剥離が発生し超電導線材として機能しなくなることがあります。実用化には線材の剥離特性を定量的に把握することが重要といえます。そこでエポキシ樹脂を使ったイットリウム系線材の剥離特性を評価しました。<sup>2)</sup>

実験に使用したイットリウム系線材の仕様を、表2に示します。はじめに、銀安定化層側にエポキシ系樹脂を塗布し、硬化させ、マイクロメータにより膜厚を測定します。温度降下させながら、並行してCCDモニターでサンプルの状態を監視し、剥離が発生した時の温度を調べます(図5)。エポキシ系樹脂とイットリウム系線材の膨張率の違いから、剥離に耐えうる強度の評価ができます。現在まで、イットリウム系線材の中間層(LaMnO)の界面が弱い傾向にあ

表2 イットリウム系線材の仕様

項目	仕様
寸法	0.1 mm × 12 mm 幅
$I_c$	>300 A (77 K, 0 T)
線材構造	Ag/超電導層/中間層 LaMnO/Hastelloy
使用本数	4本
長さ	10 cm

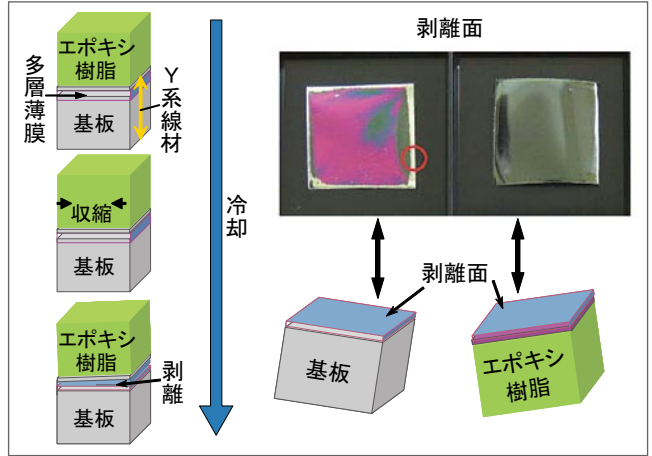


図5 イットリウム系線材の剥離特性評価法と剥離面写真

り、その部分で剥離が起きやすいことがわかりました。

### 超電導線材のコイル化

超電導線材を鉄道車両用の超電導主変圧器、浮上式鉄道用の超電導コイル、電鉄用の超電導き電ケーブル等に応用する場合、最適なコイル化設計と製作技術が必要になります。超電導主変圧器の開発においては、幅狭化、ツイストの導入、バリア層の導入などの交流損失低減の対策により、線材1本あたりの臨界電流値が低下し、並列導体を構成する素線数が増加してしまう課題があります。そこで、コイル部を効率化し、よりコンパクトな超電導コイルの設計と

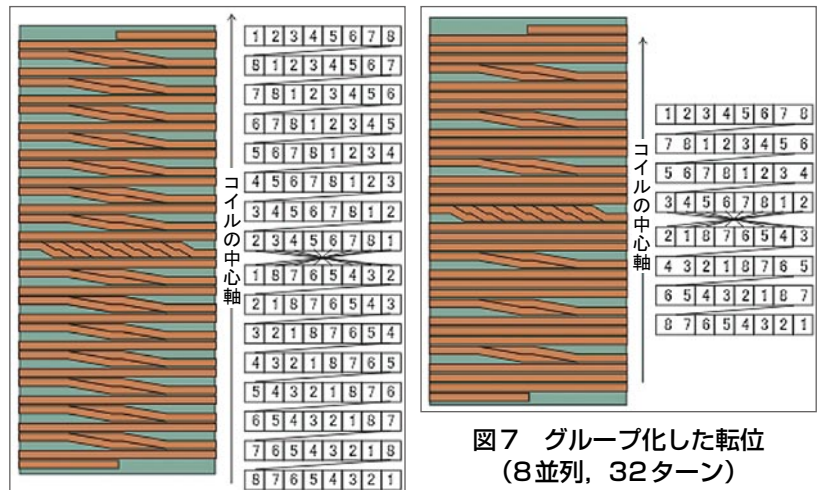


図7 グループ化した転位(8並列, 32ターン)

図6 コイルの転位図例(8並列, 32ターン)

表3 ビスマス系超電導線材の比較

	試作器の線材	低交流損失線材
幅	4.2mm	2.6mm
厚	0.25mm	0.19mm
ツイストピッチ	—	8mm
$I_c$	120A	43A

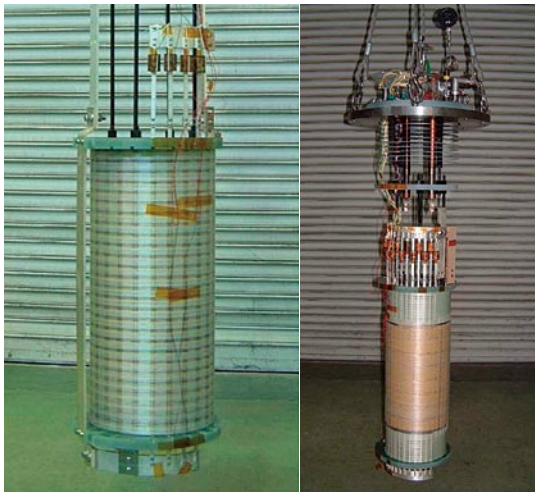


図8 モデルコイルの外観  
(左：1次モデルコイル，右：2次モデルコイル)

試作をしました。<sup>3)</sup>

コイル化での一般的な転位の例を図6に示します。各所で外側の素線を内側に持ってくる転位を施し、真中で全ての素線を入れ替える全転位を施しています。この方法では転位部で1ターン分のスペースを必要とするため、素線数が多くなるほどコイルが縦長になるため、コイル寸法が制限されます。

そこで、多並列導体になった場合でもコイル高さを短くできるように、転位数を少なくした新たな転位方法を考案し、図7に示すような超電導主変圧器の1次および2次巻線を模擬したモデルコイルを製作しました(図8)。これまでに試作した超電導主変圧器に用いたビスマス線材と、低交流損失線材の比較を表3に示します。転位数削減を目的として、外側の隣り合う2つの素線をグループとみなして転位していく方法を用いることで、従来の約1/2の転位数に抑えることができました。

### 超電導線材による電ケーブル開発

電気鉄道の直流電化区間では電圧が1500Vで、許容電圧降下が小さいことから、変電所間隔が2~3km程度となり、路線に多くの変電所が設置されています。超電導材料は物性上、直流で高い定格電流値を示す特徴を備えているため、大都市部の通勤路線の電線に超電導ケーブルの敷設を想定した場合は電圧降下の低減と同時に変電所数の削

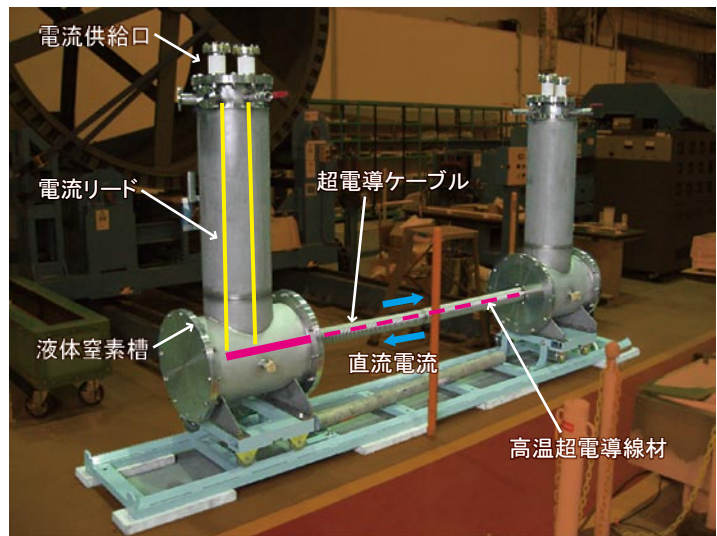


図9 高温超電導線材による電ケーブル試験装置

表4 超電導ケーブルの設計仕様

使用線材	ビスマス系 (Bi-2223) 超電導線材
外径	25.5mm
長さ	2m (ケーブル長)
ケーブル臨界電流値	DC 1500A 以上 (液体窒素中)
荷電特性	1500V

減が期待できます。そこで、このような、直流電線への応用を想定し、1500V、10kA級の超電導ケーブルの実現を目指して、現在、通常時連続運転で使用できる1500V、5kA級の超電導ケーブルに着手しています(図9)。プロトタイプとして、表4のような仕様のビスマス系線材による単層(導体・シールド1層、10本巻き)構造の1.5kA対応のケーブルを試作しました。液体窒素温度での通電試験では、導体部で1.72kA、シールド部で2.2kAの許容通電電流が得られています。

### おわりに

高温超電導材料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、高性能な機器への応用開発では材料製作から応用へ向けた一元的な研究開発が必要とされます。今後も鉄道への応用を進めつつ、超電導の要素技術の向上に力を注いでいきたいと考えています。RRR

### 文献

- 1) 福本祐介 他：低温工学・超電導学会概要集, Vol.76, p.17, 2007
- 2) 富田 優 他：低温工学・超電導学会概要集, Vol.78, p.166, 2008
- 3) 福本祐介 他：低温工学・超電導学会概要集, Vol.79, p.92, 2008