2015 年 1 月 5 日発行

超電導 Web21

（公財）国際超電導産業技術研究センター　〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP　Tel: 044-850-1612

【隔月連載記事】

鉄道と超電導（その 1）
～浮上式鉄道用高温超電導磁石の開発～

公益財団法人 鉄道総合技術研究所
浮上式鉄道技術研究部　部長　長嶋 賢

鉄道に超電導技術を適用する試みは複数ある。鉄道総研で研究テーマ化された内容だけでも、超電導磁気浮上式鉄道（超電導リニア）、超電導き電ケーブル、車両用高温超電導主変圧器、超電導磁気軸受を用いたフライホイール、SQUID によるレールの非破壊検査等がある。今回の連載では、この中からいくつかのテーマについて、鉄道総研の直接の担当者が分担して最新の研究開発状況を紹介することとしたい。

今回は副題の通り、鉄道総研における「浮上式鉄道用高温超電導磁石の開発」状況について紹介する。超電導磁気浮上式鉄道（超電導リニア）の全体概要に関しては本誌 2011 年度の隔月連載記事「やさしい超電導リニアモーターカーのお話」で筆者が紹介したので、バックナンバー（http://www.istec.or.jp/web21/series/series2011-2.pdf）の方をご覧頂きたい。

超電導技術を用いる磁気浮上式鉄道

超電導技術を用いる磁気浮上式鉄道で、実用に最も近いものは日本の JR 方式といえるが、基礎的な研究は世界各国で行われている。2014 年 10 月、ブラジルのリオデジャネイロで開催されたマグレブ国際会議（http://www.maglev2014.com.br/MagLev_2014_Conference_-_Rio_de_Janeiro_-_Home.html）の会期にあわせて、高温超電導バルク体を車両に搭載し、永久磁石軌道の上を浮上走行するタイプの磁気浮上式鉄道のデモ走行が、リオデジャネイロ連邦大学構内で実施された。大学内の 2 つの建物を結ぶ短距離のもので、速度も低速であるが、このシステムを開発関係者は「マグレブコブラ」と呼んでいる（http://www.maglevcobra.coppe.ufrj.br/index.html）。2014 年 5 月には、これとほぼ同様の浮上方式に真空チューブを組合せたシステムで時速 2900km/h を目指すとする発表が中国でなされた（http://english.swjtu.edu.cn/public/viewNews.aspx?ID=154）。このバルク体を用いる浮上方式は、バルク体のピン止め力を用いて安定浮上するので、車両の停止時にも浮上できることや、永久磁石軌道がうまく出来ていれば浮上走行に伴う磁気ドラッグが少ない等のメリットがある。しかし、バルク体と永久磁石の組合せで使用する限り、浮上力密度に限界が有るため、列車を浮上させるためには多くの超電導バルク体が必要である。また、永久磁石で軌道を構成することはインフラ側のコスト増の要因となるだけで無く、保守も難しくなるなどのデメリットも考えられる。

一方、JR 方式の超電導磁気浮上式鉄道は、車載超電導磁石では電気抵抗の損失なく数百 kA の大起磁力を確保し、地上コイルへの通電電流は数 kA だけに限定することによって通電にともなう損失を小さくでき、あわせてインフラコストも低減できる仕組みとなっている。したがって JR 方式の超電導磁気浮上式鉄道システムでは車載超電導磁石は非常に重要なパーツであり、その高性能化と小型軽量化、また高信頼性化がこれまで成功裡に進められてきた。この流れの中で将来を考えると、高温超電導磁石は当然、選択肢の一つとなってくる。これまで、鉄道総研としてはこのような考えの元、2005 年から国土交通省の国庫補助金を受けて、高温超電導磁石の開発を進めてきた。特に高磁場中での特性に優れた次世代高温超電導線材（イットリウム系線材）を選定してこれを車載

© ISTEC 2015 All rights reserved.

超電導磁石に適用する開発を進めてきたので、以下でこれまでの経緯を説明する。

鉄道総研における高温超電導磁石の開発

鉄道総研で最初に製作した高温超電導磁石は実コイルの 1/4 サイズのレーストラックコイルを内蔵した図 1 の超電導磁石である。(http://bunken.rtri.or.jp/PDF/cdroms1/0001/2011/0001003424.pdf)。これは冷凍機が無い超電導磁石である。と言っても初期冷却は必要なので、はじめに冷却装置を磁石に接続し、低温のヘリウムガスを内部の配管に流して、20 K 近くまで冷却する。その後、冷却装置を切り離すと、クライオスタット（超電導コイルの容器）の断熱効果と高温超電導コイル自身の持つ熱容量により、50 K 以下の温度を 8 時間以上維持できるものである。また、最大磁場はコイル温度 50 K の時に 1 T と実機の磁場の 1/5 の磁場を発生できる。低温部に機械式スイッチ（図 1 右の黒いハンドルが操作部）も備えており、超電導コイルに通電した後でスイッチを閉じれば電源から切り離しても磁場を出し続けることができる。コイルを製作する時に次世代線材特有の問題で線材に若干ダメージがあったためか磁場減衰が予想より大きかったが、現在この問題は技術的に克服したので、実機サイズのコイルを製作すれば、コイル自体のインダクタンスが大きいこともあいまって磁場減衰は大幅に低減することができる見通しを得た。一方、上記で低温維持時間を 8 時間としているが、実機サイズのコイルを製作すればスケール効果により低温維持時間が 1 日（24 時間）を上回ることが推算できる。そうなると夜間に車両基地で磁石を冷却し、日中は冷凍機無しで超電導磁石を運用することも考えられ、超電導磁石の重量や車上電源容量の大幅な低減が可能となる。

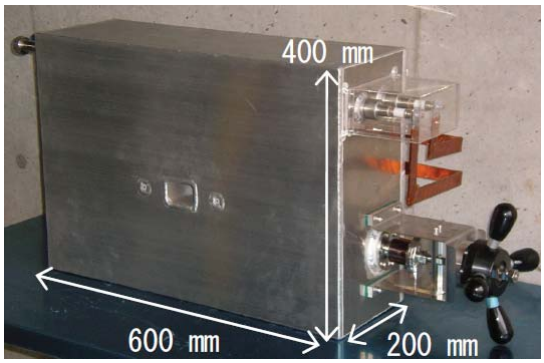


図 1　冷凍機無しで超電導状態を長時間維持する高温超電導磁石

次に試作したのが図 2 の磁石である。これは単段 GM 冷凍機で 45 K まで冷却すると実機並の 5 T の磁場を発生できる（http://bunken.rtri.or.jp/PDF/cdroms1/0001/2013/0001003707.pdf)。冷却温度が上がったことで輻射熱シールド板が省略でき、クライオスタットの構造も簡素になった。また、冷凍機も簡単な構造で効率の高いものが使える様になった。コイル自体は内径 50 mm、外径 130 mm と非常に小径だが、巻線断面の電流密度は低温超電導線材を使用している実機コイルに近い。この磁石の試験結果から、従来の 4.2 K で動作するいわゆる低温超電導コイルに近い寸法と重量で、45 K で動作する高温超電導コイルが構成できることが明らかになった。

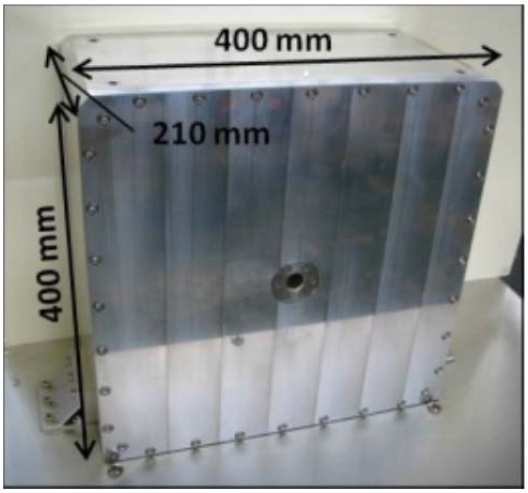


図 2 冷却系を簡素化した 5T 級高温超電導磁石

図 3 は実機大高温超電導コイルの熱シミュレータである（http://bunken.rtri.or.jp/PDF/cdroms1/0001/2014/0001003849.pdf)。超電導コイルと並行して開発を進めていたパルス管冷凍機で所定の性能を満足するものが完成した(「並列パルス管冷凍機を用い

© ISTEC 2015 All rights reserved.

た車載超電導磁石冷却システムの開発」，低温工学,Vol.48,No.7,pp.377-381,2013）ので、これを組み込んだ装置である。実機同様の断熱構造と実スケールの熱特性評価用レーストラックコイル（熱的な特性が次世代高温超電導コイルと同様なダミーコイル）を有し、実機大高温超電導コイルの熱特性をあらかじめ把握すると同時に冷却構成の最適化を図るための熱的なシミュレーション実験ができる。その際、コイルの温度分布を効率的に測定するために鉄道総研で開発した光ファイバ温度センサ（http://bunken.rtri.or.jp/PDF/cdroms1/0001/2014/0001003850.pdf）も用いる予定である。さらに実機大高温超電導レーストラックコイルが完成した際にはこの装置に組み込んで冷却性能や通電性能の確認試験をすることもできるように設計されている。

図 3　実機大高温超電導コイルの熱シミュレータ

鉄道総研では次世代高温超電導線材に最適な巻線構造や製造方法を独自に考案し、このアイデアに基づいた実機大高温超電導レーストラックコイル専用の巻線機も導入した。来年度はいよいよ本格的に実機大コイルの製作に着手する予定である。コイルが完成した際には、熱シミュレータで冷却試験、通電試験を行った後、走行時を模擬した、超電導コイルの加振試験も計画している。

また、超電導磁石単体のハードウェア的な開発だけでは無く、この高温超電導磁石を適用した場合の車両運動はどうなるのか、地上コイルへの影響はどうなるのか等、システム運用時の問題についての検討をはじめたところである。基本的にはどちらに対しても高温超電導磁石の導入は良い効果を及ぼすことを期待しているが、鉄道総研がリニア開発当初から培ってきた知見を活かして、高温超電導磁石の導入効果をシステム規模で多角的、かつ定量的に評価していく予定である。

なお、今回紹介した研究開発は一部、国土交通省の国庫補助金を受けて実施したことを付記する。

超電導 Web21 トップページ

© ISTEC 2015 All rights reserved.

2015 年 3 月 2 日発行

超電導 Web21

（公財）国際超電導産業技術研究センター　〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP　Tel: 044-850-1612

【隔月連載記事】

鉄道と超電導（その 2）
～超電導フライホイール蓄電装置～

公益財団法人 鉄道総合技術研究所
浮上式鉄道技術研究部　低温システム
研究室長　長谷川 均

鉄道に超電導技術を適用する試みは複数ある。鉄道総研で研究テーマ化された内容だけでも、超電導磁気浮上式鉄道（超電導リニア）、超電導き電ケーブル、車両用高温超電導変圧器、超電導磁気軸受を用いたフライホイール、SQUID によるレールの非破壊検査等がある。今回の連載では、この中からいくつかのテーマについて、鉄道総研の直接の担当者が分担して最新の研究開発状況を紹介することとしたい。

今回は副題の通り、鉄道総研における「超電導フライホイール蓄電装置」の開発状況について紹介する。

鉄道を含めた電力事情一般について

2011 年の東日本大震災は、日本のインフラについて直接的なダメージを与えただけではなく、電力系統の考え方そのものにもインパクトを与えた。特に、原子力発電に対する考え方は大きく転換し、電力会社のあり方、送配電分離への移行などシステム全体の変革を求められている。これまでの安定した原子力、火力、水力による発電、送電、配電、消費というエネルギの流れから、風力、太陽光など不安定ではあるが再生可能なエネルギへの移行を進めざるを得ない状況となってきた。消費側の対応としては省エネの推進であるが、これには限界があり、不安定なエネルギを有効に使う手段として、蓄エネの活用が必須という状況になってきている。

一方、電気鉄道についてみてみる。もともと鉄道は、省エネと言われており、人一人を同じ距離、同じ時間で運ぶために必要なエネルギ消費が他の乗り物に比べ小さい。さらに電気鉄道では、減速時に発生するエネルギを電力として回生することができるという大きな利点がある。しかし、ハイブリッド自動車の登場で、この回生エネルギの有効活用は、電気鉄道だけのメリットではなくなってきた。そうすると、電気鉄道における回生電力の無駄、すなわち回生失効は、重要な課題となってきており、何らかの蓄エネ装置の開発が求められている。

蓄エネ装置について

電気エネルギは電子の運動エネルギであり、電圧と電流により単位時間当たりのエネルギが定義される。電気エネルギはクリーンで、扱い易く、送電損失も少なく、漏えいがほとんどない、即応性が高く制御が容易といった利点がある。これは他の、石油やガスなどの燃焼用エネルギ、空圧や油圧などの圧力によるエネルギの伝達に比べ、圧倒的優位に立っているといっていいだろう。ところが唯一かつ最大の欠点として、電気エネルギのまま貯蔵することが非常に困難である（SEMES のように直接電気エネルギを貯める方式もある）。これは電気エネルギを何らかの別エネルギの形に変換し蓄えなければならないことを意味する。このエネルギ変換においては必ず損失が発生してしまい、電気→何らかのエネルギへ変換→エネルギ貯蔵→何らかのエネルギ→電気の変換という流れでは、エネルギ変換が２回入ることになり、大きな損失となってしまう。

© ISTEC 2015 All rights reserved.

蓄エネ装置として真っ先に思いつくのが、二次電池（蓄電池）である。二次電池は電気エネルギを化学エネルギに変換し蓄える。二次電池の歴史は古く、複雑な変換装置も必要としない、排気ガスや騒音なども発生せず、エネルギ密度も大きい。このため、携帯機器、バックアップ電源などで多数使用されている。近年、リチウムイオン電池の登場により、エネルギ密度も格段に高くなり、装置全体の軽量化に貢献している。

二次電池にも課題はあり、寿命や劣化の問題、容量が 100 %使用できない、有害廃棄物の発生、容量により出力が限定される等が考えられる。

これらの問題を解決する手段として、電気エネルギを回転（運動）エネルギに変換して蓄積するフライホイール装置が検討されている。フライホイール装置は、電気エネルギを電動機により回転エネルギに変換する。回転体の損失を抑える工夫をすることで蓄エネを行って、必要な時に電動機を発電機として運転することで電気エネルギとして取り出すことができる。いわゆる弾み車による機械式蓄エネ装置であり、原理としては非常に簡単である。エネルギ密度は二次電池に比べて劣るものの、寿命や劣化の問題など先にあげた欠点を克服することができると考えられている。フライホイール装置が実用化できるポイントは、回転体の損失を如何に小さくするかにかかっている。さらに突き詰めていくと、如何に小さな損失の軸受（ベアリング）を開発することができるかに集約される。

鉄道総研では、このような状況のもと、超電導磁気軸受を適用することで、フライホイール装置が実用化することを目指し開発を進めている（図 1）。

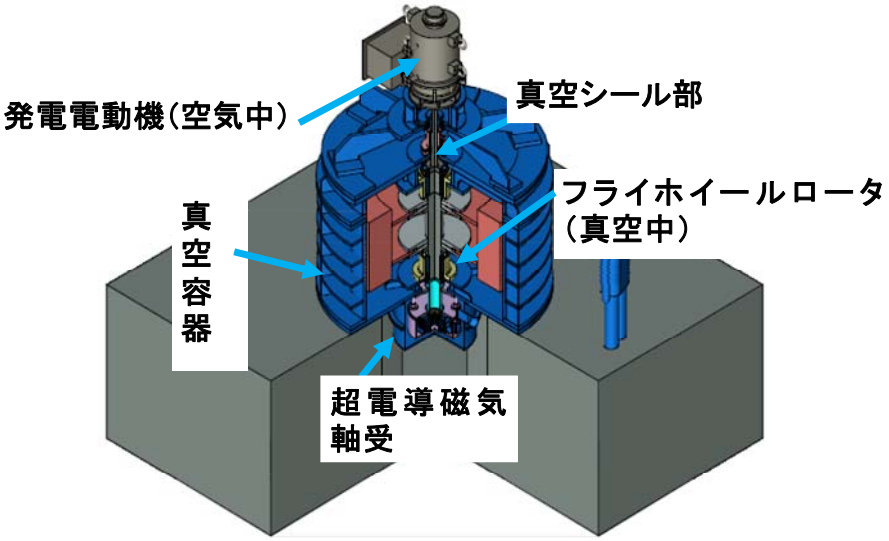


図 1　フライホイール蓄電装置の概要

超電導磁気軸受

人類は車輪が考案された、はるか昔から軸受を作ってきた。軸受は、回転方向にのみ自由度をもち、他の方向に拘束することにより、車輪や回転体の支持に使用される。すなわち、重量物を支えたりした状態でも、スムーズに損失なく回転する装置と言えよう。構造の単純なものとしては平軸受のように円筒の中に軸が通っており、潤滑材などで摩擦を少なくするものがある。数量的に、世の中の大部分を占めているのが、コロや玉を使用したいわゆるボールベアリングであろう。これらの機械的に接触を持った構造の軸受は、大きな荷重を支えられ、ガタも少ないという特徴がある。

© ISTEC 2015 All rights reserved.

一方で、高速回転に向かない、給脂が必要、振動が伝達するなどの欠点もある。

これらの欠点を解決するために考案されたのが、磁気軸受である。磁気軸受は磁力を利用し、ステータ（固定子）とロータ（回転子）の間を非接触で電磁的に支持することで超高速回転にも耐え、摩擦もほとんどなく、摩耗が全くないなどの利点がある。欠点としては、電源や制御装置が必要であり、クリアランス（ギャップ）もある程度大きくなってしまう。

磁気軸受には大きく分けて二種類ある。一つ目が能動型磁気軸受で AMB(Active Magnetic Bearing)であり、もう一つが受動型磁気軸受である。受動型磁気軸受には大きな支持力を安定して発生させるため超電導を使用する方式が大部分であり（永久磁石だけでは安定して浮上することができないため）SMB(Superconducting Magnetic Bearing)と呼んでいる。磁気浮上式鉄道になぞると、AMB がトランスラピッドやリニモなどの吸引浮上方式、SMB が誘導浮上方式である JR マグレブとなる。AMB と SMB の特徴も吸引浮上と誘導浮上との比較とほぼ同じで、ギャップの大きさや電源や制御のあり方が違うこととなる。

超電導磁気軸受を適用したフライホイール装置

フライホイール装置は、回転体の回転数の二乗及び慣性モーメントに比例して蓄えられるエネルギが大きくなる。すなわち重い物を高速で回転することで、大量のエネルギが蓄積されることとなる。回転数には二乗で比例するため、一般的には重量よりも高速で回転させた方がコンパクトになるが、周速度により最高回転数は制限を受ける。これは、ある限度を超える周速度以上になると回転体の破断強度を遠心力が上回ってしまい、破損に至ってしまうためである。回転体の重量は大きいほどよいため密度の高い材料を使用したいところだが、遠心力に打ち勝つためには、強度の高いものが要求される。炭素繊維強化プラスチック(CFRP) はまさにこの特徴にマッチングしており、高速回転させるフライホイール装置にはこの材料が使用される（図 2）。

図 2　CFRP ロータ（クボテック株式会社）

高速で回転させるためには、磁気軸受が必要なことは前述のとおりであるが、鉄道総研では、スケールアップのため、大きな重量の回転体も支えられることを条件として、磁気軸受に超電導方式を採用することとした。

© ISTEC 2015 All rights reserved.

超電導磁気軸受にも様々な方式があるが、大きな重量という点に着目し、ステータに REBCO 系超電導コイル、ロータに Gd 系超電導バルク体を使用した。この方式ではピンニングではなく、反磁性を利用し、理論上超電導コイルの臨界電流までの大きな荷重を支持することが可能となるとされている。

超電導磁気軸受の超電導コイルは冷凍機による伝導冷却であり、50 K 以下を実現し、ロータの超電導バルク体は、希薄ヘリウムによる分子伝導と輻射により冷却され、冷却と風損低減を両立している。

図 3 に示すような構成の軸受により 40 kN(4 tonf) 以上の支持に成功している。支持荷重は、超電導コイルの通電電流の二乗に比例していることが試験結果からも読み取れる（図 4）。

現在、NEDO の助成事業「次世代フライホイール蓄電装置の開発」にて、鉄道総研、クボテック、古河電工、ミラプロ、山梨県の 5 社の協力でこのような超電導磁気軸受を使用した実証機を製作中であり、平成 27 年度には太陽光発電所を利用した、実証試験を行う予定である。

実証機や実証試験の詳細については、後日ご報告したいと考えている。

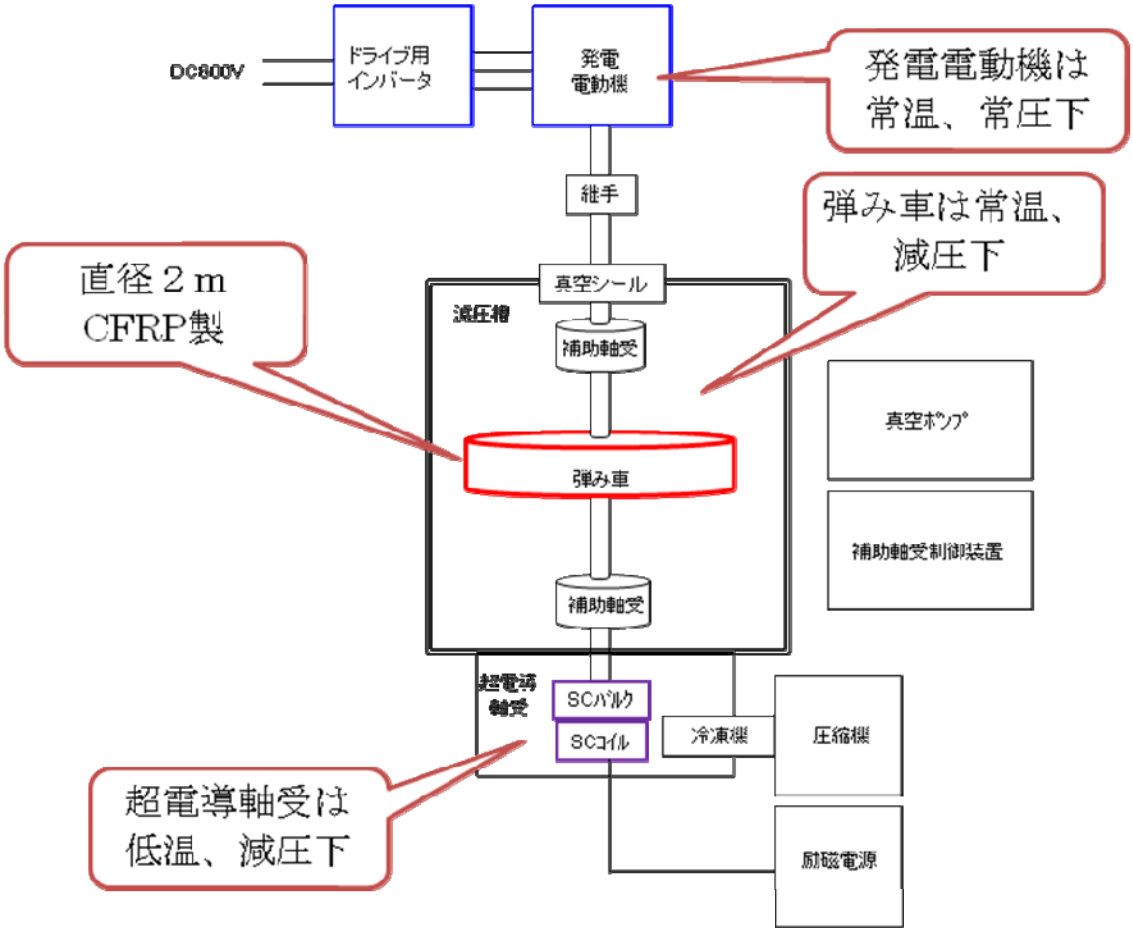
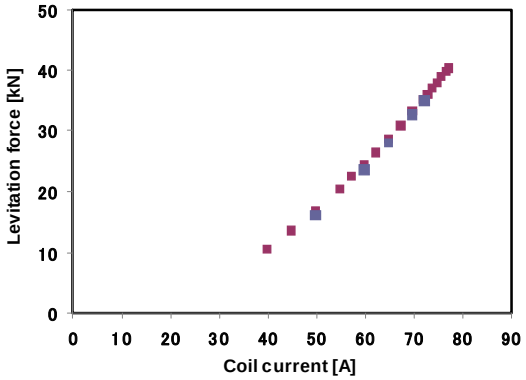


図 3　超電導フライホイールの構成

© ISTEC 2015 All rights reserved.



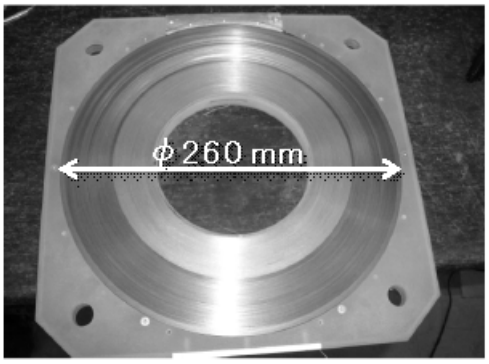


図 4　超電導磁気軸受の支持荷重
（平成 26 年秋季低温工学会 1B-p03「超電導フライホイール蓄電装置用超電導磁気軸受の開発④～冷却試験結果 」向山他）

超電導 Web21 トップページ

© ISTEC 2015 All rights reserved.

2015 年 6 月 1 日発行

超電導 Web21

（公財）国際超電導産業技術研究センター　〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP　Tel: 044-850-1612

【隔月連載記事】

鉄道と超電導（その 3）
～超電導き電ケーブルの研究開発①～

公益財団法人　鉄道総合技術研究所
研究開発推進室 担当部長
超電導き電ケーブル課長　超電導応用研究室長
富田　優

はじめに

信頼性、利便性、経済性、環境調和性を有する鉄道は、エネルギー消費の合理化・効率化が必要とされる今世紀に、ますます重要性を増していく。鉄道技術基盤で電力・電気技術の果たす役割は大きく、そこでは、超電導の持つ低損失、高密度電流、高磁場といった特性に基づいた新しい機器やシステムが大いに活躍できる。また、電気抵抗がゼロで送電できる超電導を鉄道用の送電線に適用することで、回生効率の上昇、電力損失の低減、変電所の負荷平準化や集約化、レール電位の抑制などが期待される。

鉄道用超電導ケーブルの導入効果

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、電源事情などによって異なり、車両に電気を送るためのき電線は、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。このため、変電所間隔は、都市間を結ぶ路線では 10~15 km、多くの電流容量を必要とする大都市圏の路線では 3~5 km 程度であり、多くの変電所の設置が必要である。

超電導ケーブルを鉄道の送電線へ適用すると、超電導体の電気抵抗がゼロである特性から、損失なく電気を遠くまで運ぶことができる。このため、変電所間の負荷平準化や電圧降下の低減による変電所数の削減、回生効率の向上が期待できる。また、レールに流れる帰線電流を超電導ケーブルに流すことで大地への漏れ電流もなくなり、電食の問題も解決できると期待される [1)]。

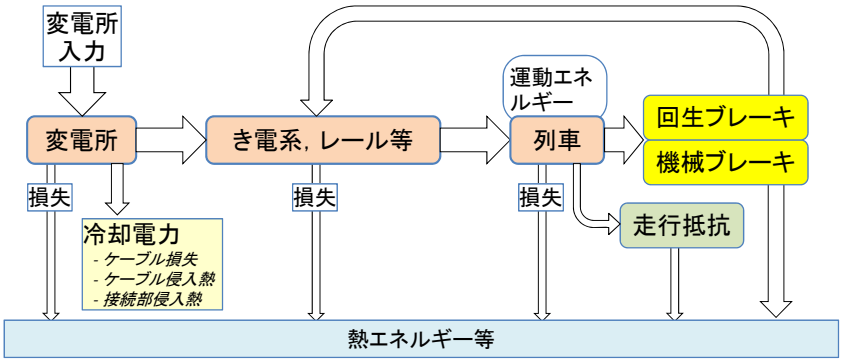


図 1　直流き電系のエネルギーフロー

直流き電回路のエネルギーフローを図 1 に示す。変電所からき電回路（帰線としてのレールも含めて）を通じて電気車に電力が供給され、電気エネルギーが電気車の駆動エネルギーに変換される。

© ISTEC 2015 All rights reserved.

その運動エネルギーの一部は制動時に回生エネルギーとしてき電回路に回生され、残りは機械ブレーキによって熱となる。また、走行抵抗も特に高速時には無視できない。変電所やき電線、電気車の中ではジュール損失等のエネルギー損失がある。超電導ケーブルを導入した場合には、き電線のジュール損失の低減、回生率の向上（回生失効の抑制）というエネルギー上のメリットと、機械ブレーキの使用頻度の低下によりブレーキのメンテナンスコストの低減が期待される。また、超電導ケーブルの導入方法によっては、変電所設置数の削減や冗長性（信頼性）の向上等も期待できる（図 2）。一方、超電導ケーブルの損失、端末や接続部、配管からの熱侵入等に対して、超電導ケーブル温度をほぼ一定に保つための冷却電力が必要であり、変電所等から供給することになる。

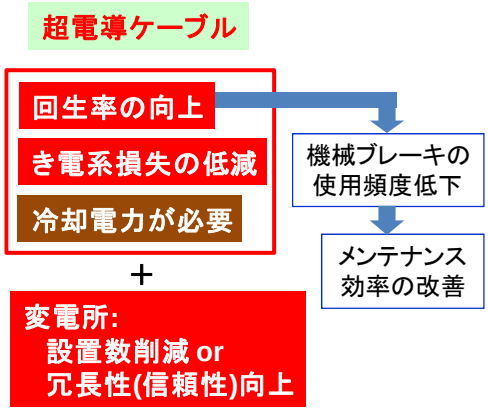


図 2　超電導ケーブル導入のメリット

鉄道用超電導ケーブルの試作

2007 年、鉄道への応用に向けた、臨界電流値が 1.5 kA 級の超電導ケーブルの試作を行った。超電導ケーブル 1 本で P 層および N 層が通電可能とするため同軸構造とし、P 層にき電電流、N 層に帰線電流を通電することを想定している。通電試験を行った結果、P 層で 1.7 kA、N 層で 2.2 kA の臨界電流値を確認した。また、通電時の漏洩磁場について測定し、実用上の通電方向となる双方向通電において、漏洩磁場を抑制できることを確認した。

超電導ケーブルは低損失で大電流を送電することができる一方で、液体窒素温度付近までの冷却が必要となる。そのため、超電導ケーブルは真空断熱配管内に設置されるものの、多少の熱侵入により温度上昇が生じ、超電導状態の維持が困難となる。そのため、冷却ステーションを設け、冷却した液体窒素を循環する必要がある。循環させるためには冷媒経路の確保する必要があるため、フォーマ内部に冷媒経路を設け、見かけ上 1 本の配管で冷媒の行き帰りを行う方式を採用した。これまでの検討結果をもとに、2010 年、実路線においても使用可能な 8 kA 級の鉄道用超電導ケーブルを製作した（図 3）[2)]。臨界電流値を測定した結果、10 kA 以上の臨界電流値を確認した。この値は都心部の主要幹線の遮断容量に相当する必要電流容量である。

図 3　8 kA 級鉄道用超電導ケーブル

超電導き電ケーブルの車両走行試験

これまでの材料評価結果を超電導ケーブルの設計に反映し、鉄道車両を用いた走行試験向けに鉄道用超電導き電ケーブルの仕様を決定した。2012 年以降、鉄道総研内の構内試験線に本ケーブルを敷設し、鉄道に必要な各種実験を進めている（図 4）。液体窒素による冷却試験および通電試験を行い、国内外で初めて、超電導ケーブルを介し電車への送電に成功し、現在、車両走行試験を行っている。

© ISTEC 2015 All rights reserved.

図 4　構内試験線に敷設した超電導き電ケーブル例
（左：30 m 級ケーブル、右：300 m 級ケーブル）

おわりに

鉄道システムへの超電導ケーブル導入を目指し、超電導線材の特性評価試験を行った。評価結果をもとに設計を進め、30 m、300 m 級の超電導き電ケーブルを製作し、鉄道総研の構内試験線に敷設後、冷却・通電試験による健全性を確認後、車両走行実験を行った。今後は、試験結果から運用上の課題点を抽出し、鉄道事業用として適用可能な超電導き電ケーブルの実現を目指していく。

謝辞

本研究の一部は、国土交通省からの補助金および（独）科学技術振興機構(JST)の「戦略的イノベーション創出推進プログラム（S-イノベ）」の支援を受けて実施している。

文献：

1) M. Tomita *et al.*: “Next generation of prototype direct current superconducting cable for railway system”, J. Appl. Phys. 109, 063909 (2011)
2) M. Tomita *et al.*: “Development of 10 kA high temperature superconducting power cable for railway systems”, J. Appl. Phys. 111, 063910 (2012)

超電導 Web21 トップページ

© ISTEC 2015 All rights reserved.

2015 年 8 月 3 日発行

超電導 Web21

（公財）国際超電導産業技術研究センター　〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP　Tel: 044-850-1612

【隔月連載記事】

鉄道と超電導（その 4）
～超電導き電ケーブルの研究開発②～

公益財団法人　鉄道総合技術研究所
研究開発推進室 担当部長
超電導き電ケーブル課長　超電導応用研究室長
富田　優

はじめに

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開発を始め、超電導線材の製作および特性評価、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いる[1,2]。超電導ケーブルをき電線へ導入すると、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。また、レールに流れる帰線電流を超電導ケーブルに流すことで双方向通電となり、漏洩磁場が低減できるとともに、レールから大地への漏れ電流もなくなりレール電位の抑制が可能であることから、電食の問題も解決できると期待される。

30 m 級超電導き電ケーブルの開発

これまでの材料評価試験を超電導ケーブルの設計に反映し、鉄道車両を用いた実証試験向けの鉄道用超電導ケーブルの仕様を決定し、製作した。30 m 級超電導き電ケーブルの構造を図 1 に示す。製作した 30 m 級超電導き電ケーブルは、鉄道総研にある構内試験線に敷設した。

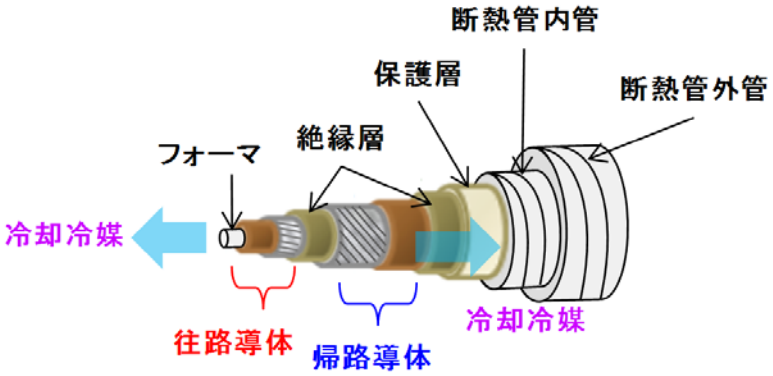


図 1.　超電導き電ケーブルの構造

電流端末端部にロードセルを設置し、冷却時に超電導ケーブルに働く冷却応力について測定を行った（図 2）。初期冷却は冷却ガス温度を管理しながら、往路と復路に同方向で流す並流式で冷却を行い、ケーブルをクリート固定した場合と、固定しない場合のそれぞれについて測定を行った（図 3）。クリート固定した場合では、最大張力は約 700 kgf であったが、クリートを外すことで 200 kgf 以下まで低減し、超電導ケーブルにかかる応力は許容範囲内であることを確認した。

© ISTEC 2015 All rights reserved.

図 2.電流端末端部に設置した応力測定装置

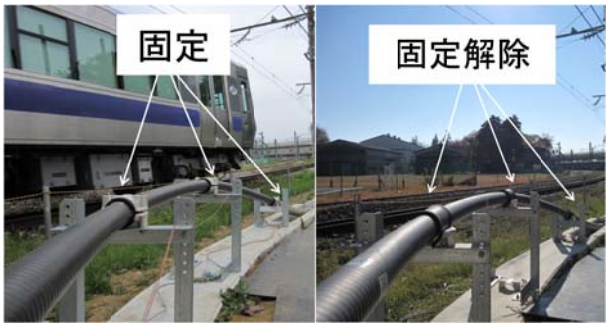


図 3. 超電導ケーブルのクリート

次に通電試験を行い、発生電圧が電界基準（1 μV/cm）に達した電流値を I_c とした結果、77 K における I_c は、約 6960 A であることを確認した。一連の超電導ケーブル敷設・試験の過程を経て、当初の超電導線材の電流値に変化がないことが分かった。

冷却・通電試験により健常性を確認した後、30 m 級超電導ケーブルを用いて、鉄道車両の走行実験を行った。超電導き電ケーブルを介し、2 両編成の車両に電力を供給し走行試験を行った結果、電車の速度の増加とともに、電流値の上昇を確認し、最大速度 約 45 km/h で走行した。超電導ケーブルを介して電車に電力を送る、国内外で初めての試験に成功した。

300 m 級超電導き電ケーブルの開発

次に、より実用に近い、長尺の 300 m 級超電導ケーブルを製作した[3)]。300 m 級超電導き電ケーブルの仕様を表 1 に示す。製作した 300 m 級超電導き電ケーブルは、図 4 に示すドラムにより搬送し、図 5 に示すケーブル延線機を用いて構内試験線に敷設した。今回の 300 m 級超電導き電ケーブルの敷設においては、実路線を想定し、敷設経路上に線路跨ぎや踏切跨ぎ箇所を設け、また、複数の曲がり箇所を有している（図 6）。

表 1　300 m 級超電導き電ケーブルの仕様

項 目	仕 様
定格電圧	1.5 kV
定格電流	1 kA
フォーマ	SUS コルゲート管
断熱管	アルミ製
ケーブルコア外径	55.9 mm
断熱管最外径	133.1 mm
ケーブル長	310 m

© ISTEC 2015 All rights reserved.

図 4. 300 m 級超電導き電ケーブルの搬送の様子

図 5. 300 m 級超電導き電ケーブルの延線の様子

次に、敷設した 300 m 級超電導ケーブルの冷却試験を行った。冷却方式は、従来の直接冷却方式に加え、軌道横断部、踏切横断部といった曲線箇所における熱侵入の増加が予想されたため、間接冷却方式であるサブクーラも設置した（図 6）。内蔵する光ファイバーにより冷却過程の温度分布を測定した。冷媒の注液は直接冷却システム側（0 m 地点）から行い、急激な温度変化を与えないように、蒸発器により液体窒素をガス化、温度調整し、徐々に温度を低下させ、約 60 時間で初期冷却が完了し、その後 16 日間において冷却状態を安定維持した。次に、超電導き電ケーブルの通電試験を行った結果、臨界電流値 1110 A を確認し、問題なく超電導ケーブルが敷設できていることを確認した。

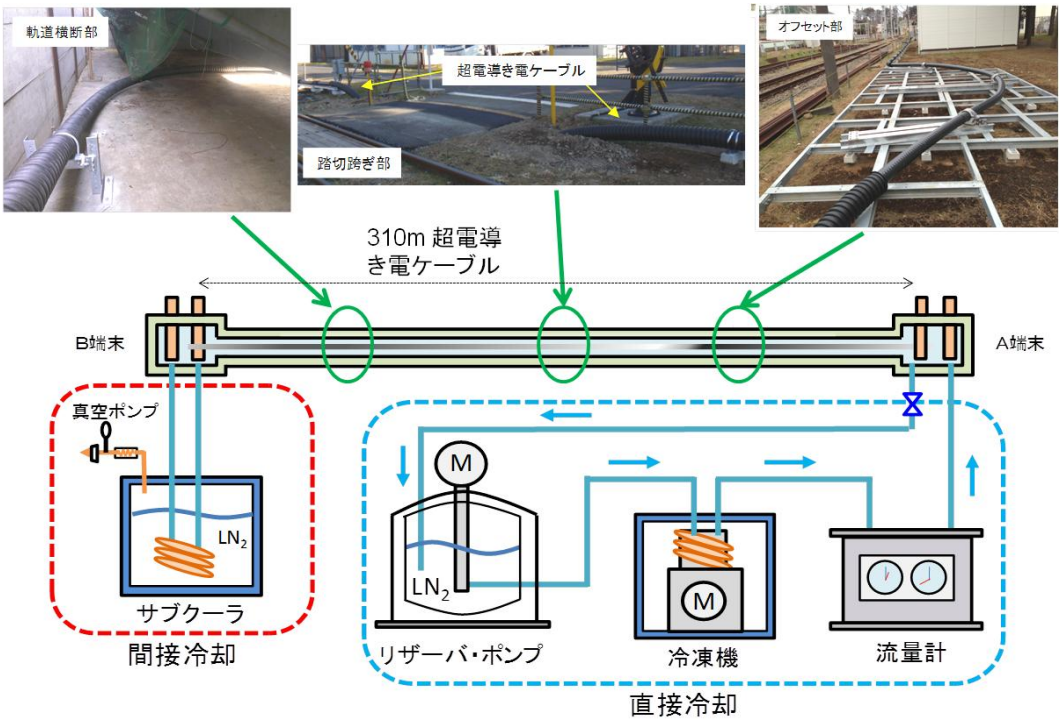


図 6.　敷設した 300 m 級超電導き電ケーブル

© ISTEC 2015 All rights reserved.

（公財）国際超電導産業技術研究センター　〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP　Tel: 044-850-1612

おわりに

これまでの評価試験結果をもとに、30 m、300 m 級の超電導ケーブルを製作し、鉄道総研の構内試験線に敷設した。現在は、超電導き電ケーブルを用い、冷却・通電の繰り返し試験や車両走行試験を行っている。また実証試験と並行し、実路線を対象としたシミュレーションによる確認を進めており、実証試験の結果と合わせて導入効果について明らかにし、鉄道事業用として適用可能な超電導ケーブルの実現を目指していく。

謝辞

本研究の一部は、国土交通省からの補助金および（独）科学技術振興機構 (JST) の「戦略的イノベーション創出推進プログラム（S-イノベ)」の支援を受けて実施している。

参考文献：

1) M. Tomita *et al*.: “Next generation of prototype direct current superconducting cable for railway system”, J. Appl. Phys. 109, 063909 (2011).
2) M. Tomita *et al*.: “Development of 10 kA high temperature superconducting power cable for railway systems”, J. Appl. Phys. 111, 063910 (2012).
3) 富田 優 他：低温工学・超電導学会概要集,Vol.90,p.25,2014.

超電導 Web21 トップページ

© ISTEC 2015 All rights reserved.

2015 年 10 月 1 日発行

超電導 Web21

（公財）国際超電導産業技術研究センター　〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP　Tel: 044-850-1612

【隔月連載記事】

鉄道と超電導（その 5）
～浮上式鉄道用高温超電導磁石の開発②～

公益財団法人鉄道総合技術研究所
浮上式鉄道技術研究部　低温システム
研究室長　小方正文

鉄道に超電導技術を適用する試みは複数ある。鉄道総研で研究テーマ化された内容だけでも、超電導磁気浮上式鉄道（超電導リニア）、超電導き電ケーブル、車両用高温超電導変圧器、超電導磁気軸受を用いたフライホイール、SQUID によるレールの非破壊検査等がある。今回の連載では、この中からいくつかのテーマについて、鉄道総研の直接の担当者が分担して最新の研究開発状況を紹介している。

今回は 1 月に掲載した「浮上式鉄道用高温超電導磁石の開発」の続編として、実機大高温超電導コイルの研究開発状況について概要を報告する。

高温超電導化のメリット

現在の超電導リニア用車載超電導磁石には、Nb-Ti 線材製の超電導コイルを液体ヘリウムで浸漬冷却する、いわゆる低温超電導方式の超電導磁石が採用されている。その一方、高温超電導線材も年々性能向上が進んでおり、鉄道総研ではリニア用超電導磁石の高温超電導化に向けた研究開発を進めている。図 1 に高温超電導化のメリットを示す[1)]。高温超電導化により小型軽量で構造も簡素化された超電導磁石が実現可能となるので、将来的にはメンテナンスコストも含めたコスト低減に向け欠かせない技術であると考えている。

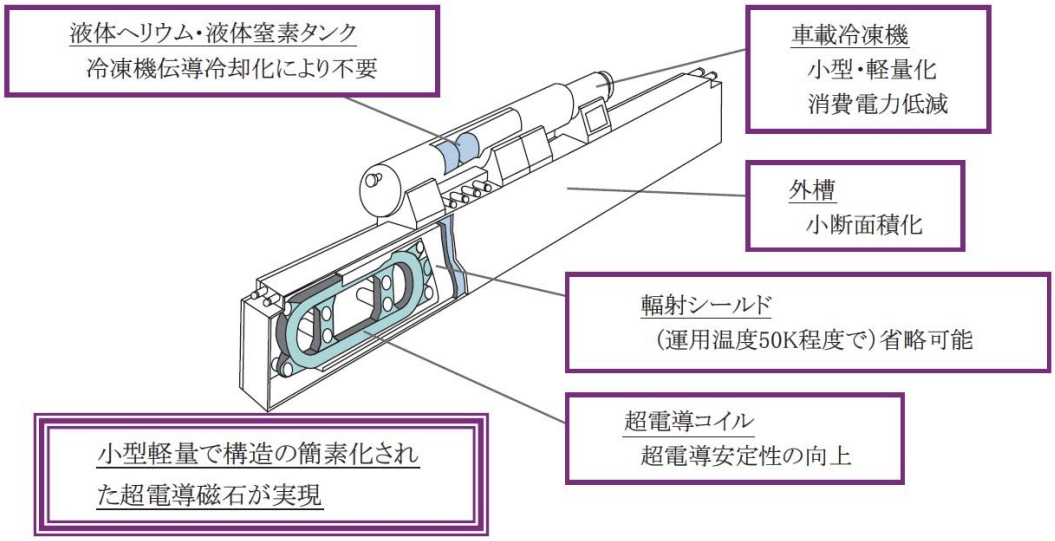


図 1　高温超電導化のメリット

© ISTEC 2015 All rights reserved.

実機大高温超電導コイル

前報記事「浮上式鉄道用高温超電導磁石の開発」[2)]のとおり、鉄道総研は高温・高磁場中の通電特性や機械的強度にも優れる RE 系高温超電導線材を選定し、超電導リニア用高温超電導コイルの開発に着手した。この開発過程において、RE 系コイルの課題のひとつであった通電特性劣化の対策として、コイル冷却時に線材平面に対して垂直な方向に発生する応力を緩和するコイル構造を考案し、これにより線材内部にある超電導層の剥離破壊を防止することで通電特性劣化の問題を解決した[3)]。

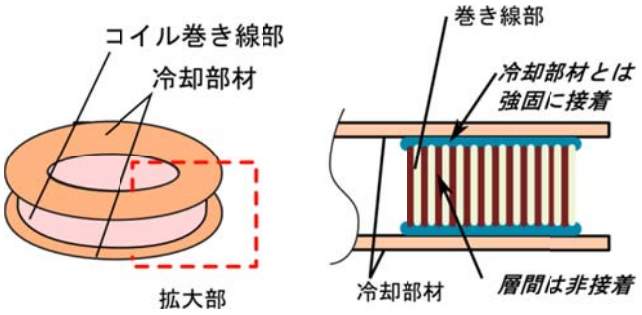


図 2　通電特性劣化を防止するコイル構造イメージ

図 2 に通電特性劣化を防止するコイル構造イメージを示す。図はシングルパンケーキコイルを示しているが、巻線の側面とコイル冷却部材とは強固な接着によって伝導冷却のための伝熱パスを確保しつつ、巻線の層間は非接着として熱応力を緩和するという考え方である。この考え方を実現する方法のひとつが、熱可塑性樹脂を用いたコイル製作手法である（図 3）。予め銅板などの冷却部材の片面に絶縁加工した熱可塑性樹脂を施工しておき、絶縁テープと共に巻き回したコイル巻き線部をこれら冷却部材で挟み込んで、約 120 °C の環境で全体加熱するだけで熱可塑性樹脂の融着が進行し、冷却するとコイルが完成する。なおこの時、粘性の高い熱可塑性樹脂は巻き線の線材層間には浸透しない。従来のエポキシ樹脂の含浸手法よりも簡易であり、製作プロセスのコスト低減にも寄与する手法である。

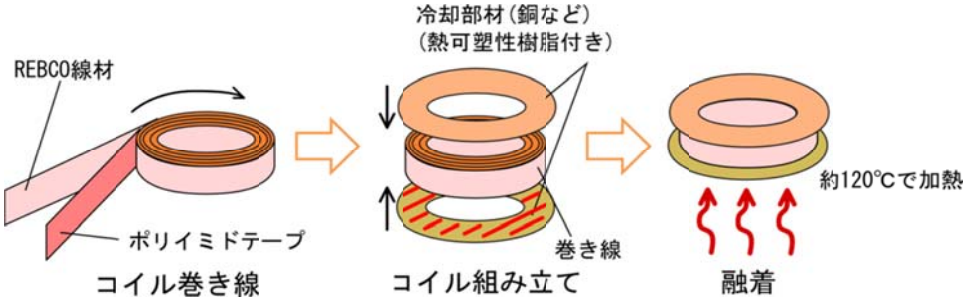


図 3　熱可塑性樹脂を用いたコイル製作プロセス

上記手法を用いて実機大の高温超電導コイルを製作した。コイル外観を図 4 に示す。実機と同寸法となる長径方向が 1070 mm、短径方向が 500 mm のレーストラック形状で、幅 6 mm、厚さ 0.1 mm の RE 系線材を 350 ターン巻き回したシングルパンケーキコイルであり、液体窒素中での融着前後のコイル通電特性比較により、融着に伴う特性劣化が発生しないことを確認している（図 5）。

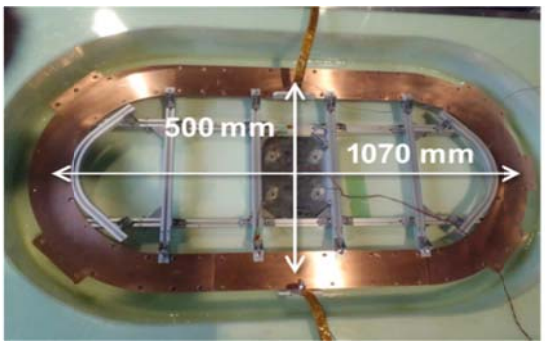


図 4　実機大高温超電導コイル（シングルパンケーキコイル）

© ISTEC 2015 All rights reserved.

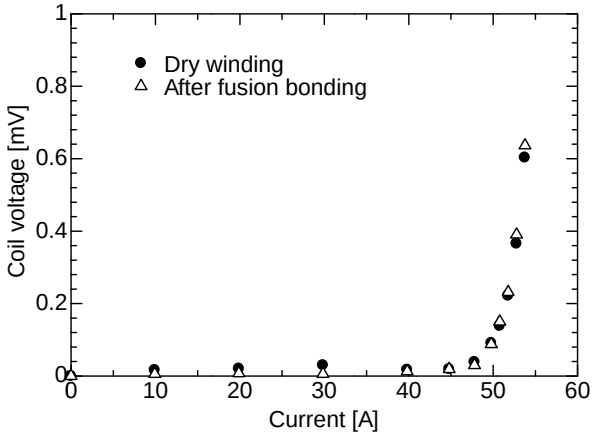


図 5　熱可塑性樹脂を用いて製作した実機大高温超電導コイル（図 4）の
融着工程前後の I-V 特性比較(77 K)

なお、実機相当のコイル起磁力 700 kA を実現するためには、本コイルを 8 個積層して 1 コイルとし、これに 250 A 通電すると達成可能である。現在の市販 RE 系線材の通電特性から予測するとコイル運用温度を 30～40 K とすることで実現可能と見積もられる。表 1 に実機相当 RE 系超電導コイル（1 個分）の仕様を示す。実機大高温超電導コイル（シングルパンケーキコイル）を 8 個積層すると、大きさだけでなく磁場性能も含めた“実機相当”超電導コイルとなるが、実用上はコイルに発生する電磁力等に対応可能な構造を持たせる必要がある。そこで、図 6 に示すように、十分な機械的強度を有する金属製コイルケース内に、積層コイルおよび熱伝導や熱容量を受け持つ熱機能材料と共に内蔵することで、実機高温超電導コイルが完成する。

表 1　実機相当 RE 系超電導コイル（1 個分）の仕様

Operating current	250 A　(External power supply)
Dimension of the race track	1070 mm × 500 mm
Number of turns	2800 (350 per pancake coil)
Total wire length	7600 m (950 m per pancake coil)
Stacking number of pancake coils	8
Inductance	12 H
Operating temperature	30 ~ 40 K　(Future target: 40~50 K)

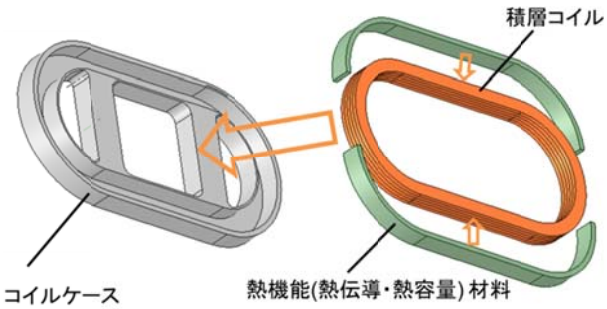


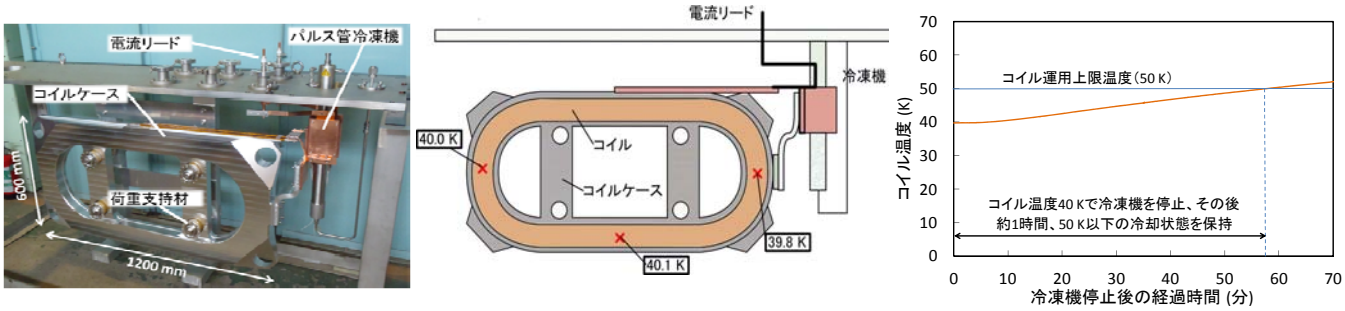
図 6　実機高温超電導コイル構成

© ISTEC 2015 All rights reserved.

また、実機高温超電導コイルの冷却性能、保冷性能の検証も実施している。図 7 に示す冷却・保冷性能試験構成を用いて、冷却性能試験および保冷性能試験を実施した結果、

(1)コイル温度 40 K 冷却時のコイル内温度分布は 1 K 以内に収まること（図 7(2)）、
(2)コイル温度 40 K で冷凍機を停止してもコイル運用上限温度に設定している 50 K 以下を約 1 時間保持できる保冷性能があること（図 7(3)）、

を確認した。なお、この保冷時間はコイルケースに収める熱機能材料の設計により調整可能であるが、約 1 時間は超電導リニアが東京と大阪を結ぶ際の所要時間にほぼ等しく、万一の冷凍システムトラブルの際のコイル温度上昇に対するマージンになると考えている。



(1) 冷却・保冷性能試験構成　　(2) 冷却性能試験結果　　(3) 保冷性能試験結果

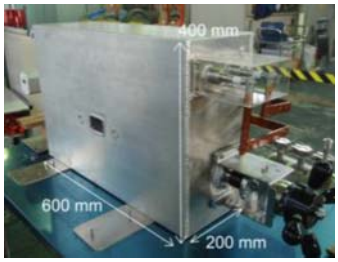
図 7　実機高温超電導コイルの冷却・保冷性能試験

アウトガス評価

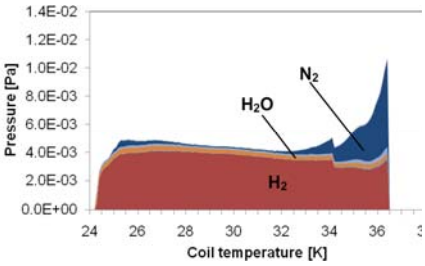
高温超電導化が進むとコイルの運用温度を上昇させることができるが、これを別の観点から見れば、液体ヘリウムという非常に強力なクライオポンプを手放すことでもある。すなわち、真空槽封じ切り運用を前提とするリニア用高温超電導磁石においては、従来は問題とならなかった真空槽内のアウトガス蓄積による真空度劣化と、それに伴う熱侵入量増大に対処することが必要となる。この問題は前報記事で説明した、実機の 1/4 サイズのレーストラックコイルを内蔵した保冷式高温超電導磁石（冷凍機無しで超電導状態を長時間維持する高温超電導磁石）においても確認されており、コイルを自然昇温させたときの真空槽内アウトガス成分のコイル温度特性試験結果を図 8 に示す。図 8 の(1)は当該磁石外観、(2)はダミーコイルの内蔵以外は当該磁石と同仕様のモデル磁石における結果、(3)は当該磁石における結果である。ここで、(3)の当該磁石にはアウトガス吸着を目的とした活性炭がコイル部に内蔵してあることを補足する。この結果から、活性炭がある場合は水素や窒素の発生が抑制されるものの、コイル温度が 50 K を超えると急激に水素が発生し始め、真空度劣化が進行することがわかった[4)]。

アウトガスの発生源は高温超電導磁石を構成する部材自体である。よって、各部材からのアウトガス特性を個別に評価検証することができれば、磁石設計の時点でアウトガス低減に向けた対処も可能になってくる。そこで、アウトガス評価のための試験装置を開発し（図 9）、アルミニウムや、エポキシ樹脂、GFRP、多層断熱材等からのアウトガスの定量的評価を鋭意進めているところである[5)]。更に、本評価試験装置は活性炭等のアウトガス吸着材の定量的な性能評価にも活用できるので、発生量低減と吸着効果改善の両面から高温超電導磁石のアウトガス対策を進めていく考えである。

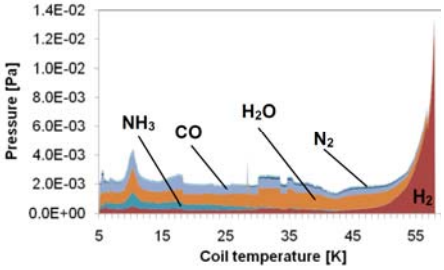
© ISTEC 2015 All rights reserved.



(1)冷凍機無しで超電導状態を長時間維持する高温超電導磁石

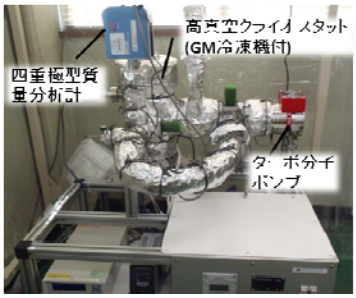


(2)アウトガス成分のコイル温度特性（ダミーコイル内蔵モデル磁石:活性炭なし）

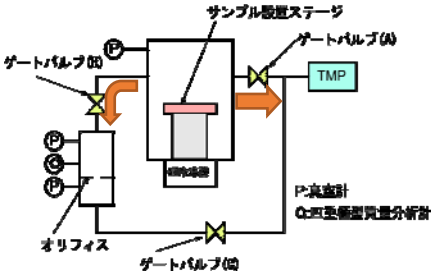


(3)アウトガス成分のコイル温度特性（当該磁石：活性炭あり）

図 8　高温超電導磁石内部のアウトガス成分分析



(1)　装置外観



(2)　装置構造

図 9　アウトガス評価試験装置

おわりに

現在、実機高温超電導コイル完成に向けた作業を進めており、完成後は、超電導リニア走行時に超電導コイルが受ける振動を再現する機械加振試験の実施を予定している。引き続き、機械加振試験をはじめとする動的性能検証試験による信頼性・耐久性確認とともに、アウトガス対策も含めた浮上式鉄道用高温超電導磁石設計のための各種データの取得を進めていく計画である。

最後に、これまで述べてきたように RE 系高温超電導磁石の開発は超電導リニアへの適用を目的としているが、その中で培われた技術は、鉄道総研が別途進めているフライホイール蓄電装置用高温超電導磁気軸受の研究開発にも適用可能である（図 10）。技術開発の相乗効果により一層の性能向上も期待できると考えている。

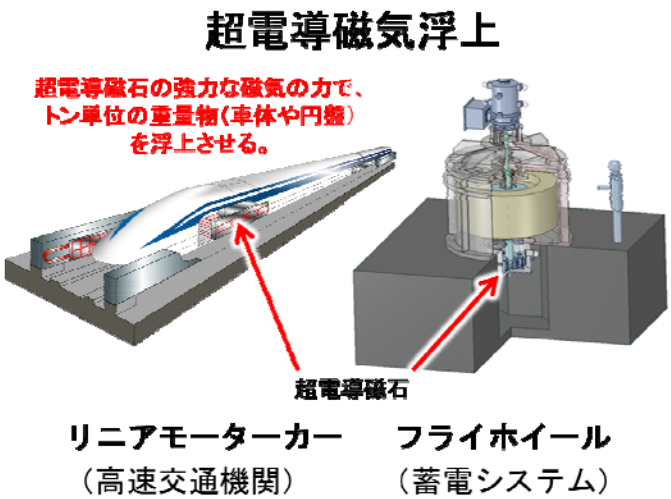


図 10　RE 系高温超電導磁石技術の適用

なお本研究は、国土交通省の国庫補助金を受けて実施した。

© ISTEC 2015 All rights reserved.

（公財）国際超電導産業技術研究センター　〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP　Tel: 044-850-1612

参考文献：

1) 小方正文他：希土類系高温超電導線材の浮上式鉄道用磁石への適用性評価，鉄道総研報告, Vol.24, No.1, pp.5-10, 2010, http://bunken.rtri.or.jp/PDF/cdroms1/0001/2011/0001003424.pdf
2) http://www.istec.or.jp/web21/pdf/15_01/all.pdf
3) 水野克俊他：浮上式鉄道用RE系高温超電導磁石の開発－実機級の起磁力実証に向けたレーストラックコイル製作－，第91回2015年度春季低温工学・超電導学会講演概要集, P.133, 2015
4) 水野克俊他：高温超電導磁石内部のアウトガス成分分析，第84回2011年度春季低温工学・超電導学会講演概要集, P.8, 2011
5) 水野克俊他：浮上式鉄道用RE系高温超電導磁石の開発－磁石構成部材のアウトガス評価－，第90回2014年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集, P.172, 2014

超電導 Web21 トップページ

© ISTEC 2015 All rights reserved.

2015 年 11 月 2 日発行

超電導 Web21

（公財）国際超電導産業技術研究センター　〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP　Tel: 044-850-1612

【隔月連載記事】鉄道と超電導（その 6）
～超電導フライホイール蓄電装置－実証機の製作－～

公益財団法人 鉄道総合技術研究所
浮上式鉄道技術研究部　山下　知久
車両制御技術研究部　水素・エネルギー　長谷川 均

鉄道に超電導技術を適用する試みは複数ある。鉄道総研で研究テーマ化された内容だけでも、超電導磁気浮上式鉄道（超電導リニア）、超電導き電ケーブル、車両用高温超電導変圧器、超電導磁気軸受を用いたフライホイール、SQUID によるレールの非破壊検査等がある。今回の連載では、この中からいくつかのテーマについて、鉄道総研の直接の担当者が分担して最新の研究開発状況を紹介することとしたい。

今回は 3 月に掲載した「超電導フライホイール蓄電装置」の実証機が完成したため、この概要と超電導磁気軸受の詳細について報告したい。

超電導フライホイール蓄電装置

現在、鉄道総研では、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成事業により系統安定化用蓄電装置をクボテック株式会社、古河電気工業株式会社、株式会社ミラプロ、山梨県企業局と共同で開発している。蓄電媒体としては、寿命、コスト、蓄積エネルギー容量、出力等を勘案してフライホイールを選択した。フライホイール蓄電装置は、電力を回転エネルギーに変換して蓄エネルギーを行うもので、電気化学的な反応を使用しない。このため、二次電池等で課題となっている化学的な劣化を生じない等のメリットがある。さらに、蓄電装置に要求される性能として、出力（単位 kW）と蓄積エネルギー容量（単位 kWh）の 2 つの指標があるが、フライホイール蓄電装置は、これらを独立に設計することが可能である。例えば、高出力であるが低容量であるとか、大容量であるが低出力であるといった装置を実現することができる。この特徴は設備容量を最適化する上で有利であり、蓄電池のように高出力を得るために余分な容量を設置するといった無駄を省くことができる。フライホイール蓄電装置の蓄積エネルギー容量は、フライホイール本体である回転体の質量に、また回転速度の二乗に比例して大きくなる。このため、大容量の装置にするためには、高速で回転する重量物を損失なく支持する必要がある。すなわち回転体を支持する軸受に耐久性と低損失が求められる。我々はこの条件を満たすものとして超電導磁気軸受に注目した。超電導磁気軸受は、非接触で支持することが可能であり、摩耗や摩擦がなく、回転に伴う損失が発生しない。また、回転軸、固定子双方に超電導を使用することで、他の磁気軸受では困難なほどの大きな浮上力を発生することができる。

もっとも、超電導状態を維持するための冷凍機の動力が必要となるが、スケールメリットが期待できるため、大容量の蓄エネルギー装置としては全体として損失が小さいものとなりうる。

フライホイール本体も、高速回転に伴う遠心力に耐えられるような工夫と万が一破損した場合の安全性を考慮して、円形螺旋織物技術を使用した炭素繊維強化プラスチックで製作し内蔵した。

この事業では、山梨県米倉山太陽光発電所に蓄電装置を設置し、電力平滑化の実証試験を行う。実証試験は 1 MW 級太陽光発電設備に、出力 300 kW、容量 100 kWh のフライホイール蓄電装置を接続し、季節変動や天候、系統条件の違いなどを加味しながら、連続運転を実施する。

開発の経緯

実証試験機の開発は平成 24 年度にフィージビリティスタディーを実施し、後述するような実証

© ISTEC 2015 All rights reserved.

試験機のコンセプトを決定し、平成 25 年度より各要素の開発試作を開始した。平成 26 年度末には、工場にて組立完了が終了し、超電導磁気軸受による非接触支持に成功し低速回転を行った。平成 27 年度初より、米倉山太陽光発電所への設置工事を行って、9 月 3 日に各界の要人ご参列のもと試験開始式典を挙行した。（表 1）

表 1　フライホイール蓄電装置開発工程

	H24 年度	H25 年度	H26 年度	H27 年度
概念設計	→			
要素開発		→		
部品製作		→	→	
組立			→	
工場試験			→	
現地設置				→
実証試験				→

実証機の概要

プロジェクト開始から実証試験完了までの期間があまり取れないことなどから、今回の実証機については、超電導磁気軸受及び CFRP ローターの開発に注力することとした。このため、ラジアル方向の補助軸受に関しては、従来の制御型磁気軸受を使用し、発電電動機についても産業用汎用機を流用したものとした。発電電動機は汎用の永久磁石型同期機であり気中で運転するため、真空槽と発電電動機の間にトルク伝達と気密を両立させる必要があり、このシール部には磁性流体シールを採用した。

表 2 に実証機の仕様を、図 1 に実証機の概要と担当した事業者を示す。

図 2 には、工場組立時の CFRP ローター組込作業の様子を、図 3 に装置全体の外観を示す。

表 2　実証用フライホイール蓄電装置仕様

項目	値
入出力	300 kW
発電機出力	330 kW
定格電圧	直流 600 V
蓄積エネルギー	100 kWh
運転回転数	3,000 ~ 6,000 min^{-1}
CFRP ローター	直径 2 m
	質量 3,200 kg
軸受	スラスト 超電導磁気軸受
	ラジアル 制御磁気軸受

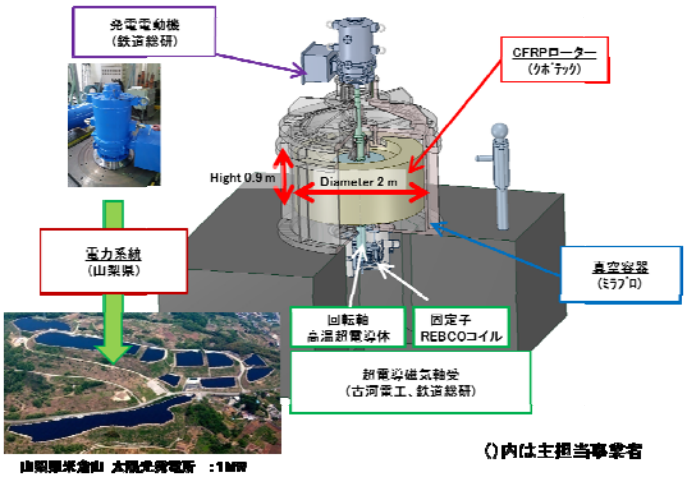


図 1　実証機の概要

© ISTEC 2015 All rights reserved.

図 2　CFRP ローター組込の様子

図 3　装置全体外観

超電導磁気軸受

今回のフライホイール蓄電装置開発の中心と言える超電導磁気軸受について詳細を述べる。図 4 に今回開発した超電導磁気軸受の構造と支持力（回転子の浮上力）を示す。回転子の超電導バルク体はシルクハットを逆さにしたような形状であり、固定子の超電導コイルから発生する磁束を排除することでスラスト方向の全荷重と、ある程度の案内方向荷重を支持することができる。固定子の超電導コイルは 5 ダブルパンケーキ形状となっており、外部の電源装置から電流リードを通じて常時通電するようになされている。図より、コイル電流が 80 A 程度で目標値のフライホイール荷重を支持する充分な力が発生できることが分かる。

超電導コイルは冷凍機からの伝導冷却により冷却されるが、回転子については、希薄ヘリウムガス（圧力数 Pa）が軸受容器内に充填されており、分子伝導と輻射により冷却される。回転子の損失としては、ガスが希薄であるため風損はほとんど発生しない。

回転子が定常状態で、固定子の中心を振動なく回転している場合は、風損のみが損失となる。しかし、フライホイールのアンバランスやトルク変動によって回転子に振動が生じると磁束密度分布に変動が発生するため、近傍に金属等の良導体が存在すると、渦電流損失が起こることがあり得る。特に低温部分では金属の導電率が非常に高く大きな渦電流が発生し、少ない発熱でも冷凍機から見ると大きな動力でないと除去できない問題がある。

磁束変動による渦電流損失を無くすためには、構成部材に樹脂やセラミックなどの絶縁物を使用すればよい。本磁気軸受も極力、金属をしないように作られているが、超電導コイルが伝導冷却方式であるため、どうしても冷却経路については、熱伝導の良い金属（銅）を使用せざるを得ない。すなわち熱伝導率は高く、電気導電率は低い構造材を使用しなければならないという二律背反の課題がある。

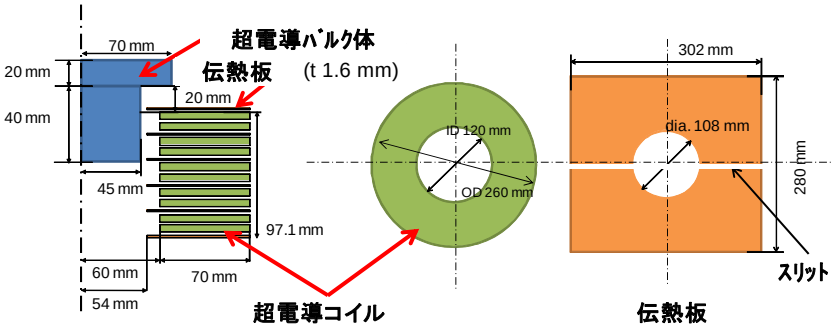


図 4　超電導磁気軸受の構造

© ISTEC 2015 All rights reserved.

今回はこの異なった特性を両立させるために、すだれ状の金属を樹脂によってモールドした構造の素材を開発し、超電導コイルの伝熱板として採用した。渦電流は、導体を細分化することにより減少すると考えられるが、磁場の分布や変動周波数により差異がある。あらかじめ導体の細分化の効果を検証するために、動磁場解析を行った。図 5 に導体の分割と渦電流損失の関係を示す。図を見ると分割数を多くしていくと、いったん渦電流損失が増えるが、その後は減少し、ある程度細分化されると顕著な減少が見られないことが分かる。細分化により占積率も下がってしまうことを考慮すると今回の場合は 100 分割以上あればよいことが分かる。

図 6 に実際に製作した超電導コイル伝熱板の外観を示す。

このような形状、構造をもった材質の場合、熱的、機械強度的に異方性を持ってしまう。特に伝熱板として使用する場合には、銅線の長手方向には熱抵抗が小さく、線と直角方向には熱抵抗が大きくなることが予測される。そこで、すだれ状の板を数枚積層し、積層間の線方向を変えることが考えられる。例えば、奇数枚目を 0°偶数枚目を 90°にすることで、渦電流損失の増加無しに、熱伝導の等方性を確保することができる。

図 7 に製作した伝熱板の等価熱伝導率の測定結果を示す。今回の超電導コイルの使用温度領域が 30 ~ 50 K で設計しており、この領域では、100 W/(m・K)以上あり、金属単体よりは小さな値であるが、伝導冷却に供する伝熱板としては十分な値である。

このような特殊な伝熱板を使用することで、損失低減と熱伝導の確保を両立することができ、実証試験用超電導磁気軸受が完成した。

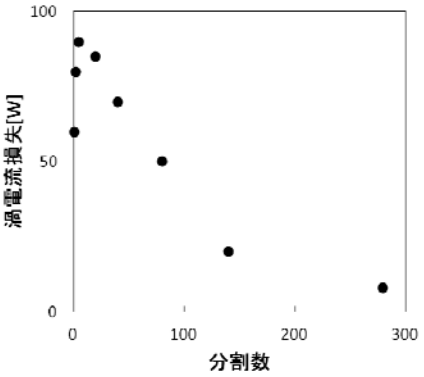


図 5　導体分割と渦電流損失

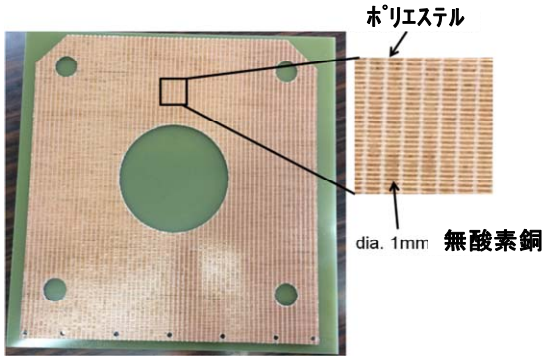


図6　超電導コイル伝熱板の外観

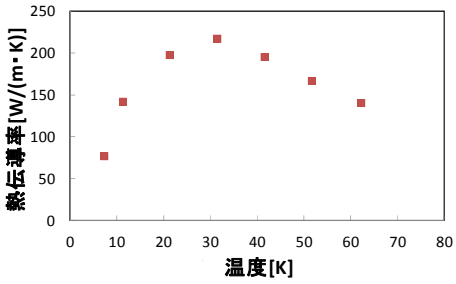


図 7　超電導コイル伝熱板の熱伝導率

超電導 Web21 トップページ

© ISTEC 2015 All rights reserved.