

# 浮上式鉄道に関する研究開発と 関連技術の在来方式鉄道への応用展開

長嶋 賢\*

**Research and Development concerning Superconducting Maglev and  
Research on applying its Technology to the Conventional Railway System**

Ken NAGASHIMA

RTRI is promoting the fundamental research and development concerning superconducting maglev. The topics of research are high-temperature superconducting magnet, maglev vehicles motion simulation, evaluation of the ground coil and the diagnostic technology of systems. Research on application of maglev technology to the conventional railway system is advanced in cooperation with other organizations. The main topics of this issue are a flywheel energy storage system using superconducting magnetic bearings and a magnetic refrigeration system for air-conditioners. This paper describes the existing circumstance of these researches and developments.

キーワード：浮上式鉄道，在来方式鉄道，超電導磁石，高温超電導，蓄電装置，磁気冷凍

## 1. はじめに

山梨県都留市では2013年8月29日に「山梨リニア実験線42.8km出発式」が開催され、42.8kmに延長された実験線における走行試験が再開された<sup>1)</sup>。2014年度に入ってから12両編成での走行試験も行われ、超電導磁気浮上式鉄道の実用化への歩みが着実に進展している。

一方、韓国の仁川国際空港では2014年5月14日に常電導の磁気浮上式鉄道（最高速度110km/h）が公開され、7月に営業運転開始との報道があった<sup>2)</sup>。また、中国の北京市でやはり原理的には韓国や日本のHSSTと同様と思われる中低速の磁気浮上式鉄道が2015年に開通するとの報道もあり<sup>3)</sup>、浮上式鉄道実用化に向けた動きが活発である。

鉄道総研では国土交通大臣の承認を受けた「超電導磁気浮上方式鉄道技術開発基本計画」に基づいて、車両運動シミュレーション、高温超電導材料の車載超電導磁石への適用研究や地上コイルの診断技術など、浮上式鉄道の基礎研究を進めている。また、浮上式鉄道の研究開発で培った技術（超電導技術、低温技術、リニアモータ技術等）をベースにした在来方式鉄道への応用研究を、もう一つの基軸として実施している。

本稿では、浮上式鉄道の基礎研究に関しては高温超電導磁石の開発を中心に、在来方式鉄道への応用研究に関

しては、上記高温超電導磁石の技術を適用した超電導フライホイール蓄電装置の技術開発を中心にその概要および開発動向を紹介する。

## 2. 浮上式鉄道用車載高温超電導磁石の開発

現在、超電導技術を用いる磁気浮上式鉄道で、実用に近いものとしては日本のJR方式のみであるが、基礎的な研究としては、高温超電導バルク体（以下ではバルク体と呼ぶ）を車両に搭載し、永久磁石軌道の上を浮上走行する磁気浮上式鉄道に関してはブラジル等で行われている<sup>4)</sup>。2014年5月に、この浮上方式に真空チューブを組合せて時速2,900km/hを目指すとする発表が中国でなされている<sup>5)</sup>。真空ではないものの、減圧トンネルに関しては、本号の調査報告「減圧トンネルにおける鉄車輪方式と磁気浮上方式の比較」でその有効性が議論されている。

このバルク体を用いる浮上方式に関しては、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り、コスト増の要因となる。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。

\* 浮上式鉄道技術研究部 部長

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

ひるがえって JR 方式の超電導磁気浮上式鉄道は、車載超電導磁石には電気抵抗の損失なく数百 kA の大起電力を確保し、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である。

そこで、JR 方式の超電導磁気浮上式鉄道では車上の超電導磁石の高性能化と小型軽量化を進めてきた。この流れの中では高温超電導磁石の開発は当然なされるべき事柄である。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高温超電導線材である、希土類系高温超電導線材（次世代線材と呼ばれることもあるが、以下では REBCO 線材と呼ぶ）を選定してこれを車載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。

まず、はじめに製作したのが実コイルの 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<sup>6)</sup>。これは冷凍機が無い超電導磁石である。低温のヘリウムガスを内部の配管に流して、20K 近くまで冷却した後高温超電導コイル自身の持つ熱容量により、50K 以下の温度を 8 時間以上維持できる。最大磁場はコイル温度 50K の時に 1T 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 REBCO 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、現在この問題も克服したので、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。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）を上回ることが予想される。そうなる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。

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 45K まで冷却すると実機並の 5T の磁場を発生できる<sup>7)</sup>。冷却温度が上がったことで超電導コイルの容器（クライオスタット）も簡素にでき、冷凍機も簡単な構造で効率の高いものを使えるようになった。コイル自体は実機より大分小径だが、巻線断面積は低温超電導線材を使用している実コイルに近い、従って電流密度は実コイルと同レベルで、従来の 4.2K で動作する超電導コイルに近い寸法と重量で、45K 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わけである。

図 3 は本号論文「浮上式鉄道用の希土類系高温超電導

磁石の熱特性評価」にも述べている実機大高温超電導コイルの熱シミュレータである。コイルの開発と同時に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<sup>8)</sup>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を有する装置で、実機高温超電導磁石が完成した際の熱特性をあらかじめ把握すると同時に構成の最適化を図るためのデータを得るものである。その際、コイルの温度分布を測定するのに本号論文「極低温環境での光ファイバ温度測定の感度向上」で紹介している光ファイバ温度センサも用いる予定である。また、実機サイズの高温度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インストールして冷却性能や通電性能の確認試

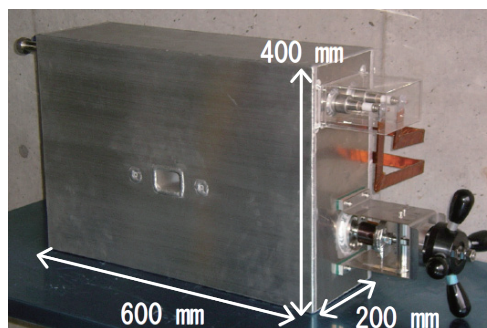


図 1 冷凍機無しで超電導状態を長時間維持する高温超電導磁石

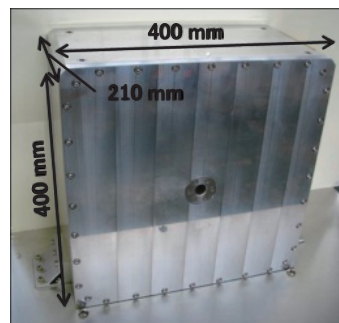


図 2 冷却系を簡素化した 5T 級高温超電導磁石

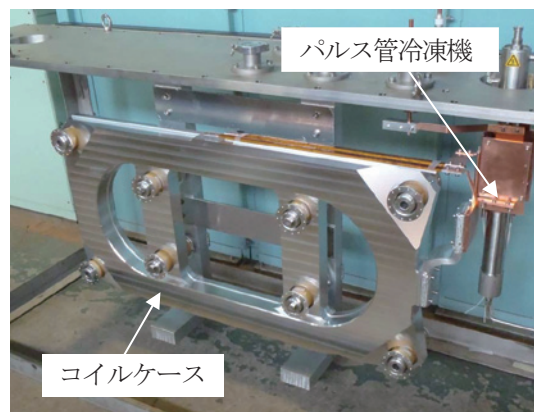


図 3 実機大高温超電導コイルの熱シミュレータ

験をすることもできるように設計されている。

いよいよ次のステップで実機高温超電導コイルを製作する段階にきた。上で述べた熱シミュレータによるスタティックな評価だけでは無く、走行時を模擬した、ダイナミックな評価も行う予定である。

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も行う。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と考えているが、浮上式鉄道車両運動の研究グループや地上コイルの研究グループの力を結集して、高温超電導磁石の導入効果を定量的に評価していく。

浮上式鉄道の基礎研究で超電導磁石と同様に重要な地上コイルに関する研究も並行して実施しており、本号論文「コアシェル粒子添加による推進系地上コイル用モールド樹脂の特性改善」、「地上コイル用モールド樹脂リサイクル手法の検討」で研究成果を報告している。

### 3. 超電導フライホイール蓄電装置の開発

前節で述べたように、REBCO 線材のコイルは高磁場を発生しつつ比較的高い冷却温度（～50K）での運用が可能であることが、これまでの研究で明らかになってきた。これは「超電導」につきものの「冷凍」という問題を大幅に低減する。使用する冷凍機を小型にでき、冷凍に要する消費電力も低減するので、機器としての効率が飛躍的に向上する。当然、浮上式鉄道の超電導磁石に使った場合のメリットも大きいですが、他の幅広い応用分野に対しても適用できる。

一方、鉄道総研では2005年度から在来方式鉄道への浮上式鉄道技術の応用研究の一環として、鉄道の回生電力有効活用を目的とした超電導フライホイール蓄電装置の開発を進めてきている。1986年の高温超電導材料発見以来、フライホイール蓄電装置にバルク体を用いた超電導磁気軸受を適用する研究開発が世界各国で行われてきたが、これらは皆、バルク体を永久磁石と組合せた磁気軸受であり、上でも述べた通り、フライホイールを支持する浮上力密度に限界があった。鉄道総研が開発を進めている超電導磁気軸受は、独自に考案したバルク体と超電導コイルを組合せたものであり、バルク体の安定浮上特性はそのままに、超電導コイルの強力な磁場により電磁力を大幅に増大するというアイデアに基づくものである。

2012年度まで国土交通省の国庫補助金を受けて超電導磁気軸受の基礎的な研究を行い、同年度にはビスマス系高温超電導線材の超電導コイルを使った超電導磁気軸受の実機相当の荷重試験および回転試験を実施した。この試験で、最大荷重60kNの確認、超電導磁気軸受によ

るロータの完全非接触浮上等に成功している<sup>9)</sup>。鉄道総研の学会発表を受け、永久磁石とバルク体の組合せによる超電導磁気軸受を開発していたドイツのグループも本方式の有効性に注目し、同様の、高温超電導コイルとバルク体を組合せた超電導磁気軸受の基礎的な検討を始めたとの報告もある<sup>10)</sup>。

現在は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の「安全・低コスト大規模蓄電システム技術開発」プロジェクトの中で、鉄道総研が取りまとめ役となり、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超電導磁気軸受だけでなく、フライホイール蓄電装置をシステムとして開発している。あわせて、山梨県企業局のメガソーラ発電施設に開発したフライホイール蓄電装置を設置して連系実証試験を行う予定である。

図4は現在開発している超電導フライホイール蓄電装置のイメージ図である。今回の装置で用いる超電導磁気軸受は鉄道総研のこれまでの研究成果の延長線上にあり、超電導磁気軸受自体の電磁力設計の考え方も同様であるが、軸受のステータとなる超電導コイルに、本節冒頭で述べた理由からREBCO線材のコイルをはじめて適用したところが特長である。

今回のプロジェクトの中では、鉄道総研は全体とりまとめの他に、これまでの知見を活かしてバルク体の配置を含む超電導磁気軸受全体の基本設計を実施し、古河電工が高温超電導コイルの設計・製作を実施している。図5はREBCO線材のメーカーである古河電工が製作した超電導コイルである。実証機ではこの超電導コイルを複数

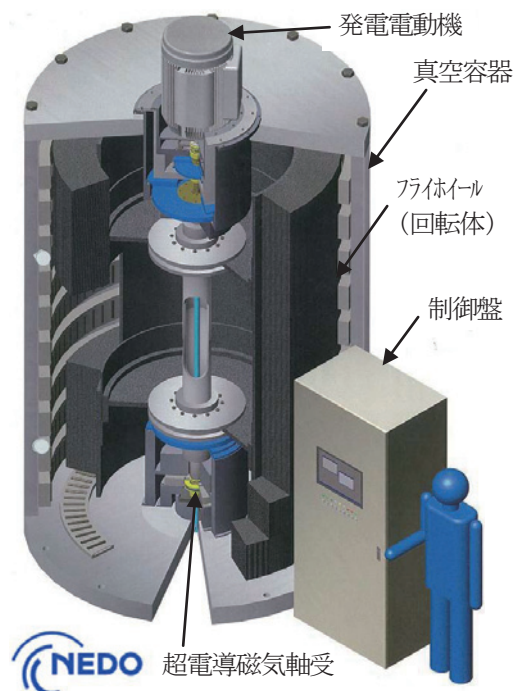


図4 超電導フライホイール蓄電装置（イメージ図）

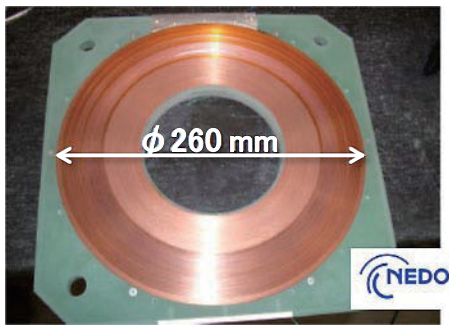


図5 超電導磁気軸受に用いる超電導コイル

積層して使用するが、この超電導コイルを冷凍機で冷却して高磁場を発生させ、バルク体と組合せた試験により、設計通り2トンを超える荷重を非接触で支持できることを既に確認している<sup>11)</sup>。

最近の研究成果に関しては、本号論文「超電導フライホイール蓄電装置の電磁界および構造解析」で報告している。

#### 4. その他の在来方式鉄道への応用技術例

浮上式鉄道の研究にとって、超電導技術や低温技術、リニアモータ技術はもちろん重要であるが、磁場の制御あるいは設計といった技術は本質的なものである。

既に触れた研究テーマはすべて磁場無くしては成り立たないが、本号論文「車両空調向け磁気ヒートポンプシステムの冷凍能力向上」ではこの磁場の設計が特に重要な役割を果たしている。詳しくは論文の方を参照していただきたい。簡単に研究の経緯を述べると、元々は超電導フライホイール蓄電装置の開発の中で、回転トルクを非接触で伝達する磁気クラッチが必要となり、その研究開発をする中で、永久磁石の配置法「ハルバッハ配列」の考え方を円環状の磁気回路に適用したところ、伝達トルクが飛躍的に増大した<sup>12)</sup>。この磁気回路は対として用いる場合、2つの磁気回路の間に高磁場な領域と磁場がほぼゼロになる領域を、交互に出現させる。このことが磁気クラッチとしてのトルク増大にも貢献したわけであるが、磁気ヒートポンプに適用すれば「磁気熱量効果」を効率的に発揮することになると考え、その考えに基づいて装置を試作したところ、磁気冷凍システムとしては国内最大となる冷凍能力を発揮することに成功したわけである。

また、本号論文「在来鉄道車両内の低周波磁界に関する測定手法および予測手法」で報告している内容は、開発が主体となる他の論文に比べて若干異色であるかも知れない。しかし、このテーマも当然、磁界あるいは磁場が主役である。研究内容に一般性があるだけに、本研究の適用範囲は非常に広く、今後ますます重要になってくる技術と考えている。

#### 5. おわりに

浮上式鉄道の基礎研究に関しては、高温超電導磁石の開発を核に、部内の地上コイル技術の研究グループや車両運動シミュレーションの研究グループなどの協力を得て、研究分野の垣根を越えたダイナミックな研究活動を進めている。

浮上式鉄道技術の在来方式鉄道への適用に関しても部内の協力を得て、外部資金等の導入も図りながら、さらに部外の機関との連携も行い、実用化に繋げるべく積極的に活動している。

どちらの研究においてもこれまで地道に積み上げてきた研究成果がようやく具体的な形になる時が近づいている。

部内の衆知を集め、知恵を部外にも求めて、今後とも浮上式鉄道の基礎研究と在来方式鉄道への超電導磁気浮上式鉄道技術の応用研究を強力に進め、得られた成果を相互にフィードバックして効率的に研究開発を進めていきたい。

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あるいは、NEDOプロジェクトの助成、あるいはNEDOの委託業務を受けて実施したことを付記する。

#### 文 献

- 1) [http://www.mlit.go.jp/page/kanbo01\\_hy\\_002900.html](http://www.mlit.go.jp/page/kanbo01_hy_002900.html)
- 2) <http://www.railwaygazette.com/news/news/asia/single-view/view/incheon-airport-maglev-unveiled.html>
- 3) <http://www.ebeijing.gov.cn/BeijingInfo/NewsUpdate/OlympicNews/t1074179.htm>
- 4) <http://www.maglevcobra.coppe.ufrj.br/>
- 5) <http://english.swjtu.edu.cn/public/viewNews.aspx?ID=154>
- 6) 小方正文 他：冷凍機無しで超電導を長時間維持する希土類系高温超電導磁石、鉄道総研報告、Vol.25, No.3, pp.11-16, 2011
- 7) 水野克俊 他：冷却系の簡素化が可能な5T級希土類系高温超電導磁石、鉄道総研報告、Vol.27, No.7, pp.5-10, 2013
- 8) 宮崎佳樹他：並列パルス管冷凍機を用い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
- 9) 荒井有気 他：荷重20kN超高温超電導磁気軸受による非接触回転試験、2013年春季低温工学会講演概要集、Vol.87, pp.89, 2013
- 10) Werfel, F N et al., "Next generation of HTS magnetic application: HTS bulk and coil interaction", Journal of Physics, Conference Series 507 032055, 2014.
- 11) <http://www.rtri.or.jp/press/2014/20140310.html>
- 12) 清野寛 他：超電導磁気軸受と永久磁石磁気クラッチの電磁力解析と評価、鉄道総研報告、Vol.24, No.1, pp.29-34, 2010