

# 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

長嶋 賢\*

Research And Development concerning Superconducting Maglev And  
Research on Applying Its Technology to The Conventional Railway System

Ken NAGASHIMA

RTRI is advancing the fundamental research and development concerning superconducting maglev. The topics of this issue include characteristics of maglev vehicle dynamics, experimental production, and evaluation of RE-BCO high-temperature superconducting coils. RTRI is also promoting the research on application of the maglev technology to the conventional railway system. The topics of this issue include the non-contact power supply system for railway vehicles and the flywheel energy storage system.

キーワード：浮上式鉄道，超電導リニア，在来方式鉄道，超電導磁石，地上コイル

## 1. はじめに

鉄道総研では2015年4月15日、浮上式鉄道関連技術の在来方式鉄道への応用研究として国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の助成を受けて、クボテック株式会社，古河電気工業株式会社，株式会社ミラプロおよび山梨県企業局の4者と開発を進めてきた超電導フライホイール蓄電システム実証機の完成を発表した<sup>1)</sup>。鉄道総研としては2005年度から超電導フライホイール蓄電システムに関する研究に取り組んできており、10年目の大きな成果である。

同じく在来方式鉄道への応用研究である鉄道車両用非接触給電技術については、2014年に鉄道総研構内で試験電車（R291）を用いて、国内では初となる停車中・走行中の給電試験に成功し、本技術が鉄道車両の電源として使用可能なことを確認した。

一方、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も進めている。

本稿では、まず、超電導フライホイール蓄電装置の開発経緯を中心に、浮上式鉄道関連技術の在来方式鉄道への応用研究の現状について紹介した後、浮上式鉄道に関する基礎研究の最近の成果について紹介する。

## 2. 浮上式鉄道関連技術の在来方式鉄道への応用研究

### 2.1 超電導フライホイール蓄電装置の開発経緯

鉄道総研は2005年から浮上式鉄道関連技術の在来方式鉄道への応用研究を本格的に開始した。その際、リニアモータ技術の応用テーマとしてリニアレールブレイキが、超電導技術の応用テーマとして超電導フライホイール蓄電システムが主なテーマとして選定された。それは、浮上式鉄道システムで超電導磁石が果たす本質的な役割あるいは特長について考察された結果であった。

超電導磁石の役割は単純で図1のように、「重量物（車体）を非接触で浮上・推進・案内して高速走行を実現する」ことである。この特長を活かせる応用が議論され

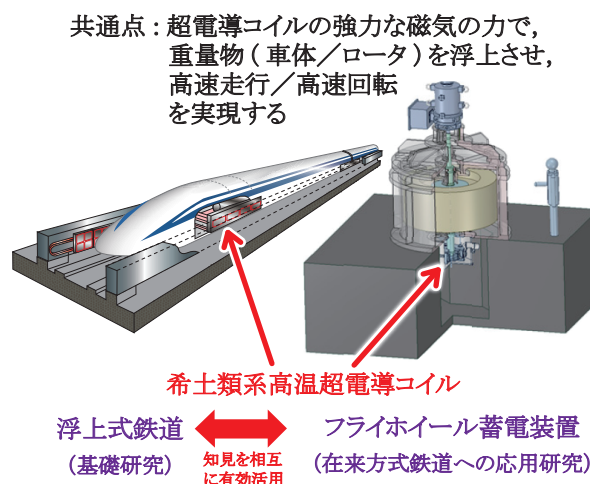


図1 高温超電導コイルによる磁気浮上技術の応用

\* 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

た結果、鉄道の回生失効対策に役立つフライホイール蓄電システムの軸受部分に超電導コイルを適用すれば、大重量のフライホイールロータを非接触で浮上させることができ、少ない損失で高速回転が実現できるという発想が提案された。当時、ちょうど浮上式鉄道の基礎研究テーマとして次世代の車載超電導磁石に希土類系高温超電導コイルを用いる検討をしていたため、フライホイールの磁気軸受に同じ希土類系高温超電導コイルを使えば、二つの研究テーマの間で知見が有効活用でき、相乗作用が期待された。

超電導磁気軸受を用いる超電導フライホイール蓄電装置の開発は、高温超電導体が発見された1986年以降、世界中で盛んに行われていたが、これらはほとんどがロータ側に永久磁石、ステータ側に液体窒素冷却の超電導バルク体という組み合わせであった。その場合、超電導磁気軸受の性能(支持荷重)は永久磁石の性能で決まってしまう、超電導バルク体の優れた性能を引き出せていないという問題があった。そのため、電磁力密度が不足し、超電導バルク体と永久磁石を複数個並べ、必要な電磁力を確保しなければならなかった。

そこで、永久磁石の代わりにより強力な磁場発生が可能な超電導コイルを使い、超電導バルク体と超電導コイルを用いるというのが、鉄道総研オリジナルのアイデアである。こうすれば、電磁力密度は磁束密度の自乗に比例して大きくなるので、超電導バルク体の個数を減らすことが可能である。ただし、回転するロータ側に超電導コイルを使うことは困難なため、ロータ側には超電導バルク体を使い、ステータ側に超電導コイルを使う図2のような構成が考案された<sup>2)</sup>。

そしてまずこの超電導磁気軸受の考え方を実証するため電磁力検証実験を実施した。その結果、超電導バルク体と超電導コイルの組合せで当初の目論見通り、電磁力密度を飛躍的に向上できることを確認した。

しかし、超電導磁気軸受のロータとステータ双方に超電導体を用いたことで、ステータ側だけでなくロータ側も冷却しなければならないことになった。そこではじめの実験機はロータ側の超電導バルク体を液体窒素で77Kまで冷却して、液体窒素の容器ごとフライホイールの回転軸として回転させることとした。一方、ステータ側のコイルはコストを考え、最も安価に入手できる低温超電導NbTiコイルを採用し、冷凍機で4Kまで冷却して実験に供した。この実験機は最終的には、2000kgのフライホイールを支持して最大3600min<sup>-1</sup>の回転数で回転することに成功した<sup>3)</sup>。

ただフライホイールの回転軸に液体窒素を貯めて試験する構造である限り長時間の回転を行うことが難しく、実用化はおぼつかない。そこで冷却方式として当初の図1にあるようにステータ側の超電導コイルを冷凍機で伝

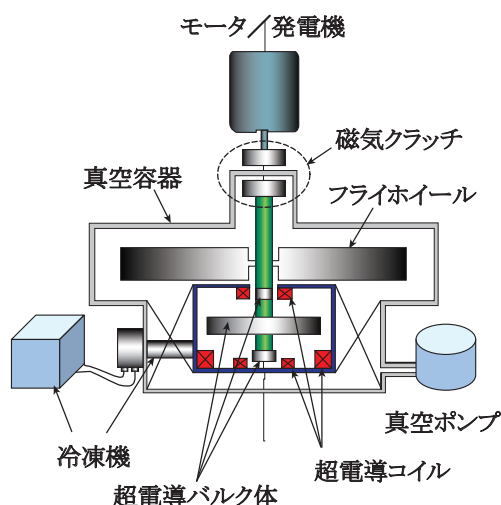


図2 超電導磁気軸受を適用したフライホイール蓄電装置のイメージ(2007年時点)<sup>2)</sup>

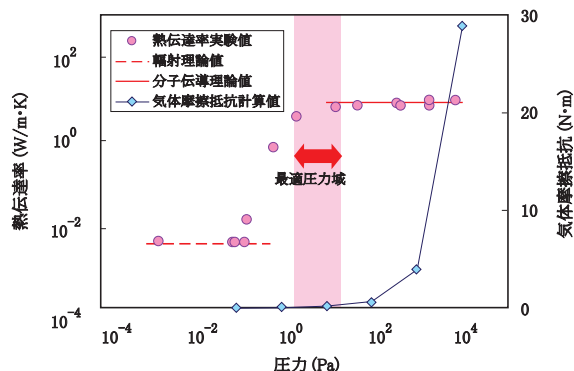


図3 ヘリウムガスの熱伝達率と摩擦抵抗<sup>4)</sup>

導冷却し、コイルを介して間接的に超電導バルク体を冷却することを検討した。非接触で浮いている超電導バルク体を冷却する方法としては気体の分子伝導しかない。そこで、実験と解析を行った結果が図3である<sup>4)</sup>。その結果は試験装置の寸法にも依存するが、使用した試験装置ではヘリウムガスの圧力が10<sup>-1</sup>Pa以下の低い圧力域では輻射伝熱の理論値と一致し、10Pa以上の圧力域では分子伝導の理論値と一致し、輻射伝熱レベルに比べて桁違いに向上することを実験的に確認できた。また、超電導バルク体と超電導コイルの間にヘリウムガスを入れるとフライホイールの回転に伴う空力的な損失(気体摩擦抵抗)が発生するが、気体摩擦抵抗が増大するのは10<sup>2</sup>Pa以上の領域である。従って10Pa前後の圧力の希薄なヘリウムガスを容器の中に入れれば、フライホイールの空力損失は少なく、超電導バルク体の冷却特性は真空に比べて桁違いに大きい領域がある事になる。

そこで、次に製作した小型の模型実験機では超電導コイルを高温超電導コイルとし、ヘリウムガスを介してロータ側の超電導バルク体を間接的に冷却する方式を採

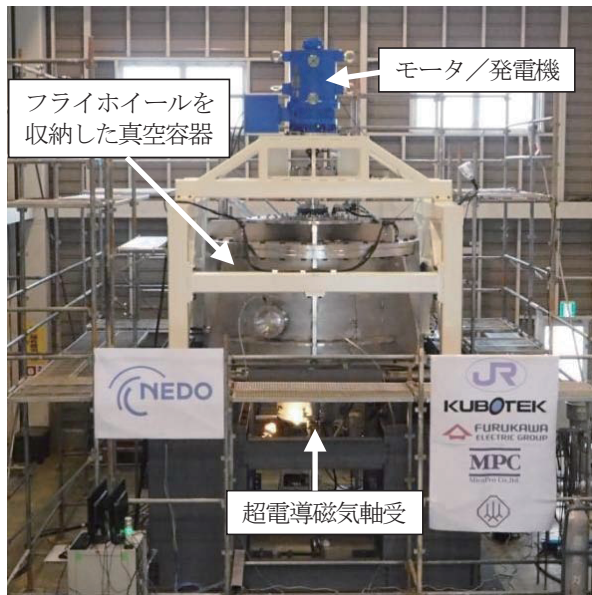


図4 超電導フライホイール蓄電装置実証機<sup>1)</sup>

用した<sup>5)</sup>。ただし、その時点では希土類系高温超電導コイルはまだ入手性や製作性の点で採用が困難であったためビスマス系高温超電導コイルを使用して製作した。その結果、希薄ヘリウムガスの冷却効果を実験的に確認することができた。また、ロータの完全非接触浮上回転にも成功した。その後、同じく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、最大荷重 60kN の確認等を行った<sup>6)</sup>。ここまでは国土交通省の国庫補助金を受けて行った、超電導磁気軸受の基礎研究であった。

これらの知見をへて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おり、2015年4月15日には図4にあるような超電導フライホイール蓄電装置実証機の完成を報道公開した<sup>1)</sup>。今回の超電導磁気軸受では、希土類系高温超電導線材のメーカーである古河電気工業株式会社が超電導コイルを担当し、開発当初の構想通り希土類系線材のコイルをはじめて適用することとなり、図1のイメージに近い装置が完成した。

## 2.2 磁気ヒートポンプ技術と非接触給電技術の開發現状

在来方式鉄道への応用研究に関して、本号では上で紹介した超電導フライホイール蓄電装置の他に磁気ヒートポンプ技術と非接触給電技術の開發現状について報告している。

磁気ヒートポンプ技術で使っている磁気回路のアイデ

アは図2にある超電導フライホイール蓄電装置の電磁クラッチの研究から派生したものである<sup>5)</sup>。また、浮上式鉄道の超電導磁石用冷凍システムの開発で培われた冷凍技術を活かして研究を進め、これまでに kW 級磁気ヒートポンプシステムを開発し、磁気冷凍技術による冷凍能力としては国内最大の 1.4 kW を達成しているが、数値解析結果と実験結果の間に大きな乖離があった。今回の本号論文「車両空調向け磁気ヒートポンプシステムの熱損失評価」では複数の熱損失を含めた数値解析により、磁気ヒートポンプシステムの特性を説明できる可能性があることがわかった。これにより、数値解析の精度が向上することにより、磁気ヒートポンプシステムの実用化に必須な、小型・軽量な高サイクルシステムの設計が可能となる。

非接触給電技術については、本号論文「鉄道車両用非接触給電装置の電力供給性能検証」で述べているように、鉄道総研所内の試験線で、国内では初となる停車中・走行中の給電試験を行い、所要の電力伝送や、車両走行用のバッテリーへの充電を行い、非接触給電装置が鉄道車両の電源装置として使用可能なことを確認した。非接触給電技術に関しても浮上式鉄道の車上電源供給のために検討してきた知見が活用された形である。レールへの漏れ磁界を低減する 8 の字コイル配置が鉄道総研オリジナルのアイデアとなっており、地上の給電コイルはフェライトコアが不要であり、かつ 4 条のケーブルを配置するのみで構成できる。

## 3. 浮上式鉄道に関する基礎研究

鉄道総研における浮上式鉄道に関する基礎研究の三本柱は「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」、「地上コイルの診断技術」となっているが、本号で報告する内容は図5に示すように高温超電導磁石に関連する物が多くなっている。

「高温超電導材料の車載超電導磁石への適用研究」については本号論文「希土類系高温超電導磁石のための要素コイル製作と評価」で述べる通り、希土類系高温超電導線材で実機大高温超電導磁石のための要素コイルの製作に着手している。通電特性が劣化しないコイルの製作手法は鉄道総研で考案したオリジナルの手法であり、実験的にもその効果を検証している。この希土類系高温超電導コイルの製作手法は、同じく希土類系高温超電導コイルを使用している超電導フライホイール蓄電装置にも適用可能で有り、これにより超電導コイルの製造コストが低減できる見込みもある。そうなると、まさに図1で述べた、知見の相互有効活用が実現することになる。

また、本号論文「高温超電導磁石用の光ファイバ温度センサの低温特性向上と実用性検証」では光ファイバ温

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

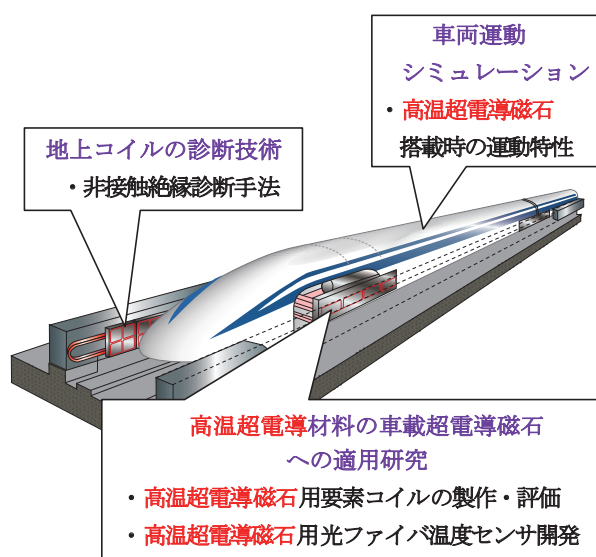


図5 鉄道総研における浮上式鉄道基礎研究のイメージ

度センサの開発について報告している。高温超電導磁石は液体冷媒を使わず、冷凍機による伝導冷却を使う点を取り扱い上有利な点であるが、反面、液体冷媒の沸騰を利用した温度の均一化ができないことが課題である。

伝導冷却では、超電導コイル部分で温度差が生じるため、温度分布をモニタする必要がある。従来、極低温の温度域で通常使われていた測温抵抗体（温度センサ）では1センサあたり計測線が4本あり、複数の温度センサを超電導コイルに取り付けると計測線による熱侵入も無視できなくなる。これに対し、光ファイバ温度センサは1本のファイバで多点測定ができるだけで無く、ファイバ自体の熱伝導率も小さいので熱侵入が少ない、電磁ノイズの影響を受けないなどのメリットもあり、超電導コイルの温度分布計測に適した特性を持つため開発を行っている。

車両運動シミュレーションについては、本号論文「希土類系高温超電導磁石の搭載を想定した車両運動特性」で述べているが、特に超電導磁石の小型・軽量化に有利な希土類系高温超電導磁石を搭載した場合の車両運動について数値計算でシミュレーションし、車両へもたらされる利点について定量的に評価している。また、断熱構造を簡略化して、小型化した高温超電導磁石について、起磁力を低減させた場合の電磁力特性、車両運動特性を求め、従来車両と同一の特性を維持しつつ、起磁力が低減可能であることを示している。

地上コイルの診断技術関連については本号論文「多数個の推進系地上コイルを対象とした効率的な非接触絶縁診断手法の開発」で報告している。走行している浮上式鉄道車両から推進コイルが発する部分放電電磁ノイズを検知することによって、絶縁性能が低下している推進コ

イルを早期に発見、特定して、効率的な保守作業に役立てようと言うものである。この技術は宮崎実験線での試験等を経て、いよいよ部分放電自動判別・記録機構付きの絶縁診断システムを構築する段階に来ている。

4. おわりに

浮上式鉄道技術の在来方式鉄道への応用研究に関しては、NEDOの助成を受け、部外の機関との連携も行って超電導フライホイール蓄電システム実証機が完成した。この実証機は希土類系高温超電導コイルを磁気軸受部分に使用している。今後、山梨県米倉山の大规模太陽光発電所で実証連系試験を進めていくことになる。非接触給電技術の開発も所内試験線で給電試験するまでに至った。

一方、浮上式鉄道の基礎研究に関しては、こちらも希土類系高温超電導磁石が特色である。いよいよ実機大希土類系高温超電導コイルの製作に着手する段階になり、磁石のハード開発だけで無く、この磁石を搭載した車両運動シミュレーションというソフト的な検討も、研究室、研究分野の垣根を越えて行っている。

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応用研究を強力に進め、得られた知見を相互に有効活用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.rtri.or.jp/press/pdf/20150415.pdf> (参照日：2015年4月15日)
- 2) 長嶋賢 他：超電導バルク体と超電導コイルを用いた磁気軸受の載荷力密度，鉄道総研報告，Vol.21, No.9, pp.29-34, 2007
- 3) 荒井有気 他：冷凍機冷却型超電導フライホイール用試験装置の開発，鉄道総研報告，Vol.25, No.3, pp.41-46, 2011
- 4) 清野寛 他：フライホイール用高温超電導バルク体磁気軸受の基礎検討，鉄道総研報告，Vol.22, No.11, pp.35-40, 2008
- 5) 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
- 6) 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