

# 浮上式鉄道に関する基礎研究と関連技術の 在来方式鉄道への応用

長嶋 賢\*

Recent Status of Basic Research on Superconducting Maglev and Research on  
Application of the Maglev Technology to the Conventional Railway System

Ken NAGASHIMA

RTRI is advancing the basic research on superconducting maglev. The topics of this issue are the experimental evaluation of REBCO high-temperature superconducting coils, the development of a system for collecting the sensor data of the ground coils, and so on. RTRI is also promoting research on the application of the maglev technology to the conventional railway system. The topics of this issue are the non-contact power supply system and the flywheel energy storage system.

キーワード：浮上式鉄道，在来方式鉄道，超電導磁石，地上コイル，非接触給電，フライホイール蓄電装置

## 1. はじめに

超電導磁気浮上式鉄道の技術開発については、1990年の運輸大臣通達（当時）に基づき、JR 東海と鉄道総研が共同で作成した「超電導磁気浮上方式鉄道技術開発基本計画」により推進されてきた。

現在、鉄道総研の浮上式鉄道技術研究部は本基本計画に基づいて浮上式鉄道の技術開発に取り組んでいる。あわせて、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も実施している。

本稿では、浮上式鉄道に関する研究開発の現状と、関連技術の在来方式鉄道への応用展開に関して解説する。2018年度は浮上式鉄道技術研究部としては喜ばしいことが二つあった。一つは、浮上式鉄道の基礎研究として開発を十年以上続けてきた希土類系（REBCO）高温超電導線材を用いた高温超電導磁石システムについて実機大コイルの組込みが完了して形となったこと、もう一つは、在来方式鉄道への応用研究で、やはり十年以上開発を続けてきた超電導フライホイール蓄電装置が鉄道事業者により営業線で実証試験を実施することが決まったことである。

## 2. 鉄道総研における浮上式鉄道の基礎研究

### 2.1 高温超電導磁石の開発

鉄道総研では高温超電導線材、特に磁場中で高い臨界電流密度が期待でき、低コスト化も期待される希土類系

高温超電導線材の、超電導磁石への適用について研究開発を進めてきた。希土類系高温超電導線材は生産あるいは開発を手がけるメーカーも多く、現在では日本のメーカーでは古河電気工業（生産は米国の SuperPower 社）、フジクラ、昭和電線ケーブルシステム、住友電気工業、海外では Bruker HTS（ドイツ）、SuNAM（韓国）、AMSC（アメリカ）等に加えて SuperOX（ロシア/日本）や Shanghai Superconductor Technology（中国）も比較的低価格で希土類系線材を提供しようとする動きがある。

高温超電導線材を用いると、これまでの超電導磁石で用いていた液体ヘリウムを使用する必要がなくなるので、冷却方式の選択肢が広がる。もっともオーソドックスな超電導磁石の構成としては図1の様なのが考えられる。2段冷凍機を用い、冷凍機の1段ステージで輻射熱シールド板（シールド）を伝導冷却し、2段ステージで超電導コイルを伝導冷却する方式である。冷媒を一切使わないため、注液などの作業が不要で、スイッチを押すだけで冷えるので扱いが容易である。ただし、冷却温度が低いほど冷却にかかる時間が長くなるという課題がある。

しかし、希土類系高温超電導線材の特徴である、高温・

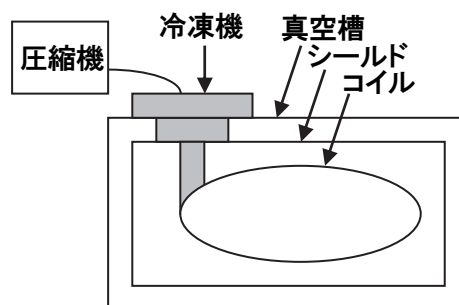


図1 2段冷凍機でコイルを冷却する高温超電導磁石

\* 浮上式鉄道技術研究部長

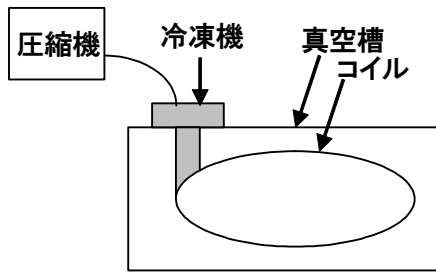


図2 単段冷凍機でコイルを冷却する高温超電導磁石

高磁場中での優れた臨界電流特性を積極的に活かして、運転温度をさらに上昇した設計を採用することで、下記の方策により、これまでの超電導磁石の構成を大幅に変更できる可能性がある。

- ・効率の高い単段冷凍機で伝導冷却する。
- ・超電導コイルのシールドを省略する。
- ・上記により断熱構造を簡略化する（できる）。

上記により超電導磁石クライオスタット断面の小面積化が可能となるので、質量や製造コストが低減できる。この場合の超電導磁石の構成は図2のようになる。この磁石は超電導コイルを囲んでいたシールドが無い分、超電導コイルが地上コイルに近づくので、同じ起磁力であれば、地上コイル位置での磁束量が增大できる。また、磁束量を増やす必要がないのであれば、超電導コイルの起磁力を下げ、使用する超電導線材の量を減らすことも可能で、これも低コスト化につながる。

鉄道総研ではこのような高温超電導磁石を用いて、まずは地上コイルの長期耐久性評価のための電磁加振試験に適用することを考えている。本号論文「電磁加振試験に用いる希土類系高温超電導磁石の監視・保護手法の検証」には図2の考え方で製作した高温超電導磁石（図3）について述べられているが、現状の電磁加振試験で使用している低温超電導磁石は図4のような形状をしている。両者は撮影の角度が違うので単純な比較はしにくいですが、前者は後者にあるような冷媒タンクが無く、また冷媒をタンクからコイルに供給する内部配管も無いため、超電導コイルを内蔵した外槽（写真の下部にある薄い直方体形状の部分）の高さが低い上に、内部にシールドが無いことから厚さも薄く、磁石断面としては40%程度小さくなっている。

また、冷凍機で伝導冷却する高温超電導磁石は、液体ヘリウムなどの冷媒を使用する従来の低温超電導磁石よりも扱いが容易で、室温から冷却する時間（予冷時間）が短くなることを確認しているが、信頼性や耐久性については、今後、地上コイル電磁加振試験等を通じて確認していく予定である。

また、重要部品である超電導磁石にもっとも求められることは、何かあった場合の「保護手法」である。保護

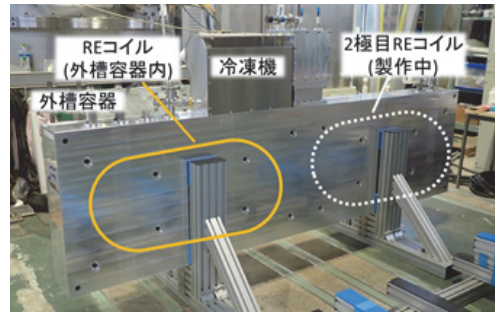


図3 電磁加振用高温超電導磁石外観



図4 電磁加振用低温超電導磁石外観

のためには内部にある超電導コイルのモニタリング（状態監視）が重要であり、本号論文ではそのあたりの検討、見通しについても述べている。

なお、ここで紹介した研究開発は一部、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施したことを付記する。

## 2.2 地上コイルに関わる研究

浮上式鉄道用地上コイルは数が莫大で、長期間の屋外使用となる。地上コイルには推進コイルと浮上・案内コイルの2種類があり、前者は特別高圧機器としての絶縁安定性が重要である。ところが、超電導磁石（コイル）とともにリニアモータを構成するこの推進コイルへは、車両走行に伴うモータとしての負荷（逆起電力）が存在しないと変電所から所定の加圧ができず、現地での絶縁診断が困難であるという事情がある。本号論文「推進コイルの部分放電現象に着目した絶縁診断手法」では現地

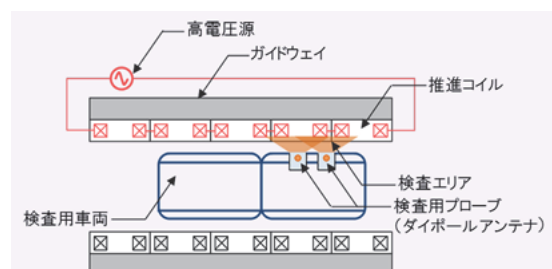


図5 部分放電による絶縁診断の原理

の推進コイルを在姿状態で評価可能な新たな絶縁診断手法について報告している。この絶縁診断手法の原理を図5に示す。推進コイルに高電圧を印加した環境下において車両を走行させ、ダイポールアンテナ等の検査用プローブを用いて電磁波を測定する。推進コイル設置区間において部分放電と推定される特性の電磁波を検出した場合、当該区間の推進コイルに絶縁性能が低下しているコイルがあると推定できる。複数のアンテナを用いることで、各アンテナへの電磁波の到達時間差を算出し、部分放電している推進コイルの特定も可能である。

今後は本号論文にある通り、推進コイルの絶縁異状レベルの定量的評価を進め、まずは鉄道総研所内にある集電試験装置を用いて、地上放電源からの電磁波を高速走行中の車上で検出できるか調べる試験を進めていく予定である。

一方、本号調査報告「RFID技術に関する国際会議(RFID-TA 2018)参加報告」で報告しているRFID技術(無線による識別技術 Radio Frequency Identification)も地上コイルの保守に関連した技術である。鉄道総研はこれまで独自に浮上式鉄道の地上コイルなどの保守管理にRFID技術の適用を検討してきた。その結果、移動しながらタグを読み取る「すれ違い通信」を提案し、保守用車を模擬した車両にリーダー・ライトと車載アンテナを搭載し、宮崎リニア実験線で性能確認を行った。その結果、移動しながらのデータが取得できること、また付加機能として、タグに保守データの書き込みができることや、センサとタグを組み合わせた「センサタグ」を用いることで、状態監視が可能なことを確認した。

この技術は浮上式鉄道だけでなく、在来鉄道のインフラの保守管理にも幅広く適用することが出来るので、今後はその方向の検討も進めていく。

### 3. 関連技術の在来方式鉄道への応用研究

#### 3.1 非接触給電技術

鉄道総研は、浮上式鉄道では車上電源の供給方法としても使われている非接触給電技術を、ハイブリッド気動車や蓄エネルギー機構を有する車両の駅停車時などの電力供給に使用可能とすべく、低損失化・高出力化・高電

力密度化を目指して開発している(図6)。これまで、8の字コイルの採用や、使用するリッツ線の工夫で低損失化を図ってきており、2014年には所内試験線で車両への給電試験も実施しているが、本号論文「高電力密度非接触給電システム用コイルの設計」では高電力密度化に関する検討結果を報告する。

海外では、2010年からドイツのアウグスブルクでBombardier社の”Primove system”と呼ばれる非接触給電装置によるトラムの試験走行が行われている。また、2014年には韓国鉄道技術研究院の試験線で次世代高速鉄道“HEMU”の車両を使った非接触給電のデモンストレーション試験が実施された。一方自動車分野では、電気自動車への給電、しかも「走行中給電」を実証する動きもいくつか見られる。2013年には韓国科学技術院(KAIST)で実験が行われ、2015年にはUtah州立大学の構内に自動車用の非接触給電システムを埋め込んだ試験路を設置したとのことである。

鉄道総研としてはこの様な動きについても注視し、トラムあるいはBRTのような比較的小規模な交通機関から非接触給電システムを導入するシナリオを視野に入れつつ開発を着実に進めていくことを考えている。

#### 3.2 超電導フライホイール蓄電システム

超電導フライホイール蓄電システムについては、2005年の浮上式鉄道技術研究部発足時から、在来方式鉄道応用の目玉として開発を進めてきた。さらに2012年からはNEDOの助成も受けながら山梨県やメーカ等と共同で「超電導フライホイール蓄電システム」の開発を進めてきた。これらの成果を発展させる形で鉄道総研、山梨県及び東日本旅客鉄道株式会社(JR 東日本)は、鉄道事業において超電導フライホイール蓄電システム」を実用化することを目指し、3者で「鉄道用超電導フライホイール蓄電システムの技術開発に関する基本合意書」を2018年3月29日に締結した。3者の役割分担は図7の様になっている。

鉄道では回生失効対策や、電圧降下対策、あるいは事業継続計画(BCP)等の目的で電力貯蔵装置を変電所に配置することが行われている。最近では、この用途に二次電池やキャパシタを用いることが多いが、京浜急行電



図6 非接触給電の適用イメージ

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

鉄では1981年に金沢の瀬戸変電所にフライホイール蓄電装置を導入して試験を実施した後に、1988年に逗子フライホイールポスト（出力3MW、充放電量25kWh）を新設して実用運転を開始した。これは逗子支線の終点付近での架線電圧の降下対策であった。この装置は30年以上にわたり、現在も稼働し続けている。フライホイール（はずみ車）部は合金鋼製で重量は13.7トンである。また、フライホイールの回転軸は水平に配置され、二つの油膜軸受で回転軸の両端を支持する構造となっている。

現在も稼働している鉄道用フライホイールは少なくとも日本国内ではこの1台だけと思われるが、そのほかに、鉄道用としてはJR東海がNEDOの委託で開発したフライホイール蓄電装置（出力1MW、充放電量50kWh）がある。こちらは、低温超電導（NbTi）コイルと鉄の吸引力で金属製のフライホイールを支持するものであった。そのほかに、海外ではスペイン鉄道インフラ管理機構ADIFが常伝導磁石を用いた磁気軸受で支持される金属製フライホイール内蔵の蓄電装置（出力350kW、充放電量55.5kWh）を開発している。同じくドイツのStormetic社は鉄道にも使う、として同様に常伝導磁石を用いた磁気軸受で支持される金属製フライホイールを内蔵した蓄電装置（出力22kW、充放電量3.6kWh）をインターネット上のホームページに掲載しているが、いずれもまだ実用段階にはない模様である。特に後者は容量が他の物に比して小さいため、複数の装置を並べて使う様である。上記のスペックを比較してみると、鉄道に必要なスペックが見えてくる。出力は数百kW～数MWで、充放電量は25kWh～50kWh程度であろうか。Stormetic社のフライホイールも10台並べればそのクラスになる。

鉄道の場合、安全性や信頼性が第一に求められるので、軸受の摩擦摩耗による損失やメンテナンスを低減するために非接触の超電導磁気軸受を採用する以外は極力既存

技術を適用すべく、既実績があるもので検討を進めた。重要部品のフライホイールには実績がある合金鋼を採用することとしたのもそのためである。フライホイールの蓄積エネルギー（充放電量）を増やすには、重量を増やす方法と、回転数を増大する方法があり、蓄積エネルギーは重量に比例し、回転数の自乗に比例する。しかし、回転数を増やすと高強度のフライホイールが必要となり、結果的に高価になる。また、高回転型で、鉄道が必要とするような大出力を発揮できる発電電動機も現状世の中にはない。結果として、京浜急行電鉄のフライホイール蓄電装置のような規模の実績あるフライホイールの方が、現実的と考えられる。

さらに、我々鉄道総研が提案した超電導磁気軸受は大きな荷重を支持できることが特長であり、超電導線材の性能向上もあって、鉄道用の想定荷重では必要な超電導線材やバルク体の物量はほとんど増えないことが明らかになった。この詳細については本号論文「鉄道用フライホイール向け超電導磁気軸受の信頼性評価試験」で報告している。また、上記で保守的な検討を行ったが、周辺機器の開発や信頼性確認は必須であり、その原理、役割等の説明を行っているのが、本号論文「超電導フライホイール実証機における主要技術」である。

4. おわりに

我々研究者の立場として、浮上式鉄道の基礎研究については、山梨のリニア実験線、あるいは来るべき営業線（中央リニア新幹線）に自らの技術を使っていただくのが最終目的であり、在来方式鉄道への応用研究でも、やはり鉄道事業者に使っていただき、はじめは実証試験であっても最終的な実用化までもっていくことが一番の喜びである。研究成果が形になってきたとはいえ、ここで気を緩めることなく、着実に研究成果を積み上げていくことをお約束して稿を閉じたい。

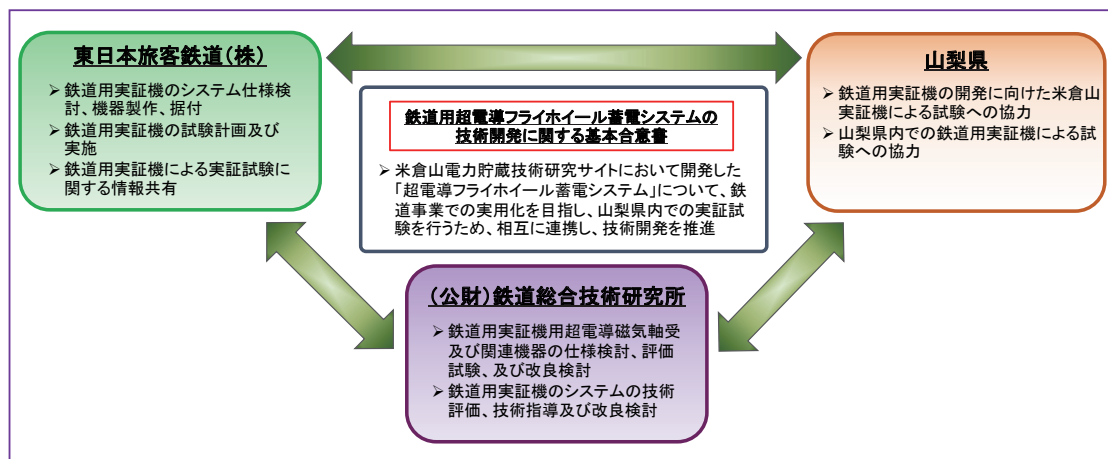


図7 超電導フライホイール蓄電システムの鉄道事業分野での実用化に向けた取り組みの役割分担