

# 浮上式鉄道の研究開発と 関連技術の在来方式鉄道への応用

長嶋 賢\*

R & D of Superconducting Maglev and Applications  
of its Technology to the Conventional Railway System

Ken NAGASHIMA

RTRI is advancing research of a maglev vehicles motion simulation, experimental studies on the applicability of high-temperature superconductivity material to on-board magnets and research on evaluation of the ground coil, etc., and is achieving results as described in this report. Research on application of Maglev technology to the conventional railway system is also ongoing. For example, there are a flywheel energy storage system using superconducting magnetic bearings, a rail brake system applying linear induction motor technology, a contactless power supply system and a magnetic refrigeration system for air-conditioners as a development theme. This paper describes the outline of these researches and developments.

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

2012年は、旧日本国有鉄道 鉄道技術研究所においてリニアモーターカーの研究開発が始められてから50周年であった。そこで、日本国有鉄道が行っていた研究開発を承継した鉄道総研の行事として、「リニアモータ推進高速鉄道研究開発50周年記念講演会」を開催した<sup>1)</sup>。現在、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、高温超電導材料の適用研究や地上コイル関連技術の研究等を進めており、成果を出しつつある。また、浮上式鉄道の研究開発と並行して、超電導技術・低温技術および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。本報告ではその概要および関連技術についての動向を紹介する。

## 2. 浮上式鉄道の研究開発

鉄道総研における浮上式鉄道の研究開発イメージは図1の様になっている。現在の検討課題を吹き出し部に列挙した。今回は本特集にも論文が出されている、超電導磁石および地上コイル関係の研究について紹介する。

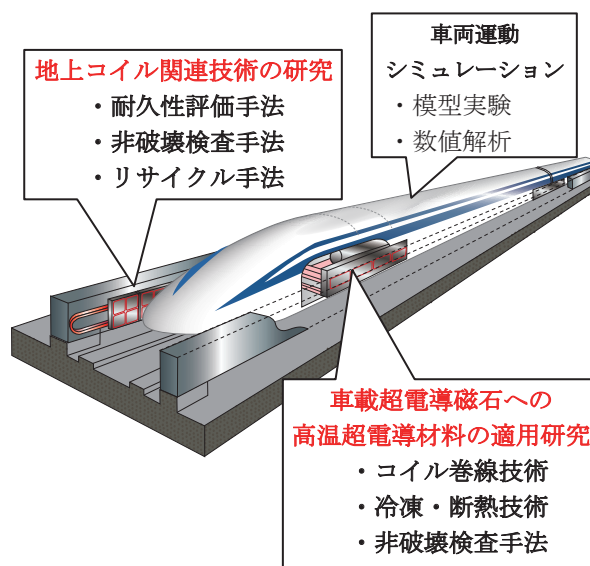


図1 鉄道総研における浮上式鉄道研究開発イメージ

### 2.1 車載超電導磁石への高温超電導材料の適用研究 高温超電導材料のメリット

高温超電導材料の適用という点、往々にしてこれまで高価な液体ヘリウムで冷却していたのが安価な液体窒素で冷却できるようになるという点が強調される。しかし、高い磁場を発生する浮上式鉄道の車載超電導磁石への応用を考えた場合、話はそう単純ではない。図2の赤い曲線は市販されている希土類系高温超電導線材の臨界電流

\* 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

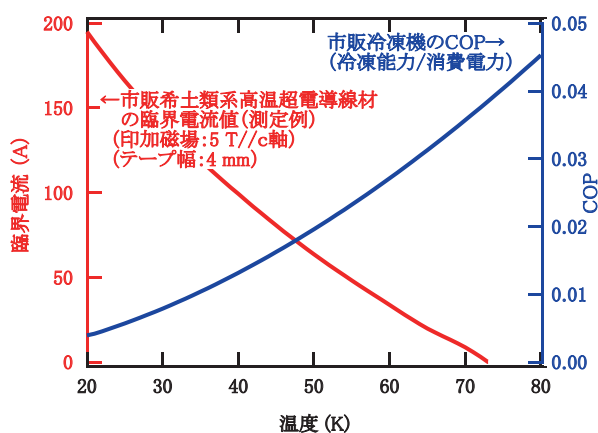


図2 高温超電導線材の臨界電流値と冷凍機のCOPの温度依存性

値を鉄道総研で測定したものの一例である。液体窒素温度（77K）でも磁場がかからなければ、今の希土類系高温超電導線材は4mm幅で100A以上の臨界電流値を有するのが一般的であるが、このグラフのデータは凡例にあるように5Tの磁場を印加した状態で臨界電流値を測定したもので、それより大分小さな値を示している。超電導送電ケーブルなどと異なり、超電導磁石の場合は線材が自身の発生する磁場によって臨界電流値を低下させてしまう問題がある。もちろんこれらの問題は、線材の性能向上によって今後解決されることが期待されるが、この実験結果を見る限り、液体窒素温度で5Tの超電導磁石を製作することは当面難しいと考えられる。では、液体窒素冷却で無ければ高温超電導磁石は魅力が無いかというところでは無い。

図2の青い曲線は、市販冷凍機の実態を調査した文献<sup>2)</sup>から冷凍機のCOP（成績係数＝冷凍能力/消費電力）を求めたものである。これによると温度を上げれば冷凍機のCOP、いわば効率は大きく向上することがわかる。即ち、同じ冷凍能力であれば、冷却温度を上げることにより必要な消費電力は大幅に低減される。また、冷凍機の消費電力は冷凍機の質量と比例関係にあるので、消費電力が減れば、冷凍機の質量も低減されることになる。超電導線材の臨界電流値と冷凍機のCOPは需要供給曲線の様に見える。温度が上がれば線材の性能は低減するため、磁石を製作するために必要な線材量（コスト）は増えるが、COPは向上するため冷却に要するコストは低減する。どこかに全体コストを最小にする温度があると考えられる。その温度は線材の性能が向上すると高い温度に推移するはずである。

そこで、もし運転温度を液体ヘリウム温度から50K程度まで上昇できれば、下記のような利点が考えられ、これまでの超電導磁石システムを大幅に変更できる可能性がある。

- ・ 構造が単純で信頼性も高い単段冷凍機で伝導冷却できる。
- ・ 超電導コイルの輻射熱シールドが省略できる。
- ・ 断熱構造が簡略化できる。

これ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、質量や製造コストの大幅低減が期待できる。

5T級高温超電導磁石の開発

ただし、線材のコストや、強度の面から次世代高温超電導線材として期待されている希土類系高温超電導線材も、まだ線材として製品化されてから日が浅く、コイル化の技術も確立していないのが現状である。巻線、含浸の仕方によっては超電導線材にダメージを与えてしまい、コイルとしての性能を十分発揮できない場合もある。その原因として、テープ状の超電導線材内部での剥離が考えられている。そこで、鉄道総研ではコイル巻線機も導入して自ら巻線技術の検討を行い、巻線方法やコイルの含浸材料の検討などを進めてきた。その結果、コイルサイズは小さいながら、冷却温度45Kで5Tという実機並の磁場を、実機に近い電流密度で達成することに成功した。その結果、現在の液体ヘリウムで冷却するいわゆる低温超電導（NbTi）コイルに近い重量、寸法で、40K以上の運用温度で使用する希土類系高温超電導コイルが構成可能であることがわかった。今後の線材の特性向上によって、50K程度での運用は十分可能であると考えている。

詳しくは本号の「冷却系の簡素化が可能な5T級希土類系高温超電導磁石」を参照されたい。

車載パルス管冷凍機および光ファイバ温度センサの開発

一方この高温超電導コイルを冷却する冷凍機についても別途開発を進めてきた。こちらについては車載超電導磁石への艱装性や信頼性を考慮し、低温部に動作部品が一切無いGM型アクティブバッファ方式パルス管冷凍機を選択し、高性能化を図った。その結果、現状の市販冷凍機の性能を元に策定した目標性能（冷却温度50Kで140Wの冷凍能力、成績係数（COP）0.02）を上回る冷凍性能（冷却温度50Kで170.3Wの冷凍能力、成績係数0.023）を達成した<sup>3)</sup>。

ところで、50Kの冷却温度では使用可能な液体冷媒が無い。そうすると、上記のような冷凍機による伝導冷却で超電導コイルを冷却せざるを得ないが、その場合、液体冷媒を用いる浸漬冷却の様にコイル全体を一定の温度に維持することは困難である。もちろん高い熱伝導率を有する材料を用いて、効率的に冷却する必要があるが、それでもコイルには場所により温度分布がつくので、この温度分布をモニタする必要がある。そこで、鉄道総研では直径100μm程度の非常に細い光ファイバ1本で分布的に温度測定ができ、低温部への熱侵入が少なく、電気絶縁性が高く、電磁ノイズに強い、等のメリットを有する光ファイバ温度センサの開発を進めており、低温で

の感度向上に成功している<sup>4)</sup>。

今後は実機大超電導磁石を実現するために上記で述べた複数の技術を組み合わせて評価試験および設計等を進める予定である。

## 2.2 地上コイル関連技術の研究

浮上式鉄道の地上コイルは、長期間の屋外使用に加え膨大な数が対象となるため、安価で信頼性の高いものが要求される。また、設備維持のためには簡易な検査方法も必要である。さらに、使用後の事も考えておかなければならない。そこで、地上コイルに関する課題としては図1に記載されているように、耐久性評価、非破壊検査手法、リサイクル手法の3つと考えている。

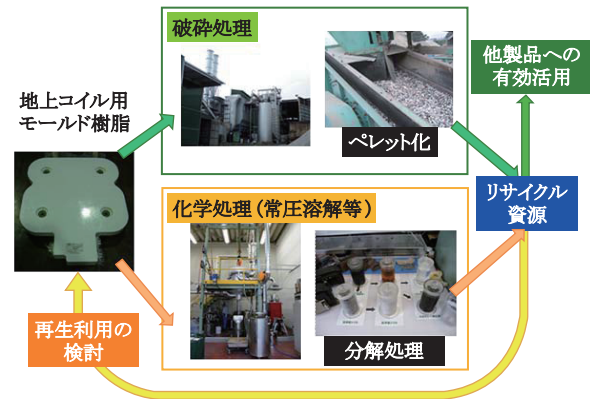
耐久性評価に関しては、鉄道総研では下記の様な、材料からコイルそのものまで評価できる、各種試験装置をそろえてデータの蓄積や評価手法の検討を進めている。

- ・ 恒温室付疲労試験装置
- ・ 地上コイル耐候性試験装置
- ・ 地上コイル屋外課通電試験装置
- ・ 地上コイルモールド樹脂耐久性試験装置
- ・ 地上コイル電磁加振試験装置
- ・ 地上コイル耐衝撃試験装置
- ・ 渦電流損失評価試験装置

一方、非破壊検査に関しては、特別高圧機器としての絶縁安定性が必要な推進コイルに関して、部分放電に伴って発生する電磁波を効果的に検出することで内部欠陥の発見とその位置標定を行う絶縁診断手法の検討を行っており、欠陥部位の特定が可能であることを検証した。詳しくは本号の「電磁波検出による地上コイル内部欠陥位置標定に関する検討」を参照されたい。

また、地上コイルに異状検知センサと電源、無線装置を組み込んで、それぞれの地上コイルのデータを無線により収集してメンテナンス作業を省力化しようという開発も行っている。詳細は本号の「地上コイル異状検知センサ用給電装置の開発」を参照されたい。ここでは、センサの電源として浮上式鉄道の推進用地上コイルの磁場を利用する給電装置を開発しているが、その他の「データを取得して無線で収集する」技術は在来方式鉄道のインフラ管理にも使える技術であるので、浮上式鉄道への応用だけでなく、在来方式鉄道への応用も視野に入れながら研究開発を進めていく予定である。

今後、数多く製作される地上コイルのリサイクル技術に関しては図3の様な想定をしている。コイル内部の導体など地上コイルに再び利用できる物は使い、そうで無いものは他の製品（例えばコンクリートの充填剤等）に利用するという方向で、LCAなども含めて検討中である<sup>5)</sup>。



※写真はいずれも一例

図3 地上コイルリサイクルの流れ（一例）

## 3. 関連技術の在来方式鉄道への応用

2005年度から超電導リニアで培った超電導技術やリニアモータ技術を在来方式鉄道に適用すべく種々の研究を行ってきた。在来方式鉄道への展開のイメージは図4の様なものである。主な成果について紹介する。

### 3.1 リニアモータ技術の応用

リニアモータ技術の応用としては、「リニアモータ型レールブレーキ」と「非接触給電技術」がある。

「リニアモータ型レールブレーキ」に関しては、2005年度から取り組んでおり、昨年、予定通り鉄道総研構内で試験電車（R291）を用いた走行試験に成功した。このブレーキシステムは、従来の渦電流ブレーキで問題となった、渦電流によるレール温度上昇を抑制できる機能を有するものである。運動エネルギーの一部をリニアインダクションモータを用いて電力回生することでレール温度上昇を低減すると同時に、停電時でもこの回生電力でブレーキ動作を可能とした画期的な構成が特長である。詳細は本号の「リニアモータ型レールブレーキの開発」を参照されたい。

「非接触給電技術」に関しては2010年度から開発を始めた。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における電力供給として使用可能なレベルを目指して、低損失化・高出力化の検討を進めている。レールブレーキと同じく、鉄道総研構内試験線での走行試験を当面の目標としている。詳細については本号の「非接触給電コイルにおける導体の近接効果による損失の検討」を参照されたい。

### 3.2 超電導・低温技術の応用

超電導・低温技術の応用としては、「超電導フライホイール蓄電装置」と「磁気冷凍システム」がある。「超電導フライホイール蓄電装置」は2.1で述べた高温超電導磁石の開発と共通する部分がある。それは「重量

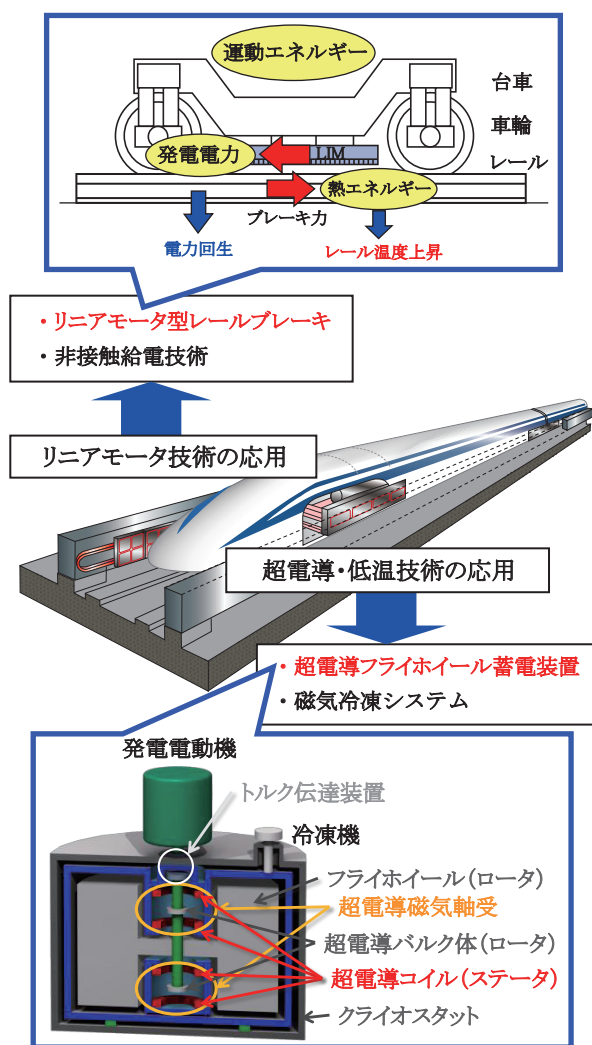


図4 超電導リニア技術の在来方式鉄道への応用イメージ

物を支える超電導コイル」という点である。車載超電導磁石はリニアの車体を支持し、このフライホイールでは超電導コイルは図4にある通りフライホイールを支持する。どちらも走行あるいは回転に伴う振動に耐えなければならない点も同じである。これまで培ってきた浮上式鉄道開発における知見がここで在来方式鉄道向け技術に役立つものと考えている。このテーマに関しては「レールブレーキ」と同様、2005年度から取り組んでおり、昨年度はビスマス系高温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。この試験では一対の超電導磁気軸受を相互の力が打ち消しあうように逆向きに配置して、フライホイールを付けず、ロータ回転軸に圧縮力がかかる状態での回転試験とした。この方式で磁気軸受には大きな荷重がかかった状態で安全に回転試験ができた。その結果、最大荷重 60kN の確認、超電導磁気軸受によるロータの非接触浮上の確認、永久磁石を用いたトルク伝達装置による非

接触駆動の確認に成功した<sup>6)</sup>。今後はこれまでに得た知見を使い、新たな枠組みで磁気軸受だけでなく、フライホイール蓄電装置としての開発を進める予定である。本テーマに関連した要素開発として「フライホイール駆動用永久磁石同期電動機の開発」も実施した。これに関しては本号の該当箇所を参照されたい。

「磁気冷凍システム」に関しては、浮上式鉄道や上記の超電導フライホイール蓄電装置の開発で培ってきた磁気回路に関する知見が役立っている。磁気作業物質にできるだけ大きな磁場とゼロに近い磁場を交互に印加することにより、磁気冷凍効果が効率的に発生できるからである。また、磁気冷凍システムの中で循環する液体冷媒の熱交換も冷凍機の効率に大きな影響を及ぼすので、そちらには低温技術の知見が役立つ。一昨年度、NEDOの提案公募型プロジェクト「省エネルギー革新技術開発事業」に採択されて研究を進めてきた。この成果は本号の「新規磁気作業物質を用いた磁気冷凍機の特性」に詳述しているので参照されたい。

#### 4. 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とあわせ、地上コイル関連技術や車両運動シミュレーションを中心に着実に進めている。浮上式鉄道技術の在来方式鉄道への適用に関しては、ニーズの把握をしながら、極力早めに実用化に繋げるべく活動している。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リニア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を受けて実施したことを付記する。

#### 文献

- 1) <http://www.rtri.or.jp/press/2012/20121221.html>
- 2) Nisenoff, M. ,” CRYOGENIC REFRIGERATION: The Enabling Technology for Superconducting Electronics Applications” Proc. The 1999 International Workshop on Superconductivity, pp. 2-5,1999.
- 3) 宮崎佳樹 他：車載超電導磁石用 50K,100W 級パルス管冷凍機の開発、2013 年春季低温工学会講演概要集, Vol.87, pp.109, 2013
- 4) 山田秀之 他：光ファイバ温度センサの極低温特性(その2)、2013 年春季低温工学会講演概要集, Vol.87, pp.57, 2013
- 5) <http://www.rtri.or.jp/rd/division/rd79/rd7930/rd79300108.html>
- 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