

浮上式鉄道とその技術の応用に関する最近の研究開発

浮上式鉄道技術研究部

部長 長嶋 賢

1. はじめに

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など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のようになっている。現在の検討課題を吹き出し部に列挙した。以下では今回の発表会で取り上げ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。

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適用を考えた場合、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値を鉄道総研で測定したものの一例である。この実験結果を見る限り、液体窒素温度（77K）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。ただ、液体窒素冷却で無くとも高温超電導磁石は魅力が無くなるわけではない。

図2の青い曲線は、市販冷凍機の実態を調査結果から冷凍機の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で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

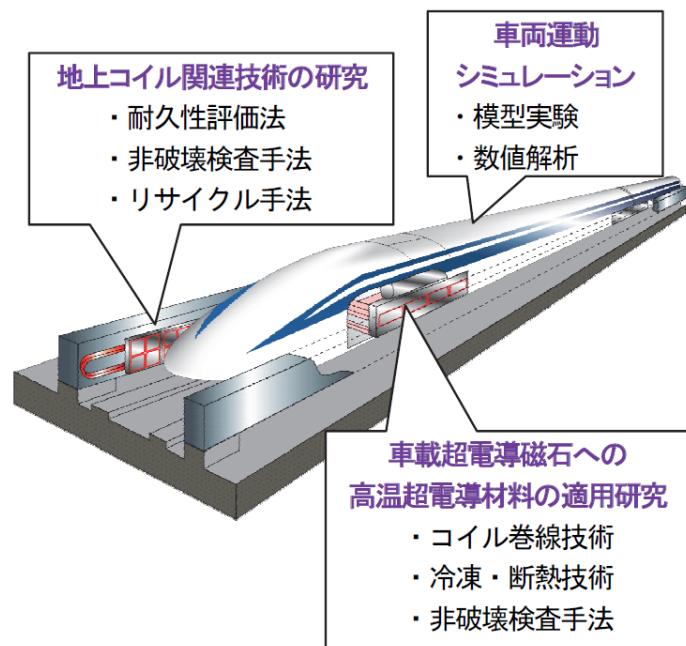


図1 鉄道総研における浮上式鉄道研究開発イメージ

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、運転温度を液体ヘリウム温度から 50 K 程度まで上昇できれば、超電導磁石の断熱構造が簡略化でき、超電導磁石の高信頼性化や小型・軽量化、あるいは製造コストの大幅低減が期待できる。

ただし、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。そこで、鉄道総研ではコイル巻線機も導入して巻線技術の検討を進めてきた。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。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「希土類系高温超電導潜在を用いた小型 5 テスラ超電導磁石の開発」で報告する。

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¹⁾。

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、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。鉄道総研では 1 本の光ファイバをコイルに沿って配置することで分布的な温度測定が可能で、かつ、低温部への熱侵入が少ない、電気絶縁性が高い、電磁ノイズに強い、など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²⁾。

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要素技術を組み合わせて評価試験および設計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ような、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。

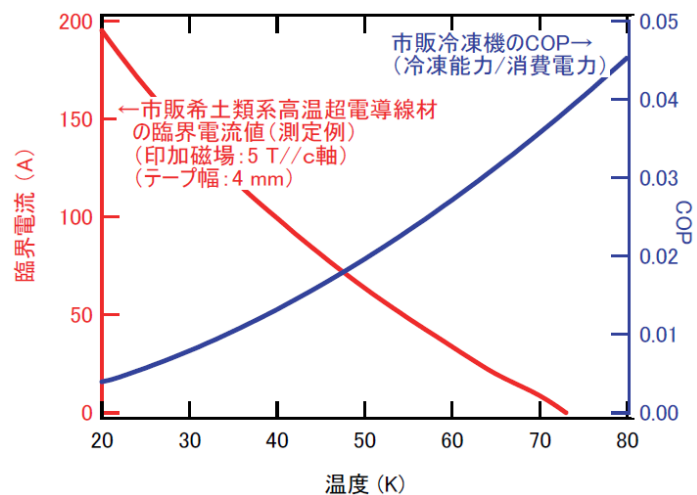


図 2 高温超電導線材の臨界電流値と冷凍機の COP（成績係数）の温度依存性

- ・ 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。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。「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も検討を進めている。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なども含めて検討している。

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 3 の様なものである。

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、主なものとして「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、2012 年度に予定通り鉄道総研構内で試験電車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ある程度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により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構成が特長である³⁾。「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。

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、鉄道システムの効率向上に向けた「超電導フライホイール蓄電装置」と車両の空調への応用を目指した「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 3 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、2012 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。詳しくは「フライホイール蓄電装置用の超電導磁気軸受の開発」で報告する。現在はこれまでに得た知見を使い、NEDO 助成事業「次世代フライホイール蓄電システムの開発」という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ている。「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。2011 年度、NEDO の提案公募型プロジェクト「省エネルギー革新技术開発事業」に採択されて研究を進めてきた。

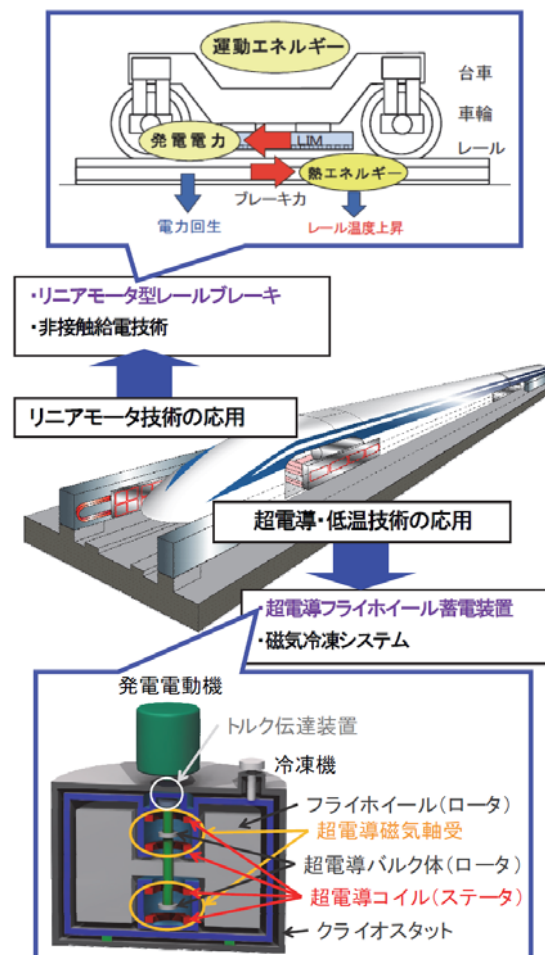


図 3 超電導リニア技術の在来方式鉄道への
応用イメージ

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、上で述べた応用研究の他に、鉄道車両の磁界の評価方法の確立なども重要な課題と考えており、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ていきたいと考えている。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。

参考文献

- 1) <http://www.rtri.or.jp/rd/division/rd79/rd7920/rd79200105.html>
- 2) <http://www.rtri.or.jp/rd/division/rd79/rd7920/rd79200103.html>
- 3) <http://www.rtri.or.jp/rd/division/rd79/rd7910/rd79100105.html>