

【隔月連載記事】

やさしい超電導リニアモーターカーのお話（その 1）

～リニアモーターカーとは～

財団法人 鉄道総合技術研究所
浮上式鉄道技術研究部
低温システム研究室長 長嶋 賢

1. 実用化されたリニアモーターカー

リニアモーターカーというとどんなイメージを思い浮かべるだろうか？「未来の超高速列車」というのが一般的な答えかも知れない。しかし、リニアモーターカーは超高速列車だけとは限らないし、未来ではなく現在、日常生活に入り込んできつつある。既に、大阪、東京、神戸、福岡、横浜の 5 都市で開業している「リニアメトロ」と言われる地下鉄もその一つである (<http://www.jametro.or.jp/linear/menu.html>)。レールの上を鉄車輪で走行するため、乗っている人も気がつかない場合が多いが、レールとレールの間に敷いたリアクションプレート（アルミまたは銅と鉄の複合板）と車両側の電磁石がリニア誘導モータを構成する立派なリニアモーターカーなのである。リニアモーターカーの定義は回転式のモータで走行するこれまでの電車と違い、モータを直線状（linear：リニア）に展開し、その一部（この場合はリアクションプレート）を軌道側に配置して、車両を直線運動させる交通機関のことである。

この他に、日本国内で既に実用化された（営業している）リニアモーターカーとしては名古屋市の藤が丘駅と豊田市の八草駅間約 9 km を最高時速約 100 km/h で結んでいる愛知高速鉄道東部丘陵線（愛称：「リニモ」）(<http://www.linimo.jp/>) もある。これは日本航空が空港アクセス用に開発を開始した「HSST (High Speed Surface Transport)」(<http://hsst.jp/index.html>) の技術を適用している。

また、中国の上海には浦東国際空港と上海市郊外の竜陽路駅間約 30 km を営業最高時速 430 km/h で結ぶ「上海磁浮列車（上海マグレブ）」(<http://www.smtdc.com/>) がある。これはドイツで開発された「Transrapid」(<http://www.transrapid.de/>) の技術を導入したものであり、文句なく「超高速列車」と言って良いだろう。

しかし、この 3 種類のリニアモーターカーは超電導技術を使っていない。実用化間近と言われる JR 方式のリニアモーターカー（以下では JR-Maglev）だけが超電導技術を適用したシステムである (http://www.rtri.or.jp/rd/division/rd79/yamanashi/maglev_frame_J.htm)。

2. 何故リニアモータなのか？

リニアモーターカーには JR-Maglev や Transrapid の様に超高速を目指すものと、リニアメトロやリニモの様に、在来方式鉄道並の速度域への応用がある。これらは何故リニアモータを使うのだろうか？

新幹線を含む従来の鉄道は、推進力や、制動力（ブレーキ力）を車輪とレールの間の摩擦力に依存している。この摩擦力を鉄道の世界では粘着力と呼んでいるが、粘着力は、車両の速度が上がるにつれて低くなる。一方、車両の速度が上がるにつれて空気抵抗などの走行抵抗が増えてくるので、走行抵抗が粘着力を上回る速度域に達すると、車輪にいくら動力を伝えても車輪は空転し、それ以上の加速が得られなくなる。車輪・レール間の粘着力は、例えば雨などが降るだけで大きく影響を受けてしまう。最近では技術が進み、世界的に鉄道の高速度化も進んでいるが、天候に左右されずに超高速走行を達成するためには粘着力に頼らず、安定して推進力を得ることが必要である。その手

段がリニアモーターなのである。

他方、高速システムではないリニアメトロでは、車両やトンネルの断面積が小さくできるので建設コストが安くできること、急カーブや急勾配に強いことなどをリニアモーターのメリットとしてあげている。また、リニモでは、振動、騒音が無いこと、車両がレールを抱え込んでいるので、脱線が無く、安全性が高いこと、建設コストと保守コストが安いこと、急勾配・急カーブにも対応できることをアピールしている。この様に、超高速が実現できるということだけでなく、コスト低減、環境負荷低減ができることもリニアモーターの特長である。

3. 推進方式による分類

リニアモーターカーは次ページの表のように、推進方式と支持（浮上）方式で分類することができる。まず推進方式のリニアモーターの分類であるが、これにはリニア誘導モーターとリニア同期モーターの 2 種類がある。

リニア誘導モーターは、車両に搭載したコイルに交流電流を流すことで進行磁界を発生し、この磁界が地上に配置したリアクションプレート（金属板）に誘導する電流との間に働く電磁力で推進する。地上側にはリアクションプレートを置くだけで良いので建設費が安くて済むが、高速域での推力特性が低下するので、高速システムには不向きである。こちらはリニアメトロとリニモで適用されている。

リニア同期モーターは、地上側に設置したコイルに交流電流を流すことで進行磁界を発生し、車両に搭載した磁石との間で発生する電磁力で推進する。こちらは高速域まで推力特性が良いので、高速システムに適しており、Transrapid と JR-Maglev に適用されている。

4. 支持（浮上）方式による分類

車両の支持（浮上）方式には、既に述べたように鉄輪方式と磁気浮上方式の 2 種類がある。高速鉄道の車両支持方式として、空気浮上方式というものがあったが、この方式は騒音が大きいことやトンネル内での走行が難しいこと、すれ違い時に車両相互が影響を及ぼしあうこと、などの理由から鉄道への応用には至らなかった。鉄輪方式も騒音や保守の理由で高速化が難しいとされ、超高速リニアモーターカーの車両支持方式としては磁気浮上方式が適していると考えられている。表にあげたリニアモーターカーでもリニアメトロ以外は全て磁気浮上方式である。磁気浮上は英語で「マグレブ」（maglev : magnetic levitation 「磁気浮上」の略語）と言われる。日本国内では「リニアモーターカー」という言葉は通りが良いが、国際的にはこの「マグレブ」という言葉の方が一般的である。

磁気浮上方式はさらに 2 種類に分けられる。電磁吸引制御方式（EMS : electromagnetic suspension の略語）と電磁誘導方式（EDS : electrodynamic suspension の略語）である。

電磁吸引制御方式は電磁石の吸引力で車体を支持する。Transrapid もリニモもこの方式である。吸引力で浮上することから、どちらのシステムもモノレール状のガイドウェイを車両が抱え込むような形となっている。また、吸引力を制御しないと車上の電磁石がガイドウェイに吸着されてしまうので、吸引力制御が不可欠である。この吸引力制御の状態、車両は走行しているときも停止しているときも常に浮上しているので、本方式は車輪を持たない。しかし、（超電導磁石では無い）電磁石の吸引力には限界があるため、車両と軌道との間の空隙は 1 cm 程度となっている。

電磁誘導方式は、上で挙げたシステムの中では JR-Maglev だけである。電磁誘導の法則を利用した浮上方式のため、浮上力は一定の速度以上では自然に得られ、浮上に伴う制御が不要である点が特長である。低速域では車輪によって車体を支持しており、航空機のように速度が上昇した際に車輪を引っ込めて浮上走行に移る。軽量かつ強力な超電導磁石を搭載することによって、車両と軌道との間に 10 cm 程度の大きな空隙を確保しつつ、十分な浮上力を得ることが可能で、高速走行に有利

である。

JR-Maglev については、誤解が多いようである。一番良く聞くのが、地上側に超電導コイルを敷き詰めると思われていること、もう一つは浮上の原理が「マイスナー効果」だと思われていることである。どちらも間違いであるが、次回以降で、超電導リニアモーターカーの原理や歴史について説明し、この様な誤解を解いていきたいと思う。

リニアモーターカーの分類

推進方式	支持(浮上)方式	開発事例と現状
リニア同期 モータ 高速走行向き	磁気浮上方式 (電磁誘導方式:EDS) 超電導磁石を使用 (車両-軌道空隙:大)	JR-Maglev (開発国:日本) ・宮崎実験線(1977~1996) (最高速度:581km/h) ・山梨実験線(1997~)
	磁気浮上方式 (電磁吸引制御方式:EMS) 常電導の電磁石を使用 (車両-軌道空隙:小)	Transrapid (開発国:ドイツ) ・エムスランド実験線(1983~) (営業最高速度:430km/h) ・上海磁浮列車(2003~)
リニア誘導 モータ		HSST(開発国:日本) ・愛知高速交通東部丘陵線 (営業最高速度100km/h) (愛称:リニモ)(2005~)
地上設備簡便	鉄輪方式	リニアメトロ(開発国:日本) ・地下鉄大江戸線 など

[超電導 Web21 トップページ](#)

【隔月連載記事】

やさしい超電導リニアモーターカーのお話（その 2）

～JR-Maglev の原理～

公益財団法人 鉄道総合技術研究所

浮上式鉄道技術研究部

低温システム研究室長 長嶋 賢

1. システムの基本構成

前回は、既に実用化された、あるいは実用化間近のリニアモーターカーの分類について紹介した。今回はそれらのリニアモーターカーの中で唯一、超電導技術を用いた JR-Maglev の原理について紹介したい。リニアモーターカーの基本構成を図 1 に示す。車両に超電導コイルを内蔵した磁石を搭載し、地上側のガイドウェイ（軌道）に地上コイルが配置されている。地上コイルには推進コイルと、浮上・案内兼用コイルの 2 種類があるが、どちらも超電導線材ではなく、アルミニウム導体製のコイルである。推進コイルは車両から見て外側に設置されており、ケーブルを介して電力変換変電所と接続され、車両を推進させる役割を担っている。浮上・案内兼用コイルは 8 の字型をした短絡コイル（両端をつないで閉回路としたコイル）で車両から見て内側に設置されている。図では一つのパネルに二つの 8 の字型コイルが設置されているので「田」の字型に見える。このコイルが車両の磁気浮上と案内（鉄道では車両の左右方向の支持のことを「案内」と呼んでいる）の役割を担っている。

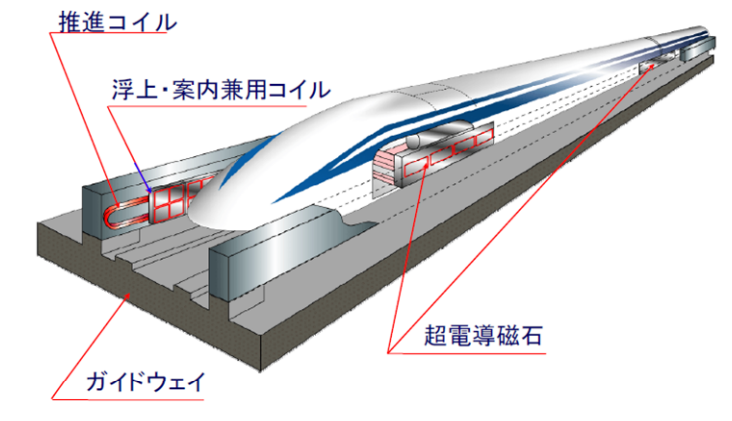


図 1 JR-Maglev の基本構成

2. 推進の原理

JR-Maglev は前回述べたように、推進方式として、リニア同期モータを採用している。ガイドウェイ上に並んだ推進コイルに、電力変換変電所から電流（三相交流）を流すと、ガイドウェイに沿って移動する磁界の波が発生する。車上の超電導磁石は、サーフボードが波に乗って進むように、この移動磁界の波に乗って（同期して）進むわけである。この様子を図 2 では動画で示している。逆に電力変換変電所側の視点で言うと、インバータで推進コイルに流す電流の周波数を、車両の速度に応じて比例変化させることにより、移動磁界の波を移動する車上の超電導磁石と常に向かい合うように調整している。また、車両の駆動力は電流の大きさと比例関係にあるので、これによって

調整できる。電流の流し方を変えることにより、車両にブレーキもかけられる仕組みである。

このように JR-Maglev では、電力会社からの一定の電圧と周波数の電力を、地上の電力変換変電所でその大きさと周波数を変えた電力に変換し、推進コイルに供給することで、直接、車両を駆動している。通常の鉄道とは異なり、速度制御と電力供給とがすべて地上で行われるので、自動運転システムとなっている。

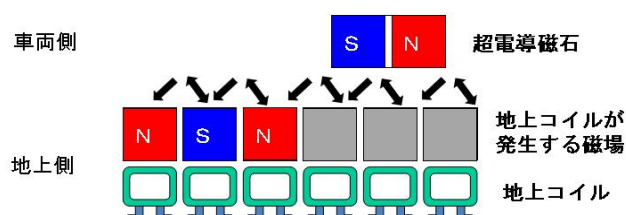


図2 推進の原理【動画】

3. 浮上の原理

ファラデーが発見した「電磁誘導現象」は「1 つの閉じた回路（2 次回路）の近くで、電流の流れている他の回路（1 次回路）または磁石を動かすとき 2 次回路に電流（誘導電流）が流れる」現象であるが、JR-Maglev の浮上ではまさにこの現象を利用している。

図 3 に示すように、ガイドウェイの浮上コイルは、上下二つのコイルが 8 の字型に接続されるとともに、垂直な側壁に配置されている。この方式を「側壁浮上方式」、または「ヌルフラックス方式」と呼んでいる。車両の超電導磁石が浮上コイルに近づく場合、上下のコイルは 8 の字型に接続されているので、それぞれ逆向きの誘導電圧（電磁誘導によって誘起される電圧）が生じる仕組みとなっている。そこで、超電導磁石が浮上コイルの中心を通る場合、上下二つのコイルに発生する誘導電圧は打ち消しあい、結局、浮上コイルに誘導電流は流れず、当然浮上力も発生しない。あるいは、8 の字コイルに鎖交する磁束（フラックス）が上コイルと下コイルで打ち消し合い、ゼロ（ヌル）になる（ヌルフラックス）から結果として誘導電流がゼロになるという説明もできる。一方、超電導磁石が浮上コイルの中心より下方を通ると、上側のコイルよりも下側のコイルに発生する誘導電圧が大きくなる。その結果、浮上コイル全体に誘導電流が流れ、下側のコイルは超電導磁石と同極に、上側のコイルは異極になる。そのため、超電導磁石と浮上コイルの間に上側のコイルでは吸引力、下側のコイルでは反発力が発生し、結局、車両に浮上力が働くことになる。この浮上力は超電導磁石と浮上コイルの高さのずれ量に応じて大きくなり、車両の重量に釣り合ったずれ量の位置で車両は浮上走行する。逆に、超電導磁石が浮上コイルの中心より上方を通ると車両には下側に引き戻す力が働くことになり、ガイドウェイから飛び出してしまうことのない安定した浮上システムとなっている。動作の様子を図 3 では動画で示している。

ところで、このような電磁誘導はその原理からも明らかなように、超電導磁石が浮上コイルの側を通過するときのみ発生し、止まっているときには発生しない。また、低速では誘導電流が小さいので浮上力も小さい。したがって、停止中および低速のときは、飛行機のように支持車輪での走行となり、ある程度の速度になってから車両に車輪を格納し、浮上走行を行う。

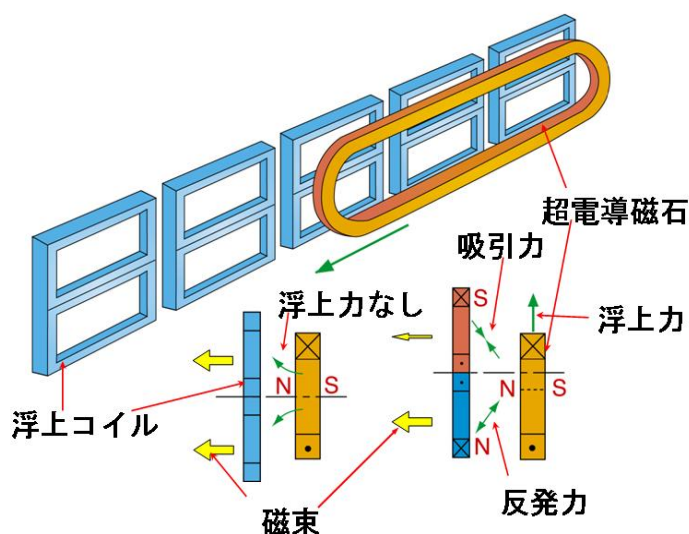


図3 浮上の原理【動画】

4. 案内の原理

磁石を上下に並べて同極同士向かい合わせ、反発浮上させようとする、そのままでは必ず上側の磁石は、ずれて落ちてしまう。このように浮上力のみを与えただけでは車両は安定して浮上することができない。このため、左右方向にずれないように車両を「案内」する仕組みが必要となる。

浮上させるには、車両の重量を支持する力を、常に発揮する必要があるが、案内させるには、車両が横にずれそうときだけ力を加えて中央に戻してやればよい。必要のない場合はできるだけ電流を流さず、電力の消費を減らす方が経済的である。

このような要求に適合した方法として、浮上の原理と同じく左右のコイルを「ヌルフラックス」接続する方式がある。この方式の基本原理は、浮上と同じく電磁誘導現象を用いたものである。具体的には左右の案内のために浮上コイルを、図 4 のように接続しておく（これにより浮上・案内兼用コイルとなる）。まず、車両がガイドウェイの中央を走っている場合には、右側の案内コイルと左側の案内コイルとは電磁誘導によって発生する電圧が等しいため電流は流れず、力の発生も損失の発生も起こらない。しかし、車両が左右どちらかに片寄った場合には、近づいた側と遠ざかった側で案内コイルに発生する誘導電圧に差が生じて電流が流れる。その結果、近づいた側の案内コイルと超電導磁石との間に反発力、遠ざかった側のコイルとの間には吸引力が発生して、超電導磁石を中央に押し戻す力となる。こうして、常に車両は中央を走るように案内される。この案内力も浮上力と同様、速度とともに大きくなり、高速では車両の姿勢はより安定する。また、案内力が不足する低速走行では、支持車輪と同様に案内車輪を左右に張り出して車両を案内させ、高速では車輪を格納して電磁力のみで車両を案内させているのも同様である。

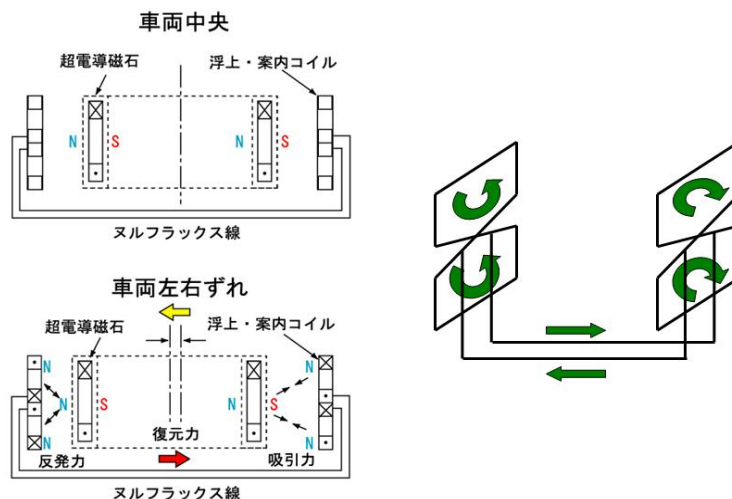


図4 案内の原理【動画】

以上説明してきたように、JR-Maglev は、推進については電力変換変電所から推進コイルに提供する電流をコントロールする必要があるが、浮上および案内については電磁誘導により「自然に」一定の浮上高さでガイドウェイの中央を走行するように電磁力が働くので、コントロールの必要が無い、非常に信頼性の高いシステムとなっている。

鉄道総研では、地上コイルのコスト削減のため、推進・浮上・案内のすべての機能を一種類のコイルで兼用し、地上コイルの数を減らすことが可能な「PLG 方式」(Propulsion : 推進・Levitation : 浮上・Guidance : 案内 兼用方式)と称する地上コイルも開発している。

(http://www.rtri.or.jp/rd/openpublic/rd77/EGT/egt_1.4.html)

次回は JR-Maglev の開発のあゆみについて紹介する。

[超電導 Web21 トップページ](#)

【隔月連載記事】

やさしい超電導リニアモーターカーのお話（その 3）

～JR-Maglev 開発のあゆみ～

公益財団法人鉄道総合技術研究所

浮上式鉄道技術研究部

低温システム研究室長 長嶋 賢

1. 開発の背景

前回は JR-Maglev の原理について紹介したが、開発当初からこの方式が決まっていたわけでは無い。今回はこの方式が確立するまでの開発のあゆみについて紹介したい。

話はだいぶ遡るが、東海道新幹線は、東京オリンピックの開幕を控えた 1964 年 10 月 1 日に開業した。その 2 年前の 1962 年、当時の日本国有鉄道（国鉄）の技術者は、次の目標を東京～大阪間 1 時間として、新幹線を上回る超高速鉄道の開発研究をはじめた。

在来の鉄道のように、鉄のレールと鉄の車輪の粘着力に依存する方法では、最高速度に限界があるため、全く新しい駆動方式を採用することが検討された。研究は駆動力としてのリニアモータを中心に保守性、耐震性、安全性から研究を進め、やがて浮上式鉄道の方法が模索されるようになった。浮上方式の比較も、磁気浮上や空気浮上等が白紙の状態から行われた。その結果、リニアモータ駆動と磁気浮上の組合せが良さそうだと考えられるようになった。

一方、超電導磁石を用いた磁気による浮上・案内の方式は、1966 年にアメリカのブルックヘブン国立研究所の J. Powell と G. Danby の二人が米国機械学会に発表し（リニア同期モータによる推進の組み合わせは 1969 年に発表）、その後、各種模型による実験がなされたが、大きな進展はなかった。当時の国鉄は、このパウエルとダンビーの方式に着目し、超電導リニアモーターカーの開発を進めることとした。こうしてアメリカで考案された超電導リニアモーターカーが、日本で形を変えて育っていくことになった。

2. 国立での研究開発（ML100A まで）

この超電導リニアモーターカーの開発の中心となったのは、中央線国立駅の北側にある国鉄の鉄道技術研究所（現在の公益財団法人鉄道総合技術研究所）であった。

最初は、誘導反発（超電導磁石の磁界を短絡コイルが横切ると、コイルに電流が流れて、超電導磁石と同じ極の磁石となり、相互に反発し合うこと）による浮上力の確認から研究を始めた。続いて、超電導磁石の下で 6 個のコイルを取り付けた円盤を回転させる模擬試験装置を作り、1971 年 3 月には、超電導磁石を収納したクライオスタット（低温容器）を浮上させることに成功した。さらに、リニアモータ推進によって浮上走行させる試みを行うことになり、延長 220 m のガイドウェイが研究所構内に設置された。ガイドウェイの底面には浮上コイル、側面には推進コイルを設け、このガイドウェイを、超電導磁石を内蔵した箱型の実験車が走行した。1972 年 3 月のことである。これが、超電導磁石を用いたリニアモータ推進による、電磁誘導浮上走行の世界初の成功であり、この実験車は後にリニア同期モータ（**Linear Synchronous Motor**）と軌道の長さにちなみ、LSM200（図 1）と名付けられた。ただし、この実験では左右の案内はローラーで代用していた。

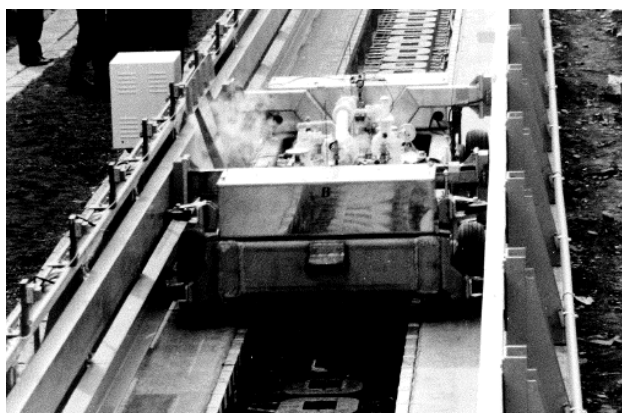


図1 世界初の電磁誘導浮上で走行した LSM200

1972 年は、1872 年に日本で初めての鉄道が新橋～横浜間を走ったときから、ちょうど 100 年の節目の年であった。この鉄道 100 年を記念して様々な行事が行われたが、その一環として、超電導磁気浮上車の走行実験を公開することになった。実験車は、超電導磁石を両側に取り付け、車内には 4 人分の座席を設けたものであり、鉄道 100 年にちなんで ML100 (図 2) と名付けられた。研究所構内に設けられた長さ 480 m のガイドウェイを走行し、推進方式としては地上一次 (推進コイルに電力を供給する方式) のリニア誘導モータを採用していた。鉄道 100 年の記念日である 10 月 14 日の公開走行では、多くの観客が見守る中で、速度 60 km/h ではあったが、浮上に成功している。この車両は現在も鉄道総研前に展示されている。この ML100 はデモンストレーションを目的としていたため、それまでの開発経緯から、推進に同期モータではなく、誘導モータを使用し、車両の左右の案内もシューという鉄のそりのようなものを用いていた。そこでその後、リニア同期モータへの移行とあわせて、地上の推進コイルを車両案内にも併用できる方式が考案され、1974 年に地上一次リニア同期モータ推進、超電導磁気浮上案内の ML100A (図 3) が試作され、初めて完全非接触浮上の走行実験に成功した。これは、次項で述べる宮崎実験線の ML500 の雛形となった。



図2 鉄道技研構内で浮上走行を公開した ML100



図3 完全非接触浮上走行に成功した ML100A

3. 宮崎での実験 (ML-500 から MLU002N まで)

国立での成果を受けて、いよいよ 500 km/h での走行が可能な実験線について検討が行われ、1974 年、国鉄の浮上式鉄道開発会議において実験線の建設が決定された。ガイドウェイの長さは単線の 7 km でほぼ直線とするが、若干の曲線の実験も可能な路線とし、勾配は特に設けないこととした。実験線候補地としては、全国で数カ所が候補にあがったが、最終的には宮崎県の日向市から都農町にかけての、日豊本線沿いの場所に決定した。

宮崎実験線は 1974 年に着工され、1977 年 4 月には実験センターが発足した。7 月には最初に完成した 1.3 km のガイドウェイを使用して、実験車の ML-500 (図 4) の走行実験を開始した。名前の「500」は目標速度 500 km/h を意味している。ガイドウェイはモノレールのような逆 T 型と呼ばれる形状をしており、T の縦棒にあたる中央突起の両側に推進・案内併用コイルを設置し、T の横棒にあたるガイドウェイの底面に浮上コイルを配置した。実験車両は一両で、長さ 13.5 m、重さ 10 t、逆 T 型のガイドウェイにまたがる格好をしていたため、乗車スペースは無かった。逆 T 型のガイドウェイ構造を採用したのは、リニアモータの推進力およびブレーキ力が車両の重心近くに発生させ得るので、車両運動的に安定するためである。当時は大きな超電導磁石の製作が難しかったため、浮上用と推進・案内用の超電導コイルを搭載していた。それぞれの超電導コイルが、地上コイルと向き合うように配置されているので、後ろから見ると超電導磁石が L 字型の構成になっていた。ガイドウェイは 3.1 km、4.7 km と伸びていき、1979 年 8 月には計画どおりの全線 7 km が完成した。その間、模擬トンネルによるトンネル内走行試験や、ヘリウム冷凍液化装置を車上に搭載した車両 ML-500R (図 5) の試験なども実施し、車載冷凍機の可能性が示された。ML-500R の「R」は冷凍機 (Refrigerator) の頭文字からきている。その後、再び ML-500 を用いて速度向上試験が行われ、1979 年 12 月に実験線での目標最高速度を上回る、517 km/h を達成した。



図 4 517 km/h (世界記録) を達成した ML-500



図 5 車載冷凍機を搭載した ML-500R

1980 年からは、乗車スペースが確保できるように車両を箱形構造にするとともに、ガイドウェイ構造を U 型に改造する工事が行われた。新しい車両は MLU001 (図 6) と名付けられ、2 両の先頭車と 1 両の中間車の 3 両編成であった。長さは、先頭車が 10.1 m、中間車が 8.2 m で、重量は全車両ともそれぞれ約 10 t であった。先頭車には 8 人分、中間車が 16 人分の座席を設けていた。超電導磁石は各車両とも両側に配置し、1 つの超電導コイルで浮上用と推進・案内用を兼用できる磁力の大きな超電導磁石の製作が可能となったため、推進・案内コイルと超電導磁石が向き合った I 字型の構成となっていた。走行試験では、2 両連結で 1987 年に 405 km/h を、3 両連結では 1989 年に 362 km/h を達成した。

その後、将来の営業線に向けた各種の機能確認とあわせ、多くの人々に試乗してもらうことを目的として、MLU002 を製作することになった。1987 年 3 月に完成した MLU002 には、44 人分の座席を設け、快適性、信頼性、安全性を確認することとした。また、超電導磁石を高性能化して個数を減らし、集中配置方式とした。1987 年 4 月に国鉄が分割・民営化されたのにもない、超電導リニアの研究開発は、財団法人鉄道総合技術研究所 (2011 年 4 月に公益財団法人鉄道総合技術研究所へ移行) に継承された。MLU002 では、それまで適用されていたガイドウェイの底面に浮上コイルを並べて設置する「対向浮上方式」と異なる「側壁浮上方式」(前回紹介) の実験も行われた。また、この車両は多くの人々に試乗され、超電導リニアの乗り心地を体験する機会を提供していたが、不幸なことに 1991 年 10 月、実験走行中に車両火災を起こして全焼してしまった。

この事故の教訓を生かして、防火対策を施した新しい実験車 MLU002N (図 7) が 1993 年 1 月に

完成し、走行実験を開始した。MLU002N による速度向上試験により、1994 年 2 月には無人走行で 431 km/h を、1995 年 1 月には宮崎実験線における有人走行で最高の 411 km/h を達成した。また、この車両で前回紹介した PLG 方式の地上コイルを用いた走行試験も行われた。

JR-Maglev の開発は表 1 にまとめたように、多くの実験車両を用いた走行試験を経て、リニア同期モータによる推進、側壁浮上コイルによる浮上、側壁浮上コイルのヌルフラックス接続による案内、という現在の方式が確立され、山梨実験線に引き継がれた訳である。



図 6 3 両編成で連結走行する MLU001



図 7 411 km/h (有人) を達成した MLU002N

表 1 JR-Maglev 開発の歴史

車両名称	導入年	技術的トピックス等	推進方式 Propulsion	浮上方式 Levitation	案内方式 Guidance
LSM200	1972	初の超電導磁気浮上走行に成功	リニア同期モータ	電磁誘導方式 (対向浮上)	機械式 (ローラー、シュー)
ML100	1972	超電導磁気浮上走行を公開	リニア誘導モータ		電磁誘導方式 (推進コイルの スルフラックス接続)
ML100A	1974	初の完全非接触浮上に成功	リニア同期モータ		
ML-500	1977	最高速度517km/hを達成			
ML-500R	1979	ヘリウム冷凍機搭載走行を実施		リニア同期モータ	電磁誘導方式 (側壁浮上)
MLU001	1981	I字型超電導コイルで推進浮上案内兼用、 3両編成での走行を実施			
MLU002	1987	超電導磁石集中配置、 側壁浮上走行実施			
MLU002N	1993	有人走行で最高速度411km/hを達成、 PLGコイルによる走行実施			

[超電導 Web21 トップページ](#)

【隔月連載記事】

やさしい超電導リニアモーターカーのお話（その 4）

～超電導磁石の開発経緯～

公益財団法人 鉄道総合技術研究所

浮上式鉄道技術研究部

低温システム研究室長 長嶋 賢

1. 超電導磁石の必要性

前回は「JR-Maglev 開発のあゆみ」と題して歴代の車両を紹介したので、今回は超電導磁石の開発経緯について紹介する。ここで超電導磁石の必要性についてもう一度考えたい。図 1 に示すように JR-Maglev では地上側に配置するコイルと車載磁石間に働く電磁力によって車両を推進、浮上、案内するわけであるが、この電磁力は地上コイルの起磁力と車上のコイル、あるいは磁石の起磁力の積に比例する。そして、地上コイルの数は車載磁石にくらべて圧倒的に多く、目的地まで切れ目なく沿線に配置する必要があるので、これの起磁力を小さくし、その分車載磁石の起磁力を大きくする方が全体システムとしては経済的である。ところで、車載磁石として考えられるのは図 1 に記載した 3 種類があるが、電磁石や永久磁石は発生磁界や損失（ロス）、質量の面で搭載が困難である。試みに今の JR-Maglev 用超電導磁石と同じ起磁力の永久磁石の質量を計算すると、質量が超電導磁石の 10 倍程度となる上、当然超電導磁石と同等の磁界は発生しない。したがって、永久磁石を現行のシステムにそのまま持ち込んだのでは浮上走行ができないという結論になる。もちろん車両と軌道の間の空隙を小さくすれば、車載磁石に必要な磁界を下げられる。しかし、本システムの開発当初に、日本の地理的な事情等を考慮して、車両-軌道間の空隙を 10 cm 程度確保することを決めている。この方針を守るためには超電導磁石が不可欠ということになる訳である。また、超電導の特徴である「電気抵抗無し」により、磁界を出すことに対する損失は無いというメリットも大きい。このあたりの事情を、既に紹介した J.Powell と G.Danby の論文では「車上の超電導コイルには損失なく数百 kA の電流を流し、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る。車上にだけ超電導コイルがあればよいので、コストも、必要な冷凍能力も少なく済む。」という様な表現で記述している。

ただ、開発開始当初には現在のように軽量の車載超電導磁石を製作することができるかどうかということにはわからなかった。電磁石や永久磁石で可能性が無いことは確かだが、超電導磁石なら可能性が有りそうだ、というところから開発が始まったわけである。JR-Maglev の開発の歴史は車載超電導磁石の軽量化の歴史という面もある。

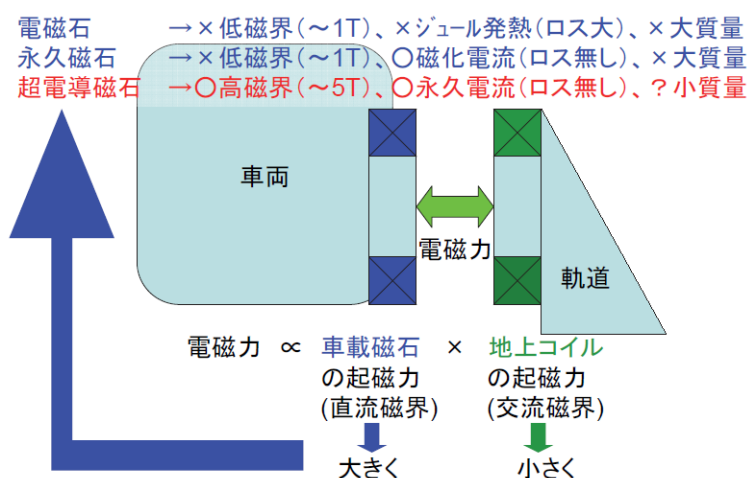


図 1 超電導磁石の必要性

2. 超電導磁石による自力浮上走行

浮上式鉄道の研究で、はじめに製作された超電導磁石は図 2 に示す「超電導磁気浮上特性基礎試験装置」の超電導磁石であり、走行するタイプではなかった。直径約 1.7 m、高さ約 1 m の円形のクライオスタット中に、起磁力 200 kA のアーチ型超電導コイルが 2 個設置されていた。超電導磁石の下で 6 個のコイルを取り付けた円盤を回転させ、浮上力の測定を行った。この時の超電導磁石の全体質量は 2 t であった。外槽、内槽、超電導コイル、永久電流スイッチ、荷重支持材、熱シールド板、低温配管、液体ヘリウム及び液体窒素など、現在の超電導磁石の基本構成要素すべてがこの時点でこの装置には組み込まれていた。以下、「超電導コイル」と「超電導磁石」という言葉が頻出するが、「超電導コイル」は文字通りのコイルを指し、「超電導磁石」は一つまたは複数の「超電導コイル」を組み込んだ、クライオスタット単位の装置全体を指す。

図 3 は ML100 用に製作された超電導磁石である。これは、車体下部に 2 個並列に取り付けられた。磁石の幅は 0.6 m、高さ 0.4 m、長さ約 4 m で、中に起磁力 250 kA の超電導コイルが 2 個水平に設置されていた。超電導磁石 1 個の質量は 1 t。車両単位では磁石 2 個で 2 t。これが磁石質量を含む 3.5 t の車両質量を支えた。なんとか自力浮上はしたものの、車両全体の半分以上が超電導磁石の質量という状態であった。



図 2 超電導磁気浮上特性基礎試験装置

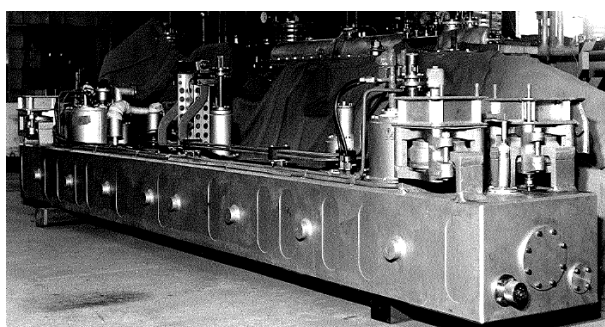


図 3 ML100 用超電導磁石

3. L 字型超電導磁石から I 字型超電導磁石へ

1977 年に宮崎実験線で 517 km/h の速度記録を達成した ML-500 の超電導磁石は、図 4 に示すような L 字型の断面を持つものであった。幅約 0.7 m、高さ約 1.3 m、長さ約 4.2 m の磁石の中には水平に配置した起磁力 250 kA の浮上コイルと、垂直に配置した起磁力 450 kA の推進コイルが 2 個ずつ入っていた。超電導磁石は 4 個で 5.6 t となり、磁石質量を含んで 10 t の車両質量を支持した。ML-500 は完全非接触浮上状態で目標速度の 500 km/h を超えた記念すべき車両であるが、まだ全体質量の半分以上が超電導磁石という状態であり、次の段階に進むには磁石の軽量化が必須であった。そんな中、この L 字型超電導磁石では、実際には浮上力の半分近くを垂直に配置した推進（超電導）コイルが受け持っていることがわかったため、ここで発想の転換がなされ、図 5 に示す I 字型超電導磁石が開発された。

上で述べたことをもう少し詳しく説明する。ML-500 は図 6 左の断面図に示すように縦横 2 種類の超電導コイルを搭載している。車上の推進（超電導）コイルは車両の推進と案内の役割を担い、浮上（超電導）コイルは浮上の役割を担うよう設計されている。しかし、実際には上で述べたように推進（超電導）コイルの起磁力が大きいこともあり、その発生する磁界が地上の浮上コイルに誘導電流を誘起する効果が、浮上（超電導）コイルの効果と同程度であった。そのため、「浮上力の半分近くを推進（超電導）コイルが受け持っていた」ということになる。そこで、「推進（超電導）コイルの起磁力を向上すれば、浮上（超電導）コイルを省略できる」という考えに至ったわけである。この I 字型超電導磁石は一種類の縦型超電導コイルで推進・浮上・案内のすべての役割を担うもの

であり、これを搭載した車両が MLU001 である (図 6 中)。I 字型超電導磁石の起磁力は L 字型超電導磁石の推進コイルの起磁力と浮上コイルの起磁力の合計値に近い 750 kA であり、磁石 4 個で 2.6 t と L 字型超電導磁石の半分以下になったにも関わらず 10 t の車両質量を支持することができた。これにより、無人の実験車両 ML-500 から乗客が搭乗できる MLU001 へ進化することができ、実用化の可能性が見えてきた。

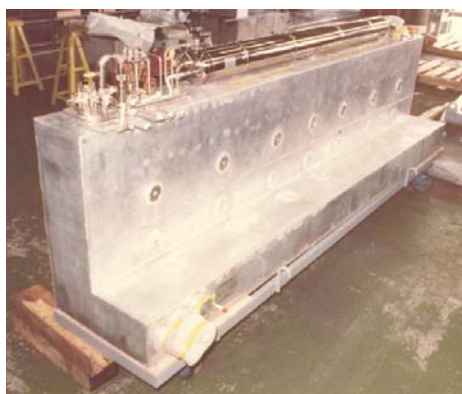


図 4 ML-500 用 L 字型超電導磁石

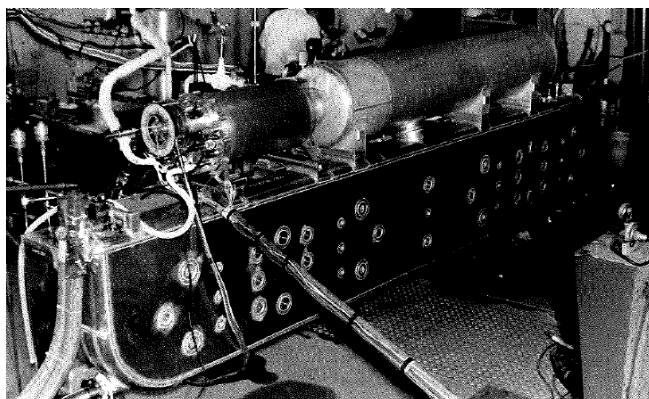


図 5 MLU001 用 I 字型超電導磁石

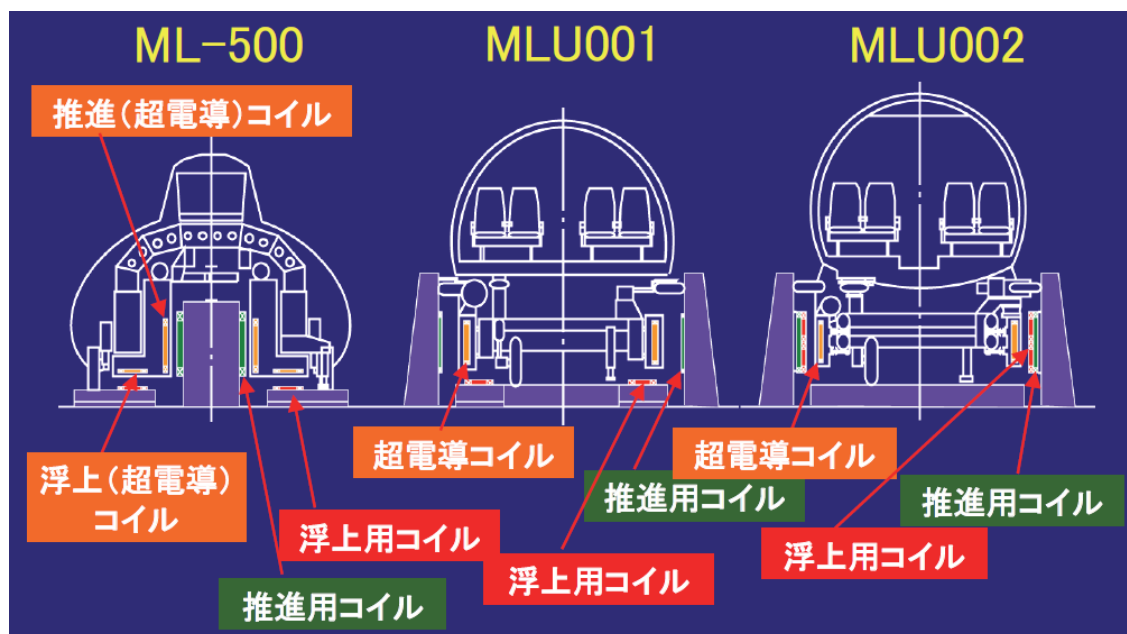


図 6 車両断面とコイル配置

4. 現在の超電導磁石

MLU002 以降、ガイドウェイ下面に設けられていた浮上コイルを側壁に移したシステム（側壁浮上方式）が採用された。このシステムは図 6 右に示すように、車上の超電導コイルと地上コイルが全て垂直に配置され、I 字型超電導磁石に適したコイル構成となっている。また超電導磁石の浮上力を増大することによって、より少ない個数の超電導磁石で車両が浮上走行できるようになってきた。そのため、乗車スペースから遠ざけた位置に超電導磁石を配置することが可能となり、車内磁界も低減できた。現在の超電導磁石は基本的に I 字型超電導磁石の構成を踏襲し、図 7 の様なものとなっている。

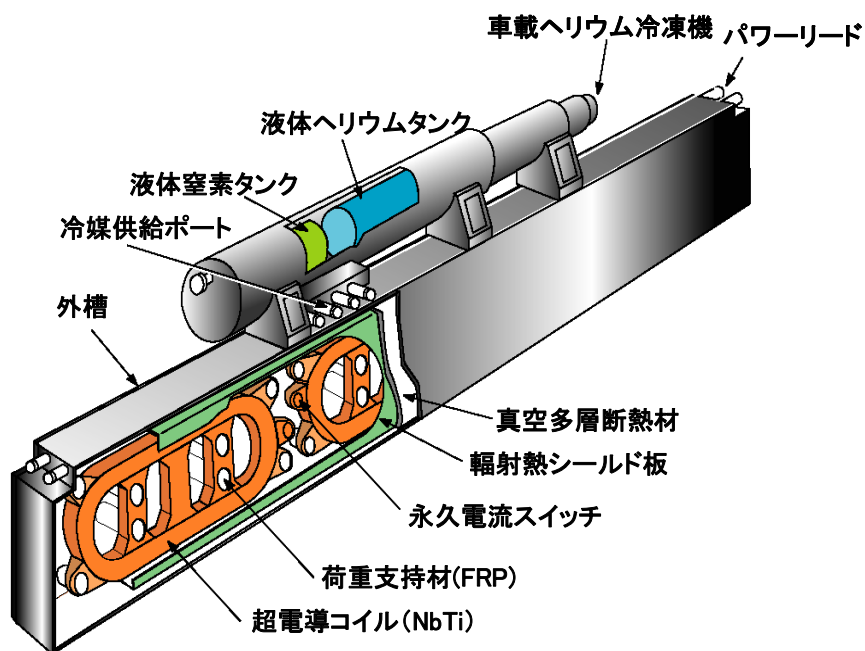


図 7 現在の超電導磁石

[超電導 Web21 トップページ](#)

【隔月連載記事】

やさしい超電導リニアモーターカーのお話（その 5）

～クライオスタットと車載冷凍システム～

公益財団法人鉄道総合技術研究所

浮上式鉄道技術研究部

低温システム研究室長 長嶋 賢

1. クライオスタットの高性能化

前回は超電導磁石の、特にコイル部分についての変遷を中心に紹介したが、超電導コイルを冷凍する車載冷凍システムや、極低温状態を維持するクライオスタット（低温容器）は超電導磁石の重要な構成要素なので、今回はこれらについて紹介する。

車載冷凍システムやクライオスタットに関して、1966 年の J.Powell と G.Danby の論文では「全長 100 フィート(30 m)の車両の場合、超電導部分への全熱侵入は 10 W 程度であろう。小型ヘリウム冷凍機は 4 K で 1 W の熱侵入につき 1 kW ほどの電力を消費する。従って消費電力 10 kW の冷凍機を積載すれば、必要な冷凍が可能となる。」と簡潔に述べている。この値は正確では無いものの、この論文が 40 年以上前、実際の開発に着手する以前に書かれたことを考えると驚くほどの確かな予測と言える。しかし、実際にクライオスタットの熱侵入をこのレベルまで低減し、冷凍システムの効率向上と小型軽量化を行って車両に搭載するまでには多くの困難があった。

熱の伝わり方には、「対流（流体の流れによって伝わる）」、「伝導（物質を介して直接伝わる）」、「輻射（電磁波の形でエネルギーを放出したり吸収したりして伝わる）」の三種類があり、現在の超電導磁石では、次のような手段でそれぞれの熱の侵入を防いでいる。

まず「対流」についてであるが、魔法瓶と同じように低温容器を二重（超電導磁石では「外槽」と「内槽」）として、その間を真空にして熱が伝わらないようにしている。

次に、「伝導」に対しては、超電導コイルを支える部品に、熱の伝わりにくい材料を選び、断面積をできるだけ小さくしている。とはいっても、超電導コイルで発生した浮上・推進力を台車経由で車両に伝えなければならないので、強度も同時に必要となる。そこで、熱伝導率は小さいが丈夫な FRP（繊維強化プラスチック）を、荷重支持材として使っている。

最後の「輻射」については、侵入する熱量が絶対温度の 4 乗の差に比例するので、高温部分と低温部分の間に中間温度の板を挿入すれば熱侵入量を小さくできる。そこで、内槽と外槽の間に、輻射シールド板と多層断熱材が入れている。輻射シールド板は液体窒素で 77 K に冷却されて内槽を完全に囲み、外部からの熱を遮断している。一方、多層断熱材は、熱の伝わりにくい材質のシートに輻射反射のためにアルミニウムを蒸着したものと、やはり熱の伝わりにくい材質の繊維を重ねて数十層にし、温度差を分割することにより、輻射による熱の侵入を小さくしている。

これらの工夫により、超電導磁石の熱侵入量は着実に低減してきた。図 1 は超電導磁石の電磁的な蓄積エネルギー当たりの熱侵入量の推移を示している。このようにして外部からの熱侵入量を極力少なくした上で、冷凍機を運転して侵入熱により蒸発したヘリウムを再び液化して使うようにすれば、高価なヘリウムを外部に出すことなくクローズドな運用が可能となる。

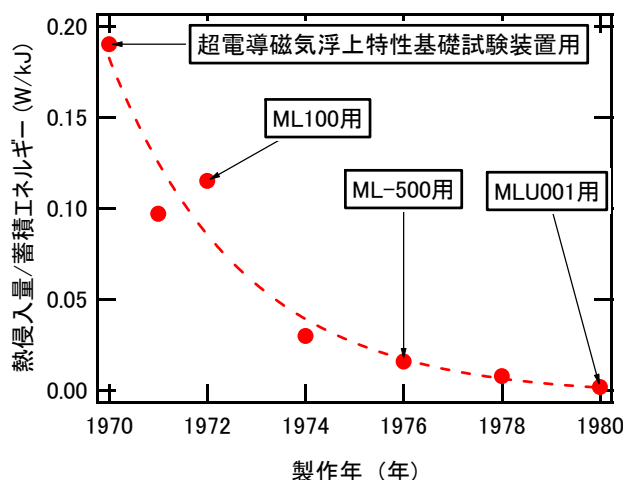


図 1 超電導磁石の熱侵入量低減の進展

2. 車載冷凍システム

冷凍機は、熱を温度の低いところから吸い上げて、高いところに捨てる働きをするが、これは、低いところにある水を高いところに汲み上げるポンプの役割に似ている。冷蔵庫のように電気で圧縮機などを運転して仕事をするわけであるが、超電導磁石では 300 K 近い温度差があるので、何十メートルもの深いところの水を、単純な一台のポンプでくみ上げられないのと同様に、冷蔵庫の様な単純なシステムではうまくいかなくなってくる。そこで、冷凍機を多段化して、段階的にガスを冷却する等の工夫が必要となってくる。

アメリカ海軍研究所の M.Nisenoff は、多くの市販冷凍機の膨大な実例を調べ、冷却温度や冷凍能力と、冷凍機の消費電力および質量の関係を整理した図 2 の様なデータを報告している。これを見ると、同じ冷凍能力であれば、冷凍機は冷却温度が上昇するにつれて質量が減少し、また質量と消費電力は比例関係にあることがわかる。このグラフの一番左に位置する液体ヘリウム温度 (4 K) の冷凍を行うためには、最も高度な技術が必要だということが数字の上からも明らかである。

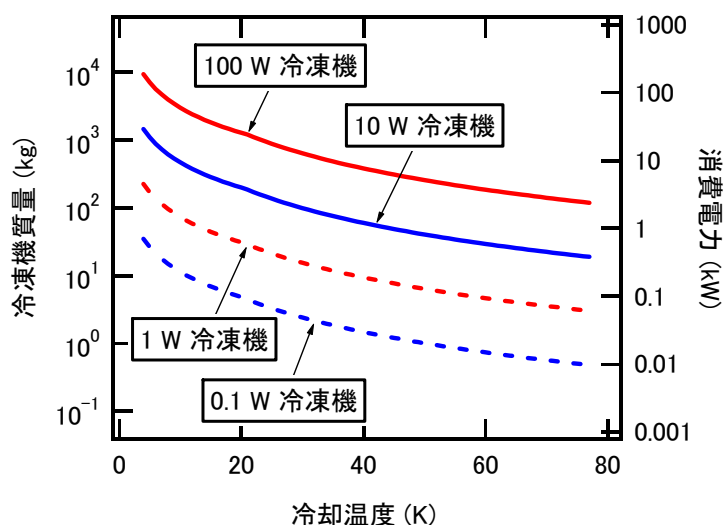


図 2 市販冷凍機の質量および消費電力調査結果

(M.Nisenoff, "CRYOGENIC REFRIGERATION: The Enabling Technology for Superconducting Electronics Applications" Proc. The 1999 International Workshop on Superconductivity, pp. 2-5, 1999)

また、超電導リアの開発開始時は当然ながらヘリウム冷凍機も地上設備でしか存在しておらず、重量、容積ともにとっても車載できるものではなかった。そこで、車両に冷凍機を搭載せず、かつヘリウムを外部に出すこともない「(ヘリウム) 封じ切りシステム」というアイデアが生まれた。これは液体ヘリウムを米国から輸入する方法を取り入れたものである。クライオスタットの蒸発ガス出口を塞ぎ、クライオスタットへの熱侵入分をクライオスタットの内圧上昇と液体ヘリウムの温度上昇で吸収し、ヘリウムを一定時間「封じ切って」保持する。ただ、実験してみると、超電導磁石が安定して使用できる温度に保持する時間が短く、実用には向かないという判断がなされた。

その後、冷凍機を 1 車両に 1 台搭載して複数の超電導磁石を冷却する方式も検討されたが、超電導磁石間を接続する低温ガス用移送管の熱侵入が多い点や、1 つの超電導磁石のトラブルが他にも波及するなどの理由から、最終的に 1 つの超電導磁石 (クライオスタット) に 1 台の冷凍機を組みあわせる現在の方式が採用された。そして、MLU001 には図 3 の様な構成の超電導磁石が搭載された。

これに先立って車載のための小型冷凍機として 3 種類の冷凍サイクルで試作が行われた。クロードサイクル冷凍機 (図 4)、スターリング/J-T (ジュール・トムソン) 冷凍機 (図 5)、GM (ギフォード・マクマホン) J-T 冷凍機 (図 6) である。それぞれの冷凍機には効率や信頼性・耐久性の点で一長一短があるが、図 3 の超電導磁石が製作された時点では、効率が高いことや車載冷凍機としてのまとまりが良いこと等が理由となり、クロードサイクル冷凍機が選択され搭載された。

ところで、残りの二つの方式の冷凍機、スターリング/J-T 冷凍機と GM/J-T 冷凍機の重要なパーツとして蓄冷器というものがあり、内部に蓄冷材が組み込まれている。この蓄冷材に要求される事柄は、極低温で大きな熱容量を有することである。殆どの物質は低温になるほど比熱が低下するために、極低温での蓄冷器の性能が低下してしまう悩みを持っていた。ところが稀土類元素を使用した蓄冷材は低温でも比熱が高く、この新しい材料を使用するようになると、これらの冷凍機の極低温領域における効率が向上した。特に GM/J-T 冷凍

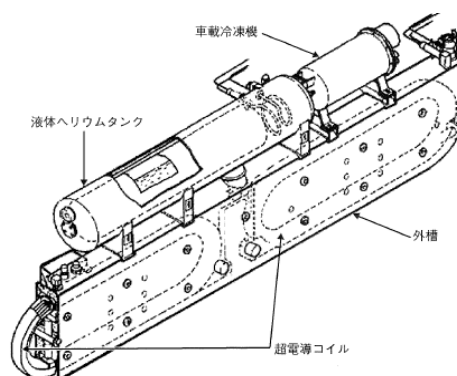


図 3 冷凍機を搭載した MLU001 用超電導磁石

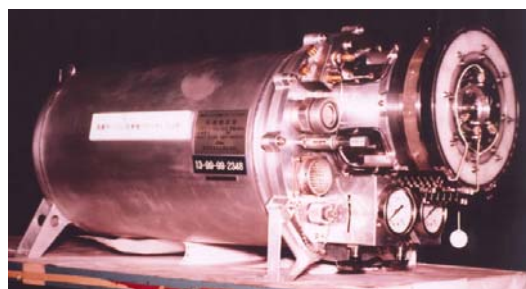


図 4 クロードサイクル冷凍機

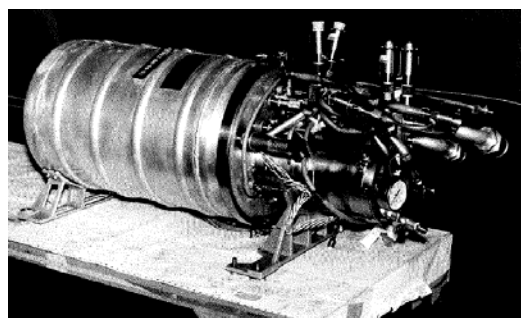


図 5 スターリング/J-T 冷凍機

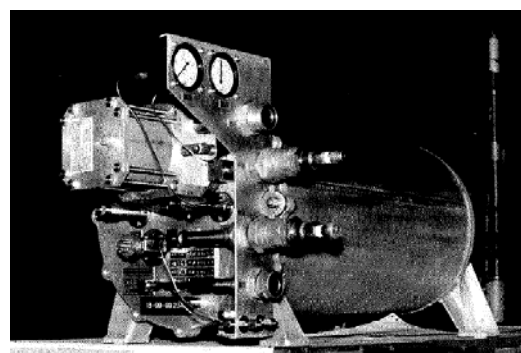


図 6 GM/J-T 冷凍機

機はその高い信頼性や台車へ搭載する際のレイアウトのしやすさ等が理由となり、現在主流の冷凍機となっている。

今後、超電導磁石に高温超電導体を用いると、冷却温度が上がるので、クライオスタットの構造はより簡単に、さらに小さくできる可能性もある。また、車載冷凍機も図 2 が示すように、温度上昇に応じて消費電力及び質量が小さくなる。当然小型化や低コスト化も可能となる。このようなことを受け、車載冷凍システムの考え方自体も大きく変わってくるであろう。

[超電導 Web21 トップページ](#)

やさしい超電導リニアモーターカーのお話（その6）

～次世代高温超電導線材適用の試み～

公益財団法人鉄道総合技術研究所
浮上式鉄道技術研究部
低温システム研究室長 長嶋 賢

前回の最後に高温超電導体の適用について触れた。また、今回は「やさしい超電導リニアモーターカーのお話」の最終回である。そこで、超電導リニアの将来につながる話として、現在鉄道総研で実施している、次世代高温超電導線材適用の試みについて紹介したい。

1. 高温超電導線材適用のメリット

高温超電導線材適用という、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事が良く強調される。しかし、高い磁場を発生する超電導磁石への適用を考えた場合、話はそう簡単ではない。まず、図 1 の赤い曲線を見て欲しい。この曲線は市販されている次世代高温超電導線材の臨界電流値を測定したものである。77 K、自己磁場中であれば、今の次世代線材は 4 mm 幅で 100 A 程度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 5 T の磁場を印加した状態で臨界電流値を測定したものである。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、人工ピンの導入など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 5 T 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そうでは無い。

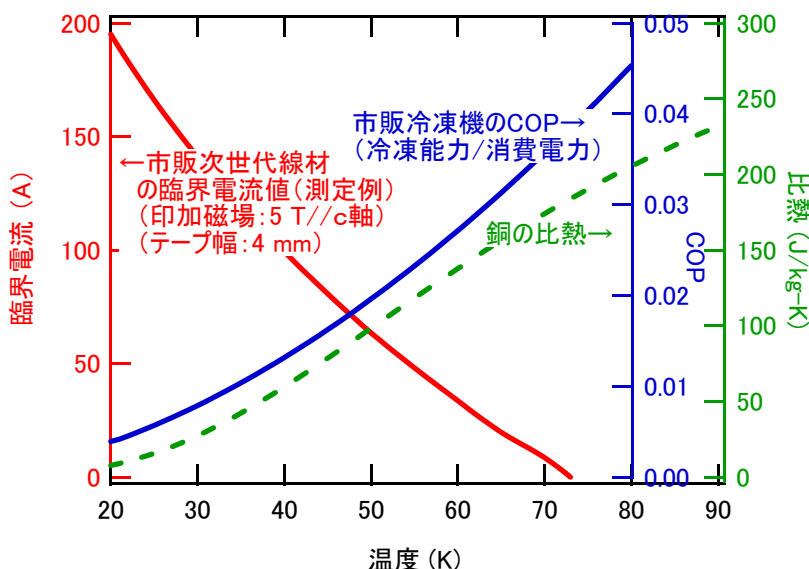


図 1 次世代線材の臨界電流値、冷凍機の COP および銅の比熱の温度依存性

図 1 の青い曲線は、前回紹介した M.Nisenoff の文献から冷凍機の 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。同じ冷凍能力であれば、必要な消費電力は大幅に低減されるし、同時に冷凍機の質量も低減される。前回説明したとおり、冷凍機の消費電力は質量と比例関係にある。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。

もし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、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。この場合の超電導磁石の構成は図 2 の様なものが考えられる。従来の超電導コイルを囲んでいたシールドが無くなる分、超電導コイルを地上コイルに近づけることができるので、超電導コイルの浮上力を増大することもできる。

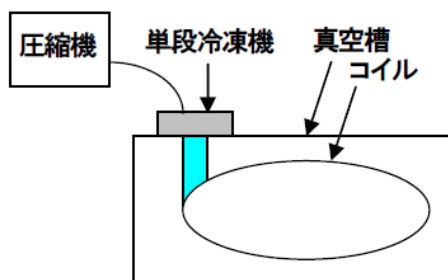


図2 単段冷凍機で冷却する超電導磁石の模式図

一方、図 1 の緑色の破線は、一般的な金属の代表として銅の比熱を示している。温度が上昇すると比熱は飛躍的に増大している。銅の場合、50 K では 4 K の約 1000 倍となる。金属が主な構成要素である超電導コイルの熱容量も同様に温度の上昇につれて飛躍的に増大する。同じ熱侵入であればコイル温度の上昇が(銅の比熱で考えると)約 1/1000 ですむため、1 日程度であれば冷凍機を車上に搭載せず、コイル部の熱容量により走行時の保冷を行うなどの運用も考えられる。その場合、夜間は車両基地等で地上に設置した大型冷凍機により、20 K 程度まで磁石の冷やし込みを行い、昼間の走行時に 50 K 以上にならないような熱設計を行えば良い。この時、20 K~50 K の温度領域での熱侵入を低減する必要があるのでシールドは必要である。この場合、超電導磁石の構成は図 3 の様なものが考えられる。

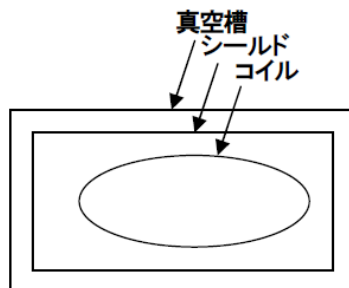


図3 冷凍機を搭載しない超電導磁石の模式図

この構成では車載冷凍機が無いので、大幅な質量低減や車上の消費電力の大幅な低減が可能となる。また、高圧ガス関連機器を車上に搭載しないですむため、高圧ガス保安法に抵触しなくなることで、台車の軽量化が進むため、乗り心地が向上すること、などの副次的なメリットも考えられる。

2. 鉄道総研での取り組み

鉄道総研は 2005 年以降、国土交通省主催の「超電導磁気浮上式鉄道実用技術評価委員会」の提言を受け、高温超電導磁石の技術開発を進めてきている。この技術開発は国土交通省から一部国庫補助を受けて実施しているが、その中で、高温、高磁場中での臨界電流密度が大きい、高強度である、銀を使わないために低コスト化の見込みがある、などの理由で鉄道総研は次世代線材に注目してきた。市販の高温超電導線材の性能については、メーカから自己磁場中、かつ液体窒素温度（77 K）での臨界電流値のデータは提供されるものの、外部磁場中あるいはより低温における臨界電流値はわからないのが現状である。しかし、実際にコイルを設計する際には、巻線に用いる線材のデータを正確に把握することが不可欠である。

そこではじめに高温超電導線材評価試験装置の開発を行った。試料の最低温度は 10 K、最大磁場強度はリニア応用で想定される 5 T 以上の 5.5 T、磁場角度は線材平面に対して $-5 \sim 95^\circ$ で、超音波モータの適用により低温状態で任意の角度に設定できる機能を有している。また、通電容量は 1000 A なので、サンプルとなる試料を前処理なく 10 cm 程度の長さに切ればそのまま評価できる独自の装置である（http://www.rtri.or.jp/rd/division/rd77/CS/cs_2.5.html）。図 1 の赤い曲線はこの装置で得た測定結果の一例である。最近では部外からの依頼で試料の評価試験も行うようになった。また、メーカから人工ピンの入った線材試料提供を受けて評価し、情報交換も行なっている。これらの結果から次世代線材の性能は現状でも十分検討に値し、さらに人工ピンの導入等により、さらなる性能向上が確実であることがわかったので、より具体的な検討を進めている。

図 2 に示した様な「単段冷凍機で冷却する超電導磁石」は運用上の扱い易さという点では、冷凍機のスイッチを入れておけば低温が維持できる車載冷凍システムは魅力的である。単段冷凍機としてはアクティブバッファ型パルス管冷凍機が適用しやすい。パルス管冷凍機は現在最も普及している GM 冷凍機の低温ディスプレイサのかわりにパルス管（ステンレス製の管）があるだけで、低温部に動作部品を持たず、機器の信頼性、メンテナンス性も高い。これを車載冷凍機として使用する場合には具体的には図 4 の様な構成が考えられる。図の破線で囲んだ筒状の冷凍機部分に圧縮機からガスを供給すると、筒中央の冷却部が冷える構造なので、浮上式鉄道用超電導磁石への組み込みに適している。また、冷凍機部は単純な構造なので、図のように複数の冷凍機を 1 台の圧縮機と組み合わせて運転を行うことも可能であり、車上の艤装性も良い。現在、鉄道総研では 50 K で 100 W 級の冷凍機を開発中である（http://www.rtri.or.jp/rd/division/rd77/CS/cs_1.2.html）。

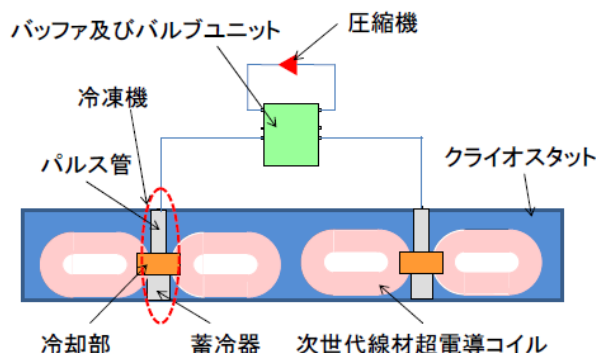


図 4 浮上式鉄道用超電導磁石に単段パルス管冷凍機を組み込む構成イメージ

図 3 の「冷凍機を搭載しない超電導磁石」を指向した研究では、次世代線材で実機の 1/4 程度の大きさの高温超電導コイルを製作し、長時間保冷が可能な断熱容器に収納して、小型の超電導磁石を完成させた。図 5 に示すこの超電導磁石は、コイル温度 50 K において 1 T 以上の磁場を発生することができる。また、高温超電導コイルの周囲に配置した金属の熱容量を利用することと、断熱容器内部に設置した活性炭で容器内の真空度を保持する工夫により、一度低温ヘリウムガスでコイルを 20 K まで冷却すると、コイル温度 50 K 以下を約 9 時間保持する保冷能力があることを確認した。また、実機の超電導磁石の場合、実験と計算から 20 K から 50 K になるまでの時間は 24 時間を超えることが見積もられた (http://www.rtri.or.jp/rd/division/rd77/CS/cs_1.4.html, http://www.istec.or.jp/web21/pdf/10_12/all.pdf)。



図 5 次世代線材を用いた小型超電導磁石

この「冷凍機を搭載しない超電導磁石」はかなり究極的な考え方であるが、この方式の検討で得られた知見は冷凍機伝導冷却方式の安全対策にも役立つ。この検証は冷凍機がトラブル等で停止した場合、どの程度の時間、超電導コイルが使えるかという磁石の冗長性検証そのものだからである。

今後はこれまでの成果を受けて、実機の磁場に相当する 5 T の磁場を発生する高温超電導磁石を次世代線材で製作し、更に検討を深度化させる予定である。現在計画されている中央新幹線が実現し、超電導磁石に次世代線材を適用することによって、超電導リニアシステムがより優れたシステムに進化していくことを祈念して本連載を終えたい。

一年間ありがとうございました。

[超電導 Web21 トップページ](#)