

第24回

超電導磁石

超高速鉄道研究会

高速鉄道時代の幕開けを告げた東海道新幹線の開業は、今から半世紀前まで遡る1964年でしたが、既にこの時、国鉄鉄道技術研究所（鉄道総研の前身）では、東京と大阪を約1時間で結ぶ次世代の超高速鉄道の研究が始まっていました¹⁾。人類が未だ経験したことのない、安全で快適な時速500kmの超高速鉄道を実現するために、車両の推進方式、支持方式といった最も基礎的な部分も含め、従来の技術にとらわれずにゼロから検討し直してシステムを構築していく緻密な作業が進められました。そして非粘着駆動のリニアモーター推進方式の基礎研究が1962年に始まります。これが超電導リニア研究の原点となりました。

超電導磁石の選択

研究の進捗に伴い、この超高速鉄道が備えるべき仕様が次第に明確になってきました。推進方式については、速度の限界や加減速性能の課題から非粘着の駆動方式が各種検討されました。ジェットエンジン推進や、チューブ式軌道内に圧力差を与えて車両を推進させる方法も議論されまし

たが、騒音や建設コストが課題となり、前述のリニアモーター推進方式が採用されました。支持方式については、車輪支持方式の他、非接触の支持方式として空気浮上と磁気浮上の基礎特性が比較検討されました。これらの検討結果は、超高速鉄道に関する他の課題と共に1967年に報告書としてとりまとめられました²⁾。

ちょうど同じ頃、米国ブルックヘブン国立研究所のパウエルとダンビーが、強力な電磁石の一種である超電導磁石を車両に搭載して磁気浮上と案内を実現する高速磁気浮上列車のアイデア（図1）を米国機械学会誌に発表します³⁾。この論文を契機として、車両へ超電導磁石を搭載して磁気浮上・案内に用いると同時に、この超電導磁石を地上一次リニア同期モーターに用いて推進にも使うという大変すっきりとしたコンセプトが固まっていきます。また、地震が多く地盤も弱い我が国の特情を考慮すると、超電導磁石の強力な磁場を利用する電磁誘導方式の磁気浮上により、特別の動力源や制御が無くても大きな浮上高さを確保できる本方式は、安全性の面からも評価を得ました。

そして1970年、国鉄はこの方式で超高速鉄道の開発を行うことを発表します。これ以降、車載用超電導磁石の開発は、超高速鉄道すなわち超電導リニアの実現に欠かせない最重要課題のひとつになりました。

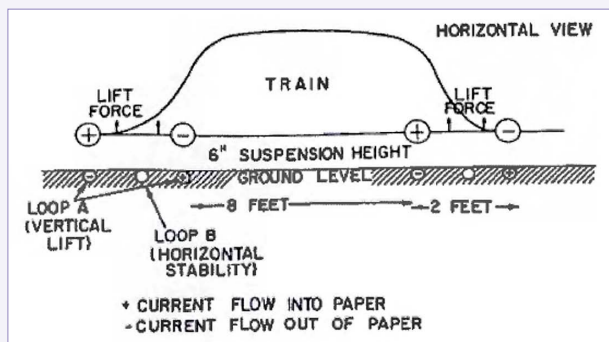


図1 パウエルとダンビーが提案した高速磁気浮上列車概念図³⁾ (1966年)

Reproduced by courtesy of ASME. J. R. Powell and G. T. Danby, High-Speed Transport by Magnetically Suspended Trains, ASME Winter Annual Meeting, 66-WA/RR-5, 1966.

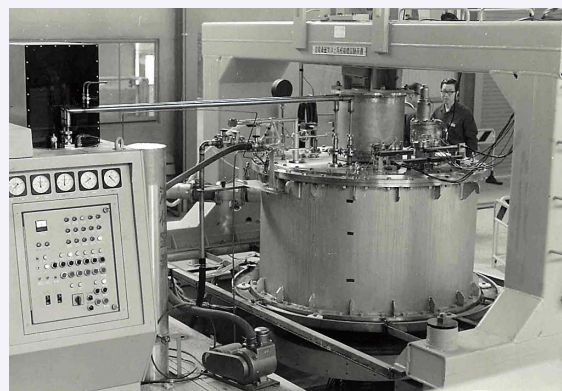


図2 超電導磁気浮上特性基礎試験装置 (1971年)

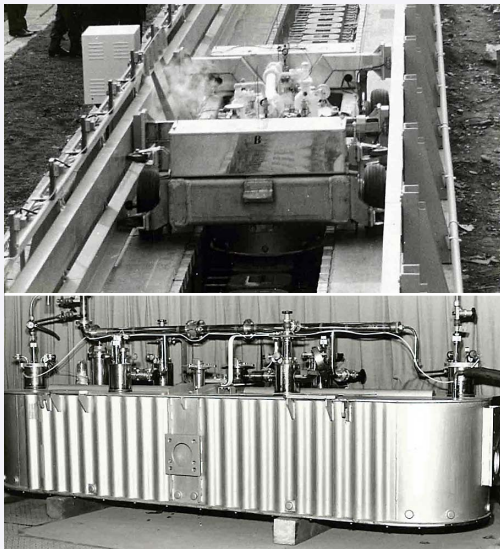


図3 LSM200 (上)と超電導磁石(1972年)

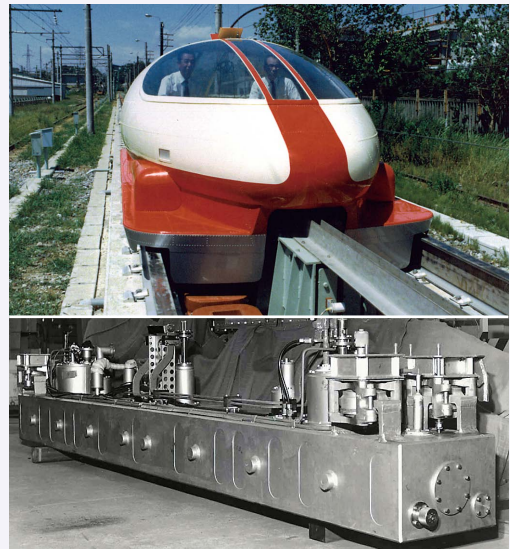


図4 ML100 (上)と超電導磁石(1972年)

超電導磁石の基礎研究

1970年前後は、超電導技術の分野も時代の大きな節目を迎えていました。1911年にオランダのオンネスが発見した超電導は、その後長く地道な材料開発の時代が続いていましたが、1960年代になると高磁場発生用として画期的な特性を持つNb-Ti(ニオブチタン合金)線材が登場したのです。発生磁場10テスラを超える超電導磁石の製作も可能となり、物性研究や加速器・核融合研究用としてその後広く普及していく原動力となりました。この超電導技術の一大発展期と重なる形で超電導リニアの研究を始動したことは、その後の研究成果にも大きく寄与することになりました。まさに当時、果敢にも超電導方式の決断を下した先見性が感じられます。

しかしながら超電導磁石の開発は、小型であること、軽量であること、振動に強いこと、低消費電力であることなど、車載用ならではの解決すべき課題があり、普及し始めた大型装置用超電導磁石の技術をそのまま適用することはできませんでした。そこで、1971年に超電導磁気浮上特性基礎試験装置(図2)が製作されました。これが定置試験用途ではありますが、超電導磁石の1号機です。超電導磁石を収納した円筒形容器の下で短絡コイルを回転させることで発生する磁気浮上力の基礎特性試験に活用されましたが、まだ磁石重量が大きすぎて実際は磁気浮上させることはできませんでした。一方で、冷却用液体ヘリウムの移送など、極低温技術特有の取り扱いの基本を習得するために本装置が果たした役割も少なくありませんでした。

超電導リニア用の超電導磁石は機能別に、磁場を発生するコイル部と、冷凍機部に分けられます。このうちコイル

部は、超電導コイル、永久電流スイッチ、内槽、輻射熱シールド板、外槽などから構成されます。研究の初期段階では両者は独立して開発が進められ、それぞれ所定の成果が得られた段階で統合する手法が採用されました。また当初はコイル部という概念はまだ確立しておらず、冷凍機の有無に関係なく超電導磁石と呼ぶことが普通だったようです。以下本稿では、超電導磁石の主な研究開発過程の概要を、研究所構内および宮崎実験線で活躍した実験車両と関連させながら述べていきたいと思ひます。

研究所構内における超電導磁石開発⁴⁾

1972年、研究所構内に長さ220mのガイドウェイが敷設されました。このガイドウェイ上を、リニア同期モーター推進により超電導磁石を用いた電磁誘導浮上走行に世界で初めて成功した実験車がLSM200です。最初の車載用モデルであるLSM200用超電導磁石(図3)の特徴は、クライオスタット(超電導コイルを収納する内槽、真空容器である外槽)に溶接密閉構造を採用したこと、外槽に波形板を採用したこと。いずれも小型化、軽量化に効果のある方法ですが、当時のクライオスタットは厚みのある箱形の形状をしており、軽量化には限界がありました。

また、1972年は我が国の鉄道開業100年にあたる年でした。これを記念して超電導リニアの公開走行実験が計画され、ML100と呼ばれる実験車が製作されました。無骨だったLSM200と違い、車内に4人分の座席が配置され、小型ながらも未来の乗り物をイメージさせる外観の超電導リニア初の有人車両となりました。ML100は研究所構内の長さ480mのガイドウェイ上を、リニア誘導モーター推進により時速60kmの電磁誘導浮上走行に成功しています。

ML100用超電導磁石(図4)の特徴は、さらなる軽量化を目的として、外槽にアルミ合金が初めて採用されたことでした。これは後に続く超電導磁石にも受け継がれていきます。

これらLSM200, ML100は、超電導磁石による電磁誘導浮上走行に成功しましたが、案内方法はガイドウェイと機械的に接触させる方式でした。そこでML100の推進システムをリニア同期モーターへ改造するのに合わせ、推進コイルに案内機能も兼用させる方式が採り入れられました。こうして1974年に完成した実験車がML100Aで、地上一次リニア同期モーター推進と超電導電磁誘導磁気浮上案内による完全非接触走行に初めて成功しました。ML100A用超電導磁石(図5)の主な特徴は、水平配置する浮上用超電導コイルに加えて推進案内用超電導コイルを縦置きに内蔵したため外観がL字形になったこと、永久電流スイッチに熱式を採用したこと、液体ヘリウムタンク方式を採用したことです。熱式永久電流スイッチは以降の超電導磁石の標準となり、また液体ヘリウムタンクと超電導コイルとの間の配管をかなり細くしてもヘリウムの補給に問題がなかったことは、大きな知見となりました。

宮崎実験線における超電導磁石開発⁴⁾

ML100Aによる完全非接触走行の基礎特性把握を終え

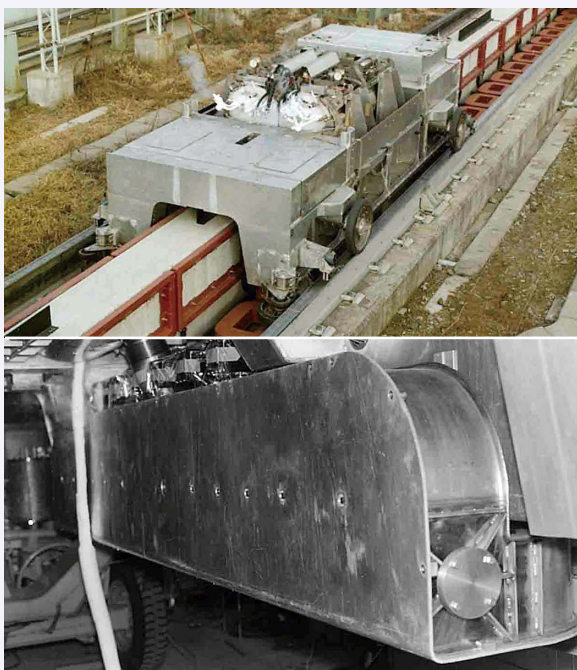


図5 ML100A(上)と超電導磁石(1975年)

ると、超電導リニア開発の舞台は宮崎実験線へ移ります。宮崎実験線は当初から時速500kmを達成する目的で建設され、1979年にML-500が当時の鉄道世界最高速度記録である時速517kmを記録しました。ML-500は無人実験車ではありましたが、超電導リニア方式で時速500km以上の超高速走行を最初に実証する輝かしい実績を残しました。1978年に製作されたML-500用超電導磁石(図6)の主な特徴は、浮上用超電導コイルと推進案内用超電導コイルを内蔵したL字形断面であること、超電導コイルを収納する内槽を円形断面のチューブ型として内槽の占める容積を大幅に減少させたこと、荷重支持材にFRP製の多重管を採用したこと、外槽の支持箇所を増やすことで外槽板厚の大幅な減少を図ったこと、再凝縮用熱交換器を内蔵した液体ヘリウムタンクを採用したことでした。これら内槽形状、荷重支持材方式、外槽支持方式、冷凍機対応液体ヘリウムタンクは現在の超電導磁石にも通じる設計思想であり、この時期の技術進歩の勢いが感じられます。

また、液体ヘリウムタンクに再凝縮用熱交換器を内蔵したことで、超電導磁石と車載冷凍機の接続が初めて可能となりました。1979年には同タイプの超電導磁石を用いた実験車ML-500Rによる初の車載冷凍機搭載走行試験が実施されています。

ML-500による超高速走行実験の後、宮崎実験線のガイ

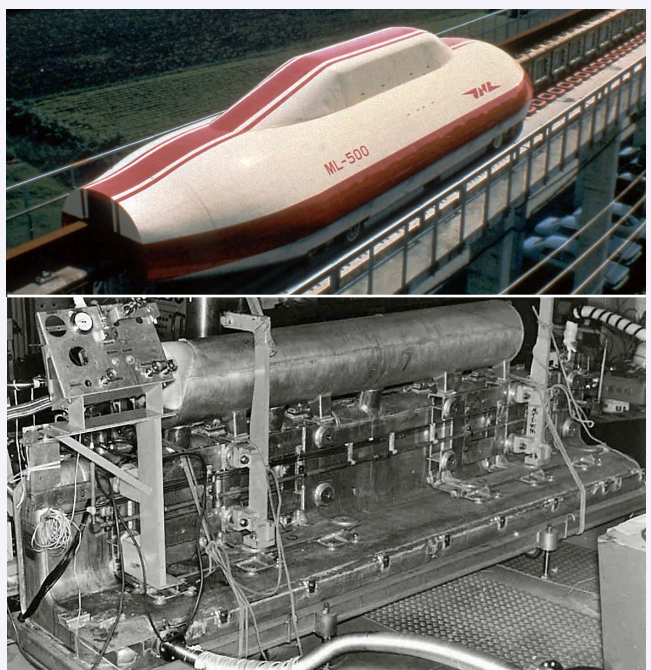


図6 ML-500(上)と超電導磁石(1978年)

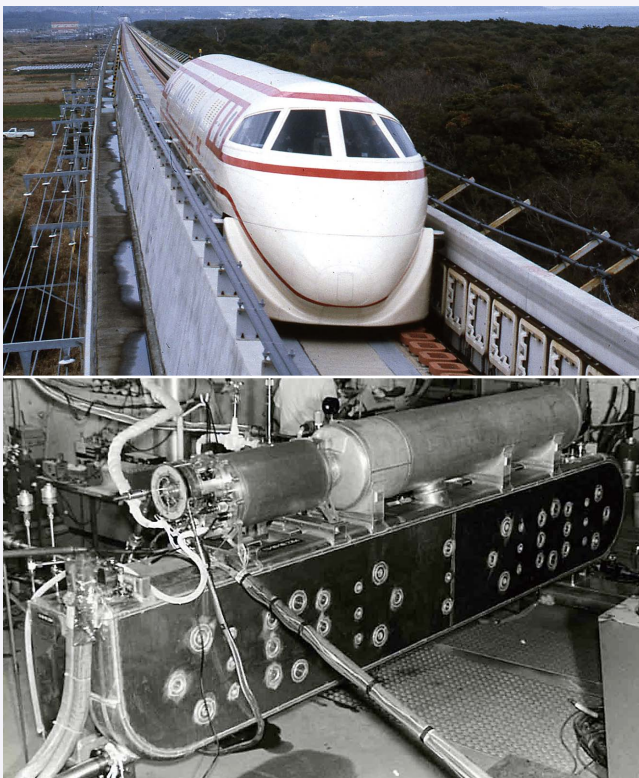


図7 MLU001(上)と超電導磁石(1980年)

ドウェイは逆T字形断面からU字形断面に改造され、1980年に有人実験車のMLU001が登場しました。MLU001用超電導磁石(図7)の主な特徴は、1種類の超電導コイルに浮上、推進、案内の全ての作用を兼用させて大幅な構造簡略化を達成したこと、本質安定化超電導コイルを用いた高電流密度化によりコイル断面をコンパクトにしたこと、内槽断面形状を楕円とし外槽表面と超電導コイルとの距離を短縮したこと、液体ヘリウムタンクの一端に車載冷凍機を固定可能としたことでした。I字形断面の外観を始め、現在の超電導磁石にも共通する基本的な仕様の多くは、MLU001用超電導磁石にも見ることができます。また、MLU001からは車載冷凍機の本格的な試験が可能となり、1車両に大型冷凍機1台の構成や、超電導磁石1個に小型冷凍機1台ずつの構成などについて、信頼性や操作性、エネルギー効率の面からの比較検討が進みました。

この後、実験車MLU002、MLU002Nと続き、側壁浮上対応超電導磁石や台車への超電導磁石配置方式、異常時検証試験などが進められ、完成度の向上した超電導磁石は山梨実験線へ引き継がれていきます。図8は、超電導磁石の性能向上を端的に表す例として、蓄積エネルギーに対する磁石重量の比の変遷を示したものです⁵⁾。着実な性能向上の歴史を見てとることができます。

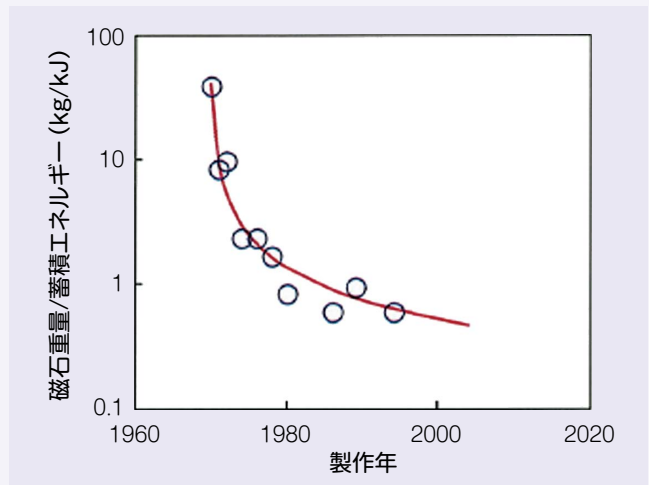


図8 超電導磁石の性能向上⁵⁾

おわりに

44年前、超高速鉄道の実現に欠かせない装置として位置付けられた超電導磁石は、強力なリーダーシップと研究者たちの不断の努力によって実用に至りましたが、研究開発過程の中で当時の技術レベルでは見送られたようなアイデアも、今の技術水準からもう一度見直してみることは価値のあることでしょう。

今も将来に向けた研究開発は進んでいます。例えば高温超電導磁石もそのひとつです。性能向上が進む希土類系高温超電導線材を超電導コイルに用いることで、液体ヘリウムや液体窒素といった寒剤が不要となり、従来よりも高い温度で使用する簡単な冷凍機を用いて簡素な構造の超電導磁石を構成することができます。一層の小型化、軽量化、低消費電力化によって、超電導磁石がますます使い易くなる日も遠くありません。

(小方正文/浮上式鉄道技術研究部 低温システム研究室)

文献

- 1) 京谷好泰：超高速鉄道について、電気学会論文誌, Vol.91, No.4, pp.581-587, 1971
- 2) 超高速鉄道研究会：超高速鉄道研究会報告, 鉄道技術研究所速報, No.67-1046, 1967
- 3) J.R.Powell and G.T.Danby, ASME Winter Annual Meeting, 66-WA/RR-5, 1966
- 4) 中島洋：浮上式鉄道の極低温技術開発経過と今後の課題, 鉄道技術研究報告, No.1183, 1981
- 5) 岩松勝：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, 鉄道総研報告, Vol.26, No.5, 2012