解 説

超電導磁気浮上列車開発の現状とこれから

京 谷 好 泰

日本国有鉄道技術開発室 東京都千代田区丸の内 1-6-5

(1975年5月21日受理)

“Development of Superconducting Levitated Train in Japan”

Yoshihiro KYOTANI

Technical development Department, Japanese National Railways
1-6-5 Chiyoda-Ku, Marunouchi, Tokyo

(Received May 21, 1975)

Synopsis :

For the development of the superconducting levitated train in Japan, high speed, low public nuisance and easy-maintenance are required in addition to the advantages of the conventional railway.

Basic experiments by rotational test device and running test on the 220m and 480m length test track have been conducted.

Now, a 7km test track it to be built to check the feasibility of superconducting levitation and linear synchronous motor propulsion up to 500km/hr. The testing on this track is scheduled to commence in the spring of 1977.

交通手段は社会に密接な関係を持ちながら多くの変遷を重ねてきた。そして、今や交通機関は人間社会に切離せないものであると共に、多くの問題をかかえている。すなわち、公害、労働力、時間、空間、資源などの問題である。

これらの問題を解決するために、また一方では、研究開発の進んでいたリニアモータの技術に加え、近年著しい進展をみせている低温技術の応用の一つとして超電導磁気浮上列車の研究開発が行なわれてきている。

以下、超電導磁気浮上列車の研究開発に着手するまでの経緯、具備すべき条件と環境、研究開発の経過、これからの研究開発について述べる。これらの研究開発は国鉄以外にも大学、研究機関、民間企業などで独自に進められているものもあるが、本誌では国鉄が進めているものを中心に述べる。

経 緯

国鉄では1962年頃から、新幹線鉄道の次に来るべき鉄道についての調査研究が始められていた。1964年に東海道新幹線が開業すると鉄道への関心はにわかに高まり、その便益性は高く評価された。

1968年には鉄道の高速化を図るため、狭軌在来線の高速化、新幹線高速化、在来方式によらない超高速鉄道を検討するチームが編成され、1969年にはそれぞれ単独のチームが編成された。

一方、同じ頃に、交通機関の中で鉄道の占める役割が検討された結果、鉄道は案内されて走行するために高速度の運転を安全に行なうことができ、連結も容易であるために大量輸送が行なえ、快適で経済的な運営ができるという特徴を有しており、この特徴を生かした役割として、都市間旅客輸送、中長距離貨物輸送、

大都市通勤通学輸送が適当であるとされた。

この都市間旅客輸送において、車輪とレールを使用した在来方式鉄道の速度限界を越え、騒音、振動、空気汚染などの公害を生じない超電導磁気浮上リニアモータ推進列車の提案がなされたのは1970年1月であった。これに対し、時期尚早であったため、公害対策等とは思ひあがりもはなはだしいとの意見もあった。しかし「運輸省」国鉄部内ではこの提案は、望ましい方式であるとして、その研究開発促進が図られることとなった。

偶然にも、同じ1970年夏頃から、交通機関に関する公害が問題となり始め、また、都市交通における空間不足は都市問題へ、新交通システムの開発へと発展し、人間と交通が論ぜられるようになった。

また、1970年発表当時から考慮していたガイドウェイ保守要員の確保が次第に困難となりはじめ、今や、保守が少なくてすむ鉄道の出現が望まれるようになった。

具備すべき条件と環境

超電導磁気浮上リニアモータ推進列車を開発目標に決める前に、都市間旅客輸送に今後望まれる具備すべき条件と環境の検討が行なわれた。

具備すべき条件は

- (1) 高速であること
- (2) 大量輸送が可能であること
- (3) 安全、快適であること
- (4) 信頼性が高く確実であること
- (5) 妥当な運賃で採算のあること
- (6) 公害のないこと
- (7) 便利なこと
- (8) 保守の容易なこと

などである。

この中で、(1)の高速であることは、あくまで旅行者が出発地から目的地までに要する時間を短くする方法の一つであって、単なる速度記録を競うものではない。時間を有効に活用しようとする人々は多くなってきており、その傾向は業務のみでなくレジャーにも現われている。また、移動時間が短くなることは行動範囲が広がることとなり、空間不足の解決にも役立つ。たとえば、500 km 離れた大都市間を1時間で結ぶ需要はすでに存在し、航空機がその必要性を示している。しかし、航空機も輸送機関共通の問題をもっていることは事実であり、航空機があるから、このよう

な高速は必要でないということにはならない。

(2)の大量輸送が可能であることは、案内輸送機関の大きな特徴であり、これによって土地、エネルギー等の資源を活用できる。

たとえば、東京—大阪約 515 km の東海道新幹線の場合、あらゆる関連施設を含めて全用地面積が約 10 km²であり、これを使って1日平均約30万人の輸送を行なっている。また、東海道新幹線の所要エネルギーは 1 seat km 当り 0.28 MJ である。

(3)、(4)、(5)、は輸送機関として当然のことであり、(6)は従来ともすると、交通機関は運営者と直接利用者の立場に立って考えがちな沿線住民まで含め、より広範囲な考慮が必要なことを示した。

(7) 便利なことは、利用者にとって旅行の計画、手続き、ターミナルまでのアクセス、ターミナル内の移動、などが便利なことを意味しており、販売システム、ターミナル構造などが対象となる。

(8) 保守の容易なことは、前記の条件を常に満足させるために保守が必要であり、労働力不足の問題から保守の容易なものが必要であることを意味している。生活が豊かになるほど、深夜の単純作業に従事する人を求めることが困難となり、また、深夜でなくとも、鉄道の保守作業は人命に直接関係する重要な作業であり、経験と知識を必要としながら、地味な仕事であるため、技能者を得ることが次第に困難な傾向にある。したがって、労働力確保の面から、稼働率向上の面からも保守の容易なことが必要となる。

環境については次のような点について検討を行なった。

- (1) 自然条件：気温、湿度、風速、降雨、降雪量、震度、地形、霧、霜、雪、雷、塩害、有害ガス、塵埃
- (2) 地理的条件：他の交通ターミナルの位置、美観、景観、日照権
- (3) 社会的条件：騒音、振動、空気汚染、誘導障害、磁気障害、列車風、他交通機関との協調
- (4) 資源的条件：エネルギー、特殊資材
- (5) 技術的背景：車輪レール方式による鉄道技術のほか工業界一般の技術的發展

このような具備すべき条件、環境の調査研究を行ないながら、一方では、これらを満足させるような可能性をもった交通機関を求めるための検討が行なわれた。

その結果、まず、案内型陸上輸送機関としての鉄道

が適当であること、ついで、これを支持案内装置、推進装置、エネルギー供給装置などに分けて検討した結果、超電導磁気浮上リニアモータ推進鉄道が望ましいものとなった。

ここでいう超電導磁気浮上とは、地上側に進行方向にならべられた常電導コイルあるいはアルミニウム板の上を車上に取付けられた超電導磁石が移動することによりコイルあるいは板に電流を誘導し、この電流と車上超電導磁石からの磁界との作用によって車両を支持案内しようとするものである。超電導磁気浮上といえ、一般にこのような方式を指しているが、超電導誘導反撓方式、あるいは電気力学方式といわれている場合もある。

この方式の主な特徴は、車両と地上側の隙間が大きくとれて一例えば 10 cm 以上—地上側の精度維持が容易なこと、超電導磁石を永久電流モードで運転することにより支持案内のための電力を必要としないこと、浮上用の超電導磁石を推進用に併用することができること、また、車両が低速の時は補助の支持案内装置が必要であるが車両の走行による誘導電流を利用しているため、浮上開始、着地に特別な制御装置を必要としないし、高速走行中に突然接地するといった危険性がないことなどがある。

リニアモータとは、一般に見られる回転型のモータを線型に展開したもので、直接、線運動を行なうことが可能である。車両が浮上すると、従来のようにモータで車輪を回し、車輪と地上側との摩擦を利用して車両を動かしたり、ブレーキをかけることは困難となるので、どうしても電磁力を直接利用するようなリニアモータが必要となる。

リニアモータには移動磁界による誘導電流を利用したリニアインダクションモータ (LIM) と、別に供給される電流と磁界の同期をとりながら生じた電磁力を利用するリニアシンクロナスモータ (LSM) があるが、当初は LIM で進められ、超電導磁石の研究とともに空隙の大きくとれ

る LSM の研究開発が活発となってきた。また、ステップ型リニアモータもあるがここでは省略する。

いままでに行なわれた主な研究開発

1962年頃から始まった調査研究が進むと共に LIM、空気浮上、永久磁石を使用した磁気浮上、常電導磁石を使用した磁気浮上などの基礎実験が進められた。この結果、磁気浮上リニアモータ推進方式に将来性があり、車載用超電導磁石とその冷却装置の成否がこの鉄道の実現を左右する一つの問題点であることが判った。

1970年には、これまでの実験をもとに万博で磁気浮上リニアモータ車の模型走行を行ない、多くの人々の関心を招いた。

一方、超電導磁気浮上の基礎的特性を把握するため Fig. 1 に示すような回転型の試験装置を試作し、実験

Fig. 1 Levitation test facility (rotating type)

Superconducting magnet

Cryostat dimension	Outside diameter	1.67m
	Height	0.98m
Number of coils		2 in one cryostat
Coil pitch		1.41m
Coil Dimension	length×width	1.32m×0.26m
Ampere turns		200 kAT/coil

Normal conducting coils

Rotary disc dimension	Outside diameter	1.42m
Number of coils, coil pitch and coil dimension		
Number of coils	Pitch (mm)	Dimension (mm)
		length width
4	707	597 260
6	471	367 260
8	355	243 260

Maximum speed	100 km/hr
---------------	-----------

を行なった。この実験を進めるにあたって問題となった点は、電流が誘導される常電導側をコイル方式にするかシート方式にするか、装置の大きさ、速度をいかに決めるか、などであった。検討の結果、解析の容易なこと、磁気抗力（超電導磁気浮上の場合、誘導された電流と常電導コイルの抵抗によって常電導側にジュール損失を生じる。この損失は車両を動かすのに対して抵抗となってくるので、車両走行に対する空気抵抗と分けて磁気浮上によるための抗力と考え、磁気抗力といわれる。超電導磁気浮上を評価する一つの係数として、浮上力とこの磁気抗力の比をドラッグレシオと呼んでおり、この係数を高くすることが望まれる）が少なくすむことからコイル方式を採用し、大きさについては浮上高さ、コイル幅を考慮して決定し、速度については最大抗力発生速度、浮上力安定速度などを考慮し、解析可能な速度とした。実験結果、浮上力は理論式とよく一致しているが、抗力は理論値より若干低い値で理論カーブと同じ傾向を示している。また、コイル方式による浮上力の変動は超電導コイルと常電導コイルの長さの比、常電導コイルの時定数によって小さくできることが確認された。また、クライオスタット下面に取付けられたシールド板による浮上力、抗力、LHe 蒸発量への影響を知ることもできた。

この実験装置は大きな成果が得られたにもかかわらず、実際は浮上しないので、人々に訴える力は乏しかった。また、次の段階として超電導磁石を実際に浮上させる実験が必要なことも明らかであった。

したがって、1971年に入ると、この装置の超電導磁石を軽量化し、超電導による最初の浮上に成功すると共に動的特性が得られるようになった。この時の超電導磁石は Fig. 2 に示すようなものであり、機械式スイッチによる永久電流モード運転を行なった。また、別に作られた超電導磁石による浮上試験も実施された。この装置において、常電導コイル側を開放したまま最大速度で回転させ急にコイルを閉回路にすることがあったが、これによって生じた急激な浮上力は超電導磁石を上下ストッパーに当てると共に強い加速度を

受けた。このような悪条件となったにもかかわらず、この超電導磁石は何らの損傷もなく、その後の実験が続けられたことは、超電導磁石の強さとダンピングの強さを示していた。

この回転型試験装置は、上記実験の他に、ガイドウェイに使用する鉄材の影響を調査することに使用され、また、前から検討中であった LSM の可能性を確認する最初の実験に使用された。

このようにして基礎的実験が進むにしたがって、動的状态を把握するための線型の実験装置が必要となった。

このため、LSM の実験も含めて各種の実験ができるように製作されたのが Fig. 3 に示す装置である。浮上のみの特性を求めるために補助推進装置 (LIM 駆動台車) によって、まず、超電導磁石のみが浮上する実験を行ない、ついで実験車全体が浮上する実験を行なった。LSM の実験は浮上用の地上コイルを開放して行なった。終りに、超電導磁石を LSM 用、浮上用に併用した実験を行なった。この超電導磁気浮上 LSM 推進の実験は1972年7月に発表された。

これらの実験結果は理論解析と一致するが、浮上、推進併用の場合は Coupling を考える必要があり、LSM 推進の場合は浮上併用よりも案内併用の方が望

Fig. 2 Light weight superconducting magnet for levitation test facility (rotating type)

Superconducting magnet

Cryostat dimension	Outside diameter	1.43m
	Height	0.23m
Weight		695 kg
Persistent current switch		mechanical

Fig. 3 LSM running test facility

Vehicle

Dimension length×width×height	4m×1.5m×0.8m
Weight	2 tons
Speed	50 km/hr
Levitation height	50 mm

Superconducting magnet

Cryostat dimension length×width×height	2.94m×0.74m×0.6m
Number of coils	2 in one cryostat
Coil pitch	1.49m
Coil dimension length×width	1.2m×0.4m
Ampere turns	320 kAT/coil
Persistent current switch	mechanical

Test track

Total track length	220m
Track coil pitch	0.468m
Track coil dimension length×width	0.3m×0.28m

ましいことが判った。

1972年は日本の鉄道が開業して以来 100 年になるので、その記念事業として超電導磁気浮上車の実験を公開することが決定された。そのため、1971年から専門のグループが編成され、超電導磁気浮上 LIM の実験装置が製作された。これが ML 100 といわれる装置で Fig. 4 に示す。ML は磁気浮上を、100 は 100 年記念を意味する。

この装置による浮上走行実験は1972年9月に発表され、10月に広く一般に公開された。これによってスムーズな走行状態、騒音のないことが多くの見学者によって評価され超電導、低温に対する関心が強くなった。ただ、この場合、走行距離約 400mで、走行時間が数分であり、また浮上実験に重点を置いたので、走行中は蒸発 He を回収しなかった。このことが後々まで影響し、超電導磁気浮上は He を浪費し、運転費が高価

なものであるとの印象を一部の人々に与え、超電導磁気浮上列車開発の誤解を招くこととなったのは残念であった。

1971年には、車載用超電導磁石の研究開発を進めるため、実物大のクライオスタット二基を試作し、また He 用の軽量 Compressor 一基を試作し、実験を行なった。これらによって、車載用のものが開発可能であるとの見通しが得られ、開発が促進された。

1973年に入ると、前々から、理論的検討を進めていた Null flux 方式 (Powell, Danby 提案のもの) についての実験を行なうため、また、LSM の特性を追及し、推進と案内の Coupling を確認するため Fig. 5 に示すような回転型試験装置を試作し実験を進めている。この装置は磁気案内特性、LSM 特性の実験ができるとともに、案内推進を超電導磁石併用のみでなく、常電導側も併用できるようになっている。

実験の結果、Null flux が drag ratio で優れていること、併用方式で十分な案内力を得ることが可能であり、理論と一致することが判った。

超電導磁石については、軽量、偏平で LHe の損失が少ないものを試作する一方、封じ切り方式の研究、実験が進められ、冷却システムの研究開発が進められるとともに実規模に近い実験が望まれる段階となった。

Damping と AC shield についても、さらに究明するため、実験装置を試作し実験を進めている。Damping については、Passive Damping の究明を行ってから、Active Damping に進むことを考えている。交通機関においては何よりも安全が第一であり、そのためには、本質的に安定な特性を有すること、複雑な制御を必要としないこと、構成要素の簡単なことなどが望まれる。超電導磁気浮上はこれらの要求を満足させる可能性が高いと考えられる。この考えが上記のようにパッシブダンピングを優先し、推進装置用の空隙制御装置を必要としない LSM を採用するに至った。

以上述べた他、ガイドウェイ試験機による振動実験、

Fig. 4 ML 100

Vehicle

Dimension length×width×height	7m×2.5m×1.93m
Weight	3.5 tons
Speed	60 km/hr
Levitation height	100 mm
Propulsion	LIM

Superconducting magnets

Number of cryostats	2
Cryostat dimension length×width×height	4.25m×0.6m×0.4m
Number of coils	2 in one cryostat
Coil pitch	1.8m
Coil dimension length×width	1.55m×0.3m
Ampere turns	250 kAT/coil
Persistent current switch	mechanical

Test track

Total track length	480m
Track coil pitch	0.67m
Track coil dimension length×width	0.48m×0.33m

LSM の電力供給、制御に関する実験も行なわれており、車体構造、車両に対する空気力学的な研究も合わせて、一つの鉄道として総合的な成果が得られるよう研究開発が進められている。しかしこのような研究が進み出すまでには超電導磁気浮上の可能性を示す多くの実験が必要であった。

これからの研究開発

超電導磁気浮上列車の個々の装置の研究開発はかなり進み、起動、浮上開始、浮上走行（最大 60 km/h）、着地、停止の実験も行なわれ、解析も進んできたので、前々から計画中であった 7 km 実験線の計画を 1974 年 6 月に発表した。

この実験線は、実規模に近い条件で超電導磁気浮上

LSM 推進による 500 km/h までの可能性を確認するために計画されたものである。場所は九州の宮崎県宮崎市の北にある日向市と都農町にわたって現在の日豊線とほぼ平行したところである。

実験線は高架構造とし、ほぼ直線で平坦であり、延長約 7 km でありガイドウェイの構造は逆 T 型を採用した。逆 T を採用した理由は主として案内力を受けるガイドウェイの強度と Null flux, LSM の配線を考慮したためであって、実用車において逆 T 型を採用すると決めたわけではない。また、この逆 T の中央部は取外し可能で、別構造の実験も行なえるよう配慮されている。

実験は地元をはじめ、多くの人達の協力によって 1977 年の春から始めたいと思っている。この実験は大きな意義を持っており、この結果によって、超電導磁気浮上列車の将来が左右されると考えられる。もし、これで更に GO の決断が下れば、25 km 以上の実験線が建設され、実規模の実験が繰返されることになる。したがって、現在は、この 7 km 実験線計画の実施が最重要な課題となっている。

しかし、この実験線計画促進と併行して行なわねばならない研究開発もあり、これらの促進も欠かせないものである。例えば超電導磁石について、線材、巻線コイルの冷却方式、AC shield, damping, 超電導コイル支持材、断熱方式、励磁方式安全装置などを総合的に考慮し、経済的で信頼度が高く保守の容易なものを開発することである。冷却システムについては He の車上クローズドシステムが考えられている。さらに研究の進んだ封じ切りクライオスタットを使用し thermal shield を LNe などで冷却する車上 Ne/He クローズド冷却システムも考えられているが、実用車に最適なシステムを開発する必要がある。7 km 実験線では走行中も He 放出を認めない考えで進めているから、封じ切り方式か、車上の軽量 Compressor でガスを回収する方法が採られるように

Fig. 5 Test device for LSM propulsion and null-flux guidance (rotaing type)

Speed	150 km/hr
Lateral displacement	± 100 mm
Vertical displacement	0-50 mm
Superconducting magnet	
Cryostat dimension length $\times$ width $\times$ height	1.6m $\times$ 0.25m $\times$ 10.4m
Number of coils	2 in one cryostat
Coil pitch	0.7m
Coil dimension length $\times$ width	0.6m $\times$ 0.3m
Ampere turns	250 kAT/coil
Normal conducting coil discs	
Number of discs	2
LSM propulsion coil	
Number of coils	18/disc
Coil pitch	0.468m
Coil dimension length $\times$ width	0.4m $\times$ 0.3m
Distance between coil center faces	0.5m
Guidance coil	
Number of coils	30/disc
Coil pitch	0.281m
Coil dimension length $\times$ width	0.22m $\times$ 0.3m
Distance between coil center faces	0.58m

なるであろう。さらに冷凍液化機の開発が進めば車上クローズドシステムの実験も 7 km 実験線で行ないたい。

推進については LSM を使用することで研究開発を進めており、その速度制御に周波数変換器が考えられている。何らかの理由により駅中間で停止する場合を考えると、この制御装置を全線にわたって列車数に応じただけ設置する必要がある。輸送量が多ければ、これだけの設備を設けても経済的に成立する。しかし、駅間での非常停止に対して同期速度まで加速可能な方法が考えられれば、駅中間は固定周波数運転でもよいことになる。このような加速方法の研究や全列車に対する制御システムの研究開発は今後の実験の進展とともに進めねばならない。

超電導磁気浮上では磁気抗力が低速時に最大値を示すが、この最大値に対する対策を含め磁気抗力の速度特性をさらに究明するとともに、低速時の補助支持案内装置、非常用支持案内装置などの開発を続ける。

超電導磁気浮上 LSM 推進とした時、車上で大電力を消費するものはないが、車内の空調、照明、通信、冷却装置などに動力源が必要である。

磁場が生体に及ぼす影響について研究が続けられているが、これにはかなりの時間が必要であり、十分な資料が得られるまでは、余裕をみた磁気遮蔽が必要である。したがって許容磁場の特性、それに応じた軽量磁気遮蔽装置の研究開発が今後にも必要である。

むすび

以上、現在までの研究開発経過と現状、これからの研究開発の代表的なものについて述べた。最初の調査研究から10数年、そして超電導磁気浮上リニアモータ推進の発表をしてから5年が経過したが、超電導磁気浮上列車こそ将来の交通機関を約束するものであるとの確信をますます強めるに至った。しかもこの鉄道は従来からの鉄道と同じく総合システム

であり、多くの新しい技術が必要である。このことは逆に、超電導磁気浮上列車の開発によって、エネルギー、発電、送電、通信などに新しいシステムが開発されて、低温の新分野を開く引金となるであろう。

現在、我が国では騒音、振動、空気汚染などの公害対策が強く要望されており、この要望に応じて、JNR のプロジェクトの名称も超高速鉄道から浮上式鉄道と変わり、速度も 500 km/h のみでなく、さらに低い速度域も含めて研究開発をすすめている。このような情勢は筆者に「何故、もっと早くこの鉄道を開発しなかったか」との声があることを紹介すれば理解されるであろう。

終るにあたり、超電導磁気浮上列車を早くから提案された、Dr. James R. Powell と Dr. Gordon R. Danby に敬意を表し、また心のこもった激励、御意見を頂いた内外の皆様に感謝します。