特 集

極低温利用テクノロジー

③ 超伝導技術の輸送機器への適用*

森 田 洋 昭**

Superconductivity Technology Applications for Transportation Systems*

by Hiroaki Morita**

キーワード：超伝導，輸送機器，磁気浮上列車，電磁推進船，リニアエレベータ

1. は じ め に

超伝導は小型・軽量で大出力の推進装置を開発する上で可能性の大きな技術と考えられ，応用研究の早い段階から輸送機器への適用が取り上げられてきた。

超伝導輸送機器として最も実用化に近いものの一つに超伝導磁気浮上列車がある。現在山梨リニア実験線が建設中である。さらに，スクリューが無く電磁力による推力を直接海水に与えて進む超伝導電磁推進船「ヤマト1」の航走試験が1992年に行われた。ここでは超伝導磁気浮上列車，超伝導電磁推進船，さらに，超伝導リニアエレベータを例に超伝導応用の現状及び将来展望を述べる。

2. 超伝導磁気浮上列車

超伝導磁気浮上列車のアイデアは1966年に米国のJ. R. PowellとG. R. Danbyによって提唱された。非接触で走行するため騒音公害が少なく高速走行に適した特性を持つ。日本では旧国鉄で新幹線後の都市間超高速・大量輸送システムとして開発が始められた。現在は宮崎県にある実験線で走行実験を実施しているが，山梨県に新たな大規模実験線が建設中であり実用化の見込みを得ることが期待されている。

2.1 磁気浮上列車の原理と超伝導技術

図1に磁気浮上列車のガイドウェイとコイル構成を示す¹⁾。車両に永久電流で運転される超伝導磁石を搭載し，ガイドウェイには浮上のための短絡した

コイルと推進のための電機子コイルを配置する。ガイドウェイの浮上コイルには超伝導磁石の移動に伴う磁束変化により電流が誘起される。この誘導された電流と超伝導磁石との間で浮上力が発生し，車両を支持する。この方式は誘導反発型磁気浮上方式(EDS: Electro Dynamic Suspension)と呼ばれる。超伝導磁石はリニア同期モータ(LSM: Linear Synchronous Motor)の界磁ともなり，ガイドウェイの電機子コイルに3相交流の電流を通電すること

図1 磁気浮上列車システムの断面

図2 超伝導磁石の構成

*原稿受付 平成7年2月6日

**非会員 三菱重工業(株) Non-Member Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

表 1 超伝導磁石の主要諸元

磁 石	寸法	5.4 m(L) × 1.17 m(H)
	重量	1500 kg
	He タンク容量	60 リットル
超伝導 コイル	起磁力	700 kA
	極ピッチ	1.35 m
	数	4
内槽部	熱侵入量	4 W

により発生する移動磁界に同期した推進力を発生する。この地上一次方式では推進のためのエネルギーはガイドウェイのコイルに供給されるために、車両側での集電は不要であり、高速走行に好都合である。

磁気浮上列車用超伝導磁石に対しては車上に搭載して使用するため小型・軽量、低熱侵入、電磁外乱や振動に対する安定性・耐久性、および車載ヘリウム冷凍機を含めての高信頼性等厳しい特性が要求される。超伝導磁石の構成を図 2 に示す。四つのレーストラックコイルがステンレス容器中に配置され液体ヘリウムに浸漬されている。液体ヘリウムは上部の冷凍機を備えた液体ヘリウムタンクから供給される。表 1 に磁石の主な諸元を示す。超伝導コイルは NbTi 多芯線で巻かれているが、その小型・軽量化のために超伝導線材に銅比（安定化銅と超伝導体の割合を示す値）が低いものを採用する、エポキシ含浸コイルを開発する等の努力がなされている。また、クライオスタットも小型・軽量化、熱侵入量の低減化のため構造、材料等の改良が図られている。

一方、軌道側に配置されるコイルは常電導コイルであるが軌道全長にわたって配置されるので、価格を極力下げることが重要課題となっている。また多数のコイルの信頼性確保も要求される。

2.2 開発の経緯と現状

我国では旧国鉄が超伝導磁気浮上列車の研究開発に着手し 1972 年には超伝導磁気浮上走行に成功している。1977 年には全長 7 km の国鉄宮崎浮上式鉄道実験センターが設置され 1979 年 12 月に時速 517 km/h の世界最高速度記録を達成した。この時点ではガイドウェイ断面形状は逆 T 字形であったがその後人が乗れる構造にするため U 字形に変更され、1987 年には有人走行での世界最高速度 400 km/h を達成した。この様に数々の輝かしい成果を出し超伝導磁気浮上列車の研究開発は世界をリードしており現在は鉄道総合技術研究所に引き継がれ実用化に向けた試験が行われている。

さらに 1989 年には新実験線を山梨に建設するこ

とが決定され現在鉄道総合技術研究所、日本鉄道建設公団および東海旅客鉄道により 42.8 km の大規模実験線が建設中である。山梨リニア実験線では 2 編成の連接方式（隣接する車両の間に台車を配置する方式）のフルスケール車両により 500 km/h での安定した走行を含む多くの試験が計画されている。

2.3 海外の開発動向

超伝導磁気浮上列車の研究開発は西ドイツ、アメリカ、カナダ等で行われてきた。西ドイツでは直径 280 m の試験路線が作られ時速 200 km/h を越える走行実験に成功している。しかし、現在計画は中断され代わりに常電導磁石による磁気浮上列車「トランスラピッド」の開発を進めている。一方アメリカでは磁気浮上列車をマグレブ (MAGLEV: magnetic levitation) と称して研究開発を行ってきたが 1975 年に開発を一端中止している。しかし日本およびヨーロッパでの高速鉄道の成功に刺激され 1990 年に再開した。アメリカでの磁気浮上鉄道開発は自動車交通あるいは短距離航空機輸送の代替として位置付けられている。NMI (National Maglev Initiative) では 4 チームによる各々の構想設計を報告している²⁾。

2.4 今後の展望

超伝導磁気浮上列車は騒音公害の少ない超高速、大量輸送手段として 21 世紀の交通システムの一翼を担うことが期待されている。今後山梨リニア実験線では 1997 年本格的な走行実験開始、その後に実用化の見極めが予定されている。実用化に向けて良い成果が望まれる。

3. 超伝導電磁推進船

超伝導を推進装置に応用した船の形式には「超伝導電気推進船」と「超伝導電磁推進船」とがある。超伝導電気推進船は超伝導電動機によってスクリュプロペラを駆動する方式の船舶であり従来の電気推進船の持つ操船性の良さ、機器配置の自由度などの長所に加え、推進用電動機の超伝導化による小型・軽量化が可能になり排水量の低減、積載重量の増加、船速の増加などが期待できる。一方、超伝導電磁推進船は、推進力を発生するのに従来船のようにスクリュプロペラを使用しておらず、スクリュプロペラに起因する問題、制限が解決され、電磁力を直接利用することからくる長所を備えた優れた特徴を持つ船舶となる。その特徴は次のようなものである。

(1) 推進装置本体に、機械的な回転機構が無いため、

全く振動や騒音が無く、また、保守・管理が容易である。

- (2) キャピテーションの発生がなく理論的に高速航行に適した推進方式である。
- (3) 速度制御が容易でかつ瞬発力の発生も可能である。
- (4) 船尾部に船体を通する回転軸が無いため、船尾形状の設計に大きな自由度を持たせることができる。

超伝導電気推進船、超伝導電磁推進船ともそれぞれ優れた特徴を持つがここでは超伝導電磁推進船について紹介する。

3.1 電磁推進の原理と超伝導技術

フレミングの左手の法則に基づき発生する電磁力を直接推進力に利用したものである。すなわち、図3に示すように船体に固定した超伝導磁石により強力な磁場を作り、その磁場と直角方向に海水中に電流を流すと、海水に電磁力が発生し、その反力によって船が進む。電磁推進船は少ない海水電流で大きな推力を得る必要があり、超伝導磁石が発生する強力な磁場があって初めて実現するものである。電磁推進の方式は、磁場の種類が直流か交流かによって、また、磁場範囲が船内に設けたダクト内か船体外かによって分類される。

超伝導電磁推進船の推進装置は超伝導磁石と海水に電流を流す電極よりなるが、超伝導ダイポールマグネットを用いた直流内部磁場型電磁推進装置を例に構成要素を説明する。

超伝導磁石は2個の鞍型コイルを円筒状のパイプ

の外側上下に取付け、コイルの外径側をコイル押えで拘束する構造となっている。鞍型コイルと超伝導磁石の外観を図4および図5に示す。超伝導電磁推進装置の実用化には超伝導磁石の高磁場化、大口径化および全体として小型・軽量化が開発課題になる。すなわち、推力は、海水電流が一定の場合、磁場の強さに比例しかつ推力の作用空間で磁場が一定の場合は作用空間の体積に比例するためである。これには高磁場用線材の開発、強大な電磁力に抗して健全

図4 鞍型コイル

図5 超伝導磁石

図3 電磁推進船の原理

図6 海水管の断面

な磁石構造の開発等が必要となる。また、船体に搭載するため小型・軽量化が当然要求される。

電極は強化プラスチック製の海水管の内側に対向するように取付けられる。その海水管は超伝導磁石の内部に磁場と海水電流が直交するように挿入される。海水管の断面を図 6 に示す。

3.2 開発の経緯と現状

電磁推進船開発の歴史は、1961 年にアメリカの A. Rice が取得した特許³⁾に始まる。これは液体金属電磁ポンプの逆発想により電磁推進の原理を提案したものである。電磁推進の超伝導化を初めて提案したのはアメリカの L. R. A. Doragh⁴⁾であるが、まだ超伝導技術が発展していない時代であり超伝導電磁推進の実験は 1976 年、日本の佐治等(神戸商船大学)による実験が最初となる⁵⁾。

1985 年より超伝導電磁推進船の実用化の可能性を実船レベルで検証する試みが、シップ・アンド・オーシャン財団にて始められた。シップ・アンド・オーシャン財団では「超伝導電磁推進船開発研究委員会」(委員長: 笹川陽平氏)を発足させ船体と推進装置の両面から研究開発を開始した。超伝導磁石及びその周辺技術、最適船型の開発等を実施した後、実験船「ヤマト 1」の建造に着手し 1992 年海上航走に成功している。「ヤマト 1」の詳細は本学会誌⁶⁾に報告済なので説明を省略する。

3.3 海外の開発動向

超伝導電磁推進船の研究開発は主として日本及びアメリカで行われている。現在実験船の建造を行っているのは日本のみで、アメリカは理論研究、モデル実験、設計検討にとどまっている。しかし、超伝導磁石を有するフローループを用いた試験が精力的に行われている。また、日本における開発は「ヤマト 1」に代表される海上船を対象としているのに対し、アメリカでは潜水船が主な対象となっている。その他、ロシア、フランス、イタリア等で研究が行われている。

3.4 今後の展望

電磁推進船は静粛性、高速性に特長があるが将来実用船となるには現状の推進装置に比べ推力を上げることが必須である。それには、磁石の高磁場化、大型化、軽量化が開発課題となる。また、船体に関しては高速に適した船体形状、軽量化、ダクトの最適化等の検討が必要であろう。さらに、海水の電気伝導度の向上という側面からのアプローチも必要となってくる。シップ・アンド・オーシャン財団では、

超伝導電磁推進船の性能向上に関する研究を引き続き実施中である。

4. 超伝導リニアエレベータ

現在のロープ式エレベータはかごと釣合おもりをロープで結合し、ロープを綱車で駆動するものであるが、垂直移動距離が増大するとロープの自重のため使用ロープ本数が飛躍的に増加しエレベータとして成立しなくなる。経済的なエレベータシステムとして現実性のあるのは垂直移動距離が 500 m 程度までであると言われている。今後予定される超高層ビルや、大深度地下施設における垂直搬送システムとしてリニアモータで駆動するリニアエレベータが、ロープ式エレベータに代わるものとして最有力である。

4.1 リニアエレベータの原理と超伝導技術

リニアモータの駆動方式はかごに一次側(電機子)を搭載するかご一次と昇降路に一次側を設置する昇降路一次方式に分けられる。かご一次方式はかごに重量物の搭載が必要で上昇時の所要電力が大きくなり好ましくない。従って、昇降路一次方式が基本と考えられている。超伝導リニアエレベータの構成・原理を図 7 に示す。超伝導磁石を装備した搬送カプセルと、その外周に垂直配置した常伝導磁石(3 相励磁)からなり、この常伝導磁石が発生する磁場(B)と超伝導磁石に流れる電流(I)の相互作用として発生するローレンツ力(F)が上昇推力となる。常伝導

図 7 超伝導リニアエレベータの構成・原理

図8 超伝導リニアエレベーターの実用構想図

磁石の電流と周波数を可変とする電源装置を用いて推力及び速度を自由に制御することができる。超伝導リニアエレベーターは大きな推力を発生することができ大重量物の搬送に適する。

4.2 開発の経緯と現状

動力炉・核燃料開発事業団と三菱重工業（株）が1988年より共同で、1000 m以上の深地層へ大型かつ大重量物を垂直搬送するシステム開発を狙いとして超伝導リニアエレベーターの開発に取り組んでいる。超伝導磁石を用いた基礎実験装置を開発し、搬送重量25 kg、搬送移動距離3.6 m、速度2 m/s、停止精度 ± 1 mm、を実証した⁷⁾。現在さらに、実用化に向けた開発が進められている。ケーススタディの結果として定員24人の超伝導リニアエレベーターの検討例が報告されている⁸⁾。その実用構想図を図8に示す。

4.3 今後の展望

超伝導リニアエレベーターは高速・大量輸送および大重量物の垂直搬送に適した特徴を持っている。1シャフト内で複数個のかごを運転することができ追い越し、退避も可能である。また、垂直方向だけでなく水平、斜め方向の移動も可能である。超伝導リニアエレベーターは優れた特徴を持つが実現にはリニ

アモータの小型・軽量化、高効率化に加え電力回生の研究、安全システムの研究等が必要である。

5. 超伝導輸送機器と溶接

輸送機器は性能向上のため推進装置の高出力化はもちろんその小型・軽量化、および車（船）体の軽量化が要求される。軽量化に向けて材料面ではアルミニウム合金、FRP（繊維強化プラスチック）等の選択がなされ、構造面では薄肉構造を基本として剛性を持つ工夫がなされている。溶接に際しては構造・強度の健全性を保つよう施行する必要がある。さらに、変形を小さく抑えるため溶接入熱を少なくし拘束治具等の工夫が必要である。溶接法としてはEBW、TIGが通常用いられる。超伝導推進装置の多くは超伝導コイルがクライオスタットに収納された構成となっているがクライオスタットの溶接部に対しては真空リークの原因となる欠陥があってはならないし極低温に晒される部材は極低温での強度、延性、靱性等の使用状況を考慮したデータが必要となる。超伝導コイルに特有の問題として超伝導材に与える熱影響も事前に検証しておく必要がある。代表的な超伝導材であるNbTiは約400°C以上の熱が加わると性能が劣化する。その他、コイルにははんだ接合部、電気絶縁材、さらにセンサ、計測線等の熱影響を受けやすいものもあるのでコイルまたはその近傍での溶接作業には注意を要する。また、クライオスタットにも熱絶縁材（FRP、スーパーインシュレーション等）のように熱影響を受けやすい部材を使用するので注意が必要である。

超伝導線材の接合には通常はんだ接合が使用されているが、電気抵抗の低減および接合部のコンパクト化の目的より超伝導線材の突き合わせ溶接（冷間圧接、加熱圧接等）の研究が行われ一部採用されている。

6. おわりに

超伝導磁気浮上列車、超伝導電磁推進船、超伝導リニアエレベーターについて紹介したが、超伝導の輸送機器への適用は実験段階のものや構想段階のものを加えると多方面にわたり提案されている。例えば超伝導電気自動車、超伝導スペースプレーン発射装置、超伝導ヘリコプター等、陸（地中）に海（海中）に空（宇宙）に輸送システムの検討がなされている。

さらに、高温超伝導が実用化されればその効果は

非常に大きなものがある。現状では液体窒素温度レベルで強い磁場を発生する高温超伝導材を用いた磁石の実現見通しは得られていないが実現すればシステムの改善に役立つようになる。高温超伝導材の開発を注視していく必要がある。

超伝導輸送システムが社会生活を支える 21 世紀の超伝導都市の実現を期待する。

参 考 文 献

- 1) H. Ohsaki, S. Torii, K. Higashi and E. Masada, "Damping Characteristics of the Superconductive Maglev Vehicle", Advances in Superconductivity VI (ISS'93), 1293 (1993).
- 2) D. M. Rote, "Status of U. S. Maglev Program", Advances in Superconductivity VI (ISS'93), 37 (1993)
- 3) A. Rice, "Propulsion System", U. S. Patent, 29970 (1961-8-13).
- 4) L. R. A. Doragh, "Magnetohydrodynamic Ship Propulsion Using Superconducting Magnet", SNAME Annual Meeting, New York, (1963-11), 14.
- 5) Y. Saji, M. Kitano and A. Iwata, "Basic Study of Superconducting Electromagnetic Thrust Device for Propulsion in Sea-water", Adv. Cryo. Eng., 23 (1978), 159.
- 6) 坂井, 松山, 南, 竹澤, "超電導電磁推進船ヤマト 1", 溶接学会誌, 第 61 巻第 7 号, 1992 年 10 月, P 592
- 7) 島本, 早川, 上城, 衣笠, "超電導垂直リニアモータ", 平成 3 年電気学会全国大会
- 8) 坂井, 山中, 早川, 上城, 衣笠, "超電導エレベータ", 第 4 回シンポジウム電磁力関連のダイナミックス講演論文集, 1992 年 6 月 10~12 日, P 101

溶接に関する国際行事の御案内 (1995)

会 議 名	日 時	開 催 地	会議用語	主 催 (連絡先)
78) ITSC'95 14th International Thermal Spraying Conference & Exhibition: "Current Status and Evolving Trends for the 21st Century"	22-26 May	Kobe JAPAN	English	-High Temperature Soc. of Japan c/o Welding Research Institute of Osaka University 11-1 Mihigaoka, Ibaraki, Osaka 567-JAPAN Fax: +81 .6. 8783110 and -IIW Thermal Spraying Sub-Commission
79) 15°Convegno Nazionale Trattamenti Termici	23-25 May	Salsomaggiore ITALY	Italian	Associazione Italiana di Metallurgia (AIM) P. le Morandi 2, 1-20121 Milano-ITALY Fax: +39. 2. 784236
80) International Conference on: "Corrosion in Natural and Industrial Environments: Problems and Solutions" and Exhibition	23-25 May	Grado ITALY	English Italian	Nace Italia Secretariat, c/o Omeco via della Taccona 26 20052 Monza (MI)-ITALY Fax: +39. 39.736433
81) Australia's Laser Applications Seminar	24-25 May	Melbourne AUSTRALIA	English	tel: +61. 2. 7484443
82) 25 Years Jubilee Conference of ISIM Timisoara: "Achievements and Perspectives in the Field of Welding and Material Testing" and Exhibition	24-26 May	Timisoara ROMANIA	Romanian English	ISIM Timisoara Bd. Mihai Viteazul Nr. 30 RO-1900 Timisoara ROMANIA