

Techno Scope

2002年12月に開通した上海リニアモーターカーは世界初の実用化をめざしている。
(写真提供:サーナ&CNSPHOTO)

実用化、間近にせまる 超高速リニアモーターカー

2002年12月31日、中国・上海でリニアモーターカーが開通した。

現在は試験運行中だが、本格的な運行に至れば、世界初の商用リニアモーターカーの誕生となる。

この大きなニュースを受け、現在リニアモーターカーの開発動向が世界中の注目を集めている。

リニアモーターカーはリニアモーターを駆動に用いた列車で、

大きく分けて車輪支持方式 (例えば都営大江戸線などのように車輪とレールで支持し、

推進のみリニアモーターで行うシステム) と磁気浮上方式がある。

今回は、高度化が可能な磁気浮上式のリニアモーターカーについて、

超電導磁石や地上設備など、実用化へのキーテクノロジーとなる要素を紹介する。



上海リニアモーターカーの起・終点となる上海・竜陽路駅

上海で実現が待たれる、商用リニアモーターカー

中国・上海に開通したリニアモーターカーは、浦東国際空港と上海市内の区間31kmを結ぶ。最高時速は430km/hで、同区間の所要時間は約8分である。発車後、約3分30秒で最高時速430km/hに達し、その後減速を始め、瞬間に到着する。

上海のリニアモーターカーは、ドイツのトランスラピッドインターナショナル社が上海リニア交通発展有限公司と契約し、2001年3月に着工、22か月の工期を経て完成された。現在は試験運行中であるが、報道によると、上海リニア交通発展有限公司は、2003年10月には正式運行を開始すると発表している (中国新聞網2003.2.19)。

中国政府は今後、2008年の北京オリンピック開催に向け、北京―上海間約1,300kmにも高速鉄道を建設する予定で、これには日本の新幹線、フランスの高速鉄道 (TGV*1)、ドイツのリニアモーターカー (トランスラピッド) と高速鉄道 (ICE*2) 等が採用の候補に上がっている。世界中の関心が上海に集まるなか、リニアモーターカーの開発動向にも今再び注目が集まっている。

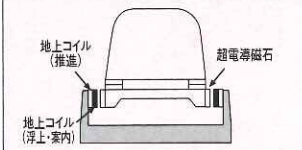
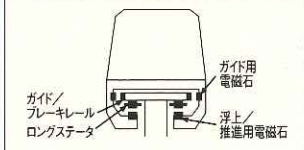
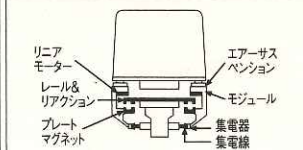
*1 Train Grande Vitesse *2 Inter City Express

常電導・超電導リニアの比較

リニアモーターカーとは、リニアモーターを駆動に用いた列車である。リニアモーターの基本的な構造は、通常の回転形モーターを切り開いて真っ直ぐにし、回転部分と固定部分を分け、この一方を地上側に固定し、他方を車両側に固定したものである。電力を供給する側 (一次側) の極性 (N極、S極) を制御することにより、前方に進む推進力を得る。磁気浮上方式のリニアモーターカーは、これにさらに電磁力を利用してガイドウェイ (在来鉄道の軌道にあたる) と接触することなく浮上して走行する。浮上走行に必要な、車両重量を支える支持力、左右に振れず進行方向を定める案内力、そして前方へ進める推進力の3つの力を、すべて電磁力により発生させ、走行させる。

特徴は、ガイドウェイと非接触であるため、急勾配や悪天候による車輪の空転、滑走がないこと、電磁力の制御によりいつでも高速から停止することができ安全性が高いこと、在来鉄道の

■常電導・超電導リニアモーターカーの比較

				
		日本・鉄道総研・JR東海等(山梨実験線)	ドイツ・トランスラピッド(エムスランド)	日本・中部HSST開発(リニモ:東部丘陵線)
磁石		超電導磁石	常電導磁石	常電導磁石
システム	支持方式	超電導電磁誘導 吸引反発・磁気浮上(側壁浮上)	吸引・磁気浮上	吸引・磁気浮上、案内
	案内方式	超電導電磁誘導 吸引反発・磁気案内	吸引・磁気案内	
	推進方式	地上1次 リニアシンクロナスモーター	地上1次 リニアシンクロナスモーター	車上1次 リニアインダクションモーター
実用速度		500km/h程度	400km/h程度	100~200km/h程度
試験最高速度		552km/h	450km	308km
断面				

ようなレール・車輪やパンタグラフから発生する騒音も抑えられること等である。また日本で実験が行なわれている超電導リニアモーターカー(山梨実験線)は、超高速走行を得意としており、在来のレール・車輪方式鉄道の営業最高速度が350km/h程度といわれているのに対し、山梨実験線では営業速度500km/hをめざし、実験速度は世界最高速度となる552km/h(ギネス記録1999.4)を達成している。

リニアモーターカーには様々な種類があるが、使用する磁石の種類により、大きく2種類に分けられる。一つは、通電時のみ磁界が発生する常電導磁石を使用したもので、ドイツ・トランスラピッドによる上海のリニアモーターカーや日本・名古屋の中部HSST開発(株)による実験線などに採用されている。もう一つは、臨界温度で電気抵抗がゼロになる超電導現象を利用した超電導磁石を使用したもので、日本・(財)鉄道総合技術研究所・JR東海等による山梨実験線がこれにあたる。超電導リニアモーターカーは他国でも研究開発が進められているが、実車を用いた有人高速走行試験を実施しているのは日本のみである。

二つのリニアモーターカーのうち、常電導磁石を用いたリニアモーターカー(常電導リニアモーターカー)は、磁石の構造が比較的シンプルで、それを用いたシステムも構築しやすく、実用化しやすいという利点がある。

一方、超電導磁石を用いたリニアモーターカー(超電導リニアモーターカー)は、強力な磁石を用いるため、一般的な常電導リニアモーターカーが約10mmの浮上高さをとるのに対し、約100mmの浮上高さを確保でき、この十分な浮上高さがさらなる超高速域での安定走行を可能としている。山梨実験線では、今後570~580km/hの超高速走行をめざした実験等も予定している。超電導リニアモーターカーは、超高速走行が可能であるという点において優位性を示す。

日本初の商用磁気浮上式リニアモーターカー
2005年3月「リニモ」が運行開始

中部HSST開発(株)の開発による常電導リニアモーターカーが、「リニモ(東部丘陵線)」として、愛知高速交通(株)により運行を開始する。リニモは、日本初の本格的な商用リニアモーターカーであり、名古屋市名東区藤が丘と豊田市八草町間約8.9kmを、所要時間15分、最高速度約100km/hで結ぶ。

今回のリニアモーターカーの導入にあたって、いくつかの鉄道方式が検討されたが、①急勾配な地形に対応できること②経済性に優れていること③加速性に優れ乗心地がよく、また騒音、振動の影響が小さいこと等が考慮され、リニアモーターカーに決定された。

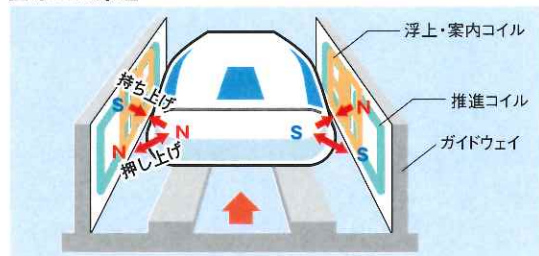
2005年3月から愛知県で開催される日本国際博覧会(愛・地球博)の会場アクセスとしても利用が期待されている。



吸引・反発力により浮上走行する超電導リニア

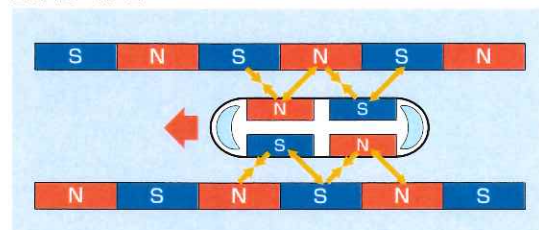
超電導リニアモーターカーは、超高速走行が可能な上、強力な超電導磁石を使用するため、約100mmの浮上高さをとることができ、地震時にガイドウェイに多少の変形が生じて、十分な浮上高さからガイドウェイに衝突する危険性が低く、地震時の振動に対して安全である。

■浮上の原理



車両が通過すると、車両のSCMと浮上・案内コイルとの間に、反発力と吸引力が発生し、浮上する

■推進の原理



車両を走行させる一定区間の推進コイルに電流を流すと、ガイドウェイ内に移動磁界が発生する。車両に搭載されたSCMがこれに吸引・反発することにより推進する。

日本ではこのような点や、未知の要素が多い超電導方式の開発を推進することにより、他分野への波及効果が大いこと等が考慮され、1962年から国鉄で超電導リニアモーターカーの開発が始まった。宮崎実験線、山梨実験線の本格的な走行実験を通じ、2000年には当時の運輸省「超電導磁気浮上式鉄道実用技術評価委員会」から「長期耐久性、経済性の一部に引き続き検討する課題はあるものの、実用化に向けた技術上のめどは立ったものと考えられる」との評価を受けている。

それではリニアモーターカーはどのようにして浮上走行するのであろうか。ここでは世界最高速を実現した、山梨実験線の超電導リニアモーターカーのシステムについて説明する。

システムの構成は、ガイドウェイの側壁内側に浮上・案内コイルと推進コイルの2種のコイルを2層に設置し、車両に超電導磁石を搭載している。

浮上の原理は、ガイドウェイに設置されている8の字型をした浮上・案内コイルの前を、車両に搭載された超電導磁石が通過すると、誘導電流が流れ、コイルが電磁石となる。そして8の字型の下側のコイルが車両の超電導磁石と同極になり、反発力が発生し車両を押し上げ、一方、上側のコイルが異極となり、吸引力が発生し車両を持ち上げ、浮上するという仕組みで、少ない誘導電流で大きな浮上力を発生させることが可能となっている。

以前は、ガイドウェイ底面に浮上コイルを設置し、その反発力を利用して車両を浮上させる方法がとられていたが、山梨実験線からはこの側壁浮上方式を採用している。

浮上力を与えただけでは車両は安定しないため、左右方向



極めて長い先頭形状を持つ山梨実験線新型車両は、500km/hという超高速域における空力特性の向上を追求している。



1972年、超電導磁石を用いたリニアモーター推進により、世界初の電磁誘導浮上走行に成功(ML100 東京)



1987年、有人による走行で400.8km/hを達成(MLU001 宮崎)



1999年、有人による走行で世界最高速度552km/hを記録(MLX01 山梨)

にずれないように車両を支持する、案内力が必要となる。案内の原理は、左右の浮上・案内コイルを接続(ヌルフラックス接続)しておくことにより、車両が中央から左右にずれた場合、コイルに誘導電流が流れ、コイルが電磁石となり、その結果反発力・吸引力が生じ、車両を中央に押し戻す力が働く。

推進の原理は、推進コイルに電流を流すことにより磁界が発生し、車両の超電導磁石との間で吸引力と反発力が生じ、車両が前に進むというものである。

実用化へのキーテクノロジー、超電導磁石

超電導リニアモーターカーの核となる技術は、超電導磁石(SCM、Super Conducting Magnet)である。SCMは超電導現象を利用した強力な電磁石である。

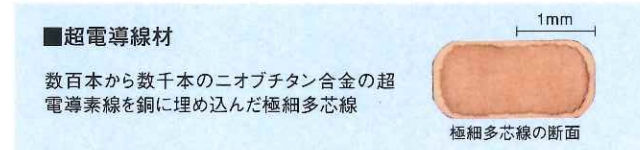
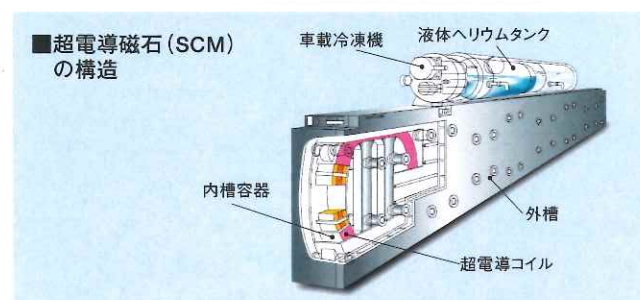
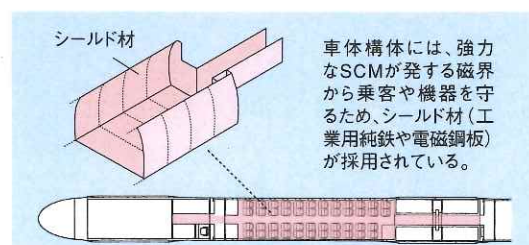
山梨実験線のSCMの構造は、外槽と呼ばれる容器の中に内槽があり、内槽の中には、超電導コイルが固定されると同時に、液体ヘリウムが浸され4.2K(−269℃)の極低温に保たれている。

超電導コイルはニオブチタン(Nb-Ti)合金が使用されている(超電導体についてはコラム参照)。

車両に搭載されたSCMは、走行中、磁束の動きにともなう微小な発熱等を起こし、超電導状態が常電導状態になるクエンチ現象を起こしやすい。そこで、ニオブチタン合金の極細多芯線を銅母材に埋め込み、銅による放熱でクエンチ現象を抑

えるという方法がとられている。最近では、軽量化を図るため、銅の量を抑え、より細い超電導線を用いている。

車両にも強力なSCMを搭載するための工夫がみられる。客室を覆う車両構体には、SCMが発する磁界から乗客や機器



高温超電導体の研究

1911年に、水銀についての超電導現象が発見されてから、長く研究が重ねられ、1950年代以降に、Nb-Ti合金、Nb₃Snなどが実用化された。Nb-Ti合金は、Nb₃Snよりも10年近く発見が遅れたにもかかわらず、その臨界電流密度の高さと加工性の良さから最も実用化が進んでいる。

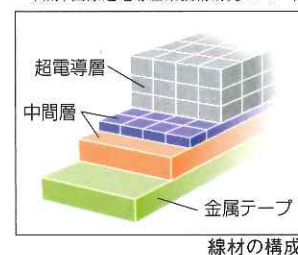
しかしこれらの材料は、臨界温度が極低温(4.2K)で、コストが高い液体ヘリウムで冷却しなければならないという難点がある。1986年以降、銅、バリウム、ストロンチウム、希土類元素などを含む酸化物が、はるかに高温で超電導状態になることが発見された。これらの酸化物高温超電導体*3の臨界温度は100Kを超え、安価な液体窒素による冷却で超電導状態になる。臨界温度が4.2K(液体ヘリウム温度)から77K(液体窒素温度)になることで、冷却エネルギーは、およそ1/50に抑えられると言われ、他分野への波及効果が期待される。

しかし実用化には多くの問題が山積しており、臨界温度だけでなく、臨界電流、臨界磁場も大きくなければ、超電導体を有効に利用することは難しい。また、磁性材料をつくるための成形

や加工も重要な課題となっており、線材開発をはじめとして積極的に研究が進められている。

(財)国際超電導産業技術研究センターは、2003年6月、超電導線材の新しい作製法を開発

■酸化物高温超電導体の線材開発 (財)国際超電導産業技術研究センター



した。この線材は、ハステロイを基材としたテープの上に中間層(Gd₂Zr₂O₇層とCeO₂層)を作製した後、溶媒に溶かした超電導体(YBa₂Cu₃O_y)を塗り、熱処理を施したものである。従来は真空中で材料を気化させて超電導層を作製していたが、この方法により、製造工程を簡素化することができ、コストも大幅に低減できる。中間層は超電導層の結晶方位をそろえる働きをするが、基材となるハステロイ表面に凹凸などがあると、超電導層の結晶方位が揃いにくくなる。そのため平滑度が高く、薄くて強度の高い材料が使用されている。現在までに長さ20cm程度の線材を試作しているが、実用化にむけて500m程度の長尺化をめざすという。

*3 一般的に臨界温度が約25K以下のものを低温超電導体、約25K以上のものを高温超電導体と呼ぶ。

を守るため、シールド材が採用されている。シールド材には工業用純鉄や電磁鋼板が使用され、安全で快適な客室空間を提供している。

この強力なSCMが山梨実験線の試験車両に搭載されながら、これまでに5万人以上が安全に試乗を行ってきた。このように安定した性能を持つSCMが完成するまでに、20～30年の年月がかかったという。超電導リニアモーターカーの開発の歴史はSCM開発の歴史と言っても過言ではない。

実用化段階に向けた研究開発

これまで超電導リニアモーターカーにおける主な開発課題は、SCMの性能向上であったが、最近では騒音や空気振動の低減、乗心地の向上、コスト低減などの実用化技術開発が新たに加わっている。

ガイドウェイは、在来鉄道の軌道と土木構造物の一部に相当するもので、車両を浮上走行させる重要な働きを担っている。山梨実験線ではU型のガイドウェイの側壁内側に地上コイルが設置されているが、その地上コイルの位置に誤差が生じると、振動などが発生し乗心地が低下するため、最も厳しい鉛直方向の狂いにおいては±3mm以下の厳しい精度で設置されている。

ガイドウェイは鉄筋コンクリート製であるが、普通鋼の鉄筋を使用すると、車両の浮上力や推進力に対する磁気抵抗が生じる。そのため、ガイドウェイ、それを支える橋梁の床板やトンネルの路盤、さらには分岐装置にも、高マンガン鋼の鉄筋が使用されている。高マンガン鋼は、透磁率が小さく磁性を帯びない非磁性材料で、強力磁場利用の設備機器等に不可欠な金属である。将来、リニアモーターカーの長距離路線の建設が実現した場合、非磁性鋼の需要が増大することが予想され、今後は非磁性鋼の低コスト化などが求められている。

実用化にむけて大きな課題となっているのが建設コストの低減である。現在、山梨実験線ではガイドウェイ形状の改良や材料の比較検証、浮上・案内コイルと推進コイルの2種類の地上

コイルを一体化するなどの、コスト低減に向けた試みがなされている。全線において敷設されるこれらの地上設備の総量は膨大であり、より効率的な構造や材料の選択等が実現への足がかりとなりそうだ。



高速すれ違い走行試験で相対速度1003km/hを記録(1999年、山梨実験線)



建設コスト低減のため、施工性の高いガイドウェイ側壁の開発が行われている(山梨実験線)

SCMや地上設備などをはじめとして、超電導リニアモーターカーには技術者による挑戦と失敗、試行錯誤と成功が詰め込まれている。それらが飛躍的な性能向上を実現させたことはいうまでもない。個々の材料技術から総合的な実用化技術にいたるまで、日本は世界に誇る技術を蓄積してきた。現在、超電導リニアモーターカーは実用化の最終段階に入っているが、これまで幾多の困難な課題を解決してきた技術力は、実用化というさらに高いハードルをも飛び越える可能性を有している。将来、世界初の超電導リニアモーターカーに乗って行き来する日が来るかもしれない。その移動スピードは、経済をはじめとして社会全体へ、かつてない効果をもたらすだろう。

東京—大阪間が1時間に リニア中央新幹線計画

東京—大阪間を超電導リニアモーターカーによって結ぶという、リニア中央新幹線計画が進められている。これは、東京と大阪を起終点に甲府市、名古屋市、奈良市付近を主な経過地として、超電導リニアモーターカーが時速500km/hで走行するという計画である。実現すれば、東京—大阪間が約1時間で結ばれることになる。

阪神淡路大震災の際、交通機関が寸断され、復旧に大きな影響を及ぼしたことは記憶に新しい。また現在、東海道新幹線の列車本数は1日当たり280本を超えており、輸送状況は逼迫している。このようなことから、東海道新幹線の相互補完交通機関として、振動に対して安全で、速い、超電導リニアモーターカーに大きな期待がかけられている。

沿線の9都府県からなるリニア中央エクスプレス建設促進期成同盟会は、早期実現に向け、国家プロジェクトとしての推進や山梨実験線の未着工区間の建設、高温超電導線材およびSCMに関する技術開発の推進等を課題に挙げている。

中央新幹線は、1973年に全国新幹線鉄道整備法に基づく基本計画路線として位置付けられており、1990年からルート決定の前提となる地形・地質等に関する調査が東京—大阪間の全区間にわたって実施されている。



写真提供:リニア中央エクスプレス建設促進期成同盟会

取材協力: (財) 鉄道総合技術研究所、愛知高速交通(株)、
(財) 国際超電導産業技術研究センター、リニア中央エクスプレス建設促進期成同盟会