

Techno Scope



時速603 kmでの走行試験に成功 (2015年4月21日)

JR東海の超電導リニア車両L0系。L(エル)はリニア (Linear)、O(ゼロ)は新幹線と同じように営業線仕様の第1世代の車両を表している。

リニア中央新幹線に使われる鉄鋼材料

リニア中央新幹線が2014年12月に着工された。2027年に品川・名古屋間、2045年には大阪までの開業を目指し、巨大プロジェクトがいよいよ動き出した。品川と名古屋を40分、大阪まで開業されると67分で結ぶ21世紀版「夢の超特急」超電導リニアモーターカー (以下、超電導リニア) のキーテクノロジーと、リニア中央新幹線建設を支える鉄鋼材料・技術を紹介する。

新しい超高速輸送システムの誕生

超電導リニアの研究は、東海道新幹線が開業する2年前の1962年、国鉄の鉄道技術研究所 (現在の (公財) 鉄道総合技術研究所) で始まった。東海道新幹線の研究開発を進める過程で、レールの上を車輪で走行する鉄道の速度には限界があることが明らかになり、将来的により速度を上げるためには別の駆動方式が必要と考えられるようになった。そこで着目されたのが磁気浮上式鉄道だった。

磁気浮上式鉄道とは、地上の推進コイルに電流を流すことにより、磁界 (N極・S極) が発生して車両の電磁石との間で、N極とS極の吸引力と、N極同士とS極同士の反発力により車両が走行する。そして車両が加速し、車両の電磁石が高速で通過するようになると、地上の浮上・案内コイルに電流が流れて磁石となり、反発力 (車両を押し上げる力) と吸引力 (車両を引き上げる力) が発生することによって浮上する (図1)。

車両の電磁石方式には、常電導と超電導がある。当時の超電導技術は研究段階だったが、高効率で強力な磁場発生が可能のため、常電導よりも浮上高さが大きく維持でき、地震大国の日本に適している。わずかな温度上昇で超電導が維持できな

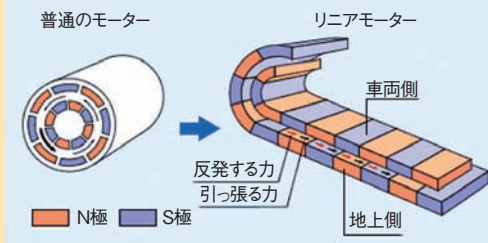
くなるため実用化のハードルは極めて高かったが、より安定した超高速鉄道システムを実現するため、常に大きな空隙の浮上状態を保ち地震の揺れに対応できる特徴を持つ超電導技術の開発が始まった。

「本当に浮くのか」といった声も聞かれるなか、研究開始から10年が経過した1972年、鉄道技術研究所の実験線でついに時速60 kmの有人浮上走行が成功した。そして1987年に宮崎実験線で時速400.8 kmを達成すると、2003年に山梨実験線で世界最高時速581 kmを記録し、2015年には時速603 kmに到達した。

超電導リニアの核となる超電導磁石は、車両の先頭と後尾、車両の連結部に配置された台車 (図2) の左右両側に搭載されている。車両の超電導磁石は、ガイドウェイの推進コイルに電流を流すことにより発生する磁界との間で、推進力を生み出す。その推進力で超電導リニアは時速150 km程度までタイヤで走行する。そして時速150 kmを超える高速時には、接地走行用の4本と、側壁と車両の間を支える4本の計8本のタイヤを航空機のように自動収納し、浮上・案内用コイルから浮上力と左右に揺れることなく安定して走る案内力を受け、地上100 mmで浮上走行する。車体は空気抵抗以外の一切の抵抗を受けないため、航空機並みの速さで多くの乗客を一度に輸送することが可能になる。新しい超高速輸送システムが、日本発の技術で誕生したのだ。

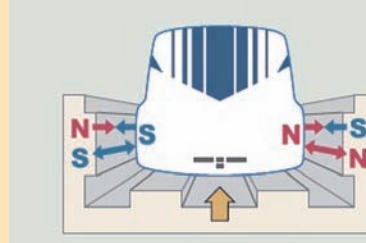
■超電導リニアの原理(図1)

リニアモーターとは



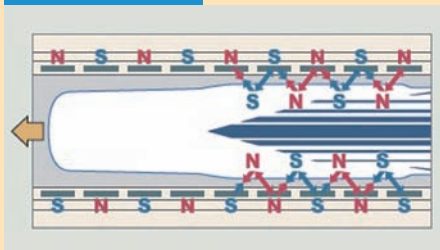
従来の鉄道車両のモーターを直線状に引きのばしたものだ。モーターの内側の回転子が車両に搭載される超電導磁石、外側の固定子が地上のガイドウェイ（軌道）に設置される推進コイルに相当する。

浮上の原理



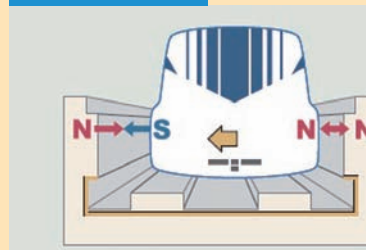
車両の超電導磁石が高速で通過すると、地上の浮上・案内コイルに電流が流れ電磁石となり、車両を押し上げる力（反発力）と引き上げる力（吸引力）が発生し、浮上する。

推進の原理



車両の超電導磁石はN極、S極が交互に配置され、地上の推進コイルに電流を流すことにより発生する磁界（N極・S極）との間で、N極とS極の吸引力と、N極同士・S極同士の反発力により車両が前進する。

案内の原理



左右の浮上・案内コイルは、電力ケーブルにより結ばれ、車両が中心から外れると、自動的に車両の遠ざかった側に吸引力、近づいた側に反発力が働き、車両を常に中央に戻す。

クエンチを克服した超電導磁石

超電導リニアの開発で大きな課題となったのが、超電導磁石の超電導状態をいかに安定的に維持させるかであった。超電導磁石を利用するためには、超電導コイルを極低温に冷やし電気抵抗がゼロになる超電導状態を保つ必要がある。超電導リニアでは、超電導コイルを液体ヘリウムに漬けて、4.2 K (-269 °C) の超電導状態をつくり出している。しかし高速走行による振動エネルギーが熱エネルギーに変わり、液体ヘリウムが蒸発して超電導磁石の温度が上昇することにより、超電導状態が失われる状態（クエンチ）が発生した。クエンチが生じると、電気抵抗が増し、超電導コイルが破損する恐れがある。そのためドイツでは、1978年に超電導磁石による浮上技術の開発を断念し、通常の電磁石による常電導による浮上技術の開発に専念していた。

■台車の位置(図2)



リニアは通常の車両と異なり、連接台車方式を採用している。連接台車では、中間の1つの台車の上に前後の車体がのっている。台車数は通常は車両数の2倍になるが、連接方式では車両数プラス1となる。台車数を減らすことで、製造費や保守費の低減を可能にした。また各車両の両端に超電導磁石を配置することで、長い客室を確保した。

一方、日本では、1997年までにクエンチを克服することに成功し、低温超電導技術を確立した。低温超電導磁石にはニオブチタン (Nb-Ti) 線材を用い、弛みなく直線上にコイルを巻き、ステンレス鋼製の内槽（容器）の内部に固定し、大きな振動が生じないようにした。内槽は、常温のアルミニウム製の外槽（真空容器）の内部に4つ納められ、低熱伝導性の荷重支持材で支持されている。外槽と内槽の間には、内槽へ侵入する輻射熱を防止するため、液体窒素で冷却される輻射シールド板がある。また上部のタンク部には、液体ヘリウムを補給する液体ヘリウムタンク、蒸発したヘリウムを再液化するためのヘリウム冷凍機が搭載され、長時間にわたり稼働できるように小型冷凍機を用いて循環冷却する構造になっている。

高温超電導磁石の開発への挑戦

超電導リニアでは、キーテクノロジーのさらなる進化を目指し、1999年からは高温超電導磁石の研究開発が行われた。高温超電導磁石にはビスマス-銀シー線材 (Bi2223) を用い、伝導冷却により20 K (-253 °C) 以下に冷却する。永久電流モードでの低電流減衰を実現するため、ひずみに弱いビスマス-銀シー線材の微小電圧の発生を極力小さくするコイル巻線技術を開発したほか、永久電流モード運用を可能とするイットリウム系薄膜を用いた熱式永久電流スイッチ、冷凍負荷を軽減する超音波モータ駆動の着脱電流リードなどの要素技術を開発した。

さらに近年では、希土類系高温超電導磁石の研究開発が進

んでいる。希土類系高温超電導磁石にはレアアース(Re)-バリウム(Ba)-銅(Cu)-酸素(O)で構成されるREBCO線材が用いられている。リニア用超電導磁石には最大5テスラ(T)という大きな磁場を発生させるため、臨界温度が高くても磁場中での通電特性が悪ければ大量の超電導線材が必要になってしまい、リニア車両に搭載するには重くなりすぎてしまう。そこで通電特性に優れたREBCO線材に着目した。従来の超電導磁石は液体ヘリウムで4.2 Kまで冷却されているが、REBCO線材を用いれば50 K(−223℃)程度と10倍以上の高い温度で運用することができる。そのため磁石の断熱構造を簡素化してもなお、冷凍機の消費電力および重量は半分程度になり、消費電力の低減および小型・軽量化を図ることができる。また40 K(−233℃)を超えると冷凍機での直接冷却が可能になるため、冷媒タンクや冷媒循環の配管類が不要になり、信頼性の向上にもつながる。

高温超電導は1980年代後半に発見され、超電導コイルをつくれるような実用的な線材に加工可能になったのは、ごく最近のことで、技術的な課題がまだ残されているものの、2027年開業時での実用化を目指し研究開発を進めていく計画だ。

構造物に使用される低磁性鋼

鉄道の土木構造物には大量の鋼材が使われる。超電導リニアは超電導磁石を利用して走行するため、電磁誘導作用によって、鋼材内部に渦電流あるいはループ電流と呼ばれる誘導電流と電磁力が発生する。誘導電流は熱に変わるため、システムのエネルギー損失につながる。また電磁力は鋼材および走行中の車両の相互に力として作用し、進行を妨げる走行抵抗となり、乗り心地と推進力に大きな影響を与える。したがって、当初は「超電導リニアに鋼構造物や鉄骨鉄筋コンクリート構造物は使えない」とまで言われた。これまでの土木構造物が経験したことの

ない全く新しい問題に直面したのだ。

エネルギー損失と車両の走行抵抗となる磁気抗力を低減させる対策として着目されたのが、磁石に吸着しない性質を示す低磁性鋼(オーステナイト系ステンレス鋼や高マンガン鋼など)であった。低磁性鋼に発生する磁気抗力は、宮崎実験線で検証したところ、普通鋼に比べて1/3～1/10程度と大幅に小さいことが明らかになった。

そこで山梨実験線では、超電導磁石から1.5 m以内に用いる鋼材には全て低磁性鋼を使用することとした(図3)。さらにトラス構造の鋼アーチ橋では、ループ状になっている部材にループ電流が流れ、磁気抗力が大きくなる。そのため普通鋼部材を超電導磁石から1.5 mより離すように配置することによって、時速500 km走行時の磁気抗力を1台車あたり2.5 kNの許容値内に納めた。このほか分岐装置の桁では、鉄骨にオーステナイト系ステンレス鋼、部材接合部に高マンガン鋼製の高力ボルト、鉄筋に高マンガン鋼が使用された。

低磁性鋼を構造用材料として用いる場合、強度(降伏強度)については、普通鋼の400N級鋼程度あればいいが、高マンガン鋼は400N級鋼程度から570N級鋼以上が開発されている。またステンレス鋼は、高マンガン鋼ほど高強度のものはないが、400N級鋼程度以上のものが開発されている。高マンガン鋼、ステンレス鋼ともに強度的には問題なく、普通鋼に比べて伸びがあり延性に富む。

こうした地道な研究開発によって、適材適所に低磁性鋼を用いた対策を施すことで、超電導磁石の近傍でも大量の鋼材を使った構造物の利用が可能であることが実証されている。

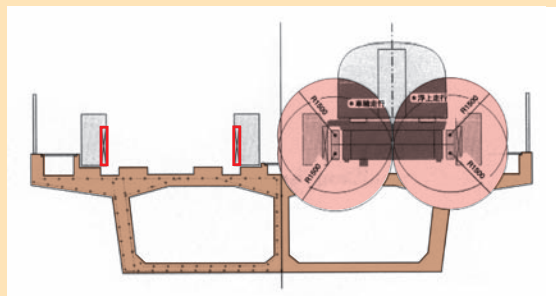
都市や山岳の大深度地下を貫くトンネル

超電導リニア技術を完成させるとともに、営業線の建設・運営・保守のコストダウンへの取り組みが実を結び、待望のリニア中央新幹線の建設が始まった。鋼材は200万トン程度が必要と見込まれており、年間国内需要の3%程度を押し上げる効果が期待されている。

リニア中央新幹線の大きな特徴は、トンネルが全体の86%に当たる246.6 kmを占める点にある(図4・図5)。都市部の大半では用地買収の必要がない地下40 m以上の大深度地下を通る。大深度地下トンネルはシールドトンネルを基本とし、施工のための立坑間隔は約5～10 km、立坑はトンネル内の換気や開業後の保守作業などにも利用する計画だ。

一方、山梨と長野にかけて3,000 m級の山々が連なる南アルプスでは、できる限り標高の高いところまで登る。このルート設定は勾配を登る力が新幹線の2倍以上もある超電導リニアだからこそ可能になった。それでも最大土被り(掘削面上部から地上まで

■低磁性鋼の使用範囲(コンクリート桁の例)(図3)



山梨実験線では、超電導磁石から1.5 m以内に用いる鋼材に低磁性鋼(オーステナイト系ステンレス鋼や高マンガン鋼など)が使用され、走行に影響がないことを実証した。

■リニア中央新幹線のルート(図4)



実験線を走行する超電導リニア車両(L0系)

の高さ)は1,400 m、延長は25 kmにも及ぶ。上越新幹線大清水トンネル(延長22.2 km、最大土被り1,300 m)、東海北陸自動車道飛騨トンネル(延長10.7 km、最大土被り1,000 m)を上回る日本一の大深度トンネルとなる。

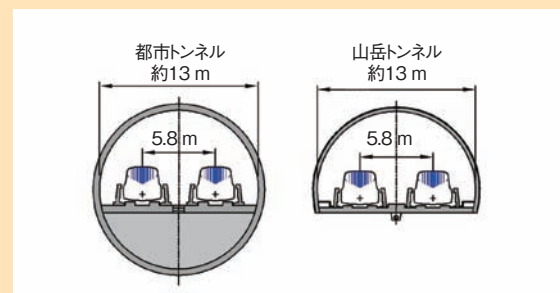
工法はNATM(New Austrian Tunneling Method)が採用される。発破・掘削し、土砂を搬出した後、岩盤が崩れないようにアーチ型の鋼製支保工で支え、コンクリートを吹き付けてロックボルトを打ち込む工法だ。地山と吹き付けコンクリートが密着し、トンネル覆工背面に空隙ができないため、地山の安定を確保しながら掘り進むことができる。これまで数々の難工事で培ってきたゼネコンの高度な技術力に期待が寄せられている。

超電導技術の応用への期待

リニア中央新幹線は、航空機並みのスピードと新幹線の高速度大量輸送能力を併せ持った画期的な輸送機関だ。航空機のような搭乗手続時間は不要で、実質的なスピードは航空機よりも速いといえる。その昔、東海道新幹線が高度経済成長期を支えたように、リニア中央新幹線はビジネスやライフスタイルを大きく変える可能性を秘めている。

さらにリニア中央新幹線の技術を使えば、米国のワシントン・ニューヨーク間を約1時間で結ぶことができ、世界の高速度鉄道市場への参入の期待も高まっている。ともあれ、リニア中央新幹

■トンネルの形状(図5)



山岳トンネルには標準的な工法であるNATM、都市トンネルにはシールド工法が採用される。

線は東海道新幹線が開業して以来の革新的な超高速輸送システムであり、日本の鉄道技術のさらなる発展を支えるだけでなく、超電導技術の他分野への応用も期待されている。まさに21世紀の技術大国日本を象徴する存在だといえるだろう。

参考文献

- 「リニア用高温超電導磁石を開発する」水野克俊、小方正文
〔RRR〕Vol.70 No.10 2013.10)
- 「超高速輸送システムを目指す超電導リニアモーターカー技術」中尾裕行、山下知久、小林芳隆(『東芝レビュー』2006 VOL.61 NO.9)
- 「リニアモーターカーと鋼材」市川篤司(『ステンレス建築』1997年9月 No.8)
- 文 杉山香里