

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

Superconducting Maglev Technology for Ultrahigh-Speed Transit System

中尾 裕行 ■ NAKAO Hiroyuki
 山下 知久 ■ YAMASHITA Tomohisa
 小林 芳隆 ■ KOBAYASHI Yoshitaka

超電導磁気浮上式鉄道（通称：リニアモーターカー、以下、超電導リニアと記す）の開発は、山梨実験線で走行試験による信頼性・耐久性の検証が続けられており、また、性能向上やコスト低減に向けた取組みも着実に進められている。

東芝は、1999年から東海旅客鉄道（株）と共同で進めてきた、従来の超電導リニア用低温超電導磁石と同じ性能を持つ高温超電導磁石の開発に成功した。その後、磁石を車両に搭載し、実験線にて最高速度 553.9 km/h を達成した。地上コイルや電力変換器についても新型を開発し、山梨実験線での試験に供している。

Development of the superconducting maglev system is steadily progressing. Running tests are being constantly conducted on the Yamanashi Maglev Test Line, and engineers are tackling challenges related to better performance and cost reduction.

In collaboration with Central Japan Railway Co. since 1999, Toshiba has successfully developed high-temperature superconducting (HTS) magnets that provide performance equivalent to that of conventional low-temperature superconducting (LTS) magnets. At present, these HTS magnets are being applied to a maglev test vehicle, which has run at a maximum speed of 553.9 kph. The ground coils and power converters of the system have also been remodeled and installed in the Yamanashi Maglev Test Line.

1 まえがき

超電導磁気浮上式鉄道（通称：リニアモーターカー、以下、超電導リニアと記す）の山梨実験線での走行試験は、1997年4月から開始され、その後、約9年以上にわたり続けられてきている。この間、大きなトラブルもなく、最高速度 581 km/h と高速すれ違い相対速度 1,026 km/h までの走行試験、及び高速連続走行試験など、性能評価に必要な走行試験が実施されてきた。

また、2006年4月1日現在、累積走行距離は 504,273 km（地球の約 12.5 周分に相当）に達するとともに、試乗者も延べ 112,889 人に上っている。更に、技術進歩を取り入れた性能向上やコスト低減に向けての技術開発も着実に進められている。

東芝は、山梨実験線建設当初から、車載用超電導磁石、地上コイル、及び電力変換器など主要電気機器の開発に参画している。ここでは、それらの最近の開発状況について述べる。

2 超電導磁石の開発

2.1 山梨実験線用 低温超電導磁石

山梨実験線では、車上の超電導磁石と軌道側のガイドウェイ上の推進用地上コイルとが地上一次方式リニアシンクロナスマーターを構成し、リニア車両の高速走行を実現して

いる。この超電導磁石は強力な直流磁場を発生する装置であり、走行に必要な浮上力、案内力、及び推進力を得るためのもっとも重要なキーテクノロジーである。

図1は、山梨実験線用の超電導磁石の構造を示したものである。ニオブ-チタン線材をレストラック型に巻いた超電導コイルは、ステンレス製の内槽と呼ばれる容器内部に収納され固定される。これらは、常温のアルミニウム製の外槽と呼ばれる真空容器内に四つ納められ、低熱伝導性の荷重支

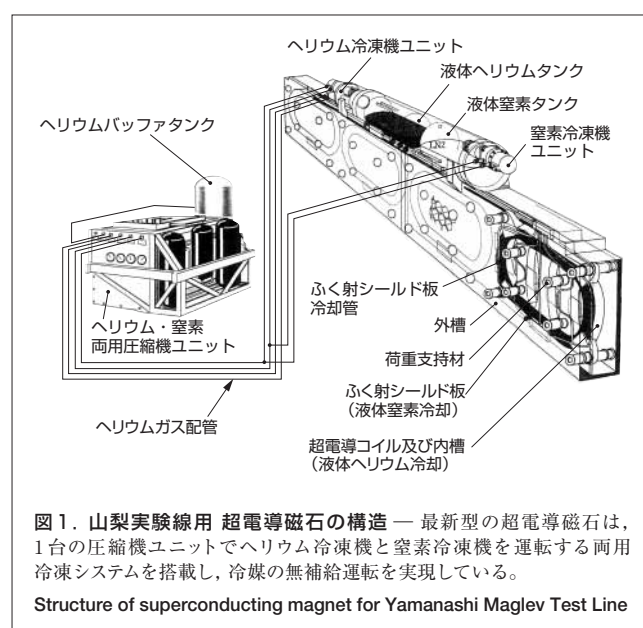


図1. 山梨実験線用 超電導磁石の構造 — 最新型の超電導磁石は、1台の圧縮機ユニットでヘリウム冷凍機と窒素冷凍機を運転する両用冷凍システムを搭載し、冷媒の無補給運転を実現している。

Structure of superconducting magnet for Yamanashi Maglev Test Line

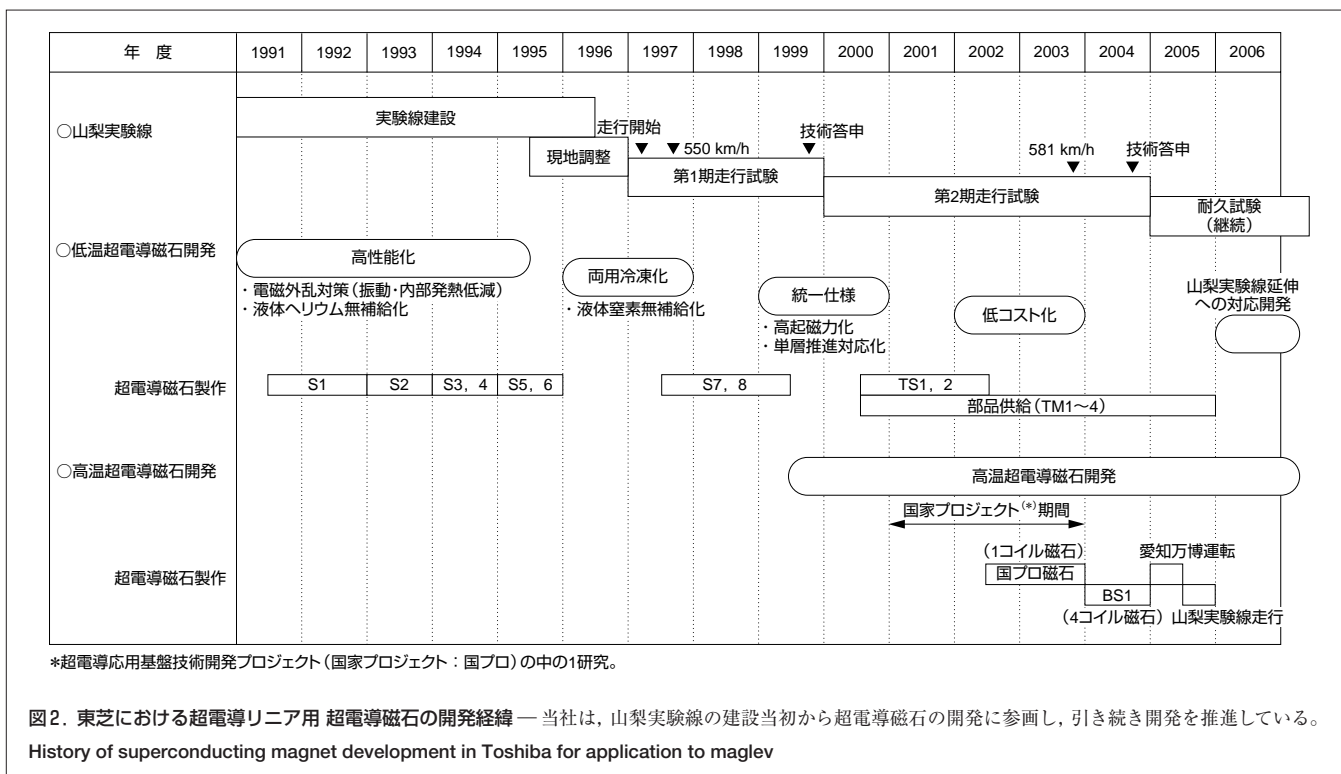


図2. 東芝における超電導リニア用超電導磁石の開発経緯 — 当社は、山梨実験線の建設当初から超電導磁石の開発に参画し、引き続き開発を推進している。
History of superconducting magnet development in Toshiba for application to maglev

持材で断熱支持される構造になっている。超電導コイルは、内槽に満たされる液体ヘリウムに浸漬(しんせき)され、極低温(4.2K)に冷却される。

外槽と内槽の間には、内槽へ侵入するふく射熱を防止するために、液体窒素で冷却されるふく射シールド板を設けている。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及び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ている。最新型の超電導磁石では、窒素冷凍機も搭載する両用冷凍システムを構成し、液体窒素の無補給化も達成している。

当社の超電導リニア用超電導磁石の開発経緯を図2に示す。最近の開発では、これまでメーカーごとに異なっていた構造仕様を統一するとともに、コスト低減を図った新型超電導磁石を共同開発した。この新型超電導磁石(TS1, 2)は、性能面でも従来の700 kAから750 kAに高起磁力化され、更に、地上コイルの簡素化につながる推進コイルの単層配置に対応した熱負荷や振動特性の向上を図っている。2002年11月から走行試験による耐久性の検証が行われている⁽¹⁾。

2.2 高温超電導磁石の開発

山梨実験線用低温超電導磁石と高温超電導磁石の構造比較を図3に示す。

山梨実験線用低温超電導磁石は、コイルを超電導状態にするため液体ヘリウム及び液体窒素を使用しているが、高温超電導磁石は、コイルに高温超電導線材を使用して冷凍機による伝導冷却方式にすることで、液体ヘリウムや液体窒素

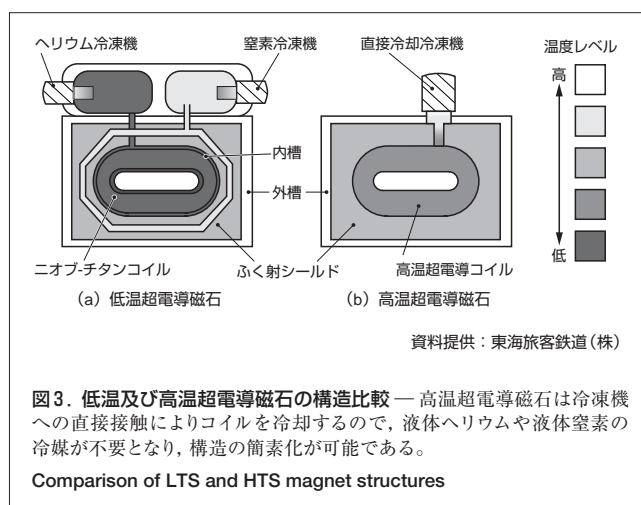


図3. 低温及び高温超電導磁石の構造比較 — 高温超電導磁石は冷凍機への直接接触によりコイルを冷却するので、液体ヘリウムや液体窒素の冷媒が不要となり、構造の簡素化が可能である。

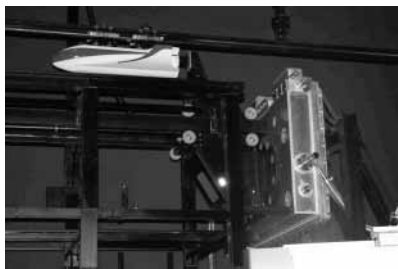
Comparison of LTS and HTS magnet structures

の冷媒が不要になり、構造が簡素化され運用が容易になる。そこで、1999年から東海旅客鉄道(株)と共同で、超電導リニア用高温超電導磁石の開発に着手した。

高温超電導線材にはビスマス-銀シース線材(Bi2223)を用い、伝導冷却により20 K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-銀シース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。

これらの要素技術開発の成果を反映し、2001年から3年間をかけて、山梨実験線用超電導コイルと同じ大きさの高温超電導コイルを1個収納した高温超電導磁石の開発を行った。この高温超電導磁石を20 K以下に冷却して評価試験を行った結果、起磁力750 kA、コイル中心磁場1.5 T以上が得られることが確認され、定格電流532 Aにおける永久電流モード時の磁場減衰は約0.44 %/日と極めて良好な結果が得られた。また、定格通電状態で行った電磁加振試験においても過大な振動は発生せず、磁場減衰に対する影響も見られなかった。更に、定格通電状態のコイル単体の機械加振試験でも±15 Gまでの耐振性能が確認され、過酷な使用環境の超電導リニア用超電導磁石への適用が可能であることが実証できた⁽²⁾。

なお、この高温超電導磁石は、愛・地球博の“JR東海超電導リニア館”において6か月の会期中、宇宙船模型の発射実演（公開実験）で問題なく運転された。これにより、長時間の励磁や毎日の励消磁及び繰り返し行われる発射時の振動印加に対し、高信頼性と高安定性能が実証された（図4）。



資料提供：東海旅客鉄道（株）

図4. 愛知万博で実演中の高温超電導磁石 — 6か月に及ぶ愛知万博の会期中、宇宙船模型の発射実演（公開実験）が行われ、問題なく運転された。
Space Shuttle miniature launching demonstration model using HTS magnet at Aichi Expo

2.3 山梨実験線用 高温超電導磁石の開発

前記の実績をもとに、山梨実験線の低温超電導磁石と置換えが可能な高温超電導磁石を、2005年3月に試作した（図5）。

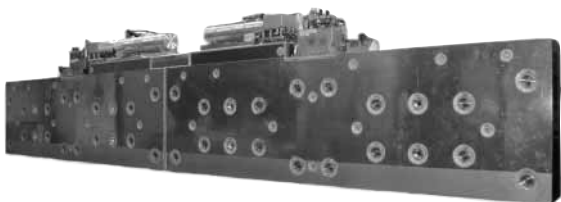


図5. 山梨実験線用 高温超電導磁石 — 現用の低温超電導磁石と置換えが可能で、4個のコイルを収納し2台の冷凍機で伝導冷却する構成の高温超電導磁石である。

HTS magnets for Yamanashi Maglev Test Line

この超電導磁石は4個のコイルを収納し、2台の冷凍機で伝導冷却する構成である。

2.2節で述べた1コイル収納の高温超電導磁石の場合と同様に、定格起磁力（750 kA）による永久電流モード運転、機械加振（±15 G）、及び電磁加振試験などを行い、良好な結果が得られた。永久電流モード運転時の4個のコイルの電流減衰率は、0.4～0.7 %/日の範囲内で、安定した特性であった。

この高温超電導磁石は、山梨実験線の3両編成列車の先頭車両に搭載された（図6）。2005年11月22日～12月9日に実施された走行試験において、超電導磁石の安定した励磁状態（平均1 %/日前後の電流減衰）が確認され、最高速度553.9 km/hを記録した。また、コイルの温度は走行試験条件にかかわらず安定しており、20 K以下の温度レベルに冷却されていた。今回の走行試験期間中に延べ走行距離4,111 kmを達成するなど多くの成果が得られた⁽³⁾。



資料提供：東海旅客鉄道（株）

図6. 車両に搭載された高温超電導磁石 — 走行試験において、高温超電導磁石の安定した励磁状態（平均1 %/日前後の電流減衰）が確認され、最高速度553.9 km/hを記録した。

HTS magnet installed on vehicle

3 一体型地上コイルの開発

地上コイルはガイドウェイ全線にわたって敷設されるため、超電導リニアの建設コストや運用コストへの影響も大きく、その製造コストの低減及び保守性の向上は非常に重要な課題である。

現在二層構造となっている推進コイルを単層構造とすることにより小型・単一化し、更に、推進コイルと浮上・案内コイルを一体化することで、コイルの製作と取付けのコストを低減した一体型地上コイルを開発した。一体型コイルとすることで、従来タイプの地上コイルに比べ、コイルの総数を1/2に減らすことができる。

2002年度には、コスト低減のために開発された新型ガイドウェイにこのコイルを取り付けて山梨実験線に導入し、現在も評価試験を継続している（図7）。



資料提供：東海旅客鉄道(株)

図7. 一体型コイルのガイドウェイ取付け状況 — 推進コイルと浮上・案内コイルを一体化することで、コイルの製作と取付けのコストを低減した。

Unified type ground coils installed on guideway

4 高効率電力変換器の開発

電力変換器は、必要とする速度に応じた電圧と周波数を地上コイルに流す、リニアモータ駆動の重要な機器である。

高圧・大容量電力変換に適した新世代パワーデバイスの IEGT (Injection Enhanced Gate Transistor) 素子は、スイッチング速度が速くスイッチング損失が少ないので装置効率が高く、更に、素子の外部周辺部品が少なく済むため装置のコンパクト化や省エネルギー化が可能など、優れた特性を持っている。この特性を生かして、電力変換器の建設コストや動力コストの低減を目的として、従来の GTO (Gate Turn-Off) サイリスタ素子を低損失の IEGT 素子に置き換えた高効率電力変換器を開発した⁽⁴⁾。

この電力変換器は、2002年8月から山梨実験線での走行試験で継続して使用されており、従来の GTO サイリスタ素子適用の電力変換器と比較して、外形は1/2 (図8)、損失は1/3を達成した。



図8. IEGT 素子適用による電力変換器の小型化 — 従来の GTO サイリスタ素子適用の電力変換器と比較して、IEGT 素子適用の電力変換器では外形1/2の小型化を達成した。

Downsized power converter equipped with injection enhanced gate transistor (IEGT) element

5 あとがき

超電導リニアの山梨実験線用として当社が開発に参画している超電導磁石、地上コイル及び電力変換器について、最近の開発の状況を述べた。

2006年4月に東海旅客鉄道(株)から、山梨実験線の先行区間のリニューアルと一般区間までの延伸につき検討を進めることが正式に表明された。この延伸に向けた機器開発に取り組んでいくとともに、将来の超電導リニアの実現に向け貢献していきたい。

謝 辞

ここで述べた機器の開発において多大なご指導をいただいた、東海旅客鉄道(株)の関係各位に深く感謝の意を表します。

なお、高温超電導コイルを1個収納した高温超電導磁石開発の一部は、超電導応用基盤技術研究体の研究として、(財)国際超電導産業技術研究センター (ISTEC) を通じて独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) からの委託により実施されたものである。

文 献

- (1) 地蔵吉洋, ほか. “超電導磁気浮上式鉄道の現状 - 5ヵ年計画を終えて - 超電導磁石・地上コイル”. 平成17年電気学会全国大会(第5分冊). 徳島, 2005-03. p.9-12.
- (2) 五十嵐基仁, ほか. 永久電流高温超電導マグネットの開発 - 磁気浮上式鉄道への適用性検証 -. 低温工学. **39**, 12, 2004, p.651-659.
- (3) 草田栄久, ほか. “超電導磁気浮上式鉄道用高温超電導磁石の開発 - 開発概要 -. 2006年度春季低温工学・超電導学会講演概要集. 大阪, 2006-05, (社)低温工学協会. p.119.
- (4) 細田博実, ほか. 新パワーデバイスと新制御で進化するパワーエレクトロニクス. 東芝レビュー. **57**, 8, 2002, p.27-31.



中尾 裕行 NAKAO Hiroyuki, D.Eng.

産業システム社 交通システム事業部 交通車両システム技術部参事, 工博. 浮上式鉄道システムの開発業務に従事。電気学会, 低温工学協会会員。

Transportation Systems Div.



山下 知久 YAMASHITA Tomohisa

産業システム社 府中事業所 交通システム部主査. 超電導磁気浮上式鉄道用超電導磁石の開発・設計に従事。低温工学協会会員。

Fuchu Complex



小林 芳隆 KOBAYASHI Yoshitaka

産業システム社 府中事業所 交通システム部主幹. 鉄道車両用モータ及び超電導磁気浮上式鉄道用地上コイルの開発・設計に従事。電気学会会員。

Fuchu Complex