

# 環境に配慮した鉄道車両用主電動機

Eco-Friendly Traction Motors for Rolling Stock

村上 理 白石 茂智 長谷部 寿郎

■ MURAKAMI Satoru ■ SHIRAIISHI Shigetomo ■ HASEBE Toshio

鉄道車両用主電動機は、パワーエレクトロニクスなどの技術革新を応用し、時代の要望に応じて、小型、軽量、及び高出力化が図られてきた。現在では誘導電動機(IM)が、かつての直流電動機に替わり、路面電車、通勤電車から新幹線、機関車に至るまですべての鉄道車両に採用され、成熟したシステムとなっている。一方、国内でIMが採用されて約20年が経過した近年、更なる高速化を実現するためのよりいっそうの小型・軽量化や省エネ化、低騒音化、省保守化など、特に環境に配慮したニーズを実現するための“主電動機の進化”が待望されている。

東芝では、これらの要求に応えるため、時代に先駆けて地球環境に配慮した主電動機として全閉モータシリーズ、軽量永久磁石同期電動機(PMSM)などの開発を行い、すでに一部の量産適用を開始している。

Induction motors (IMs) used as traction motors in rolling stock have become smaller in size, lighter in weight, and more powerful with the progress of power electronics. These motors are employed in a broad range of rolling stock including streetcars, commuter trains, Shinkansen bullet trains, and locomotives as a stable system in place of direct-current motors. However, 20 years have passed since the first IMs were applied in rolling stock in Japan, and further evolution has become necessary both to achieve additional reductions in size and weight for increased speeds and to meet environmental requirements such as energy conservation, reduction of noise, and minimal maintenance.

To meet these requirements, Toshiba has developed new environmentally conscious IMs and has already begun their commercial production.

## 1 まえがき

鉄道車両用の主電動機について単位出力当たりの質量の推移を図1に示す。主電動機が直流電動機からIMへ替わり、革新的な軽量・高出力化が実現した。これは高速化に代表される鉄道車両の高機能化へ寄与し、現在ではIMは、路面電車、通勤電車から新幹線、機関車に至るまで世界中の鉄道車両に採用されている。

国内でIMシステムが本格的に採用されてから約20年が経過し、IMは今や成熟したシステムとなっている。その一方、鉄道車両システムにはいっそうの高速化や省エネ化、低騒音化、省保守化など、一歩進んだ次世代への要求が高まっている。特に地球温暖化防止へ向けた二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)削減の世界的な意識の高まりから、省エネへの取組みが活発に行なわれている<sup>(1), (2), (3)</sup>。

そのなかで主電動機に対しても、省エネのためのいっそうの高効率化や、高速化のためのいっそうの小型・軽量化など、環境への配慮が求められている。また、通風冷却に伴って機内へ塵埃(じんあい)が侵入して堆積(たいせき)するために行わなければならない分解と清掃や軸受交換作業などに対する省保守化、回転時の騒音低減なども必要である。

東芝は、これら主電動機の進化の要求に応えるため、時代に先駆けて地球環境に配慮した主電動機の開発を行い、既に

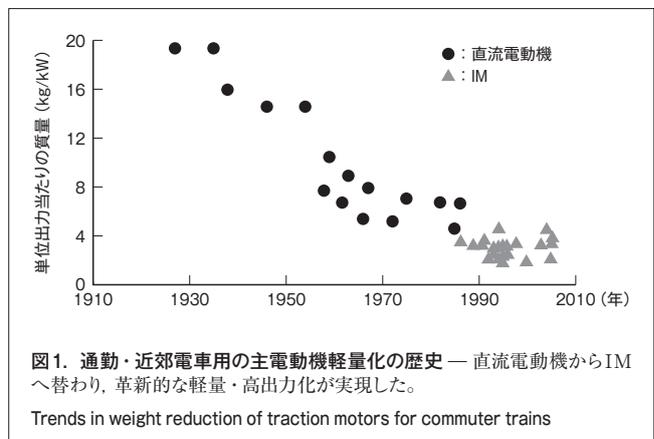
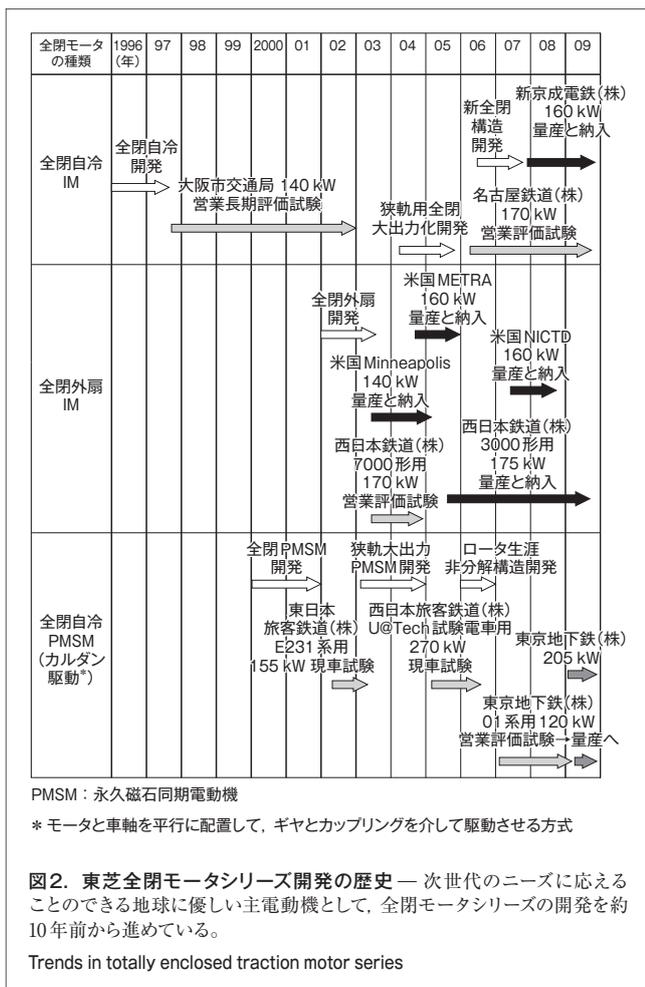


図1. 通勤・近郊電車用の主電動機軽量化の歴史— 直流電動機からIMへ替わり、革新的な軽量・高出力化が実現した。  
Trends in weight reduction of traction motors for commuter trains

一部量産を開始している<sup>(4), (5)</sup>。ここではこれらの概要と効果について述べる。

## 2 環境に配慮した主電動機(1)— 全閉モータシリーズ

全閉モータでは、効率を向上させることで力行(りっこう)での消費電力量を削減し、また、回生電力が向上するため、電力料金とCO<sub>2</sub>排出量が抑制できる。更に、モータからの排熱が抑えられるため、トンネルや地下鉄では空調消費電力も抑制ができて、CO<sub>2</sub>の排出量がいっそう削減できる。加えて、



全閉化により機内清掃レスや低騒音化も実現できる。これらの特長から、次世代のニーズに応えることのできる地球に優しい主電動機として、当社では約10年前から全閉モータの開発を進めている(図2)。

### 2.1 全閉モータシリーズの主な製品

全閉モータには様々なニーズがある。当社は、これらに対応するために次のような全閉モータを開発してきた。

- (1) 米国METRA (シカゴ近郊2階建て電車) 全閉外扇IM (図3(a)) 北米での耐雪性を考慮して、高出力の全閉外扇IMを開発し量産品を納入した。従来は車体ダクトからの冷却風取入れ、又は強制風冷していたところを、全閉外扇方式としてダクトレスを実現した。現在、順調に営業走行中である。
- (2) 西日本鉄道(株) 3000形用 全閉外扇IM (図3(b)) 7000形での営業評価試験で内部汚損レスを実証し、7000形搭載機よりも軽量化とシンプル化を実現し、開放自己通風型IMとほぼ同等の質量のIMを開発し量産品を納入した。現在、順調に営業走行中である。
- (3) 名古屋鉄道(株) 3300系用 全閉自冷・油潤滑軸受IM (図3(c)) 主電動機の高効率化と省保守化、及び低

騒音化を実現するため狭軌(1,067 mm)車両に170 kWの全閉自冷IMを適用した。消費電力削減と低騒音化効果を確認し、追跡調査を実施しながら現在順調に営業走行中である<sup>(6)</sup>。

- (4) 新京成電鉄(株) 8000形用 全閉自冷・油潤滑軸受IM (図3(d)) 主電動機の長期非分解化を目標に、油潤滑軸受を採用した初の全閉自冷IMとして開発し、量産品を納入した。既存のIMと比較して大きな省エネ効果と低騒音効果を実現するとともに、新冷却構造の開発により構造のシンプル化と油漏れレスを実現した。現在、順調に営業走行中である<sup>(7)</sup>。
- (5) 西日本旅客鉄道(株) U@Tech<sup>(注1)</sup> 試験電車用 全閉自冷PMSM (図3(e)) 狭軌用の車両に搭載できる全閉自冷IMでは達成困難な高出力を実現するため、全閉自冷PMSMを開発した。既存の開放自己通風型IMと取付け互換性を備え、同じIMよりも軽い質量を達成した。U@Techに搭載してフィールドでの効果を確認した<sup>(8)</sup>。

(注1) 西日本旅客鉄道(株)223系9000番代の試験電車の愛称。

(6) 東京地下鉄(株)01系用 全閉自冷PMSM(図3(f))

既存の開放自己通風型IMと同一サイズで冷却ファンレスのシンプルな全閉自冷PMSMを開発した。また、ロータを分解せずに、軸受だけを分解及び再組立てができる“生涯ロータ非分解構造”を採用した(2.2.2項参照)。現車試験で省エネ効果などを確認後<sup>(9), (10)</sup>、現在、東京メトロ銀座線で順調に営業走行中である。02系更新車及び16000系へも、同タイプの当社製の全閉自冷PMSMを量産投入することが決定している。

2.2 全閉モータシリーズ適用による効果

2.2.1 省エネ効果

名古屋鉄道(株)3300系に搭載した全閉自冷IM(図3(c))2台分では、全閉自冷式とすることで自己通風型に対して約9%の省エネ効果を得られることが実測された(約8万km走行時点)<sup>(6)</sup>。

この実測結果に基づき、同じ3300系1編成のモータ8台をすべて全閉自冷IMにして、20年で320万km走行すると想定した場合の省エネ効果を試算すると以下のとおりになり、ライフサイクルコストが大きく削減できることがわかる。

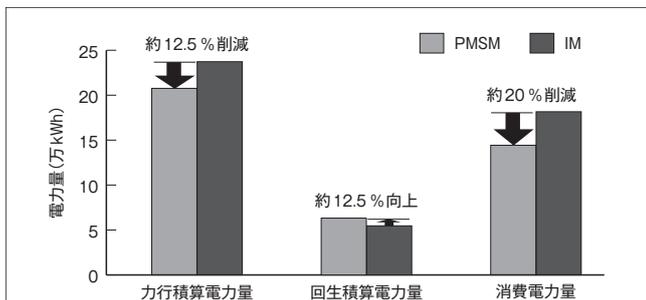
- (1) 削減電力量 : 1,150 MWh
- (2) 削減金額(\*1) : 1,490万円
- (3) CO<sub>2</sub>削減量(\*2) : 410 t

\*1 電力料金13円/kWhとして計算

\*2 CO<sub>2</sub>換算係数0.357 kg/kWhとして計算

また、東京地下鉄(株)01系に搭載した全閉自冷PMSM(図3(f))4台分を実測した消費電力量の削減効果を図4に示す。全閉自冷PMSMの場合、全閉IMよりも更に高効率化ができ、これに回生性能の向上などを組み合わせることで、消費電力量とCO<sub>2</sub>排出量を既存のIMよりも約20%削減することができる。

PMSM方式では、制御のため1台のモータに1台のインバー



出典：平成20年度「車両と機械」技術セミナー第4回資料。「東京メトロの新しい車両技術」<sup>(10)</sup>

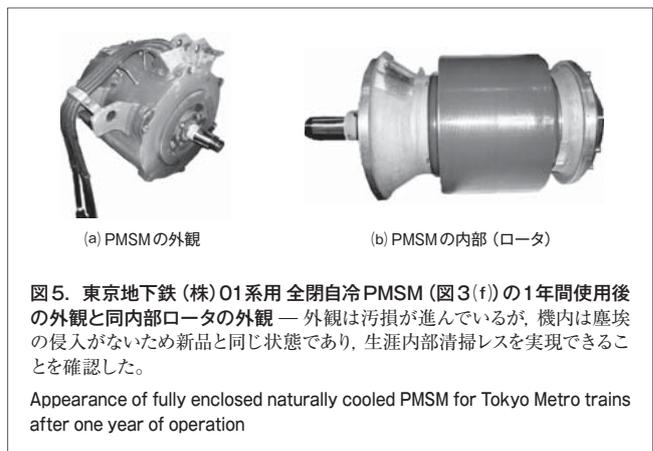
図4. 消費電力量の低減効果測定結果 — 東京メトロ銀座線の営業線での現車試験における、消費電力量の低減効果(2007年11月18日~2008年6月30日)を示す。同一車両編成で、PMSMシステムとIMシステムを比較の結果、消費電力量は約20%の省エネが実現できている。

Comparison of reduction of power consumption of permanent-magnet synchronous motor (PMSM) and induction motor (IM)

タが必要であり、また、インバータの故障に備えて、インバータとモータを切り離す開放接触器が必要である。一方、IMでは1台のインバータで複数のモータをドライブできる。このため、PMSMでは主回路全体でのイニシャルコストとしてはIMより増加するが、前述の省エネ効果により、これを上回るライフサイクルコストの削減が実現できる。

2.2.2 メンテナンス性の向上

従来の自己通風型IMでは、通風に伴って塵埃が侵入することは避けられない。塵埃を分離して除去する性能は向上してきているが、長期使用に際しては定期的に分解して清掃を行う必要があった。全閉方式とすることで、機内への塵埃侵入を遮断できるため、定期的な分解及び清掃の必要がなくなる。東京地下鉄(株)01系で1年間実車に搭載された後のPMSMの外観と内部(ロータ)の状況を図5に示す。



全閉モータの場合、内部は塵埃の付着がなく、内部の清掃は生涯にわたって不要であると判断できる。

以上から、全閉モータのメンテナンスで残るのは軸受部分となる。当社は以下に述べる構造と特長を持つ軸受を開発し、シリーズ化している。

(1) 油潤滑軸受構造

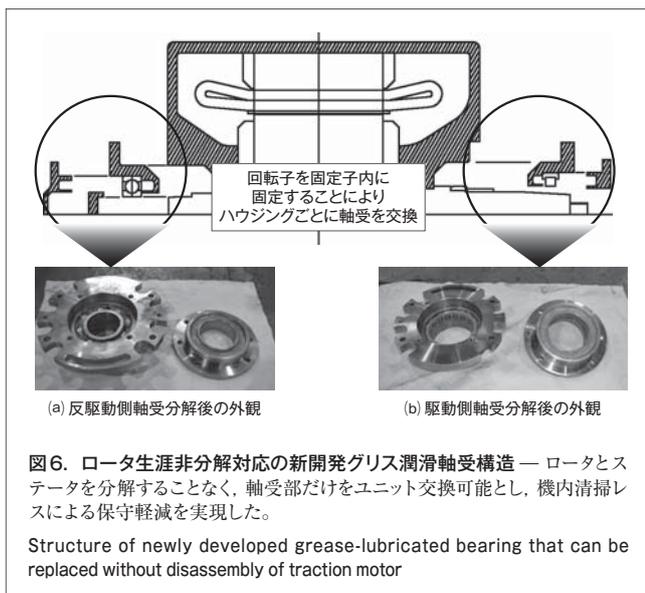
(a) 軸受部のメンテナンスは、定期的な給油及び非分解での油交換だけである。自動車のエンジンオイル交換と同様に非分解で油を交換できる。長期間軸受交換レスを目標としている。

(b) 軸受部への給油構造や油漏れ防止構造が複雑となるデメリットはあるが、耐熱性に優れるメリットがある。

(2) ロータ生涯非分解対応のグリス潤滑軸受構造

(a) 軸受部の構造を従来のIMと同等に簡素化できる。

(b) 軸受部だけのユニット交換が可能で、分解及び清掃が不要な全閉モータに適している。フォーミュラ1(F1)レースのピットインでのタイヤ交換のように、軸受ユニットを交換できる(図6)。

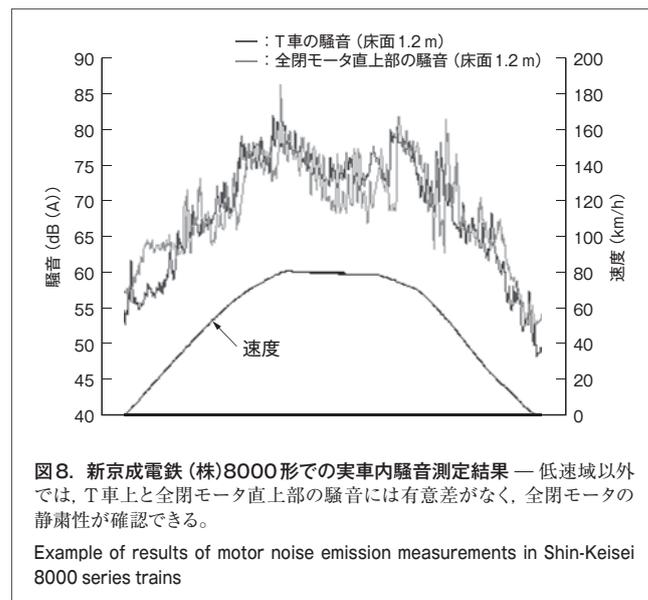
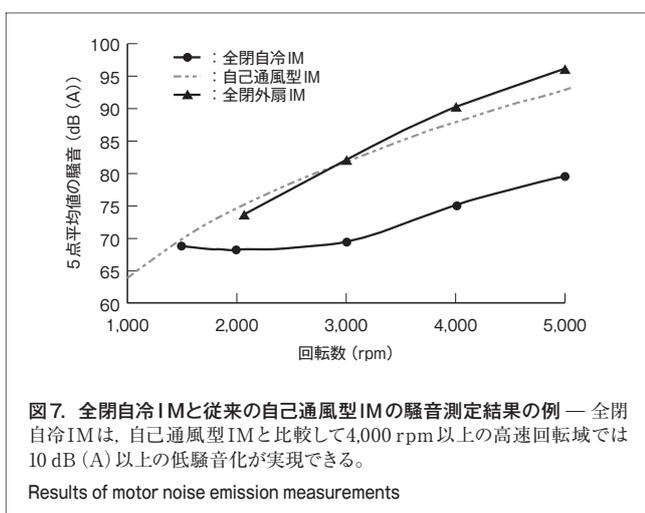


なお、PMSMについては、永久磁石ロータが磁束を発生するために分解するときには注意を要するとされているが、図6に示す“ロータ生涯非分解構造”により磁石の磁束は常に機内に封印され、内部清掃レスと合わせ、既存のモータより保守性が向上する。

**2.2.3 主電動機騒音の低減** 全閉自冷IMと従来の自己通風型IMの騒音を測定した結果を図7に示す。

機外に冷却ファンがある全閉外扇IMについては自己通風型IMと同レベルの騒音となるが、全閉自冷IMの場合は通風音が大幅に抑制されるため、4,000 rpm以上の高速回転域で10 dB (A)以上の低騒音化が実現できる。

全閉自冷IMを実車に搭載した場合の騒音測定例として、新京成電鉄(株)8000形での実測結果を図8に示す。インバータ駆動に伴う電磁音がある低速時を除き、中・高速走行時ではモータが搭載されていないT (Trailer) 車とほぼ同等の騒音となっていることが確認できる。

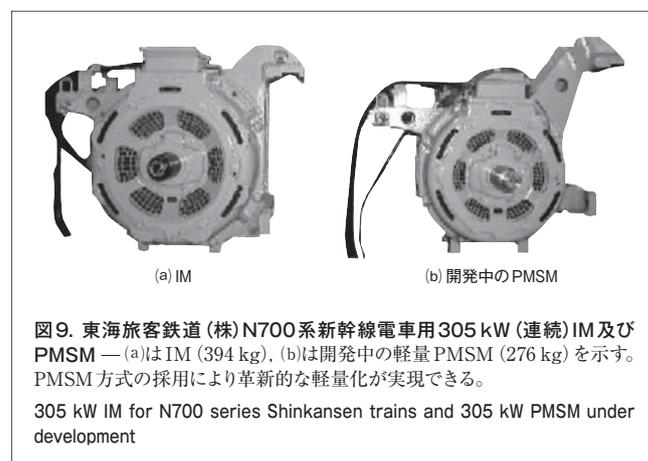


### 3 環境に配慮した主電動機(2) — 高出力・大トルクかつ高効率モータシリーズ

当社は通勤電車用だけでなく、消費エネルギーの大きい高速新幹線電車用、及び機関車用に対しても、PMSMの開発を進めている<sup>(12), (13)</sup>。IM方式に替えてPMSM方式を採用することで、いっそうの軽量・高出力化や高効率化によるライフサイクルコストの削減を実現できる。

東海旅客鉄道(株)N700系新幹線電車用TMT9形IM (305 kW (連続), 質量394 kg) と、開発中のTMT908X形軽量PMSM (305 kW (連続), 質量276 kg) の外観比較を図9に示す。この試作及び開発により、従来のIM方式では約1.3 kg/kWであった単位出力当たりの質量を、軽量PMSMでは0.9 kg/kWにまで低減し、システムの変更による主電動機の革新的な軽量化が実現できることを実証している。

また、機関車においては、日本貨物鉄道(株)は、貨物駅構



内で貨車の入換作業に使用する機関車（入換機関車）をディーゼルハイブリッド方式で開発（試作）することを決定した。老朽化したDE10形式ディーゼル機関車から、環境に配慮したクリーンな機関車に更新するためである。当社は、ハイブリッド機関車を駆動する主電動機について、通常の機関車で使用している強制風冷IM方式に替わる、冷却ブロワレスを実現できる全閉自冷PMSM方式の開発を進めている。補機を削減できるとともに、入換機関車特有の低速運転時の大幅な高効率化（時速10 km/hで約10%の高効率化）によって、いっそうの省エネを実現できる。

## 4 あとがき

次世代の鉄道車両用主電動機については海外でも欧州メーカーを中心に開発されており<sup>(4)</sup>、世界的なエネルギー問題や環境問題への関心が高まるなか、今後、ますます次世代への要望が高まってくると確信している。

当社は、鉄道会社における次世代への要望に応える革新技術を実現し、鉄道事業の発展に貢献するよう今後も開発を進める。

## 文 献

- (1) 萩原善泰, ほか. 新幹線電車の省エネルギー. 電気学会誌. 123, 7, 2003, p.406-409.
- (2) 畑 正. 通勤電車の省エネルギー. 電気学会誌. 123, 7, 2003, p.410-413.
- (3) 田口弘史. 地下鉄の省エネルギー. 電気学会誌. 123, 7, 2003, p.414-417.
- (4) 山田敏明, ほか. 高効率, 省メンテナンスを目指す鉄道車両用主電動機. 東芝レビュー. 58, 9, 2003, p.14-17.
- (5) 白石茂智. 進化を続ける鉄道車両駆動用主電動機. 鉄道車両と技術. 13, 133, 2007, p.7-12.
- (6) 渡辺雅彦, ほか. “名古屋鉄道3300系車両向け全閉自冷式主電動機”. 平成19年鉄道サイバネティクス利用シンポジウム論文集. 東京, 2007-11, 日本鉄道技術協会. 2007, No.510.
- (7) 相原 栄, ほか. “新京成電鉄8000形車両向け全閉自冷式主電動機”. 平成20年鉄道サイバネティクス利用シンポジウム論文集. 東京, 2008-11, 日本鉄道技術協会. 2008, No.507.
- (8) 蒲 浩史, ほか. 高効率な車両駆動システムの開発（在来線用全閉永久磁石同期電動機と回転角センサレス制御の開発）. JREA. 49, 7, 2006, p.31745-31748.

- (9) 留岡正男. 東京メトロの新しい車両技術. 平成20年度「車両と機械」技術セミナー第4回. 東京, 2008-12, 8, 2008.
- (10) 深澤真吾, ほか. “東京メトロ銀座線車両におけるPMSMシステム試験結果報告”. 電気学会 交通電気鉄道/ITS合同研究会 TER-07-53. 大阪, 2007-11, 電気学会. 2007, p.65-68.
- (11) 留岡正男. “東京メトロの新しい車両技術”. 平成20年度「車両と機械」技術セミナー第4回配布資料. 東京, 2008-12, 日本鉄道車両機械技術協会. 講演番号8.
- (12) 安井義隆, ほか. 小型軽量・高出力主回路機器の開発. JR EAST Technical Review. 100.14, 14, 2006, p.6-9.
- (13) 萩原善泰, ほか. “新幹線電車におけるパワーエレクトロニクス技術の発展”. 平成19年電気学会産業応用部門大会 pp.Ⅲ-95-100. 大阪, 2007-08, 電気学会. 2007, p.95-100.
- (14) 近藤主一郎. 鉄道車両駆動分野におけるパワーエレクトロニクス技術に関する世界の動向. 鉄道車両と技術. 12, 125, 2006, p.24-30.



村上 理 MURAKAMI Satoru

電力流通・産業システム社 府中事業所 交通システム部。  
鉄道車両用主電動機の開発・設計に従事。  
Fuchu Complex



白石 茂智 SHIRAIISHI Shigetomo

電力流通・産業システム社 府中事業所 交通システム部  
グループ長。鉄道車両用主電動機の開発・設計に従事。  
電気学会会員。  
Fuchu Complex



長谷部 寿郎 HASEBE Toshio

電力流通・産業システム社 府中事業所 交通システム部  
主幹。鉄道車両用主電動機の開発・設計に従事。電気学会  
会員。  
Fuchu Complex