

# TREND

## N700S新幹線車両のSiC素子を適用した駆動システム

SiC-applied Traction System for N700S Shinkansen High Speed Train

東海旅客鉄道株式会社  
総合技術本部 技術開発部



佐藤 賢司 Kenji Sato  
濱島 豊和 Toyokazu Hamajima

### はじめに

鉄道は自動車と同様に、身近な交通機関として人々の生活に不可欠な存在となっている。今年、1872年(明治5年)10月14日に日本初の鉄道が新橋～横浜間に開業して150年を記念する年である。また、新幹線の高速化を象徴する「のぞみ」も誕生から30年の節目を迎えた。東海道新幹線は、東京オリンピックの年である1964年に営業運転を開始し、東京、名古屋、大阪の3大都市圏を結ぶ輸送の大動脈として、現在も日本の経済を支えている。

新幹線車両は、第1世代の0系から2020年7月に営業デビューしたN700Sに至るまで、車体や床下機器の小型・軽量化を進め、その生み出したスペースと重量を活用し、速度向上、到達時分の短縮や車両性能向上、旅客サービスの充実、省エネルギー化の推進など、大幅な進化を遂げてきた。特に、架線から電気を取り入れ、主変圧器、主変換装置によって駆動用のモータを制御する駆動システムは、最新のパワーエレクトロニクス技術を取り入れることによって改良を重ねられた。

本稿では、まず、東海道新幹線の駆動システムの変遷を振り返り、高速鉄道としては世界で初めてSiC素子を適用し、小型・軽量化を追求したN700Sの駆動システム開発について述べる。さらに、小型・軽量化がもたらした車両の機能向上や省エネルギーへの寄与について紹介する。

### 駆動システムの変遷

鉄道車両の駆動システムは車両の床下に搭載され、架線から取り入れた電気を動力に変換して車輪を回転させる役割を担っている。図1に、現在の新幹線車両(300系以降の車両)の代表的な駆動システムの構成を示す。東海道新幹線の架線電圧は交流60Hz、25kVであり、これをパンタグラフから取り入れ、主変圧器で降圧する。さらに、主変換装置(PWMコンバータ・インバータ方式でCIと略す)のコンバータで一旦、直流に変換し、さらに、インバータで周波数と電圧を

調整した3相交流に変換することで、台車に搭載されている駆動用モータを制御している。

東海道新幹線の駆動システムは、パワーエレクトロニクス技術を取り入れて発展してきた。表1にその変遷を示す。300系からは小型・軽量化のため、駆動用のモータを誘導電動機に変更し、主変換装置(CI)はGTOサイリスタによるPWMコンバータ・インバータ方式とした。同時に、交流回生ブレーキを開発し、発電ブレーキの抵抗器を廃止している。主変換装置による誘導電動機駆動および交流回生システムは、これ以降の新幹線の標準となっている。700系では電流駆動のGTO素子に変えて、電圧駆動のIGBT素子を適用した。その後、N700系およびN700Aでは低損失IGBTを用いて走行風冷却方式の主変換装置を開発したことにより素子冷却用のブローを廃止し、大幅な小型・軽量化を実現した(図2)。

これらの開発を踏まえ、N700Sでは、さらなる小型・軽量化を目指し、新型パワー半導体であるSiC(silicon carbide:炭化ケイ素)素子の効果を最大化するため、走行風冷却方式の主変換装置(ブローレスCI)と組み合わせ、駆動用モータを含めたシステム全体での開発を行った。

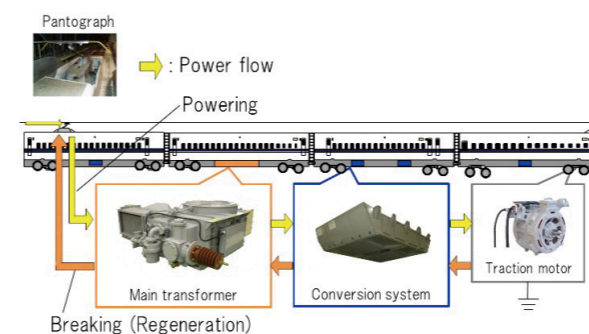


図1 新幹線車両の代表的な駆動システムの構成

表1 東海道新幹線車両の駆動システムの変遷

Type	Series 0	Series 100	Series 300	Series 700	Series N700 N700A	N700S
Year	1964	1985	1992	1999	2007	2020 (2018)*
Power device	Diode	Thyristor	GTO thyristor	IGBT	Low-loss IGBT	SiC device
Control system	Tap changer control	Thyristor-driven phase control	PWM converter and inverter			
Cooling system	Forced ventilation cooling system			Blowerless cooling system (Train draft cooling system)		
Traction motor	DC motor		3-phase induction motor			
			4-pole		6-pole	
Electric breaking	Rheostatic braking		Regenerative braking			

\* N700S validation test train, or the prototype train, started running tests.

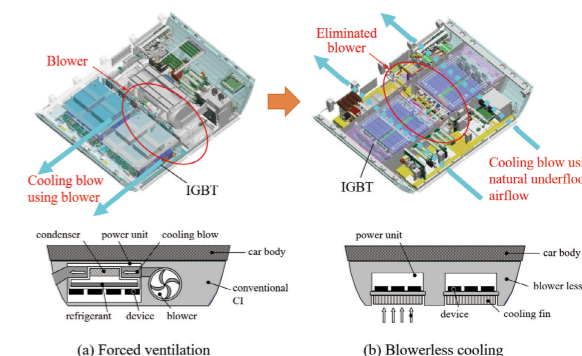


図2 走行風冷却方式の主変換装置(ブローレスCI)

### SiC素子を適用したN700Sの駆動システムの特徴

N700Sの駆動システムの開発では、SiC素子の低損失、高耐圧、高温動作等の長所を走行風冷却方式の主変換装置と組み合わせることで、駆動システム全体(主変換装置と駆動用モータ)のさらなる小型・軽量化を目指すことを開発のキーポイントとした(図3)<sup>[1]</sup>。

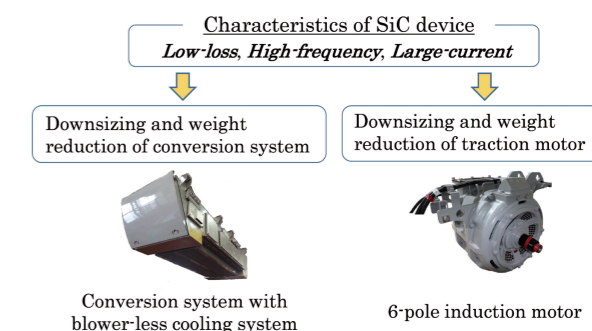


図3 N700S駆動システムの開発コンセプト

### ▶ SiC素子を適用した主変換装置

新幹線の主変換装置は、図4に示すようにPWMコンバータとPWMインバータで構成されていて、N700Sでは、走行風冷却方式の主変換装置のコンバータとインバータ両方にSiC素子を適用している。SiC素子のモジュールは、IGBTとSiC-SBDの組み合わせ(ハイブリッドSiC)と、SiC-MOSFETとSiC-SBDの組み合わせ(フルSiC)の2種類が一般的だが、開発ではそれぞれの素子のモジュールを使用した試作機を製作し、各種試験を行った。走行風冷却方式は発熱源である半導体素子を冷却体の上に載せ、冷却体下部より冷却フィンが突き出す構造であり、冷却フィンに走行風を当てることで半導体素子を冷却する。SiC素子を

適用することにより熱損失を低減することができ、この冷却体を小型・軽量化することができた(図5)。図6、7は、今回検討した駆動システムの回路である。

試験結果をもとにした熱損失のシミュレーションによりIGBTとSiC素子の熱損失を比較したところ、約30%低減されることがわかった。また、フルSiCではより熱損失が小さく、冷却体のさらなる軽量化が可能であることが確認できた。N700Sの営業車ではハイブリッドSiCとフルSiCの2種類の主変換装置を採用し、主変圧器が搭載された重量が大きい車両にフルSiCを使用している主変換装置を搭載した。

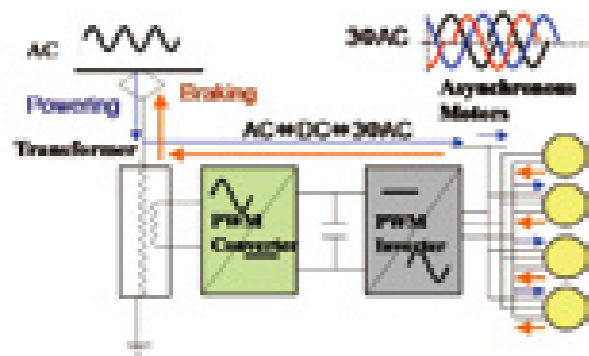


図4 主変換装置の構成



図5 N700Sの主変換装置

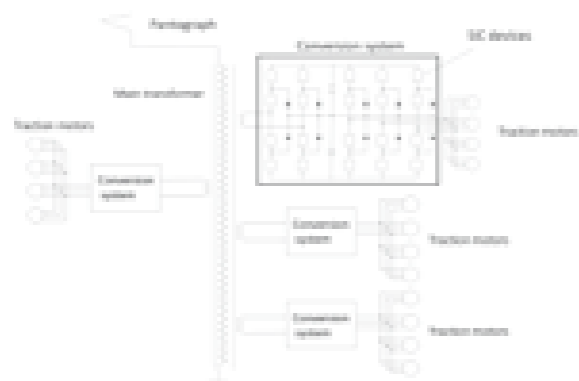


図6 N700Sの駆動システムの回路

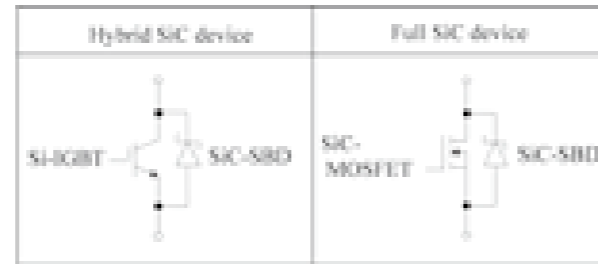


図7 ハイブリッドSiCとフルSiC

### ▶ 小型・軽量の駆動用モータ

SiC素子を主変換装置に適用することによって、電流を大きく、周波数を高く設定できるようになり、駆動用モータの設計の自由度が大幅に広がった。今回の開発では、300系以来4極であった極数を6極に変更した。極数を増やすと、各極あたりの磁気回路を小さくすることができ、一次側の鉄心の容量を削減することができる(図8)。加えて、固定子コイルのループ長が、4極より短くできるので、コイルエンド部の縮小が可能となり、コイル導体量および軸方向寸法が低減可能となった。

また、回転子については、磁界シミュレーションを行い、構造を変更した。回転子バー付近の鉄心はトルクを発生させる磁気回路として必要だが、バーから離れた内径側の鉄心は磁束密度が小さくなり、トルクに寄与しない。従来は、この部分に複数の丸穴を空けることで、通風と軽量化を行ってきたが、今回さらなる軽量化のため、台形穴を空け、磁気回路に寄与する回転子バーの近傍を厚くすることとした(図9)。

さらに、モータの特性を磁気装荷型から電気装荷型に変更した。周波数に対する電圧の傾き(V/f)を小さくし、鉄心、巻き線の軽量化を狙いつつ、停動トルク余裕率を確保する特性を検討した。このように最適なV/fを選択できたのは、SiC素子の電流特性の効果である。

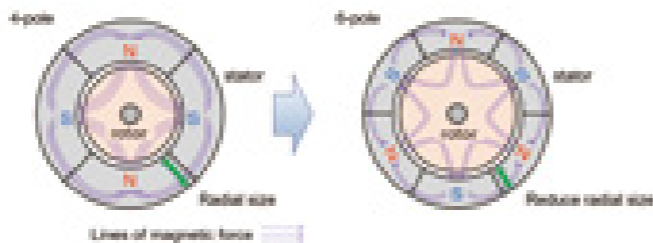


図8 小型・軽量の駆動モータのコンセプト



図9 回転子の新構造

### 小型・軽量化がもたらした効果

図10は、小型・軽量化の効果をまとめたものである。N700Sの主変換装置の幅は、N700系の半分になった。また、駆動モータの軸方向の長さは10%短くなった。駆動システム全体では、N700と比較して20%軽量化された。

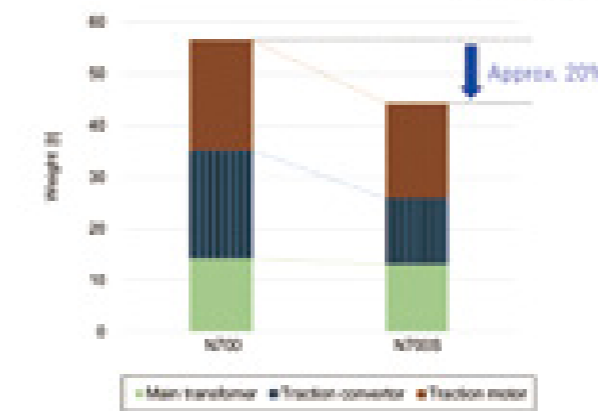


図10 小型・軽量化の効果

### ▶ 標準車両の実現

この小型・軽量化により、図11に示すように、床下機器配置のレイアウト設計の自由度を高めることができた。N700Aの主変換装置は、主変圧器を搭載した車両に搭載できるほど小さくないため別の車両に搭載されている。したがって、車両間を渡って主変圧器から主変換装置を介してモータへ接続する配線が必要となる。このように、異なる車両に主変圧器と主変換装置を別々に搭載すると、床下レイアウトの設計の自由

度が制限される。

SiC素子を採用した駆動システムは、小型で軽量なため、主変圧器と主変換装置を同じ車両に搭載でき、この問題を解決することができた。これらの柔軟性により、基本の16両編成の列車とは異なる構成の列車(例:8両編成または12両編成)を効率的に再設計できるようになった(「標準車両」と呼んでいる)。このコンセプトは、国内外で新幹線を展開する際に役立つことが期待されていて、九州新幹線の西九州ルート(長崎~武雄温泉)に6両編成のN700Sを導入する際にも活用された。

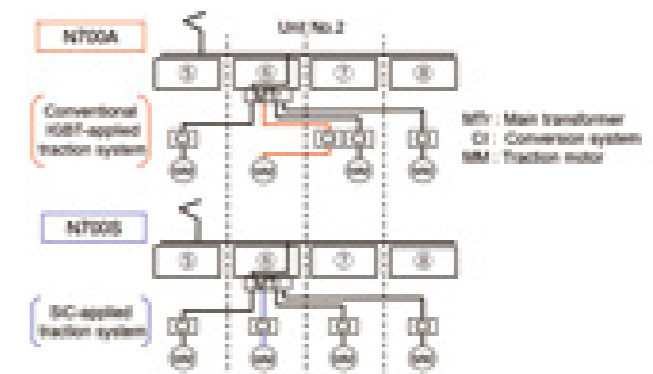


図11 標準車両のコンセプト

### ▶ バッテリー自走システムの実現

N700Sでは、駆動システムの小型・軽量化で生まれたスペースと重量余裕を旅客サービスの向上にも活用している。

長時間の停電が発生したときに、車両に搭載したバッテリーにより30km/h以下の低速で自走し、乗客を安全な場所に移動できるバッテリー自走システムを開発して、導入した(図12)<sup>[2,3]</sup>。開発では、駆動システムの基本構成を変更しないことや、バッテリーの種類や、安全性と信頼性を確保するための保護機能等を考慮した。

図13に、バッテリー自走システムの簡略回路図を示す。リチウムイオンバッテリーを使用したバッテリーユニット、接触器、コントロールユニットで構成されていて、通常モードでは、バッテリーは補助回路によって充電される。自走モードでは、バッテリーユニットのDC750Vが、主変換装置のDCリンク(通常モードではDC3000V)に接続されることで、インバータに電力を供給して駆動用モータを制御する。

N700Sは、16両編成に8台のバッテリー自走システムを搭載し、東京から新大阪までの全てのトンネルや橋梁から脱出することができる。なお、リチウムイオンバッテリーを使用したバッテリー自走システムは、世界の高速鉄道では、N700Sが初めてである。



図12 バッテリー自走システム

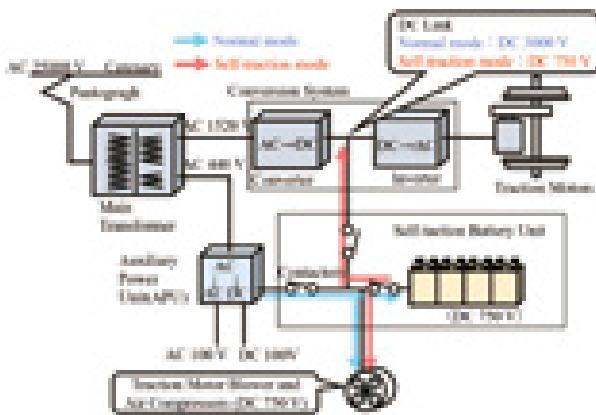


図13 バッテリー自走システムの回路

## 省エネルギーの推進

東海道新幹線では、省エネ車両の開発・導入により、省エネを積極的に推進している<sup>[4]</sup>。N700Sは、走行抵抗の低減、列車の軽量化、およびSiC素子適用による効率の向上により、エネルギー消費を改善した。駆動システムの軽量化は、台車カバーなどの車体を平滑化する走行抵抗低減策を導入するための軽量化に貢献している。

図14に消費電力の比較を示す。N700Sでは、SiC素子を適用した駆動システム、軽量の車体、空気抵抗の低減、その他の機能により、N700Aと比較してエネルギー消費をさらに6%削減した。

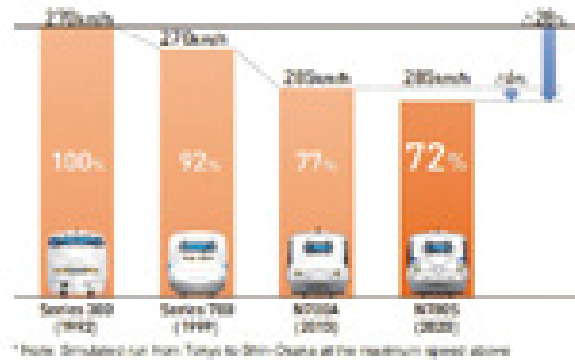


図14 N700Sによる省エネルギーの推進

## まとめ

最新の新幹線車両であるN700Sでは、SiC素子と走行風冷却方式の主変換装置および極誘導電動機を組み合わせることで、SiC素子のメリットを効果的に活用し、小型・軽量化を図った。さらに、この効果により、車両の床下機器のレイアウト設計の自由度が高まり、「標準車両」を実現した。また、「自然災害等の非常時バッテリー自走システムの搭載が可能となった。

コロナの影響が一日も早く収束し、より多くの方々に東海道新幹線をご利用いただけることを願いつつ、安全、安定輸送とサービス向上に邁進していく所存である。また、本開発が、国内外の鉄道におけるパワーエレクトロニクス技術の発展に寄与できれば幸いである。

## 参考文献

- [1] K. Sato, H. Kato, T. Fukushima: "Development of SiC Applied Traction System for Shinkansen High-speed Train", Proc. of The 2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Nigata), pp.3478-3483 (2018)
- [2] 小田 耕太郎, 佐藤 賢司, 加藤 宏和, 福島 隆文, 瀬尾 哲平, 山崎 実: 「N700Sバッテリー自走システムの開発について」, 日本機械学会第28回 交通・物流部門大会講演論文集 (2019)
- [3] K. Sato, H. Kato, T. Fukushima: "Outstanding Technical Features of Traction System in N700S Shinkansen New Generation Standardized High Speed Train", IEEJ Transactions on Industry Applications, Vol.10, No.4, pp.402-410 (2021)
- [4] JR東海アニュアルレポート 2019, p.18,33