

特集：車両技術

鉄道車両への SiC 電力用半導体素子適用状況

甘日出 悟*

A Survey of the Adoption of SiC Semiconductor for Power Devices in Railway Vehicles in Japan and Overseas

Satoru HATSUKADE

SiC power semiconductors are increasingly being applied to various power converters because of their performance of high-speed operation under even high temperature. The first adoption of SiC devices for railway vehicles was 2012 in Japan. Until the year of 2021, many railway vehicles in Japan have installed power converters with SiC devices. The adoption of these power converters with SiC devices are not limited to motor drives, but also extends to auxiliary power supplies and PWM rectifiers. However, there are few SiC device usages in overseas railway vehicles. This paper reports a survey result on the application of SiC power semiconductors to railway vehicles in Japan and overseas.

キーワード：SiC, 電力変換装置, 鉄道車両

1. はじめに

鉄道車両には省エネルギーへの要求が大きいため、車体や電機品の軽量化など種々の方策が取られてきた。なかでも最もエネルギーを消費する駆動システムについては1970年代のパワーエレクトロニクス化によって大幅な省エネルギーが達成されている。その後の駆動システムは交流電動機駆動へと進化し、2000年代になると永久磁石同期電動機の採用、蓄電池や燃料電池利用と様々な技術開発が行われている。

中でも2010年代に採用が始まった炭化けい素(SiC)を材料に用いた電力用半導体素子(以下、SiC素子)は電力変換装置そのものの消費電力低減や小型化が可能になることから、駆動用電力変換装置だけでなく、車内電源用電力変換装置(静止型補助電源装置)にも採用が進んでいる。

SiC素子適用に関する研究開発については多様な用途に関する調査報告¹⁾が2016年に出版され、東京メトロ銀座線での世界初の営業試験(2012年)が掲載されている。鉄道車両に関しては、日本では2015年ごろから活発に搭載され始めて2021年現在で既に普及期に突入したと思われるが、その一方で海外ではいまだ開発段階にあるメーカーが多いことから、鉄道車両に特化したSiC素子に関する調査報告の必要がある。

本報告では、2021年11月現在における日本と海外における鉄道車両へのSiC素子適用の現状や開発状況を調査した結果を報告する。

2. SiC素子について

2.1 SiC半導体の特徴

電力用半導体は高電圧のスイッチングを行うため、オフ時の耐電圧が高いことやスイッチング速度が速いこと、オン時の導通抵抗が低いことが求められる。日本における鉄道車両の電力用半導体として、ダイオード、サイリスタ、GTO(ゲートターンオフ(GTO)サイリスタ)、絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ(IGBT)などが用いられてきたが、いずれも材料はシリコン(けい素, Si)であった。現在主流のIGBTはSiの微細加工技術を利用することで高速スイッチングが可能になっている。しかしながら鉄道車両の駆動用のような高耐圧のスイッチングにおいては、耐電圧を高くするために素子を厚くする必要性からオン抵抗が増大し、結果として動作時の発熱が増加する。また、IGBTはバイポーラトランジスタ構造であることから少数キャリアの蓄積によりスイッチング速度が制約される傾向がある。以上の理由により鉄道車両用のIGBTではスイッチング速度が数kHzで上限となり、現状では高速走行においては1パルスモード(方形波電圧モード)を余儀なくされている。

SiCはSiに対して絶縁破壊電界強度が約10倍高いことから、素子の厚さを薄くすることができるためオン抵抗を小さくすることができる。また、キャリア蓄積が起きないMOSFETを採用するとスイッチング速度を高くすることができる。さらに、SiCデバイスは高温動作が可能のため、高密度実装により電力変換装置の小型化が可能になる。

2.2 SiCモジュール

半導体素子はチップと呼ばれる1枚の板が物理的な

* 車両制御技術研究部 駆動制御研究室

最小単位であるが、1チップで通電できる電流には限界がある。さらに電力用半導体では放熱が必要なため、複数のチップをモジュールと呼ぶパッケージに組み込んだものを使用する。SiC素子を使用したモジュールにはハイブリッド (Hybrid) SiC とフル (Full) SiC と呼ばれるモジュールがある (図1)。

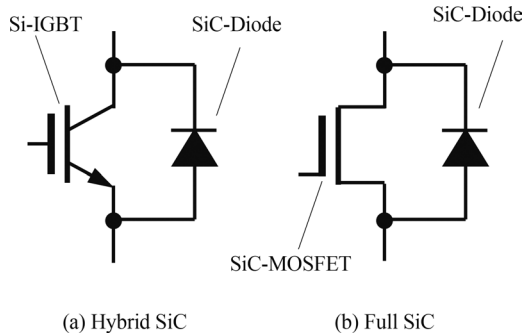


図1 SiCモジュール内の素子構成

Hybrid SiCモジュールは従来のIGBTモジュールのなかでダイオードのみをSiC素子 (SiCショットキーダイオード) としたものである。SiCショットキーダイオードは逆回復時間が短い (図2) ため、IGBTのターンオフ時の損失低減に寄与する。

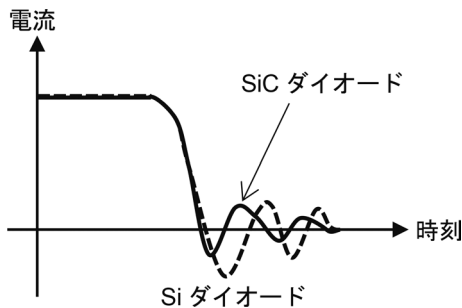


図2 ターンオフ時の逆回復動作

Full SiCモジュールはSiC MOSFETとSiCショットキーダイオードを組み合わせたものであり、高温・高速動作、オン抵抗低減が可能になる。鉄道分野においてはHybrid SiCモジュールでの実用化が先に始まり、2012年に実証試験が行われたが、2015年にはFull SiCモジュールが実用化された。現在は鉄道事業者が価格や性能などを考慮して使用するモジュールを選択している状況である。

2.3 SiC素子の特徴を利用した設計と効果

SiC素子採用の最も大きな動機は、家電製品など多くの分野においては高効率化である。しかし、鉄道車両においては素子をSiCに置き換えるだけでは効率向上のメリットが少ないとの指摘がある²⁾。一方でSiC素子の高い高温動作特性に基づく電力変換装置の小型軽量化

は、ほぼすべての鉄道車両が恩恵を受けられるため、報告が多い。なお、小型軽量化の実績値は前提条件が文献毎に異なるため、文献間の比較は困難である。

また、駆動システム全体の効率化を図るための設計として、以下のことが行われている車両もある。

- (1) 回生ブレーキの適用範囲拡大 SiC素子の高温動作特性を利用すると、IGBTモジュールに比べて電流実効値を増加させることができる。この増加分を回生ブレーキに配分することで (図3) 回生電力を増加させることができ、結果として運転電力量の削減につながる。2012年の世界初の実証試験では回生ブレーキの利用範囲拡大により、従来の構成に対して使用電力量を14%削減した³⁾。他にも使用電力量削減実績を主張する文献が多いが、装置のパラメータ設定や他列車の状況により回生電力量が変動するため文献同士の数値比較が困難である。
- (2) 主電動機の極数増加 SiC素子の高速スイッチング特性を利用すると、従来4極であった主電動機の極数を増やすことが可能である。極数増加は同一回転速度におけるトルクが増加する (ギア比が変わるイメージである) 効果がある。また、極数増加により端部が短くなることで、主電動機の軸方向長さを短縮可能である⁴⁾。このほか、Full SiCモジュールを使用したインバータと8極の永久磁石同期電動機を組み合わせたシステムの走行試験も行われている⁵⁾。

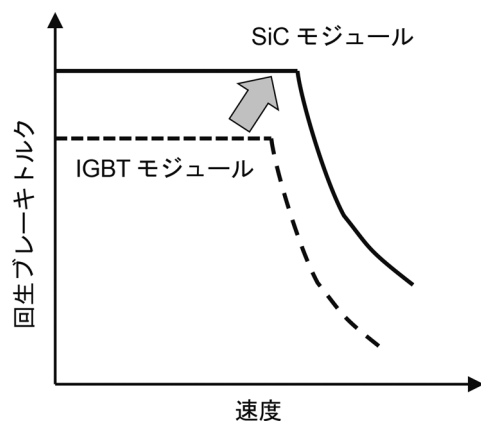


図3 回生ブレーキの適用範囲拡大

さらに、SiC素子採用により電力変換装置を小型化することで空きスペースが生じる。ここ数年は空きスペースに非常用走行バッテリーを搭載する傾向がある⁶⁾。また、N700S新幹線では電力変換装置の小型化によって、ぎ装の自由度が増したため編成内での車両種別が8種から4種に削減可能となり、編成組成の自由度が増加⁷⁾した。燃料電池車もSiC素子採用により客室スペースを生み出すことに成功している⁸⁾。今後は輸送ニーズに

合わせて編成両数が柔軟に組み替えられる短編成車両が増加する可能性や、現在は実現不可能な1両編成の交流・交直流電車が登場する可能性も考えられる。

そのほか、SiC素子の高耐圧特性を利用した、主変圧器へのパワーエレクトロニクス変圧器適用を見据えた研究開発が活発に行われており⁹⁾、交流電車の駆動システムの小型軽量化が期待される。

3. 日本における適用状況

日本では営業車両へのSiC素子適用が進んでいることから、鉄道事業者への普及状況及びメーカーからの供給状況を調査した。そのため、試験車両や試験のための搭載は調査対象から除外している。調査項目は適用車両、使用モジュール種別、電力変換装置のメーカー、SiC素子による営業開始年月とした。

正確さを確保するため、情報源は鉄道事業者及びメーカーが公表または執筆した文献（Webページ含む）に限定している。鉄道ファンが作成した資料（Wikipediaや趣味雑誌の投稿記事など）のみ記載があるものは注記または不明とした。なお、阪急電鉄8000系はSiC搭載情報があるものの、電機メーカー資料や比較的信頼性の高いWikipediaに記載がないため試験のための搭載と判断している。

信頼できる複数の資料間で記載が矛盾する場合、本報告ではSiC採用と判断した。また、SiC素子搭載車両をマイナーチェンジした車両は対象から除外した。さらに、営業開始年月が明記されていない一部車種については車両完成年月や文献の発行年月から推定している。

3.1 駆動用電力変換装置

駆動用電力変換装置（VVVFインバータ、コンバータ・インバータなど主電動機を駆動する電力変換装置）に関する調査結果を表1、表2に示す。

表1 駆動用電力変換装置への適用状況（JR）

事業者	形式	SiCでの営業走行開始	使用モジュール	装置メーカー
JR北	H100形	2020.3	Full	三菱
JR東	E235系	2015.11	Full, Hybrid	三菱, 東芝
	GV-E400系	2019.8	Hybrid	三菱
	E131系	2021.3	Hybrid	不明
	E261系	2020.3	Full	日立
JR海	N700S量産車	2020.7	Full, Hybrid	*
	315系	21年度予定	不明	不明
JR西	323系	2016.12	Full	三菱
	227系 1000代	2019.3	Full	東芝, 三菱
	271系	2020.3	Full	日立
JR九	811系更新	2017.4	Hybrid	日立
	821系	2019.3	Full	三菱
JR貨	DD200形式	2018.6	Hybrid	三菱

*：東芝、三菱、日立、富士電機、東洋電機

2021年現在で約60車種にSiC素子を使用した駆動用電力変換装置が採用されている。事業者への普及状況を見ると、JR四国を除くJR各社、大手民鉄の大多数でSiC搭載車両が営業しており、直流電車だけでなく、交流電車、交直流電車、新幹線電車、路面電車、電気式ディーゼル車と幅広く搭載されている。

表2 駆動用電力変換装置への適用状況（公民鉄）

事業者	形式	SiCでの営業開始	使用モジュール	装置メーカー
西武	6000系更新	2015.5	Full	三菱
	001系	2019.3	Full	三菱
京成	3000系	2017.12	Hybrid	東洋
	3100形	2019.10	Hybrid	東洋
京王	5000系	2017.9	Hybrid	日立
	8000系更新	2015	Hybrid	日立
小田急	1000形更新	2015.1	Full	三菱
	5000形	2020.3	Full	三菱
	8000形更新	2013	Hybrid	三菱
	30000形更新	2017.3	Full	三菱
	70000形	2018.3	Full	三菱
東急	2020系, 6020系	2018.3	Full	三菱
相鉄	20000系	2018.2	Hybrid	日立
東京地下鉄	1000系 3次車以降	2015.4	Hybrid	東芝
	2000系	2019.2	Full	東芝
	05系更新 (北綾瀬支線)	2014.4	Hybrid	三菱
	17000系	2021.2	Full	三菱
	18000系	2021.8	Full	不明
	9000系更新	2016.8	Full	不明
京急	1000形更新	2017	不明	三菱
東京都交	5500形	2018.6	Full	三菱
	6500形	22年度予定	不明	不明
	12-600形 3次車	2019.2	Hybrid	日立
横浜市交	3000V形	2017.4	Hybrid	三菱
新京成	8800形更新	2016.2	Full	不明
	80000形	2019.12	Full	三菱
つくばエクスプレス	TX-3000系	2020.3	Full	日立
名鉄	9500系 9100系	2019.12	Hybrid	東芝
名古屋市交	2000形更新	2013.3	Hybrid	三菱
福井鉄道	F1000形	2013.3	Hybrid	三菱
えちぜん鉄道	7000形	2013.2	Hybrid	三菱
近鉄	80000系	2020.3	Hybrid	三菱, 日立
南海	8300系 6次車	2019	Hybrid	不明
京都市交	10系更新	2015.5	Hybrid	不明
神戸市交	6000形	2019.2	Hybrid	日立
	7000-A系	2016	Full	不明
神戸電鉄	6500系	2016.5	Full	三菱
神戸新交通	3000系	2018.8	Hybrid	三菱
広島電鉄	3900形更新	2017.2	Hybrid	東洋
西鉄	6050形更新	2016	Hybrid	不明
	9000形	2016.3	Hybrid	東芝

このほか、Wikipediaに東京地下鉄13000系第22編成以降、東急電鉄3020系、さらに鉄道ファンによるWebページに大阪市高速電気軌道30000系、福岡市交通局N2000系もSiC素子適用との情報がある。

メーカーの供給状況を見ると、電機メーカー5社がSiC素子を搭載した電力変換装置の納入実績がある。さらにモジュールで考えると、東芝、三菱電機、日立製作所は自社製 Full SiC モジュールを使用した駆動用電力変換装置の納入実績があり、富士電機も自社製モジュール (Hybrid か Full かは不明) の供給実績があることがわかってきている。

3.2 補助電源装置

補助電源装置に対する SiC 素子採用状況をまとめたものを表3に示す。2013年に東京地下鉄1000系2次車、JRではJR四国8600系で採用されたのが最初である。補助電源装置は文献が少ないため調査が不十分な可能性もあるが、現在判明しているだけで20車種程度に搭載されている。今回調査した限りでは Full SiC を使用した補助電源装置は確認できなかった。その理由は不明であるが、補助電源装置は駆動用電力変換装置に比べて使用電流が小さく、さらには連続運転する特徴から、Full SiC を採用するメリットが少ない可能性がある。

メーカーの供給状況を見ると、三菱電機、東芝、東洋電機製造の3社が SiC 素子を搭載した電力変換装置の納入実績がある。ただし、駆動用電力変換装置の納入実績と合わせると5社全社が供給可能であると考えられる。

表3 補助電源装置への適用状況

事業者	形式	SiCでの営業開始	使用モジュール	装置メーカー
JR北	H100形	2020.3	不明	三菱
JR四	8600系	2014.6	Hybrid	不明
	7200系	2016.6	Hybrid	不明
JR貨	DD200形式	2018.6	Hybrid	三菱
札幌市交	9000形	2015年度	Hybrid	不明
東武	70000系	2017.7	Hybrid	不明
	500系	2017.4	不明	不明
京王	1000形改造	2015年度	Hybrid	三菱
西武	40000系	2017.3	Hybrid	不明
東京地下鉄	1000系2次車以降	2013.6	Hybrid	三菱
	2000系	2019.2	Hybrid	不明
	13000系	2016年度	Hybrid	不明
	05系更新(北綾瀬支線)	2014.4	Hybrid	三菱
	16000系4次車以降	2015.9	Hybrid	三菱
	17000系	2021.2	Hybrid	不明
つくばエクスプレス	18000系	2021.8	Hybrid	不明
	TX-3000系	2020.3	Hybrid	不明
近鉄	80000系	2020.3	Hybrid	不明
阪神	5700系	2015.8	Hybrid	不明
神戸市交	6000形	2019.2	Hybrid	不明
広島高速	7000系	2020.3	Hybrid	東洋
西鉄	9000形*	2016.3	Hybrid	東芝

*：駆動用と補助電源用に切り替え可能な電力変換器

4. 海外における適用状況

海外で SiC 素子を採用している営業車両が少ないことから、海外電機メーカーの開発状況も含めて調査した。欧州では研究開発プロジェクト PINTA で補助金を受けた開発が行われている。PINTA には4社 (Siemens, CAF, Bombardier, Alstom) が参画していることから、PINTA の情報が事実上海外メーカーの SiC 素子開発動向であると考えられる。この他に中国の動向も調査したが、研究情報のみであり、鉄道車両に搭載した試験に関する情報は見つけられなかった。さらに、海外電機メーカーのカatalog、Railway Gazette 誌や展示会 InnoTrans 2018などを元に、契約情報や車両メーカーの SiC 素子導入予定も調査した。調査にあたっては可能なかぎり鉄道事業者やメーカーの発表を対象としたが、情報が少ないため、Wikipedia やニュースサイトも活用した。

4.1 営業車両への適用状況

海外の営業車両に対する SiC 素子採用状況を表4にまとめた。多くが開発で先行した三菱電機のもの、あるいは日本の車両メーカーが納入した車両である。一方で ABB, Bombardier による SiC 素子を採用した補助電源装置も営業車両に搭載され始めている。なお、ロンドン地下鉄は契約情報¹⁰⁾であり、具体的な営業開始年月は不明である。海外電機メーカーで補助電源装置が先行しているのは、駆動用電力変換装置に比べて補助電源装置の電流が小さいことによりモジュール開発が容易であることが理由と考えられる。

表4 海外鉄道車両への適用状況

事業者 または路線	形式	SiCでの営業開始	用途	装置メーカー
ウクライナ キエフ市地下鉄	E-KM形 (E形更新)	2016.7	駆動	三菱
アメリカ ロング アイランド鉄道	M9形	2019.11	駆動	三菱
アメリカ マサチューセッツ湾 港局	#4 Red Line #14 Orange Line	2019.8	駆動	三菱
スイス国鉄	RABe501形	2019	補助電源	ABB
台湾 台中捷運	中運量電車	2020.11	駆動	三菱
カタール ドohaメトロ	-(形式なし)	2019.5	駆動	日立
シンガポール トムソン・イースト コースト線	T251形	2023 予定	駆動	三菱
英国 ロンドン地下鉄	1992形 更新	不明	補助電源	Bombardier

注：斜字は Wikipedia の情報をもとに作成

使用モジュールは ABB が Full、三菱・日立が Hybrid、Bombardier は不明

表5 海外電機メーカーの鉄道車両向け SiC 駆動用電力変換装置開発状況

研究フェーズ		PINTA	PINTA2	PINTA3
期間		2016.9-2018.12	2018.9-2020.11	2020.12-2023.5
資金総額* (カッコ内は Shift2Rail の補助額)		€28,855,184.05 (€12,823,24404)	€28,534,183.73 (€12,680,591.25)	€19,242,343.01 (€8,590,957.57)
開発担当 メーカー	Siemens (Tramway: 路面電車用)	電力変換器 (Hybrid モジュール) の実験室による試験	ドイツ ミュンヘンで路面電車による実証試験実施 (2020 年 8 月から 2021 年 2 月。おそらく Full SiC モジュール)	実証試験完了予定
	CAF (Metro: 通勤車用)	SiC 素子を使用した電力変換器を開発 (設計のみで製作していないと思われる)	DC 1.5kV 向け電力変換器 (Full SiC モジュール) のプロトタイプを実験室で試験。2021 年 2 月からスペイン バスク鉄道にて 2 年間の営業運転による実証試験を開始。	実証試験完了予定
	Bombardier (Regional: 近郊車用)	情報なし ※PINTA とは別にスウェーデンのストックホルムにて通勤車の営業運転による実証試験を 2017 年 12 月から 2018 年 5 月まで実施 (適用素子不明)	電力変換装置 (適用素子不明) のプロトタイプを、トランス、電力変換器、モータ、歯車装置を組み合わせて試験	試験線においてデモ走行を実施する予定

*: PINTA 各フェーズでの総額であり、この金額全てが SiC 電力変換装置開発に投入されたわけではない

4.2 海外電機メーカーの開発状況

海外の開発状況を表5に示す。欧州ではEUが資金を拠出する共同事業体であるShift2Railの中にあるプロジェクトであるPINTA¹¹⁾において2016年1月から2018年12月までSiC素子を使用した鉄道車両駆動用電力変換装置の研究開発が行われた(なお、PINTAは電力変換装置の開発だけではなく騒音、EMC、粘着など鉄道車両駆動に関する多くの研究開発課題があり、PINTAの総額は約3千万ユーロに達する)。PINTAにおいては3社が路面電車(Siemens)、通勤(CAF)、近郊(Bombardier)の用途別にSiC素子を使用した駆動用電力変換装置の開発を分担、実施している(この他、Alstomが高速車両向けのダイレクトドライブモータの開発を担当)。その後、後継プロジェクトPINTA2¹²⁾が2018年9月から2019年11月まで実施され、2021年1月27日に最終報告会が行われた。さらに、2020年12月からは最終フェーズであるPINTA3¹³⁾が2023年5月終了予定で開始されている。なお、プロジェクト間の期間に重複がある理由は不明である。

開発状況を見ると、Bombardierはいち早く2018年にスウェーデンのStockholm Metroにおいて、C20形式を用いた営業運転による駆動用電力変換装置の実証試験を実施した¹⁴⁾(この試験はPINTAプロジェクトとは無関係のようである)。SiemensはドイツのMünichで路面電車による実証試験を2020年8月から2021年2月まで実施した¹⁵⁾。この電力変換装置はFull SiCモジュールを使用していると思われる。当該SiCモジュールはベンチ試験の報告に、使用デバイスが1.7kV SiC MOSFETがサンプルデバイスであることやスイッチング周波数が3kHzとの記載がある。CAFは2021年2月からスペ

インで2年間の実証試験を開始している¹⁶⁾。

PINTA全体の計画ではPINTA3終了後の2024年にSiC電力変換装置を市場投入予定となっている。なお、各実証試験やベンチ試験に関して回路方式(2レベル、3レベル)も調査したが、判別できなかった。

4.3 海外電機メーカーのカタログ

海外の鉄道用電力変換装置は産業用電力変換装置と同様に、メーカーが型式を決めてカタログを作成しているものが多い。Siemensのカタログ¹⁷⁾(発行年不明)にはSiCがオプションとなっている鉄道用電力変換装置が存在するが型番の記載がなく、Battery chargerとOn-board converterとなっているため、補助電源用と思われる。SiCを早くから使用しているポーランドのMedcomは型番にSiC素子を使用している電力変換装置を2018年のカタログ¹⁸⁾に複数掲載している(ただし、多くが道路車両用途)。Medcomのカタログにおいて直流1500Vに対応しているものは120kVAの補助電源用1種類(PSM-145SiC)のみであった。なお、MedcomのSiC電力変換装置が札幌市交通局のササラ電車(雪21形と推測)に搭載されているとの情報¹⁹⁾があるが詳細は不明である。

4.4 海外車両メーカーによるSiC素子採用情報

電機メーカーとは別に、海外の鉄道車両メーカーがSiC素子を採用した鉄道車両のアピールを行っている。Siemensの次世代高速鉄道車両Velaro Novoは補助電源装置にSiC素子を採用し、2023年に営業運転を始めると表明²⁰⁾しているが、どのメーカーの電力変換器を使用するかなどの情報は無い。中国中車(CRRC)は駆動用電力

変換装置に SiC 素子を採用した地下鉄車両を発表²¹⁾しているが、導入の見通しは不明である。これらは主に InnoTrans 2018 での情報であり、その後 COVID-19 の影響によって開発が停滞している可能性もある。

5. まとめ

本調査報告では日本の鉄道車両への適用事例を中心に、SiC 電力用半導体素子の適用状況や海外での開発状況を調査した。その結果、日本は多くの鉄道事業者で営業車両に駆動用、補助電源用ともに導入済みであるのに対し、海外の営業車両では導入実績が数例あるのみであった。

海外電機メーカーの動向を調査した結果、2021年11月時点では駆動用電力変換装置を日本以外の電機メーカーが製作・納入した鉄道車両は存在せず、補助電源用でも確認できたのは ABB の 1 件のみであった。中国の動向も調査したが、研究情報のみであり、鉄道車両に搭載した試験に関する情報は見つけられなかった。

以上の調査結果から、鉄道車両用電力変換装置については日本が圧倒的に進んでおり、すでに普及期に突入したと考えられる。しかしながら、PINTA3 が終了する 2024 年以降は欧州の電機メーカーも SiC 搭載の電力変換装置が供給可能になると思われるため、2030 年までには欧州メーカーが日本に追いつく可能性も十分考えられる。

文献

- 1) Fred et al., "Overview of silicon carbide technology: Device, converter, system, and application," CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, Vol.1, No.1, pp.13-32, 2016.
- 2) 峯吉他：鉄道車両の省エネルギー化に向けたインバータの SiC 素子適用による電流増加時の損失の特性解析，電気学会論文誌 D, Vol.139, No.3, pp.258-265, 2019
- 3) 根来他：SiC パワーモジュール適用鉄道車両用高効率インバータシステム，平成 24 年電気学会産業応用部門大会，1-O1-5, 2012
- 4) Sato, et al., "Development of SiC Applied Traction System for Next-Generation Shinkansen High-Speed Trains," IEEE Journal of Industry Applications, Vol.9, No.4, pp.453-459, 2020.
- 5) 前田他：フル SiC モジュール適用高効率 8 極 PMSM システムの開発，第 56 回鉄道サイバネ・シンポジウム論文集，No.501, 2019
- 6) 稲垣他：東京メトロ 1000 系搭載の非常走行用電源装置について，鉄道車両と技術，Vol.23, No.6, pp.22-26, 2017
- 7) 佐藤他：N700S 駆動システムの開発，J-RAIL2018,

- No.3407, 2018
- 8) 新しい燃料電池ハイブリッド試験電車の完成，鉄道総研ニュースリリース：https://www.rtri.or.jp/press/is5f1i000000c1lab-att/20190828_001.pdf (参照日：2020 年 1 月 23 日)
- 9) 仲村孝行：鉄道車両用パワーエレクトロニクス変圧器の技術動向，鉄道総研報告，Vol.34, No.12, pp.41-46, 2020
- 10) New auxiliary power systems for London Underground trains：<https://www.railjournal.com/rolling-stock/london-underground-trains-to-get-new-auxiliary-power-system/> (参照日：2020 年 1 月 23 日)
- 11) PINTA：https://projects.shift2rail.org/s2r_ip1_n.aspx?p=PINTA (参照日：2021 年 1 月 22 日)
- 12) PINTA2：https://projects.shift2rail.org/s2r_ip1_n.aspx?p=PINTA2 (参照日：2021 年 1 月 22 日)
- 13) PINTA3：https://projects.shift2rail.org/s2r_ip1_n.aspx?p=PINTA3 (参照日：2021 年 1 月 22 日)
- 14) "Validation of Traction lab prototypes (WP11)," PINTA2 2nd Newsletter, p.6：<https://projects.shift2rail.org/download.aspx?id=47d5cd1e-c0b4-467e-ad74-d1e24cfdece7> (参照日：2021 年 1 月 22 日)
- 15) Bombardier Celebrates Success of New Energy-Saving Propulsion Technology：https://rail.bombardier.com/en/about-us/worldwide-presence/sweden/en.html/bombardier/news/2018/bt_20180315_bombardier-celebrates-success-of-new-energy-saving-p/en (参照日：2021 年 11 月 19 日)
- 16) Silicon carbide, moving towards a more sustainable train：<https://www.cafpower.com/en/news/item/648-siliconcarbide-train-sustainable-technology> (参照日：2021 年 9 月 7 日)
- 17) Electrical components for the railway industry：<https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:00ea7e7b-5ccf-4dc0-92de-770692975a1a/dfcp-b10083-01-7600-ws-railway-components72dpi.pdf> (参照日：2021 年 1 月 22 日)
- 18) Power Electronic Solutions for Public Transport：https://medcom.com.pl/uploads/downloads/trams-trolleybuses-metro-ebuses_1548854002.pdf (参照日：2021 年 1 月 22 日)
- 19) A Growing Number of Tram and Rail Contracts for MEDCOM：<https://www.railway-technology.com/contractors/electrification/medcom1/pressreleases/tram-rail-contracts-medcom/> (参照日：2021 年 9 月 7 日)
- 20) Siemens reveals Velaro Novo 360 km/h train concept：<https://www.railwaygazette.com/high-speed/siemens-reveals-velaro-novo-360-km/h-train-concept/46616.article> (参照日：2020 年 1 月 23 日)
- 21) CRRC が InnoTrans 2018 で最軽量かつエネルギー効率の高い新鋭地下鉄車両を発表：<https://kyodonewsprwire.jp/release/201809208160> (参照日：2020 年 1 月 23 日)