



技術戦略研究センターレポート

TSC Foresight

2021年10月

パワーエレクトロニクス分野の 技術戦略策定に向けて

Vol. **103**

1 章	解決すべき社会課題と将来像	2
1-1	社会課題と将来像	2
1-2	解決・実現のための方法	4
1-3	パワーエレクトロニクスの環境分析とベンチマーキング	8
2 章	解決・実現手段の候補	15
2-1	解決・実現のための課題	15
2-2	分析等から得られた具体的実現手段の候補	17
2-3	技術開発の方向性	19
3 章	おわりに	20

TSCとはTechnology Strategy Center(技術戦略研究センター)の略称です。

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構
技術戦略研究センター(TSC)

1章 解決すべき社会課題と将来像

1-1 社会課題と将来像

現代社会のこれまでの発展は、膨大なエネルギー消費に裏付けられたものであり、このエネルギーの生成、消費によって二酸化炭素(CO₂)、メタン等の温室効果ガスが大量に大気中に排出されている。人為起源の温室効果ガスの排出が20世紀半ば以降に観測された温暖化の支配的な原因であった可能性が極めて高く^{※1}、その解決は世界的規模での社会課題となっている。

これに対して、2015年にパリで開催された国連気候変動枠組条約第21回締約国会議(COP21)において、2020年以降の気候変動問題に関する新たな国際的枠組みとして、パリ協定が採択された。パリ協定では、世界の平均気温上昇を産業革命以前に比べて温度上昇を2℃未満に保つ(2℃シナリオ)とともに、1.5℃に抑える努力をするという目標が掲げられた。2℃シナリオでは、21世紀後半には、世界の人為的な温室効果ガス排出量を正味ゼロとするネット・ゼロ・エミッションの達成が必要とされている。これを踏まえ我が国では、2016年の内閣府総合科学技術・イノベーション会議(CSTI)により、「エネルギー・環境イノベーション戦略」(NESTI 2050)が策

定され、2050年頃という長期的視点に立って、世界の温室効果ガスの抜本的排出削減を実現するために、研究開発としてより重点的・集中的に進めていくべき技術とその課題が示された。「NESTI 2050」では、2℃目標との整合を図るため2050年までに世界の温室効果ガス排出量を240億トン程度の水準にする必要があるとしている。

さらに2020年10月、我が国は2050年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指すことを宣言し、これを踏まえ「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」を策定した。本戦略では、本レポートの対象分野である半導体・情報通信産業を含め、カーボンニュートラルを実現するための14の重要分野を設定し、それぞれに年限を明確化した目標や、研究開発から規制改革・標準化などを盛り込んだ実行計画を策定している。

また、国際社会においては、気候変動問題に限らず、世界の持続可能性を重視する考え方が浸透してきている。2015年には国連サミットにおいて全会一致で持続可能な開発目標(SDGs)が採択され、2030年に向けた国際社会共通の目標が定められた。さらに、英国、フランス、ドイツ等による内燃機関自動車販売禁止の方針が発表される等、各国の温室効果ガス排出を含めた環境問題に対する取組みは活発化しており、企業への投資においても、環境・社会・企業統治に配慮している企業を重視するESG投資が拡大している^{※2}。

※1 <https://www.env.go.jp/policy/hakusyo/r01/html/hj19020101.html>

※2 <https://www.nedo.go.jp/content/100903678.pdf>

パワーエレクトロニクス分野の技術戦略策定に向けて

地球温暖化と気候変動をもたらす温室効果ガス排出の内訳ではCO₂が76%（化石燃料起源65%+森林破壊等起源11%）と最大で、メタン16%、一酸化二窒素6.2%と続く。従って、温室効果ガス排出削減のためには各産業分野でのCO₂削減が求められ、前述のパリ協定では各分野での2050年の削減目標が設定されている。

本レポートでは、温室効果ガスの代表であるCO₂排出削減を対象とする。図1はIEA（International Energy Agency）の資料による2014年での各分野における世界のCO₂排出量である。発電等の電力分野の排出量が全体の約40%と大きく、電力を消費する分野では産業24%と運輸22%の排出量が多い。

IEAによると^{※3}、2050年まで特に対策を講じない場合

のCO₂排出量は約550億トンに拡大すると想定され、これに対して、2℃シナリオ達成のためには、従来技術の普及に伴うCO₂排出量削減を約150億トンとして、約400億トンの削減が求められる。その内訳として、発電160億トン（39%）、産業94億トン（23%）、運輸74億トン（18%）、建物57億トン（14%）等が見込まれており、これらは各分野の経済活動を保ちながら削減していくことが求められる。

世界規模の社会課題となっている気候変動問題を乗り越え、環境、経済、社会が調和し、新しい価値が創造され続け、持続的に発展し続ける社会、すなわち、「持続可能な社会」の実現が、目指す将来像である。

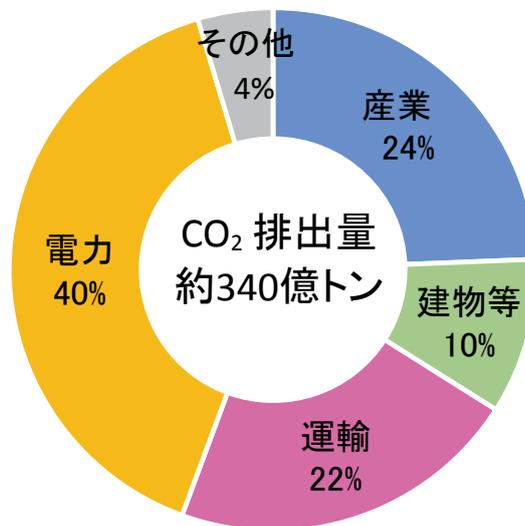


図1 各分野での世界のCO₂排出量 (2014年)
 出所：IEA Energy Technology Perspective2017を基に
 NEDO技術戦略研究センター作成 (2020)

※3 Energy Technology Perspective 2016. IEA, 2016.

1 -2 解決・実現のための方法

CO₂は、電気エネルギー、熱エネルギー、動力等を得るために、主に化石燃料（石油、石炭、天然ガス等）の人為的な燃焼を行うことで発生する。従って、温室効果ガス排出を削減するためには、化石燃料の燃焼に依らない再生可能エネルギー等へのエネルギー生成方法の転換や、社会全体のエネルギー消費（伝送や変換における損失も含む）を低減する効率化が有効となる。「NESTI 2050」では、これに資する革新技术として、省エネルギー、蓄エネルギー、創エネルギー、CO₂固定化・有効利用、さらに、コア技術として、次世代パワーエレクトロニクス、革新的センサ、多目的超電導が挙げられている^{※4}。パワーエレクトロニクスは、パワー半導体と電子部品等の組合せから成り、電気を使うすべての機器に対して、必要とする電圧、電流、交流の周波数等の電源を供給して機器の安定使用を保証するために不可欠のものである。その役割は、電力供給（発電、送電、蓄電）から電力を消費する産業、運輸、建物等のすべての分野において、電気・電子機器の電力消費の効率化や電力損失の低減に寄与することであり、電気エネルギーによって稼働している現代社会全体に効果が及んでいる。

例えば、図1の運輸におけるCO₂排出量において、各分野の削減目標量の内訳は国土交通省のデータから表1のようになっている^{※5}。自動車が64億トンと86%を占めており、その大部分を担っている。自動車は世界レベルで台数が多く、大半はまだガソリンエンジン等の内燃機関を使っており、今後の電気モーターを使った電気自動車の普及がCO₂排出削減に寄与するものと期待される。図2には世界の自動車台数（二輪、トラック、バスを除く）について2℃シナリオに従った場合のIEAによる推移予測を示す。ここで電気自動車には、バッテリー車、ハイブリッド車、プラグインハイブリッド車、燃料電池車を含んでいる。2050年には電気自動車台数が半数を超え、内燃機関の自動車台数が全体の44%に低下することでCO₂排出削減に寄与していくと見られる。また、鉄道の電動化は既に進んでおり、船舶、航空機の電動化は今後実用化が進むと見られるため、パワーエレクトロニクスによる効率改善で消費電力が下がりCO₂排出量の削減が期待される。

従って、運輸分野では電気自動車（EV）の普及を加速し、さらにエネルギー効率を向上させることが2℃シナリオ実現に大きく貢献すると言える。EVの普及においては、コア技術となるモーター、蓄電池の性能向上と共に効率的な電動化を担うパワーエレクトロニクスの果たす役割が大きい。

※4 <https://www8.cao.go.jp/cstp/nesti/gaiyo.pdf>

※5 https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_tk_000007.html

パワーエレクトロニクス分野の技術戦略策定に向けて

表1 運輸部門におけるCO₂排出削減目標量内訳（2018年度）

	削減目標（億トン）		取組み
鉄道	3	4.1%	省エネ最適化
船舶	4	4.8%	洋上充電
航空	4	4.8%	電動化
自動車	64	86%	電動化

出所：国土交通省 HP を基に NEDO 技術戦略研究センター作成（2020）

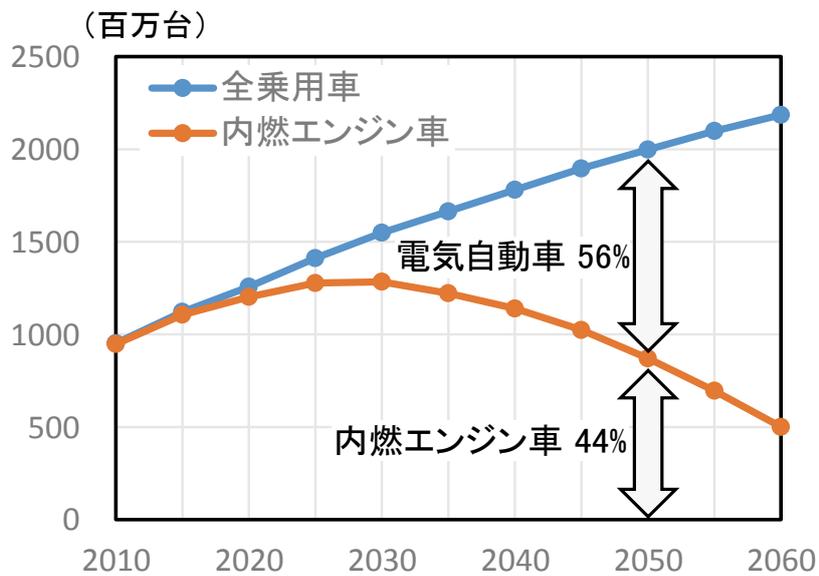


図2 2°Cシナリオにおける世界の乗用車保有台数推移

出所：IEA Energy Technology Perspective2017を基にNEDO技術戦略研究センター作成（2020）

パワーエレクトロニクス分野の技術戦略策定に向けて

パワーエレクトロニクスを構成するパワー半導体の材料は、現在、大部分でシリコン (Si) が使用されている。近年、Siとは性質の異なるSiC、GaN、Ga₂O₃といったワイドバンドギャップ半導体 (WBG半導体、Wide Band Gap) の研究開発が進展し、特にSiC、GaNについては製品化が進みつつある。

WBG半導体は、半導体の電子が存在する価電子帯と伝導帯の間にある禁制帯のエネルギーギャップ (バンド幅) がSiに比べて大きい半導体であり、これによりSiと比べて、高電力、高周波数、高温での高性能化が見込まれる。パワー半導体を使ったパワーデバイスとして、ダイオード、トランジスタ、サイリスタといったデバイスがあるが、WBG半導体を適用することでCO₂排出削減や省エネルギー化においてSiに比べてより大きな効果が期待される。図3に実用化されているSi、SiC、GaNのパワー半導体の単体での適用領域を示す。横軸は動作周波数、縦軸は電力変換容量である。Siは全域で適用されており、よ

り高電力側 (上側) ではSiCが、より高周波数側 (右側) ではGaNが性能的に優位であり、それぞれSiが適用されない先端領域を補っている。前述のCO₂排出削減の観点では、電力、運輸 (EV、鉄道等)、産業等のより高電力を使用する分野を適用領域とするSiCの果たす役割が大きいと言える。例えば、デバイスの導通時の抵抗によるエネルギー損失や、デバイスのオン、オフの導通状態を切り替えるスイッチング動作時に発生するエネルギー損失は、最大電界強度の大きさに依存しており、Siに比べ約10倍の大きさを持つWBG半導体により低減できる (表2参照)。さらにWBG半導体はSiに比べてバンドギャップが約3倍であり、熱的に励起するキャリアが少ないため、高温動作が可能である。加えて、SiCは熱伝導率も高いことから放熱効果も高く、冷却装置を含めたシステムの小型化にも有利となることから、システム全体での省エネルギー化も期待される。

パワーエレクトロニクス分野の技術戦略策定に向けて

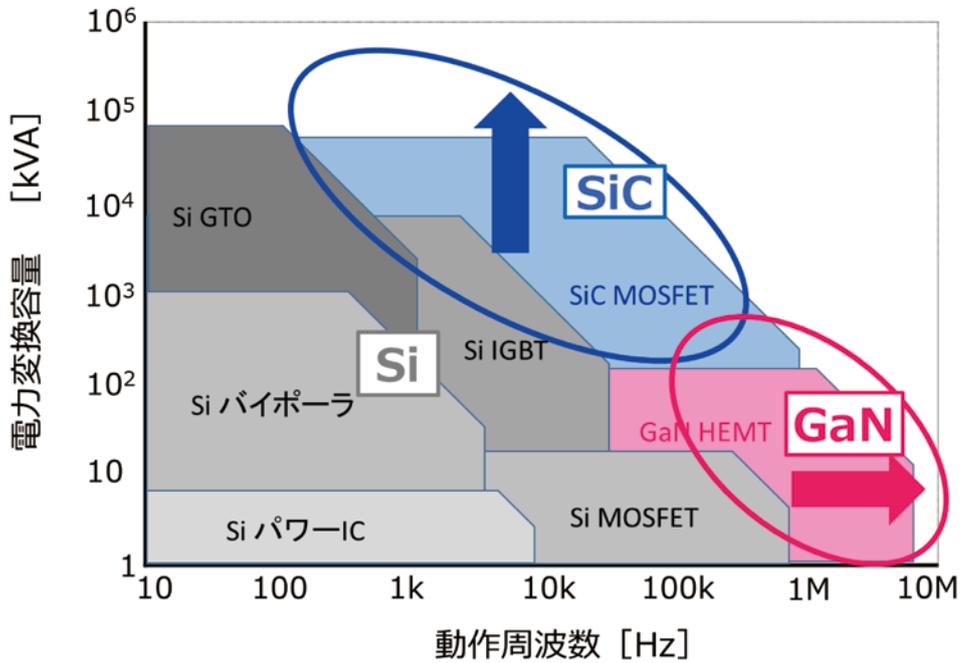


図3 実用化されているパワー半導体と適用領域

出所：NEDO 技術戦略研究センター作成 (2019)

表2 パワー半導体に用いられる材料による特性の違い

	Si	SiC	GaN
バンドギャップ (eV)	1.12	3.26	3.39
電子移動度 (cm ² /Vs)	1500	1000	900
電子飽和速度 (cm/s)	1.0E+07	2.2E+07	2.7E+07
最大電界強度 (MV/cm)	0.3	3.0	3.3
熱伝導率 (W/cmK)	1.5	4.9	2.0

出所：「SiC・GaNパワー半導体の最新技術・課題ならびにデバイス評価技術の重要性」(筑波大学、2016) を基に NEDO 技術戦略研究センター作成 (2019)

1-3 パワーエレクトロニクスの環境分析とベンチマーキング

1-3-1 各国の政策動向

パワーエレクトロニクス技術は、日本、米国、欧州では国家レベルでの研究開発が継続的に行われている。Siパワー半導体が普及する中で次世代のパワー半導体となるSiC、GaN等WBG半導体の研究開発に関して、基板、デバイスから応用技術まで幅広い取組みが行われている。

米国では、直近の主な活動としてNGPEMII (The Next Generation Power Electronics Manufacturing Innovation Institute) によるPowerAmerica、DOE (エネルギー省: Department of Energy) によるSWITCHES (Strategies for Wide Bandgap, Inexpensive Transistors for Controlling High-Efficiency Systems) 及びPNDIODES (Power Nitride Doping Innovation Offers Devices Enabling SWITCHES)、さらに、ニューヨーク州と企業によるNY-PEMC (New York Power Electronics Manufacturing Consortium) 等がある。PowerAmericaは2015年に設立され、DOEが約7,000万ドル出資、パートナー企業とノースカロライナ州からも出資され、2019年時点で総額約1億5,000万ドルのファンディングを実施している。SiC製造プロセス技術を中心に基板、デバイスから応用までの垂直統合型の研究開発が行われている。モーター、電力システム、再生エネルギー、電気自動車、防衛装備等のアプリケーションを想定しており、人材育成も取り組まれている。SWITCHESは2014年から2020年3月まで実施されたDOE出資の約3,200万ドルのプロジェクトで、GaNの基板、デバイス及びSiC、ダイヤモンドのデバイス技術の研究開発が行われた。NY-PEMCは2014年に発表され、ニューヨーク州が約1億3,500万

ドル、民間企業が約3億6,500万ドル出資した総額約5億ドルの産官学コンソーシアムである。6インチのSiC製造プロセスを主体にデバイス及びアプリケーションでの性能向上を目指した研究開発が行われ、コンソーシアムメンバーによる製品化を行う段階にある。

欧州では、欧州連合 (EU) の科学技術政策のフレームワークプログラムの中でいくつかのプロジェクトが実施されている。例えば、第7期フレームワークプログラムのSPEED (Silicon Carbide Power Technology for Energy Efficient Devices) は2014年から4年間実施されたEU出資の約1,230万ユーロのプロジェクトで、SiC基板、デバイス製造技術等の研究開発が行われた。また、欧州のパワーエレクトロニクス関連の代表的なコンソーシアムであるECPE (European Center for Power Electronics) では、欧州のフレームワークプログラムにおいてパワーエレクトロニクスの研究開発を統合する役割を担っている。

中国では、「中国製造2025」において半導体分野の研究開発投資を行っており、半導体メモリと並んでパワー半導体 (SiC、GaN) の国内企業への支援政策を進めている。また、重慶市に大規模なパワー半導体生産基地の建設を予定するなど、パワー半導体分野への積極的な政策投資を行っている^{*6}。

国内における直近の次世代パワーエレクトロニクス関連の研究開発の例を図4に示す。内閣府による「戦略的イノベーション創造プログラム (SIP: Strategic Innovation Promotion Program)」の中で2014年から5年間実施された約110億円のプロジェクトでは、SiC、GaN及び将来技術について、ウェハー・材料からデバイス、モジュール、機器回路まで一貫通貫の技術開発が行われた。経済産業省により2014年から6年間実施された約130億円のプロジェクトでは、新世代Si-IGBT技術、次世代パワエレSiC応用システム技術等の研究開発が

*6 https://www.meti.go.jp/medi_lib/report/H29FY/000403.pdf

パワーエレクトロニクス分野の技術戦略策定に向けて

行われた。その成果として、SiCパワー半導体による鉄道車両用インバータの実用化等で国内の社会実装が始まっている^{※7}。

さらに、「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」においては、超高効率の次世代パワー半導体

(GaN、SiC、Ga₂O₃など)の実用化に向けて研究開発を支援するとともに、導入促進のために半導体サプライチェーンの必要な部分に設備投資支援などを実施することで、2030年までに省エネ率50%以上の次世代パワー半導体の実用化・普及拡大を進めることとしている。

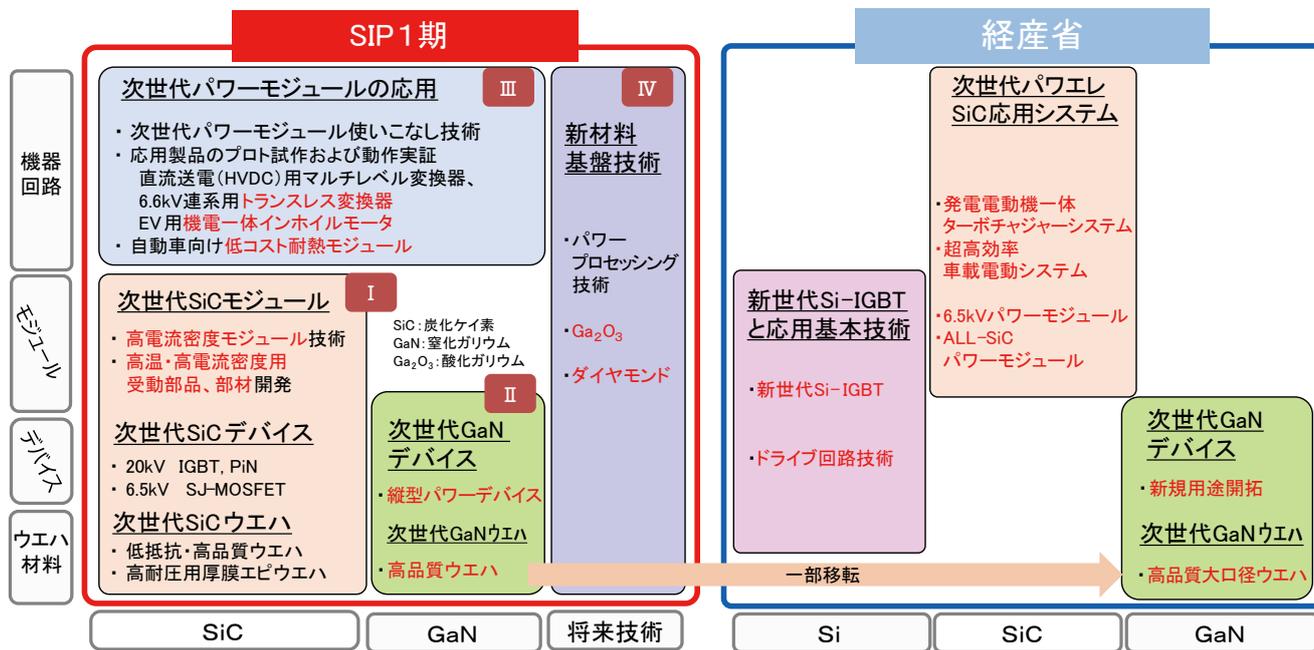


図4 国内における主な次世代パワーエレクトロニクス関連の開発例

出所：NEDO 技術戦略研究センター作成 (2019)

※7 「NEDO 実用ドキュメント パワーエレクトロニクスの新時代」
<https://www.nedo.go.jp/hyoukaku/articles/201706sic/index.html>

パワーエレクトロニクス分野の技術戦略策定に向けて

1-3-2 市場動向

世界のパワーデバイス市場予測（金額ベース）を図5に示す。2018年の約3兆円から2025年には約4兆円、2030年には約5兆円と拡大することが見込まれている。半導体材料で見たその内訳は、大部分がSiであり、2018年では全体の約99%となるが、2020年代にはSiC、GaN、Ga₂O₃といったWBG半導体の市場も徐々に

立ち上がり、2030年には、Siが約86%、SiCが約9%、GaNが約2%、Ga₂O₃が約3%とWBG半導体の割合が増加していくと予想されている。図6にパワーデバイスの適用分野別の市場予測を示す。主な適用分野としては、民生機器、情報通信機器、運輸（自動車、鉄道）、産業があり、全体的に市場は伸長していくが、中でも自動車、情報通信機器、産業での伸びが大きくなっている。

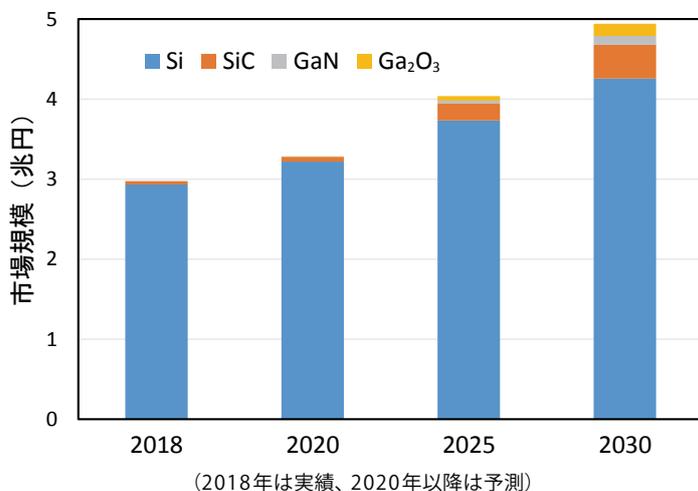


図5 パワーデバイス市場予測

出所：「2019年版次世代パワーデバイス&パワエレ関連機器市場の現状と将来展望」（富士経済、2019）を基にNEDO技術戦略研究センター作成（2019）

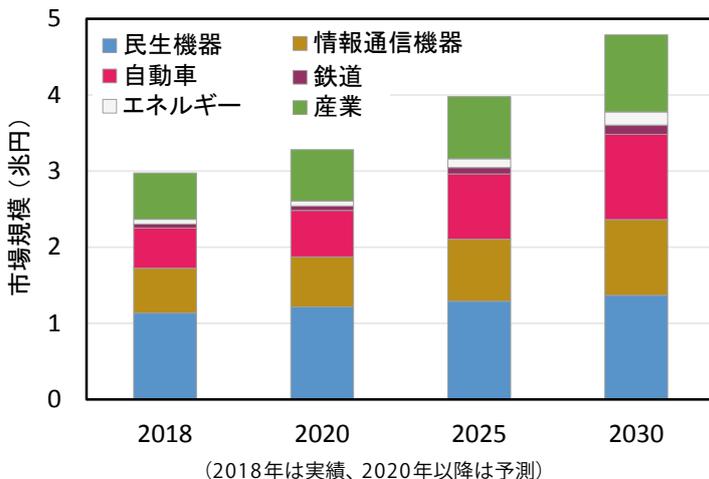


図6 パワーデバイスの適用分野別の市場予測

出所：「2019年版次世代パワーデバイス&パワエレ関連機器市場の現状と将来展望」（富士経済、2019）を基にNEDO技術戦略研究センター作成（2019）

パワーエレクトロニクス分野の技術戦略策定に向けて

図7にSiCデバイスの適用分野別市場予測を示す。2020年代から市場の拡大が予想されており、適用分野としては、特に、自動車、産業での伸びが大きくなっている。一方、図8にGaNデバイスの適用分野別市場予測を示

す。GaNでは周波数性能の優位性から情報通信機器での市場拡大が見込まれている。図3に示したようにSiCとGaNのデバイス特性の違いから適用市場分野の違いが出ている。

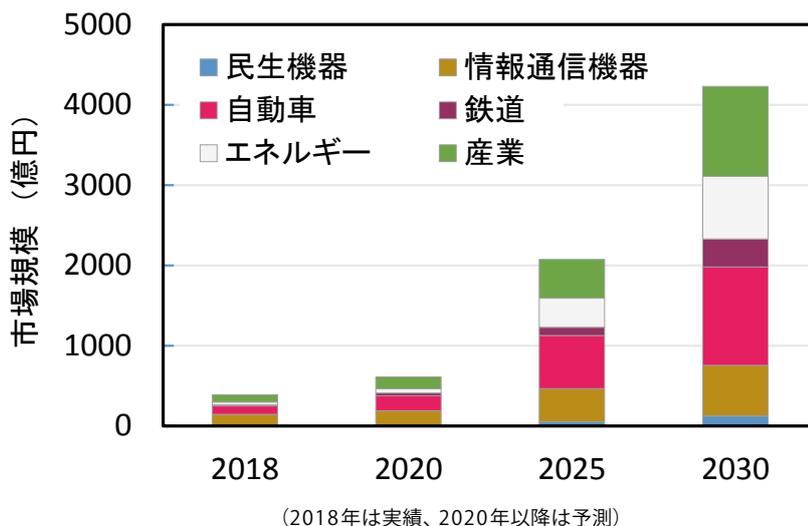


図7 SiCデバイスの適用分野別の市場予測

出所：「2019年版次世代パワーデバイス&パワエレ関連機器市場の現状と将来展望」(富士経済、2019)を基にNEDO技術戦略研究センター作成(2019)

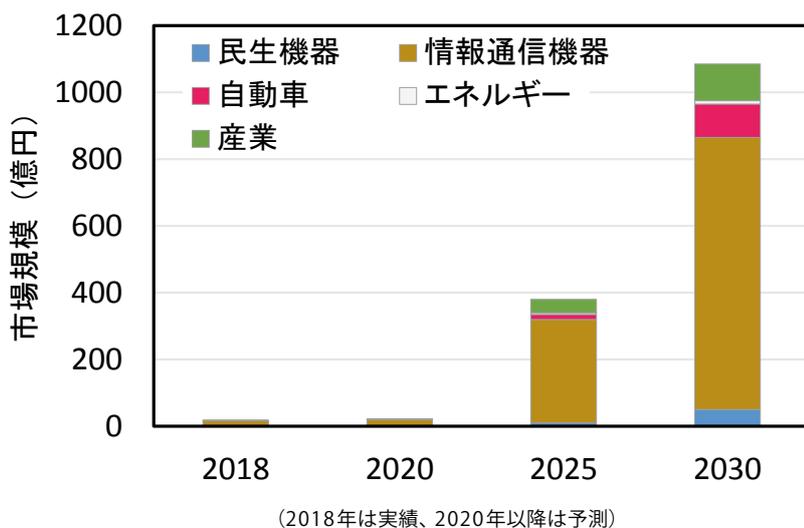


図8 GaNデバイスの適用分野別の市場予測

出所：「2019年版次世代パワーデバイス&パワエレ関連機器市場の現状と将来展望」(富士経済、2019)を基にNEDO技術戦略研究センター作成(2019)

パワーエレクトロニクス分野の技術戦略策定に向けて

図9にパワーデバイス、図10にパワーモジュール、図11にパワー半導体用Siウェハー、各々の2018年の市場におけるメーカーシェアを示す。パワーデバイス、パワーモジュールについてはSiの製品が大部分であり、一部WBGを含んでいる。日本はそれぞれで上位にあり、パワーデバイスでは日本の上位5社で約20%のシェア、パワーモジュールでは日本の上位4社で約45%のシェアを有

しており、Siウェハーでは日本の2社で約34%のシェアを有している。なお、パワーデバイスでは、欧米のシェアの大きいメーカーに比べて、日本メーカーの各社のシェアはその1/3以下であり、複数社が存在して対抗する構図となっている。欧州企業ではSiの300mmラインによる生産を予定しており、今後はシェアの構成が変わっていく可能性がある。

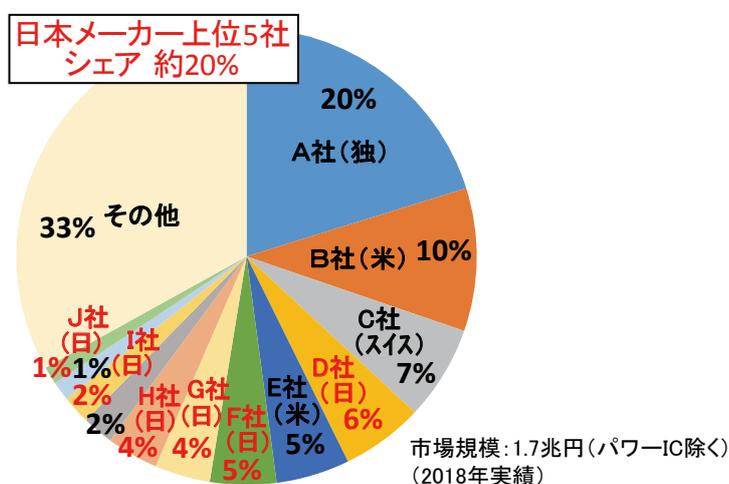


図9 パワーデバイスのメーカーシェア

出所: 「2019年版次世代パワーデバイス&パワエレ関連機器市場の現状と将来展望」(富士経済、2019)を基にNEDO技術戦略研究センター作成(2019)

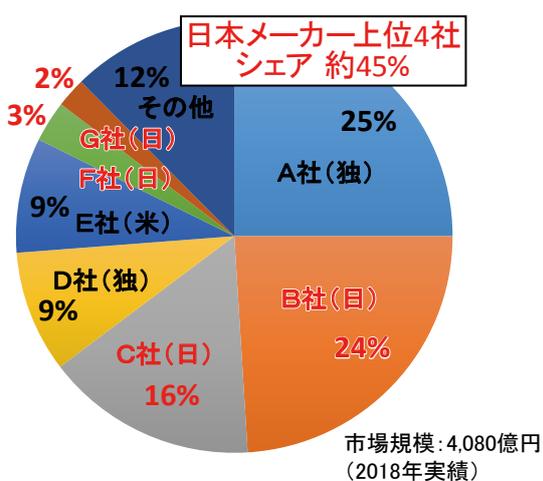


図10 パワーモジュールのメーカーシェア

出所: 「2019年版次世代パワーデバイス&パワエレ関連機器市場の現状と将来展望」(富士経済、2019)を基にNEDO技術戦略研究センター作成(2019)

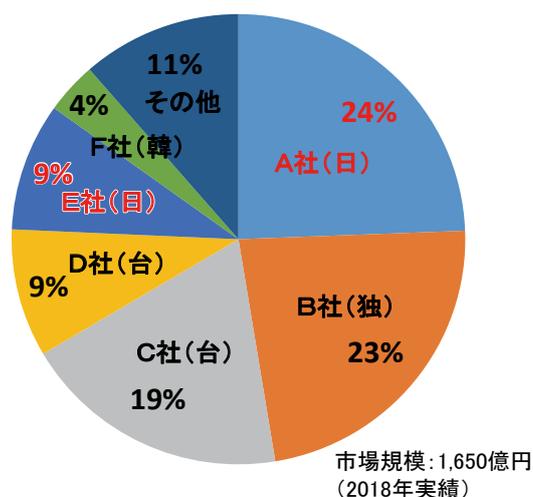


図11 パワー半導体用Siウェハーのメーカーシェア

出所: 「Status of the Power Electronics Industry Market and Technology Report, 2019 edition」(Yole Développement, 2019)を基にNEDO技術戦略研究センター作成(2019)

パワーエレクトロニクス分野の技術戦略策定に向けて

1-3-3 技術動向

パワーデバイスにおける各国の特許出願件数と論文発表件数との推移について図12、図13に示す。特許出願件数は、2012年頃までは世界的に増加傾向であったが、2010年代中頃にはやや減少傾向となっている。日本は、

2000年代初頭からトップであったが、2010年頃から中国の件数が増え始め、日本を抜いてトップに立つ勢いである。一方、論文発表件数においては、米国がトップであり、大きく抜き出した状況であったが、中国が着実に件数を伸ばしており、2011年に第2位となり、更に米国に迫る勢いである。

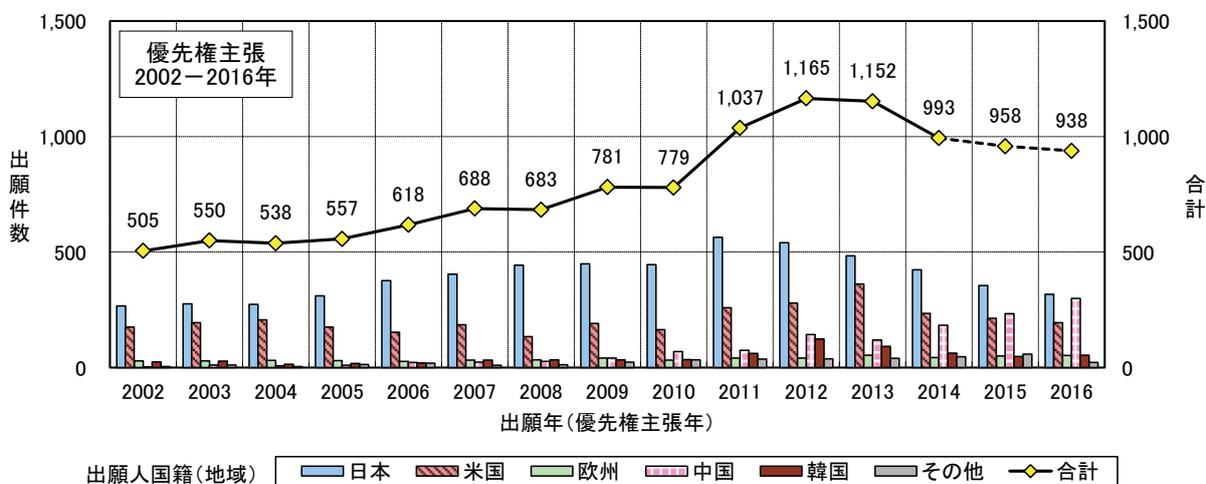


図12 パワーデバイスの特許出願件数推移

出所：委託調査結果を基に NEDO 技術戦略研究センター作成 (2019)

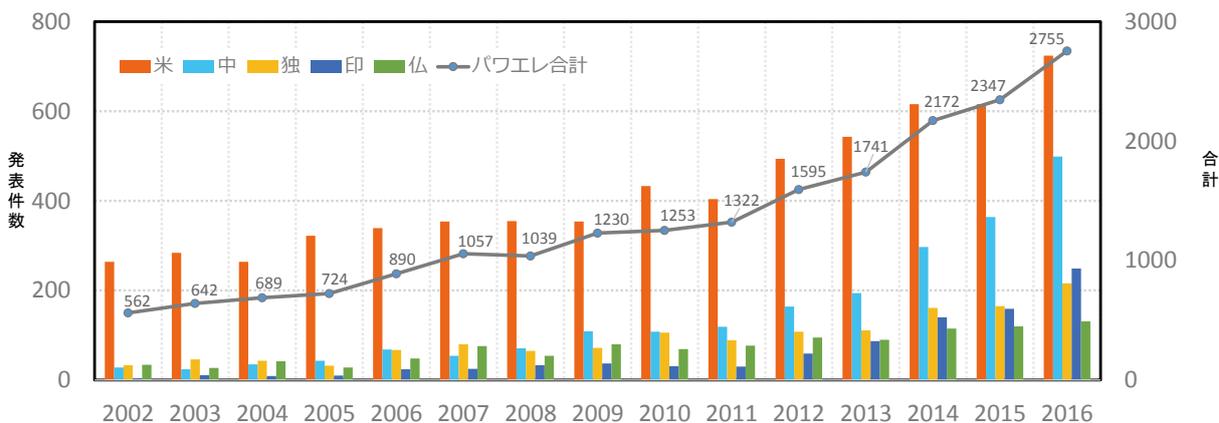


図13 パワーデバイスの論文発表件数推移

出所：Web of Science による検索を基に NEDO 技術戦略研究センター作成 (2019)

パワーエレクトロニクス分野の技術戦略策定に向けて

パワーデバイスの種類は大きく分けて、整流作用を有するダイオード、増幅やスイッチングの作用を有するトランジスタ (MOSFET、JFET、IGBT)、サイリスタ等がある。Siではあらゆるデバイスが既に製品化されているが、SiCやGaNではダイオードやトランジスタの一部で製品化されている段階である。

主なパワーデバイスの実用化の状況について表3に示す。トランジスタでは大きく分けて電子または正孔のうち1種類のキャリアを用いるユニポーラ型 (MOSFET等) と両方のキャリアを用いるバイポーラ型 (IGBT等) があり、適用される電圧や電流によって使い分けられる。Siではこれらを含め、ダイオードやサイリスタ等の様々なデバイスの製品化が既に行われている。GaNではSiやSiCのバルク基板上にGaNエピ層を形成したウェハーでHEMT

(High Electron Mobility Transistor) 等のデバイスが製品化され、高周波数向けの通信用途や低電圧・低電流向けの小型民生電源用途での適用は進んでいる。また、GaN基板上にGaNエピ層を形成したウェハーで高電圧・大電流向けMOSFETについては研究開発が進められている段階である。SiCでは既にMOSFETが実用化されて高電圧・大電流の用途での適用が進んでおり、さらに高電圧・大電流向けのIGBTの研究開発が製品化に向けて進められている。SiCのMOSFETは、国内では電車、地下鉄、新幹線での実用化が進み、米国ではテスラがSiCのMOSFETによるインバーターを搭載したEVの生産を開始するなど、社会実装の拡大が始まりつつある。

表3 パワーデバイス (トランジスタ) の実用化状況

材料	Si		GaN			SiC	
	MOSFET	IGBT	HEMT、MOSFET		MOSFET	MOSFET	IGBT
デバイス			on SiC	on Si	on GaN		
用途	低電圧・ 低電流	高電圧・ 大電流	高周波	低電圧・ 低電流	高電圧・大電流		超高電圧 超大電流
製品化	済	済	済	済	未	済	未
主な課題	高性能化、300mm化		高性能化		高性能化 製品化	高性能化 信頼性	高性能化 製品化
備考	社会実装済 超高電圧は直列接続		通信用、民生電源用 社会実装済		R&D段階	EV適用開始	R&D段階

出所：公開資料を基にNEDO技術戦略研究センター作成 (2019)

2章 解決・実現手段の候補

第1章で述べたCO₂排出削減の社会課題に対して、これを解決する手段の一つとして、ここではパワーエレクトロニクスの技術進化と実社会への適用拡大を考える。特に、WBG半導体（特にSiC）については、既に社会実装されているSiに比べて高電力の適用分野で省エネルギー効果が得られることから、その社会実装の加速は電力の生成から消費に至る社会全体でのCO₂排出削減に有効な手段である。

2-1 解決・実現のための課題

WBG半導体の研究開発は、先進国で10年以上にわたって進められてきたが、その社会実装はパワー半導体の市場の中で数%に過ぎない。例えば、近年、社会実装が進んでいるSiCでは、今後の製品適用拡大の大きな課題として、低価格化（低コスト）、信頼性向上が求められている。

図14には、CO₂排出削減のためのパワー半導体の例として、SiCデバイスにおける技術開発の進展と社会実装過程の課題を示す。

社会実装の第1段階は、ダイオードの製品化である。ダイオード（SiC SBD等）は整流を行うデバイスであって、トランジスタに比べ構造がシンプルであることから先に製品化が進み、高電圧対応の特殊機器等で使用されている。

第2段階は、トランジスタ（SiC MOSFET等）である。トランジスタは整流、スイッチ、増幅を行うデバイスであって、高電圧のインバーター等で使用されている。現在ではN型とP型の両方の製品化によりCMOSインバーターが実用化している。第2段階までは、鉄道の最新車両への導入を始めとする特殊機器向けが主である。一部EVへの搭載も始まっているが、まだ小規模生産の段階にある。

今後進めるべき第3段階以降は、トランジスタ等の大規模生産による本格的な普及であり、EVを始めとするモビリティや産業分野向けが想定される。さらに、第4段階は、将来の電動航空機や次世代電力分野向けであり、高度の信頼性を有するMOSFETやIGBTの超高耐圧デバイスの製品化である。

第2段階から第3段階への移行には、本格普及に向けて乗り越えなければならない壁があり、普及拡大に際しては大規模生産に適応できる低コスト化、安定供給、信頼性向上等の実現が大きな課題となる。WBG半導体はSiと比較して優れたデバイス特性を有するが、一方で複数の元素からなる化合物半導体であるため、単一元素からなるSiと比べて結晶欠陥が入りやすく品質向上は本質的な課題である。

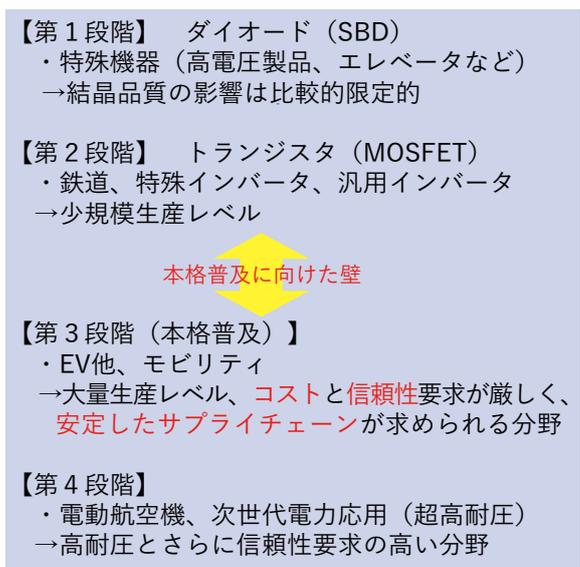


図14 SiCの社会実装過程の課題

出所：公開資料を基にNEDO技術戦略研究センター作成（2019）

パワーエレクトロニクス分野の技術戦略策定に向けて

パワーエレクトロニクスを更に普及させるためには、WBG半導体の社会実装と普及拡大が必要であり、特に、SiCは今後の世界で市場が急速に拡大していくEVに適用させるためには、大規模生産の実現が重要になる。大規模生産への移行は技術開発に加え、生産設備投資が必要となるが、投資の際には市場拡大のタイミングを見定めることが肝要である。なお、この課題は、GaN、Ga₂O₃等のWBG半導体でも共通である。

表4には、各応用分野においてパワーエレクトロニクスに求められる課題及びSiC適用による特長について示す。既に様々な応用分野へのSiCの採用が始まっており、EVと産業機器の分野においてCO₂排出削減の効果が期待される。パワーエレクトロニクスに求められる課題としては、コスト、信頼性、小型軽量、調達等が挙げられるが、その重要度は応用分野の市場規模（供給量）や品質によって異なる。

表4 応用分野から見た特長と課題

応用分野	応用分野から見たSiC適用の特長			パワエレに求められる課題					
	応用分野でのSiC採用メリット	SiC適用によるCO ₂ 削減効果	採用状況	コスト	信頼性	小型軽量	調達	性能	
運輸	EV	主インバータに採用 ・走行距離延長 ・バッテリー容量削減 ・小型化、軽量化	大	一部SiC採用中 テスラ（2018-）	大	大	大	大	・低オン抵抗 ・高温高湿動作 ・高耐圧 ~1kV
	鉄道	VVVFインバータに採用 ・電力削減、軽量化	小	SiC採用拡大中 地下鉄、新幹線	小	中	中	少	・高耐圧 ~3kV
	電動航空機	主インバータに採用 ・電力削減、軽量化、小型化	小	研究開発中	小	大	大	少	・高耐圧 ~3kV ・耐放射線
家電	家電インバータに採用 ・電力削減、小型化	小	一部SiC採用中 エアコン、冷蔵庫	大	中	中	少	・低耐圧	
電力機器	分散電源インバータに採用 電力変換器に採用 ・長距離/直流送電 ・施設小型化	小	一部SiC採用中 PV用PCS 次世代電力応用 研究開発中	小	大	中	少	・高耐圧 ~3kV ・超高耐圧 10kV~	
産業	産業機器	汎用インバータに採用 安定化電源に採用 ・電力削減・小型化	中	一部SiC採用中 エレベータ、UPS	大* 中	中* 大	中* 中	大* 中	・低オン抵抗 ・高周波
	医療機器	高電圧DC電源採用 ・小型化、軽量化	小	研究開発中	小	大	中	少	・高耐圧SBD 10kV~

* 上段はコスト要求が厳しい汎用インバータ向け、下段は信頼性要求が高い電源向け

出所：公開資料を基にNEDO技術戦略研究センター作成（2019）

パワーエレクトロニクス分野の技術戦略策定に向けて

2 分析等から得られた -2 具体的実現手段の候補

WBG半導体の市場規模は図5で示したようにまだ小さいが立ち上がってきている。SiCデバイスとSiCウェハーの2018年のメーカーシェアを図15、図16に示す。

SiCデバイスは日欧米でシェアを分け合う状況であり、それぞれの政策的な取組みを凡そ反映したものとなっている。SiCウェハーでは米国が80%以上のシェアを有しており、寡占状態にある。図7で示した今後10年のSiCの市場拡大の中でのシェアの推移が注目される。

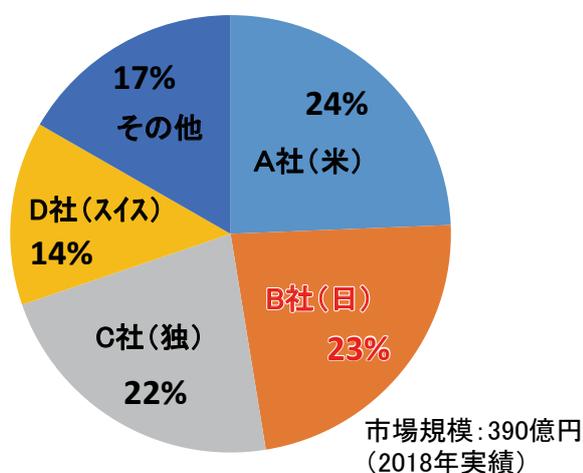


図15 SiCデバイスのメーカーシェア

出所:「2019年版次世代パワーデバイス&パワエレ関連機器市場の現状と将来展望」(富士経済、2019)を基にNEDO技術戦略研究センター作成(2019)

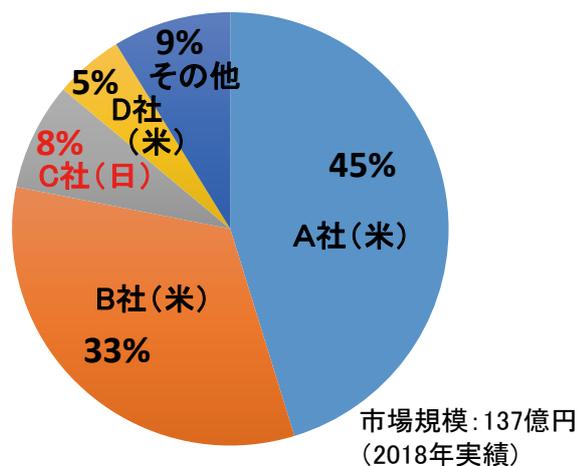


図16 SiCウェハーのメーカーシェア

出所:「2019年版次世代パワーデバイス&パワエレ関連機器市場の現状と将来展望」(富士経済、2019)を基にNEDO技術戦略研究センター作成(2019)

パワーエレクトロニクス分野の技術戦略策定に向けて

SiC材料分野の特許出願数と、論文発表数をそれぞれ図17、18に示す。SiCウェハー市場は米系企業に独占されているが、SiC材料分野の特許、論文では、日本のシェアが大きく日本の技術ポテンシャルは高い。

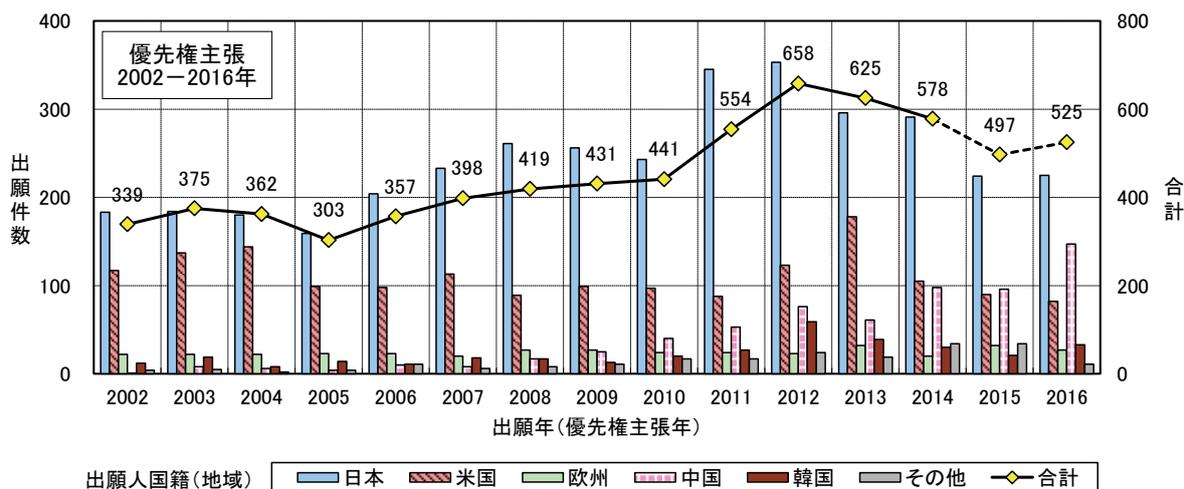


図17 SiC材料分野の特許出願数推移

出所：Derwent Innovationでの検索結果を基にNEDO技術戦略研究センター作成(2019)

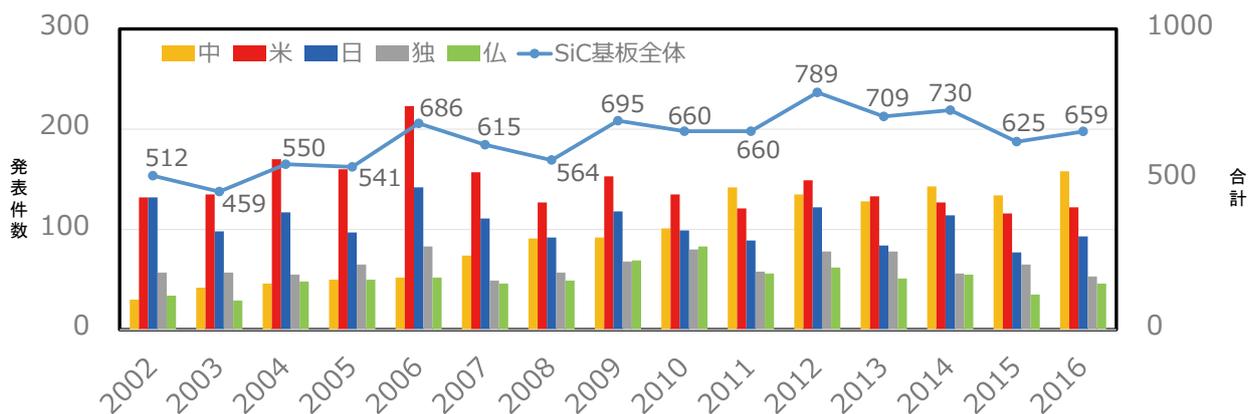


図18 SiC材料分野の論文発表数推移

出所：Web of Scienceでの検索結果を基にNEDO技術戦略研究センター作成(2019)

2-3 技術開発の方向性

2-1で述べた課題を解決する手段としては、日本がポテンシャルを有するSiC材料技術を生かした取組みが有効となろう。パワーエレクトロニクスの社会実装を実現するための技術開発の方向性として考えられる例を、ウェハー、デバイス、モジュールに関して表5に示す。

ウェハーでは、結晶欠陥の低減をはじめとする結晶品質の向上、大量生産に対応したサプライチェーンによる安定供給が重要となる。大量生産の段階では高品質、高歩留りでの安定供給が必須となるため、高品質かつ高速の結晶成長及びエピ成長の技術、ウェハーサイズの拡大による低コスト化に向けた大口径化技術、さらにウェハー加工技術の開発が重要となる。

デバイスでは、大量生産に耐え得る特性改善、信頼性向上、歩留り向上、製造技術の低コスト化技術、さらに高出力密度を実現するIGBT等のデバイス技術の開発が重要である。

モジュールでは、信頼性、安全性を高める技術として、放熱、抜熱等の熱マネジメント技術、高周波対応技術、周辺電子部品の高温対応技術、デバイス制御技術、ノイズ対策まで含めたトータルシステム設計技術等が重要になる。特に、劣化診断技術や冗長構成を含む制御技術等により機器の信頼性を確保するような高付加価値モジュール技術が重要になると見られる。図10で示したパワーモジュールの市場で日本は高いシェアを有しており、このようなモジュール技術の高付加価値化に繋がる新たな技術やコンセプトを実現して市場に普及させていくことが目指すべき方向となる。

表5 SiCのウェハー、デバイス、モジュールの技術開発の例

	具体的な手段/事例	提供価値
SiCウェハー	高速高品質結晶成長、加工技術 200mm (8インチ) 基板	低コスト化対応
SiCデバイス	SiC-IGBT 30kV	新たな技術優位性
SiCモジュール	熱制御、高信頼性対応 (劣化診断等)、 トータルシステム設計	

3章 おわりに

パワーエレクトロニクスは、省エネルギー化や温室効果ガス排出削減といった社会課題の解決において重要な役割を担っている。シリコン半導体に加えてワイドバンドギャップ半導体の適用でより大きな効果が期待されるが、ワイドバンドギャップ半導体の社会実装はまだ始まったところである。

パワーエレクトロニクスの研究開発としては、新たな材料等によるより高性能なデバイスの研究開発等も重要であるが、ワイドバンドギャップ半導体の大規模生産と社会実装を確かなものにするためには、低コスト化、信頼性向上、安定供給等の実装課題を解決していくことが求められている。これが日本の産業としての今後の競争優位性確立に繋がっていくものと考えている。

技術戦略研究センターレポート

TSC Foresight Vol.103

パワーエレクトロニクス分野の技術戦略策定に向けて

2021年11月9日発行

TSC Foresight Vol.103 パワーエレクトロニクス分野 作成メンバー

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構
技術戦略研究センター（TSC）

■ センター長 岸本 喜久雄

■ センター次長 飯村 亜紀子

西村 秀隆 (2021年6月まで)

■ デジタルイノベーションユニット

・ユニット長 伊藤 智

・主任研究員 大窪 宏明 (2020年9月まで)

・研究員 村嶋 清孝 (2021年3月まで)

砂口 洋毅 (2020年3月まで)

・フェロー 有馬 宏和

林 秀樹

元住友電工理事、IEEE Life Fellow、応用物理学会フェロー

山口 佳樹

筑波大学准教授

遠藤 直樹

株式会社東芝インダストリアルICTソリューション社技監

平井 成興

元NEDO技術戦略研究センターユニット長

高木 宗谷

元トヨタ自動車株式会社理事

橋田 浩一

国立大学法人東京大学教授

IoT 推進部

・主査 野村 重夫

池田 光

高橋 晋

● 本書に関する問い合わせ先

電話 044-520-5150 (技術戦略研究センター)

● 本書は以下 URL よりダウンロードできます。

<https://www.nedo.go.jp/library/foresight.html>

本資料は技術戦略研究センターの解釈によるものです。
掲載されているコンテンツの無断複製、転送、改変、修正、追加などの行為を禁止します。
引用を行う際は、必ず出典を明記願います。