自動車の電動化に貢献するパワー半導体

Power Semiconductors for Facilitating Electrification of Automobiles

長畦　文男 NAGAUNE, Fumio　　池田　良成 IKEDA, Yoshinari　　松尾　壮太 MATSUO, Sota

自動車の電動化が加速している。電動車（xEV）においてパワートレイン系に適用されるパワー半導体は、電力制御を行ってモータを制御するため、自動車の走行性に直結し、人命を預かる重要なキーパーツである。富士電機は、信頼性が高く、高電力密度化と小型・薄型化を目指した、パワートレイン系用パワー半導体モジュール製品を量産化してきた。一方、これらの製品やその構成部品の生産においても、温室効果ガス排出量の削減が必要である。その遂行に向けて、再生可能エネルギー電力の購入や、自社内太陽光発電システムの設置、省エネルギー機器への更新を推進している。

The electrification of automobiles is accelerating. Power semiconductors for power train system in electrified vehicles (xEVs) control electric power of the motor. Therefore, they are key components for determining driving performance and protecting people's lives. Fuji Electric has mass-produced power semiconductor modules for power train system with high reliability and power density, as well as reduced module size and thickness. On the other hand, it is necessary to reduce greenhouse gas emissions in the production of these products and their components. For that purpose, the purchases of renewable energy power, the installation of in-house solar power generation systems, and the renewal of energy-saving equipment are accelerated.

1　まえがき

国際エネルギー機関（IEA：International Energy Agency）から2021年に公表された、2050年にCO_2排出ネットゼロを達成するための提言をまとめた報告書[(1)]では、輸送セクターにおいても化石燃料の使用比率を大幅に減らし、電化や水素エネルギーの利用を進めることを求めている。このような社会情勢を受け、各自動車会社でも自動車の電動化を加速している。

電動車（xEV）では、電子スイッチ、DC/DCコンバータ、車載充電器など多くの機器にパワー半導体が使われている。xEVに搭載される機器の中でも、電動ポンプや電動コンプレッサに付随するモータや走行用モータを駆動するためにはインバータが必要であり、このインバータを構成するパワー半導体はxEVの最重要部品の一つである。

パワー半導体製品は、単体もしくは複数のパワー半導体デバイスを一つのパッケージに収めた形で提供される。xEVの動力制御に用いるインバータには、搭載スペースの制限から高電力密度化と小型化が求められるため、パワー半導体製品の中でも三相インバータブリッジ回路を内蔵した水冷タイプのパワー半導体モジュール（パワーモジュール）が使用されることが多い。このようなパワーモジュールでは、チップ性能を高めて損失を低減するのはもちろんのこと、冷却効率の向上や内部インダクタンスの低減など、パッケージ設計により性能が左右される。また、安全性の観点から、寒冷地や高温多湿環境での使用についても考慮して信頼性設計を行う必要がある。

本稿では、カーボンニュートラルの観点から、自動車の電動化に貢献するパワー半導体について述べる。

2　xEV向けパワー半導体の概要と課題

2.1　概要

富士電機は、自動車のエレクトロニクス化の要求に応じた、さまざまなパワー半導体を開発している。**図1**に、富士電機製パワー半導体製品の適用例を示す。自動車に適用されるパワー半導体は、大別してパワートレイン系、エンジン系、ボディ系の三つに分類される。xEV向けパワートレイン系パワー半導体は、インバータに搭載されて電力制御を行ってモータ制御するため、自動車の走行性に直結

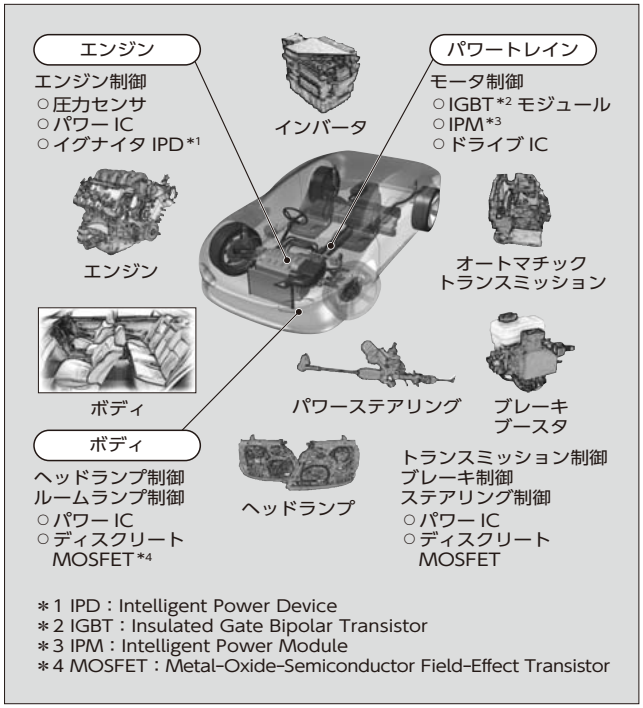


図1　富士電機製パワー半導体製品の適用例

し、人命を預かる重要なキーパーツである。

図2にモータ制御用回路構成例を示す。基本回路は、バッテリ電圧を昇降圧するコンバータ回路とインバータ回路で構成される方式と、インバータ回路のみで構成される方式に大別される。適用されるパワー半導体は、IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）に代表されるスイッチング素子と還流用ダイオード FWD（Free Wheeling Diode）である。モータ制御に適用されるパワー半導体は、複数の IGBT と FWD を内蔵したパワーモジュールが主流である。

図3に、富士電機製モータ制御用パワーモジュール例を示す。富士電機はこれまで、IGBT/FWD を 2 回路構成し、駆動回路や保護機能を含むドライブ回路をモジュール内に内蔵した 2 個組インテリジェントパワーモジュール（IPM：Intelligent Power Module[2]）、**図3**に示す IGBT/FWD を 6 回路構成した 6 個組 IGBT モジュール[3]、**図2**に示す昇降圧コンバータ、インバータ 1 およびインバータ 2、ならびに IGBT 駆動回路や保護機能を含むドライブ回路を搭載した 14 個組 IPM[4]などを量産化してきた。**図3**に示す 6 個組パワーモジュールは、**図2**に示すインバータ回路用に開発したものである。搭載されている半導体素子は、従来のモジュールでは IGBT と FWD は別々の素子で回路を構成していたが、**図3**に示す製品では、IGBT と FWD を一体化した逆導通 IGBT（RC−IGBT：Reverse−Conducting IGBT）と密閉型のアルミニウム製冷却器を適用した、最新世代の量産品である[5],[6]。

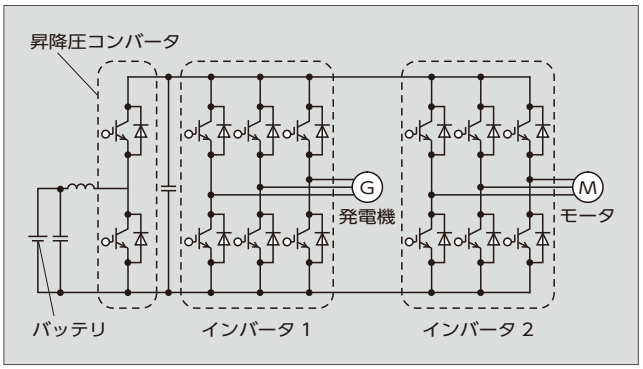


図 2　モータ制御用回路構成例

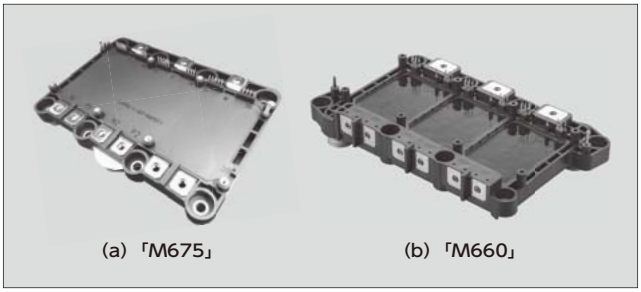


図 3　富士電機製モータ制御用パワーモジュール例

2.2　課題

図4に、パワーコントロールユニット電力密度の年次推移を示す[7]。電力密度は、年次で上昇しており、電気自動車やハイブリッド車用インバータは特に高い電力密度が求められる。

図5に機電一体型システムのイメージを示す。従来はモータとインバータは xEV 内で独立に配置されていたが、最新の動向として**図5**に示すようなモータ、トランスミッションなどとインバータが一体化した、機電一体型の構造が主流となっている。xEV では、**図5**に示すシステムが前輪か後輪の一方、あるいは両方の駆動用として搭載される。機電一体型とすることで、インバータに使われる部品点数を削減し、システムを軽量化することが可能となる。さらに、モータ、インバータをコンパクトなユニットに統合し、車軸をダイレクトに駆動させることで、パワートレインの効率が向上するだけでなく、低コスト化も実現できる。モータとインバータの一体化への要望は高く、今後も一体化を含めた駆動系ユニットの小型化の開発が、積極的に進められていくと考えられる。

さらに、近年はパワー半導体素子として SiC（炭化けい素）化のニーズが高まりつつある。SiC が実現した場合、通電電流が小さい軽負荷時に発生損失が低減することで、一充電当たりの走行距離を変えずにバッテリ容量を削減できる。これにより、軽量化によるさらなる電費向上が期待できる。

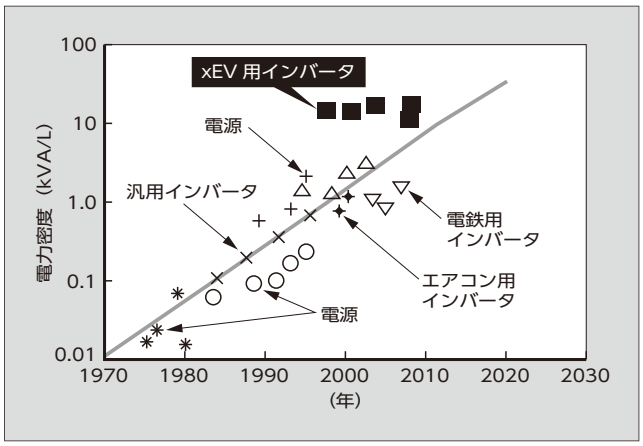


図 4　パワーコントロールユニット電力密度の年次推移

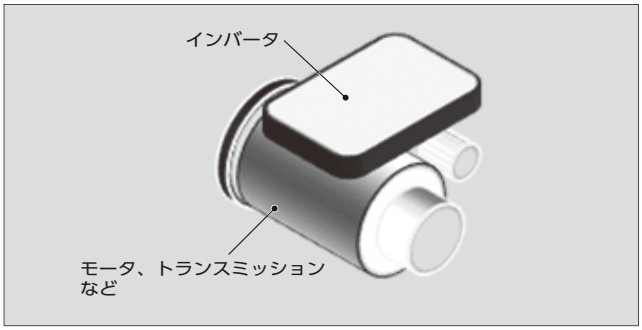


図 5　機電一体型システムのイメージ

これらのことから、自動車用インバータの高電力密度化・機電一体化に向けて、パワーモジュールの目指す方向は、高電力密度化と小型・薄型化である。また、自動車用としての信頼性の確保も重要である。さらに将来の SiC 化に対して、最適なパッケージ構造が必要である。

3　xEV 向けパワー半導体の特徴

3.1　パワー半導体素子技術

xEV 向けパワーモジュールでは、高電力密度化、小型・薄型化の要求に対応し、パワー半導体素子の性能向上を進めてきた。**図6** に、1,200 V 定格パワー半導体素子の電力密度と発生損失の年次推移を示す。従来、IGBT と FWD を xEV 向けパワー半導体として用いており、性能改善を進めてきた。さらなる進化として、Si 材料で IGBT と FWD とを一体化した RC−IGBT の採用拡大とともに、ワイドバンドギャップ材料 SiC を用いた SiC−MOSFET（Metal−Oxide−Semiconductor Field−Effect Transistor）の採用が始まっている。

3.2　高電力密度化パッケージ構造

xEV 向けパワーモジュールは、高電力密度化が必要とされている。**図7** に、富士電機製 xEV 向けモジュール電力密度の年次推移を示す。

富士電機は、パワーモジュールを高電力密度化するために必要な半導体素子やパッケージ構造の開発に取り組んでいる。**図8** に xEV 向けパワーモジュール「M677」を示す[8]。M677 は、電動車のパワートレインを構成するキーコンポーネントとして 100 kW クラスのインバータをターゲットとしており、業界トップクラスの超小型 RC−IGBT モジュールである。

M677 では、小型化と高出力化を両立させるため第 7 世代 RC−IGBT を採用し、さらにその導通損失を低減するため、Si ウェーハの薄化と表面構造の最適化を行っている。**表1** にリードフレームによる小型・高電力密度化を示す[9]。**図9** に富士電機製 xEV 向けモジュールの冷却性能の推移を示す[10]。チップ体積の減少に伴い熱容量が減少し、内部温度が上昇しやすくなることへの対策として、従来のアルミニウムワイヤ配線に比べて電気抵抗が低く、放熱性の高い銅製リードフレーム（**表1**）や、高い冷却性能を備えるフィン構造（**図9**）を採用し、xEV 向けパワーモジュールの小型化を同時に実現している。

リードフレーム配線では、パワーモジュールの短絡動作に伴うチップの破壊までに要する短絡耐量エネルギーは、

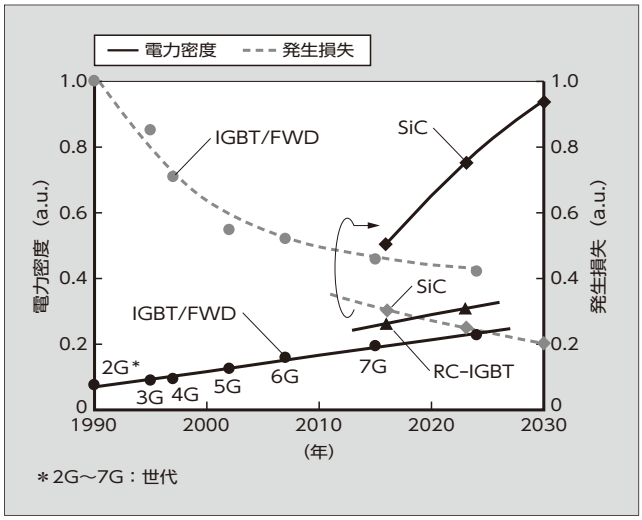


図6　1,200 V 定格パワー半導体素子の電力密度と発生損失の年次推移

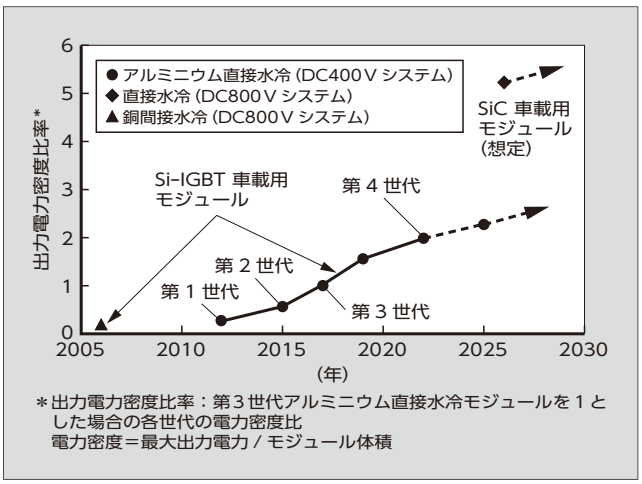


図7　富士電機製 xEV 向けモジュール電力密度の年次推移

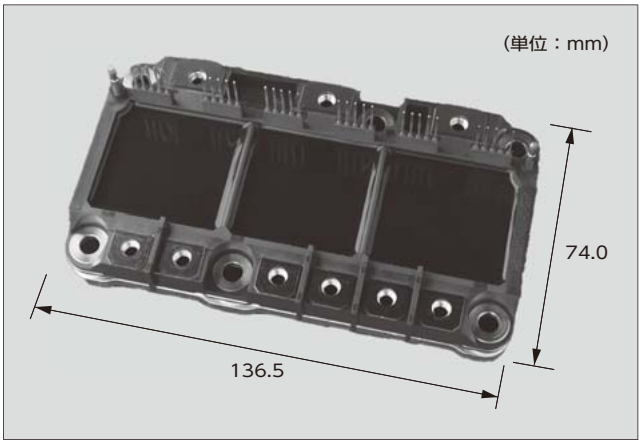
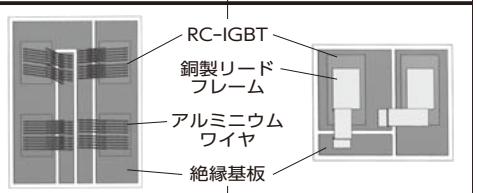


図8　xEV 向けモジュール「M677」

表1　リードフレームによる小型・高電力密度化

	M653	M677
内部回路構成		
回路面積（arb.unit）	1.00	0.49
電力密度（arb.unit）	1.00	1.98

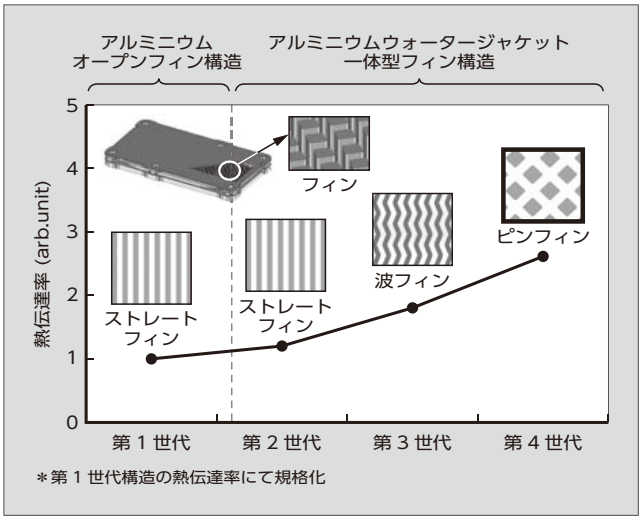


図 9　富士電機製 xEV 向けモジュールの冷却性能の推移

従来品の 1.4 倍に高まった。また、高電力密度、高温環境下で使用されることにより、配線抵抗や熱抵抗の上昇を引き起こすことが懸念されるはんだ接合部のエレクトロマイグレーションに対しては、このパッケージが十分な耐性を備えていることを信頼性試験で確認している[9]。

次に、SiC デバイスを搭載した、パワーモジュールのパッケージ技術について述べる。

SiC デバイスを搭載したモジュールとしては、電鉄向けなど産業向けが先行して市場投入されてきた[11]。SiC デバイスは、Si デバイスと比べて大幅に高速なスイッチングが可能であり、スイッチング時のサージ電圧を抑制する必要がある。**図 10** に PN ラミネートを採用したモジュール断面構造を示す[11]。3.3 kV 耐圧の大容量 SiC モジュール「HPnC」では、**図 10** に示す配線構造を採用し、低インダクタンスを実現してサージ電圧を抑え込んでいる。また、ここ数年で太陽光発電や風力発電といった再生可能エネルギーの分野においても、発電効率の向上やコスト低減を図るため、DC バス電圧の高圧化が進んでいる[12]。このような高耐圧のパワー半導体が要求される産業用途向けには、第 2 世代 SiC トレンチゲート MOSFET を搭載した定格電圧 1,700 V の All−SiC モジュールと、その系列製品を開発している。

前述のように、SiC−MOSFET は、Si−IGBT に比べて

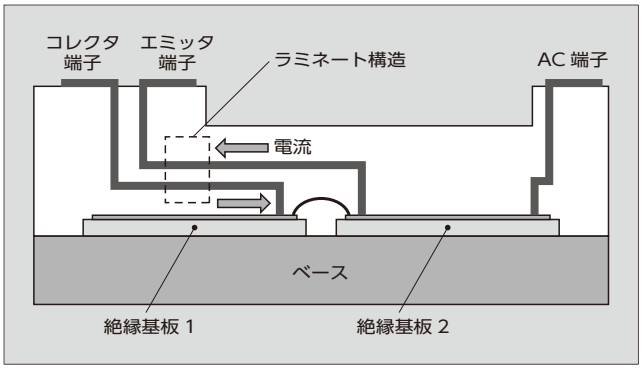


図 10　PN ラミネートを採用したモジュール断面構造

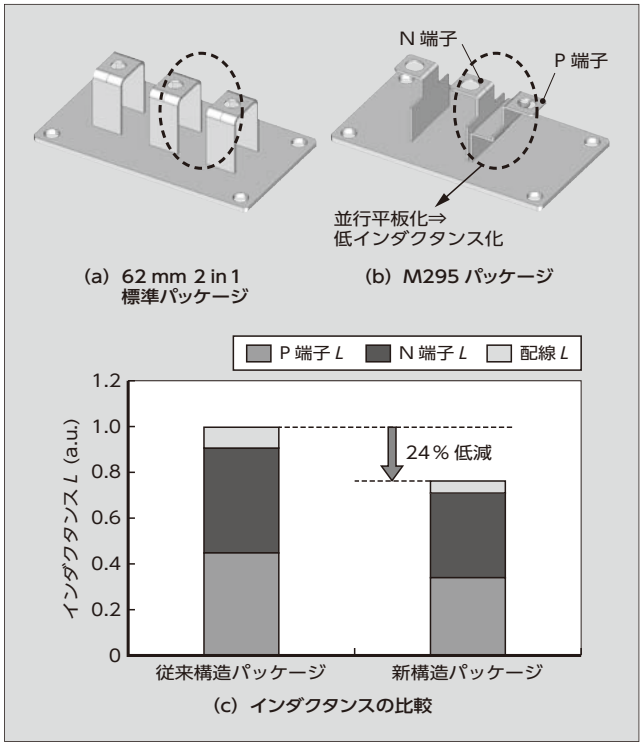


図 11　低インダクタンス化した内部配線構造

はるかに高速なスイッチングが可能であるが、高速スイッチング時には、モジュール内部の配線インダクタンスにより高いサージ電圧を引き起こすという弊害がある。**図 11** に、低インダクタンス化した内部配線構造を示す。今回開発した All−SiC モジュールにおいても、**図 11** に示すような内部構造の変更により、配線インダクタンスを 24 % 低減している[13]。これに加えて、第 7 世代「X シリーズ」IGBT の 2 in 1 パッケージの外形および端子配置との互換性を確保し、Si−IGBT との置換えも可能にしている。

xEV 向け SiC モジュールにおいても、前述したリードフレーム配線での高電力密度化と短絡耐量向上、さらに産業向けで適用が進んでいる低インダクタンス配線などのパッケージ構造を展開し、カーボンニュートラルに貢献していく。

3.3　環境を考慮した生産

富士電機では、長期視点でカーボンニュートラル、環境負荷ゼロを目指すことを骨子とした“環境ビジョン 2050”を策定し、2030 年度の目標としてサプライチェーン全体の温室効果ガス排出量を、2019 年度に比べて 46 % 超削減することを目標に掲げて施策に取り組んでいる[14]。**図 12** に、サプライチェーン排出量の構成を、**図 13** に温室効果ガス排出量の実績と目標を示す[14]。

xEV 向けモジュールは、温室効果ガス排出量低減を目指し開発しており、それらを構成する部品についても、温室効果ガス排出量が削減された工程で生産することを顧客から求められている。さらに、市場要求として、SiC パワー半導体新規納入から、再生可能エネルギー 100 % の“グリーン工場”での生産の要求を受けている。

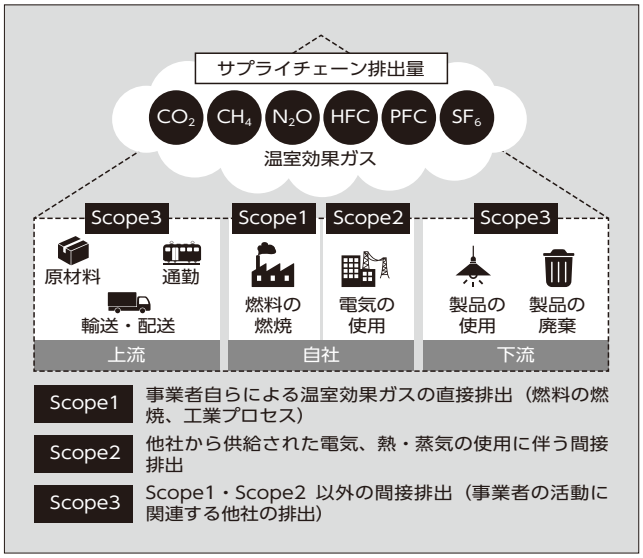


図 12　サプライチェーン排出量の構成

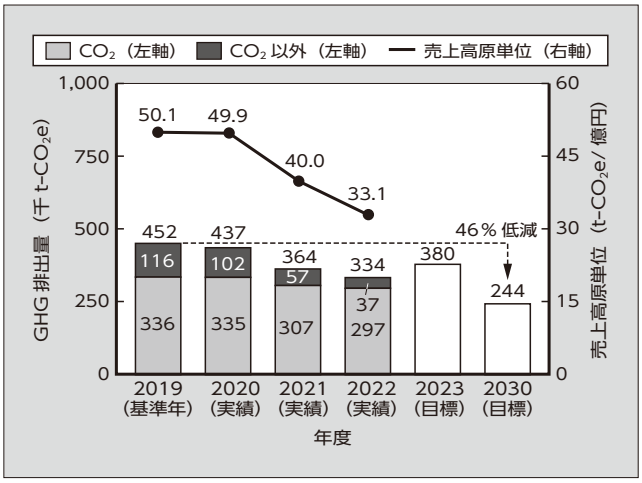


図 13　温室効果ガス排出量の実績と目標

半導体事業本部では、2022 年から毎年 4% 超の温室効果ガス排出量低減を継続し、2030 年に 46% 超の削減を実現する計画を策定した。計画遂行に向けて、再生可能エネルギー電力の購入、自社内太陽光発電システムの設置、省エネルギー機器への更新を推進している。また、太陽光や風力などの再生可能エネルギー由来の電力を導入する案件も検討している。

4　あとがき

自動車の電動化に貢献するパワー半導体について述べた。これからは製品性能と同等に、カーボンニュートラルに貢献するため、どのように製品を作るかが問われる時代になっている。これからも、xEV 向けパワー半導体製品において、材料から生産、製品性能で温室効果ガス排出量への影響を考え、カーボンニュートラル社会に貢献できるように、技術革新、生産革新に努めていく所存である。

参考文献

⑴　International Energy Agency. “Net Zero by 2050 A Roadmap for the Global Energy Sector”. May 2021. https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroby2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf,（参照 2023-07-18）.

⑵　西浦彰ほか. ハイブリッド車用IGBTモジュール. 富士時報. 2006, vol.79, no.5, p.350-353.

⑶　日達貴久ほか. 車載用直接水冷IGBTモジュール. 富士時報. 2011, vol.84, no.5, p.308-312.

⑷　郷原広道ほか. ハイブリッド自動車用IPMのパッケージ技術. 富士電機技報. 2013, vol.86, no.4, p.258-262.

⑸　Ebuchi, Y. et al, “Low loss and High-cooling-performance automotive power module for 160 kW EV application”, PCIM Asia 2023, p.232-235. https://www.vde-verlag.de/proceedings-en/566131041.html,（参照 2023-07-18）.

⑹　大澤彰浩ほか. 車載用大容量IGBTモジュール「M660」. 富士電機技報. 2017, vol.90, no.4, p.238-241.

⑺　平野尚彦ほか. ハイブリッド自動車用インバータ 両面放熱パワーモジュール「パワーカード」. デンソーテクニカルレビュー. 2011, vol.16, p.30-37, https://www.denso.com/jp/ja/-/media/global/business/innovation/review/16/16-doc-6-ja.pdf,（参照 2023-07-18）.

⑻　安達新一郎ほか. xEV向け100 kWクラス超小型RC-IGBTモジュール「M677」. 富士電機技報. 2019, vol.94, no.4, p.236-239.

⑼　佐藤悠司ほか. xEV向けIGBTモジュールの高電力密度化を実現するパッケージ技術. 富士電機技報. 2022, vol.95, no.4, p.185-189.

⑽　立石義博ほか. xEV向け超小型RC-IGBTモジュールの冷却技術. 富士電機技報. 2021, vol.94, no.4, p.240-245.

⑾　関野裕介ほか. 大容量SiCハイブリッドモジュール「HPnC」. 富士電機技報. 2017, vol.90, no.4, p.228-232.

⑿　Stevanovic et al. “Highly Efficient, Full ZVS, Hybrid, Multilevel DC/DC Topology for Two-Stage Grid-Connected 1500 V PV System with Employed 900 V SiC Devices”. 2019, IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electronics, vol.7, no.2, p.811-832.

⒀　高久拓ほか. 第2世代1,700 V All-SiCモジュールの系列拡大. 富士電機技報. 2022, vol.95, no.4, p.190-194.

⒁　富士電機ホームページ. 環境ビジョン2050. 生産時の温室効果ガス排出量削減, https://www.fujielectric.co.jp/about/csr/global_environment/management_02_02.html?ui_medium=jp_glnavi,（参照 2023-07-18）.

長畦　文男

電気・ハイブリッド自動車用モジュール・IPM の開発に従事。現在、富士電機株式会社半導体事業本部電装事業部電装設計第一部主席。工学博士。

池田　良成

パワー半導体モジュールの研究開発に従事。現在、富士電機株式会社半導体事業本部開発統括部パッケージ開発部課長。博士（工学）。エレクトロニクス実装学会会員、日本機械学会会員、電気学会会員。

松尾　壮太

電子デバイスの技術開発管理および半導体事業本部の環境対策管理に従事。現在、富士電機株式会社半導体事業本部開発統括部担当部長。

富士電機

Innovating Energy Technology

＊本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。