

パワーデバイスの変遷と将来展望

パワーデバイス製作所長
島 顕洋



1. ま え が き

近年、省エネルギーの促進や地球温暖化への影響軽減の方策として高性能パワーエレクトロニクス(Power Electronics：PE)システム機器の実現や応用領域拡大の気運が急速に高まっている⁽¹⁾。三菱電機はPEシステム機器事業を主力事業の1つに位置付け、PEシステム機器のキーパーツであるパワーデバイスの高性能化、高機能化に精力的に取り組んでいる。

当社は半導体チップ技術やパッケージ技術、駆動・保護技術を集積化した先進的なパワーモジュールを開発し、製品化することで社内外のPEシステム機器の進化に、さらには省エネルギー化による低炭素社会の実現に貢献してきた(図1)。今後も継続して高性能、高機能パワーモジュールの開発に取り組み、事業拡大及び社会発展への貢献を更に進めていく⁽²⁾。

本稿では、当社のパワーモジュールの変遷や現状を踏まえて今後のパワーモジュールの展望について述べる。

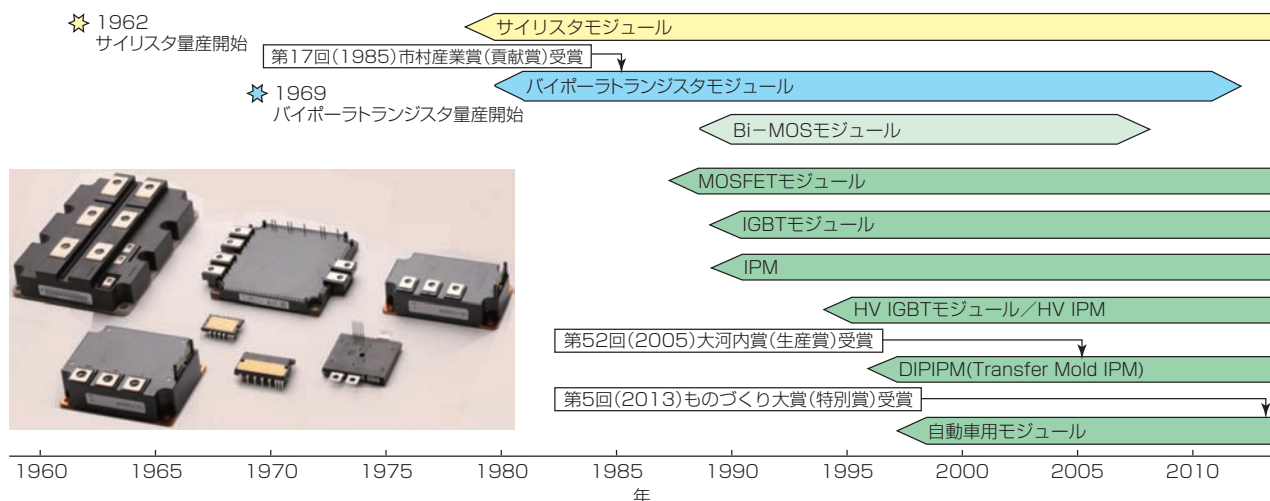
2. パワーモジュールの変遷

1949年のトランジスタの発明に続いて、1957年にはサイリスタが発明された。サイリスタを用いた電力変換機器は従来の水銀整流器を用いた機器より小型・軽量で損失低減の可能性が示唆されたことから、パワーデバイスが盛んに

研究・開発され出した。当社もパワーデバイスの研究を積極的に進め、サイリスタの発表から5年後の1962年に耐電圧1.2kVの、また1966年には耐電圧2.5kVのサイリスタを量産し、電力変換機器の小型・軽量化に貢献してきた。1970年代の2度のオイルショックによってインバータを始めとする省エネルギー技術の国内市場への早期導入が強く求められ出した。オン・オフの連続スイッチングを高精度に制御するインバータ動作には自己消弧形デバイスが必要であったことから、トランジスタやGTO(Gate Turn-Offサイリスタ)が主要パワーデバイスになった。当社は1981年に耐電圧1kVのバイポーラトランジスタを、1982年に耐電圧4.5kVのGTOを量産し、市場要求の変化にもすみやかに応えてきた。

パッケージでは、1970年代半ばに2つのサイリスタチップをケース内で結線し、上面から主電極端子と制御信号端子を取り出した最初のモジュール製品が欧州で量産された。当社も1979年に耐電圧800V、電流定格90Aのサイリスタモジュールを量産している。これらの初期構造モジュールは高耐圧・大容量化を目的とし、機能面ではディスクリート製品と同等であった。

機能面でディスクリート製品と明確に差別化したモジュールは1980年に当社が世界で初めて開発・実用化した絶縁型のトランジスタモジュールである。耐電圧600V、電流定格50Aのハーフブリッジ構成を内蔵したこのモジュール



Bi-MOS：Bipolar-MOS(Metal Oxide Semiconductor)、MOSFET：Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor、IGBT：Insulated Gate Bipolar Transistor、IPM：Intelligent Power Module、HV：High Voltage

図1. 当社のパワーモジュールの歴史と代表的なパワーモジュールの外観

ルの最大の特長は、トランジスタチップと冷却フィンを取り付けるモジュールのベース板との間に絶縁性の優れたアルミナ薄板を挿入・一体化する技術を確認し、主電極と同電位となっていた放熱部を絶縁したことであった。絶縁型モジュール構造は、モジュール内での回路の配線を容易にするとともにPEシステム機器の絶縁・放熱構造を簡素化したことから、機器の小型・軽量化に多大な貢献をした。これによって、絶縁型モジュール構造が以後のパワーモジュールの標準構造となった。この貢献によって絶縁型パワーモジュール技術は1985年に市村産業賞(貢献賞)を受賞した。

絶縁型トランジスタモジュールを市場に投入した後、大容量化及び高機能化に取り組み、1982年には業界最大容量の耐電圧1,000V、電流定格300Aトランジスタモジュールを、更に1983年には耐電圧1,400V、電流定格80Aの三相インバータの回路を組み込んだ業界初のトランジスタモジュールを量産化するなど、他社の追随を許さない技術力と充実した製品群ラインアップで市場を牽引(けんいん)し、業界を代表するパワーモジュールメーカーとしての基盤を築いた。

トランジスタモジュールの大容量化に伴い、駆動電力の増大による制御性の悪化がスイッチング性能に影響を及ぼし始めたことから、1980年代半ばから低駆動電力で高精度制御が期待できるMOS(Metal Oxide Semiconductor)ゲートパワーデバイスの研究が盛んになった。代表的なデバイスが、MOSゲート構造でありながらバイポーラトランジスタと同等の通電能力を持つIGBTである。当社は、IGBTの実用化開発と並行してIGBTの性能を最大限に引き出すための制御技術の開発を他社に先駆けて取り組み、駆動・保護回路を内蔵させることで性能と使いやすさ、信頼度を格段に高めた当社オリジナルのモジュールであるインテリジェントパワーモジュール(IPM)を一般産業用IGBTモジュールと同じ1989年に量産化した。

IGBTのデバイスとしての研究・解析が進むにつれ、

IGBTは従来のバイポーラトランジスタ以上に広いSOA(安全動作領域)を持つことが明らかになりだした。また、制御容易性が市場で認められ、1990年代前半からトランジスタモジュールのIGBTモジュール及びIPMへの置き換えが始まった。

1990年代半ばには、微細ウェーハ加工技術を活用してIGBTの高性能・高機能化に取り組むとともに大容量化、高品位化の開発を進め、モジュール製品の拡充を図った。1990年代後半には、大容量・高絶縁パッケージ技術を開発し、電車応用の耐電圧3.3kVのIGBTモジュール(HVIGBT/HVIPM)を他社に先行して実用化した。さらに、パワーモジュールにオールシリコンコンセプトを取り入れたトランスファーモールドIPM(DIIPM)を民生応用モジュールとして製品化し、性能と品質、価格の多面で民生市場の要求に応えた。DIIPM構造を民生市場のデファクトスタンダード構造に成長させ、民生市場の拡大に貢献したことが認められ、2005年度の大河内賞(生産賞)及び2013年度のものづくり大賞(特別賞)を受賞している。

1997年には高品位パワーモジュールを実用化し、自動車用パワーモジュール市場を開拓・牽引してきている。

3. 現状と将来展望

3.1 モジュール技術の現状

IGBTが市場に投入されてから約30年がたった。IGBTセル密度を増加させる微細化やトレンチゲート構造、電流経路を短縮する薄ウェーハ加工などの半導体基盤技術とライフタイム制御やキャリア蓄積構造などのバイポーラパワーデバイス固有技術の進展によってIGBTは目覚ましい進歩を遂げてきている(図2)。

また、モジュールパッケージは高絶縁性と高放熱性の材料・設計や低インピーダンスで低インダクタンスの電極形成、トランスファーモールド加工、長寿命接合形成などの

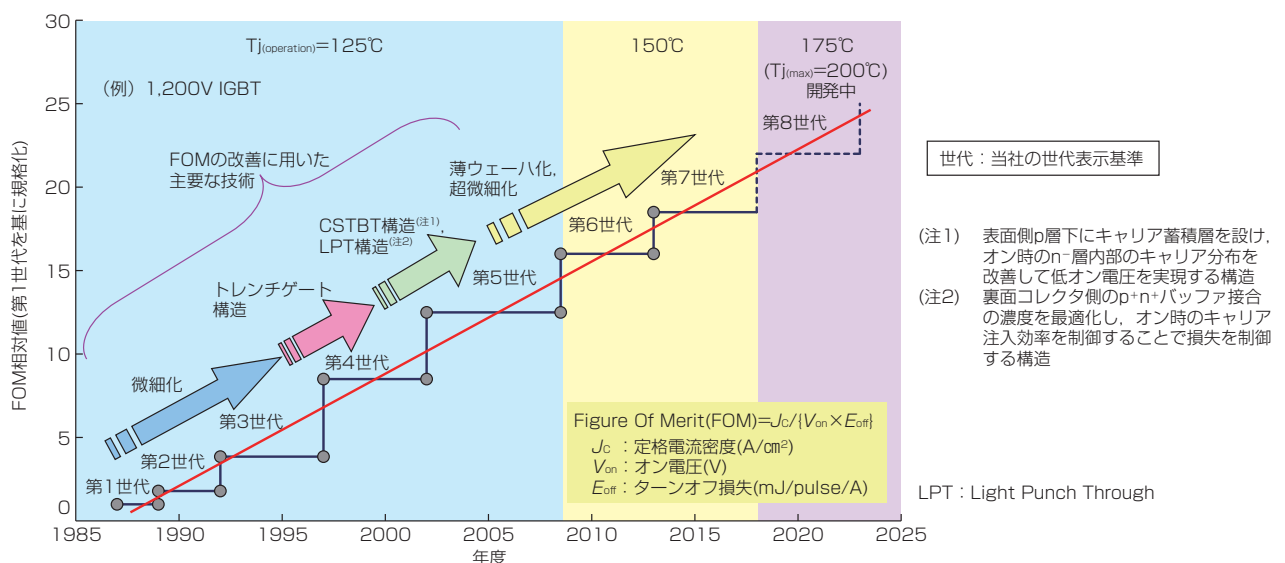


図2. IGBTチップのロードマップ

特集 I：当社技術の変遷と将来展望

要素技術を継続的に革新することでモジュールが制御できるパワー密度を大幅に向上させてきた。現在のパワー密度は10年前に比べて3倍増に向上している(図3)。

IGBT及びモジュールパッケージの高性能化はPEシステム機器の小型・軽量化に多大な影響を与えた。過去30年間で同一容量の機器は容積が数分の1に縮小されている。しかし、近年、モジュール製品の高周波応用の拡大や高密度化が進むにつれ、従来の動作環境では問題にならなかったEMC(Electromagnetic Compatibility)などが、新たな課題として顕在化してきた。スイッチング動作の途中での急激な電流変化を抑制する機能を集積した新たなFWD(Free Wheeling Diode)や低インダクタンス・低抵抗の銅リード配線などの技術をモジュールへ導入し、EMCへの有効な解決策を見いだしていく。

SiC(Silicon Carbide)パワーデバイスはPEシステム機器の劇的な小型・低損失化を提供する次期パワーデバイスと位置付け、耐電圧600Vから3.3kVのSBD(Schottky Barrier Diode)とMOSFETを開発している。SiC材料が高価であるため、モジュール製品化に当たっては内蔵しているFWDのみをSiC化したハイブリッドモジュールから市場への普及を図っていく。ハイブリッドモジュールは20kHz以上の高周波応用では現行Si-IGBTモジュールに比べて30%以上の損失低減効果があることから、高周波応用機器の冷却器の小型化、リアクトルやトランスなどの受動部品の小型化などに有効である。

フルSiCモジュールはハイブリッドモジュールに比して損失は半分以下にでき、更なる高周波動作にも対応できることから、数十kHzの動作が必要な高周波電源機器応用などに展開して、Si-IGBTやハイブリッドモジュールとすみ分けをしていく(図4)。

3.2 市場別の製品動向

3.2.1 社会インフラストラクチャー

電力応用や電車応用では、耐電圧3.3kV電流定格1,500Aや耐電圧6.5kV電流定格750AのHVIGBTを“Rシリーズ”として拡充してきた。現在、洋上風力発電所の普及拡大や電力国際連携のためのHVDC(High Voltage DC Transmission)市場の成長に應えるために、HVIGBTの更なる大容量化に取り組んでおり、既存パッケージで電流容量を増加させた耐電圧3.3kV電流定格1,800Aや耐電圧6.5kV電流定格1,000AのHVIGBTを“Xシリーズ”として開発し、順次市場に投入していく。これによって、各国の鉄道網整備や順応性の高い電力基盤網の構築に寄与していく。

3.2.2 産業・自動車

産業用モジュールは“NXシリーズ”を主に製品拡充を行ってきたが、応用領域によってモジュールへの要求が顕著に異なり始めている。そこで、モーションコントロール用途では高絶縁と高熱放散を両立させるパッケージ構造の開発によるモジュールの小型化を、再生エネルギー用途では高効率機器を実現する3レベルインバータ回路を内蔵したモジュールの開発を進めている。

自動車市場では、トランスファーマールド形パワーモジュール(T-PM)などを製品化し、長寿命化と小型化を両立させてきた。一層の小型・軽量化実現に向けて、現在、冷却性能を高めたPin-fin付きパワーモジュール(図5)を開発中であり、2015年に量産化する。さらに、来たるべき自動車の電動化を見据えてライン整備を進めていく。

3.2.3 民生

民生用パワーモジュールの最大市場であるエアコン応用では、実使用状態に沿った省エネルギー性能を示すAPF(Annual Performance Factor)国内基準が見直しされることから、DIPIPMには低損失化が要求されている。そこで、通年損失を最大限に下げられ、かつ、急冷などの過負荷動作にも対応できるようにIGBTとSJ(Super Junction)-MOSFETを並列接続した高性能DIPIPMを開発し、量産

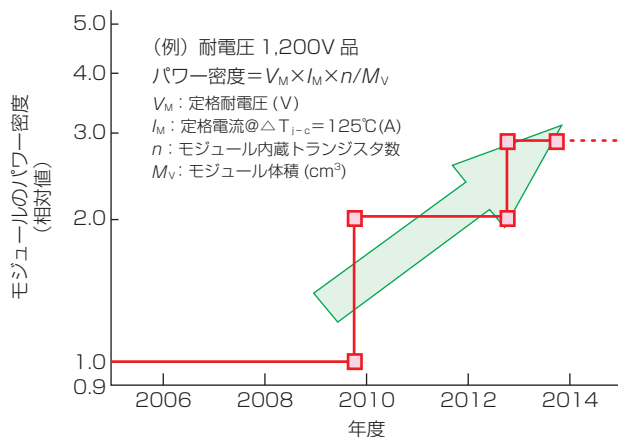


図3. パッケージの集積化の変遷

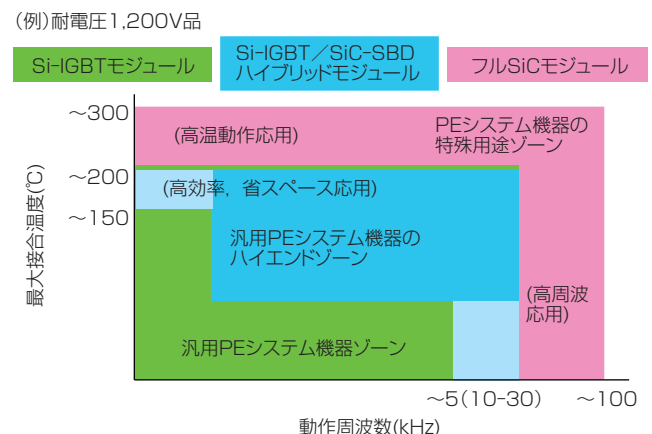


図4. Si-IGBTモジュールとSiCモジュールの棲み分けイメージ

化した。この高性能DIPIPMを主力製品として拡大していく。また、海外でも地域ごとの要求に応える製品を実用化していく。

3.3 ものづくり基盤

パワーデバイス市場はこれまでの先進国から新興国へと拡大しており、パワーモジュールを使用するユーザーは生産拠点を新興国へシフトさせている。このような事業環境の変化に対応するための、消費地でパワーモジュールを生産・供給するグローバル生産体制の強化を進めている。

また、部材・製品等の適正な在庫保有及び生産拠点の分散による重大災害発生時の製品供給維持体制の強化についても、生産体制構築の重要なファクタとして戦略的に推進する。

3.4 将来展望

IGBT及びモジュールパッケージは過去30年の間に多岐にわたる数々の研究・開発が継続的に進められてきたことで、最近では既存技術の延長では性能改善の余地は少なくなりつつある。一方で、モジュールへの小型・軽量化、低損失化、高品質(長寿命)化、低価格化の市場要求は一層強くなっている。性能改善の閉塞(へいそく)感を打破して、今後も市場の要求に応じていくために、当社は従来の開発対象領域の外に出た新領域での技術開発に注力している。特に注力している新領域は個々の要素技術の境界をまたいだ領域であり、新領域の代表的な製品開発例はモジュールとPEシステム機器の境界であるフィンをモジュールに一体化したpin-fin付きパワーモジュール、また、モジュールにPEシステム機器構成材料であったグリスを取り込んだTIM(Thermal Interface Material)付きモジュールである。これらはPEシステム機器の小型・軽量化に、また、機器の生産性改善や品質に大きな影響を及ぼし始めている。新領域には多くの研究・開発テーマが残されており、新領域での開発に対する市場からの期待は大きい。

パワーデバイスの性能向上を前進させるもう1つ主な

る技術領域は、SiCデバイスの性能を最大限に引き出すための基盤技術である。SiC-SBDを始めとして確実にSiCデバイスは市場に浸透しだし、その応用分野を広げている。SiCデバイスの市場拡大を確固たるものにするには、まだまだSiデバイスの域に到達していないウェーハ結晶の生産技術やSiC固有プロセス技術、シミュレーションなどの設計技術等の基盤技術の充実が必須である。さらに、SiC材料の優れた耐熱性能を引き出すための製品周辺技術は開発の途上であり、開発成果の蓄積が必須である。基盤技術や製品周辺技術を充実させ、当社関連製作所・部門及び材料・設備装置メーカーと連携してパワーモジュールの高性能化、小型・軽量化を確実に進めていく(図6)。

4. む す び

当社は多くの技術開発や生産基盤の充実によってパワーモジュールの業界を牽引してきた。30年の開発を経て、IGBTチップやパッケージの性能(信頼性・性能・体積・質量・価格等)は飽和傾向が見られ始めているが、その状況を打破するため、全体最適化開発にも積極的に取り組んでいる。SiCデバイスでは基盤技術のレベルアップを図りながら、SiCデバイス搭載モジュールのラインアップを拡充していく。それぞれの応用分野の動向をつかみ、小型・軽量の高性能・高機能パワーモジュールをタイムリーに市場に提供していくことによって継続的に事業を発展させ、低炭素社会の実現に貢献していく。

参 考 文 献

- (1) Sakuyama, M.: The role of IEEJ in development of secure energy infrastructure, The journal of IEEJ, 132, No.7, 400 ~ 404(2012)
- (2) 眞田 亨, ほか: パワーデバイス技術の現状と展望, 三菱電機技報, 88, No.5, 276 ~ 280(2014)

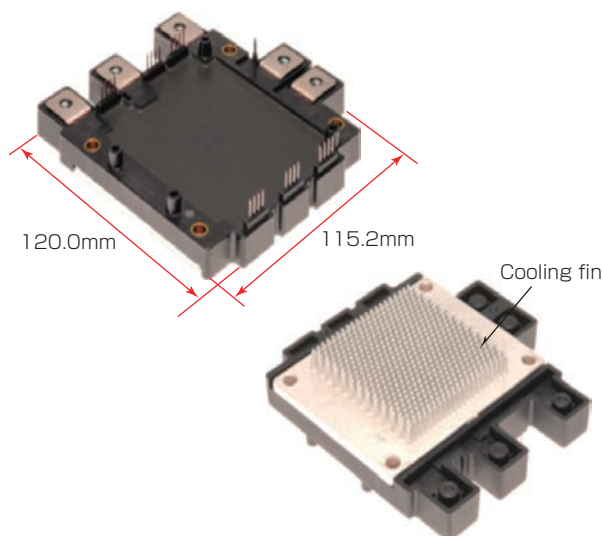


図5. Pin-fin付きパワーモジュール
(例: 耐電圧650V電流定格600A)

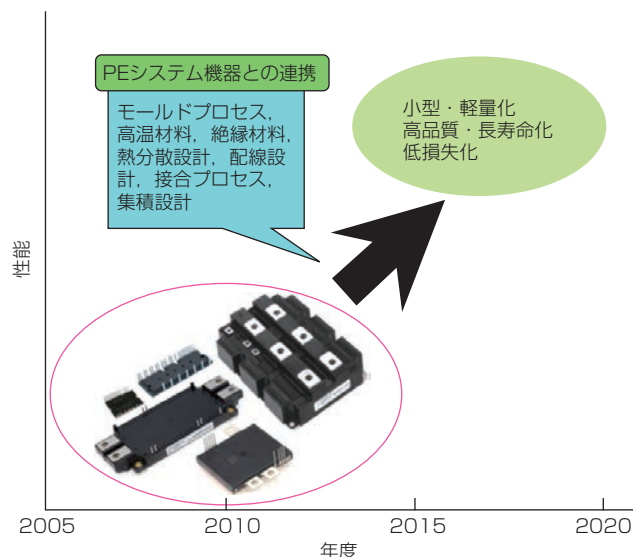


図6. パワーモジュールの将来動向