巻頭論文

パワーデバイス技術の現状と展望

眞田　享*　　佐藤克己**

Present State and Prospect of Power Semiconductor Device Technologies

Toru Sanada, Katsumi Satoh

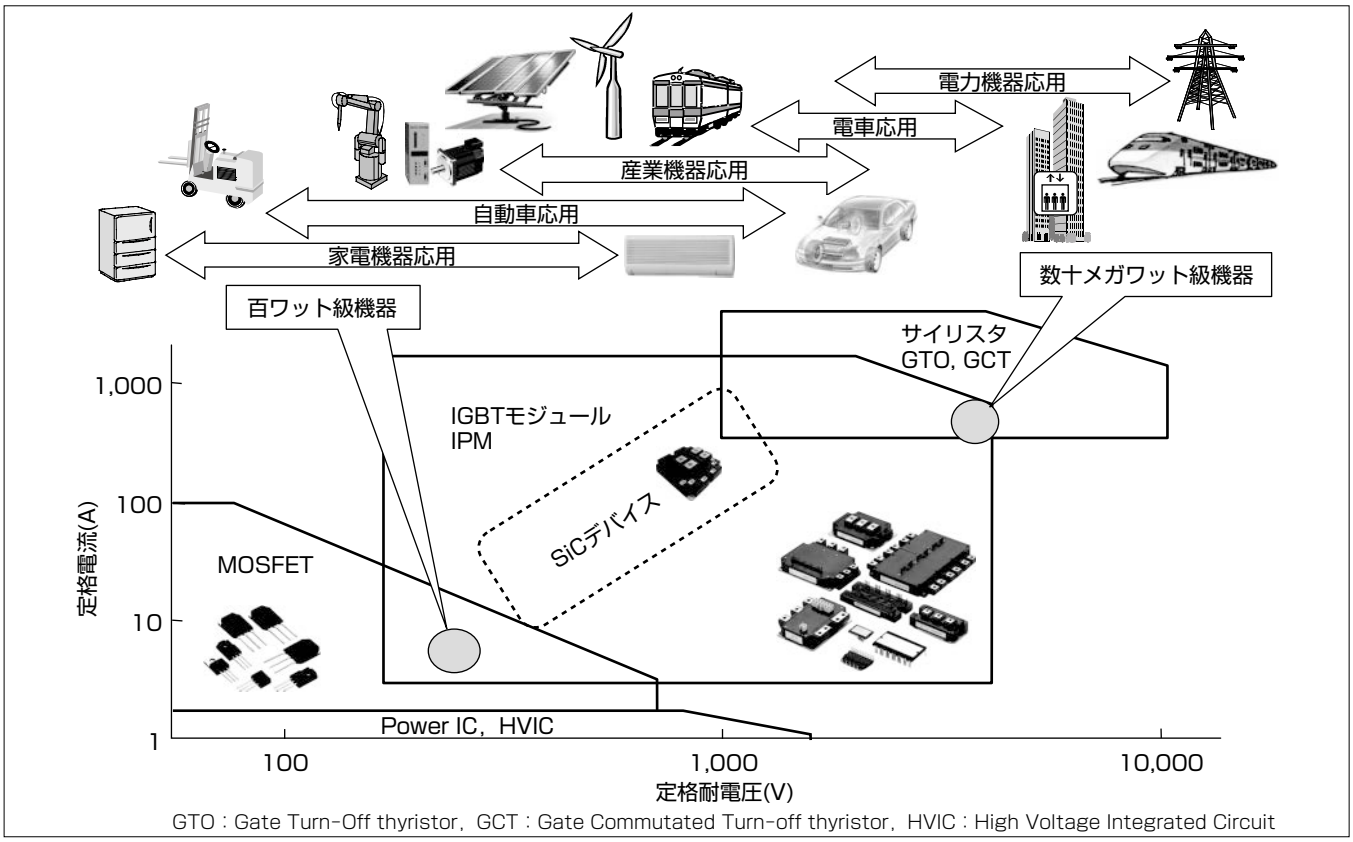
要　旨

90%以上を輸入に頼っている日本の１次エネルギーは，その40%以上が電気エネルギーに変換され，利用されている。１次エネルギーから電気エネルギーへの変換や，電気エネルギーから使用機器に適合した電気エネルギーへ形態を変換するパワーエレクトロニクス(PE)技術は，省エネルギー化に貢献している。低炭素社会の実現に向けて，PE機器の一層の高性能化・高機能化に対する期待がますます高まってきている[(1)(2)]。

近年，PE機器のキーパーツであるパワーデバイスにおいて，バイポーラデバイスの優れた通電性能を持つIGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)とモジュール化技術と組み合わせたパワーモジュールは，百ワット級から数十メガワット級までの幅広いPE機器出力容量に対応でき，家電から自動車，産業，電車，電力までの分野で使われている。

三菱電機では，それぞれの分野の市場ニーズに応えるために，パワーモジュールは高効率・大容量化，小型・軽量化，高信頼度化，高機能化を柱とした技術開発を多方位から進めている。材料では，低損失で高速動作可能なSiC(Silicon Carbide)ウェーハを用いたSBD(Schottky Barrier Diode)の実用化を始めた。製品では，第７世代の600V IGBTとそれを組み立てる技術を開発し，制御・保護回路と最適に組み合わせたIPM(Intelligent Power Module)の量産を始めている。

SiC-MOSFET(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)の実用化開発や７世代IGBTのシリーズ化開発，高性能パッケージの開発を進めており，これらの技術を搭載した先進パワーモジュールが更なるPE機器の進化に寄与するものと期待されている。



現在のパワーデバイスの容量と応用機器の関係

定格耐電圧が数百ボルトから数千ボルト，定格電流が数アンペアから数千アンペアの大きな容量領域をカバーするIGBTモジュールは，社会インフラの一翼を担う電力機器や電車応用機器，産業機器，日常生活に欠かせない自動車機器，家電機器等に使用されている。また，風力発電機器や太陽光発電機器等の再生エネルギー機器にも使用されており，適用範囲がますます拡大している。

　*常務執行役 半導体・デバイス事業本部長　**パワーデバイス製作所 主管技師長(博士)　

1. まえがき

環境維持・改善のための低炭素社会を目指した動きに加え，1次エネルギーの90%以上を輸入に頼る日本では，エネルギーの有効利用が重要課題であり，社会インフラを支える電気エネルギーの生成，備蓄，輸送(送配電)，消費を支えるパワーエレクトロニクス(PE)技術とPEを支えるパワーデバイスに注目が集まっている。

1次エネルギーから2次エネルギーである電気エネルギーに変換するPE機器は，数十ワットから数十メガワットまでの容量で幅広く存在している。パワーデバイスは，PE機器の容量に合わせて使い分けされており，100ワット級以下の小容量帯ではMOSFETが，メガワット級の大容量帯ではサイリスタやGCTが，100ワット級から数メガワット級までの広範囲にわたる中容量帯では，IGBTモジュールが一般的に使用されている。

PE機器の小型・軽量化要求に応えて来たパワーデバイスのディスクリートパワーデバイスからパワーモジュールへの進化を**図1**に示す。1980年頃までのPE機器には，ディスクリート形状のパワーデバイスが使用されていたが，その後バイポーラデバイスの優れた通電性能を持つIGBTを主たるデバイスとして，ブリッジ構成や並列構成を内蔵するモジュール化技術によって，さらには，IGBTモジュールに保護・駆動回路を内蔵したIPM技術[3]，良好な信頼性と生産性を提供するトランスファモールド技術によって，小型・軽量化が進められて来た。

図2にIGBTモジュールの進化に伴ったPE機器の小型化の推移を示す。1980年代半ばの第1世代IGBT搭載モジュ

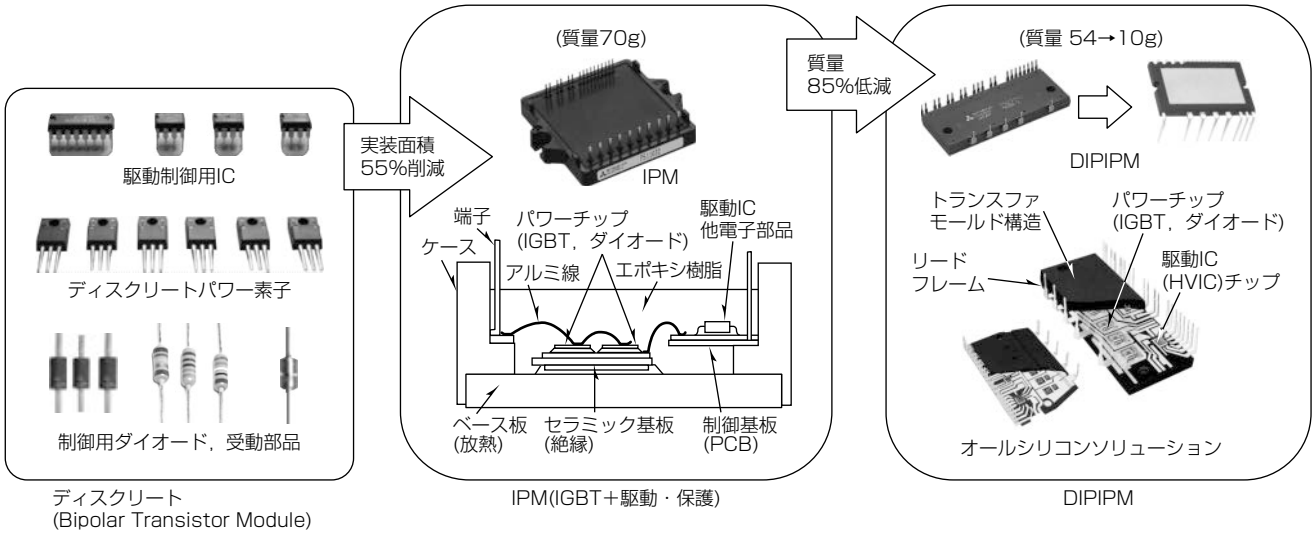


図1．パワーモジュールの進化

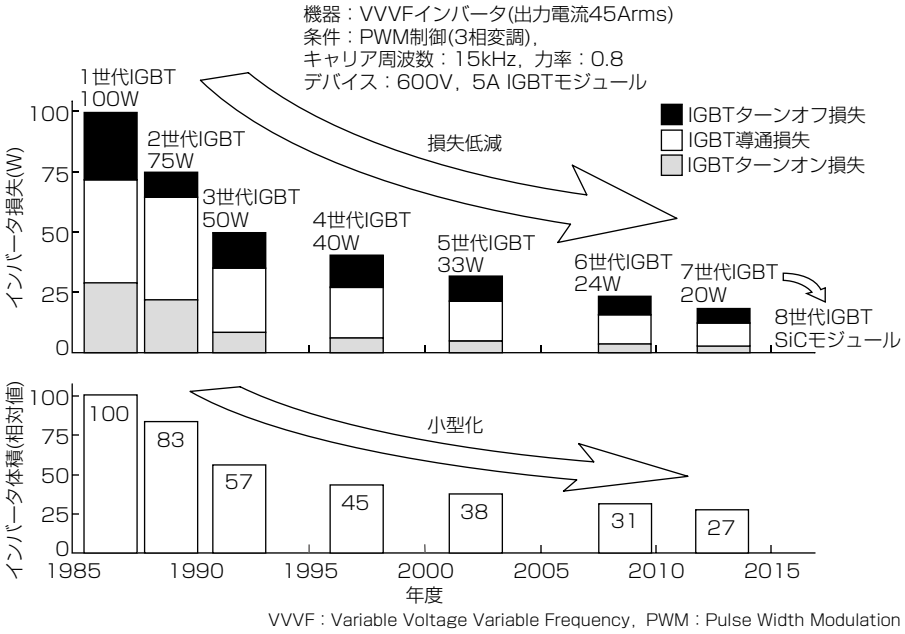


図2．IGBTの進化とPE機器の小型化の推移

ールに対して，最新の第7世代IGBT搭載モジュールでは，損失が5分の1まで低減改善され，インバータを始めとするPE機器の小型・軽量化に貢献している。今後も高効率・大容量化，小型・軽量化，高信頼度化，高機能化に向けた製品開発を進めていく。

本稿では，パワーデバイス技術の現状と展望について述べる。

2. パワーモジュールの現状

パワーデバイス(チップ)は，電流を流しているオン状態で“抵抗がゼロ(通電損失ゼロ)”，電流を遮断しているオフ状態で“抵抗が無限大(遮断損失ゼロ)”“スイッチング動作が瞬時(スイッチング損失がゼロ)”となる理想的なスイッチを目指して損失改善が続けられている。加えて，非定常動作でも機能を維持し応用機器との協調性を高めるために，安全に動作可能な電流・電圧領域(安全動作領域(Safety Operation Area：SOA))の拡大改善が進められている。損失の低減改善とSOAの拡大改善は，背反関係にあることから，背反関係の改善がパワーデバイスの最大の技術課題であり，その解決策がモジュールの大容量化や小型・軽量化に大きく影響する。**図3**はパワーモジュールの大容量化の変遷である。これまでは，電車応用が大容量化を牽引(けんいん)してきたが，新エネルギー関連への適用や電力系統応用への適用が検討され始めるなど，多用途で大容量化への期待が高まっている。**図4**はモジュールの小型・軽量化の指標であるモジュールの制御容量密度の変遷を示しており，小型・軽量化に向けた取組みが継続的に進められている。中でも，小型・軽量化を最優先の技術課題とするPE機器では，低損失で小型・軽量化を可能にするSiC-SBDとSi-IGBTを混載したハイブリッドモジュールが適用され始めている。

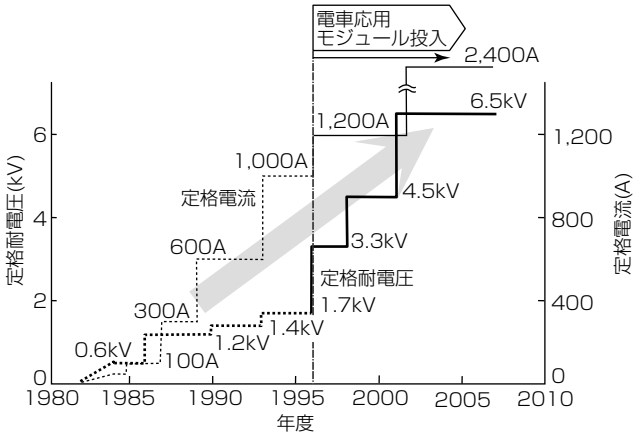


図3．パワーモジュールの大容量化の変遷

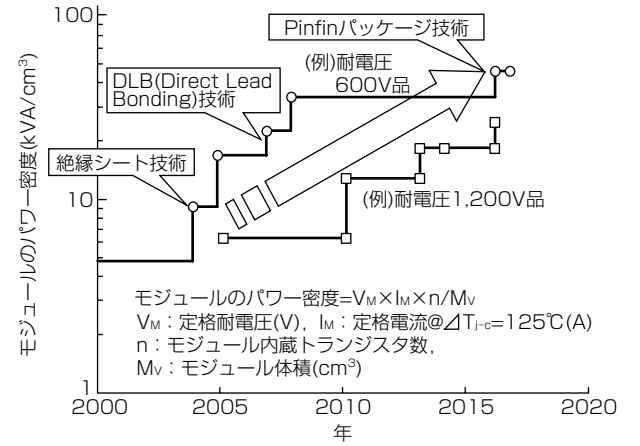


図4．トランスファモールド型パワーモジュールの制御容量密度の変遷

3. パワーチップ

チップは電流を流す有効領域を，定格耐電圧を安定的に保持するための無効領域(終端構造)が取り囲む構造であるため，チップの小型化には両領域の縮小技術が必要になる。有効面積の縮小には，先に述べた背反特性を改善する必要がある。これまでにトレンチ構造技術を含む微細化技術，キャリア分布の最適化構造設計技術，電流経路を短くするための薄ウェーハ化技術等が損失改善の手法として用いられて来た。並行して，通電性能を決める伝達特性の安定化技術(ばらつき改善)がSOA改善のために進められて来た。

図5は家電製品に応用される600V定格耐電圧のDIPIPMに搭載されるIGBTチップの主要特性値の変遷を示す。コレクタ・エミッタ間飽和電圧($V_{CE(sat)}$，オン電圧とも言う)を低減しながら，伝達特性を示すしきい値電圧($V_{GE(th)}$)のばらつきを低減させることでSOAを確保しながら制御電流密度を高めてきている。

耐電圧特性は最重要性能の一つであり，終端構造はその品質を決定する。当社では，これまで，ガードリングにFLR(Field Limiting Ring)を組み合わせた終端構造を踏襲してきたが，IGBTチップの第7世代化に当たって，終端構造の改善による無効領域の縮小にも取り組み，最新の微細加工技術を適用した新規終端構造(VLD(Variation of Lateral Doping)構造)を開発した。新規終端構造の適用効果を従来構造と比較して**表1**に示す。新規終端構造は耐電

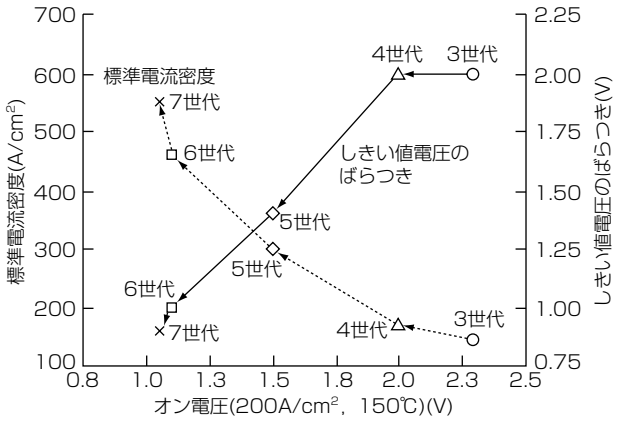


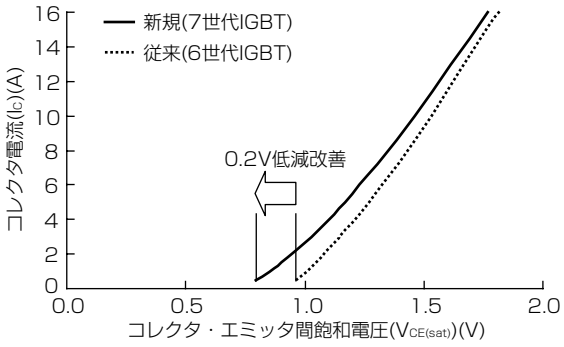
図5．600V定格耐電圧のIGBTチップの主要特性値の変遷

表1．新規終端構造の適用効果

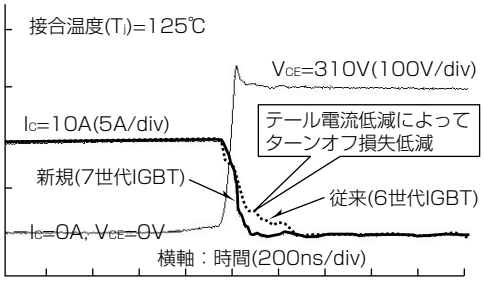
世代	終端構造	終端領域幅（μm）	有効面積率（%）	備考
～6世代	ガードリング＋FLR	450	77	ゲート電極パッド 無効（終端）領域（電圧阻止） 有効領域（電流通電） （　）は機能
7世代	VLD	230（49%縮小改善）	84	

・有効面積率＝有効領域／チップ総面積

・チップ総面積
＝有効面積＋無効面積＋ゲート電極パッド面積



(a) 出力特性



(b) ターンオフスイッチング動作波形

図6．600V，10A IGBTチップの特性

圧安定性を高めながら，無効領域の半減を実現している。

背反関係改善及び無効領域縮小の両技術を統合した最新の7世代IGBTチップ[4]は，600V DIPIPMに搭載されている。**図6**はDIPIPMに搭載の600V IGBTの出力特性とターンオフスイッチング動作波形であり，従来品と比較して損失が改善されていることが読み取れる。現在，定格耐電圧1,200Vから6.5kVまでの7世代IGBTのシリーズ化を進めている。

更なる性能改善に向けて，物理限界に迫る究極の薄さのパワーチップ技術開発やこれまで回路を形成することがほとんどなかった裏面にも回路を形成する設計・プロセス技術の開発を進めている。これらの技術はIGBTとともに使用するダイオードの特性改善やIGBTとダイオードを集積化した逆導通型IGBTの実現にも寄与する。

4. パワーモジュール

パワーモジュールは小型・軽量化に向け，①高温度耐性のチップ・パッケージ間接合技術，②発熱するチップの冷却を高める低熱抵抗設計技術の開発が進められている。従来，チップ上面の電極とパッケージ電極間はアルミニウムワイヤ接続が用いられてきたが，新たな接続技術である

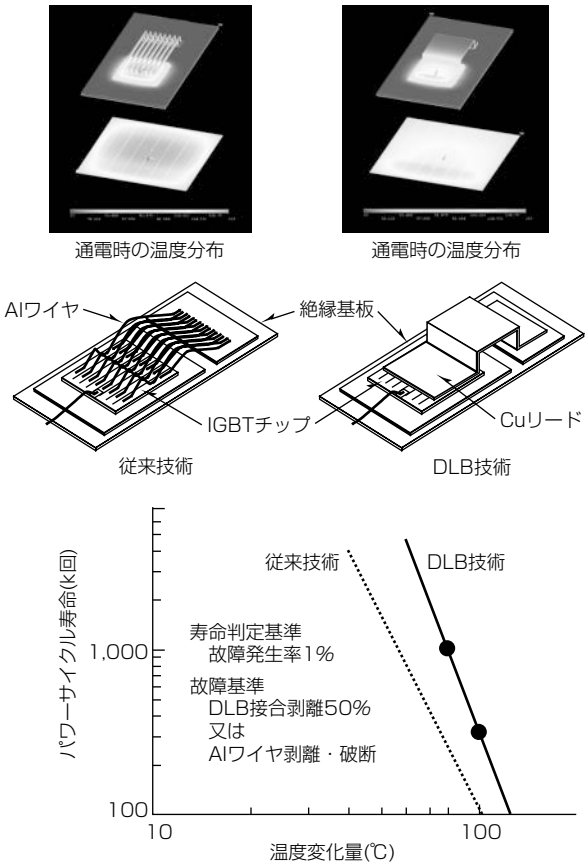
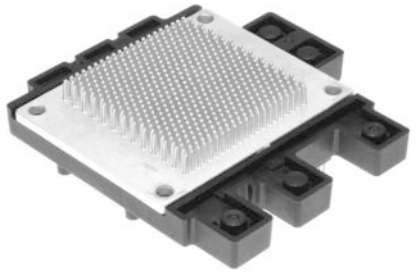


図7．従来技術とDLB技術の構造，性能比較



熱抵抗(Rth(j-w))：40%改善→フットプリント：20%低減

図8．Pinfinモジュール（冷却ピンフィン一体型パッケージ）

Cuワイヤ接合技術やDLB技術[5]等が用いられ始めた。**図7**はチップ上面電極とパッケージ電極間を直接はんだ付けするDLB技術を示している。DLB技術の採用によって接合面積を拡大でき，接合寿命を従来のチップ上面電極・パッケージ電極間アルミニウムワイヤ接続に比べて数倍改善している。

図8は冷却フィンとモジュールを一体化したPinfinモジュールである。一体化によってパッケージと冷却フィンを接続するためのグリスが不要となり，チップ・フィン間熱抵抗を約40%低減し，冷却性能が高まっている。この効果によって従来モジュールに比べてフットプリントを20%低減し，PE機器の小型化を実現できる。

更なる小型・軽量化を目指し，チップ下面電極とパッケージ電極をはんだ接合に代わり銀などを用いて接合する技術の開発を進めている。

大容量モジュールはIGBTチップを数十チップ多並列接

続して使用するため，チップ特性の均一化が求められるとともに多チップを均等に動作させるための電極配線設計技術や制御技術が必要になる。当社の大容量モジュールはモジュールの構造解析シミュレーション技術を構築し，最適活用することで配線構造やチップレイアウトを最適設計し，均一動作性や低ノイズ性を高めている。

加えて，動作診断機能や通信機能及び周辺回路の取り込みを図り，機能充実化を進めていく。

5. ワイドバンドギャップ半導体

WBG(Wide Band Gap)半導体は絶縁破壊電界強度が大きいことから，電流を流す経路を短くできるなどの理由によって低損失化が可能であり，スイッチングスピードも速いことからPE機器を劇的に高性能化できると期待されている[6]。WBG半導体にはSiC以外にもGaN(Gallium Nitride)，Ga_2O_3(Gallium(Ⅲ)oxide)，AlN(Aluminum Nitride)，ダイヤモンド等もあるが，ウェーハの開発状況やデバイス実現のためのプロセス技術の構築状況等の観点から，現在はSiCデバイス開発に注力している。これまで600Vから1,700VまでのSiC-SBDチップのシリーズ化を行い，Si-IGBTと組み合わせたハイブリッドモジュールを製品化している。**図9**は1,200V SiC-MOSFETのオン抵抗の進化を示しており[7]，SiC-MOSFETの製品化を目指して，低損失化開発を進めている。

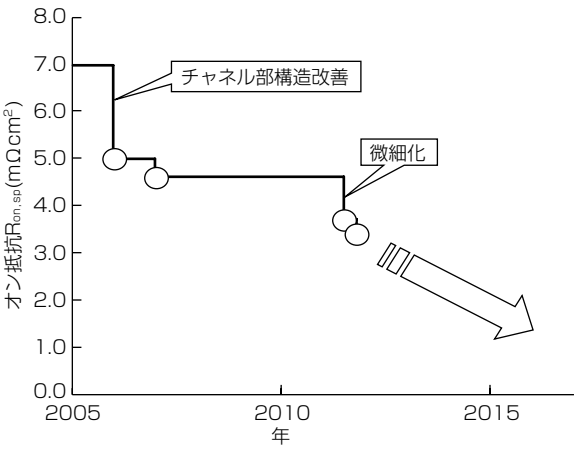


図9．1,200V SiC-MOSFETのオン抵抗の進化

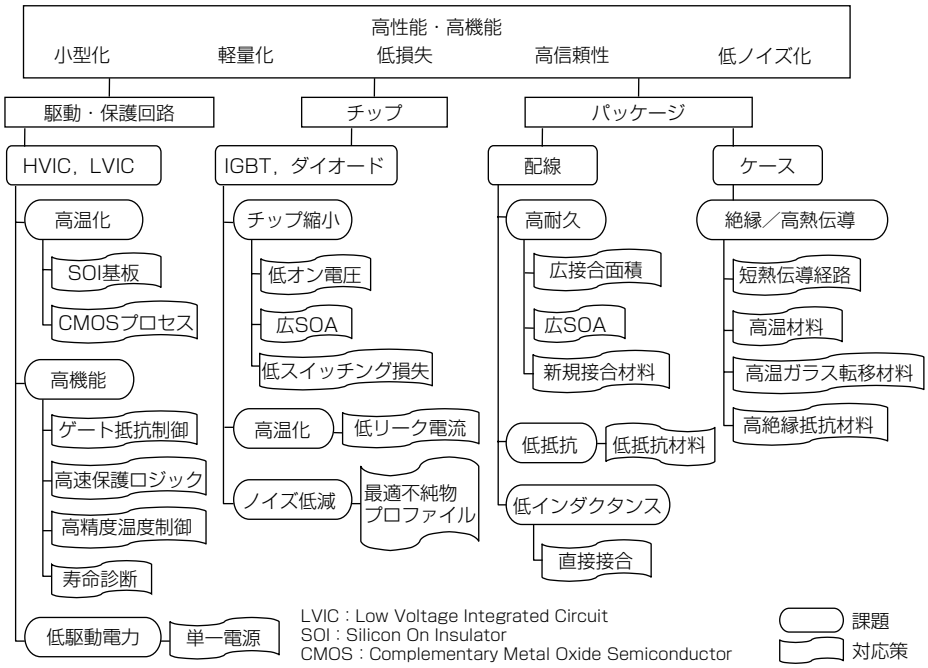


図10．モジュール進化に必要とする技術

6. む す び

電気エネルギーを使う場合の様々な形態(電圧・電流・周波数）に対応して，発電・送電・変電・蓄電等の変換効率を高めるには，PE技術の進展が不可欠である。そのキーコンポーネントであるパワーモジュールは信頼性・性能・体積・質量・価格等の市場要求に応えていくために，**図10**に示す要素技術及びその統合化技術を進歩させ，低炭素社会，持続可能な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) Yamamoto，M.，et al.：Development of secured energy infrastructure in Japan，ISPSD2013，3～7（2013）

(3) Majumdar，G.，et al.：A New Series of smart Controller，IEEE-IAS，**2**，1356～1362（1989）

(4) Haraguchi，Y.，et al.：600V LPT-CSTBT™ on Advanced Thin Wafer Technology，ISPSD2011，68～71（2011）

(5) Ueda，T.，et al.：Simple，Compact，Robust and High-performance Power module T-PM(Transfer-molded Power Module)，ISPSD2010，47～50（2010）

(6) 三菱電機ニュースリリース：三菱CNC対応ドライブユニット「MDS-DM2-SPHV3-20080」発売のお知らせ http://www.mitsubishielectric.co.jp/news/2012/1029.html

(7) Yonezawa，Y.，et al.：Low Vf and Highly Reliable 16kV Ultrahigh Voltage SiC Flip-Type n-channel Implantation and Epitaxial IGBT，IEDM Tech.Dig.，661～664（2013）