

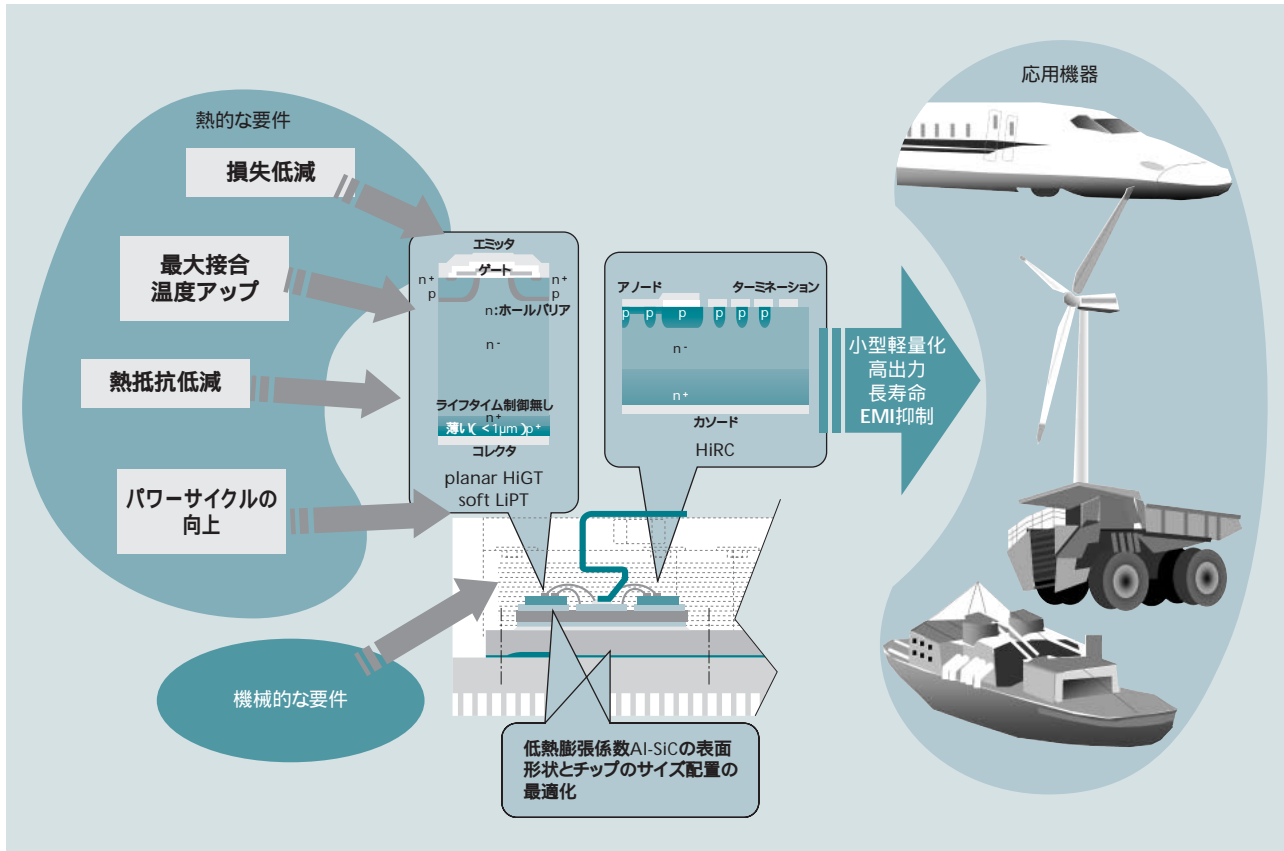
# 低損失, 高耐圧, 大電流HiGTモジュール

Low Loss, High Voltage, and Large Current HiGT Module

齊藤 克明 Katsuaki Saito

小池 義彦 Yoshihiko Koike

佐伯 貴広 Takahiro Saiki



注:略語説明 IGBT( Insulated Gate Bipolar Transistor ), HiGT( High Conductivity IGBT ), HiRC( High Reverse Recovery Capability ), LIPT( Low Injection Punch Through ), EMI( Electro Magnetic Interference )

図1 高耐圧IGBTへの技術的要件と応用機器への貢献

IGBTには熱的な要件と機械的な要件がある。損失低減, 最大接合温度のアップ, 熱抵抗低減, パワースイクル耐量の向上といった熱的な要件を満たすことでインバータなどの応用機器の出力容量をアップすることができる。

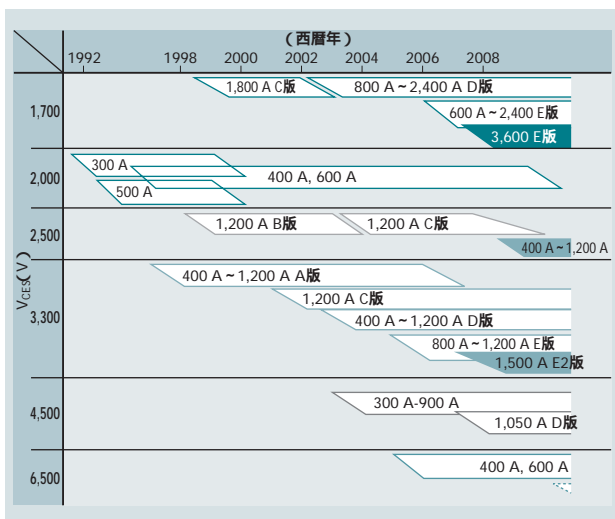
日立グループの高耐圧IGBTは, 風力発電, 鉄道, 産業用をはじめとするパワーエレクトロニクス製品のキーデバイスとして採用され, 豊かな社会や省エネルギーに貢献している。現在では1.7 kVから6.5 kV, 最大電流が3,600 Aまでのラインアップが揃えられ, 機器の大容量化と小型・軽量化に役立ってきた。

本開発のE2版では最新技術を適用し,  $V_{ce(sat)}$  および熱抵抗の低減, 最大接合温度を上げ, 従来製品と同一パッケージサイズで定格電流を25%アップした。また, 放射ノイズを抑制した環境配慮型の特性を生かし, ラインアップを拡大して, 高耐圧大容量インバータのニーズに対応していく( 図1参照 )。

## 1. はじめに

IGBTモジュールは制御性が良く取り扱いが容易であることから, 電力制御用デバイスとして普及してきた。中でも, 高耐圧IGBT( Insulated Gate Bipolar Transistor )は, それまで用いられてきたGTO( Gate Turn-off Thyristor )に比べ低損失であるとともに堅牢( ろう )性に優れ, 冷却系や保護回路を軽減できることから, 鉄道用インバータ向けなどさまざまな応用機器向けに市場規模を拡大してきた。

日立グループにおける高耐圧IGBTは, 1992年に製品化された2.0 kV, 300 A IGBTにさかのぼる。高耐圧IGBTの製品化の経緯を図2に示す。その後, 変電設備, 大型ミッドドライブ,



注:略語説明  $V_{GE}$ (Collector Emitter Voltage)

図2 日立高耐圧IGBTの製品化の経緯

1992年の2.0 kV IGBTをはじめとし、1.7 kVから6.5 kV IGBTまで六つの定格電圧ラインアップを拡充し、

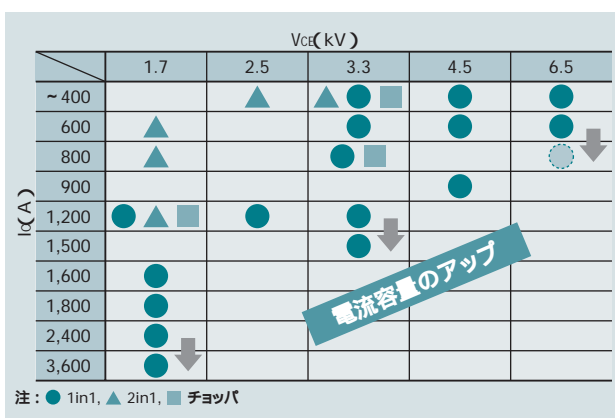
OHV(Off Highway Vehicle)や船舶などの駆動用、風力発電や粒子加速器にも用いられるようになった。応用機器の拡大に伴い、現在では1.7 kVから6.5 kVまでの六つの定格電圧ラインアップを拡充し、最大3,600 Aまでの定格電流をラインアップ化した(図3参照)。

近年、応用機器の大容量化が進むのに伴い、小型、低損失、放射ノイズの抑制が強く求められ、新型セル構造を採用することで<sup>1)</sup><sup>2)</sup>ニーズに応えてきた。

ここでは、これらの要請に応えるために、開発された3.3 kV、E2版モジュールについて述べる。

## 2. 次世代IGBT「E2版」の開発

3.3 kV、E2版モジュールでは、従来1,200 Aを最大の定格電流としてきた3.3 kV IGBTと同一パッケージサイズでありながら、定格電流を25%アップし1,500 Aとした。IGBTの世代はアルファベットのAから始まり、これまでにE版までが製品化されて

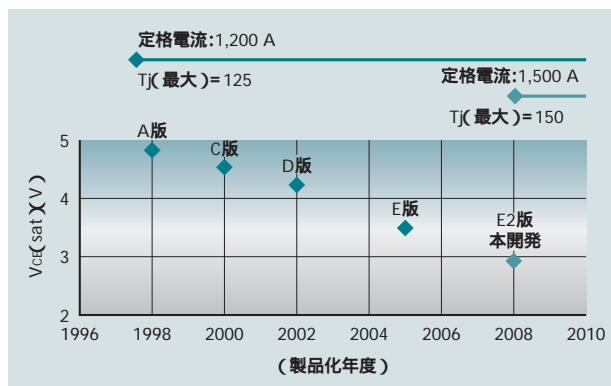


注: ● 1in1, ▲ 2in1, ■ チョップ

注:略語説明  $I_C$ (Collector Current),  $V_{GE}$ (Collector Emitter Voltage)

図3 3.3 kV IGBTの世代ごとの $V_{GE}(\text{sat})$ 推移

3.3 kV、E2版を2008年に製品化し、定格電流、最大接合温度をアップした。



注:略語説明  $V_{GE}(\text{sat})$ (Collector Emitter Saturation Voltage)

図4  $V_{GE}(\text{sat})$ のIGBTチップの世代ごとの推移

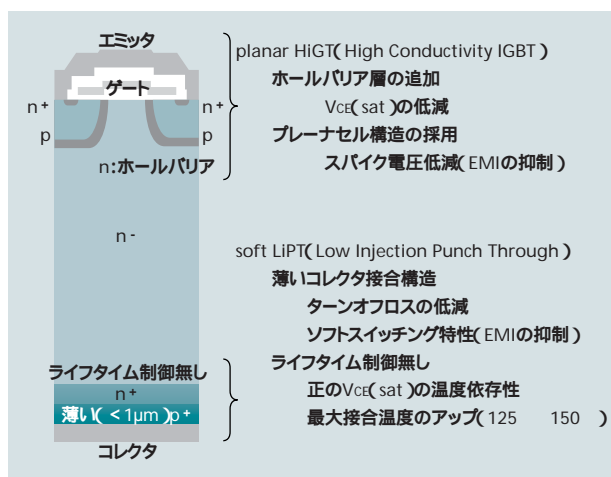
E2版を2008年に製品化し、定格電流を25%、最大接合温度を150 にアップした。

おり、この開発はE版の次世代としてE2版と名付けた(図4参照)。E2版では、 $V_{GE}(\text{sat})$ の低減、熱抵抗を低減させるとともに、最大接合温度を25度上昇させ、150 とした。実現にあたっては、IGBTチップにはplanar HiGT( $V_{GE}(\text{sat})$ 低減)およびLiPT(スイッチングロス低減)をダイオードチップにはHiRC(高逆回復耐量)構造を採用した。また、チップのサイズや配置、さらには低熱膨張AlSiC(アルミニウム/炭化ケイ素複合材料)ベースプレートの形状最適化も図っている。

## 3. IGBTチップ

開発したIGBTセルの断面構造とその特徴を図5に示す。エミッタ側にはplanar HiGT(High Conductivity IGBT)構造を、コレクタ側にはsoft LiPT(Low Injection Punch Through)構造を採用することで、 $V_{GE}(\text{sat})$ の低減、スイッチングによる放射ノイズの抑制、最大接合温度のアップを実現することができた。

IGBTの出力特性を図6に示す。-40 ~ 150 のすべての温度範囲、定格電流の20%以上の電流領域で正の温度依



注:略語説明  $V_{GE}$ (Gate Emitter Voltage)

図5 IGBTセル構造の特徴と効果

planar HiGT構造とsoft LiPT構造を採用し、 $V_{GE}(\text{sat})$ の低減、放射ノイズの抑制、最大接合温度のアップを実現する。

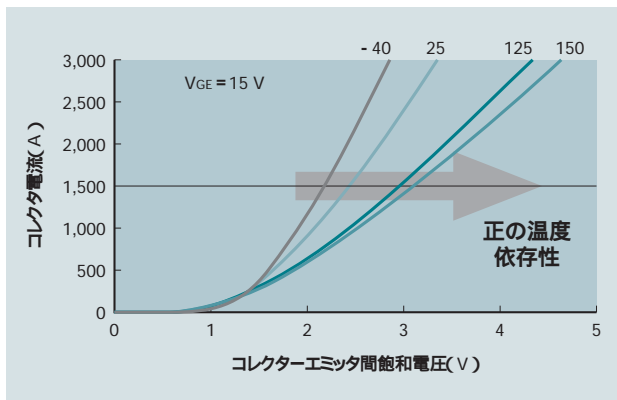


図6 IGBTの出力特性の温度依存性  
大電流モジュールとして好適なIGBT特性である正の温度依存性を示す。

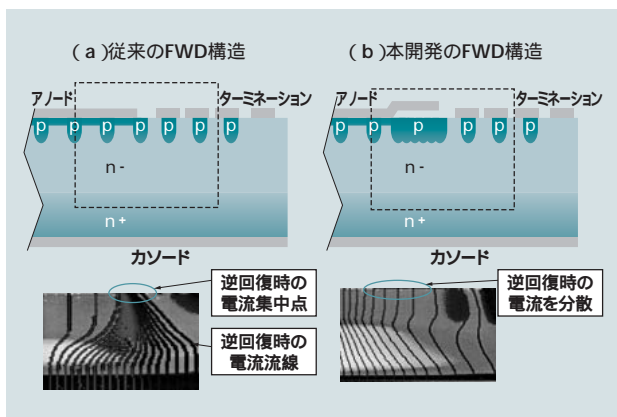
依存性を得た。これは、モジュール内に並列接続されたチップ間の電流がバランスをとりやすい特性であり、多くのチップが並列接続される大電流モジュール用として好適な特性である。

#### 4.FWDチップ

FWD( Free Wheel Diode )にはHiRC( High Reverse Recovery Capability )構造と名付けられた独特のセル構造を採用した。HiRC構造はアクティブ領域周縁部を二元的に構造最適化することで、逆回復時の電流集中を緩和し、高い逆回復耐量を得ることができる( 図7参照 )。

さらに、アノード( 陽極 )からカソード( 陰極 )に至る縦方向についてはオン状態、逆回復期間ともに理想的なキャリア分布に近づけられるように、p型、n型不純物濃度およびキャリアライフタイムの最適化を図った。この三次元的な構造最適化により、逆回復耐量、順電圧、逆回復損失の三角関係トレードオフを改善した。

順電圧特性を図8に示す。IGBTチップ同様、ほぼすべての電流、温度範囲で、大電流モジュールとして好適な、正の温度依存性が得られている。



注:略語説明 FWD( Free Wheel Diode )  
図7 FWDの断面構造と逆回復時の電流経路のシミュレーション  
HiRC構造の採用により、高い逆回復耐量を得ることができた。

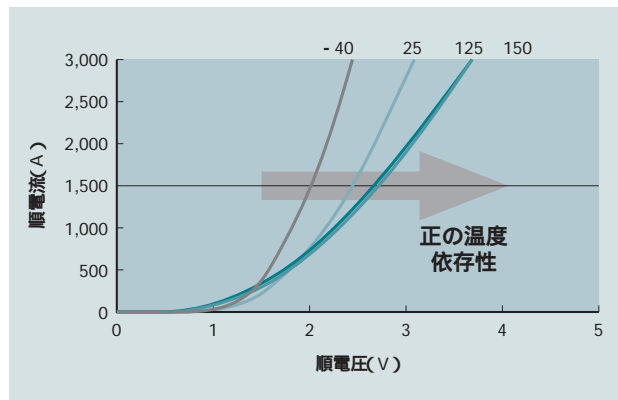


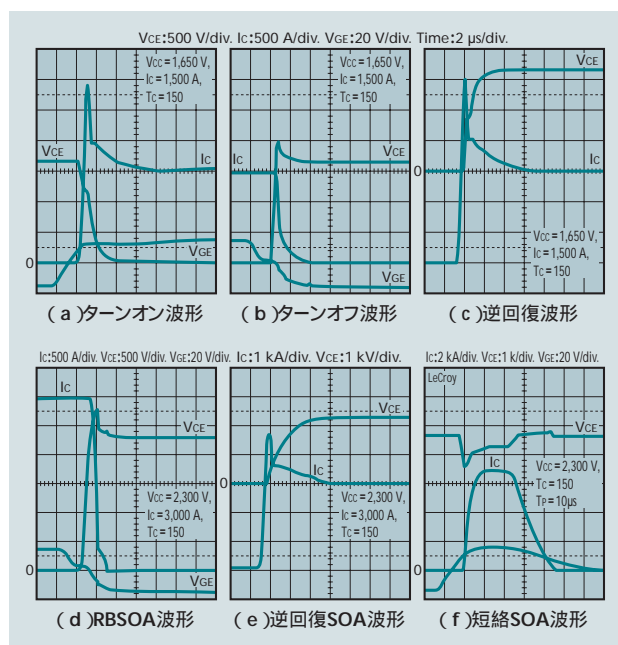
図8 FWDの順電圧特性カーブの温度依存性  
大電流モジュールとして好適なダイオード特性である正の温度依存性を示す。

#### 5.スイッチング特性

接合最高温度150におけるスイッチング波形を図9の(a),(b),(c)に、SOA( Safe Operation Area:安全動作領域 )試験波形を(d),(e),(f)にそれぞれ示す。planar HiGTとsoft LiPTの採用により、従来125で確保されていたものと同様に、スムーズなスイッチング波形を150においても確保できた。

#### 6.熱抵抗の低減

発生損失の低減、最大接合温度の向上とともに熱抵抗の低減を図った。チップサイズ、チップ配置の改善によってRth(j-c)( Siチップからケースまでの熱抵抗 )を8%低減した。モジュールとヒートシンク間に介在する熱伝導グリースは、その熱伝導率がモジュールやヒートシンクの構成部材に比べて2倍



注:略語説明 RBSOA( Reverse Bias Safe Operation Area ), SOA( Safe Operation Area ), Vc( 直流電圧 ), Tc( ケース温度 )  
図9 MBN1500E33E2のTc150でのスイッチング波形  
( a )ターンオン波形、( b )ターンオフ波形、( c )逆回復波形、( d )RBSOA波形、( e )逆回復SOA波形、( f )短絡SOA波形をそれぞれ示す。Tc = 150 においてもスムーズなスイッチング波形を確保できた。

た程度低い。このため、グリース領域での温度上昇が大きい。ヒートシンク上にマウントした際のグリース厚さが必要十分な量となるようなAlSiCベースの形状とすることで、 $R_{th}(c-hs)$ （ヒートシンク表面からベース裏面までの熱抵抗）を16%低減した。

### 7. インバータ動作時の発生損失

インバータのPWM（Pulse Width Modulation）運転に用いた際のシミュレーション例として、図10の(a)にIGBTモジュールからの発生損失の搬送波周波数( $f_c$ )依存性を、(b)にその際の温度分布、および(c)に最大接合温度となるインバータの出力電流を示す。また、同図(c)では現行製品との比較をしている。スイッチング損失が低く高周波数用途に適した「MBN1200E33D」、 $V_{ce}(sat)$ が低く高出力電流用途に適した「MBN1200E33E」と同じパッケージサイズでありながら、すべての搬送波周波数領域で25%以上の出力電流のアップが可能となる。 $V_{ce}(sat)$ の低減、最大接合温度のアップ、熱抵抗の低減がこれに寄与した。

### 8. 製品ラインアップ

3.3 kV E2版の製品ラインアップ計画を図11に示す。従来製品でも適用されていた、 $140 \times 190 \times 38$  (mm)および $140 \times 130 \times 38$  (mm)のシングルパッケージに、今回新たにデュアルパッケージを加える。電流定格は500 Aであり、これは電鉄用の補助電源や永久磁石モータ駆動用などの高耐圧小型インバータの需要に対応するものである。

### 9. おわりに

ここでは、最新世代の3.3 kV 1,500 A E2版IGBTにて、現行製品と同一パッケージ外形でありながら、出力電流を大幅に拡大できることについて述べた。

ここで紹介した技術は、3.3 kV素子だけに適用可能なものではない。今後、この開発技術を6.5 kVなど、ほかの耐圧IGBTにも展開し、これによって製品の価値を高め、さらにはこのIGBTを適用したインバータの付加価値向上に寄与していく考えである。

#### 参考文献

- 1) M. Mori, et al.: A trench gate high conductivity IGBT (HiGT) with wide short-circuit capability, IEEE Transaction on Electron Devices, Vol.54, No.8, August 2007, pp.2011-2016 (2007.8)
- 2) M. Mori, et al.: A planar-gate high-conductivity IGBT (HiGT) with hole-barrier layer, IEEE Transaction on Electron Devices, Vol. 54, No. 6, June 2007, pp.1515-1520 (2007.6)

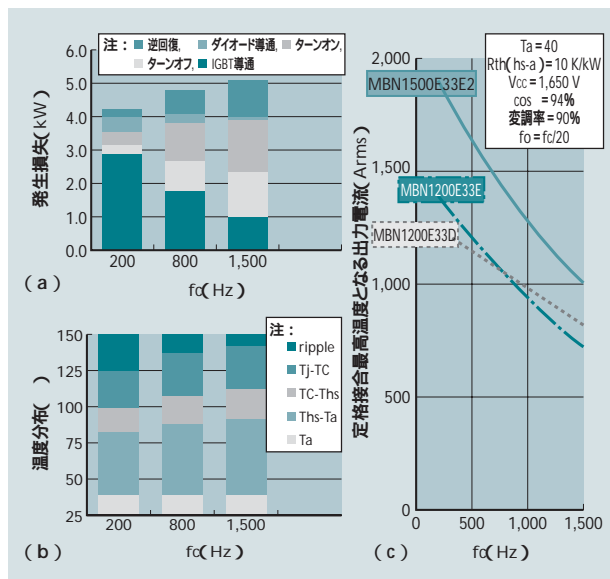


図10 PWM（パルス幅変調）動作時のシミュレーション例

(a) 発生損失成分ごとの搬送波周波数( $f_c$ )依存性、(b) 温度上昇、(c) 定格接合最高温度以下となる出力電流の周波数依存性の現行製品比較。損失特性は標準値を使用。それぞれ示す。現行製品に比べ、すべての搬送波周波数領域で25%以上の出力電流のアップが可能となる。

型式名	$V_{ce}$	$I_c$	モジュールサイズ (mm)	回路	写真
MBN1500E33E2	3.3 kV	1,500 A	$140 \times 190 \times 38$	シングル	(a)
MBN1000E33E2	3.3 kV	1,000 A	$140 \times 130 \times 38$	シングル	(b)
MBM500E33E2	3.3 kV	500 A	$140 \times 130 \times 38$	デュアル	(c)

図11 3.3 kV E2版モジュールの製品ラインアップ計画  
3.3 kV E2版では3種のパッケージをラインアップする。

#### 執筆者紹介



**齊藤 克明**  
1989年日立製作所入社、電力グループ 電機システム事業部 パワーデバイス本部 開発部 IGBT開発グループ 所属  
現在、IGBTの開発に従事



**小池 義彦**  
1982年日立製作所入社、電力グループ 電機システム事業部 パワーデバイス本部 開発部 IGBT開発グループ 所属  
現在、大容量IGBTの開発に従事



**佐伯 貴広**  
1995年日立製作所入社、電力グループ 電機システム事業部 パワーデバイス本部 開発部 IGBT開発グループ 所属  
現在、大容量IGBTの開発に従事