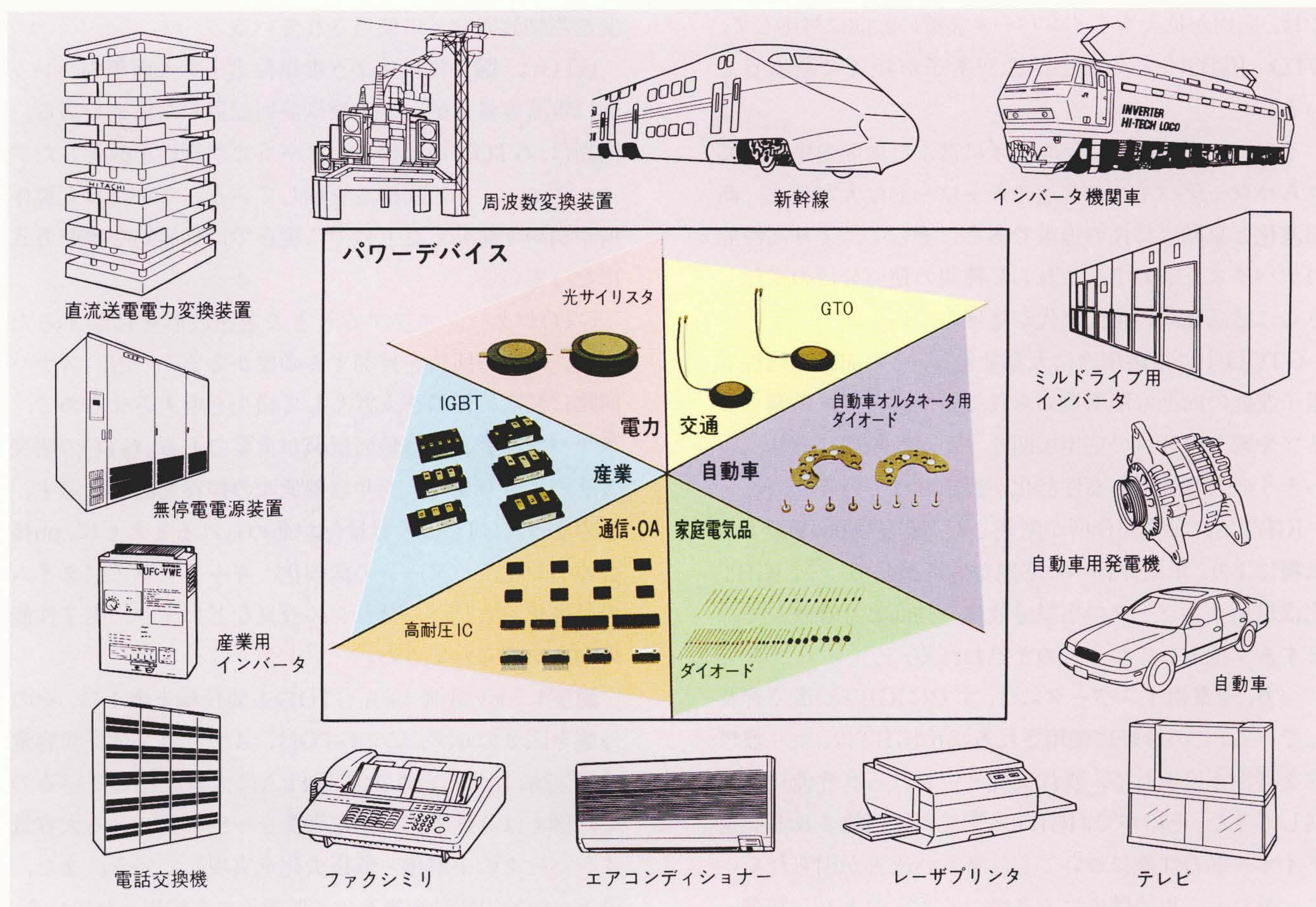


大容量化, 高速化, 低損失化を目指すパワーデバイス技術

Recent Technologies of Power Devices

須田 晃一* Kouichi Suda 高 槌 重 靖*** Shigeyasu Kôzuchi
森 睦 宏** Mutsuhiro Mori 渡嘉敷睦男**** Mutsuo Togashiki



パワーデバイスとパワーエレクトロニクス応用装置

パワーデバイスは、電力用途から家庭電気品まで、パワーエレクトロニクスのキーコンポーネントとして使用されている。

電力、鉄鋼、交通、産業、通信や家庭電気品など幅広い分野にサイリスタ、ダイオードなどを基盤とするパワーデバイスが必要とされている。今日のパワーエレクトロニクス、特に最近のインバータ装置の普及には、これに使用されているGTO (Gate Turn-off Thyristor), IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) などの自己消弧型素子をはじめとするパワーデバイスとその利用技術の進歩に負うことが大きい。

日立製作所のパワーデバイスは、パワーエレクトロニクス応用装置からの要求を実現するため、最先端の設計・製造技術を駆使して、素子の大容量化と高性能化を図っている。特にインバータ用パワーデバイスの開発は、装置の展開と相互に対応した取り組みで推進している。この成果は、例えば大容量GTO、車両用高耐圧IGBT、低損失IGBTシリーズ、およびIGBT駆動用ICなどであり、いずれもそれぞれの分野でのキーコンポーネントになっている。

* 日立製作所 日立工場 ** 日立製作所 日立研究所 *** 日立原町電子工業株式会社 **** 日立製作所 産業機器事業部

1 はじめに

パワーデバイスとは、電源や電力変換装置に使用されるキーコンポーネントとして、その種類の多様化、高耐圧・大電流化と高性能・高機能化が図られてきた。特に最近では、応用が拡大するインバータ装置の動向に対応して、GTO、IGBTなどの自己消弧型素子が顕著に進歩している。

インバータ装置のバラエティに富んだ展開の中で、これらパワーデバイスに共通のキーワードは大容量化、高周波化と駆動容易性の追求である。そして、より高性能のデバイスを求めて、これら品種間の使い分けの変化、さらには品種内の世代交代が進展している。

GTOは主に車両用途に大容量化し、その開発の過程で素子性能の向上も順次進められてきた。今後、鉄鋼ドライブや電力分野への応用展開をうかがう転機にあり、いっそうの大容量化と高性能化が要求されている。

IGBTは、日立製作所が開発した高耐圧2,000V素子の出現により、車両分野への応用が急進展している。IGBT化は車両インバータの小型分散化の動向とも合致して、ますます拡大してゆくものと思われる。

一方、産業用インバータには、すでにIGBTが広く普及している。この分野に使用される汎用IGBTは、より理想的な特性を追求して、世代交代といわれる高性能化が進展してきた。その中で、IGBTと逆並列に接続される高速ダイオードの性能についても、著しい改善が図られている。モジュールの構成にも各種のくふうがあり、制御・保護機能を取り込んだ、IGBT駆動用ドライバICの開発も活発に進められている。

ここでは、これらインバータ用のパワーデバイスの動向について、具体的な製品例をあげて述べる。

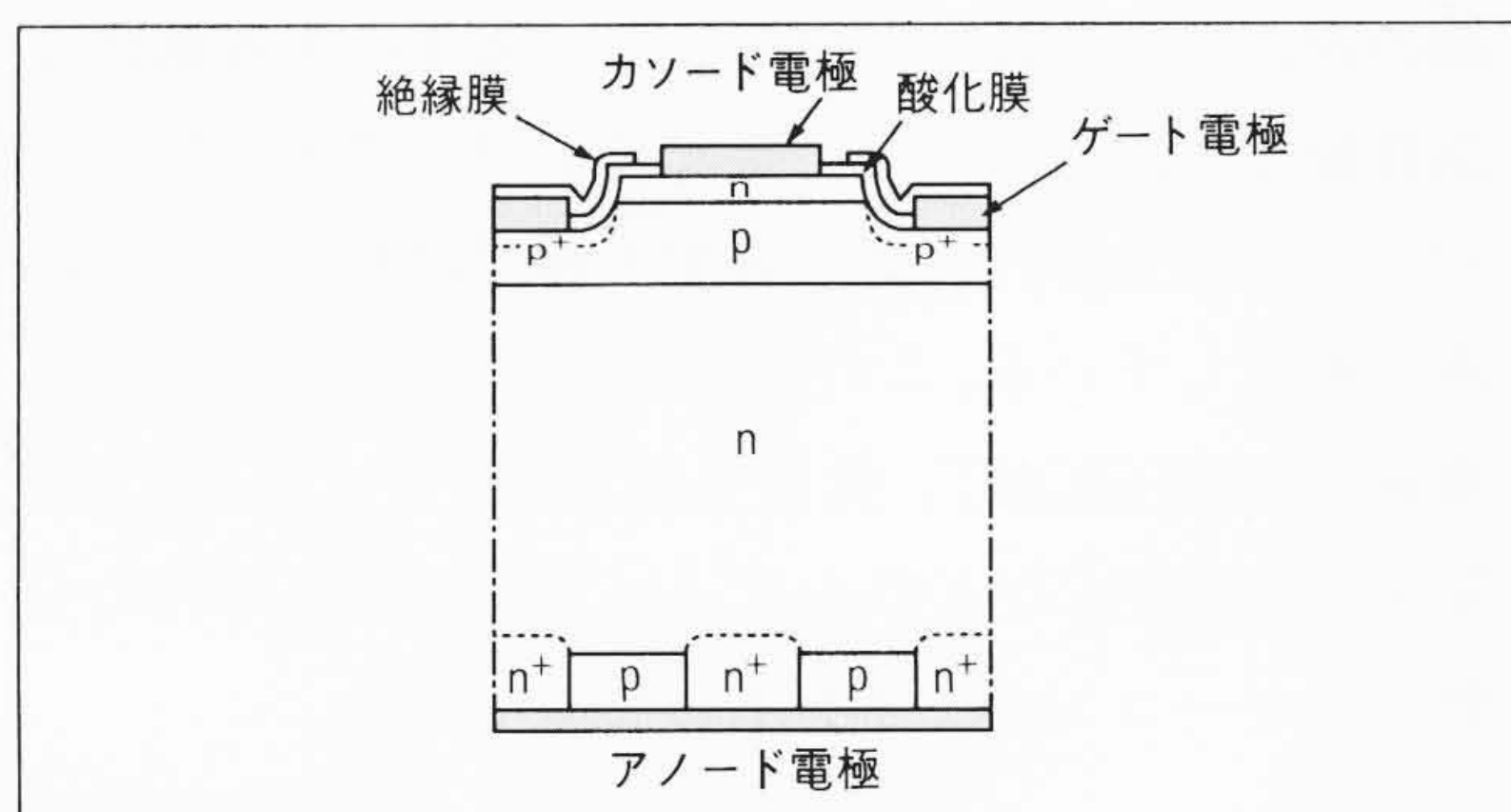


図1 GTO単位素子構造

GTOは、単位素子がペレットに多数個並列配置されている。この図はアノードエミッタ短絡構造を示している。

2 大容量GTO

GTOは、ゲートの電流方向の正・負の切換によってオン・オフ制御できるサイリスタであり、高耐圧・大電流化が比較的容易なことから、車両用、産業用の大容量可変速駆動装置などに使用されている。

GTOは、図1に示すような単位素子を大面積のペレットに電流容量に応じて多数個並列配置した構造である。同図は、GTOの導通特性とターンオフ特性を改善したアノードエミッタ短絡構造を示している。これは日立製作所が初めて開発したもので、現在では世界的な標準方式になっている。

GTOがターンオフするときの電圧波形を抑制するために、スナバ回路を付加する必要がある。一方、スナバ回路は装置の体積を大きくして損失を増大させるので、スナバコンデンサ容量の低減が重要である。GTOの開発とそのスナバコンデンサ容量低減の推移を図2に示す。このようにGTOは大容量化が進められるとともに、pn接合の均一化、パターンの微細化、キャリアライフタイムの最適化およびパッケージの改良などにより、素子性能の向上が図られてきた。

耐圧4.5 kV電流4 kA GTOの主要仕様を表1に、その外観を図3に示す。このGTOは、スナバコンデンサ容量6 μ Fで最大ターンオフ電流4 kAに大電流化しているので、例えば8個の車両用電動機を一括駆動できる大容量インバータの小型化・低損失化を実現している。また、最近の新幹線駆動変換器の主要素子にも採用されている。

今後、GTOのいっそうの大容量化を図る予定であり、車両用途の他に鉄鋼ドライブ、電力分野への応用の活発化が期待できる。

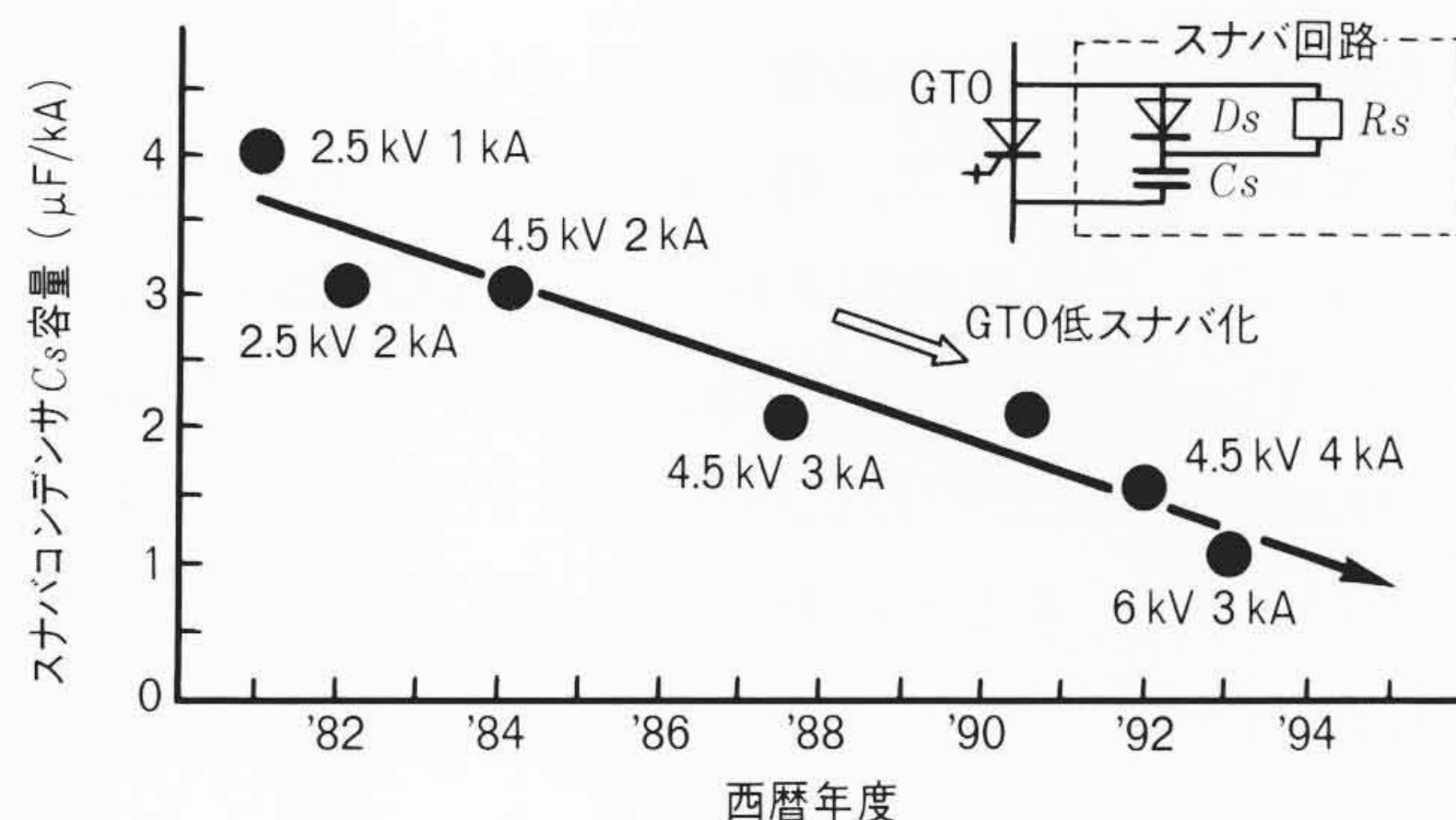


図2 GTO開発とスナバコンデンサCs容量比の推移

GTOは高耐圧・大電流化が進められるとともに、可制御電流当たりスナバコンデンサCs容量比も低減されている。

表1 4.5 kV 4 kA GTO GFP4000G45の主要仕様

耐電圧は4,500 Vで、可制御電流はスナバコンデンサ容量 $C_s = 6 \mu\text{F}$ で4,000 Aの大電流化を実現している。

項 目	記 号	仕 様	条 件
オ フ 電 圧	V_{DRM}	4,500 V	$V_{GR} = 5 \text{ V}$
可 制 御 電 流	I_{TQRM}	4,000 A	$C_s = 6 \mu\text{F}$, $L_s = 2.0 \mu\text{H}$
オ ン 電 圧	V_{TM}	4.0 V	$T_j = 125^\circ\text{C}$, $I_{TM} = 4,000 \text{ A}$
ゲートトリガ電流	I_{GT}	4.0 A	$V_D = 75 \text{ V}$, $R_L = 0.5 \Omega$
ターンオン時間	t_{gt}	10 μs	$T_j = 125^\circ\text{C}$, $V_D = 2,250 \text{ V}$, $di_g/dt = 30 \text{ A}/\mu\text{s}$, $C_s = 6 \mu\text{F}$
ターンオフ時間	t_{gq}	40 μs	$T_j = 125^\circ\text{C}$, $I_{TM} = 4,000 \text{ A}$, $C_s = 6 \mu\text{F}$, $V_D = 2,250 \text{ V}$, $dig/dt = 40 \text{ A}/\mu\text{s}$
熱 抵 抗	$R_{th(j-f)}$	0.011 $^\circ\text{C}/\text{W}$	ジャンクションーフィン間 両面冷却

3 車両用IGBTモジュール

新しい電車駆動用インバータ装置に使う世界最大級の耐圧2,000 VのIGBTについて述べる。開発した2,000 V 300 A IGBTモジュールの外観を図4に示す。

従来、車両用パワーデバイスとしてはGTOが使われてきたが、装置のいっそうの小型化、高周波化には限界があった。一方、IGBTは制御電力が小さく、制御の容易さや高速のスイッチング特性は優れているが、耐圧が最大1,400 Vにとどまっていた。そこで、IGBTのシリコンチップを外部電界の影響を受けにくい接合構造とすることにより、耐圧2,000 Vを実現し、車両用3レベルインバータへの適用を可能とした。GTOとIGBTのターンオフ波形を図5に示す。IGBTのスイッチング時間はGTOの $\frac{1}{6}$ と高速であるため、スイッチング周波数を従来の約3倍の1,500 Hz以上にでき、3レベル化によってインバータ

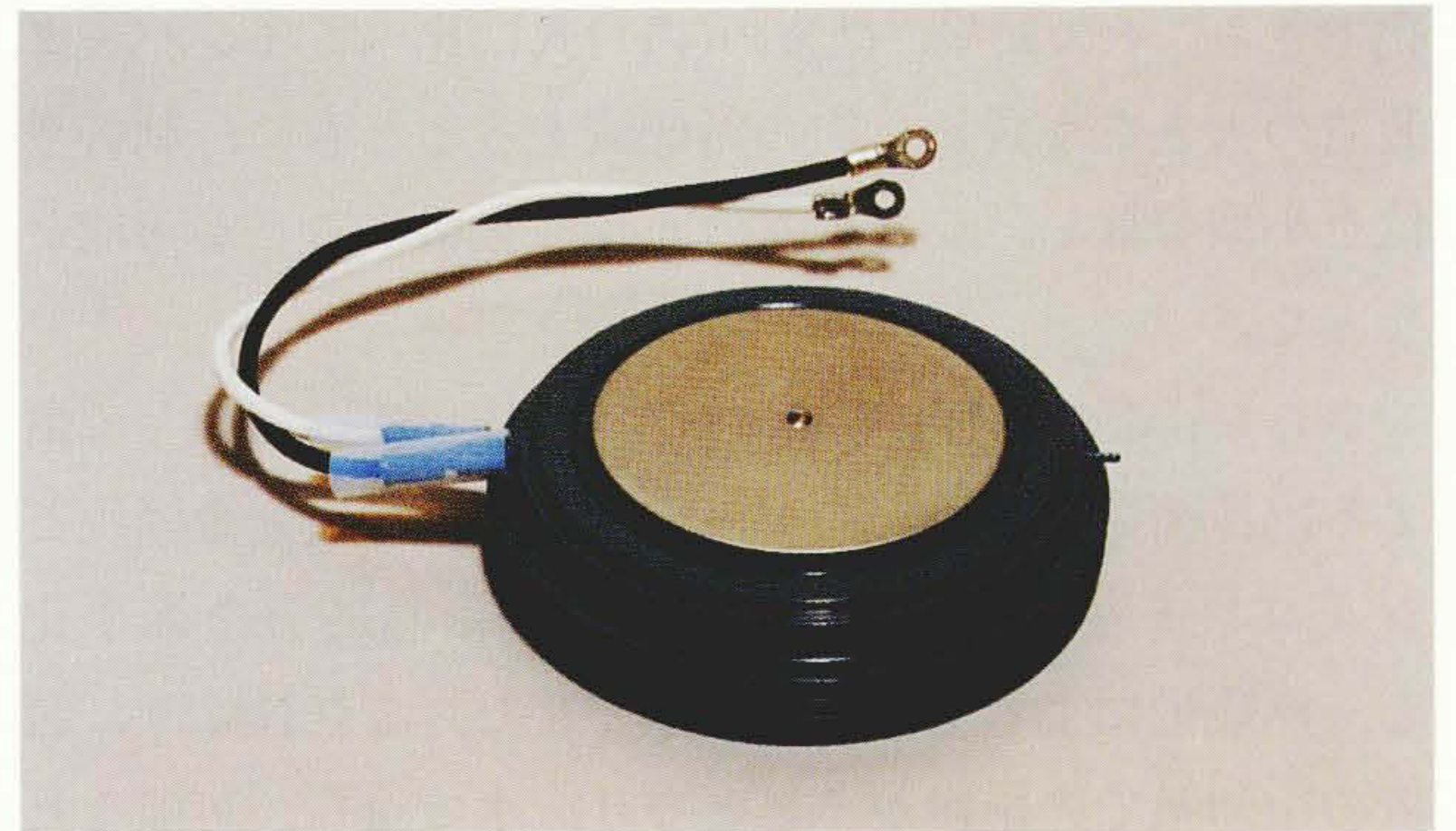


図3 GFP4000G45の外観

外部圧接面電極直径が78 mm、厚さ26 mmの平型圧接パッケージである。

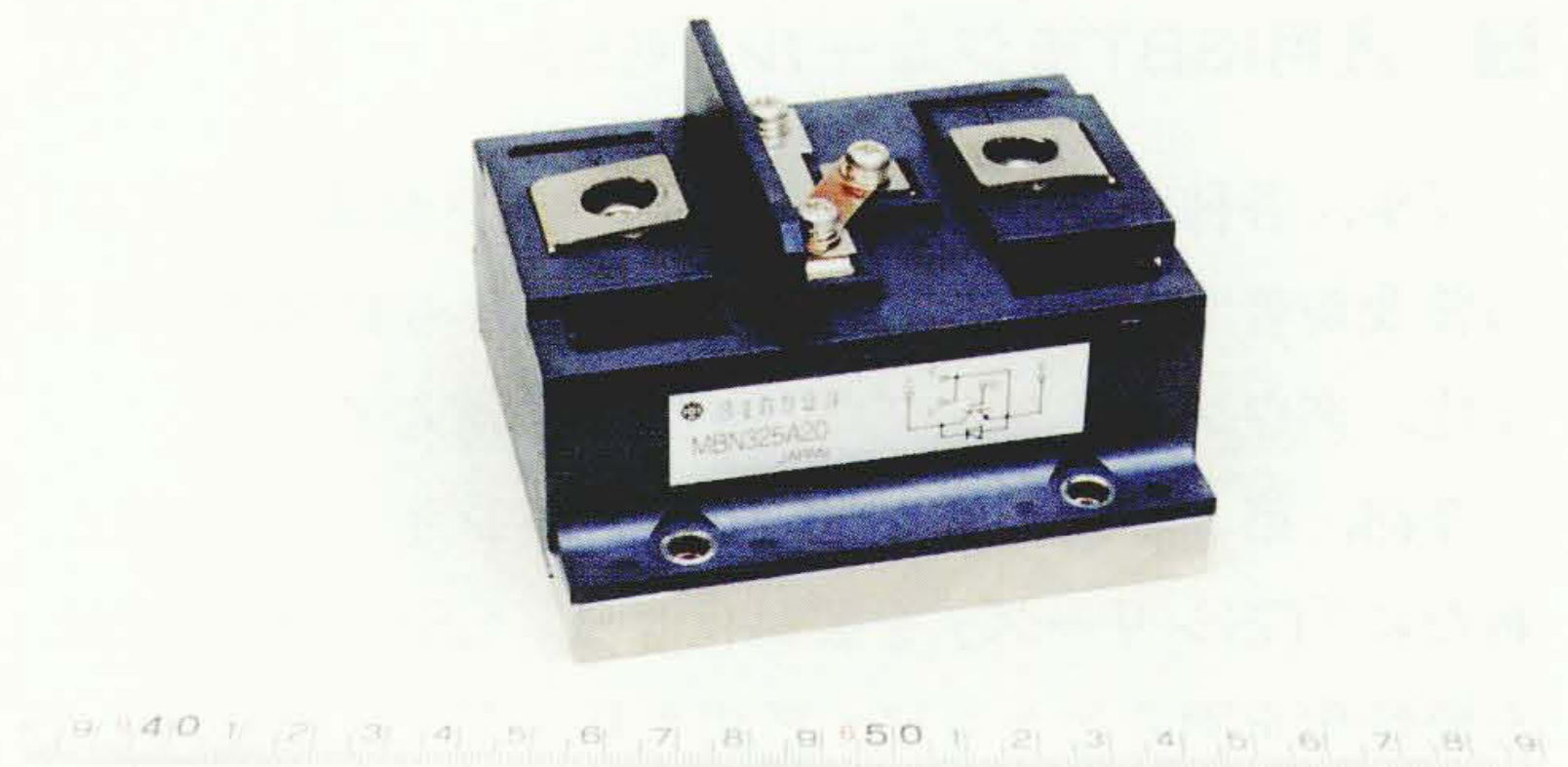


図4 車両用2,000 V 300 A IGBTモジュールの外観

新しい電車駆動用インバータ装置に使う世界最大級の耐圧2,000 VのIGBTで、架線電圧1,500 Vに耐える絶縁特性を持つ。

装置の騒音を15 dB低減できた。

またIGBTはゲートの制御電力もGTOに比べて $\frac{1}{1,000}$ 以下と小さく、電流・電圧の安全動作領域も広いことから、ゲート回路を小さくでき、スナバ用コンデンサも小容量

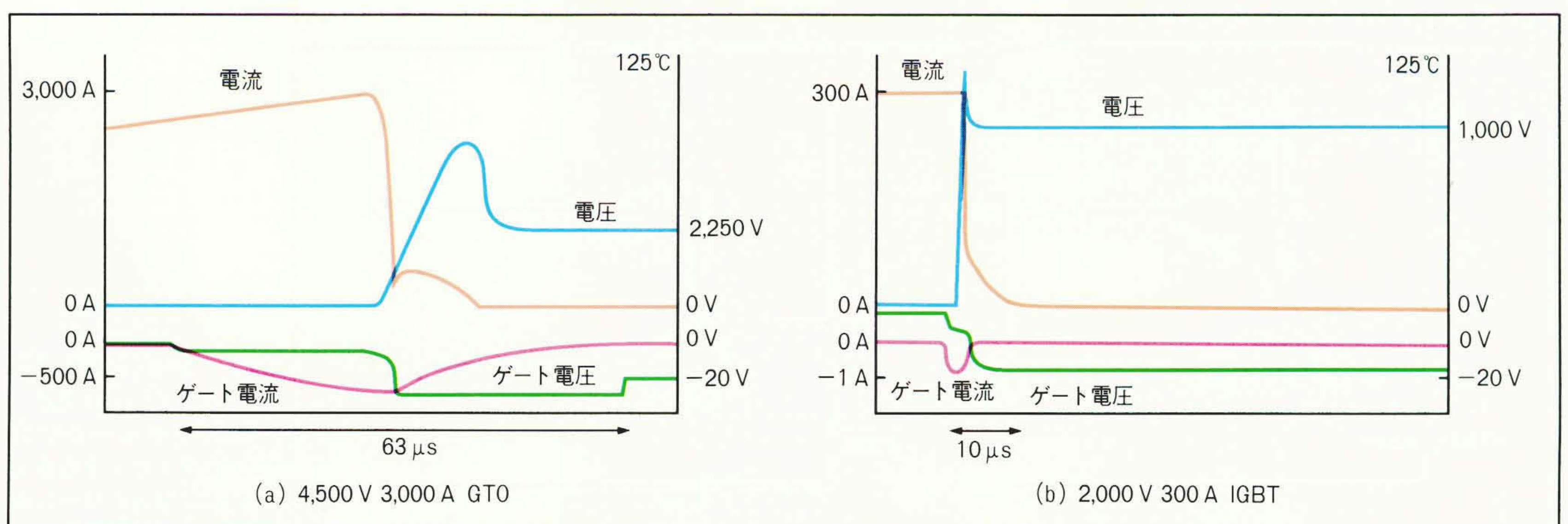


図5 GTOとIGBTのターンオフ波形の比較

IGBTのスイッチング時間は、GTOの約 $\frac{1}{6}$ と短く、ゲート電流も約 $\frac{1}{500}$ と小さい。IGBTが、高速で制御電力が少ないことがわかる。

化できる。その結果、従来のGTO式に比べてインバータ装置の大きさや質量を約40%低減するとともに、制御単位を小型分散し、システムの冗長性を増すことが可能となった。

さらに、このIGBTモジュールは架線電圧1,500 Vに耐える絶縁構造を持つ。モジュール内の絶縁板と金属板とシリコンチップのはんだ接合に加わる熱応力を極小化し、熱疲労による信頼性を向上させた。これにより、装置の冷却系での絶縁が不要となり、水で冷却が可能なヒートパイプを使うことができ、ノンフロン化を実現できた。

今後、2,000 V500 A IGBTモジュールを開発し、車両用インバータ装置への適用を拡大していく予定である。

4 汎用IGBTモジュール「GSシリーズ」

近年、各種電源や電動機のインバータ装置へのIGBTの普及が著しく、IGBTの高信頼化とともに装置の高効率化、ダウンサイジングなどが急速に進んでいる。

今回、第3世代IGBTモジュール「Sシリーズ」に加え、新たに「GSシリーズ」を製品化した。GSシリーズでは、大容量化を図るとともに、低損失化・低ノイズ化・小型化を実現した。

IGBTのオン電圧とターンオフ下降時間の関係を図6に示す。GSシリーズでは、オン電圧をSシリーズに比べて約20%低減している。またGSシリーズでは、LSIの微細化で使われているスケーリング則を初めてパワーデバイスに展開して、素子構造を最適化することにより、オン電圧の低減と相反する負荷短絡耐量の確保を両立させている。同図に示すようにオン電圧とターンオフ特性のトレードオフを改善することにより、スイッチング損失

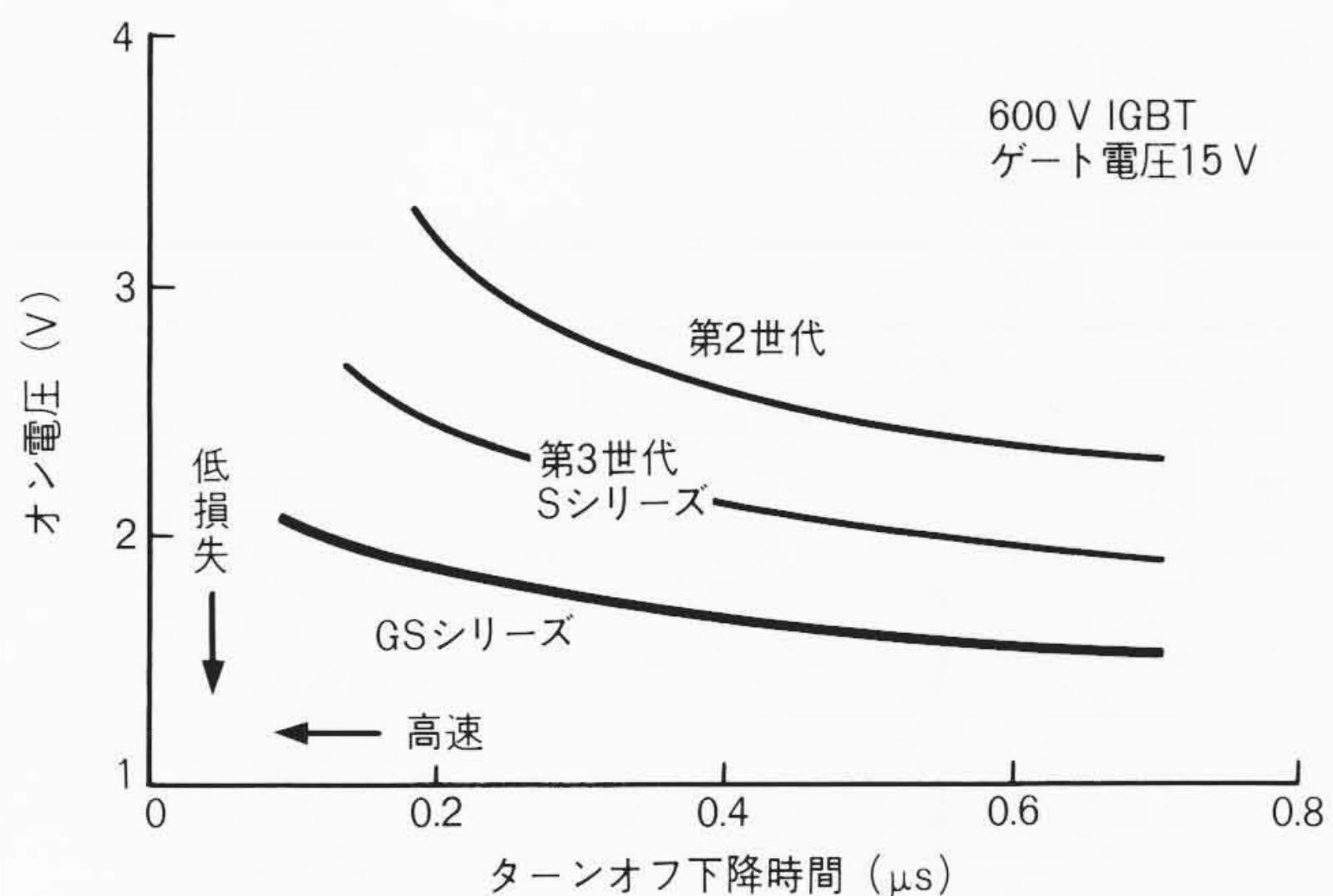


図6 オン電圧とターンオフ下降時間のトレードオフ関係
GSシリーズでは、ターンオフ時間とオン電圧のトレードオフ関係を改善し、総合損失を25%低減している。

を加えたGSシリーズの総合損失は、Sシリーズに比べて25%低減した。

一方、IGBTの低オン電圧化のために高出力化すると、伝達コンダクタンスが増え、ターンオンが速くなり、電流変化率 $\frac{di}{dt}$ が大きくなる。このため、モジュール内でIGBTと逆並列に接続されたフリーホイールダイオードのソフトリカバリー化が低ノイズのためにきわめて重要となる。GSシリーズでは、IGBTの高出力化に対応した新しいダイオードU-SFD(Ultra-Soft and Fast-Recovery Diode)を開発した。IGBTターンオン時での従来型ダイオードとU-SFDのリカバリー波形を図7に示す。従来型ダイオードでは素子耐圧の600 V近くまで電圧が跳ね上がっているのに対し、U-SFDでは、400 V以下であり、電圧の高周波ノイズもない。

また、GSシリーズではモジュールの小型化を図った。

図8に示す1,200 V150 A 1相モジュールのように取付

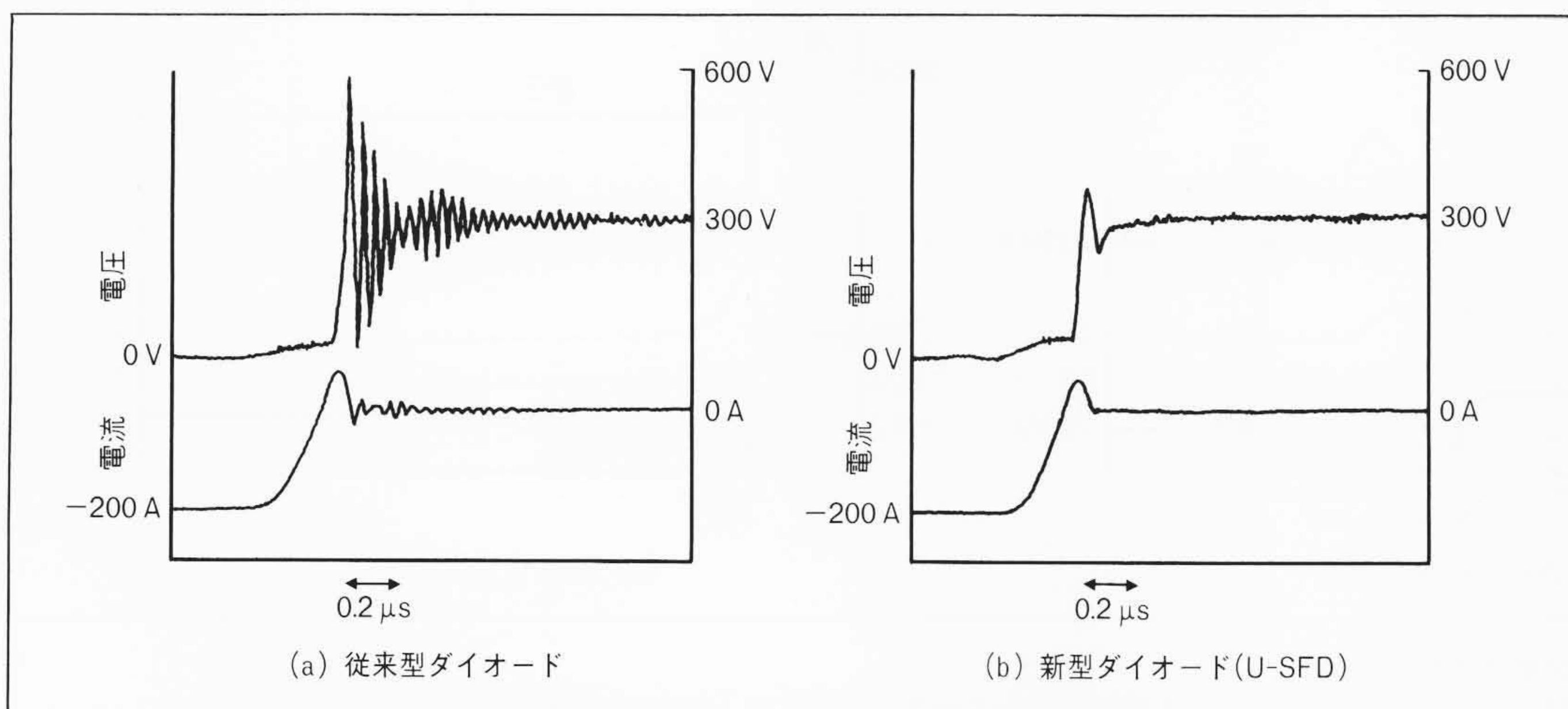


図7 ダイオードのリカバリー波形の比較
IGBTモジュールに内蔵するダイオードをさらにソフトリカバリーしたU-SFDを新たに開発し、大幅な跳ね上がり電圧と電圧振動を抑制した。

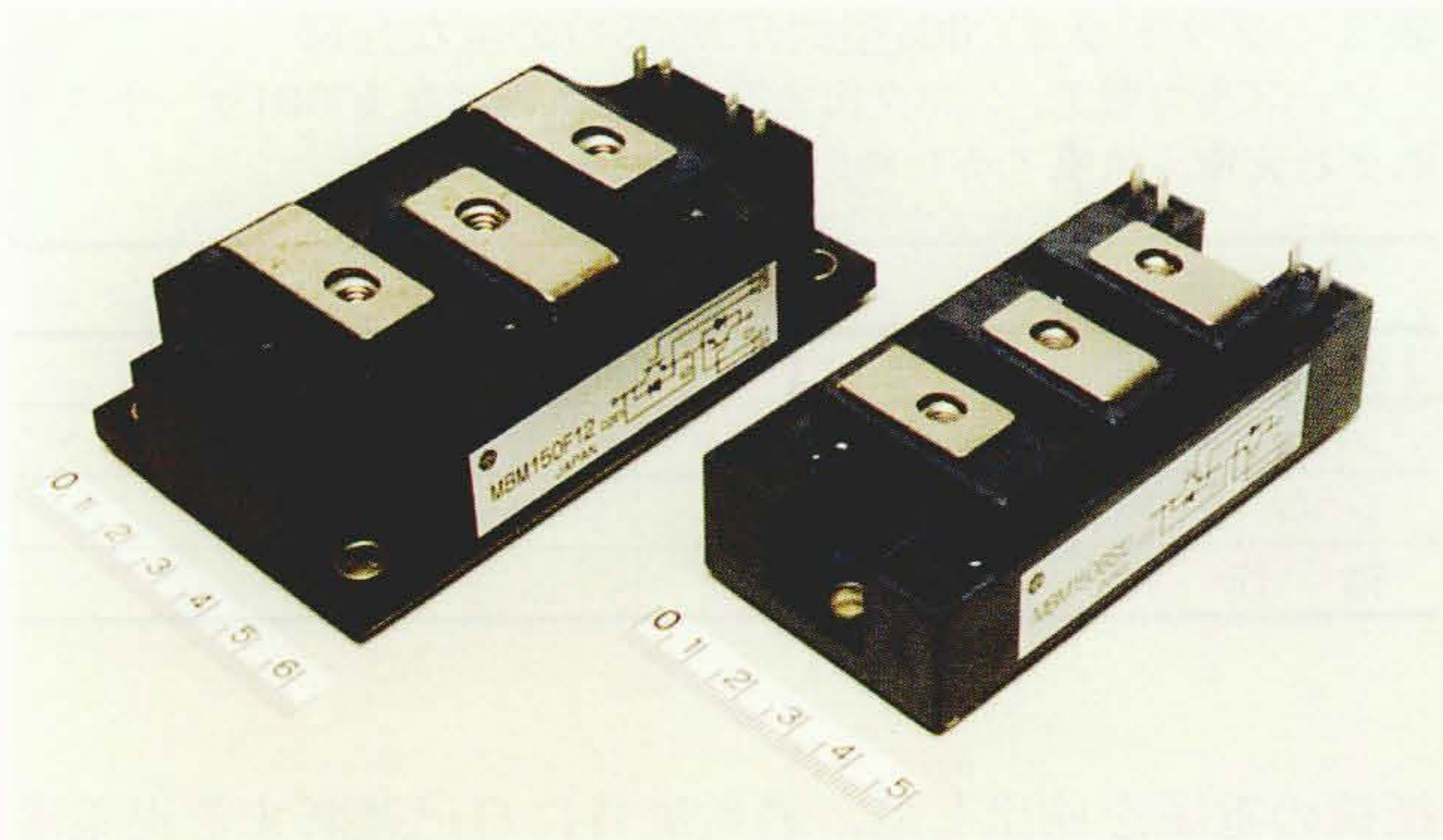


図8 1,200 V 150 A IGBTモジュール〔第2世代(左)とGSシリーズ(右)〕の外観比較
GSシリーズではモジュールの小型化を図り，応用装置のダウンサイジングに対応できるようにしている。

面積を65%に低減するとともに，取付穴を四つから二つへと低減し，応用装置のダウンサイジングと組立簡略化に対応できるようにした。

IGBTモジュールのラインアップを表2に示す。GSシリーズにより，さらに大容量化を図った。

5 IGBT駆動用高耐压IC

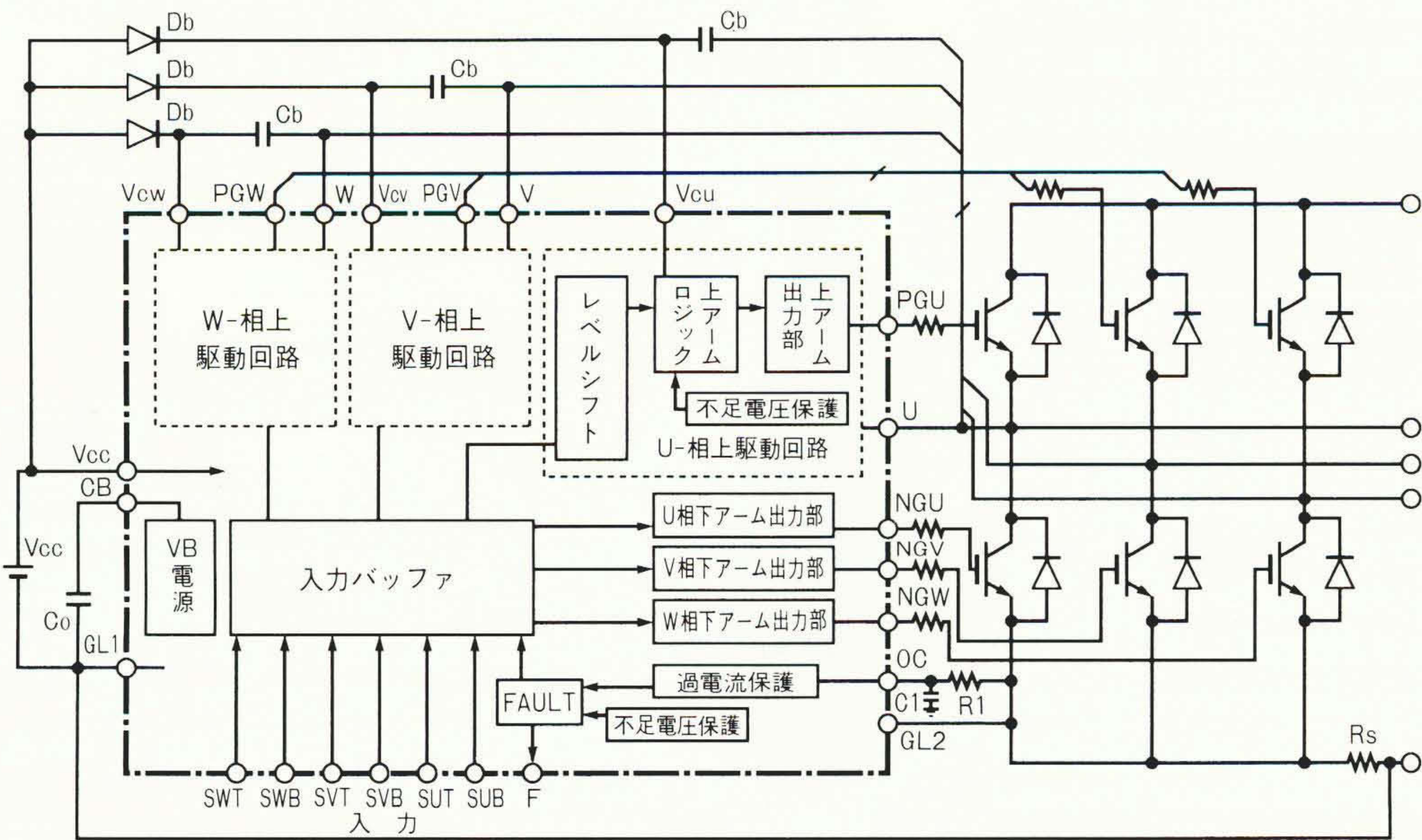
インバータ用途のIGBTゲート駆動用ICとして，現在開発中のプリドライバIC(型式ECN3051)について述べる。

AC100 V電源を受電・整流したDC電源を直接使用する，高圧DCブラシレスモータ駆動に適したワンチップインバータIC(型式ECN3013)を量産中である。これは，電

表2 IGBTモジュールのラインアップ
GSシリーズによってさらに大容量化を図り，大容量装置への適用を拡大した。

モジュール	電 圧	シリーズ	50 A	75 A	100 A	150 A	200 A	300 A	400 A
1 アーム	600 V	第2世代	—	—	—	—	—	—	□
		第3世代	—	—	—	—	—	—	○
	1,200 V	第2世代	—	—	—	—	□	□	—
		GSシリーズ	—	—	—	—	—	◎	◎
1 相	600 V	第2世代	□	□	□	□	□	—	—
		第3世代	○	○	○	○	○	○	—
	1,200 V	GSシリーズ	—	—	—	◎	◎	◎	◎
		第2世代	□	□	□	□	—	—	—
3 相	600 V	第2世代	□	□	□	—	—	—	—
		第3世代	○	○	○	—	—	—	—
	1,200 V	GSシリーズ	—	◎	◎	◎	◎	◎	◎
		第2世代	□	—	—	—	—	—	—

注：□(第2世代)，○(第3世代Sシリーズ)，◎(GSシリーズ)，*は開発中を示す。



注：略語説明
Db(ブートストラップ用外付けダイオード)
Cb(ブートストラップ用外付けコンデンサ)

図9 プリドライバIC(型式ECN3051)ブロック図
上アーム駆動回路の電源は，外付けダイオードとコンデンサを用いたブートストラップ方式を用いている。

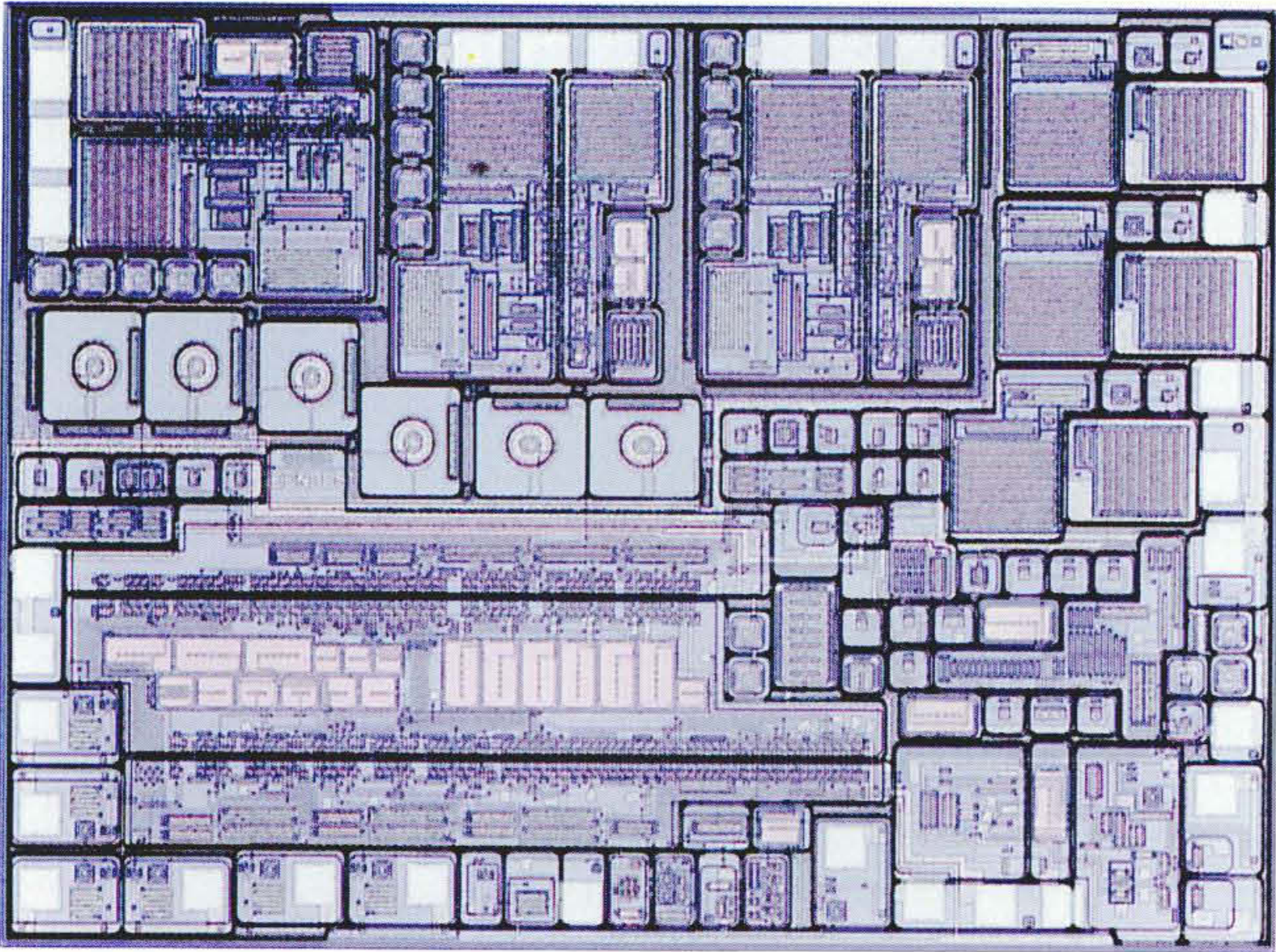


図10 ECN3051チップ外観
誘電体分離基板を用い、3相分のゲート駆動回路、制御保護回路をワンチップで構成している。

流1 A級耐圧220 VのIGBT素子6個と制御回路を内蔵したものである。

ECN3051は、電圧をAC200 V対応、電流を30 A級IGBT素子として拡大展開を図るために、出力のIGBTを別チップとし、ゲート駆動回路制御・保護回路をワンチップで構成したものである。

このICのブロック図を図9に示す。ゲートを駆動する出力部は、シンク、ソーススイッチ各6個で構成され、30 A級のIGBT6個のドライブが可能である。マイコン(マイクロコンピュータ)からのPWM(Pulse Width Modulation)信号を6入力で受け、上下アームに伝える。6入力構成は、DCブラシレスモータだけでなく3相誘導電動機へも適用を可能とした。上アームへはレベルシフト回路を通して信号を伝える。AC200 V対応とするため、耐圧620 V級の高耐圧N-chMOSをこの回路に使用している。また、上下の制御電圧不足保護回路、外付けセンス

表3 プリドライバIC(型式ECN3051)の主な仕様
ソース出力電流、シンク出力電流は、負荷となるIGBTゲートをそれぞれ充電、放電するための電流能力を示す。

項目	単位	定 格
高 耐 圧 素 子 耐 圧	V	620
ソ ー ス 出 力 電 流	A	0.25
シ ン ク 出 力 電 流	A	0.50
動 作 周 波 数	kHz	20

抵抗の電圧を検出して、過電流時に自己遮断する過電流保護回路を内蔵している。さらに、異常時に、マイコン側にアラーム出力するためのフォールト出力回路も備えている。

チップの外観を図10に示す。誘電体分離基板を用い、独自の微細加工技術によって低圧制御CMOS回路と高耐圧素子の両立を図っている。主な仕様を表3に示す。パッケージは面付けタイプのPLCC44ピンを用いている。

6 おわりに

ここでは、各種のインバータ装置に使用されているGTO、IGBTおよびIGBT駆動用ICに関する製品、および最近のパワーデバイス技術の動向について述べた。

パワーデバイスは、これらの応用装置に使用されて初めてその性能と機能の真価を発揮する。したがって、デバイスの進歩はデバイスの利用技術と切り離して考えることができない。

現在、パワーデバイスには、いっそうの高耐圧・大電流化と高性能・高機能化への要求がある。日立製作所は、これらインバータ装置をはじめとするパワーエレクトロニクスからの要求にこたえて、今後ともデバイス性能の進歩と開発に積極的に取り組んでいく考えである。

参考文献

1) 八尾, 外: パワー半導体デバイスの進展, 電気学会論文誌D, 112-1, 6~11(平4-1)

2) 菅原: パワーデバイス・パワーIC開発の現状と動向, 電気学会論文誌C, 5~13(平5-1)

3) 八尾, 外: アノードエミッタ短絡形ゲートターンオフサイリスタの電気特性, 電気学会論文誌D, 108-3(昭63-3)

4) T. Yatsuo et al.: Design Consideration for Large Current GTO, PESC 1988 RECORD, 895~900(1988-4)

5) M. Mori et al.: An Insulated Gate Bipolar Transistor with a Self-aligned DMOS Structure, IEDM 813~816, (1988)

6) M. Mori et al.: A Novel Soft and Fast Recovery Diode(SFD) with Thin P-layer Formed by Al-Si Electrode, ISPSD 113~117, (1991)

7) M. Mori et al.: A High Power IGBT Module for Traction Motor Drive, ISPSD 287~291, (1993)

8) 菅原, 外: 誘電体分離形パワーICの技術動向, 日立評論, 72, 12, 1305~1312(平2-12)