昭和40年6月3日　第三種郵便物認可　平成10年2月10日発行（毎月1回10日発行）富士時報　第71巻　第2号（通巻第755号）　ISSN 0367-3332

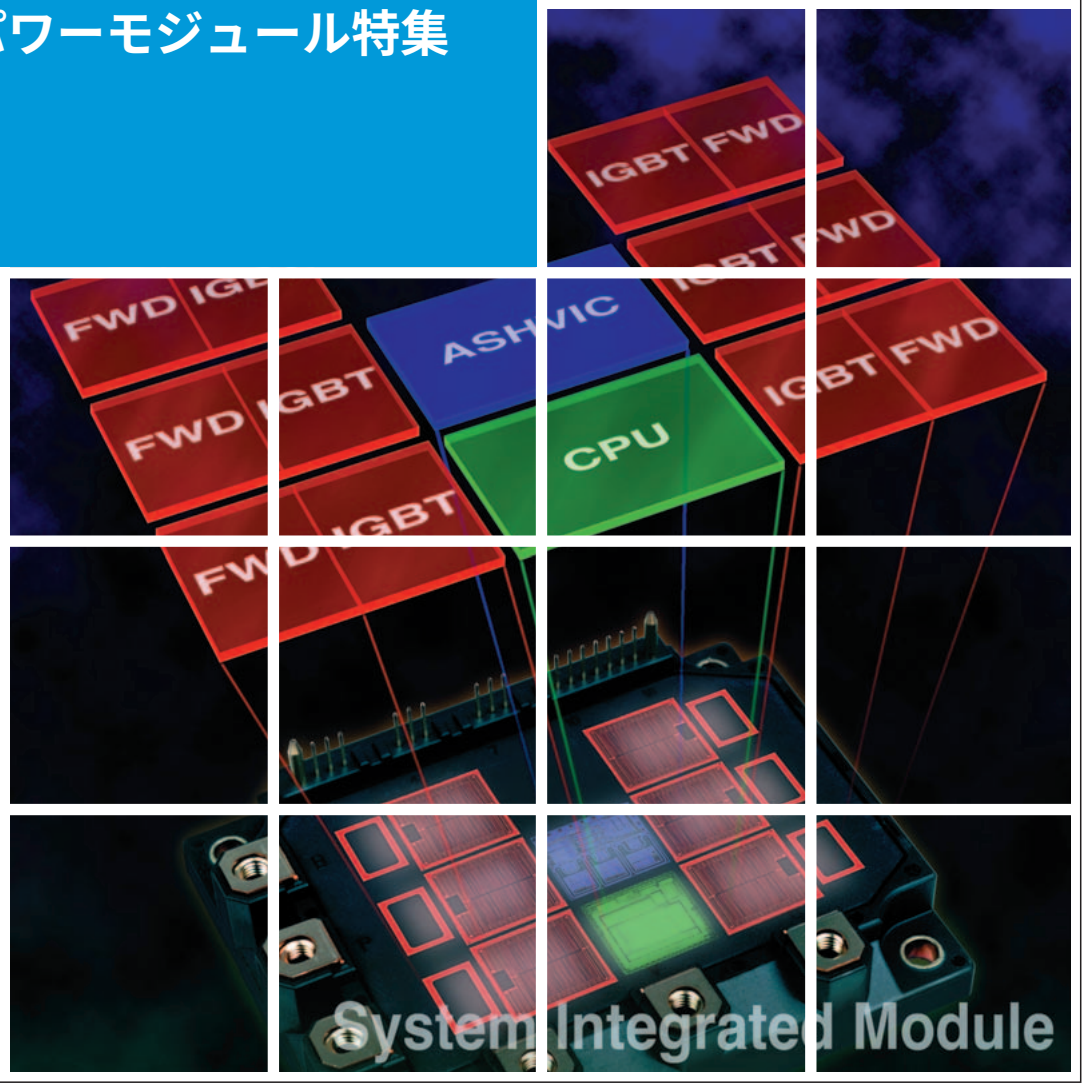
富士時報

FUJI ELECTRIC JOURNAL

2

1998 VOL. 71

パワーモジュール特集



FUJI ELECTRIC

聞こえてきますか、技術の鼓動。── 富士電機

スムーズな回転制御を実現する技術力

オールシリコンチップで高信頼性IPMを実現

滑らかな回転速度の変更を実現するインバータの性能に決定的な役割を果たすのがIGBTです。
富士電機は省エネルギー，環境保全の社会的要求を満たすシステム化されたパワー半導体デバイスとしてIGBT-IPM Rシリーズを開発し，コスト性能比が高く破壊しにくいIPMを実現しました。

インテリジェントパワーデバイス
IGBT-IPM Rシリーズ

パワーエレクトロニクス技術の富士電機

お問合せ先：電子事業本部 パワー半導体事業部　電話(03)5388-7651

富士時報
FUJI ELECTRIC JOURNAL

2
1998 VOL. 71

パワーモジュール特集

目　次

次世代パワーエレクトロニクスへの期待 96（2）
中岡　睦雄

パワーモジュールの現状と展望 97（3）
桜井　建弥

中・大容量 R シリーズ IGBT-IPM 101（7）
山口　厚司　・　市川　裕章　・　征矢野　伸

小容量民生用 IGBT-IPM 106（12）
梶原　玉男　・　岩井田　武　・　小谷部和徳

小・中容量産業用 NPT-IGBT モジュール 112（18）
中島　　修　・　宮下　秀仁　・　岩井田　武

大容量産業用・車両用 NPT-IGBT モジュール 117（23）
田久保　拡　・　石井　憲一　・　沖田　宗一

大容量車両用・産業用平形 IGBT 123（29）
一條　正美　・　関　　康 和　・　西村　孝司

パワーモジュール用チップ技術 128（34）
百田　聖自　・　大西　泰彦　・　熊谷　直樹

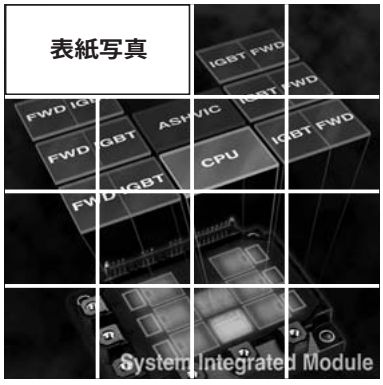
パワーモジュールパッケージ技術 135（41）
両 角　　朗　・　丸山　力宏　・　山田　克己

パワー半導体シミュレーション技術 141（47）
武 井　　学　・　大月　正人

最近登録になった富士出願 111（17）

技術論文社外公表一覧 116（22），122（28），127（33），140（46）

表紙写真



パワー半導体製品の技術動向はシステム化，小形化そして低損失化である。その例として SIM（システムインテグレーテッドモジュール）そして SOC（システムオンチップ）を挙げることができる。

パワー半導体のさらなる高性能化，高機能化，小形化そして低コスト化を実現するために，パワー回路部のすべてがシリコンベース上にシステム化される時代が到来すると考えられる。富士電機は高度な半導体技術とシステム化技術を駆使して，この実現に注力していく所存である。

表紙写真は，パワー半導体の今後の技術方向を表現するため，将来実現するであろう SIM をイメージ的に表現したものである。

［CPU チップ写真提供：富士通(株)］

次世代パワーエレクトロニクスへの期待

中岡　睦雄（なかおか　むつお）
山口大学工学部教授 工学博士

最近のパワーエレクトロニクス（PE）は半導体電力変換装置の高周波スイッチング化技術の導入に伴い，基幹産業から電力系統・新エネルギー，電鉄，通信・情報，家電民生まで広汎な分野で目覚ましい発展を遂げている。これは電力制御用半導体スイッチングデバイス（パワーデバイス）技術を筆頭に，マイクロエレクトロニクス制御回路技術，新素材・新構造電力回路部品技術，計算機シミュレーション解析技術の進歩によるところ大である。なかでも高速スイッチング化・低損失化・大容量化・高機能集積化等の諸点で性能改善が進んでいる最先端 MOS ゲートパワーデバイス（パワー MOSFET/IGBT）技術が電力変換装置に与えたインパクトは大きい。しかしながら，高速パワーデバイス適用時でも，ハードスイッチングをベースとした高周波スイッチング PWM 電力変換装置技術では，スイッチング周波数又は出力周波数が上昇するにつれてスイッチング損失の増大，スナバエネルギー処理，冷却系の大型化，電磁ノイズの増加など解決すべき点が多い。電力変換装置のスイッチング周波数又は出力周波数の高周波化には限界が見え始めており，高効率化・高性能化・小型軽量化に対して今以上の最適なトレードオフ条件を見いだすのが難しい。

近年，これらの問題を効果的にかつ同時に極小化するために電力変換装置にアクティブ補助部分共振スナバ回路又はパッシブ無損失スナバ回路を設け，パワーデバイスをゼロ電圧又はゼロ電流条件下でスイッチングさせるソフトスイッチング（S-SW）PWM 電力変換装置の研究開発が脚光を浴びている。特に次世代 PE 技術として注目されている S-SW 電力変換方式としては，アクティブ補助部分共振スナバ回路と電力変換装置の接続形式から，共振 DC リンク方式，共振 AC リンク方式，補助共振転流回路アーム方式，ロスレススナバエネルギー回生方式などが検討されている。アクティブ補助部分共振スナバ回路を用いた S-SW 電力変換回路は，高周波スイッチング動作時においてもスイッチング損失の増加が抑制され，高性能化・小型軽量化・低騒音化によるメリットが期待できる上，パワーデバイスの最大定格特性限界耐量をフルに活用できる。さらに EMI/RFI ノイズの低減やノイズフィルタの小型化ができるといった実用上優れた特徴もある。高速 MOS ゲートパワーデバイスは，使いやすさ，信頼性を追求した特定用途対応のパワーモジュールを柱に技術開発が進む一方，小容量ではパワー IC 化，中・大容量では IPS 化・ IPM 化の動きがますます活発になっている。S-SW 電力変換回路トポロジーは補助回路部品点数が多くなる上に，電圧・電流センサを含む複雑なロジック制御系とならざるを得ないこともあって，この実用化にあたっては低インダクタンスパワーモジュール化・ IPS 化・パワー IC 化・ IPM 化導入のメリットは極めて大きい。しかしながら S-SW 電力変換装置又はシステムの IPS 化・ IPM 化において，S-SW 電力変換装置の回路方式と回路特有の動作特性，制御方式と制御特性を十分考慮したデバイス回路設計をすることが必要となる。とりわけ中・大容量対応の S-SW 電力変換装置では，導通損失低減を狙ってパワーデバイスのさらなる低飽和電圧化が要求されるが，Si ベースの IGBT ではもはや現状技術からはさほど低くできない。したがって一層の低飽和電圧化を実現するにはサイリスタ構造，中でも電流密度が高くとれ，大容量向きの新型 MOS 制御サイリスタ（MCT など）の導入が有効となる。また，SiC などの新素材パワーデバイスでは，Si ベースのパワーデバイスでは考えられなかった超高速スイッチング動作が期待できる上，スイッチング損失・導通損失の大幅な低減，大容量化をも同時に達成することができる。Si ベースのパワーデバイスである次世代 IGBT ・新型 MOS 制御サイリスタや SiC ベースの各種パワーデバイスを用いた高性能・高効率・低ノイズ S-SW ・コンパクト電力変換回路と応用機器の開発並びに実証的な性能評価・検討がなされるのも遠い未来の話ではない。この新技術の実用化を目指した R&D に大きな期待の高まりを感じる。

今，21 世紀におけるクリーンエネルギーの有効変換利用と地球環境保護において企業・大学の貢献が求められている中で，新構造・新材料パワーデバイス技術をベースとした電源環境に優しい高性能・低電磁ノイズ・ダウンサイジング S-SW 電力変換回路とその多様な応用機器を取り扱う新高周波スイッチング電源システム技術は，次世代 PE を支える根幹技術の一つとなっていくものと信じている。今後，最先端パワーデバイスと S-SW 電力変換回路，さらにセンサインタフェースを含む制御回路，エネルギー変換負荷機器，新エネルギーデバイス，などのシステム統合化技術開発に向けてますます拍車がかけられていくだろう。

パワーモジュールの現状と展望

桜井　建弥（さくらい　けんや）

1　まえがき

過去 30 ～ 40年にわたって，パワーエレクトロニクス産業の発展に大きく貢献してきた技術に，集積回路素子（LSI）技術とパワー半導体デバイス技術がある。これらの半導体技術は，近年の化石エネルギーの枯渇，環境汚染など，われわれ人類が解決しなければならない非常に大きな課題に対し重要な役割を担っている。これらの課題の有望な解決策として電気自動車，太陽光発電システム，そして家電機器のインバータ化が精力的に推進されている。近い将来，通勤，通学そしてドライブには電気自動車が使われ，多くの家庭の屋根には太陽光発電システムを見ることができるであろう。また，家庭で使われる電動機搭載機器は省エネルギーのためにインバータ化されていよう。

パワー半導体技術におけるわれわれの最終ゴールはもちろん電圧降下ゼロ，スイッチング損失ゼロ，駆動電力損失ゼロで，無限の破壊耐量を持つ究極のデバイスである。これは見果てぬ夢なのであるが，これに向けて多くの努力が払われるであろう。

次なる大きな社会変革は，パワー半導体の革新を待っている。その研究開発動向は次のように要約できる。

(1)　低損失化
(2)　破壊フリー
(3)　システム化

半導体は絶え間ない技術革新により，応用先であるシステム製品の性能・機能向上，小形化，低コスト化に貢献すると期待される。その製品は，システム機能を盛り込むことでますます発展するものと考える。一例を挙げれば，インバータシステムはすべてシリコンベースの部品で実現できる時期がこよう。ここには産業再編の波が押し寄せ，その勝利者は半導体技術とシステム技術を制する者であろう。富士電機はパワーモジュールのリーディングカンパニーたるべく，顧客との密接な共同研究，さらにはグローバルな研究機関との共同研究などをより一層積極的に推進していく所存である。

本稿では IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）を主体にしたパワーモジュールの製品およびその技術について現状と展望を述べる。

2　IGBT モジュールの市場展望と製品動向

2.1　市場展望

高度情報化時代の到来とともに化石エネルギーの枯渇，環境保護の問題がクローズアップされている。われわれは未来の人類のためにもこの問題解決に全力をあげねばならない。そしてこのことはパワー半導体ビジネスの大幅な拡大と産業，コア技術の再編を予測させる。まさに変革の時代であり，大きなビジネスチャンス到来と考え，研究開発に資源を傾注していく所存である。

現在までの主な IGBT モジュールの市場は汎用インバータ，サーボモータ制御，工作機械，エアコンディショナ（エアコン），エレベータなどであった。その世界市場は1997年で 600 億円程度と予測され，年率 15 %程度の増加が見込まれている。しかし，この予測には含まれていない新しい大きな市場の創出が期待される。それは「まえがき」で述べた社会変化への対応として生み出される市場である。例えば，省エネルギーを狙いにした白物家電（エアコン，冷蔵庫，洗濯機など）のインバータ化，使いやすさや便利さを実現するバッテリー駆動機器の拡大，地球環境保護のための電気自動車，太陽光発電システムの拡大，高齢化時代の到来に呼応したホームエレベータ，セキュリティシステムおよび公共エスカレータなどを挙げることができる。これらは全世界を市場として見ることができ，特に中国，インドなどアジア地区の発展，欧米における環境保護運動などが上記市場動向に大きな影響を与えよう。

もう一つの IGBT モジュール市場を変革する事柄は新しいパワー回路トポロジーの出現である。従来主体であったハードスイッチング PWM（Pulse Width Modulation）変換技術は変換効率，ノイズ問題の点ですでに限界にきている。それをブレークスルーするためにソフトスイッチング，AC–AC 直接変換技術を適用したシステムも実現されつつある。この新しいトポロジーに最適なモジュールデバイス，

桜井　建弥

パワー半導体デバイスのチップおよびパワーモジュールの研究開発に従事。現在，松本工場半導体開発センターパワー半導体開発部次長。工学博士。

回路が必要とされる。これらの動きは，システムへのパワー半導体デバイスの搭載率をますます増大させると期待される。2000年の IGBT 市場は 1,000 億円を大幅に超えるとする予測もある。

2.2　製品動向

低損失，小形化，高機能化，高信頼性，省エネルギー，システムコスト低減を実現する IGBT モジュール登場への期待はますます強まっている。大きな流れは LSI のそれと同じようにシステム化であり，システムインテグレーテッドモジュールである。ここ数年のメインデバイスは IGBT であろう。なぜなら，IGBT の高性能化がなおも進み，次世代デバイスのターゲットがますます高くなるからである。近いうちに第四世代 IGBT が登場し，さらなる低損失化が実現されよう。

システム化への途上としてパワーインテグレーテッド製品化が進み，PIM（Power Integrated Module），IPM（Intelligent Power Module）の製品化が拡大する。電流センシング，温度センシングの高精度化，状態通信可能なモジュールの製品化も進み，システム応用に最適な製品化，差別化競争に拍車がかかる。特に EMC（Electromagnetic Compatibility）対応，高調波規制対応専用モジュールの製品化，そして SR（Switched Reluctance）モータ応用，新パワー回路専用モジュールの製品化が進むと考える。

3　次世代パワーモジュールの技術，製品動向

『富士時報』第 70 巻第 4 号（1997年）でパワー半導体デバイスの技術動向を概説した。ここでは IGBT モジュールについて富士電機の製品，技術戦略のアウトラインを述べる。

パワーモジュールの高性能化，高機能化は次の技術革新で推進される。

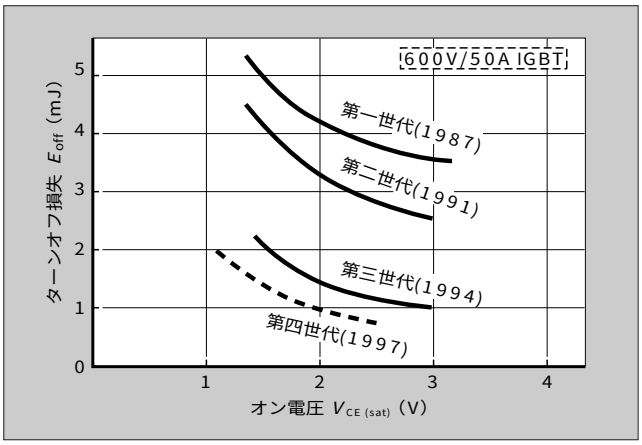
(1)　ULSI（Ultra Large Scale Integrated Circuit）プロセス技術の適用
(2)　インテリジェント化によるトレードオフのブレークスルーとシステムインモジュールの実現（専用ドライバ IC 技術，センサ技術，低コスト高耐圧絶縁分離技術）
(3)　パッケージング技術（高熱伝導絶縁材料，高放熱構造，トランスファモールドモジュールなど）
(4)　半導体動作物理の複合化などによる新コンセプトデバイスの創生
(5)　新半導体材料デバイス（SiC など）による大幅な高性能化実現

われわれはコア技術戦略を次の項目に分けて考えている。

(1)　次世代高性能 IGBT 技術
(2)　インテリジェントモジュール技術
(3)　パッケージング技術
(4)　新コンセプトデバイスへの挑戦
(5)　パワーシステムオンチップをめざして

ここでは特に(1)，(2)，(4)のコア技術を製品戦略のアウトラインとともに概説する。

図１　IGBT のトレードオフの進展



3.1　次世代高性能 IGBT 技術

図１に IGBT のトレードオフの進展を示す。市場に展開されてからすでに 10年が経過し，図に示すように大幅に性能向上が進められた。現在の最新製品は第三世代 IGBT 技術を基盤としている。図に示すように，いよいよ第四世代 IGBT の出現が本格化する。富士電機もすでにサンプル出荷を始めている。

第四世代 IGBT の性能は，600 V クラスで $V_{CE\ (sat)}$ は平均 1.6 V 程度である（第三世代 IGBT と同じ E_{off}，同じ電流密度のとき）。1,200 V クラスで 2.3 V 程度であろう。世代とは適用される技術レベルをいうのではなく，デバイスの性能レベルをいうのである。

この 2 ～ 3年は第四世代 IGBT の実現に向けて研究開発を進めてきた。電気性能はもちろん，コスト性能をも加味して第四世代 IGBT 技術（デバイス技術やプロセス技術など）を決定する必要がある。デバイス構造では従来の PT-IGBT，NPT-IGBT，そしてトレンチ IGBT など，プロセスではプレーナ形微細加工，トレンチゲート，薄い NPT-IGBT ウェーハ技術や各種ライフタイム制御技術などを研究開発，評価してきた。

結論として，第四世代 IGBT においてはその耐圧によって最適な IGBT 構造を採用することに決めた。それは，IGBT の耐圧によって最適デバイス構造が存在すると結論づけたからである。そしてプロセスについても今，トレンチゲートを採用することが得策かどうか総合的に判断した。

その結果，本特集号の別稿で詳しく述べているが，600 V IGBT にはプレーナ形微細加工（1 ミクロンルール）と JFET 抵抗成分を低減する工夫をして PT-IGBT を採用し，1,200 V 以上の IGBT にはプレーナ形微細加工 NPT-IGBT を採用することに決定した。

図２に 600 V IGBT のトレードオフ比較を示す。第四世代 IGBT は第三世代に比較して $V_{CE\ (sat)}$ で約 0.6 V の改善となる。これはインバータ回路での IGBT 損失を約 20 % 低減可能と予測できる。トレンチゲートと微細化プレーナゲートでは大きなトレードオフ差はない。**表１**にその主な

図２　600 V IGBT のトレードオフ比較

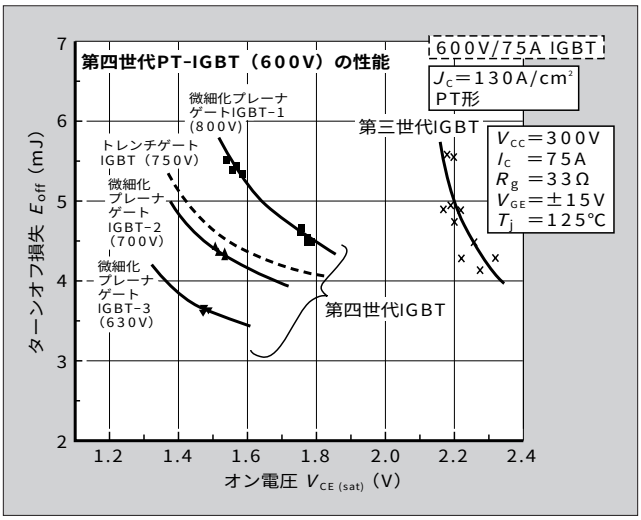


図３　1,200 V NPT-IGBT のトレードオフ比較

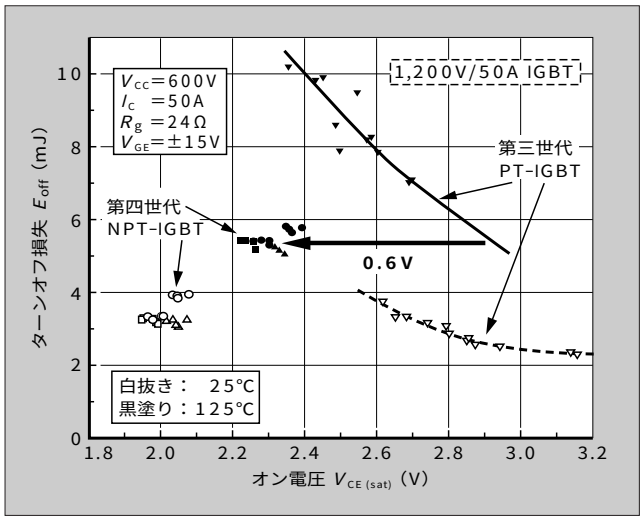
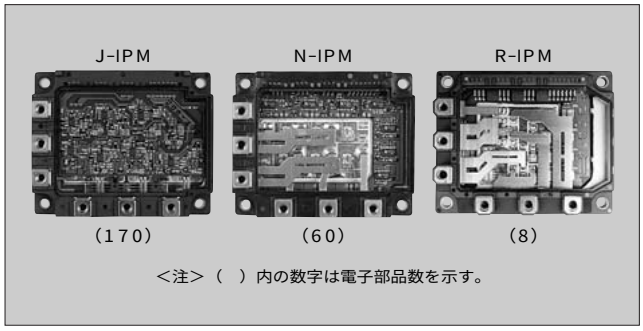


表１　トレンチゲートIGBTとプレーナゲートIGBTの比較

項　目	トレンチゲートIGBT	プレーナゲートIGBT
$V_{CE(sat)}$（600 V）	1.4 V	1.6 V
SCSOA	×	△
降伏電圧	△	◎
入力容量	× （2倍ほど大きい）	○
ゲート酸化膜信頼性	△	◎
チップの歩留り	△	○
チップ製造プロセス	複雑 （プロセスが長い）	簡単

×：悪い，△：劣る，○：良好，◎：最高

図４　IPM の構造比較



項目の比較を示す。それぞれに長所・短所が存在する。トレードオフに大きな差がない新しいプレーナ形 IGBT 技術を駆使して第四世代 IGBT を展開するほうが，現在は総合的に有利であると判断したのである。トレンチゲートについては将来のデバイス開発のコア技術であり，今後も特にコスト面の改善を図る所存である。

図３に 1,200 V NPT-IGBT のトレードオフ比較を示す。第四世代は現在の第三世代 PT-IGBT のそれを凌駕（りょうが）する性能を持つであろう。特に NPT-IGBT は低コストのシリコンウェーハを使用することが可能であり，高いコスト性能を期待できる。加えてオフ損失の温度依存性が小，オン電圧が正の温度依存性，破壊耐量が大きいなど高周波・大容量モジュールにも適している。これが基本的な次世代 IGBT チップ技術に関する考えである。これらをベースにした新モジュール，IPM シリーズは 1998年春から秋にかけて展開予定である。

次のターゲットは第五世代 IGBT の実現である。それはさらに 20 %の損失低減を実現しよう。同時にモジュールサイズも半分をめざす。

3.2　インテリジェントモジュール技術

すでに 1997年春にアナウンスし，現在量産中である新形第三世代 IGBT-IPM（R-IPM）はオールシリコン IPM であり，また直接 IGBT の接合部温度を検出・保護する機能を有し，高いコスト性能と信頼性を兼ね備えた初めての IPM である。

従来の IPM と R-IPM の比較を**図４**に示す。コスト低減のポイントは部品点数の低減である。これは多くの機能または誤動作防止などの回路を一括してドライバ IC に内蔵する技術確立によって実現された。この技術をベースに民生用市場をターゲットにした小容量 IPM も展開を始めた。さらには小容量汎用インバータ市場に向けた IPM も展開予定である。特に小容量 IPM は HV（High Voltage）ドライバ IC 搭載がメインとなろう。しかし HV ドライバ IC そのものおよびそのシステムにまだ誤動作，破壊時のシステムへの影響などの課題が存在している。さらに HV ドライバ IC の課題を完全に解決する努力を継続する所存である。この IPM シリーズは 600 V/1,200 V で 3 A から 600 A にまで展開され，随時第四世代 IGBT チップに交代されよう。

次のターゲットは高機能第四世代 IGBT-IPM の実現である。そのコンセプトは低損失，高機能，小形 IPM であり，特に低ノイズ（dv/dt 制御），スナバ回路簡素化，相電流検出機能内蔵などを特徴とする。包括的な HV ドライバ IC を開発し，R-IPM と同じオールシリコン IPM とし高いコスト性能をも実現したい。

図５　第四世代高機能 IPM のコンセプト

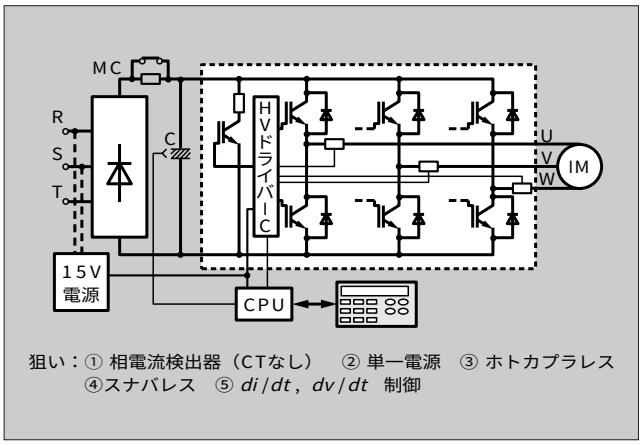
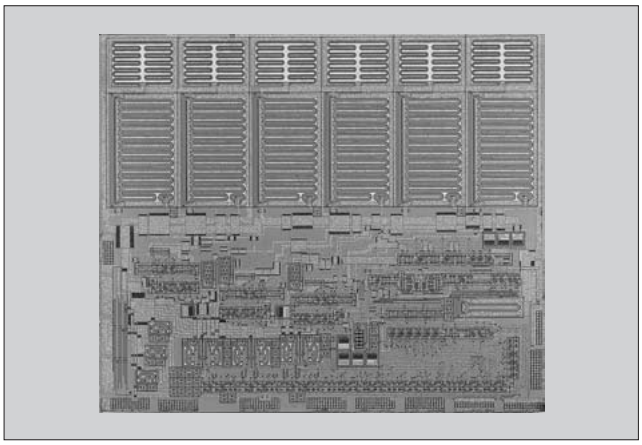


図６　B-SOI ウェーハを使用した 1 チップインバータ



第四世代高機能 IPM のコンセプトを**図５**の簡単なパワーシステムブロックダイヤグラムに示す。特に小容量分野（数 A 以下）では，さらなるシステムの小形化，低コスト化要求に呼応して 1 チップインバータの製品化が強く求められるようになってきた。富士電機でも数年前から 1 チップインバータの技術開発を手がけてきた。絶縁分離技術として低コスト誘電体分離技術がコア技術であり，直接接合絶縁分離［Bonded-SOI（B-SOI)］ウェーハなどが精力的に研究開発されている。

図６に研究開発段階における B-SOI ウェーハを使用した 1 チップインバータを示す。IGBT，FWD（Free Wheeling Diode）のインバータ回路，駆動回路，保護回路や電源回路が内蔵されている。しかし課題は高価格 B-SOI ウェーハの問題，チップ内の熱伝導の悪化など革新すべき課題が存在し，さらなるブレークスルーが不可欠である。この分野には，オールシリコン IPM 技術を駆使して高いコスト性能比を有するミニ IPM の製品化をも考えている。

3.3　新コンセプトのデバイス技術

IGBT が市場に出て 10年以上経過し，最も重要なデバイスとなった。そして今なおその改善が進められている。

次期デバイスとして MCT（MOS Controlled Thyristor）コンセプトが発表されてから十数年経過したが，いまだに市場で十分には受け入れられていない。これは MCT の可制御電流を増大することが困難であることによる。これを打開すべくさまざまなコンセプトのデバイスが発表されている。その基本動作は MOS 制御によるサイリスタ動作をベースにしている。そのラッチアップ状態の過剰キャリヤをいかに効率良く，かつ寄生動作を克服してターンオフ可制御電流を増大するかにかかっている。その役割は内蔵された MOSFET が担っており，この MOSFET のオン抵抗を限りなく小さくすることが不可欠である。そのためにトレンチゲートプロセスなどの適用なども試みられている。

加えてもう一つのコンセプトは，デュアルゲートによる動作モード切換形デバイスである。ターンオフ直前にゲート信号によってサイリスタ動作から IGBT 動作に切り換え，その可制御電流向上とスイッチング速度の向上を狙ったものである。このとき，いかにターンオフ動作時に寄生サイリスタをアクチベートさせないかがポイントである。このために微細加工，多層配線技術やターンオフ電流の均一化デバイス構造を検討している。

昨今のパワーデバイスへの LSI プロセス技術の適用拡大により，上記新コンセプトデバイスの実現の可能性も大きく進展すると期待している。しかし IGBT の高性能化が進むなかで，サイリスタ動作を導入しようとするコンセプトはそれほどドラマチックな性能改善を期待できない可能性がある。次世代のターゲットは，オン電圧降下 1 V の実現ではなく，0.5 V 程度となろう。異なる観点からのアプローチが必要と考える。例えば pn 接合を有しない構造，サージ電圧制御や新しいパワー回路トポロジーの採用などによる新デバイスの創造である。

本パワーモジュール特集号では特に最新の IGBT モジュールシリーズの製品コンセプトおよびその技術を紹介している。第四世代 IGBT，新 NPT-IGBT などをベースにした小容量産業用・民生用 PIM，IPM について紹介し，中大容量産業用・車両用モジュール，そして大容量平形 IGBT についても言及する。モジュールのコア技術については，次世代 IGBT，ドライバ IC 技術，パッケージ技術と高信頼性化の関係，シミュレーション技術などの富士電機の取組み状況に言及する。富士電機の製品，技術に対する考え方をご理解いただければ幸いである。

4　あとがき

昨今の社会的ニーズを背景に，パワーエレクトロニクス産業の果たす役割はますます拡大すると期待される。そしてその技術分野，製品分野もダイナミックに再編が起ころうとしている。勝者は真のニーズ，動向を把握し，コア技術に先んじたものであろう。

富士電機のパワーモジュール製品は世界の多くのユーザーからご愛顧をいただいてきた。これからもユーザーの期待にこたえるべくこの分野での研究開発に注力し，来るべきすばらしい社会実現のために努力していく所存である。

中・大容量 R シリーズ IGBT-IPM

山口　厚司（やまぐち　あつし）　**市川　裕章**（いちかわ　ひろあき）　**征矢野　伸**（そやの　しん）

1　まえがき

パワーエレクトロニクス応用装置である汎用インバータ，数値制御（NC）工作機械，産業用ロボットなどは，近年，低騒音化，高効率化，高機能化，低価格化，小形化の要求が一層強まっている。

パワーエレクトロニクス応用装置に使用されるパワーデバイスは低損失化，高周波化が進み，バイポーラトランジスタから現在では IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）が主流となっている。

一方，IGBT の低損失化とともに駆動回路，各種保護回路などの周辺回路をモジュール内部に取り込むインテリジェント化によって，パワー部の設計時間の短縮を可能にし，装置の小形化，高機能化に貢献してきた。

このような，パワーデバイスのインテリジェント化に伴い，富士電機では 1989年にバイポーラ形インテリジェントパワーモジュール（IPM）を発表し，さらに低損失化，高周波化をめざし，1992年に低損失化を追求した J シリーズ IGBT-IPM（J-IPM），1995年に低価格，低ノイズをめざした N シリーズ IGBT-IPM（N-IPM）を開発し，製品化してきた。さらに今回，高コストパフォーマンス，高信頼性，高機能化を追求した R シリーズ IGBT-IPM（R-IPM）の開発を行った。

以下，R-IPM の系列，特長などについて紹介する。

2　R-IPM の系列

表 1 に R-IPM の製品系列，特性および内蔵機能を示す。IGBT チップは，600 V 系，1,200 V 系ともに低 $V_{CE\ (sat)}$ の第三世代 IGBT を使用し低損失化を図っている。また，機能的には従来の IPM に素子過熱保護機能を追加した構成となる。

600 V で 50 ～ 300 A，1,200 V で 25 ～ 150 A の電流容量と，6 個組，7 個組（ブレーキ用 IGBT 内蔵）による幅広いラインアップ構成で，さまざまな市場要求に対応することができる。その外観を**図 1** に示す。特に 600 V/300 A，1,200 V/150 A は，6 個組，7 個組の IPM としては市場で初めての機種であり，大容量 IPM の要求にも十分対応可能である。

3　R-IPM の特長

今回開発した R-IPM の特長をまとめると次のようになる。

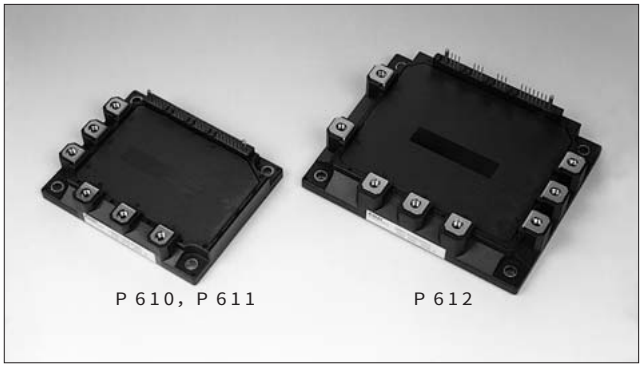
(1)　第三世代 IGBT チップの採用により，低損失かつ低ノイズ（ソフトスイッチング）
(2)　IGBT チップの温度を直接検出し保護することによって，IGBT の限界性能を追求し高信頼性を実現（**表 2** に R-IPM の保護機能を示す。）
(3)　制御回路を IC チップに集積することにより，高信頼性と高いコストパフォーマンスを実現
(4)　従来の IPM と互換性のあるパッケージを採用するとともに，豊富なラインアップ
(5)　ノイズによる誤動作を抑えた高ノイズ耐量

以下，今回の開発にあたり，かぎとなる技術的な取組みについて紹介する。

3.1　過熱保護機能の高性能化

IPM の過熱保護機能として，従来からのケース温度検出による過熱保護に加えて素子過熱保護回路を内蔵している。

図 1　R-IPM の外観



山口　厚司

インテリジェントパワーモジュールの開発に従事。現在，松本工場半導体開発センターパワー半導体開発部。

市川　裕章

インテリジェントパワーモジュールの開発に従事。現在，松本工場半導体開発センターパワー半導体開発部。

征矢野　伸

インテリジェントパワーモジュールの開発に従事。現在，松本工場半導体開発センターパワー半導体開発部。

表1　R-IPMの系列と内蔵機能

(a) 600V系

素子数	形　式	インバータ部					ブレーキ部				内蔵機能						パッケージ
		V_{DC} (V)	V_{CE} (V)	I_C (A)	P_C (W)	$V_{CE(sat)}$ 標準 (V)	V_{CE} (V)	I_C (A)	P_C (W)	ダイオード I_F (A)	Dr	UVT	OCT	SCT	T_c-OHT	T_j-OHT	
6個組	6MBP50RA060	450	600	50	198	2.3	—	—	—	—	○	○	○	○	○	○	P610
	6MBP75RA060	450	600	75	320	2.3	—	—	—	—	○	○	○	○	○	○	P610
	6MBP100RA060	450	600	100	400	2.3	—	—	—	—	○	○	○	○	○	○	P611
	6MBP150RA060	450	600	150	595	2.3	—	—	—	—	○	○	○	○	○	○	P611
	6MBP200RA060	450	600	200	735	2.3	—	—	—	—	○	○	○	○	○	○	P612
	6MBP300RA060	450	600	300	1,040	2.3	—	—	—	—	○	○	○	○	○	○	P612
7個組	7MBP50RA060	450	600	50	198	2.3	600	30	120	30	○	○	○	○	○	○	P610
	7MBP75RA060	450	600	75	320	2.3	600	50	198	50	○	○	○	○	○	○	P610
	7MBP100RA060	450	600	100	400	2.3	600	50	198	50	○	○	○	○	○	○	P611
	7MBP150RA060	450	600	150	595	2.3	600	50	198	50	○	○	○	○	○	○	P611
	7MBP200RA060	450	600	200	735	2.3	600	75	320	75	○	○	○	○	○	○	P612
	7MBP300RA060	450	600	300	1,040	2.3	600	100	400	100	○	○	○	○	○	○	P612

(b) 1,200V系

素子数	形　式	インバータ部					ブレーキ部				内蔵機能						パッケージ
		V_{DC} (V)	V_{CE} (V)	I_C (A)	P_C (W)	$V_{CE(sat)}$ 標準 (V)	V_{CE} (V)	I_C (A)	P_C (W)	ダイオード I_F (A)	Dr	UVT	OCT	SCT	T_c-OHT	T_j-OHT	
6個組	6MBP25RA120	900	1,200	50	198	2.3	—	—	—	—	○	○	○	○	○	○	P610
	6MBP50RA120	900	1,200	75	400	2.3	—	—	—	—	○	○	○	○	○	○	P611
	6MBP75RA120	900	1,200	100	595	2.3	—	—	—	—	○	○	○	○	○	○	P611
	6MBP100RA120	900	1,200	200	735	2.3	—	—	—	—	○	○	○	○	○	○	P612
	6MBP150RA120	900	1,200	300	1,040	2.3	—	—	—	—	○	○	○	○	○	○	P612
7個組	7MBP25RA120	900	1,200	50	198	2.3	1,200	15	120	15	○	○	○	○	○	○	P610
	7MBP50RA120	900	1,200	75	400	2.3	1,200	25	198	25	○	○	○	○	○	○	P611
	7MBP75RA120	900	1,200	100	595	2.3	1,200	25	198	25	○	○	○	○	○	○	P611
	7MBP100RA120	900	1,200	200	735	2.3	1,200	50	400	50	○	○	○	○	○	○	P612
	7MBP150RA120	900	1,200	300	1,040	2.3	1,200	50	400	50	○	○	○	○	○	○	P612

Dr：駆動回路，UVT：駆動電源電圧不足保護，OCT：過電流保護，SCT：短絡保護，T_c-OHT：ケース過熱保護，T_j-OHT：素子過熱保護

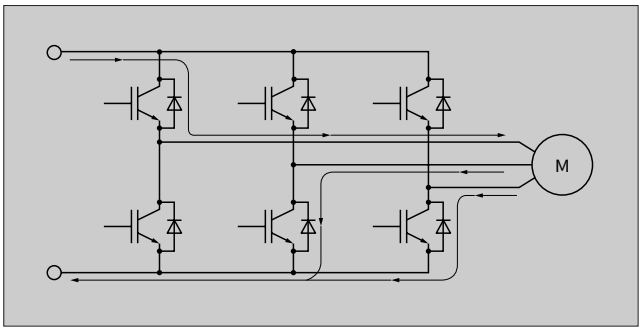
表2　R-IPMの保護機能

機　能	内　容
過電流保護機能（OCT）	IGBTごとにコレクタ電流を監視し，過電流に対して保護動作し，電流をソフト遮断する。
短絡保護（SCT）	過電流保護と同様の方法で短絡電流に対して保護動作し，電流をソフト遮断する。
駆動電源電圧不足保護（UVT）	駆動電源電圧を検出し，電圧が低下すると保護動作し，電圧不足による破壊を防ぐ。
ケース過熱保護（T_c-OHT）	ケース温度を監視する専用ICを内蔵し，ケース温度が異常に上昇すると保護動作し，出力を停止する。
素子過熱保護（T_j-OHT）	IGBTに内蔵した温度検出素子を利用して，IGBTの温度が異常に上昇すると保護動作し，出力を停止する。

従来のケース過熱保護機能は，過負荷運転状態のときや冷却ファンの故障時などモジュール温度が比較的ゆっくり上昇するような現象に対し，周辺部品への影響やモジュールの信頼性の問題があるため必要不可欠な保護機能である。

しかし，**図2**に示すようにモータロックなどのIGBTチップが急激に温度上昇するような現象に対する保護には不十分であるため，R-IPMでは素子過熱保護機能も内蔵している。

図2　モータロック時の電流経路



モータロック状態を模擬した実験として，従来のIPMで温度センサから一番遠い所のIGBTチップへ損失を印加し，発熱させたときのIGBTチップの接合温度（T_j）と温度センサの温度上昇データを取得した。結果を**図3**に示す。ケース過熱保護が働く温度に到達する前にIGBTチップの温度が150 ℃を超えているため，この運転状態が続くとIGBTチップを破壊してしまう可能性があり，素子過熱保

図３　モータロック時の温度上昇

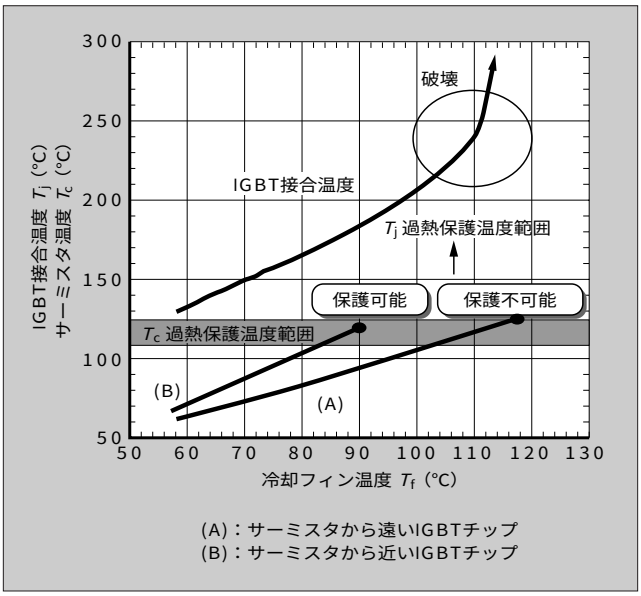
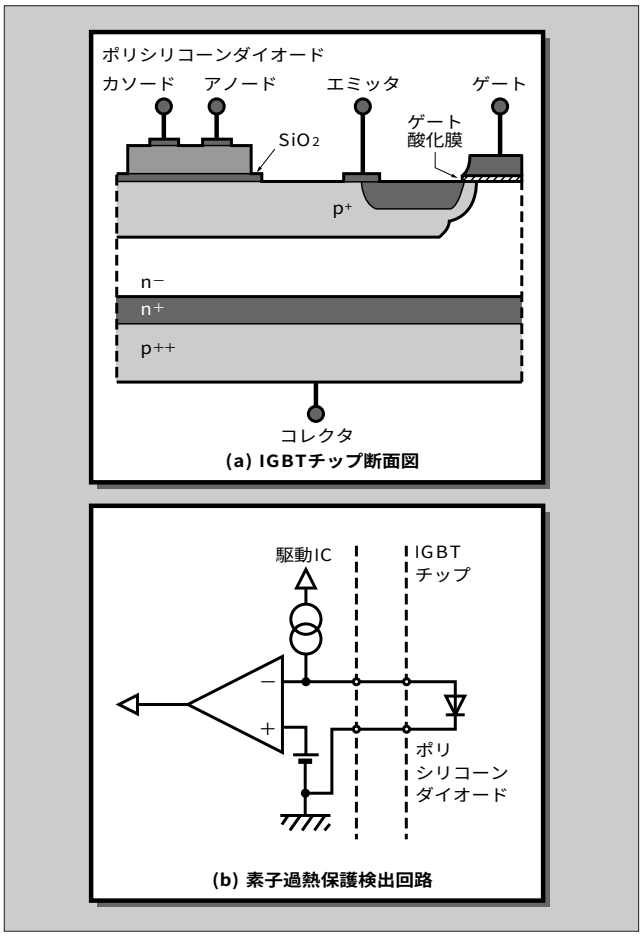


図４　IGBT チップ断面図と素子過熱保護検出回路



護機能は必要不可欠であることが分かる。

素子過熱保護機能は，従来の IPM に用いられていたケース過熱保護とは違い，IGBT チップの内部に埋め込まれた温度検出用素子からの情報により，IGBT チップの温度を直接測定し，IGBT チップを熱破壊から保護する機能である。この機能を実現するため，従来のセンス IGBT チップの内部に**図４**に示すような温度検出用素子を構成し，この素子の温度特性を利用して IGBT チップの温度を検出している。

IGBT チップ内部に温度検出用素子を構成するためにはメイン素子のスイッチング動作に影響を与えないように，また影響されないように分離技術を利用して配置してある。

検出する IC 側は，約 1 ms の不感時間を設けてあり，ノイズによる誤検出を防いでいる。

保護動作のタイミングチャートを**図５**に示す。過熱保護については，ケース過熱保護，素子過熱保護ともに，温度が検出レベルに到達し，その状態が約 1 ms 持続した場合に動作し，電流をソフト遮断する。同時にアラーム出力し，保護状態となる。アラーム出力および保護状態のリセットは，入力信号がオフ状態で温度がリセットレベルの状態のときに行われる。

3.2　制御回路の IC への集積化

従来までの IPM の制御回路部は，駆動能力，各種保護機能の調整，ノイズ対策など実際に IGBT と組み合わせなければ分からなかった部分が多いため，調整の効かない 1 チップ IC への置換えが不可能で，各種の電子部品を組み合わせたハイブリッド構成をとっていた。そのため，さらなる小形化，低価格化にはおのずと限界が生じていた。しかし，R-IPM は，従来の IPM の開発で培った経験と以下に示すような技術的な対応により，これら電子部品を IC に集積することでこの問題を解決した。

IPM 制御回路を IC 化するには，IGBT との調整をいかにしてとるか，ノイズ対策をどうするかが課題であった。これらの課題に対して以下に記す技術により制御回路の IC 化に成功した。

(1)　IGBT の特性と IC の特性を組み合わせて行うシミュレーション技術の確立により，IC に必要とされる能力などを机上検討，確認することで最適な設計をした。

(2)　各回路ブロックの基準電源にフィルタを入れることでノイズを防ぎ，従来の IPM で外付けにしていたフィルタも IC に内蔵することによって配線パターンの影響の少ないフィルタを構成し，ノイズ耐量を向上させた。

(3)　ノイズの影響を受けやすい IGBT 駆動回路のグラウンドと，センシングと保護動作をする回路のグラウンドをそれぞれ IC 内部で分離することによって，ノイズの流入経路を減らし，誤動作を防いだ。

(4)　制御回路を IC 内に集積したことにより，従来の IPM のように制御回路の配線の引回しが少なくなり，ノイズ耐量が大幅に向上した。

(5)　IGBT と IC をできるだけ近くに配置することで外部ノイズの影響を避け，また IGBT を効率よく駆動できるように IC の最適化を行い，低損失化とともにソフトスイッチングを実現した。

また，**図６**に R-IPM と J-IPM のスイッチング波形を示すが，特に R-IPM はターンオンとリカバリー時の di/dt, dv/dt を抑制し，ソフトスイッチングを実現している。

図５　保護機能のタイミングチャート

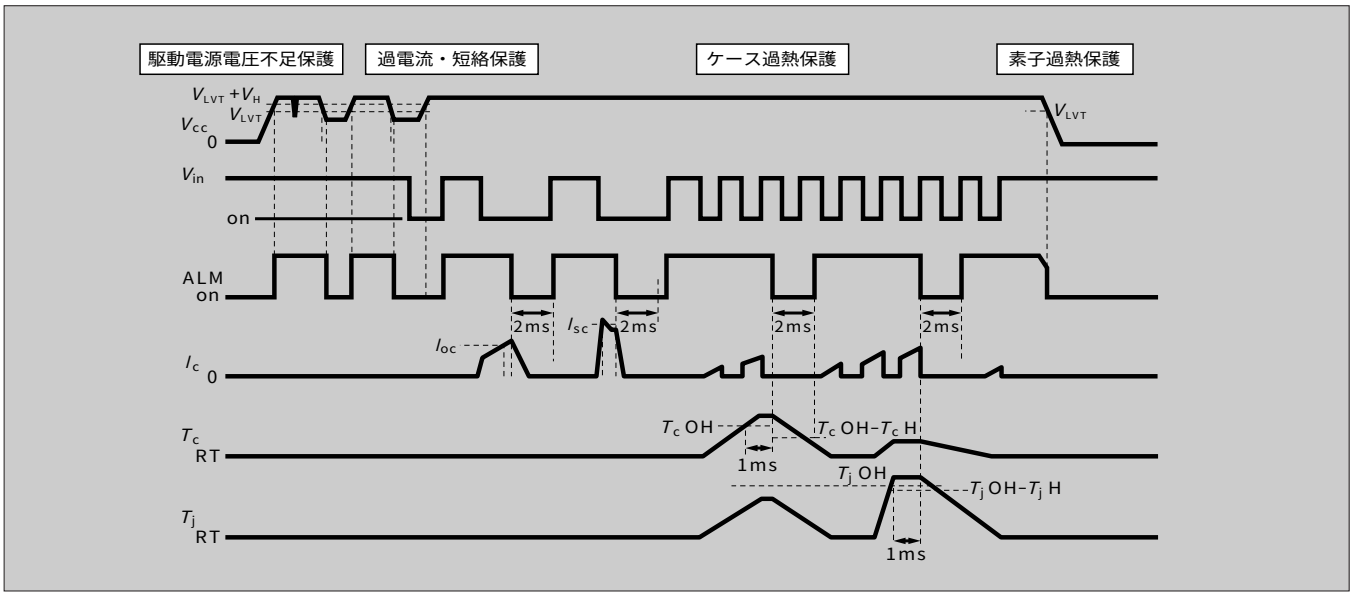
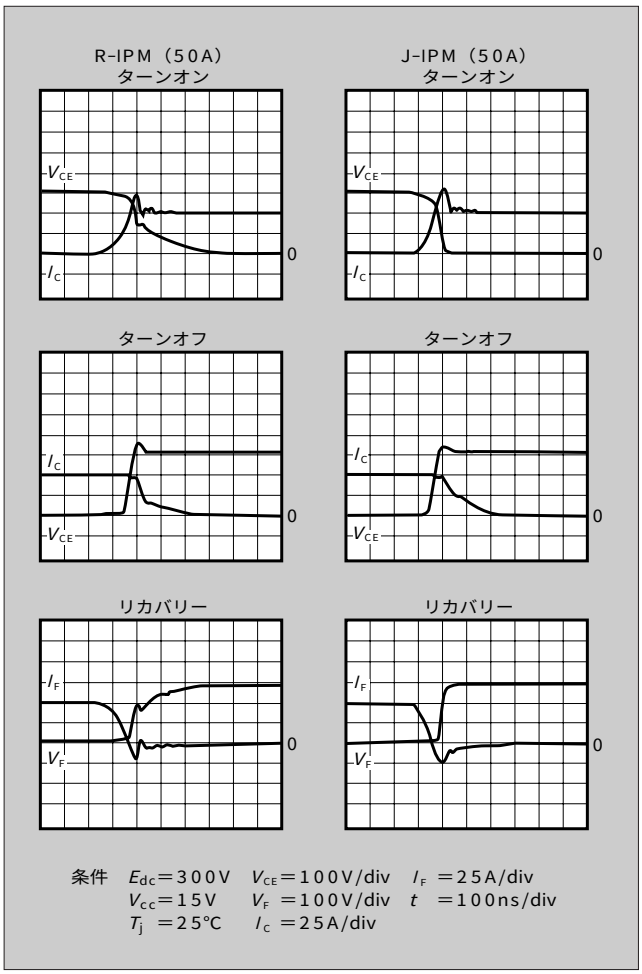


図６　R-IPM と J-IPM のスイッチング波形

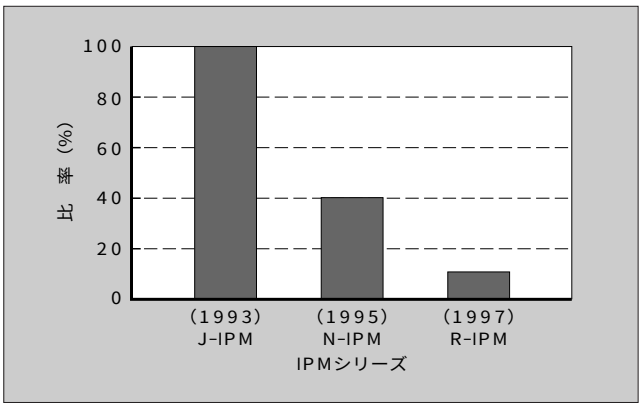


以上のような対応を行い，**図７**に示すように J-IPM に比べ電子部品数は 1/10 にまで減少させた。

3.3　ソフトスイッチングによる放射ノイズの低減

近年，産業用装置のノイズに対する規制は EMC（Electro-Magnetic Compatibility）規制，CE マーク対応による規制など年々厳しくなっている。これらの装置はパワーデバイスを使用する限り，スイッチングノイズが常に発生し，放射ノイズとなって外部の装置に誤動作などの悪影響を及ぼす。このような状況のなか，パワーデバイスには低損失化はもちろん，ソフトスイッチング化が強く求められている。

図７　使用している電子部品数の比率



市場ニーズにこたえるべく R-IPM は，放射ノイズに最も影響するといわれているターンオン dv/dt を従来の J-IPM に比べて 10 %以上低減し，ソフトスイッチング化を実現した。

3 m 法での放射ノイズの測定方法を**図８**に，放射ノイズレベルの比較を**図９**に示す。産業用の汎用インバータ，サーボアンプなどに使用されるパワーデバイスは約 80 MHz 以下の領域でノイズが発生する。その領域で J-IPM と比較すると 10 dB 以上の差があり，低ノイズ化に大きく貢献する。

3.4　システム設計マージンの合理化

R-IPM は，**3.1** 節で取り上げた過熱保護機能の高性能

図８　放射ノイズの測定方法

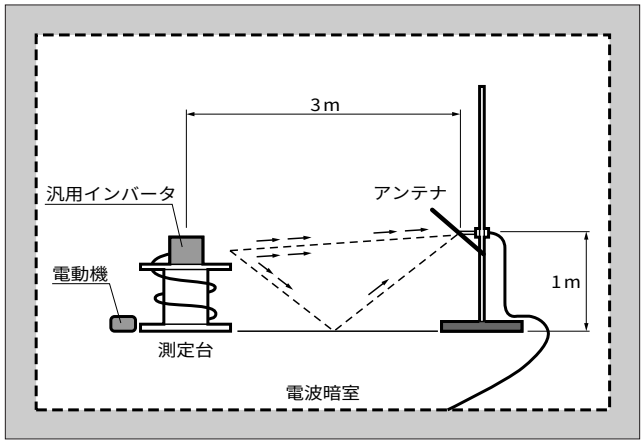
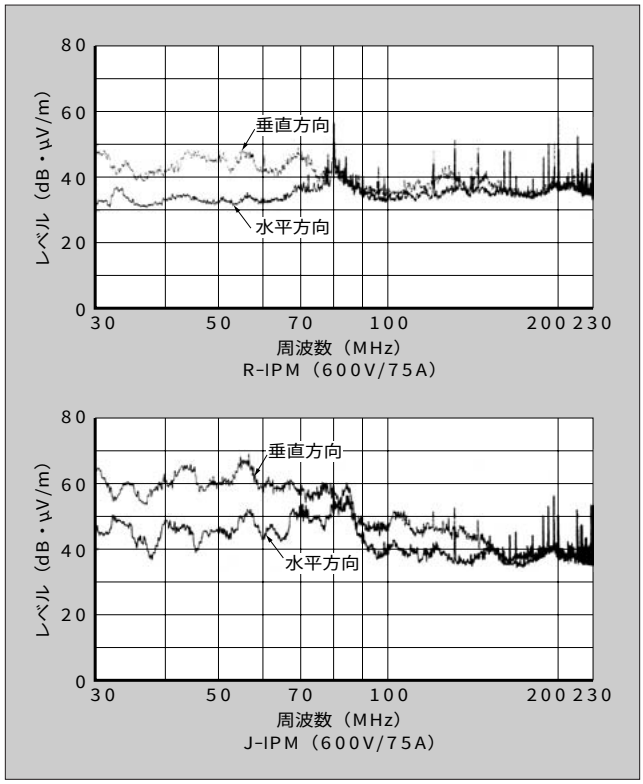


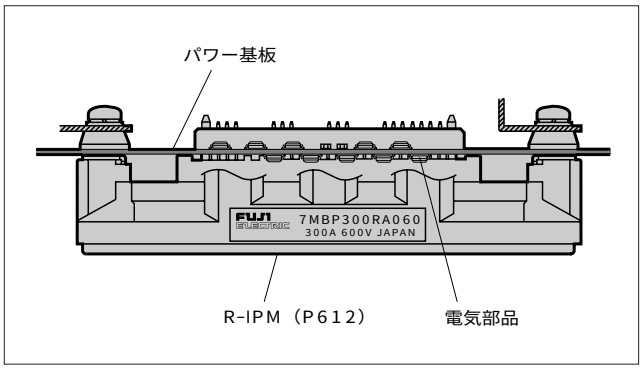
図９　放射ノイズレベルの比較



化によって，IGBT チップの温度を直接測定している。このことは，ユーザーにおけるシステム設計時（パワー主回路）の最大のポイントでもあるパワー半導体デバイスの正確な動作温度の情報提供を可能にし，IGBT の性能を限界まで追求できることを意味する。

システムの電気的な異常に対しては，過電流保護機能，短絡保護機能，駆動電源電圧不足保護機能によって保護され，熱的な異常に対しては，ケース過熱保護機能と今回新たに搭載された素子過熱保護機能によって保護される。これらの高性能化された保護機能により，電気的にも熱的にも IGBT の性能を十分に発揮させることができ，システム全体の設計マージンの合理化，開発期間の短縮などに大きく貢献する。

図 10　パワー基板取付イメージ図



3.5　パッケージ構造

R-IPM の特長は次のとおりである。

(1)　電気部品点数の大幅削減により高信頼性の実現

(2)　従来品（J-IPM，N-IPM）と互換性のあるパッケージ化

(3)　6 個組，7 個組最大定格：600 V/300 A，1,200 V/150 A の実現

(4)　内部構造の最適化による薄形化と軽量化の実現

内部構造はパワー回路と制御回路を同一ベース板上に搭載し，内部端子は L 形スリット構造の直線最短化とし，熱膨張による応力緩和と内部インダクタンスの低減とともに薄形化を実現した。**図10**に示すように，IPM に面するパワー基板上にも部品搭載が可能になり，装置での設計自由度の向上に寄与する。

(5)　制御端子のガイドピン金属化による折れと制御端子変形の解消

4　あとがき

今回開発した R-IPM の系列，特長について紹介した。R-IPM は，シリコン半導体だけで IPM を構成した初めての製品であり，また，IGBT チップの温度を直接検出する機能を新しく内蔵した。また，系列では 6 個組，7 個組の IPM としては初めて 600 V/300 A，1,200 V/150 A までをカバーしている。この R-IPM の適用により，装置の小形化，高信頼性化に大きく貢献できると確信する。

さらに，パワーデバイスのインテリジェント化は，応用製品のトータルシステムコストダウン，小形化，高信頼性の要求に対し IC 技術の進歩とともに今後ますます推進されると考えられる。これらの市場要求に十分こたえられるよう，今後とも開発，製品化に注力していく所存である。

参考文献

(1)　重兼寿夫・宝泉徹：インテリジェントパワーモジュール，電気学会誌，Vol.115，No.2，p.114-119（1995）

(2)　渡辺学・梶原玉男：インテリジェントパワーモジュール，富士時報，Vol.67，No.5，p.268-274（1994）

(3)　山口厚司・市川裕章：新形 IGBT-IPM（R シリーズ）の開発，富士時報，Vol.70，No.4，p.237-242（1997）

小容量民生用 IGBT–IPM

梶原　玉男（かじわら　たまお）　　岩井田　武（いわいだ　たけし）　　小谷部 和徳（おやべ　かずのり）

1　まえがき

「地球環境保護」をキーワードとして，家庭電化製品の省エネルギー化が重要なテーマとなってきた。特に，一般家庭におけるエアコンディショナ（エアコン）の消費電力の比率は大きい。1980年代後半には，省エネルギーでかつ快適な運転を実現するためにパワーデバイスの技術を応用したインバータエアコンが登場した。これにより，エアコンは一家に1台から各部屋に1台の時代を迎え，急速に普及し始めた。現在では日本国内でのエアコン市場は年間約700万台で，そのうちのインバータ化率は年々増加し約80％までになってきた。

しかし，産業分野で用いられるパワーデバイスのほとんどがBJT（Bipolar Junction Transistor）からIGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）へと移行してきたにもかかわらず，エアコン分野ではいまだにそのほとんどがBJTを使用している。また，価格破壊によりエアコンの低価格化が急速に進みつつある。

こういった状況のなか，駆動回路，保護回路を一つのモジュール内に集積することにより，低損失で高機能，かつ高信頼性を実現したIGBT–IPM（Intelligent Power Module）に注目が集まり，トータルシステムのコストダウンをめざしたエアコン専用IGBT–IPMの開発要求が強くなってきた。

以下に，富士電機がエアコン用を中心として新規開発した民生分野向け最新形高機能・小容量IGBT–IPMについて紹介する。

2　インバータエアコンとインバータ回路の構成

図1にインバータエアコンの構成を示す。インバータエアコンは室内機と室外機とで構成され，冷媒を圧縮させるコンプレッサモータとそれを制御するパワーデバイスを含むインバータ制御回路は室外機に組み込まれている。このコンプレッサモータをインバータ制御することにより，省エネルギーで快適なエアコン制御を実現してきた。

図1　インバータエアコンの構成

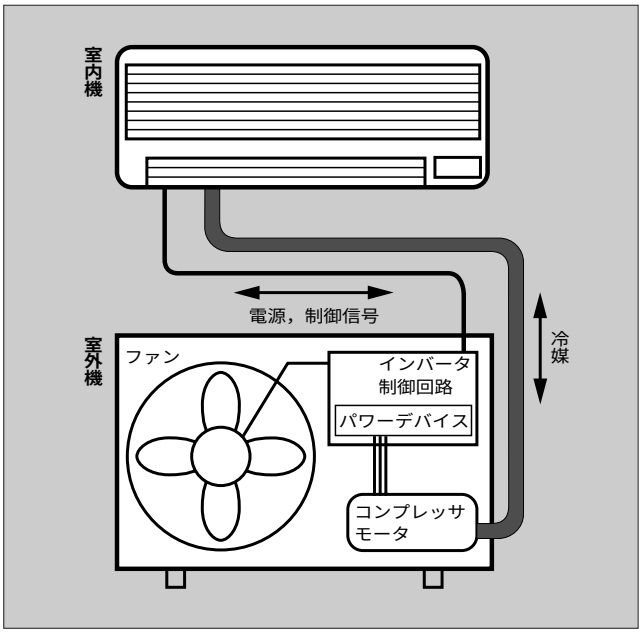


図2　インバータ回路構成例

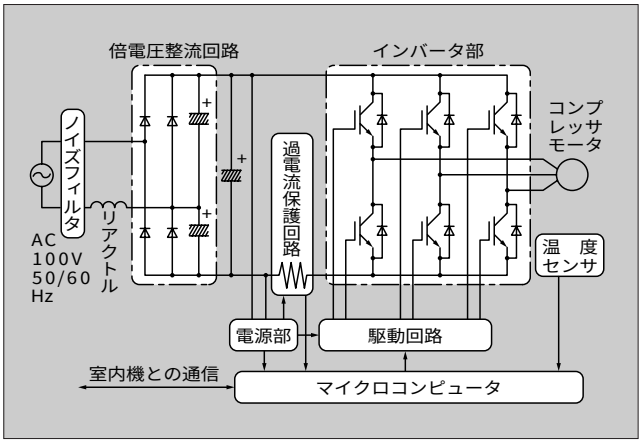


図2にはインバータエアコンに適用されている一般的なインバータ回路構成の一例を示す。

梶原　玉男

インテリジェントパワーモジュールの開発に従事。現在，松本工場半導体開発センターパワー半導体開発部。

岩井田　武

IGBTモジュールおよびIGBT–IPMのパッケージの開発に従事。現在，松本工場半導体開発センターパワー半導体開発部主任。

小谷部 和徳

インテリジェントパワーモジュール用ドライバICの設計・開発に従事。現在，松本工場半導体開発センターパワー半導体開発部。

3 エアコン用IGBT-IPMの開発

富士電機では，**表1**に示す顧客ニーズをもとにエアコン用小容量IGBT-IPMの開発を行った。そのIPMの特長は次のとおりである。

(1) マルチチップモジュール

駆動回路，保護回路をすべて集積した専用ICを開発し，シリコン半導体チップのみの構成によるマルチチップモジュールを開発した。これにより高信頼性，高コストパフォーマンスを実現した。

(2) IGBT接合温度検出過熱保護

IGBTチップの接合温度を直接検出し保護することにより，IGBTの限界性能を追求し，高信頼性，システム設計マージンの削減を実現した。

(3) 第四世代IGBTチップ

メインスイッチング素子には最先端の低損失第四世代IGBTチップを適用した。さらにエアコンの運転条件をもとにチップサイズの最適化を行い，低損失化，高速スイッチングを実現した。

(4) シャント抵抗検出方式過電流保護

IPMのNライン電流をシャント抵抗で検出する過電流保護方式を採用し，高精度で温度特性の良い過電流保護回路を実現した。また，シャント抵抗の両端をIPMの外部に出すことにより外部から過電流保護レベルの設定，調整が可能である。

(5) 銅ベースレスDBC絶縁基板構造の採用

DBC（Direct Bonded Copper）絶縁基板構造を採用し，従来のアルミ（アルミニウム）絶縁基板構造に比べて大幅な絶縁層間の漏れ電流の低減を実現した。さらに従来，DBCを支えている銅ベースをなくすことにより，軽量・小形化，組立工数の削減，低価格化を実現した。

3.1 マルチチップモジュールの実現

従来のIPMではICを設計後，実際にIGBTチップと組み合わせてIPM全体の設計，評価を行っていた。このため，制御回路はIC以外の追加外部回路でIGBTの駆動能力や各種保護機能の調整，ノイズ対策などを行うこととなり，IPMを構成する電子部品の数が多く，小形化，低価格化を実現するには限界があった。

表1　顧客ニーズとIPMの開発アイテム

顧客ニーズ	デバイスへの要求	IPM開発アイテム
省エネルギー化	低損失化	第四世代IGBTの適用
小形化	駆動回路，保護回路内蔵	専用ICの開発
低価格化	コンパクト化	マルチチップモジュールの実現
高信頼性の確保	高精度な保護回路	シャント抵抗検出による過電流保護の適用
	高機能な保護回路	IGBTチップ温度検出による過熱保護の実現
漏れ電流の低減	絶縁層間の静電容量の低減	DBC基板構造の適用

そこで，これまでのIPMの開発経験を生かし，以下に記す技術を駆使して専用ICを開発し，IGBT，FWD（Free Wheeling Diode）およびICといったシリコン半導体チップのみの構成によるIPM，すなわちマルチチップモジュール形IPMを実現した。

(1) IGBTとICの特性を組み合わせて行うミックスモードシミュレーション技術を確立し，専用ICの最適設計を行った。

(2) 従来のIPMでIC周辺に外付けしていたフィルタ回路をICに集積し，各回路ブロックの基準電源にフィルタ回路を構成した。これにより各回路ブロックへのノイズの侵入を防ぎ，配線パターンの影響を受けにくくし，ノイズ耐量を向上させた。

(3) IC内部のIGBT駆動回路と各種保護機能回路のグラウンド配線パターンを分離することによって，IGBTのスイッチングノイズの影響を少なくし，保護回路の誤動作を防止した。

(4) 制御回路をすべて専用設計のICに集積した。さらに下アーム側は3素子分の回路を1チップに集積したことにより，IC内部の安定化電源，基準電源を共通化し，ICを小形化することができた。この結果，従来のIPMのようなIC外部の複雑な制御回路配線がなくなり，最小スペースでシンプルに回路配線をレイアウトすることができ，コンパクトなパッケージおよび高ノイズ耐量を実現した。

(5) 産業分野ではキャリヤ周波数の高周波化に伴い，高価な高周波用ホトカプラを通常使用している。一方，エアコン用インバータのキャリヤ周波数は一般的に3kHz程度の低周波で駆動するため，低価格な低周波用のホトカプラを使用する。この場合，ターンオフ時間を短くするため活性領域で動作させる必要があり，これに対応するためにICの入力回路を電流駆動形とした。

3.2 高精度・高機能過熱保護の実現

3.2.1 ケース温度過熱保護の課題

IGBTチップの破壊の主要因の一つに，IGBTの損失増大による異常発熱がある。従来のIPMではモジュール内部絶縁基板上に温度センサ（サーミスタ）を搭載し，IGBTチップの温度を間接的に検出して熱破壊に対する保護を行ってきた（ケース温度過熱保護機能）。

しかし，急激なIGBT損失の増加によりチップ温度が上昇した場合，**図3**に示すように熱が基板に伝わって温度センサに達するため，**図4**に示すようにセンサの温度がIGBTチップの温度上昇に追随できない。したがって，従来のケース温度検出方式ではすべての条件において熱破壊を防ぐことができなかった。

3.2.2 チップ接合温度検出過熱保護の開発

この問題を解決するために，部分的SOI（シリコンオンインシュレータ）技術を適用してIGBTチップ上に温度検出素子を構成し，IGBTチップの接合温度を直接検出し保護する新技術を確立した。これにより，すべての場合の

図３　モジュール内の熱の伝達経路

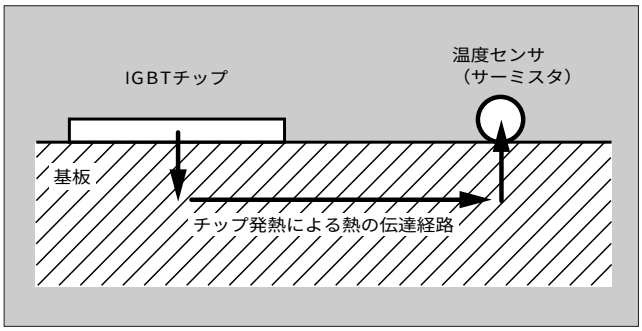
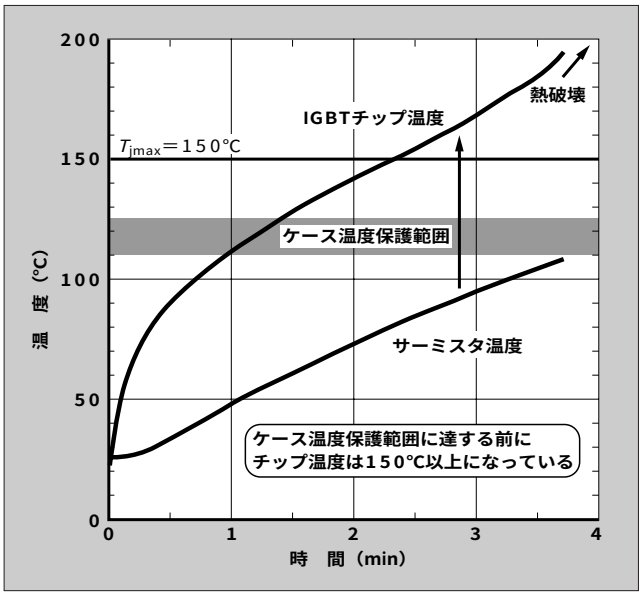


図４　IGBT チップおよびサーミスタの温度上昇カーブ
（モータロック時）



IGBT チップ異常発熱に対し保護可能となり，高信頼性と破壊フリーを実現した。

3.3　第四世代 IGBT チップの適用と最適化

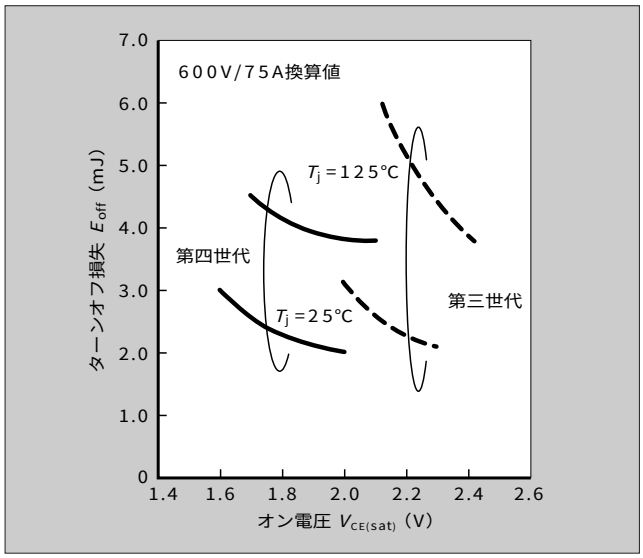
3.3.1　エアコン分野における IGBT 化の課題

産業分野では高効率化，低騒音化を目的にインバータ運転条件の一つであるキャリヤ周波数の高周波化が進み，現在では主に 15 kHz 程度で運転している。一方，エアコン分野においてはコンプレッサモータの漏れ電流低減などの問題から，現在でも 3 kHz 程度と低く抑えられている。このためエアコン用パワーデバイスにおいては，IGBT よりオン電圧の低い BJT のほうが総発生損失を小さくできるため，IGBT 化への大きな障害となっていた。つまり，BJT から IGBT へ置換えを進めるにはデバイスの発生損失の低減と低価格化の実現が重要なポイントとなる。

3.3.2　第四世代 IGBT の開発

LSI 微細加工技術を導入して，IGBT のセルパターンを微細化することで飽和電圧を下げ，ターンオフ損失とのトレードオフの関係を改善してきた。富士電機では，1992 年に第三世代 IGBT モジュールを開発し，市場へ大きく展開してきたが，最近になりさらなるトレードオフ改善，低

図５　IGBT トレードオフカーブ



損失化の要求が強くなってきた。そこで，最新の微細加工技術を駆使した第四世代 IGBT の開発に着手した。**図５**に第三世代および第四世代 IGBT のトレードオフカーブを示す。

3.3.3　エアコン用 IGBT チップの最適設計

今回，新規に開発した第四世代 IGBT チップを製品として初めて適用し，低損失化を図った。また，エアコンの運転条件をもとに発生損失シミュレーションを実施し，特性とコストの両面において高パフォーマンスを発揮できるような IGBT チップの最適設計を行った。

図６に BJT，第三世代 IGBT モジュールおよび第四世代 IGBT チップを搭載した IPM の発生損失シミュレーション結果の比較を示す。

3.4　シャント抵抗検出方式過電流保護の採用

近年のエアコンは省エネルギー化を目的に DC ブラシレスモータ（以下，DC モータという）形のコンプレッサを多く適用してきている。この DC モータのロータ部は永久磁石で，ステータ部の電流がある一定レベルを超えるとその磁力がなくなってしまう（減磁）。これを防ぐために，IPM の過電流保護レベルはこの減磁電流値以下で精度良く設定されなければならない。

一方では，コンプレッサモータは製品として初めから室外機に組み込まれインバータ回路に接続されているため，電源の地絡事故を初めから想定していない。

こういったニーズや実情を踏まえ，本製品では従来の IGBT センス電流検出方式ではなく，IPM の N ラインに流れる電流をシャント抵抗で検出する方式を採用した。これにより，高精度で温度特性の良い過電流保護を実現した。

また，種々の電動機に対応するためにシャント抵抗の両端を IPM 外部に電極端子として出し，IPM 外部からでもこの端子にシャント抵抗を付けることで過電流保護のレベルを調整できる構成とした。

図６　発生損失シミュレーション結果

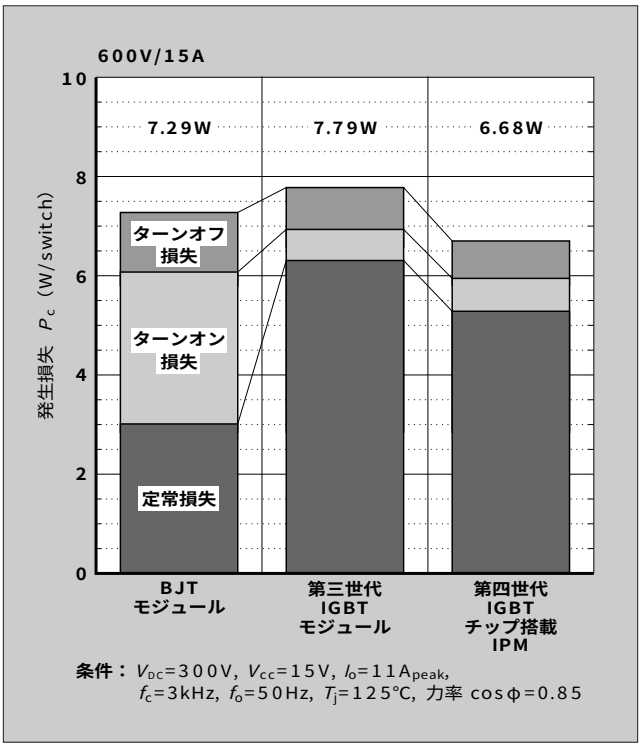


図７　絶縁基板の断面図の比較

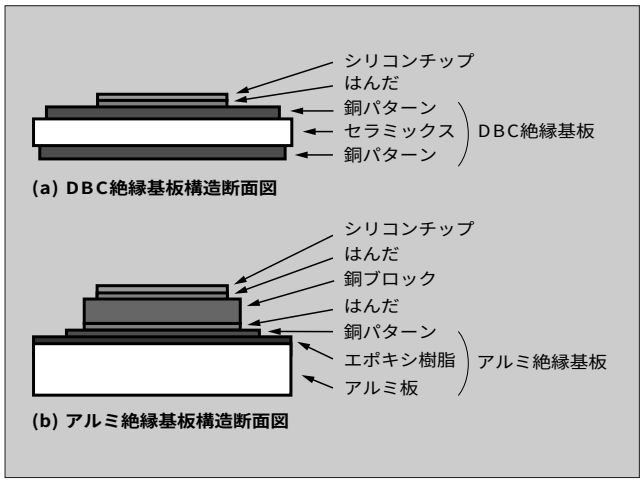
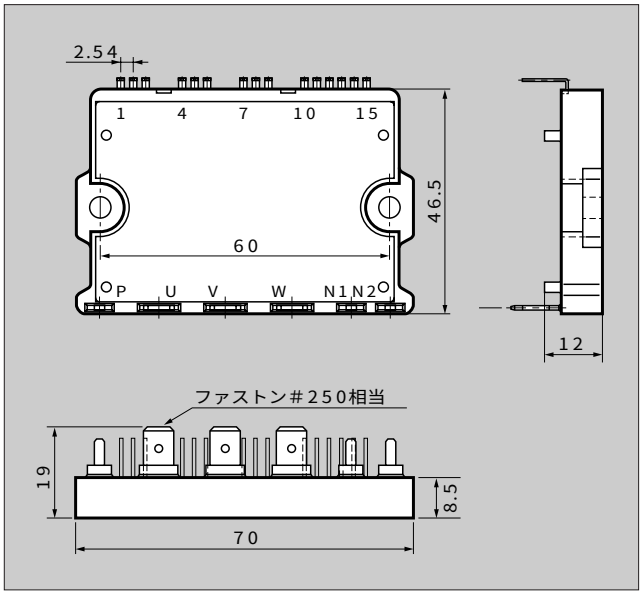


図８　IPM の外形図（P616）



3.5　銅ベースレス DBC 絶縁基板構造の採用

3.5.1　基板構造に関する課題

エアコンなどの家庭電化製品は製品の筐体（きょうたい）から接地アースに流れる電流（漏れ電流）の低減が重要な課題である。そのほとんどは電動機からの漏れ電流であるが，モジュールの絶縁基板を通して流れる電流も決して小さいものではない。モジュールの漏れ電流は，絶縁基板のモジュール内部配線パターンとベース面との間で形成されるコンデンサ成分（静電容量）と，パワーデバイスのスイッチングによる電圧変化 dv/dt が原因となって発生する。

先述したようにパワーデバイスは BJT から IGBT へと移り変わり，そのスイッチング速度は急速に速くなってきたが，一方ではそのときの dv/dt も大きくなった。また，従来の小容量分野のモジュールにはアルミ絶縁基板を主に適用しているが，一般的にこの絶縁層間の静電容量は大きい。

3.5.2　DBC 絶縁基板構造の採用と銅ベースレス化

この問題を解決するために，50 A 以上のモジュール構造で主に適用されている DBC 絶縁基板を本製品にも適用した。DBC 絶縁基板は，アルミ絶縁基板に比べて絶縁層間の静電容量が非常に少ない。

また，モジュールでは DBC 絶縁基板の強度を保つために，その下にはんだ付けにて銅ベースを接合している。本製品では，組立時の温度とチップ下のはんだを最適化したことで DBC 基板の強度を十分に確保することが可能となり，銅ベースレス構造を実現した。これにより軽量・小形化，組立工数の低減，低価格化を実現した。**図７**にアルミ絶縁基板と銅ベースレス DBC 絶縁基板の断面図の比較を示す。

この結果，高速スイッチングの IGBT を適用したにもかかわらず，アルミ絶縁基板形 BJT に比べモジュールの漏れ電流を半分以下に低減することができた。また，DBC 絶縁基板構造の適用により，熱抵抗もアルミ絶縁基板構造に比べて約 50 %低減することができた。

4　小容量 IGBT-IPM の系列

4.1　エアコン用小容量 IPM の系列化

表２に今回開発したエアコン用小容量 IGBT-IPM の系列，主要特性および内蔵機能の一覧を示す。ルームエアコンの 6 畳用からワイドルームタイプまでの幅広い機種に対応できるよう 3 形式を系列化した。**図８**に外形図を示す。また，**図９**には IPM 内部等価回路，**図10**には適用応用回路例を示す。

表２　エアコン用IPMの系列，特性および内蔵機能

形　式	エアコン適用例	主要特性					相	内蔵機能						パッケージ
		V_{DC} (V)	V_{CES} (V)	I_C (A)	P_C (W)	$V_{CE(sat)}$ 標準（V）		Dr	UVT	OCT	SCT	T_j - OHT	ALM	
6MBP15RY060	6～8畳用	450	600	15	40	2.0	上アーム	○	○	×	×	○	×	P616
							下アーム	○	○	○	○	○	○	
6MBP20RY060	10～12畳用	450	600	20	63	2.0	上アーム	○	○	×	×	○	×	P616
							下アーム	○	○	○	○	○	○	
6MBP30RY060	ワイドルーム用	450	600	30	85	2.0	上アーム	○	○	×	×	○	×	P616
							下アーム	○	○	○	○	○	○	

Dr：駆動回路，UVT：駆動電源電圧不足保護，OCT：過電流保護，SCT：短絡保護，T_j-OHT：IGBT接合温度保護，ALM：アラーム信号出力，○：内蔵，×：内蔵しない

図９　IPM の内部等価回路図

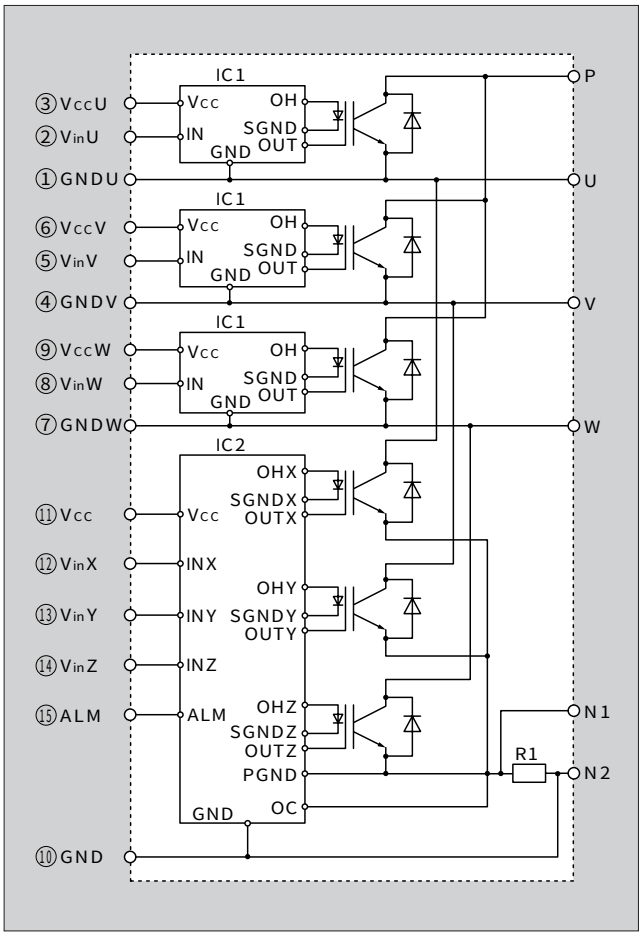
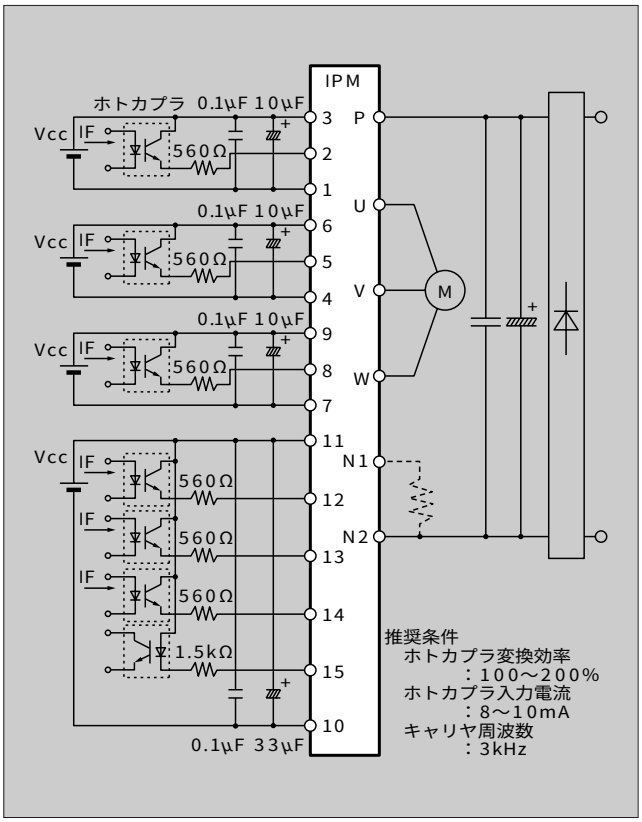


図10　IPM の適用応用回路例



4.2　他の機種への適用

最近ではこのインバータ化の波は，「省エネルギー，静音」をキャッチコピーに冷蔵庫や洗濯機の分野へも押し寄せてきている。これらの製品はエアコン室外機と異なり家の中で使用するため，低騒音化のためにキャリヤ周波数の高周波化が必要となる。そこで，冷蔵庫・洗濯機用 IGBT-IPM はエアコン用をベースとして IC の入力信号回路を高周波用ホトカプラ対応に変更し，使用条件を考慮して最適化を行う予定である。

産業分野向け IGBT-IPM は，高周波対応入力回路とする。また，地絡事故を考慮し，各 IGBT チップで過電流・短絡保護が可能なセンス IGBT 電流検出方式を適用して，最適設計を行う予定である。

4.3　新技術の開発動向

最近では，単電源化とホトカプラレスを目的に IPM への HVIC（High Voltage IC）適用の要求が強くなってきている。これにこたえるべく，現在，富士電機では HVIC 技術の開発を完了し，近く小容量 IGBT-IPM の系列拡大として HVIC 形 IPM を製品化する予定である。

構造においては，さらなる小形化・低コスト化のアイテムとして，新モールド成形構造形 IPM の研究，モールド成形技術の確立に取り組んでいる。

5　あとがき

以上，富士電機のパワーデバイス分野における「地球環境保護」への取組みの一つとして，新規開発した民生分野向け小容量 IGBT-IPM に適用した新技術および特長について紹介した。この IPM はエアコンを中心とした家庭電化製品のインバータ化をさらに推し進め，その省エネルギー化，高効率化，高信頼性化，高付加価値，快適性を実現し，市場の期待に貢献できるものと確信する。

さらに今後は，高調波対策，力率改善などをテーマとして，さらなる高機能化，システム化したパワーデバイス開発の要求は強まるものと予測される。富士電機ではこれらの要求を満足する新製品を開発し，パワーエレクトロニクスの発展に寄与する所存である。

参考文献

(1)　重兼寿夫・宝泉徹：インテリジェントパワーモジュール，電気学会誌，Vol.115，No.2，p.114-119（1995）
(2)　渡辺学・梶原玉男：インテリジェントパワーモジュール，富士時報，Vol.67，No.5，p.268-274（1994）
(3)　山口厚司・市川裕章：新形 IGBT-IPM（R シリーズ）の開発，富士時報，Vol.70，No.4，p.237-242（1997）

最近登録になった富士出願

〔特　　許〕

登録番号	名　　称	発明者
2673966	バッテリ充電器	古田　政美
2674002	電子写真用感光体の画像欠陥評価装置	笠原　正彦 本間　　奨
2674242	ディスク記憶装置の記録媒体の欠陥検査方法	田村　匡章
2674259	中華料理用なべの誘導加熱装置	松永　哲夫 相川　五蔵 黒崎　稔雄
2674263	再熱式蒸気タービンの制御方法	根岸　　徹
2674274	基準電圧回路	佐藤　　満
2674282	電子式電力量計	飛田　厚也
2674302	電子写真用感光体	丸田　幸寛
2674303	電子写真用感光体	黒川　恵市
2674305	電子写真用感光体	折笠　　仁 古庄　　昇
2674312	スラブ形固体レーザ装置	岩崎　慎司 新藤　義彦
2674768	電力変換器のデジタル周波数制御装置	小林　栄作
2674857	ガス遮断装置の遠隔制御装置	石倉　賢二 福田　徳幸
2674867	燃料電池発電装置	原嶋　孝一
2674974	プランジャ形リミットスイッチの駆動機構	久米　秀男 西尾　三男 田坂　　成 渡部　好三
2675670	ガスパイプラインのガス圧力制御方法	福本　武也 関口　哲夫
2676393	積層型圧電素子	河村　幸則
2676448	銅合金注湯炉の注湯ノズル及び注湯ノズル開閉用ストッパ並びにこれらを用いた注湯口装置	林　　静男 金城　秋夫
2676869	無人搬送台車の制御装置	中原　和仁
2676899	MOS 集積回路装置用入力回路保護装置	岩井　圭一 吉田　　豊
2676935	絶縁ゲートバイポーラトランジスタ	上野　勝典
2676937	高調波補償装置	小松木和成
2676949	冷気循環式オープンショーケース	平田　賢二
2676953	映像位置検出装置	西部　　隆
2676955	ヒューズ付き負荷開閉器	石川　　熙
2676956	電磁弁の省電力駆動回路	茂木　　浩 江口　達広
2676962	圧力センサの製造方法	村松　義久
2676964	タービンの保安装置	棚倉　信行
2676974	1cm 深部線量当量検出用電離箱	増井　　馨
2676983	鋼板搬送制御方法	伊藤　伸一
2676985	光学器械の対象検出方式	横山章太郎 西部　　隆
2677009	薄肉チューブと金属チューブとの接続構造	大内　　崇
2677075	ハーフブリッジ形電力変換回路	山田　隆二

小・中容量産業用 NPT–IGBT モジュール

中島　　修（なかじま　おさむ）　　宮下　秀仁（みやした　しゅうじ）　　岩井田　武（いわいだ　たけし）

1　まえがき

電力変換装置の発展にはめざましいものがあり，産業，交通など幅広い分野への適用が進んでいる。この発展のなかでインバータ回路の果たす役割は大きく，性能，信頼性，外形，価格など非常に多くの面において進歩を遂げてきた。最近では，このインバータ回路に使用される電力用半導体素子（パワーデバイス）が，パワーエレクトロニクスのキーデバイスとして特に注目されている。現在，市場の高周波化ニーズに伴い，パワーデバイスの MOS（Metal-Oxide-Semiconductor）ゲート化が進んでいる。IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）は，MOS ゲートを適用した代表的なパワーデバイスであり，その大電流・高耐圧特性からインバータ回路などの変換デバイスとして幅広い分野で用いられている。

このような状況のなかで，富士電機は他社に先駆けて1993年に第三世代 IGBT（J シリーズ）を発表した。その後，さらなる低価格化，使いやすさ，高信頼性化をめざした新第三世代 IGBT（N シリーズ，G シリーズ）を開発し，多くの分野で採用されている。

本稿では新 NPT–IGBT（P シリーズ）の系列と素子技術について紹介する。

2　IGBT モジュールの市場要求

パワーデバイスの適用範囲は，従来の汎用インバータ，無停電電源装置（UPS），数値制御（NC）工作機械，ロボットなどの産業分野だけでなく，家電製品，医療機器，太陽光発電システムなどの民生分野にも拡大している。これらの電力変換機器の市場ニーズとして小形軽量化，高効率化，大容量化，低ノイズが常に求められており，そのインバータ回路に用いられるパワーデバイスには高性能化，高機能化，小形軽量化，大容量化に対する技術革新が求められている。富士電機の新第三世代 IGBT モジュール（N シリーズ）は，低損失，ソフトスイッチング特性，高破壊耐量を併せ持ち，そのトータルバランスと製品系列の豊富さで現状の市場ニーズにかなった性能をそろえている。

しかし，刻々と変化する市場要求に対し，パワーデバイスのさらなる高性能化，高機能化に向けた技術革新が常に必要である。インバータ応用サイドからモジュールに対する要求は次のような項目が挙げられる。

(1)　高キャリヤ周波数でのさらなるスイッチング損失の低減
(2)　スナバ設計の簡素化，短絡時の素子破壊防止のために，さらに広い逆バイアス安全動作領域（RBSOA）と短絡安全動作領域（SCSOA）の確保
(3)　EMI（Electro-Magnetic Interference）規制に対応するソフトスイッチング特性
(4)　簡単に大容量化するための並列接続仕様
(5)　はんだ付け実装を容易にする 6 個組パッケージ
(6)　モジュール製品のさらなるコスト低減

富士電機では，このような要求に対応した IGBT モジュールの開発を推進しており，次章以降に新規開発品の概要について紹介する。

3　NPT–IGBT チップの特徴

3.1　NPT の特徴

NPT（Non-Punch-Through）–IGBT は，空乏層が p 層まで伸びないように n^- 層の厚さを最適設計した構造である。**図 1** に従来の PT（Punch-Through）–IGBT 構造との比較を示す。その特徴としては，次のような項目が挙げられる。

(1)　裏面コレクタ層の濃度を変えることにより，注入効率を制御しているため，ライフタイムコントロールが不要で，チップ特性のばらつきが小さい。また，ターンオフ特性の温度依存性が小さい。
(2)　NPT–IGBT は，ホール注入効率が低く，n^- 層が厚いため，コレクタ–エミッタ間飽和電圧 $V_{CE\ (sat)}$ の温度依存性が**図 2** に示すように正の温度特性である。
(3)　(1)，(2)の特徴から，チップまたは製品の並列接続時の電流アンバランスが起こりにくく，また $V_{CE\ (sat)}$ のラ

中島　　修

IGBT モジュールの開発・設計および応用技術の開発に従事。現在，松本工場半導体開発センターパワー半導体開発部。

宮下　秀仁

IGBT モジュールの開発・設計および応用技術の開発に従事。現在，松本工場半導体開発センターパワー半導体開発部。

岩井田　武

IGBT モジュールおよび IGBT–IPM のパッケージの開発に従事。現在，松本工場半導体開発センターパワー半導体開発部主任。

図１　NPT-IGBT と PT-IGBT のチップ構造

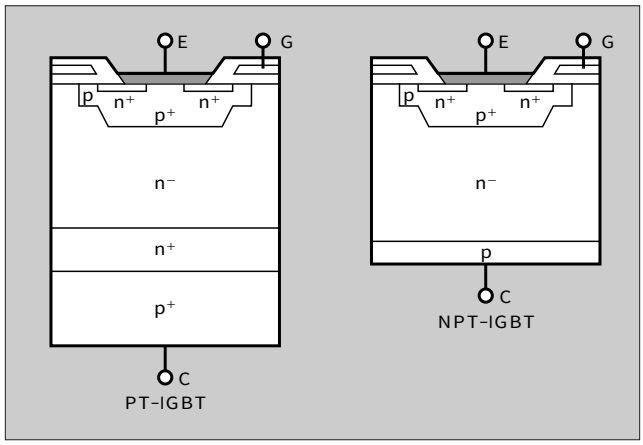


図２　NPT-IGBT の V_{CE}-I_C 温度依存性

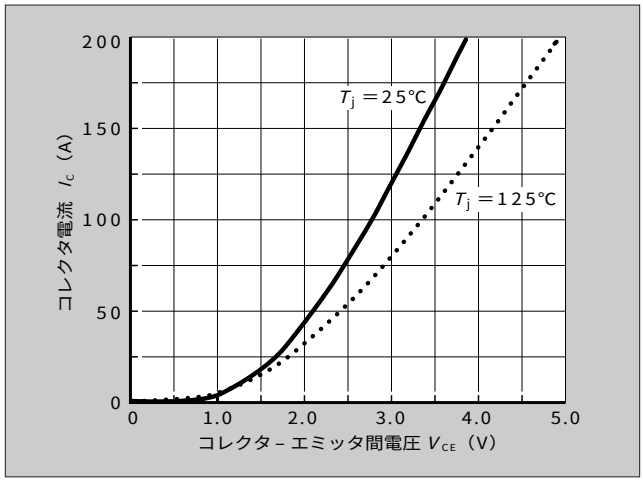
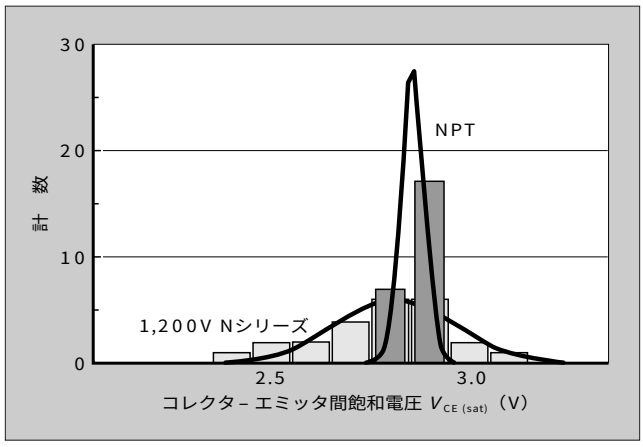


図３　$V_{CE(sat)}$のばらつき比較



ンク分けが不要となり，大容量化が容易に行える。**図３**に PT-IGBT と NPT-IGBT の $V_{CE\ (sat)}$ のばらつき比較を示す。また，**図４**に，2 並列接続したときの電流アンバランス率の比較を示す。

(4)　安全動作領域が広く，高破壊耐量が確保できる。

(5)　FZ（Floating Zone）シリコンウェーハが使用可能となるため，コストパフォーマンスが高い。

図４　並列接続時の電流アンバランス率

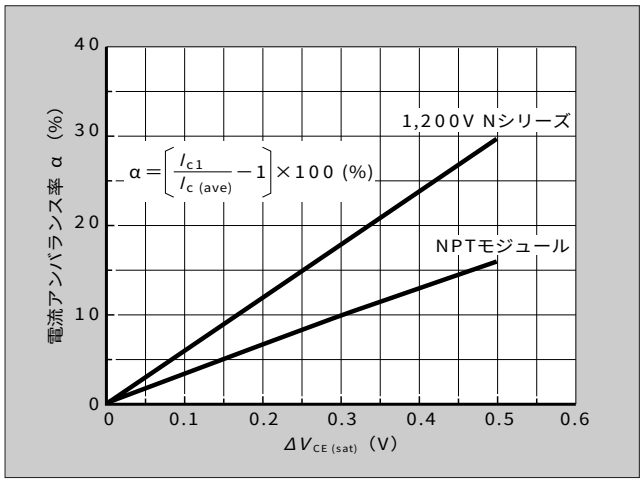
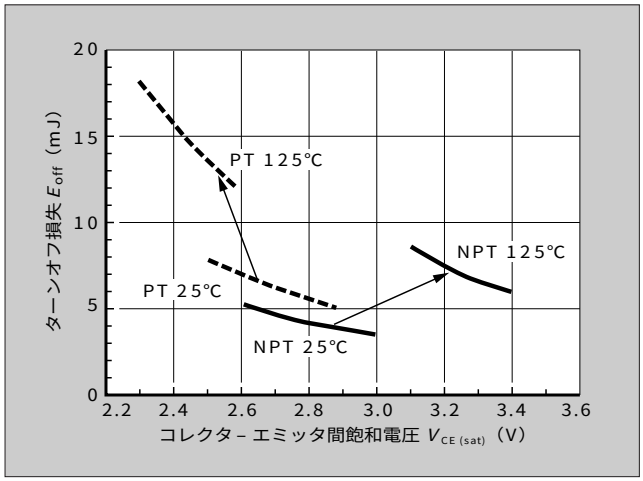


図５　トレードオフ特性



3.2　発生損失の低減

IGBT をインバータ装置に適用する場合，発生損失の低減が重要な項目である。発生損失は定常損失とスイッチング損失に大別され，それぞれ $V_{CE\ (sat)}$ とターンオフ特性に密接な関係がある。NPT は，n^-層を薄くすると $V_{CE\ (sat)}$ が小さくなり，ターンオフ時のテール電流が小さくなるという特性を持っており，損失改善のために素子耐圧を確保しながら n^-層の厚さの最適化を行い，その製造技術を確立し，1,200 V/1,400 V 耐圧を確保しつつ低損失を実現した。

図５にトレードオフ特性を示す。25 ℃の $V_{CE\ (sat)}$，ターンオフ損失 E_{off} は，PT（Punch-Through）-IGBT とほぼ同等であり，高温時の E_{off} は，1/2 の損失を実現した。また，インバータ実装時の総発生損失は，従来品とほぼ同等の発生損失を実現している。**図６**に PWM インバータ発生損失シミュレーションの結果を示す。

3.3　広い安全動作領域と破壊耐量の確保

インバータ装置においてスナバ設計の簡素化と素子保護を確実に行うためには，広い安全動作領域と十分な破壊耐量の確保，短絡電流の低減が必要である。このため，P シリーズモジュールにおいては次の特徴を持つ設計とし

図６　インバータ損失シミュレーション結果

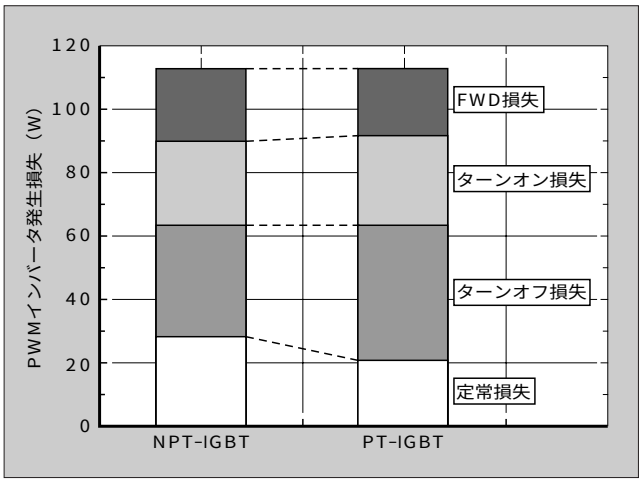
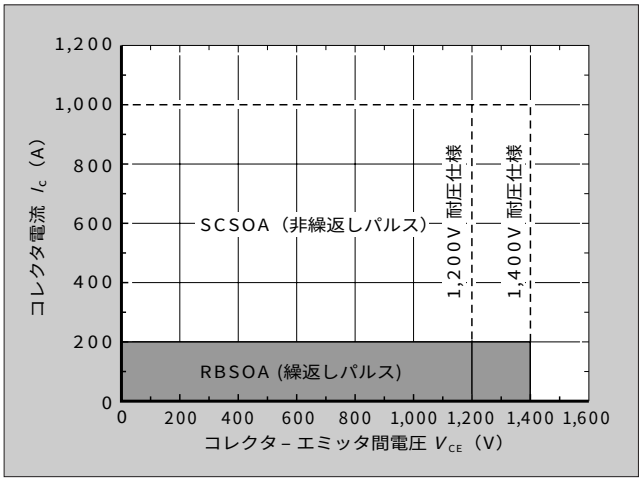


図７　RBSOA と SCSOA



た。

(1)　チップエッジ設計と n^- 層厚さ設計により，耐圧構造の最適化を行った。

(2)　セル構造や $V_{GE\ (th)}$ 設定値の最適化により，IGBT ターンオン時の di/dt の抑制をし，短絡時の電流を抑制した。また，ダイオード逆回復時のサージ電圧の低減効果も得られた。

図７に示すように RBSOA は 2 倍定格電流，SCSOA は 10 倍定格電流までのスクエアを保証可能とした。

④　P シリーズ製品系列

4.1　P シリーズ系列

NPT-IGBT を使用したモジュール（P シリーズ）の製品系列内容と外観を**表１**および**図８**，**図９**に示す。欧米市場では，AC575 V 入力インバータまでの対応が必要であり，1,200 V 素子と同等性能の 1,400 V 素子が求められている。今回，高耐圧化が容易な NPT の特徴を生かし，1,400 V モジュールを系列化した。

一方，小・中容量インバータでのモジュール実装をはんだフロー方式によって，組立工程を簡素化する動きに対応

表１　NPT-IGBTモジュールの系列

形　式	素子数	V_{CES}	$I_{C\ (DC)}$	$V_{GE\ (th)}$（標準）	$V_{CE\ (sat)}$（標準）	V_F（標準）
2MBI50P-140	2	1,400V	50A	8.0V	2.8V	2.4V
2MBI75P-140	2	1,400V	75A	8.0V	2.8V	2.4V
2MBI100PC-140	2	1,400V	100A	8.0V	2.8V	2.4V
2MBI150PC-140	2	1,400V	150A	8.0V	2.8V	2.4V
2MBI200PB-140	2	1,400V	200A	8.0V	2.8V	2.4V
2MBI300P-140	2	1,400V	300A	8.0V	2.8V	2.4V
1MBI600PX-120	1	1,200V	600A	8.0V	2.6V	2.7V
6MBI10PC-120 6MBI10PC-120L	6	1,200V	10A	8.0V	2.8V	2.4V
6MBI15PC-120 6MBI15PC-120L	6	1,200V	15A	8.0V	2.8V	2.4V
6MBI25PC-120 6MBI25PC-120L	6	1,200V	25A	8.0V	2.8V	2.4V
6MBI35PC-120 6MBI35PC-120L	6	1,200V	35A	8.0V	2.8V	2.4V
6MBI50PC-120 6MBI50PC-120L	6	1,200V	50A	8.0V	2.8V	2.4V
6MBI75PC-120	6	1,200V	75A	8.0V	2.8V	2.4V
6MBI100PC-120	6	1,200V	100A	8.0V	2.8V	2.4V

図８　2 個組モジュールの外観

する，はんだ付きピン端子 6 個組モジュール（PC-Pack）を系列化した。

4.2　PC-Pack の特徴

4.2.1　PC-Pack のパッケージ系列

PC-Pack 製品系列と従来品（N シリーズ）の製品系列を**表２**に示す。従来機種の 7 個組（ダイナミックブレーク部を含む）モジュールは 40 A と 50 A の系列であり，また，10 A，15 A，25 A は，PIM の製品系列である。PC-Pack は，これらの定格を 1 系列とし，10 A から 100 A までを 6 個組モジュールとして製品化を行う。

外形としては，10 A，15 A，25 A，35 A，50 A 定格のパッケージ（PC2）と，75 A，100 A 定格のパッケージ（PC3）の 2 系列である。

図９　6 個組モジュールの外観

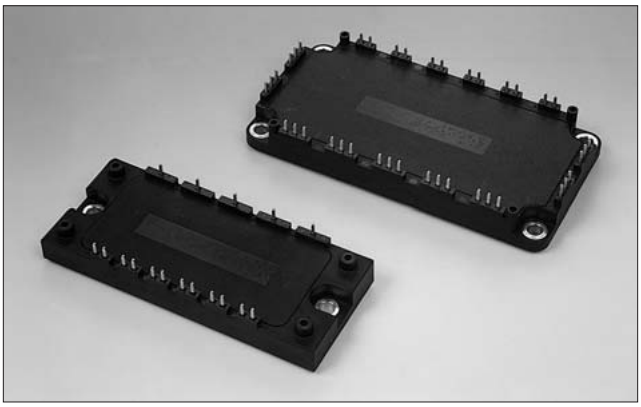


表２　PC-Packと従来品系列比較

電流値	従来品（Nシリーズ）	PC-Pack（Pシリーズ）
10A	7MBR10NF120	6MBI10PC-120
15A	7MBR15NF120	6MBI15PC-120
25A	7MBR25NF120	6MBI25PC-120
35A，40A	7MBI40N-120	6MBI35PC-120
50A	7MBI50N-120	6MBI50PC-120
75A		6MBI75PC-120
100A		6MBI100PC-120

4.2.2　パッケージの特徴

PC-Pack の外形図を**図10**に示す。

PC-Pack の外形的特徴としては，次の項目が挙げられる。

(1)　100 A までの電流定格を 6 個組モジュールとし，インバータでのモジュール実装をはんだフロー方式によって組立可能にするため，はんだ付けが可能なピン端子構造とした。

(2)　四隅にポジショナを付けることにより，プリント基板への固定が容易に行える。

(3)　小形，薄形パッケージで，かつ，75 A と 100 A 素子を 6 個組モジュールとし，装置の小形化，軽量化が可能である。

(4)　主端子と分離した信号端子配列により，主回路の影響を受けにくいピン配置とした。

(5)　PC2 ロングピン構造を採用することにより，多種多様な整流回路（ダイオードモジュール）の使用が可能である。

4.2.3　内部構造

従来品モジュールの内部構造と PC-Pack 内部構造の比較を**図11**に示す。従来品の構造では，IGBT，FWD（Free Wheeling Diode）のおのおのにワイヤを掛け，端子ケースを DBC（Direct Bonding Copper）基板にはんだ付けする構造である。それに対し，PC-Pack の構造は，端子ケース，DBC 基板，チップをワイヤで接続（ステッチワイヤの導入）することにより，パッケージ構造の簡素化，小形化を実現した。また，ワイヤで接続するため組立が容易となり，組立工数の削減が可能となった。

図10　6 個組モジュールの外形図

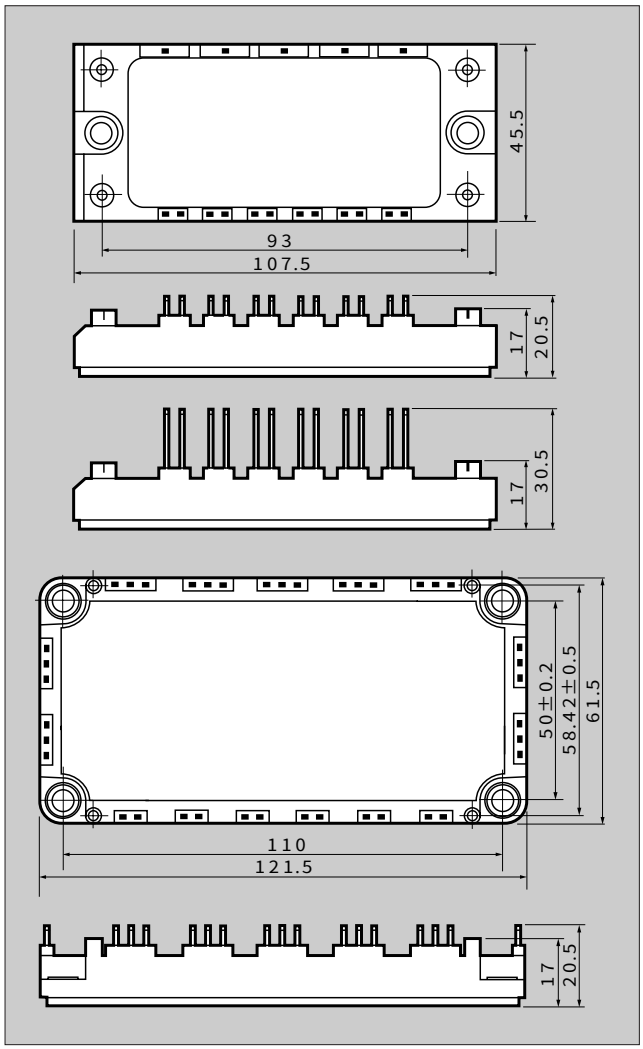
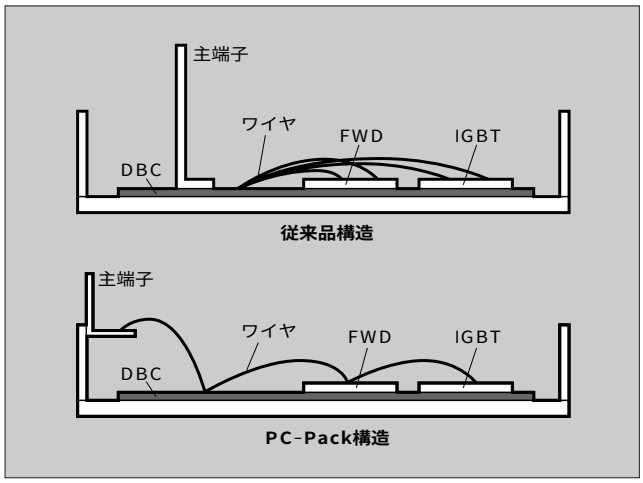


図11　内部構造比較図



5　今後の展望

NPT-IGBT の優れた特徴を生かし，さらに性能向上をめざし，チップのセルサイズ微細化と，n⁻層の薄層化によ

り，第四世代 IGBT 技術を開発中である。

また，より使いやすいモジュール製品を提供するため，PC-Pack と同サイズの PIM をラインアップする計画である。

⑥ あとがき

NPT-IGBT モジュール（P シリーズ）の製品系列および新技術について紹介した。これらのモジュールは，既存の適用分野はもちろん，新分野へ適用し，装置の性能向上，設計の容易性に寄与するものと考える。

富士電機は，今後さらに技術革新を重ね，パワーデバイスの高性能化，高機能化，高信頼性化に取り組み，多様化する市場要求にあった製品を開発していくことにより，パワーデバイスのさらなる発展に貢献していく所存である。

参考文献

(1) 宮下秀仁ほか：IGBT モジュール，富士時報，Vol.70，No.4，p.231-236（1997）

(2) 有川典男ほか：インバータ用半導体デバイス，富士時報，Vol.68，No.5，p.289-296（1995）

技術論文社外公表一覧

標題	所属	氏名	発表機関
Identification of Fuzzy Integral Model Using the Bayesian Method	富士ファコム制御 〃	後藤 賢治 石丸 恵一	11th International Federation of Automatic Control (IFAC) Symposium on System Identification (1997-7)
Countermeasures for Hydraulic Load Variation in Intermittently Aerated 2-Thank Activated Sludge Process for Simultaneous Removal of Nitrogen and Phosphorus	富士電機総合研究所 〃	森 豊 佐々木康成	International Association on Water Quality (IAWQ) 7th ICA Workshop, Water Science and Technology (1997-7)
Service Water Quality Monitor Including Hue and Colouration Grade	富士電機総合研究所 〃 公共システム事業部	平岡 睦久 野田 直広 早川千代治	
Direct Linked Type Frequency Changer Based on DC-Clamped Bilateral Switching Circuit Topology	富士電機総合研究所 〃 〃	三野 和明 大熊 康浩 黒木 一男	IEEE-IAS Annual Meeting (1997-10)
Development of the Rare-Earth Permanent Magnet Synchronous Machine	富士電機総合研究所	奥山 吉彦	CIGRE/IEE Japan Joint Colluquim on Rotating Electric Machinery Life Extension and Availability Improvement, and Development of New Machinery (1997-10)
Hight Concentration Tube Type Ozone Generator	富士電機総合研究所 〃 鈴鹿工場 公共システム事業部	石岡 久道 甲斐 一樹 西川 孝也 酒井 英治	13th Ozone World Conference (1997-10)
Film Substrate Modules	富士電機総合研究所 〃 〃 〃 〃 〃 〃 〃 〃	吉田 隆 藤掛 伸二 加藤 進二 佐藤 広喜 田淵 勝也 高野 章弘 市川 幸美 酒井 博 夏目 文夫	Japan-Indonesia Joint Seminor on Photovoltaic (1997-11)
Latest Developments in Photovoltaics in Japan	富士電機総合研究所 〃	浜 敏夫 市川 幸美	第 2 回 ASEAN 再生エネルギー会議（1997-11）
Construction of Consulting Server	S I センター	萩原 賢一	Web Net '97 Conference (1997-11)
Quantitative ICTS Measurement of Interface States at Grain Boundaries in ZnO Varistors	富士電機総合研究所 〃	向江 和郎 田中 顕紀	Materials Research Society Fall Meeting (1997-12)
A New Concept for High Voltage MCCT with No J-FET Resistance by Using a Very Thin Wafer	富士電機総合研究所 〃 〃 〃 〃	岩室 憲幸 岩穴 忠義 原田 祐一 小野沢勇一 関 康和	International Electron Device Meeting '97 (IEDM) (1997-12)
Simultaneous Observation of Current Distribution and Droplet Behavior in PEFC	富士電機総合研究所 〃	木下 伸二 卜部 恭一	Gordon Research Conference (1998-1)

大容量産業用・車両用 NPT-IGBT モジュール

田久保　拡（たくぼ　ひろむ）　　石井　憲一（いしい　けんいち）　　沖田　宗一（おきた　そういち）

1　まえがき

汎用インバータ，無停電電源装置（UPS）をはじめとし，工作機械や産業用ロボット，電気鉄道などさまざまな分野にパワーエレクトロニクス技術が浸透し，その発展にはめざましいものがある。パワーエレクトロニクス技術を駆使した電力変換装置には，①小形軽量化，②高効率化，③低騒音化，などが常に要求されている。そして変換装置に適用される電力用半導体素子（パワーデバイス）にも近年では，①高性能・低損失，②高機能化，③大容量化，などの要求が高まっている。

このような市場動向のなかで，①高速スイッチングかつ低損失，②駆動回路設計が容易，③並列接続による大容量化が容易，などバランスがとれている素子であることから，IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）が，メインデバイスとして小容量から産業用・車両用などの大容量分野まで幅広く適用されている。富士電機では，市場のさまざまなニーズにきめ細かく対応できるよう，N シリーズ IGBT をはじめとし，小容量 G シリーズ，中大容量・車両用として NPT チップ技術を駆使した 1,200/1,400 V-P シリーズおよび 1,800 V-IGBT モジュール，そして新幹線への搭載をターゲットに 2,500 V 平形 IGBT などの開発・系列化を推進している。

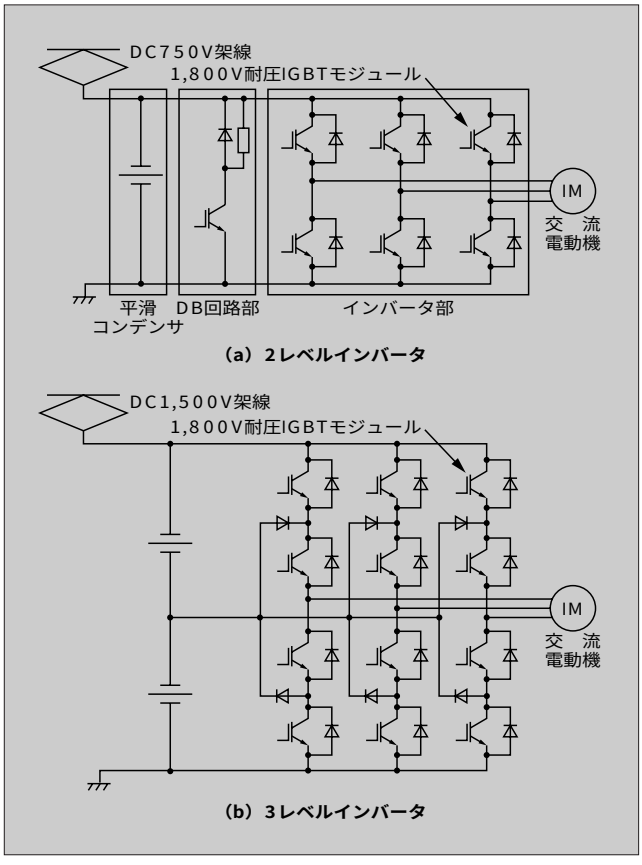
本稿では，大容量産業用や車両用などの電力変換装置の動向と，それらへの適用を狙いとした富士電機の新形 IGBT，1,200 V，1,400 V/600 A 1 個組モジュール（1MBI600PX-120/140）ならびに 1,800 V/600 A チョッパモジュール（1MBI600PF-180）の概要とその技術開発について紹介する。

2　大容量インバータの動向

2.1　インバータの主回路構成

本節では，大容量変換装置として，車両に適用される駆動装置を例にとり，インバータの構成について説明する。2 レベルインバータの基本的な主回路構成を**図 1**(a)に示す。これは，1,800 V 耐圧の素子を使い，直流 750 V 架線から供給される電力を交流に変換して，電動機を駆動する装置である。この回路方式は，インバータ直流部の電圧を平滑化する平滑コンデンサ部，直流を逆変換して交流出力を得るインバータ回路部，および電動機の回生電力による直流電圧の上昇や架線異常時の過電圧を防止するためのダイナミックブレーキ部から構成されており，現在広く適用されている。また，3 レベルインバータ回路の基本主回路構成を**図 1**(b)に示す。この方式は，2 レベルインバータに比べ出力できる電圧レベル数が多く，よりきめ細かい制御ができるため，電動機騒音や乗り心地の改善が可能である。ま

図 1　車両用駆動装置の回路構成



田久保　拡

IGBT モジュールの開発・設計および応用技術の開発に従事。現在，松本工場半導体開発センターパワー半導体開発部。

石井　憲一

IGBT チップの開発・設計に従事。現在，松本工場半導体開発センターパワー半導体開発部。

沖田　宗一

IGBT モジュールの構造開発・設計に従事。現在，松本工場半導体開発センターパワー半導体開発部。

た，同じパワーデバイスを適用した 2 レベルインバータに比べ 2 倍の直流電圧に対応できることから，直流 1,500 V 架線のインバータなどに適用されている。

2.2 大容量インバータ用パワーデバイスの動向

従来，このような大容量産業用・車両用インバータに適用されるパワーデバイスは，高耐圧・大電流化が容易な GTO サイリスタが主流であり，小・中容量インバータには耐圧 500 ～ 1,200 V クラスの BJT（Bipolar Junction Transistor）モジュールが主に適用されてきた。その後，BJT と MOSFET の特長を兼ね備えた IGBT が登場することにより，BJT から IGBT への切換が進んでいる。近年では IGBT の高耐圧チップ技術の進展により，従来 GTO サイリスタが適用されていた高耐圧・大容量分野までもが IGBT 化されつつある。また，構造面においても，サイリスタのような平形構造に比べ複雑・高価な圧接構造が不要で，組立・取扱いおよび保守が容易な絶縁形モジュール構造が注目されており，IGBT モジュールの適用分野は飛躍的に拡大している。

2.3 大容量デバイスに対する市場要求

富士電機は先に述べたような大容量変換装置のニーズを満足し，一般産業用はもとより，地下鉄や新幹線など車両駆動装置まで幅広く対応できるよう，IGBT モジュールや平形 IGBT を製品化し，各種の系列をそろえている。しかし，刻々と変化する市場要求に対し，さらなるパワーデバイスの高性能・高機能化，大容量化などの技術革新が必要である。最近の大容量モジュールに対する要求には次のような項目があげられる。

(1) スナバ設計の簡素化・短絡事故時の素子破壊防止の観点からの広い逆バイアス安全動作領域（RBSOA）と短絡時安全動作領域（SCSOA）の確保
(2) EMI（Electro-Magnetic-Interference）規制に対応できるソフトスイッチング性能の実現
(3) さらなる大容量化のための並列接続技術，あるいは高耐圧・大電流定格品の開発

富士電機では，このような要求に対応した大容量 IGBT の開発を推進しており，今回，1,200 V，1,400 V/600 A 1 個組（1MBI600PX-120/140），および 1,800 V/600 A（1MBI 600PF-180，チョッパタイプ）の新形 IGBT モジュールを開発した。次章以降ではそれらの新規開発品の概要について紹介する。

③ 1,200 V，1,400 V/600 A 大容量 IGBT モジュールの開発

3.1 製品の概要

図 2 に 1MBI600PX-120/140 の外観，**表 1** に 1MBI600 PX-120 の一般定格特性を示す。富士電機の最新 NPT-IGBT 技術を採用し，高速スイッチング・低損失特性で，RBSOA は 2 倍定格電流，SCSOA は 10 倍定格電流までスクエアを確保，また並列接続のための $V_{CE\ (sat)}$ ランク分けが不要で大容量化が容易であること，など数々の特長を備えている。

図 2　1MBI600PX-120/140 の外観

表 1　1MBI600PX-120 の主要定格特性

(a) 最大定格（$T_j = T_c = 25$ ℃）

項　目	記号	最大定格	単位
コレクタ－エミッタ間電圧	V_{CES}	1,200	V
コレクタ電流（DC）	I_c	600	A
絶縁耐圧（1分間）	V_{iso}	AC 2,500	V
接合温度	T_j	＋150	℃
保存温度	T_{stg}	－40～＋125	℃

(b) 電気的特性（$T_j = 25$ ℃）

項　目	記号	条　件	特性値	単位
コレクタ－エミッタ間遮断電流	V_{CES}	$V_{CE} = 1{,}200$ V $V_{GE} = 0$ V	最大 2.0	mA
コレクタ－エミッタ間飽和電圧	$V_{CE(sat)}$	$I_c = 600$ A $V_{GE} = 15$ V	標準 2.85	V
ダイオード順電圧	V_F	$I_F = 600$ A $V_{GE} = 0$ V	標準 2.50	V
IGBTスイッチング時間	t_{on}	$V_{CC} = 600$ V $I_c = 600$ A $V_{GE} = \pm 15$ V $R_G = 2.0\ \Omega$ 誘導性負荷	標準 0.75	μs
	t_{off}		標準 0.65	μs

3.2 NPT-IGBT チップ技術

NPT（Non-Punch-Through）-IGBT とは，空乏層が p 層まで伸びないように n^- 層の厚さを最適設計した構造である。その特長としては，次のような項目があげられる。

(1) ターンオフ特性の温度依存性が小さい。
(2) 出力特性の温度係数が正であるため，並列接続時の電流バランスが良好である。
(3) FZ（Floating-Zone）シリコンウェーハが使用可能となり，トレードオフ最適化のためのライフタイムコントロールが不要で，チップ特性のばらつきが小さい。
(4) (2)，(3)の特長から，並列接続仕様のための $V_{CE\ (sat)}$ ランク分けが不要となり，装置の大容量化が容易である。

さらに，富士電機の NPT-IGBT は以下に説明するような損失改善と必要耐圧の確保・高破壊耐量を両立させている。

(5) n^- 層の厚さの最適設計技術およびチップ厚を 180 μm

図３　1MBI600PX-120 の特性

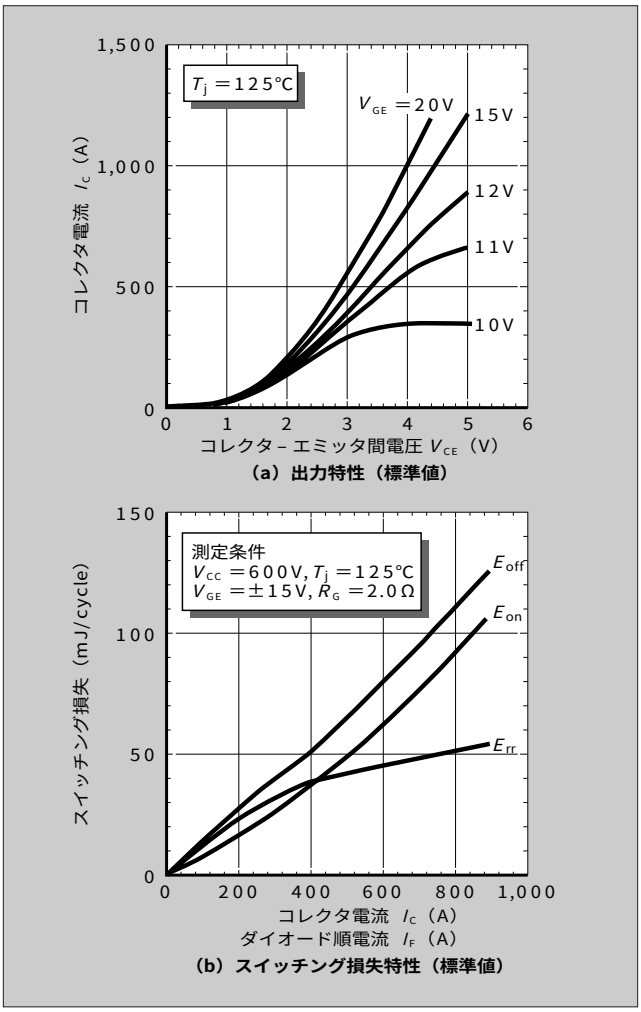
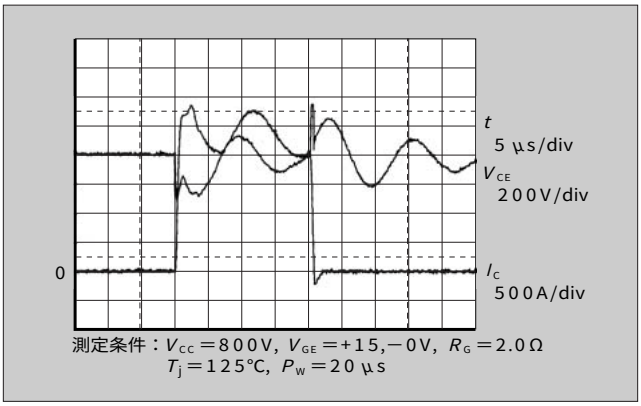


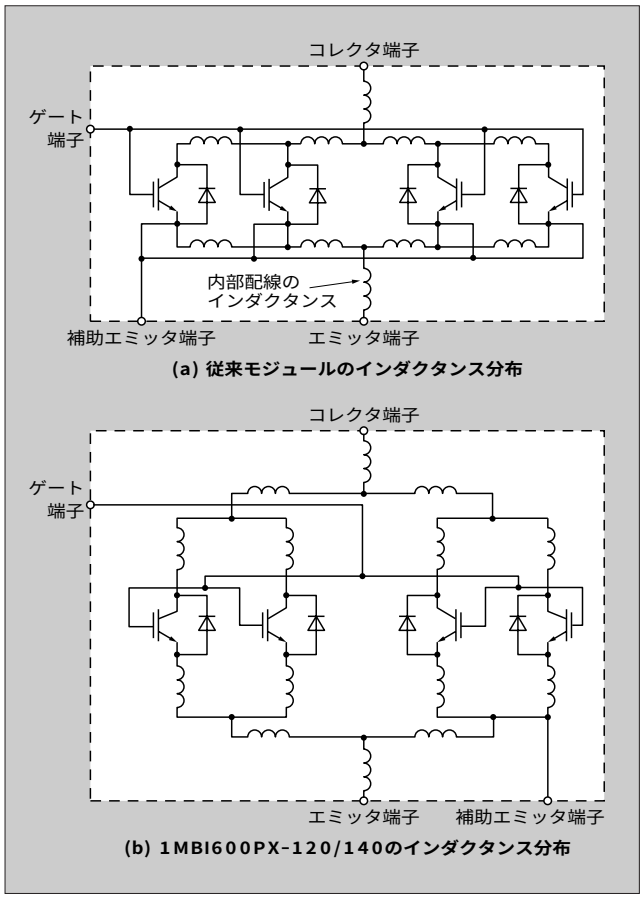
図４　1MBI600PX-120 の短絡動作波形



まで薄く製造する技術を確立することにより，1,200/1,400 V 耐圧を保ちつつ，低損失特性を実現した。**図３**に 1MBI600PX-120 の I_C-V_{CE} 特性，スイッチング損失特性を示す。

(6)　広い RBSOA，SCSOA 特性を確保するため，十分な耐圧構造設計を実施した。また，スナバ設計の簡素化・破壊耐量の向上には，短絡電流を小さくすることが必要である。本開発品では $V_{GE\ (th)}$ の設定やゲート構造・酸化膜などのプロセスを見直すことにより，短絡電流を定格値の 5 ～ 6 倍程度に抑制し，従来の N シリーズの 2 倍以上の短絡耐量を確保した。**図４**に 1MBI600PX-120 のアーム短絡電流波形を示す。

図５　モジュール内部配線の概念図



3.3　高性能パッケージ技術

大容量インバータでは，特にパワーデバイスの信頼性を確保することが重要な技術課題であり，その信頼性は発熱に大きく依存している。一方，パワーデバイスの大容量化を実現するためには，モジュール内部で多数の半導体チップを並列に接続する必要があり，これらの電流バランス・発熱をいかに均等に保ちつつ放熱させるかが長寿命設計のポイントである。このチップ間の電流分担や発熱を均等化するためには，半導体チップ自身の特性ばらつきを抑制すると同時に，パッケージ構造の最適設計が重要となる。以下に 1MBI600PX-120/140 において実施した構造設計について紹介する。

3.3.1　内部の配線インダクタンスの低減

大容量モジュールは大電流を短時間で遮断する性能が要求される。したがって，遮断性能を向上させるためにはモジュール内で発生するサージ電圧を低減すること，すなわち内部配線のインダクタンス分を低減することが重要である。本開発品ではインダクタンス低減手段として並列導体の相互誘導作用を利用し，コレクタ電極とエミッタ電極をできる限り最短かつ平行で近接配置することにより，インダクタンス分を約 18 nH（従来モジュール比で 64 %）に

図6　電流分担の解析結果（シミュレーション）

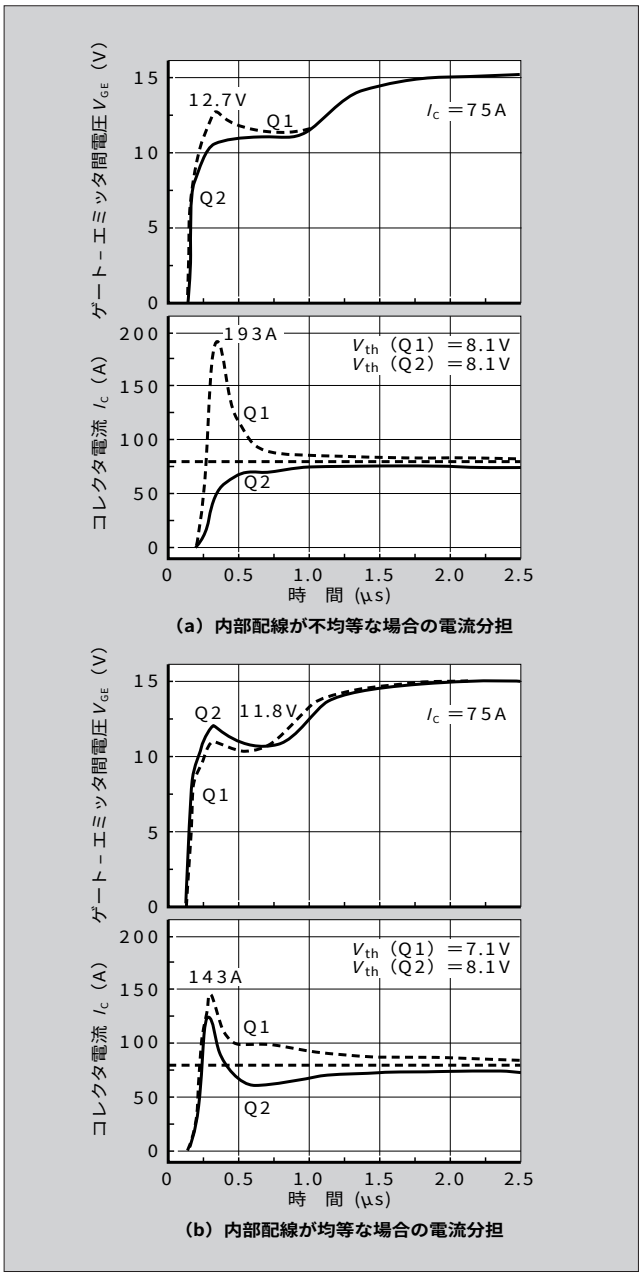


図7　1MBI600PX-120/140 の内部構成

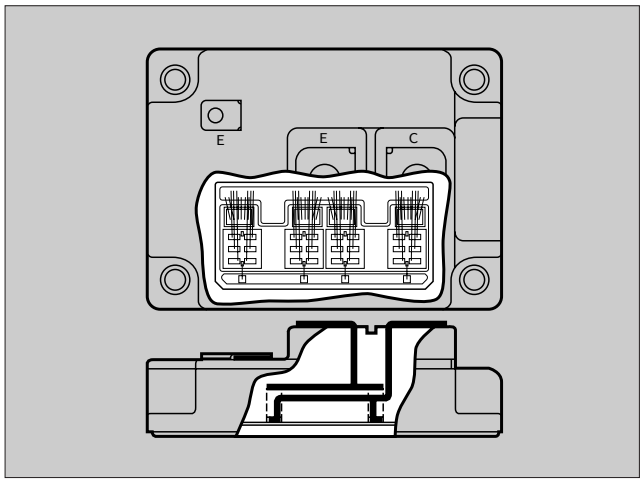
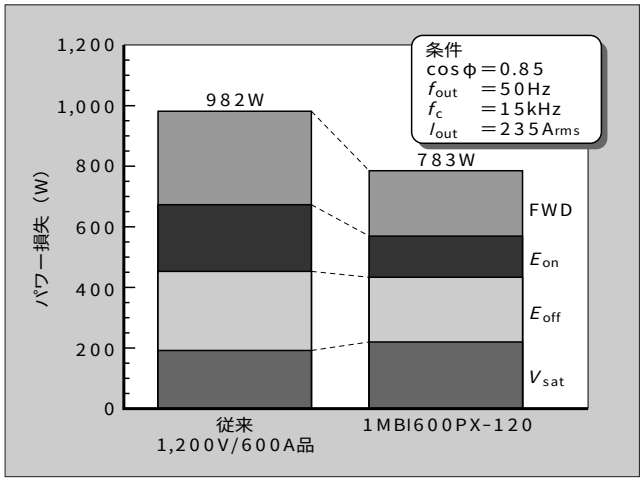


図8　1MBI600PX-120 の発生損失比較



低減した。

3.3.2　電流分担の均等化

チップの電流分担を均等化し，発熱の不均衡を抑制するためには，内部の半導体チップ配置の均等化，および配線レイアウトの対称化が必要である。**図5**(a)に従来のモジュールの内部インダクタンス分布の概念図を示す。**図5**(a)のように各チップ間の配線インダクタンスが不均等であると，スイッチングのような過渡現象時には大きな電流アンバランスを生じる。この様子をデバイスシミュレータにより解析した結果を**図6**(a)に示す。ここでは，$V_{GE\ (th)}$ をそろえているにもかかわらず，並列接続された IGBT チップ Q1, Q2 のゲート電圧およびコレクタ電流は，ターンオン時に大きくばらついてしまうことが分かる。

図7に 1MBI600PX-120/140 の内部構成図を示す。1 枚の絶縁基板上には，IGBT と FWD がそれぞれ 4 枚ずつ適切な位置に配置されている。また，コレクタ，エミッタなどの電極を並列接続された半導体チップ間の中央へ接続し，均等なインダクタンスとなるよう配慮した。**図5**(b)に 1MBI600PX-120/140 の配線インダクタンスの概念図，**図6**(b)に電流バランス解析結果を示す。$V_{GE\ (th)}$ を 1.0 V ばらつかせた解析条件においてもゲート電圧・コレクタ電流はそろっており，各チップのスイッチング動作を均等化することができた。これは，過渡時の電流バランスがデバイス特性よりも，パッケージ性能に大きく依存していることを示している。一方，ゲート駆動回路と接続される補助エミッタ端子についても，内部配線の対称性に着目し，絶縁基板上エミッタ電極の 1 か所のみに接続することにより，スイッチング動作の均等化と内部配線の簡素化を図っている。

3.3.3　構造の最適化による損失の低減

上で述べた内部の配線インダクタンスの低減と電流分担の均等化により，スイッチングスピードの改善およびスイッチング時のサージ電圧や損失を低減することができた。これは，チップ本来の性能がパッケージにより制約されることが少なくなったことを表している。1MBI600PX-120 と従来 1,200 V/600 A 品とのインバータ損失比較を**図8**に示す。スイッチング周波数 15kHz 時に，総合発生損失は約

表2　1MBI600PF-180の主要定格特性

(a) 最大定格（$T_j = T_c$ ＝25 ℃）

項　目	記号	最大定格	単位
コレクタ-エミッタ間電圧	V_{CES}	1,800	V
コレクタ電流（DC）	I_C	600	A
絶縁耐圧（1分間）	V_{iso}	AC 5,400	V
接合温度	T_j	＋150	℃
保存温度	T_{stg}	−40〜＋125	℃

(b) 電気的特性（T_j ＝25 ℃）

項　目	記号	条　件	特性値	単位
コレクタ-エミッタ間遮断電流	V_{CES}	V_{CE} ＝1,800 V V_{GE} ＝0 V	最大 1.0	mA
コレクタ-エミッタ間飽和電圧	$V_{CE(sat)}$	I_C ＝600 A V_{GE} ＝15 V	標準 3.50	V
ダイオード順電圧	V_F	I_F ＝600 A V_{GE} ＝0 V	標準 2.40	V
IGBTスイッチング時間	t_{on}	V_{CC} ＝900 V I_C ＝600 A V_{GE} ＝±15 V R_G ＝＋6.3/−3.3 Ω 誘導性負荷	標準 0.80	μs
	t_{off}		標準 1.40	μs

図9　1MBI600PF-180 の内部結線図

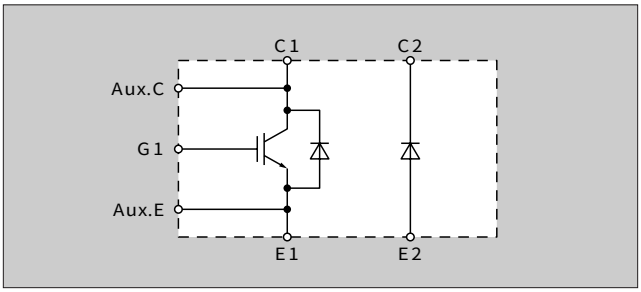
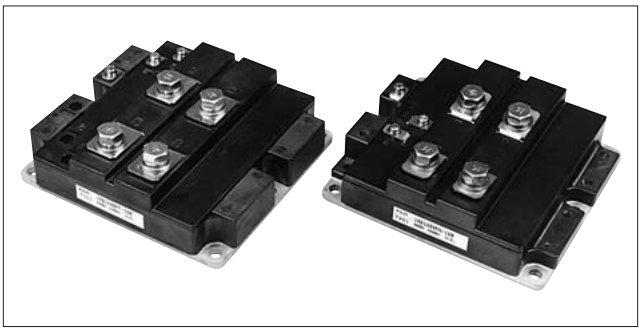


図10　1MBI600PF-180（左）と1MBI800PN-180 の外観



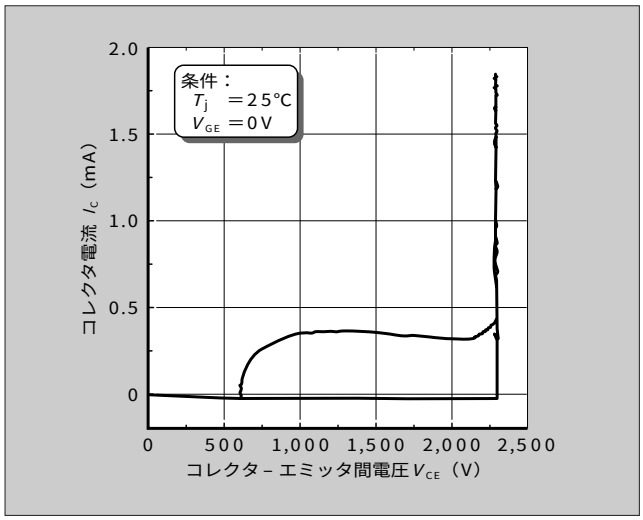
20 %低減された。

4　1,800 V/600 A 大容量チョッパモジュールの開発

4.1　製品の概要

富士電機では，特に車両用として 750 V 架線 2 レベルまたは，1,500 V 架線 3 レベルインバータに適用できる大容量 1,800 V 系 IGBT モジュールの系列化を推進しており，800 A 1 個組モジュール（1MBI800PN-180）の開発を完了している。今回，この 800 A モジュールを適用した 2 レベルインバータのブレーキ部が構成できるよう，1,800 V/600 A チョッパモジュール（1MBI600PF-180）の製品化を行った。

図11　1MBI600PF-180 の耐圧特性



4.2　製品の設計内容

表2 に 1MBI600PF-180 の主要特性を示す。**図9** にその内部結線図，**図10** に 800 A モジュールとともにその外観を示す。定格容量と外形の大きさにおいて，富士電機の IGBT モジュール系列のなかでも最大級のものである。大容量モジュールとして十分なパフォーマンスを得るため，以下の点に留意した設計を行った。

4.2.1　絶縁耐圧の確保

一般的に IGBT モジュールは，半導体チップと金属ベース間にセラミックス製の絶縁基板を挿入して電気絶縁を確保している。本開発品は，絶縁基板材料とその厚さ，縁面の絶縁距離の最適化を図りつつ，半導体チップの放熱性にも配慮した絶縁構造設計を行った。本開発品では交流 5,400 V の絶縁耐圧を確保している。

4.2.2　電流分担・放熱性の均等化

1MBI600PX-120/140 と同様に，モジュール内部の半導体チップ配列を均等化し，配線構造の簡素化とインダクタンスの低減に配慮した設計を行った。パッケージ外形は 800 A モジュールと同等の寸法とし，同一インバータスタックへの組込みを容易なものとした。

4.2.3　高耐圧化と低損失化の両立

IGBT と FWD の高耐圧化のためには，前章で述べた NPT チップの n^- 層の最適化のほかに，結晶の比抵抗やチップ表面での耐圧を確保するためエッジ部分の最適設計が要求される。本開発品では 800 A モジュールのチップ設計を基本とし，さらに損失と耐圧のトレードオフの最適化を行った。**図11** に耐圧特性を示す。アバランシ電圧は 2,300 V 付近で，定格特性に対し十分高い数値を確保した。

4.2.4　長期信頼性の確保

車両用インバータでは，パワーデバイスに要求される寿

命が 20 ～ 30 年と非常に長い。特に，パワーサイクルや温度サイクルでの高信頼性確保が重要である。本開発品では，800 A モジュールと同等以上の信頼性を確保するために，温度サイクル試験時の応力解析を行い，パッケージの変形量が少なく，はんだ接合部に過度な応力が発生しにくい構造設計を行った。駅間運転を想定したパワーサイクル試験に対しても，ワイヤボンディング部の材質・条件を最適化し，十分な接合強度を確保した。

5 あとがき

大容量インバータの動向，および新形大容量 IGBT モジュール，1MBI600PX-120/140，1MBI600PF-180 の概要・設計内容などについて紹介した。これらの IGBT モジュールは，装置性能の向上や大容量化に寄与するものと確信している。

富士電機では，今後もさらに技術革新を重ね，大容量分野での市場要求に合致したパワーデバイスの開発・製品化に取り組み，パワーエレクトロニクス産業の発展に貢献していく所存である。

参考文献

(1) 宮下秀仁ほか：IGBT モジュール，富士時報，Vol.70，No.4，p.231-236（1997）
(2) 長畦文男ほか：車両用半導体デバイス，富士時報，Vol.68，No.5，p.270-274（1995）
(3) 保坂忍ほか：産業用電動力応用プラントの可変速駆動システム，富士時報，Vol.70，No.10，p.516-521（1997）

技術論文社外公表一覧

標題	所属	氏名	発表機関
二輪速度差ユニットと旋回軸による全方向移動車両の開発	富士電機総合研究所 〃 〃 〃 〃	高木　昭 森　俊二 川田　辰実 奥澤　好之 和田　正義	第 15 回日本ロボット学会学術講演会（1997-9）
2.5kV/1.8kA パワーパック IGBT の電気的特性	富士電機総合研究所 〃 〃 〃 松本工場 富士電機総合研究所	吉川　功 高橋　良和 古閑　丈晴 藤井　岳志 桐畑　文明 関　康和	電気学会電子デバイス半導体電力変換合同研究会（1997-9）
酸化物並列導体の電流分流(2)	原子力・環境事業部 富士電機総合研究所	今野　雅行 能瀬　眞一	電気関係学会九州支部第 50 回記念連合大会（1997-10）
酸化物超伝導並列導体における交流損失(2)	原子力・環境事業部 富士電機総合研究所	今野　雅行 能瀬　眞一	
1 サイクル高速真空遮断装置	富士電機総合研究所 〃 吹上工場 機器制御事業部	昆野　康二 磯崎　優 柴田　和郎 石川　熙	電気学会開閉保護・高電圧合同研究会（1997-10）
ベクトル制御適用駆動システムの高性能化	富士電機総合研究所 神戸工場 〃 交通・特機事業部	岩堀　道雄 田村　浩明 神田　淳 相川　洋一	第 34 回鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム（1997-11）
イオン注入後のアニール条件と表面粗さとの相関	富士電機総合研究所 〃 〃	辻　崇 斎藤　明 上野　勝典	SiC 及び関連ワイドギャップ半導体研究会第 6 回講演会（1997-11）
SiC パワー素子への課題	富士電機総合研究所	上野　勝典	
酸化物超電導並列導体における交流損失(3)	原子力・環境事業部 富士電機総合研究所	今野　雅行 能瀬　眞一	第 57 回秋季低温工学・超電導学会（1997-11）
ショットキーダイオードの耐圧構造――富士電機における SiC 研究	富士電機総合研究所	上野　勝典	関西電力(株)主催 SiC 研究会（1997-11）
回生スナバ回路を用いた 1MHz 駆動フォワードコンバータ	富士電機総合研究所 〃 〃	片山　靖 鷁頭　政和 黒木　一男	電子情報通信学会電子通信エネルギー技術研究会（1997-11）
PDP ドライバ IC のプロセス・デバイス技術	松本工場	澄田　仁志	第 8 回パワーデバイス高性能化・インテリジェント化技術調査専門委員会（1997-11）

大容量車両用・産業用平形 IGBT

一條　正美（いちじょう　まさみ）　　関　　康和（せき　やすかず）　　西村　孝司（にしむら　たかし）

1　まえがき

富士電機は，電気鉄道や産業用の各種の高電圧・大容量変換装置への IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）適用の要求にこたえるため，高耐圧・大電流 IGBT の開発を積極的に推進している。このようななか先般は，**図1**に示す 2.5 kV/1 kA 定格の平形 IGBT（一般形式： EMB1001RM-25）を開発し，各種変換装置への適用を推進してきた。

IGBT のコレクタ電流定格は直流定格で表現されるが，GTO（Gate Turn-Off）サイリスタの可制御アノード電流と比較する場合にはパルス定格で比較するのが妥当である。2.5 kV/1 kA の IGBT の電流定格は，2 kA の GTO サイリスタに匹敵することになる。

しかしながら，GTO サイリスタではすでに 4 kA の電流定格の素子が実用化されており，この電流定格に匹敵する IGBT の実用化を望む声が高まりつつあった。

このような状況下，富士電機は先に開発した 2.5 kV/1 kA 平形 IGBT の技術をさらに発展させて，27.5 × 27.5（mm）の大面積チップの実用化，デバイス構造の最適化などにより，小形のパッケージで 2.5 kV/1.8 kA の定格を持つ平形 IGBT（EMB1802RM-25，一般形式： EMB1801RM-25）を開発し，東海旅客鉄道(株)700 系新幹線先行試作車用主変換装置（TCI2）に搭載した。

現在，富士電機では今春の完成を目標に，さらなるコストパフォーマンスの向上を目的とした改良形平形 IGBT（EMB1805RM-25，2.5 kV/1.8 kA）を開発中である。

図1　2.5 kV/1 kA 平形 IGBT（EMB1001RM-25）の外観

本稿では EMB1801RM-25 に採用した技術ならびに性能について説明し，開発中の EMB1805RM-25 についても概要を紹介する。

2　大容量化技術

2.1　大面積チップの実用化

EMB1001RM-25 の開発においては，20 × 20（mm）の大面積 IGBT チップとダイオードチップを開発して搭載したが，今回の EMB1801RM-25 では，さらに大きな 27.5 × 27.5（mm）の IGBT およびダイオードチップを開発し搭載した。

また，EMB1001RM-25 用の 20 × 20（mm）のチップを開発する際に，MOS ゲートデバイスでは初めての富士電機独自のリペア技術も併せて開発し，この技術を新チップにも用いて不良部分を除去することにより，高良品率を実現した。

図2に，従来の 20 × 20（mm）と今回開発した 27.5 × 27.5（mm）の IGBT およびダイオードのチップ外観を示す。

2.2　チップおよびセル構造の最適化

今回開発した 27.5 × 27.5（mm）の IGBT チップは従来の 20 × 20（mm）の IGBT チップに比較して面積でおよそ 1.9 倍である。今回開発した 27.5 × 27.5（mm）の IGBT チップでは，デッドスペースになっていた部分を見直すことにより，さらに電流を流しやすい構造へと改善した結果，20 × 20（mm）の IGBT のおよそ 2.7 倍の電流定格［20 × 20（mm）チップ： 110 A に対して 27.5 × 27.5（mm）チップ： 300 A］とすることができた。これにより，コンパクトなパッケージサイズで大容量素子を実現した。

また，セル構造の最適化やキャリヤの注入効率および輸送効率の最適化を図ることにより，IGBT のトレードオフの改善を実現した。

図3に，IGBT のコレクタ－エミッタ間飽和電圧（$V_{CE\,(sat)}$）

一條　正美

電力変換装置の研究開発に従事。現在，松本工場半導体開発センターパワー半導体開発部主席。

関　　康和

半導体デバイスの研究開発に従事。現在，(株)富士電機総合研究所先端デバイス研究所パワーデバイスグループ研究マネージャー。工学博士。

西村　孝司

パワーデバイスの研究開発に従事。現在，松本工場半導体開発センターパワー半導体開発部。

図2　チップの外観

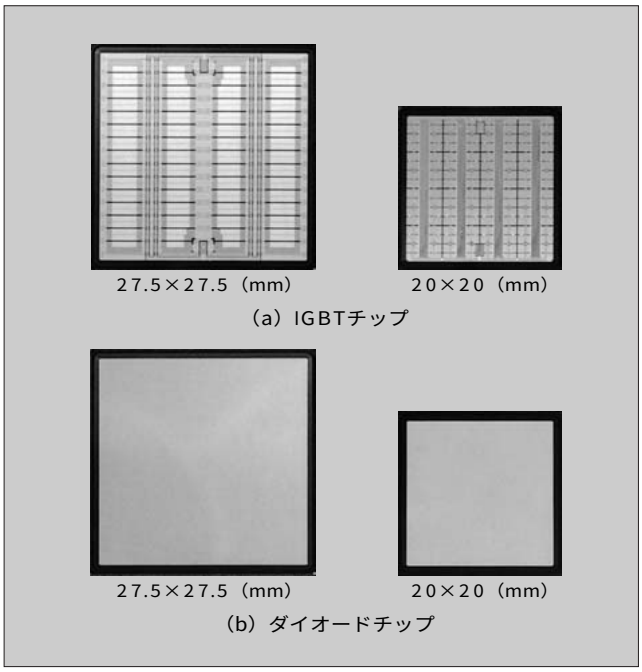
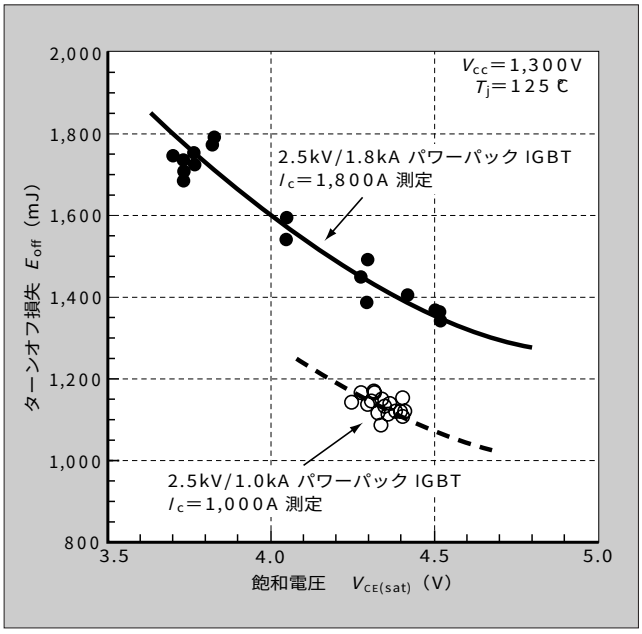


図3　IGBT のトレードオフ比較



とターンオフ損失（E_{off}）のトレードオフ関係を EMB1001RM-25 と EMB1801RM-25 を比較して示す。**図3**は，125 ℃の接合温度におけるトレードオフ曲線であるが，同じ $V_{CE\ (sat)}$ の条件での E_{off} を比較すると，例えば $V_{CE\ (sat)}$ が 4.4 V の条件では，EMB1001RM-25（2.5 kV/1 kA 素子）が 1,100 mJ，EMB1801RM-25（2.5 kV/1.8 kA 素子）が 1,400 mJ である。

1.8 kA 素子は，電流定格を 1 kA 素子の 1.8 倍にしたにもかかわらず E_{off} の増加は 1.3 倍と低く抑えられている。このように，EMB1801RM-25 は，従来の EMB1001RM-25 の技術をベースに，さらに高性能化を達成したチップを搭載している。

表1　EMB1801RM-25の定格および特性

（a）最大定格（T_j =25 ℃）

項　目	記号	定格	単位
コレクタ-エミッタ間電圧	V_{CES}	2,500	V
ゲート-エミッタ間電圧	V_{GES}	±20	V
直流コレクタ電流	I_C	1,800	A
	$-I_C$	1,800	
パルスコレクタ電流	$I_{C\ (pulse)}$	3,600	A
	$-I_{C\ (pulse)}$	3,600	
最大コレクタ損失	P_C	10,500	W
接合部温度	T_j	125	℃
圧接力	—	35～50	kN

（b）電気的特性

項　目	記号	試験条件	最小	標準	最大	単位
コレクタ-エミッタ間遮断電流	I_{CES}	V_{GE} =0 V V_{CE} =2,500 V T_j =125 ℃	—	—	50	mA
ゲート-エミッタ間漏れ電流	I_{GES}	V_{CE} =0 V V_{GE} =±20 V	—	—	±10	μA
ゲート-エミッタ間しきい値電圧	$V_{GE\ (th)}$	V_{CE} =20 V I_c =1 A	4.0	—	8.0	V
コレクタ-エミッタ間飽和電圧	$V_{CE\ (sat)}$	V_{GE} =15 V I_c =1,800 A T_j =125℃	—	—	4.8	V
ダイオード順電圧	V_F	V_{GE} =0 V I_F =1,800 A T_j =125 ℃	—	—	3.3	V
ターンオン特性	t_{on}	V_{CC} =1,300 V I_c =1,800 A T_j =125 ℃	—	3.6	—	μs
	t_r		—	2.5	—	μs
ターンオフ特性	t_{off}	V_{CC} =1,300 V I_c =1,800 A T_j =125 ℃	—	3.6	—	μs
	t_r		—	1.0	—	μs
逆回復特性	t_{rr}	$-di/dt$ =2,500 A/μs I_F =1,800 A T_j =125 ℃	—	1.0	—	μs

（c）熱特性

項　目		記号	試験条件	最小	標準	最大	単位
熱抵抗	IGBT	$R_{th\ (j-f)}$	両面冷却	—	—	0.010	℃/W
	Di	$R_{th\ (j-f)}$		—	—	0.019	

3　EMB1801RM-25 の性能

3.1　最大定格および特性

EMB1801RM-25 の最大定格および特性を**表1**に示す。

3.2　飽和電圧特性

EMB1801RM-25 の V_{CE} ・ I_C 特性および V_F ・ I_F 特性を EMB1001RM-25 と比較しながら**図4**および**図5**に示す。**図4**に示すように，EMB1801RM-25 の直流定格電流（1,800 A）でのコレクタ-エミッタ間飽和電圧は，EMB1001RM-25 の直流定格電流（1,000 A）での値と同等である。また，双方とも，接合部温度が高くなるとコレクタ-エ

図４　$V_{CE(sat)}$－I_C 特性

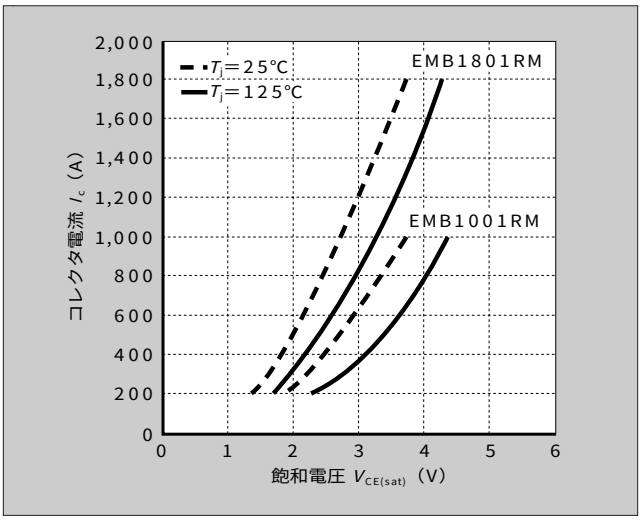
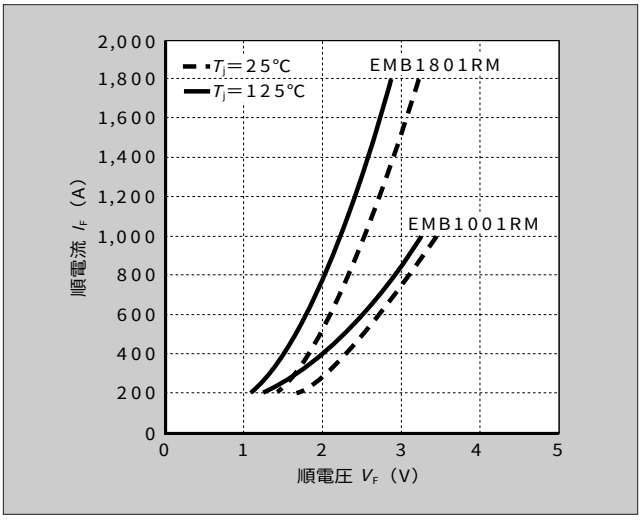


図５　V_F－I_F 特性



ミッタ間飽和電圧が上昇する傾向を有しているが，これは素子の並列接続を行う場合に電流分担の自己調整機能として作用するので有利である。

3.3　スイッチング特性

3.3.1　ターンオン特性

EMB1801RM-25 のターンオン時の動作波形例を**図６**に示す。**図６**は負荷電流が 1,800 A の場合の波形であるが，IGBT にはフリーホイーリングダイオードの逆回復電流が重畳して流れるので，そのピーク値は 2,900 A 程度になる。この条件下でのターンオン時間は 3.2 μs である。

3.3.2　ターンオフ特性

EMB1801RM-25 の直流定格電流（1,800 A）を遮断したときの動作波形例を**図７**に，4,000 A を遮断したときの動作波形例を**図８**に示す。直流定格電流を遮断したときのターンオフ時間は 2.4 μs である。

また，4,000 A の電流をスパイク電圧 2,400 V の条件で遮断できており，パルス電流定格（3,600 A）までの RBSOA（ターンオフ時安全動作領域）を十分に余裕を持ってクリアしている。

図６　ターンオン波形（1,800 A，125 ℃）

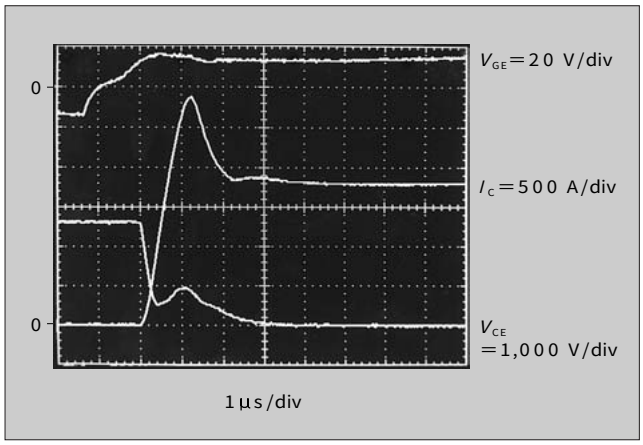


図７　ターンオフ波形（1,800 A，125 ℃）

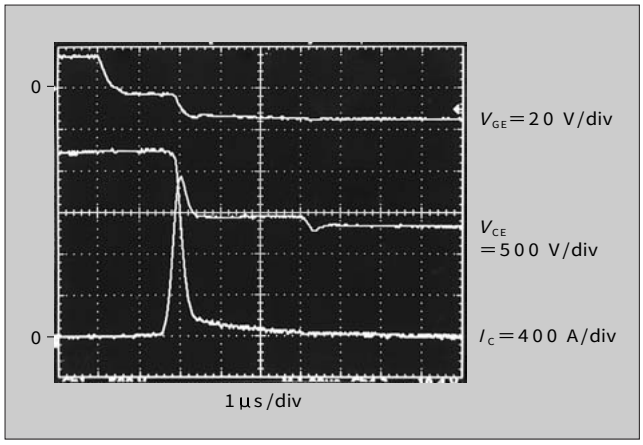
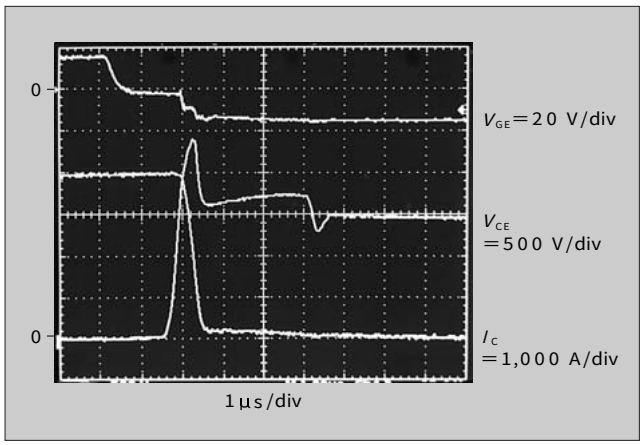


図８　ターンオフ波形（4,000 A，125 ℃）



4　外　形

図９に EMB1001RM-25 と EMB1801RM-25 の外観を示す。**図10**に EMB1801RM-25の外形を示す。EMB1801RM-25 は 140 × 140（mm）の小形の正方形のパッケージに収納されている。EMB1001RM-25 と比較すると，約 1.3 倍のパッケージサイズで 1.8 倍の電流容量を達成したことにな

図9　EMB1001RM-25 と EMB1801RM-25 の外観

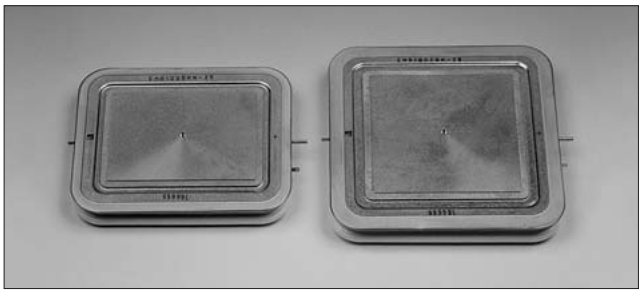


図10　EMB1801RM-25 の外形

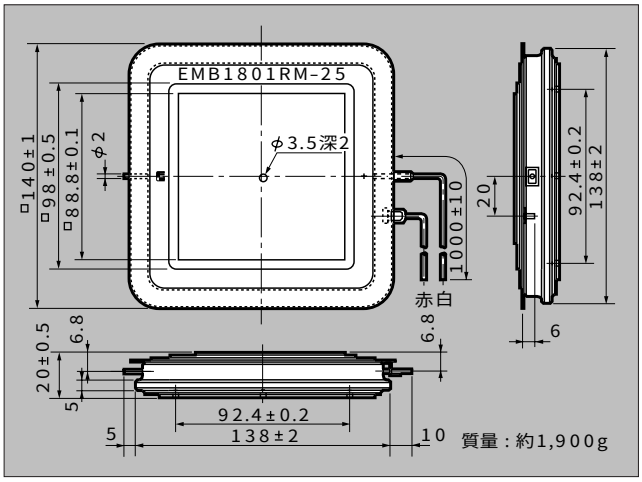


図11　新幹線 700 系先行試作車の外観

る。

5　応用例

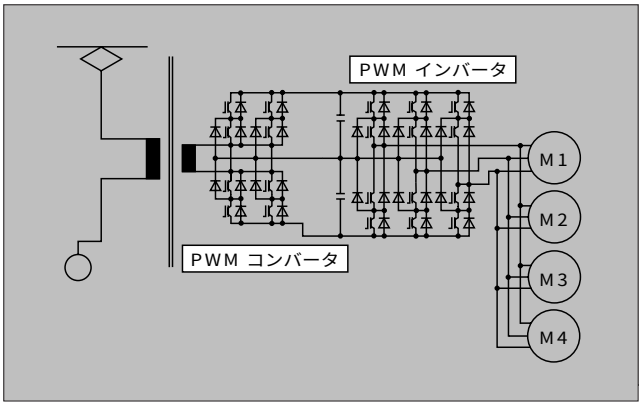
東海旅客鉄道(株)は，乗り心地の改善や対環境性の向上などを目的として，IGBT を採用した新幹線 700 系先行試作車（**図11**）を開発した。

この主変換装置（TCI2）の外観を**図12**に，回路構成を**図13**に示す。

TCI2 には，1 台のコンバータと 1 台のインバータが使用されている。双方とも 3 レベル構成を採用しており，EMB1801RM-25 相当品（EMB1802RM-25）が 1 並列で使用されている。

図12　主変換装置の外観

図13　主変換装置の回路構成



TCI2 では，IGBT ならびに 3 レベル主回路構成の採用による低騒音化や制御性能の向上，そして大容量素子の採用による主回路構造の簡素化などが図られている。

6　改良形 EMB1805RM-25

現在開発中の EMB1805RM-25 は，EMB1801RM-25 とほぼ同一の外形，電気的・熱的性能を持ちながら，チップの改良やパッケージ内部構造の改良などによって，素子組立性の向上やコストの低減をめざした素子である。

また，EMB1001RM-25 や EMB1801RM-25 では，チップと接するエミッタ側のモリブデン電極に島形状のものを用いていたが，EMB1805RM-25 ではこれをフラットなものとし，これに合わせてチップも改良したので，エミッタ側の接触面積が増え，以前より高い加圧力（スタック構成時）を許容できるようになっている。

EMB1801RM-25 の許容最大加圧力は 5 t であるが，EMB1805RM-25 では 6 t まで許容できると推定している。

この最大許容加圧力は，特に一つのスタックに多数個の素子を直列接続する用途（高電圧変換装置）では重要であり，EMB1805RM-25 は，このような用途へも適した性能を有する素子である。

7　あとがき

2.5 kV/1.8 kA の定格を有する平形 IGBT（EMB1801RM-25）に採用した技術ならびに性能，そして応用例について，

さらに開発中の EMB1805RM-25 の概要について述べた。

これらの素子は，2.5 kV クラスでは世界最大の電流定格を有しており，その実用化によって，大容量の変換装置を素子の並列接続なしに構成できるようになる。

しかしながら，4.5 kV の GTO サイリスタに置き換えるには 3 レベル主回路構成の採用あるいは素子の直列接続などが必要であり，今後は，より高い耐圧の IGBT の実用化を望む声が一段と強くなると思われる。

3 レベル主回路構成での適用が進展している状況を鑑（かんが）みると，これから開発する素子に対しては，高耐圧でしかもより高速の素子が望まれることになり，要求される技術レベルはきわめて高いものになるが，富士電機は，その実現に向けてたゆまぬ努力を積み重ねていく所存である。

参考文献

(1) 一條正美ほか：可変速駆動装置用パワーデバイスの動向，富士時報，Vol.68，No.12，p.682-686（1995）

(2) 関康和ほか：2.5 kV/1 kA 平型逆導通 IGBT（パワーパック IGBT），富士時報，Vol.69，No.5，p.290-294（1996）

(3) Takahashi, Y. et al.：Ultra high-power 2.5 kV-1.8 kA Power Pack IGBT. 1997 IEEE International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs. p.233-236（1997）

(4) Seki, Y. et al.：Ultra high-ruggedness of 2.5kV/1kA Power Pack IGBT. 7th European Conference on Power Electronics and Applications. Vol.2，p.2.049-2.053（1997）

技術論文社外公表一覧

標　　題	所　　属	氏　名	発　表　機　関
光触媒による NOx 除去プロセスの検討	富士電機総合研究所 〃 〃	西方　聡 西村　智明 天野　功	光機能材料研究会第 4 回シンポジウム光触媒反応の最近の展開（1997–12）
光触媒の閉鎖系への適用に関する検討(2)	富士電機総合研究所 〃 〃	西村　智明 西方　聡 天野　功	
ZnO バリスタ単一粒界の定量的 ICTS 解析	富士電機総合研究所 〃	田中　顕紀 向江　和郎	日本 Material Research Society（MRS）学術シンポジウム（1997–12）
燃料電池の概要	富士電機総合研究所	西原　啓徳	日本電機工業会第 18 回新エネルギー講演会（1997–12）
富士電機における平板型 SOFC の開発状況	富士電機総合研究所 〃 〃 〃 〃 〃 〃	小関　和雄 新藤　義彦 後藤平四郎 角川　功明 竹野入俊司 岩崎　慎司 中原ゆかり	SOFC 研究発表会（1997–12）
半導体を用いた無誘導解消型電力用限流器 ―― 三相系への拡張 ――	富士電機総合研究所 〃	磯崎　優 森田　公	電気学会静止器研究会（1997–12）
コジェネ発電設備の商用系統連系点への限流器適用効果の検討	富士電機総合研究所 〃 産業システム事業部 機器制御事業部 富士ファコムシステ	磯崎　優 岩井　弘美 小寺　昭紀 石川　熙 壱岐　浩幸	
簡易回生形ソフトスイッチング回路	ム	西川　幸廣 五十嵐征輝 黒木　一男	電気学会半導体電力変換研究会（1998 –1）
銅－アルミ超音波圧接部における金属間化合物の成長に伴う信頼性検討	富士電機総合研究所 〃 〃	山崎　和昭 北見　彰 橋本　信行	溶接学会マイクロ接合研究委員会第 4 回シンポジウム（1998 –1）
表面磁石構造 PM モータを用いた駆動システムの高性能制御方式	富士電機総合研究所 〃 変電システム製作所	佐藤　芳信 藤田　光悦 柳瀬　孝雄 木下　繁則	日本電動車両協会（1998 –1）
微小角入射 X 線回折による Co 系面内磁気記録媒体の構造評価(2)	富士電機総合研究所 〃 〃 〃	大沢　通夫 広瀬　隆之 小沢　賢治	第 11 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム（1998 –1）

パワーモジュール用チップ技術

百田　聖自（ももた　せいじ）　　大西　泰彦（おおにし　やすひこ）　　熊谷　直樹（くまがい　なおき）

1　まえがき

パワーエレクトロニクスの進歩は電力変換，パワーデバイス，制御技術が一体となって成し遂げられてきた。そのパワーデバイスの特性は，中に搭載されるチップの性能が決定づけるといっても過言ではなく，近年のユーザーからの厳しい要求にこたえるべくその重要性は増加してきている。

IGBT（絶縁ゲート形バイポーラトランジスタ）チップは，大容量化が可能なことと駆動の容易性などの特長により，他のパワーデバイスの置換えだけではなく，新分野への適用も進み，パワーモジュールでは最も普及しているデバイスである。

富士電機ではこの IGBT チップを使用したモジュールを1988年に製品化したのをはじめ，1994年には大幅に低損失化を実現した新第三世代チップを開発した。さらに IGBT の性能限界に接近する低損失化をめざした第四世代チップの開発を実現した。また，インテリジェント化のためにパワーインテリジェントモジュール専用制御 IC の開発にも成功している。

チップの限界性能を引き出すために，デバイス構造設計技術やその最適化のためのシミュレーション技術や，それを実現する微細加工技術をはじめとした最新プロセス技術が必要である。また，パワー半導体チップに特有の高耐圧，大電流，高破壊耐量などを実現する独自の技術も要求される。本稿ではそれらの技術動向を紹介する。

2　IGBT チップの構造と要求特性

2.1　IGBT チップの構造と特徴

IGBT のセル断面図を**図1**に示す。IGBT は n チャネル MOSFET（Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor）と BJT（Bipolar Junction Transistor）の複合デバイスであり，その特性も両素子の特徴が現れる。それは MOSFET の電圧駆動性と BJT の伝導度変調を利用した大電流容量性である。しかも，IGBT は 20 kHz の高キャリヤ周波数での使用も可能である。

2.2　チップへの要求項目と課題

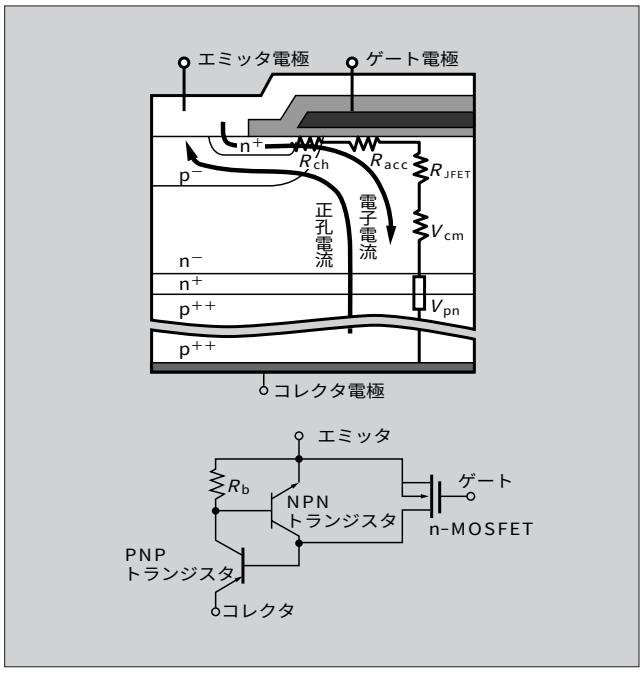
ユーザーからの要求項目の主なものは以下の 3 点である。

(1)　低損失
(2)　低コスト
(3)　高信頼性

これらはその用途などにより優先順位は多少入れ替わるものの，パワーデバイス用チップに対する普遍的な要求である。

この(1)および(2)の項目を改善するための最大の課題は，オン電圧とスイッチング損失のトレードオフをブレークスルーすることである。IGBT は一般的にスイッチング損失を低減するために，ライフタイムキラーを導入するが，定常オン状態ではキャリヤの移動度の低下によりオン電圧の増加を招くので，オン損失とスイッチング損失を同時に低

図1　IGBT のセル断面図



百田　聖自

IGBT チップの開発・設計に従事。現在，松本工場半導体開発センターパワー半導体開発部主任。

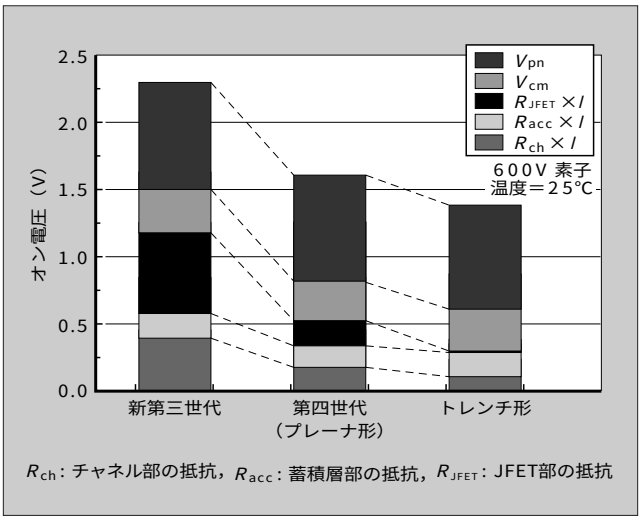
大西　泰彦

IGBT チップの開発・設計に従事。現在，松本工場半導体開発センターパワー半導体開発部。

熊谷　直樹

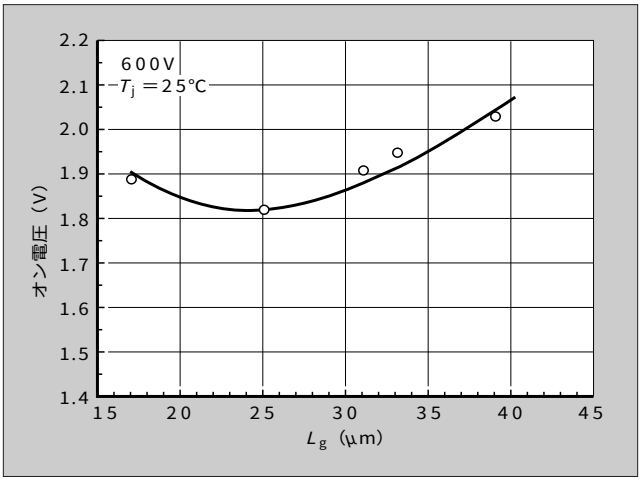
半導体デバイスの研究に従事。現在，松本工場，半導体開発センターパワー半導体開発部主査。工学博士。

図２　IGBT のオン電圧成分分析結果



R_{ch}：チャネル部の抵抗，R_{acc}：蓄積層部の抵抗，R_{JFET}：JFET部の抵抗

図３　ゲート幅とオン電圧の関係



減することは容易ではない。また，単純なオン電圧の低下は負荷短絡時に過大な電流が流れる原因となり，高破壊耐量を実現することが困難になる。このように損失と破壊耐量もトレードオフ関係であり，このブレークスルーも重要な課題である。

3　次世代 IGBT をめざして

3.1　600 V デバイスの性能改善

パワーモジュールの発生損失は冷却フィンなどの装置の大形化，高コスト化を招くため，極力削減する必要がある。この損失低減には，前記のオン電圧とスイッチング損失間のトレードオフを改善する必要がある。

オン電圧は**図１**の電流経路の電圧降下の和であり，

$$V_{CE\ (sat)} = V_{pn} + V_{cm} + (R_{ch} + R_{acc} + R_{JFET})\, I_{MOS} \quad \cdots\cdots\cdots(1)$$

で表される。これらの成分分析をデバイスシミュレーションで解析した結果を**図２**に示す。このうち V_{pn}（P–N 接合電位）と V_{cm}（n^-ドリフト領域の抵抗）は原理上低減は困難である。よって改善には R_{ch} ＋ R_{acc} ＋ R_{JFET} の表面 MOS 部の各抵抗を低減することに向けられる。つまり電流を流す領域をできるだけ広く確保し，無駄な領域を削減する設計が重要である。シミュレーションにてプレーナ形セルの解析を行った結果，以下のような改善でオン電圧が低減できることが分かった。

(1)　p^+ well をなくし，R_{JFET} の削減
(2)　L_s（ゲート電極の窓）の短縮
(3)　L_g（ゲート電極の幅）の最適化
(4)　チャネル条件最適化による負荷短絡耐量改善
(5)　部分的に n^-表面抵抗を低減

そのシミュレーションのうち，L_g とオン電圧の関係を**図３**に示す。600 V 素子では L_g 幅が 25 μm で最も低いオン電圧となることが分かった。これらの総合的なシミュレーション結果は**図２**に示したようになり，室温では 1.6 V まで低減できることが分かった。一方，トレンチ形では 1.4 V まで低減できることが分かった。実際の試作の結果，トレードオフは**図４**のように高温で約 0.5 V 低減した。

今回の改善はトレンチ形 IGBT のオン電圧にほぼ匹敵する改善が達成できたと考えられる。トレンチ形ではプレーナ形に比べ総チャネル幅を増加できるので，R_{ch}，R_{JFET} 成分を低減できるが，負荷短絡時の大電流の克服や，入力容量増加，生産コスト増加などの課題がある。これらをまとめた結果を**表１**に示す。現在のところ，その用途は負荷短絡モードを気にしない領域に限定されている。今後はよりシンプルで作りやすく，しかも特性は材料の限界まで引き出せるデバイスの開発が待たれる。

図４　600 V IGBT のトレードオフ改善結果

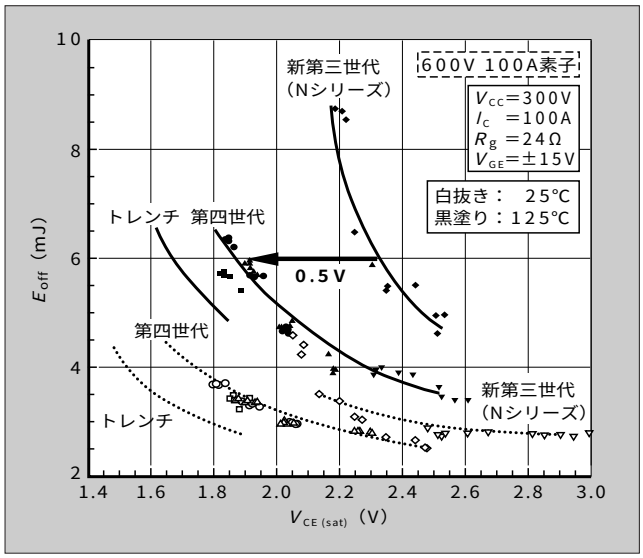


表１　プレーナ形とトレンチ形IGBTの比較

分類＼項目	オン電圧（室温）	スイッチング損失	負荷短絡耐量	入力容量	コスト 作りやすさ
プレーナ形デバイス	1.6 V	○	○	○	○
トレンチ形デバイス	1.4 V	○	なし	×	良品率悪い 工程複雑

図5　PT形とNPT形のIGBT構造比較

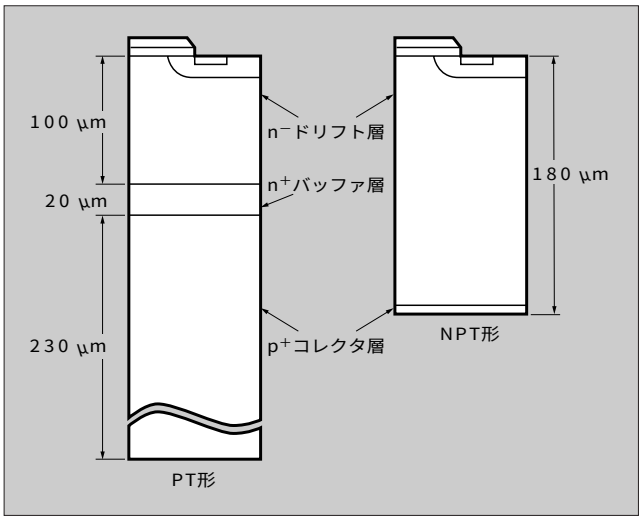
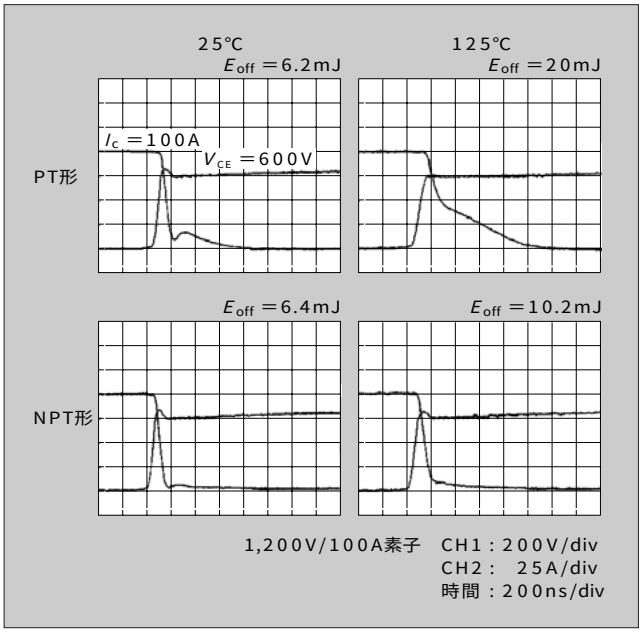


図6　IGBTのターンオフ波形



3.2　1,200 Vデバイスの性能改善

モジュールに対するコストダウンを実現するにはチップコスト，パッケージ材料費の低減が重要である。そのチップコストは，

(1)　チップサイズ（低損失化が必要）
(2)　プロセス（ホト回数）
(3)　直材費（ウェーハ代）

で決まる。通常，PT（パンチスルー）形のIGBTではエピウェーハを使用するが，このウェーハは高耐圧になればなるほどコストが高い。対策としてはFZウェーハを用いたNPT（ノンパンチスルー）形のIGBTとすることが効果的である。両構造の比較を**図5**に示す。下記のメリットがあり，1,200 V以上の耐圧では総合的にNPT形IGBTが優れていると考える。

(1)　低価格ウェーハ適用可（チップコスト低減）

図7　n^-ドリフト層厚さと破壊時の損失

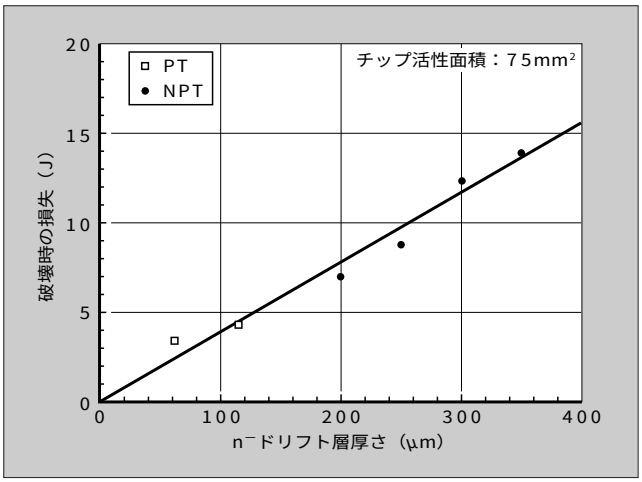
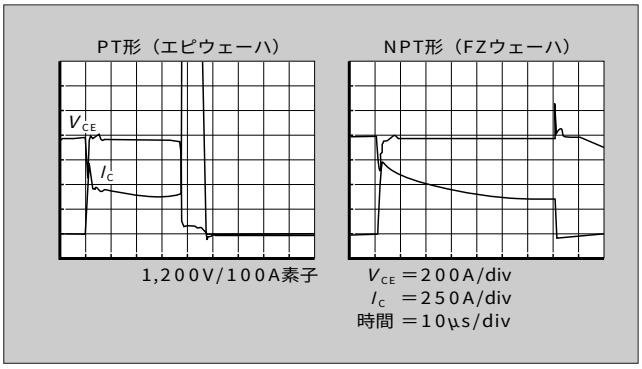


図8　IGBTの短絡耐量比較



(2)　E_{off}（ターンオフ損失）の温度依存性が小さく，高周波用途向き
(3)　負荷短絡耐量が強い
(4)　並列使用に向き，大容量化が容易（オン電圧の温度依存性が正のため）
(5)　特性値ばらつき小

ここでNPT-IGBTの特徴の幾つかを技術的に説明する。

3.2.1　E_{off}の温度依存性

PT形IGBTのターンオフの際にはn^-ドリフト層にある多量のキャリヤを消滅させるために，ライフタイムキラーの助けを借りる必要がある。しかしこの働きには温度依存性があり，高温では効果が低下し，**図6**に示すようにスイッチング時間が伸びてE_{off}が増加する。

一方，NPT形ではコレクタ側からの正孔の注入自体を抑えることにより，キャリヤの吐出しだけでターンオフできるので，ライフタイムキラーを必要としない。よって，高温でのE_{off}の増加がほとんどない。

3.2.2　高負荷短絡耐量

負荷短絡時の破壊は，その電流と電圧と時間との積である損失による素子の温度上昇に依存する。電流は素子の経路で一定であるので，各部の温度上昇はそこの電圧降下つまり，電界がきつい領域ほど発熱は大きくなる。

図5の断面図に示したように，NPT品はn^-ドリフト層が厚い構造をしている。負荷短絡時に電圧はn^-ドリフト

図９　PT 形と NPT 形のオン電圧分布比較

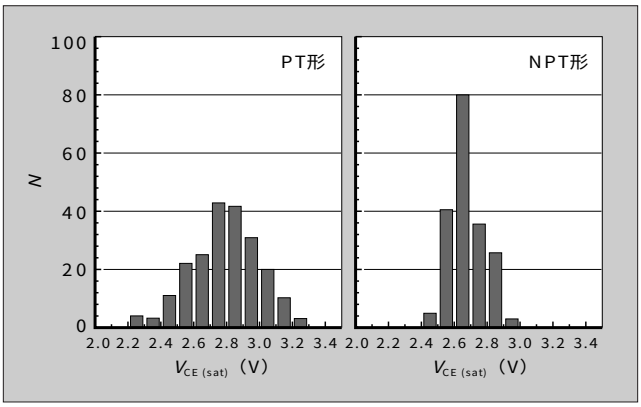
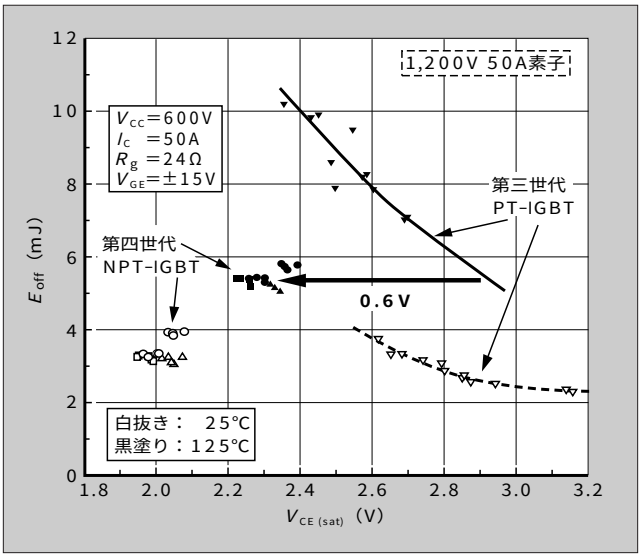


図10　1,200 V IGBT のトレードオフ改善結果



層全体に掛かるので，結果として NPT 品は電界が緩くなる。この関係を示した実験結果が**図７**である。同一のセル構造をした IGBT では破壊までの損失と n^- ドリフト層の厚さは比例する。逆算すれば破壊時の温度上昇はほぼ一定であることが分かる。よって実際，1,200 V では NPT 形の n^- ドリフト層の厚さは約 200 μm と NT 形の 100 μm の約 2 倍あるので，耐量も**図８**のように約 2 倍となる。

3.2.3　並列使用が容易

大容量化のためにチップやモジュールの並列使用をする必要が生じるが，このときチップ間のオン電圧のばらつきを決める要素がウェーハ仕様，ライフタイムキラーの導入量，そのアニール条件などと多いため，オン電圧のばらつきを少なくすることが難しい。一方，NPT 形ではオン電圧は裏面のイオン注入とウェーハの厚さでほぼ決まる。これらの製造上のばらつきは非常によく管理できるので，結果として素子の特性ばらつきは**図９**のように約 1/2 に低減することができる。

また，NPT 品は MOSFET と同様に高温でのオン電圧が増加する正の温度特性がある。これ自体損失的にはデメリットであるが，並列使用にあたっては素子間の電流アンバランスを緩和してくれるので，有利となる。さらにこの傾向は高温での電流を抑制できるので，負荷短絡耐量を向上させる効果としても働く。

図11　負荷短絡耐量と電流の関係

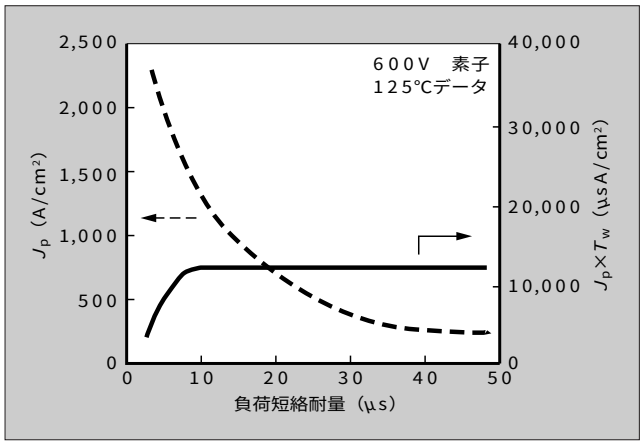
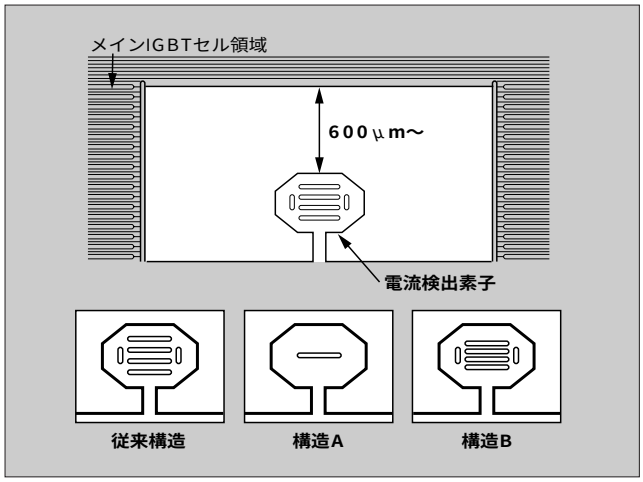


図12　電流検出素子平面図



3.2.4　トレードオフの改善

1,200 V の NPT 形 IGBT に対しても 600 V で実施した微細加工技術に加え，以下の最適化を行った。

(1)　セルピッチ：50 μm

(2)　ウェーハ厚：180 μm

これらの結果，トレードオフは**図10**のように 0.6V 改善した。

3.2.5　高機能化

パワーモジュールに要求される高機能化とは，高破壊耐量による信頼性向上と，インテリジェント化の実現である。よってチップとしては素子自体の耐量を確保することはもちろんだが，過電流や過熱検知などのセンシング機能内蔵とその精度向上が求められている。

(1)　過電流保護素子

PT 形素子の負荷短絡時の破壊までの時間と電流の関係は**図11**のようになっている。つまり電流が極端に増えて瞬時にラッチアップ破壊する領域を除けば，時間と電流の積は一定である。この領域は温度上昇によって素子が破壊することを示しており，時間で評価される破壊耐量を向上するためには電流抑制が必要となる。しかし，一般的には電

図 13　電流検出素子の V_{CE} 依存性

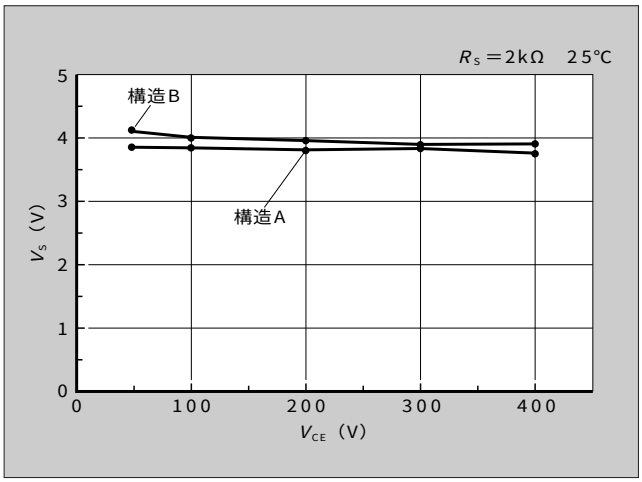
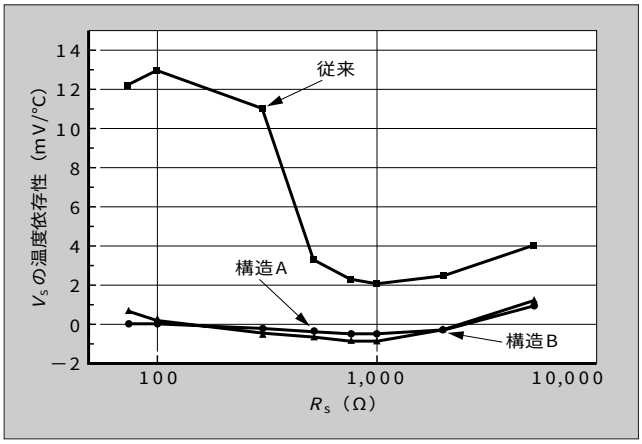


図 14　電流検出素子の温度依存性



流抑制はオン電圧増加を招くために，この関係のブレークスルーが求められている。

われわれは，この改善のために第三世代チップから電流検出素子を内蔵させ，過電流制限回路を使用する方法を採用している。この方法では異常時の過電流だけを抑制できるので，オン電圧は制約なしに極限まで低減が可能となった。

電流検出素子はメインの電流に応じた信号を出力することが必要なので，基本的にメインのセルと類似の構造となる。ただし，温度や V_{CE} 電圧に対する依存性もなくすことが重要であるため工夫が必要である。そこでシミュレーションにより**図12**のような電流検出素子を設計し試作した。図はポリシリコンゲートの平面図を示しており，従来構造はエミッタとまったく同じ構造のセルを並べたものである。これに対し，改善構造のものはより少ない電流にて検出するようにしたものである。試作結果の V_{CE} 依存性を**図13**に示す。V_{CE} 電圧が 50 V から 400 V まで変化させても電圧依存性がないことが確認された。また，温度依存性は**図14**のように改善されており，特に従来問題であった 500 Ω以下の低い R_S（センス抵抗）での改善が著しい。

(2)　過熱検出素子

従来，温度検出はモジュール内の DBC（Direct Bonding Copper）上の 1 点をサーミスタで測定していたが，モータロックなどで一部の素子に発熱が集中する場合には応答性が悪いという問題があった。また，チップ上にサーミスタをはり付ける方法もあるが，われわれはより応答性を高めるために，チップ内の活性領域に温度検出素子をシリコンで作り込む手法を採った。

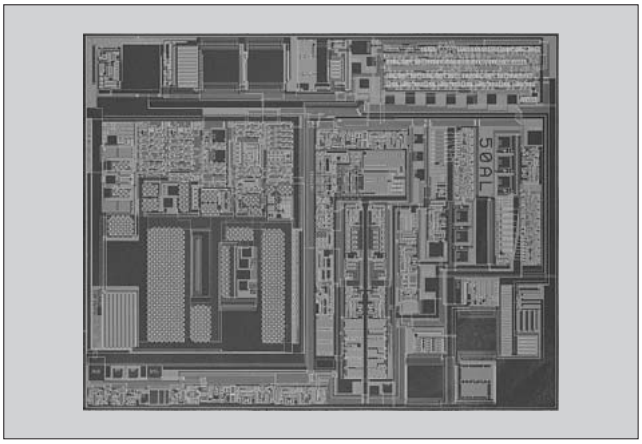
チップ内に作り込む温度検出用素子としては，抵抗，ダイオード，MOSFET がある。その要求特性は温度依存性が大きく，素子のばらつきが少なく，メイン素子の寄生効果を受けないものでなければならない。そこで検討した結果を**表2**に示す。酸化膜でシリコン基板から完全に分離しなければ寄生効果を回避できない点などから，ポリシリコン中に作成したダイオードの V_f 特性が最も適していることが分かった。

これらのセンシング技術は新第三世代 IPM（R-IPM）に使用するチップに適用している。

表 2　温度検出素子の特性比較

素　子（利用特性）	素子作成場所	寄生効果	温度依存効果	ばらつき	製造の容易性
ダイオード（V_f）	シリコン基板	×	○	○	○
	ポリシリコン上	○	○	○	△
抵　抗（R）	シリコン基板	×	○	△	○
	ポリシリコン上	○	○	△	○
MOSFET（V_{th}）	シリコン基板	×	○	×	○
	ポリシリコン上	○	○	×	×

図 15　制御 IC の外観



4　制御 IC

IGBT を効率よく安全に駆動するには制御回路が重要となってくる。富士電機ではこれまでに蓄積した IGBT 制御のノウハウを取り入れ，**図15**に示す IPM（Intelligent Power Module）専用の制御 IC を開発した。従来の制御 IC はバイポーラプロセスを適用していたが，バイポーラ IC は個々のトランジスタを分離する必要があり，回路規模が大きくなるとチップ面積が増加するとともに消費電流が多いなどの課題をもっている。

図16　制御IC ブロック図

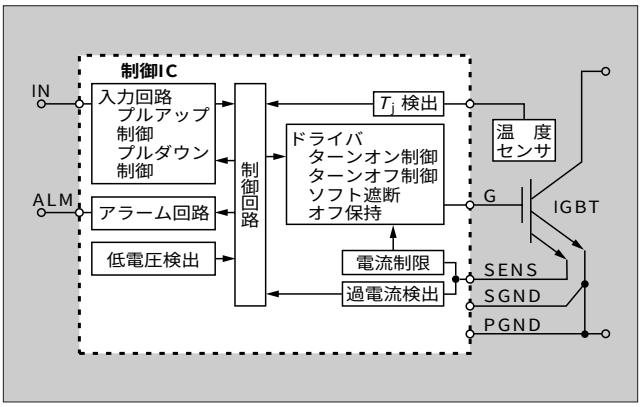
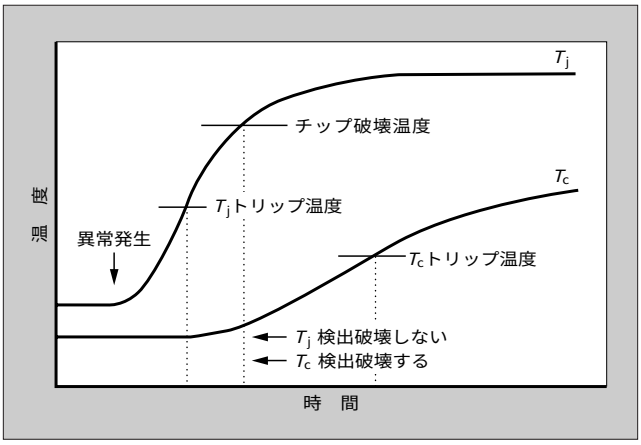


図17　異常時の温度と時間の関係



一方，CMOSIC は微細化しやすい反面，アナログ回路の高精度化が難しいなどの課題がある。本 IC は IPM の新機能に対応した回路を追加するとともに，従来外付け部品などにより実現していた機能をすべて IC 内部に取り込み，IPM の部品点数を大幅に削減した。これにより，大幅なコストダウンと信頼性の向上を実現した。したがって，制御 IC に要求される機能・性能は多岐にわたり，この回路規模の増加に対応するため，集積度の点で有利な CMOS プロセスを適用した。また，アナログ回路の精度に関しては，基準電圧にバンドギャップリファレンスを使用して温度特性とばらつきの改善を図った高精度 CMOS アナログ技術を開発するとともに，さらに精度が必要な部分に対してはツェナーザップ回路による補正（トリミング）を実施している。**図16**は制御 IC のブロック図で，過電流保護，低電圧保護，電流制限などの従来機能のほかに，破壊しにくいこと，ノイズ発生を抑えること，誤動作を防止することなどを目的として各種の機能を備えている。以下にその一部を紹介する。

4.1　チップ接合温度（T_j）検出保護機能

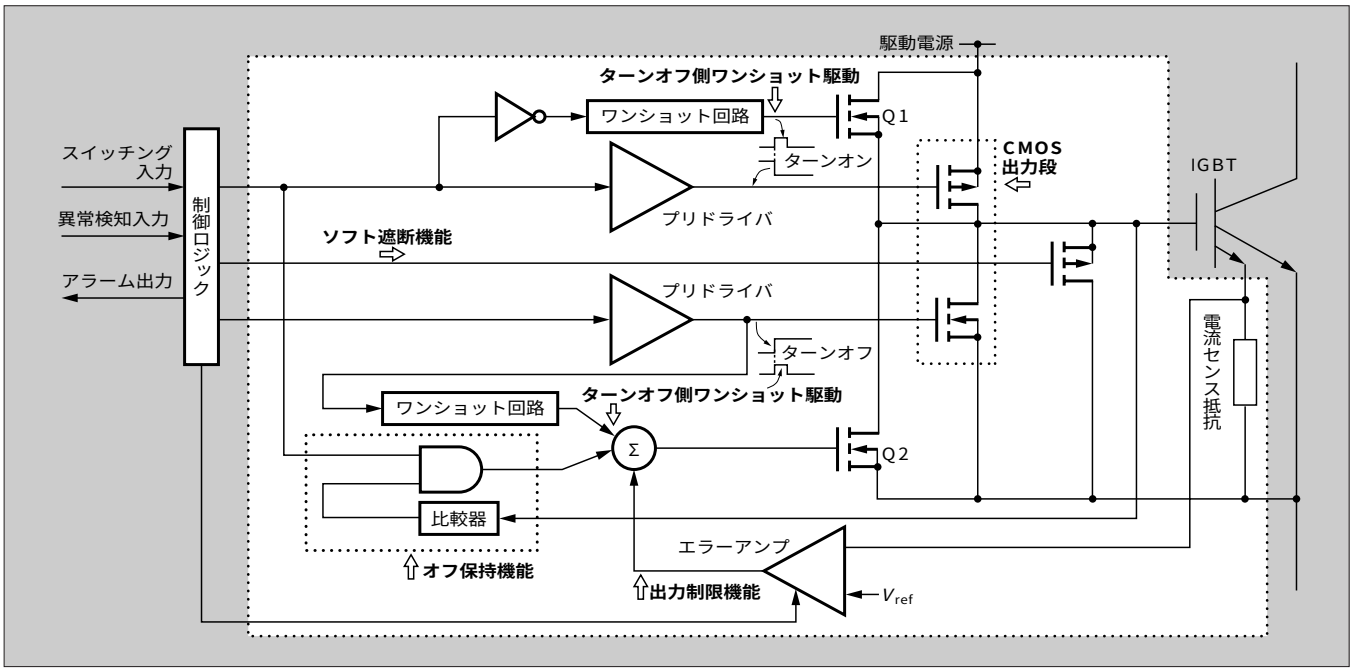
従来，過熱保護はケース温度を監視することによって行われてきた。しかしながら，ケース温度の上昇には時間遅れがあり，特に温度センサからの距離が遠いチップでは急激なチップの温度上昇時には十分保護することが困難であった。

一方，このような場合でもケース温度で保護しようとする場合は余裕を持ったトリップ温度を設定する必要があり，チップの能力を最大限に利用できない欠点があった。**図17**はこれを説明するための模式図で，太線が接合温度，細線がケース温度を示している。図に示すように何らかの異常が発生し特定のチップの温度が急激に上昇した場合，ケース温度はある時間遅れをもって上昇する。さらに熱容量の違いなどにより，温度上昇速度自体もパッケージのほうが遅く，したがって，ケース温度を監視していた場合では，接合温度が素子の破壊温度に達した場合でもケース温度はまだトリップ温度に達しないため素子を保護することができない。本 IC は**3.2.5**項で述べた IGBT 上に形成されたダイオード温度センサに一定電流を流す定電流回路を備え，ダイオードの順方向電圧を検出することにより個々の IGBT の接合温度を監視している。このため，IGBT を急激な過熱による破壊から保護することが可能となり，モータロックなどにより特定のチップに発熱が集中し，ケース温度検出では保護が困難な場合にも保護することが可能となる。これにより IPM の大幅な破壊防止効果が期待できるとともに，チップの能力を最大限に利用することが可能となる。この接合温度検出機能は，1 ms の積分期間とトリップおよび復帰温度にヒステリシス特性を持たせることにより，ノイズによる誤動作を防止している。

4.2　IGBT ゲート駆動回路

従来，IGBT のゲートと駆動回路の出力間には抵抗（ゲート抵抗）を挿入し，IGBT のスイッチング速度を制御することによりスイッチング時の損失とサージ電圧とのトレードオフの最適値を選定してきた。今回開発した制御 IC の駆動回路は**図18**に示す構成を持ち，特に放射ノイズ低減を重視し，IGBT の各定格に応じた最適のサイズの CMOS 出力段を設計した。しかし，このようにして決定した CMOS 出力段では，出力抵抗と IGBT ゲート容量で決まる時定数によりスイッチング遅れ時間が長くなり，IPM を使用する装置の制御性が悪化する。そこで，本 IC の駆動回路ではターンオンおよびターンオフ時の初期段階に IGBT のゲートをそれぞれ**図18**の Q1，Q2 で示される低インピーダンスの別の MOSFET で短時間駆動する手法をとり，この問題を回避した。主回路側のターンオン時 di/dt は，IGBT のしきい値電圧付近の駆動能力に依存するため上記の Q1 のオン期間はゲート電圧がしきい値に達する以前に停止するよう設計されている。ターンオフ時に対しても同様に，Q2 のオン期間を制御することによりサージ電圧の発生を抑制している。このほかにも本駆動回路には，**図18**に示すように過電流などの異常時にゲート電圧を緩やかに低下させ安全に遮断するためのソフト遮断機能，オフ時にゲート電圧を低インピーダンスにエミッタに接地し，dv/dt による誤オンを防止するためのオフ保持機能，IGBT を出力・負荷短絡から保護するための電流制限機能などを内蔵している。

図 18　制御 IC 駆動回路



4.3　高耐圧 IC（HVIC）

近年，特に小容量 IPM の分野ではホトカプラレス，単電源化を実現するため，HVIC の適用が進んでいる。

HVIC の基礎技術の一つとして分離技術があるが，分離技術は大きく分けると誘電体分離と接合分離に分類できる。誘電体分離は分離性能に優れ，ノイズやスイッチング時の dv/dt などによる誤動作が発生しにくい長所を持つが，製造コストが高いという短所を持つ。一方，接合分離は誘電体分離に比較し製造コストは低いものの，分離性能では若干劣り，誤動作防止には構造的，回路的工夫を施す必要がある。接合分離は，分離のための接合を持つ狭い意味での接合分離方式と，分離部内部のデバイス構造の一部を分離の接合に利用する自己分離方式に分けられ，自己分離方式ではさらに低コスト化が可能である。HVIC の基礎技術のもう一つに高耐圧配線技術がある。これは，高耐圧分離部に信号を伝えるための配線の電位の影響により分離耐圧が低下することを防止する技術で，多層のフローティングフィールドプレートを使用する，抵抗性フィールドプレートを使用するなど各社さまざまな技術によりこれを実現している。富士電機でも接合分離技術自己分離，自己シールド方式[(1)]を採用した HVIC を開発しており，レベルシフト動作などの基本機能の確認を終了し，HVIC 技術開発を完了した。現在は HVIC 搭載 IPM への適用を検討中である。しかしながら，HVIC にはパワー部破壊時などに制御回路への波及の問題，非絶縁化による安全性の問題など検討すべき課題が残されている。

5　あとがき

パワーモジュール用チップの改善には目をみはるものがあるが，今後問題となる EMC（Electromagnetic Compatibility）や環境に対する取組みをはじめ多様化するニーズへの対応など課題は山積である。しかし，超 LSI プロセス技術の適用，新デバイス構造などの独自技術の開発を行い，パワーエレクトロニクスの発展に努力していく所存である。

参考文献

(1)　Fujihira, T. et al.：Proposal of New Interconnection Technique for Very High-Voltage IC's, Proceedings of ISPSD '96, p.5655-5663（1996）

パワーモジュールパッケージ技術

両角　朗（もろずみ　あきら）　丸山　力宏（まるやま　りきひろ）　山田　克己（やまだ　かつみ）

1　まえがき

電力変換・制御技術を主とするパワーエレクトロニクスの発展にはめざましいものがあり，産業，交通，情報，民生などの分野で適用が進んでいる。このパワーエレクトロニクスを支えているのはパワーデバイスであり，今日のパワーデバイスの主要素子である IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）は，年々大容量化が進んできている。特に大容量電力変換の一つである鉄道車両分野では，装置の IGBT 化の進展が著しい。

一方，地球環境問題が深刻になるなかで，クリーンな電気エネルギーは，今後ますます需要が増大していくことと思われ，太陽光，風力，燃料電池など新エネルギー発電の実用化や電気自動車の普及により，装置の大容量化，分散化などが進み，高性能な電力変換装置がますます必要性を増していくことは確実である[1]。このような市場環境は，富士電機の主要製品であるパワーモジュールにおいて，より一層の高機能・高性能・高信頼度の必要性をも意味しており，特に高信頼度においては，市場におけるトラブルの際には致命的な事態を招く可能性があるため，パワーモジュールにおける信頼性設計は重要である。

本稿では，高信頼度パワーモジュールにおけるパッケージ技術について，その概要とそのなかで特に絶縁信頼性および熱的性能を支配するキーパーツである絶縁基板に関して，信頼性設計の一例を紹介する。

2　パッケージ技術

2.1　パワーモジュール構造

図1は，富士電機製 IGBT モジュールの主流パッケージの構造である。シリコンチップは，回路基板を兼ねたセラミックス製の絶縁基板上にはんだ付けされ，この基板はさらに金属ベース板にはんだ付けされている。シリコンチップとセラミック板上に形成された回路パターンとは，アルミニウム（アルミ）ワイヤにより結線されている。また，モジュールの外部導出端子は，セラミック板上の回路パターン上にはんだ接続されている。シリコンチップの上部は，シリコンチップおよびアルミワイヤを保護するため，シリコーンゲルとふたにより封止・保護されている。

図1に示したパッケージ構造では，コレクタ電極と金属ベース板はセラミック基板により絶縁され，3,000 ～ 6,000 V の絶縁耐圧を確保している。また，パッケージ材料は，金属，セラミックスおよびプラスチックなどさまざまな物性であり，特に熱膨張係数に関しては，シリコンチップより下層に向かって大きくなるような積層構成となっている。

このように，パワーモジュールのパッケージ技術は，シリコンチップの性能を最大限に生かしながら，これに信頼性を含めた各種性能を付加し，市場要求にこたえられる形にまとめあげることである。

2.2　パワーモジュールの信頼性とパッケージ技術

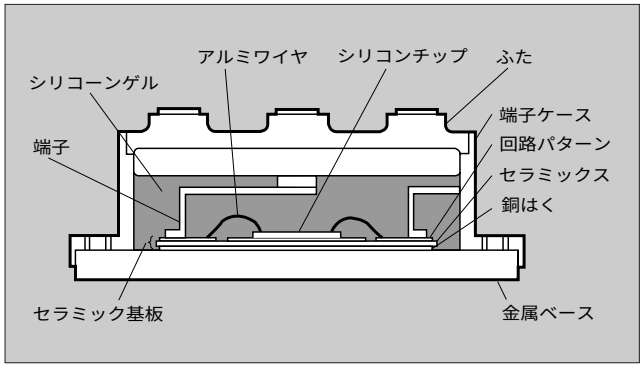
パワーモジュールの信頼性において，パッケージには各種接合部信頼性や絶縁信頼性などが必要である。

図2はパッケージにおける信頼性項目と故障モードとの関係を示したものである。

2.2.1　はんだ接合部信頼性

はんだ接合部では，いずれも構造部品材料間の熱膨張係数差に起因して発生する熱応力により，はんだにひずみが生じる。はんだに許容値を超えて過大なひずみが加わるとはんだ部に亀裂が発生し，熱応力の繰返しにより亀裂は進

図1　パッケージ構造



両角　朗

IGBT モジュールの構造開発・設計に従事。現在，松本工場半導体開発センターパワー半導体開発部。

丸山　力宏

IGBT モジュールの構造開発・設計に従事。現在，松本工場半導体開発センターパワー半導体開発部。

山田　克己

IGBT モジュールの構造開発・設計に従事。現在，松本工場半導体開発センターパワー半導体開発部主査。

図２　パッケージにおける信頼性項目と故障モード

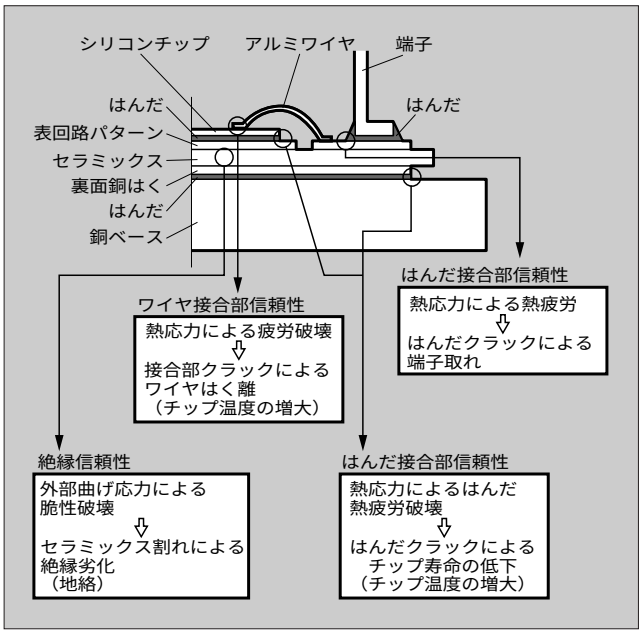
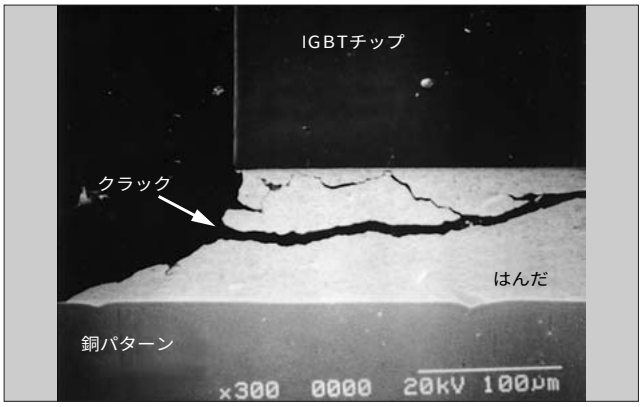


図３　熱疲労寿命試験におけるチップ下はんだ劣化



展する。この亀裂の進展は，シリコンチップ下および絶縁基板下はんだでは，熱抵抗の増大を招き放熱効果の低下を生じ，シリコンチップの破壊に至らしめる。また，端子接合部はんだにおいては，端子取れ（端子オープン）に至ることになる。

図３は，熱疲労寿命試験においてシリコンチップと絶縁基板間のはんだ部に亀裂が発生し，熱抵抗増大（劣化）に至った例であり，また**図４**は，温度サイクル試験において端子はんだ接合部に亀裂が発生した例である。**図４**では亀裂周辺のはんだ組織において，金属組織が応力方向に粗大化しているのが分かる。

2.2.2　ワイヤ接合部信頼性

アルミワイヤ接合部では，オン・オフの繰返しに伴い，シリコンチップとアルミワイヤの熱膨張係数差により接合界面にせん断応力が生じる。熱応力の繰返しにより，接合界面に金属疲労による亀裂が発生し，この亀裂が進展することによりアルミワイヤがはがれる。これにより，残ったワイヤに電流が集中するため，温度が急激に上昇し破壊に至ることになる。**図５**は，断続動作（パワーサイクル）試

図４　温度サイクル試験における端子はんだクラック

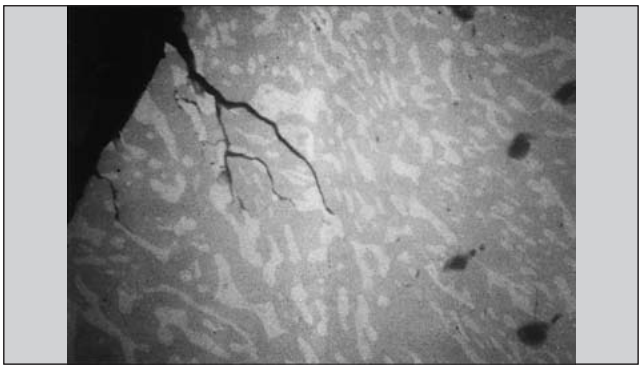
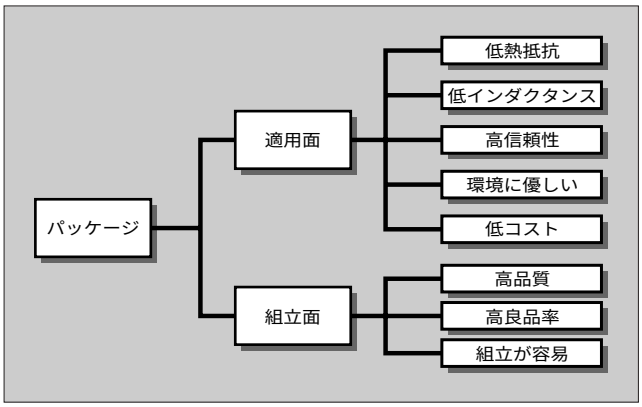


図５　断続動作試験におけるワイヤはがれ

図６　パッケージに求められる性能



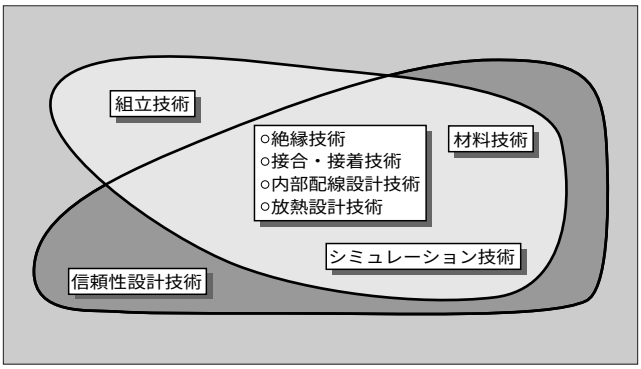
験において，シリコンチップとアルミワイヤの接合界面でワイヤはがれ（ワイヤオープン）に至った例である。

2.3　パッケージに求められる性能

パッケージに求められる主な性能としては，**図６**に示すように適用面からの要求性能と，組立面からの要求性能に大別される。特に適用面においては，急加減速が頻繁に負荷される用途（サーボ・スピンドルモータ駆動用およびエレベータ用インバータなど）といった熱的に厳しい使われ方に対する低熱抵抗化や，大容量・高耐圧の車両分野への適用では高度な絶縁信頼性（絶縁耐圧 5,000 V 以上）が要求される。

一方，大気・土壌および水質汚染などによる環境破壊の

図７　パッケージ要素技術



問題が世界的に注目され始めていることから，環境に対する配慮は，今後特に重要視されることが予想される。富士電機においても，新パッケージ構造や新組立方式の開発により，従来封止材料として使用していたエポキシ樹脂を廃止することにより，リサイクル性の改善を図っており，今後は，より一層のリサイクルおよび環境に適合した材料の開発・適用ならびにパッケージ構造の開発により，環境保護に努めていく。

2.4　パッケージ要素技術

パッケージ技術では，**図６**の要求性能を満たすため，各種要素技術の開発および蓄積を行っている。各種要素技術は，**図７**のように互いに関連しており，パッケージ設計の根幹を成す絶縁技術，接合・接着技術，内部配線設計技術および放熱設計技術を，材料技術，組立技術およびシミュレーション技術が支えている。

そして，これら要素技術と広範囲に深くかかわっている構造部品材料の一つに絶縁基板がある。この絶縁基板は，**図１**に示されるようにシリコンチップ直下に位置しており，そのため絶縁基板は，以下の(1)～(4)の機能を具備する必要がある。

(1)　シリコンチップ実装のための基体（メインボード）
(2)　シリコンチップ発熱時の熱放散
(3)　対地間絶縁の確保
(4)　シリコンチップ電極と外部電極間接続のための中継体（インタコネクトボード）

このように，パッケージにおいて絶縁基板は，モジュールの主要性能を左右する重要な部品材料であることが分かる。

3　パワーモジュール用セラミック基板

富士電機における主要パワーモジュールには，絶縁基板として主にセラミック基板を採用している。セラミック基板は，その優れた絶縁性（体積固有抵抗＞ 10^{14} Ω・cm^2）と，絶縁材料のなかでは熱放散が良好（熱伝導率： 20 ～ 200 W/mK）であるといった特徴が備わった材料である。

パワーモジュール用のセラミック基板は，アルミナや窒化アルミニウムなどのセラミック板（厚さ 0.25 ～ 0.8 mm 程度）の表裏に銅はく（厚さ 0.2 ～ 0.3 mm 程度）が接合された構造が一般的である。このセラミックスと銅はくの接合には，接合材を用いずにセラミックスと銅との直接反応により接合する直接接合法（Direct Bonding）と，チタンやジルコニウムなどの活性金属を添加したろう材を用いる活性金属接合法（Active Metal Bonding）とが主に適用されている。

直接接合法は，主にアルミナなどの酸化物系セラミックスに用いられ，約 1,030 ～ 1,070 ℃の温度で接合される。一方，活性金属接合法は，窒化アルミニウムなどの窒化物系セラミックスに用いられ，接合温度は約 700 ～ 800 ℃である。また，最近は，銅のほかにアルミニウムを用いた基板も開発され，商品化されている。

富士電機では，アルミナ，窒化アルミニウムに加えて，新規に高強度・高靭性の特性を備えたニューアルミナ基板[(2)]を開発している。そして，窒化アルミニウムの高熱伝導・高熱放散性や，ニューアルミナの優れた機械的特性を生かしながら，要求性能に合わせてそれぞれを適用している。

3.1　セラミック基板に求められる性能

3.1.1　高強度・高靭性（優れた機械的特性）

セラミック基板には，熱膨張係数の異なるシリコンチップや金属（銅）ベースが接合されるため，組立工程内の熱履歴や実稼動での動作ならびに使用環境の温度変化により，熱応力が発生する。そのため，セラミック基板には，これら発生応力に耐えられる機械的特性が要求される。

一方，セラミックスの破壊は，そのほとんどが引張応力の作用によって起こり，しかもこの応力は，冷却時だけでなく昇温時においても発生する。

このため，富士電機ではセラミックスの強度評価においては，一般的に行われている曲げ強度評価のほかに，高温引張強度の評価を行っている。この引張強度は，曲げ強度に対してセラミックスの真の強度を示しており，これを用いることにより精度の高い解析・設計を行うことができる。このように，引張強度は非常に重要な特性である。

図８は，各種セラミックスにおける高温引張強度の評価結果であり，これより，窒化アルミニウムなどの窒化物系セラミックスは，アルミナなどの酸化物系セラミックスに比べて，高温域での強度低下が少ないことが分かる。

また，これらセラミックスのなかで，窒化アルミニウムは特に強度が低いことが分かる。

3.1.2　高熱伝導・高熱放散性（優れた熱的特性）

シリコンチップで発生した熱流束は，セラミック基板を経由して金属ベースに伝えられ，放熱フィンに逃がされる。このため，モジュールの低熱抵抗化には，大量の熱流束を金属ベースに移動させる必要があることから，セラミック基板には，高熱伝導・高熱放散性が求められる。

このため，低熱抵抗化には，窒化アルミニウムなど熱伝導率の高いセラミックスの適用や，セラミック板の薄板化などが一般的に行われる。

図８　各種セラミックスにおける引張強度の温度依存性

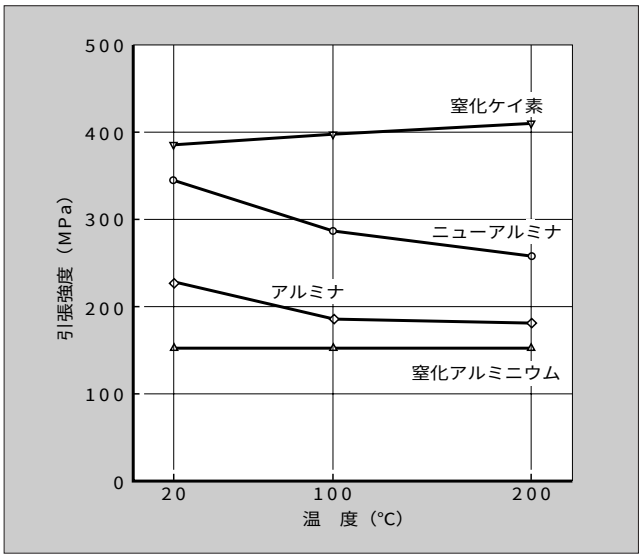
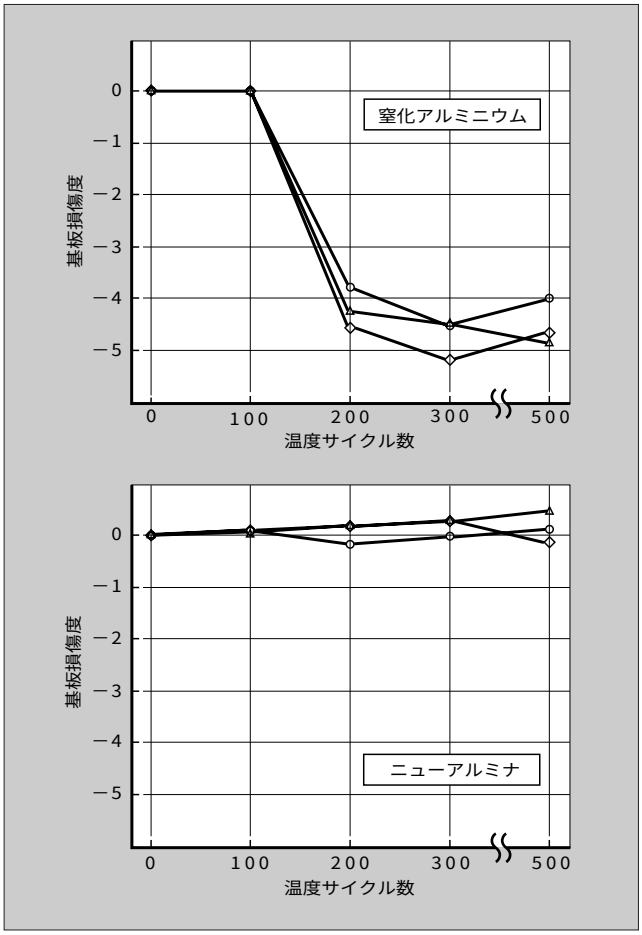


図９　温度サイクルにおける基板損傷挙動



3.2　セラミック基板性能と絶縁信頼性

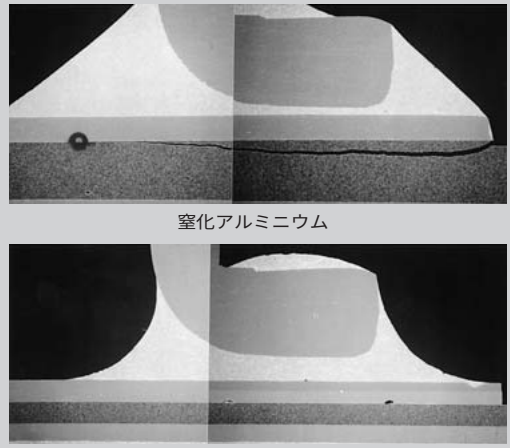
3.2.1　温度サイクルにおける基板損傷現象

大電流・高電圧を扱うパワーモジュールには，特に高い絶縁信頼性が要求され，セラミック基板の性能が信頼性に及ぼす影響は大きい。したがって，セラミック基板の性能が絶縁信頼性に及ぼす影響を把握することは，信頼性設計において重要である。

図９は，それぞれ機械的特性の異なる２種類のセラミック基板について，モジュール構造での温度サイクルにおける基板損傷挙動を比較したものである。なお，基板損傷度合いは，０～－５の数字で表しており，０は損傷がなく，－５は損傷が著しいことを意味している。

これより，窒化アルミニウム基板では100サイクルから著しい損傷が起こり始めるが，ニューアルミナ基板は損傷が起きず，セラミック基板の特性の違いにより，絶縁信頼性に優位差が現れていることが分かる。

図１０　温度サイクル終了品の断面観察

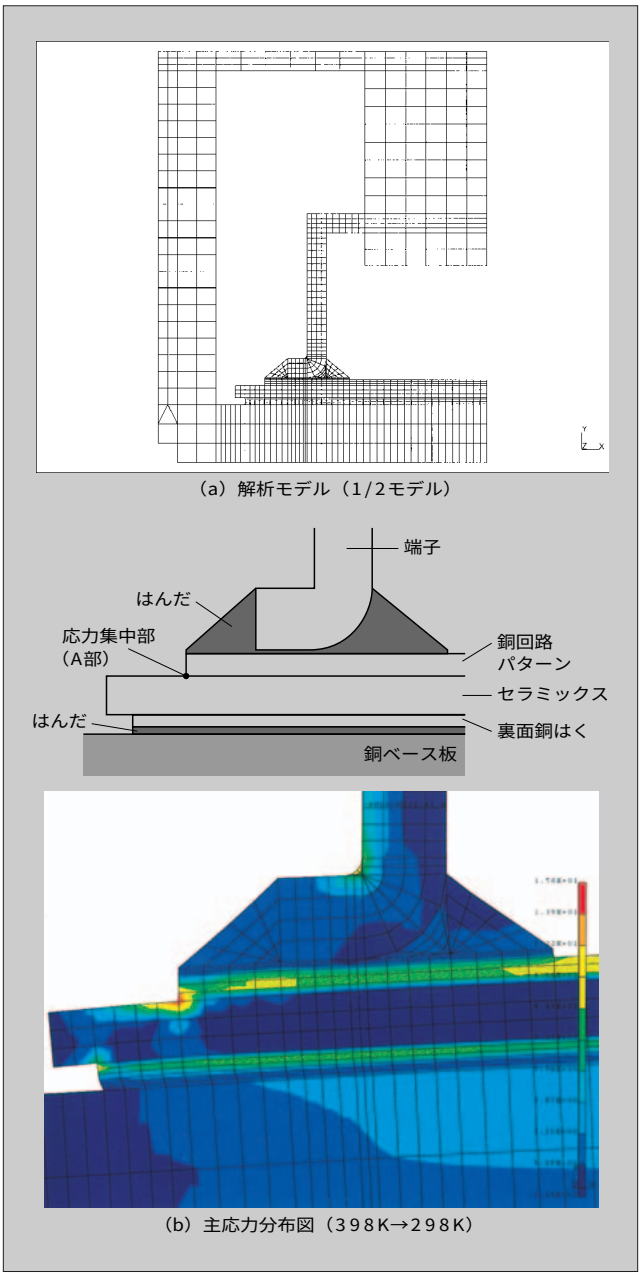


3.2.2　基板損傷メカニズム

図10は，温度サイクル終了品の断面観察写真である。基板損傷の著しい窒化アルミニウム基板では，端子はんだ接合部直下のセラミックス部分に，面方向に平行なクラックの発生がみられる。このクラックは，銅はくとセラミックスとの接合界面の銅はく端部を起点に基板中央部に向かって進展している。これに対して，基板損傷の起きていないニューアルミナ基板には，このようなクラックはみられない。また，著しい損傷の起きた窒化アルミニウム基板でも，セラミック基板上に端子はんだ接合部のない構造体では，セラミックスにクラックは発生せず基板損傷は起きない。クラックによる基板損傷現象を，図11のような熱応力解析（二次元弾性解析）により検証を行うと，表１の結果が得られ，すべての構造体で銅はく端部のセラミックス接合界面に集中応力が発生していることが分かる。この応力は，回路パターン側において，温度サイクルの昇温過程（233 K → 398 K）では圧縮，降温過程（398 K → 298 K）では引張りである。また，引張応力は，端子はんだ接合部のない構造体よりも，端子はんだ接合部のある構造体の方が大きい。

銅はく端部とセラミックスの接合界面（A 部）に発生する応力に関して，同一パッケージモデルの評価において，熱応力解析により求めた発生応力と，引張試験から求めたセラミックスの破壊強度とを比較すると，ニューアルミナ基板では，端子はんだ接合部の有無にかかわらず，発生応

図 11　熱応力（二次元弾性）解析モデル



（a）解析モデル（1/2モデル）

（b）主応力分布図（398K→298K）

図 12　温度サイクルによるモジュール変形挙動

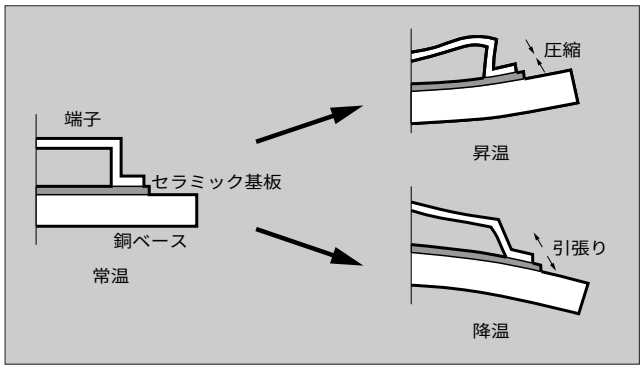


表 1　熱応力解析結果

基板種類	最大主応力（MPa）				セラミックス・引張破壊強度（MPa）
	233K→398K		398K→298K		
	端子あり	端子なし	端子あり	端子なし	
窒化アルミニウム	−52.0	−35.7	+153.0	+130.4	+157
ニューアルミナ	+20.2	—	+73.7	+12.3	+334

※マイナス符号は圧縮応力，プラス符号は引張応力

力は破壊強度を下回っている。これに対して，窒化アルミニウム基板では，端子はんだ接合部のある構造体において破壊強度に近い応力が発生している。

したがって，温度サイクルによる基板損傷は，**図12**のように，降温過程において熱膨張係数差によりモジュール全体が変形し，端子に引張応力が作用する。このため，端子はんだ接合部近傍のセラミックス表面には，モジュールの変形に伴う一様な引張応力に加えて，端子の引張作用に伴う局所的な引張応力が作用することになる。これら応力が，引張強度の低い窒化アルミニウム基板では破壊強度に達し，基板損傷に至ったものである。

4　絶縁信頼性の向上をめざしたパッケージ技術

前章で述べた基板損傷は，絶縁耐圧の低下を引き起こすものではないが，高信頼性パワーモジュールにおけるより一層の絶縁信頼性の向上を図るため，基板損傷を防ぐ構造として，

(1)　応力緩和・吸収効果のある端子形状
(2)　端子はんだ接合部の基板中央への配置
(3)　高強度のセラミック基板の適用
(4)　低熱膨張・高弾性率ベース材の適用

がある。

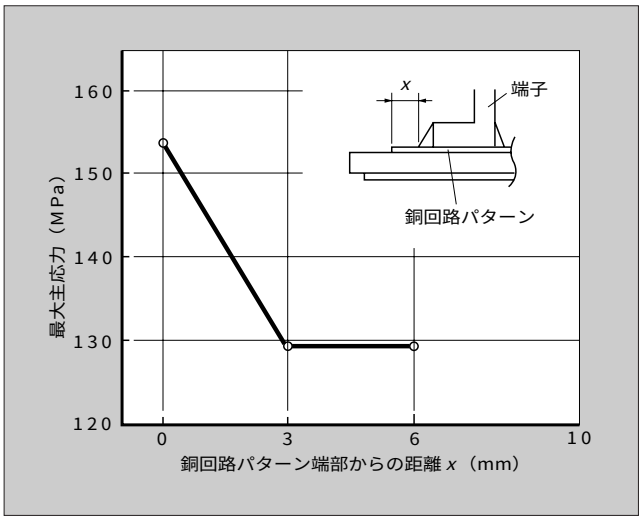
このなかで，端子はんだ接合部の基板中央への配置について，**図13**に銅はく端部から端子はんだ接合部までの距離と発生応力との関係を示す。これより，端子はんだ接合部の位置が，基板中央に位置するに従って発生応力は小さくなり，本パッケージでは，端子接合部が銅はく端部から中央へ 3 mm 寄れば，発生応力はセラミックスの許容応力以下になり，基板損傷は防止できる。

また，高強度のセラミック基板の適用に関しては，前述のとおり低熱抵抗化の要求を満たすため，窒化アルミニウムの適用は必要不可欠である。このため，窒化アルミニウム基板においても，原料粉末や焼成条件の改善によるセラミックスの高強度化や銅以外の導体材料との組合せ（アルミニウム，銅クラッド材）によるセラミックスへの負荷応力の軽減および基板の小形・多分割化などにより，改善を行うことができる。

一方，低熱膨張・高弾性率ベース材を適用すると，モジュール内での熱膨張係数差が小さくなるため，モジュール全体の変形が防止される。これにより，発生応力をセラミックスの許容応力以下に抑えられ，同様に基板損傷を防止することができる。

上記(1)〜(4)の構造は，いずれもセラミック基板に負荷

図13　端子はんだ付け位置と発生応力の関係



される応力を低減させ，セラミックスの破壊を抑えることにより絶縁信頼性を向上させている。

5　あとがき

以上，パワーモジュールにおけるパッケージ技術について，特に大容量・高耐圧分野で厳しく要求される絶縁信頼性を例に，高信頼化への取組みについて紹介した。

パワーモジュールを核としたパワーエレクトロニクスを取り巻く環境は，地球環境保護の立場からも，クリーンな電気エネルギーを主体とした生活体系の拡充および循環形社会への移行が今後ますます進展していくであろう。

このなかで，富士電機のパワーモジュールがどれだけ地球環境保護に貢献できるか，また，市場の要求・期待にどれだけこたえることができるか，人々にどれだけ快適で安全な生活を提供することができるか，そのためにどうすべきかを常に考え，実現に向けて最善を尽くす所存である。

参考文献

(1)　木村軍司：パワー半導体特集に寄せて，富士時報，Vol.67，No.5，p.262（1994）
(2)　有川典男ほか：インバータ用半導体デバイス，富士時報，Vol.68，No.5，p.289-296（1995）

技術論文社外公表一覧

標題	所属	氏名	発表機関	
半導体式超高速限流遮断装置の三相短絡試験用高速投入器の開発	富士電機総合研究所 〃 〃 〃 〃	磯崎　優 彦坂　知行 畠山　吉文 山田　守 森田　公	電気学会電力・エネルギー部門誌，**117**-B，11（1997）	電気学会
可燃性ガスセンサの最新技術動向	富士電機総合研究所	津田　孝一	ニューセラミックス，**10**，12（1997）	ティー・アイ・シー
YAG レーザによる遠隔自動切断装置の試作・試験	富士電機総合研究所 原子力・環境事業部	清水　明夫 細田　博	FAPIG，**147**，2（1997）	第一原子力産業グループ
ホロノミック全方向移動ロボットの開発	富士電機総合研究所 〃	和田　正義 森　俊二	日本ロボット学会誌，**15**，8（1997）	日本ロボット学会
第6章　交通・産業の中の電動機	富士電機総合研究所	奥山　吉彦	電気機器（アルテ21シリーズ）（1997-11）	オーム社
ごみ焼却炉の排熱を利用する熱電発電技術	富士電機総合研究所	東　泉	OHM，**84**，12（1997）	オーム社
金属ベースプリント基板の絶縁劣化と空間電荷分布	富士電機総合研究所 〃	岡本　健次 芳賀　弘二	電気学会基礎・材料・共通部門誌，**118**-A，1（1998）	電気学会
オゾンによる臭気物質の分解	富士電機総合研究所	星川　寛	Ozone News In Japan，No.26（1998）	日本オゾン協会
In-Plane Structural Analysis of CoCr Thin-Film Magnetic Media by Grazing Incidence X-Ray Diffraction	富士電機総合研究所 〃 〃 〃 松本工場 〃	大沢　通夫 広瀬　隆之 寺西　秀明 石渡　統 安宅　豊路 小沢　賢治	Photon Factory Activity Report 1996，**14**（1997-11）	高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所
Substrate Bias Effect on Blocking Capability of a Lateral P-channel MOSFET on SOI	富士電機総合研究所 〃	澄田　仁志 平林　温夫	Solid-State Electronics，**41**，11（1997）	Elsevier Sience Ltd.

パワー半導体シミュレーション技術

武井　　学（たけい　まなぶ）　　大月　正人（おおつき　まさひと）

1　まえがき

パワーデバイスの高性能化および高機能化が進み，開発に長い期間が必要になってきている。半導体シミュレーション技術を用いるとデバイスを試作せずに特性を予測することが可能であり，パワーデバイスの最適設計，新デバイスの開発，および開発時に発生する問題の解決に寄与できるため多くの期待が寄せられている。コンピュータ技術のめざましい進展およびシミュレーションソフトウェアの高度化により，シミュレータは高速化・高精度化し，複雑な外部回路とパワーデバイスを組み合わせた計算や三次元構造デバイスの特性予測も可能になった。

本稿では半導体シミュレーションの概要について述べ，IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor），FWD（Free Wheeling Diode），および制御 IC を組み合わせた IPM（Intelligent Power Module）の解析例を紹介する。

2　半導体シミュレータの構成

半導体の設計に使われるシミュレータには大きく分けて，プロセスシミュレータ，デバイスシミュレータ，回路シミュレータ，Mixed-Mode シミュレータの四つがある。

(1)　プロセスシミュレータ

半導体デバイスの製造プロセスをコンピュータ上で再現するためのソフトウェアである。酸化，拡散，エッチングなどのプロセス条件を入力するとプロセス終了後のデバイスの形状，不純物濃度分布などが結果として得られる。

富士電機ではスイス ISE 社製の TESIM，DIOS，PROSIT と米国 SILVACO 社製の ATHENA を使用している。IGBT，MOSFET（Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor），FWD，および IC のプロセス設計において最適なプロセス条件を見つけるために，これらのプロセスシミュレータを活用している。

(2)　デバイスシミュレータ

半導体デバイスの形状，不純物濃度プロファイル，およびデバイスの電極に与える電気的条件を入力するとデバイスの電気的特性が得られる。また，実験では分からないデバイス内部の動作を知ることができる。

ISE 社製の DESSIS と SILVACO 社製の ATLAS を，IGBT，MOSFET，および FWD の低損失化や高耐量化のために活用している。また MCCT，DGMOS，トレンチ MOSFET，トレンチ IGBT など次世代パワーデバイスの研究にも使われている。

(3)　回路シミュレータ

回路図，回路素子の特性，および電源を入力すると回路の動作を計算することができる。

米国 META 社製の HSPICE と米国 ANALOGY 社製の SABER を，IGBT 制御用の IC の設計およびパワーモジュールのノイズ解析のために使用している。

(4)　Mixed-Mode シミュレータ

デバイスシミュレータの拡張機能であり，デバイスの特性を計算すると同時に外部回路の特性を回路シミュレータとして計算し，デバイスと回路を組み合わせた解析が可能である。パワーエレクトロニクス回路の動作をきわめて正確に計算することができる。

ISE 社製の DESSIS と SILVACO 社製の ATLAS を Mixed-Mode オプション付きで使用している。IGBT，FWD および外部回路（電源，ゲート抵抗，寄生インダクタンスなど）を組み合わせたスイッチング特性の解析のために活用している。また開発途中で発生する問題に対し，原因およびメカニズムを探るためのツールとしても使われている。

3　Mixed-Mode シミュレーション技術

ここでは特に，パワー半導体デバイスのシステム化に向けて重要になってきた Mixed-Mode シミュレーション技術の開発状況について述べる。

現在，回路設計の分野では回路シミュレータが広く使われている。SABER などの回路シミュレータを使うと，近年主流のパワーデバイスである IGBT を使用したパワーエレクトロニクス回路の解析が可能である。しかし，回路シ

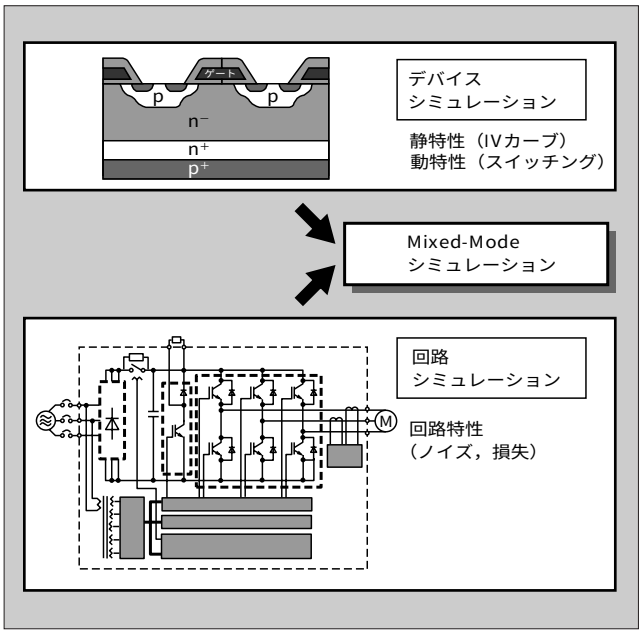
武井　　学

MOS ゲートパワーデバイスの設計・開発に従事。現在，松本工場半導体開発センターパワー半導体開発部。

大月　正人

MOS ゲートパワーデバイスの設計・開発に従事。現在，松本工場半導体開発センターパワー半導体開発部。

図1　Mixed-Mode シミュレーション

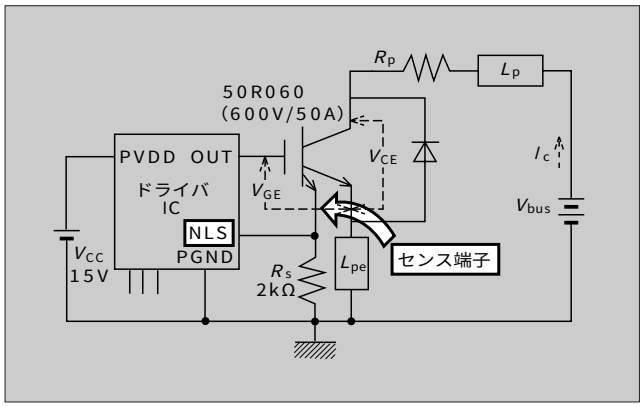


ミュレータを IGBT 回路に適用した場合，その精度が大きな問題となる。過去 10年以上の間 IGBT の特性を正確に再現するために，IGBT の回路モデルの作成に多くの努力がなされてきた。にもかかわらず，十分な精度で IGBT の特性を予測できるような IGBT 回路モデルはいまだ存在しない。これは IGBT の動作原理が複雑であり，しかも各メーカーがしのぎを削って新構造の IGBT を開発しているために，正確な回路モデルの開発が追いつかないなどの原因がある。

パワーデバイスの特性を正確に計算するためには，デバイス内部のポアソン方程式とキャリヤの流れの方程式を解けばよい。しかし，これらの偏微分方程式を複雑な境界条件の下で解析的に解くことはできない。そこで IGBT などのパワーデバイスの構造を多数のグリッドに分割して方程式を差分化することにより，コンピュータ上で数値的に解を求める必要がある。このような数値計算ソフトウェアがデバイスシミュレータであり，最近になって幾つか市販されるようになってきた。最初は本来の目的どおりデバイス単体の解析に使われていたが，デバイス外部の回路も含めて解析を行う「Mixed-Mode」法が開発された。Mixed-Mode 法はデバイスシミュレータと回路シミュレータの機能を組み合わせたもので，IGBT などのパワーデバイスを使用した回路の動作をきわめて正確に再現することができる（**図1**）。

Mixed-Mode 法はきわめて精度よくパワー系の回路を解析できる反面，回路シミュレータに比べて計算時間が膨大になる。このため従来は，IC などの複雑かつ大規模な外部回路と IGBT を組み合わせた計算は不可能であった。しかし近年，コンピュータの高性能化・大容量化が進み，このような解析も可能になってきた。

図2　IPM の短絡回路（1 相のみ）



4　新シリーズ R-IPM の Mixed-Mode 法による解析

4.1　IPM の機能

IPM とは，IGBT などのパワーデバイスと，これを制御および保護するための IC を組み合わせて一つのパッケージに収めた製品である。IPM は通常のスイッチング機能のほかにパワーデバイスの保護機能を持つので，破壊しにくいモジュールを実現できる。このため，顧客（インバータメーカーなど）が IPM を使って装置を設計する際にモジュールの保護回路を簡略化することができ，製品の開発期間を短縮できることから近年好んで使われるようになってきた。今後はますますパワーデバイスのインテリジェント化が進んでいくと考えられている。

富士電機は 1997年，最初のオールシリコン IPM を開発し，市場展開を始めた。パワーデバイスの保護および制御などのすべての機能を制御 IC に集積し実現した。

4.2　短絡時におけるパワーデバイスの保護

IPM の出力が短絡する事故が発生すると，IPM 内部の IGBT チップには高電圧が加わったままの状態で大電流が流れ，IGBT チップは瞬時に過熱する。このような事故が起きた場合には，外部回路は IPM の入力をオフすることで速やかに（数 μs 以内に）電流を遮断し，IGBT チップを破壊から守っている。外部回路が動作するまでの間に IGBT チップが破壊されないようにするため，**図2**のように IPM の制御 IC は IGBT のセンス端子電圧を検出して，ゲート電圧を低下させ，コレクタ電流を絞り，発熱をある程度抑えている。

ところで IGBT チップが短絡状態にあるとき，コレクタ電流（およびゲート電圧）が振動する現象が見られる。チップの設計によって振動の大小が異なるものの，あらゆる IGBT チップで振動の傾向が見られる。コレクタ電流が振動すると，大きなサージ電圧が発生したり外部の短絡検出回路が誤動作する可能性があり，最悪の場合には IPM が破壊される。したがって，短絡時にはできるだけ振動を抑える設計にしなくてはならない。

図３　IGBT のセル構造断面図

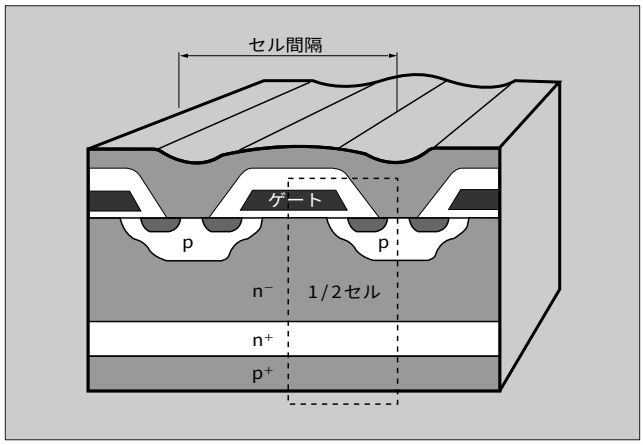


図４　IGBT チップの短絡実測波形

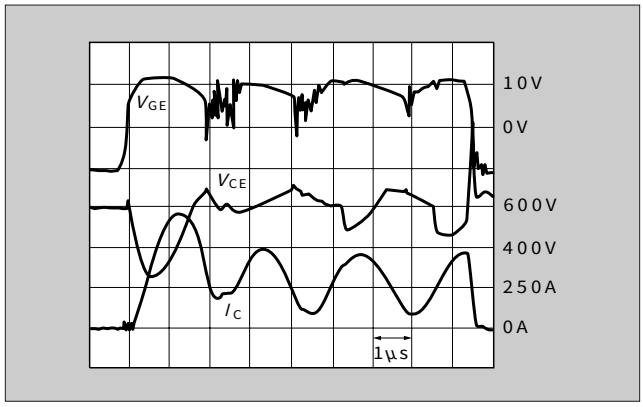
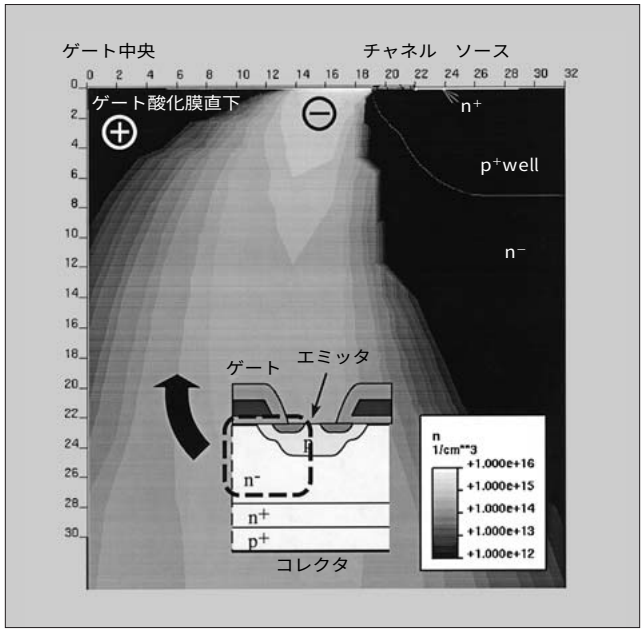


図５　短絡時における IGBT 内部の電子密度分布（計算値）



4.3　電流振動現象のシミュレーションによる解析

IGBT は**図３**に示すように，単位セルと呼ばれる同一の基本構造が多数集まってデバイスを構成している。単位セルを配置する間隔が大きいチップは，短絡試験において**図４**に示すように電流の振動が確認された。図中の I_C は IGBT のコレクタ電流，V_{GE} はゲート－エミッタ間電圧，V_{CE} はコレクタ－エミッタ間電圧を表す。なお，チップ単体の短絡振動現象はシミュレータ上でも再現できた。短絡中の IGBT 内部の動作をシミュレータで調べた結果，以下のことが分かった。

(1)　短絡時にデバイス内部を大電流が流れるとき，**図５**に示されるようにデバイス中の電子の通路に電子が偏って集中し，ゲート酸化膜直下のシリコン電位が変動する。

(2)　電子（およびホール）の分布が平衡値に落ち着くまでには有限の時間が必要であるためにゲート酸化膜下の電位変化に遅れが生じて，**図６**に示すように単位セル内の位置によって電位変化の位相がずれる。

(3)　電位変化の位相ずれのため，**図７**に示すように同一セル内でゲート酸化膜を通した電荷のやり取りが行われる。

この結果，チャネル領域の酸化膜に加わる電圧，すなわち IGBT のゲート電圧が上下して，コレクタ電流が大きく振動する。

図６　セル内の位置による電位変化の遅れ

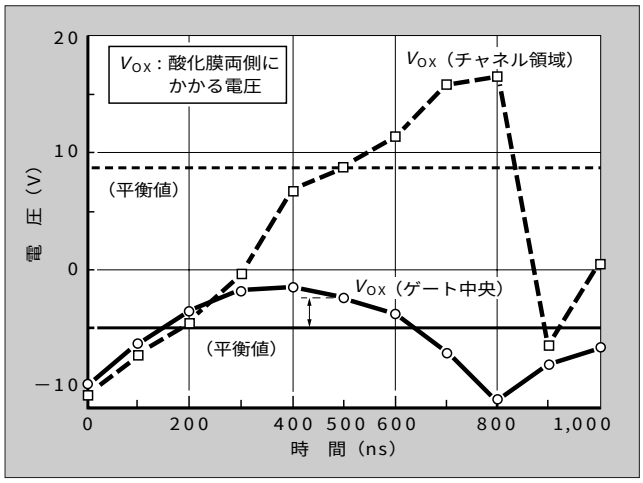


図７　同一セル内の変位電流

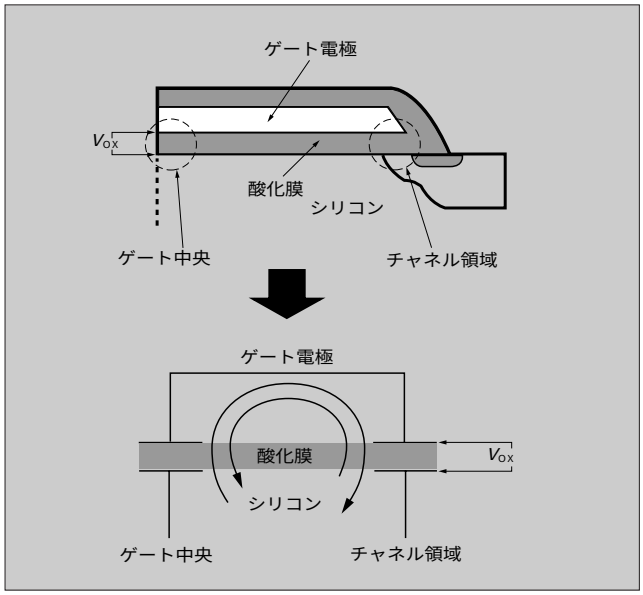


図8　IPM 短絡電流の実測波形

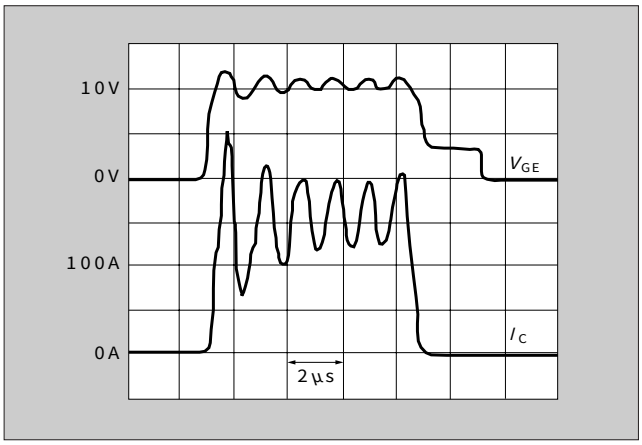
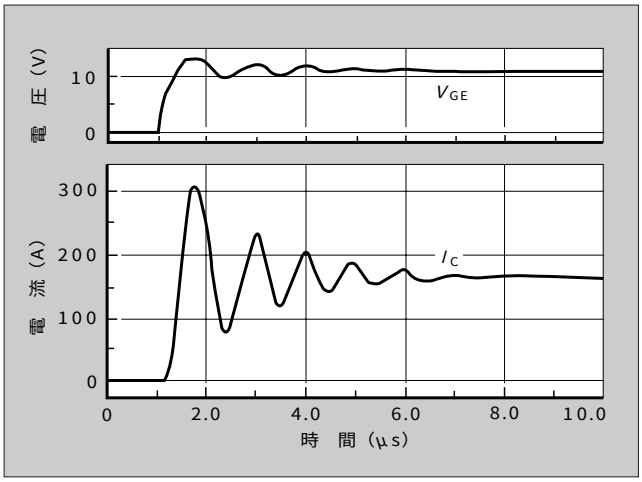


図9　Mixed-Mode 法により計算した IPM の短絡波形



セル間隔の小さい IGBT は酸化膜面積が小さくゲート酸化膜を通して流れる電流が小さいために，ゲート電圧の変化も小さくなる。このためコレクタ電流の振動は低減される。

4.4　電流制限時の振動

IPM の短絡時には，**図2**に示されるように制御 IC と IGBT チップはフィードバック回路を構成している。フィードバック回路の伝達遅延時間と IGBT 単体の振動周期が同程度であると，IGBT チップ単体では目立った振動がない場合でも，IC と組み合わせると振動が助長される可能性がある。

実際に組み合わせ評価を行うと，**図8**のような短絡時における電流振動現象が発生する。Mixed-Mode シミュレータを用いて**図3**の回路を IC を含めて解析したところ，**図9**のように振動を再現することができた。

4.5　対　策

短絡時の振動を抑えるためには次の方法がある。

(1)　パッケージの寄生インダクタンスを利用する。

(2)　制御 IC の短絡電流制限回路に IGBT ゲートからのフィードバック信号を与える。

図10　寄生インダクタンスによる振動の抑制

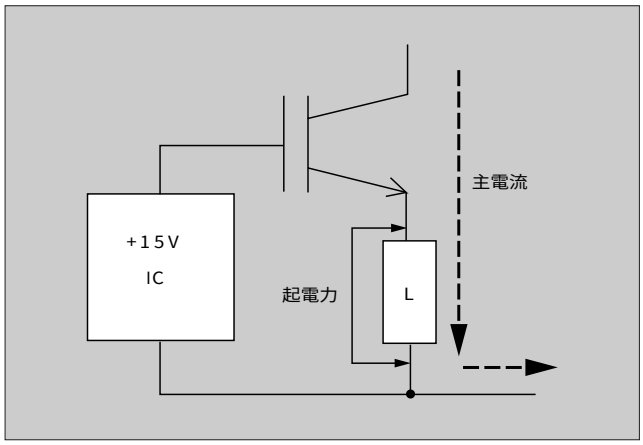
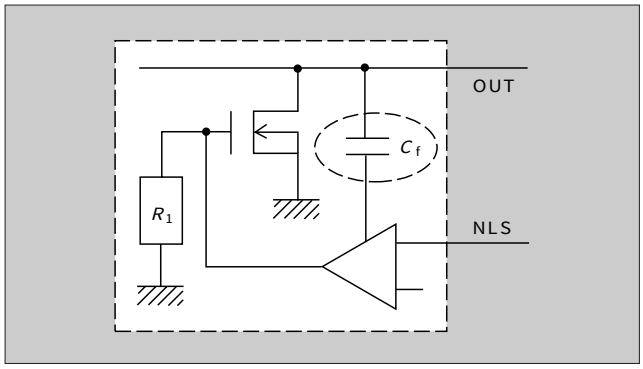


図11　IC の回路変更による振動の抑制



上記のいずれも短絡時の電流立上りを遅くして振動を有効に抑える方法であるが，逆に通常スイッチング時のターンオンまで遅くなり損失が大きくなる。したがって，振動の抑制とターンオン損失はトレードオフ関係にある。

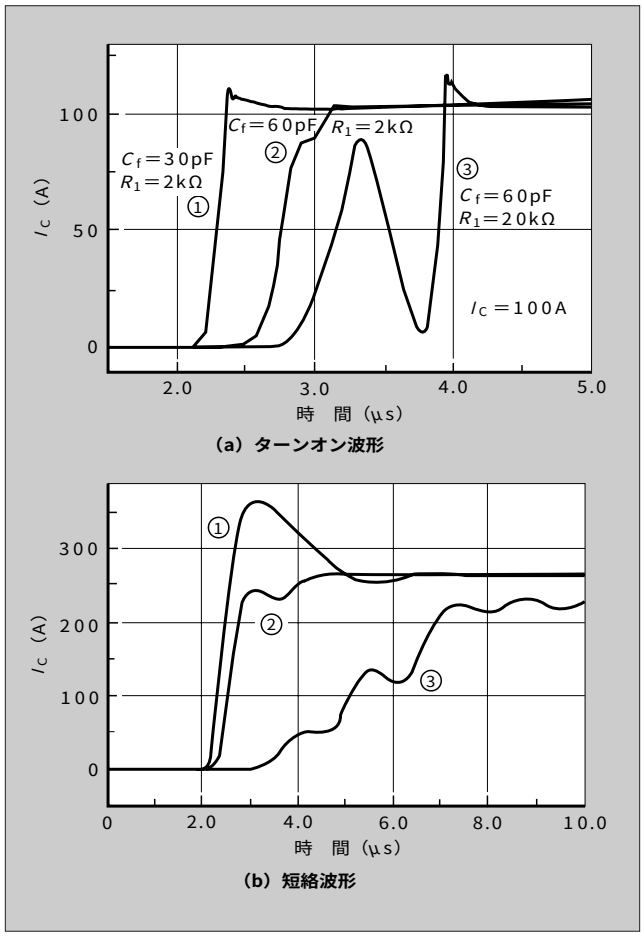
(1)は**図10**のように IGBT のエミッタ－ゲート間にインダクタンスを故意に設ける方法である。コレクタ電流が増加しているときはインダクタンス両端に IGBT ゲート側が負の電位になるような電圧が発生してコレクタ電流が抑えられる。逆に電流減少中はゲートが正になり，電流を増加させる方向に作用する。このため電流の振動は逆方向に抑えられて安定化する。

このインダクタンスはパッケージ内部端子の寄生成分によって実現されるが，モジュールパッケージの設計に制約を設けてしまうので好ましくない。

一方，(2)は**図11**のように IC 内部に容量 C_f を加えるだけで可能になる。コレクタ電流の増加中，すなわちゲート電圧の増加中は，容量 C_f を通して電流が流れて電流制限用の MOSFET をオンさせゲート電圧をしぼる。コレクタ電流減少中は逆の動作をしてゲート電圧を上昇させる。

ところがこの方法は，IC 内部の回路変更であるため簡単に実験することはできない。そこで Mixed-Mode シミュレータを用いてコンピュータ上で最適回路を設計することにした。容量 C_f の値などをパラメータとして短絡時の波形とターンオン波形を予測した結果が**図12**である。この結果をもとにして設計した IC を使用する IPM の短絡実測波

図12　Mixed-Mode 法による IPM の特性予測



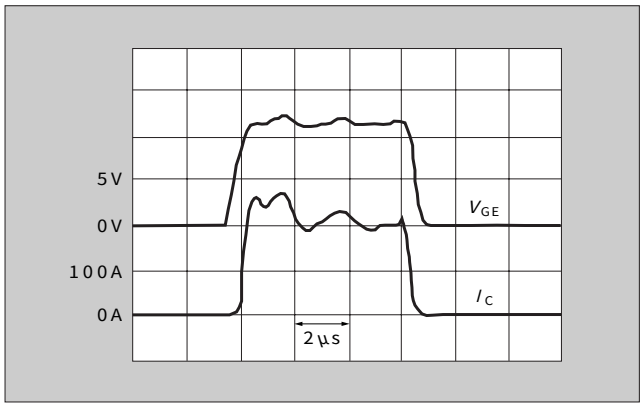
形を**図13**に示す。IC の回路変更だけで短絡電流の振動を抑えることができた。

5　あとがき

Mixed-Mode シミュレーション技術を用いた IPM の解析例を紹介した。高性能のコンピュータと最新のシミュレータを用いることで，大規模な外部回路を含むパワーデバイスの正確な動特性解析が可能である（本稿の解析例では 1 個の IGBT と約 100 個の外部回路素子を組み合わせて計算している）。Mixed-Mode シミュレータを使用すると，従来の回路シミュレータでは不可能であったパワーデバイスの内部動作に起因する現象の解析も精度よく行うことができ，IPM および，より大規模なパワーエレクトロニクス回路の最適設計に活用することができる。

現在市販されているデバイスシミュレータはパワーデバイス専用ではなく，多くが LSI やサブミクロンデバイスに向かっている。このようなシミュレータをパワーデバイス分野で有効に活用するにはさまざまなノウハウが必要である。今後も進展していくであろうシミュレーション技術に対し，パワーデバイス分野への適用技術を発展させてパワーモジュールの開発に役立てていく所存である。

図13　IC 改良後の IPM 短絡実測波形



参考文献

(1)　田上三郎・岡本章信：電力用半導体デバイスシミュレーションの最近の動向，富士時報，Vol.66，No.4，p.269–271（1993）

(2)　大月正人・工藤基：デバイスシミュレーション技術，富士時報，Vol.67，No.5，p.306–309（1994）

主要営業品目

電　機

電動機，可変速装置，誘導加熱装置，誘導炉，産業用電源装置，クリーンルームシステム，非常用電源装置，コンピュータ用電源装置，舶用電気品，車両用電気品，変圧器，遮断器，ガス絶縁開閉装置，電力変換装置，原子力機器，火力機器，水力機器，発電機，新エネルギー発電システム，発電設備用保護・監視・制御装置，発電設備用コンピュータ制御装置，誘導電動機，ギヤードモータ，ブレーキモータ，ファン，ポンプ，ブロワ，電磁開閉器，操作・表示機器，制御リレー，タイマ，ガス関連機器，配線用遮断器，漏電遮断器，限流ヒューズ，高圧受配電機器，汎用モールド変圧器，電力制御機器，プログラマブルコントローラ，プログラマブル操作表示器，多重伝送システム，汎用インバータ，サーボシステム，加熱用インバータ，可変速電動機

制御・情報・電子デバイス

コンピュータ制御装置，運転訓練・系統解析シミュレータ，電力量計，放射線モニタリングシステム，保護・監視・制御装置，マイクロコントローラ，水処理装置，遠隔制御装置，オゾン処理システム，電気集じん機，FA システム，電話自動選択着信装置，レーザ応用装置，ビデオセンサ応用装置，工業計測制御機器，分析機器，放射線計測機器，OCR，磁気記録媒体，複写機・プリンタ用感光体，パワートランジスタ，サイリスタ，シリコン整流素子，集積回路，パワーハイブリッド IC，サージアブソーバ，半導体センサ，スイッチング電源

業務用民生機器ほか

自動販売機，コインメカニズム，紙幣識別装置，貨幣処理システム，飲料ディスペンサ，自動給茶機，冷凍冷蔵ショーケース，ホテルベンダシステム，カードシステム

富士時報	**第 71 巻　第 2 号**	平成 10 年 1 月 30 日　印刷 平成 10 年 2 月 10 日　発行 定価 525 円（本体 500 円・送料別）
編集兼発行人	沢　邦彦	
発行所	富士電機株式会社内 「富士時報」編集部	〒100-8410 東京都千代田区有楽町一丁目 12 番 1号 （新有楽町ビル） 電話　東京（03）3211 － 7111(大代表) 〔編集室：電話　東京（03）3211－1168〕
印刷所	富士電機情報サービス株式会社	〒151-8520 東京都渋谷区代々木四丁目 30 番 3 号 （新宿コヤマビル） 電話　東京（03）5388 －8241
発売元	株式会社オーム社	〒101-8460 東京都千代田区神田錦町三丁目 1 番地 電話　東京（03）3233－0641（代表） 振替口座　東京　6－20018

© 1998 Fuji Electric Co., Ltd., Printed in Japan（禁無断転載）

富士時報論文抄録

パワーモジュールの現状と展望

桜井　建弥
富士時報　Vol.71 No.2 p.97-100（1998）

半導体の研究開発動向を要約すると，低損失化，破壊フリー，システム化の三つになる。半導体は絶え間ない技術革新により，応用先であるシステム製品の性能・機能向上，小形化，低コスト化に大きく貢献する。その製品は，システム機能を盛り込むことでますます発展すると考える。本稿では，IGBT を主体にしたパワーモジュールの製品とその技術について述べる。

中・大容量 R シリーズ IGBT-IPM

山口　厚司　　市川　裕章　　征矢野　伸
富士時報　Vol.71 No.2 p.101-105（1998）

R シリーズ IPM の系列と新機能について解説する。R シリーズ IPM は，6 個組，7 個組としては市場で初めて 600 V/300 A，1,200 V/150 A まで系列化され，大容量の要求にも十分対応可能である。

内蔵機能としては，従来の IPM で採用されていた保護機能のほかに，素子温度を直接検出して保護する素子過熱保護機能があり，IPM の高信頼性を達成している。また，制御回路の IC 集積化により，小形化，低コスト化を実現している。

小容量民生用 IGBT-IPM

梶原　玉男　　岩井田　武　　小谷部 和徳
富士時報　Vol.71 No.2 p.106-111（1998）

家庭電化製品のインバータ化に対応し，富士電機では民生分野向け小容量 IGBT-IPM を開発した。その特徴は次のとおりである。①専用 IC の開発と最適化によるマルチチップ形 IPM の実現。②IGBT 接合温度を直接検出する過熱保護方式の適用による高信頼性の実現。③最先端の低損失第四世代 IGBT チップの適用。④シャント抵抗検出方式の適用による高精度過電流保護機能を実現。⑤銅ベースレス DBC 絶縁基板の適用による絶縁層間漏れ電流の低減化を実現。

小・中容量産業用 NPT-IGBT モジュール

中島　修　　宮下　秀仁　　岩井田　武
富士時報　Vol.71 No.2 p.112-116（1998）

インバータなどの電力変換分野では，市場要求である小形軽量化，高効率化，低騒音化を実現するために，低損失，高速スイッチングを特長とするパワーデバイスである IGBT の適用が進んでいる。富士電機では，1,200 V/1,400 V 素子に NPT-IGBT を適用し，高耐圧，高信頼性のモジュールを開発した。今回，NPT-IGBT を適用した小・中容量 IGBT モジュールの開発を行ったので，その内容を紹介する。

大容量産業用・車両用 NPT-IGBT モジュール

田久保　拡　　石井　憲一　　沖田　宗一
富士時報　Vol.71 No.2 p.117-122（1998）

産業用や車両駆動装置などの大容量変換装置は，パワーデバイスの発展により飛躍的な性能向上が図られている。大容量パワーデバイスは GTO サイリスタが主流であったが，IGBT の高耐圧・大容量化技術の進展により，特に IGBT モジュールが大容量装置にも適用され，注目を集めている。本稿では，大容量変換装置の動向と富士電機の大容量パワーデバイスに対する取組みについて述べる。また，1,200，1,400 V/600 A 1 個組，1,800 V/600 A 1 個組チョッパタイプの新形大容量 NPT-IGBT モジュールの概要と，その技術開発について紹介する。

大容量車両用・産業用平形 IGBT

一條　正美　　関　康和　　西村　孝司
富士時報　Vol.71 No.2 p.123-127（1998）

2,500 V の耐圧で 1,800 A の電流容量を有する加圧接触形の IGBT（形式名： EMB1802RM-25）を開発し，東海旅客鉄道(株)700 系新幹線先行試作車用主変換装置に搭載した。この素子は，先に開発した 1,000 A の電流容量の EMB1001RM-25 に比較して，一段と小形・高性能を追求したものになっている。富士電機は，この素子のコストパフォーマンスをさらに高いものとすべく改良開発を推進しており，今春には完成させる予定である。

パワーモジュール用チップ技術

百田　聖自　　大西　泰彦　　熊谷　直樹
富士時報　Vol.71 No.2 p.128-134（1998）

チップの性能がパワーモジュールの特性を決定づけるほど，その重要性は高い。富士電機では，大容量化，電圧駆動性などの特長をもつ IGBT の開発を行っているが，プレーナ形では限界まで性能を改善した第四世代チップの開発を行った。また，インテリジェント化のために，パワーインテリジェントモジュール用制御 IC の開発にも成功した。本稿ではその特性を達成するためのチップ設計技術を，その過程であるシミュレーション解析やプロセス技術をも併せて概要を紹介する。

パワーモジュールパッケージ技術

両角　朗　　丸山　力宏　　山田　克己
富士時報　Vol.71 No.2 p.135-140（1998）

地球環境保護に対する社会的関心が高まるにつれて，クリーンな電気エネルギーが改めて注目されてきており，より高性能な電力変換装置の必要性が求められている。これに伴い，キーデバイスであるパワーモジュールには，より一層の高機能・高性能・高信頼度が必要であり，特に信頼性は最も重要な基本性能である。本稿では，パワーモジュールにおけるパッケージ技術について，絶縁性能および熱的性能を支配するキーパーツであるセラミック基板を取り上げ，絶縁に対する高信頼化への取組みについて紹介する。

Abstracts (Fuji Electric Journal)

R-Series IGBT-IPMs for Large and Medium Power Drive

Atsushi Yamaguchi Hiroaki Ichikawa Shin Soyano
Fuji Electric Journal Vol.71 No.2 p.101-105 (1998)

This paper describes the R series of IPMs and its new functions. The series ranges up to 600 V/300 A and 1,200 V/150 A with a 6-pack or 7-pack module first in the market and can fully meet requirements for large power drive. The built-in function in addition to the conventional protective function is overheat protection by directly detecting the IGBT temperature, which attains the high reliability of IPMs. The integrated circuit for the control circuit realizes reduction in size and cost.

NPT-IGBT Modules for Industrial Small and Medium Power Drive

Osamu Nakajima Shuji Miyashita Takeshi Iwaida
Fuji Electric Journal Vol.71 No.2 p.112-116 (1998)

IGBTs, power devices characteristic of low loss and high-speed switching, have been wider used for power converters such as inverters to attain small size and weight, high efficiency, and low noise. Fuji Electric applied NPT-IGBTs to 1,200 V/1,400 V IGBTs and developed high-voltage, high-reliability modules. This paper describes IGBT modules newly developed with NPT-IGBT for small and medium power drive.

High-Power Flatpack IGBTs for Traction and Industrial Use

Masami Ichijo Yasukazu Seki Takashi Nishimura
Fuji Electric Journal Vol.71 No.2 p.123-127 (1998)

Fuji Electric developed 2,500 V/1,800 A press-pack IGBTs (type:EMB1802RM-25) and installed them in main converters for a prototype of the 700-series Shinkansen electric trains of Central Japan Railway Co. These IGBTs have been improved in size and performance compared with the former 1,000 A EMB1001RM-25. Fuji Electric is promoting improvement and development to raise cost performance, which is scheduled to complete this spring.

Packaging Technology for High-Reliability Power Modules

Akira Morozumi Rikihiro Maruyama Katsumi Yamada
Fuji Electric Journal Vol.71 No.2 p.135-140 (1998)

As social concern for the protection of global environment increases, clean electric energy is again noticed and power converters with higher efficiency are desired. Power modules, the key devices, require higher functions, performance, and reliability, and especially reliability is the most important basic quality. This paper describes packaging technology for power modules, focusing on the reliability of insulation, citing ceramic substrates which are the key parts controlling insulation and thermal characteristics.

Present Status and Prospects for Power Modules

Kenya Sakurai
Fuji Electric Journal Vol.71 No.2 p.97-100 (1998)

The trend of research and development of semiconductors boils down to loss reduction, freedom from destruction, and system integration. The ceaseless technical innovation of semiconductors has greatly helped systems with semiconductor applications improve performance and functions and reduce size and cost. These systems are expected to further develop with modules incorporating system functions. This paper describes power modules and their technological features.

Low-Power IGBT-IPM Modules for Home Appliances

Tamao Kajiwara Takeshi Iwaida Kazunori Oyabe
Fuji Electric Journal Vol.71 No.2 p.106-111 (1998)

Fuji Electric has developed novel intelligent power modules (IPMs) for home appliances to meet market demands toward inverter application. The features are multi-chip IPMs by developing and optimizing specific ICs overheat protection by detecting the temperature of IGBT chip junctions application of novel low-loss 4th-generation IGBT chips highly accurate overcurrent protection by shunt resistance detection low leakage current through the isolation layer by applying DBC insulation substrates.

High-power NPT-IGBT Modules for Industrial and Traction Inverters

Hiromu Takubo Kenichi Ishii Souichi Okita
Fuji Electric Journal Vol.71 No.2 p.117-122 (1998)

The performance of high-power converters for industrial and traction drive has made rapid progress with power device development. The mainstream of high-power devices was GTO thyristor. However, as IGBT technology for high voltage and power had developed, IGBT modules have noticeably been used for high-power equipment. This paper describes trends of high-power converters and Fuji Electric's attitude for power devices for high-power drive. It also introduces an outline of new high-power NPT-IGBT modules of 1-pack 1,200 V or 1,400 V/600 A and 1-pack 1,800 V/600 A (chopper) and

Technologies for Power Module Chips

Seiji Momota Yasuhiko Ohnishi Naoki Kumagai
Fuji Electric Journal Vol.71 No.2 p.128-134 (1998)

The performance of chips is so important that it determines the characteristics of power modules. Fuji Electric developed IGBTs characteristic of high power and voltage drive, and in planar devices, it attained development of 4th-generation chips improved in performance to the maximum. Also it succeeded in developing the control IC for intelligent power modules. This paper outlines chip design technology to attain the characteristics as well as simulation analysis and processing technology required in the process.

パワー半導体シミュレーション技術

武井　学　　大月　正人
富士時報　Vol.71 No.2 p.141−145（1998）

半導体シミュレーションはデバイスを試作せずにその特性を予測することが可能であり，パワーモジュールの開発期間短縮への貢献が期待されている。コンピュータ技術のめざましい進展およびシミュレーションソフトウェアの高度化により，シミュレータは高速化し，複雑な外部回路とパワーデバイスを組み合わせた計算が可能になった。本稿では IPM の解析例を紹介する。

Simulation Technology for Power Device

Manabu Takei Masahito Otsuki

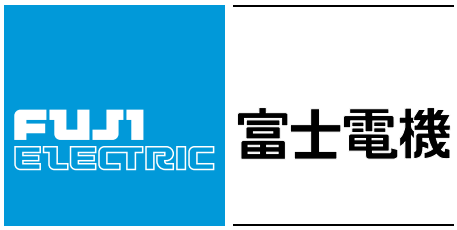
Fuji Electric Journal Vol.71 No.2 p.141−145 (1998)

Semiconductor simulation can predict characteristics of a device without trial manufacture and is expected to shorten time required to develop power modules. The development of computer technology and advancement of simulation software have raised simulator speed and can execute calculation for power devices combined with a complicated external circuit. This paper introduces an example of IPM analysis.

富士電機株式会社

本社事務所	☎(03)3211-7111	〒100-8410 東京都千代田区有楽町一丁目12番1号（新有楽町ビル）
〃 新宿別館	☎(03)3375-7111	〒151-8520 東京都渋谷区代々木四丁目30番3号（新宿コヤマビル）
北海道支社	☎(011)261-7231	〒060-0042 札幌市中央区大通西四丁目1番地（道銀ビル）
東北支社	☎(022)225-5351	〒980-0811 仙台市青葉区一番町一丁目2番25号（仙台NSビル）
北陸支社	☎(0764)41-1231	〒930-0004 富山市桜橋通3番1号（富山電気ビル）
中部支社	☎(052)204-0290	〒460-0003 名古屋市中区錦一丁目19番24号（名古屋第一ビル）
関西支社	☎(06) 455-3800	〒553-0002 大阪市福島区鷺洲一丁目11番19号（富士電機大阪ビル）
中国支社	☎(082)247-4231	〒730-0021 広島市中区胡町4番21号（朝日生命広島胡町ビル）
四国支社	☎(087)851-9101	〒760-0017 高松市番町一丁目6番8号（高松興銀ビル）
九州支社	☎(092)731-7111	〒810-0001 福岡市中央区天神二丁目12番1号（天神ビル）
北関東支店	☎(0485)26-2200	〒360-0037 熊谷市筑波一丁目195番地（能見ビル）
首都圏北部支店	☎(048)657-1231	〒330-0802 大宮市宮町一丁目38番1号（野村不動産大宮共同ビル）
首都圏東部支店	☎(043)223-0701	〒260-0015 千葉市中央区富士見二丁目15番11号（日本生命千葉富士見ビル）
神奈川支店	☎(045)325-5611	〒220-0004 横浜市西区北幸二丁目8番4号（横浜西口KNビル）
新潟支店	☎(025)284-5314	〒950-0965 新潟市新光町16番地4（荏原新潟ビル）
長野システム支店	☎(026)228-6731	〒380-0836 長野市南県町1002番地（陽光エースビル）
長野支店	☎(0263)36-6740	〒390-0811 松本市中央四丁目5番35号（長野鋳物会館）
松山支店	☎(089)933-9100	〒790-0878 松山市勝山町一丁目19番地3（青木第一ビル）
北見営業所	☎(0157)22-5225	〒090-0831 北見市西富町163番地の30
釧路営業所	☎(0154)22-4295	〒085-0032 釧路市新栄町8番13号
道東営業所	☎(0155)24-2416	〒080-0803 帯広市東三条南十丁目15番地
青森営業所	☎(0177)77-7802	〒030-0861 青森市長島二丁目25番3号（ニッセイ青森センタービル）
盛岡営業所	☎(019)654-1741	〒020-0034 盛岡市盛岡駅前通16番21号（住友生命盛岡駅前ビル）
秋田営業所	☎(0188)24-3401	〒010-0962 秋田市八橋大畑一丁目5番16号
山形営業所	☎(0236)41-2371	〒990-0057 山形市宮町一丁目10番12号
福島営業所	☎(0249)32-0879	〒963-8004 郡山市中町1番22号（郡山大同生命ビル）
金沢営業所	☎(076)221-9228	〒920-0031 金沢市広岡一丁目1番18号（伊藤忠金沢ビル）
福井営業所	☎(0776)21-0605	〒910-0005 福井市大手二丁目7番15号（安田生命福井ビル）
山梨営業所	☎(0552)22-4421	〒400-0858 甲府市相生一丁目1番21号（清田ビル）
松本営業所	☎(0263)33-9141	〒390-0811 松本市中央四丁目5番35号（長野鋳物会館）
岐阜営業所	☎(058)251-7110	〒500-8868 岐阜市光明町三丁目1番地（太陽ビル）
静岡営業所	☎(054)251-9532	〒420-0011 静岡市安西二丁目21番地（静岡木材会館）
浜松営業所	☎(053)458-0380	〒430-0935 浜松市伝馬町312番地32（住友生命浜松伝馬町ビル）
豊田営業所	☎(0565)29-5771	〒471-0835 豊田市曙町三丁目25番地1
和歌山営業所	☎(0734)72-6445	〒640-8341 和歌山市黒田94番地24（鍋島ビル）
山陰営業所	☎(0852)21-9666	〒690-0874 松江市中原町13番地
岡山営業所	☎(086)227-7500	〒700-0826 岡山市磨屋町3番10号（住友生命岡山ニューシティビル）
山口営業所	☎(0836)21-3177	〒755-0043 宇部市相生町8番1号（宇部興産ビル）
徳島営業所	☎(0886)55-3533	〒770-0832 徳島市寺島本町東二丁目5番地1（元木ビル）
高知営業所	☎(0888)24-8122	〒780-0870 高知市本町四丁目1番16号（高知電気ビル別館）
小倉営業所	☎(093)521-8084	〒802-0014 北九州市小倉北区砂津二丁目1番40号（富士電機小倉ビル）
長崎営業所	☎(095)827-4657	〒850-0037 長崎市金屋町7番12号
熊本営業所	☎(096)387-7351	〒862-0954 熊本市神水一丁目24番1号（城見ビル）
南九州営業所	☎(099)224-8522	〒892-0846 鹿児島市加治屋町12番7号（日本生命鹿児島加治屋町ビル）
沖縄営業所	☎(098)862-8625	〒900-0005 那覇市天久1131番地11（ダイオキビル）
エネルギー製作所	☎(044)333-7111	〒210-0856 川崎市川崎区田辺新田1番1号
変電システム製作所	☎(0436)42-8111	〒290-8511 市原市八幡海岸通7番地
東京システム製作所	☎(042)583-6111	〒191-8502 日野市富士町1番地
神戸工場	☎(078)991-2111	〒651-2271 神戸市西区高塚台四丁目1番地の1
鈴鹿工場	☎(0593)83-8100	〒513-8633 鈴鹿市南玉垣町5520番地
松本工場	☎(0263)25-7111	〒390-0821 松本市筑摩四丁目18番1号
山梨工場	☎(0552)85-6111	〒400-0222 山梨県中巨摩郡白根町飯野221番地の1
吹上工場	☎(0485)48-1111	〒369-0122 埼玉県北足立郡吹上町南一丁目5番45号
大田原工場	☎(0287)22-7111	〒324-8510 大田原市中田原1043番地
三重工場	☎(0593)30-1511	〒510-8631 四日市市富士町1番27号
(株)富士電機総合研究所	☎(0468)56-1191	〒240-0101 横須賀市長坂二丁目2番1号
(株)エフ・エフ・シー	☎(03)5351-0200	〒151-0053 東京都渋谷区代々木四丁目30番3号（新宿コヤマビル）

昭和40年6月3日　第三種郵便物認可　平成10年2月10日発行（毎月1回10日発行）富士時報　第71巻　第2号（通巻第755号）



本誌はエコマーク認定の再生紙を使用しています。

定価525円（本体500円）