第 7 世代「X シリーズ」中容量 IGBT−IPM「P638」

"P638" 7th−Generation "X Series" Medium Capacity IGBT−IPM

藤井　優孝 FUJII, Masanari　　城塚　直彦 JOZUKA, Naohiko　　唐本　祐樹 KARAMOTO, Yuki

富士電機は、電力変換装置のさらなる小型化、低損失化の要求に応えるため、新パッケージ「P638」を適用した第 7 世代「X シリーズ」IGBT−IPM を開発した。この製品は、第 6 世代 IGBT−IPM の「P630」に比べ、モジュール設置面積を 54% 縮小した。また、第 7 世代チップ技術による発生損失の 10% 低減と、第 7 世代のパッケージ技術の適用による 150℃での高温動作化の両方を実現することで、連続動作時の負荷電流を第 6 世代 IGBT−IPM P630 よりも増大でき、28% 大きい負荷領域まで使用可能となった。

Fuji Electric has developed a 7th-generation "X Series" IGBT-IPM, which utilizes our new "P638" package to meet the demand for further miniaturization and lower loss in power converters. Compared to the "P630" 6th-generation IGBT-IPM, this 7th-generation product has a 54% smaller module footprint. The 7th-generation chip technology has reduced the generated loss by 10% and the 7th-generation package technology has increased the operating temperature to 150°C, allowing the P638 to have the higher continuous load current than that of the P630 6th-generation IGBT-IPM by 28%.

1　まえがき

近年、地球温暖化対策が世界共通の課題となり、エネルギーの有効利用が求められている。その対策として、電気エネルギーを効率的に利用して、省エネルギー（省エネ）化に貢献するパワーエレクトロニクス（パワエレ）機器への期待が高まっている。そのため、産業用ロボットや工作用機械をはじめとした幅広い用途で利用されるパワエレ機器である電力変換装置には、さらなる省エネ化が求められている。加えて、電力変換装置には、省スペースで高信頼性であることも求められている。

これらを実現するためには、電力変換装置で使用するパワー半導体が低損失、小型、高信頼性であることが重要となる。このパワー半導体の一つとして IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）チップとダイオードチップを搭載した IGBT モジュールがある。IGBT−IPM（Intelligent Power Module）は、IGBT のゲートを駆動する制御 IC を内蔵し、さらに保護機能も備えた高機能な IGBT モジュールであり、高い信頼性が要求される NC 工作用機械やロボットなど、さまざまな用途で使用されている。

今回、電力変換装置のさらなる小型化と低損失化要求に応えるために、第 7 世代のチップ技術とパッケージ技術を適用し、従来製品より小型化した新パッケージ「P638」を適用した第 7 世代 IGBT−IPM を開発し、系列化した。

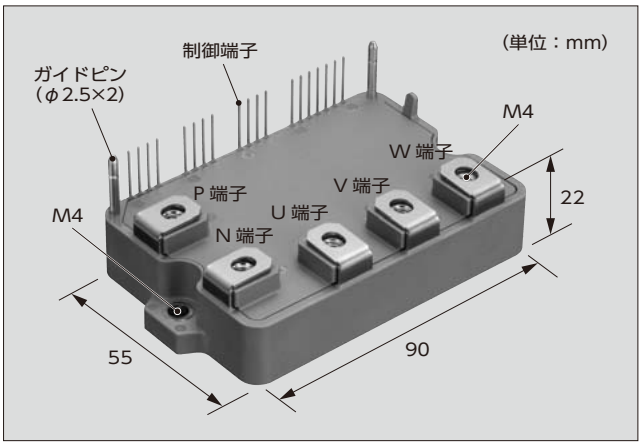

図 1　新パッケージ「P638」

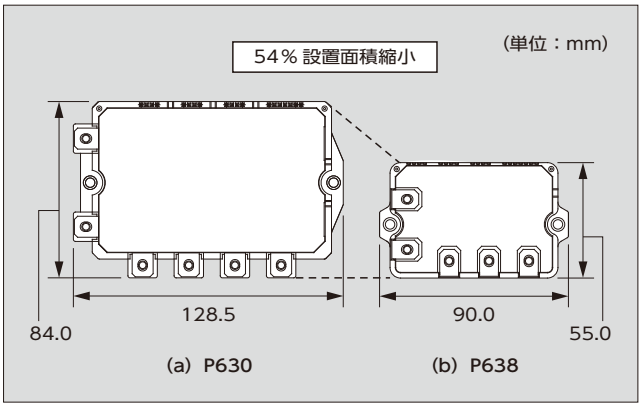

図 2　「P638」と「P630」の外形の比較

2　製品概要と機能

2.1　製品外形

図 1 に新パッケージ P638 の外観を示す。**図 2** に今回開発した第 7 世代 IGBT−IPM P638 と同一出力定格の第 6 世代 IGBT−IPM「P630」の外形の比較を示す。P638 は、モジュール設置面積を P630 に対して 54% 縮小した。P630 と同様に装置のプリント基板への取り付けは、はんだ付けを必要としない M4 ねじ用のナット入り主端子と

し、制御信号用の端子は、金めっきを行ったコネクタ用ピン端子を適用した。また、両端にガイドピンを設けることでプリント基板への挿入を容易にした。本モジュールの回路構成は三相インバータ回路を一つのモジュールに集積化した 6 in 1 構成とした。

2.2　ラインアップ

表 1 に第 7 世代 IGBT−IPM P638 の製品ラインアップを示す。定格電圧 650 V 系は定格電流 100 A と 150 A、定格電圧 1,200 V 系は定格電流 50 A と 75 A のそれぞれ 2 系列を製品化した。

2.3　機能

表 2 に第 7 世代 IGBT−IPM と第 6 世代 IGBT−IPM の機能比較を示す。第 7 世代 IGBT−IPM は、第 6 世代 IGBT−IPM に対して短絡保護の動作遅延時間を 50% 短縮するとともに、チップ過熱保護動作温度のばらつきを約 60% 低減した。また、第 7 世代 IGBT−IPM は、第 6 世代 IGBT−IPM よりも最高動作温度が向上しているため、チップ過熱保護の動作温度を 182.5 ℃に上げることにより、使用可能な温度帯域を広げた。

さらなる高信頼性化要求に応えるため、第 7 世代 IGBT−IPM は、チップ温度が 150 ℃以上になると、チップ過熱状態であることをチップ過熱保護動作より早く装置側に警報として知らせる温度ワーニング出力機能を業界で初めて搭載した。本機能を利用することにより、IGBT−IPM が過熱保護にて出力停止するより早く運転条件を緩和することが可能となり、突然の装置停止による生産性の低下を防ぐことができる。

図 3 にチップ温度ワーニング動作のタイミングチャートを示す。**図 3** の①において、IGBT チップ接合温度 T_{vj} がチップワーニング温度 T_{jW} を超えると、ワーニング出力端子電圧が High から Low となる。その際、スイッチング動作は継続される。

図 3 の②では、①の状態の後も温度上昇が継続し、T_{vj} がチップ過熱保護温度 T_{jOH} を超えたため過熱保護アラーム出力端子信号が High から Low となり、スイッチング動作を停止する。

図 3 の③では、T_{vj} がワーニングリセット温度を下回り、ワーニング出力端子電圧が Low から High に復帰する。

このように T_{jOH} は、IGBT のチップ温度が 175 ℃以上になると動作し、保護アラームを出力するとともにスイッチング動作を停止するが、チップ温度ワーニング出力機能は、チップ温度ワーニングを出力した後もスイッチング動作を継続する。

2.4　高温動作化

表 3 に、第 7 世代 IGBT−IPM と第 6 世代 IGBT−IPM の最高動作温度の比較を示す。第 7 世代 IGBT−IPM は、第 7 世代パッケージ技術である高耐熱ゲルや高信頼性はんだの採用により、連続動作時チップ接合温度 T_{vjop} の最高値を第 6 世代 IGBT−IPM の 125 ℃から 150 ℃に向上

表 1　第 7 世代 IGBT-IPM「P638」の製品ラインアップ

定格電圧	定格電流	製品型式
650 V	100 A	6MBP100XGN065-50
	150 A	6MBP150XGN065-50
1,200 V	50 A	6MBP50XGN120-50
	75 A	6MBP75XGN120-50

表 2　第 7 世代 IGBT-IPM と第 6 世代 IGBT-IPM の機能比較

機能		第6世代IGBT-IPM	第7世代IGBT-IPM
保護機能	短絡保護	○ (動作遅延2 μs)	◎ 高速化 (動作遅延1 μs)
	チップ過熱保護	○ (170 ℃±20 ℃)	◎ 高精度化 (182.5 ℃±7.5 ℃)
	電源電圧低下保護	○	○
チップ温度ワーニング出力機能		—	○ (≧150 ℃)

○は機能あり、◎は従来に対する機能向上、−は機能なし

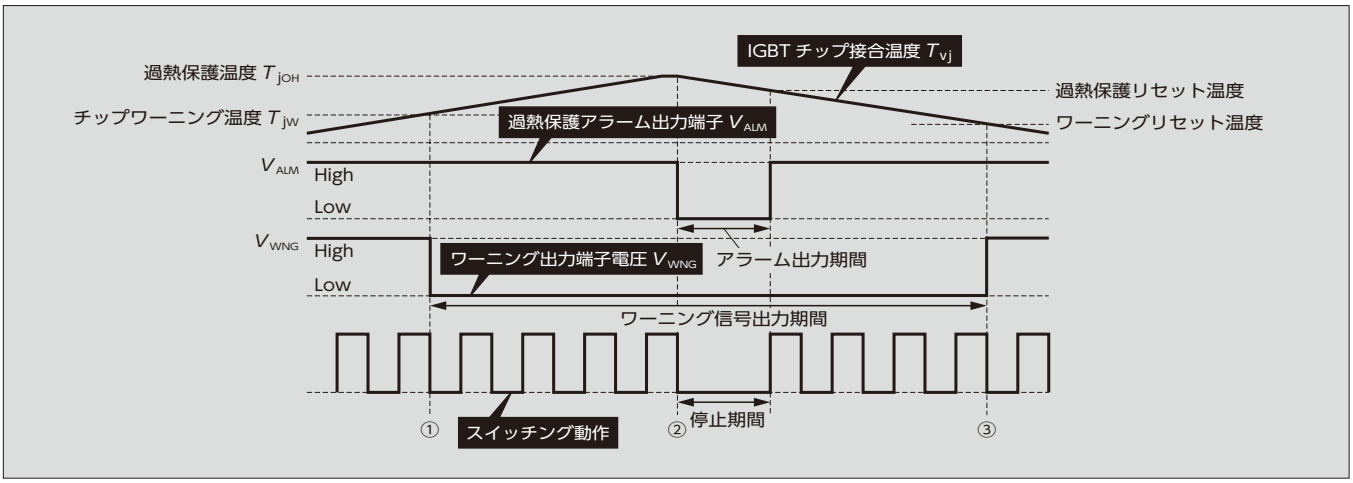

図 3　チップ温度ワーニング動作タイミングチャート

表 3　最高動作温度の比較

項目	第6世代IGBT-IPM	第7世代IGBT-IPM
最高ケース温度T_{cmax}	110 ℃	125 ℃
連続動作時チップ接合温度T_{vjop}	125 ℃	150 ℃
最高チップ接合温度T_{vjmax}	150 ℃	175 ℃

し、最高チップ接合温度 T_{vjmax} を第 6 世代 IGBT−IPM の 150 ℃から 175 ℃に向上した。[(1)(2)(3)]

3　発生損失の低減

今回開発した P638 パッケージは、同一定格の第 6 世代 IGBT−IPM P630 のパッケージよりも小型のためチップ搭載密度が上がり、チップ温度が上昇する懸念があった。そこで、次の二つの取組みによって低損失化を図った。

⑴　IGBT 導通損失の低減

⑵　IGBT ターンオン損失の低減

3.1　IGBT 導通損失の低減

第 7 世代 IGBT−IPM の IGBT チップは、チップ表面のトレンチゲート構造の微細化と薄ウェーハ加工技術によるドリフト層の薄化によって、導通損失 P_{sat} を低減した。[(2)(3)]

P_{sat} は IGBT 導通時のコレクタ・エミッタ間飽和電圧 $V_{CE\ (sat)}$ と導通電流の積に比例する。また、この $V_{CE\ (sat)}$ は、電流遮断時のターンオフ損失 E_{off} との間にトレードオフの関係がある。**図 4** に示すとおり、第 7 世代 IGBT−IPM は第 6 世代 IGBT−IPM に対し、$V_{CE\ (sat)}$ を低減できている。

図 5 に定格 650 V/150 A IGBT−IPM の PWM インバータ動作時の発生損失シミュレーション結果を示す。第 7 世代 IGBT−IPM は、発生損失に占める比率が最も大きい P_{sat} を下げるために、$V_{CE\ (sat)}$ を 0.4 V 低減した。これにより第 7 世代 IGBT−IPM は、PWM インバータ動作時の発生損失全体の約 43% を占める IGBT の P_{sat} を、第 6 世代 IGBT−IPM に比べて約 19% 低減した。

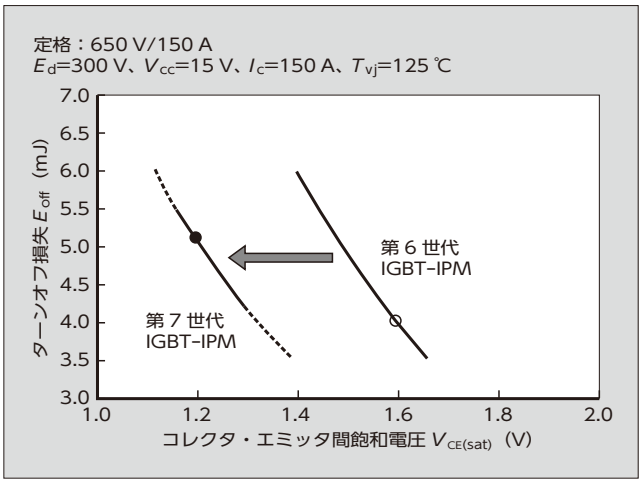

図 4　コレクタ・エミッタ間飽和電圧 $V_{CE(sat)}$ とターンオフ損失 E_{off}

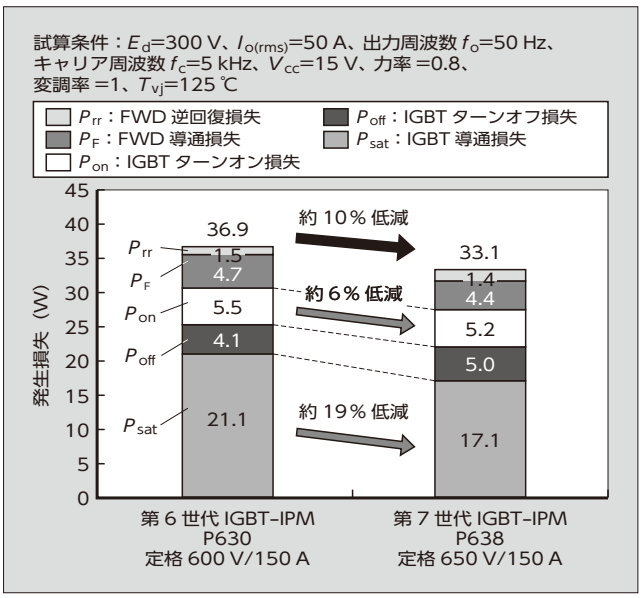

図 5　発生損失シミュレーション結果

なお、一般に導通損失低減のために薄ウェーハ化すると素子耐圧が低下するが、今回、薄ウェーハ化に伴う素子耐圧の低下は、IGBT チップ裏面構造のフィールドストップ（FS）層を最適化することにより抑制した。

3.2　ターンオン損失

一般に IGBT は、温度が高いほど電圧変化率 dv/dt が小さくなり、スイッチングが遅くなるため、スイッチング損失が増大する。そこで、第 7 世代 IGBT−IPM では、高温時のターンオン損失 P_{on} を低減するために、IGBT チップに内蔵された温度センサの情報を制御 IC にフィードバックすることにより、高温時の dv/dt が小さくならないよう IGBT のゲート駆動能力の切替えを制御 IC で行うことにした。[(1)]

その結果、発生損失全体の約 15% を占める IGBT の P_{on} を第 6 世代 IGBT−IPM に対して約 6% 低減した。前述の導通損失低減と合わせて、第 7 世代 IGBT−IPM の総発生損失は、第 6 世代 IGBT−IPM に対して約 10% 低減している。

3.3　放射ノイズ特性

一般にスイッチング損失を低減するために、ゲート駆動電流を増加して dv/dt を大きくすると、放射ノイズが大きくなる。そこで、放射ノイズ特性を評価した。

図 6 に放射ノイズ特性の評価結果を示す。第 7 世代 IGBT−IPM では、ゲート駆動電流切替え後の dv/dt を第 6 世代 IGBT−IPM と同等になるように設計したことにより、ノイズレベルが最大となる周波数 60 MHz 近傍を含め、全周波数帯域でノイズレベルが第 6 世代 IGBT−IPM と同等となっている。

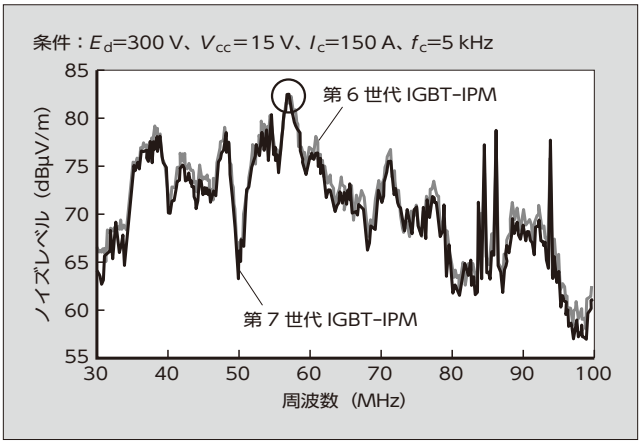

図 6　放射ノイズ特性の評価結果（相対比較試験結果）

4　小型化と高出力化

図 7 に P638 パッケージと P630 パッケージの銅ベースサイズ比較を示す。P638 パッケージは、パッケージサイズを小型化するために、チップで発生した熱を放熱する銅ベースの面積を P630 パッケージに対して 26％縮小した。

図 8 に連続動作時の温度分布比較（熱解析結果）を示す。

図 8 (a)と**図 8** (b)は、第 6 世代 IGBT−IPM P630 のケース温度が連続動作時に最高ケース温度 T_c=110 ℃となる放熱条件にて第 7 世代 IGBT−IPM P638 を動作させたときの有限要素法（FEM：Finite Element Method）による熱解析での温度分布の比較である。第 7 世代 IGBT−IPM P638 は銅ベースの面積縮小に伴い放熱性が低下しているが、前述の損失低減によって最高ケース温度 T_c は第 6 世代 IGBT−IPM P630 と同等となっている。第 6 世代 IGBT−IPM P630 は、T_{vjop} が最高 125 ℃に対して、T_{vj} は 115 ℃で、マージンが 10 ℃である。これに対して第 7 世代 IGBT−IPM P638 は、チップの最高使用温度の向上により、T_{vjop} が最大 150 ℃であり、T_{vj} の 114 ℃に対し、36 ℃のマージンが確保されている。

また、**図 8** (c)は第 7 世代 IGBT−IPM P638 の負荷電流

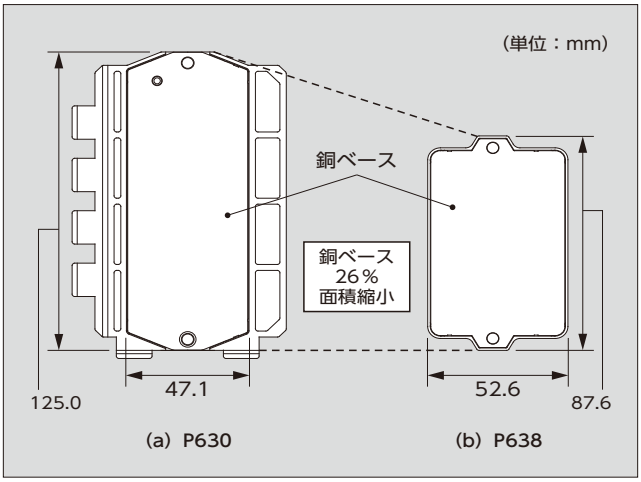

図 7　銅ベースサイズ比較

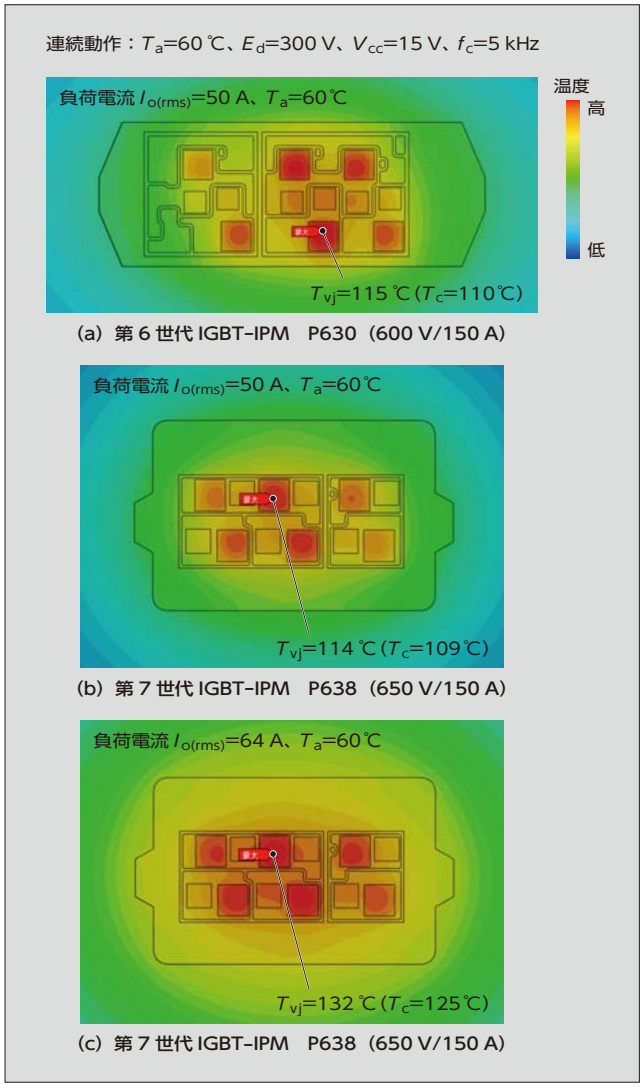

図 8　連続動作時の温度分布比較（熱解析結果）

を第 6 世代 IGBT−IPM P630 より 28％大きくし、T_c が最高 125 ℃となるようにしたときの熱解析の結果である。T_{vj} は 132 ℃であり、T_{vjop} が最高 150 ℃よりも 18 ℃低い。損失低減とチップの最高使用温度の向上により、第 7 世代 IGBT−IPM P638 は第 6 世代 IGBT−IPM P630 よりも 28％大きい負荷領域まで使用可能である。

5　あとがき

本稿では、第 7 世代「X シリーズ」中容量 IGBT−IPM「P638」について述べた。

X シリーズ中容量 IGBT−IPM のラインアップ拡充により、今後の電力変換装置のさらなる省スペース化、省エネルギー化、高信頼化に貢献し、エネルギー資源を有効に活用できる社会の実現を目指していく所存である。

参考文献

(1)　皆川啓ほか. 第7世代「Xシリーズ」IGBT−IPM. 富士電機技報. 2019, vol.92, no.4, p.219−223.
(2)　川畑潤也ほか. 第7世代「Xシリーズ」IGBTモジュール. 富

士電機技報. 2015, vol.88, no.4, p.254−258.
⑶ Kawabata, J.et al. “The New High Power Density 7th Generation IGBT Module for Compact Power Conversion Systems”. Proceeding of PCIM Europe 2015.

藤井　優孝

インテリジェントパワーモジュールの開発に従事。現在、富士電機株式会社半導体事業本部産業事業部産業設計第一部。

城塚　直彦

パワーモジュールのパッケージ設計に従事。現在、富士電機株式会社半導体事業本部産業事業部産業設計第一部。

唐本　祐樹

パワー半導体の設計開発に従事。現在、富士電機株式会社半導体事業本部産業事業部産業設計第一部。

富士電機

Innovating Energy Technology

＊本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。