

# 車載用大容量 IGBT モジュール「M660」

“M660” High-Power IGBT Module for Automotive Applications

大澤 彰浩 OSAWA, Akihiro

樋口 恵一 HIGUCHI, Keiichi

仲野 逸人 NAKANO, Hayato

車載用 IGBT モジュールには、バッテリー電力を効率よく利用するための低損失化に加え、小型・軽量化などが求められる。また、大容量化も同時に実現しなければならない。富士電機はこれらの要求に応えるため、直接水冷パワーモジュール「M660」を開発した。従来の内部配線であったワイヤボンディング接続をリードフレーム構造にするとともに、特性を改善した RC-IGBT (Reverse-Conducting IGBT: 逆導通 IGBT) とウォータージャケット一体型冷却構造を採用することにより、汎用 6 in 1 IGBT モジュールとしては世界最大容量の定格 750 V/1,200 A を実現した。

IGBT modules for automotive applications need to have low power loss to efficiently use battery power. They are also required to achieve small size and lighter weight while having high power. In response to these market demands, Fuji Electric has developed the “M660” direct water-cooled power module. This module adopts a lead frame structure, instead of wire bonding, which was conventionally used for internal wiring. It also employs the cooling structure that integrates a water jacket with reverse-conducting insulated gate bipolar transistors (RC-IGBTs) that have improved characteristics. With these structures, the M660 achieves the rated capacity of 750 V/1,200A, which is the world’s highest power as a general-purpose 6-in-1 IGBT module.

## 1 まえがき

CO<sub>2</sub> 排出量の削減や省エネルギーに向けて、世界各国の取組みが加速している。この取組みに対応するため、自動車メーカーは従来のガソリンや軽油を燃料とする内燃機関で動く自動車から、ハイブリッド自動車 (HEV) や電気自動車 (EV) に代表される電動化車両への切り替えを積極的に進めている。HEV や EV では、電気モータを動作させるために用いられるパワーエレクトロニクス技術のキーコンポーネントの一つが IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュールである。IGBT モジュールには、バッテリー電力を効率よく利用する低損失化に加え、小型・軽量化などが求められている。これに加え、大容量化も同時に実現しなければならない。

富士電機は、これらの要求に応えるため、直接水冷パワーモジュールを開発した。本稿では、車載用大容量 IGBT モジュール「M660」の特徴および性能について述べる。

## 2 「M660」の特徴

図 1 に M660 の外観を、表 1 に特徴を示す。

表 1 から分かるように、M660 は従来品に比べて、コレクタ・エミッタ飽和電圧  $V_{CE(sat)}$  が 22%、熱抵抗  $R_{th(j-w)}$  が 31% 低減しており、電力密度は 58% 向上している。表 1 に示した電力密度、モータ出力の定義は次のとおりである。

- (a) 電力密度 = 使用直流電圧 × 出力電流 / モジュール体積
- (b) モータ出力 = 使用直流電圧 × 出力電流 × モータ効率

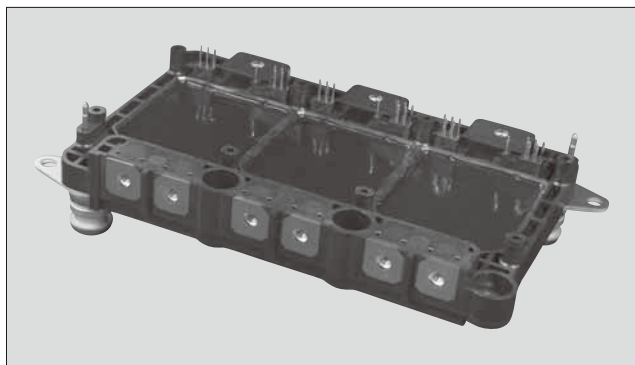


図 1 車載用大容量 IGBT モジュール「M660」

表 1 「M660」の特徴

項目	M660	従来品
内部配線	リードフレーム	ワイヤボンディング
チップ	RC-IGBT	RC-IGBT
コレクタ・エミッタ電圧	750 V	750 V
定格電流	1,200 A	800 A
コレクタ・エミッタ飽和電圧	1.54 V	1.98 V
熱抵抗	0.09 °C/W	0.13 °C/W
外形寸法 (mm)	W178×D116×H24	W162×D116×H24
電力密度	684 kVA/L	433 kVA/L
モータ出力	200 kW	150 kW

## 3 「M660」への適用技術

### 3.1 リードフレーム技術の適用

富士電機では直接水冷パワーモジュールの主回路配線に

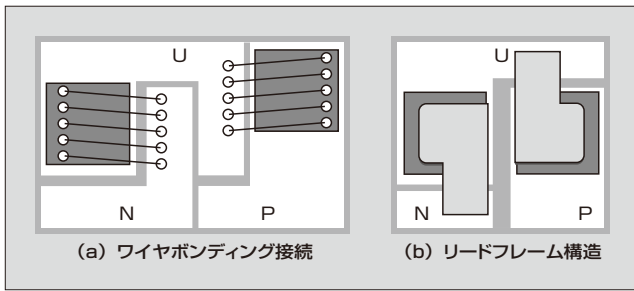


図2 ハーフブリッジ回路の内部レイアウト

リードフレームを適用した。ワイヤボンディング接続に替わり、リードフレーム構造を適用することのメリットには、次の2点がある。

(a) DCB (Direct Copper Bonding) 基板のサイズを縮小することにより、製品を小型化できる。ワイヤボンディング接続の場合、複数本のワイヤをDCB基板上に接合する必要があるため、リードフレーム構造に比べてDCB基板のサイズが大きくなる。

(b) チップとの接合面積が広がったリードフレームからの放熱量が多くなり、チップの最高温度が低下する。

(a), (b)のメリットに加えて、封止材料として樹脂を用いることで、リードフレーム下はんだに発生する応力を低減することができ、これによりパワーサイクル耐量を向上させることができる。また、ワイヤボンディング接続では複数回ワイヤをボンディングするといった工程が必要になる。これに対してリードフレーム構造では、単一のリードフレームをDCB基板上に接合するだけの構造であるため、IGBTモジュールの生産性に優れている。

図2に、ワイヤボンディング接続とリードフレーム構造を適用したIGBTモジュールのハーフブリッジ回路の内部レイアウトを示す。

M660はリードフレーム技術を適用することにより、ワイヤ構造を適用した場合と比較して、IGBTモジュールのサイズを23%低減している。

### 3.2 RC-IGBTの採用と特性改善

M660では、モジュールを小型化するために、RC-IGBT (Reverse-Conducting IGBT: 逆導通IGBT) を採用した。RC-IGBTはFS (Field Stop) 構造を持ったIGBTをベースとし、ストライプ状のIGBTユニットとFWD (Free Wheeling Diode) ユニットの交互の一つのチップに配置した構造になっている。RC-IGBTの概略構造を図3に示す。

ワンチップ化でチップ周辺部の耐圧を確保するガードリングと呼ばれる領域を削減でき、IGBTとFWDが別体となっているチップ(別体チップ)で構成する従来品よりもチップ面積が小さくなる。また、IGBT動作時にはFWD領域からも放熱し、FWD動作時にはIGBT領域からも放熱するので、IGBTとFWDそれぞれの動作時に熱抵抗を低減できる効果がある<sup>(2)</sup>。

富士電機は、これまでにRC-IGBTを搭載した車載用モ

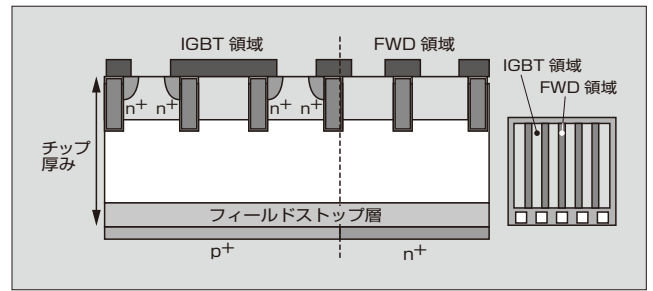


図3 RC-IGBTの概略構造

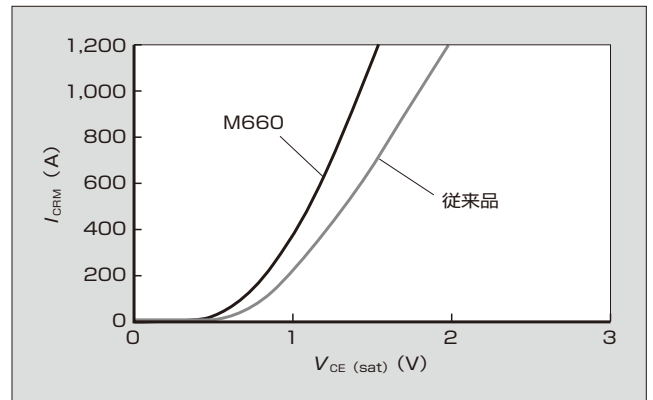


図4  $V_{CE(sat)}$ - $I_{CRM}$ 特性

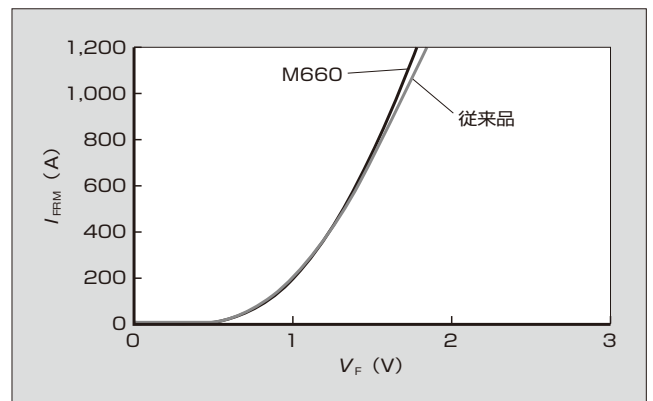


図5  $V_F$ - $I_{FRM}$ 特性

ジュールを製品化している<sup>(3)</sup>。今回はIGBTモジュールのさらなる低損失化を図った。搭載するRC-IGBTチップの低損失化を行うための方法の一つとして、チップの薄化による定常損失の低減が挙げられる。そこで、最先端の薄ウェーハ加工技術を開発し、750V耐圧に必要な十分な厚さまでウェーハを薄くし、RC-IGBTの定常損失を低減した。加えて、トレンチピッチ、チャンネル密度、コンタクトといった表面構造を最適化した。図4にM660と従来のRC-IGBTを搭載したモジュールの $V_{CE(sat)}$ -コレクタ電流 $I_{CRM}$ 特性を、図5にダイオード順電圧 $V_F$ -ダイオード順電流 $I_{FRM}$ 特性を示す。

M660は、IGBTのセルデザインを最適化したことにより、定格電流1,200Aにおいて、従来品に対して $V_{CE(sat)}$ が22%、 $V_F$ が4.2%低減している。

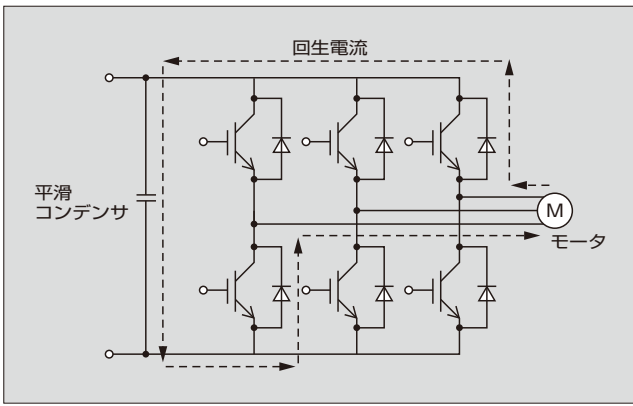


図6 インバータの回生動作

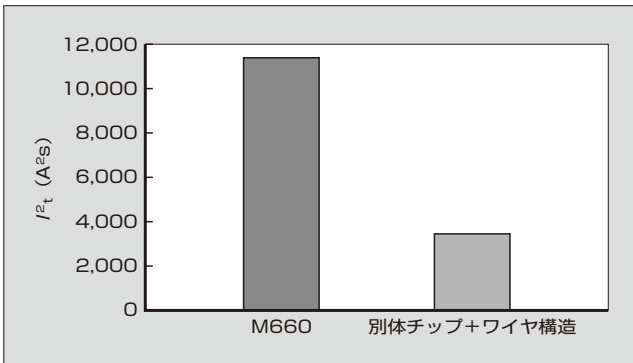


図7  $I^2t$  耐量

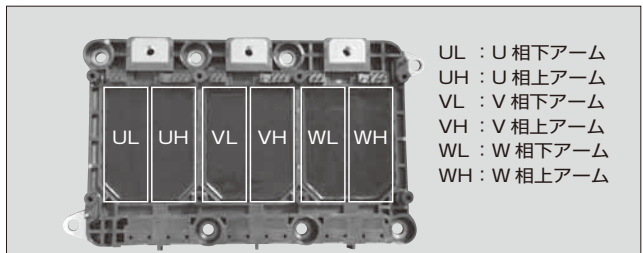
### 3.3 $I^2t$ 耐量

電流二乗時間積  $I^2t$  は、IGBT モジュールに内蔵されている FWD の過電流耐量を表す指標である。インバータの回生動作時に FWD を通して回生電流が流れることにより、コンデンサを充電する(図6)が、この回生電流による  $I^2t$  に対して FWD が破壊せずに耐える必要がある。回生時の FWD の主な故障モードは大電流通電による素子の破壊、もしくはワイヤが発熱することによるワイヤ発熱破壊である<sup>(4)</sup>。

図7に、M660 および別体チップでワイヤボンディング接続である IGBT モジュールの  $I^2t$  耐量を示す。別体チップでワイヤボンディング接続である IGBT モジュールと比較して、M660 は3倍以上の  $I^2t$  耐量であることが分かる。RC-IGBT では FWD 領域に電流が流れた場合、IGBT 領域にも熱が広がるため、FWD 領域の昇温を緩和できる。また、M660 で採用しているリードフレーム構造は、ワイヤボンディング接続と比較してチップとの接触領域が広い。そのため、熱はリードフレーム表面に伝わり、局所的な昇温が緩和される。

### 3.4 高放熱冷却器の適用

富士電機では、水冷フィンとウォータージャケットとの間に生じる空間が熱抵抗悪化の原因となっていることを明らかにし、ヒートシンクとウォータージャケットを一体化した高効率の冷却構造を開発している<sup>(5)</sup>。



(a) M660 の相の位置関係

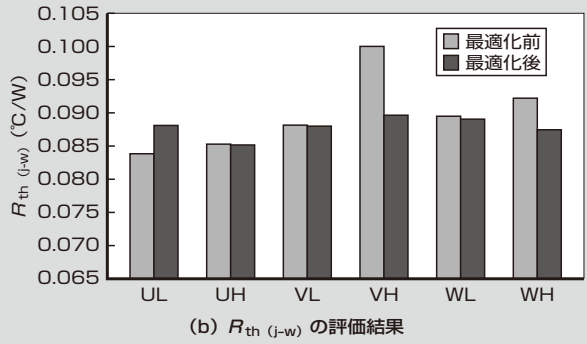


図8 冷却体改善前と改善後の熱抵抗  $R_{th(j-w)}$  評価結果

M660 では、このウォータージャケット一体型冷却構造の冷却効率をさらに向上するため、冷却器内部構造の改良を行った。

その結果、従来品の熱抵抗  $R_{th(j-w)}$  は  $0.13\text{ }^\circ\text{C/W}$  であったが、M660 では  $R_{th(j-w)}$  を 23% 低減し、 $0.1\text{ }^\circ\text{C/W}$  を達成した。しかし、熱設計を行う場合、 $R_{th(j-w)}$  はモジュール内の最大値を用いる必要がある。そこで、冷却性能の面内ばらつきを低減することで、さらなる熱抵抗低減ができると考えた。図8に、M660 の相の位置関係と、冷却体の内部構造最適化前後の  $R_{th(j-w)}$  の面内ばらつきを示す。

図8(b)から明らかなように、VH相の冷却性能の面内分布を改善することで、 $R_{th(j-w)}$  をさらに 10% 改善し、 $0.09\text{ }^\circ\text{C/W}$  とすることができた。

## 4 動作可能電流

許容最大電流を見積もるため、M660 と従来品 (RC-IGBT 搭載、ワイヤボンディング使用) において、出力電流をパラメータとしてチップ温度  $T_{vjop}$  のシミュレーションを実施した。

シミュレーションの条件は、バッテリー電圧  $V_{DC}=450\text{ V}$ 、PWM スイッチング周波数  $f_c=5, 8, 10\text{ kHz}$ 、冷媒温度  $T_w=65\text{ }^\circ\text{C}$ 、冷媒流量  $=10\text{ L/min}$  である。図9に M660 の  $T_{vjop}$  シミュレーション結果を、図10に従来品の  $T_{vjop}$  シミュレーション結果を示す。

なお、図9、図10はRC-IGBT の特性ばらつきや実使用を模擬したときのはんだクラックに伴う熱抵抗の変化を考慮していない。 $f_c=10\text{ kHz}$  において  $T_{vjop}$  が  $150\text{ }^\circ\text{C}$  未満になる最大出力電流は、従来品が  $390\text{ Arms}$  であるのに対して、M660 は  $525\text{ Arms}$  と 1.35 倍に向上していることが分かる。実際の製品では、搭載されるチップの特性ばらつきや、

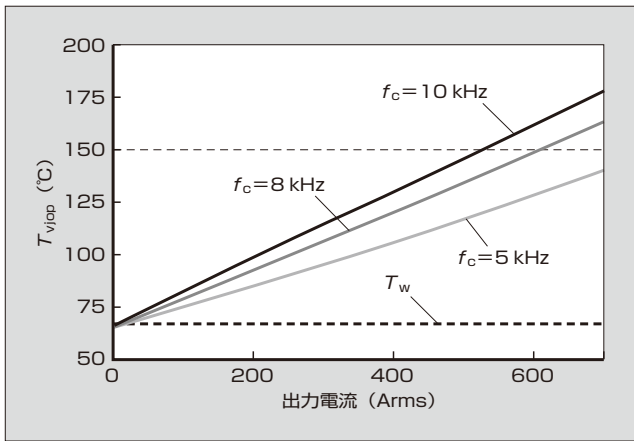


図9 M660の  $T_{vjop}$  シミュレーション結果

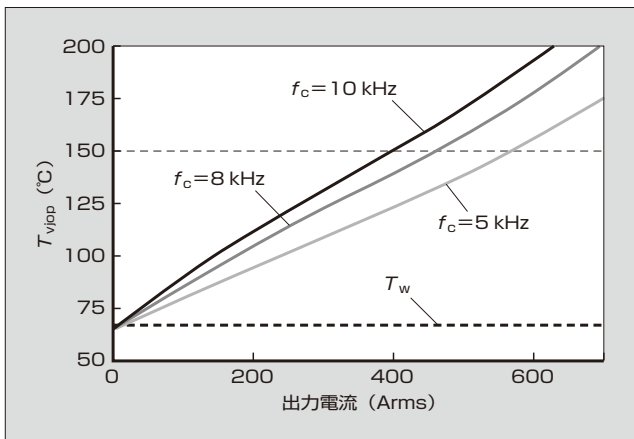


図10 従来品の  $T_{vjop}$  シミュレーション結果

実動作中のはんだのクラックを考慮して、マージンを取る必要がある。M660に搭載されているRC-IGBTチップの保証温度は175℃である。 $f_c=10\text{ kHz}$ においてマージンを見込んだワーストケースの場合、M660は電流を約600 Armsまで出力することができる。

M660は、リードフレーム技術、特性改善を行ったRC-IGBTチップ、最適化されたウォータージャケット一体型冷却構造を採用しているため、チップの損失が小さく、放熱性能に優れる。その結果、M660は従来品よりも大きな電流を出力することができる。

5 あとがき

車載用大容量 IGBT モジュール「M660」について述

べた。M660は、リードフレーム、特性を改善したRC-IGBT,ならびに最適化した直接水冷ウォータージャケット一体型冷却構造を採用することにより、汎用6 in1 IGBTモジュールとしては世界最大容量の定格750 V/1,200 Aを実現した。

今後も、加速する自動車の電動化の要求に応え、地球温暖化の改善に貢献していく所存である。

参考文献

- (1) 安達新一郎ほか. 車載用IGBTモジュールの直接水冷技術. 富士電機技報. 2012, vol.85, no.6, p.435-439.
- (2) 佐藤憲一郎ほか. RC-IGBTを搭載した車載用3世代直接水冷型パワーモジュールの高機能化. 富士電機技報. 2016, vol.89, no.4, p.270-274.
- (3) 榎本一雄ほか. 車載用第3世代直接水冷型パワーモジュール. 富士電機技報. 2017, vol.90, no.1, p.53-54.
- (4) Osawa, A. et al, "700 kVA/L power density IGBT module for xEV power density", PCIM Asia 2017, p.137-143.
- (5) Gohara, H. et al, "Next-gen IGBT module structure for hybrid vehicle with high cooling performance and high temperature operation", PCIM Europe 2014, p.1187-1194.



大澤 彰浩

電気・ハイブリッド自動車用 IGBT モジュール・IPMの開発に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部事業統括部電装モジュール部。



樋口 恵一

電気・ハイブリッド自動車用 IGBT モジュール・IPMの開発に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部事業統括部電装モジュール部。



仲野 逸人

電気・ハイブリッド自動車用 IGBT モジュール・IPMの開発に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部事業統括部電装モジュール部。



\*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。