

# 車載用第3世代直接水冷型パワーモジュール

3rd-Generation Direct Liquid Cooling Power Module for Automotive Applications

荒井 裕久 ARAI, Hirohisa

樋口 恵一 HIGUCHI, Keiichi

小山 貴裕 KOYAMA, Takahiro

富士電機は、ハイブリッド自動車および電気自動車向けに車載用第3世代直接水冷型パワーモジュールを開発した。100kWクラスのモータ容量を想定した750V/800A定格のパワーモジュールである。車載用パワーモジュールに対する市場の要求は、高効率化と小型化である。これに応えるため、水冷フィンとカバーを一体化したウォータージャケットにより放熱性を改善するとともに、はんだの信頼性を向上させて連続動作温度175℃を実現した。また、IGBTとFWDを一体化したRC-IGBTの適用により、パワーモジュールの小型化を実現した。

Fuji Electric has developed a 3rd-generation direct liquid cooling power module for hybrid and electric vehicles. The power module has a rated capacity of 750V/800A, which is designed for motor capacity of 100kW. The market for automotive application based power modules has been requiring increased efficiency and module miniaturization. To meet these demands, we have improved exothermicity by adopting a water jacket for integrating the cooling fins and cover while also increasing the reliability of the solder, thus enabling the module to achieve continuous operation at 175℃. Furthermore, we have miniaturized the power module by adopting an RC-IGBT that integrates IGBT and FWD.

## 1 まえがき

地球温暖化を防止するためにCO<sub>2</sub>削減が求められており、電気モータで走行するハイブリッド自動車(HEV)や電気自動車(EV)はCO<sub>2</sub>削減に大きな効果があると期待されている。HEVやEVに用いられるインバータは、車両内部の限られたスペースに搭載され、高電力・低損失であることが必要になる。したがって、インバータの主要な部品である車載用パワーモジュールにも小型化と高効率化が求められる。

富士電機は、次世代の車載用パワーモジュールとして車載用第3世代直接水冷型パワーモジュールを開発した(図1)。このパワーモジュールは、最適化された流路デザインにより、従来よりも高い放熱性能を達成している。さらに、カバー一体型のアルミニウムウォータージャケットを採用するとともに、冷媒の出入り口にはフランジ構造を採用している<sup>(1)</sup>。ユーザは出入り口に指定の流量の冷媒を流す配慮をするだけでよい。

また、IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)には第7世代のチップ技術を適用して損失の低減を図るとともに、FWD(Free Wheeling Diode)が不要なRC-IGBT

(Reverse-Conducting IGBT: 逆導通IGBT)を使用してモジュールを小型化した。

## 2 特徴

車載用第3世代直接水冷型パワーモジュールの特徴を次に示す。また、主な仕様を表1に示す。

(a) 高放熱性能を実現する冷却技術

水冷フィンとカバーを一体化したウォータージャケットにより放熱性を改善した。

(b) 連続動作温度175℃の保証

はんだの信頼性を向上させた。

(c) モジュールの小型化

IGBTとFWDを一体化したRC-IGBTを適用した。

本稿では、これらの特徴の中から冷却技術とRC-IGBTの適用技術について述べる。

## 3 高放熱性能を実現する冷却技術

自動車の動力制御に用いるインバータは限られたスペースに搭載されるため、小型かつ搭載方法の自由度の高さと、低燃費を意識した軽量化と効率向上が求められる。イン

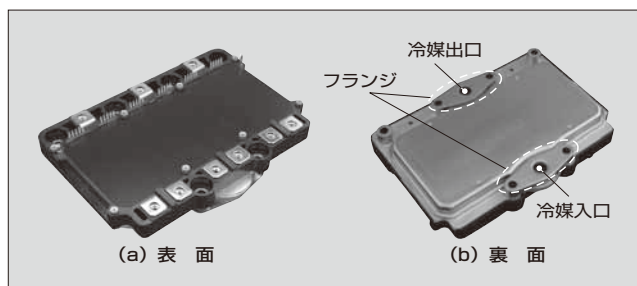


図1 車載用第3世代直接水冷型パワーモジュール

表1 車載用第3世代直接水冷型パワーモジュールの主な仕様

| 項目            | 定格                  |
|---------------|---------------------|
| コレクター-エミッタ間電圧 | 750V                |
| 定格電流          | 800A                |
| 最大動作温度        | 175℃                |
| 外形            | 162 × 116 × 24 (mm) |
| 質量            | 520g                |

バータに搭載されるパワーモジュールにおいても、小型・軽量化、高効率化が必要であり、世代ごとに20%以上の小型・軽量化を行ってきた。特に、車載用パワーモジュールでは、直接水冷構造を用いた高放熱化やアルミニウム冷却器を用いた軽量化が進んでいる。

富士電機は、放熱性能を改善するためパワーモジュールの直接水冷構造においてアルミニウム冷却フィンの放熱性能を向上させ、熱抵抗を30%低減させた。

### 3.1 冷却技術の課題

図2に、第2世代アルミニウム直接水冷型IPM (Intelligent Power Module) における従来構造の断面図を示す。この構造は、モジュールとヒートシンクを直接はんだで接合している。ウォータージャケットはユーザが独自に設計するため、ヒートシンクとウォータージャケットが個別部品となり、流路設計だけでなく、水密性と公差を考慮した設計が必要である。そのため、座屈や変形に耐えられる材料の選択やベース厚さの確保が必要であり、熱抵抗上昇の要因となっていた。アルミニウム直接水冷構造における放熱能力の向上と高信頼性を同時に確保することが課題であり、これを解決するため、ヒートシンクとウォータージャケットを一体化したアルミニウム冷却器を開発した。

### 3.2 第3世代の冷却設計技術

パワーモジュールの放熱性能は、熱抵抗と熱伝達係数の二つで示すことができる。熱抵抗と熱伝達係数には式(1)の関係がある。

$$h = \frac{1}{R_{th} \cdot A} \dots \dots \dots (1)$$

$h$  : 熱伝達係数 [W/ (m<sup>2</sup> · K)]

$R_{th}$  : 熱抵抗 (K/W)

$A$  : フィン表面の面積 (m<sup>2</sup>)

また、熱伝達係数  $h$  は冷媒とフィンの熱交換性能を示す。熱抵抗を下げるためにはフィンの熱交換性能を大きくすることが有効であり、フィン表面の流速が速いほど熱交換性能を示す熱伝達係数は大きくなる (式(2))。

$$h = \frac{0.664 k \times \frac{\eta C_p^{1/3}}{k}}{L} \times \frac{\rho L}{\eta} \times \frac{\rho \nu L^{1/2}}{\eta} \dots \dots \dots (2)$$

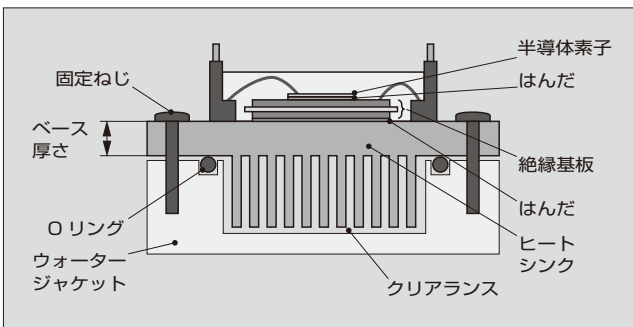


図2 従来構造の断面図

$h$  : 熱伝達係数 [W/ (m<sup>2</sup> · K)]

$k$  : 熱伝導率 [W/ (m · K)]

$\eta$  : 冷媒の粘度 (Pa · s)

$C_p$  : 比熱 [J/ (kg · K)]

$L$  : フィンの代表長さ (m)

$\rho$  : 冷媒の密度 (kg/m<sup>3</sup>)

$\nu$  : 冷媒の流速 (m/s)

シール材を用いた従来の冷却構造は、ウォータージャケットをユーザが設計し用意するため、フィンの先端とウォータージャケットの間にクリアランスが必要である。このクリアランスが放熱性能に与える影響について簡易モデルを用いて試算した。

フィン形状は厚さ1mm、間隔1mm、高さ10mmとし、冷媒は冷媒導入口に均等に1L/minが流れるように設定した。試算の結果、クリアランスが広がるほど熱抵抗は上昇し、悪化することが分かった。冷媒は圧力抵抗の低い部分を通るため、開口部の広いクリアランス部に流出し、放熱性能に寄与するフィン間の流速が低下する。さらに、モジュールが並列に接続されると、冷媒流速の低下が顕著になることが予想できる。ヒートシンクとウォータージャケットを一体化してクリアランスをなくすことは、フィン間の冷媒流速を上げて熱抵抗を下げるのに効果的である<sup>(2)</sup>。

図3に、車載用第3世代直接水冷型パワーモジュールに採用した新構造の断面図を示す。新構造は、ウォータージャケットとフィン先端部を接合してクリアランスをなくすだけでなく、フィン形状にも工夫を加えた。これにより、冷媒を効率よく活用できる冷却構造とした。さらに、ベースに相当する部分の厚さも薄くしている。

図4に熱抵抗の比較結果を示す。新構造は、冷媒の活

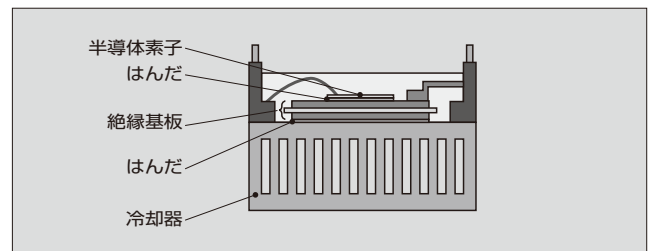


図3 新構造の断面図

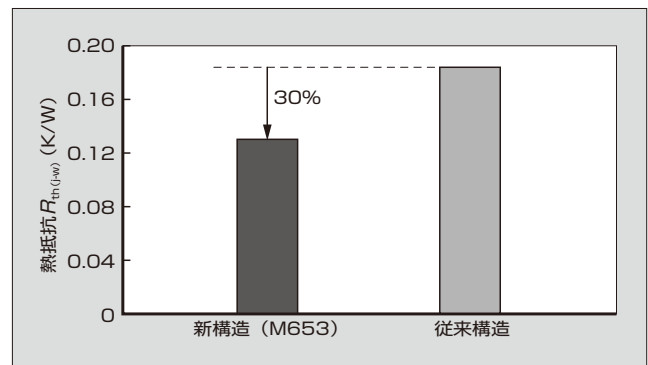


図4 熱抵抗

用と熱伝導性を考慮しており、従来構造よりも熱抵抗が30%低減した。

#### 4 RC-IGBTの適用技術

富士電機では、750V/800Aクラスの車載用パワーモジュールの開発において、燃費向上のための低損失化に加え、モジュールの小型化の要求に応えるため、IGBTとFWDを一つのチップに統合した750V耐圧のRC-IGBTを開発した。RC-IGBTは家電向けの小容量チップでは実用化されているが、車載用として要求される大容量チップでは、これまで低損失化のための技術的ハードルが高く困難であった<sup>(3)</sup>。ここではRC-IGBTの適用における設計技術と適用効果について述べる。

##### 4.1 RC-IGBTの設計技術

図5にRC-IGBTの概略構造を示す。フィールドストップ(FS)型IGBTをベースに、ストライプ状に交互にIGBT領域とFWD領域を配置した構造である。このため、2チップを1チップにすることで、無効領域(ガードリングと呼ばれるチップ周辺部の耐圧保証のための領域)を削減し小型化が実現できる<sup>(4)</sup>。また、IGBT動作時の発熱がFWD部からも放熱し、FWD動作時にはIGBT部からも放熱するので、熱抵抗を低減できる効果がある。

750V/800Aクラスのパワーモジュールの電流容量はモータ容量によって異なるものの、電源電圧 $V_{cc}$ は400~450V、キャリア周波数 $f_{sw}$ は5~10kHzの範囲で動作することが一般的である。図6に、750V耐圧RC-IGBTをパワーモジュールに適用した場合のインバータ動作時の発生損失を示す。

スイッチング周波数が10kHzまで高くなるとスイッチング損失( $P_{on}$ ,  $P_{off}$ ,  $P_{rr}$ )が大きくなるものの、IGBTとFWDの定常損失( $P_{sat}$ ,  $P_f$ )は40%と大きな比率を占める。定常損失を低減するために、IGBT領域のトレンチピッチなどデバイス表面のデザインを工夫することで、定常損失を決めるパラメータであるコレクター-エミッタ間飽和電圧を最小限に抑えている。また、チップは薄いほど飽和電圧と順電圧を下げるができる。そこで、750V耐圧に必

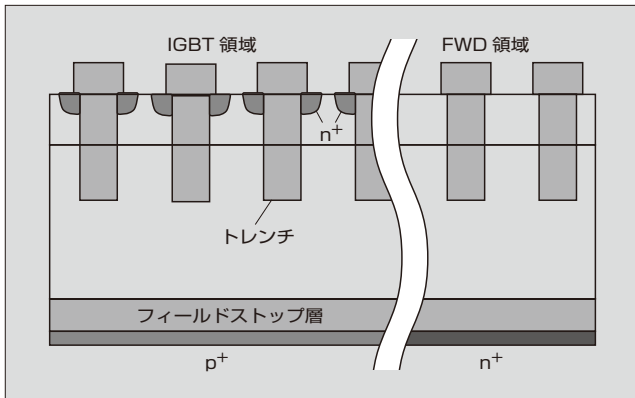


図5 RC-IGBTの概略構造

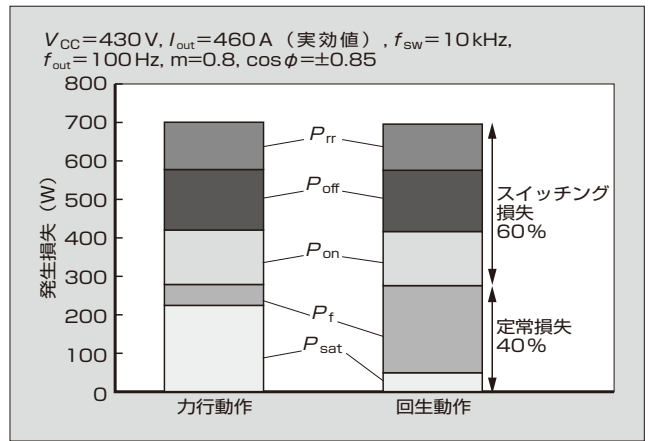


図6 インバータ動作時の発生損失

要な最小限の厚さまでウェーハを薄くし、低損失化を図った。また、IGBTのコレクタp形層とFWDのカソードn形層を同一チップの裏面に形成した。IGBTとFWDのスイッチング損失は、定常損失とトレードオフの関係にある。そこで、キャリアライフタイム制御を行って、このトレードオフを最適化した。

##### 4.2 RC-IGBTの損失改善

IGBTとFWDを組み合わせた通常の場合と同じ活性面積におけるRC-IGBTの電気特性について述べる。

###### (1) IGBT特性

図7に、RC-IGBTと通常のIGBTの飽和電圧出力特性を示す。RC-IGBTでは、薄ウェーハ化と表面デザインの最適化により、通常のIGBTよりも低い飽和電圧を実現している。また、RC-IGBTでは低飽和電圧領域において伝導度変調<sup>(注)</sup>が起りにくく、電流-飽和電圧曲線にスナッチバック<sup>(6)</sup>が起ることが報告されている。そこで、IGBTとFWDの各領域の構造を最適化して伝導度変調を起しやすくし、スナッチバックを抑制するようにした。

図8に、RC-IGBTと通常のIGBTのターンオフ特性を

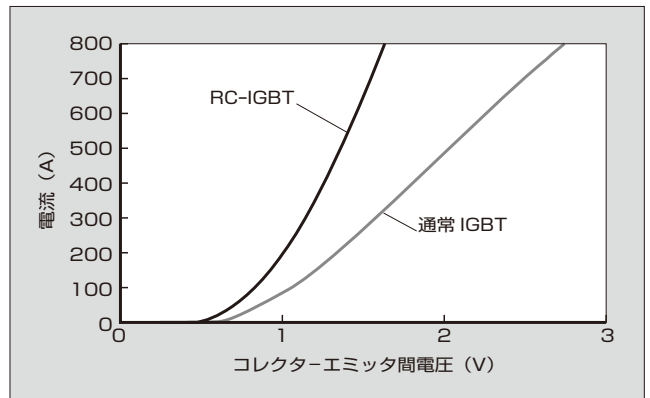


図7 IGBTの飽和電圧出力特性

<注> スナッチバック：電流と飽和電圧が途中で減少した後に増加に転じる現象をいう。

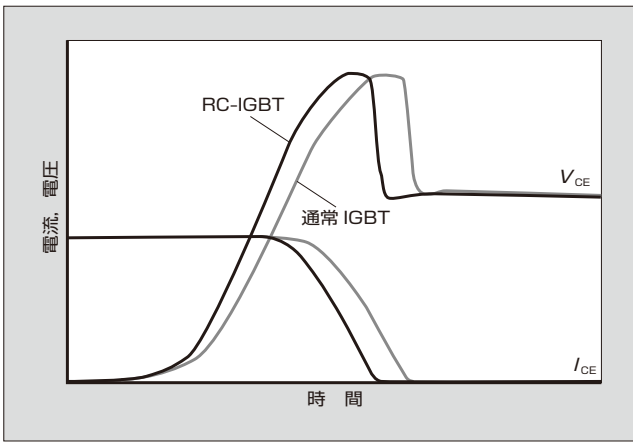


図8 IGBTのターンオフ特性

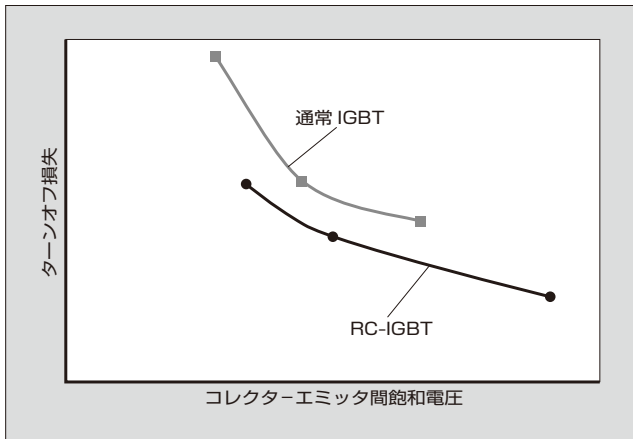


図9 IGBTのトレードオフ特性

示す。RC-IGBTの方が通常のIGBTに比べてターンオフ時の $dv/dt$ が大きく、キャリアの排出速度が大きいことが分かる。これは、RC-IGBTでは裏面のp形層（IGBT領域）とn形層（FWD領域）が短絡しているコレクタショートの状態となっていることにより、ターンオフ時に電子がコレクタp形層に加えて、隣接するFWD領域のカソードn形層からも排出されるためである。この結果、RC-IGBTは通常のIGBTに比べてターンオフ損失が低減される。RC-IGBTでは、定常損失を改善する方向（低飽和電圧化）に調整しても、通常のIGBTよりもターンオフ損失を抑制することができ、トレードオフ特性を大きく改善することができた（図9）。

(2) FWD特性

図10に、RC-IGBTと通常のFWDの順方向出力特性を示す。IGBTの定常損失と同様に、RC-IGBTでは薄ウェーハ化および表面構造の最適化の効果により、通常のFWDに比べて順方向電圧の降下を低減させた。

4.3 放熱特性

RC-IGBTでは、IGBTとFWDを一体化することによりチップの面積とモジュールの面積を縮小した。また、RC-IGBTにおいては、FWD領域からの発熱をIGBT領域の部分も介して放熱するため、通常のFWDよりも大幅

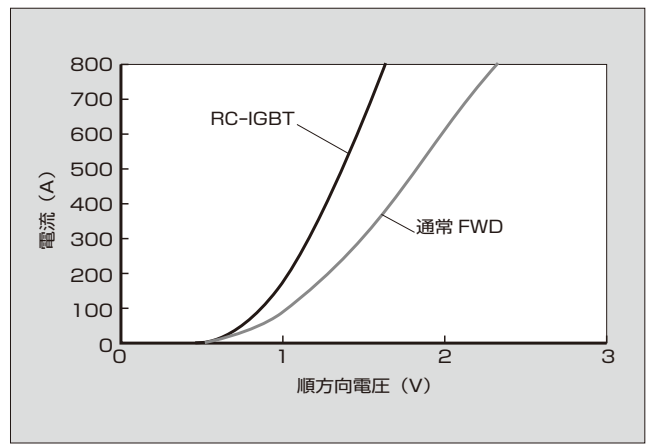


図10 順方向出力特性

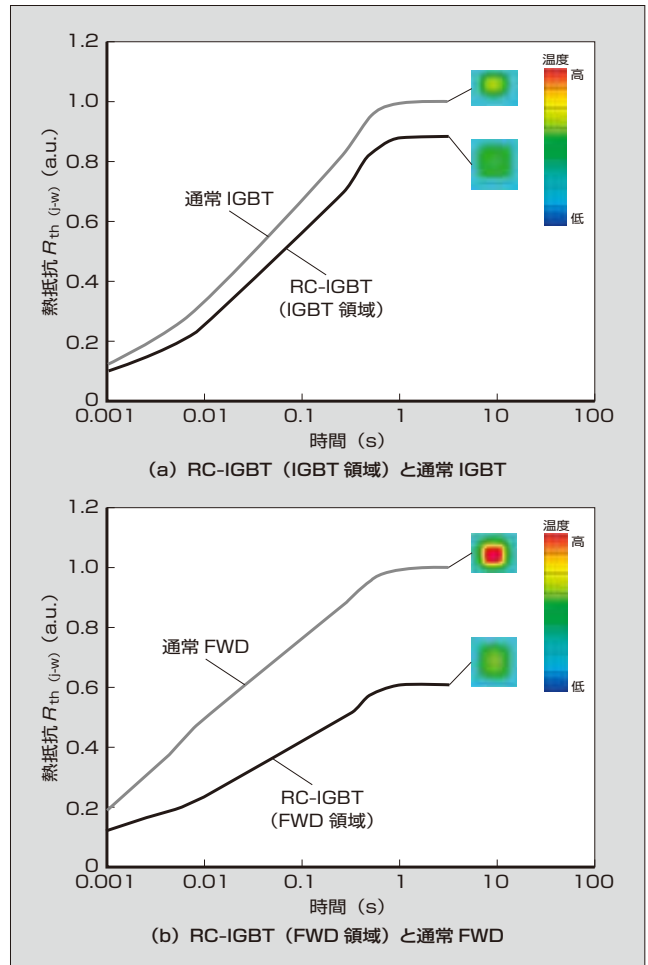


図11 同一活性面積における熱抵抗

に熱抵抗が低い。直接水冷構造のモジュールを想定し、同一活性面積におけるRC-IGBTと通常のIGBT・FWDの熱抵抗を比較した（図11）。RC-IGBTのIGBT領域の熱抵抗は通常のIGBTに比べて12%、FWD領域の熱抵抗は通常のFWDに比べて40%低くなっている。

4.4 達成した性能

図12に、通常のIGBT・FWD、これと活性面積が同じRC-IGBT、および30%小型化したRC-IGBTについてイ

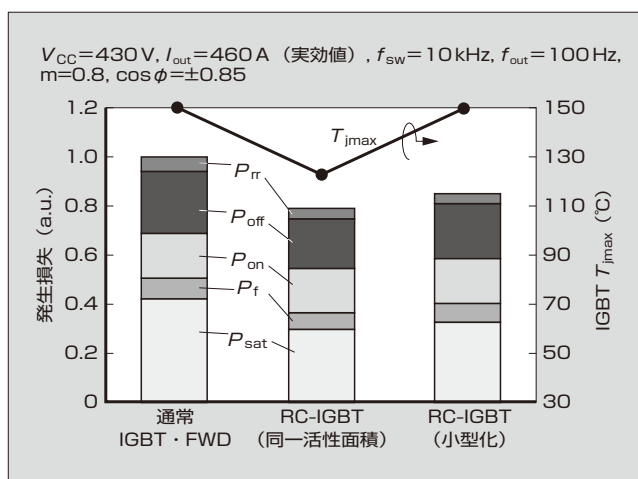


図12 インバータ動作時の発生損失と温度の計算結果

ンバータ動作時の発生損失と温度を計算した結果を示す。

通常のIGBT・FWDに比べて、飽和電圧、順電圧、ターンオフ損失を低減したことで、RC-IGBTはインバータ動作時の電力損失を20%以上低減できる。低損失化に加え、放熱性に優れるのでチップ最高温度は28℃程度低減できる。モジュールのチップサイズは動作時の最大温度で決まるため、この結果は、RC-IGBTは通常のIGBT・FWDより小さいチップサイズで同定格のインバータ動作が可能であることを意味する。30%小型化したRC-IGBTで通常のIGBT・FWDと同程度の温度となっており、モジュールの面積は15%低減が可能である。

5 あとがき

車載用第3世代直接水冷型パワーモジュールについて述べた。高放熱性能と連続動作温度175℃を実現しつつ、RC-IGBTの適用によって従来に比べて、電流容量当たりの体積で40%の削減を達成した。

今後、さらなる技術革新を実施し、小型・低損失の製品を開発していく所存である。

参考文献

(1) Higuchi, K. et al. "An intelligent power module with high accuracy control system". Proceedings of PCIM Europe

2014, May 20-22, Nuremberg, p.39-46.  
 (2) Gohara, H. et al. "Next-gen IGBT module structure for hybrid vehicle with high cooling performance and high temperature operation". Proceedings of PCIM Europe 2014, May 20-22, Nuremberg, p.1187-1194.  
 (3) Takahashi, K. et al. "New Reverse-Conducting IGBT (1,200 V) with Revolutionary Compact Package". Proceedings of ISPSDS 2014, p.131-134.  
 (4) Laska, T. et al. "The Field Stop IGBT (FS IGBT) - A New Power Device Concept with a Great improvement Potential". Proceedings of ISPSD 2000, p.355-358.  
 (5) Momota, S. et al. Plated Chip for Hybrid Vehicles. FUJI ELECTRIC REVIEW. 2008, vol.54, no.2, p.49-51.  
 (6) M, Rahimo. et al. "The Bi-mode Insulated Gate Transistor (BIGT) A Potential Technology for Higher power Applications". Proceedings of ISPSD 2009, p.283-286.



荒井 裕久

ハイブリッド自動車用IGBTモジュールの開発に従事。現在、富士電機株式会社パワエレ機器事業本部輸送パワエレ事業部EVモジュール開発部。



樋口 恵一

ハイブリッド自動車用IGBTモジュールの開発に従事。現在、富士電機株式会社パワエレ機器事業本部輸送パワエレ事業部EVモジュール開発部。



小山 貴裕

ハイブリッド自動車用IGBTモジュールの開発に従事。現在、富士電機株式会社パワエレ機器事業本部輸送パワエレ事業部EVモジュール開発部。



\*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。