

# 特集 ハイブリッド車用パワーコントロールユニットの開発\*

## Development of Power Control Units for Hybrid Vehicles

瀬高庸介

Yousuke SETAKA

菊地隆二

Takaji KIKUCHI

石山 弘

Hiroshi ISHIYAMA

稲垣充晴

Mitsuharu INAGAKI

真光邦明

Kuniaki MAMITSU

Recently, the hybrid vehicle market has been growing rapidly, and carmakers are planning to expand their lineup of hybrid vehicles from compact vehicles to full-size vehicles. To make this rapid expansion possible, the Power Control Unit (PCU) that controls the traction motors of hybrid vehicles is required both to be smaller in size in order to facilitate installation in vehicles, and to have higher power output in order to meet the requirements of full-size vehicles. To realize both of these targets, we have developed a PCU for the Lexus LS600h with higher power output per volume through a significantly improved cooling design for power semiconductor chips by dissipating heat from both sides of the chips.

**Key words:** Hybrid vehicle / Power control unit, Inverter, IGBT, Double-sided power module, Stacked cooler

### 1. はじめに

トヨタ自動車は、2003年のプリウス以降のハイブリッド車（以下、HV）にTHS-II (Toyota Hybrid System II)を採用してきた。THS-IIには、昇圧コンバータと二つのMG(Motor/Generator)の各々を制御する2組のインバータからなるPCU (Power Control Unit)を有する<sup>1)</sup> Fig. 1にTHS-IIのPCU回路構成を示す。IGBT (Insulated-Gate Bipolar Transistor)とFWD(Free Wheeling Diode)の2種類のシリコンチップが並列接続された多数の半導体スイッチから構成されている。

PCUは、エンジンコンパートメントに搭載されるため体格が小さいこと、より高い動力性能を発揮するため高出力であることを両立させる必要がある。結果としてより大きな体積当りの出力、つまり高出力密度が要求されている。

既存のガソリンエンジン駆動の車両をHV化する場合、エンジンコンパートメント内は既存部品に占有されておりPCUのスペースを確保する必要がある。HVでエンジンコンパートメントから移動可能な唯一の部品は補機バッテリーである。なぜなら、スタータモータを駆動する大電流はもはや必要なく、エンジンのそばにある必要がないためである。PCUが鉛バッテリーと同じ大きさと同形であるなら、補機バッテリーの搭載位置に収めることができる。トヨタ自動車は2006年のGS450h、カムリ・ハイブリッド、エスティマ・ハイブリッド以降この手法を採っている<sup>2)</sup>

LS600h用のPCUは従来と同じ体格で高出力化が要

求されており、出力密度を更に向上する必要がある。ひとつの方法としてシリコンチップの並列数を増やすかチップサイズを大きくして電流容量を増加させれば容易に出力を上げることができる。しかしこのような方法はチップコストと体格の両面で採用不可能である。LS600hの要求出力を実現するために1チップ当り200Aの設計を適用すると、合計40組もの半導体チップが必要になってしまう。我々は、Fig. 2に示すように、これを40%削減して24組とし、1チップ当りの最大電流を300A以上とすることを開発目標とした。

電流を増大させる際に最も問題となるのがシリコンチップからの発熱である。我々はシリコンチップを効果的に冷却する方法に着目し、シリコンチップを両面から冷却する新しい冷却構造を開発した。

### 2. 両面放熱パワー素子

従来のPCUでは、シリコンチップはFig. 3に示すようにIPM (Intelligent Power Module) に実装される。

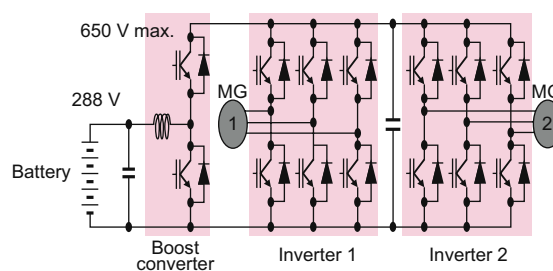


Fig. 1 Simplified schematic of PCU

\* (社)自動車技術会の了解を得て、「シンポジウムテキスト (電気動力技術専門委員会)」No.16-07より、一部加筆して転載

ここにゲート駆動と保護回路は図示されていない。シリコンチップはDBA (Direct Bonded Aluminum) 基板に半田付けされ、更に銅モリブデン合金ベース板にロウ付けされる。ベース板は水冷ヒートシンクに熱伝導グリスを介してボルト固定される。シリコンチップの上面はワイヤボンディングで端子に接続される。

IGBTの最高動作温度は150℃である。出力電流が増大してもIGBTの温度を限界以内に抑えるためには、熱抵抗、つまり発熱1ワット当たりの温度上昇を減少させることが重要である。シリコンチップから冷却水までの熱抵抗を減少させるには三つの手段がある。即ち、①1チップ当たりのヒートシンク面積を増し、②熱障壁を越える前に熱を効率よく拡散して熱流束を下げ、③水冷ヒートシンクの熱伝達を改善することである。

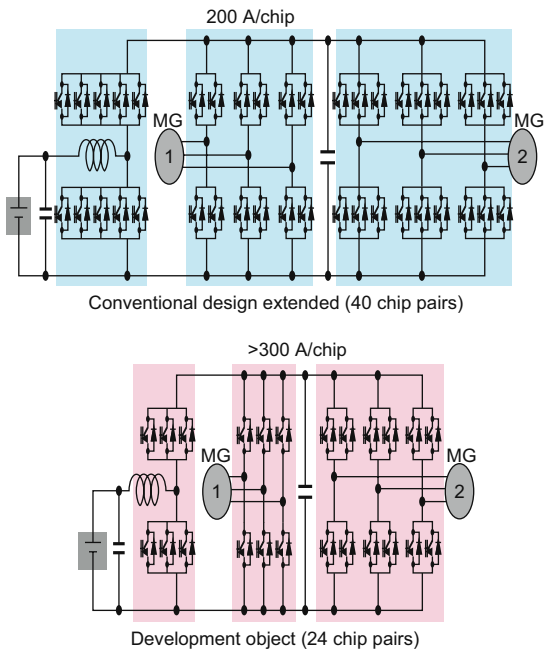


Fig. 2 Chip count reduction

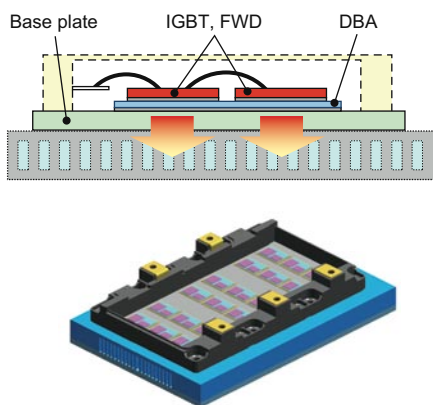


Fig. 3 Intelligent power module

我々は、両面から放熱する新しい概念のパワーモジュールを採用することにより、チップ当たりのヒートシンク面積を2倍にした。Fig. 4に示す両面放熱構造は、①シリコンチップの両面にヒートスプレッドを半田付けした樹脂モールドパワーモジュールと、②熱拡散した後のパワーモジュール外側にある絶縁板と、③両面放熱パワー素子を挟み込む冷却プレートからなる。

Fig. 5に今回開発した両面放熱パワー素子を示す。パワーモジュールは、一对のシリコンチップ (IGBTとFWD) と、ヒートスプレッドと端子を一体化した上下リードフレーム、制御信号のボンディングワイヤと上部ヒートスプレッドの接触を避けるための導電スペーサからなっている。これらの部品は鉛フリー半田付けされた後、樹脂トランスファー成型される。

リードフレームと導電スペーサは、熱と電気の伝導性に優れた無酸素銅で作られる。シリコンチップはヒートスプレッドに直接半田付けされるか、金属の部品のみを挿入して半田付けされており、熱のボトルネックを作ることなく効率よくヒートスプレッドに熱伝導される。

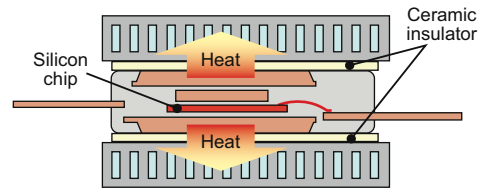


Fig. 4 Double-side cooling concept

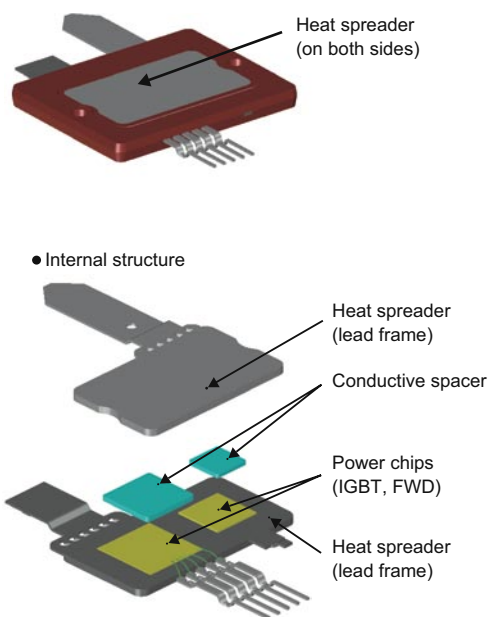


Fig. 5 Double-sided power module

### 3. 三次元配置

Fig. 6 に両面放熱パワー素子の基本特性を試験するために製作した初期の試作品概略図を示す。

本試作品では両面放熱パワー素子は冷却板上に並べられ、熱伝導ブリッジを用いて上面の熱を放熱するように作られているが、実装密度において劣っていることは明らかであった。そこで、我々は Fig. 7 に示す積層冷却の概念を採用した。両面放熱パワー素子は垂直に配置され、冷却板によって挟み込まれる。パワー端子は上方に立ち上げられバスバーに接続され、制御端子は下方に向かいゲート駆動基板に接続されている。

### 4. 積層冷却器

積層冷却の概念を実現するために、我々はまずラジエータのような標準的熱交換器を応用することを考えた。ラジエータフィンを用いた両面放熱パワー素子で置き換えればうまく行きそうに思われたが、各々の冷却プレートの弾性力が圧縮力を打ち消すため、パワースタックの中央に向かうにしたがって圧縮力は減少してしまう (Fig. 8)。従って、ヘッダ部は柔軟性を有する必要がある。

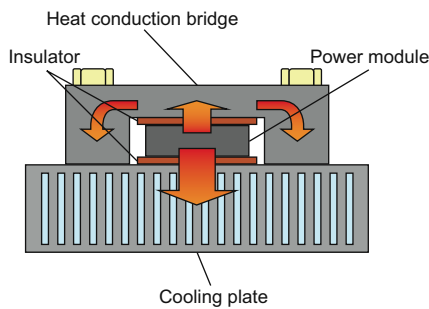


Fig. 6 Early prototype

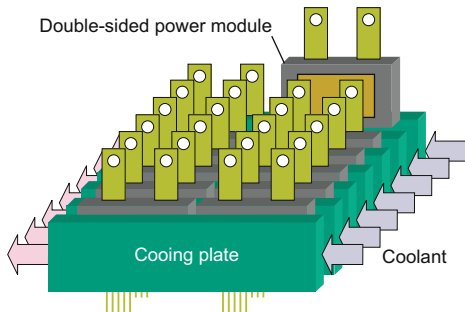


Fig. 7 Stacked cooling concept

Fig. 9 にパワースタックの分解図を示す。積層冷却器は、アルミ板により構成された冷却板が積み重ねられ、出入り口パイプが設けられている。冷却板はエアコン用エバポレータと同様にロウ付けされ、漏れの危険をなくしている。各段の出入り口窓は直列にロウ付けされ、全体として入口、出口のヘッダを形成し、各冷却板の流量を均等化する。

Fig. 10 は冷却板の断面図である。冷却板は両面から熱を吸収するように設計され、熱交換を促進し圧縮力に耐える平均チャンネル幅 0.9 mm の波型フィン 2 層で構成されている。

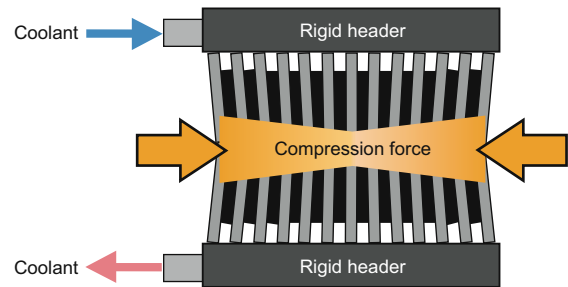


Fig. 8 Rigid headers

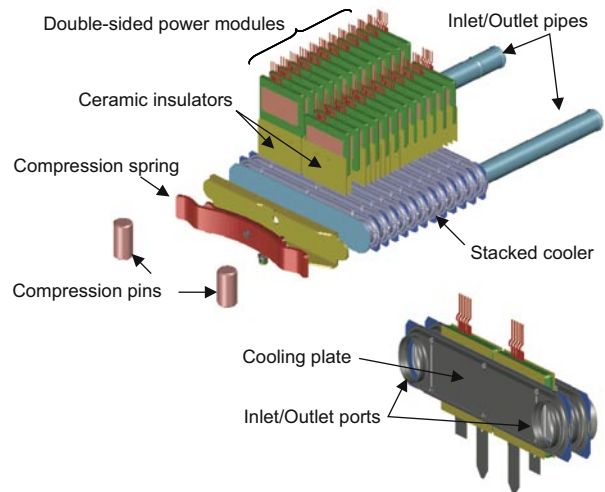


Fig. 9 Exploded view of power stack

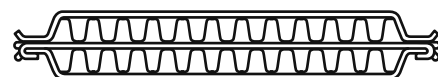


Fig. 10 Cross section of cooling plate

各々の冷却板は、出入り口窓の周囲に変形可能なダイアフラム部を持ち、ヘッドに柔軟性を与えるとともに両面放熱パワー素子を保持するため間隔を狭めることを可能にしている。Fig. 11 にヘッドが変形する様子を示す。

両面放熱パワー素子は絶縁板と熱伝熱グリスを介して冷却板の隙間に挿入される。1段当たり2個のパワーモジュールが収容されるので、全部で24個のパワーモジュールは12段となって13枚の冷却板に挟み込まれる。積層冷却器は加圧バネによって圧縮され、パワーモジュールに密着する。Fig. 12 に組み立てられたパワースタック部を示す。

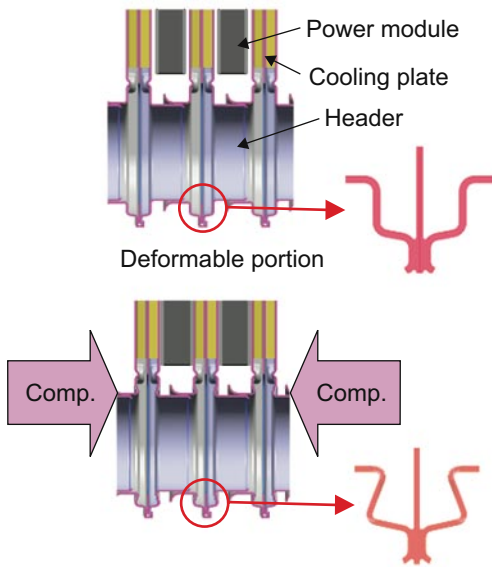


Fig. 11 Deformation of header

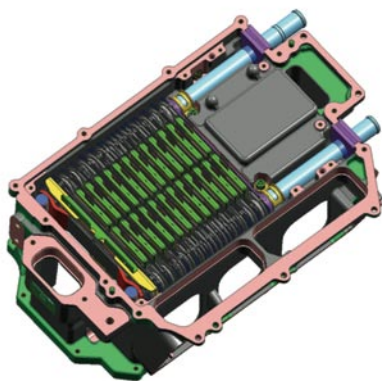


Fig. 12 Assembled power stack

### 5. 冷却性能

Fig. 13 に従来の IPM と両面放熱パワー素子の温度分布シミュレーション結果を示す。両面放熱パワー素子の推定熱抵抗は 0.203 K/W であった。

Fig. 14 に Table 1 の条件でパワースタック部を評価した結果を示す。上流側のパワーモジュールでの発熱は下流側パワーモジュールの見掛けの熱抵抗に影響を与える。各段の熱抵抗は概ね均等に分布していた。最悪の熱抵抗でも開発目標を十分に下回っていた。Fig. 15 に流量に対する熱抵抗の変化を確認した結果を示す。流量の低下で熱変換効率も低下するため、熱抵抗が上昇するが流量 6 L/min おいても開発目標を満足している。

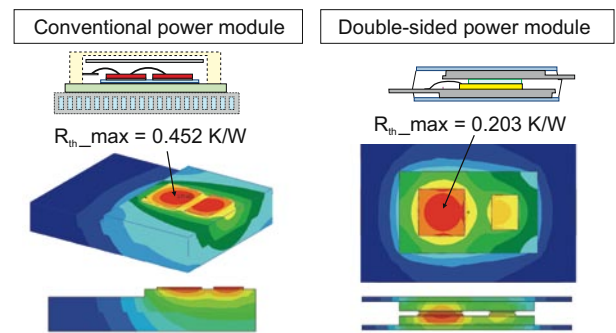


Fig. 13 Simulation of heat conduction

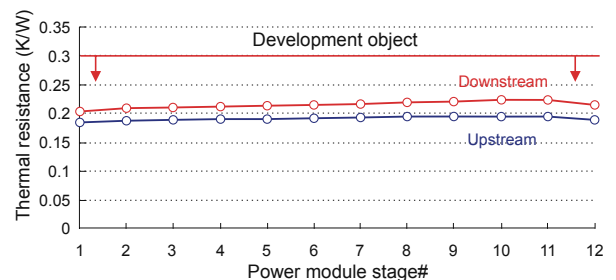
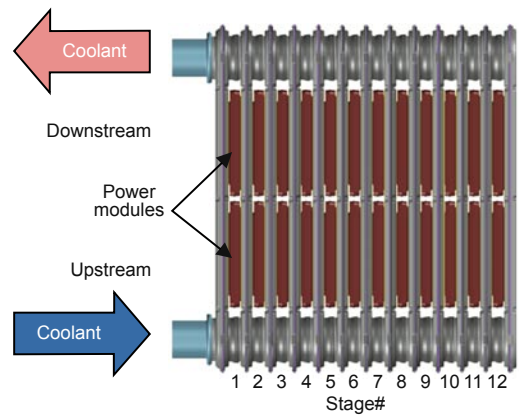


Fig. 14 Thermal resistance experimental result ①

## 6. 開発結果

Fig. 16 に LS600h・PCU を示す。Fig. 17 に当社従来技術（片面放熱）に対する効果を示す。単位体積当りの出力において、約 60%の向上ができた。

## 7. 結論

両面放熱パワー素子と積層冷却を用いて高密度実装を実現し、従来モデルより高い出力密度を持つ LS600h 用 PCU を開発した。熱抵抗は従来設計の半分以下となり、シリコンチップの使用数を大幅に削減できた。本冷却方式を用いた PCU は、09 年に RX450h にも搭載された。

## 8. まとめ

今後の HV の車種展開に向けて、さらなる小型・低コストな製品開発に取り組んでいきたい。最後に、本製品を開発に当たり、時間を惜しまず、議論し製品の完成度向上に尽力して頂いたトヨタ自動車（株）の関係者の皆様に深く感謝の意を表します。



Fig. 16 The developed PCU

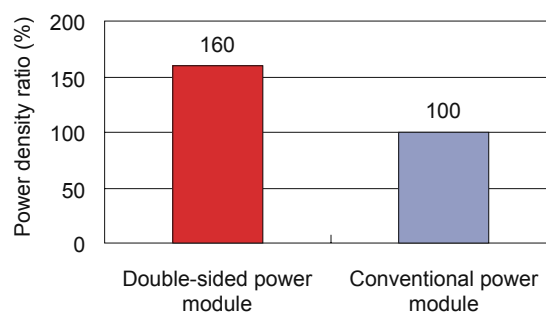


Fig. 17 Comparison of power density

Table 1 Test condition

Coolant	Long-Life Coolant water solution
Concentration	50 wt%
Flow rate	12 L/min (total)
Heat dissipation	300 W/module

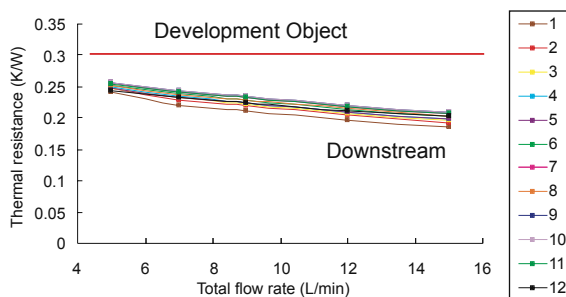


Fig. 15 Thermal resistance experimental result ②

### <参考文献>

- 1) T. Kikuchi, O. Shimura, “Development of Power Control Unit for SUVs”, in Proc. EVS-21, 2005.
- 2) R. Hironaka, H. Kusafuka, “Development of small size Power Control Unit”, in Proc. EVS-22, 2006.



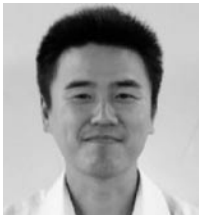
<著 者>



瀬高 庸介  
(せたか ようすけ)  
EHV 機器製造部  
ハイブリッド製品の生産技術開発  
に従事



石山 弘  
(いしやま ひろし)  
EHV 機器技術部  
PCUの開発・設計に従事



稲垣 充晴  
(いながき みつはる)  
熱交換器開発部  
熱交換器の開発・設計に従事



真光 邦明  
(まみつ くにあき)  
IC 技術3部  
半導体素子の開発・設計に従事



菊地 隆二  
(きくち たかじ)  
トヨタ自動車(株)  
HV システム開発統括部  
ハイブリッドシステムの企画・開発  
統括業務に従事