

ハイブリッド車用第2世代アルミニウム直接水冷パッケージ技術

Packaging Technology of 2nd-generation Aluminum Direct Liquid Cooling Module for Hybrid Vehicles

郷原 広道 GOHARA, Hiromichi

齊藤 隆 SAITO, Takashi

山田 教文 YAMADA, Takafumi

地球温暖化の防止や資源の有効利用に向けた取組みとして、ハイブリッド車などの環境対策車のさらなる燃費向上が求められている。そのため、ハイブリッド車用インテリジェントパワーモジュール (IPM) の小型・軽量化が必要である。これに応えるため、富士電機は三つの新パッケージ技術、すなわちアルミニウム直接水冷構造の冷却器設計技術、超音波接合技術、ならびに 175℃連続動作を可能とする高耐熱化技術を開発した。これらの技術を適用した第2世代アルミニウム直接水冷型 IPM は、第1世代に対して体積を 30%、質量を 60% 低減した。

As activities for preventing global warming and allowing for effective use of resources, further improvements in the fuel efficiency of eco-friendly vehicles such as hybrid electric vehicles is called for. To that end, size and weight reduction of intelligent power modules (IPMs) for hybrid electric vehicles is required. To meet this need, Fuji Electric has developed three new packaging technologies: technology for designing a radiator with a structure capable of direct liquid cooling using aluminum, ultrasonic bonding technology and thermal resistance improvement technology that allows continuous operation at 175°C. The 2nd-generation direct liquid cooling IPM using aluminum, which applies these technologies, has achieved a volume reduction of 30% and mass reduction of 60% from the 1st-generation model.

1 まえがき

地球温暖化の防止や資源の有効利用が各国共通の取組みとして重要性を増している。自動車分野では、ハイブリッド車 (HEV) や電気自動車 (EV) の開発と普及が加速している。これらの自動車の動力制御に用いるインバータユニット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・軽量化が求められている。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。

富士電機では、二つのモータを制御するインバータと昇降圧コンバータを内蔵した、車載用アルミニウム直接水冷型インテリジェントパワーモジュール (IPM: Intelligent Power Module) を開発し⁽¹⁾、HEV に必要とされる高出力を実現した。図1に、車載用アルミニウム直接水冷型 IPM を示す。第2世代の IPM は第1世代に対し、体積を 30%、質量を 60% 低減した⁽²⁾。

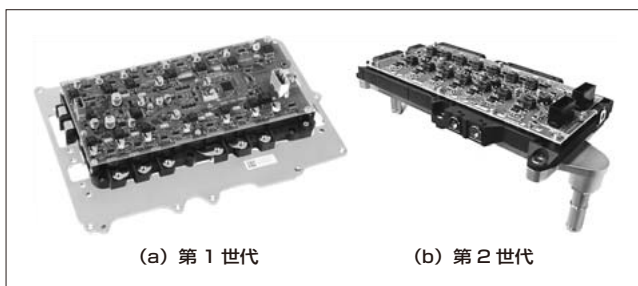


図1 車載用アルミニウム直接水冷型 IPM

本稿では、第2世代の IPM に適用した三つの新パッケージ技術、すなわちアルミニウム直接水冷構造の冷却器設計技術、超音波接合技術、ならびに 175℃連続動作を可能とする高耐熱化技術について述べる。

2 冷却構造の技術課題

図2に、第1世代アルミニウム直接水冷型 IPM の断面構造を示す。この構造では、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別個の部品となり、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、座屈や変形を考慮した材料選択やベース厚さが必要であり、熱抵抗上昇の要因となっていた。

このような課題を解決し、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確保するため、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。

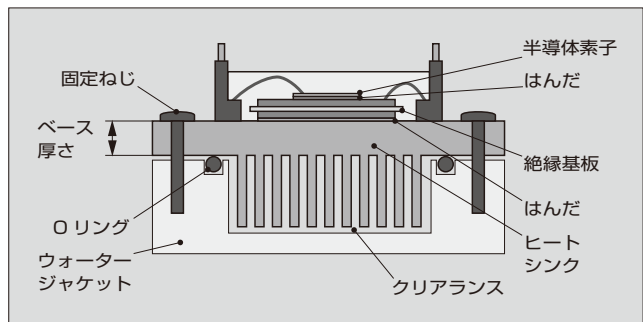


図2 第1世代アルミニウム直接水冷型 IPM の断面構造

3 冷却器設計技術

3.1 放熱性能の設計

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 R_{th} は、チップのジャンクション温度と比較対象とする箇所との差を発生損失で除した値である。また、熱伝達係数 h は冷媒とフィン間の熱交換性能を示す。これらの関係は式(1)で表される。また、式(2)に置き換えることができる。

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

h : 熱伝達係数 [W / (m² · K)]

R_{th} : 熱抵抗 (K/W)

A : フィン表面の面積 (m²)

$$h = \frac{Nu\lambda}{L} \dots\dots\dots (2)$$

h : 熱伝達係数 [W / (m² · K)]

Nu : ヌセルト数

λ : 構成部材の熱伝導率 [W / (m · K)]

L : フィンの代表長さ (m)

ヌセルト数 Nu は、形状パラメータを用いて式(3)で計算することができる。このとき、レイノルズ数 Re は式(4)で、プラントル数 Pr は式(5)で表される。

$$Nu = 0.664Re^{1/2}Pr^{1/3} \dots\dots\dots (3)$$

Nu : ヌセルト数

Re : レイノルズ数

Pr : プラントル数

$$Re = \frac{\rho v L}{\eta} \dots\dots\dots (4)$$

Re : レイノルズ数

ρ : 冷媒の密度 (kg/m³)

v : 冷媒の流速 (m/s)

L : フィンの代表長さ (m)

η : 冷媒の粘度 (Pa · s)

$$Pr = \frac{\eta Cp}{\lambda} \dots\dots\dots (5)$$

Pr : プラントル数

η : 冷媒の粘度 (Pa · s)

Cp : 比熱 [J / (kg · K)]

λ : 熱伝導率 [W / (m · K)]

これらの式から、熱伝達係数は使用する冷媒の密度、粘度、比熱、熱伝導率と流速から計算できることが分かる。流速に対する熱伝達係数を単位当たりの長さから計算した結果を図3に示す。

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。これはチップで発生した熱がフィンに伝わり、冷媒を伝えて放熱される状態について、フィン表面を流れる冷媒流速が放熱性能に大きく影響することを示し

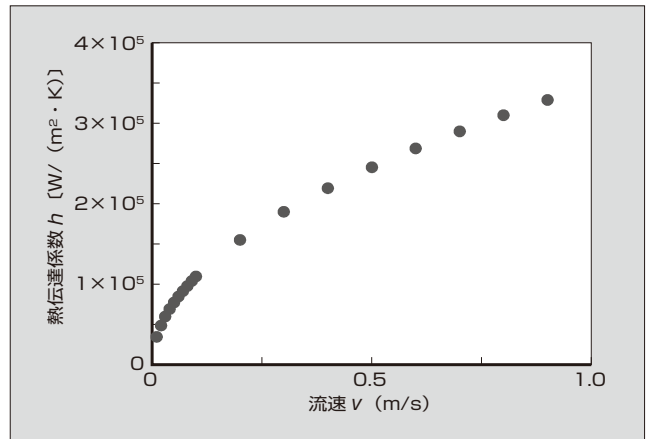


図3 熱伝達係数と冷媒流速の関係

ている。よって、フィン表面の流速向上が放熱設計のポイントであることが分かる。⁽³⁾

3.2 流速と放熱性能

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。図4に、簡易モデルとシミュレーション結果を示す。

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る。冷媒は圧力抵抗の低い部分を流れるため、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

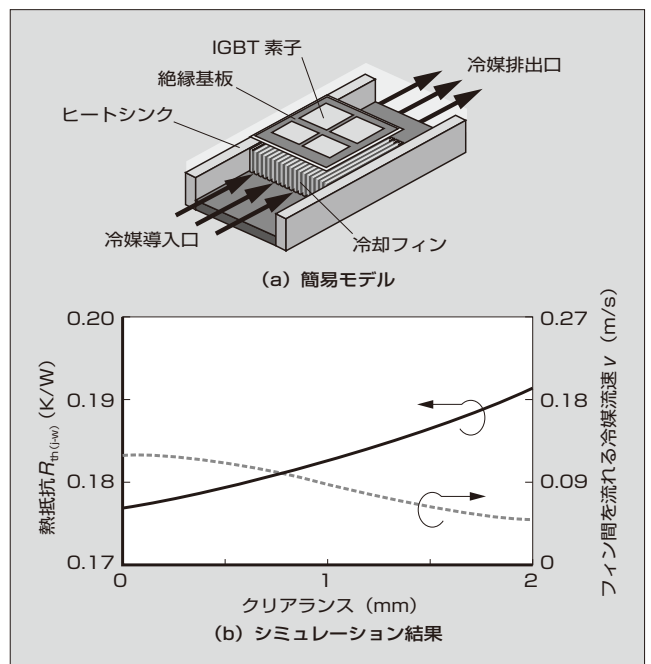


図4 簡易モデルとシミュレーション結果

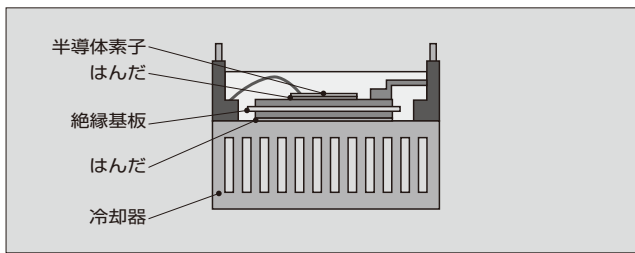


図5 第2世代アルミニウム直接水冷型IPMの断面構造

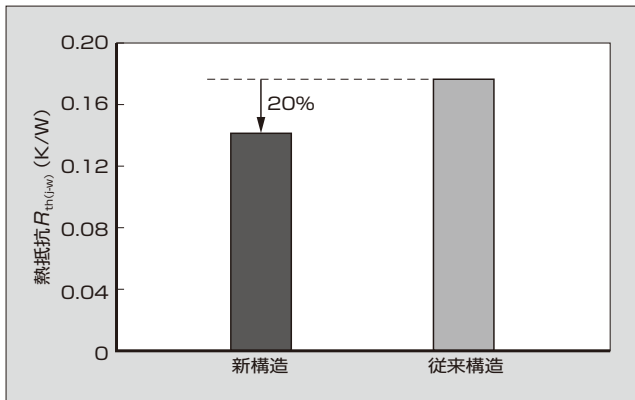


図6 熱抵抗

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早くして熱抵抗を下げるのに効果的であることが分かる。

図5に、第2世代のアルミニウム直接水冷構造として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した。これにより、冷媒を最大限に活用できる冷却構造とし、ベースに相当する部分の厚さを薄くするとともに高熱伝導率材料を採用したものである。

図6に熱抵抗の比較結果を示す。新構造は、冷媒の活用と熱伝導性を考慮しており、従来構造と比較して熱抵抗を20%低減することができる。

4 超音波接合技術

第1世代のアルミニウム直接水冷型IPMでは、主端子と内部回路基板の接続にアルミニウムワイヤを採用していた。電流密度を確保するために必要な本数のワイヤをボンディングできる接合面積が必要であり、配線部は出力に応じた広い実装面積が必要であった。小型・軽量化するために、第2世代のIPMでは、主端子である銅端子と内部回路基板の接続に超音波接合を用いた。図7に、超音波接合を行った銅端子の外観写真を示す。超音波接合では銅端子と基板銅回路が固相拡散によって直接接合しているため、強固な接合部が得られる。図8に、同じ電流容量で比較した銅端子超音波接合とアルミニウムワイヤボンディングにおける実装面積を示す。アルミニウムワイヤより導電率の高い銅端子を直接接合したことで、超音波接合構造はアル

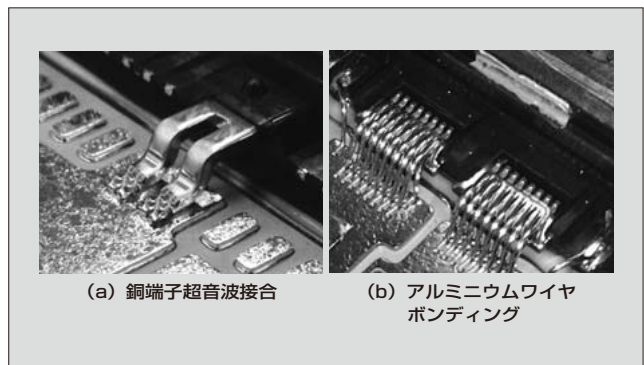


図7 接合部の外観写真

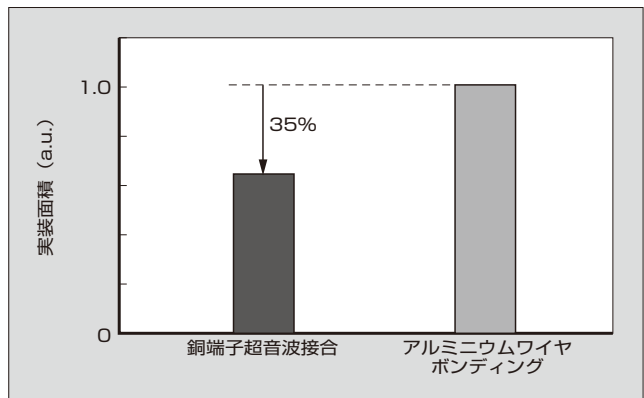


図8 実装面積

ミニウムワイヤボンディング構造と比較して35%の実装面積の低減が可能となった⁽⁴⁾。

直接水冷構造における放熱性能の向上に加え、超音波接合技術を適用したことで、第2世代のアルミニウム直接水冷型IPMは、第1世代に対して体積を30%、質量を60%低減した。

5 175℃連続動作を可能とする高耐熱化技術

IPMの動作時にチップで発生した熱は、放熱ベースを通じて冷却フィンから放熱される。素子温度 T_j の上限は150℃が一般的であり、また水冷の場合、水温と素子上限温度の差である ΔT をどれだけ有効に活用できるかが出力特性を左右する。熱抵抗低減に加えて素子保障上限温度 T_{jmax} を175℃に上げることで、よりいっそうの高出力化の達成を目指した。

T_{jmax} を150℃から175℃に上昇させるには、素子周辺部材の信頼性に与える影響を改善しなければならない⁽⁵⁾。従来のモジュール構成を用い、 T_{jmax} を固定した場合のパワーサイクル試験を行った。図9に試験結果を示す。25℃の高温化により、 $\Delta T_j=75℃$ のときに寿命が40%低下した。

ここでは、素子下はんだ接合部の寿命低下に着目する。従来のSn-Ag系はんだでは、熱劣化による強度低下が寿命低下の要因と考えられる。そこで、破壊モードを解析し、耐熱に優れ高強度となるように、強化機構を取り入れた新はんだの開発を行った。

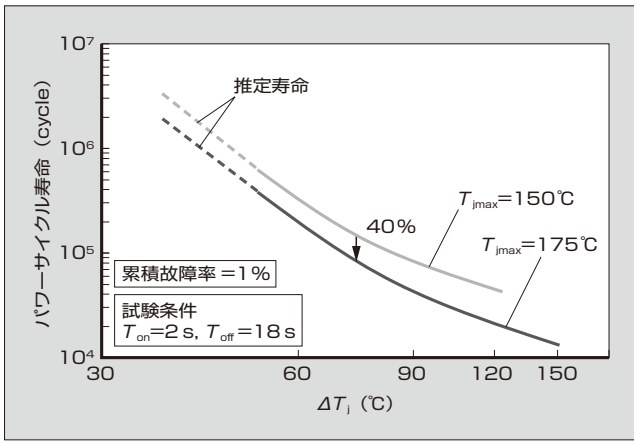


図9 T_{jmax} 上昇によるパワーサイクル寿命の低下

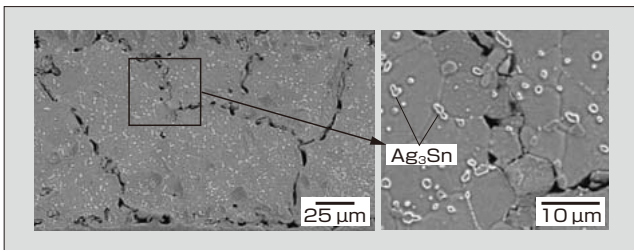


図10 パワーサイクル試験後 ($T_{jmax}=175^{\circ}\text{C}$) のはんだ断面観察結果

5.1 Sn-Ag系はんだの破壊モード

図10に、パワーサイクル試験後の断面を観察した結果を示す。Snの粒界に沿ってクラックが観察された。Sn-Ag系はんだは、Snの粒界に Ag_3Sn が析出することで粒界を強化してクラック進展を抑制する構造であるが、パワーサイクル試験によるはんだ部の発熱および繰り返し応力により、 Ag_3Sn の凝集とSn粒子の粗大化が発生することで、粒界を強化する構造が消失したことが原因と考えられる。特に、 175°C で連続動作を行った場合、チップ直下にあるはんだ接合部の温度は、 150°C 動作時と比較して、約 25°C 上昇することとなり、金属組織の変化と熱疲労によるクラック進展が加速し、寿命が低下したと考えられる。

5.2 はんだの強化機構

175°C 連続動作においても金属組織が変化せず、強度を維持するはんだを開発するために、金属材料の強化機構に着目した。代表的なはんだの強化機構としては、Sn-Ag系はんだに代表される析出強化とInやSbを添加した固溶強化がある⁽⁶⁾。従来はどちらか一方の強化機構を利用した組成であったが、 175°C 連続動作時の信頼性を確保するため、Sn-Sb系はんだをベースに第3元素を添加し、析出強化と固溶強化の二つの強化機構を合わせた複合強化型の新はんだとした。

5.3 はんだの機械的特性

析出強化と固溶強化の両方の強化機構を持つはんだの

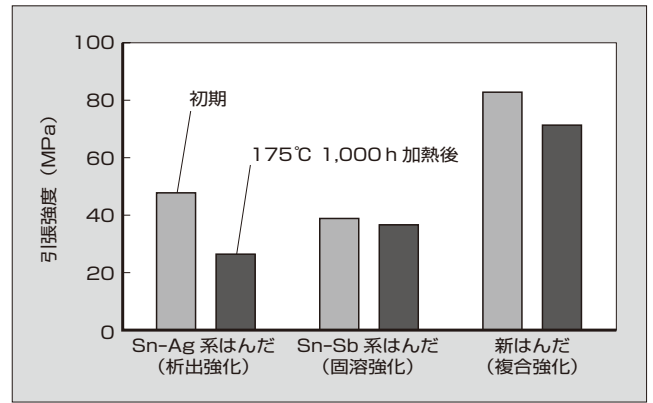


図11 引張強度

機械的特性について、高温下での組織変化による強度低下の影響を調査するために、室温および高温時効 175°C 、 $1,000\text{h}$ を行ったサンプルの引張強度を測定した。図11に、Sn-Ag系はんだ、Sn-Sb系はんだ、新はんだの測定結果を示す。

Sn-Ag系はんだは 175°C で $1,000\text{h}$ 加熱後、強度が約44%低下し、固溶強化であるSn-Sb系はんだは、約5%の強度低下であった。一方、複合強化型の強化機構を持つ新はんだは13%の強度低下であった。強度の低減割合は多少大きかったものの、複合強化型は強度自体が高く、寿命改善に効果を発揮することが期待できる⁽⁷⁾。

5.4 パワーサイクル試験結果

開発した新はんだの高温での信頼性を評価するため、 $T_{jmax}=175^{\circ}\text{C}$ の試験条件でパワーサイクル試験を実施した。図12に、パワーサイクル試験の結果を示す。新はんだは、Sn-Ag系はんだと比較して、 $\Delta T_j=75^{\circ}\text{C}$ のときに2.6倍のパワーサイクル寿命を持つことが分かった。

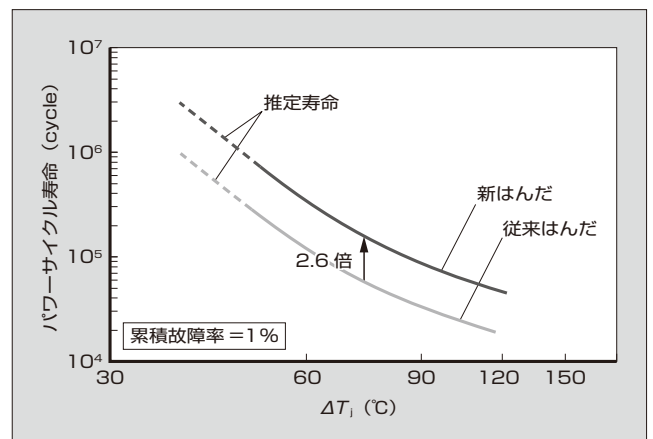


図12 新はんだのパワーサイクル試験結果

<注> 時効：時間の経過に伴い金属の性質（例えば、硬さなど）が変化する現象をいう。

6 あとがき

本稿では、ハイブリッド車用IPMの小型・軽量化を実現するパッケージ技術として、アルミニウム直接水冷構造の冷却器設計技術と超音波接合技術、および175℃連続動作を可能とする高耐熱化技術について述べた。

パッケージ技術は、お客さまのインバータ開発設計を支援するものであり、これらの技術を基にさらなる技術革新を推進し、高効率、省エネルギー化に貢献する製品を提供していく所存である。

参考文献

- (1) 郷原広道ほか. ハイブリッド自動車用IPMのパッケージ技術. 富士電機技報. 2013, vol.86, no.4, p.258-262.
- (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) Morozumi, A. et al. "Next-gen IGBT module structure for hybrid vehicle with high cooling performance and high temperature operation". Proceedings of the 2014 IEEJ, Hiroshima, p.671-676.
- (4) 百瀬文彦ほか. IGBT モジュールの高信頼性実装技術. 富士電機技報. 2012, vol.85, no.6, p.408-412.
- (5) K, Vogel. et al. "IGBT with higher operation temperature

- Power density, lifetime and impact on inverter design". Proceedings of PCIM Europe, 2011, p.679-684.

- (6) Saito, T. et al. "New assembly technologies for $T_{jmax}=175^{\circ}C$ continuous operation guaranty of IGBT module". Proceedings of PCIM Europe 2013, Nuremberg, p.455-461.
- (7) Saito, T. et al. "Novel IGBT Module Design, Material and Reliability Technology for 175°C Continuous Operation". Proceedings of IEEE 2014, Sep 14-18, Pittsburgh, p.4367-4372.



郷原 広道

パワー半導体パッケージの研究開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部電子デバイス研究所次世代モジュール開発センターパッケージ開発部。日本機械学会会員。



齊藤 隆

パワー半導体パッケージの研究開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部電子デバイス研究所次世代モジュール開発センターパッケージ開発部。表面処理技術協会会員，エレクトロニクス実装学会会員。



山田 教文

パワー半導体パッケージの研究開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部電子デバイス研究所次世代モジュール開発センターパッケージ開発部。





*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。