特集論文

高性能トランスファーモールド型パワーモジュール

西村　隆*　塩田裕基*
三村研史**　上田哲也***
平松星紀**

High Performance Transfer-molded Power Module

Takashi Nishimura, Kenji Mimura, Seiki Hiramatsu, Hiroki Shiota, Tetsuya Ueda

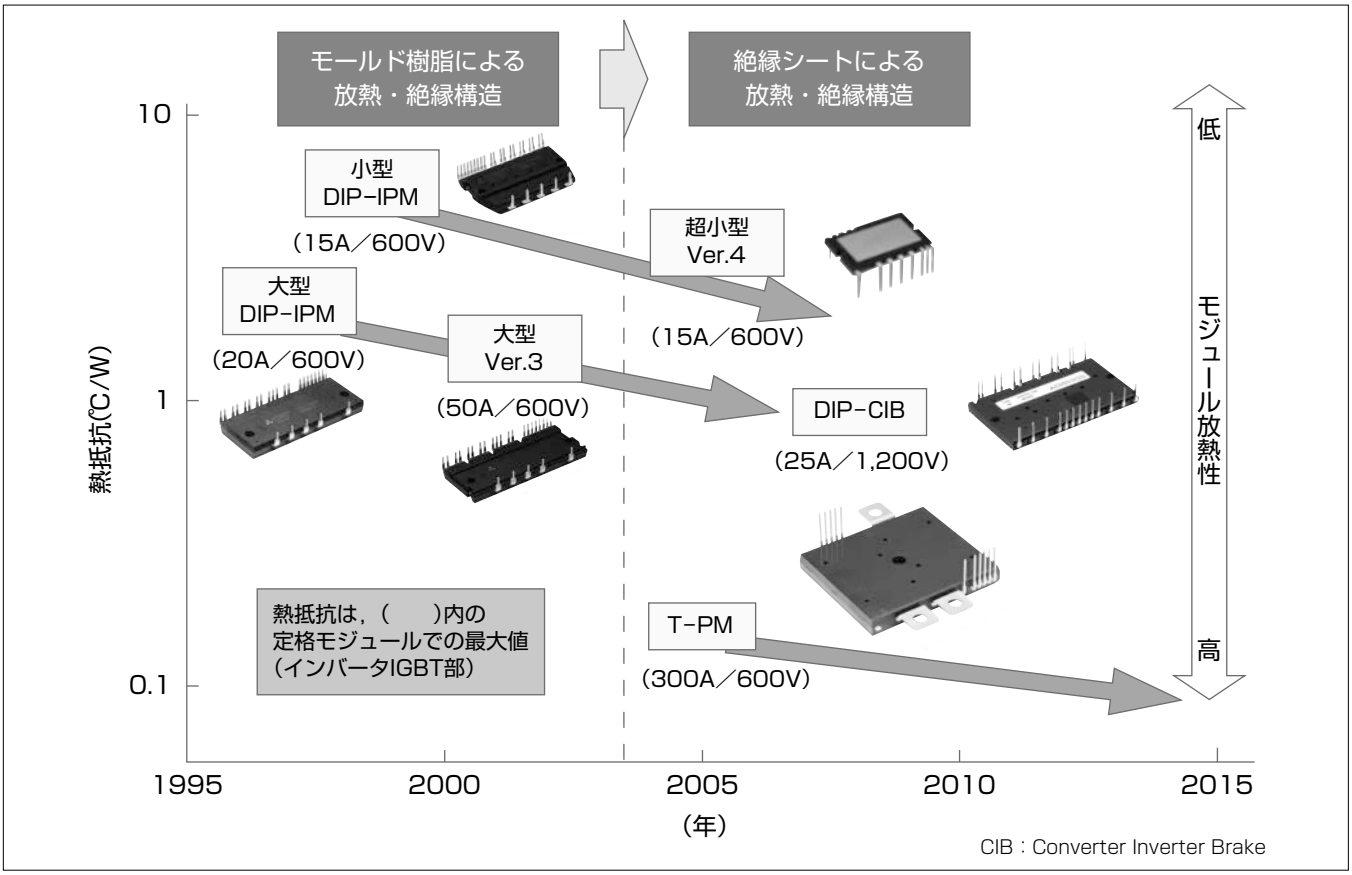
要　旨

生産性に優れるトランスファーモールド型のパワーモジュールは，従来小型軽量化を特長に，主に白物家電用途のモジュール(Dual In-line Package-Intelligent Power Module：DIP-IPM)として市場を伸ばしてきた。近年，それらの用途にもモジュールの大容量化・小型化の要望が高まり，更なる放熱性の向上が必要となった。この解決策として，従来パッケージの放熱・絶縁構造を見直すとともに，絶縁シートの放熱性を改善した。新規開発したパワーモジュールは，従来モールド樹脂が担っていた放熱・絶縁の役割を，高熱伝導かつ高絶縁耐圧の絶縁シートが担うことで，高絶縁耐圧と低熱抵抗化を実現した。

さらに三菱電機は，絶縁シートの優れた放熱性を生かし，ヒートスプレッダ(注1)を内蔵した高放熱モジュール構造の適用によって，大容量に対応可能なトランスファーモールド型パワーモジュール(Transfer-molded Power Module：T-PM)を開発し，産業用及び車載用に展開している。T-PMは，①セラミックス基板搭載モジュールに匹敵する放熱性を持つ，②従来のケース型モジュールに比べ，高い信頼性を持つなどを特長に，今後更に大きな需要が見込まれる。

本稿では，T-PMに適用される絶縁シート技術の紹介と，最近の技術動向を述べるとともに，T-PMの高性能化技術について述べる。

(注1)　チップからの発熱を効果的に放散させるために設けられた金属などの構造部材



トランスファーモールド型パワーモジュールの放熱性の向上

1997年に大型DIP-IPMを製品化して以来，モールド樹脂で放熱・絶縁するモジュールの市場が拡大したが，放熱性に限界が生じたため，2004年から絶縁シートを適用することによって，モジュールの熱抵抗低減を実現した。さらに高放熱が可能なT-PMは，産業用，車載用の大容量モジュールに展開され，絶縁シートの高熱伝導化とともに，熱抵抗の低減が図られている。

*先端技術総合研究所　**同研究所(工博)　***パワーデバイス製作所

1. まえがき

半導体の樹脂モールドは，1960年代前半，代表的な熱硬化樹脂であるエポキシ樹脂材によるキャスティング封止で始まった。1960年代後半には，より生産性が優れた固形封止材を用いた低圧トランスファー成形法が開発され，これが現在の半導体樹脂モールド技術の主流になっている。

一方，パワーモジュールのパッケージ基本構造は，従来は**図1**に示すようなケース型モジュールが主流であったが，当社では1997年から半導体樹脂モールド技術で養われたトランスファーモールド型パワーモジュールを実用化し，この10年でパッケージ種，生産数ともに増加している。トランスファーモールド型パッケージは生産性に優れる上，小型化・軽量化を実現しており，主に白物家電用途の小容量の領域で急速に拡大している。このパッケージ構造では，絶縁耐圧を確保しつつ，熱抵抗を低減することが重要であり，最新世代では高熱伝導の“絶縁シート”を採用することで放熱性能を大幅に改善し，パッケージの小型化を実現した[1]。

本稿では絶縁シートの進歩によって，大電流化，高電圧化が大いに期待されるトランスファーモールド型パワーモジュールの高放熱化技術の開発状況について述べる。

2. モールド型パッケージ構造の歴史

図2に当社の代表的なモールド型パワーモジュール製品の変遷を示す。1997年に初めてトランスファーモールド型の大型DIP-IPM（～20A／600V）を製品化し，1999年にはヒートスプレッダを持たない小型DIP-IPM（～15A／600V）を上市した。その後，2002年に大型DIP-IPMをベースに，銅材のヒートスプレッダを内蔵して低熱抵抗化を図り，電流容量50Aまで対応した大型DIP-IPM Ver.3を開発した。

2004年にはパッケージコンセプトを見直して，“絶縁シート”を採用したDIP-IPM（超小型Ver.4）を開発・量産化した。従来のDIP-IPMでは，モールド樹脂が放熱と絶縁を担ってきたが，超小型DIP-IPM Ver.4では，新たに開発した高熱伝導絶縁シートに放熱及び絶縁機能を持たせた構造としている。**図3**にモールド樹脂によって絶縁された従来構造及び**図4**に絶縁シート構造のDIP-IPMの断面構造模式図を示す。

絶縁シート搭載のパワーモジュールは，DIP-IPM以外にも展開しており，2004年以降には主に産業機器，又は車載用途向けに，定格300A／600Vの大容量モールド型IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）モジュールとなるT-PM（**図5**）を開発した[2]。これは，絶縁シートと銅ヒートスプレッダの組合せによって極めて高い放熱性を実現している。また，2006年には，汎用（はんよう）インバータ用途向けに，絶縁シートとアルミヒートスプレッダを放熱経路としDIP-CIB（DIP-Converter Inverter Brake）を製品化した。

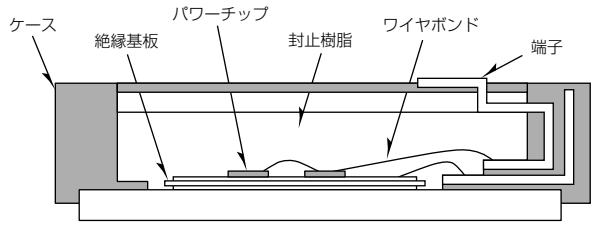


図1．ケース型モジュールの構造

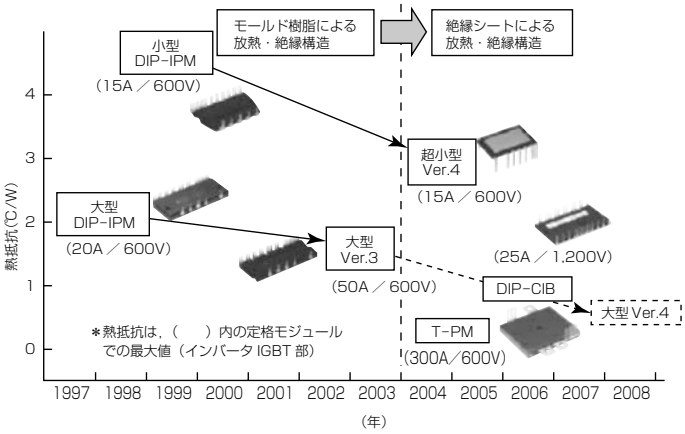


図2．モールド型パワーモジュール製品の変遷

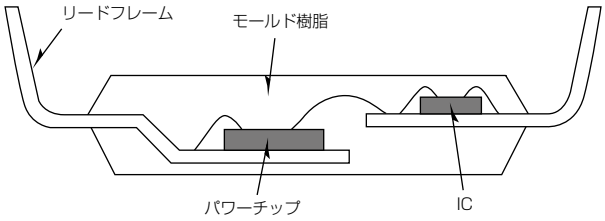


図3．モールド樹脂絶縁型モジュールの構造（従来型：小型DIP-IPM）

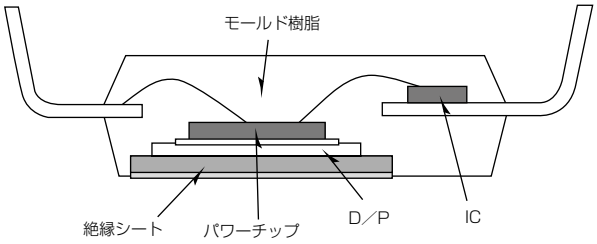


図4．絶縁シート型モジュールの構造（超小型DIP-IPM Ver.4）

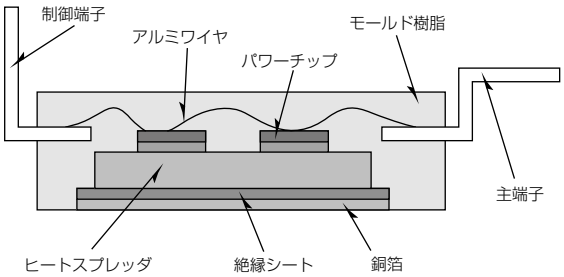


図5．トランスファーモールド型大容量パワーモジュール（T-PM）構造図

3. 絶縁シート適用トランスファーパワーモジュール

3.1 絶縁シート適用のメリット

従来のDIP-IPMは，**図3**のようにパワーチップ，制御チップを同一リードフレーム上に搭載し，全体をモールド樹脂で封止する構造となっている。パワーチップからの放熱は，チップ→はんだ→リードフレーム→モールド樹脂を経由し，外部に放出される。

一方，絶縁シート構造DIP-IPMは，**図4**のようにフレームと絶縁シートを接合し，フレームから直接絶縁シートを経由して放熱する構造としている。

絶縁シートは，モジュールの高放熱化と高絶縁耐圧化を実現することを目的としている。放熱性は，式(1)で表される熱抵抗の逆数であり，各構成層の熱伝導率が高く，絶縁層の厚さが薄いほど良くなる。

$$Rth = \Sigma(1/\lambda \cdot t/S) \quad \cdots\cdots(1)$$

Rth：熱抵抗　λ：構成材料の熱伝導率

t：厚さ　S：伝熱面積

モールド樹脂の熱伝導率は，**表1**に示すように比較的高い熱伝導率のフィラーを用いても数W/mKレベルが限界となっている。また，**図6**には，モールド成形時の樹脂の流動イメージを示しており，リードフレーム下の間隔が狭く，樹脂の流動抵抗が大きくなっている。したがって成形性を確保するためには，リードフレーム下の樹脂層の薄膜化には限界が生じる。このように従来構造のDIP-IPMでは，モールド注入の制約から樹脂の高熱伝導化と絶縁層の薄膜化に限界が生じ，放熱性向上が困難であった。

対してモールド封止型モジュールの高放熱化を目的として絶縁シートを適用したDIP-IPMでは，熱抵抗の大幅な低減が可能となる。**図7**に，シミュレーションで求められたDIP-IPMの熱抵抗の成分比率を示す。モールド樹脂の熱伝導率は金属，セラミックスに比べて1～2けた小さく，モールド型パッケージでは封止樹脂層(モールド樹脂)の熱抵抗が支配的になる。絶縁シート構造でも，絶縁シート部の熱抵抗が最も大きな比率を示すことに変わりはないが，従来型のモールド樹脂に比較すると1/3以下となっている。これは，絶縁シートの熱伝導率を高く，かつ薄く設計できるためである。この絶縁シートを適用することによって，モジュールの放熱性が飛躍的に向上し，従来型に比較し大幅にパッケージを小型化することに成功した。

3.2 絶縁シートの高熱伝導化技術

樹脂モールドによる絶縁と異なり，絶縁シートを用いたパワーモジュールでは放熱性と封止を機能分担しているため，絶縁シートは放熱性重視の設計が可能となる。すなわち，放熱性と電気絶縁性が求められる絶縁シートは，封止材料に必要な流動性や離型性などが不要となるため，熱伝導フィラー(注2)(以下“フィラー”という。)の充填(じゅうてん)率を高めることができ，フィラー形状，粒径，界面処理などの材料設計の自由度も高くなった。また，材料使用量が少ないため，比較的高コストの材料設計が可能となるというメリットも生じる。**図8**に，絶縁シートに使用可能な代表的なフィラーのコストと熱伝導率を示す。従来の封止材料には，コストの制約から酸化物フィラーが主に使用されていた。一方，絶縁シート型パワーモジュールに適用

(注2)　熱伝導率向上のために添加される充填材

表1．モールド樹脂に用いられる熱伝導フィラーと熱伝導率

熱伝導フィラー	熱膨張係数 $\times 10^{-6}$ (/K)	熱伝導率 (W/mK)	モールド樹脂としての熱伝導率(W/mK)
溶融シリカ　SiO_2	0.5	1	0.7～0.8
結晶シリカ　SiO_2	1.5	12	2.0～2.5
アルミナ　Al_2O_3	6	36	3.0～4.0
窒化ケイ素　Si_3N_4	3.2～3.7	45	3.0～3.5

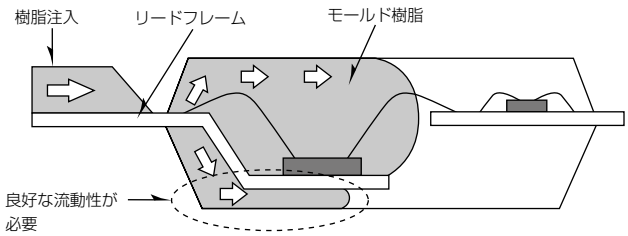


図6．モールド成形時の樹脂流動イメージ

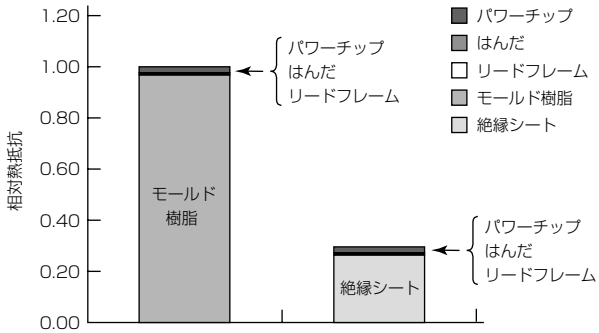


図7．従来構造及び絶縁シート構造のDIP－IPMの熱抵抗

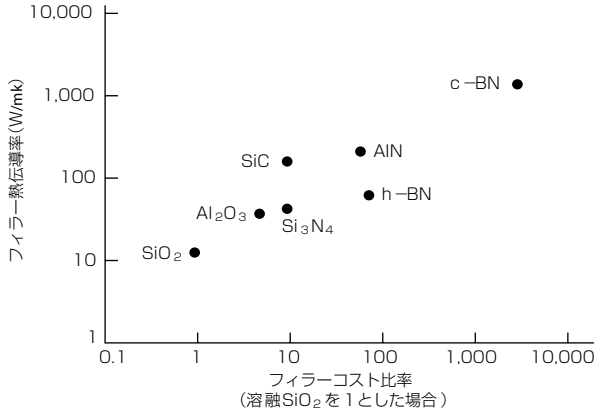


図8．熱伝導フィラーのコストと熱伝導率

される絶縁シートは，使用量が少ないため，比較的高価な材料，特に最近の高放熱性が要求される大容量パワーモジュールには，窒化物系フィラーの適用が盛んに検討されている。

最近の有機材料の高熱伝導化技術動向として，以下のような様々な検討が進められている。

①フィラーの高充填化：フィラー形状，粒径設計による充填率極限化技術[3]

②フィラー間の熱抵抗低減：ブリッジ材によるフィラー間熱抵抗の低減技術[4]

③樹脂成分の高熱伝導化：液晶骨格導入等による樹脂ナノ構造制御技術[5]

④異方性フィラーの配向制御：c，h-BN等異方性の強いフィラーの充填配向制御技術[6][7]

このように，有機材料の高熱伝導化技術の進歩とともに，絶縁シートの性能も向上している。**図9**に，当社の大容量トランスファーパワーモジュールT-PMのモジュール放熱性の進化を示す。2004年に初めて絶縁シートを適用したモジュールの熱抵抗に対し，絶縁シートの熱伝導率の向上とともにモジュールの熱抵抗は低下し，2009年では20%以上低減している。また，開発中のモジュールでは，2004年品に比べて35%程度の熱抵抗低減を目標としている。このように絶縁シートの高熱伝導化に伴い，モジュール放熱性は向上し，小型化又は大容量化設計が可能となってきている。

3.3　絶縁設計技術

T-PMでは**図5**に示したように，リードフレーム(ヒートスプレッダ)と銅箔(はく)間に高電圧が印加されるため，その間に挟まれた絶縁シートや封止樹脂で絶縁を確保する構造になっている。電界が集中する絶縁シート及びリードフレーム近傍の封止樹脂では，高耐圧絶縁設計が重要である。特に絶縁シートは薄肉であり高電界が印加されるため，高度な絶縁設計技術が必要となる。

図10に絶縁シートを適用したモジュールの放熱性能と絶縁性能の関係を示す。放熱性能と絶縁性能は，しばしばトレードオフの関係にあり，例えば熱伝導シートで考えると，フィラー粒径を大きくすることで熱伝導率は向上するが，フィラー端部の局所電界が高くなり耐電圧は低下する。

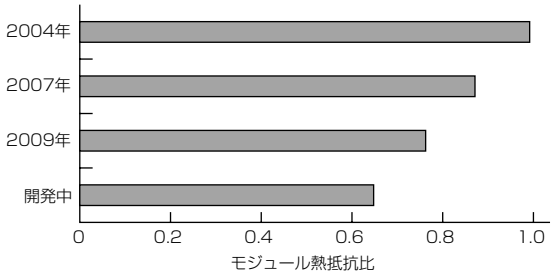


図9．T−PMの放熱性の向上

よって，高耐圧高熱伝導シートを構築するには両者のバランス設計が必要であり，次のような絶縁設計要素を最適化する必要がある。

①絶縁シートの厚さ

②フィラーの粒径，形状

③フィラーの種類(誘電率)

④フィラーの充填率

⑤ シート内ボイドサイズ

⑥ リードフレーム(ヒートスプレッダ)端部形状

表2に，絶縁シートに適用される主な熱伝導フィラーの物性を示す。絶縁設計には，フィラー自体の絶縁抵抗値だけでなく，誘電率や耐湿性への配慮も重要である。窒化物フィラーは，酸化物系フィラーに比較し，高い放熱設計が可能となるが，例えば窒化アルミニウムでは，高誘電率であることに加え，耐湿性の配慮が必要となる。フィラーと樹脂の誘電率の差が大きいと，通電時の電界集中が生じやすく，絶縁性能の低下につながる場合がある。また耐湿性が低い材料では，分解したイオン成分によってリーク電流の増大を引き起こし，絶縁性能が低下する場合がある。このため，例えば窒化アルミニウムを絶縁材料に用いるには，耐湿性向上策として様々な表面処理法が施されている[8]。

このように，絶縁シートの絶縁性能はフィラーの影響を大きく受けており，フィラーの特性を生かした絶縁設計技術が不可欠である。

3.4　信頼性向上技術

絶縁シート適用のパワーモジュールでも，セラミック基板を用いたパワーモジュールと同様の信頼性が求められる。特に最近は，モジュールの大容量化，コンパクト化に伴うモジュール作動温度の上昇や，高温高湿環境下耐性への要

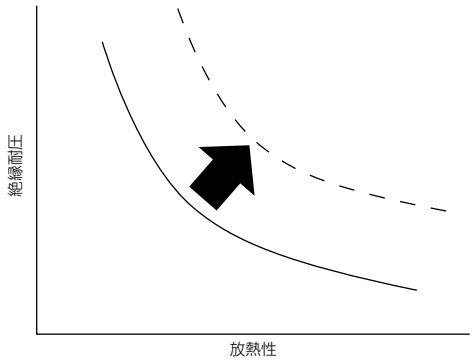


図10．モジュールの放熱性と絶縁耐圧の関係

表2．絶縁シートに適用される主な熱伝導フィラーの物性

熱伝導フィラー		熱伝導率 W/mK	体積固有抵抗 Ω・cm	比誘電率	耐湿性
結晶シリカ	SiO_2	12	1×10^{15}	4.6	良好
アルミナ	Al_2O_3	36	1×10^{15}	10	良好
窒化硼素(六方晶)	h-BN	60	1×10^{14}	4.2	良好
窒化アルミニウム	A1N	200	$>1\times10^{14}$	8.5	対策要

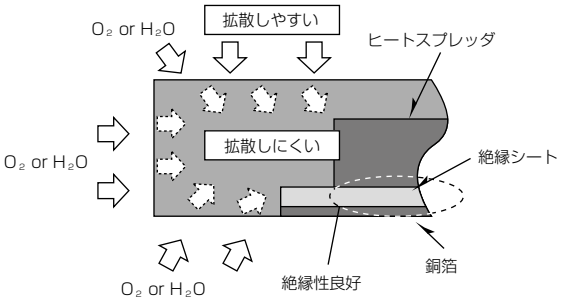


図11. トランスファーモールドのO_2とH_2Oの拡散を示す模式図

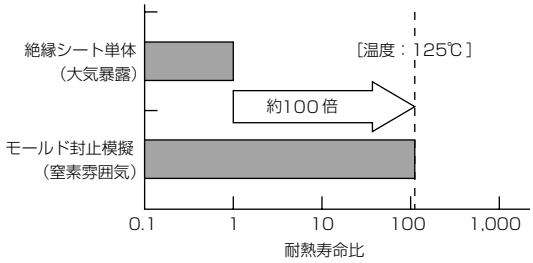


図12. 雰囲気の絶縁シート耐熱寿命に与える影響

求が高まっており，過酷な作動環境での信頼性確保が不可欠となっている。

絶縁シートは，熱伝導性のセラミックフィラーを樹脂で固めたものであり，樹脂の耐熱性及び耐湿性等が信頼性を左右する重要な要素となる。このため，絶縁シートに適用される樹脂は，比較的，耐熱性と耐湿性に優れる高架橋樹脂が用いられている。またトランスファーモールド型パワーモジュールの特長は，**図11**に示すとおりモールド樹脂で覆われた構造になっており，絶縁シートは外気と直接触れない構造，すなわち，直接酸素や水分に触れない構造になっている。一般に樹脂劣化は，熱・光・酸素等のアタックによってラジカル(注3)を発生する分解サイクルが進行することが知られている。絶縁シートが直接アタックされにくいモールド構造では，樹脂の耐久性が更に向上することが期待できる。

図12に，絶縁シート単体とモールド封止された構造を模擬した窒素雰囲気下での耐熱寿命比を示す。また絶縁シート単体と実際にモールド封止された絶縁シートが吸湿飽和するまでの時間比を**図13**に示す。これらの評価結果から，熱分解速度や吸湿速度が2けた以上遅くなっており，絶縁シートの耐熱性，耐湿性はモールド封止されることによって，大きく向上するものと思われる。

図14には，T-PMを125℃で長期保管してモジュールリーク電流を測定した結果，2,000時間後も安定した絶縁性を維持できることが示されている。

（注3） 不対電子を持つ化学種のこと

4. む す び

当社のトランスファーパワーモジュールは，絶縁シートの性能向上とモジュール部品を強固に封止するモールド技術の融合技術によって，優れた放熱性と信頼性を実現している。今後，更に大容量化と高性能化を実現するパワーモジュールの開発を目指すためには，絶縁シートをはじめとする材料技術の更なる進化が重要となる。

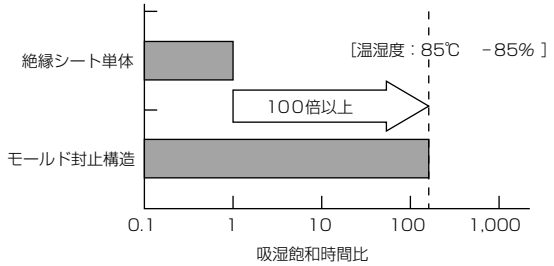


図13. 封止有無の絶縁シート吸湿速度に与える影響

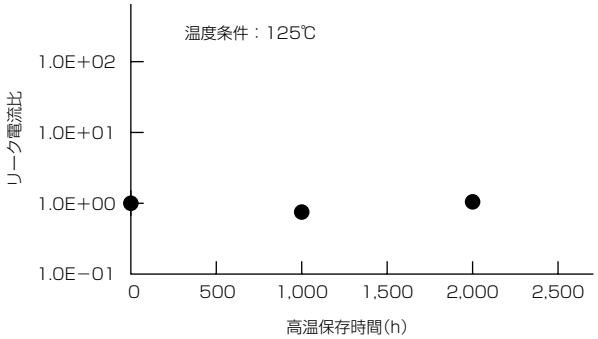


図14. T-PMの高温保存時間とリーク電流の関係

参 考 文 献

(1) 菊池　巧，ほか：モールド型パワーモジュール用絶縁シート，三菱電機技報，**81**，No.5，365～368（2007）
(2) 篠原利彰，ほか：トランスファーモールド型大容量パワーモジュール，三菱電機技報，**81**，No.5，325～328（2007）
(3) 福家直仁：高放熱性シート状封止材の開発内容について，第10回プリント配線板EXPO，PWB-9，25～32（2008）
(4) 出光ホームページ http://www.idemitsu.co.jp/ipc/resin/challenge/metal.html
(5) 日立化成ホームページ http://www.hitachi－chem.co.jp/japanese/information/2009/n_090714.html
(6) 日立化成ホームページ http://www.hitachi－chem.co.jp/japanese/information/2009/n_090623.html
(7) 宮田健治，ほか：複合材料の熱伝導における粒子配向の影響，第30回日本熱物性シンポジウム講演論文集，136～138（2009）
(8) 川崎　卓：熱伝導性フィラーの特性・設計及び熱伝導率の向上，技術情報協会セミナーテキスト，1～45（2007）