

# メガソーラー用パワーコンディショナ向け All-SiC モジュール

All-SiC Module for Mega-Solar Power Conditioner

梨子田 典弘 NASHIDA, Norihiro

仲村 秀世 NAKAMURA, Hideyo

岩本 進 IWAMOTO, Susumu

メガソーラー用パワーコンディショナ向けの All-SiC モジュールを開発した。All-SiC モジュール用に開発した構造は、ワイヤボンディングを使用した従来構造と比較して配線のインダクタンスを約 80% 低減している。これにより、大幅な損失低減が可能となり、SiC デバイスの高速スイッチングにおいて有利である。また、パワーサイクル試験による熱負荷に対しても、従来構造と比べて高い耐量を持つ。これらの技術を適用した昇圧回路用の All-SiC チョップパモジュールを開発し、メガソーラー用パワーコンディショナに搭載することで、世界最高レベルの効率 98.8% を達成した。

An all-SiC module for mega-solar power conditioners has been developed. The structure developed for the all-SiC module has achieved a reduction in wiring inductance of approximately 80% from the existing structure that uses wire bonding. This allows for a significant reduction in loss, leading to an advantage in high-speed switching of SiC devices. In addition, it has shown a higher resistance to thermal load in a power cycling test as compared with the conventional structure. We have developed an all-SiC chopper module for booster circuits by applying these technologies and integrated it in a mega-solar power conditioner, thereby achieving the world's highest level of efficiency of 98.8%.

## 1 まえがき

低炭素社会を実現するため、再生可能エネルギーの活用や省エネルギー化への必要性が高まっている。中でも、われわれの生活に必要な不可欠である電気を効率的に利用する上で、電力変換技術はますます重要となっている。その電力変換において重要な役割を果たしているのがパワー半導体である。近年、その主力であった Si（シリコン）デバイスに代わる次世代半導体として、SiC（炭化けい素）や GaN（窒化ガリウム）といったワイドバンドギャップ半導体を使用したパワー半導体の研究・開発が活発に行われている。中でも、SiC デバイスは産業分野をはじめ、家電製品など身近なパワーエレクトロニクス製品への採用が進んでおり、ハイブリッド車（HEV）、電気自動車（EV）など今後ますます採用範囲が広まるものと考えられる。

本稿では、SiC-MOSFET（Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor）と SiC-SBD（Schottky Barrier Diode）を搭載した All-SiC モジュール技術と、メガソーラー用パワーコンディショナ（PCS）への適用について述べる。

## 2 All-SiC モジュールの特徴

### 2.1 モジュール構造

図 1 に開発構造と従来構造のモジュールの断面図を示す。All-SiC モジュール用に開発した構造は、従来の Si-IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）モジュール用と構造が大きく異なっている。開発構造では、従来のアルミニウムのボンディングワイヤに代わり、パワー基板上に形成した銅ピンで配線している。これにより、大電流が流せるようになり、SiC デバイスの高密度実装が可能である。チップ

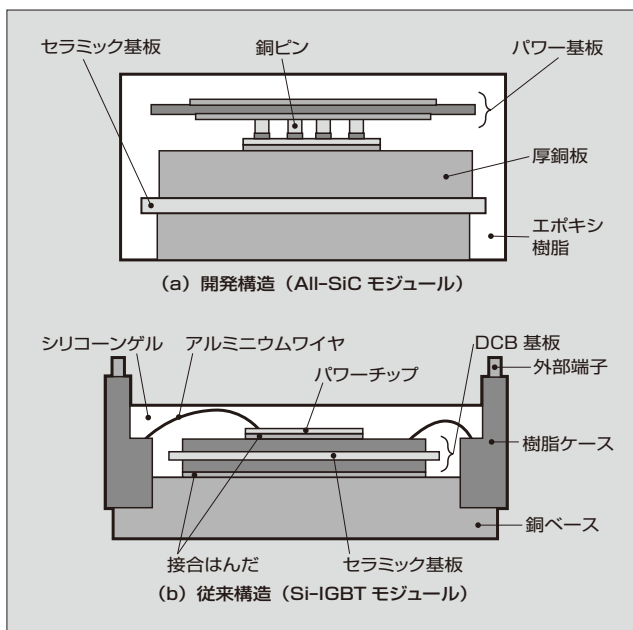


図 1 モジュールの断面図

を搭載する絶縁基板には、従来の DCB（Direct Copper Bonding）基板に代わり、厚い銅板が接合された  $\text{Si}_3\text{N}_4$ （窒化けい素）セラミック基板を採用し、低熱抵抗化を図っている。さらに、モジュール内部の封止材料として、従来のシリコングルに代わってエポキシ樹脂を採用し、高温動作において高い信頼性を確保している。

図 2 に、新型パッケージの All-SiC モジュールと従来パッケージの Si-IGBT モジュールの外観写真を示す。どちらも定格 1,200 V/100 A のモジュールである。新型パッケージのフットプリントサイズは、従来パッケージと比較して約 40% にまで小型化している。

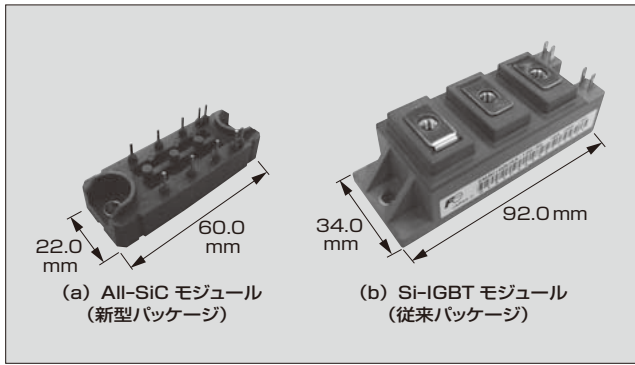


図2 モジュール外観

## 2.2 低インダクタンス設計

### (1) インダクタンス評価

SiC-MOSFETは現在のパワーモジュールで使われているSi-IGBTと比べ、高速スイッチングが可能である。しかし、一般にスイッチング速度に比例してサージ電圧が増大するので、ゲート信号に対するノイズの影響を小さくするためには、モジュール内部の配線の低インダクタンス化が重要である。

図3に、ゲート配線と主配線のインダクタンスの比較を示す。従来パッケージのシミュレーションによって求めたゲート配線と主配線におけるそれぞれの内部インダクタンスを1として比較している。まず、ゲート配線のインダクタンスでは、従来パッケージよりも約80%低減していることを確認した。また、主配線でも同様の評価を行い、新型パッケージでは解析と実測のそれぞれにおいて、従来パッケージより約80%低減していることを確認した。

これらの結果は、新型パッケージではパワー基板および低熱抵抗絶縁基板を採用してモジュールを小型化することによって電流経路が短縮し、インダクタンスの低下に大きく寄与していることを示している。さらに、パワー基板と厚銅板を並行に配置しているため、電流経路間の磁界の相互作用がインダクタンスを低下させている。

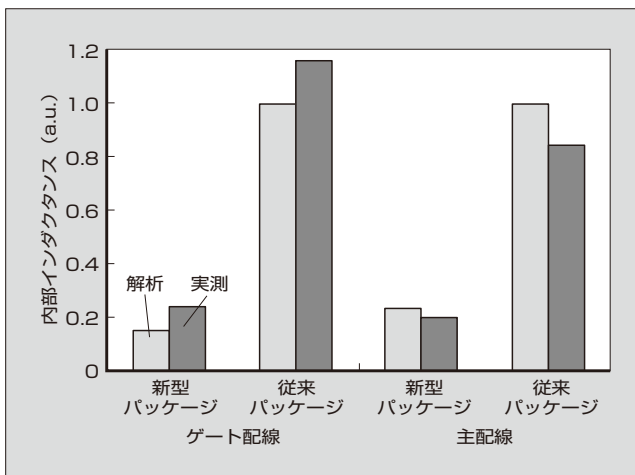


図3 ゲート配線と主配線のインダクタンス

### (2) 損失比較

All-SiCモジュールの低インダクタンス化の効果を確認するため、同じSiCデバイスを新型パッケージと従来パッケージに搭載したモジュールを作製し、スイッチング試験を行った。図4に示すように、新型パッケージは従来パッケージと比べてスイッチング損失が約50%低減した。これは、インダクタンスが低下した新型パッケージのサージ電圧を抑制する効果によるものである。

図5に、スイッチング周波数10~100kHzの範囲におけるトータル損失の比較を示す。トータル損失はスイッチング損失と定常損失から成り、従来パッケージにSiC-MOSFETを搭載した場合の10kHzのトータル損失を1として比較している。従来パッケージでは、スイッチング周波数が高くなるとスイッチング損失の増加が大きく、100kHzのトータル損失は2.2になる。一方、新型パッケージでは損失の増加は少なく、1.2に留まっている。損失の内訳に注目すると、従来パッケージと新型パッケージにおいて定常損失はほぼ同じであり、周波数依存性は見られない。また、スイッチング損失は、いずれの周波数でも従来パッケージが新型パッケージの4倍以上となっており、周波数が高くなるにつれ、全体の損失に占める割合が増加することが分かる。このように、モジュールの内部インダクタンスを低減させた新型パッケージは、SiCデバイス的高速スイッチングに有利であることを確認した。

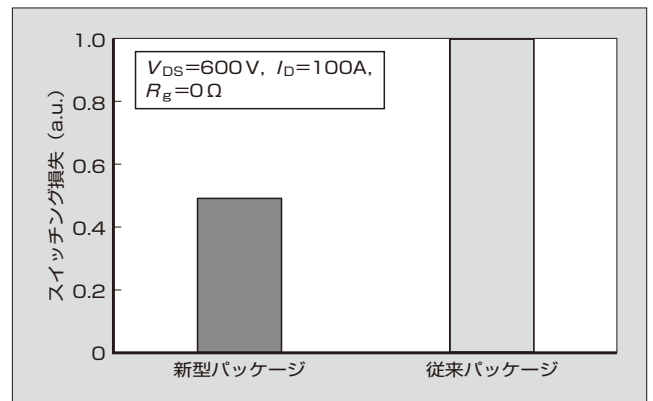


図4 SiCデバイス搭載モジュールのスイッチング損失

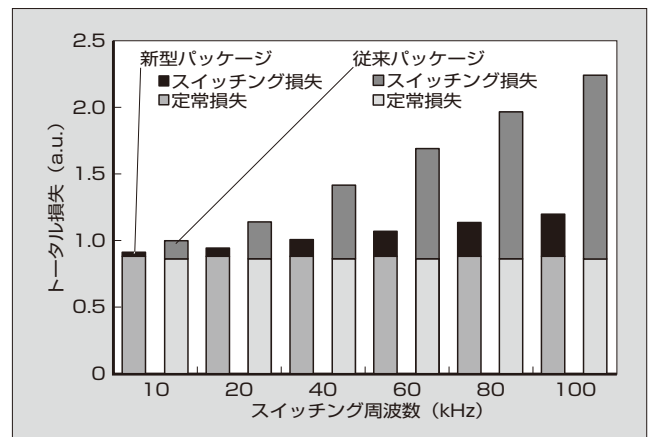


図5 トータル損失

### 2.3 高信頼性

#### (1) $\Delta T_j$ パワーサイクル試験

パワーモジュールではデバイス動作時の温度上昇によって熱応力が発生し、チップ接合部などの破壊が引き起こされることがある。 $\Delta T_j$  パワーサイクル試験は、このデバイス動作を繰り返し行うことで、パワーモジュールの寿命を評価する信頼性試験である。

図6に、 $\Delta T_j$  パワーサイクル試験寿命の比較を示す。試験開始温度を25°Cとし、横軸に温度振幅 $\Delta T_j$ 、縦軸に累積故障率1% [F(t)=1%] となるサイクル数をプロットしたものである。実線はSiデバイスを搭載した従来パッケージのパワーサイクル寿命であり、プロット(O)はSiデバイスを搭載した新型パッケージにおいて検証した寿命である。この結果から、 $\Delta T_j=150^\circ\text{C}$ の試験条件では、新型パッケージは従来パッケージの10倍以上の寿命があると見込まれる。

そこで今回、新型パッケージに独立行政法人 産業技術総合研究所と共同で開発したSiC-MOSFETであるIEMOS (Implantation and Epitaxial Metal Oxide Semiconductor) を搭載し、 $\Delta T_j=150^\circ\text{C}$ のパワーサイクル試験を行った。その結果、F(t)=1%で50,000サイクルとSiデバイスを搭載した従来パッケージに対し、20倍以上の寿命向上を確認することができた(図6プロット:●)。従来パッケージでは、動作温度が高くなると、チップ電極とワイヤボンディングの接合部に剥離が発生するといった破壊が生じ、寿命が低下する<sup>(2)</sup>。一方、新型パッケージでは、高耐熱のエポキシ樹脂で封止しており、チップ電極と銅ピンの接合部において、動作時に発生する熱応力を緩和することで接合部の破壊を抑制している。また、エポキシ樹脂は、ガラス転移温度 $T_g$ が200°C以上となるものを開発したことにより<sup>(3)</sup>、使用温度の範囲内で線膨張係数、弾性率などの機械的物性が大きく変化せず、高信頼性を実現している。

#### (2) $\Delta T_c$ パワーサイクル試験

メガソーラーなどの太陽光発電用PCSへ搭載するには、その動作モードを把握し信頼性試験を行う必要がある。太

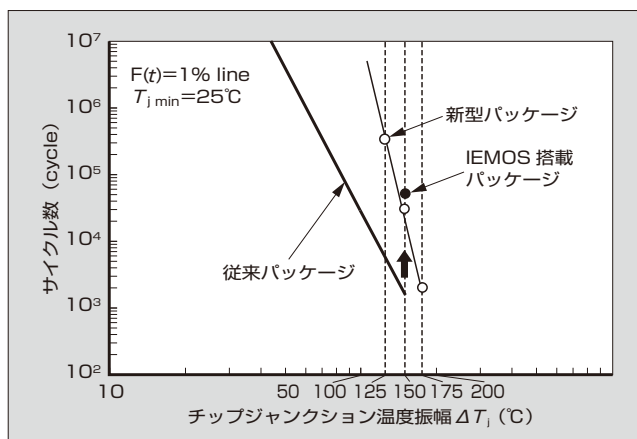


図6  $\Delta T_j$  パワーサイクル試験寿命

陽光発電用PCSは昼間の発電時は連続運転を行い、夜間は停止する。そこで、その際のモジュールにかかる熱負荷を検証するために、動作時のモジュール表面温度 $T_c$ を変化させる $\Delta T_c$  パワーサイクル試験も重要となる。

図7に、従来のパッケージ構造で $\Delta T_c$  パワーサイクル試験を実施したサンプルの超音波探傷像を示す。20,000サイクル経過後では、試験前には見られない銅ベースとDCB基板間のはんだ接合部において破壊が発生しており、熱抵抗の上昇を引き起こして故障に至ったと考えられる。しかし、新型パッケージでは銅ベースがない構造であるため、従来パッケージのような故障ではなく、絶縁基板とチップの接合部の耐久性が $\Delta T_c$  パワーサイクル試験の寿命に影響を与える。そこで、試験開始温度25°Cの $\Delta T_c=80^\circ\text{C}$ 条件において $\Delta T_c$  パワーサイクル試験における新型パッケージの熱抵抗の推移を確認した(図8)。縦軸の熱抵抗は、それぞれのサンプルの初期値を基準とし変動を表している。その結果、25,000サイクル経過後でも熱抵抗の変動は初期値の7%以内に収まっており、増加傾向は確認されなかった。

図9に、 $\Delta T_c$  パワーサイクル試験前後のパッケージのチップ下接合部の超音波探傷像を示す。試験前と比較し、25,000サイクル経過した後も接合状態の変化は確認されなかった。また、セラミック基板の割れや厚銅板の剥離も見られず、新型パッケージはPCSへの適用に十分な耐久性を持っていることを確認した。

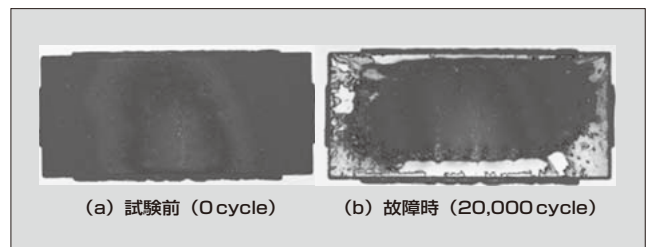


図7 従来パッケージ構造の $\Delta T_c$  パワーサイクル試験における超音波探傷像

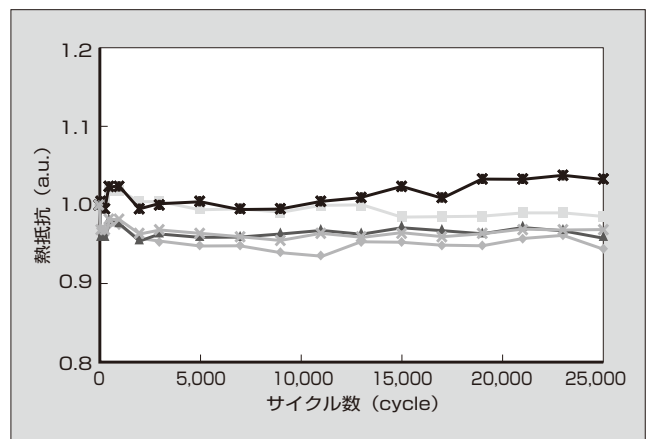


図8 新型パッケージ構造の $\Delta T_c$  パワーサイクル試験における熱抵抗の推移

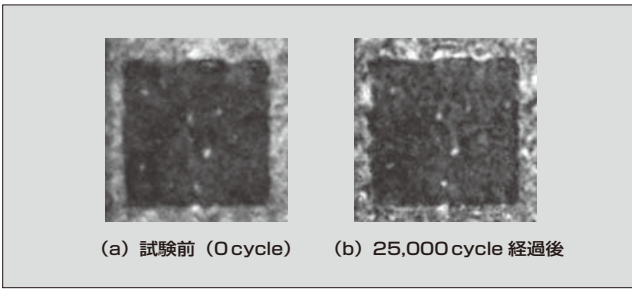


図9  $\Delta T_c$  パワーサイクル試験におけるチップ下はんだ接合部の超音波探傷像



図11 6インチ SiC ウェーハ

### ③ メガソーラー用パワーコンディショナへの適用

メガソーラーをはじめとした太陽光発電では、太陽電池で発電した直流電圧を PCS で交流電圧に変換し、送電している。太陽光発電では、日射量の減少や温度上昇による電圧低下が発生し、PCS の変換効率が低下する問題がある。解決策として、PCS に昇圧回路（チョッパ回路）を搭載する方法がある。この方法では、交流電圧へ変換するインバータ部への入力最小電圧を高くすることができ、入力最小電圧の上昇に伴って交流電圧の出力も向上する。ここで、SiC デバイスを昇圧回路に適用することで、昇圧部の発生損失を抑えられ、インバータ部を含む PCS 全体の変換効率の向上が期待できる。さらに、従来の Si デバイスでは、昇圧部はインバータ部と同程度の体積が必要であったが、SiC デバイスを使用することで小型化できる。そこで、これまで述べた新型パッケージを適用し、SiC デバイスの特長を生かした昇圧回路用の All-SiC チョッパモジュールを開発した（図 10）。

All-SiC チョッパモジュールに搭載している SiC デバイスは、独立行政法人 産業技術総合研究所と共同で開発した IEMOS と SiC-SBD であり、松本工場でも量産している（図 11）。図 12 に、この All-SiC チョッパモジュールを搭載したメガソーラー用 PCS の外観を示す。大きさは 2,980 × 900 × 1,900 (mm) であり、屋内型としては世界最大級の出力容量 1,000 kW を実現している。今回、開発した



図10 All-SiC チョッパモジュール



図12 メガソーラー用パワーコンディショナ

All-SiC チョッパモジュールを昇圧回路に採用することで、課題であった損失増加を抑制することができ、PCS 変換効率として世界最高レベルの 98.8% を達成した（従来機 98.5%<sup>(4)</sup>）。さらに、回路の小型化も実現し、従来の配電盤と比較し 20% 縮小しており、輸送コストなど施工時のコストの削減にも貢献している。

### ④ あとがき

メガソーラー用 PCS 向けの All-SiC チョッパモジュールを開発し、Si デバイスでは困難であった世界最高レベルの 98.8% の変換効率を達成するとともに、装置の小型化を実現した。

今後も All-SiC モジュールをさまざまなパワーエレクトロニクス機器へ適用し、エネルギー利用の高効率化を図ることで、低炭素社会の実現に貢献する所存である。

### 参考文献

- (1) Nashida, N. et al. "All-SiC Power Module for Photovoltaic Power Conditioner System," Proceedings of ISPSD 2014. p.342-345.
- (2) 百瀬文彦ほか. 175℃連続動作を保證するIGBTモジュールのパッケージ技術. 富士電機技報. 2013, vol.86, no.4, p.249-252.
- (3) Horio, M. et al. "Ultra Compact and High Reliable SiC MOSFET Power Module with 200℃ Operating Capability," Proceedings of ISPSD 2012. p.81-84.
- (4) 藤井幹介ほか. メガソーラー向け屋外設置型高効率PCS



「PVI1000」. 富士時報. 2012, vol.85, no.3, p.245-249.



**梨子田 典弘**

パワー半導体デバイス用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。エレクトロニクス実装学会会員。



**岩本 進**

SiC および IGBT モジュールの開発・設計に従事。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モジュール技術部。博士（工学）。



**仲村 秀世**

MEMS 機器の研究開発，パワー半導体用パッケージの開発に従事。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。

特集  
エネルギーマネジメントに貢献するパワー半導体





\*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。