

第3世代 SiC MOSFET の特長

目次

1. はじめに	3
2. 製品リスト	3
3. 第3世代 SiC MOSFET の特長	4
3.1 導通損失とスイッチング損失の改善	4
3.2 V_{GS} 定格と V_{th} によるドライブ容易性	6
3.3 内蔵 SBD による低 V_F と高信頼性の両立	6
4. 第3世代 SiC MOSFET の優位性	7
4.1 オン抵抗($R_{DS(ON)}$)の温度特性	7
4.2 スwitchング特性	8
4.3 ソース・ドレイン間 V_F	9
4.4 トーテムポール PFC 評価基板での評価結果	9
製品取り扱い上のお願い	11

1. はじめに

電力を供給、制御する役目を果たすパワー半導体は、あらゆる電気機器の省エネルギー化やカーボンニュートラルの実現に不可欠であり、自動車の電動化や産業機器の高効率化、小型化などを背景に、今後も継続的な需要拡大が見込まれています。その需要拡大も背景に、従来の Si(シリコン)よりも高耐圧、低損失化が可能な次世代のパワー半導体材料として SiC が注目されています。

当社第3世代 SiC MOSFET は、第2世代から引き続き、SiC MOSFET のドレイン・ソース間に存在する PN ダイオードと並列にショットキーバリアダイオード(SBD)を内蔵する構造を採用し、デバイスの信頼性課題を解決しました。さらに最新デバイス構造を採用することで、当社第2世代の製品と比較して単位面積当たりのオン抵抗 $R_{DS(ON)}$ 、スイッチング特性を示す性能指数 $R_{on} * Q_{gd}$ を大幅に改善しました。また、広いゲート・ソース間電圧 (V_{GS}) 定格と高いゲートしきい値電圧 (V_{th}) を実現したことで、スイッチングノイズによる誤動作が発生しにくく、対ノイズ性が高い使いやすい製品になっています。

第3世代 SiC MOSFET は上記のような特長を有し、スイッチング電源、無停電電源装置(UPS)、太陽光インバーター、EV 充電スタンドなどのアプリケーション向けに使用され、機器の低消費電力化、高出力化に貢献します。

2. 製品リスト

第3世代 SiC MOSFET は、表 2.1 に示すようにまず 650V、1200V 耐圧の TO-247 パッケージ製品をラインアップしました。

製品名	パッケージ	耐圧 (V)	オン抵抗 $R_{DS(ON)}$ typ. (mΩ)	定格電流 I_D (A)	V_{th} (V)	Q_g typ. (nc)
TW015N120C	TO-247	1200	15	100	3.0~5.0	158
TW030N120C			30	60		82
TW045N120C			45	40		57
TW060N120C			60	36		46
TW140N120C			140	20		24
TW015N65C		650	15	100		128
TW027N65C			27	58		65
TW048N65C			48	40		41
TW083N65C			83	30		28
TW107N65C			107	20		21
TW015Z120C	TO-247-4L	1200	15	100	3.0~5.0	158
TW030Z120C			30	60		82
TW045Z120C			45	40		57
TW060Z120C			60	36		46
TW140Z120C			140	20		24
TW015Z65C		650	15	100		128
TW027Z65C			27	58		65
TW048Z65C			48	40		41
TW083Z65C			83	30		28
TW107Z65C			107	20		21

表 2.1 第3世代 SiC MOSFET 製品リスト

3. 第3世代 SiC MOSFET の特長

3.1 導通損失とスイッチング損失の改善

図 3.1(b)は第3世代 SiC MOSFET の構造であり、第2世代 SiC MOSFET 構造(図 3.1(a))に対して p 型の広い拡散領域 (p-well) の下側に窒素を注入することにより、p-well 下部の広がり抵抗 R_{spread} を削減し、SBD の電流能力を増加させました。また、JFET^[注 1]領域にも窒素を注入することで、JFET の面積を小さくすることにより $R_{on}A$ を上げることなく帰還容量を小さくしました。

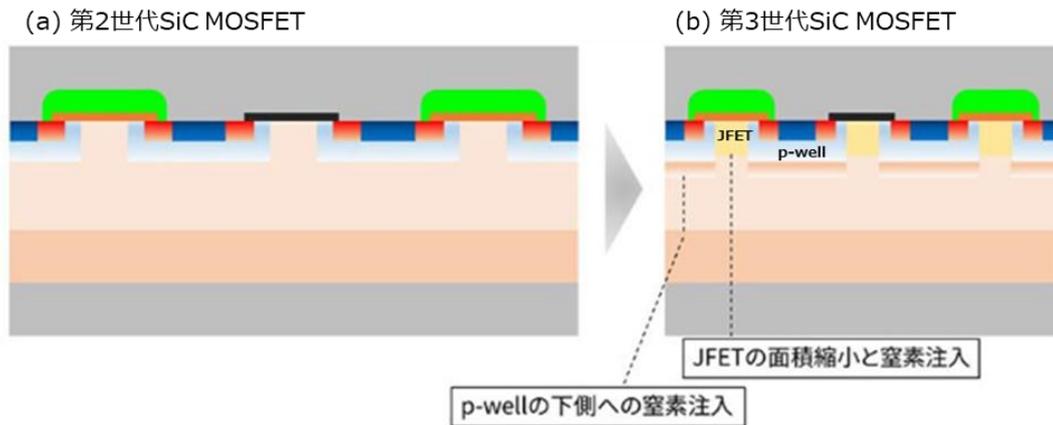


図 3.1 第2世代と第3世代 SiC MOSFET の構造

この最新デバイス構造を適用することで、当社第2世代と比較し、図 3.2 に示すように第2世代品に対して第3世代 1200V SiC MOSFET は単位面積当たりのオン抵抗 $R_{on}A$ を 43%削減し、スイッチング特性を示す性能指数 $R_{on} * Q_{gd}$ を 80%削減しました。第2世代品と第3世代品のそれぞれのスイッチング損失を評価した結果を図 3.3 に示します。第3世代 SiC MOSFET(1200V, 45m Ω (typ.))のスイッチング損失は、第2世代 SiC MOSFET(1200V, 70m Ω (typ.))に対して、 R_{on} を約 35%削減しているにもかかわらず、約 11%低減しています。スイッチング時の波形と損失を評価するためのインダクタンス(L)負荷回路を図 3.4、ターンオン波形とターンオフ波形を図 3.5 に示します。

注1 JFET : Junction Field Effect Transistor (接合型電界効果トランジスタ) の略で、電圧制御のトランジスタのこと。

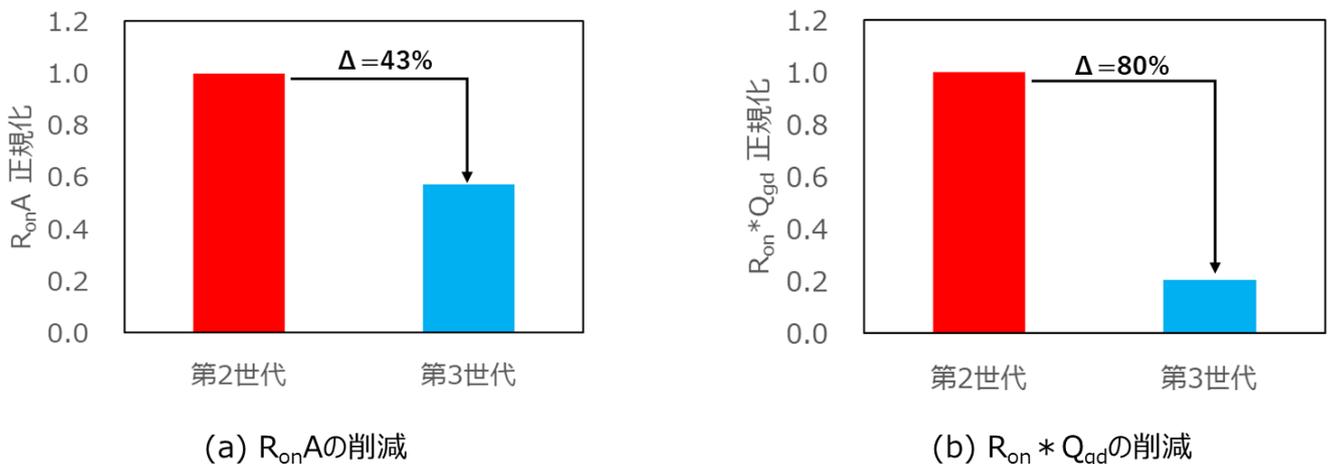


図 3.2 第2世代に対する第3世代の $R_{on}A$ と $R_{on} * Q_{gd}$ の削減結果

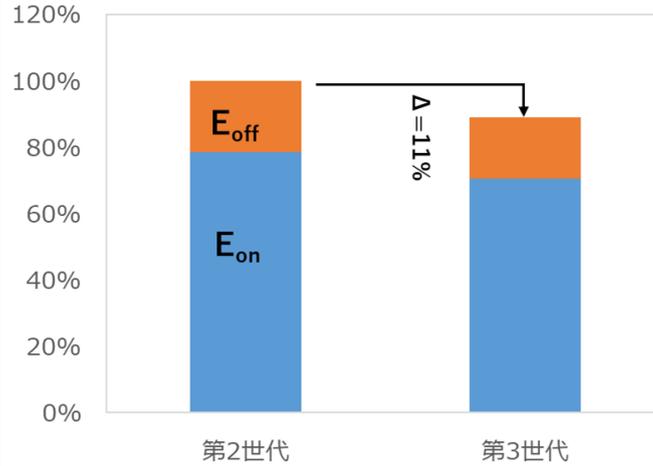


図 3.3 第 2 世代と第 3 世代の 1200V SiC MOSFET のスイッチング損失比較

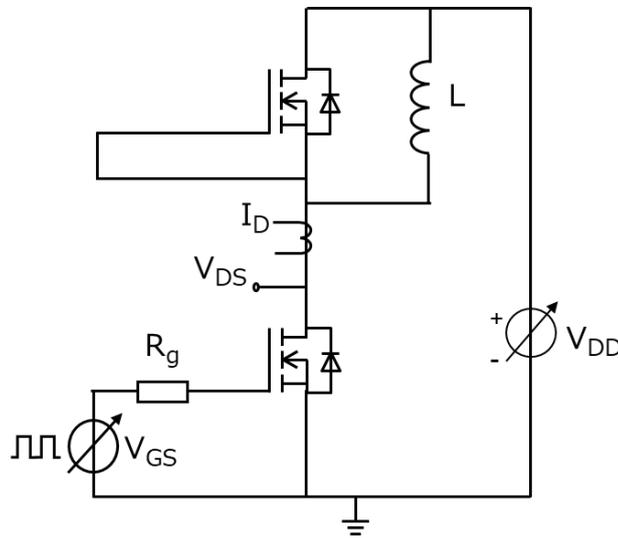


図 3.4 スイッチング時の波形と損失を評価するための L 負荷回路

測定条件 : $V_{DD}=800V$, $I_D=20A$, $L=100\mu H$, $V_{GS}=18V/0V$, R_g (外付けゲート抵抗)= 4.7Ω

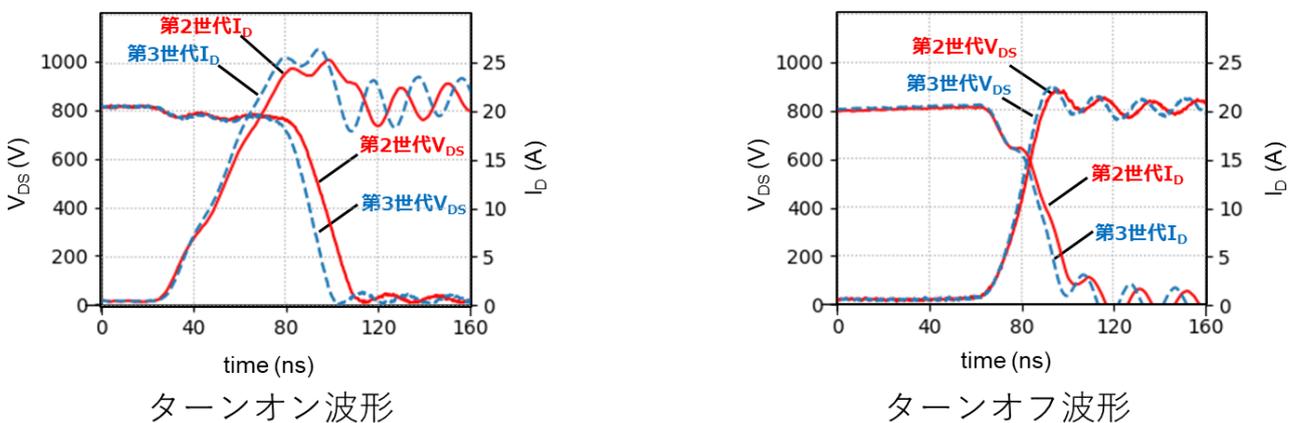


図 3.5 第 2 世代と第 3 世代の 1200V SiC MOSFET の L 負荷スイッチングの波形比較

3.2 V_{GS} 定格と V_{th} によるドライブ容易性

図 3.6 に示すように、当社第3世代 SiC MOSFET は、競合他社最新世代品に対して広い V_{GS} 定格：-10V(min)~25V(max)と高い V_{th} ：3V(min)~5V(max)を有していることから、スイッチングノイズによる誤動作がしにくく、ゲートドライブ設計が容易になります。

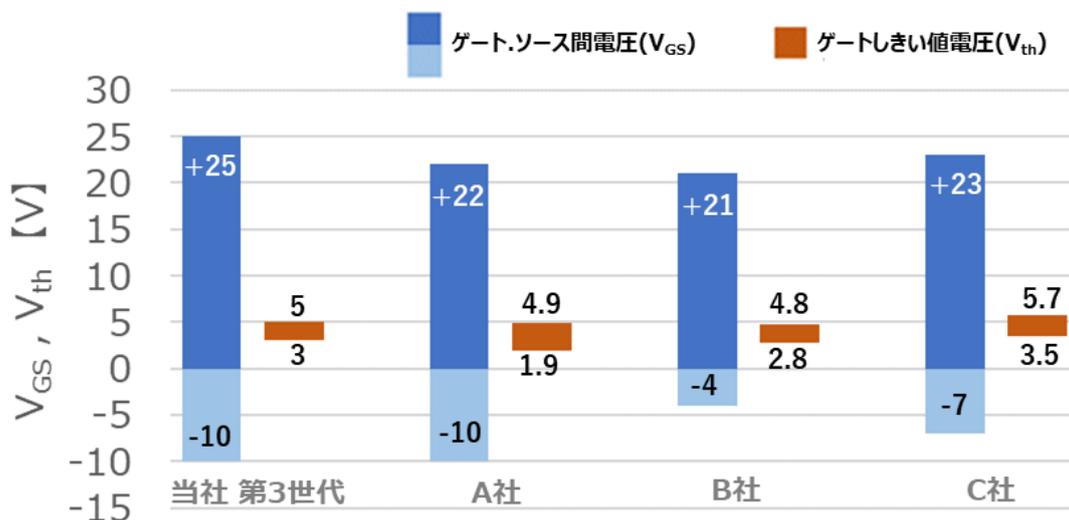


図 3.6 当社第3世代品および他社最新世代品の V_{GS} 定格と V_{th} 規格

3.3 内蔵 SBD による低 V_F と高信頼性の両立

第3世代 SiC MOSFET はチップ内に SiC MOSFET の PN ダイオードと並列に SBD を内蔵する構造(図 3.7)を採用しました。これにより、低 V_F 特性と SiC 結晶中の欠陥拡張による R_{on} 変動を大幅に抑制します。図 3.8 に、従来の SBD 非内蔵 SiC MOSFET と当社が採用している SBD 内蔵 SiC MOSFET において、ソースからドレインへ電流密度 $250A/cm^2$ で 1000 時間通電実施した場合のオン抵抗($R_{DS(ON)}$)変動率を示します。従来の SBD 非内蔵 SiC MOSFET では、1000 時間通電後に最大で 42% オン抵抗($R_{DS(ON)}$)が変動する素子を確認しました。一方、当社が採用している SBD 内蔵 SiC MOSFET では最大でも 3% のオン抵抗($R_{DS(ON)}$)変動に抑えることができました。これは SBD を内蔵することで、高電流領域まで PN ダイオード動作を抑制し結晶欠陥の拡張を防いでいるためです。

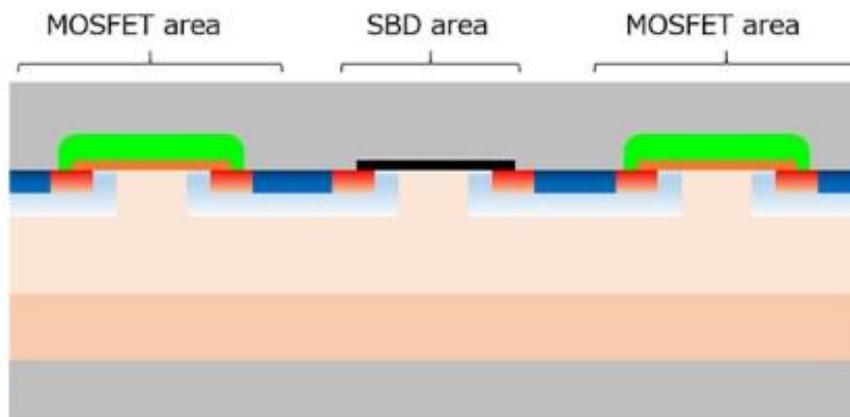


図 3.7 SBD を内蔵した MOSFET の断面構造

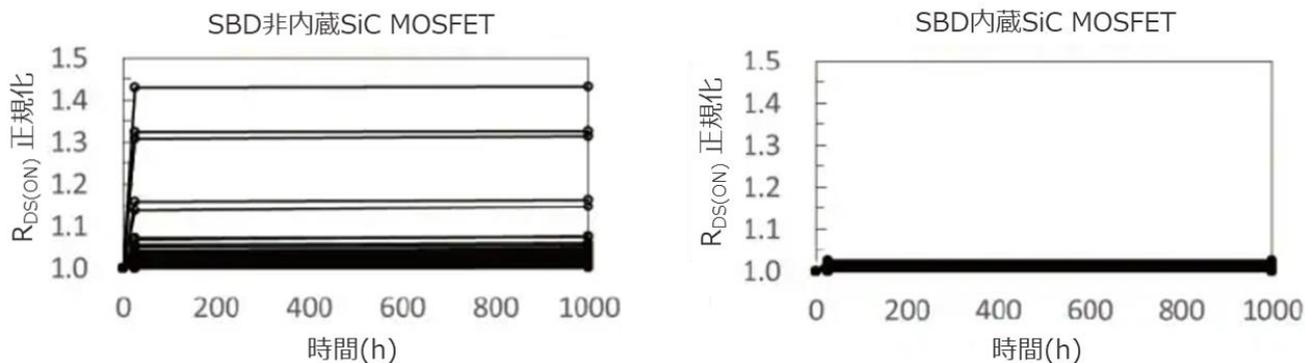


図 3.8 第3世代 SiC MOSFET のドレイン逆電流通電後の $R_{DS(ON)}$

4. 第3世代 SiC MOSFET の優位性

4.1 オン抵抗($R_{DS(ON)}$)の温度特性

以下測定条件における当社第3世代品と競合最新世代品の $R_{DS(ON)}$ の温度特性(図 4.1)を示します。温度が高ければ高いほど各社製品の $R_{DS(ON)}$ も上昇します。25°C の $R_{DS(ON)}$ を 1 とし、各温度において当社第3世代品の $R_{DS(ON)}$ 上昇率が最も低いことを確認しました。Ta=175°C においても当社第3世代品の $R_{DS(ON)}$ は 25°C に対して 17% しか上昇しておらず、上昇率が二番目に低い C 社品では 43% 上昇していました。全競合他社に対し $R_{DS(ON)}$ の温度特性は有利であることがわかりました。

測定条件： $V_{GS}=18V$, $I_D=20A$

当社測定サンプル：TW048N65C

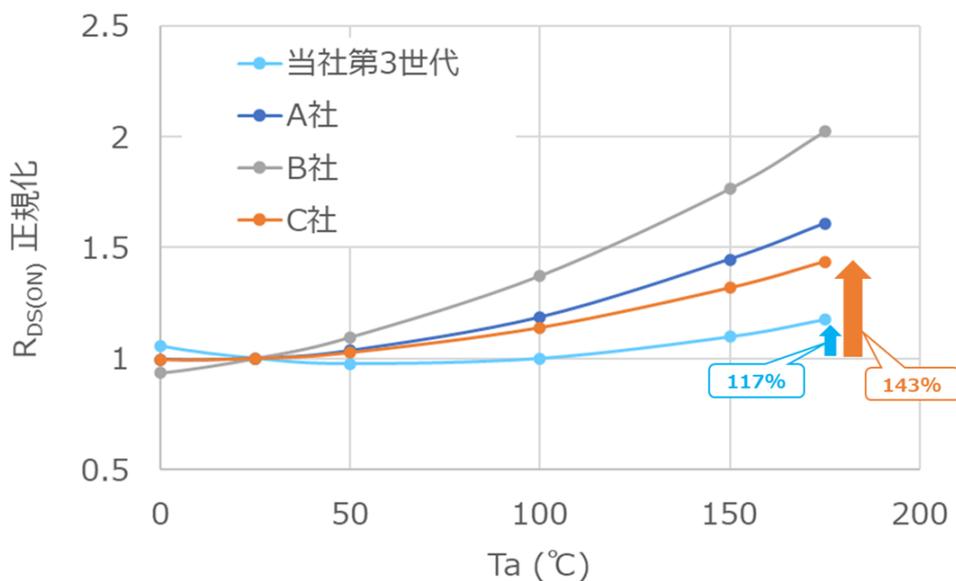


図 4.1 $R_{DS(ON)}$ の温度依存性

4.2 スイッチング特性

ターンオンスイッチング損失(E_{on}), ターンオフスイッチング損失(E_{off})について、当社第3世代品と競合最新世代品の比較評価を実施しました。図4.2は E_{on} 損失と E_{off} 損失の R_g 依存性カーブを示します。第3世代品はSBDを内蔵しているため、出力容量が競合最新世代品より若干大きく、 E_{on} は今回評価した R_g 条件($4.7\Omega \sim 20\Omega$)において競合最新世代品より大きいことを確認しました。一方、当社第3世代品はターンオフ時の電流引き抜きが早く、 R_g の全領域において競合最新世代品より E_{off} が小さいことが確認できました。図4.3のようにスイッチング損失($E_{on}+E_{off}$)は今回評価した R_g 条件において当社第3世代品は競合最新世代品に対して同等以下となることを確認しました。

試験条件: $V_{DD}=400V$, $I_D=20A$, $T_a=25^\circ C$, $V_{GS}=20V/0V$, $L=100\mu H$

各製品のソース・ドレイン間ダイオードを誘導負荷と並列に還流ダイオードとして使用しています。

当社測定サンプル: TW048N65C

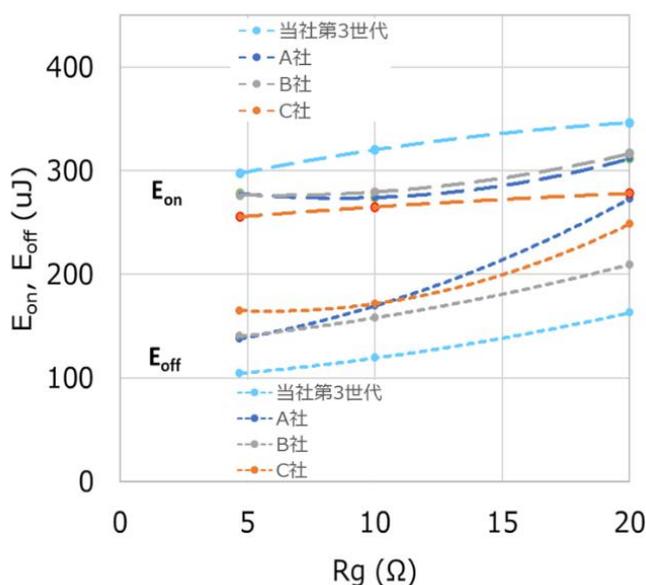


図 4.2 ターンオン(E_{on})、ターンオフ(E_{off})スイッチング損失の R_g 依存

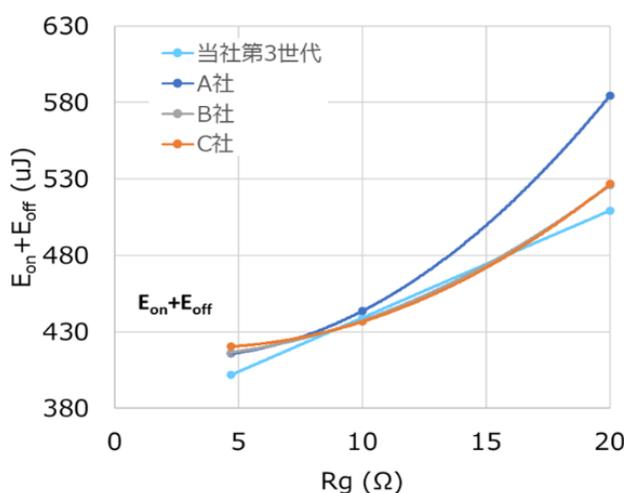


図 4.3 スイッチング損失($E_{on}+E_{off}$)の R_g 依存

4.3 ソース・ドレイン間 V_F

当社第3世代 SiC MOSFET は SBD を内蔵することで、ソース・ドレイン間 V_F が低い為、低い逆導通損失を実現しています。図 4.4 に示す $I_{DR}-V_F$ ($V_{GS}=0V$)カーブでは当社第3世代品は全 I_{DR} 領域において競合最新世代品より V_F が低いことがわかります。逆導通期間がある場合、例えば同期整流モードにおけるデッドタイムの期間では、ソース・ドレイン間に電流が通電され導通損失が発生するため、低 V_F 特性が損失低減の一助となります。

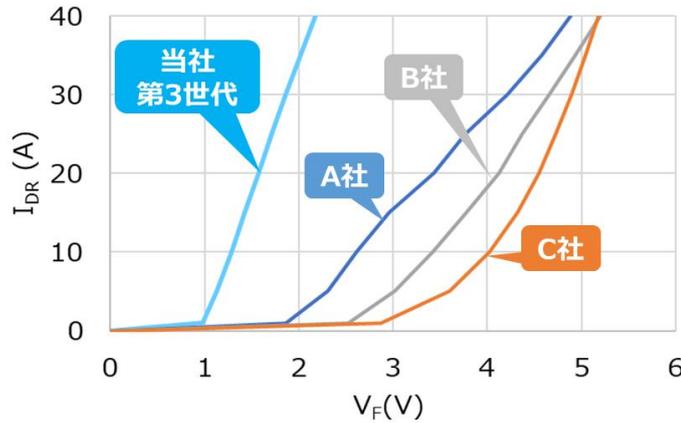


図 4.4 $I_{DR}-V_F$ カーブ

4.4 トーテムポール PFC 評価基板での評価結果

トーテムポールPFC は高効率と少部品点数を両立できる電源PFC回路トポロジーであり、近年SiCやGaNの普及により注目されています。図4.5はトーテムポール接続のPFC 回路およびその動作説明です。高周波レグ(Q1,Q2)は高周波(～数百kHzまたはMHz)スイッチング動作を行い、低周波レグ(Q3,Q4)は商用周波数(50-60Hz)での整流動作を行います。Q1とQ2は高周波でのハードスイッチング動作を行うため、Q1とQ2の同時オンを防ぐ目的でデッドタイム期間を設けています。この期間の間にボディダイオードが通電動作し逆回復電流による損失が生じますので、トーテムポールPFCの損失を低減するために、SiC MOSFETやGaNなどの優れた逆回復特性を備えた製品を使用する必要があります。また、図4.5のQ3とQ4は入力交流電源の半サイクルごとに交互に同期整流動作しており、切り替えはゼロクロスポイントとなりますので、寄生内蔵ダイオードの高速逆回復特性を必要とせず、低オン抵抗製品を選択することが可能です。

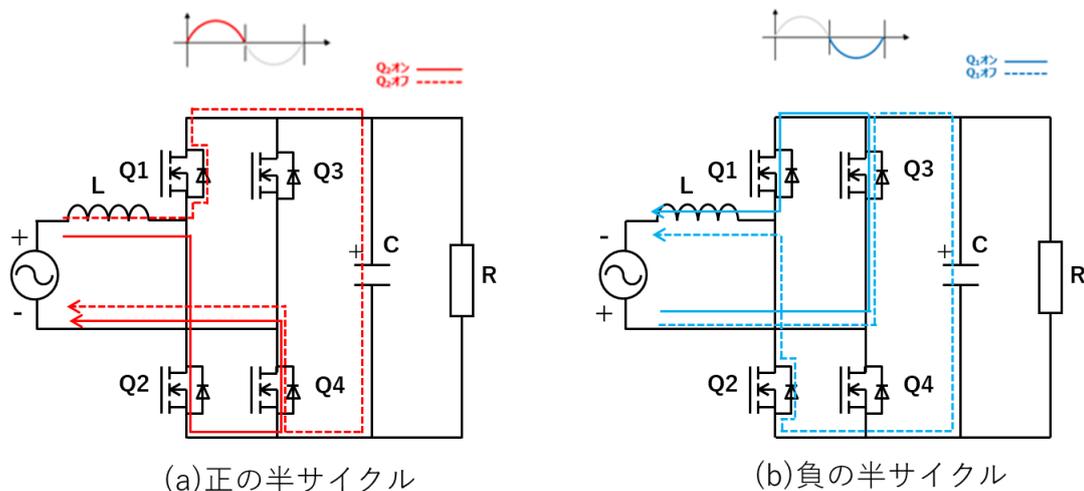


図 4.5 トーテムポール接続の PFC 回路および動作説明

今回高周波スイッチング用のQ1,Q2に当社第3世代SiC MOSFET(TW048N65C)を搭載して競合他社との効率比較を実施しました。表4.1にトータムポールPFC評価基板での評価条件を示します。

入力電圧	230VAC, 50Hz
出力電圧	400V
出力電力	~3600W
スイッチング周波数	72kHz

表 4.1 PFC 評価条件

図4.6は当社第3世代品(TW048N65C)と競合最新世代品の効率カーブ比較を示します。各社とも50%負荷の1.8kWで98%以上の高効率を達成していることを確認しました。また図4.7に示すように50%負荷1.8kW以上の重負荷条件においては、競合最新世代品に対して当社第3世代品のほうが効率高く、効率優位性が顕著になります。これは当社第3世代品の特長であるオン抵抗($R_{DS(ON)}$)の良好な温度依存性による導通損失の低減、高速スイッチング特性および低 V_F 特性によるデットタイム損失の低減によって得られた結果と考えられます。

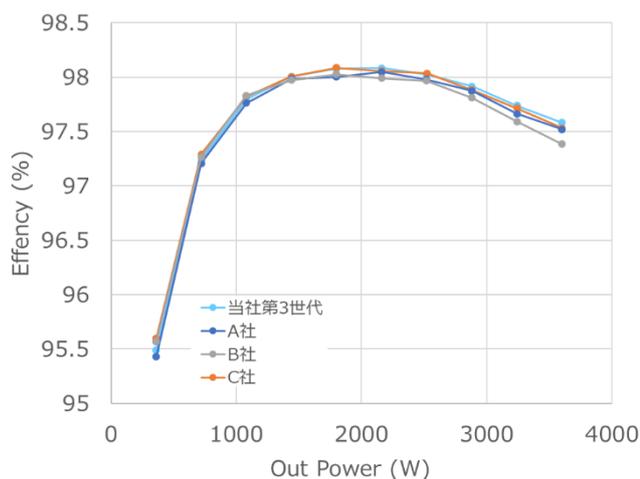


図 4.6 トータムポールPFC評価基板の効率結果

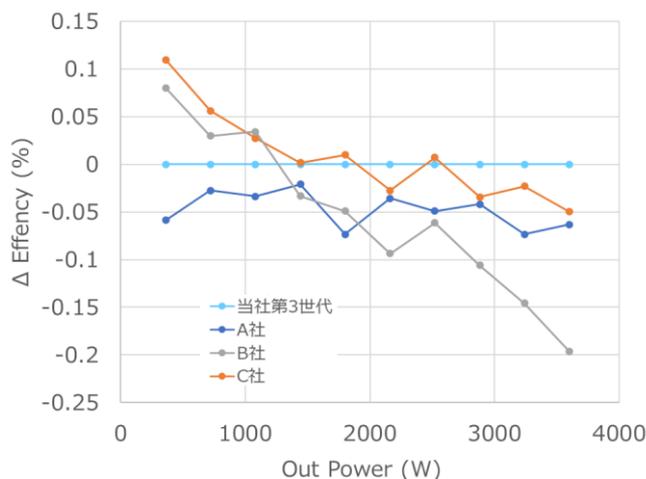


図 4.7 当社第3世代品の効率を基準とした他社比較

製品取り扱い上のお願い

株式会社東芝およびその子会社ならびに関係会社を以下「当社」といいます。
本資料に掲載されているハードウェア、ソフトウェアおよびシステムを以下「本製品」といいます。

- 本製品に関する情報等、本資料の掲載内容は、技術の進歩などにより予告なしに変更されることがあります。
- 文書による当社の事前の承諾なしに本資料の転載複製を禁じます。また、文書による当社の事前の承諾を得て本資料を転載複製する場合でも、記載内容に一切変更を加えたり、削除したりしないでください。
- 当社は品質、信頼性の向上に努めていますが、半導体・ストレージ製品は一般に誤作動または故障する場合があります。本製品をご使用頂く場合は、本製品の誤作動や故障により生命・身体・財産が侵害されることのないように、お客様の責任において、お客様のハードウェア・ソフトウェア・システムに必要な安全設計を行うことをお願いします。なお、設計および使用に際しては、本製品に関する最新の情報（本資料、仕様書、データシート、アプリケーションノート、半導体信頼性ハンドブックなど）および本製品が使用される機器の取扱説明書、操作説明書などをご確認の上、これに従ってください。また、上記資料などに記載の製品データ、図、表などに示す技術的な内容、プログラム、アルゴリズムその他応用回路例などの情報を使用する場合は、お客様の製品単独およびシステム全体で十分に評価し、お客様の責任において適用可否を判断してください。
- 本製品は、特別に高い品質・信頼性が要求され、またはその故障や誤作動が生命・身体に危害を及ぼす恐れ、膨大な財産損害を引き起こす恐れ、もしくは社会に深刻な影響を及ぼす恐れのある機器（以下“特定用途”という）に使用されることは意図されていませんし、保証もされていません。特定用途には原子力関連機器、航空・宇宙機器、医療機器（ヘルスケア除く）、車載・輸送機器、列車・船舶機器、交通信号機器、燃焼・爆発制御機器、各種安全関連機器、昇降機器、発電関連機器などが含まれますが、本資料に個別に記載する用途は除きます。特定用途に使用された場合には、当社は一切の責任を負いません。なお、詳細は当社営業窓口まで、または当社 Web サイトのお問い合わせフォームからお問い合わせください。
- 本製品を分解、解析、リバースエンジニアリング、改造、改変、翻案、複製等しないでください。
- 本製品を、国内外の法令、規則及び命令により、製造、使用、販売を禁止されている製品に使用することはできません。
- 本資料に掲載してある技術情報は、製品の代表的動作・応用を説明するためのもので、その使用に際して当社及び第三者の知的財産権その他の権利に対する保証または実施権の許諾を行うものではありません。
- 別途、書面による契約またはお客様と当社が合意した仕様書がない限り、当社は、本製品および技術情報に関して、明示的にも黙示的にも一切の保証（機能動作の保証、商品性の保証、特定目的への合致の保証、情報の正確性の保証、第三者の権利の非侵害保証を含むがこれに限らない。）をしておりません。
- 本製品、または本資料に掲載されている技術情報を、大量破壊兵器の開発等の目的、軍事利用の目的、あるいはその他軍事用途の目的で使用しないでください。また、輸出に際しては、「外国為替及び外国貿易法」、「米国輸出管理規則」等、適用ある輸出関連法令を遵守し、それらの定めるところにより必要な手続を行ってください。
- 本製品の RoHS 適合性など、詳細につきましては製品個別に必ず当社営業窓口までお問い合わせください。本製品のご使用に際しては、特定の物質の含有・使用を規制する RoHS 指令等、適用ある環境関連法令を十分調査の上、かかる法令に適合するようご使用ください。お客様がかかる法令を遵守しないことにより生じた損害に関して、当社は一切の責任を負いかねます。

東芝デバイス&ストレージ株式会社

<https://toshiba.semicon-storage.com/jp/>