

SiC トレンチゲート MOSFET 搭載 All-SiC モジュール

All-SiC Modules Equipped with SiC Trench Gate MOSFETs

中沢 将剛 NAKAZAWA, Masayoshi

大長 規浩 DAICHO, Norihiro

辻 崇 TSUJI, Takashi

電力変換装置のさらなる高効率化、小型化、大容量化の要求に対し、これを実現する SiC モジュールの製品化への期待が高まっている。富士電機は、これまで独自の新構造パッケージにて、定格容量 1,200 V/100 A までの All-SiC モジュールを製品化してきた。この新構造パッケージは、SiC モジュールの高性能化や高信頼性を実現している。今回、定格容量を拡大するため、新たに大容量新構造パッケージを開発した。本パッケージに、低オン抵抗と高速スイッチング特性を兼ね備えた SiC トレンチゲート MOSFET を搭載することにより、定格容量 1,200 V/400 A の All-SiC モジュールを実現した。

There are increasing expectations placed on products that utilize SiC modules to achieve higher efficiency, smaller size and larger capacity in power conversion equipment. Fuji Electric has been producing products that incorporate All-SiC modules with a rated capacity of up to 1,200 V/100 A in a package with a new structure. This package achieves higher performance and higher reliability for SiC modules. In order to expand the rated capacity, Fuji Electric has recently developed a large-capacity package with a new structure. This new package utilizes an All-SiC module with a rated capacity of 1,200 V/400 A, being equipped with a SiC trench gate MOSFET that achieves both low on-resistance and high-speed switching characteristics.

① まえがき

地球温暖化などの環境問題への対応や低炭素社会の実現のためには、電力変換機器の省エネルギー（省エネ）化や再生可能エネルギーの積極的な活用が必要である。効率的な電力変換において重要な役割を担っているのが、パワー半導体である。これまで、半導体材料として主流であったシリコン（Si）を使用した半導体デバイスは、特性改善が進められているものの、既にその材料物性に基づく理論的特性限界に近づいている。そこで、次世代半導体材料としてワイドバンドギャップ半導体である炭化けい素（SiC）が注目されている。SiC デバイスは、Si デバイスよりも大幅に低損失化が可能であるため、さらなる省エネ化への貢献が期待されている。

富士電機は、2013 年に松本工場にて図 1 に示す業界初の 6 インチ SiC ウェーハを適用した製造ラインの稼働を開始した。2014 年には、メガソーラー用パワーコンディ

ション（PCS：Power Conditioning System⁽¹⁾）の昇圧回路向けに、SiC-MOSFET（Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor）と SiC-SBD（Schottky Barrier Diode）を組み合わせた All-SiC チョップパモジュールを開発し、生産を開始した。この All-SiC チョップパモジュールは、世界最高レベルである 98.8% の変換効率を達成するとともに、従来の PCS に比べて約 60% の小型化に貢献している。さらに、2016 年には All-SiC 2 in 1 モジュールを開発し、その低損失、高温動作保証、高信頼性、低熱抵抗という特長を生かし、全閉自冷タイプインバータ（IP65 インバータ⁽²⁾）を実現した。

既に富士電機では、最大定格容量が 1,200 V/100 A の All-SiC モジュールを開発した⁽³⁾。パワーモジュールの容量のさらなる拡大への要求に応えるために、大容量の新構造パッケージを開発している。本パッケージに、低オン抵抗と高速スイッチング特性を兼ね備えた第 1 世代 SiC トレンチゲート MOSFET を搭載し、定格容量 1,200 V/400 A の All-SiC 2 in 1 モジュールについて述べる。

② All-SiC 2 in 1 モジュールのラインアップ

表 1 に、All-SiC 2 in 1 モジュールのラインアップを示す。定格電流ごとにタイプ 1、タイプ 2、タイプ 3L の新構造パッケージをラインアップしている。これまでの最大定格であるタイプ 2 モジュールの 1,200 V/100 A に対し、新たに開発した大容量タイプ 3L パッケージを採用し、最大定格 1,200 V/400 A 2 in 1 モジュールを実現した。

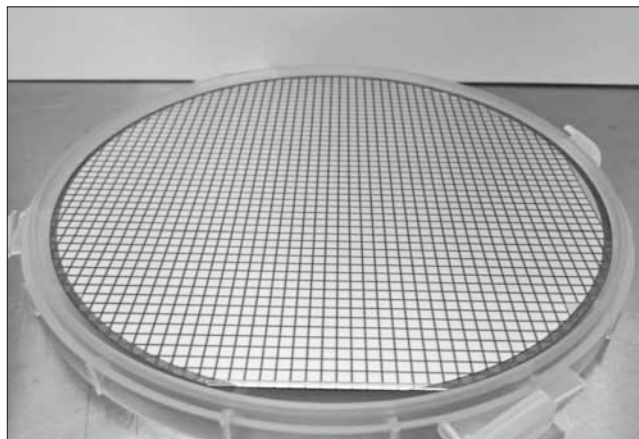





図 1 6 インチ SiC ウェーハ

表1 All-SiC 2 in 1 モジュールのラインアップ

項目	タイプ1	タイプ2	タイプ3L	
外形寸法 (mm)	W68×D26×H13	W68×D26×H13	W126×D45×H13	
外観				
定格	電圧 (V)	1,200		
	電流 (A)	25, 50	75, 100	200, 300, 400
端子	主端子	ソルダーピン		ねじ端子
	補助端子	ソルダーピン		
接続先	主端子	プリント基板		ブスバー
	補助端子	プリント基板		

③ All-SiC モジュールの要素技術

3.1 大容量新構造パッケージ

All-SiC モジュール用に開発した新構造パッケージと、Si-IGBT モジュール用の従来構造パッケージの比較を図2に示す。従来パッケージでは、配線にはアルミニウムボンディングワイヤを、絶縁用の封止樹脂にはシリコンゲル樹脂を、絶縁基板には薄銅セラミックス絶縁基板を採用していた。これに替わり、新構造パッケージでは、配線にはインプラントピンを、封止樹脂には高耐熱エポキシ樹脂を、絶縁基板には厚銅セラミックス絶縁基板を採用している。これにより、SiC チップを多数並列接続した高密度実装、内部のインダクタンスの低減、低熱抵抗化、高信頼性

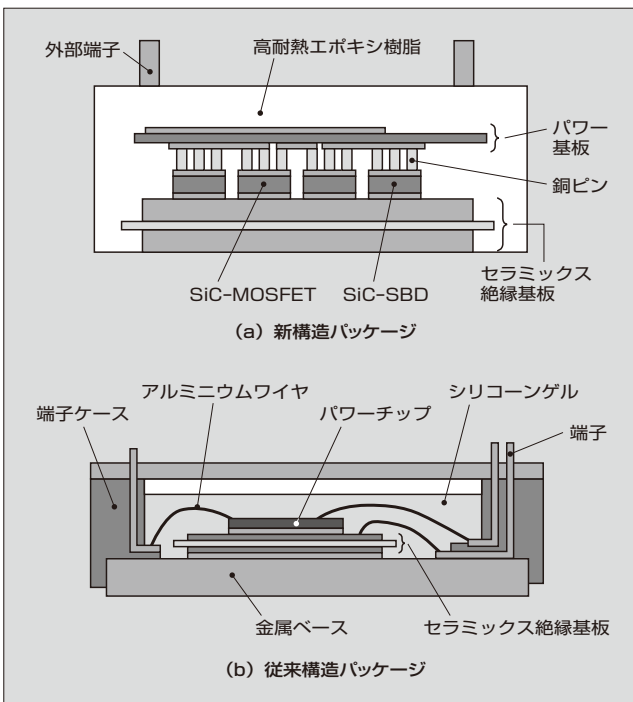


図2 パッケージの構造比較

を実現している。

これらの技術を基にした大容量新構造パッケージの開発ポイントは、次に示す3点である。

- (a) 主端子とラミネートブスバーとの容易な接続
- (b) 補助端子とプリント基板との容易な接続
- (c) 端子間、対地間絶縁距離の確保と低インダクタンスの両立

入力側の電源とパワーモジュールとを接続し、低インダクタンスとするためには、ラミネートブスバーが望ましい。ラミネートブスバーとパワーモジュールとの接続に用いられるねじ端子構造を、今回の大容量新構造パッケージにも採用した。このねじ端子構造は、外部端子とその上部に位置するねじ穴のついた銅バーとをレーザ溶接によって接合することで実現している。

また、高速・高周波スイッチングのためには、ゲートソース間の配線のインダクタンスを小さくする必要がある。このため、補助端子は回路基板をはんだ付で直接接続できるソルダーピンとし、ゲートドライバ回路をモジュールの直近に配置できるようにした。

加えて、絶縁性は IEC 60077, IEC 62497 に準拠し、絶対最大定格電圧を 1,700 V まで拡張可能な外形にするためには、十分な絶縁距離を確保する必要があるが、パッケージが大型化してしまうという問題があった。また、電流の高速遮断時のサージ電圧を抑制するためには、モジュールの内部インダクタンスは小さくしなければならないという課題があった。そこで、本パッケージは、これまでのタイプ2パッケージと同様の低背型の外形にすることにより、十分な絶縁距離を確保するとともに主回路経路を短縮し、低インダクタンス化を図った。

3.2 1,200V 定格耐圧 SiC トレンチゲート MOSFET

富士電機はこれまで、プレーナゲート MOSFET を搭載した All-SiC モジュールを製品化してきた。一般的に、プレーナゲート MOSFET のさらなる単位面積当たりのオン抵抗を低減するためには、セルピッチの微細化が有効である。しかし、過度に微細化すると JFET (Junction Field-Effect Transistor) 抵抗が増加してしまい、オン抵抗も下げ止まってしまう。

そこで、トレンチゲート MOSFET にすることにより、微細化による JFET 抵抗成分の増加を抑えることができ、低オン抵抗化が可能となる。図3に、今回開発した SiC トレンチゲート MOSFET の断面構造と、チップの外観を示す。

低オン抵抗化と誤動作しない高いしきい値電圧とを両立するために、セルピッチの微細化と、チャンネル長の最適化を行った。さらに酸化膜の信頼性を向上させるために、トレンチ底のゲート酸化膜を p ウェルで囲い、ゲート酸化膜への高い電界を緩和した。さらに、図3に示すように、トレンチ底の p ウェル (図中 A) とソースに接続した p ウェル (図中 B) とで挟まれた JFET 領域 (図中 C) を最適化した。

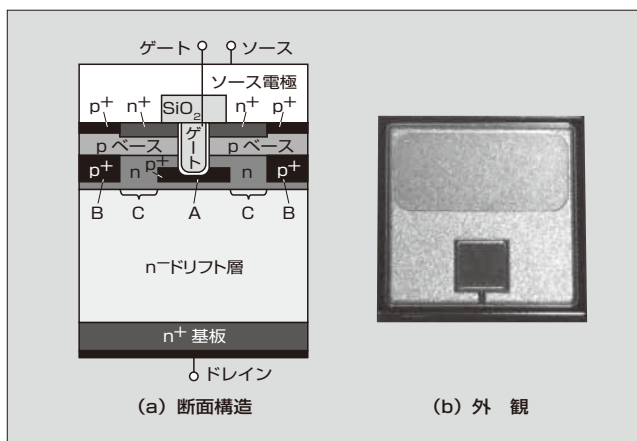


図3 SiC トレンチゲート MOSFET の断面構造とチップの外観

前述したトレンチゲート MOSFET の採用と各種パラメータの最適化により、世界最高レベルのオン抵抗 $3.5 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 、しきい値電圧 5 V の $1,200 \text{ V}$ 定格耐圧 SiC-MOSFET を実現した。

4 1,200 V/400 A All-SiC 2 in 1 モジュールの特性

4.1 出力特性

大容量新構造パッケージにトレンチゲート MOSFET を搭載した All-SiC モジュール ($1,200 \text{ V}/400 \text{ A}$ 定格品) と比較するために第7世代「X シリーズ」Si-IGBT モジュール ($1,200 \text{ V}/450 \text{ A}$ 定格品⁽⁶⁾) の出力特性を図4に示す。MOSFET は IGBT のようなビルトイン電圧がないので、All-SiC モジュールの連続運転時の定常損失は Si-IGBT モジュールよりも低い。

4.2 スwitching特性

図5に、All-SiC モジュールのターンオン、ターンオフ、逆回復時のスウィッチング波形を示す。誤動作なく安定した波形を示している。

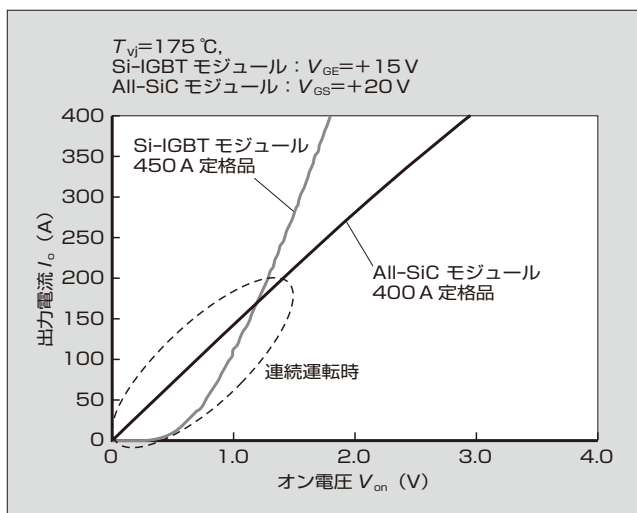


図4 出力特性比較

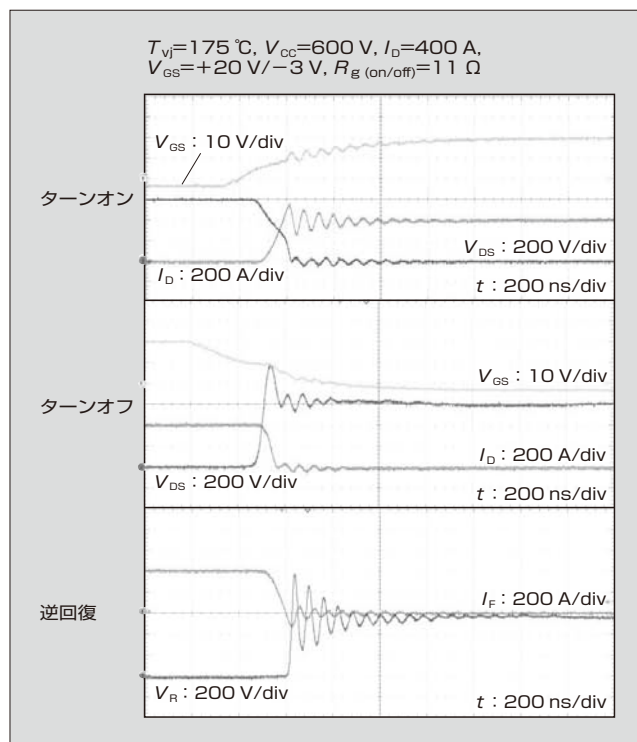
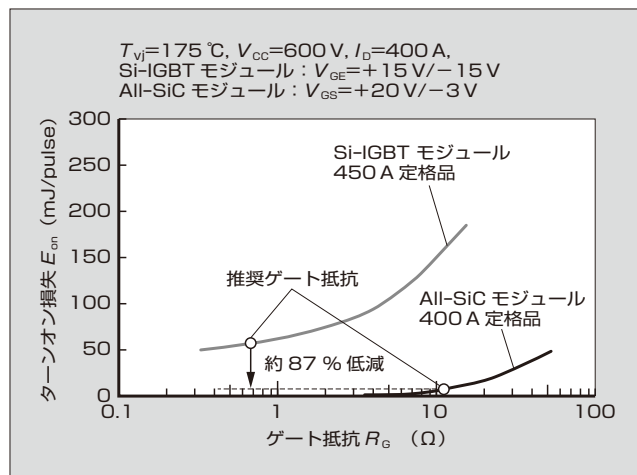
図5 All-SiC モジュールのスウィッチング波形 ($1,200 \text{ V}/400 \text{ A}$)

図6 ターンオン損失

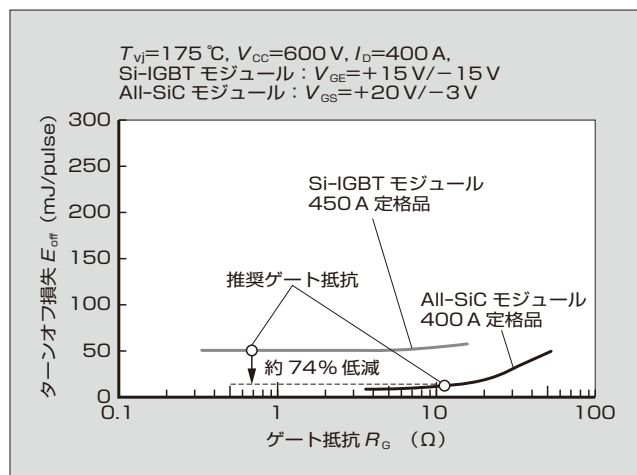


図7 ターンオフ損失

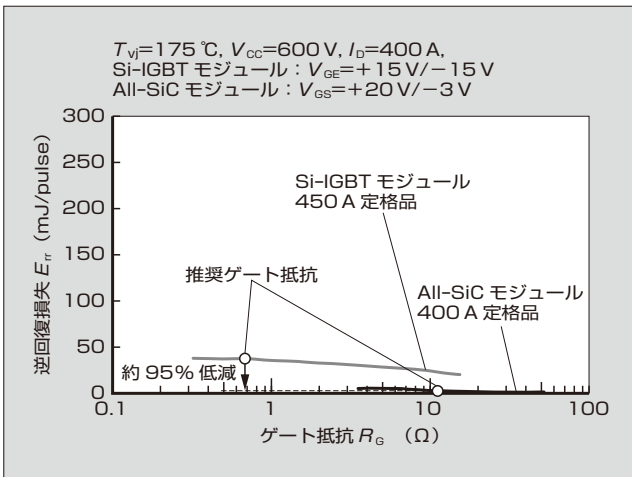


図8 逆回復損失

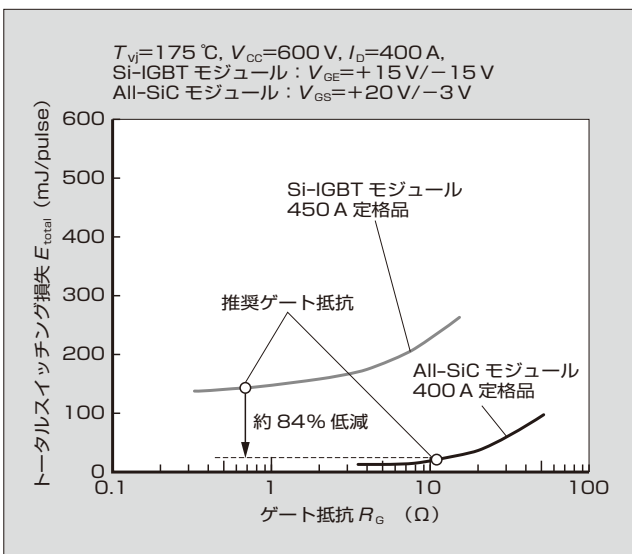


図9 トータルスイッチング損失

ターンオン損失の比較を図6に、ターンオフ損失の比較を図7に、逆回復損失の比較を図8に、トータルスイッチング損失の比較を図9に示す。All-SiC モジュールは、第7世代 X シリーズ Si-IGBT モジュールに対し、ターンオン損失を約 87%、ターンオフ損失を約 74%、逆回復損失を約 95% 低減している。これにより、トータルスイッチング損失を約 84% 低減した。

4.3 インバータ発生損失シミュレーション

インバータに搭載した All-SiC モジュールと第7世代「X シリーズ」Si-IGBT モジュールの一般的な使用条件における発生損失について、シミュレーションで求めた結果を図10に示す。All-SiC モジュールのインバータ発生損失は、Si-IGBT モジュールに対して約 57% 低減する。

図11に、発生損失のキャリア周波数依存性をシミュレーションで求めた結果を示す。All-SiC モジュールは、Si-IGBT モジュールに対してスイッチング損失が非常に小さい。そのため、高キャリア周波数化により DC リアクトルや絶縁トランスなどの受動部品は大幅に小型化するこ

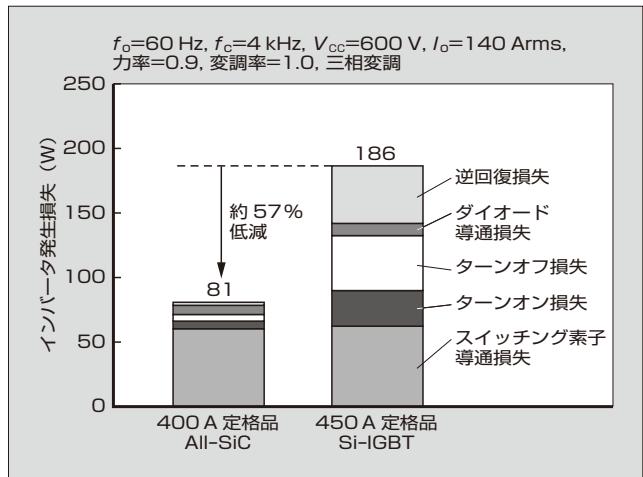


図10 インバータ発生損失のシミュレーション結果

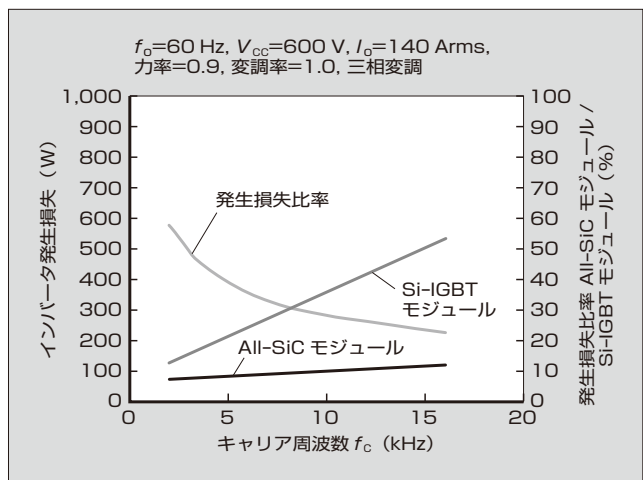


図11 インバータ発生損失のキャリア周波数依存性

とができる。例えば、鉄道車両用の補助電源装置では、従来の商用周波絶縁方式に対し、装置を約 1/2 に小型・軽量化できる⁽⁷⁾。

5 あとがき

SiC トレンチゲート MOSFET を搭載した All-SiC モジュールについて述べた。新たに開発した新構造大容量パッケージに SiC トレンチゲート MOSFET を搭載することにより、1,200 V/400 A 定格 2 in 1 モジュールを実現した。今後は、さらなる All-SiC モジュールの高電力密度化やラインアップの拡充により、各種電力変換装置の小型化、高効率化、高信頼性化に貢献していく所存である。

本開発の一部は、共同研究体 つくばパワーエレクトロニクスコンステレーション (TPEC) 殿の事業として行われた。関係各位に謝意を表す。

参考文献

- (1) 大島雅文ほか. All-SiCモジュール搭載のメガソーラー用 PCS 「PVI1000 AJ-3/1000」. 富士電機技報. 2015, vol.88, no.1,

p.13-17.

- (2) 蝶名林幹也ほか. All-SiC 2in1モジュール. 富士電機技報. 2016, vol.89, no.4, p.238-241.
- (3) Iwasaki, Y. "All-SiC Module with 1st Generation Trench Gate SiC MOSFETs and New Concept Package". PCIM Europe 2017.
- (4) 仲村秀世ほか. All-SiCモジュールのパッケージ技術. 富士電機技報. 2015, vol.88, no.4, p.241-244.
- (5) 辻崇ほか. 1.2 kV SiC トレンチゲート MOSFET. 富士電機技報. 2016, vol.89, no.4, p.234-237.
- (6) Yoshida, K. "Power Rating extension with 7th generation IGBT and thermal management by newly developed package technologies", PCIM Europe 2017.
- (7) 茨木那津子ほか. SiCデバイスを適用した高周波絶縁形鉄道車両用補助電源の回路方式検討. 平成26年電気学会全国大会 5-124.



中沢 将剛

SiC 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産業モジュール部。



大長 規浩

SiC モジュールのパッケージ開発・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開発統括部パッケージ開発部。



辻 崇

SiC パワー MOSFET, SBD の研究開発に従事。現在，富士電機株式会社電子デバイス事業本部開発統括部デバイス開発部。応用物理学会会員。





*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。