

All-SiC モジュール搭載のメガソーラー用 PCS 「PVI1000AJ-3/1000」

Mega Solar PCS Incorporating All-SiC Module “PVI1000 AJ-3/1000”

大島 雅文 OSHIMA, Masafumi

前田 哲也 MAEDA, Tetsuya

村津 宏樹 MURATSU, Hiroki

近年、太陽光発電に対して、より高い発電性能が求められている。その中心となるパワーコンディショナ（PCS）には、高効率をはじめ、継続して発電する信頼性、トータルコストの低減などが必要である。富士電機は、次世代半導体デバイスである SiC（炭化けい素）-MOSFET（Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor）と SiC-SBD（Schottky Barrier Diode）から成る All-SiC モジュールを搭載することにより、高効率なメガソーラー用 PCS を開発した。

In recent years, solar power generation has come to need greater power generation performance. Power conditioning sub-systems (PCSs) are the core of the generation, and they require high efficiency, reliability to continue to generate electricity, and a reduction of total cost. Fuji Electric has developed a highly efficient PCS for mega-solar plants by incorporating an All-SiC module consisting of silicon carbide metal-oxide-semiconductor field-effect transistors (SiC-MOSFETs) and SiC Schottky barrier diodes (SiC-SBDs), which are the next-generation semiconductors.

① まえがき

世界的にエネルギー需要は増大の一途をたどり、CO₂ による地球温暖化が大きな問題となっており、太陽電池をはじめとした再生可能エネルギーの利用拡大が進められている。国内では 2012 年に施行された「再生可能エネルギーの固定価格買取制度」^{〔注1〕}によって、事業用の太陽光発電所、いわゆるメガソーラー^{〔注1〕}が建設ラッシュとなっている。電力機器の価格低下と高効率化のためパワーコンディショナ（PCS：Power Conditioning Sub-system）の大容量化が進んでいる。

家庭用 PCS や従来の小・中規模 PCS では、太陽電池の電圧変動を補正するため、Si（シリコン）-IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）を搭載した昇圧回路と、昇圧された直流電圧を交流に変換するインバータ回路で構成されており、電力変換を 2 回行っている。太陽電池は、太陽光パネルの表面温度が低い冬期は出力電圧が高く、表面温度が高い夏期は出力電圧が低下するので、昇圧回路を使って出力電圧を一定にしている。

一方、メガソーラー用 PCS では、電力変換を 2 回行うことによる損失の増大を避けるため、昇圧回路を使用せずに、太陽電池の出力電圧の下限付近で PCS の発電効率が最大となるように装置の仕様を設定するのが一般的である。そのため、太陽電池の出力電圧が高い秋から春にかけては、インバータの効率が低下し不経済な使用状態となっていた。

そこで、直流の昇圧回路に All-SiC モジュールを使用し、直流-交流変換を行うインバータに RB（Reverse-Blocking）-IGBT の 3 レベル電力変換回路を使用した。こ

〔注1〕メガソーラー：設備認定されている発電規模が 1 MW を超える大規模発電所



図1 「PVI1000AJ-3/1000」

の PCS により、太陽電池の電圧変動を高効率で補正しながら、年間を通じてインバータ効率の高い状態で運転することができる。All-SiC モジュールは、富士電機と独立行政法人 産業技術総合研究所が共同で開発した次世代半導体の SiC（炭化けい素）-SBD（Schottky Barrier Diode）と SiC-MOSFET（Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor）を用いたものである。本稿では、この All-SiC モジュールを搭載したメガソーラー用 PCS 「PVI1000 AJ-3/1000」（図1）の特徴について述べる。

② PCS における課題

これまででは、太陽光パネルの総出力電力と PCS が発電できる電力量を同程度に設計して、発電所を設置することが多かった。しかし、日本をはじめ各国の再生可能エネル

ギーの電力買取制度によって太陽光パネルの低コスト化が進むにつれ、設備利用率を上げる方法として、太陽光パネルの並列数を増やして PCS の発電能力の 1.2 ～ 1.4 倍程度の発電量とする発電所が増えている。このような発電所では、太陽光パネルは最適動作点よりも電流は低く電圧は高い状態での発電が多くなる。そのため、最適動作点よりも高い電圧で高効率な電力変換が PCS に求められる。

一般に、PCS は太陽光パネルの出力特性に応じて最適動作点で発電するように直流電圧と電流を制御するという最大電力点追従制御 (MPPT 制御) を行い、系統へ電力を供給している。太陽光パネルと PCS の発電能力が同等の場合、昼の一番強い日射のときに最大発電電力となる。一方、太陽光パネルの並列数を増やす (積み増しする) ことにより発電能力を PCS の最大発電量よりも高めた場合の太陽光パネルの積み増しと出力特性を図 2 に示す。この場合には、昼の日射が最大となる時点よりも早い時間に最大発電電力に達する (図 2 (a))。太陽光パネルをより多く積み増して、最大発電が可能な時間帯をより長くすることで一日の発電量を上げることができる。早朝の発電を開始する前の太陽光パネルは開放電圧 V_{oc} の状態であり、MPPT 制御によって V_{oc} から太陽光パネルの最適動作電圧 V_{pm} へ向かって動作するため、太陽光パネルは常に最適動作点より高い状態での動作となる。(図 2 (b))。

変換器の損失には、導通損失とスイッチング損失の二つがある。インバータ回路はインバータの直流中間電圧が高

いほどスイッチング損失が増加する。インバータの出力電圧と電流が同じであれば導通損失は変わらないため、直流中間電圧が高くなるにつれてスイッチング損失は増え、変換効率が低下する。これまでのメガソーラー用 PCS は、太陽光パネルの出力を直接インバータ回路の直流中間へ接続していることが多く、太陽光パネルを積み増すと太陽光パネルの最適動作点より高い電圧で発電する機会が多くなること、昼間の気温がそれほど高くない秋から冬、春にかけて太陽光パネルの電圧は開放電圧、最適動作電圧含めて高くなることから、インバータのみの変換では効率が低下するという問題があった。

③ 「PVI1000AJ-3/1000」の特徴

②章で述べた課題を含め、発電事業に大きな損失をもたらすことなく、継続して発電し続けるという高い信頼性が PCS に求められる。したがって、PCS には次の 3 点が必要である。

- (a) 高効率 (最適動作点以上において)
- (b) トータルコストが低いこと
- (c) 信頼性 (発電継続性) が高いこと

PVI1000AJ-3/1000 は、これらを実現するメガソーラー用 PCS である。

3.1 高効率

今回、太陽光パネルの積み増しに対して装置効率を上げるために、昇圧回路を採用した。昇圧回路は、負荷量が変わらなければ、昇圧回路の直流入力電圧が低いときは、導通損失、スイッチング損失とも発生するが、電圧が上がるにつれて電流が減少するので、導通損失、スイッチング損失とも減少していく。この損失特性と昇圧された状態におけるインバータ部の効率の関係を最適化することで、装置の効率は直流入力電圧が上がるほど高効率になる特性にすることができる。昇圧回路の直流入力電圧は太陽光パネルの出力電圧に相当するので、積み増しや季節変動に対してこの特性を適用できる。

本製品は、昇圧回路に All-SiC モジュール (図 3) を搭載することでチョッパ部を高効率化し、インバータ部の

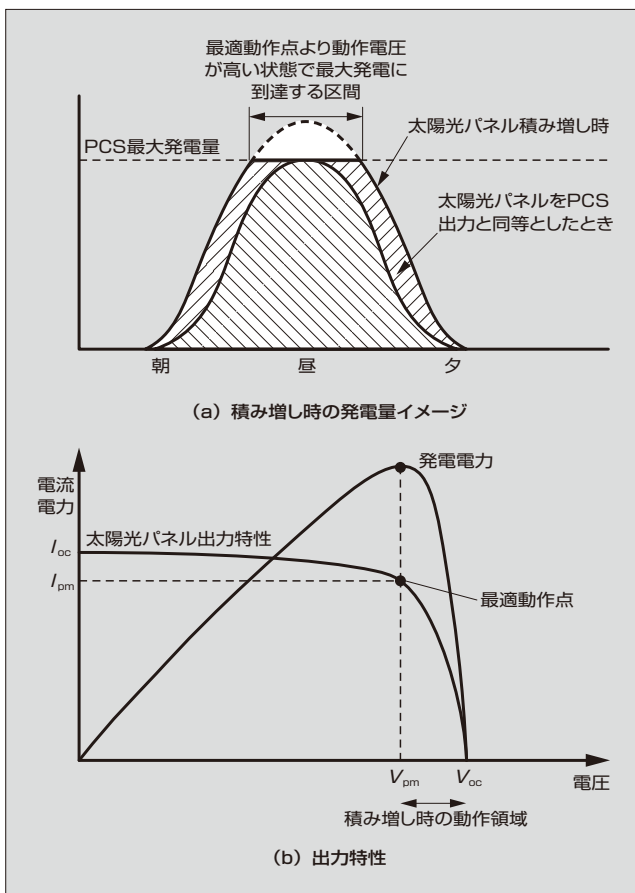


図 2 太陽光パネルの積み増しと出力特性

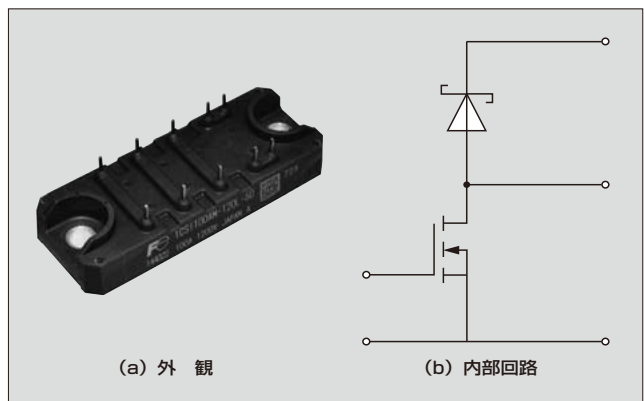


図 3 All-SiC モジュール

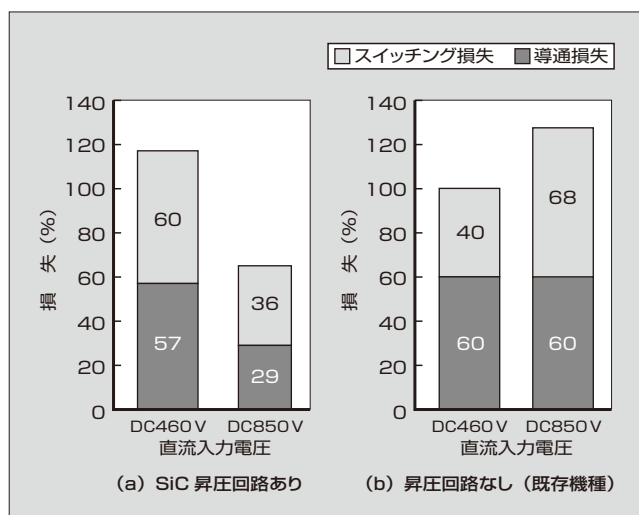


図4 PCSの損失比較

Tタイプ3レベル電力変換回路にAT-NPC (Advanced T-type Neutral-Point-Clamped) 3レベルIGBTを採用した。

図4に、昇圧回路がない場合のPCS (既存機種) とSiC昇圧回路がある場合のPCSについて損失の比較を示す。既存機種の直流入力電圧460Vにおける導通損失とスイッチング損失の合計を100%とすると、直流入力電圧が850Vに上がると導通損失は変化しないが、スイッチング損失が40%から68%に増加し、損失は約128%になった。今回開発したSiC昇圧回路を付与したPCSでは、直流入力電圧が460Vのときは、昇圧回路がないPCSに比べ17ポイントほど損失が増えているものの、直流入力電圧が850Vのときには損失が35ポイント改善している。

その結果、装置の最大効率を98.8% (IEC 61683 効率裕度表示、内部電源含まず) とすることができた。

3.2 トータルコストの低減

従来のメガソーラー用のPCSは、太陽光パネルの直流電圧とインバータ回路の直流中間部を直接接続する方式が多く、太陽光パネルの電圧が変動するとインバータ回路の直流中間電圧も変動する。一方、太陽光パネルの電圧は、開放電圧と最適動作電圧の間で変動するため、冬期の気温が低いときは開放電圧が高くなり、夏期の気温が高いときは最適動作電圧が低くなる。そのため、インバータ回路は、最適動作電圧が低いときでも、開放電圧が高いときでも動作する必要がある。

例えば、インバータの直流中間電圧 (太陽光パネルの夏期の最適動作点) が340V程度の場合、交流電圧200V (282Vピーク) までしか出力できない。インバータ回路の出力電力は、インバータの交流出力電圧と電流で決まるが、インバータの直流中間電圧を340Vから800V程度まで高くできれば、これまでと同じインバータ回路で、交流出力電圧を400Vまで上げて出力電力を2倍にすることができる。

そこで、昇圧回路によってインバータ回路の直流中間電

圧を上げ、インバータの出力電圧、出力電力を大きくしてインバータ回路の利用効率を改善した。さらに、出力を1MWと大容量化することで、メガソーラーでのPCSの使用台数や、高圧連系を行う機器類の使用数を削減できるようになりトータルコストが低減する。

3.3 高信頼性

チョップ主回路部は、1台当たり83kW出力のユニットを12台用いて構成している。いずれのユニットが故障しても、故障したユニットを自動で停止し、運転を継続することができる。この機能により装置全体の停止を避けることができ、発電継続性が向上した。故障したユニットは、監視モニタや本体の表示画面にて特定することができるとともに、プラグイン方式なので簡単に交換することができ、迅速な復旧が行える。なお、ヒューズ溶断などの重故障が発生した場合は、手動により故障ユニットを除いたあとに、縮退運転で運転を継続できる。

3.4 発電電力の向上

(1) MPPT制御の2系統化

これまでのメガソーラー用PCSは、複数の直流入力に対してMPPT制御を一括で行っていた。本製品は、4入力のうち2入力ごと (500kW単位) に、チョップ回路部で個別にMPPT制御を行い、発電量の向上を図っている。

(2) 出力力率0.9～1.0の定格出力電力

太陽光発電を含めた再生可能エネルギーによる発電の増加は系統電圧が変動する原因となるので、系統を適正に維持する手段が必要である。特に太陽光発電は、電力消費地域から遠方に設置されることが多く、系統へ送電する電力が、消費される電力より大きくなると系統の電圧を上昇させてしまう。そこで、電力会社は、配電系統の電圧上昇を抑制するため、PCSから無効電力を系統に注入することで電圧抑制を図るように推奨している。例えば、これまでの富士電機のPCS (1,000kVA, 1,000kW) の場合、力率を0.9にすると1,000kVA, 900kWとなり定格の1,000kWが出力できなかった。本製品では、出力力率が0.9～1.0の範囲で定格出力電力を発電できるように出力定格を1,111kVA, 1,000kWとすることで、発電電力量を低下させずに配電系統の電圧上昇を抑制できる。

3.5 屋内型構造と装置の小型化

(1) 屋内型構造

本製品は屋外へ設置するときは、コンテナに搭載して使用する屋内型構造とし、屋外型PCS「PVI1000」では対応できなかった沿岸地域 (塩害地域) に対しては、コンテナの仕様を変更することで設置できるようにした。

(2) 装置の小型化

チョップ部をユニット構造とし、インバータ回路を最適化することで、外形は従来機種の「PVI750-3/500-T」 (500kW出力PCS) を2台設置した場合と比較して約60%の小型化 (フットプリント) を実現した。チョップ

ユニットはそれぞれインターリーブ制御が行われており、主回路の小型化と、スイッチング損失のバランスを考慮してスイッチング周波数を 20 kHz としている。これらによりスイッチングリップルを低減し、フィルタを縮小することでチョッパユニットを小型化している。

表1 「PVI1000AJ-3/1000」の仕様

項目	仕様
出力容量	1,111 kVA/1,000 kW
直流電圧範囲	450 ~ 1,000 V
MPPT範囲	460 ~ 850 V
最大入力電流	2,440 A
交流電圧	480 V (±10%)
周波数	50/60 Hz
力率	0.9 ~ 1.0 (定格出力) 0.8 ~ 0.9 (出力低減)
高調波ひずみ率	5%
最高効率	98.8%
EURO効率	98.5%
外形	W2,980×D900×H1,950 (mm)
質量	2,850 kg

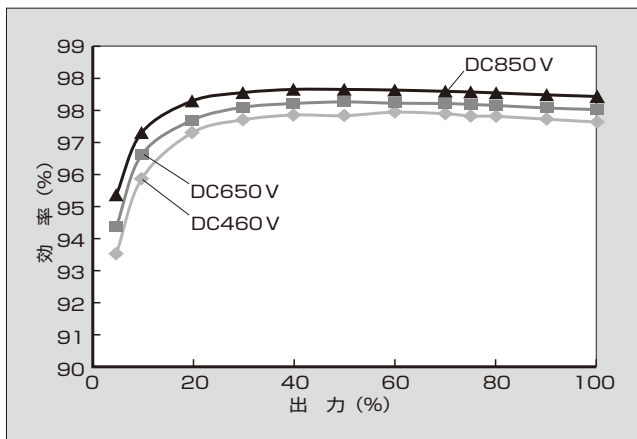


図5 効率カーブ

3.6 仕様

表1に、PVI1000AJ-3/1000の仕様を示す。直流電圧範囲は、DC1,000Vに対応し、定格出力における最大電力点追従範囲は460～850Vである。交流出力電圧は480Vであり、連系トランスにより各サイトにおける系統電圧に昇圧する。最高効率である98.8%およびEURO効率（EU圏で規定されている、より実運用に近い効率）98.5%は、直流電圧が850Vのときの値である。図5に出力電力と効率の関係を示す。入力電圧が高くなるにつれて効率がよく

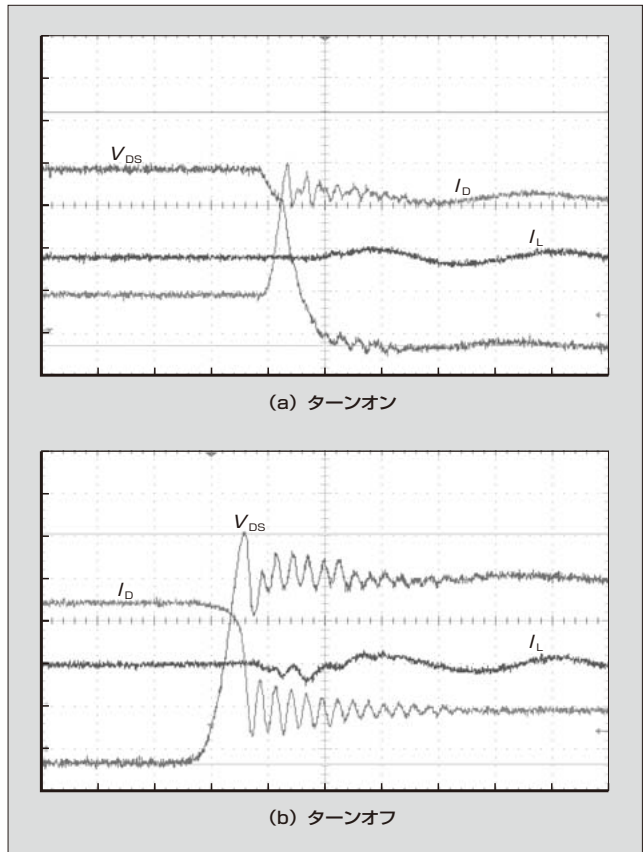


図7 SiC-MOSFETのスイッチング波形

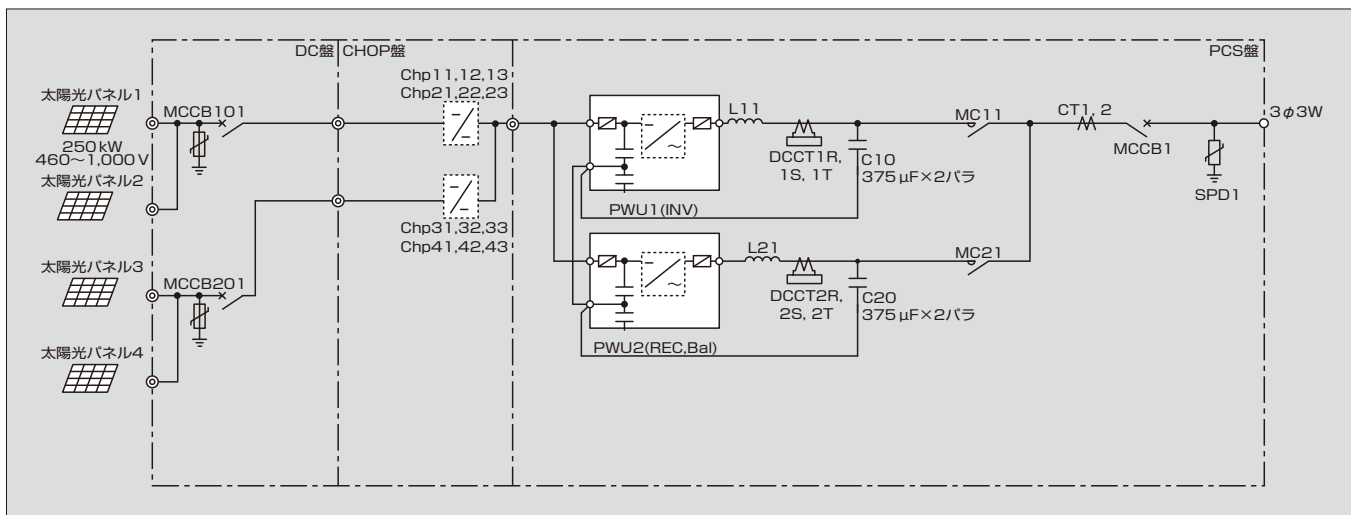


図6 「PVI1000AJ-3/1000」の回路構成

なっている。

3.7 回路構成

図 6 に、PVI1000 AJ-3/1000 の回路構成を示す。83kW のチョップユニット 12 台と、500kW のインバータユニット 2 台から成る。図に示したものでは直流入力は 4 回路であるが、オプションの直流入力盤により最大 24 回路まで増やすことができる。

3.8 低インダクタンス化

All-SiC モジュールは、チップと端子間のボンディングワイヤをなくしている⁽⁹⁾ので、インダクタンスが従来のモジュールよりも低い。さらに、主回路端子をプリント基板で構成することで、ねじ端子で接続する方法よりインダクタンスは低い。これにより、従来のモジュールに比べてスイッチング速度が速くなっているが、ターンオフ時の跳ね上がり電圧を抑制している。直流電圧 850V、スイッチング電流 100A における SiC-MOSFET のスイッチング波形を図 7 に示す。ターンオフの時間は、低インダクタンス化により Si-IGBT の 10% 以下の 100ns 以内であり、跳ね上がり電圧は Si 並みのレベルである。

4 あとがき

「PVI1000 AJ-3/1000」^(注2)は、メガソーラー用 PCS として初めて All-SiC モジュールを採用し、高効率発電を実現した。これに加え、単機大容量によるシステムコストの低減やコンテナ収納による耐設置環境の向上により、メガソー

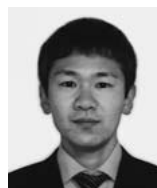
〈注2〉「PVI1000 AJ-3/1000」：一般社団法人 日本電機工業会「平成 27 年度（第 64 回）電機工業技術功績者表彰」対象

ラーに最適な PCS である。

今後も、さらなる高効率化と大容量化を推進し、低炭素社会の実現に貢献していく所存である。

参考文献

- (1) 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.
- (2) 松本康ほか. SiCデバイス搭載のパワーエレクトロニクス機器. 富士時報. 2012, vol.85, no.3, p.255-259.
- (3) Hinata, Y. et al. "Full SiC Power Module with Advanced Structure and its Solar Inverter Application", Conference Proceeding on Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2013.



大島 雅文

パワーコンディショナ、無停電電源装置の開発・設計に従事。現在、富士電機株式会社パワエレ機器事業本部パワーサプライ事業部開発部課長補佐。パワーエレクトロニクス学会会員。



前田 哲也

パワーコンディショナ、無停電電源装置の開発・設計に従事。現在、富士電機株式会社パワエレ機器事業本部パワーサプライ事業部開発部。



村津 宏樹

パワーコンディショナ、無停電電源装置の開発・設計に従事。現在、富士電機株式会社パワエレ機器事業本部パワーサプライ事業部開発部。パワーエレクトロニクス学会会員。





*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。