

リファレンスデザイン:3 相 AC400V 入力対応 PFC 電源

SiC MOSFET 採用により電源システムの効率を向上

環境とエネルギーに関する問題解決は、世界的な重要課題であることは言うまでもありません。省エネルギーが注目されるなか電力需要は逆に増加しており、高効率で小型の電力変換システムのニーズが急速に高まっています。

身近な例として近年、温暖化ガス排出の削減に向けガソリン車を規制する動きが世界各地で相次いでいます。この動きは先進国に加え中国、インドといった新興国にも起きており、すでに世界規模の流れになっています。この流れに対応するには、電気自動車 (EV) の普及が 1 つの鍵になります。しかしながら、それにはいくつかの課題があり、中でも充電インフラの整備が一番の課題とされています。インフラゆえに国情、政策、資金、技術開発、規格標準化などが複雑に関係しますが、特に新興国においては必要な性能を持つ高効率な EV 充電システムを短期間で開発するのは、保有技術の面から困難なことが予想されます。そのため、開発から製品化までをスムーズかつ迅速に推進可能にするサポートや情報の提供が強く求められています。

この例に関わらず、特に産業分野では共通化や標準化が進む中、能率のよい開発設計アプローチとしてリファレンスデザインを利用するケースが増えています。デバイスメーカーが持つ多くのアプリケーション情報と、デバイス選択と回路の最適解をベースにした汎用性の高いリファレンスデザインが今注目されています。

リファレンスデザインのご紹介

東芝デバイス&ストレージ株式会社では、機器設計を迅速に進めるための参考データとして数々のリファレンスデザインを提供しています。リファレンスデザインは、ウェブサイトのリファレンスデザインセンターから一式をダウンロードすることができます。末尾の「関連情報」に、ここで紹介するリファレンスデザインおよび関連情報へのリンクなどをまとめてありますので、是非ご利用ください。なお、リファレンスデザインには利用規約がありますので、併せて確認をお願いします。

今回は、EV 用充電ステーションなどの大電力変換機器の構成に利用できる「3 相 AC400V 入力対応 PFC 電源」のリファレンスデザインを紹介します。

●3 相 AC400V 入力対応 PFC 電源 (リファレンスデザイン: RD044)

このリファレンスデザインは、三相 AC400V 入力、4kW/DC750V 出力の電源で、PFC (力率改善) 搭載により力率 0.99 以上、電力変換効率 97% を達成します。基本的に、AC ライン部と PFC 部 (ゲート駆動回路、センサ回路、出力パワースイッチ) のリファレンスデザインとなっています。このリファレンスデザインには、以下の特長があります。

①各相をダイレクトにスイッチングする 3 相トータムポール構成でブリッジレスを実現

このリファレンスデザインのような 4kW と大電力の PFC を構成しようとした場合、一般的なダイオードブリッジ整流 + 昇圧

コンバータ構成では、ダイオードブリッジでの損失が大きく、スイッチング素子への負荷も大きくなるため、複数の素子を並列に接続する構成がよく使われます。しかしながら、大電力化への対応は可能になりますが、変換効率は決して高くなく、インダクタなどの大型部品が並列回路数分、つまり最低でも 2 倍以上必要になるため電源装置としての規模が大きくなってしまいます。このリファレンスデザインに採用した各相をダイレクトにスイッチングするトータムポール構成は、ダイオードブリッジを要しないため、これらの問題を解決します。

②パワースwitchに SiC MOSFET を採用し、高い電力変換効率を実現

このリファレンスデザインは、三相 AC400V 入力を受ける 4kW の PFC であるため、トータムポール構成にする場合はスイッチング素子に高耐圧が要求されます。このリファレンスデザインに必要な素子耐圧は 1000V であることから、一般的には IGBT を選択することになります。しかし、IGBT は MOSFET と比較して構造および特性的にスイッチング損失が大きく、高効率化には限界があります。対して SiC MOSFET はスイッチングが高速なことから IGBT よりスイッチング損失が小さく、より高いスイッチング周波数で動作させることが可能になります。通常、スイッチング周波数を高くするとスイッチング損失は増加する傾向にありますが、SiC MOSFET を使用することで総合的な損失を IGBT より低く抑えることが可能です。また、スイッチング周波数を高くできることで小型のインダクタを使用できるようになり、電源装置としての小型化が期待できます。

③スイッチング速度を調整可能なゲート駆動回路により、トレードオフである効率と EMI の最適化が可能

SiC MOSFET のターンオンおよびターンオフのスイッチング速度を各々に調整可能なゲート駆動回路を搭載したことで、セット上での最終的なスイッチング条件の調整ができます。ユーザーは最終的な使用環境における EMI の影響やスイッチングサージなどをモニターしつつ、スイッチング駆動条件の最適化が可能です。このリファレンスデザインのゲートドライバ IC には、1200V 耐圧 SiC MOSFET のスイッチング時ゲート充放電電流を十分にドライブ可能な 4A のシンク・ソース電流能力を備えた TLP5214A を採用しています。TLP5214A は、過電流保護機能や UVLO 機能を備えているので、異常時の回路保護も提供しています。

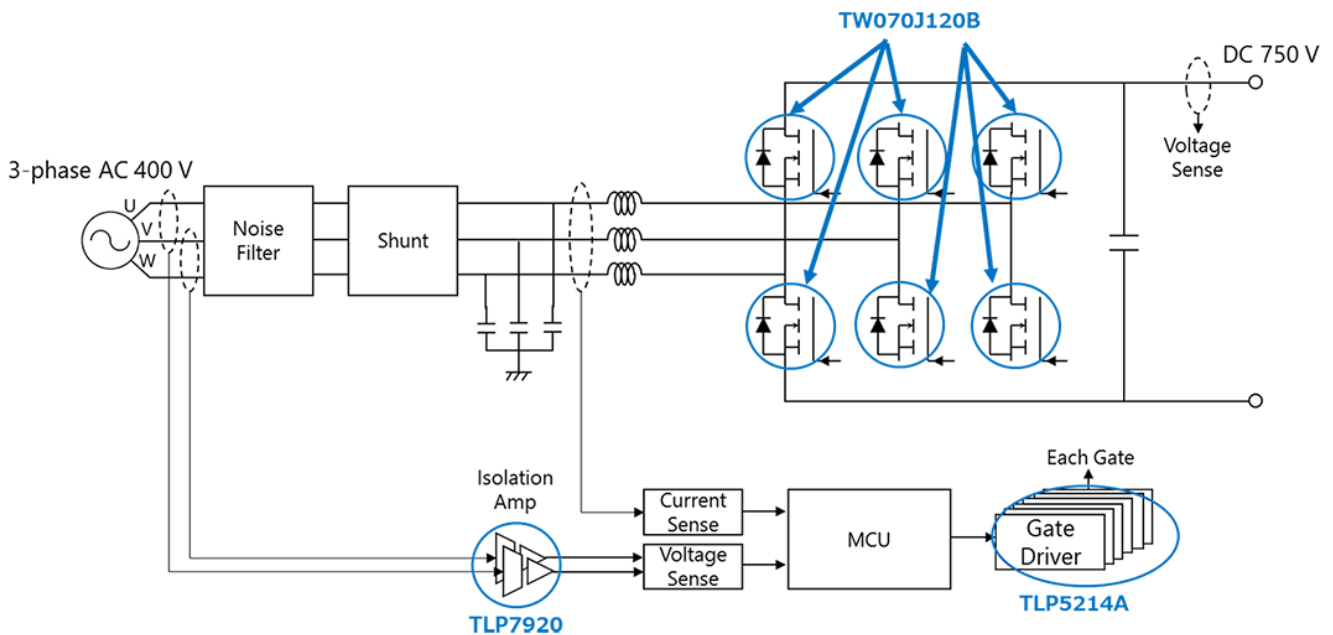


図 1:3 相 AC400V 入力対応 PFC 電源リファレンスデザインの機能ブロック図

また、主な仕様は以下の通りです。

- ・ 交流入力電圧定格: 三相 AC400V (AC312V~AC528V)
- ・ 交流周波数: 50Hz \pm 0.2Hz、60Hz \pm 0.3Hz
- ・ 最大交流入力電流定格 6.2A RMS
- ・ 出力電圧定格: DC750V \pm 1%
- ・ 出力電力定格: 4.0kW
- ・ スイッチング周波数: 50kHz
- ・ 電力変換効率: 97%(AC400V 入力、4.0kW 出力時)
- ・ 制御方式: 力率 1 制御、直流電圧制御、力率 0.99 以上
- ・ 絶縁耐圧: 2500V (主回路—制御回路)

このリファレンス回路の非常に高い変換効率は、IGBT に比べて高速なスイッチング特性を持つ SiC MOSFET をスイッチング素子として採用したことにより達成されています。SiC パワーデバイスは、電力変換回路において非常に高いポテンシャルを持っていることから、関連アプリケーションでの採用が広がっています。

双方向充電アプリケーションの例

このリファレンスデザインを利用した、アプリケーション例を示します。3 相 AC400V を PFC 電源により高効率に DC に変換し、双方向 DC-DC との組み合わせにより、双方向充電を実現するシステムイメージです。

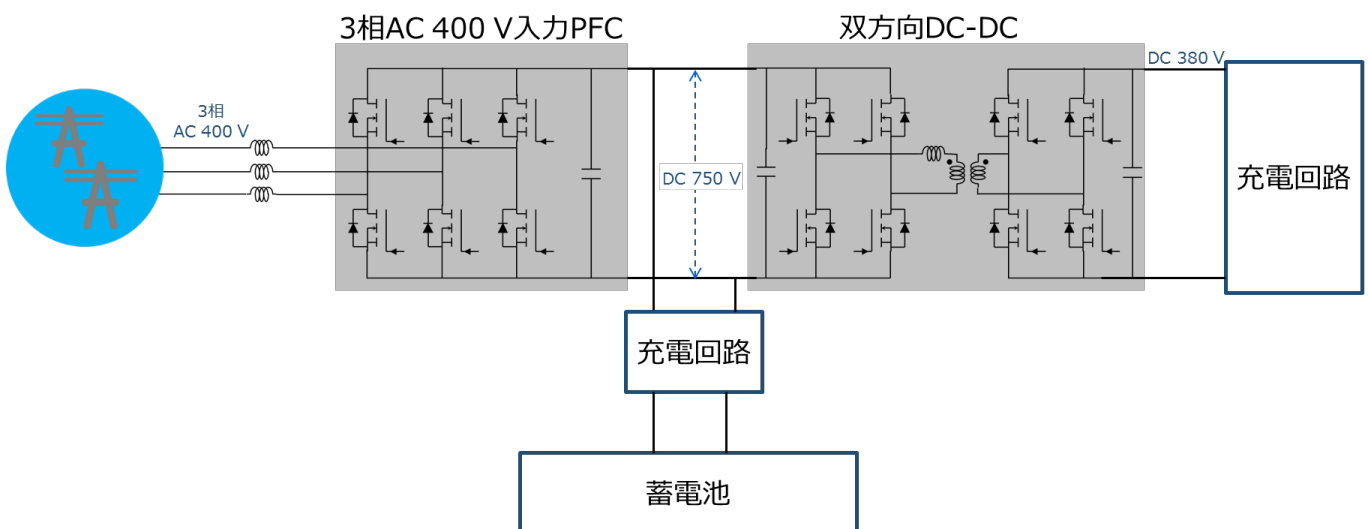


図 2:3 相 AC400V 入力対応 PFC 電源リファレンスデザインを利用した EV 充電システムのイメージ

現在、双方向 DC-DC のリファレンスデザインについても準備中ですので、併せて利用することでシステム開発を迅速

かつ簡単に進めることが可能です。

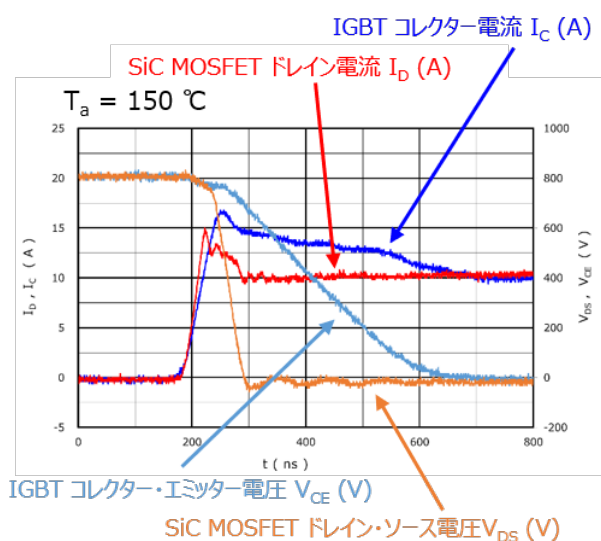
SiC MOSFET のシステムへの貢献

電力変換システムの効率向上、つまり損失の低減には、使用するパワーデバイスの性能が大きく影響します。そのため、従来の Si (シリコン) に加えて、SiC (炭化ケイ素) や GaN (窒化ガリウム) などの半導体材料を使用したパワーデバイスが増えてきています。

今回紹介したリファレンスデザインでは、上述の通り SiC MOSFET の採用により変換効率の向上を図っています。以下に、大電力変換アプリケーションでは現在の主流である IGBT (絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ) と SiC MOSFET の損失比較例、SiC MOSFET の仕様と特徴を示します。

●SiC MOSFET と IGBT の損失比較

スイッチングトランジスタにおける損失は、スイッチング損失、オン抵抗による導通損失、内部ダイオード順方向電圧の損失の総和となります。その中でもスイッチング損失は全体の 9 割近くを占めます。図 3 は、SiC MOSFET と IGBT のターンオン時のスイッチング波形と損失 E_{on} の比較例です。比較に使用した SiC MOSFET は、今回のリファレンス回路に採用した東芝製 [TW070J120B](#)、IGBT は他社製高速スイッチングタイプを使用しています。



●SiC MOSFET 試験条件

$V_{DD}=800\text{V}$ 、 $I_D=10\text{A}$ 、 $T_a=150^\circ\text{C}$ 、 $V_{GS}=20\text{V}/-5\text{V}$ 、誘電負荷： $L=1\text{mH}$ 、外付けゲート抵抗 $R_G=150\Omega$
ソース・ドレイン間ダイオードを誘導負荷と並列にフリーホイーリングダイオード (FWD) として使用

●IGBT 試験条件

$V_{CC}=800\text{V}$ 、 $I_C=10\text{A}$ 、 $T_a=150^\circ\text{C}$ 、 $V_{GE}=20\text{V}/-5\text{V}$ 、誘電負荷： $L=1\text{mH}$ 、外付けゲート抵抗 $R_G=47\Omega$
エミッタ・コレクター間ダイオードを誘導負荷と並列に FWD として使用

※ターンオン時の I_D, I_C の傾き $dI_D(I_C)/dt$ を合わせるために設定した試験条件

図 3: SiC MOSFET と IGBT のターンオン時のスイッチング波形と損失 E_{on} の比較例

この例は、IGBT のターンオン損失が 2.5mJ、SiC MOSFET は 0.6mJ であることから、スイッチングトランジスタを IGBT から SiC MOSFET に置き換えた場合にターンオン損失を 76%低減可能であることを示しています。この損失の差は、スイッチング波形図の V_{DS} と V_{CE} のスイッチング特性（速度）の差が主な要因になっています。SiC MOSFET は速やかに完全にターンオンしそれに従った I_D が流れていますが、IGBT は完全なターンオンに時間を要し、その期間が損失となります。

また、図 4 はシミュレーションによる SiC MOSFET と IGBT のターンオンおよびターンオフのスイッチング損失、オン抵抗による導通損失、内部ダイオード順方向電圧による損失の総和の比較例です。条件は、 $V_{CC}=400V$ 、 $I_O=7.0Arms$ 、力率=1、3 相変調、 $T_J=150^{\circ}C$ です。この結果からは、SiC MOSFET は IGBT と比較して約 28W の損失を低減可能で、機器の効率向上に寄与することがわかります。

このように、汎用的な既存の電力変換アプリケーションにおいても、IGBT を SiC MOSFET に置き換えることで大幅な損失低減が可能です。損失の低減により、同じ電力を扱うなら回路の小型化が可能になります。また、同じサイズであれば、より多くの電力を扱うことが可能になります。

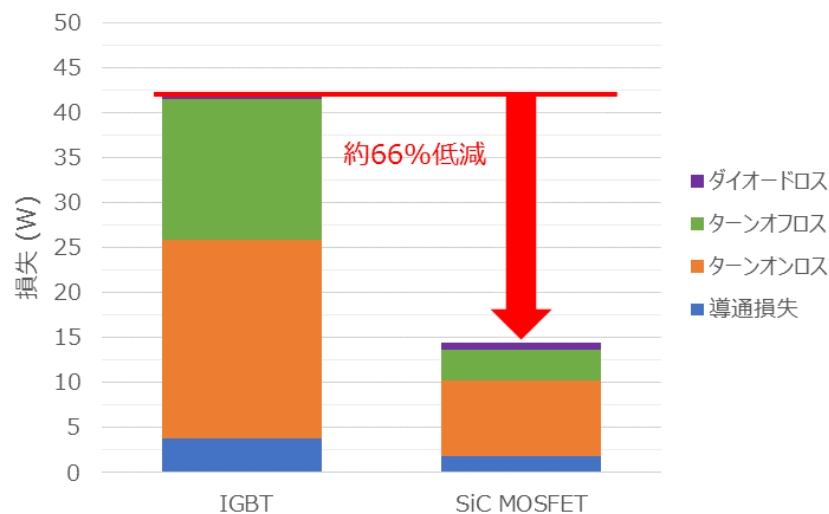
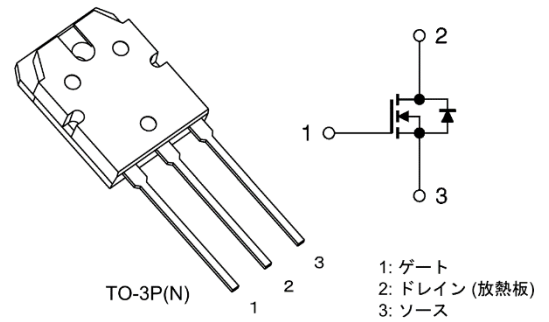


図 4: SiC MOSFET と IGBT の各損失と総和の比較例

● SiC MOSFET: [TW070J120B](#)

今回のリファレンス回路に使用した TW070J120B は N チャネルの SiC MOSFET で、弊社第 2 世代チップデザインの SiC ショットキーバリアダイオード (SiC SBD) 内蔵タイプです。以下に主な仕様を示します。

- SiC ショットキーバリアダイオードを内蔵
- 低い内臓ダイオード順方向電圧: $V_{DSF} = -1.35V$ (標準)
- 高耐圧: $V_{DSS} = 1200V$
- 広いゲート・ソース間電圧: $V_{GSS} = +25V \sim -10V$
- 低オン抵抗: $R_{DS(ON)} = 70m\Omega$ (標準)
- 高いゲートしきい値: $V_{th} = 4.2V \sim 5.8V$



SiC ショットキーバリアダイオードを内蔵したことで、MOSFET のボディ (寄生) ダイオードより低い V_{DSF} を実現し、ダイオードの導通損失が低減します。また、 I_{FSM} が高いダイオードを採用しているため、サージ電流耐量に優れています。信頼性の観点からは、ダイオード内蔵により部品カウントが 1 個となることで、構成回路の故障率を下げるすることができます。

ゲート・ソース間電圧の定格 V_{GSS} は、競合品に比べ範囲が広がっています。 V_{GSS} の許容範囲が広いことで、設計が容易になります。

また、ゲートしきい値電圧の規格は競合品より高い値で規定されています。これにより、ゲート電圧の変動やノイズに対して誤動作しにくくなっています。

このような特長から TW070J120B は、低損失で強靭さを持ち合わせた設計しやすい SiC MOSFET になっています。

● SiC MOSFET のゲート駆動

SiC MOSFET のゲート駆動は、SiC の物性や高速スイッチング特性を考慮した方法になります。以下に、TW070J120B を例にしたポイントをまとめました。詳細につきましては、関連のアプリケーションノートなどを参照願います。

<SiC MOSFET ゲート制御のポイント>

- ①ゲート・ソース電圧は絶対最大定格 $-10V \sim 25V$ を厳守する。
- ②ターンオン時のゲート電圧を $18V \sim 20V$ に設定する。
- ③ターンオフ時のゲート電圧を $0 \sim -5V$ に設定する。
- ④ゲート・ソース間容量 (C_{GS}) をゲート電荷で十分に充電する必要がある。

ゲート電圧を印加しターンオンさせるためには、ゲート・ソース間容量をゲート電荷で充電する必要があります。 V_{GS} が $0 \sim 20V$ 時のゲート電荷は標準で $70nC$ ($V_{DD} = 800V$ 、 $V_{GS} = 20V$ 、 $I_D = 36A$) です。使用するスイッチング周波数で、この電荷を十分に充電できる電流を流す必要があります。

なお、先に紹介したリファレンスデザインでは、ゲート駆動回路において標準的な条件が設定されています。実際の動作を確認し評価を行い最適化が可能です。

まとめ

近年、製品市場投入までの時間短縮要求は厳しさを増しており、機器の開発設計に携わる技術者には短時間で極力手戻りのない設計が求められています。その解決策の1つとして、デバイスメーカーが提供するリファレンスデザインを利用するケースが増えています。

今回紹介した「3相 AC400V 入力対応 PFC 電源」のリファレンスデザインは、電力変換アプリケーションの高効率化と小型化を意図した提案です。高効率化のための損失低減には、パワースイッチを従来の IGBT から SiC MOSFET に置き換えたことがポイントになっています。SiC パワーデバイスが、大電力アプリケーションにおいて非常に有用な選択肢であることはすでに広く知られていますが、その優れた特性を活用するためには、SiC パワーデバイスの特徴を理解する必要があります。この点において、リファレンスデザインは標準的な条件を提供しており、開発設計をスムーズかつ迅速に進める大きな手助けになります。

アプリケーションの観点では、温暖化ガス排出の削減に向け EV の普及が世界的に急務となっています。このリファレンスデザインは EV の充電ステーションといったインフラ設計への利用が可能です。特に新興国での開発には、このようなリファレンスデザインは大いに役立つものと考えられます。

弊社では今後、さらにリファレンスデザインの提供を増やす方針です。また、大電力変換アプリケーション向けには SiC パワーデバイスを取り入れたデザインを積極的に展開していきます。同時に SiC パワーデバイスの新世代品の開発も進めており、近々現状の第2世代に加えて第3世代品の発表も予定しています。

関連情報

- [3相 AC400V 入力対応 PFC 電源 \(リファレンスデザイン: RD044\)](#)
- [リファレンスデザインセンター](#)
- [SiC MOSFET 製品ページ](#)
- [SiC MOSFET: TW070J120B](#)

東芝デバイス&ストレージ株式会社

☆ 当社の製品・ソリューションに関するお問い合わせ

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



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いたします。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。
- 本製品には GaAs（ガリウムヒ素）が使われているものがあります。その粉末や蒸気等は人体に対し有害ですので、破壊、切断、粉碎や化学的な分解はしないでください。
- 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。