

産業用フル SiC パワーモジュール NX タイプ アプリケーションノート

目次

1章 導入	3
1.1 産業用フル SiC パワーモジュールの特長	3
1.2 構造	4
1.3 形名の構成.....	4
1.4 SiC-MOSFET の特長.....	5
1.4.1 ID-VDS 特性	5
1.4.2 IS-VSD 特性	6
1.4.3 MOSFET 部逆導通（チャネル部導通）	6
1.4.4 スイッチング特性.....	7
1.5 推奨動作範囲	8
1.6 短絡動作.....	8
1.7 測定上の注意	9
1.8 特性変動.....	10
2章 用語説明	113
2.1 一般.....	11
2.2 最大定格.....	11
2.3 温度定格.....	11
2.4 熱的定格・特性.....	11
2.5 電気的特性.....	12
3章 製品ラベル記載情報	13
3.1 ラベル印字例.....	13
3.2 ロット番号構成	13
3.3 二次元コード仕様	13
4章 制御回路設計	14
4.1 ゲート抵抗の選定	15
4.2 ゲート電圧の選定.....	15
4.2.1 ゲート正バイアス	15
4.2.2 ゲート負バイアス	16
4.3 ゲート駆動電源	17
4.4 デッドタイム設定	18
4.5 ゲートドライバー	18

5章	パワーモジュール実装	19
5.1	システムレイアウト	19
5.2	ヒートシンクへの取付け	20
5.3	熱伝導性（放熱用）グリース塗布方法	21
5.4	主端子への取り付け	22
5.5	制御端子への取り付け	23
5.6	熱抵抗の考え方	24
5.7	熱電対の取り付け	25
6章	産業用フル SiC パワーモジュールの使用方法	27
6.1	パワーモジュールの選定	27
6.1.1	電圧定格	27
6.1.2	電流定格	27
6.2	サージ電圧抑制方法	27
6.2.1	主回路配線の低減	27
6.2.2	スナバ回路	28
6.3	並列接続	29
6.3.1	電流デレーティング	29
6.3.2	主回路配線	30
6.3.3	ゲートドライバ回路	31
7章	損失と放熱設計	32
7.1	発生損失の求め方	32
7.1.1	定常損失	33
7.1.2	スイッチング損失	34
7.1.3	平均パワー損失	35
7.1.4	温度上昇の求め方	36
7.2	ヒートシンクの選定方法	38
7.3	インバータへの応用時の一般的な注意点	38
7.4	熱設計への応用時の注意点	38
8章	取り扱い上の注意事項	39
8.1	難燃性について	40
9章	安全規格（UL 規格）	41

※本資料に記載されたデータは参考値であり、値を保証するものではありません。

1章 導入

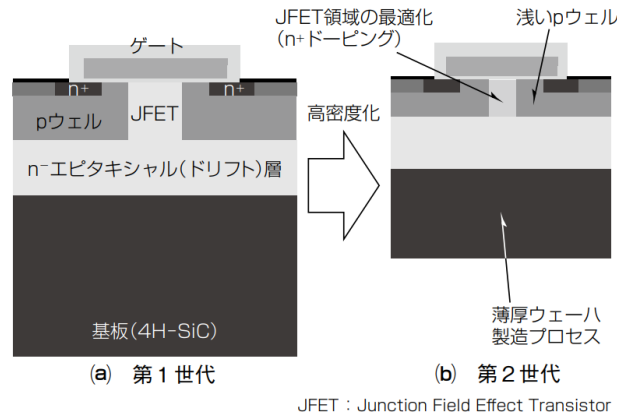
1.1 産業用フルSiCパワーモジュールの特長

フル SiC パワーモジュールは最新の第 2 世代 SiC-MOSFET チップを搭載し、Si デバイスでは実現困難な低損失特性を有するパワーモジュールです。機器の効率化・高密度化、周辺部材の簡素化による小型化・軽量化などシステム最適化に貢献します。

主な特長 (チップ)

(1) 低損失特性と高キャリア周波数駆動により、機器の効率化、小型・軽量化に貢献

MOSFET チップのセル高密度化と高濃度ドーピングにより低オン抵抗特性を有します。また、構造の最適化によりさらなる高速スイッチングを可能とし、低スイッチング損失を実現しました。Si 製品では実現困難なレベルの低損失特性を生かし、機器の効率化や小型・軽量化に貢献します。



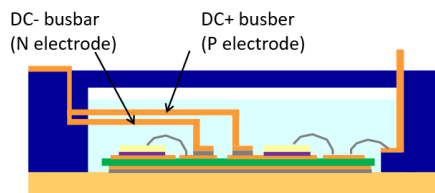
(2) 高ゲートしきい値電圧と低損失特性の両立

ゲートしきい値電圧を高くすると誤動作耐量は向上しますが、ターンオンスイッチング損失が増加します。第 2 世代 SiC パワーモジュールでは、チップ構造の最適化により、使用ゲート電圧範囲での誤動作耐量と低損失特性の両立を実現しました。

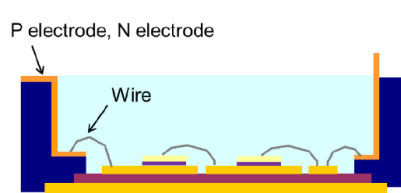
NXタイプの特長

(1) パッケージインダクタンスを低減し、さらなる低損失を実現

従来の Si-IGBT に採用されている NX タイプのパッケージでは内部 $Ls \approx 17nH$ でしたが、チップ内部最適配置および内部ラミネート構造を採用する事で内部 $Ls \approx 9nH$ を実現しています。内部インダクタンスを低 Ls にすることでサージ電圧を抑制し、更なる低損失動作が可能になり、装置の効率化に貢献できます。



パッケージ内部構造 (内部 $Ls \approx 9nH$)



従来パッケージ内部構造 (内部 $Ls \approx 17nH$)

(2) 製品ラインナップ

NXタイプ

形名	定格電流	定格電圧	結線
FMF600DXE-24BN	600A	1200V	2in1
FMF600DXE-34BN	600A	1700V	2in1



パッケージ外観 (NX-type)

1.2 構造

フル SiC パワーモジュール NX タイプのパッケージ断面構造（イメージ図）を図 1-1 に示します。銅ベース板－絶縁基板間，絶縁基板－半導体チップ間をはんだで接合しゲルで封入した構造をしています。

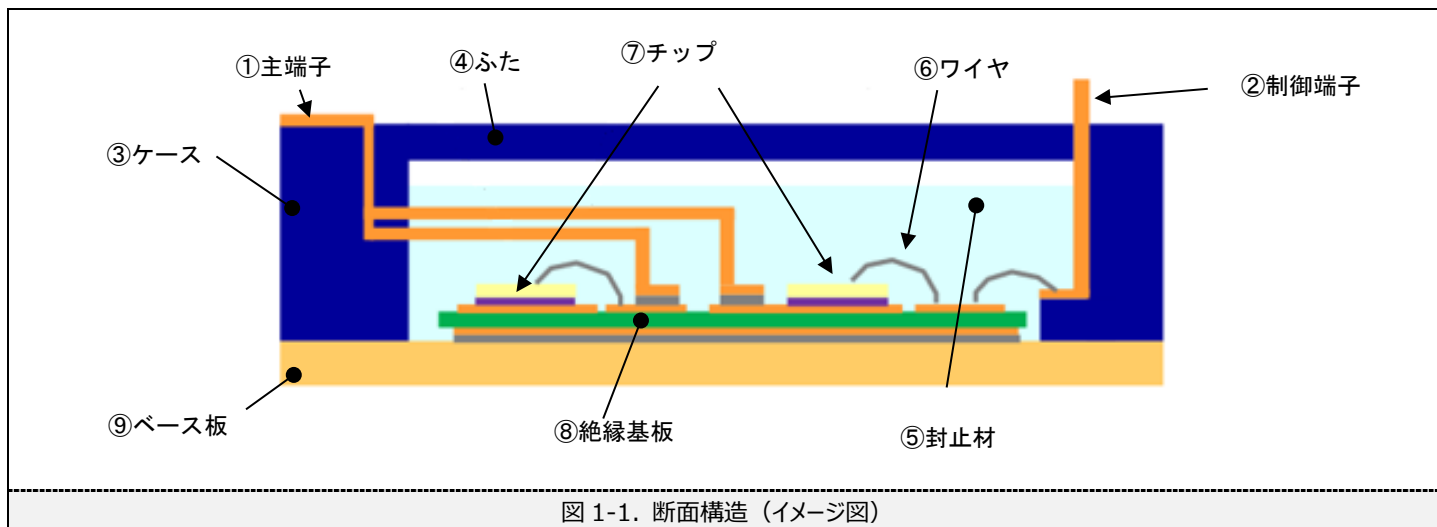


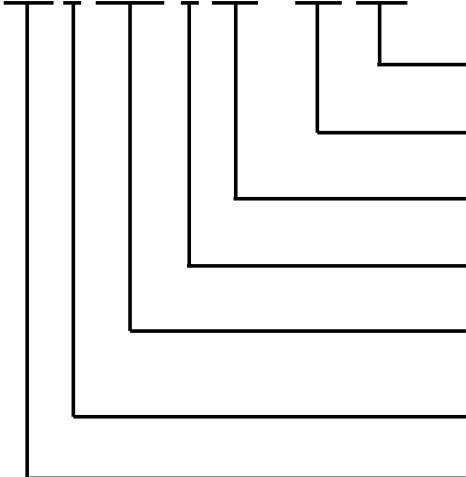
表 1-1. 構成部材

番号	部品	材質	難燃性
①	主端子	主材：銅，めっき：ニッケル	-
②	制御端子	主材：銅，めっき：ニッケル+すず	-
③	ケース	PPS	UL94V-0
④	ふた	PPS	UL94V-0
⑤	封止材	シリコンゲル	-
⑥	ワイヤ	アルミニウム	-
⑦	チップ	シリコンカーバイド	-
⑧	絶縁基板	窒化アルミニウム	-
⑨	ベース板	銅	-

1.3 形名の構成

形名例

F M F 6 0 0 D X E - 2 4 B N



チップ世代 BN：第2世代 SBD レス

耐電圧クラス（数字の50倍が定格 V_{DSX} ）
24:1200V， 34:1700V

外形

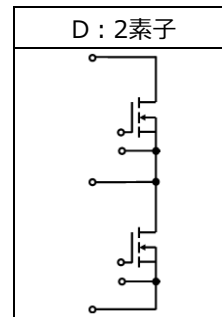
結線方式
D：2in1

電流定格
例) 600：600A 品

SiC 素子の構成
F:フル SiC

主素子の種類
FM：MOSFET

結線方式



1.4 SiC-MOSFETの特長

1.4.1 ID-VDS 特性

SiC-MOSFETのオン電圧 (ID-VDS) 特性を示します。MOSFETはユニポーラデバイスのためビルトイン電圧がなく、低オン電圧の時点から電流が流れます。SiC-MOSFETは低電流領域においては、同定格電流品のSi-IGBTと比較して大幅にオン電圧が低くなり、DC損失の減少による損失低減効果が期待できます。SiC-MOSFETの温度特性は、25℃付近に極小値があり温度変化にともないオン電圧は増加します。

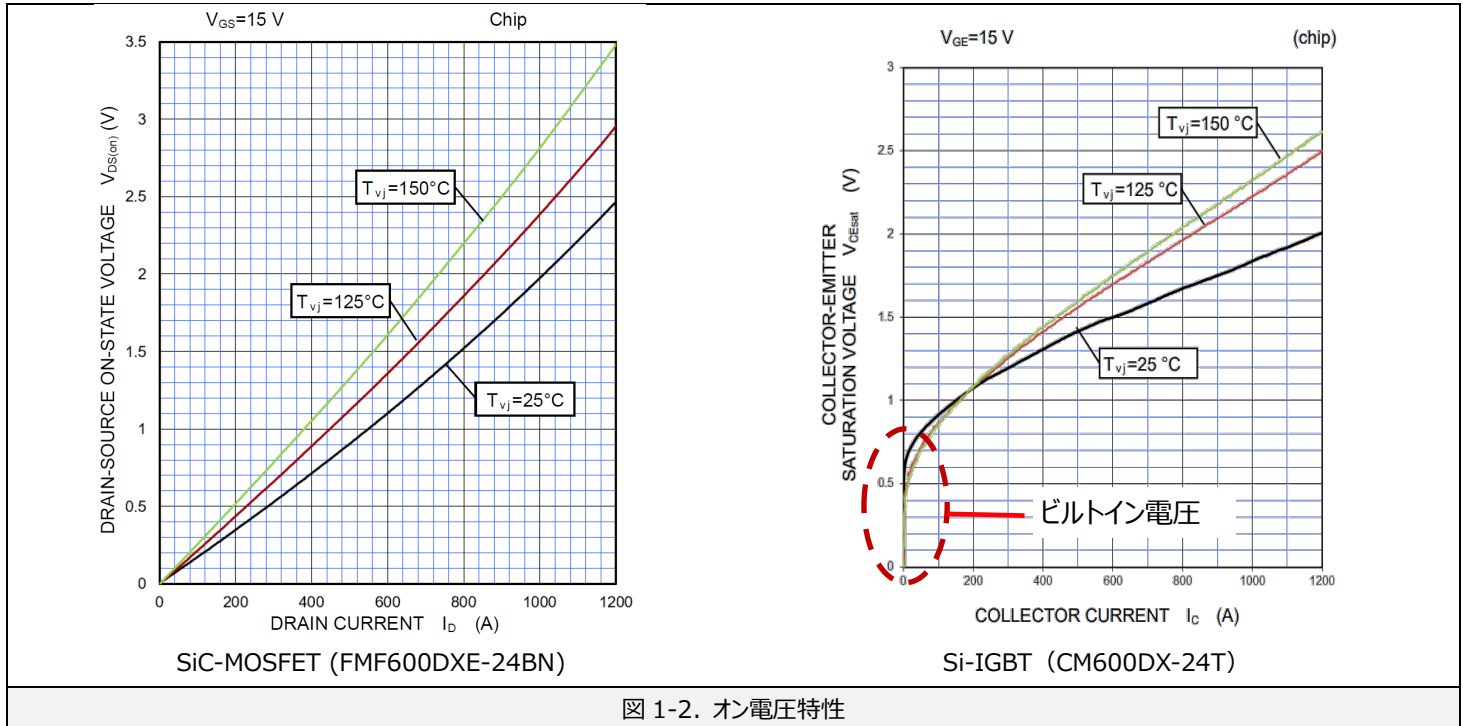


図 1-2. オン電圧特性

1.4.2 IS-VSD 特性

NXタイプのフルSiCパワーモジュールではFWDとして機能させるダイオードチップは搭載していません。MOSFET部の逆導通（チャネル部導通）もしくはMOSFETチップ内部に形成されるボディダイオードがFWDとしての機能を果たします。ダイオードとして利用する場合は、可能な限り特性が良い逆導通を利用し、損失の低減を図って下さい。ただし、デッドタイム期間中にはボディダイオードに通電しますので、ダイオードのターンオフ時にはスイッチング損失（Err）が発生します。損失計算する場合には、SBD搭載品とは異なりダイオードのスイッチング損失（Err）も加味ください。

1.4.3 MOSFET 部逆導通（チャネル部導通）

MOSFET にゲート正バイアスを印加すると、チャネル部を介してソースからドレイン方向に導通が可能です。本項で説明する MOSFET 逆導通は、MOSFET の寄生ダイオード（ボディダイオード）通電とは異なります。MOS チャネル逆導通時の電流と電圧は、MOSFET 順方向通電時と同様に比例関係になります。ボディダイオードを利用するよりもソース・ドレイン間電圧は小さくなるため、逆導通時にゲートに正バイアスを印加し MOS チャネルを導通させることで、導通損失を低減することができます。

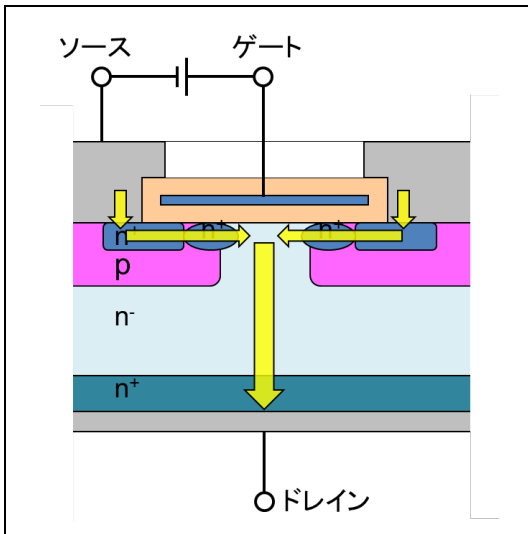


図 1-3. MOSFET 断面概略図

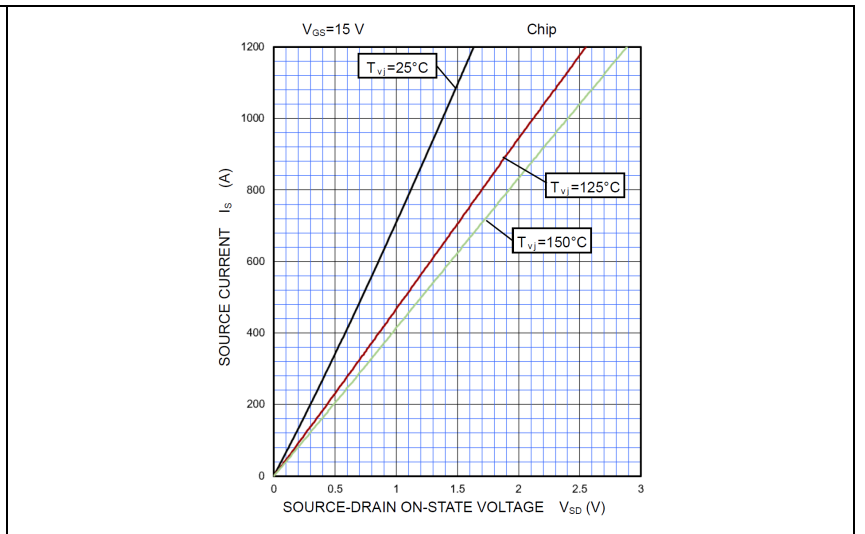


図 1-4. ソース・ドレイン間電圧特性 (FMF600DXE-24BN)

MOSFET部逆導通（ボディダイオード）

MOSFETは素子の構造上ソース・ドレイン方向に pn 接合が形成され、これをボディダイオードといいます。pn 接合のビルトインポテンシャル以上の電圧が印加されるとソース・ドレイン方向に通電が可能となります。ただし、ボディダイオードに通電し続けると SiC の結晶欠陥が拡張し、通電時のオン電圧が増加する可能性がある事が確認されていますが、破壊するものではありません。

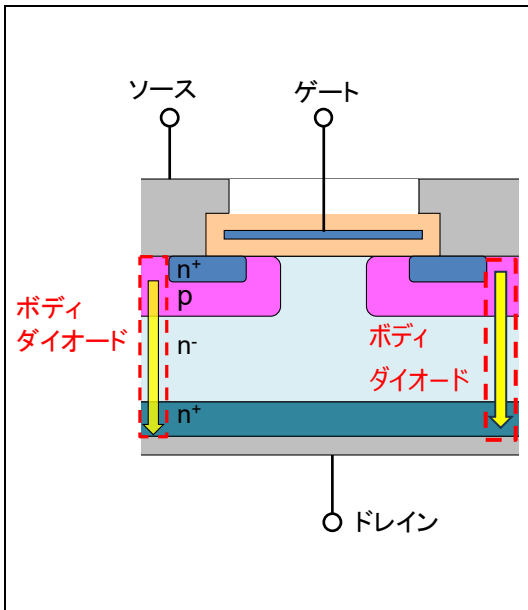


図 1-5. MOSFET 断面概略図

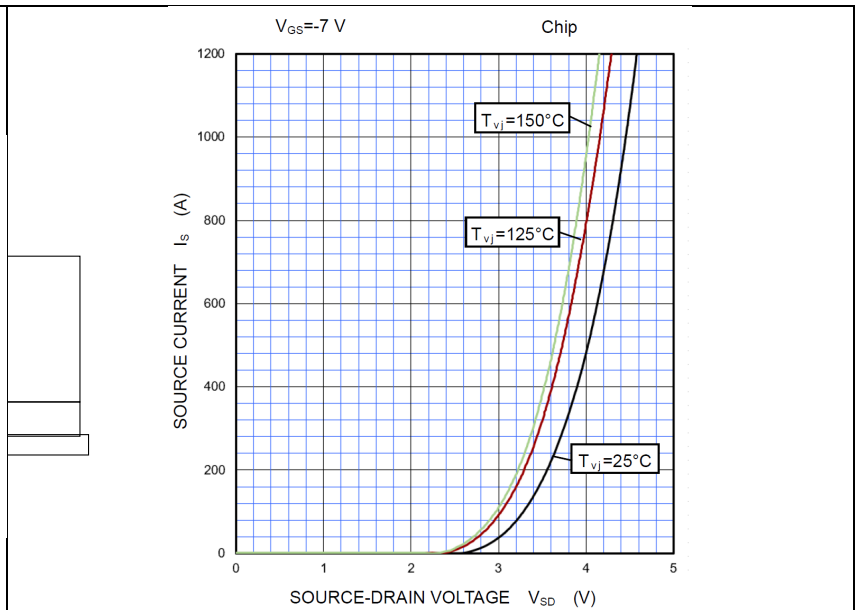


図 1-6. ソース・ドレイン間電圧特性 (FMF600DXE-24BN)

1.4.4 スwitching特性

ボディダイオードが通電状態から非通電状態に変化するときの電流・電圧挙動を示します。MOSFET内に形成されるボディダイオードは、ダイオードのターンオフ後も電荷が再結合するまでの間、電流が流れ続け（逆回復電流）、0Aになるまで一定の時間がかかります。損失を算出する際は、ダイオードのリカバリ損失Errを加味ください。

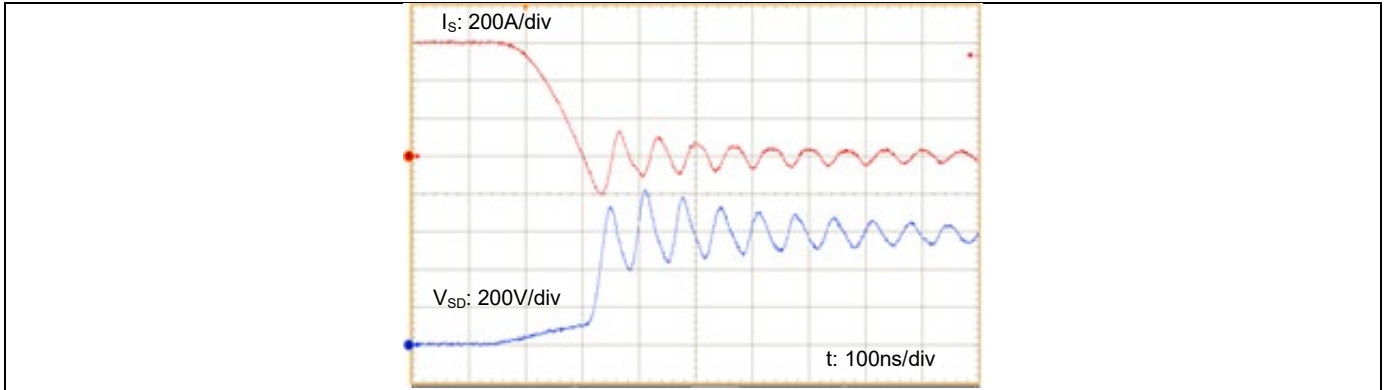


図 1-7. ダイオードターンオフ（リカバリ）波形

FMF600DXE-24BN $T_{vj}=25^{\circ}\text{C}$, $V_{GS}=+15\text{V}/-7\text{V}$, $R_{G(on)}=1.6\Omega$, $R_{G(off)}=1.0\Omega$, $V_{DD}=600\text{V}$, $I_D=600\text{A}$

ゲート・ソース間しきい値電圧

SiC-MOSFET のゲート・ソース間閾値電圧 ($V_{GS(th)}$) は Si-IGBT 製品より低く、ノイズによる誤点弧が起こらないようにゲート負バイアス、制御回路配線等に注意して設計する必要があります。また、ゲート・ソース間閾値電圧は高温になるにつれ減少する傾向があるため、高温時の動作も含めて動作時に異常がないかをご確認されることを推奨します。

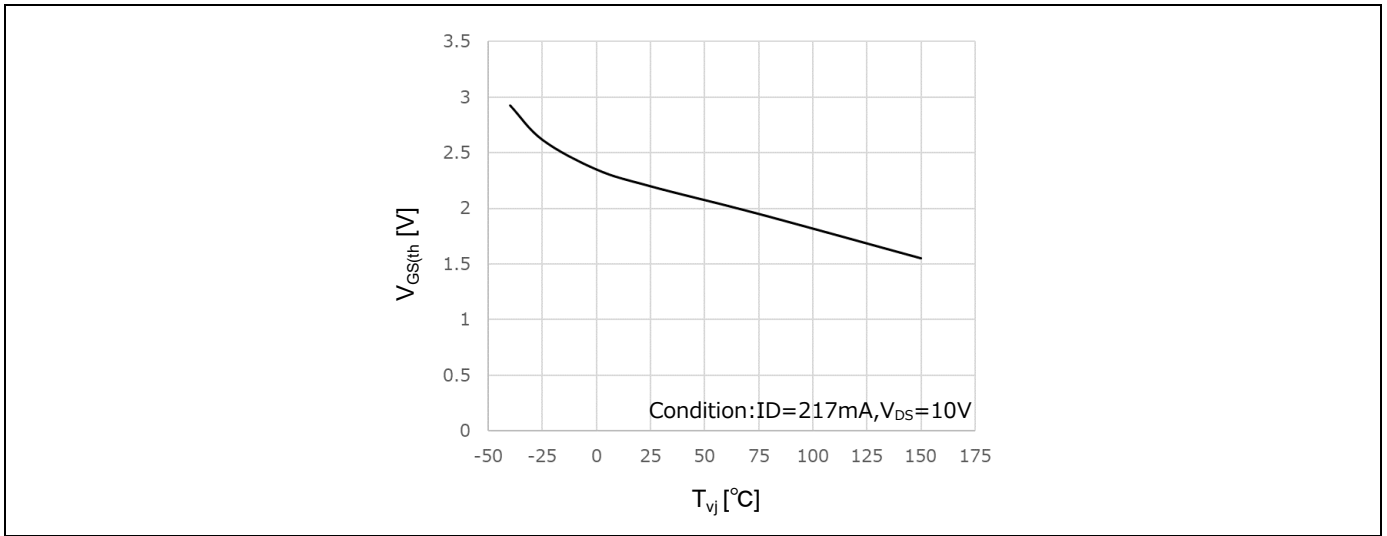
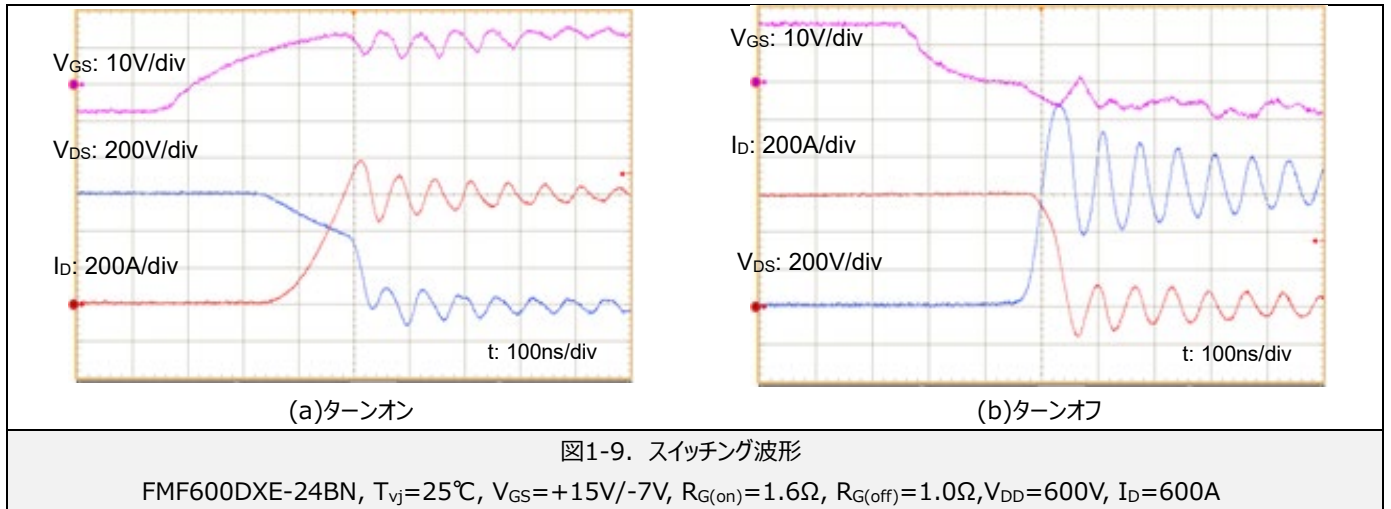


図 1-8. ゲート・ソース間しきい値電圧の温度特性 (FMF600DXE-24BN)

スイッチング特性

フルSiCパワーモジュールのスイッチング波形を示します。SiC-MOSFETはターンオフ時の残留電荷によるテイル電流がないため、ターンオフ損失が小さくなります。



1.5 推奨動作範囲

フル SiC パワーモジュール NX タイプの動作推奨範囲は以下になります。その他詳細は各データシートをご参照ください。

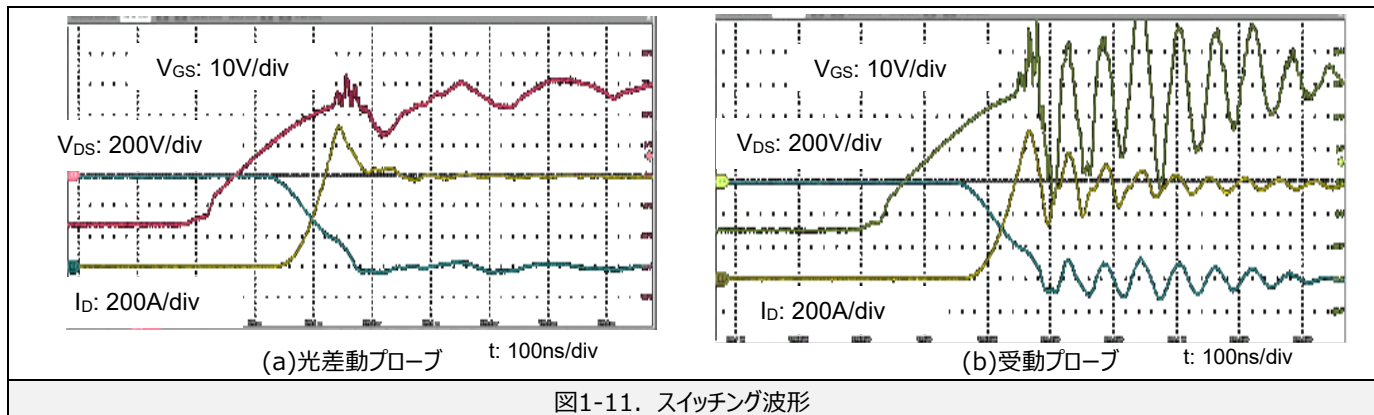
	V_{DD}	$V_{GS(+)}$	$V_{GS(-)}$
FMF600DXE-24BN	~850V	13.5~16.5V	-8.5~-5.5V
FMF600DXE-34BN	~1200V	13.5~16.5V	-8.5~-5.5V

1.6 短絡動作

フル SiC パワーモジュール NX タイプでは、短絡動作を保証しておりません。短絡耐量はありませんので、ご注意ください。

1.7 測定上の注意

SiC-MOSFET は、スイッチングスピードが速いため測定においてノイズを拾う可能性が高くなります。例えば、プローブのグランドリードが長い場合など、その L 分やプローブが持っている寄生容量などによりノイズが重畳して見える場合があります。下の波形は、ゲート電圧モニタに光差動プローブと受動プローブを使って測定した波形例になります。その他の D.U.T やオシロスコープ等は変えておりません。測定機器等により、下の様に見える波形が異なる事があるために注意が必要です。実際のデバイスの挙動なのか、測定機器による影響なのか切り分けが必要になります。

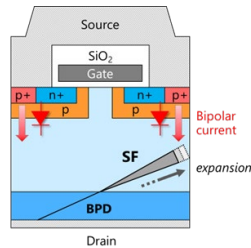


1.8 特性変動

■ SiC-MOSFET では、ボディダイオードへの通電により、ある確率において特性変動することが広く報告されています。

これはボディダイオードへの継続的な通電により注入されたホールの再結合エネルギーと、SiC 結晶中に不可避免的に内在する不連続性（いわゆる結晶欠陥）との相互作用により不連続性が拡張し、導通路路を阻害することにより特性変動（ $V_{DS(on)}$ 増加など）を引き起こすものです。

フル SiC パワーモジュール NX タイプでは、この相互作用および拡張を抑制するためのチッププロセスを取り入れる事により、動作中においてその発生率を無視できるレベルまで引き下げる事に成功しました。



イメージ図

■ 一般的にゲート酸化膜寿命は、印加ゲート電圧に対する経時的な絶縁破壊（Time Dependent Dielectric Breakdown:TDDB）に依存します。これに加え、ゲート信号の ON, OFF を繰り返す（スイッチング動作）ことにより $V_{GS(th)}$ と $V_{DS(on)}$ が増加する現象も認められています。

三菱フル SiC パワーモジュールでは、ゲート酸化膜の品質を向上することにより産業機器としての期待寿命を保ち、かつその寿命において特性変動を抑えることに成功しました。

20年稼働（※1日12時間稼働）想定でも、その変動は製品の規格内におさまります。

負バイアスはスイッチング時の誤動作を防ぐために必要ですが、その電圧値に注意してください。

推奨動作範囲を超える深い負バイアスは、素子特性（ $V_{GS(th)}$ ）の顕著な変動を引き起こす可能性があります。なお、推奨範囲内での使用であれば、特性変動量は無視できるレベルであり問題ありません。

2章 用語説明

2.1 一般

記号	項目	説明
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor	金属酸化膜半導体電界効果トランジスタ
SBD	Schottky Barrier Diode	ショットキーバリアダイオード
FWD	Free Wheeling Diode	フリーホイール（フライホイール）ダイオード
t_{dead}	デッドタイム	上下アームトランジスタのオン信号間に設ける休止（無信号）時間
PC	Photocoupler or Optocoupler	フォトカプラ

2.2 最大定格

記号	項目	定義又は説明
V_{DSX}	ドレイン・ソース間電圧	ゲート・ソース間に規定の負バイアスを印加した状態で、ドレイン・ソース間に短時間印加し得る最大電圧。
V_{GSS}	ゲート・ソース間電圧	ドレイン・ソース間を短絡した状態で、ゲート・ソース間に短時間印加し得る最大電圧。
I_D	ドレイン電流	定格接合部温度範囲内において、ドレインからソースに連続して流すことのできる最大電流。
I_{DRM}	（最大）ドレイン電流	定格接合部温度範囲内において、ドレインからソースに短時間に繰返し流すことのできる最大電流。
I_S	ソース電流	定格接合部温度範囲内において、ソースからドレインに連続して流すことのできる最大電流。
I_{SRM}	（最大）ソース電流	定格接合部温度範囲内において、ソースからドレインに短時間に繰返し流すことのできる最大電流。
P_{tot}	ドレイン損失	規定のケース温度において、MOSFET が最大限許容できる電力損失。
V_{isol}	絶縁耐電圧	主端子と制御端子を全て短絡した状態で、端子－ベース板間に印加し得る最大電圧。通常は、実効値で表される。
T_{vjmax}	最大接合温度	過負荷等の瞬時動作においてチップが許容できる最大温度。
T_{vjop}	連続動作接合温度	連続動作においてチップが許容できる温度。
T_{cmax}	最大ケース温度	ケースが許容できる最大温度。
T_{stg}	保存温度	電力を印加しない状態で保存する場合の周囲温度範囲。

2.3 温度定格

記号	項目	定義又は説明
T_a	周囲温度	自冷又は風冷で使用する場合、発熱体の影響を受けない点の空気温度。
T_c	ケース温度	素子のベース板上の定められた点の温度。
T_s	ヒートシンク温度	放熱器（ヒートシンク又は放熱フィン）上の定められた点の温度。

2.4 熱的定格・特性

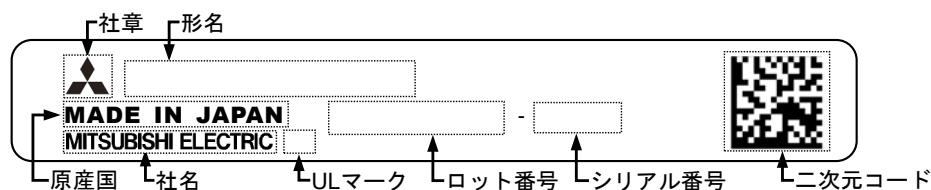
記号	項目	定義又は説明
R_{th}	熱抵抗	接合部の消費電力による熱流が平衡状態にあるとき、接合部の温度が外部の指定点よりも単位電力あたり何 K 上昇するかを表す値。
$R_{th(j-c)}$	熱抵抗	接合部（チップ）からベース板表面までの熱抵抗。
$R_{th(c-s)}$	接触熱抵抗	ベース板表面から放熱器（ヒートシンク又は放熱フィン）表面間の熱抵抗。 熱伝導性グリースを塗布したときの値。

2.5 電気的特性

記号	項目	定義又は説明
I_{DSX}	ドレイン・ソース間遮断電流	ゲート・ソース間に規定の負バイアスを印加した状態で、ドレイン・ソース間に規定の電圧を印加したとき流れるドレイン電流。
I_{GSS}	ゲート・ソース間漏れ電流	ドレイン・ソース間を短絡した状態で、ゲート・ソース間に規定の電圧を印加したとき流れるゲート電流。
$V_{GS(th)}$	ゲート・ソース間しきい値電圧	規定の条件にて、規定のドレイン電流を流すのに必要なゲート・ソース間電圧。
$V_{DS(on)}$	ドレイン・ソース間オン電圧	規定の条件にて、規定のドレイン電流を流したときのドレイン・ソース間電圧。
$r_{DS(on)}$	ドレイン・ソース間オン抵抗	規定の条件にて、既定のドレイン電流を流したときのドレイン・ソース間抵抗。
C_{iss}	入力容量	規定の条件にて、ドレイン・ソース間を交流的に短絡した状態において、ゲート・ソース端子間からみた素子内部の容量。
C_{oss}	出力容量	規定の条件にて、ゲート・ソース間を交流的に短絡した状態において、ドレイン・ソース端子間からみた素子内部の容量。
C_{rss}	帰還容量	規定の条件にて、ドレイン・ソース間を交流的に短絡した状態において、ドレイン・ゲート端子間からみた素子内部の容量。
Q_G	ゲート電荷量	MOSFET スイッチング時に、ゲートに注入が必要な電荷量。
$t_{d(on)}$	ターンオン遅延時間	ターンオン時、ゲート電圧の 0% からドレイン電流が最終値の 10% に上昇するまでの時間。
t_r	上昇時間	ターンオン時、ドレイン電流が最終値の 10% から 90% まで上昇するまでの時間。
$t_{d(off)}$	ターンオフ遅延時間	ターンオフ時、ゲート電圧が 90% に下降した時間からドレイン電流が最終値の 90% に下降するまでの時間。
t_f	下降時間	ターンオフ時、初期のドレイン電流が 90% に下降した時間から 10% に下降するまでの時間。
E_{on}	ターンオンエネルギー (ターンオン損失)	ターンオン時、ドレイン電流が最終値の 10% まで上昇した時点からドレイン・ソース間電圧がターンオン開始直前の 10% まで下降した時点までの、ドレイン電流とドレイン・ソース間電圧の積の時間積分値。
E_{off}	ターンオフエネルギー (ターンオフ損失)	ターンオフ時、ドレイン・ソース間電圧が最終値の 10% まで上昇した時点からドレイン電流がターンオフ開始直前の 2% まで下降した時点までの、ドレイン電流とドレイン・ソース間電圧の積の時間積分値。
E_{rr}	リバースリカバリエネルギー (リカバリ損失)	ダイオードターンオフ時、リカバリ電流が 0% ~ 0% までのリカバリ電流とドレイン・ソース間電圧の積の時間積分値。
V_{SD}	ソース・ドレイン間電圧	規定の条件にて、規定のソース電流を流したときのソース・ドレイン間電圧。
$R_{DD'+SS'}$	内部配線抵抗	チップからモジュール端子までの配線抵抗値。
L_s	内部インダクタンス	規定の経路でのモジュールインダクタンス。
r_g	内部ゲート抵抗	モジュール内部に搭載されたゲート抵抗値。

3章 製品ラベル記載情報

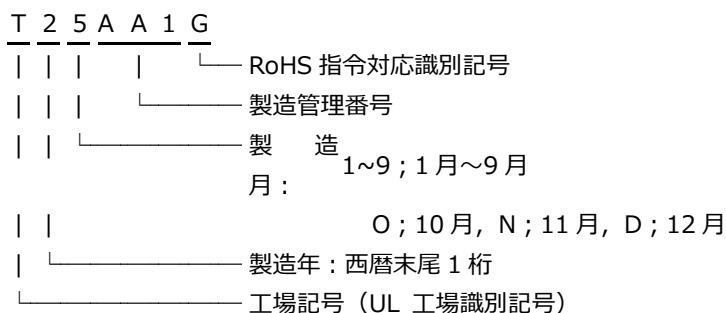
3.1 ラベル印字例



本製品は RoHS※指令(2011/65/EU,2015/863/EU)に準拠しています。

※Restriction of the use of certain Hazardous Substances in electrical and electronic equipment

3.2 ロット番号構成



3.3 二次元コード仕様

仕様

項目	仕様
コード種別	Data Matrix (ECC200)
データ種別	英数字
誤り訂正能力	20 ~ 35 %
シンボルサイズ	6.0 mm × 6.0 mm
コードサイズ	24 セル × 24 セル
セルサイズ	0.25 mm
データ容量	39 桁

データ例 1

項目	文字数
形名	1-20
スペース	21-22
ロット番号	23-30
スペース	31-35
シリアル	36-38
スペース	39
合計	39

データ例 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
F	M	F	6	0	0	D	X	E	-	2	4	B	N	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	T	2	5	A	A	1	G	SP	SP	SP	SP	SP	SP	0	0	1	SP

"SP"は、スペース (空白=ASCII コード番号 32 相当) を表します。

4章 制御回路設計

ゲート駆動回路設計のキーポイントはゲート抵抗、ゲート電圧及び配線です。ゲート回路の基本形を示します。

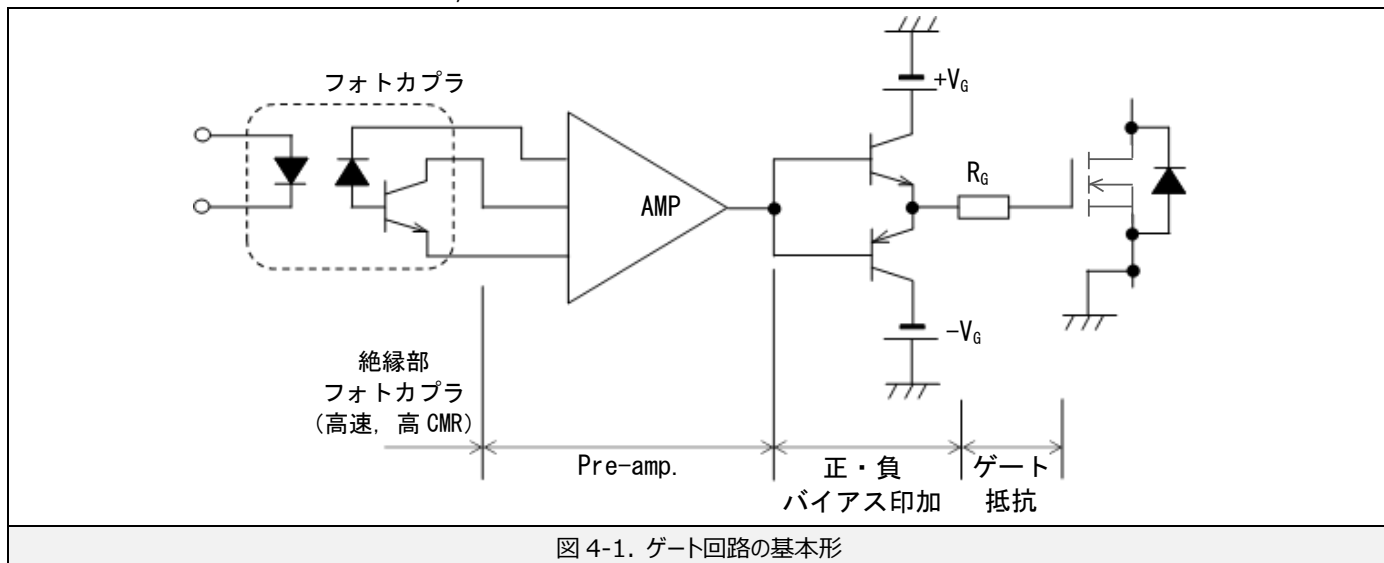


図 4-1. ゲート回路の基本形

- フォトカプラを使用することでパワーモジュールと入力信号間を電氣的に絶縁します。使用するフォトカプラは高速でノイズ耐量の大きいもの（高 CMR）を選定する必要があります。
- 正負バイアス印加するバッファ回路はゲート電流を十分流しうる設計としてください。
- ゲート駆動回路とパワーモジュール間の配線は極力短くし、ゲート配線とソース配線はツイスト配線等により主回路配線等の誘導ノイズを受けないよう配慮ください。また、他相のゲート配線と一緒に束ねないでください。
- 負荷短絡等でゲート・ソース間電圧 V_{GS} が持ち上がり、より大きな電流が流れることで破壊する場合があります。ゲート・ソース間電圧の持ち上がりを抑制することを推奨します。対策例を図 4-2 に示します。
- ゲート回路が確立する前に主回路に電圧が印加されるとパワーモジュールが破壊することがありますので、ゲート回路が確立された後に、主回路電源を投入されるようお願いいたします。
- ゲート回路が確立される前に主回路に電圧が印加される場合には、ゲート・ソース間に抵抗を挿入することを推奨いたします。（抵抗値例：数 $k\Omega$ ～数十 $k\Omega$ です）

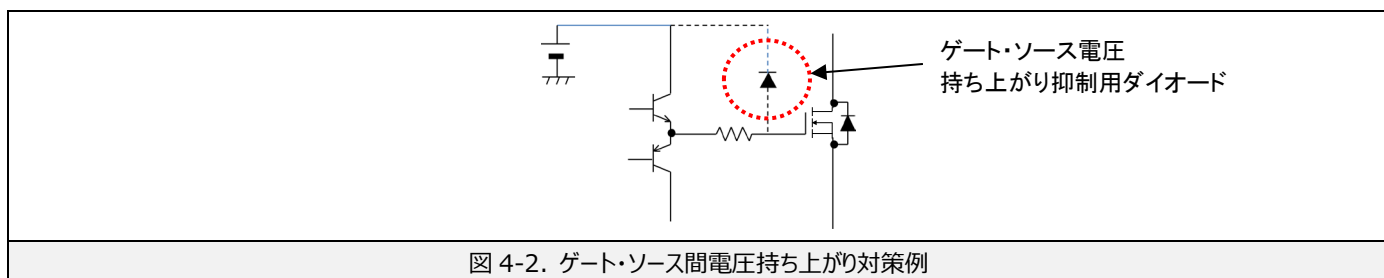


図 4-2. ゲート・ソース間電圧持ち上がり対策例

4.1 ゲート抵抗の選定

ゲート抵抗はスイッチング特性やノイズに関わる重要なパラメータの一つです。データシートには上限・下限の推奨値を記載しています。ゲート抵抗が影響を与える主な項目を以下に示します。接合温度やサージ電圧等の特性がモジュールの絶対最大定格内になるようゲート抵抗値を選定ください。最適なゲート抵抗値はシステム毎に異なるため、十分な評価・検討の上設定ください。パワーモジュールの性能を最大限発揮させるために、ゲート抵抗をターンオン側とターンオフ側で個々に設定することを推奨します。

ゲート抵抗が影響を与える主な項目

- ・スイッチング損失
- ・サージ電圧
- ・デッドタイム
- ・ノイズ（スイッチング dv/dt） 等

項目	メリット	デメリット
ゲート抵抗増加 (スイッチング速度減少)	・サージ電圧減少 ・ノイズ減少 (スイッチング dv/dt 減少)	・スイッチング損失増加 ・デッドタイム増加
ゲート抵抗減少 (スイッチング速度増加)	・スイッチング損失減少 ・デッドタイム減少	・サージ電圧増加 ・ノイズ増加 (スイッチング dv/dt 増加)

4.2 ゲート電圧の設定

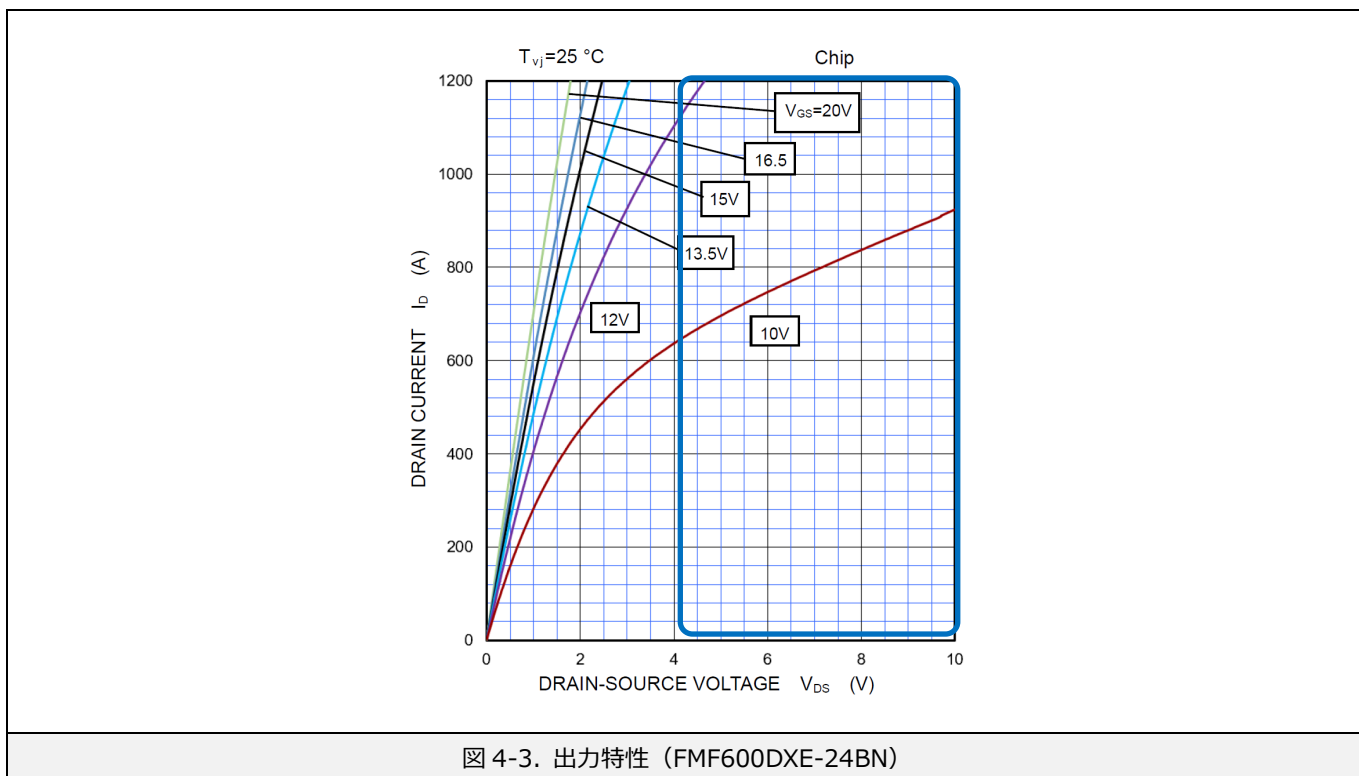
ゲート電圧はスイッチング特性に大きく影響します。NXタイプでは推奨ゲート電圧値は正バイアスが 13.5V~16.5V, 負バイアスが-5.5V~-8.5V の範囲内でご使用ください。

4.2.1 ゲート正バイアス

ゲート正バイアスは、主にターンオン特性とダイオード特性、短絡耐量に影響します。ゲート正バイアスを大きく ($V_{GS(+)}=13.5V \Rightarrow 16.5V$) した場合、ターンオン時のスイッチング速度が速くなるためターンオン損失が低減します。一方で、ダイオードサージ電圧の増加、ダイオード側のスイッチング dv/dt が増加します。

メリット	デメリット
ターンオン損失減少 $V_{DS(on)}$ 減少	ダイオードサージ電圧増加 ダイオードスイッチング dv/dt 増加

また、ゲート電圧が推奨範囲より低い場合、図4-3の枠内のように V_{DS} の増加が想定され、急激な温度上昇により短時間で熱破壊する可能性があります。



4.2.2 ゲート負バイアス

ゲート負バイアス値が大きい程 ($V_{GS(-)} = -5.5V \Rightarrow -8.5V$) , ターンオン損失・ターンオフ損失ともに小さくなりますが、サージ電圧、スイッチング dv/dt が増加します。 dv/dt はスイッチング中にドレイン・ソース間電圧の変化率が最大となるときの値です。

メリット	デメリット
ターンオン・ターンオフ損失減少	ターンオフ・ダイオードサージ電圧増加 ダイオードスイッチング・ターンオフ dv/dt 増加

4.3 ゲート駆動電源

ゲート電流、駆動電力を十分供給できるゲート駆動電源が必要です。ゲート電圧とゲート電流の関係を以下に図示します。ゲート電圧及びゲート抵抗 R_G が決定されると駆動回路のゲート電流及び必要な駆動電力は以下のように計算されます。

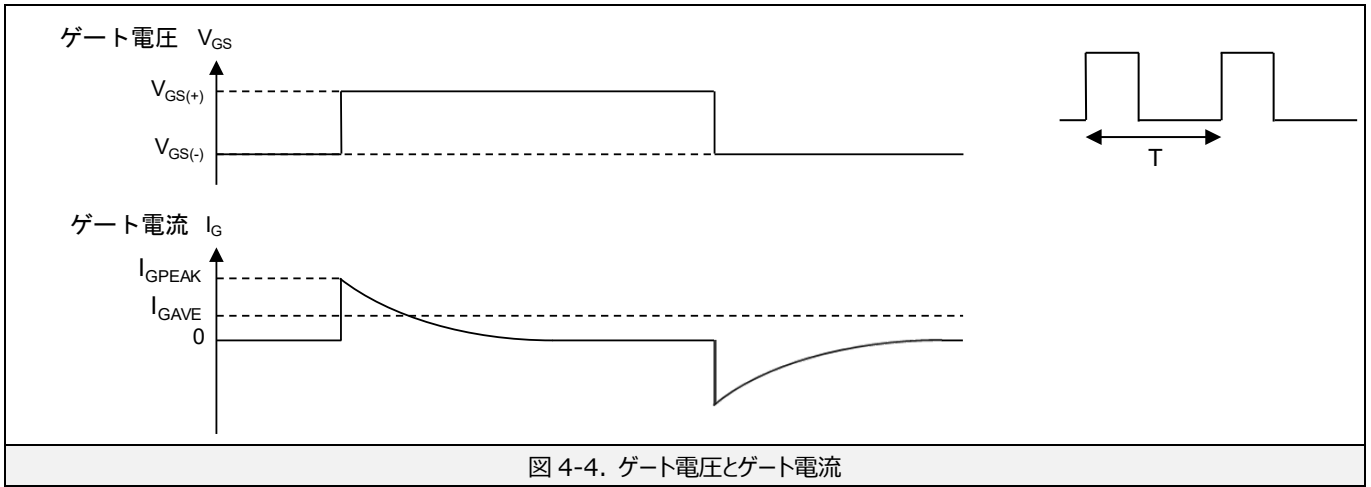


図 4-4. ゲート電圧とゲート電流

(1) 平均電流

ゲート電流の平均値 I_{Gave} は駆動回路による消費分を除くと以下の式で表されます。

$$I_{Gave} = Q_G (V_{GS(-)} \rightarrow V_{GS(+)}) \times f_c$$

Q_G : ゲート電荷量

f_c : スイッチングキャリア周波数

(2) ピーク電流

$$I_{Gpeak} = \frac{(+V_{GS}) - (-V_{GS})}{(外付けR_G) + (モジュール内部r_g)}$$

注) 実際には駆動回路の遅れや駆動配線のインダクタンス等により計算値より電流値が小さくなることがあります。

(3) 平均ドライブ電力

$$\frac{1}{T} \int V \cdot idt$$

$$= (+V_{GS}) \frac{1}{T} \int idt + (-V_{GS}) \frac{1}{T} \int idt$$

$$= (+V_{GS}) \cdot f_c \cdot Q_G + (-V_{GS}) \cdot f_c \cdot Q_G$$

$$= ((+V_{GS}) + (-V_{GS})) \cdot Q_G \cdot f_c$$

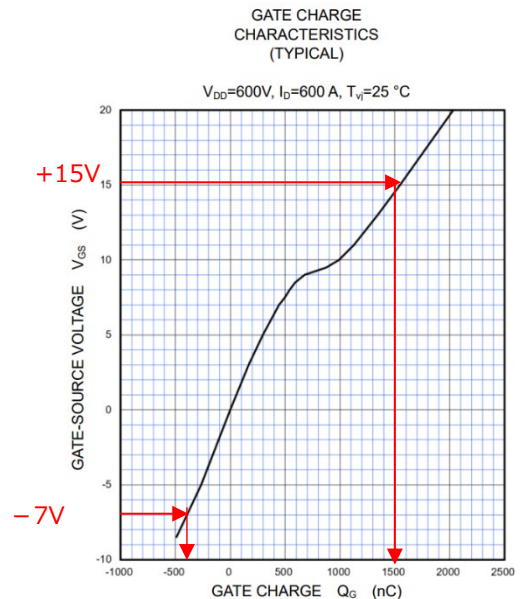
T: 周期

例: FMF600DXE-24BN を +15V/-7V f_c=50kHz 動作させた場合 (右図より)

- +QG = 1500nC
- -QG = 400nC
- ΔVGS = 22V (+15V ⇔ -7V)

$$= 22V \cdot 1900nC \cdot 50kHz = 2.09W$$

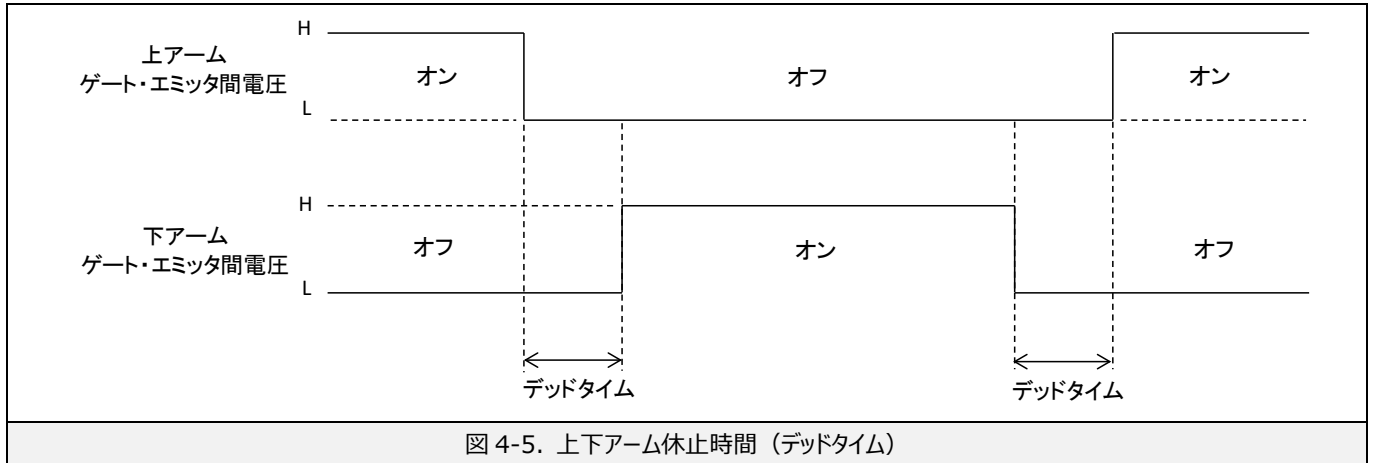
※100kHz での動作では 2 倍の容量が必要になります。



4.4 デッドタイム設定

インバータ回路などでは上下アーム短絡防止のため、駆動信号のシーケンスに上下アーム休止時間（デッドタイム）を設ける必要があります。

必要なデッドタイムは、上下アームのターンオン時、ターンオフ時のスイッチング時間に左右されます。よってゲート抵抗値により必要なデッドタイムは変わってきます。デッドタイムが短い場合、上下アームが上下短絡し短絡電流が流れ熱破壊に至る可能性がありますので注意が必要です。実機にて確認の上、デッドタイムの設定をお願いします。



4.5 ゲートドライバー

フル SiC パワーモジュールに適用可能なゲートドライバーを、社外メーカー様より提供しております。ゲートドライバーに関するお問合せは、各社に直接お問合せください。

- イサハヤ電子株式会社様
- 株式会社タムラ製作所様

5章 パワーモジュール実装

5.1 システムレイアウト

コンデンサとパワーモジュールを接続するバスバーの形状やコンデンサの配置は、スイッチング時のサージ電圧や電流バランス等に影響を与えます。コンデンサからスイッチング素子を通してコンデンサへ戻る閉回路には、スイッチング時の di/dt と配線インダクタンスにより電圧が発生し ($L \times di/dt$) , サージ電圧として素子に印加されます。閉回路の配線が長い場合サージ電圧が増加し、素子に印加される電圧が素子耐圧を越えれば素子が破壊します。

コンデンサ配置、バスバーの設計時は、以下の点に注意してください。

- ① 平滑コンデンサと素子の配置を可能な限り近づけ、かつ往復線路をラミネート状に配置。

磁界をキャンセルすることにより、インダクタンスを減少しサージ電圧を低下。

- ② 素子の端子直近に、スナバコンデンサを接続。高周波電流をバイパスさせ、サージ電圧を吸収。
- ③ 平滑コンデンサを低インピーダンスタイプにする。
- ④ 各端子に対し経路長が均等になるようバスバーを設計。均等な経路を形成することでモジュール内ブロック間の動的アンバランスを抑制。

①, ③により主回路の配線インダクタンス(L_1)を最小限にします。サージ電圧が大きい場合は、②やゲート抵抗増加、ゲート・ソース間容量の追加、等が一般的な対策になります。②については、配線インダクタンス (L_1) が大きいと C_s - L_1 間の共振により電圧の振動が大きくなる場合があります。その時は C_s の値を変更すると振動が抑えられます。

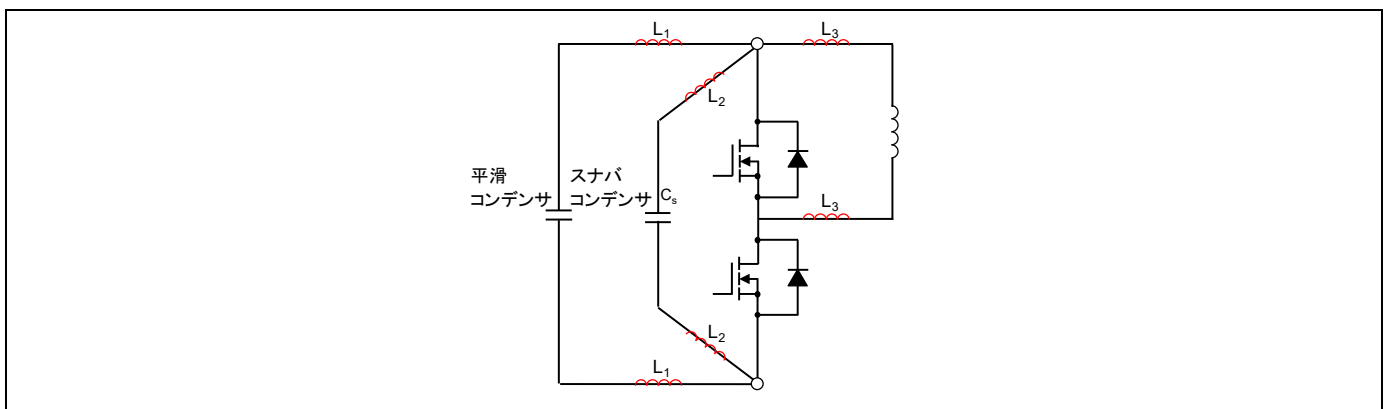


図5-1. パワーモジュールの適用回路

L_1 : 平滑コンデンサとパワーモジュールを接続する配線のインダクタンス。往復線路なので、絶縁体を挟んだ平行平板の金属板によるラミネート状の配線とし互いの磁界がキャンセルするようにする必要があります。

L_2 : スナバコンデンサのリード線のインダクタンス。このインダクタンスが大きいと、バイパスしなくなります。

L_3 : 負荷をつなぐ配線のインダクタンス。

5.2 ヒートシンクへの取付け

チップの温度上昇を抑制するために、パワーモジュールを放熱用ヒートシンクに取り付け、適切な放熱設計を行ってください。ヒートシンクによる放熱効果を最大限にするために、ヒートシンクとの接触面積をできるだけ大きくし、かつ、接触熱抵抗を最小にする必要があります。

締め付け

モジュールをヒートシンクなどに取り付ける場合、極端な片締めを行いますと、パワーモジュール内の絶縁用セラミック基板やチップに応力が加わり絶縁基板の割れや素子の破壊又は劣化を招く可能性があります。締め付け順序例を図5-2に示します。パワーモジュールとヒートシンク間に異物が混入しないように注意し、締め付けにはトルクドライバーやトルクレンチを使用し所定のトルクで締め付けてください。締め付けねじにはスプリングワッシャおよび平ワッシャをご使用ください。図5-3に示すような座金組み込みねじを推奨いたします。使用されるグリースの粘度や塗布方法によっては、仮締め後グリースが広がらず本締め時に過度な応力がかかる可能性があるため、締め付け間に十分な時間を確保してください。

実際の締め付け条件下（グリース、工具、締め付け順序、締め付け時間間隔、等）において、問題がないかをご確認ください。

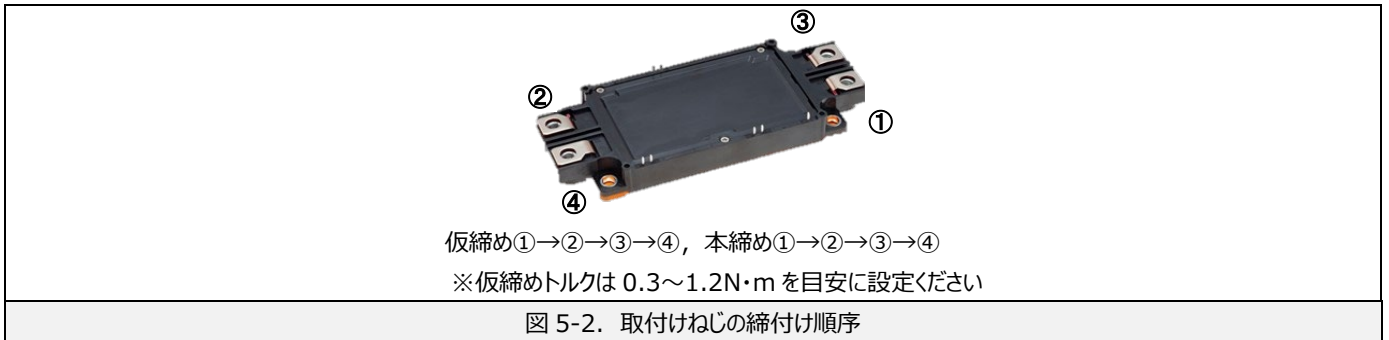


図 5-2. 取付けねじの締め付け順序

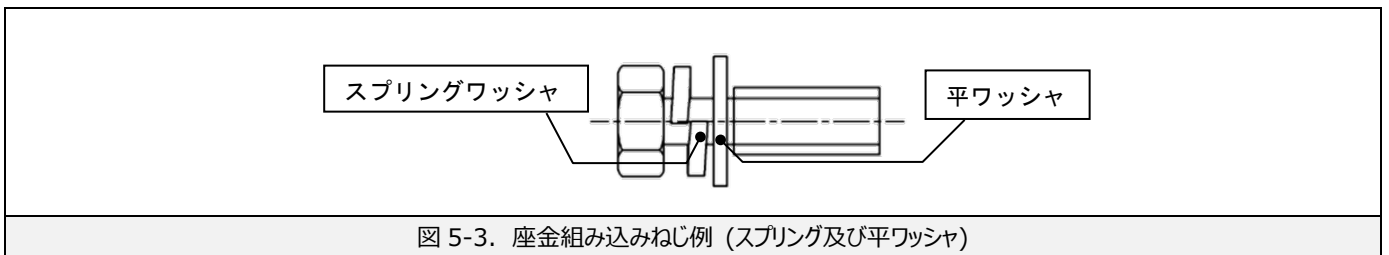


図 5-3. 座金組み込みねじ例 (スプリング及び平ワッシャ)

- 取付けねじ及びワッシャなどは、モジュール取付け穴サイズに合ったものをご使用ください。推奨ねじサイズより小さいサイズのねじ（平ワッシャ付）を使用されますとねじの中心線ずれが発生し、平ワッシャにせん断力が掛り、締め付け力がモジュール取付け穴に均等に掛らなくなる可能性が考えられます。それにより取付けねじの緩みが発生することになります。軸力を揃えとと共にボルトの頭部端面が取付け穴全面を覆うよう中心線ずれ以内に収めるような取付け方法が理想的と考えます。
- 取り付け線に鉄ねじを使用される場合、締め付けトルクはモジュール本体の樹脂ケースなどの強度で制限されます。JISなどで規定された鉄ねじの基準締め付けトルクで締め付けますとケースの破損の要因となることがありますのでご注意ください。

推奨ヒートシンク仕様

- ヒートシンクの平面度は、モジュール取付け面において、長さ100mmに対し-50 μ m~+50 μ mとしてください（図5-4）。また、表面粗さは、長さ100mmに対して10 μ m以内としてください。過度のマイナス（凹）反りは、接触熱抵抗 $R_{th(c-s)}$ が大きくなりモジュールの放熱性に影響を及ぼします。また、過度のプラス（凸）反りは、取り付けの際にモジュール内部に応力が加わり、モジュールの破壊要因となることがあります。

※使用される放熱フィンが推奨範囲を超える場合は、破壊や熱抵抗悪化など問題がない事を十分に確認の上、使用をご判断ください。

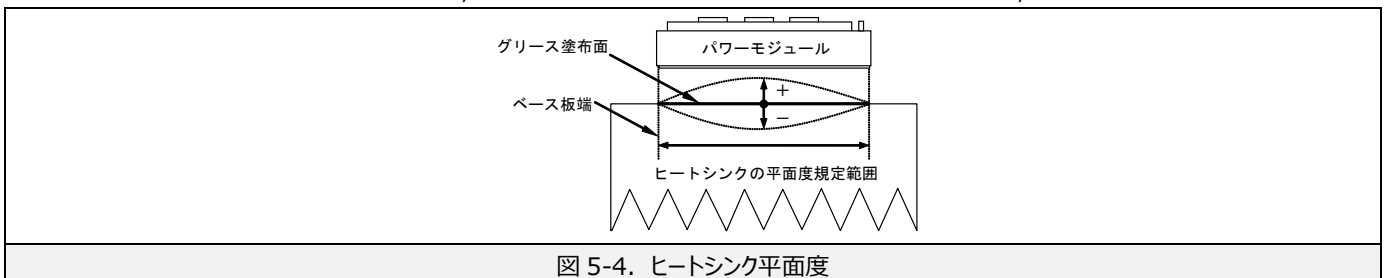


図 5-4. ヒートシンク平面度

熱伝導性グリース

パワーモジュールとヒートシンク間の空隙を埋めるために、熱伝導性グリースの使用を推奨します。

- ・厚み100 μm 程度で均一になるように塗布してください。グリースに偏りがある場合、絶縁基板への応力が増加し割れる可能性があります。
- ・ヒートシンクとの接触面にグリースを塗布しますと接触部の腐蝕防止にも役立ちます。ただし、塗布するグリースは、使用動作温度範囲内で変質せず、経年変化のないものをご使用ください。
- ・長期使用時は、グリースの特性変化やグリース抜け等による熱抵抗値の変化が懸念されます。長期使用時に対する特性（ポンピングアウト等による熱抵抗の増加含む）は、お客様のアプリケーションの実使用条件にてご確認ください。長期使用による温度上昇がある場合も、最大定格以下でご使用いただく必要があります。

5.3 熱伝導性（放熱用）グリース塗布方法

パワーモジュールに使用する熱伝導性グリースの塗布方法についてご説明します。

①準備するもの：パワーモジュール、熱伝導性グリース、スクリーン、電子質量計、手袋

サーマルコンパウンドと呼ばれているものも基本的には熱伝導性グリースと同じ機能を果たしますが、粘度の高いものを使用する場合は、ベース全面に広がるよう塗布前によく攪拌ください。

②塗布する熱伝導性グリースの量と厚みの関係は下記になります。

$$\text{熱伝導性グリースの厚み} = \frac{\text{熱伝導性グリースの量 [g]}}{\text{モジュールの取り付け面積 [cm}^2\text{]} \times \text{熱伝導性グリースの密度 [g/cm}^3\text{]}}$$

弊社推奨の熱伝導性グリース厚みは約 100 μm です。

なお、この厚みは、塗布時の初期値で、取り付け後は、ベース板やヒートシンクの平面度に依り変化します。

準備したパワーモジュールに必要な熱伝導性グリースの量を算出します。

（計算例）取り付け面積 12.2 cm \times 6.6 cm、熱伝導性グリースは信越化学工業株式会社製 G-747 の場合

$$100\mu\text{m} = \frac{\text{熱伝導性グリースの量 [g]}}{12.2 \times 6.6 [\text{cm}^2] \times 2.65 [\text{g/cm}^3]}$$

∴熱伝導性グリース量 \approx 2.13 [g] となります。

③準備したパワーモジュールの質量を計測します。

④電子質量計を使ってパワーモジュールのベース板に、②で算出した熱伝導性グリースの量を加えます。

熱伝導性グリースの加え方は特に指定しておりません。

⑤加えた熱伝導性グリースを均一になるようベース板全面に塗布します。

最終的に、目的の厚みがパワーモジュールのベース板全面でほぼ均一となる方法であれば、特に方法は問いません。

※塗布する際に異物や気泡が混入しないようご注意ください。

ローラーなどで塗布する場合は、グリースに気泡が混入しないようご注意ください。

金属へらを使用する場合は、ベース板表面に傷を付けないようご注意ください。

ヒートシンク取り付け後に、はみ出した熱伝導性グリースを全て拭取らないことで、接触面の熱伝導性グリースの経年変化を抑制する効果が上がることがあります。

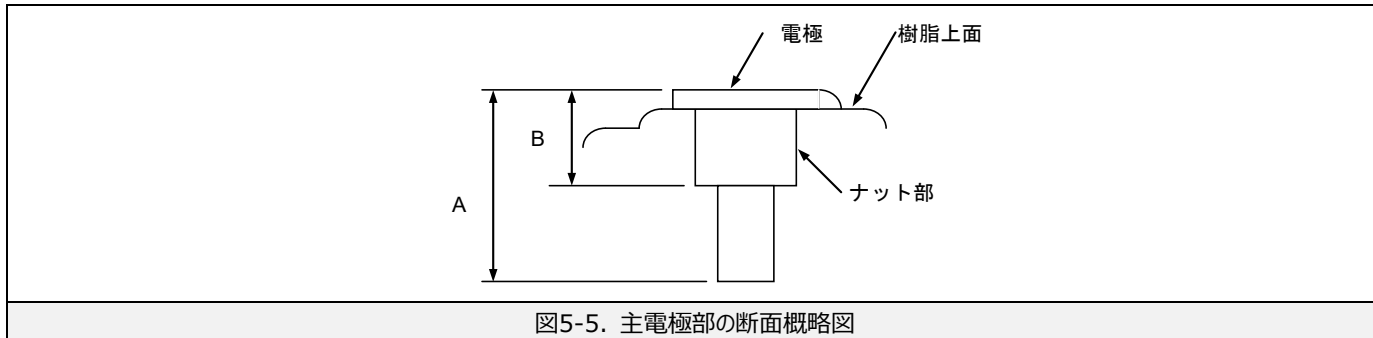
アルミニウム電導体接続用のグリースは、アルミニウム表面の接触性改善や腐食防止による電気・接触抵抗低下を主目的としたものです。長期の使用実績があるようですが、接触部の熱伝導を改善する目的のものではないため、接触熱抵抗低減効果はあまり期待できません。もし、これらを採用される場合には、さらに十分な放熱設計が必要となります。

用途、使用方法により最適な熱伝導性グリースは異なりますので、選定・使用の際には直接グリースメーカーへご照会ください。

5.4 主端子への取り付け

主端子部の締め付けを行う場合、締め付けトルクはデータシートに記載の推奨範囲内で締め付けてください。

また、必要以上に長いねじを使用されますと、端子部の樹脂の破損原因となります。下記寸法を参照の上、最適な長さのねじをご使用願います。



主端子ねじ穴深さ (単位: mm, 樹脂部公差: ±0.3 mm)

ねじとサイズ		代表パッケージ	端子名	A	B
主端子	M6	P, N  OUT	P, N, OUT	13.5	6.5

5.5 制御端子への取り付け

端子仕様

項目	仕様	
端子材質	銅 (Cu)	
めっき種類	錫 (Sn)	
	下地 ニッケル (Ni)	
めっき厚	Sn	4~10 μm
	Ni	1~6 μm

推奨はんだ付け条件

はんだ浸せきによるはんだ付け (フローはんだ)

はんだ温度	浸せき時間
260 °C±5 °C	10秒±1秒

はんだごてによるはんだ付け (手はんだ)

コテ先温度	加熱時間
360 °C±10 °C	5秒±1秒

スタンドオフ推奨使用条件

プリント基板固定にスタンドオフねじ締めを行われる際の推奨条件を以下に記載いたします。

スタンドオフ取り付け推奨ねじ

ねじ種類	ねじサイズ	締付けトルク	締付け方法
B1タッピンねじ	φ2.6x10	0.75N・m±10%	手作業 (電動ドライバー30rpm相当) ~電動ドライバー 600rpm以下
B1タッピンねじ	φ2.6x12		
PT® Screw	K25x8	0.55N・m±10%	
PT®Screw	K25x10	0.75N・m±10%	
DELTA PT®Screw	K25x8	0.55N・m±10%	
DELTA PT®Screw	K25x10	0.75N・m±10%	

※PT®・DELTA PT®は、EJOT社の登録商標です。

- *1 上記条件はプリント基板厚みt1.6使用時の締付条件です。
- *2 推奨外のねじをご検討の場合や、各種条件変更の際は別途評価確認の上、条件を設定願います。
- *3 電動ドライバー等の高速締付けツールをご使用の際は、推奨条件を満たす性能を有し、回転数・トルク共に定期校正されたものをご使用ください。
- *4 取り付け/取り外し回数は、全ねじともに1回とします。
- *5 上記条件は使用環境等により異なる可能性があります。必ず実機評価の上で条件決定されますようお願いいたします。

5.6 熱抵抗の考え方

モジュールは、 接合・ケース（ベース板）間熱抵抗 $R_{th(j-c)}$ とケース・ヒートシンク間の接触熱抵抗 $R_{th(c-s)}$ を規定しています。熱抵抗の基準点（ケース温度）は、 チップ直下です。各製品のチップレイアウトは、 データシートに記載しています。

チップレイアウト例を図5-6に示します。Tr**はMOSFETチップの中心位置を示します。2素子入の場合、 Tr1は上アーム、 Tr2は下アームを示します。図中のチップ座標（チップ直下）のベース板およびヒートシンクに熱電対を取り付け、 ベース板及びヒートシンク温度を測定します。

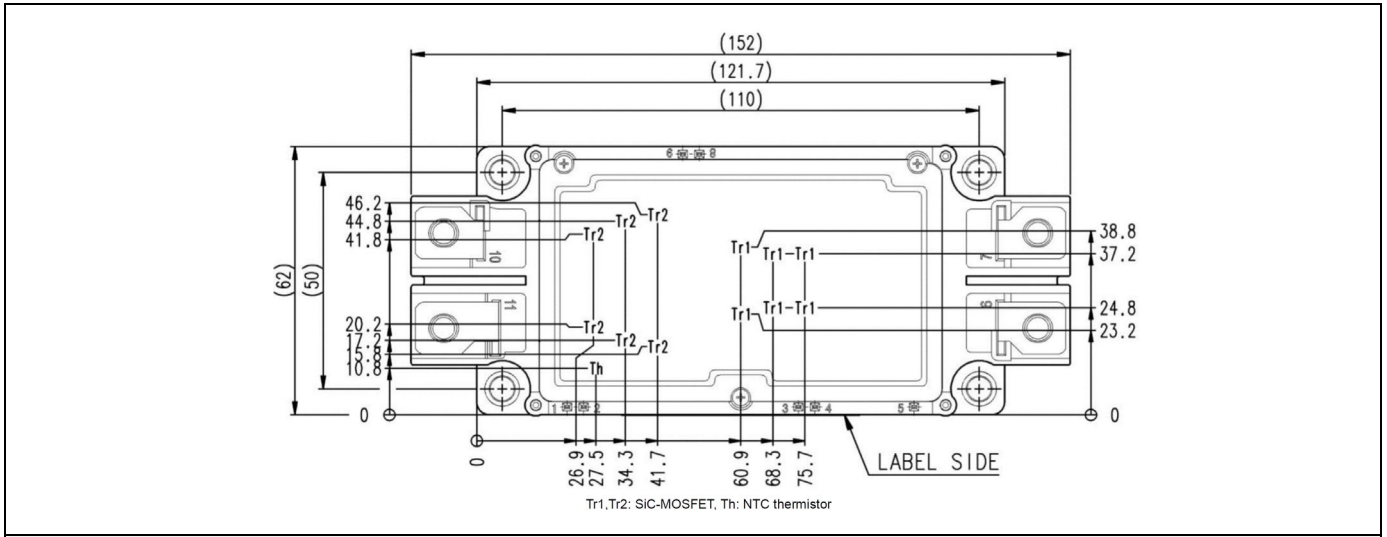


図5-6. チップレイアウト例 (FMF600DXE-24BN)

注意事項

- ・使用するヒートシンクの材質、面積、厚みによりヒートシンクの熱抵抗は変わります。一般的に同一材質のヒートシンクでは、面積が小さいほど、厚みが薄くなるほど熱抵抗が大きくなります。
- ・データシートに記載の接触熱抵抗 $R_{th(c-s)}$ は、データシート内注釈に記載された熱伝導性（放熱用）グリース塗布条件における標準値です。グリース熱伝導率は $0.9W/(m \cdot K)$ を想定した接触熱抵抗値を記載しております。実際の接触熱抵抗は、熱伝導性（放熱用）グリースの種類や塗布量、また発熱条件によって変わりますので、実際に使用される熱伝導性グリース及びヒートシンクを使用した実動作条件でご確認（実測）ください。特に、チョップ動作のように、チップの負荷に偏りがある場合などは、熱設計される上で使用される接触熱抵抗の値にご注意ください。
- ・水冷ヒートシンクについて
 - 一般産業用パワーモジュールは、自冷及び空冷ヒートシンクを用いた冷却システムでの使用を前提としております。
 - 水冷ヒートシンクを用いますと、熱の拡がりの性質上、熱抵抗 $R_{th(j-c)}$ 及び接触熱抵抗 $R_{th(c-s)}$ が大幅に変ることがあります。
 - また、結露が発生した場合、主電極間で放電が発生することが考えられます。結露による破壊原因としましては、放電により発生するサージ電圧による過電圧破壊が想定されます。水冷で使用される場合、モジュールとしての結露対策はありませんので、モジュールをご使用になるユニットとして結露対策を採っていただく必要があります。
- ・一般産業用パワーモジュールのパッケージは、気密構造ではありませんので、液体はモジュール内部に容易に滲入可能です。パッケージ素材、半導体チップ以外のものとの長期接触を想定して設計していません。したがって、モジュールをシリコンオイルなどに浸せきした場合については、特性や信頼性を保証できません。

5.7 熱電対の取り付け

チップ直下のケース温度を測定する場合の熱電対取付け例を以下に示します。

●ケース温度測定

接合温度 T_{vj} の推定に、チップ直下のケース温度を使用します。

図5-7は、ベース板の端からチップ直下まで溝加工を行った例です。チップ直下の位置を確認後、フライス盤でモジュールのベース板に幅1.5~2 mm、深さ1 mmの溝加工を行います。溝の長さは、熱電対かきめ作業時の作業性の面から、熱電対取付け穴よりも2.0 mm程度長めに加工します。加工後、熱電対の皮膜およびヒートシンクを傷付けないよう加工面のバリ取りを行います。

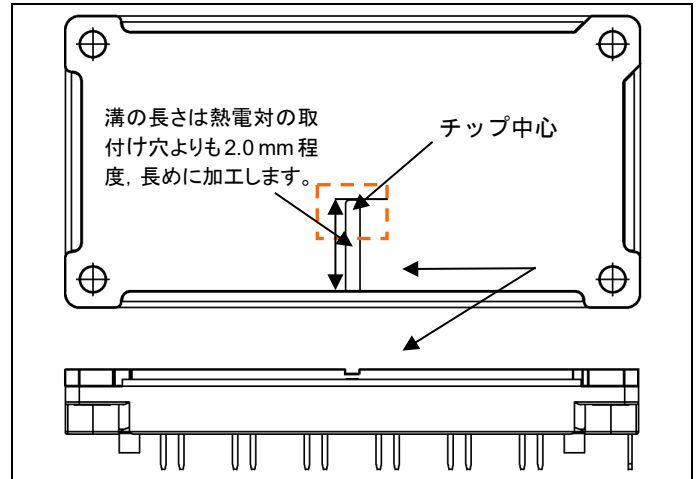


図 5-7. 溝加工例 (モジュール裏面, 側面)

チップ直下位置へボール盤などで穴径0.8φ、深さ1 mmの穴加工を行います。図5-8に穴加工後のベース板状態を示します。

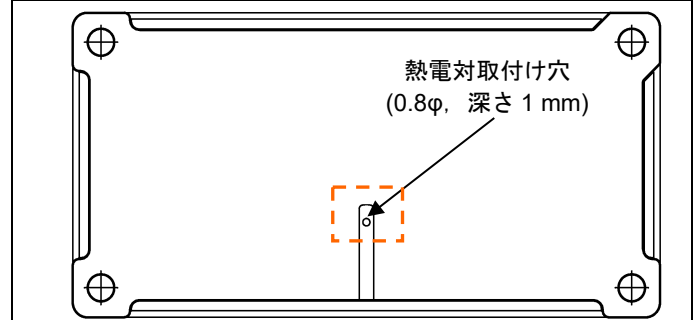


図 5-8. 穴加工実施例 (モジュール裏面)

熱電対を取付け穴に差し込みます。このとき、熱電対の先端合金部がベース板にきちんと接触するように押さえます。その状態で取付け穴の両端をセンターポンチでかきめます。(図5-9参照) また、先端合金部が1 mm以上ある場合は、1 mm程度にカットします。かきめ完了後に熱電対を溝に沿ってはわせ、熱電対が溝からはみ出さないようにします。

以上で熱電対の取付けは完了ですが、溝にはわせた熱電対が溝からはみ出し、ヒートシンクに取付け時のかみこみによる、切断がないよう充填剤を使用します。

グリス塗布後、モジュールの取付け方法に基づき、ヒートシンクに取付けます。取付け後に熱電対を温度計測器 (マルチメータ, ロガーなど) に接続し、測定器の表示がふらつかないか確認します。熱電対がきちんと取付けられている場合は測定器の表示が安定します。

逆に測定器の温度表示がふらつく場合は、先端合金部とベース板がきちんと接触していないか熱電対の断線の可能性がありますので、取付け状況の再確認が必要です。

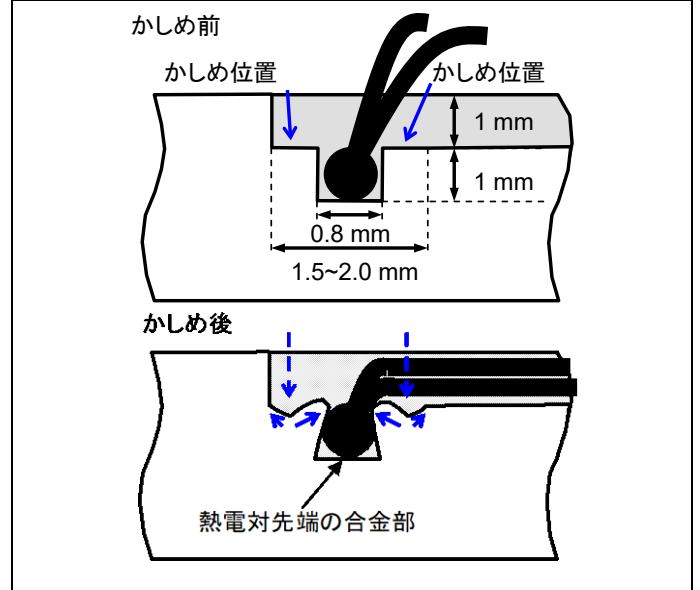


図 5-9. 熱電対かきめ時の実施例

●ヒートシンク温度測定

<Step1>

図5-10に示すように、ヒートシンクに溝を掘ります。

(溝の深さは1mm、幅は1mmを目安とする^{※3)})

この時、測定したいポイント(チップ直下)に熱電対先端の根元(青点線部がくるように)注意してください。

※3. 素線径0.3mm(推奨値)の熱電対を使用した場合。

<Step2>

Step1で掘った溝に熱電対を挿入し、ヒートシンクにあて、熱電対が動かないように、上から高熱伝導性の充填材にて封止してください。

熱電対をヒートシンクにかしめても問題ありません。

図5-11にヒートシンクの溝加工実施例を示します。

加工後のバリや充填材によりヒートシンクの平坦度を損なわないように注意ください。

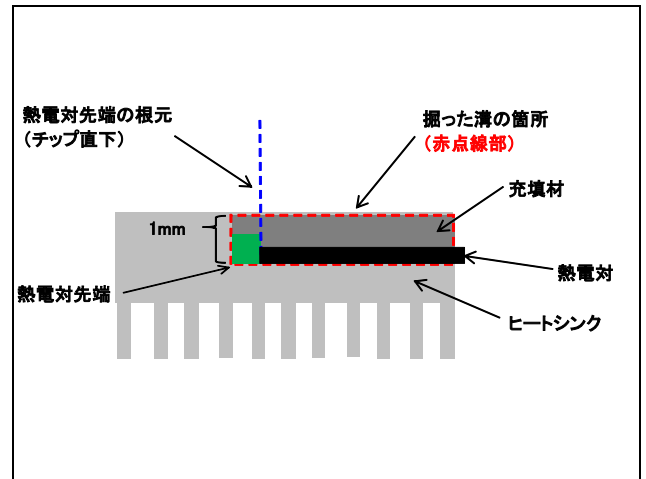


図 5-10. 熱電対取付け例 (ヒートシンク)

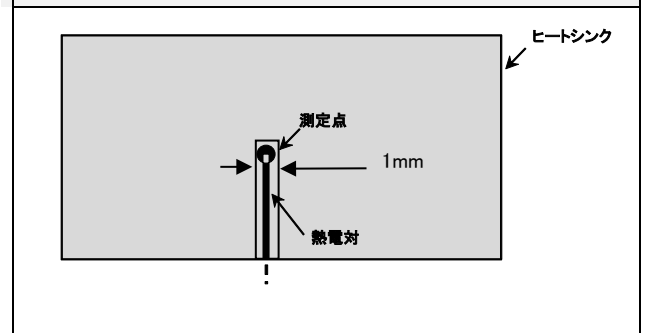


図 5-11. 溝加工実施例 (ヒートシンク)

6章 産業用フルSiCパワーモジュールの使用方法

6.1 パワーモジュールの選定

6.1.1 電圧定格

パワーモジュールの電圧定格は適用する装置の入力電源電圧あるいはモジュールの P-N 間に印加される母線電圧によって決定されます。一般に入力電源電圧，母線電圧，素子定格の目安を表 6-1 に示します。

表 6-1. 入力電源電圧と素子定格の適用例

電圧	パワーモジュールの電圧定格	
	1200V	1700V
入力電源電圧 (AC)	~480Vrms	~690Vrms
P-N 間母線電圧 (DC)	~850V	~1200V

6.1.2 電流定格

直流電流として流すことのできる電流値です。スイッチング動作（パルス）においては，2 倍の定格電流まで許容できます。また，実使用においてはジャンクション温度やケース温度，寿命（パワーサイクルやサーマルサイクル等の寿命）等を考慮して設定する必要があります。

6.2 サージ電圧抑制方法

モジュール内部あるいは外部の主回路配線インダクタンス (L) とモジュールのスイッチングスピード (di/dt) によりサージ電圧が発生します。スイッチング素子のターンオフ，ダイオードのターンオフ時に発生します。

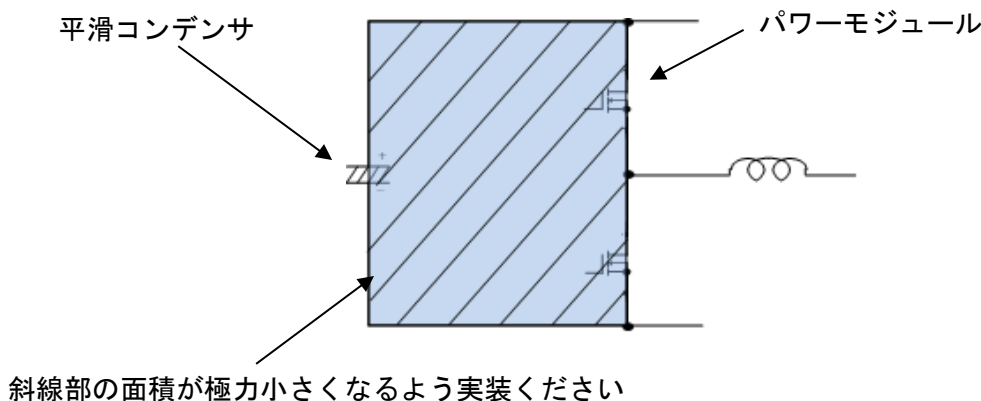
$$\text{サージ電圧} : \Delta V = di/dt \times L$$

SiCパワーモジュールは，MOSFETを使用しておりスイッチングスピードがSi品よりも速くなるため，より高いサージ電圧が発生しやすくなります。サージ電圧の抑制方法として下記の方法を推奨いたします。

- ・主回路配線インダクタンスをできる限り小さくする。
- ・スナバ回路を挿入する。
- ・スナバ回路の配線インダクタンスを小さくする。
- ・過電圧保護回路を挿入する。
- ・スイッチングスピードを遅くする。（ゲート抵抗を大きくする，ゲート・ソース間にコンデンサを挿入する）

6.2.1 主回路配線の低減

平滑コンデンサとパワーモジュールの接続経路に存在する主回路配線インダクタンス (L1) を低減するために，下記斜線部にできる閉回路の面積が極力小さくなるように実装してください。一例として2枚の直流母線用導体に絶縁板をはさんで重ね合わせた平行平板を用いる方法があります。



6.2.2 スナバ回路

スナバ回路はモジュールP,N端子の直近に接続し、スナバ回路と端子間の配線インダクタンスを出来る限り小さくしてください。スナバ回路と端子の距離が長いと効果が得られません。

スナバ回路には以下のような種類があります。各回路方式の特長を踏まえ、実機評価の上、適切な回路を選定ください。

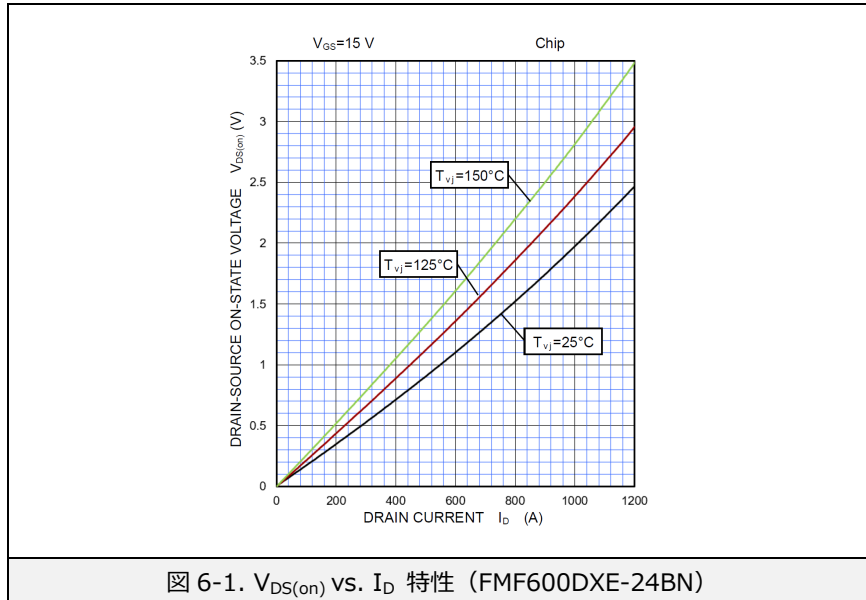
表6-2. スナバ回路例

回路方式	C スナバ	RCD スナバ (1)	RCD スナバ (2)
メリット	最も簡易的な回路。	比較的簡易な回路。	サージ抑制効果があり、スナバ損失も小さい。
デメリット	主回路インダクタンス A とスナバコンデンサの共振回路により電圧が振動する。	スナバ回路配線が長くなるためサージ抑制効果が薄い。	コストが高くなる。

6.3 並列接続

パワーモジュールを並列接続することで、システムとしてパワーモジュールの定格電流以上の出力電流を得ることができます。並列接続時の留意点について記載します。

SiC-MOSFET の $V_{DS(on)}$ vs. I_D 特性は、全電流領域で正の温度依存を持っています。正の温度依存とは、温度増加に伴い抵抗値が増加する性質です。通電によりチップ温度が上昇すると抵抗値が大きくなるため電流が流れにくくなります。並列接続時に、ある1素子への電流値が大きい場合も、チップ温度上昇により並列接続間の電流アンバランスが抑制されます。そのため、フル SiC パワーモジュールは比較的容易に並列接続することができます。



6.3.1 電流デレーティング

パワーモジュールを並列接続する際、各素子のオン電圧 $V_{DS(on)}$ にバラつきがあると $V_{DS(on)}$ が小さい素子に電流が流れやすいため電流バランスが崩れます。この時の電流値アンバランス率を電流不平衡率といいます。

例えば、2 並列時のトータル出力電流が 600A、素子 A の電流値が 330A、素子 B の電流値が 270A のときの不平衡率は、平均電流値が 300A のため

$$(330A - 300A) \div 300A \times 100 = +10\%$$

$$(270A - 300A) \div 300A \times 100 = -10\% \text{ となります。}$$

$V_{DS(on)}$ の差 ($\Delta V_{DS(on)}$) が小さいほど電流不平衡率は減少するため、 $\Delta V_{DS(on)}$ が小さくなるように組み合わせることが重要です。同一製品ロットを組み合わせることを推奨します。ただし、 $V_{DS(on)}$ をそろえれば静的な電流バランスはそろいますが、スイッチングの電流バランスには効果がありません。

並列時の電流アンバランスを考慮し最大通電電流値をデレーティングする必要があります。並列数の増加に伴い、1 素子にドレイン電流が集中しやすくなりますので、並列数に応じてデレーティング量を設定する必要があります。

n 個並列接続したときの電流デレーティング量は、不平衡率を $\pm x\%$ とすると以下の式で求めることができます。

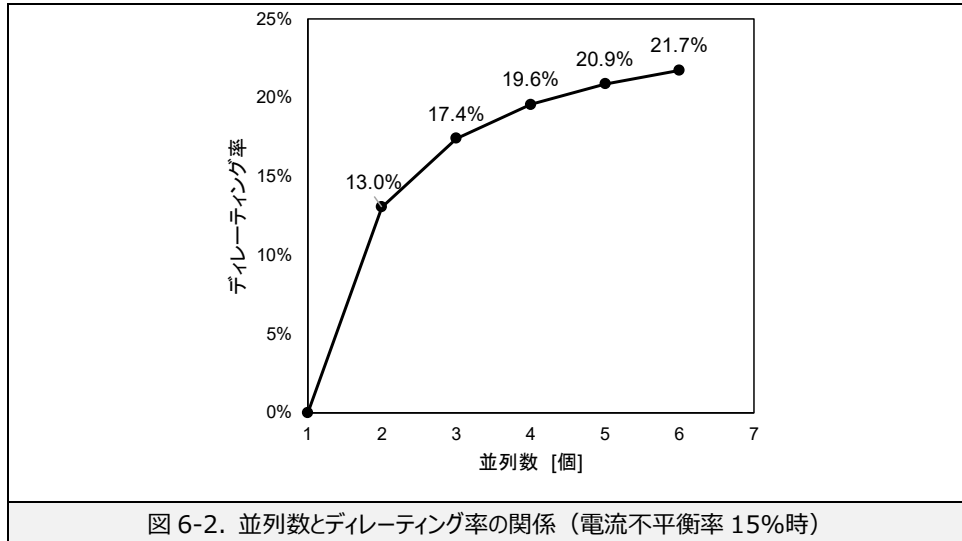
$$\left\{ 1 - \frac{(n-1) \times \frac{1 - \frac{x}{100} + 1}{1 + \frac{x}{100}}}{n} \right\} \times 100 [\%]$$

電流不平衡率 15% のときの、並列数とデレーティング率の関係性を図 8-3 に示します。

1 モジュールの最大電流値が 600A、3 並列、電流不平衡率 15% の場合、デレーティング後のトータル電流値は

$$600A \times 3 \text{ 並列} \times (1 - 0.174) = 1486.8A$$

となります。電流アンバランスにより単純な電流値 \times 並列数とならないため、実装置での電流アンバランスなどを十分にご確認の上、デレーティング率を決定してください。



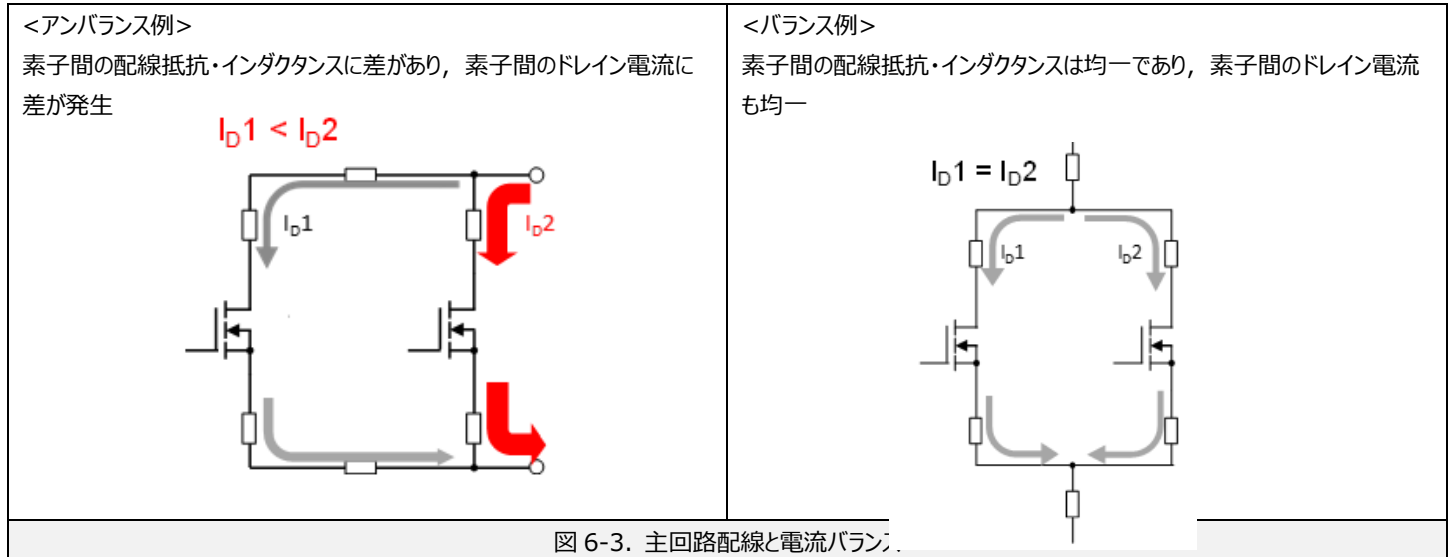
6.3.2 主回路配線

主回路配線は、静的な電流バランスと動的な電流バランスの両方に影響を与えます。並列接続時の主回路配線の留意点を以下に示します。

- 各素子の配置は対象とし、配線インダクタンス・配線抵抗を均一かつ最小限となるようご注意ください。

各素子の配線インダクタンスのアンバランスは、スイッチング時の動的な電流アンバランスを引き起こし、一部の素子への電流集中による損失増加やサージ電圧により破壊にいたる可能性があります。

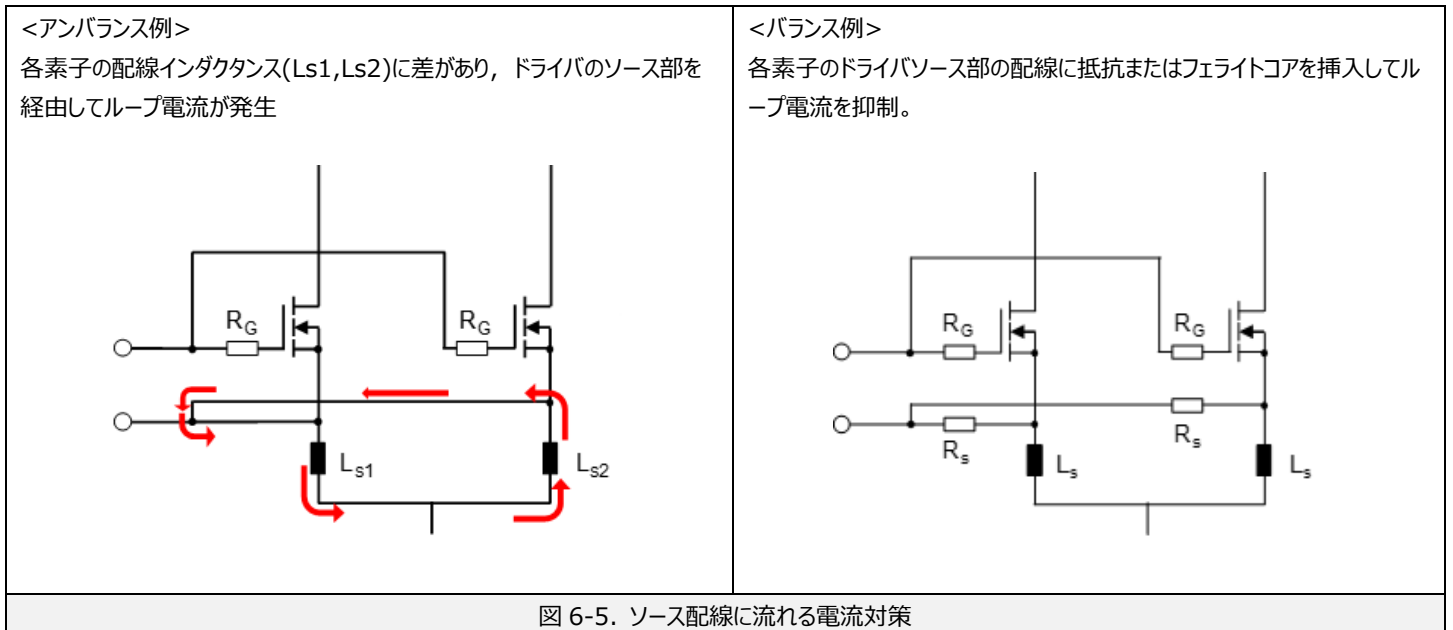
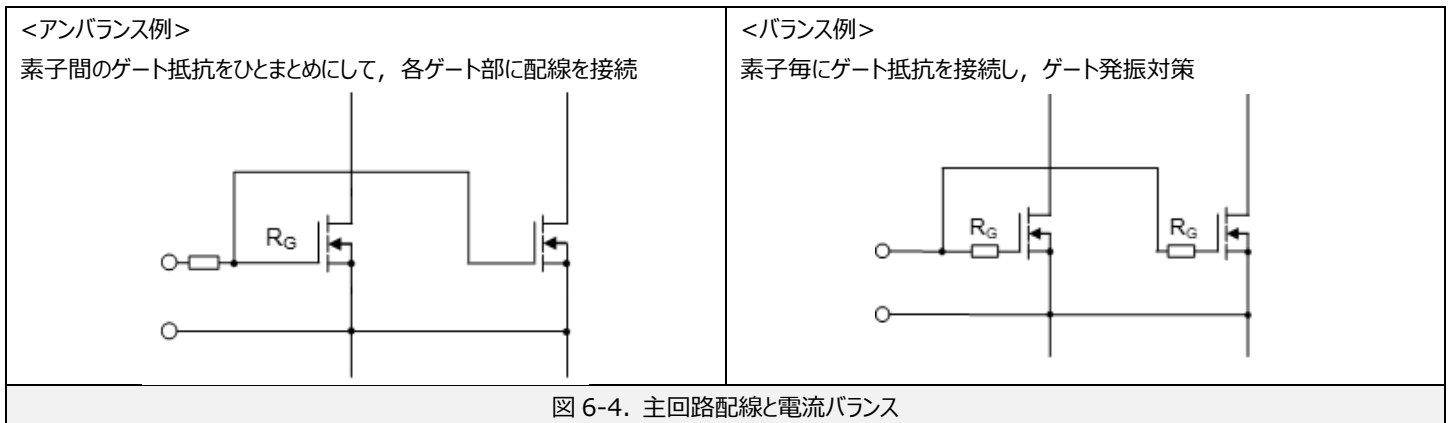
- 各素子にスナバ回路を接続し、配線インダクタンスを低減し、サージ電圧を抑制してください。



6.3.3 ゲートドライバ回路

モジュールの並列接続においてドライバ回路の留意点を以下に示します。

- 各素子に接続するゲート抵抗と配線インダクタンスを含むインピーダンスの差が大きい場合、各素子間で電流アンバランスが生じますので、ドライバ毎のインピーダンスをそろえてください。
- 配線は、短い同じ長さのツイスト線にして、インピーダンスの差が生じないようにご注意ください。
- R_G が大きくなりすぎないようにご注意ください。
- 主回路にドライバ配線が平行にならないようにご注意ください。
- ゲート抵抗は並列素子においてまとめず、各素子にゲート抵抗を接続してください。各素子にゲート抵抗を挿入しない場合はゲート発振の原因になります。(図 6-4)
- ソース主配線とドライバ配線間の経路で、配線インダクタンスの起電力により電流が流れる場合には、ソースのドライバ配線に 0.1Ω 程度の抵抗又はフェライトコアなどを挿入し、起電力による電流を抑制して並列素子のスイッチング速度に差が発生しないようにしてください。(図 8-6)



7章 損失と放熱設計

パワーモジュールの損失計算について

パワーモジュールを安全にご使用いただくために、ご使用になる条件での発生損失及び、接合温度を把握し、絶対定格以内で使用いただく必要があります。

パワー損失と接合温度

パワーモジュールをご使用いただく上で接合温度を把握することが重要です。接合温度の求め方を以下で説明します。例としてトランジスタ部の計算を示します。また、温度上昇につきましては最大定格を超えないようにするだけでなく、温度変化による接合部のパワーサイクル寿命にもご留意ください。

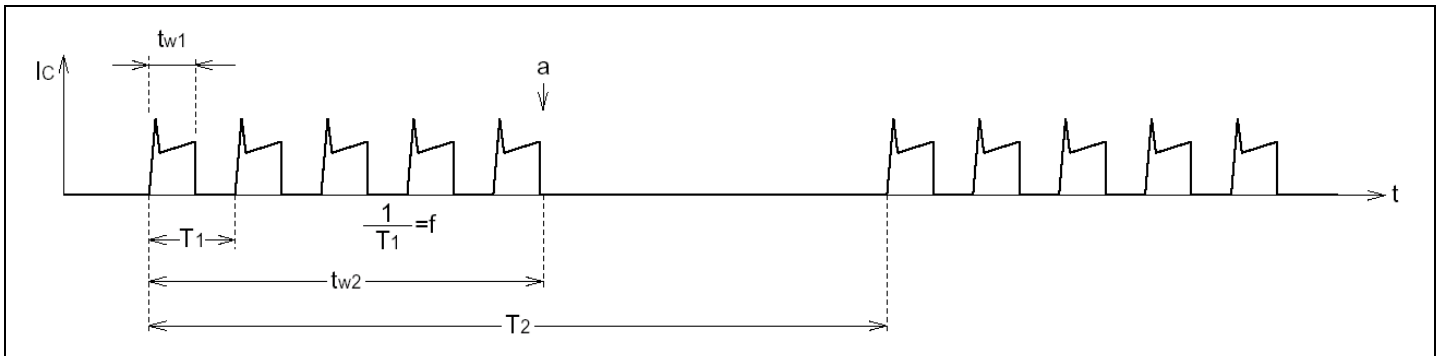


図 7-1. 接合温度の求め方 模式図

7.1 発生損失の求め方

接合温度を求めるためには、パワーモジュールの損失を知る必要があります。最初に 1 パルス当りの損失を求めます。1 パルスの損失は定常損失とスイッチング損失に分けて考えます。1 パルスの電流・電圧波形と発生損失の概略図を示します。電流と電圧の積分値が発生損失であり、図 7-2 中の $E_{(sat)}$ が定常損失、 E_{on} と E_{off} がスイッチング損失です。

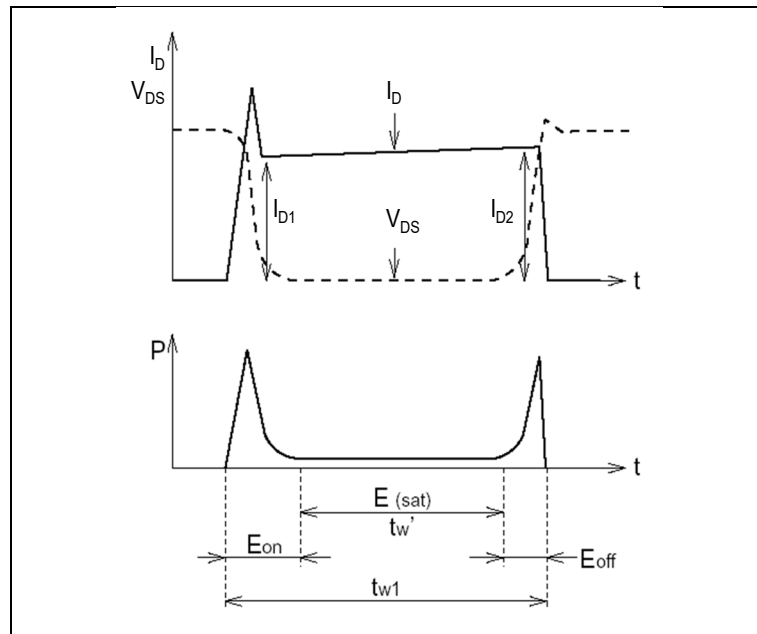


図 7-2. 定常損失 ($E_{(sat)}$) とスイッチング損失 (E_{on} , E_{off})

7.1.1 定常損失

(a)順方向通電（ドレイン・ソース方向通電）

順方向通電の場合、MOSFET チップに電流が導通します。V_{DS(on)} vs. I_D 特性のグラフを用い、エネルギーを求めます。特性グラフは T_{vj} = 150°C のデータを使用します。定常損失の計算式は以下です。

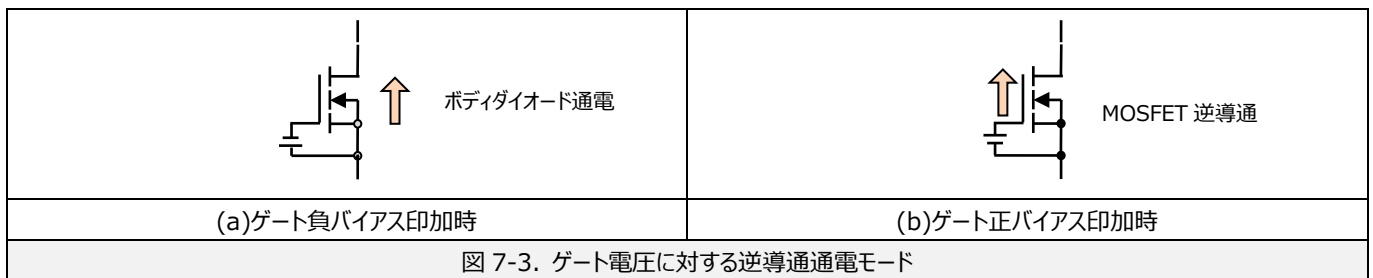
$$E_{sat} = \frac{I_{D1} \times V_{DS} + I_{D2} \times V_{DS}}{2} \times t_{wr}$$

注)上式は簡略化した式ですが、本来は $E_{sat} = \int_0^{t_{wr}} I_D(t) \cdot V_{DS(on)}(t) dt$

(b)逆導通（ソース・ドレイン方向通電）

ソースからドレイン方向に通電する場合、通電時のゲート電圧に応じて通電モードが変化します。（図 7-3）

逆導通時にゲートが負バイアスされている場合はボディダイオードに電流が流れます。一方、ゲートが正バイアスされている場合、MOSFET に電流が流れます。各通電モードにおける定常損失の計算方法を記載いたします。



ゲート負バイアス印加時（ボディダイオード通電）

前述の(a)順方向通電時と同様の方法で、I_S vs. V_{SD} 特性グラフを用いてボディダイオードの定常損失を求めることができますが、一般的な動作ではデッドタイム期間中を除きゲート正バイアスを印加し逆導通動作にて動作ください。

ゲート正バイアス印加時（MOSFET 通電）

ボディダイオードと MOSFET で分けて損失を計算する必要があります。

- ①ゲート正バイアス時の I_S vs. V_{SD} 特性から通電電流 I_S に対する V_{SD} を求めます。
- ②求めた V_{SD} に対する MOSFET, ボディダイオードの通電量 I_S をそれぞれ求めます。
- ③求めた V_{SD} と I_S を用いて MOSFET, ボディダイオードそれぞれの導通損失を前述の(a)順方向通電時と同様に計算します。

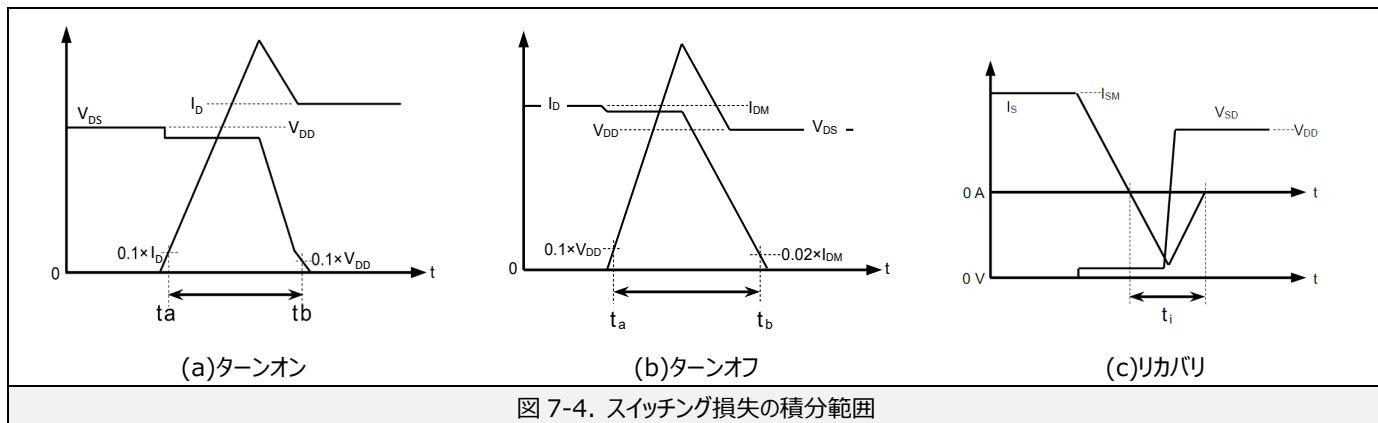
7.1.2 スイッチング損失

スイッチング損失は、実際の波形から区分求積により求めます。スイッチング損失の積分範囲を下图に示します。(ダイオード E_{rr} も同様に計算ください)

$$E_{on} \text{ or } E_{off} \text{ or } E_{rr} = \int_{t_a}^{t_b} I_D(t) \cdot V_{DS}(t) dt = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^n P_n \times (t_b - t_a)$$

n : 分割数

($t_a \sim t_b$ の区間を n 等分し、各点ごとのパワー損失を求め平均化します)



7.1.3 平均パワー損失

1 パルス当りの MOSFET の損失を E_1 とした時, $E_1 = E_{sat} + E_{on} + E_{off}$

1 パルス内の平均パワー損失は,

$$P_1 = \frac{E_1}{t_{w1}} \quad (W)$$

で表されます。図 7-4 の波形を電力に関して矩形波近似すると下図のようになります。



図 7-5. 平均パワー損失の考え方 1

t_{w2} 期間内の平均パワー損失を求めます。(下図参照)

$$P_{av} = \frac{E_1}{t_{w2}} \times N \quad (W)$$

N : t_{w2} 期間内のパルス数

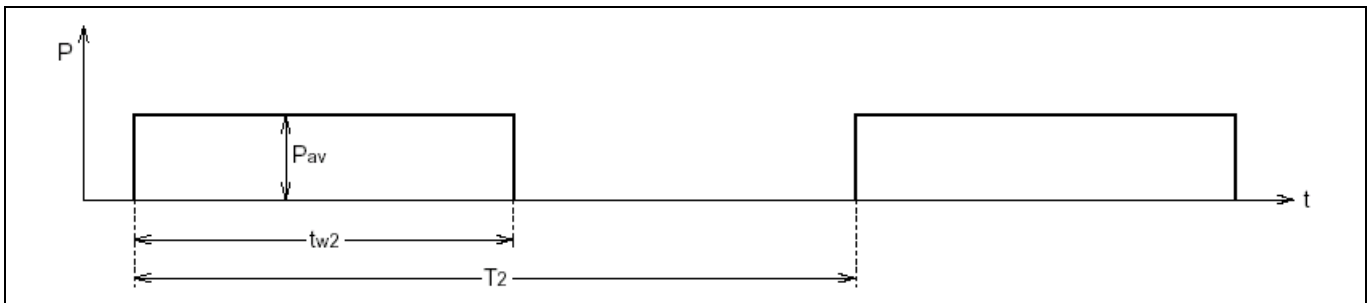


図 7-6. 平均パワー損失の考え方 2

全体の平均パワー損失を求めます。(下図参照)

$$P_{AV} = P_{av} \times \frac{t_{w2}}{T_2} \quad (W)$$

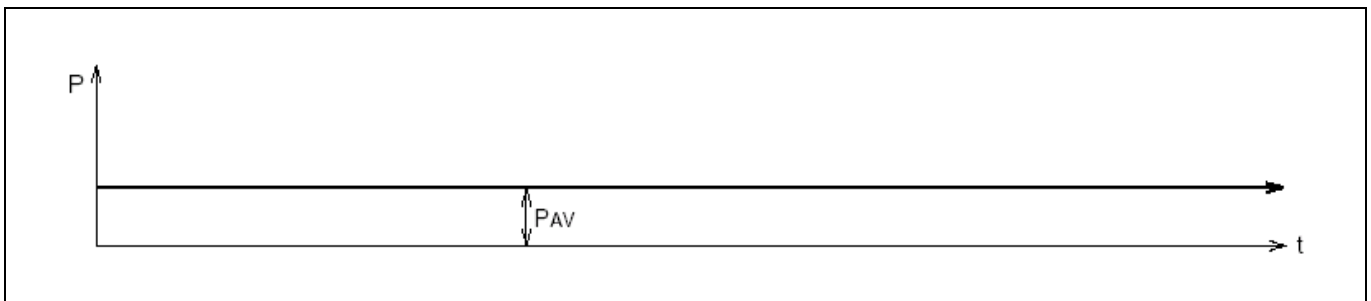


図 7-7. 平均パワー損失の考え方 3

7.1.4温度上昇の求め方

これまでに求めた P_1 , P_{av} , P_{AV} を用いて接合温度を求めます。

(1) $t_{w1} \ll 1 \text{ ms}$

図 7-8 の近似において接合温度が最も高くなるのは、ケース温度（又は、ヒートシンク温度）が定常に達し、かつ t_{w2} の切れる時点です。（図 7-9 参照）

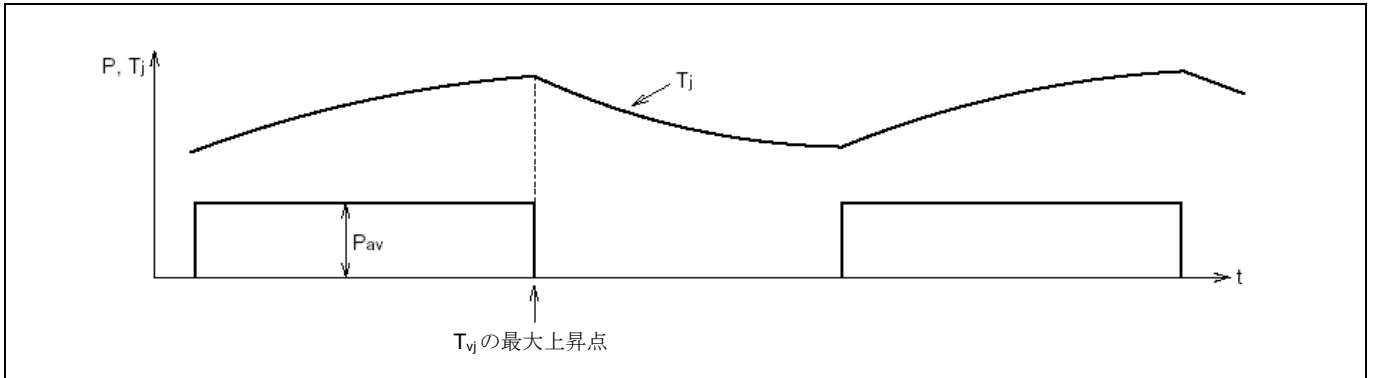


図 7-8. 接合温度の考え方 1

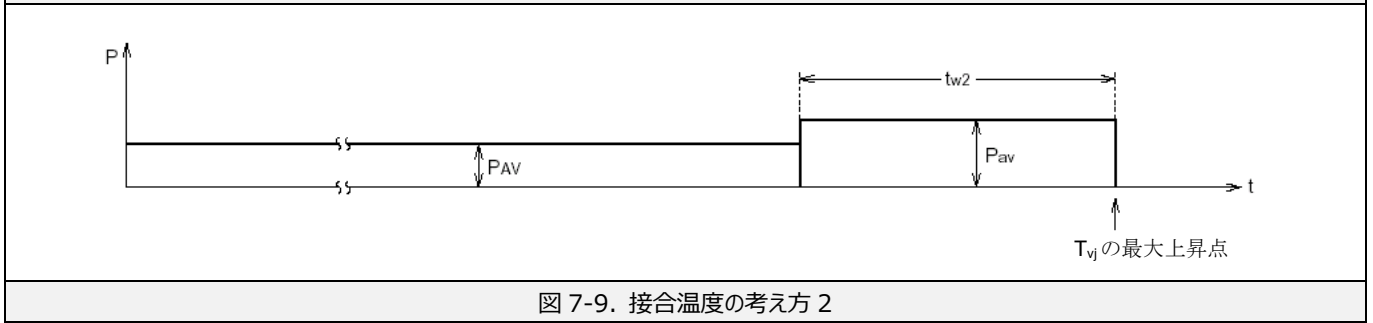


図 7-9. 接合温度の考え方 2

接合・ケース間の温度差を $\Delta T_{(j-c)}$ とすると、

$$\Delta T_{(j-c)} = R_{th(j-c)} \times P_{AV} - Z_{th(j-c)} @ t_{w2} \times P_{AV} + Z_{th(j-c)} @ t_{w2} \times P_{av} = R_{th(j-c)} \times P_{AV} + (P_{av} - P_{AV}) \times Z_{th(j-c)} @ t_{w2}$$

$R_{th(j-c)}$ ……接合・ケース間の熱抵抗
 $Z_{th(j-c)} @ t_{w2}$ ……接合・ケース間の t_{w2} 時点での過渡熱インピーダンス

この計算結果を用いて、接合温度は

$$T_{vj} = T_c + \Delta T_{(j-c)}$$

と計算できます。（ここで T_c はチップ直下位置における熱電対での実測値）

また、この接合温度が最大定格 $T_{vjmax} = 175^\circ\text{C}$ を超えないためには、ケース温度の最大上昇値は

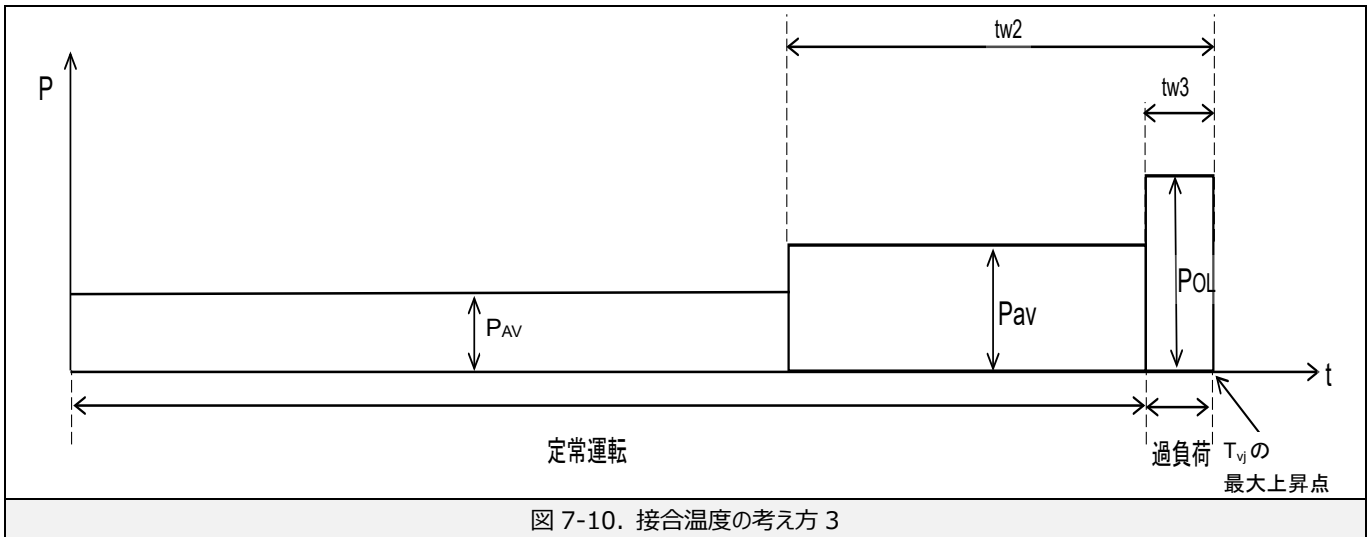
$$T_{C(max)} = 175 - \Delta T_{(j-c)}$$

以下とする必要があります。

※ただし、ケース温度が最大定格 T_{Cmax} を超えないようご注意ください。

(2) 定常運転から過負荷の場合

この場合は P_{OL} によるリップルも考慮に入れる必要があります。(1) の場合と同様に下図のような矩形波近似を行います。



$$\begin{aligned} \Delta T_{(j-c)} &= R_{th(j-c)} \times P_{AV} - Z_{th(j-c)} @ t_{w2} \times P_{AV} + Z_{th(j-c)} @ t_{w2} \times P_{av} - Z_{th(j-c)} @ t_{w3} \times P_{av} + Z_{th(j-c)} @ t_{w3} \times P_{OL} \\ &= R_{th(j-c)} \times P_{AV} + (P_{av} - P_{AV}) \times Z_{th(j-c)} @ t_{w2} + (P_{OL} - P_{av}) \times Z_{th(j-c)} @ t_{w3} \end{aligned}$$

$R_{th(j-c)}$ …… 接合・ケース間の熱抵抗
 $Z_{th(j-c)} @ t_{w2}$ …… 接合・ケース間の t_{w2} 時点での過渡熱インピーダンス
 $Z_{th(j-c)} @ t_{w3}$ …… 接合・ケース間の t_{w3} 時点での過渡熱インピーダンス

この計算結果を用いて、接合温度は $T_{vj} = T_c + \Delta T_{(j-c)}$ と計算できます。(ここで T_c はチップ直下位置における熱電対での実測値)

※ただし、ケース温度が最大定格 T_{cmax} を超えないようご注意ください。

(3) 過渡熱インピーダンス

各時間での過渡熱インピーダンスは、下記の式で導出されます。

$R_{th(j-c)}$, R_i , τ_i の具体的な数値は、各製品のデータシートを参照ください。

$$Z_{th(j-c)} = R_{th(j-c)} \times \sum_{i=1}^4 \left\{ R_i \times \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}} \right) \right\}$$

7.2 ヒートシンクの選定方法

複数のモジュールを1つのヒートシンクに取り付けた場合の熱等価回路を下図に示します。

この等価回路において、ヒートシンクの温度は、 $T_s = T_a + P_{Q(AV)} \times N \times R_{th(s-a)}$

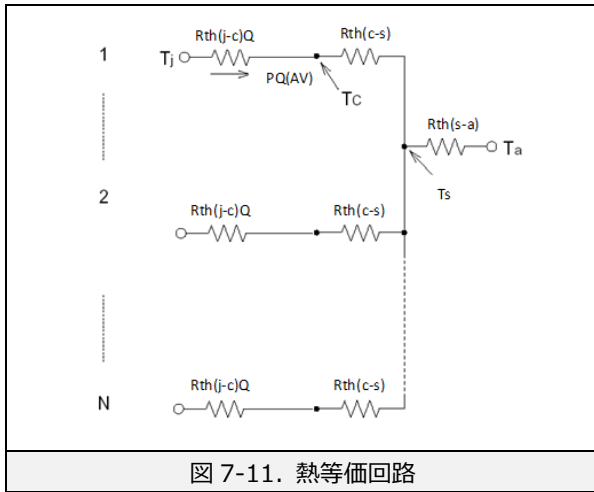


図 7-11. 熱等価回路

T_a : 周囲温度

$P_{Q(AV)}$: トランジスタ部の平均パワー損失 (W)

N : 素子数

$R_{th(s-a)}$: ヒートシンク・周囲間の熱抵抗 (K/W)

ケース温度 T_c は、

$$T_c = T_s + P_{Q(AV)} \times R_{th(c-s)}$$

$$= T_a + P_{Q(AV)} \times N \times R_{th(s-a)} + P_{Q(AV)} \times R_{th(c-s)}$$

$R_{th(c-s)}$: ケース・ヒートシンク間接触熱抵抗

このケース温度が、7.1 で求めた最大許容ケース温度 $T_{C(max)}$ を超えないようなヒートシンクを選定する必要があります。

したがって、求めるヒートシンクの熱抵抗は、

$$T_c = T_a + P_{Q(AV)} \times N \times R_{th(s-a)} + P_{Q(AV)} \times R_{th(c-s)} < T_{C(max)}$$

$$\therefore R_{th(s-a)} < \frac{T_{C(max)} - T_a - P_{Q(AV)} \times R_{th(c-s)}}{P_{Q(AV)} \times N}$$

7.3 インバータへの応用時の一般的な注意点

前述の計算方法は簡易計算方法です。詳細な計算実施時には以下についてご注意ください。

- ①出力電流 1 周期分を多数分割し、各点における実際の「PWM デューティー」、「出力電流」、その電流における「 V_{DS} 、 V_{SD} 、 E_{on} 、 E_{off} 、 E_{rr} 」に基づいて計算し加算する必要があります。
- ②PWM デューティーは、信号の発生方法に依存します。
- ③出力電流波形や出力電流と PWM デューティーの関係は、信号の発生方法、負荷、その他の種々の要因に依存しますので、実波形を基にします。
- ④ V_{DS} 、 V_{SD} は、 $T_{vj}=150^\circ\text{C}$ の値を使用します。
- ⑤ E_{on} 、 E_{off} 、 E_{rr} は、 $T_{vj}=150^\circ\text{C}$ ハーフブリッジ動作時の値を使用します。
- ⑥スイッチング損失は E_{on} は低温時、 E_{off} 、 E_{rr} は高温時が大きいため、効率計算の際は温度特性を考慮ください。

7.4 熱設計への応用時の注意点

- ①損失が最悪となる動作条件を検討する必要があります。
- ②出力電流の周期による温度変化を加味します。
(60 Hz で約 30% 程度。数 Hz の出力電流が数秒続く際には、ピーク電流の直流連続スイッチングと同等となります。)
- ③ T_{vjmax} だけでなく、パワーサイクル及びサーマルサイクルの影響も考慮する必要があります。

8章 取り扱い上の注意事項

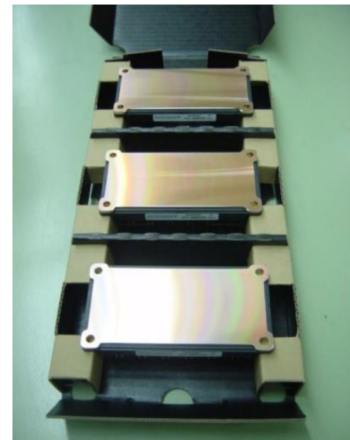
パワーモジュールは、使用条件（電氣的・機械的ストレス、取扱いなど）によっては素子が破壊することがあります。弊社のパワーモジュールを安全にご使用いただくため、次に示す注意事項を守り、正しくご使用ください。

取扱い上の注意

▲ 注意	
運送・運搬方法	<ul style="list-style-type: none">・運送中は、梱包箱を正しい向きに置いてください。逆さにしたり、立てかけたり不自然な力を加えますと、電極端子が変形したり樹脂ケースが壊れる原因になります。【天地無用】・投げたり、落したりしますと素子が壊れる原因になります。【ワレモノ注意】・水に濡れますと使用時の故障原因になります。降雨、降雪時の運搬には濡らさないように注意してください。【水濡れ注意】
保管方法	<ul style="list-style-type: none">・製品を保管する場所の温度及び湿度は、5～35℃、45～75%の常温常湿範囲内が望ましく、この温度、湿度から極度にかけ離れた環境では、素子の性能や信頼性を低下させることがあります。
長期保管	<ul style="list-style-type: none">・製品を長期（1年以上）に渡って保管する場合は、除湿対策をしてください。なお、長期保管後のご使用の際には、外観に傷、汚れ、錆等がないことを確認してください。
使用環境	<ul style="list-style-type: none">・高湿度環境（結露も含む）や有機溶剤が直接付着する場所、腐蝕性ガスを発生する場所、また、爆発性ガス、粉塵、塩分などのあるところでの使用は重大な事故につながる可能性がありますので避けてください。
難燃性	<ul style="list-style-type: none">・エポキシ充填樹脂及びケース材料には、UL規格の94V-0認定品を使用しています。不燃性ではありませんので、ご注意ください。
静電気対策	<ul style="list-style-type: none">・静電気による破壊を防止するために下記事項を守ってください。 (1) 静電気破壊に対する注意事項 人体や梱包材料に帯電した静電気やゲート・ソース間に過大な電圧（±20 V以上）が印加されると、素子が破壊することがあります。静電気対策の基本は、静電気の発生をできるだけ抑えることと、帯電した電荷をすばやく逃がすことです。 * 運搬、保存に静電気を帯びやすい容器は使用しないでください。 * モジュールを使用する直前まで、カーボンクロス等でゲート・ソース間を短絡することを推奨します。また、素手で端子間を絶対に触らないように手袋をしてください。 手袋や作業衣はナイロンなどの帯電しやすい布地のものは避けてください。 * 組立は、使用機器や人体を接地して作業を行ってください。 また、作業台表面及び作業台周囲の床には導電性マットを敷き、接地されることを推奨します。組立は、製品を梱包箱から取出す時点から指します。 * 素子を実装したプリント基板上でゲート・ソース間が開放状態になっていいますと、プリント基板に帯電した静電気により破壊することがありますのでご注意ください。 * はんだごてを使用する場合は、半導体用の低電圧（12 V～24 V）のはんだごてを用い、こて先を接地してください。 (2) ゲート・ソース間開放時の注意事項 * ゲート・ソース間が開放状態で、ドレイン・ソース間に電圧を印加しないでください。 * 素子を取外す際は、ゲート・ソースを短絡して取外してください。

▲ 注意

<p>静電気対策</p>	<p>(3) 内装箱</p> <p>内装箱には導電性段ボールを使用しています。</p> <p>この導電性段ボールは、輸送中の段ボール箱同士又は段ボール箱とモジュールの摩擦で発生し蓄積される静電気を放電するためのものです。</p> <p>ゲート・ソース間の短絡に導電性スポンジは使用しておりません。</p> <p>なお、この導電性段ボールはゲート・ソース間を完全に短絡したり、過電圧をクランプしたりするような静電対策部品ではありません。</p> <p>梱包箱からのモジュール取出しから機器への取り付けまでの工程中は、導電マットとそのアース、作業員へのアースバンド及び除電ブローの使用など十分な静電気対策をお願いいたします。内装箱からモジュールを取出して別のコンテナなどで保管される場合は、保管用コンテナに導電性コンテナを用いるなどの静電対策を実施ください。</p> <p>また、モジュール本体は、内装箱に完全には固定されておりませんので、内装箱からの取出しや開梱の際に、はずみでモジュールを落下させたりしないよう取扱いには十分ご注意願います。</p>
<p>帯電対策</p>	<ul style="list-style-type: none"> ゲート・ソース間に電圧を印加するような受入れ検査（飽和電圧試験など）を実施される場合、試験終了後に梱包箱や保管用の（導電性）コンテナへ戻す前にゲート・ソース間に蓄積された電荷を高抵抗（10 kΩ程度）で放電させてください。
<p>配線方法</p>	<ul style="list-style-type: none"> モジュールを製品に実装する場合は、ねじ端子（構造）部に過大な応力を加えないでください。端子構造部自体や端子構造部ケースの接合部の破損を招く恐れがあります。 プリント基板などを用いてピン形状の主端子及び制御端子を配線する場合は、過大な応力で変形させないようにご注意ください。 プリント基板をモジュールケース部にタッピンねじで固定する場合は、ねじのサイズ及び取付け方法に十分ご注意願います。ねじのサイズや取付け方法を誤りますとモジュールのケースを破損することがあります。



8.1 難燃性について

SiCパワーモジュールのケース及びふたに使用しておりますPPSは、UL94 V-0適合の難燃性を有し、自己消火性を有しておりますので、燃焼源を断れば延焼の危険性はありません。

シリコンゲルは可燃性で、UL94 V-0には適合しておりません。引火点340℃、発火点450℃で、硬化後の絶縁破壊強度が、10kV/mm以上の特性の製品を使用しています。また、自己消火性もありませんので、火災時は、粉末消火剤・二酸化炭素消火剤・泡消火剤などを使用して消火する必要があります。その他のチップ、銅ベース板などには該当するULの難燃性基準はありません。

9章 安全規格（UL規格）

三菱パワーモジュールは、UL規格1557、カテゴリコードQQQX2に対してUL認証（Recognized）を受けております。
（一部の特殊品を除き File No.E323585）

その他の安全規格（TUV, VDE, CSAなど）についての認証・認定は受けておりません。

（CEマーキングの強化絶縁への対応を考慮した設計はされていません。）

欧州CE及び中国CCCに関しては、2021年9月現在、パワーモジュールとして対象となる規制は確認できておりません。

特記事項

本資料に記載されている情報は、いかなる場合でも、条件、特性及び品質を保証するものではありません。弊社半導体製品は最大定格の範囲内でご使用いただき、また、適用される法令による要求、規範及び基準をお客様が遵守することを前提としております。

なお、弊社の権限を有する者が署名した書面による明示の承諾がある場合を除き、人身事故を招くおそれのある用途に弊社半導体製品を使用することはできません。

パワー半導体製品は、長期の信頼性（パワーサイクルやサーマルサイクル等）について寿命を有していることや、特殊環境下（結露、高湿度、高粉塵、高塩分、高地、有機物・腐食性ガス・爆発性ガスが多い環境、端子部等への過度な応力等）での使用により、故障が発生したり、誤動作したりする場合がありますので、十分ご注意ください。また、技術的要件によっては弊社半導体製品に環境規制物質等が含まれる可能性があります。詳細確認を要する場合には、最寄りの弊社営業所、あるいは代理店までお問い合わせください。

本資料の内容・データは、専門技術・教育を受けられた技術者を対象としています。弊社半導体製品のお客様用途への適合性及び適合性に関する弊社製品データの完全性については、お客様の技術部門の責任にて評価・判断してください。なお、貴社製品への適用検討にあたって、弊社半導体製品単体で評価するだけでなく、システム全体で十分に評価し、適用可否をご判断ください。必要に応じ、電源と半導体製品の間に適切な容量のヒューズまたはブレーカーを取り付けて二次破壊を防ぐなど、安全設計に十分ご注意ください。関連するデータシート・技術資料も合わせてご参照ください。

安全設計に関するお願い

弊社は品質、信頼性の向上に努めておりますが、半導体製品は故障が発生したり、誤動作する場合があります。弊社の半導体製品の故障又は誤動作によって結果として、人身事故、火災事故、社会的損害などを生じさせないような安全性を考慮した冗長設計、延焼対策設計、誤動作防止設計などの安全設計に十分ご留意ください。

本資料ご利用に際しての留意事項

- 本資料は、お客様が用途に応じた適切な三菱半導体製品をご購入いただくための参考資料であり、本資料中に記載の技術情報について三菱電機または、第三者に帰属する知的財産権その他の権利の実施、使用を許諾するものではありません。
- 本資料に記載の製品データ、図、表、プログラム、アルゴリズムその他応用回路例の使用に起因する損害、第三者所有の権利に対する侵害に関し、三菱電機は責任を負いません。
- 本資料に記載の製品データ、図、表、プログラム、アルゴリズムその他全ての情報は本資料発行時点のものであり、三菱電機は、予告なしに、本資料に記載した製品または仕様を変更することがあります。三菱半導体製品のご購入にあたりましては、事前に三菱電機または代理店へ最新の情報をご確認頂きますとともに、三菱電機半導体情報ホームページ (www.MitsubishiElectric.co.jp/semiconductors/) などを通じて公開される情報に常にご注意ください。
- 本資料に記載した情報は、正確を期すため、慎重に制作したのですが万一本資料の記述誤りに起因する損害がお客様に生じた場合には、三菱電機はその責任を負いません。
- 本資料に記載の製品データ、図、表に示す技術的な内容、プログラム及びアルゴリズムを流用する場合は、技術内容、プログラム、アルゴリズム単位で評価するだけでなく、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。三菱電機は、適用可否に対する責任を負いません。
- 本資料に記載された製品は、人命にかかわるような状況の下で使用される機器あるいはシステムに用いられることを目的として設計、製造されたものではありません。本資料に記載の製品を運輸、移動体用、医療用、航空宇宙用、原子力制御用、海底中継用機器あるいはシステムなど、特殊用途へのご利用をご検討の際には、三菱電機または代理店へご照会ください。
- 半導体・デバイスサイトに含まれる製品や技術をお客様が他の国へ提供する場合は、日本およびその他の国の輸出管理規制等を遵守する必要があります。また、日本、その他の仕向け地における輸出管理規則に抵触する迂回行為や再輸出は禁止します。
- 本資料の一部または全部の転載、複製については、文書による三菱電機の事前の承諾が必要です。
- 本資料に関し詳細についてのお問い合わせ、その他お気づきの点がございましたら三菱電機または代理店までご照会ください。

記載されている会社名及び商品名は、一般に各社の商標又は登録商標です。