

富士 IGBT モジュール 第2章 用語と特性

Application Manual

 **注意**

本資料の内容(製品の仕様、特性、データ、材料、構造など)は2022年3月現在のものです。
この内容は製品の仕様変更のため、または他の理由により事前の予告なく変更されることがあります。

このマニュアルに記載されている製品を使用される場合には、その製品の最新版の仕様書を入手して、
データを確認して下さい。

富士電機は絶えず製品の品質と信頼性の向上に努めています。しかし、半導体製品はまれに故障、誤作
動が発生する場合があります。富士電機製半導体製品の故障または誤動作が、結果として人身事故・火災
などによる財産に対する損害や社会的な損害を起こさないように冗長設計・延焼防止設計・誤動作防止設
計など安全確保のための手段を講じて下さい。

本資料の記載内容は工業所有権、その他権利の実施に対する保障または実施権の許諾を行なうもので
はありません。

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。本資料の製品を車両機器、船舶、航空宇宙、医
療機器、原子力制御、海底中継機器あるいはシステムなど、特殊用途への使用に対して弊社は一切の責
任を負いません。

本資料には製品を保証する項目が記載されていますが、製品が顧客装置に組み込まれた際の特性及び
品質に対して保証するものではありません。製品を使用される際は、製品が使用されるアプリケーションにて
評価いただいた上で、適用側の責任において適用可否を判断して下さい。

富士電機は、適用可否に対する責任は負いません。

第2章 用語と特性

1. 用語説明	2-2
2. IGBTモジュールの特性	2-5

本章では、IGBTモジュールに関する用語及び特性について説明します。

1. 用語説明

以下に、仕様書などに使用している様々な用語について説明します。

表2-1 最大定格(Maximum Ratings)

用語	記号	定義及び説明(条件は各製品の仕様書を参照して下さい)
コレクタ - エミッタ間電圧	V_{CES}	ゲート(以下G)-エミッタ間(以下E)を短絡した状態でコレクタ-エミッタ間に印加できる最大電圧
ゲート- エミッタ間電圧	V_{GES}	コレクタ(以下C)-Eを短絡した状態でG-E間に印加できる最大電圧
コレクタ電流	I_C	IGBTに流すことができる最大直流電流
	I_{CRM} I_C pulse	IGBTに流すことができる最大パルス電流
内蔵ダイオード 順方向電流	I_F	内蔵ダイオード(以下、FWD)に流すことができる最大直流順電流
	I_{FRM} $-I_C$ pulse	FWDに流すことができる最大パルス順電流
最大損失	P_{tot} P_C	1アーム当たりのIGBTで許容する最大電力損失
チップ接合温度	T_{vj} T_j	素子が異常を引き起こさず動作できる接合部の最高温度 (装置の最悪条件下にて、この値を超えない設計が必要)
連続動作時接合温度	$T_{vj(op)}$ T_{vjop}	素子を連続的に動作させることが可能な接合部の最高温度
ケース温度	T_C	IGBTモジュール内部の最も発熱しているIGBTチップ又はFWDチップ直下のケース温度 (IGBTあるいはFWD直下の銅ベース下温度を示す。詳細は第6章を参照)
保存温度	T_{stg}	IGBTモジュールに電氣的負荷をかけずに保存、または輸送できる温度範囲
電流二乗時間積	I^2t	ダイオードが許容する過電流のジュール積分値 商用正弦半波(50、60Hz)、1サイクルで規定する
尖頭サージ順電流	I_{FSM}	ダイオードが許容する1サイクルの商用正弦半波(50、60Hz)電流ピーク値
絶縁耐圧	V_{iso}	IGBTモジュールの電極全てを短絡した状態で、電極とヒートシンク取付面間で許容する正弦波電圧実効値の最大値
締付けトルク	Mounting	所定のネジで素子とヒートシンクを締付ける際の最大許容トルク値
	Terminals	所定のネジで端子と外部電極を締付ける際の最大許容トルク値

注1:特に規定のない限り $T_C=25^\circ\text{C}$ の値を記載しています。

注2:最大定格として記載されている値は、いかなる場合もこれを超えてはなりません。

表2-2. 電気的特性(Electrical Characteristics)

用語	記号	定義及び説明(条件は各製品の仕様書を参照して下さい)	
静特性	コレクタ - エミッタ間漏れ電流	I_{CES}	G-E間を短絡した状態で、C-E間に指定電圧を印加したときのC-E間の漏れ電流
	ゲート - エミッタ間漏れ電流	I_{GES}	C-E間を短絡した状態で、G-E間に指定電圧を印加したときのG-E間の漏れ電流
	ゲート - エミッタ間しきい値電圧	$V_{GE(th)}$	指定C-E間電流(以下 I_C)とC-E間電圧(以下 V_{CE})におけるG-E間電圧(以下 V_{GE})
	コレクタ - エミッタ間飽和電圧	$V_{CE(sat)}$	指定の V_{GE} において定格 I_C を流した時の V_{CE} 値
	入力容量	C_{ies}	C-E間を交流的に短絡した状態で、G-E間及びC-E間に指定電圧を印加した時のG-E間容量
	出力容量	C_{oes}	G-E間を交流的に短絡した状態で、G-E間及びC-E間に指定電圧を印加した時のC-E間容量
	帰還容量	C_{res}	G-E間、C-E間を交流的に短絡した状態でG-E間及びC-E間に指定の電圧を印加した時のC-G間容量
	ダイオード順電圧	V_F	FWDに指定の順方向電流を流したときの順方向電圧値
動特性 (詳細は図2-5を参照して下さい)	ターンオン時間	t_{on}	IGBTのターンオン時 V_{GE} が0Vに上昇後、 V_{CE} が最大値の10%に下降するまでの時間
	立上り時間	t_r	IGBTのターンオン時コレクタ電流が設定値の10%に上昇した時点から、 V_{CE} が設定値の10%に下降するまでの時間
		$t_{r(l)}$	IGBTのターンオン時コレクタ電流が設定値の10%に上昇した時点から、90%に到達するまでの時間
	ターンオフ時間	t_{off}	IGBTのターンオフ時 V_{GE} が設定値の90%に下降した時点から、コレクタ電流が下降する電流の接線上で設定値の10%に下降するまでの時間
	立下り時間	t_f	IGBTのターンオフ時コレクタ電流が設定値の90%から、下降する電流の接線上で設定値の10%に下降するまでの時間
	ターンオン損失	E_{on}	IGBTのターンオン時に発生する損失
	ターンオフ損失	E_{off}	IGBTのターンオフ時に発生する損失
	逆回復損失	E_{rr}	FWDの逆回復時に発生する損失
	逆回復時間	t_{rr}	FWDの逆回復電流が消滅するまでに要する時間
	逆回復電流	I_{rr} I_{rrm}	FWDの順方向電流遮断時に逆方向に流れる電流及びそのピーク値
逆バイアス安全動作領域	RBSOA	ターンオフ時に指定の条件にてIGBTを安全に遮断できるコレクタ電流 I_C とコレクタ電圧 V_{CE} の領域	
内蔵ゲート抵抗	r_g $R_{g(int)}$	IGBTモジュールに内蔵するゲート直列抵抗値	
ゲート電荷量	Q_G Q_g	IGBTをターンオンさせるためにG-E間に充電する電荷量	

注1:動特性の定義はVシリーズ以前とXシリーズ以降で異なります。詳細は各製品の仕様書を参照して下さい。

表2-3. 熱的特性(Thermal Characteristics)

用語	記号	定義及び説明(条件は各製品の仕様書を参照して下さい)
熱抵抗	$R_{th(j-c)}$	IGBTあるいはFWDのチップ(接合部)-ケース間熱抵抗
	$R_{th(c-f)}$	IGBTモジュールをサーマルグリスを用いて推奨トルク値にてヒートシンクに取付けた状態でのケース-ヒートシンク間熱抵抗
ケース温度	T_c	最も発熱している素子直下のケース温度

表2-4. サーマスタ特性(Thermistor Characteristics)

用語	記号	定義及び説明(条件は各製品の仕様書を参照して下さい)
サーミスタ抵抗	R	指定温度でのサーミスタ端子間電気抵抗値
B値	B	抵抗-温度特性において、任意の2温度間での抵抗変化の大きさを示す定数

2. IGBTモジュールの特性

6MBI100VB-120-50(1200V/100A、第6世代IGBTモジュール)を例に、仕様書などに記載しているIGBTの種々の特性についての説明を以下に示します。

2.1 静特性

VシリーズIGBT: 6MBI100VB-120を例に、 V_{CE} - I_C 特性(一般的に出力特性と呼ばれる)の V_{GE} 依存性を図2-1、図2-2に示します。この特性はIGBTがオンしている時の V_{CE} と I_C の関係を示すもので、オン時にIGBTに発生する損失となります。従って V_{CE} が低い程、発生損失が小さくなりますが、この特性は T_{vj} と V_{GE} によって変化しますので、これらの特性をよく考慮した上で装置設計を行なって下さい。

一般的には $V_{GE}=15V$ において、装置の最大出力電流 \leq 素子の定格電流値で使用することを推奨します。

なお、図2-3は図2-1のデータを V_{CE} - V_{GE} 特性の I_C 依存性に置き換えたグラフで、 V_{CE} が急激に増える限界の V_{GE} の目安を読み取ることが出来ます。

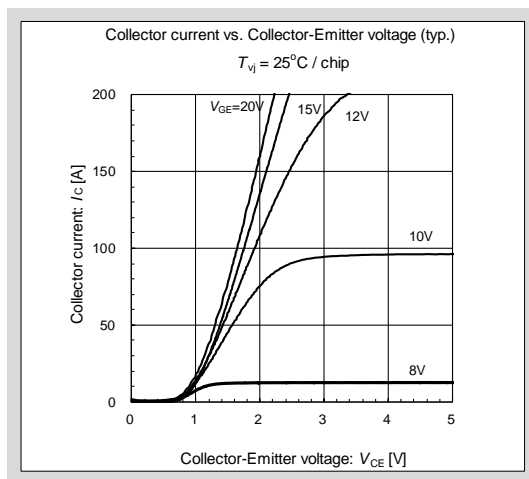


図2-1 $V_{CE(sat)}$ - I_C 特性($T_{vj}=25^\circ\text{C}$)

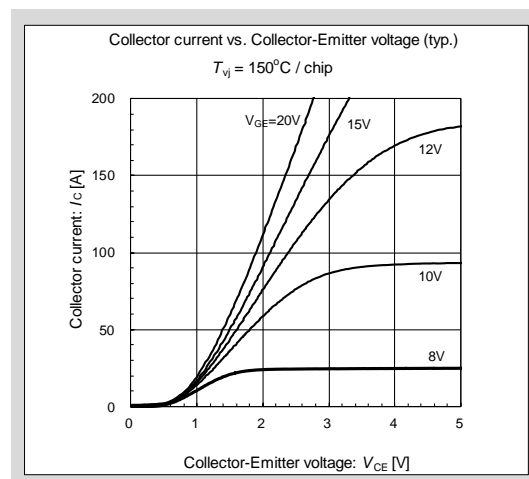


図2-2 $V_{CE(sat)}$ - I_C 特性($T_{vj}=150^\circ\text{C}$)

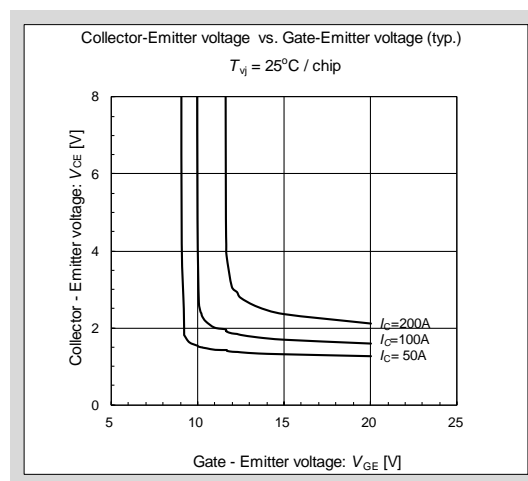


図2-3 V_{CE} - V_{GE} 特性($T_{vj}=25^\circ\text{C}$)

2.2 スイッチング特性

IGBTは一般的にスイッチング用途に使用するため、ターンオン、ターンオフ時のスイッチング特性を十分に理解しておくことが重要です。また、この特性は種々のパラメータによって変化するため、これらも考慮に入れて装置の設計を行なう必要があります。

スイッチング特性は、スイッチング時間とスイッチング損失の二つに大別することができます。これらのスイッチング特性は図2-4に示すチョッパ回路で測定する事が出来ます。

表2-2(動特性項目)に記載した動特性 t_{on} 、 t_r 、 $t_{r(i)}$ 、 t_{off} 、 t_f 、 E_{on} 、 E_{off} 、 E_{rr} 、 t_{rr} 、 I_{rr} の定義を図2-5の概略波形で示します。

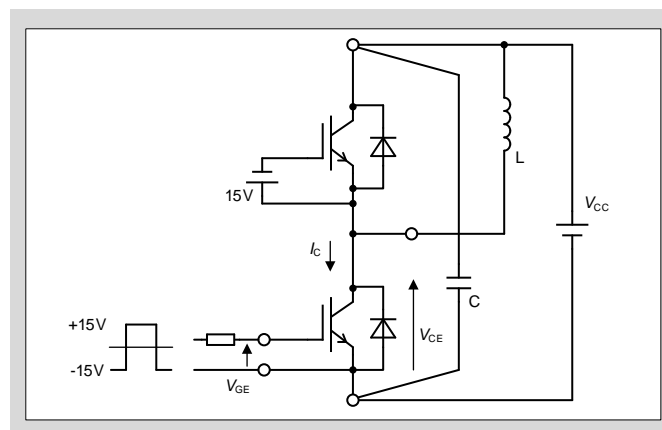


図2-4 スイッチング特性測定回路

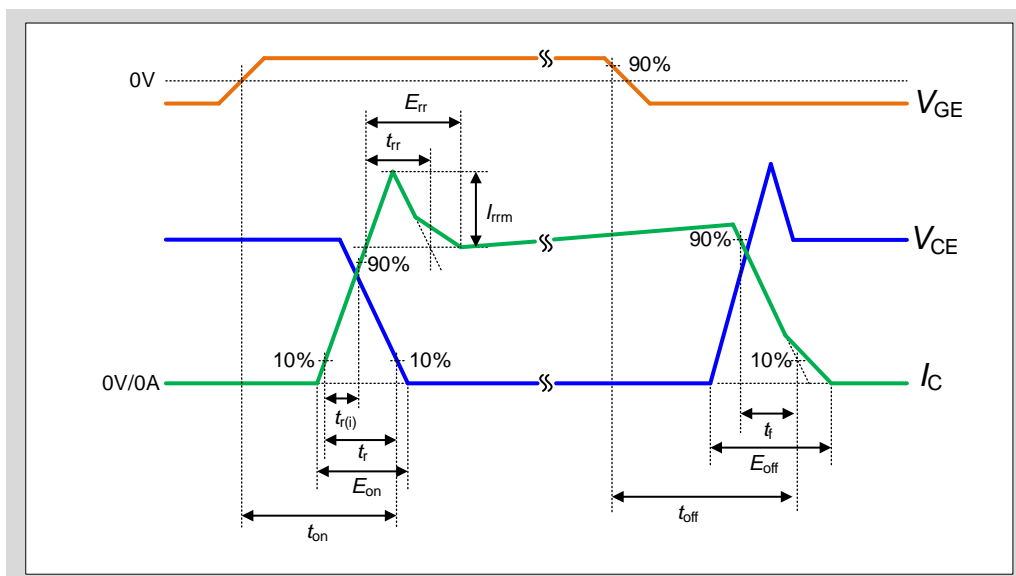


図2-5 スイッチング時間の定義(Vシリーズ)

これらのスイッチング時間と I_C の関係を図2-6、図2-7に示します。また、スイッチング時間とゲート抵抗 R_G の関係を図2-8に示します。この図の様にスイッチング時間は I_C 、 T_{vj} 、 R_G によって変化しますので装置設計の際は充分に考慮して下さい。

例えば、 t_{off} などのスイッチング時間が長くなる条件で使用すると、デッドタイム不足による直列アーム短絡(詳細は第4章を参照して下さい)などの不具合を起し素子が破壊する可能性があります。

一方、 t などのスイッチング時間が短すぎる条件で使用すると過渡的な電流変化 dI_C/dt が大きくなり、回路のインダクタンス L_S による過大なサージ電圧($=L_S \cdot dI_C/dt$)が発生します。このサージ電圧が印加電圧に重畳されるため、RBSOA(詳細は第2、4章を参照して下さい)を超えて素子が破壊する場合があります。したがって装置設計時には、 I_C 、 T_{vj} 、 R_G などを充分に考慮し、上記不具合が発生しないように設計する必要があります。

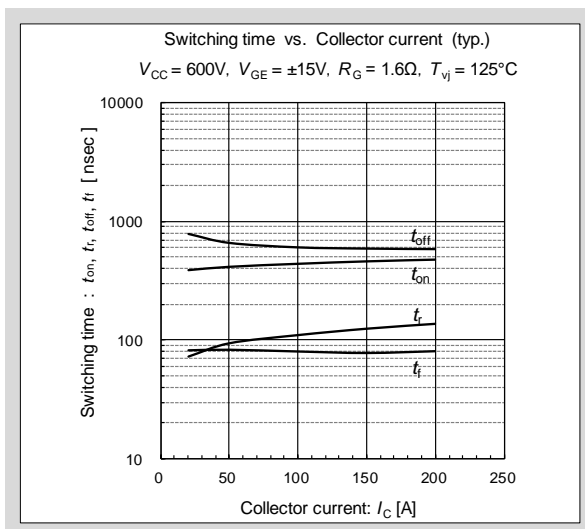


図2-6 スイッチングタイム- I_C 特性($T_{vj}=125^\circ\text{C}$)

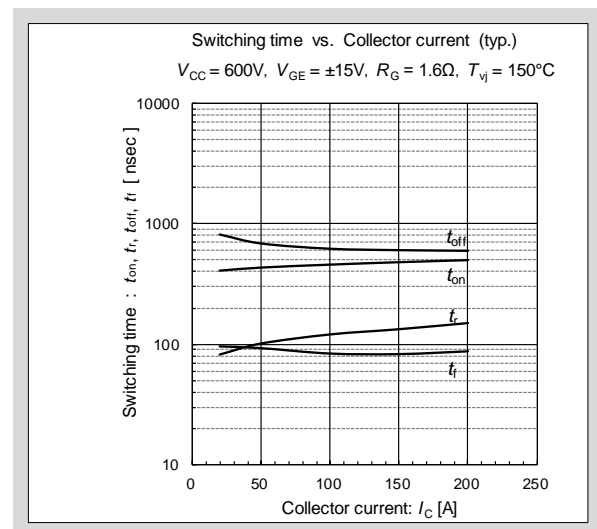


図2-7 スイッチングタイム- I_C 特性($T_{vj}=150^\circ\text{C}$)

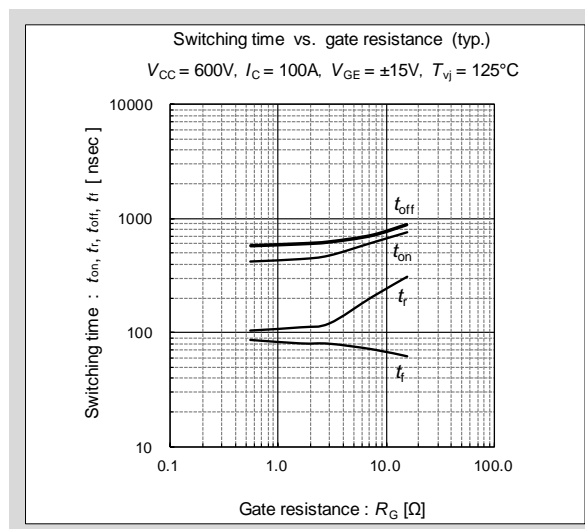


図2-8 スイッチングタイム- R_G 特性($T_{vj}=125^\circ\text{C}$)

E_{on} 、 E_{off} 、 E_{rr} は、IGBTがスイッチングする際(ターンオン、オフ時)に発生します。この特性は図2-9、図2-10に示す様に I_C 、 T_{vj} 、 R_G で変化します。特に R_G の選定は重要で、大きすぎるとスイッチング損失が大きくなる上、前述のデッドタイム不足による直列アーム短絡を起こしやすくなります。逆にスイッチング損失を小さくするために R_G を小さくする場合は、前述の過大なサージ電圧($=L_S \cdot di_C/dt$)が発生する可能性があります。

ここから分かるように、 R_G の選定においては L_S が大きく影響します。 L_S が小さければ過大なサージ電圧が発生しにくいので、 R_G 選定の検討が容易になります。したがって装置設計において、この L_S の値を出来るだけ小さく設計する事を推奨します。

なお、 R_G の決定にはIGBT駆動回路の容量とのマッチングも考慮する必要がありますので、本章2.3の容量特性を使用して十分に検討を行なった上で R_G を選定して下さい。

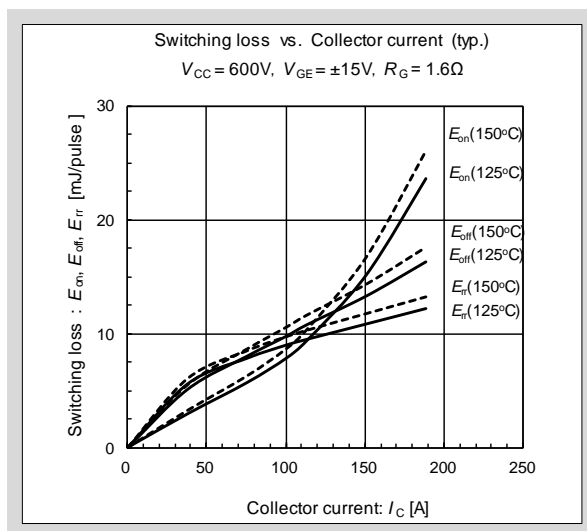


図2-9 スイッチング損失- I_C 特性

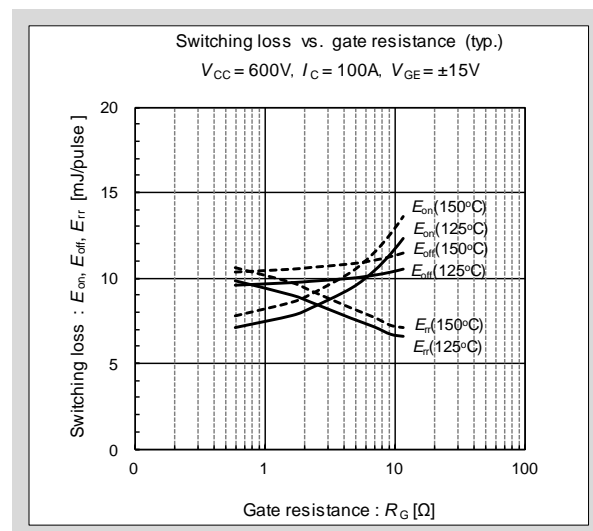


図2-10 スイッチング損失- R_G 特性

2.3 容量特性

図2-11に Q_g の特性を示します。この特性は、 Q_g に対する V_{CE} 、 V_{GE} の変化を示しています。「 Q_g が増加する」ことは「IGBTのG-E間の容量に電荷を充電する」ことを表すため、 Q_g が増加すると V_{GE} (= Q_g / G-E間容量)が上昇しIGBTがオンします。IGBTがオンすると V_{CE} がオン電圧まで下降します。このように Q_g はIGBTを駆動するために必要な電荷量を示しています。この特性は駆動回路の電源容量を決定する際に使用して下さい。図2-12にIGBTの各接合容量の特性を示します。また、IGBTの接合容量である C_{ies} 、 C_{oes} 、 C_{res} を図2-13に示します。これらの特性は Q_g と共に駆動回路設計の際に使用して下さい。

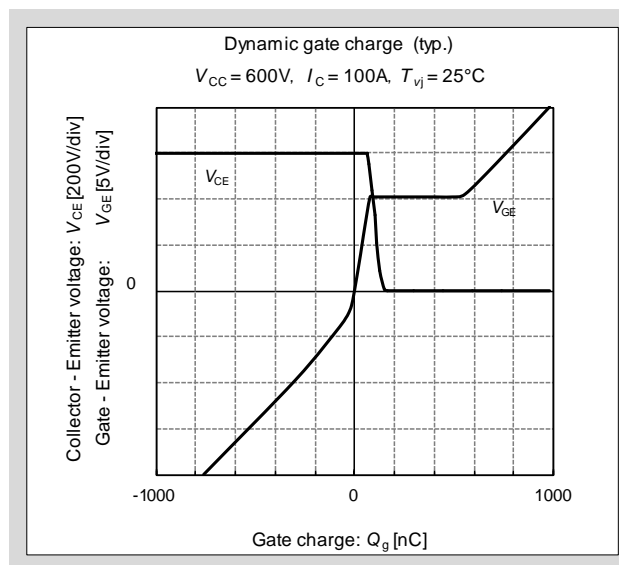


図2-11 V_{CE} 、 V_{GE} - Q_g 特性

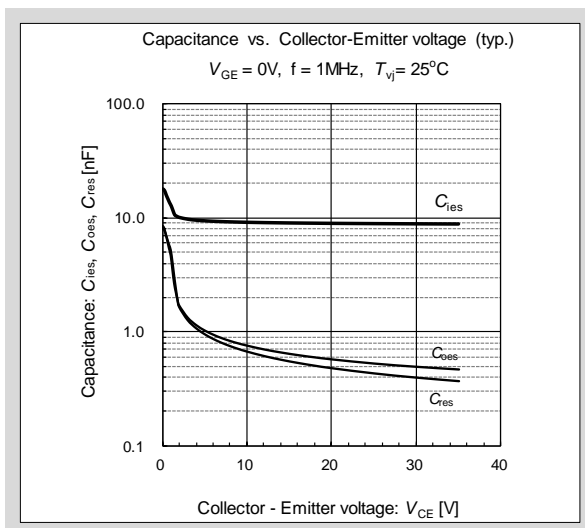


図2-12 接合容量- V_{CE} 特性

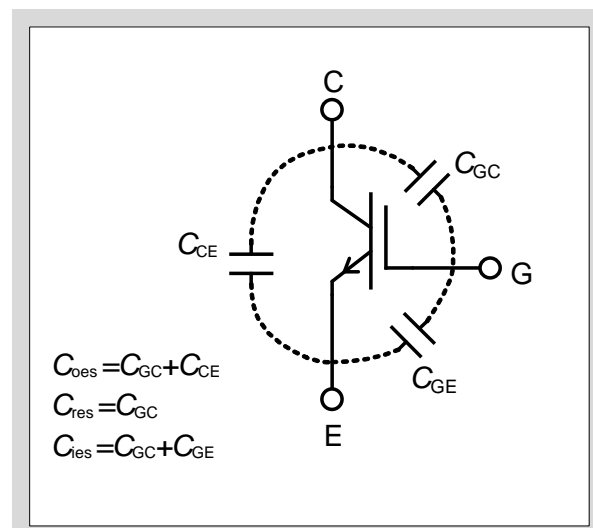


図2-13 接合容量

2.4 逆バイアス安全動作領域RBSOA

IGBTをターンオフさせる際、安全に遮断できる $V_{CE}-I_C$ の動作範囲を逆バイアス安全動作領域 RBSOA(Reverse Bias Safe Operating Area)と言います。図2-14に例として1200V/100A/IGBTモジュールの範囲を示します。

ターンオフ時 $V_{CE}-I_C$ の動作軌跡がこのRBSOAの領域に納まるようにスナバ回路設計をする必要があります。

なお、短絡電流遮断時の安全動作領域SCSOA(Short Circuit Safe Operating Area)については、シリーズごとに異なりますので、そのシリーズの技術資料を参照して下さい。

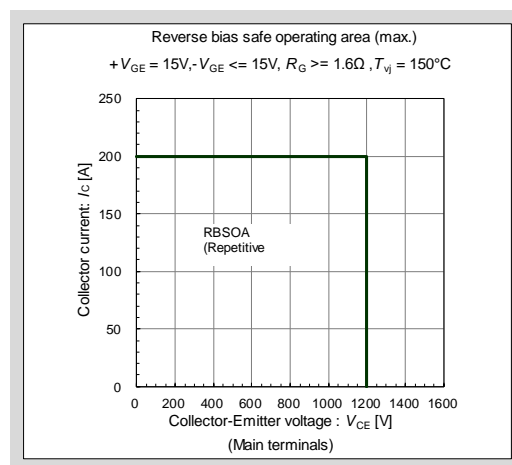


図2-14 逆バイアス安全動作領域(RBSOA)

2.5 FWDの特性

IGBTモジュールではFWDをIGBTと逆並列に接続し、内蔵しています。このFWDは図2-15に示す V_F-I_F 特性と図2-16に示す逆回復特性 (t_{rr} , I_{rr})、及び図2-9と図2-10に示す逆回復動作時の E_{rr} 特性があります。これらの特性はIGBTと同様FWDIに発生する損失計算に使用します。またFWDの特性は I_F , T_{vj} , R_G などに変化するので注意が必要です。

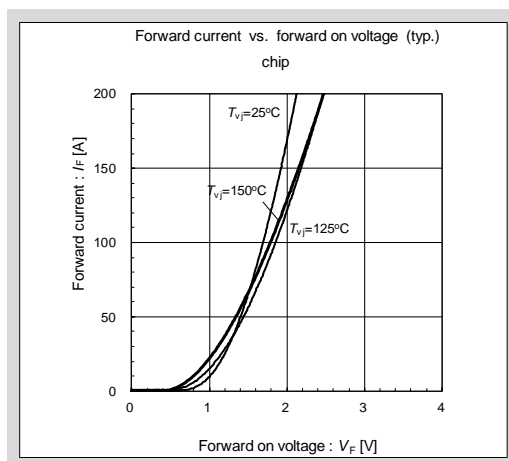


図2-15 V_F-I_F 特性

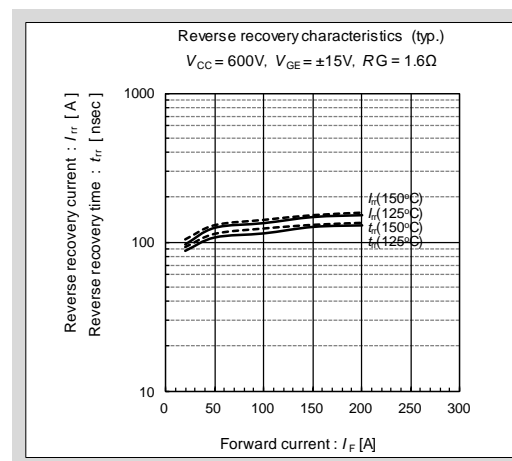


図2-16 t_{rr} , $I_{rr}-I_F$ 特性

2.6 過渡熱抵抗特性

温度上昇の計算及びヒートシンク的设计に用いる過渡熱抵抗特性を図2-17に示します(この特性はIGBT、FWD共に1アーム当りの特性)。

熱抵抗とは熱解析などでよく使われる特性で電気抵抗のオームの法則に酷似した公式：

「温度差 ΔT [°C]= 熱抵抗 R_{th} [°C/W]×エネルギー E (損失)[W]」で定義されます。

この過渡熱抵抗特性はIGBT、FWDの T_{vj} を計算する際に使用します。(詳細は第6章を参照して下さい)

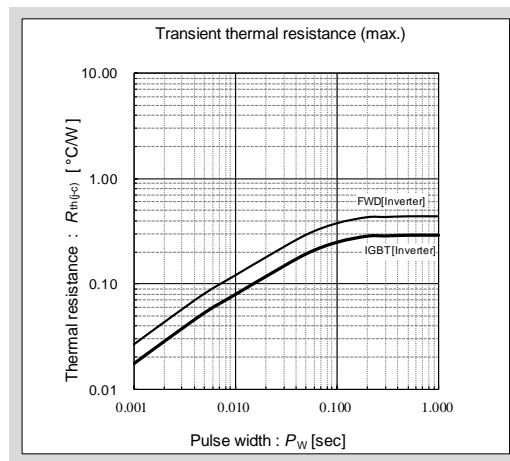


図2-17 過渡熱抵抗特性