

富士 IGBT モジュール 第11章 パワーモジュールの信頼性

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、誤動作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を負いません。

第11章 パワーモジュールの信頼性

1. 信頼性の基礎	11-2
2. 信頼性試験	11-4
3. パワーサイクル寿命	11-5

パワー半導体モジュールの市場は、汎用インバータ、サーボモータ制御、工作機械、エレベータなどにとどまらず、電気自動車や太陽光・風力・燃料電池発電システムなどの実用化に伴い、新たな用途へ広がろうとしています。

富士電機はこれまで各種パワーモジュール製品を開発し、市場要求に答えてきました。今後は更なる市場の拡がりとともに、これらパワーモジュール製品に対する要求性能は今以上に多様化・高度化する方向へ進展すると考えられます。

このような要求に対応するには、パワーモジュールの信頼性確保に対し、十分に注意を払う必要があります。

本章では、パワーモジュール、特にIGBTモジュールの信頼性に関して説明します。

1. 信頼性の基礎

半導体デバイスの故障率経時変化

一般にIGBTモジュールなどの電子機器・電子部品の故障率は、図11-1に示すようなバスタブカーブ形の故障率カーブとなります。この故障率カーブは初期故障期、偶発故障期、磨耗故障期の3種類の期間で示されます。

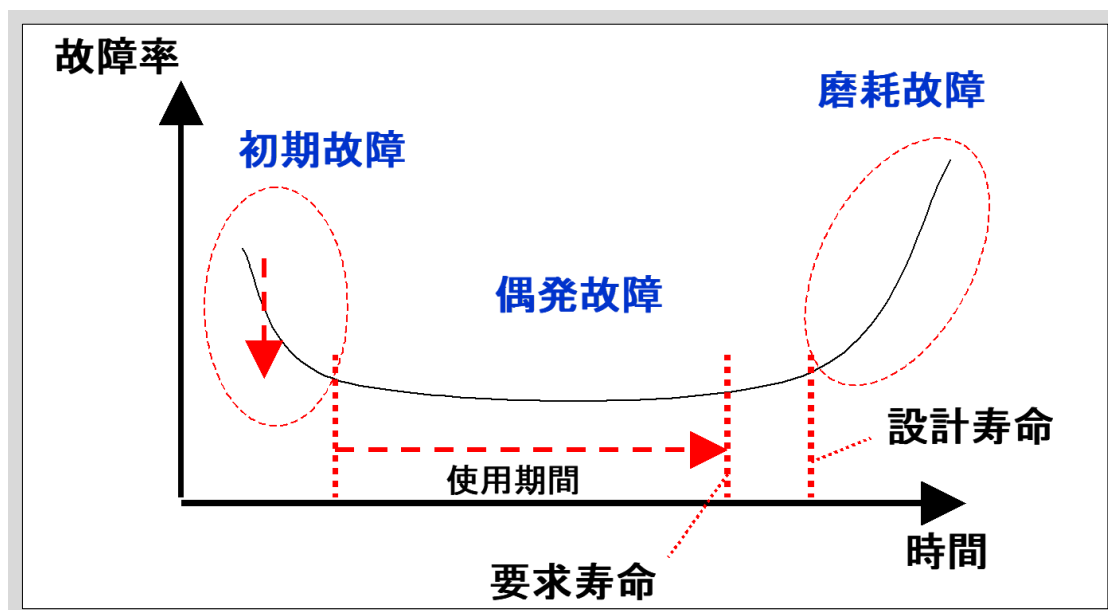


図11-1 半導体デバイスの故障率経時変化

上記故障率カーブにおいて、半導体デバイスの1つであるIGBTモジュール製品の初期故障はIGBT・FWD中の微細な欠陥、DCBの欠陥、信号線を接続するワイヤの接触などのごく微細な欠陥や人為的ミスなどに起因して発生します。

このような欠陥やミスはIGBT・FWDチップ設計、モジュール構造設計、チップ製造工程設計、組立工程設計において、様々な設計手法を用いた品質向上活動を継続して行なうことで低減することが可能です。しかし、設計段階でこれらを完全になくすことは非常に困難ですので、スクリーニング試験(出荷試験)が必要となります。

富士電機においてもスクリーニング試験を適用することによって初期故障率の低減に取り組んでいます。

故障率カーブの偶発故障期は、初期故障品が除去されたことで、その故障率はほぼ一定に落ち着きます。この故障率が一定となる期間はIGBTモジュールや他の部品などで構成されるシステム全体の使用条件や環境によって変わり、システム固有の信頼度に相当します。この期間に生じる偶発故障は、過電圧(G-E間、C-E間)、過電流、過熱など、製品仕様書に記載の最大定格を超える過剰なストレスが印加された場合に起こることが一般的です。

これより、偶発故障期での故障率低減のためにはシステムの最悪運転条件において各種特性が最大定格を超えないよう設計・確認する必要があります。そのために使用電圧、使用電流などの運転条件は仕様書に記載の最大定格に対し、デレーティングして使用することを推奨します。

故障率カーブの磨耗故障期は製品寿命による故障期であり、磨耗や疲労によって故障を引き起します。したがって、IGBTモジュール製品の長期信頼性を確保するためには、磨耗故障に達する前に製品寿命となるように設計する必要があります。

当社では次節以降に示す長期信頼性試験を設計段階で検証し、品質確認を行なっています。特に、パワーサイクル故障モデルについては、第3項に示す ΔT_{vj} パワーサイクル(ΔT_{vj} -P/C)と ΔT_c パワーサイクル(ΔT_c -P/C)の2モデルについて寿命確認を行なっています。IGBTモジュール製品寿命設計を行なう際、本パワーサイクル寿命を考慮し、寿命内で設計して下さい。

また、製品寿命は使用環境、使用方法によって大きく変わりますので考慮の上、設計して下さい。

2. 信頼性試験

富士電機では長期信頼性確保のために、各種信頼性試験を実施し設計検証を行なっています。下記の表11-1、表11-2に富士電機の第7世代IGBTモジュールであるXシリーズについて、代表的な信頼性試験の抜粋を示します。なお、詳細につきましては納入仕様書を参照して下さい。

表11-1 Xシリーズでの信頼性試験(環境試験)

Test categories	Test items	Test methods and conditions	Reference norms JEITA ED-4701 (Aug.-2013 edition)	Number of sample	Acceptance number
Environment Tests	1 High Temperature Storage	Storage temp. : 125±5°C Test duration : 1000hr.	Test Method 201A	5	(0:1)
	2 Low Temperature Storage	Storage temp. : -40±5°C Test duration : 1000hr.	Test Method 202A	5	(0:1)
	3 Temperature Humidity Storage	Storage temp. : 85±2°C Relative humidity : 85±2% Test duration : 1000hr.	Test Method 103A Test code C	5	(0:1)
	4 Temperature Cycle	Test temp. : High temp. 125+15/-0°C Low temp. -40+0/-10°C Minimum soak time : 15 min. Number of cycles : 100cyc	Test Method 105A	5	(0:1)
	5 Thermal Shock	Test temp. : High temp. 100+10/-2°C Low temp. 0+2/-10°C Used liquid : Water with ice and boiling water Dipping time : 5min.par each temp. Transfer time : 10sec. Number of cycles : 10cycles	Test Method 307B Condition code B	5	(0:1)

表11-2 Xシリーズでの信頼性試験(耐久試験)

Test categories	Test items	Test methods and conditions	Reference norms JEITA ED-4701 (Aug.-2013 edition)	Number of sample	Acceptance number
Environment Tests	1 High Temperature Reverse Bias (IGBT/FWD chip)	Test temp. : $T_{vj} = 175 \pm 5^\circ\text{C}$ Bias voltage : $V_{CE} = 0.8 \times V_{CES}$ Bias method : Applied DC voltage to C-E $V_{GE} = 0\text{V}$ Test duration : 1000hr.	Test Method 101A	5	(0:1)
	2 High Temperature Bias (for Gate)	Test temp. : $T_{vj} = 175 \pm 5^\circ\text{C}$ Bias voltage : $V_{GE} = +20\text{V}$ or -20V Bias method : Applied DC voltage to G-E $V_{CE} = 0\text{V}$ Test duration : 1000hr.	Test Method 101A	5	(0:1)
	3 Temperature Humidity Bias (IGBT/FWD chip)	Test temp. : $85 \pm 2^\circ\text{C}$ Relative humidity : $85 \pm 5\%$ Bias voltage : $V_{CE} = 0.8 \times V_{CES}$ Bias method : Applied DC voltage to C-E $V_{GE} = 0\text{V}$ Test duration : 1000hr.	Test Method 102A Condition code C	5	(0:1)
	4 Intermitted Operating Life (Power Cycle) (for IGBT)	ON time : 2 sec. OFF time : 18 sec. Test Temp. : $\Delta T_{vj} = 100 \pm 5$ deg. $T_{vj} \leq 175^\circ\text{C}$, $T_s = 75 \pm 5^\circ\text{C}$ Number of cycles : 60000 cycles.	Test Method 602	5	(0:1)

3. パワーサイクル寿命

IGBTモジュールは、使用動作条件に応じて温度の上昇・下降が生じます。温度の上昇・下降によってIGBTモジュールの内部構造は熱ストレスによる応力を受けて疲労・劣化が進みます。この疲労・劣化は、温度の上昇と下降の変動幅に大きく依存するため、運転条件や環境条件によって寿命が異なります。熱ストレスによる寿命は、パワーサイクル寿命(パワーサイクル耐量)と呼ばれます。パワーサイクル寿命は、温度変化 ΔT に対する繰り返しサイクル数の関係を表わしたパワーサイクル寿命曲線から算出できます。その曲線は2種類あります。

1つは ΔT_{vj} -P/C寿命で、素子のジャンクション温度が急激に上昇・下降することで生じる故障です。故障モードはチップ表面のアルミワイヤ接合部の劣化またはチップ直下のはんだ接合部の劣化による故障が支配的となります。

もう1つは ΔT_c -P/C寿命で、ジャンクション温度 T_{vj} の上昇・下降によるケース温度(主にベース温度) T_c の変化によって生じる故障です。故障モードは絶縁基板DCBと銅ベース間の接合に使用しているはんだ接合部の劣化による故障が支配的となります。

ΔT_{vj} -P/C、 ΔT_c -P/Cそれぞれの測定方法とパワーサイクル寿命曲線について次頁以降に記載します。

3.1 ΔT_{vj} -P/C寿命曲線

図11-2に ΔT_{vj} -P/C試験の通電パターンを示します。図11-3及び図11-4に ΔT_{vj} -P/C試験時の等価回路図と T_C 及び T_s 測定位置の概略図をそれぞれ示します。 ΔT_{vj} -P/C試験では、 T_{vj} を比較的短い時間の周期で急激に上昇・下降させます。したがってシリコンチップとDCB間及びシリコンチップとアルミワイヤ間で温度差が生じるため、それらの間に熱ストレスが発生します。このような理由から ΔT_{vj} -P/Cは主にアルミワイヤとチップの接合及びシリコンチップ下はんだ部分の寿命を示します。

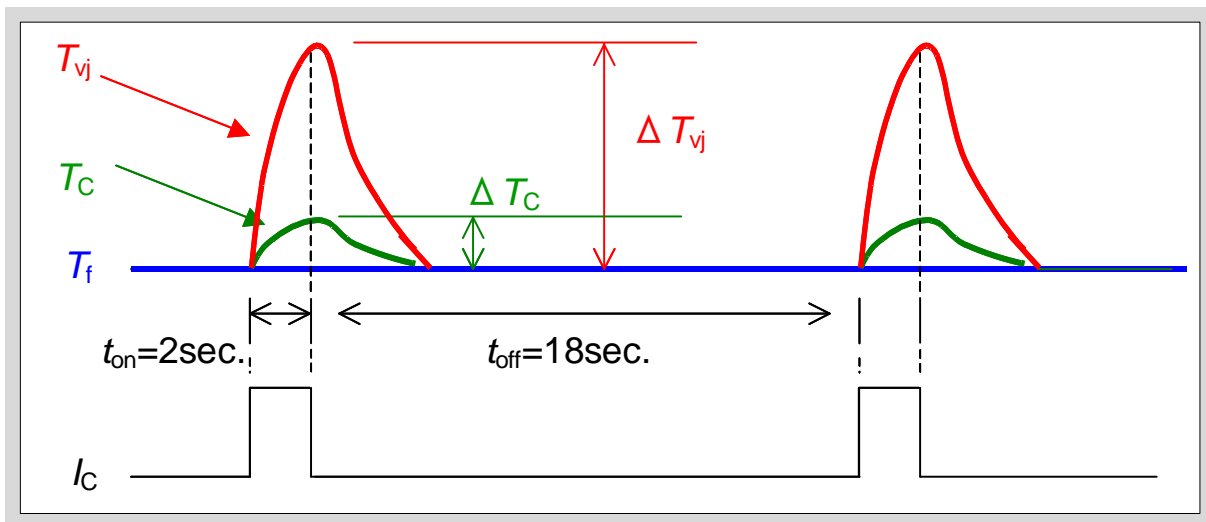


図11-2 ΔT_{vj} -P/Cの通電パターンと温度推移の模式図

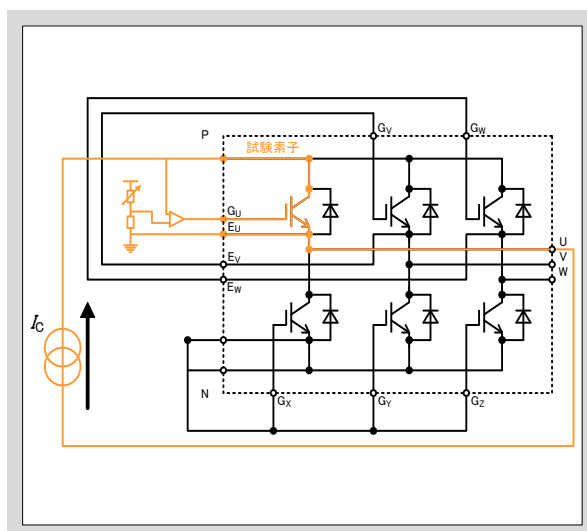


図11-3 ΔT_{vj} P/C試験の等価回路

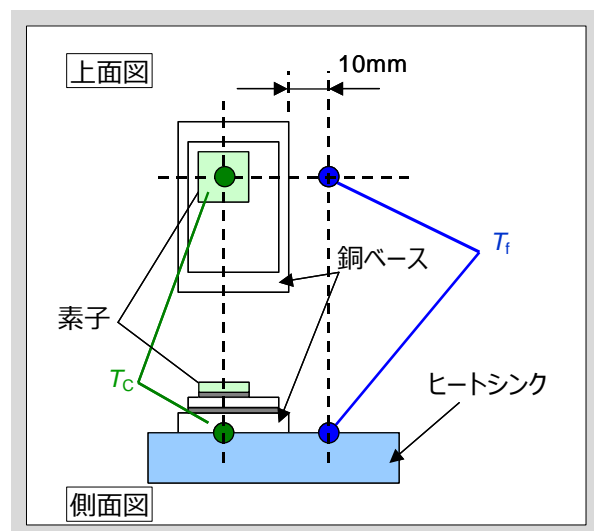


図11-4 T_C 及び T_s 測定位置の概略図

図11-5にIGBTモジュールの ΔT_{vj} -P/C寿命曲線例として、Uシリーズ、Vシリーズのカーブを示します。図11-5の $T_{vj(min)}=25^{\circ}\text{C}$ のラインはヒートシンクの温度を 25°C に固定し、チップ温度を変化させたときの寿命サイクル数を表しています。例えば $\Delta T_{vj}=50^{\circ}\text{C}$ の場合ではヒートシンク温度が 25°C でジャンクション温度が 75°C に達する条件となります。一方 $T_{vj(max)}=150^{\circ}\text{C}$ のラインはジャンクション到達温度を 150°C に固定しヒートシンク温度を変化させたときの寿命サイクル数を表しています。例えば $\Delta T_{vj}=50^{\circ}\text{C}$ の場合ではヒートシンク温度が 100°C でチップ温度が 150°C に達する条件となります。このように同一の ΔT_{vj} でもヒートシンク温度及びジャンクション到達温度が高いほど、その寿命は短くなります。

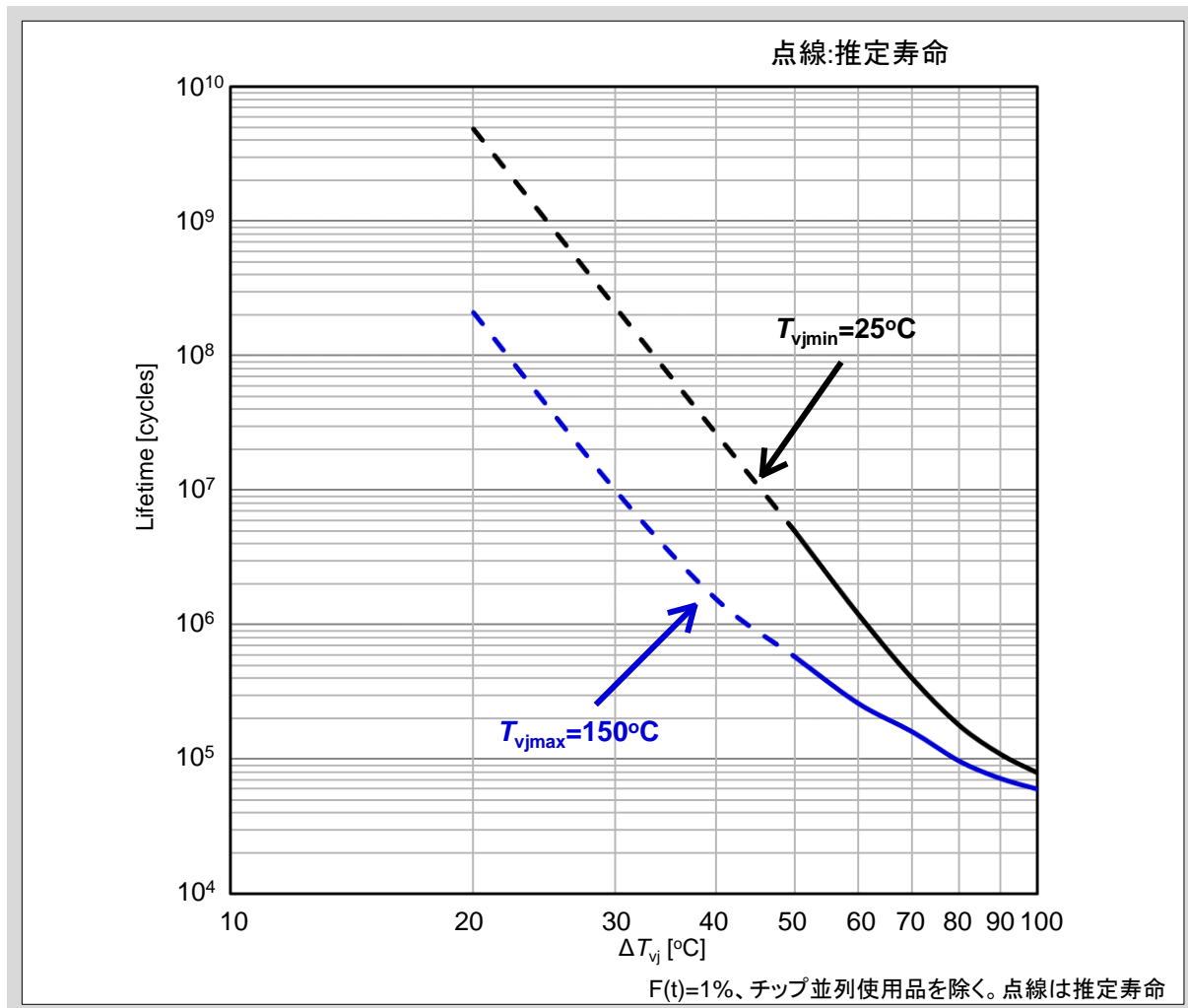


図11-5 ΔT_{vj} -P/C寿命曲線の例

3.2 実際の装置における ΔT_{vj} -P/C寿命の考え方

例えば図11-6に示すモータの加速・減速や起動・停止が頻繁に起こる装置では最大ジャンクション温度 T_{vj} とヒートシンク温度 T_f の差を ΔT_{vj} として(図11-2参照)、 ΔT_{vj} -P/C寿命を求めて下さい。また求めた寿命が目標設計製品寿命より充分長いことを確認して下さい。ただし、このような運転条件時の寿命設計は定常運転時の ΔT_{vj} から求めないよう注意して下さい。加速、減速、起動や停止時では定常運転時よりも大きな温度変化が生じるため、そのジャンクション温度変化により寿命が決まることによります。また、0.5Hzなどで低速運転をするインバータシステムでは、ジャンクション温度変化が大きくなるので、このときの ΔT_{vj} に充分注意して製品寿命を設計して下さい。

装置の運転1周期内に複数の加減速運転や低速運転がある場合、後述の「1周期に対して複数の温度上昇がある場合のパワーサイクル寿命計算」に記載の計算方法にしたがってパワーサイクル寿命を計算の上、寿命設計をして下さい。

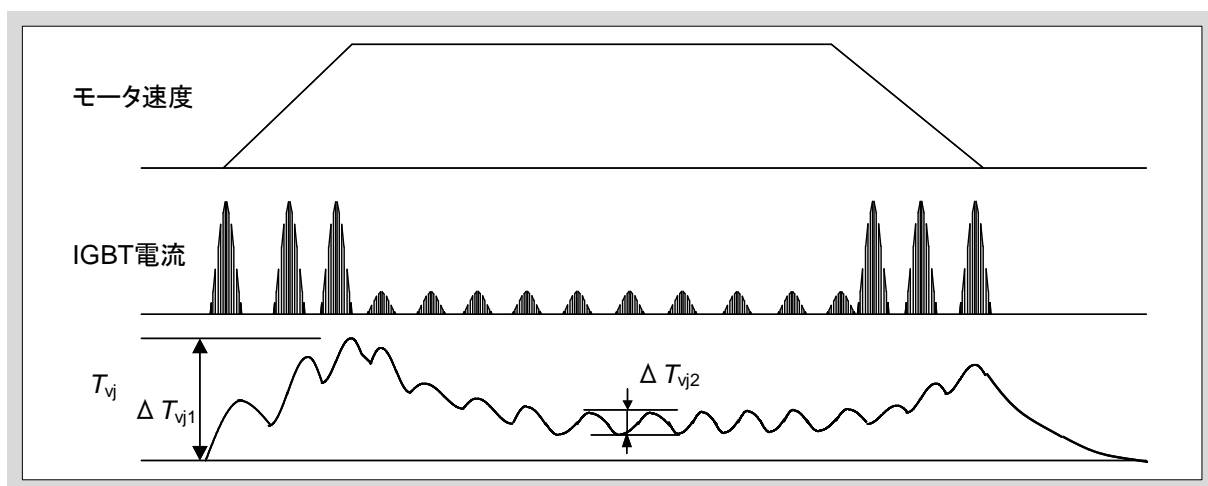


図11-6 実際のインバータにおける動作(例)

3.3 ΔT_C -P/C寿命曲線

図11-7に ΔT_C -P/Cの通電パターンを示します。

図11-8に6-Packモジュールを ΔT_C -P/C試験する時の等価回路図例を示します。 ΔT_C -P/C試験時には、すべてのIGBTに通電し、ケース(銅ベース)全体の温度を上下させます。このとき T_{vj} と T_C の温度差が小さくなるように、 T_C を比較的長い時間の周期で上昇・下降させます。このような温度変化が生じる場合は、銅ベースと絶縁基板DCB間に大きな応力ひずみが支配的になることから、 ΔT_C -P/C寿命は主に絶縁基板DCB下はんだ接合部の寿命を示します。

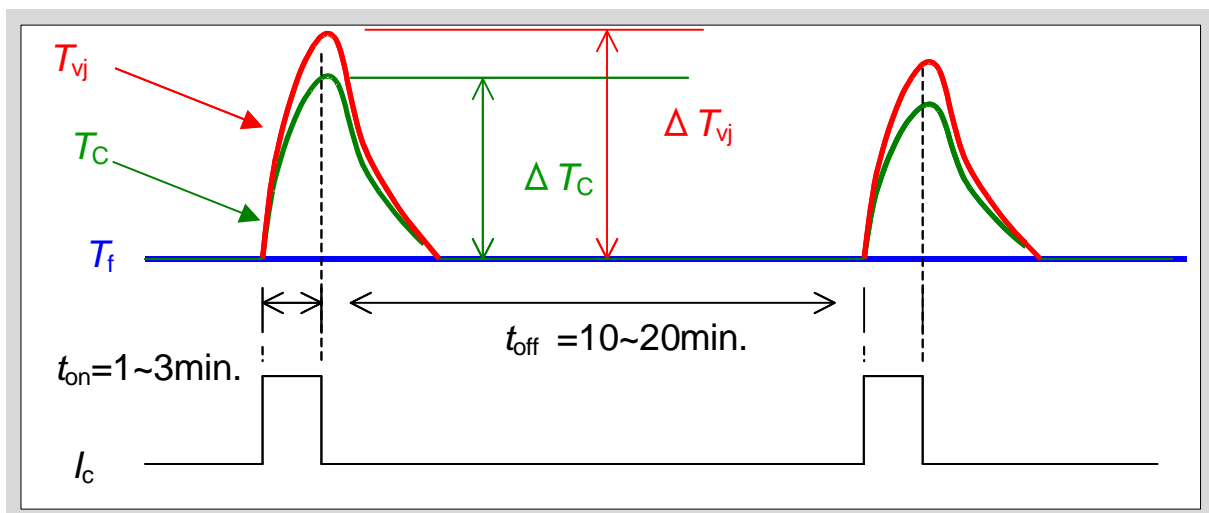


図11-7 ΔT_C パワーサイクルの通電パターン

ΔT_C -P/Cの破壊モードは次のように説明することができます。

T_C を上昇・下降させた場合、絶縁基板DCBとベースの熱膨張係数差によって、その間のはんだ接合部に最も大きな応力ひずみが生じます。温度変化を繰り返すと応力ひずみによりはんだ接合部に亀裂が発生します。亀裂が進行し、シリコンチップが配置された絶縁基板DCBの下まで到達すると、シリコンチップの放熱が悪化(熱抵抗 R_{th} が上昇)するため、 T_{vj} が上昇し、最終的には T_{vj} が T_{vjmax} を越え、熱破壊に至る可能性があります。

図11-9にIGBTモジュールの ΔT_C -P/Cカーブを示します。接合温度とケース温度の差が小さく、ケース温度の上昇・下降が頻繁に起こる場合は、 ΔT_C パワーサイクルカーブから求めた寿命回数が要求される目標設計製品寿命より充分長いことを確認して設計して下さい。

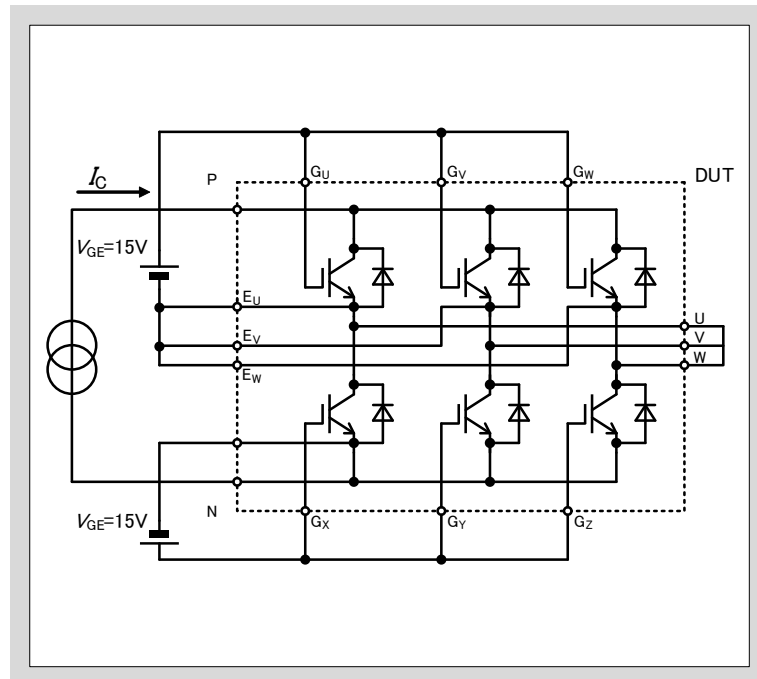


図11-8 ΔT_c -P/C試験の等価回路例

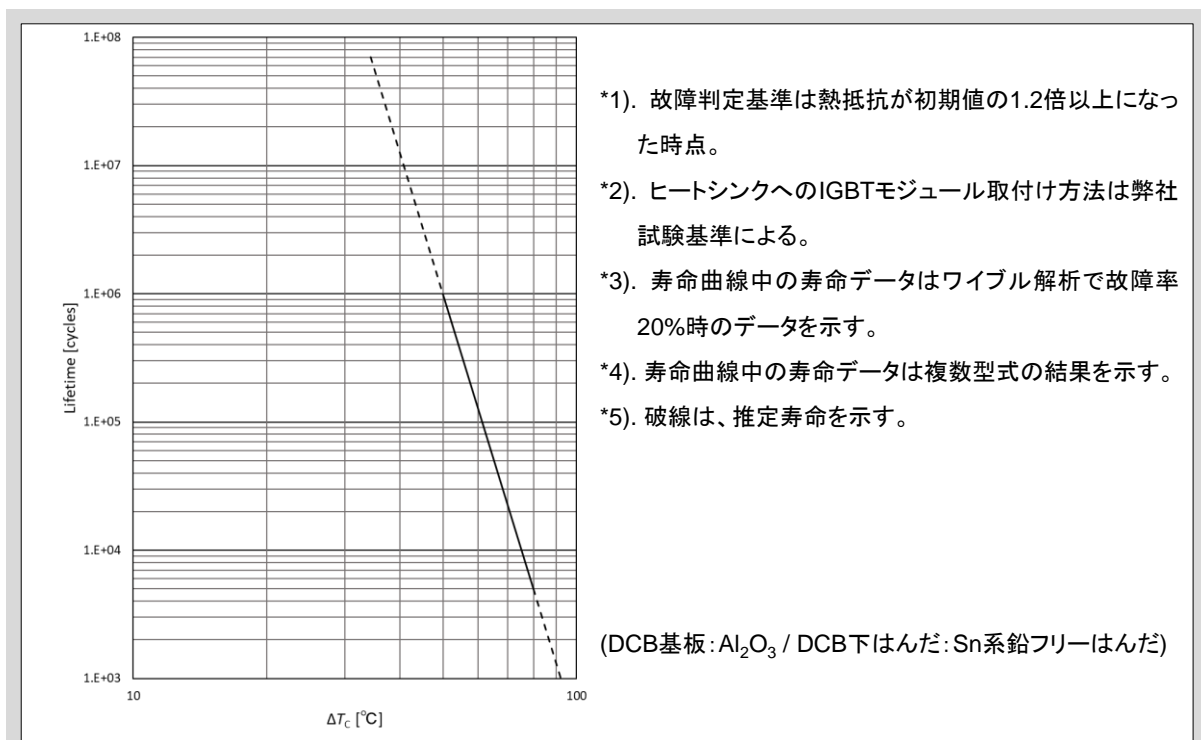


図11-9 ΔT_c パワーサイクル寿命の例

3.4 装置の運転1周期に対して複数の温度上昇がある場合のパワーサイクル寿命計算

IGBTモジュールのパワーサイクル寿命はパワーサイクル中の温度上昇幅及び最大ジャンクション温度に依存します。したがってインバータ運転1周期に対しIGBTモジュールの温度上昇ピークが1回の場合にはパワーサイクル寿命曲線から算出した回数がIGBTモジュールの寿命回数となります。しかしインバータ運転1周期に対しIGBTモジュールの温度上昇ピークが複数回ある場合は複数回の温度上昇の影響を受けるため、パワーサイクル寿命回数は短くなります。

以下に、複数の異なる温度上昇ピークがある場合のパワーサイクル寿命回数計算方法について示します。

インバータ運転1周期に対してn回の温度上昇がある場合、k回目(k=1、2、3、……、n)の温度上昇に対するパワーサイクル寿命回数をP/C(k)とすると合成パワーサイクル寿命回数は下記の式で表わすことができます。

$$P/C = 1 / \left(\sum_{k=1}^n \frac{1}{P/C(k)} \right)$$

n=4回、各温度上昇ピークに対応するパワーサイクル回数が 3.8×10^6 、 1.2×10^6 、 7.6×10^5 、 4.6×10^5 の場合

$$P/C = 1 / \left(\frac{1}{3.8 \times 10^6} + \frac{1}{1.2 \times 10^6} + \frac{1}{7.6 \times 10^5} + \frac{1}{4.6 \times 10^5} \right) = 2.2 \times 10^5$$

と計算できます。

この様にして計算したパワーサイクル寿命回数と運転モード1周期(時間)の積からパワーサイクル寿命時間を求めることができます。上記の運転モード1周期が1800秒 (30分) とした場合

$$2.2 \times 10^5 \times 1800 / (60 \times 60 \times 24 \times 365) = 12.55 \approx 12 \text{年} 6 \text{ヶ月}$$

が寿命時間となります。