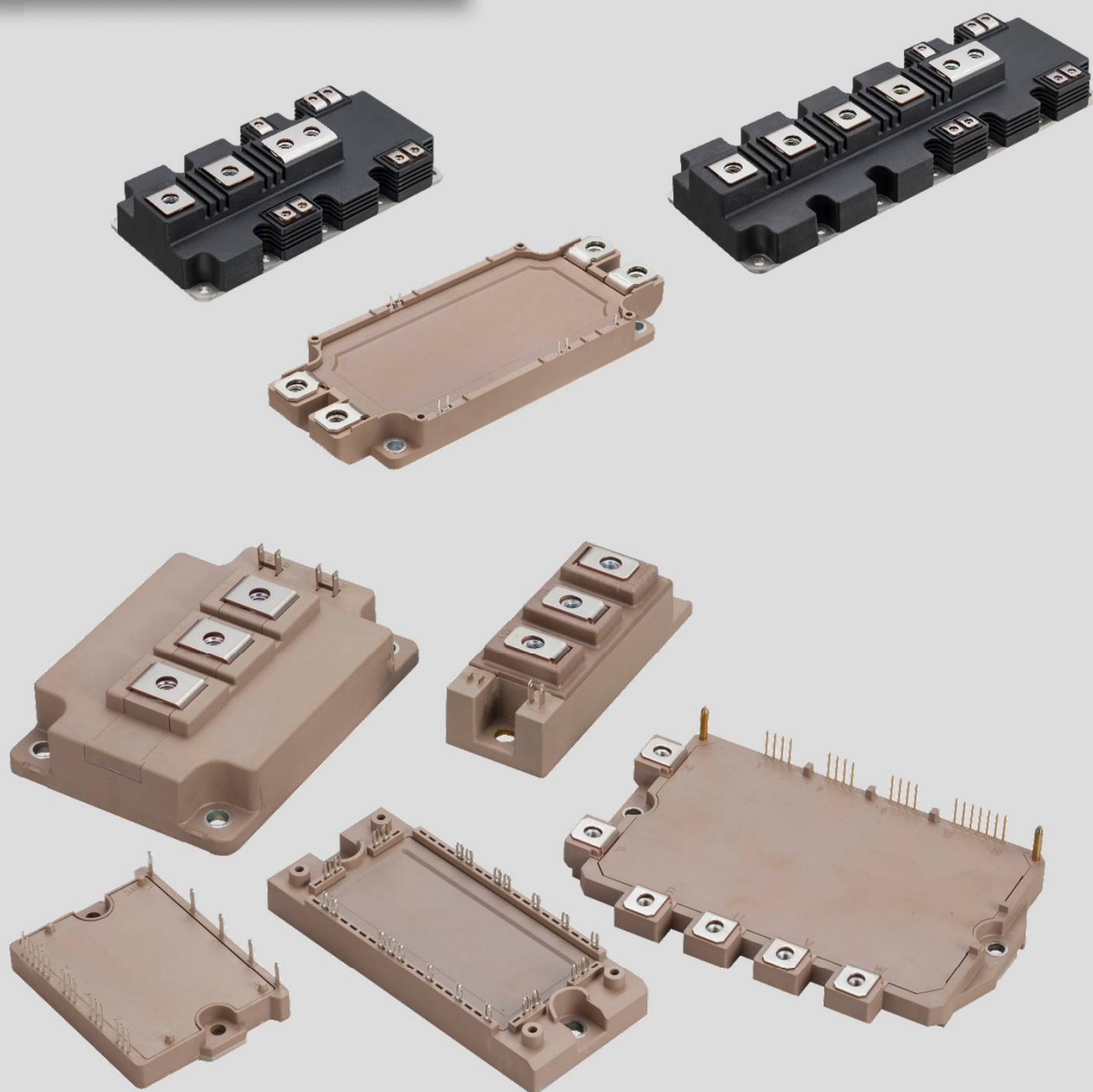




富士 IGBT モジュール 第11章 パワーモジュールの信頼性

Application Manual

注意

このマニュアルの内容(製品の仕様、特性、データ、材料、構造など)は2020年12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、
データを確認してください。

本資料に記載してある応用例は、富士電機の半導体製品を使用した代表的な応用例を説明するものであり、
本資料によって工業所有権、その他権利の実施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。

 注意

(1) 輸送と保管

段ボール箱の適切な面を上にして運搬してください。そうしないと製品に予期しないストレスがかかり、端子の曲りや樹脂パッケージ内の歪みなど、影響を及ぼす可能性があります。さらに製品を投げたり落下させたりすると、製品に大きなダメージを与える可能性があります。また水に濡れると破壊や故障の原因になりますので、雨や凍結には十分な配慮をお願いします。輸送中の温度や湿度などの環境条件は、仕様書に記載してありますので厳守してください。

(2) 組み立て環境

パワーモジュールの素子は静電気放電に対して非常に弱いため、組み立て環境におけるESD 対策を、仕様書に記載の範囲内で適切に実施してください。特に、導電性スポンジを制御端子から取り外す時が、最も製品に電氣的ダメージを与える可能性があります。

(3) 動作環境

製品を酸や有機物、腐食性ガス(硫化水素、硫酸ガスなど)にさらされる環境で使用した場合、製品性能や外観を十分確保することができません。

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広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。

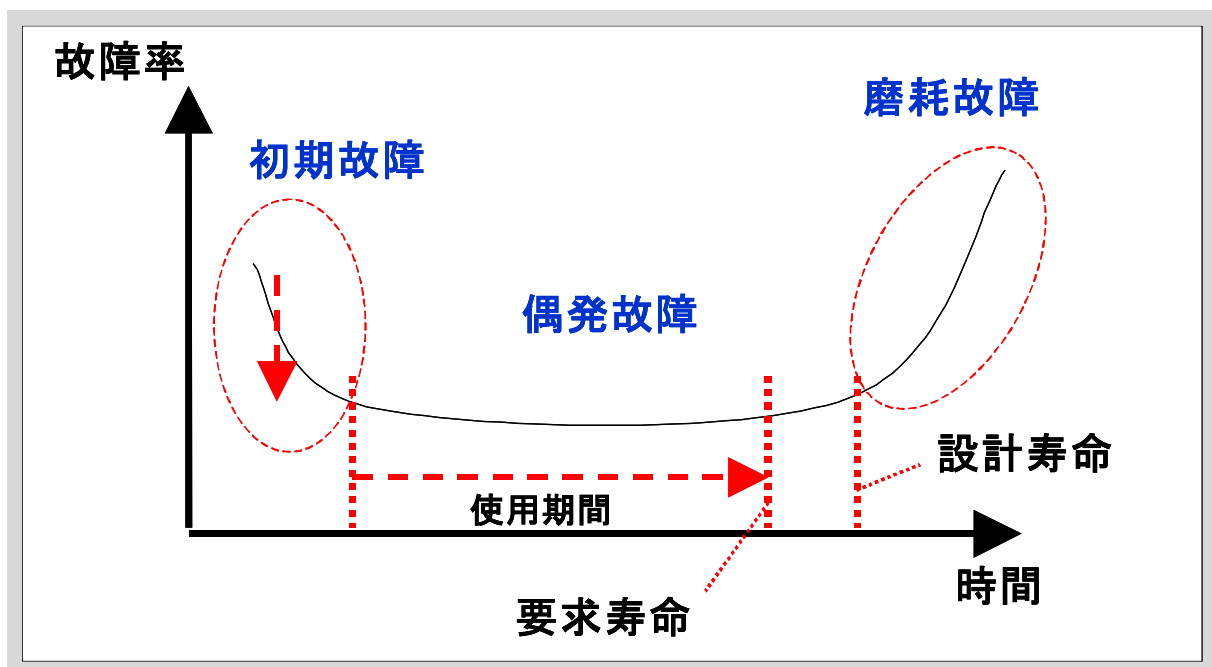


図11-1 半導体デバイスの故障率経時変化

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、ディレーティングして使用することを推奨いたします。

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節に示す 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う際、本パワーサイクル寿命を考慮し、寿命内で設計してください。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、設計してください。

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11-1,11-2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一覧の抜粋を示します。なお詳細につきましては納入仕様書を参照願います。

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. : $125\pm5^{\circ}\text{C}$ Test duration : 1000 hr.	Test Method 201A	5	(0:1)
	2 Low Temperature Storage	Storage temp. : $-40\pm5^{\circ}\text{C}$ Test duration : 1000 hr.	Test Method 202A	5	(0:1)
	3 Temperature Humidity Storage	Storage temp. : $85\pm2^{\circ}\text{C}$ Relative humidity : $85\pm5\%$ Test duration : 1000 hr.	Test Method 103A Test code C	5	(0:1)
	4 Temperature Cycle	Test temp. : $\begin{cases} \text{High temp. } 125+15/-0^{\circ}\text{C} \\ \text{Low temp. } -40+0/-10^{\circ}\text{C} \end{cases}$ Minimum soak time : 15 min. Number of cycles : 100 cycles	Test Method 105A	5	(0:1)
	5 Thermal Shock	Test temp. : $\begin{cases} \text{High temp. } 100+10/-2^{\circ}\text{C} \\ \text{Low temp. } 0+2/-10^{\circ}\text{C} \end{cases}$ Used liquid : Water with ice and boiling water Dipping time : 5 min. per each temp. Transfer time : 10 sec. Number of cycles : 10 cycles	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
Endurance 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 : 1000 hr.	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 -20 V Bias method : Applied DC voltage to G-E $V_{CE} = 0\text{ V}$ Test duration : 1000 hr.	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 : 1000 hr.	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. : $\Delta T_{vj} = 100 \pm 5\text{ deg.}$ $T_{vj} \leq 175^\circ\text{C}, T_s = 75 \pm 5^\circ\text{C}$ 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カーブから算出できます。そのカーブは大きく分けて2種類あります。

1つは ΔT_{vj} パワーサイクル(ΔT_{vj} -P/C)寿命カーブで、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寿命カーブです。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半田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 パワーサイクル(ΔT_c -P/C)寿命カーブで、ジャンクション温度の上昇, 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寿命カーブです。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半田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カーブについて次頁以降に記載します。

3.1 ΔT_{vj} パワーサイクル (ΔT_{vj} -P/C) 寿命カーブ

図11-2に ΔT_{vj} パワーサイクル (ΔT_{vj} -P/C) 試験の通電パターンを示します。図11-3および図11-4に ΔT_{vj} パワーサイクル試験時の等価回路図と T_c および T_s 測定位置の概略図をそれぞれ示します。 ΔT_{vj} パワーサイクル試験では、素子のジャンクション温度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間およ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} パワーサイクルは主にアルミワイヤとチップの接合およびシリコンチップ下半田部分の寿命を示します。

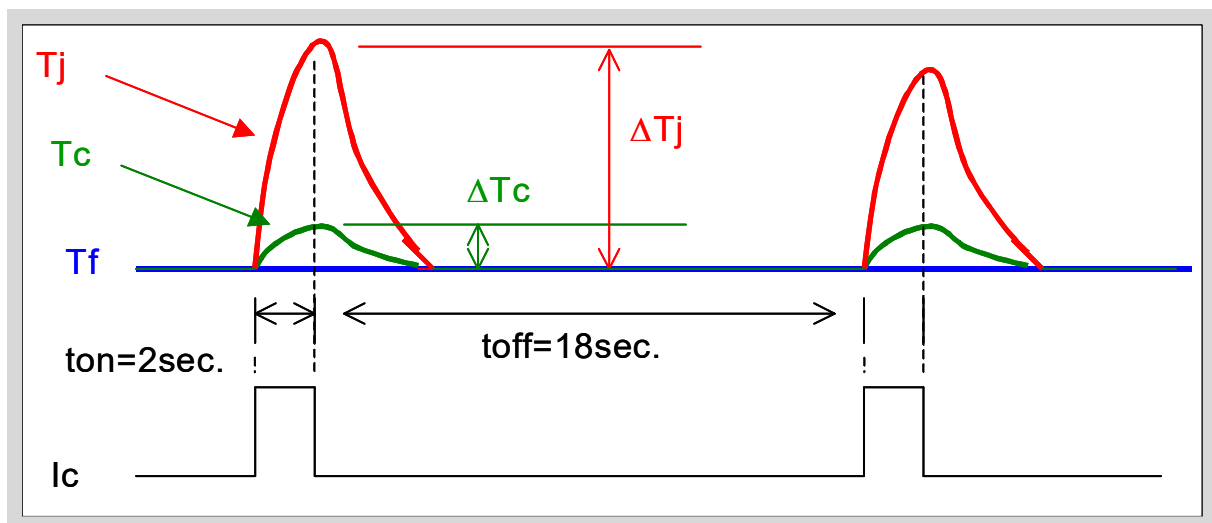


図11-2 ΔT_{vj} パワーサイクルの通電パターンと温度推移の模式図

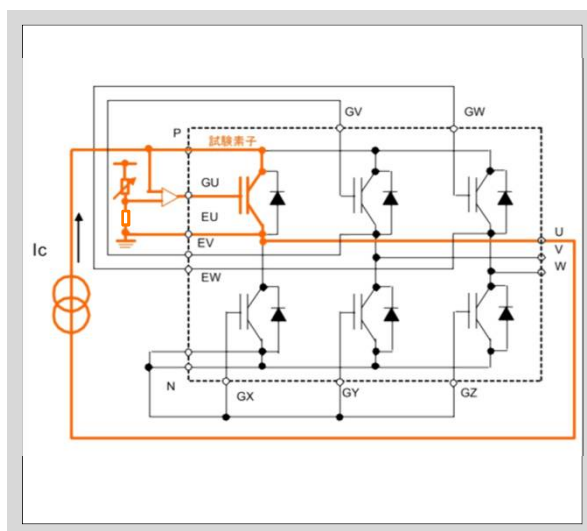


図11-3 ΔT_{vj} パワーサイクル試験の等価回路

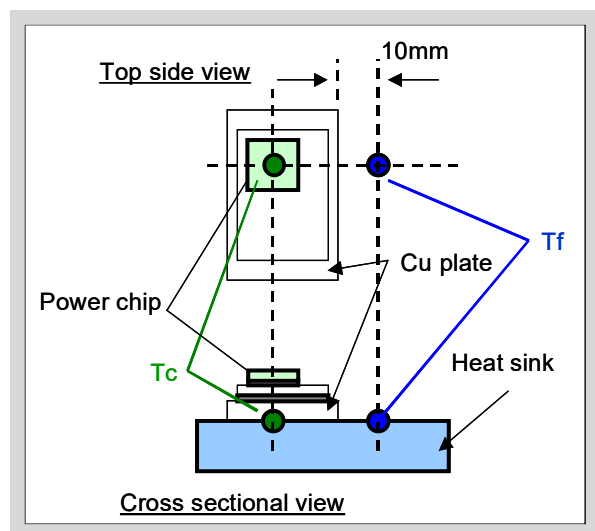


図11-4 T_c および T_s 測定位置の概略図

図11-5にIGBTモジュールの ΔT_{vj} パワーサイクル寿命カーブ例として、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。たとえば $\Delta T_{vj}=50^{\circ}\text{C}$ 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。たとえば $\Delta T_{vj}=50^{\circ}\text{C}$ 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およ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。

実際の装置における寿命設計では使用装置の運転条件で ΔT_{vj} を確認し、 ΔT_{vj} パワーサイクル寿命カーブから求められるパワーサイクル寿命が目標設計製品寿命より充分長いことを確認してください。

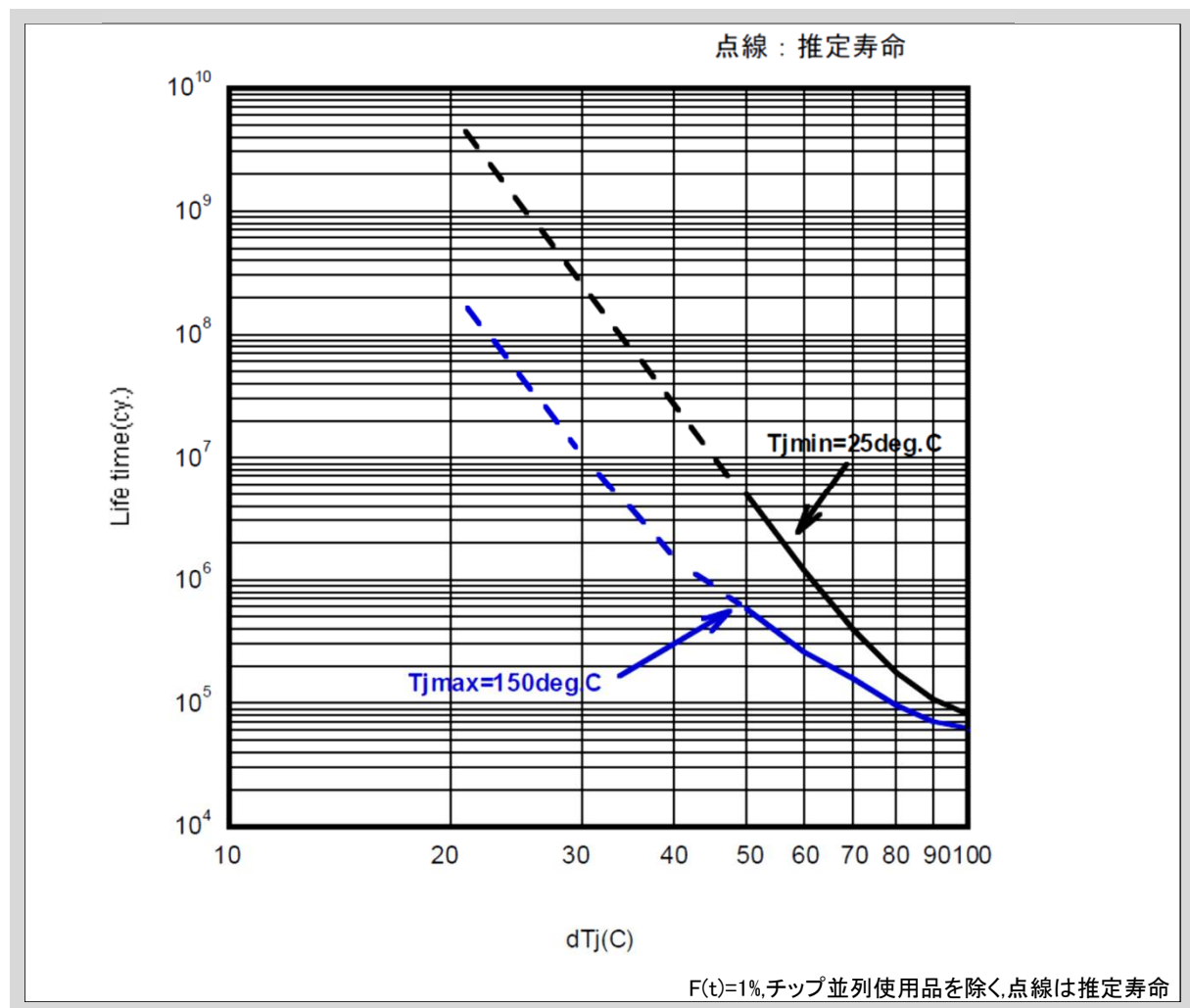


図11-5 ΔT_{vj} パワーサイクル寿命カーブの例

たとえば図11-6に示すモータの加速、減速、起動や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_s の差を ΔT_{vj} として（図11-2参照）、 ΔT_{vj} パワーサイクル寿命を求めてください。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ください。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ください。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低速運転時の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ください。

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、寿命設計をしてください。

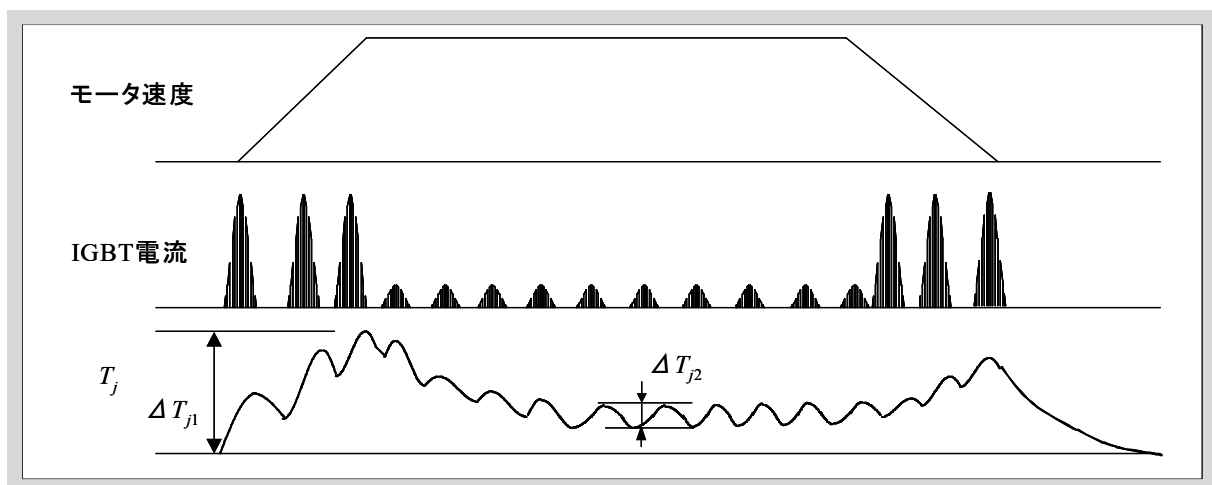


図11-6 実際のインバータにおける動作（例）

3.2 ΔT_c パワーサイクル (ΔT_c -P/C) 寿命カーブ

図11-7に弊社で実施の ΔT_c パワーサイクル (ΔT_c -P/C) の通電パターンを示します。

図11-8に6in1モジュールを ΔT_c パワーサイクル試験する時の等価回路図を示します。 ΔT_c パワーサイクル試験時には、すべての相（6in1モジュールの場合には6相、2in1モジュールの場合では2相）に通電し、ケース（銅ベース）全体の温度を上下させます。このとき接合温度 T_{vj} とケース温度 T_c の温度差が小さくなるように、ケース温度 T_c を比較的長い時間の周期で上昇、下降させる点が ΔT_{vj} パワーサイクル試験時の試験条件と異なります。このような温度変化が生じる場合は、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 パワーサイクル寿命は主に絶縁基板DCB下半田接合部の寿命を示します。

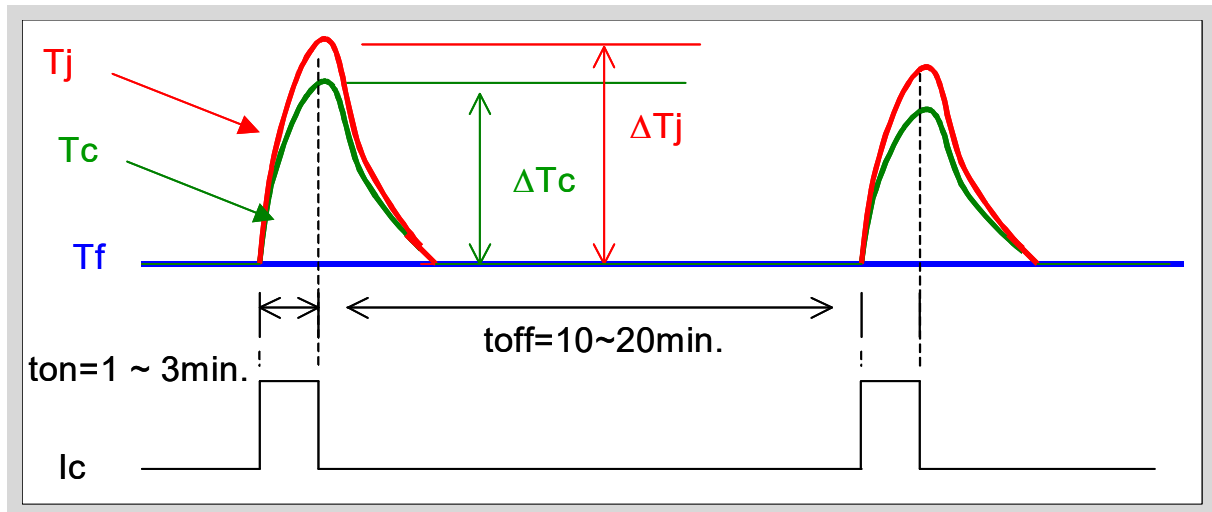


図11-7 ΔT_c パワーサイクルの通電パターン

ΔT_c パワーサイクルの破壊モードは次のように説明することができます。

ケース温度 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、その間の半田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半田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、ジャンクション温度 T_{vj} が上昇し、最終的にはジャンクション温度 T_{vj} が $T_{vj\max}$ を越え、熱破壊に至る可能性があります。

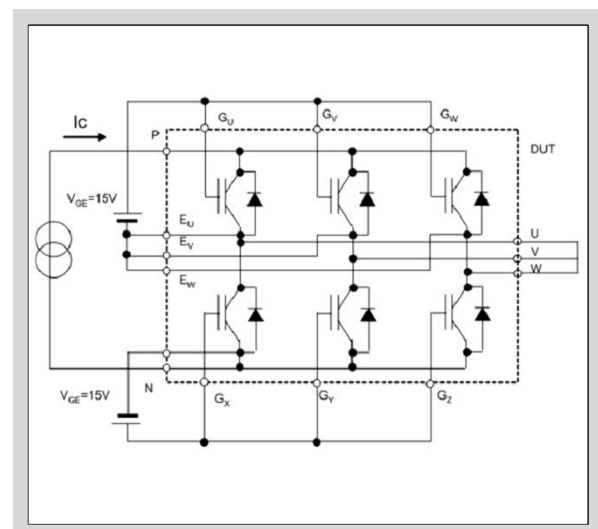


図11-8 ΔT_c パワーサイクル試験の等価回路

図11-9にIGBTモジュールの ΔT_c パワーサイクル

カーブを示します。接合部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ください。

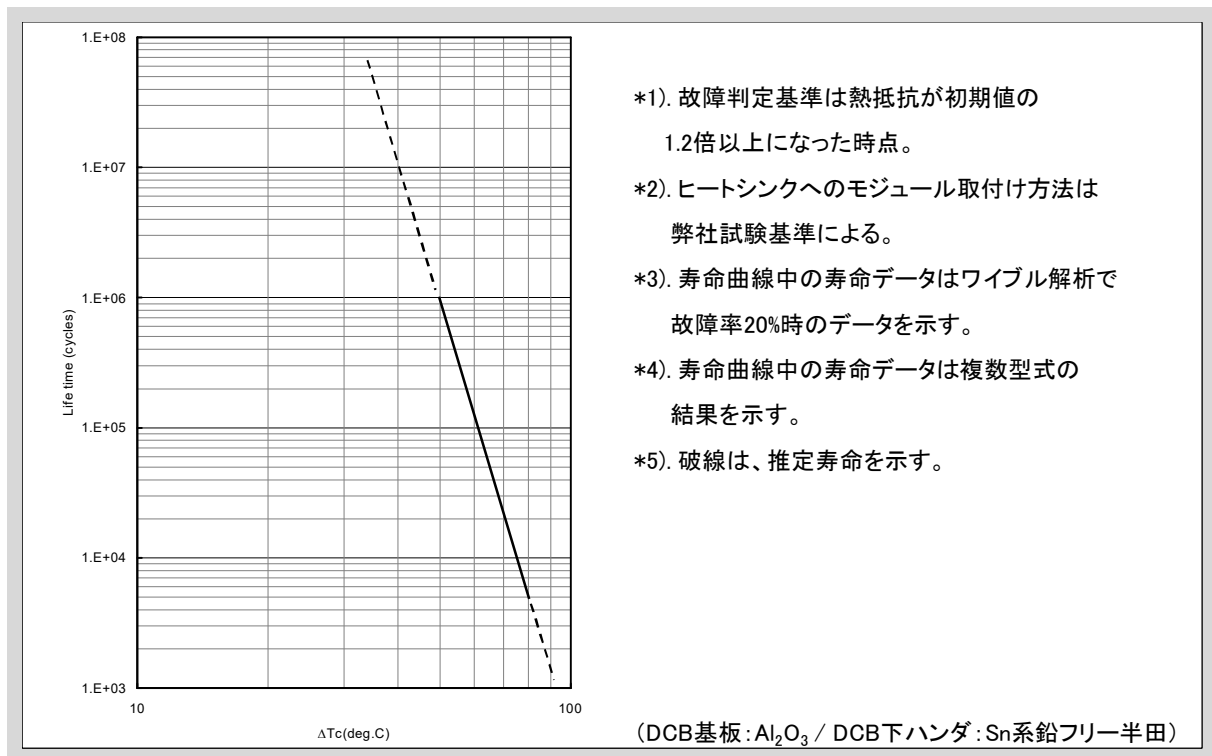


図11-9 ΔT_cパワーサイクル寿命の例

3.3 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(とその最大温度)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PC(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。

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

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

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

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

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

が寿命時間と計算できます。