
－ 第 11 章 －

パワーモジュールの信頼性

	目次	ページ
1	信頼性の基礎	11-2
2	信頼性試験	11-4
3	パワーサイクルカーブ	11-6

はじめに

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、これらの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のパワーモジュール製品に対する要求性能は、今以上に多様化あるいは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ためには、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 に示すように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。

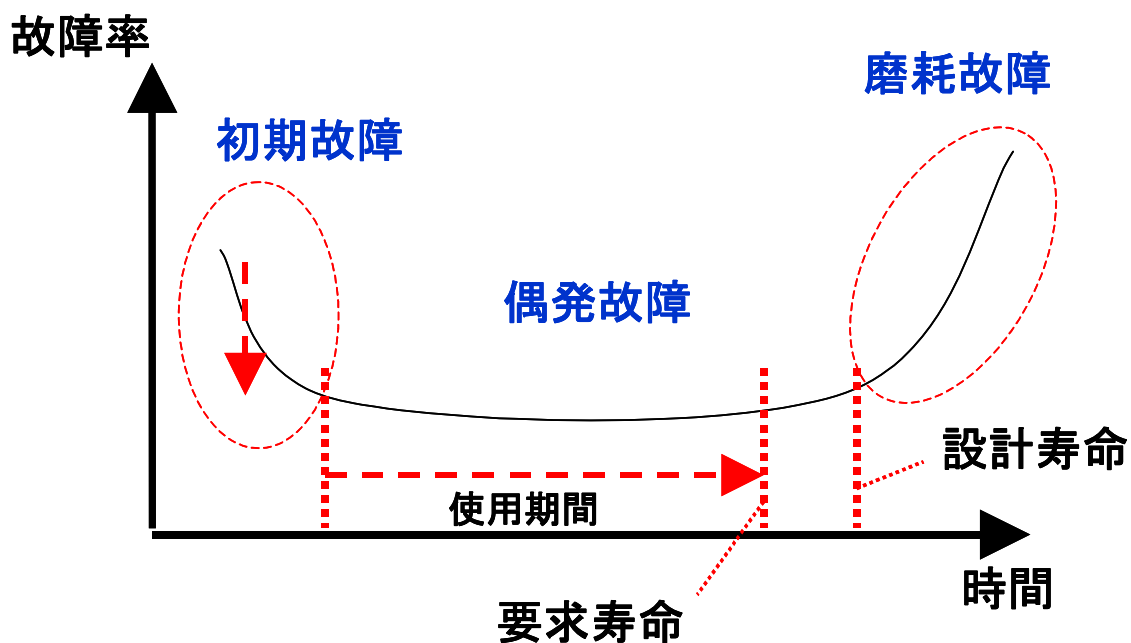


図 11-1 半導体デバイスの故障率経時変化

上記の故障率カーブにおいて、半導体デバイスの 1 つである IGBT モジュール製品での初期故障は、IGBT や 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な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 や FWD の設計、その製造工程設計、モジュールの構造設計、その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。しかしながら設計段階でこれらを完全に無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ることで、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、その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（ゲート・エミッタ間、ゲート・コレクタ間）、過電流、過熱など、製品の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。

それゆえ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に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されている最大定格に対し、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の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こされます。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した長期信頼性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、第三節に示すように ΔT_j パワーサイクル (ΔT_j -P/C) と ΔT_c パワーサイクル (ΔT_c -P/C) の 2 つのモデルについて寿命確認を行なっていますので、製品寿命設計に関しては、本パワーサイクル耐量内で設計してください。

また製品寿命は使用される環境や使用方法によって大きく変わりますので、それらも考慮して設計してください。

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 6 世代 IGBT モジュールである V 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 V 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 EIAJ ED-4701 (Aug.-2001 edition)	Number of sample	Acceptance number
Environment Tests	1 High Temperature Storage	Storage temp. : 125±5 °C Test duration : 1000hr.	Test Method 201	5	(0 : 1)
	2 Low Temperature Storage	Storage temp. : -40±5 °C Test duration : 1000hr.	Test Method 202	5	(0 : 1)
	3 Temperature Humidity Storage	Storage temp. : 85±2 °C Relative humidity : 85±5% Test duration : 1000hr.	Test Method 103 Test code C	5	(0 : 1)
	4 Unsaturated Pressurized Vapor	Test temp. : 120±2 °C Test humidity : 85±5% Test duration : 96hr.	Test Method 103 Test code E	5	(0 : 1)
	5 Temperature Cycle	Test temp. : ┌ Low temp. -40±5 °C ├ High temp. 125 ±5 °C └ RT 5 ~ 35 °C Dwell time : High ~ RT ~ Low ~ RT 1hr. 0.5hr. 1hr. 0.5hr. Number of cycles : 100 cycles	Test Method 105	5	(0 : 1)
	6 Thermal Shock	Test temp. : ┌ High temp. 100 ⁺⁰ ₋₅ °C └ Low temp. 0 ⁺⁵ ₋₀ °C Used liquid : Water with ice and boiling water Dipping time : 5 min. par each temp. Transfer time : 10 sec. Number of cycles : 10 cycles	Test Method 307 method I Condition code A	5	(0 : 1)

表 11-2 V 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 EIAJ ED-4701 (Aug.-2001 edition)	Number of sample	Acceptance number
Endurance Tests	1 High temperature Reverse Bias	Test temp. : $T_j = 150^{\circ}\text{C} (-0^{\circ}\text{C}/+5^{\circ}\text{C})$ Bias Voltage : $V_C = 0.8 \times V_{CES}$ Bias Method : Applied DC voltage to C-E $V_{GE} = 0\text{V}$ Test duration : 1000hr.	Test Method 101	5	(0 : 1)
	2 High temperature Bias (for gate)	Test temp. : $T_j = 150^{\circ}\text{C} (-0^{\circ}\text{C}/+5^{\circ}\text{C})$ Bias Voltage : $V_C = V_{GE} = +20\text{V}$ or -20V Bias Method : Applied DC voltage to G-E $V_{CE} = 0\text{V}$ Test duration : 1000hr.	Test Method 101	5	(0 : 1)
	3 Temperature Humidity Bias	Test temp. : $85 \pm 2^{\circ}\text{C}$ Relative humidity : $85 \pm 5\%$ Bias Voltage : $V_C = 0.8 \times V_{CES}$ Bias Method : : voltage to C-E $V_{GE} = 0\text{V}$ Test duration : 1000hr.	Test Method 102 Condition code C	5	(0 : 1)
	4 Intermittent Operating Life (Power cycle) (for IGBT)	ON time : 2 sec. OFF time : 18 sec. Test temp. : $100 \pm 5^{\circ}\text{deg}$ $T_j \leq 150^{\circ}\text{C}$, $T_a = 25 \pm 5^{\circ}\text{C}$ Number of cycles : 15000 cycles	Test Method 106	5	(0 : 1)

3 パワーサイクル寿命（パワーサイクル耐量）

IGBT モジュールは、使用される動作条件に応じて熱の上昇、下降が生じます。この熱の上昇、下降によって IGBT モジュールの内部構造は熱ストレスを受けて疲労、劣化が進みます。この疲労や劣化は温度の上昇と下降の変化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。この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耐量カーブから算出できますが、そのカーブは大きく分けて 2 種類存在します。

その 1 つは ΔT_j パワーサイクル (ΔT_j -P/C) 耐量カーブで、素子温度が急激に上昇、下降することで生じる寿命カーブです。このカーブではチップ表面のアルミワイヤ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) 耐量カーブで、素子温度の上昇、下降にケース温度（主にベース温度） T_c の変化が追従することで生じる寿命カーブです。この場合には、絶縁基板 DCB と銅ベース間の接合に使用される半田接合部の劣化による故障が支配的となります。

以下では ΔT_j -P/C、 ΔT_c -P/C パワーサイクルのそれぞれの測定方法とパワーサイクル耐量カーブについて記載します。

3.1 ΔT_j パワーサイクル (ΔT_j -P/C) 耐量カーブ

図 11-2 に ΔT_j パワーサイクル (ΔT_j -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_j パワーサイクル試験時の等価回路図と T_c および T_f 測定位置の概略図をそれぞれ示します。 ΔT_j パワーサイクル試験時には、素子の接合部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、もしくは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_j パワーサイクルは主にアルミワイヤの接合およびシリコンチップ下はんだ部の寿命を示します。

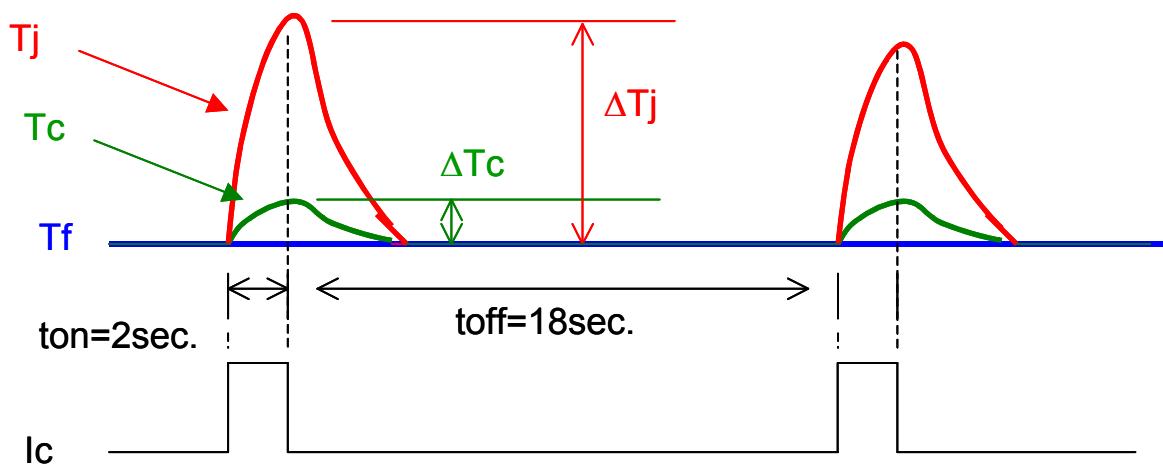


図 11-2 ΔT_j パワーサイクルの通電パターンと温度推移の模式図

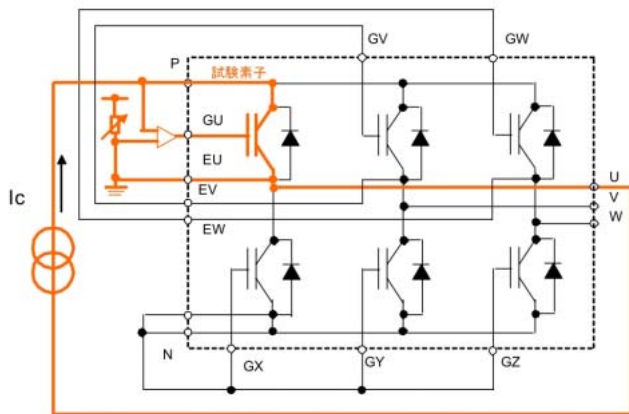


図 11-3 ΔT_j パワーサイクル試験の等価回路

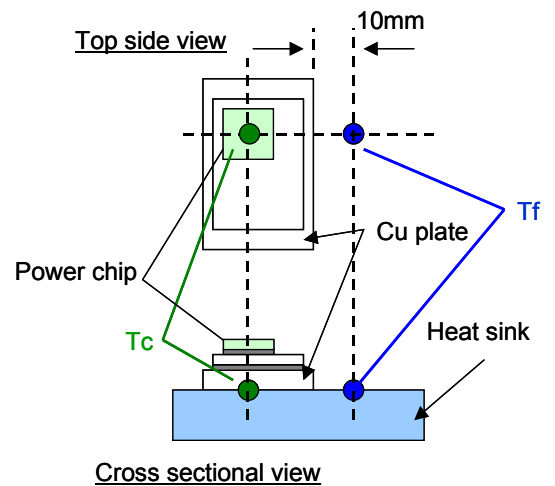


図 11-4 T_c および T_f 測定位置の概略図

図 11-5 に IGBT モジュールの ΔT_j パワーサイクル耐量カーブの例として、U シリーズ、V シリーズのカーブを示します。

図 11-5 の $T_{jmin}=25^\circ\text{C}$ のラインは冷却フィンの温度を 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 $\Delta T_j=50^\circ\text{C}$ の場合では冷却フィン温度が 25°C でチップ温度が 75°C に達する条件となります。一方 $T_{jmax}=150^\circ\text{C}$ のラインはチップの到達温度を 150°C に固定し冷却フィン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 $\Delta T_j=50^\circ\text{C}$ の場合では冷却フィン温度が 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_j でも冷却フィン温度およびチップ

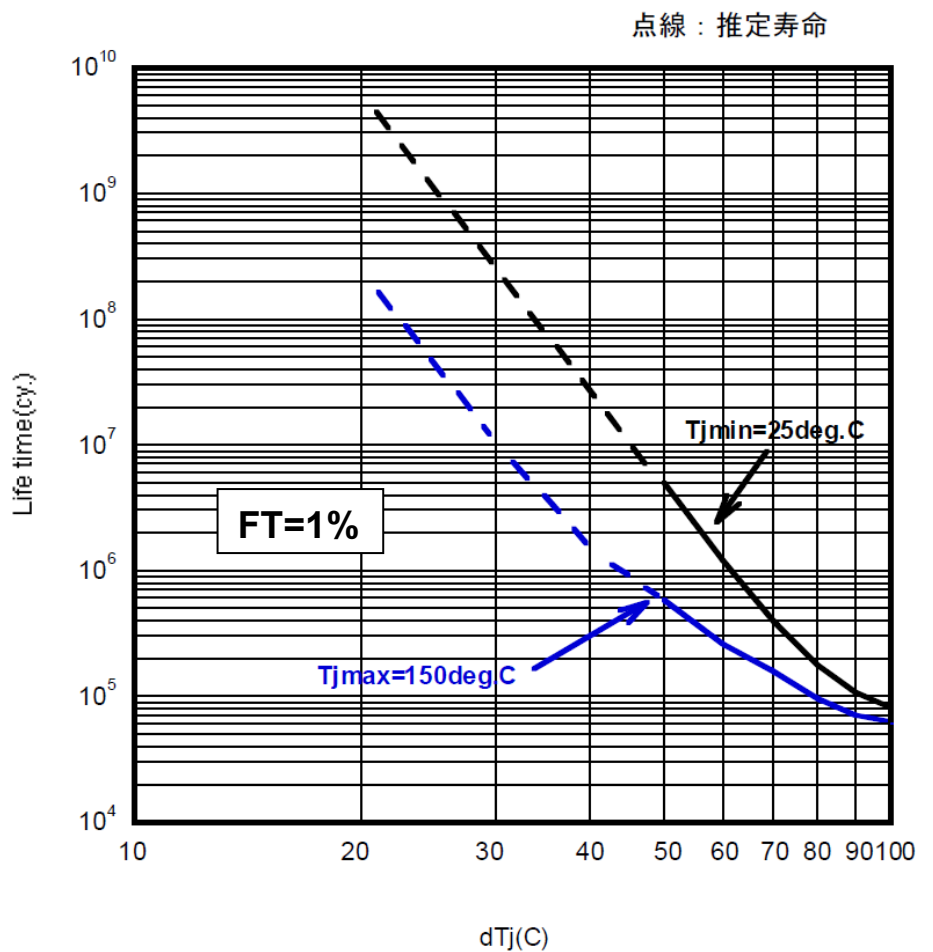


図 11-5 ΔT_j パワーサイクル耐量カーブの例
($F(t)=1\%$ 。チップ並列使用品を除く。点線は推定寿命。)

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は、使用される装置の運転条件での ΔT_j を確認し、 ΔT_j パワーサイクル耐量カーブから求められるパワーサイクル寿命が要求される製品寿命回数より充分長いことを確認して設計してください。

例えば図 11-6 に示したようなモータの加速や減速、起動や停止が頻繁に起こる装置では、最大接合温度 T_j とフィン温度 T_f の差を ΔT_j として（図 11-2 参照）、 ΔT_j パワーサイクル寿命を求めてください、そしてその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。

このとき、このような運転条件での寿命設計は定常運転時の ΔT_j から求めないように注意してください。これは加速や減速、起動や停止時には定常運転時よりも大きな温度変化が生じ、その温度変化により寿命が決まるためです。

また、0.5Hz などの低速運転をするドライブシステムにおいても温度変化が大きくなるので、このときの ΔT_j 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温度がある場合には、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し、寿命設計をしてください。

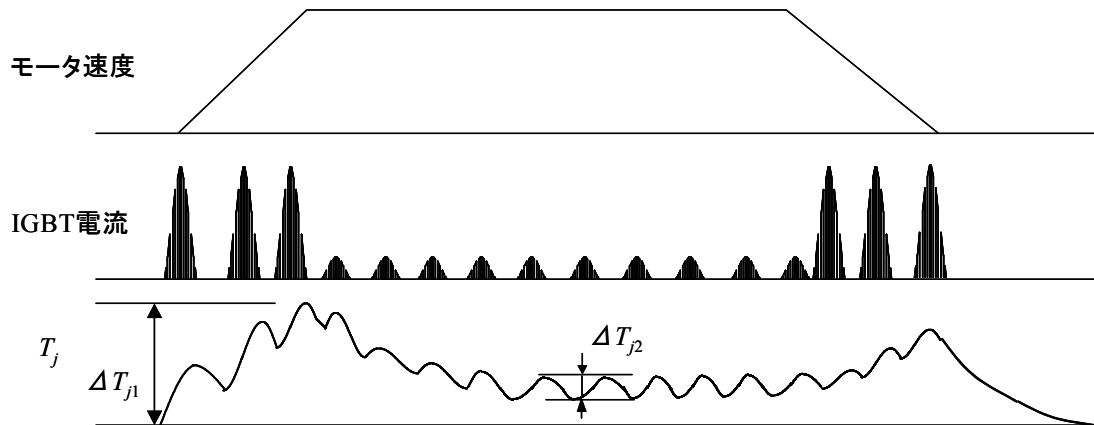


図 11-6 実際のインバータにおける動作（例）

3.2 ΔTc パワーサイクル (ΔTc-P/C) 耐量カーブ

図 11-7 に弊社で行っている ΔTc パワーサイクル (ΔTc-P/C) の通電パターンを示します。図 11-8 に 6in1 モジュールに対する ΔTc パワーサイクル試験時の等価回路図を示します。ΔTc 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) を通電させケース (主に銅ベース) 全体の温度を上下させます。このとき接合温度 T_j 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 ΔTj 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には、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、そのパワーサイクルは主に絶縁基板 DCB 下はんだ接合部の寿命を示します。

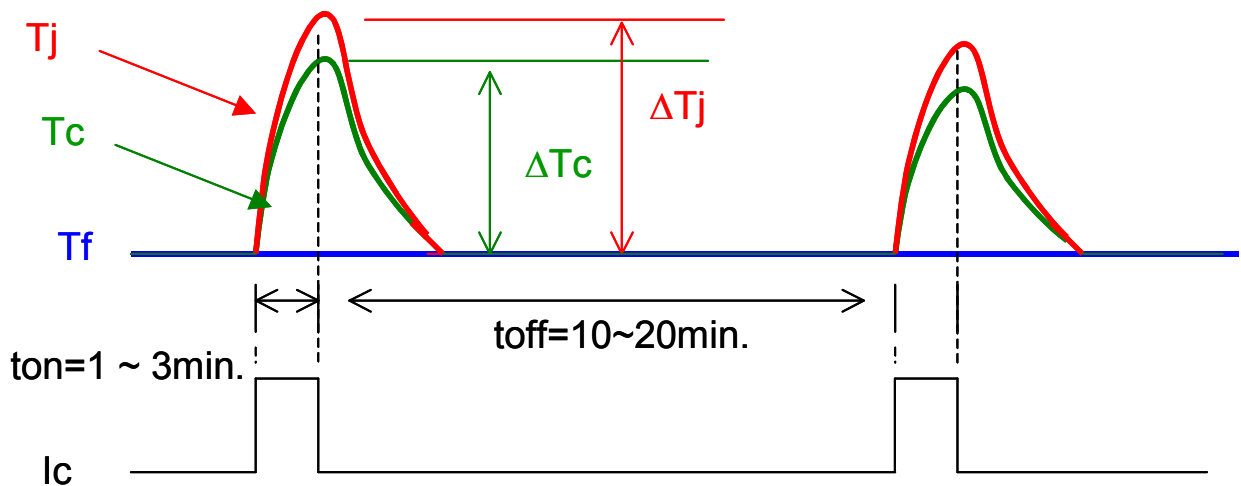


図 11-7 ΔTc パワーサイクルの通電パターン

ΔTc 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。この温度変化が繰り返されると応力ひずみにより半田接合部に亀裂を発生させます。この亀裂が進行しシリコンチップが配置された絶縁基板 DCB の下まで進展すると、シリコンチップの放熱が悪化する (熱抵抗 R_{th} が上昇する) ためチップ接合温度 T_j が上昇します。その結果、最終的にはチップ接合温度 T_j が T_{jmax} を越えて、熱破壊に至る可能性があります。

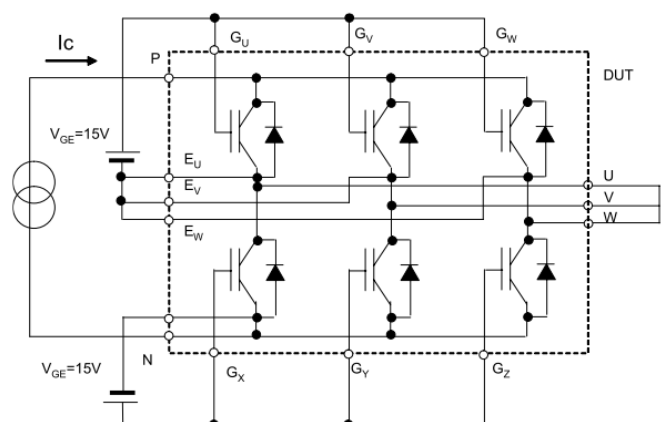


図 11-8 ΔTc パワーサイクル試験の等価回路

図 11-9 に IGBT モジュールでの 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には、 ΔT_c パワーサイクルカーブから求められる運転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。

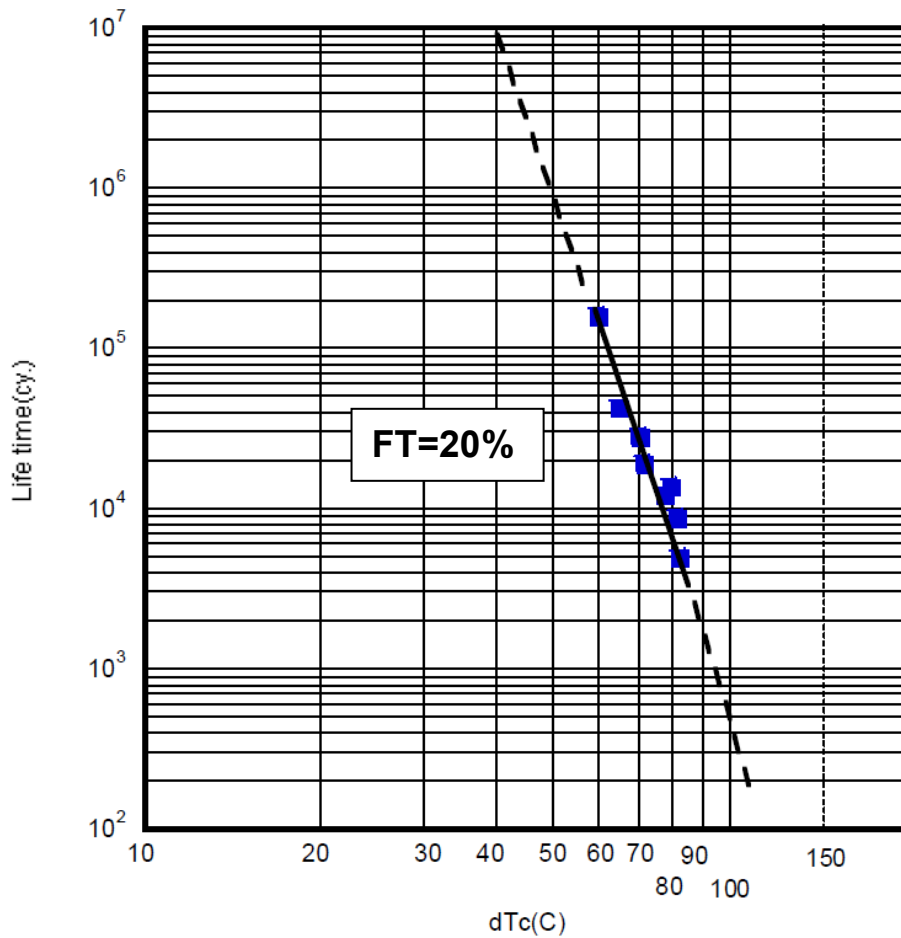


図 11-9 ΔT_c パワーサイクル耐量の例
(DCB 基板 : Al_2O_3 / DCB 下ハンダ : Sn 系鉛フリーハンダ)

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の運転 1 周期に対して IGBT モジュールの温度上昇のピークが 1 回の場合には、パワーサイクル寿命曲線から算出される回数が IGBT モジュールの寿命回数となります。

しかしながら、インバータの運転 1 周期に対して IGBT モジュールの温度上昇ピークが複数回ある場合には、複数回の温度上昇の影響を受けるため、そのパワーサイクル寿命回数は短くなります。

以下では、複数の異なる温度上昇ピークがある場合におけるパワーサイクル寿命回数の計算方法について示します。

インバータの運転 1 周期に対して n 回の温度上昇がある場合、それらの k 回目 ($k=1, 2, 3, \dots, n$) 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。

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

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

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

と計算されます。

それゆえこの様に計算される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。

例えば上記の運転モード 1 周期が 1800sec (30min) とした場合

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

と寿命時間が計算されることとなります。

ご 注 意

- このカタログの内容（製品の仕様、特性、データ、材料、構造など）は2011年4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。このカタログ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。
- 本カタログ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、本カタログ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。
- 富士電機（株）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、半導体製品はある確率で故障する可能性があります。富士電機の半導体製品の故障が、結果として人身事故、火災等による財産に対する損害や、社会的な損害を起さぬように冗長設計、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ください。
- 本カタログに記載している製品は、普通の信頼度が要求される下記のような電子機器や電気機器に使用されることを意図して造られています。

・コンピュータ	・OA 機器	・通信機器（端末）	・計測機器	・工作機械
・オーディオビジュアル機器		・家庭用電気製品	・パーソナル機器	・産業用ロボット など
- 本カタログに記載の製品を、下記のような特に高い信頼度を持つ必要がある機器に使用をご予定のお客様は、事前に富士電機（株）へ必ず連絡の上、了解を得てください。このカタログの製品をこれらの機器に使用するには、そこに組み込まれた富士電機の半導体製品が故障しても、機器が誤動作しないように、バックアップ・システムなど、安全維持のための適切な手段を講じることが必要です。

・輸送機器（車載、船用など）	・幹線用通信機器	・交通信号機器	
・ガス漏れ検知及び遮断機	・防災／防犯装置	・安全確保のための各種装置	・医療機器
- 極めて高い信頼性を要求される下記のような機器及び戦略物資に該当する機器には、本カタログに記載の製品を使用しないでください。

・宇宙機器	・航空機搭載用機器	・原子力制御機器	・海底中継機器
-------	-----------	----------	---------
- 本カタログの一部または全部の転載複製については、文書による当社の承諾が必要です。
- このカタログの内容にご不明の点がありましたら、製品を使用する前に富士電機（株）または、その販売店へ質問してください。本注意書きの指示に従わないために生じたいかなる損害も富士電機（株）とその販売店は責任を負うものではありません。