

お客様各位

---

## カタログ等資料中の旧社名の扱いについて

---

2010年4月1日を以ってNECエレクトロニクス株式会社及び株式会社ルネサステクノロジが合併し、両社の全ての事業が当社に承継されております。従いまして、本資料中には旧社名での表記が残っておりますが、当社の資料として有効ですので、ご理解の程宜しくお願ひ申し上げます。

ルネサスエレクトロニクス ホームページ (<http://www.renesas.com>)

2010年4月1日  
ルネサスエレクトロニクス株式会社

【発行】ルネサスエレクトロニクス株式会社 (<http://www.renesas.com>)

【問い合わせ先】 <http://japan.renesas.com/inquiry>

## ご注意書き

1. 本資料に記載されている内容は本資料発行時点のものであり、予告なく変更することがあります。当社製品のご購入およびご使用にあたりましては、事前に当社営業窓口で最新の情報をご確認いただきますとともに、当社ホームページなどを通じて公開される情報に常にご注意ください。
2. 本資料に記載された当社製品および技術情報の使用に関連し発生した第三者の特許権、著作権その他の知的財産権の侵害等に関し、当社は、一切その責任を負いません。当社は、本資料に基づき当社または第三者の特許権、著作権その他の知的財産権を何ら許諾するものではありません。
3. 当社製品を改造、改変、複製等しないでください。
4. 本資料に記載された回路、ソフトウェアおよびこれらに関連する情報は、半導体製品の動作例、応用例を説明するものです。お客様の機器の設計において、回路、ソフトウェアおよびこれらに関連する情報を使用する場合には、お客様の責任において行ってください。これらの使用に起因しお客様または第三者に生じた損害に関し、当社は、一切その責任を負いません。
5. 輸出に際しては、「外国為替及び外国貿易法」その他輸出関連法令を遵守し、かかる法令の定めるところにより必要な手続を行ってください。本資料に記載されている当社製品および技術を大量破壊兵器の開発等の目的、軍事利用の目的その他軍事用途の目的で使用しないでください。また、当社製品および技術を国内外の法令および規則により製造・使用・販売を禁止されている機器に使用することができません。
6. 本資料に記載されている情報は、正確を期すため慎重に作成したのですが、誤りが無いことを保証するものではありません。万一、本資料に記載されている情報の誤りに起因する損害がお客様に生じた場合においても、当社は、一切その責任を負いません。
7. 当社は、当社製品の品質水準を「標準水準」、「高品質水準」および「特定水準」に分類しております。また、各品質水準は、以下に示す用途に製品が使われることを意図しておりますので、当社製品の品質水準をご確認ください。お客様は、当社の文書による事前の承諾を得ることなく、「特定水準」に分類された用途に当社製品を使用することができません。また、お客様は、当社の文書による事前の承諾を得ることなく、意図されていない用途に当社製品を使用することができません。当社の文書による事前の承諾を得ることなく、「特定水準」に分類された用途または意図されていない用途に当社製品を使用したことによりお客様または第三者に生じた損害等に関し、当社は、一切その責任を負いません。なお、当社製品のデータ・シート、データ・ブック等の資料で特に品質水準の表示がない場合は、標準水準製品であることを表します。  
標準水準： コンピュータ、OA 機器、通信機器、計測機器、AV 機器、家電、工作機械、パーソナル機器、産業用ロボット  
高品質水準： 輸送機器（自動車、電車、船舶等）、交通用信号機器、防災・防犯装置、各種安全装置、生命維持を目的として設計されていない医療機器（厚生労働省定義の管理医療機器に相当）  
特定水準： 航空機器、航空宇宙機器、海底中継機器、原子力制御システム、生命維持のための医療機器（生命維持装置、人体に埋め込み使用するもの、治療行為（患部切り出し等）を行うもの、その他直接人命に影響を与えるもの）（厚生労働省定義の高度管理医療機器に相当）またはシステム等
8. 本資料に記載された当社製品のご使用につき、特に、最大定格、動作電源電圧範囲、放熱特性、実装条件その他諸条件につきましては、当社保証範囲内でご使用ください。当社保証範囲を超えて当社製品をご使用された場合の故障および事故につきましては、当社は、一切その責任を負いません。
9. 当社は、当社製品の品質および信頼性の向上に努めておりますが、半導体製品はある確率で故障が発生したり、使用条件によっては誤動作したりする場合があります。また、当社製品は耐放射線設計については行っておりません。当社製品の故障または誤動作が生じた場合も、人身事故、火災事故、社会的損害などを生じさせないようお客様の責任において冗長設計、延焼対策設計、誤動作防止設計等の安全設計およびエージング処理等、機器またはシステムとしての出荷保証をお願いいたします。特に、マイコンソフトウェアは、単独での検証は困難なため、お客様が製造された最終の機器・システムとしての安全検証をお願いいたします。
10. 当社製品の環境適合性等、詳細につきましては製品個別に必ず当社営業窓口までお問合せください。ご使用に際しては、特定の物質の含有・使用を規制する RoHS 指令等、適用される環境関連法令を十分調査のうえ、かかる法令に適合するようご使用ください。お客様がかかる法令を遵守しないことにより生じた損害に関し、当社は、一切その責任を負いません。
11. 本資料の全部または一部を当社の文書による事前の承諾を得ることなく転載または複製することを固くお断りいたします。
12. 本資料に関する詳細についてのお問い合わせその他お気付きの点等がございましたら当社営業窓口までご照会ください。

注 1. 本資料において使用されている「当社」とは、ルネサスエレクトロニクス株式会社およびルネサスエレクトロニクス株式会社とその総株主の議決権の過半数を直接または間接に保有する会社をいいます。

注 2. 本資料において使用されている「当社製品」とは、注 1 において定義された当社の開発、製造製品をいいます。

# アプリケーション・ノート

## Power MOS FETの アバランシェ耐量について

---

- 本資料に記載されている内容は2007年6月現在のもので、今後、予告なく変更することがあります。量産設計の際には最新の個別データ・シート等をご参照ください。
- 文書による当社の事前の承諾なしに本資料の転載複製を禁じます。当社は、本資料の誤りに関し、一切その責を負いません。
- 当社は、本資料に記載された当社製品の使用に関連し発生した第三者の特許権、著作権その他の知的財産権の侵害等に関し、一切その責を負いません。当社は、本資料に基づき当社または第三者の特許権、著作権その他の知的財産権を何ら許諾するものではありません。
- 本資料に記載された回路、ソフトウェアおよびこれらに関する情報は、半導体製品の動作例、応用例を説明するものです。お客様の機器の設計において、回路、ソフトウェアおよびこれらに関する情報を使用する場合には、お客様の責任において行ってください。これらの使用に起因しお客様または第三者に生じた損害に関し、当社は、一切その責を負いません。
- 当社は、当社製品の品質、信頼性の向上に努めておりますが、当社製品の不具合が完全に発生しないことを保証するものではありません。当社製品の不具合により生じた生命、身体および財産に対する損害の危険を最小限度にするために、冗長設計、延焼対策設計、誤動作防止設計等安全設計を行ってください。
- 当社は、当社製品の品質水準を「標準水準」、「特別水準」およびお客様に品質保証プログラムを指定していただく「特定水準」に分類しております。また、各品質水準は、以下に示す用途に製品が使われることを意図しておりますので、当社製品の品質水準をご確認ください。

標準水準：コンピュータ、OA機器、通信機器、計測機器、AV機器、家電、工作機械、パーソナル機器、産業用ロボット

特別水準：輸送機器（自動車、電車、船舶等）、交通用信号機器、防災・防犯装置、各種安全装置、生命維持を目的として設計されていない医療機器

特定水準：航空機器、航空宇宙機器、海底中継機器、原子力制御システム、生命維持のための医療機器、生命維持のための装置またはシステム等

当社製品のデータ・シート、データ・ブック等の資料で特に品質水準の表示がない場合は、標準水準製品であることを表します。意図されていない用途で当社製品の使用をお客様が希望する場合には、事前に当社販売窓口までお問い合わせください。

(注)

- (1) 本事項において使用されている「当社」とは、NECエレクトロニクス株式会社およびNECエレクトロニクス株式会社とその総株主の議決権の過半数を直接または間接に保有する会社をいう。
- (2) 本事項において使用されている「当社製品」とは、(1)において定義された当社の開発、製造製品をいう。

M8E 02.11

# 目 次

はじめに.....	4
1. アバランシェ動作とは.....	5
2. アバランシェ破壊のメカニズム.....	6
2.1 アバランシェ破壊のモード 《電流破壊》.....	6
2.2 アバランシェ破壊のモード 《エネルギー破壊》.....	8
3. アバランシェ動作時の実測波形（破壊ポイントの実測波形例）.....	9
4. アバランシェ破壊耐量の実力値と定格値の考え方.....	10
4.1 アバランシェ耐量定格： $E_{AV}$ 、 $I_{AV}$ のインダクタンス値との関係《理論計算式例》.....	11
5. アバランシェ耐量定格の温度によるディレーティングの考え方.....	13
5.1 電流破壊領域での $I_{AV}$ のディレーティングについて.....	13
5.2 エネルギー破壊領域での $E_{AV}$ のディレーティングについて.....	13
5.3 エネルギー破壊領域での $I_{AV}$ のディレーティングについて.....	15
6. シングルパルス動作時と繰り返しパルス動作時のアバランシェ耐量の考え方.....	16
7. 製品に対する選別方法について.....	16
8. 実用動作波形でのアバランシェ耐量の安全動作可否判定例.....	18
8.1 スタートイング $T_{ch}$ の算出方法.....	18
8.2 アバランシェ・エネルギーの算出方法と安全動作可否判定例.....	20
8.3 電圧波形、電流波形が同一時間内で直線的に変化する場合の時間内平均電力損失の算出方法.....	21
8.4 検討結果による安全動作可否の判定例（まとめ）.....	22
8.5 アバランシェ動作時を含めた $T_{ch}$ ピーク値の算出方法.....	22
おわりに.....	23

## はじめに

近年、パワーMOS FETの性能は飛躍的に向上し、用途の多様化、拡大化が進んでいます。パワーMOS FETは、バイポーラ型のパワー・トランジスタと比べて高速スイッチング、低損失、大SOA (SOA: Safe Operating Area) であるため、特に大電流、高速スイッチング分野を中心に市場のニーズが広まりつつあります。一例を挙げれば、昨今の自動車電装分野における電子制御化の進展も、パワーMOS FETの市場ニーズを多様化させる大きな要因となっています。こうした市場ニーズの広まりは、同時にパワーMOS FETの動作条件、環境条件の多様化を意味しており、使用される回路の回路定数や実装条件などに適した最適な製品を選定することが非常に重要となってきています。

パワーMOS FET選定時の重要な判断材料のひとつに耐圧性能が挙げられます。つまり、使用電圧に対して十分なマージンを確保した耐圧性能であることが求められます。しかし同時にパワーMOS FETの高性能化、軽薄短小化要求が強まり、近年では十分なマージンを確保して高性能なパワーMOS FETを選択することが難しくなっています。

アバランシェ耐量の規定は、誘導性負荷でのスイッチング動作オフ時(直後)に生じるサージ電圧が、パワーMOS FETの耐圧定格(ドレイン - ソース間電圧)を超え、ブレイクダウン領域にまで達し、FETを破壊させる場合を想定し、ある一定の条件下では耐圧定格を超えた状態でもパワーMOS FETが安全動作できることを規定(保証)したものです。アバランシェ耐量保証品は、アバランシェ電流値( $I_{AS}$ または $I_{AR}$ )、アバランシェ・エネルギー値( $E_{AS}$ または $E_{AR}$ )を、個別の製品データ・シートに絶対最大定格として規定しています。

このアプリケーション・ノートでは、パワーMOS FETのアバランシェ耐量に焦点を絞り、アバランシェ動作、アバランシェ耐量定格の考え方、および実用回路での定格適用方法について説明しています。製品選択時の参考資料としてご活用ください。

**備考1.** 本文中では、パワーMOS FETを単にFETと表記しています。

2. 本文中では、インダクタンスを単にL負荷またはLと表記しています。

3. このアプリケーション・ノートでは、個別の製品データ・シートで使用されるアバランシェ耐量規定項目略号「 $I_{AS}$ ,  $I_{AR}$ 」または「 $E_{AS}$ ,  $E_{AR}$ 」を、それぞれ「 $I_{AV}$ 」、「 $E_{AV}$ 」の略号を使用して説明しています。 $I_{AV}$ を $I_{AS}$ ,  $I_{AR}$ に、 $E_{AV}$ を $E_{AS}$ ,  $E_{AR}$ にそれぞれ読み換えていただいても問題ありません。



## 2. アバランシェ破壊のメカニズム

アバランシェ破壊とは、誘導性負荷でのスイッチング動作オフ時（直後）に生じるサージ電圧が、FETの耐圧定格を超えFETがブレイクダウン（破壊）するモードです。アバランシェ動作時のFETの破壊には、以下の2つのモードがあります。

1. 電流破壊モード
2. エネルギー破壊モード

以下にそれぞれの破壊モードについて説明します。

### 2.1 アバランシェ破壊のモード 《電流破壊》

FETは、多数の小さなFETセルの集合体で形成（多数のFETセルが並列に接続）されています。特に250 V以下の低電圧系品種では、素子のオン抵抗を低減させるため、個々のFETセルを微細化し、表面に溝（トレンチ）を形成してその中にゲートを埋め込む（FETセル面積を縮小する）構造（当社ではUMOS構造と表現）を用いて性能向上を図っています。図2にトレンチ構造FETチップのFETセルの断面構造と等価回路を示します。図2の断面構造において、ソース電極に接続されているN<sup>+</sup>層、チャンネルを形成するP層、そしてドレイン側のN層との間でNPN型寄生トランジスタが構成されます。

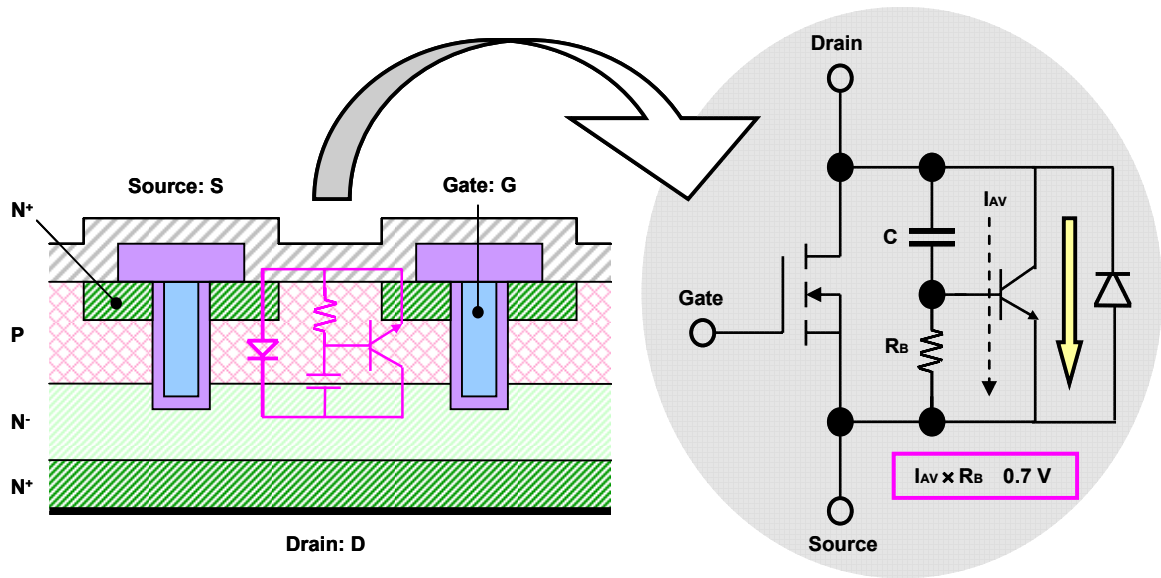
このような構造のFETにおいて、どのようにして電流破壊が生じるかについて下記に説明します。

- (1) ドレイン－ソース間に定格値を超える電圧が印加されると、ブレイクダウン電流（アバランシェ電流： $I_{AV}$ ）が流れます。
- (2) この電流（ $I_{AV}$ ）は、パルス的に寄生容量（C）を経由してP層の抵抗成分（ $R_B$ ）を通してドレインからソースに流れます。
- (3) ここで $I_{AV}$ が大電流化し、 $R_B$ 両端の電圧が寄生NPNトランジスタの $V_{BE}$ オン電圧値以上になると、NPNトランジスタがターン・オンします。
- (4) その結果、寄生トランジスタで増幅された過大電流（ $I_{AV}$ ）がコレクタ側に流れ、大電流による発熱で寄生トランジスタ（= FET）が破壊されます。

電流破壊を回避するためには、セル構造の設計段階で寄生容量（C）、抵抗成分（ $R_B$ ）を極力小さくする工夫が必要です。また、破壊電流は温度による影響も受け、高温になればなるほど小さな電流で破壊に至ります。しかし、一般的には後述のエネルギー破壊領域よりも温度による影響は小さいものとなります。



図2 トレンチ構造FETチップのFETセル断面構造と等価回路



素子の耐圧定格電圧 ( $V_{DSS}$ ) を超える電圧が印加され、 $R_B$ により寄生トランジスタがバイアスされる。  
寄生トランジスタがターン・オンして大電流が流れ、セルが破壊する。

## 2.2 アバランシェ破壊のモード 《エネルギー破壊》

図3に示すL負荷スイッチング回路でのアバランシェ動作波形では、アバランシェ動作時 ( $t_{AV}$ ) にFETのチャンネル温度 ( $T_{ch}$ ) が上昇します。これは、アバランシェ電圧 ( $BV_{DSS}$ )、アバランシェ電流 ( $I_{AV}$ ) のエネルギーが、FETで消費されるためです。

一般的にPN接合は、絶対温度が約608 K (= 335°C) になると、N, P半導体のエネルギー構造が真性半導体の状態へと変化するため、PN接合の役目を果たさず、電流制御不能となり破壊します。

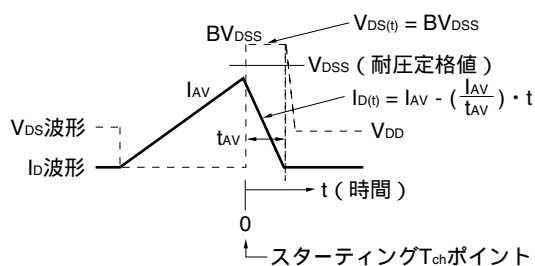
エネルギー破壊モードとは、FETにエネルギーが印加され、PN接合が上記限界温度以上に達して破壊することを指します。このときの破壊エネルギー量 ( $E_{AV}$ ) は、下記要件にて決定されます。

- ・ L値 ( $t_{AV}$ に比例)
- ・ L負荷に流したピーク電流  $I_{AV}$  (L負荷のオン時間に比例)
- ・ FETのアバランシェ電圧  $BV_{DSS}$

また、エネルギー破壊は温度上昇に起因する破壊のため、アバランシェ動作に入る直前のチャンネル温度 (スターティング $T_{ch}$ ) に直接的に影響されます。

**備考** 当社個別製品のデータ・シートで保証しているアバランシェ・エネルギー耐量 ( $E_{AS}$ ) は、一般的にスターティング $T_{ch} = 25^{\circ}\text{C}$ 時の保証値です。

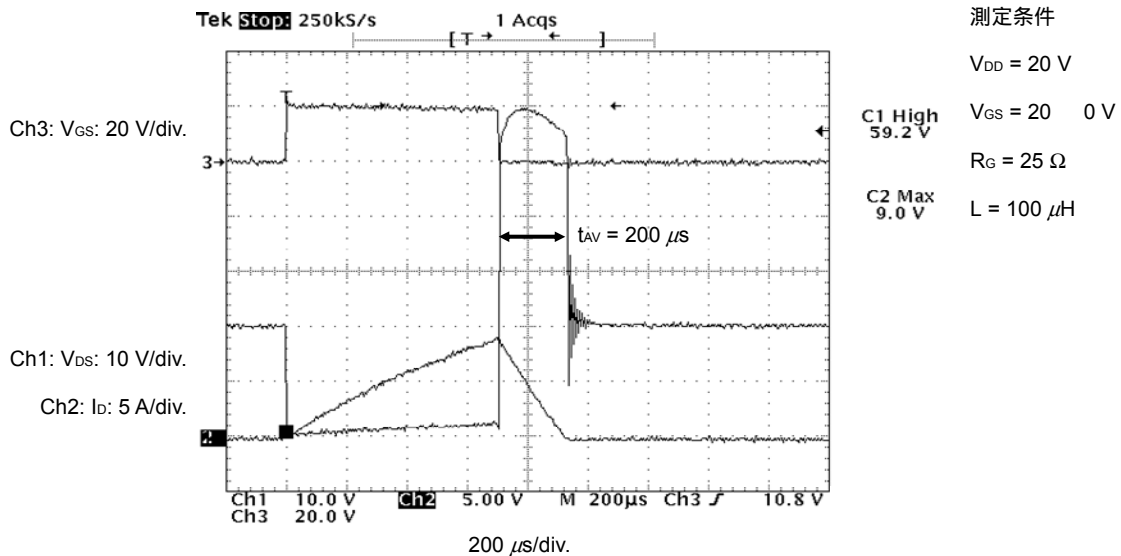
図3 L負荷スイッチング回路でのアバランシェ動作波形



### 3. アバランシェ動作時の実測波形（破壊ポイントの実測波形例）

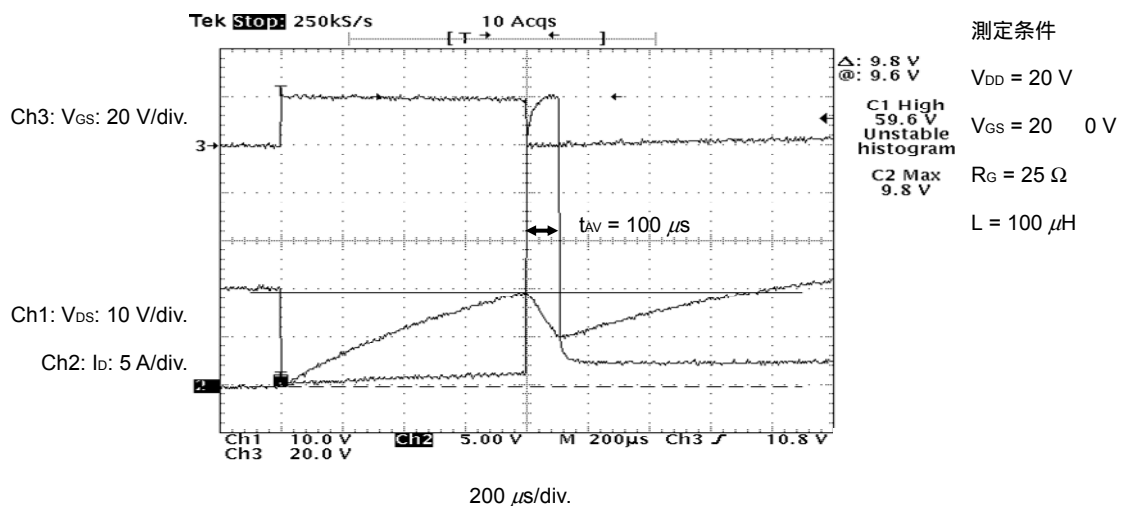
図4, 図5はFETのアバランシェ動作実測時の $V_{DS}$ と $I_D$ の動作波形例を示したものです。図4は正常品の波形, 図5は異常品の波形を示しています。

図4 FETのアバランシェ動作（実測）波形例（正常品の波形）



備考 正常品では,  $t_{AV} =$  約 $200\ \mu\text{s}$ で正常動作しています。オフ後に電流が再度上昇する（FETの破壊を示す）現象も見られません。

図5 FETのアバランシェ動作（実測）波形例（異常品の波形）

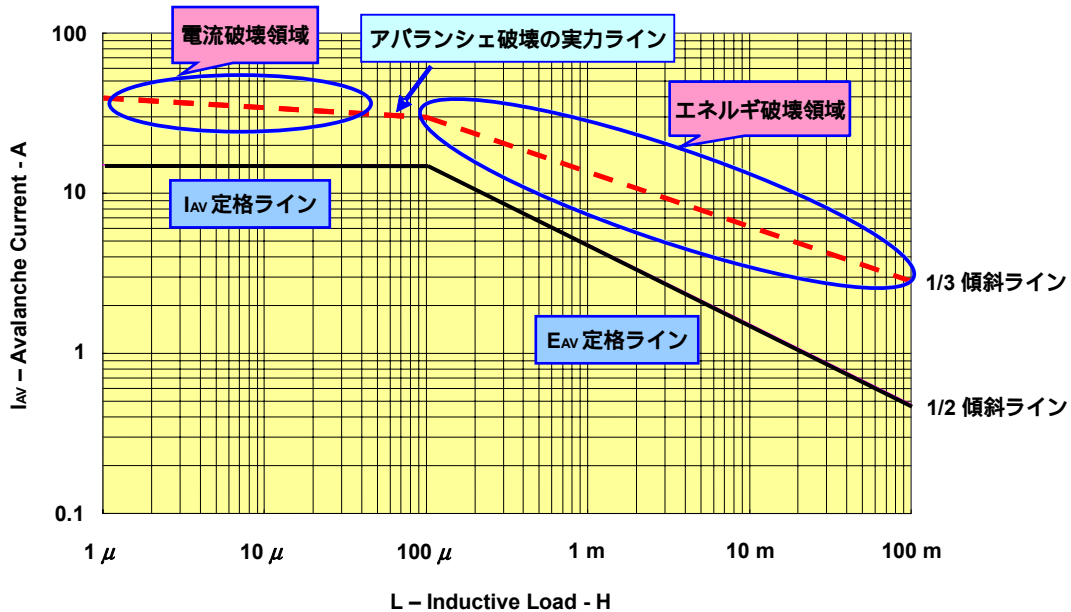


備考 異常品では,  $t_{AV} =$  約 $100\ \mu\text{s}$ と正常品に比べ非常に短く, またオフ後に電流が再度上昇するなど, FETが破壊していることを示す波形が見られます。つまり, 異常品のアバランシェ・エネルギー耐量 ( $E_{AS}$ ) は, 正常品のそれと比べて, 約半分以下であることを示しています。

#### 4. アバランシェ破壊耐量の実力値と定格値の考え方

図6はFETのアバランシェ破壊耐量の実力ラインおよび定格ラインと測定常数のL値との関係を示したものです。

図6 アバランシェ破壊耐量の実力ラインおよび定格ラインとL値の関係



注意 実力ラインおよび定格ラインは、スターティング $T_{ch} = 25^{\circ}\text{C}$ が条件です。実力ラインおよび定格ラインはスターティング $T_{ch}$ によるディレーティングを考慮する必要があります。

図6の詳細説明は、以下のとおりです。

破線で示すラインは、L値を変えて破壊ポイントのアバランシェ電流 ( $I_{AV}$ ) を実測しプロットしたFETのアバランシェ破壊の実力ラインです。実力ラインにおいては、L値が小さく、 $I_{AV}$ の大きな領域がアバランシェ電流破壊領域となります。この領域ではL値による影響が少ないため、ほぼ横ばいに近い電流値となります。

また、安全動作範囲を示す $I_{AV}$ 定格ラインは、実力ラインから十分なマージンを確保しており、一定の電流値（破壊実力値の約50%程度）となっています。これをアバランシェ電流定格値 ( $I_{AV}$ 定格値) といいます。

他方、L値の大きな領域は、エネルギー破壊領域となります。この領域はFETのチャネル温度を上昇させるアバランシェ・エネルギー ( $E_{AV}$ ) が支配する領域です。チャネル温度が約 $335^{\circ}\text{C}$ まで上昇すると破壊ポイントとなります。

また、 $E_{AV}$ 定格ラインは、チャネル温度のmax.定格値以下となるように換算して算出したラインから、さらにマージンを確保した右下がりのラインとなります。この定格ライン上の $I_{AV}$ とL値から算出したエネルギーは一定となり、この値がアバランシェ・エネルギー定格値 ( $E_{AV}$ 定格値) となります。

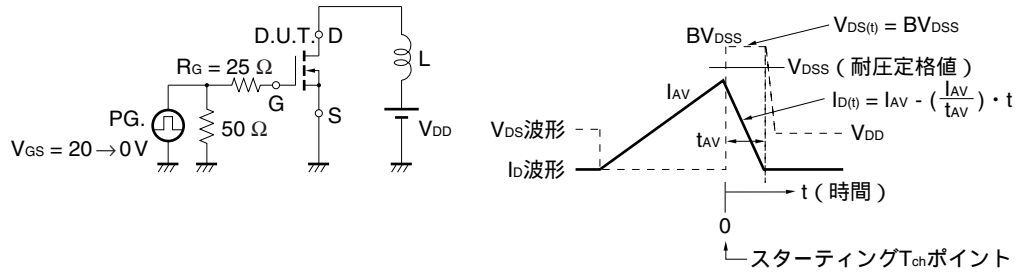
以上のようにアバランシェ動作確認には、アバランシェ電流 ( $I_{AV}$ ) とアバランシェ・エネルギー ( $E_{AV}$ ) の両者を規定する必要があります。同時に、温度上昇によるディレーティングを考慮します。つまり、実用状態でのアバランシェ動作直前のスターティング $T_{ch}$ を算出し、温度上昇によるディレーティングを考慮し、その結果がアバランシェ定格範囲内かどうかの判断が必要となります。

一般的に $I_{AV}$ 、 $E_{AV}$ は、スターティング $T_{ch} = 25^{\circ}\text{C}$ の定格値が、個別の製品データ・シートに絶対最大定格として規定されています。パラメータとしては、 $I_{AS}$ または $I_{AR}$ 、 $E_{AS}$ または $E_{AR}$ がそれに該当します。また、L値との関係、スターティング $T_{ch}$ によるディレーティング特性についても、データ・シートに特性曲線が記載されています。

#### 4.1 アバランシェ耐量定格： $E_{AV}$ , $I_{AV}$ のインダクタンス値との関係《理論計算式例》

ここでは、アバランシェ耐量定格の $E_{AV}$ ,  $I_{AV}$ の測定常数（L値）との関係を理論式で検証しています。  
 図7にアバランシェ耐量試験回路図を示します。

図7 アバランシェ耐量試験回路およびFETのアバランシェ動作波形



上記試験回路図でのアバランシェ・エネルギー（ $E_{AV}$ ）は次式で表されます。

$$\begin{aligned}
 E_{AV} &= \int_0^{t_{AV}} V_{DS(t)} \cdot I_D(t) dt \\
 &= \int_0^{t_{AV}} BV_{DSS} \cdot \left( I_{AV} - \frac{I_{AV}}{t_{AV}} \cdot t \right) dt \\
 &= \int_0^{t_{AV}} BV_{DSS} \cdot I_{AV} \cdot \left( 1 - \frac{t}{t_{AV}} \right) dt \\
 &= \frac{1}{2} BV_{DSS} \cdot I_{AV} \cdot t_{AV} \dots\dots
 \end{aligned}$$

エネルギーの放出時間（ $t_{AV}$ ）は、L値と $I_{AV}$ を掛けたものを、Lの両端電圧（ $BV_{DSS} - V_{DD}$ ）で割った値となります。

$$t_{AV} = \frac{L \cdot I_{AV}}{BV_{DSS} - V_{DD}} \dots\dots$$

の式に を代入します。

$$E_{AV} = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I_{AV}^2 \cdot \frac{BV_{DSS}}{BV_{DSS} - V_{DD}} \dots\dots$$

次にチャネル温度を理論式で検証します。

$$\Delta T_{ch} = P_{AV} \cdot r_{th(t_w)} = \frac{1}{2} \cdot BV_{DSS} \cdot I_{AV} \cdot r_{th(t_w)} \dots\dots$$

パルス幅 $t_{AV}$ の過渡熱抵抗 ( $r_{th(t_{AV})}$ ) は、任意のパルス幅 $P_W$ の過渡熱抵抗を $r_{th(P_W)}$ ) とすると、

$$r_{th(t_w)} = r_{th(P_W)} \cdot \sqrt{\frac{t_{AV}}{P_W}} \dots\dots$$

の式に 式および 式を代入して、 $\Delta T_{ch}$ を $I_{AV}$ の関数で表すと、次式のようにになります。

$$\begin{aligned} \Delta T_{ch} &= \frac{1}{2} \cdot BV_{DSS} \cdot I_{AV} \cdot r_{th(t_w)} = \frac{1}{2} \cdot BV_{DSS} \cdot I_{AV} \cdot r_{th(P_W)} \cdot \sqrt{\frac{t_{AV}}{P_W}} \\ &= \frac{1}{2} \cdot BV_{DSS} \cdot I_{AV} \cdot r_{th(P_W)} \cdot \sqrt{\frac{L \cdot I_{AV}}{BV_{DSS} - V_{DD}}} \\ &= \frac{1}{2} \cdot r_{th(P_W)} \cdot \sqrt{\frac{BV_{DSS}^2 \cdot I_{AV}^2 \cdot L \cdot I_{AV}}{BV_{DSS} - V_{DD}}} \\ &= \frac{1}{2} \cdot r_{th(P_W)} \cdot \sqrt{\frac{BV_{DSS}^2 \cdot I_{AV}^3 \cdot L}{P_W \cdot (BV_{DSS} - V_{DD})}} \\ &= \frac{1}{2} \cdot r_{th(P_W)} \cdot \sqrt{\frac{BV_{DSS}^2}{P_W \cdot (BV_{DSS} - V_{DD})}} \cdot L^{\frac{1}{2}} \cdot I_{AV}^{\frac{2}{3}} \dots\dots \end{aligned}$$

の式から、 $E_{AV}$  = 一定の定格ラインは、

$$I_{AV} \propto L^{-\frac{1}{2}} \dots\dots$$

の式から、 $T_{ch} = T_{ch(max)}$ の定格ラインは、

$$I_{AV} \propto L^{-\frac{1}{2} \cdot \frac{2}{3}} = I_{AV} \propto L^{-\frac{1}{3}} \dots\dots$$

および の式をグラフに表すと、**図6**の1/2傾斜ライン、1/3傾斜ラインとなります。

## 5. アバランシェ耐量定格の温度によるディレーティングの考え方

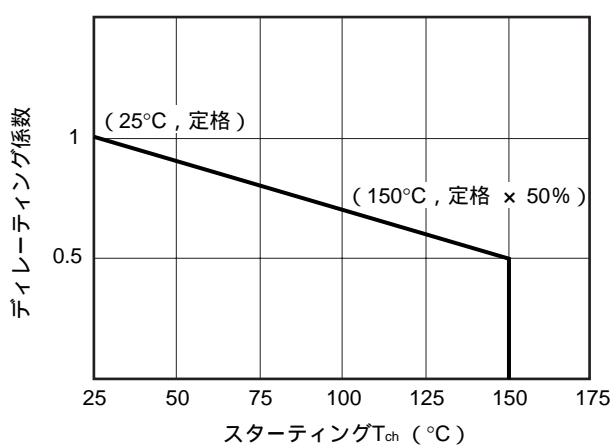
アバランシェ耐量定格のアバランシェ電流値 ( $I_{AV}$ ) とアバランシェ・エネルギー値 ( $E_{AV}$ ) とでは、スターティング  $T_{ch}$  によるディレーティング傾向が異なります。ここでは、その差異について説明します。

一般的に温度によるディレーティングは、ディレーティング係数 ( $dT\%$ ) で表記され、スターティング  $T_{ch} = 25^\circ\text{C}$  のときを100%として、温度上昇にともなうアバランシェ耐量の軽減率を規定しています。

### 5.1 電流破壊領域での $I_{AV}$ のディレーティングについて

図8は、電流破壊領域における  $I_{AV}$  定格値のディレーティング例です。製品のチャネル温度 ( $T_{ch}$ ) MAX. 値が  $150^\circ\text{C}$  の場合、その製品の  $I_{AV}$  定格値は、スターティング  $T_{ch} = 150^\circ\text{C}$  で50%にディレーティングされます。

図8  $I_{AV}$  のディレーティング特性例

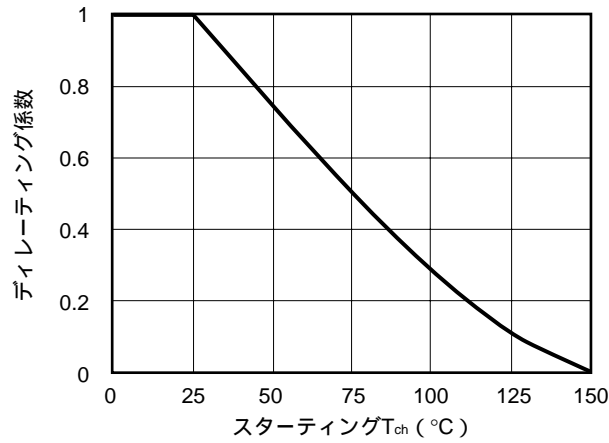


注意 実用の際は、必ず各製品のデータ・シートをご確認ください。

## 5.2 エネルギー破壊領域でのE<sub>AV</sub>のディレーティングについて

図9は、エネルギー破壊領域におけるE<sub>AV</sub>定格値のディレーティングを示しています。スターティングT<sub>ch</sub>が製品のチャネル温度 (T<sub>ch</sub>) MAX. 値の場合は、ディレーティング係数が0%になります。

図9 E<sub>AV</sub>のディレーティング特性例



次に、エネルギー破壊領域におけるE<sub>AV</sub>定格値のディレーティングについて、理論式で検証します。

4.1項で示した の式から、

$$I_{AV} = \left( \frac{\Delta T_{ch}}{\frac{1}{2} \cdot r_{th}(P_w) \cdot \sqrt{\frac{BV_{DSS}^2}{P_w \cdot (BV_{DSS} - V_{DD})}} \cdot L^{\frac{1}{2}}} \right)^{\frac{2}{3}}$$

この式を、4.1項で示した の式に代入して、

$$\begin{aligned} E_{AV} &= \frac{1}{2} \cdot L \cdot I_{AV}^2 \cdot \frac{BV_{DSS}}{BV_{DSS} - V_{DD}} \\ &= \frac{1}{2} \cdot L \cdot \frac{BV_{DSS}}{BV_{DSS} - V_{DD}} \cdot \left( \frac{\Delta T_{ch}}{\frac{1}{2} \cdot r_{th}(P_w) \cdot \sqrt{\frac{BV_{DSS}^2}{P_w \cdot (BV_{DSS} - V_{DD})}} \cdot L^{\frac{1}{2}}} \right)^{\frac{2}{3} \cdot 2} \\ &= \frac{\frac{1}{2} \cdot L \cdot \frac{BV_{DSS}}{BV_{DSS} - V_{DD}}}{\left( \left( \frac{1}{2} \cdot r_{th}(P_w) \cdot \sqrt{\frac{BV_{DSS}^2}{P_w \cdot (BV_{DSS} - V_{DD})}} \cdot L^{\frac{1}{2}} \right)^{\frac{2}{3}} \right)^2} \cdot (\Delta T_{ch}^{\frac{2}{3}})^2 \\ &= \frac{\frac{1}{2} \cdot L \cdot \frac{BV_{DSS}}{BV_{DSS} - V_{DD}}}{\left( \left( \frac{1}{2} \cdot r_{th}(P_w) \cdot \sqrt{\frac{BV_{DSS}^2}{P_w \cdot (BV_{DSS} - V_{DD})}} \cdot L^{\frac{1}{2}} \right)^{\frac{2}{3}} \right)^2} \cdot (\Delta T_{ch}^{\frac{4}{3}}) \end{aligned}$$

このように、E<sub>AV</sub>定格値のディレーティングは、ΔT<sub>ch</sub>の4/3乗に比例しています。



### 5.3 エネルギー破壊領域での $I_{AV}$ のディレーティングについて

図10は、エネルギー破壊領域における $I_{AV}$ 定格値のディレーティングを示しています。前述の $E_{AV}$ ディレーティング特性（図9）とは異なる傾向を示しています。

そこで $I_{AV}$ のエネルギー破壊領域の温度によるディレーティングについて、 $I_{AV}$ と $T_{ch}$ の関係を理論式で検証します。

$$\text{式を変形した } \Delta T_{ch} = \frac{1}{2} \cdot r_{th(P_w)} \cdot \sqrt{\frac{L}{P_w} \cdot \frac{BV_{DSS}^2}{BV_{DSS} - V_{DD}}} \cdot I_{AV}^{\frac{3}{2}} \text{ より}$$

$$\frac{\Delta T_{ch1}}{\Delta T_{ch2}} = \left( \frac{I_{AV1}}{I_{AV2}} \right)^{\frac{3}{2}}$$

ここで $\Delta T_{ch1}$ は任意の温度（ $0 < \Delta T_{ch1} < T_{ch(max.)} - 25^{\circ}\text{C}$ ）、 $\Delta T_{ch2} = T_{ch(max.)} - 25^{\circ}\text{C}$

$I_{AV1}$ は $\Delta T_{ch1}$ での値、 $I_{AV2}$ は製品の規格とすると

$$\frac{\Delta T_{ch1}}{T_{ch(max.)} - 25^{\circ}\text{C}} = \left( \frac{I_{AV1}}{I_{AV2}} \right)^{\frac{3}{2}}$$

したがって、

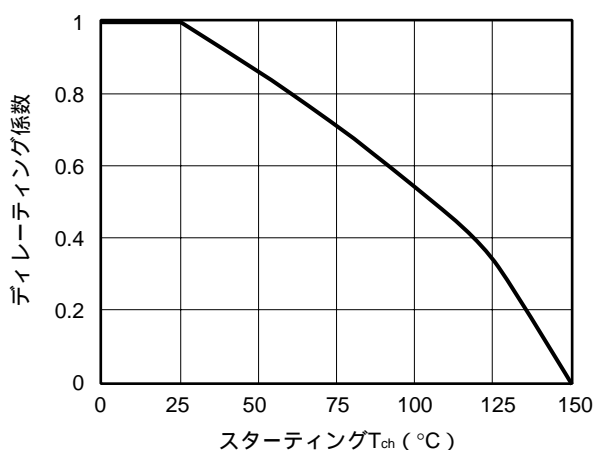
$$\frac{I_{AV1}}{I_{AV2}} = \left( \frac{\Delta T_{ch1}}{T_{ch(max.)} - 25^{\circ}\text{C}} \right)^{\frac{2}{3}}$$

$\frac{I_{AV1}}{I_{AV2}}$ はディレーティング係数(dT)、 $\Delta T_{ch1} = T_{ch(max.)} - \text{スターティング}T_{ch}$ と置き換えられるので、

$$dT = \left( \frac{T_{ch(max.)} - \text{スターティング}T_{ch}}{T_{ch(max.)} - 25^{\circ}\text{C}} \right)^{\frac{2}{3}}$$

これをグラフに表したものが、図10となります。

図10  $I_{AV}$ のディレーティング特性例



**注意** スターティング $T_{ch}$ によるディレーティング特性については、 $E_{AV}$ ディレーティング特性、 $I_{AV}$ ディレーティング特性のどちらを採用するかは、製品によって異なります。実用の際は、必ず各製品のデータ・シートをご確認ください。

## 6. シングルパルス動作時と繰り返しパルス動作時のアバランシェ耐量の考え方

実製品上のアバランシェ耐量規定は、2種類に大別されます。

1. 1回のアバランシェ動作を条件に規定
  - ・単発（シングル）アバランシェ電流（ $I_{AS}$ ）
  - ・単発（シングル）アバランシェ・エネルギー（ $E_{AS}$ ）
2. 連続するアバランシェ動作を条件に規定
  - ・連続アバランシェ電流（ $I_{AR}$ ）
  - ・連続アバランシェ・エネルギー（ $E_{AR}$ ）

品種によって単発動作しか許容できない製品と連続動作も許容できる製品とがあります。一般的に単発動作と連続動作の規定は、同じ定格値となっています。ただし、定格値は品種によって異なりますので、必ず個別の製品データ・シートで確認してください。

**備考** 本マニュアルの本文中に記載されている $I_{AV}$ 、 $E_{AV}$ の略号は、そのまま「 $I_{AS}$ 、 $I_{AR}$ 」または「 $E_{AS}$ 、 $E_{AR}$ 」に置き換えてお読みいただいても問題ありません。

## 7. 製品に対する選別方法について

アバランシェ耐量の測定試験は破壊試験となるため、非破壊のまま同じサンプルで繰り返し測定することができません。したがって、当社の高アバランシェ耐量FETシリーズでは、アバランシェ動作保証を前提にしたプロセス設計を行っています。また、FETの製造段階でアバランシェ耐量定格を製品の選別に組み入れる場合には、正常品を劣化させないようにアバランシェ破壊ライン（実力ライン）から十分なマージンを確保するとともに、適切な条件を設定し検査しています。さらに、製造工程内でのばらつきを考慮して全数アバランシェ検査を実施し、不良品を除去する方法を採用しています。

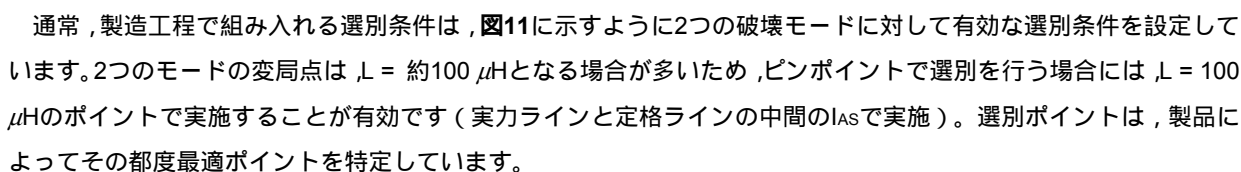
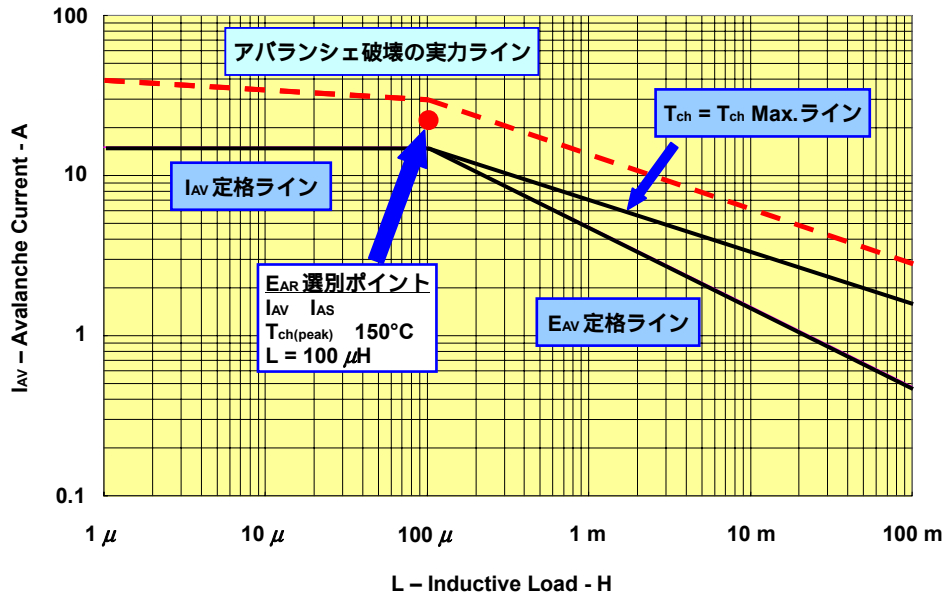
通常、製造工程で組み入れる選別条件は、11に示すように2つの破壊モードに対して有効な選別条件を設定しています。2つのモードの変局点は $L =$  約100  $\mu\text{H}$ となる場合が多いため、ピンポイントで選別を行う場合には、 $L = 100$   $\mu\text{H}$ のポイントで実施することが有効です（実力ラインと定格ラインの中間の $I_{AS}$ で実施）。選別ポイントは、製品によってその都度最適ポイントを特定しています。

図11 製造工程でのアバランシェ耐量定格選別条件例



## 8. 実用動作波形でのアバランシェ耐量の安全動作可否判定例

ここでは、実用状態のアバランシェ動作に関する安全動作可否判定例について説明します。前提条件として、実用状態のアバランシェ電流 ( $I_{AV} = I_{D2}$ ) が、アバランシェ電流定格値以下であることが必要です。アバランシェ電流が定格値を超えている場合は、この時点で定格オーバーとなります。

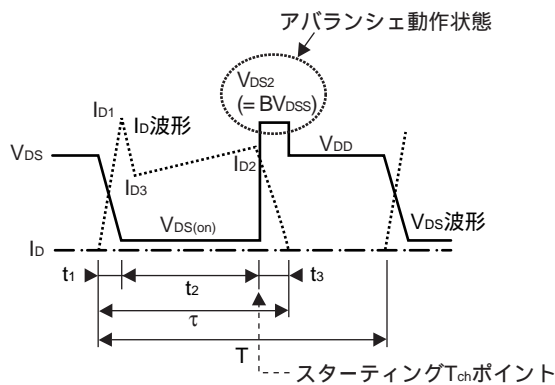
また、製品によって規定がある場合には、アバランシェ電流定格のスターティング $T_{ch}$ によるディレーティングを考慮した安全動作可否判定が必要です。

### 8.1 スターティング $T_{ch}$ の算出方法

安全動作可否判定を行う上で必要となるスターティング $T_{ch}$ 算出方法（手順）について説明します。なお、算出方法については、上述のアバランシェ電流定格のスターティング $T_{ch}$ によるディレーティングを考慮した安全動作可否判定においても適用できます。

まず、**図12**のような実用動作波形例において、アバランシェ動作に入る直前のチャネル温度を算出します。

**図12 実用動作波形例**



実用動作波形例における電力損失は、**図13 (a)**に示すような下記3つの損失から構成されます。

- $P_{on}$  : オン抵抗による損失
- $P_{S(on)}$  : ターン・オン時のスイッチング損失
- $P_{S(off)}$  : ターン・オフ時のスイッチング損失

これらで構成される電力損失が無限に続いているものとして、“重ね合わせの理”を用いて上昇温度を算出します。電力損失波形に対しては全期間平均値から飛び出す部分2~3波を合わせて計算する方法が算出も容易で精度が高く有効です。具体的には電力損失波形の近似**図13 (b)**のように $T$ 間の平均化された電力損失

$$P_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T P_T dt = \frac{\tau}{T} \cdot P_\tau$$

を印加し、さらに $P_{on}$ ,  $P_{S(on)}$ ,  $P_{S(off)}$ の平均値を $\tau$ 区間積分することで求められる $\tau$ 間の平均電力損失

$$P_\tau = \frac{1}{\tau} \int_0^T P_T dt$$

との差、すなわち $P_\tau - P_{av}$ の電力損失を $T + \tau - t_3$ 時間印加し、次に $-P_\tau$ の負の電力損失を $T - t_3$ 時間印加し、以下同様に $P_{on}$ ,  $-(P_{S(on)} - P_{on})$ をそれぞれ $\tau - t_3$ ,  $\tau - t_1 - t_3$ 時間印加してチャネル温度上昇分を求めます。

ここで、アバランシェ動作直前のチャンネル温度(スターティング $T_{ch}$ )は、 $P_{S(off)}$ 印加直前点と考えられるので、 $P_{on}$ 終了時点のチャンネル温度ピーク値を以下の式より算出します。

$$\begin{aligned} \Delta T_{ch(peak)} = & P_{av} \cdot R_{th(ch-c)} + (P_{\tau} - P_{av}) \cdot r_{th(ch-c)}(T + \tau - t_3) \\ & - P_{\tau} \cdot r_{th(ch-c)}(T - t_3) + P_{S(on)} \cdot r_{th(ch-c)}(\tau - t_3) \\ & - (P_{S(on)} - P_{(on)}) \cdot r_{th(ch-c)}(t_2) \end{aligned}$$

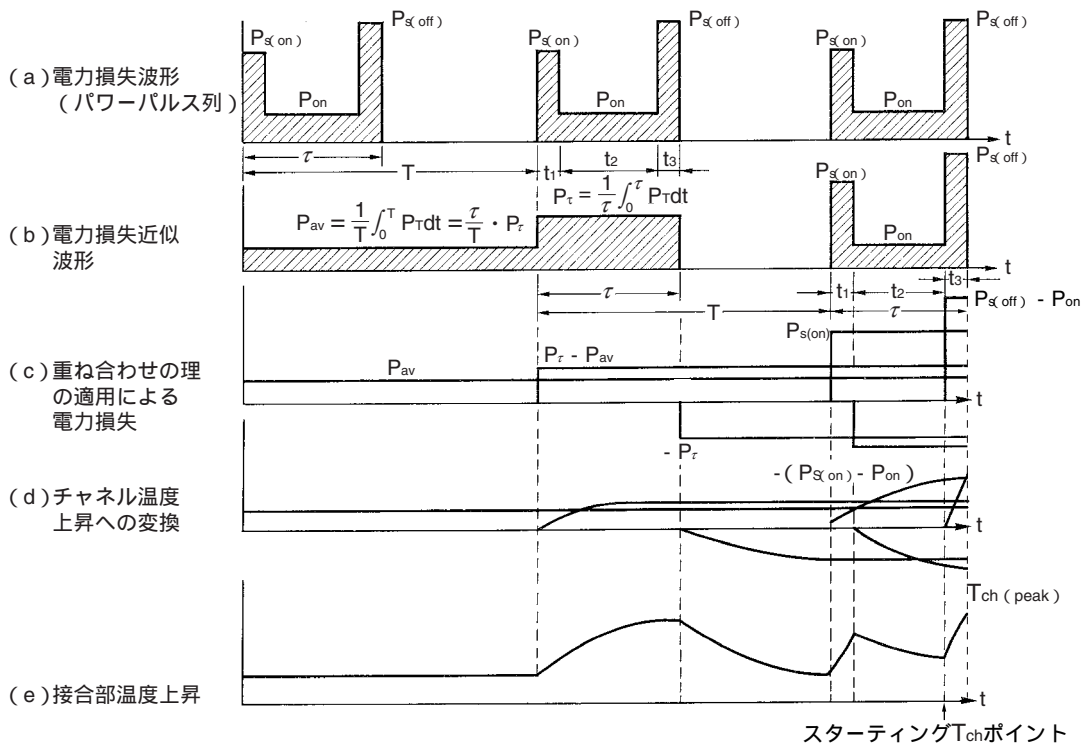
上記にFETのケース温度を足した値が、スターティング $T_{ch}$ となります。

つまり、スターティング $T_{ch} = T_c + \Delta T_{ch(peak)}$

**備考** 各略号の意味は以下のとおりです。

- $\tau$  : 電力損失のパルス幅 (=  $t_1 + t_2 + t_3$ ) (s)
- $T$  : 周期 (1/f) (s)
- $P_{\tau}$  : 電力損失のパルス幅の平均電力損失 (W)
- $P_{av}$  : 1周期内での平均電力損失 (W)
- $t_1$  : ターン・オン時のスイッチング時間 (s)
- $t_2$  : オン時間 (s)
- $t_3$  : ターン・オフ時のスイッチング時間 (s)
- $R_{th(ch-c)}$  : FETのチャンネル - ケース間の飽和熱抵抗 ( $^{\circ}C/W$ )
- $r_{th(ch-c)}(t)$  : パルス幅 (t) におけるFETのチャンネル - ケース間の過渡熱抵抗 ( $^{\circ}C/W$ )
- $T_c$  : FETのケース温度 ( $^{\circ}C$ )
- $\Delta T_{ch(peak)}$  : ケース温度からのチャンネル温度上昇の最大値 ( $^{\circ}C$ )

**図13 電力損失波形と定常時におけるチャンネル温度の求め方**



## 8.2 アバランシェ・エネルギーの算出方法と安全動作可否判定例

図12の実用動作波形におけるアバランシェ・エネルギー算出方法について説明します。

図12では $V_{DS} = BV_{DSS}$ の状態がアバランシェ動作となります。そのエネルギー値は、

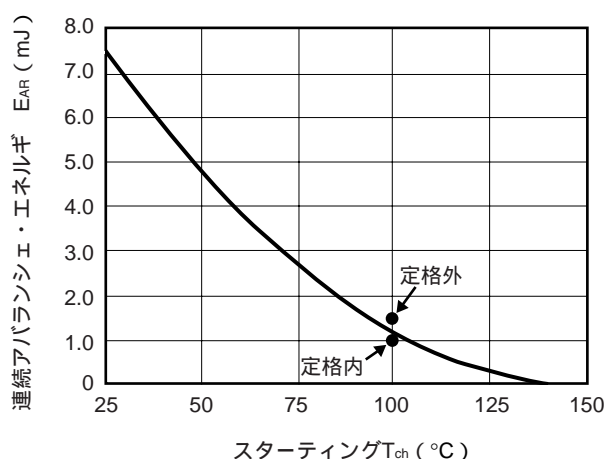
$$E_{AV} = P_{S(off)} \times t_3 \text{ (J)} \text{ で算出できます。}$$

通常、アバランシェ保証品のデータ・シートには、常温 ( $T_A = 25^\circ\text{C}$ ) 時のアバランシェ・エネルギー定格値が規定されています。この定格値を実用状態のスターティング $T_{ch}$ によってディレーティングし、上記 $E_{AV}$ と比較します。その結果、 $E_{AV}$ がディレーティング特性(ディレーティング・カーブ)の範囲内であれば、安全動作していると判定できます。もう少し具体的に説明すると、ディレーティング特性グラフ上に実用状態の $E_{AV}$ とスターティング $T_{ch}$ のポイントをプロットし、このポイントがディレーティング・カーブの下側であれば定格値以内の安全動作、ディレーティング・カーブの上側であれば定格オーバーとなります。

なお、データ・シートには図14のようなスターティング $T_{ch}$ によるディレーティング特性も掲載されています。上記のようにディレーティングを考慮した判定を行う際は、その特性グラフを使用してください。

- 備考1.** 上記判定は、アバランシェ動作領域のスターティング $T_{ch}$ ポイントが明確な場合を想定しています。つまり、アバランシェ動作直前の $T_{ch}$ をスターティング $T_{ch}$ としています。ターン・オフ時の波形がFETのスイッチング動作とアバランシェ動作の重なり合いにより明確に分けられず、スターティング $T_{ch}$ ポイントが不明確な場合には、ターン・オフ完了時点(アバランシェ動作を含めた完了時点)の $T_{ch}$ を算出してください。その値が $T_{ch(max)}$ 定格値を超えていなければ、安全動作と判定することができます。
2. 大きくマージンを確保してより安全な設計を行なう場合は、 $P_{S(off)}$ 完了時点の $T_{ch}$ をスターティング $T_{ch}$ とし、アバランシェ・エネルギーのディレーティング特性を考慮して可否判定を行う場合があります。

図14 ディレーティング特性による判定例

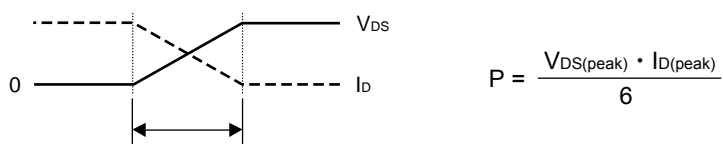


### 8.3 電圧波形，電流波形が同一時間内で直線的に変化する場合の時間内平均電力損失の算出方法

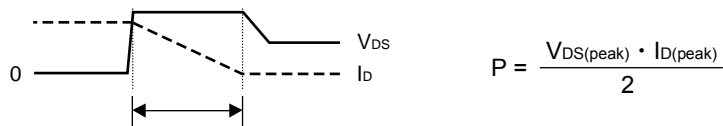
電圧および電流のスイッチング波形が，同一時間内で直線的に変化する場合の時間内平均電力損失を算出する場合の簡易計算式について，代表的な例を用いて以下に説明します。

実際の波形が複雑に変化しているような場合は，直線的な変化と近似できるよう期間を適切に分割し，期間ごとの計算式を組み合わせることで算出します。

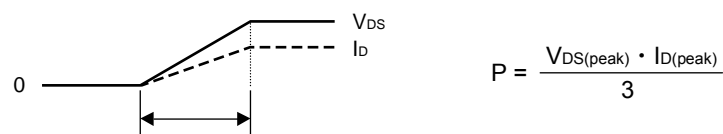
- (1) スイッチング波形が0基準で同一時間内に交差する場合



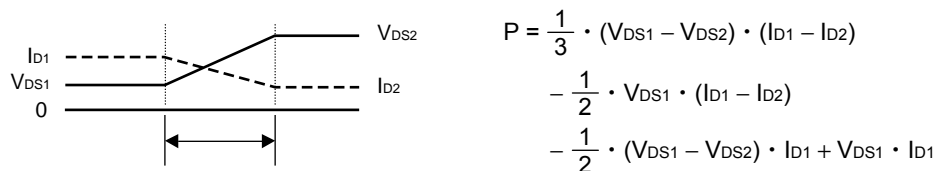
- (2) 電流スイッチング波形が0基準で遅延する場合（L負荷）



- (3) スイッチング波形が0基準で同時に立ち上がる場合



- (4) 0基準でない場合



## 8.4 検討結果による安全動作可否の判定例（まとめ）

8章では実用状態のアバランシェ動作が、定格以内の安全動作かどうかの可否判定について、検討過程を含めて説明しました。要約すると以下の条件を満たすことが、FETを安全に動作させるための必須条件となります。

### ・安全動作上の必須条件1

$$I_{AV} \leq I_{AS}, I_{AR}$$

アバランシェ動作直前の電流値（ $I_{AV}$ ）が、 $I_{AS}$ 、 $I_{AR}$ の定格値以下であること。温度上昇によるディレーティングを考慮する必要がある場合は、ディレーティング後の値が定格値以内であること。

### ・安全動作上の必須条件2

$$E_{AV} \leq E_{AS}, E_{AR}$$

アバランシェ動作直前の温度（スターティング $T_{ch}$ ）によるディレーティング後の値が、定格値以内であること。

## 8.5 アバランシェ動作時を含めた $T_{ch}$ ピーク値の算出方法

これまで説明してきた方法は、アバランシェ動作直前の $T_{ch}$ （スターティング $T_{ch}$ ）を算出し、アバランシェ定格値のディレーティングを考慮して定格値以内かどうかを判定する方法でした。

他方、アバランシェ動作時間（ $t_{AV}$ ）が100  $\mu$ s程度以下と短い場合には、アバランシェ動作時を含めた $T_{ch(peak)}$ 値を簡易計算式で求め、その値が $T_{ch(max)}$ 定格値を超えていなければ、定格値以内の安全動作と判定する手法もあります。アバランシェ動作時を含めた $T_{ch}$ の計算式は、8.1 スターティング $T_{ch}$ の算出方法で記載した算出方法を使って、アバランシェ動作終了直後の $T_{ch}$ の温度上昇を求めることができます。一般的にこの手法では、温度上昇による定格値のディレーティングを考慮する必要がありません。

アバランシェ動作終了直後のチャンネル温度は、 $P_{S(off)}$ 印加終了時点と考えられるので、 $P_{S(off)}$ 終了時点のチャンネル温度ピーク値を以下の式より算出します。

$$\begin{aligned} \Delta T_{ch(peak)} = & P_{av} \cdot R_{th(ch-c)} + (P_{\tau} - P_{av}) \cdot r_{th(ch-c)}(T + \tau) \\ & - P_{\tau} \cdot r_{th(ch-c)}(T) + P_{S(on)} \cdot r_{th(ch-c)}(\tau) \\ & - (P_{S(on)} - P_{on}) \cdot r_{th(ch-c)}(\tau - t_1) \\ & + (P_{S(off)} - P_{S(on)}) \cdot r_{th(ch-c)}(t_3) \end{aligned}$$

上記にFETのケース温度を加えた値が、チャンネル温度（ $T_{ch}$ ）となります。つまり、 $T_{ch} = T_c + \Delta T_{ch(peak)}$ となり、この場合の $T_{ch}$ が $T_{ch(max)}$ 値以下であれば、定格範囲内の安全動作と判定できます。

図15 平均電力損失近似波形

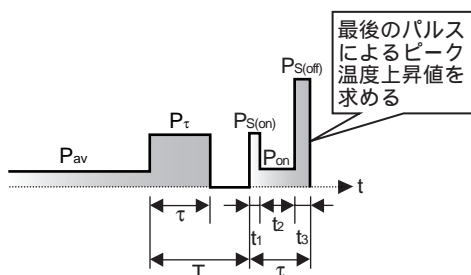
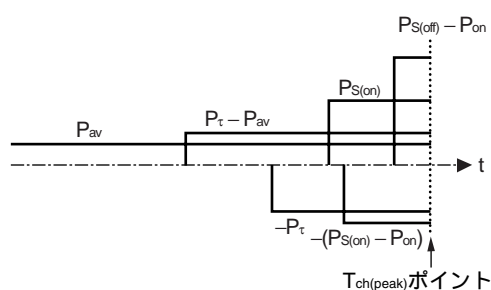


図16 重ね合わせの理による電力損失波形の分解





## おわりに

FETのアバランシェ耐量は、使用される回路の回路定数、動作条件、環境条件などによって変化する可能性があります。また、アバランシェ動作の規定条件と実用回路の条件に微妙な相違がある場合も多くあると思われます。したがって、応用回路上で積極的にアバランシェ動作をさせて良いかどうかの判断は、実用回路で十分な評価を実施するとともに、適切なマージンを確保して判断する必要があります。

FETのアバランシェ耐量規定に関しては、個別の製品データ・シートの規定が優先します。ご使用时には必ずデータ・シートの規定をご確認くださいませようお願いします。

## 【発 行】

NECエレクトロニクス株式会社

〒211-8668 神奈川県川崎市中原区下沼部1753

電話（代表）：044(435)5111

—— お問い合わせ先 ——

---

## 【ホームページ】

NECエレクトロニクスの情報がインターネットでご覧になれます。

URL(アドレス) <http://www.necel.co.jp/>

---

## 【営業関係，技術関係お問い合わせ先】

半導体ホットライン

(電話：午前 9:00～12:00，午後 1:00～5:00)

電 話 : 044-435-9494

E-mail : [info@necel.com](mailto:info@necel.com)

---

## 【資料請求先】

NECエレクトロニクスのホームページよりダウンロードいただくか，NECエレクトロニクスの販売特約店へお申し付けください。

---