

# 高耐圧・大電流パワー半導体モジュールの 総合的な劣化評価

福田 典子\*

Degradation of High-Voltage / High-Current Power Semiconductor Modules for Trains

Tenko FUKUDA

Various electronic equipment including traction converters are installed in railway vehicles. It is important to improve the reliability of each element constituting the equipment. Failure of power semiconductors used in devices such as traction converters may have an adverse effect on vehicle operation. In order to address this problem, researches on quantitative estimates of aged degradation have been conducted to obtain basic data used for maintenance and renewal of the devices. Degradation of the gate turn-off thyristor (GTO) was estimated on the electrical characteristics of semiconductors. Thermal resistance is important when evaluating aged degradation of devices composed of multiple materials such as an insulated gate bipolar transistor (IGBT) module. However, degradation estimate was challenging due to difficulty in calculating thermal resistance precisely, which in turn prevented meaningful comparison with given specifications. In this paper, we report on the method of a thermal resistance test for degradation of IGBT modules (3300 Volts/1200 Amperes) by quantitative examinations and degradation estimates.

キーワード：パワー半導体モジュール，IGBT，保守，特性劣化，熱抵抗，電気的特性

## 1. はじめに

鉄道車両において、駆動用インバータ装置（走行用電動機の制御装置）や、補助電源装置（室内灯などのサービス用の電源装置）に使用されているパワー半導体の不具合は、運行に影響を及ぼす場合がある。そのため、装置の保守や更新工事の基礎データとしての活用を目指し、開発段階では予測が難しい経年によるパワー半導体の特性劣化を非破壊で定量的に評価する研究に取り組んでいる。

1984年に、大阪市交通局でゲートターンオフサイリスタ（以下、GTO）を使用した駆動用インバータ装置搭載の20系電車の営業運転が始まった。しかし、GTOをターンオフさせるためには、大電流を必要とし、スイッチング速度も数百Hz程度と低かったため、1990年代に入ると、絶縁ゲートバイポーラトランジスタ（以下、IGBT）への置き換えが始まり、現在主流のデバイスとなっている。

GTOについては、半導体の電気的特性から劣化評価を行った。一方、IGBTのように複数材料から構成されるモジュール型デバイス（図1参照）の劣化を評価する場合は、電気的特性に加えて、熱抵抗特性も重要な評価項目の1つである。しかし、精度よく熱抵抗を算出する

ことが困難であったため、規格値との比較ができず、劣化評価を行えないことが課題であった。そこで、熱抵抗算出法と冷却方法を開発し、実験により精度よく求められる見通しを得た。

ここでは、その方法を使用し、2台のIGBTモジュールの劣化評価を、IEC60747-9に準拠し試みたので報告する。

## 2. 熱抵抗測定の概要

シリコンNPN形半導体チップは、100℃程度まで温度が上昇すると25℃の時と比較して、故障率が5倍近く上がると言われており、更に150℃を超えるような高温では正常に動作しなくなる。この半導体チップの温度上昇は冷却性能に左右される。

図1に示すように、IGBTモジュールの半導体チップの主な放熱経路は、冷却器方向である。そのため、②～⑦の各材料や境界面の特性が変化すると、熱が伝わりにくくなることも考えられ、半導体チップ温度の上昇につながる。

IGBTモジュールのチップ接合部からケースまでの熱構造関数を精度よく算出することで、チップ温度の上昇値を推定できるとともに、経年による放熱特性の劣化の定量的評価を行うことができるようになる。

\* 車両制御技術研究部 駆動制御研究室

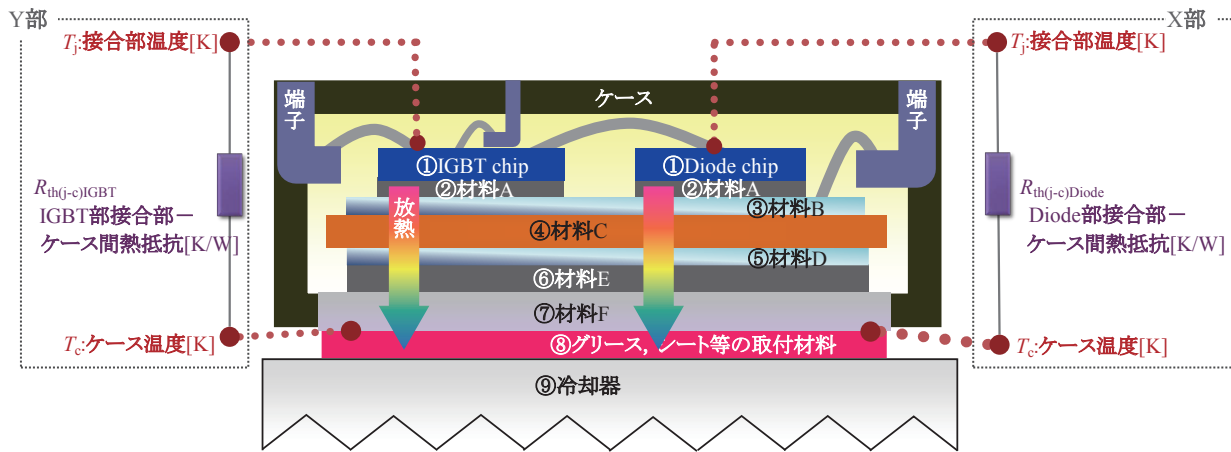


図1 IGBT モジュールの内部構造例と熱抵抗

熱構造関数<sup>1) 2)</sup>は、熱抵抗  $R_{th}$  に対する熱容量  $C_{th}$  の関数で、材料により傾きが異なり、一般に以下に示す方法で求められる。

図2に示すような熱インピーダンス等価回路で表される試料に、パルス電力  $P[W]$  を与えたとすると、以下の式(1)(2)が成り立つ。

$$P_c(t)dt = C_{th}dt(t) \quad (1)$$

$$(P - P_c(t))R_{th} = T(t) \quad (2)$$

ここで、 $R_{th}$ ：熱抵抗 [K/W]、 $C_{th}$ ：熱容量 [J/K]、 $P_c(t)$ ：容量への電力 [W]、 $T(t)$ ：温度 [K] である。

式(1)を式(2)へ代入し、微分方程式を解くと、境界条件は  $t \rightarrow 0$  の時  $P_c(t) = P$  より、

$$T(t) = R_{th}P(1 - e^{-\frac{1}{R_{th}C_{th}}t}) \quad (3)$$

となる。よって、 $t \rightarrow \infty$  の時

$$T(t)|_{t \rightarrow \infty} = R_{th}P \quad (4)$$

となる。式(4)より、安定した時の温度  $T(t)$  を測定すれば、熱抵抗  $R_{th}$  がわかる。また、 $t_c = R_{th}C_{th}$  の時、

$$T(t_c) = R_{th}P(1 - e^{-1}) = 0.632 \cdot T(t)|_{t \rightarrow \infty} \quad (5)$$

となり、温度  $T(t)$  が 63.2% まで変化する時間を測定すれば、 $C_{th} = t_c / R_{th}$  より、熱容量がわかる。Foster-Cauer モデルを適用すると、累積された熱抵抗と熱容量の関数

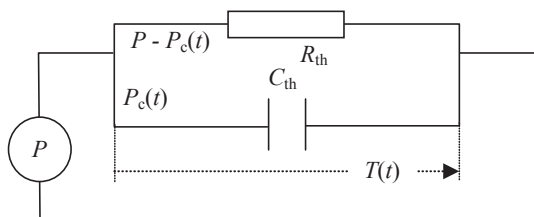


図2 熱インピーダンス等価回路

を求められる<sup>3) 4)</sup>。

しかし、実際の IGBT モジュールでは、温度  $T(t)$  を直接測定することは難しい。ここでは、接合部温度  $T_j$  の関数である順方向電圧の特性に注目し、その関数を実験で求め温度  $T(t)$  を推定する。

### 3. 熱抵抗算出結果の検証

#### 3.1 試料の仕様

検証に用いた試料 IGBT モジュール (以下、DUT-0) は、駆動用インバータ装置に使用されているタイプのパワー半導体である。表1に、DUT-0の最大定格と熱抵抗の規格最大値を示す。

DUT-0の最大定格は、コレクター-エミッタ間電圧  $V_{CES} = 3300V$ 、ゲート-エミッタ間電圧  $V_{GES} = \pm 20V$ 、コレクタ電流  $I_C = 1200A$  である。また、熱抵抗の規格最大値は、ダイオード部が  $R_{th(j-c)Diode} = 0.017K/W$ 、IGBT 部が  $R_{th(j-c)IGBT} = 0.0085K/W$  である。

表1 IGBT モジュール DUT-0 の仕様

最大定格		
項目	記号	定格値
コレクター-エミッタ間電圧	$V_{CES}$	3300V
ゲート-エミッタ間電圧	$V_{GES}$	$\pm 20V$
コレクタ電流	$I_C$	1200A

熱抵抗		
項目	記号	最大値
Diode 部接合部-ケース間熱抵抗	$R_{th(j-c)Diode}$	0.017K/W
IGBT 部接合部-ケース間熱抵抗	$R_{th(j-c)IGBT}$	0.0085K/W

3.2 測定方法

測定は、冷却法（JEDEC規格：Joint Electron Device Engineering Council Standard, JESD51-14に準拠）で行った<sup>5)</sup>。以下に測定手順を示す。

- (1) 図3に示すように、最初に一定加熱電流  $I_H$  を DUT-0 に与える。 $I_H$  は、DUT-0 の接合部温度  $T_j$  が一定になるまで流す。
- (2) DUT-0 の温度  $T_j$  が、十分な飽和状態に達した時 ( $t = t_1$ )、 $I_H$  から測定電流  $I_M$  に切り替える。ここで、 $I_M$  は、 $I_H$  と比較して無視できるほど小さい値とする。
- (3) DUT-0 の温度  $T_j$  の測定は、電流を  $I_M$  に切り替えた時  $t = t_1$  から開始し、冷却器温度と同じになる時間  $t = t_2$  まで、連続的に行う。
- (4) 2章で示した計算方法により、熱構造関数と熱抵抗を算出する。

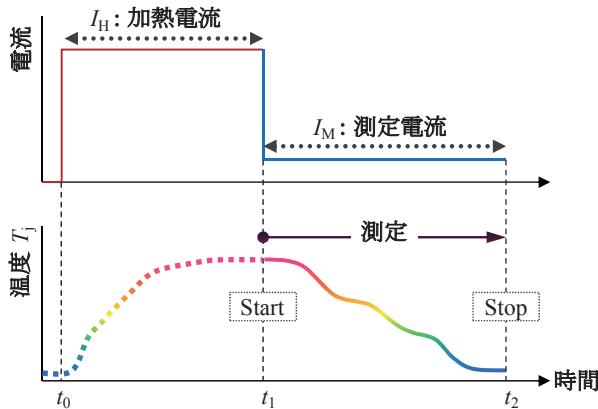


図3 測定方法（冷却法）

ここで、ダイオード部の温度  $T_j$  は順方向電圧  $V_F$  を、IGBT 部の  $T_j$  はコレクターエミッタ間電圧  $V_{CE}$  を測定し求めた。図4に、ダイオード部の  $I_M$  における温度  $T_j$  に対する順方向電圧  $V_F$  の測定結果と近似式を示す。温度  $T_j$  は、283K から順に、298K, 313K, 323K, 333K, 348K, 363K, 378K, 393K まで恒温槽を使用して変化

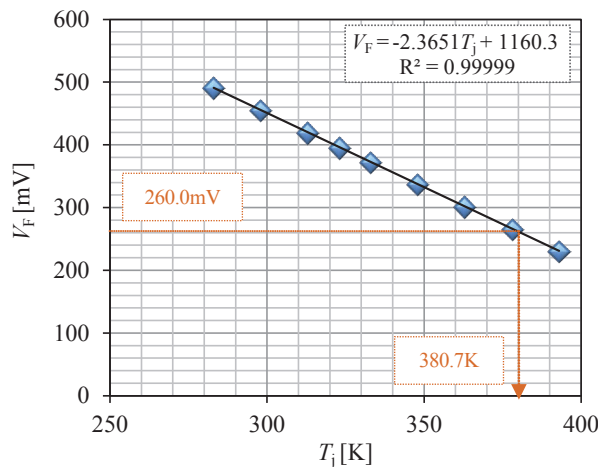


図4  $T_j$  に対する  $V_F$  の測定結果と近似式（Diode 部）

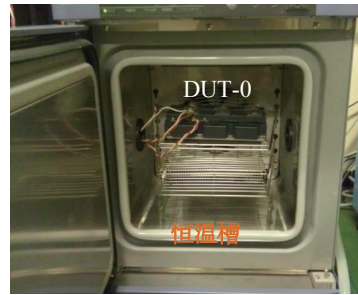


図5 恒温槽内測定状況

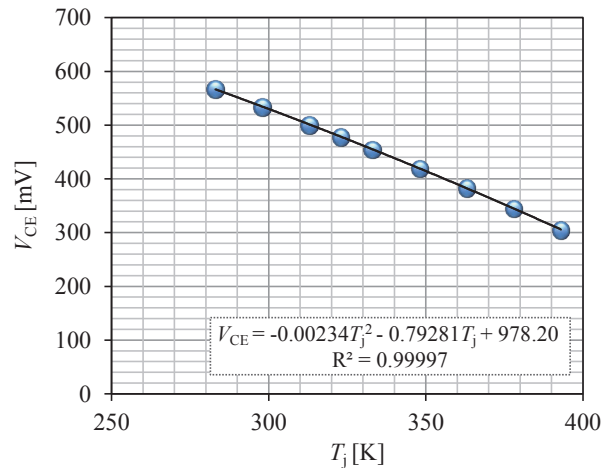


図6  $T_j$  に対する  $V_{CE}$  の測定結果と近似式（IGBT 部）

させた（図5）。図4の近似式から、 $V_F = 260.0\text{mV}$  の時は、 $T_j = 380.7\text{K}$  と求めることができる。同様に、図6に、IGBT 部の  $I_M$  における  $T_j$  に対する  $V_{CE}$  の測定結果と近似式を示す。

3.3 算出結果の検証

図7に、DUT-0 のダイオード部、図8に IGBT 部の熱構造関数とその微分関数の算出結果を示す。図より、ダイオード部の接合部（図中①）－ケース（図中⑦）間の熱抵抗  $R_{th(j-c)Diode} = 0.0145\text{K/W}$ 、IGBT 部の熱抵抗  $R_{th(j-c)IGBT} = 0.0084\text{K/W}$  が得られた。この値は、表1に示す熱抵抗規格最大値 ( $R_{th(j-c)Diode} = 0.017\text{K/W}$ ,  $R_{th(j-c)IGBT} = 0.0085\text{K/W}$ ) より小さく、DUT-0 は良品であると判断でき、データシートと比較可能なレベルの精度を得られることを確認した。

また、図7, 8の①～⑦は、DUT-0 内部の材料毎の熱抵抗を推定した結果である。冷却法を使用し、飽和温度状態から冷却器温度まで、連続で電圧測定を行い、熱構造関数を算出した。その結果、内部材料毎に熱特性評価を行える可能性もでてきた。

なお、図7と図8を比較すると、ダイオード部（図1-X部）の熱構造関数から内部材料の熱抵抗を算出した場合と、IGBT 部（図1-Y部）から算出した場合とでは、相違が見られる。これは、加熱電流  $I_H$  を流すチップ面

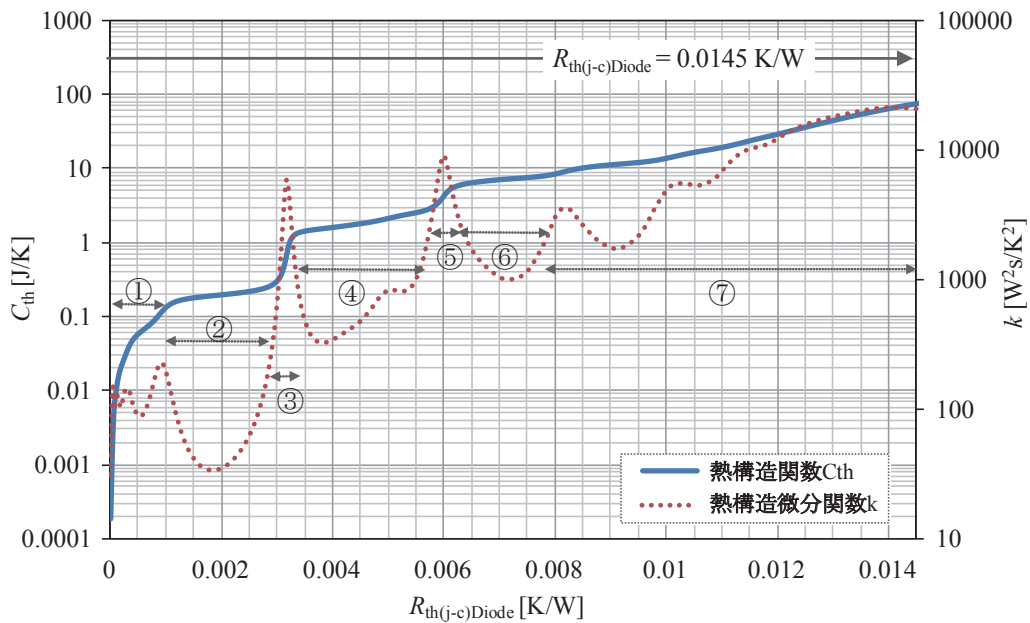


図7 接合部-ケース間の熱構造関数算出結果 (Diode部)

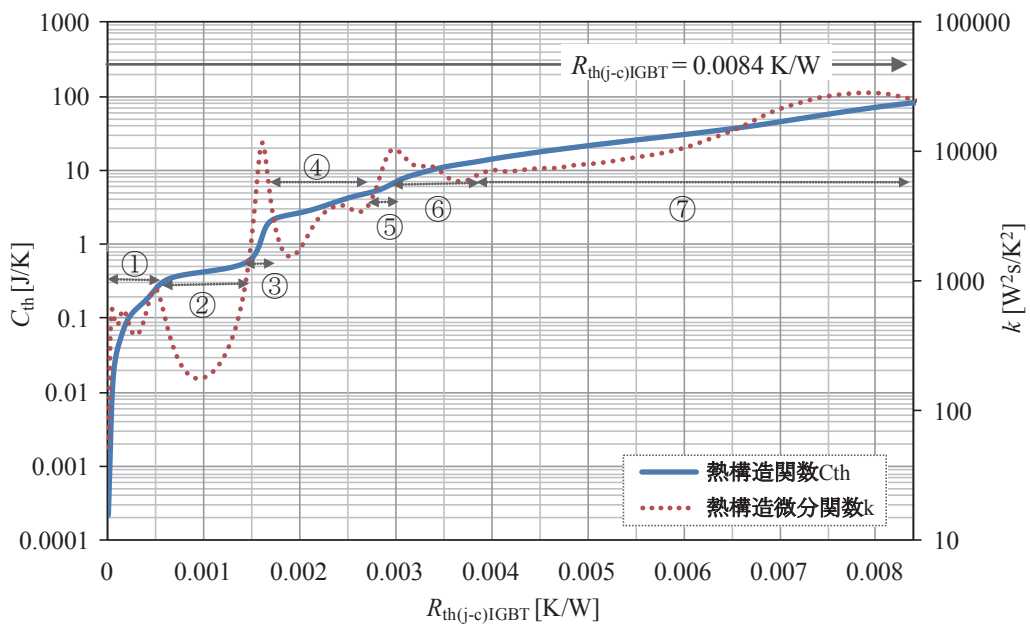


図8 接合部-ケース間の熱構造関数算出結果 (IGBT部)

積に関係しているためである。この解析は、モジュール構造との照らし合わせが必要であり、今後取り組む予定である。

#### 4. IGBT モジュールの劣化評価<sup>6)</sup>

使用年数の異なる IGBT モジュール DUT-1, DUT-2(使用年数は DUT-1 < DUT-2, 以下 DUT-1, DUT-2) の 2 台に対して、3 章の方法を適用し、劣化評価を試みた。最大定格は、表 1 の DUT-0 と同様に、コレクター-エミッタ間電圧  $V_{CES} = 3300V$ , ゲート-エミッタ間電圧  $V_{GES}$

$= \pm 20V$ , コレクタ電流  $I_C = 1200A$  である。表 2 に、評価項目、評価基準及び測定条件を示す。評価基準は、IEC60747-9 の耐久性試験後の合格判定基準<sup>7)</sup> に準拠し、ここでは、その基準を超えた場合に、劣化とする。但し、製造に起因すると考えられる場合は除く。

図 9 から図 14 に、劣化評価結果を示す。DUT-1 は、表 2 の 7 つの評価項目のすべてに対して、合格基準値以内であった。DUT-2 は、No.1 のダイオード部熱抵抗  $R_{th(j-c)Diode}$  と No.3 ~ No.7 の電気的特性は、合格基準値以内であったが、No.2 の IGBT 部熱抵抗  $R_{th(j-c)IGBT}$  は、合格基準  $R_{th(j-c)IGBT} < USL (= 8.0K/kW)$  を超え、劣化を確認

表2 IGBTの劣化評価項目・評価基準

No.	評価項目	記号	測定条件	評価基準
1	Diode部 接合部-ケース間熱抵抗	$R_{th(j-c)Diode}$	Diode部 3章参照	< USL
2	IGBT部 接合部-ケース間熱抵抗	$R_{th(j-c)IGBT}$	IGBT部 3章参照	< USL
3	エミッター-コレクタ間電圧	$V_{EC}$	$I_E = I_C, V_{GE} = 0V$	< USL
4	ゲート-エミッタ間閾値電圧	$V_{GE(th)}$	$I_C = \text{データシート指定値}, V_{CE} = \text{データシート指定値}$	> LSL, < USL
5	コレクター-エミッタ間飽和電圧	$V_{CE(sat)}$	$I_C = I_C, V_{GE} = 15V$	< USL
6	コレクタ遮断電流	$I_{CES}$	$V_{CE} = V_{CES}, V_{GE} = 0V$	< USL
7	ゲート-エミッタ間漏れ電流	$I_{GES}$	$V_{GE} = V_{GES}, V_{CE} = 0V$	< USL

・USL：データシート最大値，LSL：データシート最小値

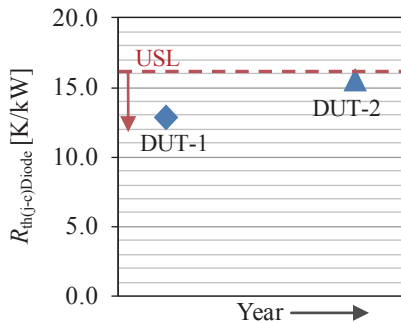


図9 接合部-ケース間熱抵抗 (Diode部)

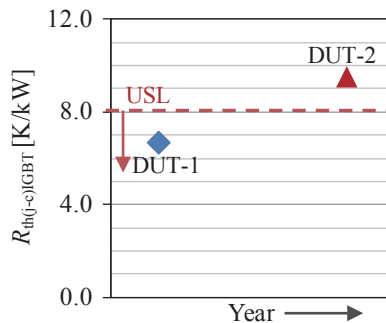


図10 接合部-ケース間熱抵抗 (IGBT部)

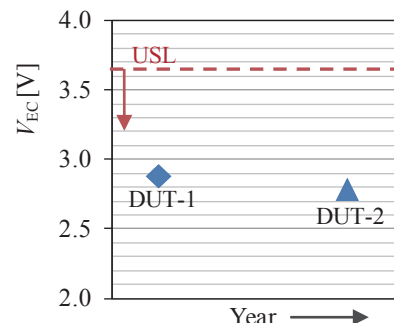


図11 エミッター-コレクタ間電圧

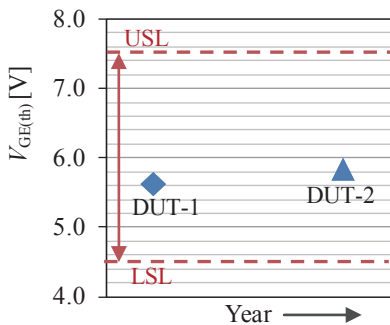


図12 ゲート-エミッタ間閾値電圧

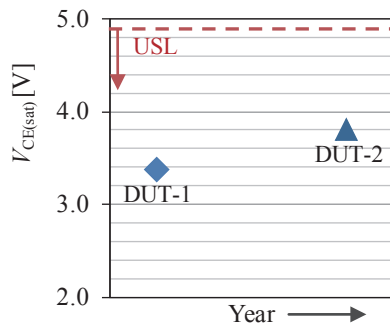


図13 コレクター-エミッタ間飽和電圧

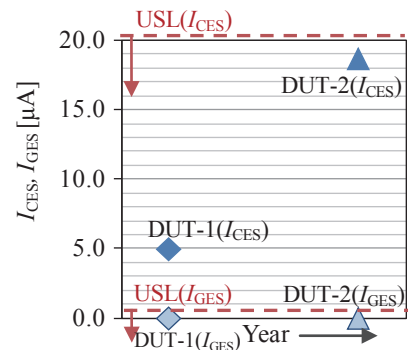
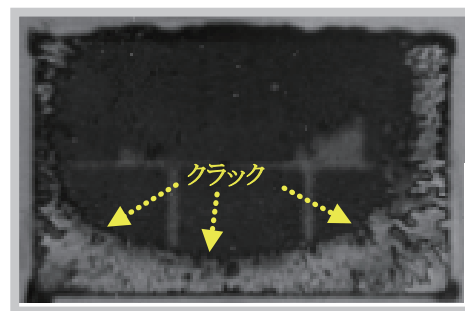


図14 コレクタ遮断電流，ゲート-エミッタ間漏れ電流



(a)DUT-1



(b)DUT-2

図15 超音波検査画像 (図1の⑥材料Eと⑦材料Fの境界面)

特集：車両技術

した(図10)。この試料の場合、熱抵抗  $R_{th(j-c)IGBT}$  の増大は、図15に示す超音波検査結果から、内部材料(図1の⑥材料Eと⑦材料F)の境界面に発生したクラックが原因の1つであると推測される。

次に、DUT-1、DUT-2の  $V_{GE}=8V$ 、 $20V$  におけるコレクターエミッタ間電圧  $V_{CE}$  対コレクタ電流  $I_C$  の出力特性の測定結果を図16示す。図より、 $I_C$  の立ち上がり特性には差は見られないが、立ち上がり以降の特性曲線は、 $V_{GE}=8V$ 、 $20V$  とも違いが見られる(同じ  $V_{CE}$  に対して、DUT-2の  $I_C$  はDUT-1より小さい)。表2のNo.3～No.7の電気的特性は、すべて合格基準値以内の結果であったため、出力特性  $V_{CE}-I_C$  と経年劣化の関係については、測定試料数を増やし、劣化の評価データになるかどうかを、検討する予定である。

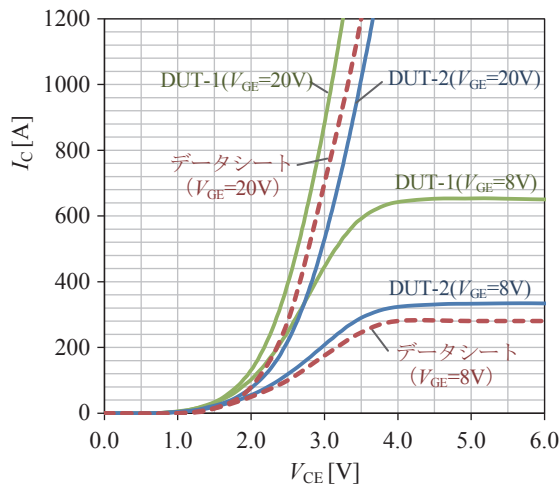


図16 出力特性  $V_{CE} - I_C$

5. まとめ

鉄道車両用電力変換装置のパワー半導体モジュールの劣化を評価することは、メンテナンスの基礎データとして必要である。今回、高耐圧・大電流 IGBT モジュールの劣化評価を行うための課題であった熱抵抗を実験的に求めた。その結果、使用年数の異なる2台の試料のうち1台について、電気的特性はすべて合格基準値以内であったが、熱抵抗値からは劣化が確認された。熱抵抗は、複数材料から構成されるモジュール形の素子の場合、電気的特性に加えて、重要な評価項目の1つであることがわかる。以下に、得られた結果についてまとめる。

(1) 最大定格  $3300V \cdot 1200A$  の IGBT モジュールを用いて熱抵抗測定を行った結果、例えばダイオード部

の接合部-ケース間熱抵抗  $R_{th(j-c)Diode}$  で  $0.0145K/W$  の値が得られた。これにより、規格値の最大  $R_{th(j-c)Diode} = 0.017K/W$  との比較が可能なレベルに達し、電気的特性とともに、定量的に劣化評価を行える見通しを得た。

(2) 使用年数の異なる2台の IGBT モジュールの劣化評価を、IEC60747-9の耐久性試験後の合格基準に準拠し、試みた。2台の試料とも、電気的特性は、合格基準内であったが、1台の IGBT 部熱抵抗  $R_{th(j-c)IGBT}$  は、合格基準  $R_{th(j-c)IGBT} < USL$  を超え、劣化を確認した。この試料の場合、熱抵抗の増大は、超音波検査の結果から、内部材料境界面に発生したクラックが原因の1つであると推測される。

今後、加速試験等により、IGBT モジュール内の材料毎の熱抵抗の経時変化まで解析できるかどうかを検討する予定である。また、コレクターエミッタ間電圧  $V_{CE}$  対コレクタ電流  $I_C$  出力特性の変化と経年劣化との関係については、測定試料数を増やし、劣化の評価データになるかどうかを検討する予定である。

文献

- 1) V.Székely, Tran van Bien: "Fine structure of heat flow path in semiconductor devices: a measurement and identification method", Solid-State Electronics 31(9): 1363-1368 (1988).
- 2) V.Székely: "On the representation of infinite-length distributed RC one-ports", IEEE Transactions on Circuits and Systems II - Analog and Digital Signal Processing, 38(7):711-719, 1991.
- 3) M. Rencz, A. Poppe, E. Kollár, S. Röss, V. Székely: "Increasing the Accuracy of Structure Function Based Thermal Material Parameter Measurements", IEEE Transactions On Components and Packaging Technologies 28(1): 51-57, 2005.
- 4) E. N. Protonotarios, O. Wing: "Theory of nonuniform RC lines", IEEE Transactions on Circuit Theory, 14(1):2-12, 1967.
- 5) JEDEC STANDARD, JESD51-14: "Transient Dual Interface Test Method for the Measurement of the Thermal Resistance Junction to Case of Semiconductor Devices with Heat Flow Through a Single Path".
- 6) T. Fukuda: "Degradation of Power Semiconductor Modules for Train", EPE' 13, 0047.
- 7) IEC 60747-9: "Semiconductor devices, Discrete devices, Part 9: Insulated-gate bipolar transistors (IGBTs)".