

講座番号:C03

**パワーモジュール用実装材料の進展-1
(接合・接続)**



大同大学 山田 靖

目次

1. パワー半導体実装用接合技術の概要
2. KAMOME-PJ* における最近の進捗
3. 接合材料の特性評価法

* KAMOME-PJ

Kanagawa Advanced MOdule Material Evaluation Project
(SiC等大電流パワーモジュール用実装材料開発・評価支援PJ)
(横浜国立大学、大同大学、神奈川県立産業技術総合研究所、
参加企業、試作企業など)

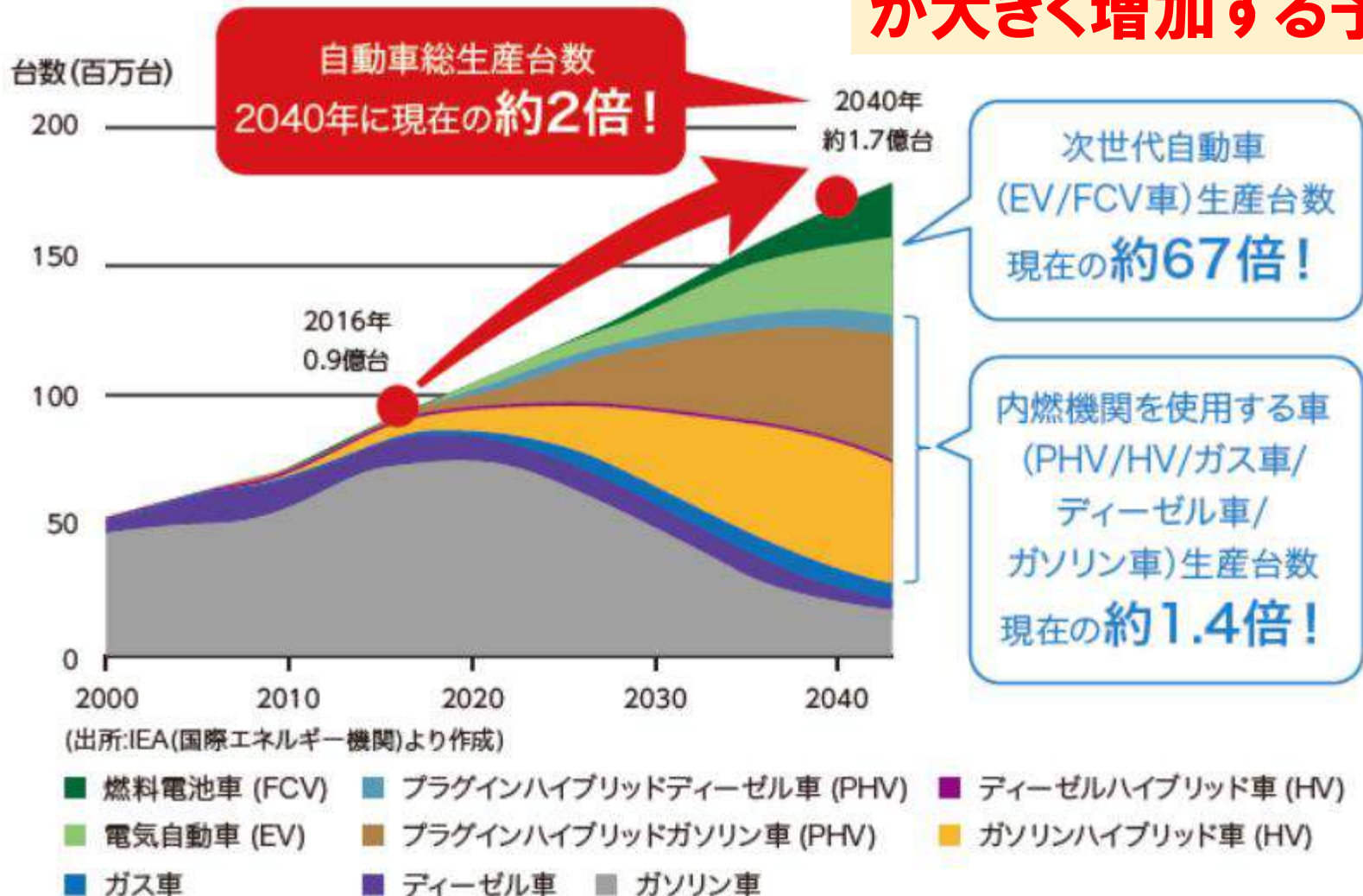
目次

- 1. パワー半導体実装用接合技術の概要**
- 2. KAMOME-PJ* における最近の進捗**
- 3. 接合材料の特性評価法**

1. パワー半導体実装用接合技術の概要

自動車産業の展望

**パワーデバイスの需要
が大きく増加する予想**



1. パワー半導体実装用接合技術の概要

次世代パワー半導体 (WBG) への期待

- **低損失 (低定常損失)**
- **高速 (低スイッチング損失)**
- **高温動作 $>200^{\circ}\text{C}$ (高温環境)**

実装の高耐熱化が必要

1. パワー半導体実装用接合技術の概要

200℃を超える高温動作のニーズは、あるか？

- 負荷が刻々と変化する乗物では、短時間高負荷のニーズ有

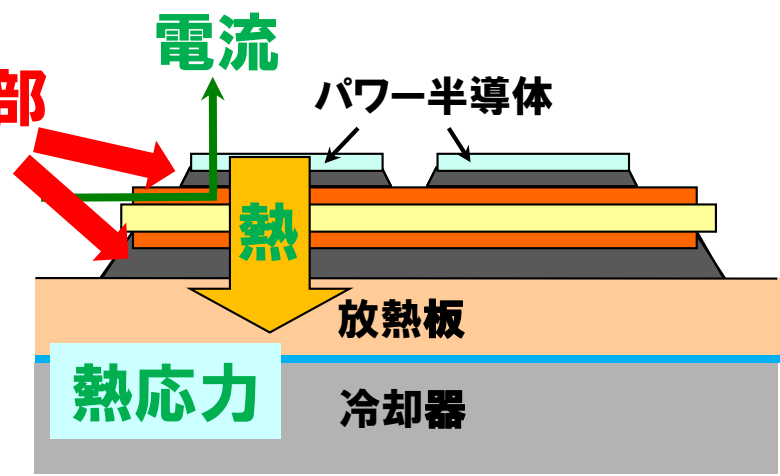
- 高温では損失が増えるため、高温動作は効率を下げる

- ハイブリッド車のような高温環境では、メリット有 (冷却系の簡素化)

1. パワー半導体実装用接合技術の概要

パワー半導体用接合材料に求められる性能

- **高耐熱性** (高温動作の実現)
- **高熱伝導性** (低熱抵抗化)
- **高導電性**
- **信頼性** (熱応力、電流など)



接合材料	融点	利点	欠点
Sn系はんだ	220°C前後	安価、広く利用	200°C超の高温動作困難。熱伝導率70W/mK程度
Pb系はんだ	300°C程度まで可	安価、高耐熱	有毒で使用不可。低熱伝導率
Au系はんだ	Au-Snは280°C		高価
Ag、Cu焼結系接合材料	非常に高い	高耐熱 高熱伝導率	種々の材料有。接合工程(温度、時間)によって性質が異なる

有望

評価が必要

1. パワー半導体実装用接合技術の概要

接合技術に求められる要件

電気

- 直流
- 交流 / 高周波
- 電圧 / 電流分布

伝熱

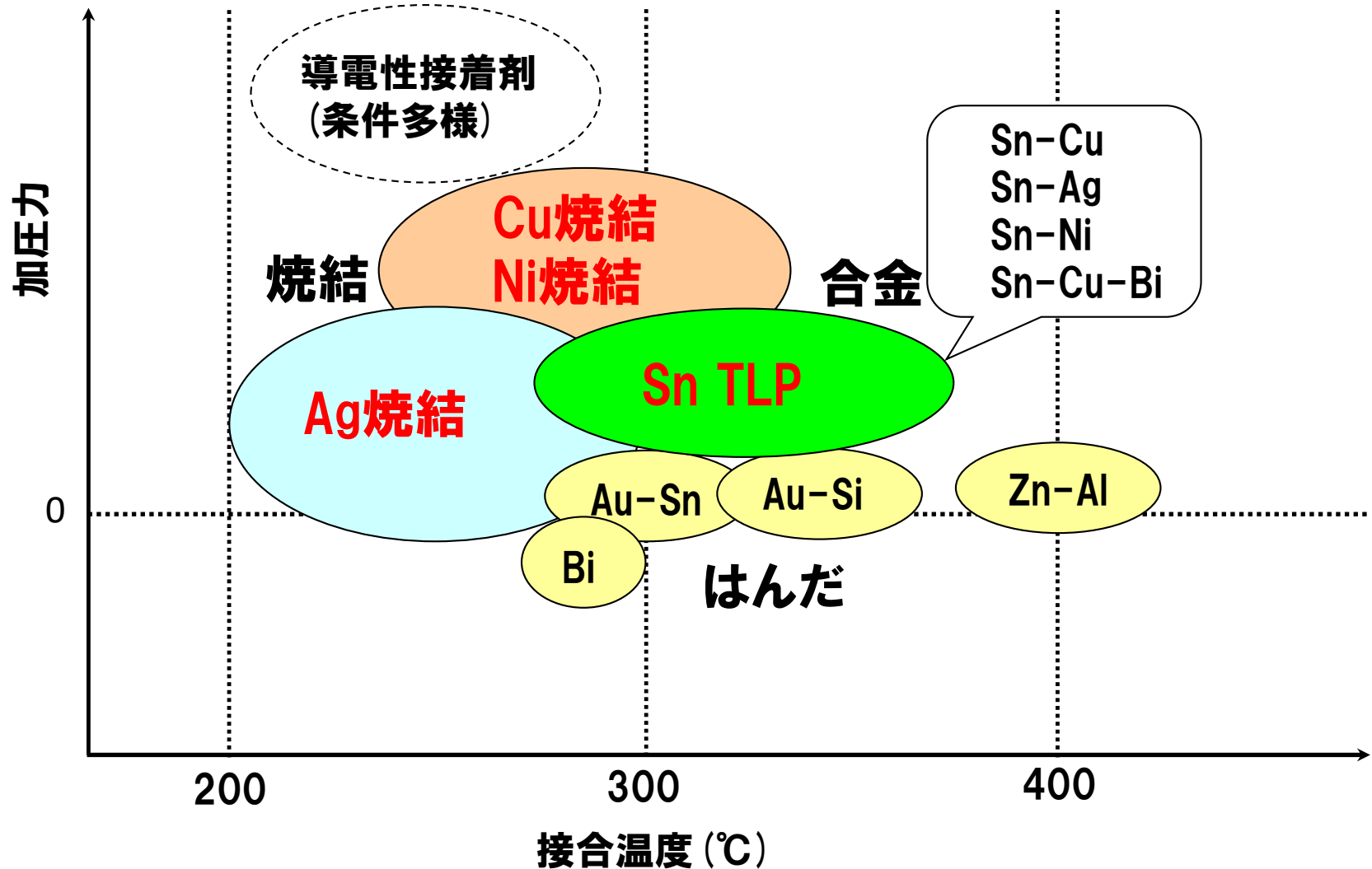
- 熱抵抗
- 熱容量
- 冷却

熱応力

- 応力 / ひずみ
- 変形
- 亀裂進展 / 剥離

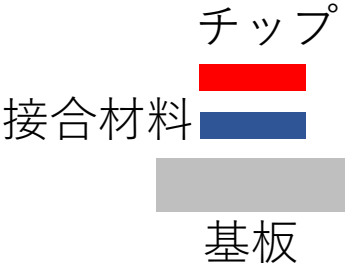




1. パワー半導体実装用接合技術の概要

接合技術の概況



1. パワー半導体実装用接合技術の概要

接合原理

接合前	接合時		接合後
 <p>チップ 接合材料 基板</p>	(1)高融点はんだ	 <p>← 溶融・凝固</p>	
	(2)金属ナノ粒子	 <p>← 焼結 (有機物脱離)</p>	
	(3)合金接合	 <p>← 反応 (合金化)</p>	

目次

1. パワー半導体実装用接合技術の概要
2. KAMOME-PJ* における最近の進捗
3. 接合材料の特性評価法

2. 最近の進捗 (大面積接合)

接合面積

10mm × 10mm

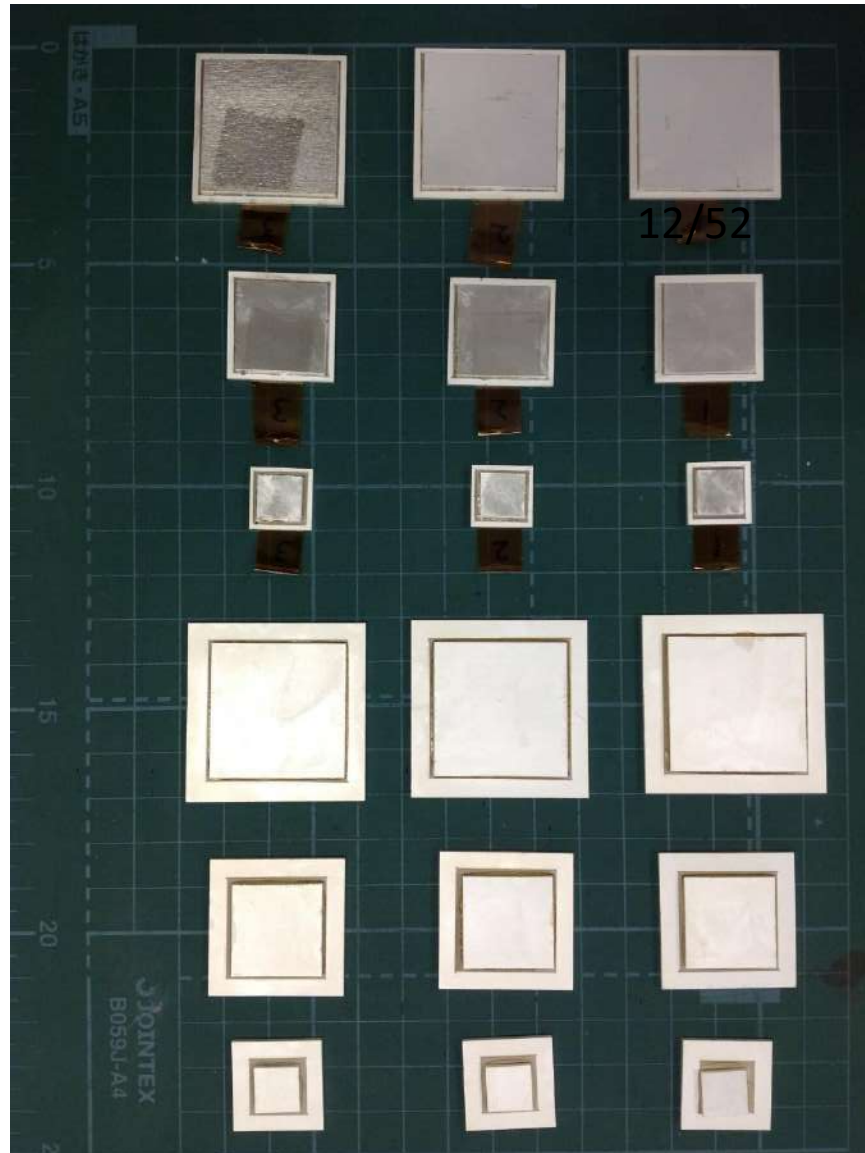
20mm × 20mm

30mm × 30mm

接合状態を

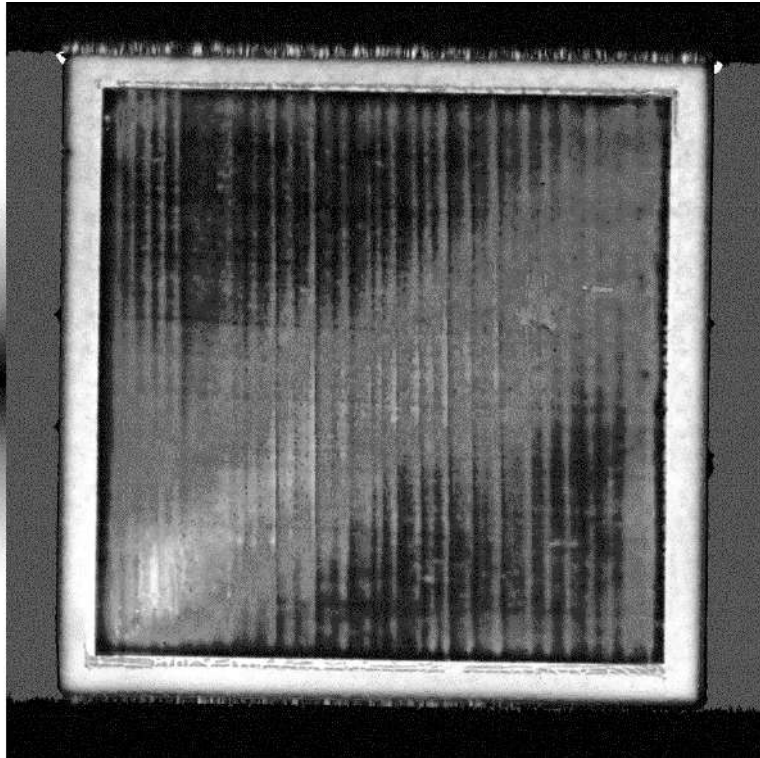
①SATで評価

②断面を観察

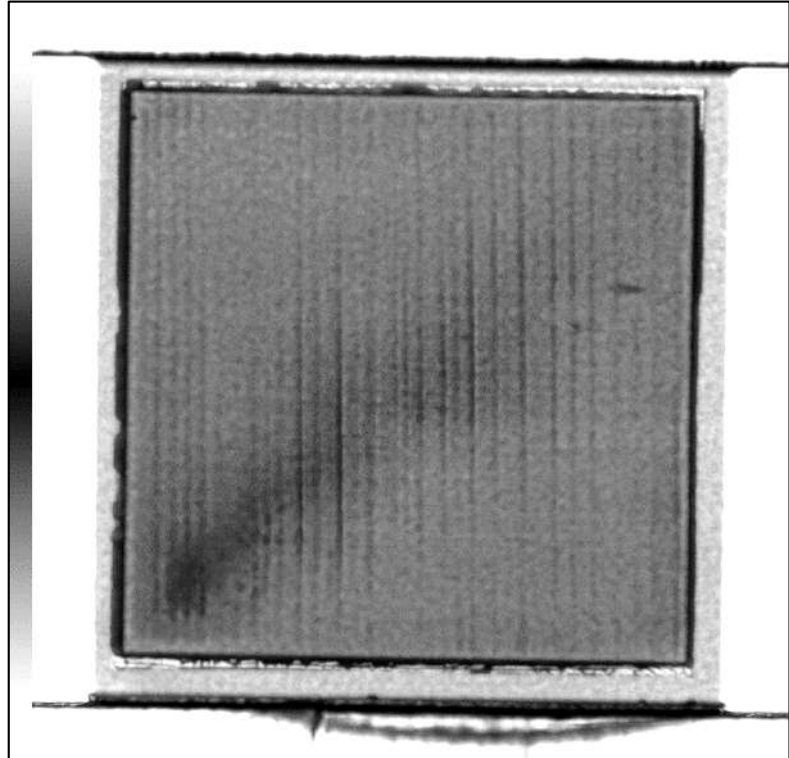


サンプル写真

2. 最近の進捗 (大面積接合)



反射像 (50MHz、裏面側)



← 40mm →

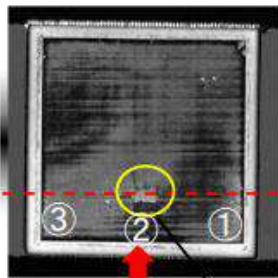
透過像 (50MHz、裏面側)

2. 最近の進捗 (大面積接合)

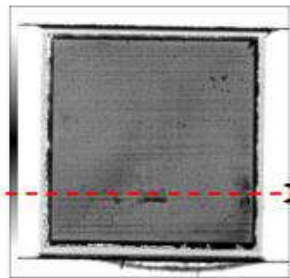
3. □30mm

○□30mm-3を研磨・観察

Kistec SAT像



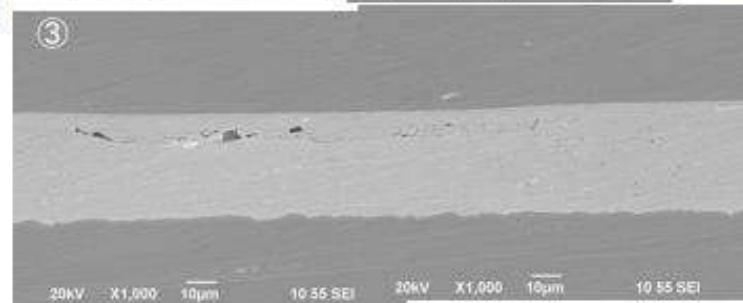
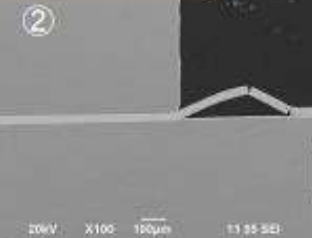
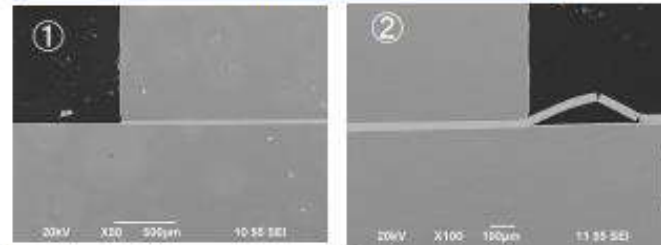
反射像 (50MHz, 裏面側)



透過像 (50MHz, 裏面側)

40mm

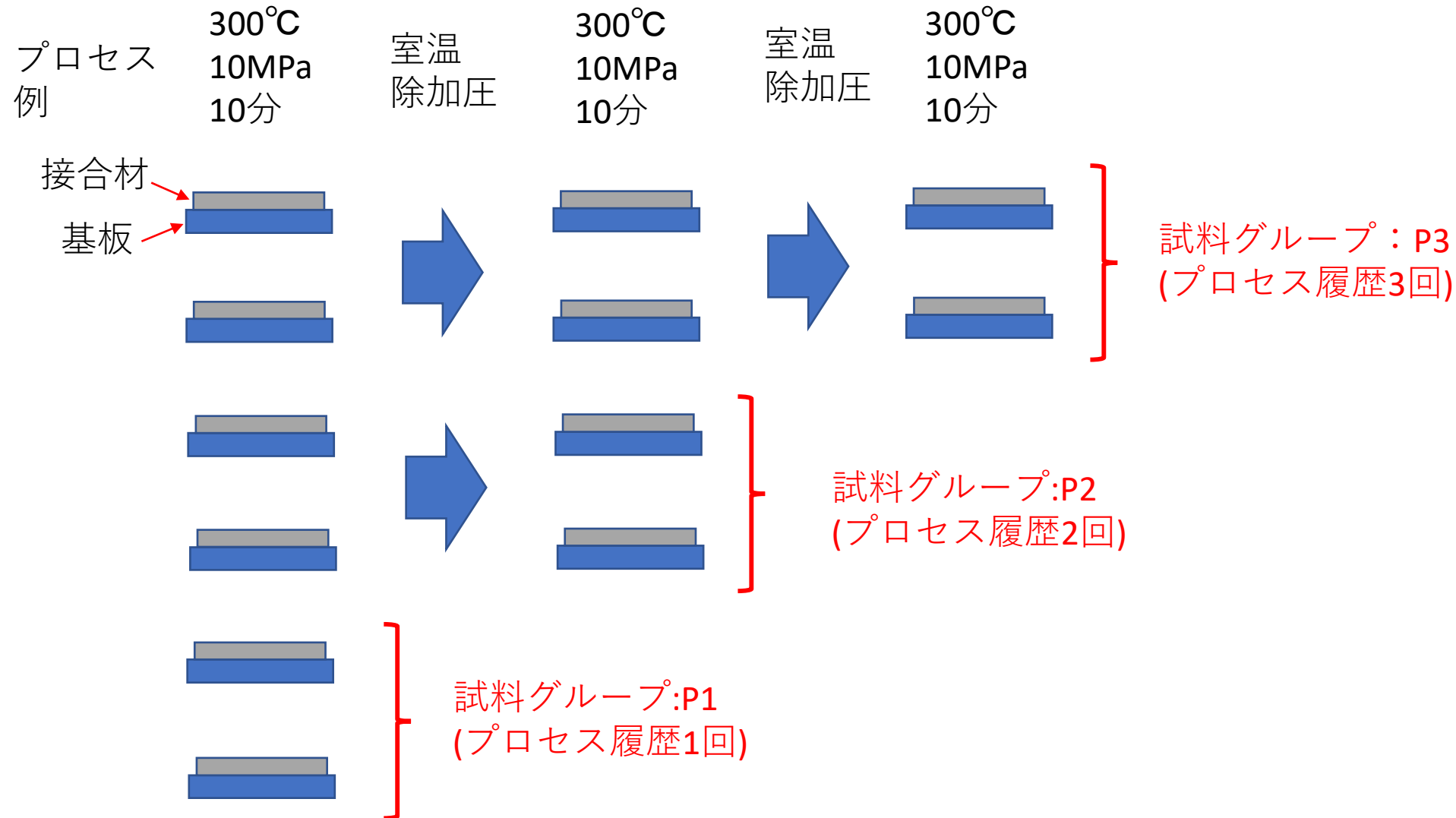
断面像



DD

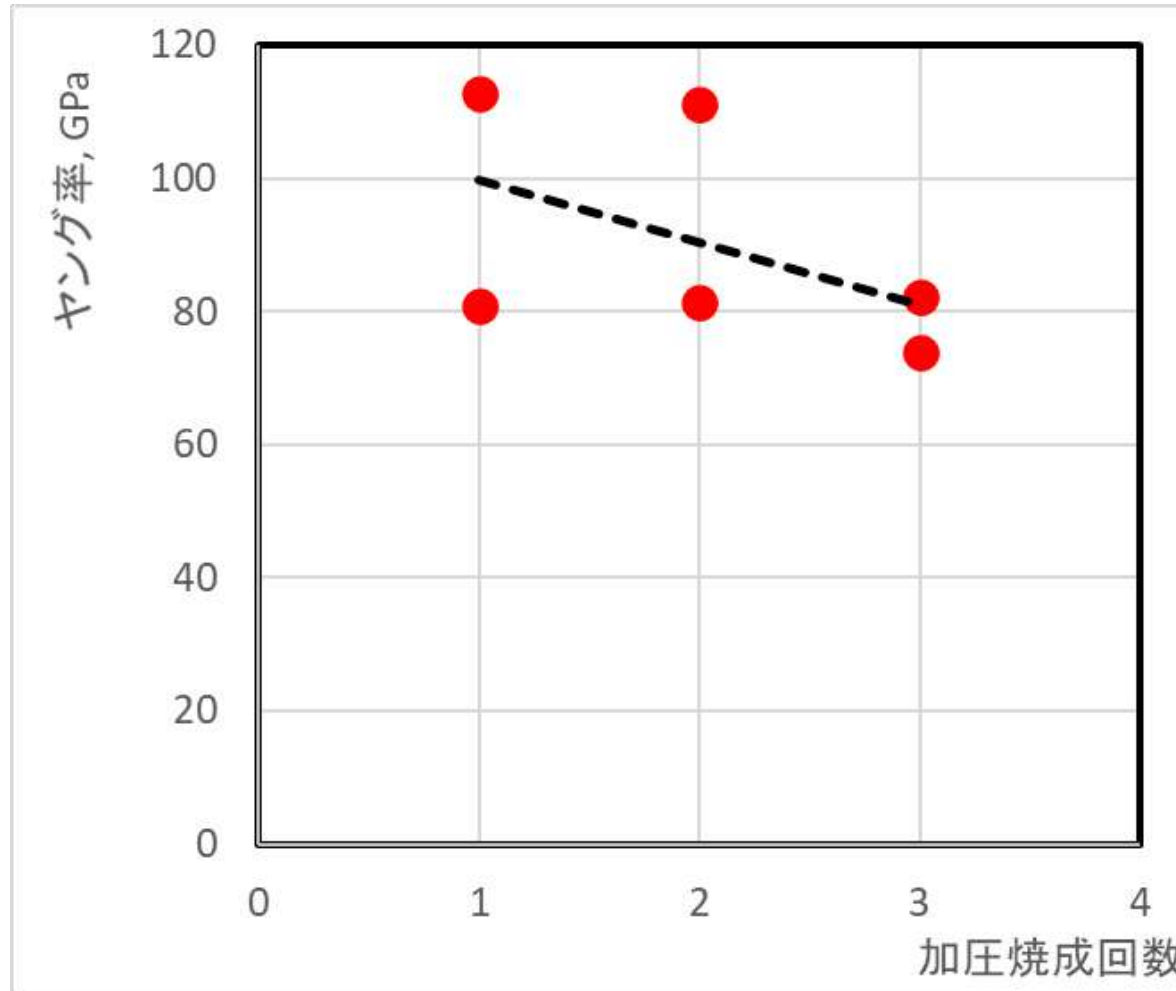


2. 最近の進捗 (プロセス繰返しによる特性変化) ^{15/54}

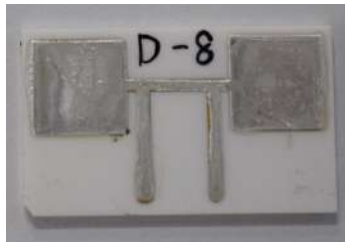


2. 最近の進捗 (プロセス繰返しによる特性変化) ^{16/54}

ヤング率

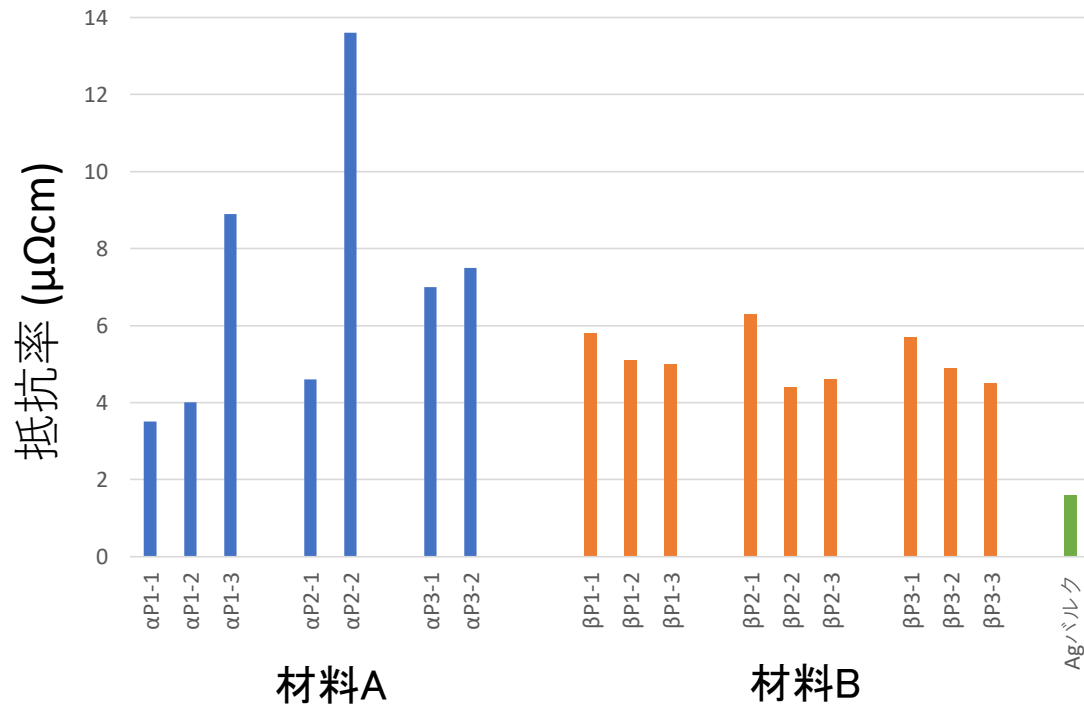


2. 最近の進捗 (プロセス繰返しによる特性変化) ^{17/54}



試料

抵抗率



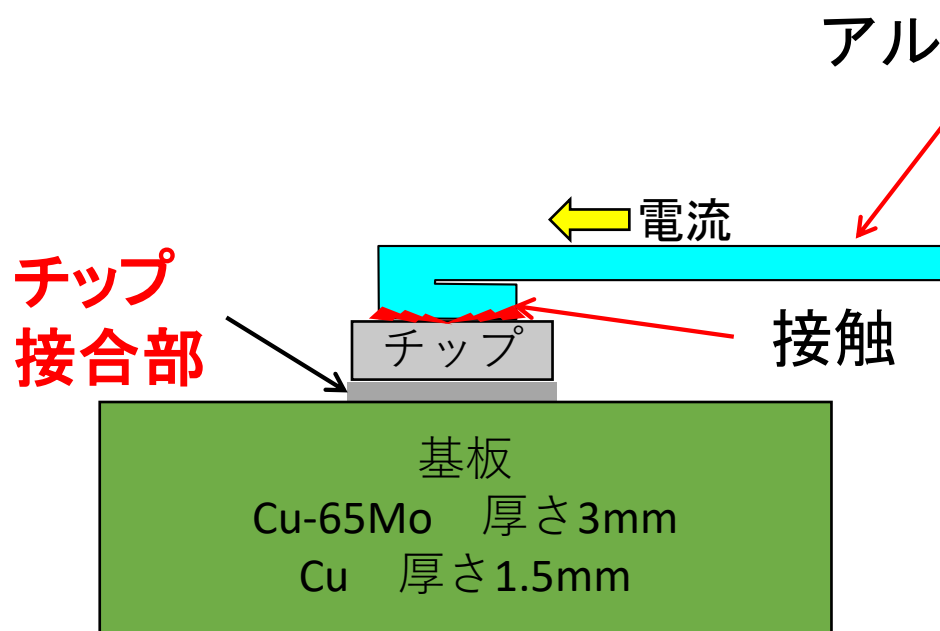
試料番号

P1: プロセス1回、P2: プロセス2回、P3: プロセス3回

2. 最近の進捗 (パワーサイクル信頼性)

PCT用サンプル

リード接触構造



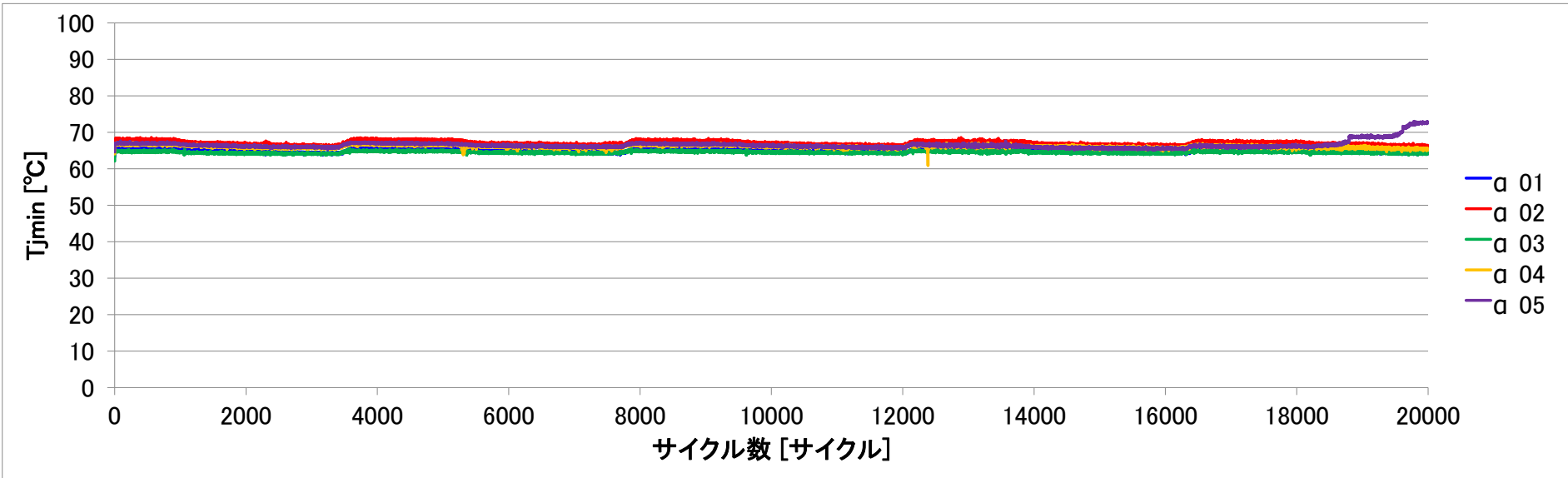
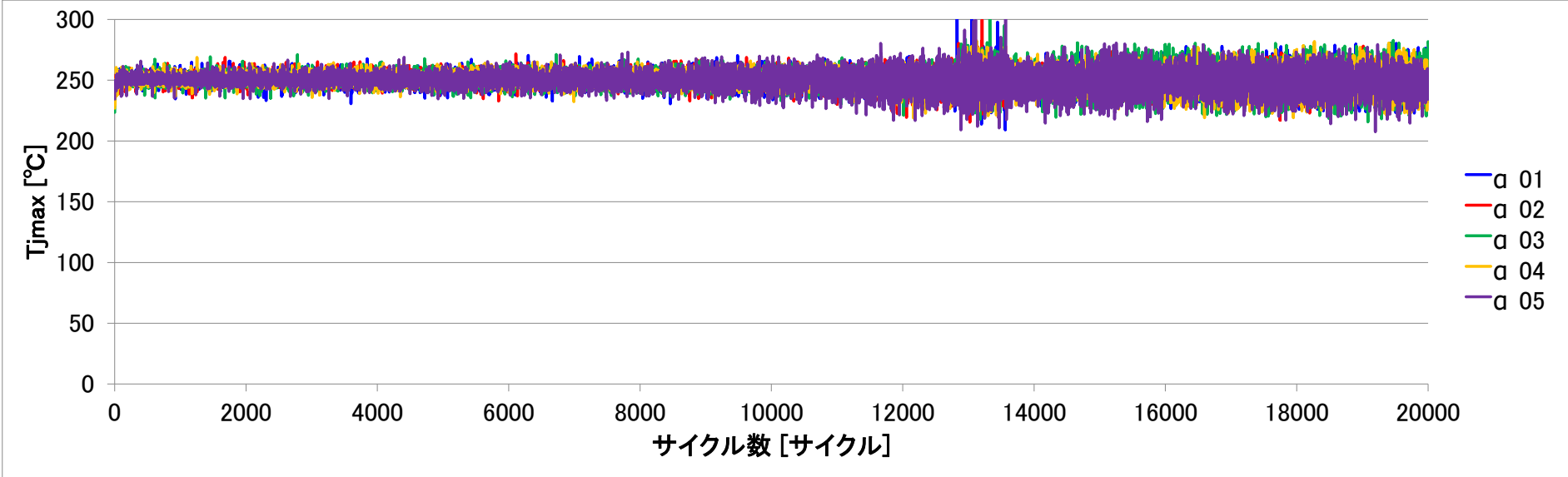
- ・チップ表面にリードを接触
- ・チップとリードの熱膨張係数差は接触部の摺動で吸収
- ・接触抵抗が高い・劣化する

評価項目

- ・SAT観察
- ・熱抵抗測定
- ・I-V測定

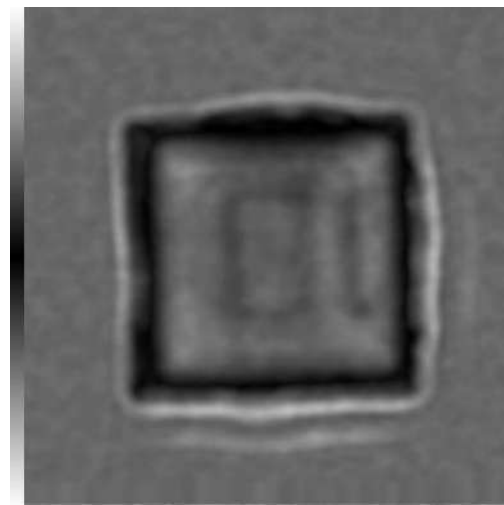
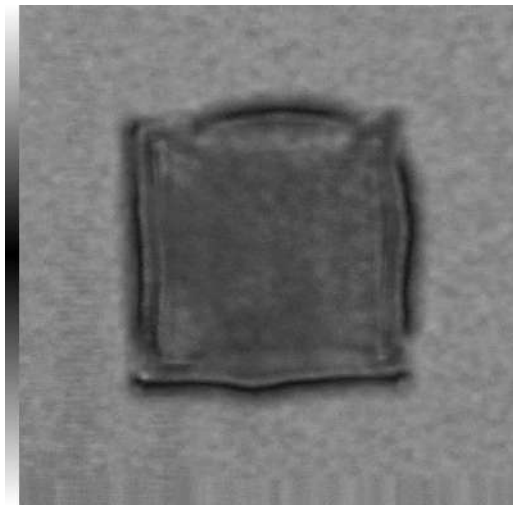
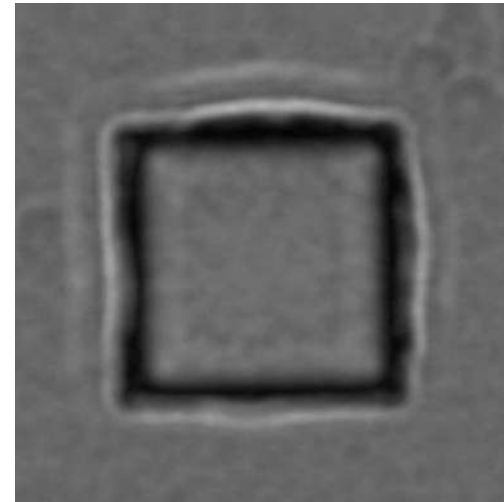
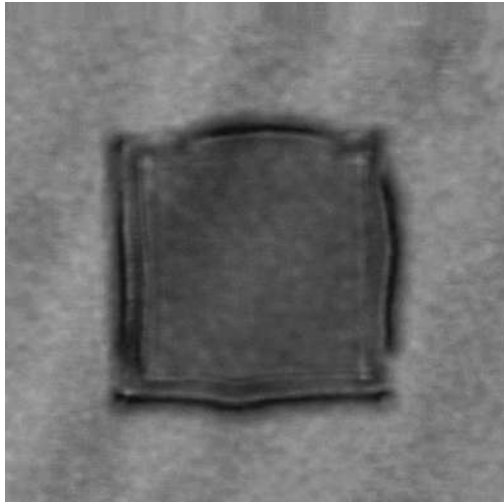
2. 最近の進捗 (パワーサイクル信頼性)

PCT中のTjの変化



2. 最近の進捗 (パワーサイクル信頼性)

試験前後のSAT像の比較



反射像 (50MHz、裏面側)

透過像 (50MHz、裏面側)

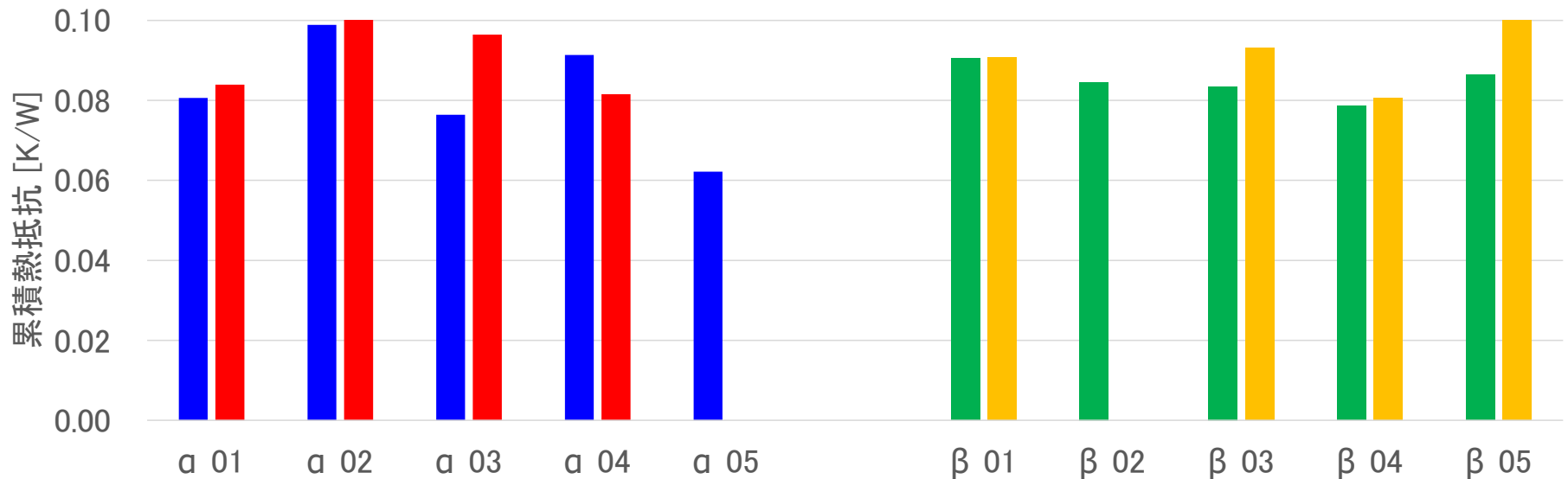
上 : 試験前 下 : PCT (20000サイクル) 後

2. 最近の進捗 (パワーサイクル信頼性)

熱抵抗の比較

① Cu-65Mo基板

累積熱容量0.03[J/K]に対応する累積熱抵抗



左:試験前、右:試験後

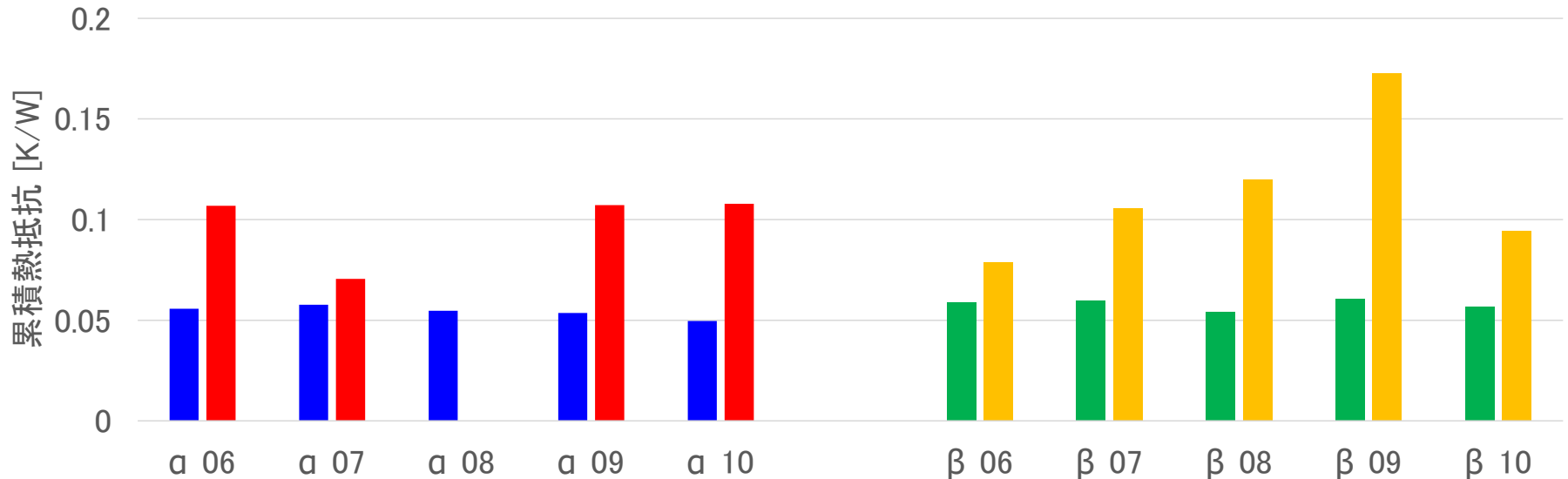
PCTによる熱抵抗の変化は少ない

2. 最近の進捗 (パワーサイクル信頼性)

熱抵抗の比較

②Cu基板

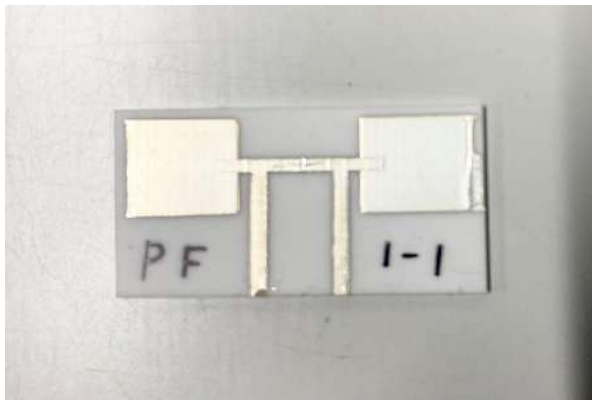
累積熱容量0.03[J/K]に対応する累積熱抵抗



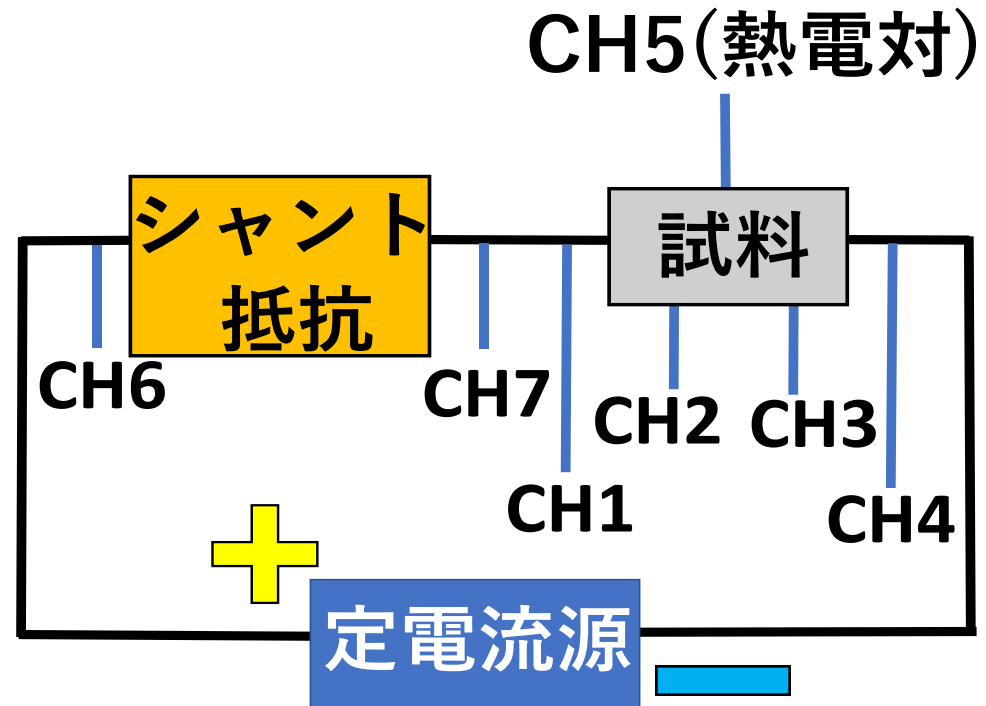
左:試験前、右:試験後

PCTによる熱抵抗の変化が大きい

2. 最近の進捗 (エレクトロマイグレーション信頼性)



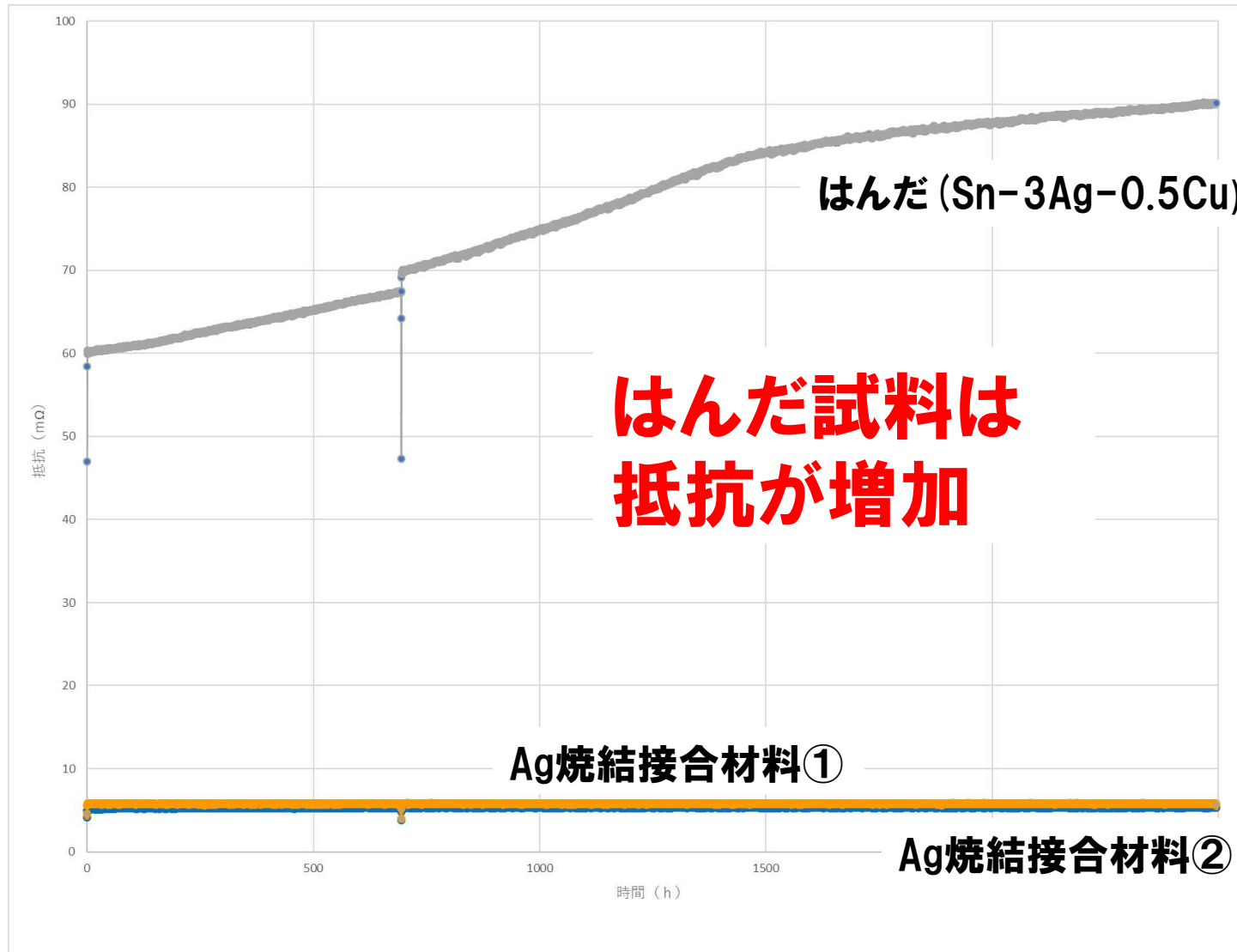
4端子測定用試料
(アルミナ基板上に
接合材料を成膜)



測定系

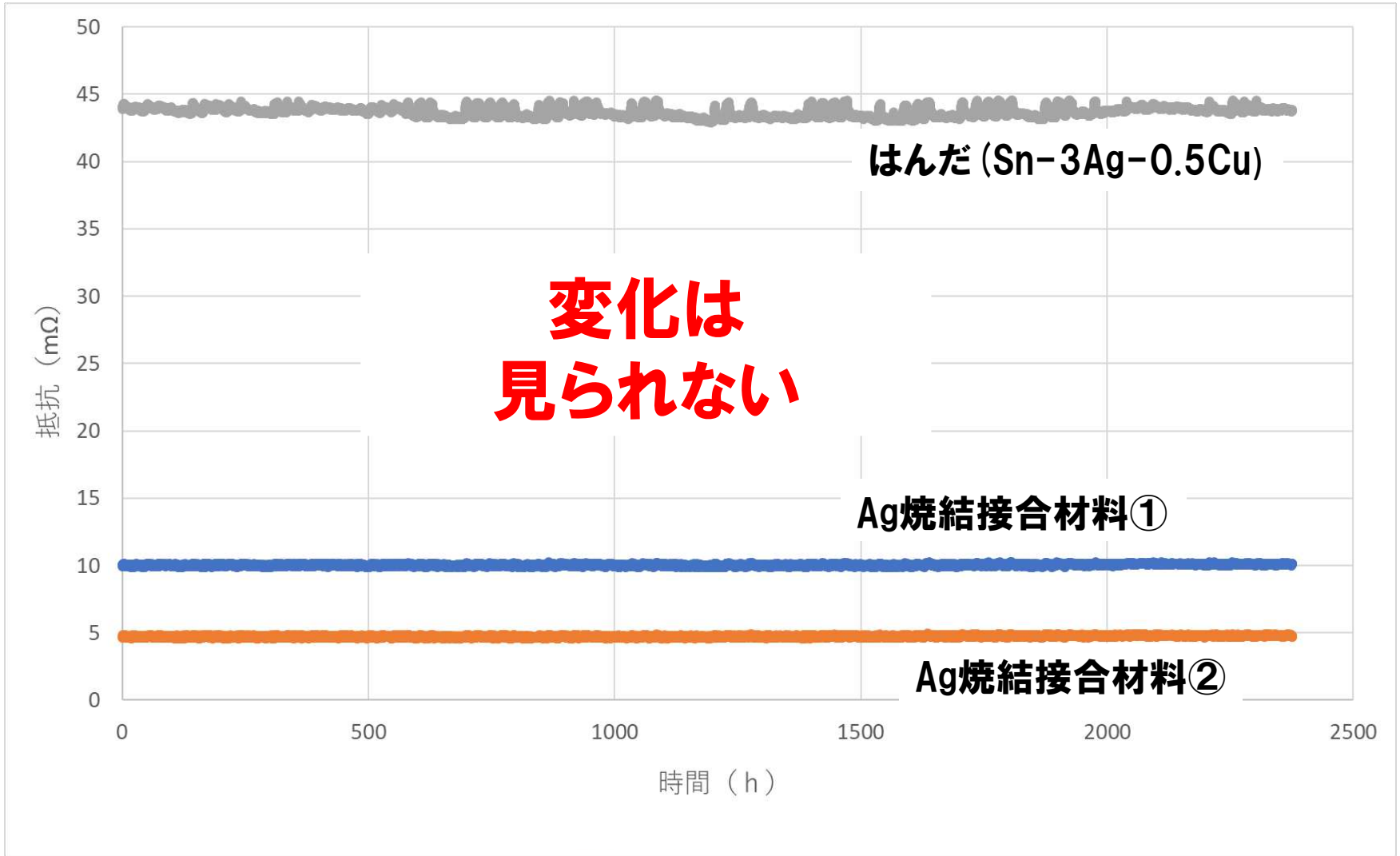
2. 最近の進捗 (エレクトロマイグレーション信頼性)

150°C試験



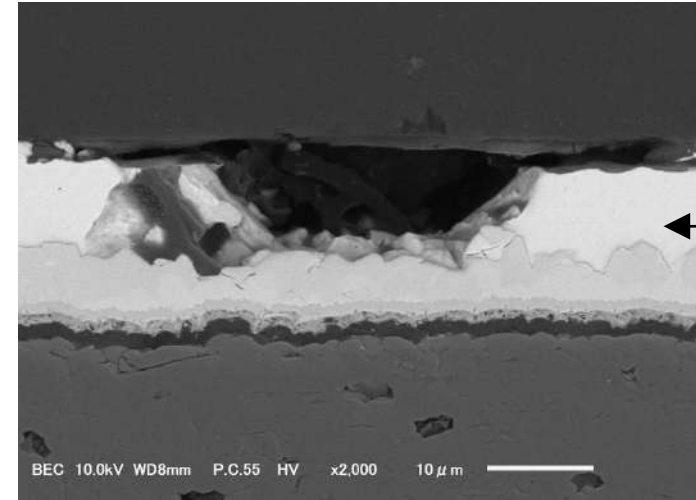
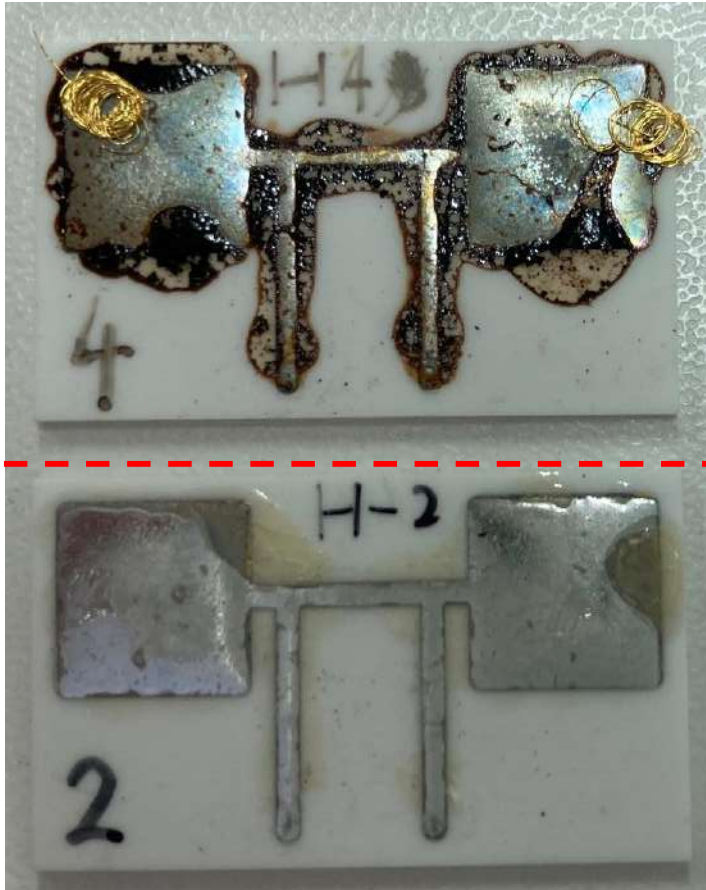
2. 最近の進捗 (エレクトロマイグレーション信頼性)

室温試験



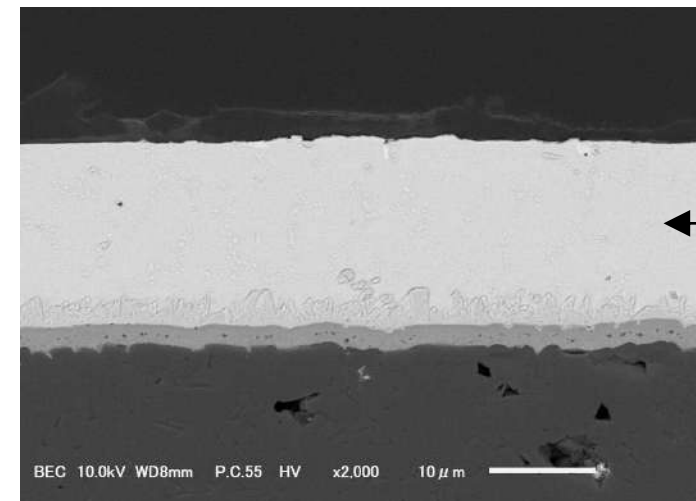
2. 最近の進捗 (エレクトロマイグレーション信頼性)

150°C
試験



はんだ層

室温
試験



はんだ層

4端子試験用の試料

目次

1. パワー半導体実装用接合技術の概要
2. KAMOME-PJ* における最近の進捗
3. 接合材料の特性評価法

3. 接合材料の特性評価法 (ヤング率)

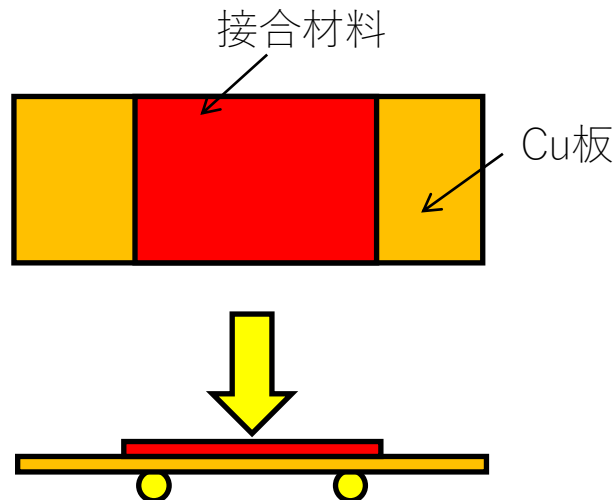
接合材料のヤング率の評価方法

方法	引張試験	インデンテーション	曲げ試験
試験片	板状あるいは柱状の材料を機械加工し、ダンベル型試験片を作製	接合した試料から断面を研磨	薄板上に接合材料を成膜
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・ 試験片は、実装構造と異なる ・ はんだなど、一般的な材料との比較が容易 ・ 焼結接合材では、大きな試料の作製は困難な場合が多い 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 試験片は、実装構造そのもの ・ 細かい圧子で押すため、局所的な情報になるが、一方、状態の異なる箇所データの得られる。 ・ 装置が高価なため高コスト 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 試験片は、実装構造と異なる ・ 試料の作製や測定が容易 ・ 低コスト

本研究では、3点曲げを実施

3. 接合材料の特性評価法 (ヤング率)

基板(Cu板)上に、接合材料(～0.1mm)を積層した複合材の3点曲げ特性を評価

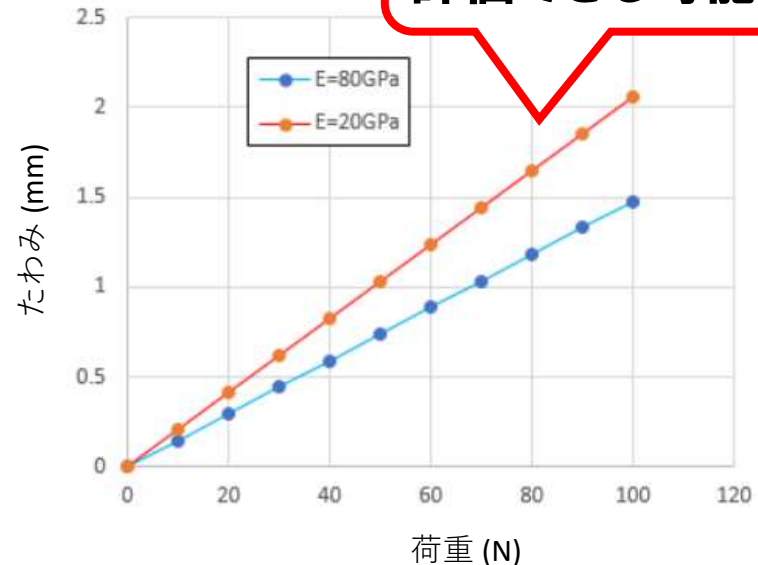


試料の例



試料の構造 Cu板は、 $t=0.1\text{mm}$

接合材料のヤング率を評価できる可能性

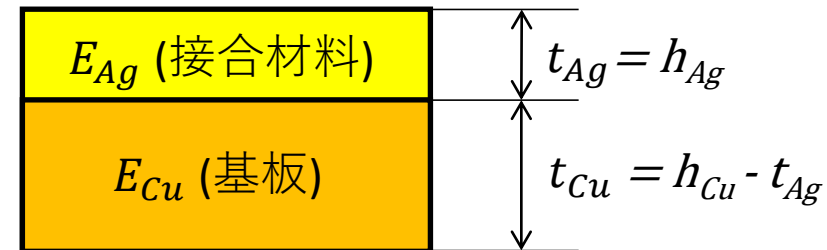
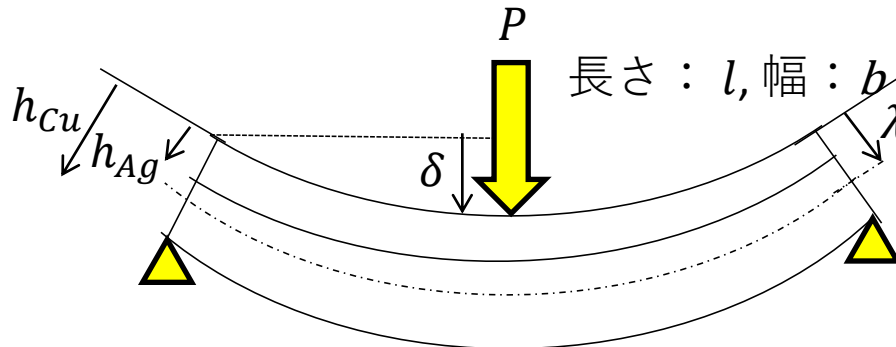


ヤング率 80, 20GPaの比較

はり理論による見積もり
(Cu板 $t=0.2\text{mm}$ の場合)

3. 接合材料の特性評価法 (ヤング率)

積層はりの曲げたわみによる接合材料のヤング率の算出



曲げの中立(引張・圧縮が生じない)面 : λ

$$\lambda = \frac{E_{Ag} h_{Ag}^2 + E_{Cu} (h_{Cu}^2 - h_{Ag}^2)}{2(E_{Ag} t_{Ag} + E_{Cu} t_{Cu})}$$

曲げ剛性 : $(EI)^{eff}$

$$(EI)^{eff} = \frac{b}{3} [E_{Ag} (h_{Ag}^3 - 3h_{Ag}^2 \lambda + 3h_{Ag} \lambda^2)]$$

曲げたわみ : δ

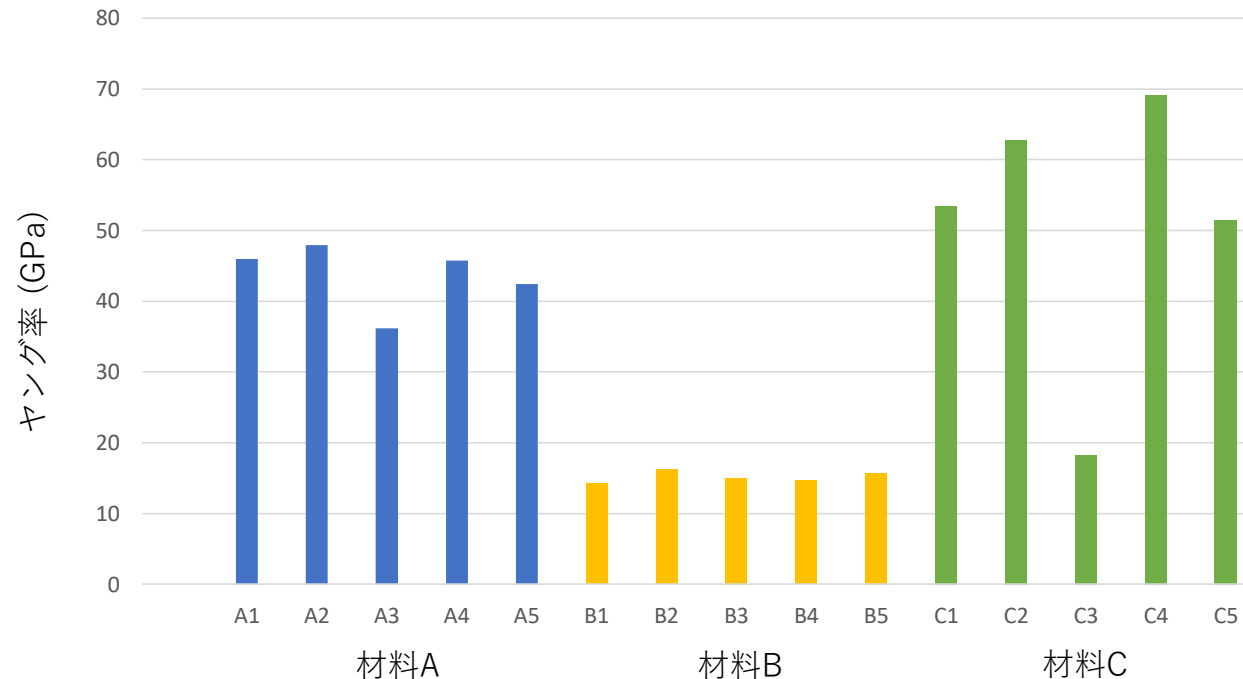
$$\delta = \frac{Pl^3}{48(EI)^{eff}}$$

• これらの関係式を E_{Ag} について解くことで、接合材料のヤング率を求める

• 弾性変形範囲内で実施

3. 接合材料の特性評価法 (ヤング率)

種々の接合材料 (焼結材料) のヤング率を求めた例



- 接合材料による違いが見られる
- バルクのヤング率に比べ低い → 焼結材料のためか？

3. 接合材料の特性評価法 (熱膨張係数)

接合材料

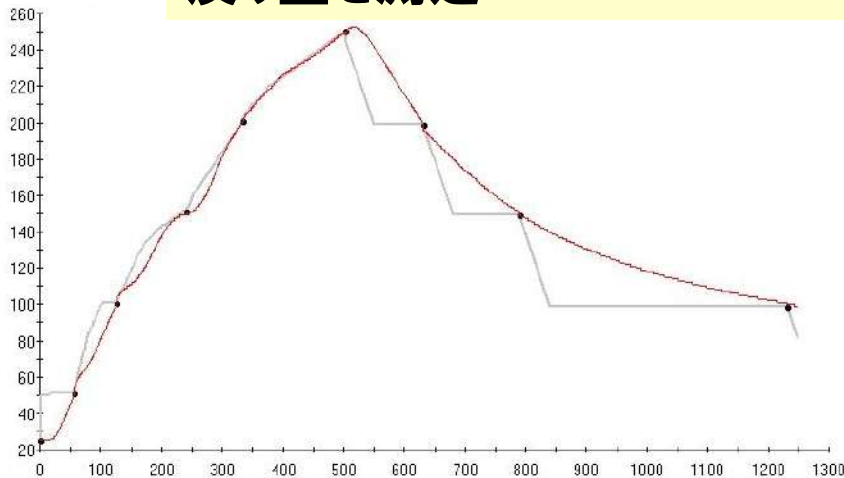


Cu板 3x20 または 10x20mm t=0.1mm

試料の構造

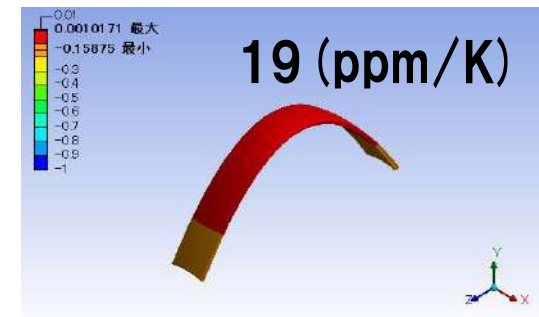
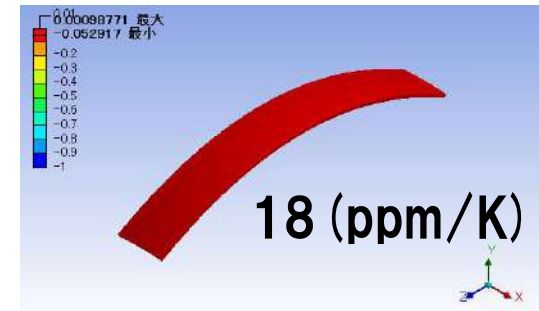
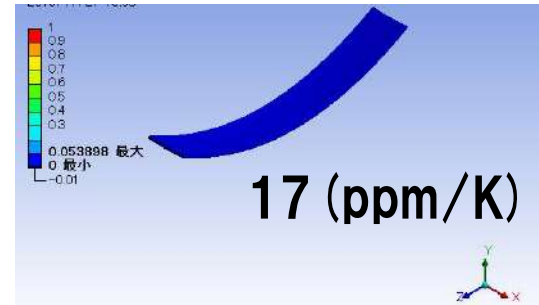
シャドーモアレを用いて、厚さ方向の反り量を測定

温度 (°C)



— Desired Profile • Measurement Points — Process 1 — Process 2

温度プロファイル

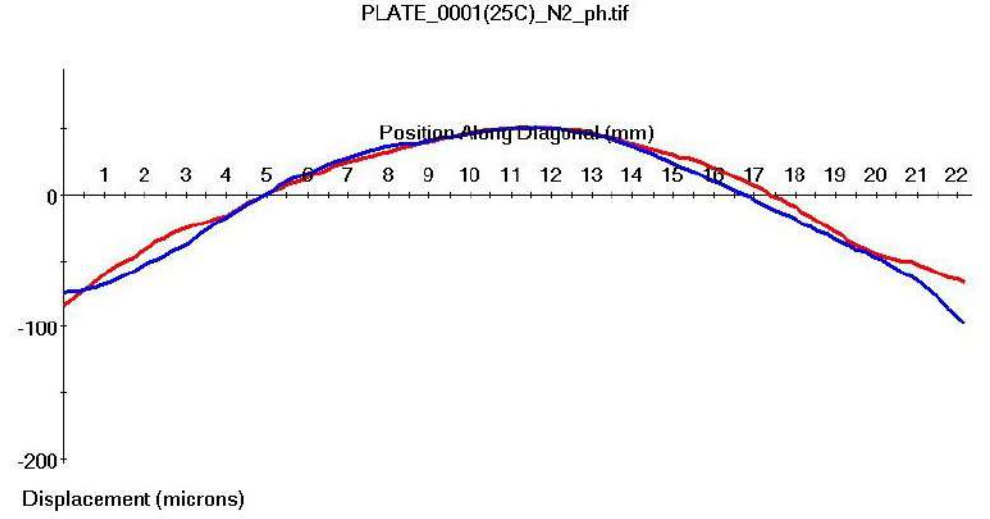
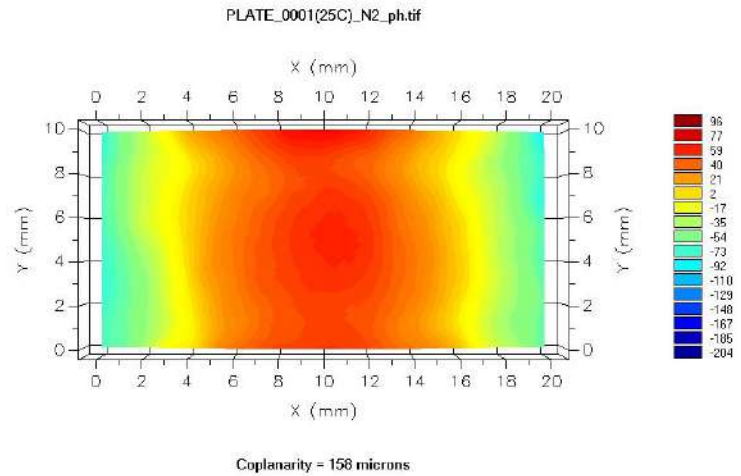


シミュレーションによる反りの予測

- ヤング率: 80GPa
- 温度変化: 25→300 (°C)

3. 接合材料の特性評価法 (熱膨張係数)

変形の測定例



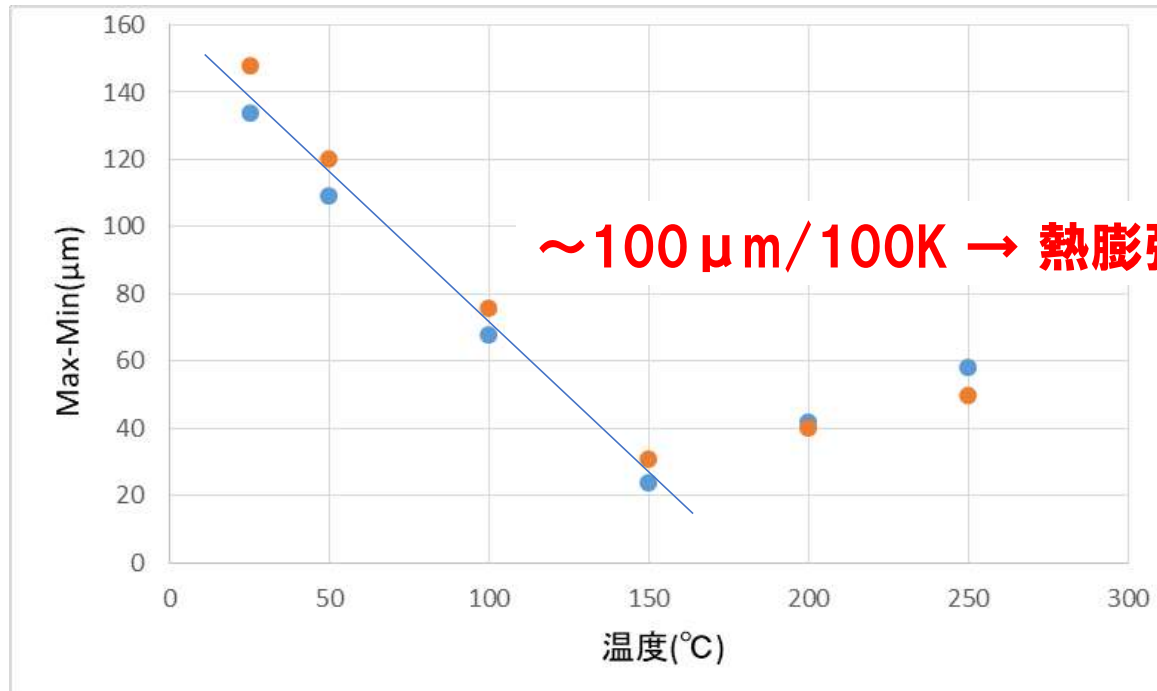
— Upper Left to Lower Right (AB) — Lower Left to Upper Right (CD)

Min AB: -83 Max AB: 51 Min CD: -97 Max CD: 51 (microns)

面内の反りの様子

対角線での反り量

3. 接合材料の特性評価法 (熱膨張係数)



温度に対する反り量

- 300°C前後で接合材料を成膜するため、室温付近で反り量が最大
- 200°C以上では、挙動が変わる

3. 接合材料の特性評価法 (熱膨張係数)

たわみ： δ 、長さ： $L=10\text{mm}$ 、厚さ： $h=0.1\text{mm}$ 、温度差： ΔT

材料(接合材)：熱膨張係数： α_1 、ヤング率： E_1

基板Cu：熱膨張係数： $\alpha_2=17\text{ppm/K}$ 、ヤング率： $E_2=130\text{GPa}$

$$\delta = R(1 - \cos \theta) \doteq \frac{1}{2} \frac{l^2}{R} = \frac{l^2 (\alpha_1 - \alpha_2) T}{h} \cdot \frac{6 E_1 E_2}{(E_1 + E_2)^2 + 12 E_1 E_2}$$

$$\alpha_1 = \frac{h \cdot \delta}{L^2 \cdot \Delta T \cdot E} + \alpha_2$$

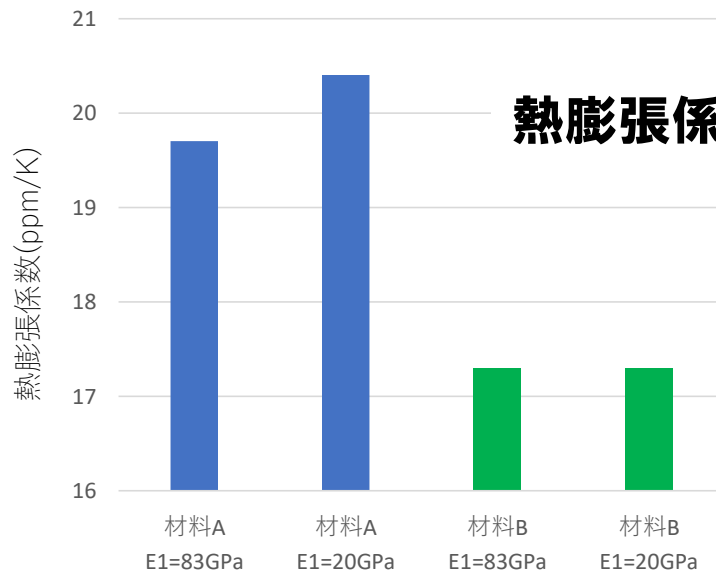
$$= \frac{h}{L^2 \cdot E} \cdot \frac{\delta}{\Delta T} + \alpha_2$$

E とする

材料のヤング率のみで決まる定数

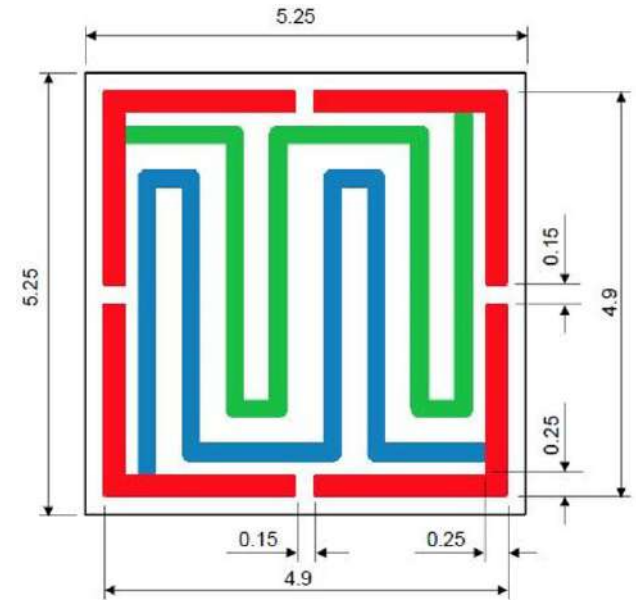
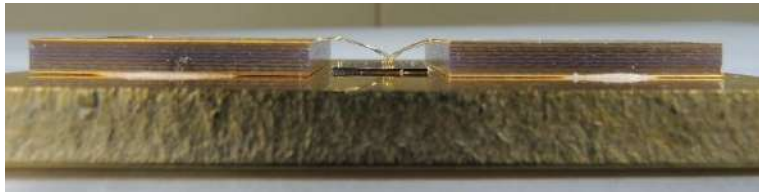
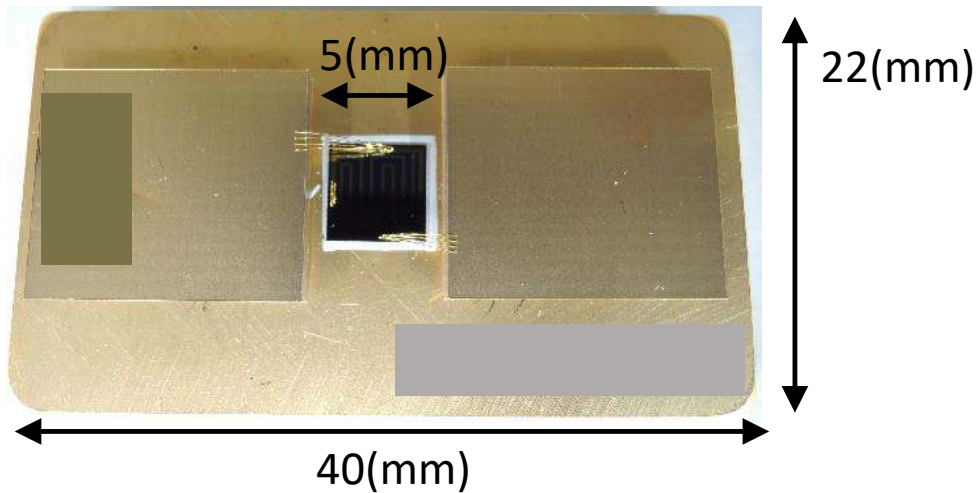
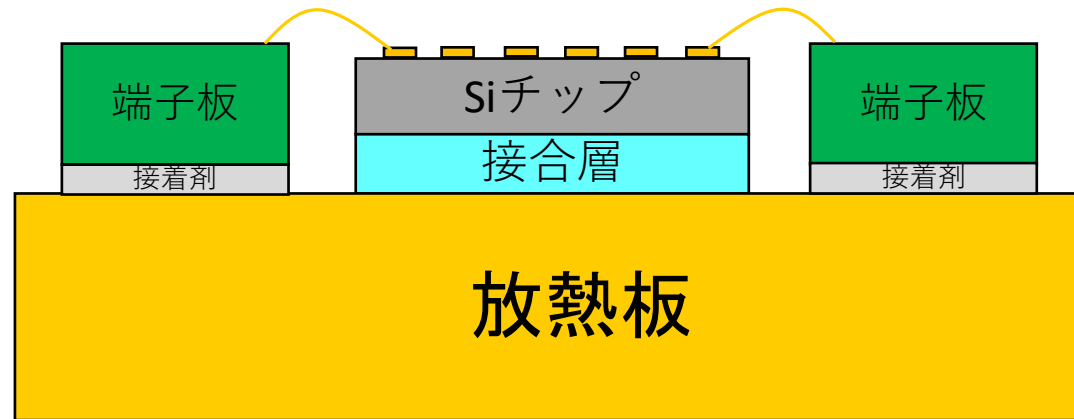
$E_1=83\text{GPa}$ の場合： $E=0.37$

$E_1=20\text{GPa}$ の場合： $E=0.29$



接合材料により、
熱膨張係数が異なる

3. 接合材料の特性評価法 (熱特性)



2セットの発熱部を直列接続して使用

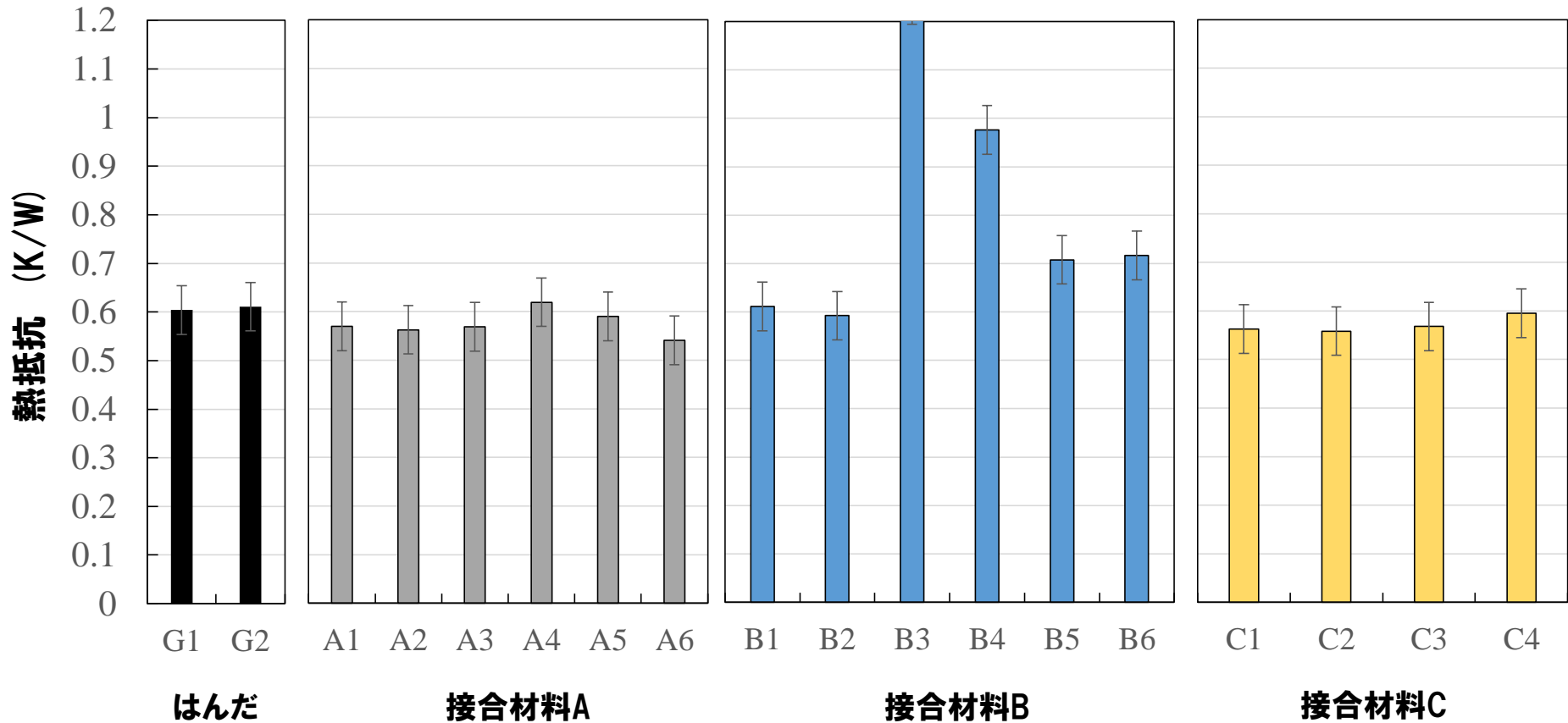
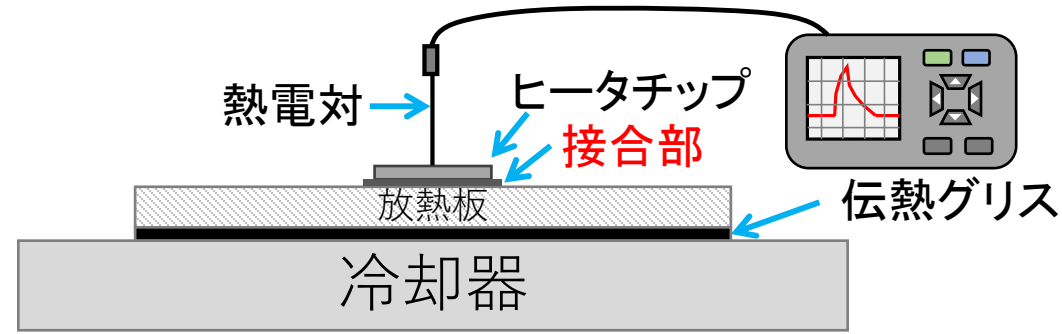
3. 接合材料の特性評価法 (熱特性)

熱抵抗 $R_{th} = (T_1 - T_0) / P$

T_1 : 電圧印加時の温度

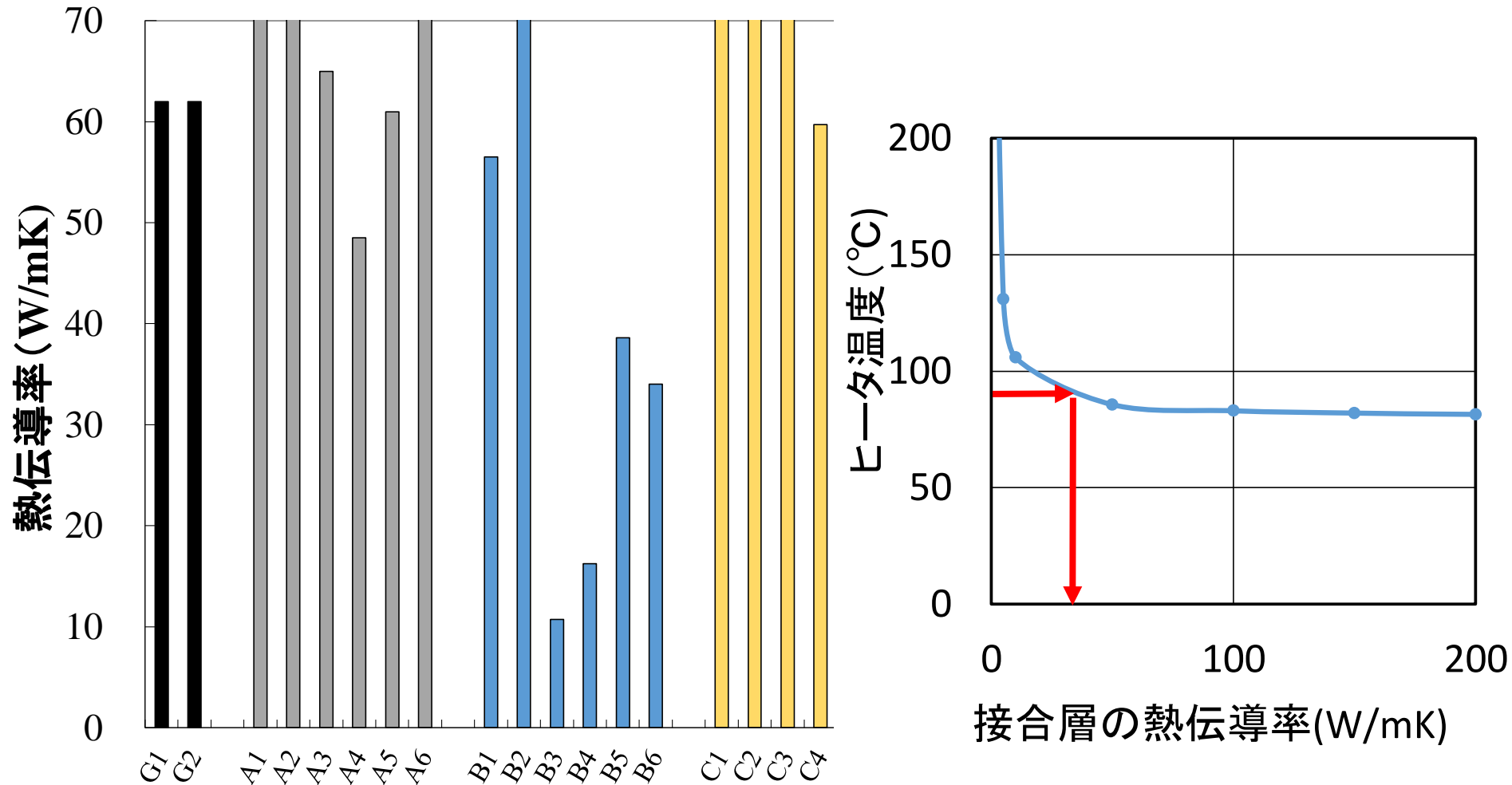
T_0 : 電圧非印加時の温度

P: ヒータチップの電力

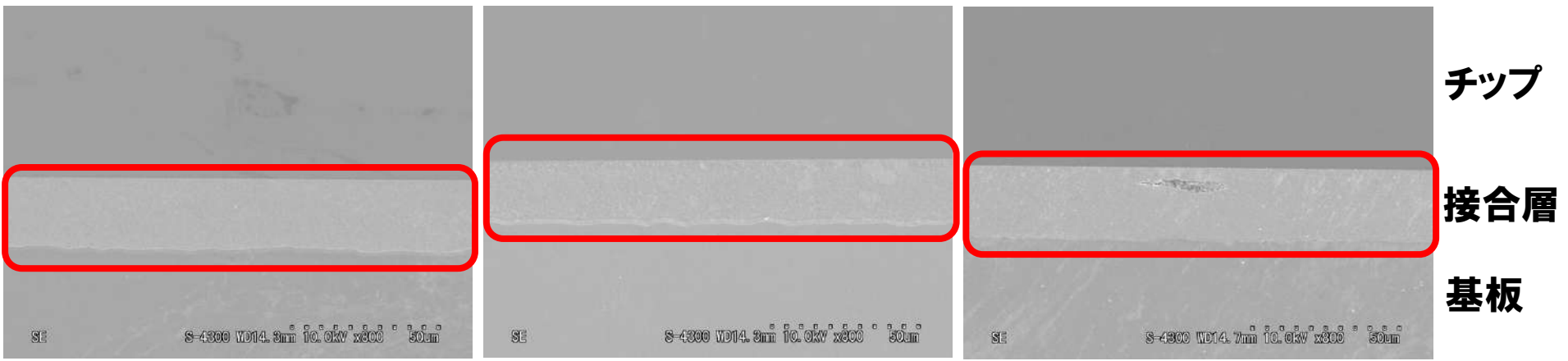
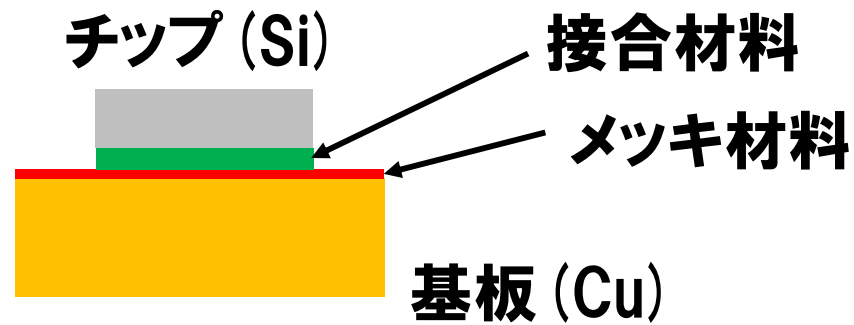


3. 接合材料の特性評価法 (熱特性)

接合層の熱伝導率推定



3. 接合材料の特性評価法 (表面のメッキ)



メッキ材料: Au

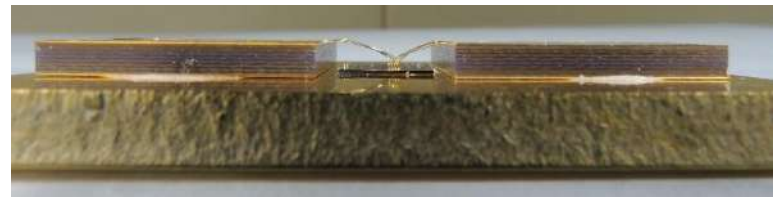
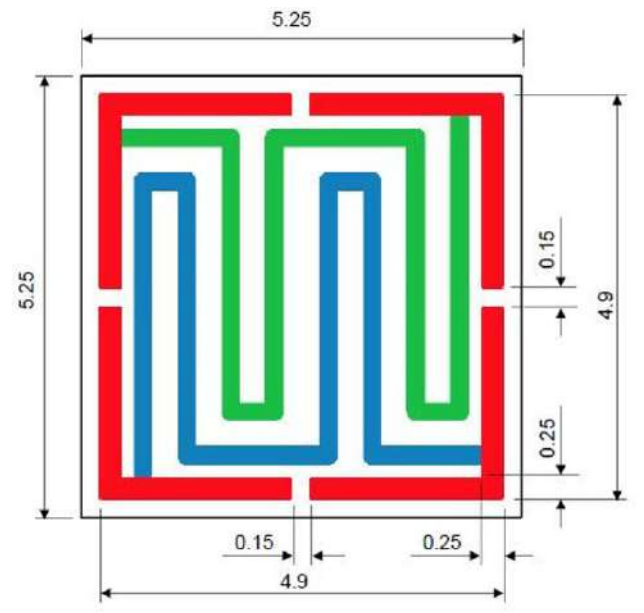
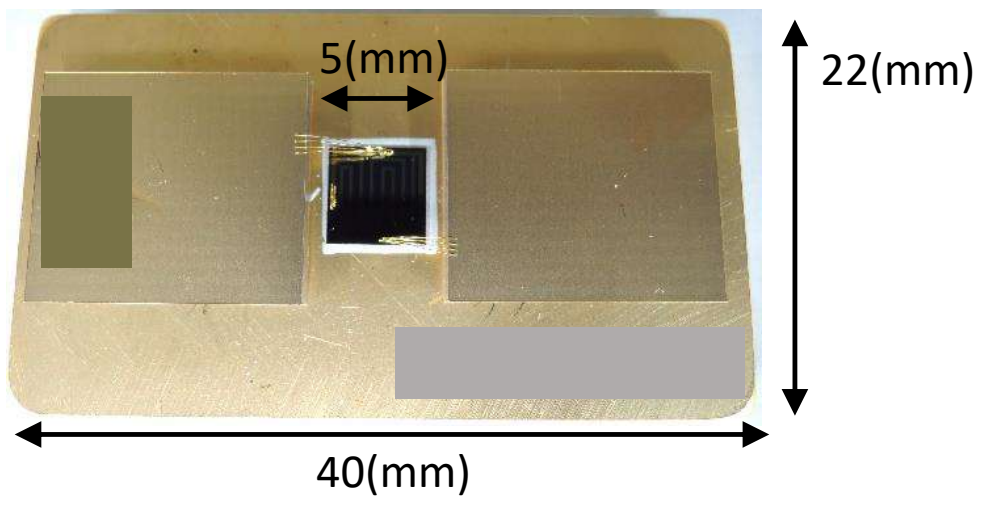
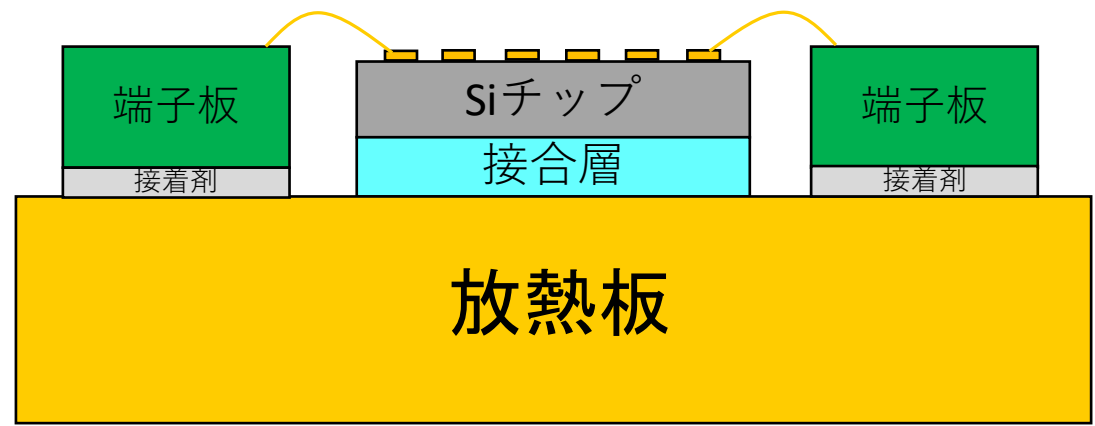
メッキ材料: Ag

メッキ材料: Cu

基板のメッキ材料の違い (断面SEM)

この接合材料では、メッキ材料による違いは見られない

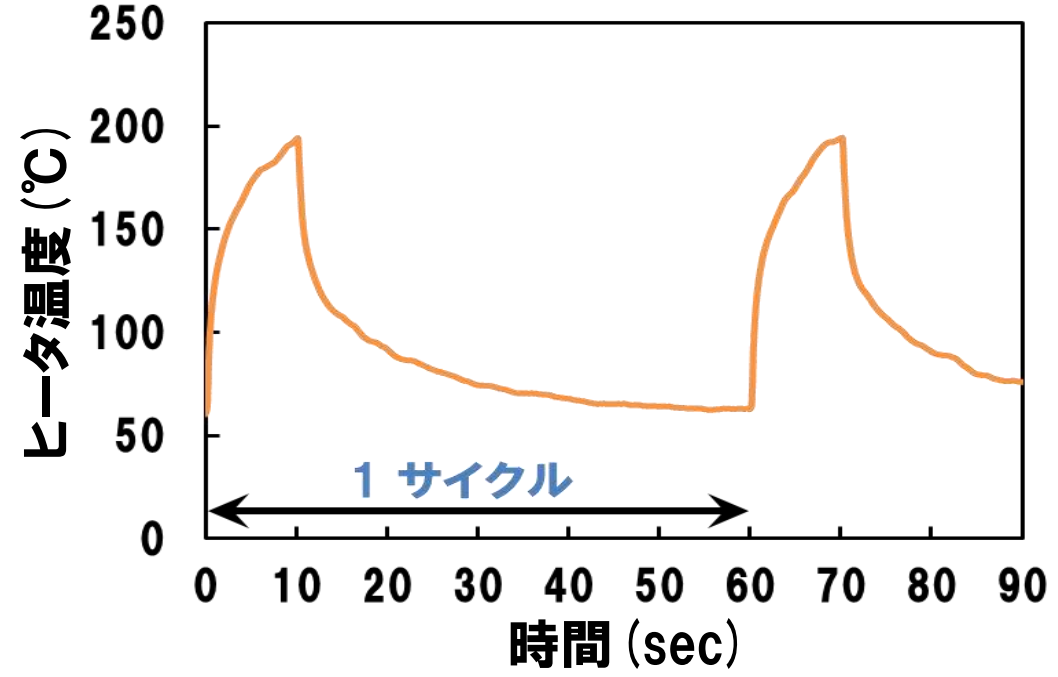
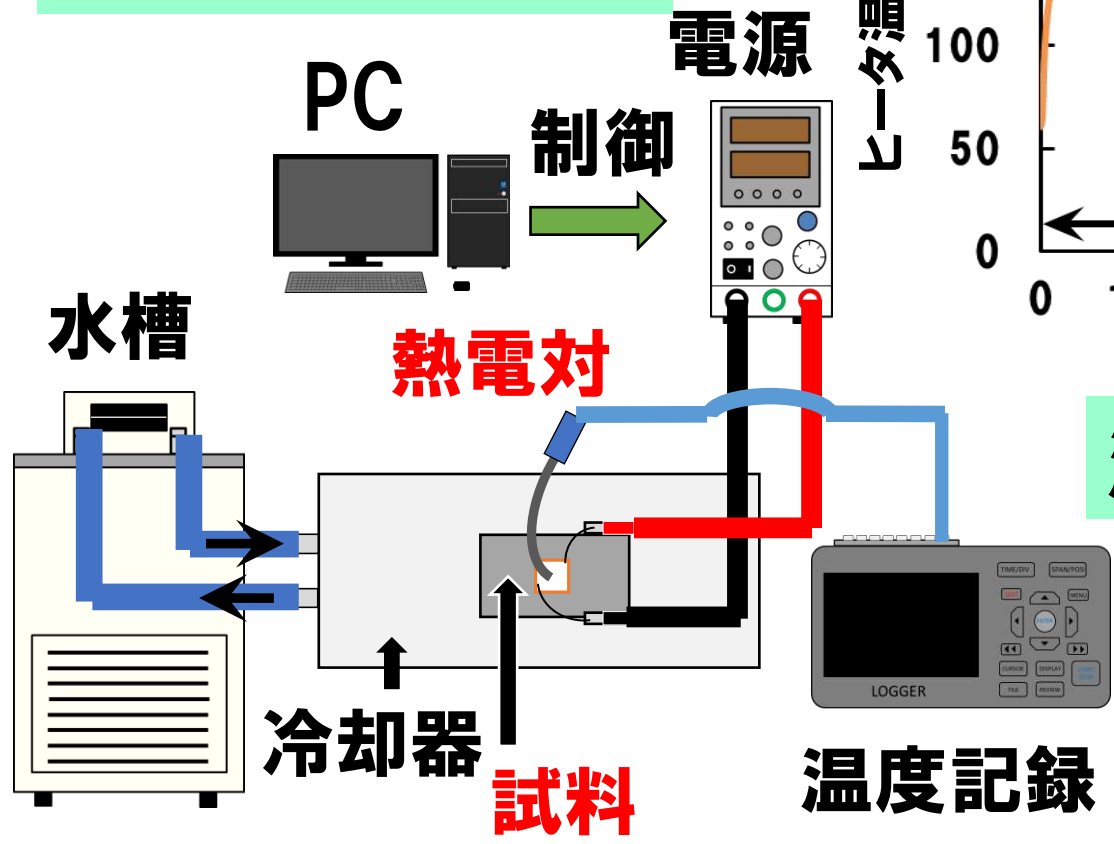
3. 接合材料の特性評価法 (パワーサイクル信頼性)



2セットの発熱部を直列接続して使用

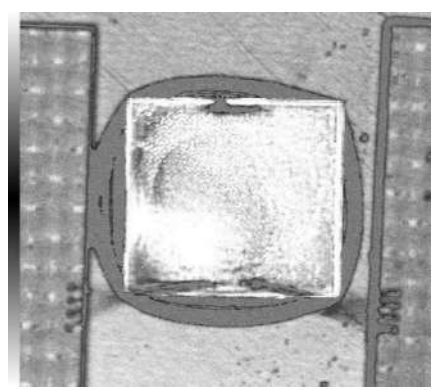
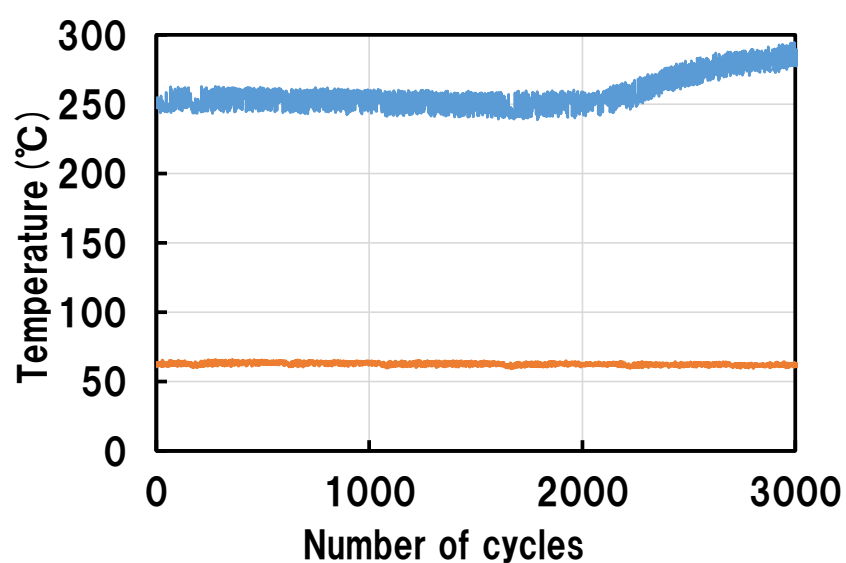
3. 接合材料の特性評価法 (パワーサイクル信頼性)

試験機器の構成



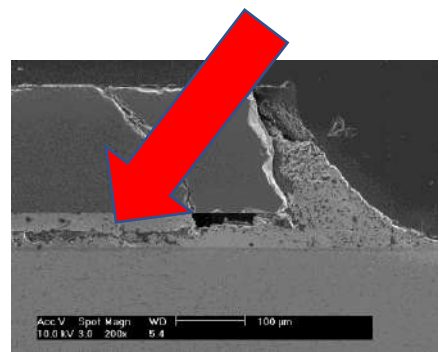
温度プロファイルの例

3. 接合材料の特性評価法 (パワーサイクル信頼性)



SAT

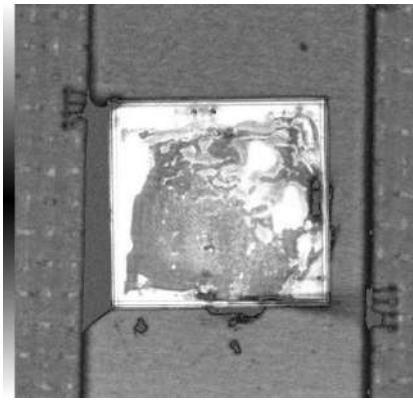
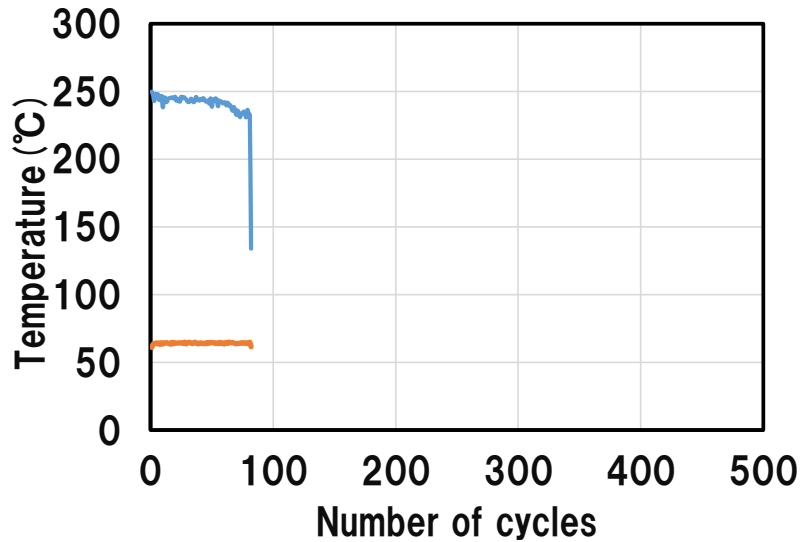
接合材料内で
クラック進展



断面SEM

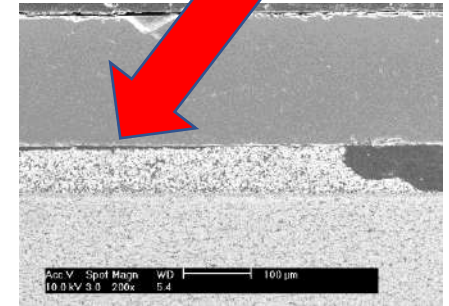
温度が徐々に増加する例

3. 接合材料の特性評価法 (パワーサイクル信頼性)



SAT

チップ接合界面
に剥離



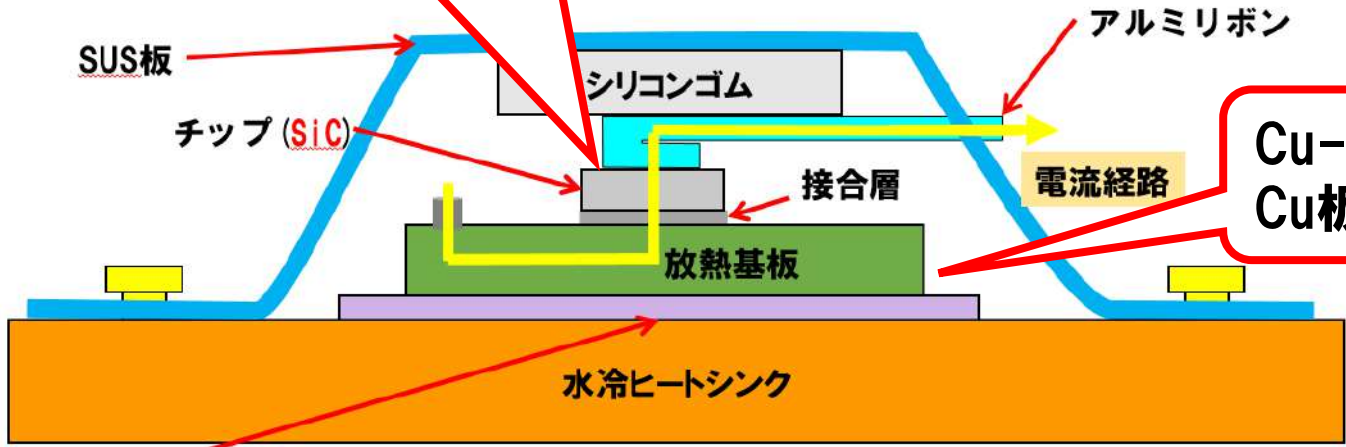
断面SEM

急激に破壊する例

3. 接合材料の特性評価法 (パワーサイクル信頼性)

チップ上には、Al薄板を接触 (摺動可)

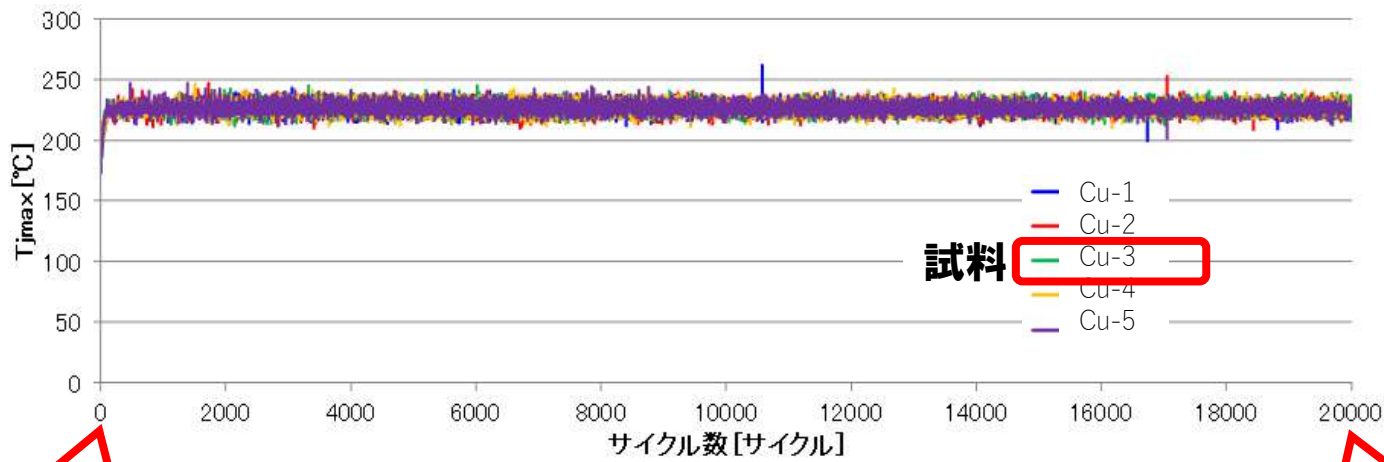
太線ワイヤボンディングや、封止樹脂がなく、接合材料の評価に特化した構造



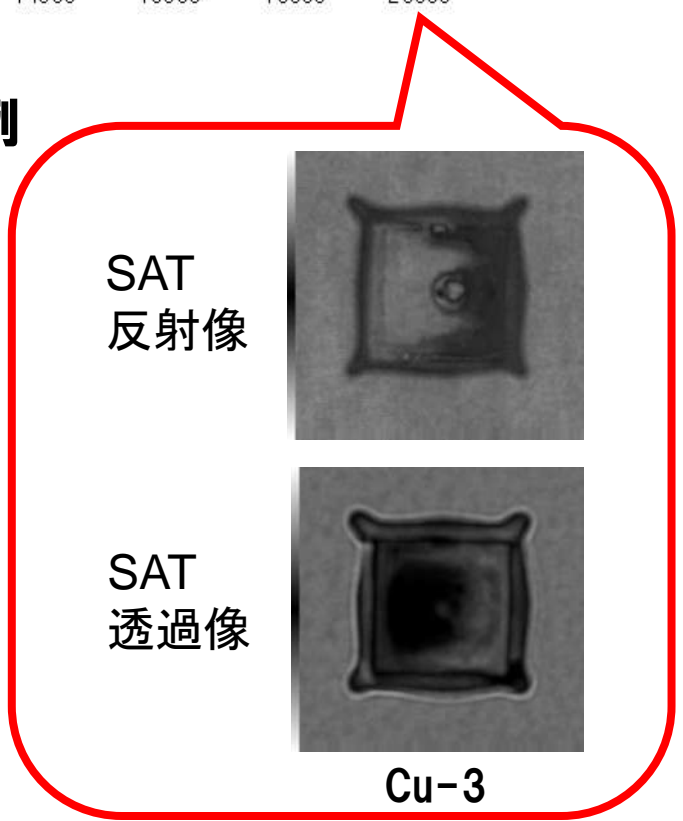
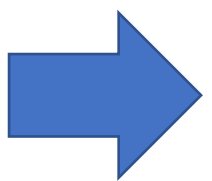
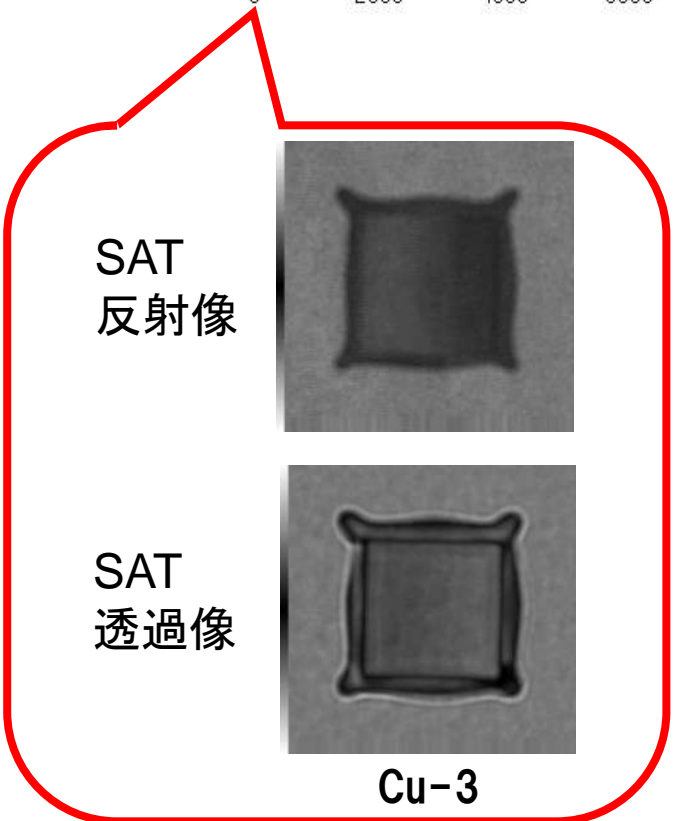
Cu-65Mo板 (8.2ppm/K)
Cu板 (17ppm/K)

- チップ SiC-SBD (Schottky Barrier Diode)
- 水冷 水温65℃、流量4L/min、エチレングリコール濃度約50%
- Tj推定方式: 微小電流Vf計測による温度換算方式 (If=20mA)
- Tjmin. 65℃ (冷却水温)、Tjmax. 225℃ (加熱電流制御)
- ON時間2秒、OFF時間18秒、最大20,000サイクル
- 加熱電流値: 前サイクルのTjmaxにより、Tjmax=225℃となるように制御

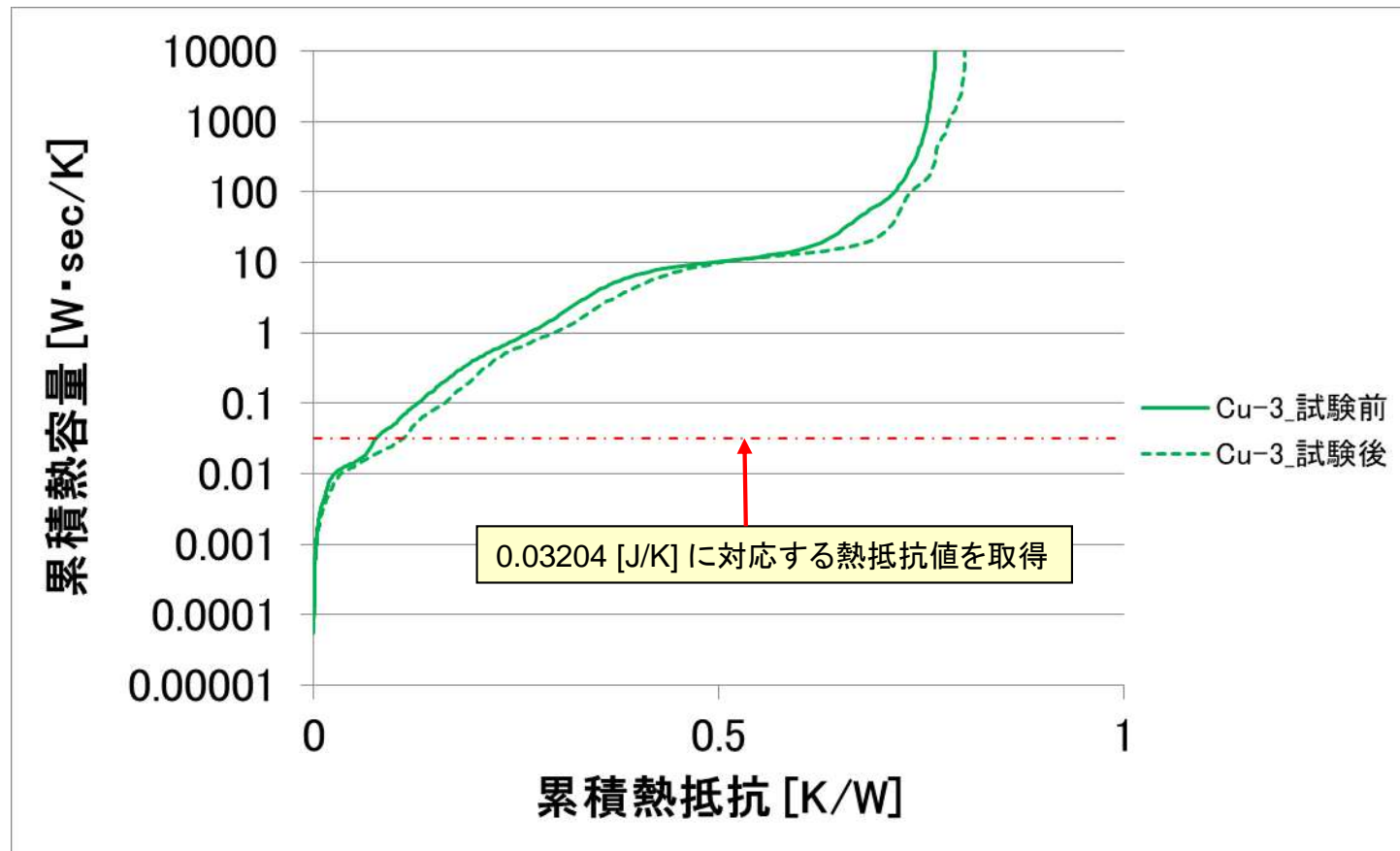
3. 接合材料の特性評価法 (パワーサイクル信頼性)



試験中の挙動の例



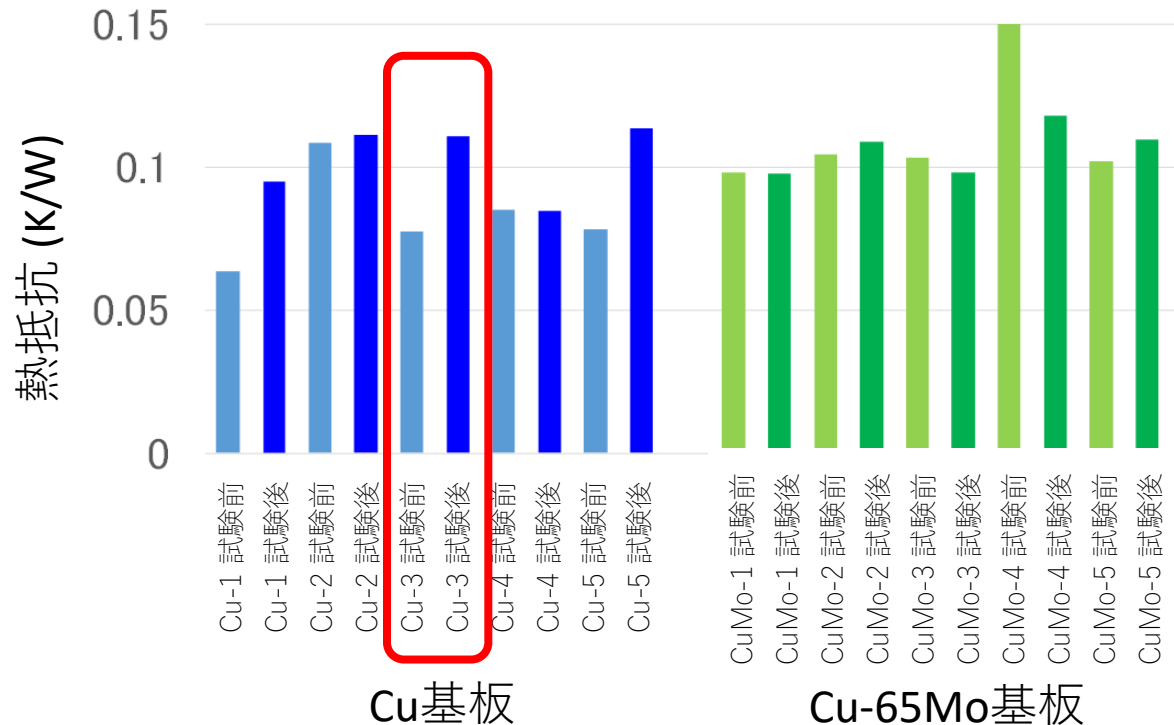
3. 接合材料の特性評価法 (パワーサイクル信頼性)



構造関数を用いた熱抵抗の評価例

接合層の熱抵抗の上昇が見られる

3. 接合材料の特性評価法 (パワーサイクル信頼性)



試験前後の熱抵抗の評価例

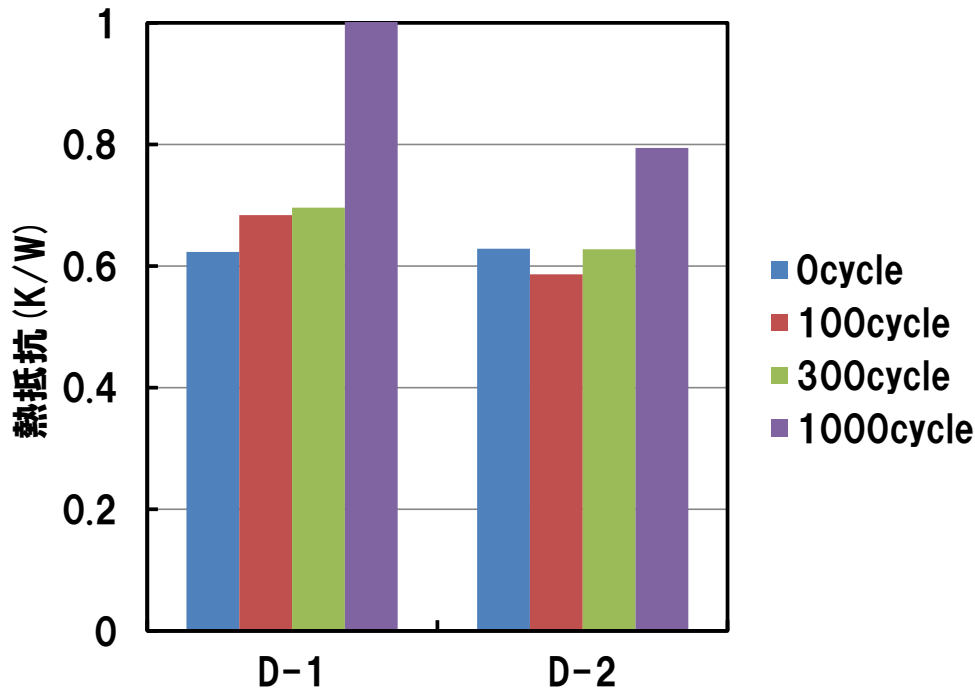
Cu基板を用いた方が、熱抵抗の上昇が大きい
→ SiCチップとの熱膨張係数差が大きいいため

3. 接合材料の特性評価法 (冷熱サイクル信頼性)^{48/54}

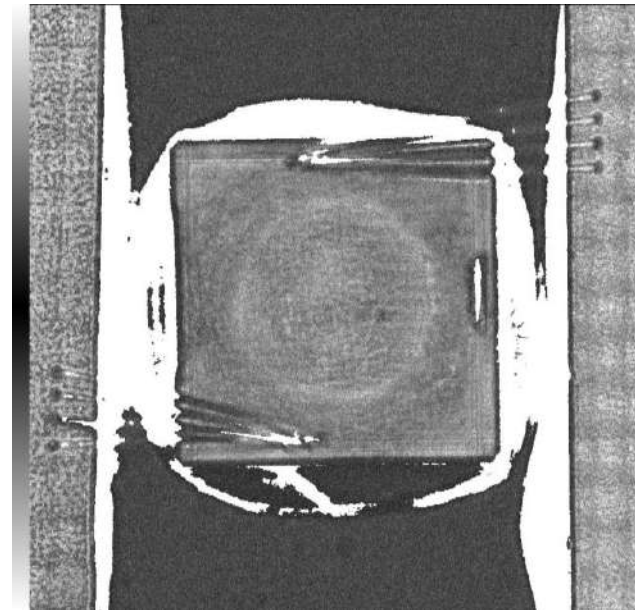
熱抵抗測定

冷熱衝撃試験機に投入
(-40/200°C)

所定サイクル経過後に、
試料を冷却器に取り付けて
熱抵抗を測定

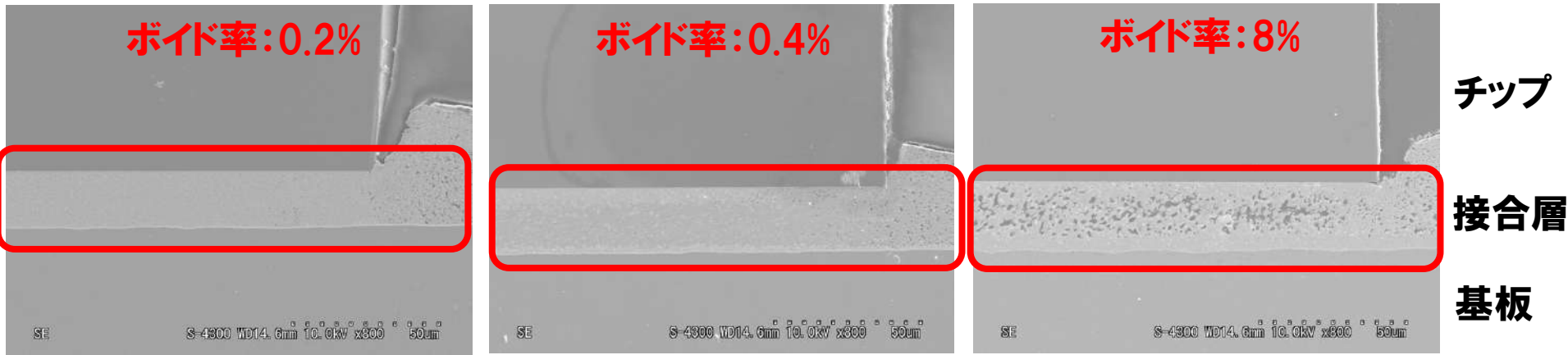
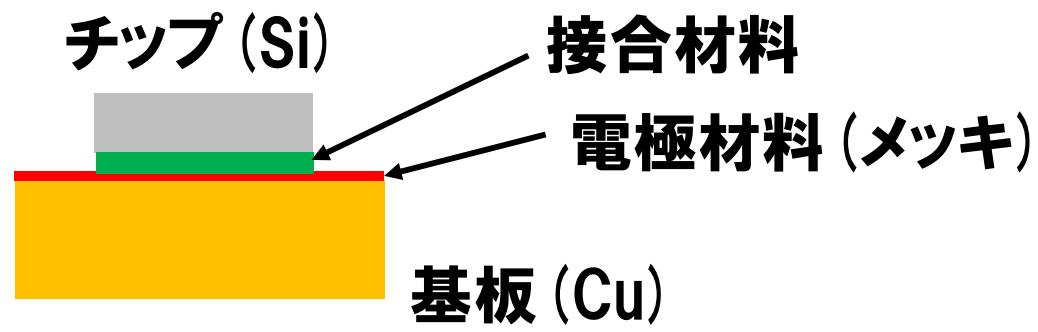


熱抵抗の変化



冷熱試験後のSAT

3. 接合材料の特性評価法 (高温放置)



試験未実施

200°C 1000h後

250°C 1000h後

高温放置試験結果 (断面SEM)

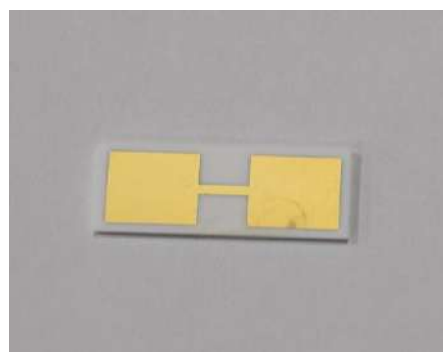
250°Cでは、接合材料の組織に変化が見られる

3. 接合材料の特性評価法 (エレクトロマイグレーション)

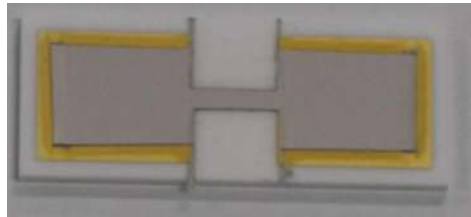
- 焼結型接合材料で、板状・柱状の試料作製は容易でない
- 大電流密度 (連続通電) の試験を行いたい
- 試料を電気炉内に入れて、加熱した雰囲気で行いたい



セラミック基板の上に接合材料を成膜した試料で検討



基板の外観
(金属パターン付きAl₂O₃基板)



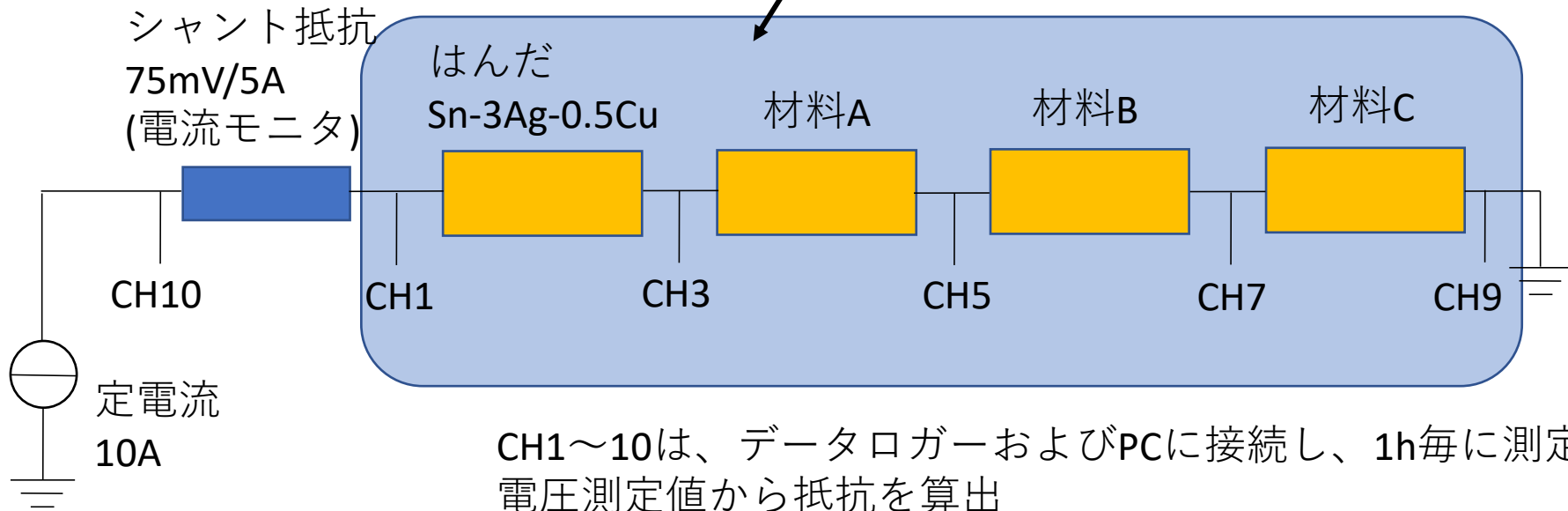
接合材料を成膜した
試料の外観



電極を含めた試料の外観

3. 接合材料の特性評価法 (エレクトロマイグレーション)

加熱試験の場合は、電気炉内に入れる



- ・ 電流：10、15、20A (10Aは、30分ON、30分OFFも実施)
- ・ 温度：室温、100、150、200、250°C

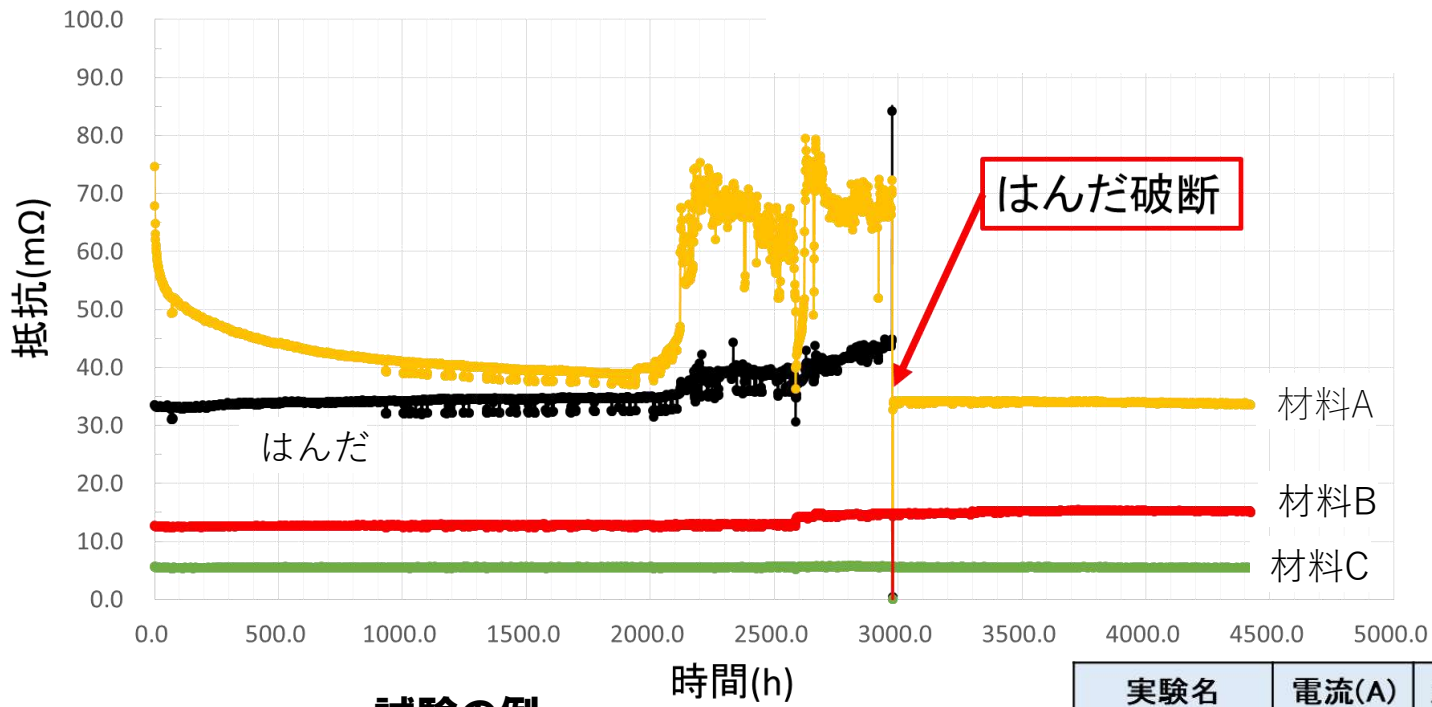
電流密度の見積り

線幅1mm、接合材料厚さ0.04mm = 0.04mm²

10Aの通電で、 $10/0.04 = 250\text{A}/\text{mm}^2 = 25\text{kA}/\text{cm}^2$



3. 接合材料の特性評価法 (エレクトロマイグレーション)



試験の例

試験結果

- 室温の試験で、はんだ試料は断線発生 (2例)
- 焼結系接合材料は、250℃でも、ほぼ安定
- 断線はなくても、抵抗が変動する場合が見られた

実験名	電流(A)	温度(℃)	結果
A	10	室温	約4900h破断なし はんだは1500hで断線
B	10	室温	約5330時間破断なし はんだは3000hで断線
C	10	100	2500h断線なし
D	15	室温	1920h断線なし
D2	20	室温	590h断線なし
A' (ON/OFF)	10	室温	1900h断線なし
E	10	150	1030h断線なし
E2	10	200	940h断線なし
E3	10	250	550h抵抗上昇有

- [1] Y. Yamada, et al. "Pb-Free High Temperature Solder Joints for Power Semiconductor Devices" Trans. of JIEP Vol.2, No,1 (2009) pp.79-84
- [2] Y. Yamada, et al. "Reliability of wire-bonding and solder joint for high temperature operation of power semiconductor device" Microelectronics Reliability Vol.47 (2007) pp.2147-2151
- [3] T. Ishizaki, et al. "Thermal characterization of Cu nanoparticle joints for power semiconductor device" Microelectronics Reliability Vol.53 (2013) pp.1543-1547
- [4] 石崎ら "Cuナノ粒子接合の熱特性評価" 第23回マイクロエレクトロニクスシンポジウム論文集 (MES 2013) pp.163-166
- [5] 柳瀬ら "Cuナノ粒子接合のシミュレーションによる熱特性予測" 第23回マイクロエレクトロニクスシンポジウム論文集 (MES 2013) pp.159-162
- [6] 久野ら "Cuナノ粒子接合のパワーサイクル信頼性" 20th Symposium on Microjoining and Assembly Technology in Electronics (Mate 2014) pp.125-130
- [7] T. Ishizaki, et al. "Reliability of Cu nanoparticle joint for high temperature power electronics" Microelectronics Reliability Vol.54 (2014) pp.1867-1871
- [8] T. Ishizaki, et al. "Thermal cycle reliability of Cu-nano-particle joint" Microelectronics Reliability Vol.55 (2015) pp.1861-1866
- [9] T.Ishizaki, et al. "Thermal simulation of joints with high thermal conductivities for power electronic device" Microelectronics Reliability Vol.55 (2015) pp.1060-1066
- [10] T.Ishizaki, et al. "Power cycle reliability of Cu nanoparticle joints with mismatched coefficients of thermal expansion", Microelectronics Reliability, Vol.64 (2016) pp.287-293
- [11] 三浦ら "Cuナノ粒子接合の信頼性に及ぼす熱膨張係数差の影響", 第30回エレクトロニクス実装学会春季講演大会 (2016) pp.446-449
- [12] T.Ishizaki, D.Miura, A.Kuno, K.Hasegawa, M.Usui, Y.Yamada: Young's modulus of a sintered Cu joint and its influence on thermal stress, Microelectronics Reliability, 76-77 (2017) pp.405-408
- [13] 山田靖: パワー半導体実装用接合材料の特性評価法, エレクトロニクス実装学会誌, Vol.21, 6, (2018) pp.579-585

- [14] 長谷川ら “無加圧窒素雰囲気による銅ナノ粒子接合の特性評価” 第27回マイクロエレクトロニクスシンポジウム論文集 (MES 2017) pp.81-84
- [15] 長谷川ら “無加圧窒素雰囲気による銅ナノ粒子接合の信頼性” 第28回マイクロエレクトロニクスシンポジウム論文集 (MES 2018) pp.225-228
- [16] 長田ら “合成分散剤による銅ナノ粒子接合分散体と接合材料としての評価” 23rd Symposium on Microjoining and Assembly Technology in Electronics (Mate 2017) pp. 453-454
- [17] Y.Yamada, et.al “Reliability of pressure-free Cu nanoparticle joints for power electronic devices”, Microelectronics Reliability, 100-101, 113316 (2019) pp.1-5
- [18] 菊池ら “Cuナノ粒子焼結体の力学特性におよぼす焼結温度の影響” 23rd Symposium on Microjoining and Assembly Technology in Electronics (Mate 2017) pp. 455-456
- [19] Kim S Siow, et.al “Die Attach Materials for High Temperature Applications in Microelectronics Packaging” Springer, pp.181-196
- [20] EV・HEV向け電子部品、電装品開発とその最新事例、技術情報協会 pp.107-117
- [21] 放熱・高耐熱材料の特性向上と熱対策技術、技術情報協会 pp.420-432
- [22] 菅沼克昭他:次世代パワー半導体実装の要素技術と信頼性、シーエムシー出版 pp.238-244
- [23] 八坂ら “接合材料のパワーサイクル試験による信頼性評価を目的としたパワーモジュールの検討” 第24回マイクロエレクトロニクスシンポジウム (Mate2018) pp.337-342
- [24] 岩室ら “次世代パワー半導体の開発・評価と実用化”、NTS pp.279-290
- [25] 山田ら “パワー半導体実装用接合材料の基礎物性と信頼性評価法” 第31回マイクロエレクトロニクスシンポジウム論文集 (MES 2021) pp.227-230
- [26] 山田ら “パワー半導体実装用接合材料の基礎物性と信頼性の評価法” エレクトロニクス実装学会誌, Vol.26, 1, (2023) pp.158-166