

焼損再現実験

電子回路故障解析チーム

背景

近年、モジュール等の軽薄短小化が進み、基板パターンも狭ピッチ化する傾向にある。それに伴い、パターン間ショートが発生リスクも高くなり、基板焼損の発生率も高まると考えられる。

そこで、パターン間ショートによる基板焼損モードについて、再現実験によって検証データを集め、メカニズム解明を試みる。

目的

パターン間ショートによる基板焼損の原因として、
マイグレーションの発生によるショート
導体異物によるショート を想定。

再現実験により焼損発生の有無、焼損モードについて検証する。

内容

- | | | | |
|----|---------------|----|------------------------|
| 01 | テストサンプル外観 | 06 | マイグレーション箇所の許容溶断電流 |
| 02 | テストサンプル測長 | 07 | 実験方法 |
| 03 | マイグレーションの発生方法 | 08 | マイグレーションサンプル 再現実験 |
| 04 | マイグレーションの確認 | 09 | 導体異物ショートサンプル 再現実験 |
| 05 | 「Cu」の物性値 | 10 | ショート箇所と発熱箇所(高温スポット)の関係 |

1. テストサンプル 外観

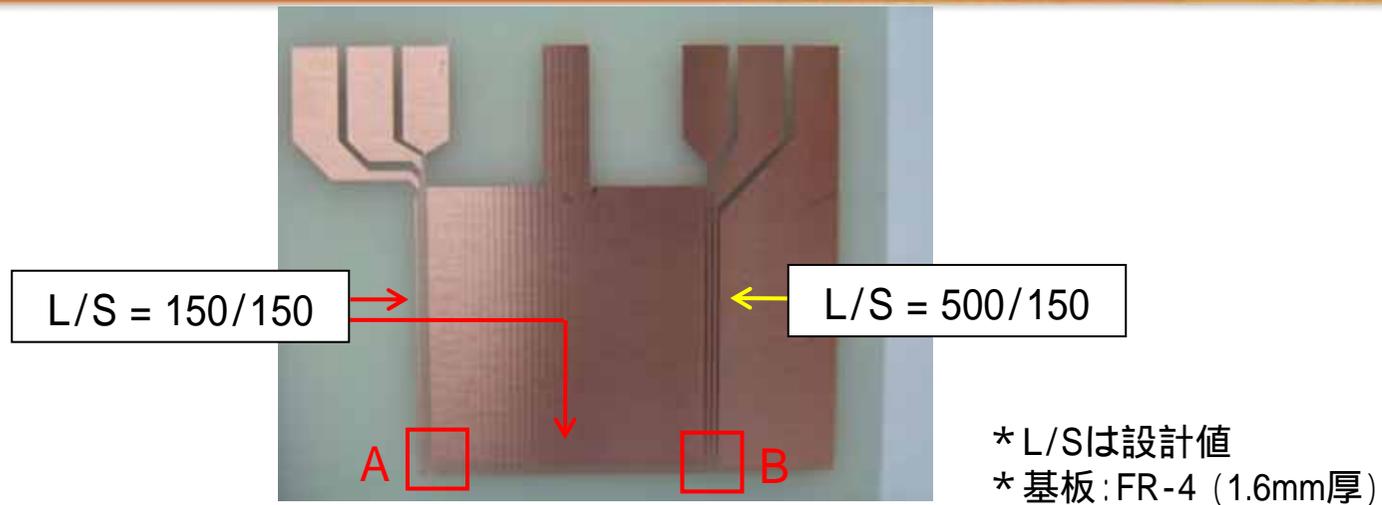


Fig1: テストサンプル外観

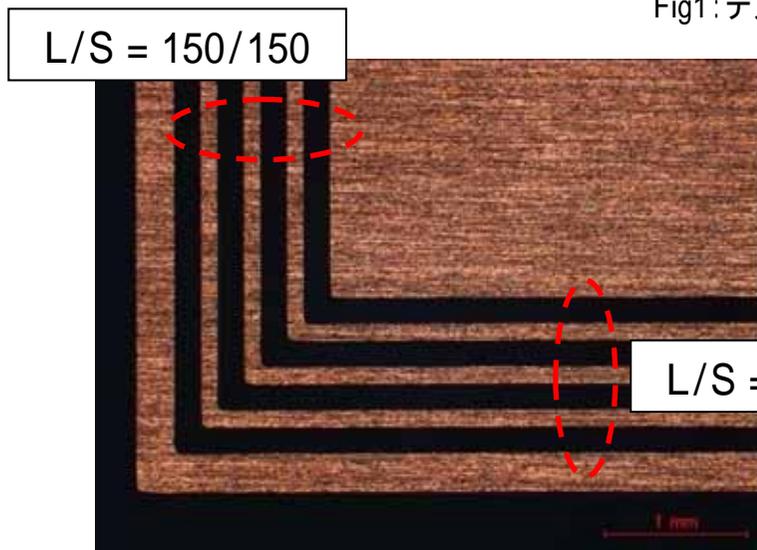


Fig2: 観察箇所 A

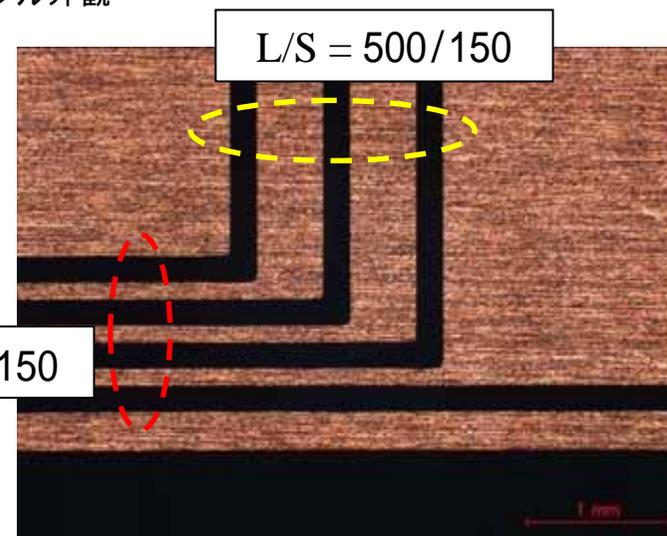


Fig3: 観察箇所 B

2. テストサンプル 測長

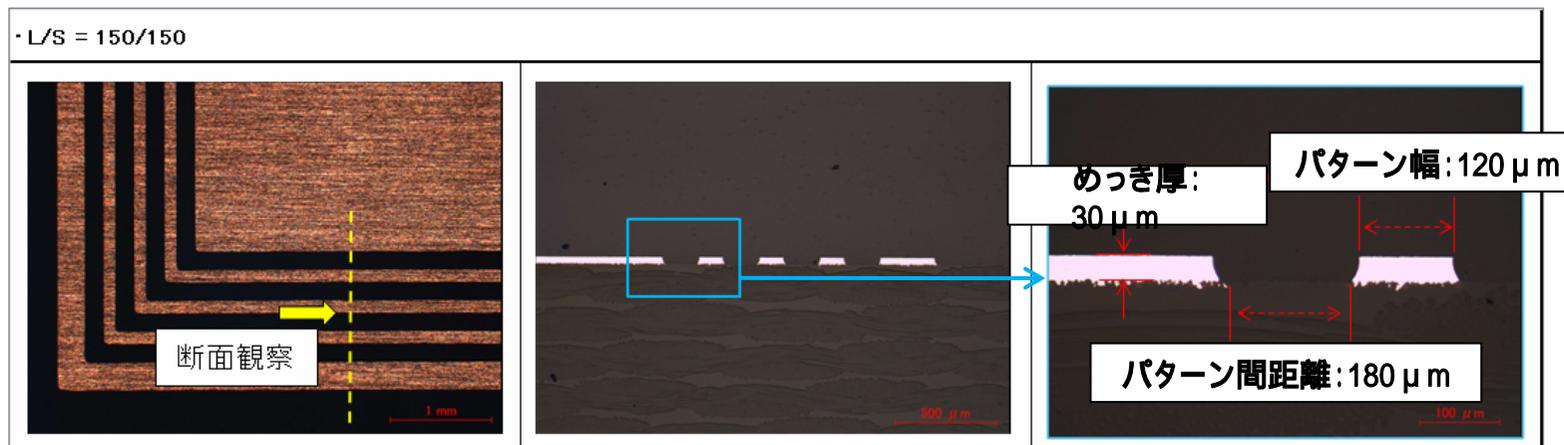


Fig4: 表面・断面写真(L/S=150/150)

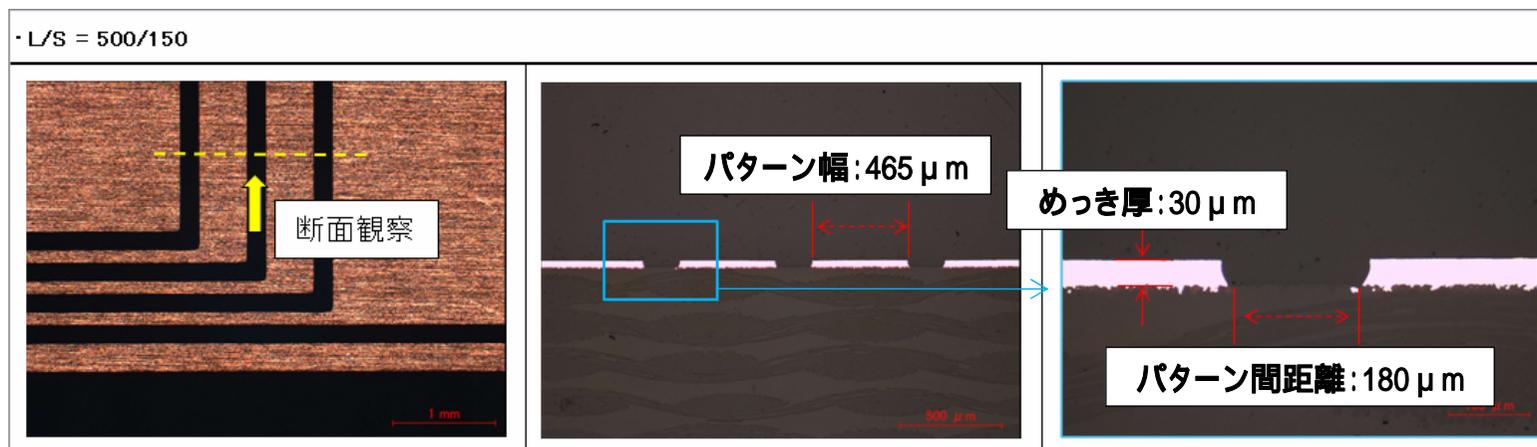


Fig5: 表面・断面写真(L/S=500/150)

3. マイグレーションの発生方法(ウォータードロップ)

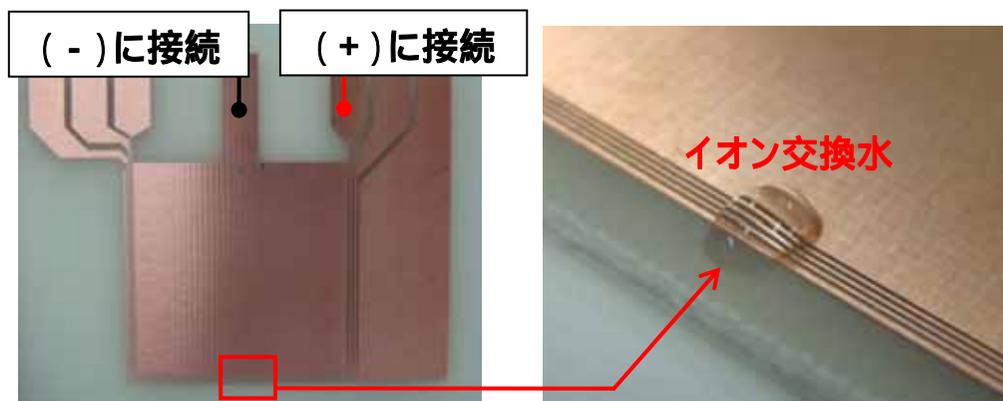


Fig6: イオン交換水滴下写真

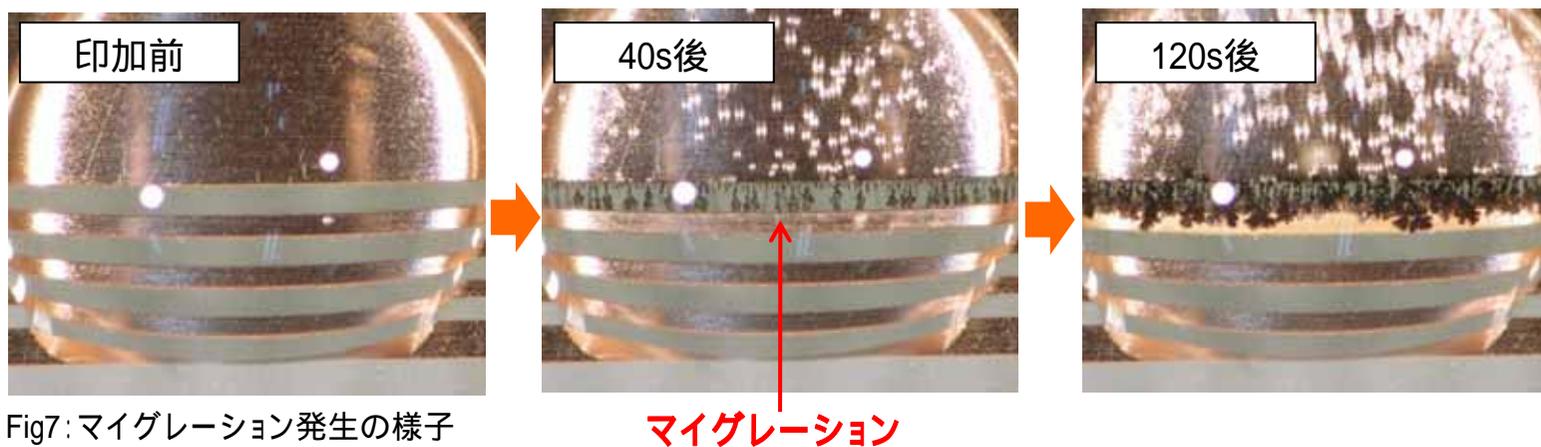


Fig7: マイグレーション発生の様子

イオン交換水を滴下後、電圧印加(1~5V)によりマイグレーションを発生。
発生範囲はマスキングや滴下量でコントロール。

4. マイグレーションの確認

外観、パターン間抵抗測定、SEM/EDS分析により確認。

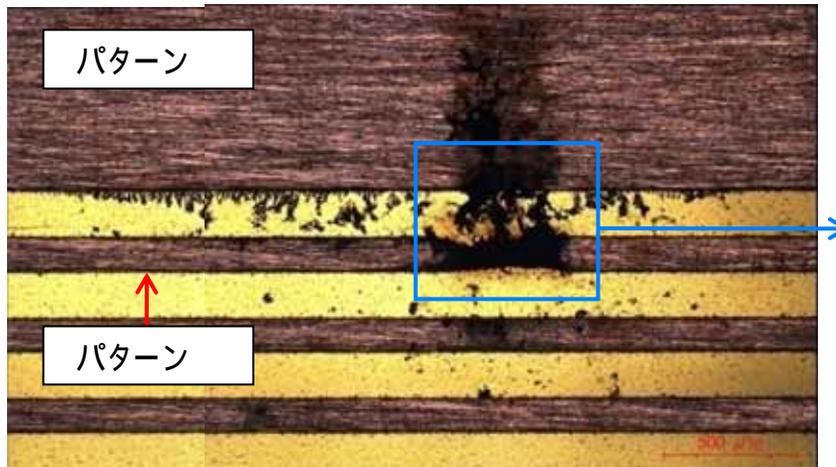


Fig8: 光学顕微鏡写真

パターン間抵抗(- 間)は73



Cuマイグレーション発生

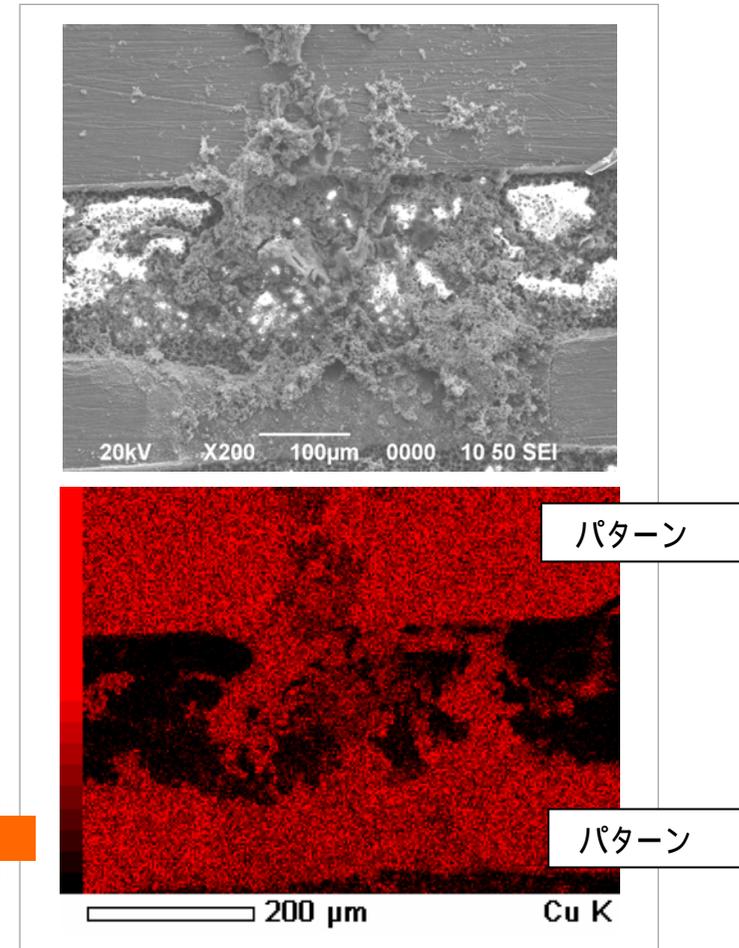


Fig9: (上)SEM像、(下)EDS分析Cuマッピング像

5. 「Cu」の物性値

密度	8.96 [g/cm ³]
比熱	0.415 [J/g·K]
融点	1084.4 []
温度係数 * 室温 20 のとき	4.3×10^{-3} [/]

温度係数について

温度上昇に伴い導体抵抗が増加する場合、温度係数は「正の値」となる。
一般的な金属である「Cu」も、温度係数は「正の値」であり、温度が「1 」高くなると、抵抗は約「0.4%」高くなる(理論値)。

また、炭素の温度係数は「負の値(-0.5×10^{-3} [/])」であり、これは、炭素の抵抗が温度上昇に伴い低下することを示す。

6. マイグレーション箇所の特容溶断電流(1)

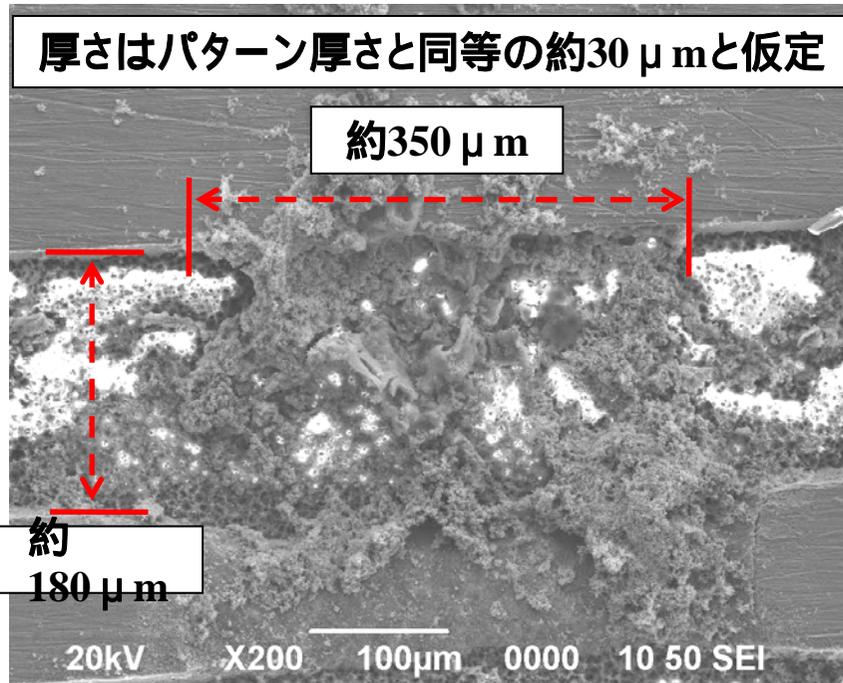


Fig10: マイグレーション箇所

マイグレーション箇所におけるCuサイズを予想最大の $350 \times 180 \times 30 [\mu\text{m}]$ と仮定。



体積	$1.9 \times 10^{-6} [\text{cm}^3]$
質量	$17.0 \times 10^{-6} [\text{g}]$

1 の温度上昇に $7.06 \times 10^{-6} [\text{J}]$ 必要(比熱 $0.415 [\text{J}/\text{g}\cdot\text{K}]$ より)。

融点まで温度上昇させる為には、 **$7.51 \times 10^{-3} [\text{J}]$ 必要**

* 初期温度を20 として、融点までの温度差は $1084.4 - 20 = 1064.4 []$

6. マイグレーション箇所の許容溶断電流(2)

20 における金属抵抗: R_{20} 、温度係数 $\alpha_{20}: 4.3 \times 10^{-3} [1/^\circ\text{C}]$
「Cu」融点到達時の金属抵抗 ($R_{1084.4}$) は
 $R_{1084.4} = R_{20} \{ 1 + \alpha_{20} (1084.4 - 20) \}$ 【 】で示される。



* 室温20 での抵抗 73

融点到達時、マイグレーション箇所の「Cu」抵抗は、
上記式より **約407** と推定される。

2V印加では、5mAの電流 発生電力: $10 \times 10^{-3} [\text{W}]$
1sの溶断を考えた場合、「 $J = W \cdot s$ 」から、 $10 \times 10^{-3} [\text{J}]$ となり、
これはマイグレーションCuを融点まで温度上昇させ、溶断させるのに
十分な熱量と言える(前項より $7.51 \times 10^{-3} [\text{J}]$ 以上あればよい)。

マイグレーション箇所の許容溶断電流は 5mA 以下と考える。

7. 実験方法

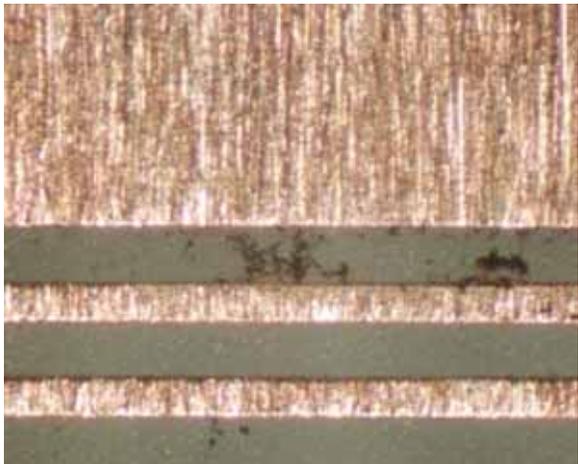


Fig11: マイグレーション

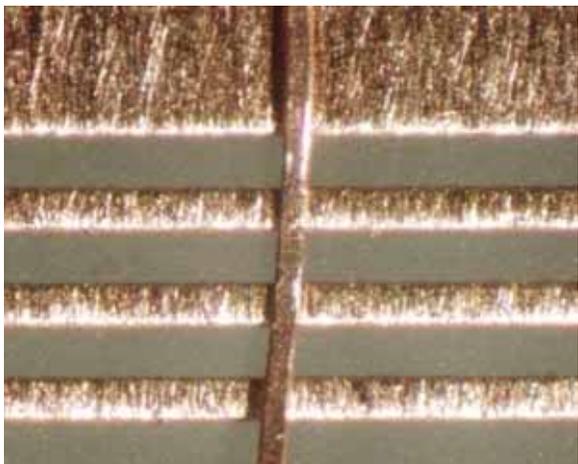


Fig12: 異物 (Cuパターン片)

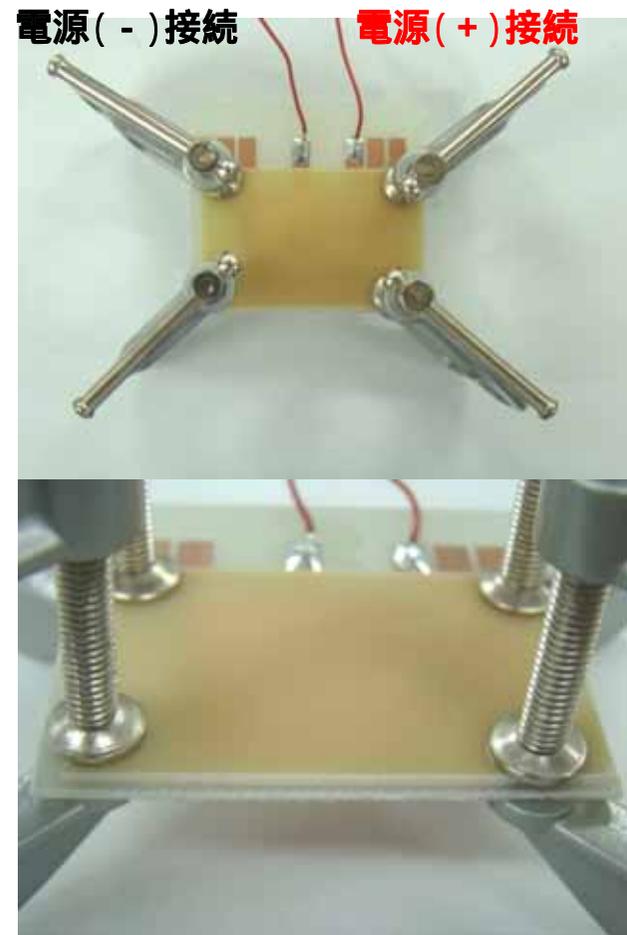
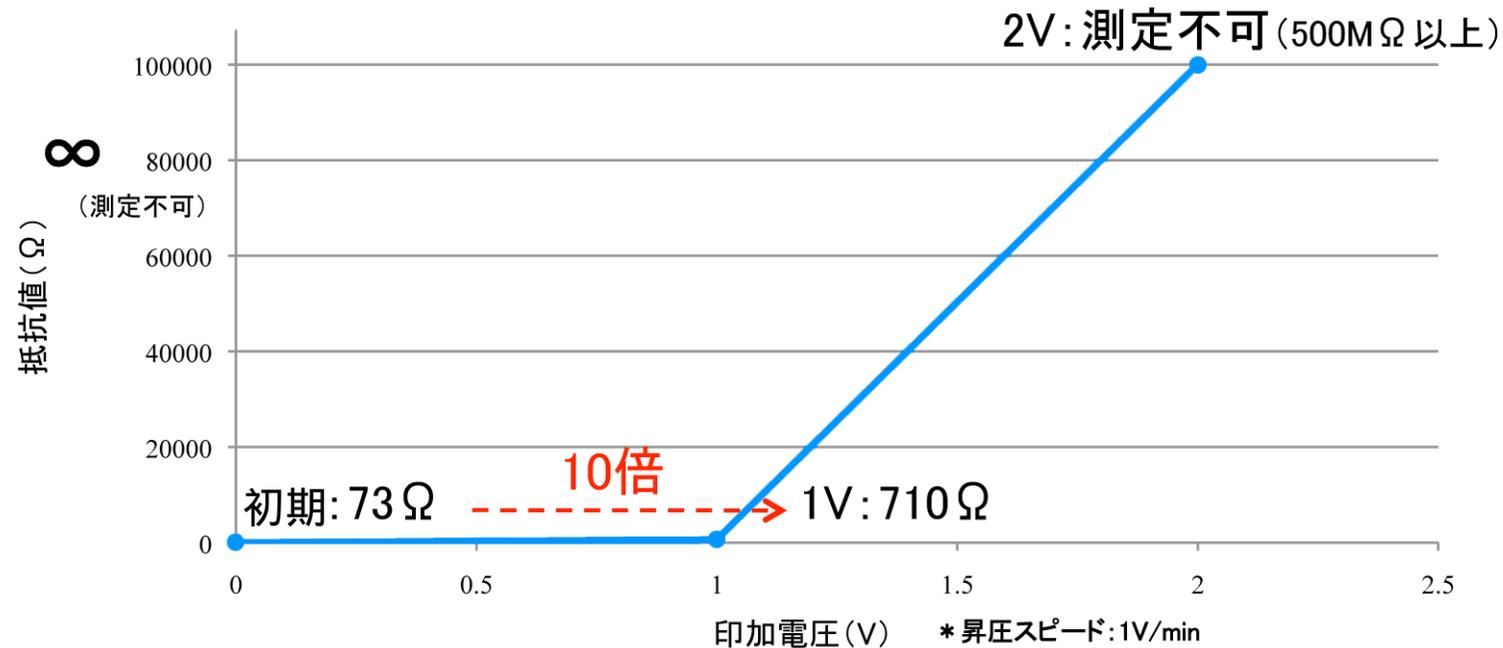


Fig13: クランプ挟み込み後
* ガラエポ基板でショート箇所を挟み込んだ後、
電源と接続し実験を行った。

8. マイグレーションサンプル 再現実験(1)

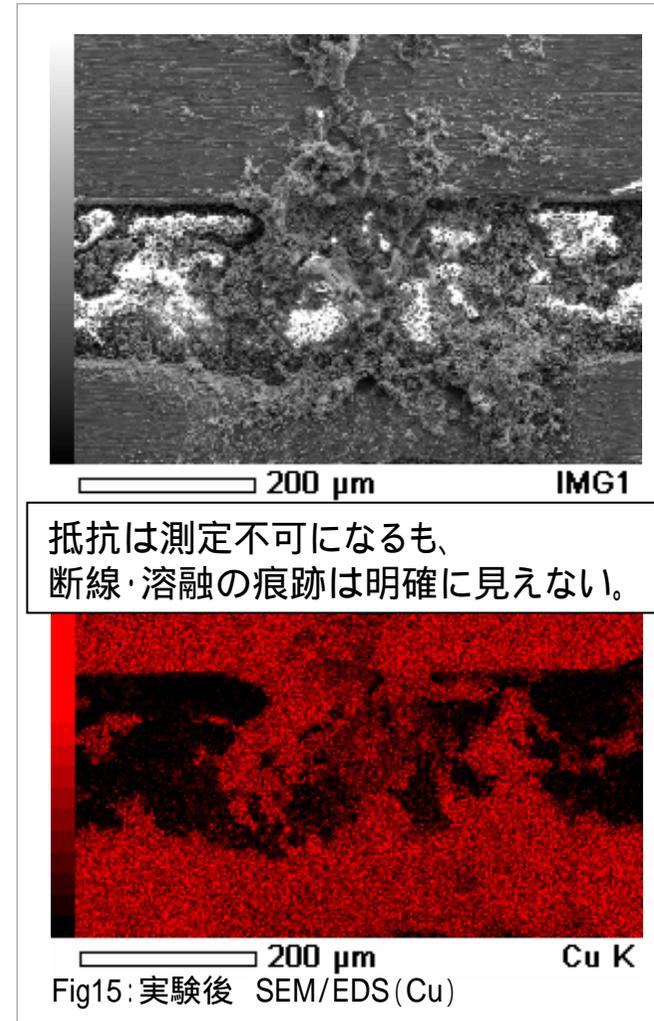
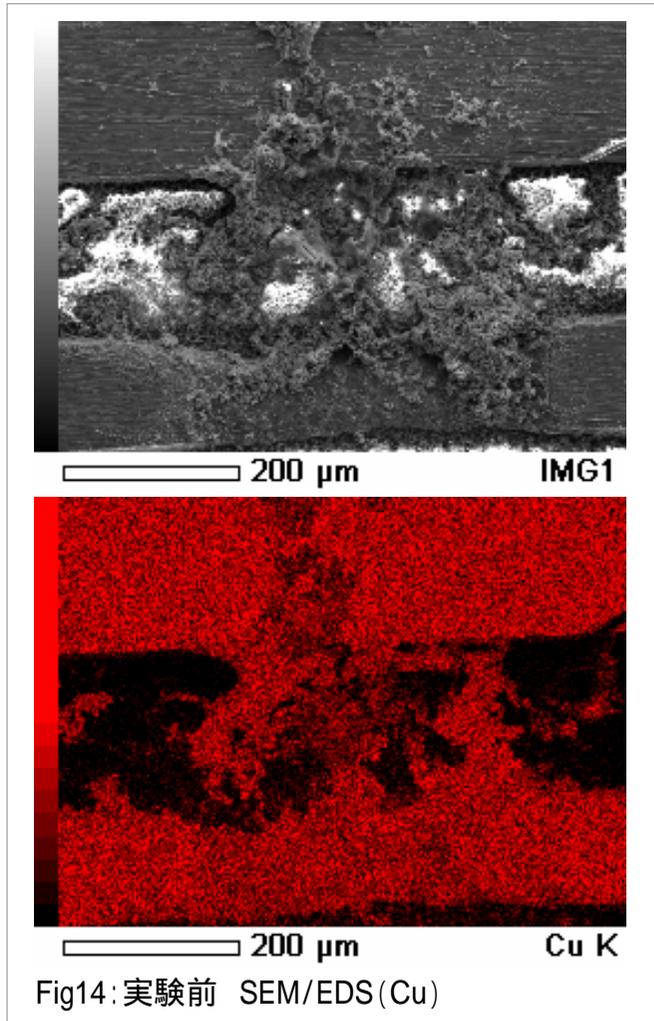
パターン① - ②間 抵抗値変化



1Vの電圧印加で抵抗は上昇し、**許容溶断電流に至る2Vの電圧印加**では、**パターン① - ②間の抵抗は測定不可**(500M Ω 以上)となった(オープンになったと考えられる)。

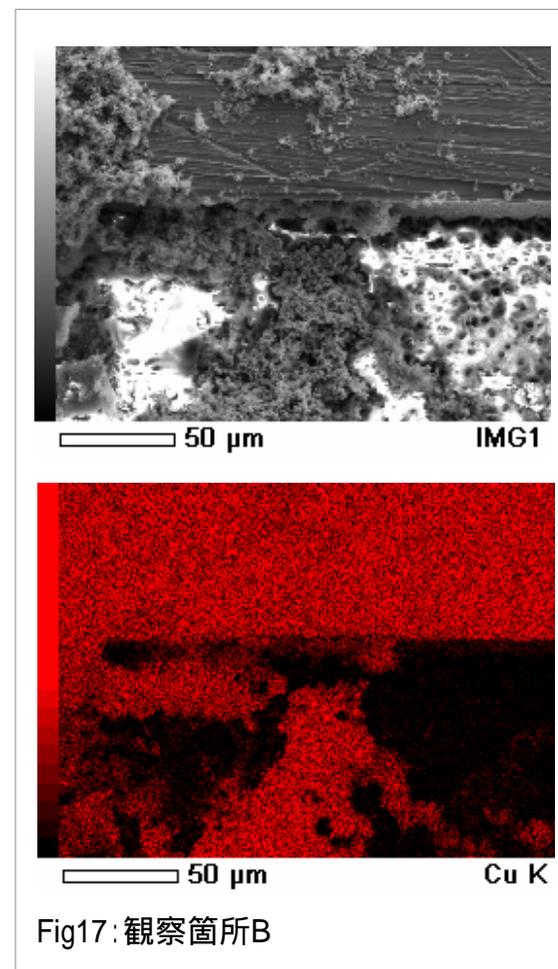
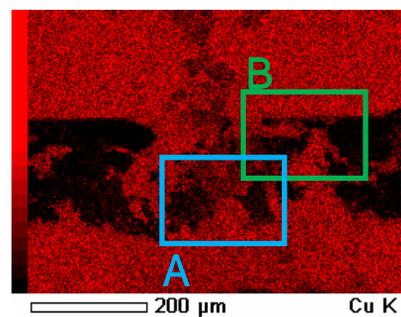
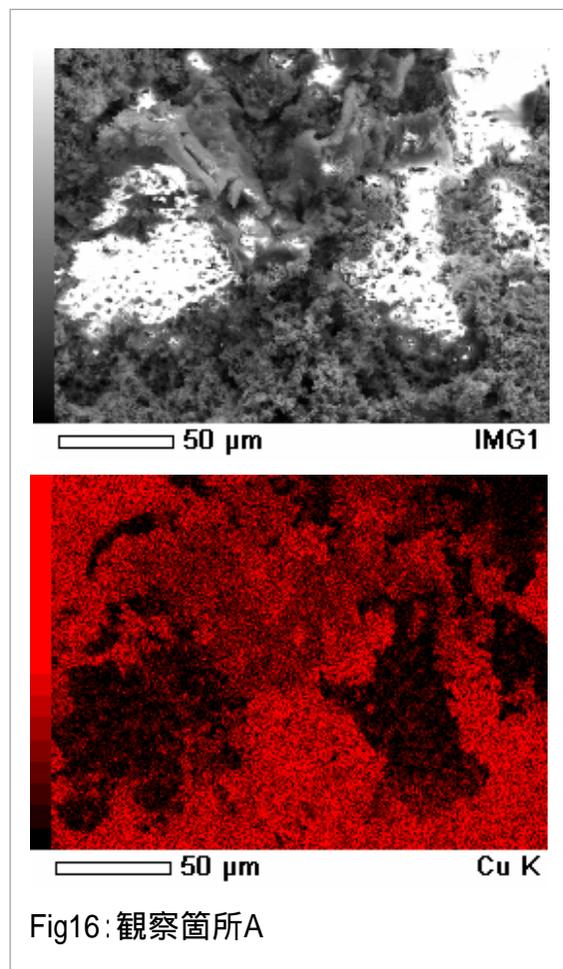
8. マイグレーションサンプル 再現実験(2)

SEM/EDS分析 実験前後比較



8. マイグレーションサンプル 再現実験(3)

実験後SEM/EDS(Cu) 拡大像



8. マイグレーションサンプル 再現実験(4)

マイグレーション発生程度と焼損発生の関係

マイグレーションの幅(mm)	焼損発生の有無	実験n数
2	無	2
4	無	2
5	無	3
8	無	3
30	無	2



幅: 2mm



幅: 30mm

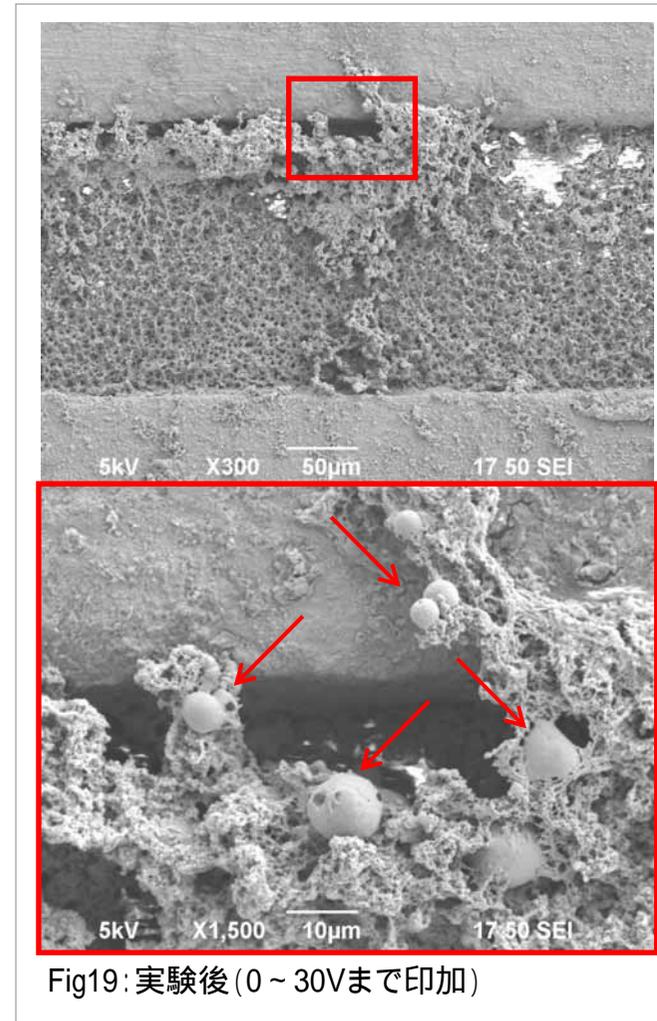
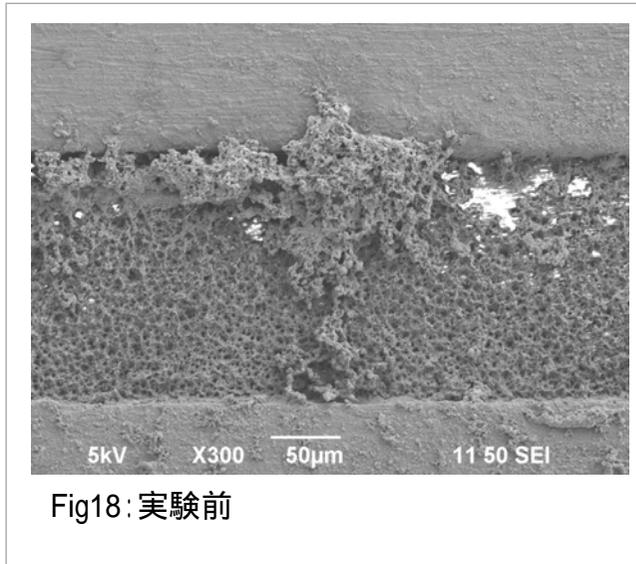
マイグレーション発生程度(幅)に関わらず、
焼損(発煙・発火)の発生は確認されず。

* 実験後 パターン - 間の抵抗値は増加(M 単位、500M 以上で測定不可となる)。

* 印加電圧 50V までの結果。

8. マイグレーションサンプル 再現実験(5)

マイグレーション箇所の変化(SEM観察像比較)



一部で「Cu」が溶融した(赤矢印)
と思われる箇所が確認された。

8. マイグレーションサンプル 再現実験(6)

過電圧によるパターン破壊

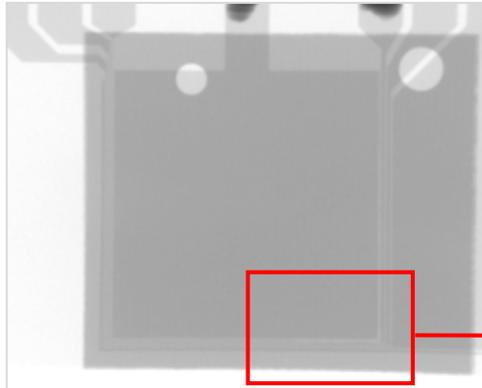


Fig20: 80V印加後(全体)

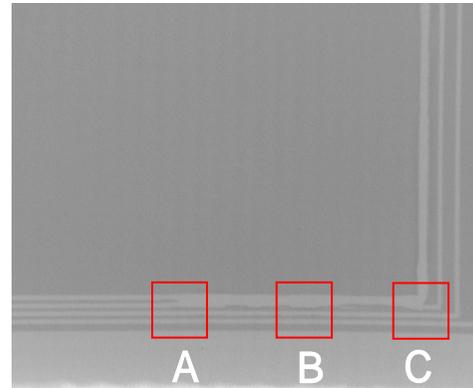


Fig21: 80V印加後(パターン破壊箇所)

印加電圧を上げ、
80Vに到達した
瞬間にパターン
破壊が発生。

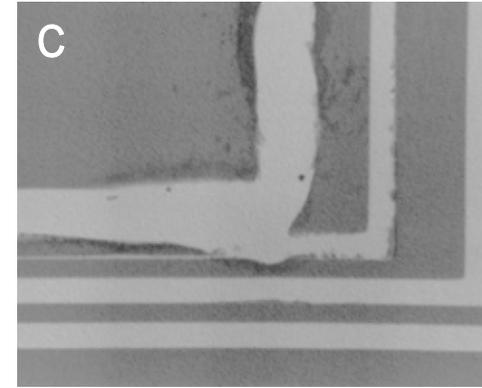
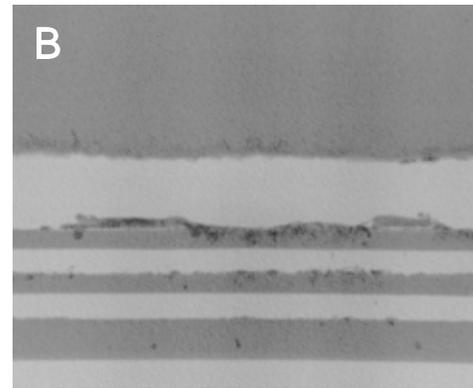
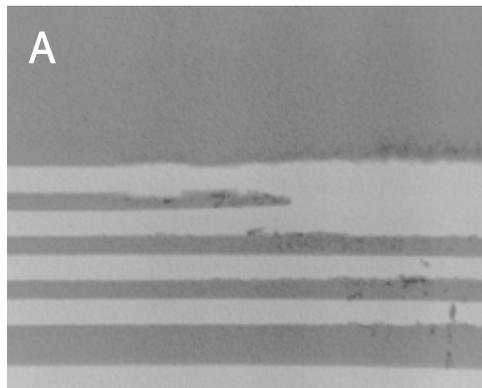


Fig22: パターン破壊箇所拡大

過電圧で発生するモードは発煙・発火ではなく、パターン破壊。

9. 導体異物ショートサンプル 再現実験(1)

導体異物(Cuパターン片) 写真と許容溶断電流の計算

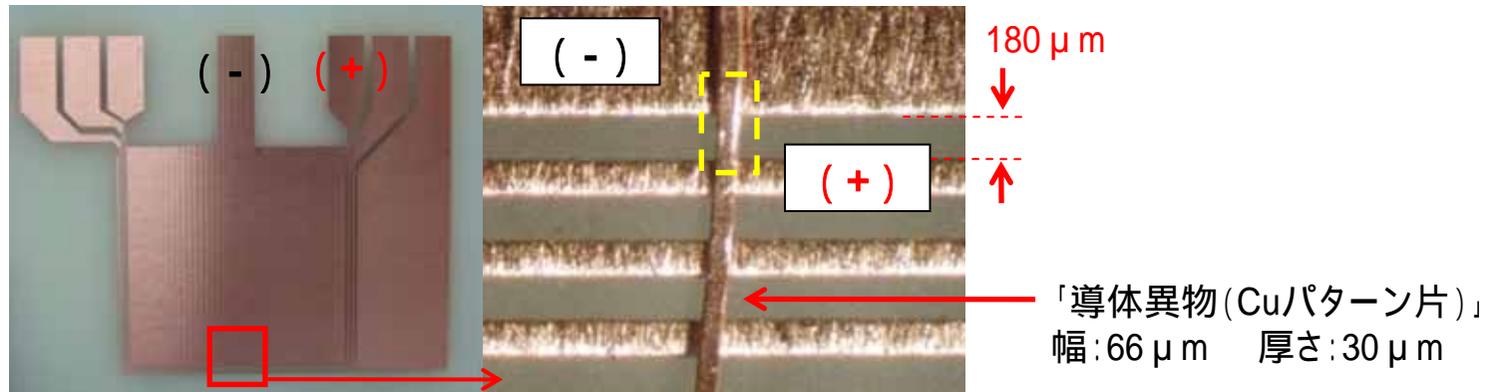


Fig23: 導体異物写真

異物体積	$3.6 \times 10^{-6} [\text{cm}^3]$
異物質質量	$32.3 \times 10^{-6} [\text{g}]$
1 昇温に必要な熱量	$13.4 \times 10^{-6} [\text{J}]$
融点到達に必要な熱量	$14.3 \times 10^{-3} [\text{J}]$

室温20 °Cでのショート抵抗:0.23 Ω、Cu溶融時の抵抗:1.28 Ω
印加電圧1Vでは、780mAの電流 電力: $780 \times 10^{-3} [\text{W}]$ 。
1sでのジュール熱は $780 \times 10^{-3} [\text{J}]$ 溶断に至る。

計算上 0.15V、120mAで $18.0 \times 10^{-3} [\text{J}]$ となる為、
異物ショート箇所の**許容溶断電流は、120mA以下**と考えられる。

9. 導体異物ショートサンプル 再現実験(2)

電流値と焼損モード

電流値	確認されたモード				
	基板発熱	基板変色	発煙	発火	Cuパターン溶融
3A(3h)	あり	なし	なし	なし	なし
4A	あり	あり	あり	あり	あり
6A	不明	あり(一部)	なし	なし	あり(瞬断)



Fig24: 基板変色例

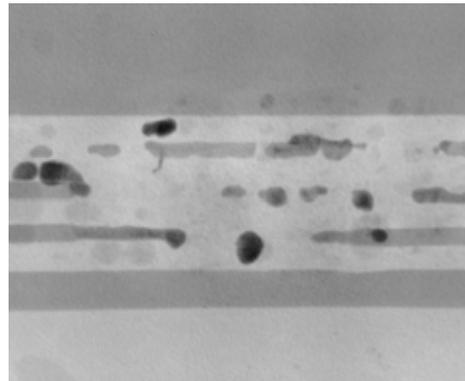


Fig25: Cuパターン溶融

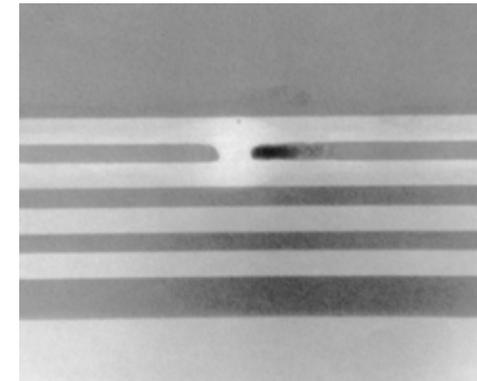


Fig26: Cuパターン溶融(瞬断)

過電流ではパターン瞬断で終了。

電流が小さ過ぎても、大き過ぎても焼損(発煙・発火)には至らない。

9. 導体異物ショートサンプル 再現実験(3)

電流と焼損モード例

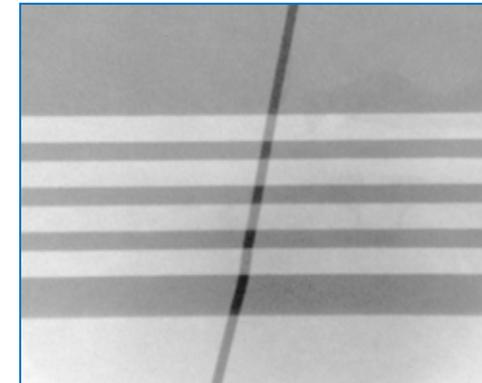
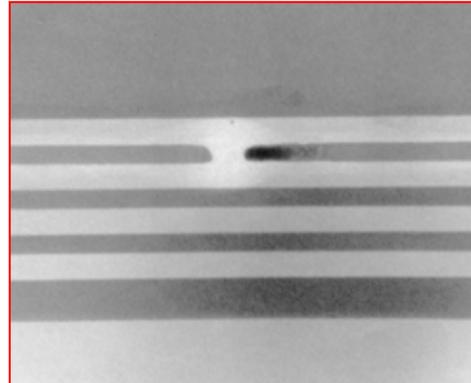
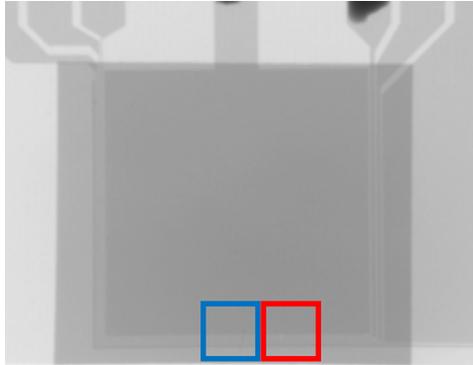


Fig27: 電流 6A 「発煙・発火 なし。パターンの一部が瞬断。ショート箇所変化なし。」

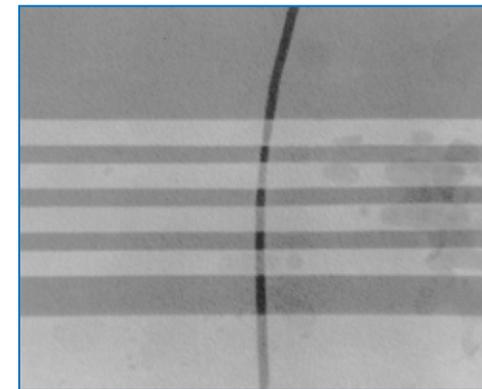
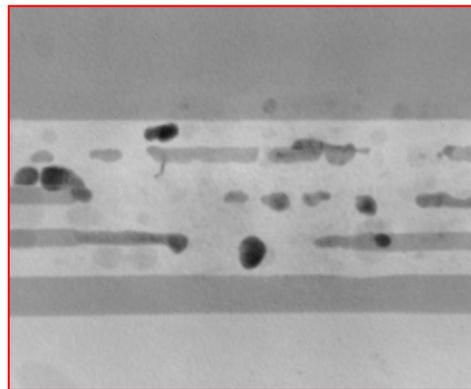
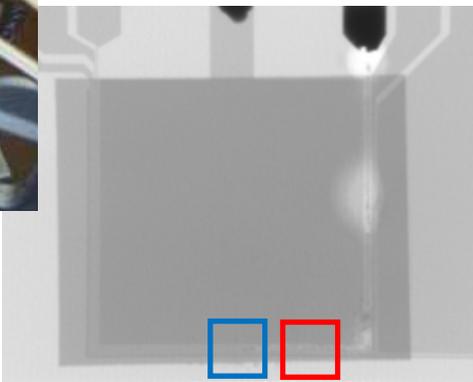


Fig28: 電流 3A ~ 11A 「発煙・発火 あり。ショート箇所変化なし。」*0.5A/5minで電流増大

少しずつ流れ・増大していく電流は、焼損に繋がる。

9. 導体異物ショートサンプル 再現実験(4)

電流 3A ~ 11A 再現実験途中経過写真

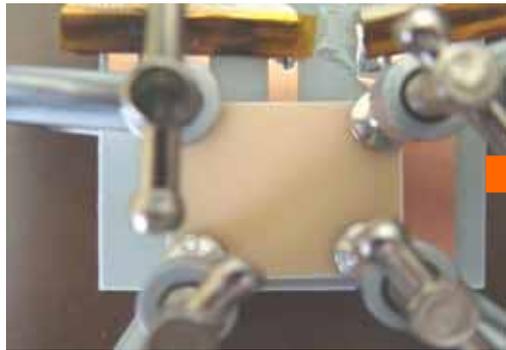


Fig29: 開始時



Fig30: 25min後、5A

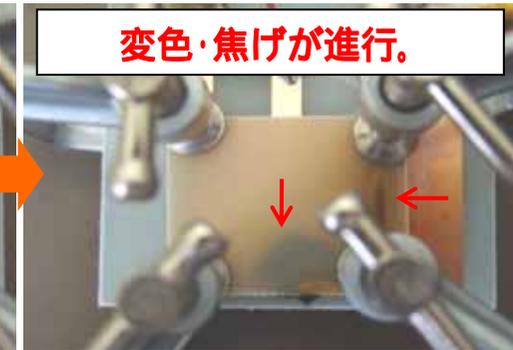


Fig31: 75min後、10A



Fig32: 80min後、10.5A

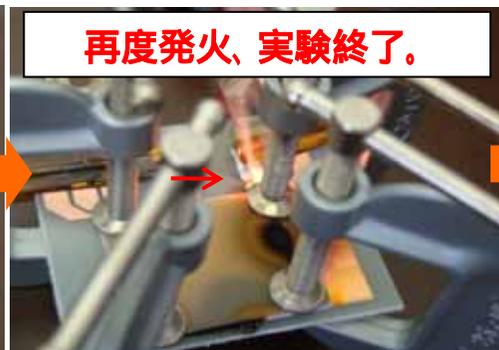


Fig33: 85min後、11A

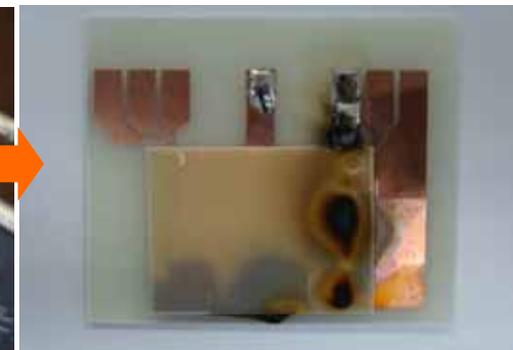


Fig34: 実験後サンプル全体

9. 導体異物ショートサンプル 再現実験(5)

電流 3A ~ での熱挙動(サーモグラフィによる観察)

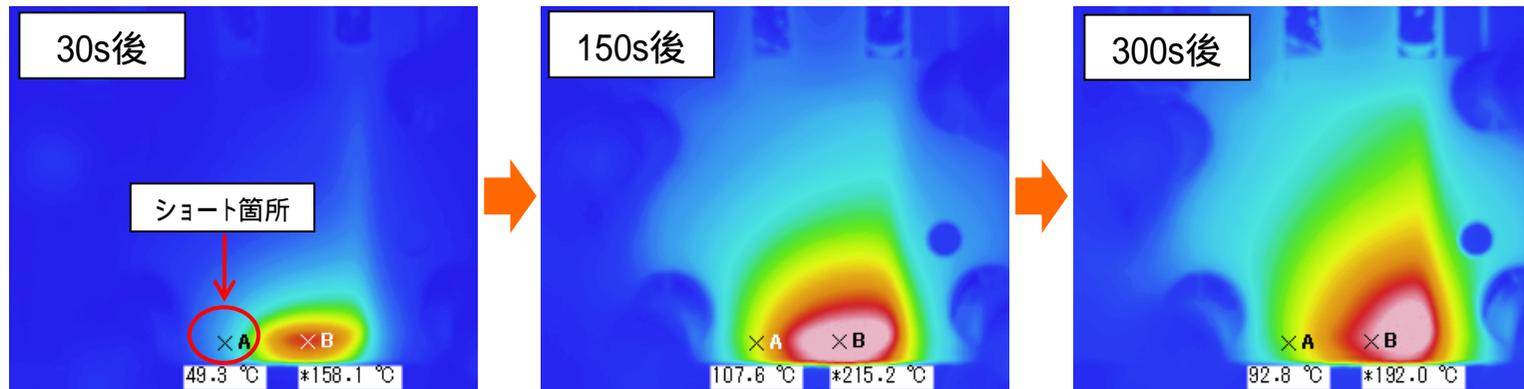


Fig35-1: Cuパターンの熱挙動

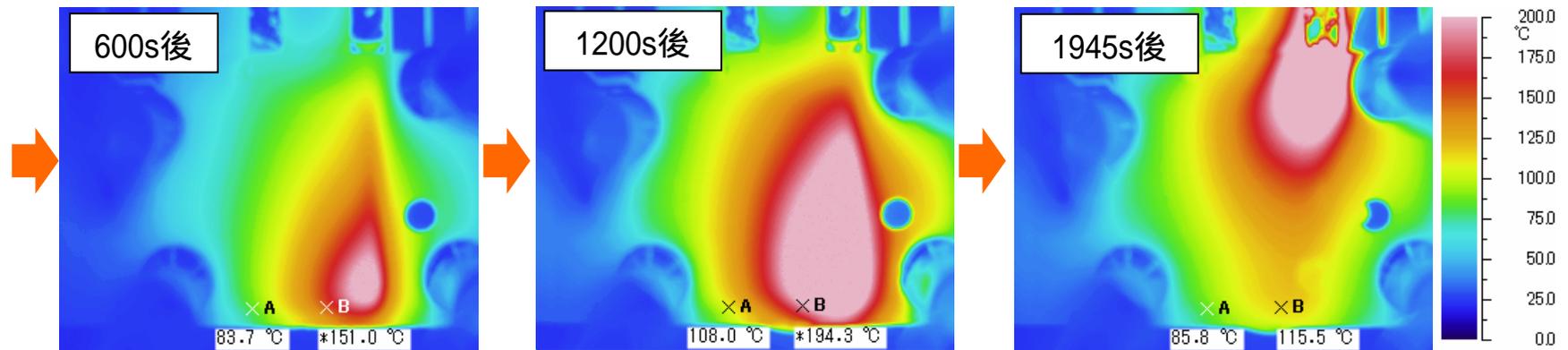


Fig35-2: Cuパターンの熱挙動

9. 導体異物ショートサンプル 再現実験(6)

電流 3Aでの熱挙動(サーモグラフィによる観察)

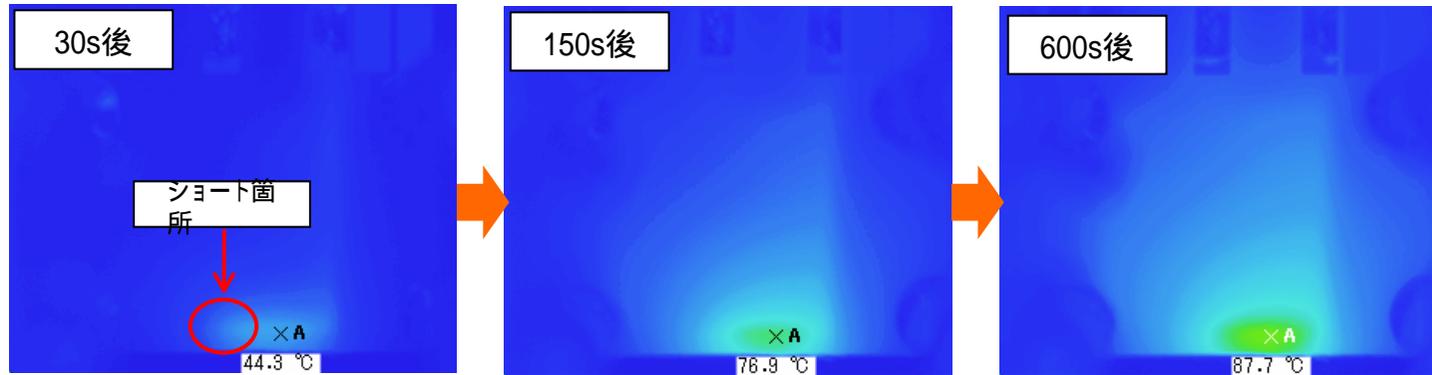


Fig36-1: Cuパターンの熱挙動(3A)

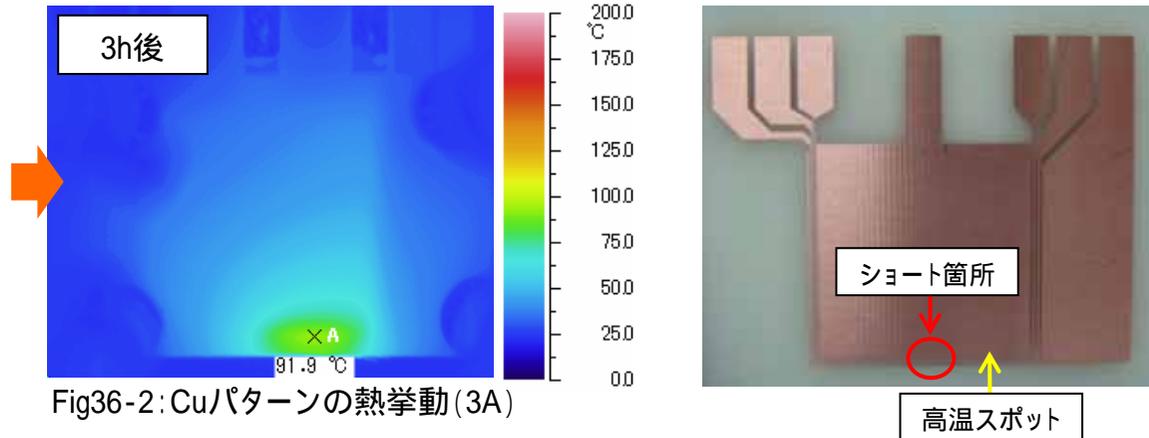


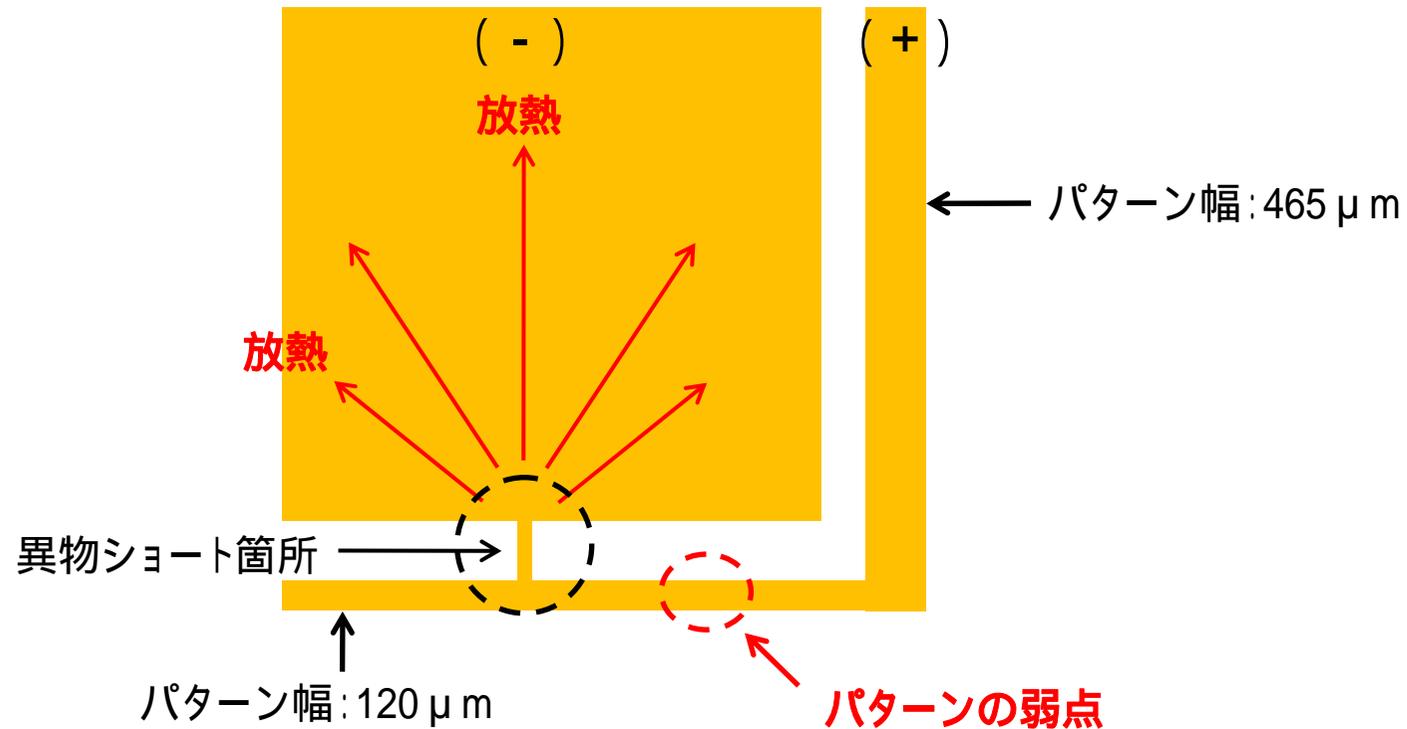
Fig36-2: Cuパターンの熱挙動(3A)

開始10分以降、
大きな温度上昇なし。
平衡状態に。

**3Aでは発熱と放熱が平衡状態となり、焼損には至らないと考えられる。
ショート箇所=発熱箇所(高温スポット)では無い。**

9. 導体異物ショートサンプル 再現実験(7)

「ショート箇所 = 高温スポット」ではない理由についての考察

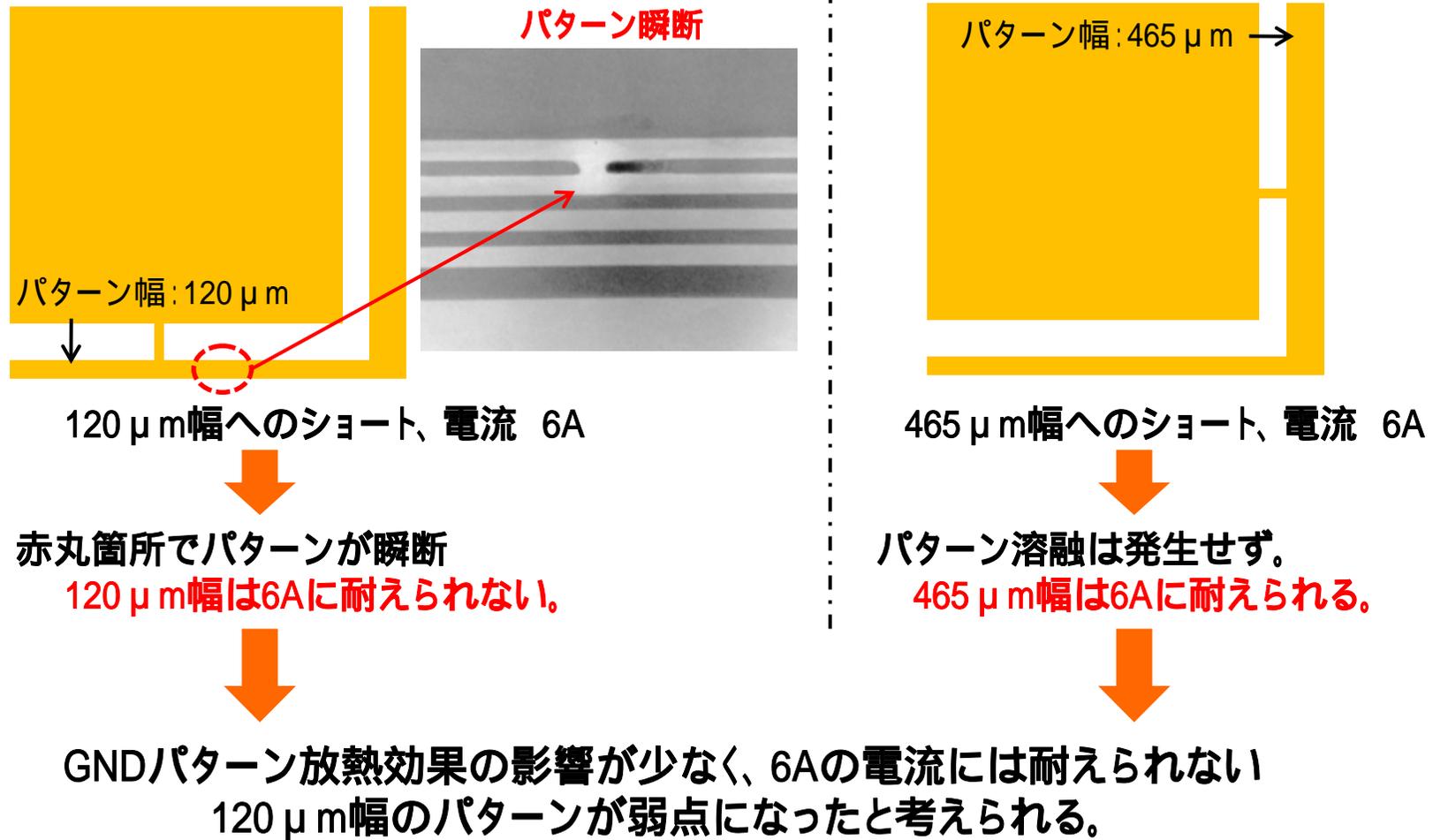


異物ショート箇所は細い為、許容溶断電流は小さいが、隣接する仮想GNDパターンが放熱板の役割を果たし高温にならない。実際の弱点は「パターン幅 120 μm」部分の中心になると考えられる。

* パターン幅 465 μm 箇所は、許容溶断電流・放熱効果共に120 μm幅より大きい。

9. 導体異物ショートサンプル 再現実験(8)

パターン幅 120 μm が弱点となる理由についての考察



9. 導体異物ショートサンプル 再現実験(9)

ショート箇所が溶融する条件についての考察

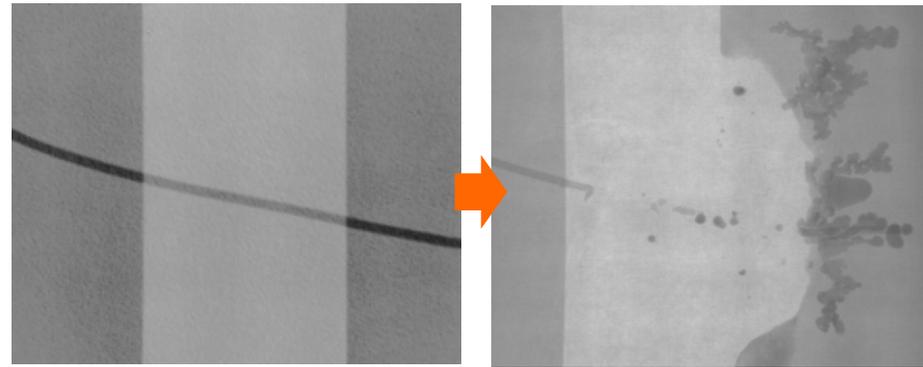
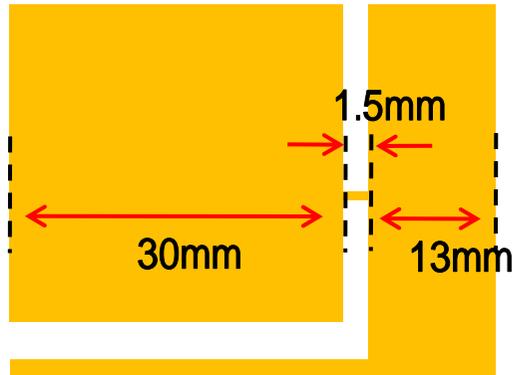
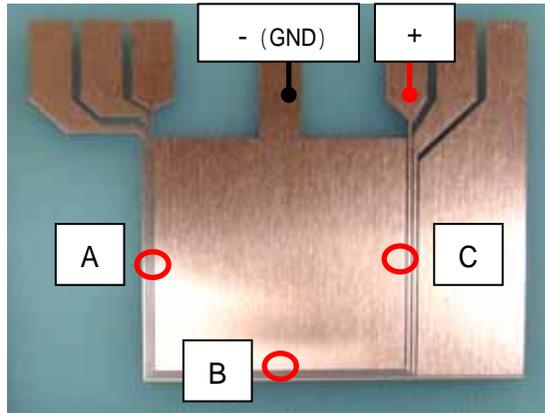


Fig37: 電流 8A 実験前後 ショート箇所付近
* 6Aでは焼損発生せず 8Aにて加速実験

ショート箇所と比較して、周辺パターン幅が圧倒的に広い(有利)場合、
ショート箇所が弱点となり溶融が発生。

10. ショート位置と発熱箇所(高温スポット)の関係



A, B パターン幅: 120 μm
C パターン幅: 465 μm

Fig38: ショート箇所

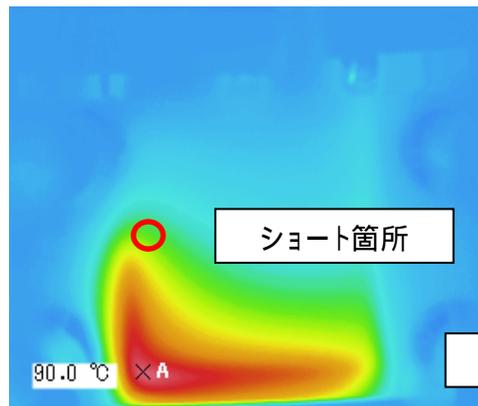


Fig39: ショート箇所 A

* 全て 電流: 3A、時間: 実験開始50s後のデータ

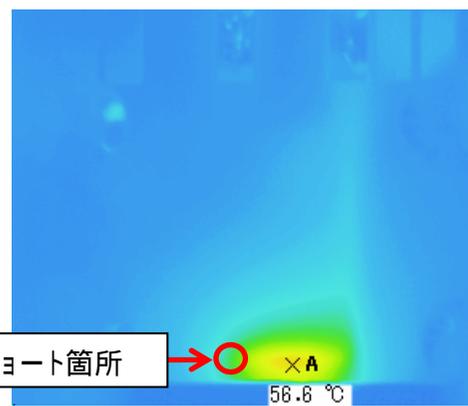


Fig40: ショート箇所 B

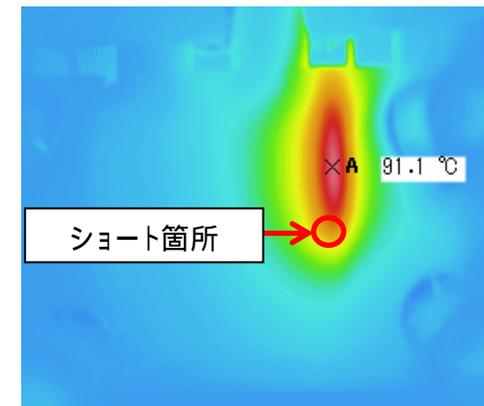


Fig41: ショート箇所 C

ショート箇所 = 発熱箇所(高温スポット)では無い。

まとめ(1)

01 マイグレーションによるショートの場合、焼損には至らない。

マイグレーション箇所の許容溶断電流が極めて小さい為、電流が流れた瞬間にリークタッチ部が瞬断し、絶縁状態に戻る(或いは高抵抗状態になる)。その為、瞬時にショートモードが回復し、発煙・発火を伴う焼損には至らない。

但し、マイグレーションが発生し続けた場合は別のメカニズムとなる可能性あり。

02 焼損は「パターンの弱点」を起点として発生する。よって「ショート箇所 = 焼損箇所」とは限らない。

パターンの幅、厚さ等による各部の許容溶断電流のバランスや、放熱・伝熱効果の影響が弱点を決めるファクターとなる。

まとめ(2)

01 電流の流れ方によって焼損モードは変化する。

- モード 「ジュール熱の発生 放熱」の場合、発煙・発火を伴う焼損には至らない。
- モード 急激に過電流が流れた場合、瞬時にパターン弱点部のみが溶断し、ショートが回復。発煙・発火を伴う焼損には至らない。
- モード パターンを瞬断しない弱い電流が流れ続けた場合、弱点箇所周辺でジュール熱によるパターンCuの抵抗上昇と基材の炭化、温度上昇による炭素抵抗の低下が発生、最終的に発煙・発火を伴う焼損に至る。

02 「急激な過電流」よりも「微弱なリーク電流」の方が、 焼損原因に繋がり危険。