



発火事故原因究明に資する基板トラッキングの 痕跡解析、技術データの蓄積

製品安全センター
燃焼技術センター

1. 調査の目的

家電製品内部でのトラッキングに起因したと考えられる発火事故が散見されるが、そこに印加される電気的な条件から発火の可能性を推定する際の物差しとなるような情報が豊富にあるとは言い難く、事故原因究明の際に事業者との間で見解が分かれる場合も見られる。



『製品から出火したのかあるいは火災によって製品が燃焼したのかを、焼損事故品の痕跡から調べるための技術データを取得する』

2. 実験の内容

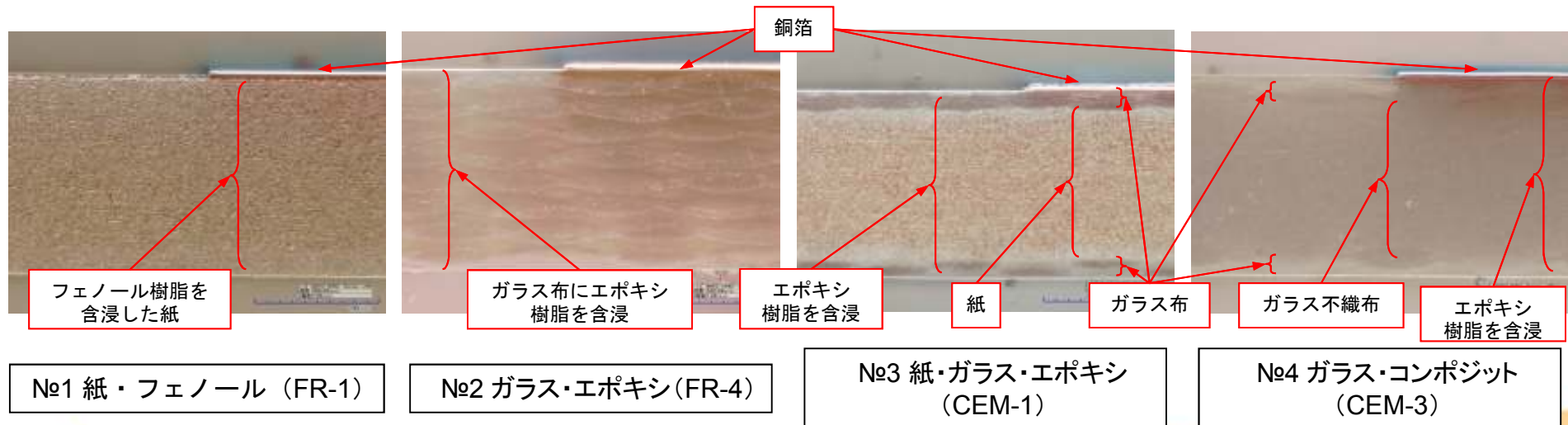
2. 1 基材ごとの特徴を調べる実験（レジスト処理されていない基板による）
2. 2 レジスト処理を施した基板を用いた各種滴下物による発火痕跡作製実験
2. 3 レジスト処理を施した基板を用いた外火被熱サンプルの作製
2. 4 その他の実験（参考）

3. 試料

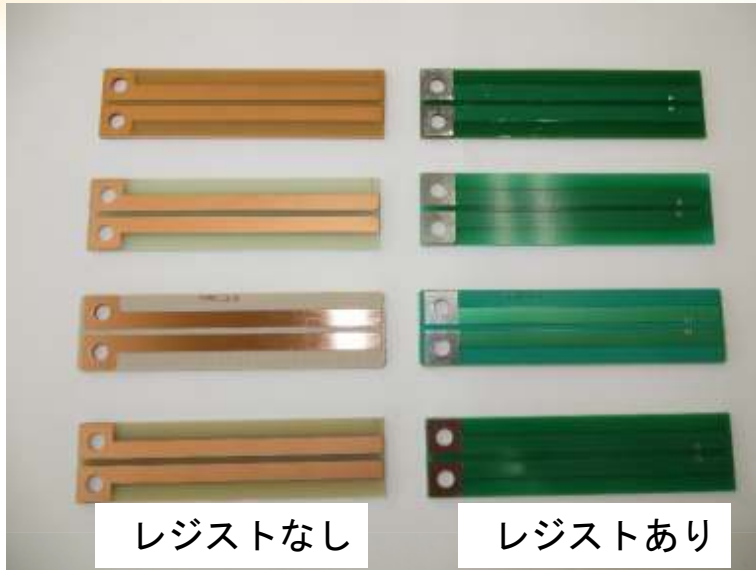
家電製品で主に用いられる4種類の硬質基板

試料 No.	種類	記号	板厚 (mm)	銅箔の厚さ (μm)	難燃性	はんだ耐熱性 (浸漬時間:秒)		トラッキング指数(CTI)
						260°C	300°C	
1	紙フェノール銅張積層板	FR-1	1.6	35	94V-0	35	10以下	600
2	ガラスエポキシ銅張積層板	FR-4				60以上	記載なし	
3	紙・ガラス布・エポキシ樹脂銅張積層板	CEM-1				20以上	500以上	
4	ガラス布・ガラス不織布基材エポキシ樹脂銅張積層板	CEM-3				60以上	600	

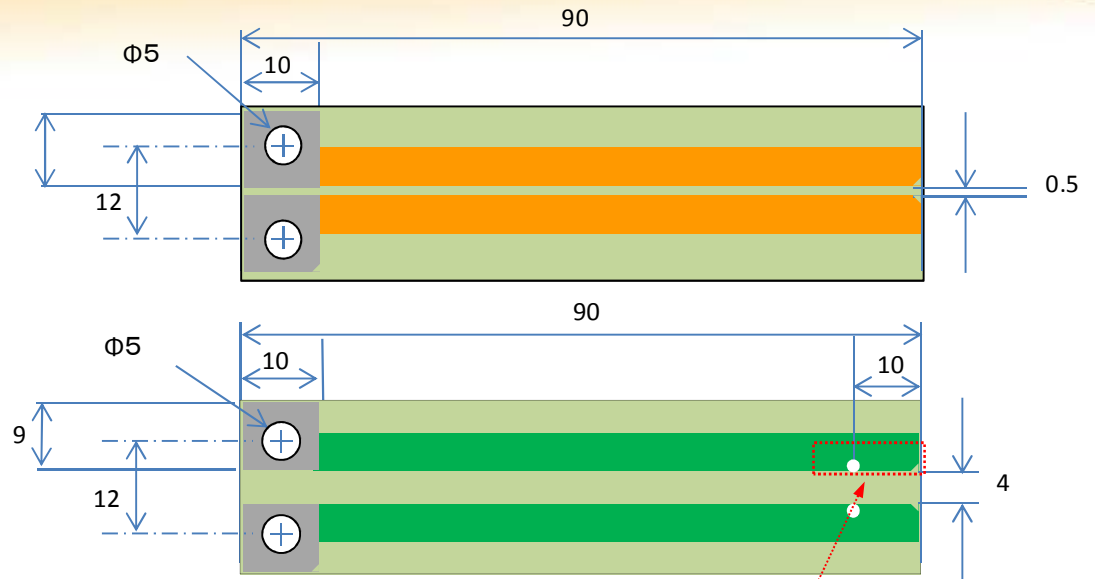
各基板材料の断面



試料（表面）



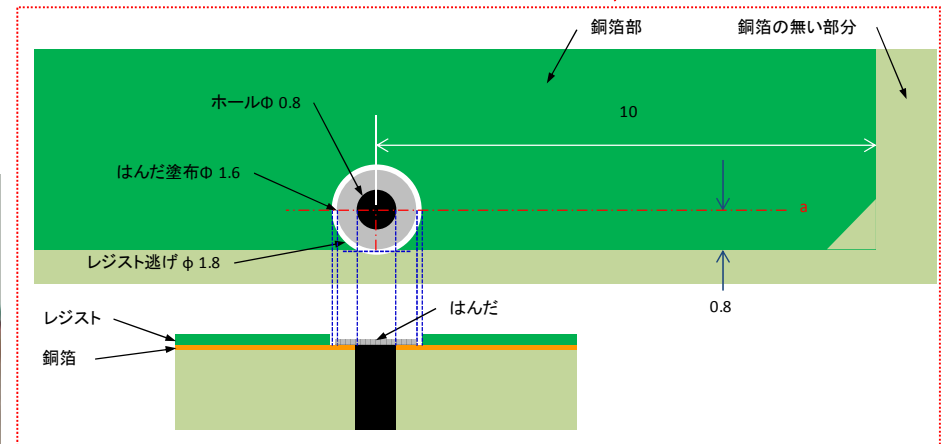
実験用パターン（例）



レジスト処理された試料の断面（例）



紙・フェノール基板は、フロー処理のため、スルーホールが有鉛はんだで閉そく。



4. 実験

4.1 基材ごとの特徴を調べる実験(レジスト処理されていない基板による)

印加電圧			銅箔間の距離	絶縁破壊時の電流制限	電解液	電解液の滴下量(μ l)	電解液の滴下間隔(秒)	実験回数
AC/DC	電圧	周波数(Hz)						
AC	200V	50	4mm、1mm	2A	2%塩化アンモニウム水溶液	20	30	1条件あたり3回
	100V							
DC	100V	—	2mm、0.5mm	2A	2%塩化アンモニウム水溶液	20	※3	
AC	40V	50						
	DC	40V						
20V								
10V								
7.5V								
5V								
2.5V	—	—	—	—	—	—	最大3回 ※4	

※1：銅箔間の距離が0.5mmの基板に40Vを印加する実験では、銅箔と銅箔の間の隙間に沿って電解液が広範囲に広がったため電解液の量を減らして実験を行った。

※2：基材の炭化は電解液が蒸発する際のシンチレーションによって促進される。低電圧での実験では電解液が蒸発しにくく、自然乾燥を待つ必要があり、実験に長時間を要することから、径の小さいノズルを用いることで滴下量を減らして実験を行った。

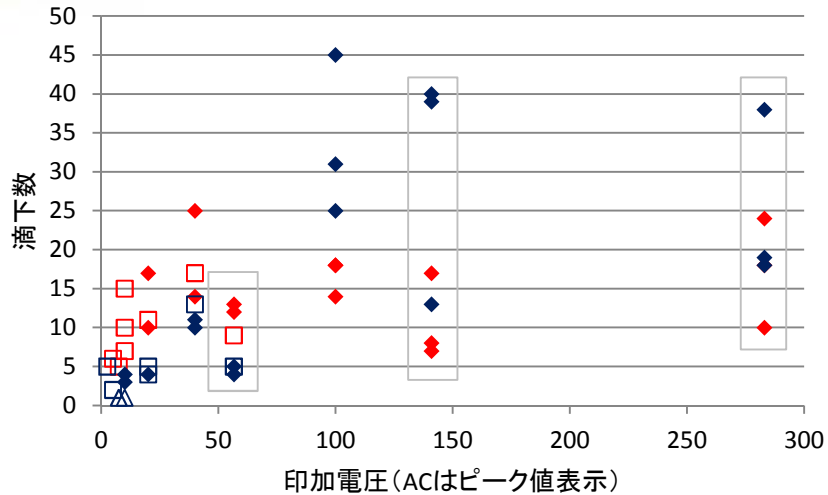
※3：40V以下の低電圧では30秒以内に電解液が蒸発しないことから、電解液の蒸発を目視により確認しながら滴下間隔を調整した。

※4：7.5V以下での実験は、発火、赤熱などの現象を確認する目的で行った。そのため、危険と思われる発火や赤熱、導通といった現象が見られた場合、その電圧での実験を中止し、より低い印加電圧での実験に進むこととした。導通については、実際の製品で電流制限がない状態を想定した場合、赤熱に至る可能性があると考え、当該現象が確認された場合は、発火、赤熱と同様、より低い電圧での実験に移行した。

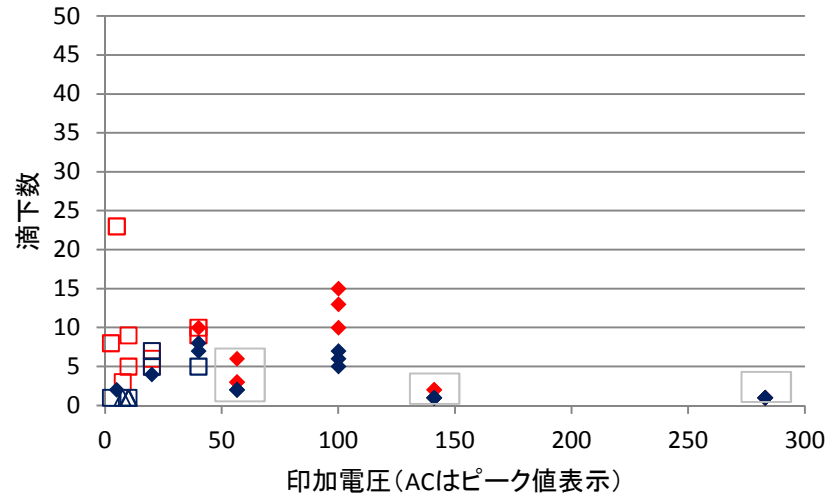
実験結果-1 破壊までの滴下数

◆ 銅箔間の距離が長いもので発火したもの
 ◆ 銅箔間の距離が短いもので発火したもの
 □ 銅箔間の距離が長いもので赤熱したもの
 □ 銅箔間の距離が短いもので赤熱したもの
 △ 銅箔間の距離が短いもので破壊時に制限電流に近い電流が流れたもの

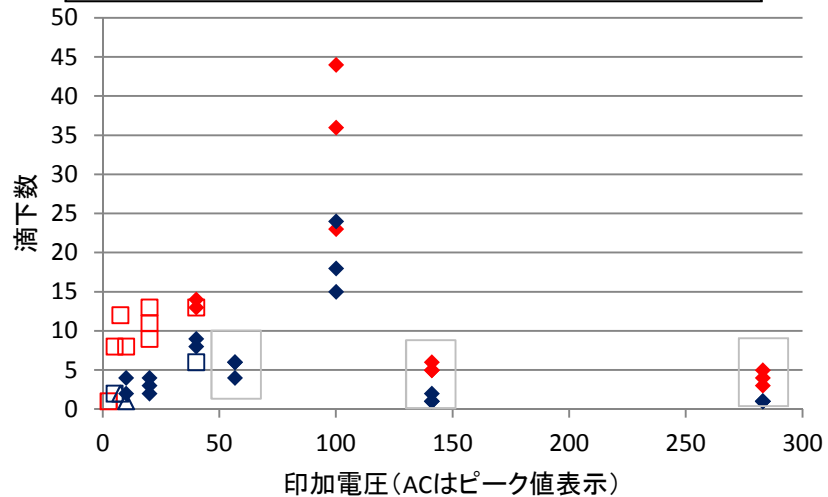
試料No1 紙・フェノール基板 (FR-1)



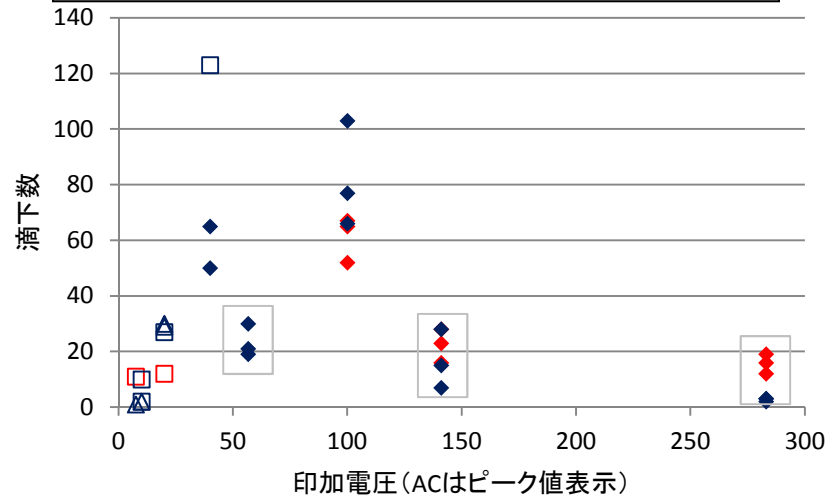
試料No2 ガラス・エポキシ基板 (FR-4)



試料No3 紙・ガラス・エポキシ基板 (CEM-1)



試料No4 ガラス・コンポジット基板 (CEM-3)



印加電圧 : AC200Vは283V、AC100Vは141V、AC40Vは56.6Vでプロット
 (グラフ中、枠で囲った部分がAC電圧)

銅箔間の距離 : AC200、100V、DC100Vでは長=4mm、短=1mm AC、DC40V以下では長=2mm、短=0.5mm

実験結果-2 破壊時の現象

レジスト処理していない基板に2%塩化アンモニウム水溶液を滴下した際の発火、赤熱の発生状況

<発火の発生状況>

試料		銅箔間の距離	結果									
No.	基板		DC							AC		
			2.5V	5V	7.5V	10V	20V	40V	100V	40V	100V	200V
1	紙・フェノール基板 (FR-1)	長	×	(×)	(×)	×	○	○	◎	○	◎	◎
		短	(×)	(×)	(×)	○	△	○	◎	○	◎	◎
2	ガラス・エポキシ基板 (FR-4)	長	(×)	(×)	(×)	×	×	△	◎	◎	◎	◎
		短	(×)	☆	(×)	×	△	○	◎	◎	◎	◎
3	紙・ガラス・エポキシ基板 (CEM-1)	長	(×)	(×)	(×)	×	×	○	◎	×	◎	◎
		短	(×)	(×)	(×)	○	◎	○	◎	◎	◎	◎
4	ガラス・コンポジット基板 (CEM-3)	長	—	×	(×)	×	×	×	◎	×	◎	◎
		短	×	(×)	(×)	×	△	△	◎	◎	◎	◎



<赤熱の発生状況>

試料		銅箔間の距離	結果									
No.	基板		DC							AC		
			2.5V	5V	7.5V	10V	20V	40V	100V	40V	100V	200V
1	紙・フェノール基板 (FR-1)	長	×	(×)	☆	◎	◎	◎	◎	○	△	×
		短	☆	☆	(×)	○	◎	◎	○	◎	×	×
2	ガラス・エポキシ基板 (FR-4)	長	☆	☆	☆	○	◎	◎	◎	◎	◎	○
		短	☆	(×)	(×)	△	◎	◎	○	◎	○	×
3	紙・ガラス・エポキシ基板 (CEM-1)	長	☆	☆	☆	△	◎	◎	○	×	◎	◎
		短	×	☆	(×)	○	◎	◎	△	◎	◎	◎
4	ガラス・コンポジット基板 (CEM-3)	長	—	×	☆	×	△	×	◎	×	○	×
		短	×	(×)	(×)	△	△	○	○	◎	×	×



◎ : 3点全部で発生、○ : 3点中2点で発生、△ : 3点中1点で発生、× : 3点の実験で発生なし

☆ : DC7.5V以下において、現象が確認されたもの、

(×) : DC7.5V以下において、1又は2点の実験中に発火又は赤熱が見られなかったもの

— : 実施せず

銅箔間の距離 : AC200、100V、DC100Vでは長=4mm、短=1mm AC、DC40V以下では長=2mm、短=0.5mm

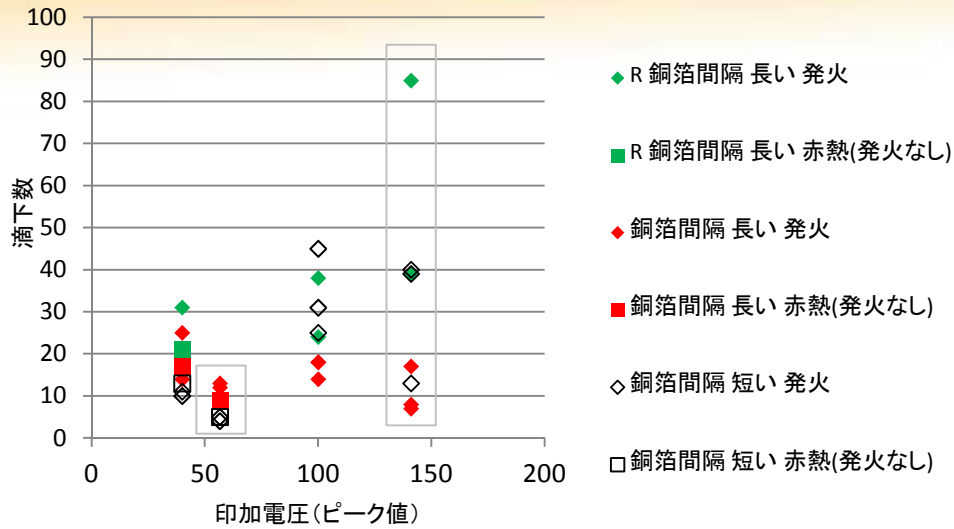
発火したものの中には発火前に赤熱状態となったものが含まれる。

4. 2 レジスト処理を施した基板を用いた各種滴下物による発火痕跡作製実験

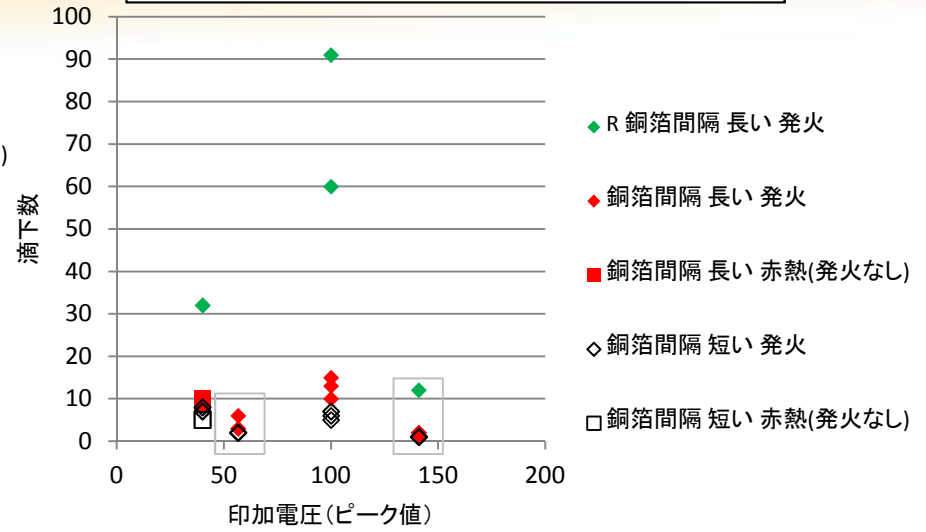
滴下物	成分	実験条件		備考
		印加電圧	銅箔間の距離	
1	2%塩化アンモニウム水溶液	—	AC、DC100V DC40V	1.2実験との比較用
2	業務用エアコン洗浄剤1 ケイ酸塩 キレート剤 液性:アルカリ性	AC100V、 DC40V	AC、DC100Vについては4mm DC40V以下については2mm	使用時は10~20倍に希釈
3	業務用エアコン洗浄剤2 水酸化ナトリウム 水酸化カリウム 陰イオン界面活性剤 消臭剤 液性:アルカリ性			使用時は10~20倍に希釈
4	トイレ洗浄剤 9.5%塩酸、界面活性剤 アルキルトリメチルアンモニウム 洗浄助剤			原液
5	電解コンデンサ1 電解液 溶媒:エチレングリコール 安息香酸 溶質:ヘキシトール リン酸化合物			DC100V DC40V
6	電解コンデンサ2 電解液 溶媒:エチレングリコール 溶質:ウンデカン二酸 アゼライン酸 ジエチルアミン 他			

実験結果-1 2%塩化アンモニウム水溶液を滴下した場合のレジストの有無による差

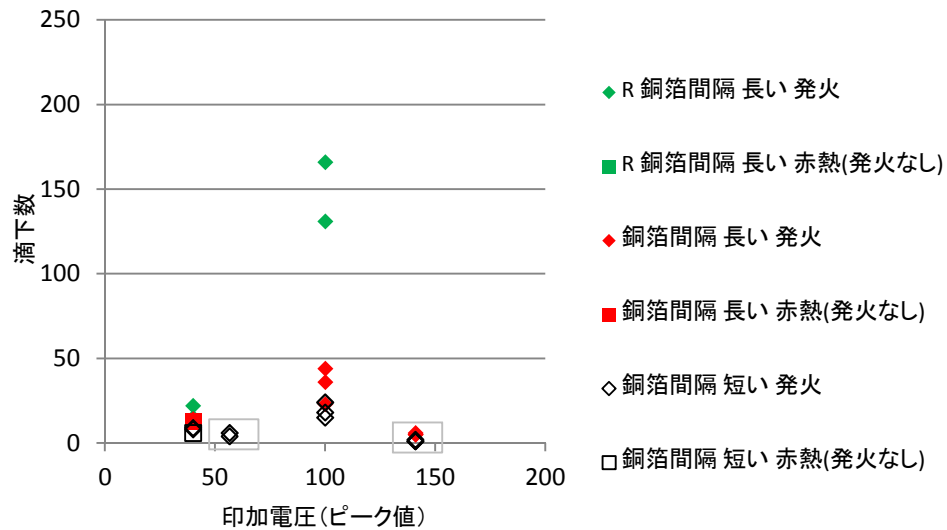
試料No1 紙・フェノール基板 (FR-1)



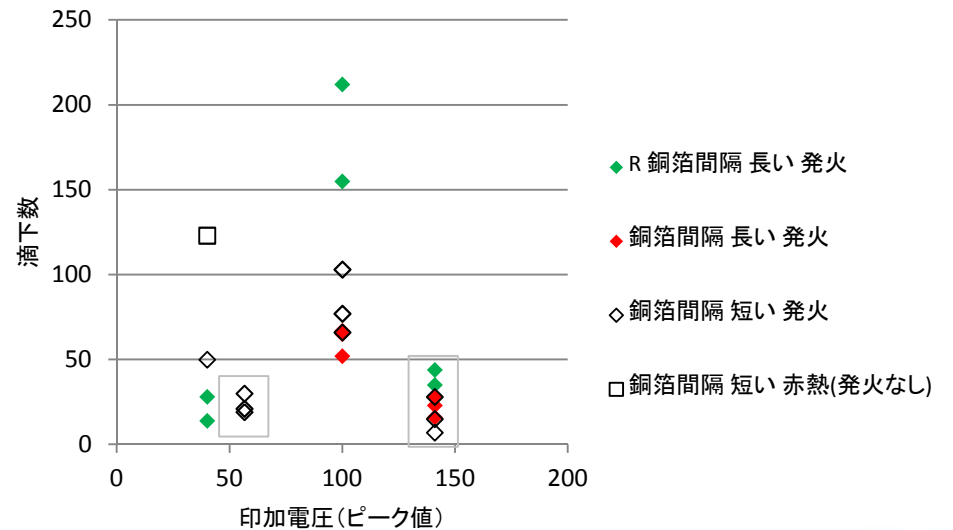
試料No2 ガラス・エポキシ基板 (FR-4)



試料No3 紙・ガラス・エポキシ基板 (CEM-1)



試料No4 ガラス・コンポジット基板 (CEM-3)



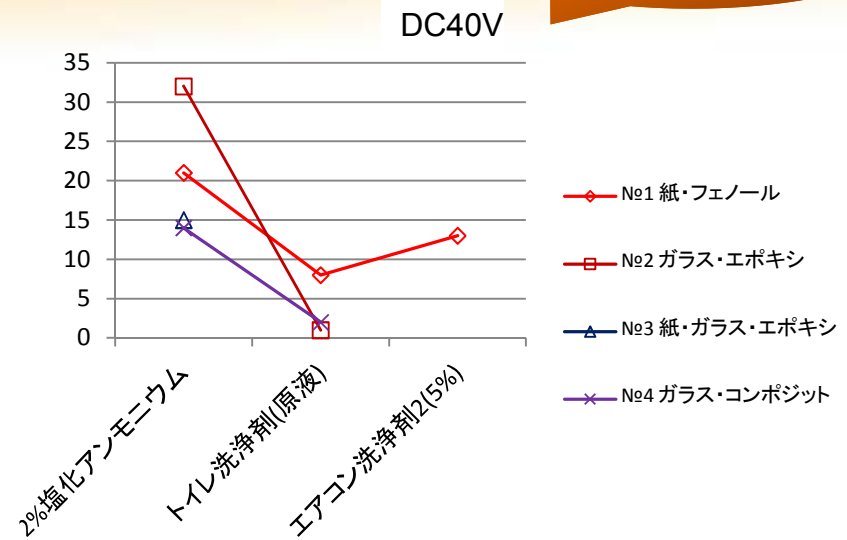
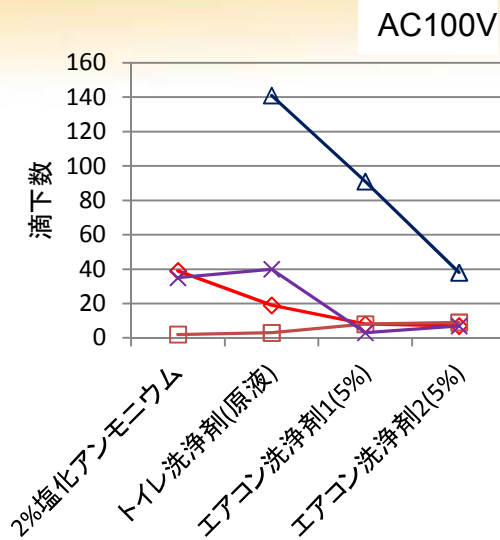
印加電圧 : AC200Vは283V、AC100Vは141V、AC40Vは56.6Vでプロット
(グラフ中、枠で囲った部分がAC電圧)

銅箔間の距離 : AC200、100V、DC100Vでは長=4mm、短=1mm AC、DC40Vでは長=2mm、短=0.5mm

実験結果-2 滴下物による違い




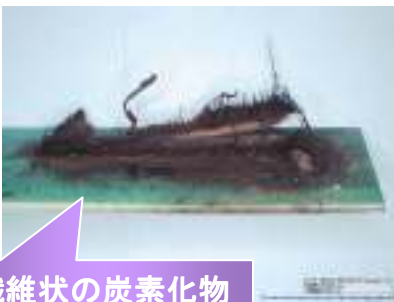

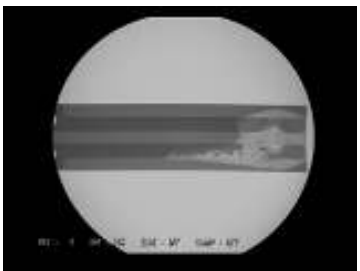



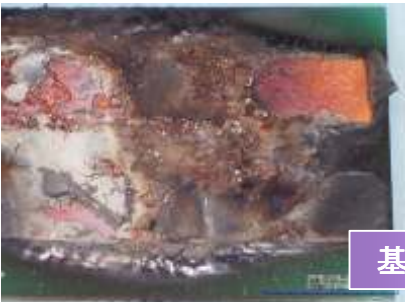




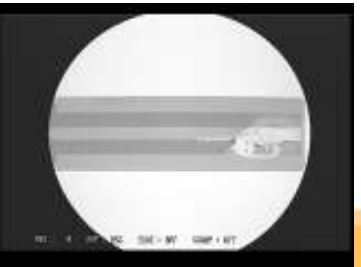

基板の種類別、付着物別の発火、赤熱に至る滴下数

電解コンデンサの電解液は、発火したものがなかった。





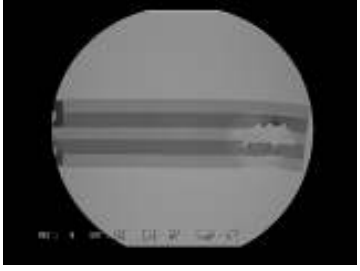
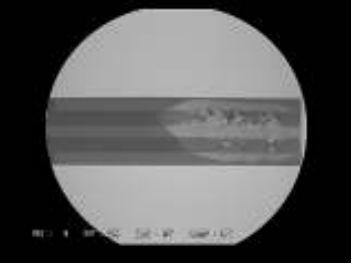
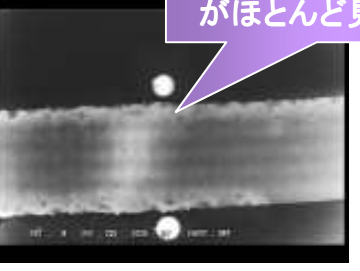



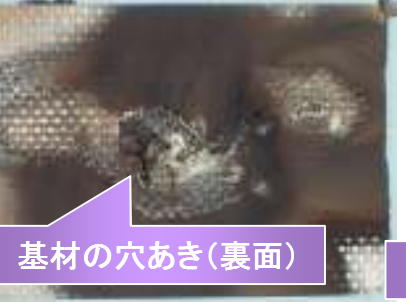
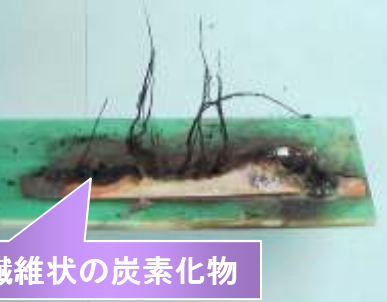






No.	基板種類	滴下物	AC100V				DC40V		
			エアコン洗浄剤2(5%)	エアコン洗浄剤1(5%)	トイレ洗浄剤(原液)	2%塩化アンモニウム	トイレ洗浄剤(原液)	エアコン洗浄剤2(10%)	2%塩化アンモニウム
No.1	紙・フェノール (FR-1)	滴下物	エアコン洗浄剤2(5%)	エアコン洗浄剤1(5%)	トイレ洗浄剤(原液)	2%塩化アンモニウム	トイレ洗浄剤(原液)	エアコン洗浄剤2(10%)	2%塩化アンモニウム
		滴下数(最少)	7	8	19	39	8	13	21
No.2	ガラス・エポキシ (FR-4)	滴下物	2%塩化アンモニウム	トイレ洗浄剤(原液)	エアコン洗浄剤1(5%)	エアコン洗浄剤2(5%)	トイレ洗浄剤(原液)	2%塩化アンモニウム	エアコン洗浄剤2(10%)
		滴下数(最少)	2	3	8	9	1	32	×
No.3	紙・ガラス・エポキシ (CEM-1)	滴下物	エアコン洗浄剤2(5%)	エアコン洗浄剤1(5%)	トイレ洗浄剤(原液)	2%塩化アンモニウム	2%塩化アンモニウム	エアコン洗浄剤2(10%)	トイレ洗浄剤(原液)
		滴下数(最少)	38	91	141	×	15	×	×
No.4	ガラス・コンポジット (CEM-3)	滴下物	エアコン洗浄剤1(5%)	エアコン洗浄剤2(5%)	2%塩化アンモニウム	トイレ洗浄剤(原液)	トイレ洗浄剤(原液)	2%塩化アンモニウム	エアコン洗浄剤2(10%)
		滴下数(最少)	3	7	35	40	2	14	×

実験結果-3 発火実験で生じた痕跡(1)

	No1 紙・フェノール (FR-1)	No2 ガラス・エポキシ (FR-4)	No3 紙・ガラス・エポキシ (CEM-1)	No4 ガラス・コンポジット (CEM-3)
2%塩化アンモニウム水溶液	 <p>穴あき</p>	 <p>繊維状の炭素化物</p>	 <p>400滴、滴下して発火せず</p> <p>繊維状の炭素化物</p>	 <p>繊維状の炭素化物</p>
				
エアコン洗浄剤1	 <p>穴あき</p>	 <p>基材からはく離した銅箔</p>	 <p>ガラスクロスの白化(裏面)</p>	 <p>穴あき</p>
				

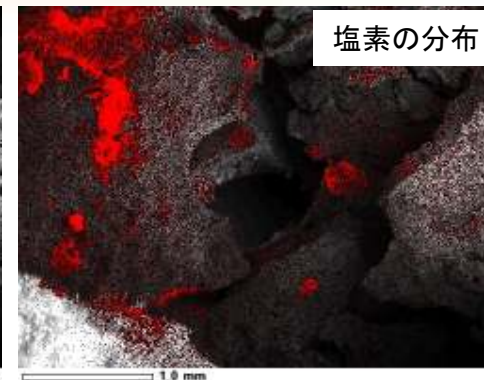
実験結果-3 発火実験で生じた痕跡(2)

	No1 紙・フェノール (FR-1)	No2 ガラス・エポキシ (FR-4)	No3 紙・ガラス・エポキシ (CEM-1)	No4 ガラス・コンポジット (CEM-3)
エアコン 洗浄剤2	 <p>穴あき</p>			
			 <p>銅箔に短絡による損傷 がほとんど見られない</p>	
トイレ用 洗浄剤		 <p>延焼中に飛散した 繊維状の炭素化物</p>	 <p>基材の穴あき(裏面)</p>	 <p>繊維状の炭素化物</p>
				

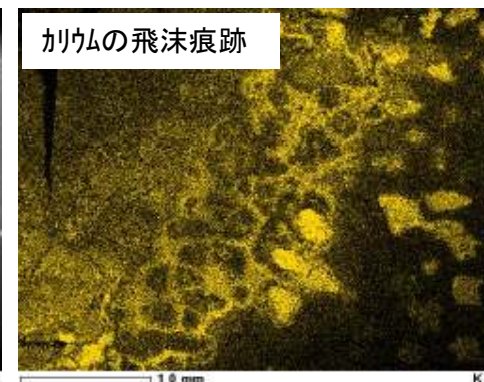
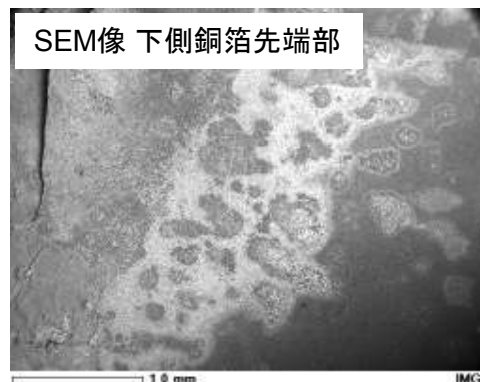
実験結果-4 発火サンプルの元素分析(EDSによる分析)

発火部位の周辺から滴下物由来の元素を検出したものもあった。

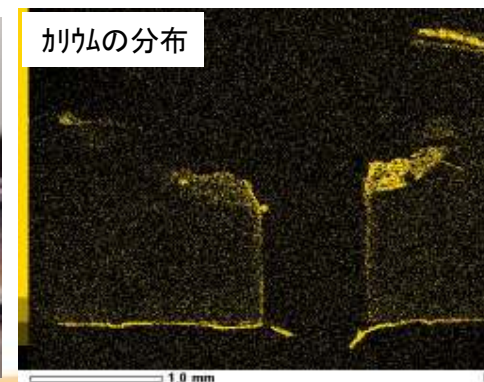
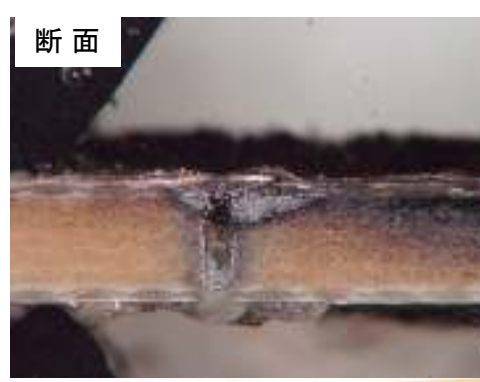
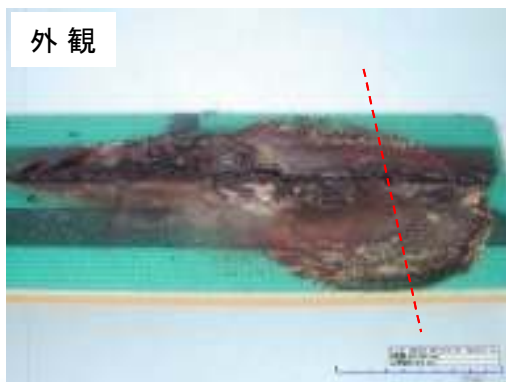
トイレ用洗浄剤の
滴下で発火した
№1 紙・フェノール基板
FR-1
(AC100V)



エアコン用洗浄剤1の
滴下で発火した
№2 ガラス・エポキシ基板
FR-4
(AC100V)



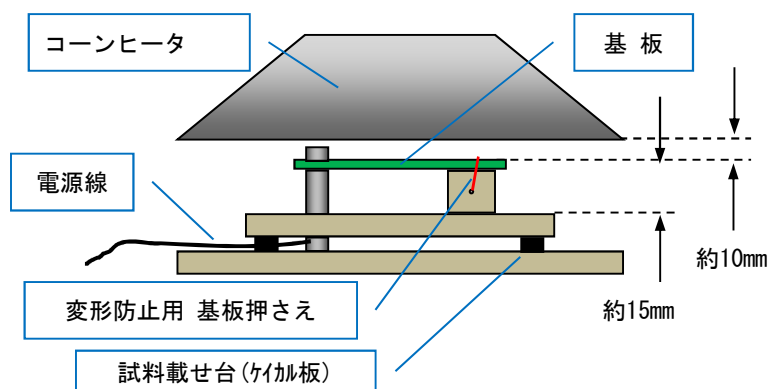
トイレ用洗浄剤1の
滴下で発火した
№3 紙・ガラス・エポキシ
CEM-1
基板 (AC100V)



4.3 レジスト処理を施した基板を用いた外火被熱サンプルの作製

試料	レジスト	印加電圧	電流制限	銅箔間の距離	熱源	加熱条件
No.1~4	あり	AC100V	2A	4mm	ISO 5657 「放射熱源を使用した 建築材の発火性」 試験機用 コーンヒータ	試料表面での温度が400°C以上となるように設定。 ヒータが所定の温度に達したのち、試験片をヒータ下に 置き、加熱する。 短絡、発火しない場合、最大20分まで加熱するが、加熱 中に発火して端子部近傍まで延焼した時点で終了とする。
		DC40V		2mm		

実験装置図



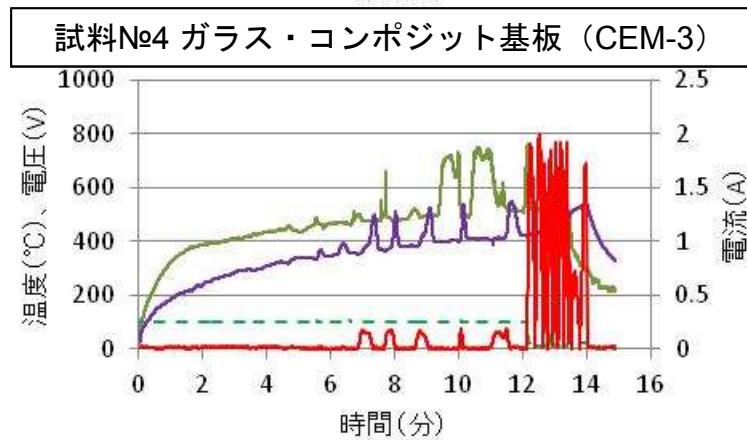
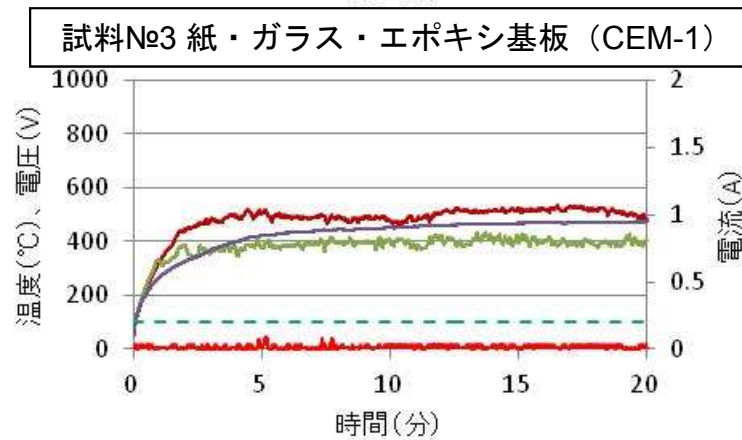
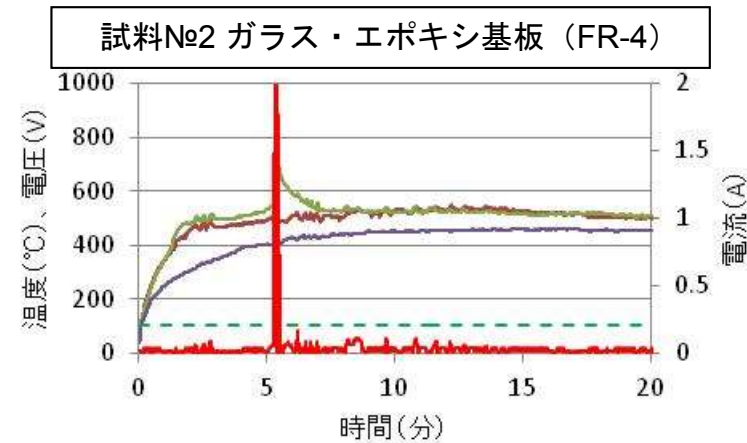
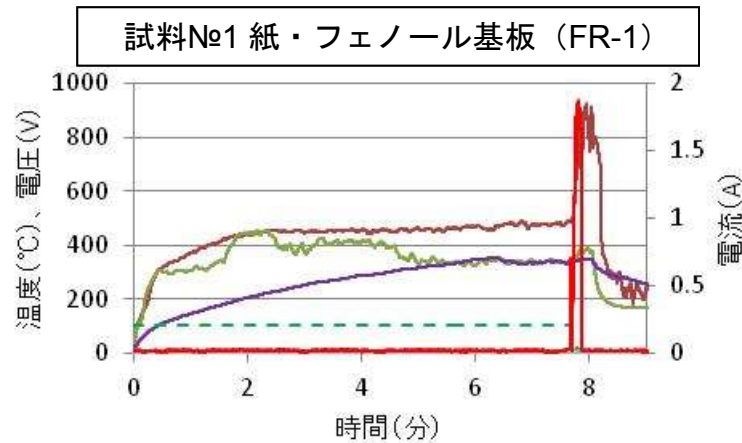
実験装置 写真






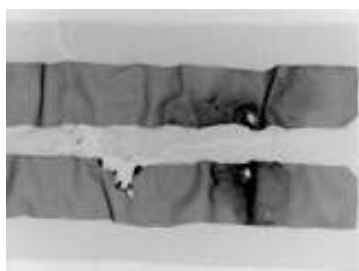

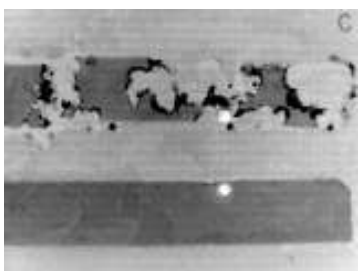




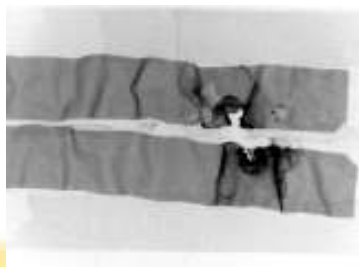
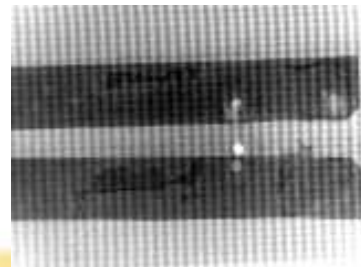
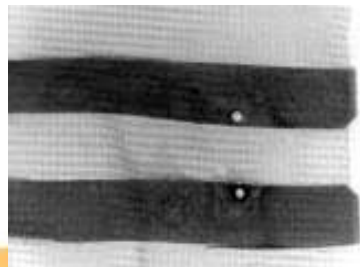
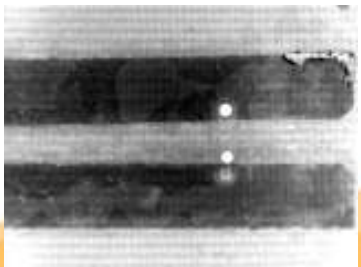
実験結果-1 実験時の現象及び経過

試料			銅箔間で短絡が生じた実験の回数及び加熱時間					
			AC100V			DC40V		
No.	基板	記号	短絡が生じた実験の回数 / 実験回数	絶縁破壊後の現象	加熱時間	短絡が生じた実験の回数 / 実験回数	絶縁破壊後の現象	加熱時間
1	紙・フェノール	FR-1	2 / 2	発火、延焼	8分、10分	2 / 2	赤熱、発火	約10分
2	ガラス・エポキシ	FR-4	2 / 2	発火、赤熱	20分	2 / 3	赤熱	20分
3	紙・ガラス・エポキシ	CEM-1	0 / 2	—	20分	0 / 2	—	20分
4	ガラス・コンポジット	CEM-3	1 / 3	発火、赤熱	14分、20分	2 / 2	赤熱	15~16分

— 基板左端 — 基板中央 — 基板右端 - - - 電圧 — 電流 (参考)



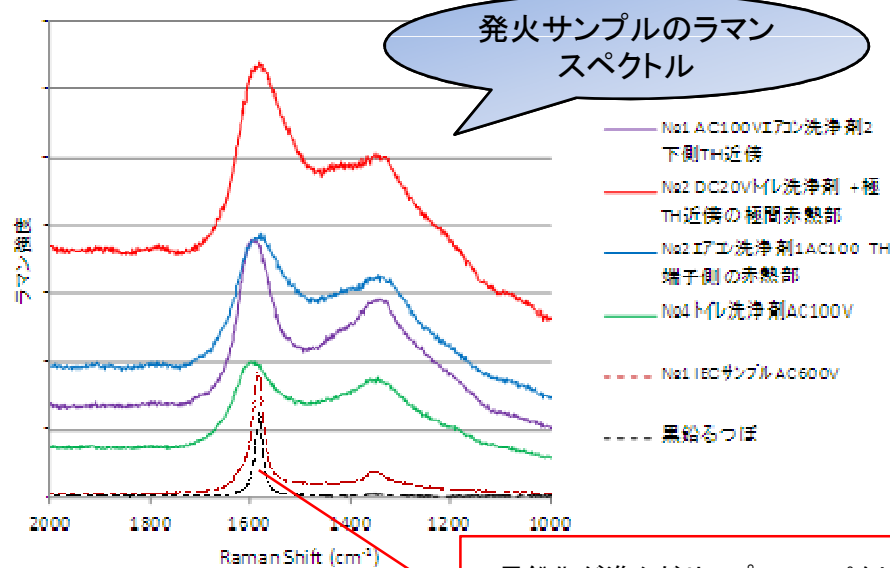
実験結果-2 輻射熱による外火加熱実験で生じた痕跡

	№1 紙・フェノール (FR-1)	№2 ガラス・エポキシ (FR-4)	№3 紙・ガラス・エポキシ (CEM-1)	№4 ガラス・コンポジット (CEM-3)
AC100V	 <p>銅箔の波打ち</p>		 <p>1点も短絡しなかつた輻射熱サンプル</p>	 <p>輻射熱サンプルの裏面</p>
				
DC 40V				
				

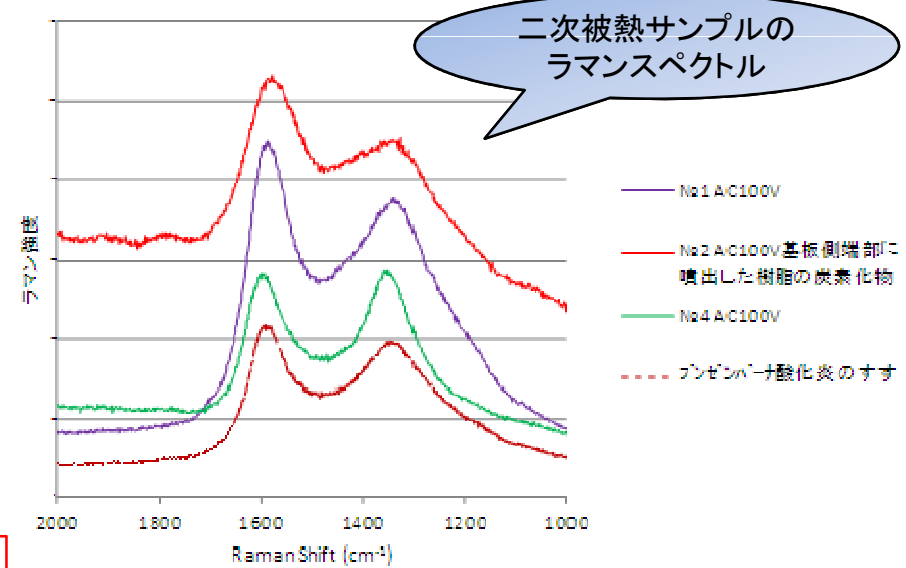
5. サンプルに生じた炭素化物のラマン分光分析

・ラマン分光分析による黒鉛化の評価については、導回路が形成された直後や発火直前に電圧を遮断したサンプルなど、一部からは黒鉛化が進んだことをうかがわせるスペクトルが得られたが、一連の発火サンプル及び外火被熱サンプルからはそうしたスペクトルは得られなかった。

ラマン分光分析装置



黒鉛化が進んだサンプルのスペクトル
1580cm⁻¹付近のピークが鋭く伸び、
1380cm⁻¹付近のピークが低くなる。
この二つのピークの強度比から、黒鉛化
度を評価する手法が知られている。



6. その他の実験（参考）

(1) 電流制限の代わりに電流ヒューズを挿入した発火実験

試料			実験条件					実験結果					備考
No.	基板	記号	レジスト処理	銅箔間の距離 (mm)	印加電圧	滴下物	ヒューズ容量 (A)	破壊までの滴下数	ヒューズが溶断した実験の回数 / 実験回数	発火が観察された実験の回数 / 実験回数			
1	紙・フェノール	FR-1	なし	4	AC 100V	2%NH ₄ Cl	2	29	1 / 1	0 / 1	試料点数不足により1点のみ実施		
							5	42~49	0 / 3	3 / 3			
							10	34~56	0 / 3	3 / 3			
2	ガラス・エポキシ	FR-4					2	2~3	3 / 3	0 / 3			
							5	2~3	1 / 3	2 / 3			
							10	2~16	0 / 3	3 / 3			
3	紙・ガラス・エポキシ	CEM-1					2	4~5	3 / 3	0 / 3			
							5	4~9	0 / 3	3 / 3			
							10	7~8	0 / 3	3 / 3			
4	ガラス・コンポジット	CEM-3					2	26~41	3 / 3	0 / 3			
							5	32~84	0 / 3	3 / 3			
							10	45~50	0 / 3	3 / 3			

(2) 電流制限の代わりに10Aヒューズを挿入した状態での輻射熱による加熱実験（レジストあり）

試料			銅箔間で短絡が生じた実験の回数及び加熱時間									
			AC100V					DC40V				
No.	基板	記号	銅箔間の距離	短絡が生じた実験の回数 / 実験回数	絶縁破壊後の現象	10Aヒューズが溶断した実験の回数	加熱時間	銅箔間の距離	短絡が生じた実験の回数 / 実験回数	絶縁破壊後の現象	10Aヒューズが溶断した実験の回数	加熱時間
1	紙・フェノール	FR-1	4mm	3 / 3	発火	2	8分~11分	2mm	2 / 3	赤熱、発火	1	8.5~20分
2	ガラス・エポキシ	FR-4		2 / 2	発火、赤熱	0	7、20分		2 / 2	赤熱	0	8~20分
3	紙・ガラス・エポキシ	CEM-1		0 / 2	—	—	20分		0 / 2	—	—	20分
4	ガラス・コンポジット	CEM-3		0 / 2	—	—	20分		2 / 3	赤熱	0	11、20分

7. まとめ

7.1 基材ごとの特徴～レジスト処理していない基板に対する2%塩化アンモニウム水溶液滴下実験

<実験結果>

- ・紙・フェノール及び紙・ガラス・エポキシ基板では最低でDC10Vまで、ガラス・エポキシ及びガラス・コンポジット基板では最低DC20Vまで発火するものがあった。
- ・ガラス・コンポジット基板以外のものでは、DC2.5Vまで、かすかに赤熱、発光するものがあった。

7.2 滴下付着物による発火実験と外火加熱サンプルの痕跡作製実験

- ・エアコン洗浄剤、トイレ洗浄剤は2%塩化アンモニウム水溶液よりも少ない滴下で発火した。

<No.1 紙・フェノール(FR-1)>

- ・紙・フェノール基板の発火サンプルでは銅箔間に穴があき、輻射熱による加熱で短絡したサンプルには穴あきは生じなかった。
- ・外火加熱サンプルでは基材が収縮し、銅箔には波打ちが生じた。

<No.2 ガラス・エポキシ(FR-4)>

- ・発火実験で絶縁破壊後、激しく燃焼したサンプルには繊維状の炭素化物が見られ、赤熱したサンプルでは裏面でガラスクロスが白化していた。
- ・外火加熱実験で短絡したサンプルに繊維状の炭素化物は生じなかった。

<No.3 紙・ガラス・エポキシ(CEM-1)>

- ・紙・ガラス・エポキシ基板で発火、赤熱したサンプルには、基材のガラスクロスが破れたものがあった。
- ・外火加熱実験では銅箔の短絡は生じなかった。

<No.4 ガラス・コンポジット(CEM-3)>

- ・No.2のガラス・エポキシ基板同様、発火実験で絶縁破壊後、激しく燃焼したサンプルには繊維状の炭素化物が見られた。また、赤熱したサンプルには裏面で基材のガラスクロスの白化が生じ、穴あきを生じたものもあった。
- ・外火加熱実験で短絡したサンプルに繊維状の炭素化物は見られず、基材の穴あきも見られなかったが、赤熱部位の裏面でガラスクロスが白化していた。

<EDS元素分析、ラマン分光分析>

- ・発火後の発火部位周辺や炭素化物表面のEDS分析から、滴下物由来の元素を検出したものがあった。
- ・発火直後に実験を停止した紙・フェノール基板の炭化導電路の一部を除き、発火サンプル、外火サンプルのいずれからも黒鉛化が進んだことをうかがわせるスペクトルは得られなかった。

7.3 その他の実験

- ・電流制限抵抗の代わりに2A、5A、10Aのガラス管ヒューズを挿入して発火実験を行ったところ、10Aでは溶断したものはなく、5Aについてはガラス・エポキシ基板で3点中1点溶断したものがあつた。2Aは、すべての試料、実験で溶断した。
- ・輻射熱による加熱実験では、AC100V印加時の紙・フェノール基板で、3回の実験で短絡が生じ、うち2回で10Aヒューズが溶断し、DC40V印加時も3回中2回の実験で短絡し、うち1回でヒューズが溶断した。他の試料では短絡が生じないか、短絡しても10Aの電流ヒューズが溶断することはなかった。

発火のトリガのひとつである極間の絶縁破壊の要因は、導電性異物付着以外にも考えられるが、そこに生じる銅箔の熔融痕や基材の欠損などの観察のみから、異物付着によるトラッキングか、どのような物質が付着したか、又はトラッキング以外の要因によるものかを見分けるのは困難と思われる。

家電製品に用いられる基板に施されるパターンにはさまざまな形状。印加される電圧、安全装置の配置なども異なるほか、実際の事故品では、使用期間中の基板やレジストの劣化が起こり、事故発生後の被熱条件、焼損程度も異なる。今回観察された痕跡のみから発火部位か否かを特定することはできないが、焼損後の基板を観察する上でポイントとなる痕跡の特徴や、痕跡が生じる条件の一端は整理することができたと考える。

8. データの活用

- ・発火サンプル、輻射熱サンプルの痕跡の特徴を整理したサンプル集を作成している。