

X線CTによる電源コード短絡痕に生じる 気泡の三次元解析

製品安全センター
燃焼技術センター

今田 修二

< 説明内容 >

1. 調査の目的
2. 実施内容の概要
3. 短絡痕作製実験及び気泡データの取得
 - (1) 実験一・二次痕の作製
 - (2) 実験一・二次痕の作製
 - (3) 前処理
 - (4) CTデータの取得
 - (5) 気泡の検出方法
4. データの解析結果
 - (1) 解析対象サンプル及び計測結果の概要
 - (2) 最大気泡の体積率による解析
 - (3) 最大気泡の体積率に差が生じる要因について
5. まとめ

1. 調査の目的

電源コード短絡痕の一・二次痕識別については、これまでに断面組織に着目した手法を開発し、事故調査において活用してきたが、最終的な判断については「周辺情報を含む総合的な判断が必要」であり、調査の観点を増やす取組が必要である。

各種書籍で紹介されている溶融痕の内部に生じる気泡の大きさに着目し、溶融痕内部に生じた気泡の特徴をX線CTを用いて三次元的に捉えて解析し、作製条件との関係性を比較することにより、発火元特定のための解析手法としての有効性の検証を行う。

2. 実施内容の概要

(1) 実験一・二次痕作製実験

- ① 半断線、束線、手撚り線状態での断続通電による実験一次痕を作製する。
- ② バーナ火炎及び輻射熱による実験二次痕を作製する。

(2) 気泡データの収集

- ① 前処理
- ② 気泡の検出

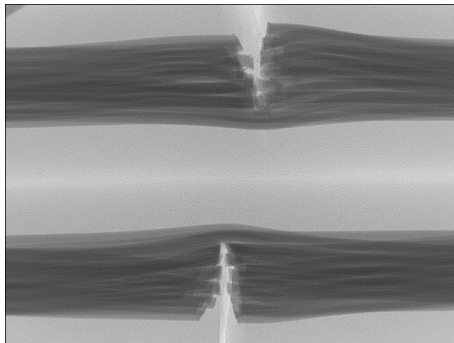
(3) 解析

3. 短絡痕作製実験及び気泡データの取得

(1) 実験一次痕の作製

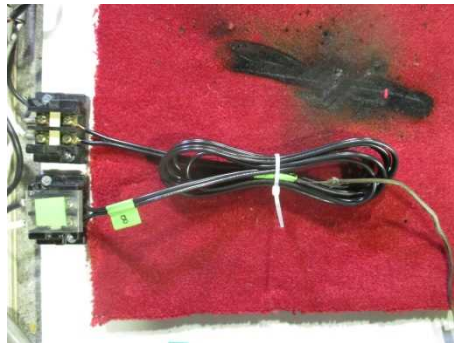
① 半断線

長さ約300mmの試料コードのほぼ中央に、カッターで芯線の一部を切断して、断続的に通電して発熱させ、コードを短絡させる。



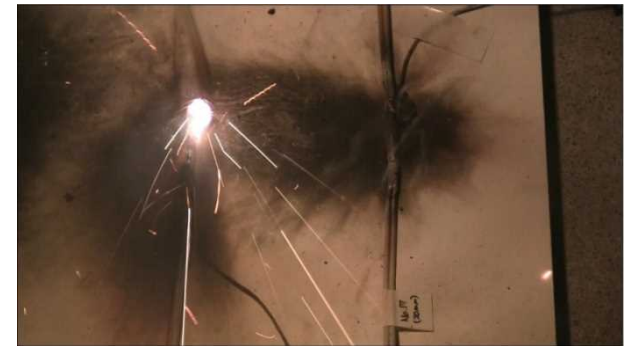
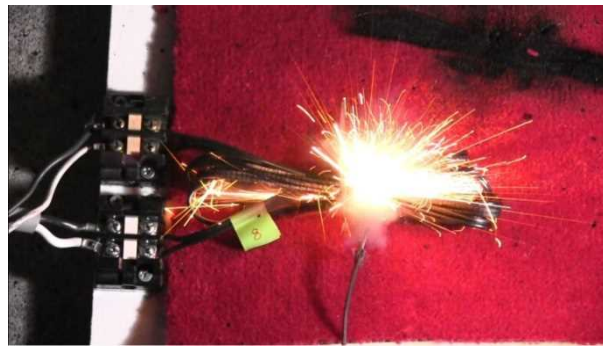
② 束線

長さ約2mの試料コードで直径15cmのループを作り、ループの中央をインシュロックで縛る。断続的に通電して、通電時の発熱、放熱不良により短絡させる。



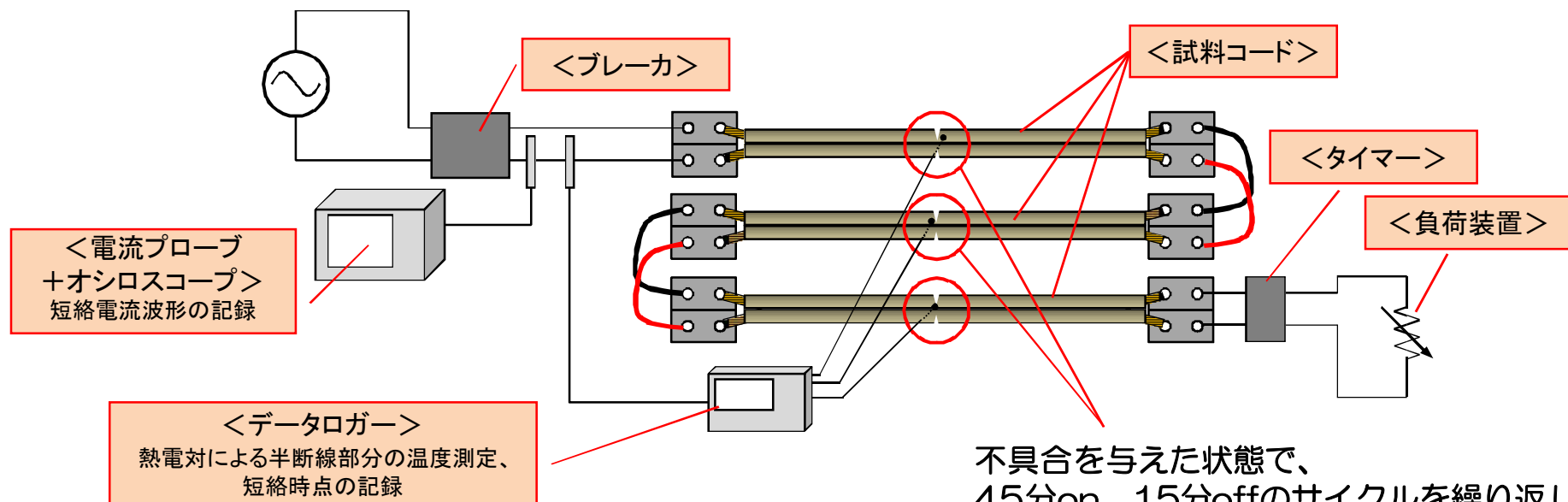
③ 手擦り線

長さ約30cmの試料コードを半分の長さに切断し、その先端部で約10mm被覆を除去する。露出させた芯線同士を重ねて接触させた状態でビニルテープを巻き、絶縁する。



実験は、0.75mm²のVFF及びHVFFのコードを用いて行った。

実験装置

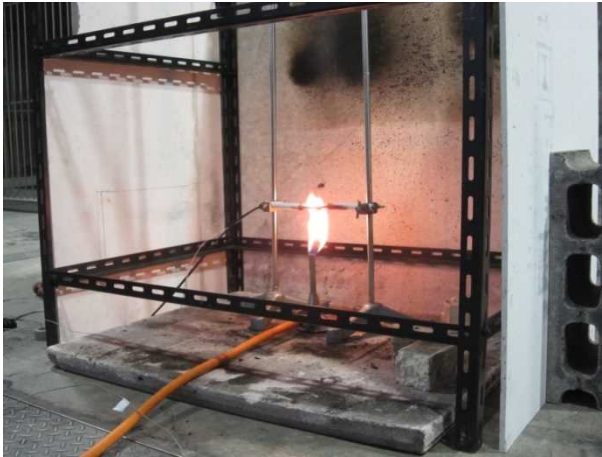


不具合を与えた状態で、
45分on、15分offのサイクルを繰り返し、
短絡させる（図は半断線実験の例）。

(2) 実験二次痕の作製

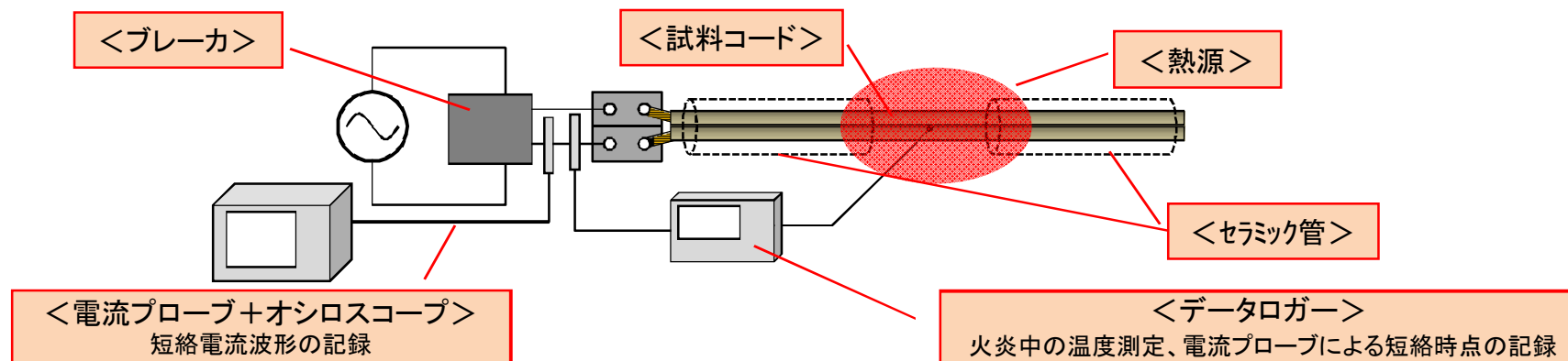
① バーナ火炎による加熱

電圧印加状態の試料コードをブレンザーの拡散炎で加熱する。



② 炭火輻射熱による加熱

電圧印加状態の試料コードを炭火の輻射熱により加熱する。

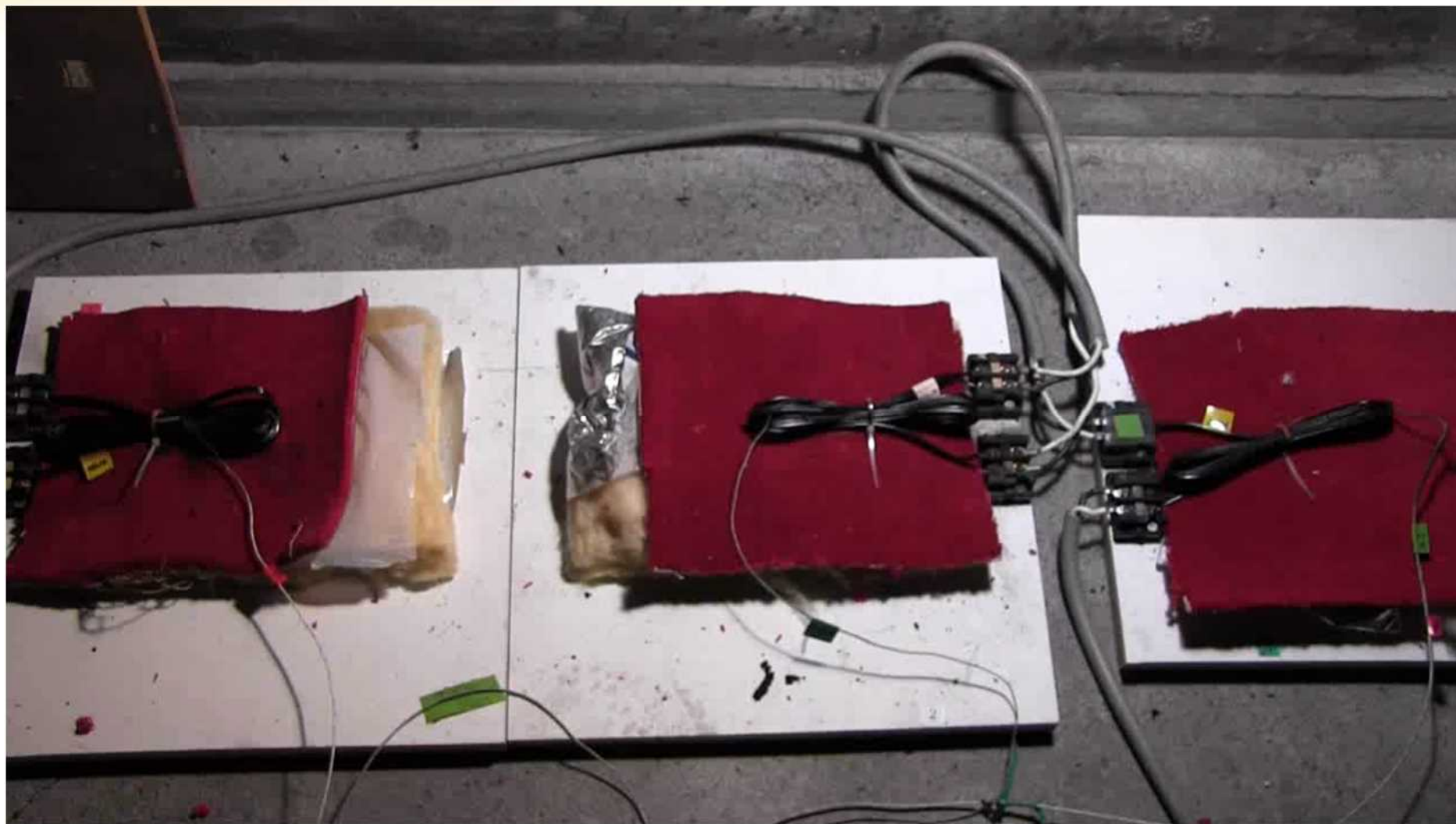


実験は、0.75mm²のVFF及びHVFFのコードを用いて行った。

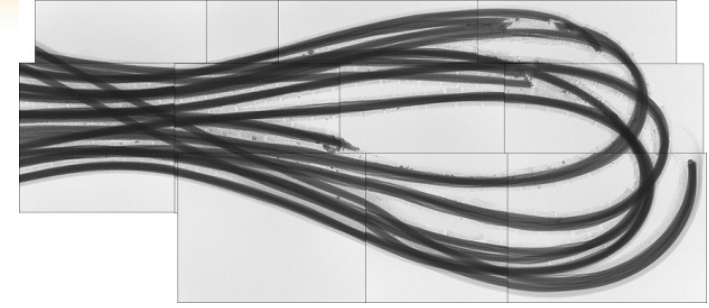
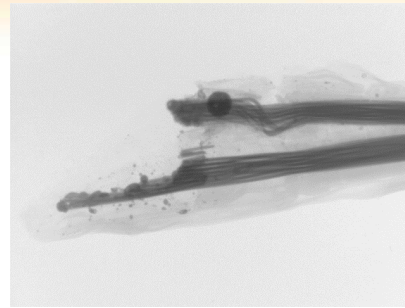
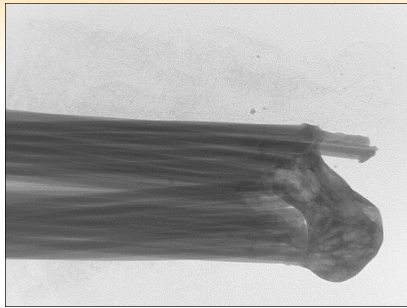
実験一次痕の作製実験
半断線コード短絡時の状況（例）



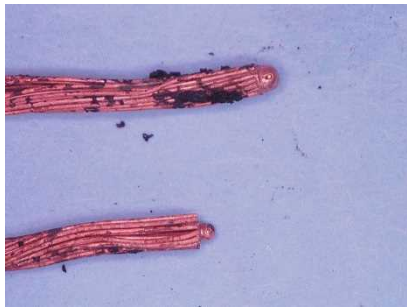
実験一次痕の作製実験
束線コード短絡時の状況（例）



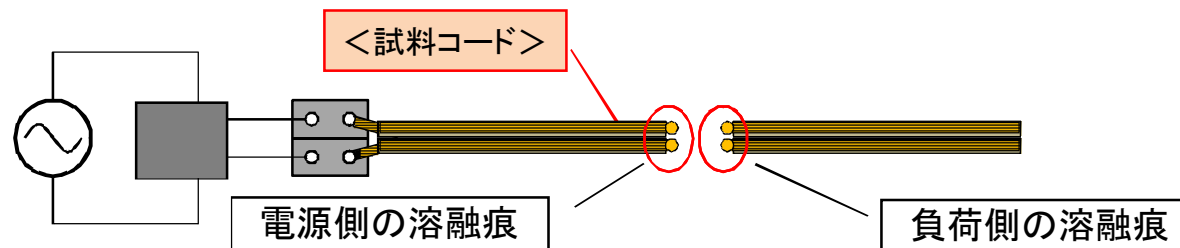
(3) 前処理—溶融痕の採取



軟X線写真(例)



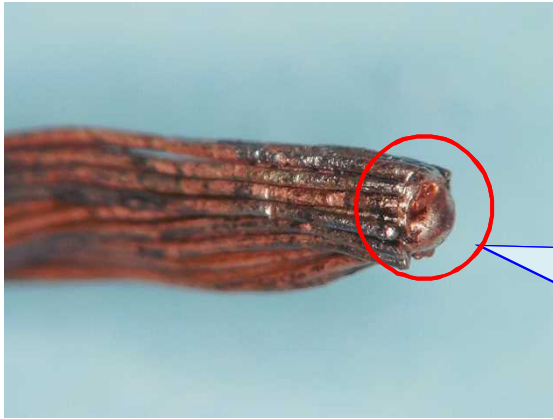
マイクروسコープ写真(例)



- ・半断線、手燃り線及び二次痕サンプルについては、溶融痕の生成位置電源側、負荷側に分けて採取した。
- ・形状、大きさにはさまざまなものがあり、ほとんど溶融痕を残していないものもあった。
- ・束線では複数箇所断線が生じたものや、片極で断線しているものもあり、短絡の順序、個々の溶融痕の生成状況は把握できなかった。

(4) CTデータの取得

溶融痕の切り出し



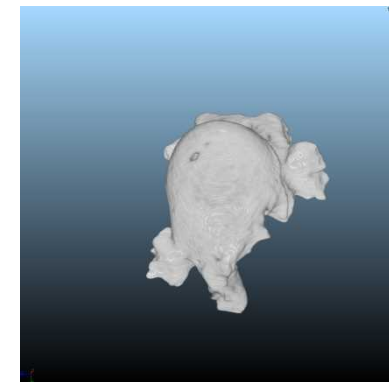
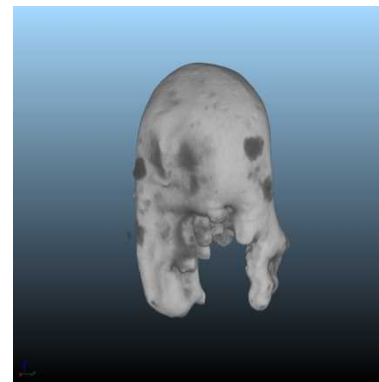
大小様々な溶融痕の気泡の大きさを比較するため、コードから溶融痕のみを切り出す。



CT観察のため、溶融痕のみを切り出したサンプル

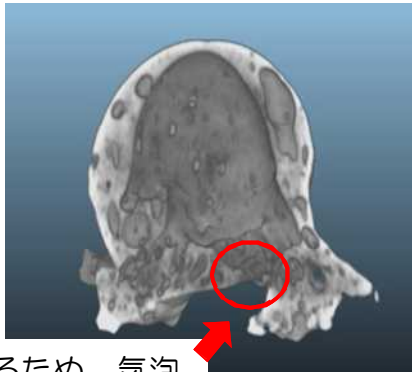


CTデータ取得

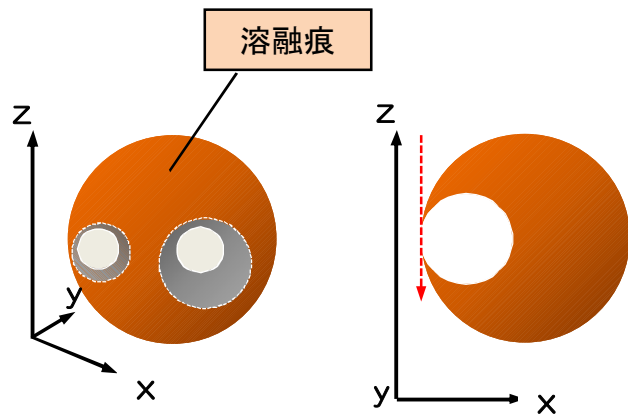


(5) 気泡の検出方法

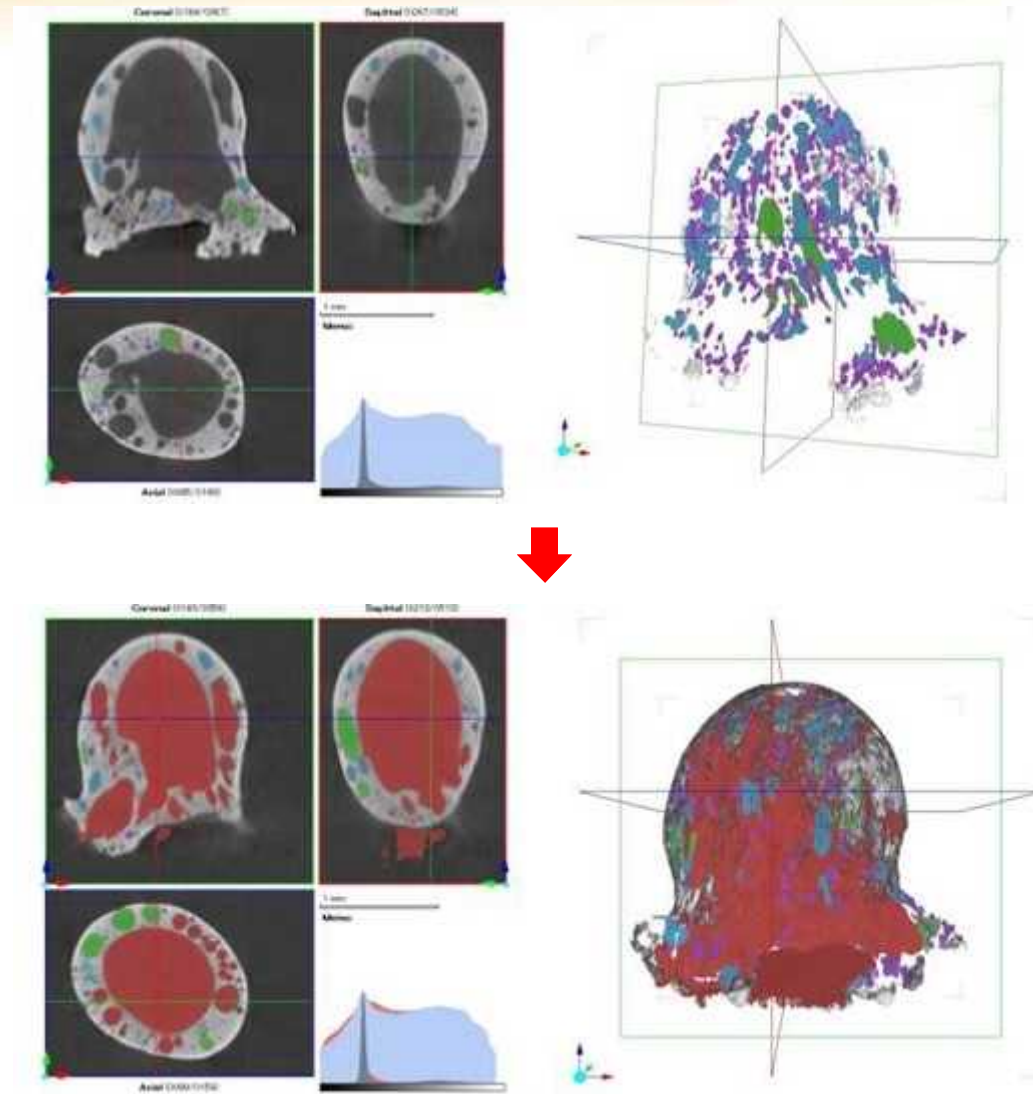
初期状態では、表面に開口部のある気泡を認識しない。



開口部があるため、気泡として認識していない。



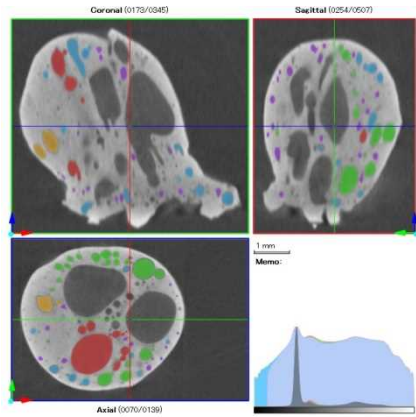
ソフトウェア上で、x,y,zの方向から、開口部をふさぐ操作を行い、認識させる。



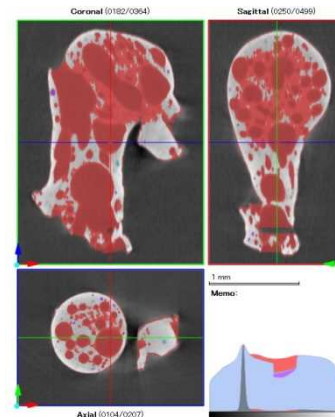
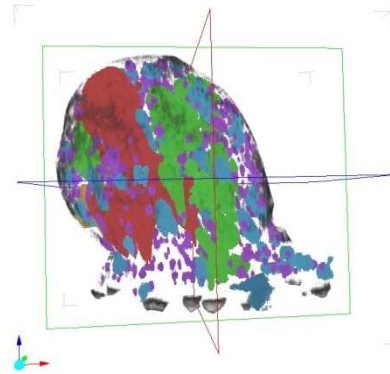
多数のサンプルを効率的にデータ取得するため、統一的な条件により気泡を検出した。

<解析対象サンプル>

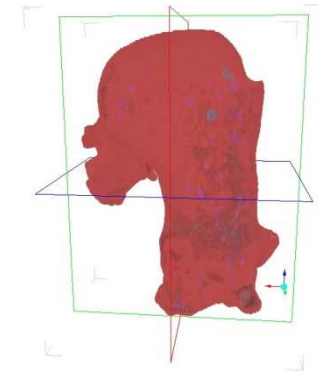
同じ検出条件でも見た目に著しく認識率の低いもの、過剰に認識したものがあつた。
それらのサンプルは、解析対象から除外した。



著しく認識率の低いサンプル(例)

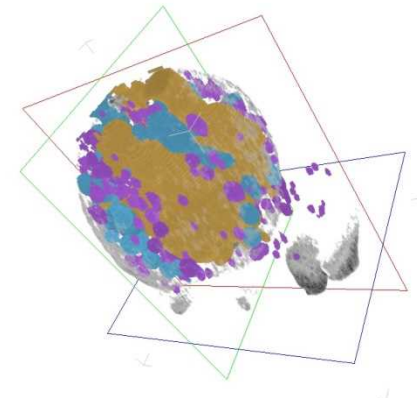
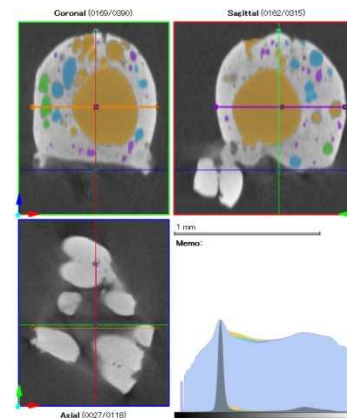
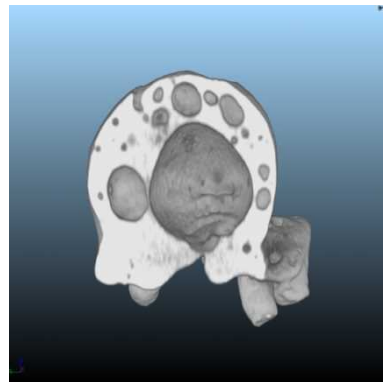
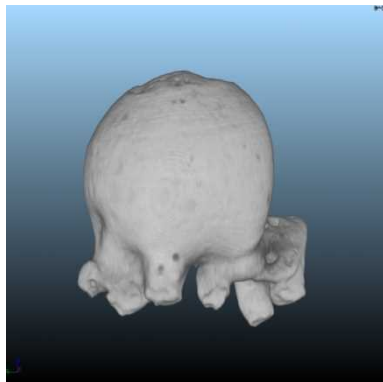


著しく過剰認識したサンプル(例)



<溶融痕の体積及び溶融痕の体積に対する気泡の体積率>

気泡がないものとして溶融痕の体積を求め、溶融痕体積に対して占める割合(体積率)を求めた。



4. データの解析結果

(1) 解析対象サンプル及び計測結果の概要

表1 解析対象サンプル

CT解析で異常検出したものを除く。

試料	実験サンプル					採取した 溶融痕 の数	気泡解析用CTデータ を取得したサンプル		
	作製条件	サンプル 数	実験時間	短絡時温度	サンプル 数		実験時間	短絡時温度	
実験 一次痕	VFF	半断線	10	5~215時間	163~271℃	19	15	5~215時間	170~271℃
	HVFF		10	9~694時間	室温~319℃	21	17	9~694時間	155~319℃
	VFF	手燃り線	5	38~502	110~258℃	10	8	38~502	153~258℃
	HVFF		5	249~759	室温~573℃	10	8	249~759	室温~573℃
	VFF	束線	4	358~692	室温~278℃	21	12	358~692	室温~278℃
	HVFF		5	403~1298	167~305℃	24	19	403~1298	167~305℃
実験 二次痕	VFF	バーナ 火炎	5	51~76秒	219~706℃	20	18	51~76秒	219~706℃
	HVFF		5	51~292秒	528~919℃	12	11	51~292秒	528~919℃
	VFF	炭火輻 射熱	5	約6分~約1時間50分	255~508℃	18	15	約6分~約1時間50分	255~508℃
	HVFF		5	約1分~約45分	236~478℃	21	16	約1分~約45分	236~478℃

表2 解析結果概要~溶融痕の大きさと検出した気泡の数及び大きさ

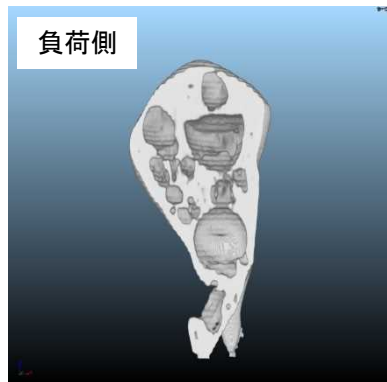
試料		解析結果概要					
		球換算したときの 溶融痕の直径(mm)		検出した 気泡の数	球換算したときの気泡 の直径(mm)		
		最小	最大		最小	最大	
実験 一次痕	半断線	VFF	0.581	2.448	62~1095	0.009	0.904
		HVFF	0.547	1.645	45~793	0.013	0.829
	手燃り線	VFF	0.526	1.639	53~710	0.015	0.625
		HVFF	0.479	1.831	47~460	0.003	0.648
	束線	VFF	0.549	1.972	38~240	0.013	0.801
		HVFF	0.350	3.254	48~616	0.014	1.563
実験 二次痕	バーナ火炎	VFF	0.731	1.927	62~1028	0.016	1.404
		HVFF	0.789	1.605	67~488	0.014	1.200
	炭火輻射熱	VFF	0.470	1.486	56~895	0.012	1.051
		HVFF	0.757	1.980	136~659	0.009	1.003

換算直径で約10μmのものから検出できた。

実験一次痕サンプル

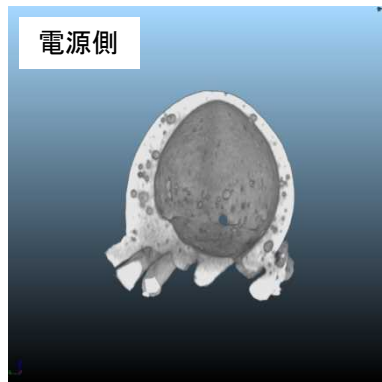
<半断線VFF>

実験時間: 約5時間10分
短絡直前温度: 170°C



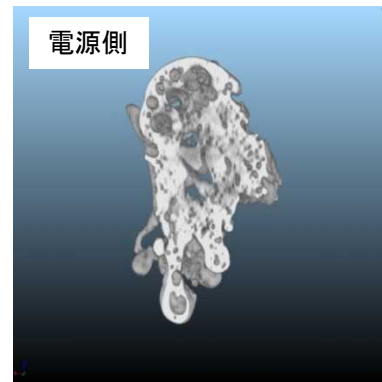
<半断線 HVFF>

実験時間: 約50時間
短絡直前温度: 176°C



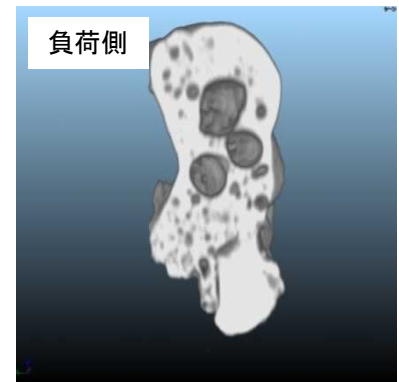
<手撚りVFF>

実験時間: 約346時間
短絡直前温度: 173°C



<手撚りHVFF>

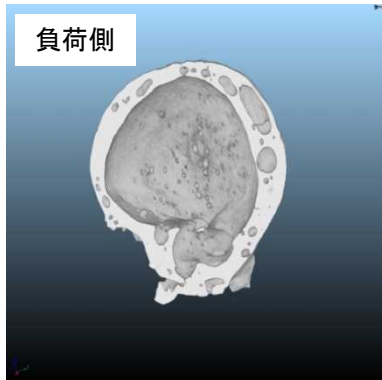
実験時間: 約107時間
短絡直前温度: 80°C



バーナ火炎による二次痕サンプル（例）

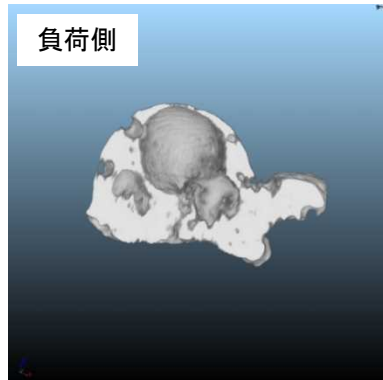
<VFF>

短絡までの加熱時間: 57秒
短絡時の温度: 710°C



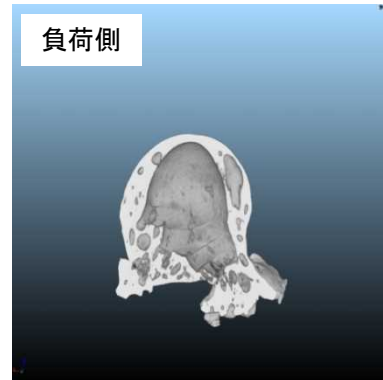
<VFF>

短絡までの加熱時間: 61秒
短絡時の温度: 659°C



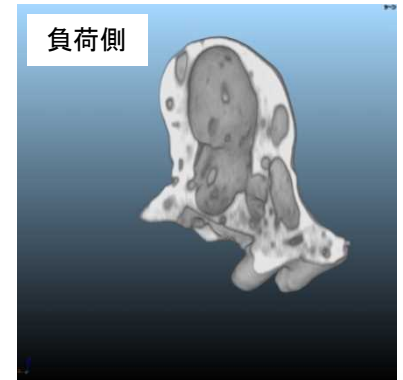
<HVFFサンプル>

短絡までの加熱時間: 51秒
短絡時の温度: 920°C

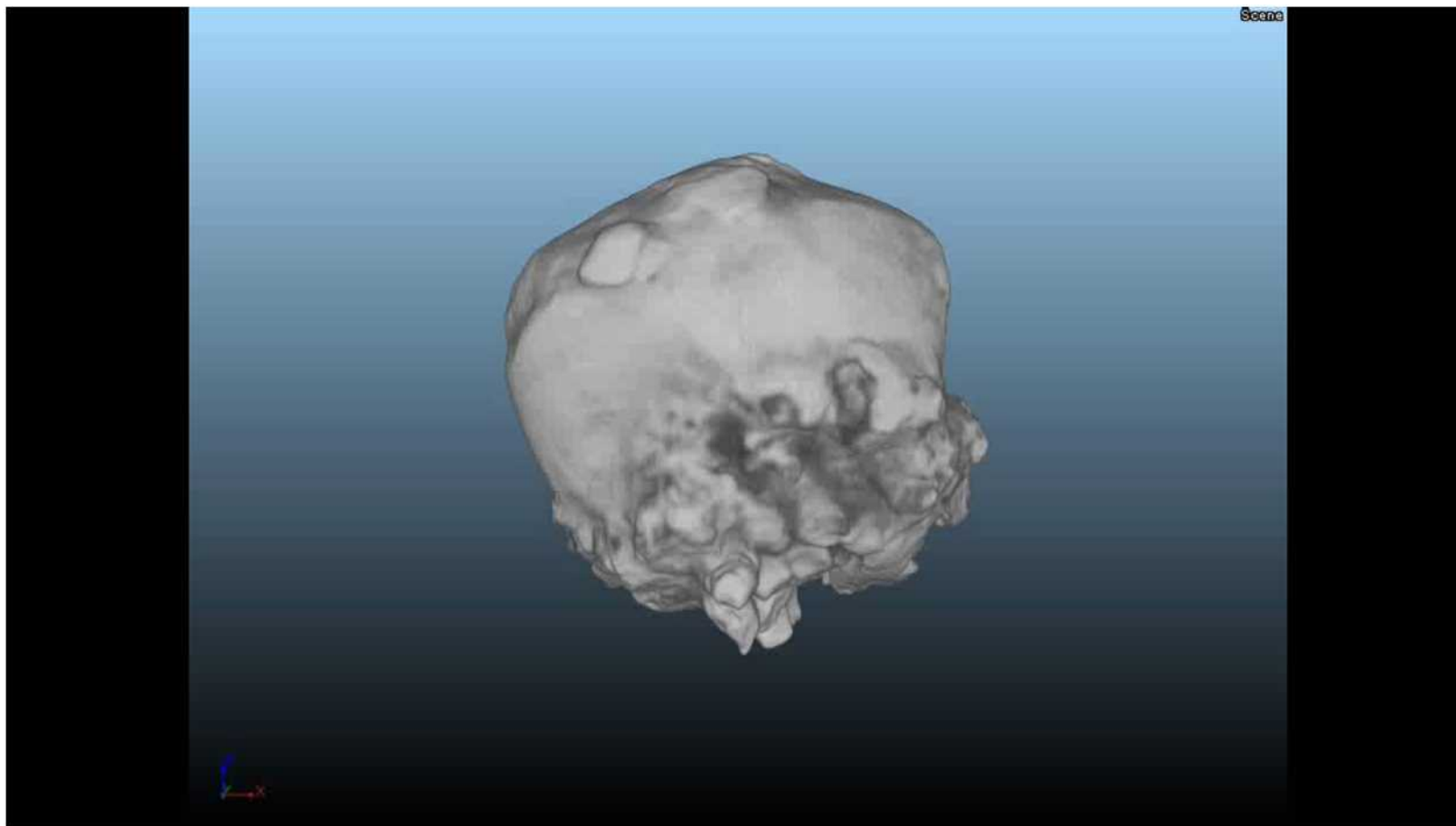


<HVFFサンプル>

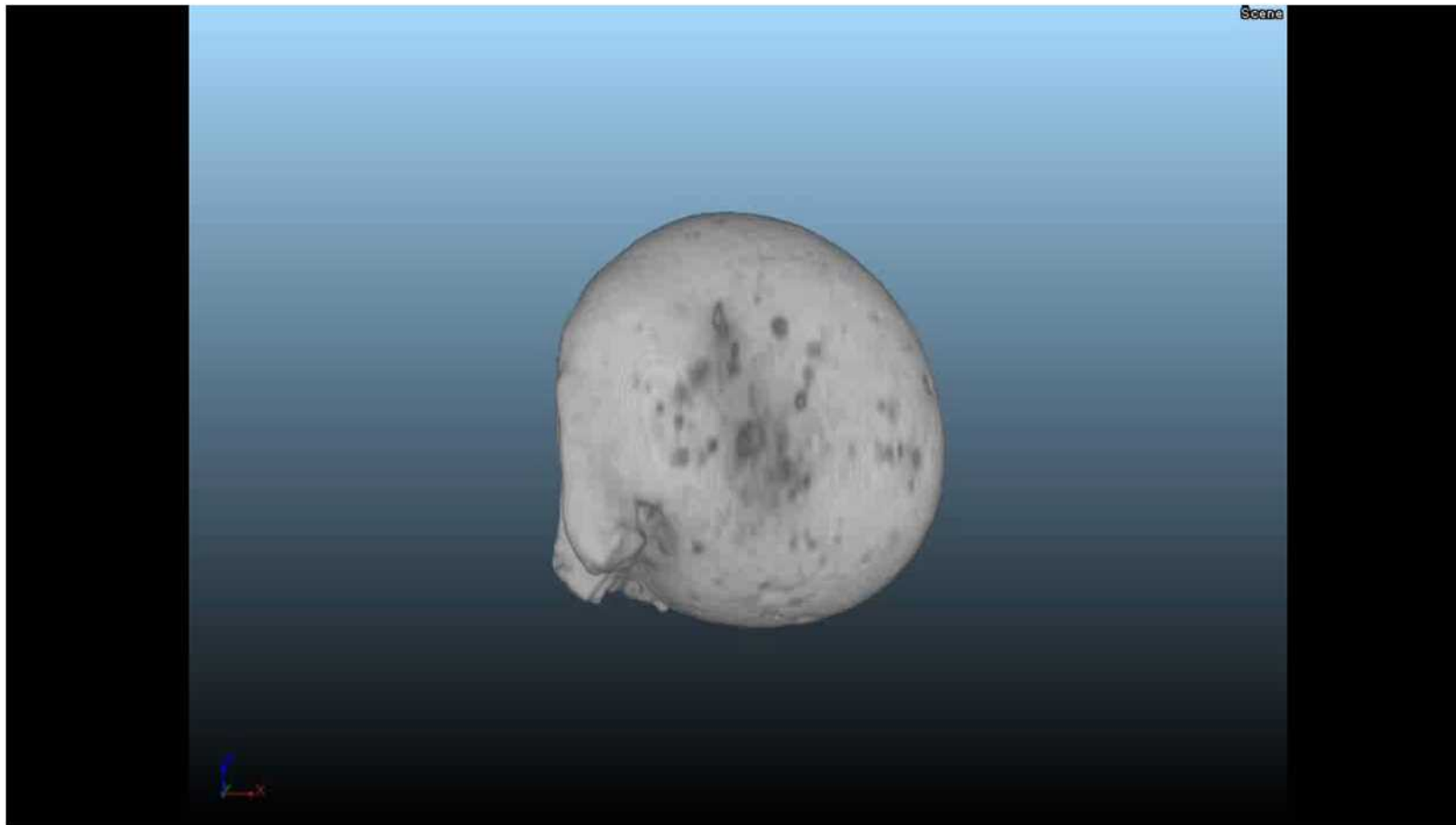
短絡までの加熱時間: 292秒
短絡時の温度: 760°C



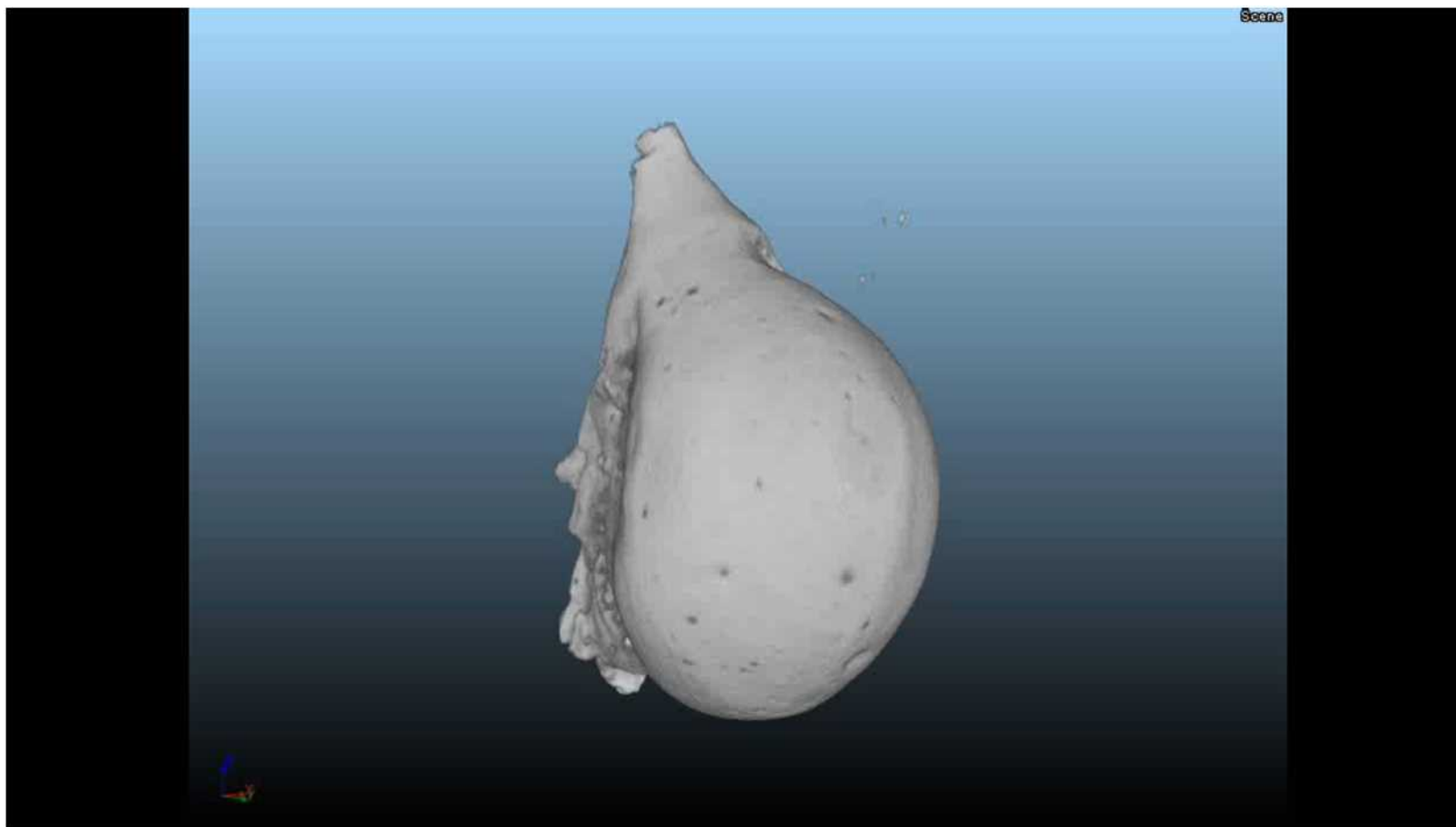
溶融痕のCT像（例1：半断線サンプル）



溶融痕のCT像（例2：束線サンプル）



溶融痕のCT像（例3：バーナ火炎二次痕）

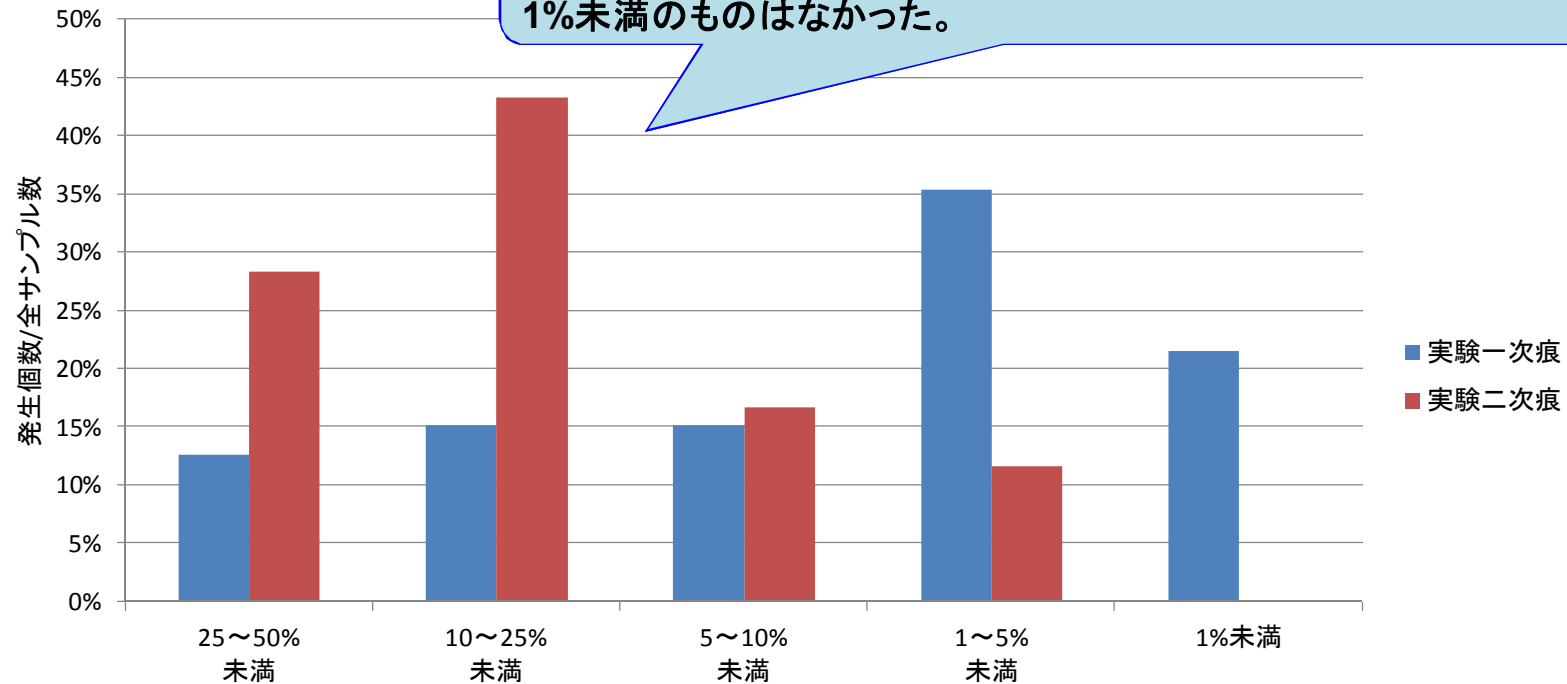


(2) 最大気泡の体積率による解析

表3 最大気泡の体積割合からみた発生率

サンプル	項目	25~50% 未満	10~25% 未満	5~10% 未満	1~5% 未満	1%未満
実験一次痕 (79個)	個数	10	12	12	28	17
	割合	12.7%	15.2%	15.2%	35.4%	21.5%
実験二次痕 (60個)	個数	17	26	10	7	0
	割合	28.3%	43.3%	16.7%	11.7%	0.0%

一次痕の最大気泡にも大きなものもあるが、小さい場合が多い。
二次痕の最大気泡には大きなものが多いほか、5%未満のものは少なく、
1%未満のものはなかった。

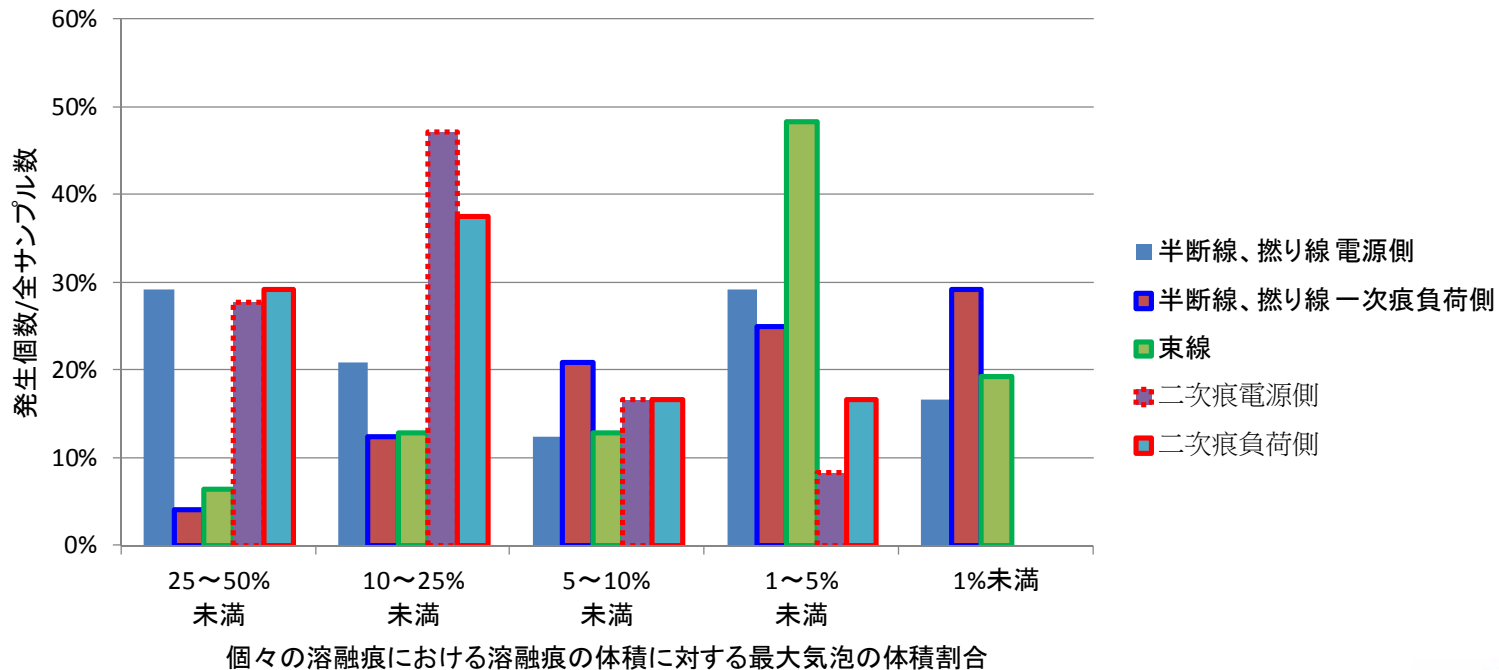


個々の溶融痕における溶融痕の体積に対する最大気泡の体積割合

実験一次痕でも、電源側では体積割合で25%以上の気泡が、二次痕と同程度の割合でみられた。負荷側では最大気泡が大きいものの割合が少なく、5%未満の小さいものの割合が大きい。

表4 最大気泡の体積割合別サンプル数（電源側と負荷側の別を加えたもの）

サンプル		項目	25~50% 未満	10~25% 未満	5~10% 未満	1~5% 未満	1%未満
実験一次痕 (半断線、撚り線48個)	電源側 (26個)	個数	7	5	3	7	4
		割合	26.9%	19.2%	11.5%	26.9%	15.4%
	負荷側 (22個)	個数	1	3	5	6	7
		割合	4.2%	12.5%	20.8%	25.0%	29.2%
実験一次痕 (束線31個)		個数	2	4	4	15	6
		割合	6.5%	12.9%	12.9%	48.4%	19.4%
実験二次痕 (60個)	電源側 (36個)	個数	10	17	6	3	0
		割合	27.8%	47.2%	16.7%	8.3%	0.0%
	負荷側 (24個)	個数	7	9	4	4	0
		割合	29.2%	37.5%	16.7%	16.7%	0.0%



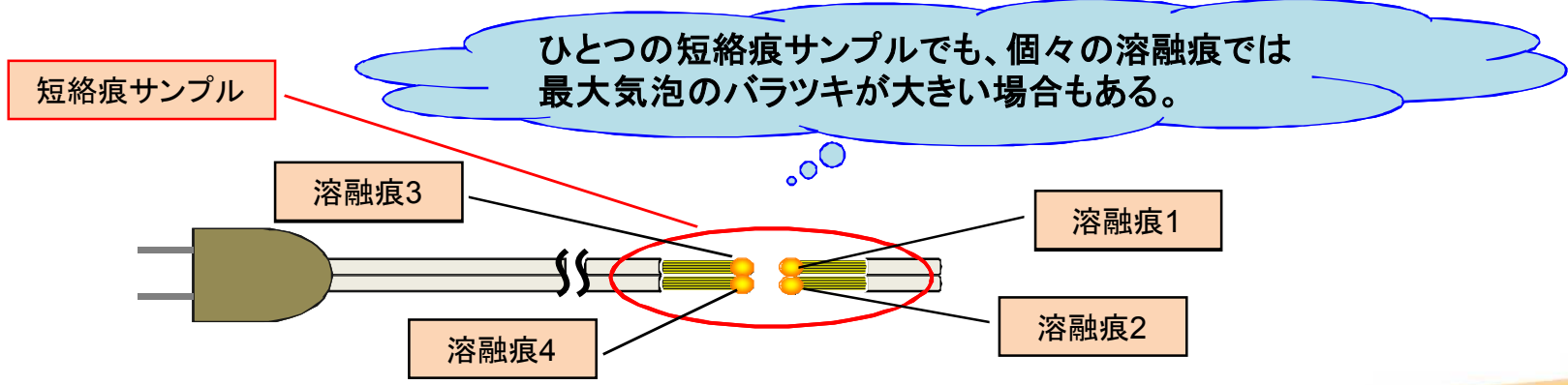
一つの短絡痕サンプルから採取した複数の溶融痕でみる個々の溶融痕に生じた最大気泡の大きさ

<比較的バラツキの小さいもの>

短絡痕サンプル	試料 (VVF/HVFF)	短絡時の 温度	採取位置 (電源側/ 負荷側 ほか)	溶融痕の 体積(mm ³)	体積割合
半断線	HVFF	200	電源側	0.238	6.3%
			負荷側	0.190	0.9%
手燃り	VFF	166	電源側	0.896	5.9%
			負荷側	0.076	13.2%
バーナー火炎	VFF	219	電源側	0.982	10.8%
			負荷側	0.277	27.1%
炭火輻射熱	VFF	255	電源側	0.826	13.1%
			負荷側	3.747	37.4%
炭火輻射熱	VFF	255	電源側	0.609	32.3%
			負荷側	0.229	18.0%
				0.054	22.9%

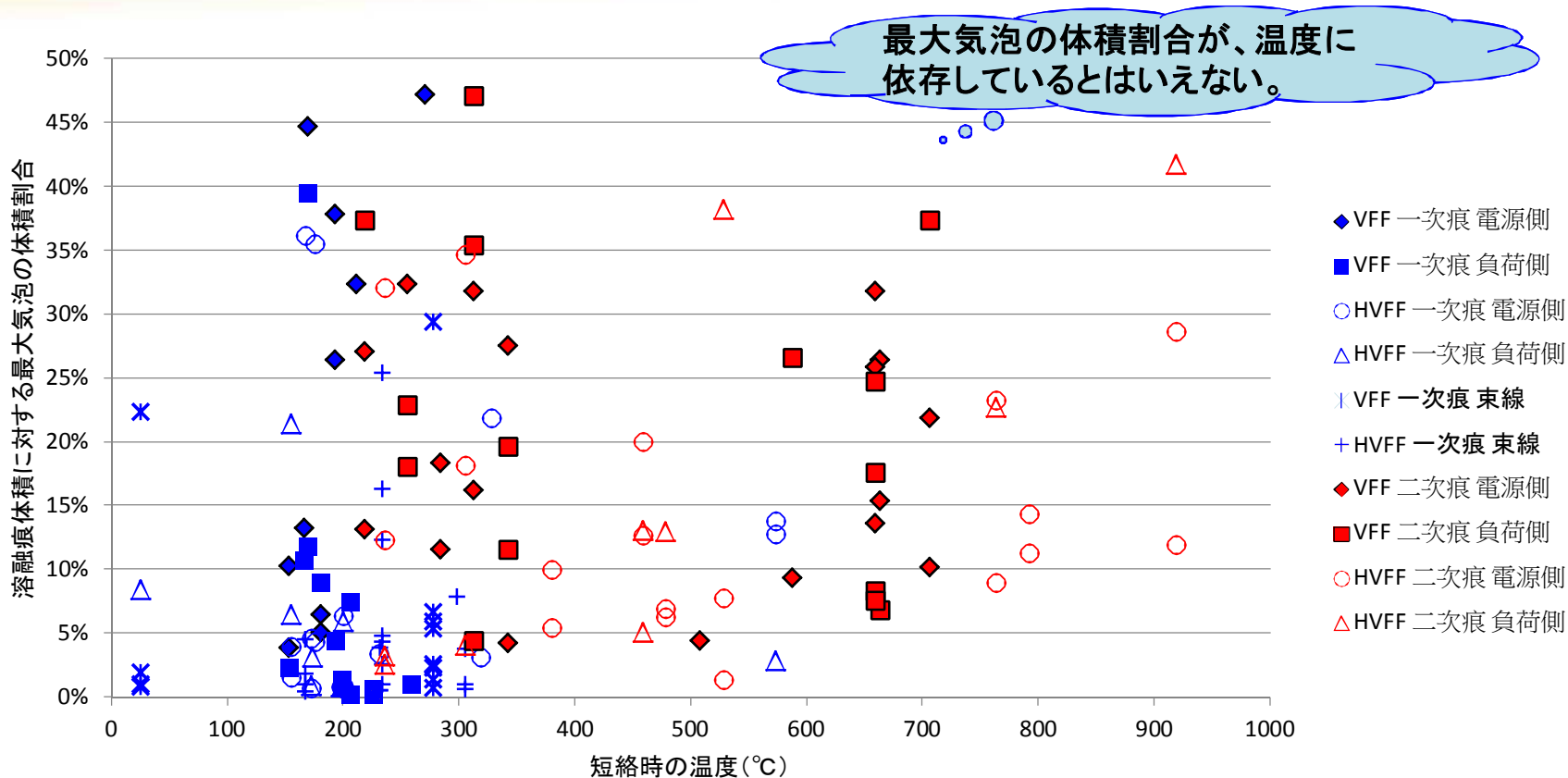
<比較的バラツキの大きいもの>

短絡痕サンプル	試料 (VVF/HVFF)	短絡時の 温度	採取位置 (電源側/ 負荷側 ほか)	溶融痕の 体積(mm ³)	体積割合
半断線	HVFF	155	電源側	2.331	4.0%
			負荷側	0.183	1.6%
手燃り	HVFF	573	電源側	0.324	21.4%
			負荷側	0.722	6.4%
手燃り	HVFF	573	電源側	0.058	13.8%
			負荷側	1.118	12.8%
バーナー火炎	VFF	659	電源側	0.399	2.8%
			負荷側	0.696	25.8%
バーナー火炎	VFF	659	電源側	0.204	31.8%
			負荷側	0.446	13.6%
バーナー火炎	VFF	659	電源側	0.299	24.7%
			負荷側	0.286	17.6%
バーナー火炎	VFF	659	電源側	0.652	8.3%
			負荷側	0.728	7.6%
炭火輻射熱	VFF	342	電源側	0.116	27.5%
			負荷側	0.451	4.3%
炭火輻射熱	VFF	342	電源側	0.344	19.6%
			負荷側	0.349	11.5%



(3) 最大気泡の体積率に差が生じる要因について

① 短絡時の温度と最大気泡の体積割合

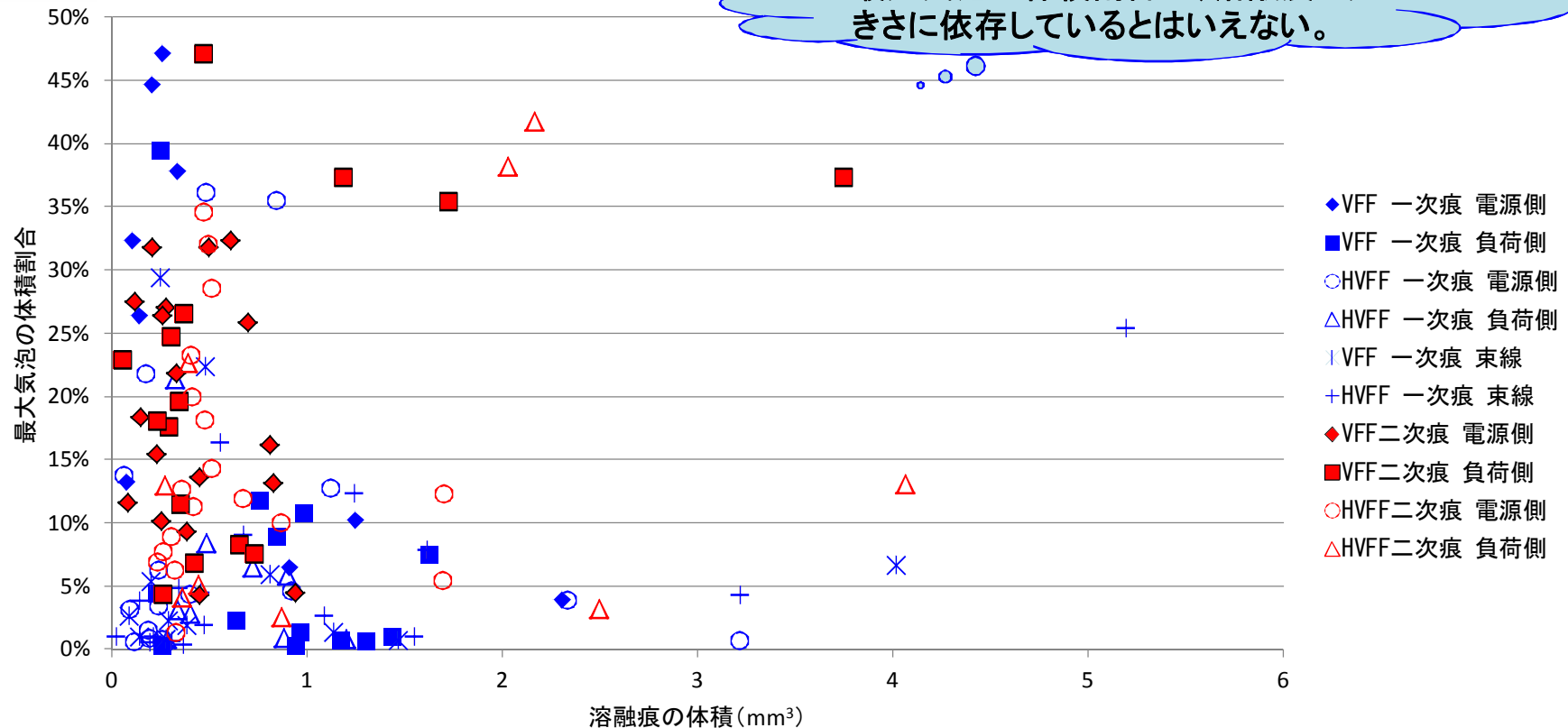


束線を含む全サンプルでの相関係数	
0.253	低い相関

一次、二次比較					
対象データ	相関係数	結果	痕跡部位の別	相関係数	結果
一次痕 (含 束線)	-0.001	相関なし	—	—	—
一次痕 (束線 除外)	0.001	相関なし	電源側	0.035	相関なし
			負荷側	-0.220	低い相関
二次痕	0.027	相関なし	電源側	-0.115	相関なし
			負荷側	0.202	低い相関

② 溶融痕の体積と最大気泡の体積割合

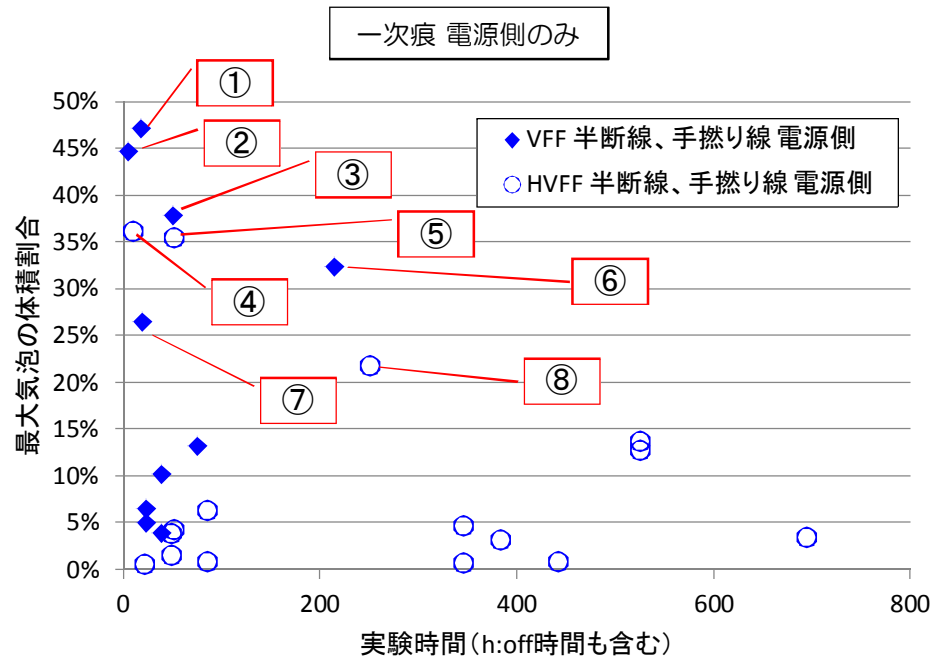
最大気泡の体積割合が、溶融痕の大きさに依存しているとはいえない。



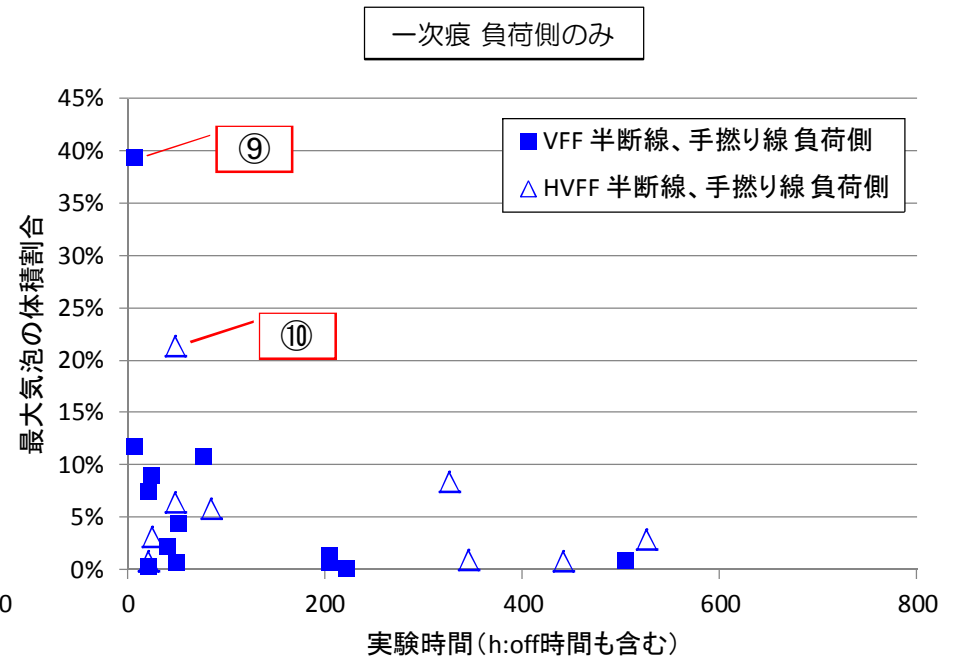
束線を含む全サンプルでの相関係数	
-0.050	相間なし

一次、二次比較					
対象データ	相関係数	結果	痕跡部位の別	相関係数	結果
一次痕 (含 束線)	-0.047	相間なし	—	—	—
一次痕 (束線 除外)	-0.221	低い相関	電源側	-0.254	低い相関
			負荷側	-0.334	低い相関
二次痕	0.170	相間なし	電源側	-0.197	相間なし
			負荷側	0.266	低い相関

④ 束線を除いた実験一次痕の作製時間と最大気泡の体積割合



番号	不具合	被覆	発生位置	実験時間 (h)	最大気泡の体積割合(%)	短絡時の状況
①	半断線	VFF	電源側	18	47.2	間欠
②	半断線	VFF	電源側	5	44.7	単発
③	手撚り	VFF	電源側	50.5	37.8	間欠
④	半断線	HVFF	電源側	9	36.2	単発(数波)
⑤	半断線	HVFF	電源側	50	35.5	間欠
⑥	半断線	VFF	電源側	215	32.3	間欠
⑦	半断線	VFF	電源側	19	26.4	単発(数波)
⑧	手撚り	HVFF	電源側	250	21.9	間欠

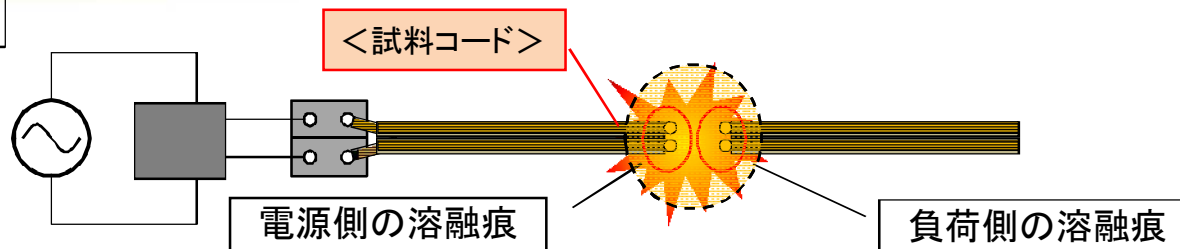


番号	不具合	被覆	発生位置	実験時間 (h)	最大気泡の体積割合(%)	短絡時の状況
⑨	半断線	VFF	負荷側	5	39.5	単発
⑩	半断線	HVFF	負荷側	48	21.4	単発

- ・電源側では、短絡までの時間が短いもの又は短絡時に間欠短絡したもの
- ・負荷側でも短絡までの時間が短いものに、体積割合が20%以上の大きな気泡が生じていた。

実験一次痕でも体積割合の大きなものが生じる要因（推定）

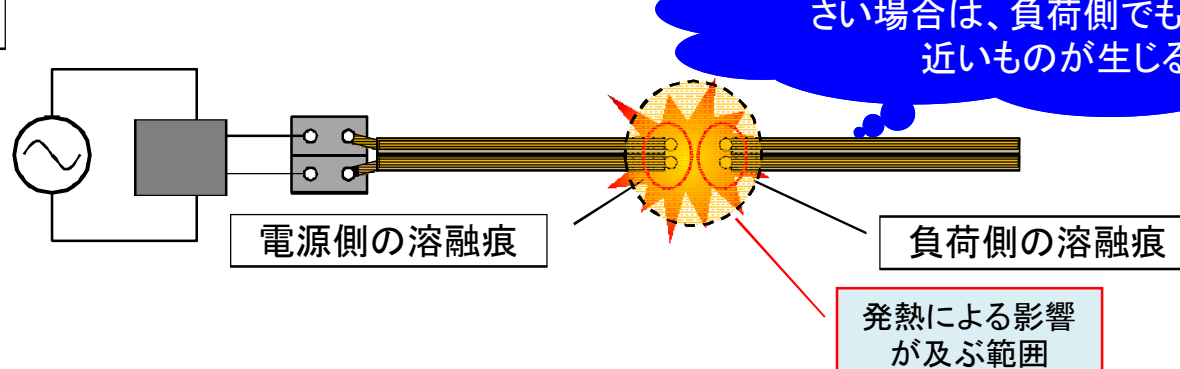
間欠的な短絡の場合



負荷側は最初に短絡した際の痕跡が残る。

電源側に短絡が続くことで素線の損傷が小さい部位に溶融痕が生じ、二次痕に近いものが生じる。

単発的な短絡の場合



実験時間が短く、素線の損傷が小さい場合は、負荷側でも二次痕に近いものが生じる。

5. まとめ

実験一次痕の溶融痕105個、実験二次痕の溶融痕71個のうち、CTによる気泡解析が可能と判断した一次痕79個、二次痕60個の気泡について、「個々の溶融痕に生じた最大の気泡の大きさ」で調べたところ

...

- 負荷側に生じた溶融痕で比較した場合、一次痕では小さな気泡を生じたものが多く、二次痕では大きな気泡の生じたものが多かった。
- 一次痕の負荷側でも、実験時間の短いものには、大きな気泡が生じていた。



- 気泡の大小に差が生じるメカニズムは明らかにできなかったが、
- X線CTにおいても短絡痕及びその内部に生じた気泡の解析は概ね可能。
 - 負荷側の溶融痕に大きな気泡が生じていない場合は、一次痕の可能性が考えられる。
 - 「気泡が大きい」ことのみで二次痕との断定はできない。
 - 束線状態で短絡し、複数箇所で溶断したようなものについては、適用できない。

など、解析結果の考え方に関する知見が得られた。

ご清聴ありがとうございました