

原子力規制委員会原子力規制庁長官官房参事官殿

# 平成26年度海水及び ホウ酸注入影響評価試験

成果報告書

平成27年3月

一般財団法人 電力中央研究所

原子力技術研究所



**CRIEPI**

---

**Central Research Institute of  
Electric Power Industry**

## 目次

1. 緒言 .....	1
2. 既往研究の調査 .....	2
2.1. 無機物の水に対する溶解度 .....	2
2.2. 硫酸カルシウムの溶解度 .....	2
2.3. 塩化ナトリウムとホウ酸の混合溶液の溶解度 .....	2
2.4. ホウ酸塩とメタホウ酸塩の関係 .....	7
2.4.1. 溶液中のメタホウ酸の分析方法 .....	7
2.4.2. ホウ酸からメタホウ酸の生成 .....	7
2.4.3. ホウ酸塩の特性 .....	9
2.4.4. メタほう酸塩の性質と分析 .....	12
2.5. ホウ酸塩水の沸騰濃縮試験における知見 .....	15
2.5.1. 沸騰濃縮における析出塩の性状 .....	15
2.5.2. ホウ酸溶液の物性 .....	17
2.5.3. ホウ酸溶液の物性 .....	21
2.6. 多孔質体のプール沸騰熱伝達 .....	25
2.6.1. ハニカム多孔質体 .....	25
2.6.2. 微細構造を有する沸騰伝熱促進面 .....	26
2.6.3. セラミックのクエンチ挙動 .....	28
2.6.4. 金属の急冷 .....	29
2.6.5. 人工キャビティによる沸騰挙動 .....	29
2.6.6. 硫酸カルシウムの析出の影響 .....	30
2.6.7. スケール生成による熱伝達係数の時間変化 .....	33
2.6.8. プール沸騰挙動に及ぼすパーティクルの影響と可溶塩の影響 .....	39
3. 燃料バンドル除熱性能 .....	44
3.1. 長尺バンドル試験設備の洗浄・廃液機器の設計製作 .....	44
3.2. 短尺バンドル試験装置 .....	57
3.2.1. 基本仕様 .....	57
3.2.2. 装置概要 .....	57
3.2.3. 装置詳細仕様 .....	58

3.2.4.	装置改造部分の概要 .....	64
3.2.5.	X線 CT 撮影設備 .....	72
3.2.7.2.	試験溶液 .....	80
3.2.7.4.	ICP-MS による溶液分析 .....	83
3.2.7.5.	塩析出量の推定方法 .....	84
3.2.7.6.	洗浄効果の確認 .....	86
3.3.	短尺バンドル内での沸騰濃縮試験結果 .....	89
3.3.1.	試験結果の鳥瞰 .....	89
3.3.2.	塩析出量の可視化 .....	95
3.3.3.	沸騰濃縮溶液の分析結果 .....	138
4.	クラスト冷却特性 .....	144
4.1.	クラスト中クラック伝熱特性試験装置 .....	144
4.1.1.	装置構成 .....	144
4.1.2.	補給水供給機器 .....	145
4.1.3.	水槽 .....	145
4.1.4.	模擬クラスト多孔質体 .....	149
4.1.5.	伝熱面の構造 .....	152
4.1.6.	計測条件 .....	154
4.1.7.	装置の組立構造 .....	154
4.2.	試験手順 .....	157
4.3.	多孔質体の特性分析 .....	160
4.3.1.	熱伝導率 .....	160
4.3.1.1.	計測原理 .....	160
4.3.1.2.	測定条件 .....	160
4.3.2.	熱伝導率の測定結果の結果 .....	162
4.3.3.	気孔率 .....	162
4.4.	プール沸騰伝熱試験 .....	165
4.4.1.	クラスト中クラック形状の影響 .....	165
4.4.2.	クラストポロシティの影響 .....	166
4.4.3.	クラストを構成する粒子径の影響 .....	167
4.4.4.	溶液種類の影響 .....	168

5. まとめ .....	170
--------------	-----

## 表目次

表 2-1	無機物の水に対する溶解度.....	3
表 2-2	塩化ナトリウムとホウ酸の溶解度.....	5
表 2-3	ホウ酸の特徴 [7] [8] .....	8
表 2-4	ほう酸塩の特徴 [8] .....	10
表 2-5	各種メタホウ酸塩の物性.....	13
表 2-6	ホウ酸注入試験における析出物の分類と事例.....	16
表 2-7	沸騰濃縮試験の概要と知見の整理.....	19
表 2-8	ホウ酸の析出挙動の異なる試験結果の比較.....	23
表 2-9	沸騰熱伝達と可視観察結果.....	34
表 3-1	短尺バンドル試験体構成部材の概略仕様一覧.....	69
表 3-2	X線撮影装置の仕様.....	73
表 3-3	人工海水の成分.....	81
表 3-4	沸騰濃縮試験時間.....	82
表 3-5	海水沸騰濃縮試験結果（海水, TAF-200mm）.....	90
表 3-6	海水沸騰濃縮試験結果（海水, TAF-100mm）.....	91
表 3-7	海水沸騰濃縮試験結果（海水, TAF）.....	92
表 3-8	海水沸騰濃縮試験結果（混合溶液, TAF-100mm）.....	93
表 3-9	沸騰濃縮溶液の ICP-MS 分析結果.....	140
表 4-1	多孔質試験体の設置構造と諸元.....	150
表 4-2	試験体種類.....	150
表 4-3	運転条件試験手順と管理値.....	159
表 4-4	多孔質体の熱伝導率及び諸元の測定結果.....	163

## 目次

図 2-1	各種硫酸カルシウム(石こう)の溶解度 .....	6
図 2-2	塩化物共存溶液に対する二水硫酸カルシウム (石こう) 溶解度 ....	6
図 2-3	オルトホウ酸とメタホウ酸の立体構造 .....	8
図 2-4	メタホウ酸ⅢからⅡへの変化 .....	8
図 2-5	溶液中でのホウ酸の酸解離平衡 .....	9
図 2-6	二ホウ酸イオンの構造 .....	10
図 2-7	メタホウ酸イオンの構造その 1 (Na 塩等等) .....	10
図 2-8	メタホウ酸イオンの構造その 2 (Ca 塩) .....	10
図 2-9	四ホウ酸ナトリウムの構造 [10] .....	11
図 2-10	メタホウ酸ナトリウム溶液のラマン分光結果と溶液種の分布 ....	11
図 2-11	反応機構の考察 .....	12
図 2-12	Na-B-O 系化合物の XRD スペクトル .....	14
図 2-13	想定する冷却材喪失事故 .....	22
図 2-14	REWET-II 試験装置 .....	22
図 2-15	ホウ酸とホウ砂の混合物の溶解度 .....	24
図 2-16	沸騰曲線 .....	26
図 2-17	溶射膜プール沸騰熱伝達の知見 .....	27
図 2-18	セラミックス伝熱面のクエンチ装置 .....	28
図 2-19	過渡沸騰熱伝達実験装置および試験部概略 .....	29
図 2-20	塩水プール沸騰試験装置 .....	30
図 2-21	塩水沸騰伝熱面の構造 .....	31
図 2-22	塩水プール沸騰曲線 .....	31
図 2-23	硫酸カルシウム水溶液と水との沸騰様相の比較 .....	33
図 2-24	析出を伴うときの熱伝達係数の時間変化 .....	34
図 2-25	空隙からの沸騰伝熱モデル .....	35
図 2-26	蒸気経路の観察写真 .....	35
図 2-27	伝熱管汚損による沸騰熱伝達率の変化 .....	37
図 2-28	平滑管 (上) の析出物 .....	38
図 2-29	フィン付管 (下) の析出物 .....	38

図 2-30	沸騰曲線に与える溶液種類と溶液濃度の影響	40
図 2-31	塩被膜面での限界熱流束と沸騰熱伝達	40
図 3-1	燃料バンドル除熱試験装置の機器構成及び配管接続	50
図 3-2	洗浄・廃液機器の全景写真	51
図 3-3	溶液移送操作盤据付状況写真	52
図 3-4	溶液注水操作盤据付状況写真	53
図 3-5	貯槽タンク寸法図	54
図 3-6	廃液タンク寸法図	55
図 3-7	溶液タンク寸法図	56
図 3-8	短尺バンドル試験装置概要	65
図 3-9	試験バンドルのロッド配列及び熱電対位置	66
図 3-10	短尺ヒータロッド形状寸法図	67
図 3-11	短尺バンドル試験体の概念図	68
図 3-12	5×5 バンドル試験スペーサの形状寸法	70
図 3-13	サンプリングポートの位置および構造	71
図 3-14	サンプルの設置位置	73
図 3-15	X線 CT 設備の回転試料台とフラットパネル	74
図 3-16	X線 CT 撮影用の台座	75
図 3-17	上部から見た短尺バンドル撮影位置と向き	76
図 3-18	高さ方向の撮影範囲	77
図 3-19	LA-ICP-MS 設備の外観図	78
図 3-20	海水析出塩の洗浄効果試験に用いた試験体	87
図 3-21	海水析出塩の洗浄後の試験片外観	87
図 3-22	混合溶液の洗浄試験結果	88
図 3-41	沸騰濃縮溶液のサンプリング箇所	139
図 3-42	沸騰濃縮液の元素濃度分布	142
図 4-1	クラスト中クラック伝熱特性試験装置の概念図	146
図 4-2	試験装置の外観写真	147
図 4-3	伝熱面と水槽の概念図	147
図 4-4	ヒータの概念図	148
図 4-5	組立中の水槽（透明ポリカーボネート）	148



図 4-6	試験体の設置構造	150
図 4-7	薄板とセラミック試験体の接着	151
図 4-8	SUS304 薄板と拡散接合した銅基板	153
図 4-9	銅基板への熱電対接続法	153
図 4-10	伝熱面への試験体組立手順	155
図 4-11	試験体と断熱材の取付	156
図 4-12	セラミック試験体との密着性を高めるサポートピン	156
図 4-13	補給水タンクでの循環予熱待機状態	158
図 4-14	運転中のプロセスフロー	158
図 4-15	熱伝導率の測定原理	160
図 4-16	熱伝導率測定の全景	161
図 4-17	乾燥状態の熱伝導率測定状況	161
図 4-18	湿潤状態の熱伝導率測定状況	161
図 4-19	セラミックス多孔質体の気孔率と熱伝導率の湿潤/乾燥比	164
図 4-20	セラミック試験体の気孔率と熱伝導率	164
図 4-21	クラスト中クラック形状が沸騰伝熱に与える影響	166
図 4-22	クラストポロシティが沸騰伝熱に与える影響	167
図 4-23	クラストを構成する粒子径が沸騰伝熱に与える影響	168
図 4-24	溶液が沸騰伝熱に与える影響	169

## 1. 緒言

原子炉施設における過酷事故発生時の事故緩和策として、水源が枯渇した後海水が原子炉や使用済み燃料ピットに注入される状況において、海水やホウ酸水またはそれらの混合溶液に曝された燃料の除熱特性を適切に把握し、対策に活用することは重要である。また、燃料が溶融して、クラストやデブリベッド状に堆積した際の除熱特性を適切に把握して安全評価の精度を向上させる必要がある。

本研究は、独立行政法人 原子力安全基盤機構殿からの委託研究「平成26年度海水及びホウ酸注入影響評価試験」において、昨年度に引き続き海水が注水される場合の熱物性値や熱伝達に関する既往研究で得られている知見を明らかにすると共に、模擬炉心である燃料バンドル体系および模擬クラスト・デブリベッドである多孔質体を対象に除熱性能を明らかにすることである。

## 2. 既往研究の調査

昨年度は、海水およびホウ酸水の物性値を調査した。本年度は更なる調査を行い、海水の沸騰濃縮において、早期にかつ顕著な量として析出する可能性がある硫酸カルシウムについて重点的に調査を行った。

### 2.1. 無機物の水に対する溶解度

表 2-1 に、100g の飽和溶液中に溶存する各無機物の量をグラム(g)で示す。すべて化学式に示された無水物の重量として表してある。\*印は 100g の水に溶解する量を表す。温度の関数として報告されている。この表において硫酸ナトリウムは 40℃において最大値となり、温度が低くなっても、高くなっても溶解度は減少する [1]。

### 2.2. 硫酸カルシウムの溶解度

図 2-1 に各種硫酸カルシウムの溶解度を温度の関数として示す。二水塩では温度と共に溶解度が上昇するのに対し、半水塩及び無水塩では温度の上昇と共に溶解度が減少する [2]。

図 2-2 に塩化物イオンが共存する溶液の硫酸カルシウムの溶解度を示す。温度の関数として溶解度が得られている。塩化物イオン濃度が増大するに従い、溶解度が減少する [2]。

### 2.3. 塩化ナトリウムとホウ酸の混合溶液の溶解度

秋田大学大学院工学資源学研究科の金児らの研究 [3]は、原子炉圧力容器の炭素鋼を用いた腐食試験を行い、塩化ナトリウムとホウ酸の混合溶液中での腐食量を測定した。表 2-2 に、試験溶液の濃度（上段）と溶液温度に対する飽和溶解度が示されている。腐食試験の結果、塩化ナトリウム水溶液中では腐食量が少ないが、ホウ酸水溶液中では腐食量は顕著に多く、それらの混合溶液中ではさらに腐食量が増大した。

同論文には、混合溶液の溶解度について実験結果が記されている。すなわち、「373 K で NaCl 飽和濃度は 7.149 mol/kg, H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> 飽和濃度は 6.797 mol/kg で、単独の場合よりも溶解度が増す」との記載がある。ホウ酸との混合溶液の情報が少ない中では、貴重な情報である。

表 2-1 無機物の水に対する溶解度

物質	化学式	0℃	20℃	40℃	60℃	80℃	100℃
(無水)亜ヒ酸(六酸化四ヒ素)	As <sub>4</sub> O <sub>6</sub>	1.21	1.81	2.93	4.45(62°)	5.62(75°)	8.18(98.5°)
アンモニウムミョウバン	Al(NH <sub>4</sub> )(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	2.97	5.91	14.41(45°)	22.0(55°)	47.3(85°)	—
亜硫酸ナトリウム*	Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	13.3	30.7(25°)	35.7	31.7	28.0	26.3
塩化アンモニウム*	NH <sub>4</sub> Cl	29.4	37.2	45.8	55.2	65.6	77.3
—カリウム	KCl	21.92	25.5	28.6	31.4	33.9	36.0
—カルシウム	CaCl <sub>2</sub>	37.3	42.7	53.4	57.8	59.5	61.4
—銀	AgCl	0.000070	0.000155	0.00036	—	—	0.0021
—コバルト(II)	CoCl <sub>2</sub>	30.3	34.6	41.0	48.4	49.4	51.5
—ストロンチウム	SrCl <sub>2</sub>	30.3	35.8(25°)	39.5	45.0	47.5	50.2
—セシウム	CsCl <sub>2</sub>	61.7	65.1	67.5	69.7	71.4	73.0
—水銀(II)	HgCl <sub>2</sub>	3.5	6.1	9.3	14.4	23.4	36.5
—銀(I)	Hg <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	0.000140	0.000038	—	—	—	—
—鉄(III)	FeCl <sub>3</sub>	42.66	47.88	60.01(37°)	78.86	84.03	84.26
—鉄(II)	FeCl <sub>2</sub>	33.2	38.5	40.7	43.9	—	48.7
—タリウム	TlCl	1.6	3.9(25°)	—	—	—	—
—ナトリウム	NaCl	26.28	26.38	26.65	27.05	27.54	28.2
—ニッケル	NiCl <sub>2</sub>	34.8	38.29	—	44.8	45.96	46.7
—バリウム	BaCl <sub>2</sub>	23.8	26.30	28.9	31.6	34.3	37.0
—マグネシウム	MgCl <sub>2</sub>	34.6	35.3	36.5	37.9	39.8	42.3
—ルビジウム	RbCl	43.5	47.7	50.9	53.6	56.0	58.9
塩素酸カリウム	KClO <sub>3</sub>	3.2	6.8	12.2	19.2	27.3	36.0
過塩素酸ナトリウム	NaClO <sub>4</sub>	62.87	67.82(25°)	70.38(38°)	—	—	76.75
ヘキサシアノ鉄(II)酸カリウム (黄血塩)	K <sub>4</sub> Fe(CN) <sub>6</sub>	12.5	22.0	27.8(35°)	36.8(65°)	40.1	42.63
過マンガン酸カリウム	KMnO <sub>4</sub>	2.75	5.96	11.13	18.15	—	—
クロム酸カリウム*	K <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub>	58.8	63.9	68.0	72.2	76.3	80.1
クロムミョウバン*	CrK(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	—	12.51(25°)	—	—	—	—
臭化カリウム	KBr	34.9	39.4	43.2	46.1	48.7	51.0
—鉛*	PbBr <sub>2</sub>	0.4554	0.9744(25°)	1.7457(45°)	2.574(65°)	3.343	4.751
—ナトリウム	NaBr	44.47	—	—	54.10	—	—
硝酸アンモニウム	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	54.2	65.5	74.6	80.7	85.7	90.3
—亜鉛	Zn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	48.3(0.4°)	58.1(30°)	70.2(45°)	87.2(59°)	—	—
—カリウム	KNO <sub>3</sub>	11.7	24.0	39.0	52.2	62.8	71.0

表 2-1 無機物の水に対する溶解度 (続き) [1]

物質	化学式	0℃	20℃	40℃	60℃	80℃	100℃
硝酸銀	AgNO <sub>3</sub>	54.8	68.4	75.7	81.5	85.4	88.0
—ストロンチウム	Sr(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	28.2(0.1°)	40.7	47.2(35°)	48.3	49.2	51.2(105°)
—タリウム	TlNO <sub>3</sub>	3.76	8.72	17.33	31.55	52.6	80.54
—銅(II)	Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	45.5	55.5	62.0	64.5	67.5	71.2
—ナトリウム	NaNO <sub>3</sub>	41.9	46.0				62.39(94°)
—鉛*	Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	38.8	56.5	75	95	115	138.8
—バリウム	Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	4.72	8.27	12.35	16.9	21.4	25.6
水酸化カリウム	KOH	49.2	52.8	58.03	—	61.73	65.15
—カルシウム	Ca(OH) <sub>2</sub>	0.143	0.129(25°)	0.107	0.0917	0.0800(70°)	0.0523(99°)
—ナトリウム	NaOH	29.6	52.2	56.3	63.5	75.8	78.5(110°)
—バリウム	Ba(OH) <sub>2</sub>	1.65	3.74	7.60	17.32	50.38	—
炭酸カリウム	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	51.25	52.5	53.9	55.9	58.3	60.9
—水素カリウム	KHCO <sub>3</sub>	18.6	25.0	31.3	37.5	—	—
—水素ナトリウム	NaHCO <sub>3</sub>	6.48	8.72	11.29	14.10	19.1	—
—ナトリウム	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	6.54	18.1	32.8	31.6	31.1	30.9
チオ硫酸ナトリウム	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	33.40	41.20	55.33(45°)	—	—	—
(重クロム酸ナトリウム)	K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	4.6	12.2	26.0	46.5	70	97
(赤血塩)	K <sub>3</sub> Fe(CN) <sub>6</sub>	23.22(0.1°)	32.80(25°)	37.22	41.10(58°)	45.27	47.60(99°)
ホウ酸	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	2.70	4.65	8.17	12.96	19.06	27.53
ホウ砂	Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	1.18	2.58	6.00	14.82	19.88	28.22
ミョウバン*	AlK(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	3.0	5.9	11.70	24.75	71.0	119.0(92.5°)
ヨウ化カリウム	KI	56.0	59.0	61.6	63.8	65.7	67.4
—ナトリウム	NaI	61.54	64.1	67.2	72.0	74.7	75.14
硫酸アルミニウム	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	27.50	27.82(25°)	28.8	31.0	37.4(80.6°)	43.90(99.2°)
—アンモニウム	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	41.35	42.85	44.7	46.64	48.47	50.42
—亜鉛	ZnSO <sub>4</sub>	28.58	36.65(25°)	41.2	42.98	39.2(85°)	37.7
—カリウム	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	7.20	10.0	12.9	15.4	17.1	19.4
—カドミウム*	CdSO <sub>4</sub>	75.5	76.4	78.4	83.7	67.5(79°)	58.4(99°)
—カルシウム*	CaSO <sub>4</sub>	0.1759	0.2080(25°)	0.2097	0.2009(55°)	0.1847(75°)	0.1619
—鉄(II)	FeSO <sub>4</sub>	13.6	20.8	28.6	35.5	30.4	24.0
—銅(II)	CuSO <sub>4</sub>	12.3	16.8	22.3	28.5	35.9	43.5
—ナトリウム*	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	4.5	19.0	48.1	45.2	43.2	42.2
—ニッケル(II)*	NiSO <sub>4</sub>	27.6	38.0	47.9	56.4	66	78
—マグネシウム	MgSO <sub>4</sub>	18.0	25.2	30.8	35.3	35.8	33.5
リン酸二水素ナトリウム	NaH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	36.5	45.5	57.0	65	68	71
リン酸水素二ナトリウム*	Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	1.6	7.7	52.7	82.8	93.5	103.3
リン酸三ナトリウム*	Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	5.38	14.53(25°)	23.3	46.2	68.0	94.6

表 2-2 塩化ナトリウムとホウ酸の溶解度

	NaCl	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> O
Amount	20.00 g	20.00 g	25.00 g
Maximum concentration	13.7 mol/kg	12.9 mol/kg	
423 K	7.23 mol/kg (Saturated concentration)	12.9 mol/kg* <sup>2</sup>	
373 K	6.71 mol/kg (Saturated concentration)	6.15 mol/kg (Saturated concentration)	
298 K	6.14 mol/kg (Saturated concentration)	0.93 mol/kg (Saturated concentration)	

\*<sup>1</sup> Three solutions with the same amount of H<sub>2</sub>O were prepared: 20.00 g NaCl and 20.00 g H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> in 25.00 g H<sub>2</sub>O (as a NaCl-H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> solution); 20.00 g NaCl, in 25.00 g H<sub>2</sub>O (as a NaCl solution); 20.00 g H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> in 25.00 g H<sub>2</sub>O (as a H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> solution).

\*<sup>2</sup> At 423 K, the maximum concentration (12.9 mol/kg) of H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> is lower than the saturated concentration (19.4 mol/kg).

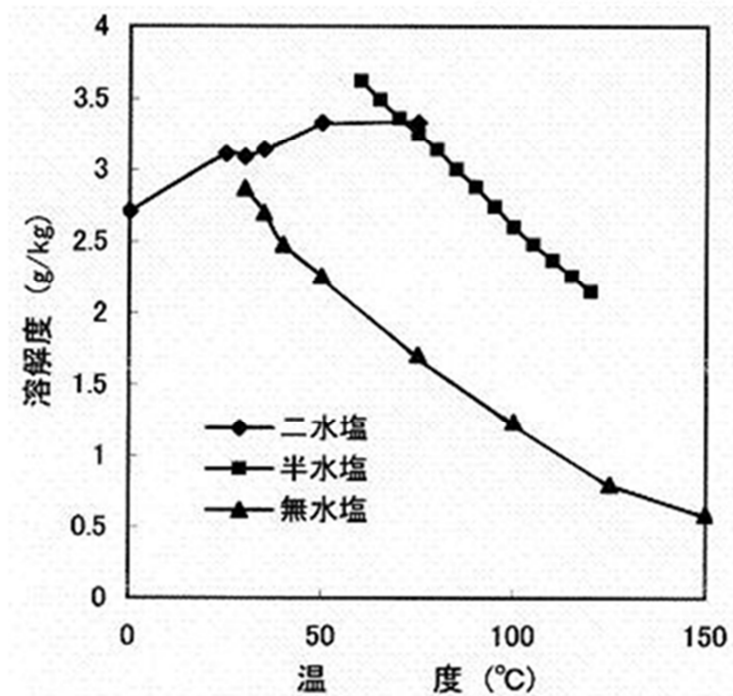


図 2-1 各種硫酸カルシウム(石こう)の溶解度

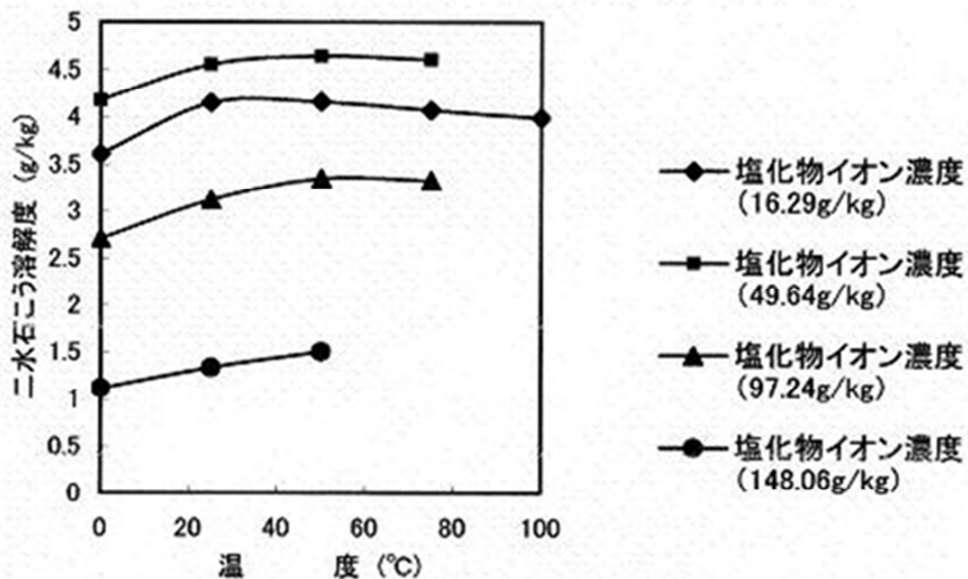


図 2-2 塩化物共存溶液に対する二水硫酸カルシウム (石こう) 溶解度

## 2.4. ホウ酸塩とメタホウ酸塩の関係

本研究では、ホウ酸塩（ナトリウム塩）を海水に加えて、そのホウ酸塩の析出挙動を探る。その際に、現象を理解するためには、その析出物の分析を行い素の性状を把握することが重要である。ここで、水を沸騰させて塩析出を見るために、想定されていることのひとつにメタホウ酸の生成がある。そこで、ホウ酸やメタホウ酸の分析方法を調査した。

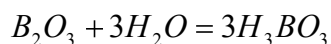
### 2.4.1. 溶液中のメタホウ酸の分析方法

溶液中の「メタホウ酸の定性・定量」が鉱泉分析法指針 [4] に示されている。クルクマ試験法、マンニット法、クルクミンによる比色法などが示されている。しかしながら、手順では標準溶液にはホウ酸ナトリウムを使っていること、分析方法もホウ酸イオンの定量と同様に、ホウ酸を分析してメタホウ酸に換算している [5]。イオンクロマトグラフによるメタホウ酸分析例も開示されているが、同様にホウ酸を定量してメタホウ酸換算している。したがって、鉱泉分析法指針の方法は、ホウ酸の分析法と同じ手法である [6]。

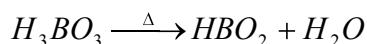
### 2.4.2. ホウ酸からメタホウ酸の生成

ホウ酸は、三酸化二ホウ素（ $B_2O_3$ ）が水和して生ずる酸素酸の総称で、オルトホウ酸、メタホウ酸が含まれる。オルトホウ酸を加熱脱水すると、メタホウ酸となり、さらに加熱すると三酸化二ホウ素になる。表 2-3 にホウ酸とメタホウ酸の違いを示す。

三酸化二ホウ素の溶解



オルトホウ酸からメタホウ酸の生成



メタホウ酸は、加熱温度により 3 つのメタホウ酸となる。  
メタホウ酸から三酸化二ホウ素へ

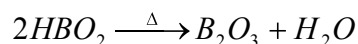




表 2-3 ホウ酸の特徴 [7] [8]

種類	化学式	構造などの情報
オルトホウ酸	$H_3BO_3$	水酸化ホウ素 $B(OH)_3$ に相当する。図 2-3
メタホウ酸	$HBO_2$	ホウ酸の脱水により得られるもので $HBO_2$ という組成式をもつ。三つの異性体が存在し、低温で安定なものから順に、メタホウ酸Ⅲ、Ⅱ、Ⅰとよばれる。図 2-4 水に溶解すると、オルトホウ酸と同じ組成式となる。
	Ⅲ	ホウ酸を $80\sim 100^\circ C$ に加熱すると、1 分子の水がとれて、メタホウ酸Ⅲが得られる。 $HBO_2$ の化学式であるが、 $(BOOH)_3$ の形の三量体である。
	Ⅱ	脱水反応を阻害するため密封したガラスアンプル中で $130\sim 140^\circ C$ に加熱すると、単斜晶系のメタホウ酸Ⅱが得られる。
	Ⅰ	$140^\circ C$ 以上に加熱すると等軸のメタホウ酸Ⅰが得られる。

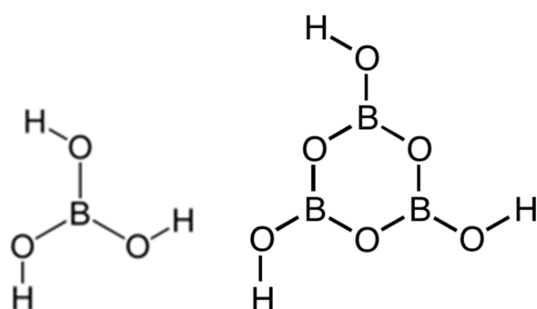


図 2-3 オルトホウ酸とメタホウ酸の立体構造

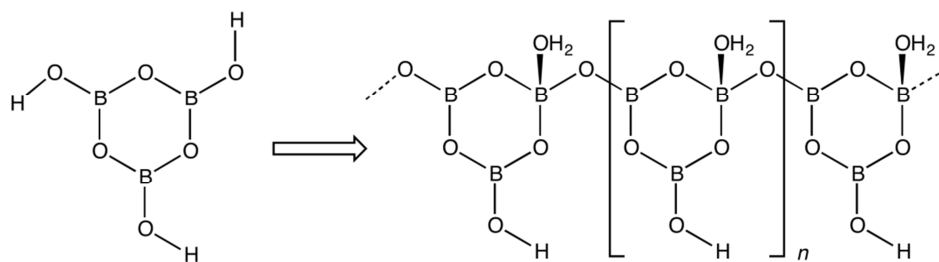


図 2-4 メタホウ酸ⅢからⅡへの変化

ホウ酸の構造は、化学式としては、 $H_3BO_3$  となるが、3 価の酸ではなく、水溶液中ではルイス酸として働き、水酸化物イオンを受取り、4 配位となる化学平

衡が存在する。立体構造で表すと、  
図 2-5 のようになる。

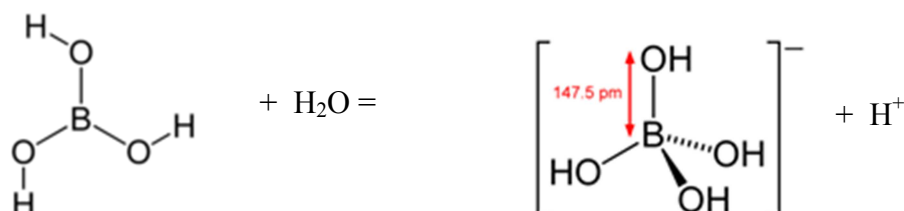
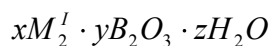


図 2-5 溶液中でのホウ酸の酸解離平衡  
上記反応の pKa は、9.24 とされている

メタホウ酸は、水溶液中ではオルトホウ酸溶液と同様となる。メタホウ酸が 3 量体を形成する B・・O 間の水素結合によるためであり、多量の水のある条件では、脱水前の形に戻ってしまうと考えられる。したがって、水溶液中でメタホウ酸イオンは存在しないと考えられるので、溶液種を対象とした分析方法（イオンクロマトグラフや液体クロマトグラフィー）で、分析しても、メタホウ酸イオンは検出されないものと考えられる。

### 2.4.3. ホウ酸塩の特性

ホウ素を中心原子とする酸素酸の塩、すなわち対の一般式を持つ化合物の総称で以下で表される。



y/x の比によって、6 種類のものがある。このうち、一般的なホウ酸塩は、メタホウ酸塩、四ホウ酸塩、五ホウ酸塩がある。これらのうち、四ホウ酸ナトリウムの水和物が、天然に存在するホウ砂 (Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> · 10H<sub>2</sub>O) である。

表 2-4 ほう酸塩の特徴 [8]

Y/X	名称	構造	構造などの情報
1/3	オルトほう酸塩	$\text{InBO}_3$ , $\text{ScBO}_3$ , $\text{YBO}_3$ , $\text{LaBO}_3$ など	三角形のオルトほう酸イオン $\text{BO}_3^{3-}$ を持つ
1/2	二ほう酸塩	$\text{Mg}_2\text{B}_2\text{O}_5$ , $\text{Co}_2\text{B}_2\text{O}_5$ など	2 個の $\text{BO}_3$ の三角形が O を共有してつながった $[\text{B}_2\text{O}_3]^{4-}$ を持つ
1	メタほう酸塩	$\text{KBO}_2$ , $\text{NaBO}_2$	$\text{BO}_2$ が平面上に 3 個、六角形を作ったような $[\text{B}_3\text{O}_6]^{3-}$ イオンを持つ
		$\text{Ca}(\text{BO}_2)_2$	$\text{BO}_3$ の 3 角形が二つの O をそれぞれ隣の $\text{BO}_3$ と共有して生じた $(\text{BO}_2)_n$ の鎖状構造を持つ
2	四ほう酸塩	$\text{B}_4\text{O}_7^{2-}$	$(\text{BO}_2)_n$ の鎖状構造において共有されていない O のうち半分を共有した二重鎖状構造が存在するものと推定される
5/2	五ほう酸塩	$\text{KB}_5\text{O}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	六角形が二つつながったような $[\text{B}_5\text{H}_4\text{O}_{10}]$ イオンを持つ
4	八ほう酸塩	参考文献中に記載なし	記載なし

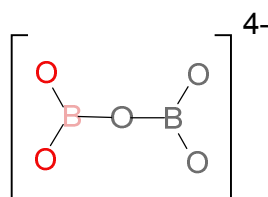


図 2-6 二ほう酸イオンの構造

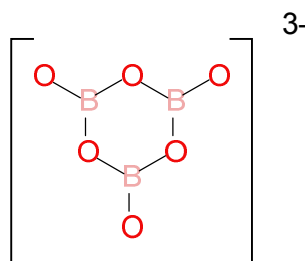


図 2-7 メタほう酸イオンの構造その 1 (Na 塩等等)

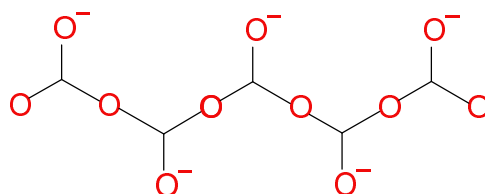


図 2-8 メタほう酸イオンの構造その 2 (Ca 塩)  
隣の鎖と、O-のところ、Ca を共有している [9]

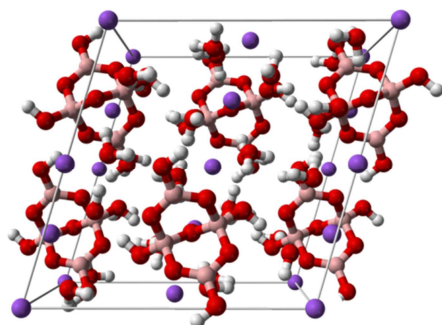


図 2-9 四ホウ酸ナトリウムの構造 [10]  
 (ピンク：ホウ素、赤：酸素、白：水素、青：カルシウム)

Zhou [11]らは、室温でメタホウ酸ナトリウムを溶かしながらラマン分光分析、pH の記録などを残した。その結果では、メタホウ酸ナトリウムを溶かした際の主な生成物は、 $B(OH)_4^-$ であると報告している。したがって、ホウ酸-メタホウ酸のときと同様に、溶液に溶かすことによって両化合物の違いはなくなるものと考えられる。

741  $cm^{-1}$  のピークは、 $B(OH)_4^-$  のピーク  
 (A)~(D):濃度 (A):4.98  $mol \cdot kg^{-1}$ , (B):4.58, (C):4.19, (D):3.75

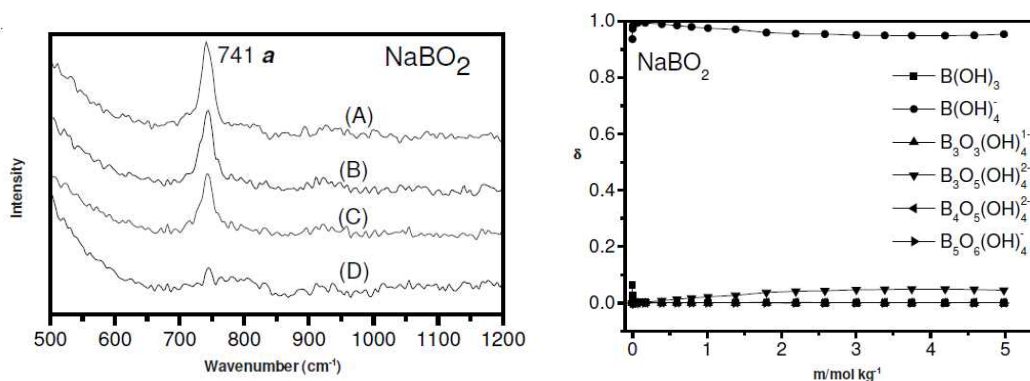


図 2-10 メタホウ酸ナトリウム溶液のラマン分光結果と溶液種の分布

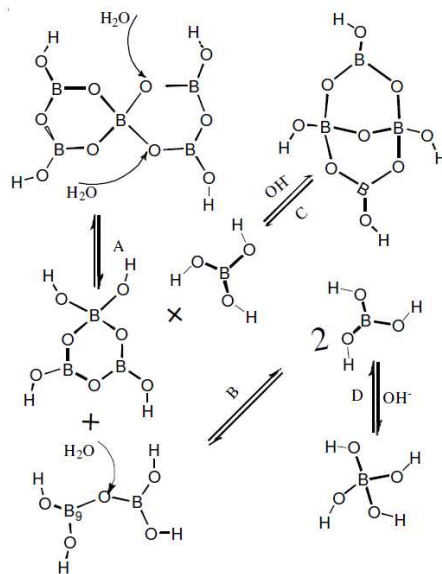


図 2-11 反応機構の考察  
加水分解によって  $B(OH)_4^-$  になる

#### 2.4.4. メタほう酸塩の性質と分析

メタホウ酸あるいはメタホウ酸塩が生成する場合は固体が主と考えられる。溶液に溶かして分析するのでは、元の構造が崩れて区別がつかなくなると考えられる。一方、固体のホウ酸塩やメタホウ酸塩は、結晶構造が既知の物質が多く、生成した固体を X 線回折で分析して、PDF と照合すれば、同定できる可能性は高いと考えられる。参考資料のため、物質・材料研究機構の公開している材料データベース (Atom work) [12] に示されている Na-B-O 系の化合物の XRD スペクトル (結晶構造に基づくシミュレーション値) を図 2-12 に示す。

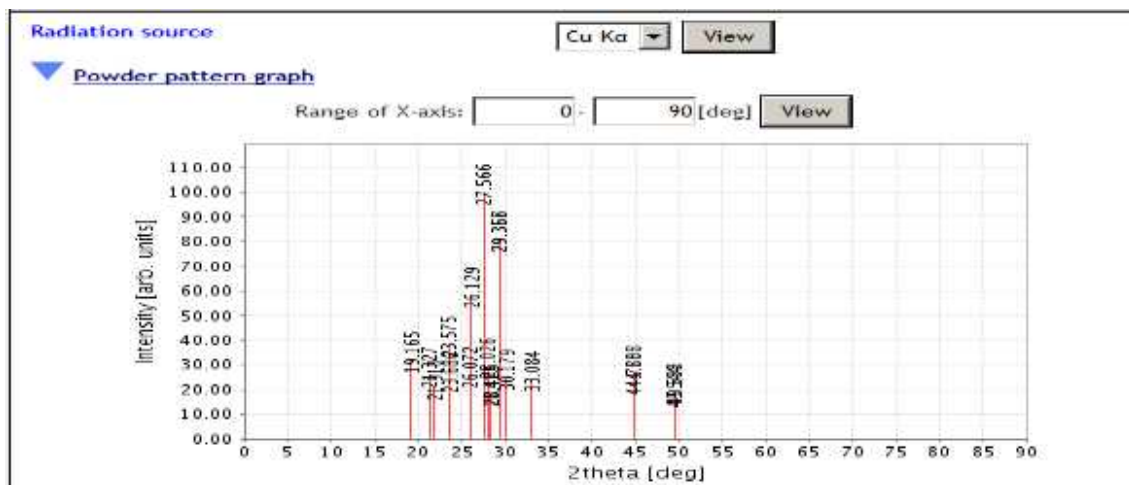
また、海水に含まれるイオンを考慮しつつ、生成する可能性のあるホウ酸塩類について、その性質を表 2-5 比較した。Ca 塩や Mg 塩が、Na 塩や K 塩に比べ溶解度が低く、液相が残っている状態で析出しやすい成分は、アルカリ土類金属の塩の可能性を考えて分析するべきと考えられる。

ホウ酸は溶液に溶けているときは、メタホウ酸等にはならず、過飽和になって析出するときに、メタホウ酸あるいはメタホウ酸塩を作るものと考えられる。そこで、メタホウ酸の生成確認を行うためには、析出物を採取して、固体の分析方法、例えば、ラマン分光や XRD 分析法を適用するべきと考える。

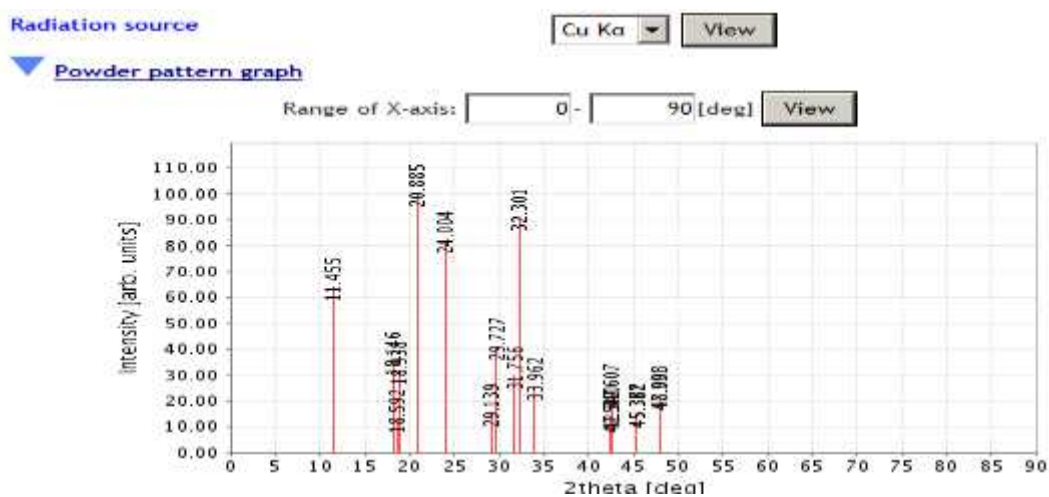
表 2-5 各種メタホウ酸塩の物性

カチオン	メタホウ酸塩	備考	溶解度
K	針状晶。再結晶できない		14.7g/100g (0°C)
Ca	透明な針状、プリズムあるいは板状晶		0.4g/100g (30°C、90°C)
Na	無色の六方晶系プリズム状晶		26g/100g(20 °C ) 、 35 °C (36g/100g)
Mg	八水塩、無色の正方晶系針状晶	天然鉱物 ビンアイト	熱水および冷水に不溶
Li	三斜晶系、真珠光沢のある結晶		0.696mol/L (25°C)

Na<sub>2</sub>B<sub>8</sub>O<sub>13</sub> (Acta Crystallogr., 1967)



NaB<sub>3</sub>O<sub>5</sub> (Acta Chrystallogr. 1974)



NaBO<sub>2</sub> (J. Inorg. Chem 1978)

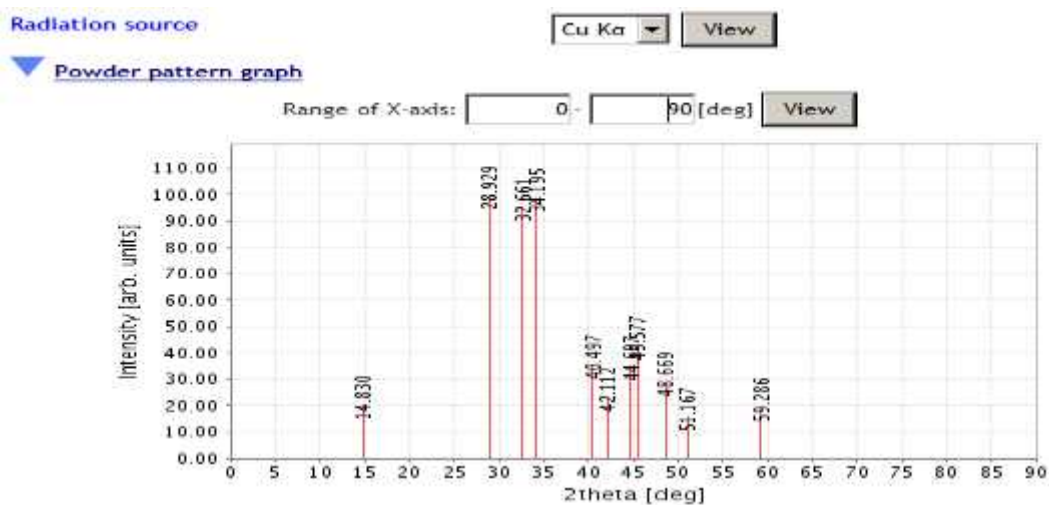


図 2-12 Na-B-O 系化合物の XRD スペクトル

## 2.5. ホウ酸塩水の沸騰濃縮試験における知見

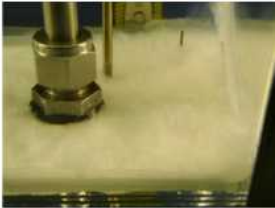



### 2.5.1. 沸騰濃縮における析出塩の性状

文献 [13]では、ホウ酸注入時の析出物のまとめを行っている。沈殿の形態や発生場所に関する定性的な記述であるが、これまでの実験報告では、均一沈殿が生じた例がなく、不均一沈殿（濃度や温度等が系の中で局所的・部分的に異なる状態での沈殿）のみである。また、沸騰・蒸発等気液二成分共存状態では、非晶質の析出物が発生し、沸騰状態にない液相のみの場合に結晶質の析出物が発生した例が存在する。

表 2-6 に上記の知見を整理した。



表 2-6 ホウ酸注入試験における析出物の分類と事例

析出場所		不均一沈殿	均一沈殿
	発生場所	局所的あるいは特定領域	バルク、混合場所
	影響・条件	溶出種、表面の材質や幾何学構造	均一な濃度と温度
	過去事例	観察されている	観察されていない
析出物の形態		結晶質	非晶質
特徴	構造	高度な配向、緻密	不規則な配向、空隙が多い
	比表面積	低い	高い
	析出機構	飽和度、拡散律速	飽和度、供給速度律速
事例		<p>一相領域で冷却器表面に析出</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>下部ヘッダの炉心支持領域</li> </ul>  	<p>溶液の急激な蒸発（沸騰）時</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>露出した燃料棒</li> <li>蒸気発生器配管</li> </ul>  <p>泡の底面のマイクロ層</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>燃料棒の加熱部（沸騰領域）</li> </ul> <p>蒸発（非沸騰）</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>上部プレナム</li> <li>露出燃料棒</li> <li>バレル・ハッフル領域</li> <li>蒸気発生器配管</li> </ul>  

### 2.5.2. ホウ酸溶液の物性

緩衝されていない (Unbuffered) ホウ酸と緩衝された (Buffered)ホウ酸 (つまり、酸単独の場合と、NaOH で pH 調整したも) について、密度、粘度、表面張力、等の測定を温度やホウ酸濃度を変化させながら取得している。主な結果を次頁の表にまとめた。

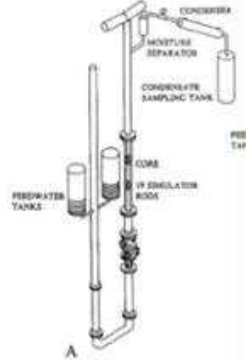
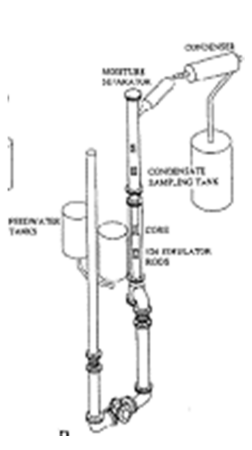
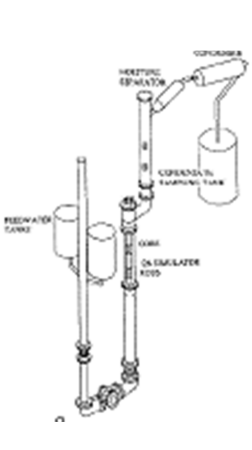
ホウ酸溶液の物性測定結果

- Boric Acid ( $H_3BO_3$ , un-buffered)
- Boric Acid buffered with Sodium Hydroxide (NaOH) pH 7
- Boric Acid buffered with Sodium Hydroxide (NaOH) pH 10
- Boric Acid buffered with Trisodium Phosphate (TSP,  $Na_2PO_4 \cdot 12H_2O$ )
- Boric Acid buffered with Sodium Tetraborate (Borax,  $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$ )

結果サマリー

密度	<p>温度が高い方が密度は低くなるが、<u>100℃で高濃度の物質の密度が、65.6℃で低濃度の物質の密度より高い場合がある。</u></p> <p><u>これは LOCA 時に上部と下部の対流による混合の力となる。</u></p>
粘度	<p>ホウ素濃度 2500ppm の低濃度では種類によって粘度の違いはなかった。しかし、<u>高濃度では、化学種によって粘度は異なり、次のような序列であった。</u></p> <p><u>ホウ酸&lt;ホウ酸-NaOH,pH7&lt;ホウ酸-四ホウ酸ナトリウム&lt;ホウ酸-NaOH,pH10&lt;ホウ酸-リン酸ナトリウム</u></p> <p>高濃度で粘度は高くなるものの、流れを淀ませたり混合を抑制するような粘度の顕著な増大は報告されていない。</p>
表面張力	<p>すべての溶液で表面張力が同じ温度の純水に比べ低かった。<u>低表面張力は、核沸騰を促進するので、</u>ホウ酸の存在により炉心での核沸騰伝熱は向上されることが期待される。</p>
飽和溶解度	<p><u>すべての緩衝させたホウ酸において、緩衝させてないホウ酸よりも大きな値を示した。例えば、NaOH を加えて初期 pH7.7 に調整したものは、ホウ酸の 2 倍以上を示した。</u>ホウ酸の溶解度を使って評価すると、大きく保守的な見積をすることになる。</p> <p>また、Post-LOCA における容器内では、過飽和状態も起こりうる。過飽和状態は、浮遊するデブリ、系の表面、冷却システムの速度等々に関係してくる。本報での溶解度測定は、過飽和をなるべく避ける条件で行ったので、結果は保守的な値である。しかしながら、冷却材と冷却材中の不純物の反応は考慮されておらず、そのようなことがあると、飽和溶解度の変化にも影響する可能性がある。</p>

表 2-7 沸騰濃縮試験の概要と知見の整理

装置名 / 特徴	外観	結果
<p><b>REWET-II</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 小規模（出力/冷却の容積比は再現）</li> <li>・ 19本の実長加熱棒（～8 1/4、0.36OD）</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 炉心領域での濃度勾配</li> <li>・ 析出物が混合部分のトップで観察された（水分分離器あり）</li> <li>・ 濃度平衡が達成された。（気水分離器なし）</li> </ul>
<p><b>VEERA</b></p> <p>小スケール、燃料集合体 1 体 炉心出口構造を忠実に模擬</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 炉心領域で濃度は均一</li> <li>・ 低部プレナムに濃度勾配</li> <li>・ 析出物が混合部上部（一定圧）</li> <li>・ 析出物が <b>throughout top of core</b></li> <li>・ 析出物が、低部プレナムに検出（高濃度溶液が炉心から流下する）</li> </ul>
<p><b>Modified VEERA</b></p> <p>小規模、燃料集合体 1 体 炉心の上部下構造を模擬</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>・ U 字型配管の振動が炉心と低部プレナムとの間の物質移行に影響与える。</li> <li>・ 析出物が混合部上部（一定圧）</li> <li>・ 析出物炉心上部まで存在</li> <li>・ 析出物が、低部プレナムに観察されている（高濃度溶液が炉心から流下する）</li> </ul>

<p>IVO Hydraulic Laboratory 低部プレナムの混合</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 炉心下部構造を模擬</li> <li>・ U字管振動を抑制</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 低部プレナムでは浮力による混合効果大。</li> <li>・ U字管振動が炉心と低部プレナムとの間の物質移行に影響与える。</li> </ul>
<p>BACCHUS 実高試験設備</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 実長ヒータ</li> <li>・ 炉心上部下部構造を模擬</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 炉心上部プレナムーバレルバツフル領域で相対的に均質な濃度であった。</li> <li>・ 濃度と温度の濃度勾配が炉心サポートと低部プレナムの領域にあった。</li> </ul>
<p>Westinghouse 社 PWROG 沸騰試験装置</p> <p>小規模、核沸騰伝熱用</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ ヒータ長さ (21 インチ、0.374OD)</li> </ul> <p>4"ID の矩形チャンネル</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 結晶質の析出物が、水分分離器と低温の低部プレナム表面に生成した。</li> <li>・ ヒータ棒に非晶質の析出物</li> </ul> <p>。沸騰 (炉心) 領域と低温の低部プレナム領域の間で物質移動の確証を得た</p>

### 2.5.3. ホウ酸溶液の物性

前節の表 2-7 にまとめた試験の中で、REWET-II、VEERA 等の試験結果に関する報告およびそれらを対象とした実機のシミュレーションが報告されている (J.Tuunanen et al.,1994)。

この研究の目的は、炉心冷却を困難にするような炉心や下部プレナムにおけるホウ素析出のリスクを特定することである。濃度分布を得るため REWET-II で長時間の運転をした。その結果、設備を実機に近づける必要が認識され、VEERA 装置が作られた。さらに、詳細な検討をするために、その改良や一部分を取り出した試験がされた。

図 2-13 が cold leg 小破断 LOCA の模式図である。REWET-II と VEERA の試験を実施した。水位を炉心頂部にして、炉心内で沸騰させる。蒸発で失われる水は、フィードタンクからダウンカマへ補給した。コラプスト水位は試験中はほぼ一定とした。

沸騰によりホウ酸濃度が上昇し、密度も高くなり、低部プレナムとの密度差が大きくなる。この密度差によって浮力による混合が発生し、U 字管振動が重畳し、ホウ酸が炉心から低部プレナムに移行する。冷却材の速度は遅いが、浮力による物質移動を打ち消す程度の速度である。

試験では、加速するため、例えば、注入するホウ酸は 2.5 % (実機では 1%) とした。

試験パラメータは、

- ・ 注入液のホウ酸濃度
- ・ 炉心の電力
- ・ 水位
- ・ 系の圧力

REWET-II の実験結果では、圧力 (または温度) が低い、またはボイド率が高い、水位が低い、ホウ素濃度が高い場合に、ホウ酸が析出しやすいことが判明した。析出は、液面の近傍で見られた。液面が炉心頂部よりも低いと、バンドル内で閉塞が発生し、温度が急上昇した。

ホウ酸の物質収支と析出挙動を調べた BOR003 と BOOR004 の試験結果の比較を表 2-8 にまとめた。

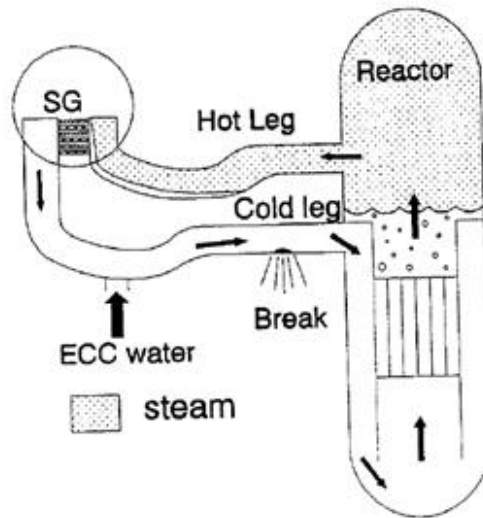


Fig. 1. Schematic representation of the simulated accidental situation (cold leg small-break LOCA).

図 2-13 想定する冷却材喪失事故

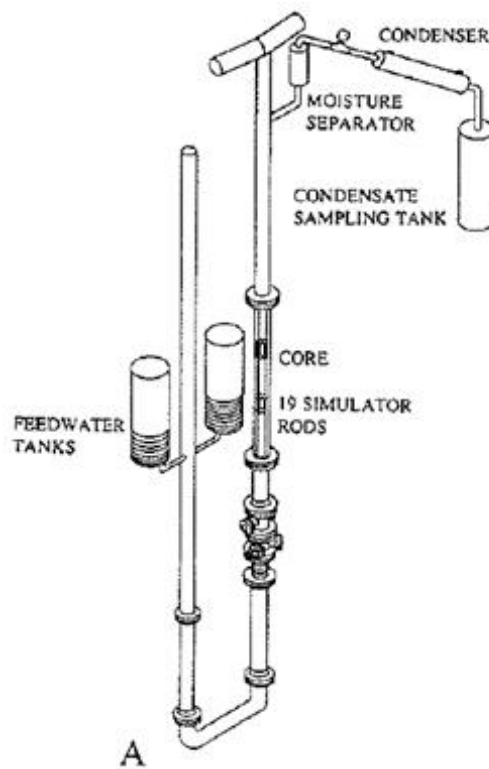


図 2-14 REWET-II 試験装置

表 2-8 ホウ酸の析出挙動の異なる試験結果の比較

試験番号	BOR003	BOR004
加熱出力	8 kW	8kW
注入ホウ酸濃度	1.2wt%	2.5wt%
水分離器	なし	あり
試験結果の図	<p>Fig. 3. Measured boric acid concentration in the REWET-II experiment BOR003 at the core top, middle and bottom and in the lower plenum bottom.</p> <p>3 時間まではホウ酸濃度が上昇し、その後、増えなくなる。</p>	<p>Fig. 4. Measured boric acid concentration in the REWET-II experiment BOR004 at the core top, middle and bottom and in the lower plenum bottom.</p> <p>ホウ酸濃度は上昇しつづけ飽和する。</p>
現象の説明	<p>湿分水分離器が無い場合、飛沫同伴でホウ酸溶液が系外に流出する。これによって系内のホウ酸が増大しなくなると。</p>	<p>湿分分離器によりホウ酸溶液が系内に戻るためホウ酸濃度は増え続ける。飽和に達することは析出しているということである。</p>

図 2-14 に REWET-II 試験設備を示す。バンドルは 19 本、実機では 126 本のため、スケールアップした VEERA 装置で検討した。VEERA 装置は、1 体の燃料をフルスケールで実現している。

顕著な違いは VEERA は、炉心領域の混合が効果的だったことである。これは、大きなバンドルサイズ効果によるものである。したがって、ホウ酸の濃度分布は均一であった。

このような試験結果をもとに、実機の LOCA 時の系内ホウ酸濃度の変化を予測するシミュレーションコードを作成した。

その中で、ホウ酸でなく、ホウ砂 (Borax, 四ホウ酸ナトリウム) も利用することにしており、ホウ砂とホウ酸の混合物における溶解度のデータを調べている。図 2-15 のようにホウ砂を加えると、ホウ酸の溶解度が上がる。この影響が計算結果に大きく出て、LOCA 時のホウ酸濃度の沈殿濃度しきい値があがるため、ホウ酸析出のリスクは LOCA50h 後までは低いとの結論を得た。



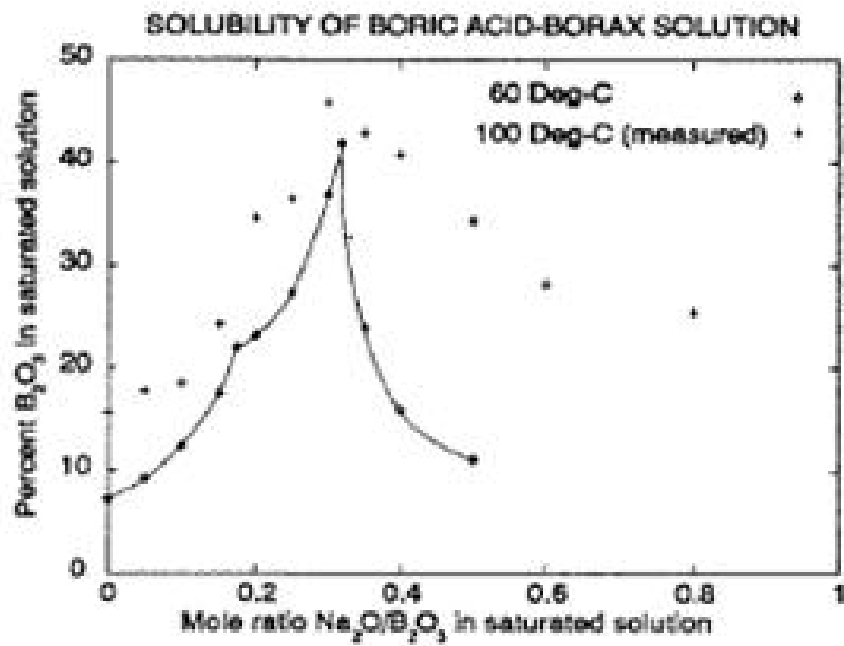


Fig. 14. Solubility of boric acid-borax solution in water.

図 2-15 ホウ酸とホウ砂の混合物の溶解度

## 2.6. 多孔質体のプール沸騰熱伝達

本節では、多孔質体が伝熱面となる試験体系を対象とした既往実験結果を整理した。本実験ではクラスト中クラックの沸騰熱伝達を把握する試験を行うため、類似な体系として調査を行った。

### 2.6.1. ハニカム多孔質体

横浜国大 森・奥山ら [14]は、プール沸騰の工業的利用として、電気素子の冷却への応用があり、さらに伝熱を高めるため、伝熱面に微細加工技術を用いて微細構造体の形成、多孔質膜を形成するなどの研究がなされている。森と奥山は、その時点までの多孔質膜の研究のまとめを次のように述べている。

『多孔質を伝熱面に設けることで、プール沸騰の限界熱流束が向上するメカニズムは以下が考えられ、これらの複合効果として、限界熱流束は向上する。

(1) 毛管力による液体供給

(2) 伝熱面積の拡大

(3) Zuber の限界熱流束モデルにおける流体力学的不安定限界を律速する蒸気柱間隔の減少など特に限界熱流束を飛躍的に向上させるためには、毛管力で強制的に伝熱面に液体を供給する方法が有効と考えられるが、大伝熱面積の高熱流束除去は困難のようである』

森と奥山ら [15]は、多孔質体のよりシンプルなモデルとしてハニカム構造に着目して伝熱面上に、自動車排ガス処理用のハニカム多孔質体を取り付けて実験を行っている。壁厚 0.4mm、格子寸法は 1.3mm で開口率は 0.55、ハニカムの厚さは 1.2, 5.0, 10mm と変えて実験をおこなっている。

また、ハニカムのマクロ孔のない、ミクロ孔だけの多孔質体（中実多孔質体）も用いた。

主な結果として、ハニカムに接着剤を含浸させてハニカムの壁のミクロの気孔を潰した状態では、限界熱流束が低下し、壁の気孔を残したものは熱流束が向上。また、中実多孔質体はさらに大きく低下している。これらのことから、以下が言える。

吸水性の有>無・・・・・・・・ 毛管力による液供給が限界熱流束向上に効いている。

ハニカム>中実多孔質・・・・ 伝熱面近傍で発生した蒸気を排出させるためのマクロな孔も重要な因子である。

また、ハニカム多孔質体の肉厚は薄い方がよく、1.2mm の場合は、裸面の約 2.5 倍まで向上した。

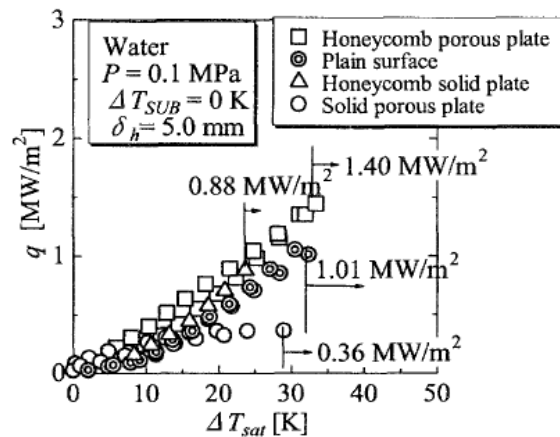


Fig. 4 Boiling curves at different structures of porous plates

図 2-16 沸騰曲線

クラスト試験に参考となる知見

$\Delta T_{sat}$  と  $q$  の関係（沸騰曲線）を、裸面との比較で示した。

図 2-16 が参考になると考えられる。

この図では、高さ 5mm の条件で、2 種のハニカムプレートと中実多孔質体の結果をプロットしている。この中で、クラスト試験に参考になるのは、中実多孔質体の結果である。

限界熱流束の値として、 $0.36 \text{ MW/m}^2$  の値が示されており、何もない平面やハニカムを貼った結果にくらべ、約 1/3 程度になっている。

クラスト試験では、これは溝無しのセラミックの結果と関連する。なお、この文献での中実多孔質体は、カルシウムアルミネート 30~50wt%、シリカ 40~60wt%、チタニア 5~20%、空隙率が 24.8%、平均細孔径が  $0.0372 \mu\text{m}$  であった。

一方、ハニカムは壁厚が 0.4mm 程度で格子寸法が 1.3mm であるため、開口率が大きすぎて、クラスト内のクラックの参考にはならないと考えられる。

### 2.6.2. 微細構造を有する沸騰伝熱促進面

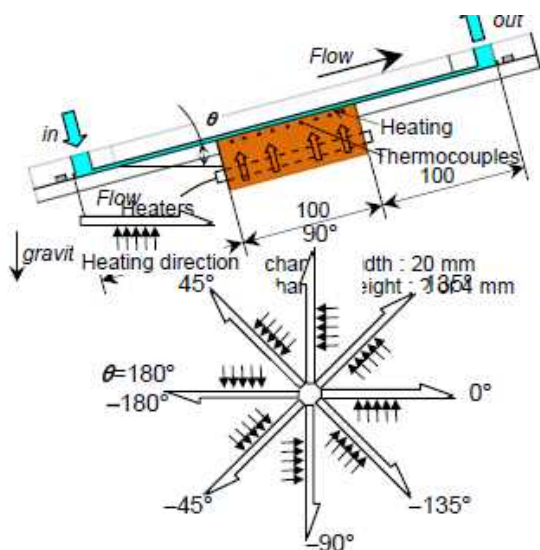
神戸大：浅野ら [16]は、微細構造を有する沸騰伝熱促進面を利用した先進的熱交換技術に関する基礎研究(2009~2011)を報告している。

この研究も、電子デバイスの冷却などを視野にいたったものであり、狭隘流路型コールドプレートの内部対流を強制的にさせながら沸騰冷却をする仕組みを用いて、伝熱面に溶射皮膜を加工し、沸騰伝熱特性や表面処理の伝熱促進効果について検討している。

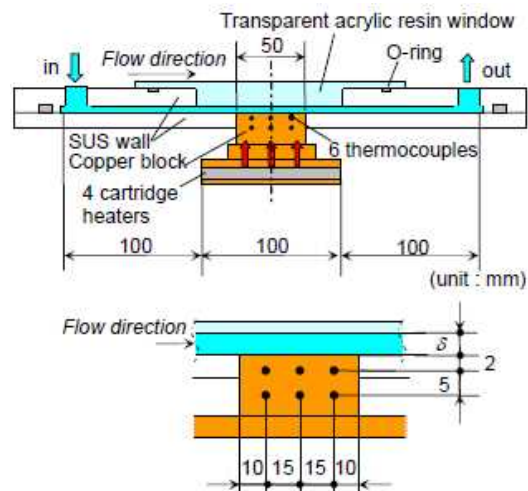
取り上げた課題は以下の 3 点である。

- (1) 飽和沸騰熱伝達特性
- (2) サブクール沸騰における限界熱流束
- (3) 沸騰開始過熱度

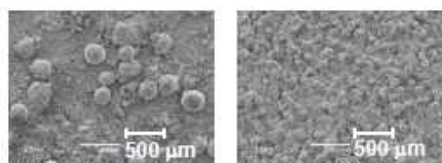
沸騰伝熱特性として、溶射面（図中 SurfaceB）を用いると、約 8 倍の伝熱促進効果があったが、高出力・高乾き度で低下し、この領域で沸騰様相が核沸騰から液膜蒸発に遷移したためと推定している。



(b) 試験部姿勢と流動方向  
図 1 飽和沸騰実験試験部



加熱部拡大図  
図 3 サブクール沸騰試験部



(a) 溶射 A (溶射材粒径: 200 $\mu$ m)  
(b) 溶射 B (溶射材粒径: 50 $\mu$ m)  
図 2 溶射伝熱面表面

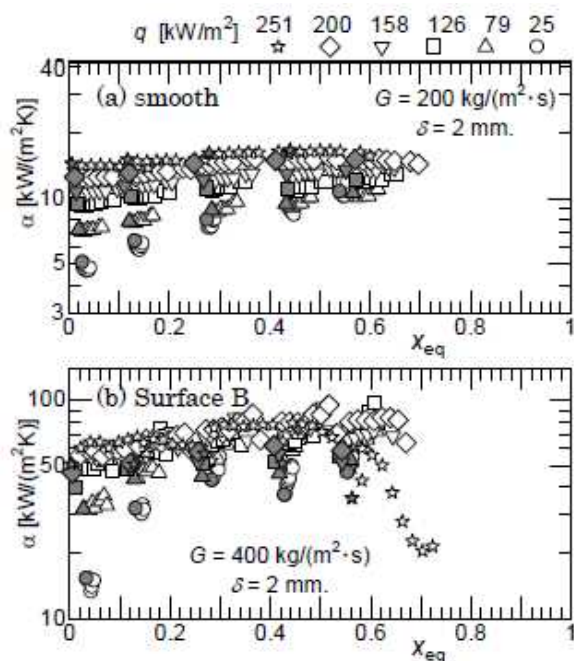


図 5 飽和沸騰熱伝達率

図 2-17 溶射膜プール沸騰熱伝達の知見

### 2.6.3. セラミックのクエンチ挙動

名工大 高らは、プール沸騰の試験方法として、水槽の下から加熱していく方法以外に、十分な温度に加熱した試験片を一気に水槽に送り、急冷して、温度変化を記録したり、気泡発生状況を観察するという方法がある。

名工大の高ら [17]は、セラミックを針金で吊り下げて炉で均一加熱したあと、炉の下部に設置した水槽中に落下させた。

高らは、この場合、表面の熱伝導挙動は時間経過に伴って三つの区間を示すことを見出している。

- ① 急冷直後はガスの持ち込みまたは境界層が剥離する状態となり、熱伝導方程式により求めた理論曲線とは異なる。
- ② 第2区間では境界層が安定し、理論と近くなる。
- ③ 最終的な第3区間では自然対流伝熱となり、再び外れる。

水中急冷法において試験片内の過渡的温度変化を測定し、それを計算図表にプロットする方法で、各急冷温度差における熱伝達係数を求めた。

その結果、急冷温度差が高くなるに伴い、熱伝達係数が徐々に増加する自然対流伝熱、急激に増加する核沸騰伝熱および減少が認められる遷移域へと変化することがわかった。

遷移急冷温度差は従来考えられている温度差よりさらに高温側にシフトし、その領域での熱伝達係数の温度依存性は極めて大きいことがわかった。

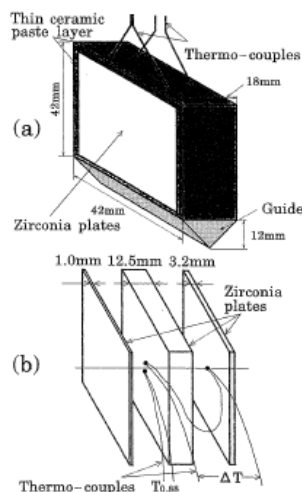


Fig. 1. Schematic figure of a specimen used to determine the heat transfer coefficient.

図 2-18 セラミックス伝熱面のクエンチ装置

2) クラスト試験に参考となる知見

セラミックの沸騰伝熱を扱った文献が少ない中で、参考になることを期待したが、実験系が異なり、参考にならなかった。

#### 2.6.4. 金属の急冷

同様に、熱した金属を急冷する方法での研究例として、京大の河原の事例がある。この研究では、高速度ビデオカメラと遠距離顕微鏡という道具を使って、沸騰時の気泡の発生状況を詳細に観察できる手法の開発である。

沸騰挙動の観察では、高速度ビデオが必要のようである。

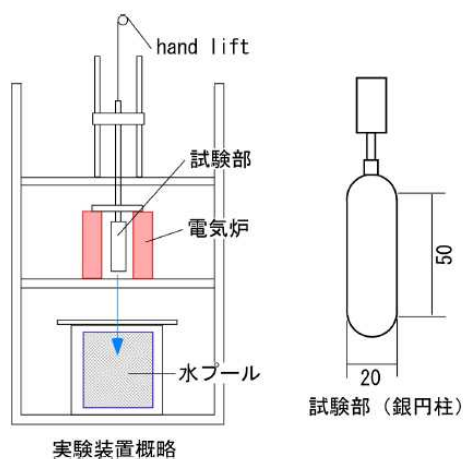


Fig.2 過渡沸騰熱伝達実験装置および試験部概略

図 2-19 過渡沸騰熱伝達実験装置および試験部概略

#### 2.6.5. 人工キャビティによる沸騰挙動

200 $\mu\text{m}$  厚さのシリコンウェハに微細加工を適用して、直径 10 $\mu\text{m}$ 、深さ 100 $\mu\text{m}$  の円柱状の孔を加工して、気泡発生起点とする研究例が報告されている（東大：卒業論文 2002、類似の研究として工学院大学の博士論文もある）。

この研究例では実験装置も興味深い工夫がされており、基板の加熱はレーザーを利用した加熱を行っている。

高速ビデオカメラを用いて核沸騰領域における気泡の発生状況・合一状況などを、4 種類の微細加工品の間で比較し、気泡の挙動について、キャビティの距離が重要な因子であると纏めている。

クラックをモデル化した文献として参考になることを期待したが、孔のサイズが小さいことからスケールの違いには留意が必要である。

### 2.6.6. 硫酸カルシウムの析出の影響

海水そのものを扱ったものでなく、NaCl 等が含まれない系での試験であるが、硫酸カルシウム (CaSO<sub>4</sub>) 溶液を用いて析出を伴う塩分を含む系での試験結果を報告した文献があり、参考になると考えた [18]。

海水中からの析出成分としては、温度が高いほど溶解度が低下するものとして、CaSO<sub>4</sub>、CaCO<sub>3</sub>、Mg(OH)<sub>2</sub> がある。後の2つは、pH を若干酸性にすることによって析出を防止できるが、CaSO<sub>4</sub>は pH では制御できない。

Stuttgart 大学の一派がいくつか報告をしているが、平滑な管とフィン付管との比較を中心に、CaSO<sub>4</sub> 溶液からの析出過程を加味した沸騰熱伝達挙動の検討を行っている。

以下のような整理をしている。沸騰曲線ではなく、熱伝達係数  $\alpha$  に対する様々な因子の影響を整理している。

$$\alpha = \frac{\dot{q}}{T_s - T_b}$$

T<sub>s</sub> : 表面温度、T<sub>b</sub> : バルク温度、q : 熱流束

パイプ状のタンク内に、円筒型ヒータを挿入して加熱する。

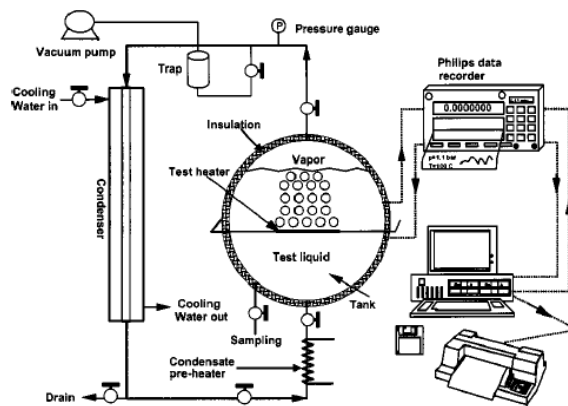


Fig. 1 Pool boiling apparatus

図 2-20 塩水プール沸騰試験装置

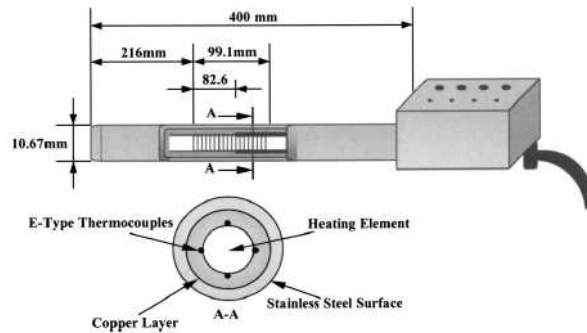


Fig. 2 Schematic diagram of the test heater

図 2-21 塩水沸騰伝熱面の構造

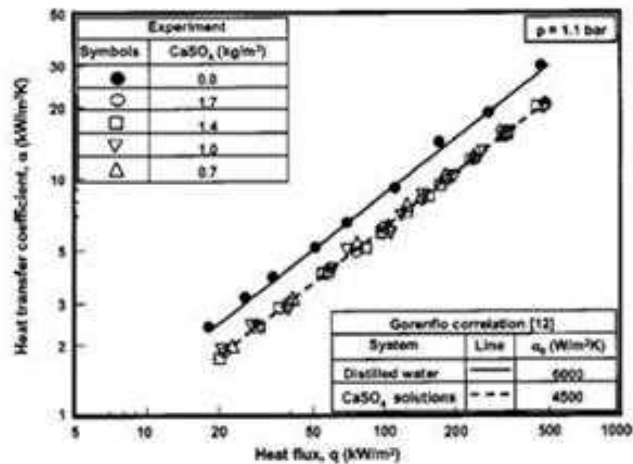


Fig. 3 Heat transfer coefficients for pool boiling of water and calcium sulfate solutions

図 2-22 塩水プール沸騰曲線

図 2-22 の黒丸と実線が、蒸留水の試験で、その他のマークは、CaSO<sub>4</sub>濃度を 0.7~1.7 g/m<sup>3</sup>の結果である。0.7g/m<sup>3</sup>の添加ですぐに、熱伝達係数が低下し、塩濃度が増えても変化がなかった。

なお、直線は理論式で、次のように示される。

$$\frac{\alpha}{\alpha_{ref}} = F_q \cdot F_p \cdot F_{WR} \cdot F_{WM}$$

ここで、

$$F_q = \left( \frac{\dot{q}}{q_0} \right)^{0.9-0.3 p_r^{0.15}}, F_p = 1.2 p_r^{0.27} + 2.05 p_r + \frac{p_r}{1-p_r}, F_{WR} = \left( \frac{R_a}{R_{a,ref}} \right)^{0.133} \cdot F_{WM} = \left( \frac{\rho c_p \lambda}{(\rho c_p \lambda)_{ref}} \right)^{0.25}$$

脱イオン水について、α<sub>ref</sub>=6 kW/m<sup>2</sup>K 熱流束 20kW/m<sup>2</sup>、圧力 0.1



熱伝達係数は、CaSO<sub>4</sub>の添加で急激に低下する。

CaSO<sub>4</sub> 溶液が蒸発するとき、気液界面では水の濃度はバルクより低い。そのため、CaSO<sub>4</sub> 分子は、界面からバルクへ逆拡散し、界面の濃度は飽和濃度以下を保つ。

Schlunder と Shmitt は以下の 2 プロセスを提唱：

(1) 核沸騰が伝熱面状でのバブルの成長とともに生じる。

熱は加熱面からバブル界面を通して液層に移動する

この場面では、優先的な水の揮発が局所的な bubble point 温度を Tb から Ti に変化させる、蒸発によって過熱が抑制される

(2) バブルが伝熱面から離れ、液の方面に上っていき、温度が Ti から Tb に低下する。

Schlunder はこの仮定を断熱的と仮定した。バブルを発生させるに必要な蒸発潜熱に加えて、供給された熱のある部分は、対流により直接移動する。

上記 1)では、

$$\dot{q} = \alpha_i(T_s - T_i)$$

これを通常の式  $\dot{q} = \alpha_i(T_s - T_b)$  と組合せると、

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{T_i - T_b}{\dot{q}} = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{\Delta T_b}{\dot{q}}$$

右辺第一項は界面での伝熱抵抗、第二項は物質移動による追加的な抵抗  
沸点上昇は、

$$\Delta T_b = imK_b$$

i : van't Hoff 因子で、溶質分子のイオン化効果を考慮するもの

m : 溶液のモル濃度、Kb はモル沸点上昇係数で、CaSO<sub>4</sub> の場合、i=2, Kb=0.512

CaSO<sub>4</sub> の溶解度は低いので、モル沸点上昇は無視できる。→ Δ Δ Δ 度は

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\alpha_i}, \quad \alpha = \alpha_i$$

したがって、モル沸点上昇では CaSO<sub>4</sub> 共存時の現象は説明できない。

一方、バブルの様子を見ると、CaSO<sub>4</sub> 溶液中のバブルは脱イオン水中と異なり、大きくなる。

塩の存在によって、核発生サイトの数が減少し、脱離するバブルの粒径が大

きくなっているのが明らかである。

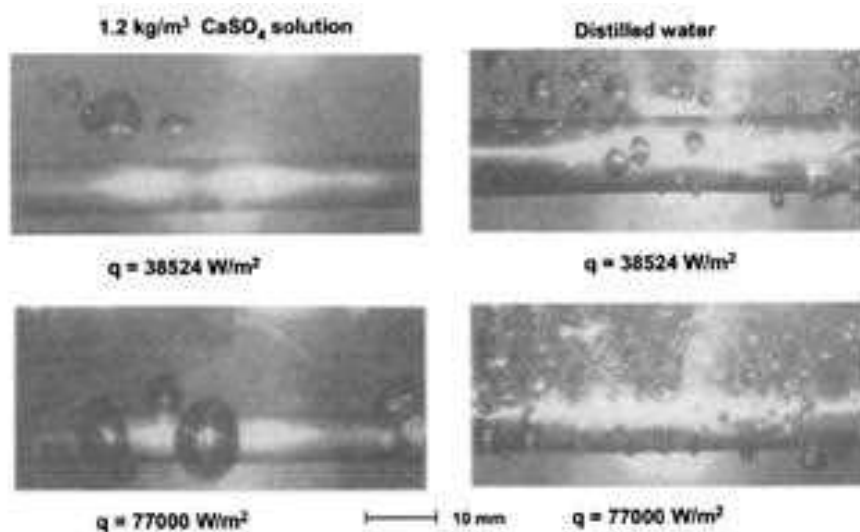


Fig. 5 Comparison of bubble departure diameter and nucleation site density during boiling of a calcium sulfate solution with those in distilled water

図 2-23 硫酸カルシウム水溶液と水との沸騰様相の比較

以上のことから、混合物の物理物性とあわせて純粋な流体の沸点挙動を用いて  $\alpha$  上を計算するのが一般的である。

Gorenflo の式は、Stephan と Preusser の提言による方法で補正される。

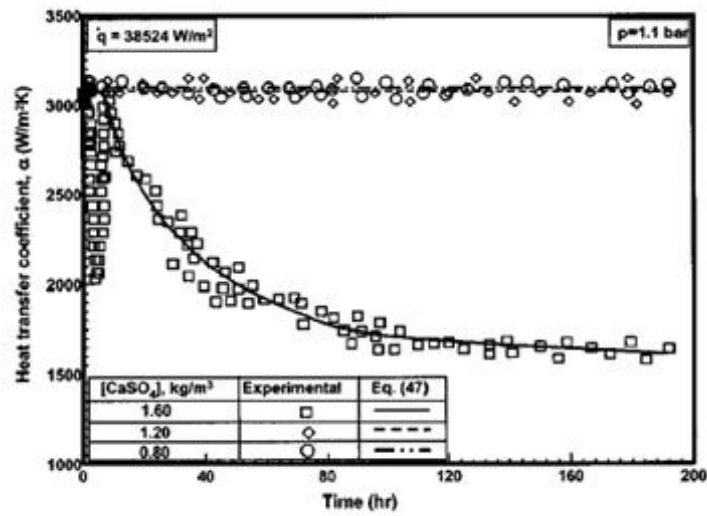
CaSO<sub>4</sub> 溶液については、20kW/m<sup>2</sup> と圧力 0.1 の条件で  $\alpha$  条件で  $\alpha_m$  は、で補正 <sup>2</sup>/K が得られている（純水の場合は、6000W/m<sup>2</sup>/K）

#### 2.6.7. スケール生成による熱伝達係数の時間変化

析出物は、熱伝達係数を低下させる。熱流束 35 kW/m<sup>2</sup>～480 kW/m<sup>2</sup>における熱伝達係数の時間変化を示す。表 2-9 に時間変化ごとの各種の特徴をまとめて示す。

表 2-9 沸騰熱伝達と可視観察結果

領域	熱流束増大時の挙動	析出物影響	気泡観察結果			
			発泡点密度	形状	気泡径	脱着速度
region1	急に最小値まで低下	時間減少	小さい	半球	10~25	7
region2	最大値まで上昇	時間減少	大きい	球状	2	
region3	徐々に漸近値に低下	早く減少	小さい	球状	2	



(a)

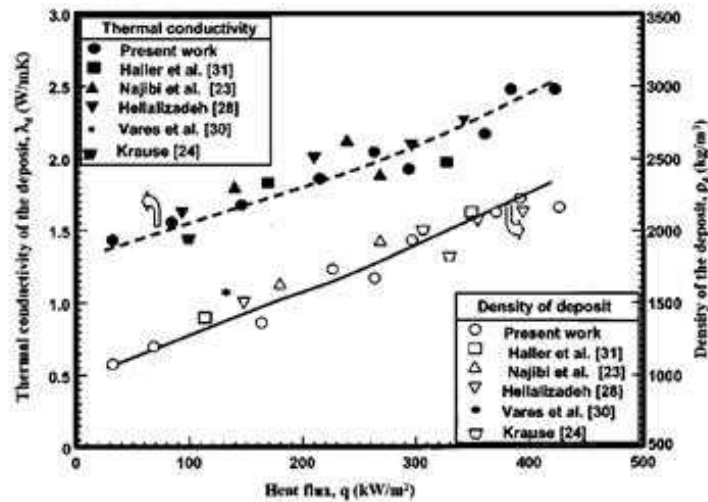


Fig. 11 Variation of the thermal conductivity and density of the deposit with heat flux

図 2-24 析出を伴うときの熱伝達係数の時間変化

### 析出物の物性

- Hallerらは、析出物は、0.045~0.23mm で熱伝導度は 0.6~1.5 W/m・K。
- Krause は、熱伝導度 1.2 W/m・K、密度が 2100kg/m<sup>3</sup>
- Chenoweth は、析出物は gypsum で 1.3 W/m・K

### 析出物結晶の様子

- 低熱流束 ポーラスで針状
- 高熱流束 短くて、ポーラス度は低く、接着性高い

熱流束に対する密度、熱伝導度は従来の文献値とよく一致 (図 2-24)

以上の結果からモデル作りを行った。

- ポイントは、これまでのように、元の熱伝導に追加的な熱伝導抵抗を加えるというアプローチではなく、析出プロセスがバブル生成機構に影響し、そして、熱伝達係数に影響するという過程をモデル化した。

### モデルを考える上での析出物の空隙構造の仮説

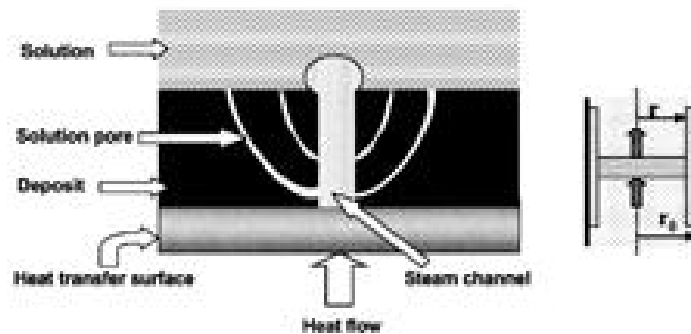


Fig. 12 Boiling from porous deposit according to McBeth [33]

図 2-25 空隙からの沸騰伝熱モデル

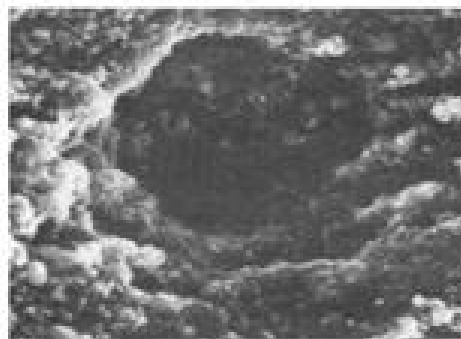


Fig. 13 Close up of picture of the mouth of a steam chimney with about 0.005 mm diameter [33]

図 2-26 蒸気経路の観察写真

細いキャピラリーが大きな空隙（煙突の役目をする）につながっている。

初期ステップ region1 と region2 の領域

CaSO<sub>4</sub>の沈殿反応を0次反応とすると

$$-\frac{dC}{dt} = k_r \quad \text{積分して置き換えたりすると、} t = \frac{C_b X}{k_r} \text{となる。}$$

単純に積分すると、 $C_t = C_b - k_r t$ 、 $X$ を時刻  $t$ における濃度変化  $\Delta$ における濃度

変化  $\Delta$ とバルク濃度  $C_b$ の比  $X = \Delta / C_b$ とすると、 $\Delta C_t = C_b X = k_r t$ となる

ので、上式となる。

速度定数については、Helalizadehが求めたものとして、

$k_r = 3.8 \times 10^{11} \cdot e^{-124287/RT_s}$ があり、 $X$ が0.01になる時刻  $t_0$ が、遷移領域

(region1,2)が終わる時刻として、式21で計算することができる。

$$t_0 = 0.731 \times 10^{-17} C_b e^{-124287/RT_s} \quad (21)$$

Region3については、煙突の直径の変化等を計算して熱伝達係数の変化を計算する。最終的には式47を得る。

$$\alpha = \frac{\alpha_0}{1 + \Phi (\eta C_s^b - C^*)^2 (1 - e^{-k_d (t-t_0)})} \quad (47)$$

$$\text{ここで、} \Phi = \frac{1}{90.2 + 5.7 \times 10^{-7} \dot{q}} \quad (48)$$

$$\eta = \frac{C_s^i}{C_s^b} = \exp(2.685 \times 10^{-6} \dot{q}) \quad (45)$$

$$k_d = 1.1 \times 10^3 e^{-33650/RT_s} \quad (37)$$

$\alpha$  : 熱伝達係数, W/m<sup>2</sup>K、 $\alpha_0$  : 清浄な表面での熱伝達係数

$\Phi$  : 塩濃度、熱流束の関数で式48で計算

$\eta$  : 界面とバルクの濃度比、式45で計算。 $C_s^b$ :バルクの溶質濃度

$C^*$  : 飽和濃度、 $k_d$ :不活性化速度定数 s<sup>-1</sup> (式37)、 $\dot{q}$  : 熱流束, W/m<sup>2</sup>

関連文献

1)と同じ研究室の論文 [19]において、平滑管とフィン付管を用いて、CaSO<sub>4</sub>の析出に伴う熱伝達変化やバブルの発生状況や析出挙動の違いを調べた結果が報告されている。主な結論は以下のとおりである。

以下において出てくる、Fouling resistance、R<sub>f</sub> は次のように定義されている。

$$\alpha = \frac{q}{T_s - T_b} \quad R_f = \left( \frac{1}{\alpha} \right)_t - \left( \frac{1}{\alpha} \right)_0$$

t : その R<sub>f</sub> を求めた時間、0:試験開始時

T<sub>s</sub>, T<sub>b</sub> : 表面温度とバルク温度、q : 熱流束

- ・フィン付チューブと平滑管とで R<sub>f</sub> の傾向が異なった。
- フィン付管 : 一般的に R<sub>f</sub> が低い ⇔ 平滑管 : R<sub>f</sub> が高く徐々に上昇する。
- これらの傾向に、熱流束、硫酸カルシウム濃度が与える影響は小さい。

平滑管

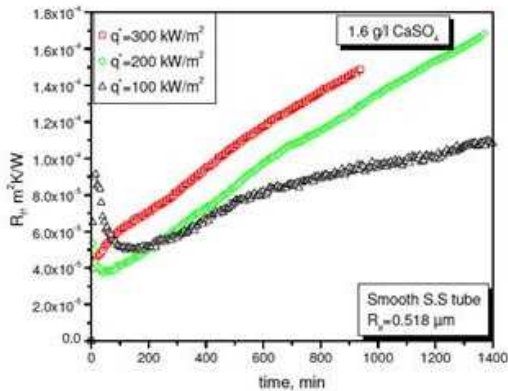


Fig. 6 Fouling resistance of the smooth tube as a function of time for different heat fluxes and a given concentration of 1.6 g/L

フィン付管

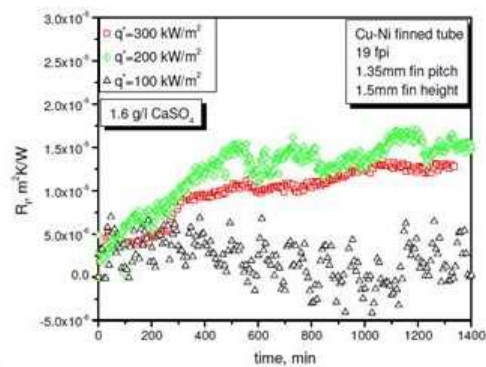


Fig. 7 Fouling resistance of the finned tube at different heat fluxes and given concentration of 1.6 g/L

図 2-27 伝熱管汚損による沸騰熱伝達率の変化

- ・熱流束の変化に伴う R<sub>f</sub> の傾向も異なった。
- 平滑管 ; 熱流束の増加は、R<sub>f</sub> を高める  
⇔ フィン付管 ; R<sub>f</sub> は熱流束が 200~300kW/m<sup>2</sup> になると急激に低下する。  
フィン間を昇ってくるバブルによる高い turbulence の度合いによって温度が下げられ、バブルのダイナミクスに影響与えたと推定。
- ・全体的にフィン付管の方の優位性が示される。

高熱流束(200~300)で、高 CaSO<sub>4</sub>濃度(1.6g/L) において 95%に達する Rfの低下があった。

100kW/m<sup>2</sup>より低いときには、Rfはゼロだった。

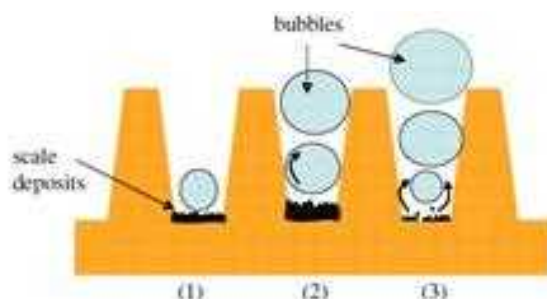


Fig. 8 Descriptive graph of impact of bubble behavior on scale formation

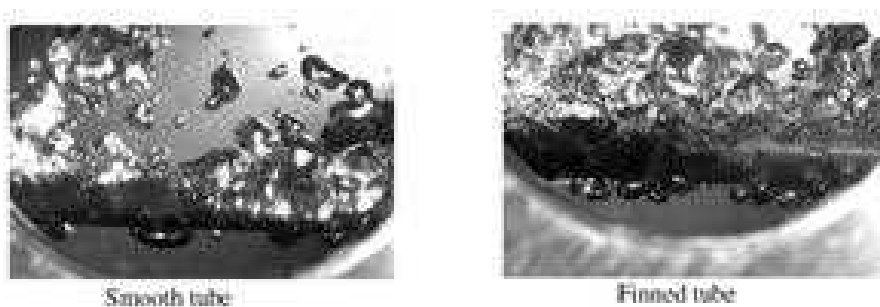


Fig. 9 Comparison of bubbles mechanism during clean boiling for the smooth and finned tubes for a heat flux of 200 kW/m<sup>2</sup>

図 2-28 平滑管（上）の析出物



Fig. 11 Typical fouling pictures of smooth and finned tubes for a heat flux of 200 kW/m<sup>2</sup> and a given concentration of 1.6 g/L

図 2-29 フィン付管（下）の析出物

・フィン付管には薄い不均一な結晶層が生じ、すぐに取り除けるようなものだった。平滑管では厚くて強固な膜となった。

クラスト試験で実施している海水または海水+ホウ酸の系とは直接的には比較できないが、析出が無いときの熱伝達の変化や、熱流束に対する析出物の構造との関係に関する知見（図 2-29）が得られている。

また、析出が進んでいくときの熱伝達の変化とそのメカニズムに関する考察などに共通点があるのか無いのかなど、クラスト試験の解析の参考になると考えられる。

また、フィン付管において、析出物による表面コーティングが生じにくく、生じた析出物も薄いものであるとの結果がある。クラスト上のクラックとは様相は違う可能性はあるが、クラックの有無によってクラスト上への析出物の生成状況が異なる可能性などについて、試験的に確認することが有効であると考えられる。

#### 2.6.8. プール沸騰挙動に及ぼすパーティクルの影響と可溶塩の影響

ナノ流体（粒子が分散した流体）を使って沸騰伝熱試験をすると、色々な結果が報告されているが、ナノ粒子の伝熱面へのコーティングによって限界熱流束が向上するということが言われている。

一方、可溶性塩であるホウ酸および塩化ナトリウムを使って沸騰伝熱試験を行った結果 [20]では、これら可溶性塩であっても、限界熱流束が向上し、ある濃度以上になると、沸騰熱伝達が低下するという結果が得られている。

この結果は、ナノ粒子分散液で実施した沸騰伝熱試験と非常に似た挙動であることから、沸騰過程において、ホウ酸や塩化ナトリウムが析出して、伝熱面をコーティングしたことによって、ナノ粒子によるコーティングと同じような作用をもたらしたと結論づけた。

その証拠として、試験後の伝熱面の塩の析出を顕微鏡で確認した。

一方、あらかじめナノ粒子でコーティングした伝熱面を使って可溶性塩の試験をしても、限界熱流束の増大は見られなかった。

これは、すでにコーティングの効果が表れているため、追加効果は出なかったものと考えられる。また、一旦、析出した電熱面を、次に、純水を用いて実験すると、限界熱流束の向上は見られなかったことから、純水を利用したことによって、これらの塩が溶けて、伝熱面から洗い去られたことを示している。すなわち、逆に、可溶塩を溶解した試験では、沸騰過程で析出したと考えられる。



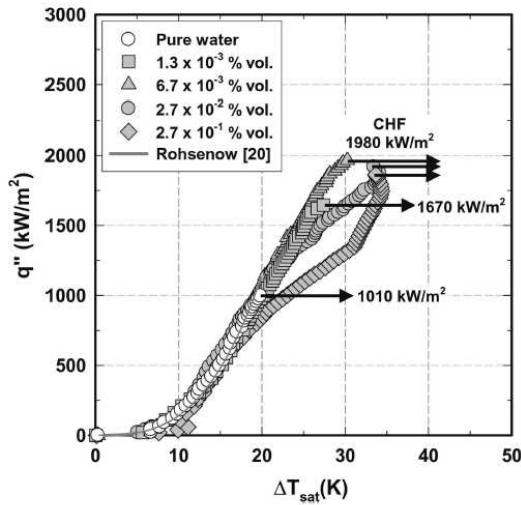


Fig. 2. Pool Boiling Curves for  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Nanofluids ( $1.3 \times 10^{-3} - 2.7 \times 10^{-1}$  % vol.). Obtained by Kwark et al. [16].

(a) ナノ粒子濃度の影響

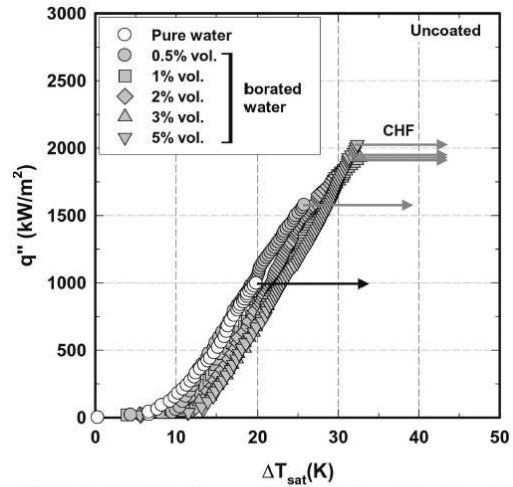


Fig. 4. Pool Boiling Curves of Borated Water (0.5 - 5% vol.) with the Uncoated Surface.

(b) ホウ酸水濃度の影響

図 2-30 沸騰曲線に与える溶液種類と溶液濃度の影響

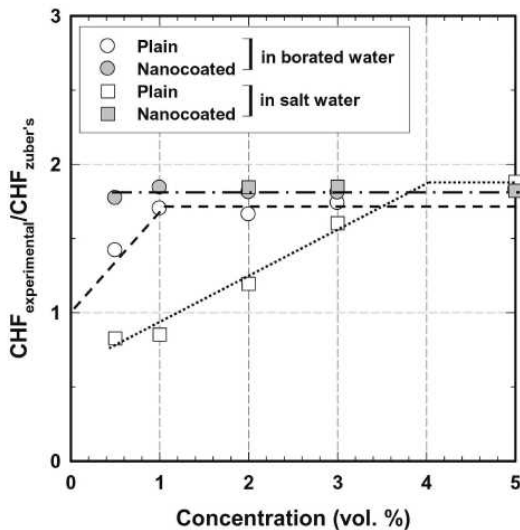


Fig. 10. CHF Enhancement, Defined as the Ratio of Obtained CHF Over Water CHF as Predicted by Zuber's Correlation [22], for Borated and NaCl Water Using Plain and Nanocoated Surfaces.

(a) 塩被膜面での限界熱流束

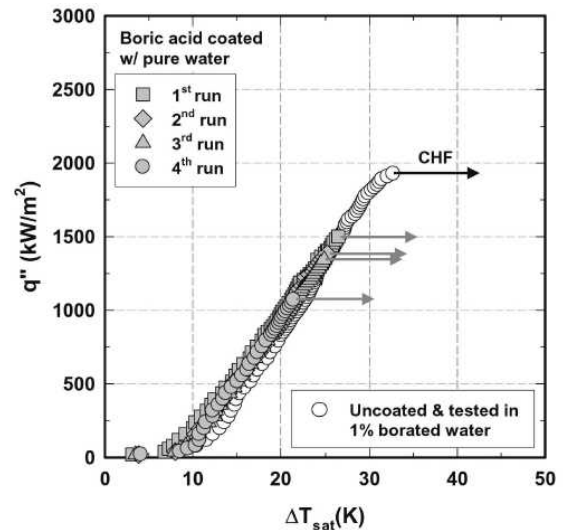


Fig. 11. Pool Boiling Curves of Pure Water with the Boric Acid Coated Surface.

(b) ホウ

図 2-31 塩被膜面での限界熱流束と沸騰熱伝達

この報告では、析出物が表面に生じた際に、被覆して熱伝導を悪化させるというよりも、一種の多孔質膜のようなものができて、むしろ、熱伝達を改善するような効果が見られるということ述べているものと考えられる。

$\text{CaSO}_4$  の析出による影響を見た文献においても、時間の経過と熱伝達係数の変化は上がってから、徐々に低下のような時間経過をたどる例が示されている。

したがって、クラストの試験においても、析出物が発生するような状況において、時間経過は上記文献が検討の一助になる。

## 引用文献

- [1] 国立天文台編, “理科年表平成 15 年,” 丸善(株), <http://ebw.eng-book.com/pdfs/15a5c5843afad2fbc8b558fbab15aa80.pdf>.
- [2] 橋本 壽夫, “たばこ塩産業 塩事業版,” [http://www.geocities.jp/t\\_hashimotoodawara/salt6/salt6-07-02.html](http://www.geocities.jp/t_hashimotoodawara/salt6/salt6-07-02.html), 2007.
- [3] 金児紘征、中川時子、平泉浩成, “NaCl-H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> 水溶液における原子炉圧力容器材料の加速腐食試験,” 日本金属学会誌, 76-11 (2012), 615-623.
- [4] 環境省自然環境局, “鉱泉分析法指針 (平成 26 年改訂),” 環境省自然環境局, 2014.
- [5] サーモフィッシャーサイエンティフィック株式会社, “電荷検出器による環境試料中のけい酸、ほう酸、炭酸の定量,” 2015.
- [6] 松永 敏朗, “生活とホウ素,” [http://cse.naro.affrc.go.jp/tmatunag/life\\_b/life\\_b.htm](http://cse.naro.affrc.go.jp/tmatunag/life_b/life_b.htm).
- [7] “Boric Acid wikipedia” .
- [8] 化学大辞典編集委員会, 化学大辞典, 共立出版, 1981.
- [9] P.L.Robinson, R.B.Heslopand, 無機化学-上- 3rd ED., 1975.
- [10] “Borate Wikipedia” .
- [11] Y.Q.Zhou, C.H.Fan, Y.Fang, F.Y.Zhu and L.D. Cao, “Polyborates in Aqueous Sodium Borate Solution at 298.15 K,” 2010.
- [12] Yibin Xu, Masayoshi Yamazaki, and Pierre Villars, “Inorganic Materials Database for Explorin the Nature of Material,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, 50, 2011.
- [13] Methodology, Boric Acid Precipitation Analysis, “Phenomena Identification and Raining Tables,” PWR Owners Group, Oct. 28, 2009.
- [14] 森 昌司、奥山邦人, “ハニカム状多孔質体装着による飽和プール沸騰限界熱流束の向上,” 第 75 巻, 第 758, p. 9-14, 2009.
- [15] 森 昌司、沈 ロージェ、奥山邦人, “ハニカム状多孔質体装着による飽和プール沸騰限界熱流束向上に与えるセル幅の影響,” 第 76 巻, 第 771, p. 228-236, 2010.
- [16] 浅野 等, “微細構造を有する沸騰伝熱促進面を利用した先進的熱交換技術に関する基礎研究,” 科学研究費助成滋養研究成果報告書, 2009 - 2011.
- [17] 高 鐵、西川直宏、日比雅義、高津學, “セラミックスの熱衝撃試験時のいわゆる熱伝達係数の温度依存性について,” 第 7 巻, 第 101, pp. 788-792, 1993.
- [18] H.Muller-Steinhagen, M.Jamialahmad, “A new model for the effect of calcium sulfate scale foration on pool boiling heat transfer,” *Journal of Heat Transfer*, 第 128 巻, pp. 507-517, 2004.
- [19] M.Esawy, M.R.Malayeri, H.Muller-Steinhaen, “Mechanism of crystallization

- fouling during pool boiling of finned tubes,,” *Thirteenth International Water Tehnology Conference, IWTC*, 第 卷 13, pp. 1417-1430, 2009.
- [20] S.M.Kwark, M.Amaya, H.Moon and S.M.You, “Effect of soluble additives, boric acid( $H_3BO_3$ ) and salt( $NaCl$ ), in pool boiling heat transfer,” *Nuclear Engineering and Technology*, 第 卷 43, 第 3, pp. 195-205, 2011.
- [21] 伊藤 猛宏、田中 克典、玉利 孝徳, “各種多孔質沸騰伝熱面の性能比較 (第 3 報 性能予測法の提案),” *日本機械学会論文集 [B 編]*, 第 卷 55, 第 513, pp. 1403-1409, 1989.
- [22] 佐藤邦明、佐々木康夫, “岩の伝熱および熱水浸透流による熱拡散係数の実験的研究,” *土木学会論文集*, 第 351, p. 127-135, 1984.
- [23] 鈴木康一, “気泡微細化沸騰を用いる高発熱密度機器の高熱流束冷却技術,” JST (独) 科学技術振興機構 東京理科大学新技術説明会, JST ホール (東京・市ヶ谷), 2010.

### 3. 燃料バンドル除熱性能

本章では燃料バンドル除熱性能試験用の洗浄・廃液機器の設計製作及び短尺バンドルを用いた沸騰濃縮試験について述べる。

#### 3.1. 長尺バンドル試験設備の洗浄・廃液機器の設計製作

平成 24, 25 年度に製作した燃料バンドル試験体に加えて、今年度は洗浄・廃液機器の設計製作を実施した。図 3-1 に燃料バンドル除熱試験装置の概略機器構成を示す。同図には次年度計画予定の完成予想機器構成も含めて示した。図中二点鎖線赤枠で囲んだ機器が今年度実施の洗浄・廃液機器の概略構成である。図 3-2 に増設架台を含む洗浄・廃液機器の全景写真を、図 3-3 に溶液移送操作盤の据付状況写真を、図 3-4 に溶液注水操作盤の据付状況写真を示す。機器基本仕様を以下に示す。

##### (1) 貯槽/廃液タンク、容液タンク

###### ① 貯槽タンク（図 3-5 に貯槽タンク寸法を示す）

- ・ 使用条件 大気圧、最大 40℃
- ・ 型式 PVC タンク/500ℓ 相当品
- ・ 形状寸法 850×850×H1150mm / 重量 110kg
- ・ 貯蔵液 塩水、ホウ酸水溶液
- ・ 付属機器 簡易型攪拌機、水位計
- ・ 接続ノズル 薬剤挿入孔(φ200)×1カ所、純水給水孔(15A)×1カ所、供給孔(32A) ×1カ所、ドレン孔(10A) 1カ所
- ・ 計測孔 温度計測孔 8A(PT ネジ込)/温度計取付 2カ所
- ・ 材質 PVC(ポリ塩化ビニル)
- ・ 製作数 2基

###### ② 廃液タンク（図 3-6 に廃液タンク寸法を示す）

- ・ 使用条件 大気圧、最大 40℃
- ・ 型式 密閉丸型タンク(鉄枠付)/MC1 型-1500ℓ 相当品
- ・ 形状寸法 約 φ1100×H1600mm /約 1500ℓ
- ・ 貯蔵液 塩水、ホウ酸水溶液等の混合水
- ・ 付属品 水位計

- ・ 接続ノズル 廃液挿入孔(φ380mm)×1カ所、給水孔(15A) 1カ所  
廃液孔(50A) 1カ所
  - ・ 計測孔 温度/採取孔 8A(PTネジ込)/温度指示計付 2カ所
  - ・ 材質 PVC(ポリ塩化ビニル)
  - ・ 製作数 1基
- ③ 容液タンク (図3-7に溶液タンク寸法を示す)
- ・ 使用条件 大気圧、最大 80℃
  - ・ 使用流体 人口海水、ホウ酸水、及び混合水
  - ・ 形式 縦型円筒容器 (材料;SUS304/内壁テフロンコーティング)
  - ・ 形状寸法 φ600mm×H900mm/250ℓ相当
  - ・ 上端部 JIS2K フランジ相当
  - ・ 内蔵機器
    - 攪拌機 (回転調整器付/上蓋に取付台設置)
    - 予熱ヒータ 5kw×1/3kW×1/AC200V 単相
  - ・ 接続ノズル
    - 溶液流入孔 20A(ネジ込ボス取付) 2カ所
    - 給水ノズル 15A(ネジ込ボス取付) 1カ所
    - 排水/開放ノズル 15Aネジ込ボス 2カ所
  - ・ 計測孔
    - 温度計測孔 8A(ネジ込をボス) 2カ所
    - 水位計測孔 8A(ネジ込をボス) 2カ所
    - 濃度採取孔(φ1mm) 8A(ネジ込をボス) 1カ所
  - ・ 計装品
    - 温度センサ K型熱電対 1カ所
    - 現場指示温度計 1カ所
    - 水位指示計 耐熱管(φ16mm) 1カ所
    - 水位検出器取付 1箇所
    - 水位警報取付 2箇所
  - ・ 弁類
    - 給水ノズル 電磁弁取付(15A) 1台
    - 排水ノズル 手動弁(15A/黄銅) 1台

計装止弁                      ボール弁(8A./黄銅) 4台

- ・ 製作数                      2基

(2) 回転機器(移送ポンプ、水位調整ポンプ、廃液ポンプ)

① 移送ポンプ                      2基

使用条件                      温度 ; 常温(80℃以下)                      流体 ; 海水、ホウ酸水

- ・ 流量/揚程                      流量 ; 30ℓ/min、                      揚程 ; 10m 以上
- ・ 動力                              AC200V φ 3×0.3kW

② 水位調整ポンプ                      1基

- ・ 使用条件                              温度 ; 80℃                              流体 ; 海水、ホウ酸水
- ・ 流量/揚程                              流量 ; 30ℓ/min、                              揚程 ; 10m 以上
- ・ 動力                              AC200V φ 3×0.3kW

③ 廃液ポンプ                              1基

- ・ 使用条件                              温度 ; 常温(60℃以下)                              流体 ; 海水、ホウ酸水
- ・ 流量/揚程                              流量 ; 100ℓ/min、                              揚程 ; 10m 以上
- ・ 動力                              AC200V φ 3×0.75kW

(3) 試験架台の増設

既設の試験架台に隣接して、下記仕様の試験架台を増設した。

① 試験架台仕様

- ・ 床面積                      B3m × W2.m (既設架台;B3m×W3m)
- ・ フロア高さ                      2.5m スパン×3 階建て(架台 7.5m 高さ)
- ・ アクセス                      2 階及び 3 階への階段を設置のこと
- ・ 床、安全柵                      2 階/3 階床を設けた。架台周囲は落下防止のための安全柵、滑り止めを設けた。

(4) 試験溶液の移送/注水配管

① 溶液移送配管

架台 2 階に据付の貯水槽タンク-移送ポンプ間、及び移送ポンプ-架台 3 階への溶液タンク間について、下記仕様の配管を施工した。

- ・ 配管材                              20A 塩ビ管/耐食材を使用のこと
- ・ 接続継ぎ手                              機器接続はユニオン継手使用した。
- ・ 計装品取付  
移送ポンプ出口に流量計取付(支給)/ネジ込接続

- ・ 弁類  
溶液タンク接続孔に逆止弁、止め弁を取付のこと
- ・ 施工数 #1/#2 の 2 系統配管を施工した。
- ・ 移送ポンプ出口配管は、分岐にて 2 台の溶液タンクに接続。
- ・ 溶液タンク 2 台の分接続は、移送ポンプ 2 台とも実施。
- ・ 架台 2-3 階の立上げ配管の最下部位置にドレン弁取付(8A)

#### ② 溶液給水配管

溶液タンク 2 基より電磁弁を介して合流させ、下降管に給水する水位調整ポンプ吸い込みまでの配管接続とし、下記仕様に沿って施工した。

- ・ 配管材 15A-ステンレス管を使用した。
- ・ 接続継ぎ手 PT ネジ込み接続
- ・ 弁類 溶液タンク出口に電磁弁(施工側手配/AC100V)
- ・ その他  
水位調整ポンプ配管の最下部位置にドレン弁取付(8A)

#### (5) 給水・排水配管

各種タンクへの上水配管、貯槽タンクへの純水配管、廃液/貯槽/溶液タンクへの給水配管、及び排水配管を下記仕様で施工した。

##### ① 純水配管

- ・ 配管機器 貯槽タンク#1/#2 タンク上蓋の注水孔に接続
- ・ 配管材 10A 塩ビ管
- ・ 弁、計装品 注水孔接続部に止め弁及び流量計(ネジ込/支給)取付

##### ② 上水配管

- ・ 配管位置 廃液シク近傍、貯槽タンク近傍、溶液タンク近傍
- ・ 配管材 15A 塩ビ管、端部に止め弁及びブレードホース:3m を取付

#### (6) 操作盤、電源配線、計装配線

下記仕様の溶液移送操作盤、溶液注水操作盤を製作据付し、電源配線、計装配線を施工した。

##### ① 溶液移送操作盤

- ・ 型式 屋内壁掛型
- ・ 操作器形状 W400×H500×B200mm
- ・ 盤据付計器 前面上部 警報表示、非常 SW、リセット SW



全面中央 純水量/移送水量表示 ×1 系統

溶液タンク水位表示 ×1 系統

移送ポンプ On/Off-SW ×2 系統

(使用する系統の表示/操作の切替 SW を設けた)

廃液ポンプ On/Off-SW ×1 系統

前面下部 攪拌器 On/Off-SW ×2 系統

- ・ 盤内部計器 盤内上部 接点リレー  
盤内下部 入出力端子、電源端子等
- ・ 据付場所 試験架台 2 階

② 溶液注水操作盤

- ・ 型式 屋内壁掛型
- ・ 操作器形状 W500×H700×B250mm
- ・ 盤表示 ポンプ ON/OFF、攪拌器 ON/OFF、流量指示 2 箇所
- ・ 系統数 盤操作・表示について 2 系統配置
- ・ 配管位置 排水タンク近傍、貯水タンク近傍、溶液タンク近傍
- ・ 据付場所 試験架台 3 階

③ 溶液移送操作盤電源配線

- ・ 操作盤給電 AC200V  
AC100V
- ・ 電源出力 移送ポンプ 2 基 AC200V 0.3kW  
攪拌器 2 基 AC100V 0.5kW  
廃液ポンプ 1 基 AC200V 0.75kW

④ 溶液注水操作盤電源配線

- ・ 操作盤給電 AC200V  
AC100V
- ・ 電源出力 水位調整ポンプ 1 基 AC200V 0.3kW  
攪拌器 2 基 AC100V 0.5kW  
ヒータ電源 2 系統 AC200V 3kW  
電磁弁 2 台 AC100V 0.3kW

⑤ 溶液移送操作盤計装配線

下記の検出器について、電線管を用いたケーブル敷設により溶液移送操作盤

の入力端子に配線接続した。

- ・ 純水給水量 貯槽タンク給水 4芯シールド 2系統
- ・ 溶液流量 移送配管流量 4芯シールド 2系統

⑥ 溶液注水操作盤計装配線

溶液タンクの温度計装、及び水位警報線について、電線管を用いたケーブル敷設にて溶液注水盤の入力端子に配線接続した。

- ・ 溶液タンク温度 溶液タンク上部 補償導線(K型) 2系統
- ・ ヒータ温度接点 溶液タンクヒータ 2芯 CVV 2本 2系統
- ・ タンク水位(圧力) 溶液タンク下部 4芯シールド 1系統
- ・ タンク水位接点 溶液タンク水位(上下) 6芯シールド 2系統

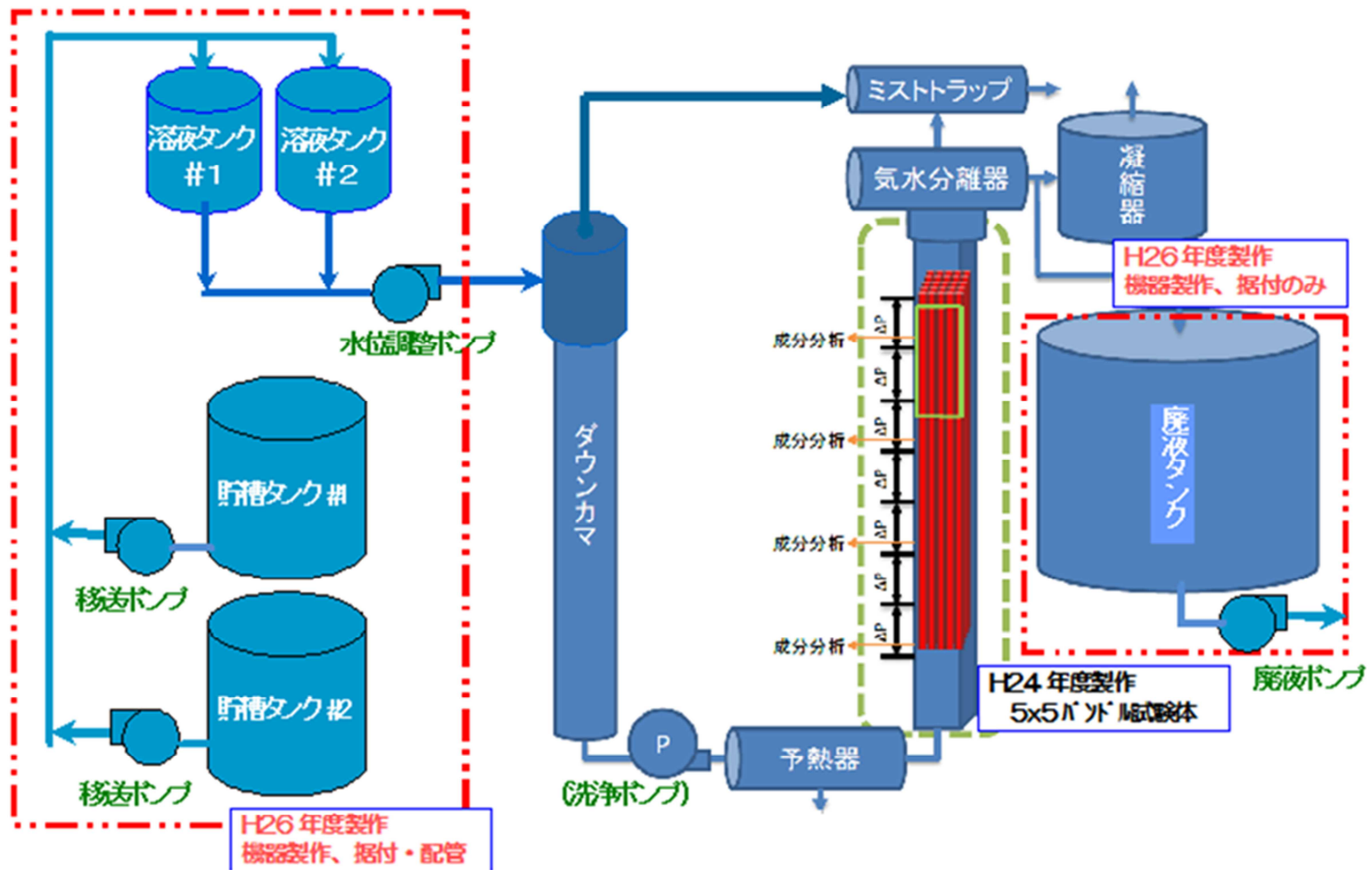


図 3-1 燃料バンドル除熱試験装置の機器構成及び配管接続

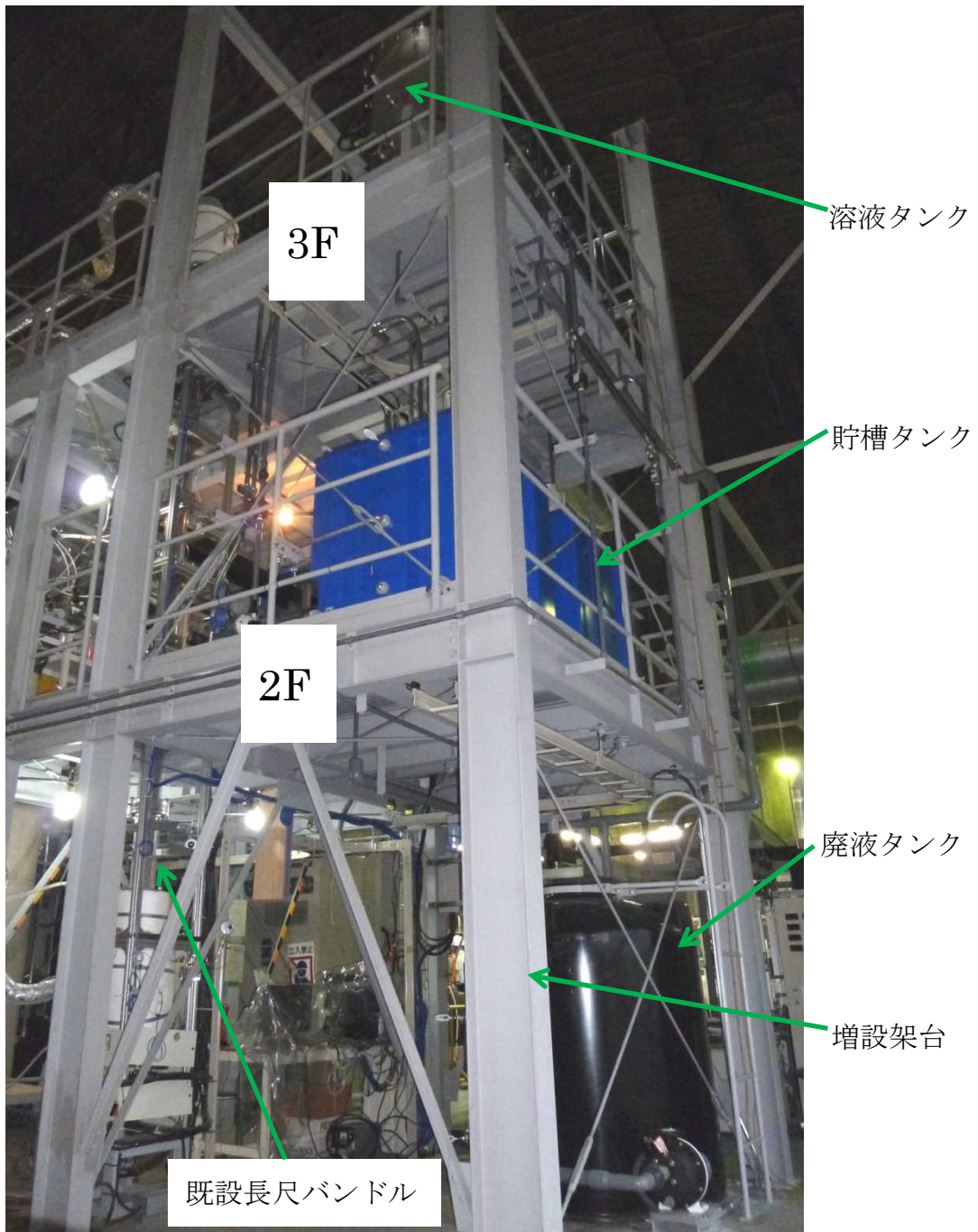


図 3-2 洗浄・廃液機器の全景写真



图 3-3 溶液移送操作盤据付状况写真



图 3-4 溶液注水操作盤据付状况写真

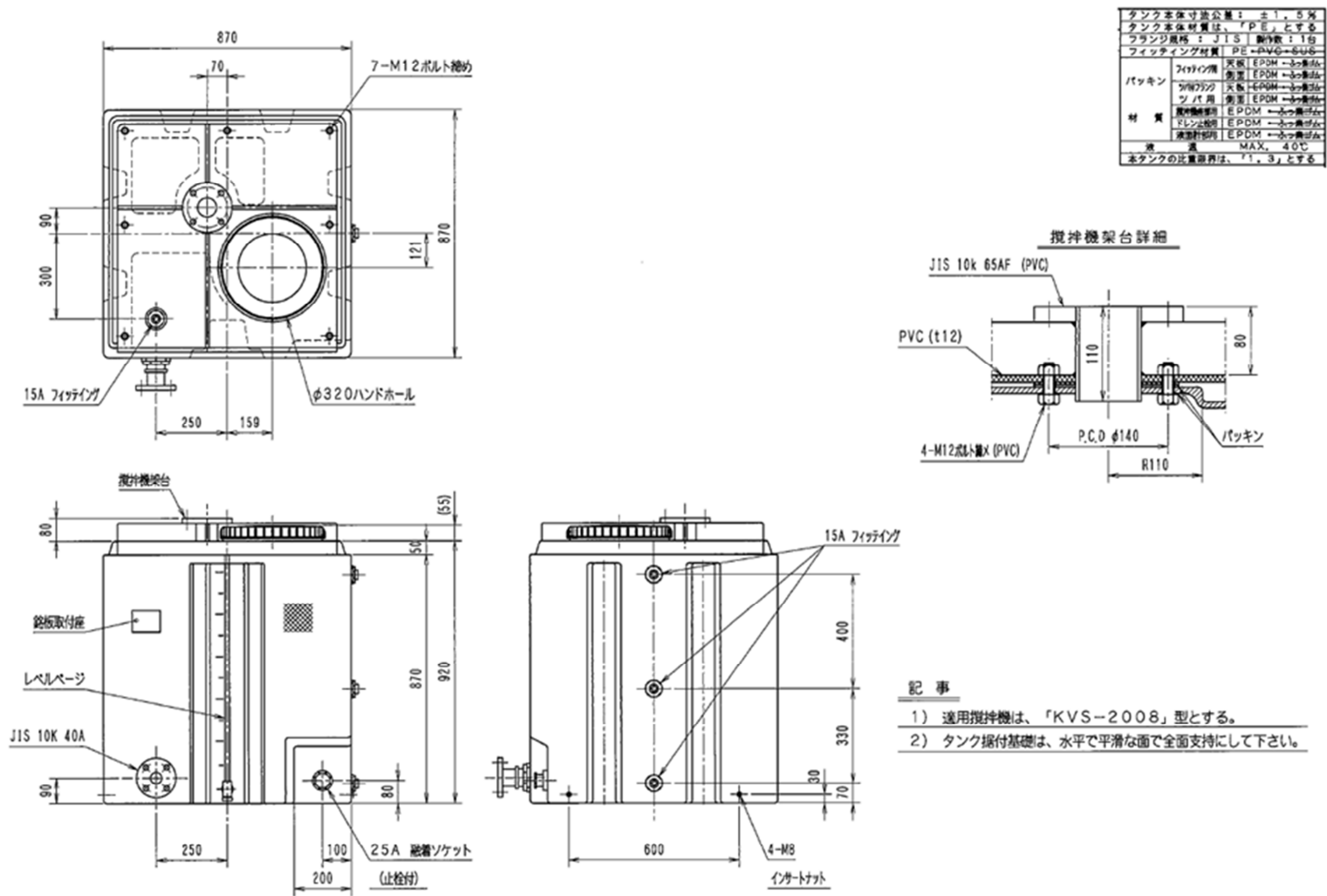


図 3-5 貯槽タンク寸法図

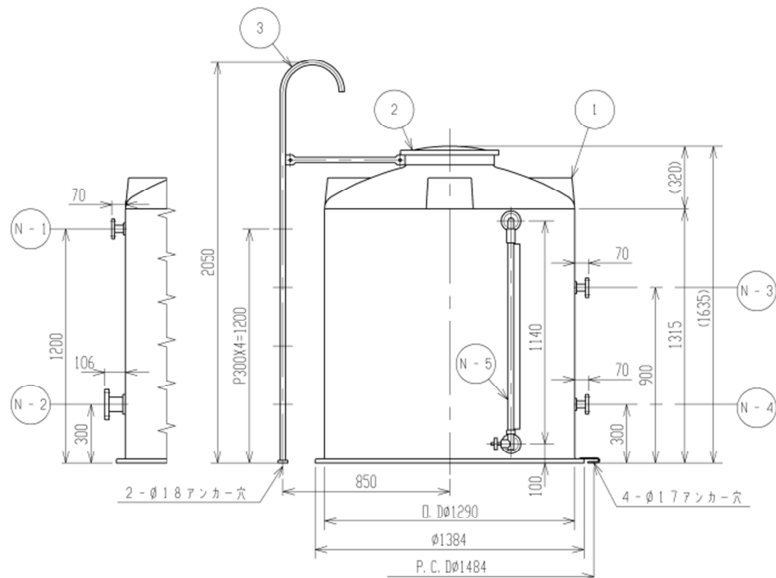
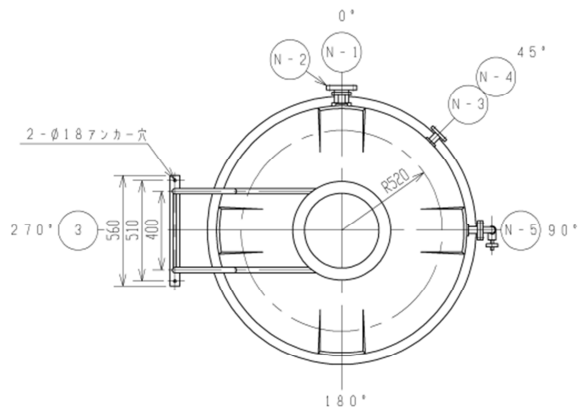


図3-6 廃液タンク寸法図

部番 PART. NO.	名 称 NAME OF PART	材 質 MATERIAL	個数 Q'TY	備 考 NOTE
1	タンク	P E	1	1.5 M <sup>3</sup> (黒) t=6
2	マンホール	P E	1	φ380 検込式
3	梯子	S G P	1	20 <sup>A</sup> RBφ16 (SS400)
N-1	給水口	P E	1	20 <sup>A</sup> 融着F
N-2	廃液口	P E	1	50 <sup>A</sup> 融着F
N-3	温度採取口	P E	1	20 <sup>A</sup> 融着F
N-4	温度採取口	P E	1	20 <sup>A</sup> 融着F
N-5	液面計	P V C	1	20 <sup>A</sup> 融着F <small>AVC 融着製法適用</small>

注記 1. アンカー押工金具 (SS400) 4ヶ同送トスル。

タンク基本寸法公差: ±1.5%		
付属品取付位置ハ平面図ニヨル。		
フランジ規格: JIS	製作数: 1台	
フィッティング材質	PE P V C S U S	
パ ツ キ ン	フィッティング用	天板 EPDM FKM 側面 EPDM FKM
	フランジ用	天板 EPDM PTFE 側面 EPDM PTFE
融着F (PE) ハJIS10 <sup>K</sup> F相当トスル。		



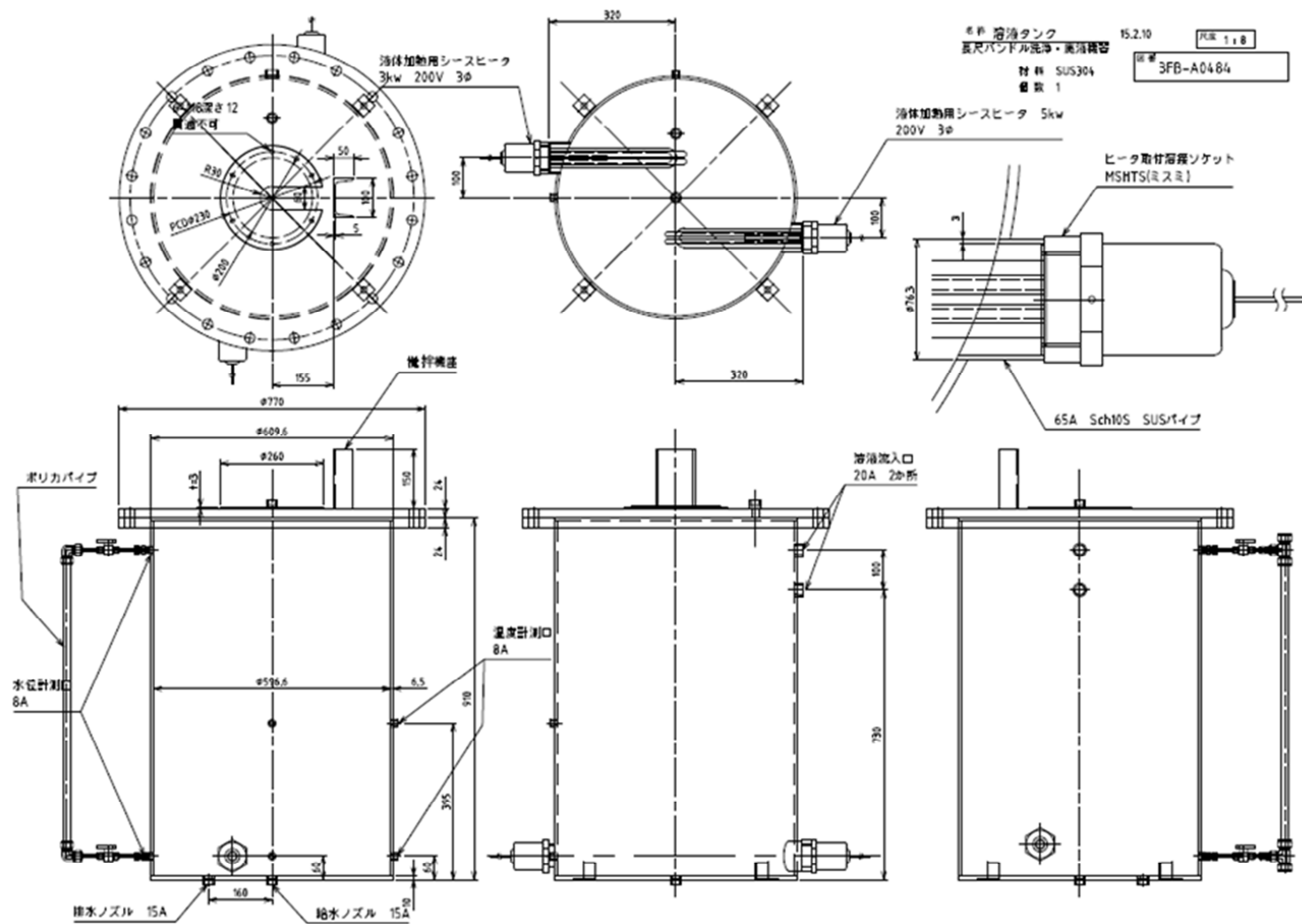


図 3-7 溶液タンク寸法図

## 3.2. 短尺バンドル試験装置

海水が注入された原子炉燃料模擬バンドル流路において、沸騰濃縮による塩析出挙動及び濃度分布を調べるため、短尺バンドルを用いた沸騰濃縮試験を実施し、析出塩を X 線 CT 撮影して、析出量と塩見掛け密度をバンドル試験体内の各位置で取得する。昨年度は、海水系でのデータ取得を行った。今年度は、海水系に加え、海水とホウ酸水の混合溶液を対象とし、ホウ酸の影響を評価する。

### 3.2.1. 基本仕様

短尺バンドル沸騰濃縮試験装置は、昨年度と同様な設備構成である。本試験におけるヒータバンドルの基本仕様は以下の通りである。

- 設計圧力 0.2 (MPa)
- 設計温度 200 (°C) (ロッド表面温度)
- 最高温度 600 (°C) (ロッド表面温度)
- 主要材質 耐腐食材(被覆管材は NCF600 相当品)
- 使用流体 海水あるいは海水+ホウ酸ナトリウム混合水

### 3.2.2. 装置概要

試験装置は、可視化容器に(5×5)バンドルが組み込まれ短尺試験体、下降配管(模擬配管)、凝縮タンク、試験体電源、及び溶液タンク、廃液タンク等から構成される。図 3-8 に装置の概略構成図を示した。

短尺試験体は、発熱長が短い電気加熱のヒータロッドをスペーサで(5×5)正方格子に束ねた(5×5)バンドルを試験容器に挿入されたもので、ヒータロッドへの上部は O リングシールにて大気へ引出して給電している。

短尺試験体への給水は、飽和水溶液を所定水位に一定維持の下降管下部と短尺試験体下部との配管接続にて U 字管流路とすることで、短尺試験体の通電加熱により沸騰状態の水位を所定に維持する構成としている。下降管内溶液の温度は、管側面にヒータを巻付けて加熱することで、飽和温度近傍にて温度維持している。また、短尺試験体内の水位は、下降管水位をポンプ給水にて所定水位に調整することで一定に維持している。

短尺試験体で発生した蒸気は、市販タンク底部に蒸気放出コイルを内蔵させた凝縮タンクへ放出して冷却する。凝縮タンク上部にはドーナツ状スプレイヘッダーを配置し、スプレイノズルにて冷却水を散水している。

試験バンドルでの主な計測は、ロッド表面温度、バンドル内圧力、バンドル

水位、流体温度等である。

### 3.2.3. 装置詳細仕様

#### 1) バンドル仕様

試験に用いる短尺燃料バンドルの仕様を下記に示した。図 3-9 に短尺バンドルのロッド配列、概略形状を示した。また、図 3-10 にヒータロッドの形状寸法を示した。

- バンドル構成 5×5 正方格子配列
- バンドル出力 最大 50 kW (単相 AC200V印加時)
- ロッド形状寸法 外径 ;  $\phi 10\text{mm}$ 、発熱長 ; 530mm
- 出力分布 軸方向;一様分布、径方向;一様分布
- 模擬チャンネル 矩形チャンネル( $\square 68.3\text{mm}$ /コーナー R8mm)
- スペーサ 丸セルスペーサ模擬(有効発熱部 1 個)
- その他 バンドル下部にロッド位置決めの支持孔を形成  
電源供給及び熱電対はバンドル上部端より引出す構造

#### 2) バンドル内計測仕様

試験バンドルの所定のロッドにおいて、ロッド表面に熱電対を埋め込み温度計測が出来るものとし、図 3-9 に熱電対埋め込みの計装ロッドの配置、及びバンドル軸方向での温度計測位置を示した。

- 温度計装ピン配置 バンドル内に 5 本配置  
(図 3-9(a)径方向位置図に示す)
- 温度計測数 最大 2 カ所/ロッド
- 計測位置 発熱端部、スペーサ内  
(図 3-9(b)軸方向位置図に示す)

図 3-11 に短尺バンドル試験体の全体組立図を示した。また、図 3-11 の部品番号の名称、概略仕様を表 3-1 に示した。

#### (1) 可視化容器

- 設計圧力 0.2 MPaG
- 設計温度 120 °C
- 形式 縦型矩形管
- 内幅寸法 68mm × 68mm -0/+0.3 mm 以下
- コーナ形状 R9 mm +0/-1 mm

- 長さ 全長 800 mm
- 流路管接続 JIS5K 異型フランジ接続/印籠形状/芯出しピン取付  
フランジ間シールは O リングシール構造
- 接続孔 流入孔 25A-PT1 ネジボス ×1 カ所  
ドレン孔 15A-PT1/2 ネジボス ×1 カ所  
オーバーフロー孔 20A-PT3/4 ネジボス ×2 カ所  
(上部フランジ 下面位置)
- 計測孔 ボス形状 穴径 2mm/ISO 管用 PF1/8 ボス取付(O リングシール)  
個数 差圧 2 カ所(計測スパン 350mm)  
温度 2 カ所
- スペーサ
  - ・ 形式 丸セルスペーサ(5×5 正方格子) (図 3-12 を参照)
  - ・ 内幅寸法 66.0mm ×66.0mm ×H30mm
  - ・ 板厚 セル厚 ; 約 0.4mm、バンド厚 ; 0.5mm
  - ・ 材質 SUS 材にて製作、組立後全面テフロンコーティング
  - ・ 製作数 1 個
- 容器底板
  - ・ 形状寸法 JIS5K-100A 閉止フランジ(RF) ×厚さ 25~30mm  
接続 O リングシール構造
  - ・ ロッド支持孔 フランジ上面に 5×5 正方格子配列のロッド端栓差し込み孔  
差し込み孔 7×7mm×深さ 10mm  
孔配列 13×13mm ピッチにて 25 個(縦列;5/横列;5)  
(5×5 格子配列の差込孔は中心振分けにて配置)
  - ・ 排水孔 PT1/4 ネジ穴/六角穴付閉塞栓取付)
- その他 フランジボルト締付面は、半月形状(二つ割り)の当て板を用いてボルト締付
- 材質 ポリカーボネイト
- 製作数 3 体

## (2) 上部接続管

- 形式 薄肉円筒管
- 形状寸法 約 69mm×69mm×長さ 200mm(コーナー部 R8 以下)
- 接続形式 下端部 JIS5K-;100A-RF 接続  
(印籠接続にて芯だし構造)  
下端部 T 字管を接続にて上端は閉止板(□69mm 穴)溶接  
(周囲にシール板締のボルト穴)

- シール板     Oリングシール板、Oリング押え板  
                   (シール板/押え板のボルト穴は上下千鳥配置)
- 上部流路管     形状寸法 約 69 mm × 69 mm × H70 mm  
                   (テフロンコーティング処理)  
                   流路管取付 模擬チャンネル/上部接続管接続間に挟込  
                   上下部フランジ面はOリングシール。
  - 接続孔         蒸気放出孔 50A-PT2 ネジユニオン取付         1カ所  
                   計装線取出 穴径 50 mm ボスを溶接にて取付 2カ所  
                   Oリングシールの閉止板取付(PT1/4 ネジ孔 3個付)  
                   均圧孔 20A-PT1/2 ネジボス                 1カ所
  - その他         計測孔 穴径 2 mm/ISO 管用 PT1/8 ボス取付     2カ所  
                   エア抜き孔 上端部位置に PT1/4 ネジのボス 1カ所  
                   流路管下端より 30 mm 上の管側面に排出孔(φ 15mm 32個)
  - 材質            本体             SUS304 にて管内面はテフロンコーティング  
                   シール部材 ポリカーボネイトにてテフロンコーティング
  - 製作数         3基

### (3) 下降管仕様

- 形式            円筒縦型
- 形状寸法        内径約 φ 100mm × H850 mm
- 接続形式        上端部            JIS5K-100A-RF 接続構造  
                   下端部            100A-付合わせ溶接キャップ
- 容器形構造
  - ・ 容器接続孔    均圧接続孔 20A-PT3/4 ネジ込ボス  
                   バンドル接続     25A-PT1 差込み溶接  
                   溶液供給孔 10A
  - ・ 加熱ヒータ    容器下部胴部     マイクロヒータ巻付(約 10m)/AC200-2kW  
                   表面温度熱電対取付 (2カ所)
  - ・ 計測孔         流体温度         PT1/4 ネジボス         1カ所  
                   液位差圧         PT1/4 ネジボス(500 mm) 2カ所
- 材質            SUS304            (下部シール板はポリカーボネイト)
- 製作数         1基

### (4) 凝縮タンク仕様

- 形式            円筒縦型
- 概略形状        市販ドラム管を追加工にて使用(φ 550mm × H850 mm)

- (容器上端部に上蓋締付固定のフランジ取付)
- タンク上蓋
    - 形状寸法  $\phi 600 \text{ mm} \times t5 \text{ mm(SUS)}$
    - 蒸気放出孔 JIS5K-50A フランジ(上蓋に固定)
    - 50A-SUS 管接続にてタンク内上部で支持固定
    - 大気開放孔 80A-塩ビ管エルボ端部に JIS5K-FF 取付
    - その他 エア抜き排出孔 ; 10A-PT3/8 ネジ込ボス
  - スプレイヘッダー
    - タンク内上端部にスプレイヘッダー取付
    - 形状寸法 管径 32A  $\times \phi 500 \text{ mm}$
    - スプレイノズル  $\phi 5 \text{ mm} \times 6$  箇所 (PT ネジ込)
  - 冷却コイル
    - $\phi 450 \text{ mm} \times 200$  ピッチ  $\times 5$  巻の薄肉管
    - (コイル内側に蒸気放出孔  $\phi 10 \text{ mm} \times 30$  箇所)
  - 接続孔
    - ① スプレイ水ノズル ; 15A 1 箇所
    - ② ドレン排水 ; 32A 1 箇所
    - ③ オーバーフロー ; 32A 1 箇所
    - ④ 給水孔 ; 15A 1 箇所
  - 計測孔
    - ① 水位計取付 ; PT1/4 ネジボス 2 箇所  
(計測範囲;700mm、可視部;アクリル管、止弁取付)
    - ② 温度計測 ; PT1/4 ネジボス 2 箇所
  - 換気ファン
    - 屋外排気の簡易ファン及び簡易ダクトを取り付けた。
  - 材質
    - SUS304

## (5) 溶液タンク

### 1) 溶液タンク

- 形式
  - 円筒縦型
- 形状寸法
  - $\phi 560 \text{ mm} \times H600\text{mm}$  上端部上蓋付
- 容器形状
  - ・ 容器接続孔
    - 凝縮管吐出し 25A-PT1.1/2 ネジボス
    - 戻り管接続 15A-PT1 ネジボス
    - ドレン孔 15A-PT1/2 ネジ(止め弁付)
  - ・ 液位計
    - 計測仕様 テフロン管;400mm/計測孔に止弁取付
  - ・ 計測孔
    - 温度計測 PT1/4 ネジボス 1 カ所
    - 液位計測 PT1/4 ネジボス 2 カ所
    - (計測孔距離 400mm)
  - ・ ヒータ
    - 上部上蓋に簡易型の投込みヒータ取付
    - ヒータ容量 AC200V 単相 2kW
- その他
  - オーヨー株式会社製容器 SUS タンクの追加工にて製作した。管内壁はテフロンコーティングした。
- 材質
  - 耐食材(SUS304 相当品)

- 製作数 1基

## 2)廃液タンク

- 型式 密閉丸型タンク(鉄枠付), 200ℓ 相当品  
(株)タクミナ <http://www.tacmina.co.jp>
- 形状寸法 □750 mm × H600 mm, 200ℓ 容器
- 貯蔵液 塩水
- 付属品 ドレン止弁
- 接続ノズル 廃液挿入孔(φ100mm以上)×1カ所、給水孔(15A)×1カ所  
排液孔(20A) 1カ所
- その他 水位表示(本体付属)
- 材質 PVC(ポリ塩化ビニル)
- 製作数 1基

## 3)洗浄タンク

- 形式 円筒縦型
- 形状寸法 内径約φ560mm × H600 mm 上端部上蓋付
- 容器形状
- ・ 容器接続孔
 

試験体戻り管	25A-PT1 ネジボス
ポンプ吸込み	25A-PT1 ネジボス
ドレン孔	15A-PT1/2 ネジ(止め弁付)
- ・ 計測孔
 

温度計測	PT1/4 ネジボス	1カ所
水位計測	テフロン管;400 mm	計測孔に止弁取付
- ・ ヒータ 上蓋に簡易型の投込みヒータ取付  
(ヒータ容量; AC200 V 単相-2 kW)
- その他 オーヨー株式会社製 SUS タンクの追加工にて製作した。
- 材質 耐食材(SUS304 相当品)
- 製作数 1基

## (6) その他

- 模擬チャンネルの軸方向には、下記仕様の内部溶液濃度を測定するための抽出孔を設けた。
  - ・ 抽出孔形状 ISO-1/8 ネジ込ボス/抽出孔; φ2 mm
  - ・ 抽出孔位置 図 3-13(C)に示す下降管 2箇所、配管 1箇所、試験体 2箇所の計 5箇所
  - ・ 抽出孔構造 スウェーヂロック (SS-400-1-2RT) の 1/8 インチオネジを使

用してセプタム（ゴム製、アジレント製 5080-8728）を締め込む構造とした。  
詳細は図 3-13(A)参照

- その他 流入口配管（25A-Sch20-SUS304）および下降配管側面のサンプリングポートは、適切な配管材料（ティー／ブッシュなど）を用いて同様なレイアウトとし、保温材などを考慮して針先が約 10mm 液中へ出るようにした。
- 上部接続管の下部フランジには、試験体据付固定のための支持金具を取り付けた。
- 配管、保温
  - 下降管と試験体管の接続配管、蒸気放出配管、及び排水管等の配管施工している。下降管と試験バンドルとの配管は保温している。また、蒸気配管は火傷防止のため、保温した。
- 配管サイズ
 

下降管/試験バンドル	SUS-25A-sch40
蒸気管	SUS-50A
均圧配管	SUS-20A
給水/排水	ブレードホース/15A～25A
- 配管接続
 

試験バンドル	ユニオン接続、蒸気配管はフレキ管接続
下降管	下部配管は差込み溶接、上蓋は PT ネジ込
凝縮タンク	JIS5K-2B-FF
- その他
 

洗浄ポンプ	シリコン系ブレードホースでポンプ及び試験体、洗浄タンクと接続
-------	--------------------------------
- 保温
 

下降管	下降管本体及び下部配管の保温
試験バンドル	上部接続管、蒸気配管の火傷防止
- 計装品取付、配線
 

計装品の導圧配管にはテフロンチューブを使用し、継手にはメイルタイプを使用した。計測取出し部は止弁を設けた。計装配線は装置架台に簡易端子箱を取付け、内部に端子台を設けて計装品の配線施工した。
- 圧力計測
 

試験部上部圧力	デジタル圧力計/PT1/8 ネジ
---------	------------------
- 差圧計測
 

加熱部差圧	微差圧計/G1/8 ネジ
下降管液位	微差圧計/G1/8 ネジ
- 温度計測
 

試験バンドル	K 型シース熱電対(φ 1.6mm) 2 カ所
下降管表面	K 型シース熱電対(φ 1.6mm) 2 カ所
下降管内温度	K 型シース熱電対(φ 1.6mm) 2 カ所
接続配管温度	K 型シース熱電対(φ 1.6mm) 1 カ所
凝縮タンク温度	K 型シース熱電対(φ 1.6mm) 2 カ所
- 排水

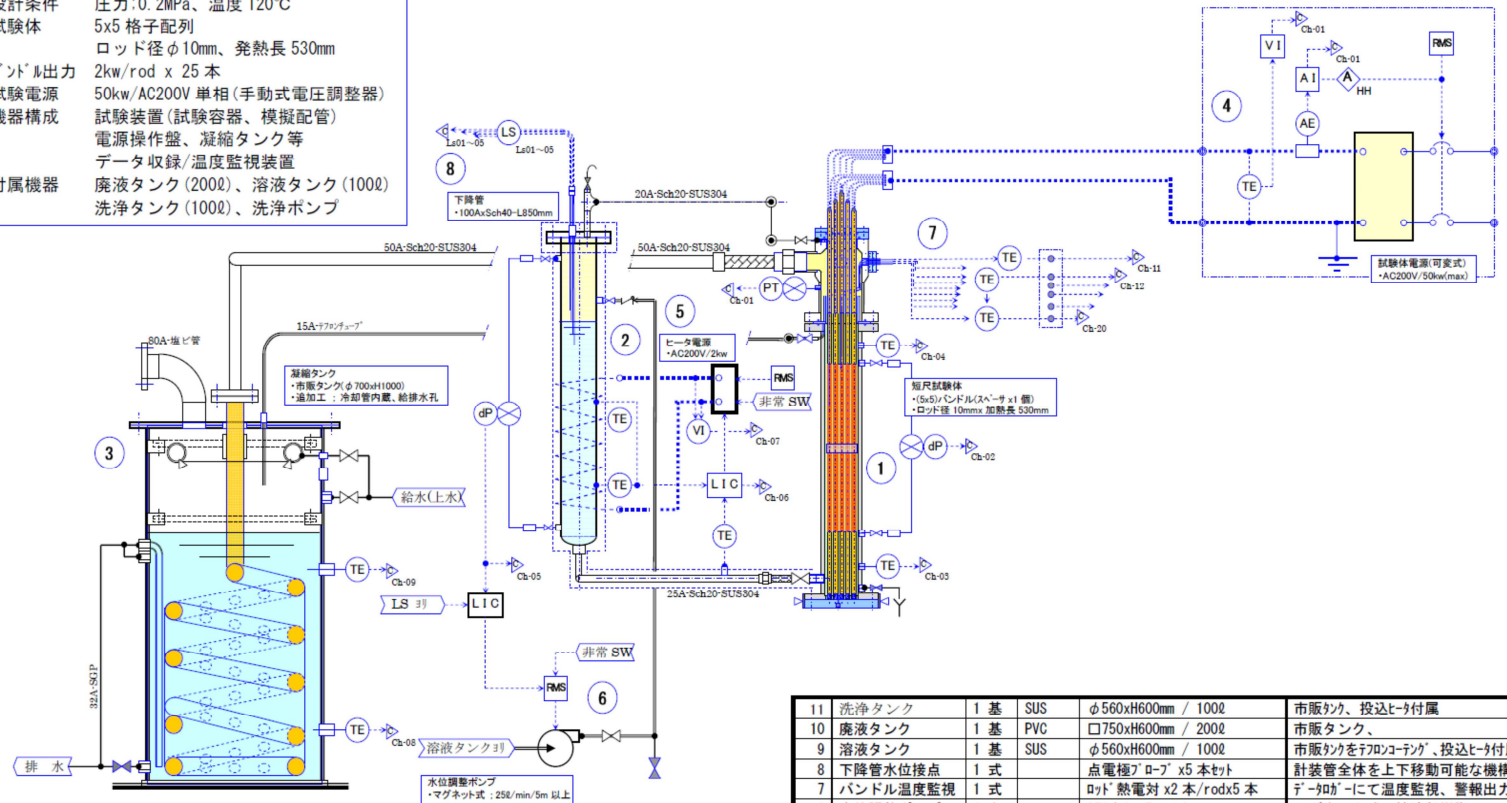


- ・ 機器のドレンは、ブレードホースを用い、接続継手はリングジョイントを用いた。
- 電源配線
  - ・ 短尺バンドルの電源は、付属の電源リード線を接続し、簡易架台下部位置に電源端子台を設けて接続した。
  - ・ 下降管のヒータ電源は、バンドルヒータ同様に、端子箱内に端子台を設けて接続した。

#### 3.2.4. 装置改造部分の概要

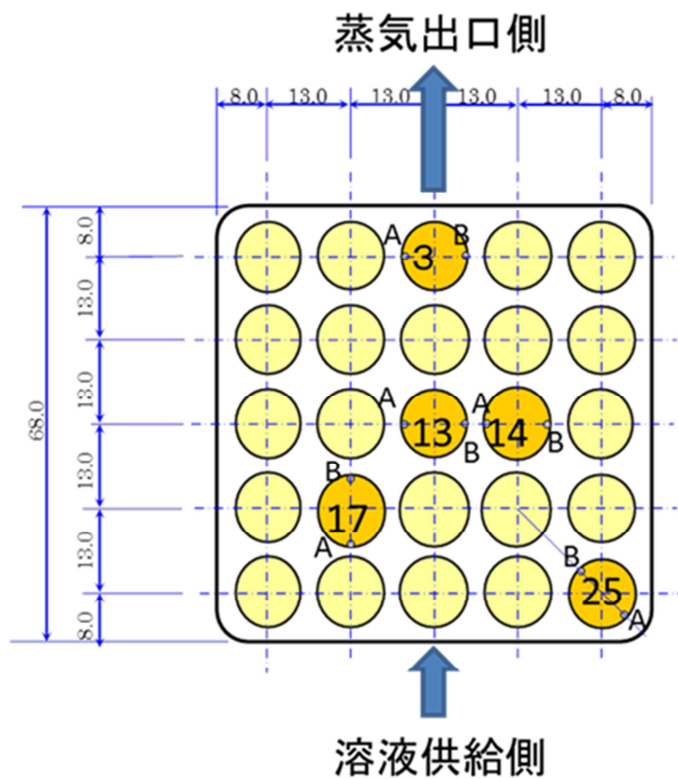
平成 25 年度の試験において、水位が高い試験条件において試験体上部の蒸気放出管出口より試験液が流出し、試験体内の沸騰濃縮が緩和される現象が確認されていた。このオーバーフロー現象を抑える目的で、蒸気放出立上げ管を 50A から 100A に改造した。さらに試験体内の上部流路管の長さを短くして試験体内での蒸气流路を大きくすることにより内圧上昇を緩和した。

- 試験装置仕様**
- 設計条件 圧力:0.2MPa、温度 120℃
  - 試験体 5x5 格子配列  
ロッド径φ10mm、発熱長 530mm
  - バンドル出力 2kw/rod x 25 本
  - 試験電源 50kw/AC200V 単相 (手動式電圧調整器)
  - 機器構成 試験装置 (試験容器、模擬配管)  
電源操作盤、凝縮タンク等
  - 付属機器 データ収録/温度監視装置  
廃液タンク (200ℓ)、溶液タンク (100ℓ)  
洗浄タンク (100ℓ)、洗浄ポンプ

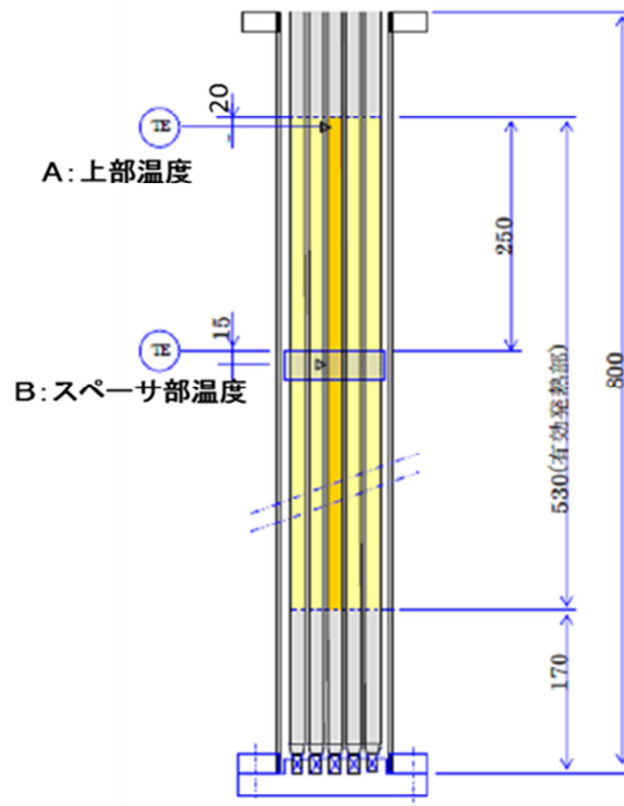


11	洗浄タンク	1 基	SUS	φ560xH600mm / 100ℓ	市販タンク、投込ロータ付属
10	廃液タンク	1 基	PVC	□750xH600mm / 200ℓ	市販タンク、
9	溶液タンク	1 基	SUS	φ560xH600mm / 100ℓ	市販タンクをフロンコーティング、投込ロータ付属
8	下降管水位接点	1 式		点電極プローブ x5 本セット	計装管全体を上下移動可能な機構
7	バンドル温度監視	1 式		ロッド 熱電対 x2 本/rod x5 本	テフロンにて温度監視、警報出力
6	水位調整ポンプ	1 台		25ℓ/min-5m 以上	マグネット式、接液部樹脂
5	試験溶液予熱電源	1 式		AC200V-4kw /ON-OFF 制御	流入温度制御、温度警報付属
4	試験ヒータ電源	1 式		AC200V-50kVA/手動電圧調整	指示計器、電源 ON/OFF・警報付属
3	凝縮タンク	1 基	SUS304	φ700xL1000mm/内部に冷却管	市販容器を追加加工にて製作
2	下降配管	1 基	SUS302	100AxSch40xL850mm	管内壁はフロンコーティング処理
1	模擬バンドル	3 体	NCF600	5x5 φ10x 加熱長 530mm	試験容器、スペーサ含む
番号	品名	員数	材質	概略仕様	備考

図 3-8 短尺バンドル試験装置概要



(a) バンドルロッド配列



(b) 軸方向熱電対位置

図 3-9 試験バンドルのロッド配列及び熱電対位置

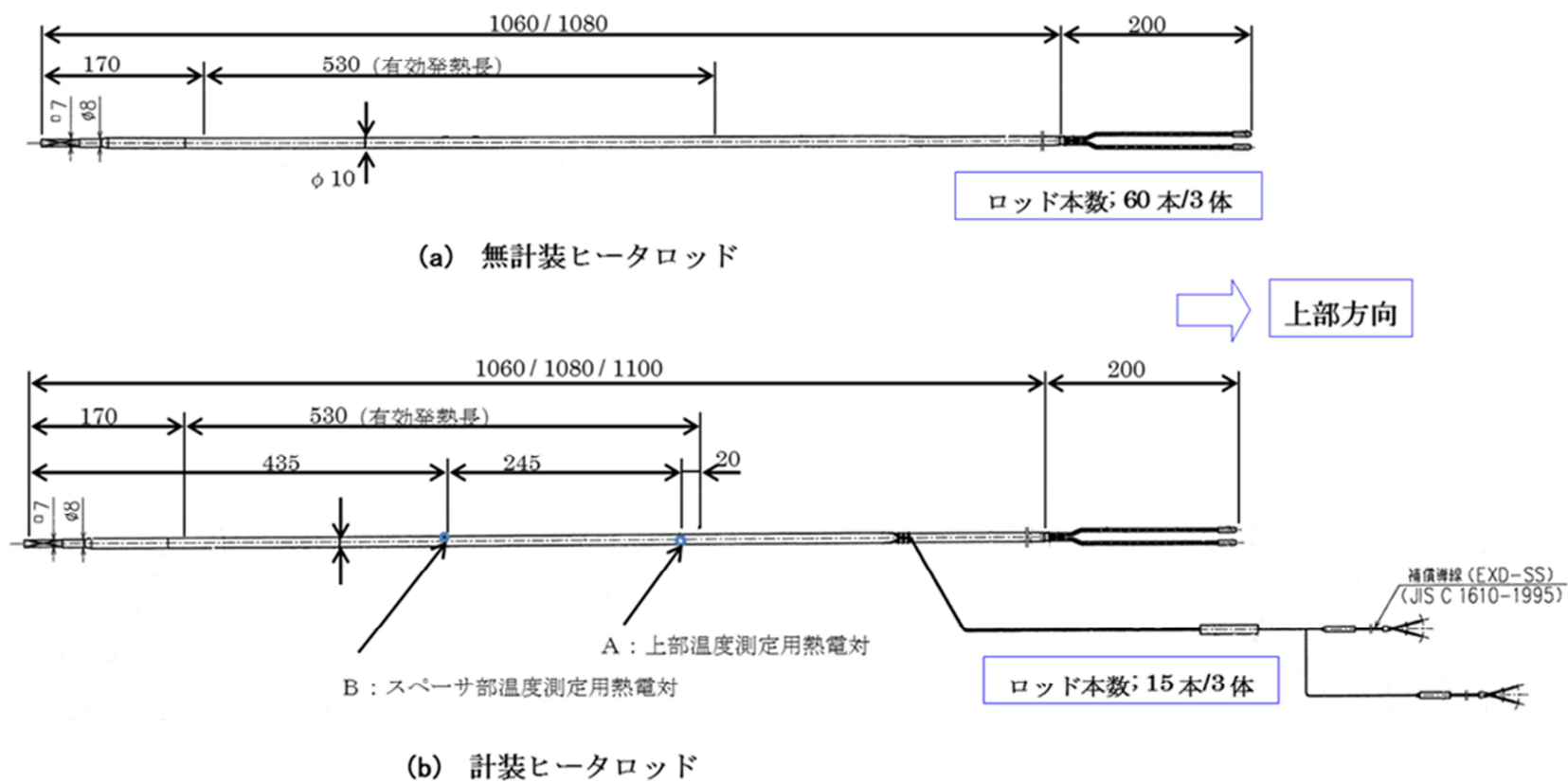


図 3-10 短尺ヒータロッド形状寸法図

**試験バンドル仕様**

- 設計条件 圧力:0.2Mpa、温度:120℃ (ロッド表面;400℃)
- バンドル構成 (5x5) 格子配列
- 発熱形式 間接加熱 (非接地型)
- ロッド仕様
  - \* 発熱部 ロッド径:φ10 mm、発熱長:530mm
  - ロッド出力 :2kw/単相 AC200V
  - \* 電源仕様 AC200V/250A\_50kw x 1 台
- 発熱分布
  - \* 軸方向/径方向とも一様分布

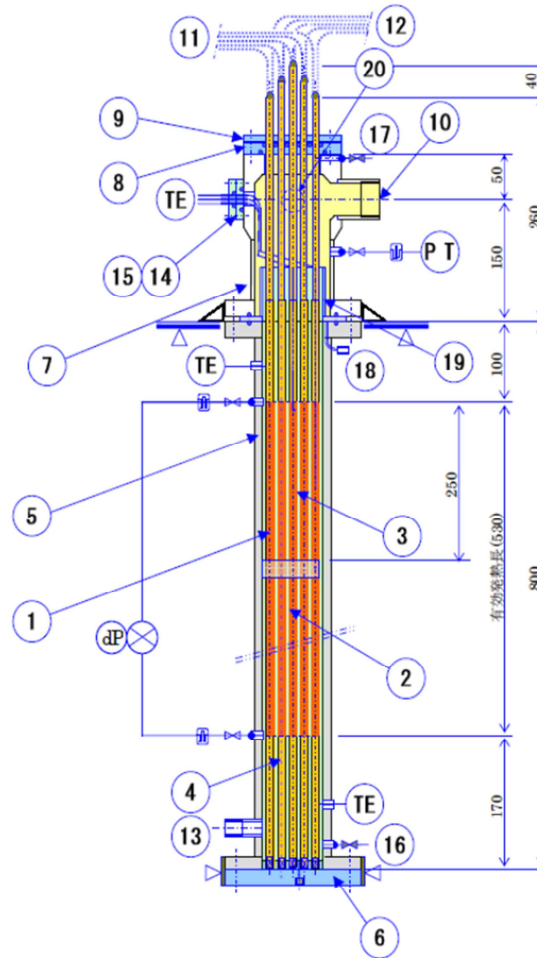
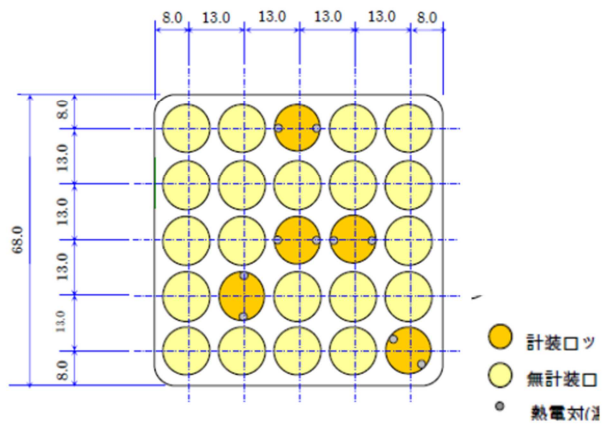


図 3-11 短尺バンドル試験体の概念図

表 3-1 短尺バンドル試験体構成部材の概略仕様一覧

13	流入孔	1カ所	銅ボネ	25A-PT1 ネジ					
12	ヒータ(-)極	25本	Cu 導線	ヒータ付属/接続コネクタ付					
11	ヒータ(+ )極	25本	Cu 導線	ヒータ付属/接続コネクタ付					
10	上部出口孔	1カ所	SUS304	50A-PT2.1/2 ネジ					
9	Oリング押え板	1枚	SUS304	φ120x10mm-φ9x25 穴					
8	圧力シール板	1枚	SUS304	JIS5K-100A-□65x 深 7mm					
7	上部容器	1個	SUS304	φ100xH250mm/100A-FF	20	均圧接続孔	1個	SUS304	15A-PT1/2-ボス
6	可視化容器底板	1枚	銅ボネ	JIS5K-100A-□7x25 溝穴	19	上部流路管	1個	SUS304	□68xL70mm/
5	可視化チャンネル容器	1体	銅ボネ	□68xL800mm/100A-FF	18	水位排水孔	2個	SUS304	20A-PT3/4-ボス
4	ダミーロッド	25本	SUS304	φ10xL170mm_接続:M6	17	上部エア抜き孔	1式	SUS304	10A-PT3/8ボス
3	スペーサ	2カ所	SUS304	丸セル模擬(テフロン被覆)	16	下部ドレイン孔	1基	SUS304	10A-PT3/8ボス
2	ヒータロッド	25本	NCF600	φ10x 加熱長 530mm	15	Oリング押え板	1枚	SUS304	JIS5K-50A/φ6SUS管 x5
1	模擬バンドル	2体	NCF600	5x5_φ10xL1200mm	14	熱電対取出し孔	1個	SUS304	JIS5K-50A/Oリングシール
番号	品名	員数	材質	概略仕様	番号	品名	員数	材質	概略仕様

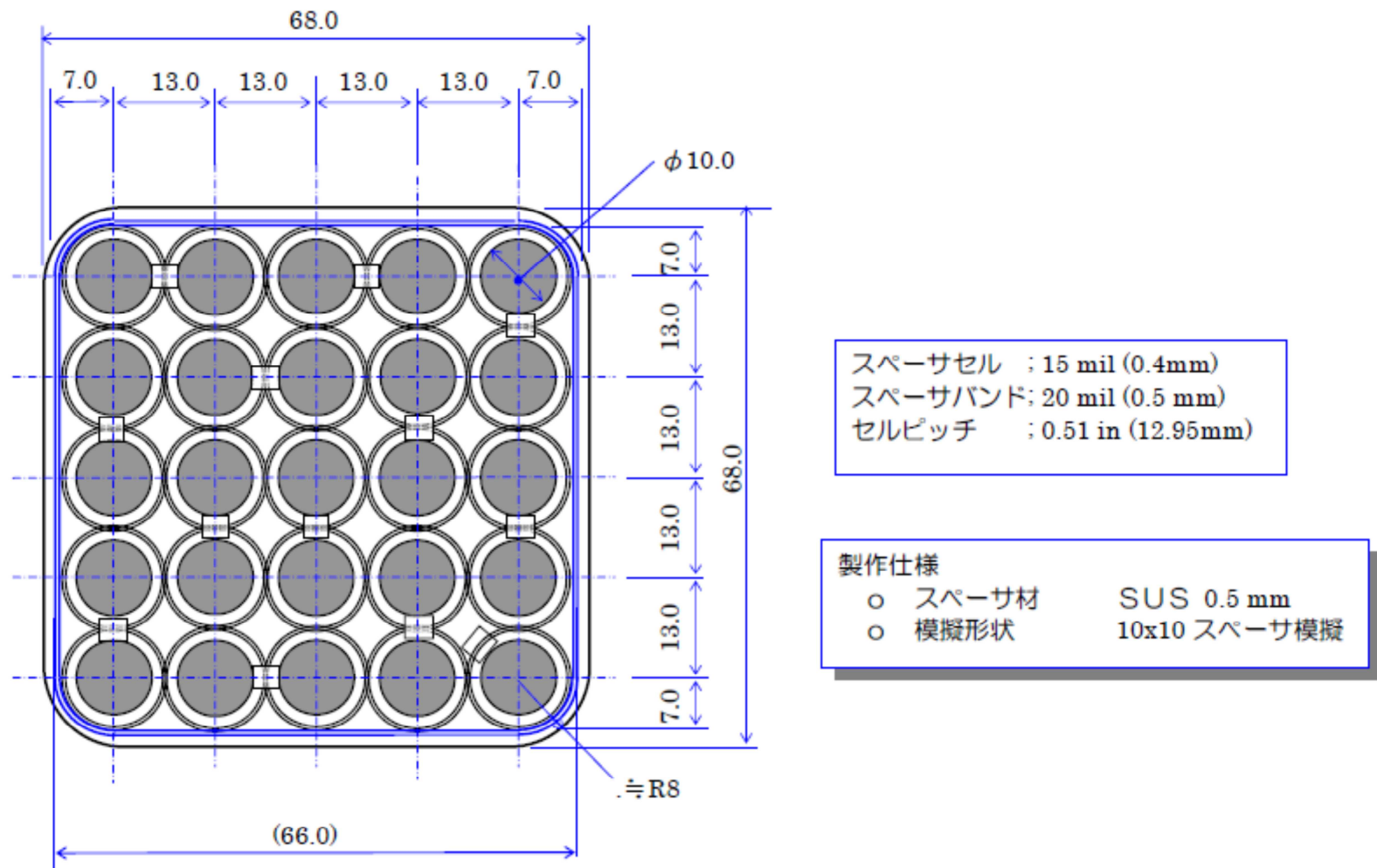
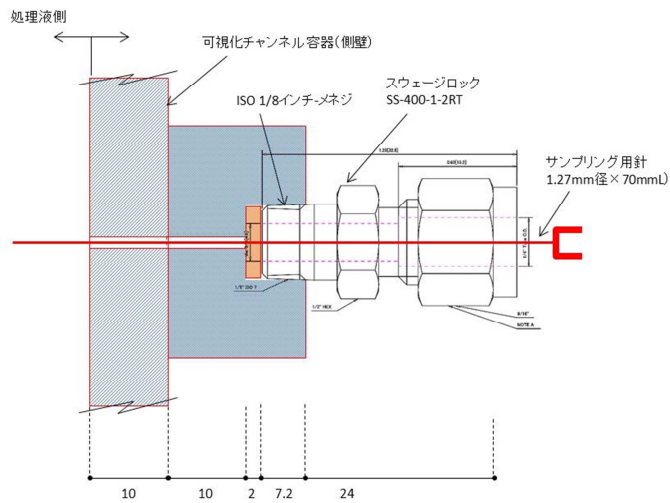
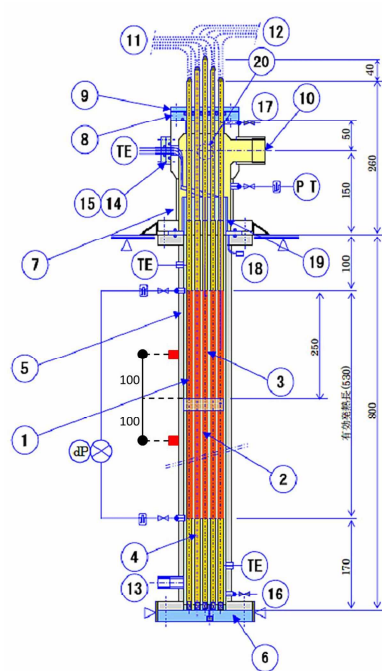


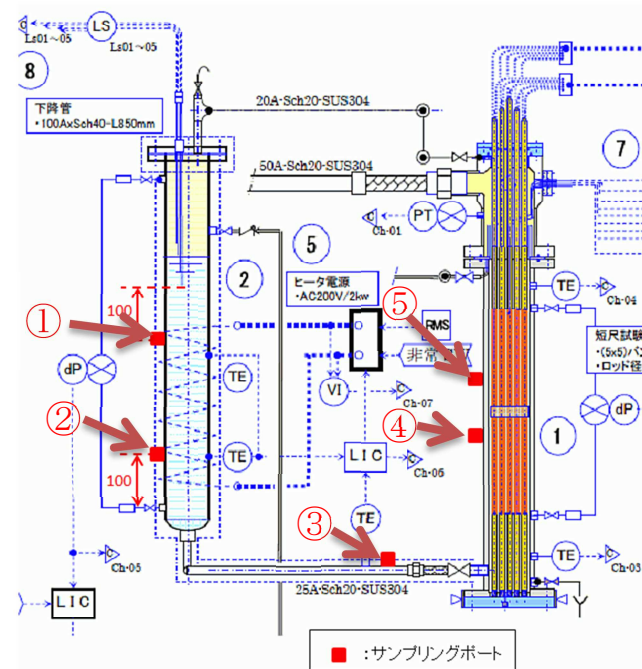
図 3-12 5×5 バンドル試験スペーサの形状寸法



(A) ポート寸法



(B) 可視化チャンネル側壁



(C) 流入孔配管および  
下降配管

図 3-13 サンプリングポートの位置および構造



### 3.2.5. X線 CT 撮影設備

X線 CT 撮影は、株式会社光子発生技術研究所所有の装置（model MIC-RT）を使用した。表 3-2 に X線撮影装置の仕様を示す。図 3-15 に回転試料台及び放射線検出器であるフラットパネルディテクタの写真を示す。回転試料台の上に載せた短尺バンドル試験体が測定中に揺れないように固定するため、設置台と短尺バンドル試験体の間に入れる台座を作成した。図 3-16 に台座の制作図を示す。

サンプルは、回転中心が撮影パネルから 450 mm の位置に設置し、バルブの向きが図 3-17（上から視点）のようになるように設置した。バンドル本体に対してバルブが図中では左上になるように 45 度回転した位置に配置した。図中上部には X線源を、下部には板状の撮影用のフラットパネルを記載した。一点鎖線はターンテーブルの回転中心と X線源中心とを結ぶ直線として示す。

図 3-18 に高さ方向の撮影範囲を示す。X線 CT の高さ方向の撮影範囲は上部と下部とで二分割されている。上部は図中に赤色で示す範囲で、最上部のバルブから 20 mm 上から下方に 282 mm の範囲とした。下部は図中に青色で示す範囲で最下部バルブから 13 mm 下より上方に 282 mm の範囲とした。上部と下部の範囲はスペーサ部にて 10 mm 重なり、上部と下部合わせて高さ 550 mm 以上の視野（図 3-18 中の緑色矢印）を確保した。

水平方向には図 3-18 中に緑色矢印で示した範囲で、上部と下部共に 310 mm の範囲である。中点に回転中心が来るようにした。

X線の線量は、1 秒露光で 15000 カウントになる線量とした。撮影データの水平方向 230 mm を 1024 ピクセルにマッピングして CT 再構成を行った。再構成画素の 1 ピクセルは一辺 0.225 mm の立方体となっている。

表 3-2 X線撮影装置の仕様

構成	仕様			
マニピレータ	自動4軸構成(拡大軸・オフセット軸・昇降軸、回転軸)			
	高さ	500mm		
	直径	400mm		
	重量	100kg		
検出器	方式	フラットパネルディテクタ		
	検出面サイズ	16 inch		
	画素サイズ	200 $\mu$ m		
	画素配列	2048 x 2048 pixel(有効画素2028 x 1828pixel)		
	出力諧調	16ビット		
X線源	MIC6	5.5MV		
	コーンビーム			
撮影時間と分解能(例)	サンプルサイズ	撮影時間	分解能	備考
	$\Phi$ 156mm x H156mm	13分	78 $\mu$ m	最大倍率:2.5倍拡大撮影
	$\Phi$ 260mm x H260mm	13分	130 $\mu$ m	最小倍率:1.3倍拡大撮影
CTシステム	画像の種類	透視画像・二次元CT画像・三次元CT画像・MPR画像		
	ROIの種類	矩形・楕円・線分		
	ROIの計測	長さ・面積・角度・グレイ値の最大値、最小値、平均値、標準偏差		
		プロフィール表示・ヒストグラム表示		
	三次元画像処理システム	VGStudioMAX(コンプリートパッケージ)		
座標計測・設計値/測定値比較・肉厚検出解析				
P201/VW50097欠陥/介在物解析				

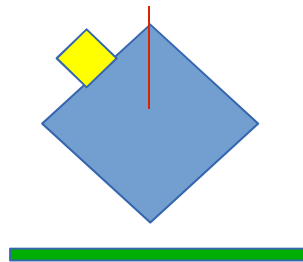


図 3-14 サンプルの設置位置



図 3-15 X線 CT 設備の回転試料台とフラットパネル

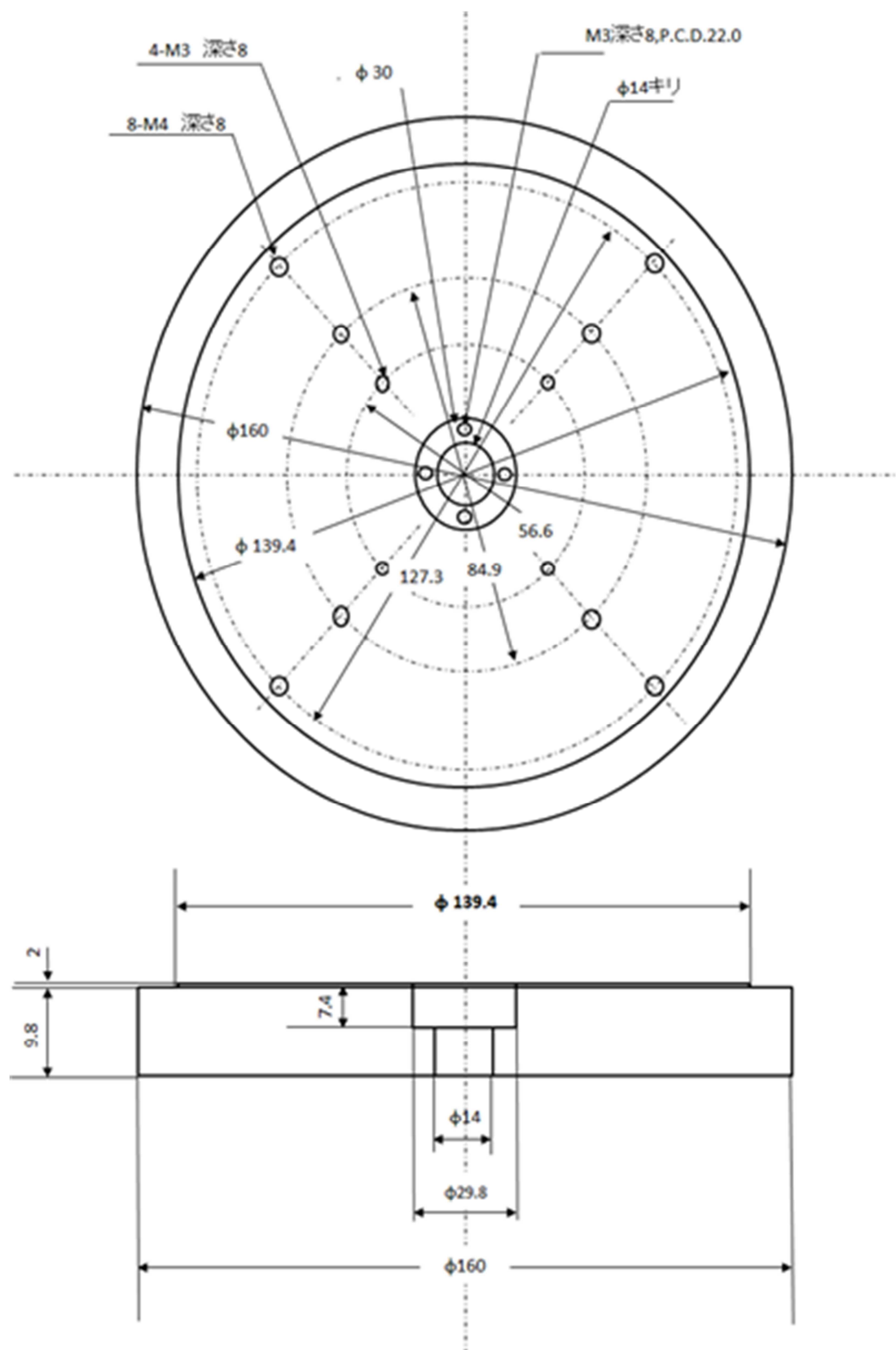


図 3-16 X線 CT 撮影用の台座

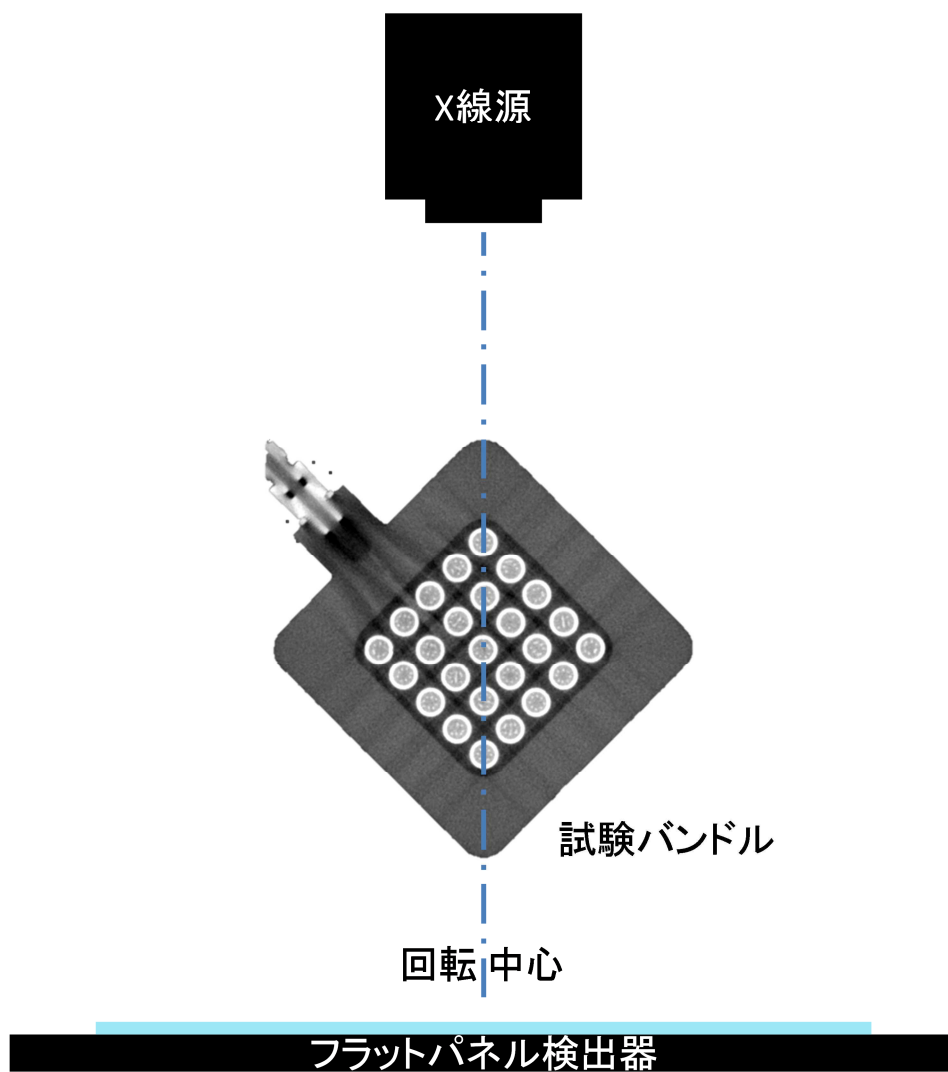


図 3-17 上部から見た短尺バンドル撮影位置と向き

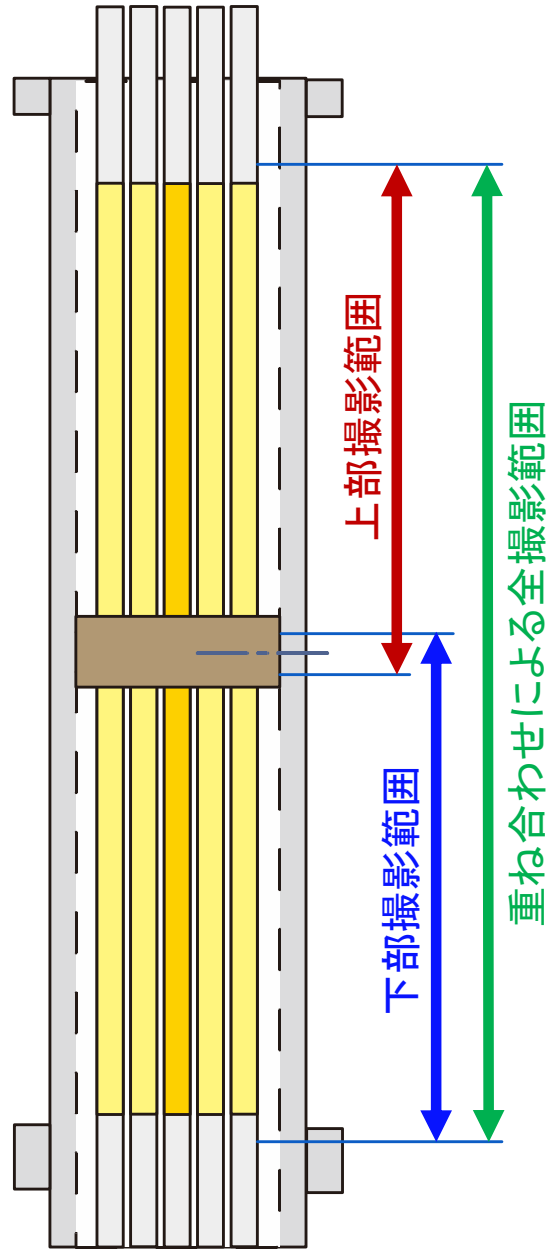


図 3-18 高さ方向の撮影範囲

### 3.2.6. ICP-MS 測定装置

アジレントテクノロジー社の ICP-MS（誘導結合プラズマ質量分析）装置 7700X を用いて測定を行った。図 3-19 右側に ICP-MS 装置の外観写真を示す。



図 3-19 LA-ICP-MS 設備の外観図

### 3.2.7. 試験条件及び試験手順

#### 3.2.7.1. 短尺バンドル沸騰濃縮試験手順

本項では前述の短尺バンドル試験体を用いた沸騰濃縮試験の手順を述べる。溶液タンクの試験溶液（人工海水または人工海水とホウ酸水との混合溶液）は溶解度が最も高くなる温度で且つ過度な蒸発が抑制できるように温調ヒータを用いて 70 °C になるように制御した。下降管は周囲の温調ヒータにより 98 °C に維持した。初期に低温時からの加熱では過温（オーバーシュート）による析出を抑制するため、一端 90 °C に制御し、徐々に設定値を 98°C になるように変更した。

沸騰濃縮試験は、バンドル試験体のヒータ電源を入れた後、沸騰が観察された時刻を開始とし、目標時間まで加熱を継続した。沸騰により液位は低下するが、自動制御により液位調整ポンプが自動的に起動／停止し、溶液タンクからの注液により一定液位が維持される。

溶液の採取は基本的には試験開始時と試験終了時とする。2 時間を超える実験条件については、試験時間の半分の時間の時点でサンプリングを行う。溶液の採取場所は、採取孔 1~5 とするが、条件によっては液面が採取孔よりも低い場合があり、その場合は採取しない。

目標時間まで沸騰濃縮試験を行った後、濃縮液を排出し、バンドル試験体の X 線 CT 撮影を行った。

約 60°C の洗浄液を洗浄ポンプで通水し、約 30 分間循環させる。洗浄状況を観察し、30 分間の循環で清浄にならない場合はさらに時間を延長して、洗浄を継続する。目視で循環水による洗浄が完了したと判断されたら、循環ポンプを停止し、バンドル試験体内に滞留する温水を抜く。その後、更にイオン交換水を上部から注水し、バンドル試験体内部を洗浄する。洗浄は、排水の塩分濃度が純水に近い値であることを確認できるまで実施した。しかしながら目視や塩分濃度で洗浄が確認できた場合でも、塩分が壁面等に固着していることも考えられる。このため、初期の 2 回の実験では洗浄後のバンドルの X 線 CT 撮影を行い、判別できる塩が存在しないことを確認し、洗浄方法が適切である確信を得た。

下降管の洗浄はバンドル試験体と同様に 30 分間洗浄液を流通させて洗浄した。洗浄液にはクエン酸を用いた。



### 3.2.7.2. 試験溶液

表 3-3 に、人工海水の組成を示す。本年度使用した人工海水は昨年度と同様にマリンアート SF-1 である。平成 24 年度に用いたダイゴ人工海水と比較しても主成分の違いは小さい。本試験では、初期および沸騰濃縮中に注液する溶液は共に人工海水の 2.5 倍濃縮とした。飽和温度における人工海水は 3 倍濃縮で硫酸カルシウムが析出するため、それより十分低い濃度として 2.5 倍濃縮とした。1 kg のイオン交換樹脂を通した水に、マリンアート 95 g を溶解させた溶液である。

ホウ酸塩は、五ホウ酸ナトリウム 10 水和物（富山薬品工業株式会社製）を用いた。混合水は、人工海水と五ホウ酸ナトリウムの塩濃度が 1 : 1 となるようにイオン交換水に溶解した液とした。具体的には、イオン交換水 20kg に人工海水 950g と五ホウ酸ナトリウム十水和物 1427g を溶解した液を試験液とした。

表 3-3 人工海水の成分

原料名	構造式	マリンアート	ダイゴ人工海水
塩化ナトリウム	NaCl	22.1 g	20.747 g
塩化マグネシウム	MgCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	9.9 g	9.474 g
塩化カルシウム	CaCl <sub>2</sub> · 2H <sub>2</sub> O	1.5 g	1.326 g
無水硫酸ナトリウム	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	3.9 g	3.505 g
塩化カリウム	KCl	0.61 g	0.597 g
炭酸水素ナトリウム	NaHCO <sub>3</sub>	0.19 g	0.171 g
臭化カリウム	KBr	96 mg	85 mg
ホウ砂	Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> · 10H <sub>2</sub> O	78 mg	34 mg
無水塩化ストロンチウム	SrCl <sub>2</sub>	13 mg	12 mg
フッ化ナトリウム	NaF	3 mg	3 mg
塩化リチウム	LiCl	1 mg	1 mg
ヨウ化カリウム	KI	81 μg	70 μg
塩化マンガン	MnCl <sub>2</sub> · 4H <sub>2</sub> O	0.6 μg	0.8 μg
塩化コバルト	CoCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	2 μg	0.2 μg
塩化アルミニウム	AlCl <sub>3</sub> · 6H <sub>2</sub> O	8 μg	8 μg
塩化第二鉄	FeCl <sub>3</sub> · 6H <sub>2</sub> O	5 μg	5 μg
タングステン酸ナトリウム	Na <sub>2</sub> WO <sub>4</sub> · 2H <sub>2</sub> O	2 μg	0.2 μg
モリブデン酸アンモニウム	(NH) <sub>6</sub> Mo <sub>7</sub> O <sub>24</sub> · 4H <sub>2</sub> O	18 μg	20 μg

### 3.2.7.3. 沸騰濃縮試験パラメータ

試験条件は、人工海水で水位 3 水準、熱流束 3 水準、沸騰濃縮試験時間 3 水準、混合水で水位 2 水準、熱流束 3 水準、沸騰濃縮試験時間 3 水準とし、合計ケース数は $(3+2) \times 3 \times 3 = 45$  ケースとした。

水位は加熱開始前において、発熱部頂部（TAF）を基準としてダウンカマの液位が一定になるように制御した。三水準として TAF, TAF - 100 mm, TAF - 200 mm を選定した。これらの値について、実施困難な条件が生じた場合には適宜受注者との協議に基づき変更を行った。

熱流束は定格出力の 0.5, 1.0, 1.5% を目安に 3, 6, 9 kW/m<sup>2</sup> の三水準とした。

沸騰濃縮時間は、発熱部沸騰濃縮濃度の簡易式を参照して 3 水準とした。表 3-4 に沸騰濃縮試験時間を目的塩水濃度の関数として示す。目的塩水濃度 40, 50, 60 wt% に対して、熱流束毎に示す。

表 3-4 沸騰濃縮試験時間

定格出力	%	0.5	1.0	1.5
熱流束	kW/m <sup>2</sup>	3.0	6.0	9.0
バンドル出力	kW	1.25	2.50	3.75
目標塩水濃度に到達する試験時間				
塩水濃度 wt%	40	3:54:41	1:57:21	1:18:14
	50	6:11:32	3:05:46	2:03:51
	60	9:36:48	4:48:24	3:12:16

試験時間の単位は「時：分：秒」である。

#### 3.2.7.4. ICP-MS による溶液分析

ICP-MS の分析において、分析対象とする元素は、B, Na, Mg, S, Cl, K, Ca, Sr, Br とした。標準液は関東化学製 Na, Mg, Ca, Cl, Br, B, K, Sr 標準液 1,000mg/L および SPEX 社製 S 標準液 1,000mg/L を使用した。上記元素のうち、Na, Mg, K, Ca, B, Sr は内標準法に従い定量化した。内標準は Be, Y 各 1mg/L の溶液をペリスタルティックポンプによるオンライン法で添加した。その場合、内標準溶液と試料溶液中での内標準物質のカウント比が約 16 : 1 となるため、試料中内標準物質濃度は約 60ng/L の測定を行ったことになる。試料の希釈及び検量線の作成は 1 % 硝酸を用いた。Br, S, Cl は 0.25%水酸化テトラメチルアンモニウム (TMAH)水溶液にてアルカリ希釈して測定。アルカリ溶液中での内標準は、ばらつきが大きかったため、絶対検量線法にて測定を実施。内標準を用いないため、アルカリ分析時には低濃度、高濃度の 2 カ所で添加回収による精度の確認を行った。

### 3.2.7.5. 塩析出量の推定方法

本年度の試験では、発熱長が実燃料の約 1/7 の短尺バンドルを用いて沸騰濃縮試験を行い、X 線 CT により析出塩の分布を可視化する。長尺バンドルはその長さ故、X 線 CT 設備内への設置が困難なため、析出量を定量化する方法を検討する必要がある。

本研究では、沸騰濃縮試験後に溶液を排出する際に、試験部差圧と排出量を同時計測することで、流路断面積の硬さ方向分布を得ることを検討した。この流路断面積の狭窄が塩析出を示すと考えられる。

溶液排出重量と差圧測定データ処理手順を以下に記載する。

#### ①塩付着量の評価手法

沸騰濃縮試験によって試験体内に付着した塩の量を推定するために、試験後の溶液排出重量とバンドル内の水頭差圧の時系列変化を測定する。塩付着量は測定データに基づき下記評価式で評価する。

$$\frac{dW}{dt} = \rho \cdot \frac{dV}{dt} = \rho \cdot \frac{d}{dt} (A \cdot Z) = \rho \left[ Z \cdot \frac{\partial A}{\partial t} + A \cdot \frac{\partial Z}{\partial t} \right] \quad (1)$$

用いた記号を以下に示す。

- $W$  : 溶液排出重量[kg]
- $V$  : 溶液排出体積[m<sup>3</sup>]
- $\Delta P$  : 試験体内差圧[Pa]
- $A$  : 試験体内流路断面積[m<sup>2</sup>]
- $Z$  : 試験体内高さ位置[m]
- $\rho$  : 溶液密度[kg/m<sup>3</sup>]
- $t$  : 時間[sec]
- $g$  : 重力加速度[m/s<sup>2</sup>]

ここで、 $A$  は時間に依存しないので  $\frac{\partial A}{\partial t} = 0$  になる。

また、 $Z$  は  $Z = \frac{\Delta P}{\rho g}$  で表され、 $A$  は  $Z$  の関数  $A(Z)$  で表されるので、(1)

式は (2) 式となる。

$$\frac{dW}{dt} = \rho \cdot A(Z) \cdot \frac{1}{\rho g} \cdot \frac{\partial \Delta P}{\partial t} \quad (2)$$

したがって、 $A(Z)$ は下記、式 (3) で求められる。

$$A(Z) = g \cdot \frac{dW}{dt} / \frac{\partial \Delta P}{\partial t} \quad (3)$$

さらに、塩付着部面積及びその割合は、式 (4)、(5) で求められる。

$$[\text{塩付着部面積}] = [\text{試験体内設計流路面積}] - A(Z) \quad (4)$$

$$[\text{塩付着部面積の割合}] = [\text{塩付着部面積}] / [\text{試験体内設計流路積}] \times 100\% \quad (5)$$

ここで、 $A(Z)$ は  $Z$  位置における試験体内流路の断面積である。

### 3.2.7.6. 洗浄効果の確認

試験体を再利用するに際して、洗浄方法が適切であるかを確認する分離効果試験を行った。

まず、人工海水の析出塩の洗浄効果について述べる。図 3-20 に使用した試験体を示す。昨年度の試験体から切り出して用いた。材質はポリカーボネイトである。洗浄試験の結果を図 3-21 に示す。いずれの洗浄剤を用いても、表面の付着物は取り除かれていることが確認できた。一方で蒸留水では、付着物は残存したままであった。

いずれの洗浄剤を用いても常温で短時間で表面付着物の洗浄効果があることが確認できた。同等の効果であるので、組成が単純で取り扱いが容易なクエン酸を用いて洗浄を行うこととした。

次に、海水とホウ酸水の混合溶液の析出塩の洗浄効果について述べる。図 3-22(a)に塩が付着したネジを示す。ネジは短尺バンドル試験体において析出箇所にはないが、微細な凹凸における析出塩の洗浄効果を観察しやすいことからネジを用いた。5%クエン酸に 30 分浸漬させると図 3-22(b)に示すように塩はほぼ完全に除去できたが、ねじ部とビス穴部に若干析出物が残存していた(図 3-22(c))。したがって、引き続き、イオン交換水に浸漬し、時々攪拌しながら 30 分間放置した。その結果、図 3-22(d)に示すように、ねじ部、ビス穴部共に析出塩は除去できた。ポリカーボネイト試験片についても同様に洗浄を行った。洗浄後は図 3-22(e)に示すように析出塩は除去できることが確認された。よって、混合溶液では、常温で 5%クエン酸洗浄 (30 分間浸漬) 後、イオン交換水洗浄 (30 分間浸漬し、時々攪拌) で表面付着物が洗浄できることが確認できた。

左上（昨年度使用した短尺バンドルヒータ試験体の側を輪切りにしたもの）  
 右上（クエン酸に使用）  
 左下（ユニゾールE V IIに使用）  
 右下（蒸留水に使用）

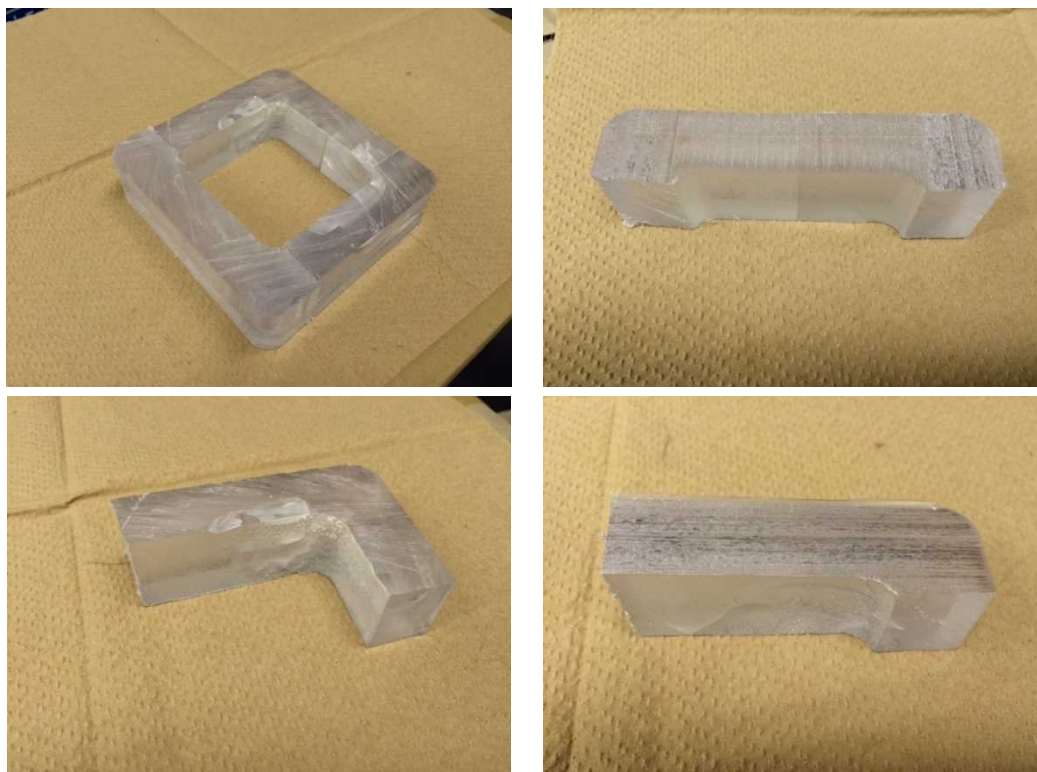


図 3-20 海水析出塩の洗浄効果試験に用いた試験体

左（5%クエン酸 常温 5分間静置浸漬）  
 右（ユニゾールEVII 常温 5分間静置浸漬）

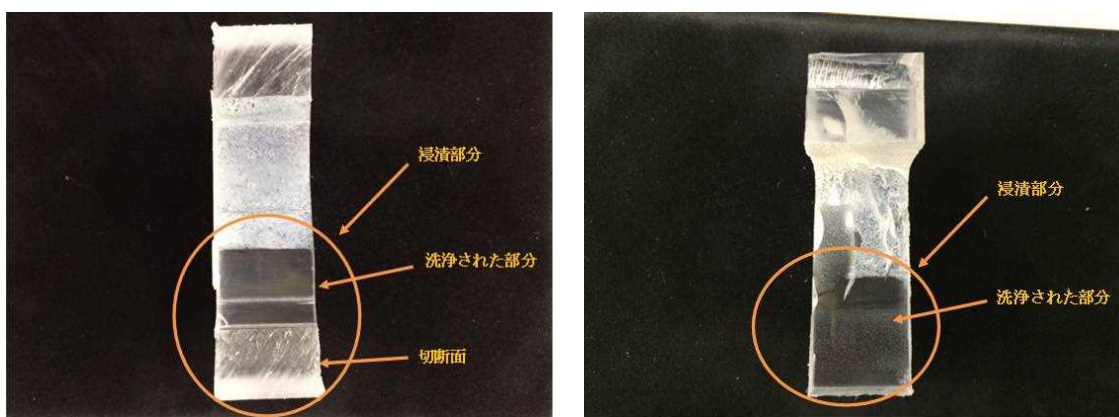
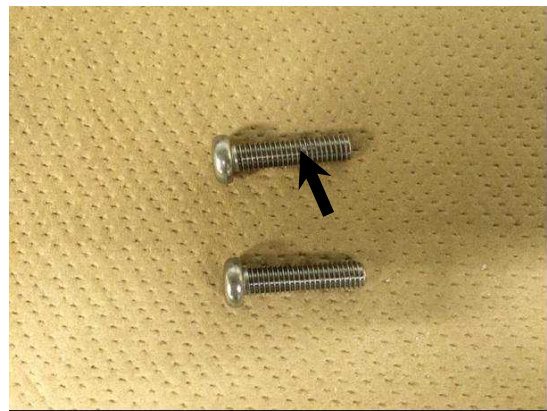


図 3-21 海水析出塩の洗浄後の試験片外観

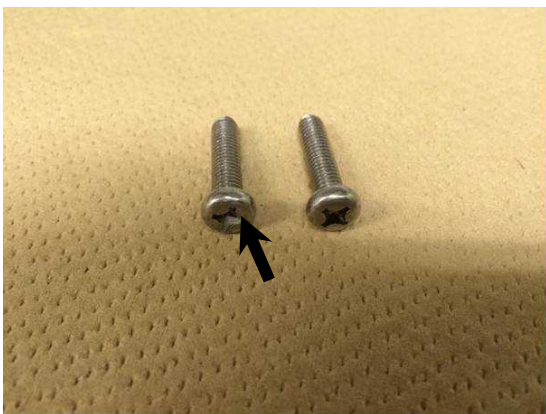




(a) 塩が付着したねじ



(b) 5%クエン酸に 30 分浸漬後



(c) 5%クエン酸に 30 分浸漬後  
攪拌しながら 30 分間放置



(d) イオン交換水に浸漬し、時々  
攪拌しながら 30 分間放置

(e) 5%クエン酸に 30 分浸漬後、イオン交換水に 30 分間浸漬（時々攪拌）



図 3-22 混合溶液の洗浄試験結果

### 3.3. 短尺バンドル内での沸騰濃縮試験結果

#### 3.3.1. 試験結果の鳥瞰

表 3-5～表 3-8 に試験条件及び試験結果を示す。試験は概ね目標時間に亘り記載した熱流束での沸騰濃縮試験が完了している。但し、途中でヒーター内に埋め込んだ熱電対が警報温度（190℃）を超えて上昇した場合は、目標時間以前で試験を中断している。

表 3-5 海水沸騰濃縮試験結果 (海水, TAF-200mm)

No	Case	溶液	水位 (mm)	目標加熱 時間	熱流束 (kW/m <sup>2</sup> )	特記事項
1	RL3L	海水	TAF -200	3:54:41	3	沸騰液が間欠的にしか届かず加熱面の湯きにより上部温度が過大に高くなり、1:53 で試験中止した
2	RL3M			1:57:21	6	目標時間で試験終了。
3	RL3H			1:18:14	9	目標時間で試験終了
4	RL4L			6:11:32	3	RL3L が目標時間達しなかったので試験実施せず
5	RL4M			3:05:46	6	目標時間で終了。塩析出大でドライアウト。ロッド 13 上部温度高、ロッド 17 上部温度高。ロッド 25 のスペーサ部と上部温度熱電対断線のため測定せず
6	RL4H			2:03:51	9	目標時間で試験終了
7	RL5L			9:36:48	3	RL3L が目標時間達しなかったので試験実施せず
8	RL5M			4:48:24	6	塩析出大でドライアウトし 3:10 で終了。ロッド 13 上部温度高、ロッド 14 上部温度高、ロッド 17 上部温度高。ロッド 13 スペーサ部温度熱電対断線のため測定せず。
9	RL5H			3:12:16	9	塩析出大でドライアウトし 2:22:00 で終了。ロッド 13 上部温度高、ロッド 14 上部温度高、ロッド 17 上部温度高

表 3-6 海水沸騰濃縮試験結果（海水，TAF-100mm）

No	Case	溶液	水位 (mm)	目標加熱 時間	熱流束 (kW/m <sup>2</sup> )	特記事項
10	RM3L	海水	TAF -100	3:54:41	3	目標時間で試験終了
11	RM3M			1:57:21	6	目標時間で試験終了
12	RM3H			1:18:14	9	目標時間で試験終了
13	RM4L			6:11:32	3	目標時間で試験終了
14	RM4M			3:05:46	6	目標時間で試験終了
15	RM4H			2:03:51	9	目標時間で試験終了
16	RM5L			9:36:48	3	塩析出大でドライアウトし 8:54:00 で終了。ロッド 3 上部 温度高、ロッド 13 上部温度 高、ロッド上部温度高、ロッド 17 上部温度高。ロッド 25 のス ペーサ部と上部温度熱電対断 線のため測定せず
17	RM5M			4:48:24	6	塩析出大でドライアウトし 4:19 で終了。ロッド 13 上部温度 高、ロッド 17 上部温度高。ロ ッド 03 スペーサ部とロッド 14 上 部温度熱電対断線のため測定 せず
18	RM5H			3:12:16	9	塩析出大でドライアウトし 2:37:00 で終了。ロッド 13 上部 温度高、ロッド 14 上部温度 高、ロッド 17 上部温度高。ロ ッド 13 スペーサ部温度熱電対 断線のため測定せず

表 3-7 海水沸騰濃縮試験結果（海水，TAF）

No	Case	溶液	水位 (mm)	目標加 熱時間	熱流束 (kW/m <sup>2</sup> )	特記事項
19	RH3L	海水	TAF	3:54:41	3	目標時間で試験終了
20	RH3M			1:57:21	6	目標時間で試験終了
21	RH3H			1:18:14	9	目標時間で試験終了
22	RH4L			6:11:32	3	目標時間で試験終了
23	RH4M			3:05:46	6	目標時間で試験終了
24	RH4H			2:03:51	9	目標時間で試験終了
25	RH5L			9:36:48	3	目標時間で試験終了
26	RH5M			4:48:24	6	塩析出大でドライアウトし 4:33:00 で終了。ロッド 13 上部温度高、ロッド 17 上部温度高。ロッド 13 スペーサ 部温度熱電対断線のため測定せず
27	RH5H			3:12:16	9	試験体上部への塩析出による温度上昇のため、3:05:00 で終了。ロッド 13 上部温度高、ロッド 14 上部温度高、ロッド 17 上部温度高

表 3-8 海水沸騰濃縮試験結果 (混合溶液, TAF-100mm)

No	Case	溶液	水位 (mm)	目標加熱 時間	熱流束 (kW/m <sup>2</sup> )	特記事項
28	MM3L	混合溶液	TAF -100	3:54:41	3	目標時間で試験終了
29	MM3M			1:57:21	6	塩付着が少ない。目標時間で試験終了
30	MM3H			1:18:14	9	目標時間で試験終了
31	MM4L			6:11:32	3	MM5L が目標時間達しなかった ので試験実施せず
32	MM4M			3:05:46	6	目標時間で試験終了。TAF での 塩析出大
33	MM4H			2:03:51	9	白色粒子による懸濁 温度が徐々に上昇。目標時間で 試験終了。
34	MM5L			9:36:48	3	沸騰液が間欠的にしか届かず加 熱面の渴きにより上部温度が過 大に高くなり 3:57:00 で試験中止
35	MM5M			4:48:24	6	沸騰液が間欠的にしか届かず上 部温度が過大に高くなり 4:18:38 で終了
36	MM5H			3:12:16	9	塩析出大でドライアウトし、 2:22:00 で終了。ロッド 3 上部温 度高、ロッド 13 上部温度高、ロッ ド 14 上部温度高、ロッド 17 上部 温度高、ロッド 25 上部温度高

表 3-9 海水沸騰濃縮試験結果（混合溶液，TAF）

No	Case	溶液	水位 (mm)	目標加熱 時間	熱流束 (kW/m <sup>2</sup> )	特記事項
37	MH3L	混合溶液	TAF	3:54:41	3	目標時間で試験終了
38	MH3M			1:57:21	6	目標時間で試験終了
39	MH3H			1:18:14	9	目標時間で試験終了
40	MH4L			6:11:32	3	目標時間で試験終了
41	MH4M			3:05:46	6	目標時間で試験終了
42	MH4H			2:03:51	9	目標時間で試験終了
43	MH5L			9:36:48	3	目標時間で試験終了
44	MH5M			4:48:24	6	目標時間で試験終了
45	MH5H			3:12:16	9	目標時間で試験終了
46	MH6M					7:39:27
47	MH6H			5:06:18	9	析出大でドライアウトし、3:21で終了。ロッド 3 スペーサ部と上部温度高、ロッド 13 上部温度高、ロッド 14 スペーサ部と上部温度高、ロッド 17 スペーサ部と上部温度高、ロッド 25 スペーサ部と上部温度高。ロッド 13 スペーサ部温度熱電対断線のため測定せず。

### 3.3.2. 塩析出量の可視化

図 4.5-1～図 4.5-42 に、沸騰濃縮試験後の試験体の X 線 CT 撮影結果を示す。結果は、試験一覧で示した試験番号順に 6 枚の写真にまとめた。左上にバンドルの最上部位置（TAF 部）を指定した top 断層画像のデータ、右上にスペーサ部を指定した top 断層画像のデータ、中央右には、top 断層画像のデータの縦方向対角で垂直方向に切り出した断層データ、左下には top 断層画像のデータの横方向対角で垂直方向に切り出した断層データ、右下には 3D モデルの画像を配した。中央左は垂直方向の切り出しの基となるバンドルの最上部位置（TAF 部）を指定した top 断層画像のデータを示した。次頁の RL3H1209 の結果については図中に上記の説明を図示した。以降の結果に付いては、説明は省略している。

ソフトウェア VGStudioMAX の画像解析により、既知形状としてバンドルヒータおよびチャンネルボックスを分離し、密度の違いにより雰囲気から塩を抽出して赤色に着色して示した。



試験番号 2

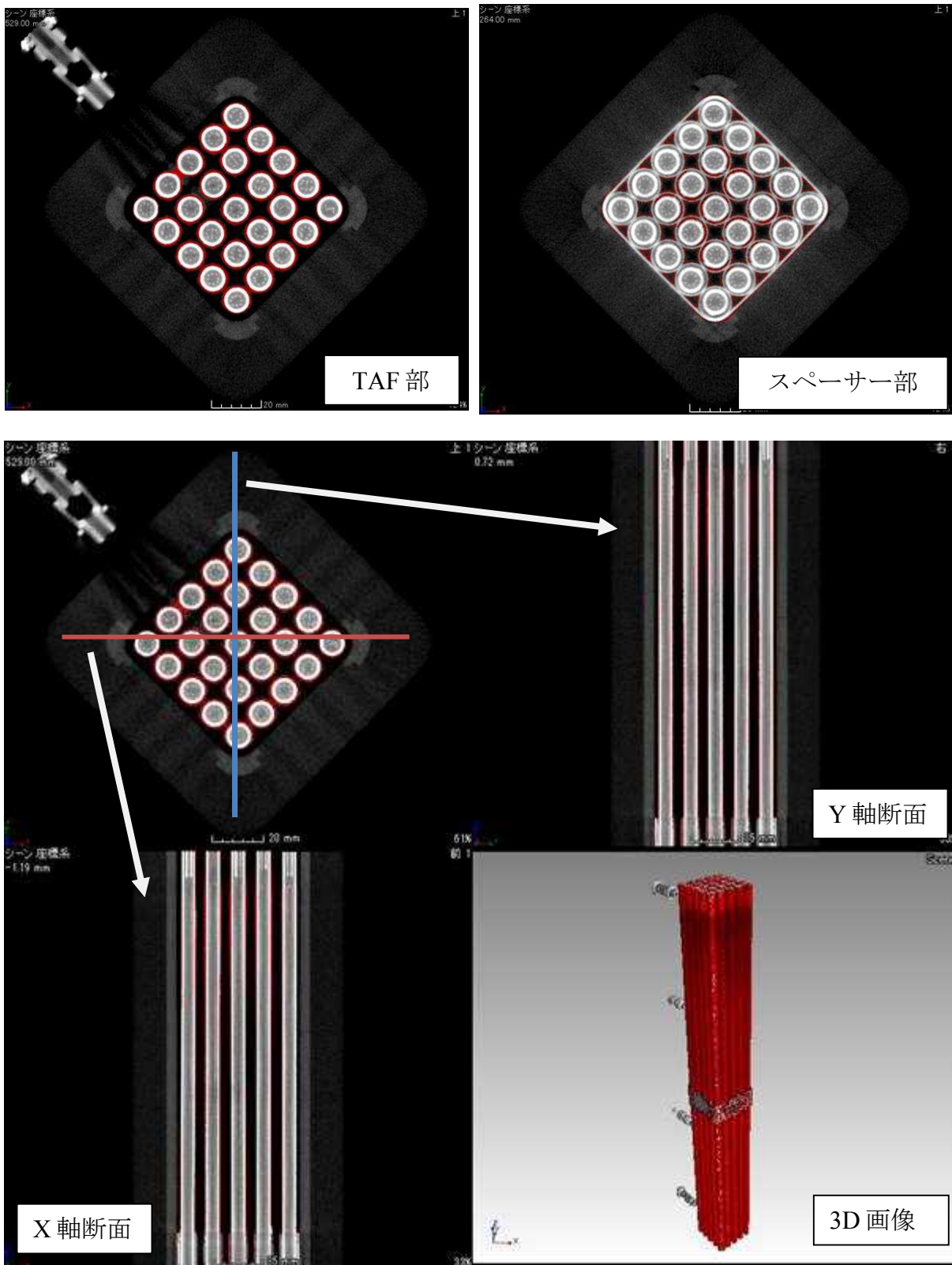


図 4.5- 1 X線 CT 撮影像による析出塩分布 RL3M

試験番号 3

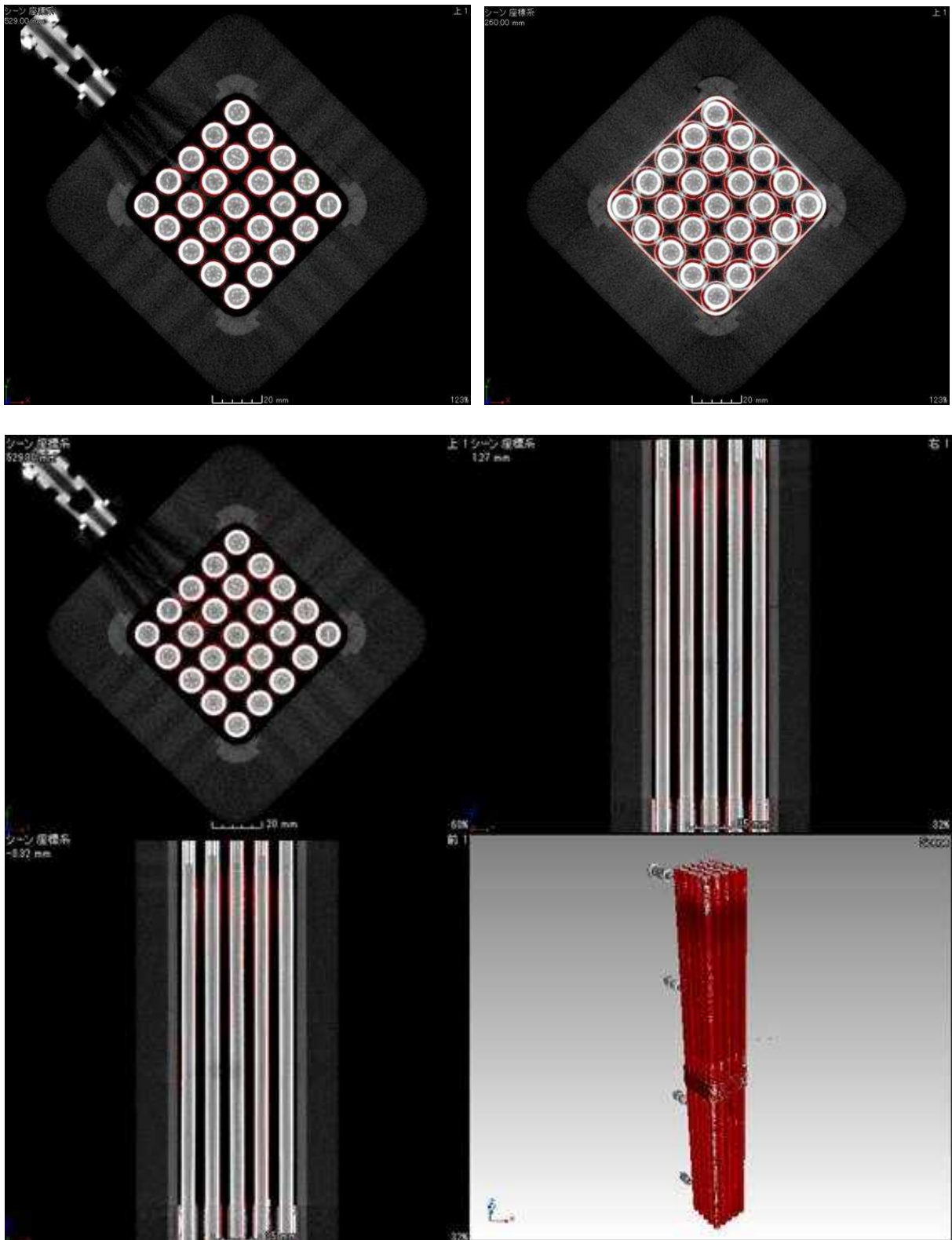


図 4.5- 2 X線 CT 撮影像による析出塩分布 RL3H

試験番号 5

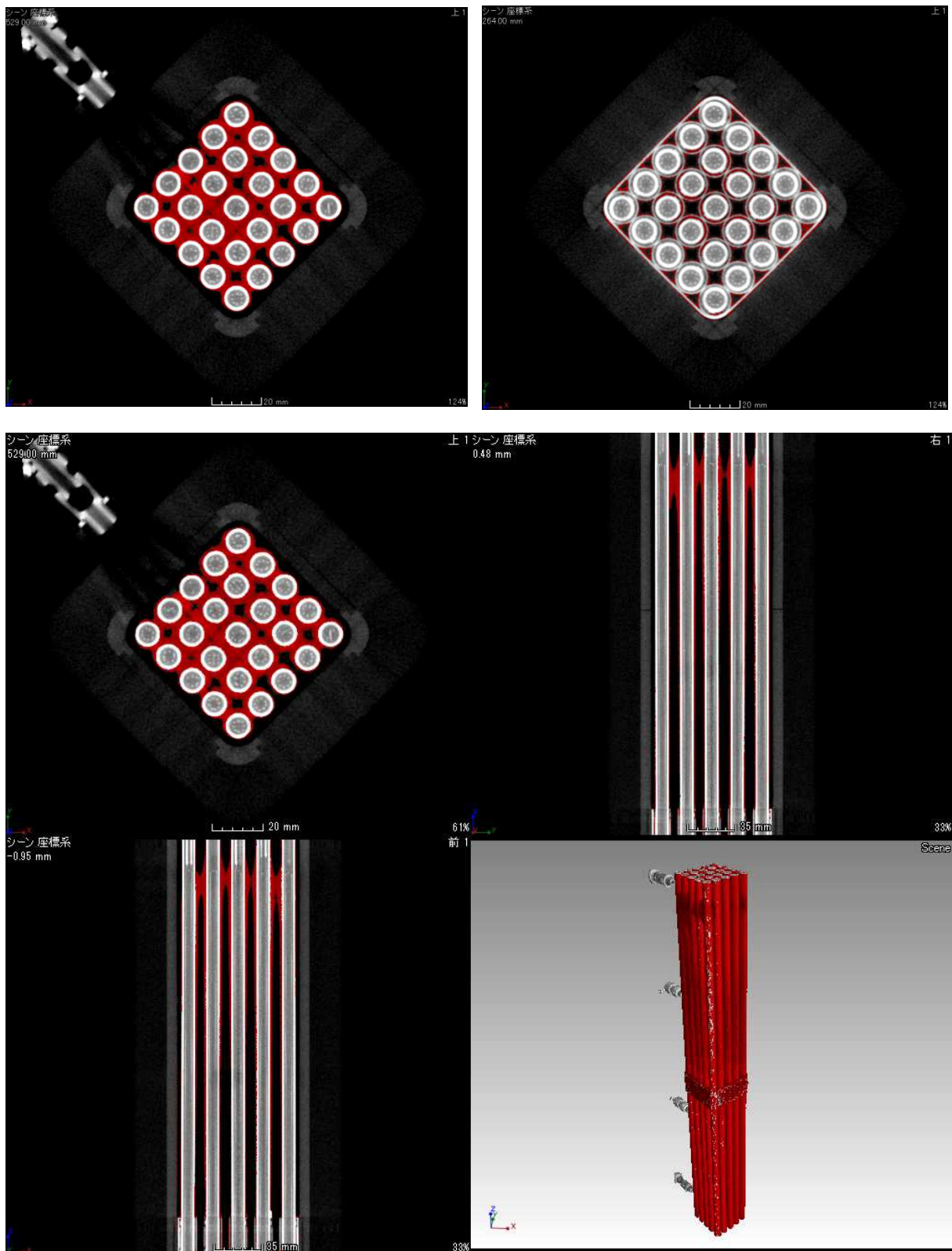


図 4.5- 3 X線 CT 撮影像による析出塩分布 RL4M

試験番号 6

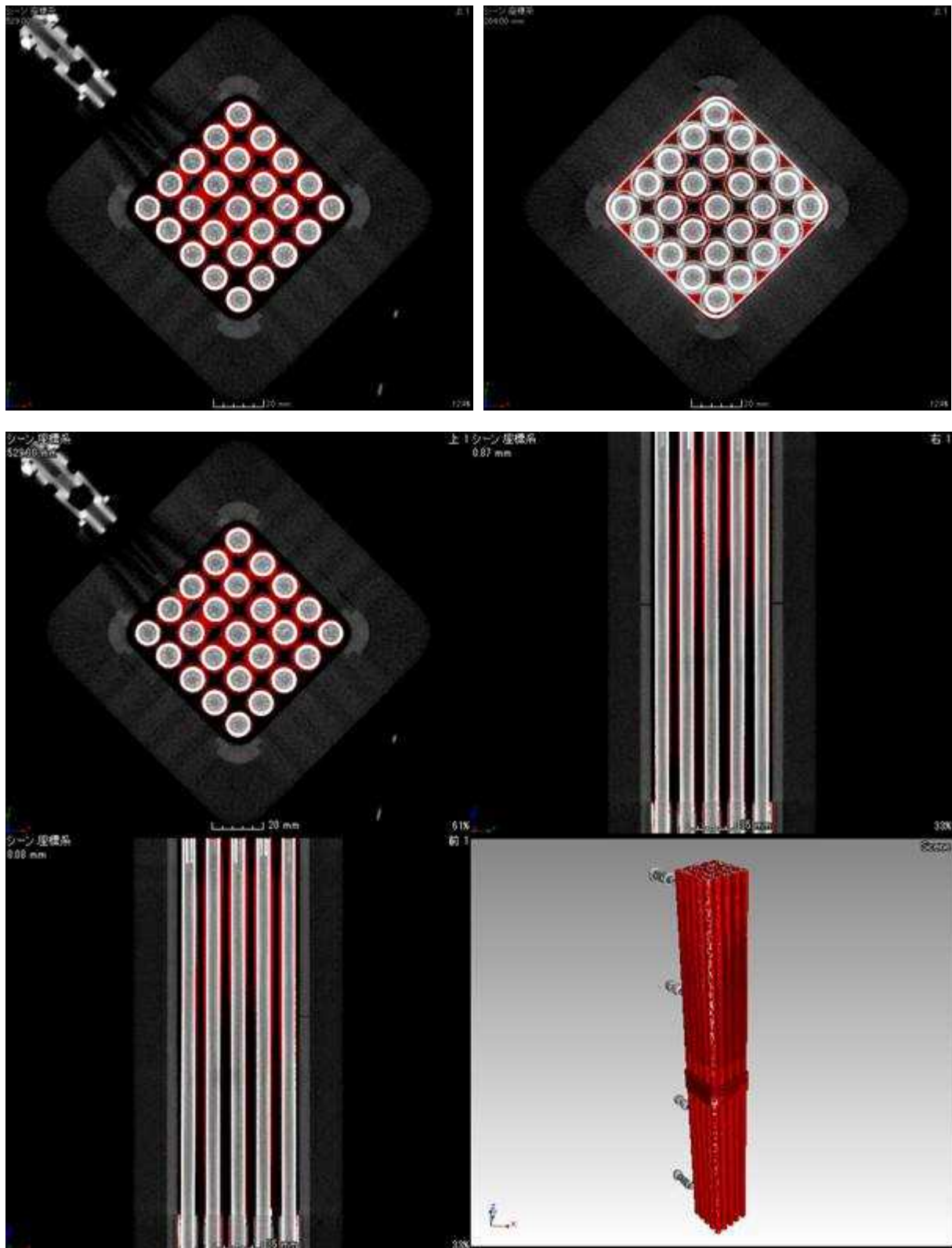


図 4.5- 4 X線 CT 撮影像による析出塩分布 RL4H

試験番号 8

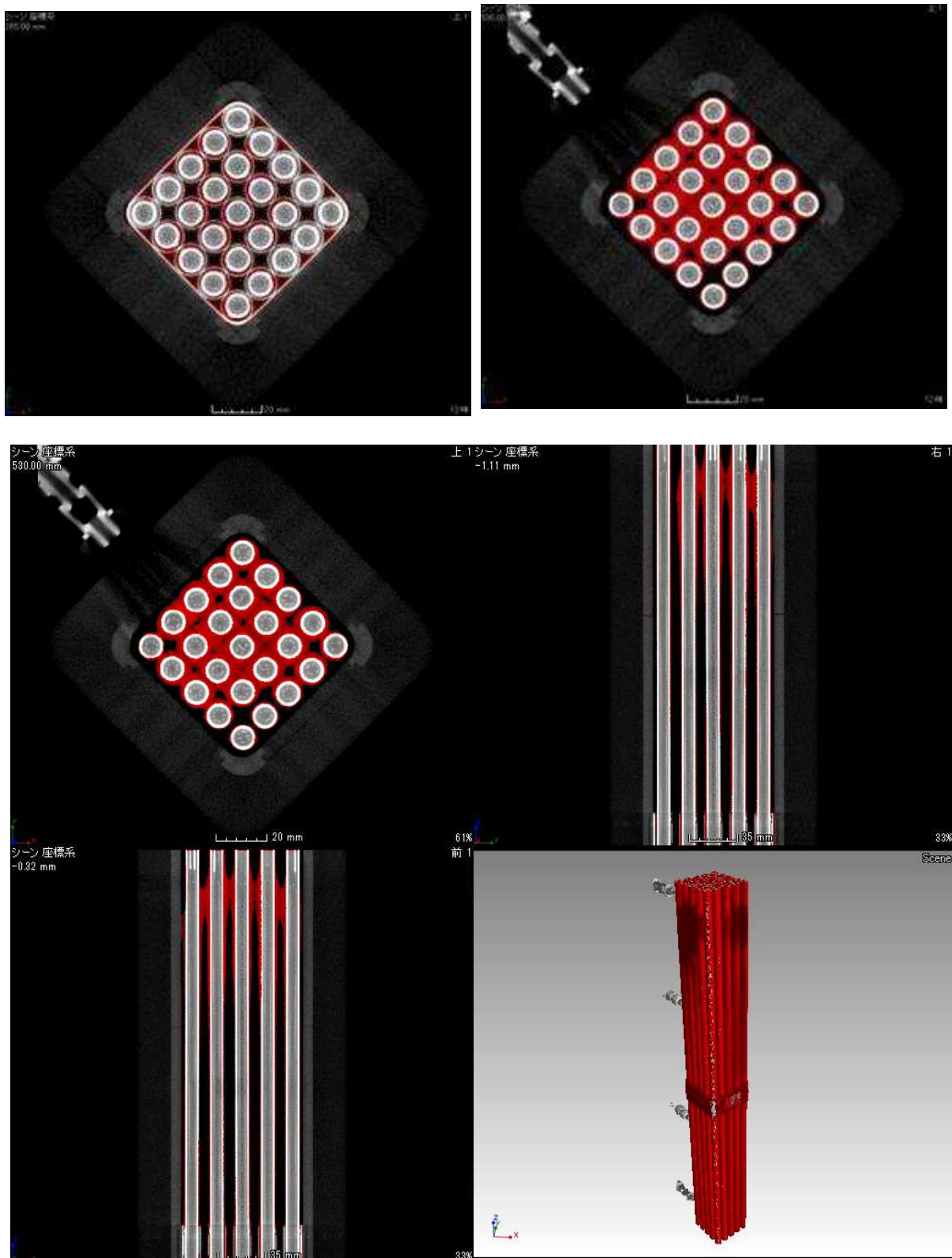


図 4.5- 5 X線 CT 撮影像による析出塩分布 RL5M

試験番号 9

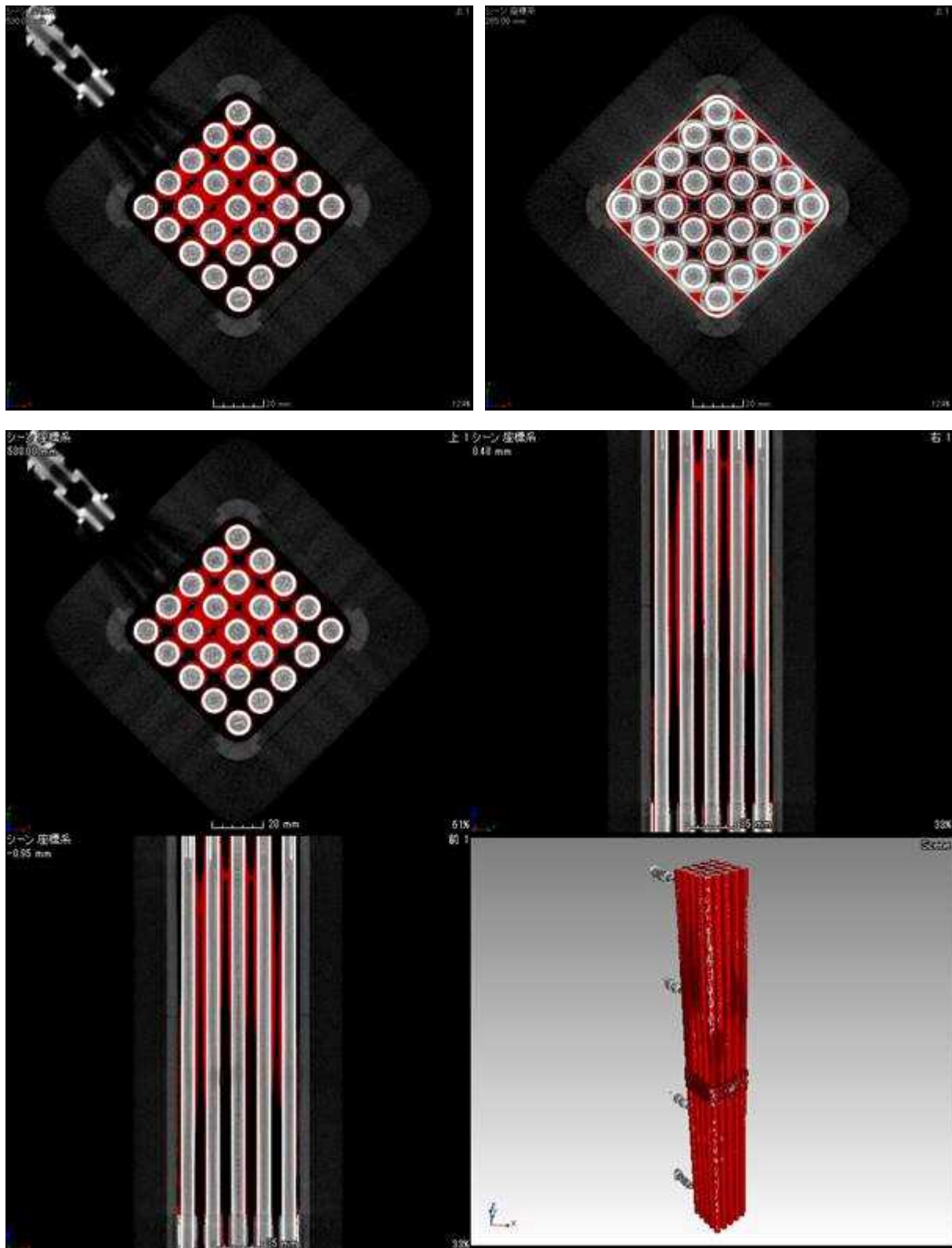


図 4.5- 6 X線 CT 撮影像による析出塩分布 RL5H

試験番号 10

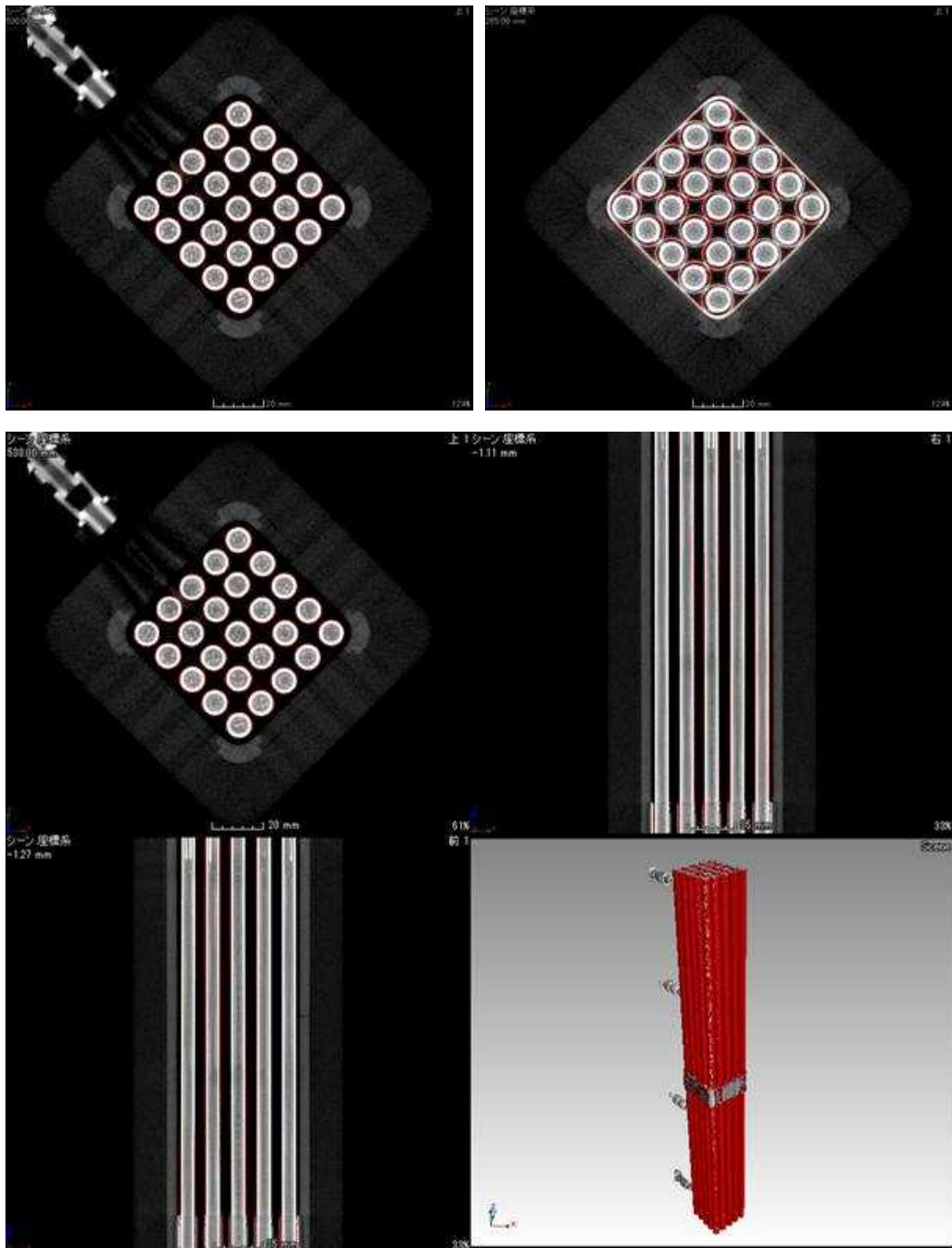


図 4.5- 7 X線 CT 撮影像による析出塩分布 RM3L

試験番号 11

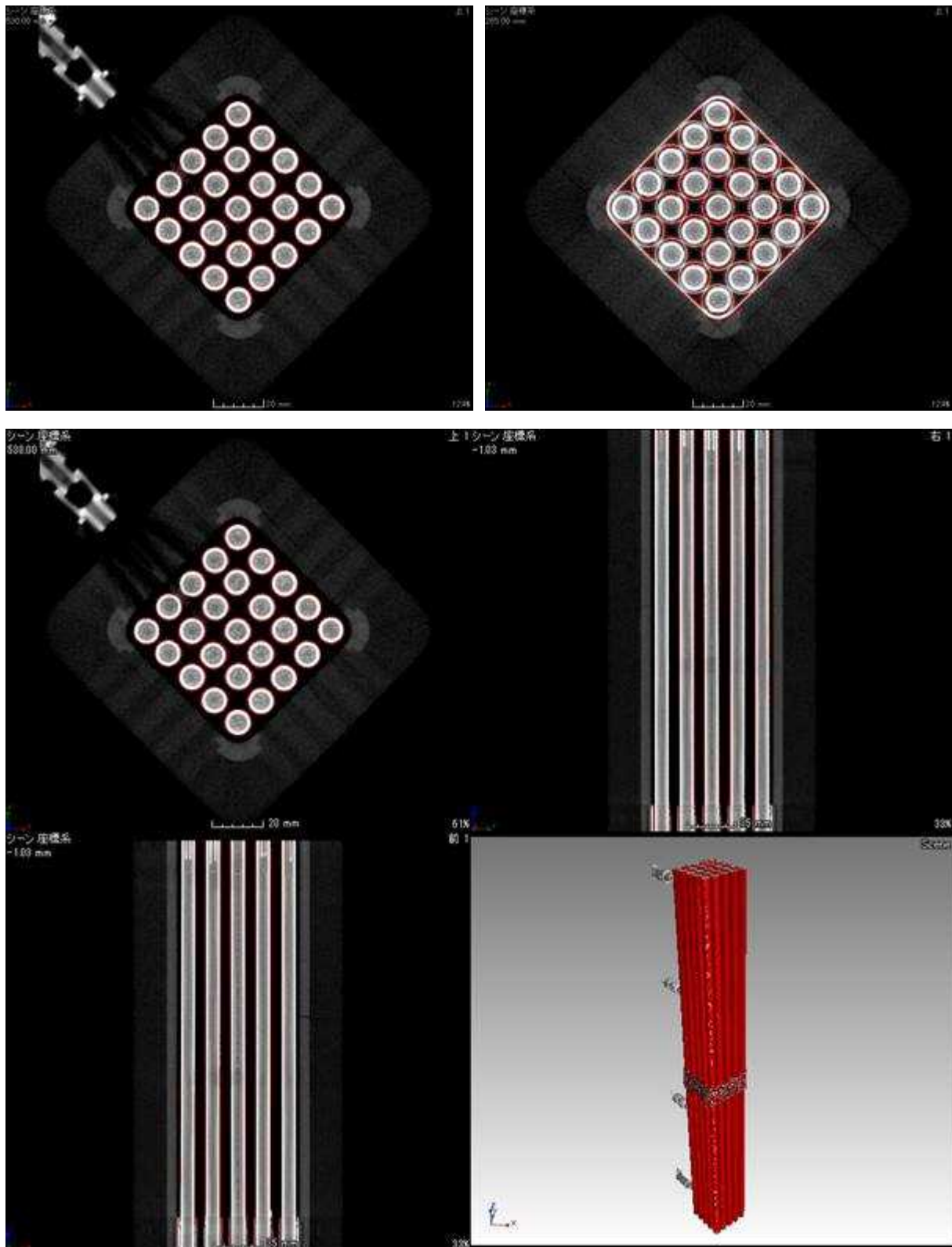


図 4.5- 8 X線 CT 撮影像による析出塩分布 RM3M



試験番号 12

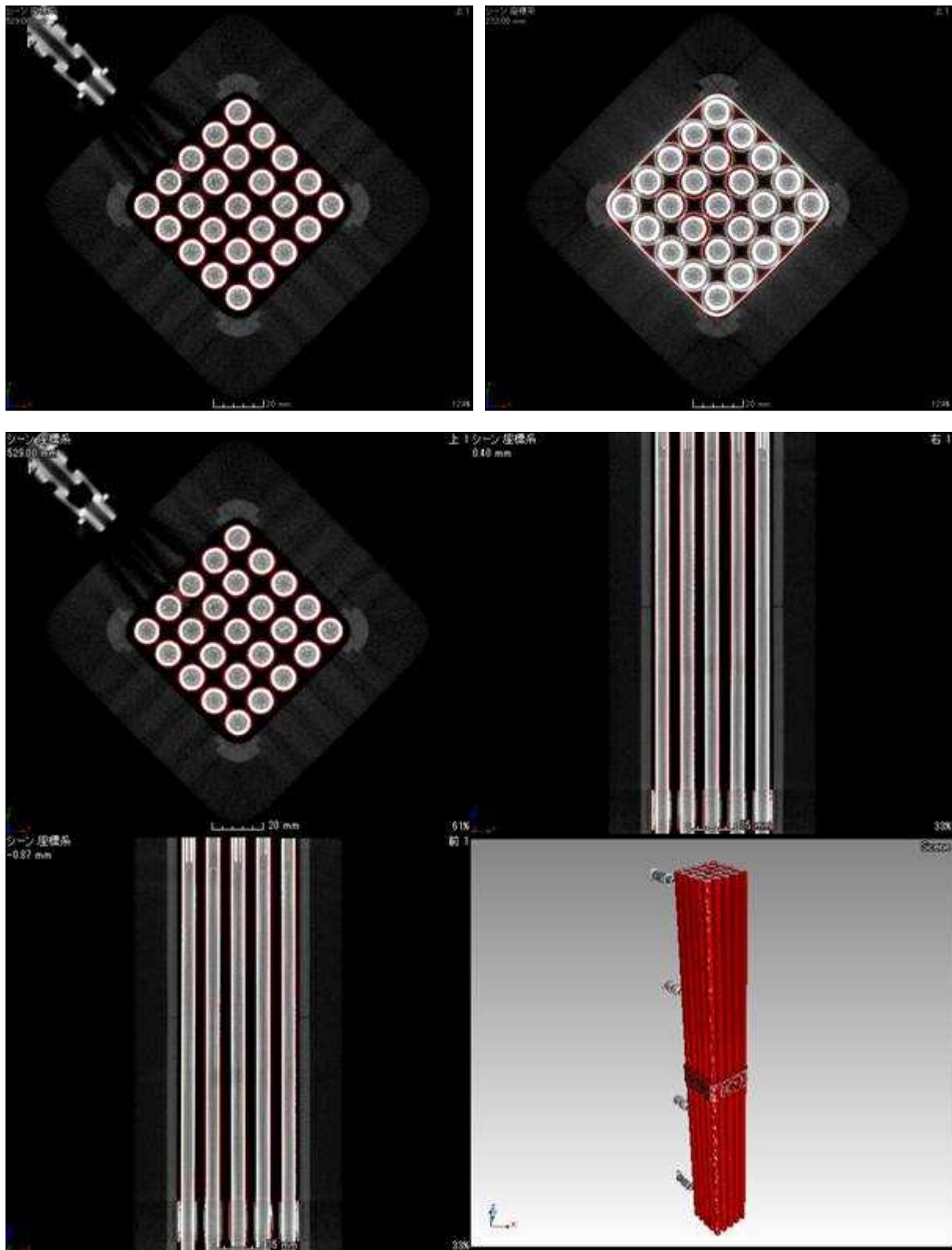


図 4.5- 9 X線 CT 撮影像による析出塩分布 RM3H

試験番号 13

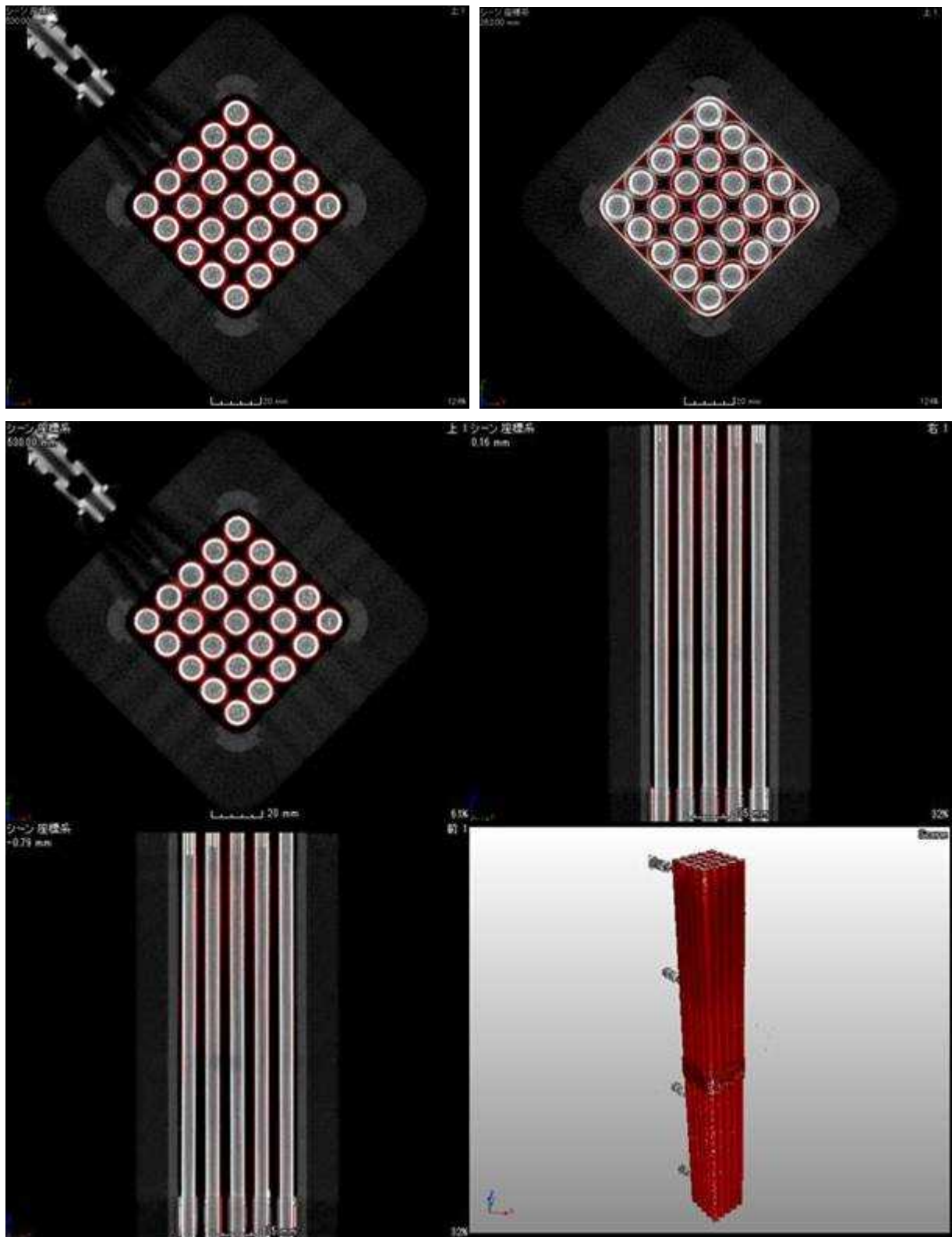


図 4.5- 10 X 線 CT 撮影像による析出塩分布 RM4L

試験番号 14

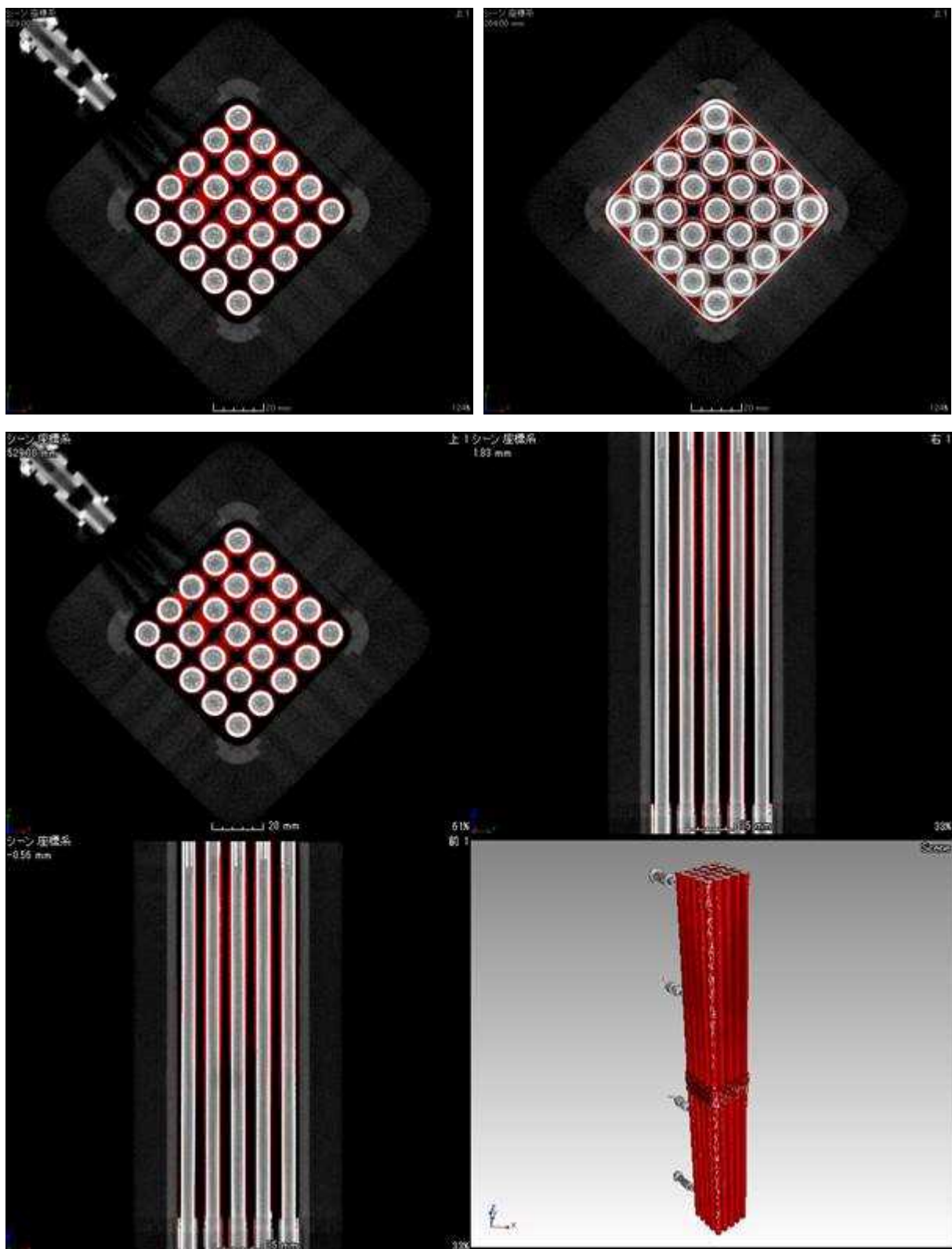


図 4.5- 11 X線 CT 撮影像による析出塩分布 RM4M

試験番号 15

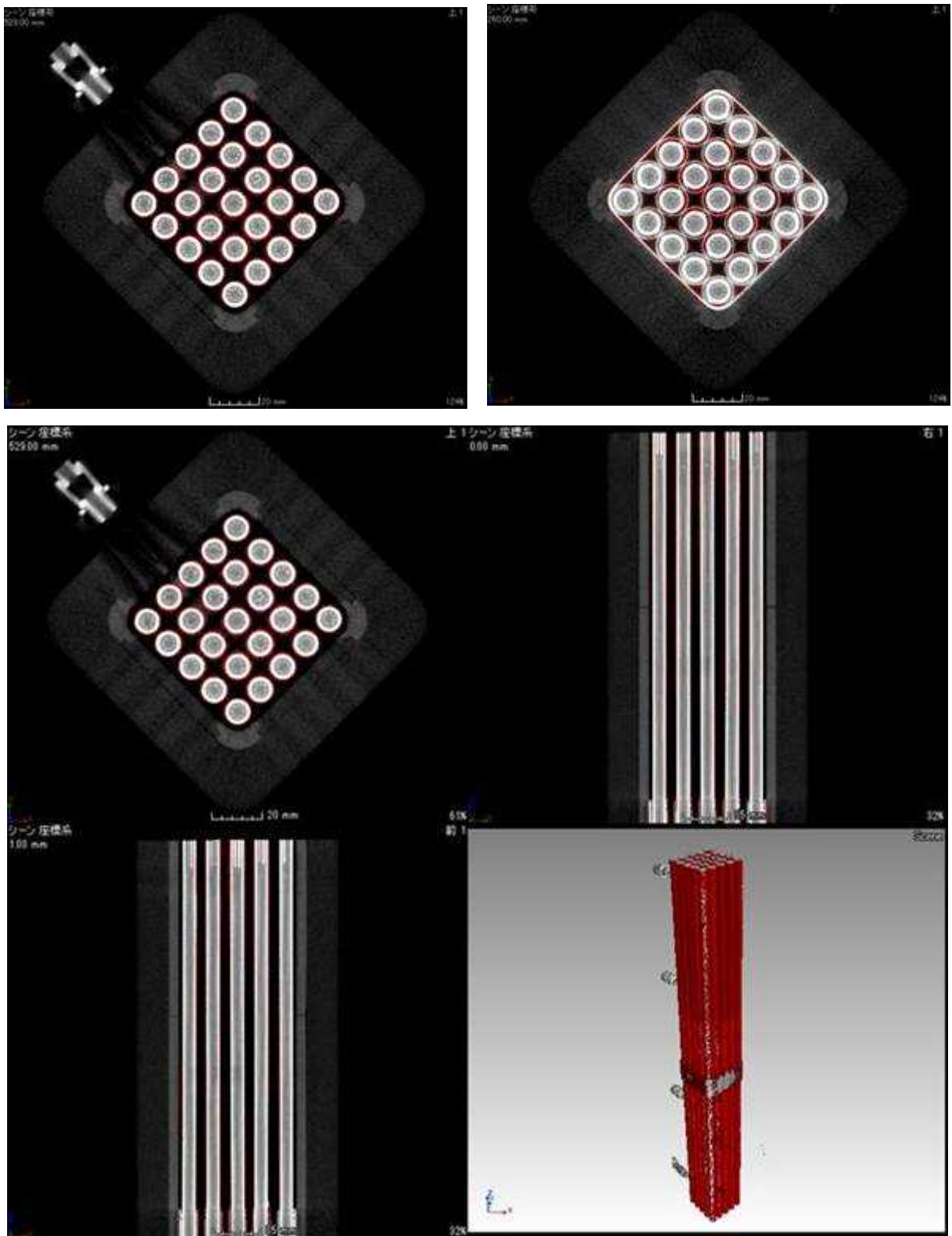


図 4.5- 12 X線 CT 撮影像による析出塩分布 RM4H

試験番号 16

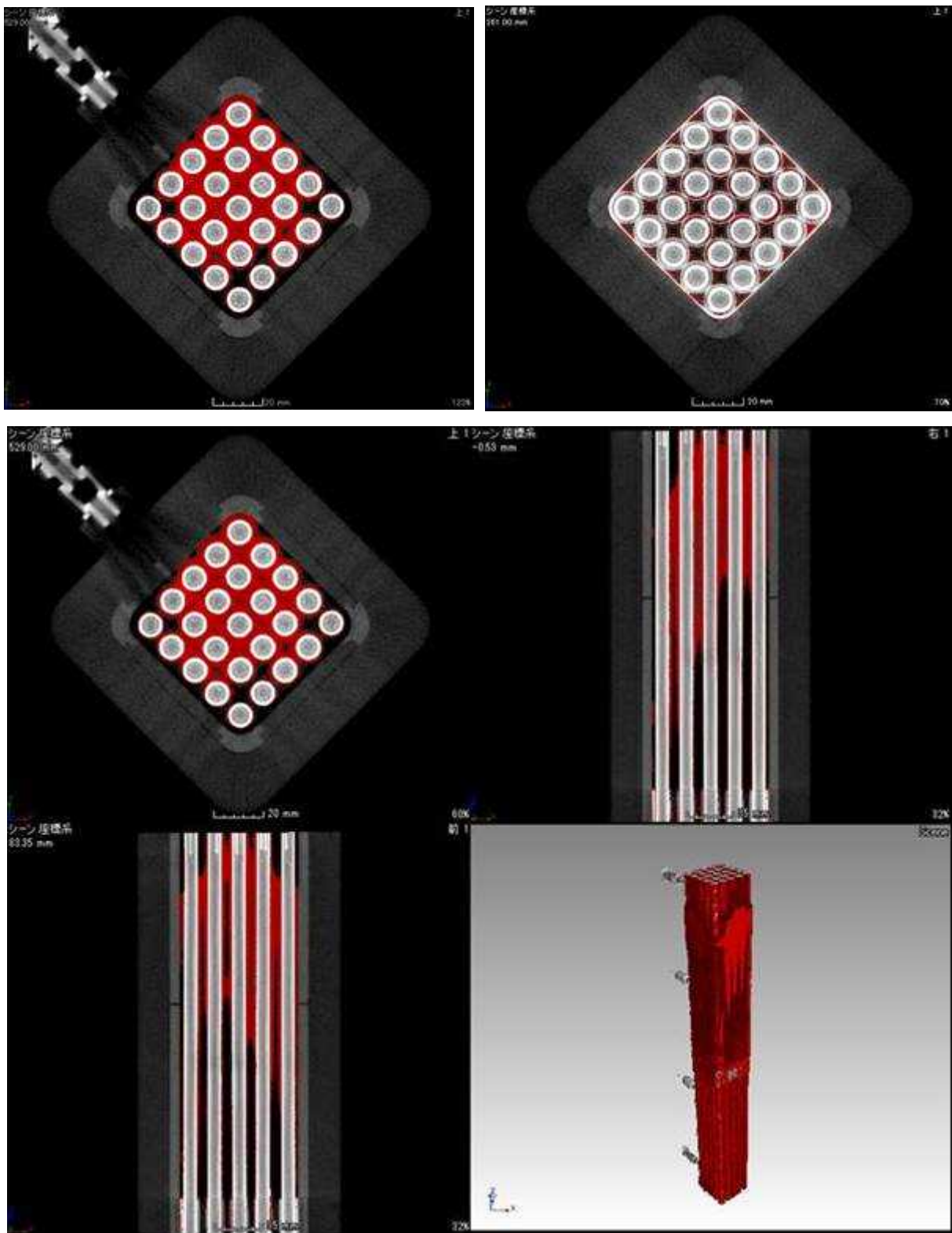


図 4.5- 13 X線 CT 撮影像による析出塩分布 RM5L

試験番号 17

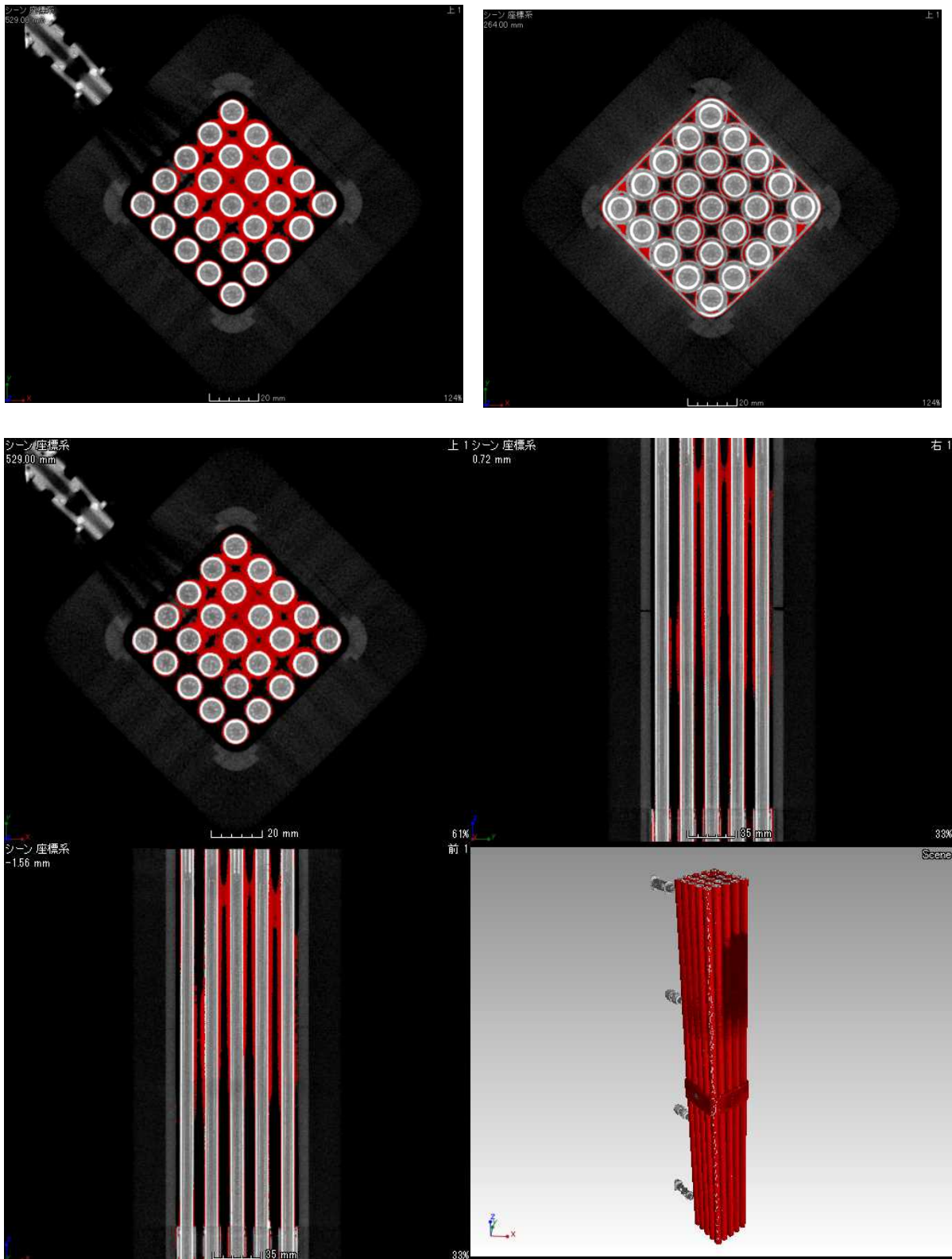


図 4.5- 14 X線 CT 撮影像による析出塩分布 RM5M

試験番号 18

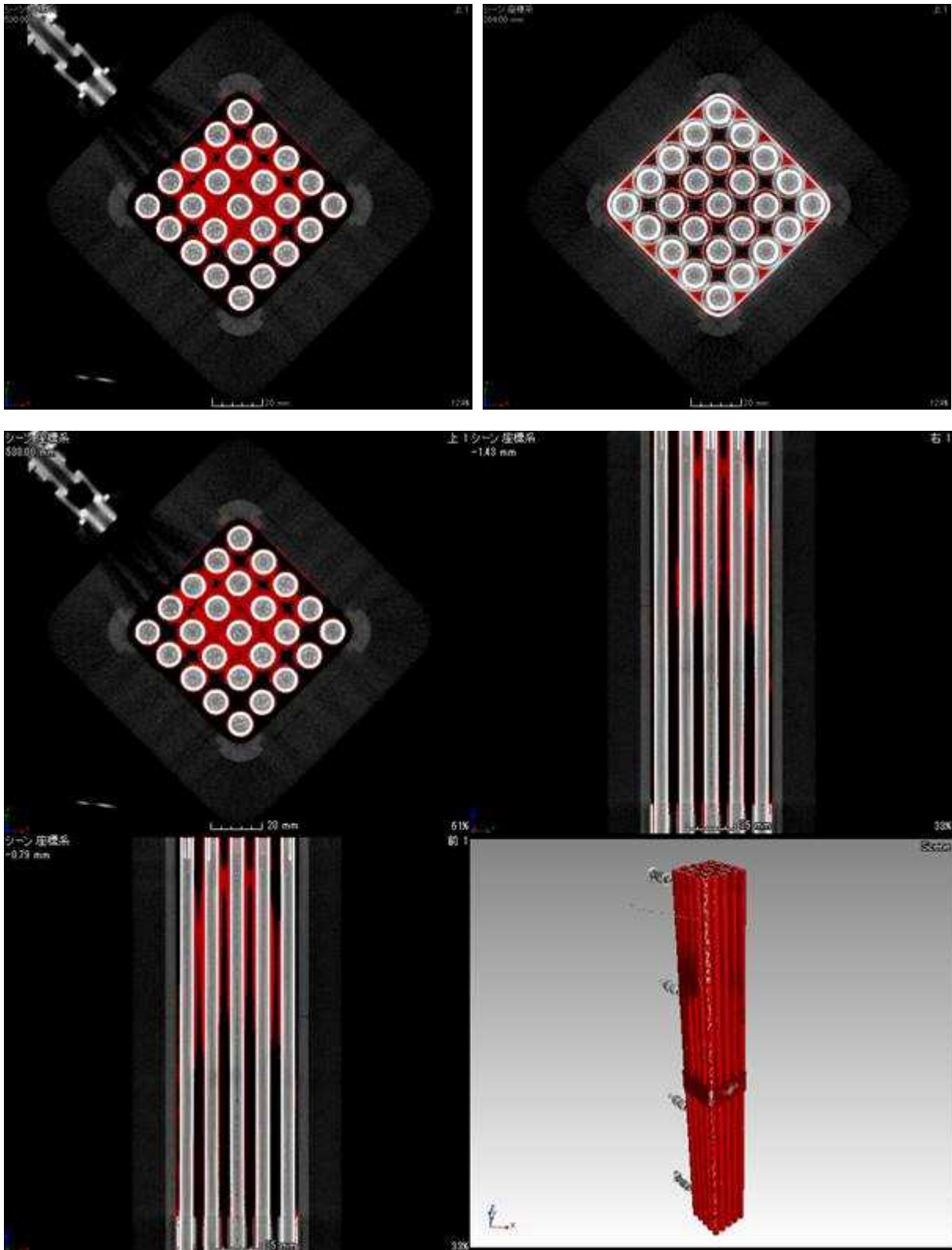


図 4.5- 15 X線 CT 撮影像による析出塩分布 RM5H

試験番号 19

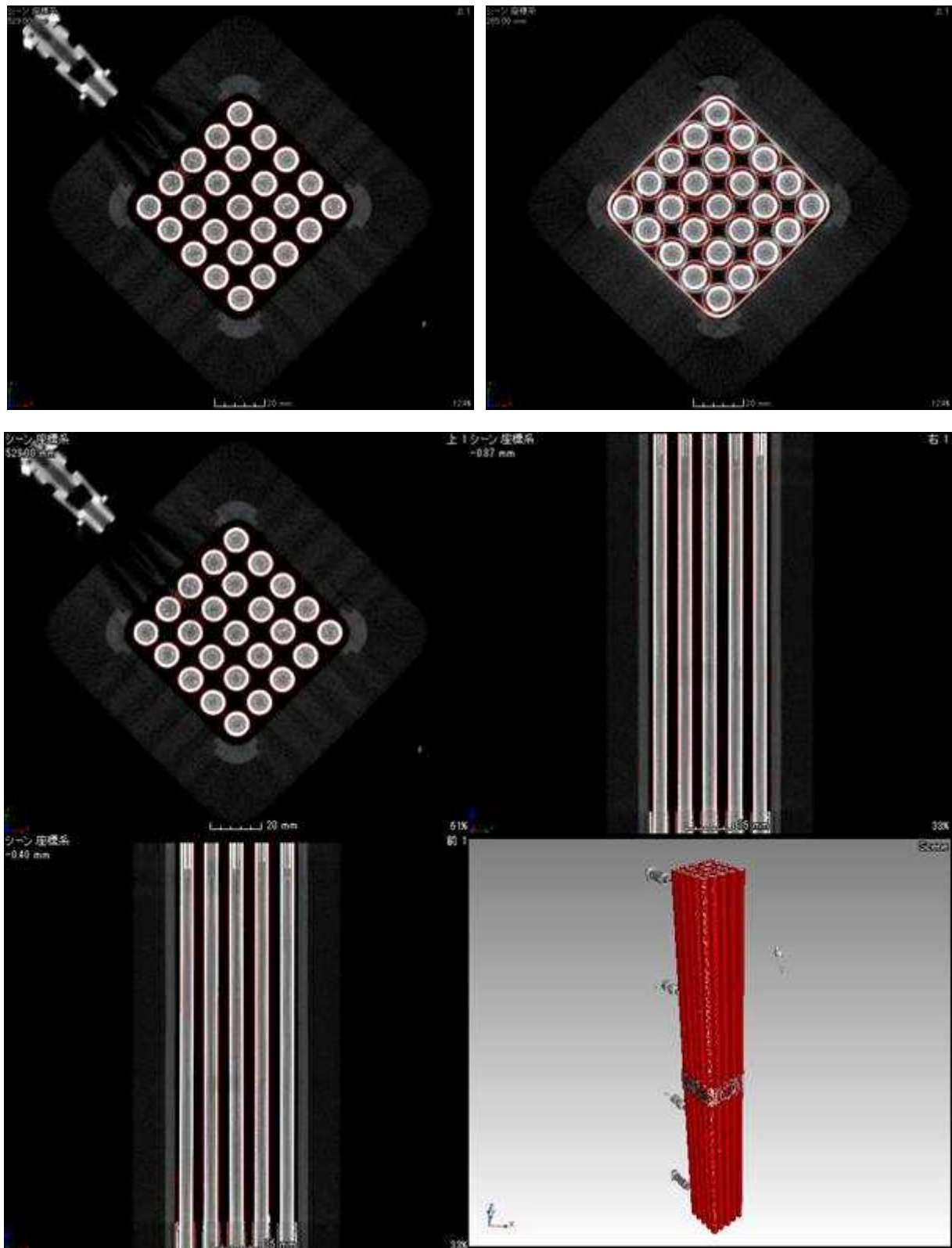


図 4.5- 16 X線 CT 撮影像による析出塩分布 RH3L



試験番号 20

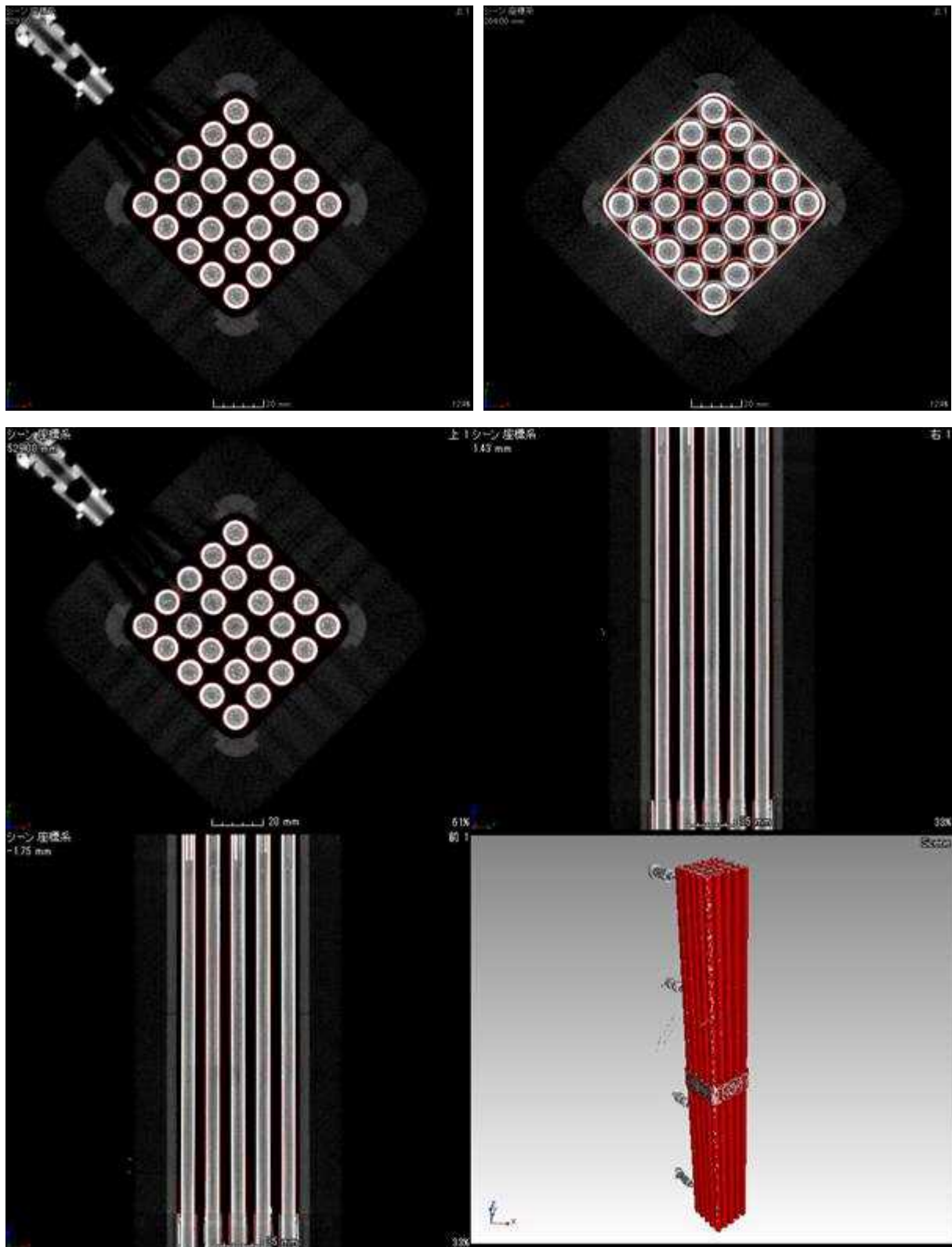


図 4.5- 17 X線 CT 撮影像による析出塩分布 RH3M

試験番号 21

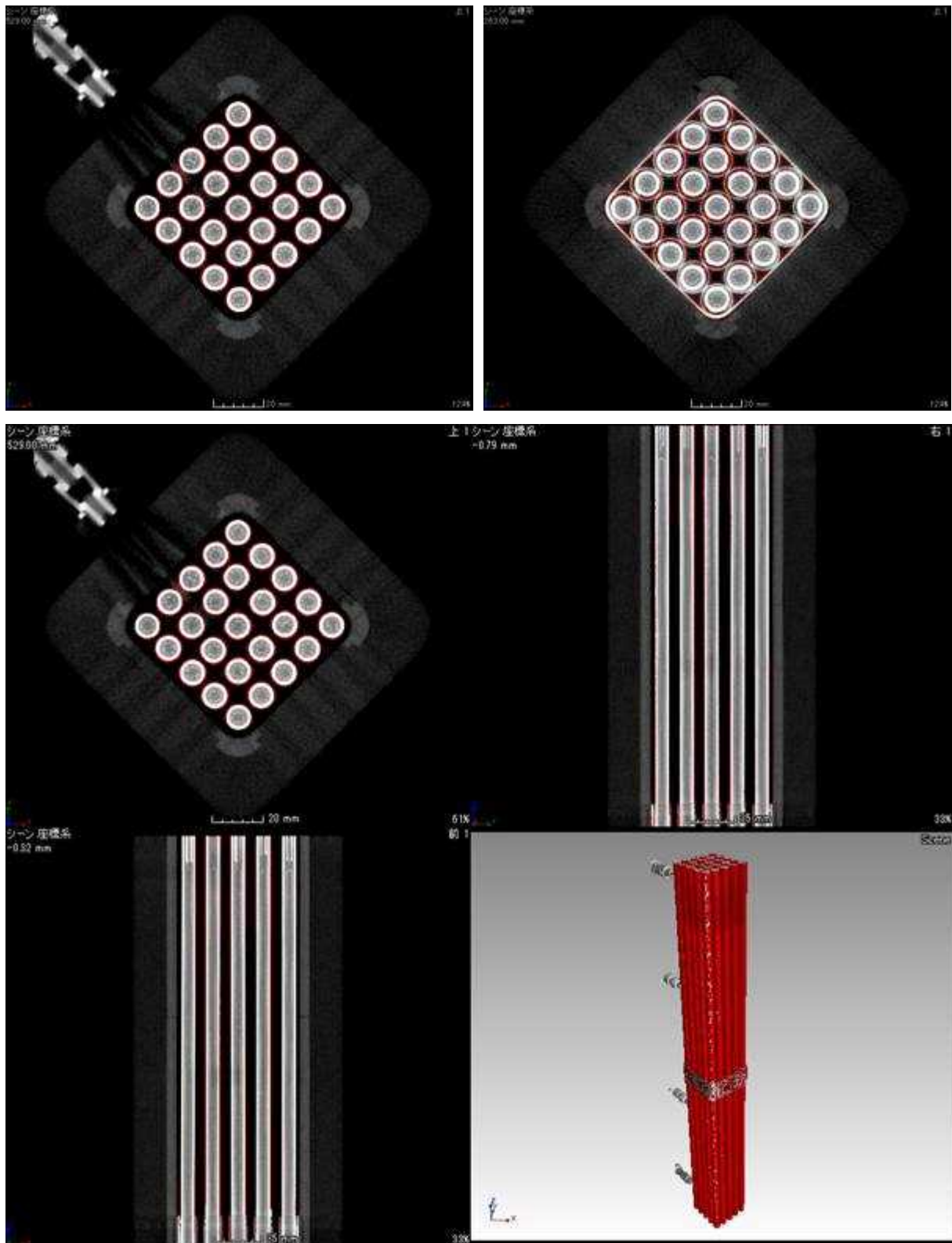


図 4.5- 18 X 線 CT 撮影像による析出塩分布 RH3H

試験番号 22

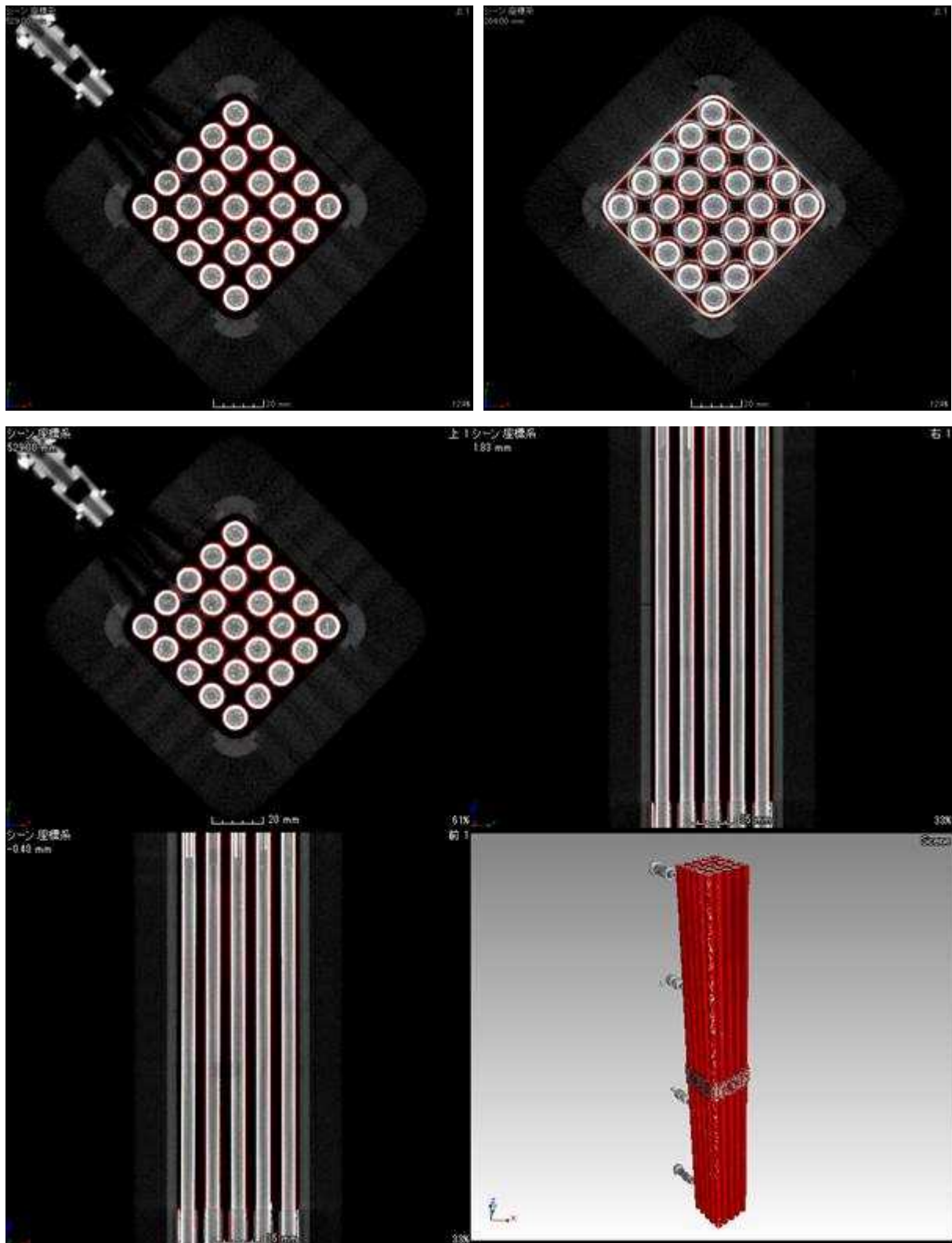


図 4.5- 19 X線 CT 撮影像による析出塩分布 RH4L

試験番号 23

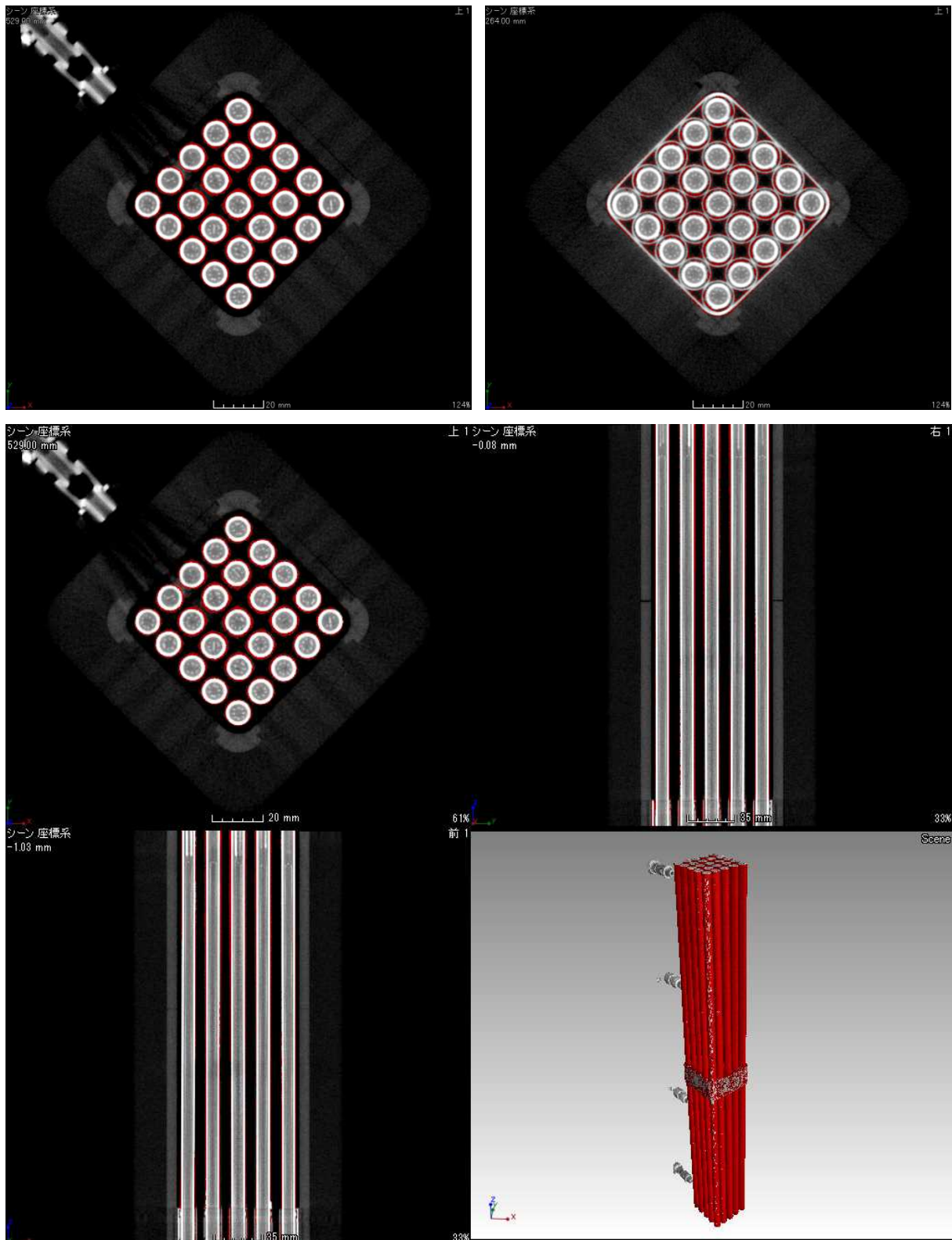


図 4.5- 20 X線 CT 撮影像による析出塩分布 RH4M

試験番号 24

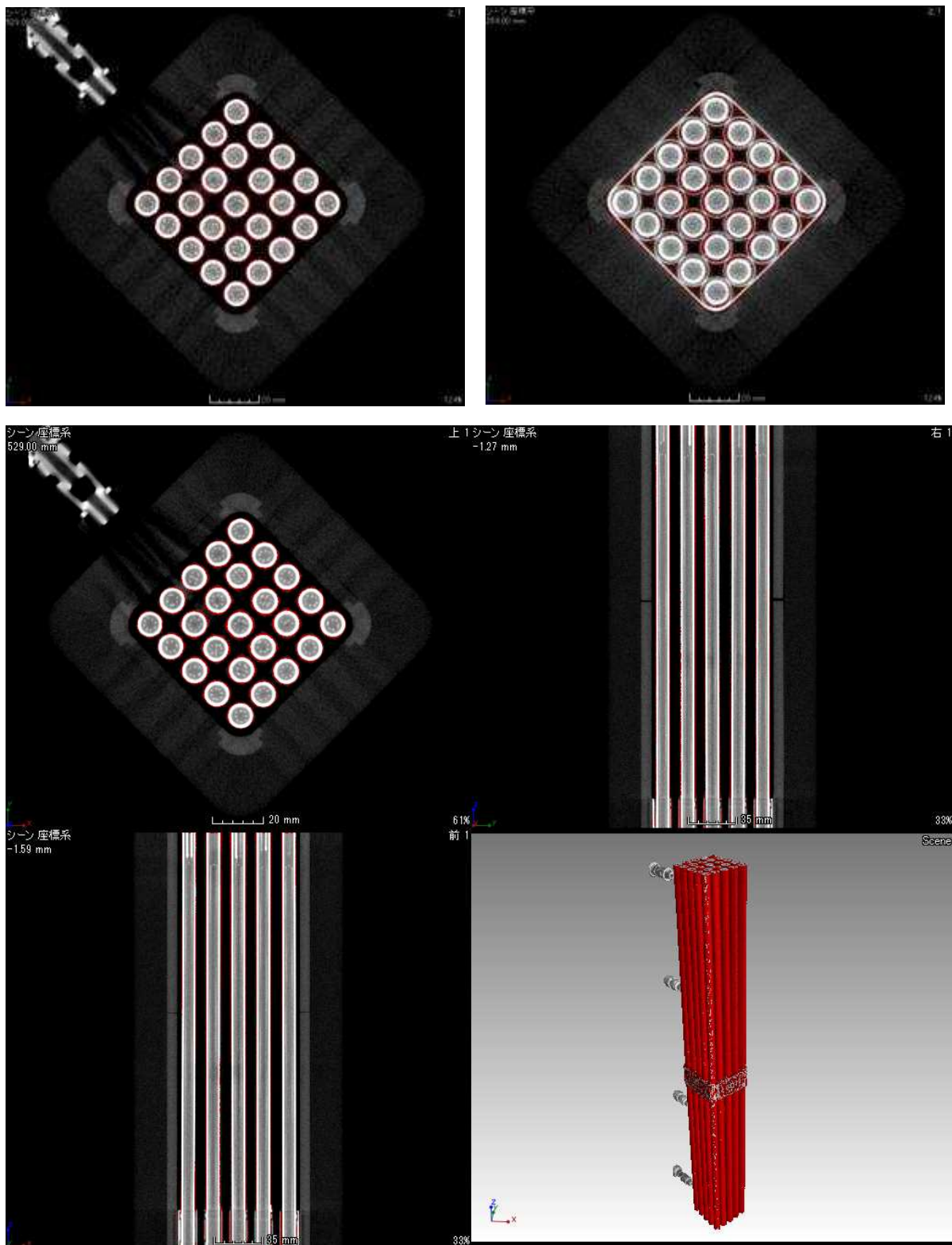


図 4.5- 21 X線 CT 撮影像による析出塩分布 RH4H

試験番号 25

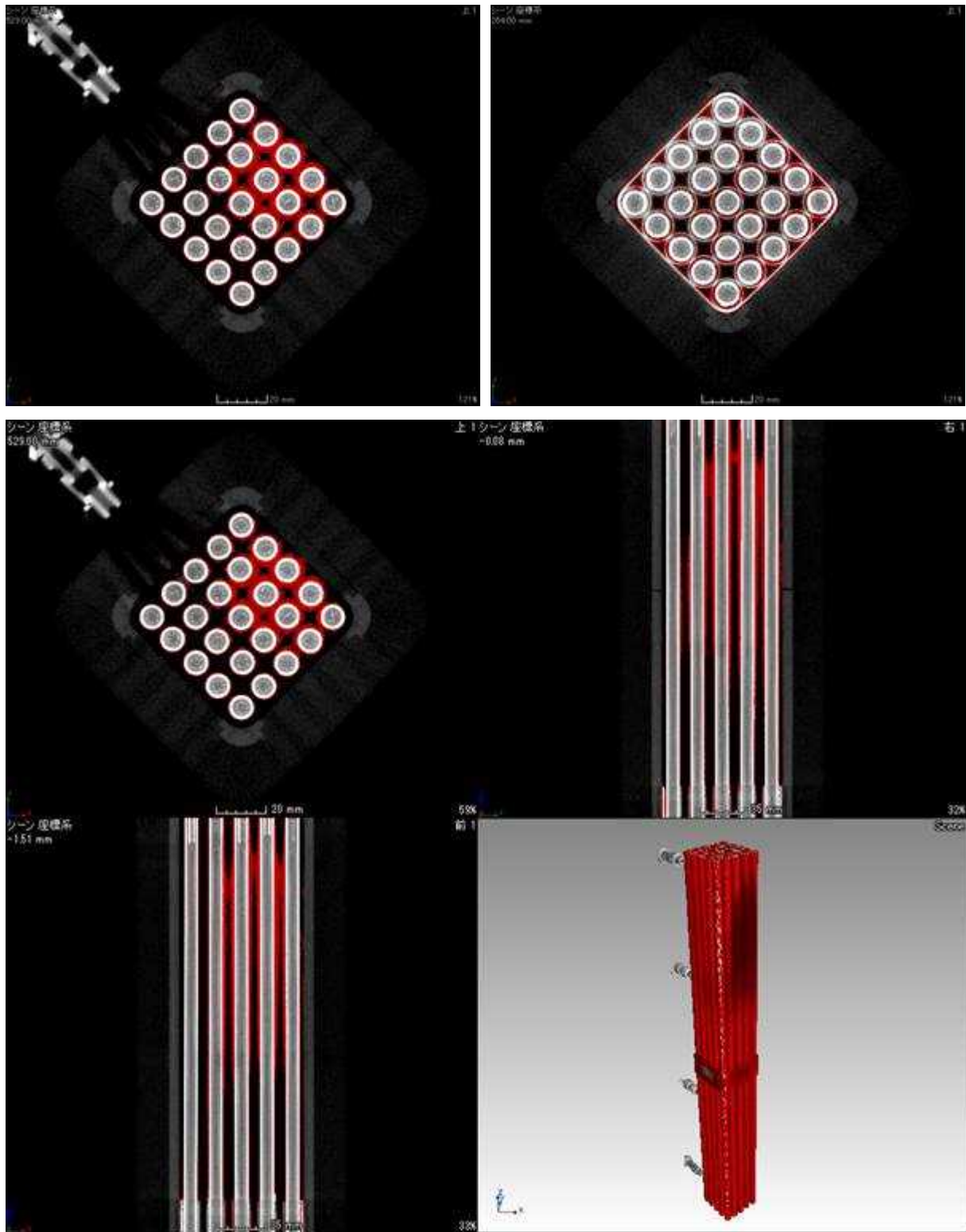


図 4.5- 22 X線 CT 撮影像による析出塩分布 RH5L

試験番号 26

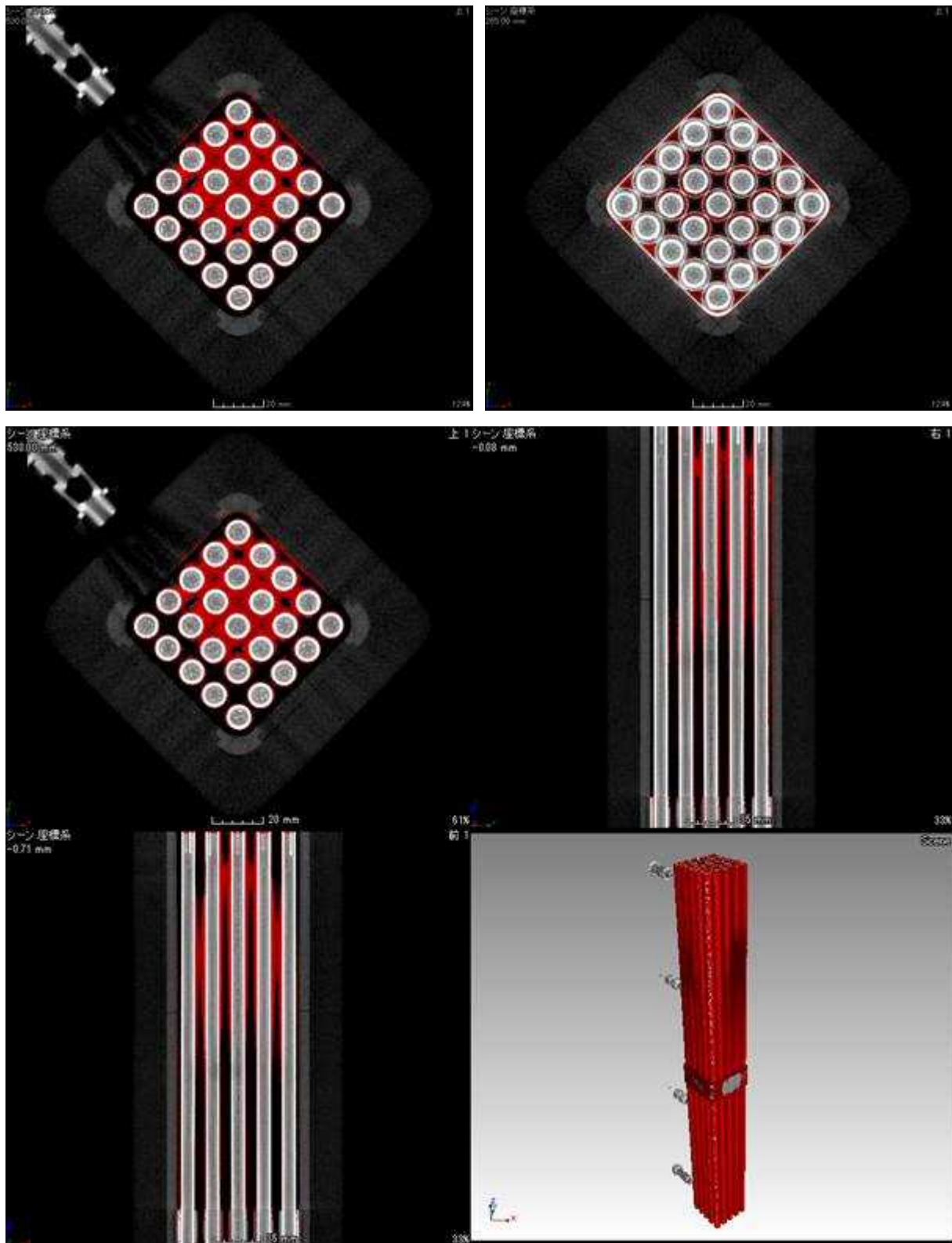


図 4.5- 23 X 線 CT 撮影像による析出塩分布 RH5M

試験番号 27

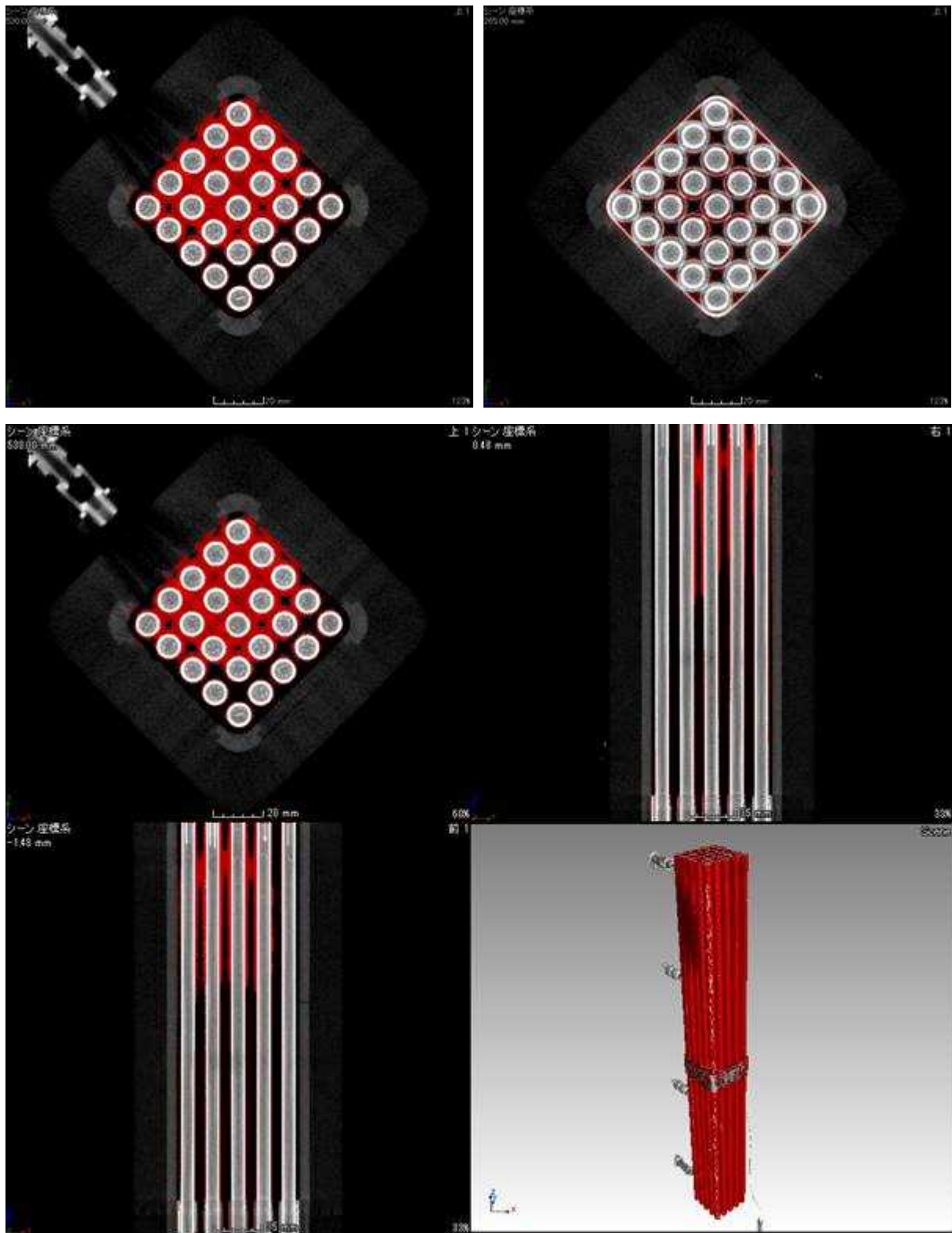


図 4.5- 24 X線 CT 撮影像による析出塩分布 RH5H



試験番号 28

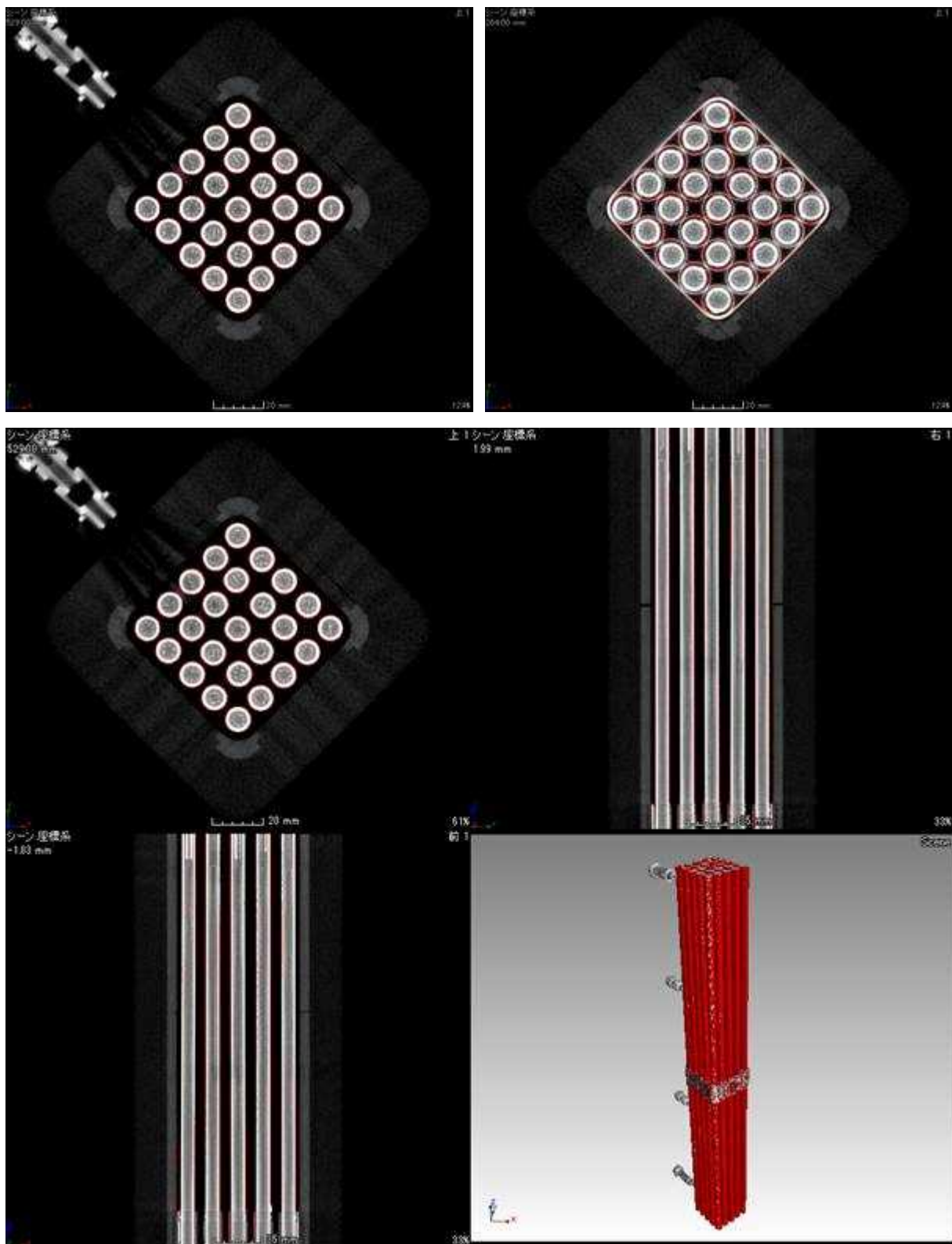


図 4.5- 25 X 線 CT 撮影像による析出塩分布 MM3L

試験番号 29

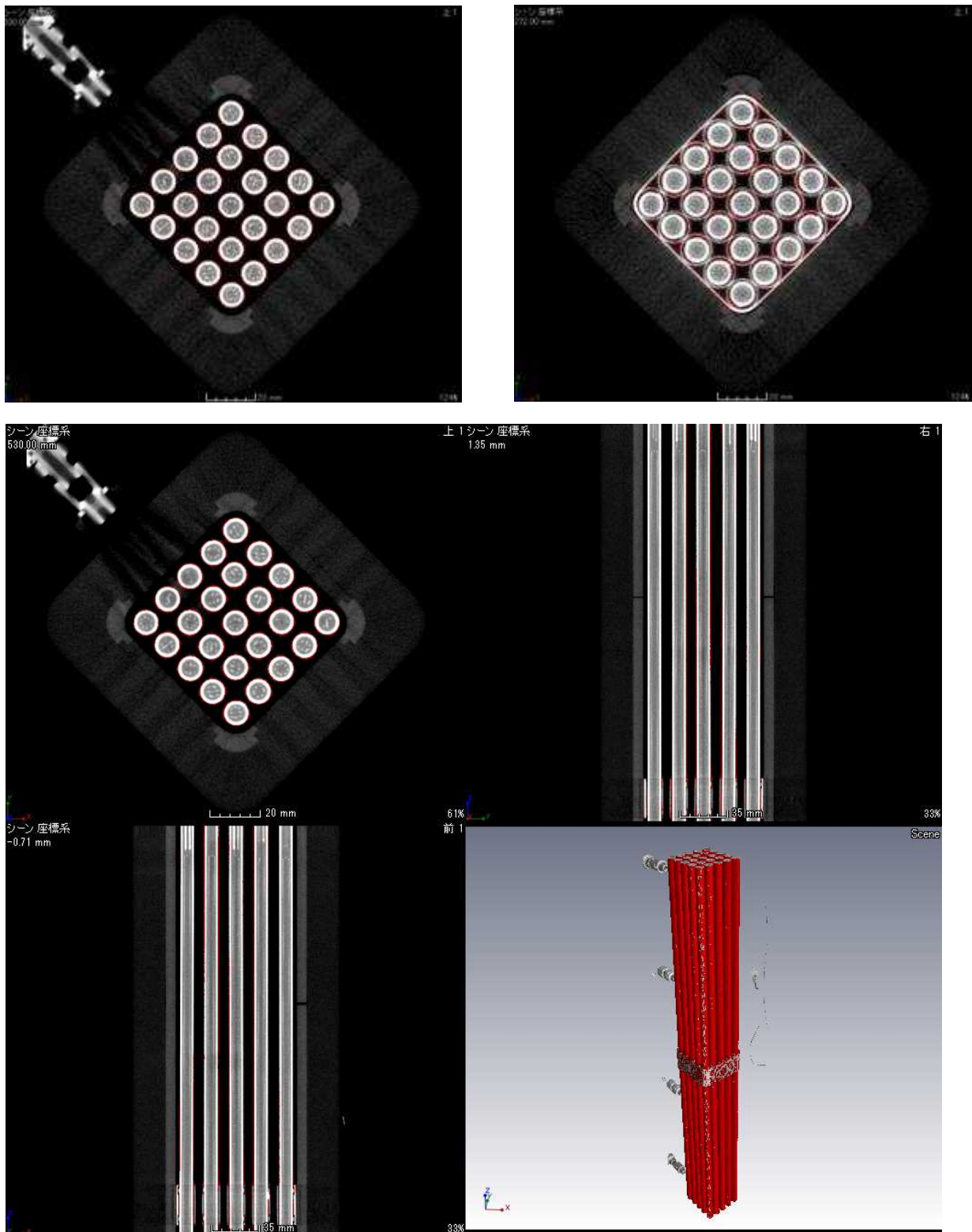


図 4.5- 26 X 線 CT 撮影像による析出塩分布 MM3M

試験番号 30

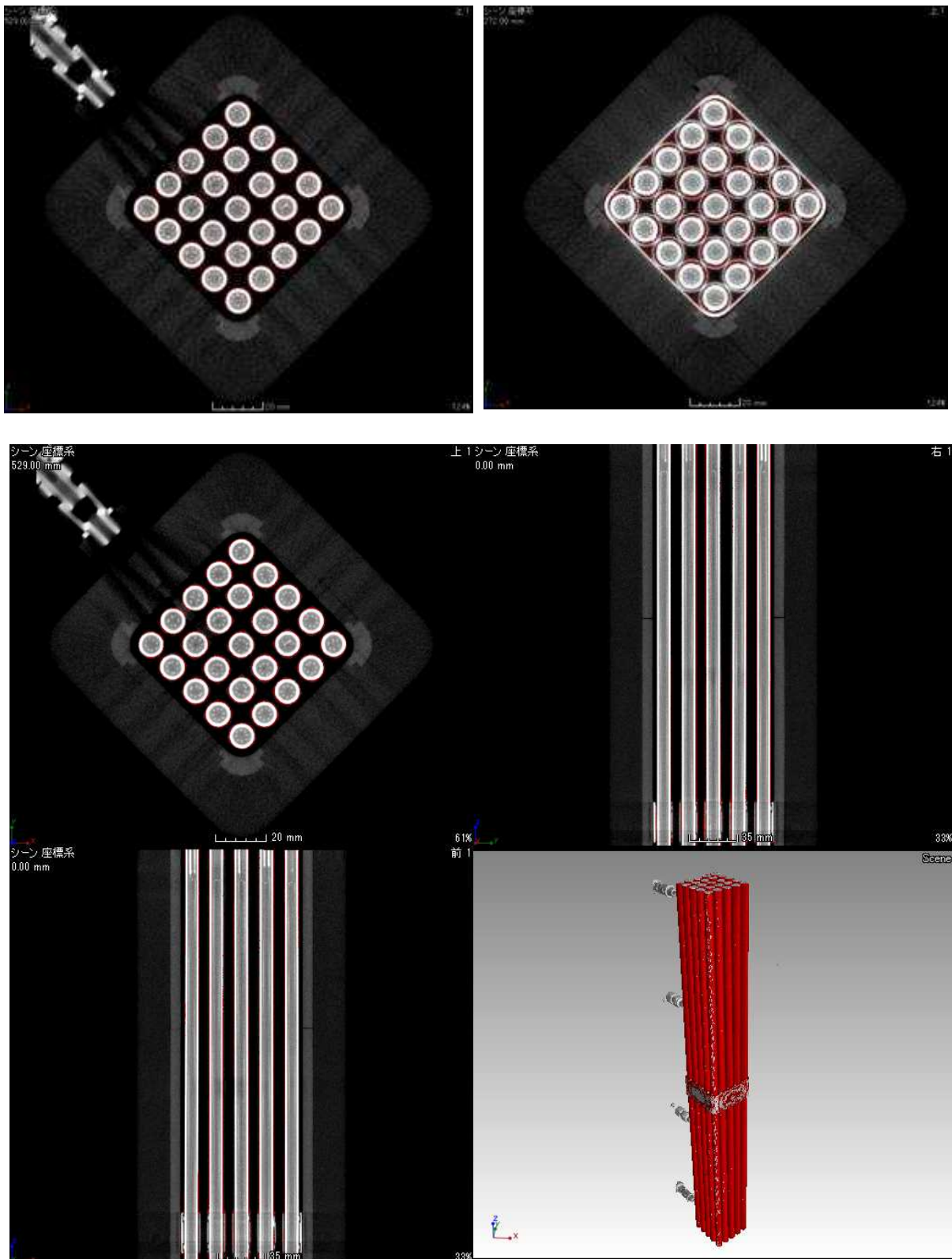


図 4.5- 27 X線 CT 撮影像による析出塩分布 MM3H

試験番号 32

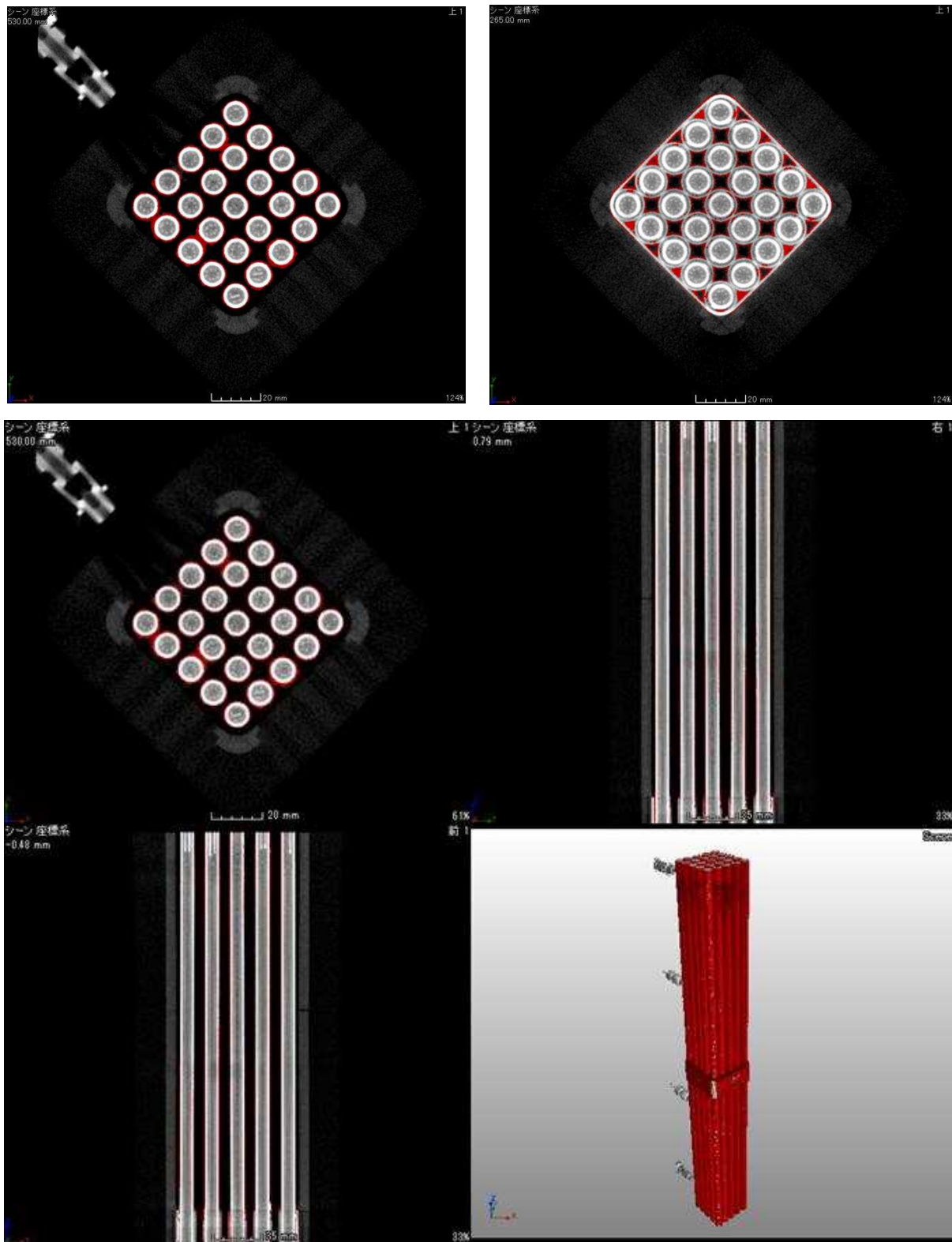


図 4.5- 28 X線 CT 撮影像による析出塩分布 MM4M

試験番号 33

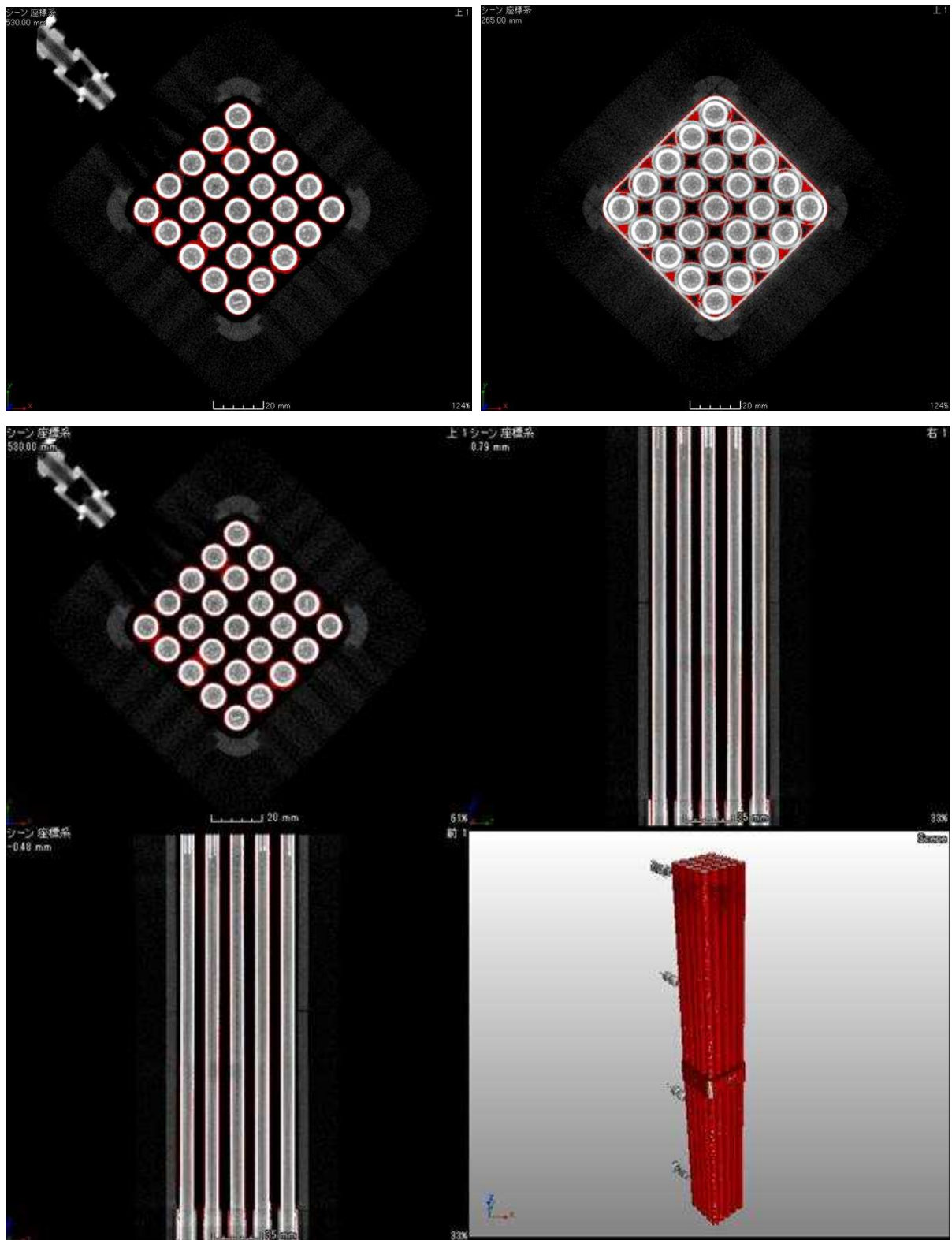


図 4.5- 29 X線 CT 撮影像による析出塩分布 MM4H

試験番号 35

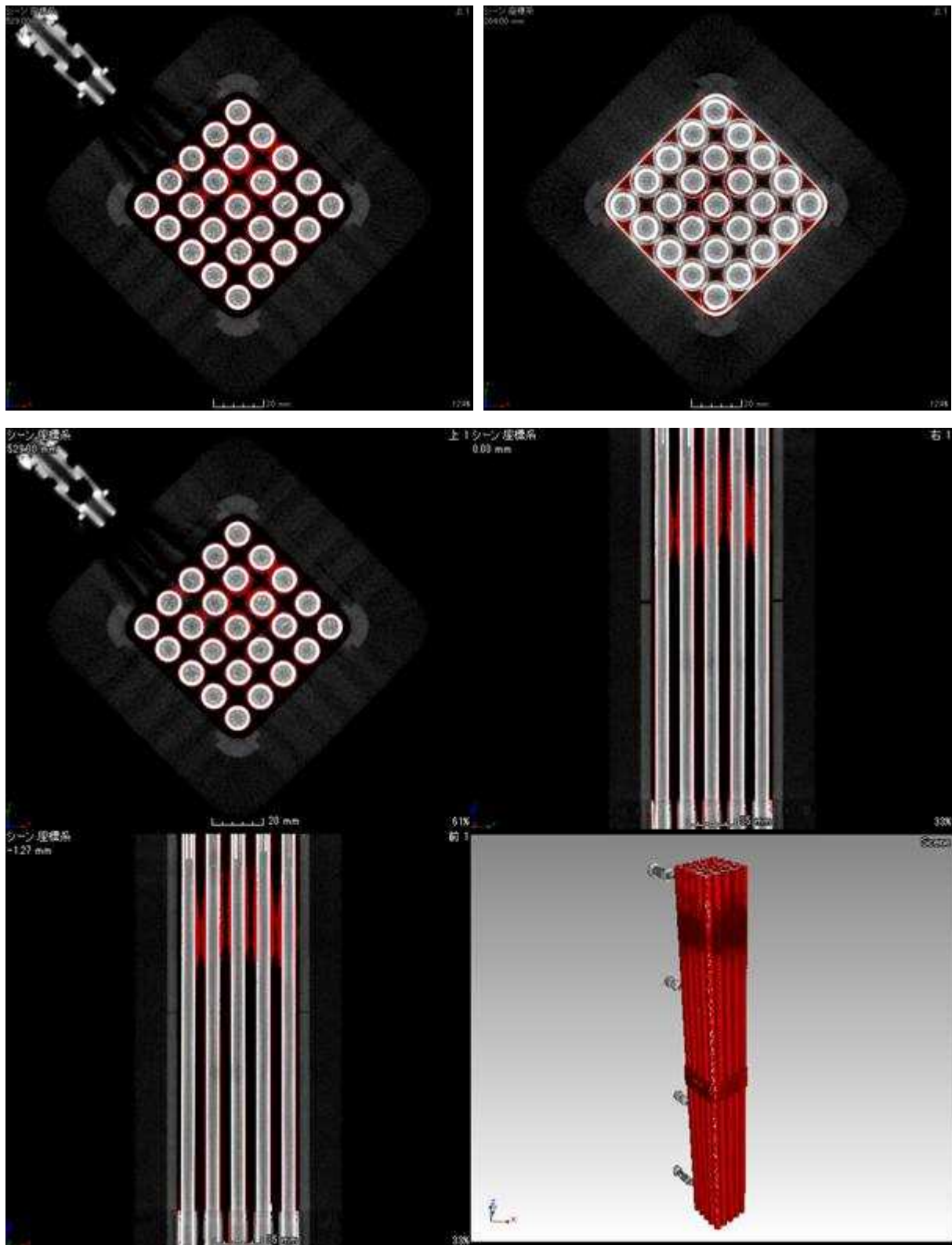


図 4.5- 30 X線 CT 撮影像による析出塩分布 MM5M

試験番号 36

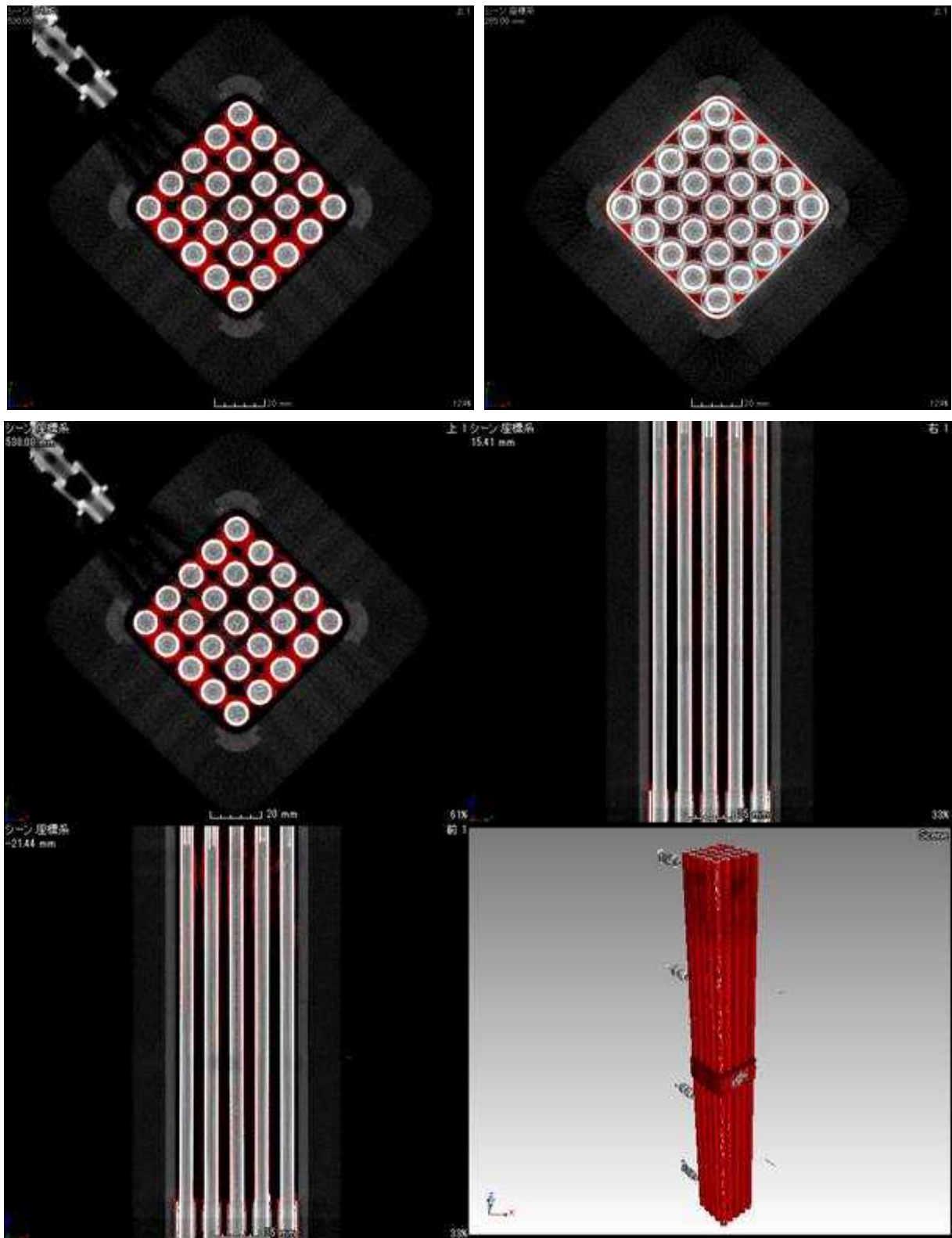


図 4.5- 31 X線 CT 撮影像による析出塩分布 MM5H

試験番号 37

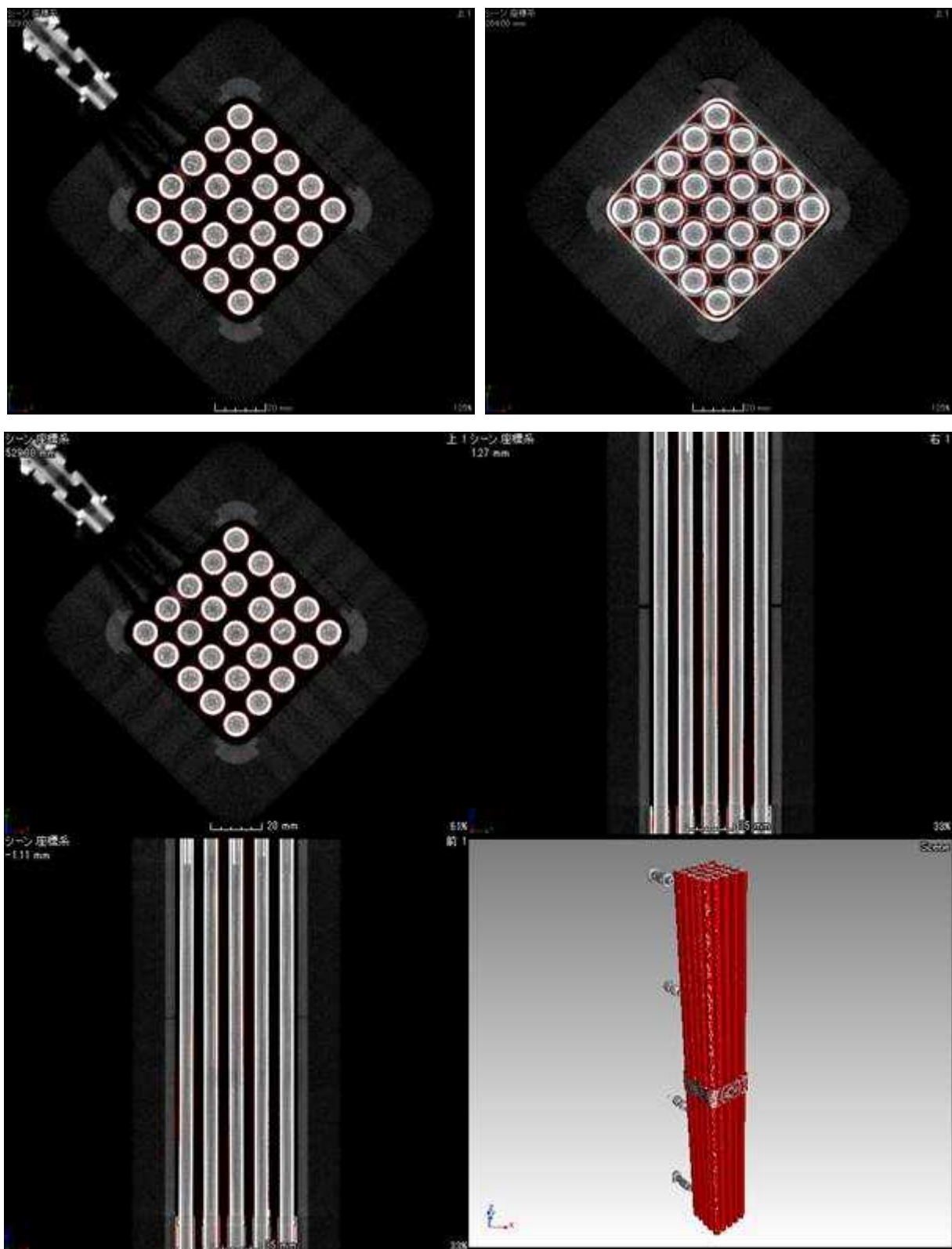


図 4.5- 32 X線 CT 撮影像による析出塩分布 MH3L



試験番号 38

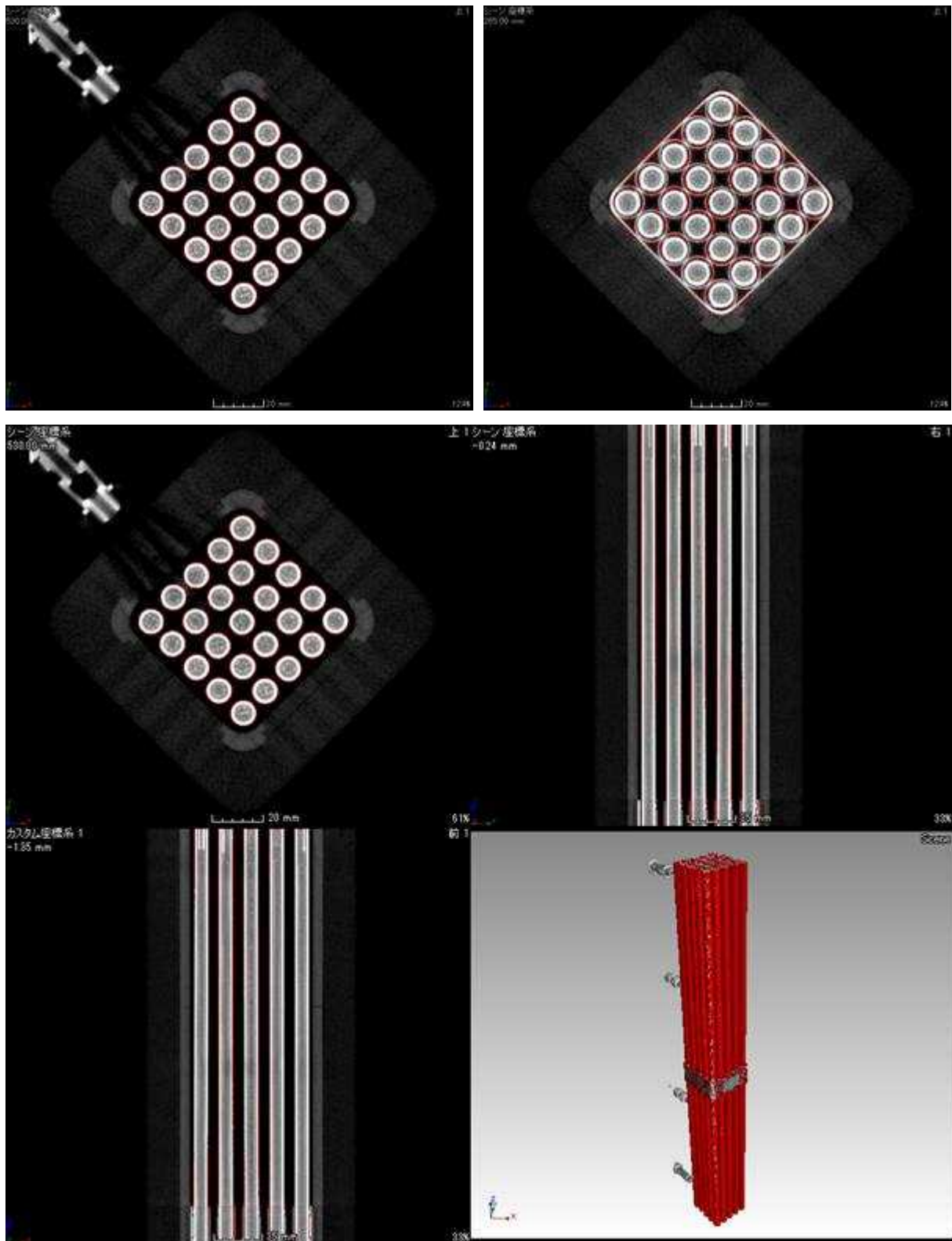


図 4.5- 33 X 線 CT 撮影像による析出塩分布 MH3M

試験番号 39

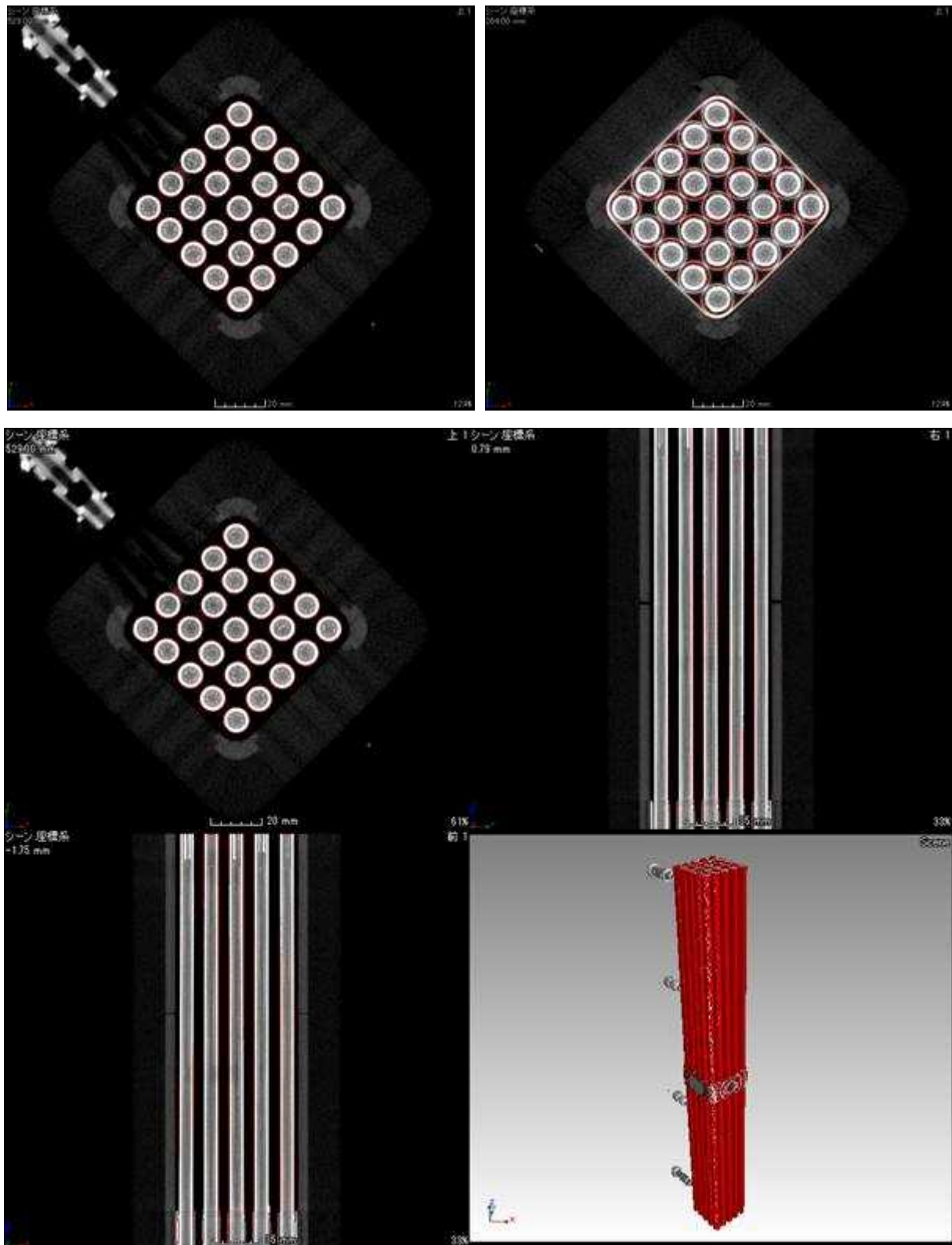


図 4.5- 34 X線 CT 撮影像による析出塩分布 MH3H

試験番号 40

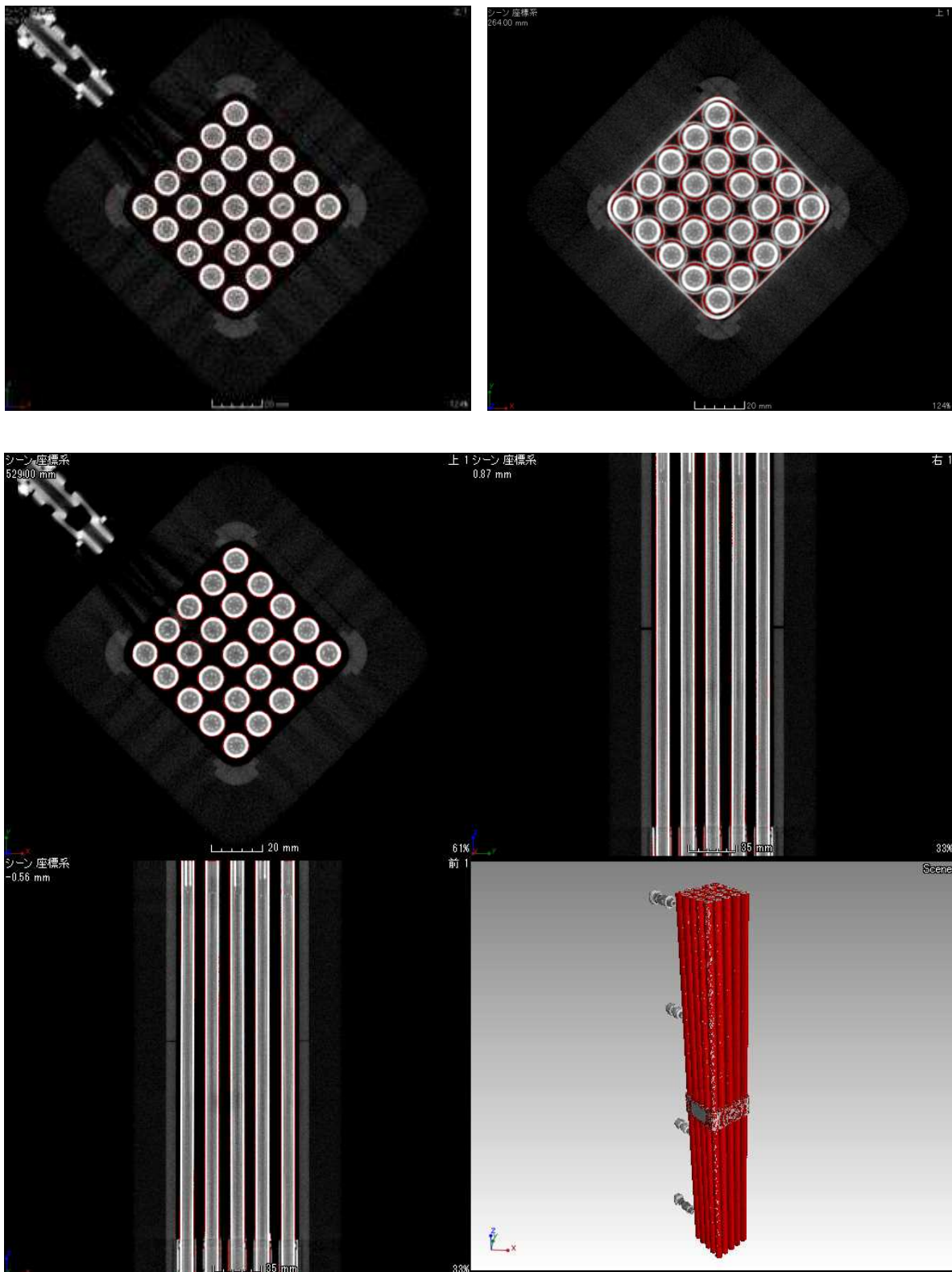


図 4.5- 35 X線 CT 撮影像による析出塩分布 MH4L

試験番号 41

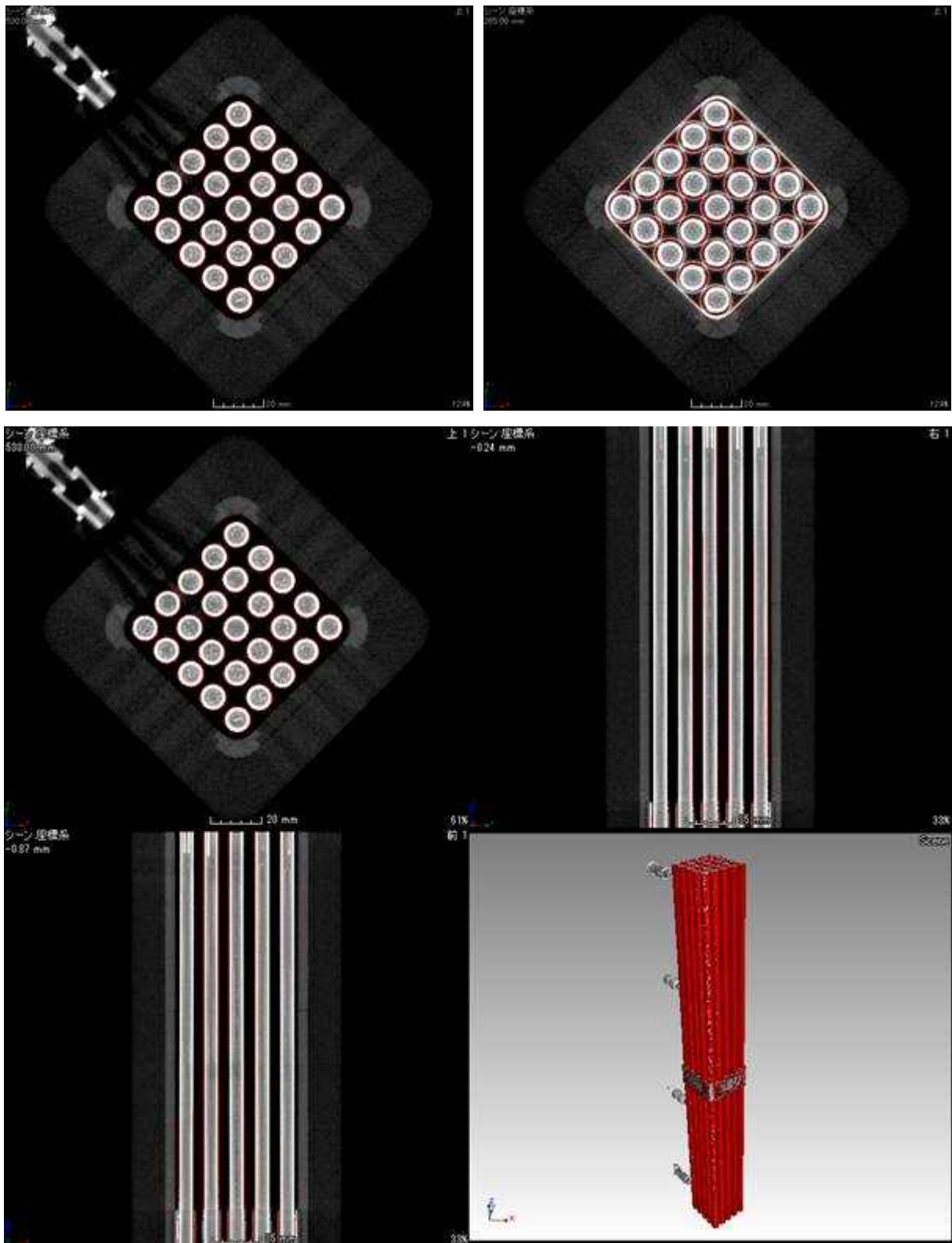


図 4.5- 36 X 線 CT 撮影像による析出塩分布 MH4M

試験番号 42

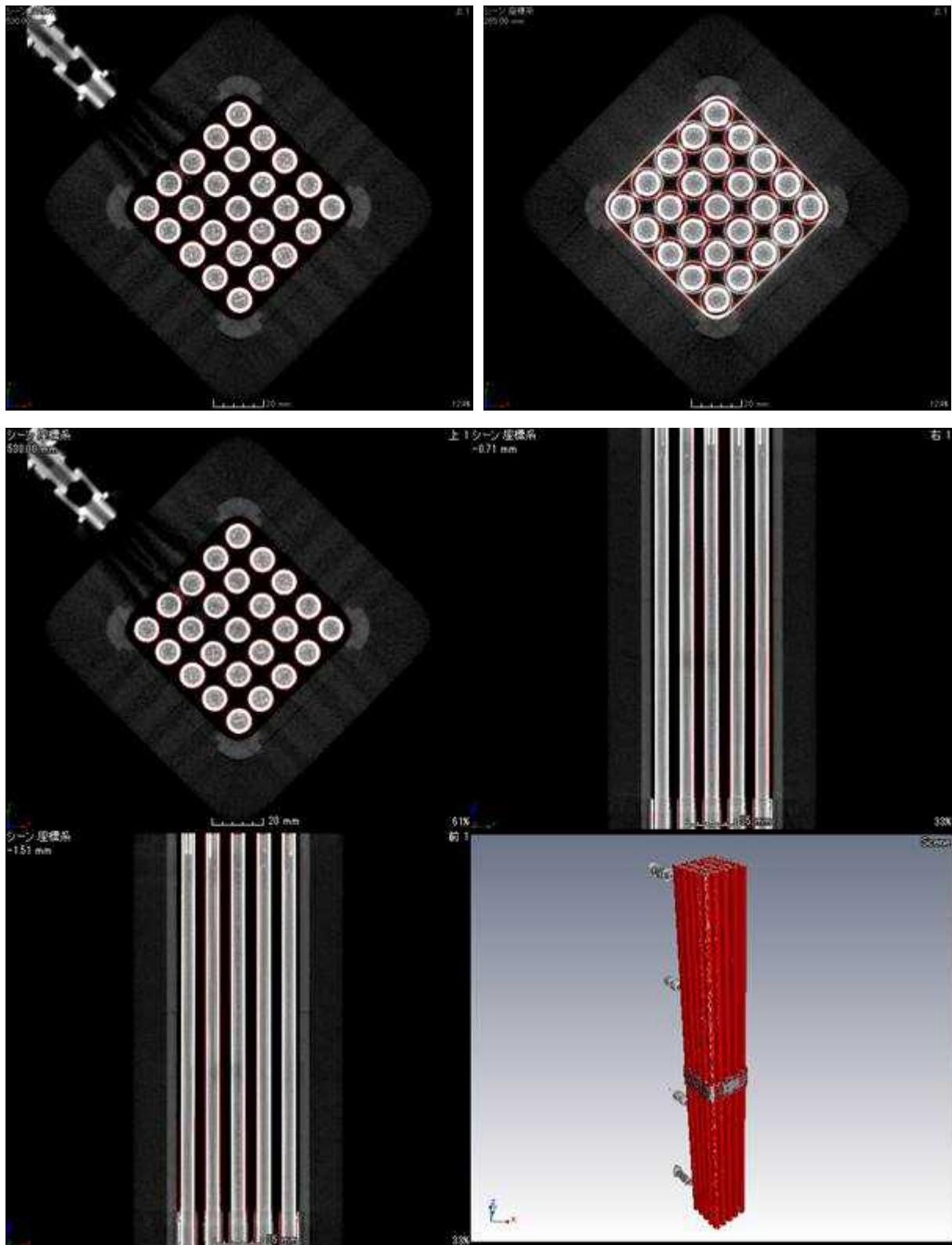


図 4.5- 37 X線 CT 撮影像による析出塩分布 MH4H

試験番号 43

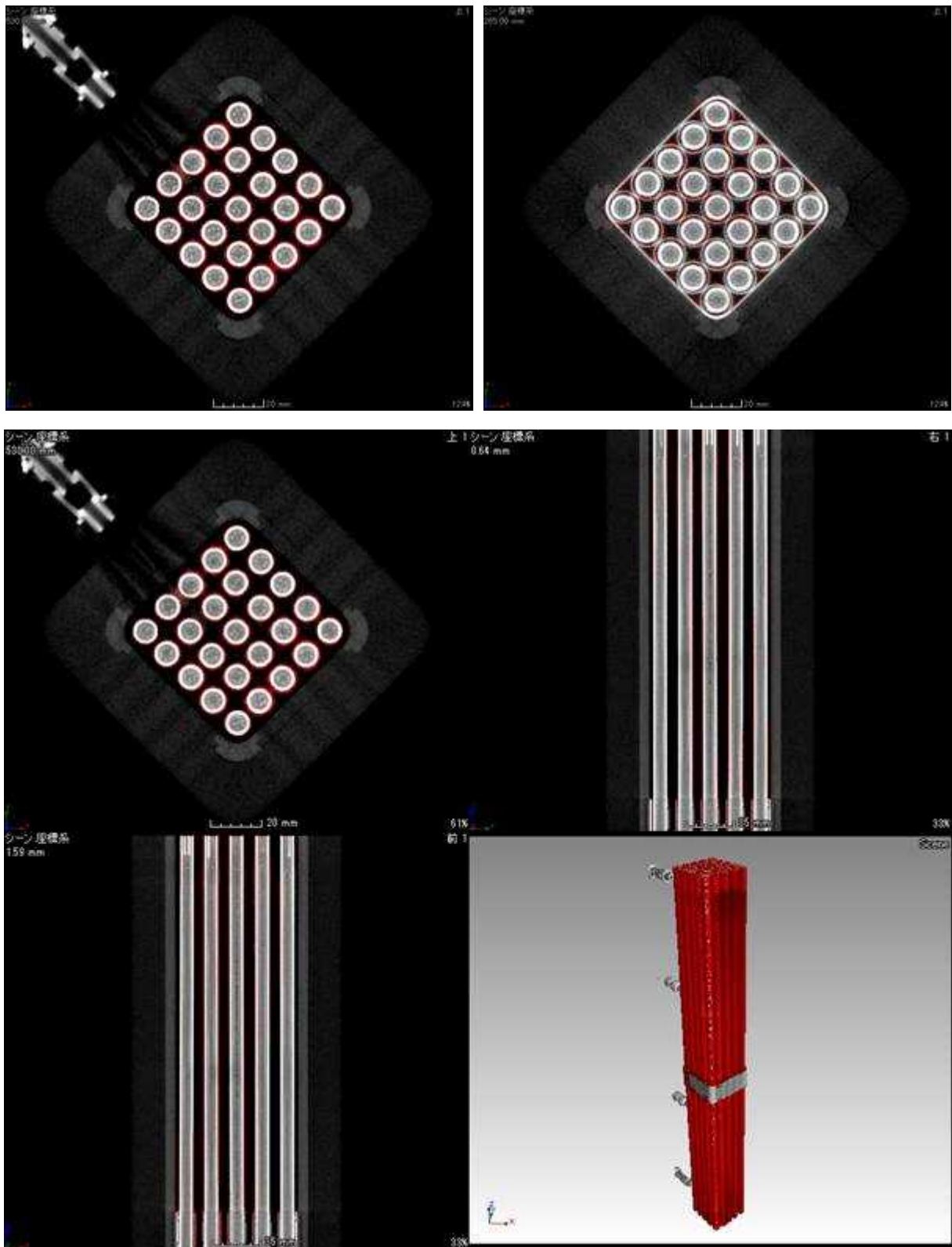


図 4.5- 38 X線 CT 撮影像による析出塩分布 MH5L

試験番号 44

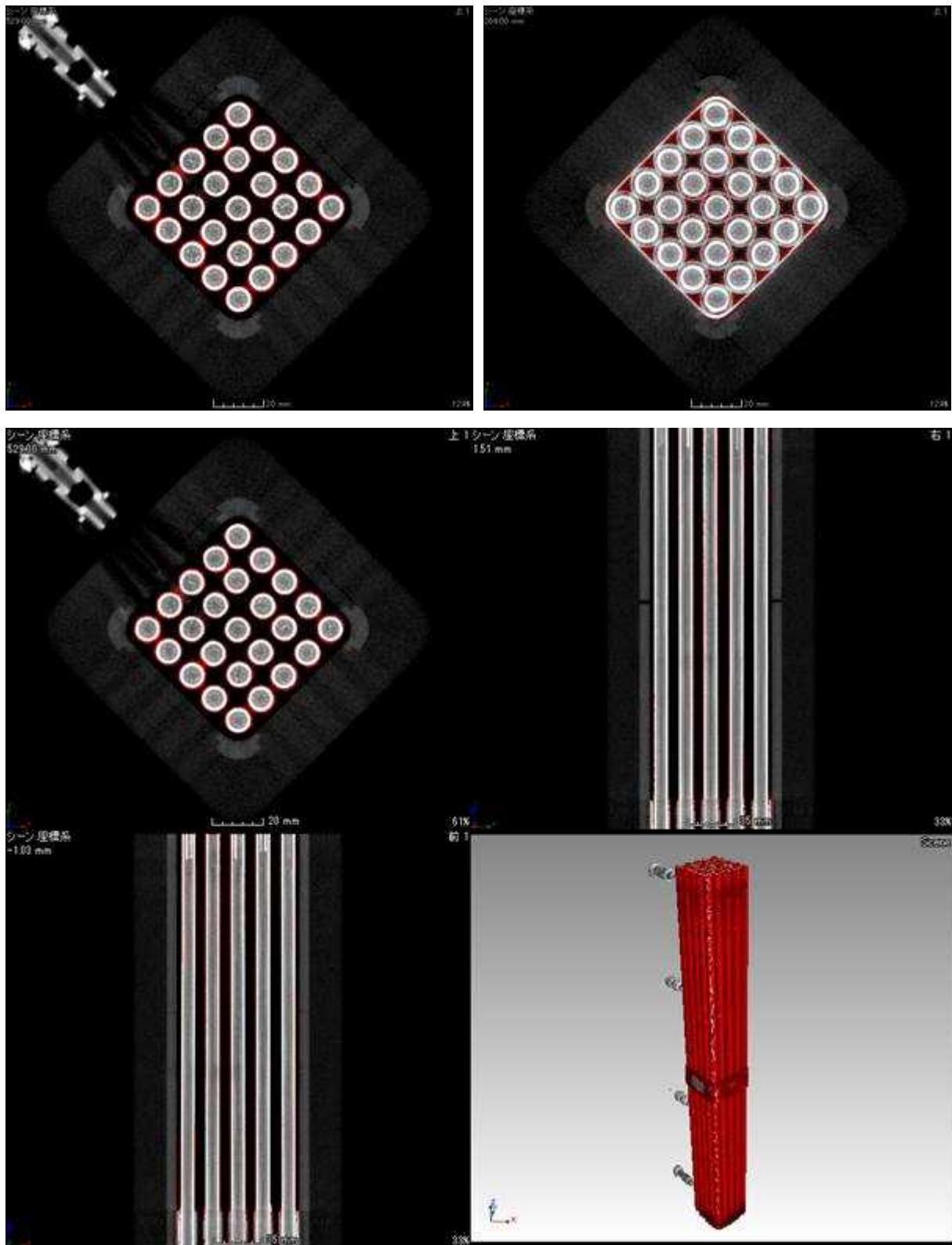


図 4.5- 39 X線 CT 撮影像による析出塩分布 MH5M

試験番号 45

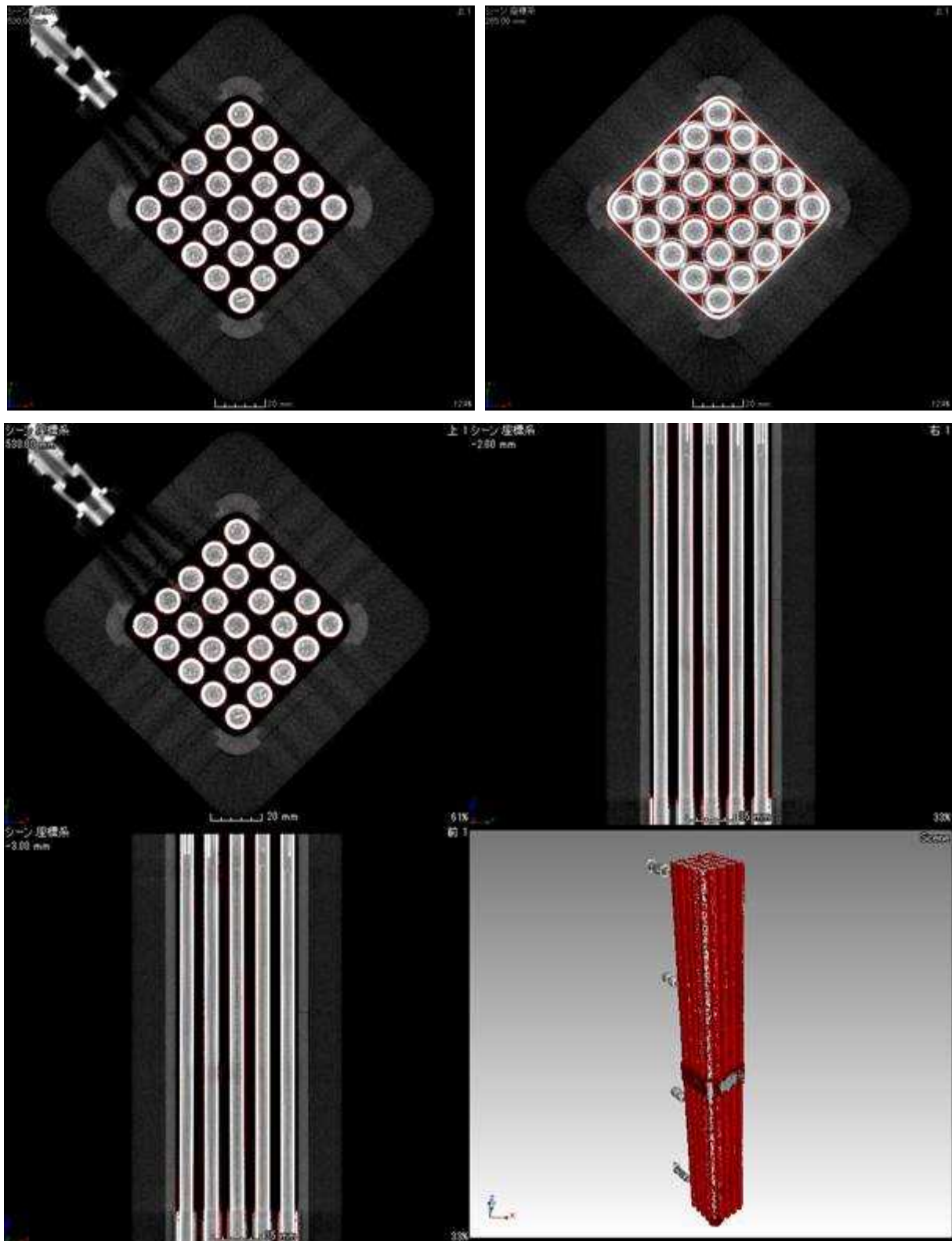


図 4.5- 40 X線 CT 撮影像による析出塩分布 MH5H



試験番号 46

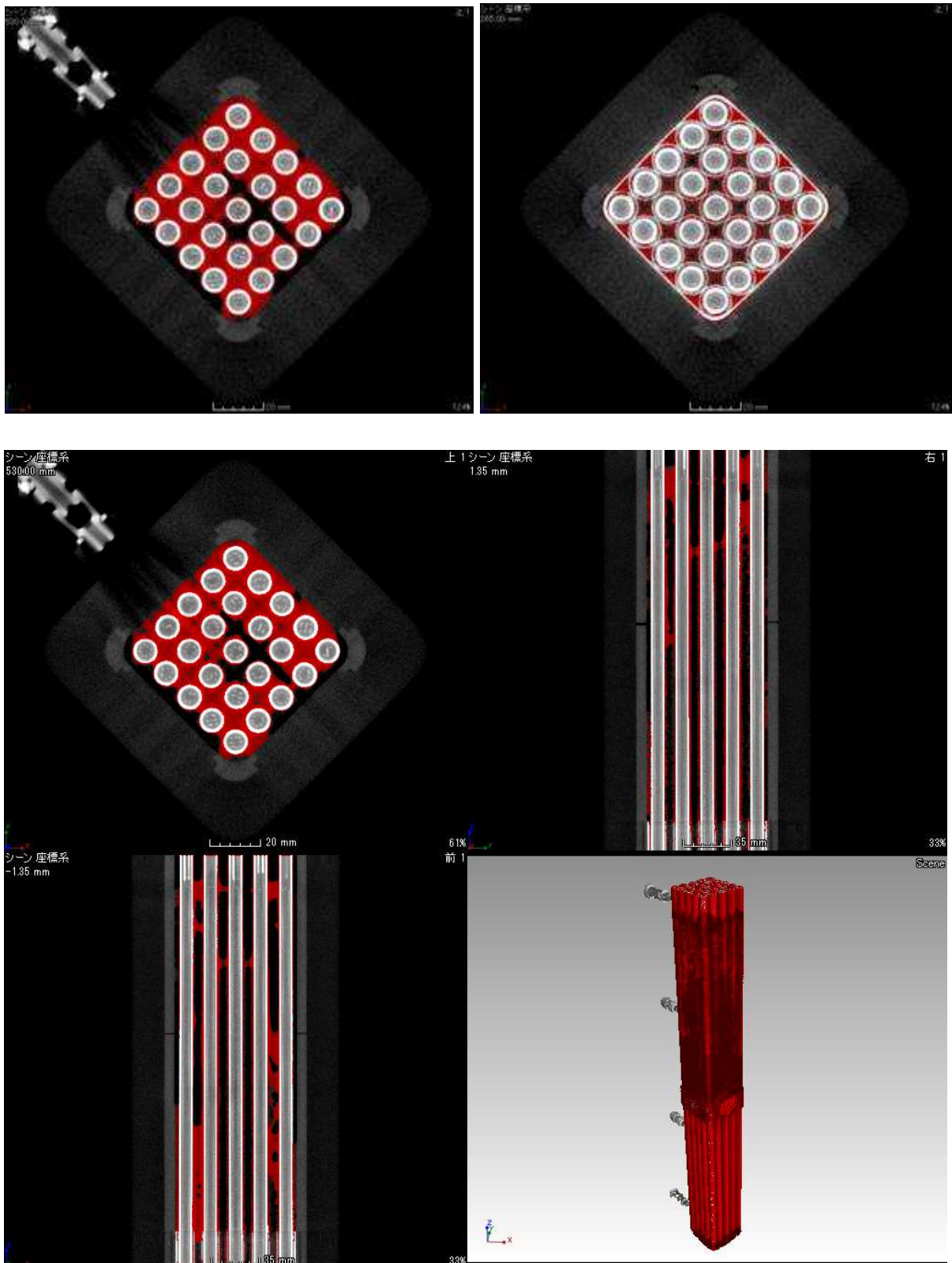


図 4.5- 41 X線 CT 撮影像による析出塩分布 MH6M

試験番号 47

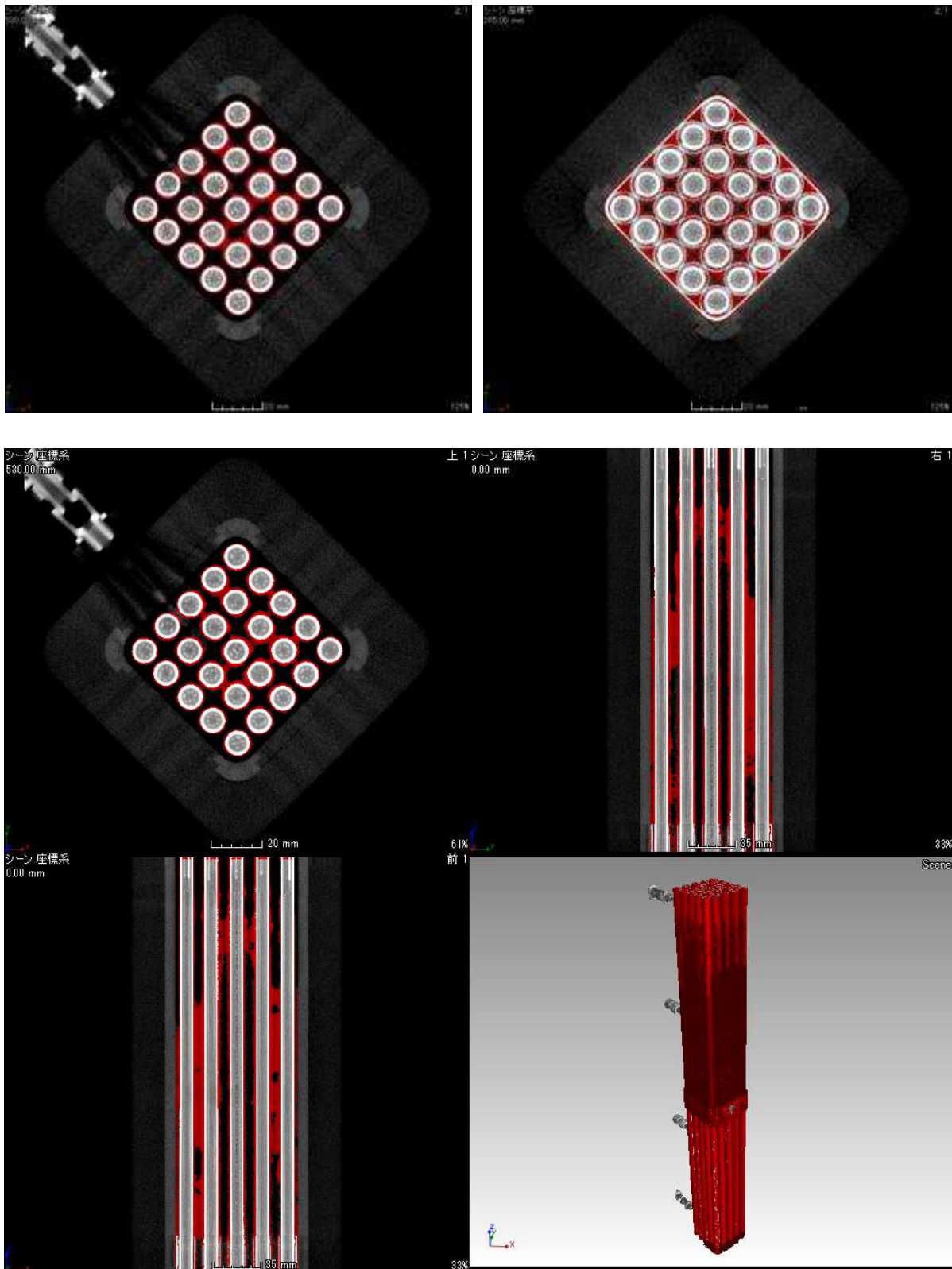


図 4.5- 42 X線 CT 撮影像による析出塩分布 MH6H

### 3.3.3. 沸騰濃縮溶液の分析結果

図 3-23 に、短尺バンドル沸騰濃縮試験設備の沸騰濃縮溶液の採取箇所を示す。昨年度と同様に注射筒と注射針の間にコックを付けて、注射針を常にサンプリング口に取り付けた形でサンプリングを行った。また、液位の低い試験条件では、①および⑤のサンプリング口よりも液面が低くなるため、その条件では液が回収できない場合があった。なお、終了時のサンプリングは各条件の運転終了後ただちに、①から順に開始した。分析結果を表 3-9 に示す。また、結果を基に作成した採取場所ごとの各元素濃度を図 3-24 に示す。分析結果より、試験後の試験体内液のナトリウム、塩素濃度が高くなっていることが分かる。また、ナトリウム、塩素以外のマグネシウム、硫黄、カリウム、臭素濃度も試験体内で濃度が高くなっている。これらの結果より、試験後液は、試験体内で濃縮されていることが確認できた。一方で、カルシウムとストロンチウムは逆に試験体内で濃度が減少していた。飽和溶解度を超えて析出したものと考えられる。これらは昨年度実施した分析でも確認されており、同じ結果が得られている。

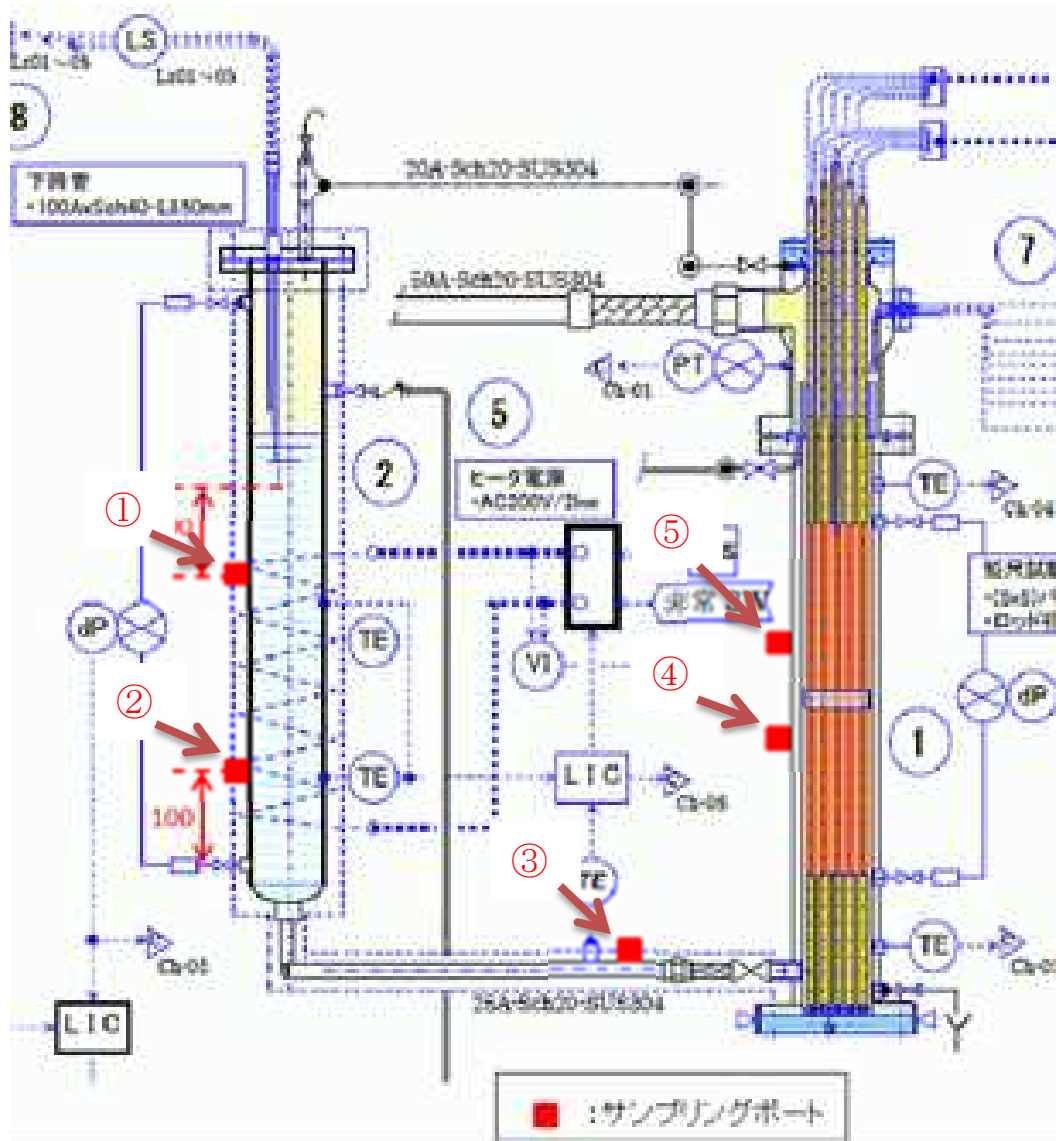


図 3-23 沸騰濃縮溶液のサンプリング箇所

表 3-9 沸騰濃縮溶液の ICP-MS 分析結果

試験No.	採取時間	採取場所	ほう素(B)	ナトリウム (Na)	マグネシウム (Mg)	カリウム(K)	カルシウム (Ca)	ストロンチウム (Sr)	硫黄(S)	塩素(Cl)	臭素(Br)
RL3H1209	試験前	B0	26	24000	2800	820	860	15	2600	42000	150
		B2	28	26000	3000	870	890	16	2700	44000	150
		B3	40	26000	3400	970	830	15	2700	48000	170
		B4	25	23000	2700	800	850	15	2600	42000	140
	試験後	A0	25	24000	2900	830	880	15	2800	44000	140
		A2	28	25000	2900	850	870	16	2400	45000	150
		A3	110	73000	12000	3500	450	6.2	7400	140000	630
RM3M0126	試験前	B0	25	28000	3000	900	870	15	1800	44000	140
		B2	25	27000	2900	870	840	14	2000	44000	140
		B3	24	26000	2900	880	840	14	2400	44000	140
		B4	23	24000	2600	820	780	13	1700	39000	140
		B5	21	22000	2300	720	700	12	1800	35000	110
	試験後	A0	26	27000	2900	900	860	15	2500	45000	160
		A2	31	25000	2700	830	810	14	1900	40000	140
		A3	110	90000	13000	3800	360	3.2	7100	150000	650
		A4	100	87000	12000	3600	320	3.7	7000	150000	660
		A5	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
		B0	27	30000	3200	920	870	16	2700	45000	140
RM3H0127	試験前	B2	26	28000	3000	920	1100	15	2600	45000	150
		B3	29	31000	3300	1000	830	14	2700	49000	160
		B4	22	25000	2600	810	770	13	2100	41000	140
		B5	24	26000	3000	890	750	13	2000	46000	160
		A0	27	28000	2900	900	900	15	2800	47000	140
	試験後	A2	24	27000	2800	840	800	14	2800	45000	150
		A3	110	87000	13000	3800	280	3.1	7500	150000	680
		A4	92	79000	11000	3200	350	3.9	6700	130000	590
		A5	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
		B0	24	24000	2800	830	880	16	2600	41000	160
		B2	25	24000	2800	840	880	15	2700	44000	170
RM4L1211	試験前	B3	28	26000	3100	940	860	15	2400	45000	170
		B4	29	28000	3300	930	850	16	2800	45000	170
		B5	25	23000	2800	800	850	15	2100	42000	160
		A0	24	24000	2700	850	1000	15	2600	43000	160
		A2	24	23000	2700	810	990	15	2600	39000	150
	試験後	A3	130	90000	16000	4800	520	4.2	7300	170000	870
		A4	120	89000	16000	4500	500	4.6	7500	170000	860
		A5	210	82000	13000	3800	1200	7.7	7700	150000	730
		B2	35	26000	3000	860	920	16	3400	45000	160
		B3	61	26000	3000	900	950	16	2800	46000	170
		B4	29	25000	2800	820	870	15	3700	42000	160
RM4H1208	試験前	B5	24	24000	2700	780	840	15	2600	44000	170
		A0	22	22000	2400	820	880	14	2000	42000	160
		A2	23	28000	3200	770	810	18	2500	39000	150
		A3	170	79000	16000	4500	310	3.4	8500	160000	940
	試験後	A4	130	86000	17000	4500	310	3.3	8000	160000	860

表 3-9 沸騰濃縮溶液の ICP-MS 分析結果 (続き)

試験No.	採取時間	採取場所	ほう素(B)	ナトリウム(Na)	マグネシウム(Mg)	カリウム(K)	カルシウム(Ca)	ストロンチウム(Sr)	硫黄(S)	塩素(Cl)	臭素(Br)
RM5L1216	試験前	B0	20	24000	2600	810	880	15	2500	40000	150
		B2	20	26000	2800	830	890	16	2400	41000	150
		B3	25	26000	3100	920	840	15	2400	42000	170
		B4	19	17000	1900	680	740	11	1500	33000	130
		B5	16	19000	2100	640	690	12	1800	31000	120
	試験後	A0	21	35000	3800	870	950	21	3000	41000	160
		A2	29	27000	3000	890	850	15	2400	42000	170
		A3	160	68000	21000	7300	290	2.6	10000	150000	1200
		A4	120	52000	14000	3900	160	1.4	6300	99000	750
		A5	130	56000	15000	4200	210	2.8	8700	110000	820
	試験中	N0	21	25000	2700	830	910	15	2600	40000	150
		N2	22	25000	2700	890	890	14	3100	41000	160
		N3	150	76000	21000	6500	260	2.6	11000	150000	1100
		N4	160	79000	23000	6900	290	2.6	11000	160000	1200
		N5	150	79000	22000	6600	360	4.1	10000	160000	1200
RH4H0121	試験前	B0	25	26000	2800	840	810	14	2300	43000	150
		B1	25	27000	2900	880	830	15	1900	44000	160
		B2	26	26000	2700	850	820	14	2700	45000	150
		B3	25	27000	2800	880	810	14	2500	47000	150
		B4	25	25000	2800	840	800	14	2200	41000	140
	試験後	B5	22	25000	2800	840	780	13	2300	41000	130
		A0	24	26000	2800	870	850	15	2400	44000	150
		A1	24	24000	2500	790	750	13	2100	39000	130
		A2	26	24000	2500	780	750	13	1900	39000	120
		A3	140	74000	16000	4700	340	4	8700	140000	810
	A4	120	74000	13000	4000	360	4.8	7900	130000	700	
	A5	120	76000	13000	4000	350	4.6	7500	140000	660	



図 3-24 沸騰濃縮液の元素濃度分布

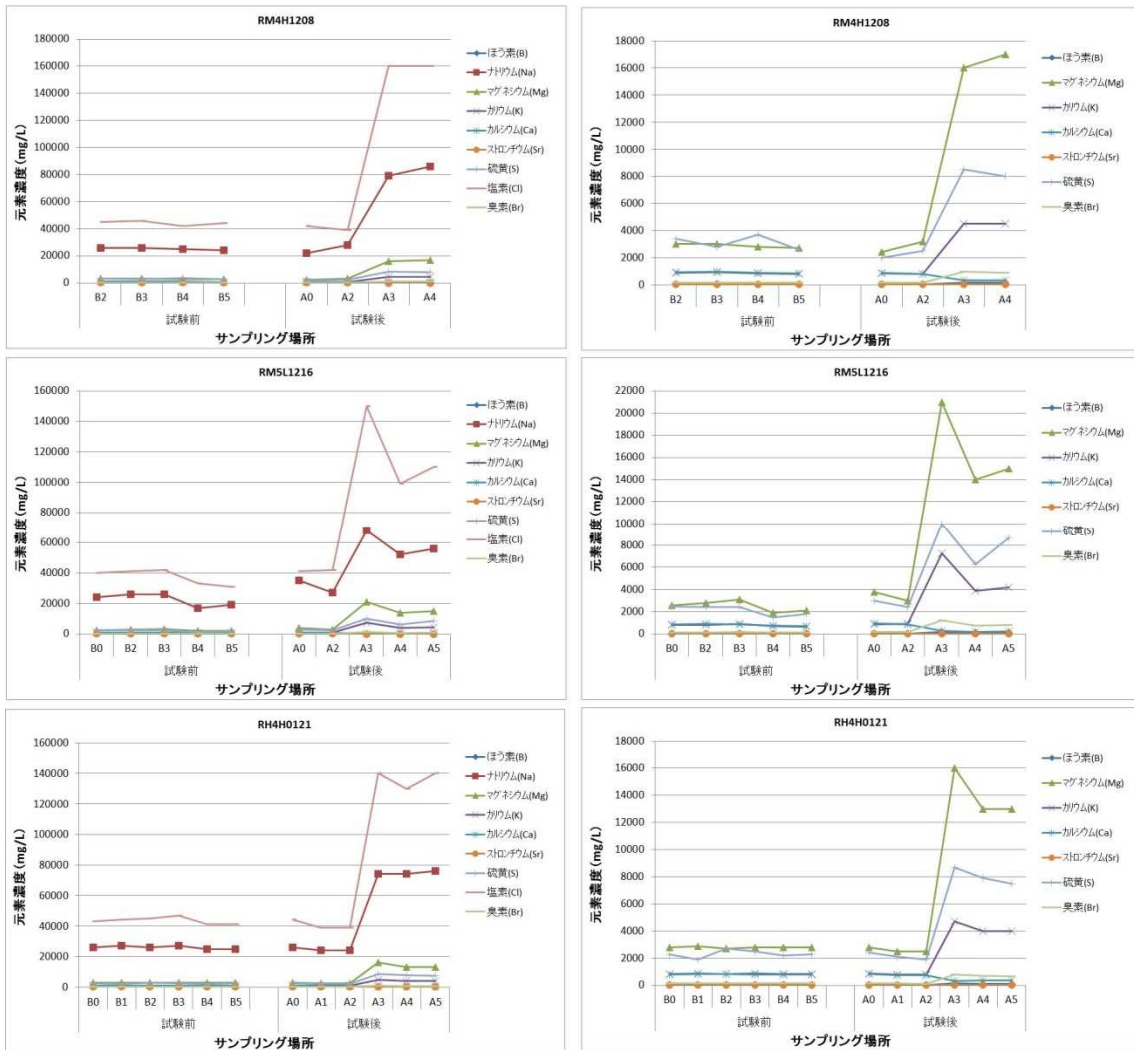


図 3-24 沸騰濃縮液の元素濃度分布 (続き)



## 4. クラスト冷却特性

本章では溶融炉心のクラストやデブリベッドの形状を模擬した多孔質体を用いて、塩水中での沸騰濃縮試験を実施し、伝熱特性を把握する。

### 4.1. クラスト中クラック伝熱特性試験装置

本試験におけるクラスト中のクラック伝熱影響試験装置（以下、本試験装置という）の基本仕様は以下の通りである。

- 設計圧力 大気圧 (水槽圧力)
- 設計温度 120 °C (水槽温度)
- ロッド温度 1100 °C (試験体底部基板温度)
- ヒータ熱量 0.9kW×5 本×2 段
- 主要材質 SUS304 (供給水ポンプ、ステンレス薄板、水槽中段部、計装品、ポンプ等)  
ポリカーボネイト (水槽可視化部)
- 使用流体 純水、海水、海水と五ホウ酸ナトリウム水和水の混合溶液

#### 4.1.1. 装置構成

図 4-1 に試験装置の概略構成を示す。図 4-2 に試験装置の外観写真を示す。試験装置は、沸騰試験を行う水槽と、それに所定温度の液を供給する給水タンク、また蒸発した蒸気を凝縮する冷水タンクとスクラバーから構成される。

図 4-3 に伝熱面と多孔質試験体、水槽の概念図を示す。クラスト中のクラックの影響を把握するため、多孔質体内にスリット（溝）を設けたセラミック製も使用する。多孔質体の試験体を水槽底部に設置し、多孔質試験体をヒータで加熱することで、セラミック試験体の沸騰伝熱特性を測定する。

試験に際して水槽底部にはシール用のステンレス薄板を設置し、この薄板上部にセラミック試験体を接着剤で接着し、また薄板下部には銅基板に拡散接合している。

銅製の伝熱面は上部の銅基板と下部の銅ブロック、銅ブロック内に挿入される 10 本のシースヒータから構成される。銅基板は銅ブロックにチタンボルトで締結されている。銅ブロック内にはマルチセル型のシースヒータが設けられ

ており、この熱が銅ブロック、銅基板を経由してセラミック試験体に伝えられる構造とする。

#### 4.1.2. 補給水供給機器

補給水供給機器は、図 4-1 に示した補給水タンク、補給ポンプから構成される。試験に用いる液は、水や人工海水、人工海水とホウ酸水の混合液を使用する。補給水は、タンク入口にはボール弁を設置し、補給時に液位を一定に保つようにする。

また海水、海水・ホウ酸混合液の場合は、別のポリエチレンタンクで溶解、濃度調整、攪拌をおこなった上で、補給水タンクに投入する。

補給水タンクではヒータによって約 95℃程度に温度を調整する。所定温度の液は、補給水ポンプで水槽に送液する。補給水タンクにはバイパスラインを設けて、必要に応じて液を循環する。補給水槽には海水やホウ酸の析出塩の有無が確認できるように上部は蓋構造としている。

#### 4.1.3. 水槽

図 4-3 に水槽の構造を示す。水槽底部には、銅基板、SUS304 薄板、試験体が一体で組み込まれている。銅基板と SUS304 の薄板 (270 mm×270 mm×厚み 100 μm) とは拡散接合によって接続されている。

SUS304 薄板の上にはセラミック試験体が接着剤で接合される。SUS304 薄板は水槽底部に設置する場合の上部の液のシールの働きをする。この一体化した銅基板をさらに銅ブロックにボルトで締結する。銅ブロックには 10 本のヒータが設置されており、ヒータから銅ブロック、銅基板、SUS 薄板、セラミック試験体の順に熱が移行する。試験体の周囲はセラミック製の断熱材で囲い、横方向の放熱が最少になるようにした。

また試験体と底部の面が同一になるよう水槽底部に断熱板を装着し、この底部断熱材は水槽内部に取り付けたネジで固定した。試験体と銅基板および銅ブロックは、水槽下部からリフターで持ち上げることで水槽に接続する構造としている。また水槽は試験体での沸騰が観察できるように透明なポリカーボネイトで製作されている。図 4-5 に、組立中の水槽を斜め上方から観察した写真を示す。

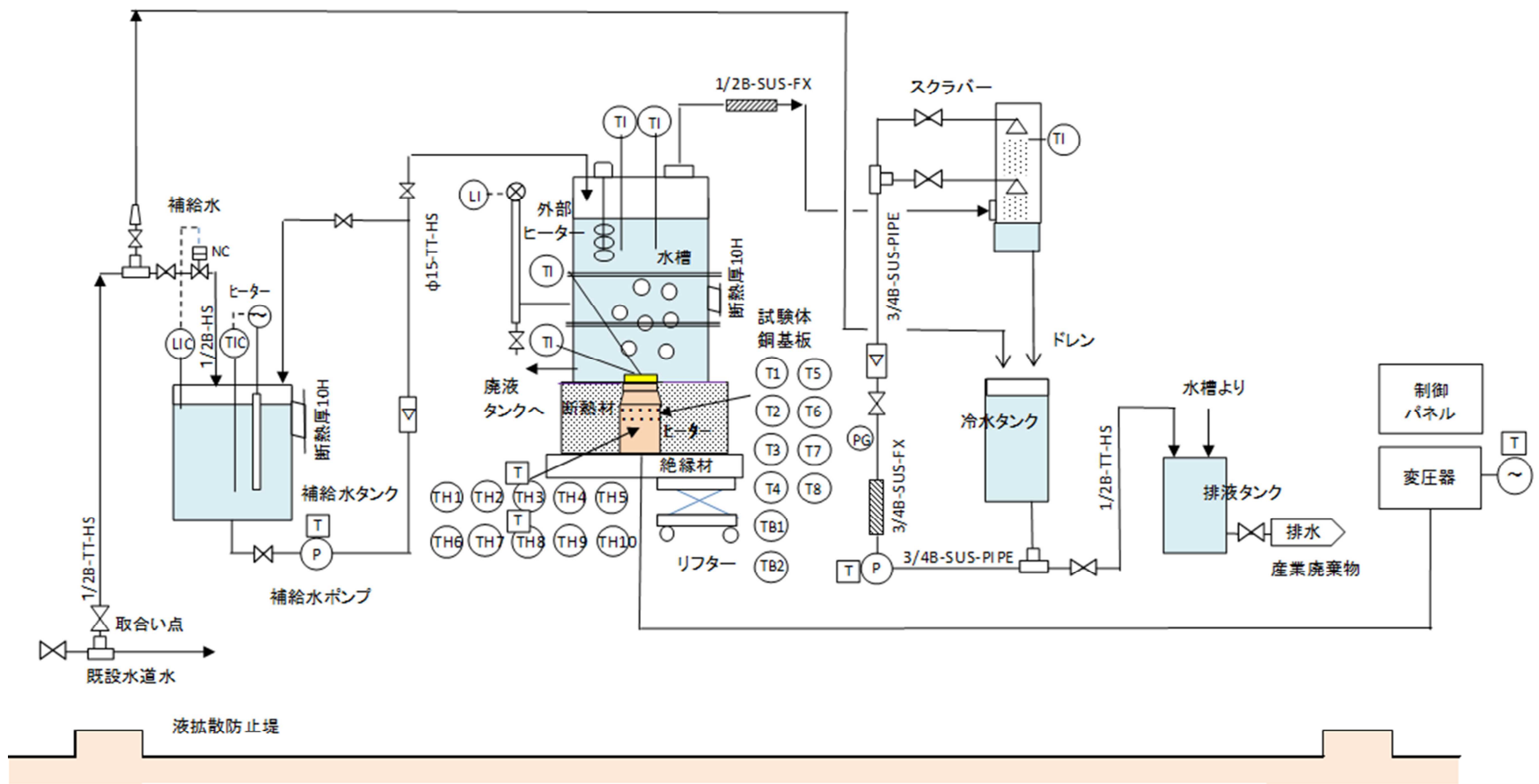


図 4-1 クラスト中クラック伝熱特性試験装置の概念図



図 4-2 試験装置の外観写真

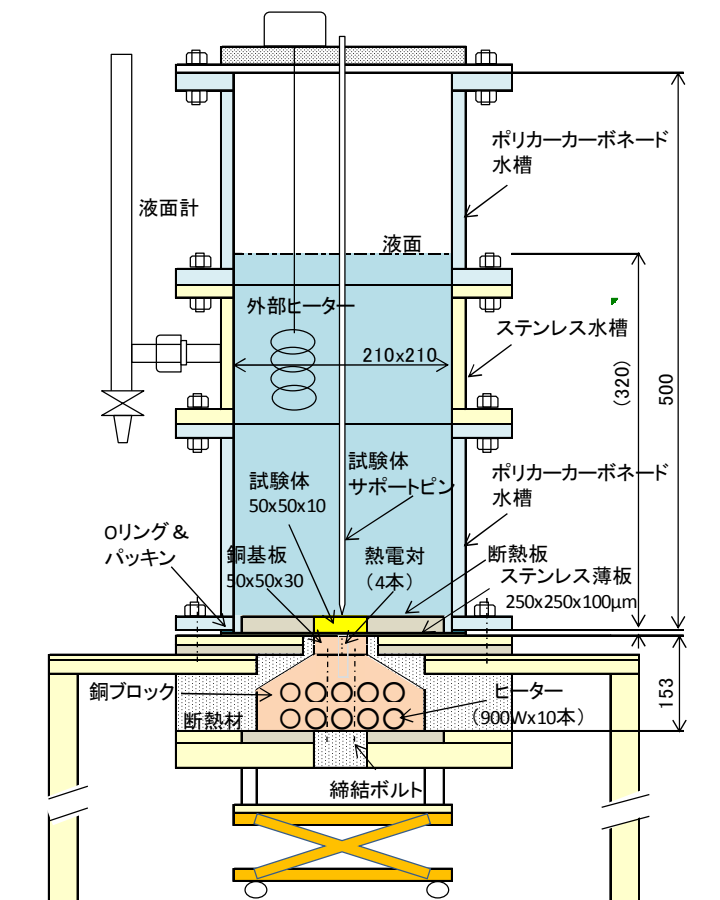


図 4-3 伝熱面と水槽の概念図

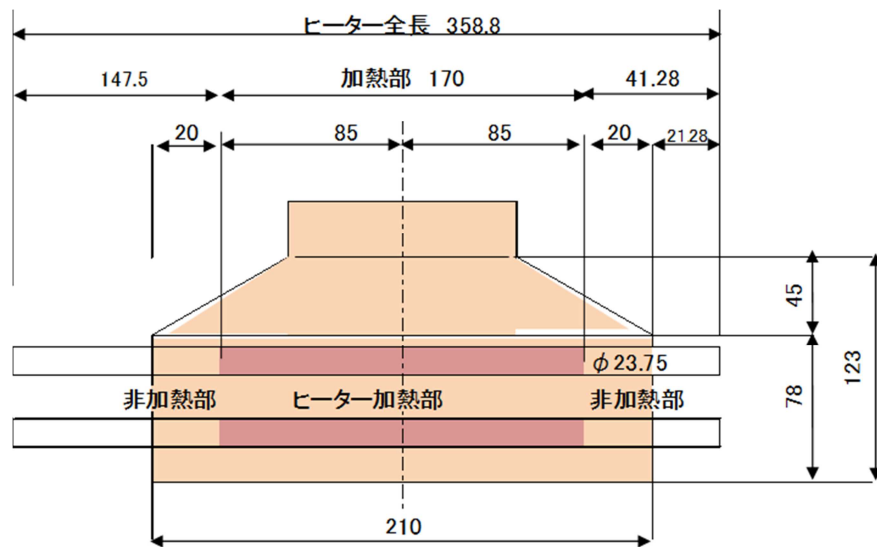


図 4-4 ヒータの概念図

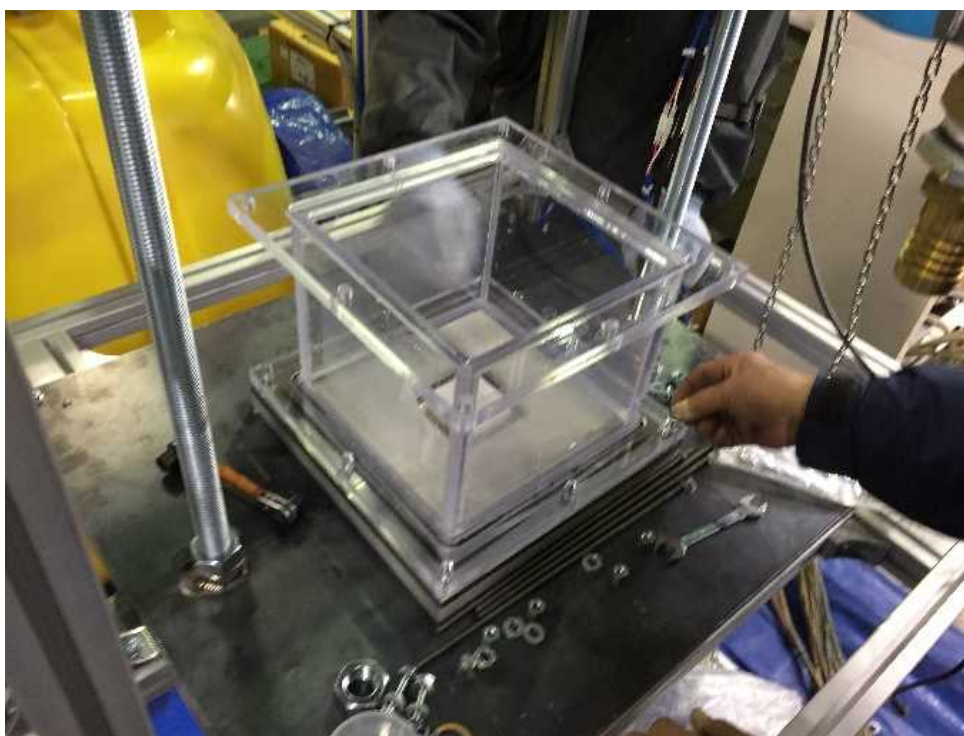


図 4-5 組立中の水槽（透明ポリカーボネート）

#### 4.1.4. 模擬クラスト多孔質体

図 4-6 にクラストを模擬した多孔質体セラミックス試験体の設置構造を示す。鉛直上方から観察した場合の構造である。図 4-7 に水槽と試験体の取り付け図を示す。SUS304 薄板の上にセラミック試験体を接着する。試験体の基本寸法は 50mm×50mm×10mm である。試験体の寸法精度は 0.5mm 以下である。クラック（溝）を模擬するために、試験体を小ピースに分割し、図 4-6 に示す形状のクラックとみなし、銅基板に接着する。クラックの構造として、鉛直上方からの構造として、井形とロ形の 2 種類を、対照試験として溝がない構造をセラミック試験体は、銅基板試験体に接着剤で接合する。接着剤は東亜合成社製のアロンセラミック W を用いた。

表 4-1 に多孔質体の設置構造に対する諸元を示す。クラックの隙間は全ての場所で 2 mm である。試験体と銅基板の接着物（および後述の水シール用のステンレス箔）は、試験ごとに取り換えた。

表 4-2 に多孔質試験体の種類と粒子径、気孔率を示す。多孔質体はセラミックで、以下にパラメータを示す。

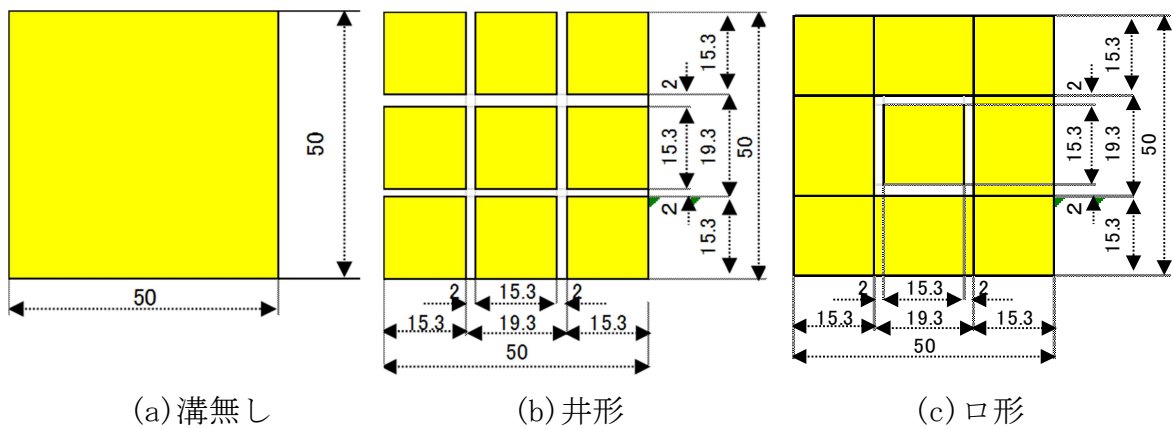
- ・成分 4 水準：シリカ 100%、シリカ 60%とアルミナ 40%、アルミナ 100%)
- ・原料粒子径 2 水準：0.6 mm、0.3 mm
- ・気孔率 2 水準：20%以下、30%以上

表 4-1 多孔質試験体の設置構造と諸元

	溝無し	井形	口形
全面積(mm <sup>2</sup> )	2,500	2,500	2,500
溝面積(mm <sup>2</sup> )	0	384	138
溝比率	0.0%	15.4%	5.5%

表 4-2 試験体種類

		材質A	材質B	材質C	材質D	材質E
成分	シリカ	100%	100%	100%	60%	—
	アルミナ	—	—	—	40%	100%
粒子径		0.6mm	0.3mm	0.3mm	0.3mm	0.4mm
気孔率		26.30%	32.15%	19.00%	36.40%	32.30%
備考		粒子径大	気孔率大	気孔率小	アルミナ含有	アルミナ熱伝導率大



厚みはいずれも 10 mm

図 4-6 試験体の設置構造

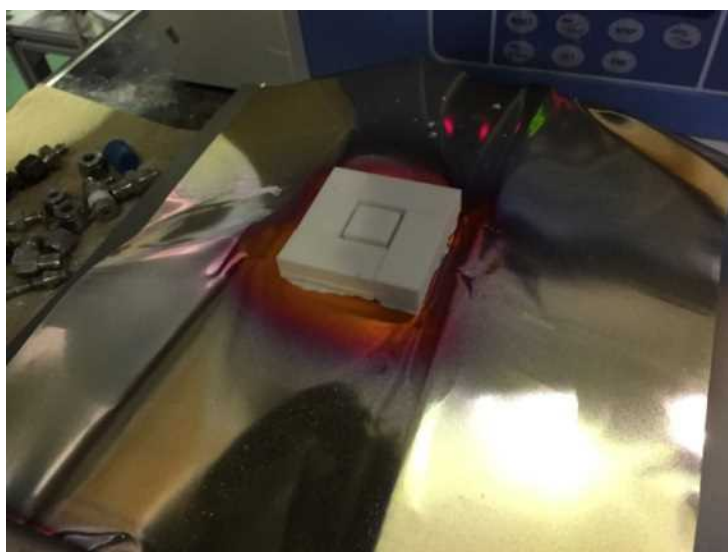


図 4-7 薄板とセラミック試験体の接着



#### 4.1.5. 伝熱面の構造

銅基板と SUS304 薄板とは拡散接合した。銅と SUS304 を密着させ、高温に維持することで固相状態のまま二つの金属表面を冶金学的に接合させる方法である。図 4-8 に拡散接合した試験体を示す。拡散接合は以下の手順で行った。

- (1) ステンレス薄板 (SUS304) の接合部側を塩化第二鉄でエッチング
- (2) 銅基板にステンレス薄板を載せて、治具で荷重をかけ、接触圧を高める。
- (3) 真空炉に投入し、温度 900~950°C で加熱
- (4) 冷却時に不活性ガス投入、

図 4-9 に銅基板の熱電対取り付け方法を示す。銅基板の中央部には鉛直方向に 2 mm ピッチで外形  $\phi 0.25$  mm のシース熱電対を 4 本埋め込み、温度指示値を線形回帰により表面温度と熱流束を求めた。熱電対の埋め込み穴は内径  $\phi 0.3$  mm である。熱電対は岡崎製作所 SUPER COUPLE K 形であり、細径であるが 900°C まで使用可能である。

前述のセラミック試験体と銅基板は、銅ブロックに 4 本のチタンボルトで締結した。銅基板と銅ブロックの接合面での接触熱抵抗を低減するように、銀 70%含有の銀ペーストを塗布した。チタンボルトは銅ブロック底部から貫通して、銅基板にネジ止めとし、ボルトは熱的影響を最小限度にするために M5 とした。

銅ブロック中には 5 本のヒータを上下 2 列、合計 10 本のヒータを取り付けた。ヒータは米国ワトロー社製マルチセルヒータで、直径 23.75 mm、長さは 359 mm、加熱部長さ 170 mm、1 本の常温時の出力密度は  $100 \text{ kW/cm}^2$ 、定格発熱量は 900 W/本である。耐熱温度は 1120 °C である。ヒータ内部にはそれぞれ熱電対が挿入できる。内部温度を監視しながら過熱異常を検知する安全機能を設けた。ヒータはサイリスタ方式の交流電源にて加熱される。

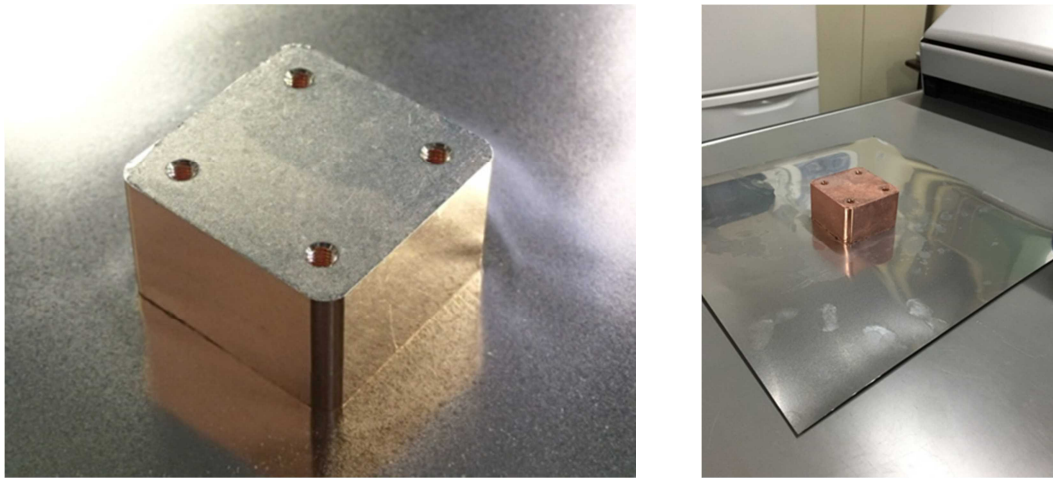


図 4-8 SUS304 薄板と拡散接合した銅基板

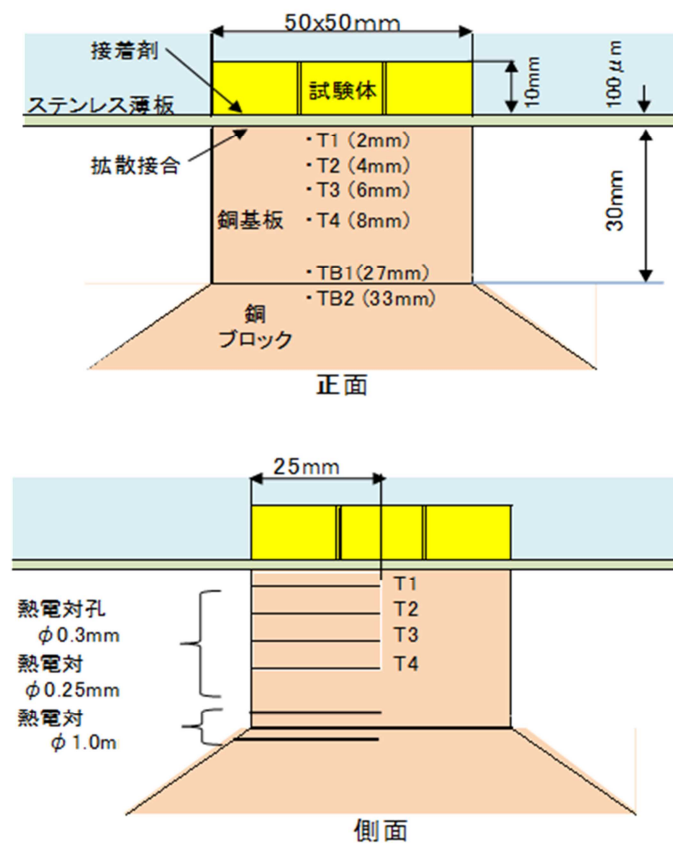


図 4-9 銅基板への熱電対接続法

#### 4.1.6. 計測条件

本研究では、伝熱面の銅基板に埋め込まれた熱電対指示温度や流体温度、電源電力、溶液位などを2秒間隔で行った。

#### 4.1.7. 装置の組立構造

伝熱面表面や多孔質体には塩が析出するため、伝熱面表面のステンレス鋼板および多孔質体は毎回交換した。このため、装置は毎回分解・組立操作が必要になる。

図 4-10 に伝熱面の組立方法を示す。多孔質体を接着したステンレス板付銅基板を銅ブロックにボルトで締結する。図 4-11 に銅基板を銅ブロックに取り付けた状態の外観写真を示す。その後、水槽を取り付ける。

図 4-12 左側に多孔質体を鉛直上方から押さえて固定するサポートピンの構造を示す。試験体は極薄い接着剤で接合しているが、沸騰の影響により接触熱抵抗が増大する恐れがある。そこで鉛直上方から多孔質体を押しつけ、塩水の沸騰中にも接触熱抵抗を低減させる構造とした。サポートピンの先端は鋭角にして試験体の接触面積を極力減らすようにした。またサポート板は試験体より 270 mm 鉛直上方に離してプール沸騰の流れに影響がないようにした。図 4-12 右側は、サポートピンが井形試験片を押さえている状態を斜め上から撮影した写真である。

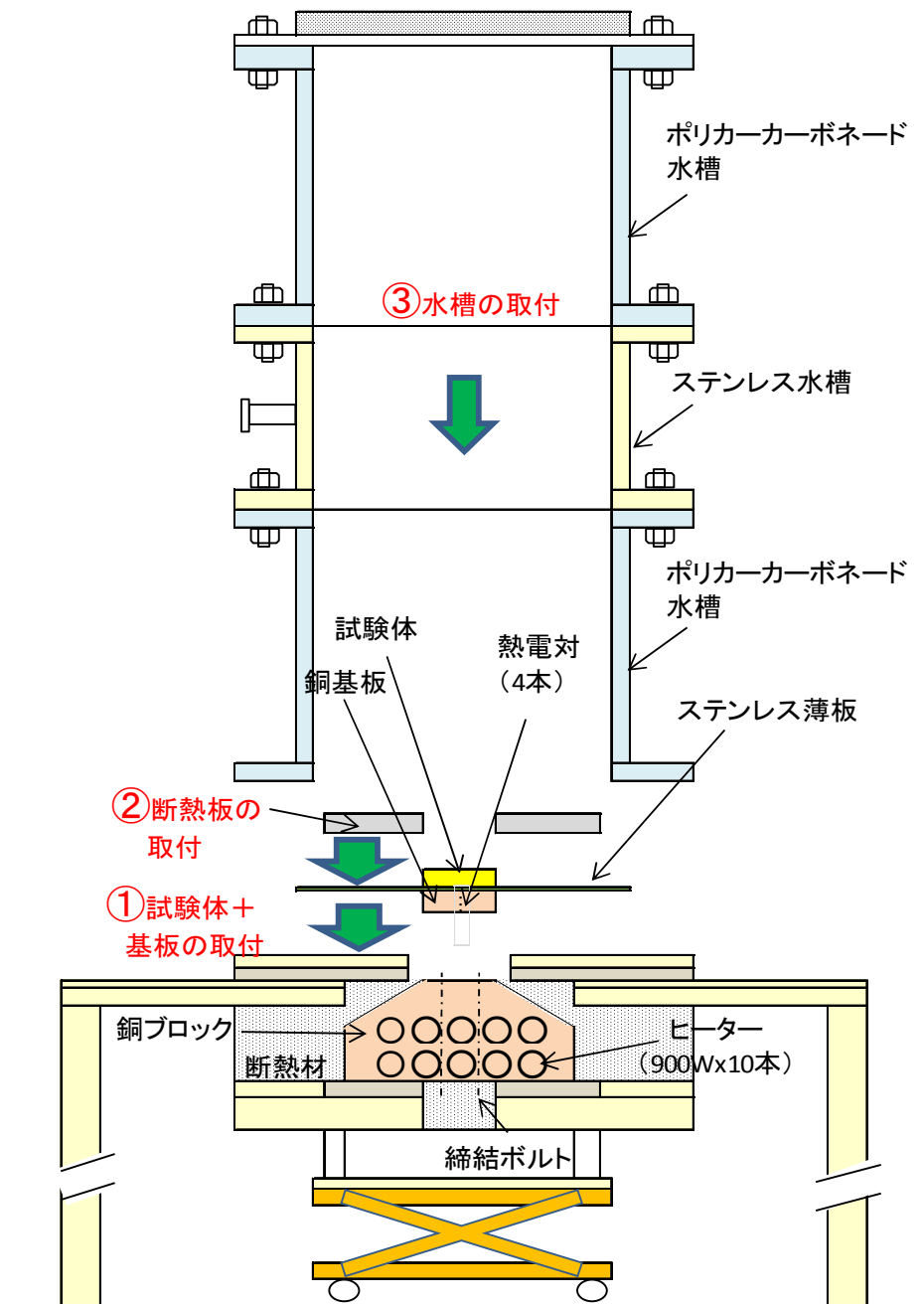


図 4-10 伝熱面への試験体組立手順

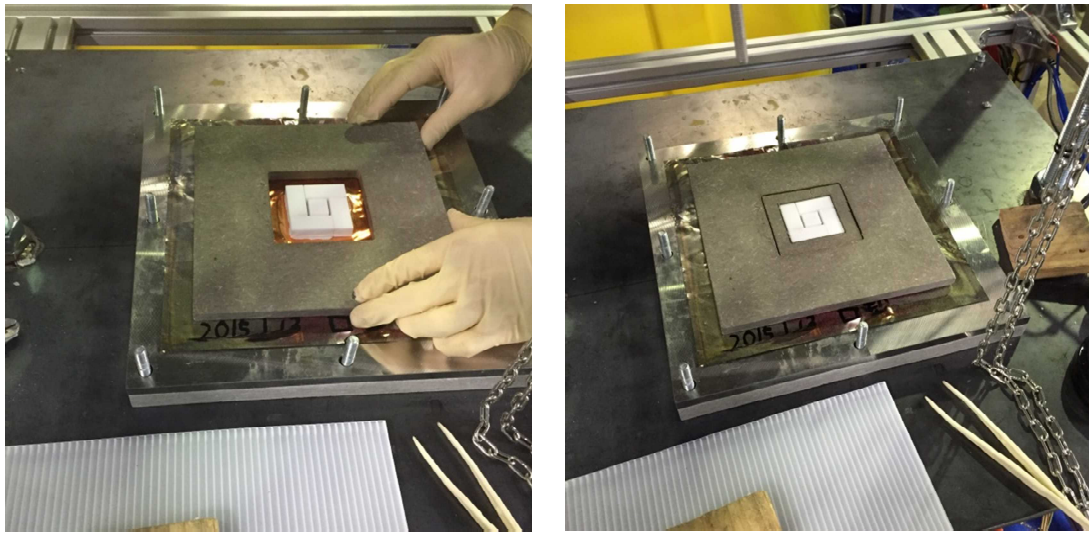


図 4-11 試験体と断熱材の取付

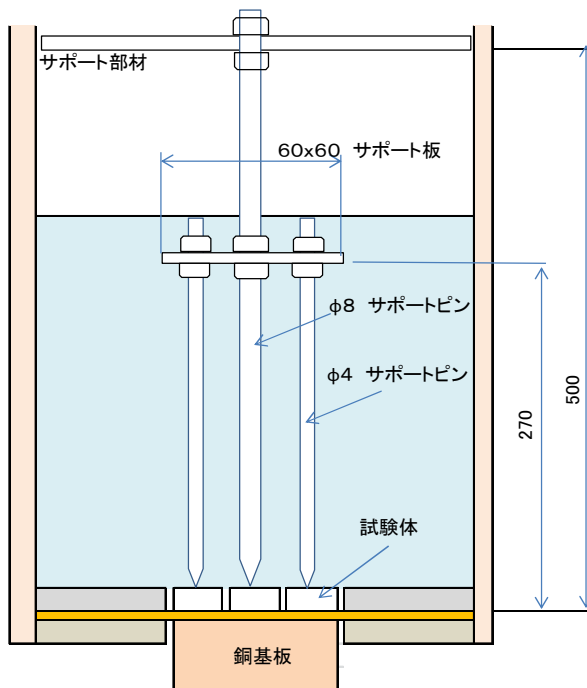


図 4-12 セラミック試験体との密着性を高めるサポートピン

## 4.2. 試験手順

試験手順は以下の通りである。

- (1) 試験溶液（海水又は混合溶液）をタンク中で指定濃度に溶解させる。
- (2) 補給水タンクに液を移送し、加熱して所定の温度に維持する。図 4-13 にこの時の補給水タンクでの循環予熱待機状態を示す。
- (3) 補給水ポンプにより、水槽に溶液を移送する。
- (4) 外部ヒータで水槽内の溶液温度を沸点近傍に予熱する。
- (5) 水槽内溶液温度が沸点近傍に到達後、銅ブロック内のヒータで試験体の加熱を開始する。図 4-14 に運転中のプロセスフローを示す。
- (6) 水槽液面が蒸発により低下すれば、液を補充する。
- (7) 銅基板中の熱電対が急速な温度上昇を示した場合には限界熱流束に達そたと判断し、ヒータ電源を遮断する。同様に、各熱電対指示値が融点近傍になるなどの危険が懸念される水準になった際にも同様にヒータ電源を遮断する。
- (8) 試験終了後、溶液を排出し、装置内を洗浄する。

表 4-3 に上記の試験手順における管理値、条件値を示す。

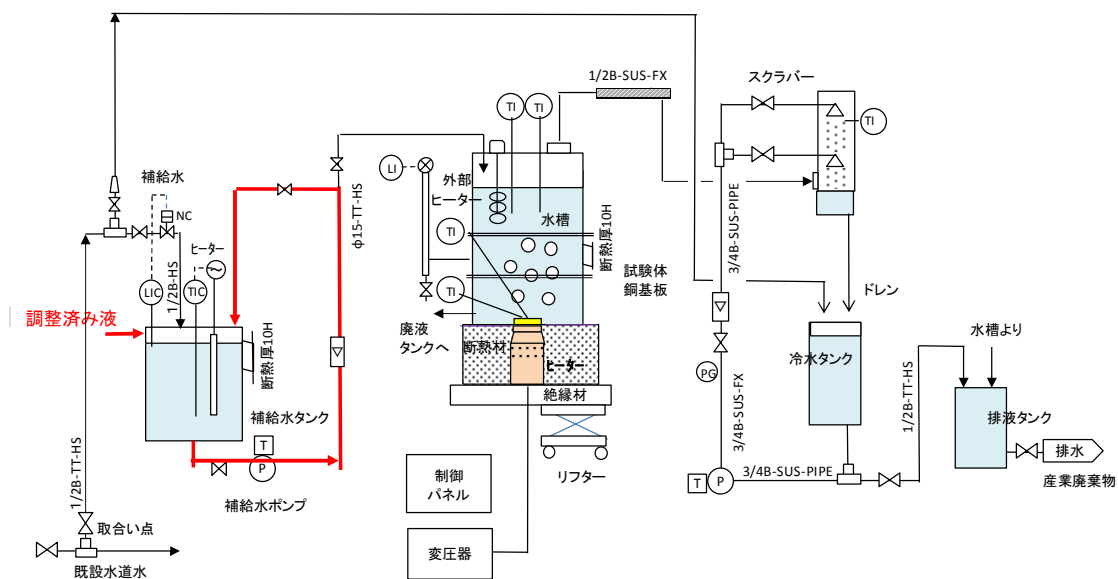


図 4-13 補給水タンクでの循環予熱待機状態

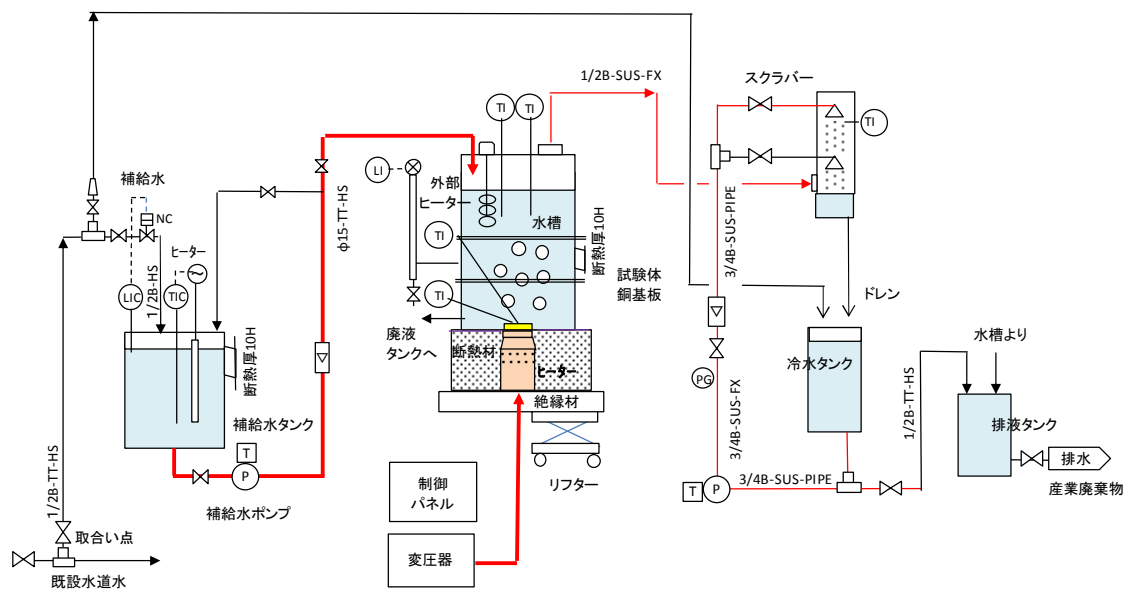


図 4-14 運転中のプロセスフロー

表 4-3 運転条件試験手順と管理値

No.	項目		設定数値	記事
1	試験溶液の調整基準		純水	イオン交換水
			海水	人工海水の 2.5 倍濃度
			混合溶液	海水 1.25 倍+ホウ酸水 1.25 倍相当で、海水と同じ重量濃度に。
2	補給水の予熱温度		95 °C	補給水タンクヒーター（最大 1kW）で予熱
3	水槽張り込み量		14 L	内寸 210×210mm×液位 320m
4	水槽内の予熱温度		100°C	水槽を飽和状態に維持する目的加熱ヒータ作動時も継続加熱
5	加熱ヒータの電力量		右記	0.9 kW × 10 本 3 水準：2.6, 5.0, 7.0 kW
6	液の補充基準	標準液位	300mm	蒸発・補充で変動
		補充量	約 1.7 L/回	液位が 280 mm 以下になれば、320 mm まで溶液補充
7	終了基準		限界熱流束到達	銅基板温度が急上昇で即時停止
			機器の焼損防止	ヒータ温度 950 °C 銅基板温度 900 °C
8	洗浄方法		溶液排出後	5%のクエン酸を 30 分含浸させて、洗浄する。



### 4.3. 多孔質体の特性分析

#### 4.3.1. 熱伝導率

##### 4.3.1.1. 計測原理

図 4-15 に熱伝導率測定装置の概念図を示す。直線状に張った熱線で試料を加熱し、温度上昇曲線から熱伝導率を測定した。図 4-16 に熱伝導測定装置の外観写真を示す。

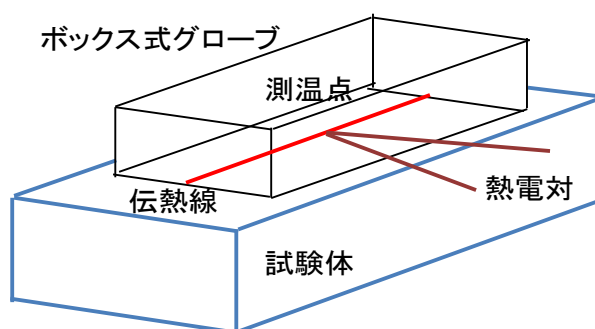


図 4-15 熱伝導率の測定原理

##### 4.3.1.2. 測定条件

測定に際しては雰囲気は空気及び水の二種類とした。前者は乾燥状態、後者は湿潤状態と呼ぶ。図 4-17 と図 4-18 にそれぞれ乾燥状態及び湿潤状態の熱伝導率測定状況を示す。湿潤状態はステンレス製トレイに水を入れ、多孔質体を水中に 1 時間以上浸漬した。いずれも雰囲気は加熱せず、室温である。なお熱線熱伝導率計の保護のため、プローブ部はラップで包んだ。

さらに一部の多孔質体については、湿潤状態で真空引きを行った。大気中で湿潤にただけでは、セラミック気孔中の空気が抜けないことが懸念されるため、真空引きして多孔質体内の空気を抜きだし、圧力を回復させることでより含水し易い状態とした。ロータリーポンプで約 30 分真空引きし、 $10^{-2}$  Torr 以下にした。圧力回復のため一晩放置した。



図 4-16 熱伝導率測定的全景



図 4-17 乾燥状態の熱伝導率測定状況



図 4-18 湿潤状態の熱伝導率測定状況

### 4.3.2. 熱伝導率の測定結果の結果

表 4-4 に熱伝導率の測定結果を示す。成分ではシリカに対して熱伝導率が高いアルミナの配合が多い多孔質体の方が熱伝導率が高い。また同じ成分で比較すると、乾燥状態よりも湿潤状態の方が、さらに真空引きした湿潤状態の方が熱伝導率が高い。これは多孔質体中の空気が熱伝導率が高い水に置き換わるためと考えられる。特に真空引きをした後の熱伝導率が、約 8%程度増大した結果は水中浸漬のみでは気孔中の残留空気が水に置換されなかったことを示唆している。

### 4.3.3. 気孔率

表 4-4 にはセラミックメーカー TEP 株式会社において計測された気孔率値を示している。セラミックを水に沈めて、増加する水量を測定することで、気孔率を求めている。

図 4-19 にセラミックス多孔質体の気孔率と熱伝導率の湿潤/乾燥比を示す。気孔率が大きい場合には乾燥状態より湿潤状態になることで熱伝導率が増大することが分かる。この結果からも、気孔に水が含浸することにより熱伝導率が増大することを示している。

表 4-4 多孔質体の熱伝導率及び諸元の測定結果

	材質A		材質B		材質C		材質D					材質E	
成分	シリカ		シリカ		シリカ		60%シリカ, 40%アルミナ					アルミナ	
粒子径	0.6mm		0.3mm		0.3mm		0.3mm					0.4mm	
見掛け比重(乾燥時)	2.13		2.17		2.14		2.62					3.94	
嵩比重(乾燥時)	1.58		1.41		1.73		1.62					2.94	
気孔率	28.9%		36.8%		22.2%		39.7%					26.5%	
状態	A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2	D3	D4	D5	E1	E2
	湿潤	乾燥	湿潤	乾燥	湿潤	乾燥	湿潤	乾燥	湿潤	乾燥	湿潤	湿潤	乾燥
測定前処理	常圧		常圧		常圧		常圧		常圧		真空引き	常圧	
熱伝導率 (W/mK)	1.03	0.71	0.96	0.52	1.02	0.69	1.64	0.67	1.67	0.67	1.78	14.02	7.98
熱伝導率比 湿潤/乾燥	1.45		1.84		1.47		2.87		2.49		2.65	1.76	

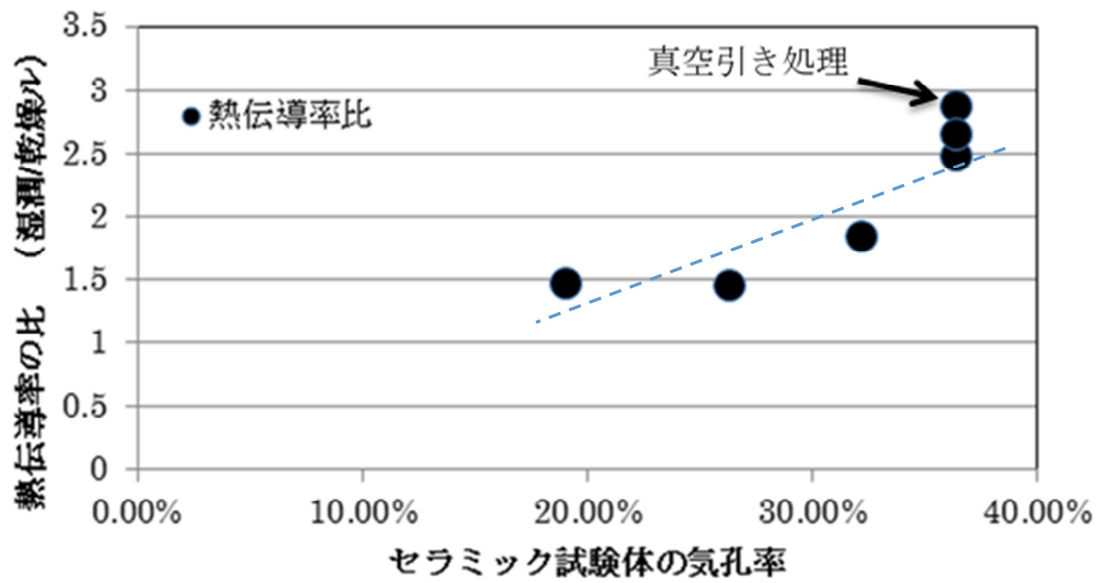


図 4-19 セラミックス多孔質体の気孔率と熱伝導率の湿潤/乾燥比

図 4-20 セラミック試験体の気孔率と熱伝導率

## 4.4. プール沸騰伝熱試験

### 4.4.1. クラスト中クラック形状の影響

図 4-21 に、クラスト中クラック形状がプール沸騰熱伝達に及ぼす影響を示す。図中にアイコンを示すとおり、クラックとしての溝は有り無しとの二種類であり、このうち溝有りでは溝の形状が井形となしと溝有り井形とロ形の二種類がある。クラスト模擬試験体である多孔質体は E であり、中心粒径 0.4 mm のアルミナ粉末を固化形成した多孔質体である。溶液は海水で、人工海水を 2.5 倍濃縮した溶液を使用した。

プール沸騰曲線は慣例に従い両対数で示している。溝無しの試験体による傾きが 1 よりやや低く、伝熱面過熱度に対してほぼ直線的に熱流束が増大している。その最大値は限界熱流束より低く、銅ブロックの溶融温度に近接したため、試験を停止している。

溝有りのプール沸騰曲線は、溝なしより高熱流束側に移行している。井形溝のプール沸騰曲線はロ形より高熱流速側に移行している。この 3 つの沸騰曲線を比較すると、溝の面積が広くなるに従い、沸騰曲線が高熱流速側に移行している。

溝は多孔質体を介することなく直接伝熱面に海水を供給し、沸騰気泡が多孔質体内を通ることなく伝熱面から離脱することができる。よって、溝の面積割合が大きい方が、沸騰熱伝達が促進されたと考えられる。

ロ形溝では過熱度が約 400 K を超えると傾きが変わり、負勾配となる。井形溝では約 500 K で同様に負勾配となる。試験範囲では沸騰曲線は溝無しに近づいている。海水の沸騰濃縮では塩が析出するが、析出塩が溝を閉塞させることにより溝としての伝熱促進効果が低減することが伝熱劣化の要因と考えられる。

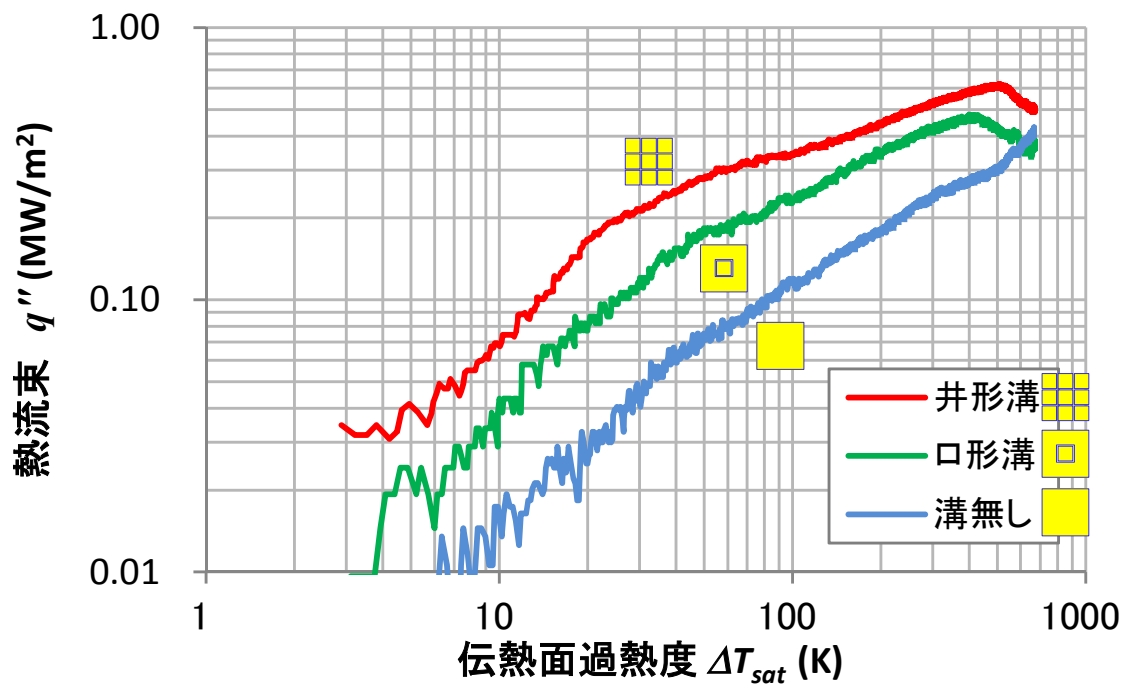


図 4-21 クラスト中クラック形状が沸騰伝熱に与える影響

#### 4.4.2. クラストポロシティの影響

図 4-22 に、多孔質体のポロシティの影響を示す。図中にはポロシティが 22.2 % と 36.8 % との 2 種類を比較して示した。前者は多孔質体 C で後者は多孔質体 B である。材質は中心粒径 0.4 mm のシリカで、粉末を固化形成した多孔質体である。溝は井形である。溶液は海水で、人工海水を 2.5 倍濃縮した溶液を使用した。

沸騰曲線は両者で概ね同じであるが、数十 K 程度の過熱度においてはポロシティが大きい多孔質体 B がやや高熱流速側に移行している。一方で、十分発達したプール沸騰においては両者の違いは小さい。

ポロシティは多孔質内で海水への熱伝達を行うことで伝熱面積の拡大効果が期待できる。よって、ポロシティが大きい多孔質体 B の方が沸騰熱伝達が高いのは伝熱面積の拡張効果の発現であると考えられる。昨年度の報告書に記載した通り、沸騰濃縮は多孔質体内部でも発生し、析出が見られた。析出により多孔質内のポロシティが閉塞すると、多孔質内での流路拡大効果が期待できなく

なる。よって、時間経過により多孔質体中のポロシティが閉塞し、高伝熱面過熱度においては、ポロシティの差が小さくなったと考えられる。

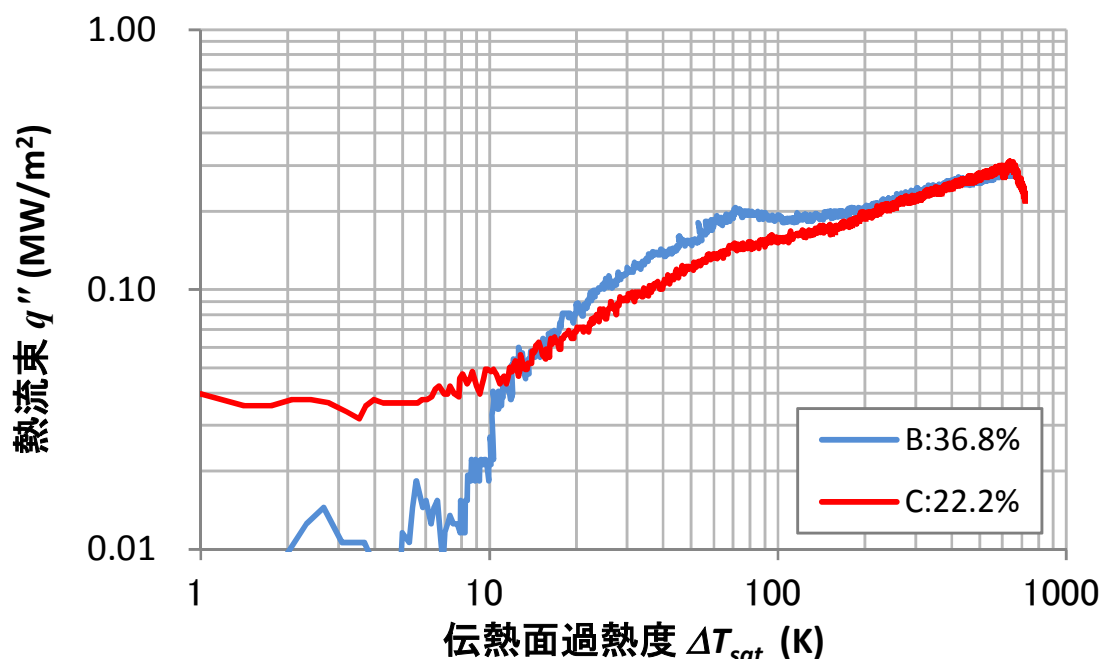


図 4-22 クラストポロシティが沸騰伝熱に与える影響

#### 4.4.3. クラストを構成する粒子径の影響

図 4-23 に、粉末粒径の影響を示す。図中には中心粒径 0.3 mm と 0.6 mm の多孔質体を対比した。前者は多孔質体 B で、後者は多孔質体 A である。溝は井形である。粉末を固化形成した多孔質体である。溶液は海水で、人工海水を 2.5 倍濃縮した溶液を使用した。

沸騰曲線は数十 K 程度の過熱度においては粒径が小さい多孔質体 B がやや高熱流速側に移行している。一方で、十分発達したプール沸騰においては両者の違いは小さい。

粒径が小さい場合には多孔質体内での界面積濃度が高いことから伝熱面積の拡大効果が期待でき、伝熱促進効果がある。一方で、圧損が増大することで伝熱劣化の要因にもなる。それぞれの効果は相殺するが、初期には伝熱面積の拡大効果により伝熱促進効果として現れたと考えられる。また気孔率で比較する



と、中心粒径 0.3 mm の多孔質体 B は気孔率が 36.8 % であり、中心粒径 0.6 mm の多孔質体 A は 28.9 % である。気孔率の差は小さいが、中心粒径 0.3 mm の多孔質体 B の方が気孔率も大きいことから、沸騰熱伝達率も高くなったと考えられる。

前述の通り、沸騰濃縮は多孔質体内部でも発生し、析出により多孔質内のポロシティが閉塞すると、多孔質内での流路拡大効果が期待できなくなる。よって、時間経過により多孔質体中のポロシティが閉塞し、高伝熱面過熱度においては、粒径の差が小さくなったと考えられる。

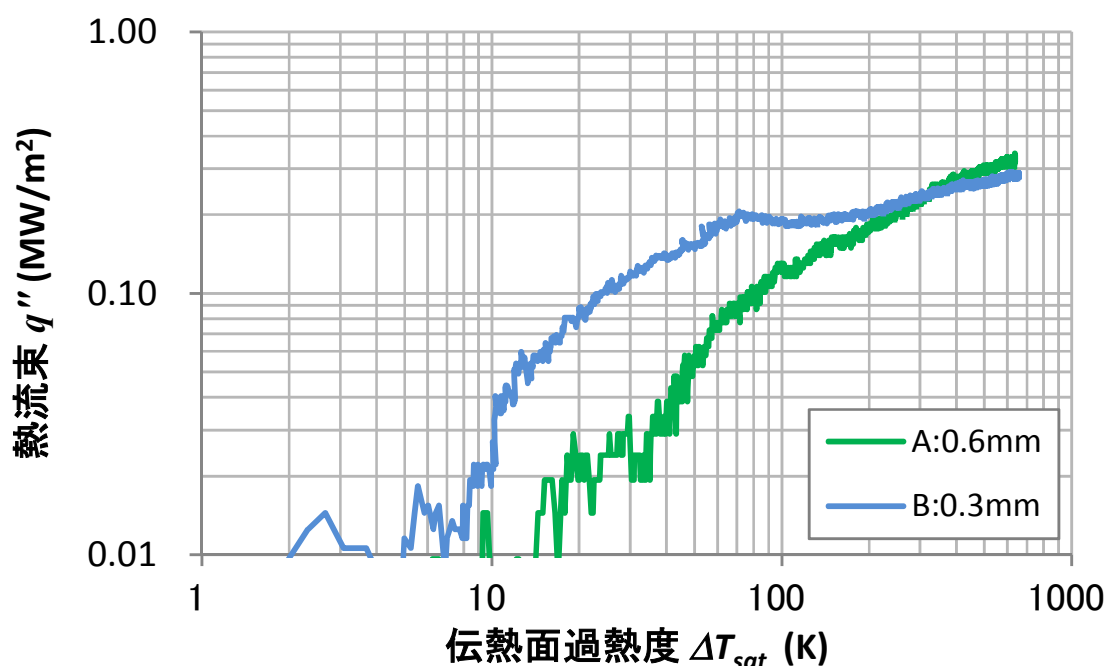


図 4-23 クラストを構成する粒子径が沸騰伝熱に与える影響

#### 4.4.4. 溶液種類の影響

図 4-24 に、溶液種類の影響を示す。図中には三種類の溶液、すなわち水と人工海水、人工海水と五ホウ酸ナトリウムとの混合溶液を対比した。人工海水は 2.5 倍濃度であり、混合溶液も人工海水と同じ重量濃度である。多孔質体は中心粒径 0.4 mm のアルミナ粉末を固化形成した多孔質体 E を用いた。溝は井形

である。

水のプール沸騰曲線では、勾配が 2 倍程度と大きいのが、熱流束が  $0.6 \text{ MW/m}^2$  で勾配が緩やかになり、伝熱面過熱度が時間と共に増大した。人工海水と混合溶液では沸騰曲線の勾配が共に水より小さい。人工海水では  $0.2 \text{ MW/m}^2$  程度で、混合溶液では熱流束が 0.3 程度から勾配がやや低下する現象が観察される。これは沸騰濃縮による析出が伝熱劣化をもたらした可能性が示唆される。

伝熱面過熱度が水の場合には約 330 K 以上、人工海水では 500 K 以上、混合溶液では 600 K 以上で負勾配が観測される。これは伝熱面が高温になり、溝の内部に水または溶液が供給できなくなり、伝熱劣化したことが原因と考えられる。

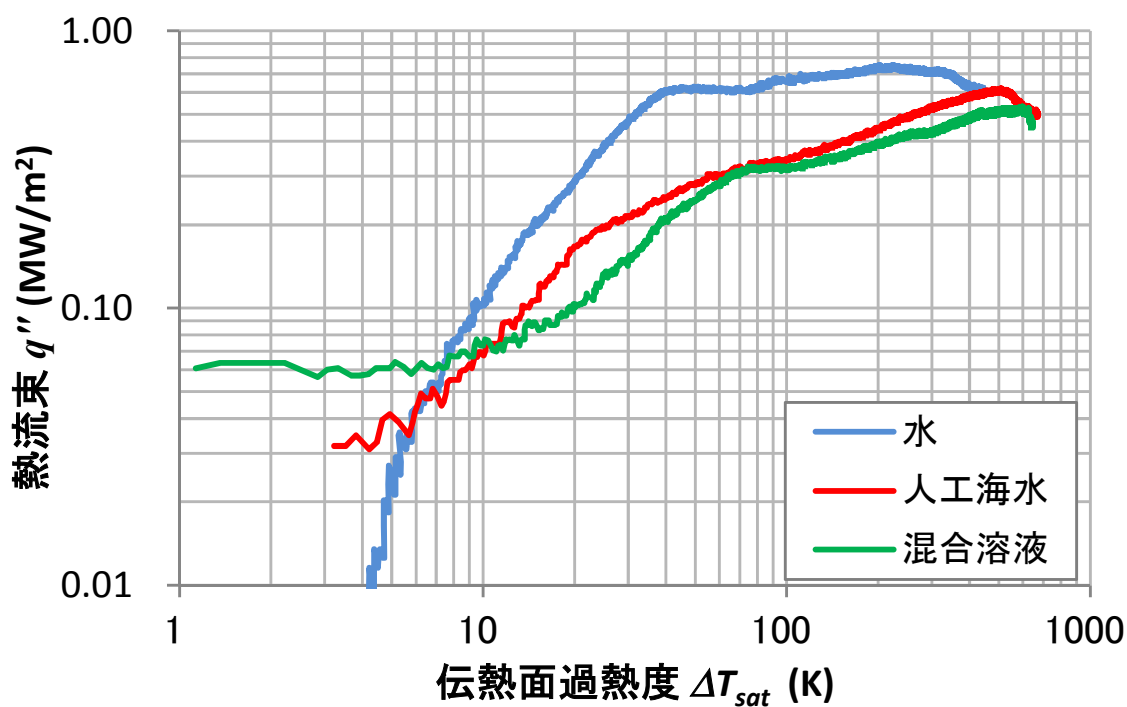


図 4-24 溶液が沸騰伝熱に与える影響

## 5. まとめ

海水およびホウ酸水に関する文献を調査し、これらが注水される場合の模擬炉心である燃料バンドル体系および模擬クラスト・デブリベッドである多孔質体を対象に除熱性能について実験を行った結果、以下の結論を得た。

### (1) 文献調査

ホウ酸塩の特性やメタホウ酸の生成、析出物が沸騰熱伝達に与える影響等を調査した。

### (2) 長尺バンドル試験設備の洗浄・廃液機器の設計製作

平成 24, 25 年度に製作した 5 本×5 本の長尺バンドル試験体に加えて、洗浄・廃液機器を設計製作し、濃縮海水及びホウ酸ナトリウム水溶液の洗浄及び廃液を可能にした。

### (3) X線 CT 撮影による短尺バンドル内での海水沸騰濃縮試験

スペーサ間隔に対応する高さ 530 mm の 5 本×5 本の短尺バンドルを用いて、人工海水を 2.5 倍濃縮した溶液、並びに人工海水と五ホウ酸ナトリウム水溶液との混合溶液（重量濃度は前記の濃縮海水と同一）中での沸騰濃縮試験を行った。三次元 X 線 CT で析出塩のバンドル内分布を観察した結果、濃縮海水と比較して混合溶液は、よりボイド率が高い位置での析出量が多い傾向がある。両溶液に共通して、流路が狭くなるスペーサ部分より、ボイド率が高い上部の析出量が多く観察された。発熱部より上部では析出は顕著に減少する。発熱部上端付近では、中央部での析出が顕著である。低液位条件で析出が顕著であることから、中央部では乾き面がより高温になり、塩水が蒸発乾固しやすくなることが原因と考えられる。ICP-MS を用いた元素濃度分析の結果、Ca 及び Sr は下流側で濃度が低下した。これらは炭酸塩として析出し、溶液中の濃度を減少させたと考えられる。その他の 7 元素 (B, Na, Mg, S, Cl, K, Br) は水平連結管に濃度拡散するが、下降管の濃度は低いまま維持されている。

#### (4) クラスト内クラックの沸騰熱伝達試験

幅 50 mm×奥行 50 mm×厚さ 10 mm の模擬クラスト（多孔質体）を銅ブロック伝熱面上に設置して、プール沸騰伝熱試験を行った。多孔質体中のクラックに海水が浸入することで伝熱が促進されるが、塩析出やクラストが高温になることで海水のクラストを介しての供給が困難になり伝熱が劣化する。海水とホウ酸水とでは同様な沸騰熱伝達であり、いずれも水よりは沸騰熱伝達係数が低いことから、海水やホウ酸水との混合溶液での冷却にはこれらの伝熱劣化要因を考慮する必要がある。

紙へリサイクル可