

原子力規制委員会原子力規制庁長官官房参事官殿

平成25年度海水及び ホウ酸注入影響評価試験

成果報告書

平成 26 年 3 月

一般財団法人 電力中央研究所

原子力技術研究所

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
3. 燃料バンドル除熱性能	9
3.1. 塩水採取システムの改良	9
3.2. 差圧計測法の改良	18
3.3. 沸騰濃縮試験と析出塩の X 線 CT 撮影	22
3.3.1. 短尺バンドル試験装置	22
3.3.2. X 線 CT 撮影設備	37
3.3.3. 沸騰濃縮試験手順	43
3.3.4. 試験溶液	47
3.3.5. 沸騰濃縮液の成分分析方法	48
3.3.6. 沸騰濃縮試験パラメータ	49
3.3.7. 沸騰濃縮試験結果	52
4. クラスト・デブリベッド冷却特性	116
4.1. クラスト・デブリベッド模擬試験装置	116
4.2. プール沸騰試験パラメータ	123
4.3. プール沸騰試験手順	125
4.4. プール沸騰試験結果および考察	126
5. まとめ	135

表目次

表 2-1	無機物の水に対する溶解度.....	4
表 2-2	塩化ナトリウムとホウ酸の溶解度.....	6
表 3-1	五ホウ酸ナトリウム水和水の自動採取結果.....	16
表 3-2	人工海水の自動採取結果.....	17
表 3-3	塩分拡散防止効果試験における塩分濃度測定結果.....	19
表 3-4	短尺バンドル試験体構成部材の概略仕様一覧.....	34
表 3-5	X線撮影装置の仕様.....	38
表 3-6	人工海水の成分.....	47
表 3-7	短尺バンドル内沸騰濃縮試験パラメータ.....	51
表 3-8	短尺バンドル試験条件の命名法.....	51
表 3-9	沸騰濃縮試験結果.....	55
表 3-10	TAF 高さ水平断面の析出塩分布一覧(液位 TAF).....	101
表 3-11	TAF 高さ水平断面の析出塩分布一覧(液位 TAF - 100 mm).....	102
表 3-12	TAF 高さ水平断面の析出塩分布一覧(液位 TAF - 200 mm).....	103
表 3-13	スぺーサ高さ水平断面の析出塩分布一覧(液位 TAF).....	104
表 3-14	スぺーサ高さ水平断面の析出塩分布一覧(液位 TAF - 100 mm).....	105
表 3-15	スぺーサ高さ水平断面の析出塩分布一覧(液位 TAF - 200 mm).....	106
表 3-16	鉛直断面の析出塩分布一覧(液位 TAF).....	107
表 3-17	鉛直断面の析出塩分布一覧(液位 TAF - 100 mm).....	108
表 3-18	鉛直断面の析出塩分布一覧(液位 TAF - 200 mm).....	109
表 3-19	溶液中の濃度分布(液位 TAF、全濃度範囲).....	110
表 3-20	溶液中の濃度分布(液位 TAF、濃度範囲拡大).....	111
表 3-21	溶液中の濃度分布(液位 TAF - 100 mm、全濃度範囲).....	112
表 3-22	溶液中の濃度分布(液位 TAF - 100 mm、濃度範囲拡大).....	113
表 3-23	溶液中の濃度分布(液位 TAF - 200 mm、全濃度範囲).....	114
表 3-24	溶液中の濃度分布(液位 TAF - 200 mm、濃度範囲拡大).....	115
表 4-1	プール沸騰試験パラメータ.....	124
表 4-2	プール沸騰試験条件の命名法.....	124

図目次

図 2-1	各種硫酸カルシウム(石こう)の溶解度	7
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....	8
図 3-1	塩水自動採取システムの概念図.....	13
図 3-2	改良に用いたステンレスマイクロシリンジポンプ.....	14
図 3-3	五ホウ酸ナトリウム水和水濃度と導電率の関係.....	15
図 3-4	人工海水濃度と導電率との関係.....	15
図 3-5	計装配管継手の構造図.....	20
図 3-6	差圧計導管改良部の塩分拡散防止効果確認試験の様子.....	21
図 3-7	短尺バンドル試験装置の概念図.....	23
図 3-8	試験バンドルのロッド配列及び熱電対位置.....	31
図 3-9	短尺ヒータロッド形状寸法図.....	32
図 3-10	短尺バンドル試験体の概念図.....	33
図 3-11	5×5 バンドル試験スペーサの形状寸法.....	35
図 3-12	サンプリングポートの位置および構造.....	36
図 3-13	X線 CT 設備の回転試料台とフラットパネル	39
図 3-14	X線 CT 撮影用の台座	40
図 3-15	上部から見た短尺バンドル撮影位置と向き	41
図 3-16	高さ方向の撮影範囲.....	42
図 3-17	X線 CT 撮影像による析出塩分布 SH1L.....	56
図 3-18	X線 CT 撮影像による析出塩分布 SH2L.....	57
図 3-19	X線 CT 撮影像による析出塩分布 SH3L.....	58
図 3-20	X線 CT 撮影像による析出塩分布 SH4L.....	59
図 3-21	X線 CT 撮影像による析出塩分布 SH5L.....	60
図 3-22	X線 CT 撮影像による析出塩分布 SH1M.....	61
図 3-23	X線 CT 撮影像による析出塩分布 SH2M.....	62
図 3-24	X線 CT 撮影像による析出塩分布 SH3M.....	63
図 3-25	X線 CT 撮影像による析出塩分布 SH4M.....	64
図 3-26	X線 CT 撮影像による析出塩分布 SH5M.....	65
図 3-27	X線 CT 撮影像による析出塩分布 SH1H	66

図 3-28	X線 CT 撮影像による析出塩分布 SH2H	67
図 3-29	X線 CT 撮影像による析出塩分布 SH3H	68
図 3-30	X線 CT 撮影像による析出塩分布 SH4H	69
図 3-31	X線 CT 撮影像による析出塩分布 SH5H	70
図 3-32	X線 CT 撮影像による析出塩分布 SM1L	71
図 3-33	X線 CT 撮影像による析出塩分布 SM2L	72
図 3-34	X線 CT 撮影像による析出塩分布 SM3L	73
図 3-35	X線 CT 撮影像による析出塩分布 SM4L	74
図 3-36	X線 CT 撮影像による析出塩分布 SM5L	75
図 3-37	X線 CT 撮影像による析出塩分布 SM1M	76
図 3-38	X線 CT 撮影像による析出塩分布 SM2M	77
図 3-39	X線 CT 撮影像による析出塩分布 SM3M	78
図 3-40	X線 CT 撮影像による析出塩分布 SM4M	79
図 3-41	X線 CT 撮影像による析出塩分布 SM5M	80
図 3-42	X線 CT 撮影像による析出塩分布 SM1H	81
図 3-43	X線 CT 撮影像による析出塩分布 SM2H	82
図 3-44	X線 CT 撮影像による析出塩分布 SM3H	83
図 3-45	X線 CT 撮影像による析出塩分布 SM4H	84
図 3-46	X線 CT 撮影像による析出塩分布 SM5H	85
図 3-47	X線 CT 撮影像による析出塩分布 SL1L	86
図 3-48	X線 CT 撮影像による析出塩分布 SL2L	87
図 3-49	X線 CT 撮影像による析出塩分布 SL3L	88
図 3-50	X線 CT 撮影像による析出塩分布 SL4L	89
図 3-51	X線 CT 撮影像による析出塩分布 SL5L	90
図 3-52	X線 CT 撮影像による析出塩分布 SL1M	91
図 3-53	X線 CT 撮影像による析出塩分布 SL2M	92
図 3-54	X線 CT 撮影像による析出塩分布 SL3M	93
図 3-55	X線 CT 撮影像による析出塩分布 SL4M	94
図 3-56	X線 CT 撮影像による析出塩分布 SL5M	95
図 3-57	X線 CT 撮影像による析出塩分布 SL1H	96
図 3-58	X線 CT 撮影像による析出塩分布 SL2H	97

図 3-59	X線 CT 撮影像による析出塩分布 SL3H.....	98
図 3-60	X線 CT 撮影像による析出塩分布 SL4H.....	99
図 3-61	X線 CT 撮影像による析出塩分布 SL5H.....	100
図 4-1	クラスト・デブリベット試験装置の構造概念.....	118
図 4-2	クラスト・デブリベット試験装置の概念図.....	119
図 4-3	伝熱面内の熱電対配置図.....	120
図 4-4	伝熱面熱電対の配置図.....	121
図 4-5	クラスト・デブリベット試験体と伝熱面の概念図.....	122
図 4-6	伝熱面表面温度の時間変化 W,S01L	127
図 4-7	伝熱面表面温度の時間変化 W,S03L	127
図 4-8	伝熱面表面温度の時間変化 W,S05L	128
図 4-9	伝熱面表面温度の時間変化 W,S10L	128
図 4-10	伝熱面表面温度の時間変化 W,S12L	129
図 4-11	伝熱面表面温度の時間変化 W,S01M	129
図 4-12	伝熱面表面温度の時間変化 W,S03M	130
図 4-13	伝熱面表面温度の時間変化 W,S05M	130
図 4-14	伝熱面表面温度の時間変化 W,S10M	131
図 4-15	伝熱面表面温度の時間変化 W,S12M	131
図 4-16	伝熱面表面温度の時間変化 W,S01H.....	132
図 4-17	伝熱面表面温度の時間変化 W,S03H.....	132
図 4-18	伝熱面表面温度の時間変化 W,S05H.....	133
図 4-19	伝熱面表面温度の時間変化 W,S10H.....	133
図 4-20	伝熱面表面温度の時間時間変化 W,S12H.....	134

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25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°C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。

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。

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。

2.3. 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は、原子炉压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, H₃BO₃ 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。

参考文献

[1] 理科年表平成 15 年、丸善(株)、国立天文台編

<http://ebw.eng-book.com/pdfs/15a5c5843afad2fbc8b558fbab15aa80.pdf>

[2] 橋本壽夫, たばこ塩産業 塩事業版, 2007

http://www.geocities.jp/t_hashimotodawara/salt6/salt6-07-02.html

[3] 金児紘征、中川時子、平泉浩成 「NaCl-H₃BO₃ 水溶液における原子炉压力容器材料の加速腐食試験」, 日本金属学会誌, 76-11 (2012), 615-623.

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 ₂ O ₃	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 ₄)(SO ₄) ₂	2.97	5.91	14.41(45°)	22.0(55°)	47.3(85°)	—
亜硫酸ナトリウム*	Na ₂ SO ₃	13.3	30.7(25°)	35.7	31.7	28.0	26.3
塩化アンモニウム*	NH ₄ 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 ₂	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 ₂	30.3	34.6	41.0	48.4	49.4	51.5
—ストロンチウム	SrCl ₂	30.3	35.8(25°)	39.5	45.0	47.5	50.2
—セシウム	CsCl ₂	61.7	65.1	67.5	69.7	71.4	73.0
—水銀(II)	HgCl ₂	3.5	6.1	9.3	14.4	23.4	36.5
—銀(I)	Hg ₂ Cl ₂	0.000140	0.000038	—	—	—	—
—鉄(III)	FeCl ₃	42.66	47.88	60.01(37°)	78.86	84.03	84.26
—鉄(II)	FeCl ₂	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 ₂	34.8	38.29	—	44.8	45.96	46.7
—バリウム	BaCl ₂	23.8	26.30	28.9	31.6	34.3	37.0
—マグネシウム	MgCl ₂	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 ₃	3.2	6.8	12.2	19.2	27.3	36.0
過塩素酸ナトリウム	NaClO ₄	62.87	67.82(25°)	70.38(38°)	—	—	76.75
過マンガン酸カリウム	K ₂ Fe(CN) ₆	12.5	22.0	27.8(35°)	36.8(65°)	40.1	42.63
クロム酸カリウム*	KMnO ₄	2.75	5.96	11.13	18.15	—	—
クロムミョウバン*	K ₂ CrO ₄	58.8	63.9	68.0	72.2	76.3	80.1
臭化カリウム	CrK(SO ₄) ₂	—	12.51(25°)	—	—	—	—
—鉛*	KBr	34.9	39.4	43.2	46.1	48.7	51.0
—ナトリウム	PbBr ₂	0.4554	0.9744(25°)	1.7457(45°)	2.574(65°)	3.343	4.751
硝酸アンモニウム	NaBr	44.47	—	—	54.10	—	—
—亜鉛	NH ₄ NO ₃	54.2	65.5	74.6	80.7	85.7	90.3
—カリウム	Zn(NO ₃) ₂	48.3(0.4°)	58.1(30°)	70.2(45°)	87.2(59°)	—	—
	KNO ₃	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 ₃	54.8	68.4	75.7	81.5	85.4	88.0
—ストロンチウム	Sr(NO ₃) ₂	28.2(0.1°)	40.7	47.2(35°)	48.3	49.2	51.2(105°)
—タリウム	TlNO ₃	3.76	8.72	17.33	31.55	52.6	80.54
—銅(II)	Cu(NO ₃) ₂	45.5	55.5	62.0	64.5	67.5	71.2
—ナトリウム	NaNO ₃	41.9	46.0				62.39(94°)
—鉛*	Pb(NO ₃) ₂	38.8	56.5	75	95	115	138.8
—バリウム	Ba(NO ₃) ₂	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) ₂	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) ₂	1.65	3.74	7.60	17.32	50.38	—
炭酸カリウム	K ₂ CO ₃	51.25	52.5	53.9	55.9	58.3	60.9
—水素カリウム	KHCO ₃	18.6	25.0	31.3	37.5	—	—
—水素ナトリウム	NaHCO ₃	6.48	8.72	11.29	14.10	19.1	—
—ナトリウム	Na ₂ CO ₃	6.54	18.1	32.8	31.6	31.1	30.9
チオ硫酸ナトリウム	Na ₂ S ₂ O ₄	33.40	41.20	55.33(45°)	—	—	—
（過硫酸ナトリウム）	K ₂ C ₂ O ₈	4.6	12.2	26.0	46.5	70	97
（過硫酸ナトリウム）	K ₂ Fe(CN) ₆	23.22(0.1°)	32.80(25°)	37.22	41.10(58°)	45.27	47.60(99°)
ホウ酸	H ₃ BO ₃	2.70	4.65	8.17	12.96	19.06	27.53
ホウ砂	Na ₂ B ₄ O ₇	1.18	2.58	6.00	14.82	19.88	28.22
モウペリン*	AlK(SO ₄) ₂	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 ₂ (SO ₄) ₃	27.50	27.82(25°)	28.8	31.0	37.4(80.6°)	43.90(99.2°)
—アンモニウム	(NH ₄) ₂ SO ₄	41.35	42.85	44.7	46.64	48.47	50.42
—亜鉛	ZnSO ₄	28.58	36.65(25°)	41.2	42.98	39.2(85°)	37.7
—カリウム	K ₂ SO ₄	7.20	10.0	12.9	15.4	17.1	19.4
—カドミウム*	CdSO ₄	75.5	76.4	78.4	83.7	67.5(79°)	58.4(99°)
—カルシウム*	CaSO ₄	0.1759	0.2080(25°)	0.2097	0.2009(55°)	0.1847(75°)	0.1619
—鉄(II)	FeSO ₄	13.6	20.8	28.6	35.5	40.4	24.0
—銅(II)	CuSO ₄	12.3	16.8	22.3	28.5	35.9	43.5
—ナトリウム*	Na ₂ SO ₄	4.5	19.0	48.1	45.2	43.2	42.2
—ニッケル(II)*	NiSO ₄	27.6	28.0	47.9	56.4	66	78
—マグネシウム	MgSO ₄	18.0	25.2	30.8	35.3	35.8	33.5
リン酸二水素ナトリウム	NaH ₂ PO ₄	36.5	45.5	57.0	65	68	71
リン酸水素二ナトリウム*	Na ₂ HPO ₄	1.6	7.7	52.7	82.8	93.5	103.3
リン酸三ナトリウム*	Na ₃ PO ₄	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 ₃ BO ₃	H ₂ 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 ^{*2}	
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)	

^{*1} Three solutions with the same amount of H₂O were prepared: 20.00 g NaCl and 20.00 g H₃BO₃ in 25.00 g H₂O (as a NaCl-H₃BO₃ solution); 20.00 g NaCl, in 25.00 g H₂O (as a NaCl solution); 20.00 g H₃BO₃ in 25.00 g H₂O (as a H₃BO₃ solution).

^{*2} At 423 K, the maximum concentration (12.9 mol/kg) of H₃BO₃ is lower than the saturated concentration (19.4 mol/kg).

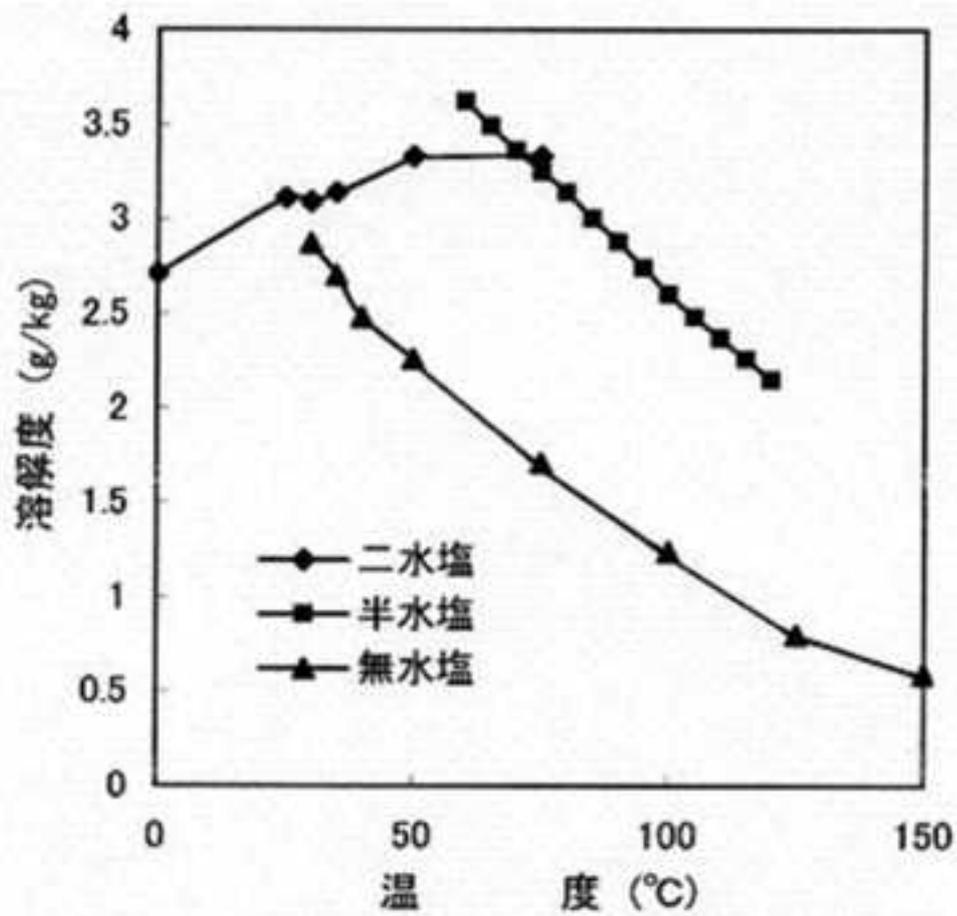


図 2-1 各種硫酸カルシウム(石膏)の溶解度

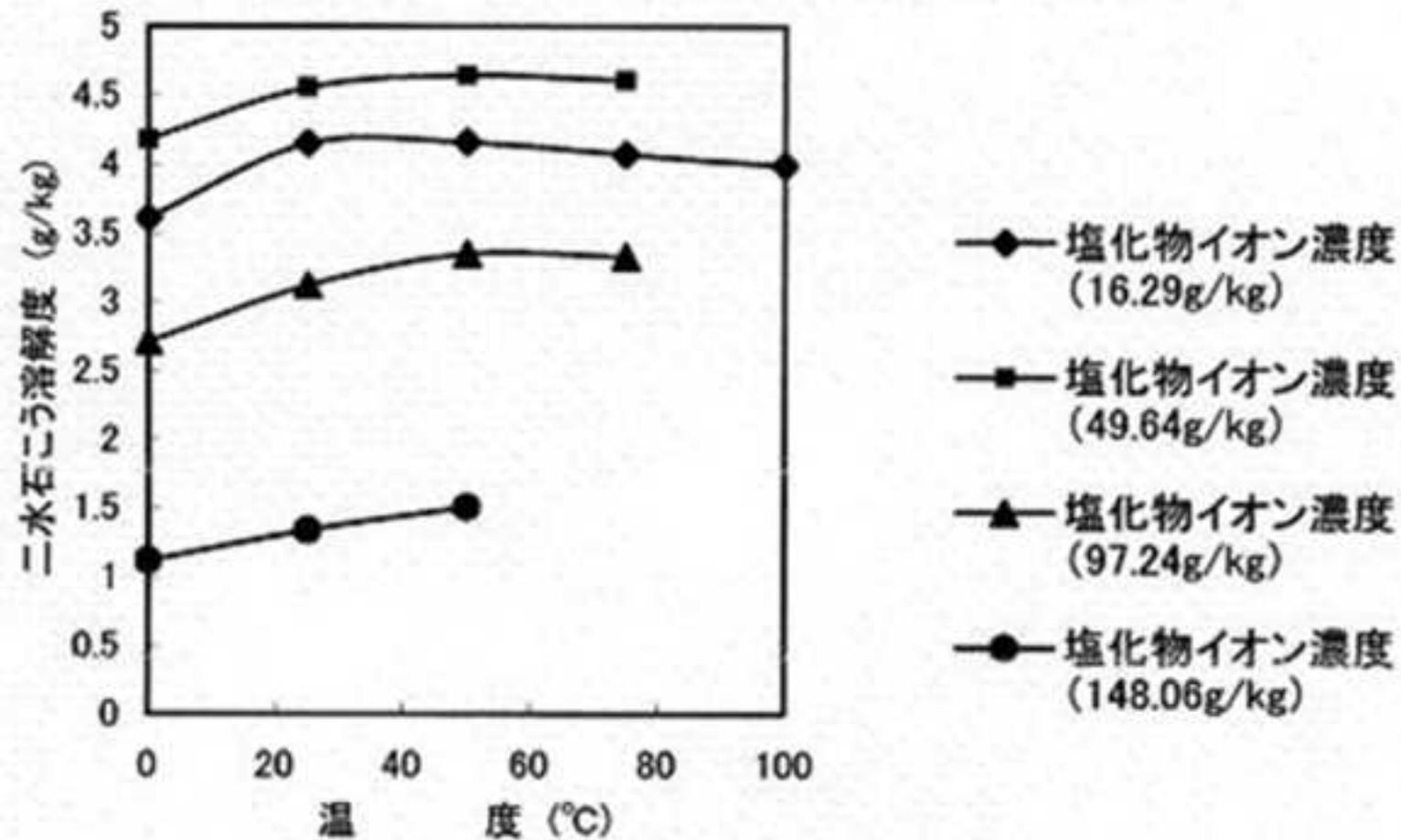


図 2-2 塩化物共存溶液に対する二水硫酸カルシウム（石膏）溶解度

3. 燃料バンドル除熱性能

本章では塩水自動採取装置と差圧計測方法の改良と、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. 塩水採取システムの改良

昨年度に製作した塩水自動採取システムは、バンドル試験体中の溶液を少量抽出し、超純水により一定の倍率で希釈して試料を採取する装置である（図3-1参照）。試料の採取は1時間毎に行い、約3日間連続して行えるようにバイアル自動切換ユニットには計72本のバイアル瓶が設置できる仕様である。当該装置は連続的に自動運転するための独自ソフトウェアを製作した。既存の塩水自動採取システムの構成を以下に示す。

(1) 送液バルブ

ポート数	: 6ポート (ロータリー)
バルブ駆動方式	: 小型電動型
材質	: ステンレス、PEEK材
接続口	: 1/16 inch

(2) シリンジポンプ

シリンジサイズ	: 0.5 μ L~60 mL (任意で選択可能)
最少フローレート	: 1 μ L/s 以下
最大フローレート	: 100 μ L/s 以上
自動プログラムにより制御できる	

(3) バイアル自動切換えユニット

サンプル数	: 72本
-------	-------

(4) 塩析出防止ヒータ

形状	: 紐状型ヒータ
設定可能温度	: 100 $^{\circ}$ C以上

制御 : 温度制御コントローラーによる

(5) コントローラー

上記「送液切替バルブ」「バイアル自動切換ユニット」を制御（手動操作）し、「温度調整コントローラー」を内蔵している。

(6) 制御ソフトウェア

コントローラー（温度調整を除く）及びシリンジポンプの操作をプログラム上で自動化するためのソフトウェア。予め各種装置の動作を入力し、繰り返し行うことが可能。

(7) 純水タンク

特殊ボトルキャップ付きねじ口瓶

容量 : 150 mL

接続口 : 1/16 inch

(8) ドレンタンク

特殊ボトルキャップ付きねじ口瓶

容量 : 約 250 mL

接続口 : 1/16 inch

(9) 各装置接続配管等

SUS316 及びテフロンチューブ

本年度は、海水が沸騰濃縮された場合や五ホウ酸ナトリウム溶液が低温部で粘性が高くなることに対応すべく、改良を行う。このため塩水採取システムのシリンジを従来の樹脂製から温度を調整しやすいステンレス鋼製に変更し、周囲にヒータを巻いて自動制御することにより採取元の温度と同じになるように温度調整する。またサンプリング経路も同様に断熱保温や温度調節し、温度変化を抑制する。改良の効果が得られることを試験流体である人工海水および五ホウ酸ナトリウム水和水を用いて確認する。

以下に当該システムの改造項目を列挙する。

(1) シリンジポンプの改造

図 3-2 に改造に用いたステンレス製マイクロシリンジを示す。シリンジポンプへの換装が可能である。また、ステンレス製シリンジにも紐状ヒータを設置してサンプリング全域に亘って±1℃以下の温度調整を可能とした。

ポンプ型式 : ネクサス 6000
シリンジサイズ : 5 mL (ステンレス製)
最少フローレート : 0.0019 mL/h
最大フローレート : 19.3 mL/min
PC のプログラムによる自動制御が可能

(2) 制御ソフトウェア (PC インストール)

コントローラー (温度制御は除く) 及び交換したシリンジポンプの操作をプログラム上で自動で行うためのソフトウェアである。予め各種装置の動作時間を入力し、各動作の繰り返し回数を設定することができる。

バンドル試験体中の溶液を模擬した以下の試料溶液を当該システムにより採取し、採取した試料の容量および試料溶液の塩濃度を計測した。

- ①五ホウ酸ナトリウム水和水 100℃飽和溶液 (約 51 wt%)
- ②人工海水 100℃飽和溶液 (約 38 wt%)

試料溶液の塩濃度は導電率で評価した。導電率の測定は、HANNA 社製 Dist7 を使用した。本測定器は、測定に必要な試料量が 3 mL と少量であるため採用した。

図 3-3 に五ホウ酸ナトリウム水和水濃度と導電率との関係を示す。図中には 100℃における溶解度 (51 wt%) の水溶液を純水で希釈した倍率を示している。純水を含めて、6 点のデータは濃度と導電率が比例関係にあることを示している。

図 3-4 に人工海水濃度と導電率との関係を示す。図中には 100℃における濃度 (38 wt%) の水溶液を純水で希釈した倍率を示している。純水を含めて 4 点のデータは濃度と導電率が比例関係にあることを示している。

続いて自動採取装置の機能検証を行った。試料採取間隔を 30 分に設定し

て、各々の模擬溶液について 72 本の試料採取を実施した。電子天秤には島津製作所の EB-3200D を使用した。

表 3-1 に五ホウ酸ナトリウム水和水の自動採取結果を示す。採取の基準量 5g に対してサンプル採取量は 5.39 g から 5.69 g の変動幅であった。平均値は 5.56 g であった。また、導電率から換算した塩濃度については基準値 0.51 wt% に対して採取サンプルの濃度は、0.48 wt% から 0.52 wt% の変動幅で平均値は 0.50 wt% となり、ほぼ基準値に近い濃度となった。

表 3-2 に人工海水の自動採取結果を示す。採取の基準量 5 g に対してサンプル採取量は 5.51 g から 5.66 g の変動幅で、平均値は 5.59 g であった。また、導電率から換算した濃度については基準値 0.38% に対して採取サンプルの濃度は、0.36 wt% から 0.39 wt% の変動幅で平均値は 0.38 wt% となり基準値と良い一致を示した。

本試験により、改良した塩水自動採取システムにて定量的な採取と希釈が可能であることを確認した。

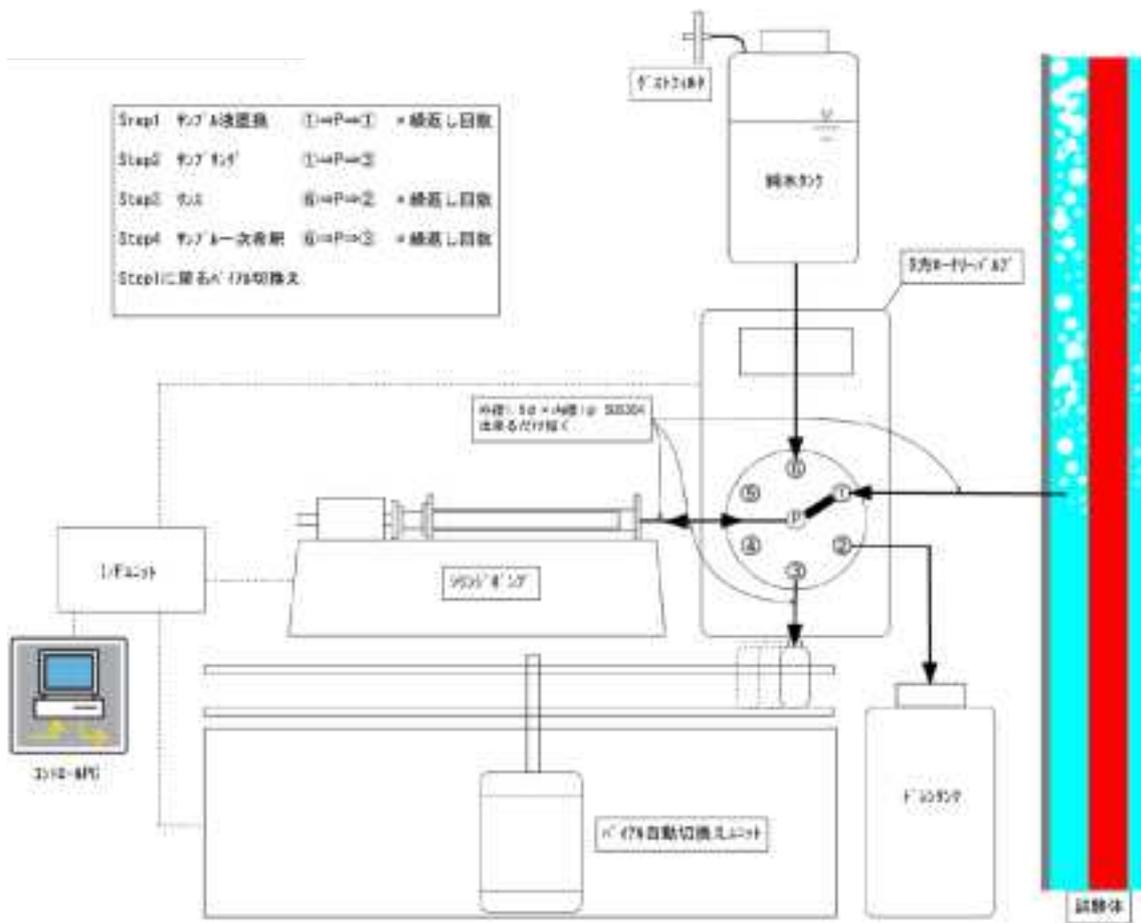


図 3-1 塩水自動採取システムの概念図

マイクロシリンジポンプ



■オクス0000高圧注入/吸引

強力モーターを搭載し、高粘度溶液の送液に適したハイパワーモデルです。1本の大容量シリンジが使用でき、注入/吸引の切替が可能で、最大4本まで同時に処理可能な**オクス0000 4本型セット**や高圧送液に適した専用の**ステンレスシリンジ**もあります。送液モードの詳細は**こちら**をご参照ください。

仕様

コード番号	OXS0070
シリンジサイズと本数	0.5 μ L~200 μ L×1本
運転モード	高圧注入/吸引
最小フローレート	任意選択
最大フローレート	任意選択
作動距離	0.046 μ m/ステップ
駆動力(水平方向)	200 μ g
環境条件	+4~40°C(湿度20~90%)
サイズ	W27×D20×H18cm
重量	8.8kg
入力電源	AC100~240V 50/60Hz
電源コード長	1.7m
精度	$\pm 0.2\%$
再現性	$\pm 0.09\%$
価格	¥570,000

非常に強い力で作動しますので、取扱いには十分ご注意ください。
シリンジおよび接続チューブラインは一切保証していません。
シリンジは付属していません。

フローレート範囲

シリンジサイズ	最小フローレート	最大フローレート
0.5 μ L	0.0001 μ L/秒	1.43 μ L/分
1 μ L	0.0002 μ L/秒	2.86 μ L/分
2 μ L	0.0006 μ L/秒	5.94 μ L/分
5 μ L	0.0015 μ L/秒	14.9 μ L/分
10 μ L	0.0031 μ L/秒	32.2 μ L/分
25 μ L	0.0072 μ L/秒	74.6 μ L/分
50 μ L	0.0144 μ L/秒	149 μ L/分
100 μ L	0.0290 μ L/秒	298 μ L/分
250 μ L	0.0718 μ L/秒	740 μ L/分
500 μ L	0.1435 μ L/秒	1487 μ L/分
1mL	0.0003mL/秒	3.01mL/分
2mL	0.0011mL/秒	11.2mL/分
5mL	0.0019mL/秒	19.3mL/分
10mL	0.0029mL/秒	30.3mL/分
20mL	0.0052mL/秒	53.6mL/分
30mL	0.0070mL/秒	72.1mL/分
50mL	0.0107mL/秒	110mL/分
100mL	0.0186mL/秒	170mL/分
140mL	0.0200mL/秒	206mL/分
200mL	0.0411mL/秒	433mL/分

※例：0.0001 μ L \leq 0.1mL、0.0003mL \leq 0.3 μ L

シリンジや接続チューブラインにより誤差があります。

シリンジサイズはシリンジメーカーにより異なり、保証するものではありません。本製品は医療用にはご使用になれません。

図 3-2 改良に用いたステンレスマイクロシリンジポンプ

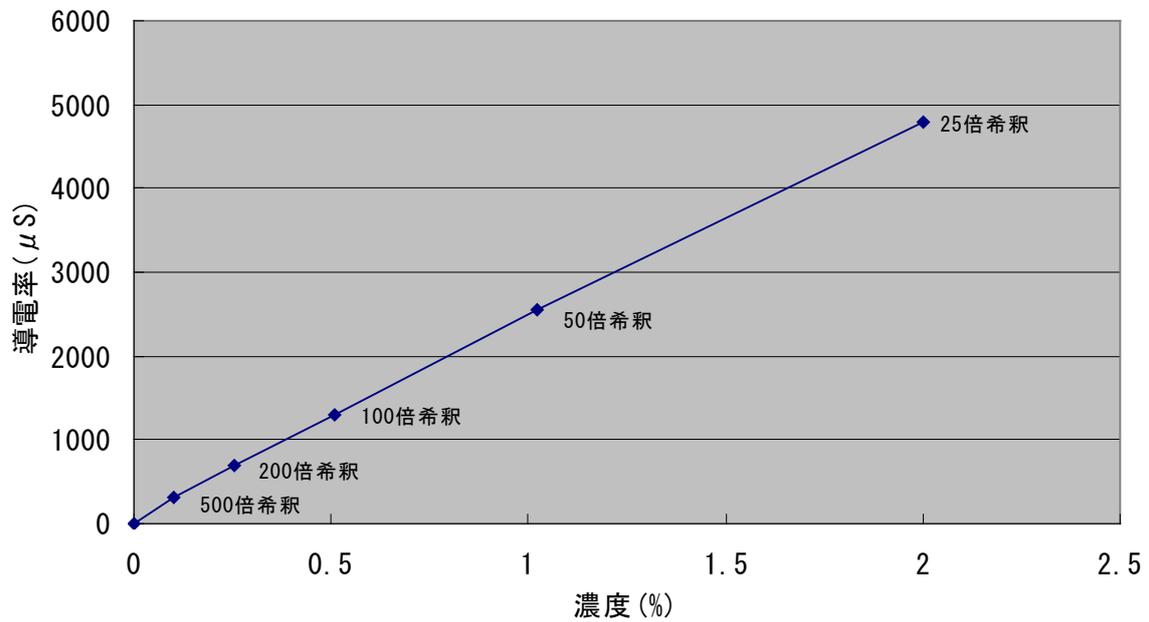


図 3-3 五ホウ酸ナトリウム水和水濃度と導電率の関係

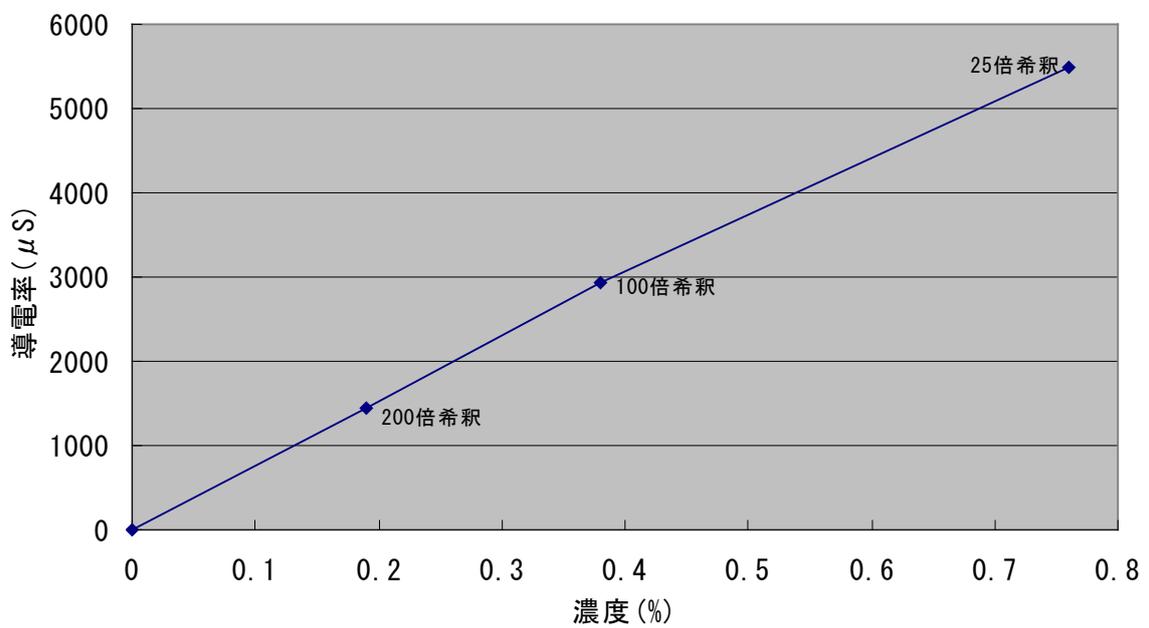


図 3-4 人工海水濃度と導電率との関係

表 3-1 五ホウ酸ナトリウム水和水の自動採取結果

採取試料瓶 ラベル番号	試料総重量 瓶含(g)	瓶重量 (g)	試料液測定 重量(g)	実測導電率 (μ S)	換算濃度 (%)	
1	13.65	8.26	5.39	1295	0.518	
2	13.78	8.39	5.39	1290	0.516	
3	13.79	8.39	5.40	1300	0.520	
4	13.78	8.38	5.40	1266	0.506	
5	13.78	8.36	5.42	1251	0.500	
6	13.77	8.36	5.41	1217	0.487	
7	13.78	8.36	5.42	1242	0.497	
8	13.86	8.42	5.44	1267	0.507	
9	13.86	8.42	5.44	1247	0.499	
10	13.82	8.37	5.45	1230	0.492	
11	13.80	8.35	5.45	1263	0.505	
12	13.83	8.35	5.48	1283	0.513	
13	13.79	8.32	5.47	1275	0.510	
14	13.78	8.27	5.51	1293	0.517	
15	13.89	8.37	5.52	1262	0.505	
16	13.91	8.40	5.51	1290	0.516	
17	13.85	8.36	5.49	1246	0.498	
18	13.91	8.39	5.52	1233	0.493	
19	13.91	8.38	5.53	1243	0.497	
20	13.92	8.40	5.52	1242	0.497	
21	13.91	8.41	5.50	1246	0.498	
22	13.92	8.40	5.52	1243	0.497	
23	13.84	8.31	5.53	1252	0.501	
24	13.84	8.31	5.53	1246	0.498	
25	13.90	8.38	5.52	1255	0.502	
26	13.84	8.31	5.53	1233	0.493	
27	13.94	8.42	5.52	1251	0.500	
28	13.92	8.38	5.54	1275	0.510	
29	13.93	8.40	5.53	1230	0.492	
30	13.95	8.41	5.54	1262	0.505	
31	13.85	8.33	5.52	1220	0.488	
32	13.83	8.32	5.51	1307	0.523	
33	13.90	8.36	5.54	1238	0.495	
34	13.90	8.37	5.53	1250	0.500	
35	13.88	8.34	5.54	1270	0.508	
36	13.95	8.39	5.56	1258	0.503	
37	13.88	8.32	5.56	1278	0.511	
38	13.92	8.34	5.58	1308	0.523	
39	13.93	8.34	5.59	1301	0.520	
40	13.94	8.33	5.61	1289	0.516	
41	13.98	8.37	5.61	1231	0.492	
42	14.00	8.39	5.61	1282	0.513	
43	13.98	8.36	5.62	1292	0.517	
44	14.00	8.38	5.62	1249	0.500	
45	13.98	8.36	5.62	1300	0.520	
46	14.00	8.38	5.62	1203	0.481	
47	13.97	8.37	5.60	1226	0.490	
48	13.94	8.30	5.64	1209	0.484	
49	13.98	8.34	5.64	1284	0.514	
50	14.02	8.38	5.64	1254	0.502	最小重量
51	14.05	8.42	5.63	1194	0.478	5.39
52	14.06	8.39	5.67	1234	0.494	
53	13.97	8.32	5.65	1217	0.487	最大重量
54	14.09	8.46	5.63	1218	0.487	5.69
55	13.98	8.33	5.65	1222	0.489	
56	14.01	8.36	5.65	1283	0.513	平均重量
57	14.01	8.36	5.65	1204	0.482	5.56
58	14.01	8.36	5.65	1280	0.512	
59	14.01	8.35	5.66	1259	0.504	
60	14.08	8.39	5.69	1240	0.496	
61	14.02	8.35	5.67	1215	0.486	
62	14.03	8.35	5.68	1269	0.508	最小濃度
63	14.06	8.38	5.68	1213	0.485	0.48
64	13.96	8.30	5.66	1254	0.502	
65	14.05	8.37	5.68	1251	0.500	最大濃度
66	14.04	8.37	5.67	1263	0.505	0.52
67	14.01	8.34	5.67	1288	0.515	
68	14.09	8.43	5.66	1244	0.498	平均濃度
69	13.98	8.30	5.68	1265	0.506	0.50
70	14.03	8.34	5.69	1264	0.506	
71	14.06	8.37	5.69	1263	0.505	
72	14.00	8.32	5.68	1261	0.504	

表 3-2 人工海水の自動採取結果

採取試料瓶 ラベル番号	試料総重量 瓶含(g)	瓶重量 (g)	試料液測定 重量(g)	実測導電率 (μS)	換算濃度 (%)	
1	13.79	8.26	5.53	2659	0.372	
2	13.97	8.39	5.58	2678	0.375	
3	13.96	8.39	5.57	2684	0.376	
4	13.95	8.38	5.57	2708	0.379	
5	13.93	8.36	5.57	2699	0.378	
6	13.93	8.36	5.57	2657	0.372	
7	13.92	8.36	5.56	2604	0.365	
8	13.97	8.42	5.55	2662	0.373	
9	13.97	8.42	5.55	2672	0.374	
10	13.95	8.37	5.58	2659	0.372	
11	13.93	8.35	5.58	2680	0.375	
12	13.93	8.35	5.58	2703	0.378	
13	13.90	8.32	5.58	2736	0.383	
14	13.86	8.27	5.59	2626	0.368	
15	13.96	8.37	5.59	2726	0.382	
16	13.99	8.40	5.59	2757	0.386	
17	13.95	8.36	5.59	2788	0.390	
18	13.99	8.39	5.60	2638	0.369	
19	13.98	8.38	5.60	2604	0.365	
20	14.00	8.40	5.60	2724	0.381	
21	14.00	8.41	5.59	2676	0.375	
22	13.99	8.40	5.59	2760	0.386	
23	13.91	8.31	5.60	2709	0.379	
24	13.92	8.31	5.61	2700	0.378	
25	13.98	8.38	5.60	2734	0.383	
26	13.92	8.31	5.61	2718	0.381	
27	14.01	8.42	5.59	2755	0.386	
28	14.01	8.38	5.63	2734	0.383	
29	14.01	8.40	5.61	2737	0.383	
30	14.04	8.41	5.63	2644	0.370	
31	13.95	8.33	5.62	2623	0.367	
32	13.93	8.32	5.61	2696	0.377	
33	13.98	8.36	5.62	2678	0.375	
34	13.98	8.37	5.61	2684	0.376	
35	13.96	8.34	5.62	2708	0.379	
36	14.02	8.39	5.63	2699	0.378	
37	13.96	8.32	5.64	2757	0.386	
38	13.99	8.34	5.65	2604	0.365	
39	13.99	8.34	5.65	2662	0.373	
40	13.99	8.33	5.66	2672	0.374	
41	13.96	8.37	5.59	2659	0.372	
42	13.98	8.39	5.59	2680	0.375	
43	13.95	8.36	5.59	2703	0.378	
44	13.96	8.38	5.58	2738	0.383	
45	13.93	8.36	5.57	2626	0.368	
46	13.96	8.38	5.58	2673	0.374	
47	13.93	8.37	5.56	2642	0.370	
48	13.88	8.30	5.58	2656	0.372	
49	13.92	8.34	5.58	2638	0.369	
50	13.96	8.38	5.58	2758	0.386	最小重量
51	14.00	8.42	5.58	2654	0.372	5.51
52	13.98	8.39	5.59	2648	0.371	
53	13.92	8.32	5.60	2622	0.367	最大重量
54	14.05	8.46	5.59	2722	0.381	5.66
55	13.92	8.33	5.59	2656	0.372	
56	13.95	8.36	5.59	2654	0.372	平均重量
57	13.93	8.36	5.57	2645	0.370	5.59
58	13.96	8.36	5.60	2663	0.373	
59	13.93	8.35	5.58	2610	0.365	
60	13.98	8.39	5.59	2643	0.370	
61	13.95	8.35	5.60	2784	0.390	
62	13.94	8.35	5.59	2673	0.374	最小濃度
63	13.90	8.38	5.52	2686	0.376	0.36
64	13.81	8.30	5.51	2631	0.368	
65	13.90	8.37	5.53	2686	0.376	最大濃度
66	13.90	8.37	5.53	2681	0.375	0.39
67	13.88	8.34	5.54	2690	0.377	
68	13.98	8.43	5.55	2683	0.376	平均濃度
69	13.85	8.30	5.55	2688	0.376	0.38
70	13.90	8.34	5.56	2639	0.369	
71	13.91	8.37	5.54	2641	0.370	
72	13.84	8.32	5.52	2681	0.375	

3.2. 差圧計測法の改良

試験対象である海水やホウ酸水は沸騰濃縮することで密度が増大する。差圧を計測する際に、差圧導管内にも同じ流体が存在するため、対流や拡散により導管内の密度が変化する可能性がある。密度の変化は水頭を変化させることから、差圧計測値に影響を及ぼす。

本節では、正確な差圧を計測するために、試験体に繋がる差圧導管を水平に維持し、水平部にシリコーンを封入することで溶質の拡散を抑制するように改良する。その後に溶質の拡散がないことを確認する。

図 3-5 に製作した計装管継手の構造図を示す。外形寸法は幅 100 mm、奥行 50 mm、高さ 65 mm で、材質はアクリルである。出入口接続孔間を凹凸流路構成とし、上部凸部に隔離液を封入する。凹凸流路は、上下左右 $\phi 5\text{mm}$ の孔加工にて形成し、穴加工の不要な箇所は閉塞栓を取り付けた。接続孔は PT1/8 ねじ込である。拡散を防止するためのシリコーン液はモーメンティブ・パフォーマンス・マテリアルズ社の Element14*PDMS 10-JC を用いた。動粘性係数 $10\text{ mm}^2/\text{s}$ のシリコーンである。

接続に際してはバンドル試験体近傍の計装管接続部を外し、製作した計装管継ぎ手を試験体のアルミ架台に据付固定し、計器側計装管を接続復旧した。差圧計導管内の溶液封入手順は以下の通りである。

- (1) 境界調整孔の閉止栓 2 箇所を外す。
- (2) 差圧計側より計装管を水封入する。
- (3) 計装管エア抜きを行う。
- (4) 計器側止弁を閉じる。
- (5) 試験体側計装管のエア抜きを行う。
- (6) 試験体側止弁を閉じる。
- (7) 境界調整孔 2 箇所を閉止する。
- (8) エア抜き孔止弁を開く。
- (9) 閉止栓を外してシリコーンを封入する。
- (10) エア抜き/封入孔を閉じる。
- (11) 計装管継手出入口止弁を開く。

改良した差圧計導管改良部の塩分拡散防止効果の確認を行った。図 3-6 差圧計導管改良部の塩分拡散防止効果確認試験の様子図 3-6 に試験の様子を示す。

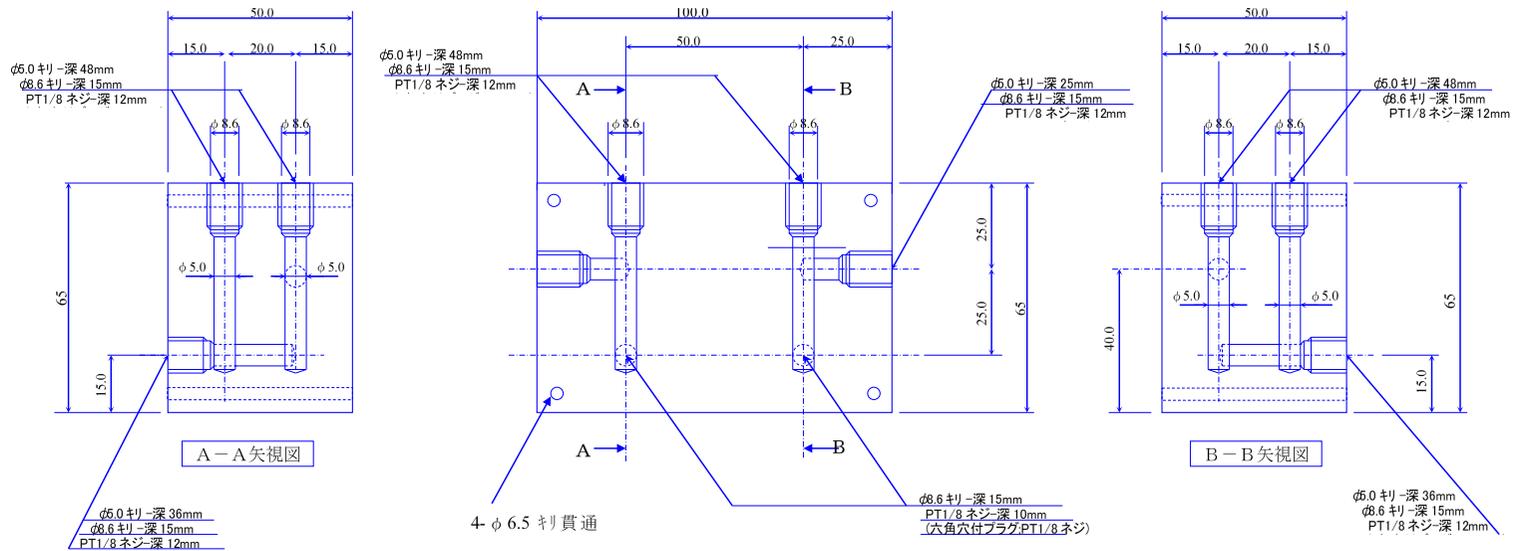
試験体側の溶液は人工海水である。水頭圧を加えるために、鉛直配管には高さ 450 mm に人工海水を充填している。それより下流側（実際の測定においては差圧計側）にはシリコン油を注入した。シリコン油の動粘性係数は $10 \text{ mm}^2/\text{s}$ である。塩分濃度計にはアタゴ製 PAL-41S を使用した。

表 3-3 に塩分濃度試験結果を示す。試験に使用した人工海水は海水濃度より濃く、4.3 wt% とした。試験開始時にシリコンを境に試験体側で計測した濃度は 4.2 wt%、差圧計側では 0.0 wt% であった。170 h 後に同じ場所から計測した濃度は、試験体側では 4.3 wt%、差圧計側では 0.0 wt% であった。

本試験結果から、塩分の拡散は防止できたと言える。

表 3-3 塩分拡散防止効果試験における塩分濃度測定結果

時期	測定時刻	試験体側濃度	差圧計側濃度	周囲温度
試験開始時	0 h	4.2 wt%	0.0 wt%	7 °C
試験終了時	170 h	4.3 wt%	0.0 wt%	7 °C



製作仕様

- ・ 最大圧力 0.2 MPa
- ・ 最大温度 60 °C
- ・ 形状寸法 W100xD50xH65mm
- ・ 材料 アクリル
- ・ 内部導通孔 導通説明図を参照
- ・ 導通孔径 $\phi 5$ mm
- ・ 閉塞栓孔 PT-1/8/メネジ
- ・ 計装接続孔 PT-1/8 メネジ
- ・ 上端部 T字継手付 x2カ所(接続/止弁)
L字継手付 x2カ所
- ・ その他 側面孔は閉塞栓(六角穴付プラグ)
- ・ 製作数 18 個

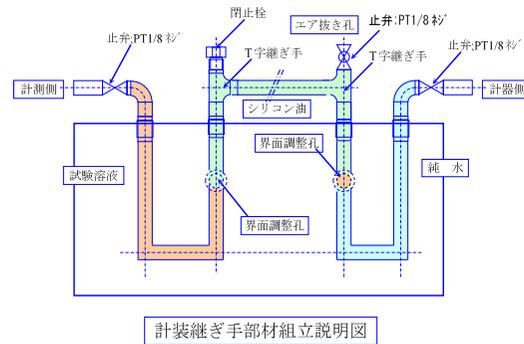


図 3-5 計装配管継手の構造図

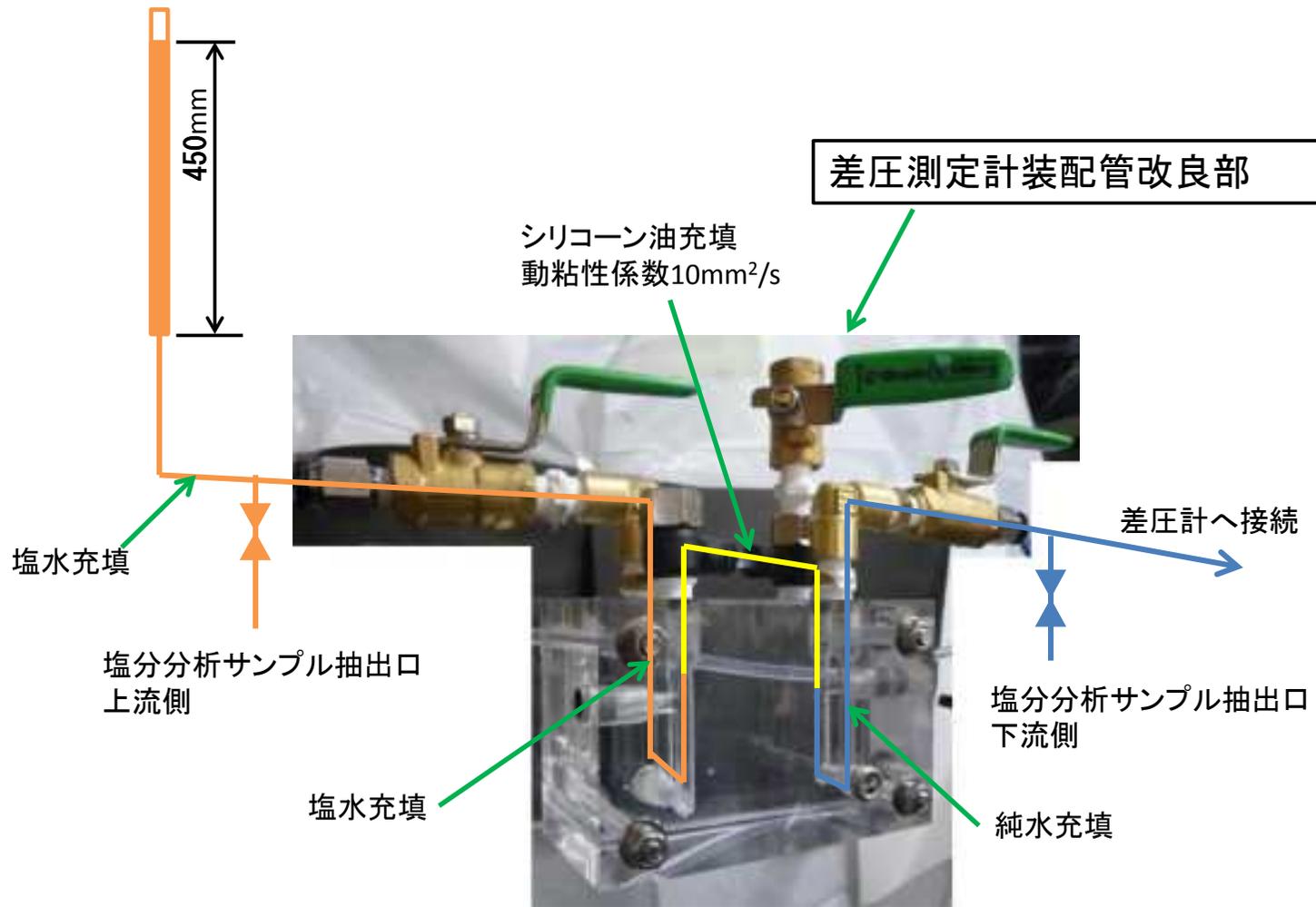


図 3-6 差圧計導管改良部の塩分拡散防止効果確認試験の様子

3.3. 沸騰濃縮試験と析出塩の X 線 CT 撮影

本節では、海水が注入された原子炉燃料模擬バンドル流路における塩析出試験の分離効果試験として、短尺バンドルを用いた沸騰濃縮試験を実施する。試験後の短尺バンドルの析出塩を X 線 CT 撮影し、沸騰条件とバンドル試験体内の塩析出量、析出位置との関係性を見出す。

3.3.1. 短尺バンドル試験装置

使用する短尺バンドル試験装置の概要を述べる。まず、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) (常時ロッド表面温度)
- ロッド温度 600 (°C) (最大上昇温度)
- 主要材質 耐腐食材(被覆管材は NCF600 相当品)
- 使用流体 海水

試験装置は、可視化容器に 5×5 バンドルが組み込まれた短尺試験体、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 3-7 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、飽和水溶液を所定液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液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、短尺試験体内の液位は、下降管液位をポンプ給水にて所定液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、バンドル流路圧力、ダウンコマ液位、流体温度等である。

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 3-8 に短尺バンドルのロッド配列、概略形状を示した。また、図 3-9 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；φ10mm、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(□68.3mm/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用の支持孔を形成
電源供給及び熱電対はバンドル上部端より引出す

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 3-8 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
- 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 3-10 に短尺バンドル試験体の全体組立図を示した。表 3-4 に、図 3-10 の部品番号の名称、概略仕様を示した。可視化容器の仕様は以下の通りである。

- 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 x 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 x1 カ所
ドレン孔 15A-PT1/2 ネジボス x1 カ所

オーバーフロー孔 20A-PT3/4 ネジボス x2 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 (5x5 正方格子)
 - ・ 内幅寸法 66.0mm x66.0mm xH30mm
 - ・ 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) x 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 5x5 正方格子配列のロッド端栓差し込み孔
差し込み孔 7x7mm x 深さ 10mm
孔配列 13x13mm ピッチにて 25 個 (縦列;5/横列;5)
(5x5 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)
- フランジボルト締付面は、二つ割り半月形状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

上部接続管の仕様を以下に示す。

- 形式 薄肉円筒管
- 形状寸法 約 69mmx69mm x 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 x 69 mm x 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 x1 カ所
計装線取出 穴径 50 mm ボスを溶接にて取付 x2 カ所
O リングシールの閉止板取付 (PT1/4 ネジ孔 x3 個付)
均圧孔 20A-PT1/2 ネジボス x1 カ所
- その他 計測孔 穴径 2 mm/ISO 管用 PT1/8 ボス取付 x2 カ所
エア抜き孔 上端部位置に PT1/4 ネジのボス x1 カ所
流路管下端より 30 mm 上の管側面に排出孔 (φ 15 mm x 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

下降管の仕様を以下に記載する。

- 形 式 円筒縦型
- 形状寸法 内径約 φ 100mm x 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 x1 カ所
液位差圧 PT1/4 ネジボス (500 mm) x2 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

(1) 凝縮タンク

- 形 式 円筒縦型
- 概略形状 市販ドラム管を追加加工にて使用(φ550mm x 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 φ600 mm x t5 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prayヘッダー タンク内上端部に取付
形状寸法 管径 32A x φ500 mm
スプレインズル φ5 mm x 6箇所 (PT ネジ込)
- 冷却コイル φ450 mm x 200ピッチ x 5巻の薄肉管
(コイル内側に蒸気放出孔 φ10 mm x 30箇所)
- 接続孔 ① Spray水ノズル ; 15A x 1箇所
② ドレイン・排水 ; 32A x 1箇所
③ オーバーフロー ; 32A x 1箇所
④ 給水孔 ; 15A x 1箇所
- 計測孔 ① 液位計取付 ; PT1/4 ネジボス x 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 x2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

溶液タンクの仕様を以下に示す。

- 形 式 円筒縦型
- 形状寸法 φ560 mm x H600mm 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
ドレイン孔 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 x1カ所

- 液位計測 PT1/4 ネジボス x2 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 市販 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。
(オーヨー(<http://oyogkn.co.jp>) ステンレス容器相当品)
- 材 質 耐食材(SUS304 相当品)
- 製作数 1 基

廃液タンクの仕様を以下に示す。

- 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 x 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)x1 カ所、給水孔(15A)x1 カ所
排液孔(20A) x 1 カ所
- その他 液位表示(本体付属)
- 材 質 PVC(ポリ塩化ビニル)
- 製作数 1 基

洗浄タンクの仕様を以下に示す。

- 形 式 円筒縦型
- 形状寸法 内径約 φ560mm x 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
ドレーン孔	15A-PT1/2 ネジ(止め弁付)
- ・ 計測孔

温度計測	PT1/4 ネジボス x1 カ所
液位計測	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)
- 材 質 耐食材(SUS304 相当品)

- 製作数 1 基
- 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; $\phi 2$ mm
 - ・ 抽出孔位置 図 3-12 (C) に示す下降管 x2、配管 x1、試験体 x2 の計 5 箇所
 - ・ 抽出孔構造 図 3-12 (A) に示す通り、スウェージロック (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。
 - ・ 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	SS-50A
 - ・ 均圧配管

SUS-10A	
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

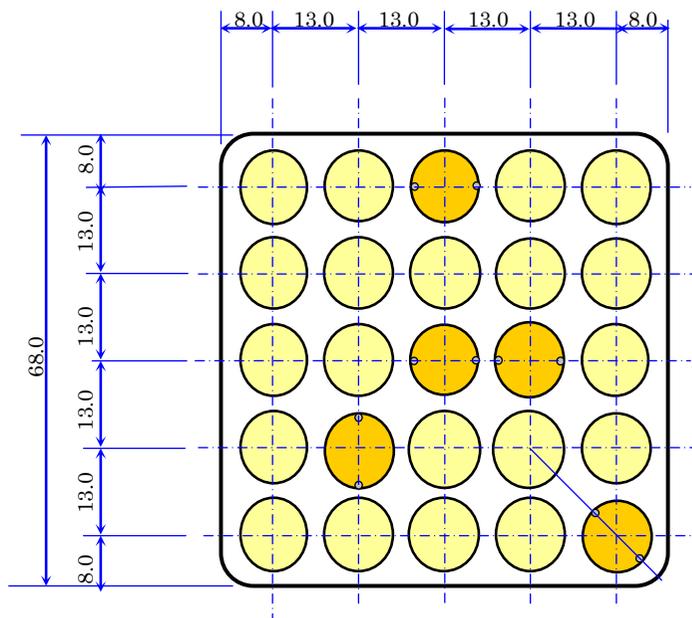
洗浄ポンプ	シリコン系ブレードホースでポンプ及び
	試験体、洗浄タンクと接続
 - ・ 保温

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

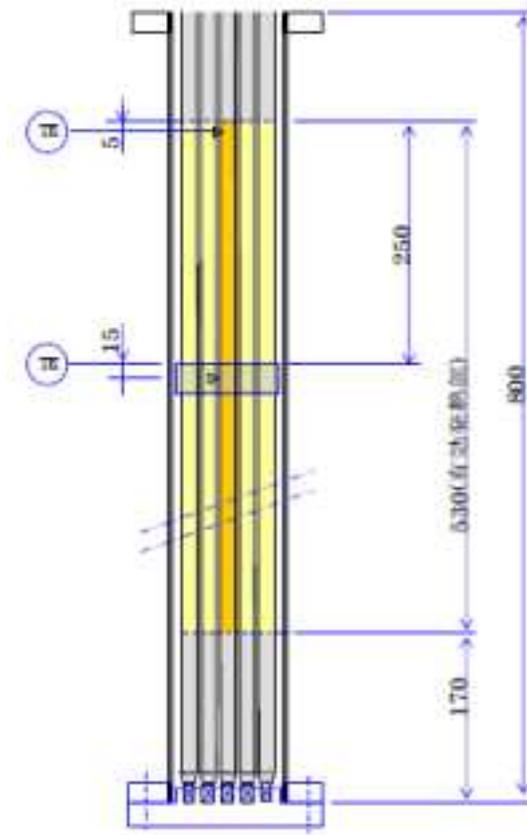
計装品の導圧配管にはテフロンチューブを使用し、継手にはマイルタ

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(φ1.6mm) x 2カ所
 下降管表面 K型シース熱電対(φ1.6mm) x 2カ所
 下降管内温度 K型シース熱電対(φ1.6mm) x 2カ所
 接続配管温度 K型シース熱電対(φ1.6mm) x 1カ所
 凝縮タンク温度 K型シース熱電対(φ1.6mm) x 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。



(a) バンドルロッド配列



(b) 軸方向熱電対位置

図 3-8 試験バンドルのロッド配列及び熱電対位置

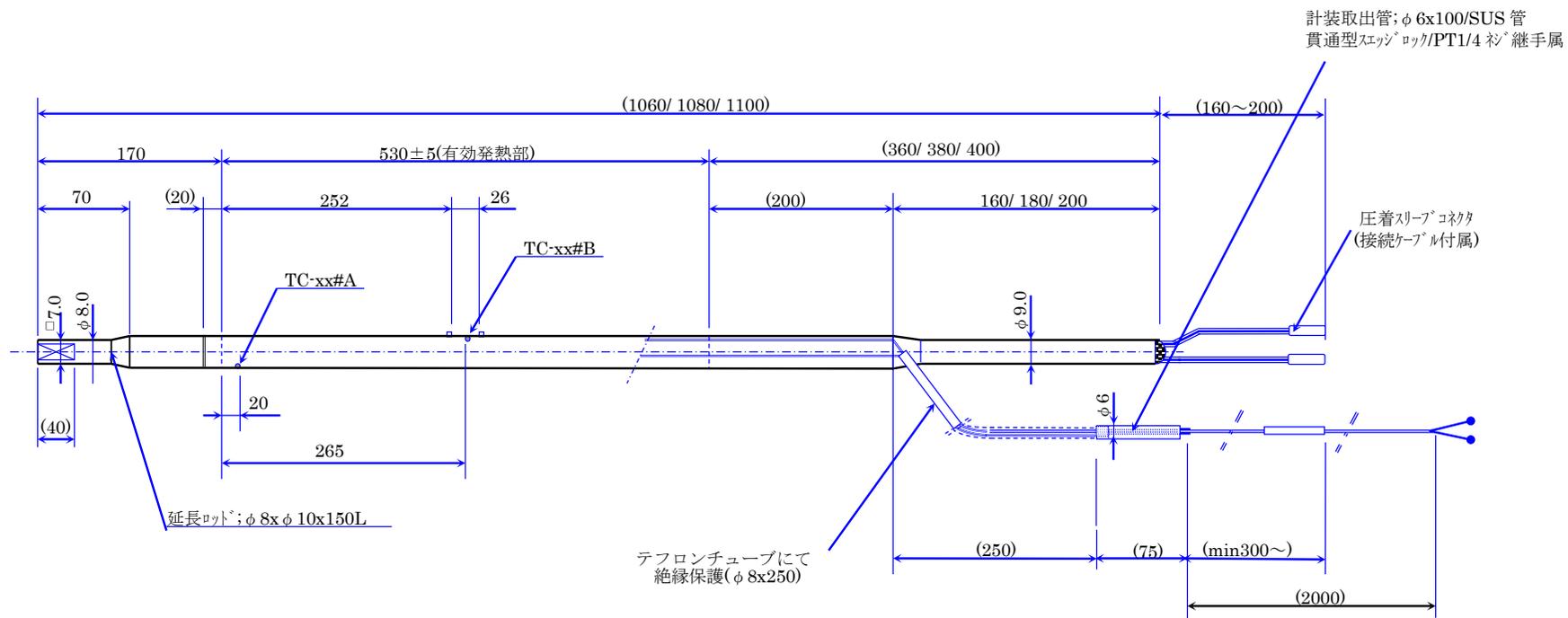


図 3-9 短尺ヒータロッド形状寸法図

- 試験バンドル仕様**
- 設計条件 圧力0.2Mpa、温度120℃ (出口表面400℃)
 - バンドル構成 (5x5) 格子配列
 - 発熱形式 筒状加熱 (非接触型)
 - ロッド仕様
 - * 発熱部 ロッド径:φ10mm、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

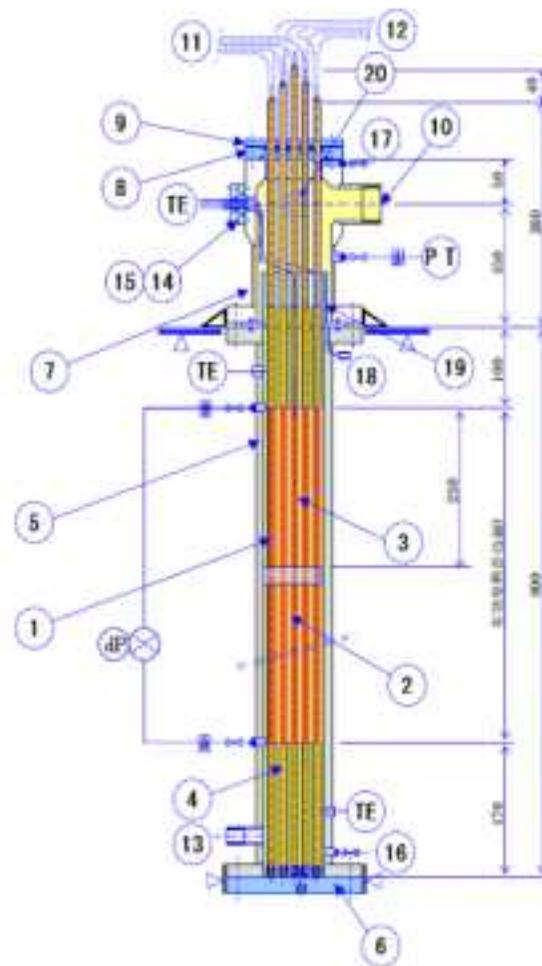
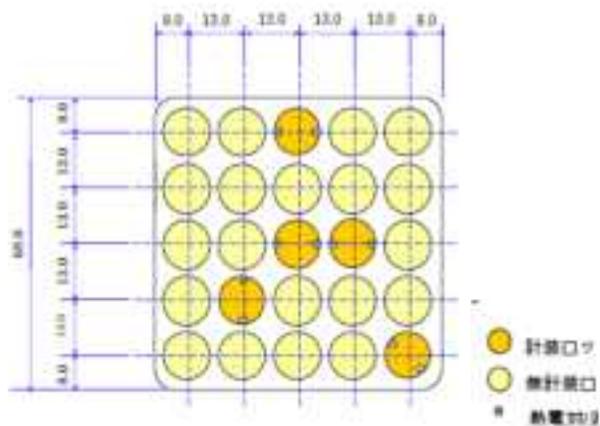


図 3-10 短尺バンドル試験体の概念図

表 3-4 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	銅ボルト	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	銅ボルト	JIS5K-100A-□7x25 溝穴	19	上部流路管	1個	SUS304	□68xL70mm/
5	可視化チャンセル容器	1体	銅ボルト	□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	スパーサ	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

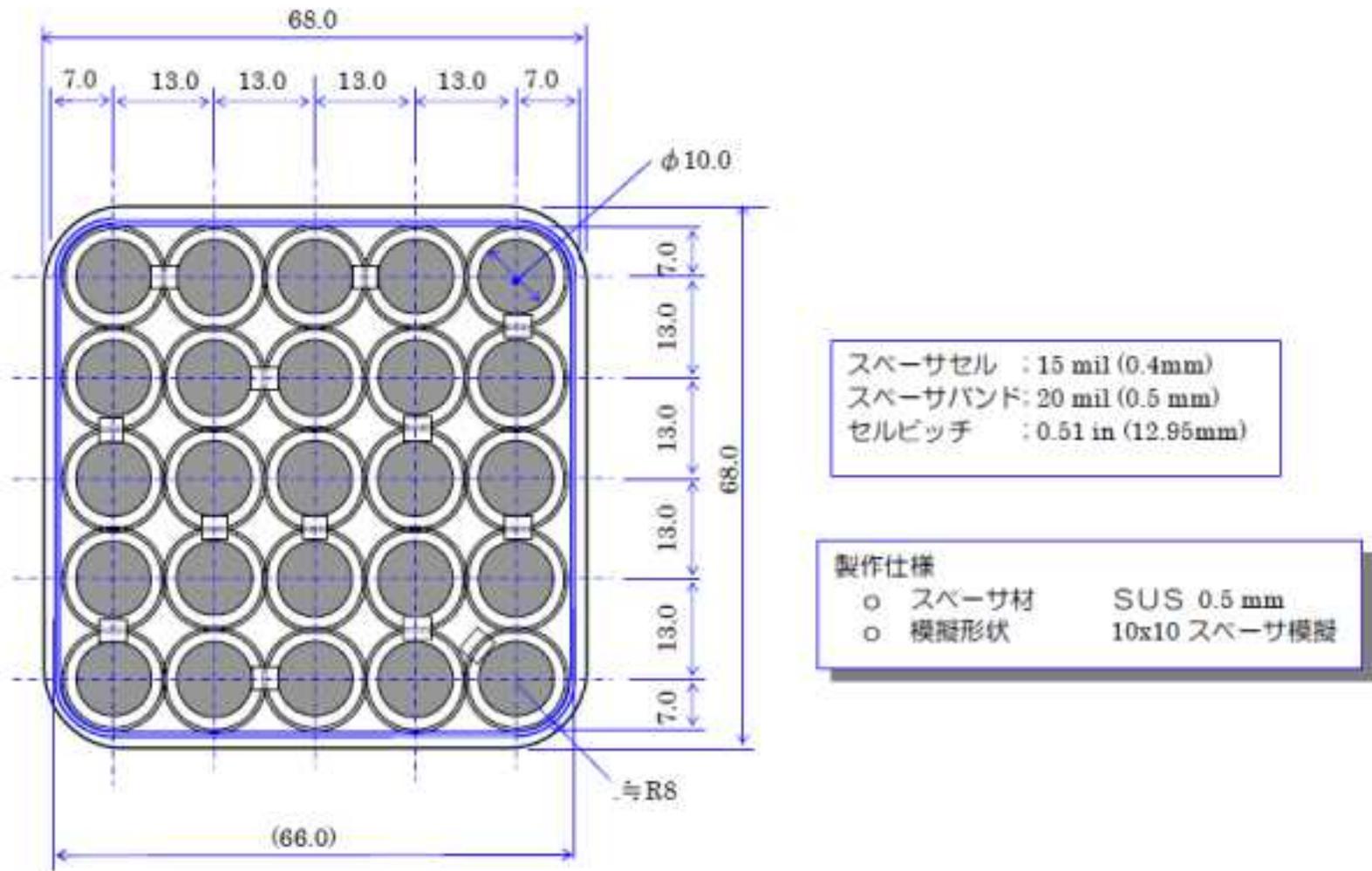
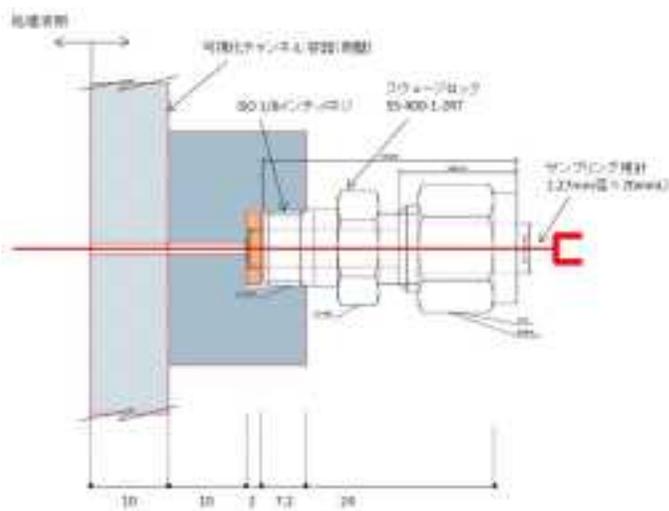
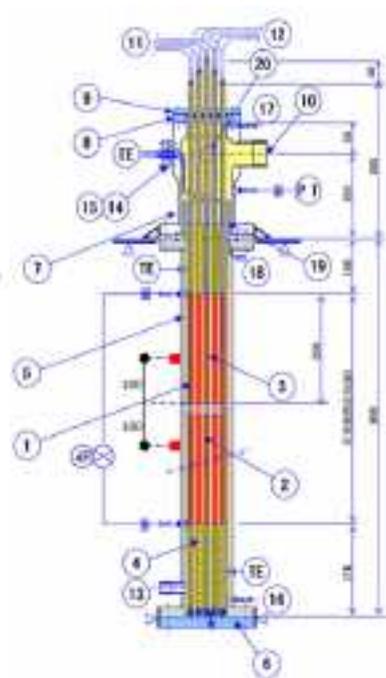


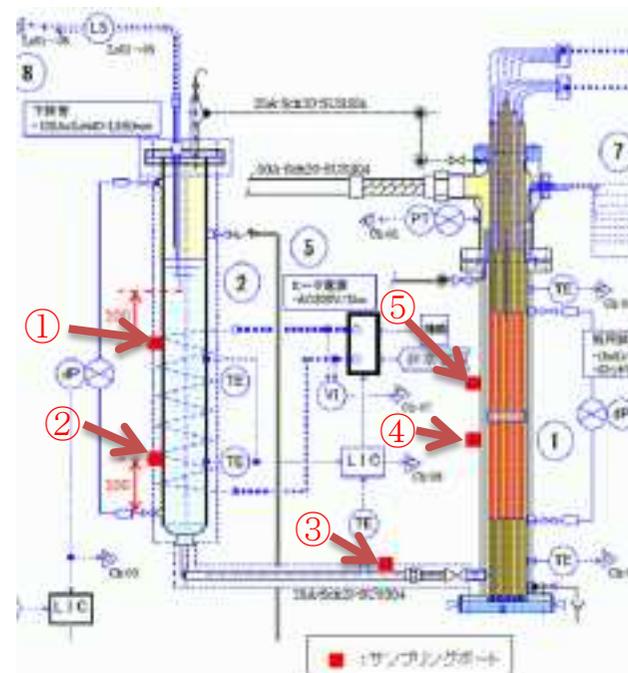
図 3-11 5×5 バンドル試験スペーサの形状寸法



(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 3-12 サンプリングポートの位置および構造

3.3.2. 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 3-5 に X 線撮影装置の仕様を示す。図 3-13 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 3-14 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 3-15（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 3-16 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 20mm 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 3-16 中の緑色矢印）を確保した。

水平方向には図 3-16 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 3-5 X線撮影装置の仕様

構成	仕様			
マニピュレータ	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 μ 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
	Φ 156mm x H156mm	13分	78 μ m	最大倍率:2.5倍拡大撮影
	Φ 260mm x H260mm	13分	130 μ 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		
		プロファイル表示・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 3-13 X線 CT 設備の回転試料台とフラットパネル

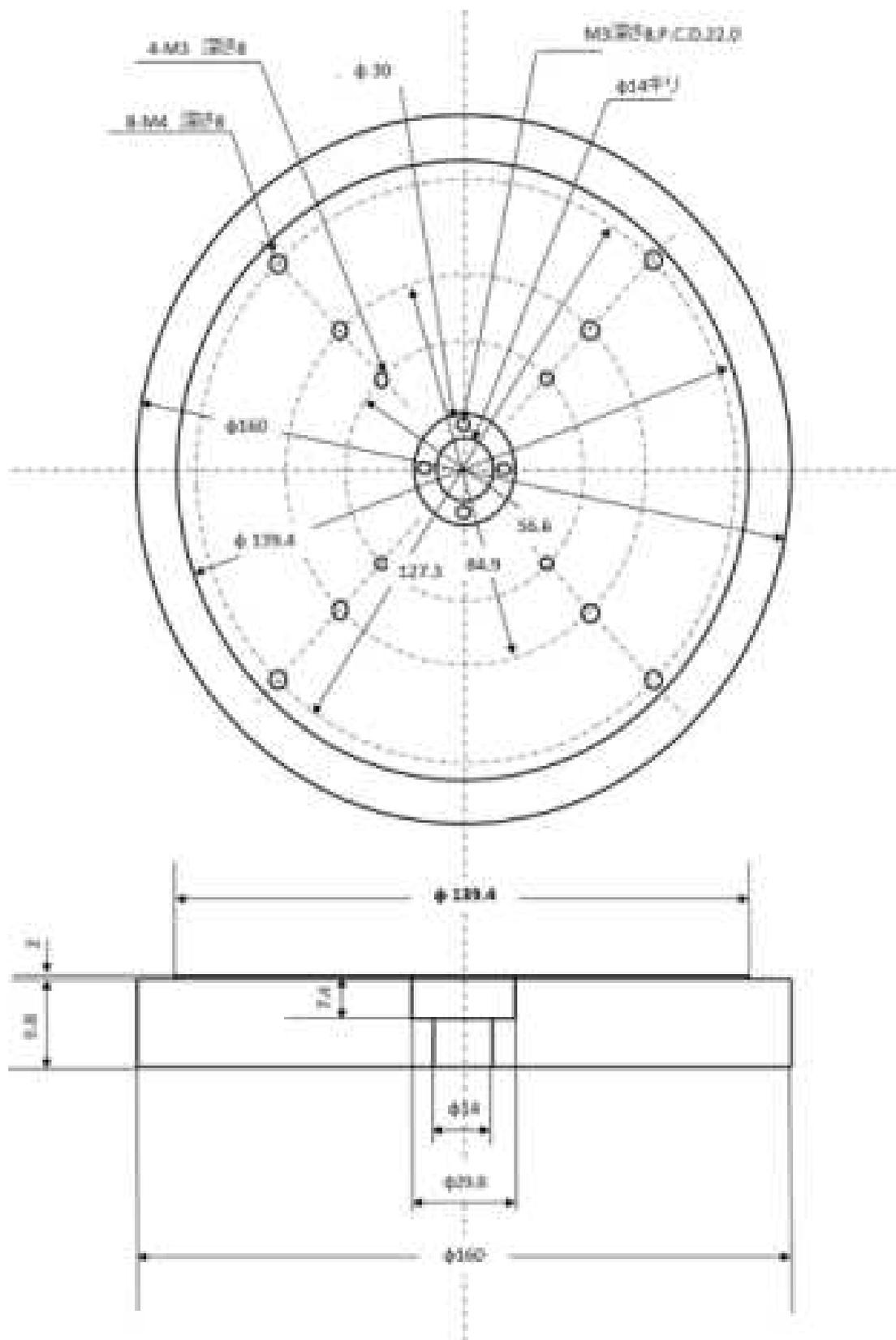


図 3-14 X線 CT 撮影用の台座

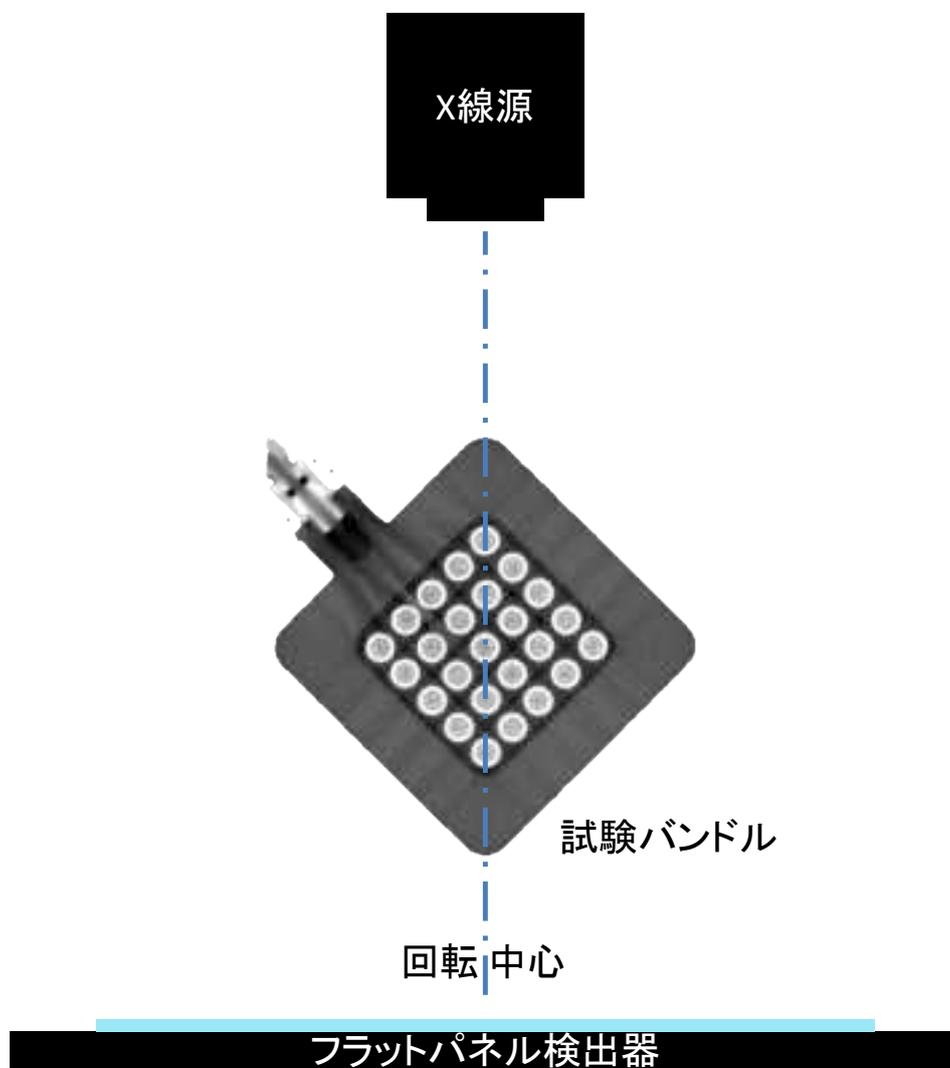


図 3-15 上部から見た短尺バンドル撮影位置と向き

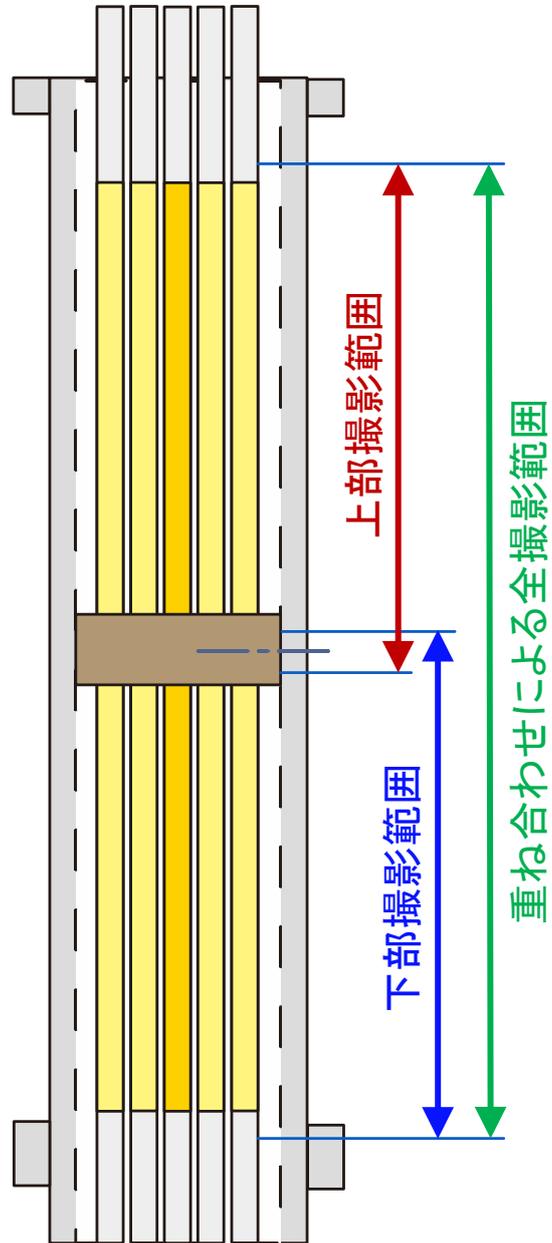


図 3-16 高さ方向の撮影範囲

3.3.3. 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示す。本試験における主な作業項目は、①試験前点検、②試験機器の起動、③試験溶液の予熱、④試験液位設定、液位差圧計調整 ⑤バンドル試験体への注水、昇温 ⑥塩析出試験 ⑦バンドル試験体の洗浄 ⑧下降管の洗浄 である。各項目について以下にその詳細を示す。

① 試験前点検

短尺バンドル試験体を垂直に固定し、揺れ防止用板を取り付ける。下降管とバンドル試験体入口とを接続する。蒸気排出口等の必要配管を接続する。計測のためロッド温度、溶液温度測定用の熱電対、圧力計、差圧センサを接続する。ヒータを端子番号に従い接続する。下降管とバンドル試験体の接続配管の弁 (BV001、BV002)、エア抜き弁(BV010、BV011)、均圧管止弁(BV009)は全開にする。差圧計装弁 (BV003)、ドレン弁(BV006) は全閉にする。

② 実験機器の起動

配電盤の元電源を入れ、計装電源の電源(ELB)を入れる。次にヒータ電源を除く他の電源 (ELB) を入れる。データ収録装置を起動し、データ収録状況を確認する。

③ 試験溶液の予熱

溶液タンクに試験溶液である人工海水が 50 L 以上保有されていることを確認する。不足の場合は補充する。溶液タンクに備え付けのヒータ 2 台の電源スイッチを入れ、温度調節器の設定温度 70℃にセットする。加熱されていること(溶液温度の上昇)を確認し、タンクの上蓋を閉じる。屋外凝縮タンクの配管の接続状況、ポンプ、周辺の水漏れ等の不具合がないことを確認する。凝縮タンクの液位を約 60%に調節する。スプレー流量調節弁を約 50%に設定する。凝縮ポンプを稼働させ、ポンプ吐き出し圧が 0.15 MPa 以上であることを確認する。

④ 試験液位、液位差圧計の設定

試験液位に合わせて、制御の上下限の設定を行う。制御の上限値は設定値の

0.1 kPa 高くし、下限値は設定値より 0.2 kPa 低い値に設定する。試験部差圧計(計測位置が大気接続になっている)を零に調整する。

⑤ バンドル試験体への注水、加熱

溶液タンク内の人工海水温度が 70℃近傍になってから溶液タンクポンプ吸い込み止弁を全開にし、液位調整ポンプを起動して試験設定液位の上限においてポンプを停止する。下降管入口の給水止弁の開度は 45 度程度に絞り、試験中の急激な給水を緩和する。液位計表示値が設定液位を超え、警報表示の赤ランプの点灯を確認し、ドレン止弁を開いて設定液位(容器に赤線表示)まで排水する。微差圧計のデジタル値を読み、これを液位設定値として液位の上下限値を再設定する。下降管温度調節計の設定温度を 90.0℃にセットし、液位調整ポンプが ON 状態において下降管ヒータの電源を入れる。下降管水温が 90℃を超えたら、設定温度を徐々に高め、最終的に 98℃にセットする。

⑥ 塩析出試験

以下の項目が試験条件に到達していることを確認する。

- ・下降管温度が約 98℃で安定していること。
- ・溶液タンク内の人工海水の温度が約 70℃で安定していること。
- ・下降管液位が実験液位の制御範囲内であること。

データ収録を開始し、バンドル試験体のヒータ電源を入れ、出力調整器を操作して目標熱流束に調整する。電圧、電流は小刻みに変化するので、平均値が所定の熱流束になるように調整する。バンドル試験体内の溶液の状態を観察し、沸騰が開始した時点を試験の開始としてその時間を記録し、ストップウォッチで沸騰濃縮時間を計測する。試験中は定期的に以下の状態を監視し、所定時間に溶液を採取する。

- ・液位低下により、液位調整ポンプが自動的に起動/停止し、一定液位を保つこと。
- ・ロッド表面温度がほぼ一定温度であること。
- ・バンドル試験体のヒータの電圧/電流がほぼ安定していること。
- ・下降管温度がほぼ一定で安定していること
- ・塩の析出状況やバンドルや下降管に漏れなどがないか観察すること

- ・ データロガーの各測定値において急激な変化がないこと
- ・ 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る。その場合は採取不可とする。

所定時間になった時点で以下の操作を行い、バンドル試験体は X 線 CT 観察に提供する。

- ・ 所定時間にバンドル試験体のヒータと下降管ヒータの電源を切る。
- ・ BV001 を閉じ、BV003 を開き、バンドル試験体内の溶液を抜く。
- ・ データ収録を停止する。
- ・ 温度測定端子、圧力測定端子 等 計測端子を取り外す。
- ・ 各接続配管を外し止栓する。
- ・ ヒータ端子を取り外し、まとめておく。
- ・ バンドル試験体を架台から取り外し、台車に仮固定する。
- ・ 必要部位の観察、写真撮影を行う。
- ・ X 線 CT 測定位置に移動する。

⑦ バンドル試験体の洗浄

バンドル試験体下部の液流入口に洗浄ポンプの吐き出し口のパイプを取り付け、上部蒸気出口のユニオン接続部に洗浄タンクへの配管を取り付ける。洗浄液温度が約 60℃であることを確認し、洗浄ポンプを起動させ、約 30 分間循環させる。洗浄状況をよく観察する。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。洗浄に際しては排水の塩分濃度が純水に近い値であることを確認した。その場合であっても固着していることも考えられるため、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た。

⑧ 下降管の洗浄

循環ポンプ吐き出し配管と下降管出口部を接続し、上部均圧管にホースを接続して洗浄タンクへの配管を確保する。循環ポンプを起動させ、バンドル試験体と同様に 30 分間下降管内部を洗浄する。

3.3.4. 試験溶液

表 3-6 に、人工海水の組成を示す。本年度使用した人工海水はマリンアート SF-1 である。昨年度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。

表 3-6 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 ₂ ・6H ₂ O	9.9 g	9.474 g
塩化カルシウム	CaCl ₂ ・2H ₂ O	1.5 g	1.326 g
無水硫酸ナトリウム	Na ₂ SO ₄	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 ₃	0.19 g	0.171 g
臭化カリウム	KBr	96 mg	85 mg
ホウ砂	Na ₂ B ₄ O ₇ ・10H ₂ O	78 mg	34 mg
無水塩化ストロンチウム	SrCl ₂	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 ₂ ・4H ₂ O	0.6 μg	0.8 μg
塩化コバルト	CoCl ₂ ・6H ₂ O	2 μg	0.2 μg
塩化アルミニウム	AlCl ₃ ・6H ₂ O	8 μg	8 μg
塩化第二鉄	FeCl ₃ ・6H ₂ O	5 μg	5 μg
タングステン酸ナトリウム	Na ₂ WO ₄ ・2H ₂ O	2 μg	0.2 μg
モリブデン酸アンモニウム	(NH) ₆ Mo ₇ O ₂₄ ・4H ₂ O	18 μg	20 μg

3.3.5. 沸騰濃縮液の成分分析方法

沸騰濃縮試験中に抽出した溶液の成分を分析するために、昨年度導入した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 を用いた。分析対象とする元素は、B, Na, Mg, S, Cl, K, Ca, Sr, Br とする。試験溶液の成分元素である。

図 3-12 に溶液の採取場所を赤字丸数字①～⑤として記載した。採取孔にはセプタムを取り付けており、繰り返しの溶液採取に対しても漏洩を抑制できる。しかしながら初期の実験においては、採取孔のセプタムがサンプリングの注射針に詰まることが頻発し、サンプリングを困難にしたため、注射筒と注射針の間にコックを設けて、注射針を常にサンプリング口に取り付ける構造に変更して、閉塞の問題は解消した。液位が低い試験条件では、サンプリング孔①および⑤の位置が液面より低くなるため、溶液がサンプリングできないことがあった。なお、サンプリングは各条件の運転時間が終了する 5 分前から、①から順に開始し⑤のサンプリング終了と運転時間終了がほぼ同時となるように実施した。

ICP-MS 分析に用いる標準液は関東化学製 Na, Mg, Ca, Cl, Br, B, K, Sr 標準液 1,000 mg/L および SPEX 社製 S 標準液 1,000 mg/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 1 mg/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。この条件では内標準溶液と試料溶液中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 60 ng/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した。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した。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 水準で添加回収による精度の確認を行った。

3.3.6. 沸騰濃縮試験パラメータ

表 3-7 に沸騰濃縮試験パラメータを示す。試験条件は、液位 3 水準、熱流束 3 水準、沸騰濃縮試験時間 5 水準とし、合計ケース数は $3 \times 3 \times 5 = 45$ ケースとした。液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メラの液位が一定になるように制御した。三水準として TAF, TAF-100mm, TAF-200mm 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^2 の三水準とした。

沸騰濃縮時間は 5 水準とした。沸騰濃縮時間は、熱流束が異なるため、目標濃度を 5 水準に定めて熱流束毎に異なる値を設定することにした。発熱部沸騰濃縮濃度を簡易に評価する方法を検討する。加熱量 Q により溶液が沸騰蒸発する場合を考える。沸騰蒸発量は体積 V の時間変化として以下の式で表せる。

$$\rho_s h_{gl} \frac{dV}{dt} = Q \quad (1)$$

ρ_s は流入塩水密度 (kg/m^3)、 h_{gl} は蒸発潜熱 (J/kg)、 t は時間、である。 Q は受熱量である。初期塩水濃度 c_0 は初期塩水密度 ρ_0 、初期体積 V_0 、初期重量 m_0 と以下の関係にある。

$$c_0 = \frac{m_0}{\rho_0 V_0} \quad (2)$$

塩水が流入して、水蒸気として流出すると考えると、蒸発して損耗した溶液量が塩水として注入されると考えると、それぞれの溶液体積は同じであることから、時間 t (s) におけるこの体積を ΔV (m^3) と記す。水の密度を ρ_l (kg/m^3) を用いると、塩水の濃度 c (-) は次式で表される。

$$c = \frac{m_0 + (\rho_s - \rho_l) \Delta V}{\rho_0 V_0 - \rho_l \Delta V + \rho_s \Delta V} \quad (3)$$

沸騰濃縮時間 t は、初期塩水濃度 c_0 から塩水濃度 c に濃縮されるまでの時間として、式 (2) を式 (3) に代入することで、次式で表される。

$$t = \frac{c - c_0}{1 - c} \frac{\rho_0 \rho_l}{\rho_s - \rho_l} \frac{h_{gl} V_0}{Q} \quad (4)$$

目標濃度の 5 水準を 20, 30, 40, 50, 60 wt% と設定した場合の沸騰濃縮時間を式 (4) を用いて算出した。表 3-7 に熱流束の関数として、沸騰濃縮時間を記載した。なお、沸騰濃縮時間は式(4)にも示される通り、液位に関係ない値である。

表 3-8 に試験条件の命名法を示す。試験条件の略称は 8 桁の英数字で記載する。最初の 4 文字は試験パラメータ値を、続く 4 文字は試験日の月と日を表す。一例として、「SM2H0108」は溶液が海水、液位は TAF-100mm、試験時間は 30%濃縮相当、出力は 3.75kW、試験日が 1 月 8 日を示す。

表 3-7 短尺バンドル内沸騰濃縮試験パラメータ

定格出力	%	0.5	1.0	1.5
熱流束	kW/m ²	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%	20	1:03:38	0:31:49	0:21:13
	30	2:16:56	1:08:28	0:45:39
	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。

注：コラプスト液位は TAF, TAF - 100 mm, TAF - 200 mm の三水準である。
上記パラメータは液位に依らず共通である。

表 3-8 短尺バンドル試験条件の命名法

溶液	液位	時間	出力	日付
S:海水	L:低, TAF-200mm	1:20%濃縮相当	L:低, 1.25kW	MMDD 月日の 4桁
B:ホウ酸水	M:中, TAF-100mm	2:30%濃縮相当	M:中, 2.50kW	
	H:高 TAF	3:40%濃縮相当	H:高, 3.75kW	
		4:50%濃縮相当		
		5:60%濃縮相当		

一例として、「SM2H0108」は溶液が海水、液位は TAF - 100 mm、試験時間は 30 %濃縮相当、出力は 3.75 kW、試験日が 1 月 8 日を示す。

3.3.7. 沸騰濃縮試験結果

表 3-9 に沸騰濃縮試験結果を示す。4 条件では目標の沸騰濃縮時間に至らずに途中で停止した。該当する 4 条件では、沸騰濃縮時間を赤色で記載し、目標時間と対比した。残りの 41 条件では、目標通りの沸騰濃縮時間である。目標時間に達しなかった理由は後述する。液位が TAF (TAF 基準 - 0 m) の条件では 2 条件において、突沸が顕著となりバンドルヒータ内の海水が所定濃度までに濃縮されないと判断した。突沸が発生した際には、上部オーバーフロー管より溶液がオーバーフローし、下降管より頻繁に補給される状況になる。残りの 2 条件では、液位が TAF - 200 mm の条件で、上部ヒータ表面温度が警報温度 (250°C) を超えたことにより、安全回路が動作し、試験を中断せざるを得なかった。以下にそれぞれの状況を試験番号共に示す。

試験番号 9：沸騰開始から 2 時間 7 分後以降に突沸が継続した。溶液の消費量が増加し、回復が見込めないため、目標時間に達する前に試験を終了した。

試験番号 10：突沸が発生するため、オーバーフロー管に止栓をして試験を実施した。沸騰開始から 1 時間 27 分後、1 時間 32 分後、3 時間 28 分後に液位アラームあり、沸騰開始から約 1 時間 40 分後以降、溶液の消費量が増加しはじめ、溶液タンク内の溶液を使い果たしたため、目標時間に達する前に試験を終了した。

試験番号 35：試験開始直後に上部ロッド表面温度の上昇がみられたため、液位の下限側を 0.2 kPa 高く設定した。これにより試験は継続できたが、試験体のポリカーボネイト製の管体内面に熱損傷の可能性が認められたため、沸騰開始から 8 時間 7 分後に試験を終了した。

試験番号 45：沸騰開始から 2 時間 9 分後に上部ヒータロッド表面温度が警報温度を超えたため、安全装置が働き電源がトリップした。温度が 200°C 以下となったのを確認し、4 分後に電源を入れたが、再度トリップした。このため、沸騰開始から 2 時間 23 分後に試験を終了した。試験後、ポリカーボネイト製管体に熱による気泡の発生が認められた。

図 3-17 から図 3-61 に 45 条件に対する X 線 CT 撮影像をそれぞれ示す。1 条件当たり代表的な 6 枚の写真に掲載している。最初の図 (図 3-17) のみ、6 枚の図の意味を記載した。左上段が TAF 部の水平断面、右上段がスペーサ部の水平断面である。左中段は TAF 部の画像で有り、青線で示した Y 方向対角断面が右中段の鉛直断面である。同様に赤線で示した X 方向対角断面が左下段の鉛直断面である。右下段には透明ポリカーボネイト容器を画像処理により削除した三次元画像を示す。

各試験条件の影響を鳥瞰するために、TAF 部 (表 3-10~表 3-12)、スペーサ部 (表 3-13~表 3-15)、並びに鉛直断面 (表 3-16~表 3-18) について撮影画像を並べて示す。それぞれの表は試験条件の液位毎に整理しており、液位が TAF、TAF - 100 mm、TAF - 200 mm の順で記載した。水平断面では、横方向に熱流束の変化を、縦方向に沸騰濃縮時間 (目標濃度) の変化を示している。鉛直断面では写真のアスペクト比からその逆の構成としており、横方向に沸騰濃縮時間 (目標濃度) の変化を、縦方向に熱流束の変化を示している。

析出塩の分布を鳥瞰すると、沸騰濃縮試験時間が長くなるほど、塩の析出が顕著になる。目標塩水濃度が濃くなるため、当然の帰結である。鉛直方向の析出では、スペーサ部 (高さ TAF - 250 mm) より、TAF の方が析出量が多い。TAF より上の非加熱部では、析出量が顕著に減少することが分かる。塩分が飛来することに加え、表面での蒸発乾固が析出塩の固着に顕著になることを示唆している。同じ塩分濃度では、熱流束が大きい方が析出が少ない。熱流束が大きい方が放熱が大きい、沸騰系においては放熱量の差は小さい。本試験では沸騰濃縮時間は熱流束に反比例するため、熱流束が大きい方が、試験時間中の放熱量の積分値は小さくなる。それにもかかわらず熱流束が大きい方が析出量が少ない原因は、沸騰気泡による攪拌効果であると考えられる。攪拌効果が大きい高熱流速条件では、塩の固着が抑制されると考えられる。

続いて水平断面において塩の析出分布を考察する。スペーサ部では外周部に顕著に析出する。前述の通り低熱流束の方が析出が顕著であることから、ボイド率変動が小さい外周部で析出しやすいことが原因と考えられる。一方で、上部では中央部に顕著に析出する。液位が低い場合に析出が顕著となることから、ヒータロッドに囲まれる中央部では乾き面がより高温になり、塩水が蒸発乾固

し易くなることが原因と考えられる。

表 3-19、表 3-21、表 3-23 に沸騰濃縮試験中の溶液を採取して ICP-MS を用いて元素濃度分析を行った結果を、それぞれ液位 TAF, TAF - 100 mm, TAF - 200 mm に対して示す。表 3-20、表 3-22、表 3-24 は低濃度元素の傾向を把握するため、それぞれ表 3-19、表 3-21、表 3-23 の縦軸を拡大したグラフである。横軸の数字は溶液採取位置（図 3-12(c)のサンプリング箇所の上流側からの位置）である。

全体の傾向としては、塩濃度が低い時（目標濃度が 20 wt%以下の場合）には今回確認した 8 種類の元素濃度は全て、下降管内が最も低く、水平連結管から濃度が高い値を示し、ヒータ内部で高くなっている。これは、下流側の飽和状態にある濃縮海水が、連結管までは濃度拡散しているが、さらに上流の下降管までは濃度拡散していないこと示している。

一方、塩濃度が目標濃度が 30 wt%以上の場合、今回測定した 8 種類の元素の内、Ca と Sr を除く 6 種類は濃度が低い場合と同じ傾向を示した。すなわち下降管内が最も低く、連結管から濃度が上昇し始め、ヒータ内部で高くなる傾向を示している。しかしながら Ca 及び Sr 濃度は下流側に行くにつれて低くなり、他の 6 種類の元素とは異なる挙動を示している。Ca は塩濃度の上昇に従って溶解度の低い炭酸カルシウムなどとなって析出することで溶液中の濃度が減少したと考えられる。Sr についても溶解度の低い、例えば炭酸ストロンチウムとして析出したと考えられる。

以上より、短尺バンドル体系での人工海水の沸騰濃縮実験を熱流束、液位、沸騰濃縮時間をパラメータに 45 条件実施し、析出塩の分布を X 線 CT 撮影することで、パラメータの感度や析出場所の傾向を把握した。

表 3-9 沸騰濃縮試験結果

No.	ID (ファイル名)	熱流束 (kW/m ²)	TAF基準液 位 (mm)	沸騰濃縮時間 (HH:MM:SS)	備考
1	SH1L0214	3.0	0	1:03:38	
2	SH2L0214	3.0	0	2:16:56	
3	SH3L0213	3.0	0	3:54:41	
4	SH4L0210	3.0	0	6:11:32	
5	SH5L0217	3.0	0	9:36:48	
6	SH1M0220	6.0	0	0:31:49	
7	SH2M0204	6.0	0	1:08:28	
8	SH3M0212	6.0	0	1:57:21	1h47mから突沸発生
9	SH4M0212	6.0	0	2:26:00 < 3:05:46	2h07mから突沸発生
10	SH5M0228	6.0	0	3:35:00 < 4:48:24	1h40mから突沸発生
11	SH1H0204	9.0	0	0:21:13	
12	SH2H0204	9.0	0	0:45:39	30mから突沸発生
13	SH3H0121	9.0	0	1:18:14	開始時から突沸発生
14	SH4H0221	9.0	0	2:03:51	40mから突沸発生
15	SH5H0227	9.0	0	3:12:16	50mから突沸発生
16	SM1L0205	3.0	-100	1:03:38	
17	SM2L0129	3.0	-100	2:16:56	
18	SM3L0124	3.0	-100	3:54:41	
19	SM4L0123	3.0	-100	6:11:32	
20	SM5L0131	3.0	-100	9:36:48	
21	SM1M0205	6.0	-100	0:31:49	
22	SM2M0203	6.0	-100	1:08:28	
23	SM3M0130	6.0	-100	1:57:21	
24	SM4M0128	6.0	-100	3:05:46	
25	SM5M0127	6.0	-100	4:48:24	
26	SM1H0128	9.0	-100	0:21:13	
27	SM2H0203	9.0	-100	0:45:39	
28	SM3H0130	9.0	-100	1:18:14	
29	SM4H0122	9.0	-100	2:03:51	
30	SM5H0120	9.0	-100	3:12:16	
31	SL1L0205	3.0	-200	1:03:38	
32	SL2L0221	3.0	-200	2:16:56	
33	SL3L0226	3.0	-200	3:54:41	
34	SL4L0224	3.0	-200	6:11:32	
35	SL5L0225	3.0	-200	8:07:00 < 9:36:48	熱損傷の懸念から中断
36	SL1M0219	6.0	-200	0:31:49	
37	SL2M0218	6.0	-200	1:08:28	
38	SL3M0219	6.0	-200	1:57:21	
39	SL4M0207	6.0	-200	3:05:46	
40	SL5M0206	6.0	-200	4:48:24	
41	SL1H0220	9.0	-200	0:21:13	
42	SL2H0220	9.0	-200	0:45:39	
43	SL3H0219	9.0	-200	1:18:14	
44	SL4H0116	9.0	-200	2:03:51	
45	SL5H0117	9.0	-200	2:23:00 < 3:12:16	表面温度高により中断

赤字は目標時間より早く終了した時間を示す。

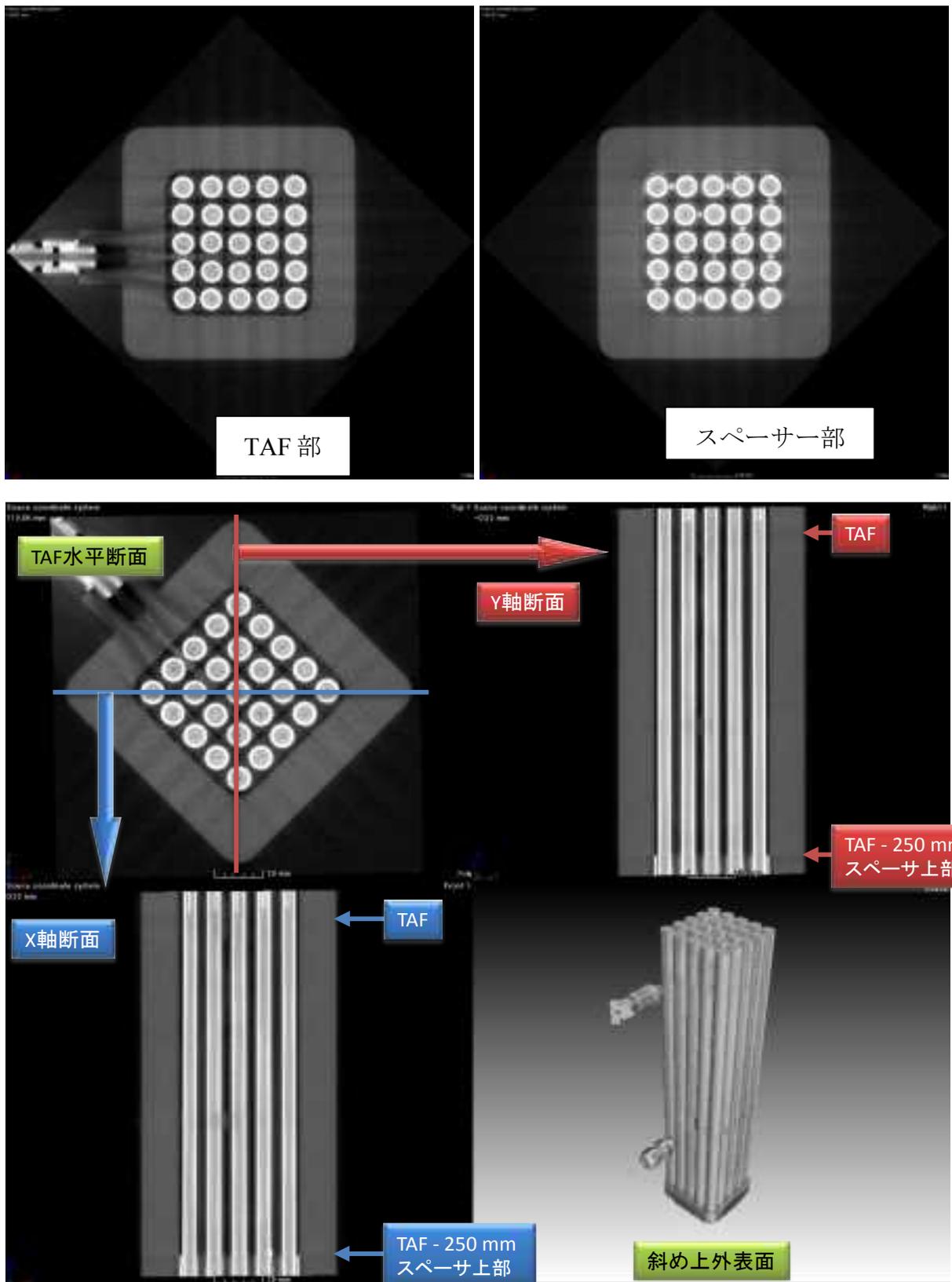


図 3-17 X線 CT 撮影像による析出塩分布 SH1L

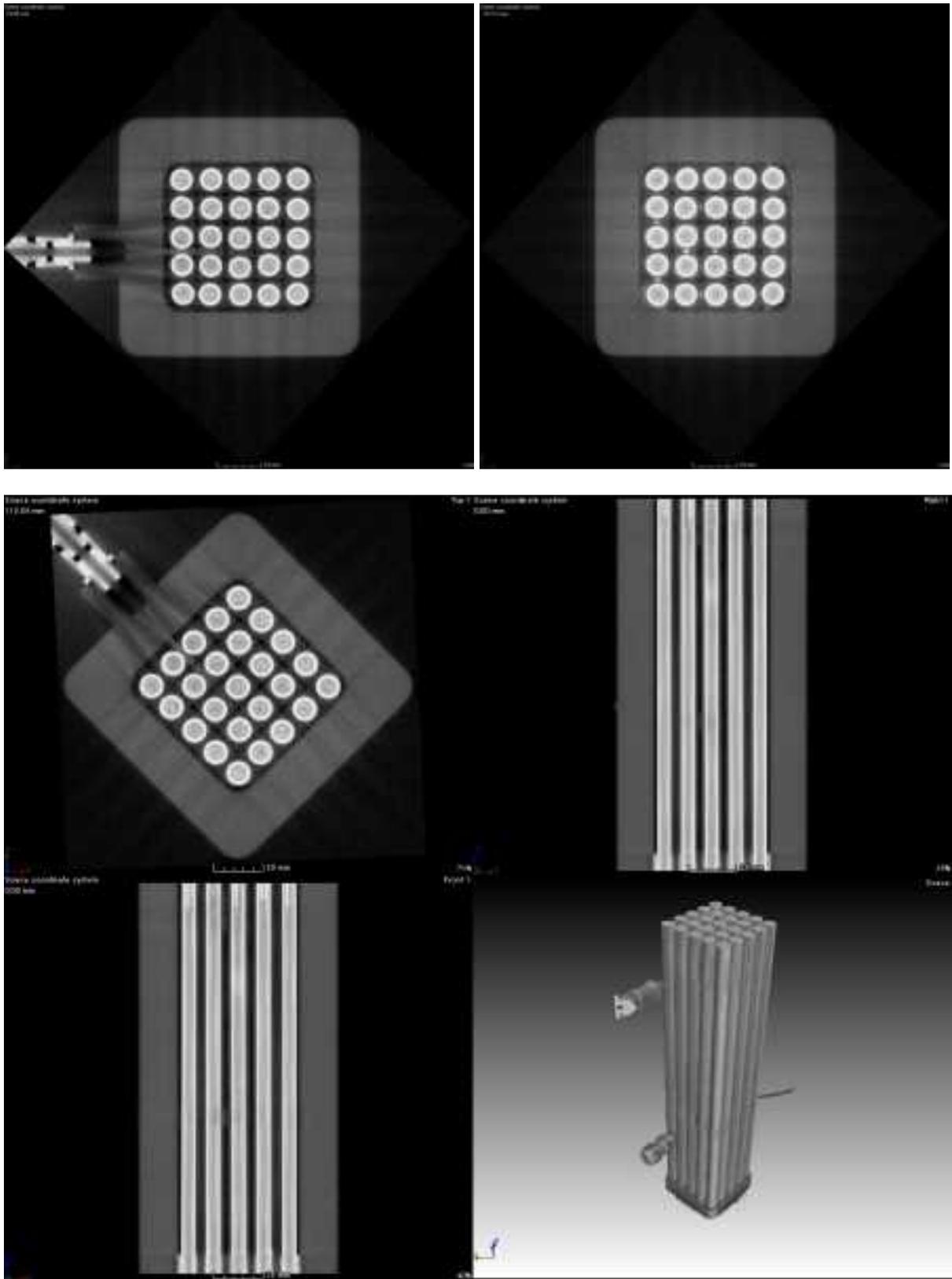


図 3-18 X線 CT 撮影像による析出塩分布 SH2L

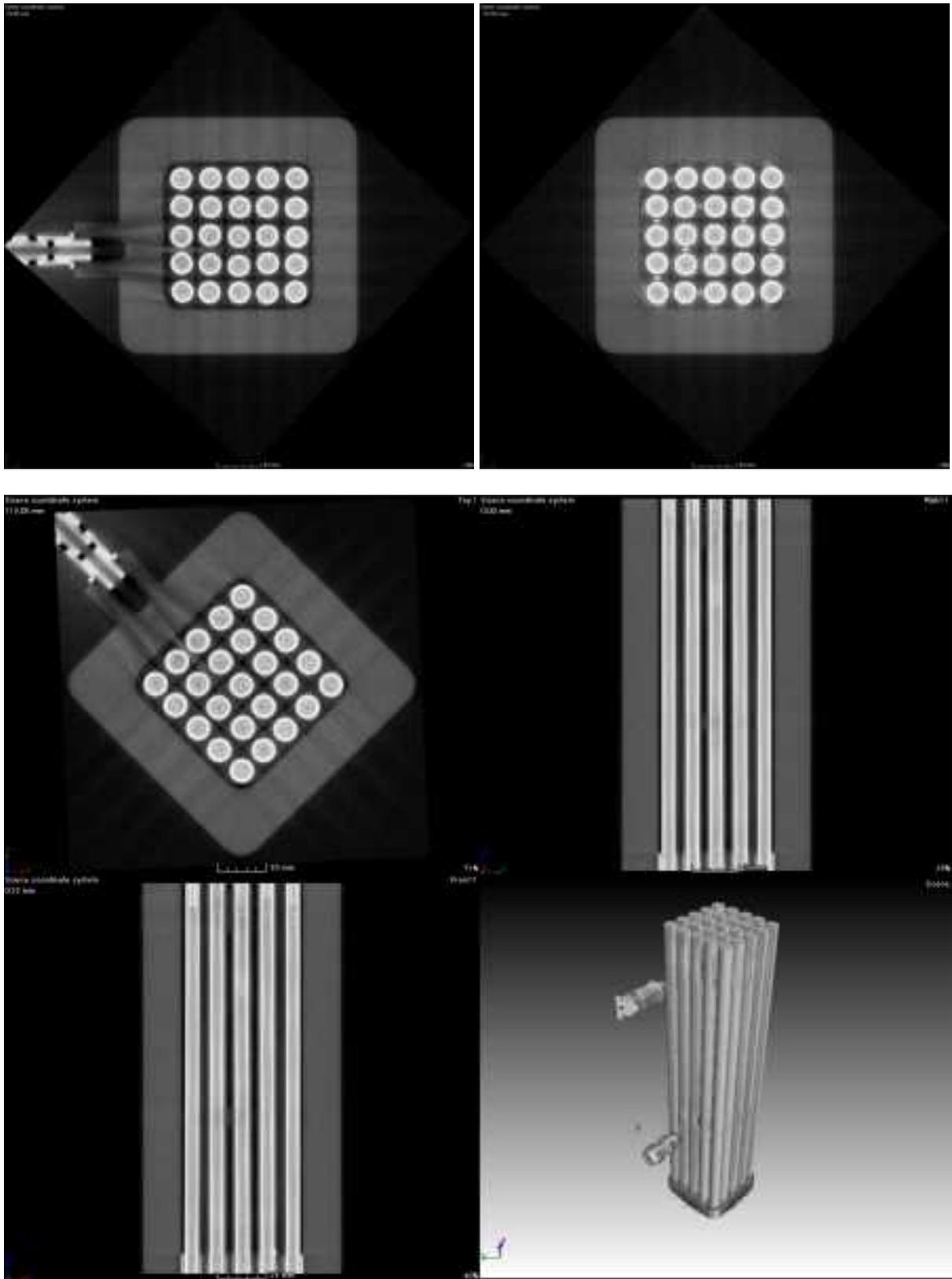


図 3-19 X線 CT 撮影像による析出塩分布 SH3L

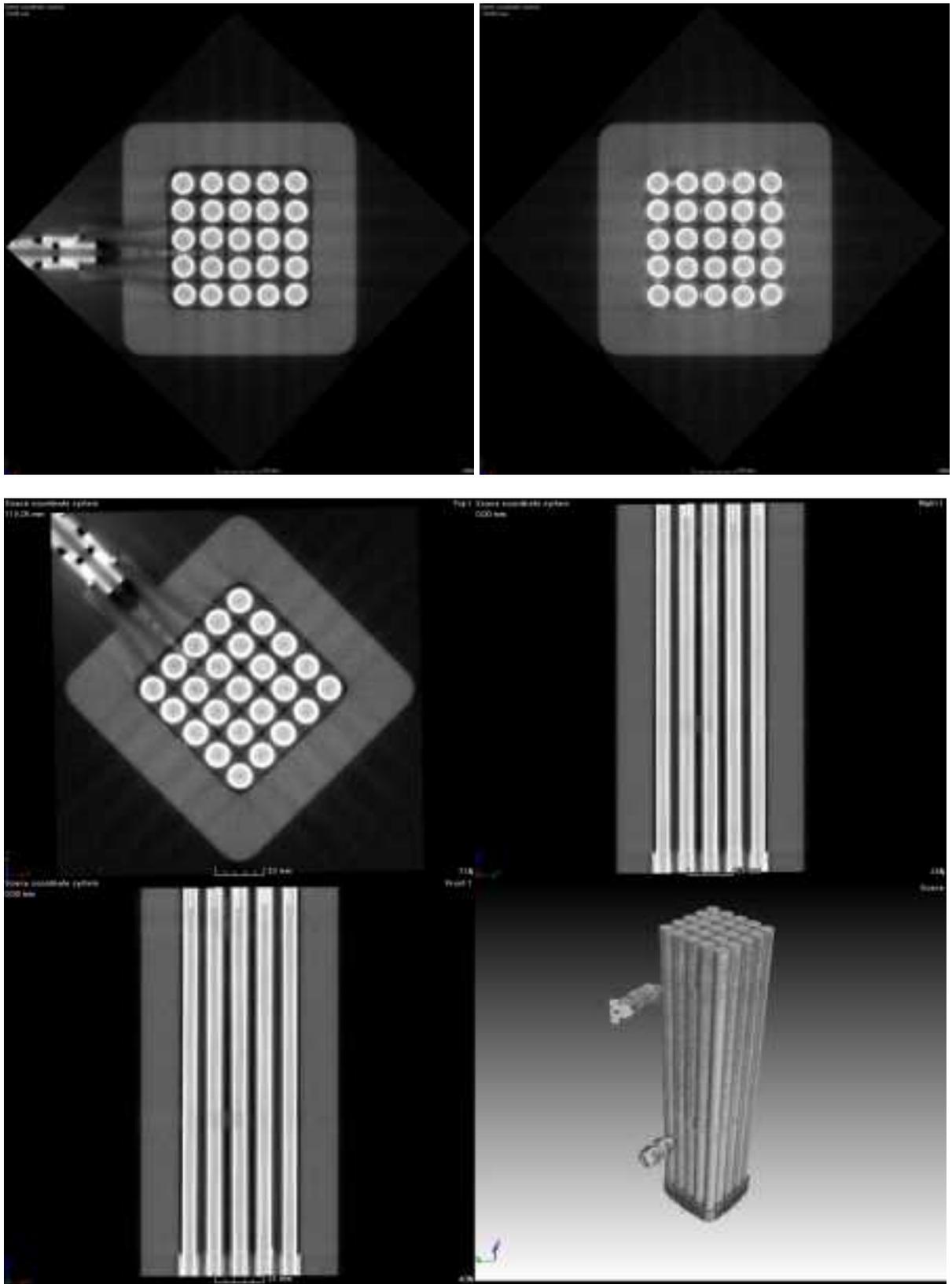


図 3-20 X線 CT 撮影像による析出塩分布 SH4L

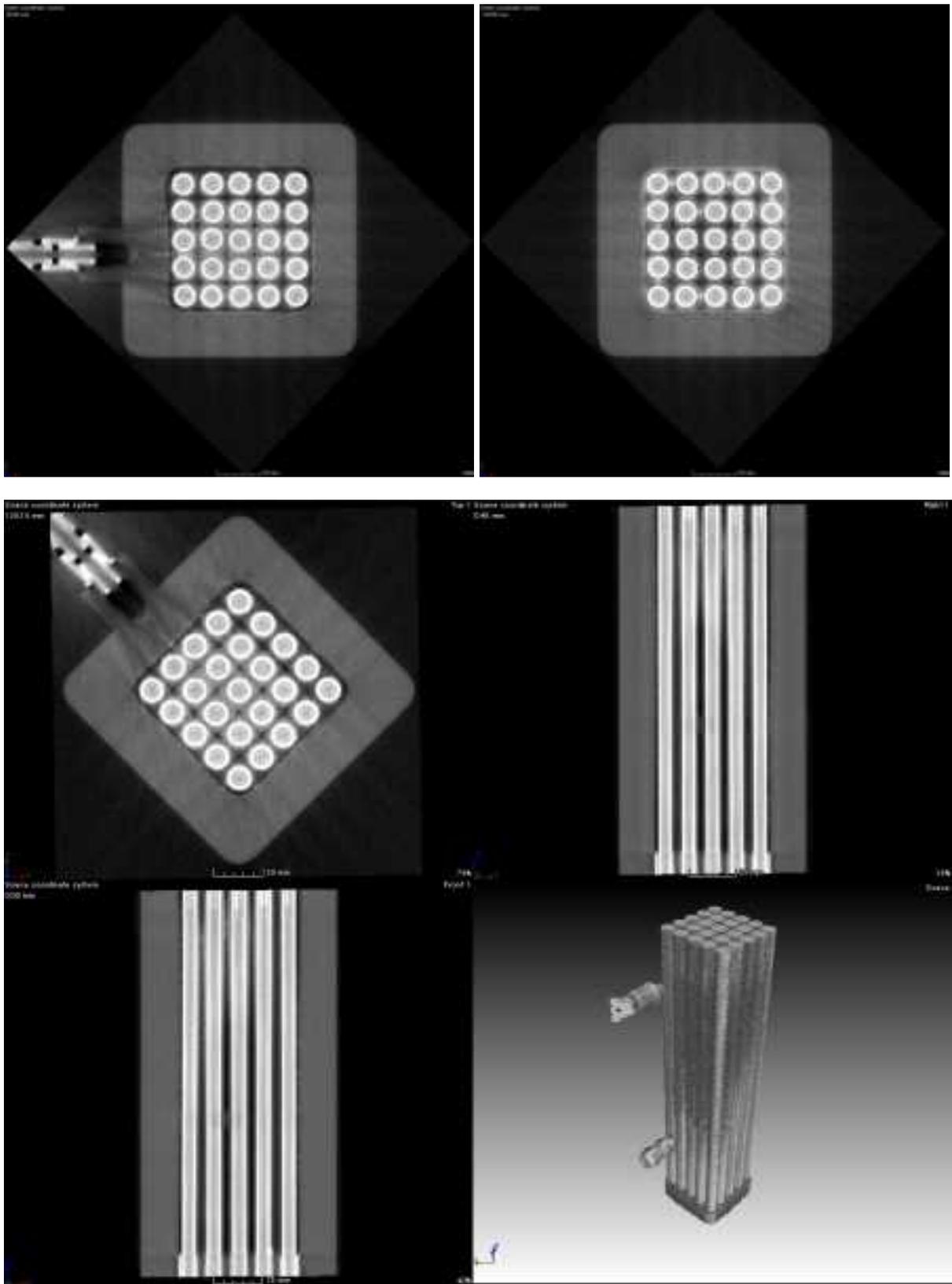


図 3-21 X線 CT 撮影像による析出塩分布 SH5L

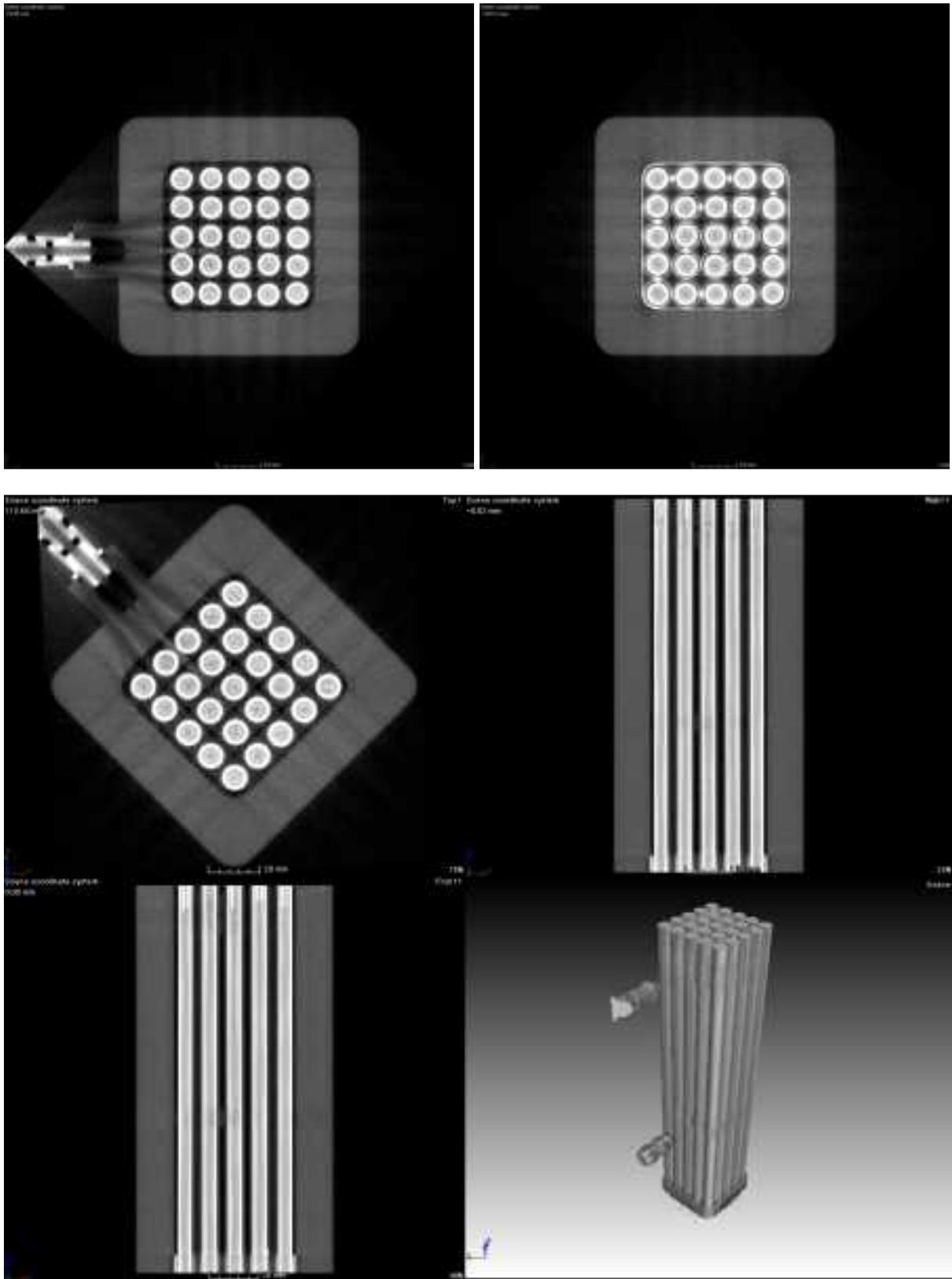


図 3-22 X線 CT 撮影像による析出塩分布 SH1M

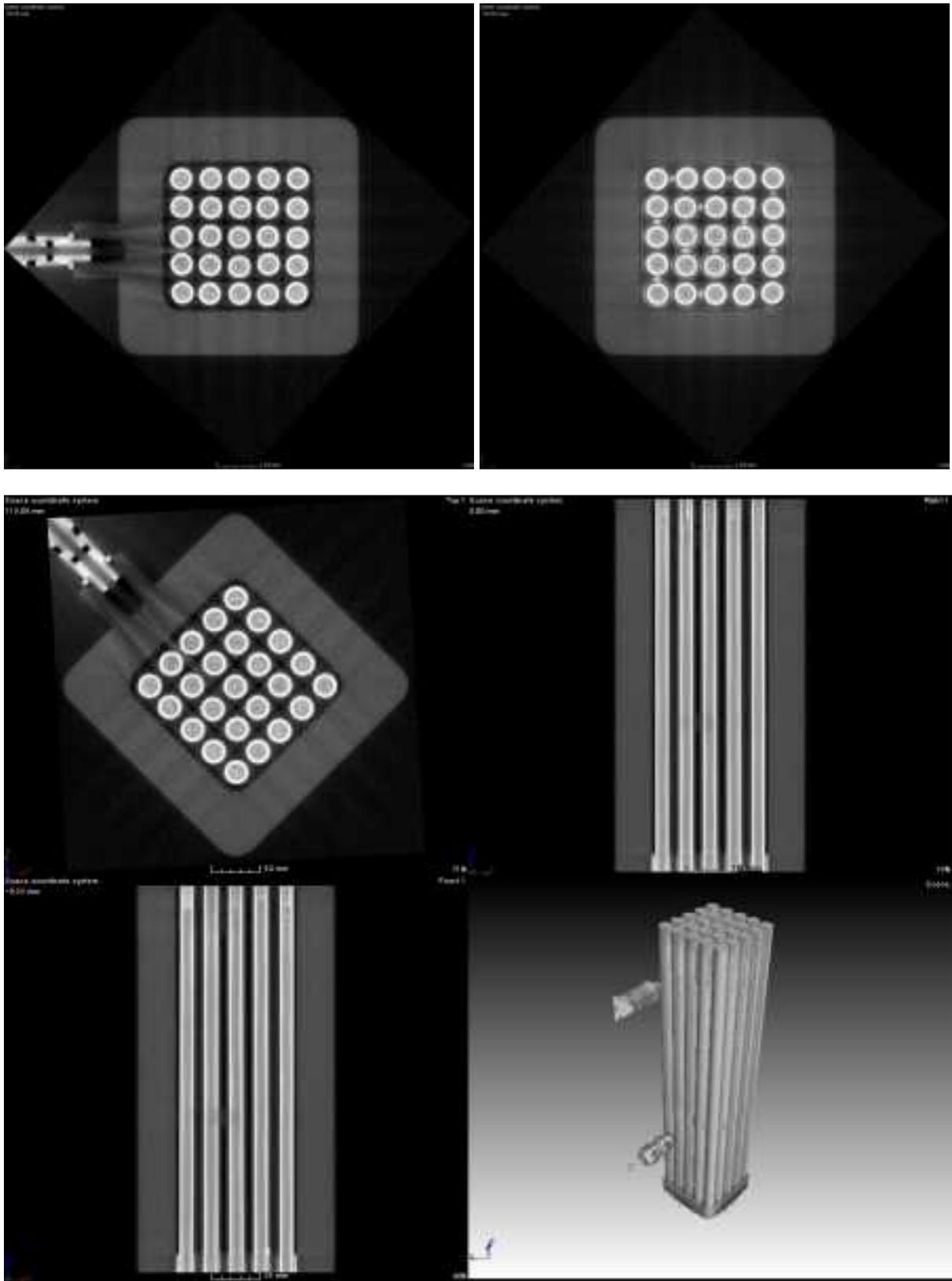


図 3-23 X線 CT 撮影像による析出塩分布 SH2M

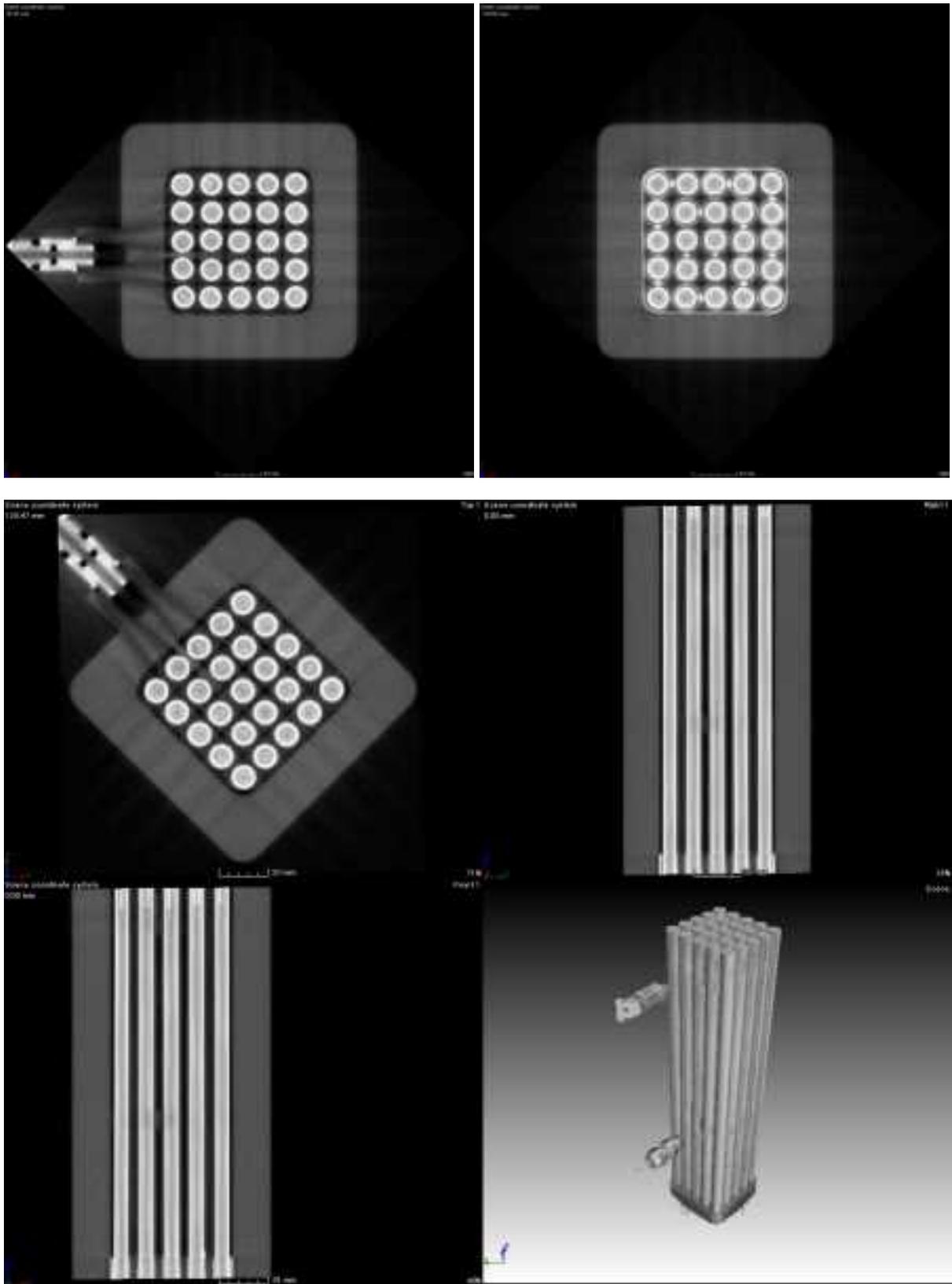


図 3-24 X線 CT 撮影像による析出塩分布 SH3M

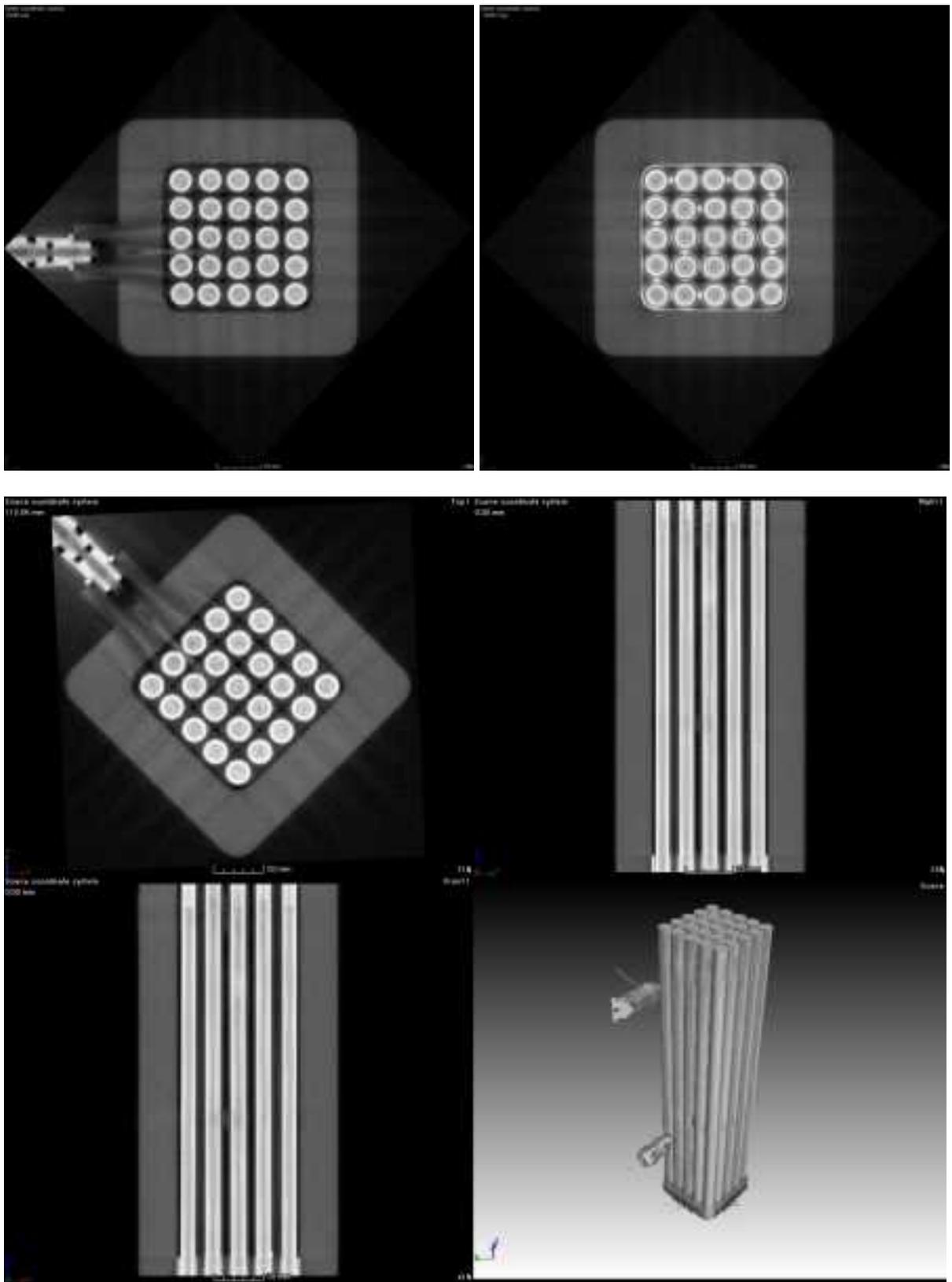


図 3-25 X線 CT 撮影像による析出塩分布 SH4M

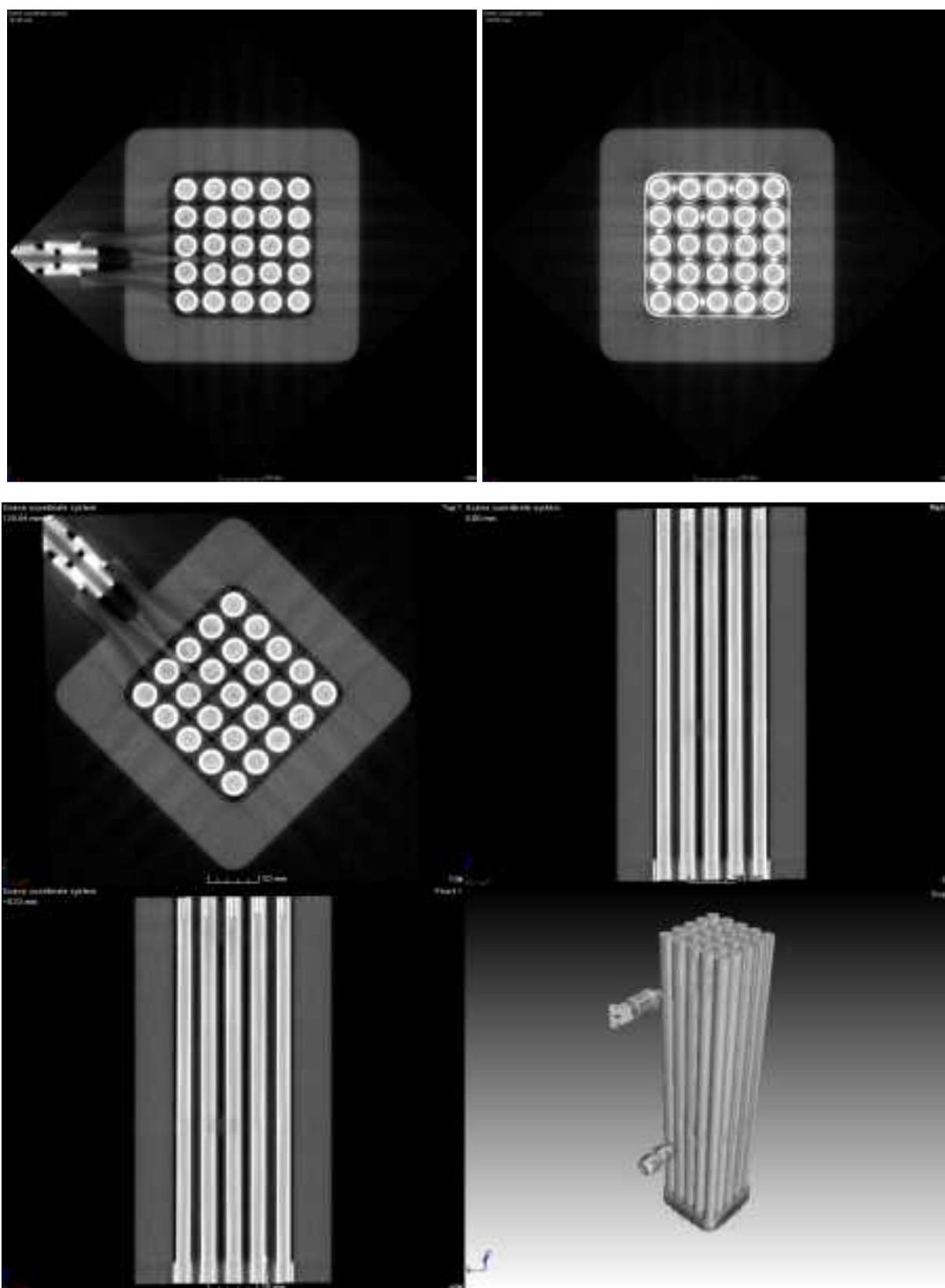


図 3-26 X線 CT 撮影像による析出塩分布 SH5M

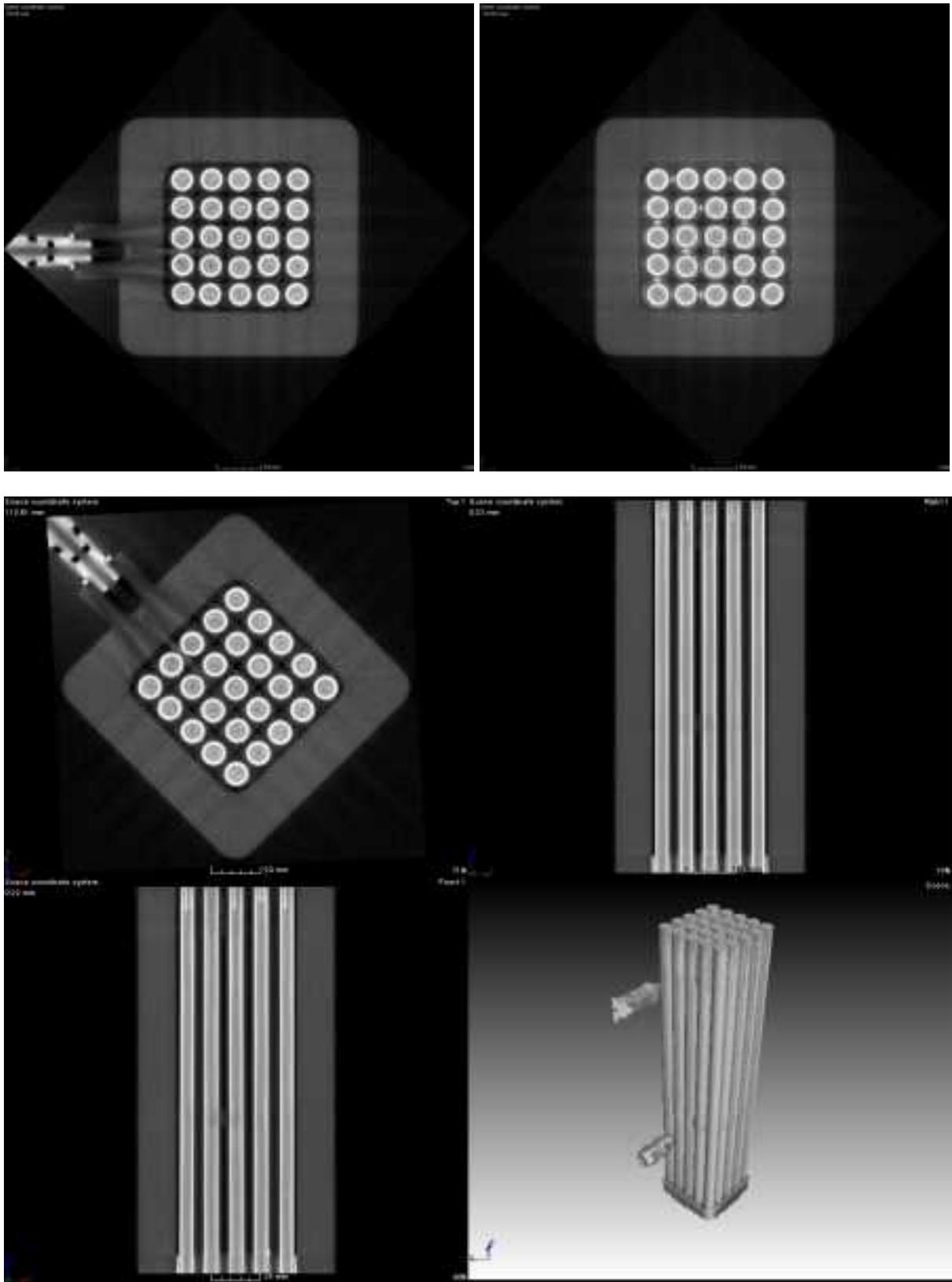


図 3-27 X線 CT 撮影像による析出塩分布 SH1H

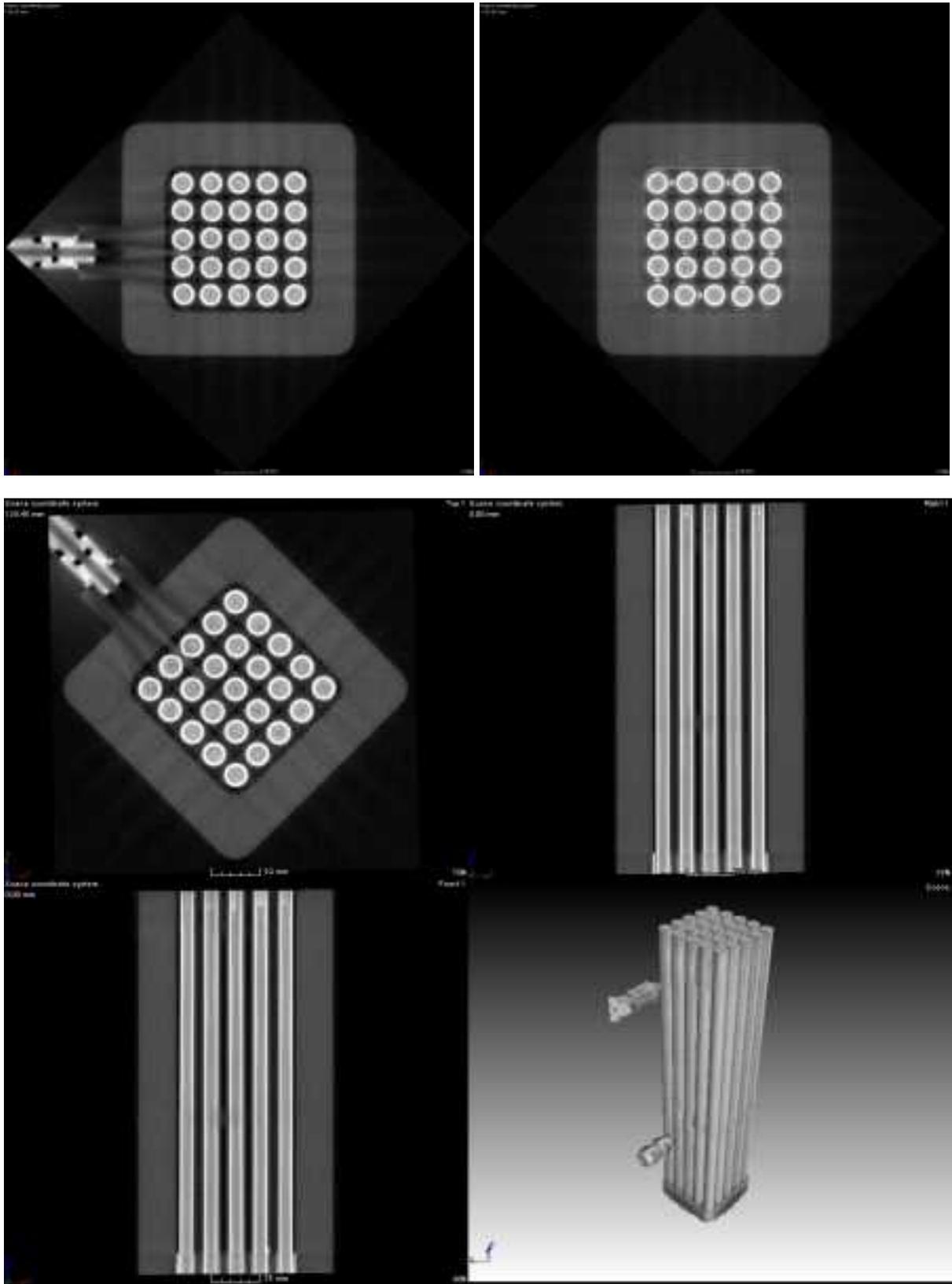


図 3-28 X線 CT 撮影像による析出塩分布 SH2H

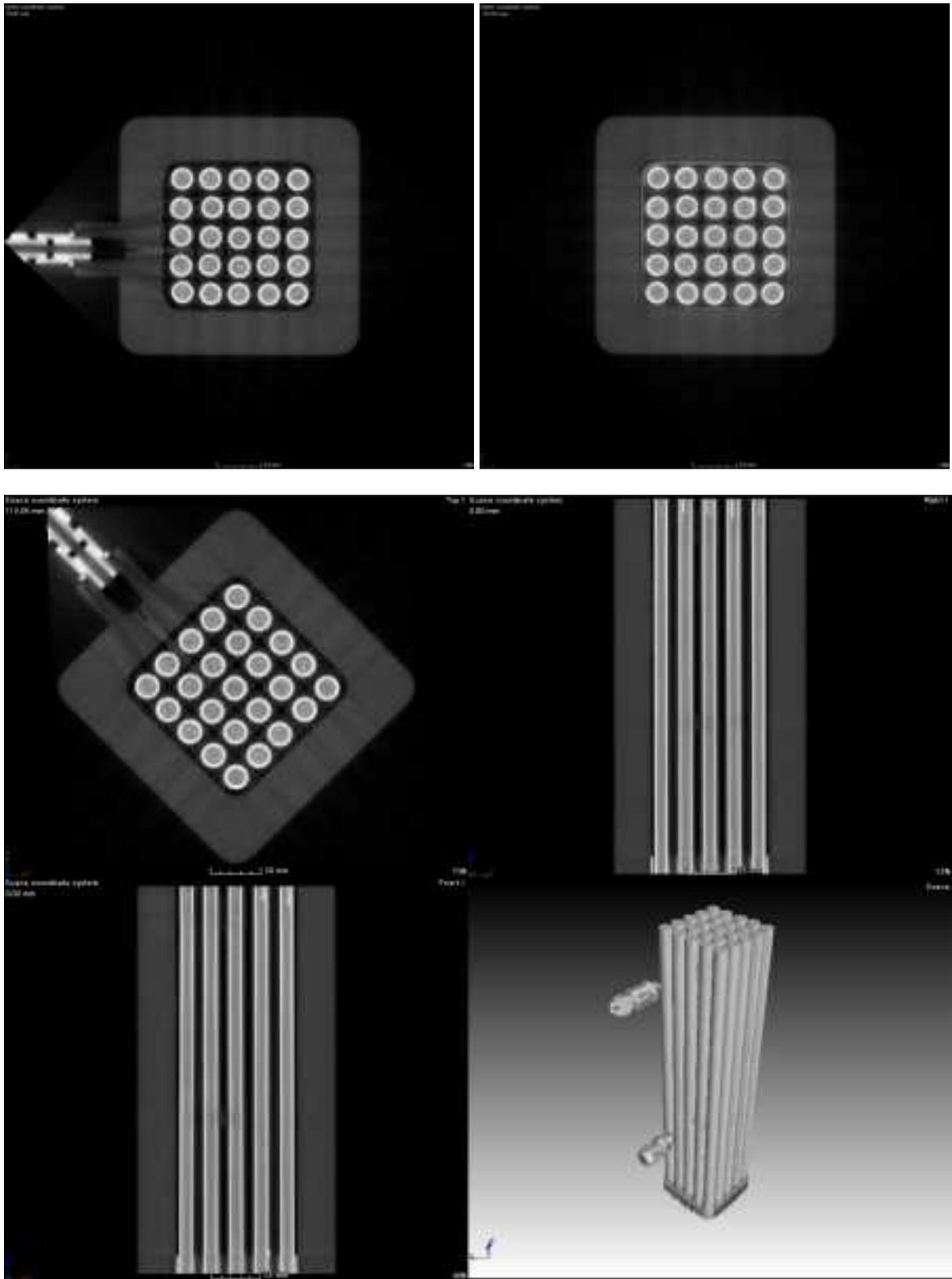


図 3-29 X線 CT 撮影像による析出塩分布 SH3H

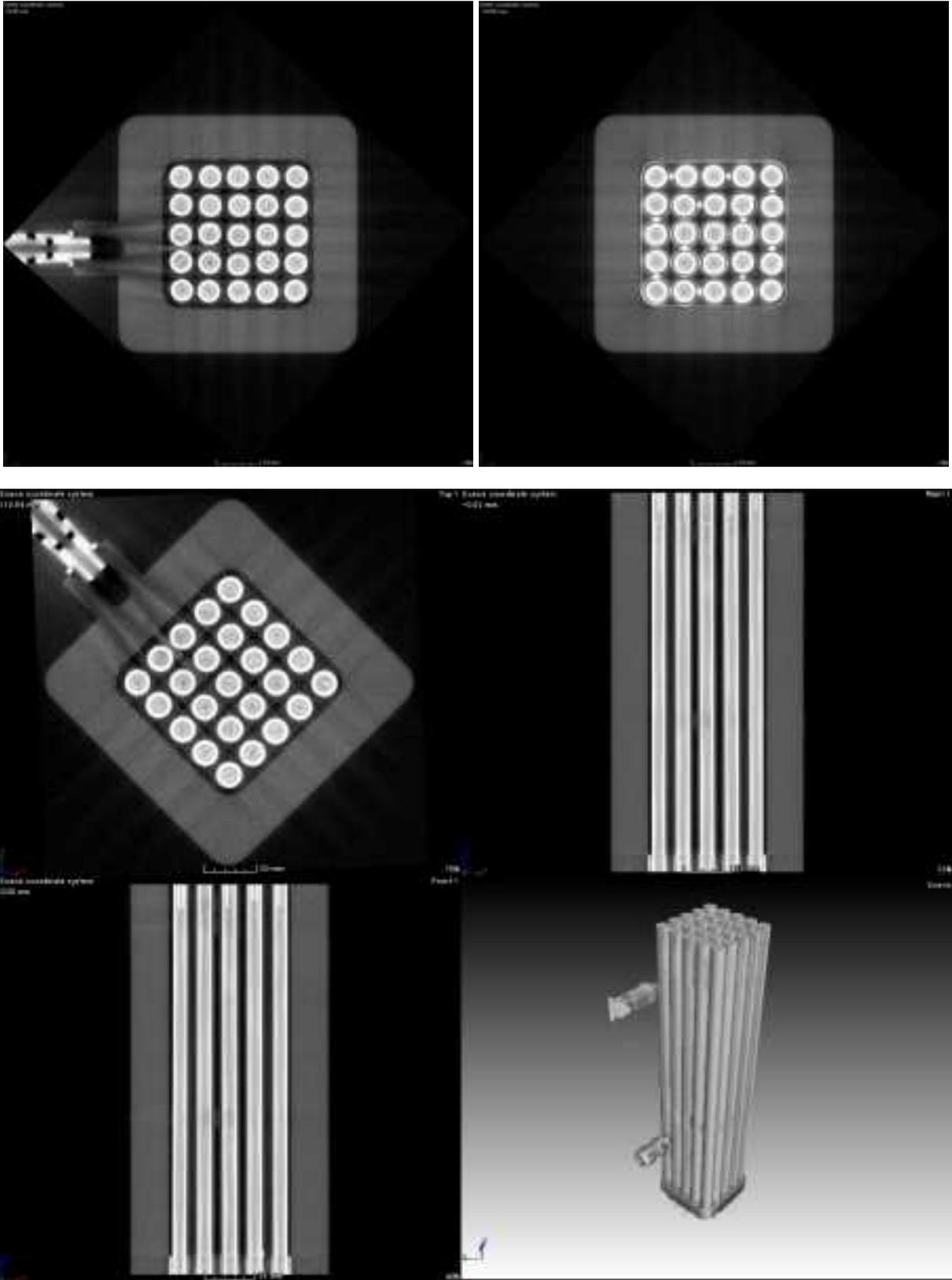


図 3-30 X線 CT 撮影像による析出塩分布 SH4H

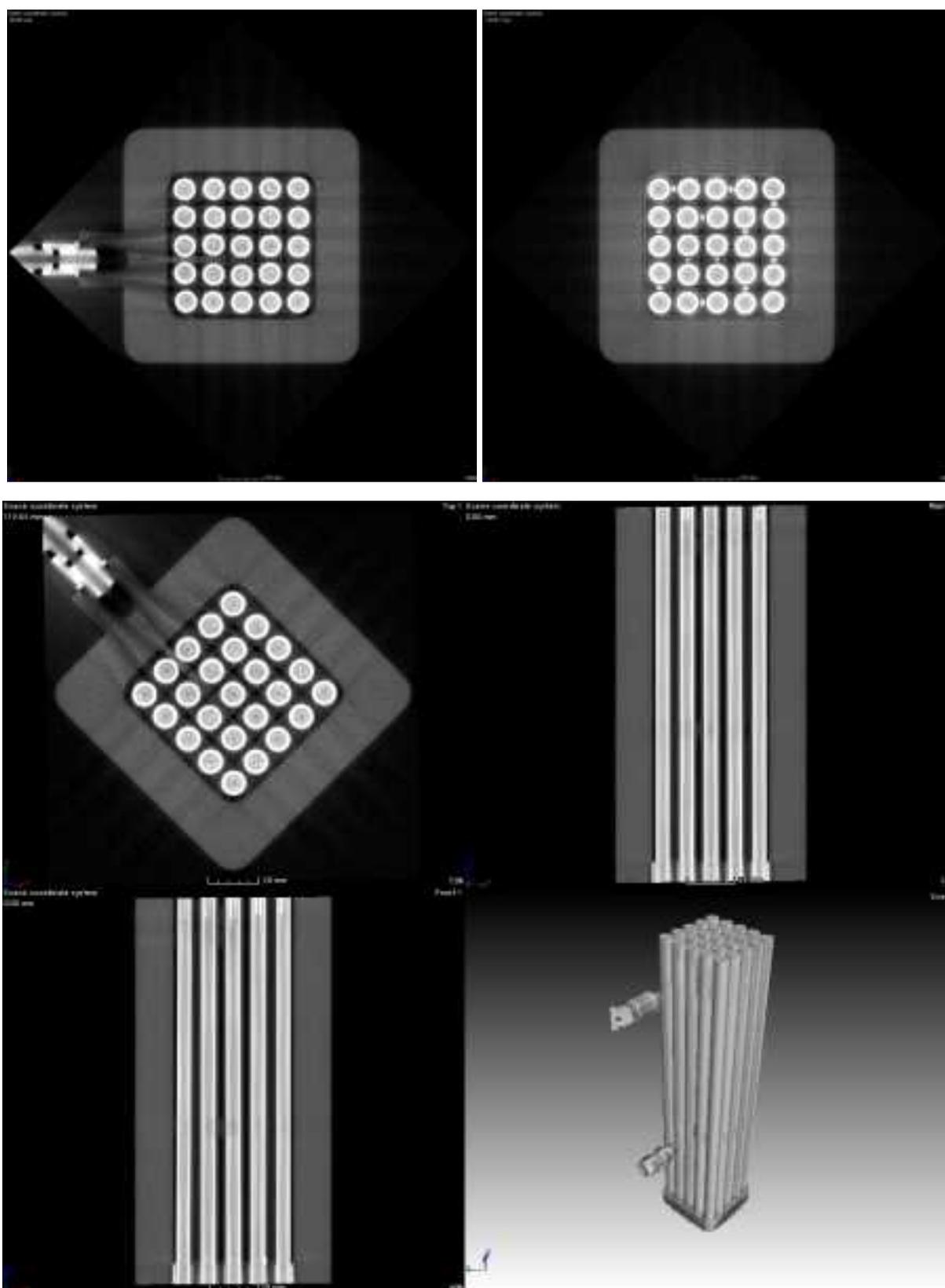


図 3-31 X線 CT 撮影像による析出塩分布 SH5H

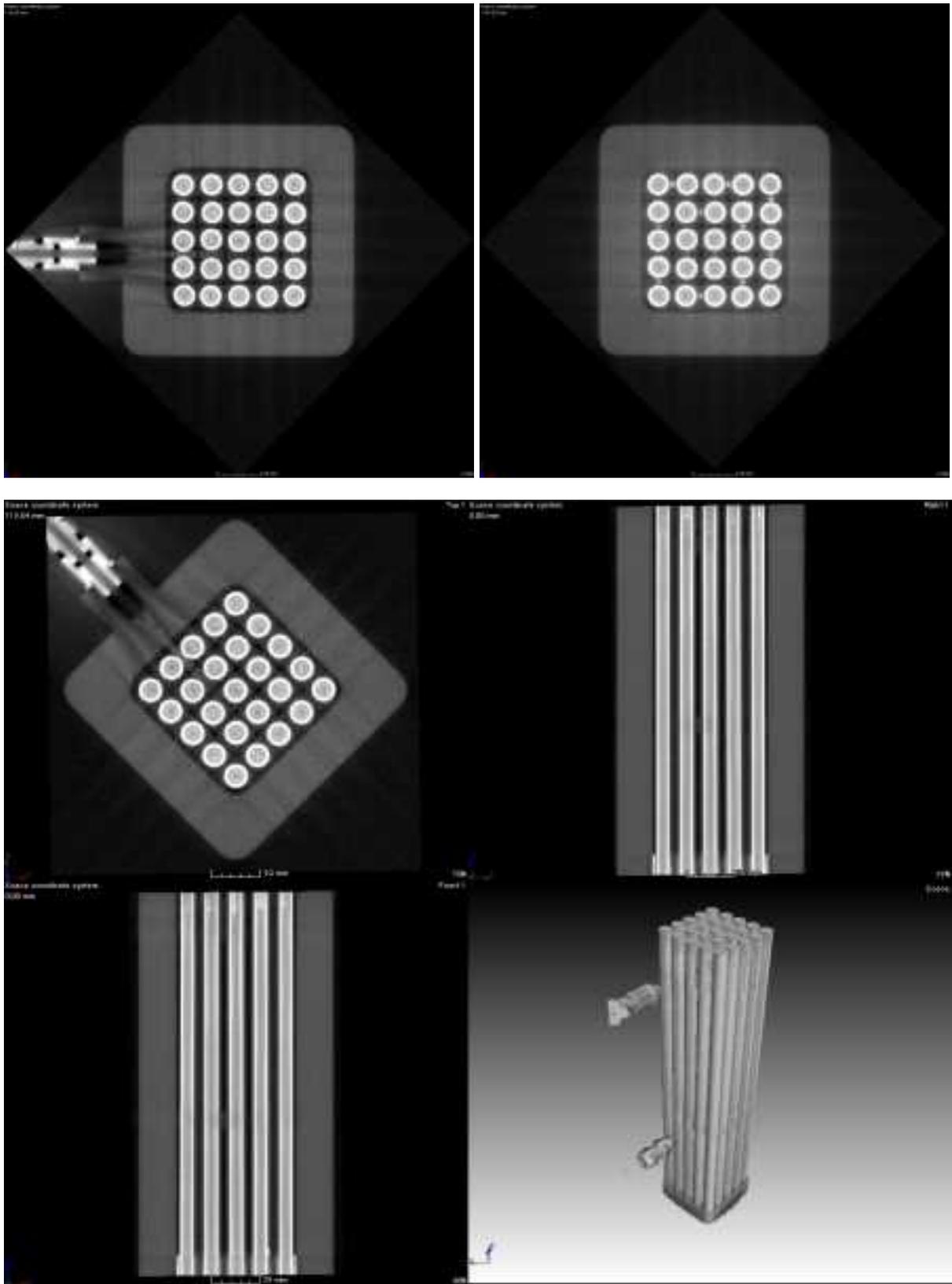


図 3-32 X線 CT 撮影像による析出塩分布 SM1L

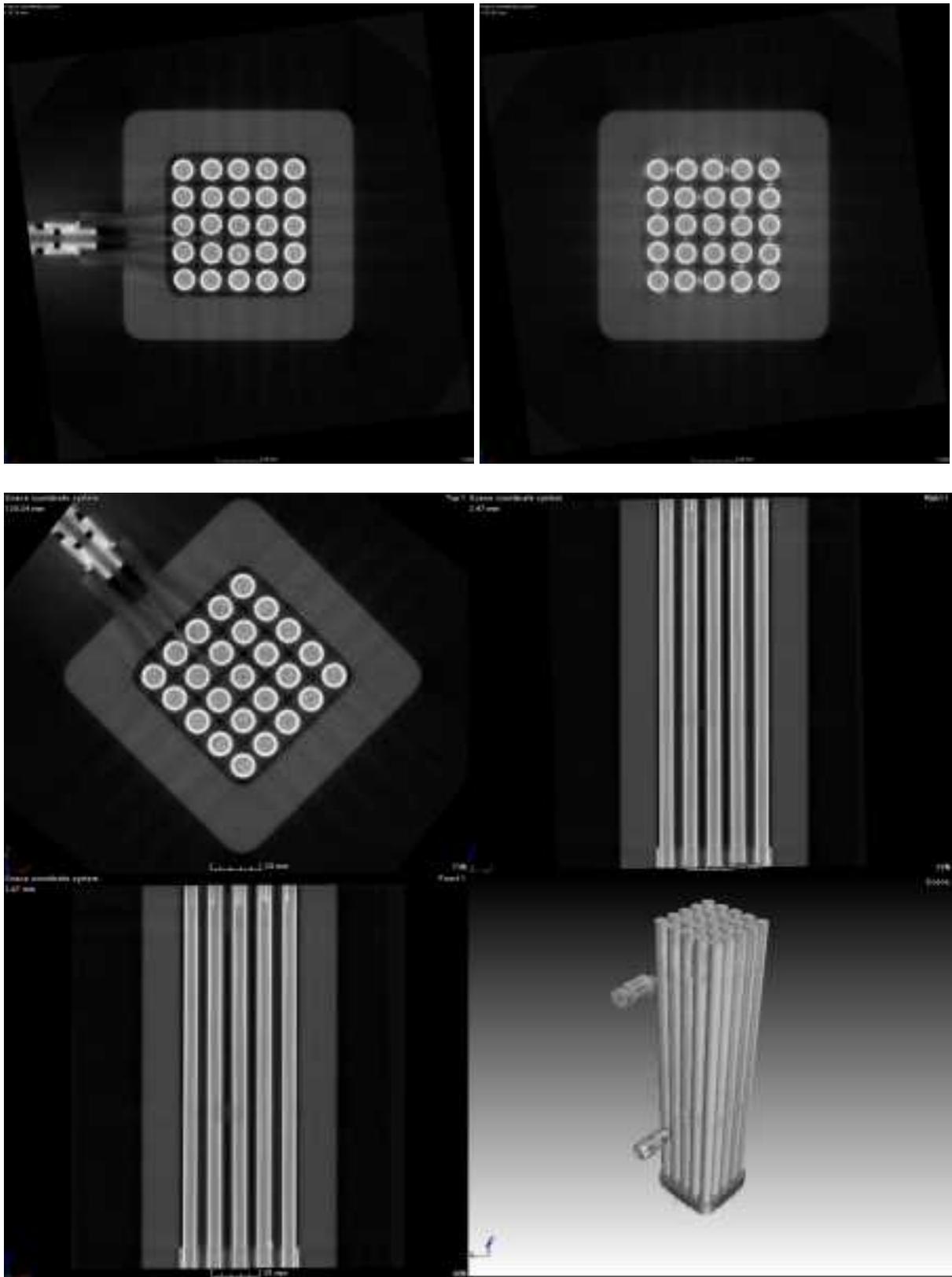


図 3-33 X線 CT 撮影像による析出塩分布 SM2L

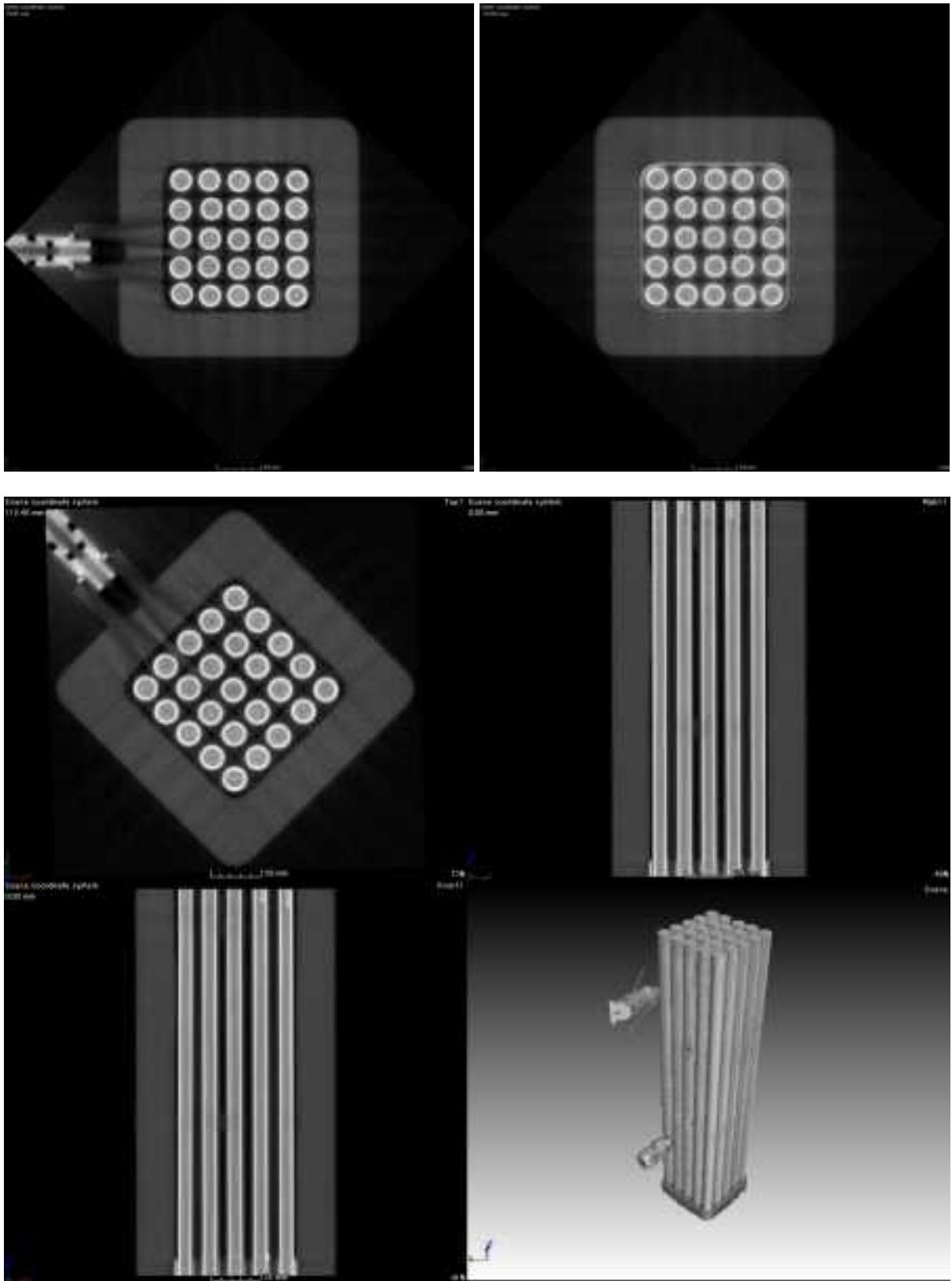


図 3-34 X線 CT 撮影像による析出塩分布 SM3L

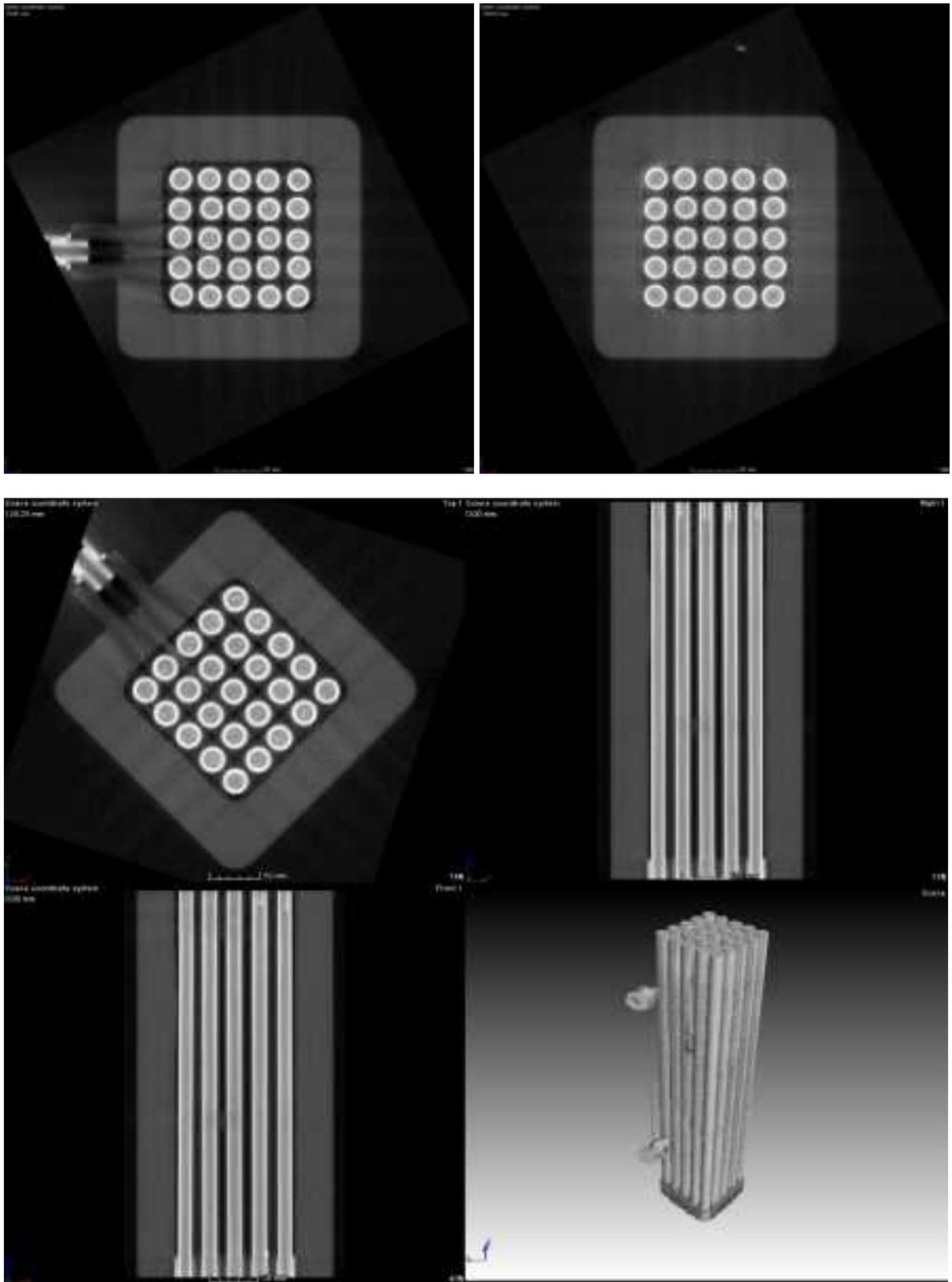


図 3-35 X線 CT 撮影像による析出塩分布 SM4L

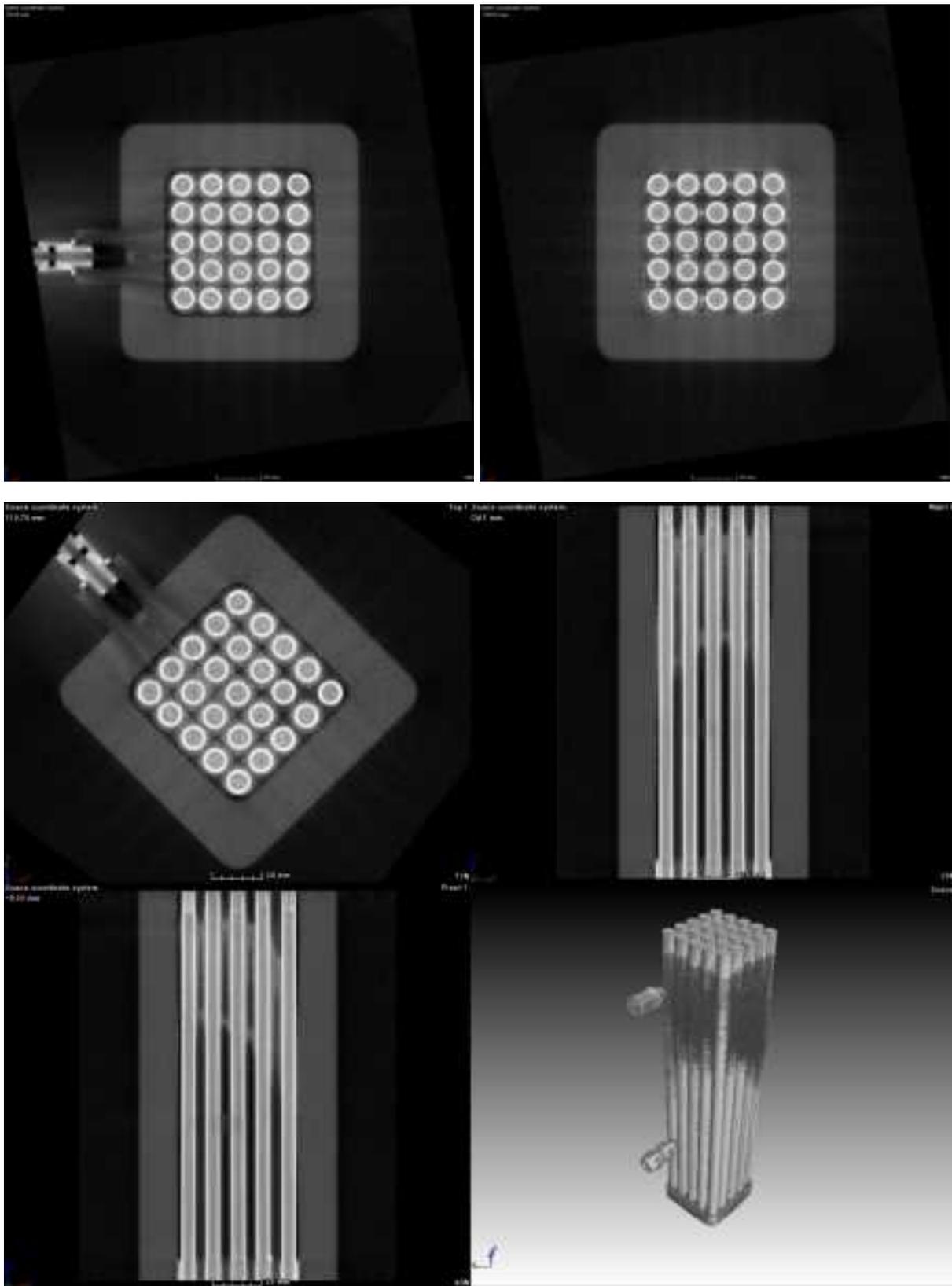


図 3-36 X線 CT 撮影像による析出塩分布 SM5L

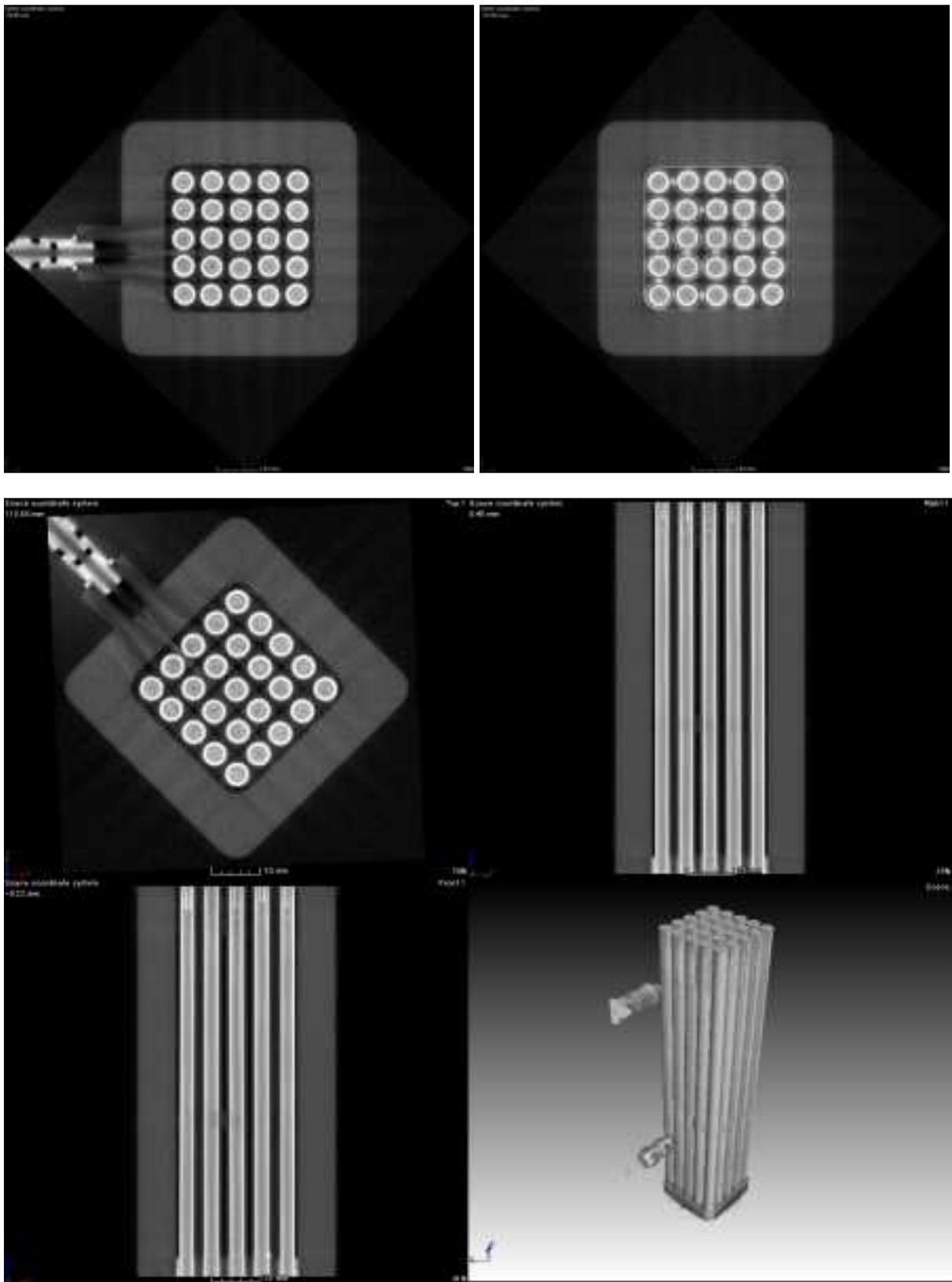


図 3-37 X線 CT 撮影像による析出塩分布 SM1M

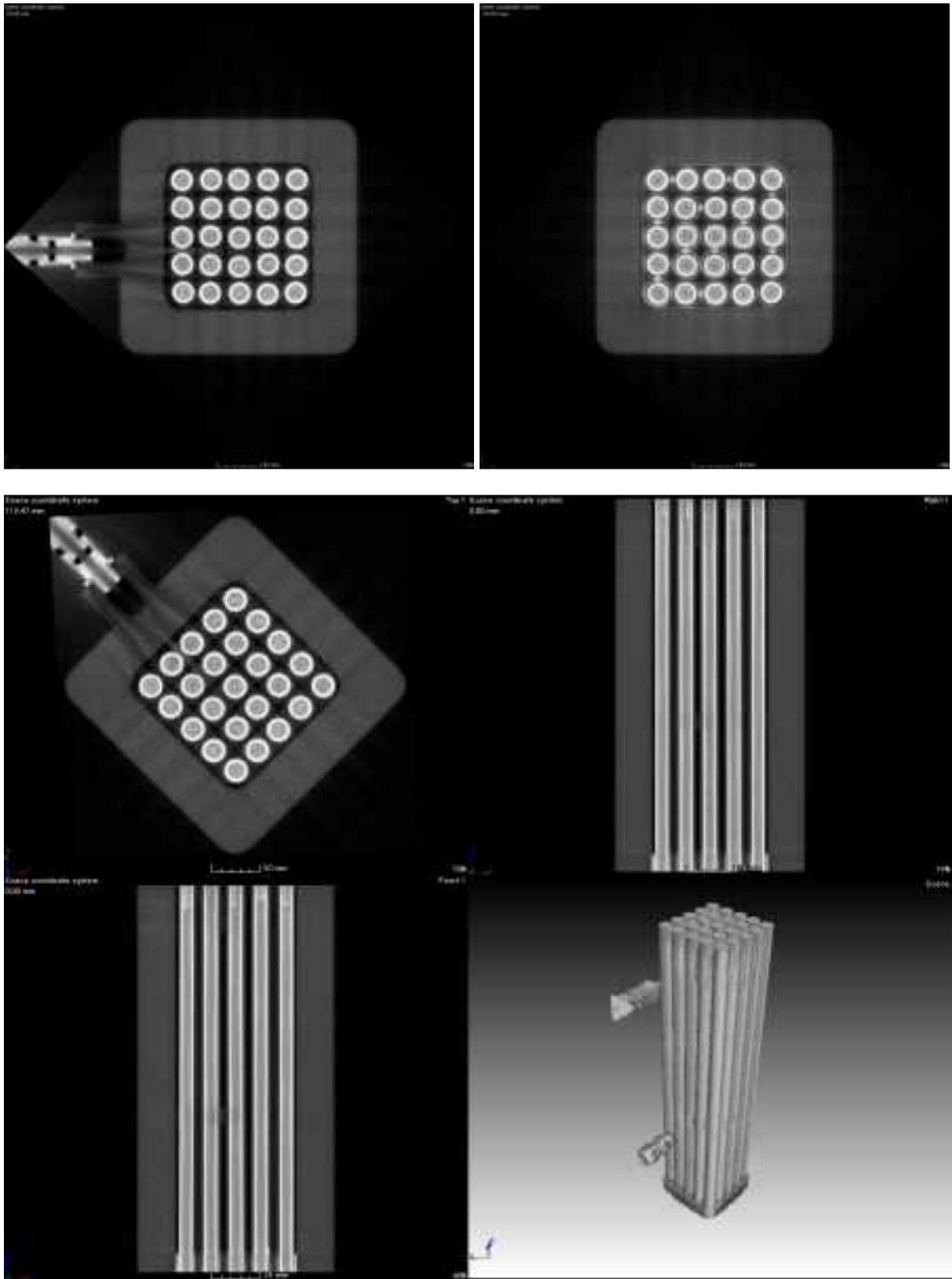


図 3-38 X線 CT 撮影像による析出塩分布 SM2M

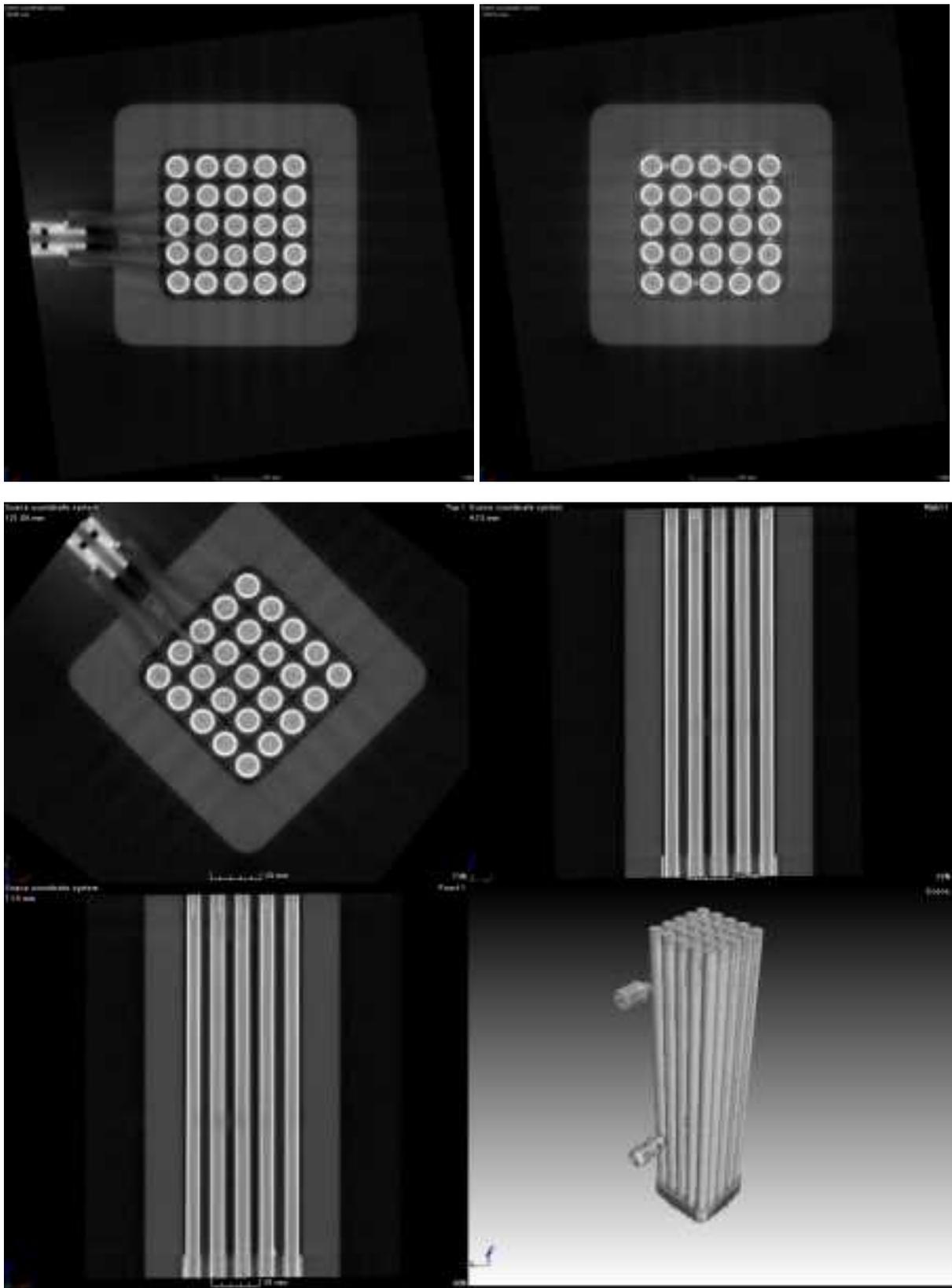


図 3-39 X線 CT 撮影像による析出塩分布 SM3M

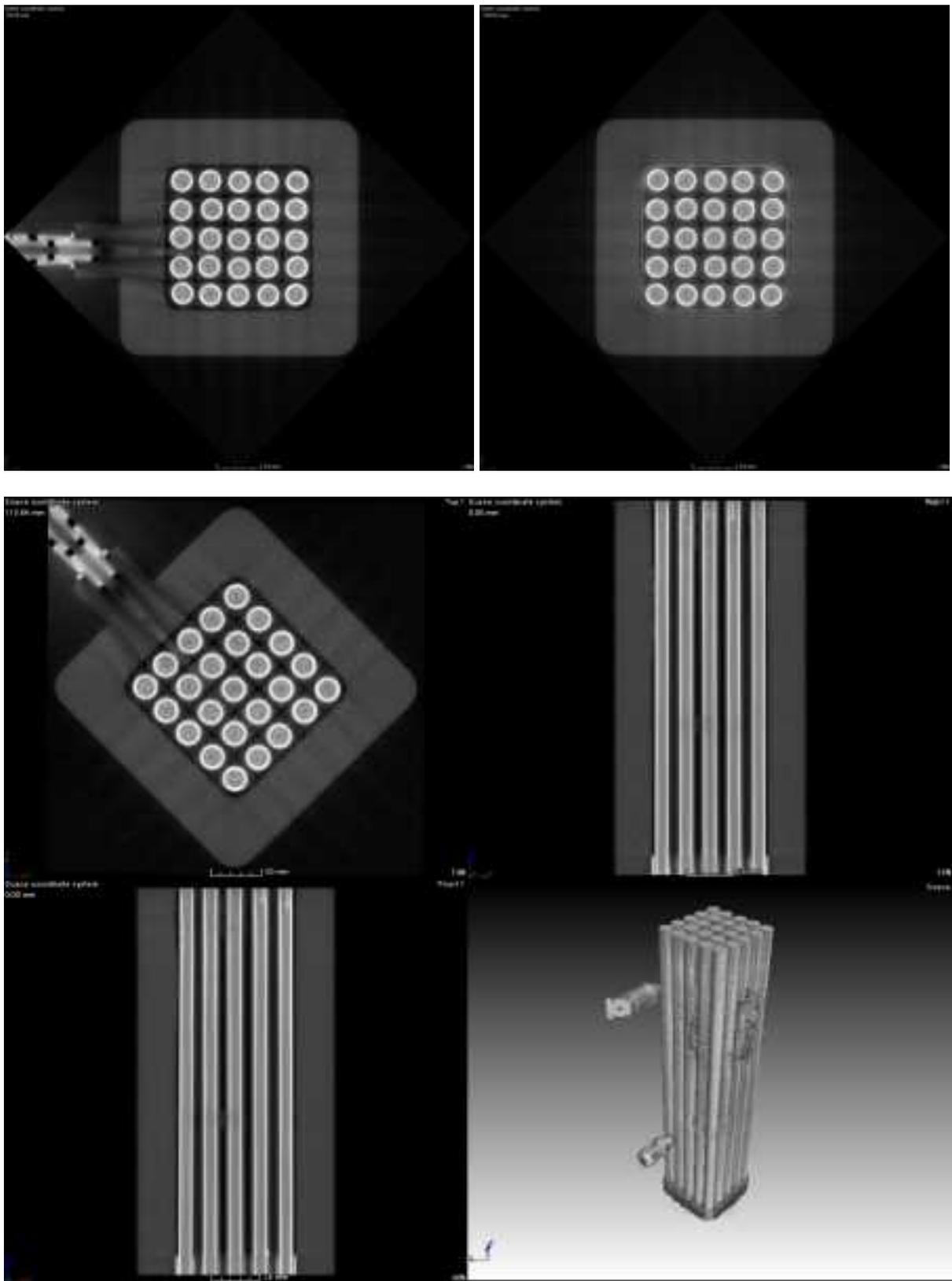


図 3-40 X線 CT 撮影像による析出塩分布 SM4M

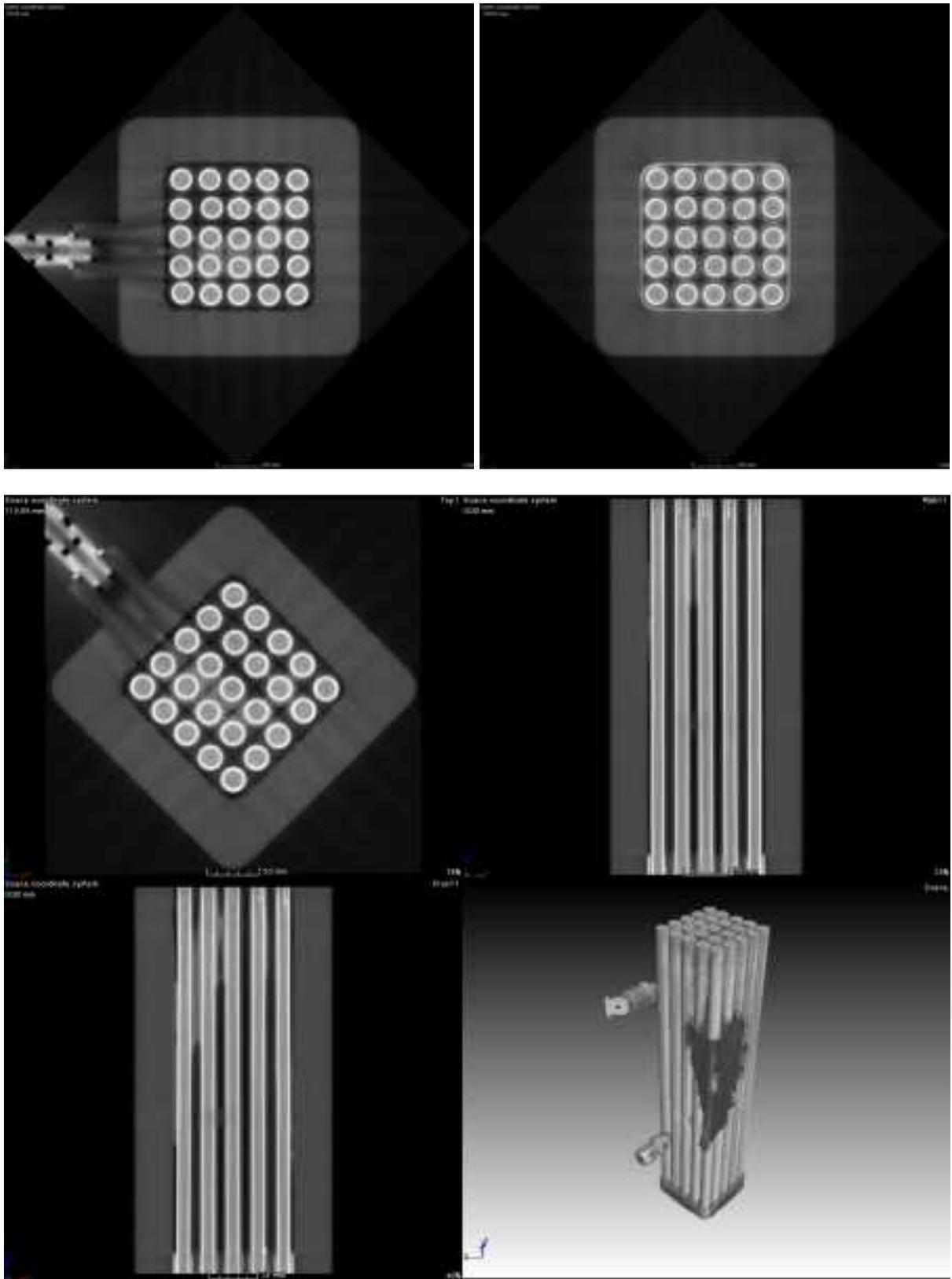


図 3-41 X線 CT 撮影像による析出塩分布 SM5M

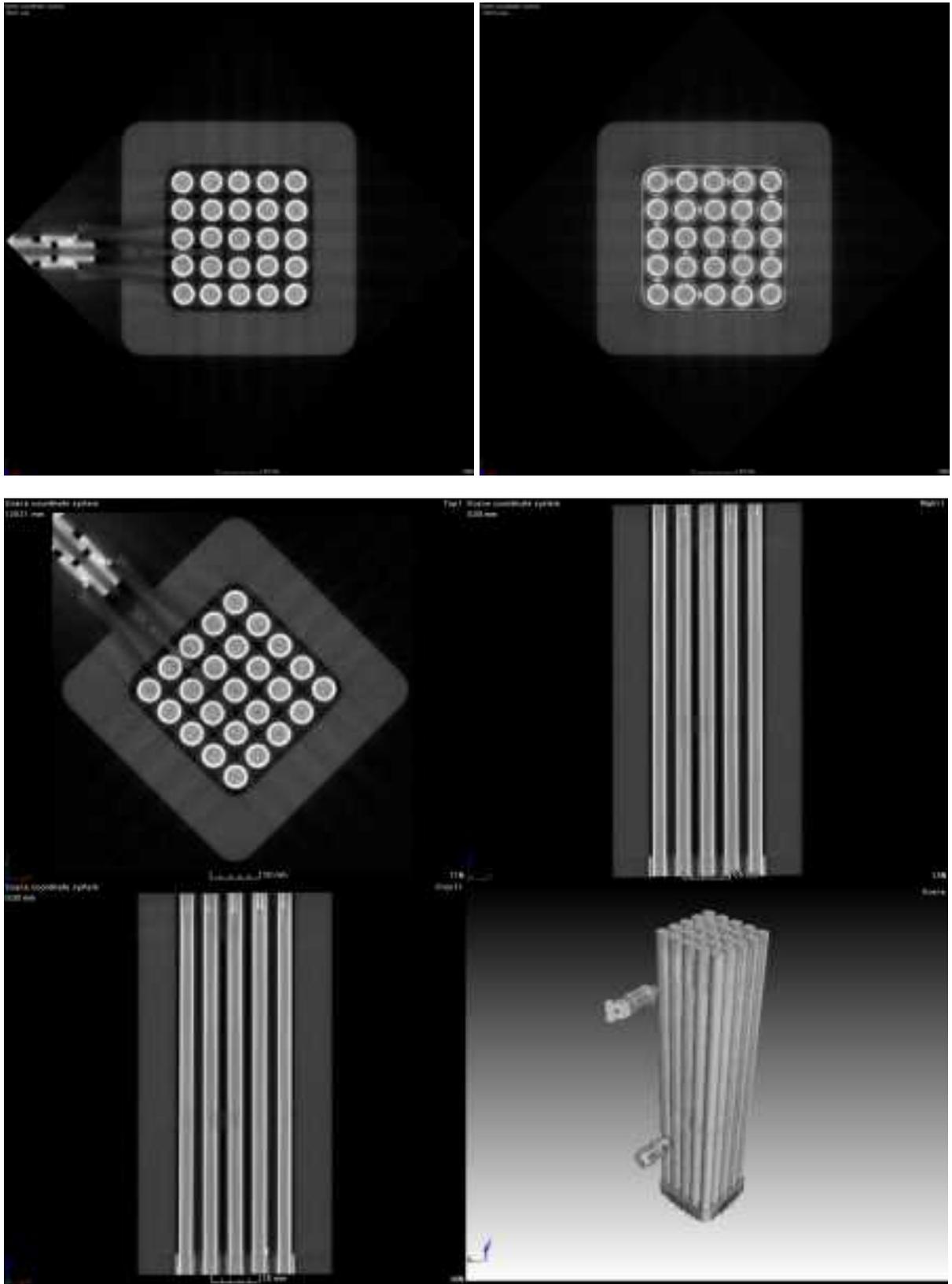


図 3-42 X線 CT 撮影像による析出塩分布 SM1H

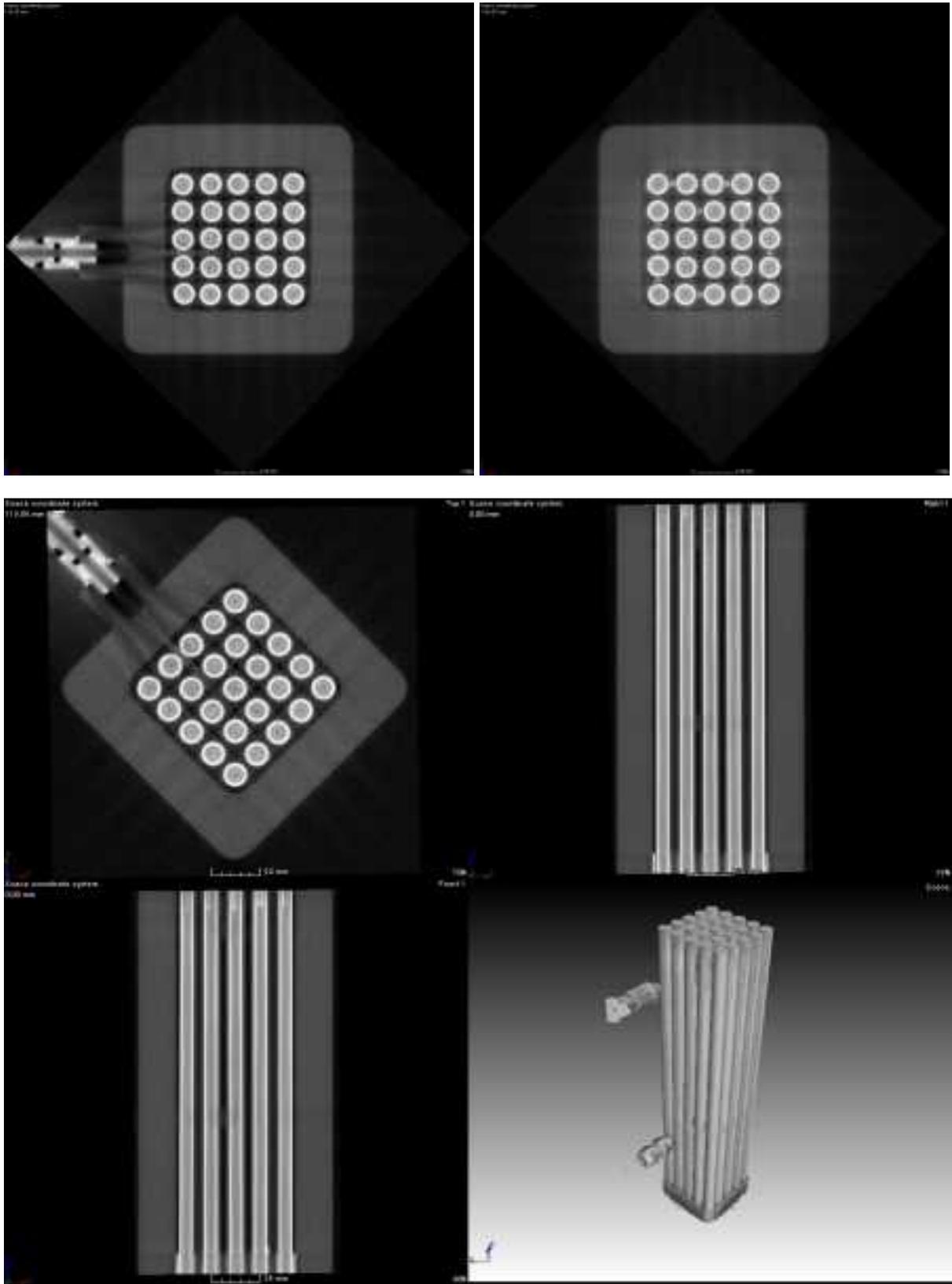


図 3-43 X線 CT 撮影像による析出塩分布 SM2H

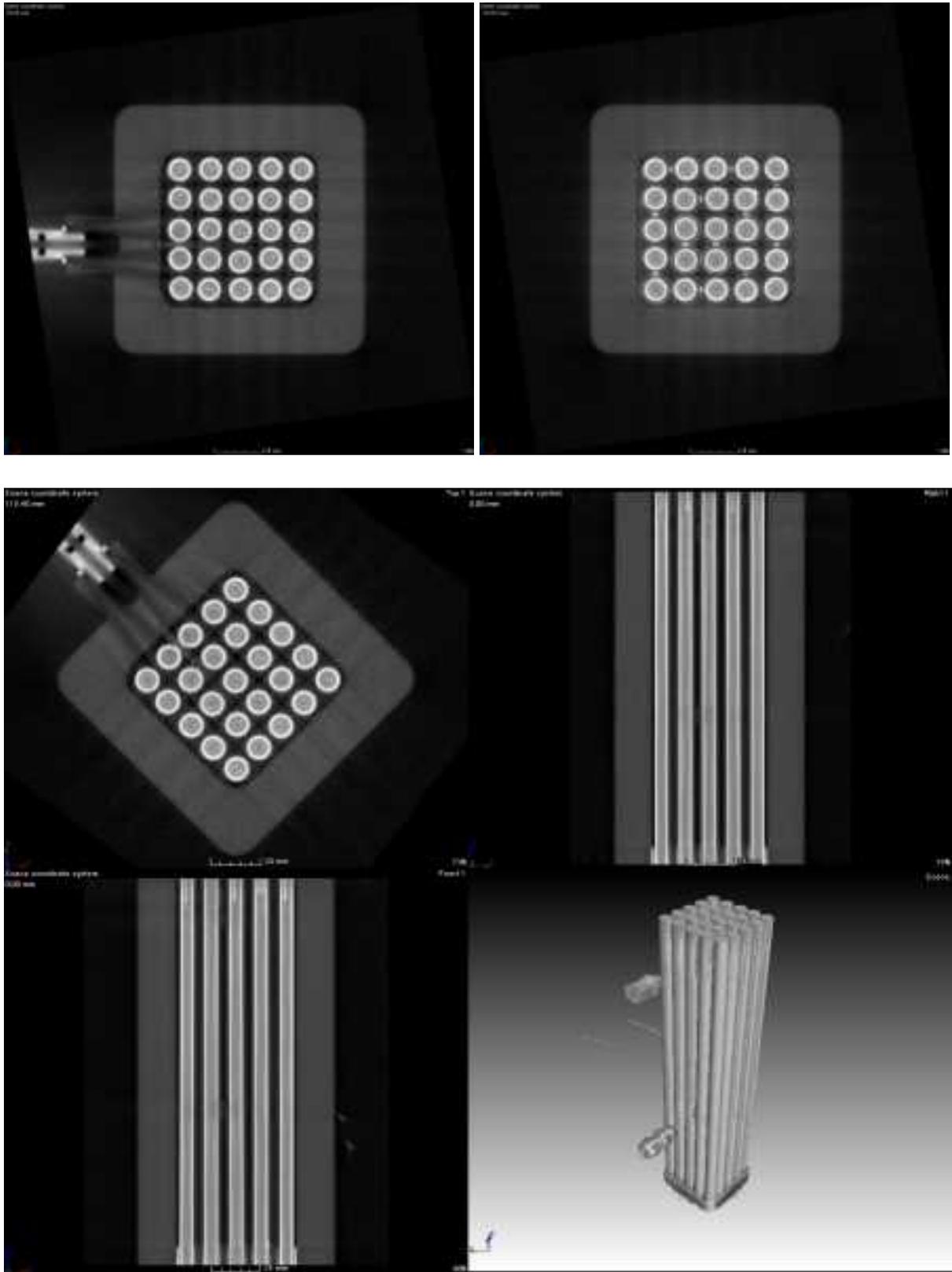


図 3-44 X線 CT 撮影像による析出塩分布 SM3H

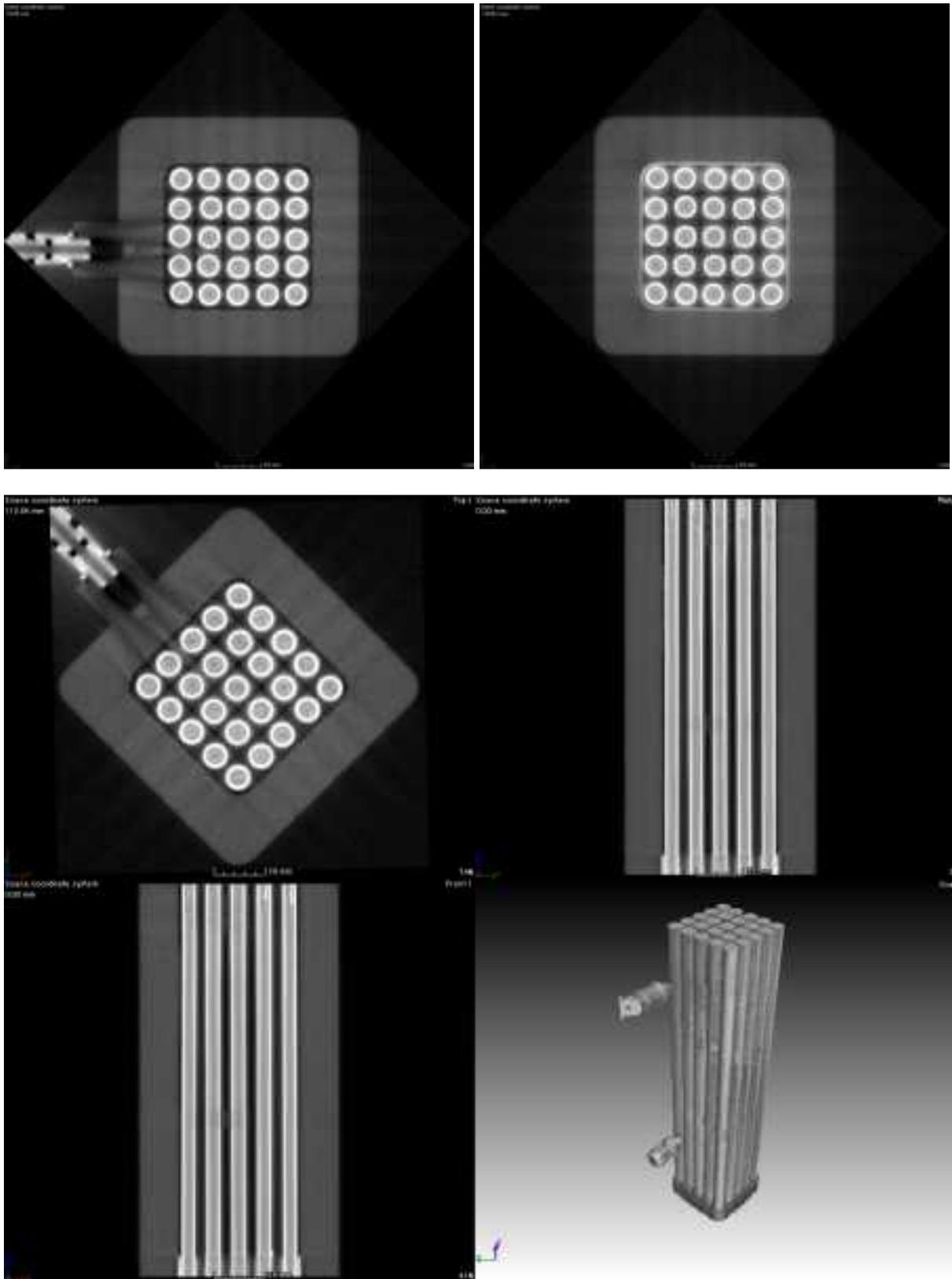


図 3-45 X線 CT 撮影像による析出塩分布 SM4H

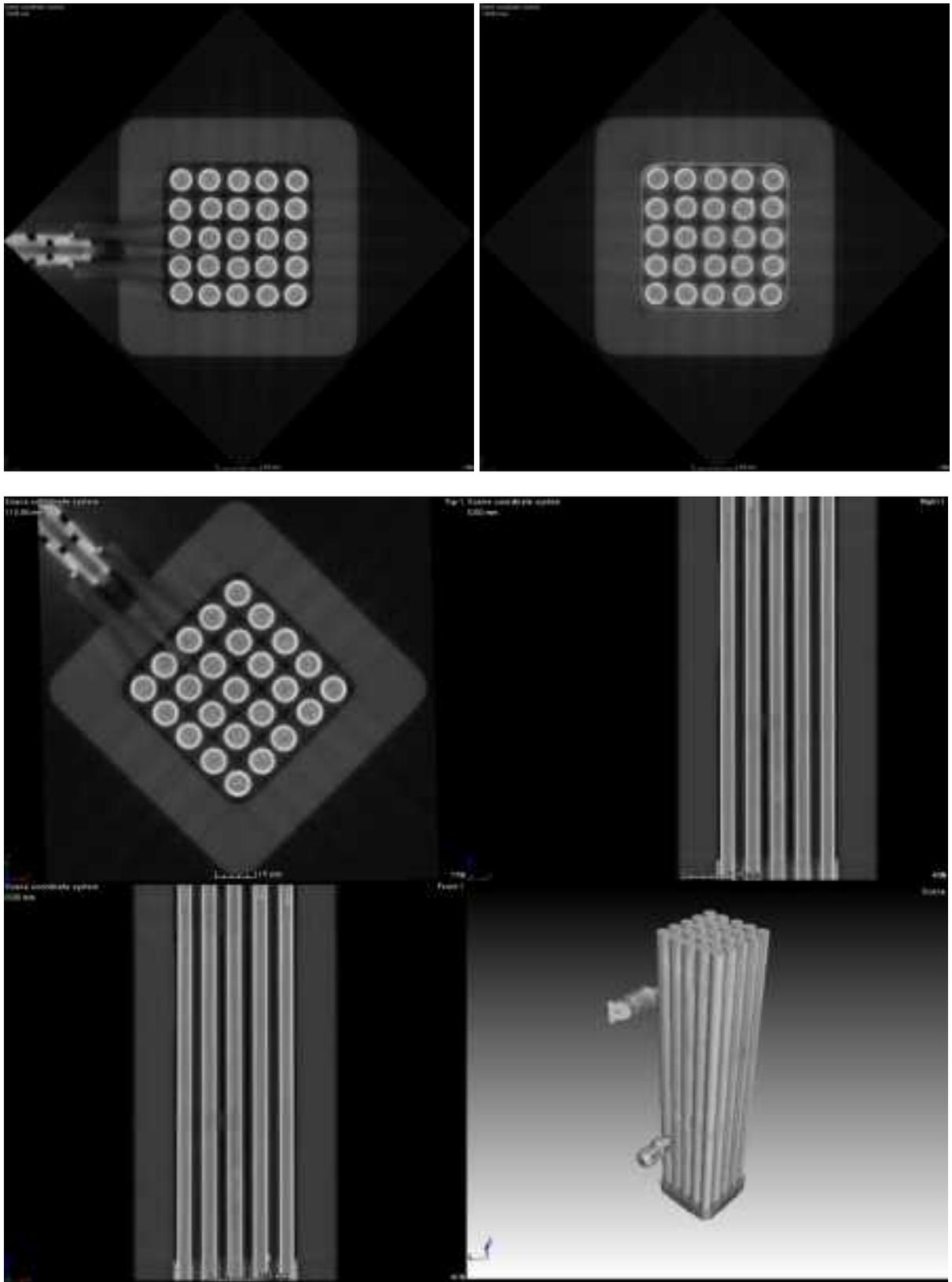


図 3-46 X線 CT 撮影像による析出塩分布 SM5H

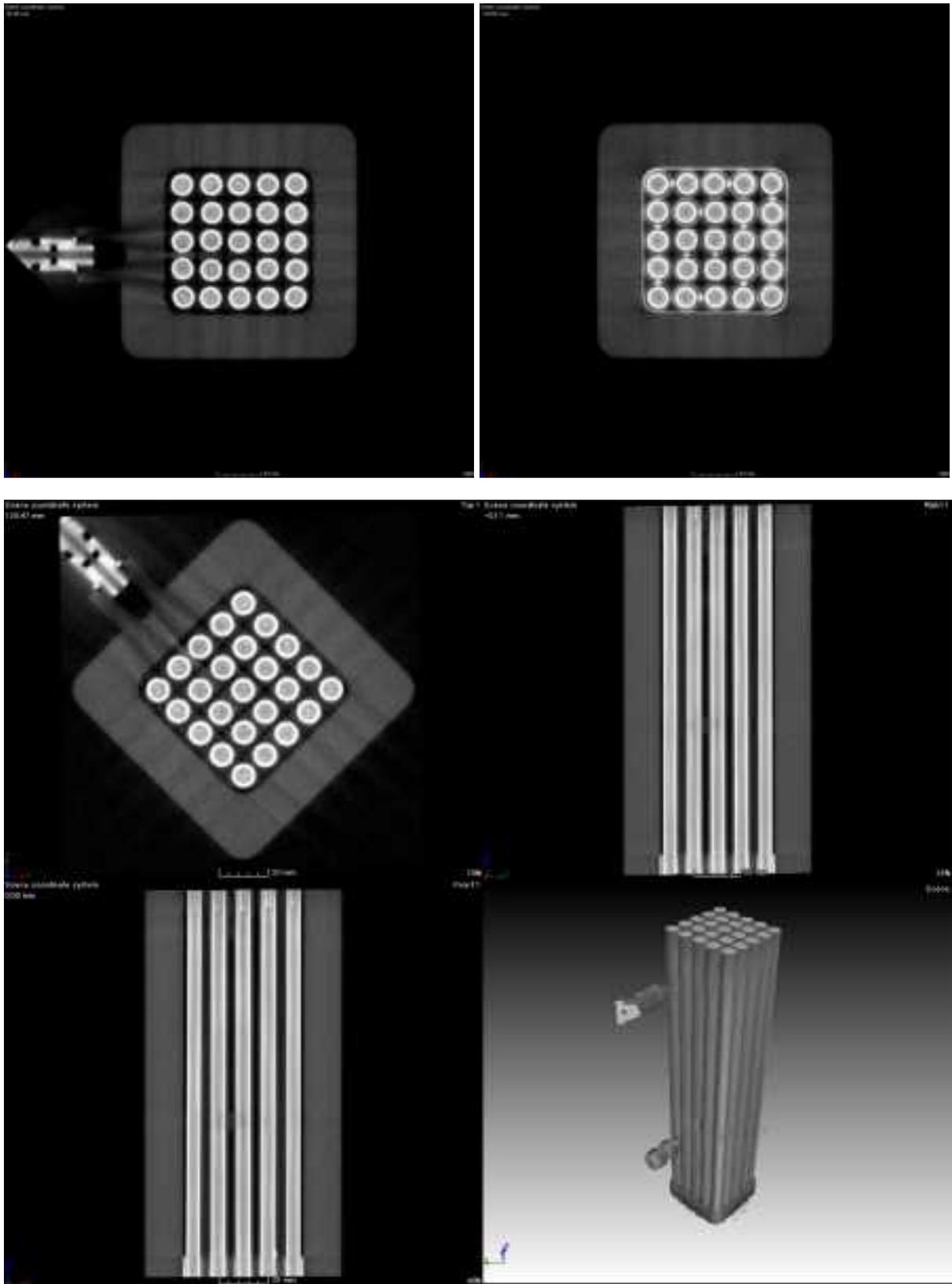


図 3-47 X線 CT 撮影像による析出塩分布 SL1L

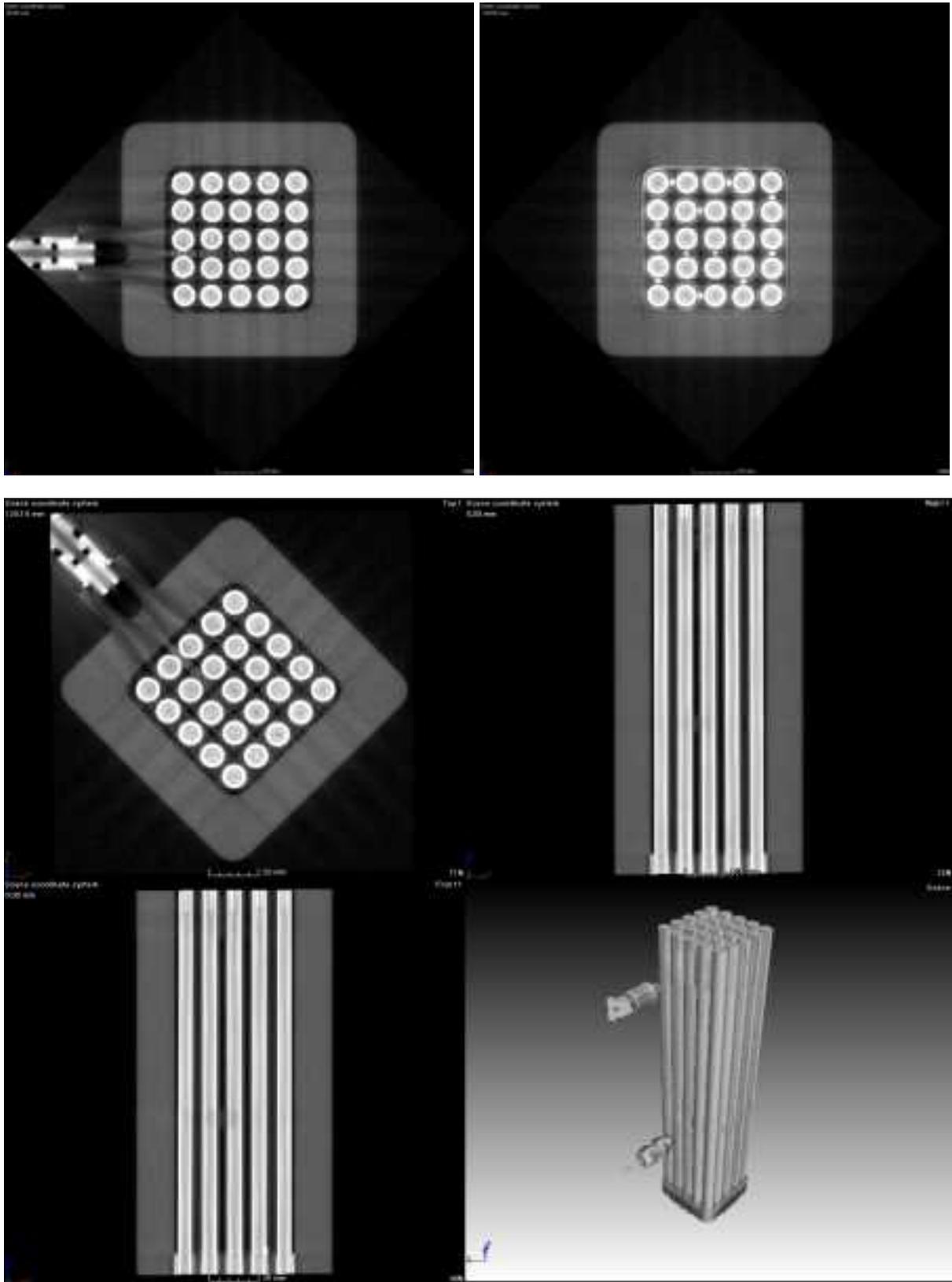


図 3-48 X線 CT 撮影像による析出塩分布 SL2L

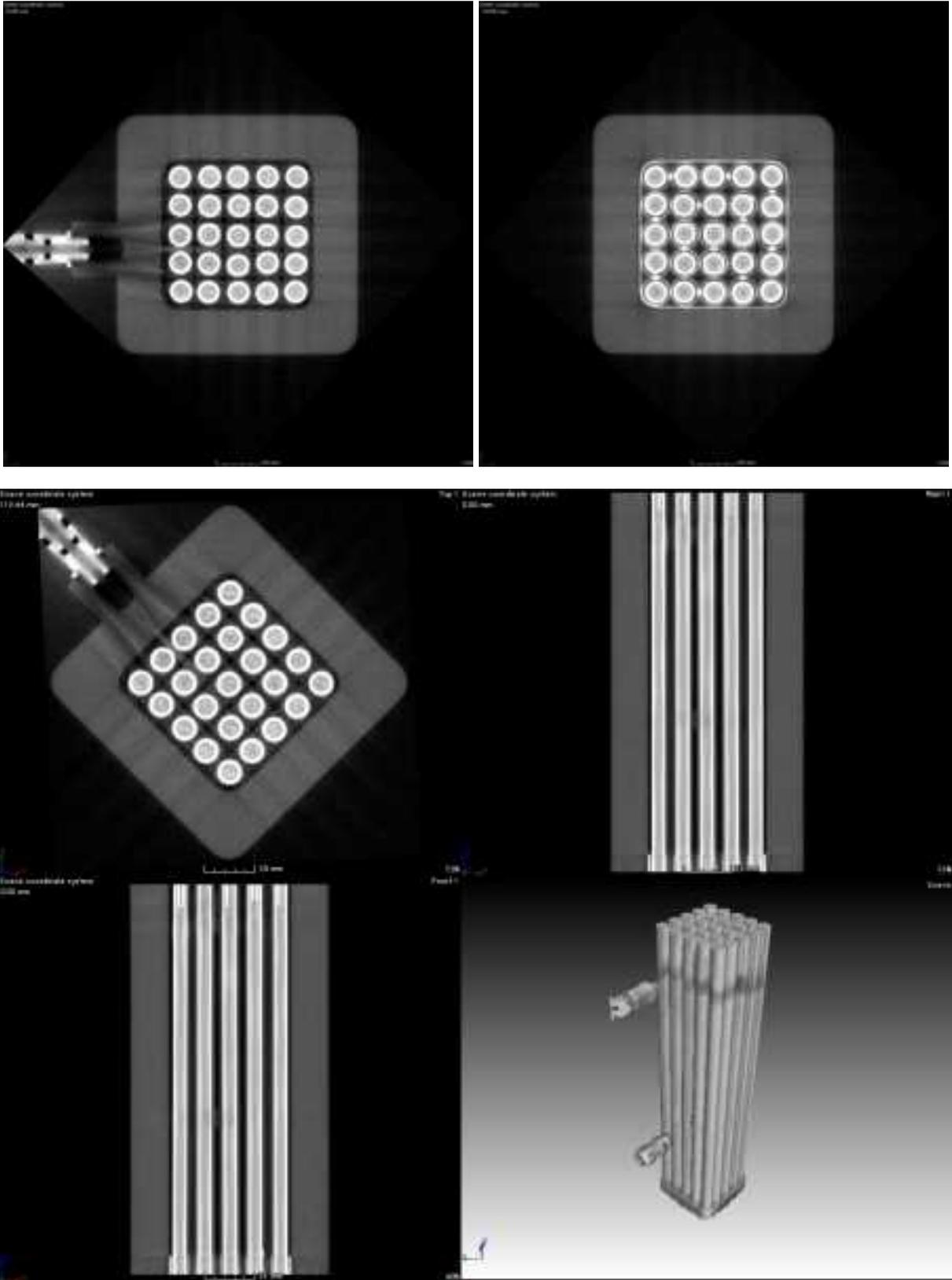


図 3-49 X線 CT 撮影像による析出塩分布 SL3L

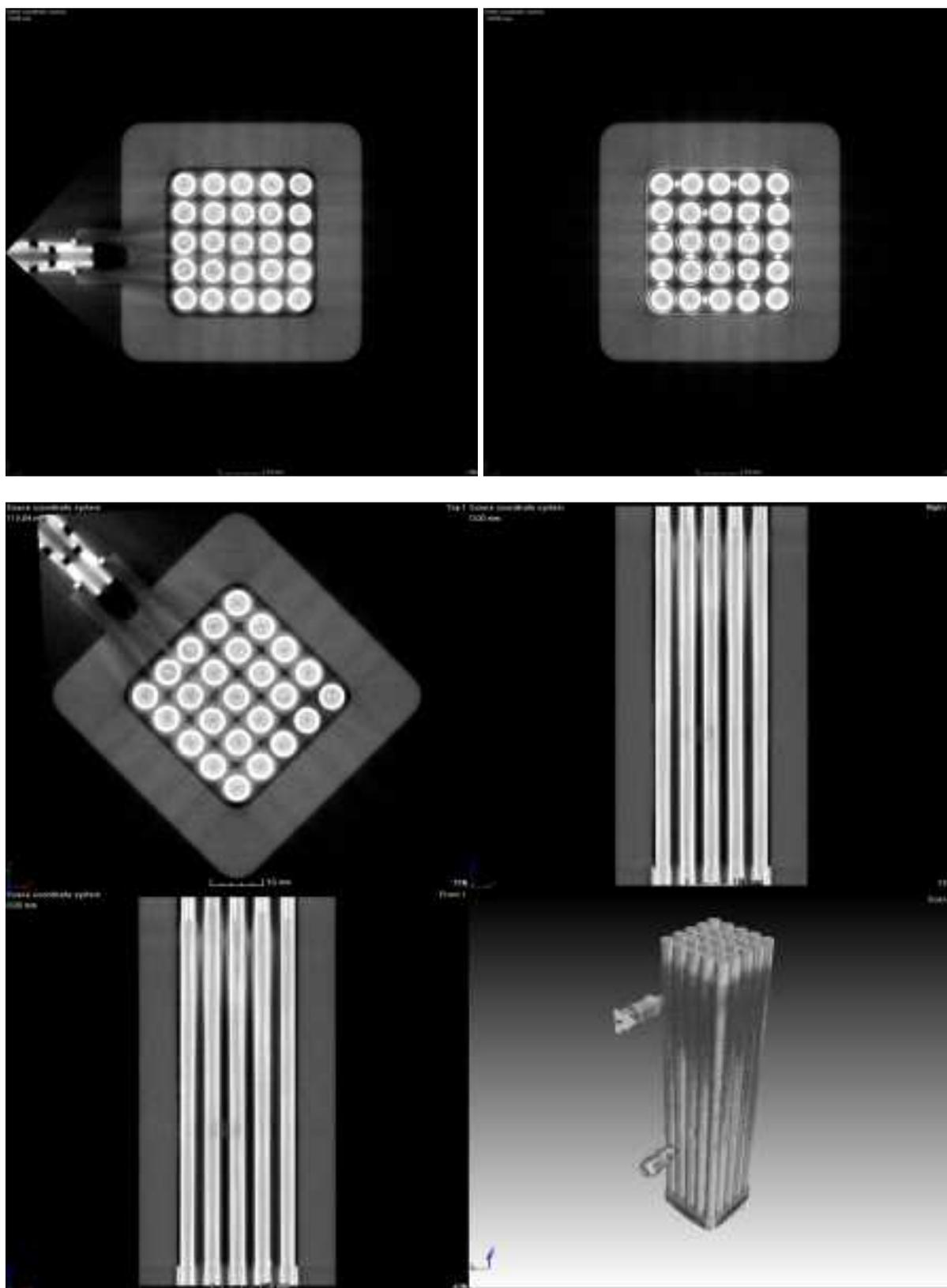


図 3-50 X線 CT 撮影像による析出塩分布 SL4L

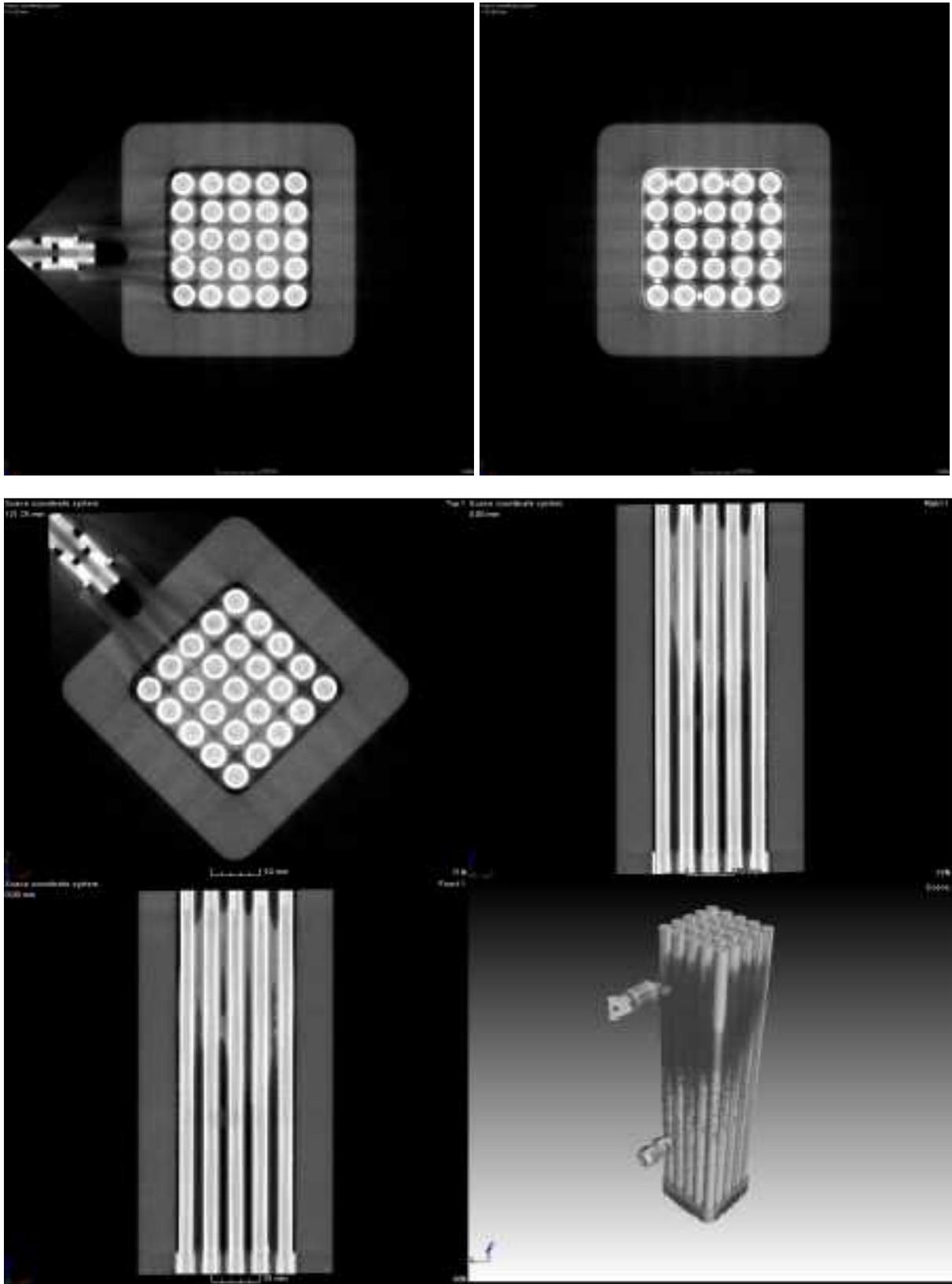


図 3-51 X線 CT 撮影像による析出塩分布 SL5L

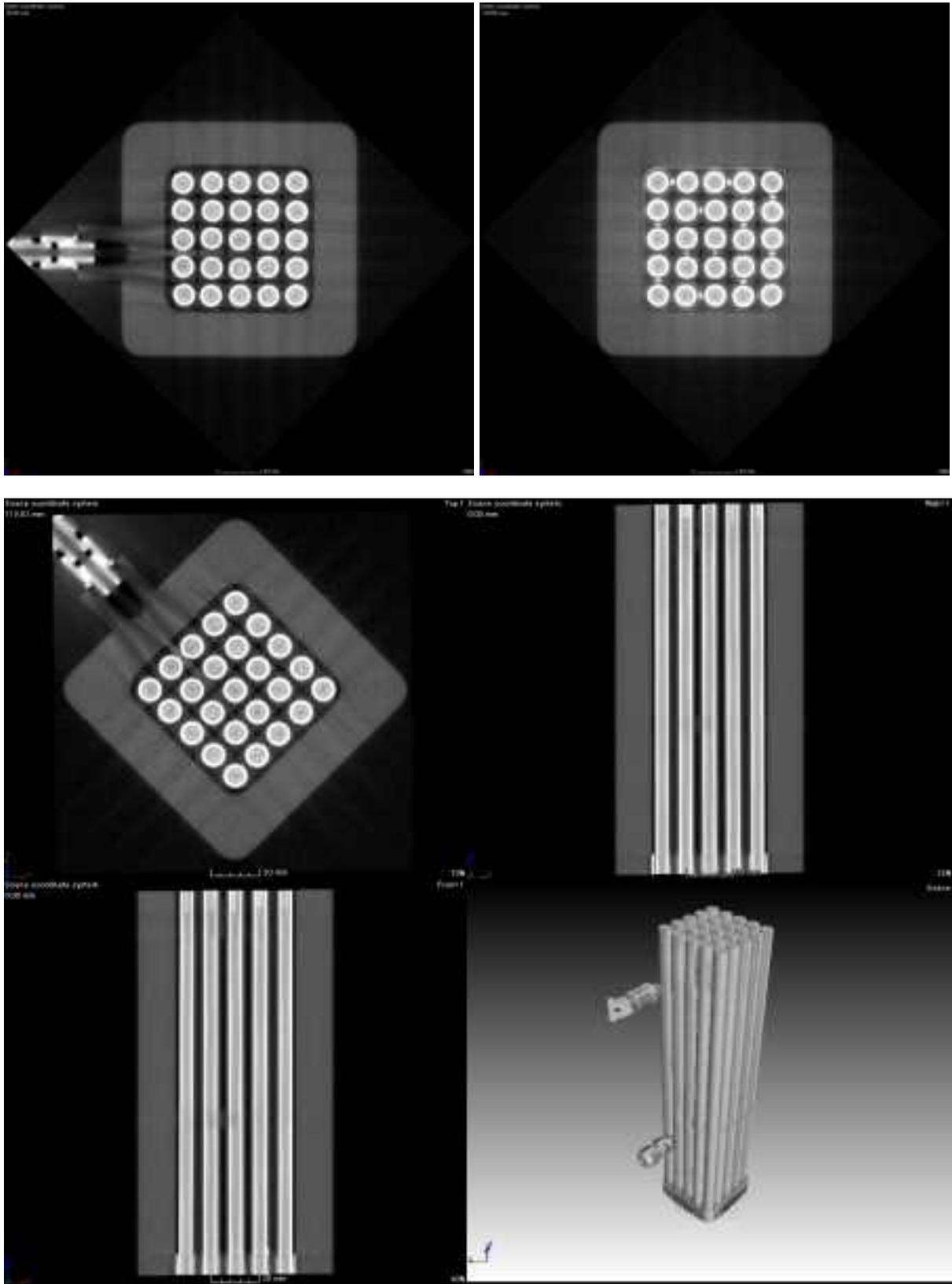


図 3-52 X線 CT 撮影像による析出塩分布 SL1M

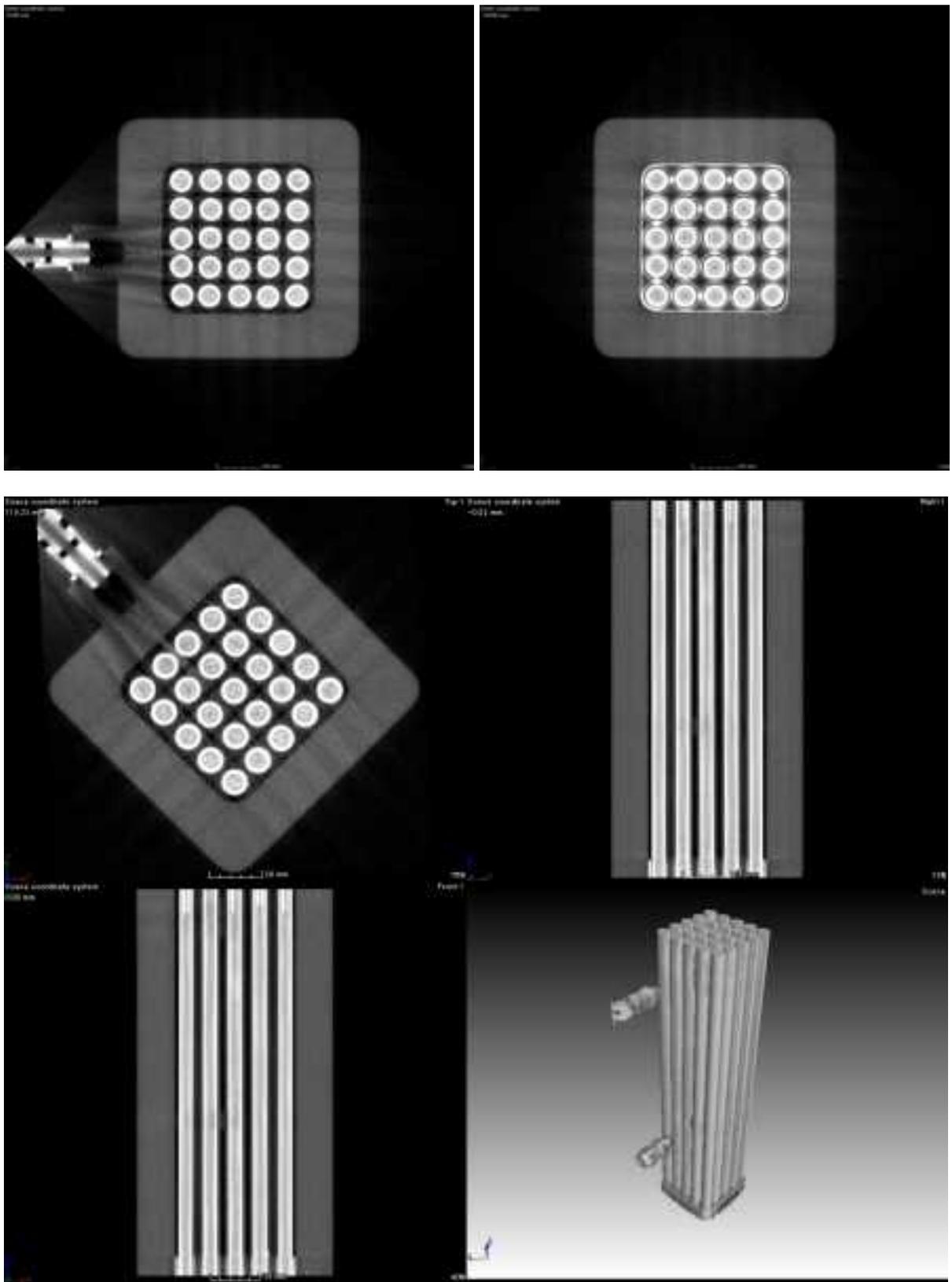


図 3-53 X線 CT 撮影像による析出塩分布 SL2M

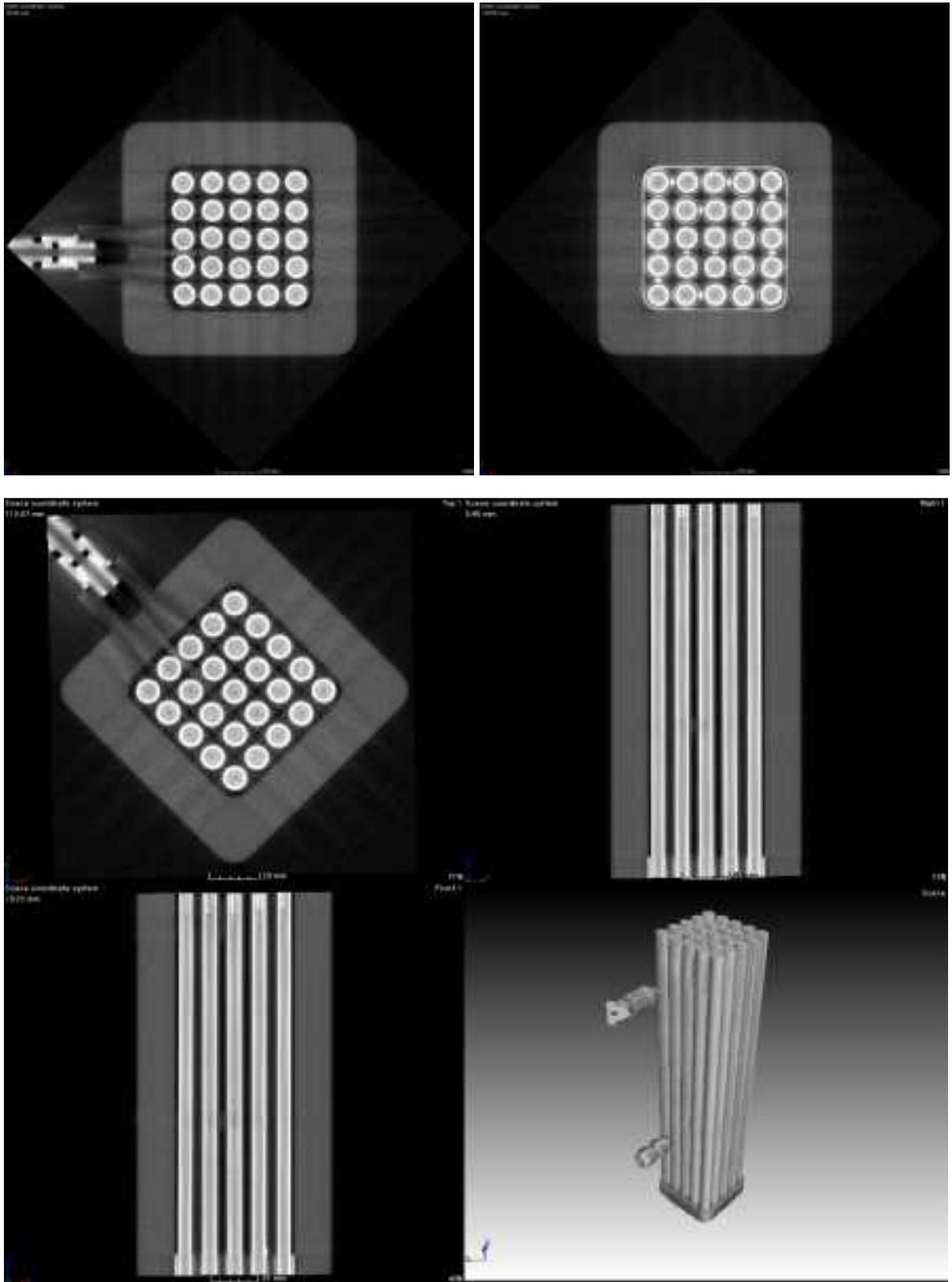


図 3-54 X線 CT 撮影像による析出塩分布 SL3M

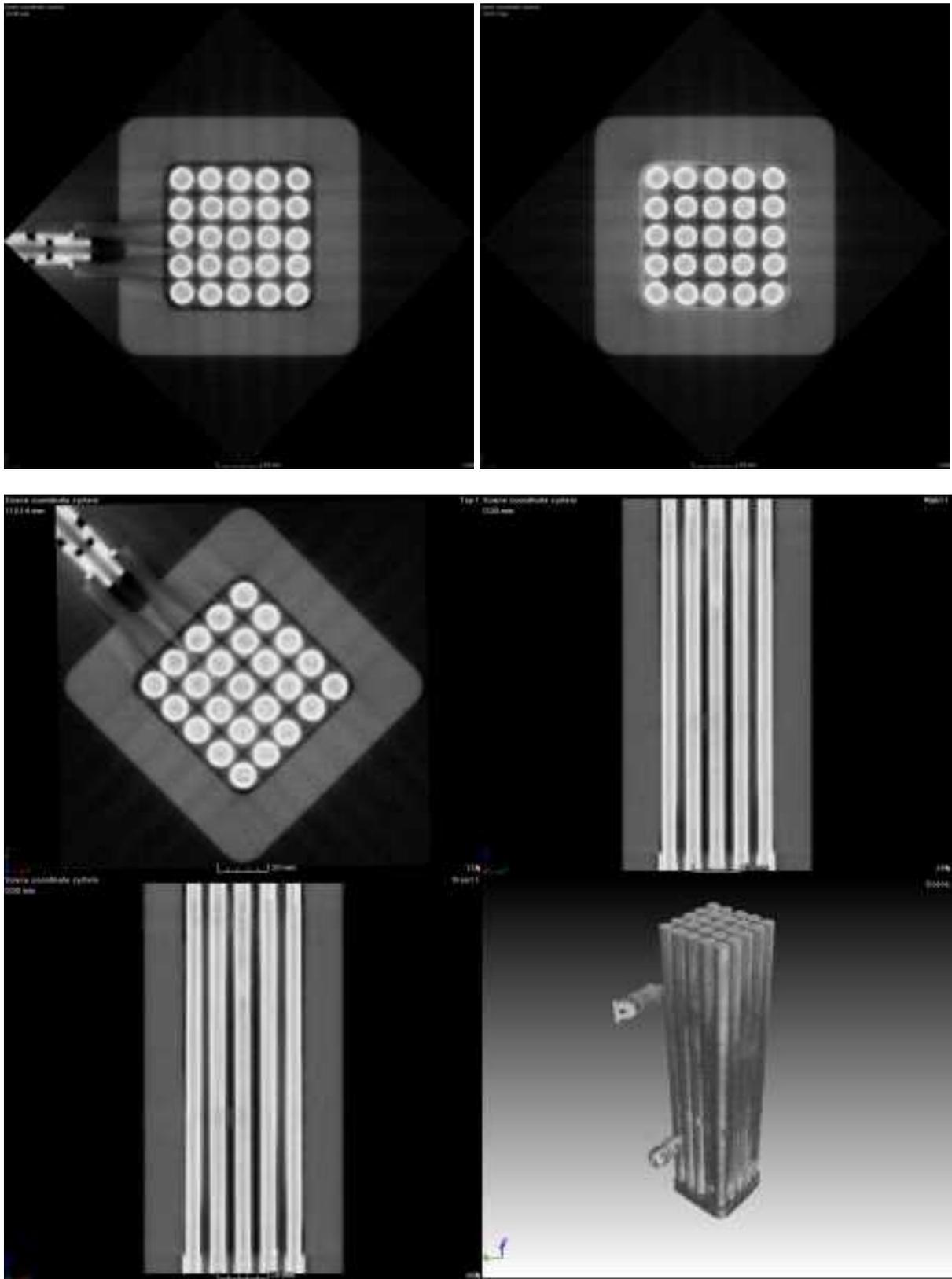


図 3-55 X線 CT 撮影像による析出塩分布 SLAM

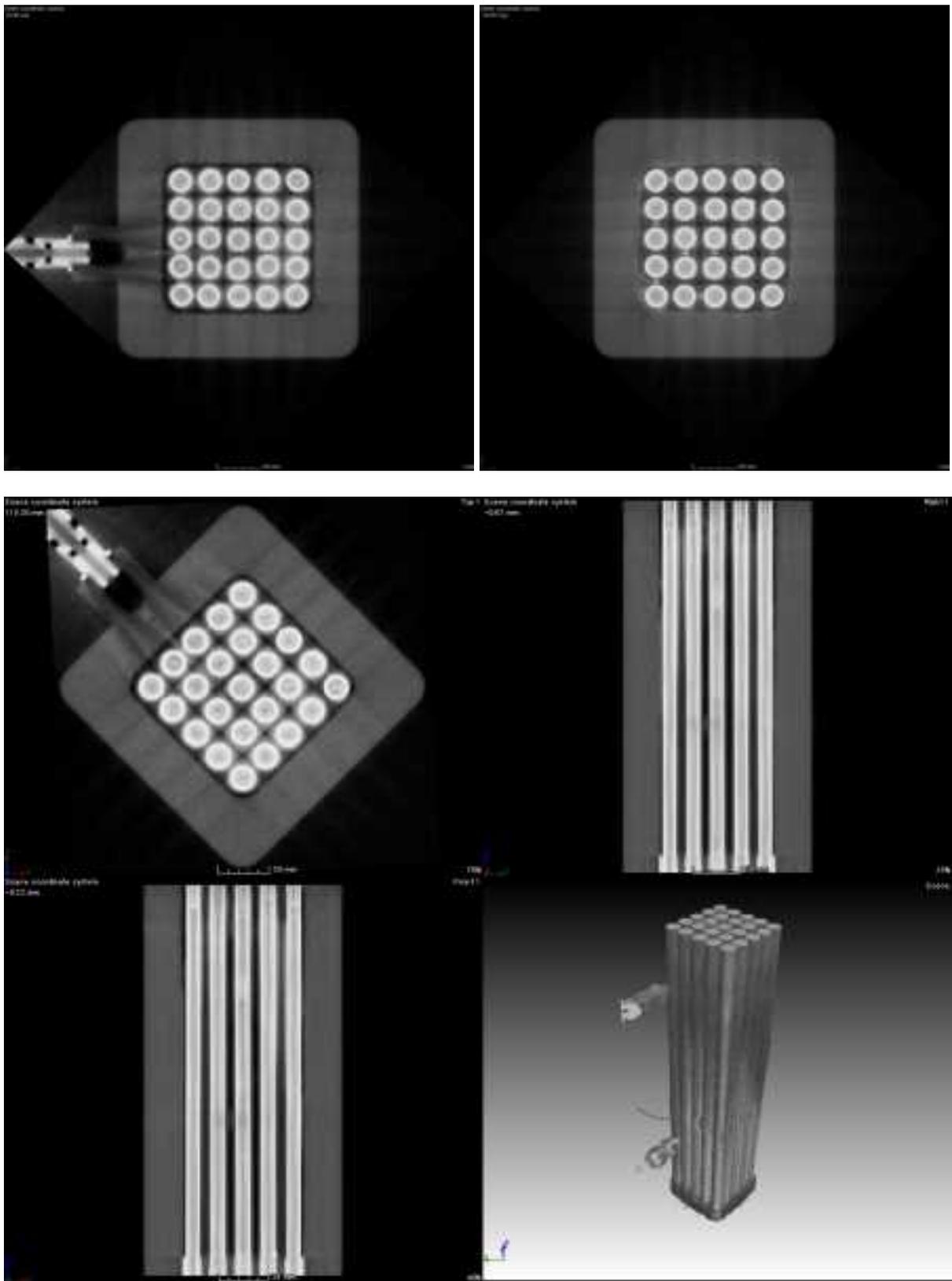


図 3-56 X線 CT 撮影像による析出塩分布 SL5M

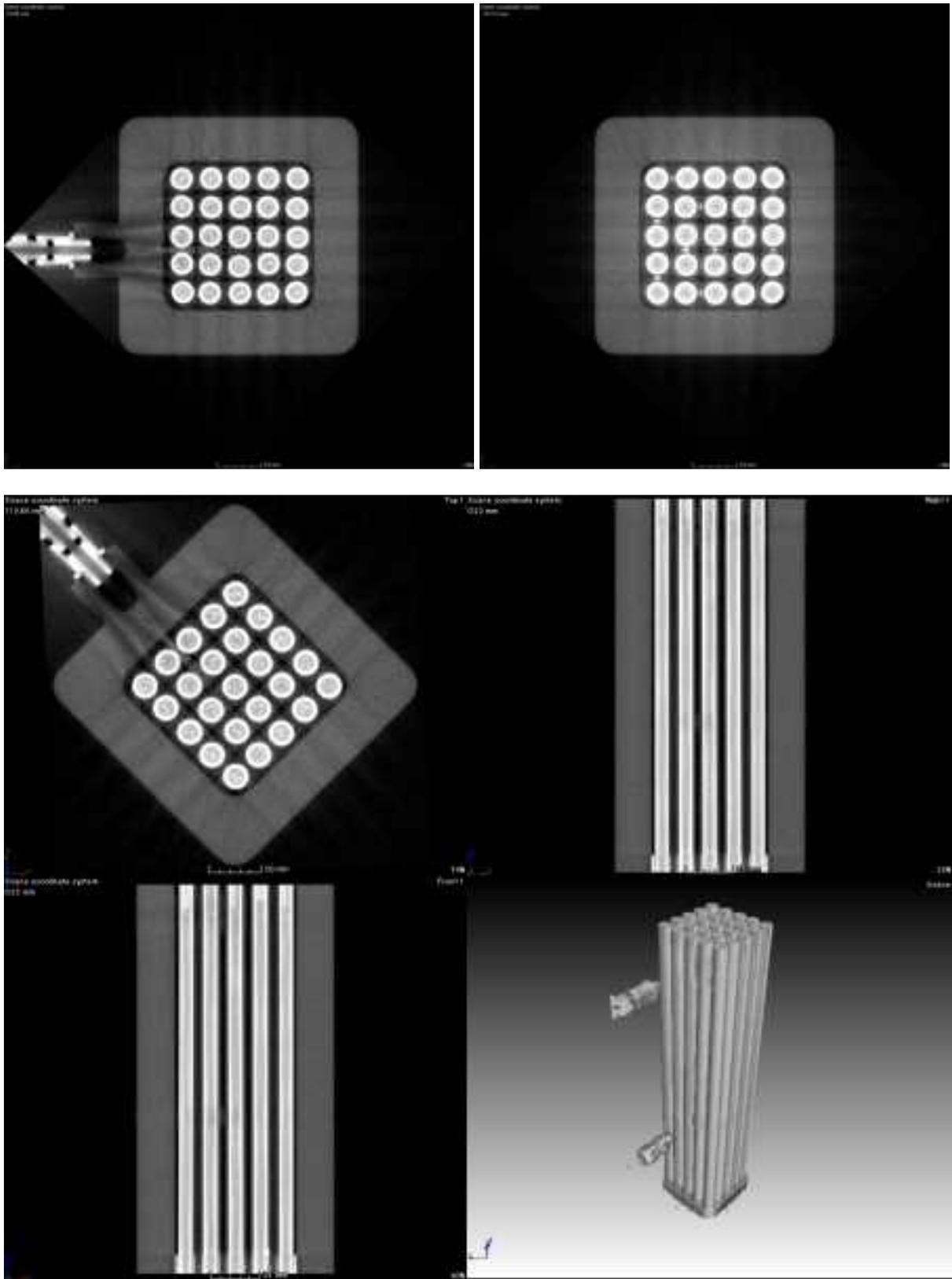


図 3-57 X線 CT 撮影像による析出塩分布 SL1H

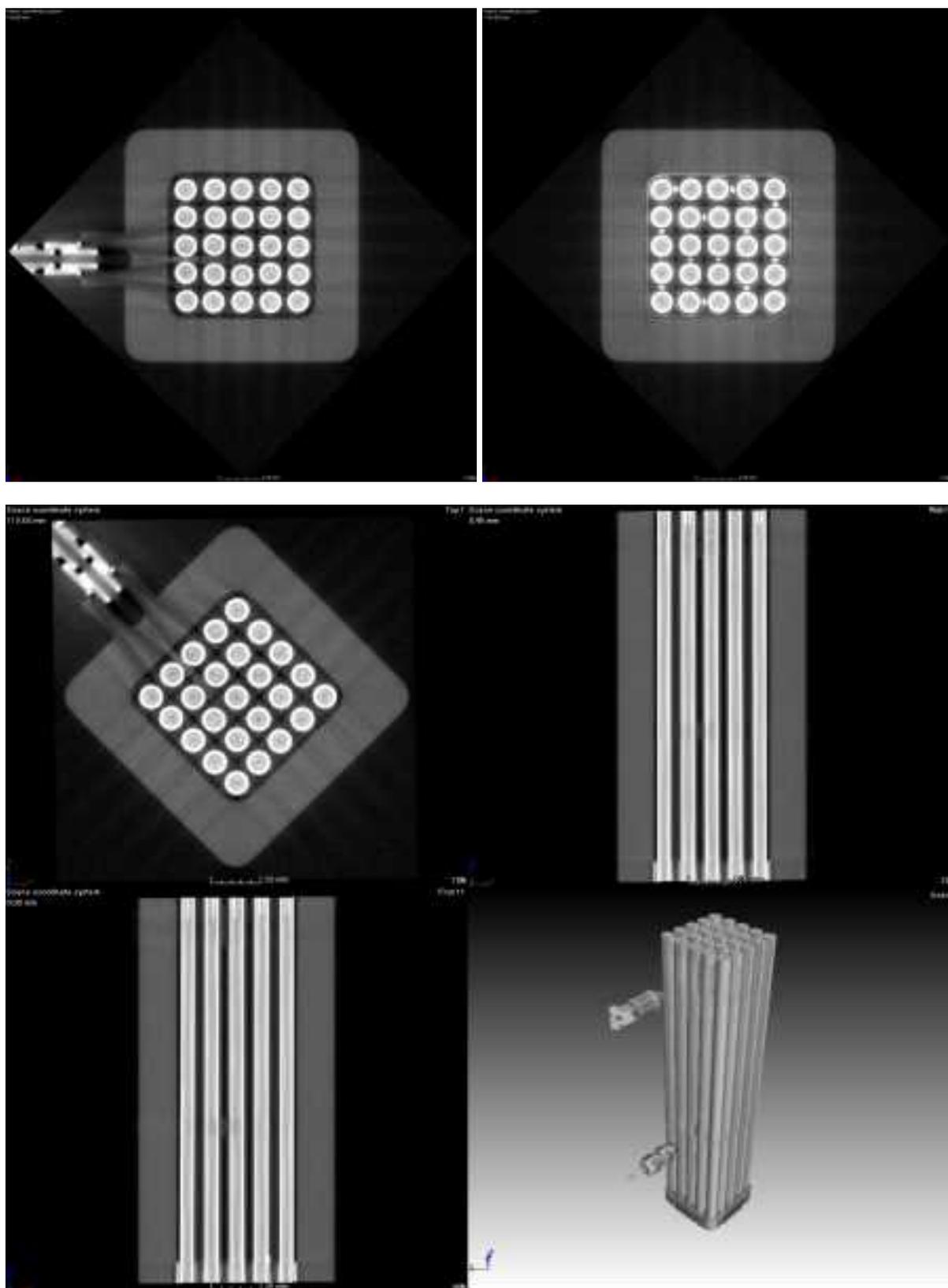


図 3-58 X線 CT 撮影像による析出塩分布 SL2H

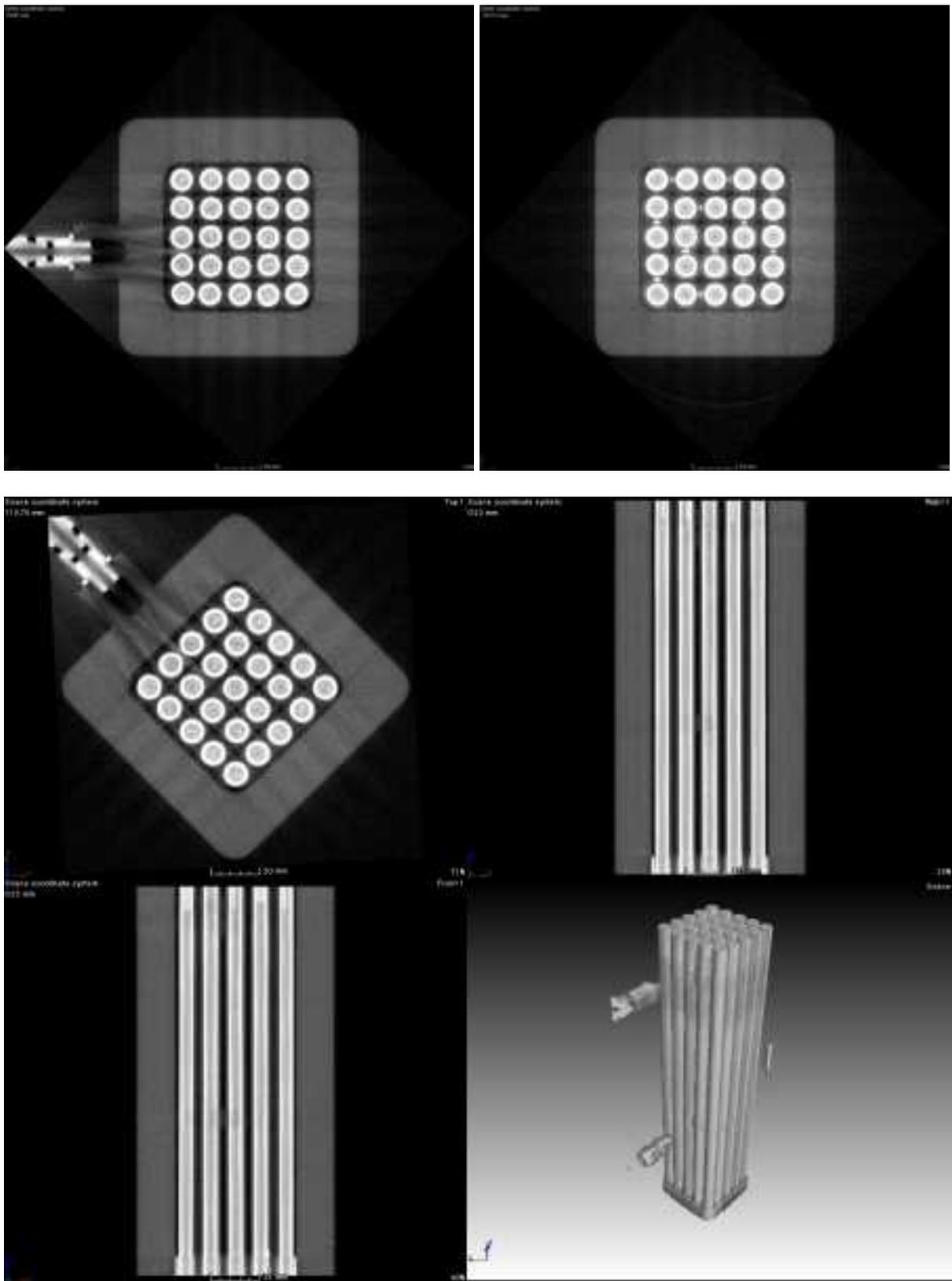


図 3-59 X線 CT 撮影像による析出塩分布 SL3H

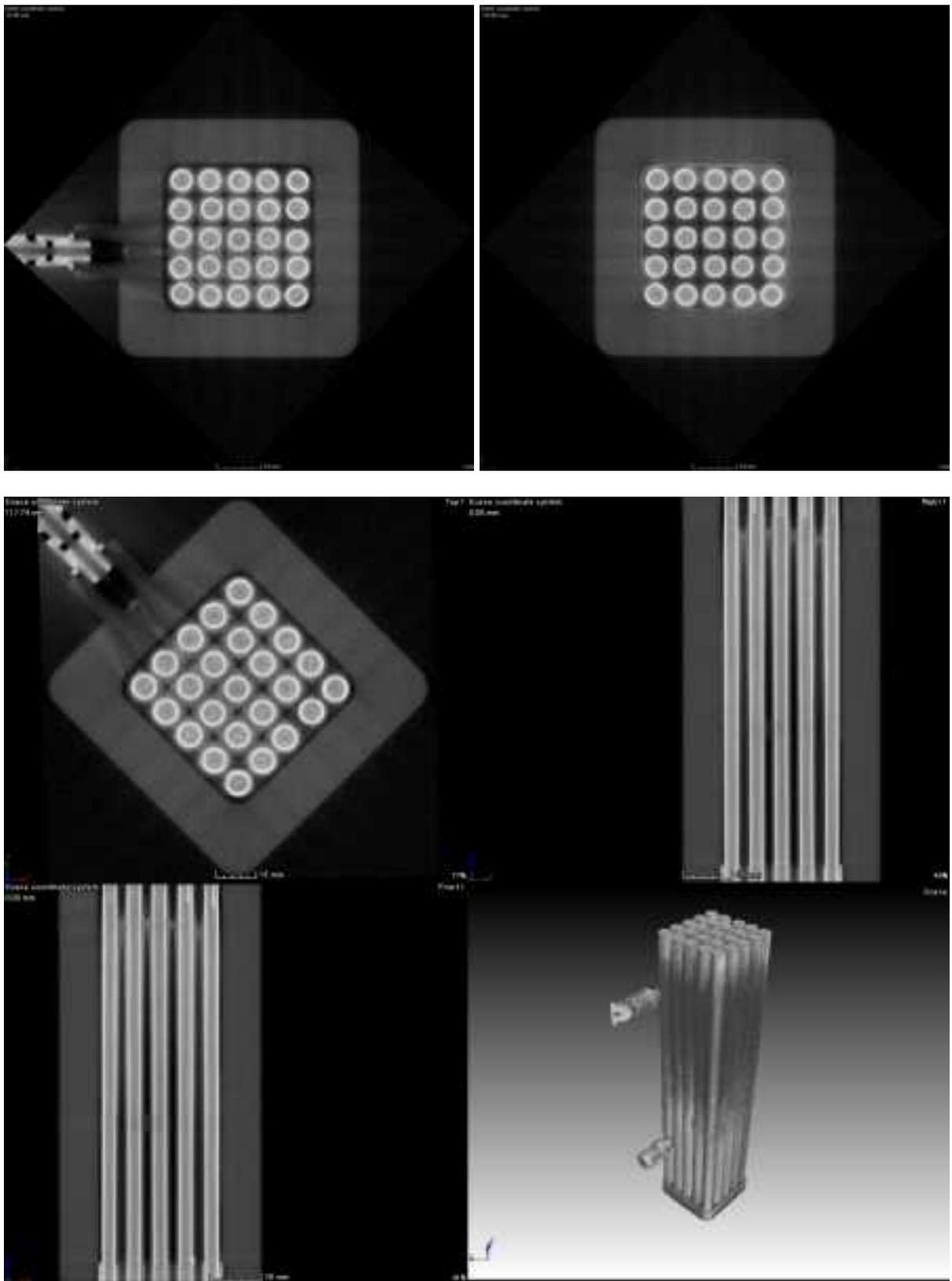


図 3-60 X線 CT 撮影像による析出塩分布 SL4H

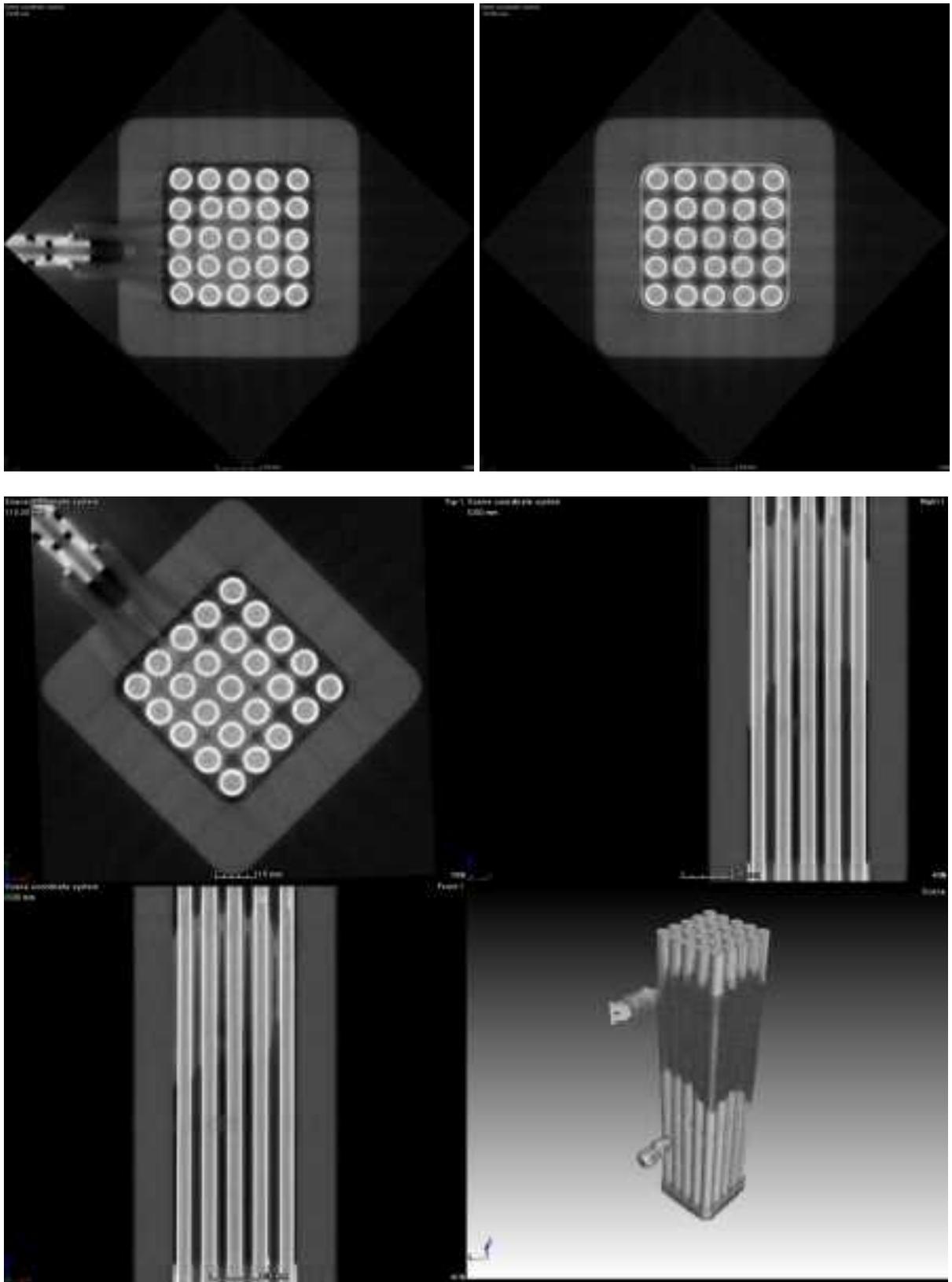


図 3-61 X線 CT 撮影像による析出塩分布 SL5H

表 3-10 TAF 高さ水平断面の析出塩分布一覽(液位 TAF)

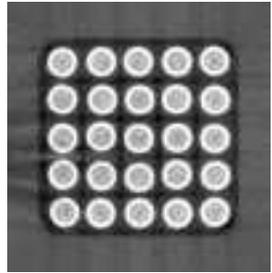
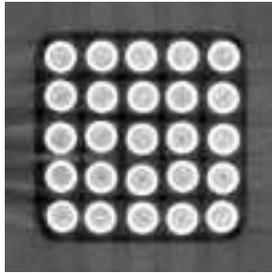
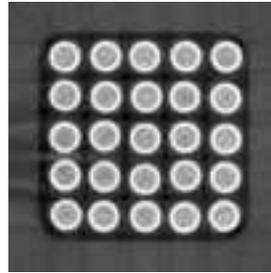
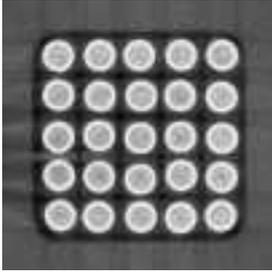
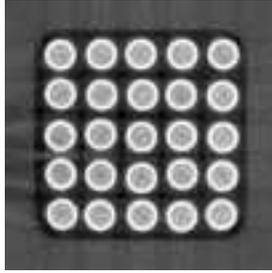
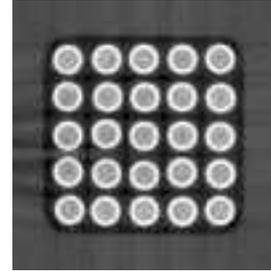
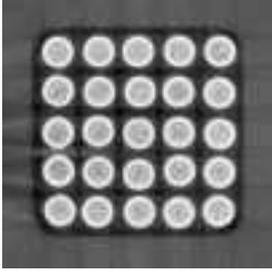
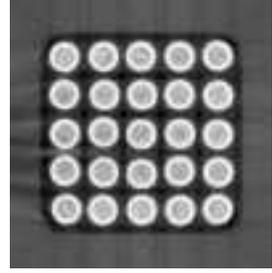
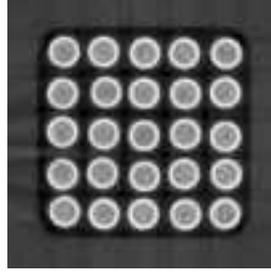
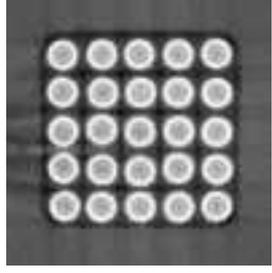
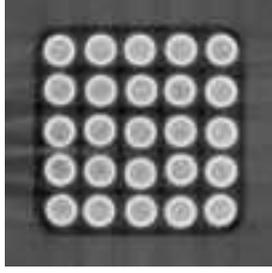
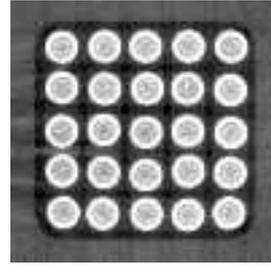
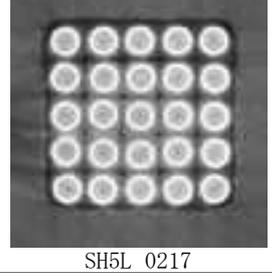
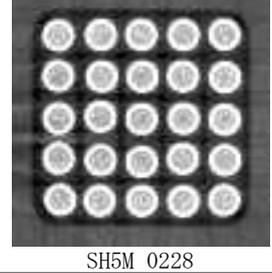
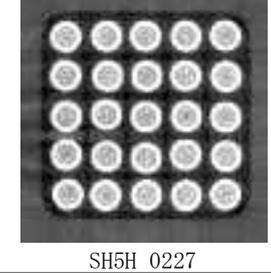
定格出力	%	0.5	1.0	1.5
熱流束	kW/m ²	3.0	6.0	9.0
バンドル出力	kW	1.25	2.50	3.75
塩水濃度 Wt%	20			
		SH1L 0214	SH1M 0220	SH1H 0204
	30			
		SH2L 0214	SH2M 0204	SH2H 0204
	40			
		SH3L 0213	SH3M 0212	SH3H 0121
	50			
		SH4L 0210	SH4M 0212	SH4H 0227
	60			
		SH5L 0217	SH5M 0228	SH5H 0227

表 3-11 TAF 高さ水平断面の析出塩分布一覽(液位 TAF - 100 mm)

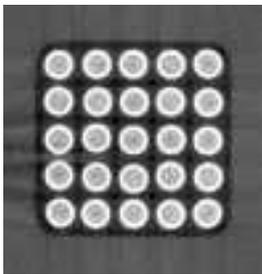
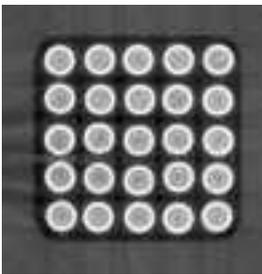
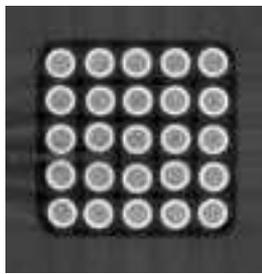
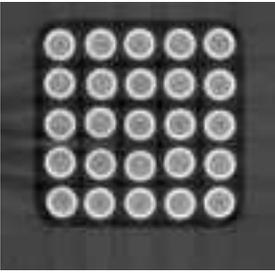
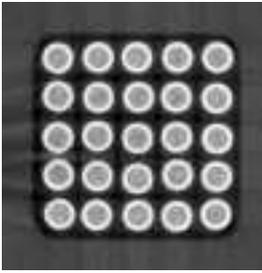
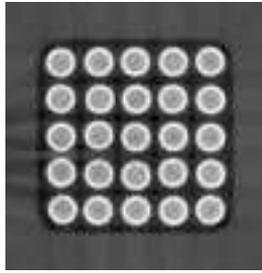
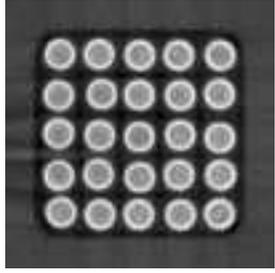
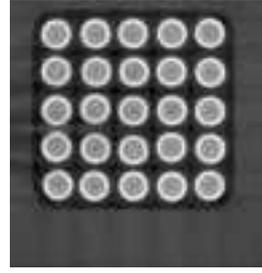
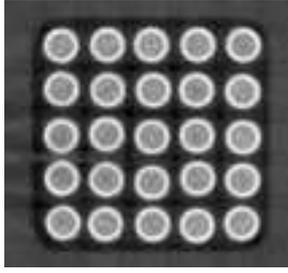
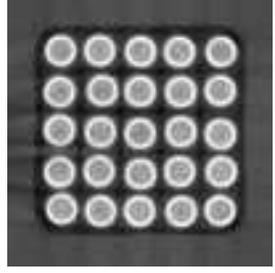
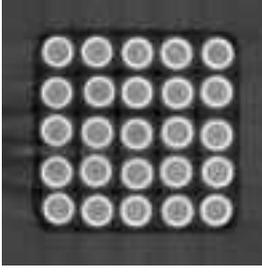
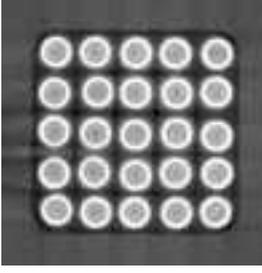
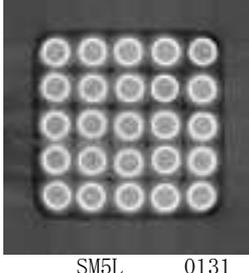
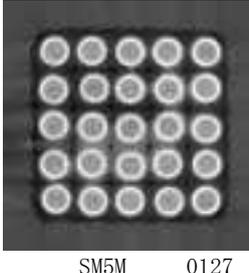
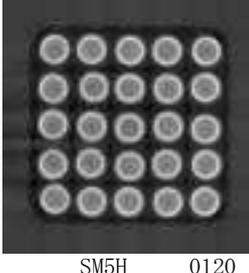
定格出力	%	0.5	1.0	1.5
熱流束	kW/m ²	3.0	6.0	9.0
バンド出力	kW	1.25	2.50	3.75
塩水濃度 Wt%	20	 SM1L 0205	 SM1M 0205	 SM1H 0128
	30	 SM2L 0129	 SM2M 0203	 SM2H 0203
	40	 SM3L 0124	 SM3M 0130	 SM3H 0130
	50	 SM4L 0123	 SM4M 0128	 SM4H 0122
	60	 SM5L 0131	 SM5M 0127	 SM5H 0120

表 3-12 TAF 高さ水平断面の析出塩分布一覽(液位 TAF - 200 mm)

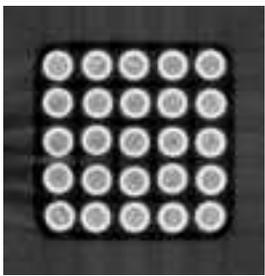
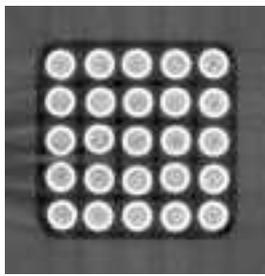
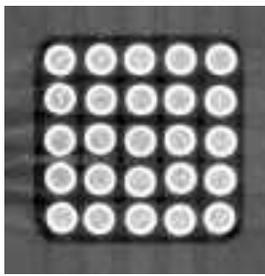
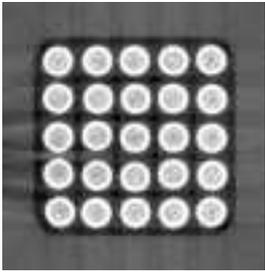
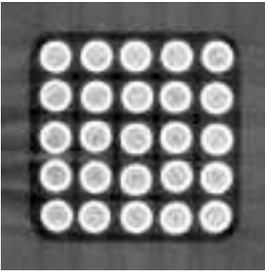
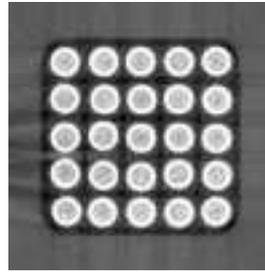
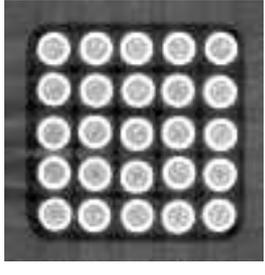
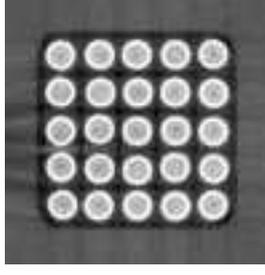
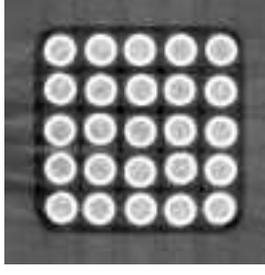
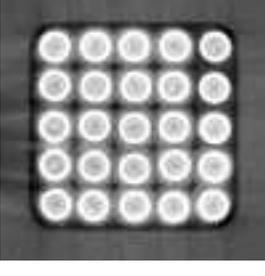
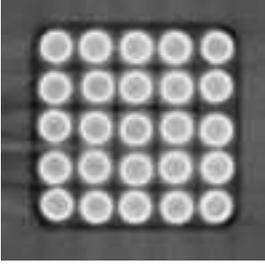
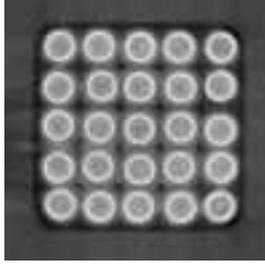
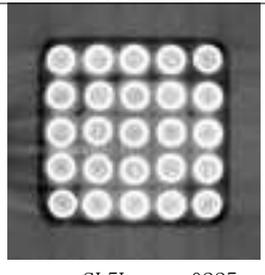
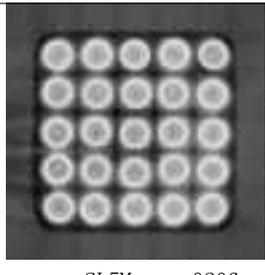
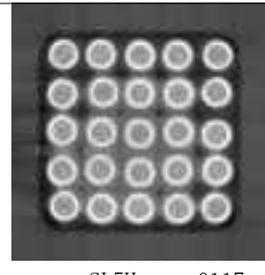
定格出力	%	0.5	1.0	1.5
熱流束	kW/m ²	3.0	6.0	9.0
バンドル出力	kW	1.25	2.50	3.75
塩水濃度 Wt%	20	 SL1L 0205	 SL1M 0219	 SL1H 0220
	30	 SL2L 0221	 SL2M 0218	 SL2H 0220
	40	 SL3L 0226	 SL3M 0219	 SL3H 0219
	50	 SL4L 0224	 SL4M 0207	 SL4H 0116
	60	 SL5L 0225	 SL5M 0206	 SL5H 0117

表 3-13 スペーサ高さ水平断面の析出塩分布一覽(液位 TAF)

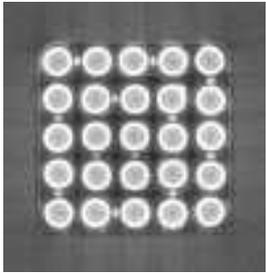
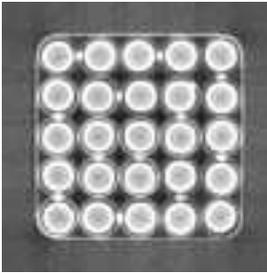
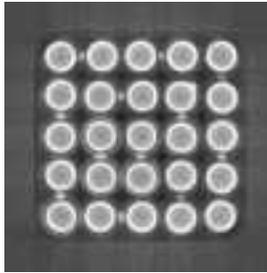
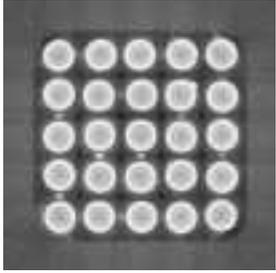
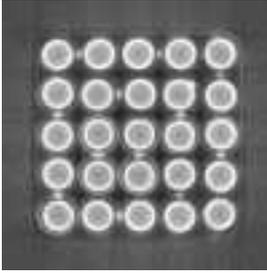
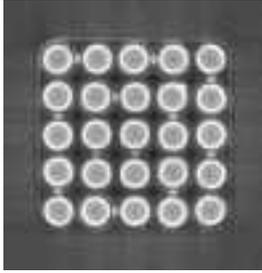
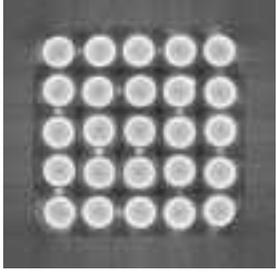
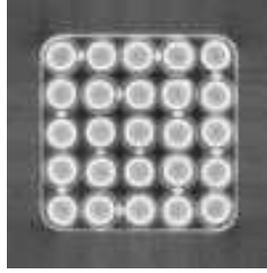
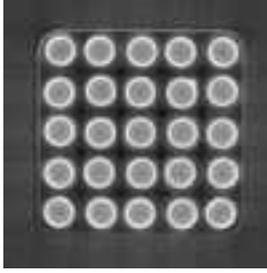
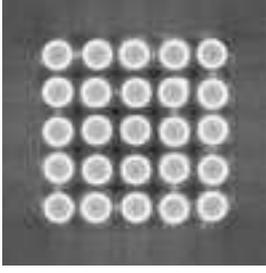
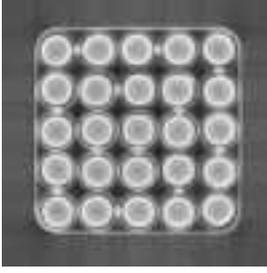
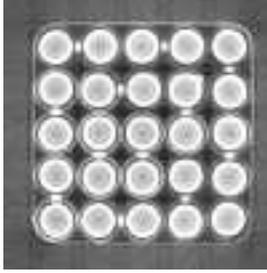
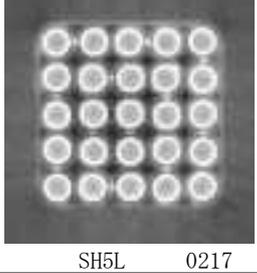
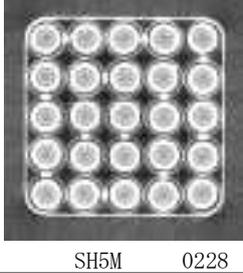
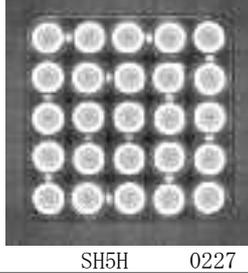
定格出力	%	0.5	1.0	1.5
熱流束	kW/m ²	3.0	6.0	9.0
バンドル出力	kW	1.25	2.50	3.75
塩水濃度 Wt%	20	 SH1L 0214	 SH1M 0220	 SH1H 0204
	30	 SH2L 0214	 SH2M 0204	 SH2H 0204
	40	 SH3L 0213	 SH3M 0212	 SH3H 0121
	50	 SH4L 0210	 SH4M 0212	 SH4H 0227
	60	 SH5L 0217	 SH5M 0228	 SH5H 0227

表 3-14 スペーサ高さ水平断面の析出塩分布一覽(液位 TAF - 100 mm)

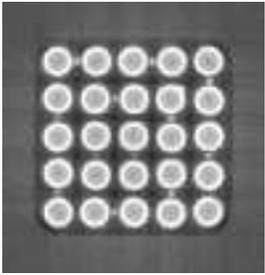
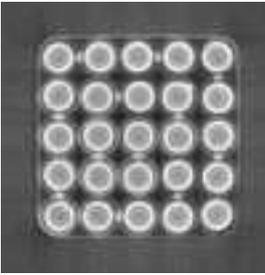
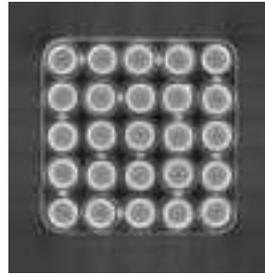
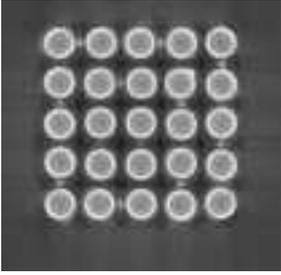
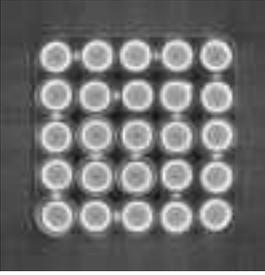
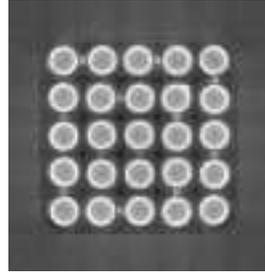
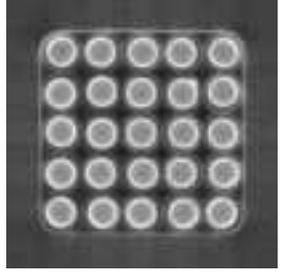
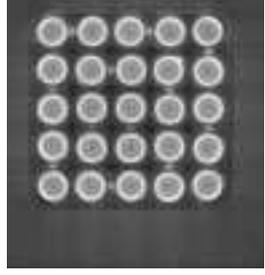
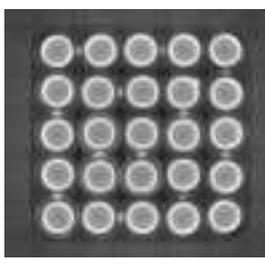
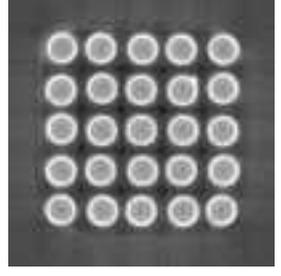
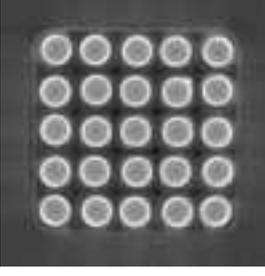
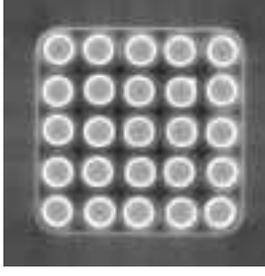
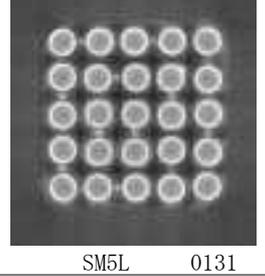
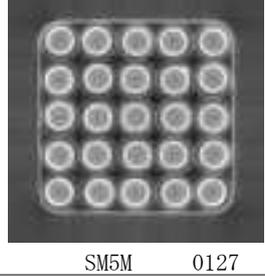
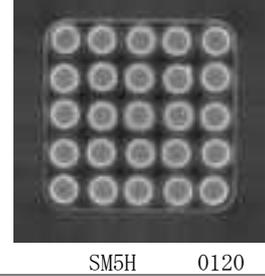
定格出力	%	0.5	1.0	1.5
熱流束	kW/m ²	3.0	6.0	9.0
バンドル出力	kW	1.25	2.50	3.75
塩水濃度 Wt%	20	 SM1L 0205	 SM1M 0205	 SM1H 0128
	30	 SM2L 0129	 SM2M 0203	 SM2H 0203
	40	 SM3L 0124	 SM3M 0130	 SM3H 0130
	50	 SM4L 0123	 SM4M 0128	 SM4H 0122
	60	 SM5L 0131	 SM5M 0127	 SM5H 0120

表 3-15 スペーサ高さ水平断面の析出塩分布一覽(液位 TAF - 200 mm)

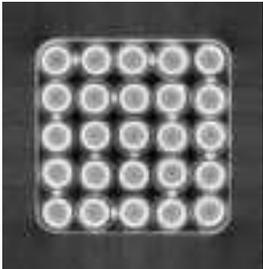
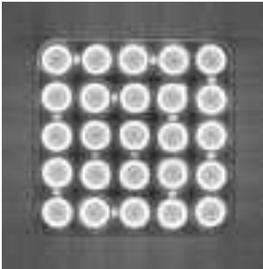
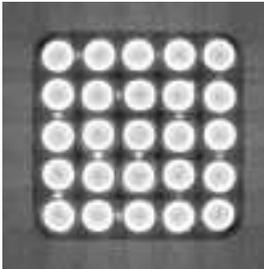
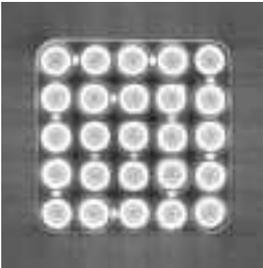
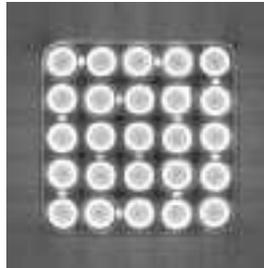
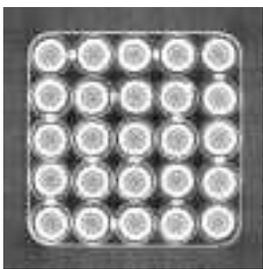
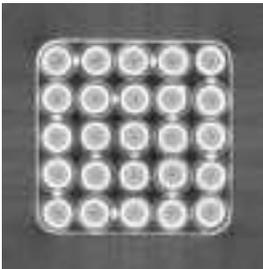
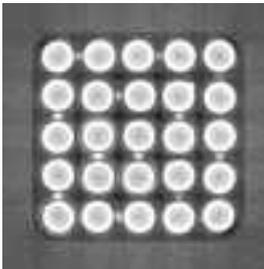
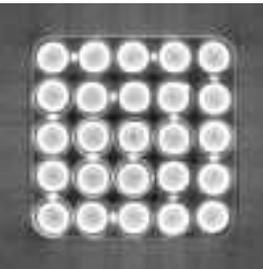
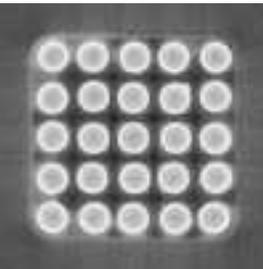
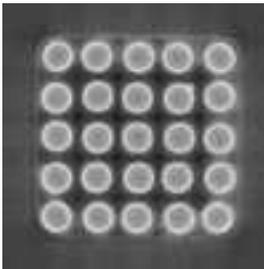
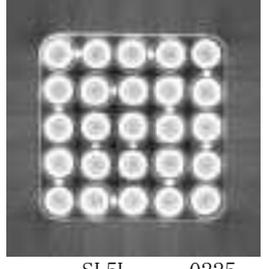
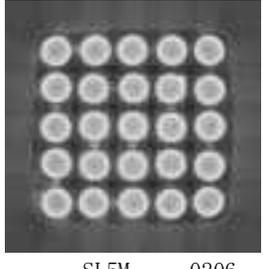
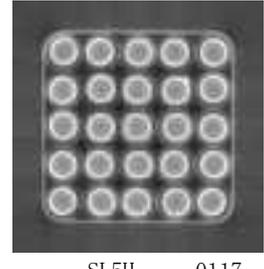
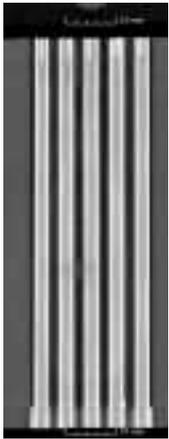
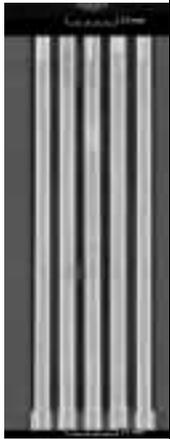
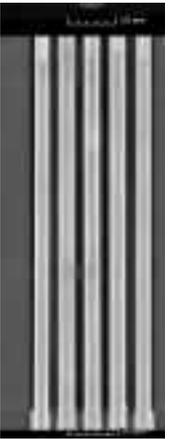
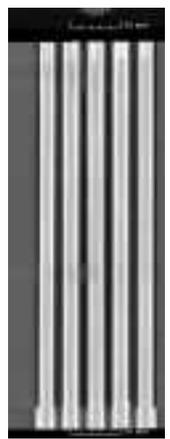
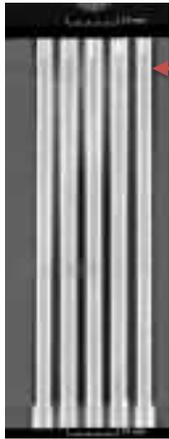
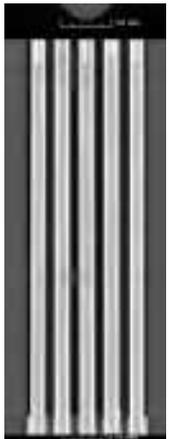
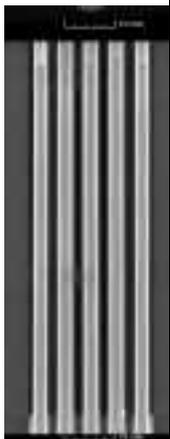
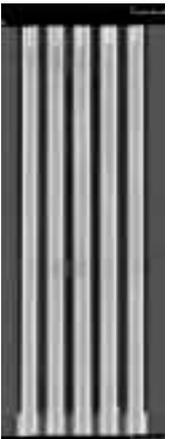
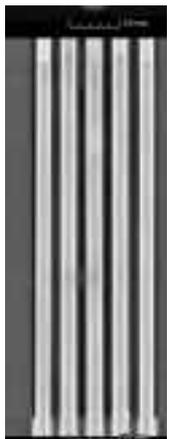
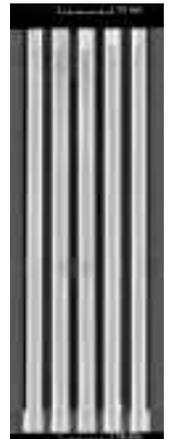
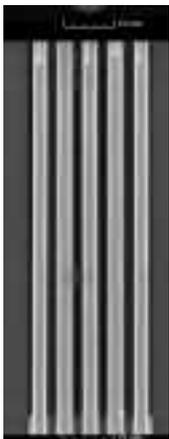
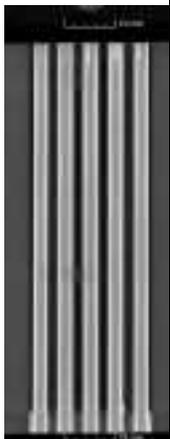
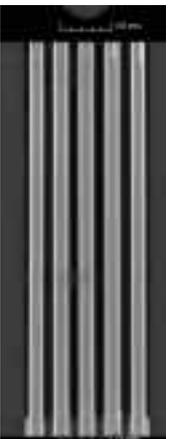
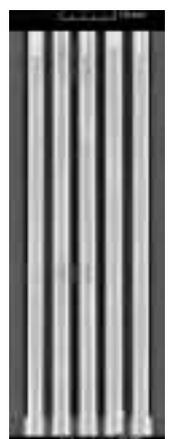
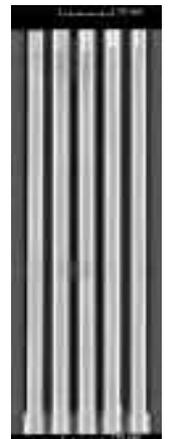
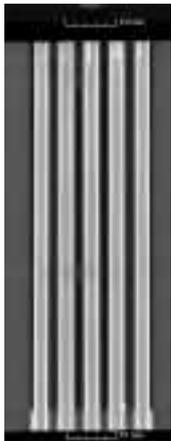
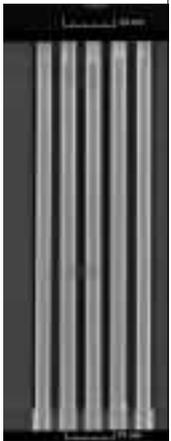
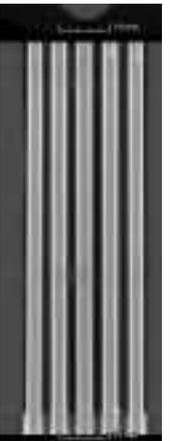
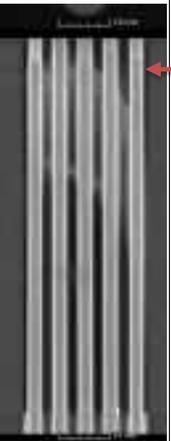
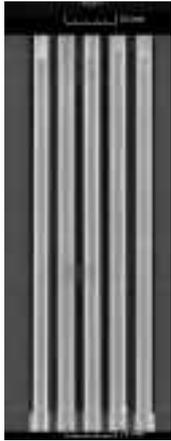
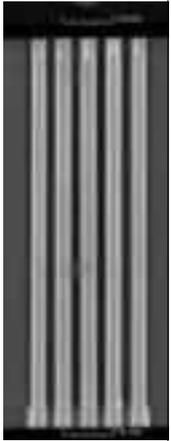
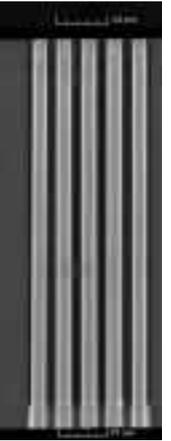
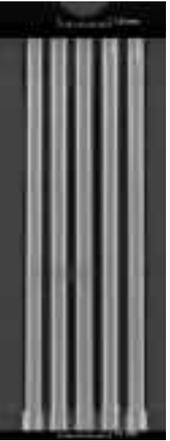
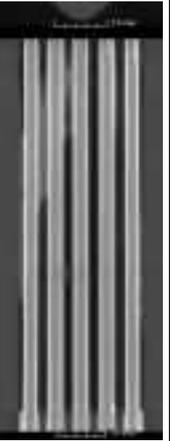
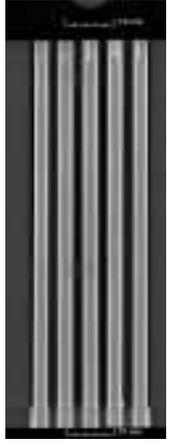
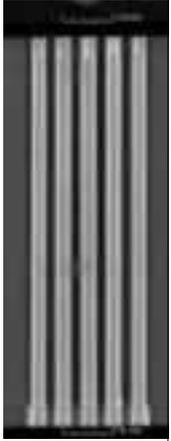
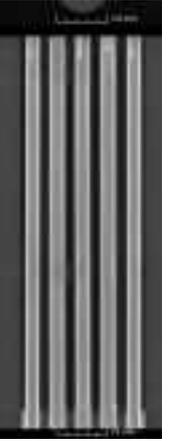
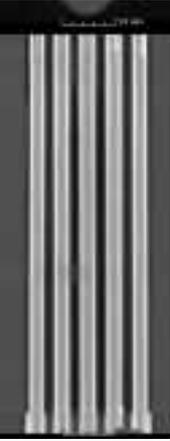
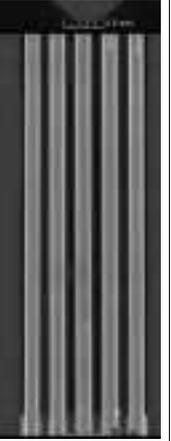
定格出力	%	0.5	1.0	1.5
熱流束	kW/m ²	3.0	6.0	9.0
バンドル出力	kW	1.25	2.50	3.75
塩水濃度 Wt%	20	 SL1L 0205	 SL1M 0219	 SL1H 0220
	30	 SL2L 0221	 SL2M 0218	 SL2H 0220
	40	 SL3L 0226	 SL3M 0219	 SL3H 0219
	50	 SL4L 0224	 SL4M 0207	 SL4H 0116
	60	 SL5L 0225	 SL5M 0206	 SL5H 0117

表 3-16 鉛直断面の析出塩分布一覽(液位 TAF)

定格出力	熱流束	パワートル出力	塩水濃度 (Wt%)				
			20	30	40	50	60
0.5	3.0	1.25					
			SH1L 0214	SH2L 0214	SH3L 0213	SH4L 0210	SH5L 0217
1.0	6.0	2.50					
			SH1M 0220	SH2M 0204	SH3M 0212	SH4M 0212	SH5M 0228
1.5	9.0	3.75					
			SH1H 0204	SH2H 0204	SH3H 0121	SH4H 0227	SH5H 0227

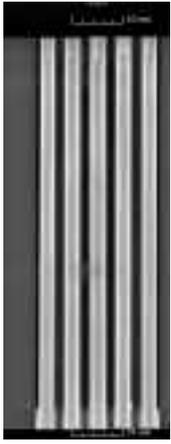
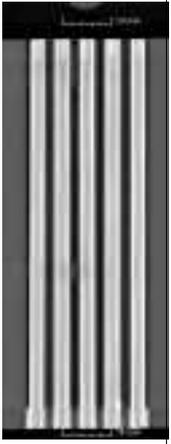
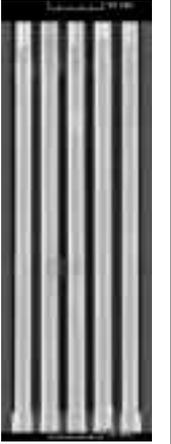
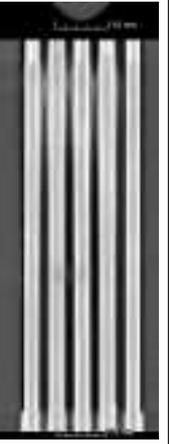
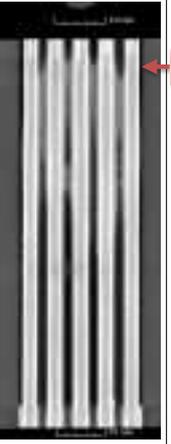
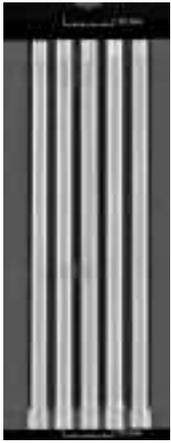
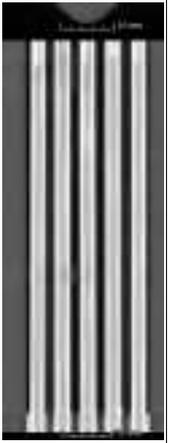
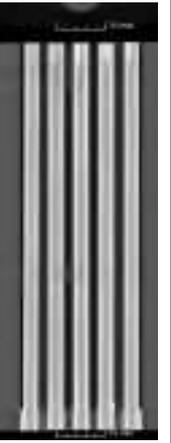
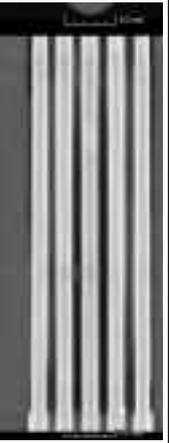
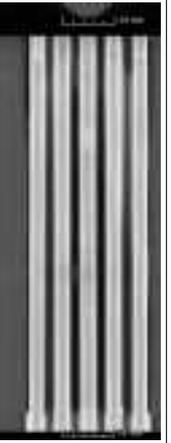
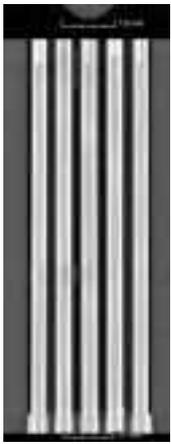
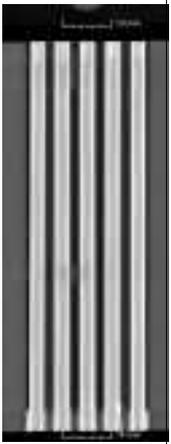
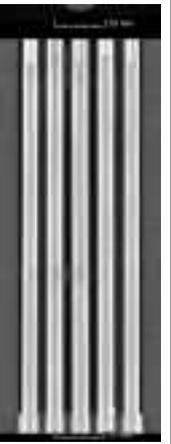
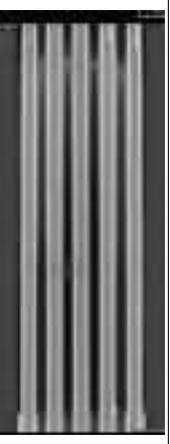
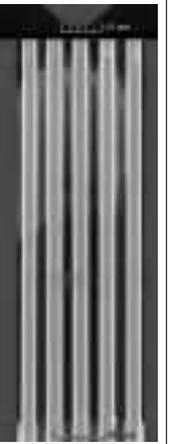
TAF

表 3-17 鉛直断面の析出塩分布一覽(液位 TAF - 100 mm)

定格出力	熱流束	パントル出力	塩水濃度 (Wt%)				
			20	30	40	50	60
0.5	3.0	1.25					
			SM1L 0205	SM2L 0129	SM3L 0124	SM4L 0123	SM5L 0131
1.0	6.0	2.50					
			SM1M 0205	SM2M 0203	SM3M 0130	SM4M 0128	SM5M 0127
1.5	9.0	3.75					
			SM1H 0128	SM2H 0203	SM3H 0130	SM4H 0122	SM5H 0120

TAF

表 3-18 鉛直断面の析出塩分布一覽(液位 TAF - 200 mm)

定格出力	熱流束	パントル出力	塩水濃度 (Wt%)				
			20	30	40	50	60
0.5	3.0	1.25					
			SL1L 0205	SL2L 0221	SL3L 0226	SL4L 0224	SL5L 0225
1.0	6.0	2.50					
			SL1M 0219	SL2M 0218	SL3M 0219	SL4M 0207	SL5M 0206
1.5	9.0	3.75					
			SL1H 0220	SL2H 0220	SL3H 0219	SL4H 0116	SL5H 0117

TAF

表 3-19 溶液中の濃度分布(液位 TAF、全濃度範囲)

定格出力	%	0.5	1.0	1.5
熱流束	kW/m ²	3.0	6.0	9.0
バンドル出力	kW	1.25	2.50	3.75
塩水濃度 Wt %	20			
	30			
	40			
	50			
	60			

表 3-20 溶液中の濃度分布 (液位 TAF、濃度範囲拡大)

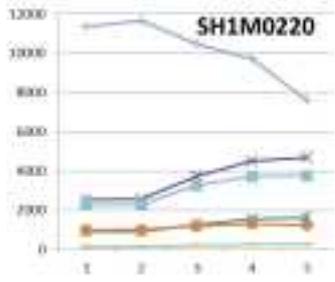
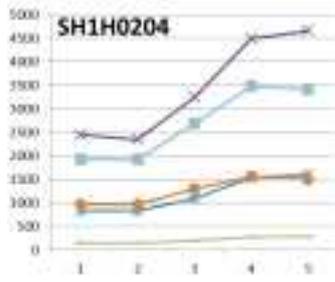
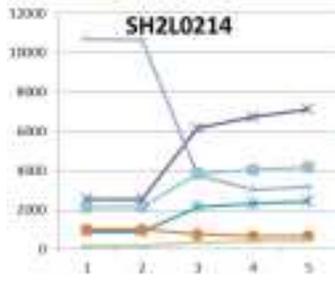
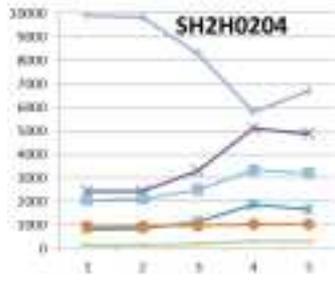
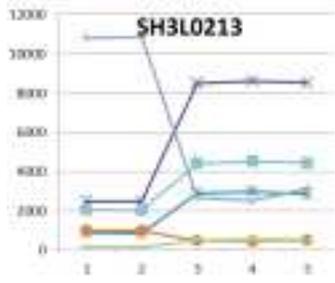
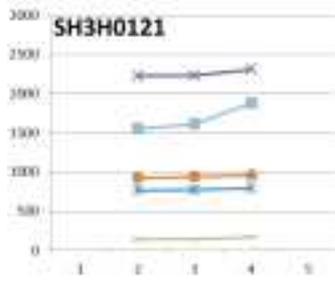
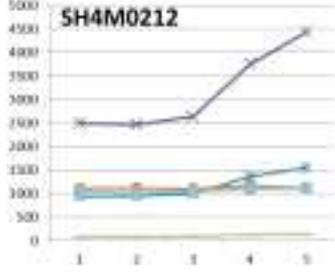
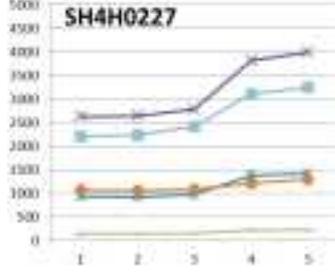
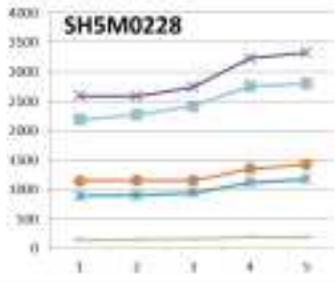
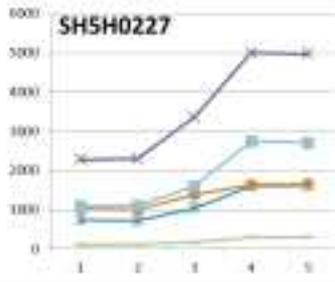
定格出力	%	0.5	1.0	1.5
熱流束	kW/m ²	3.0	6.0	9.0
バンドル出力	kW	1.25	2.50	3.75
塩水濃度 Wt %	20			
	30			
	40			
	50			
	60			

表 3-21 溶液中の濃度分布(液位 TAF - 100 mm、全濃度範囲)

定格出力	%	0.5	1.0	1.5
熱流束	kW/m ²	3.0	6.0	9.0
バンドル出力	kW	1.25	2.50	3.75
塩水濃度 Wt %	20			
	30			
	40			
	50			
	60			

表 3-22 溶液中の濃度分布(液位 TAF - 100 mm、濃度範囲拡大)

定格出力	%	0.5	1.0	1.5
熱流束	kW/m ²	3.0	6.0	9.0
パンプ出力	kW	1.25	2.50	3.75
塩水濃度 Wt%	20			
	30			
	40			
	50			
	60			

表 3-23 溶液中の濃度分布(液位 TAF - 200 mm、全濃度範囲)

定格出力	%	0.5	1.0	1.5
熱流束	kW/m ²	3.0	6.0	9.0
バンドル出力	kW	1.25	2.50	3.75
塩水濃度 Wt %	20			
	30			
	40			
	50			
	60			

表 3-24 溶液中の濃度分布(液位 TAF - 200 mm、濃度範囲拡大)

定格出力	%	0.5	1.0	1.5
熱流束	kW/m ²	3.0	6.0	9.0
パンドル出力	kW	1.25	2.50	3.75
塩水濃度 Wt %	20			
	30			
	40			
	50			
	60			

4. クラスト・デブリベッド冷却特性

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・デブリベッド模擬試験装置

図 4-1 にクラスト・デブリベッド試験装置の構造概念を示す。水平上向き伝熱面上に多孔質体を設置して、沸騰濃縮による伝熱面の温度変化を把握する。沸騰による液位低下を補うために、伝熱面上部から人工海水を散布するノズルが設置されている。具体的には、液位計測により液位が多孔質体上面より 30 mm を下回ると、人工海水が散布される。人工海水は前節でも用いたマリネアートである。

図 4-2 により具体的な試験装置の概念図を示す。散布ノズルまでの流路にヒータが巻かれており、散布ノズル出口温度が飽和温度になるように温度調節されている。上流側の貯水タンクでは人工海水が蒸発により顕著に濃縮しない程度の温度として 70°C に保持している。

図 4-3 に伝熱面内の熱電対配置図を示す。多孔質体の底部の伝熱面は多孔質体と同じ面積 (200 mm×200 mm) で高さ 50 mm のステンレス製矩形ブロックである。矩形ブロックの底面から 10 mm 上方を中心位置として直径 10 mm の貫通孔を開け、外径 10 mm で加熱長さ 200 mm のカートリッジヒータを 15 mm 間隔で挿入した。この構造を持って、矩形ブロックの上面を均一に加熱できる伝熱面としている。個々のカートリッジヒータには熱電対が埋め込まれており、ヒータ温度の異常な上昇を検知して、加熱電源を遮断する制御を行った。ヒータ表面の上限温度は 400°C とした。

図 4-3 に伝熱面表面に埋め込んだ熱電対の構造図を示す。熱電対は外径 0.5 mm の K 型シース熱電対である。伝熱面に直径 0.5 mm の孔を開け、伝熱面裏面から熱電対を挿入し、伝熱面表面が平面となるように研磨した。

図 4-4 に伝熱面表面に埋め込んだ熱電対の配置図を示す。ヒータのピッチに相当する 15 mm 間隔で熱電対を縦横に配置した。よって、14×14 の格子状になるが、最外周はドライアウトする可能性が低いことから、一点ずつ間引いた配置としている。

図 4-5 にクラスト・デブリベット試験体と伝熱面の概念図を示す。クラストデブリベット試験体はステンレス容器に囲まれている。壁面を伝わって冷却水が流下すると多孔質体をバイパスすることになるため、多孔質体側面とステンレス容器の隙間にテフロン薄膜を挿入して流動を抑制した。

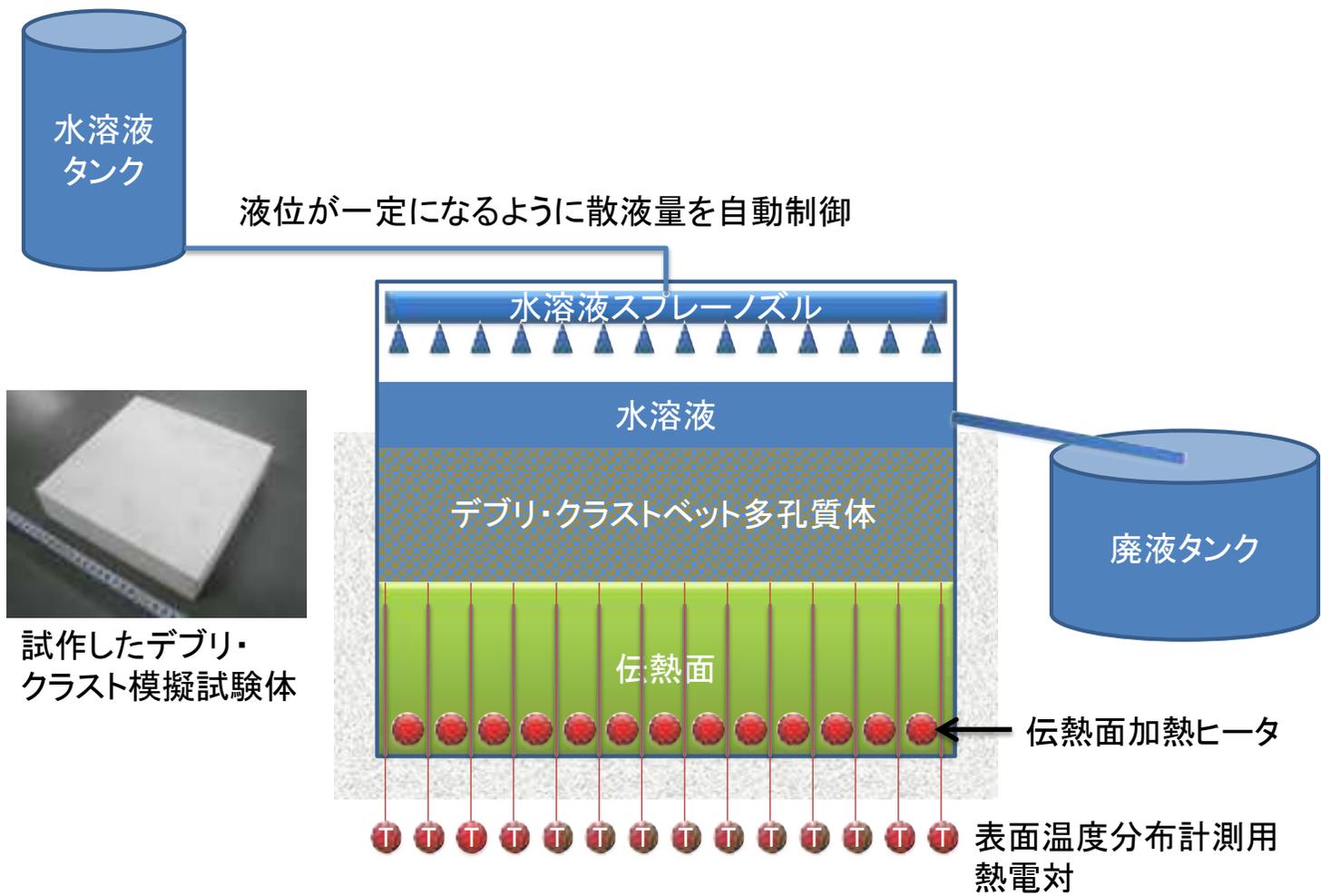


図 4-1 クラスト・デブリベット試験装置の構造概念

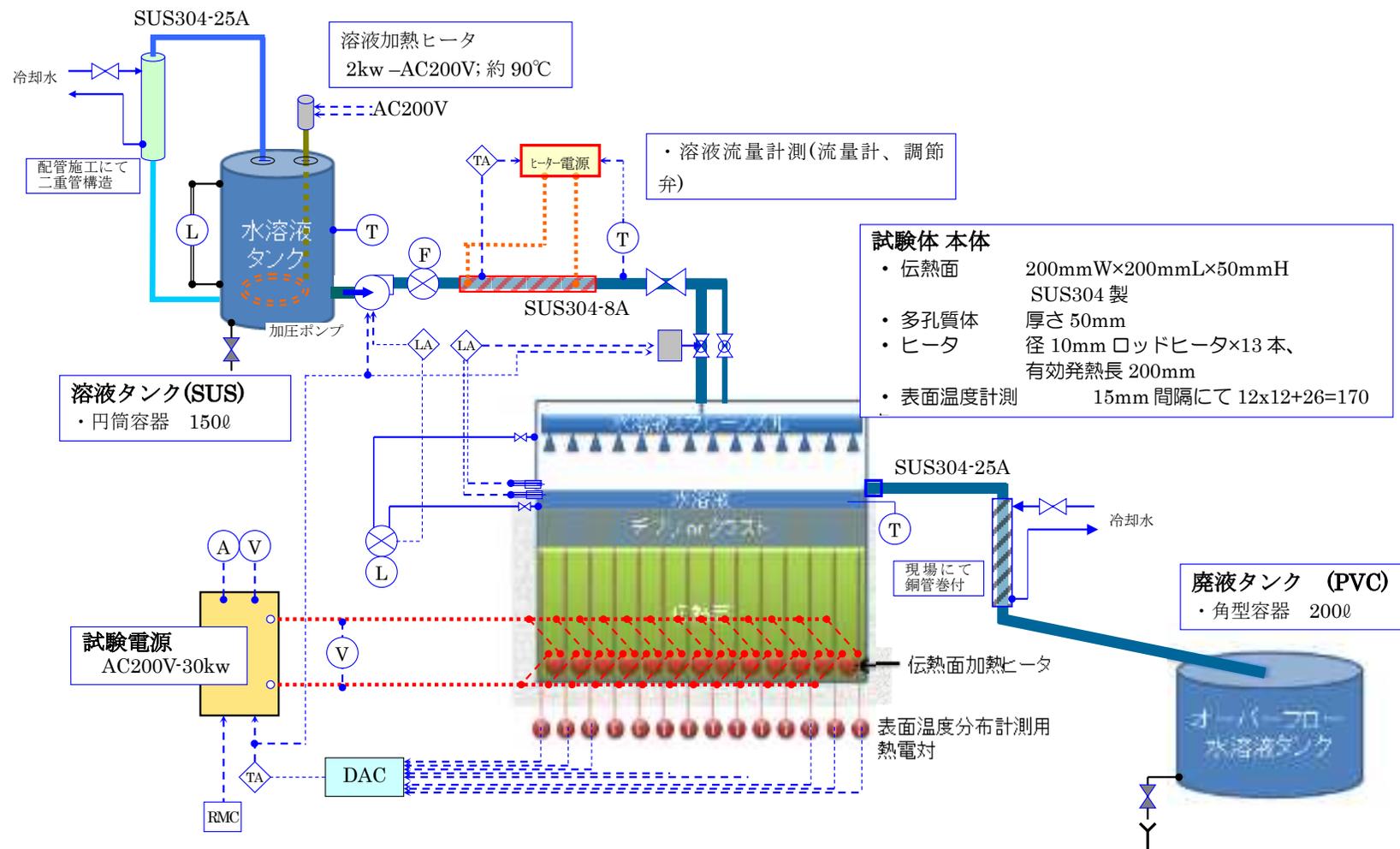


図 4-2 クラスト・デブリベット試験装置の概念図

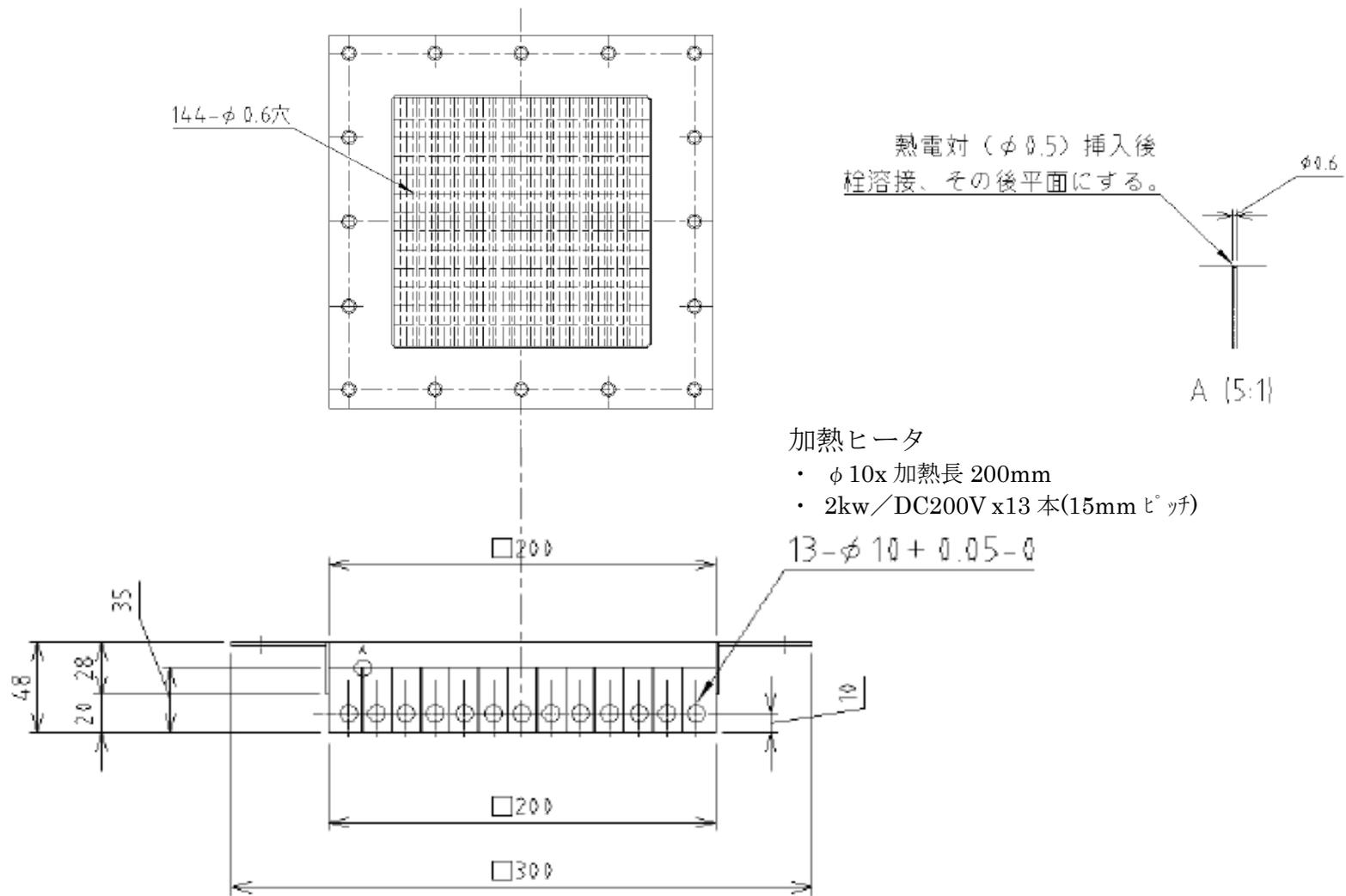


図 4-3 伝熱面内の熱電対配置図

熱電対配列→

ヒーター結線例

P4		P5		P6		P7		P8		P9		P10	
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	P11
P3	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11	L12	
	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	K11	K12	P12
P2	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10	J11	J12	
	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12	P13
P1	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10	G11	G12	
	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	N13
N1	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	N12
N2	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	N11
N3	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	
	N4		N5		N6		N7		N8		N9		N10

図 4-4 伝熱面熱電対の配置図

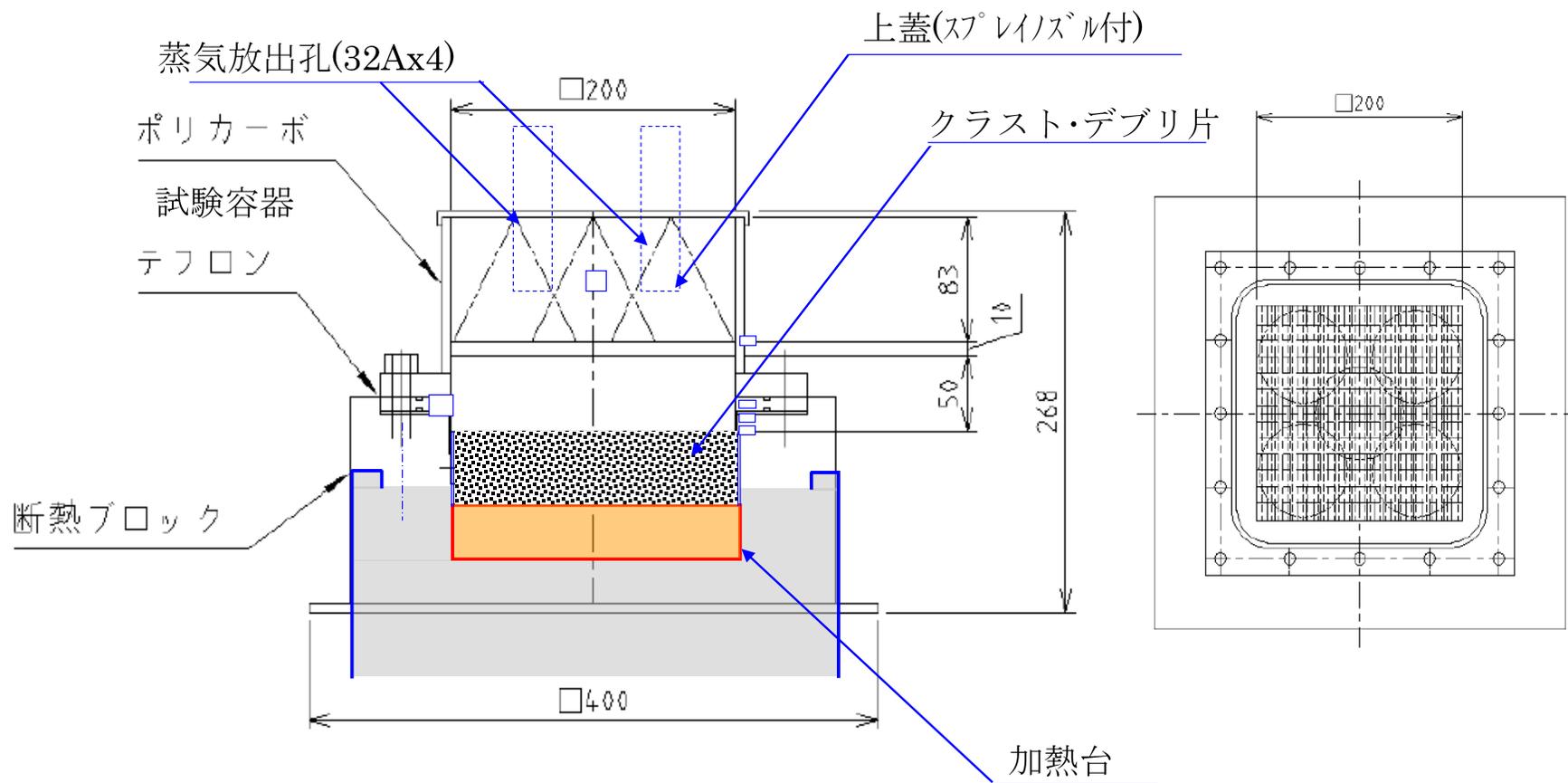


図 4-5 クラスト・デブリベット試験体と伝熱面の概念図

4.2. プール沸騰試験パラメータ

表 4-1 に沸騰濃縮試験パラメータを示す。試験条件は、多孔質体の粉末粒径 5 水準と熱流束 3 水準であり、合計ケース数は $5 \times 3 = 15$ ケースとした。昨年度製作した多孔質体は粉末の中心粒径は 0.1, 0.3, 0.5, 1.0, 1.2 mm の 5 水準である。また熱流束は 20, 40, 60 kW/m² である。本研究に於ける熱流束は伝熱面に与えた熱量を上面の面積 ($0.200 \text{ m} \times 0.2 \text{ m} = 0.04 \text{ m}^2$) で除した値である。合計ケース数は、多孔質体の粒径 5 水準と熱流束 3 水準を掛け合わせ、 $5 \times 3 = 45$ ケースである。

表 4-2 に試験条件の命名法を示す。試験条件の略称は 8 桁の英数字で記載する。最初の 4 文字は試験パラメータ値を、続く 4 文字は試験日の月と日を表す。一例として、「S03H0108」は溶液が海水、粉末粒径は 0.3 mm、熱流束は 60 kW/m²、試験日が 1 月 8 日を示す。

試験溶液は前述の人工海水マリンアート SF-1 である。前出の表 3-6 に、人工海水の組成を示す。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と同じ濃度で濃縮はしない。すなわち 1 kg のイオン交換樹脂を通した水に、マリンアート 38 g を溶解させた溶液である。

初期プール液位は多孔質体上面から 50 mm とした。試験に従い蒸発することになるが、試験時間が短いため液位の減少は小さい。溶液温度は初期から飽和温度とした。

表 4-1 プール沸騰試験パラメータ

パラメータ	単位	範囲
多孔質体粉末粒径	mm	0.1, 0.3, 0.5, 1.0, 1.2
熱流束	kW/m ²	20, 40, 60

表 4-2 プール沸騰試験条件の命名法

溶液	粉末粒径	熱流束	日付
S:海水	01:0.1 mm	L:低, 20 kW/m ²	MMDD 月日の4桁
W:水	03:0.3 mm	M:中, 40 kW/m ²	
	05:0.5 mm	H:高, 60 kW/m ²	
	10:1.0 mm		
	12:1.2 mm		

一例として、「S03H0108」は溶液が海水、粉末粒径は 0.3 mm、熱流束は 60 kW/m²、試験日が 1 月 8 日を示す。

4.3. プール沸騰試験手順

プール沸騰試験の準備として、多孔質体を溶液（水または海水）に浸漬し、溶液が十分浸透させた。溶液を飽和にするために、マイクロヒータを溶液に浸漬し、溶液を飽和温度に維持した。

初期伝熱面温度が室温に影響されないように、伝熱面表面温度が 100 °C になるように伝熱面を加熱した。試験パラメータの熱流束と比較すると、1/5 以下の熱流束で加熱したことになる。表面温度が時間に対して変化が小さくなったことを確認して、目標の熱流束を伝熱面に与えた。この時刻を時間 0 s と定めた。

全てのデータを 2 s 間隔で収録した。十分な温度変化が得られるまで試験を継続したが、高出力の場合には、パッキンの損傷を防ぐため伝熱面表面温度が 400 °C になる前に停止した。

4.4. プール沸騰試験結果および考察

伝熱面表面温度を計測する熱電対の指示値はいずれも中心部が最も高く、放熱の影響を受けやすい周辺部ではやや低い温度を示した。断熱により温度差は小さく抑制されていることから、事故時のクラスト・デブリベットの広い伝熱面を均一発熱加熱条件で模擬できていると考えられる。以降の実験では、伝熱面温度として、中央の4点、すなわち図4-4の熱電対配置図でのG6, G7, F6, F7の平均値で代表させた。

図4-6から図4-10に熱流束 20 kW/m^2 の結果を、図4-11から図4-15に熱流束 40 kW/m^2 の結果を、図4-16から図4-20に熱流束 60 kW/m^2 の結果を、それぞれの粒径毎に示す。熱流束が大きいくほど、伝熱面表面の温度上昇速度が大きくなる。しかしながら、多孔質体の粉末粒径の影響は小さい。また水と海水との伝熱面表面の温度上昇における有意な差は見られない。使用した多孔質体は占積率がいずれも約50%である。粒径 0.1 mm から 1.2 mm の粒子を密に詰めた多孔質体では、多孔質体表面で沸騰し、多孔質体内部に水や海水が流入しにくいことが流体種類の違いが現れない原因であると考えられる。

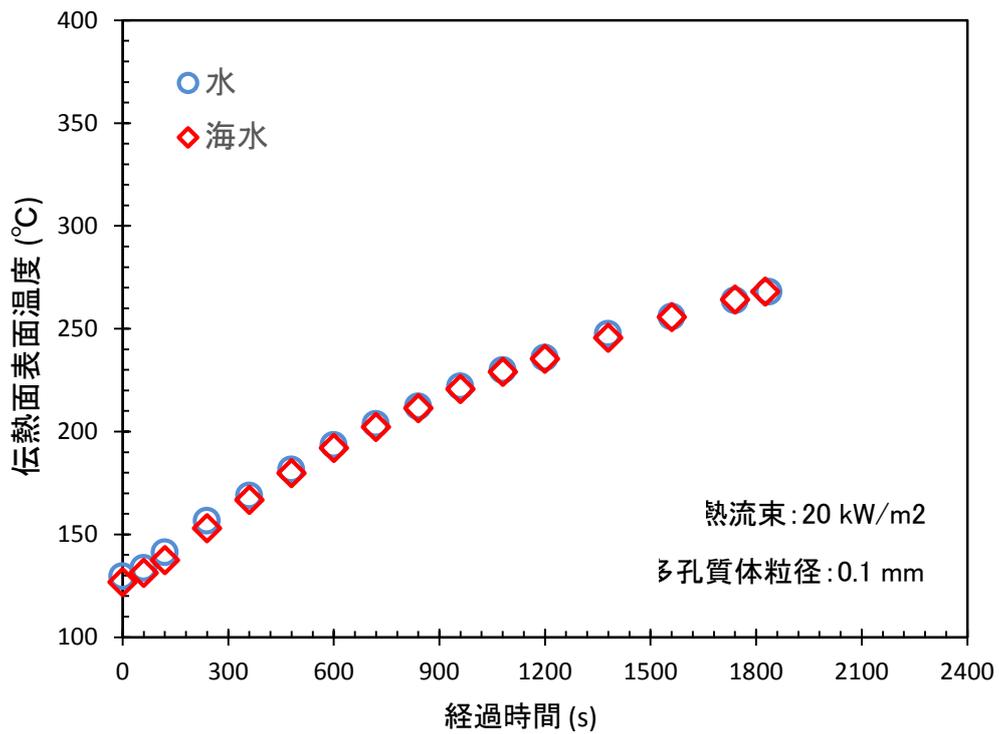


図 4-6 伝熱面表面温度の時間変化 W, S01L

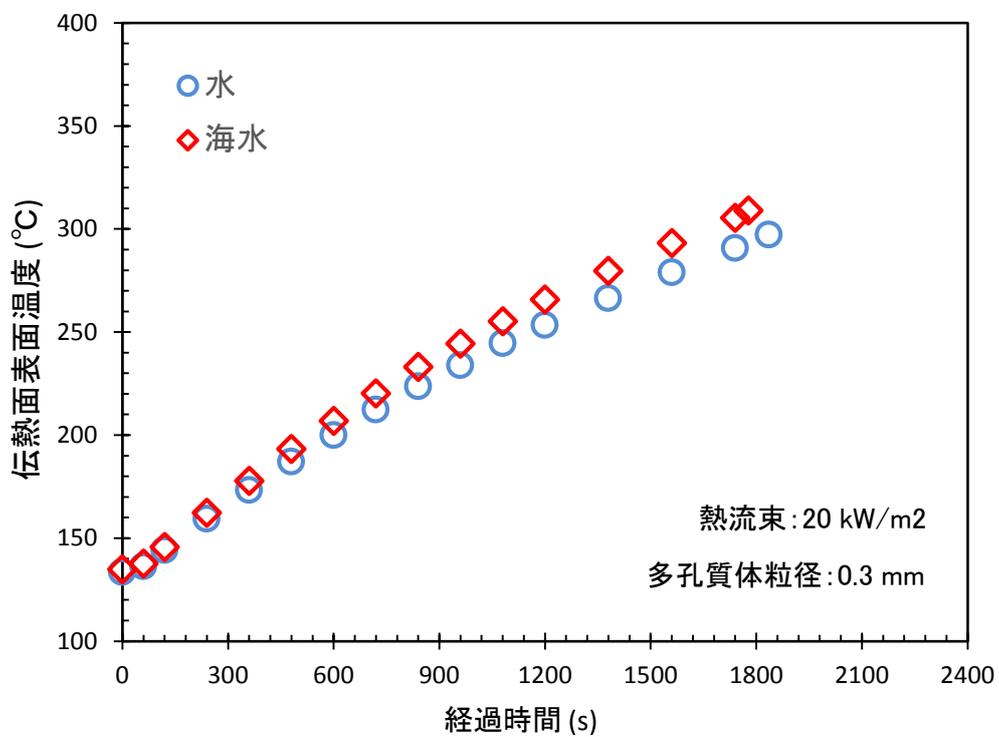


図 4-7 伝熱面表面温度の時間変化 W, S03L

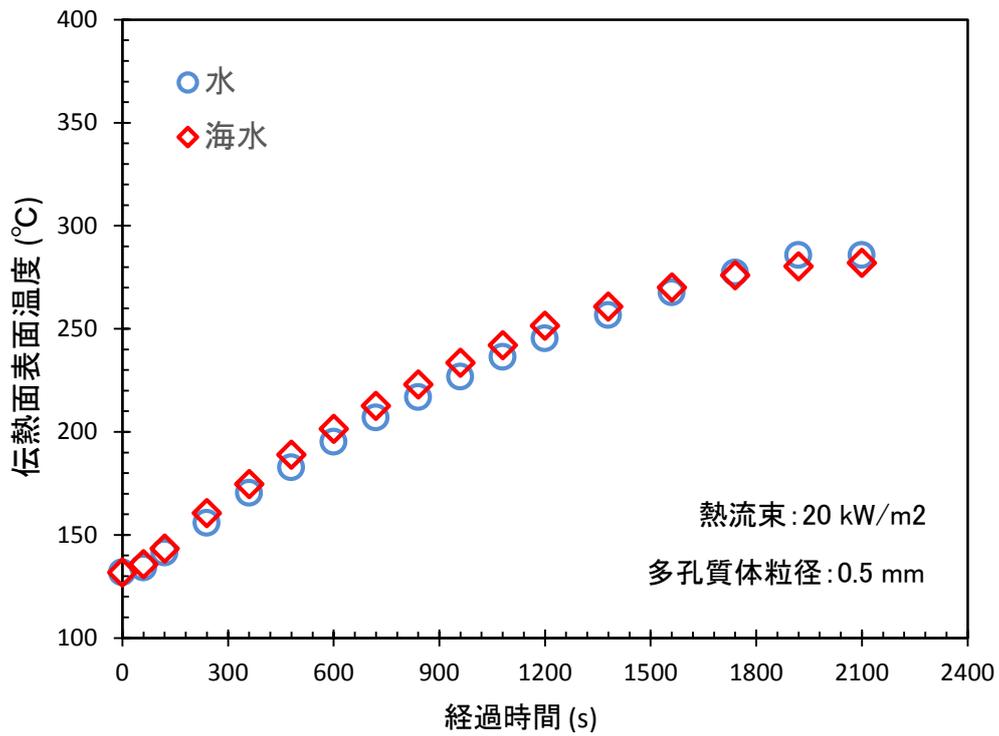


図 4-8 伝熱面表面温度の時間変化 W, S05L

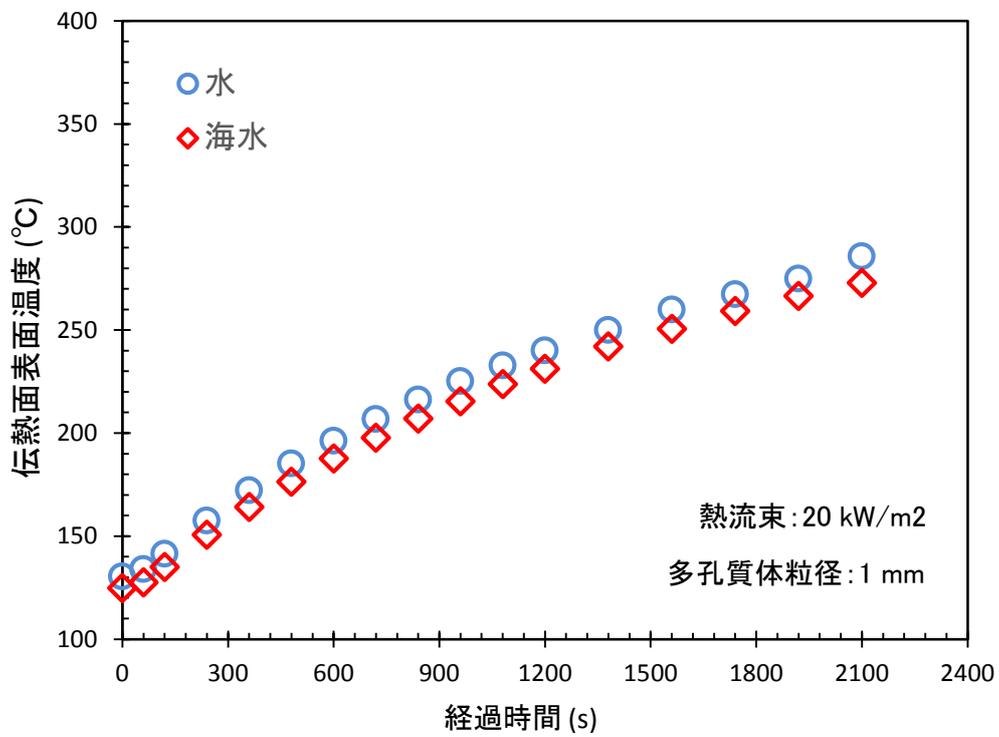


図 4-9 伝熱面表面温度の時間変化 W, S10L

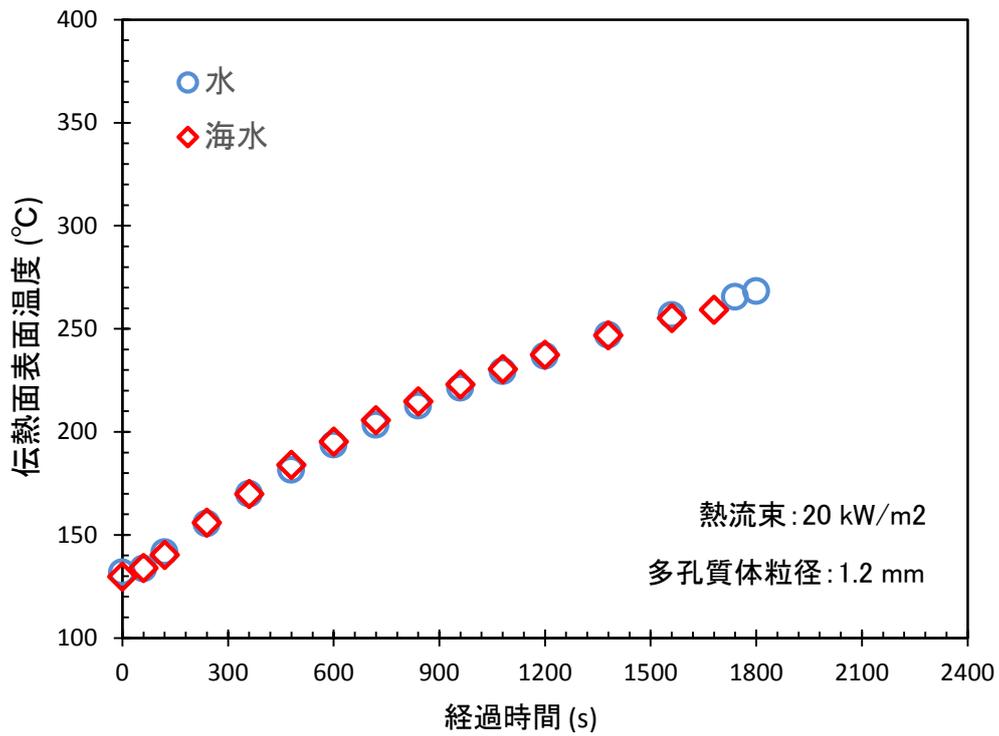


図 4-10 伝熱面表面温度の時間変化 W, S12L

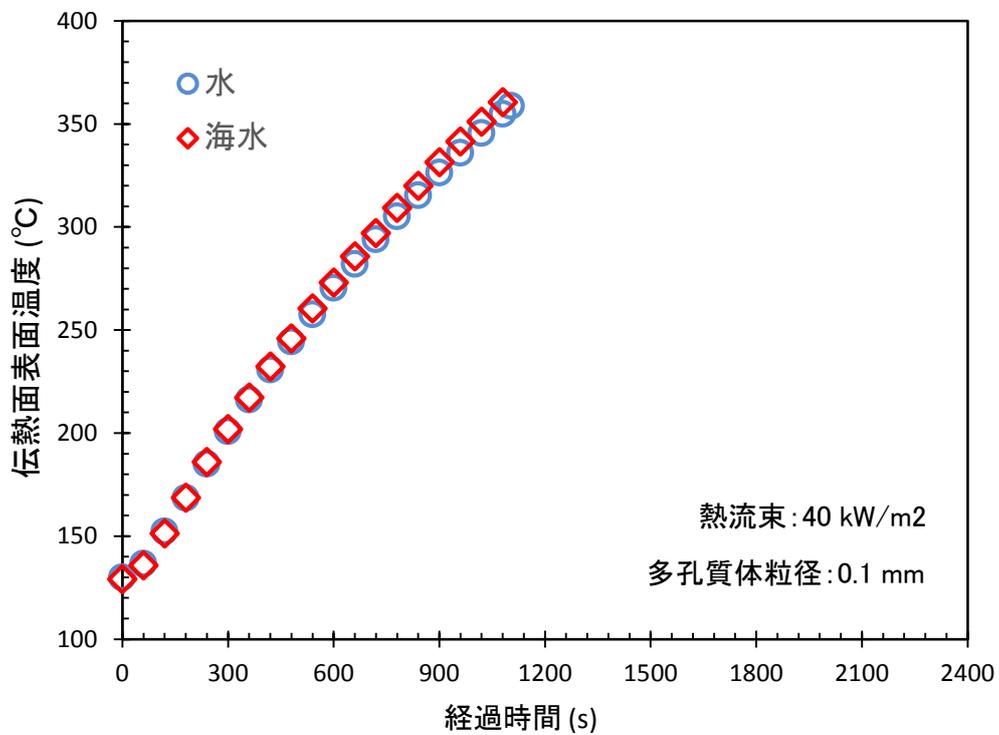


図 4-11 伝熱面表面温度の時間変化 W, S01M

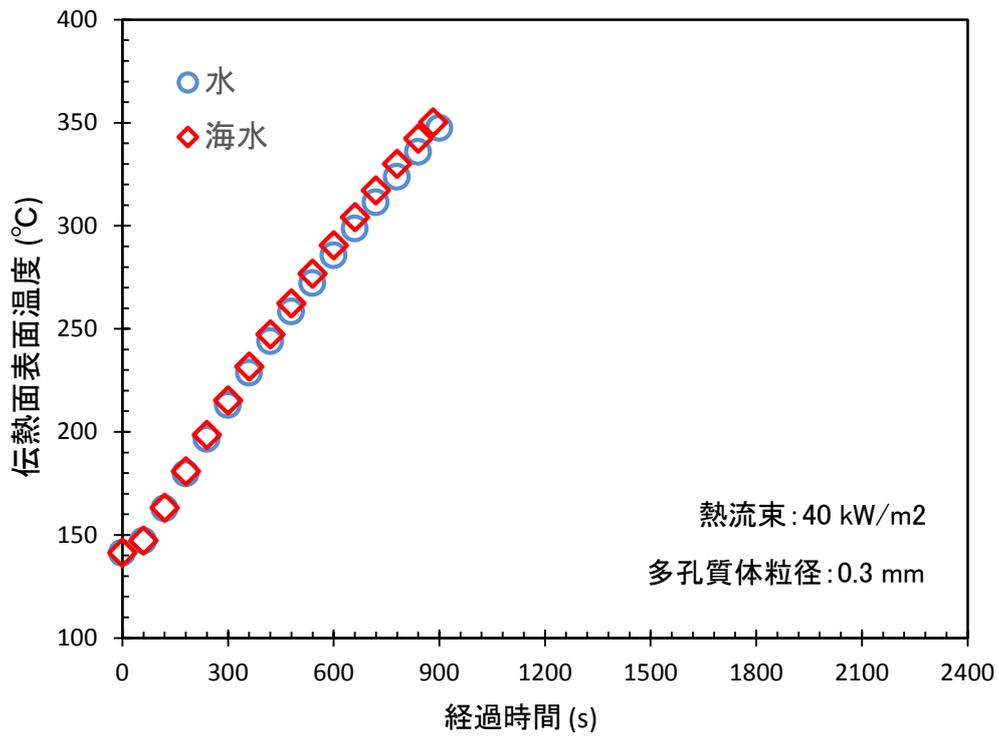


図 4-12 伝熱面表面温度の時間変化 W, S03M

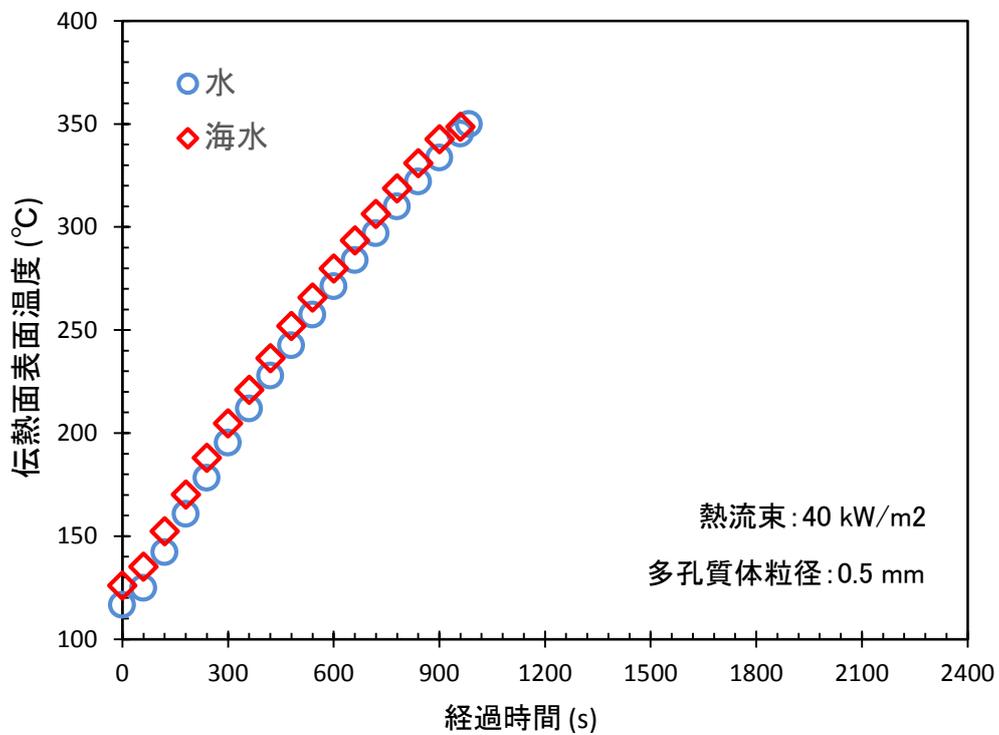


図 4-13 伝熱面表面温度の時間変化 W, S05M

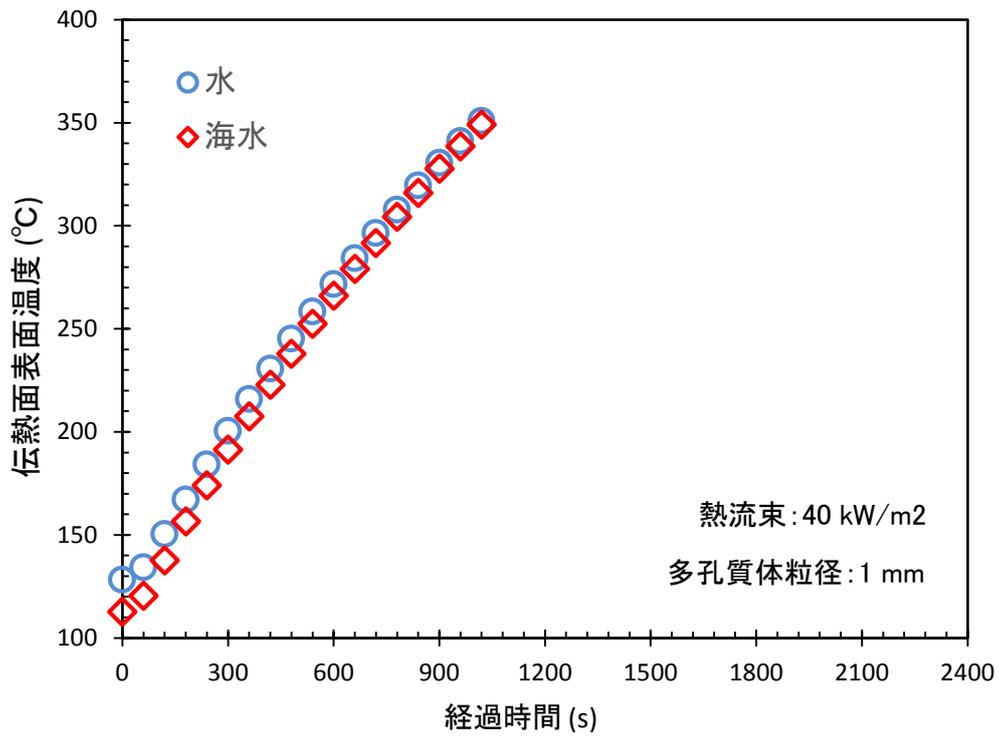


図 4-14 伝熱面表面温度の時間変化 W, S10M

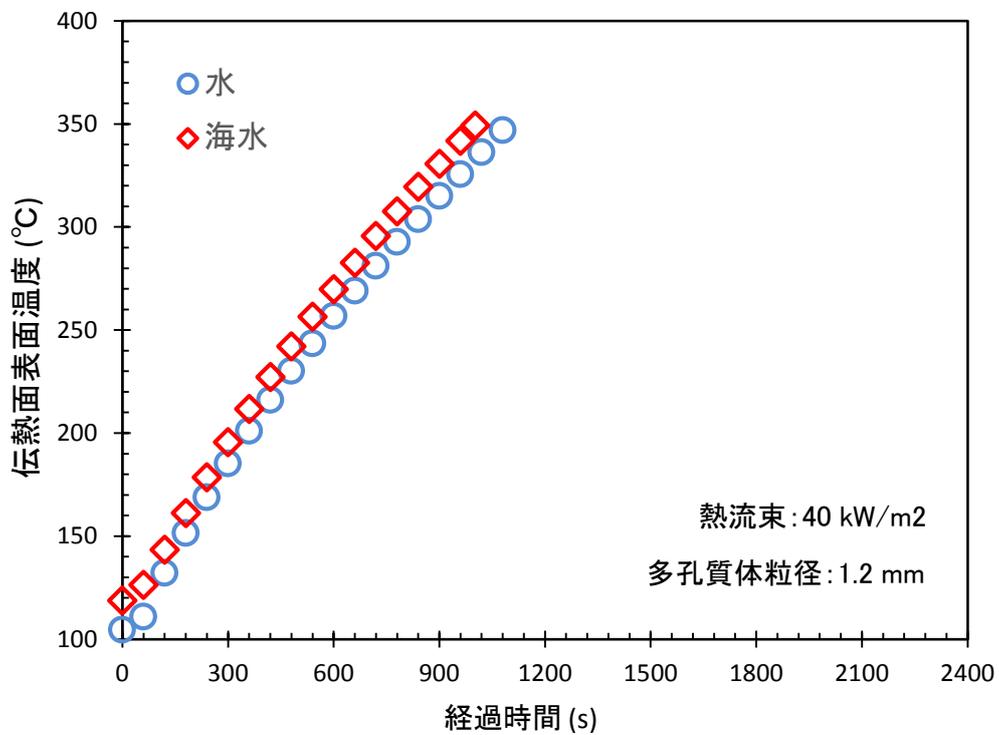


図 4-15 伝熱面表面温度の時間変化 W, S12M

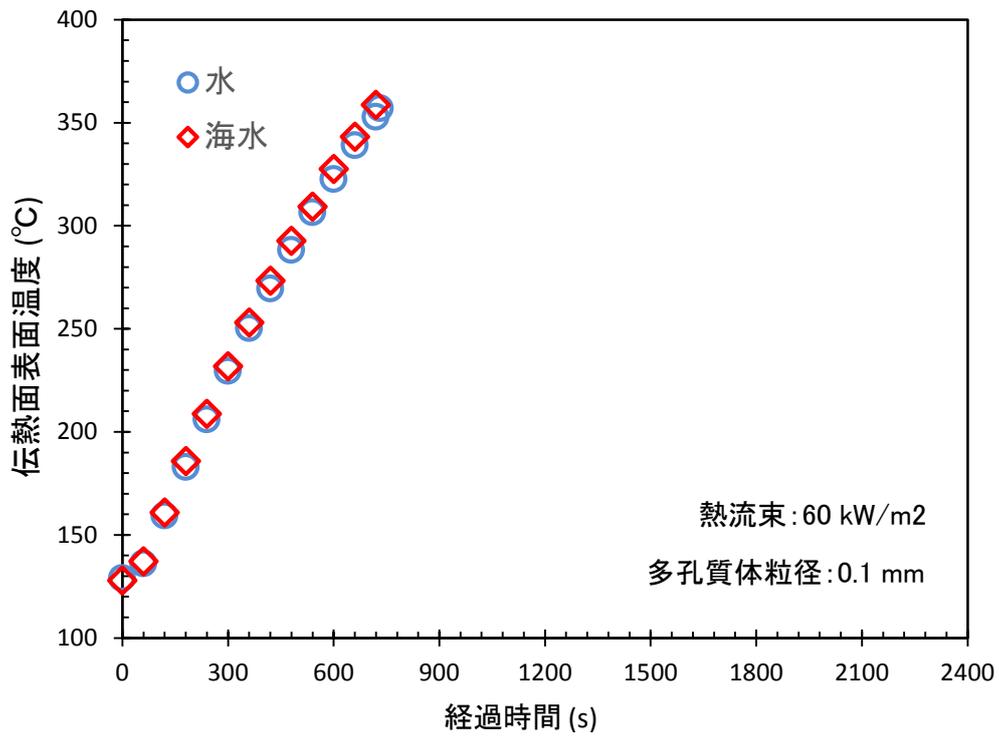


図 4-16 伝熱面表面温度の時間変化 W, S01H

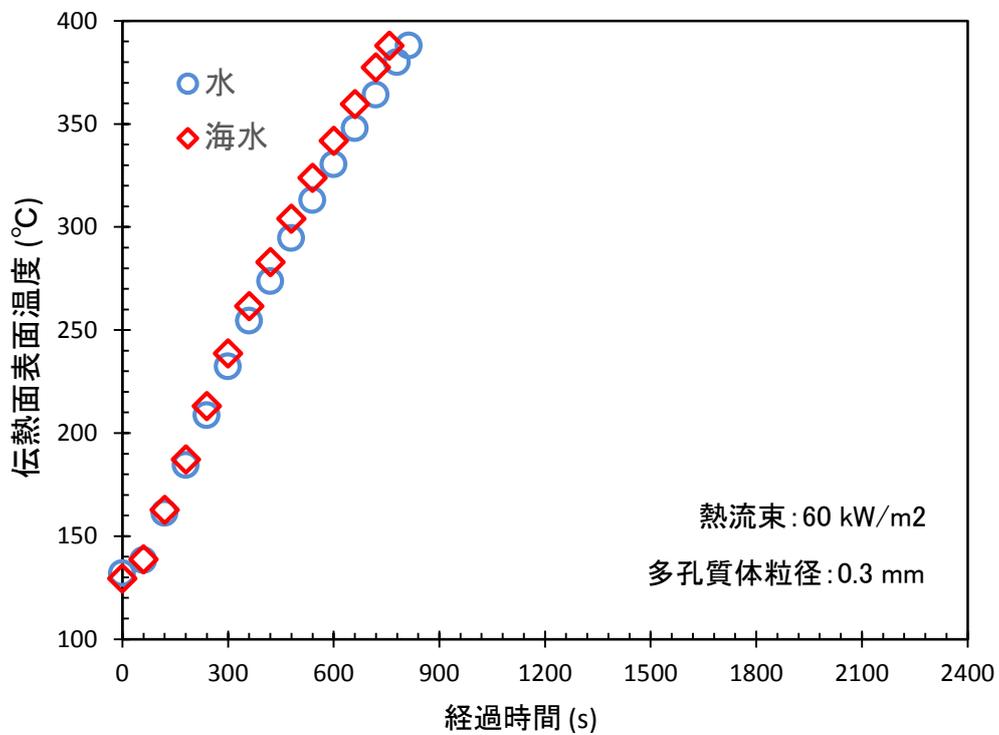


図 4-17 伝熱面表面温度の時間変化 W, S03H

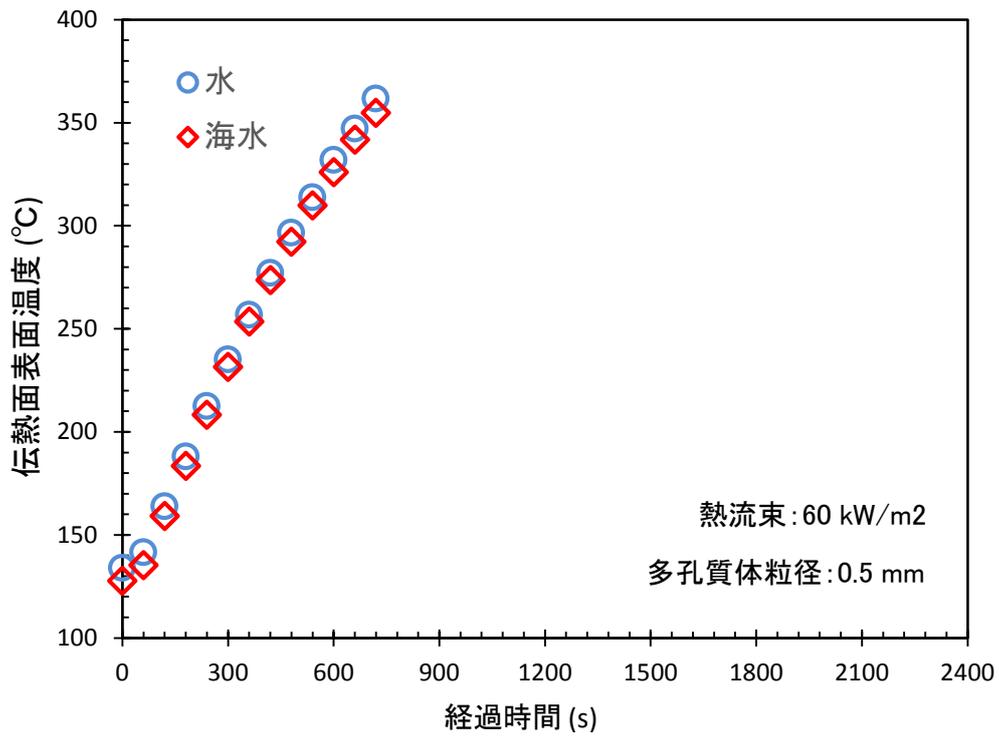


図 4-18 伝熱面表面温度の時間変化 W, S05H

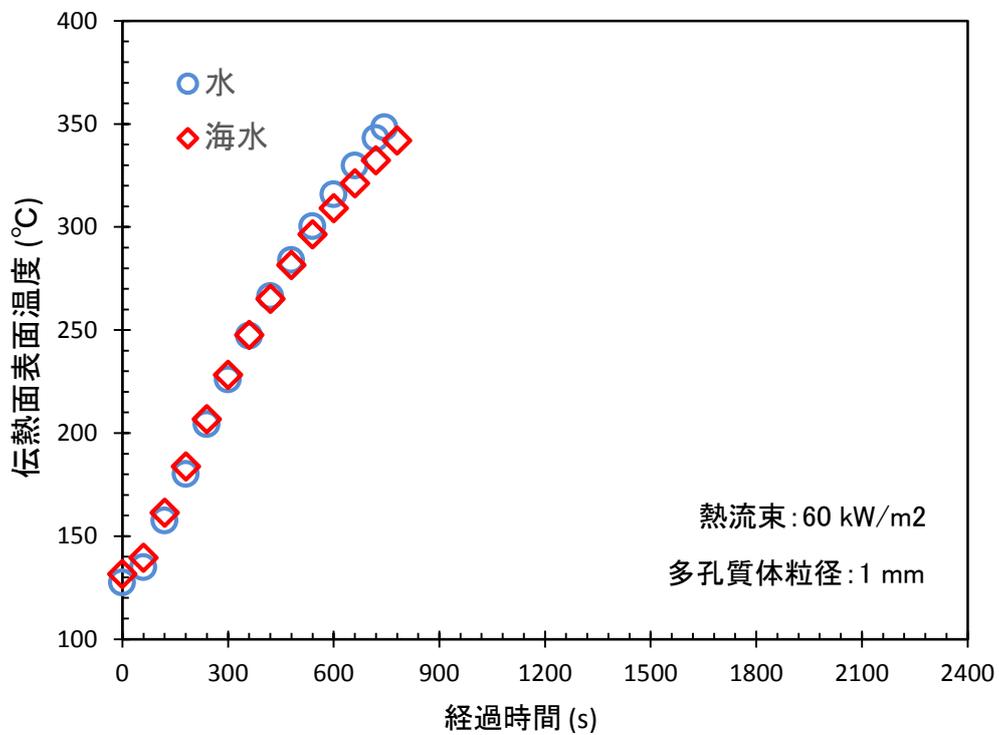


図 4-19 伝熱面表面温度の時間変化 W, S10H

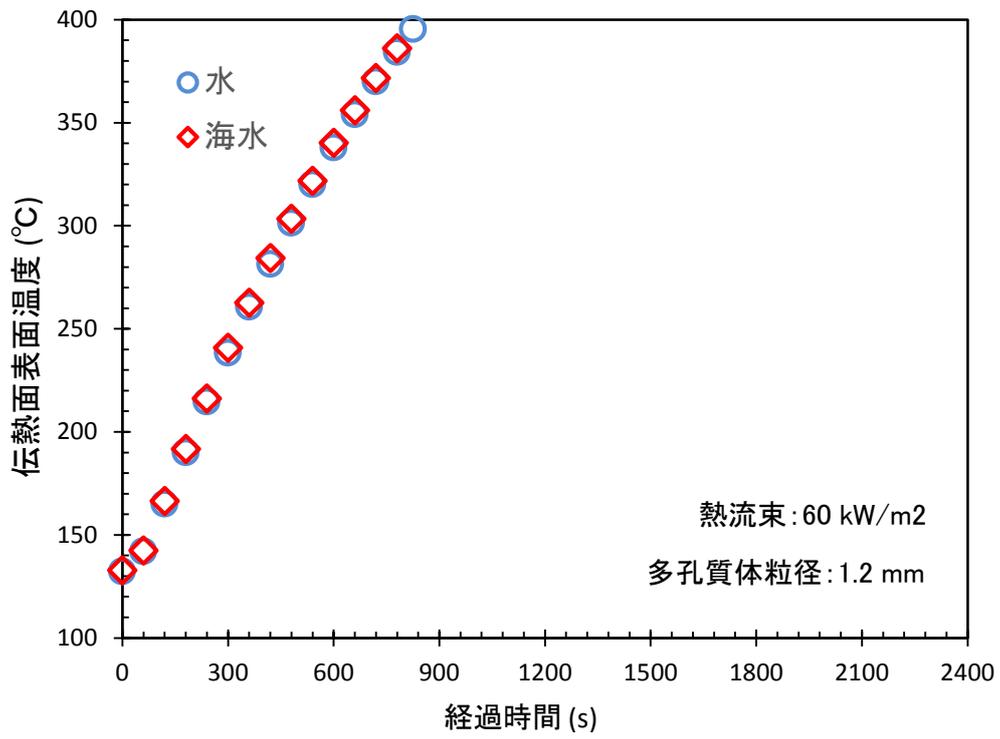


図 4-20 伝熱面表面温度の時間時間変化 W, S12H

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

塩化物イオン共存溶液の硫酸カルシウム溶解度の温度依存性や、ホウ酸と塩化ナトリウム混合溶液の溶解度の温度依存性を調査した。

(2) 塩水自動採取装置の改良

海水が沸騰濃縮される場合や、五ホウ酸ナトリウム水溶液が低温で粘性が高くなることに配慮して、昨年度製造した塩水自動採取装置のマイクロシリンジや管路をステンレス製に変更し、ヒータを巻いて保温することで、飽和温度近傍で恒温維持することが可能になった。人工海水と五ホウ酸ナトリウム水溶液を用いた実験を行い、広い濃度範囲で精度良く自動採取できることを確認した。

(3) 差圧計側方の改良

差圧導管内の塩水濃度変動が差圧計測値に影響することを抑制するため、導管内にシリコーンを封入した差圧導管構造を設計・製作した。シリコーンを介して塩分が拡散しないことを実験で確認した。

(4) 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 の短尺バンドルを作成した。沸騰濃縮時間と熱流束から濃度を求める式を導出した。人工海水を用いた沸騰濃縮試験を出力 3 水準、目標濃度（沸騰濃縮時間）5 水準、液位 3 水準で行った。三次元 X 線 CT で析出した塩のバンドル内分布を観察した結果、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い。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。スぺーサ部では外周側に顕著に析出する。低出力では析出が顕著であることから、ボイド変動が小さい外周側で析出し易い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 濃度は目標濃度が 30 wt% 以上の場合は下流側に行くにつれて低くなった。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 6 元素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。

(5) クラスト・デブリベット伝熱面の海水沸騰熱伝達試験

多孔質体を伝熱面上に設置したプール沸騰実験装置を製作した。熱流束 3 水準、多孔質体粒径 5 水準に対してプール沸騰実験を実施した結果、伝熱面表面の温度上昇は海水と水とで有意な差は得られなかった。昨年度製作した多孔質体の粒径範囲(0.1 mm～1.2 mm)では多孔質体内に溶液が浸透できずに表面沸騰が支配的なために顕著な違いが現れなかったことが原因と考えられる。

紙へリサイクル可