

原子力規制委員会原子力規制庁長官官房参事官殿

平成27年度海水及び ホウ酸注入影響評価試験

成果報告書

平成 28 年 3 月

一般財団法人 電力中央研究所

原子力技術研究所



CRIEPI

Central Research Institute of
Electric Power Industry

目次

1. 緒言	6
2. 燃料バンドル除熱性能	7
2.1. 短尺バンドル試験装置	7
2.1.1. 基本仕様	7
2.1.2. 装置概要	7
2.1.3. 装置詳細仕様	8
2.1.4. X線 CT 撮影設備	20
2.1.5. 試験条件及び試験手順	23
2.1.6. 試験溶液の調整法	23
2.1.7. 沸騰濃縮試験パラメータ	26
2.2. 短尺バンドル沸騰試験結果	28
2.2.1. 濃縮海水のバンドル内ボイド率分布	28
2.2.2. 混合液のバンドル内ボイド率分布	29
2.2.3. 総合評価	29
3. クラスト冷却特性	36
3.1. クラスト中クラック伝熱特性試験装置	36
3.1.1. 装置構成	36
3.1.2. 補給水供給機器	37
3.1.3. 水槽	37
3.1.4. 模擬クラスト多孔質体	43
3.1.5. 伝熱面の構造	47
3.1.6. 計測条件	49
3.1.7. 試験溶液	49
3.1.8. プール沸騰試験パラメータ	49
3.2. 試験手順	51
3.3. プール沸騰伝熱試験	52
3.3.1. 沸騰様相の観察	52
3.3.2. 溶液種類の影響	53
3.3.3. クラックの影響	53

3.3.4.	粒径の影響	53
3.3.5.	総合評価	54
4.	まとめ	62

表目次

表 2-1	短尺バンドル試験体構成部材の概略仕様一覧.....	18
表 2-2	人工海水の成分.....	25
表 2-3	バンドル内沸騰試験条件.....	27
表 2-4	バンドル内沸騰試験番号命名法.....	27
表 3-1	プール沸騰試験条件.....	50
表 3-2	プール沸騰試験番号命名法.....	50

図目次

図 2-1	短尺バンドル試験装置概要	14
図 2-2	試験バンドルのロッド配列及び熱電対位置	15
図 2-3	短尺ヒータロッド形状寸法図	16
図 2-4	短尺バンドル試験体の概念図	17
図 2-5	5×5 バンドル試験スペーサの形状寸法	19
図 2-6	X 線 CT 設備の概観	22
図 2-7	直線加速器と試験体、検出器の位置関係	22
図 2-8	バンドル内ボイド率分布（濃縮海水, TAF）	30
図 2-9	バンドル内ボイド率分布（濃縮海水, TAF-100mm）	31
図 2-10	バンドル内ボイド率分布（濃縮海水, TAF-200mm）	32
図 2-11	バンドル内ボイド率分布（混合液, TAF）	33
図 2-12	バンドル内ボイド率分布（混合液, TAF-100mm）	34
図 2-13	バンドル内ボイド率分布（混合液, TAF-200mm）	35
図 3-1	クラスト中クラック伝熱特性試験装置の概念図	38
図 3-2	試験装置の外観写真	39
図 3-3	伝熱面と水槽の概念図	40
図 3-4	伝熱面の組立図（側面）	41
図 3-5	伝熱面の組立図（上面）	42
図 3-6	多孔質体三次元造型機	44
図 3-7	多孔質体三次元造型中の様子	45
図 3-8	使用粉末と造形物の X 線回折結果	46
図 3-9	ヒータ及び温度計測用のステンレス鋼箔の諸元	48
図 3-10	120 kW/m ² における沸騰様相	55
図 3-11	240 kW/m ² における沸騰様相	56
図 3-12	360 kW/m ² における沸騰様相	57
図 3-13	沸騰曲線（クラック無、小粒径に対する溶液種類の影響）	58
図 3-14	沸騰曲線（クラック有、小粒径に対する溶液種類の影響）	58
図 3-15	沸騰曲線（クラック無、大粒径に対する溶液種類の影響）	59
図 3-16	沸騰曲線（クラック有、大粒径に対する溶液種類の影響）	59

図 3-17	沸騰曲線（水に対するクラック有無と粒径の影響）	60
図 3-18	沸騰曲線（濃縮海水に対するクラック有無と粒径の影響）	60
図 3-19	沸騰曲線（混合液に対するクラック有無と粒径の影響）	61
図 3-20	沸騰曲線（溶液とクラック有無、粒径の影響）	61

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27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及びホウ酸水との混合液が注入される場合を対象に、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. 燃料バンドル除熱性能

本章では短尺バンドルを用いた沸騰濃縮試験について述べる。スペーサ間隔に対応する高さ 530 mm の 5 本×5 本の短尺バンドルを用いて、人工海水を 2.5 倍に濃縮した溶液、並びに人工海水と五ホウ酸ナトリウムとの混合液（重量濃度は前記の濃縮海水と同一）中での沸騰濃縮試験を行う。沸騰試験中のバンドル試験体を三次元 X 線 CT 撮影し、解析の妥当性確認に必要な三次元ボイド率分布の実験データベースを得ることが目的である。

2.1. 短尺バンドル試験装置

昨年度は、短尺バンドルを用いた沸騰濃縮試験を実施し、析出塩を X 線 CT 撮影して、析出量と塩見掛け密度をバンドル試験体内の各位置で取得した。本年度は同試験設備を用いて、本年度は塩水沸騰中のボイド率分布を X 線 CT 撮影する。昨年度と同じ設備であるが、試験設備の仕様を以下に記載する。

2.1.1. 基本仕様

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

- 設計圧力 0.2 (MPa)
- 設計温度 200 (°C) (ロッド表面温度)
- 最高温度 600 (°C) (ロッド表面温度)
- 主要材質 耐腐食材(被覆管材は NCF600 相当品)
- 使用流体 濃縮海水あるいは濃縮海水と五ホウ酸ナトリウムとの混合液

2.1.2. 装置概要

試験装置は、可視化容器に(5×5)バンドルが組み込まれ短尺試験体、下降配管(模擬配管)、凝縮タンク、試験体電源、及び溶液タンク、廃液タンク等から構成される。図 2-1 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、飽和水溶液を下降管下部からポンプアップすることで、短尺試験体の通電加熱により沸騰状態の水位を所定に維持する構成としている。下降管内溶液の温度は、管側面にヒータを巻付けて加熱することで、飽和温度近傍にて温度維持している。また、短尺試験体内の水位は、下降管内溶

液を短尺試験体へポンプアップして水位調整ポンプの ON-OFF 自動制御で所定水位に調整することで一定に維持している。下降管内溶液は、溶液注水ポンプを適宜手動 ON-OFF 操作により溶液タンクから補充している。

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

試験バンドルでの主な計測は、ロッド表面温度、バンドル内圧力、バンドル水位、流体温度等である。

2.1.3. 装置詳細仕様

1) バンドル仕様

試験に用いる短尺燃料バンドルの仕様を下記に示した。図 2-2 に短尺バンドルのロッド配列、概略形状を示した。また、図 2-3 にヒータロッドの形状寸法を示した。

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

2) バンドル内計測仕様

試験バンドルの所定のロッドにおいて、ロッド表面に熱電対を埋め込み温度計測が出来るものとし、図 2-2 に熱電対埋め込みの計装ロッドの配置、及びバンドル軸方向での温度計測位置を示した。

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

図 2-4 に短尺バンドル試験体の全体組立図を示した。また、図 2-4 の部品番号の名称、概略仕様を表 2-1 に示した。

(1) 可視化容器

- 設計圧力 0.2 MPaG
- 設計温度 120 °C
- 形 式 縦型矩形管
- 内幅寸法 68mm × 68mm -0/+0.3 mm 以下
- コーナ形状 R9 mm +0/-1 mm
- 長 さ 全 長 800 mm
- 流路管接続 JIS5K 異型フランジ接続/印籠形状/芯出しピン取付
フランジ間シールは O リングシール構造
- 接続孔 流入孔 25A-PT1 ネジボス ×1 カ所
ドレン孔 15A-PT1/2 ネジボス ×1 カ所
オーバーフロー孔 20A-PT3/4 ネジボス ×2 カ所
(上部フランジ下面位置)
- 計測孔 ボス形状 穴径 2mm/ISO 管用 PF1/8 ボス取付(O リングシール)
個数 差圧 2 カ所(計測スパン 350mm)
温度 2 カ所
- スペーサ
 - ・ 形 式 丸セルスペーサ(5×5 正方格子) (図 2-5 を参照)
 - ・ 内幅寸法 66.0mm × 66.0mm × H30mm
 - ・ 板厚 セル厚 ; 約 0.4mm、バンド厚 ; 0.5mm
 - ・ 材 質 SUS 材にて製作、組立後全面テフロンコーティング
- 容器底板
 - ・ 形状寸法 JIS5K-100A 閉止フランジ(RF) × 厚さ 25～30mm
接続 O リングシール構造
 - ・ ロッド支持孔 フランジ上面に 5×5 正方格子配列のロッド端栓差し込み孔
差し込み孔 7×7mm × 深さ 10mm
孔配列 13×13mm ピッチにて 25 個(縦列;5/横列;5)
(5×5 格子配列の差込孔は中心振分けにて配置)
 - ・ 排水孔 PT1/4 ネジ穴/六角穴付閉塞栓取付)
- その他 フランジボルト締付面は、半月形状(二つ割り)の当て板を用いて
ボルト締付
- 材 質 ポリカーボネイト

(2) 上部接続管

- 形 式 薄肉円筒管

- 形状寸法 約 69mm×69mm×長さ 200mm(コーナー部 R8 以下)
- 接続形式 下端部 JIS5K-;100A-RF 接続
(印籠接続にて芯だし構造)
下端部 T 字管を接続にて上端は閉止板(□69mm 穴)溶接
(周囲にシール板締のボルト穴)
シール板 O リングシール板、O リング押え板
(シール板/押え板のボルト穴は上下千鳥配置)
- 上部流路管 形状寸法 約 69 mm × 69 mm × H70 mm
(テフロンコーティング処理)
流路管取付 模擬チャンネル/上部接続管接続間に挟込
上下部フランジ面は O リングシール。
- 接続孔 蒸気放出孔 50A-PT2 ネジユニオン取付 1 カ所
計装線取出 穴径 50 mm ボスを溶接にて取付 2 カ所
O リングシールの閉止板取付(PT1/4 ネジ孔 3 個付)
均圧孔 20A-PT1/2 ネジボス 1 カ所
- その他 計測孔 穴径 2 mm/ISO 管用 PT1/8 ボス取付 2 カ所
エア抜き孔 上端部位置に PT1/4 ネジのボス 1 カ所
流路管下端より 30 mm 上の管側面に排出孔(φ 15mm 32 個)
- 材質 本体 SUS304 にて管内面はテフロンコーティング
シール部材 ポリカーボネイトにてテフロンコーティング

(3) 下降管仕様

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

(4) 凝縮タンク仕様

- 形 式 円筒縦型
- 概略形状 市販ドラム管を追加加工にて使用($\phi 550\text{mm} \times \text{H}850\text{mm}$)
(容器上端部に上蓋締付固定のフランジ取付)
- タンク上蓋 形状寸法 $\phi 600\text{mm} \times t5\text{mm}$ (SUS)
蒸気放出孔 JIS5K-50A フランジ(上蓋に固定)
50A-SUS 管接続にてタンク内上部で支持固定
大気開放孔 80A-塩ビ管エルボ端部に JIS5K-FF 取付
その他 エア抜き排出孔 ; 10A-PT3/8 ネジ込ボス
- スプレイヘッダー タンク内上端部にスプレイヘッダー取付
形状寸法 管径 32A $\times \phi 500\text{mm}$
スプレイノズル $\phi 5\text{mm} \times 6$ 箇所 (PT ネジ込)
- 冷却コイル $\phi 450\text{mm} \times 200$ ピッチ $\times 5$ 巻の薄肉管
(コイル内側に蒸気放出孔 $\phi 10\text{mm} \times 30$ 箇所)
- 接続孔 ① スプレイ水ノズル ; 15A 1箇所
② ドレン排水 ; 32A 1箇所
③ オーバーフロー ; 32A 1箇所
④ 給水孔 ; 15A 1箇所
- 計測孔 ① 水位計取付 ; PT1/4 ネジボス 2箇所
(計測範囲;700mm、可視部;アクリル管、止弁取付)
② 温度計測 ; PT1/4 ネジボス 2箇所
- 換気ファン 屋外排気の簡易ファン及び簡易ダクトを取り付けた。
- 材 質 SUS304

(5) 溶液タンク

1)溶液タンク

- 形 式 円筒縦型
- 形状寸法 $\phi 560\text{mm} \times \text{H}600\text{mm}$ 上端部上蓋付
- 容器形状
- ・ 容器接続孔 凝縮管吐出し 25A-PT1.1/2 ネジボス
戻り管接続 15A-PT1 ネジボス
ドレン孔 15A-PT1/2 ネジ(止め弁付)
- ・ 液位計 計測仕様 テフロン管;400mm/計測孔に止弁取付
- ・ 計測孔 温度計測 PT1/4 ネジボス 1カ所
液位計測 PT1/4 ネジボス 2カ所
(計測孔距離 400mm)
- ・ ヒータ 上部上蓋に簡易型の投込みヒータ取付
ヒータ容量 AC200V 単相 2kW

- その他 オーヨー株式会社製容器 SUS タンクの追加工にて製作した。管内壁はテフロンコーティングした。
- 材 質 耐食材(SUS304 相当品)

2)廃液タンク

- 型 式 密閉丸型タンク(鉄枠付), 200ℓ 相当品
 (株)タクミナ <http://www.tacmina.co.jp>
- 形状寸法 □750 mm × H600 mm, 200ℓ 容器
- 貯蔵液 塩水
- 付属品 ドレン止弁
- 接続ノズル 廃液挿入孔(φ 100mm 以上)×1 カ所、給水孔(15A)×1 カ所
 排液孔(20A) 1 カ所
- その他 水位表示(本体付属)
- 材 質 PVC(ポリ塩化ビニル)

3)洗浄タンク

- 形 式 円筒縦型
- 形状寸法 内径約 φ 560mm × H600 mm 上端部上蓋付
- 容器形状
- ・ 容器接続孔 試験体戻り管 25A-PT1 ネジボス
 ポンプ吸込み 25A-PT1 ネジボス
 ドレン孔 15A-PT1/2 ネジ(止め弁付)
- ・ 計測孔 温度計測 PT1/4 ネジボス 1 カ所
 水位計測 テフロン管;400 mm 計測孔に止弁取付
- ・ ヒータ 上蓋に簡易型の投込みヒータ取付
 (ヒータ容量 ; AC200 V 単相-2 kW)
- その他 オーヨー株式会社製 SUS タンクの追加工にて製作した。
- 材 質 耐食材(SUS304 相当品)

(6) その他

- 上部接続管の下部フランジには、試験体振れ止めのための支持金具を取り付けた。また試験体下部には X 線 CT 設備架台に据付固定するための試験体受け台を設置して試験体を固定した。
- 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。
- ・ 配管サイズ 下降管/試験バンドル SUS-25A-sch40

- | | | |
|--|-------|-----------------|
| | 蒸気管 | SUS-100A |
| | 均圧配管 | SUS-20A |
| | 給水/排水 | ブレードホース/15A～25A |
- ・ 配管接続

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

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

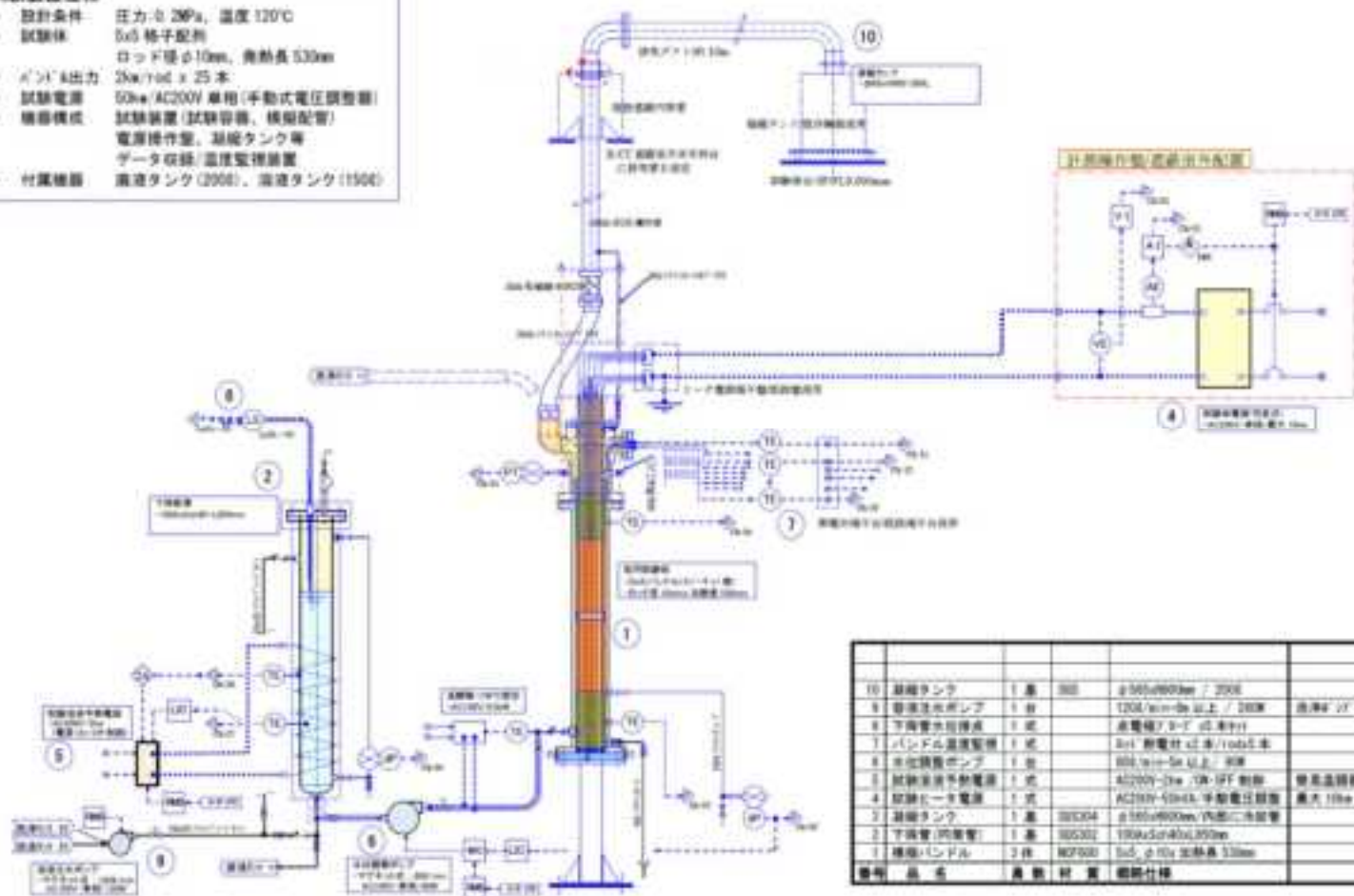
下降管	下降管本体及び下部配管の保温
-----	----------------
- 計装品取付、配線
- 計装品の導圧配管にはテフロンチューブを使用した。計測取出し部は止弁を設けた。計装配線は装置架台に簡易端子箱を取付け、内部に端子台を設けて計装品の配線施工した。
- ・ 圧力計測

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

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

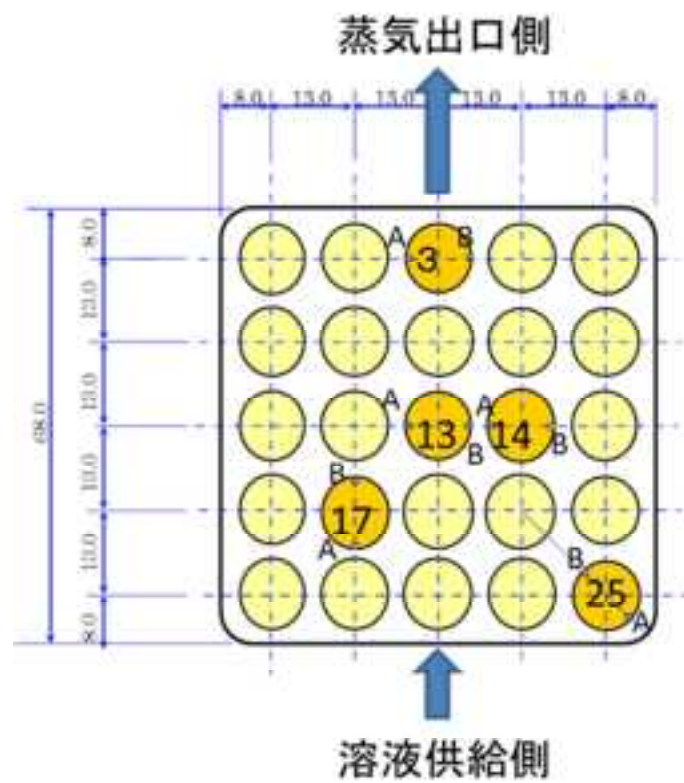
試験バンドル	K 型シース熱電対(φ 1.6mm) 2 カ所
下降管表面	K 型シース熱電対(φ 1.6mm) 2 カ所
下降管内温度	K 型シース熱電対(φ 1.6mm) 2 カ所
接続配管温度	K 型シース熱電対(φ 1.6mm) 1 カ所
凝縮タンク温度	K 型シース熱電対(φ 1.6mm) 2 カ所
- 排水
- ・ 機器のドレンは、ブレードホースを用い、接続継手はリングジョイントを用いた。
- 電源配線
- ・ 短尺バンドルの電源は、付属の電源リード線を接続し、X 線 CT 遮蔽室屋外天井位置に電源端子台を設けて接続した。
 - ・ 下降管のヒータ電源は、簡易架台端子箱内に端子台を設けて接続した。

- 試験装置仕様**
- ・ 試験条件 圧力: 0.2MPa、温度: 120°C
 - ・ 試験体 SuS 棒状配列
 ロッド径φ10mm、有効長530mm
 - ・ポンプA出力 20m³/min × 25本
 - ・ 試験電源 50W/AC200V 単相(手動式電圧調整器)
 - ・ 機器構成 試験装置(試験容器、模擬配管)
 電源操作盤、基礎タンク等
 データ収録/温度監視装置
 - ・ 付属機器 高圧タンク(200L)、高圧タンク(150L)

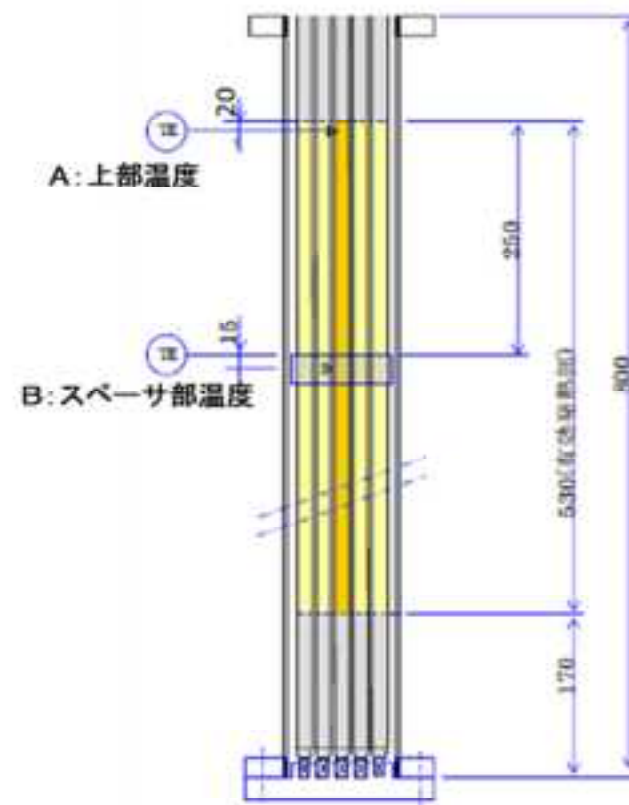


番号	品名	数量	材質	規格仕様
10	基礎タンク	1基	SUS	φ500×600mm / 200L
9	高圧タンク	1基		120L/φ100mm以上 / 200mm
8	下向きポンプ	1式		流量2.0~5.0L/min
7	パンドル温度監視	1式		0~100℃電圧出力
6	流量調整弁	1式		0~100mm³/min
5	試験電源	1式		AC200V-50Hz / 50W
4	試験電源	1式		AC200V-50Hz / 50W
3	基礎タンク	1基	SUS	φ500×600mm / 200L
2	下向きポンプ	1式		流量2.0~5.0L/min
1	試験体	25本	SuS	φ10mm 有効長530mm

図 2-1 短尺バンドル試験装置概要



(a) バンドルロッド配列



(b) 軸方向熱電対位置

図 2-2 試験バンドルのロッド配列及び熱電対位置

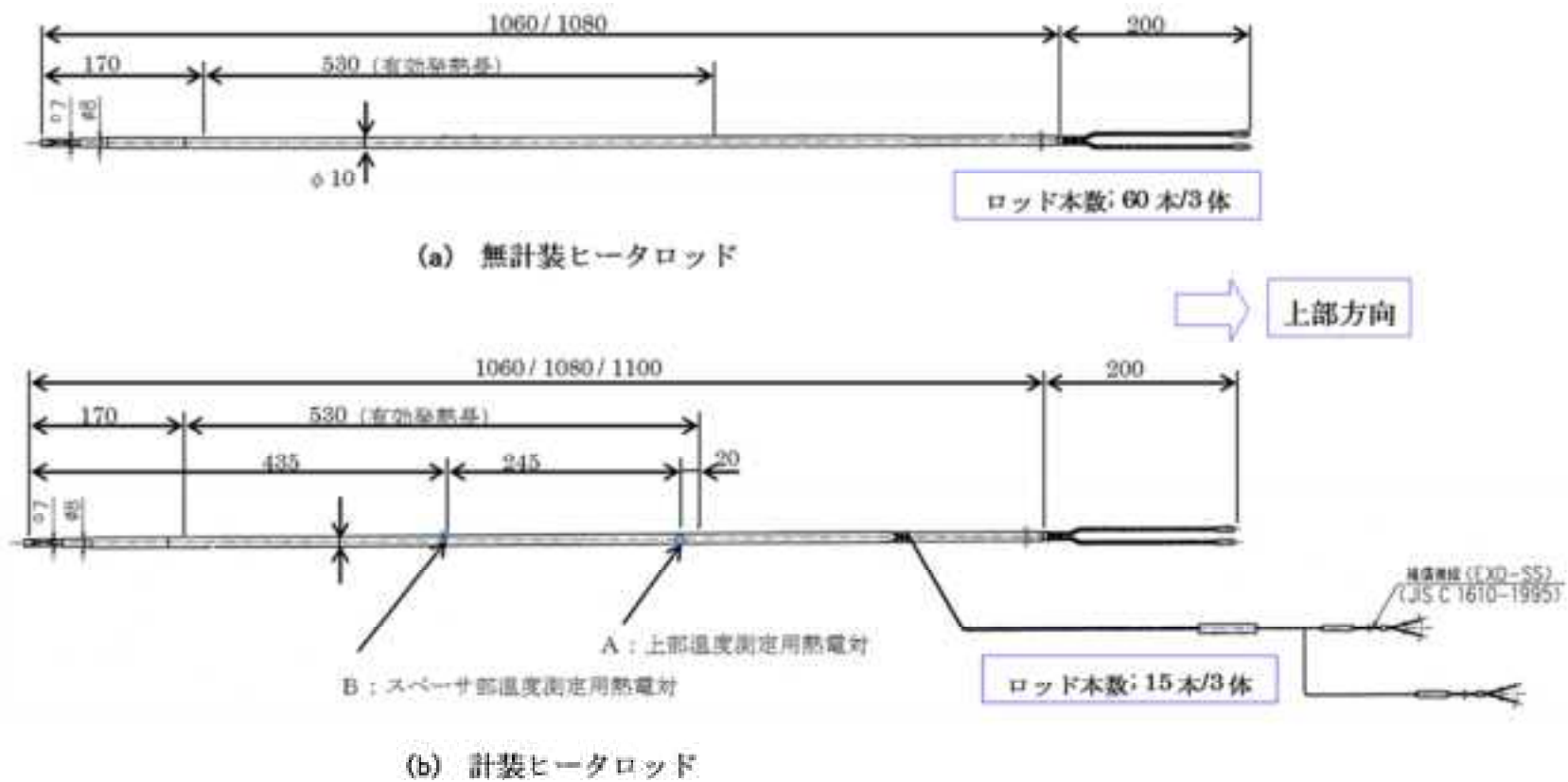


図 2-3 短尺ヒータロッド形状寸法図

試験バンドル仕様	
○ 設計条件	圧力0.2Mpa、温度120℃（棒表面400℃）
○ バンドル構成	（5x5）格子配列
○ 発熱形式	間接加熱（非接触型）
○ ロッド仕様	
＊ 発熱部	ロッド径φ10 mm、発熱長530mm ロッド出力 2kw/単相 AC200V
＊ 電源仕様	AC200V/250A 50kw x 1 台
○ 発熱分布	
＊ 軸方向/径方向とも一様分布	

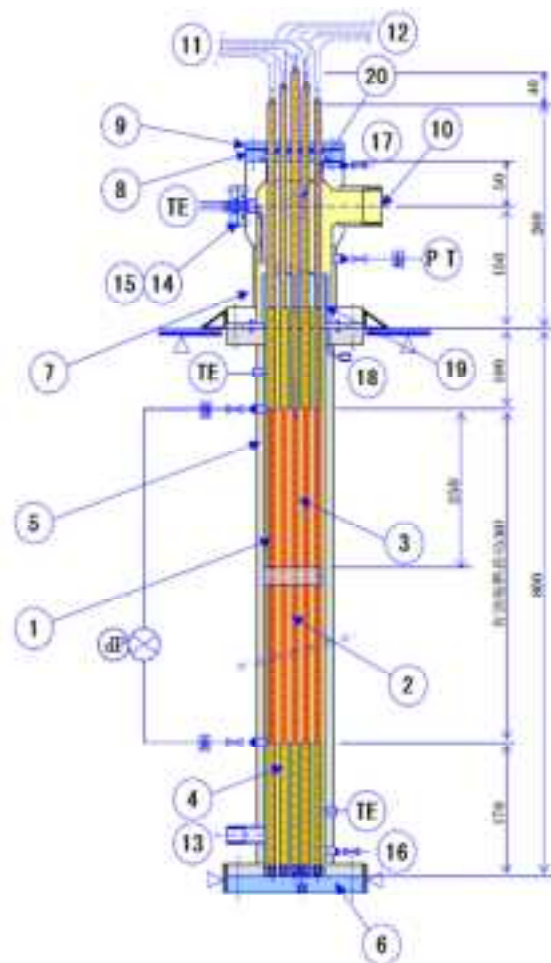
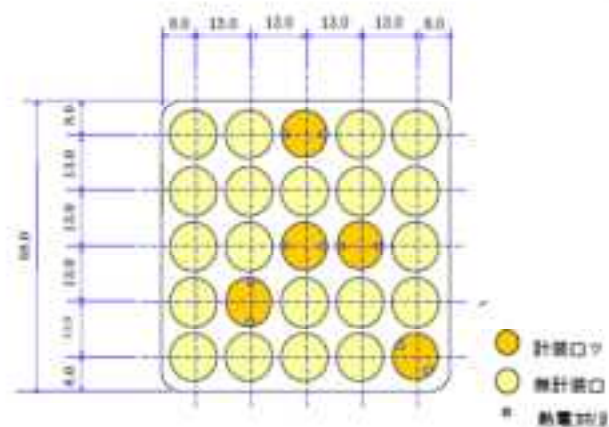


図 2-4 短尺バンドル試験体の概念図

表 2-1 短尺バンドル試験体構成部材の概略仕様一覧

番号	品 名	員 数	材 質	概略仕様	番号	品 名	員 数	材 質	概略仕様
13	流入孔	1カ所	銅板	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	銅板	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	銅板	□68xL800mm/100A-FF	18	水位排水孔	2 個	SUS304	20A-PT3/4-ボス
4	ダミーロッド	25 本	SUS304	φ10xL170mm 接続M6	17	上部エア抜き孔	1 式	SUS304	10A-PT3/8ボス
3	スペーサ	2カ所	SUS304	丸セル模擬(テフロン被覆)	16	下部ドレーン孔	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

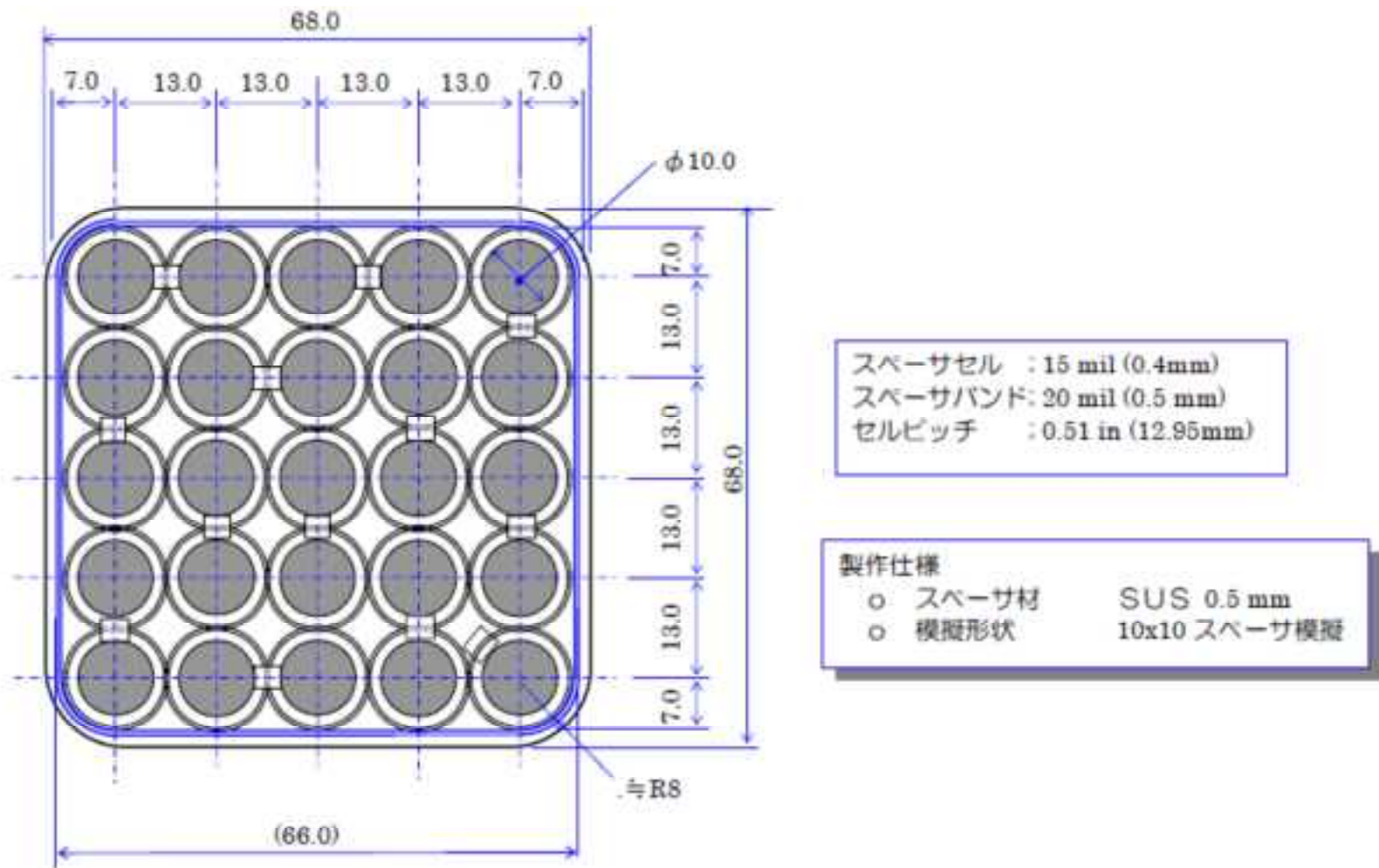


図 2-5 5×5 バンドル試験スぺーサの形状寸法

2.1.4. X線 CT 撮影設備

平成 25, 26 年度に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。同設備は析出した試験体を沸騰二相流ループから切り離し、ターンテーブルの上に試験体を設置して回転させることにより、X 線の析出塩の位置と量を定量評価した。今回の試験では、沸騰中に撮影することになるので、試験体を回転させると流れに影響するため、同装置を利用することが出来ない。

そこで本年度は、一般財団法人電力中央研究所横須賀地区に設置されている X 線 CT 設備を使用した。図 2-6 に X 線 CT 設備の概観を示す。昨年度までとは異なり、X 線加速器と検出器はターンテーブル上に配置され、回転しながらその間に設置した試験体の透過像を撮影する。円形のターンテーブルは中心に試験体を設置できる穴がある。図 2-7 に直線加速器と試験体、検出器の位置関係を示す。ターンテーブル上には直線加速器 (linac) と X 線検出器が配置され、ターンテーブルと共に回転することによりあらゆる角度から透過像を撮影する。線形加速器で 3 MeV まで加速された電子はターゲットに衝突することにより制動 X 線を放射する。コリメータで放射形状を扇形に整えられた後に、試験体を透過した X 線は散乱線の影響を減衰させるためのコリメータを介して、検出器 (ラインディテクタ) において線量として検出される。

撮影は TAF (発熱部上端) より上方 50 mm から鉛直下方に 50mm 間隔で 12 回実施した。高エネルギー X 線を十分吸収させるために検出器は照射方向に長くなるが、長くすることにより検出器間のクロストークの影響が顕著になる。特許出願技術として、それぞれの検出器には散乱線による検出器間のクロストークを抑制するために十分な幅方向厚さの遮蔽体を設置し、検出器が設置されない角度は回転時の位相角を検出器のステップ角の数分の一とすることで濃度分解能を最適化する機能を付加している。本実験では位相角を検出器ステップ角の 1/3 (オーバーサンプリングとしては 3) とした。この値は撮影時間当たりの濃度分解能が最大となる条件である。

撮影当たりの X 線照射は 2 回 (2 pulses/view) に、1 回転当たりの撮影数を 8000 枚 (8000 views/rotation) に、サイノグラム平均は 1 回とした。こうして得られたサイノグラムから X 線 CT 像を再構成した。再構成画像は水平断面の二次現像となり、4096 pixels $\times$ 4096 pixels として表示される。再構成画像の画素は一辺約 0.07 mm である。

一断面当たりの撮影時間は約 2 分間である。よって 2 分間の撮影における再構成画像を各断面で得ている。高さ方向に 12 断面の撮影を自動で行うため、ターンテーブル移動時間を含めて 30 分弱の撮影になる。透明なポリカーボネイト製バンドル容器壁から観察したところ、沸騰試験後に顕著な析出は観察されなかった。

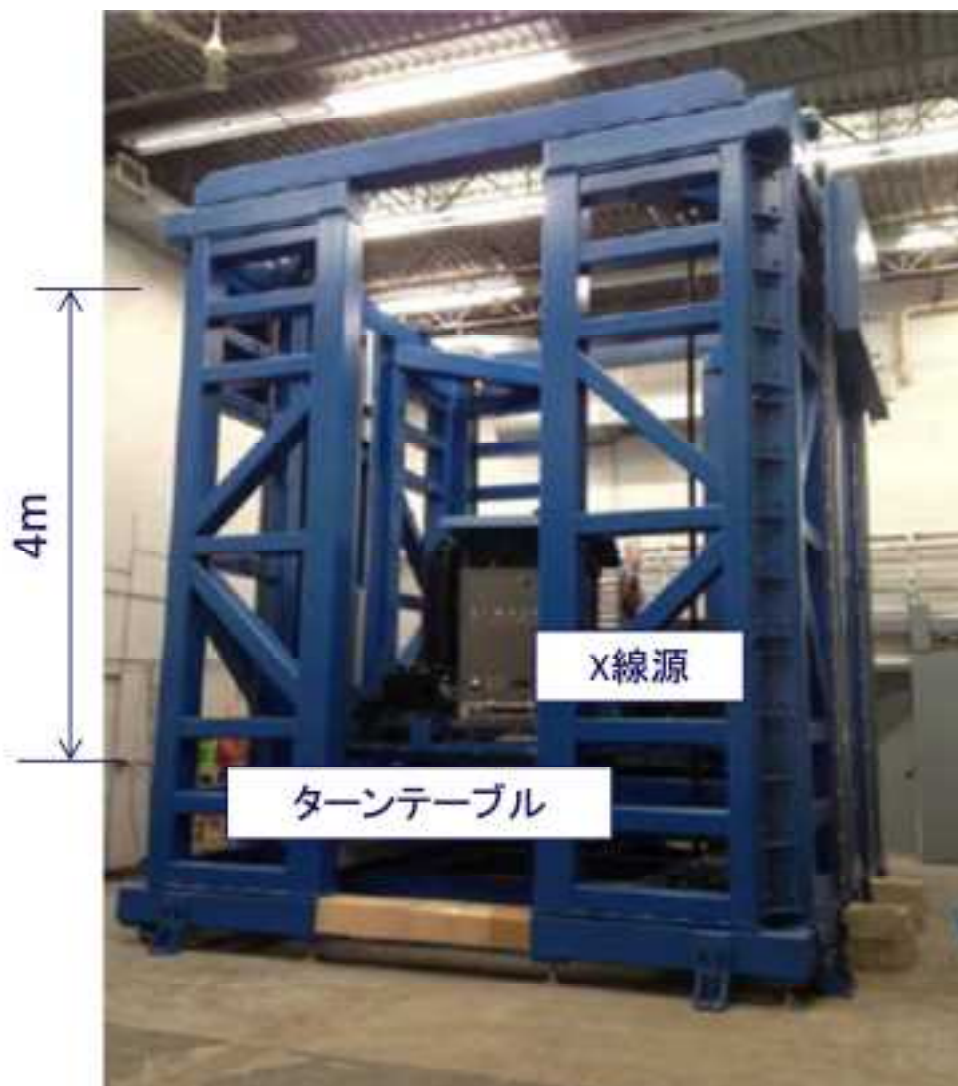


図 2-6 X 線 CT 設備の概観

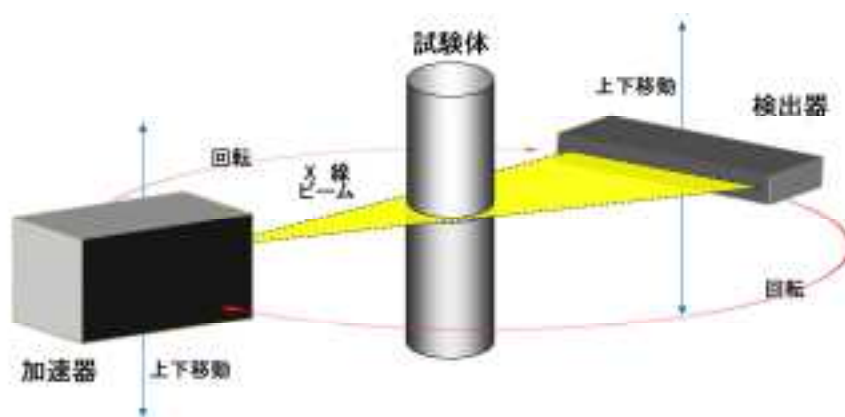


図 2-7 直線加速器と試験体、検出器の位置関係

2.1.5. 試験条件及び試験手順

本項では前述の短尺バンドル試験体を用いた沸騰濃縮試験の手順を述べる。溶液タンクの試験溶液（濃縮海水または濃縮海水と五ホウ酸ナトリウムとの混合液）は溶解度が最も高くなる温度で且つ過度な蒸発が抑制できるように温調ヒータを用いて 70 °C になるように制御した。下降管は周囲の温調ヒータにより 98 °C に維持した。初期に低温時からの加熱では過温（オーバーシュート）による析出を抑制するため、一端 90 °C に制御し、徐々に設定値を 98°C になるように変更した。

沸騰濃縮試験は、バンドル試験体のヒータ電源を入れた後、沸騰が観察されて定常になったことを目視で確認し、X 線 CT 遮蔽室から退室し、撮影を終了するまで加熱を継続し定常状態を維持した。沸騰により液位が低下するのでポンプにより自動注入して液位を制御した。

撮影後に試験体の洗浄を行う。常温の洗浄液を下降管に充填後、ポンプアップによりバンドル試験体内に充填し 30 分間浸漬保持し、その後洗浄液を排水する。その後、イオン交換水を下降管に充填し、ポンプアップにより試験体内に充填後排水する。このイオン交換水の充填と排水を 3 回繰返して洗浄を終了した。本年度の実験では時間が短いため、沸騰試験直後にも目視では塩の析出は確認されていなかったが、累積により塩の薄膜の蓄積を避けるため一日一回前記洗浄を実施した。

下降管を経由して洗浄液及びイオン交換水を試験体内へ充填して洗浄しているので下降管も同時に洗浄されている。洗浄液にはクエン酸を用いた。

2.1.6. 試験溶液の調整法

表 2-2 に、人工海水の組成を示す。本年度析出塩の X 線 CT 撮影に使用した人工海水と同様にマリンアート SF-1 である。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 のイオン交換水に、マリンアート 95 g を溶解させた溶液である。

ホウ酸塩は、五ホウ酸ナトリウム十水和物（富山薬品工業株式会社製）を用

いた。混合液は、人工海水と五ホウ酸ナトリウムの塩濃度が 1 : 1 となるようにイオン交換水に溶解した液とした。具体的には、イオン交換水 20kg に人工海水 950g と五ホウ酸ナトリウム十水和物 1427g を溶解した液を試験液とした。

表 2-2 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

2.1.7. 沸騰濃縮試験パラメータ

表 2-3 に試験条件を示す。濃縮海水と混合液とでそれぞれ液位 3 水準、熱流束 3 水準とし、合計ケース数は（溶液）2×（液位）3×（熱流束）3=18 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マの液位が一定になるように制御した。3 水準として TAF, TAF - 100 mm, TAF - 200 mm を選定した。これらの値は昨年度の塩析出試験と同じである。

熱流束は定格出力の 0.5, 1.0, 1.5%を目安に 3, 6, 9 kW/m²の 3 水準とした。これらの値も平成 26 年度の塩析出試験と同じである。

表 2-4 にバンドル内沸騰試験番号の命名法を示す。ファイル名は溶液種類、液位、時間、出力、試験日付、高さの順で命名した。平成 26 年度の実験にならない条件はグレイアウトした。例えば、溶液に於ける水(W)や、平成 25 年度までの実験として分類した濃縮海水(S)である。また、本実験は短時間であるため、時間には数字 0 を割り当てたが、これは過年度の命名法と統一して扱うことができるようにしたためである。一例を挙げると、ファイル名が RL0L0108-375 は、溶液が濃縮海水、液位は TAF-200mm、CT 撮影試験、3kW/m², 試験日が 1 月 8 日の場合で、CT 撮影高さが 375mm の場合を意味する。

表 2-3 バンドル内沸騰試験条件

試験パラメータ	水準数	範囲
溶液	2	濃縮海水、混合液
コラプスト液位	3	TAF, TAF - 100 mm, TAF-200 mm
熱流束	3	3, 6, 9 kW/m ²

表 2-4 バンドル内沸騰試験番号命名法

溶液	液位	時間	出力	日付	高さ
S:海水(-H25)	L:低, TAF-200mm	0:CT試験	L:低, 1.25kW	MMDD,月日の4桁	12水準
R:海水(H26-)	M:中, TAF-100mm	3:40%濃縮相当	M:中, 2.50kW		単位:mm
M:混合溶液	H:高TAF	4:50%濃縮相当	H:高, 3.75kW		
W:水		5:60%濃縮相当			

2.2. 短尺バンドル沸騰試験結果

図 2-8～図 2-13 に、短尺バンドル内沸騰試験の X 線 CT 撮影像から変換して得られたボイド率分布を示す。流体 2 種類（濃縮海水と混合液）と液位 3 水準毎に図を作成し、それぞれの図中には左から右に熱流束を(a) 3 kW/m²、(b) 6 kW/m²、(c) 9 kW/m²の試験結果を示しており、上下には撮影高さ方向に 50 mm 間隔で 12 枚ずつの水平断面ボイド率を示している。図中右側にはそれぞれの図の高さを $z = 375 \text{ mm} \sim 975 \text{ mm}$ として併記している。左側の 5×5 バンドル試験体の模式図で赤色のヒータロッドの有効発熱部として示す通り、 $z = 875 \text{ mm}$ は発熱部上端である。模式図中の灰色はヒータロッドの非加熱部とチャンネルボックスである。同様に模式図にスペーサが示されている通り、 $z = 625 \text{ mm}$ はスペーサ上端である。スペーサは高さ 30 mm である。実験結果の断面図ではヒータロッドとチャンネルボックスは灰色で示した。これらの構造物の間を流れる流体は液単相が青色、水蒸気単相は黄色とし、図中右下に記載したカラーマップ通り、ボイド率に従い中間色を配した。図に共通した溶液と液位は図中右上に記載した。

2.2.1. 濃縮海水のバンドル内ボイド率分布

図 2-8 並びに図 2-9、図 2-10 はコラプスト水位が TAF 並びに TAF-100mm、TAF-200mm の濃縮海水に対する沸騰中のボイド率分布である。いずれの場合にも熱流束が高いほど、沸騰開始点が上流側に移行している。上流側のボイド率の値は、コラプスト水位の影響は小さい。また、コラプスト水位が低い TAF-100mm 及び TAF-200mm では顕著に、熱流束が高いほど、下流部のボイド率が高くなる。熱流束が高いと沸騰量が増大することから下流側でのボイド率が大きくなりそうであるが、沸騰が激しくなるため二相水位変動が激しくなり、熱流束が高いほど溶液がより高く到達したことが原因と考えられる。またいずれの場合においても、スペーサ頂部($z = 675 \text{ mm}$)のボイド率より、スペーサ直上流部($z = 575 \text{ mm}$)の方がボイド率は高い。流動系では一般に加熱部下流側に従いボイド率は単調増加するが、プール沸騰においては可視化の結果スペーサ近傍で気泡が大きく上下動することが観察されており、スペーサの混合効果により上流側でのボイド率が増大したと考えられる。

2.2.2. 混合液のバンドル内ボイド率分布

図 2-11 並びに図 2-12、図 2-13 はコラプスト水位が TAF 並びに TAF-100mm、TAF-200mm の濃縮海水と五ホウ酸ナトリウムとの混合液に対する沸騰中のボイド率分布である。熱流束が高いほど、沸騰開始点が上流側に移行していることは濃縮海水の場合と同様である。一方で、熱流束が大きい方が下流側のボイド率が大きい。これは濃縮海水とは異なる結果である。本実験での低熱流束においても、混合液では激しい沸騰により大きく変動し、高い位置まで溶液が到達していることが原因と考えられる。またスプレーサ上流に於けるボイド率上昇も観察されている。

2.2.3. 総合評価

これら全ての特徴は濃縮海水及び混合液に共通して観察されていることから、濃縮海水と混合液の違いによる沸騰二相流への影響は小さいと考えられる。よって昨年度の塩析出試験において観察された違いは沸騰二相流の違いではなく、飽和溶解度など化学的な影響が直接関与していると考えられる。

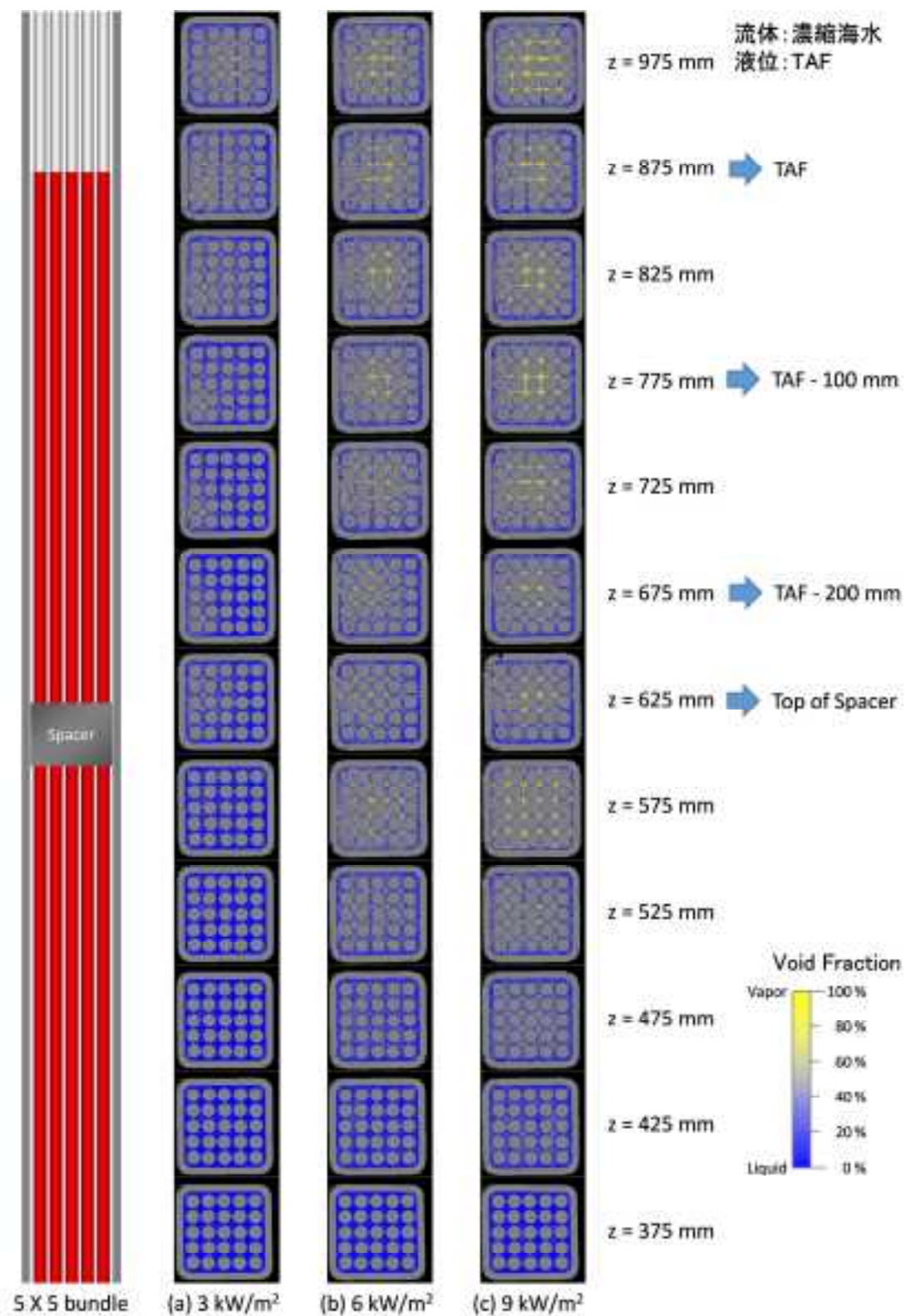


図 2-8 バンドル内ボイド率分布（濃縮海水，TAF）

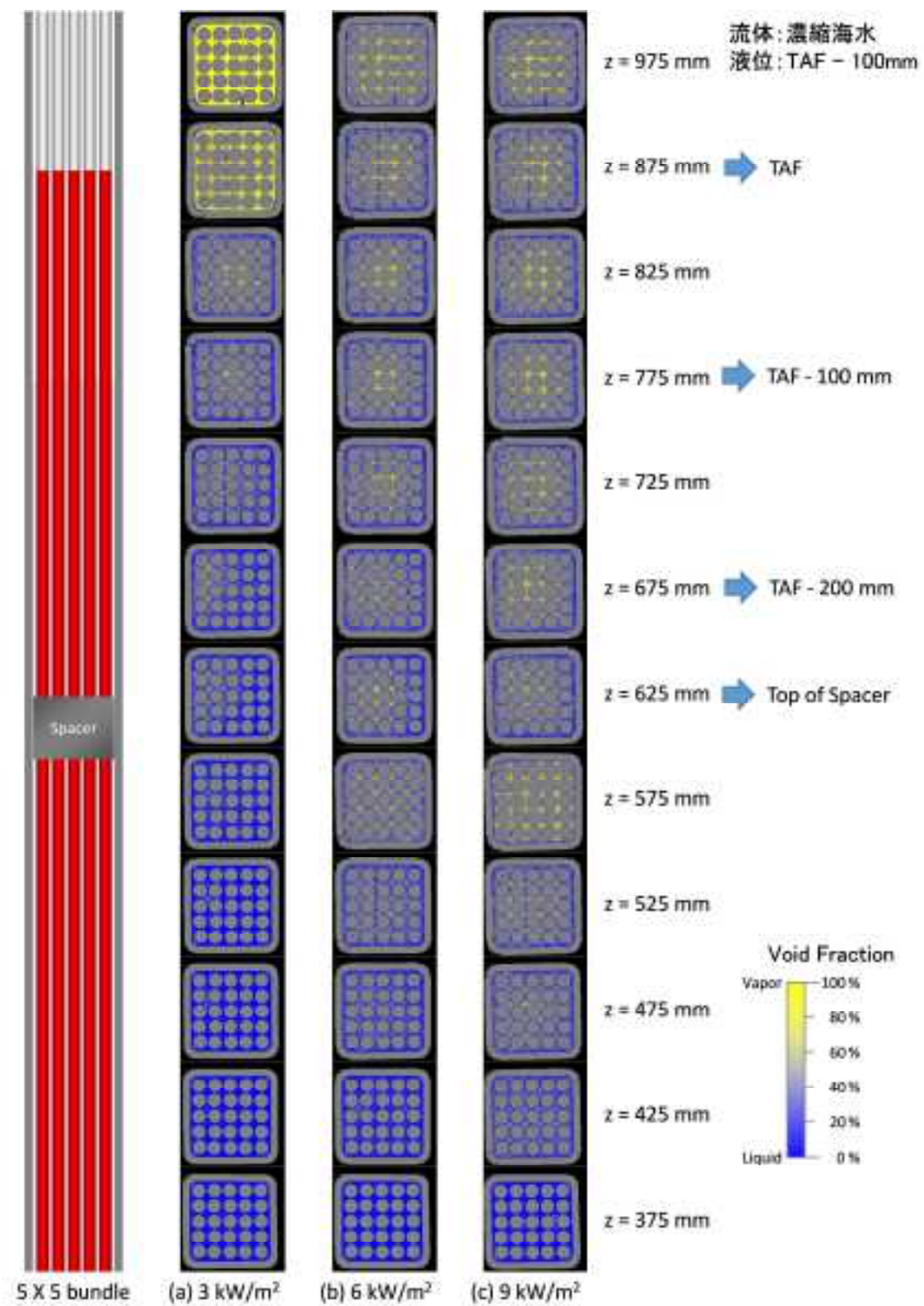


図 2-9 バンドル内ボイド率分布（濃縮海水，TAF-100mm）

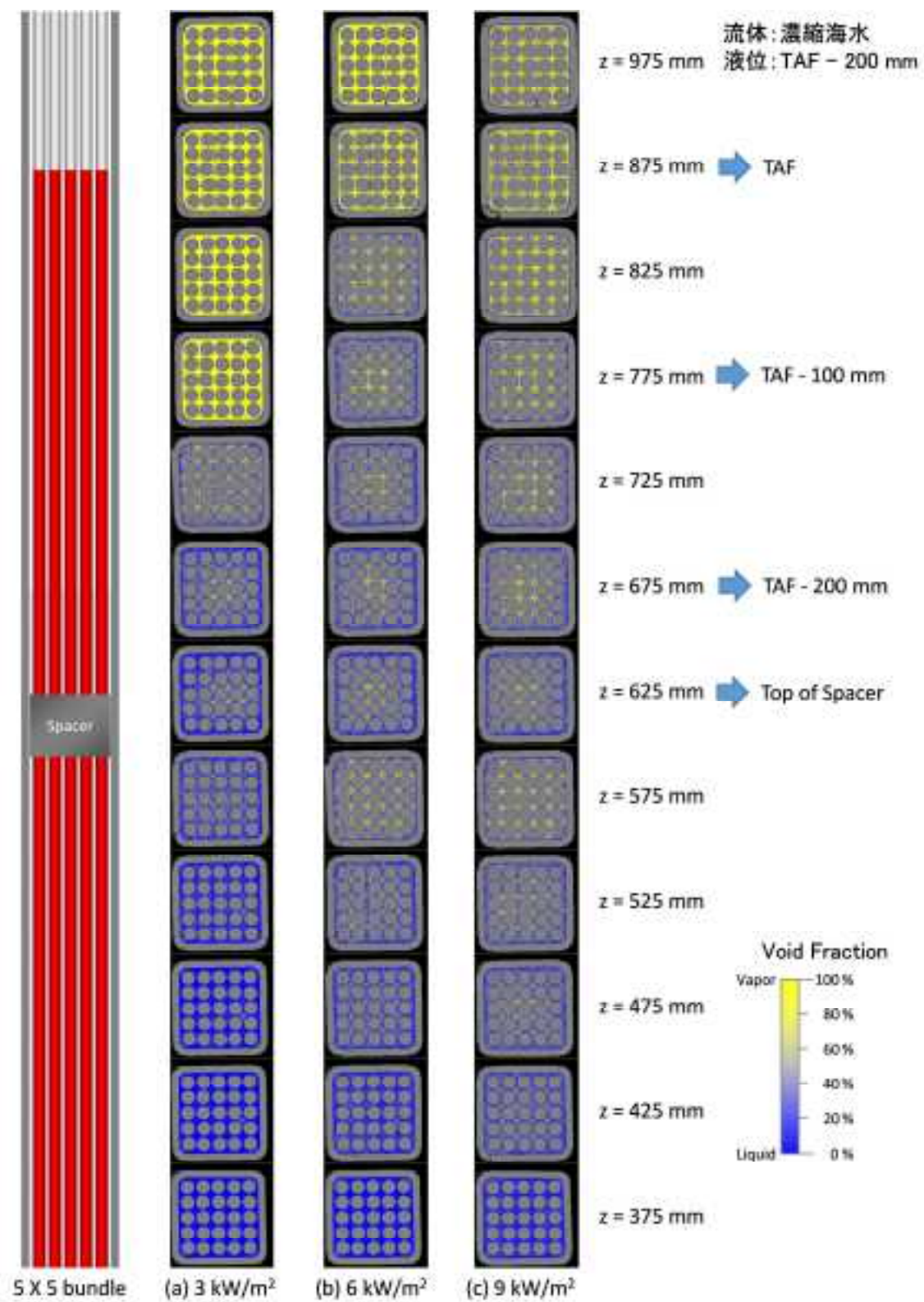


図 2-10 バンドル内ボイド率分布 (濃縮海水, TAF-200mm)

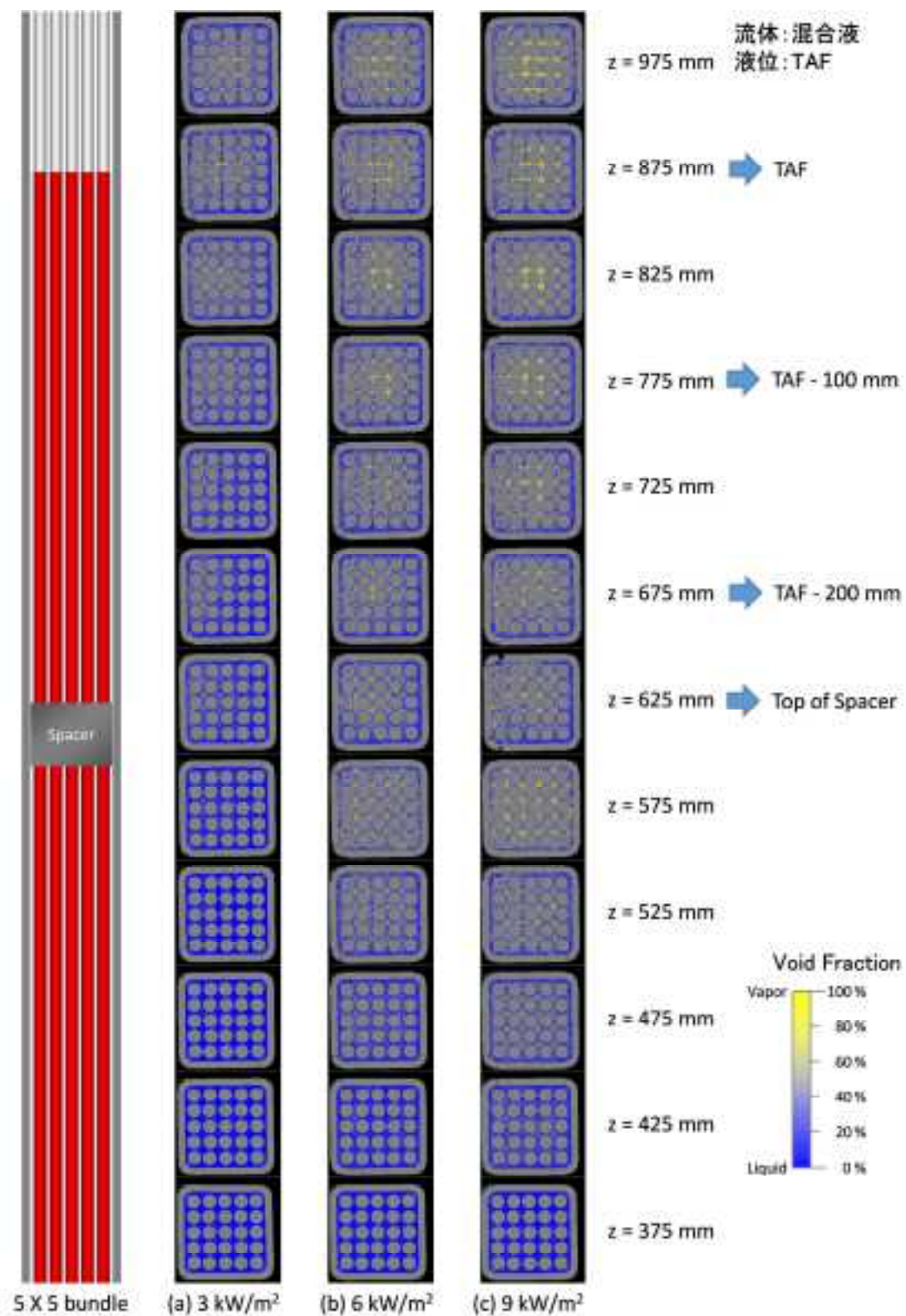


図 2-11 バンドル内ボイド率分布 (混合液, TAF)

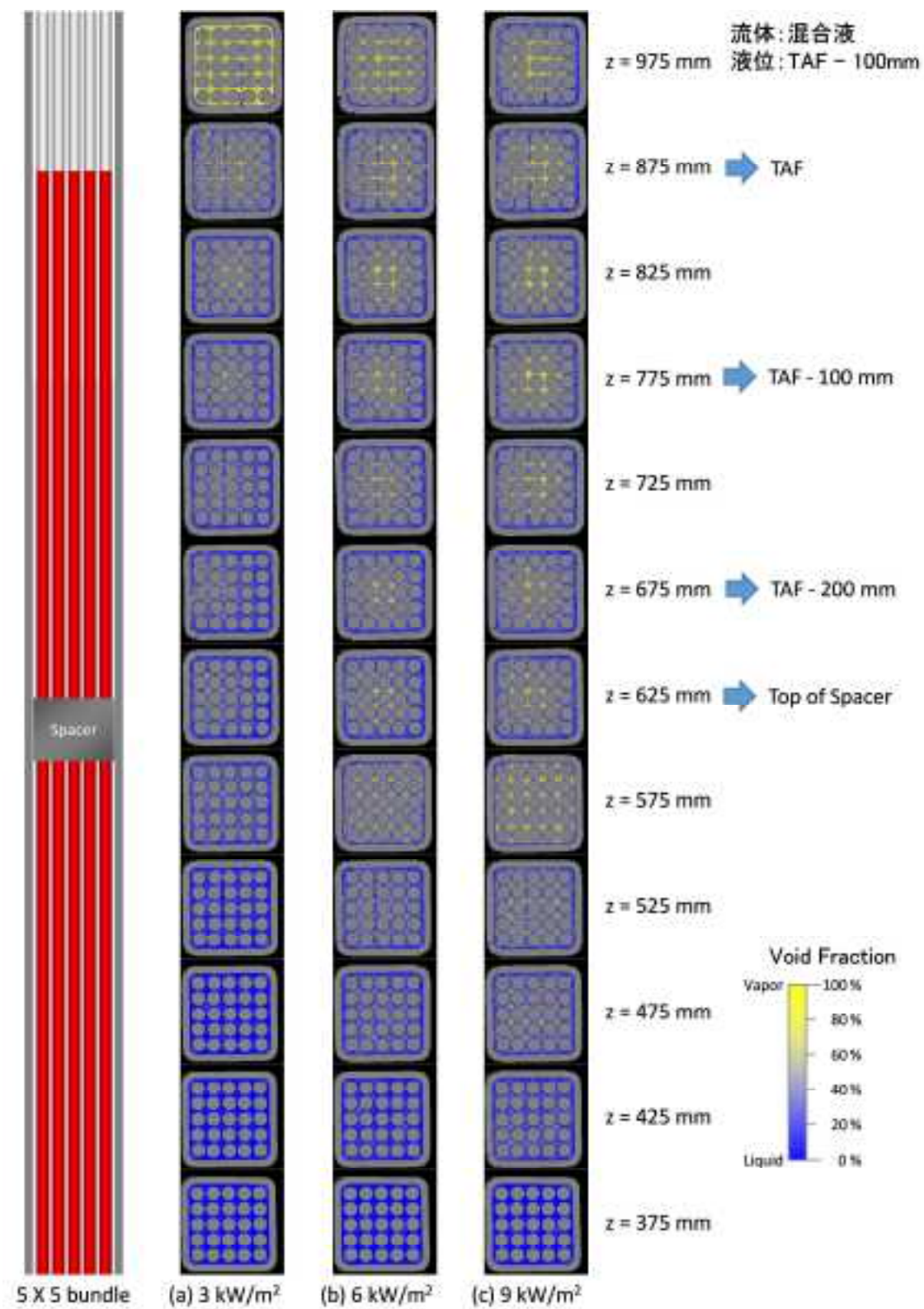


図 2-12 バンドル内ボイド率分布 (混合液, TAF-100mm)

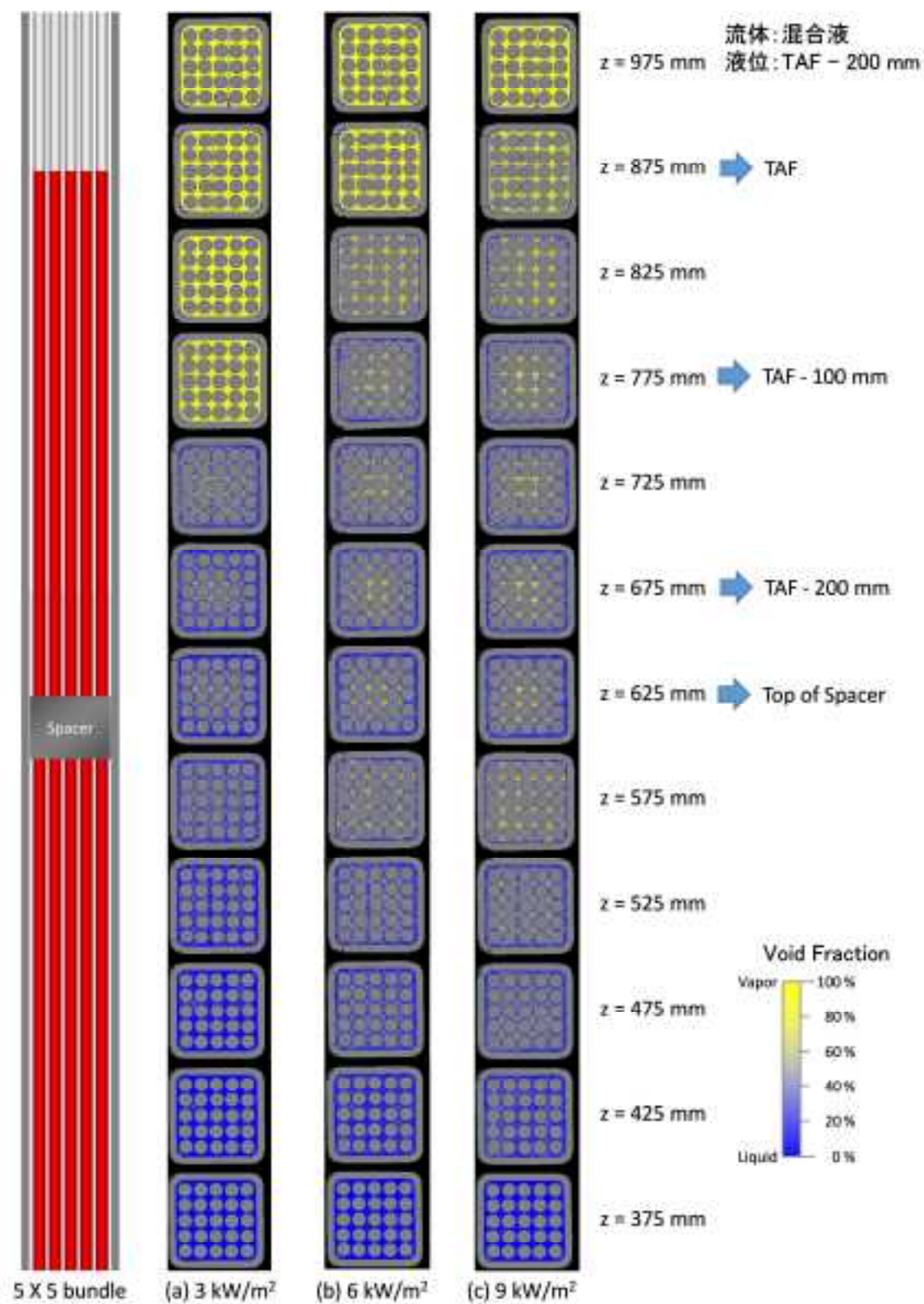


図 2-13 バンドル内ボイド率分布 (混合液, TAF-200mm)

3. クラスト冷却特性

本章では溶融炉心の表面に形成されるクラストを模擬した多孔質体を用いて、塩水中でのプール沸騰濃縮試験を実施し、塩水成分や、クラスト中に亀裂（クラック）がある場合、クラスト粒径が伝熱特性に与える影響を把握する。

3.1. クラスト中クラック伝熱特性試験装置

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

- 設計圧力 大気圧 (水槽圧力)
- 設計温度 120 °C (水槽温度)
- ヒータ温度 700 °C (ステンレス鋼最高温度)
- ヒータ容量 12kW (電源容量 30V, 400A)
- 主要材質 SUS304 (供給水ポンプ、ステンレス薄板、水槽中段部、計装品、ポンプ等)
 ポリカーボネイト (水槽可視化部)
- 使用流体 イオン交換水、濃縮海水、濃縮海水と五ホウ酸ナトリウムの混合液

3.1.1. 装置構成

図 3-1 に試験装置の概略構成を示す。図 3-2 に試験装置の外観写真を示す。試験装置は、沸騰試験を行う水槽と、それに所定温度の液を供給する給水タンク、また蒸発した蒸気を凝縮する冷水タンクとスクラバーから構成される。

図 3-3 に多孔質試験体と水槽の概念図を示す。水槽底面中央部にクラストを模擬した試験体を設置している。図 3-4 及び図 3-5 にクラスト試験体を伝熱面とした組み立て図をそれぞれ側面と上面からとして示す。金属箔を直接通電加熱するために大電流を流すことができる電極を配置しているため、強固なボルト締結構造となっている。それ以外の部分を押さえるために H 型（図中では 90 度回転させた角度）の試験体押さえがある。複雑な構造ではあるが、上面は図 3-4 に示されているとおり、平滑である。

クラスト中のクラックの影響を把握するため、多孔質体内にスリット上のク

ラック（溝）を設けたセラミック製も使用する。多孔質体の試験体を水槽底部に設置し、多孔質試験体をその下面の金属箔ヒータで加熱することで、セラミック試験体の沸騰伝熱特性を測定する。

3.1.2. 補給水供給機器

補給水供給機器は、図 3-1 に示した補給水タンク、補給ポンプから構成される。試験に用いる液は、水や濃縮海水、濃縮海水と五ホウ酸ナトリウムの混合液を使用する。本試験は、液補給に際して、タンク入口のボール弁を使用し、液位を一定に保つことができる。本年度の試験は、試験時間が数十分と短いことから液位減少が少ない。よって、プール沸騰試験中の液位補給は行わない。

濃縮海水や、濃縮海水と五ホウ酸ナトリウム十水和物の混合液の場合は、別のステンレスタンクで溶解、濃度調整、攪拌をおこなった上で、市販の投込みヒータで 60℃程度に加熱してポンプで水槽に充填する。

水の場合は、補給水タンクに直接イオン交換水を充填してヒータによって約 95℃程度に温度を調整する。所定温度の液は、補給水ポンプで水槽に送液する。

3.1.3. 水槽

図 3-3 に水槽の構造を示す。水槽底部には、セラミックス多孔質体とヒータが一体で組み込まれている。水槽は立方体計上で、その内寸は幅 210 mm、奥行き 210 mm、高さ 500 mm である。液位は 250 mm で統一している。水槽は試験体での沸騰が観察できるように透明なポリカーボネイトで製作されている。

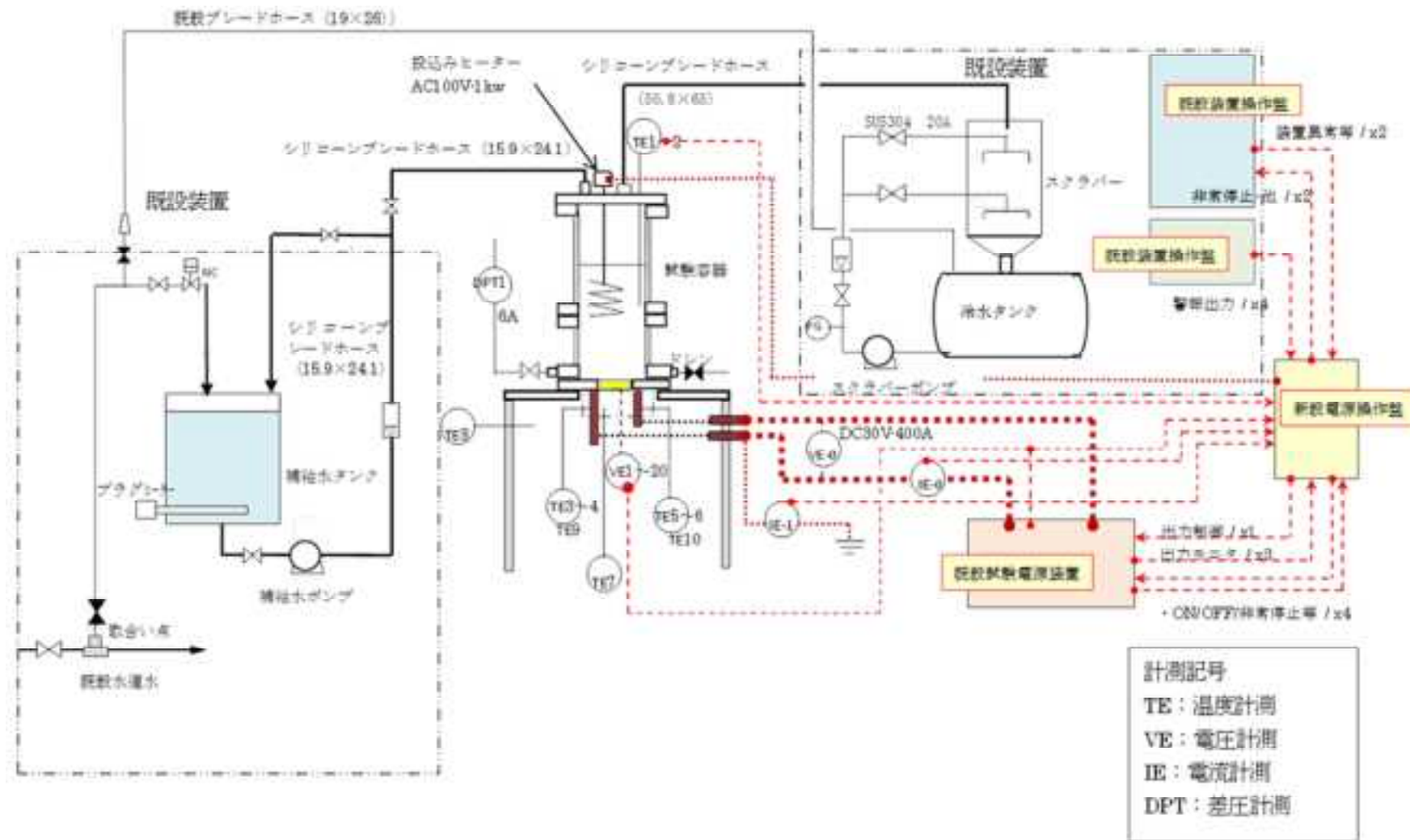




図 3-2 試験装置の外観写真

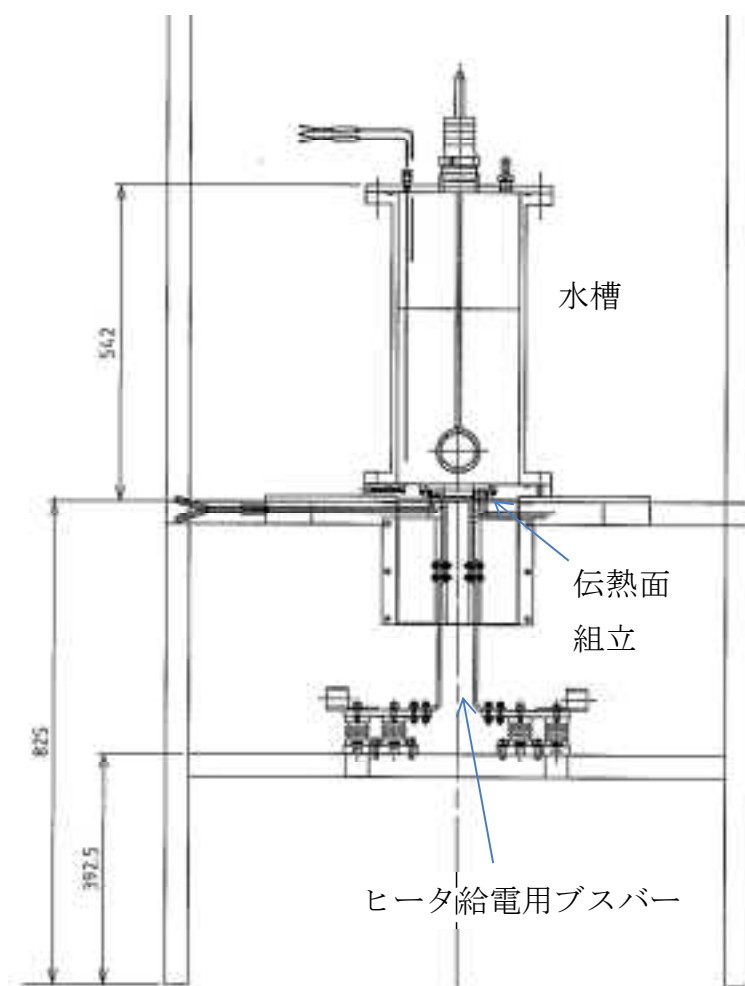


図 3-3 伝熱面と水槽の概念図

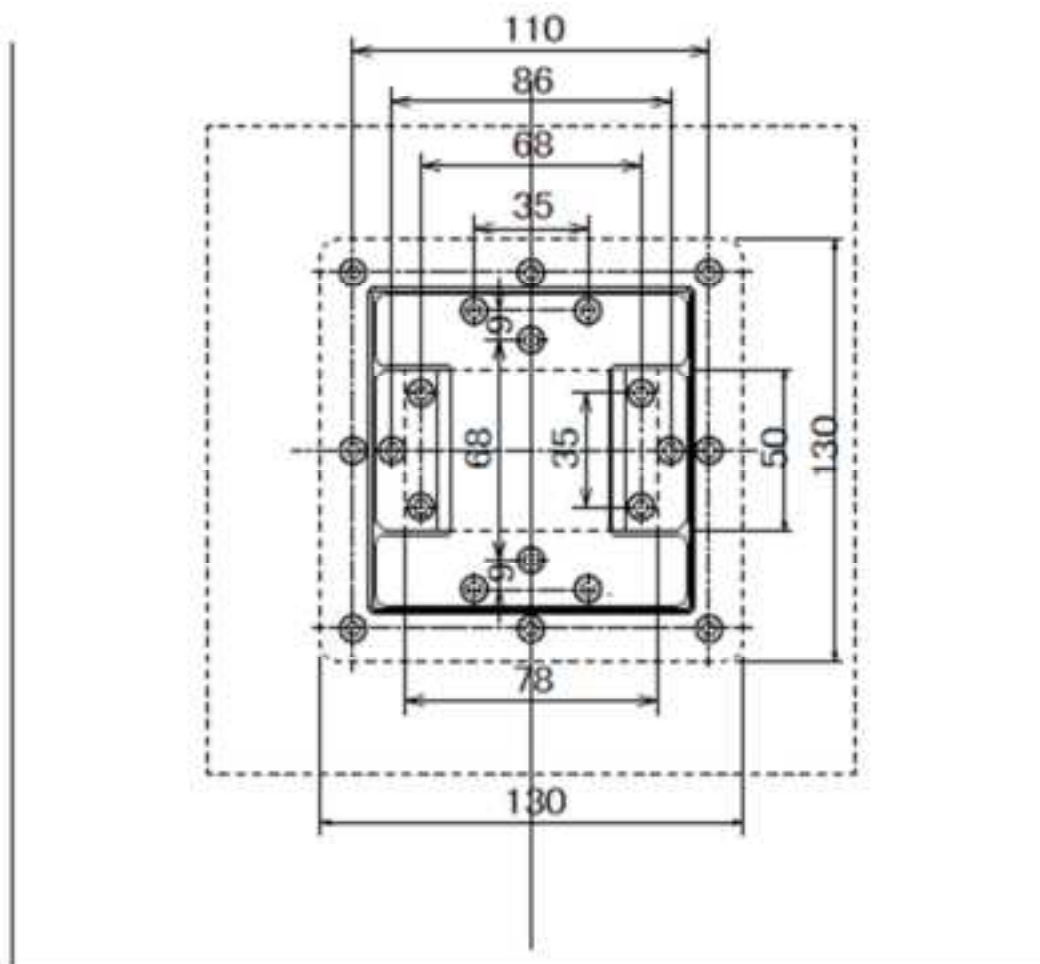


図 3-5 伝熱面の組立図（上面）

3.1.4. 模擬クラスト多孔質体

多孔質体中である模擬クラスト試験体を伝熱面上に配置するためには、周囲に隙間無く固定されていることが重要である。本年度は三次元加工機を用いて、粉末をレーザーで焼結しながら固化形成した。本加工法では、クラストのポロシティやクラックなどを自在に配置できる利点がある。

図 3-6 に、本試験で用いた多孔質体三次元造型機を示す。写真左側は 3D Systems 社の金属用三次元造型機で製品名は ProX200 である。現時点では三次元造型機としては、樹脂か金属を対象とした製品が存在するのみである。対象とするアルミナを形成するため、金属が造形できる三次元造型機として、本製品を選定した。

3D Systems 社の ProX200 の造形方式は、金属粉末をレーザーで焼結する粉末焼結積層法である。造形寸法は幅 100mm、奥行き 100mm、高さ 80mm が推奨されているが、沸騰伝熱面の面積を大きくすることから、造形プレートとほぼ同じ面積の幅 130 mm、奥行き 130 mm とした。多孔質体の高さは 10 mm であるが、形成後の多孔質体を造形プレートから切り離すために、2 mm の切り代を考慮し、高さは 12 mm とした。積層ピッチは 40 μm である。使用したアルミナ粉末粒径は 5 μm である。図 3-6 写真右側はエアードライヤ（フクハラ製 N2M4-85HXIII-8K）及び窒素発生器（日立産機システム製 HDN-25BF）である。既存のコンプレッサ（アネスト岩田製 SLP-75ED）からの圧縮空気は、エアードライヤで乾燥空気とし、窒素発生器により酸素を分離して窒素を三次元造型機に供給することで、レーザー照射により高温になった熔融物の酸化を抑制する方式である。金属用造型機の特徴であり、セラミックス造形に際しては不要であるが、安全機能の一部であることから購入際して除外不能であったため、窒素発生器を使用して造形を行った。

図 3-7 に三次元造型機を用いてクラスト試験体を造形している様子を示す。アルミナ粉末ベッドのうち、約 130 mm 四方が対応する造形領域である。写真中の左上の明るい部分は、レーザーが照射され、アルミナ粉末が熔融・凝固している場所である。中央部の 50 mm 四方はクラスト模擬試験体の多孔質部分である。写真は中央部の造形前に、周辺部を造形している。図示されているように造形は六角形を最小単位としている。これは収縮時の圧縮応力になるべく分散されるように小さな領域毎に分けて造形するためである。

図 3-8 に、使用した原材料粉末と造形物、対照として用いたアルミナ粉末の三種類の粉末 X 線回折結果を示す。三種類の粉末はいずれも主要ピークが同じ回折角に出現し、既知の単斜晶アルミナの X 線回折結果(PDF)と一致している。図 3-7 に示されるとおり、白色のアルミナ粉末はレーザー照射により熔融・凝固した後に灰色を呈する。しかしながらその組成は単斜晶アルミナのままであることが確認された。



(a) 三次元造形機



(b) エアードライヤ窒素発生器

図 3-6 多孔質体三次元造形機



図 3-7 多孔質体三次元造型中の様子

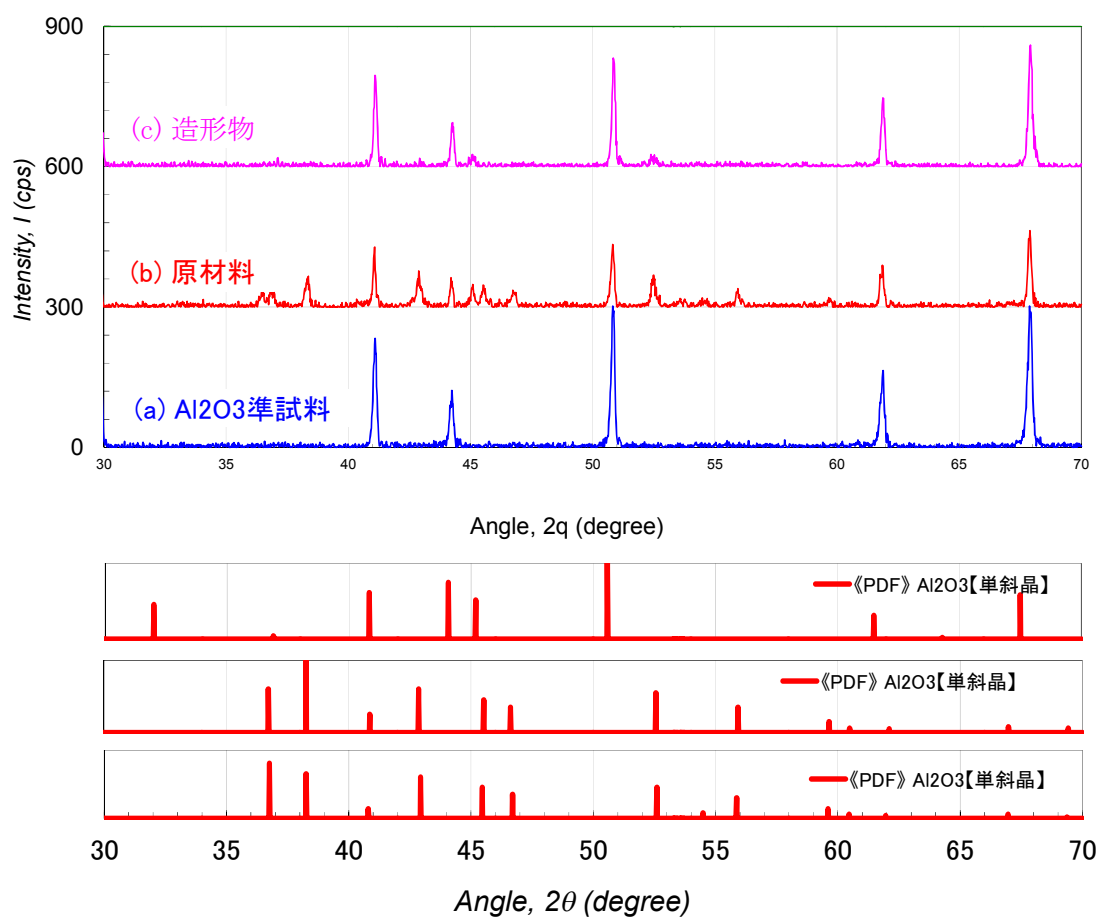


図 3-8 使用粉末と造形物の X 線回折結果

3.1.5. 伝熱面の構造

前述のクラスト多孔質体を伝熱面とするために、底部に金属箔を貼り付け、直接通電加熱により発熱させる。図 3-8 にヒータ及び温度計測用の金属鋼箔の形状と諸元を示す。金属箔として、Type 316 オーステナイト系ステンレス鋼を用いた。幅と長さは共に 100 mm で、厚さは 20 μm である。この金属箔を図中赤線部分にレーザーを照射し、切断する。その結果、中央部に有効発熱長 50 mm、幅 50 mm のヒータと、図中左右に電極部、上下に 24 本の電位計測リードを有する一枚の箔が完成する。

この金属箔をクラスト多孔質体の下面に接着する。接着剤はセメダイン社製の耐火パテを用いた。主成分はセラミックスである。

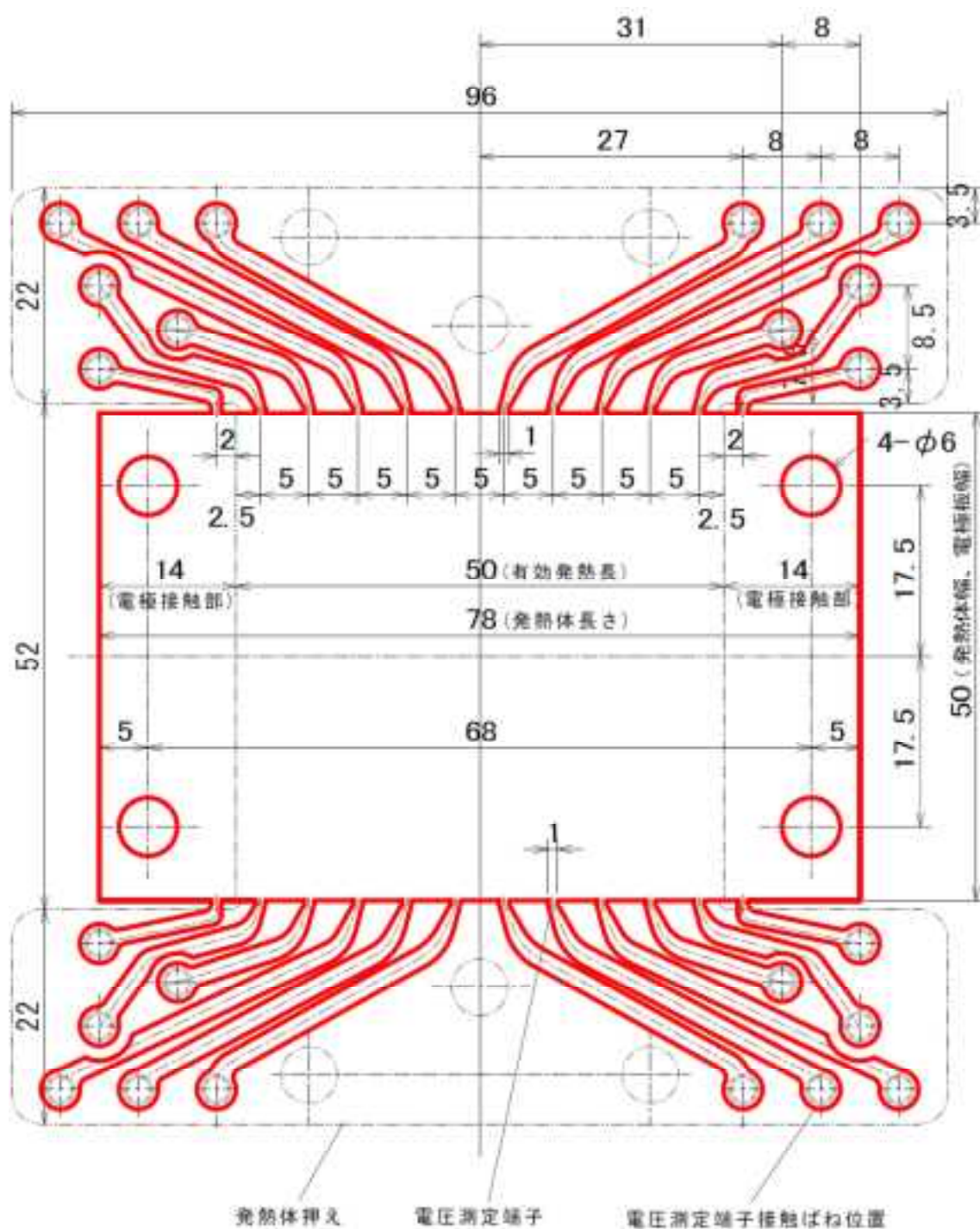


図 3-9 ヒータ及び温度計測用のステンレス鋼箔の諸元

3.1.6. 計測条件

計測対象の温度や流体温度、電源電流、ヒータ各部の電位、液位などは 1 秒間隔で収録した。沸騰曲線に必要とされる熱流束は、金属箔端部の計測リードの電位差に電流値を乗して、伝熱面積で除した値とした。伝熱面温度は、中央部に配置した熱電対指示値を用いた。プール沸騰試験のプール液が飽和であることを確認するために、プール底面の多孔質体近傍に Type K 熱電対を設置して溶液温度を計測し、98℃以上であることを確認した。液位は前述の通り 250 mmであることを確認して実験を開始した。

3.1.7. 試験溶液

本試験の濃縮海水は 2.5 倍濃縮であり、マリンアート SF-1（富田製薬株式会社製）をイオン交換水へ溶解させた溶液である。具体的には、イオン交換水 17kg にマリンアート SF-1 1615g を溶解した。

混合液はマリンアート SF-1 と五ホウ酸ナトリウム十水和物（富山薬品工業株式会社製）の塩濃度が 1 : 1 となるように、これらをイオン交換水へ溶解した。具体的には、イオン交換水 17kg にマリンアート SF-1 808g、五ホウ酸ナトリウム十水和物 1213g を溶解した

3.1.8. プール沸騰試験パラメータ

表 3-1 に、プール沸騰試験条件を示す。溶液はイオン交換した純水と濃縮海水、混合液の 3 種類である。クラックは有無の 2 水準とし、有の場合にはクラック幅を 2 mm とした。クラスト粒径は小粒径と大粒径である。小粒径の場合には多孔質体は緻密でポロシティ（空孔率）は約 30%である。大粒径多孔質体のポロシティは約 36%である。小粒径は粒径が約 0.1 mm、大粒径は粒径が約 1.2 mm である。

表 3-2 に、プール沸騰試験番号の命名法を示す。最初の記号は流体種類を示し、水（イオン交換水）の場合には W、濃縮海水では S、混合液は M である。続いてクラック幅であり、0 はクラック無しを、2 は多孔質体の中央に幅が 2

mm のクラックが存在する。続く記号がクラスト粒度を示しており、S は小粒径を、Lは大粒径を示している。続く 4 桁の数字は MMDD 形式の日付で、実験日を示している。

表 3-1 プール沸騰試験条件

試験パラメータ	水準数	範囲
溶液	3	水、濃縮海水、混合液
クラック幅	2	0 mm（クラック無）、2 mm
クラスト粒径	2	小、大

表 3-2 プール沸騰試験番号命名法

試験体		水 W	濃縮海水 S	混合溶液 M	日付
クラック 有 2mm	粒度小	W2S	S2S	M2S	MMDD 月日の 4桁
	粒度大	W2L	S2L	M2L	
クラック 無 0mm	粒度小	W0S	S0S	M0S	
	粒度大	W0L	S0L	M0L	

3.2. 試験手順

試験手順は以下の通りである。

- (1) 試験溶液が塩水（濃縮海水又は混合液）の場合にはタンク中で指定濃度に溶解させる。
- (2) 加熱して所定の温度に維持する。
- (3) ポンプにより、水槽に溶液を移送する。
- (4) 水槽内の溶液に補助ヒータを浸漬し、水槽内の溶液温度を沸点近傍に予熱する。
- (5) 金属箔ヒータに 2 V を印加して、ヒータ及び伝熱面を予熱する。
- (6) 水槽内溶液温度が沸点近傍に到達後、金属箔ヒータで試験体の加熱を開始する。加熱速度は 10 mV/s とする。
- (7) 金属箔ヒータ温度が 650℃に到達した際に、試験を終了する。
- (8) 試験終了後、溶液を排出し、装置内を洗浄する。

3.3. プール沸騰伝熱試験

3.3.1. 沸騰様相の観察

図 3-10 に、熱流束 120 kW/m^2 の場合の沸騰様相の可視化写真を示す。写真は 4 行 3 列の表に埋め込まれている。3 列は溶液の違いで左から順に水、濃縮海水、並びに混合溶液の場合である。水に比べて濃縮海水と混合液では気泡径が小さい。4 列は伝熱面の違いで上から順にクラック有 (2 mm) で粒度が小と大、クラック無で粒度が小と大の場合である。溶液の影響としては、濃縮海水において濁りがある。これは飽和溶解度に近いためであると考えられる。水及び混合液では濁りは殆ど見られない。クラックがある場合にはいずれも、クラックから気泡が上昇している。クラックが無い場合にはいずれも、伝熱面から微細な気泡が均一に発生し、上昇している。

図 3-11 に、熱流束 240 kW/m^2 の場合の沸騰様相の可視化写真を示す。図 3-10 と同様に濃縮海水のみに濁りが見られる。水に比べて濃縮海水と混合液では気泡径が小さい。クラックがある場合にはいずれも、クラックから気泡が上昇している。熱流束 120 kW/m^2 の場合より気泡径が大きいことからより合体した気泡が上昇していることを示している。クラックが無い場合にはいずれの液でも、粒度が小さい場合には微小な気泡が観測され、中央付近に引き寄せられ上昇している。クラックがなく、粒度が大きい場合にはいずれも、伝熱面から均一に気泡が発生し、上昇している。

図 3-12 に、熱流束 360 kW/m^2 の場合の沸騰様相の可視化写真を示す。他の熱流束と同様に濃縮海水のみに濁りが見られる。水に比べて濃縮海水と混合液では気泡径が小さい。クラックがある場合にはいずれも、クラックから気泡が上昇している。熱流束の増大に伴い、気泡径も増大し、上昇速度も速くなっている。クラックが無い場合にはいずれの溶液でも表面で気泡が発生し、中央部に引き寄せられて上昇している。

以上から、水と比較して濃縮海水及び混合液は気泡径が小さい。クラックの気泡放出が顕著であるが、熱流束が高くなるに伴い、クラック以外からも気泡が放出され、クラック有無の差異は小さくなる。粒度が小さい場合には気泡も微小であることが判明した。

3.3.2. 溶液種類の影響

図 3-13～図 3-16 にクラックの有無と粒径毎に沸騰曲線を示す。図 3-13 はクラック無で小粒径を、図 3-14 はクラック有で小粒径を、図 3-15 はクラック無で大粒径を、図 3-16 はクラック有で大粒径を対象とした沸騰曲線である。いずれの図においても、青色が水を、黒色が濃縮海水を、赤色が混合液を対象とした試験結果である。いずれの試験結果も、水よりも濃縮海水が、濃縮海水より混合液の沸騰曲線が低過熱度側に移行しており、熱伝達がより高いことを示している。可視化の結果から、水と比較すると濃縮海水と混合液は気泡径が小さいが、熱伝達が向上していることから、熱伝導率や密度が増大していることにより、熱伝導や対流熱伝達率が増大するためと考えられる。しかしながら熱流束が増大し、核沸騰が十分発達すると溶液の差異は小さくなる。

3.3.3. クラックの影響

次に、同じ試験結果を溶液毎に図示し、クラックの有無や粒径の影響を考察する。図 3-17、図 3-18、並びに図 3-19 に、それぞれ水（イオン交換水）、濃縮海水、混合液に対する沸騰曲線を示す。沸騰曲線はクラックに対しては実線がクラック無を、二重線がクラック 2 mm を示している。また粒径に対しては実線が粒径小（ポロシティが小さく緻密な多孔質体）を、破線は粒径大（ポロシティが大きい多孔質体）を示している。

いずれの溶液に対しても、クラスト中にクラックがある場合には沸騰曲線は低過熱度側に移行し、クラックが熱伝達を向上させていることを示している。前述の可視観測の結果でも、クラックから合体気泡が放出され上昇していることから、伝熱面上のクラスト多孔質体は沸騰熱伝達を阻害し、クラックにより伝熱面近傍まで溶液が導かれることで熱伝達が向上したと考えられる。しかしながら高熱流束になり核沸騰が十分発達するとクラック有無の際は小さくなる。クラック以外の熱伝達が相対的に良好になるためと考えられる。

3.3.4. 粒径の影響

一方で、粒径の影響はクラックの有無によって異なる。図 3-19 は混合液の影響であるが、違いは無視できる程小さい。図 3-17 の水（イオン交換水）の場合と図 3-18 の濃縮海水の場合では、粒径が大きい場合の沸騰曲線は低過熱度側に

移行しており、熱伝達がより高いことを示している。前述の可視化の結果から粒径が大きい方が気泡径が大きく、熱伝達を向上させていると考えられる。他方、粒径が小さい場合には逆の傾向の場合もあるが、その違いは小さい。いずれの場合にも高熱流束になると核沸騰が十分発達するために粒径の影響は小さくなる。

3.3.5. 総合評価

図 3-20 に、本研究で得られた全てのプール沸騰曲線を重ね書きした。前述の結論の通り、低過熱度では溶液やクラック有無、粒径の影響が差異として現れているが、熱流束が高くなるに従い差異は小さくなり、それぞれの沸騰曲線は傾きが 1 かやや小さい直線上に漸近すると考えられる。核沸騰が十分発達すると、溶液やクラック有無、粒径が沸騰熱伝達に与える影響が小さくなることが示されている。

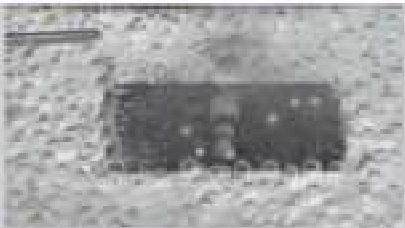
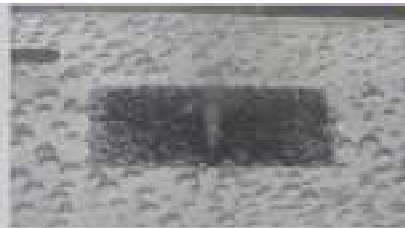
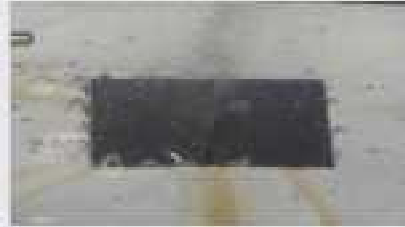
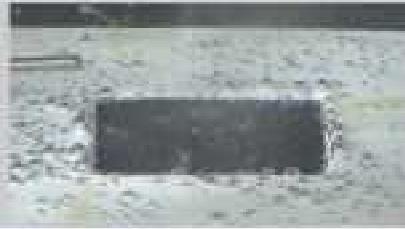
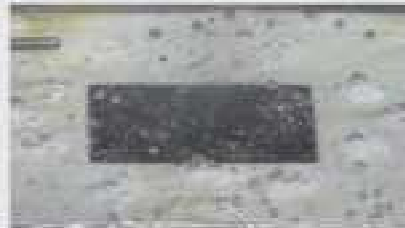
試験体		水 W	濃縮海水 S	混合溶液 M
クラック 有 2mm	粒度小			
	粒度大			
クラック 無 0mm	粒度小			
	粒度大			

図 3-10 120 kW/m²における沸騰様相

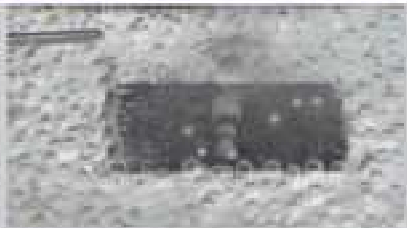
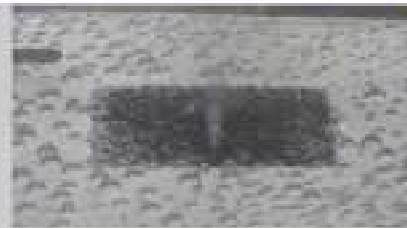
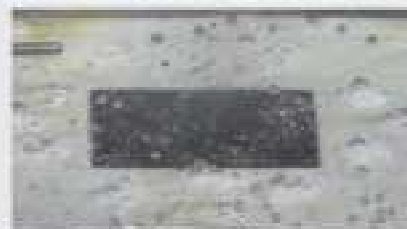
試験体		水 W	濃縮海水 S	混合溶液 M
クラック 有 2mm	粒度小			
	粒度大			
クラック 無 0mm	粒度小			
	粒度大			

図 3-11 240 kW/m²における沸騰様相

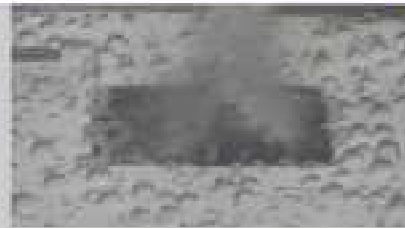
試験体		水 W	濃縮海水 S	混合溶液 M
クラック 有 2mm	粒度小			
	粒度大			
クラック 無 0mm	粒度小			
	粒度大			

図 3-12 360 kW/m²における沸騰様相

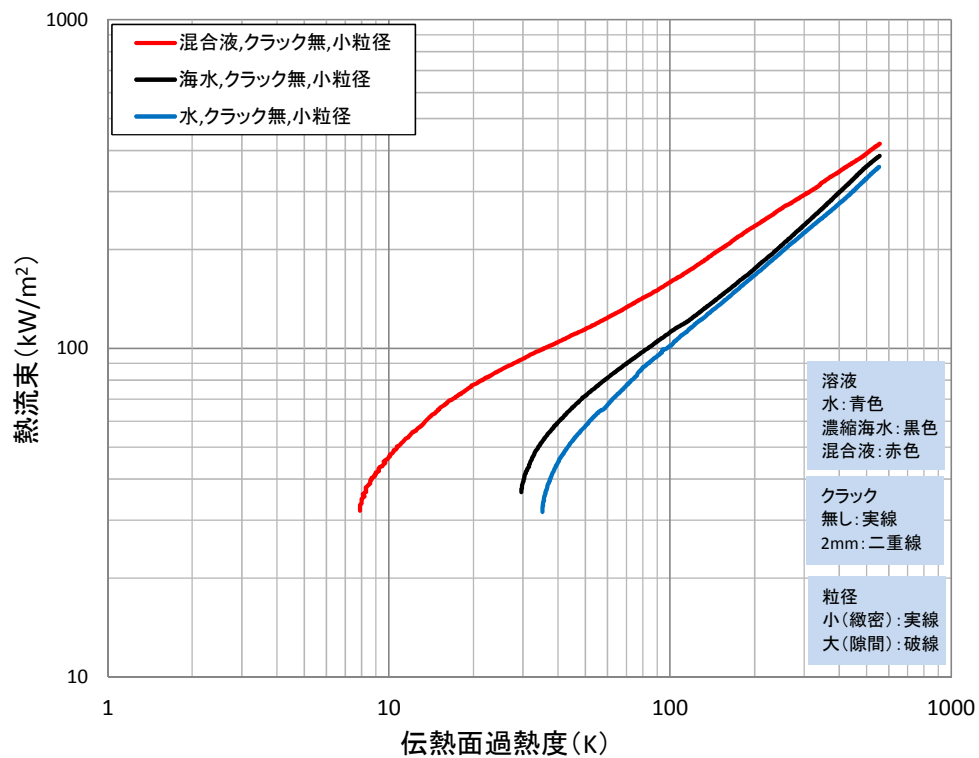


図 3-13 沸騰曲線（クラック無、小粒径に対する溶液種類の影響）

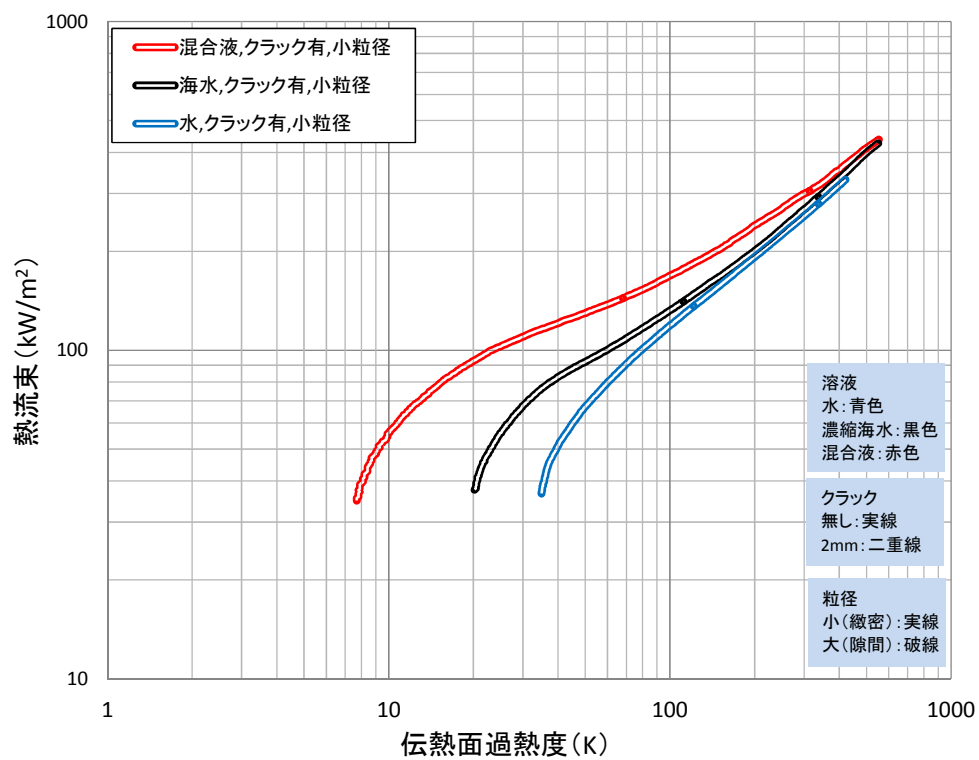


図 3-14 沸騰曲線（クラック有、小粒径に対する溶液種類の影響）

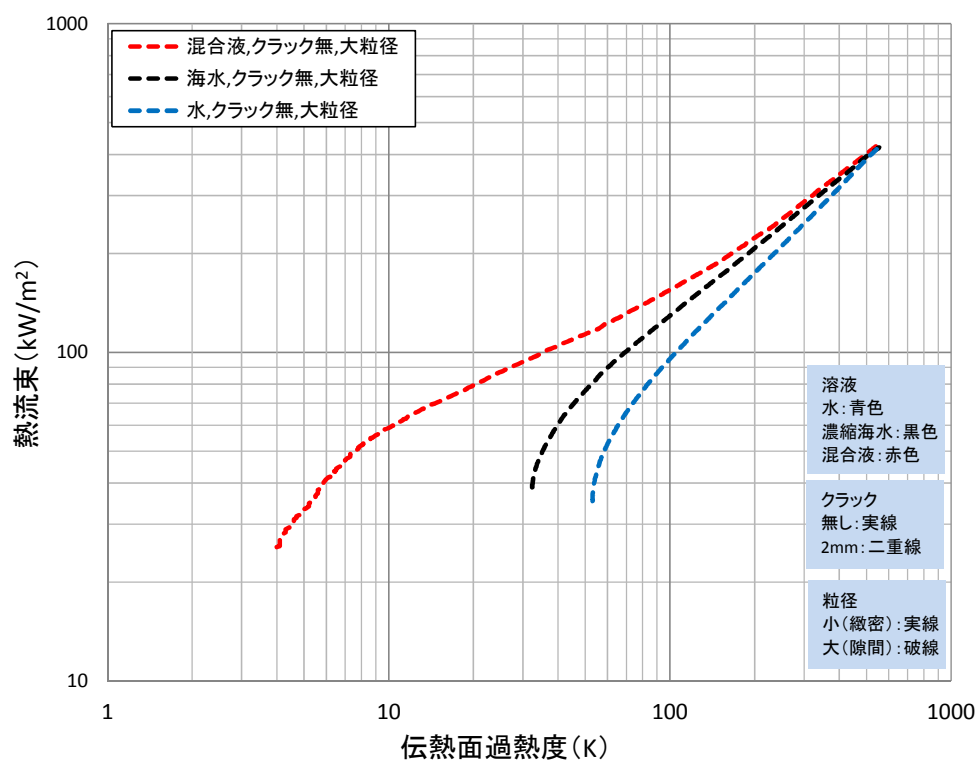


図 3-15 沸騰曲線（クラック無、大粒径に対する溶液種類の影響）

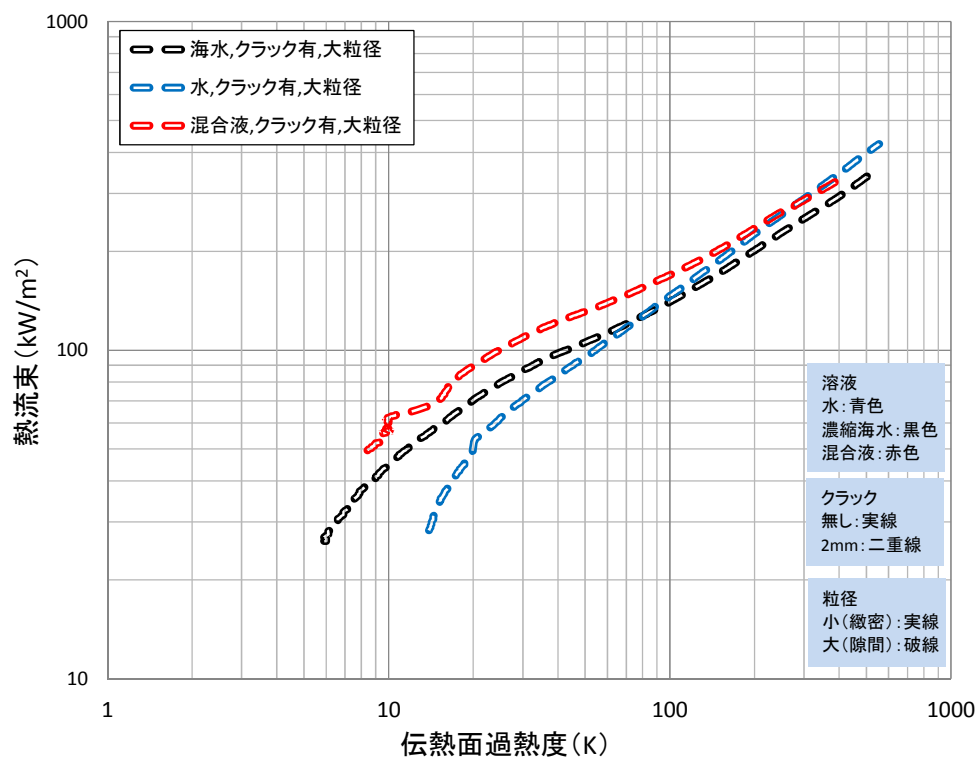


図 3-16 沸騰曲線（クラック有、大粒径に対する溶液種類の影響）

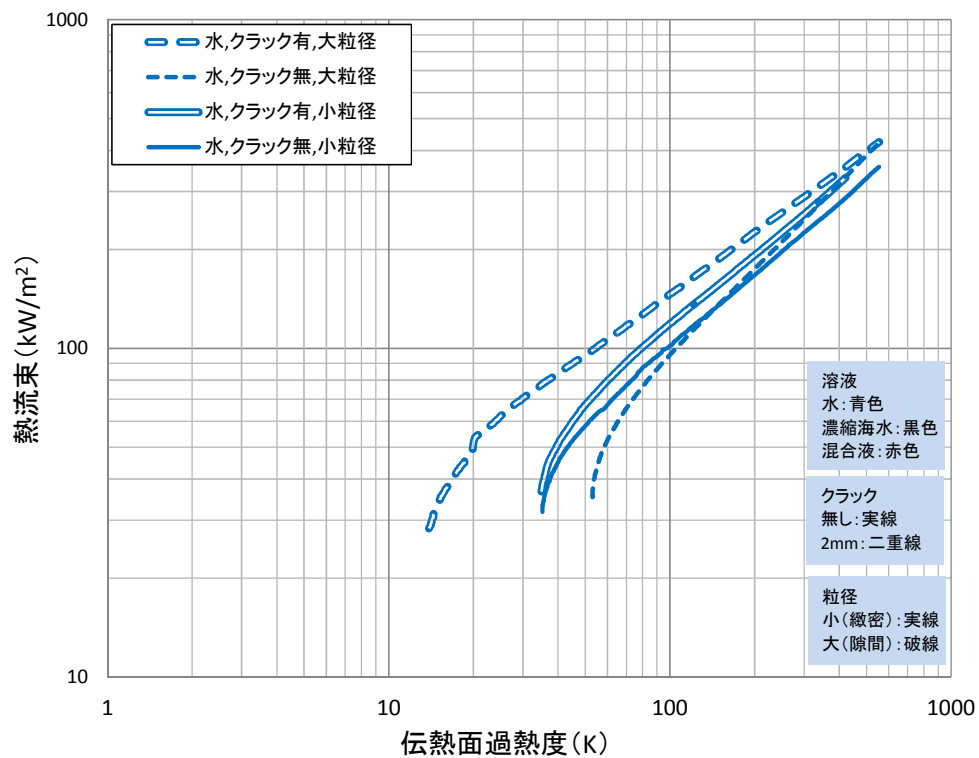


図 3-17 沸騰曲線（水に対するクラック有無と粒径の影響）

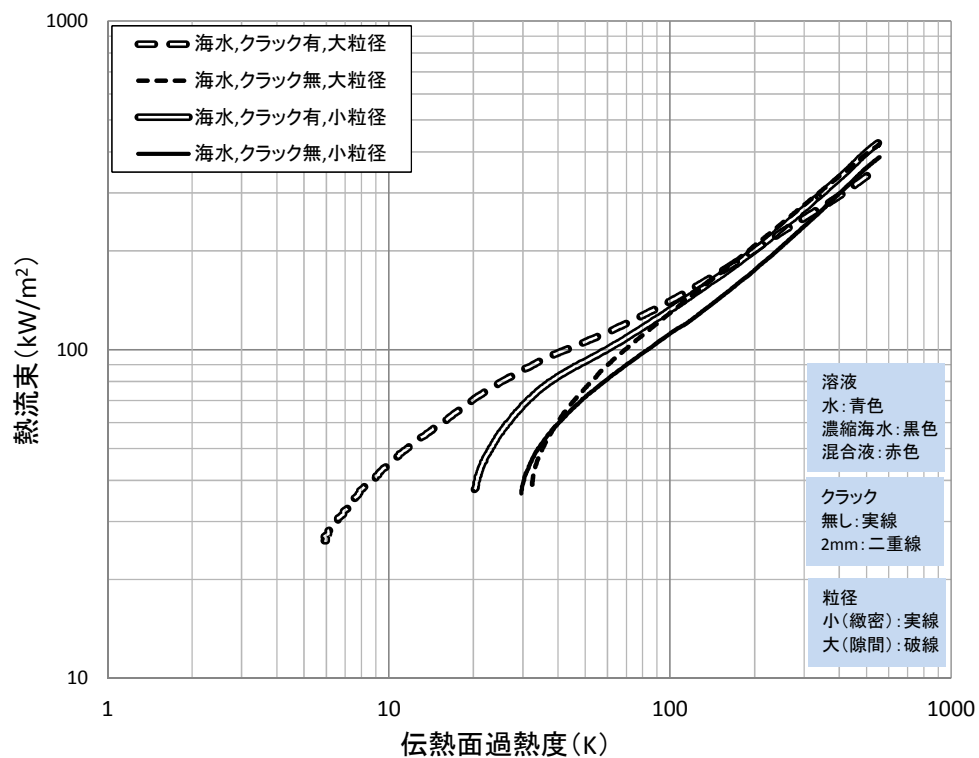


図 3-18 沸騰曲線（濃縮海水に対するクラック有無と粒径の影響）

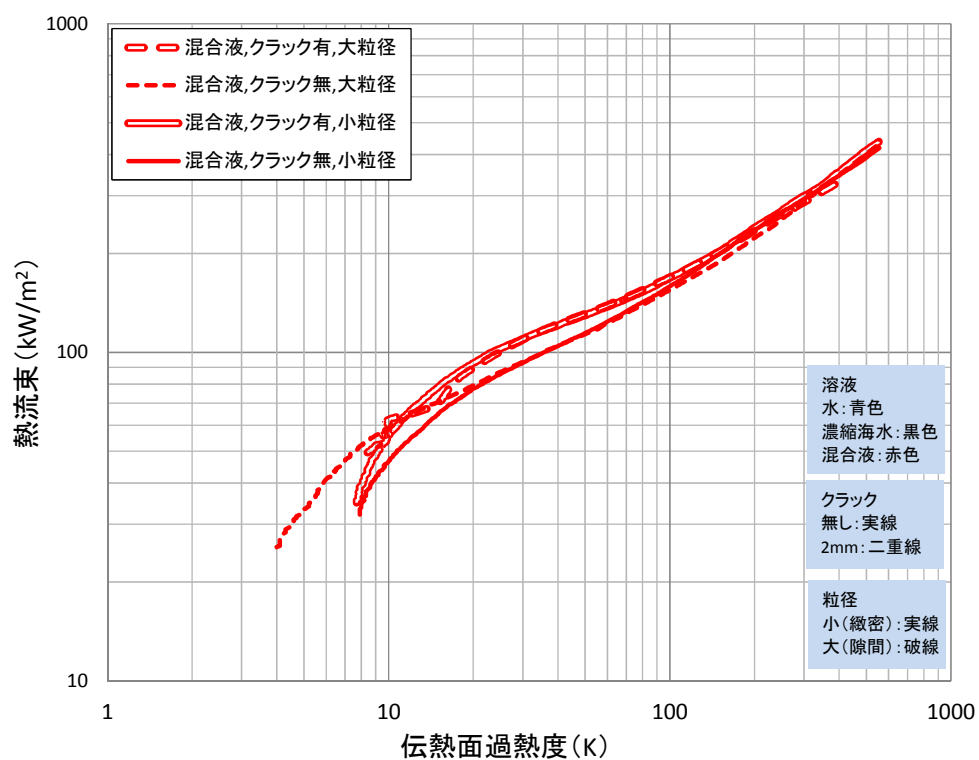


図 3-19 沸騰曲線（混合液に対するクラック有無と粒径の影響）

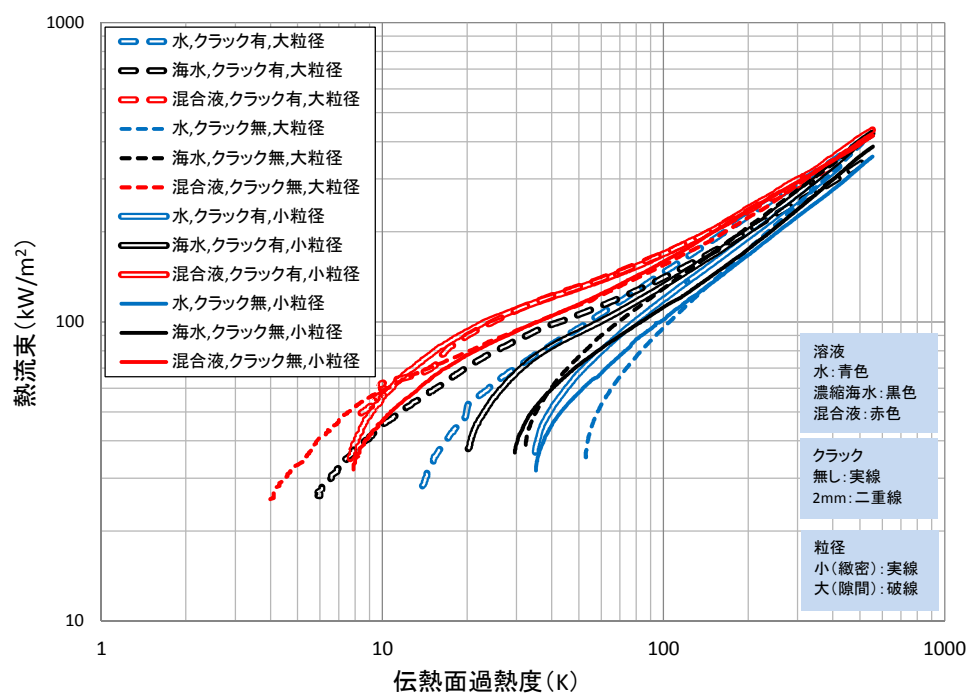


図 3-20 沸騰曲線（溶液とクラック有無、粒径の影響）

4. まとめ

海水およびホウ酸水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) X線 CT 撮影による短尺バンドル内での塩水沸騰濃縮試験

スペーサ間隔に対応する高さ 530 mm の短尺バンドルを用いて、人工海水を 2.5 倍濃縮した溶液、並びに濃縮海水と五ホウ酸ナトリウムとの混合液（重量濃度は前記濃縮海水と同一）中での沸騰試験を行った。三次元 X 線 CT でボイド率分布を観察した結果、スペーサ上部では流路中央のボイド率が高いこと、スペーサ下部ではボイド率が高く均一に混合されていること、出力の高い方が塩水の高い位置まで到達することが定量的に示された。このボイド率分布は、昨年度の成果である上部では塩析出量が流路中央で多いこと、スペーサ部では周辺部でも析出が多いこと、並びに同じ濃度では出力の高い方が析出量が多いこととの相間が示された。また濃縮海水と混合液とではボイド率分布の差異が小さいことから、濃縮海水の析出量が多いのは沸騰様相の違いではなく、溶解度に起因すると考えられる。

(2) クラスト伝熱面の塩水沸騰熱伝達試験

金属三次元プリンタのレーザー強度や照射パターンを変化させることでアルミナ粉末の造形法を見出し、幅 50 mm×奥行 50 mm×厚さ 10 mm の模擬クラスト（多孔質体）を中央に配置した伝熱面を作成した。開発した手法により幅 2 mm のクラックを中央に配置し、気孔率を変化させたクラスト模擬試験体を製作した。金属箔（厚さ 20 μm の Type 316 ステンレス鋼製）をクラスト下面に密着させ、直接通電加熱させることで、プール沸騰伝熱試験を行った。クラックは低熱流束において冷却効果を有するため沸騰気泡がクラックから顕著に放出されることにより熱伝達が向上するが、熱流束が高くなった際には全面から沸騰し、クラックの影響は小さくなることが明らかになった。濃縮海水と混合液とでは同様な沸騰熱伝達であり、いずれも水よりは沸騰熱伝達率がやや高い。粒径が大きい方が大きな気泡が観測され、熱伝達もやや大きい。溶液や粒径が熱伝達に及ぼす影響も、十分発達した核沸騰ではその差は小さくなる。

紙へリサイクル可