

平成 29 年度原子力規制庁委託成果報告書

使用済み燃料貯蔵プール冷却試験

原子燃料工業株式会社

平成 30 年 3 月

本報告書は、原子力規制委員会原子力規制庁からの委託により実施した業務の成果をとりまとめたものです。

本報告書に関する問い合わせは、原子力規制庁までお願いします。

## 目次

1	はじめに	1
2	事業計画	2
2.1	事業目的	2
2.2	事業内容	2
2.2.1	スプレー流量分配実験	2
2.2.2	スプレー熱伝達実験	2
2.2.3	実験データの分析	3
2.2.4	成果報告書の作成	3
2.2.5	外部評価委員会の設置	3
3	事業成果	10
3.1	スプレー流量分配試験	10
3.1.1	試験装置および試験体	10
3.1.2	試験方法および試験条件	12
3.1.3	試験結果	14
3.1.4	スプレー流量分配試験のまとめ	18
3.2	スプレー熱伝達試験	69
3.2.1	試験装置	69
3.2.2	試験方法および試験条件	72
3.2.3	試験結果	74
3.2.4	スプレー熱伝達試験のまとめ	77
3.3	試験データの分析	112
3.3.1	熱伝達	112
3.3.2	クエンチフロント進展	145
3.3.3	ボイド率	172
3.3.4	システム解析コードによる再現解析と課題検討	197
3.4	外部評価委員会の開催	217
4	まとめ	220
	付録 3.1-1 スプレー流量分配試験 図面一覧	
	付録 3.1-2 スプレー流量分配試験 空気試験結果一覧	
	付録 3.1-3 スプレー流量分配試験 蒸気試験結果一覧	
	付録 3.2-1 スプレー熱伝達試験 図面一覧	
	付録 3.2-2 測定データの評価方法	
	付録 3.2-3 スプレー熱伝達試験 材質・幾何形状・高さ位置	
	付録 3.2-4 スプレー熱伝達試験 試験マトリックス	
	付録 3.2-5 スプレー熱伝達試験 試験データグラフ	

## 【本報告書における略語】

BAF	: 発熱有効長下端 (Bottom of Active Fuel)
CCFL	: 気液対向流制限 (Counter Current Flow Limited)
CFD	: 数値流体力学 (Computational Fluid Dynamics)
$D_{32}$	: ザウター平均液滴径 [mm]
ECVL	: 静電容量水位計 (Electrical Conductance Void and water Level sensor)
LOCA	: 冷却材喪失事故 (Loss-of-Coolant Accident)
PCT	: 被覆管最高温度 (Peak Cladding Temperature) [°C] (本報告書においては各水平断面内におけるヒータ表面の最高温度を示す)
PTV	: 粒子追跡法 (Particle Tracking Velocimetry)
SCVS	: サブチャンネルボイドセンサ (SubChannel Void Sensor)
SFP	: 使用済燃料貯蔵プール (Spent Fuel Pool)
TCi	: 発熱有効長上端から i 番目の熱電対
TAF	: 発熱有効長上端 (Top of Active Fuel)
UTP	: 上部タイプレート (Upper Tie Plate)

## 1 はじめに

本報告書は、原子力規制庁の平成 29 年度原子力施設等防災対策等委託費（使用済み燃料貯蔵プール冷却試験）事業による委託業務として、原子燃料工業株式会社が実施した平成 29 年度の成果を取りまとめたものである。

## 2 事業計画

### 2.1 事業目的

“実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則”では第54条（使用済燃料貯蔵槽の冷却等のための設備）第2項において、使用済燃料貯蔵プール（以下「SFP」という。）からの大量の水の漏えいその他要因により SFP の水位が異常に低下した場合において SFP 内の燃料集合体等の著しい損傷の進行を緩和し臨界を防止するために必要な設備として、スプレイ設備等を要求している。今後、事業者がスプレイ設備を使用した重大事故対策を提出した場合に、その有効性評価の妥当性の確認に活用できる定量的な実験データが必要となる。

そこで、この委託では、SFP が大量の冷却材を喪失する重大事故時に、スプレイによる SFP 内の使用済燃料の冷却特性についての技術的知見を精緻化し、スプレイ冷却の定量的効果の評価に活用するための実験データを取得する。

### 2.2 事業内容

平成27年度原子力施設等防災対策等委託費（使用済み燃料貯蔵プール冷却試験）事業の下で設計・製作した単バンドル用の実験装置を用いて、スプレイ熱伝達実験を実施してスプレイ冷却特性等の定量化のための実験データを取得するとともに、平成28年度原子力施設等防災対策等委託費（使用済み燃料貯蔵プール冷却試験）事業の下で2×2バンドル向けに改造した実験装置を用いて、4バンドル体系下でのスプレイ流量配分実験を実施してスプレイ分配特性の定量化のための実験データを取得する。更に、取得した実験データを分析し、スプレイ冷却等を解析コード等で評価するための手法及び課題について検討を行う。

#### 2.2.1 スプレイ流量配分実験

平成28年度に製作した実験装置を用いて、多バンドル（2×2バンドル相当）条件下でのスプレイ流量配分特性に関する実験を行う。各模擬バンドルは非発熱であり、各模擬バンドルの上部タイプレートから流出する作動流体は蒸気流、空気流又は両者の混合ガス（以下「ガス」という。）とし、ガス流量は模擬バンドルごとに個々に測定し調節する。また、圧力は大気圧とし、過熱蒸気など373Kを相当量超える温度のガスを取り扱い、模擬燃料容器ごとに、上部タイプレート部からチャンネルボックス内側の領域内に落水したスプレイ水流量を計測する。

表2.2.1-1に使用する実験装置の構成、これを用いて実施する実験などについての基本仕様を示す。また、図2.2.1-1にスプレイ流量配分実験装置のイメージを示す。

なお、詳細な実験条件等は原子力規制庁担当官と協議して決定する。

#### 2.2.2 スプレイ熱伝達実験

図2.2.2-1に示す流れに従って出力レベル及び集合体内の2相若しくは単相の水位又はプール水タンク内の単相水位（以下「水位」という。）レベルを個々のケースで初期設定し、模擬燃料

集合体の熱出力を段階的に上昇することで燃料被覆管の表面熱流束及び温度上昇率を変化させ、一連の実験を実施し、平成28年度に取得した実験データの拡充を図る。

表2.2.2-1に実験の基本仕様、図2.2.2-2に単バンドル実験装置のイメージ、図2.2.2-3に単バンドル実験で用いる模擬燃料集合体の構成を示す。

なお、詳細な実験条件等は原子力規制庁担当官と協議して決定する。

### 2.2.3 実験データの分析

2.2.1項及び2.2.2項の実験で取得・整理したデータを用いて、スプレー冷却特性の分析を行う。また、スプレー冷却等の現象をシステム解析コード等で評価するための手法及び課題について検討する。

### 2.2.4 成果報告書の作成

2.2.1項、2.2.2項及び2.2.3項の作業の内容に関する報告、並びに作業に伴って発生した課題、問題点、その対策などを取りまとめた技術資料を作成し、成果報告書とする。

### 2.2.5 外部評価委員会の設置

3名の学識経験者、専門家から構成される外部評価委員会を設置し、事業実施内容等への評価、助言等を受ける。

表 2.2.1-1 SFP 冷却実験 (2×2 バンドル) の基本仕様

項目	内容	備考
装置構成	実験装置本体容器 (模擬燃料集合体 (上部タイププレートなど), 模擬チャンネルボックス, 模擬ラック), 実験装置上部容器, 計測系, 制御系, 冷却水供給ポンプ, 予熱器, 水抜き配管, 弁, スプレーなど	上部タイププレート形状及びスプレータイプを変更できること。
計測機器	熱電対 (ガス温度分布の測定用) 及びシャドウ法/PTV 液滴径・流速計	必要十分な計測を実現できるものであれば, 他の計測機器等の使用, 設置等も可。必要に応じて高速度ビデオカメラなどを考慮。
実験条件	<ul style="list-style-type: none"> <li>圧力条件: 大気圧</li> <li>ガス流量レベル: 崩壊熱レベルでの蒸気蒸発量及び空気 (SFP 水位なし) の自然循環流量に相当するレベル</li> <li>ガス温度: 常温～約 423K</li> </ul>	ガス温度の上限については, 可能な範囲での上限値 (ただし 373K 以上) であることが望ましい。
作動流体	ガス: 蒸気, 空気又は両者の混合ガス スプレー水: 常温の純水又は純水相当の水	
実験パラメータ	<ul style="list-style-type: none"> <li>ガス流量レベル</li> <li>模擬燃料容器ごとのガス流量分布</li> <li>ガス温度</li> <li>スプレー流量</li> <li>スプレー設定位置: 軸方向, 横方向に変更できること</li> </ul>	
計測項目	<ul style="list-style-type: none"> <li>スプレー 流量, 液滴径分布, 分散角度, 濃度分布, 速度分布, 集合体内への落水量の配分又は複数集合体への 3 次元的分配挙動, など</li> <li>ガス温度分布 (模擬燃料集合体の内外, 同集合体より上部の空間内など)</li> </ul>	可能であれば, 上部タイププレート近傍の上下方向の媒質流速についての横方向断面内分布データを取得する。



表 2.2.2-1 SFP 冷却実験（単バンドル）の基本仕様

項目	内容	備考
装置構成	実験装置本体容器（模擬燃料集合体（ヒータロッド、非加熱ロッド、スペーサ、上部タイプレートなど）、模擬チャンネルボックス、模擬ラック）、実験装置上部容器、プール水タンク、計測系、制御系、冷却水供給ポンプ、予熱器、水抜き配管、弁、スプレーなど	
計測機器	熱電対（16本のロッド及びチャンネルボックスのそれぞれに軸方向に10段程度設置）、水位計、ボイド率計、及びシャドウ法/PTV液滴径・流速計、2相水位測定機器	
実験条件	<ul style="list-style-type: none"> <li>圧力条件：大気圧</li> <li>発熱レベル：崩壊熱相当</li> <li>模擬燃料集合体（7×7、軸方向一様発熱など）</li> <li>冷却水喪失：下方に冷却水流出用配管を接続</li> <li>冷却水温度：常温～373K</li> <li>初期水位：BAF～TAFの範囲内</li> </ul>	被覆管温度を監視し、急激な酸化等の反応が生じる温度以下で実験条件を設定する。
作動流体	冷却水側は純水又は純水相当の水、水面より上は空気及び発生した蒸気の混合流体	BWR条件の場合、水面より上のインチャンネル内では、蒸気流が支配的である可能性が高いが、特にスプレー水による冷却時には上部タイプレートからの空気の下流が想定される。
実験パラメータ	<ul style="list-style-type: none"> <li>発熱レベル</li> <li>冷却水温度</li> <li>スプレー流量</li> <li>スプレー開始時刻の遅れ</li> <li>スプレー設定位置：</li> <li>軸方向、横方向位置を変更できること</li> <li>初期水位：BAF～TAFの範囲内（3レベル）</li> </ul>	BWR条件で発熱レベルが低い場合には集合体内で蒸気流が循環する3次元の流れが生じる可能性があることに留意し、必要に応じて実験パラメータに反映すること。
計測項目	<ul style="list-style-type: none"> <li>2相水位（集合体内外）</li> <li>冷却水内ボイド率</li> <li>スプレー 流量、液滴径分布、分散角度、濃度分布、速度分布、集合体内への落水量の配分など</li> <li>燃料被覆管温度</li> <li>プール水温度及び集合体内流体温度</li> </ul>	燃料被覆管温度は、集合体断面内の位置依存性にも着目して整理し、集合体内の3次元流れの効果、液滴冷却、Top down quenchなどの燃料棒位置依存性を把握する。

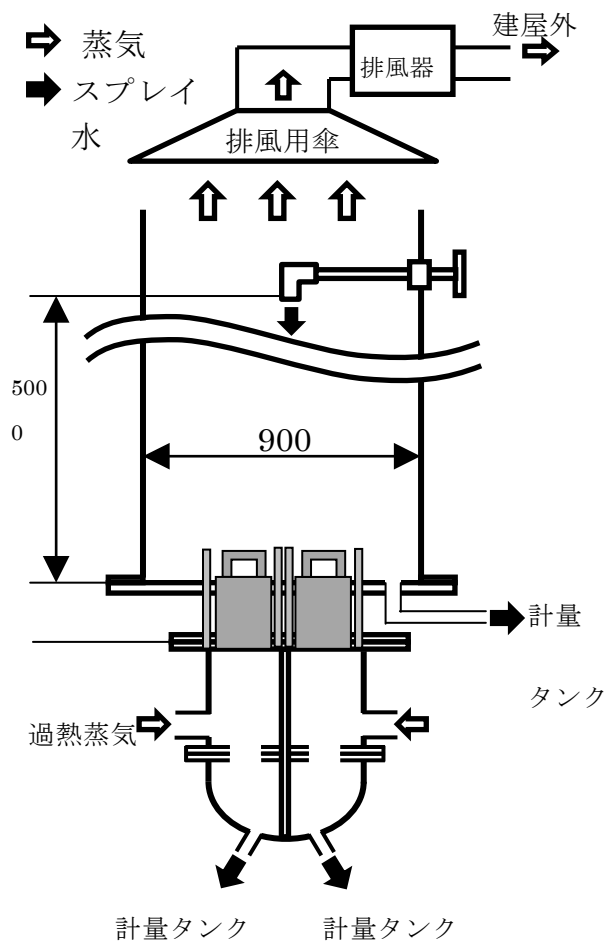


図 2.2.1-1 スプレイ流量配分実験装置のイメージ

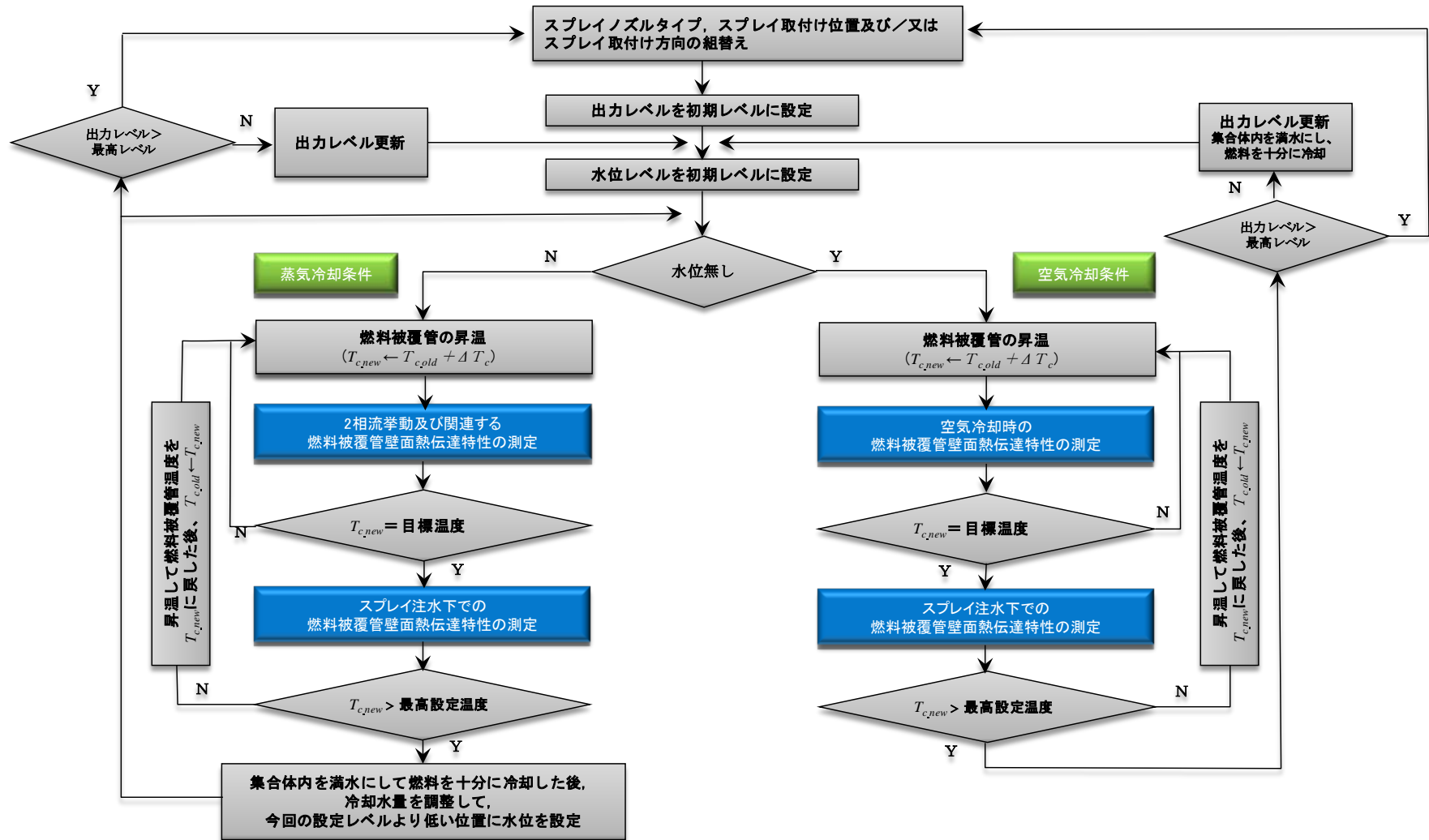


図 2.2.2-1 実験の流れ

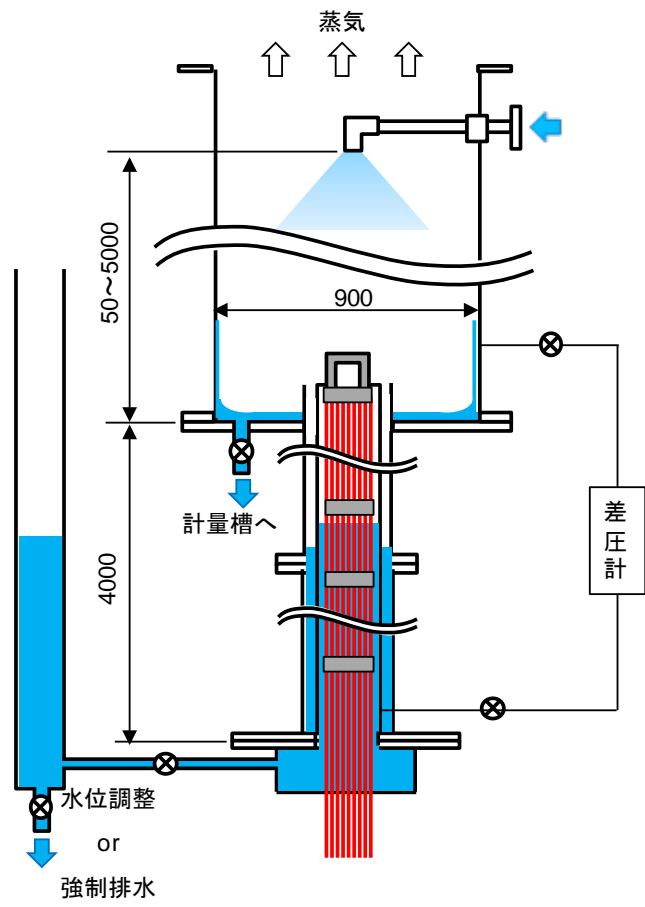


図 2.2.2-2 単バンドル実験装置のイメージ

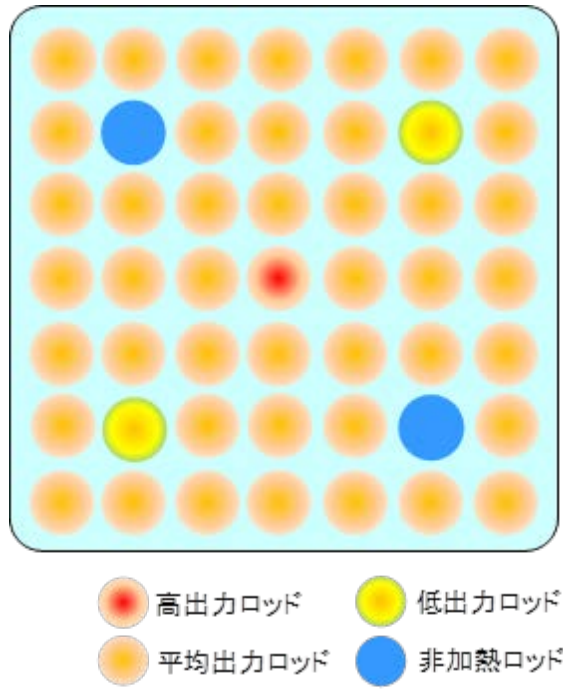


図 2. 2. 2-3 模擬燃料集合体の構成例

### 3 事業成果

#### 3.1 スプレー流量分配試験

SFP 内へ噴霧されたスプレーは、集合体より発生した蒸気と流動方向が逆向きであり、気液対向流となり集合体内に落水する。気液対向流においては、気体流量と液相流量が大きくなるほど、落水量が制限される CCFL が発生する可能性が高まる。また、吹上げた蒸気によって液滴には抗力と浮力が発生することで集合体領域から外れるようにスプレーが流れ、集合体内に落水するスプレー量が減少する可能性がある。この他に SFP 内においては崩壊熱が異なる燃料が貯蔵され、隣接する集合体の発熱量が異なる。発熱量違いによって吹上げる蒸気量が異なるため、蒸気吹上げ量不均一に起因した横流れが生じ、スプレー流動に影響する可能性がある。

以上の現象によって、実際に集合体内へ落水するスプレー量は、気体吹上げが無い状態を基に算定した値より減少することが懸念される。3.2 において後述する熱伝達試験においては、単バンドルを対象とした試験であり、隣接する集合体が与える影響は考慮されていない。また、加熱によるプール水の沸騰や、温度上昇した模擬燃料棒との接触によるスプレー水蒸発が発生し、さらにヒータ加熱やスプレー冷却により温度と発生蒸気量が時間変化する非定常試験であるため、集合体内に落水したスプレー量を定量的に把握することが困難である。このため、4体の模擬燃料集合体を配置した定常状態の非加熱試験体系において、各集合体より気体を吹上げてスプレー落水量の変化を確認するスプレー流量分配試験を実施した。

##### 3.1.1 試験装置および試験体

本試験は「平成 28 年度原子力施設等防災対策委託費（使用済み燃料貯蔵プール冷却試験）事業」において改造した、スプレー流量分配試験装置を用いた。本試験装置は、スプレー熱伝達試験装置の一部部品を交換することにより、7×7 縮小模擬燃料集合体 4 体を 2×2 格子配列として、各集合体下端からユーティリティより供給された蒸気もしくは空気を吹上げ可能としたものである。

###### 3.1.1.1 試験装置

試験装置の概略図を図 3.1-1、装置図面を付録 3.1-1 に示す。試験装置に供給する蒸気はボイラ、空気はコンプレッサより供給され、実施する試験条件に合わせて閉止弁を開ける。供給された気体は各集合体へのラインに分岐し、調整バルブにより各ラインで流量が設定される。流量調整後の気体は、スーパーヒータにより試験温度まで昇温され、各集合体下部に流入する。流入した気体は、集合体部を抜けた後に上部容器内へ流れ、排気ファンを通して装置外へ放出される。スプレー水は、スプレーポンプにより装置上端まで送水され、調整バルブにより流量調整された後にスプレーノズルより噴霧される。

###### 3.1.1.2 模擬燃料集合体および模擬ラック

試験部の幾何形状と寸法を表 3.1-1 に示す。模擬燃料集合体と模擬ラックは、長さを除いて寸法等はスプレー熱伝達試験と同じである。模擬燃料集合体と模擬ラック部の図面を付録 3.1-1 に示す。

### 3.1.1.3 計測機器

本試験においては、主に以下の項目について計測を行った。

- ・各集合体へ流入する気体の流量，気体温度，圧力（流量計，温度計，圧力計）
- ・装置へ噴霧するスプレイ水の流量，温度（流量計，圧力計）
- ・各集合体へ落水するスプレイ水の量（貯水タンクへ設置した差圧式液面計）
- ・上部容器底面およびラック内に落水するスプレイ量（貯水タンクへ設置した差圧式液面計）
- ・各集合体内の温度（熱電対）
- ・各集合体上部タイプレートハンドル下面の温度（熱電対）
- ・液滴の頻度，径，速度（液滴計）

なお，液滴計測は図 3.1-2 および図 3.1-3 に示すように実施したが，気体吹上げ時の試験は高さ 5m 位置 X 方向のみである。

### 3.1.1.4 スプレイノズル

使用したスプレイノズルの性能を表 3.1-2，図面を付録 3.1-1 に示す。本試験で使用したスプレイノズルは，模擬燃料集合体 4 体にスプレイを噴霧できるように，スプレイ熱伝達試験より大型のものを使用した。

気体吹上げが無い状態において，各集合体および上部容器底面への落水量を確認した。確認した結果を図 3.1-4～図 3.1-8 に示す。本試験においては，気体吹上げが無い場合の各集合体へのスプレイ落水量を，以下に示す近似式で算出した。なお，スプレイ流量 1100g/s を境目として各集合体の落水量に変化が見られたため，本値を境目として算出式を分けている。

$$\cdot \text{集合体 A : } (<1100\text{g/s}) \quad W_{A0} = -5.32 \times 10^{-5} \times W_{SP}^2 + 0.125 \times W_{SP} \quad (3.1-1)$$

$$(\geq 1100\text{g/s}) \quad W_{A0} = -5.25 \times 10^{-5} \times W_{SP}^2 + 0.225 \times W_{SP} - 98.5 \quad (3.1-2)$$

$$\cdot \text{集合体 B : } (1100\text{g/s 未満}) \quad W_{B0} = -1.55 \times 10^{-5} \times W_{SP}^2 + 0.105 \times W_{SP} \quad (3.1-3)$$

$$(1100\text{g/s 以上}) \quad W_{B0} = 4.09 \times 10^{-2} \times W_{SP} + 50.7 \quad (3.1-4)$$

$$\cdot \text{集合体 C : } (1100\text{g/s 未満}) \quad W_{C0} = 9.92 \times 10^{-6} \times W_{SP}^2 + 9.42 \times 10^{-2} \times W_{SP} \quad (3.1-5)$$

$$(1100\text{g/s 以上}) \quad W_{C0} = 0.116 \times W_{SP} - 24.6 \quad (3.1-6)$$

$$\cdot \text{集合体 D : } (1100\text{g/s 未満}) \quad W_{D0} = -4.32 \times 10^{-5} \times W_{SP}^2 + 0.114 \times W_{SP} \quad (3.1-7)$$

$$(1100\text{g/s 以上}) \quad W_{D0} = -1.79 \times 10^{-4} \times W_{SP}^2 + 0.575 \times W_{SP} - 3.35 \times 10^{-2} \quad (3.1-8)$$

$$\cdot \text{上部容器底面 :} \quad W_{\text{Drain}0} = 6.45 \times 10^{-1} \times W_{SP} \quad (3.1-9)$$

図中に示すように，大部分の条件においてスプレイ高さ 3m とした場合においても，各集合体への落水量に変化が無いため，スプレイ高さ 5m と同様の式により算出する。また，径方向位置

をオフセットした場合は落水量が大きく変わるが、試験条件はスプレー流量  $1.0\text{m}^3/\text{h}$  のみのため、以下に示す取得データ平均値を、気体吹上げが無い状態のスプレー落水量とした。

$$\cdot \text{集合体 A : } W_{A0} = 4.71\text{g/s} \quad (3.1-10)$$

$$\cdot \text{集合体 B : } W_{B0} = 11.6 \text{ g/s} \quad (3.1-11)$$

$$\cdot \text{集合体 C : } W_{C0} = 14.9 \text{ g/s} \quad (3.1-12)$$

$$\cdot \text{集合体 D : } W_{D0} = 3.62 \text{ g/s} \quad (3.1-13)$$

$$\cdot \text{上部容器底面 : } W_{\text{Drain}0} = 230.57 \text{ g/s} \quad (3.1-14)$$

気体吹上げが無い状態において測定した液滴径、液滴速度の結果を表 3.1-3～表 3.1-20、図 3.1-9～図 3.1-14 に示す。なお、液滴径の平均はザウター径  $D_{32}$ 、各方向の速度平均値は算術平均とした。各平均値の算出方法は付録 3.2-2 に示す。各測定結果では、高さおよび径方向で液滴径と速度に分布が生じている。

### 3.1.2 試験方法および試験条件

#### 3.1.2.1 試験方法

本試験は以下の手順により実施した。

- ① スプレーを噴霧する。流量および温度を試験条件に設定後、噴霧を停止する。
- ② 集合体計量タンクの水位が開始レベルとなるように、タンク水を排水する。
- ③ ユーティリティより試験装置へ、気体(蒸気もしくは空気)を流入させる。
- ④ スーパーヒータを稼働し、流入気体の温度と試験装置の温度を試験温度まで上昇させる。
- ⑤ 流入気体の流量を調整する。
- ⑥ 温度および気体流量調整後、スプレーを調整した条件において噴霧する。
- ⑦ データ収録を開始し、試験時間(スプレー流量  $4.0\text{m}^3/\text{h}$  未満は 10 分、スプレー流量  $4.0\text{m}^3/\text{h}$  以上は 5 分)のデータを収集する。
- ⑧ 試験時間経過後、データ収録を停止し、スプレーおよび気体流入を停止する。

#### 3.1.2.2 気体温度

スプレーの流量分配に影響を与えるパラメータの 1 つとして、密度や粘性係数等が変化する気体温度が挙げられる。この気体温度の試験条件を設定するため、確認試験を実施した。確認試験の条件を以下に示す。

- ・スプレー流量 :  $1.0 \text{ m}^3/\text{h}$
- ・スプレー温度 :  $22\sim 27 \text{ }^\circ\text{C}$
- ・気体流量 :  $140\sim 150 \text{ kg/h}$
- ・気体温度 : (空気)  $20^\circ\text{C}$ ,  $42^\circ\text{C}$ ,  $150^\circ\text{C}$  の 3 条件  
(蒸気)  $110^\circ\text{C}$ ,  $150^\circ\text{C}$  の 2 条件



確認試験における試験体内および UTP 部の温度測定結果を図 3.1-15, 図 3.1-16 に示す。空気試験, 蒸気試験共に, スプレー開始数十秒後に温度が急激に低下している。これは気体の熱容量がスプレー水の熱容量に比べて大幅に小さく, 温度が維持できずに冷却されるためと考えられる。結果として, 空気はスプレー水温程度, 蒸気は大きな潜熱が発生する飽和温度まで温度が低下していると考えられる。なお, 気体温度 150℃の試験においては, スプレー噴霧後も他の試験に比べて温度が高い状態にあるが, 徐々に温度低下しており, 本試験で取得を目的とする定常状態のデータとしては不適と考えられる。

ここで, 実機と同様に集合体が発熱している状態について確認する。「平成 28 年度原子力施設等防災対策委託費 (使用済み燃料貯蔵プール冷却試験) 事業」において実施した, 熱伝達試験での上部タイプレート温度変化を図 3.1-17 に示す。試験条件は定格出力比 3%(バンドル出力 84kW), スプレー流量 0.2m<sup>3</sup>/h である。出力が全て蒸気発生に寄与したと仮定すると, 発生蒸気量は約 147kg/h と確認試験の蒸気量と同程度である。また, スプレー熱伝達試験のスプレー噴霧範囲は, 本確認試験 1/4 でありスプレー流量も同程度と考えられる。スプレー熱伝達試験においても, スプレー噴霧後に UTP 温度は急減少し, 飽和温度で一定となっている。このことから UTP 近傍に着目した場合, 集合体部の発熱によらず UTP 近傍の蒸気温度は飽和温度まで低下していると考えられる。

以上より, 気体温度は基本的に試験パラメータとせず, 一部試験条件においてのみ変更した。なお, 空気試験は試験時の再現性が得られるように外気により高めの 42℃, 蒸気試験は飽和蒸気中のミストを取り除くため 110℃を基本的な試験条件とした。

### 3.1.2.3 試験条件

気体温度以外にスプレーの流量分配へ影響を与えるパラメータとしては, 以下の項目が考えられる。

- ・スプレー流量, 温度
- ・気体流量, 気体種類
- ・各集合体の気体吹上げ量分布(各集合体の崩壊熱分布)

これらをパラメータとした表 3.1-21 に示す試験条件において試験を実施した。各試験において共通となる試験時間, 計測条件等は表 3.1-22 に示す。

また CCFL 発生有無の確認は, 本体系の流動現象を理解する上で重要となる。このため, 蒸気凝縮が発生せず安定して試験が実施可能な空気試験において, スプレー流量を細かに変化させ CCFL 発生有無を確認する試験を実施した。

参考として, 本試験条件と 3.2 スプレー熱伝達試験において試験パラメータとする定格出力比, 空気流量, スプレー流量との比較を以下に示す。なお, バンドル出力は蒸気の物性値を 100℃ 大気圧における値として全ての熱量が蒸気発生に用いられた場合の参考値である。

【バンドル出力】 29.2kW (定格出力比 1%) : 蒸気流量 13.6 g/s

【空気流量条件】 3kg/h : 0.83g/s, 6kg/h : 1.7g/s, 30kg/h : 8.3g/s

【スプレー流量】 スプレー熱伝達試験の 4 倍 (集合体 4 体のため噴霧領域 4 倍)

### 3.1.3 試験結果

スプレー流量分配試験における空気試験結果の一覧を付録 3.1-2, 蒸気試験結果の一覧を付録 3.1-3 に示す。

#### 3.1.3.1 スプレー落水量の測定結果

集合体 X へのスプレー落水量  $W_X$  および上部容器底面へのスプレー落水量  $W_{\text{Drain}}$  は、気体吹上げが無い状態の落水量に対する割合  $W_X/W_{X0}$  で評価した。また、各試験条件における気体流動は、(3.1-15) に示す集合体 X の上部タイプレートにおけるレイノルズ数  $Re_X$  により整理した。なお、上部容器底面については、集合体 A のレイノルズ数  $Re_A$  を用い整理した。ここで、 $W_{GX}$  は集合体 X の吹上げ気体の体積流量 [kg/s]、 $Dh_{UTP}$  は上部タイプレート部の水力等価直径、 $A_{UTP}$  は上部タイプレート部の流路断面積 [m<sup>2</sup>]、 $\mu_{GX}$  は集合体 A のバンドル部における気体粘性係数 [Pa・s] を示す。なお、空気試験については、気体を飽和空気として  $Re_X$  を算出した。

$$Re_X = \frac{W_{GX} Dh_{UTP}}{\mu_{GX} A_{UTP}} \quad (3.1-15)$$

なお、スプレー熱伝達試験におけるバンドル出力 29.2kW (定格出力比 1%) の出力全てが蒸気発生に寄与したとすると、大気圧 100℃において  $Re_X$  は 2350 となる。また、空気流量 3kg/h, 6kg/h, 30 kg/h の  $Re_X$  は、飽和状態大気圧 100℃において 62, 124, 621 である。

#### (1) 各集合体の落水量変化

各集合体への落水量について、空気試験の結果を図 3.1-18, 蒸気試験の結果を図 3.1-19 に示す。各集合体への落水量は、空気試験  $Re_X > 4000$ , 蒸気試験  $Re_X > 6000$  の条件において、明確な減少が確認された。一方、各集合体において明確な差異は見られず、各集合体の吹上げ気体量により落水量変化が整理されている。

空気試験と蒸気試験を比較すると、蒸気試験の方が空気試験に比べて落水量が多くなっており、気体吹上げが無い場合に対しても落水量が大幅に増加している。蒸気試験においては、スプレー冷却によって凝縮した蒸気が落水に含まれていると考えられる。また、空気試験において供給される空気は、コンプレッサによって圧縮されたのちに加熱されている。このため、装置入口部において乾き空気となっており、試験部内でスプレー水が空気内に蒸発して落水量が減少していると考えられる。

#### (2) 蒸気の凝縮量

蒸気試験においては、計量タンクへの落水量中に凝縮した吹上げ蒸気が含まれる。この凝縮蒸気の量および影響を確認するため、計量タンク部の測定温度より集合体 X の落水量に含まれる凝縮蒸気量  $WT_X$  凝縮量を推定した。 $WT_X$  は、以下に示すエネルギー保存の式より算出した。ここで、 $h_v$ ,  $h_{sp}$ ,  $h_X$  は供給蒸気の比エンタルピ [J/g] であり、左辺第一項が集合体 A に供給された蒸気のエネルギー、左辺第二項が集合体 A に落水したスプレー水のエネルギー、右辺が計量タンクへ落水した水のエネルギーを示す。周囲への伝熱等は無視した。

$$h_v W_{TX} + h_{SP}(W_X - W_{TX}) = h_X W_X$$

$$W_{TX} = \frac{(h_X - h_{SP})W_X}{h_v - h_{SP}}$$

(3.1-16)

集合体 A のみ蒸気が吹上げている状態における，各集合体の蒸気凝縮量  $W_X$  を算出した結果を図 3.1-20 に示す。蒸気が吹上げている集合体 A においては，スプレー流量の増加に伴い凝縮量が増加している。これはスプレー流量増加により冷却される蒸気が増加したためと考えられる。また，吹上げ蒸気量による依存性はほぼ見られないが，スプレー流量  $4.0\text{m}^3/\text{h}$  の  $Re_A=10000$  近傍においてのみ，凝縮量の減少が見られる。本領域は落水量が集合体への落水量が大きく減少する条件であるため，集合体内に落水するスプレー量が減少し凝縮量が減少したと考えられる。

一方，周辺チャンネルにおいてはスプレー流量および蒸気量が増加した場合においても，凝集量は  $1\sim 4\text{mg}$  の間で大きな変化は見られず，平均値で  $1.58\text{g}$  であった。このことから，蒸気の凝縮は  $1.58\text{g/s}$  程度が集合体通過後の上部容器，残りが集合体内で発生していると考えられる。

### (3) 空気中へのスプレー水蒸発量

空気試験においては，供給される空気が乾燥しているため，試験装置内において落水したスプレーが蒸発し，計量タンク内への落水量が減少していたと考えられる。このスプレー水の蒸発量について推定した。

供給される空気は図 3.1-21 に示すように，コンプレッサにおいて  $0.8\text{MPa}$ （稼働中平均値）に圧縮され，その後スーパーヒータで加熱され試験装置に供給される。外気に含まれる蒸気に比べて，コンプレッサ圧縮時の飽和蒸気量が少ないため，圧縮時に空気の湿度は  $100\%$  となる。よって装置入口部において，供給空気中に含まれる蒸気量はコンプレッサの圧縮圧  $0.8\text{MPa}$  における飽和蒸気量となる。試験装置内はスプレー水によって充満しているため，即座に飽和空気となるまでスプレー水が蒸発したと仮定すると，装置内の圧力状態における飽和蒸気量と， $0.8\text{MPa}$  における飽和蒸気量の差がスプレー水の蒸発量となる。

以上の推定より，以下の式を用いてスプレー水の蒸発量  $W_E$  を推定した。ここで， $\rho_c(T, P)$  と  $\rho_a(T, P)$  は，温度  $T$ ，圧力  $P$  における蒸気密度および乾燥空気密度 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]， $T_X$  は集合体  $X$  へ供給する気体温度 [ $^{\circ}\text{C}$ ]， $P_{TX}$  と  $P_{20C}$  は温度  $T_X$  および  $20^{\circ}\text{C}$  における飽和蒸気圧 [ $\text{MPa}$ ] を示す。なお，コンプレッサに供給される外気は  $20^{\circ}\text{C}$  とした。

$$W_E = \left\{ \frac{\rho_c(T_X, P_{TX})}{\rho_a(T_X, P_{atm} - P_{TX})} - \frac{\rho_c(20^{\circ}\text{C}, P_{20c})}{\rho_a(20^{\circ}\text{C}, 0.8\text{MPa} - P_{20c})} \right\} W_G$$

(3.1-17)

算出したスプレー水の蒸発量  $W_E$  を図 3.1-22 に示す。蒸発量は空気流量に比例して大きくなる傾向となる。

#### (4) 蒸気凝縮およびスプレー水蒸発の考慮

(2) (3)において検討した結果より，集合体への落水量および気体レイノルズ数に対して，蒸気凝縮およびスプレー水蒸発を考慮した。本評価は上部タイプレートより下部における落水量変化を考慮するため，蒸気の凝縮量に関しては集合体内における凝縮分について考慮した。また，空気試験におけるスプレー水蒸発は，装置への入口部(集合体下端)において発生するとした。蒸気凝縮およびスプレー水蒸発を考慮した集合体Aへの落水量 $W'_A$  [g/s]，集合体Aの上部タイプレートにおける気体レイノルズ数 $Re'_A$ を以下の式で算出した。なお，各試験において凝縮量にばらつきが見られるため，以後の蒸気試験評価については計量タンクの水溫測定を行った試験条件のみを評価対象とする。

・ 蒸気試験

$$Re'_X = \frac{(W_{GX} - W_T + 1.58 \times 10^{-3}) Dh_{UTP}}{\mu_{GX} A_{UTP}} \quad (3.1-18)$$

$$W'_A = W_A - W_T + 1.58 \quad (3.1-19)$$

・ 空気試験

$$Re'_X = \frac{(W_{GX} + W_E) Dh_{UTP}}{\mu_{GX} A_{UTP}} \quad (3.1-20)$$

$$W'_A = W_A + W_E \quad (3.1-21)$$

#### (5) スプレー流量の影響

スプレー流量による落水量 $W'_A/W_{A0}$ の変化を図 3.1-23 および図 3.1-24 に示す。流入させる気体によらず，スプレー流量による落水量の変化に差異は見られない。

#### (6) スプレー高さの影響

スプレー高さによる落水量 $W'_A/W_{A0}$ の変化を図 3.1-25 および図 3.1-26 に示す。比較条件は高 $Re_A$ に限られるが同様の落水量減少が確認されており，スプレー高さの影響は確認されなかった。

#### (7) スプレーノズルの径方向位置

スプレーノズルを集合体C方向にずらした場合の落水量 $W'_A/W_{A0}$ の変化を図 3.1-27 および図 3.1-28 に示す。比較条件は高 $Re'_A$ に限られるが，スプレーノズルが中央に位置する試験においては落水量が減少する気体流領域にもかかわらず，スプレーノズルをオフセットした試験においては $W'_A/W_{A0}$ の減少は見られない。

ここで，落水量の減少については後述するようにCCFLが関係していると考えられる。CCFLは落水量が多くなるほど発生しやすいが，スプレーノズルをオフセットした試験においては，スプレーノズル位置がずれることで $W_{A0}$ が減少している。このため，オフセットした試験においては， $W_{A0}$ が減少することでCCFLが発生しにくい状態となり， $W'_A/W_{A0}$ の減少が見

られないと考えられる。

(8) CCFL 発生と落水量減少の原因

以上で示したように、落水量  $W_A'/W_{A0}$  の減少は主に気体流量に依存しているが、空気と蒸気、スプレイ流量および  $W_{A0}$  の違いにより、落水量が減少する  $Re_A'$  の開始点および減少幅の違いが見られる。落水量の減少要因としては CCFL の発生が考えられるため、CCFL 発生の条件の整理に用いられる Wallis プロットにより試験結果を整理した。

CCFL の発生条件を整理に用いられる Wallis プロットでは、無次元気相体積流束の平方根  $J_G^{*0.5}$ 、無次元液相体積流束の平方根  $J_L^{*0.5}$  で整理される。以下に各無次元数の算出式を示す。ここで、 $J_G$  および  $J_L$  は気相および液相の体積流束 [m/s]、 $\rho_G$  と  $\rho_L$  は気相と液相の密度 [kg/m<sup>3</sup>]、 $g$  は重力加速度 [m<sup>2</sup>/s]、 $D$  は代表長さを示す。なお、本報告書の評価では  $D$  に水力等価直径を用いる。

$$J_G^* = J_G \left\{ \frac{\rho_L}{gD(\rho_L - \rho_G)} \right\}^{0.5} \quad (3.1-22)$$

$$J_L^* = J_L \left\{ \frac{\rho_G}{gD(\rho_L - \rho_G)} \right\}^{0.5} \quad (3.1-23)$$

CCFL の発生条件は以下の式によって整理される。ここで、 $m$  および  $C$  は流路形状や CCFL 発生部の形状による実験定数である。

$$J_G^{*0.5} + mJ_L^{*0.5} = C \quad (3.1-24)$$

なお参考として、スプレイ熱伝達試験におけるバンドル出力、空気流量、スプレイ落水量について、大気圧、気体温度 100℃、スプレイ落水の温度 30℃とした場合の  $J_G^{*0.5}$  および  $J_L^{*0.5}$  を以下に示す。

【バンドル出力】 29.2kW (定格出力比 1%) :  $J_G^{*0.5} = 0.62$

【空気流量条件】  $J_G^{*0.5} = 0.15$  (3kg/h), 0.22 (6kg/h), 0.49 (30kg/h)

【スプレイ流量】  $J_G^{*0.5} = 0.10$  (0.1 m<sup>3</sup>/h), 0.16 (0.2 m<sup>3</sup>/h), 0.32 (1.0 m<sup>3</sup>/h)

円管などの単純形状の試験結果によると、 $m=1$ ,  $C=1$  において液相が逆流するフラッディングが発生し、フラッディングを停止させるには  $m=1$ ,  $C=0.88$  まで減少させる必要があるとされている<sup>(1)</sup>。

Wallis プロットにより整理した試験結果を図 3.1-29 に示す。なお、図中に示す  $m=0.7$ ,  $C=1.0$  は参考として  $C=1.0$  を基準として試験において落水量減少が開始しているデータにあわせた線である。また  $m=1.9$ ,  $C=1.55$  も同様に参考として、空気試験において CCFL が発生していると考えられる部位を基に引いた線である。

空気試験においてはスプレイ流量増加により落水量の増加幅は少なくなり、最終的に落水量が変化しない CCFL が発生している。蒸気試験においては、蒸気凝縮が発生するため高

スプレー流量において安定した試験が実施できず、CCFL の発生まで確認できなかった。しかし、空気試験において CCFL が発生している  $m=1.9$ ,  $C=1.55$  以下で蒸気試験の落水量が変化しており、空気試験と同様の傾向が見られる。なお、落水量の減少は  $m=0.7$ ,  $C=1.0$  以上において徐々に発生している傾向が見られる。またスプレーノズルをオフセットした試験は、落水量が他の試験結果に比べて低く、CCFL が発生しない領域であることがわかる。このため、(7)に示したように落水量減少が見られなかったと考えられる。

本評価においては、空気試験におけるスプレー量の蒸発量、蒸気試験における蒸気凝縮量を推定した値がもとになっており、CCFL や落水量減少については真値と若干の差異があると考えられる。しかしながら CCFL の発生は明確に示されており、本試験で確認された落水量の減少は CCFL およびフラッディングの発生が要因となっていると考えられる。

参考として、落水量が減少する  $m=0.7$ ,  $C=1.55$ , CCFL が発生している  $m=1.9$ ,  $C=1.55$  の式と集合体 A における  $Re_A' - W_A' / W_{A0}$  の比較を図 3.1-30 および図 3.1-31 に示す。

#### (9) スプレー液滴

液滴計による計測データより、気体吹上げがスプレー液滴の流動に与える影響を評価した。なお、各スプレー流量において液滴の計測は実施したが、スプレー流量の増加に伴い画像が不鮮明となり十分な液滴数を判別できなかったため、本評価においてはスプレー流量  $0.5\text{m}^3/\text{h}$  のみを用いた。また、落水量評価において周辺チャンネルの影響が見られなかったため、集合体 A のみ気体が吹上げている条件を対象とした。

空気試験における液滴計の計測結果について、各計測位置における平均値を図 3.1-32 に示す。なお、集合体部径方向位置は中心より  $25.5\text{mm} \sim 127.5\text{mm}$  である。ザウター径は気体量増加に伴い低下傾向にあり、液滴の分裂もしくはフラッディングによる集合体からはじき出しが発生していると考えられる。水平方向速度に大きな変化は見られないが、垂直方向速度は空気量増加により集合体部周辺で負の値(上向き)に転じており、集合体より液滴がはじき出されていることが分かる。

液滴径ごとの計測数、水平方向速度平均値、垂直方向速度平均値を表 3.1-23～表 3.1-28 に示す。空気流量増加に伴い、垂直方向速度  $0\text{m/s}$  近傍の  $1\text{mm}$  未満の液滴が増加している。

蒸気試験については、蒸気凝縮が大量に発生するため、測定画像が不鮮明であり十分な信頼性があるデータが取得できなかった。参考として、蒸気試験における各計測位置における平均値を図 3.1-33 に示す。

#### 3.1.4 スプレー流量分配試験のまとめ

複数の気体吹上げが有る状態にある集合体へスプレーを噴霧した場合における、スプレー落水量の変化を確認するため、4 体の模擬燃料集合体を配置した定常状態非加熱試験体系において、スプレー流量分配試験を実施した。試験の結果、隣接する集合体の影響は見られず、集合体へのスプレー落水量は各集合体の気体吹上げ量に依存して減少していた。落水量の減少は Wallis プロットにより整理でき、フラッディングおよび CCFL が影響していると考えられる。

またスプレー液滴の計測を行い、気体量増加に伴う液滴径の減少、小液滴の増加、小液滴の垂直方向減少が確認されており、落水量減少の主要因とみられるフラッディングや CCFL と関連していると思われる。

表 3.1-1 試験部の幾何形状と寸法

垂 直 方 向 位 置	試験部 (チャンネル下端から上部容器上端まで)	約 5.64m (5643)
	集合体部 (チャンネル下端から上部タイプレート下端まで)	0.707m
試 験 部 容 器 断 面	上部容器 形状 内径 材質	円形 φ 900mm SUS304
	模擬ラック 形状 内径 材質	矩形 □128mm SUS304
	模擬チャンネルボックス 形状 内径 材質	矩形 □102mm SUS304
集 合 体 断 面	集合体 (1体あたり) 形状 ロッドピッチ 断面積 水力等価直径	7×7 ロッドバンドル 14mm 約 5747mm <sup>2</sup> 約 10.9mm
	上部 (タイ) プレート 形状 材質	ドリルホール型 SUS304
	スペーサ 形状 材質 母材 模擬ディンプル	丸セル型 SUS304 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
	模擬ロッド 外径 材質	φ 11mm SUS304
	下部 (タイ) プレート 形状 材質	矩形 SUS304

表 3.1-2 スプレynoズルの性能

噴霧様式	一様噴霧
スプレイ向き	垂直下向き
ノズル 外寸	□400mm
吐出口 径	φ3mm
個数	360 個所
ピッチ	20mm

表 3.1-3 気体吹上げなし時の X 方向液滴径分布 (スプレイ流量 0.5 m<sup>3</sup>/h)

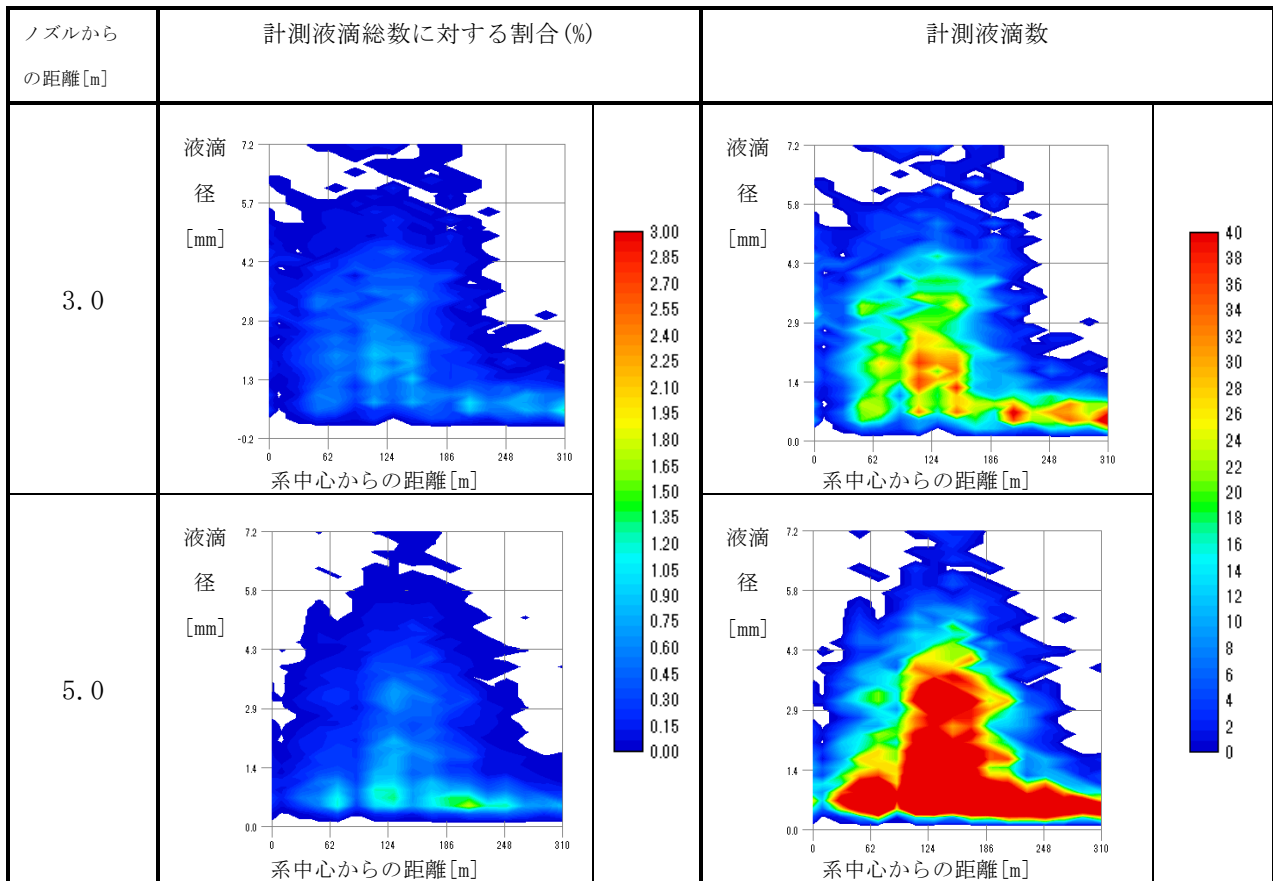
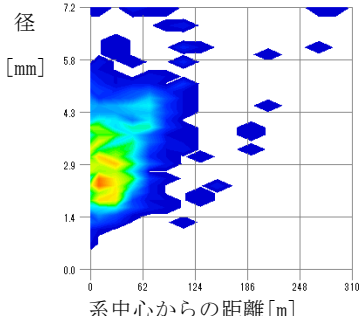
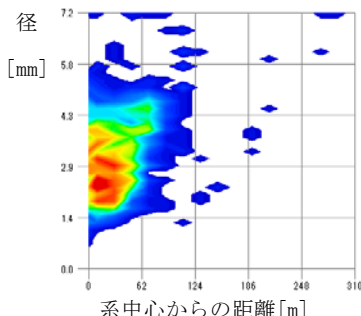
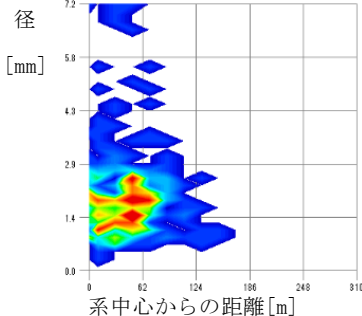
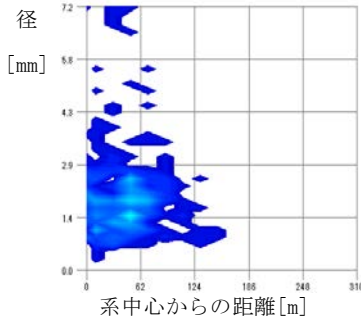
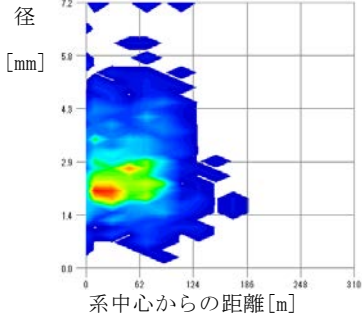
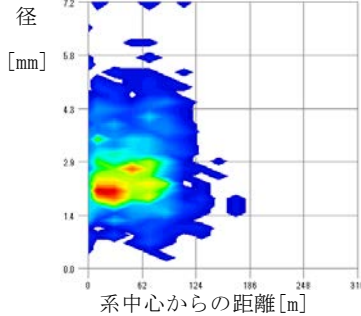
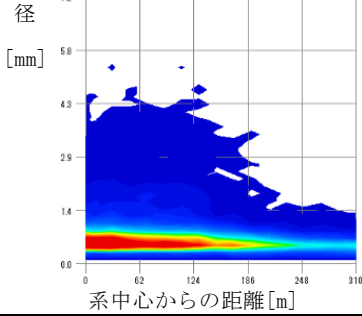
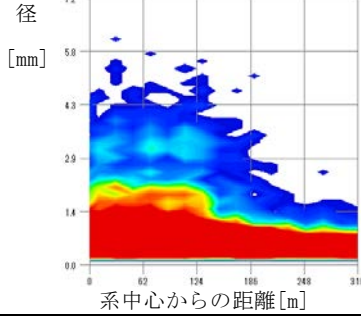




表 3.1-4 気体吹上げなし時の Y 方向液滴径分布 (スプレー流量 0.5 m<sup>3</sup>/h)

ノズルからの距離 [m]	計測液滴総数に対する割合 (%)	計測液滴数
0.5	液滴径 [mm]  系中心からの距離 [m]	液滴径 [mm]  系中心からの距離 [m]
1.2	液滴径 [mm]  系中心からの距離 [m]	液滴径 [mm]  系中心からの距離 [m]
2.2	液滴径 [mm]  系中心からの距離 [m]	液滴径 [mm]  系中心からの距離 [m]
5.0	液滴径 [mm]  系中心からの距離 [m]	液滴径 [mm]  系中心からの距離 [m]

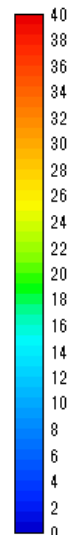
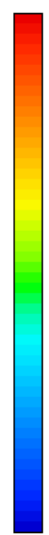


表 3.1-5 気体吹上げなし時の X 方向液滴径分布 (スプレー流量 1.0 m<sup>3</sup>/h)

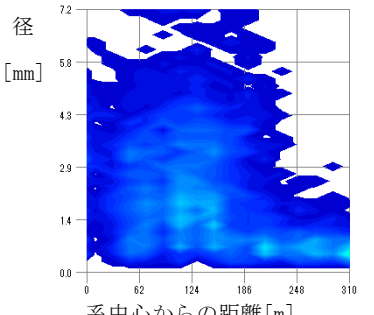

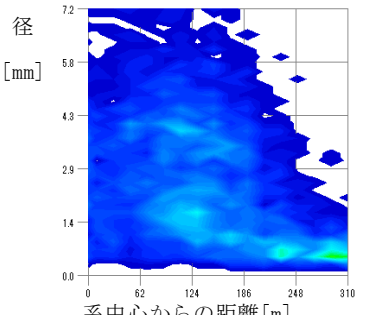
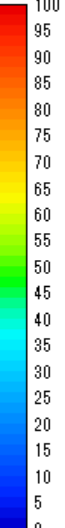
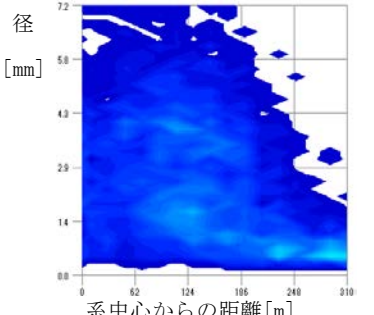
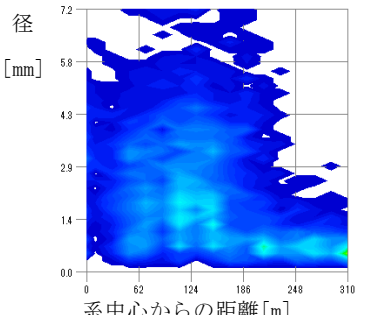
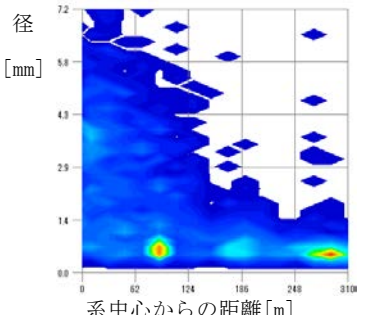
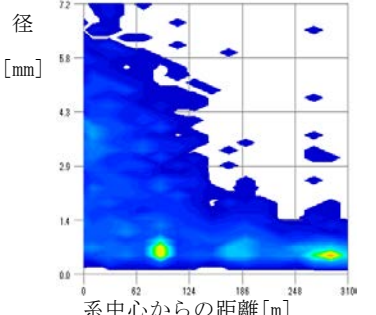
ノズルからの距離 [m]	計測液滴総数に対する割合 (%)		計測液滴数	
3.0	液滴径 [mm]  系中心からの距離 [m]		液滴径 [mm]  系中心からの距離 [m]	
5.0	液滴径 [mm]  系中心からの距離 [m]		液滴径 [mm]  系中心からの距離 [m]	
5.0 (オフセット)	液滴径 [mm]  系中心からの距離 [m]		液滴径 [mm]  系中心からの距離 [m]	

表 3.1-6 気体吹上げなし時の Y 方向液滴径分布 (スプレイ流量 1.0 m<sup>3</sup>/h)

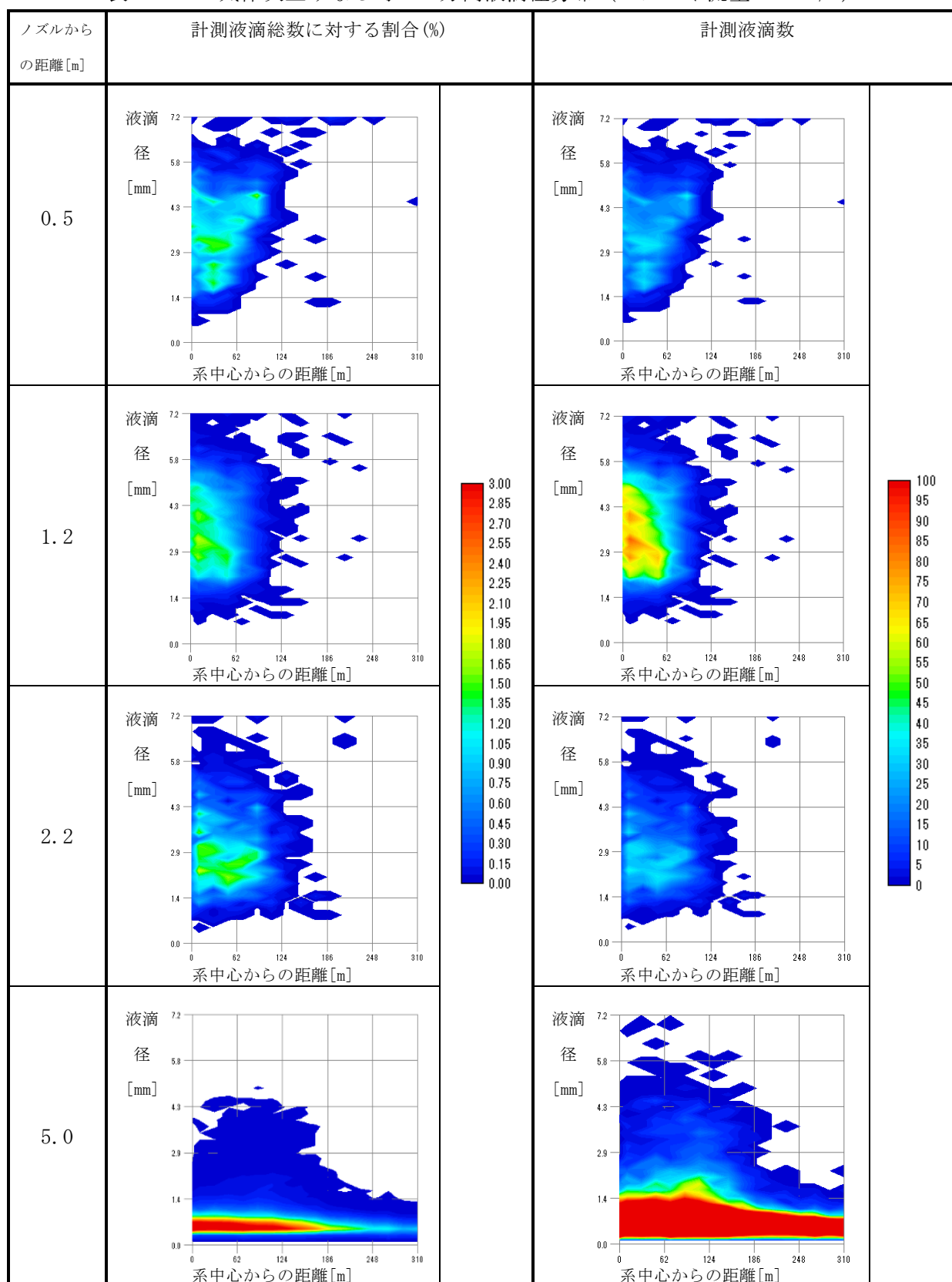


表 3.1-7 気体吹上げなし時の X 方向液滴径分布 (スプレー流量 4.0 m<sup>3</sup>/h)

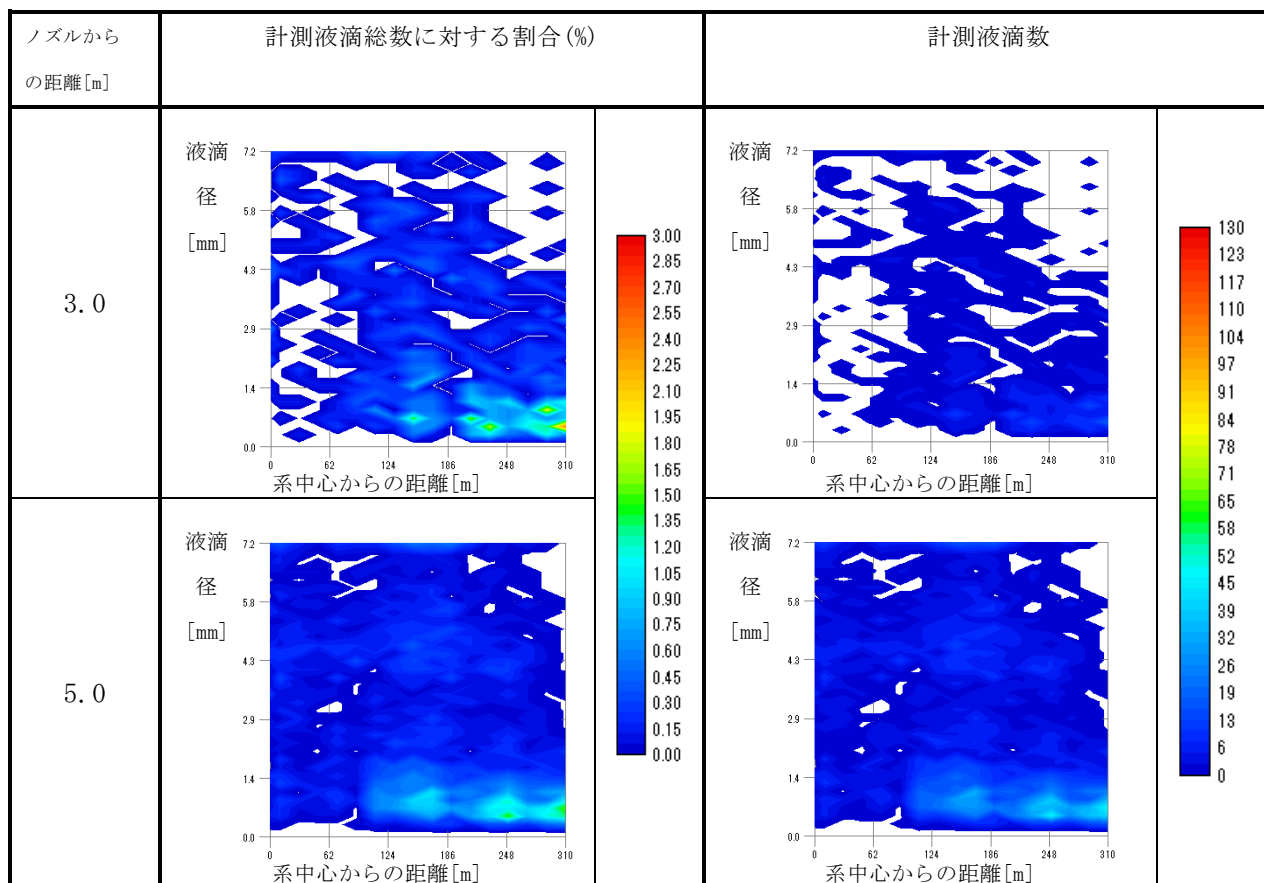


表 3.1-8 気体吹上げなし時の Y 方向液滴径分布 (スプレイ流量 4.0 m<sup>3</sup>/h)

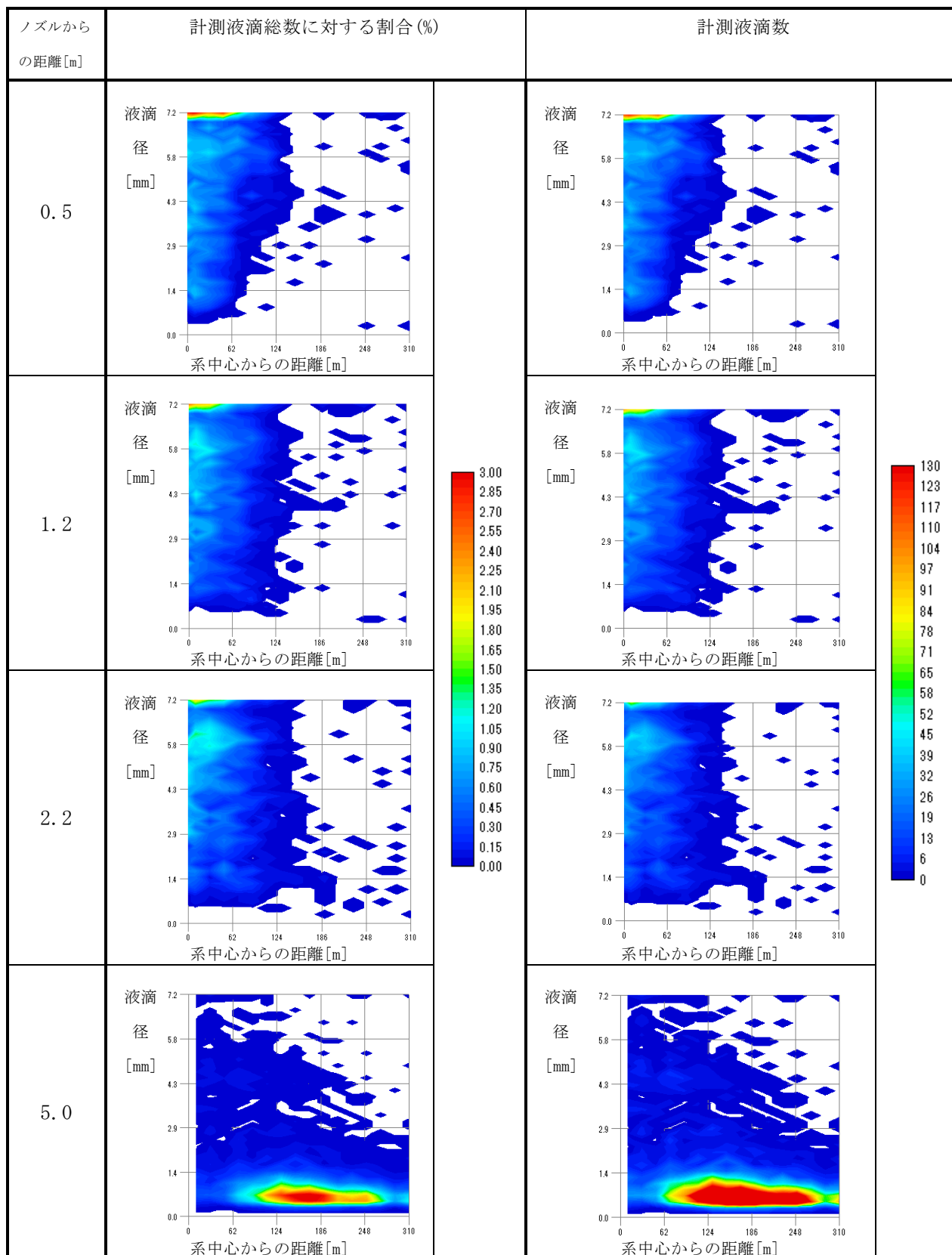


表 3.1-9 気体吹上げなし時の X 方向水平速度分布 (スプレー流量 0.5 m<sup>3</sup>/h)

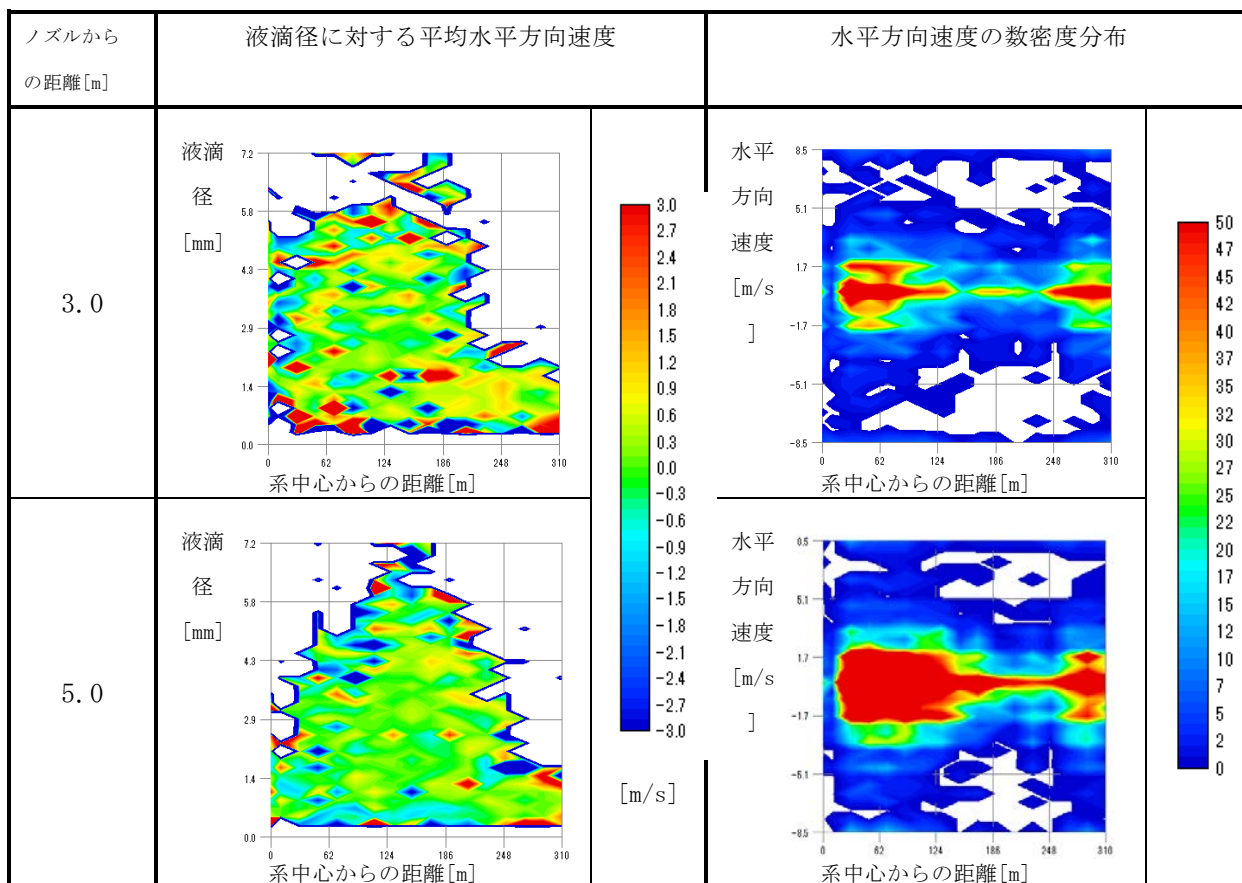


表 3.1-10 気体吹上げなし時の Y 方向水平速度分布 (スプレー流量 0.5 m<sup>3</sup>/h)

ノズルからの距離 [m]	液滴径に対する平均水平方向速度	水平方向速度の数密度分布
0.5		
1.2		
2.2		
5.0		

表 3.1-11 気体吹上げなし時の X 方向水平速度分布 (スプレー流量 1.0 m<sup>3</sup>/h)

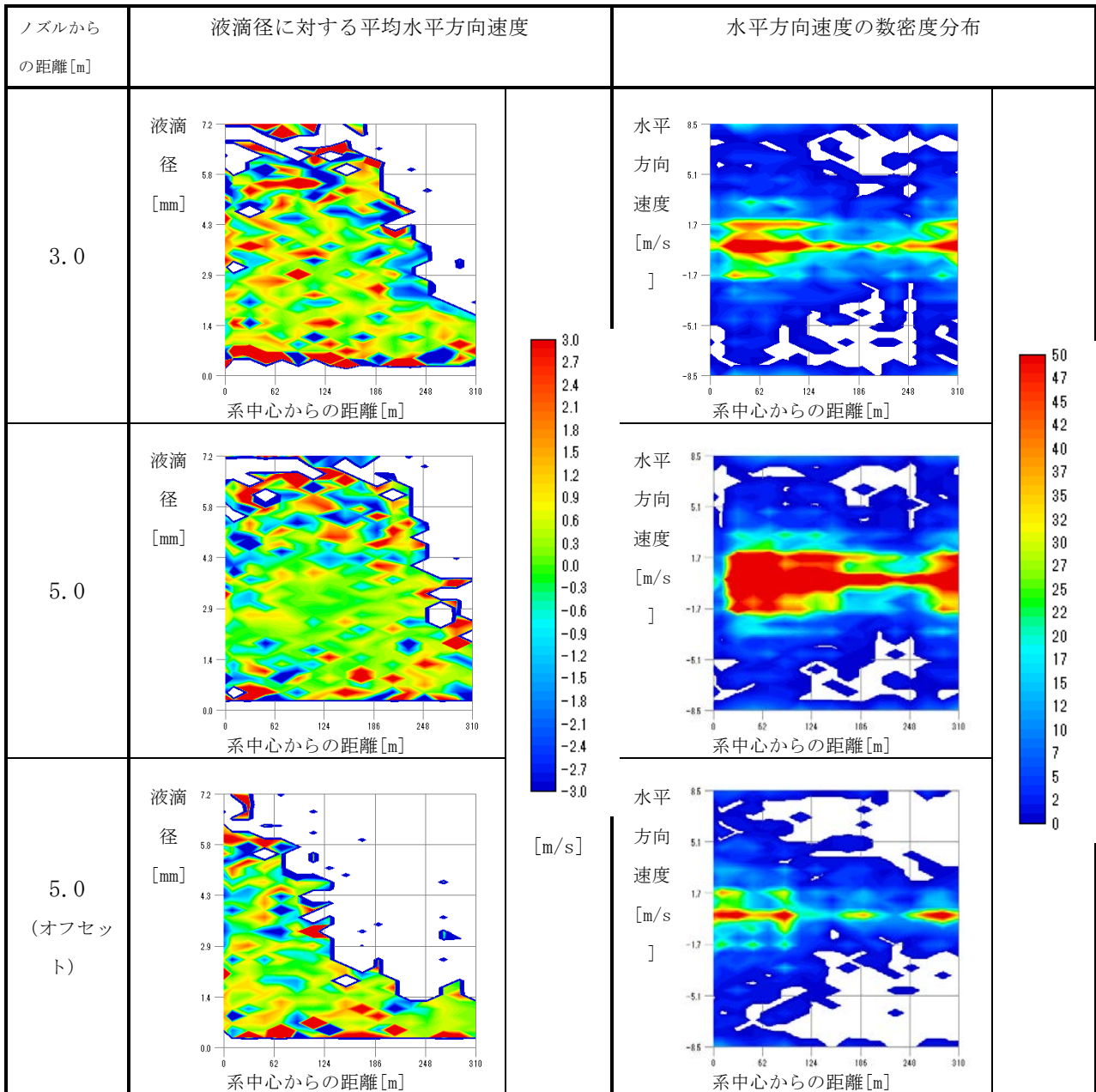




表 3.1-12 気体吹上げなし時の Y 方向水平速度分布 (スプレー流量 1.0 m<sup>3</sup>/h)

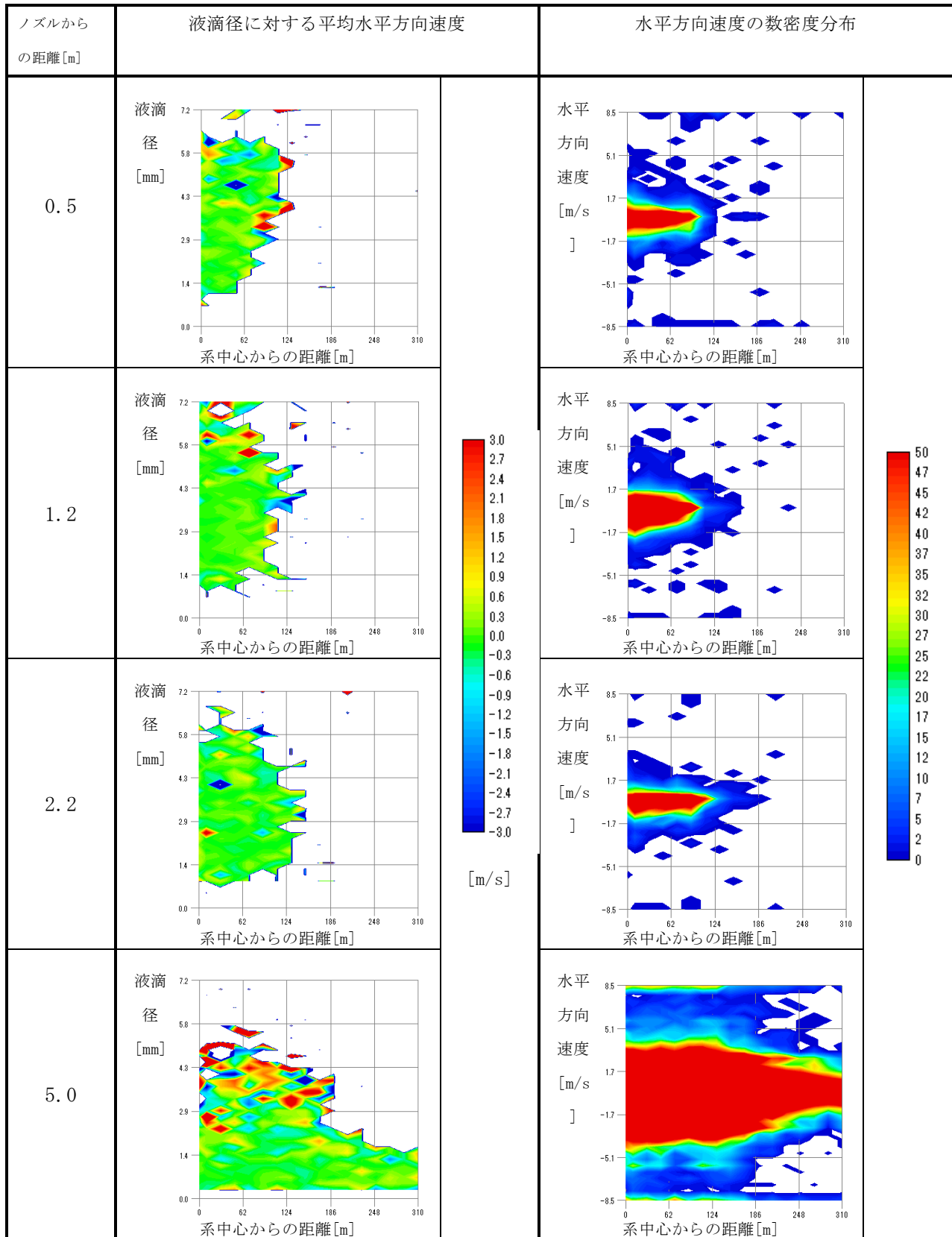


表 3.1-13 気体吹上げなし時の X 方向水平速度分布 (スプレー流量 4.0 m<sup>3</sup>/h)

ノズルからの距離 [m]	液滴径に対する平均水平方向速度	水平方向速度の数密度分布
3.0	<p>液滴径 [mm]</p> <p>系中心からの距離 [m]</p> <p>[m/s]</p>	<p>水平方向速度 [m/s]</p> <p>系中心からの距離 [m]</p> <p>[m/s]</p>
5.0	<p>液滴径 [mm]</p> <p>系中心からの距離 [m]</p> <p>[m/s]</p>	<p>水平方向速度 [m/s]</p> <p>系中心からの距離 [m]</p> <p>[m/s]</p>

表 3.1-14 気体吹上げなし時の Y 方向水平速度分布 (スプレー流量 4.0 m<sup>3</sup>/h)

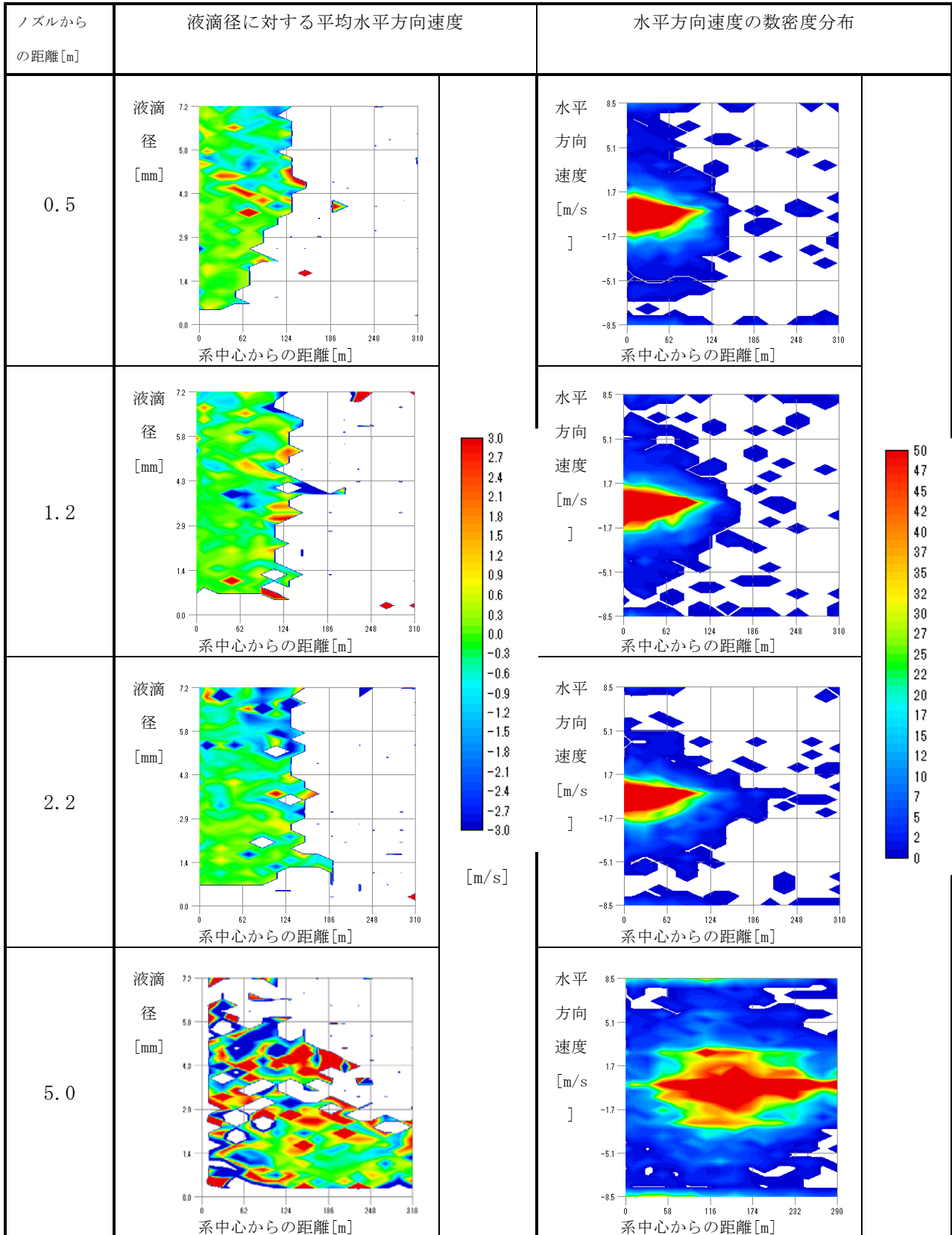


表 3.1-15 気体吹上げなし時の X 方向垂直速度分布 (スプレー流量 0.5 m<sup>3</sup>/h)

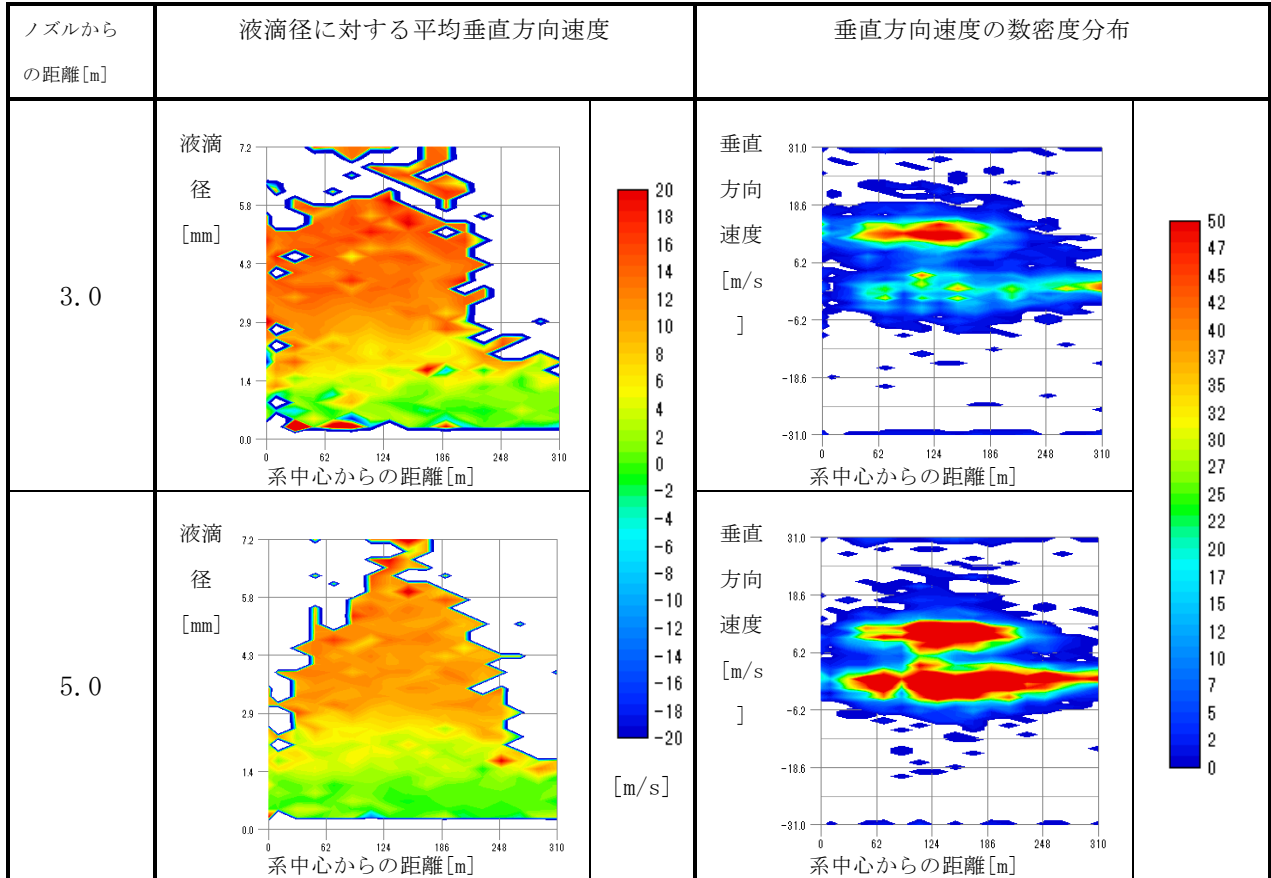


表 3.1-16 気体吹上げなし時の Y 方向垂直速度分布 (スプレー流量 0.5 m<sup>3</sup>/h)

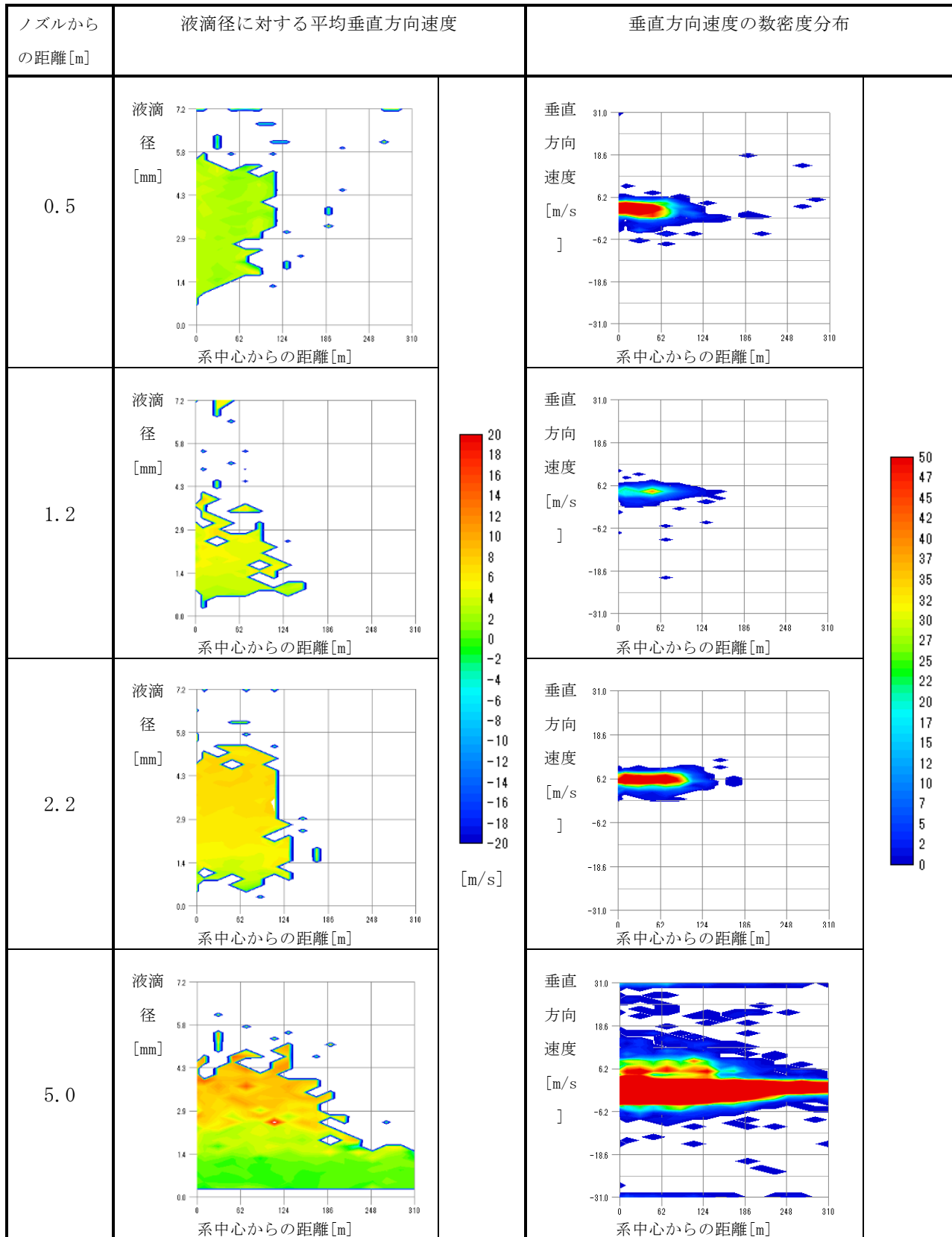


表 3.1-17 気体吹上げなし時の X 方向垂直速度分布 (スプレー流量 1.0 m<sup>3</sup>/h)

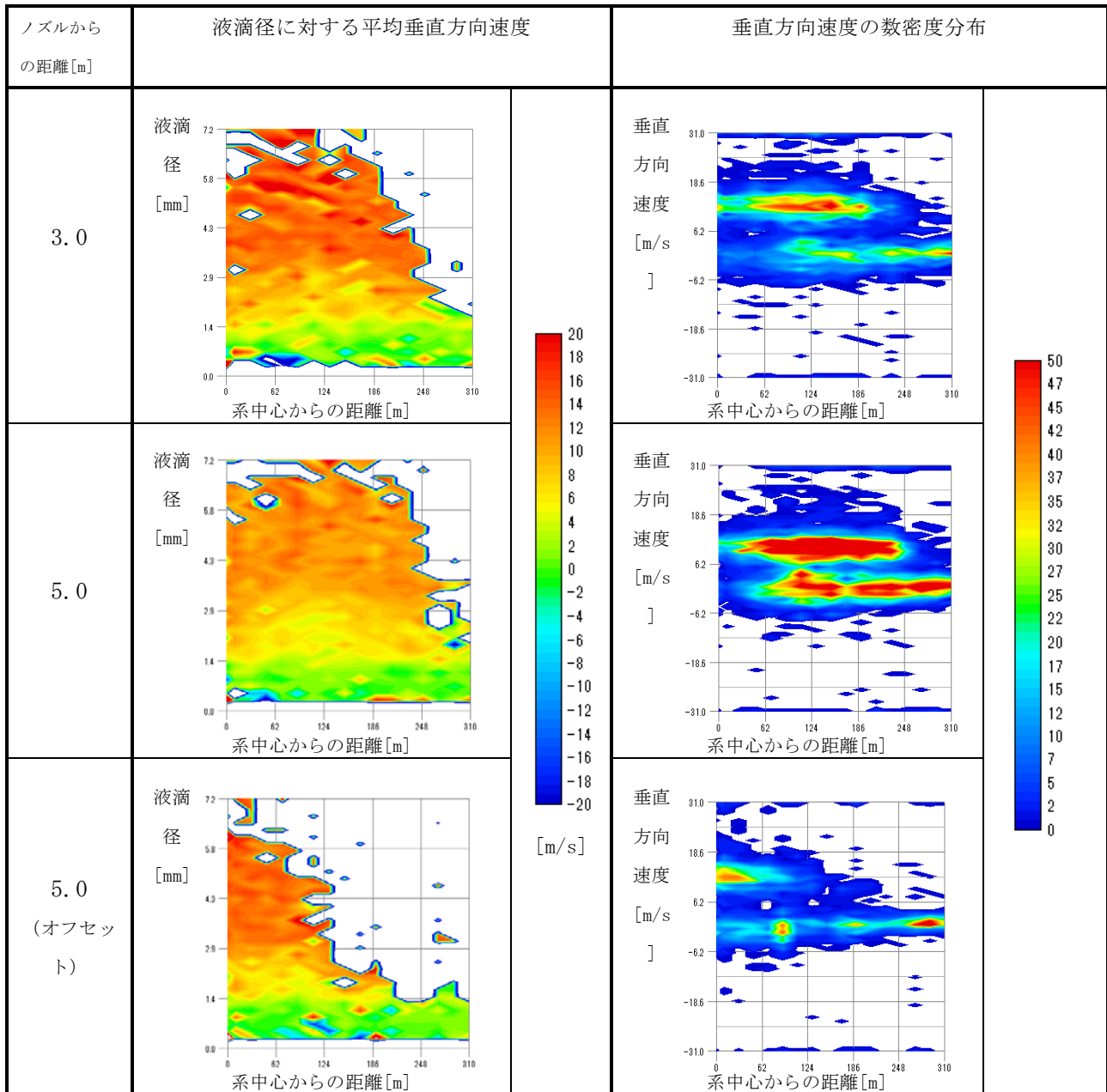


表 3.1-18 気体吹上げなし時の Y 方向垂直速度分布 (スプレー流量 1.0 m<sup>3</sup>/h)

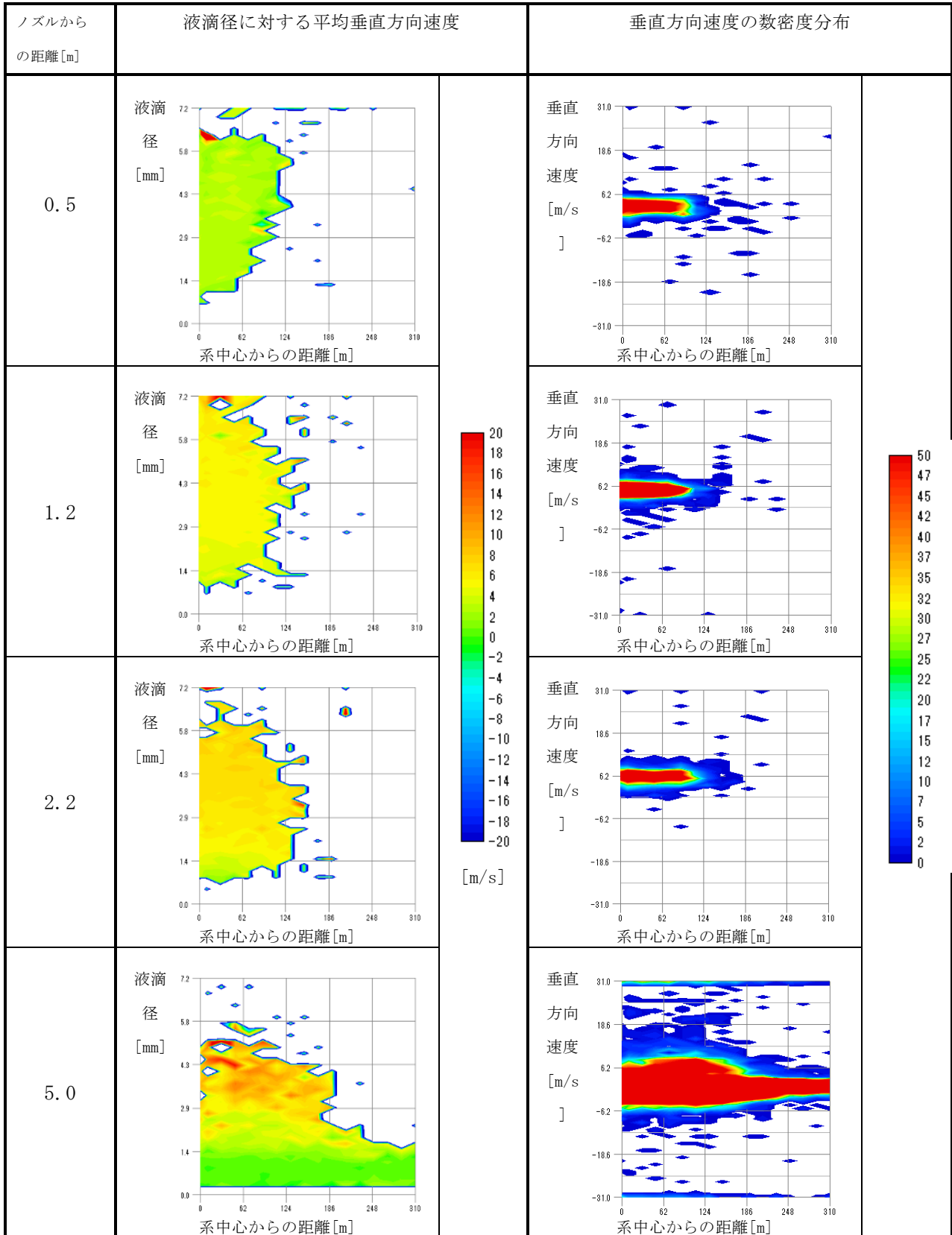


表 3.1-19 気体吹上げなし時の X 方向垂直速度分布 (スプレー流量 4.0 m<sup>3</sup>/h)

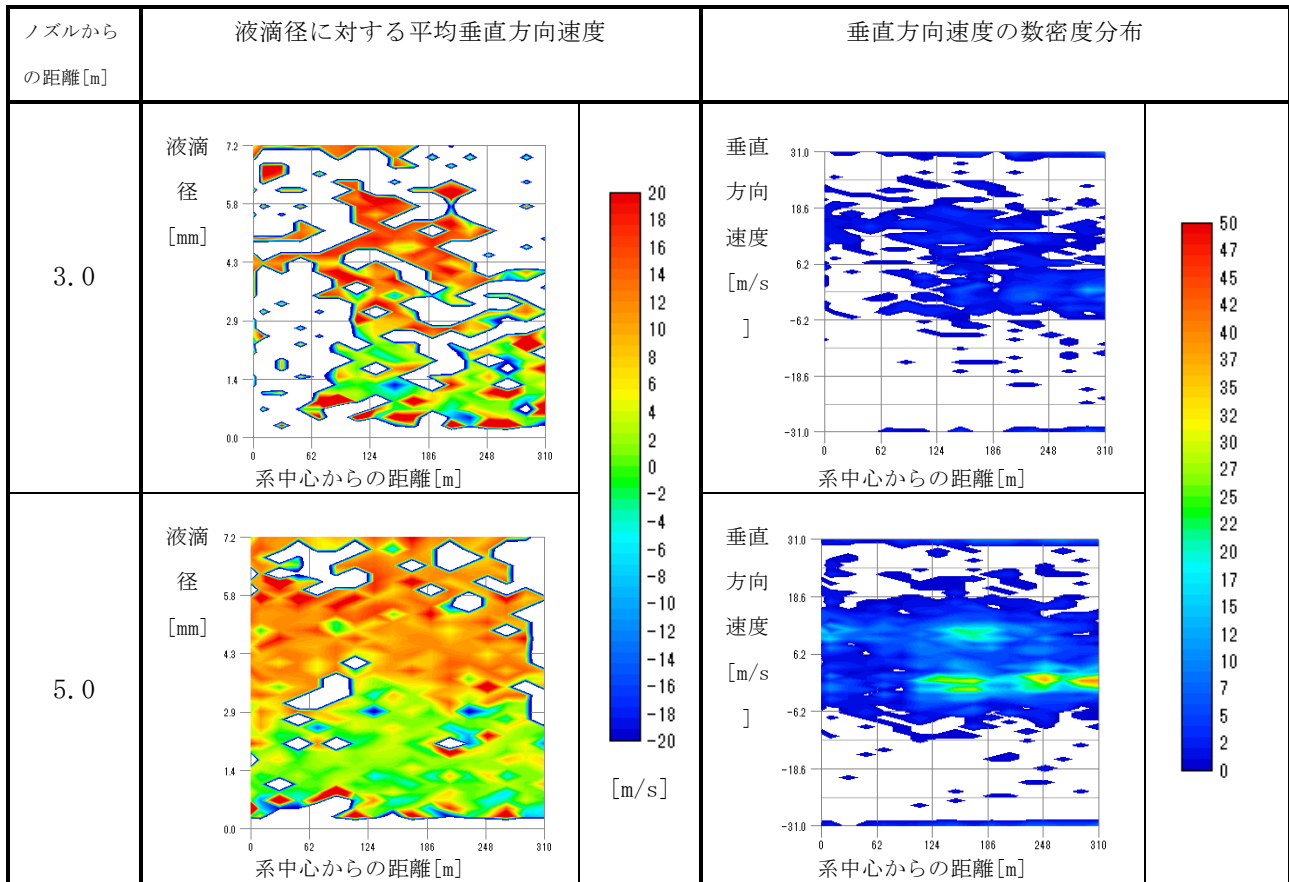




表 3.1-20 気体吹上げなし時の Y 方向垂直速度分布 (スプレイ流量 4.0 m<sup>3</sup>/h)

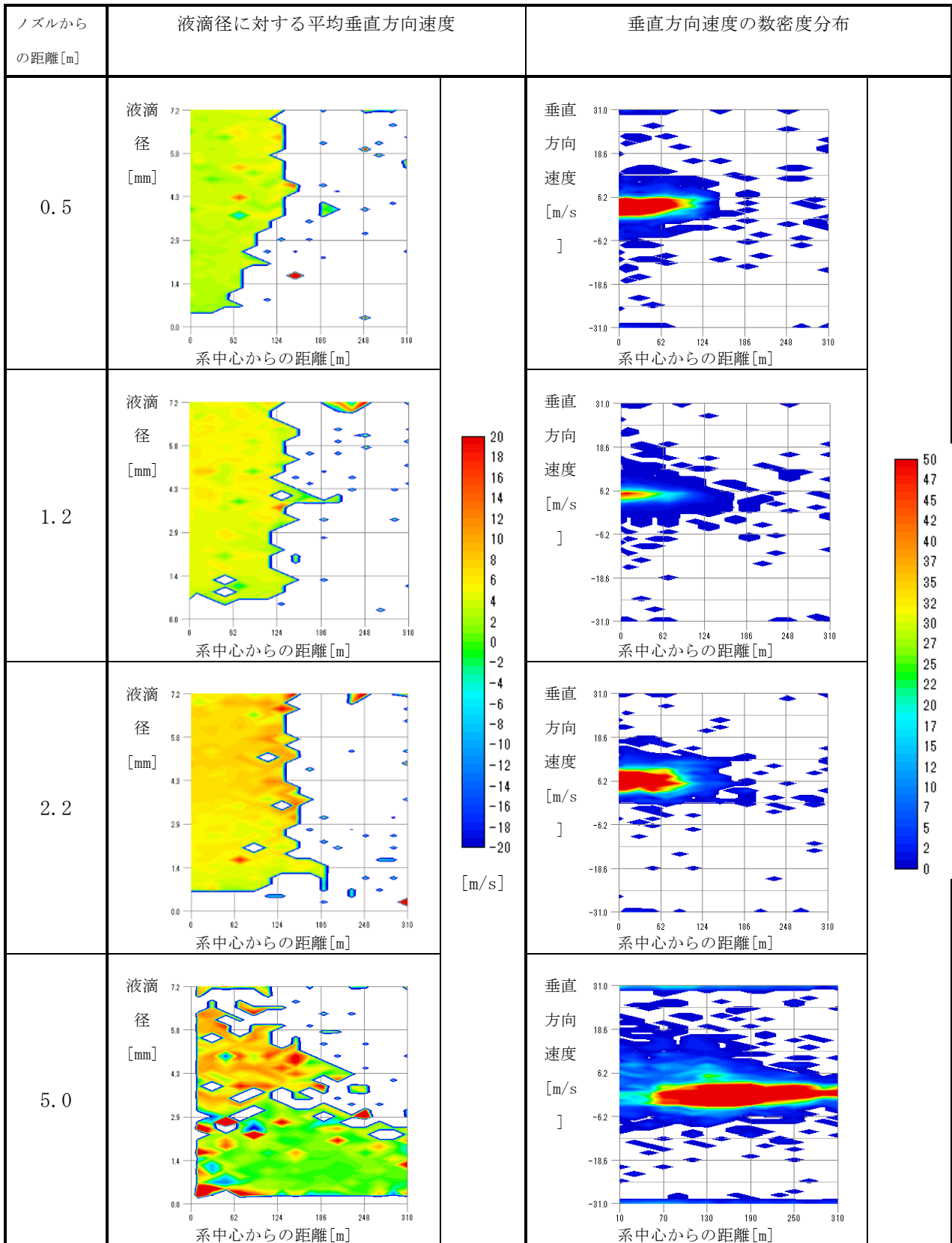


表 3.1-21 試験条件

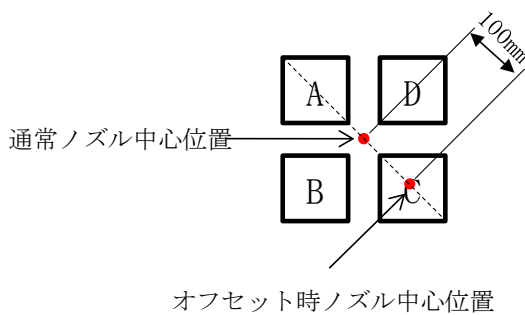
スプレイ 流量	0.5～7.4 m <sup>3</sup> /h ( 137～2040 g/s ) 0 m <sup>3</sup> /h (蒸気試験における蒸気凝集量確認)																																				
スプレイ 温度	22～95℃																																				
スプレイ 高さ	5m 一部条件 3m																																				
スプレイ 径方向 位置	装置中心 一部条件のみ下図のオフセット位置 																																				
入口部 気体温度	空気： 20～150℃ 蒸気： 100～150℃																																				
気体 流量	空気 試験	集合体 A： 6.3 ～ 83 g/s 集合体 B： 0 ～ 39 g/s 集合体 C： 0 ～ 17 g/s 集合体 D： 0 ～ 17 g/s																																			
	蒸気 試験	集合体 A： 7.0 ～ 56 g/s 集合体 B： 0 ～ 28 g/s 集合体 C： 0 ～ 14 g/s 集合体 D： 0 ～ 14 g/s																																			
	流量 分布 パターン	<table style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td>分布 1</td> <td>分布 2</td> <td>分布 3</td> <td>分布 4</td> <td>分布 5</td> </tr> <tr> <td><table border="1" style="display: inline-table;"><tr><td style="background-color: red;">A</td><td>D</td></tr><tr><td>B</td><td>C</td></tr></table></td> <td><table border="1" style="display: inline-table;"><tr><td style="background-color: red;">A</td><td style="background-color: red;">D</td></tr><tr><td style="background-color: red;">B</td><td style="background-color: red;">C</td></tr></table></td> <td><table border="1" style="display: inline-table;"><tr><td style="background-color: red;">A</td><td>D</td></tr><tr><td style="background-color: red;">B</td><td>C</td></tr></table></td> <td><table border="1" style="display: inline-table;"><tr><td style="background-color: red;">A</td><td>D</td></tr><tr><td>B</td><td style="background-color: red;">C</td></tr></table></td> <td><table border="1" style="display: inline-table;"><tr><td style="background-color: red;">A</td><td>D</td></tr><tr><td style="background-color: gray;">B</td><td style="background-color: gray;">C</td></tr></table></td> </tr> <tr> <td><table border="1" style="display: inline-table;"><tr><td style="width: 20px; height: 20px;"></td></tr></table> 気体なし</td> <td><table border="1" style="display: inline-table;"><tr><td style="width: 20px; height: 20px; background-color: red;"></td></tr></table> 気体あり</td> <td><table border="1" style="display: inline-table;"><tr><td style="width: 20px; height: 20px; background-color: gray;"></td></tr></table> 気体ありの 50%</td> </tr> </table>	分布 1	分布 2	分布 3	分布 4	分布 5	<table border="1" style="display: inline-table;"><tr><td style="background-color: red;">A</td><td>D</td></tr><tr><td>B</td><td>C</td></tr></table>	A	D	B	C	<table border="1" style="display: inline-table;"><tr><td style="background-color: red;">A</td><td style="background-color: red;">D</td></tr><tr><td style="background-color: red;">B</td><td style="background-color: red;">C</td></tr></table>	A	D	B	C	<table border="1" style="display: inline-table;"><tr><td style="background-color: red;">A</td><td>D</td></tr><tr><td style="background-color: red;">B</td><td>C</td></tr></table>	A	D	B	C	<table border="1" style="display: inline-table;"><tr><td style="background-color: red;">A</td><td>D</td></tr><tr><td>B</td><td style="background-color: red;">C</td></tr></table>	A	D	B	C	<table border="1" style="display: inline-table;"><tr><td style="background-color: red;">A</td><td>D</td></tr><tr><td style="background-color: gray;">B</td><td style="background-color: gray;">C</td></tr></table>	A	D	B	C	<table border="1" style="display: inline-table;"><tr><td style="width: 20px; height: 20px;"></td></tr></table> 気体なし		<table border="1" style="display: inline-table;"><tr><td style="width: 20px; height: 20px; background-color: red;"></td></tr></table> 気体あり		<table border="1" style="display: inline-table;"><tr><td style="width: 20px; height: 20px; background-color: gray;"></td></tr></table> 気体ありの 50%
分布 1	分布 2	分布 3	分布 4	分布 5																																	
<table border="1" style="display: inline-table;"><tr><td style="background-color: red;">A</td><td>D</td></tr><tr><td>B</td><td>C</td></tr></table>	A	D	B	C	<table border="1" style="display: inline-table;"><tr><td style="background-color: red;">A</td><td style="background-color: red;">D</td></tr><tr><td style="background-color: red;">B</td><td style="background-color: red;">C</td></tr></table>	A	D	B	C	<table border="1" style="display: inline-table;"><tr><td style="background-color: red;">A</td><td>D</td></tr><tr><td style="background-color: red;">B</td><td>C</td></tr></table>	A	D	B	C	<table border="1" style="display: inline-table;"><tr><td style="background-color: red;">A</td><td>D</td></tr><tr><td>B</td><td style="background-color: red;">C</td></tr></table>	A	D	B	C	<table border="1" style="display: inline-table;"><tr><td style="background-color: red;">A</td><td>D</td></tr><tr><td style="background-color: gray;">B</td><td style="background-color: gray;">C</td></tr></table>	A	D	B	C													
A	D																																				
B	C																																				
A	D																																				
B	C																																				
A	D																																				
B	C																																				
A	D																																				
B	C																																				
A	D																																				
B	C																																				
<table border="1" style="display: inline-table;"><tr><td style="width: 20px; height: 20px;"></td></tr></table> 気体なし		<table border="1" style="display: inline-table;"><tr><td style="width: 20px; height: 20px; background-color: red;"></td></tr></table> 気体あり		<table border="1" style="display: inline-table;"><tr><td style="width: 20px; height: 20px; background-color: gray;"></td></tr></table> 気体ありの 50%																																	

表 3.1-22 主な計器の計測条件

データログ 収録条件	サンプリング周波数	1 Hz
	測定時間	10分(スプレイ量 4.0m <sup>3</sup> /h 未満) 5分(スプレイ量 4.0m <sup>3</sup> /h 以上)
	測定項目	測定レンジ
	【スプレイ流量】 スプレイ流量(小) スプレイ流量(大)	0~1.2m <sup>3</sup> /h 0~10.0m <sup>3</sup> /h
	【気体流量】 蒸気合計量 各集合体への流入量	43.2~432kg/h (蒸気) 23.5~282kg/h (空気) 29.1~388 kg/h
【集合体計量タンク水位】	0.981kPa~29.42kPa(タンク水位 0~100%)	
液滴計の 収録条件	サンプリング周波数 1計測あたりのレーザーパルス間隔 レーザーパルス幅 サンプリング数 垂直方向測定位置 水平方向位置	約 14.7Hz 3×10 <sup>-3</sup> 秒 200×10 <sup>-6</sup> 秒 200 上部タイプレート下端より上方 42.53mm ・集合体(4体)の中央位置 ・中央から集合体A方向へ 10mm~310mmの間を20mm間隔で測定

表 3.1-23 空気試験における液滴径ごとの計測数変化

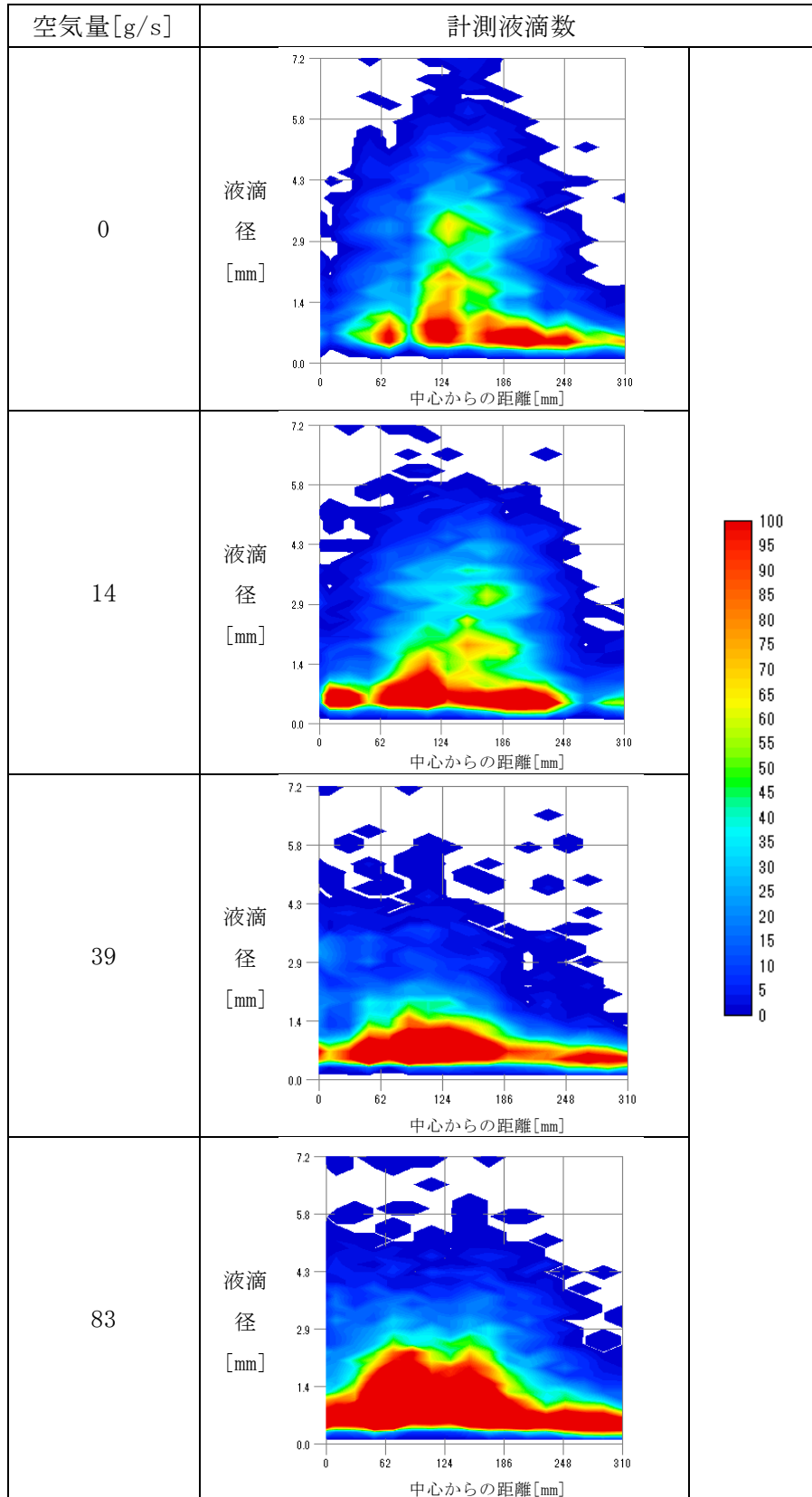


表 3.1-24 空気試験における液滴径ごとの水平方向速度平均値

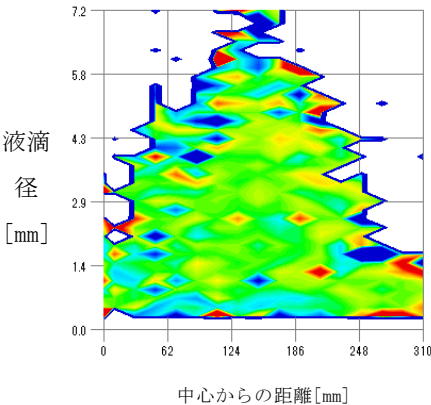
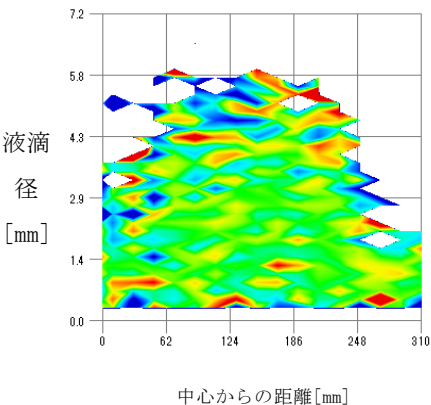
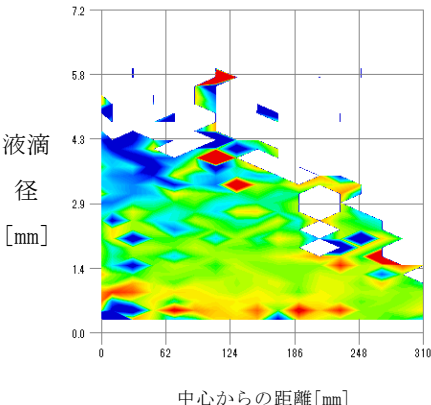
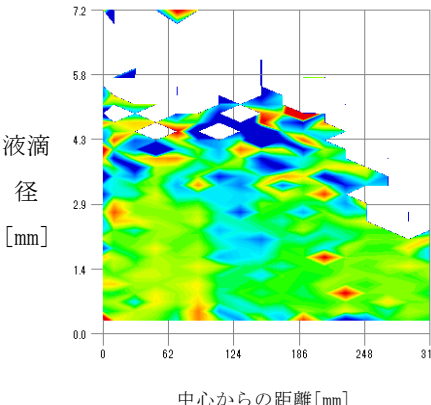
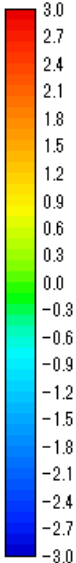
空気量 [g/s]	水平方向速度 [m/s]	
0		
14		
39		
83		

表 3.1-25 空気試験における液滴径ごとの垂直方向速度平均値

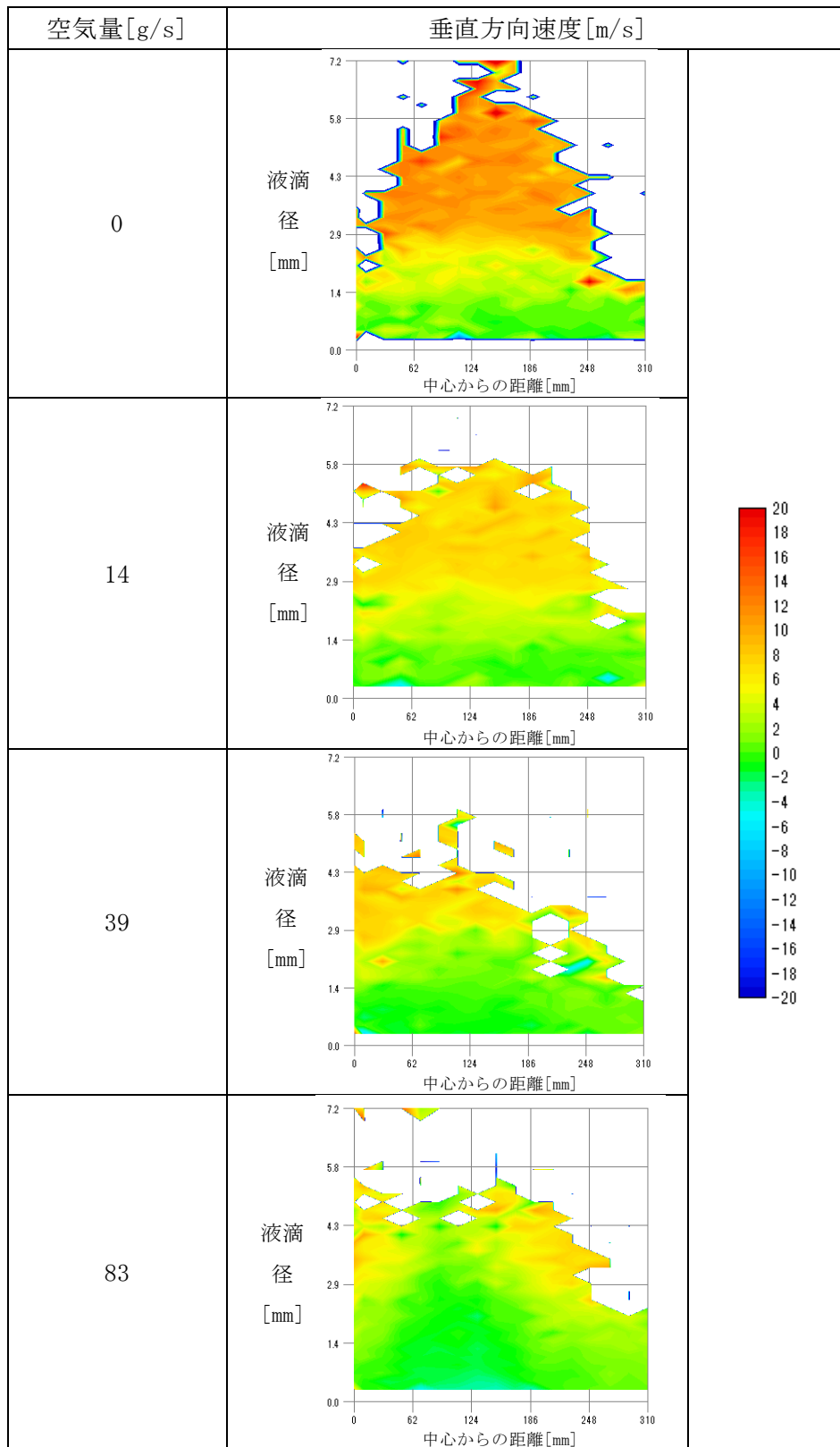


表 3.1-26 蒸気試験における液滴径ごとの計測数変化

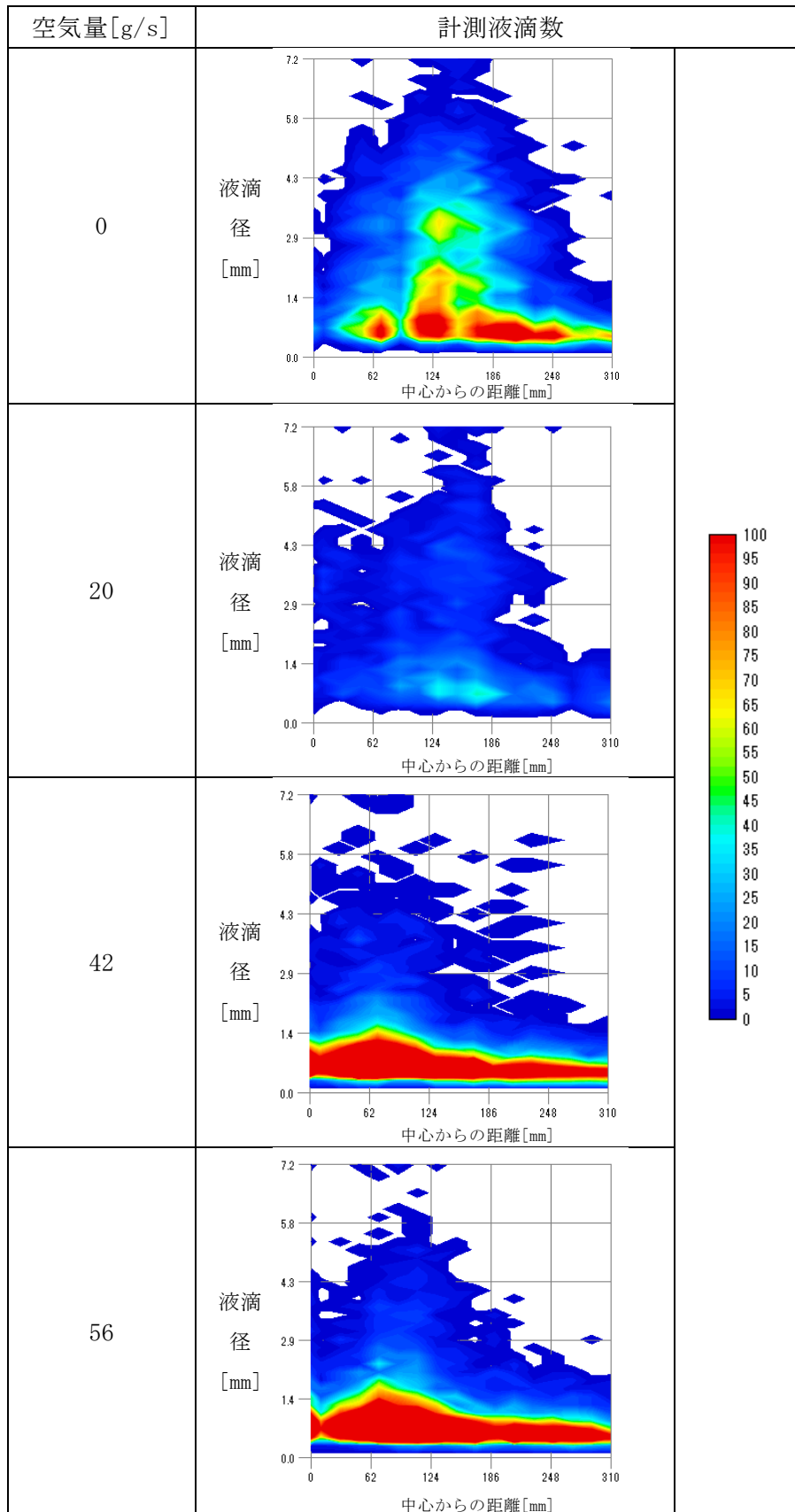


表 3.1-27 蒸気試験における液滴径ごとの水平方向速度平均値

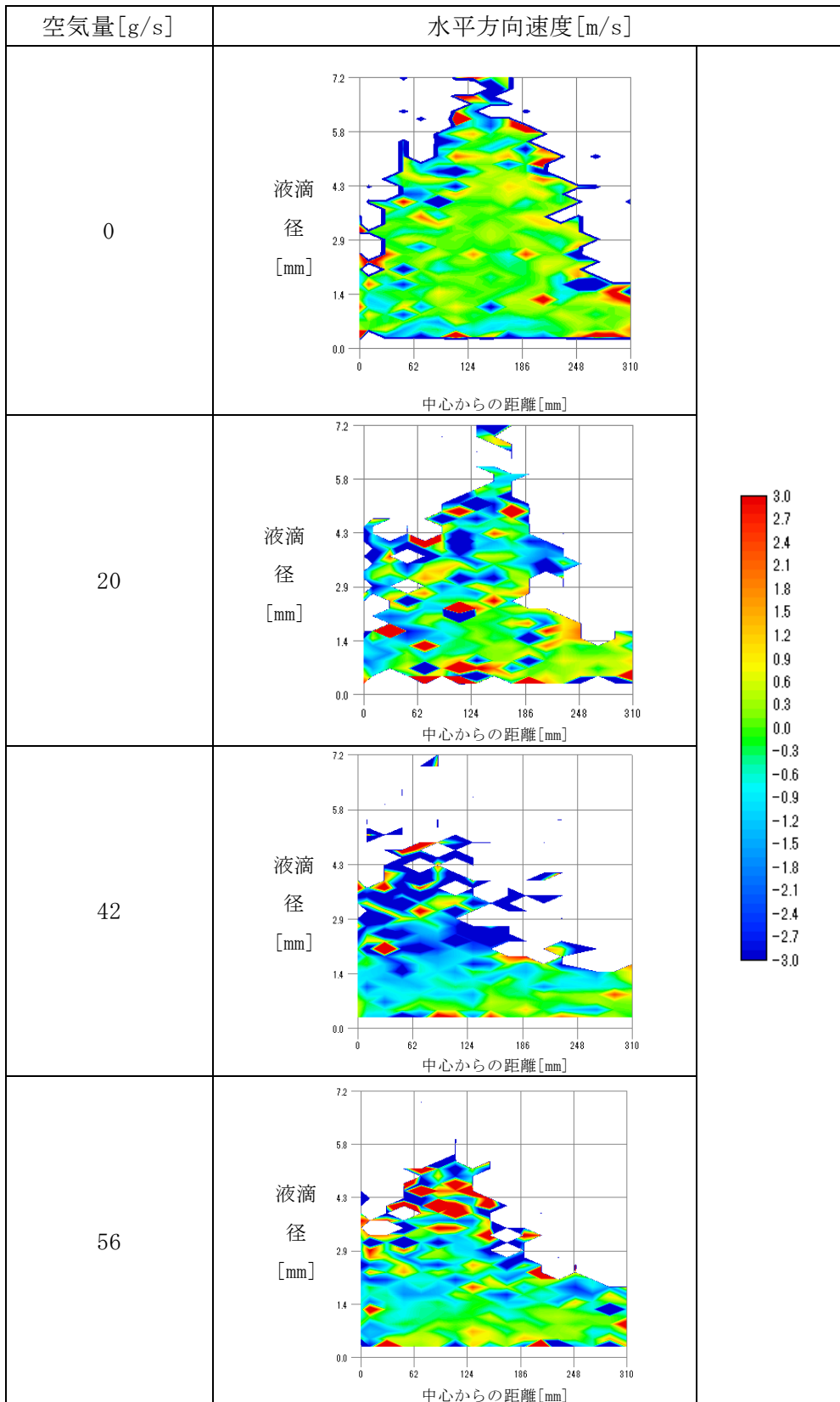
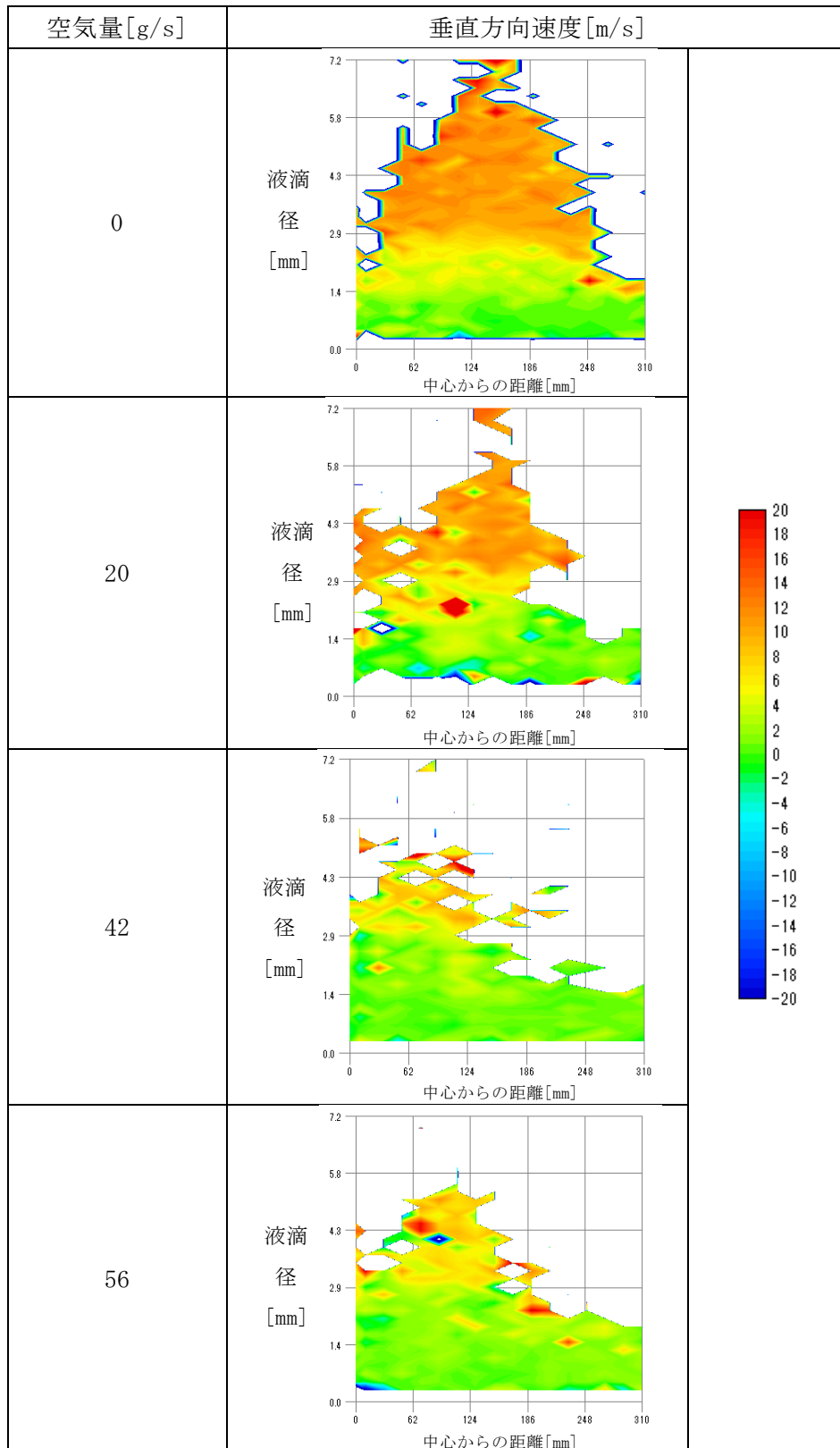




表 3.1-28 蒸気試験における液滴径ごとの垂直方向速度平均値



F 流量計   
 T 温度計   
 P 圧力計   
 L 液面計   
 DP 差圧式液面計   
 ⊗ 閉止弁   
 □ 流量調整バルブ

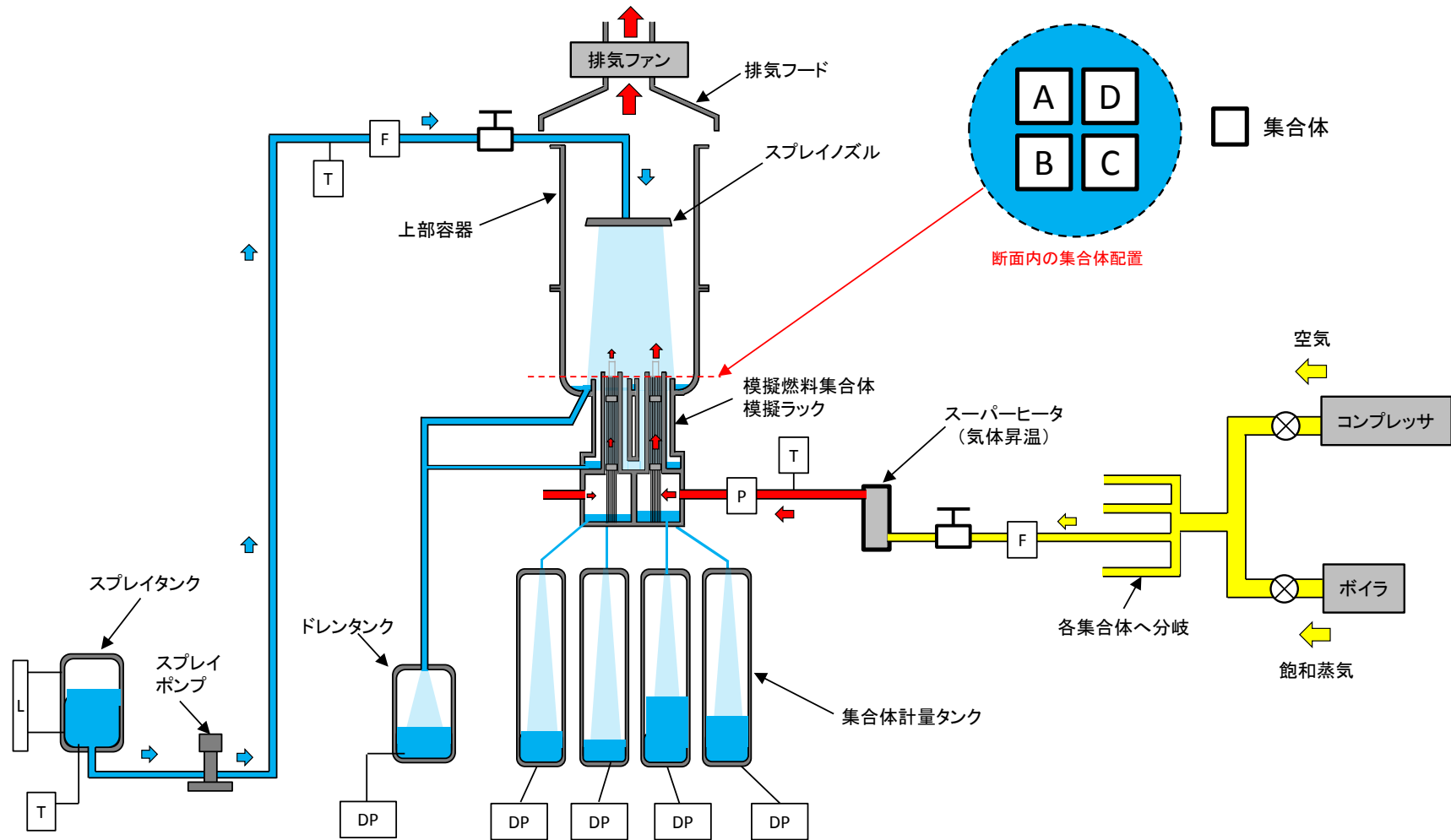
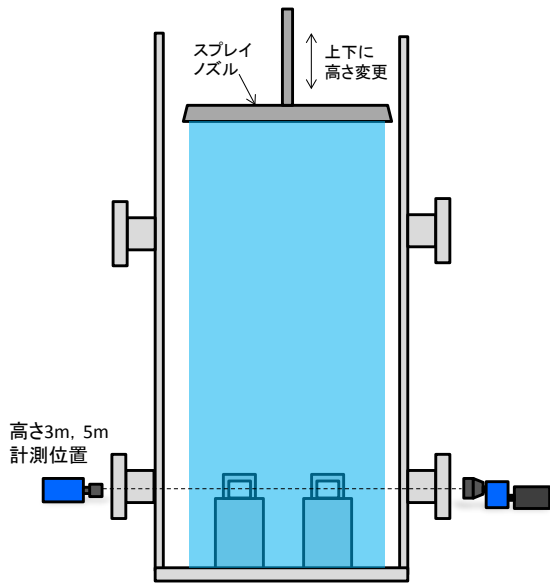
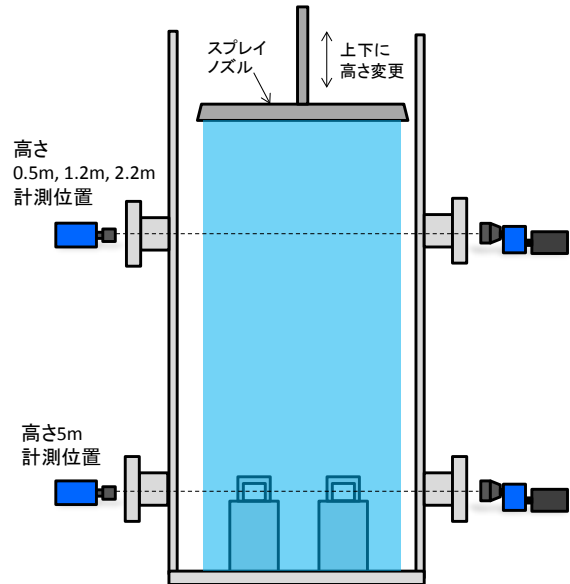


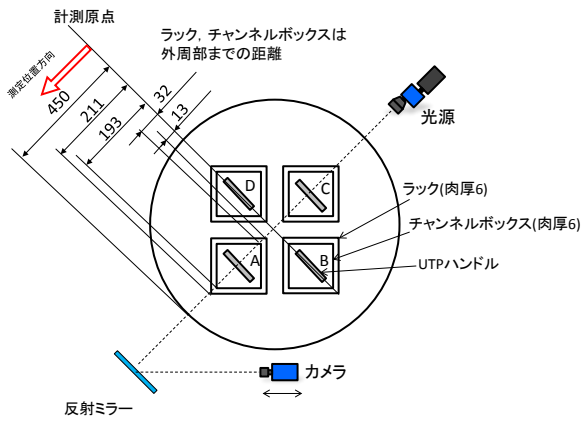
図 3.1-1 スプレイ流量分配試験装置の概略図



(a) X方向計測高さ位置

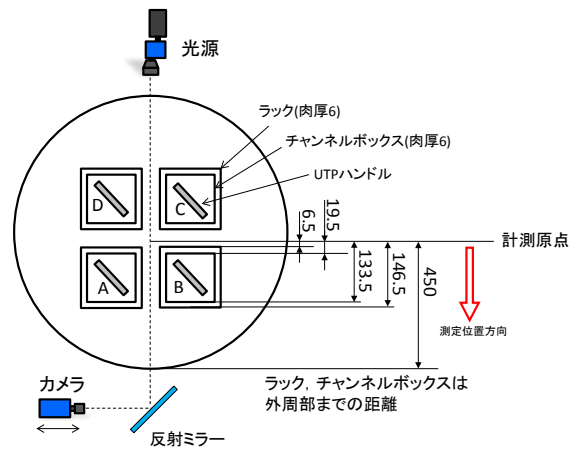


(a) Y方向計測高さ位置



(b) X方向計測高さ位置

図 3.1-2 X方向計測位置



(b) Y方向計測高さ位置

図 3.1-3 Y方向計測位置

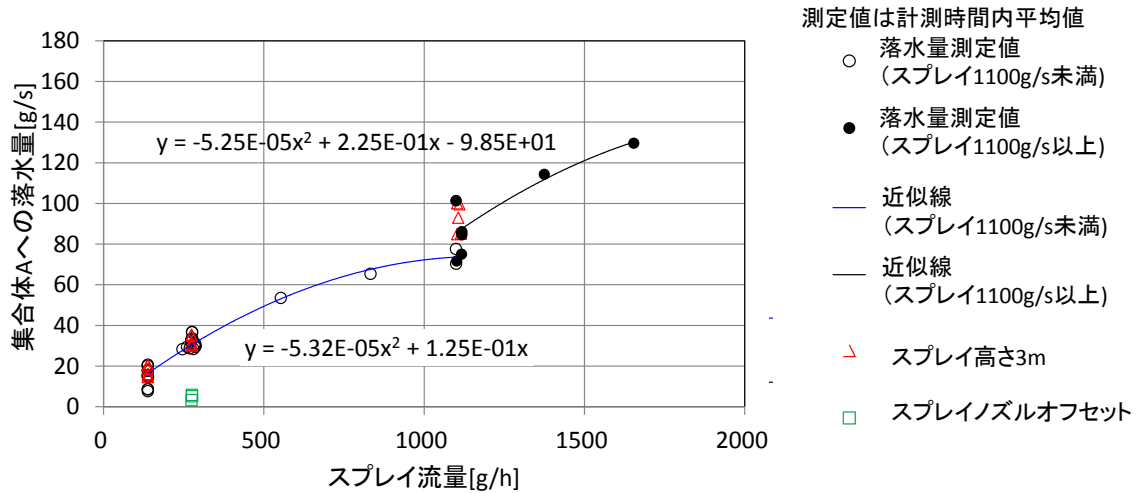


図 3.1-4 気体吹上げ無し時の降水量(集合体 A)

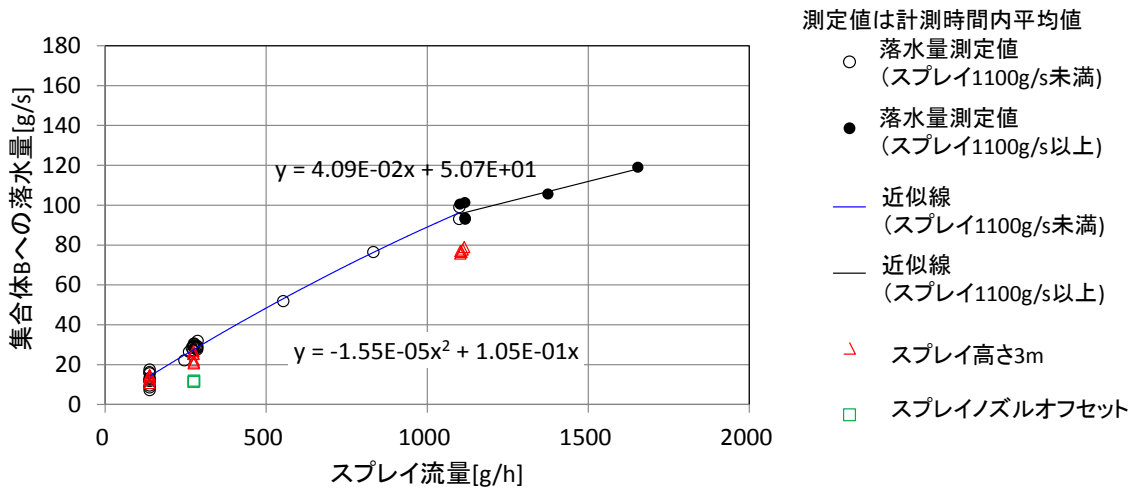


図 3.1-5 気体吹上げ無し時の降水量(集合体 B)

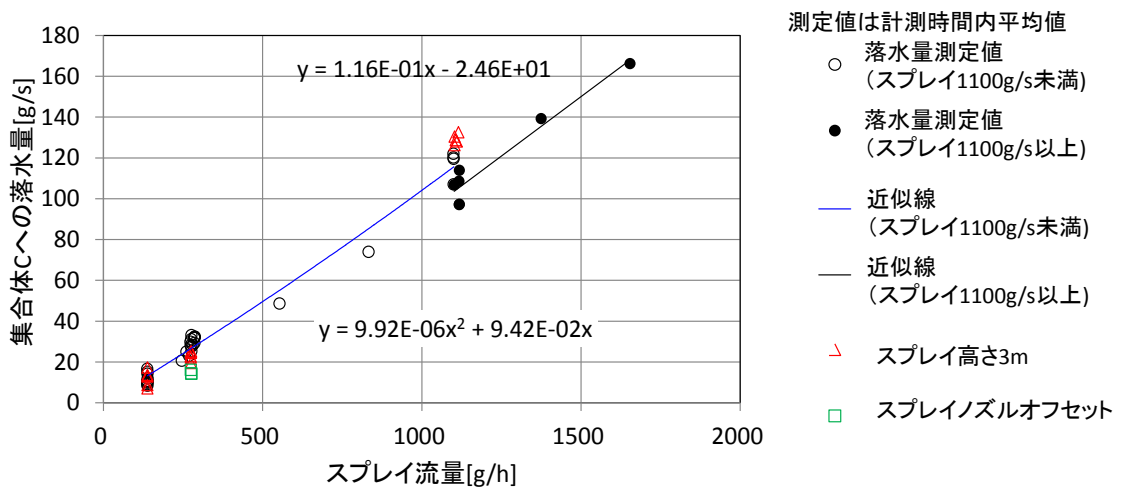


図 3.1-6 気体吹上げ無し時の降水量(集合体 C)

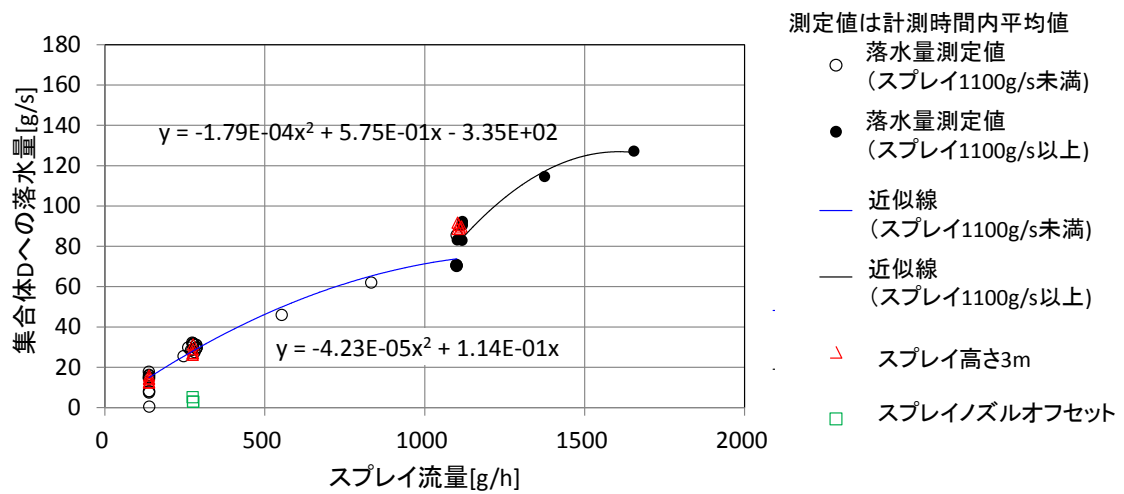


図 3.1-7 気体吹上げ無し時の降水量(集集体 D)

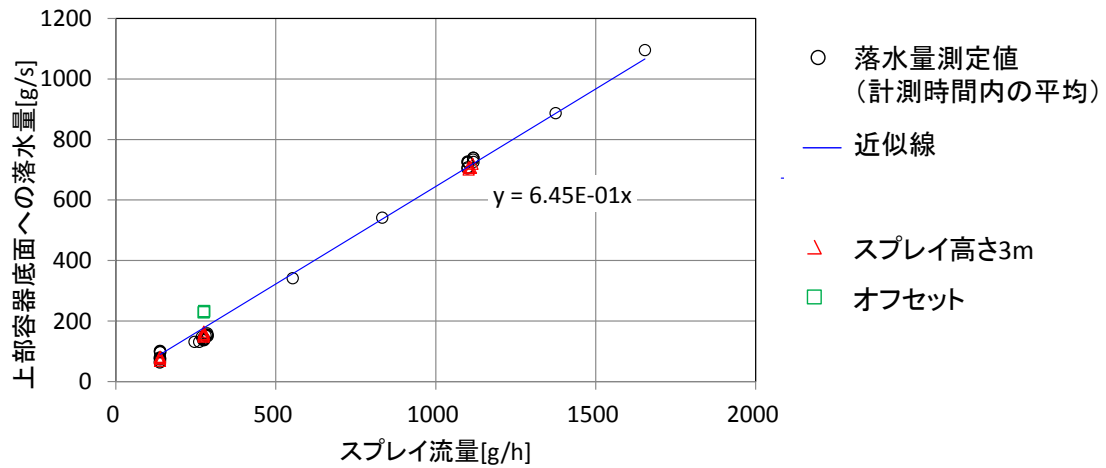
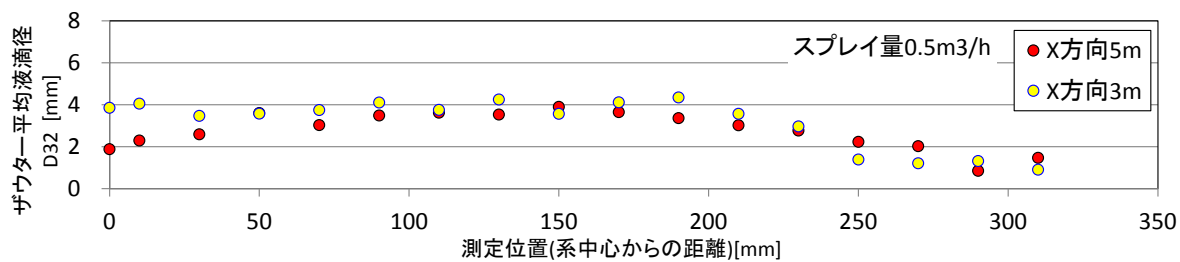
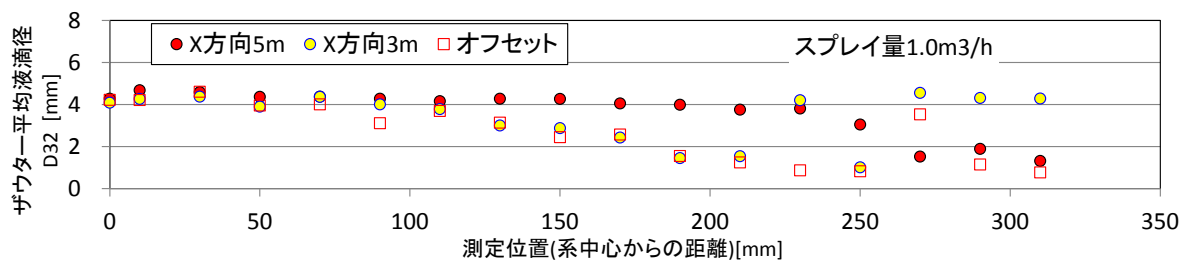


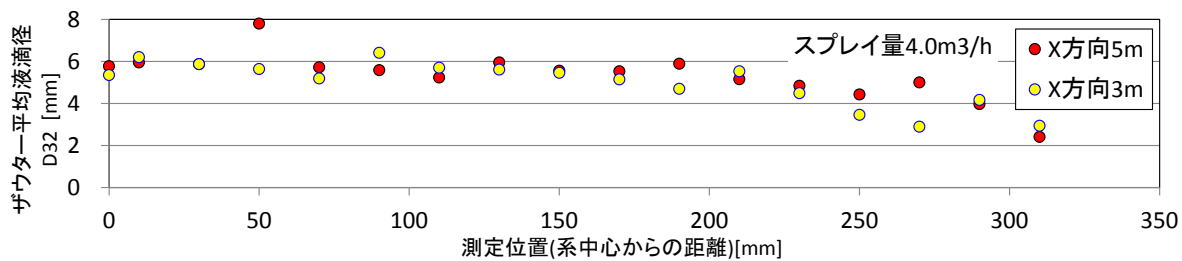
図 3.1-8 気体吹上げ無し時の降水量(上部容器底面)



(a) スプレイ流量 0.5m<sup>3</sup>/h

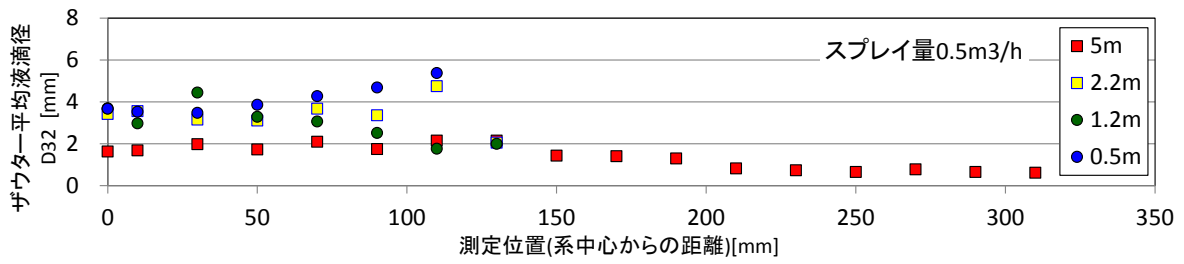


(b) スプレイ流量 1.0m<sup>3</sup>/h

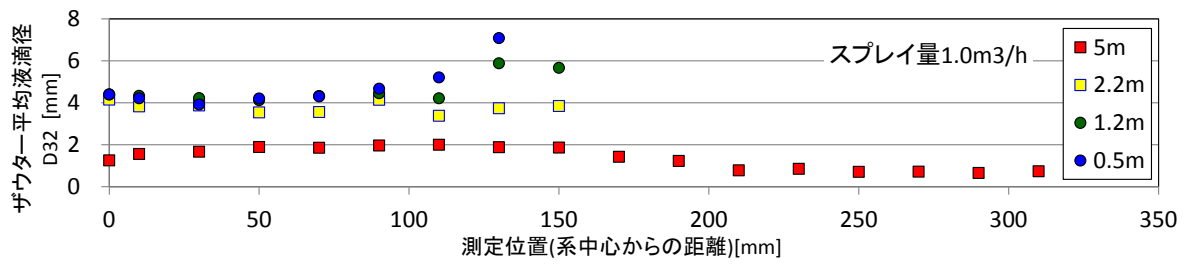


(c) スプレイ流量 4.0m<sup>3</sup>/h

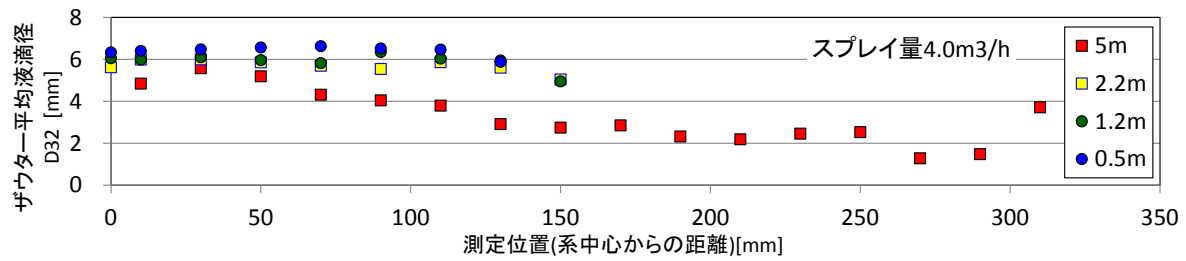
図 3.1-9 X方向の液滴径分布



(a) スプレイ流量 0.5m<sup>3</sup>/h

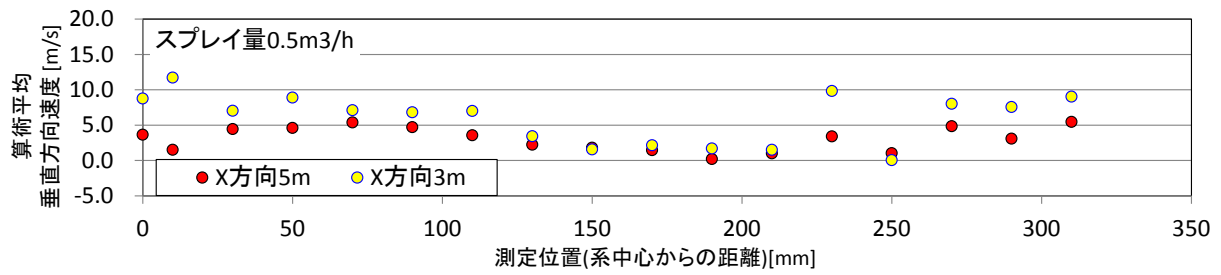


(b) スプレイ流量 1.0m<sup>3</sup>/h

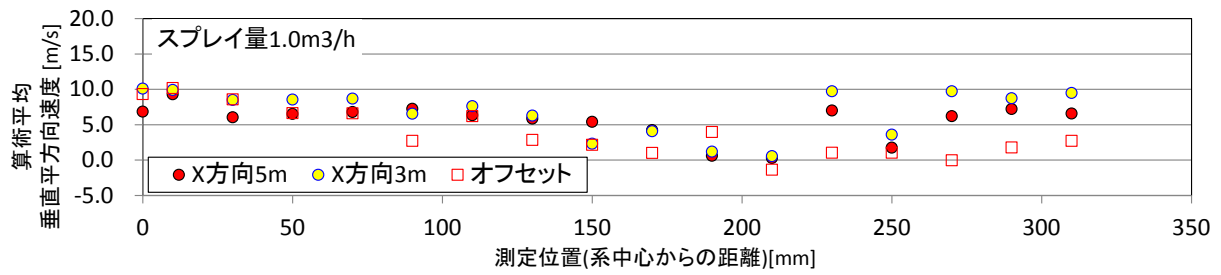


(c) スプレイ流量 4.0m<sup>3</sup>/h

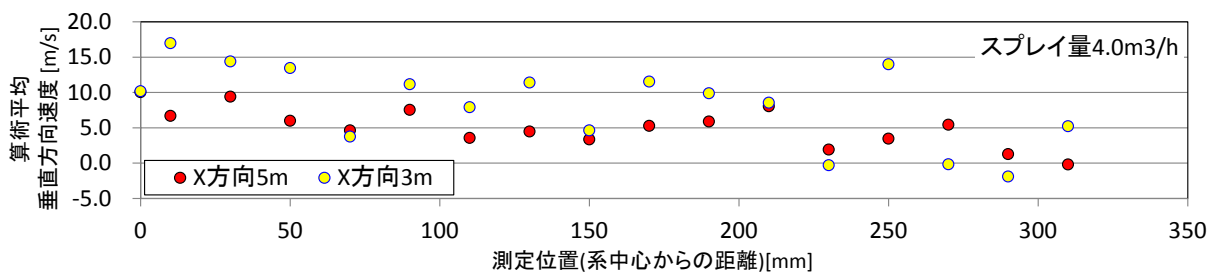
図 3.1-10 Y方向の液滴径分布



(a) スプレイ流量 0.5m<sup>3</sup>/h



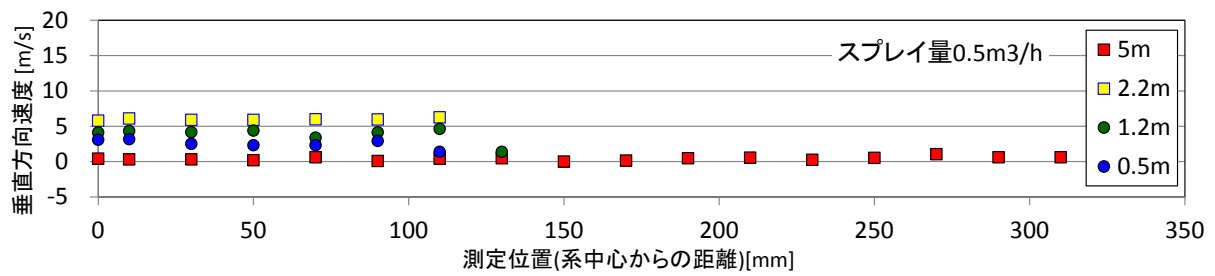
(b) スプレイ流量 1.0m<sup>3</sup>/h



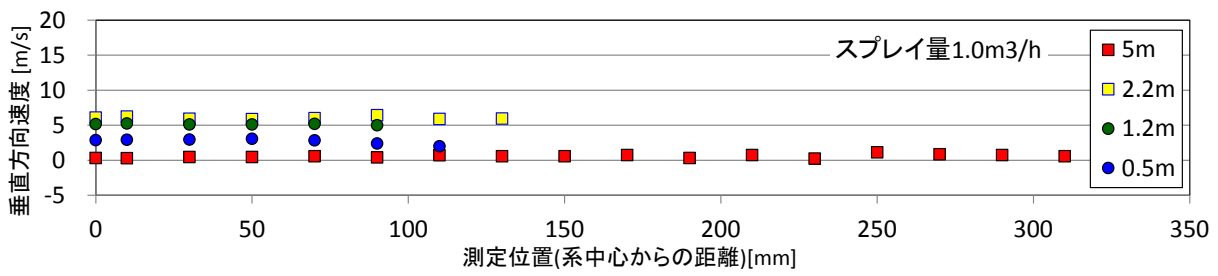
(c) スプレイ流量 4.0m<sup>3</sup>/h

図 3.1-11 X方向の垂直方向液滴速度分布

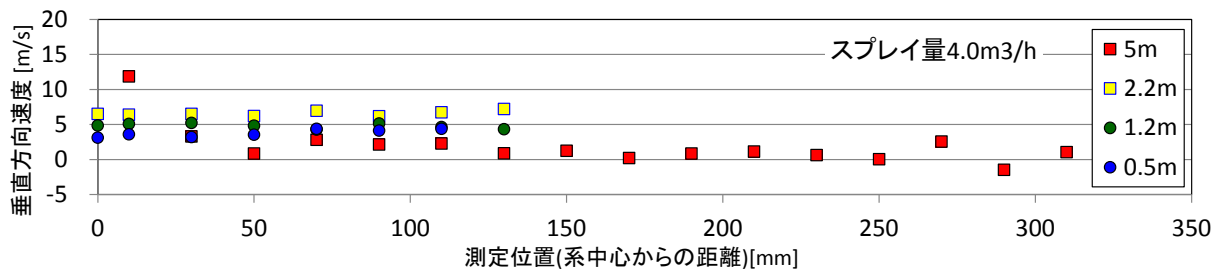




(a) スプレイ流量 0.5 m<sup>3</sup>/h

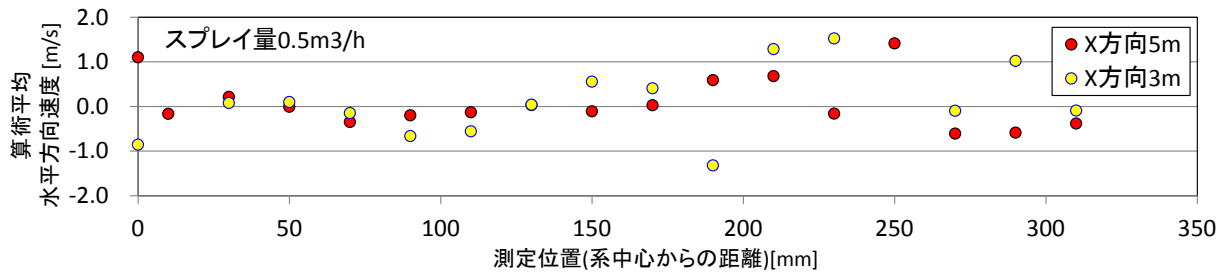


(b) スプレイ流量 1.0 m<sup>3</sup>/h

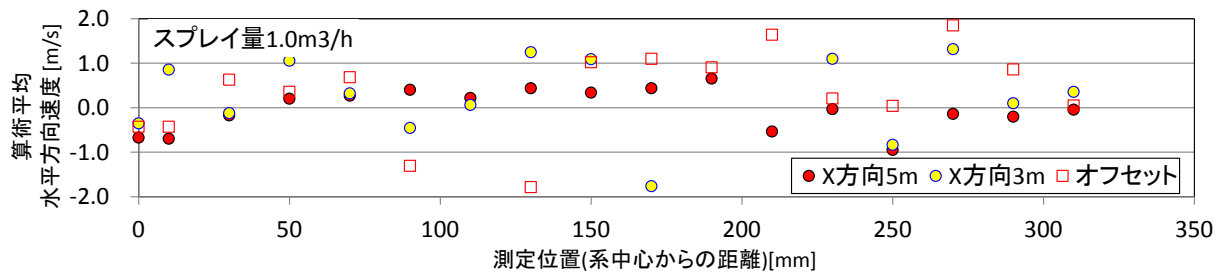


(c) スプレイ流量 4.0 m<sup>3</sup>/h

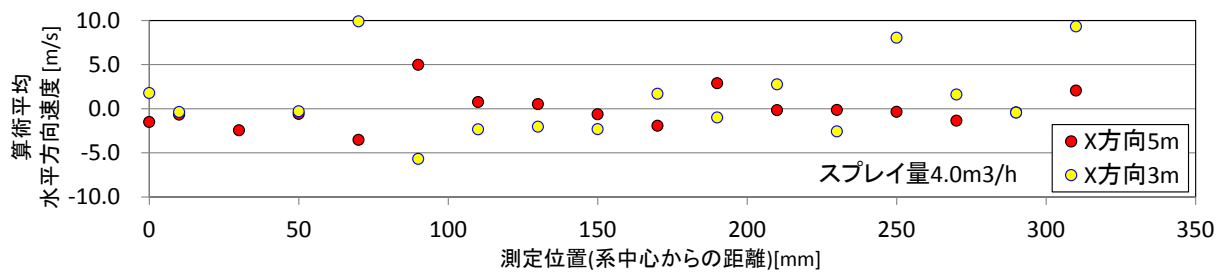
図 3.1-12 Y 方向の垂直方向液滴速度分布



(a) スプレイ流量 0.5m<sup>3</sup>/h

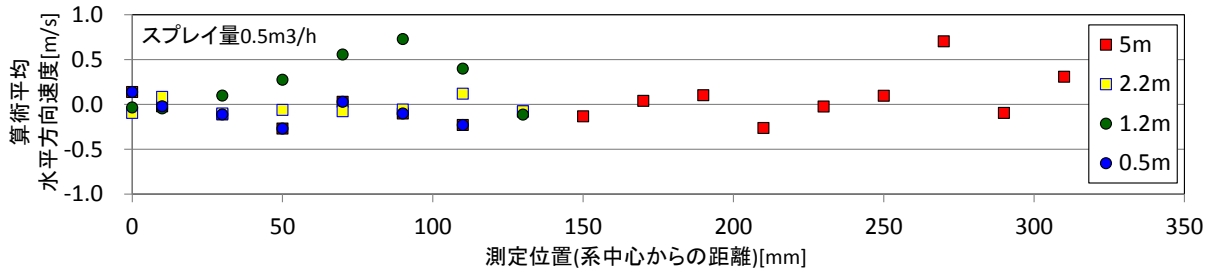


(b) スプレイ流量 1.0m<sup>3</sup>/h

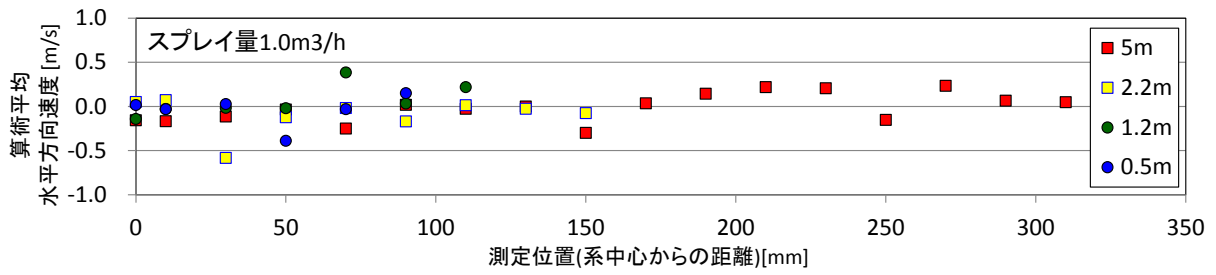


(c) スプレイ流量 4.0m<sup>3</sup>/h

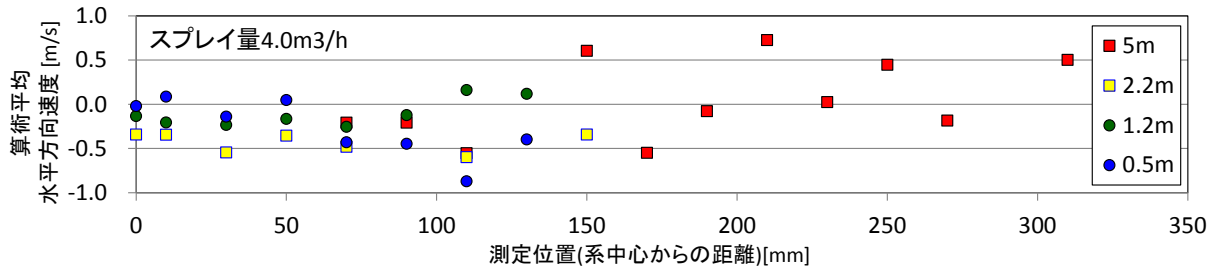
図 3.1-13 X方向の水平方向液滴速度分布



(a) スプレー流量 0.5m³/h

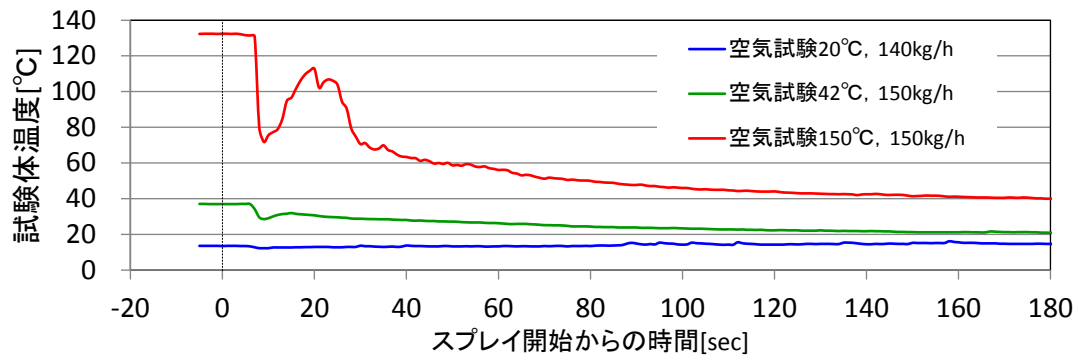


(b) スプレー流量 1.0m³/h

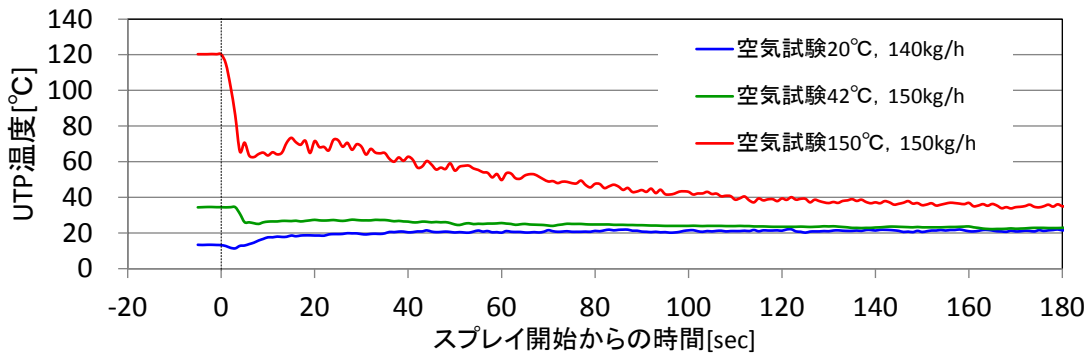


(c) スプレー流量 4.0m³/h

図 3.1-14 Y方向の水平方向液滴速度分布

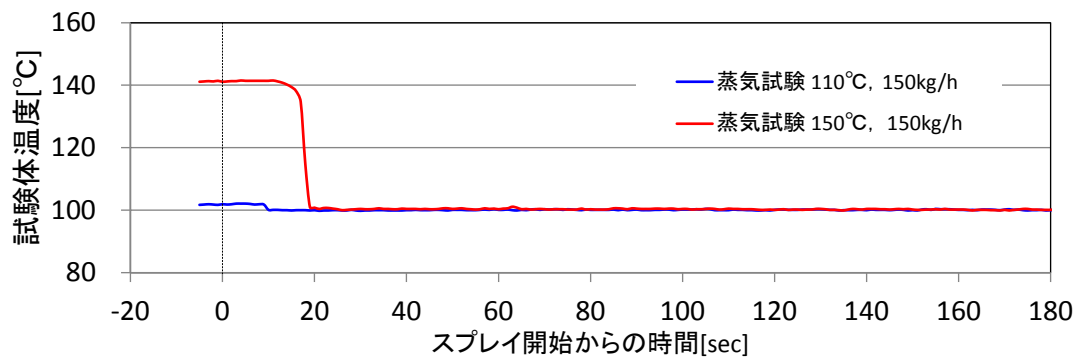


(a) 試験体温度

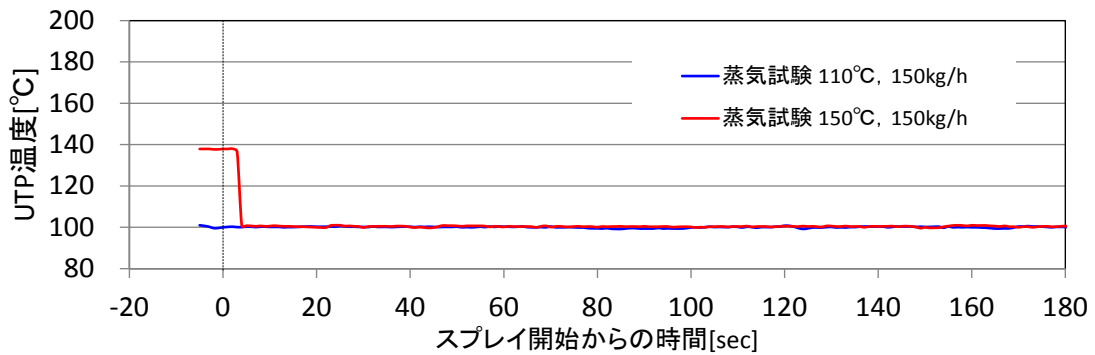


(b) 上部タイプレート (UTP) 温度

図 3.1-15 空気確認試験における試験体部の温度変化



(a) 試験体温度



(b) 上部タイプレート (UTP) 温度

図 3.1-16 蒸気確認試験における試験体部の温度変化

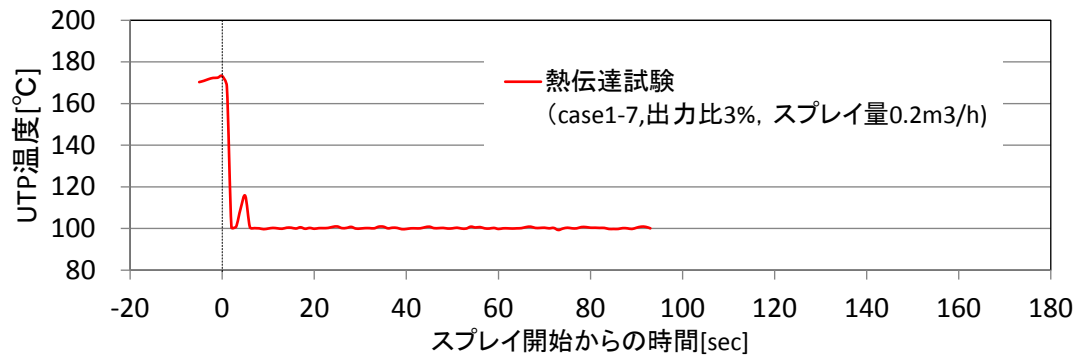
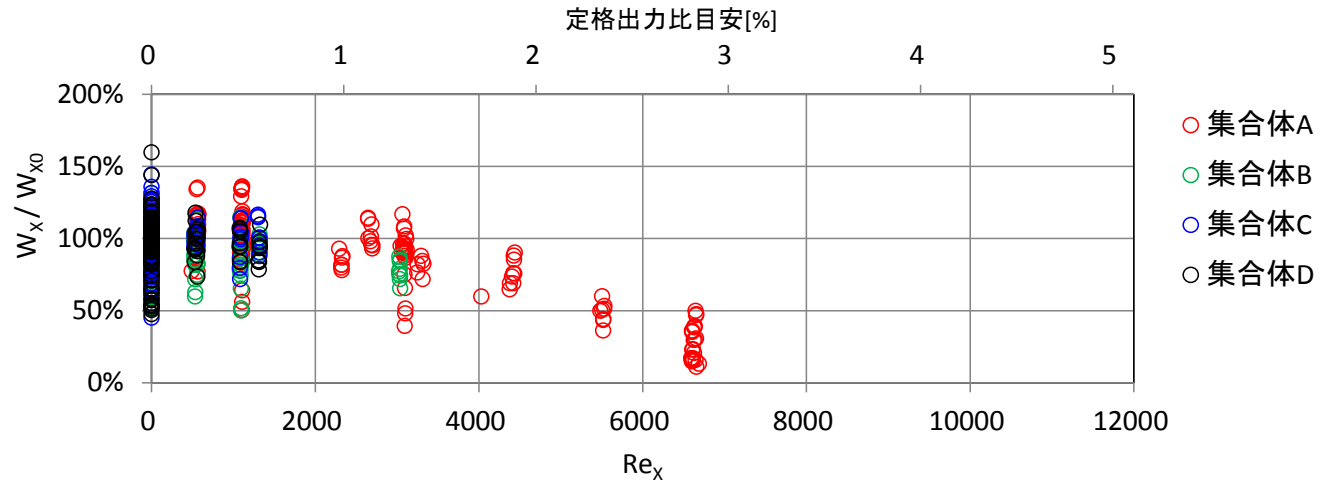
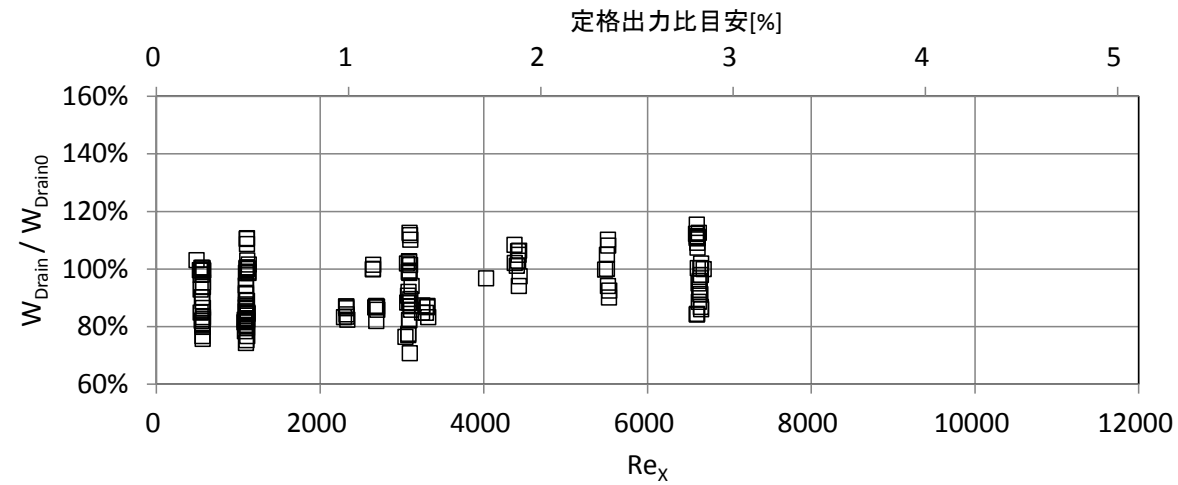


図 3.1-17 熱伝達試験における上部タイプレート温度変化(Case1-7)

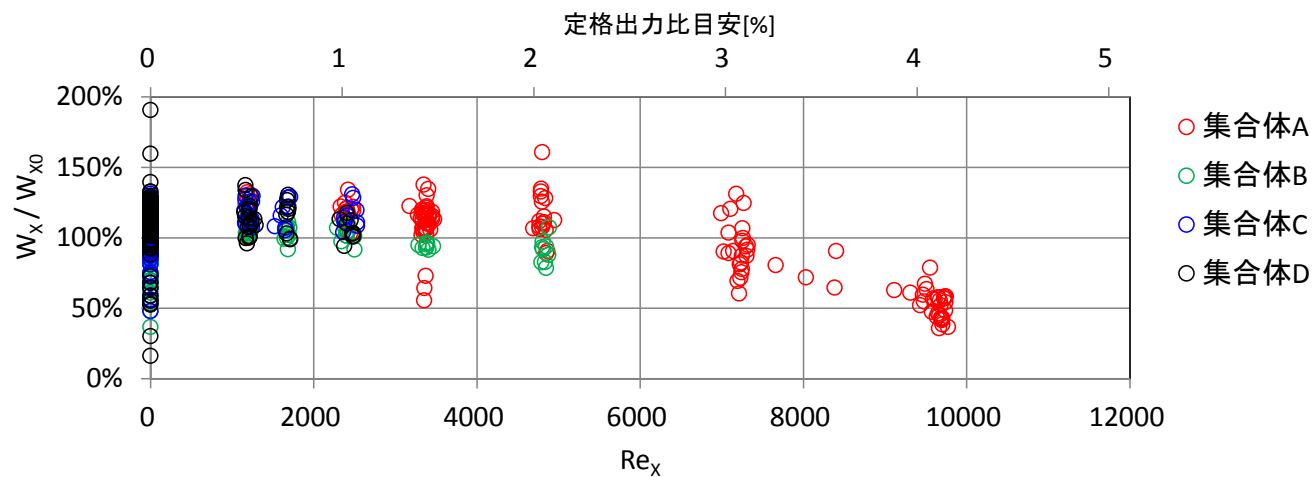


(a) 集合体への落水量

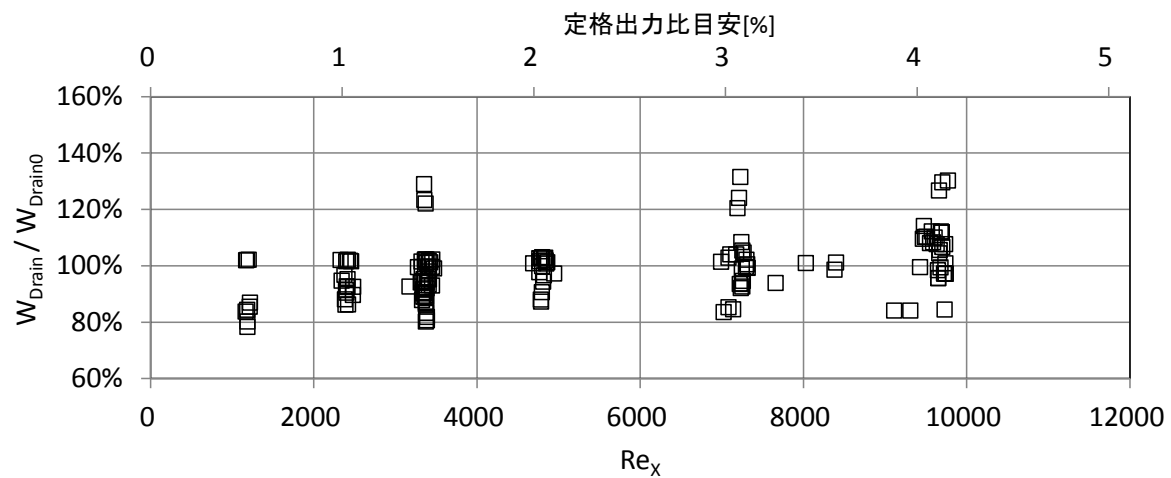


(b) 集合体への落水量

図 3.1-18 空気試験における各集合体への落水量

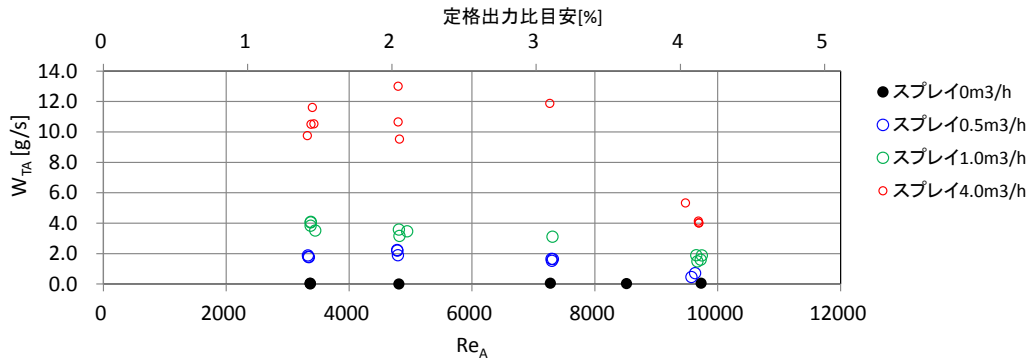


(a) 集合体への落水量

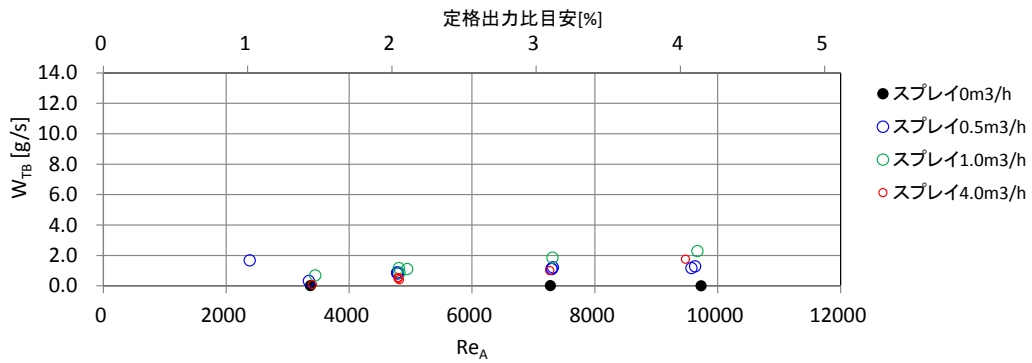


(b) 集合体への落水量

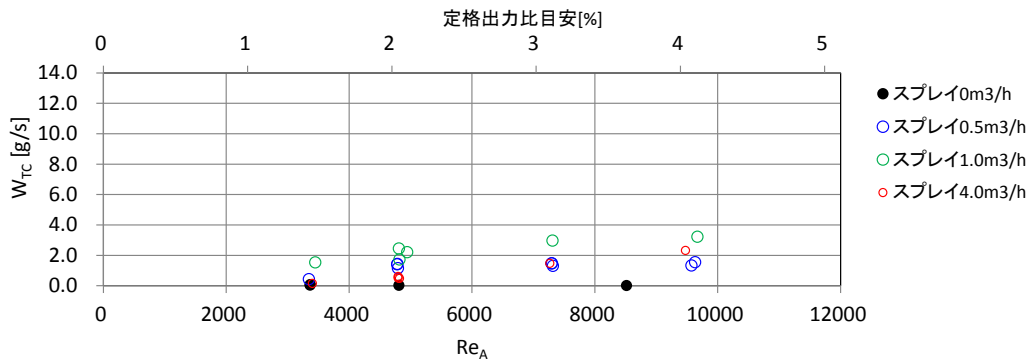
図 3.1-19 蒸気試験における各集合体への落水量



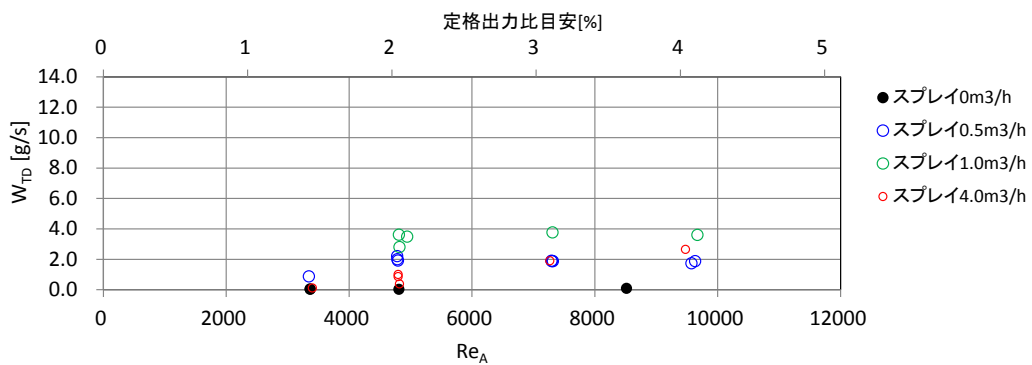
(a) 集合体 A



(b) 集合体 B



(c) 集合体 C



(d) 集合体 D

図 3.1-20 タンク落水に含まれる落水蒸気凝縮量  $W_{Tx}$



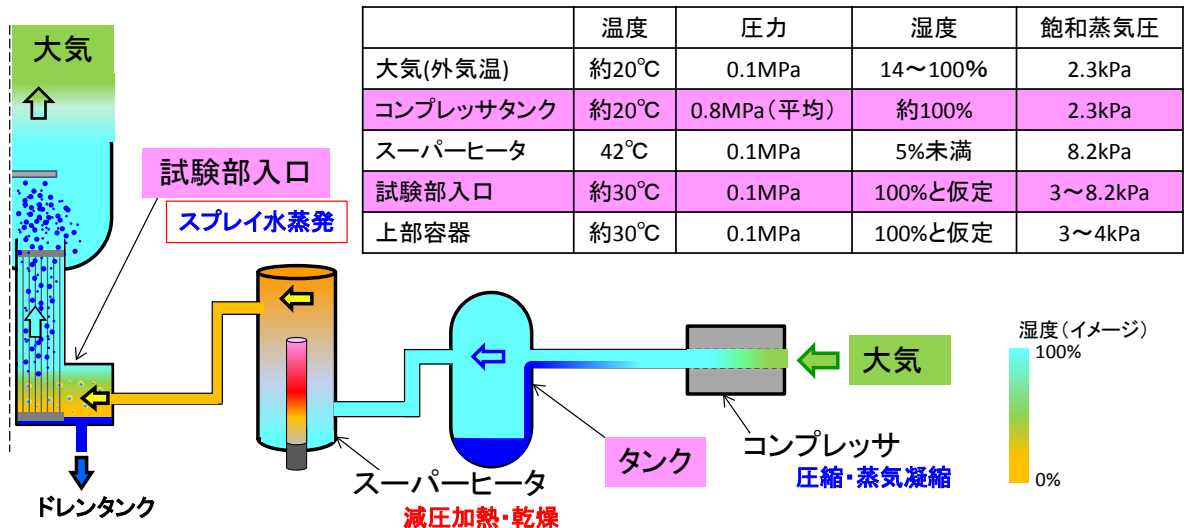


図 3.1-21 供給される空気の流れ概略図

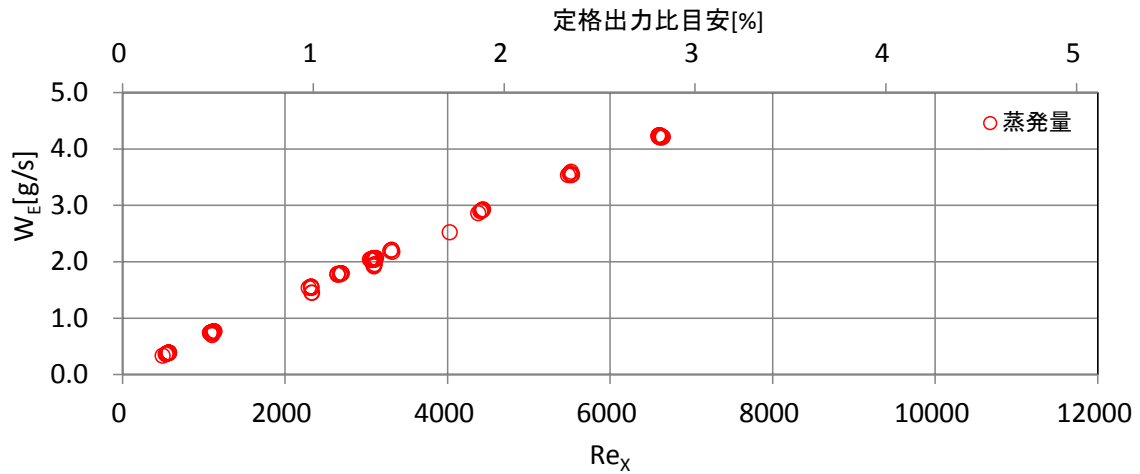


図 3.1-22 空気試験におけるスプレィ水の蒸発推定量(集合体 A)

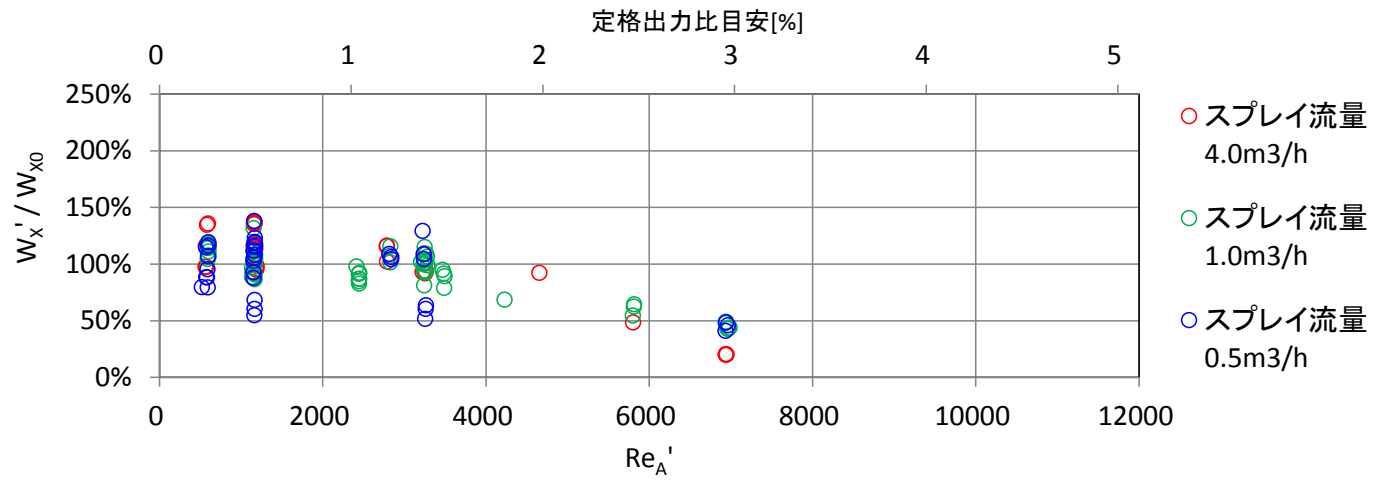


図 3.1-23 スpray流量の影響(空気試験)

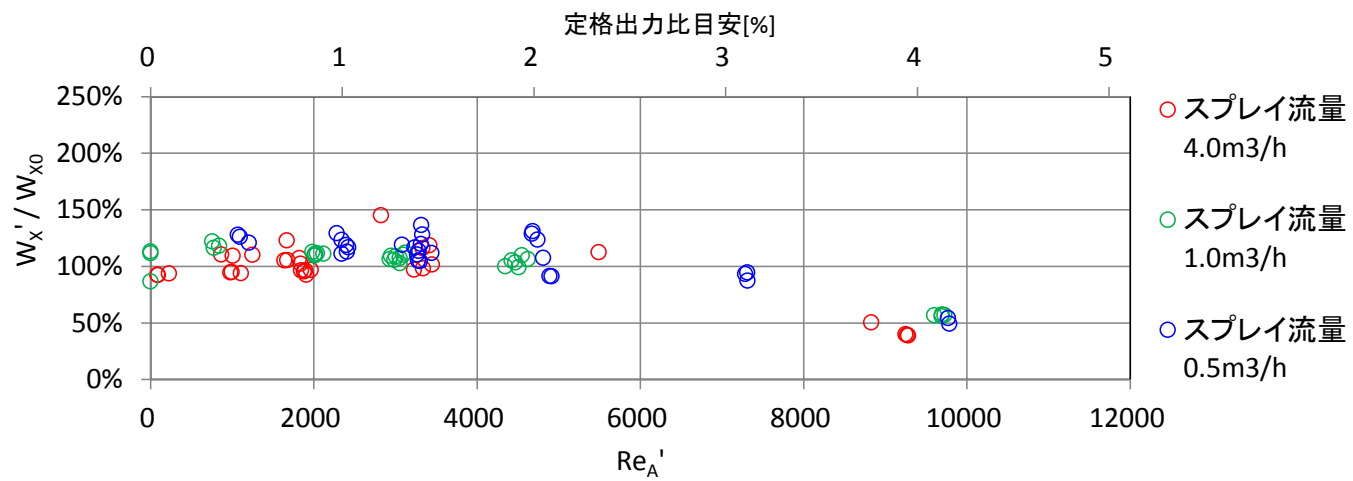


図 3.1-24 スpray流量の影響(蒸気試験)

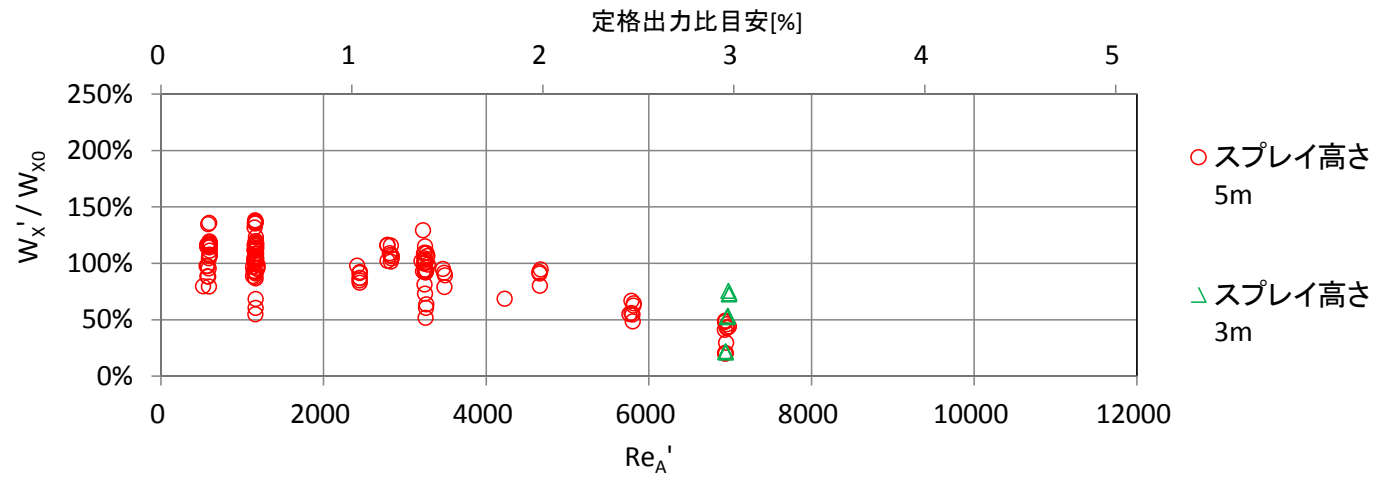


図 3.1-25 スpray 高さの影響(空気試験)

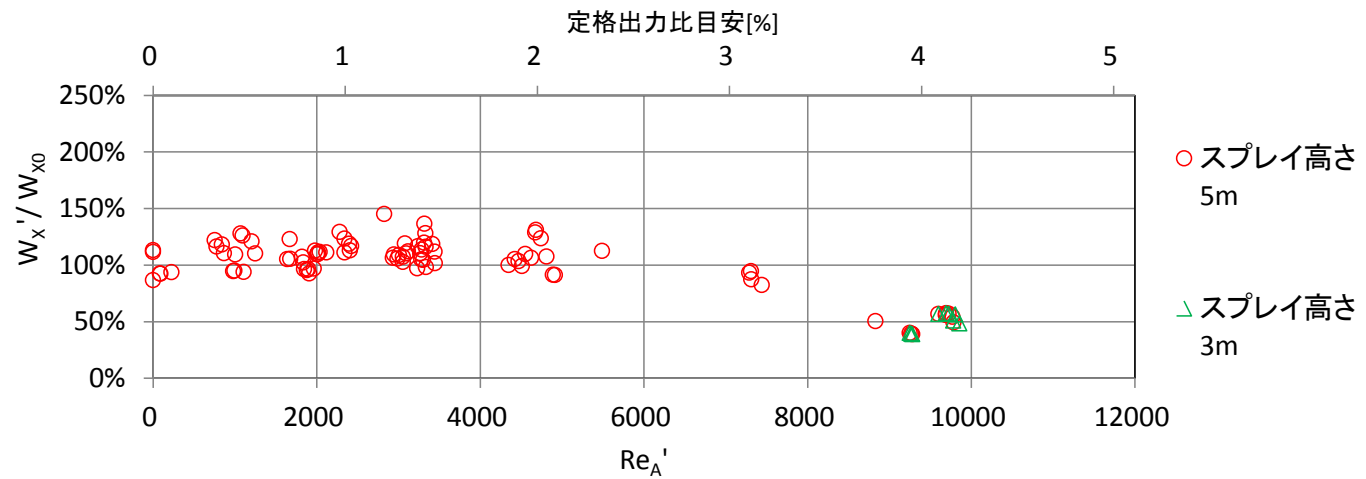


図 3.1-26 スpray 高さの影響(蒸気試験)

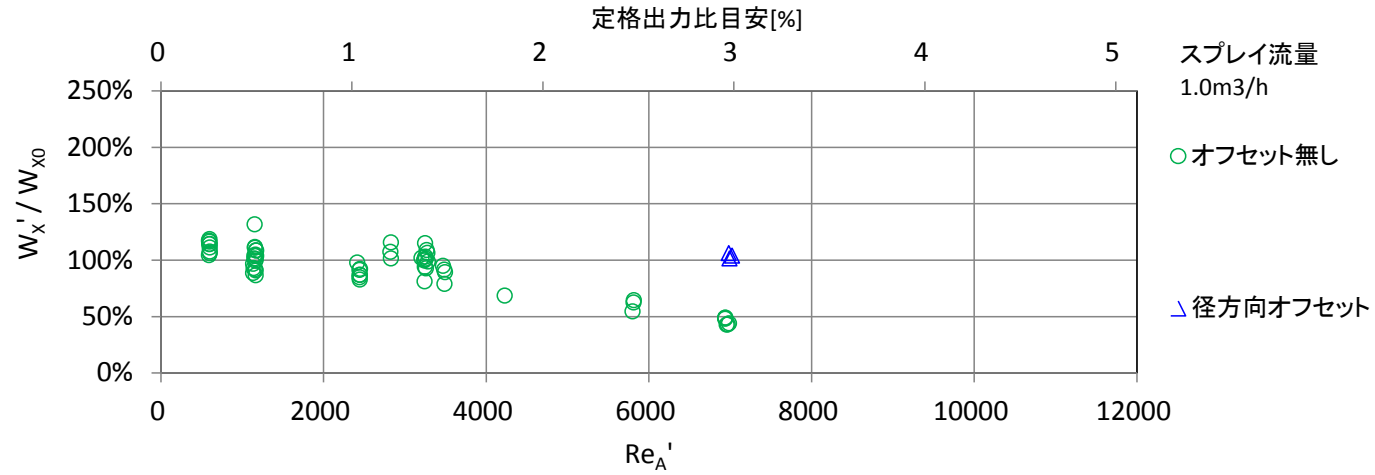


図 3.1-27 スpray高さ とノズル径方向オフセットの影響(空気試験)

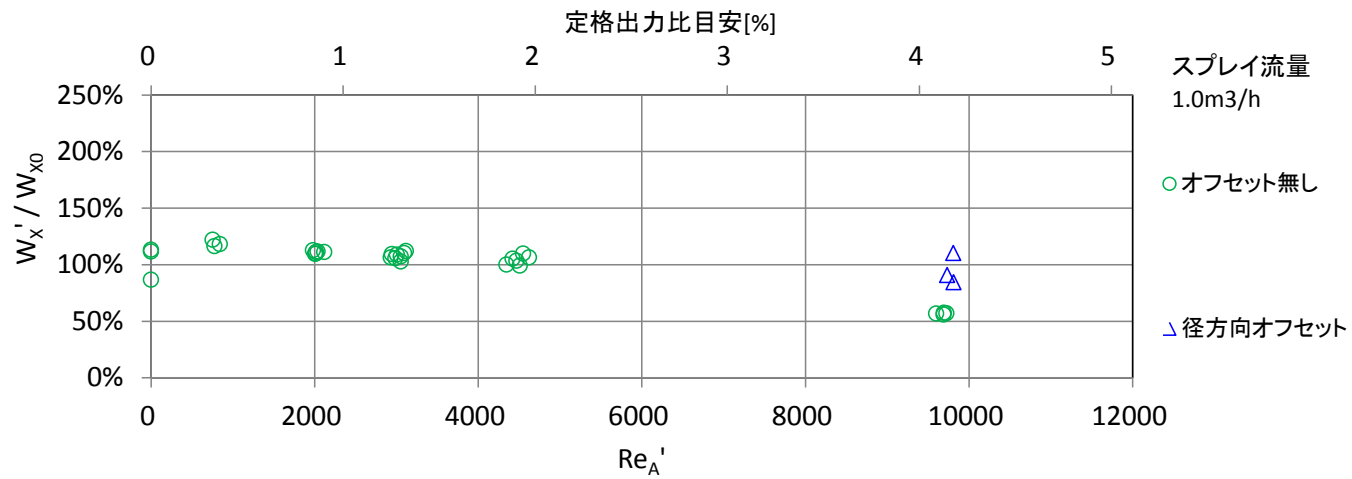
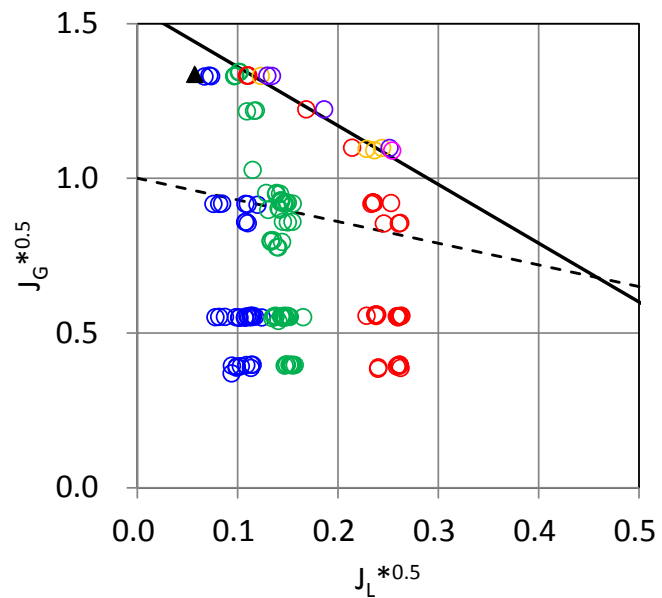
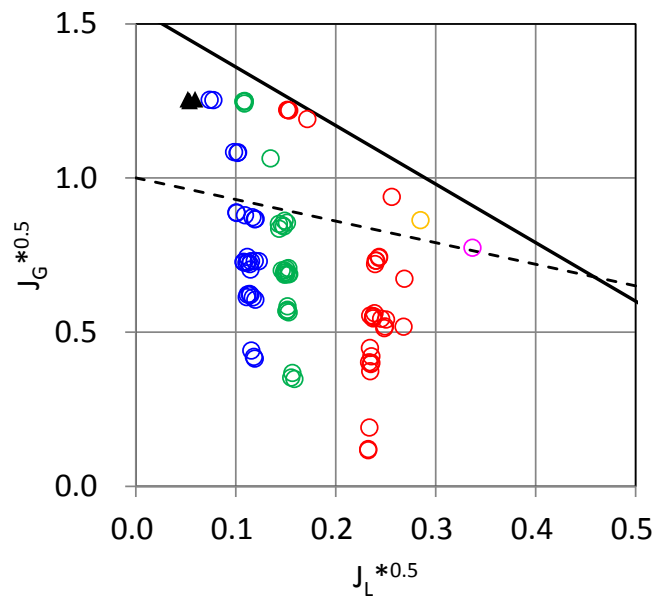


図 3.1-28 スpray高さ とノズル径方向オフセットの影響(蒸気試験)



(a) 空気試験



(b) 蒸気試験

- スpray流量0.5m³/h
- スpray流量1.0m³/h
- スpray流量4.0m³/h
- スpray流量5.0m³/h
- スpray流量6.0m³/h
- スpray流量7.4m³/h
- ▲ 径方向オフセット
- m=0.7, C=1.0
- m=1.9, C=1.55

図 3.1-29 Wallis プロットによる気体量と落水量の整理

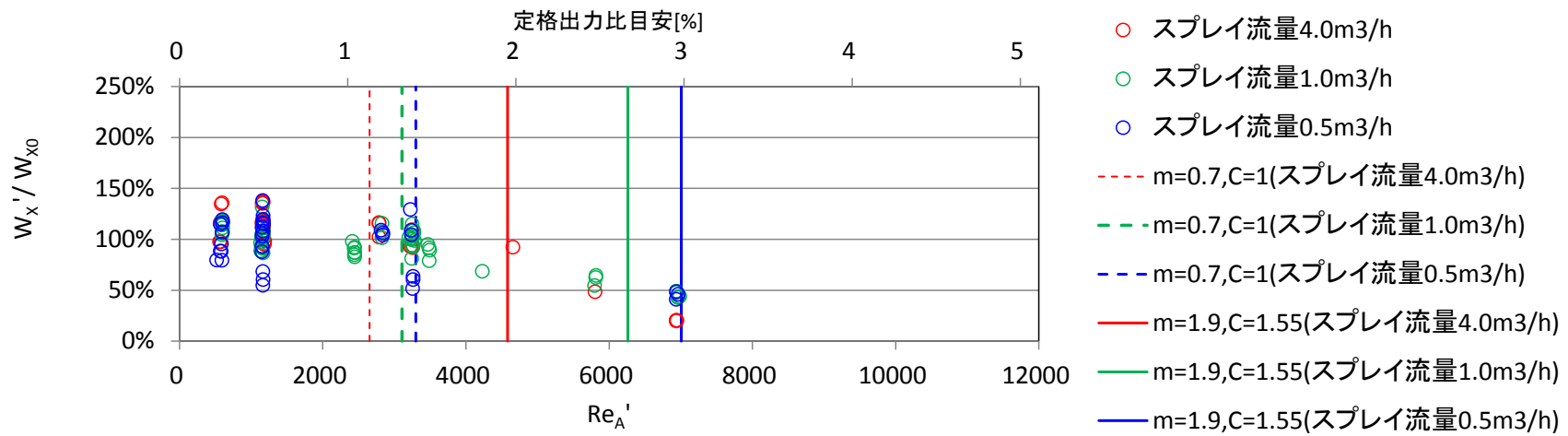


図 3.1-30 Waliis プロットにおける落水量減少と CCFL 線と  $Re_A' - W_A / W_{A0}$  比較(空気試験)

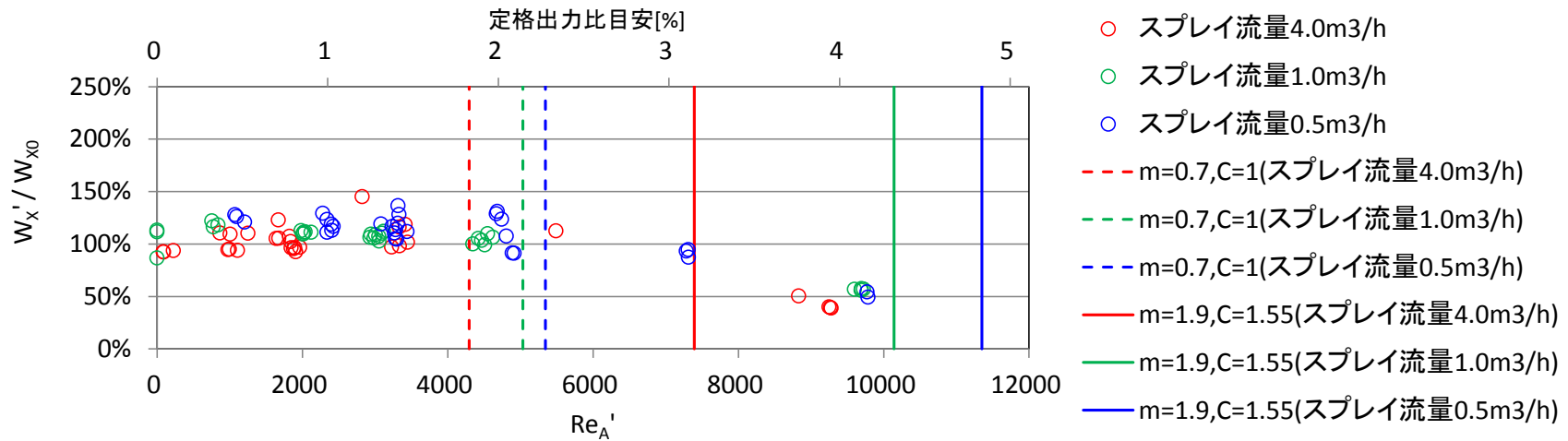
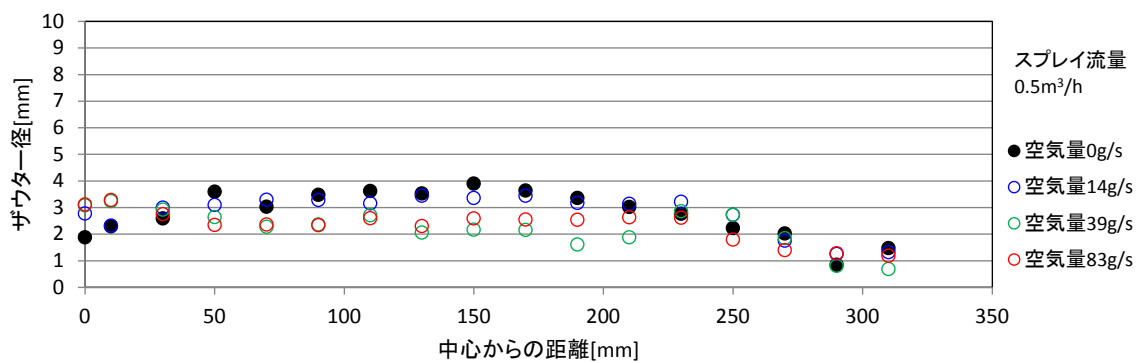
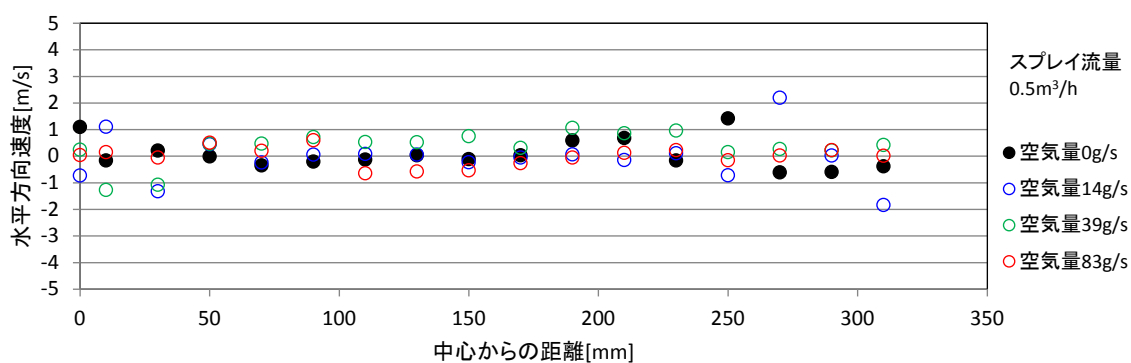


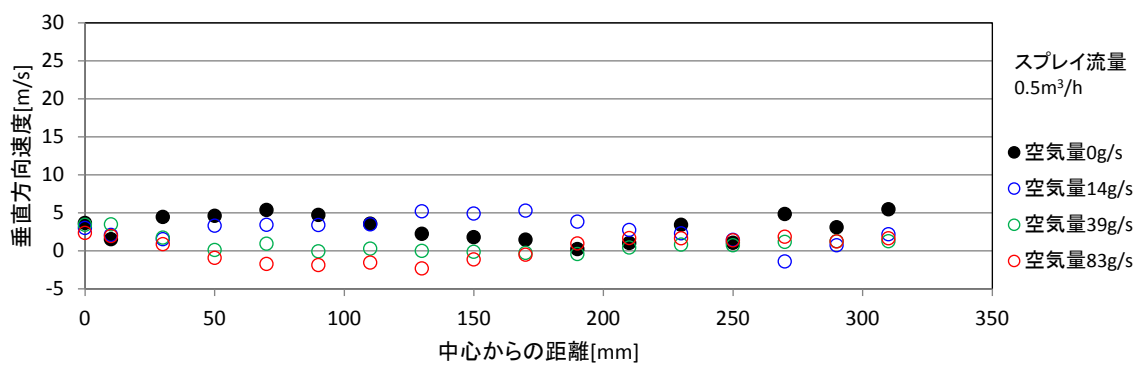
図 3.1-31 Waliis プロットにおける落水量減少と CCFL 線と  $Re_A' - W_A / W_{A0}$  比較(蒸気試験)



(a) ザウター径

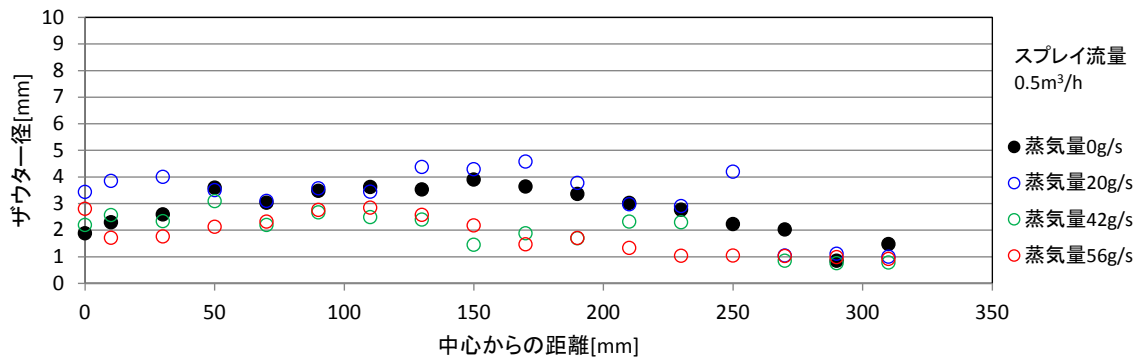


(b) 水平方向速度

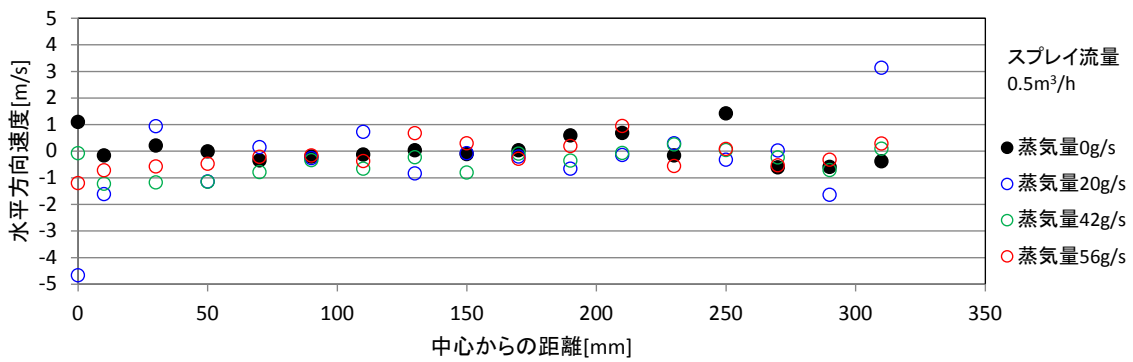


(c) 垂直方向速度

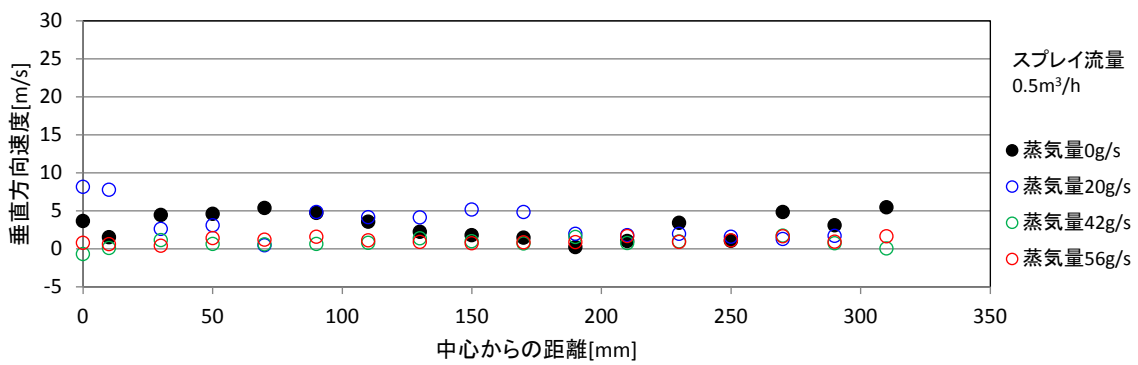
図 3.1-32 空気試験における液滴の計測結果平均値



(a) ザウター径



(b) 水平方向速度



(c) 垂直方向速度

図 3.1-33 蒸気試験における液滴の計測結果平均値

## 参考文献

〈1〉 日本機械学会, 「改定 気液二相流技術ハンドブック」, コロナ社, 2006



## 3.2 スプレイ熱伝達試験

「平成 28 年度原子力施設等防災対策委託費（使用済み燃料貯蔵プール冷却試験）事業」において、ヒータロッドにより燃料棒崩壊熱を模擬した縮小 7×7 模擬燃料集合体体系によるスプレイ冷却挙動、二相水位、ボイド率を測定する試験を実施した。（以下、本成果報告書においては「16 年度試験」とする）

16 年度試験においては、スプレイ冷却に対してスプレイ流量・バンドル出力・初期水位が特に大きな影響、スプレイ液滴径およびスプレイ噴霧様式による差異が見られ、その他のパラメータの影響は見られなかった。一方、実機 SFP において想定される崩壊熱は各パラメータが及ぼす影響有無を確認するには小さいため、17 年度試験においては SFP に貯蔵される燃料集合体の崩壊熱に比べて倍以上高いバンドル出力において実施した。また冷却水初期水位についても高温における測定機器の耐熱性の観点より 2m をベースとして試験を実施した。このため、影響が確認されたパラメータのスプレイ冷却、二相水位、断面平均ボイド率に対する、実機 SFP で想定される崩壊熱範囲における感度についてデータが不足している。また試験条件の冷却材初期水位とバンドル出力が高いため、模擬燃料棒有効長の露出部が少ない状態で装置上限温度に到達する試験データが多く、スプレイ水のクエンチフロント進展減少を把握するためのデータが不十分であった。

この他に、大規模な自然災害やテロリズム等によって SFP において大規模な冷却材喪失が発生した場合、SFP 内で空気自然循環が生じる可能性がある。この自然循環による冷却現象や、自然循環時にスプレイを噴霧した場合のスプレイ冷却効果についてもデータが不十分である。

以上の観点より、実機 SFP において想定されるバンドル出力における各パラメータの感度、クエンチフロント進展速度を把握、空気自然循環時の気体冷却およびスプレイ冷却効果を把握およびデータするための各種スプレイ熱伝達試験を実施した。（以下、本事業において実施したスプレイ熱伝達試験について、成果報告書においては「17 年度試験」とする）

### 3.2.1 試験装置

本試験は「平成 27 年度原子力施設等防災対策委託費（使用済み燃料貯蔵プール冷却試験）事業」において製作し、16 年度試験で使用したスプレイ熱伝達試験装置の一部を変更し実施した。

#### 3.2.1.1 試験装置概要

試験装置の概略図を図 3.2-1、図 3.2-2 に示す。試験装置の詳細な寸法に関しては図面を付録 3.2-1 に示す。試験装置は、試験部・実機 SFP のプール水を模擬するための補助容器・スプレイ供給系・ドレンタンク・整流器から構成される。補助容器は、下部において試験部と配管により接続され、配管に設けられた連通弁により試験部との開閉および通過流量の制御が可能である。スプレイ供給系は、スプレイタンクに貯水された冷却水をスプレイポンプによりスプレイノズルに供給した。スプレイノズルは、試験部上部容器内に設置され、試験条件にあわせて先端形状、高さ、軸方向位置を変更可能である。なお、補助容器およびスプレイタンクは、蒸気加熱により冷却水温度を調整可能である。ドレンタンクは、上部容器下部と配管で接続しており、試験体部（集合体および模擬ラック内）の外に噴霧されたスプレイ、および集合体から溢れた冷却水を貯水する。ドレンタンクと補助容器を接続する配管は 16 年度試験から改造され、

給水ポンプに分岐接続している。本分岐配管に設置したバルブを操作することにより、ドレンタンクと補助容器内の水を試験装置内に供給可能である。この試験装置、ドレンタンク、冷却水ポンプの循環ラインを用いることで、冷却水の循環が可能である。

本試験装置では、後述するように燃料の崩壊熱をヒータロッドの発熱により模擬した。本ヒータロッドは直流電流抵抗により発熱し、動力となる電力は試験部下部から電力線によって接続された3台の整流器より供給される。

### 3.2.1.2 試験部および模擬集合体

試験部形状・主要寸法・材質を表 3.2-1、試験部および温度・差圧計測位置の概略図を図 3.2-3 に示す。試験部は、模擬ラックと模擬燃料集合体から構成される。模擬燃料集合体は、実機9×9燃料の内7×7の燃料領域を取出した縮小バンドルであり、模擬燃料棒を上部タイプレート、下部プレート、等間隔に配置されたスペーサによって固定し、径方向外周にチャンネルボックスを取り付けた構造である。模擬燃料棒にはヒータロッドを用い、電気抵抗の発生熱によって燃料の崩壊熱を模擬する。ヒータロッドは、発熱有効長上端を起点として約800mm間隔(図 3.2-3 に示すTC1, 3, 5, 7, 9位置)で熱電対を表面に設置した熱電対付A型、発熱有効長上端から下方412mm地点を起点として約800mm間隔(図 3.2-3に示すTC2, 4, 6, 8, 10位置)で熱電対を表面に設置した熱電対付B型、熱電対を設置していないC型の3種類がある。各ヒータロッドにおいて、熱電対の径方向向きは全て同一である。なお、各種類のヒータロッドは、熱電対設置場所もしくは熱電対の有無を除き、同一の性能である。また、軸方向出力分布は一樣である。

試験部の断面図を図 3.2-4に示す。各ヒータロッドは、高出力ロッド、平均出力ロッド、低出力ロッドの3つの領域に分けて配置した。各領域は、それぞれ別の整流器に接続されており、独立して出力を制御可能である。なお、2本のヒータロッドは非加熱ロッドとして、整流器に接続していない。

### 3.2.1.3 計測機器

本試験装置は、図 3.2-1、図 3.2-2に記載された運転状態を把握するための計器を備える。これらの計器を用いて、装置運転状態の監視、調整、記録を行った。試験部の温度は、ヒータロッド表面以外に、チャンネルボックス内面、チャンネルボックス外面、模擬ラック容器内面において熱電対を設置し測定した。各配置は図 3.2-3および図 3.2-4に示す箇所である。なお、ドレンタンク内に落水するスプレイ水温度を把握するため、16年度試験から上部容器底面と外気温測定用の熱電対が追加された。外気測定用の熱電対位置は付録3.2-3に示す。

運転状態監視用計器、集合体部熱電対の他に、集合体内のボイド率を計測するための差圧計(以下、区間差圧計とする)、静電容量水位計(以下ECVLとする)を設置した。なお、16年度試験において用いたサブチャンネルボイドセンサは使用していない。このため、サブチャンネルボイドセンサを設置していた部位には、サブチャンネルボイドセンサの代わりにステンレス構造材を用いて代替した。耐熱性が低いポリカーボネート製サブチャンネルボイドセンサをステンレス製部材に交換したことにより、集合体部全長にわたって冷却材から露出させることが可能となった。また、スプレイの液滴径、速度、頻度を測定するため、液滴計(日本カノマックス製パーティクルマスタ)を用いた。

各測定器の計測位置を図 3.2-5 に示す。区間差圧計によるボイド率計測は、発熱有効長上端

から上部容器までの1区間、および発熱有効長範囲内をほぼ等分割にした5区間においてデータを取得するため、各区間の上下端に差圧導管を配置した。各差圧導管は、区間ごとにそれぞれの差圧計へ接続し、隣接する区間においては差圧導管を共有した。ECVLは、発熱有効長範囲内30点において、ほぼ等間隔に1対の電極を配置した。それぞれの電極は、上方より10個ずつ3系統に分かれ、それぞれ切換器を介して3つのLCRメータに接続した。計測の際には、切換器により計測する電極を切換え、各地点における静電容量を計測した。液滴計は、上部タイププレート下端より上方約40mmの位置に設置された観測窓を介して計測を行った。各測定における計測法、ボイド率・気相速度・液滴径・液滴速度の算出法については、付録3.2-2に示す。各測定機器の測定条件について表3.2-5に示す。

#### 3.2.1.4 スプレイノズル

本試験では、16年度試験において使用した、一様分布液滴径3mmのスプレイノズルを使用した。高さ3mおよび5mにおいて本スプレイノズルの液滴径を計測した結果を表3.2-2、表3.2-3、図3.2-6に示す。

ヒータ出力が無い状態においてスプレイを噴霧し、ラックおよび集合体への落水量を確認した。本確認においては、補助容器への連通弁を閉め、差圧計測定値によるラック部の水位変化よりスプレイ水の落水量を算出した。水位の変化を図3.2-7、水位変化を基に算出した落水量を表3.2-4に示す。ラック・集合体部にはスプレイの50～70%程度が落水している。

#### 3.2.1.5 寸法，高さ位置

以上に示した試験装置、計測位置の断面幾何形状、高さ方向位置を付録3.2-3に示す。

### 3.2.2 試験方法および試験条件

本試験では、以下に示す方法および条件により試験を実施した。

#### 3.2.2.1 試験方法

##### (1) 初期状態の設定

16年度試験では図 3.2-8 に示すように、試験体内の冷却材を循環させる装置構成となっていなかったため、集合体満水位置まで試験装置および補助容器内に水を溜め、停滞水状態においてヒートアップして試験開始温度まで昇温、昇温後に試験開始水位まで冷却材を排水して試験を実施した。16年度試験における初期状態設定の運転計器測定データを図 3.2-9 に示す。停滞水中の加熱を行っているため、二相水位上昇による水位低下および冷却水蒸発によって水位が低下する。加熱を継続すると冷却水蒸発によって、発熱有効長が露出して模擬燃料棒温度が上昇するため、集合体下端部の温度が十分に温度上昇する前にヒートアップを停止し、水位調整を行っていた。このため、試験実施前にあたる初期条件設定時の最終的な温度は、下端に位置する TC9 部の温度が低く、その他の位置の温度も試験ケースにより若干の差異が生じていた。

17年度試験においては、図 3.2-10 に示すように配管改造によって冷却水循環が可能となったため、冷却水の強制対流循環状態でのヒートアップにより初期状態設定を行った。初期条件設定の手順を以下に示す。

- ① 連通弁を閉じ、試験部ードレンタンクー冷却水ポンプの循環ラインとする。
- ② 流量  $2.5\text{m}^3/\text{h}$  として、冷却水ポンプにより冷却水を循環させる。
- ③ 定格出力比 2% (バンドル出力  $58\text{kW}$ ) として、集合体ヒータにより加熱する。
- ④ ヒータロッド表面温度が 5 分間  $\pm 1^\circ\text{C}$  の変化となった状態で出力を停止する。
- ⑤ 出力停止後、冷却水ポンプの出口バルブを閉じる。
- ⑥ 連通弁を開け、補助容器より排水して冷却水水位を試験条件に合わせる。なお、空気冷却試験時は全冷却水を排水する。

17年度試験における初期状態設定の運転計器測定データを図 3.2-11 に示す。冷却水を循環させているため装置下端を含めて温度は上昇しており、出力停止前の状態で温度変化はほぼ無く、熱平衡状態に近い状態となっている。装置全体の温度が上昇しているために排水後も大きな温度変化はなく、試験実施前にあたる初期条件設定時の最終的な状態とでは、温度成層が形成されている。熱平衡状態近傍まで装置を昇温しているため、各試験における温度の差異は小さく、試験結果の比較に適した状態となっていると考えられる。

##### (2) 試験・測定手順

初期条件設定後は、以下の手順により試験を実施した。なお、試験装置内に冷却水がある冷却水加熱試験と、空気を流入させた試験、LOCA を想定した試験により試験手順が異なる。

### 【冷却水加熱試験】

- ① (1)に示す初期温度条件設定を行う。
- ② データロガーの収録を開始する。
- ③ ECVLの収録を開始する。
- ④ トリガー信号変化によってECVL作動を確認後、整流器出力を入れる。
- ⑤ 装置内のヒータ表面最高温度が試験温度に到達時後スプレイ開始する。
- ⑥ スプレイ開始後に液滴計データ収録開始する。
- ⑦ 全ヒータロッドの表面温度が100℃以下となった場合は試験終了として、データ収録を停止する。ヒータロッドの表面最高温度が350℃に達した場合、試験終了として整流器出力を停止、全ヒータロッドの表面温度が100℃以下となるまで収録を継続する。

### 【空気冷却試験】

- ① 流入空気の温度と流量を安定させる。
- ② 条件安定後、試験装置への気体入口バルブを閉じる。
- ③ (1)に示す初期温度条件設定を行う。
- ④ 連通弁を閉じる。
- ⑤ 気体入口バルブを開ける。
- ⑥ データロガーの収録を開始する。
- ⑦ データロガーの収録後、整流器出力を入れる。
- ⑧ 装置内のヒータ表面最高温度が試験温度に到達時後スプレイ開始する。
- ⑨ スプレイ開始後に液滴計データ収録開始する。
- ⑩ 全ヒータロッドの表面温度が100℃以下となった場合は試験終了として、データ収録を停止する。ヒータロッドの表面最高温度が350℃に達した場合、試験終了として整流器出力を停止、全ヒータロッドの表面温度が100℃以下となるまで収録を継続する。

### 【LOCA 試験】

- ① 流入空気の温度と流量を安定させる。
- ② 条件安定後、試験装置への気体入口バルブを閉じる。
- ③ (1)に示す初期温度条件設定を行う。
- ④ 補助容器と接続した連通弁を閉じる。
- ⑤ 補助容器の冷却水を全量排水。
- ⑥ データロガーの収録を開始する。
- ⑦ データロガーの収録後、整流器出力を入れる。
- ⑧ 収録開始後、試験条件開度で連通弁を開け、排水を開始する。
- ⑨ 排水開始後、気体入口バルブを開け空気を流入させる。
- ⑩ 装置内のヒータ表面最高温度が試験温度に到達時後スプレイ開始する。
- ⑪ スプレイ開始後に液滴計データ収録開始する。
- ⑫ 全ヒータロッドの表面温度が100℃以下となった場合は試験終了として、データ収録を停止する。ヒータロッドの表面最高温度が350℃に達した場合、試験終了として整流器出力を停止、全ヒータロッドの表面温度が100℃以下となるまで収録を継続する。

### 3.2.2.2 試験条件

本試験においては、表 3.2-6 に示す試験条件をベース条件とした。各試験ケースにおいては、試験結果に影響を与えると考えられるパラメータに着目し、ベースケースから変更した。着目した試験パラメータおよびベース条件からの変更値について、冷却水加熱試験を表 3.2-7、空気冷却および LOCA 試験を表 3.2-8 に示す。試験条件マトリックスを付録 3.2-4 に示す。各試験ケースでは、対象となるベース条件と各計測値を比較することで、着目するパラメータが熱伝達特性やスプレイ冷却、空気冷却等に与える影響を確認した。なお、各試験の試験番号は以下の命名則により定めた。

・ 17CaseXX-YY-ZZ

YY：試験条件変更時の番号

ZZ：試験繰り返し数

### 3.2.3 試験結果

測定によって得られた各種運転状態および温度の時間経過について、付録 3.2-5 に示す。

#### 3.2.3.1 冷却水加熱試験

##### (1) 出力の影響

出力に対する各断面の PCT 比較としてベースケース 17Case01 における代表的な結果を図 3.2-12 に示す。出力影響は PCT の上昇に大きく影響し、出力が高まるほど温度上昇が早くなる。スプレイ後の PCT 変化を図 3.2-13 に示す。発熱有効長上端 (TAF) 近傍においては出力による差異はあまり見られないが、TC3 より下部では出力が上昇するほど冷却に時間を要しており、クエンチフロント進展に差異が見られた。

##### (2) スプレイ流量の影響

スプレイ流量に対する各断面の PCT 比較として、ベースケース 17Case01 における代表的な結果を図 3.2-14 に示す。TAF 近傍においてはスプレイ流量による PCT 温度変化に差異は見られないが、TC3 より下においてはスプレイ流量の増加によって、PCT の温度減少は早まっており、クエンチフロント進展に差異が見られた。

##### (3) スプレイ水温の影響

16 年度試験において、スプレイ水温度による若干の差異が見られた。16 年度試験においては冷却水初期温度違いによる再現性の観点より、細かな差異について比較が困難であった。このため同様の試験を実施し、水スプレイ水温度の影響について再確認した。

スプレイ水温に対する各断面の PCT 比較を図 3.2-15 に示す。出力が高く試験条件温度 300℃に達したため試験を中断したが、スプレイ後の各断面 PCT に影響は見られず、スプレイ水温度による明確な影響は見られなかった。なお、スプレイ開始前から TC6 の温度に差異が見られるが、これは出力や初期温度などの若干の違いにより二相水位が異なり、スプレイ水温 60℃の試験時のみ TC6 断面が冠水していたためと考えられる。

#### (4) 冷却水初期水温の影響

初期水温に対する各断面の PCT 比較として、ベースケース 17Case01 における代表的な結果を図 3.2-16 に示す。クエンチ時間に差異が見られるが、極端な変化は見られない。

#### (5) 初期水位の影響

初期水位に対する各断面の PCT 比較として、ベースケース 17Case01 における代表的な結果を図 3.2-17 に示す。各試験ケースにおいては、スプレイ開始時の露出部が異なるため、本グラフのみでの単純比較は難しいが、クエンチ時間に差異が生じており、水位が低下するほどスプレイによる冷却時間が短くなる可能性がある。

#### (6) 径方向出力分布の影響

径方向出力を変化させた試験においては、ピーキングが異なる高出力、平均出力、低出力ロッドの本数を変更している。このため、比較する際のバンドル出力と棒出力の比率が変化する。分布 B の条件はベースケースと各出力ロッドの本数変更が少ないため、この比率についてベースケースとの差が小さい。一方、分布 C については大きく異なる。このため、バンドル出力と棒出力それぞれの影響を把握するため、分布 C については両方の基準で設定した試験条件で試験を実施した。

径方向出力分布を変更した場合の PCT 変化を図 3.2-18、スプレイ後の変化を図 3.2-19 に示す。300℃到達までの時間については、出力を中央に集中させた分布 C がベースケースより早い傾向にあり、高出力ロッド分布 B を有しない分布 B が最も遅い結果となった。これは、出力が高い領域を集めることで最高温度が上がりやすい傾向となることを示している。スプレイ後の冷却については、それぞれで異なる挙動を示しており、棒出力とバンドル出力双方が影響していると考えられる。

### 3.2.3.2 空気冷却試験

#### (1) 空気流量の影響

空気流量に対する各断面の PCT 比較としてベースケース 17Case08 における代表的な結果を図 3.2-20 に示す。300℃到達時間に大きな差異は見られないが、温度が上昇する位置が空気流量により異なる。空気流量が大きくなることで空気を介した集合体下部から上部への熱量輸送が行われ、集合体下部では温度が低下と上部では上昇したと考えられる。

スプレイ後の結果について、図 3.2-21 に示す。最下端の TC10 はスプレイ開始時に 100℃ に到達していないが、スプレイ噴霧後に温度が 100℃ に上昇している。これは、スプレイ冷却によって蒸気が発生し体積が急膨張するため、集合体上方のみに流動するだけでなく、集合体下方に流れた後にラック部へ流入する流れが生じていると考えられる。この結果蒸気によって非加熱部の温度も上昇していると考えられる。この温度上昇は、高空気量の条件では遅くなっており、吹上げ空気量増加により蒸気の下降が阻害されていると考えられる。スプレイ噴霧後の冷却挙動については、高空気流量では温度低下時に乱れが見られる。空気吹上げ量の増加により、クエンチフロント進展を阻害している可能性がある。

## (2) 空気温度の影響

空気温度に対する各断面の PCT 比較として、代表的な結果を図 3.2-22, 図 3.2-23 に示す。初期温度が異なるため 300℃到達時間に差異が見られる。有効長下端部付近については図 3.2-24 に示すように、TC9 では 5℃程度、TC10 においては 30℃程度の差異がスプレイ開始前に生じており、TC8 以上では差異が見られない。また、スプレイ開始後の冷却挙動に大きな差異は見られない。

### 3.2.3.3 LOCA 試験

LOCA 試験の結果について、代表例を図 3.2-25 に示す。冷却水排水後、空気が流入する状態が再現されている。

排水中も温度上昇するため直接比較は難しいが、参考として同じ試験条件の空気試験について LOCA 試験の空気流入開始時間と空気試験の出力上昇開始時間を合わせたグラフを同図中に示す。LOCA 試験の方が空気試験に比べて温度上昇が早く、空気試験との差異が生じている。

### 3.2.3.4 液滴の計測結果

液滴計による計測結果を以下に示す。なお、液滴速度は算出結果が想定される数値よりも 10～100 倍以上大きく、信頼性が不十分であった。各計測液滴の対応が取れていないなどのポスト処理上の問題が考えられるため、本報告書においては内容を記載していない。

#### (1) 出力変化時の影響(17Case01-03-3, 17Case01-07-1)

ベースケースにおいて出力を変化させた場合(17Case)の液滴径分布の変化を図 3.2-26, ザウター径変化を図 3.2-27 に示す。出力上昇により 1mm 未満の液滴が増加し、ザウター径が減少しておりスプレイ流量分配試験における気体流量増加時と同様の傾向を示している。

#### (2) 初期水温変化時の影響(17Case01-03-3, 17Case03-02-1, 17Case04-01-1)

初期水温を変化させた場合の液滴径分布の変化を図 3.2-28, ザウター径変化を図 3.2-29 に示す。冷却水加熱試験と同様に出力上昇により 1mm 未満の液滴が増加し、ザウター径が減少している。水温による大きな変化は見られない。

#### (3) 初期水位変化時の影響(17Case01-03-3, 17Case05-01-1, 17Case06-02-1)

初期水温を変化させた場合の液滴径分布の変化を図 3.2-30, ザウター径変化を図 3.2-31 に示す。水温による大きな変化は見られない。

#### (4) 出力変化時の影響(空気冷却試験) (17Case08-05-1, 17Case08-07-1)

空気冷却試験において、出力を変化させた場合の液滴径分布の変化を図 3.2-32, ザウター径変化を図 3.2-33 に示す。冷却水加熱試験と同様に出力上昇により 1mm 未満の液滴が増加し、ザウター径が減少している。



(5) 空気流量変化時の影響 (17Case08-01-1, 17Case08-02-1, 17Case08-03-1, 17Case08-05-1)

空気流量を変化させた場合の液滴径分布の変化を図 3.2-34, ザウター径変化を図 3.2-35 に示す。空気を流入させない場合においても出力上昇により 1mm 未満の液滴が増加し, ザウター径が減少している。

ここで, 本試験条件であるバンドル出力 2.9kW の出力全てがスプレイ水の蒸発に寄与したと仮定すると, 蒸気発生量は 4.1 kg/h となる。このようにスプレイ噴霧後は, 空気試験においてパラメータとする流量と同程度の蒸気が, スプレイ水蒸発によって発生していると考えられる。この結果, 空気流量 0kg/h の条件においても, スプレイ水蒸発によって発生した蒸気により空気流量がある状態と同様の液滴径減少が見られたと考えられる。なお, 出力 0kW と空気流量 0kg/h におけるデータであるが, スプレイ集合体とラック部への落水量は 39g/s(140kg/h)であり, 蒸気発生に十分なスプレイ水が集合体内に供給されていると考えられる。

(6) 空気温度変化時の影響 (17Case08-05-1, 17Case09-02-1)

流入空気温度を変化させた場合の液滴径分布の変化を図 3.2-36, ザウター径変化を図 3.2-37 に示す。空気温度の変化による大きな差異は見られない。

### 3.2.4 スプレイ熱伝達試験のまとめ

実機 SFP において想定されるバンドル出力における各パラメータの感度, クエンチフロント進展速度を把握, 空気自然循環時の気体冷却およびスプレイ冷却効果を把握およびデータするための各種スプレイ熱伝達試験を実施した。試験の結果以下の傾向が確認された。

- ・ 冷却水加熱試験においては, 出力とスプレイ流量がスプレイ冷却およびクエンチフロント進展に大きく影響し, 初期水位と初期水温によりクエンチフロント進展に多少の差異が見られた。
- ・ 空気加熱試験においては, 空気流量増加によりスプレイ冷却の乱れが見られ, 空気吹上げがクエンチフロント進展を阻害している可能性が確認された。流入空気温度によるスプレイ冷却の差異は確認されなかった。
- ・ 径方向出力分布変更により, 加熱時間およびスプレイ後の冷却に差異が見られ, バンドル出力と棒出力双方が影響していることが確認された。
- ・ 液滴径の計測結果より, 出力上昇後にスプレイを噴霧した場合, 1mm 未満の液滴が多数確認され, スプレイ流量分配試験と同様の傾向が確認された。

表 3.2-1 スプレー熱伝達試験装置の試験部形状・主要寸法・材質

垂直方向寸法	試験部（集合体入口から上部容器上端まで）	約 9.26 m
	集合体部全長 （集合体部入口から上部タイプレート下端まで）	約 4.53 m (4529)
	発熱部 発熱有効長 集合体部入口から発熱有効長下端までの距離	3.708 m 0.416 m
	発熱有効長下端からの距離 模擬ラック上端まで チャンネルボックス上端まで	約 4.15m 約 4.17m
断面形状	上部容器 形状 内径 材質	円形 φ900mm SUS304
	模擬ラック 模擬ラック形状 内寸 材質	矩形 128mm（角部 R12mm） SUS304
	チャンネルボックス 形状 内寸 材質 母材 静電容量測定用絶縁材	矩形 102mm SUS304 マセライト SP
	スペーサ 形状 材質 母材 模擬ディンプル絶縁材	丸セル型 SUS304 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
	上部タイプレート 形状 材質	ドリルホール型 マコール®
	ヒータロッド 外径 材質 ヒータシース 芯線 絶縁材	φ 11 mm NCF600TP Ni MgO
	集合体部 形状 ロッドピッチ 断面積 水力等価直径	7×7 ロッドバンドル 14 mm 約 5747 mm <sup>2</sup> 約 10.9 mm

表 3.2-2 加熱がない状態におけるスプレイ高さによる液滴径変化(0.2m<sup>3</sup>/h)

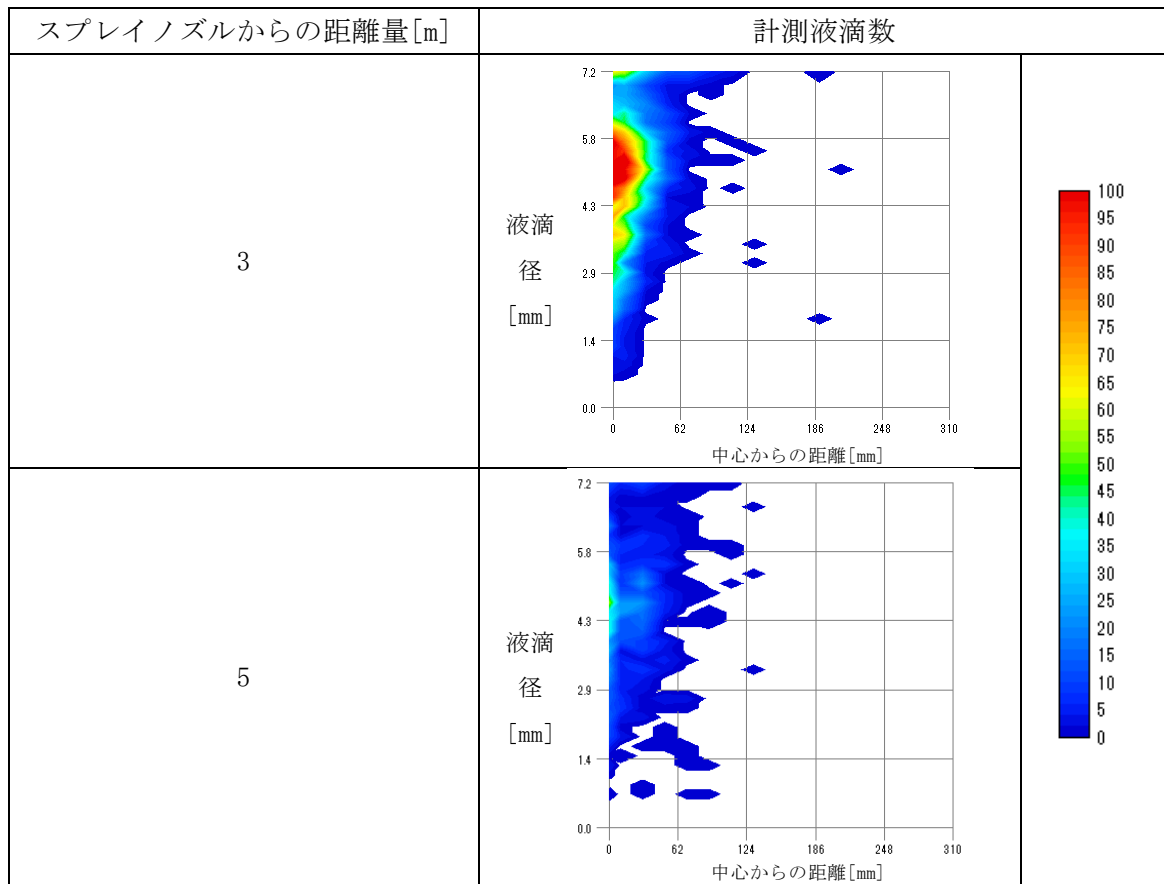


表 3.2-3 加熱がない状態におけるスプレイ高さによる液滴径変化(1.0m<sup>3</sup>/h)

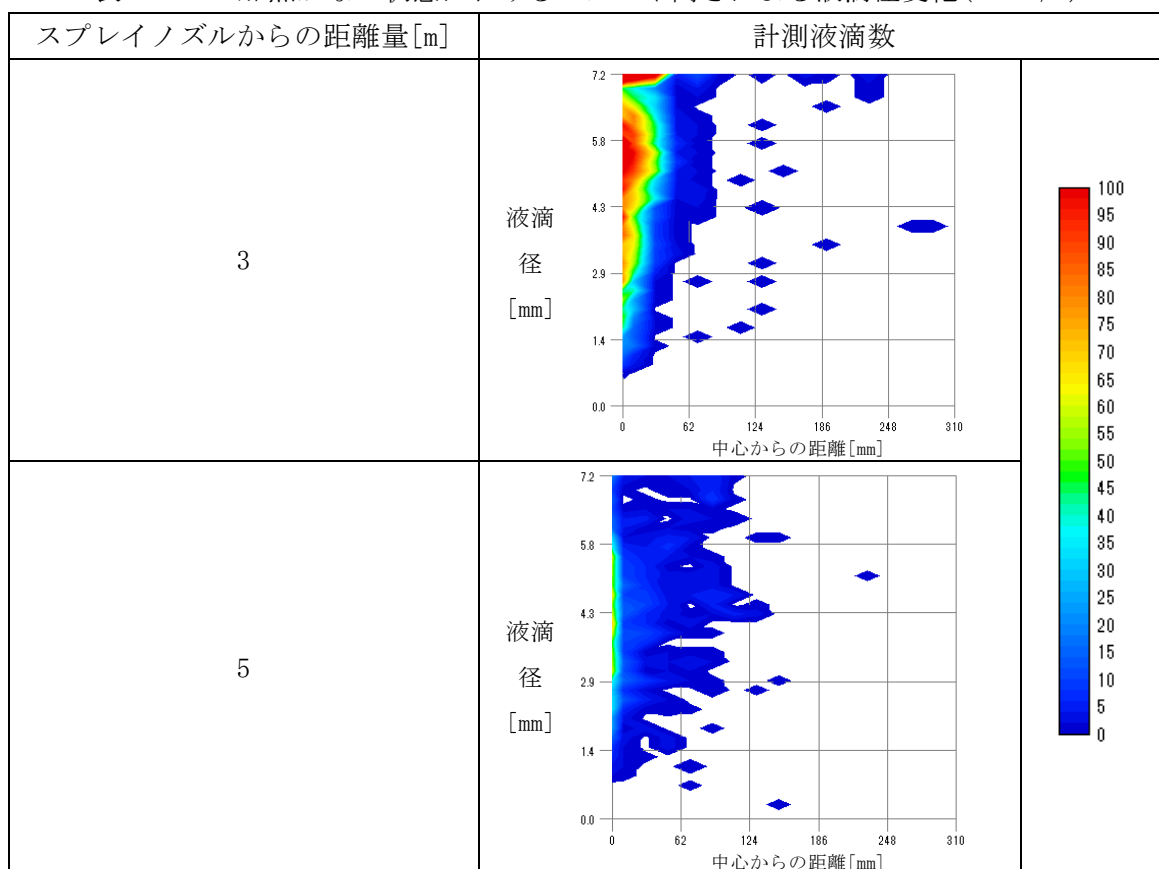


表 3.2-4 ラック・集合体へのスプレイ落水量

スプレイ流量		水位上昇速度 [m/s]	ラック・集合体への落水量		スプレイ全量に対する ラック・集合体への落水量割合 [%]
[m <sup>3</sup> /h]	g/s		[m <sup>3</sup> /s]	g/s	
0.1	28	0.0017	1.55×10 <sup>-5</sup>	15	55.8%
0.2	55	0.0043	3.92×10 <sup>-5</sup>	39	70.6%
1	277	0.0162	1.48×10 <sup>-4</sup>	147	53.2%

表 3.2-5 計測条件

サンプリング周波数	1Hz
測定期間	<p>【試験準備】 試験条件設定のための加熱 ～初期水位設定完了</p> <p>【試験時】 整流器電源投入前 (ECVL 設定開始前) ～集合体内温度 100℃以下</p>
計測項目	測定レンジ
<p>【整流器出力】 (通常)</p> <p>低出力ヒータロッド(2本分)合計 平均出力ヒータロッド(44本分)合計 高出力ヒータロッド</p>	<p>0～9 kW 0～150 kW 0～9 kW</p>
(17Case11)	
平均出力ヒータロッド(47本分)合計	0～150 kW
(17Case12)	
低出力ヒータロッド(38本分)合計 平均出力ヒータロッド(8本分)合計 高出力ヒータロッド	<p>0～150 kW 0～9 kW 0～9 kW</p>
<p>【スプレイ流量】 スプレイ流量(小)</p>	0～1.2m <sup>3</sup> /h
<p>【空気流量】 流量(小) 流量(大)</p>	<p>0～100 NL/min 29.1～388 kg/h</p>
<p>【静水圧水位 (差圧計測)】 試験体水位 補助容器水位</p>	<p>発熱有効長下端より 425mm 下側の地点基準 0～100%(17.46kPa～65.21 kPa)</p> <p>発熱有効長下端より 782mm 下側の地点基準 0～100%(14.12kPa～83.06 kPa)</p>
<p>【区間差圧】 差圧計 1～6</p>	-25～25 kPa (計器のレンジ -20～20 kPa)

表 3.2-6 ベース条件(17Case01, 08)の試験条件

・【】内は項目をパラメータとする試験ケース	
出力 軸方向出力分布 径方向ピーキング バンドル出力 (冷却水加熱試験) 【17Case 01】  (空気冷却試験) 【17Case 08】	一様 低出力 0.7, 平均出力 1.0, 高出力 1.3  2.9kW, 14.6 kW, 29.2kW (定格出力比* <sup>1</sup> 0.1%, 0.5%, 1.0%)  1.5kW, 2.9 kW, 14.6kW, 29.2kW (定格出力比* <sup>1</sup> 0.05%, 0.1%, 0.5%, 1.0%)
径方向出力分布 【17Case 11~12】	
試験部冷却水(冷却水加熱試験 17Case01) 平均初期水温 【17Case 03~04】 初期水位 【Case 05~06】	95℃ 1 m
流入空気条件(空気冷却試験 17Case10) 試験体初期温度 【17Case 09】 空気流量 【17Case 08】 空気温度 【17Case 08】	30℃ 0kg/h, 3kg/h, 6kg/h, 30kg/h 30℃
補助容器冷却水 (冷却水加熱試験 17Case01) 平均初期水温 【17Case 03~04】 初期水位 【17Case 05~06】 連通弁開度* <sup>2</sup> 【17Case 10】 排水量 【17Case 10】	試験部冷却水と同様 試験部冷却水と同様 100% (全開) 無し
スプレイ 噴霧様式 スプレイ向き ノズル高さ 径方向位置 水温 【17Case 02】 スプレイ吐出圧 スプレイ流量	一様噴霧 垂直下向き 3 m 上部容器中心 30℃ 上部容器上端高さの流量調整弁前において 1.0 MPa 0.1 m <sup>3</sup> /h, 0.2 m <sup>3</sup> /h, 1.0m <sup>3</sup> /h
外気温	10~30℃

\*1: ABWR 定格運転時における燃料棒平均出力に対する、ヒータロッド平均出力の割合

\*2: LOCA 試験ケースにおいて、排水量調整に使用

表 3.2-7 冷却水加熱試験の各試験ケースにおいて着目したパラメータおよび変更値

ケース No.	試験数	着目点	着目パラメータ	
			該当ケースにおける変更後の数値	ベースケースの数値
17Case00	4	16年度 リファレンス (出力)	58.4kW (2%)	2.9kW, 14.6kW, 29.2kW (0.1%), (0.5%), (1%)
17Case01	14	ベース ケース	—	—
17Case02	2	スプレイ水温	60℃	30℃
17Case03	9	初期温度	30℃	95℃
17Case04	2		60℃	
17Case05	6	初期水位	発熱有効長下端(BAF) 以下	1m
17Case06	14		2m	
17Case11	2	径方向 出力分布		
17Case12	3			

表 3.2-8 空気試験と LOCA 試験の各試験ケースにおいて着目したパラメータおよび変更値

ケース No.	試験数	着目点	パラメータ数値
17Case08	10	常温空気冷却 (ベースケース)	流入空気温度 30°C
17Case09	5	高温空気冷却	流入空気温度 55°C
17Case10	4	LOCA	LOCA 後の空気流量 0~6kg/h
17Case11	2	径方向 出力分布	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 非加熱</li> <li>● ピーキング0.7</li> <li>○ ピーキング1.0</li> <li>● ピーキング1.3</li> <li>○ 熱伝对付ロード</li> </ul>
17Case12	3		



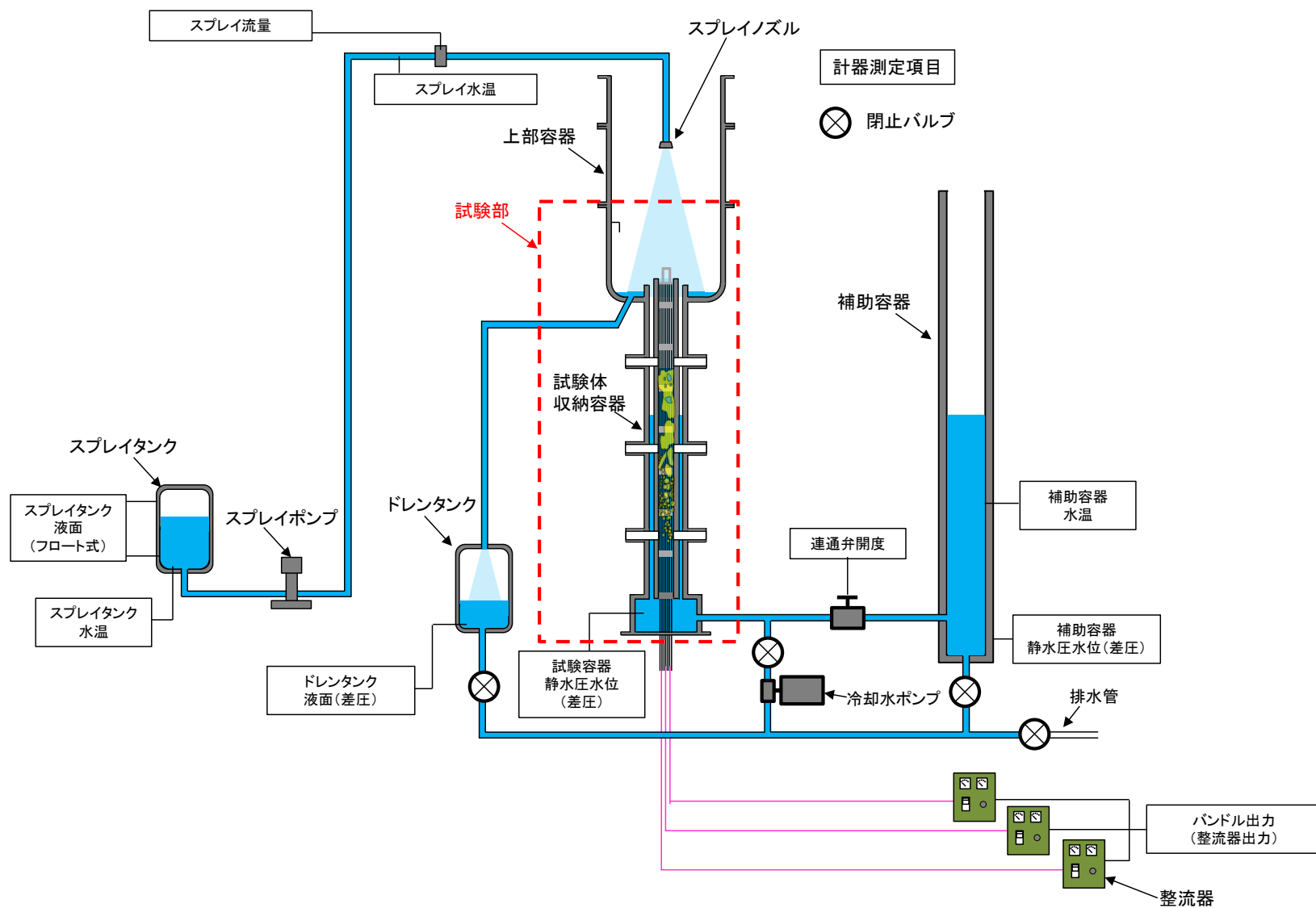


図 3.2-1 試験装置の概略図(冷却水加熱試験)

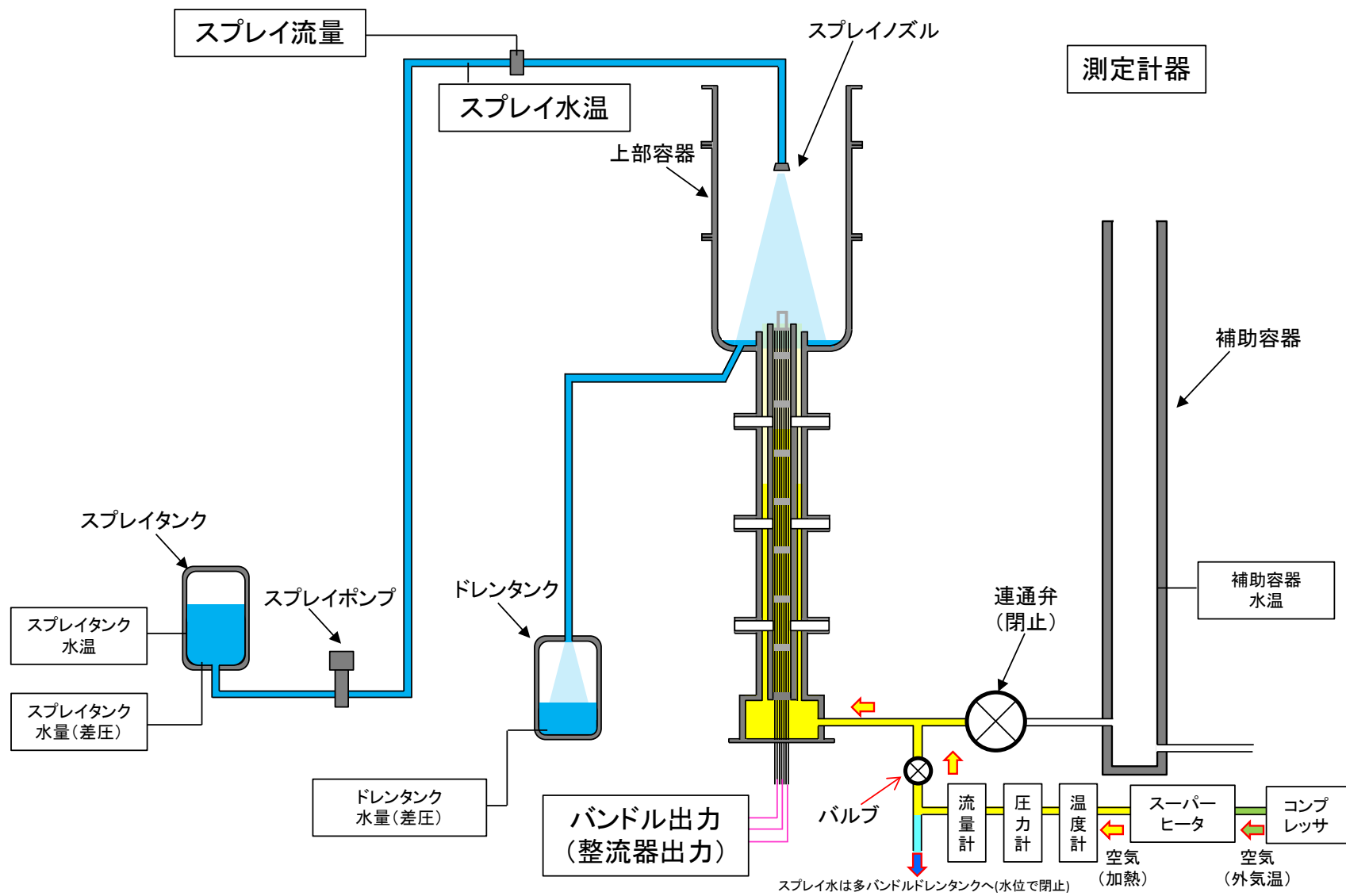


図 3.2-2 試験装置の概略図(空気冷却, LOCA 試験)

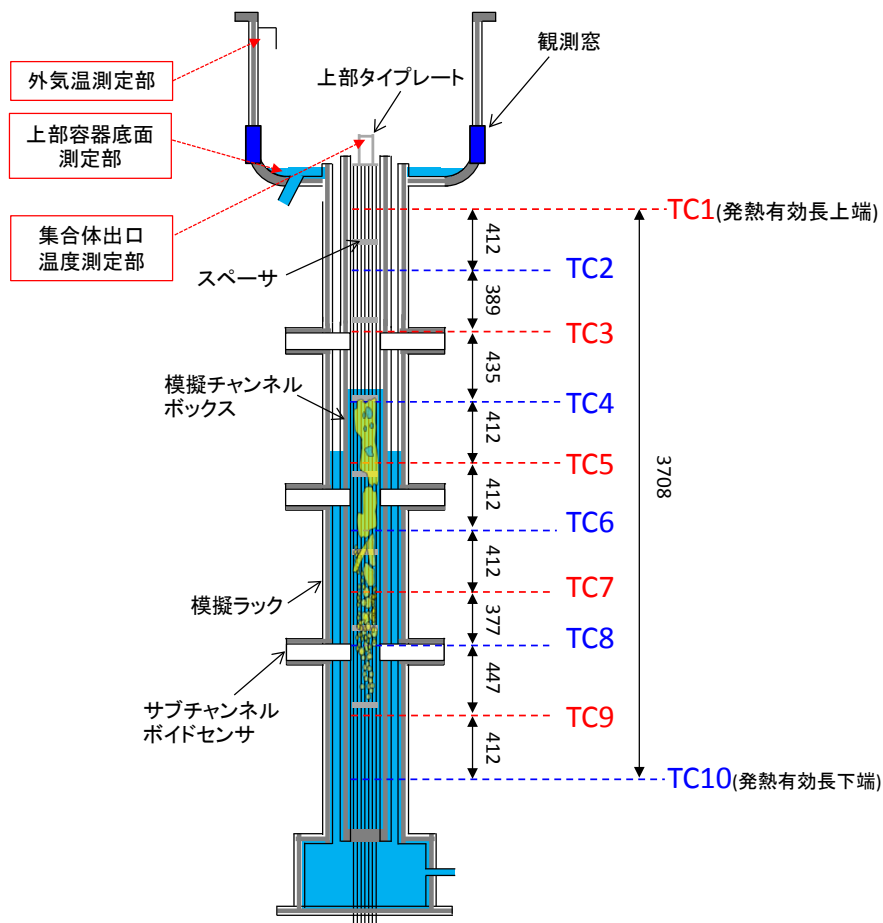


図 3.2-3 試験部および温度・差圧計測位置の概略図

### 熱電対種類

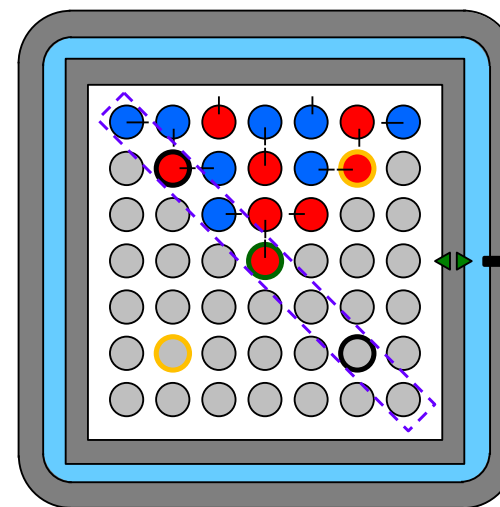
ヒータ表面 A型 (TC1, 3, 5, 7, 9)

ヒータ表面 B型 (TC2, 4, 6, 8, 10)

チャンネル内外面 (TC1~10)

外容器内面 (TC2, 4, 7, 9)

各シンボル上向  
熱電対方向



○ 高出カロッド

○ 平均出力ロッド

○ 低出力ロッド

○ 非加熱ロッド

□ 上部タイプレート  
ハンドル

図 3.2-4 試験部断面図

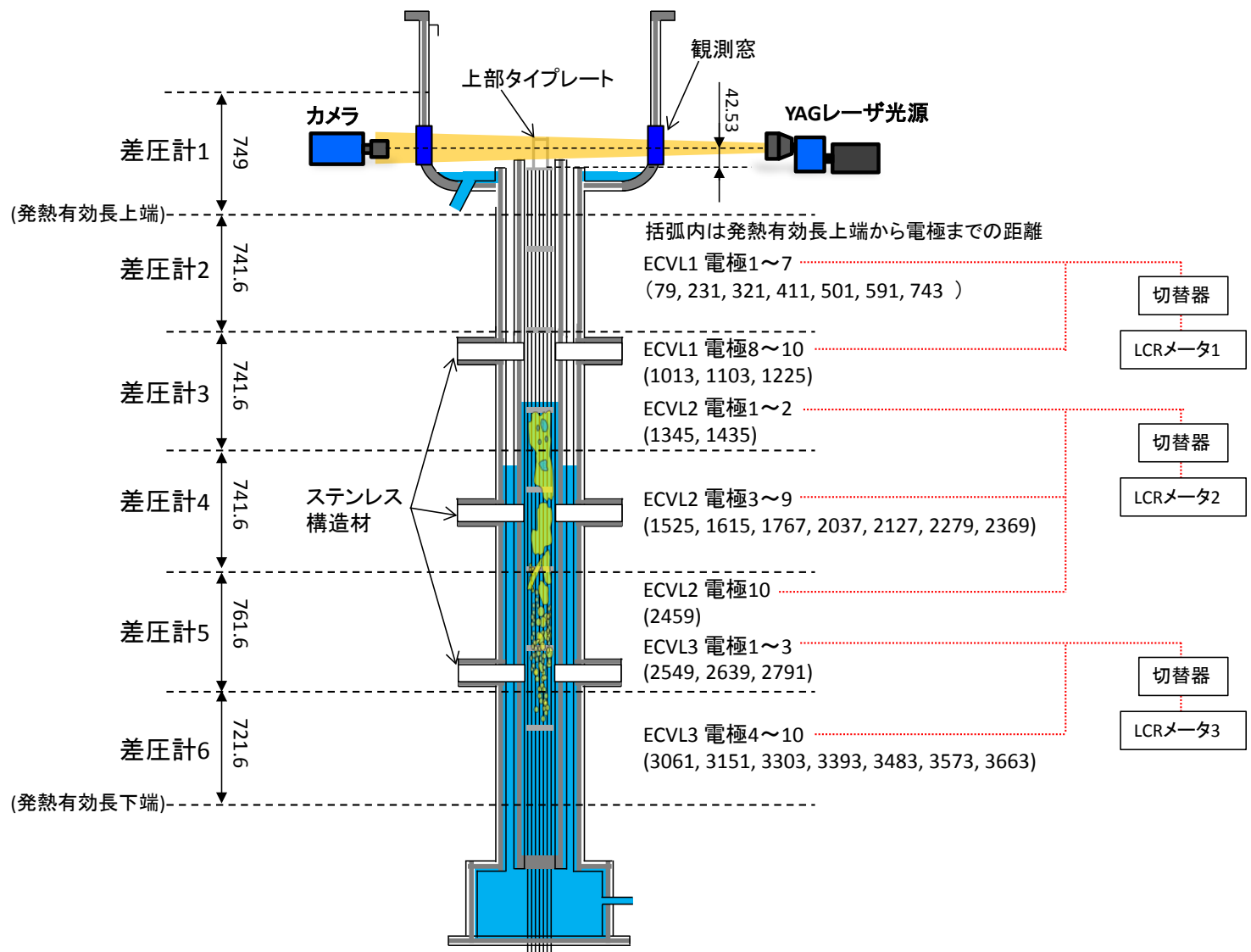
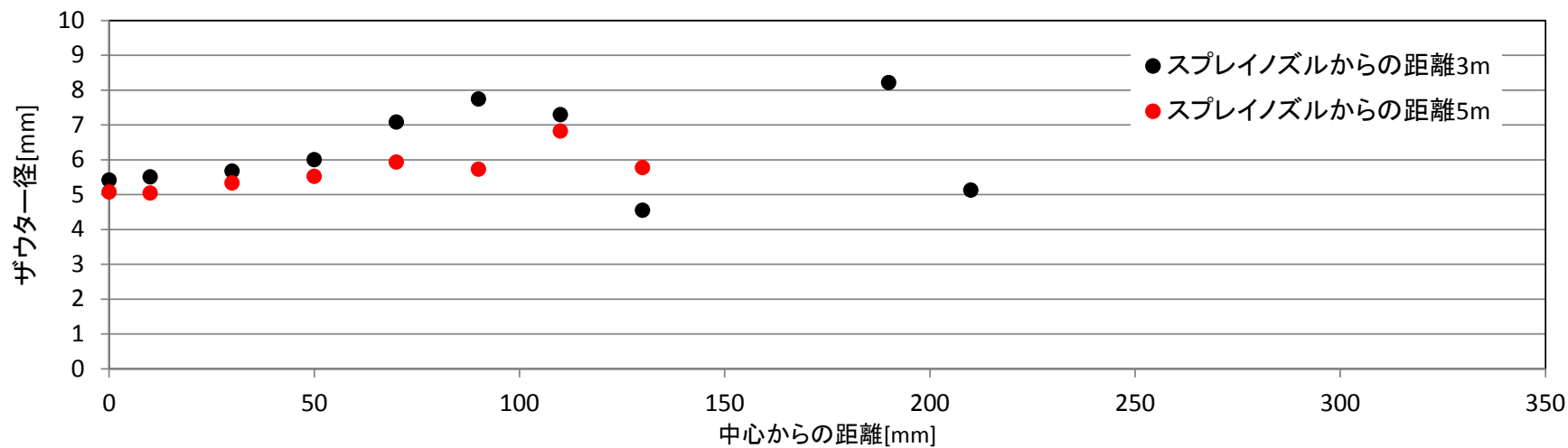
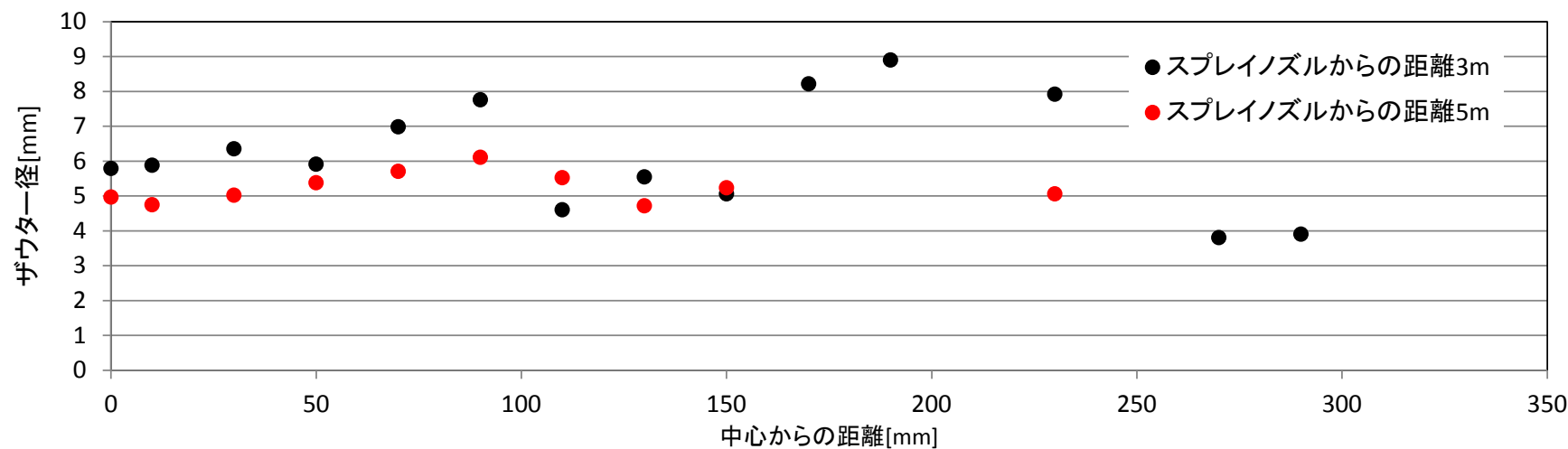


図 3.2-5 差圧計・ECVL・液滴計の計測位置



(a) スプレイ流量  $0.2\text{m}^3/\text{h}$



(b) スプレイ流量  $1.0\text{m}^3/\text{h}$

図 3.2-6 加熱無し時のスプレイ液滴分布の計測結果

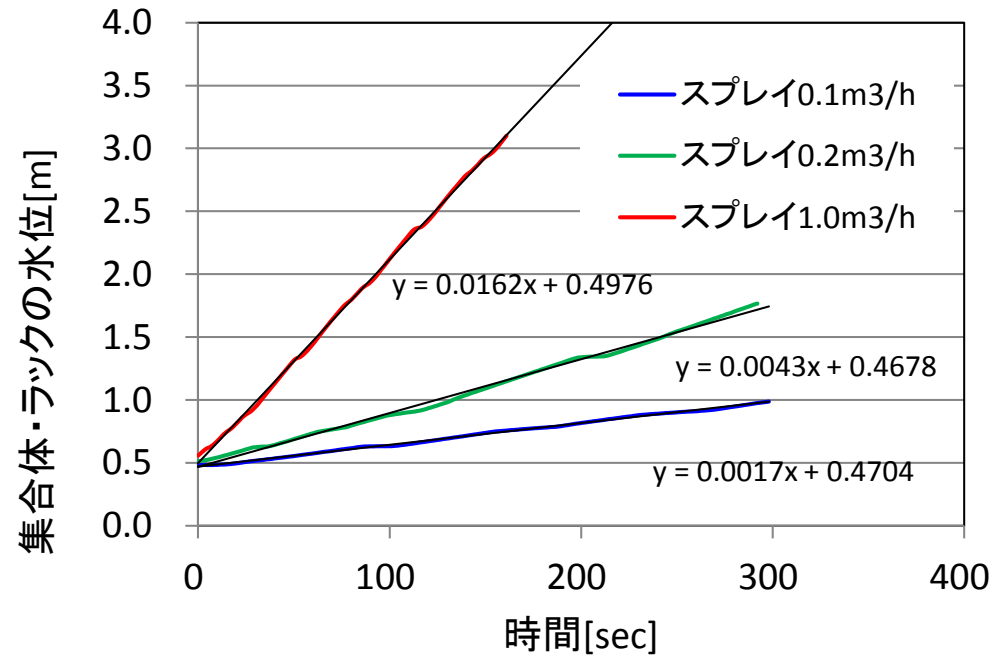


図 3.2-7 ヒータ加熱が無い状態におけるラック・集合体へのスプレイ落水量

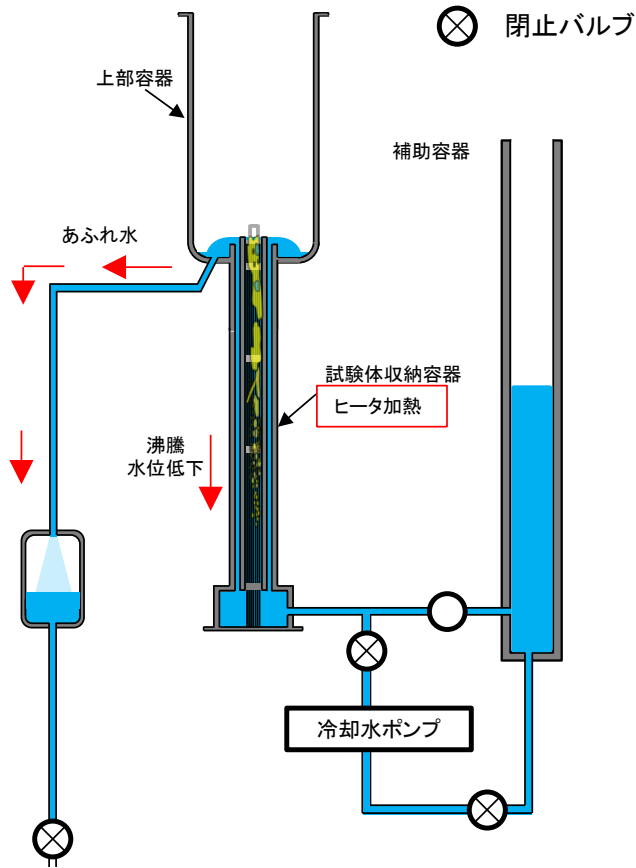


図 3.2-8 16 年度試験のヒートアップ

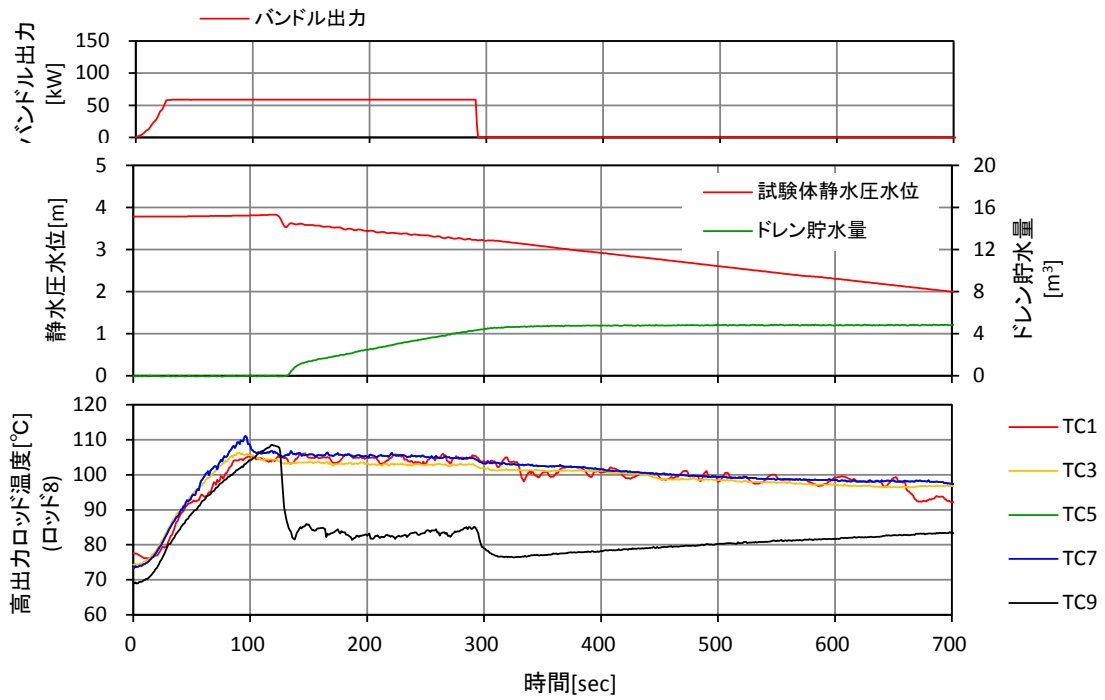


図 3.2-9 16 年度初期条件設定時の運転データ例

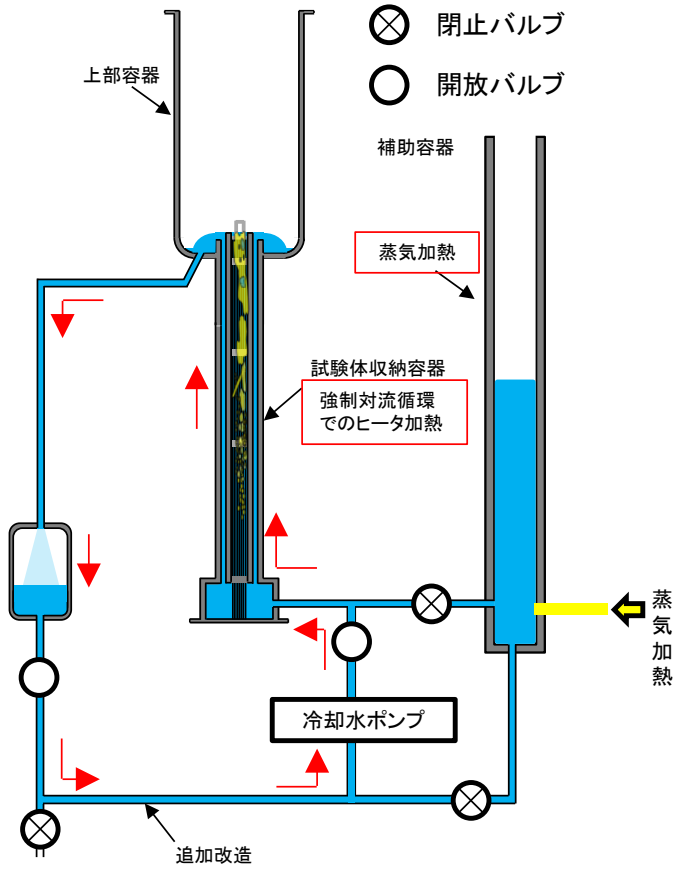


図 3.2-10 17年度試験のヒートアップ

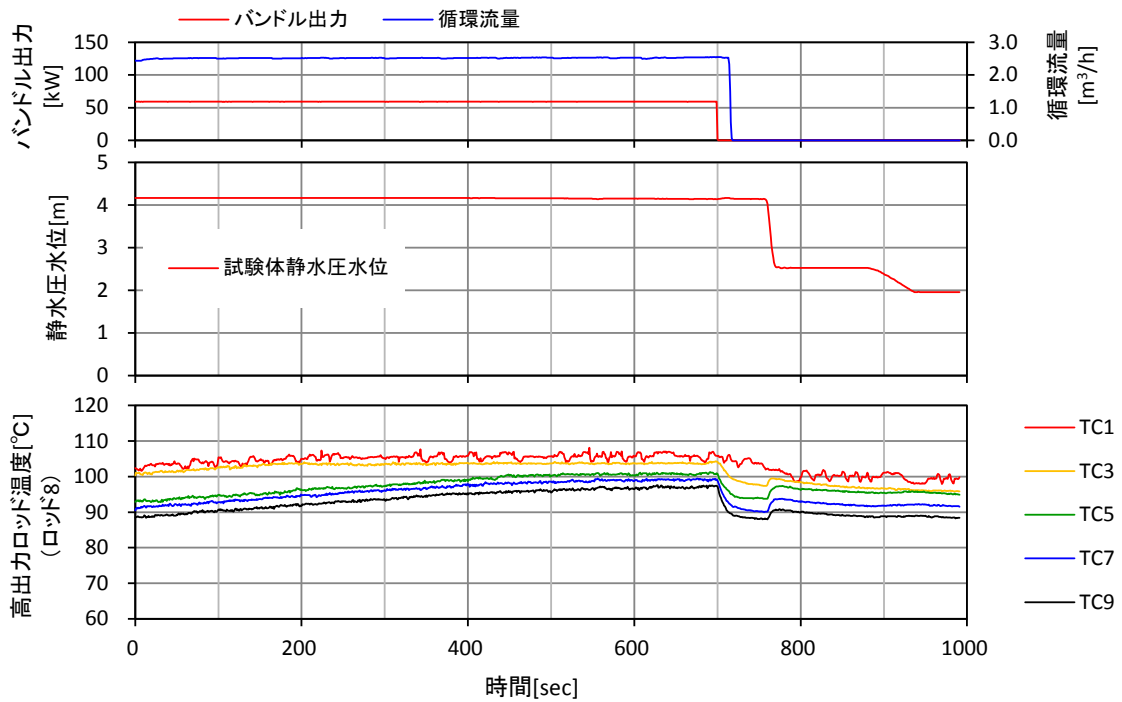
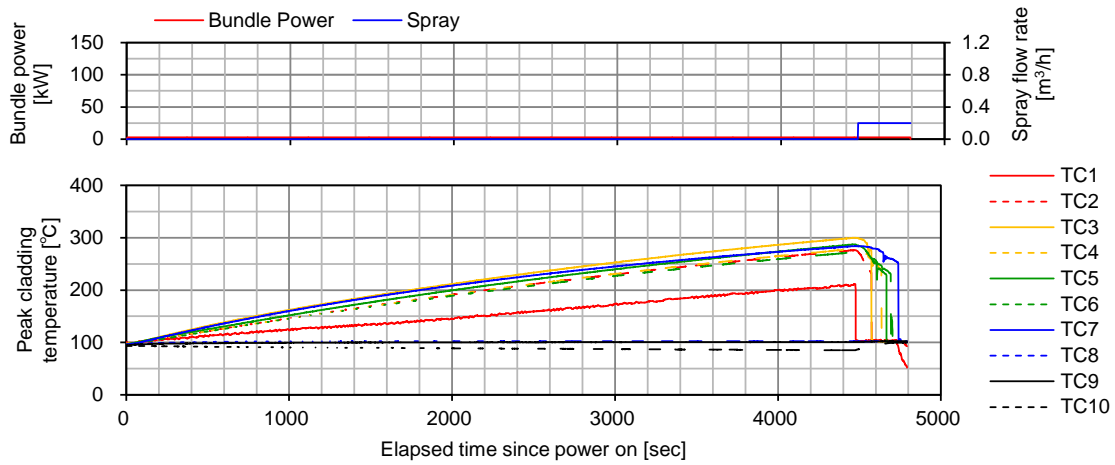
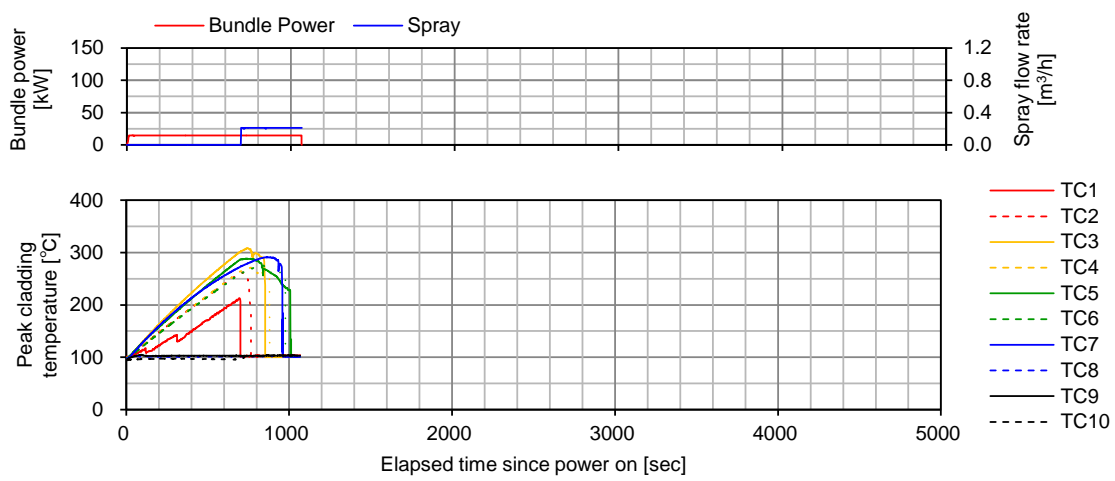


図 3.2-11 17年度初期条件設定時の運転データ例

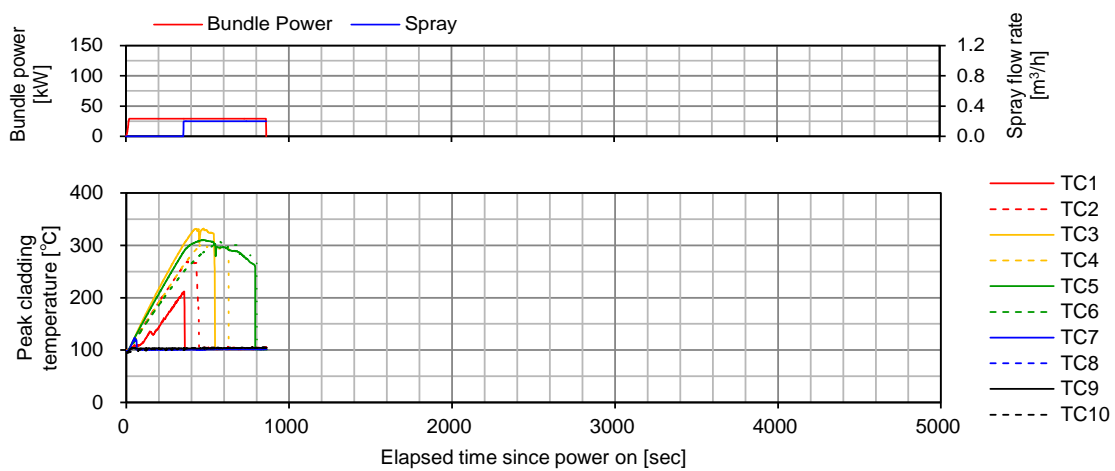




(a) 17Case01-03-3 (バンドル出力 2.9kW)



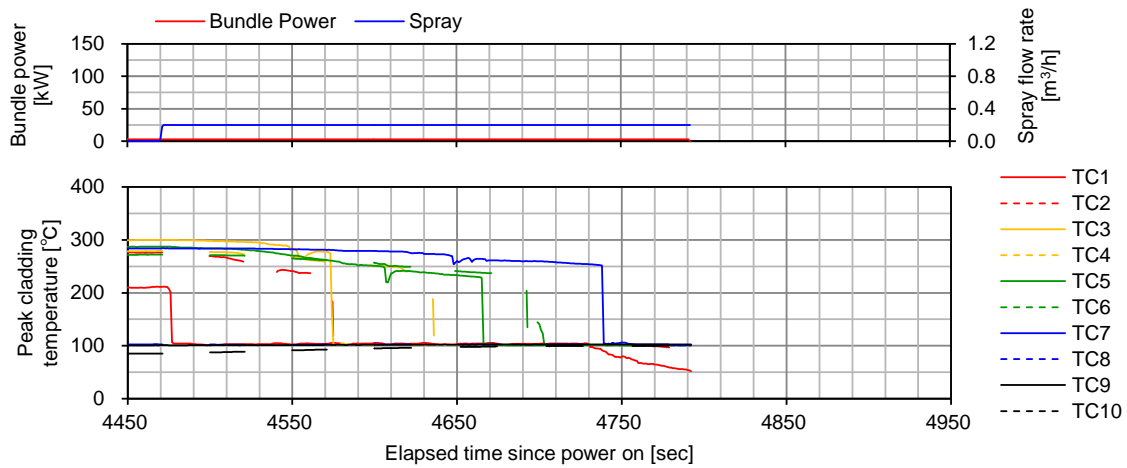
(b) 17Case01-07-1 (バンドル出力 14.6kW)



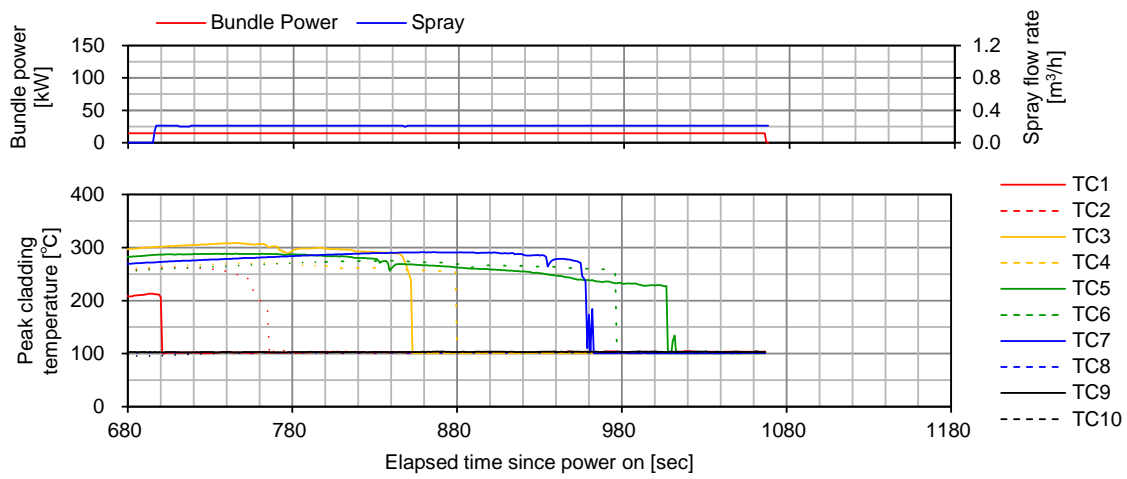
(c) 17Case01-12-1 (バンドル出力 29.2kW)

図 3.2-12 バンドル出力による影響

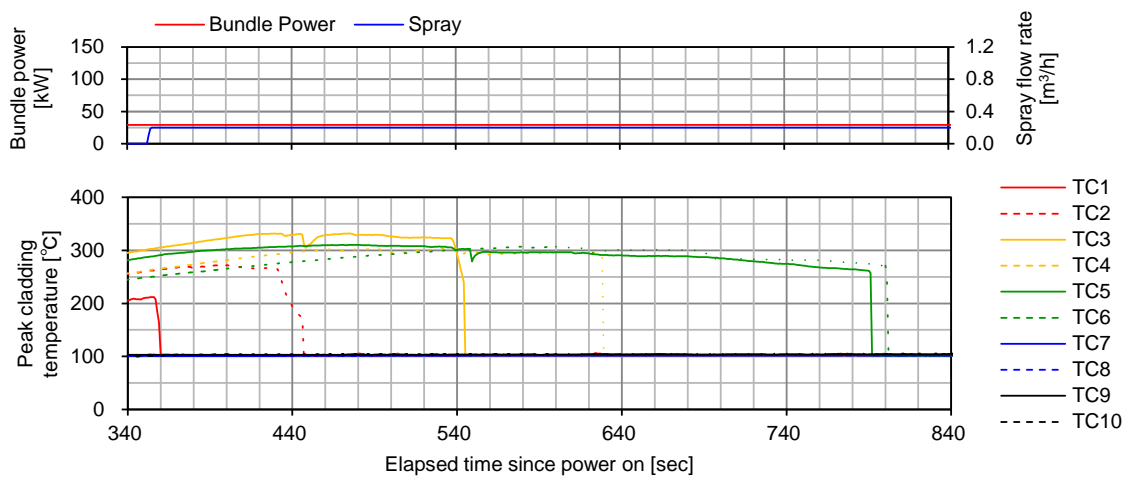
(17Case01 : 初期水位 1m, 初期水温 95°C, スプレー流量 0.2m<sup>3</sup>/h, スプレー温度 30°C)



(a) 17Case01-03-3 (バンドル出力 2.9kW)



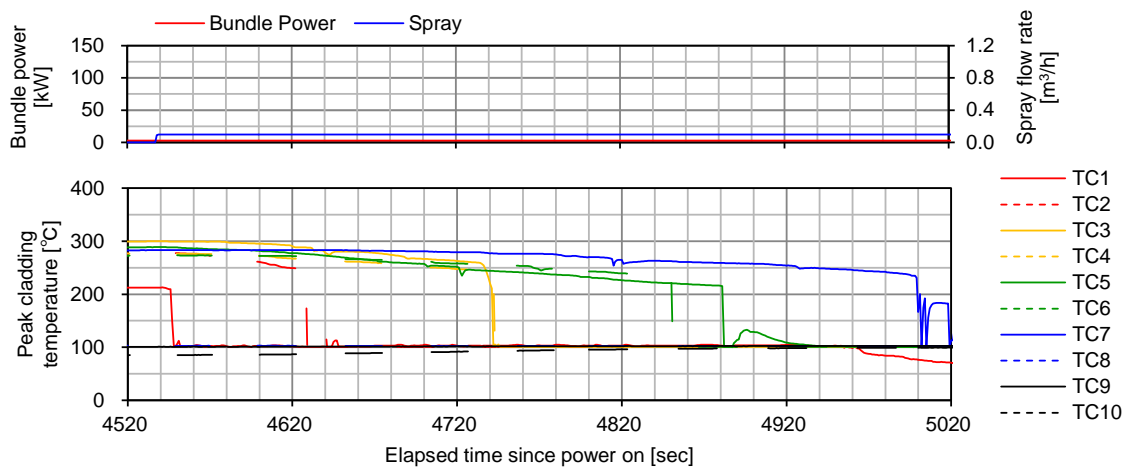
(b) 17Case01-07-1 (バンドル出力 14.6kW)



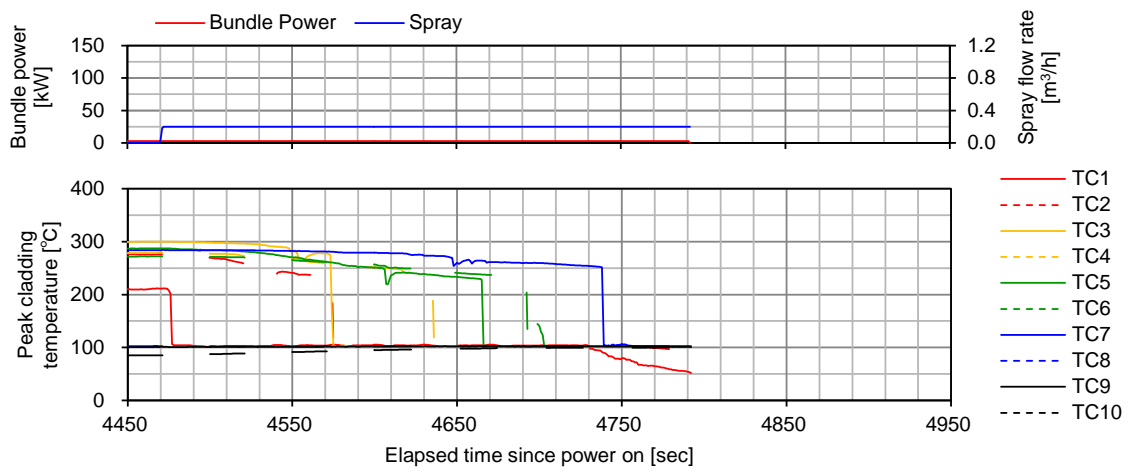
(c) 17Case01-12-1 (バンドル出力 29.2kW)

図 3.2-13 スプレー後の PCT 変化

(17Case01 : 初期水位 1m, 初期水温 95°C, スプレー流量 0.2m³/h, スプレー温度 30°C)



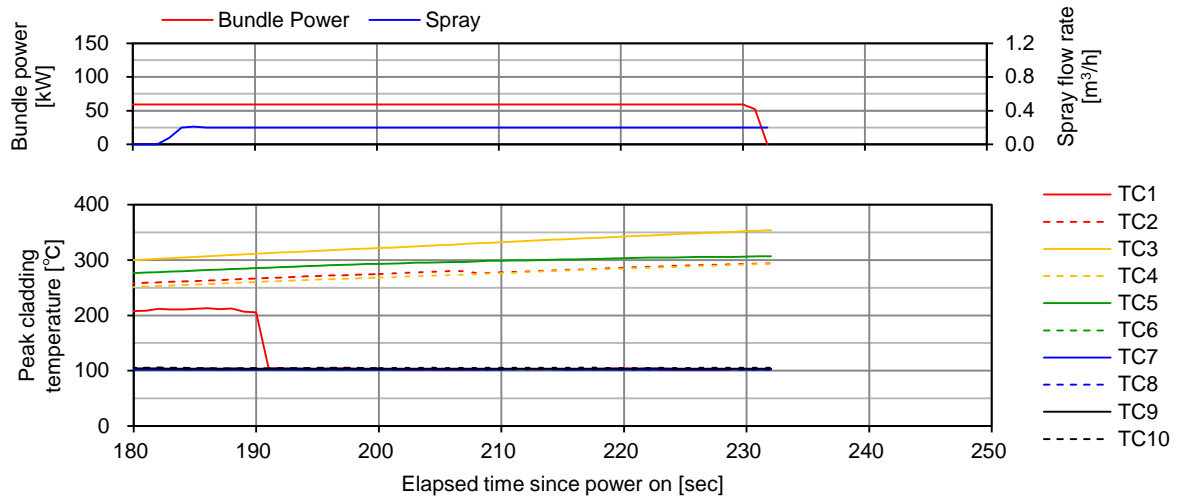
(a) スプレー流量 0.1m<sup>3</sup>/h(17Case01-04-1)



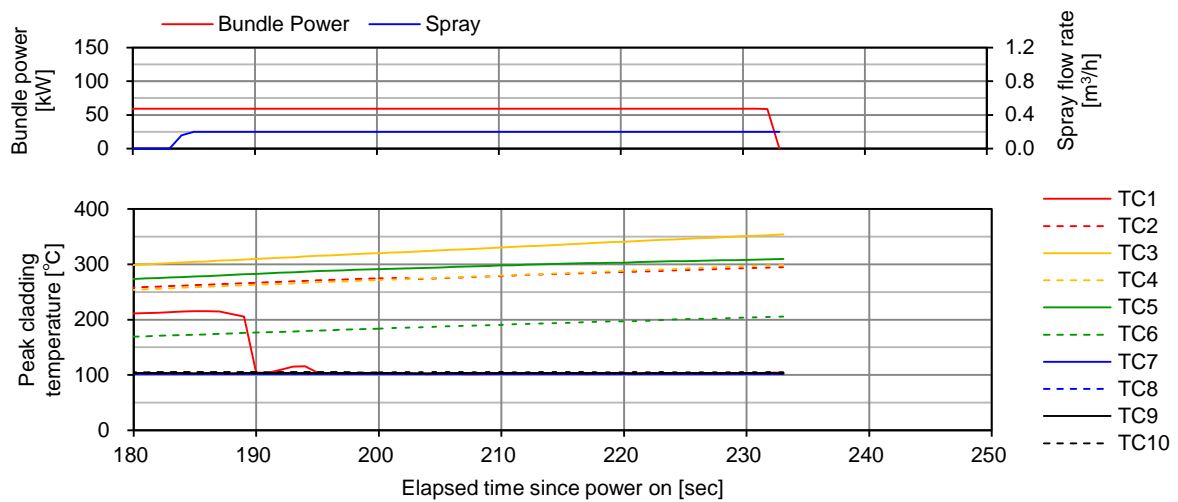
(b) スプレー流量 0.2m<sup>3</sup>/h(17Case01-04-3)

図 3.2-14 スプレー開始後のスプレー流量による PCT 変化

(17Case01 : バンドル出力 2.9kW, 初期水位 1m, 初期水温 95°C, スプレー温度 30°C)

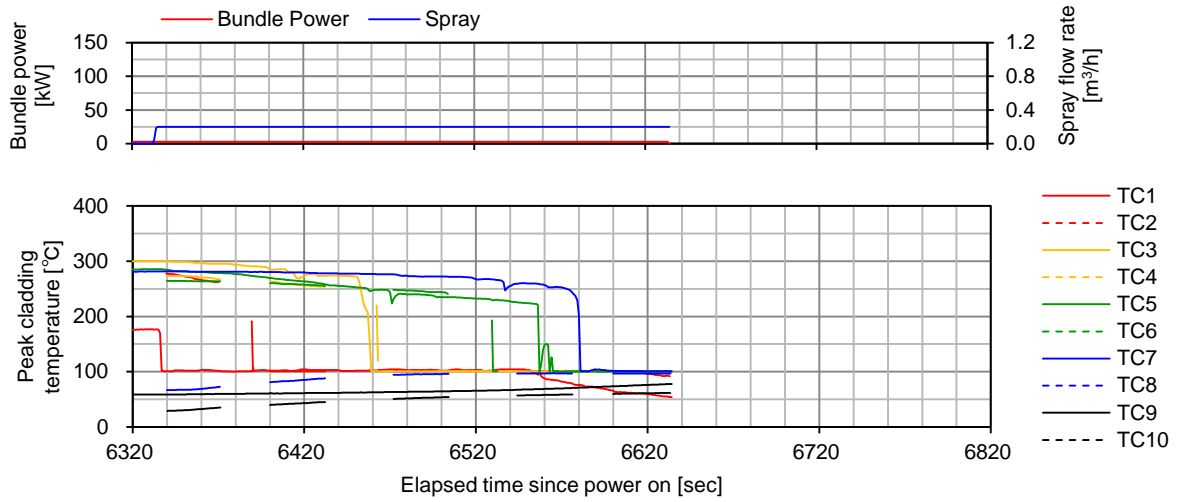


(a) スプレー水温 30°C (17Case00-03-1)

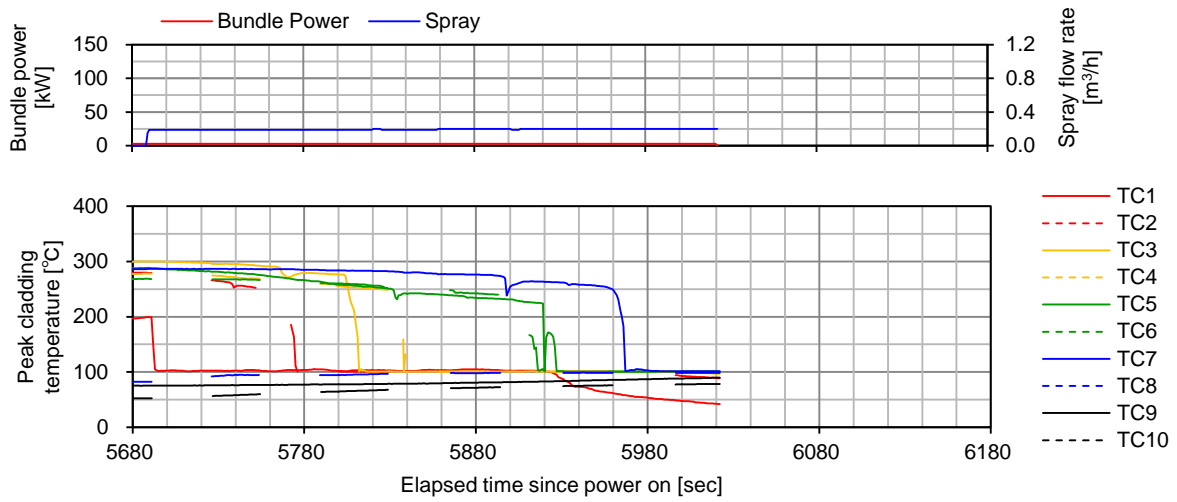


(b) スプレー水温 60°C (17Case02-01-1)

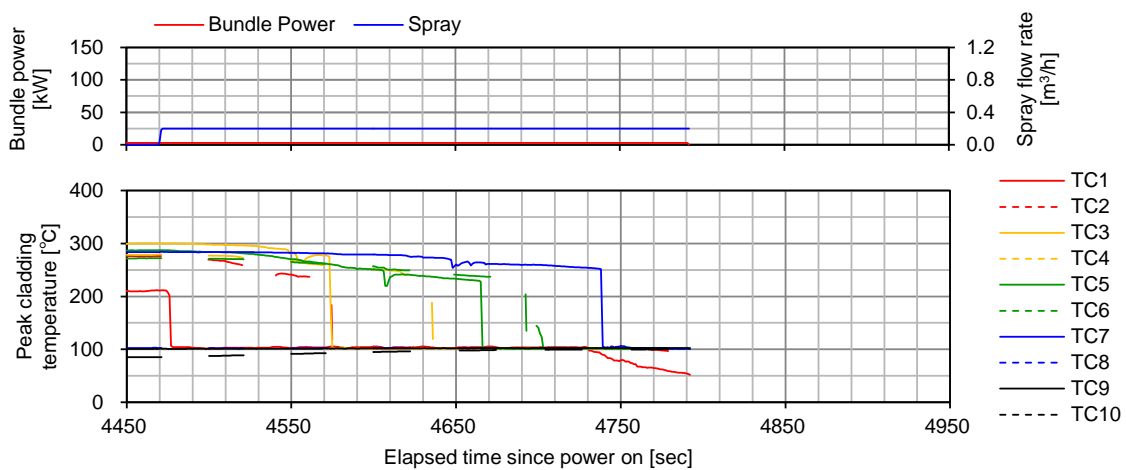
図 3.2-15 スプレー開始後のスプレー水温による PCT 変化  
 (バンドル出力 58.4kW, 初期水位 1m, 初期水温 95°C, スプレー流量 0.2m<sup>3</sup>/h)



(a) 冷却水初期水温 30°C (17Case03-02-1)

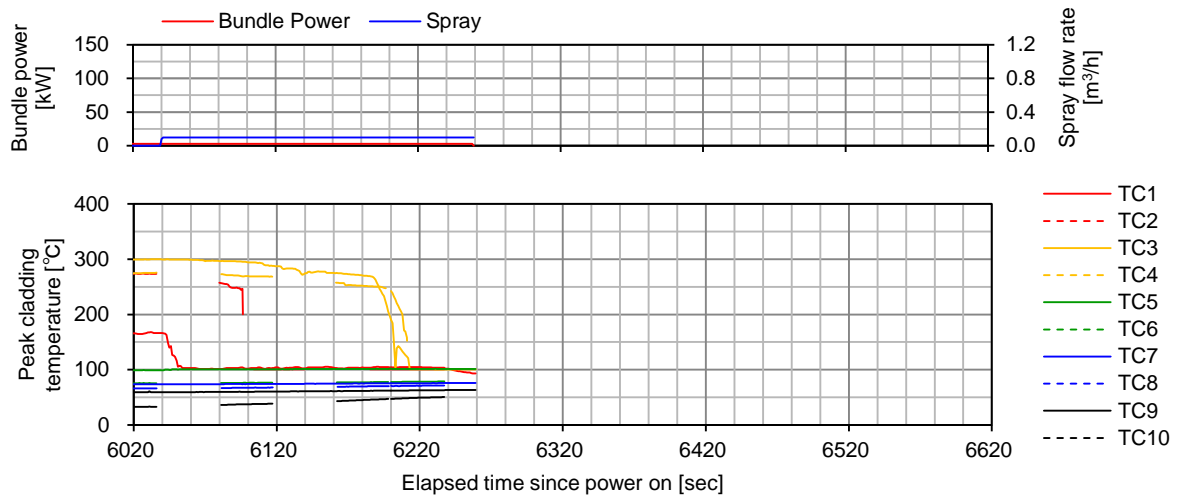


(b) 冷却水初期水温 60°C (17Case04-01-1)

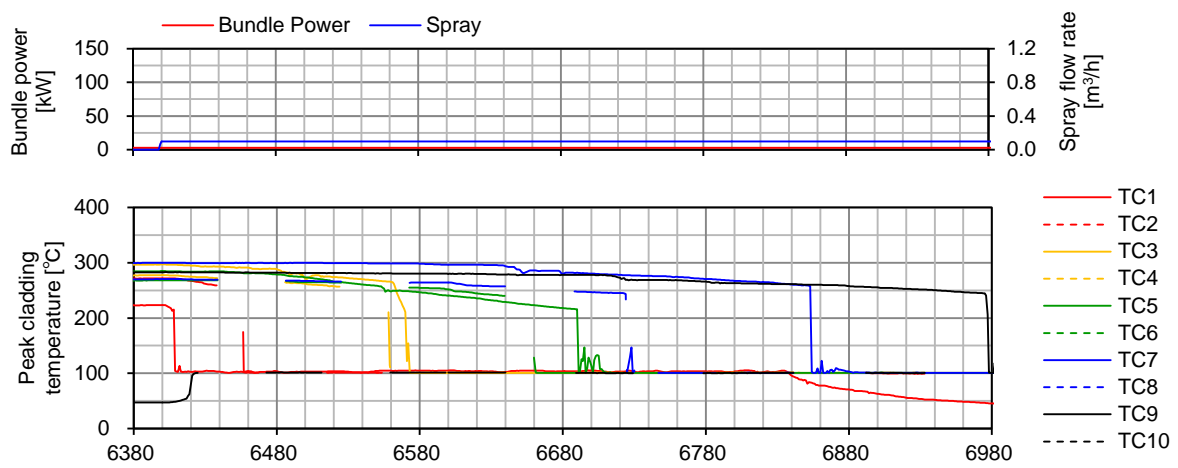


(c) 冷却水初期水温 95°C (17Case01-03-3)

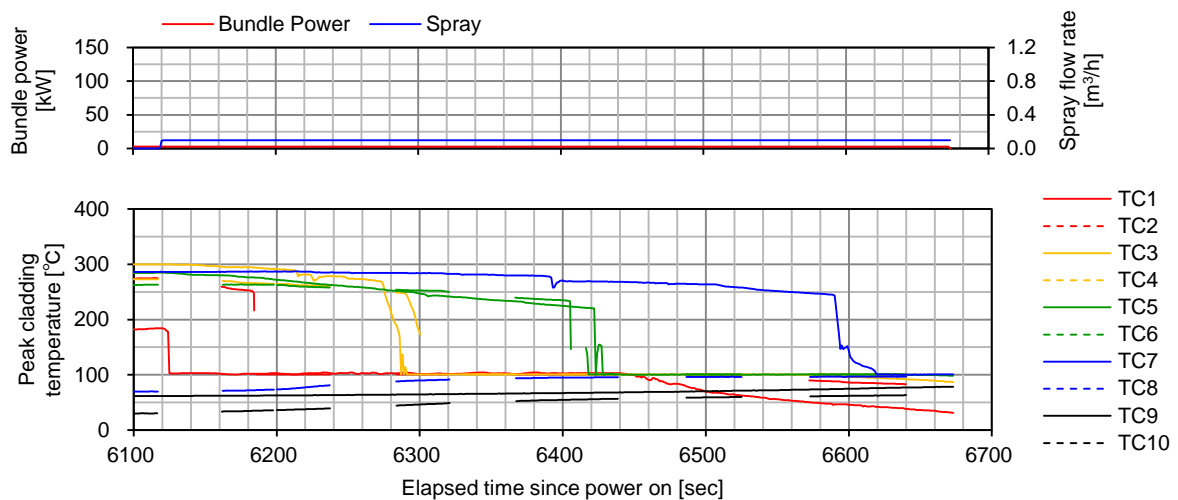
図 3.2-16 スプレー開始後の冷却水初期水温による PCT 変化  
(バンドル出力 2.8kW, 初期水位 1m, スプレー流量 0.2m<sup>3</sup>/h, スプレー水温 30°C)



(a) 初期水位 2m (17Case06-11-1)



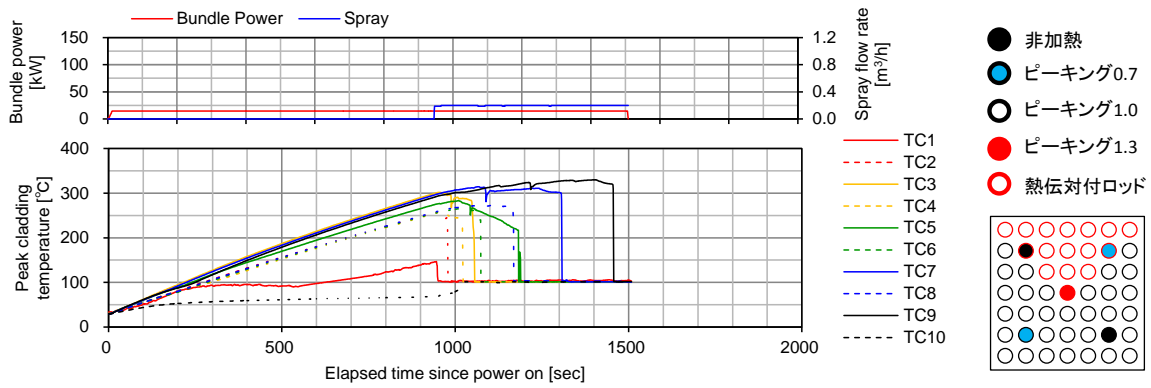
(b) 初期水位 1m (17Case03-03-1)



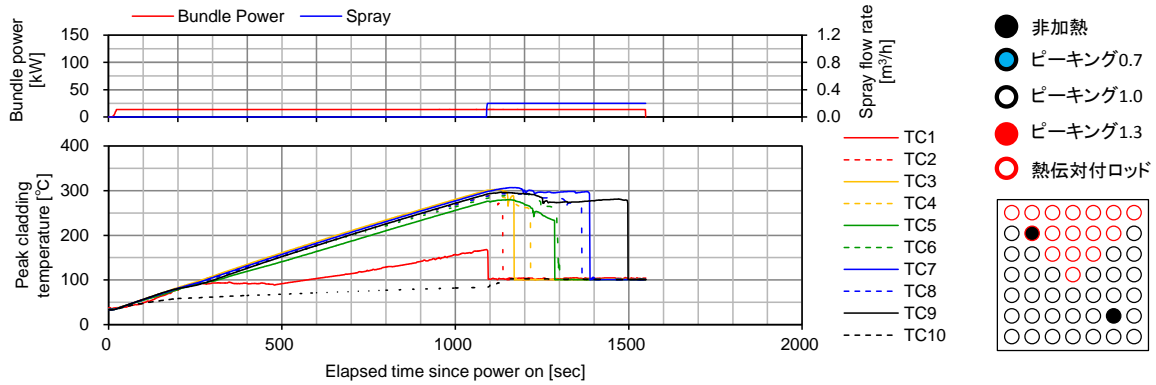
(c) 初期水位 BAF 以下 (17Case05-03-1)

図 3.2-17 スプレー開始後の初期水位による PCT 変化

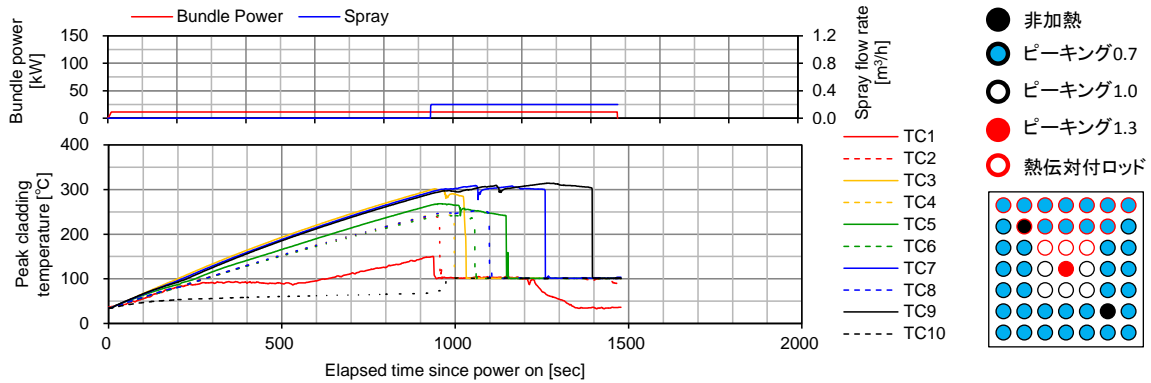
(バンドル出力 2.8kW, 初期水温 95°C, スプレー流量 0.2m<sup>3</sup>/h, スプレー水温 30°C)



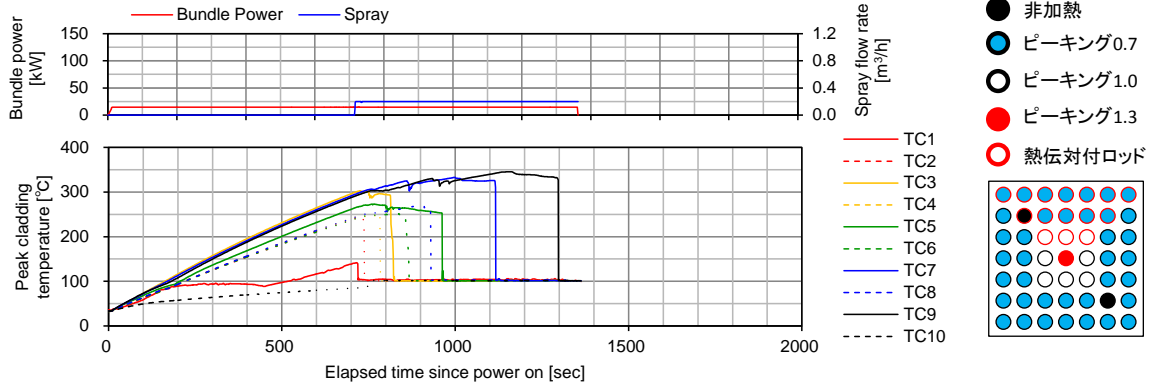
(a) 出力分布 A バンドル出力 14.6kW (17Case05-02-1)



(b) 出力分布 B / バンドル出力 14.6kW (17Case11-05-1)



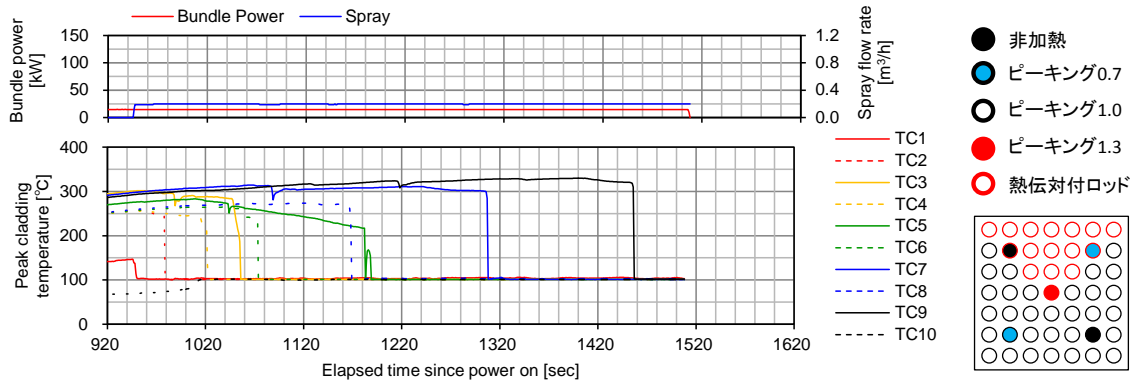
(c) 出力分布 C / 【棒出力基準】 バンドル出力 11.2kW (17Case12-09-1)



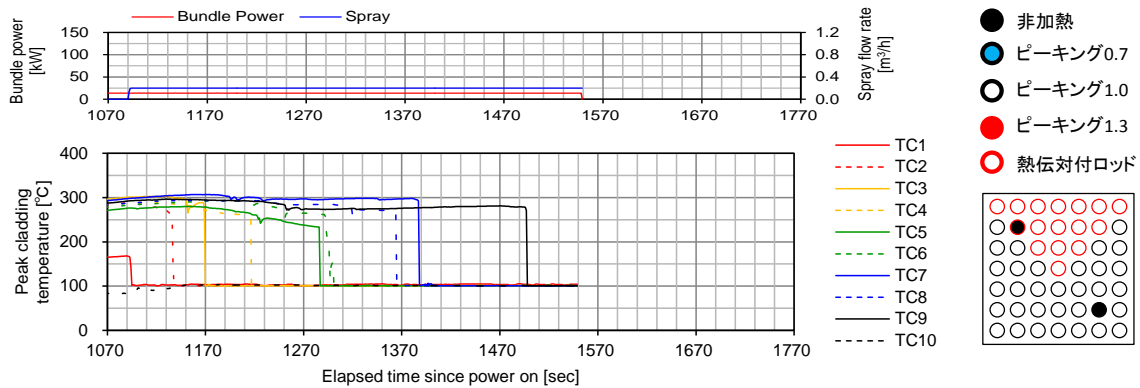
(d) 出力分布 C / 【バンドル出力基準】 バンドル出力 14.6kW (17Case12-10-1)

図 3.2-18 径方向出力分布による影響

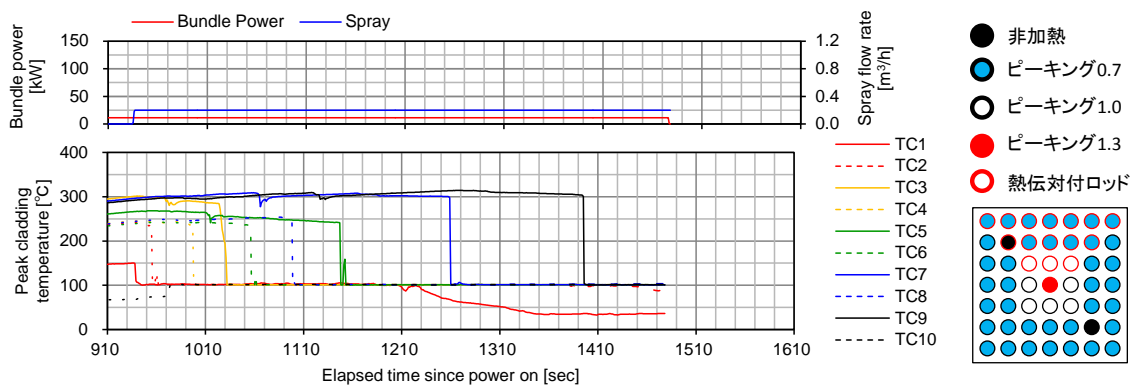
(初期水温 30°C, 初期水位 BAF 以下, スプレー流量 0.2m<sup>3</sup>/h, スプレー水温 30°C)



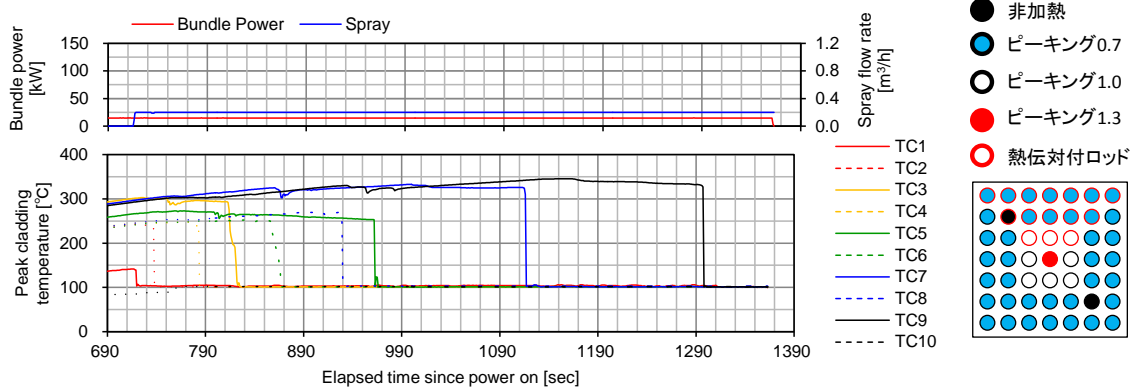
(a) 出力分布 A バンドル出力 14.6kW (17Case05-02-1)



(b) 出力分布 B/バンドル出力 14.6kW (17Case11-05-1)



(c) 出力分布 C/【棒出力基準】バンドル出力 11.2kW (17Case12-09-1)

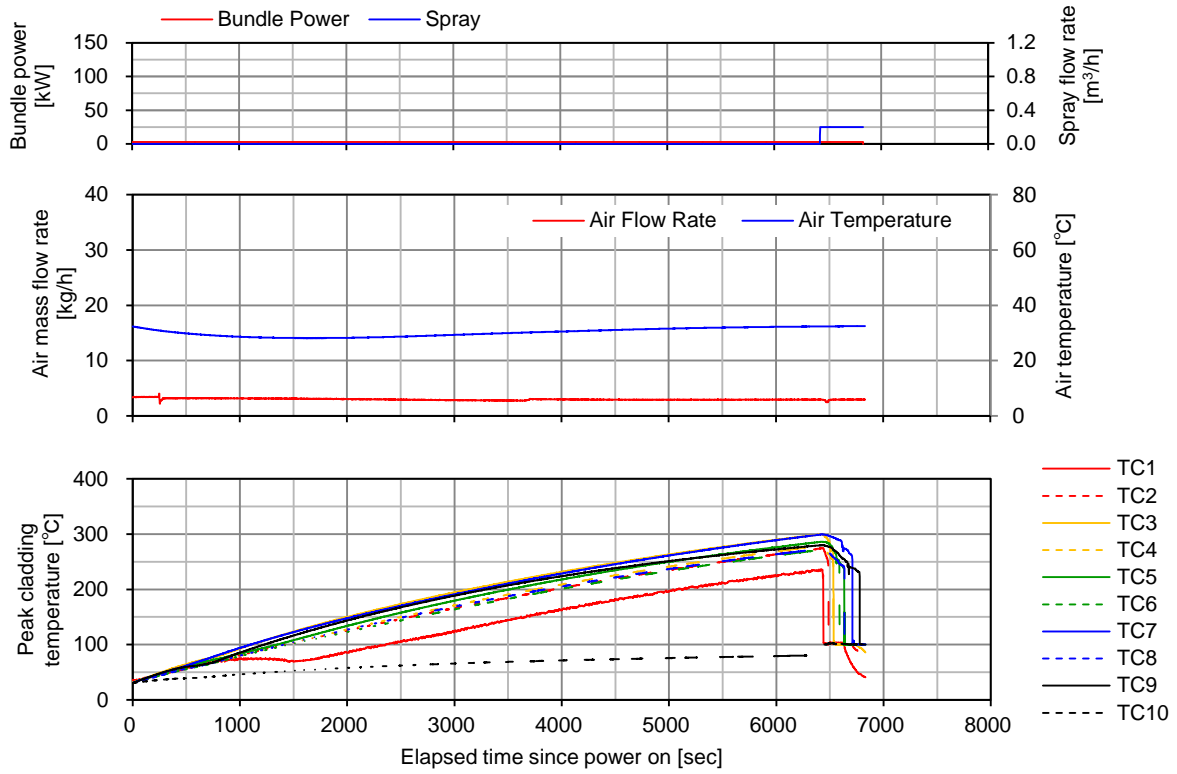


(d) 図 3.2-18 出力分布 C/【バンドル出力基準】バンドル出力 14.6kW (17Case12-10-1)

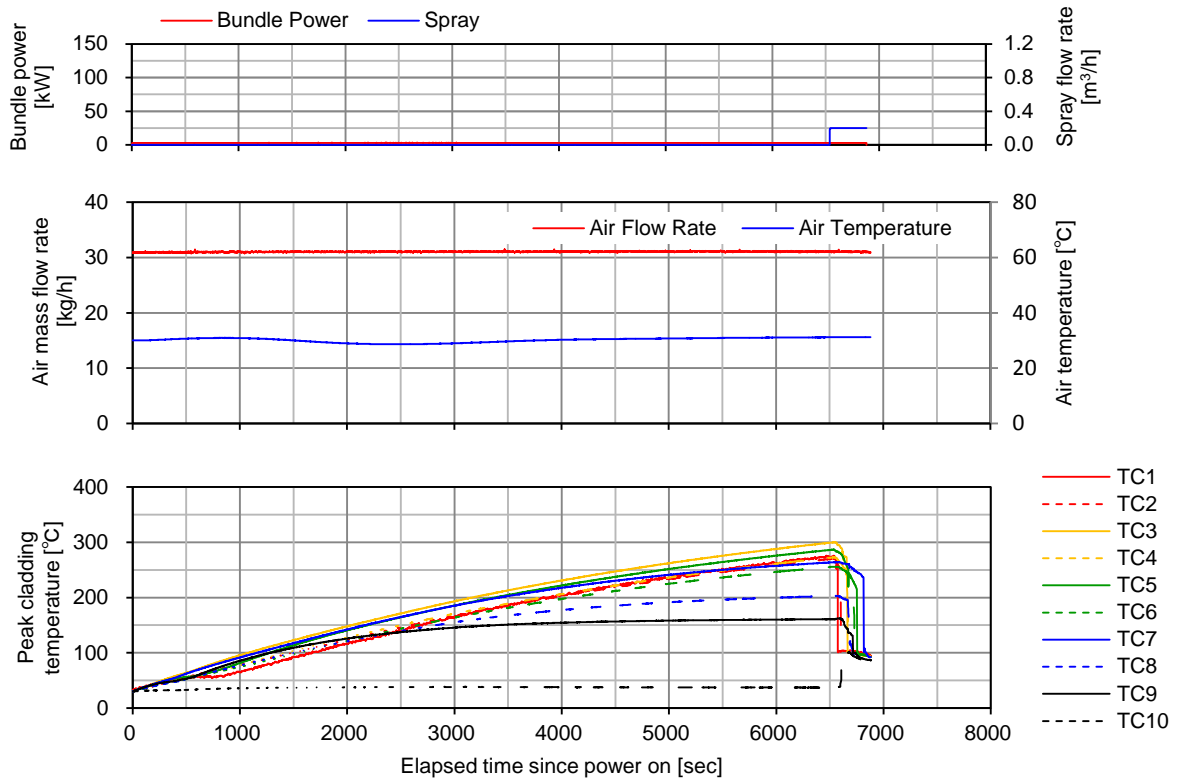
図 3.2-19 スプレー開始後の径方向出力分布による PCT 変化

(初期水温 30°C, 初期水位 BAF 以下, スプレー流量 0.2m³/h, スプレー水温 30°C)





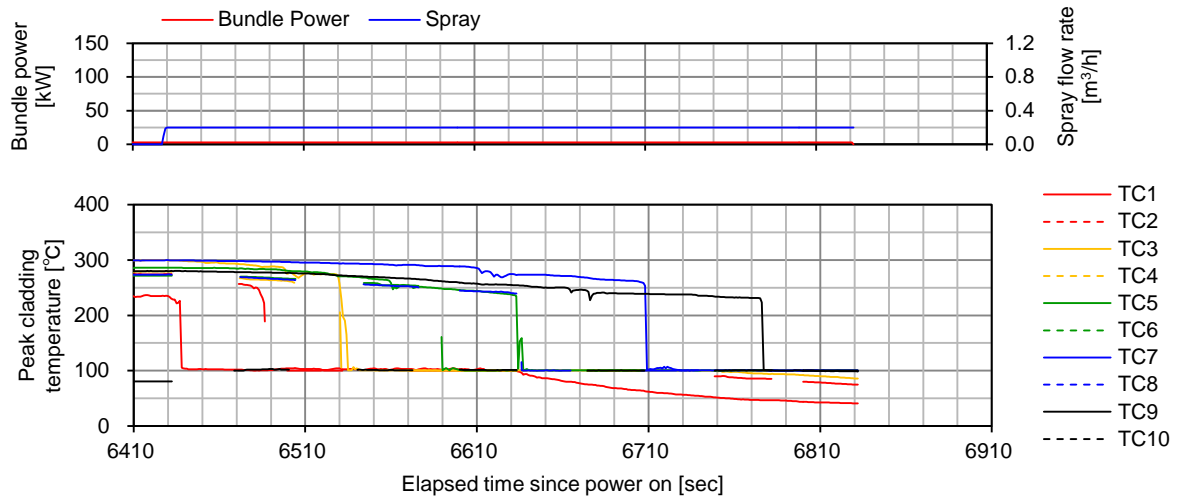
(a) 空気流量 3kg/h(17Case08-03-1)



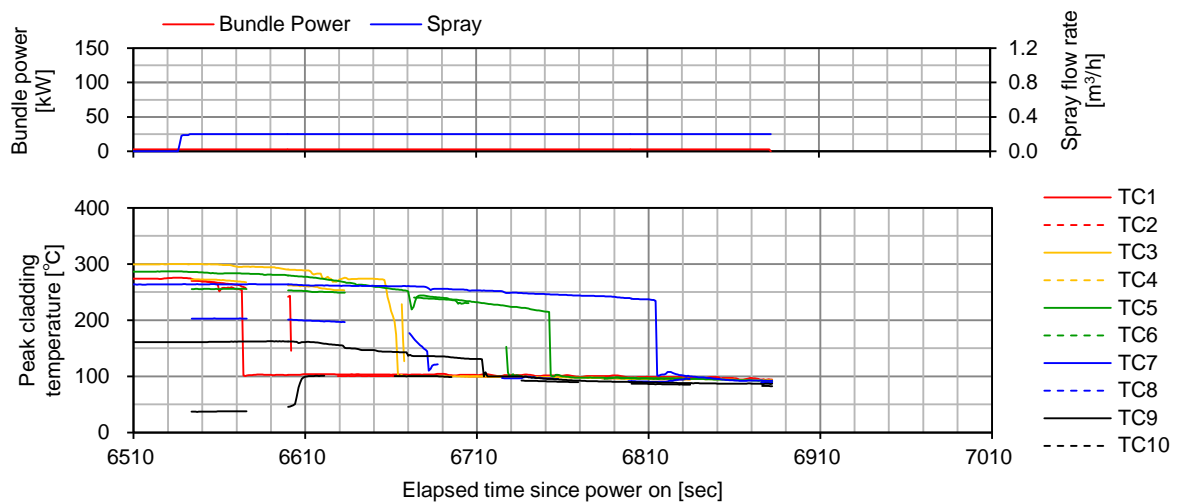
(b) 空気流量 30kg/h(17Case08-02-1)

図 3.2-20 空気流量の影響

(バンドル出力 2.8kW, 初期温度 30°C, 空気温度 30°C, スプレー流量 0.2m³/h, スプレー水温 30°C)



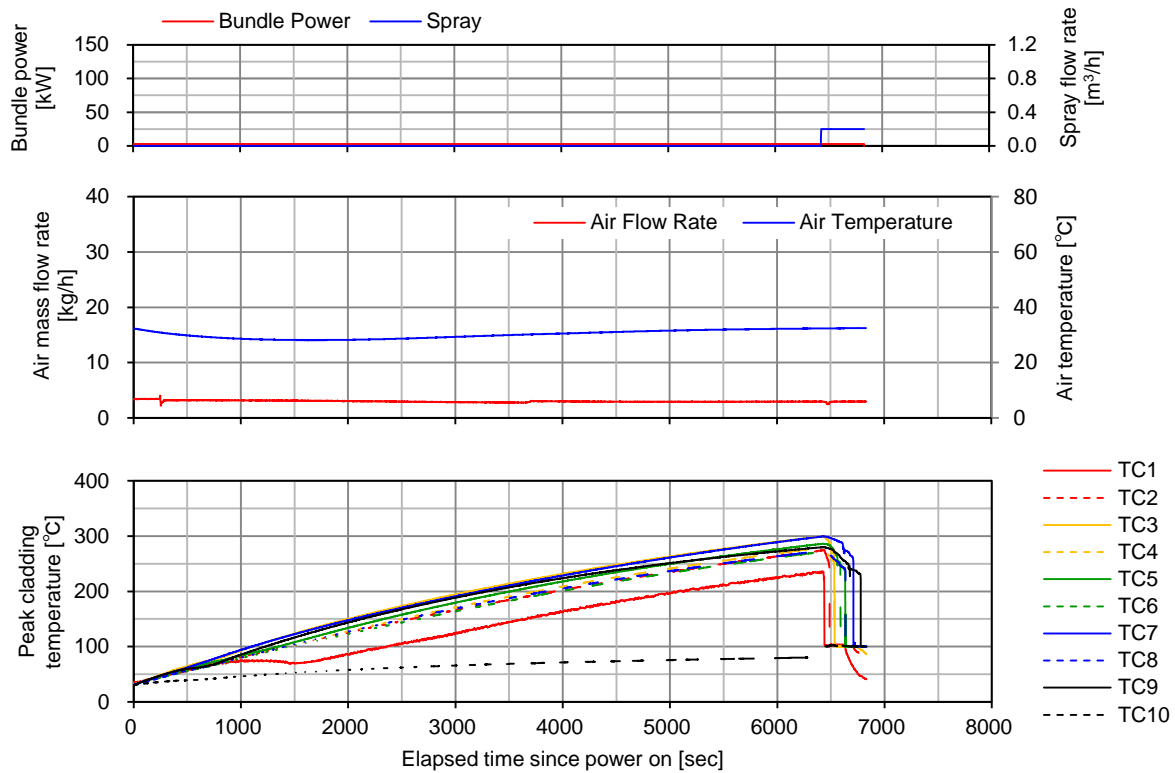
(a) 空気流量 3kg/h(17Case08-03-1)



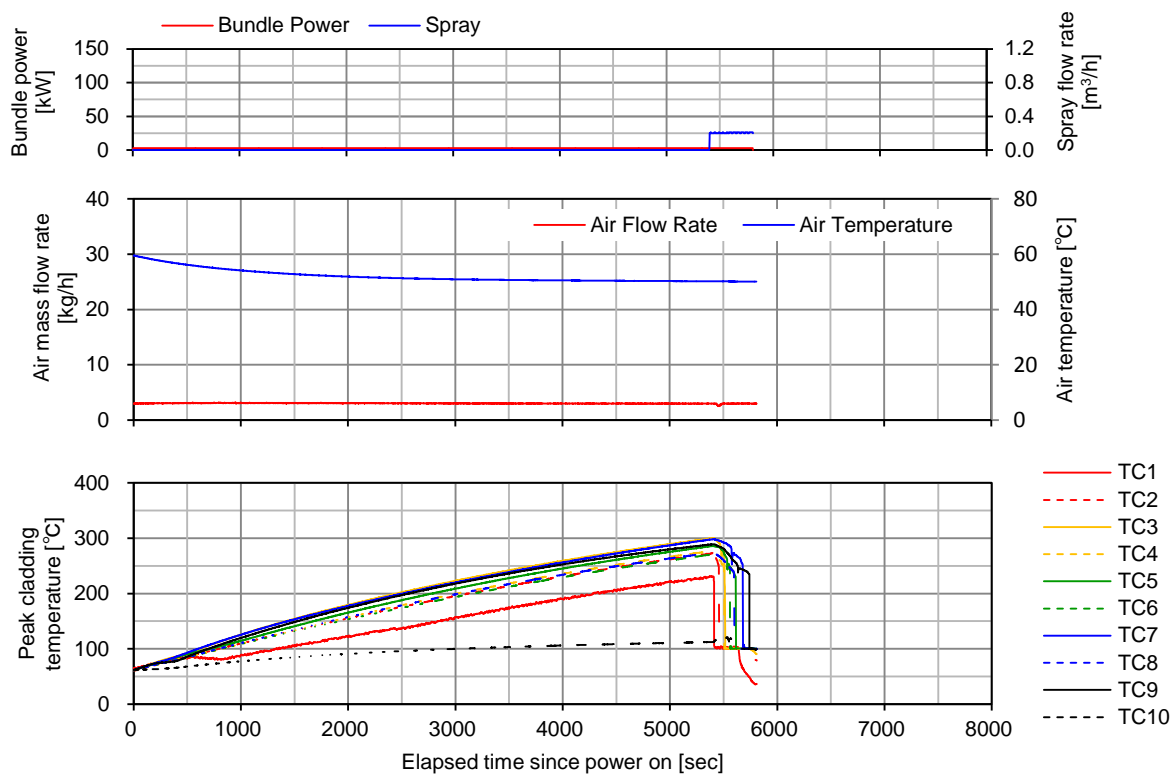
(b) 空気流量 30kg/h(17Case08-02-1)

図 3.2-21 スプレー開始後の空気流量による PCT 変化

(バンドル出力 2.8kW, 初期温度 30°C, 空気温度 30°C, スプレー流量 0.2m³/h, スプレー水温 30°C)



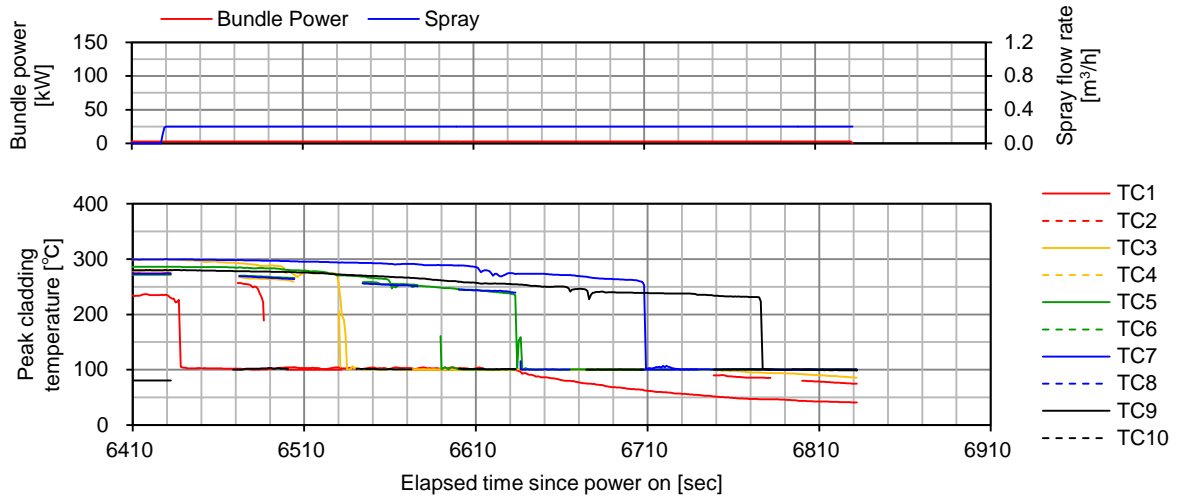
(a) 空気温度 30°C (17Case08-03-1)



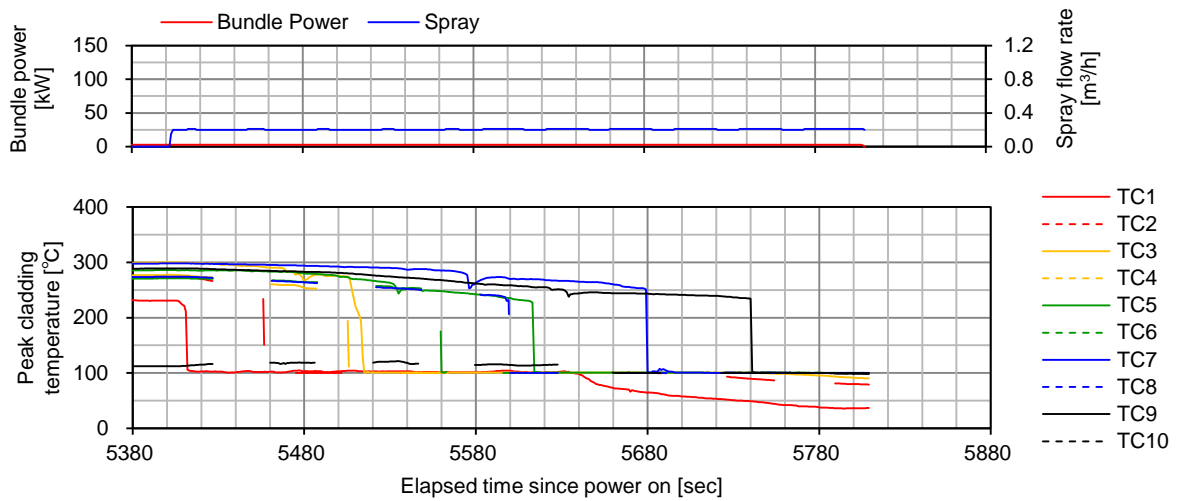
(b) 空気温度 55°C (17Case09-05-1)

図 3.2-22 空気温度の影響

(バンドル出力 2.8kW, 初期温度 30°C, 空気流量 3kg/h, スpray流量 0.2m<sup>3</sup>/h, Spray水温 30°C)



(a) 空気温度 30°C (17Case08-03-1)



(b) 空気温度 55°C (17Case09-05-1)

図 3.2-23 スプレー開始後の空気温度による PCT 変化

(バンドル出力 2.8kW, 初期温度 30°C, 空気流量 3kg/h, スプレー流量 0.2m³/h, スプレー水温 30°C)

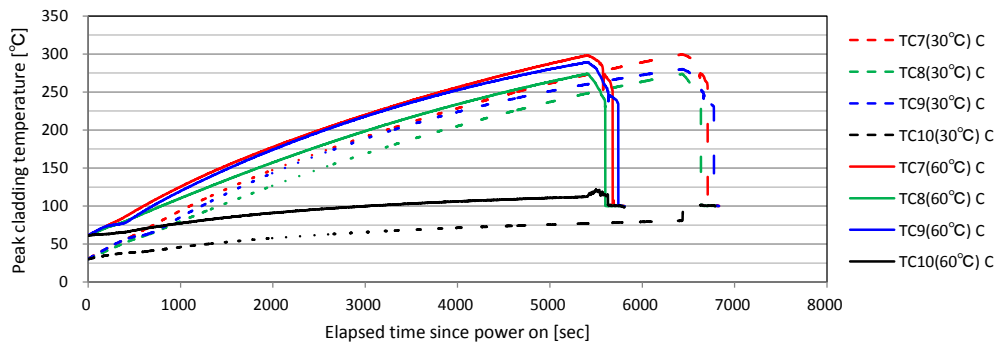
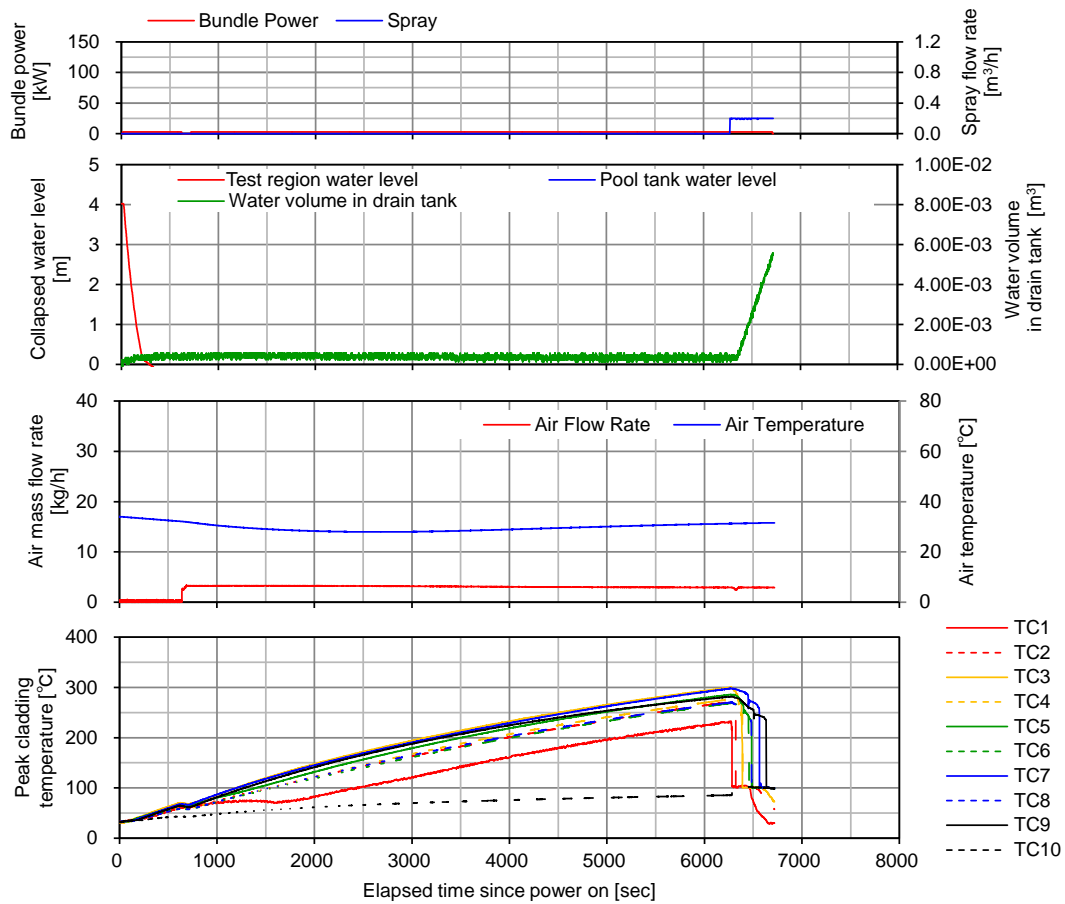
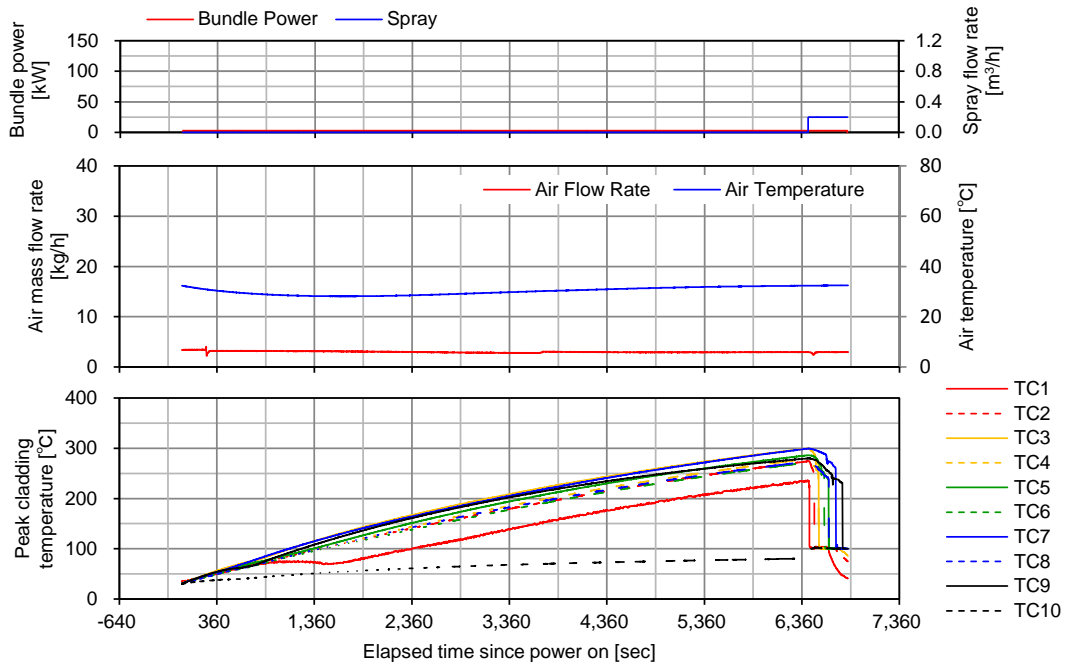


図 3.2-24 空気温度 30°C条件と 60°C条件の温度比較 (発熱有効長下端部近傍)



(a) 17Case10-03-1 小 LOCA 試験

(バンドル出力 2.8kW, 初期水温 30°C, 空気流量 3kg/h, スpray流量 0.2m<sup>3</sup>/h, スpray水温 30°C)



(b) 参考 : 17Case08-03-1 空気試験結果

(バンドル出力 2.8kW, 初期水温 30°C, 空気流量 3kg/h, スpray流量 0.2m<sup>3</sup>/h, スpray水温 30°C)

図 3.2-25 LOCA 試験結果の例

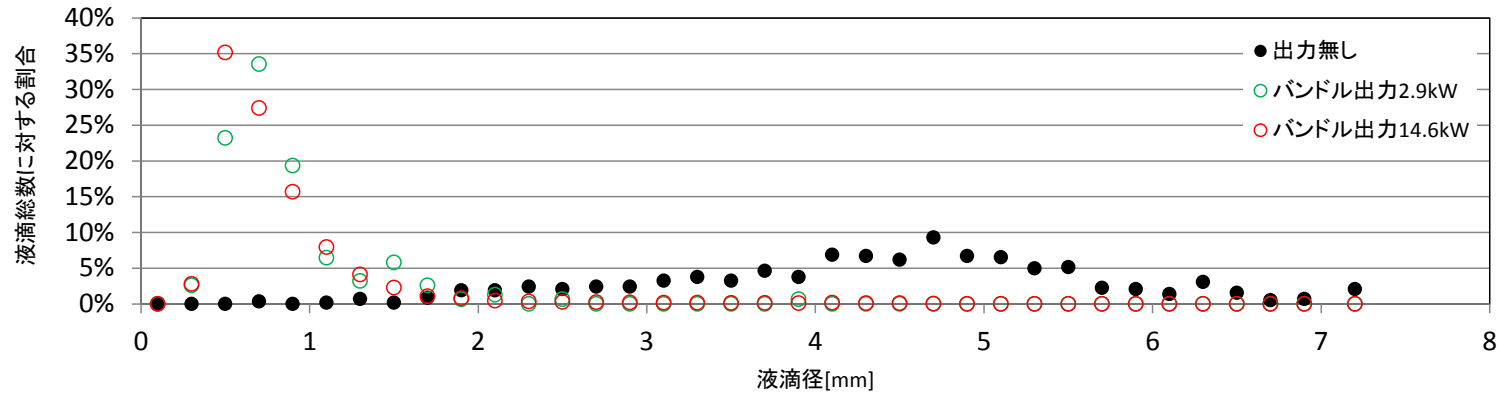


図 3.2-26 出力を変化させた場合の液滴径分布変化  
 (初期水位 1m, 初期水温 95°C, スプレー流量 0.2m<sup>3</sup>/h, スプレー温度 30°C)

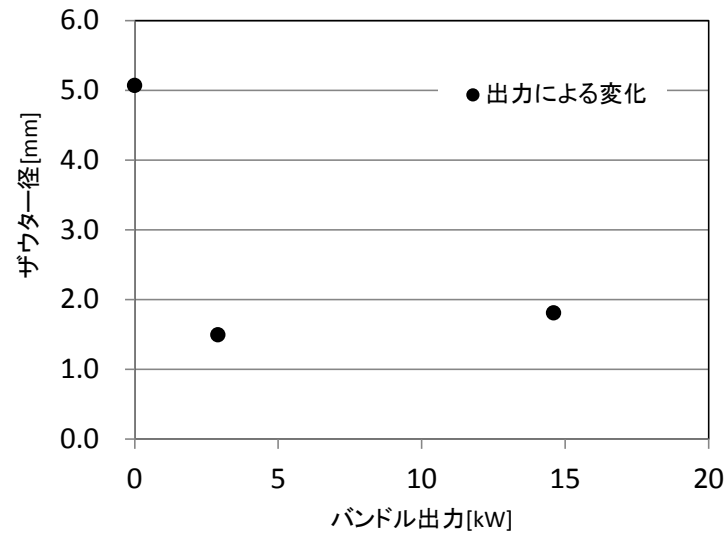


図 3.2-27 出力を変化させた場合のザウター径変化  
 (初期水位 1m, 初期水温 95°C, スプレー流量 0.2m<sup>3</sup>/h, スプレー温度 30°C)

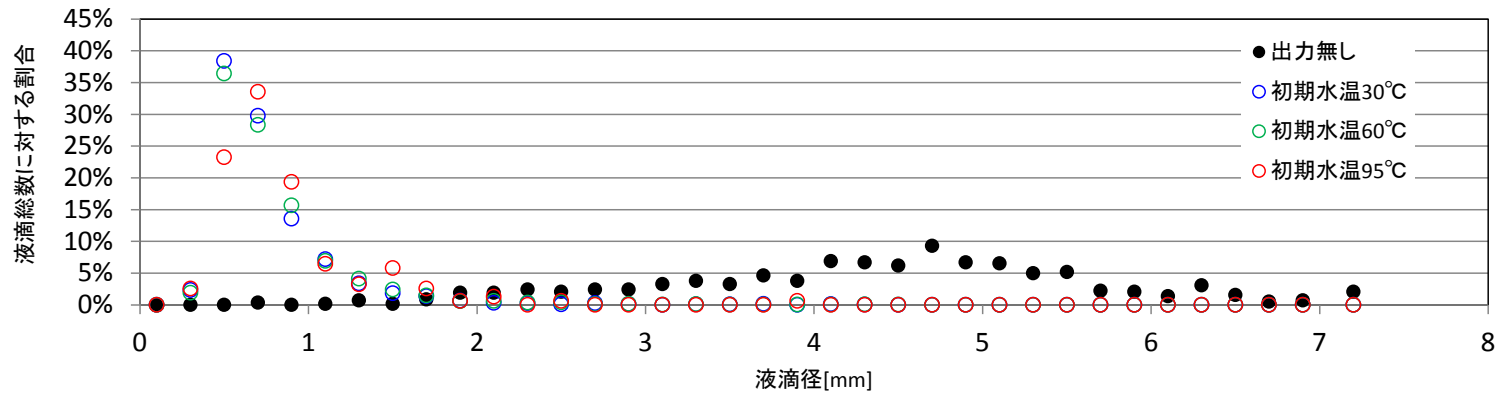


図 3.2-28 初期水温を変化させた場合の液滴径分布変化  
 (バンドル出力 2.9kW, 初期水位 1m, スプレー流量 0.2m<sup>3</sup>/h, スプレー温度 30℃)

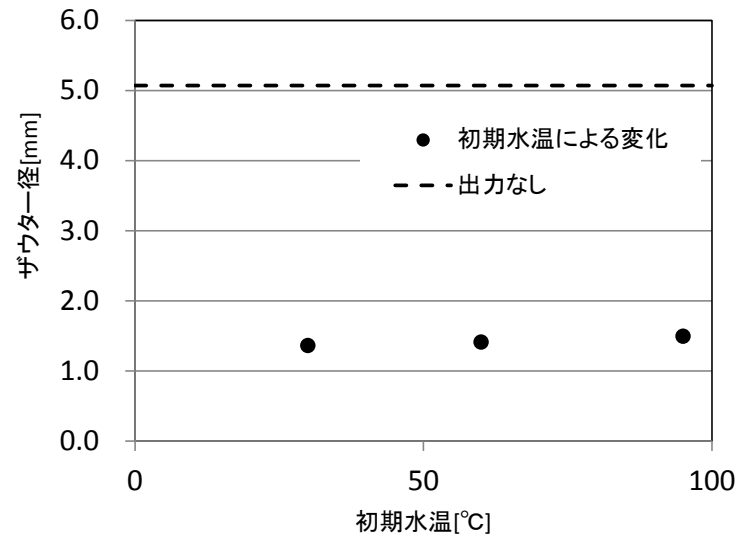


図 3.2-29 初期水温を変化させた場合のザウター径変化  
 (バンドル出力 2.9kW, 初期水位 1m, スプレー流量 0.2m<sup>3</sup>/h, スプレー温度 30℃)

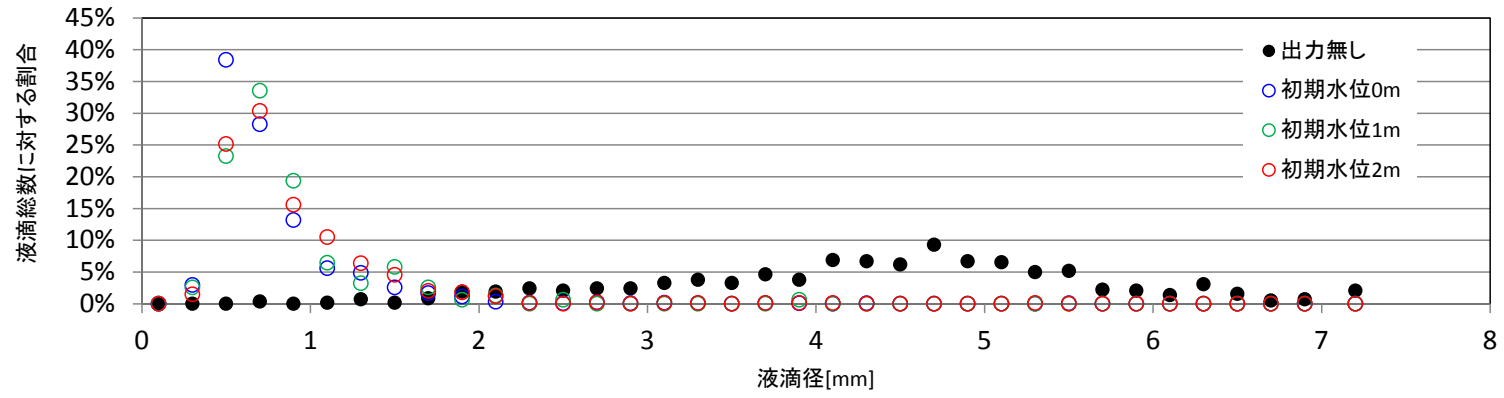


図 3.2-30 初期水位を変化させた場合の液滴径分布変化  
 (バンドル出力 2.9kW, 初期水温 95℃, スプレー流量 0.2m<sup>3</sup>/h, スプレー温度 30℃)

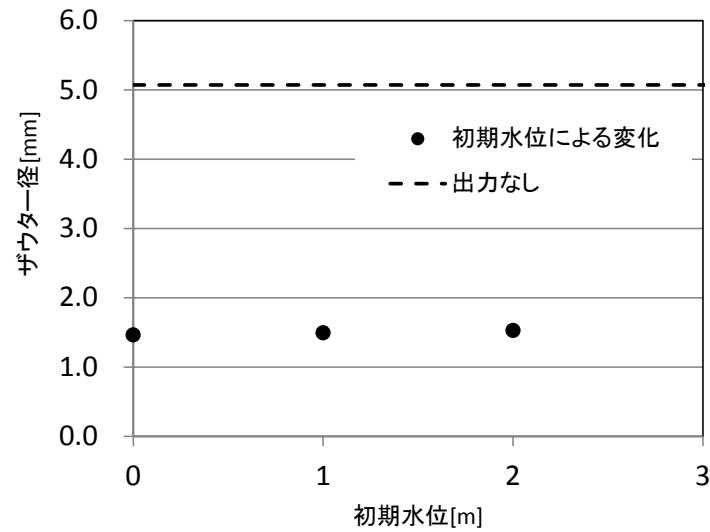


図 3.2-31 初期水位を変化させた場合のザウター径変化  
 (バンドル出力 2.9kW, 初期水温 95℃, スプレー流量 0.2m<sup>3</sup>/h, スプレー温度 30℃)



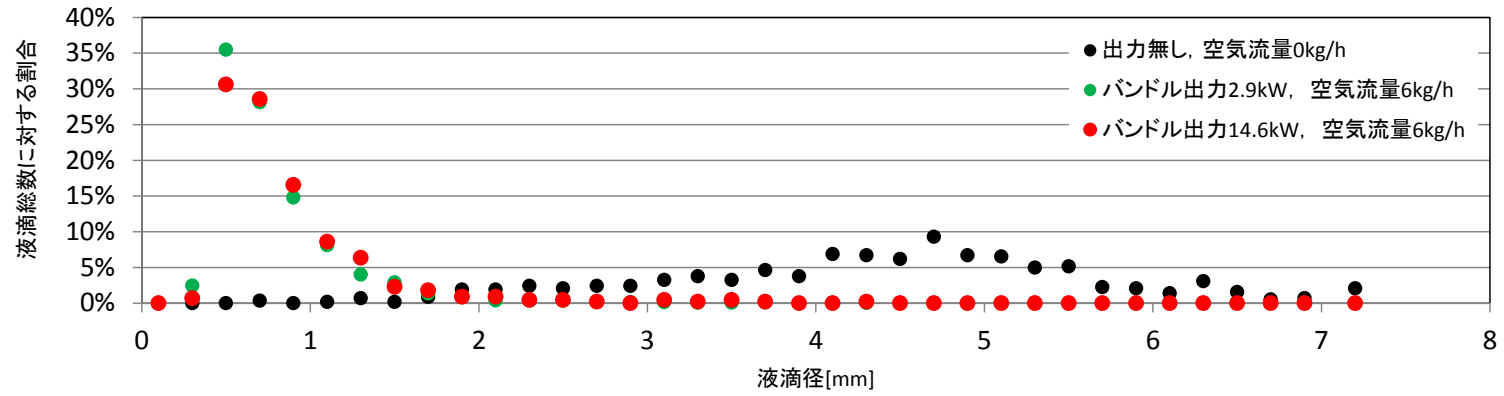


図 3.2-32 出力を変化させた場合の液滴径分布変化(空気試験)  
 (空気流量 6kg/h, 初期温度 30℃, 空気温度 30℃, スプレー流量 0.2m<sup>3</sup>/h, スプレー水温 30℃)

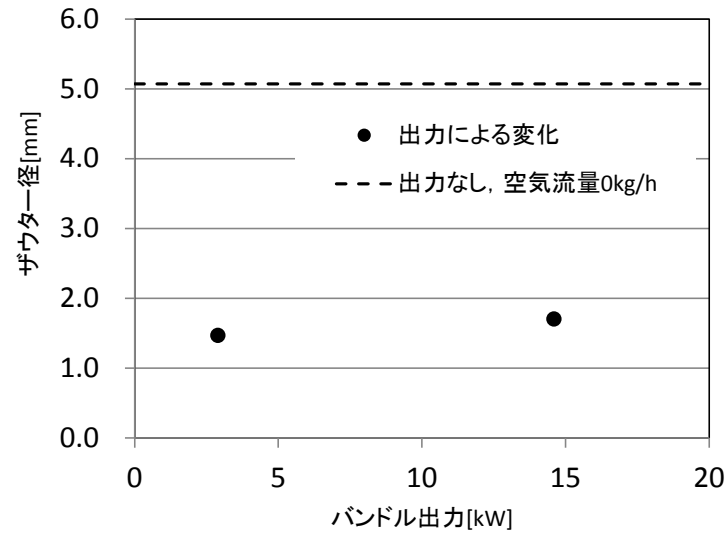


図 3.2-33 出力を変化させた場合のザウター径変化(空気試験)  
 (空気流量 6kg/h, 初期温度 30℃, 空気温度 30℃, スプレー流量 0.2m<sup>3</sup>/h, スプレー水温 30℃)

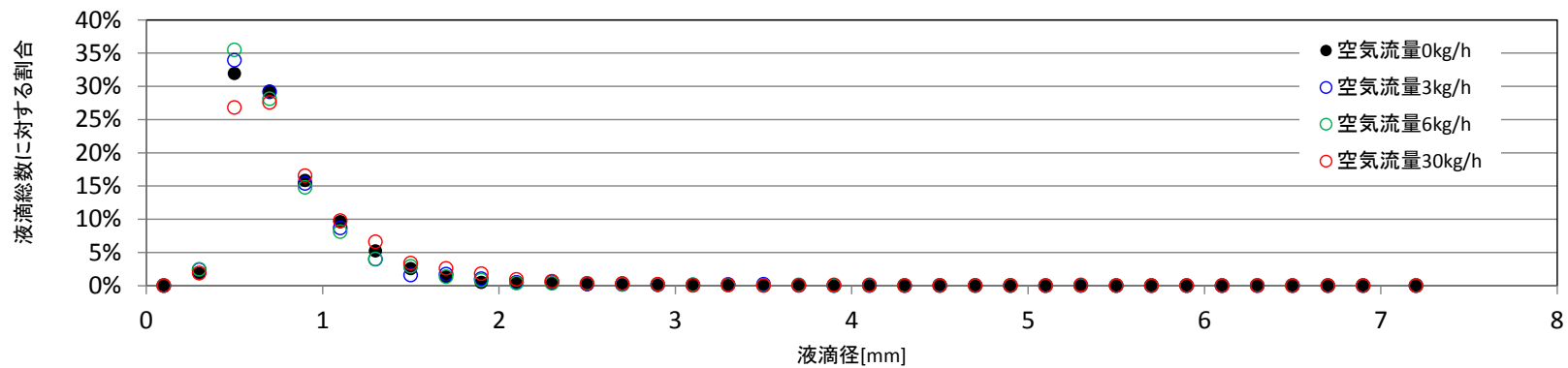


図 3.2-34 空気流量を変化させた場合の液滴径分布変化  
 (バンドル出力 2.9kW, 初期温度 30℃, 空気温度 30℃, スプレー流量 0.2m<sup>3</sup>/h, スプレー水温 30℃)

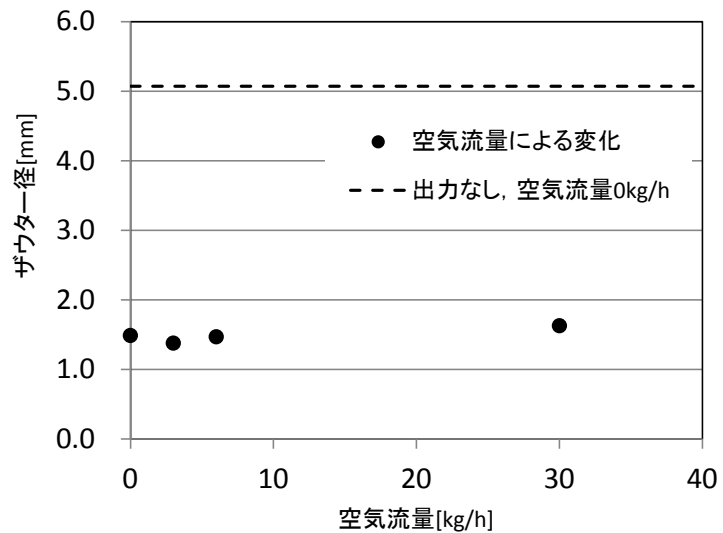


図 3.2-35 空気流量を変化させた場合のザウター径変化  
 (バンドル出力 2.9kW, 初期温度 30℃, 空気温度 30℃, スプレー流量 0.2m<sup>3</sup>/h, スプレー水温 30℃)

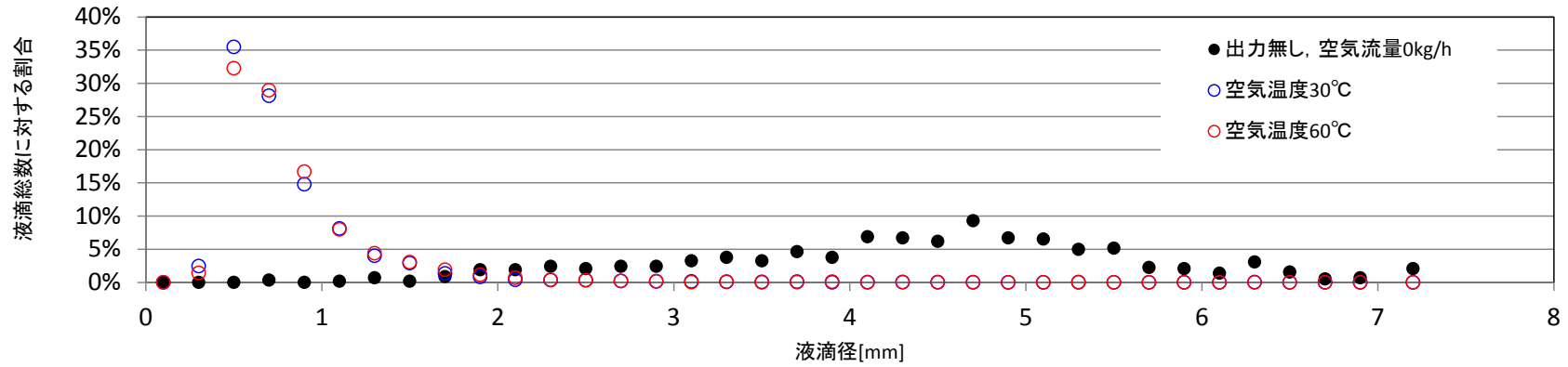


図 3.2-36 空気温度を変化させた場合の液滴径分布変化  
 (バンドル出力 2.9kW, 空気流量 6kg/h, スプレー流量 0.2m<sup>3</sup>/h, スプレー水温 30°C)

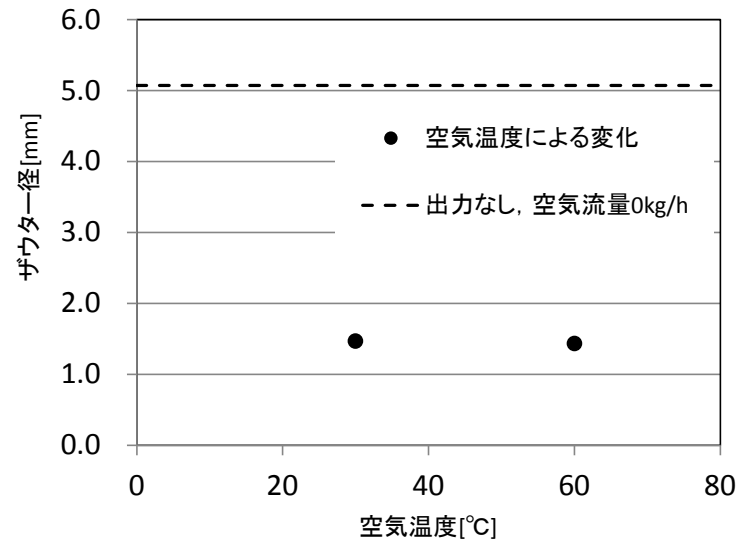


図 3.2-37 空気温度を変化させた場合のザウター径変化  
 (バンドル出力 2.9kW, 空気流量 6kg/h, スプレー流量 0.2m<sup>3</sup>/h, スプレー水温 30°C)

### 3.3 試験データの分析

#### 3.3.1 熱伝達

スプレイ熱伝達試験で取得したデータを整理し、各種パラメータによる熱伝達への影響を分析した。

##### 3.3.1.1 熱伝達係数の評価方法

電気出力により発生した熱量の一部はロッドの温度上昇に消費され、残りは熱伝導、放射及び対流熱伝達によりロッドの外部に伝わる。ここでは、簡便のため熱伝導及び放射が無視できると仮定し、ヒータ出力から温度上昇に消費される熱量を減じることで表面熱流束を算出する。また、表面熱流束をヒータ表面温度とバルク温度の差分で除算することにより熱伝達係数を求めた。なお、本試験ではバルク温度を測定していないため、非発熱ロッドの表面温度で代表する。

$$q'' = \frac{1}{\pi D} \left( \frac{P}{L} - C \frac{T_{w2} - T_{w1}}{t_2 - t_1} \right) \quad (3.3.1-1)$$

$$h = \frac{q''}{T_{w1} - T_{b1}} \quad (3.3.1-2)$$

ここで、

- $q''$  : 熱流束 ( $W/m^2$ )
- $D$  : ロッド径 (m)
- $P$  : ロッド出力 (W)
- $L$  : 有効長 (m)
- $C$  : 単位長さ当たりの熱容量 (J/Km)  
(ヒータロッドサンプルの重量及び寸法、NCF600, Ni, MgO の物性に基つき、 $336 [J/Km]$ と推定。)
- $T_{w1}, T_{w2}$  : タイムステップ 1 及び 2 における壁面温度 (K)
- $t_1, t_2$  : タイムステップ 1 及び 2 における時刻 (s)
- $h$  : 熱伝達係数 ( $W/m^2K$ )
- $T_{b1}$  : タイムステップ 1 におけるバルク温度

##### 3.3.1.2 16 年度データの分析

16 年度のスプレイ熱伝達試験は定格出力 1~3% の高出力条件において実施されている。ここでは、当該データの熱伝達係数を評価した結果を示す。

###### (1) 評価対象ロッド及び軸方向位置

熱伝達係数は代表位置を対象に整理した。軸方向位置については、16 年度取得データは高出力条件であるため、多くの試験では二相水位が大きく上昇し、バンドル上方の熱電対のみが露出した状態でスプレイ温度に到達する。したがって、試験条件の影響を網

羅的に分析するためには、バンドル上方の熱電対を選定することが望ましい。一方、TC1（TAF 位置）は、上部構造物への熱伝導及び上部空間からの空気流入等の影響により、複雑な温度変化を示す傾向が見られた。そこで、評価対象位置としては、TC1 を除いて最上部に位置する熱電対（TC2）を選定した。

評価対象ロッドについては、熱伝達係数の計算において輻射の影響を考慮しないことを踏まえると、輻射伝熱が生じにくい中央付近のロッドから選定することが望ましい。また、熱伝達係数を評価する代表的な軸方向位置として TC2 を対象とするため、TC2 に熱電対を有し、かつ中央付近に配置されたロッドとして No. 16（平均出力ロッド）を評価対象として選定した。

また、バルク温度については、非発熱ロッドが TC2 位置に相当する軸方向位置に熱電対を有していないため、TC1 及び TC3 による測定結果の平均値として TC2 位置におけるバルク温度を推定した。なお、本試験におけるヒータ出力条件では、冠水時及びクエンチ後のように十分大きい熱伝達が期待される状態において壁面過熱度が非常に小さく、測定誤差、評価の不確かさを考慮すると有意な数値が得られない場合がある。そこで、壁面過熱度は最小でも  $1^{\circ}\text{C}$  として熱伝達係数を評価した。

## (2) 評価対象試験ケース

16 年度に実施したスプレイ熱伝達試験では、12 種類の試験パラメータについて影響を確認するため、合計で 100 ケースに近い試験を実施している。これら全てを対象とした分析は現実的でないため、冷却特性に対する影響が大きいパラメータを絞り込み、それらを変化させた試験データを対象として、データ整理及び分析を実施した。

評価対象とする試験ケースと試験条件の一覧を表 3.3.1-1 に示すが、ここでは、初期水位、出力、初期温度、スプレイ水温及び流量の影響を評価する観点から試験ケースを選定した。

## (3) 熱伝達係数の評価結果

図 3.3.1-1 には、ケース 1-4（出力 2%，初期温度  $95^{\circ}\text{C}$ ，初期水位 2m）における熱伝達係数評価結果の時間変化を示す。ケース 1-4 を含む多くのケースでは、熱伝達係数は試験開始後に  $10^4[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$  オーダーまで上昇し、その後スプレイ開始直前には  $\sim 100[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$  まで低下する傾向を示す。これは熱電対が一旦冠水した後、再度露出するためである。また、スプレイ開始後も熱伝達係数は大きく改善されない。これは、スプレイ開始後においてもクエンチ前までは蒸気単相による冷却が支配的となっており、液滴による冷却の寄与は小さいことを示唆している。

スプレイ開始前の熱伝達係数に影響を与える要因としては、出力、初期水温、初期水位が考えられる。図 3.3.1-2、図 3.3.1-3、図 3.3.1-4 には、それぞれケース 1-1（出力 1%）、ケース 10-3（初期温度  $30^{\circ}\text{C}$ ）、ケース 14-4（初期水位 1m）における熱伝達係数の時間変化を示す。これらの試験では、スプレイ開始直前の熱伝達係数がケース 1-4 に比べて明確に小さい傾向が見られる。出力、初期温度、初期水位の低下はいずれも蒸気発生量を低下させる要因となるため、下方からの蒸気流による対流熱伝達が低下した結果と考えられる。

図 3.3.1-5 には、スプレー開始前 100 秒間の水位減少率と熱伝達係数平均値を整理して示す。ここで、水位減少率がほぼゼロの試験条件（ケース 10-1, 10-3, 10-5, 11-1）、及びスプレー開始前において既に TC2 が冠水しているケース 11-3 は除外した。図 3.3.1-5 より、水位減少率の増加にしたがって熱伝達係数は増加する傾向が見られ、蒸気発生量と熱伝達係数の相関を示唆している。

また、スプレー開始後の熱伝達係数に影響を与える要因としては、スプレー水温及び流量が考えられる。図 3.3.1-6 及び図 3.3.1-7 にはケース 1-5（スプレー流量 1.0m<sup>3</sup>/h）及びケース 12-1（スプレー水温 60℃）における熱伝達係数の時間変化を示すが、ケース 1-4 と比べてもスプレー開始後の熱伝達係数に大きな差異は見られない。これは、先述のとおり、スプレー開始後においても蒸気単相による冷却が支配的と考えれば、妥当な傾向である。したがって、スプレー開始後の冷却挙動については、熱伝達係数よりも 3.3.2 に示すクエンチ時間に着目した整理が重要になる。

#### (4) 既存相関式との比較

スプレー開始前における熱伝達係数の評価結果を相関式による予測値と比較するため、Nu 数と Re 数の関係として図 3.3.1-8 のとおり整理した。ここで、Re 数は水位減少率から推定した蒸気発生量を用いて算出しており、また物性値には大気圧における飽和蒸気の値を使用した。図 3.3.1-8 には、単相流における熱伝達の算出に広く用いられる Dittus-Boelter 式<sup><2></sup>、及び FLECHT-SEASET 試験に基づき開発された Wong-Hochreiter 式<sup><3></sup>による計算値をあわせて示す。

・ Dittus-Boelter

$$\text{Nu} = 0.023\text{Re}^{0.8}\text{Pr}^{0.4} \quad (3.3.1-3)$$

・ Wong-Hochreiter

$$\text{Nu} = 0.0797\text{Re}^{0.6774}\text{Pr}^{1/3} \quad (3.3.1-4)$$

乱流領域に相当する高 Re 数 (>2500) に着目すると、試験結果は両相関式による計算値をやや上回る傾向を示す。この理由として、本試験では水面が存在するため、エントレインメントされた液滴、又は二相水位の遥動が冷却を促進している可能性が考えられる。一方、層流領域に相当する低 Re 数 (<2500) では、一般に Nu 数は一定になるとされるが、今回の試験結果は管内流れに対する計算値 4.36 も下回る小さい値となっている。この原因はバルク温度の不確かさによるものと考えられるが、17 年度データの分析においてより詳細に考察する。

### 3.3.1.3 17年度データの分析

17年度に実施したスプレイ熱伝達試験は、実機相当の出力条件において実施されている。ここでは当該データに対する熱伝達係数評価手法の適用性、及び各パラメータによるヒートアップ挙動への影響を分析した結果を示す。

#### (1) 熱伝達係数の評価方法の確認

17年度のスプレイ熱伝達試験では、出力を低下させ平衡状態に至るまで継続したケース（ケース 17-9-1）が含まれる。ここでは、当該データを用いて、熱伝達係数の評価手法の適切性を確認する。

##### a) 試験条件

ケース 17-9-1 の主要な試験条件は次のとおりである。

- ・ 初期温度 : 60 (°C)
- ・ 出力 : 0.05 (%)
- ・ 空気流量 : 6 (kg/h)
- ・ 空気温度 : 55 (°C)
- ・ 試験時間 : 約 16000 秒 (4.6 時間)

##### b) 測定データの特徴

図 3.3.1-9 には、試験終了直前における非発熱ロッドの軸方向温度分布を、次式で求めた平衡状態の温度分布と比較して示す。

$$T(Z) = T_{in} + \frac{P}{GC_p} \frac{Z}{L_H} \quad (3.3.1-5)$$

図 3.3.1-9 より、TC5（約 2.1m）より上方では温度がほぼ一定となっている。この原因として、輻射による体系外への熱流出、バンドル内を循環するような流動の影響が考えられる。

また、図 3.3.1-10 には、TC7 及び TC9 による温度測定結果の時間変化を示す。TC7 の温度変化は 16000 秒後においても上昇を継続しており、平衡状態に到達していない。一方、TC9 においては温度上昇が飽和する傾向が確認できる。さらに、この試験条件の特徴として、顕著な水平方向温度分布が見られる。同じ平均出力ロッドでも、中央付近に配置された No. 5 は、最外周に配置された No. 2 に比べて 50°C 以上高い。これは、高出力条件で実施された 16 年度データには見られない傾向であり、出力を低下させることによって輻射による伝熱量が相対的に増加したためと考えられる。

##### c) 熱伝達係数の評価結果

16 年度データと同様の方法で、高出力ロッド (No. 8) 及び平均出力ロッド (No. 2, No. 3, No. 5) の TC9 の温度測定結果を用いて熱伝達係数を評価し、Nu 数として整理した結果を図 3.3.1-11 に示す。

図 3.3.1-11 において、ロッド間で Nu 数に差異が見られるのは、バルク温度の水平方向分布による影響と考えられる。非発熱ロッドの温度でバルク温度を代表しているが、例えば、中央に配置された高出力ロッド (No. 8) に対しては、バルク温度を過小に評価し、結果として熱伝達係数は過小に算出されている可能性が高い。また、Nu 数が時間とともに増加する傾向を示すのは、図 3.3.1-12 に示すように非発熱ロッドの表面温度とバルク温度の差によると推測される。

なお、上述したバルク温度による熱伝達係数への影響を考慮するため、例えば非発熱ロッドの温度上昇傾向から蒸気温度を計算するとともに、ヒータロッド間の温度上昇傾向からバルク温度の水平方向分布を推測するといった方法が考えられる。バルク-非発熱ロッド間の熱伝達係数が  $Nu=4.36$  に従うと仮定し、また No. 8 周辺のバルク温度を高出力ロッド (No. 8) と平均出力ロッド (No. 3) の温度上昇の比から推測して、熱伝達係数を評価した結果を図 3.3.1-13 に示すが、補正により現実的な熱伝達係数が得られることが確認される。ただし、このような評価は計算で仮定する条件に大きく依存し、パラメータによる影響を詳細に分析する目的には適さない。

#### d) まとめ

本評価で使用した熱伝達係数の評価方法は、非発熱ロッドとバルク温度に差がある条件、及びバルク温度の水平方向温度が顕著な条件では、適用に課題があることを確認した。

16 年度データについては、高出力条件で取得されたデータであることから、水平方向温度分布は比較的平坦であり、したがって大きな問題にはならないと考えられる。また、非発熱ロッドとバルク温度の差は蒸気発生量が小さい条件で顕在化するため、図 3.3.1-8 のうち Re 数が高い領域の評価結果は信頼できるものの、Re 数が低い領域については過小に評価している可能性が高い。

17 年度データについては、低出力条件で取得されたデータであるため、水平方向には顕著な温度分布が見られる。また、いずれの条件でも蒸気発生量又は空気流量は小さく、非発熱ロッドとバルク温度の差は無視できない。このため、17 年度データの分析には熱伝達係数は使用せず、温度上昇傾向を直接比較することで、各パラメータによる熱伝達への影響を確認する。

### (2) ヒートアップ挙動の比較

#### a) 評価対象試験ケース

評価対象とする試験ケースを表 3.3.1-2 に示す。試験ケースは、0.1%出力で統一し、初期温度、水位、空気流量及び出力分布の影響を分析する観点で選定した。

評価対象ロッドは、代表的に高出力ロッド (No. 8) と非発熱ロッドとする。また、評価対象とする軸方向位置は、蒸気流量、空気流量の影響が現れやすい試験体下方から優先的に評価することとした。ただし、水位が設定されている試験では露出している範囲で対象を選定した。



## b) 初期温度の影響

図 3.3.1-15 には、初期温度が異なるケースにおける温度の時間変化を比較して示す。図 3.3.1-15 では、露出範囲における最下部の熱電対として、各ロッドの TC7 による測定結果を比較して示している。同図において、温度はほぼ平行に上昇しており、ヒートアップ挙動に大きな差異は見られない。

さらに詳細に影響を確認するため、TC7 による測定結果を初期温度からの増分として整理した結果を図 3.3.1-16 に示す。同図より、いずれのロッドについても初期温度 30℃ の場合に温度上昇がわずかに速い傾向を示す。この傾向の差については、次のような原因が考えられる。

- ・ 初期温度が高い場合、試験開始後すぐに蒸気が発生するため、飽和温度の蒸気が下方から供給されることでバルク温度の上昇が抑えられ、その結果ヒータロッド温度の上昇がやや緩やかになる。
- ・ 初期温度が高いほど、輻射及び熱伝導による体系外への熱流出が大きくなるため、温度上昇がより緩慢になる。

一方、初期温度が高い場合においても 0.1%出力で生じる蒸気量はごくわずかであることを踏まえると、対流熱伝達による影響は考えにくい。1m の範囲で生じる蒸気発生量から概算すると、蒸気流の Re 数は 50 程度に過ぎず、Nu 数は初期温度に依らず一定と考えるのが妥当である。

また、TC3 による測定結果を初期温度からの増分として整理した結果を図 3.3.1-17 に示すが、下方の熱電対と同様の傾向が確認できる。

## c) 初期水位の影響

図 3.3.1-18 には、初期水位が異なるケースにおける温度の時間変化を比較して示す。図 3.3.1-18 では、露出範囲における最下部の熱電対として、各ロッドの TC7 による測定結果を比較して示している。同図より、BAF 水位の方が 1.0m 水位よりも温度上昇が速い傾向が確認される。温度上昇の差は高出力ロッド (No.8) の温度が飽和温度を超えるタイミングから生じており、1.0m 水位条件では下方からの飽和蒸気の供給によりバルク温度の上昇が緩やかになることが要因と考えられる。

さらに、TC3 の温度変化を整理した結果を図 3.3.1-19 に示す。同図より、上方の熱電対では系統的な差が認められず、いずれの条件でもほぼ同等の温度変化を示すことが確認できる。これは、上方の熱電対においては、下部からの蒸気流入に比べて、輻射及びバンドル内流動の影響が相対的に増加するためと考えられる。

初期温度の影響とあわせて考察すると、初期温度及び初期水位による影響は次のとおり整理される。

- ・ 初期温度及び初期水位が高い条件では、下方からの蒸気供給により温度上昇が緩やかになる。ただし、この影響は水面近傍のみに現れ、上方の温度上昇には大きく影響しない。
- ・ 初期温度が高い条件では、蒸気供給の効果に加えて輻射及び熱伝導による熱流出が増加する。この影響は軸方向位置に依らないため、上方においても温度上昇がやや緩やかな傾向を示す。

#### d) 空気流量の影響

図 3.3.1-20 には、BAF 水位条件と空気強制対流条件における温度の時間変化を比較して示す。図 3.3.1-20 では、最下部の熱電対として各ロッドの TC9 による測定結果を比較して示している。同図より、空気強制対流条件では温度上昇が飽和しており、BAF 水位条件と明確に異なる傾向を示している。空気強制対流条件における流量は高々 30kg/h であり、Re 数に換算しても 1000 程度に過ぎないことを考慮すると、空気強制対流により熱伝達係数が著しく増加するとは考えられず、バルク温度の上昇が抑えられる効果により、温度上昇が飽和すると考えるのが妥当である。

また、TC3 の温度変化を整理した結果を図 3.3.1-21 に示す。同図より、上方の熱電対では系統的な差が認められず、いずれの条件でもほぼ同等の温度変化を示すことが確認できる。これは、上方の熱電対において、下部からの空気流入に比べて、輻射及びバンドル内流動の影響が相対的に増加していると考えられる。

さらに、図 3.3.1-22 には、空気流量 0kg/h 条件における温度の時間変化を BAF 水位条件と比較して示す。当該条件は、チャンネルボックスラック間とバンドル部を循環する自然循環による冷却を期待して実施した条件であるが、図 3.3.1-22 より、下方から流入する空気の影響を受けやすい TC9 においても系統的な差異は見られない。この結果は、本試験体系において自然循環がほとんど生じていないことを示唆しているが、軸方向にほとんど温度分布が生じていない傾向を踏まえると妥当な傾向と考えられる。

#### e) 出力分布の影響

図 3.3.1-23～図 3.3.1-25 には、各出力分布における温度の時間変化を比較して示す。図 3.3.1-23～図 3.3.1-25 では、最下部の熱電対として各ロッドの TC9 による測定結果を比較して示している。非発熱ロッドと高出力ロッド (No. 8) について、各出力分布における温度の大小関係は次のとおりである。

##### 非発熱ロッド

温度の大小関係はおおよそ次のとおりである。

$$【A】 \cong 【B】 \cong 【C-b】 > 【C-a】$$

【C-a】のみ有意に低い傾向を示すのは、バンドル出力及び当該ロッドを囲むロッド出力がその他の出力分布に比べて小さいためと考えられる。

##### 高出力ロッド (No. 8)

温度の大小関係はおおよそ次のとおりである。

$$【C-b】 > 【A】 > 【C-a】 > 【B】$$

ロッド出力は【C-b】が最も高く、次に高いのが【A】及び【C-a】で、【B】が最も低くなる。したがって、温度の関係は、ロッド出力の大小関係におおよそ従うといえるが、同じロッド出力でも温度が【A】>【C-a】となるのは、バンドル出力の差異に起因したバルク温度の違いによるものと考えられる。また、【C-a】と【B】の温度を比較すると、試験開始後徐々に【C-a】が【B】を上回り始めるが、その後徐々に差異は減少する。これは、試験開始直後はバルク温度に大きな差異がないためロッド出力の差異により温度が【C-a】>【B】となるものの、【B】のバルク温度が徐々に高くなるにしたがって、ロ

ッド出力の差異が相殺されるためと考えられる。

以上を踏まえると、ヒートアップ挙動にはロッド自体の出力に加えて、バンドル出力が大きく影響するといえる。

表 3.3.1-1 評価対象とする試験ケースと試験条件（16年度データ）

試験ケース	出力 (%)	スプレイ 流量 (m <sup>3</sup> /h)	初期温度 (°C)	スプレイ 水温 (°C)	初期水位 (m)
1-1	1	0.2	95	30	2.0
1-2	1	1.0	95	30	2.0
1-4	2	0.2	95	30	2.0
1-5	2	1.0	95	30	2.0
1-6a	2	0.1	95	30	2.0
1-6b	2	0.4	95	30	2.0
1-6c	2	0.6	95	30	2.0
1-7	3	0.2	95	30	2.0
1-8	3	1.0	95	30	2.0
10-1	1	1.0	30	30	2.0
10-3	2	1.0	30	30	2.0
10-5	3	1.0	30	30	2.0
11-1	1	1.0	60	30	2.0
11-3	2	1.0	60	30	2.0
11-5	3	1.0	60	30	2.0
12-1	2	0.2	95	60	2.0
12-2	2	1.0	95	60	2.0
13-1	1	0.2	95	30	1.5
13-4	2	0.2	95	30	1.5
13-5	2	1.0	95	30	1.5
13-7	3	0.2	95	30	1.5
14-1	1	0.2	95	30	1.0
14-4	2	0.2	95	30	1.0
14-5	2	1.0	95	30	1.0
14-7	3	0.2	95	30	1.0

表 3.3.1-2 評価対象とする試験ケースと試験条件（17年度データ）

試験ケース	出力分布 (*1)	初期水位 (m)	初期温度 (°C)	出力 (%)	空気流量 (kg/h)	空気温度 (°C)
17-1-3	【A】	1.0	95	0.1	—	—
17-3-2	【A】	1.0	30	0.1	—	—
17-4-1	【A】	1.0	60	0.1	—	—
17-5-1	【A】	BAF	30	0.1	—	—
17-5-5	【A】	BAF	60	0.1	—	—
17-6-2	【A】	2.0	95	0.1	—	—
17-6-11	【A】	2.0	30	0.1	—	—
17-6-13	【A】	2.0	60	0.1	—	—
17-8-2	【A】	—	30	0.1	30	30
17-8-8	【A】	—	30	0.1	0	—
17-8-9	【A】	—	60	0.1	0	—
17-9-4	【A】	—	60	0.1	30	55
17-11-2	【B】	—	30	0.1	0	—
17-11-4	【B】	—	30	0.1	30	30
17-11-6	【B】	BAF	30	0.1	—	—
17-12-3	【C-a】	—	30	0.1	0	—
17-12-4	【C-b】	—	30	0.1	0	—
17-12-7	【C-a】	—	30	0.1	30	30
17-12-8	【C-b】	—	30	0.1	30	30
17-12-11	【C-a】	BAF	30	0.1	—	—

(\*1) 図 3.3.1-14 参照

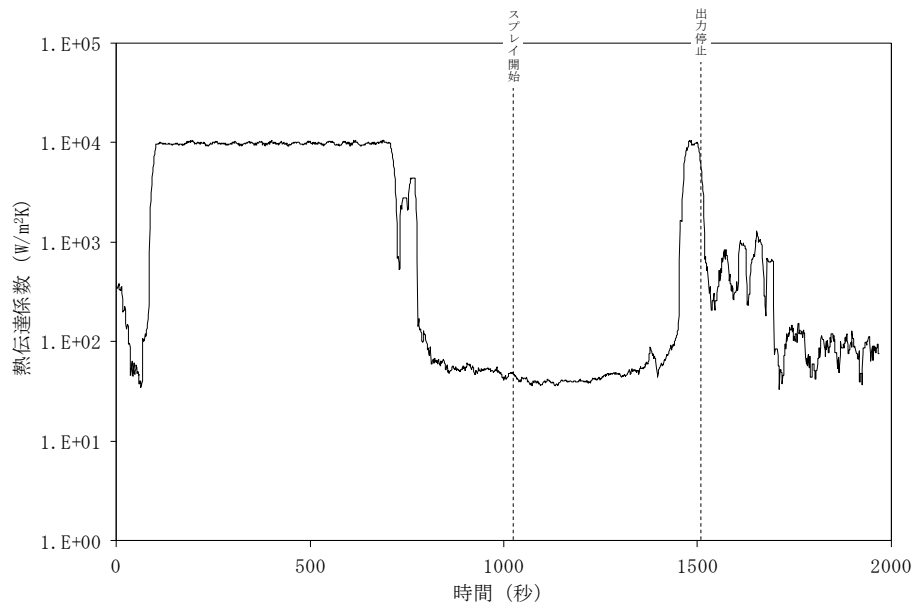


図 3.3.1-1 熱伝達係数の時間変化 (ケース 1-4)  
 (出力 2%, 初期温度 95℃, 初期水位 2.0m, スプレイ流量 0.2m³/h, スプレイ水温 30℃)

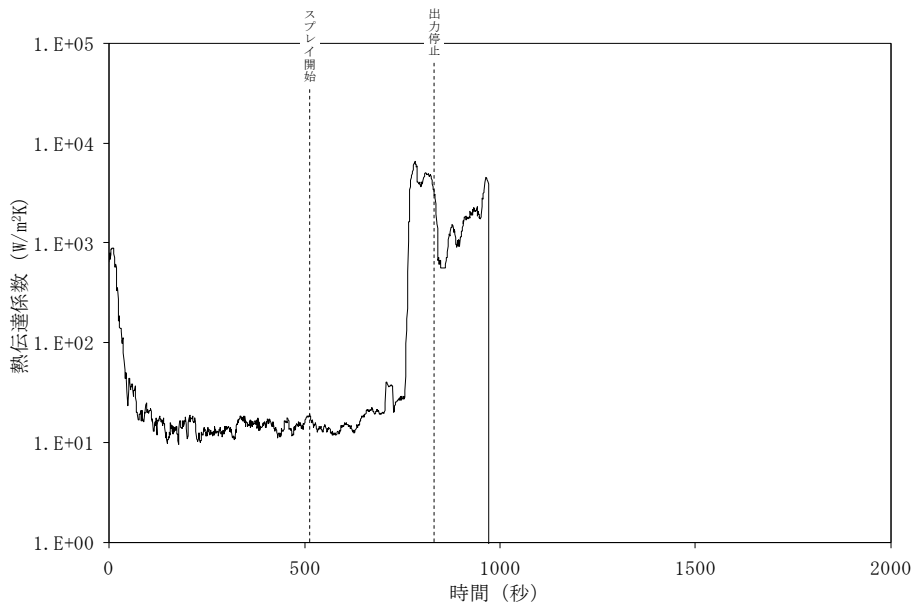


図 3.3.1-2 熱伝達係数の時間変化 (ケース 1-1)  
 (出力 1%)

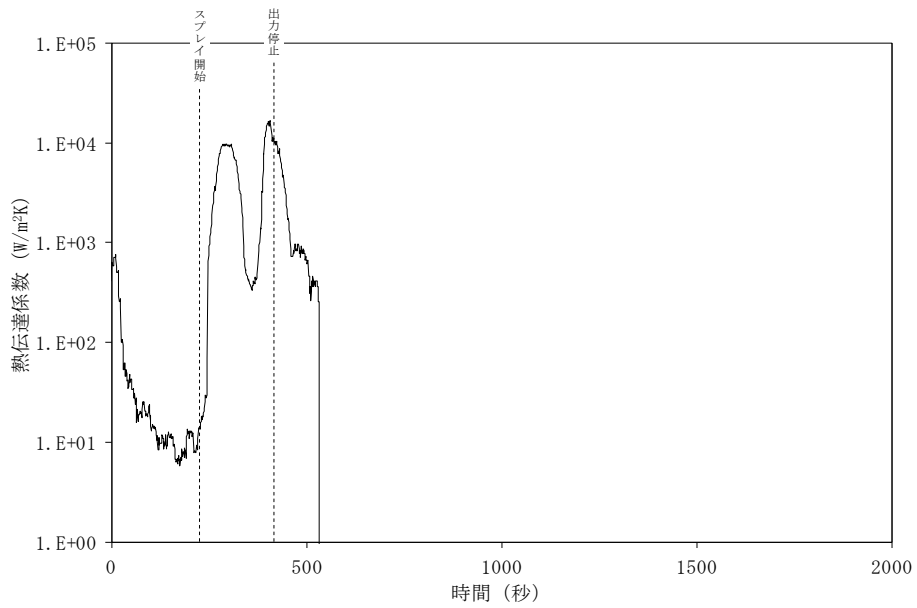


図 3.3.1-3 熱伝達係数の時間変化 (ケース 10-3)  
(初期温度 30°C)

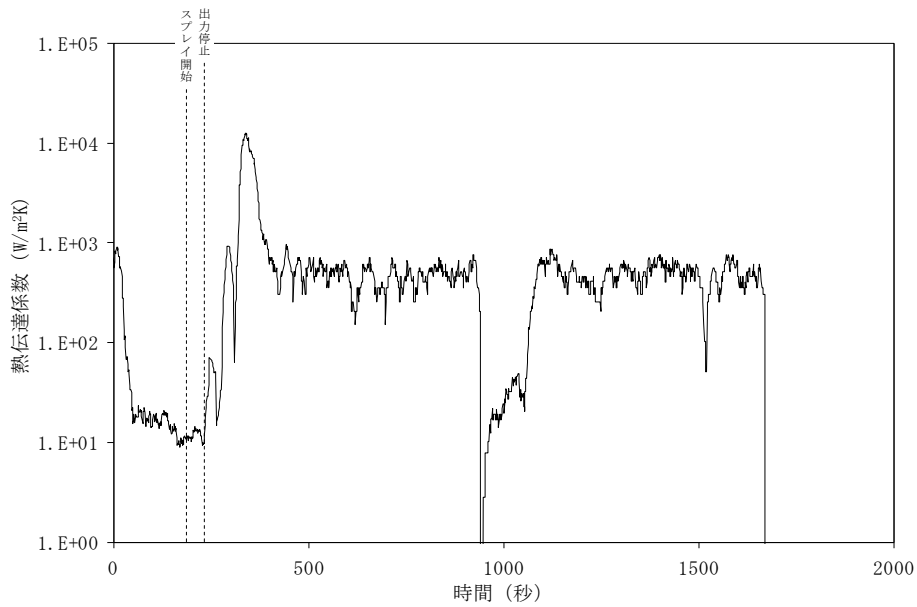


図 3.3.1-4 熱伝達係数の時間変化 (ケース 14-4)  
(初期水位 1.0m)

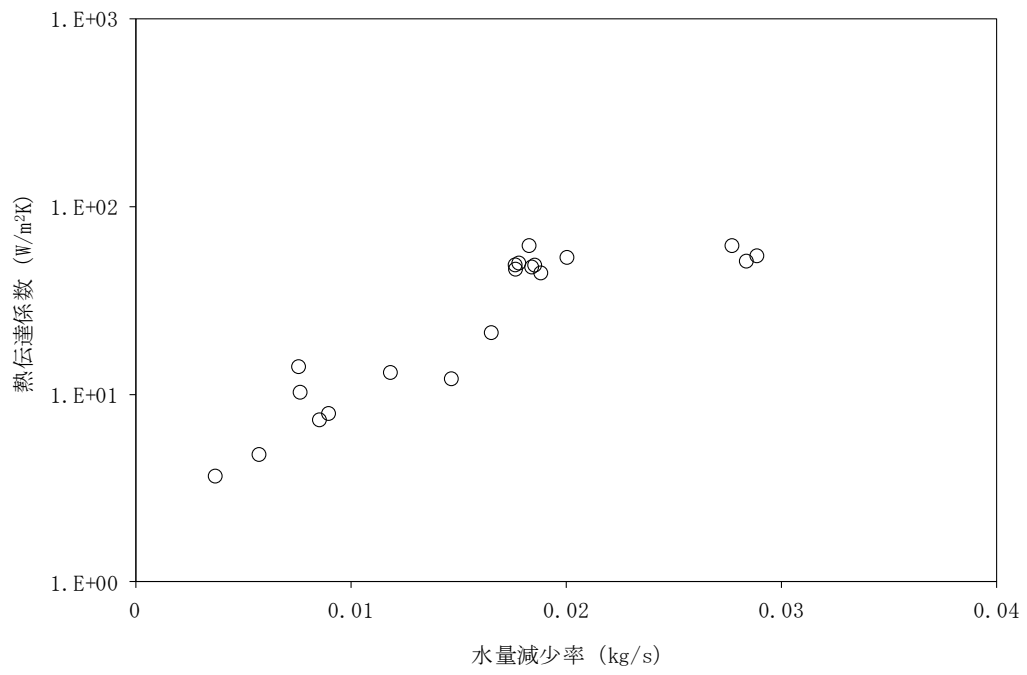


図 3.3.1-5 水量減少率と熱伝達係数の関係



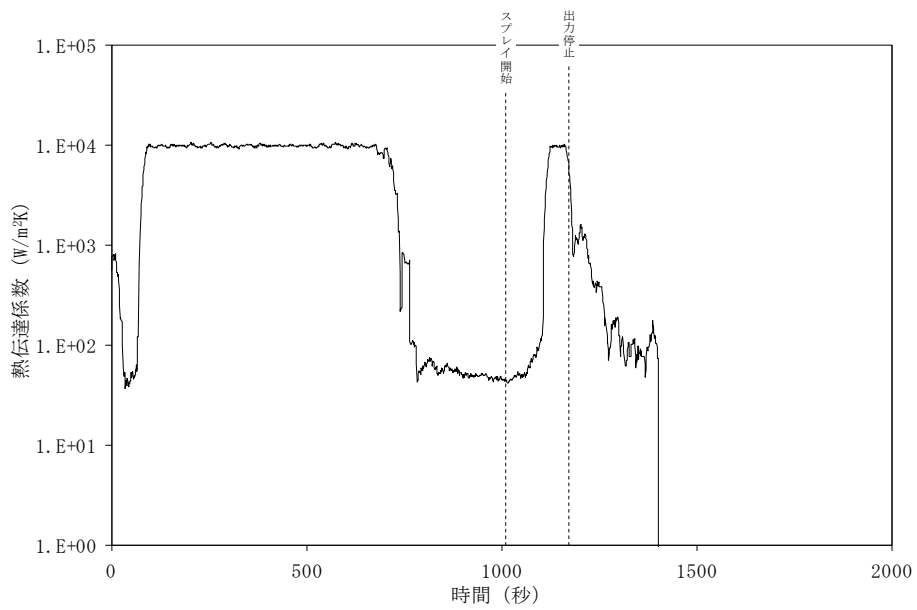


図 3.3.1-6 熱伝達係数の時間変化 (ケース 1-5)  
(スプレー流量 1.0m<sup>3</sup>/h)

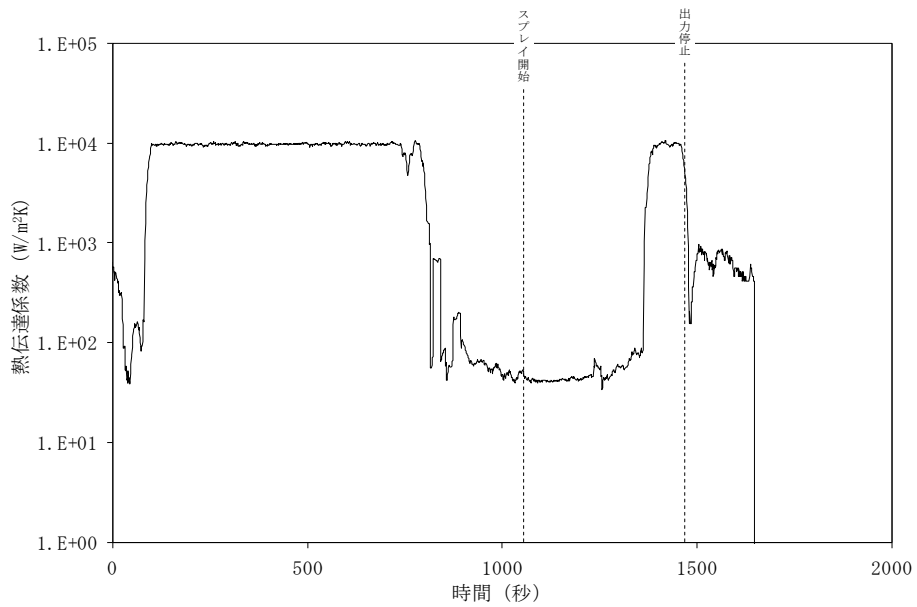


図 3.3.1-7 熱伝達係数の時間変化 (ケース 12-1)  
(スプレー水温 60°C)

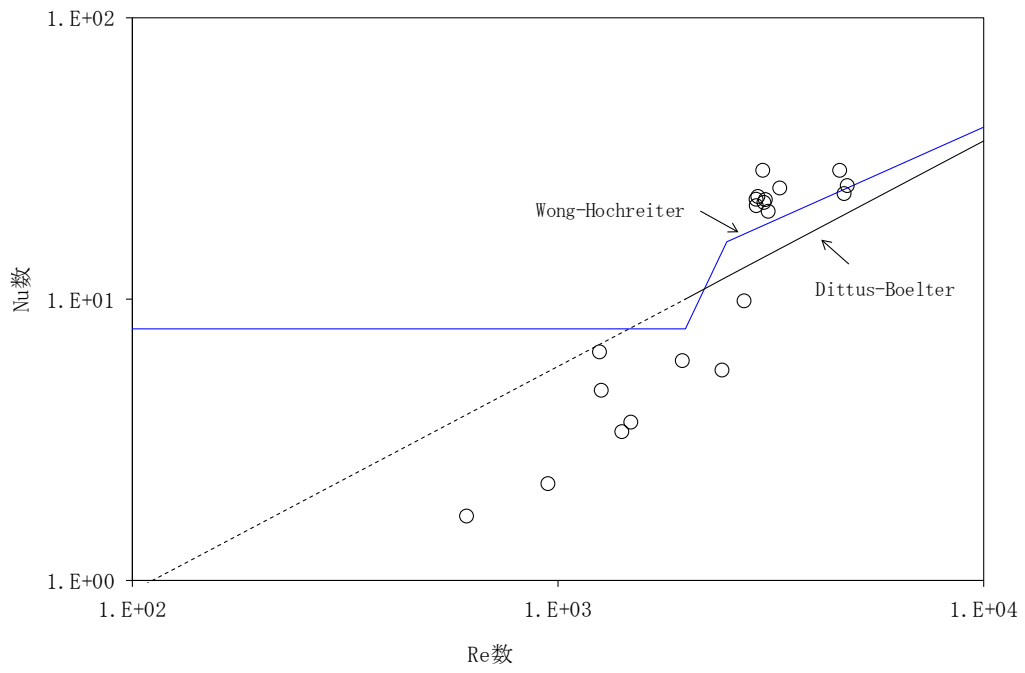


図 3.3.1-8 熱伝達係数評価結果の相関式との比較

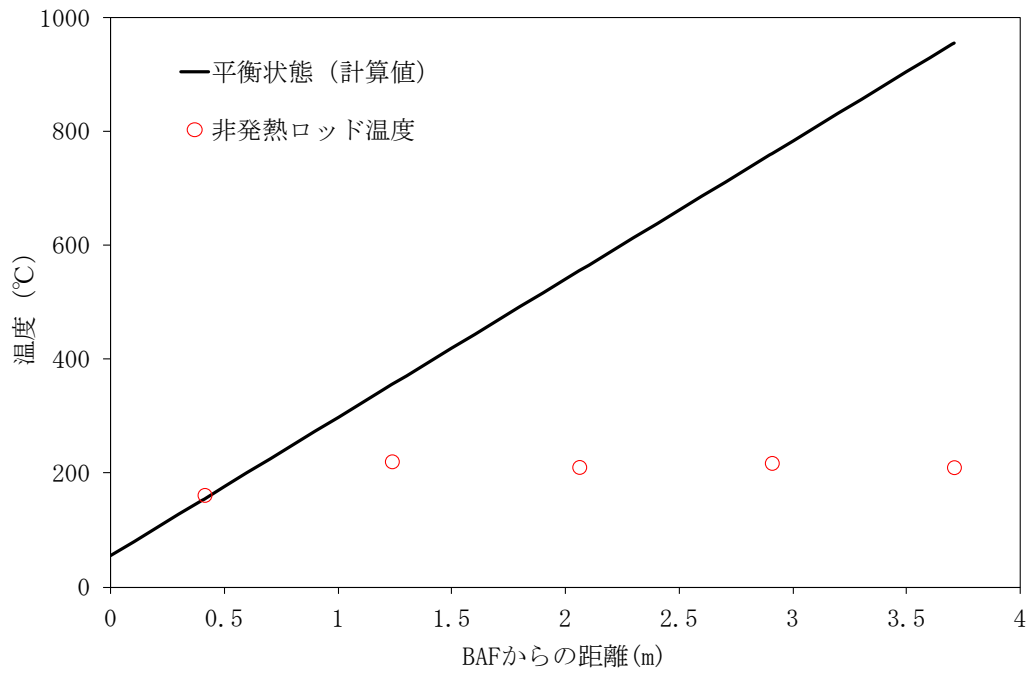
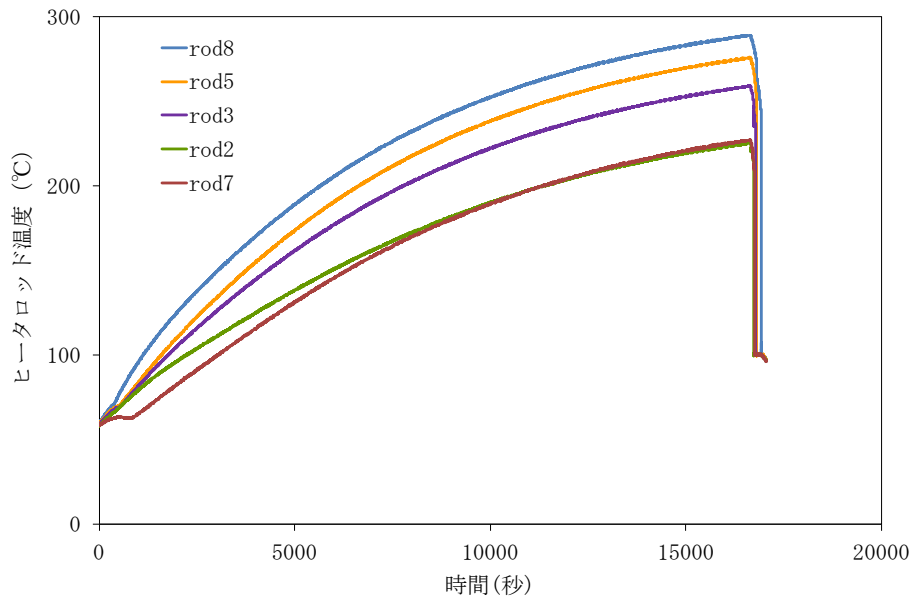
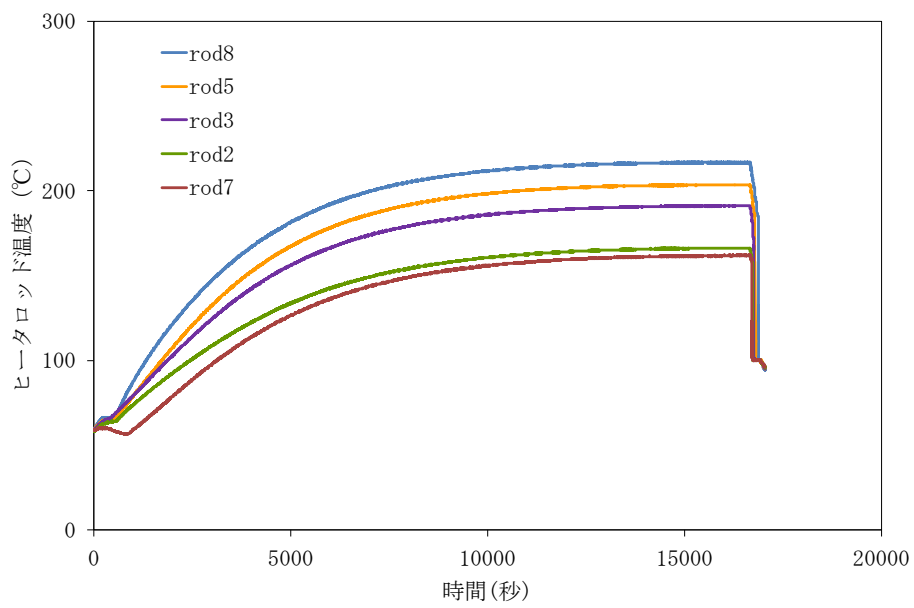


図 3.3.1-9 非発熱ロッドの軸方向温度分布 (ケース 17-9-1, 16000 秒後)



(TC7)



(TC9)

図 3.3.1-10 各ヒータロッド温度の時間変化 (ケース 17-9-1)

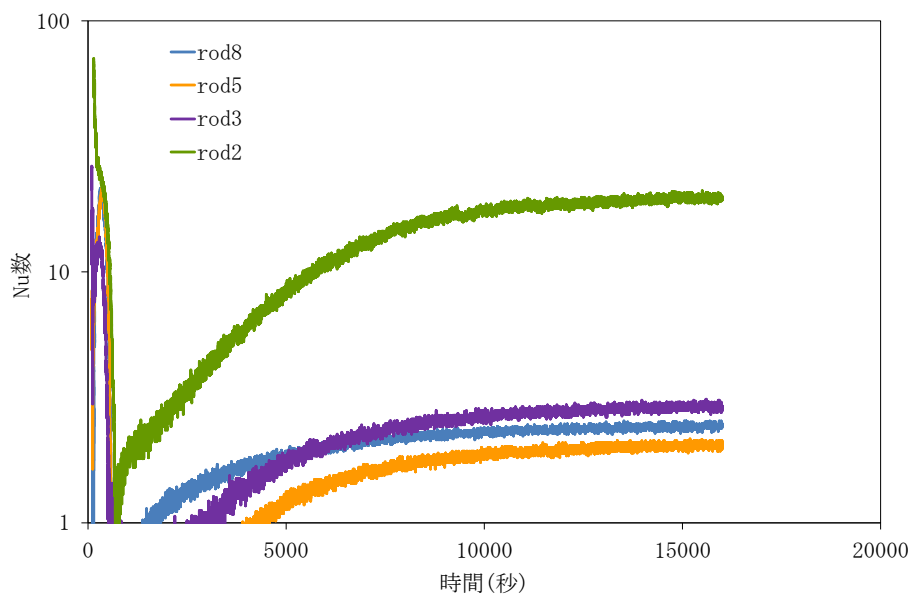


図 3.3.1-11 熱伝達係数の評価結果 (ケース 17-9-1, TC9)

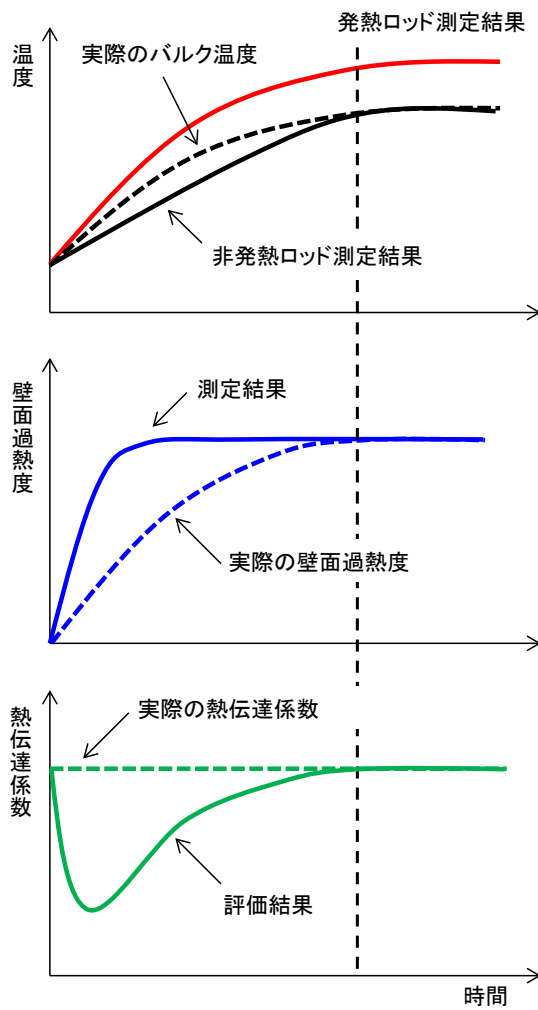


図 3.3.1-12 非発熱ロッド温度を用いた熱伝達係数評価のイメージ

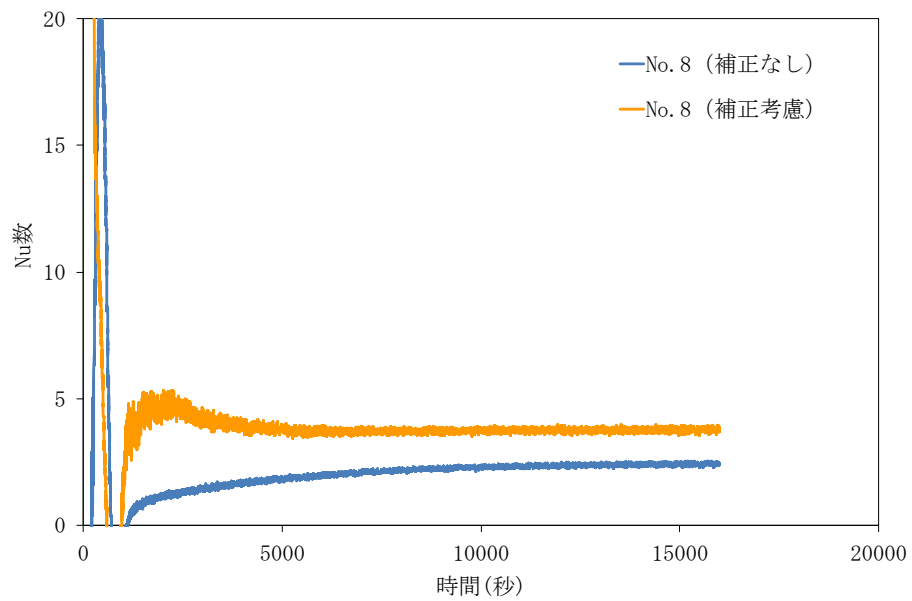
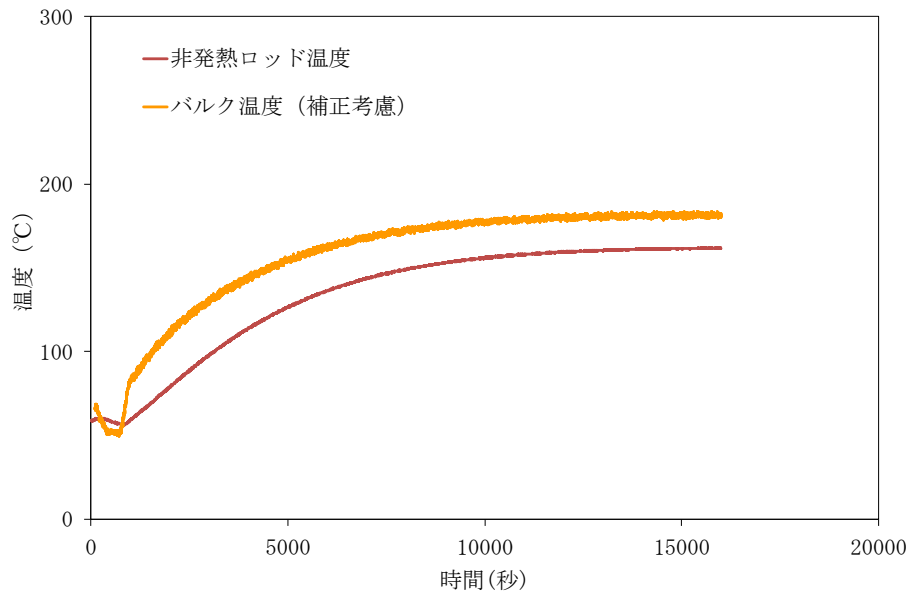
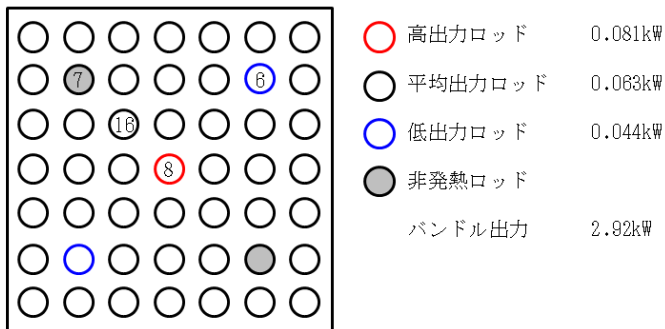
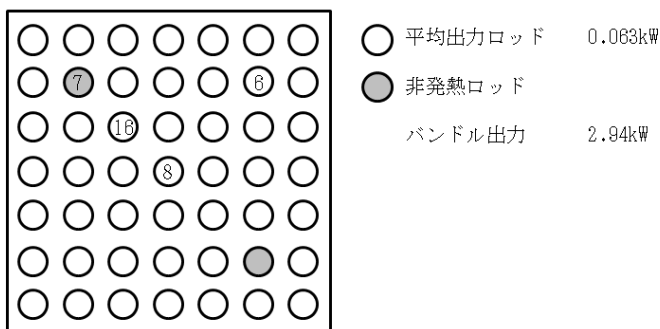


図 3.3.1-13 熱伝達係数評価の補正の例

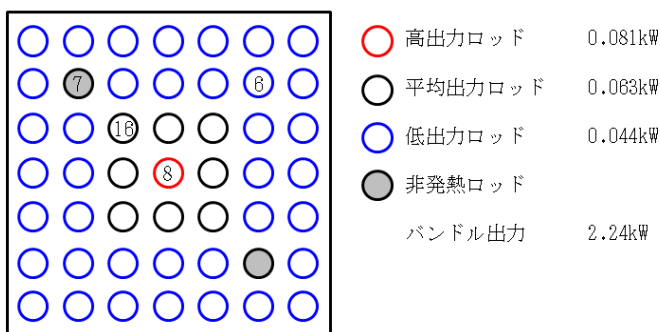
出力分布【A】



出力分布【B】



出力分布【C-a】(各ロッドタイプの出力が出力分布 A と同一, バンドル出力は低下)



出力分布【C-b】(バンドル出力が出力分布 A と同一, 各ロッドタイプの出力は増加)

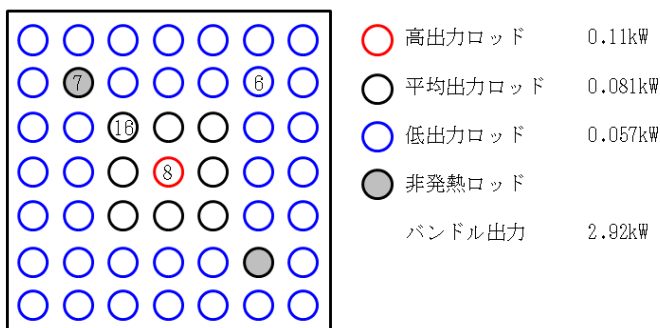


図 3.3.1-14 試験における水平方向出力分布



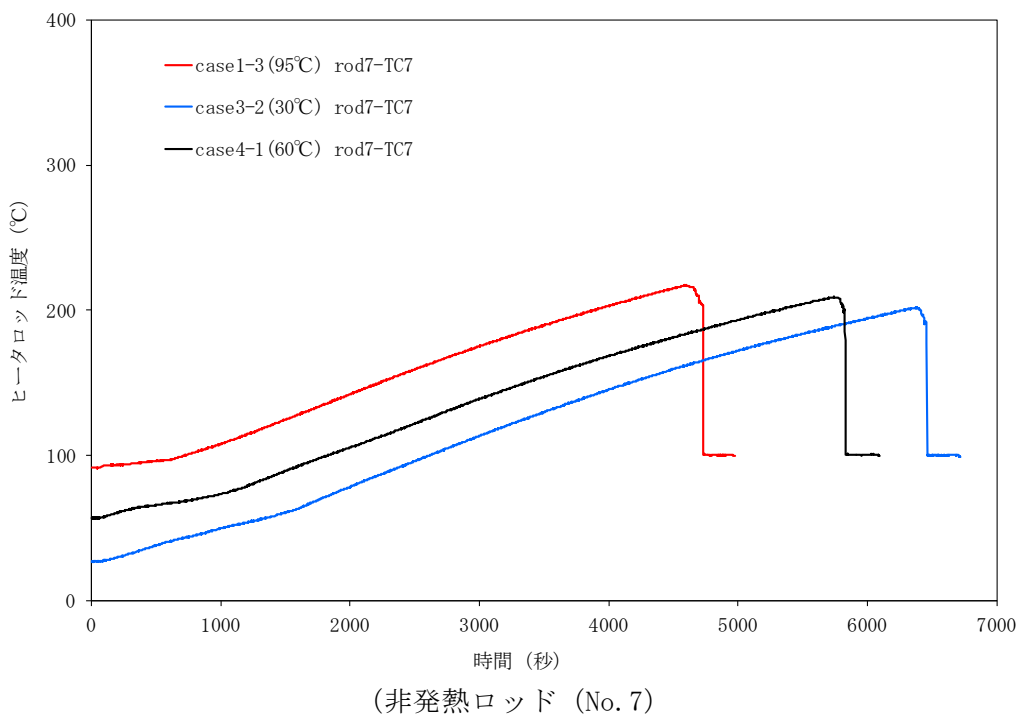
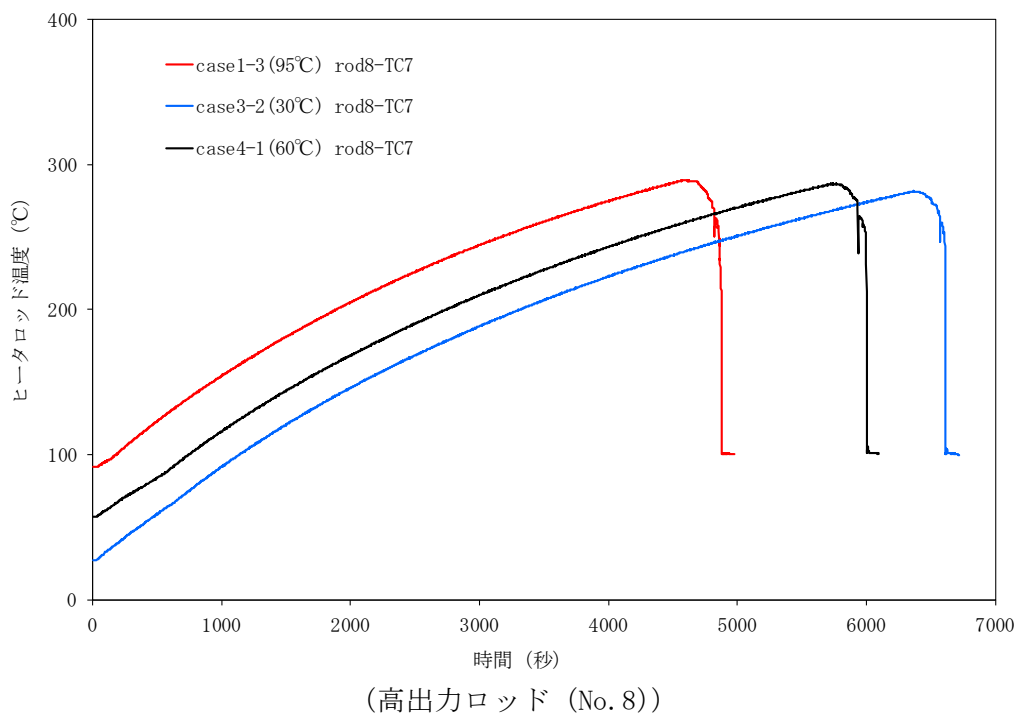


図 3.3.1-15 初期温度によるヒートアップ挙動への影響 (TC7)

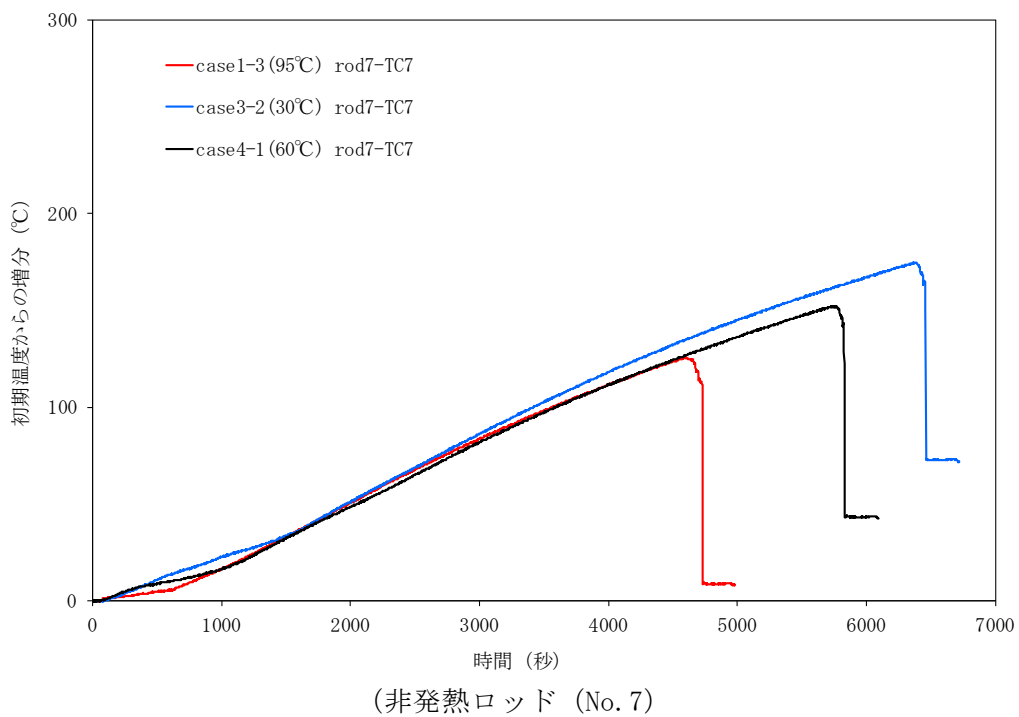
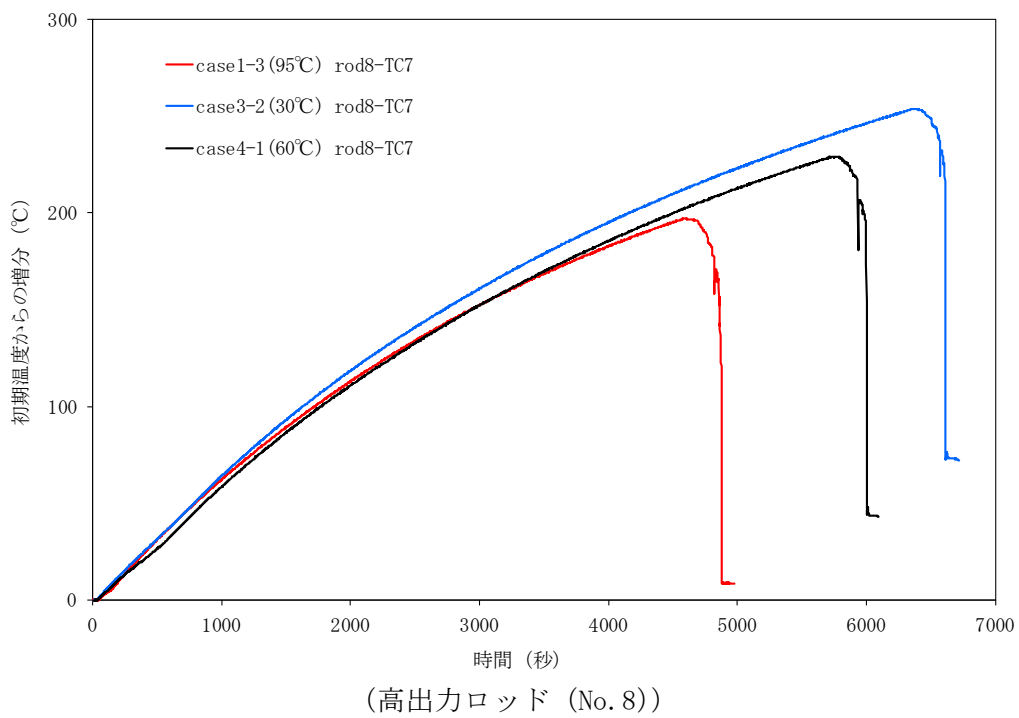


図 3.3.1-16 初期温度によるヒートアップ挙動への影響 (TC7, 温度増分)

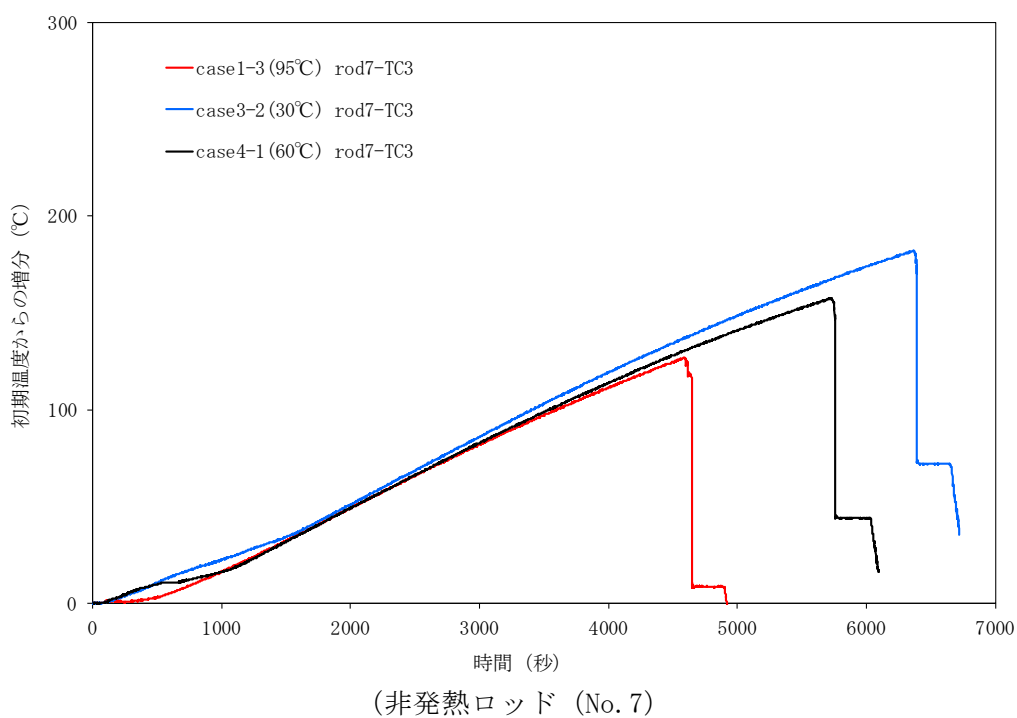
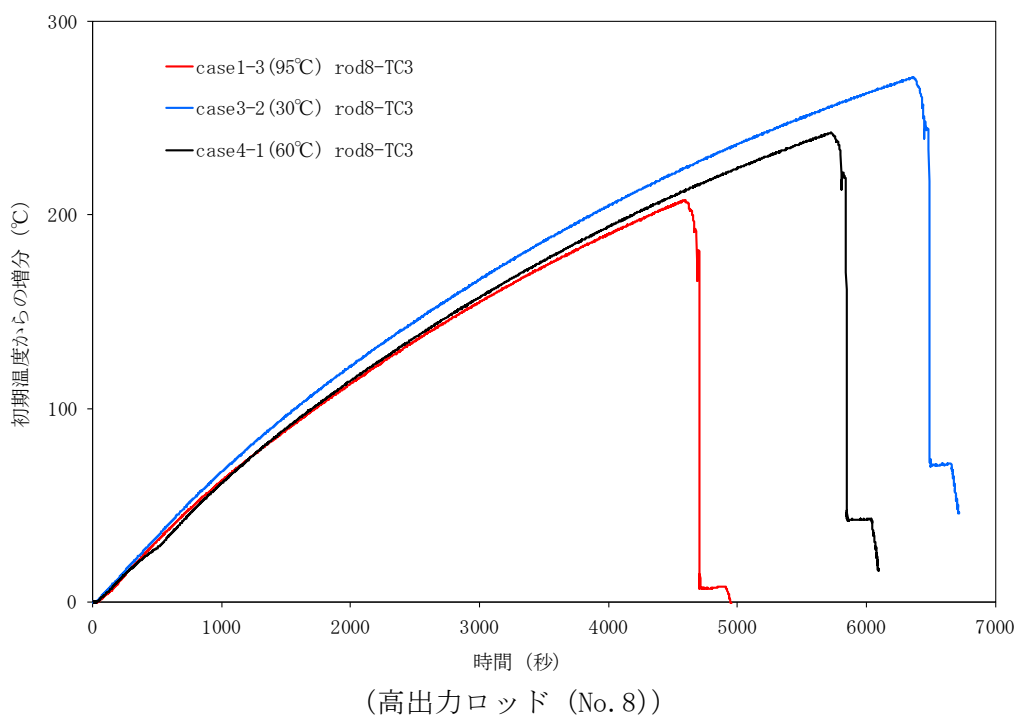
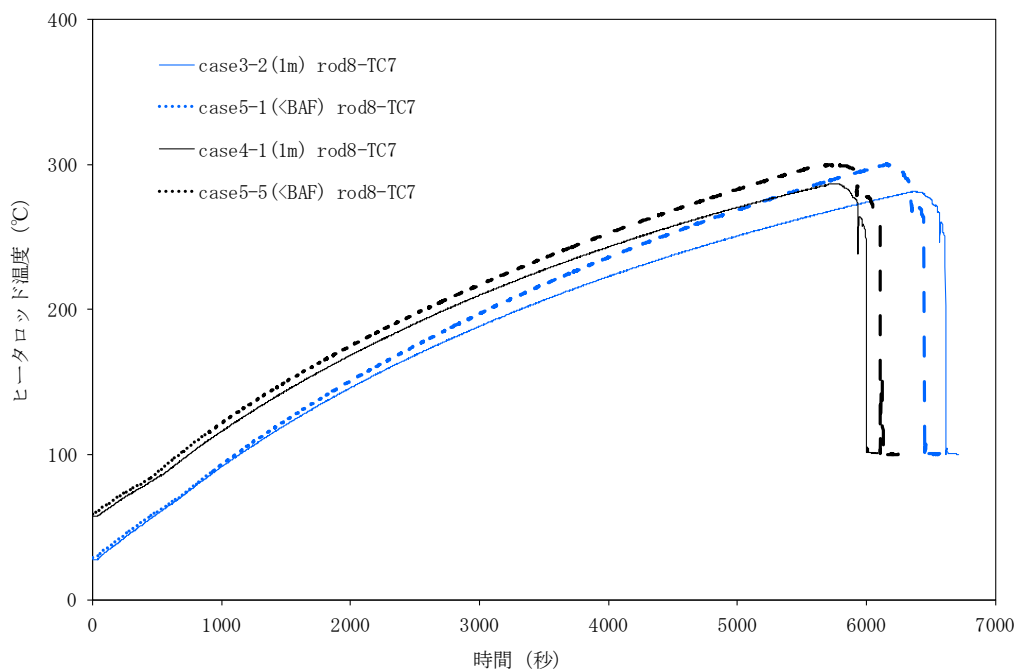
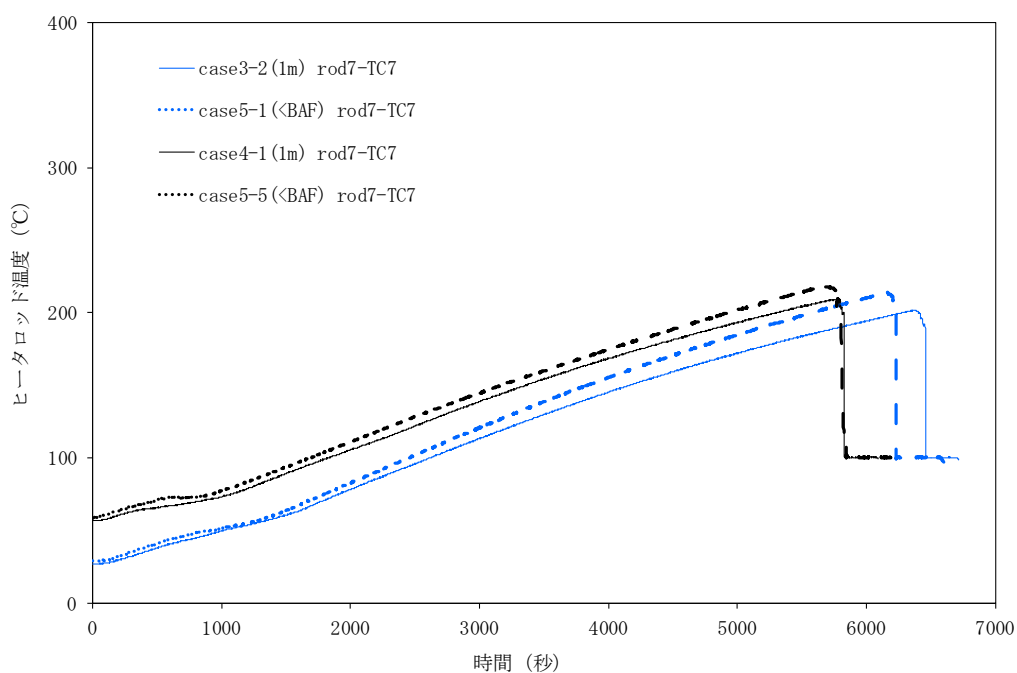


図 3.3.1-17 初期温度によるヒートアップ挙動への影響 (TC3, 温度増分)

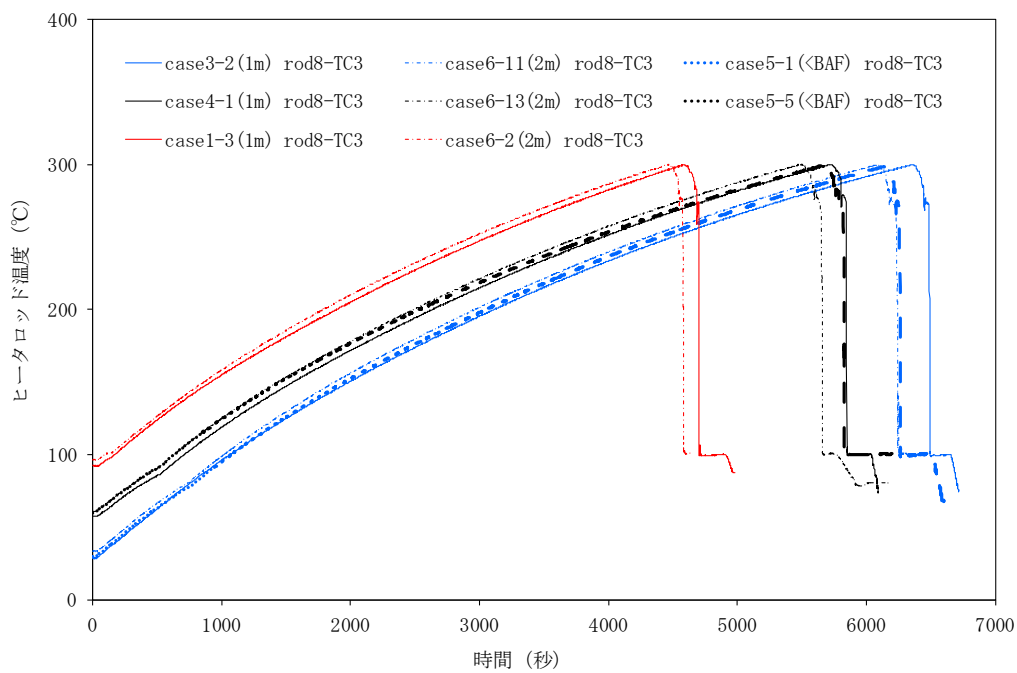


(高出力ロッド (No. 8))

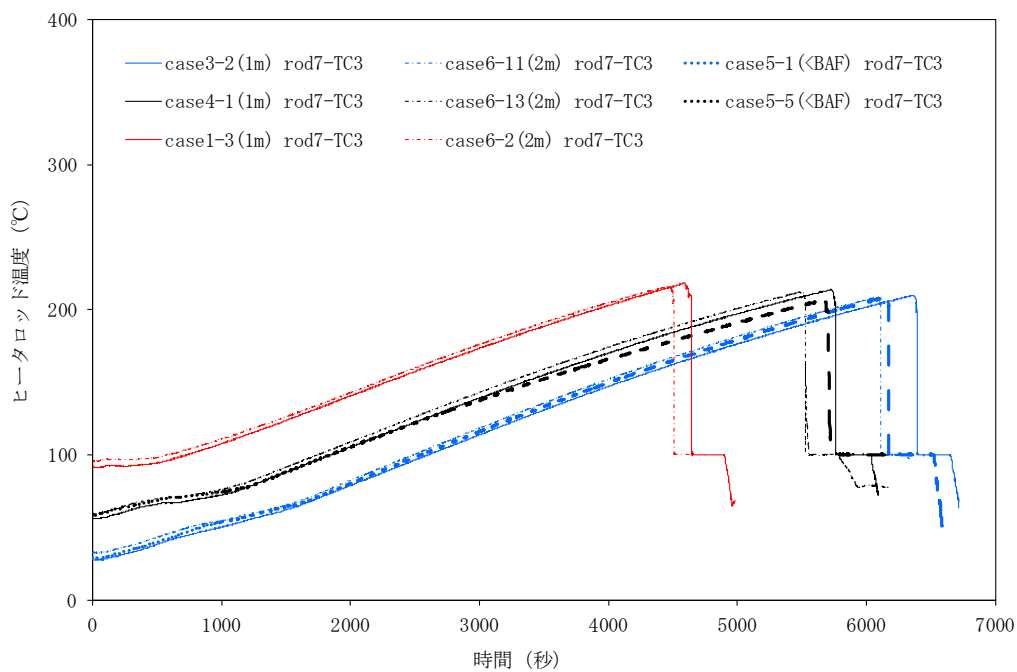


(非発熱ロッド (No. 7))

図 3.3.1-18 初期水位によるヒートアップ挙動への影響 (TC7)

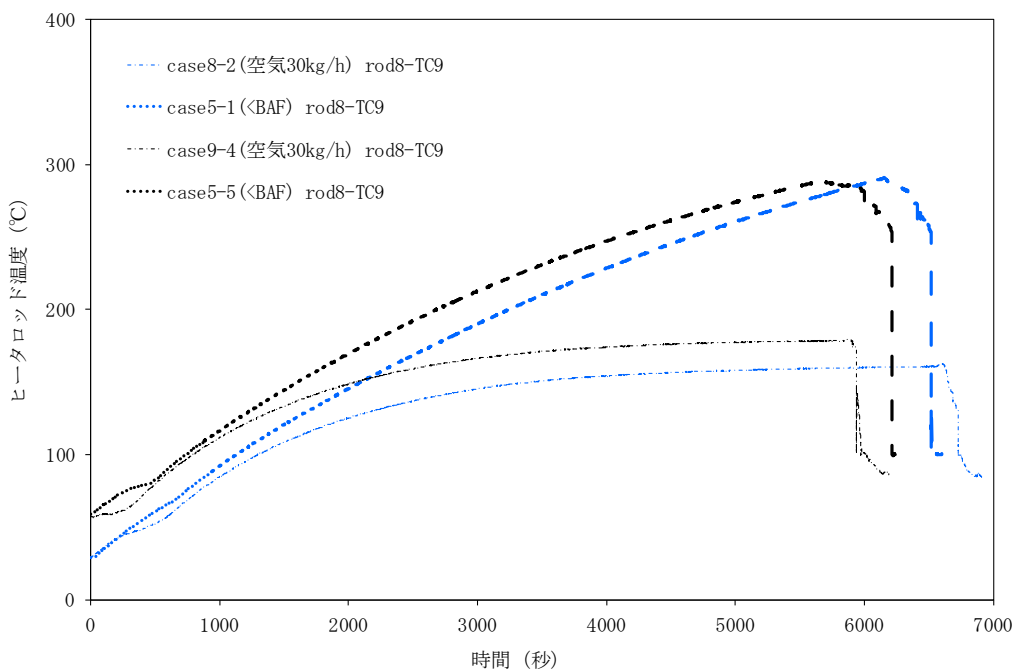


(高出力ロッド (No. 8))

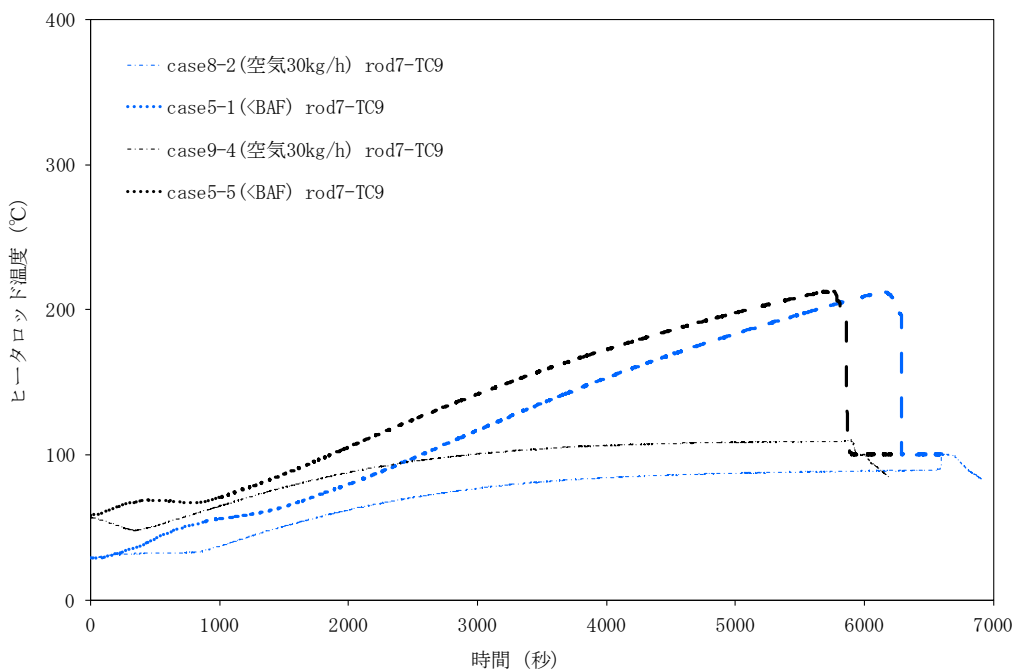


(非発熱ロッド (No. 7))

図 3.3.1-19 初期水位によるヒートアップ挙動への影響 (TC3)

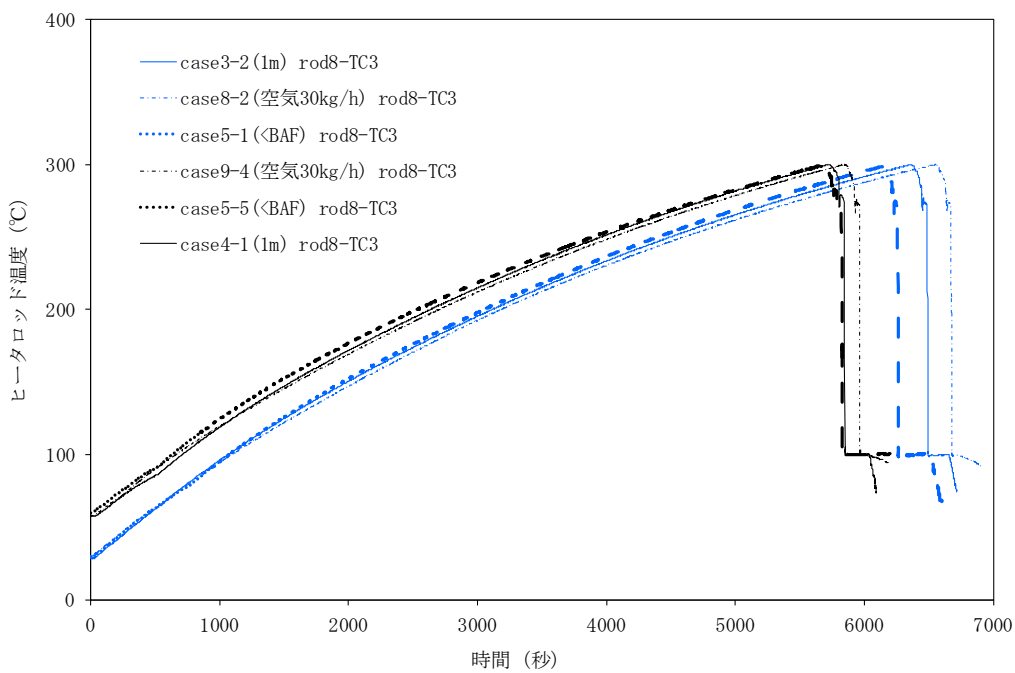


(高出力ロッド (No. 8))

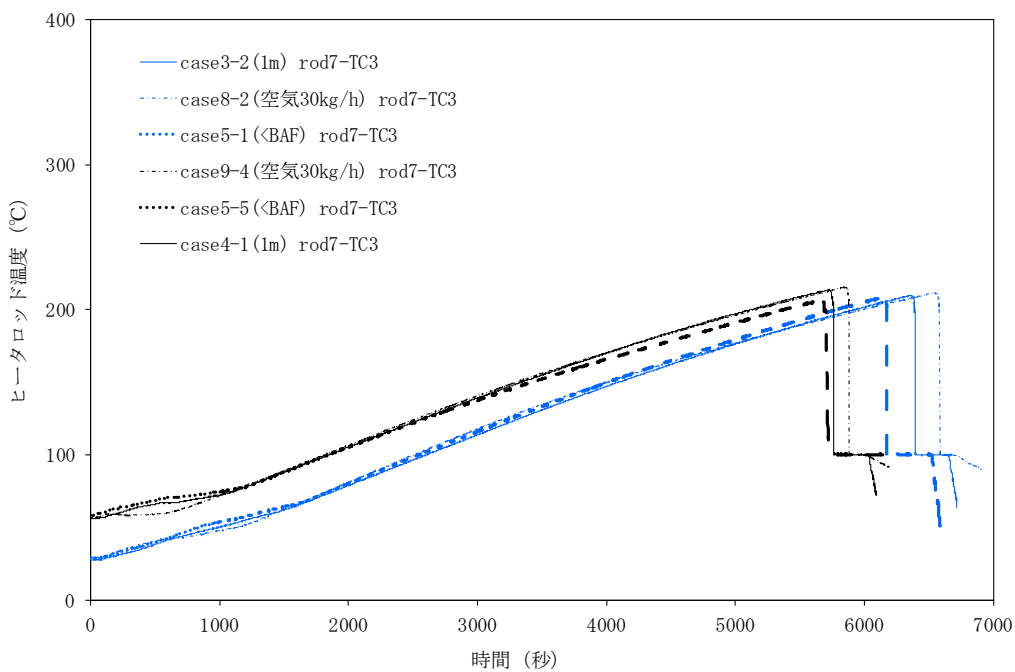


(非発熱ロッド (No. 7))

図 3.3.1-20 空気強制対流によるヒートアップ挙動への影響 (TC9)

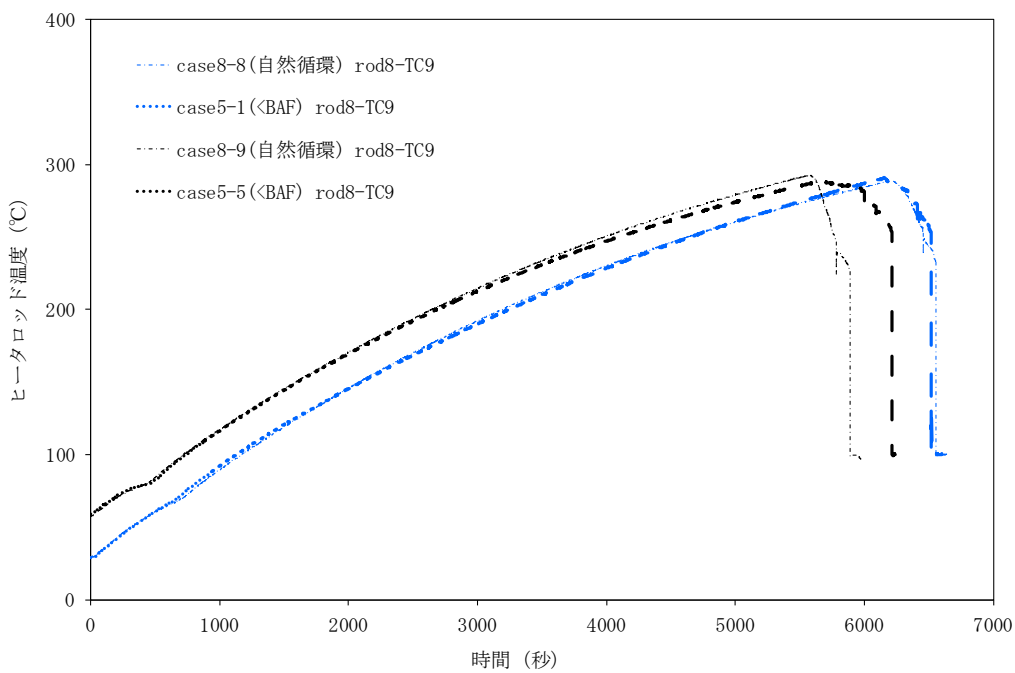


(高出力ロッド (No. 8))

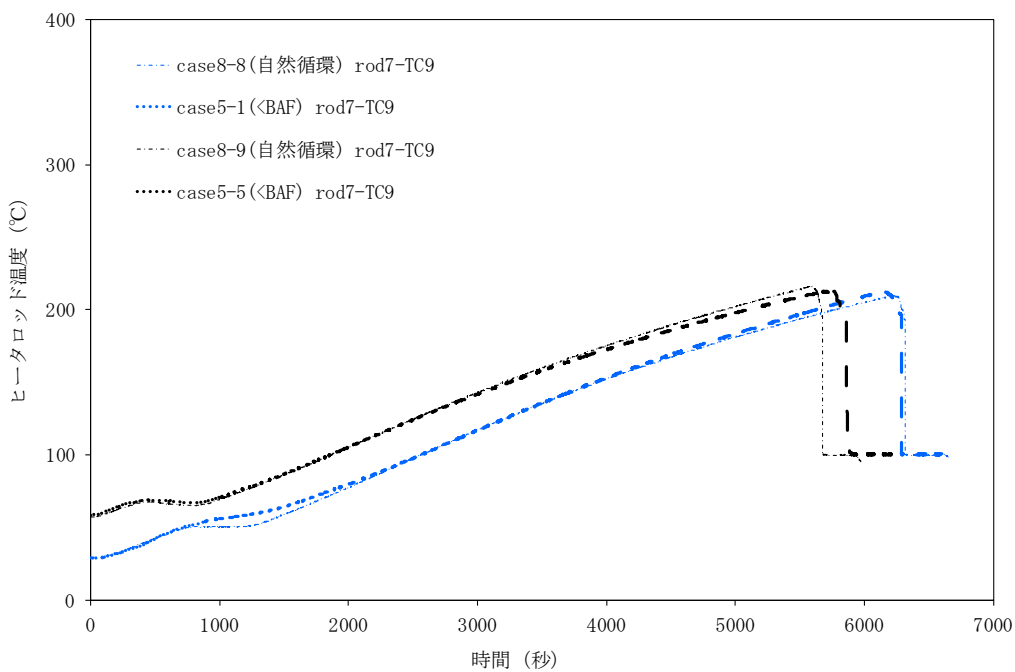


(非発熱ロッド (No. 7))

図 3.3.1-21 空気強制対流によるヒートアップ挙動への影響 (TC3)



(高出力ロッド (No. 8))



(非発熱ロッド (No. 7))

図 3. 3. 1-22 空気流量 0kg/h 時のヒートアップ挙動 (TC9)



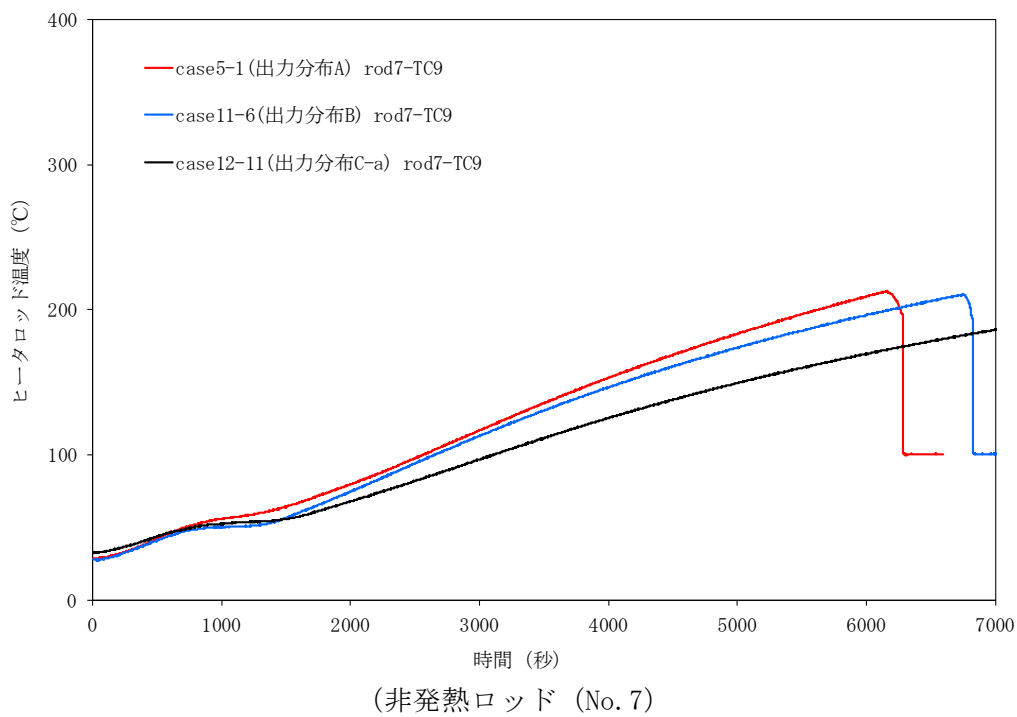
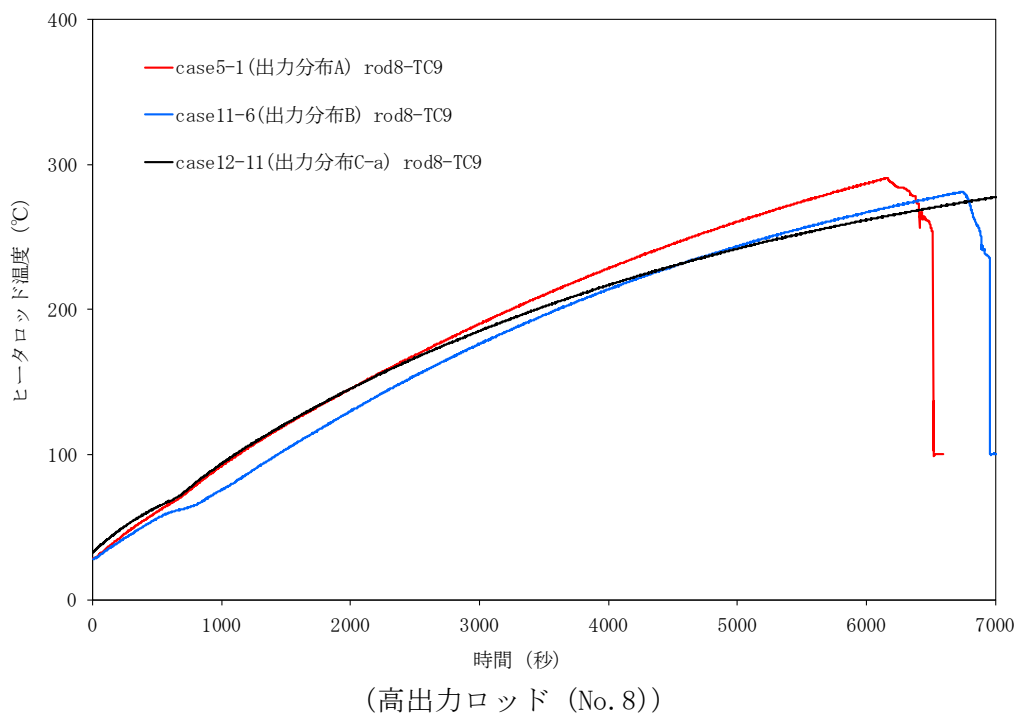
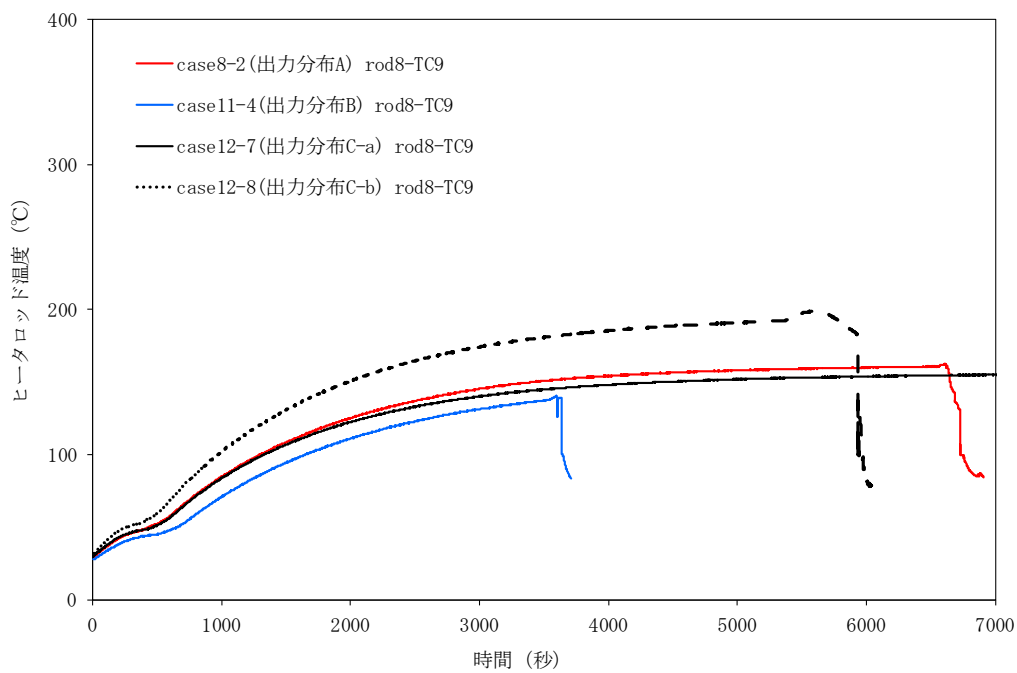
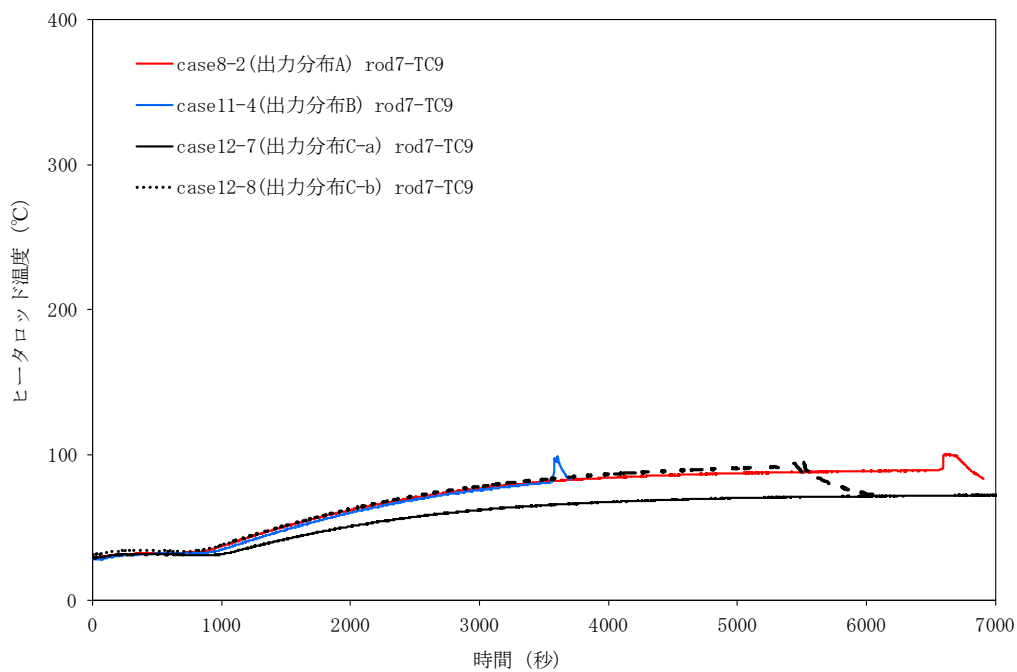


図 3.3.1-23 出力分布によるヒートアップ挙動への影響 (TC9, BAF 水位)

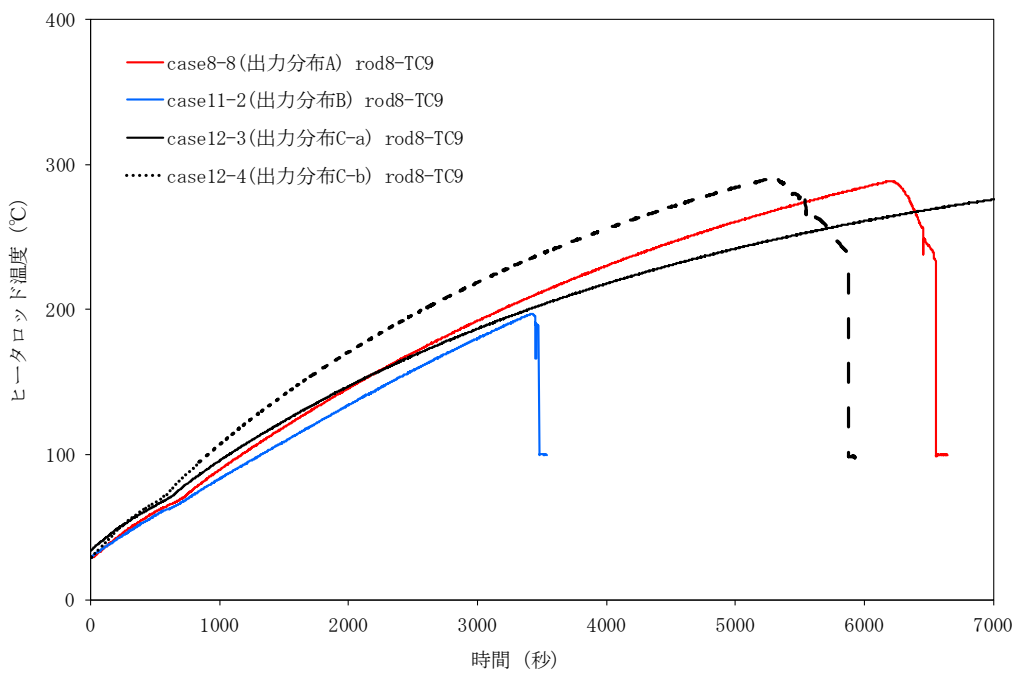


(高出力ロッド (No. 8))

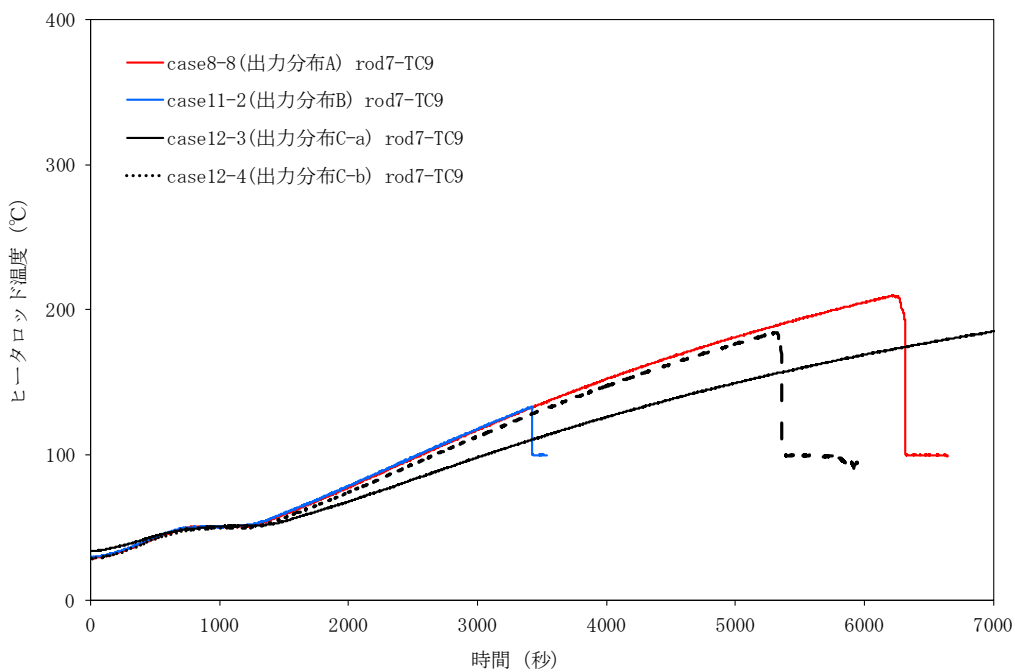


(非発熱ロッド (No. 7))

図 3.3.1-24 出力分布によるヒートアップ挙動への影響 (TC9, 空気強制対流)



(高出力ロッド (No. 8))



(非発熱ロッド (No. 7))

図 3.3.1-25 出力分布によるヒートアップ挙動への影響 (TC9, 空気流量 0kg/h)  
(上: 高出力ロッド (No. 8), 下: 非発熱ロッド (No. 7))

## 参考文献

- <2> F. W. Dittus and L. M. K. Boelter, "Heat Transfer in Automobile Radiators of the Tubular Type", University of California Publications in Engineering, Vol. 2, 1930
- <3> S. Wong, "Analysis of the FLECHT SEASET Unblocked Bundle Steam Cooling and Boiloff Tests", NUREG/CR-1533, 1981

### 3.3.2 クエンチフロント進展

スプレイ熱伝達試験で取得したデータを整理し、各種パラメータによるスプレイ開始後の冷却挙動への影響を分析した。

#### 3.3.2.1 トップダウンクエンチ挙動

スプレイ熱伝達試験の結果は、スプレイ開始後に直ちに温度は低下せずにある時点で急激に低下する傾向が見られる。また、温度の急減は試験体上方から下方に向かって進展する傾向を示しており、流下液膜による高温壁面の冷却、すなわちトップダウンクエンチによる冷却を示唆している。トップダウンクエンチは、特にBWRのLOCA時におけるECCS性能評価等の観点から重要な現象であり、多くの研究が実施されている。この現象の一般的な理解は図3.3.2-1に示すとおりであり、上部から流下した液膜がクエンチフロントに到達すると、壁面を冷却するとともに、スパッタリングされ管壁から剥離する。剥離により生じた液滴は流下してクエンチフロントより下方の冷却に寄与するものの、液膜による沸騰熱伝達に比べて非常に小さく、壁面温度をわずかに低下させるか、又は上昇速度を緩和させる程度である。クエンチフロントは、高温壁面を飽和温度程度まで低下させながら下方に移動し、壁面温度はクエンチフロントが到達した時点で急激に低下する。図3.3.2-2には、トップダウンクエンチにおける典型的な温度変化挙動を示す。

#### 3.3.2.2 16年度データの分析

16年度のスプレイ熱伝達試験は定格出力1~3%の高出力条件において実施されている。ここでは、当該データのクエンチフロント進展を評価した結果を示す。

##### (1) 評価対象試験ケース

評価対象試験ケースは熱伝達の分析と同一とする。評価対象とする試験ケースと試験条件の一覧を表3.3.2-1に示す。

##### (2) 16年度試験における冷却成否について

本試験では、ロッド温度を350℃に制限しており、これを超えた場合はスプレイ流量を増加させるとともに、出力を停止することで試験を完了させる。出力を停止することなくヒータ温度を収束できたケースを“○”，収束できなかったケースを“×”として、冷却の成否を整理した結果を表3.3.2-1に示す。

冷却に失敗する試験ケースは、大きく2種類に分類できる。一方は、投入する冷却水が不足するケースであり、ケース1-6a, 1-7, 13-7及び14-7が該当する。例えば、ケース1-6aではTC1及びTC2の冷却にかろうじて成功するものの、水位が低下し続け、TC3がスプレイ後に露出、ヒートアップすることで冷却に失敗する。また、ケース13-7では、TAFに位置するTC1さえも冷却できず、出力を停止している。これらのケースでは、出力に対して十分な冷却水が投入されていないと言える。出力2%に相当する熱量を蒸発潜熱で除去するためには、約0.1m<sup>3</sup>/hの冷却水が必要となる。これを下回ると、水位が徐々に低下するか、又は上部空間において過熱蒸気を冷却するために多くのスプレイ水を消

費するため、試験部を速やかに冷却することができない。スプレー流入割合を考慮すると、スプレー流量  $0.2\text{m}^3/\text{h}$  では出力 2% をかろうじて冷却できる程度であり、出力 3% では明らかに冷却水が不足する。

もう一方は、クエンチフロントの進展に比べてヒートアップが速いケースであり、ケース 13 及びケース 14 の大部分が該当する。これらは、初期水位を低下させた条件であるため、比較的低い位置まで露出し、当該位置までクエンチフロントが進展する前に  $350^\circ\text{C}$  に到達する。したがって、ヒータ温度制限を考慮せずに長時間冷却すれば冷却に成功する可能性があるケースともいえる。

なお、冷却に失敗するケースについては、成功したケースとクエンチフロント進展の状況が大きく異なるため、評価対象から除外することとした。

### (3) 評価方法

ここでは、まずクエンチ時間をスプレー開始からヒータ温度が  $105^\circ\text{C}$  まで低下するまでの時間と定義して、各ロッド及び熱電対のクエンチ時間を整理した。水位を高く設定した試験ケース（ケース 1, 10, 11 及び 12）の多くでは冷却に成功するもの、TC3 より下方が冠水しているため、クエンチフロント進展の評価に有用なデータは TC1 及び TC2 のみとなる。一方、水位を低く設定した試験ケース（ケース 13 及び 14）では、下方の熱電対まで露出するものの、多くのケースで冷却に失敗するため、冷却に成功したケースと進展速度を直接比較することが難しい。そこで、クエンチ時間を整理する熱電対は TC1 及び TC2 とし、出力停止後にヒータがクエンチした場合は評価対象から除外することとした。

また、クエンチ時間に基づきクエンチフロント進展速度を評価した。クエンチフロント進展速度は、同一ロッドの各軸方向位置について温度の時間変化を整理し、クエンチ時間の差分と、熱電対間の距離から算出するのが一般的である。しかし、16 年度に実施した試験の多くでは、各ロッドにつき 1 個 (TC1 又は TC2) の熱電対しかクエンチ時間を評価できないため、ここでは TAF から TC2 までの距離 ( $412\text{mm}$ ) を TC2 のクエンチ時間で除算することでクエンチフロント進展速度を算出した。

### (4) 評価結果

#### a) クエンチ時間とスプレー開始時点の温度の関係

図 3.3.2-3 にはスプレー開始時点の温度とクエンチ時間の関係を示す。TC1 については、スプレー開始時点の温度とクエンチ時間に相関が見られ、 $250^\circ\text{C}$  以下ではほぼスプレー開始と同時にクエンチするのに対し、 $250\sim 300^\circ\text{C}$  ではクエンチ時間が増加する。Henry モデル<sup>(4)</sup>から算出される最小膜沸騰温度は液相温度を飽和温度と仮定すると約  $300^\circ\text{C}$  となり、クエンチ時間の増加が見られる壁面温度は最小膜沸騰温度とほぼ一致している。一方、TC2 については明確な傾向が認められず、液膜進展速度には壁面温度以外のパラメータが影響していることを示唆している。

#### b) クエンチ時間とスプレー流量の関係

図 3.3.2-4 には図 3.3.2-3 のプロットをスプレー流量で区別した結果を示す。TC1 ではスプレー流量による明確な傾向が認められない。後述する Yamanouchi のモデル<sup>(5)</sup>に従

えば、スプレー流量は濡れ部の熱伝達を介してクエンチフロント進展速度に影響するが、TC1 (TAF) についてはスプレー流量によらず上部の非発熱部は飽和温度で維持されるため、スプレー流量の影響が現れないと考えられる。一方、TC2 ではスプレー流量が小さいほどクエンチ時間が増加する傾向が見られる。TC2 においてスプレー流量が多い条件 ( $>0.2[\text{m}^3/\text{h}]$ ) に着目すると、スプレー開始時点の温度と強く相関していることが確認できる。しかし、スプレー流量が小さい条件では、依然としてスプレー開始時点の温度との明確な関係は認められず、さらに異なる要因の影響を示唆している。

c) クエンチ時間と出力の関係

図 3.3.2-4 を低流量 ( $\leq 0.2[\text{m}^3/\text{h}]$ ) と高流量 ( $>0.2[\text{m}^3/\text{h}]$ ) のデータで分割し、さらに出力でプロットを区別した結果を図 3.3.2-5 及び図 3.3.2-6 に示す。TC1 については、出力に対する依存性はほとんど見られない。これは、蓄熱に比べて電気出力による発熱が相対的に小さいことを考慮すると妥当と考えられる。一方、TC2 については、低流量の場合、出力が高いほどクエンチ時間が増加する傾向が認められる。これは、TC2 における低流量時のクエンチ時間が冷却水の供給によって支配されているためと考えられる。すなわち、出力が高いほどより多くの冷却水が TC2 の上部で消費され、TC2 に到達するまでに時間を要すると推測される。しかし、高流量の場合は、冷却水が十分に存在するため、冷却水の供給ではなくクエンチフロントにおける熱伝導及び液膜への熱伝達により現象が支配されると考えられ、出力による影響は小さくなる。

d) クエンチ時間と水平方向位置の関係

ヒータロッドの水平方向位置によるクエンチ時間の違いを確認するため、図 3.3.2-7 に示す領域毎にスプレー開始時点の温度とクエンチ時間を整理した。

ケース 1 におけるスプレー開始時点の温度を図 3.3.2-8 に示す。同図において、複数のロッドから構成される領域については平均値を示しており、エラーバーを用いて最大値及び最小値の範囲を表わしている。TC1 のスプレー開始時点の温度は領域 1 が高いがこれは当該領域のロッド出力が高いためである。逆に領域 3 は低出力ロッドを含むため、下限値が他の領域に比べて小さい傾向を示している。TC2 については、領域間で大きな差は見られない。

図 3.3.2-9 にはクエンチ時間を示すが、TC1 については領域 1 が有意に大きく、スプレー開始時点の温度による影響が見られる。しかし、その他の領域についてはクエンチ時間が小さいこともあり、明確な傾向は見られない。TC2 については、ケース 1-1 及び 1-6a で領域 2 が大きい傾向を示している。この原因として、スプレー流量が  $0.1[\text{m}^3/\text{h}]$  又は  $0.2[\text{m}^3/\text{h}]$  と小さい当該試験ケースで、上部タイプレートのハンドル等によりスプレー流入量に偏りが生じた可能性が考えられるが、全体的には水平方向位置の影響はほとんど見られない。

e) クエンチフロント進展速度の相関式との比較

トップダウンクエンチにおいては、軸方向熱伝導がクエンチフロントの進展に重要な役割を果たすと考えられており、熱伝導方程式に基づきクエンチフロント進展を評価する手法が一般的に用いられる<sup>6)</sup>。ここでは、Yamanouchi による熱伝導方程式の解を用い

てクエンチフロント進展速度を評価する。

Yamanouchi は、ヒータ出力による発熱を無視するとともに、クエンチフロントを原点とした座標系に対して進展速度及び温度分布が一定との仮定の下、一次元熱伝導方程式の解として次式を得ている。

$$u^{-1} = \frac{\rho_s C_{ps}}{2} \sqrt{\frac{\delta}{h_{fb} k_s} \sqrt{\left\{ \frac{2(T_\infty - T_0)}{(T_0 - T_{sat})} + 1 \right\}^2} - 1} \quad (3.3.2-1)$$

ここで、

- $u$  : クエンチフロント進展速度 (m/hr)
- $\rho_s$  : ロッド材の密度 (kg/m<sup>3</sup>)
- $C_{ps}$  : ロッド材の比熱 (kcal/kg-°C)
- $\delta$  : ロッド壁面厚さ (m)
- $k_s$  : ロッド材の熱伝導率 (kcal/m-hr-°C)
- $T_\infty$  :  $z=\infty$ でのロッド温度 (°C)
- $T_0$  :  $z=0$ でのロッド温度 (°C)
- $T_{sat}$  : 飽和温度 (°C)

また、濡れ部において熱伝達係数は  $h_{fb}$  で一定、乾き部において熱伝達係数はゼロと仮定するとともに、 $h_{fb}$  についてクエンチフロント進展速度及び壁面温度の測定値から逆算して、次に示す近似式を得ている。

$$h_{fb} = 1.4 \times 10^5 G_H^{0.5} \quad (3.3.2-2)$$

ここで、

- $G_H$  : ロッドを伝わる液膜の流量 (kg/hr)

本評価では、 $\rho_s$ ,  $C_{ps}$ ,  $k_s$  に NCF600 の密度、比熱及び熱伝導率としてそれぞれ 8420[kg/m<sup>3</sup>], 0.106[kcal/kg-°C] (=0.444[kJ/kgK]) 及び 12.7[kcal/m-hr-°C] (=14.8[W/mK]) を適用した。また、 $T_0$  は  $z=0$  でのロッド温度であり、表面が濡れる限界温度に相当するが、ここでは Yamanouchi と同様に 150°C を使用した。 $T_{sat}$  は大気圧における飽和温度として 100°C とした。また、 $h_{fb}$  を求めるに際し使用する  $G_H$  は、スプレー流量にスプレー流入割合を乗じた上でロッド 1 本当たりの流量に換算した値とする。ここでは簡便のため、スプレー流入割合は 50% と仮定し、ロッド 1 本当たりの流量への換算は流路面積比に基づき 1.76% を乗じることとした。

図 3.3.2-10 には、Yamanouchi の式を用いて算出したクエンチフロント進展速度を試験結果と比較して示している。なお、Yamanouchi の式では  $T_\infty$  を  $z=\infty$  でのロッド温度と定義しているが、試験ではヒータロッド温度が軸方向に分布を有しているとともに、時間により変化するため、厳密に定義することはできない。したがって、ここではスプレー開始時点の TC2 における温度で代表することとした。



試験結果は Yamanouchi の式により評価した  $0.1\sim 1.0[\text{m}^3/\text{h}]$  における進展速度の範囲よりも大きくばらつくことが確認できる。この原因として、次の点が考えられる。

- ・ Yamanouchi の式は温度の時間変化を考慮していないが、試験では顕著な温度変化が生じる。図 3.3.2-10 はスプレー開始時点の温度で整理しているが、試験ケースによっては、スプレー開始からクエンチフロント到達まで  $50^\circ\text{C}$  以上温度が上昇する。
- ・ Yamanouchi の式は軸方向温度分布を考慮していないが、試験では有意な温度分布が存在する。例えば、ケース 10-5 のロッド 14 はスプレー開始時点の温度が  $256^\circ\text{C}$ 、クエンチフロント進展速度が  $3.17\times 10^{-2}\text{m/s}$  であり、相関式による計算値に比べて大幅に速いが、当該試験ケースでは TC1 がほぼ飽和温度で推移しており、TC2 までの平均的な温度はプロットに対して大幅に小さいと考えられる。
- ・ TC2 における低流量時のクエンチ時間は冷却水の供給によって支配されていると考えられる。すなわち、Yamanouchi の式では液膜流量の変化を考慮しないが、試験ではクエンチフロントより上方を冷却するために相当量の液膜が消費されている可能性がある。
- ・ 本評価では、スプレー開始と同時に TC1 (TAF) がクエンチすると仮定しているが、試験ケースによっては TC1 がクエンチするまでに一定時間が生じる。したがって、クエンチフロント進展速度を過小に評価している可能性がある。

以上のとおり、実際のクエンチフロント進展挙動は空間的、時間的溫度変化に左右され、複雑な挙動を示すと考えられ、Yamanouchi のモデルとの単純な比較は難しい。より詳細に比較するためには、空間的、時間的に離散化した状態で時々刻々と変化するクエンチフロント進展速度を評価する必要があると考えられる。

### 3.3.2.3 17年度データの分析

17年度のスプレイ熱伝達試験は実機相当の出力条件において実施されている。ここでは、当該データのクエンチフロント進展を評価した結果を示す。

#### (1) 評価対象試験ケース

評価対象試験ケースは空気冷却試験及び出力分布の影響確認試験を除く全ケースとする。評価対象とする試験ケースと試験条件の一覧を冷却の成否とあわせて表 3.3.2-2 に示す。

#### (2) 評価方法

16年度データの分析と同様にクエンチ時間を定義して、各ロッド及び熱電対のクエンチ時間を整理した。

17年度に実施した試験は出力が比較的小さいため、二相水位の上昇が抑えられ、多くの試験ケースにおいて下方の熱電対まで露出するとともに、スプレイ開始後には 350℃ の温度制限に到達することなく冷却に成功する。このため、クエンチ時間の評価対象として、TC1～TC6 までの広い範囲を選定した。

また、同一ロッドについて、クエンチ時間の差分と熱電対間の距離からクエンチフロント進展速度を算出した。ここでは、軸方向位置によるクエンチフロント進展速度の差異を確認するため、TC2～TC4、TC3～TC5、TC4～TC6 の 3 つの異なる区間を対象に評価を行った。なお、これらの熱電対に隣接する下方の熱電対が冠水している場合は、トップダウンクエンチの進展と水位上昇によるクエンチを区別できないため、評価から除外した。さらに、クエンチフロント進展速度が下式で求めた自由落下液膜の流速を超える場合についても、評価から除外することとした<sup>(7)</sup>。

$$u = \sqrt[3]{\frac{\rho g}{3\mu} \left( \frac{G}{\pi D \rho} \right)^{2/3}} \quad (3.3.2-3)$$

#### (3) 評価結果

##### a) クエンチ時間とスプレイ開始時点の温度の関係

図 3.3.2-11 には TC1～TC6 におけるスプレイ開始時点の温度とクエンチ時間の関係を示す。同図より、いずれの熱電対についても、スプレイ開始時点の温度とクエンチ時間に相関が見られる、16年度データと同様に、TC1 において 250℃ 以下ではほぼスプレイ開始と同時にクエンチするのに対し、250～300℃ ではクエンチ時間が増加する傾向が確認できる。また、下方に向かうに従ってプロットのばらつきは増加しており、その他のパラメータによる液膜進展速度への影響を示唆している。

##### b) クエンチ時間とスプレイ流量の関係

図 3.3.2-12 には図 3.3.2-11 のプロットをスプレイ流量で区別した結果を示す。特に下方の熱電対 (TC4～TC6) では、高スプレイ流量 (1.0 [m<sup>3</sup>/h]) のプロットがばらつき

の下限に分布しており，スプレイ流量の増加にともないクエンチフロント進展が促進される傾向を示唆している。スプレイ流量  $0.1 \text{ [m}^3/\text{h]}$  と  $0.2 \text{ [m}^3/\text{h]}$  の差はほとんど見られないが，Yamanouchi の式においてもクエンチフロント進展速度に対する流量の感度は小さく， $1/4$  乗に比例することを踏まえると，妥当な傾向と考えられる。

また，16 年度データに比べるとスプレイ流量による傾向の差異は明確に見られない。これは，スプレイ水の潜熱と出力が拮抗している 16 年度の試験条件に比べて，17 年度の試験条件ではスプレイ流量が十分に確保されているためと考えられる。

#### c) クエンチ時間と出力の関係

図 3.3.2-13 には図 3.3.2-11 のプロットを出力で区別した結果を示すが，16 年度データに比べると明確な傾向は見られない。これは，スプレイ流量による傾向と同様に，スプレイ水の潜熱と出力が拮抗している 16 年度の試験条件に比べて，17 年度の試験条件ではスプレイ流量が十分に確保されているためと考えられる。蓄熱に比べてヒータ出力は相対的に小さく，実際に Yamanouchi の式を含む多くのモデルでは発熱量を考慮していない。図 3.3.2-14 には，ロッド出力（高出力／平均出力／低出力）によりプロットを区別した結果を示す。高出力ロッドの方がスプレイ開始時点のヒータ温度が高いため，クエンチ時間も大きい傾向を示すが，温度とクエンチ時間の関係はロッド出力により大きく変わらない。

#### d) クエンチフロント進展速度の相関式との比較

クエンチフロント進展速度の評価結果を図 3.3.2-15 に示す。同図は，TC2～TC4，TC3～TC5 及び TC4～TC6 における進展速度を区別してプロットしているが，軸方向位置による明確な傾向は認められない。したがって，代表的に TC2～4 の進展速度を対象に，さらにスプレイ流量でプロットを区別して，Yamanouchi の式による計算値と比較した結果を図 3.3.2-16 に示す。Yamanouchi の式による計算値はプロットのばらつきの下限に位置しており，同式の適用性が確認できる。また，16 年度データの評価結果（図 3.3.2-10）と比べると，17 年度データはクエンチフロントの進展が速い傾向が見られる。この原因として，次の点が考えられる。

- ① 16 年度データの分析では TAF のクエンチ時間がスプレイ開始時間に等しいと仮定して，TC2 のクエンチ時間からクエンチフロント進展速度を算出している。実際には，TAF 位置の TC1 がクエンチするまでに一定時間を要する結果が得られており，したがってクエンチフロント進展速度を過小に評価している可能性が高い。
- ② 16 年度試験では，スプレイ流量と出力が釣り合っていない試験条件が含まれており，十分なスプレイ流量が確保されていないため，クエンチフロント進展が遅れる傾向がある。
- ③ 16 年度試験は高出力条件で実施されており，スプレイ開始からクエンチフロントが到達するまでに有意な温度上昇が生じている。したがって，16 年度データと 17 年度データを比較した場合，スプレイ開始時点での温度が同等のプロットでも，16 年度データの方がクエンチフロント到達時点の温度は高い傾向にある。

e) クエンチ時間の逆転

17年度データの一部では、自由落下液膜の流速を超える速度でクエンチフロントが進展する、又は下方の熱電対が上方よりも先にクエンチする結果が見られる。図 3.3.2-17にはケース 17-3-9におけるロッド No. 15 の温度変化を一例として示すが、TC4 がクエンチした後に、TC2, TC6 の順番でクエンチする様子が確認できる。このような挙動は、様々な出力及びスプレイ流量条件、並びにヒータロッド及び熱電対位置で見られており、また温度の時間変化も、過渡的に温度が低下した後に再度温度が上昇するケース、高温状態から緩慢に低下するケース及び急激に低下するケースが含まれ、規則性を見出すことはできない。

この現象の発生メカニズムを特定することは難しいが、一つの推測として液膜の周方向分布による影響が考えられる。試験において周方向に均一な液膜が形成されるとは考えにくく、図 3.3.2-18 のように特定の周方向位置で乾いた状態（ドライパッチ）が維持される可能性は否定できない。一方、下流に進んでいく過程で、スプレーサを通過する際に液膜の周方向分布に影響が生じ、下方の熱電対が上方よりも先にクエンチする可能性がある。また、その他の可能性としては、スプレーサによる液滴付着、非加熱面を流下する液膜の遷移等が疑われるが、物理的にはやや考えにくい。

表 3.3.2-1 評価対象とする試験ケースと試験条件 (16 度データ)

試験ケース	出力 (%)	スプレー 流量 (m <sup>3</sup> /h)	初期水温 (°C)	スプレー 水温 (°C)	初期水位 (m)	冷却成否
1-1	1	0.2	95	30	2.0	○
1-2	1	1.0	95	30	2.0	○
1-4	2	0.2	95	30	2.0	○
1-5	2	1.0	95	30	2.0	○
1-6a	2	0.1	95	30	2.0	×
1-6b	2	0.4	95	30	2.0	○
1-6c	2	0.6	95	30	2.0	○
1-7	3	0.2	95	30	2.0	×
1-8	3	1.0	95	30	2.0	○
10-1	1	1.0	30	30	2.0	○
10-3	2	1.0	30	30	2.0	○
10-5	3	1.0	30	30	2.0	○
11-1	1	1.0	60	30	2.0	○
11-3	2	1.0	60	30	2.0	○
11-5	3	1.0	60	30	2.0	○
12-1	2	0.2	95	60	2.0	○
12-2	2	1.0	95	60	2.0	○
13-1	1	0.2	95	30	1.5	×
13-4	2	0.2	95	30	1.5	×
13-5	2	1.0	95	30	1.5	○
13-7	3	0.2	95	30	1.5	×
14-1	1	0.2	95	30	1.0	×
14-4	2	0.2	95	30	1.0	×
14-5	2	1.0	95	30	1.0	×
14-7	3	0.2	95	30	1.0	×

表 3.3.2-2 評価対象とする試験ケースと試験条件 (17 度データ)

(1/2)

試験ケース	出力 (%)	スプレイ 流量 (m <sup>3</sup> /h)	初期水温 (°C)	スプレイ 水温 (°C)	初期水位 (m)	冷却成否
17-1-1	0.1	0.2	95	30	1.0	○
17-1-2	0.1	0.2	95	30	1.0	○
17-1-3	0.1	0.2	95	30	1.0	○
17-1-4	0.1	0.1	95	30	1.0	○
17-1-5	0.5	0.2	95	30	1.0	○
17-1-6	0.5	0.2	95	30	1.0	○
17-1-7	0.5	0.2	95	30	1.0	○
17-1-8	0.5	1.0	95	30	1.0	○
17-1-9	0.5	0.1	95	30	1.0	○
17-1-10	1.0	0.2	95	30	1.0	○
17-1-11	1.0	0.2	95	30	1.0	○
17-1-12	1.0	0.2	95	30	1.0	○
17-1-13	1.0	1.0	95	30	1.0	○
17-2-1	2.0	0.2	95	60	1.0	×
17-2-2	2.0	1.0	95	60	1.0	×
17-3-1	0.1	0.2	30	30	1.0	○
17-3-2	0.1	0.2	30	30	1.0	○
17-3-3	0.1	0.1	30	30	1.0	○
17-3-4	0.5	0.2	30	30	1.0	○
17-3-5	0.5	0.2	30	30	1.0	○
17-3-6	0.5	0.1	30	30	1.0	○
17-3-7	1.0	0.2	30	30	1.0	○
17-3-8	1.0	0.2	30	30	1.0	○
17-3-9	1.0	1.0	30	30	1.0	○
17-4-1	0.1	0.2	60	30	1.0	○
17-4-2	0.5	0.1	60	30	1.0	○
17-5-1	0.1	0.2	30	30	0.0	○
17-5-2	0.5	0.2	30	30	0.0	○
17-5-3	0.1	0.1	30	30	0.0	○
17-5-4	0.5	0.1	30	30	0.0	×
17-5-5	0.1	0.1	60	30	0.0	○
17-5-6	0.5	0.1	60	30	0.0	×

表 3.3.2-2 評価対象とする試験ケースと試験条件 (17 度データ)

(2/2)

試験ケース	出力 (%)	スプレイ流量 (m <sup>3</sup> /h)	初期水温 (°C)	スプレイ水温 (°C)	初期水位 (m)	冷却成否
17-6-1	0.1	0.2	95	30	2.0	○
17-6-2	0.1	0.2	95	30	2.0	○
17-6-3	0.1	0.1	95	30	2.0	○
17-6-4	0.5	0.2	95	30	2.0	○
17-6-5	0.5	0.2	95	30	2.0	○
17-6-6	0.5	1.0	95	30	2.0	○
17-6-7	0.5	0.1	95	30	2.0	○
17-6-8	1.0	0.2	95	30	2.0	○
17-6-9	1.0	0.2	95	30	2.0	○
17-6-10	1.0	1.0	95	30	2.0	○
17-6-11	0.1	0.1	30	30	2.0	○
17-6-12	0.5	0.1	30	30	2.0	○
17-6-13	0.1	0.1	60	30	2.0	○
17-6-14	0.5	0.1	60	30	2.0	○

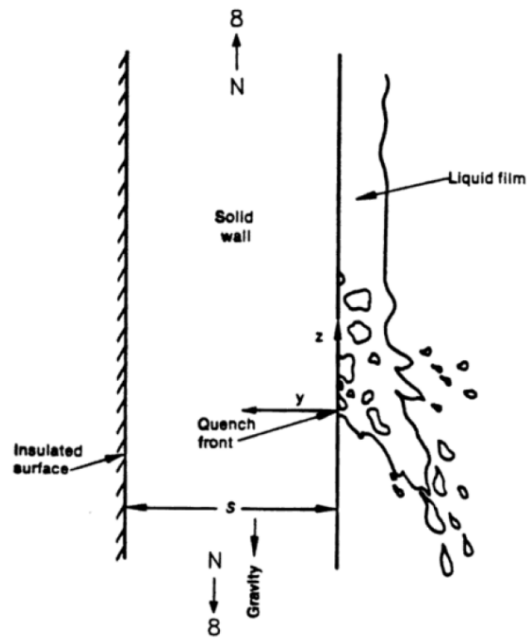


図 3.3.2-1 トップダウンクエンチの概念<sup><4></sup>

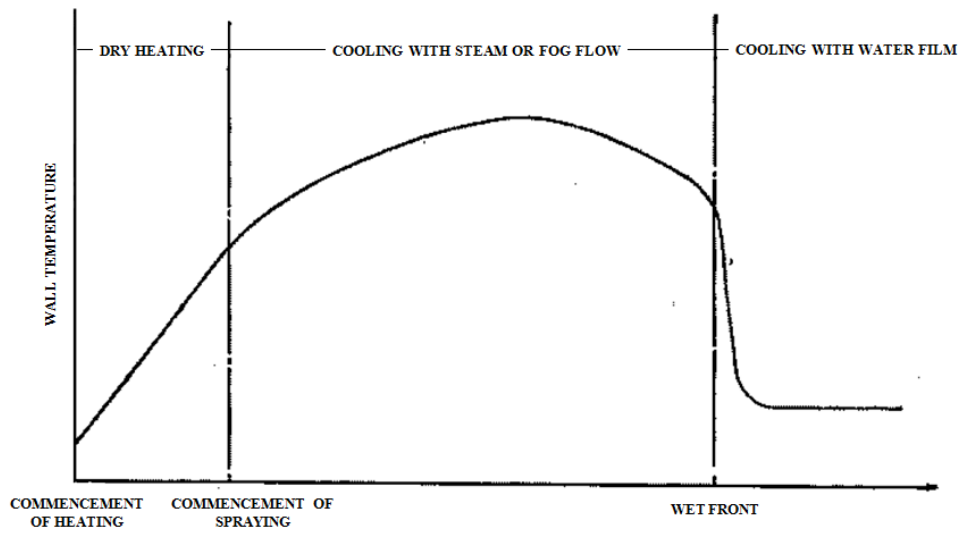
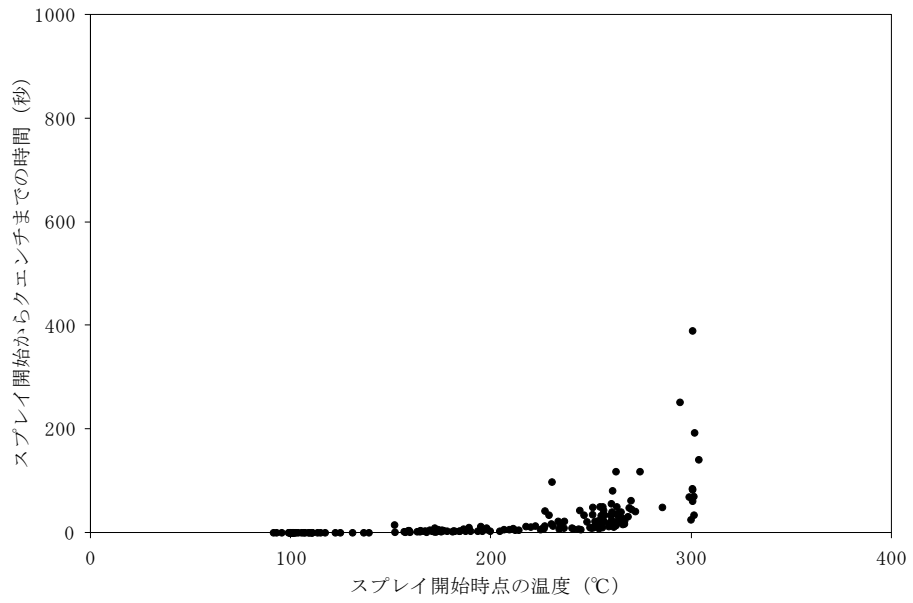
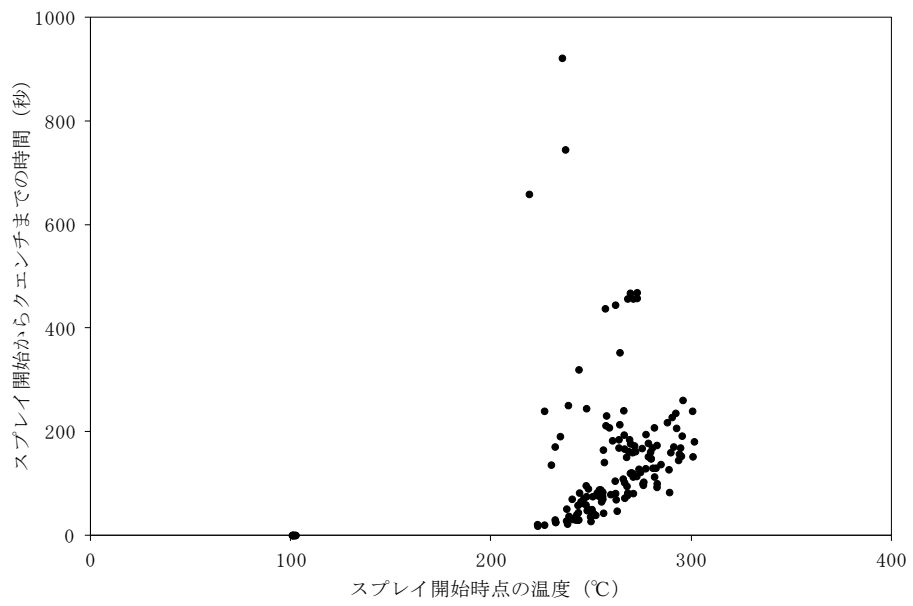


図 3.3.2-2 トップダウンクエンチ時の温度変化<sup><5></sup>



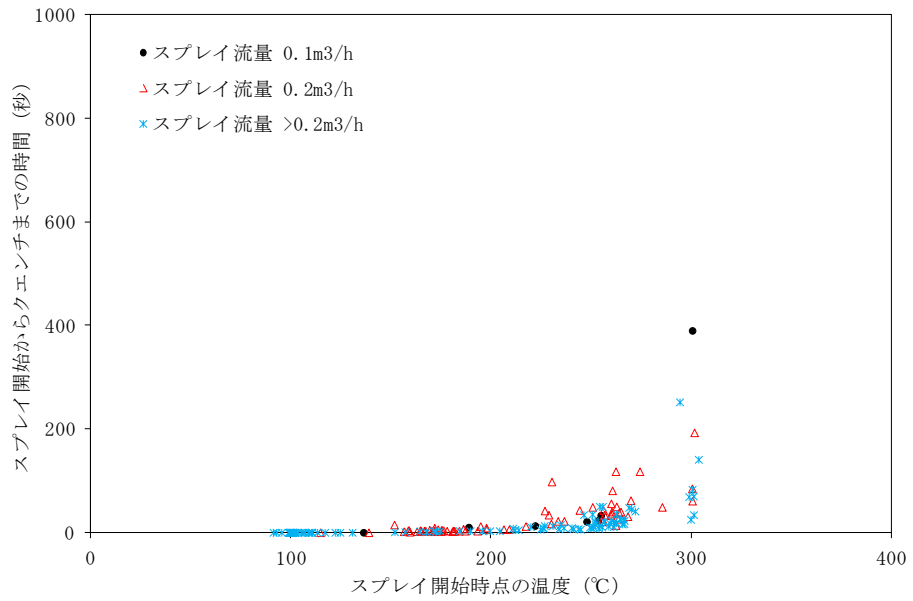


(TC1)

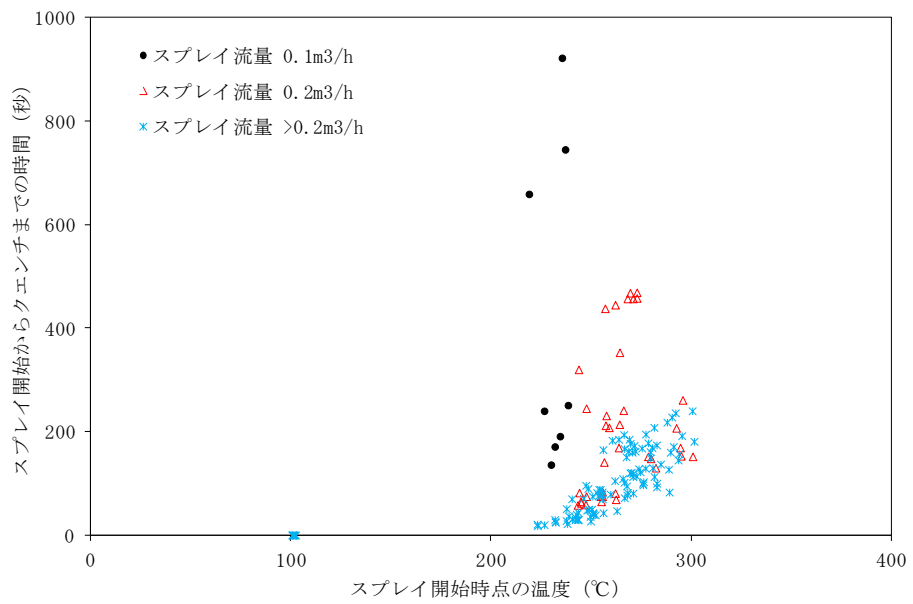


(TC2)

図 3.3.2-3 スプレー開始時点の温度とクエンチ時間の関係 (16年度データ)

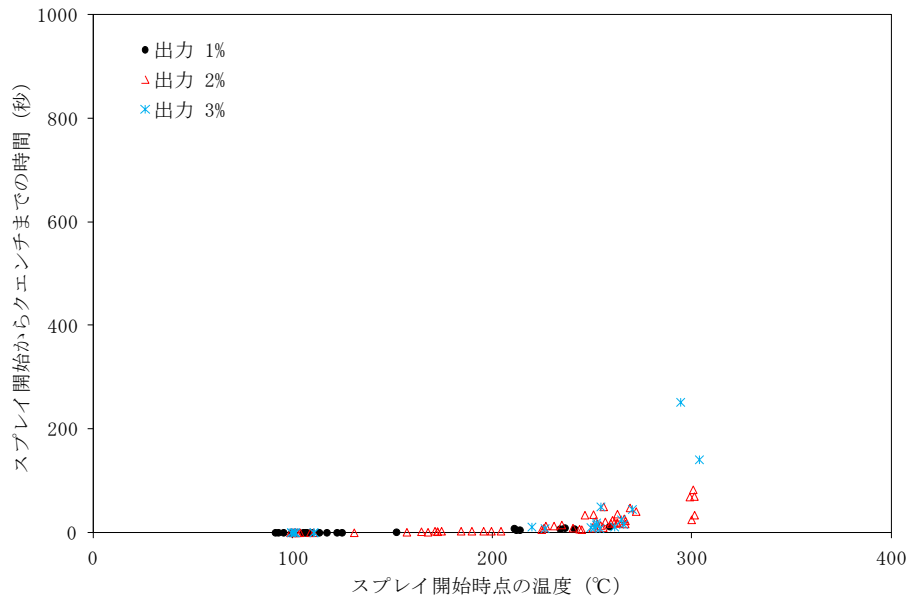


(TC1)

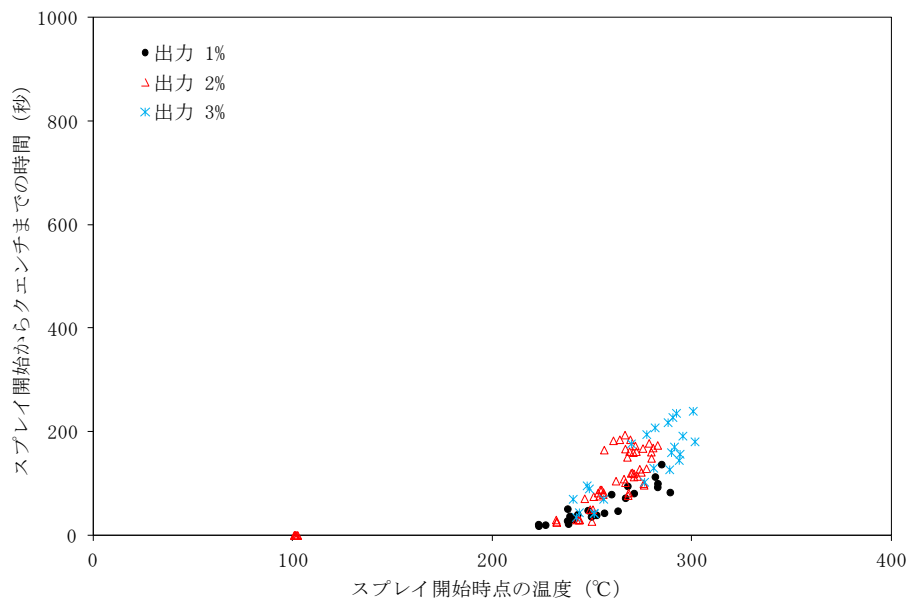


(TC2)

図 3.3.2-4 スプレー流量とクエンチ時間への関係 (16年度データ)

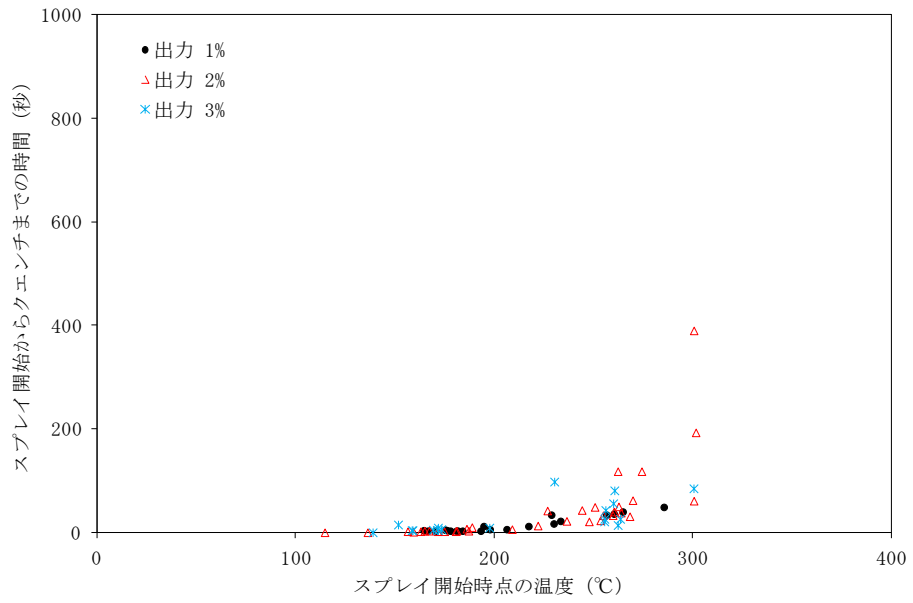


(TC1)

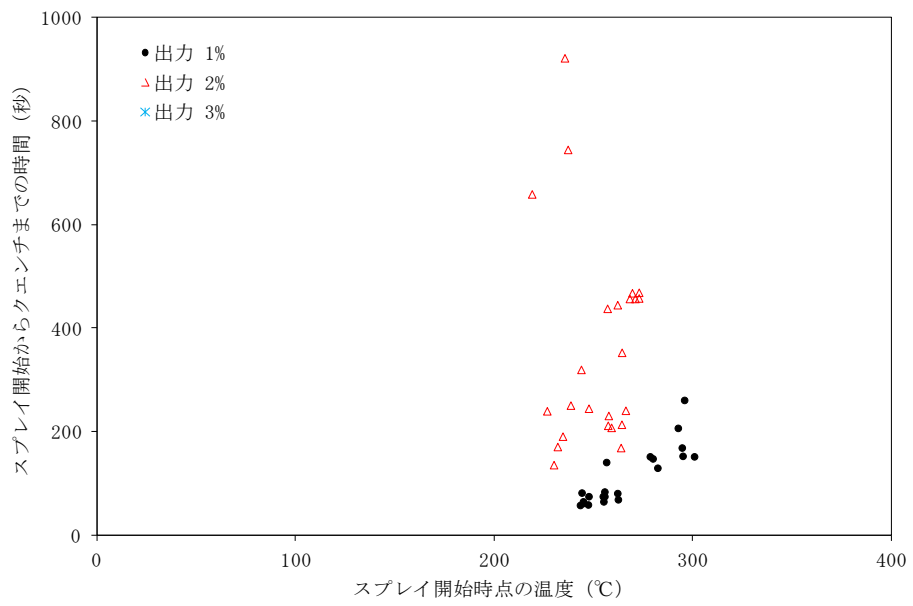


(TC2)

図 3.3.2-5 出力とクエンチ時間への関係 (16年度データ, 高スプレイ流量)



(TC1)



(TC2)

図 3.3.2-6 出力とクエンチ時間への関係 (16年度データ, 低スプレイ流量)

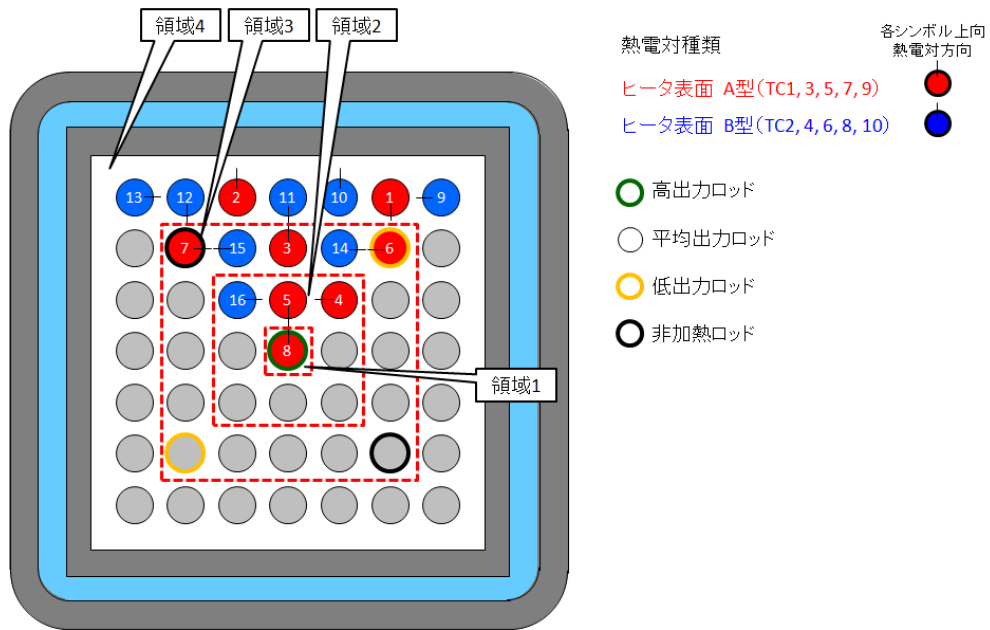


図 3.3.2-7 クエンチ時間の整理における領域分け

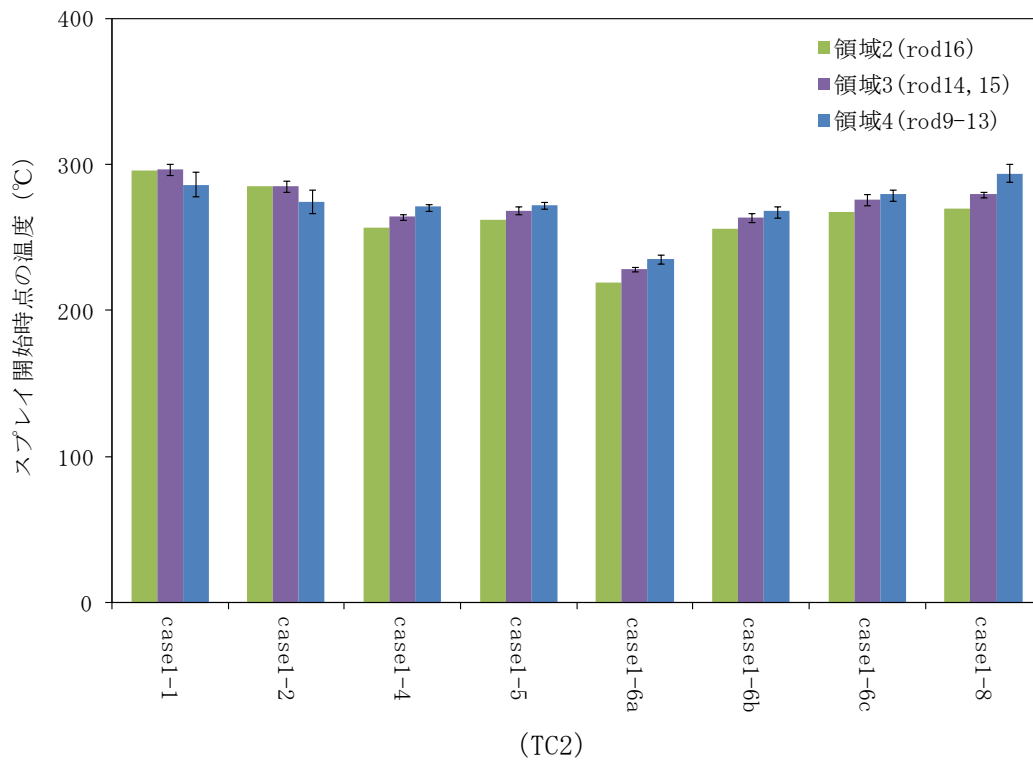
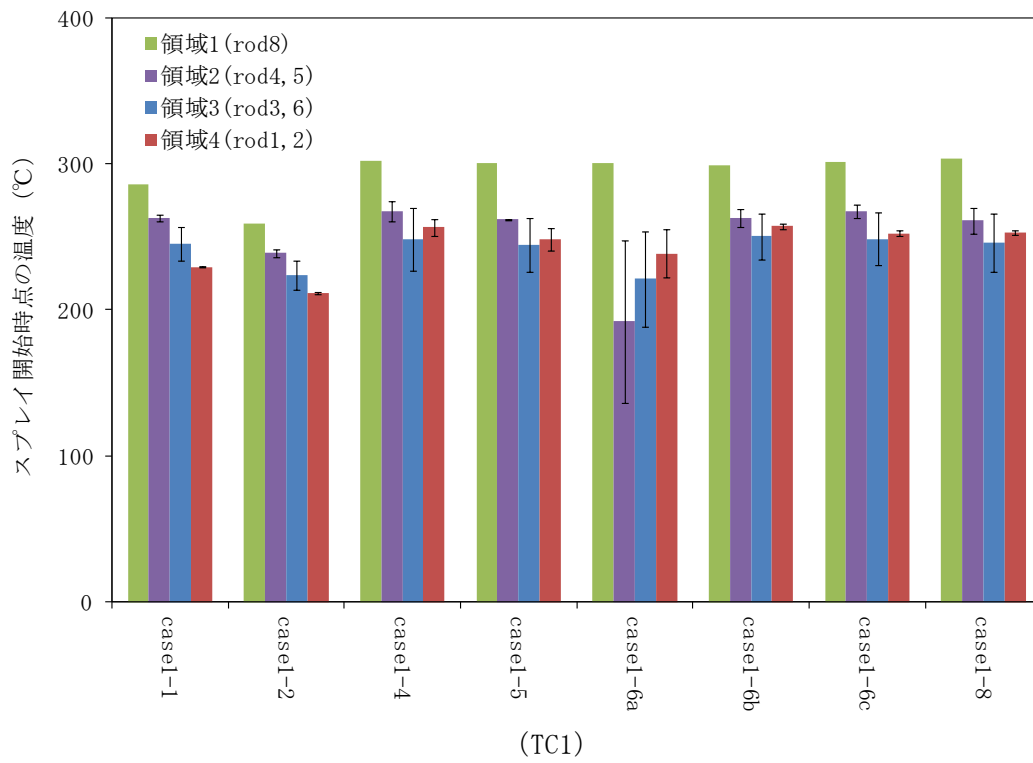


図 3.3.2-8 スプレー開始時点の温度の領域間比較

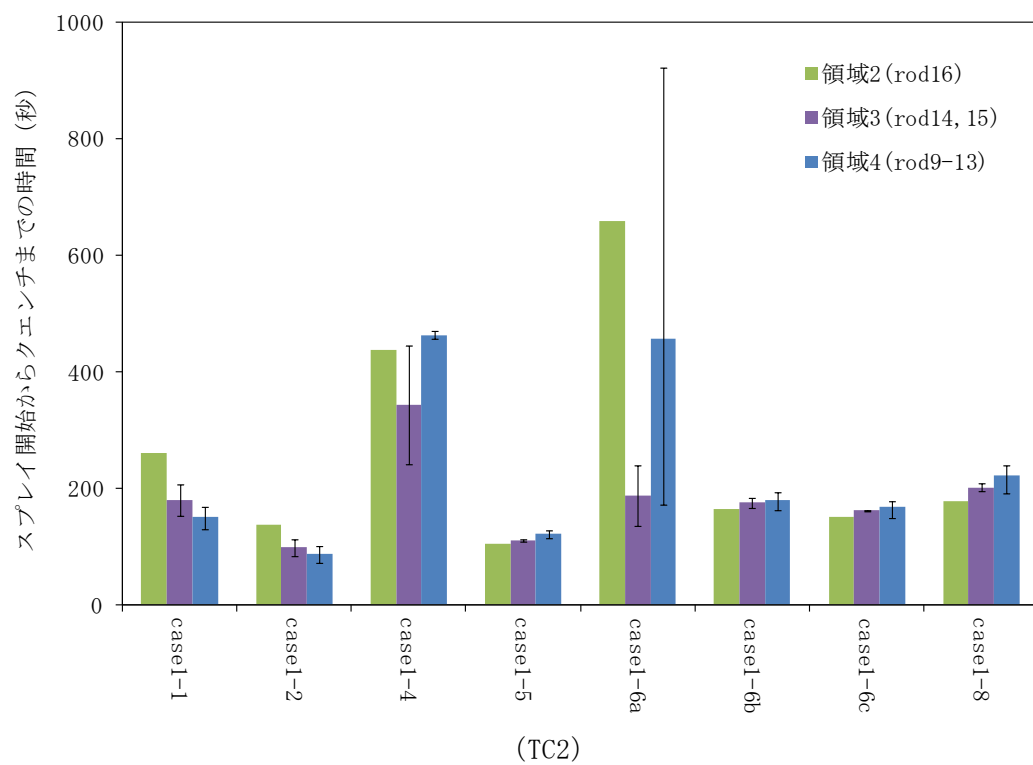
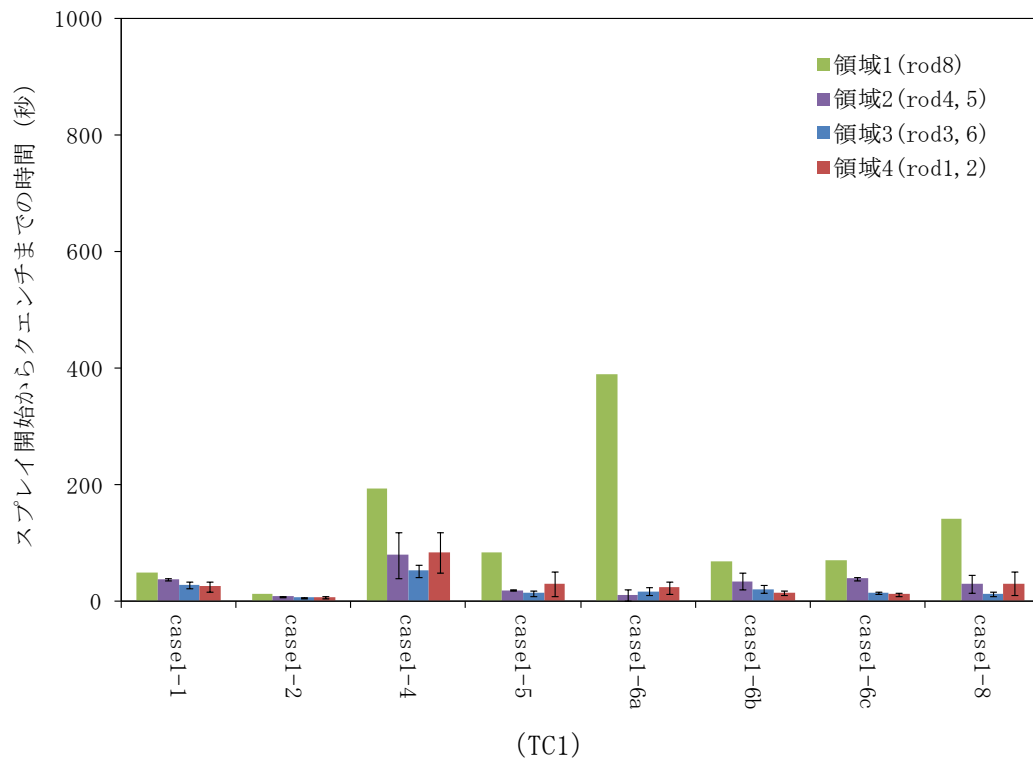


図 3.3.2-9 クエンチ時間の領域間比較

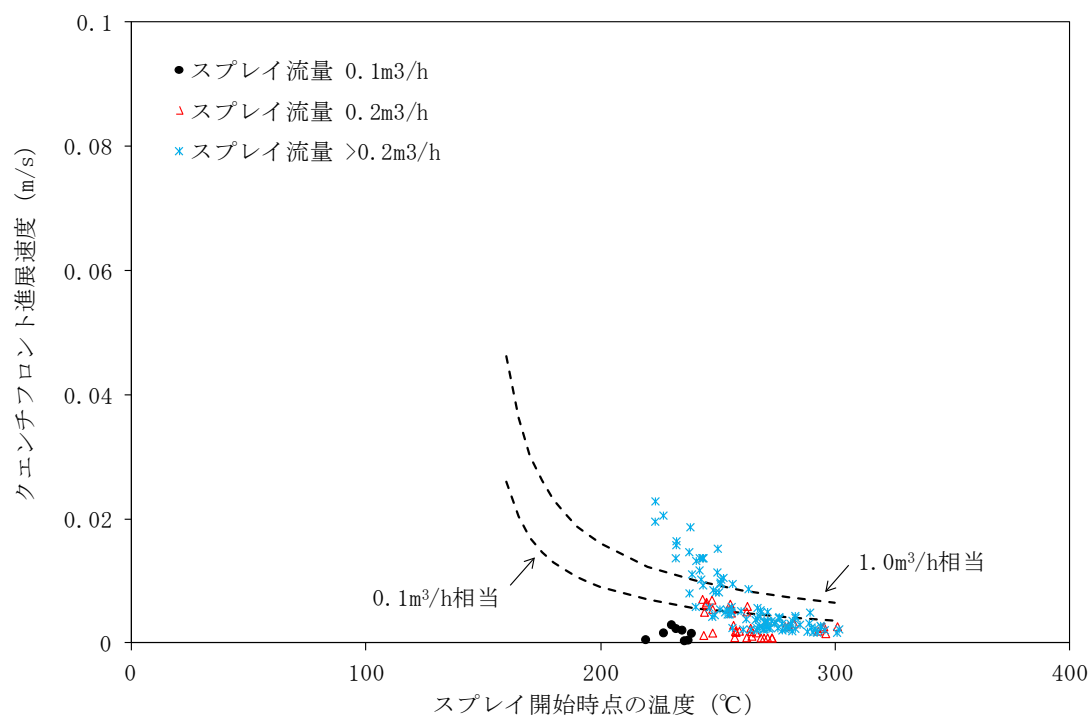
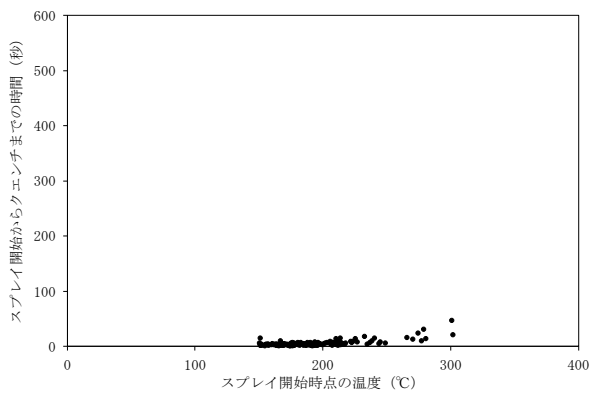
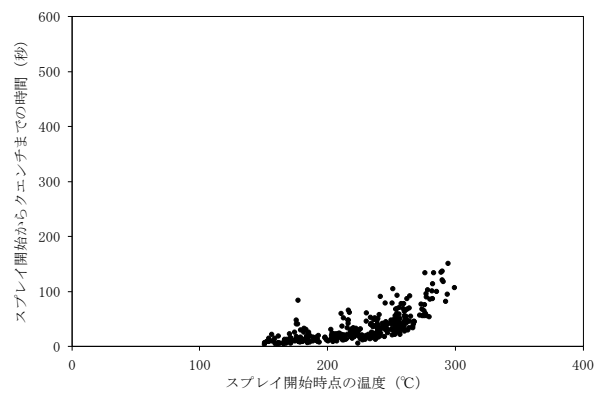


図 3.3.2-10 クエンチフロント進展速度の相関式との比較 (16年度データ)

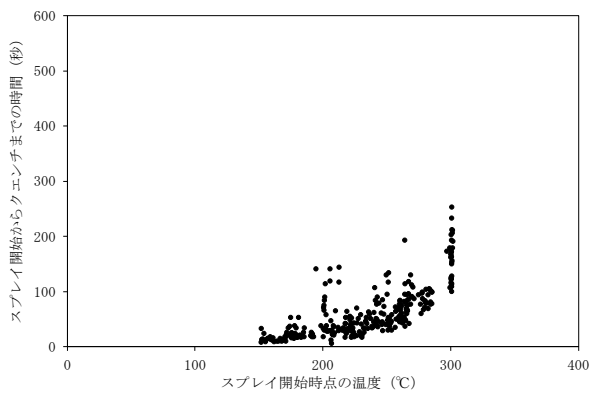




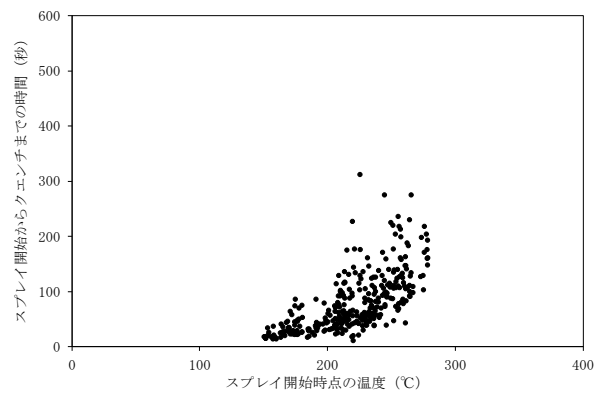
(TC1)



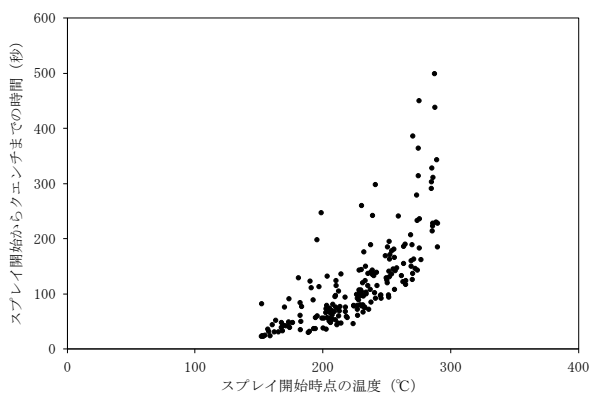
(TC2)



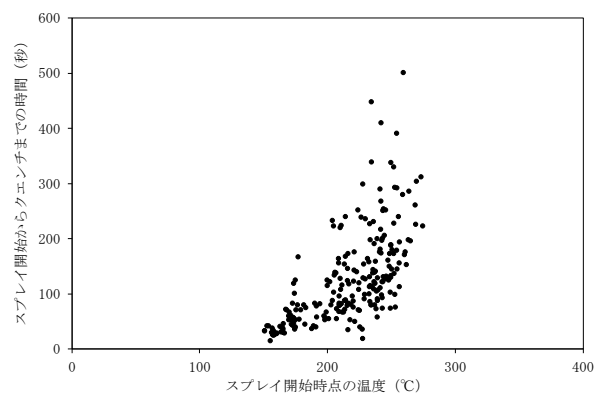
(TC3)



(TC4)

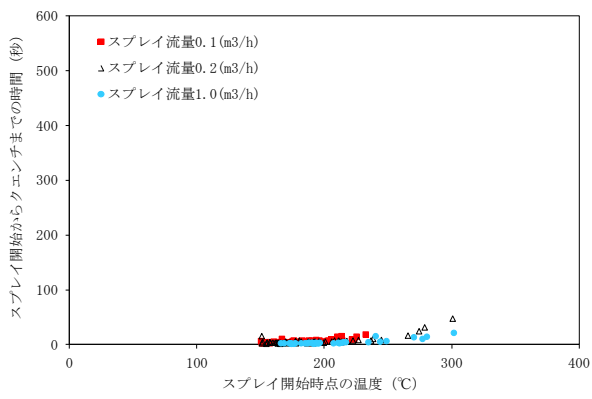


(TC5)

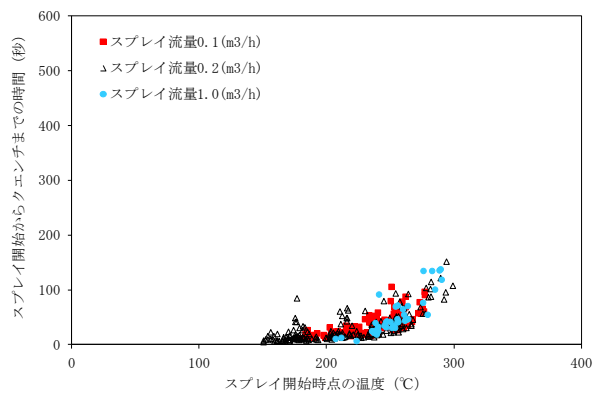


(TC6)

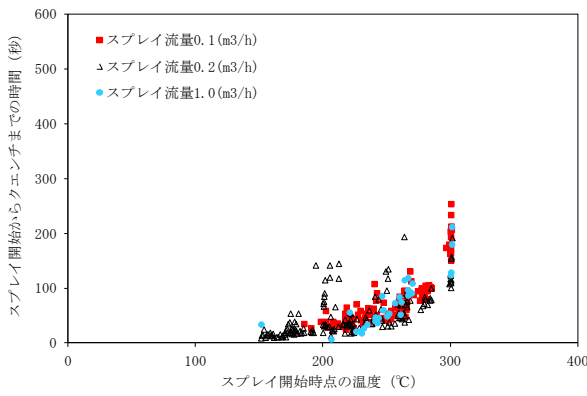
図 3.3.2-11 スプレー開始時点の温度とクエンチ時間の関係 (17年度データ)



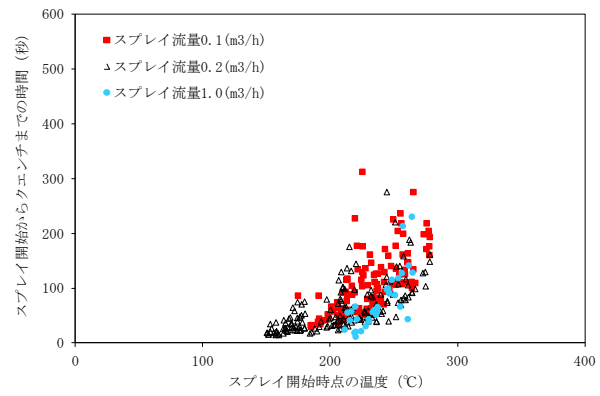
(TC1)



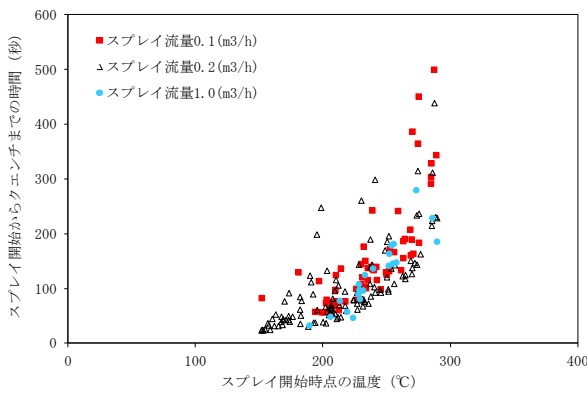
(TC2)



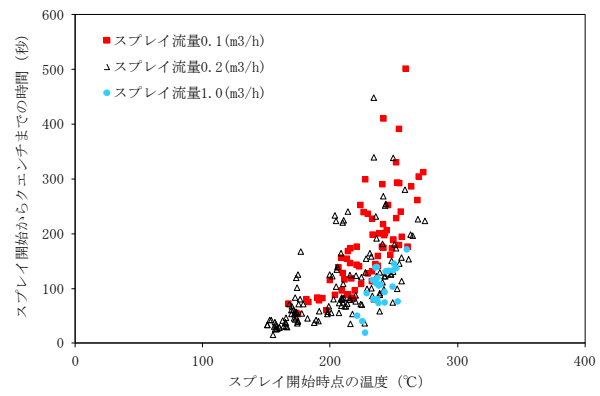
(TC3)



(TC4)

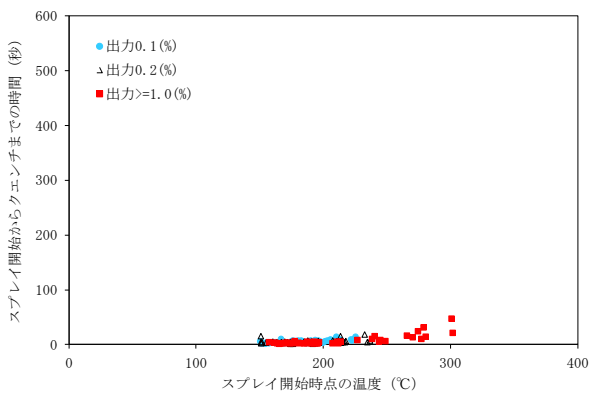


(TC5)

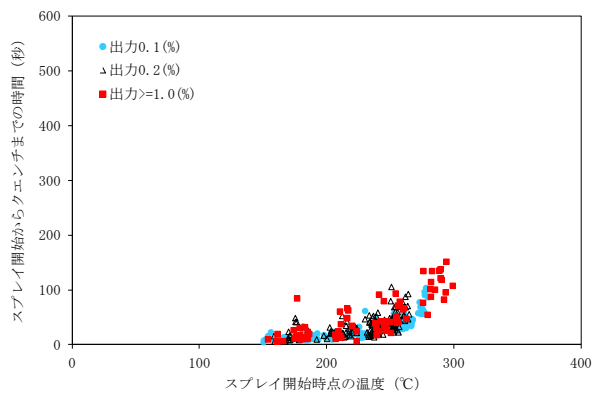


(TC6)

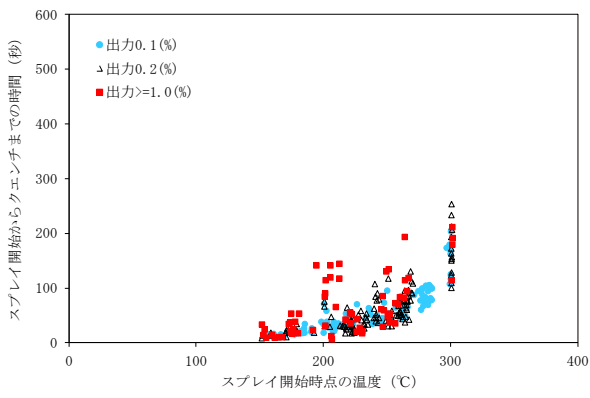
図 3.3.2-12 スプレー流量とクエンチ時間の関係 (17年度データ)



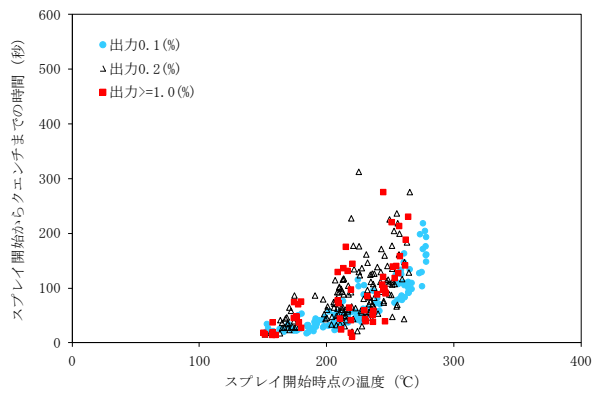
(TC1)



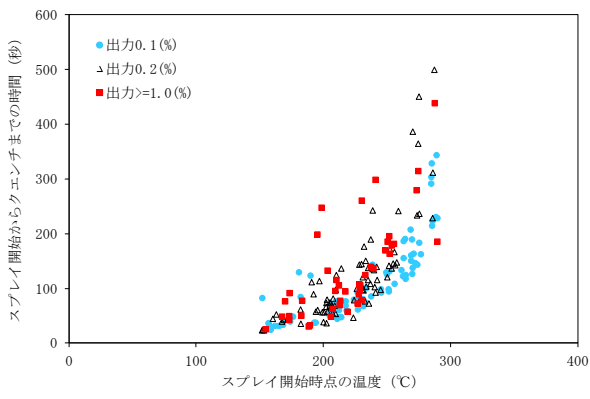
(TC2)



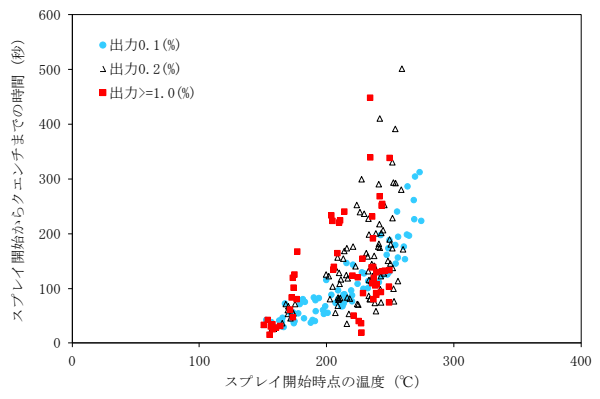
(TC3)



(TC4)



(TC5)



(TC6)

図 3.3.2-13 出力とクエンチ時間の関係 (17年度データ)

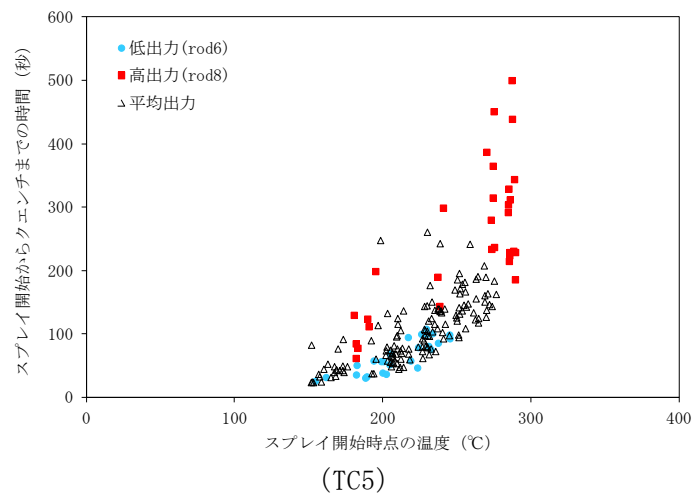
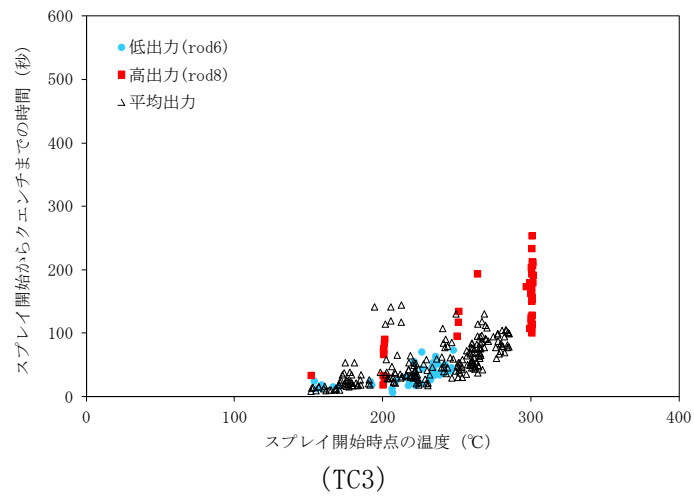
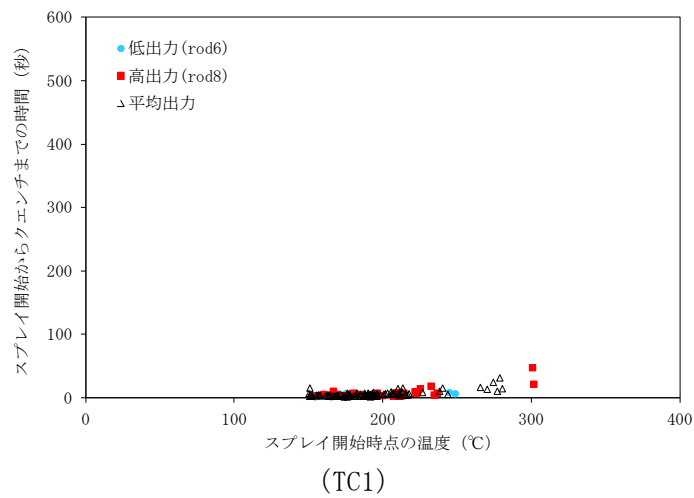


図 3.3.2-14 ロッド出力とクエンチ時間の関係 (17年度データ)

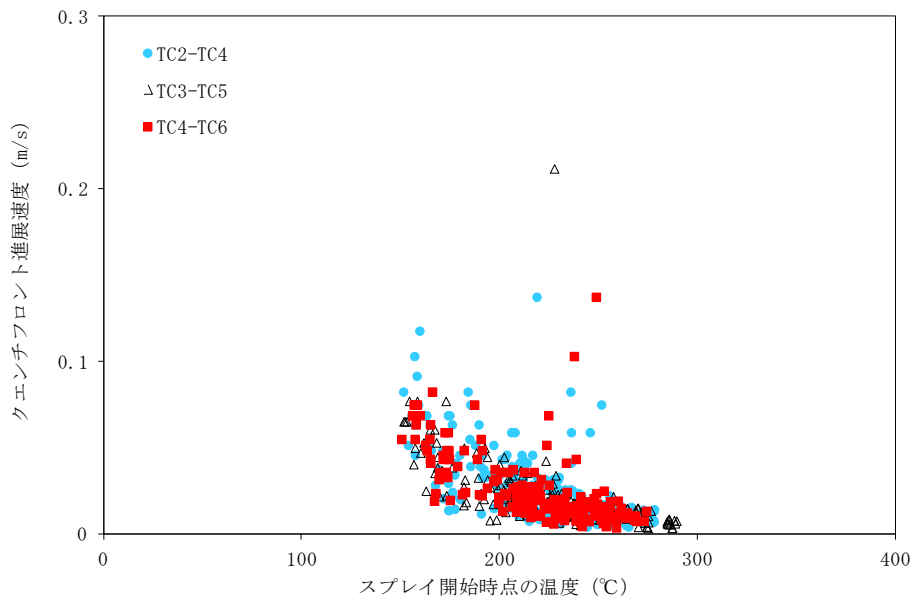


図 3.3.2-15 クエンチフロント進展速度の評価結果 (17年度データ)

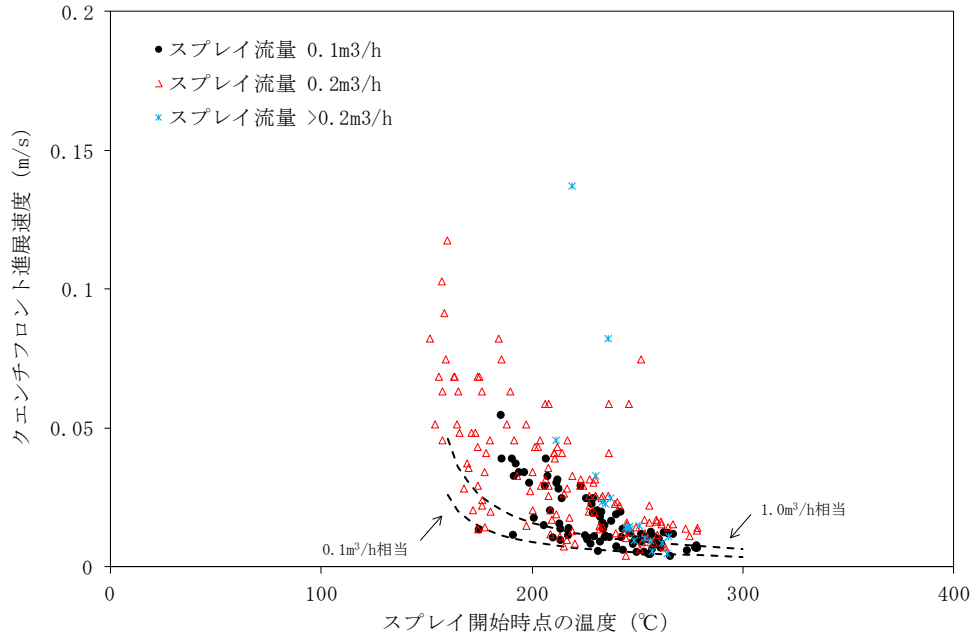


図 3.3.2-16 クエンチフロント進展速度の相関式との比較 (17年度データ)

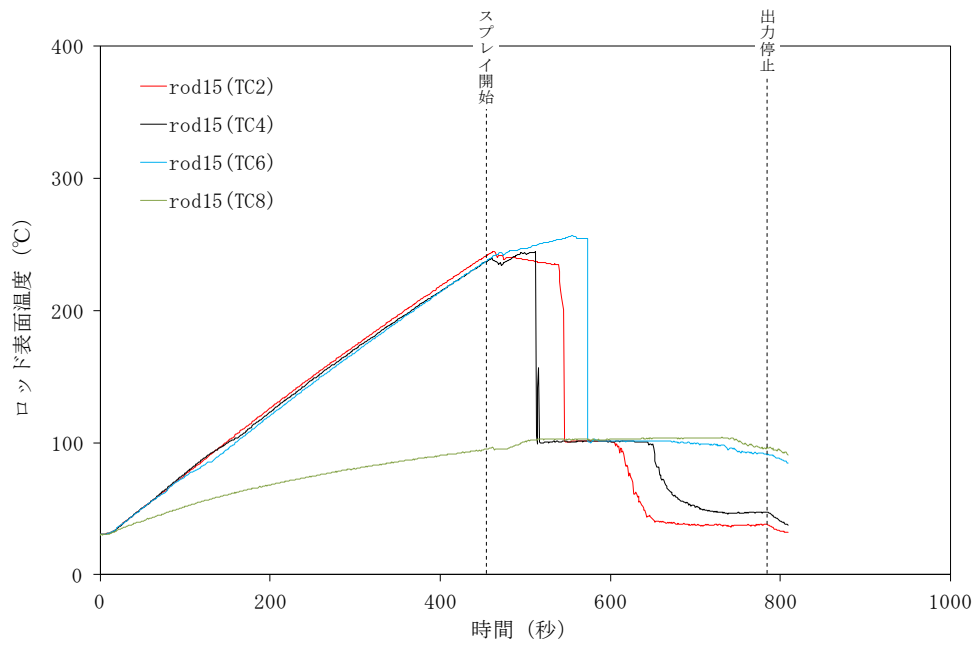


図 3.3.2-17 クエンチ時間が逆転する例 (ケース 17-3-9, ロッド No. 15)

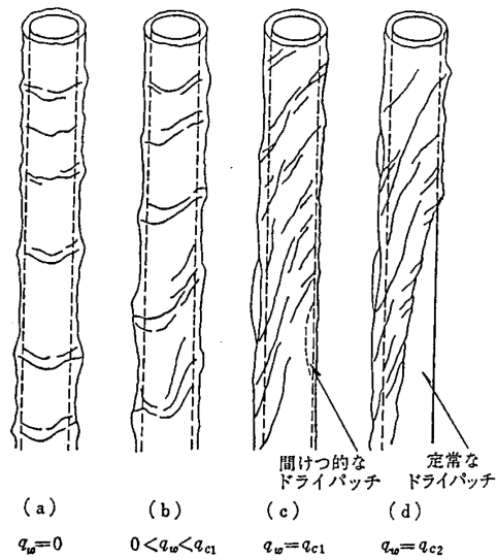


図 3.3.2-18 サブクール液膜の破断の概念図 0

## 参考文献

- <4> R. E. Henry, "A Correlation for the Minimum Film Boiling Temperature", AIChE Symposium Series, 70, 1974
- <5> A. Yamanouchi, "Effect of Core Spray Cooling in Transient State after Loss of Coolant Accident", J. Nucl. Sci. Technol., 5, 1968
- <6> E. Elias, "Rewetting and Liquid Entrainment During Reflooding - State of Art", EPRI NP-435, 1977
- <7> R. B. Bird, "Transport Phenomena", 1960
- <8> G. F. Hewitt, "Post-Dryout Heat Transfer"
- <9> 植田辰洋, 「気液二相流－流れと熱伝達－」, 1981

### 3.3.3 ボイド率

#### 3.3.3.1 ボイド率の評価について

本検討では、16年度及び17年度の試験結果に対し、サブチャンネルボイドセンサ（SCVS）、熱電対及び差圧計の計測データを比較することで、試験体部のボイド率分布を評価した。また、軸方向ボイド率分布に対して、既存のドリフトフラックスモデルとの比較を行い、試験結果の妥当性を確認した。

#### 3.3.3.2 計測機器

ボイド率の評価に用いる計測機器を表 3.3.3-1 に、軸方向位置を図 3.3.3-1 に示す。

##### (1) サブチャンネルボイドセンサ（SCVS）

SCVS の断面図を図 3.3.3-2 に、収録条件を表 3.3.3-2 に示す。SCVS は 3 断面に設置しており、それぞれの断面ではボイドの速度を測定するため、間隔 30mm を空けて下流側及び上流側の 2 断面で計測している。ワイヤ-ワイヤ間では、下流側及び上流側の両方で同じ径方向位置を測定しており、ワイヤ-ロッド間では下流側と上流側で測定位置が異なる。断面のボイド率分布を整理する際には、ワイヤ-ワイヤ間は下流側で代表させ、ワイヤ-ロッド間については下流側及び上流側の両者のデータを用いる。

昨年度の評価においては、計測データに対して 150Hz のローパスフィルタを施していたが、スラッグの通過等によって引き起こされる高周波数のボイド率の変動を考慮するため、フィルタ処理を省いた。

また、それぞれの計測点に対する流路断面積について、昨年度は格子上に流路を区切っていたが、今年度では図 3.3.3-3 のように、ワイヤ-ロッド間の計測領域については周状に区切り、それ以外の領域をワイヤ-ワイヤ間とした<sup>(10)</sup>。

SCVS の計測値は以下の式を用いてボイド率 $\epsilon$ に換算した。

$$\epsilon = \frac{X_{water} - x}{X_{water} - X_{air}} \quad (3.3.3-1)$$

ここで、 $X_{water}$ 、 $X_{air}$ はそれぞれ液相 100%、気相 100%の換算係数であり、 $x$ は SCVS の信号値である。なお、気相 100%のボイド率が一部の計測点において 1.0 とならなかったため、気相 100%の時間平均ボイド率 $\bar{\epsilon}_{air}$ を用いて以下のようにボイド率を校正した。

$$\epsilon' = \frac{\epsilon}{\bar{\epsilon}_{air}} \quad (3.3.3-2)$$

校正に用いた気相 100%の時間平均ボイド率 $\bar{\epsilon}_{air}$ を図 3.3.3-4 に示す。ワイヤ-ロッド間の計測位置において、気相 100%のボイド率が低くなっていることが確認できる。なお、一部のボイド率が気相 100 にも関わらず 0 に近い値となっており、これらの計測位置については計測不良とし、評価から除外する。校正データ以外についても、同様の傾向が確認される信号値があり、



これらについても除外して評価を行った。また、四隅の計測点については、露出している場合においてもボイド率が0に近い値を示しており、これらの計測値は断面平均ボイド率の評価から除外した。

## (2) 静電容量系 (ECVL)

ECVL のボイド率 $\epsilon$ は、以下の式に基づく渡辺らのC計測法<sup>(11)</sup>を用いた。

$$\epsilon = \frac{1 - C}{1 + 0.5C} \quad (3.3.3-3)$$

$$C = \frac{C_{\epsilon} - C_{air}}{C_{water} - C_{air}} \quad (3.3.3-4)$$

ここで、 $C_{water}$ 、 $C_{air}$ はそれぞれ液相 100%、気相 100%の静電容量であり、 $C_{\epsilon}$ は計測点における静電容量である。ボイド率は液相 100%及び気相 100%の静電容量から換算しており、これらの値の計測例を図 3.3.3-5 に示す。このデータの例では、 $C_{water}$ が約 1000pF、 $C_{air}$ が約 600pF となっており、 $C_{water}$ と $C_{air}$ の差からボイド率を求めることになるが、計測値のばらつきが大きく、ボイド率の計測精度が低いことが確認できる。したがって、本検討からは ECVL の計測データは除外する。

### 3.3.3.3 ボイド率の計測値の評価

#### (1) Case1-4-300

##### a) 試験結果概要

16年度に実施したベースケース Case1-4-300 に対し、ボイド率の計測結果の評価を行う。試験条件を表 3.3.3-3 に示す。本試験ケースは、初期水位及び初期冷却水温度が高いため、出力上昇後、二相水位が TAF を上回る。広い範囲で二相領域が形成されるため、ボイド率の評価に適している。

被覆管最高温度の推移を図 3.3.3-6 に示す。出力上昇開始後、露出している TC4 以上の温度が上昇するが、100 秒程度で二相水位が上昇することにより温度は飽和温度程度まで低下する。その後、沸騰に伴う水位低下により、約 500 秒で TC1 の温度が上昇を開始し、続いて TC2 の温度も上昇を開始する。1025 秒でスプレイを開始し、TC1 の温度上昇が緩慢になり約 1200 秒でクエンチする。温度が上昇している TC2 についても、幾ばくかの時間遅れの後に TC1 と同様の挙動を示す。チャンネルボックス内面温度の推移を図 3.3.3-7 に示す。チャンネルボックス内面温度は、温度の上昇が被覆管温度よりも遅く、TC1 の温度上昇開始は約 900 秒となっている。また、スプレイ開始後すぐに温度が低下するという特徴が確認される。非加熱ロッドの温度の推移を図 3.3.3-8 に示す。非加熱ロッドの温度についてもチャンネルボックス内面と同様の挙動を示すが、温度上昇に関してはチャンネルボックス内面よりも応答が早い。差圧計ボイド率の推移を図 3.3.3-9 に示す。約 900 秒から約 1100 秒にかけて、区間 2 のボイド率が低くなっているが、これは露出したことにより差圧導管内の水が沸騰したためだと考えられる。差圧計水位及びドレンタンク水量を図 3.3.3-10 に示す。試験体部の水位は沸騰開始する約 50 秒から低下を始め、ドレンタンク水量は 200 秒程度から上昇を始めている。ドレンタンクへ水が移行する要因としては、試験体部からの溢れ、またはスプレイ筒内での蒸気凝縮が考えられるが、ドレンタンク水量が上昇に転じる時間が沸騰開始時間と一致していないため、二相水位が上昇したことによる試験体部からの溢れが主要因だと考えられる。

##### b) ボイド率分布の比較

出力上昇開始後 136 秒の軸方向ボイド率分布を図 3.3.3-11 に、径方向ボイド率分布と断面平均ボイド率の時間変化を図 3.3.3-14 に示す。SCVS の時間平均ボイド率は、SCVS 計測時間 60 秒間の平均値である。差圧計 (DP) のボイド率は同様に 60 秒間の時間平均値として整理した。温度については、SCVS 計測時間の最後の計測点で整理した。出力上昇開始後 136 秒では、ボイド率の上昇が収まり、準定常状態となっている。軸方向ボイド率では、SCVS は DP に対して低く計測していることが確認される。TAF の燃料棒温度が上昇していないことから、TAF まで冠水されている状態または水面揺動により冷却可能な状態であることが確認される。

出力上昇開始後 889 秒の軸方向ボイド率分布を図 3.3.3-12 に、径方向ボイド率分布と断面平均ボイド率の時間変化を図 3.3.3-15 に示す。TC1 及び TC2 の温度が上昇し、同位置は完全に露出していることが確認できる。SCVS 上段の断面平均ボイド率の時間変化を見ると、同位置は露出し、水面揺動によって時折水が掛かっている様子が確認できる。ただし、SCVS 上段の直ぐ上に位置する TC3 の温度は上昇しておらず、この状態では燃料棒を冷却できていることが確認される。

出力上昇開始後 994 秒の軸方向ボイド率分布を図 3.3.3-13 に、径方向ボイド率分布と断面

平均ボイド率の時間変化を図 3.3.3-16 に示す。1025 秒後よりスプレーを開始しており、スプレーのボイド率への影響を確認することができる。SCVS 上段の断面平均ボイド率の時間変化は、スプレー開始前は 889 秒後と同様の挙動を示すが、スプレー開始後は、露出が維持されるように変化する。発熱ロッドの温度は、スプレーを開始してもしばらくの間は冷えないが、非加熱ロッドやチャンネルボックス内面の温度はすぐに冷却されている挙動より、スプレー水は非加熱面等を伝って液相部へ到達し、二相水位を低下させていることが推測される。ただし、SCVS 中段及び下段のボイド率は大きな変化をしておらず、計測時間の範囲においてはスプレーの影響は上部領域のみに限られている。なお、図 3.3.3-13 では SCVS 上段のすぐ上に位置する TC3 の燃料棒最高温度が上昇しているが、これは図 3.3.3-6 に示すように、スプレー開始後に温度が上昇しており、二相水位低下によって露出したためだと考えられる。

### 3.3.3.4 ドリフトフラックスモデルとの比較

(1) プール沸騰条件下のドリフトフラックスモデル

プール沸騰条件において、無次元化されたドリフトフラックスモデルは次のように表される。

$$\langle\langle v_g^+ \rangle\rangle = \frac{\langle j_g^+ \rangle}{\langle \epsilon \rangle} = C_0 \langle j_g^+ \rangle + V_{gj}^+ \quad (3.3.3-5)$$

Chen<sup><12></sup>らは、バンドル体系がサブチャンネルとバンドルを収めたケーシングの幅という2つの異なる空間スケールを有していることに着目し、ドリフト速度として次式を提案している。

$$V_{gj}^+ = V_{gj,B}^+ \exp[-1.39 \langle j_g^+ \rangle] + V_{gj,C}^+ (1 - \exp[-1.39 \langle j_g^+ \rangle]) \quad (3.3.3-6)$$

ここで、 $V_{gj,B}^+$ は気泡流における無次元ドリフト速度を表す。

$$V_{gj,B}^+ = \sqrt{2} (1 - \langle \epsilon \rangle)^{1.75} \quad (3.3.3-7)$$

$V_{gj,C}^+$ はバンドルケーシングのスケールを考慮した無次元ドリフト速度であり、SFP冷却試験体系の粘性数 (Viscous Number)  $N_{\mu f}$  及びケーシングのサイズに対しては次式で与えられる。

$$V_{gj,C}^+ = 0.030 \left( \frac{\rho_g}{\rho_f} \right)^{-0.157} N_{\mu f}^{-0.562} \quad \text{for } N_{\mu f} \leq 2.25 \times 10^{-3} \text{ and } D_C^* \geq 30 \quad (3.3.3-8)$$

$$N_{\mu f} = \frac{\mu_f}{\left( \rho_f \sigma \sqrt{\frac{\sigma}{g \Delta \rho}} \right)^{1/2}} \quad (3.3.3-9)$$

$$D_C^* = \frac{D_C}{\sqrt{\frac{\sigma}{g \Delta \rho}}} \quad (3.3.3-10)$$

ここで、 $\sigma$ は水の表面張力 (N/m)、 $\rho_g$ は蒸気密度 (kg/m<sup>3</sup>)、 $\Delta\rho$ は気液密度差 (kg/m<sup>3</sup>)、 $g$ は重力加速度 (m/s<sup>2</sup>)、 $D_C$ はケーシングの幅 (m) である。既存のドリフトフラックスモデルでは通常 $D_C$ の代わりに水力等価直径を用いるが、ここでは、複数のサブチャンネルに跨る気泡を考慮するため、ケーシングの幅をスケールとして用いている。大気圧下で実施したSFP冷却試験の体系では、粘性数が約7.5e-4、 $D_C^*$ が約41となる。

また、Chenらは、式(3.3.3-6)のドリフト速度を用いて、試験データから分布定数 $C_0$ を次式のとおり決定している。

$$C_\infty = 4.79 \langle j_g^+ \rangle + 1.00 \quad \text{for } \langle j_g^+ \rangle \leq 0.5 \quad (3.3.3-11)$$

$$C_\infty = 3.45 \exp[-0.52 \langle j_g^+ \rangle^{0.51}] + 1.00 \quad \text{for } \langle j_g^+ \rangle > 0.5 \quad (3.3.3-12)$$

$$C_0 = C_\infty - (C_\infty - 1) \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_f}} \quad (3.3.3-13)$$

本検討では、SFP 冷却試験における軸方向ボイド率分布の評価手法として、Chen のモデルを使用することとする。

## (2) 沸騰開始点と二相水位

沸騰開始点 $L_n$ から二相水位 $L_{tp}$ までの間の発熱量が蒸発に寄与すると仮定すると、蒸発率 $w_{1g}$  (kg/s) には以下の関係が成り立つ。

$$w_{1g} = \frac{L_{tp} - L_n}{L_H} \frac{P}{H_{fg}} \quad (3.3.3-14)$$

ここで、 $L_H$ は発熱有効長 (m)、 $P$ は燃料集合体出力 (W)、 $H_{fg}$ は蒸発潜熱 (J/kg) である。プール沸騰条件下においては、水面の揺動によって二相水位は絶えず変化しているが、本検討では式(3.3.3-14)に示すとおり、蒸気発生に寄与する水位を二相水位と定義する。

式(3.3.3-14)より沸騰開始点は以下となる。

$$L_n = L_{tp} - \frac{H_{fg} w_{1g}}{P} L_H \quad (3.3.3-15)$$

また、式(3.3.3-5)より、ボイド率が求まるので、燃料集合体の平均ボイド率 $\bar{\epsilon}$ をとすれば、二相水位には以下の式から求めることができる。

$$L_{tp} = \frac{L_{stat}}{1 - \bar{\epsilon}} \quad (3.3.3-16)$$

ここで、 $L_{stat}$  (m) は単相水位である。

蒸発率は各領域の水位の計測値の時間変化より算出する。単相水位についても差圧計の計測値より算出する。燃料集合体出力については、チャンネルボックス内外面の温度差により、熱の漏えい割合を算出し、補正する。以上により、軸方向ボイド率分布を評価し、試験結果との比較を行う。

## (3) 計測結果との比較 (Case1-4-300)

16年度実施のベースケース Case1-4-300 について試験結果とドリフトフラックスモデルの比較を行う。出力が 2%と高いので、気相の見かけの流速  $j_g$  が比較的大きくなり、式(3.3.3-6)において  $V_{gj,c}^+$  の項が支配的となる。発熱有効部のチャンネルボックス内外面温度差から算出した熱の漏えい割合を図 3.3.3-17 に示す。熱の漏えい率は、試験開始直後の出力上昇中を除けば、最大で約 14%となり、スプレイ開始直前では約 4%である。

軸方向ボイド率分布の比較を図 3.3.3-18 及び図 3.3.3-19 に示す。Chen らのドリフトフラックスモデルと差圧計のボイド率分布が良く一致し、SCVS については、やや過少評価していることが確認できる。また、沸騰開始点についても差圧計と計測値と整合していることが確認できる。ドリフトフラックスのボイド率の終点が二相水位に対応しており、136 秒後の結果では TAF よりも低い位置に二相水位があるが、TAF の燃料棒温度は上昇していないことが確認される。これは蒸気生成に寄与する二相水位よりも上方の領域において、水面揺動により供給される水によって、除熱が維持されていると考えられる。

## (2) 試験結果との比較 (17case06-02)

17 年度実施の低出力試験について、ドリフトフラックスモデルとの比較を行う。試験条件を表 3.3.3-4 に示す。出力が 0.1% と低いので、気相の見かけの流速  $j_g$  が小さくなり、式(3.3.3-6)において  $V_{gj,B}^+$  の項が支配的となる。

燃料最高温度を図 3.3.3-20 に示す。出力上昇後、TC4 以上の位置で温度上昇を続け、4444 秒後にスプレイを開始する。差圧計ボイド率を図 3.3.3-21 に示す。初期水位は区間 4 に位置しており、同区間のボイド率は気液二相流のボイド率には対応しておらず、露出した区間を含んだ気相割合になっていることに注意が必要である。なお、区間 2 のボイド率が低下しているが、この位置では露出しているため、差圧導管の沸騰が原因だと考えられる。差圧計水位及びドレンタンク水量を図 3.3.3-22 に示す。出力が低いいため、試験体部の水位低下は小さく、また、二相水位もあまり上昇していないことからドレンタンクへの水の流出は確認されていない。

ボイド率のドリフトフラックスモデルとの比較を図 3.3.3-23 及び図 3.3.3-24 に示す。二相流が形成されている領域が少ないため、差圧計の結果と比較できる点が少ないが、ドリフトフラックスモデルの沸騰開始点及び二相水位と整合することが確認される。また、被覆管温度から予想される二相水位とも整合することが確認される。

### 3.3.3.5 気泡速度

#### (1) 気泡速度の算出

SCVS は図 3.3.3-2 に示すように上，中，下段のそれぞれにおいて間隔 30mm を空けて 2 断面で計測をしており，これらの断面での計測値に対して相関係数を評価することで気泡速度を算出することができる。ワイヤ-ロード間については，上流側断面と下流側断面とで径方向の計測位置が異なるため，ワイヤ-ワイヤ間についてのみ評価を行う。

フレーム数  $n$  のデータに対し，フレーム  $j$  における上流側断面のボイド率を  $\alpha(j)$ ，下流側断面のボイド率を  $\beta(j)$  とし，下流側ボイド率のフレーム遅れ  $x$  における相関係数  $C(x)$  は，以下の式から計算される。

$$C(x) = \frac{\frac{1}{n-x} \sum_{j=1}^{n-x} \alpha(j)\beta(j+x) - \bar{\alpha}\bar{\beta}}{\sqrt{\frac{1}{n-x} \sum_{j=1}^{n-x} \alpha(j)^2 - \bar{\alpha}^2} \sqrt{\frac{1}{n-x} \sum_{j=1}^{n-x} \beta(j+x)^2 - \bar{\beta}^2}} \quad (3.3.3-17)$$

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{n-x} \sum_{j=1}^{n-x} \alpha(j) \quad (3.3.3-18)$$

$$\bar{\beta} = \frac{1}{n-x} \sum_{j=1}^{n-x} \beta(j+x) \quad (3.3.3-19)$$

相関係数が最も高くなるフレーム  $x$  を  $X$  とすれば，気相速度  $v$  は以下の式から計算される。

$$v = \frac{0.03}{\frac{X}{640} - T_0} \quad (3.3.3-20)$$

ここで， $T_0$  は上流側断面と下流側断面の計測時間の遅れである。

#### (2) 気泡速度の評価

Case1-4-300 の 136 秒後において気泡速度を評価した。ボイドがある程度発達し，かつ水面揺動の影響を受けにくい中段について，相関係数の最大値及び気泡速度の分布を図 3.3.3-25 に示す。相関係数の最大値は低出力ロードを結ぶ対角線上の中心部で他よりも大きい値となっているが，それでも 0.2 程度であり，全体的に相関が弱い傾向となっている。この原因としては，プール沸騰条件下では液相の流速が低く，気泡が 3 次元的に動くことにより，同じ気泡が上流側と下流側の計測点を通過しにくいことが考えられる。以上により，気泡速度の評価については参考扱いとする。

### 3.3.3.6 まとめ

差圧計及び SCVS の計測結果を用いて軸方向ボイド率を整理した結果,以下の項目を確認した。

- スプレイを注水すると,発熱燃料棒が冷却されるにはある程度の時間を要するが,チャンネルボックス等は比較的短時間で冷却される。スプレイ水は非発熱面を伝わって落水し,二相水位を低下させていると考えられる。
- 露出した断面においても,水面揺動によって水が供給され,冷却が維持される領域が形成される場合がある。
- 高出力条件(出力 2%)において,差圧計ボイド率とドリフトフラックスモデルから計算される軸方向ボイド率分布が良く一致することを確認した。
- 低出力条件(出力 0.1%)において,二相流が形成される領域が少ないため,軸方向ボイド率分布を差圧計ボイド率とドリフトフラックスモデルとで直接比較することはできないが,ドリフトフラックスモデルから計算される二相水位は熱電対の計測結果と良く整合することを確認した。

システムコード等で SFP の気液二相流をドリフトフラックスモデルで評価する場合においては,バンドル体系のプール沸騰条件に適用可能なモデルを選出する必要がある。より詳細に燃料の冷却性を評価する場合には,気泡通過に伴う水面揺動やそれに付随する露出部への液滴の供給を考慮することの重要性が確認された。



表 3.3.3-1 ボイド率の評価に関連する計測機器

計測機器	発熱有効部の軸方向測定数	備考
サブチャンネル ボイドセンサ	3 断面	断面の詳細なボイド分布を計測する。面積加重平均を取ることで断面平均ボイド率も評価する。
熱電対 (燃料棒)	10 点 (非発熱ロッドに関しては 5 点)	発熱ロッド及び非発熱ロッドの温度から二相水位を推定する。熱電対が露出した場合には発熱ロッド及び非発熱ロッドの温度が上昇する。発熱ロッドの温度に関してはそれぞれの軸方向位置での径方向最高温度で整理する。
熱電対 (チャンネルボックス 内面)	10 点	チャンネルボックス内面の温度から二相水位を推定する。ただし、燃料棒の温度上昇よりも応答が遅い。
差圧計	5 区間	発熱有効部の 5 区間の差圧から測定領域の平均ボイド率を評価する。ただし、ボイド率が高い領域では適切に測定できていないものがある。これは差圧導管の水の沸騰が原因と考えられる。
静電容量計	30 区間	計測値のばらつきが大きいため、本検討からは除外する。

表 3.3.3-2 SCVS の収録条件

測定周波数	640Hz
測定時の電圧パルス幅	$11.75 \times 10^{-6}$ 秒
測定時間	60 秒
ボイド率測定点 サブチャンネル部 ギャップ部	780 (1 断面辺り 260 点) 192 (64 サブチャンネル × 3 センサ) 588 (196 ギャップ × 3 センサ)
気相速度測定点	192 (サブチャンネル部のみ)

表 3.3.3-3 試験条件 (Case1-4-300)

項目	値
上部タイプレート	タイプ 1
スパーサ	肉厚 0.5mm タイプ
スプレイ	一様分布
スプレイ液滴径	3mm
スプレイ高さ	3m
スプレイオフセット	0mm
初期水位	2m
出力	2%
初期冷却水温度	95℃
スプレイ水温度	30℃
スプレイ流量	0.2m <sup>3</sup> /h
目標燃料最高温度	300℃
スプレイ開始時刻	1025 秒後
SCVS 計測開始時刻	136, 629, 759, 889, 994 秒後

表 3.3.3-4 試験条件 (17Case6-2)

項目	値
上部タイプレート	タイプ 1
スパーサ	肉厚 0.5mm タイプ
スプレイ	一様分布
スプレイ液滴径	3mm
スプレイ高さ	3m
スプレイオフセット	0mm
初期水位	2m
出力	0.1% (出力分布 A)
初期冷却水温度	95℃
スプレイ水温度	30℃
スプレイ流量	0.2m <sup>3</sup> /h
目標燃料最高温度	300℃
スプレイ開始時刻	4444 秒後
SCVS 計測開始時刻	なし

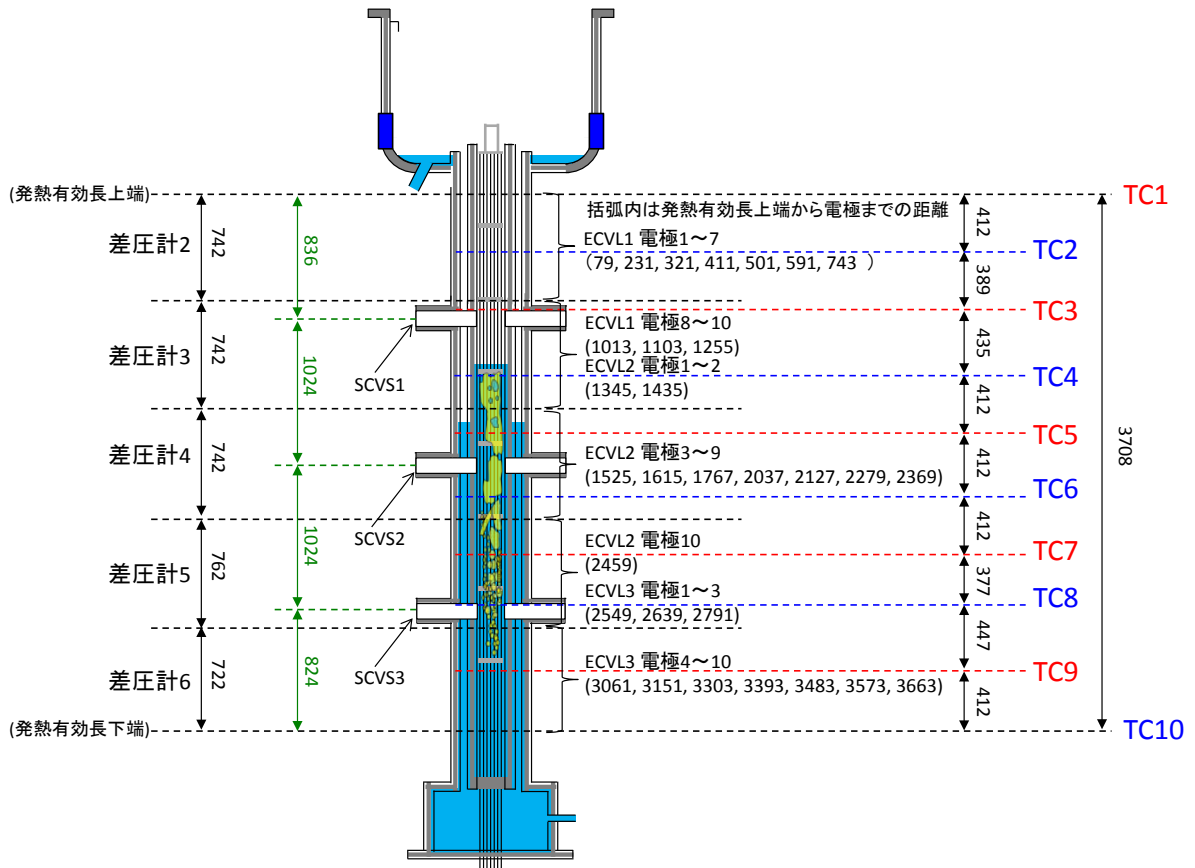


図 3.3.3-1 計測機器の位置

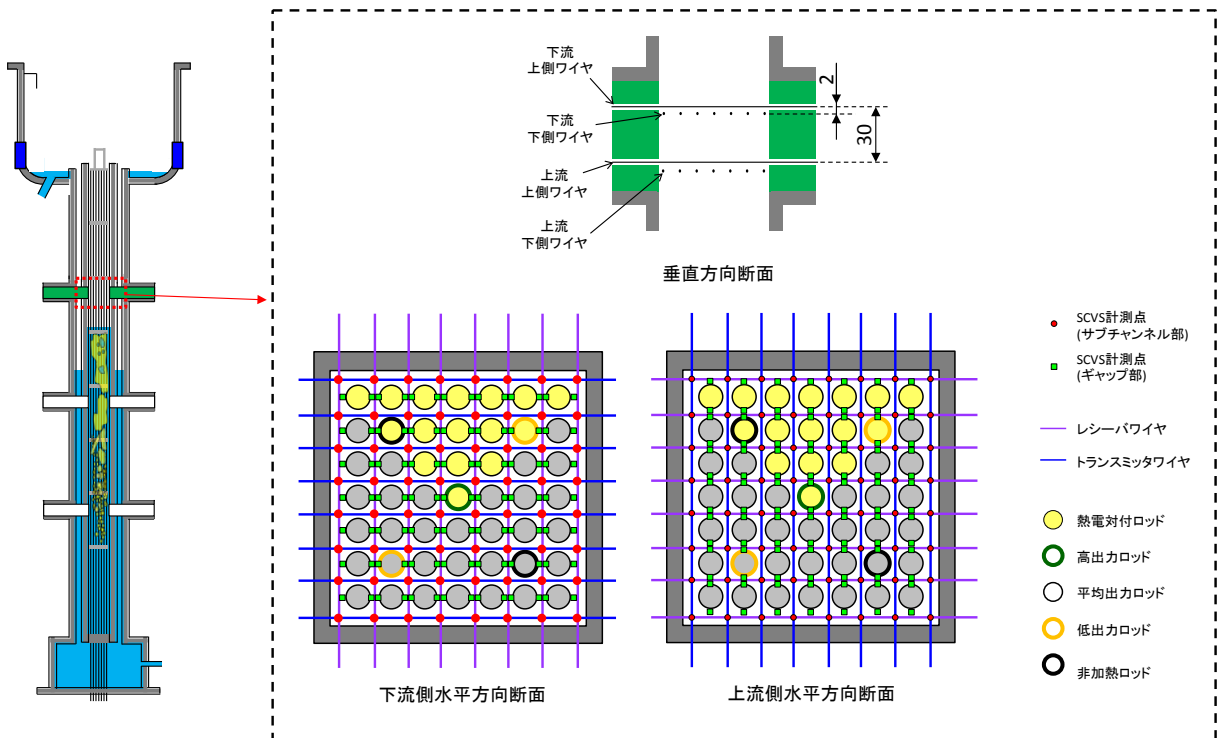


図 3.3.3-2 サブチャンネルボイドセンサ部断面図

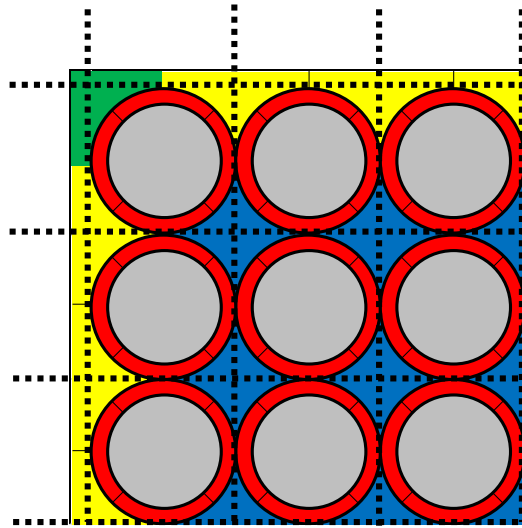
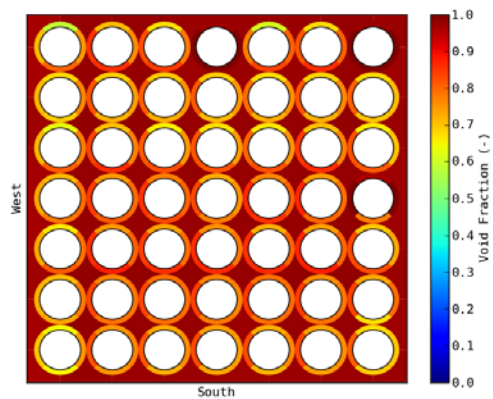
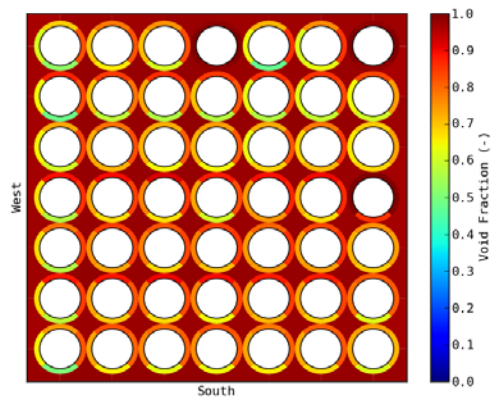


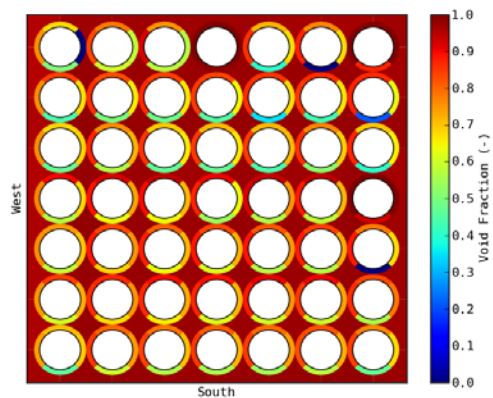
図 3.3.3-3 流路の区切り方



(上段)



(中段)



(下段)

図 3.3.3-4 気相 100%時のボイド率分布

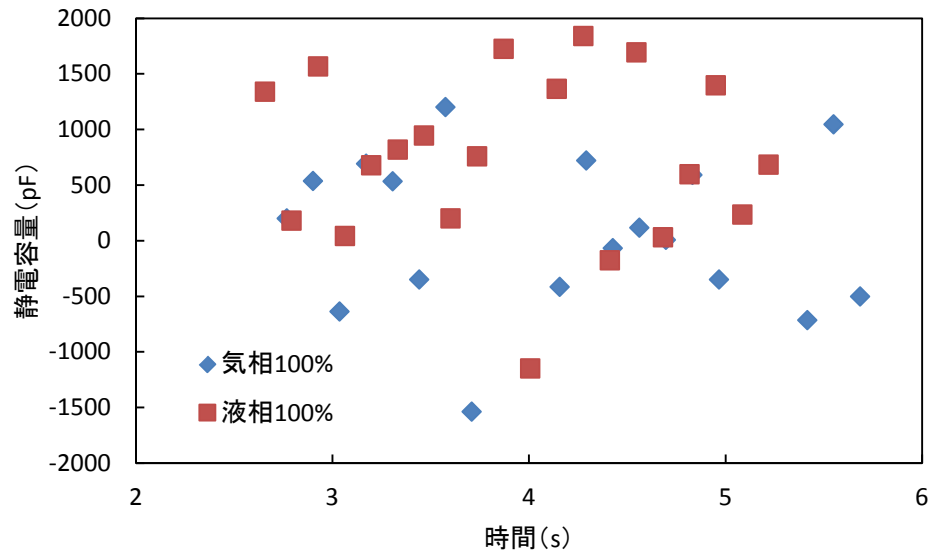


図 3.3.3-5 静電容量の校正データの例

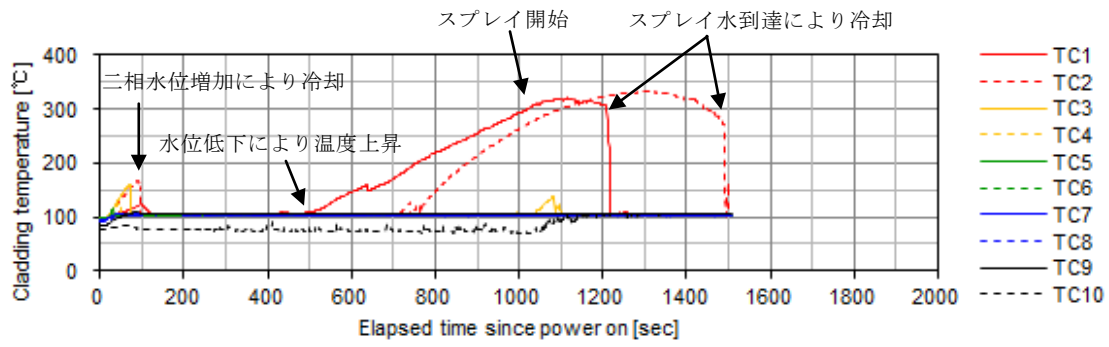


図 3.3.3-6 燃料最高温度 (Case1-4-300)

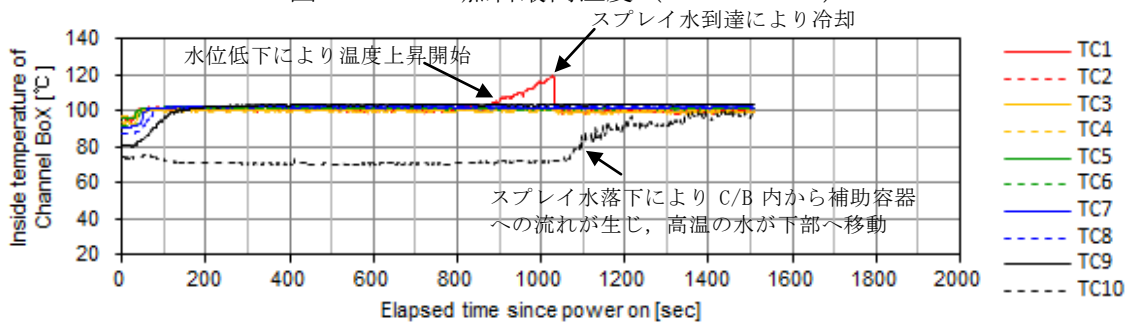


図 3.3.3-7 チャンネルボックス内面温度 (Case1-4-300)

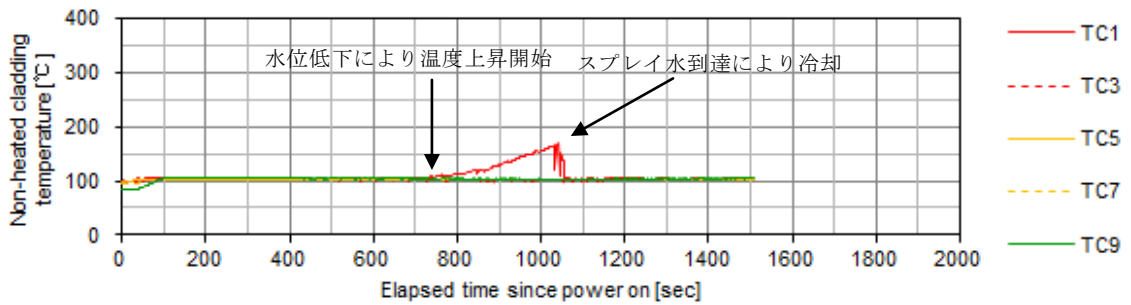


図 3.3.3-8 非加熱ロッド温度 (Case1-4-300)

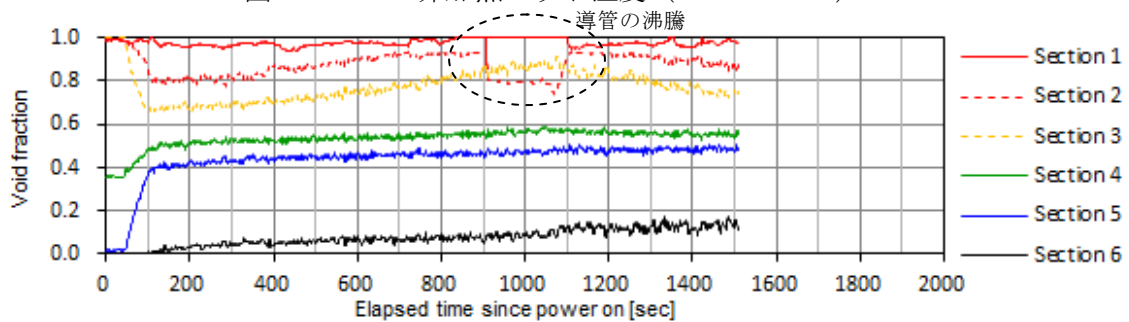


図 3.3.3-9 差圧計ボイド率 (Case1-4-300)

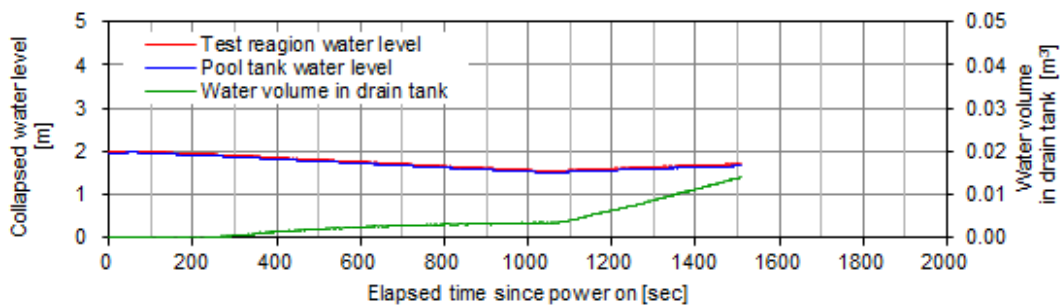


図 3.3.3-10 差圧計水位及びドレンタンク水量 (Case1-4-300)

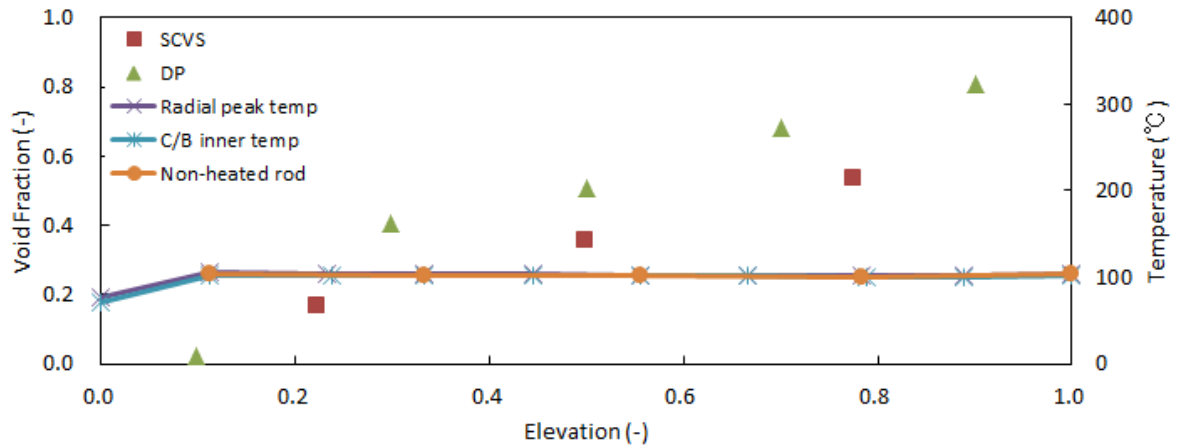


図 3.3.3-11 軸方向ボイド率分布 (Case1-4-300/136 秒後)

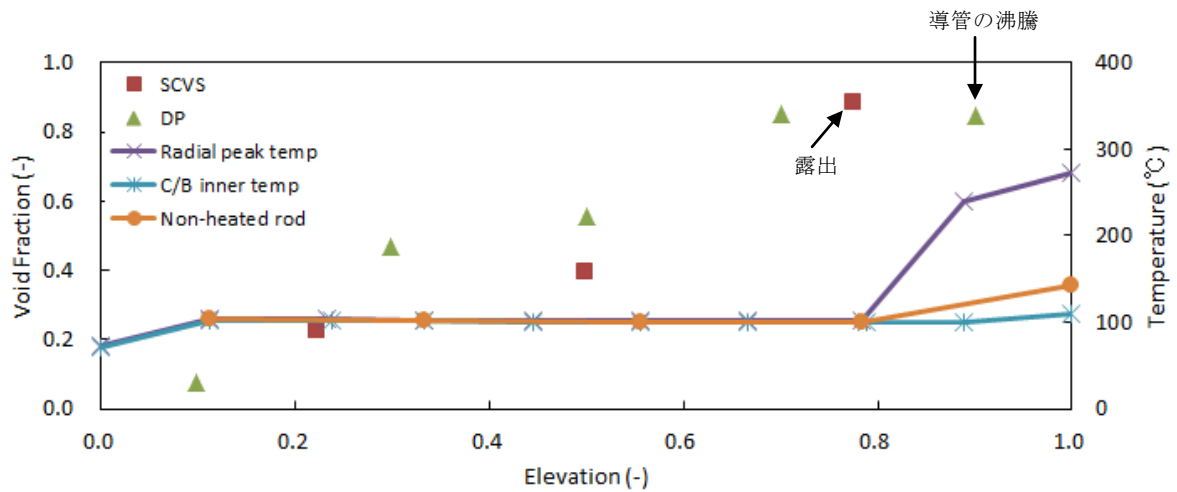


図 3.3.3-12 軸方向ボイド率分布 (Case1-4-300/889 秒後)

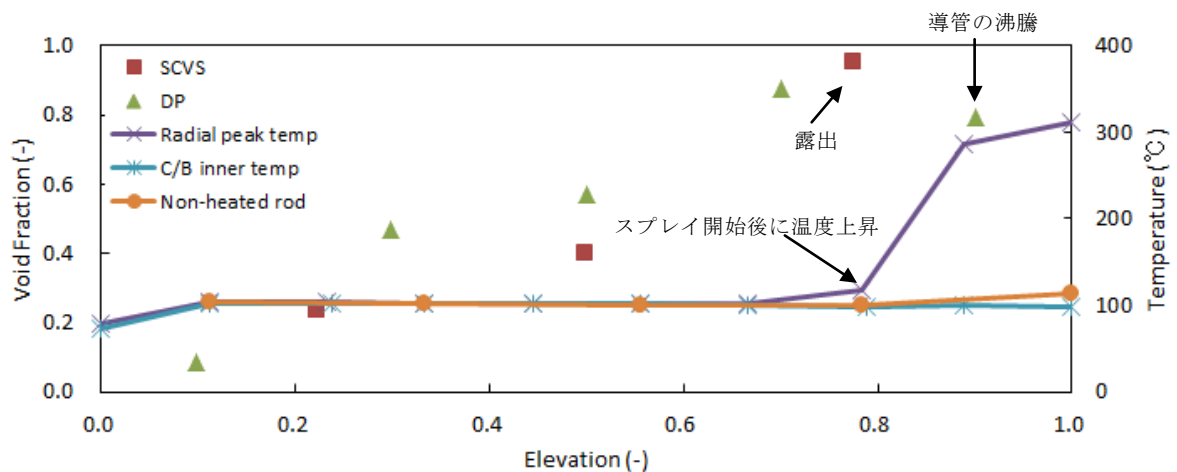
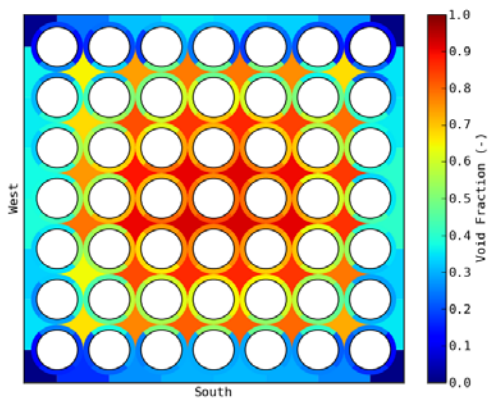
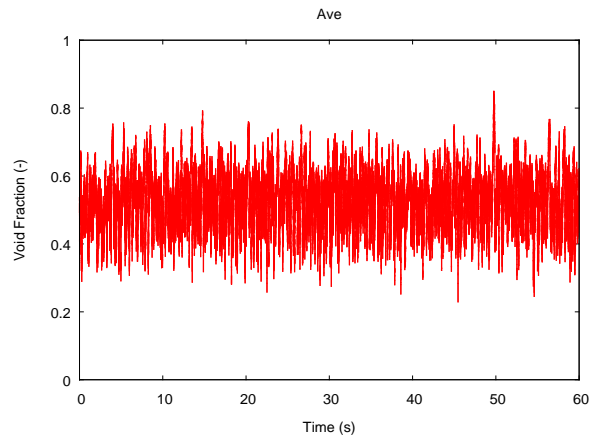


図 3.3.3-13 軸方向ボイド率分布 (Case1-4-300/994 秒後)

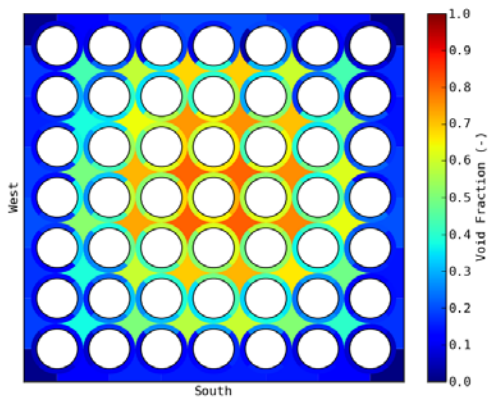




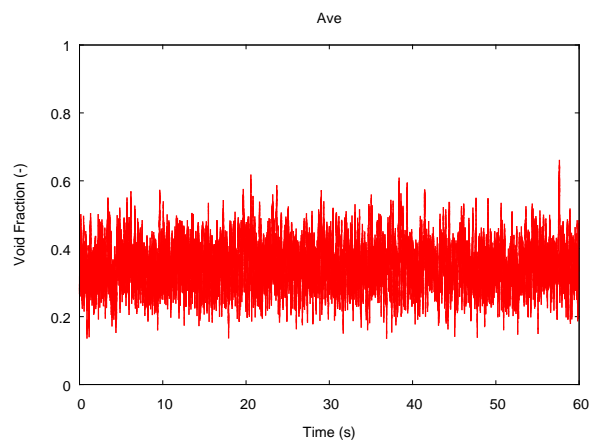
(上段) 時間平均ボイド率分布



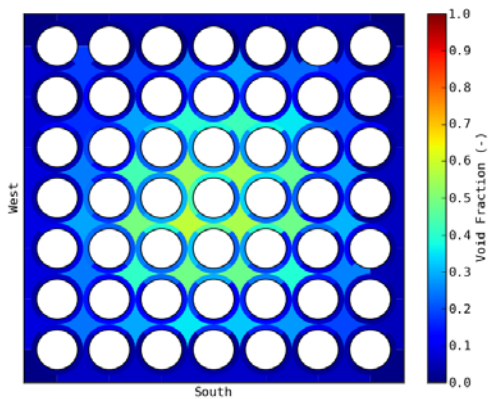
(上段) 断面平均ボイド率



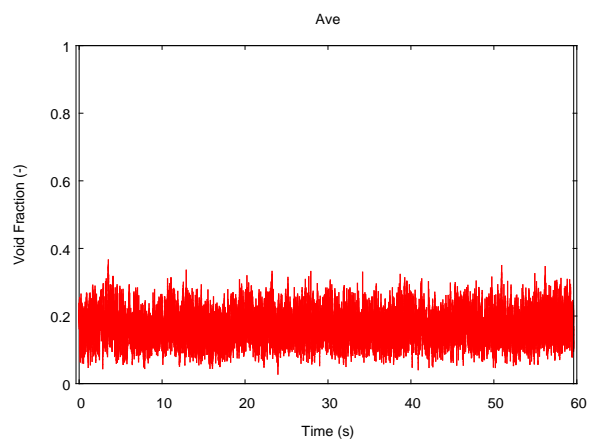
(中段) 時間平均ボイド率分布



(中段) 断面平均ボイド率

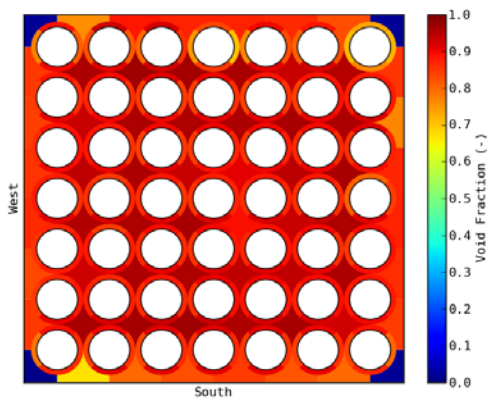


(下段) 時間平均ボイド率分布

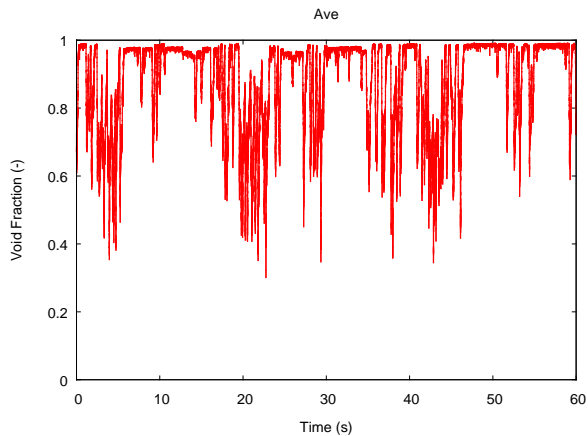


(下段) 断面平均ボイド率

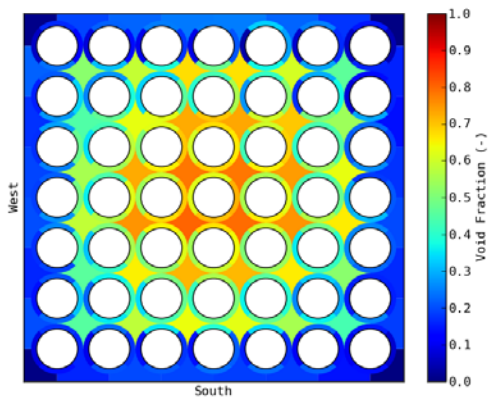
図 3.3.3-14 ボイド率分布と時間変化 (Case1-4-300/136 秒後)



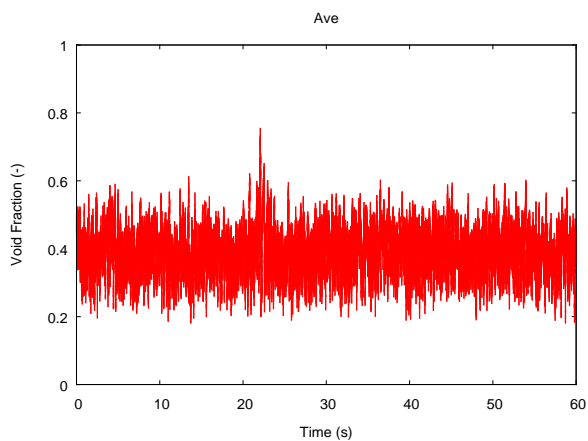
(上段) 時間平均ボイド率分布



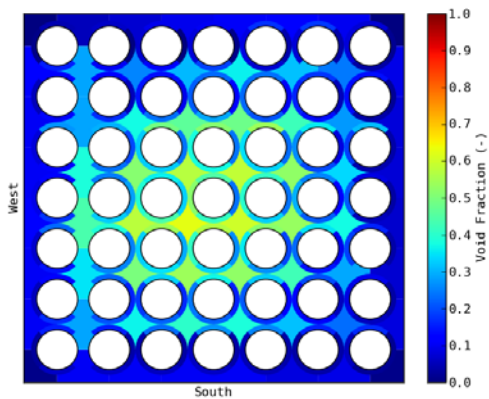
(上段) 断面平均ボイド率



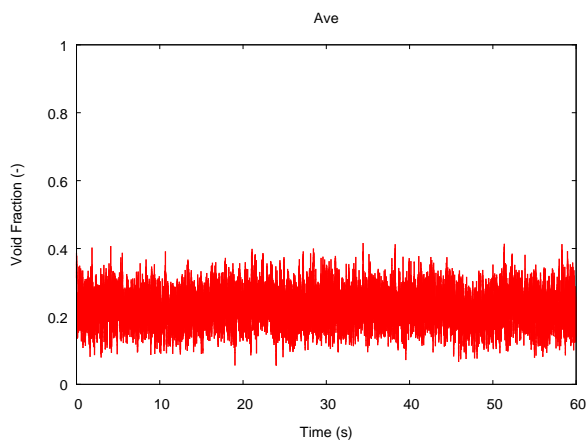
(中段) 時間平均ボイド率分布



(中段) 断面平均ボイド率

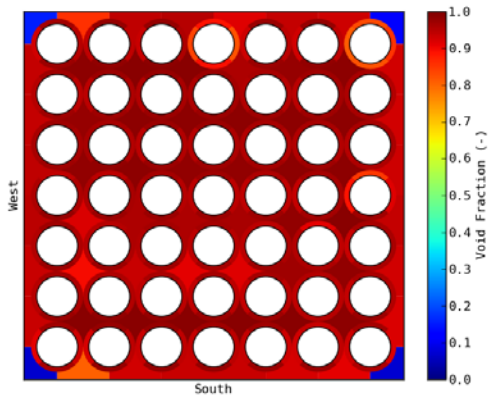


(下段) 時間平均ボイド率分布

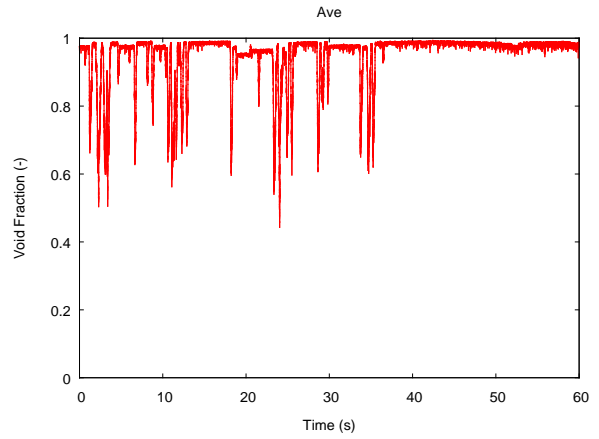


(下段) 断面平均ボイド率

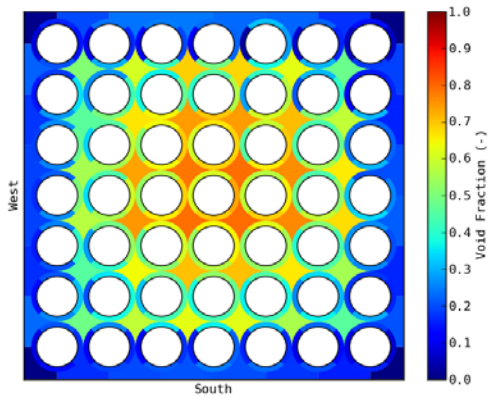
図 3.3.3-15 ボイド率分布と時間変化 (Case1-4-300/889 秒後)



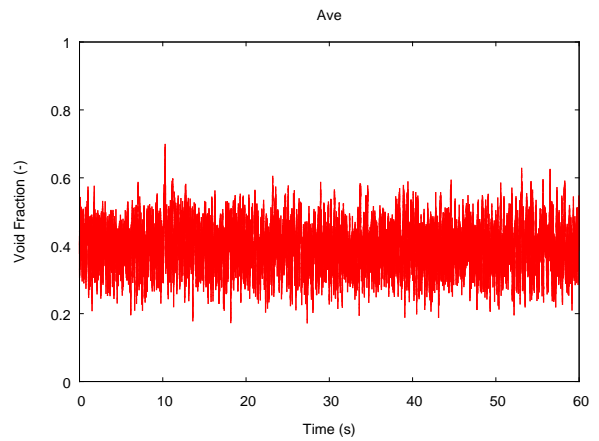
(上段) 時間平均ボイド率分布



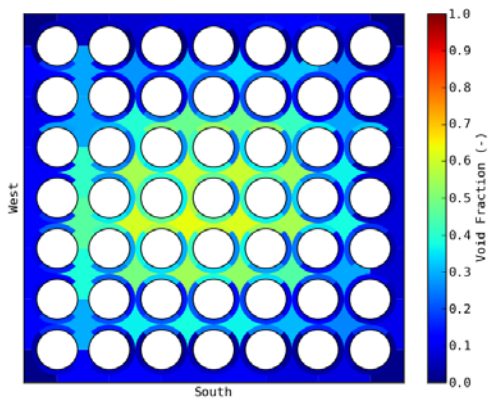
(上段) 断面平均ボイド率



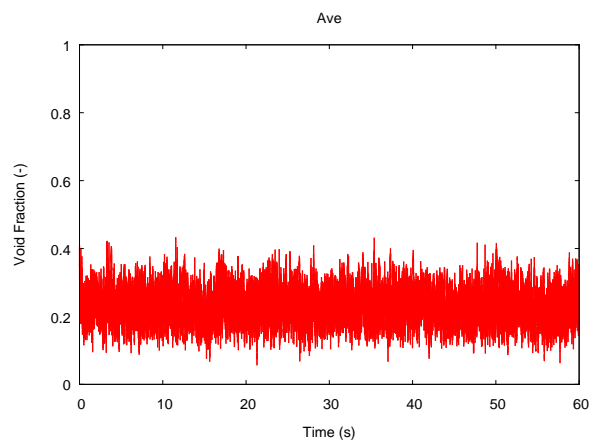
(中段) 時間平均ボイド率分布



(中段) 断面平均ボイド率



(下段) 時間平均ボイド率分布



(下段) 断面平均ボイド率

図 3.3.3-16 ボイド率分布と時間変化 (Case1-4-300/994 秒後)

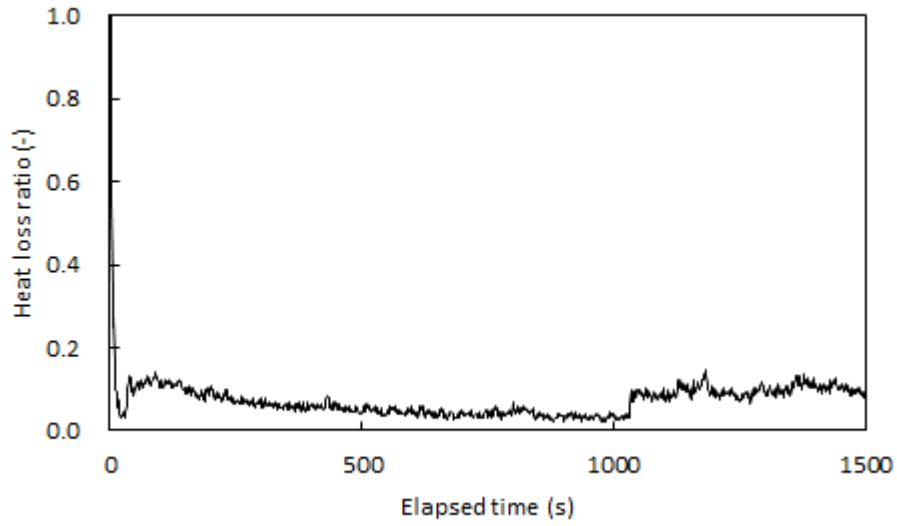


図 3.3.3-17 熱の漏えい率 (Case1-4-300)

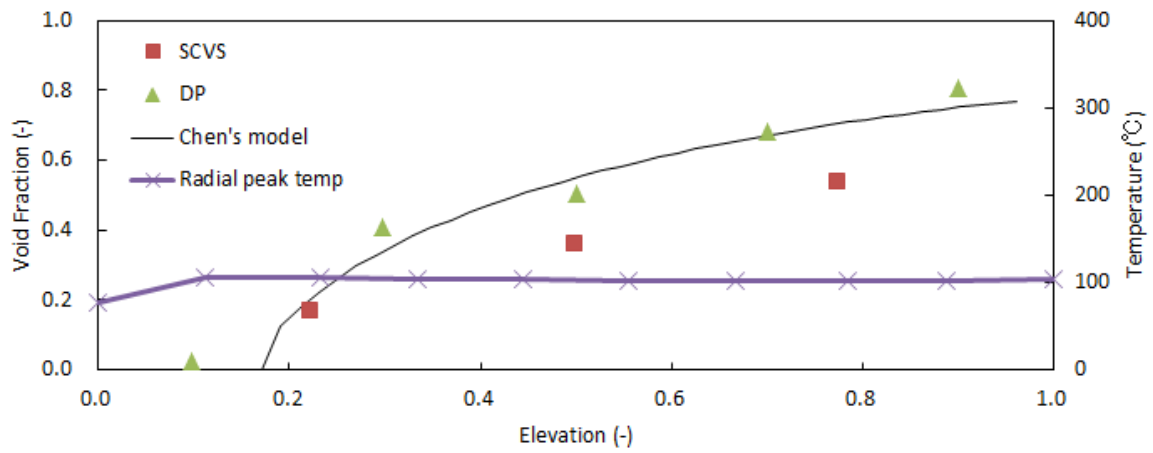


図 3.3.3-18 軸方向ボイド率分布の比較 (Case1-4-300/136 秒後)

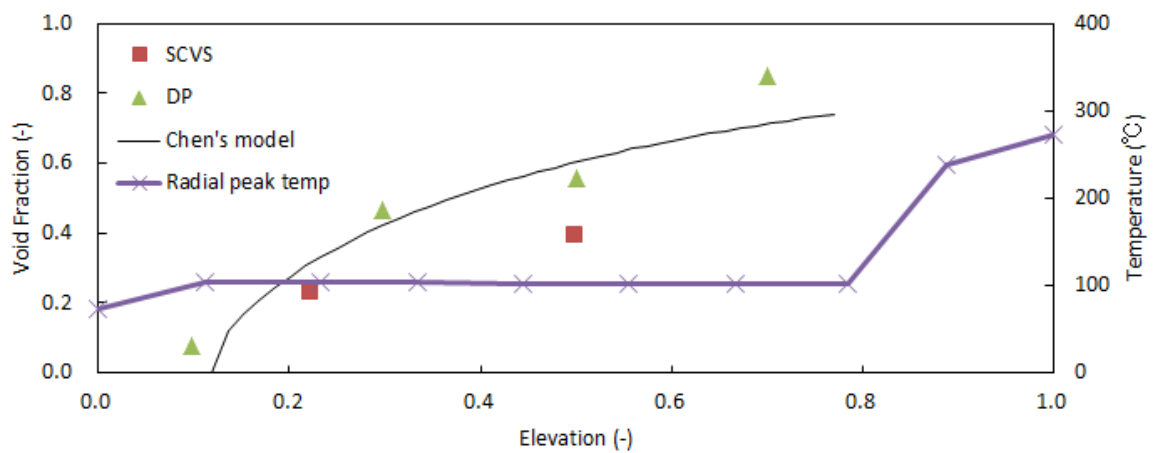


図 3.3.3-19 軸方向ボイド率分布の比較 (Case1-4-300/889 秒後)



図 3.3.3-20 燃料最高温度 (17Case6-2)

二相水位が計測区間中に存在しているため、気液二相流のボイド率に対応していない

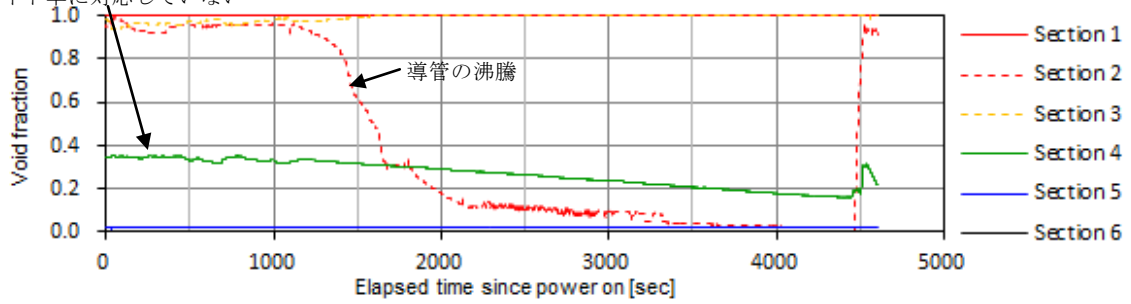


図 3.3.3-21 差圧計ボイド率 (17Case6-2)

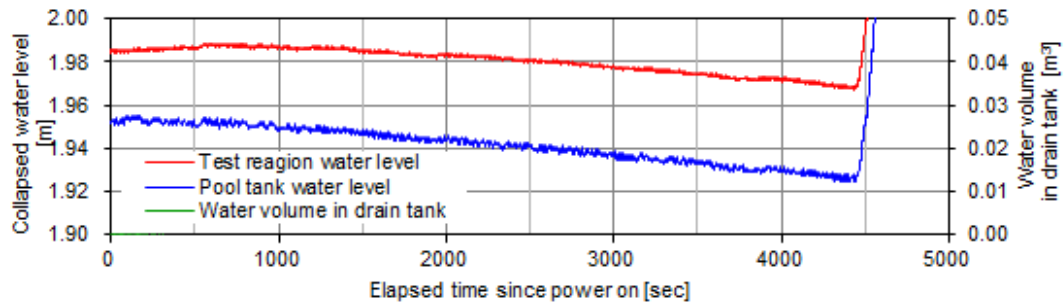


図 3.3.3-22 差圧計水位及びドレンタンク水量 (17Case6-2)

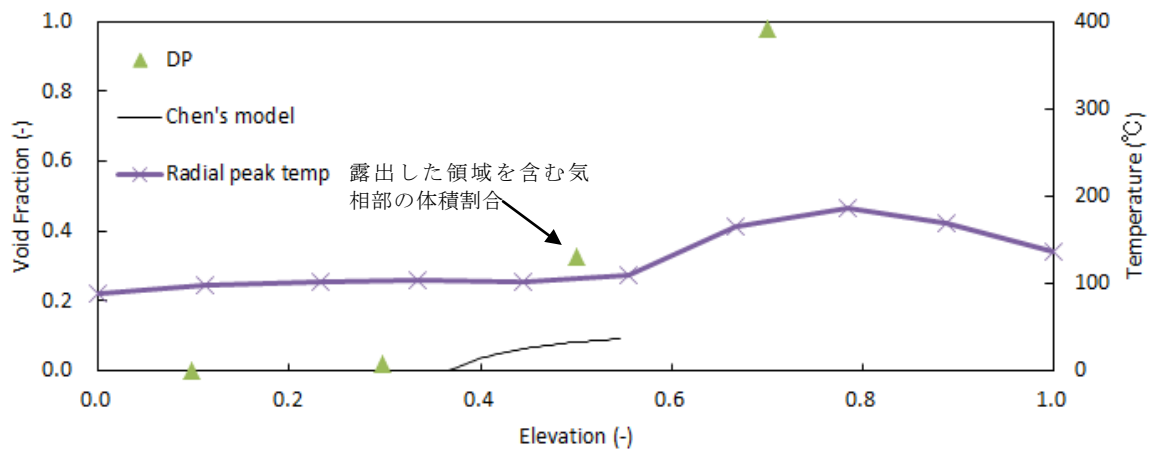


図 3.3.3-23 軸方向ボイド率分布 (17Case6-2/1000 秒後)

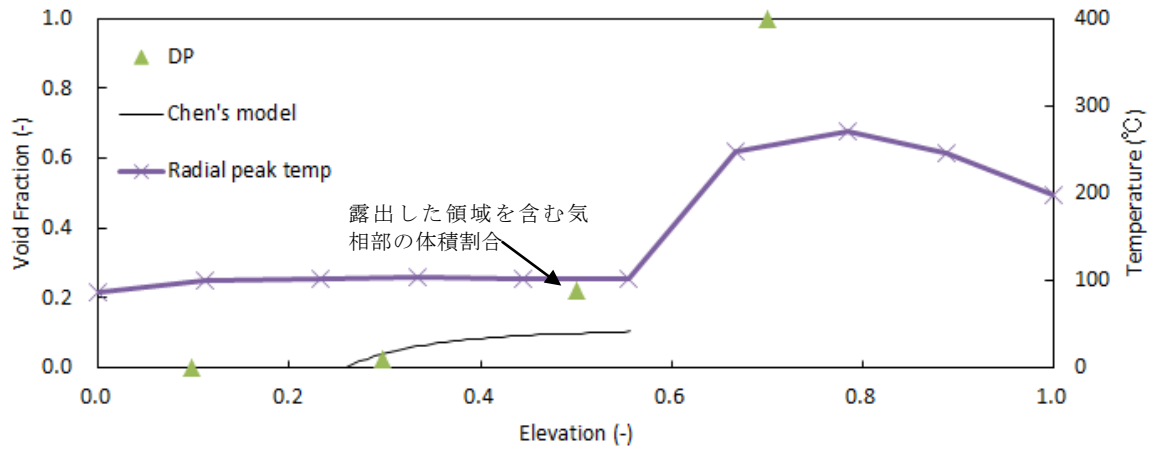


図 3.3.3-24 軸方向ボイド率分布 (17Case6-2/3000 秒後)

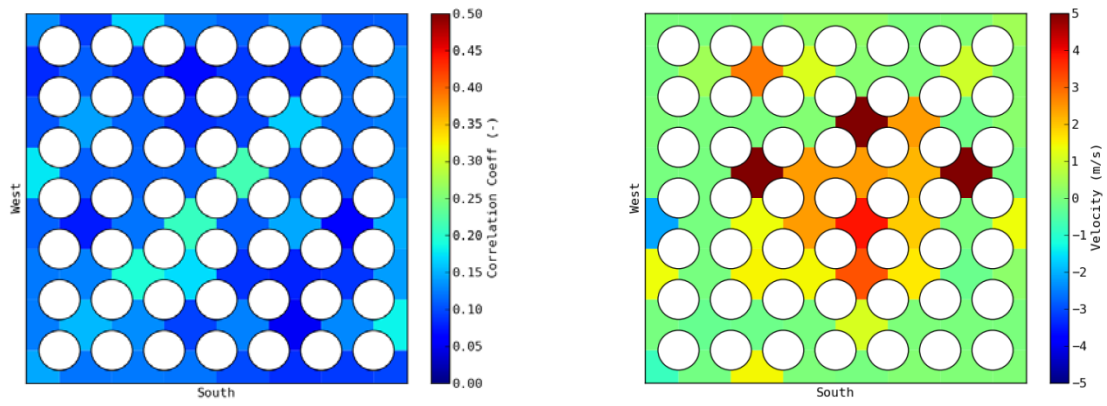


図 3.3.3-25 相関係数の最大値（左図）及び気泡速度（右図）の分布

## 参考文献

- <10> Takahiro ARAI et al “Multi-dimensional void fraction measurement of transient boiling two-phase flow in a heated rod bundle”, JSME Mechanical Engineering Journal, Vol2, No. 5, 2015
- <11> 渡辺 博典, 光武 徹, 柴田 光彦, 高瀬 和之, 「静電容量式ボイド率計の高温高圧条への適応研究」, 日本機械学会論文集(B編)76巻769号, 2010
- <12> S. Chen, “One-dimensional drift-flux model for two-phase flow in pool rod bundle systems”, International Journal of Multiphase Flow. 40, 2012



### 3.3.4 システム解析コードによる再現解析と課題検討

ここでは、TRAC-BF1 コード<sup><13><14></sup>によるスプレイ熱伝達試験の再現解析を実施し、その解析結果からスプレイ冷却などの現象をシステム解析コードなどで評価するための手法及び課題について検討した。

TRAC-BF1 コードは、BWR を対象とした仮想事象の熱水力挙動を解析する機能を有するシステム解析コードであり、アイダホ国立工学研究所で開発された。また、原燃工では界面せん断モデルの改良<sup><15></sup>、3次元炉心計算コードと結合した解析<sup><16></sup>などを実施している。

#### 3.3.4.1 再現解析条件

解析対象は16年度試験のベースケースであるケース1-4のうち、目標燃料最高温度300℃とした試験を解析対象とし、再現解析条件はこの試験の仕様に従うこととした。この試験の主要な仕様を表3.3.4-1に、試験結果を図3.3.4-1に再掲する。

#### 3.3.4.2 再現解析体系

TRAC-BF1 では解析体系をコンポーネントと呼ぶ領域に分割して解析を行う。ここで実施した解析では、次に示す二つの体系を作成した。それぞれの体系において、試験設備と対応するコンポーネントを表3.3.4-2に示す。また、この表では試験体部についてのセル分割など基本的な設定を合わせて示す。

##### (1) 単チャンネル体系

試験体の内部の熱水力挙動の確認のため、図3.3.4-2に示す単チャンネル体系を作成した。また、図には模擬燃料棒温度(TC1からTC10)及びボイド率(Section1からSection6)を試験結果と比較するセルを合わせて示す。

試験体を模擬するCHANコンポーネントはチャンネルボックス下端から上端までに対応し、発熱部24セル、上部非発熱部2セル、及び下部非発熱部1セルに分割した。上部非発熱部は上部タイプレートをセル境界とし、ここでCCFLを判定する設定とした。また、模擬燃料棒のうち上部非発熱部は解析における伝熱体として考慮していない。

CHANコンポーネントの下部に流量境界であるFILLコンポーネント、上部に圧力境界であるBREAKコンポーネントを接続した。また、TRAC-BF1コードではリークパスを用いて体系内の任意のセルにFILLコンポーネントを接続可能であり、この機能を用いてCHANコンポーネントの上端のセルにFILLコンポーネントを接続し、スプレイ水の流入を模擬した。

なお、チャンネルボックス内に流入するスプレイ水は、全スプレイ流量の半分であると仮定して、体系上部のFILLコンポーネントに与える流量は0.1m<sup>3</sup>/hrとした。

##### (2) 複合体系

試験体の他、上部容器、模擬ラックなどの試験設備全体での熱水力挙動を模擬するため、図3.3.4-3に示す複合体系を作成した。試験体を模擬するCHANコンポーネントは、単チャンネル体系で用いたものとはほぼ同一の設定であり、チャンネルボックス外表面におけるラックとの間隙の流体との伝熱を考慮している点が異なる。

上部容器及び模擬ラックは VESSEL コンポーネントで模擬し、模擬ラックの壁面を伝熱体として考慮している。スプレイノズルを PIPE コンポーネント及び FILL コンポーネント、連通管及び連通弁を VALVE コンポーネント、補助容器及びドレンタンクを PIPE コンポーネント及び BREAK コンポーネントでそれぞれ模擬し、互いに接続して試験設備全体を解析体系とした。

なお、TRAC-BF1 では気相を蒸気及び空気の混合気体として取り扱うことが可能であり、この体系を用いる場合は、流体として水、蒸気及び空気の 3 成分を考慮した解析とした。

### 3.3.4.3 再現解析結果及び感度解析

#### (1) 単チャンネル体系

単チャンネル体系を用いた再現解析結果を図 3.3.4-4 に示す。この解析では、試験体下部の流量境界での流量を 0 とした。

試験開始から約 100 秒までの試験結果について、初期に露出している試験体の上部で模擬燃料棒温度が上昇する。下部側では冷却水が沸騰しボイド率が増加し冷却水が上部側に移動するため、下部側から順に冠水して模擬燃料棒温度が低下し約 100℃になる。解析結果においても、試験結果と同様な挙動が確認できる。ただし、試験結果で発熱部上端にある TC1 及び下部側にある TC2 の温度上昇を比べると、TC1 の温度上昇が小さいが、解析結果では TC1 及び TC2 は同等の温度上昇である。このことから、解析において考慮していない上部非発熱部、体系外などへの伝熱が結果に影響を与えている可能性が考えられる。

約 100 秒以降の試験結果について、冷却水がチャンネルボックス上端に達して溢れること、及び試験体内で発生した蒸気が上部容器に流出することから、試験体内のボイド率が緩やかに上昇し、試験開始から約 500 秒で TC1、約 700 秒で TC2 において模擬燃料棒温度が上昇し始める。解析結果も同様の挙動であるが、ボイド率が試験結果より大きく、試験体上部では試験結果より早く約 1 まで上昇するため、試験結果と比べ早い時刻である約 200 秒までに TC1 から TC4 で模擬燃料棒温度が上昇し始めている。このことから、試験体内のボイド率分布が燃料棒温度の上昇開始時刻を予測するために重要であると考えられる。また、この解析では試験体下部での冷却水の流入を 0 としているが、実際には模擬ラック及び補助容器からの流入が結果に影響を与えていると考えられる。

模擬燃料棒温度が上昇を開始してから 300℃を超えるまでに要する時間は、試験結果では TC1 で約 500 秒、TC2 で 300 秒以上である。解析結果は試験結果より温度上昇速度が大きく、TC1 から TC3 までで 100 秒に満たない時間で 300℃に達しており、解析では模擬燃料棒表面での伝熱を小さく評価していると考えられる。この理由として、試験では温度上昇中であっても下部側での水面の揺動、液滴の飛散などによる冷却が期待できるが、解析でこれを模擬できていない可能性、壁面熱伝達のモデル式により算出した熱伝達係数がこの解析での条件において実際より小さく評価されている可能性などが考えられる。

スプレイ開始は模擬燃料棒温度が 300℃を超える時点であり、試験では約 1020 秒であり、解析では 250 秒とした。また、チャンネルボックス内に流入するスプレイ水は、全スプレイ流量の半分であると仮定して、体系上部の FILL コンポーネントに与える流量は 0.1m<sup>3</sup>/hr とした。試験結果の模擬燃料棒温度挙動は、スプレイ開始から約 200 秒の間、TC1 が 300℃を超える状態を維持し、その後約 100℃まで低下する。TC2 が約 100℃まで低下するのは、スプレイ開始から約 500 秒後である。一方、解析結果の模擬燃料棒温度挙動は、スプレイ開始直後に TC1 が低

下し、スプレー開始から約 100 秒後には TC2 及び TC3 が低下している。このことから、この解析での条件において CCFL、クエンチなどの高温壁面と冷却水の相互作用を十分に予測できていない可能性が考えられる。

ここまで示した解析結果から、解析結果への影響が大きいと考えられる項目について、次のような二つの感度解析を実施した。

a) 感度解析 1：上部非発熱部を考慮

模擬燃料棒上部の非発熱部は、発熱部上端の温度挙動に影響すると考えられ、この部分を解析における伝熱体として考慮した感度解析を実施した。感度解析結果を図 3.3.4-5 に示す。

上部非発熱部を考慮することにより、試験開始直後及び約 150 秒以降での TC1 の温度上昇が緩やかとなり、試験結果に近い傾向を示している。また、TC2 から TC4 でも温度上昇が小さく抑えられる結果となっている。

この感度解析結果から、試験体上部の構造物などへの伝熱は、発熱部上端の温度挙動への影響が大きく、また、比較的広い範囲に対して影響を及ぼしていると考えられる。

b) 感度解析 2：試験体下端からの流入を考慮

試験体の下部では、模擬ラック及び補助容器との冷却水の移動があると考えられ、解析体系下部の流量境界に流量を与えた感度解析を実施した。感度解析結果を図 3.3.4-6 に示す。

なお、ここで与えた流量は  $0.04 \text{ m}^3/\text{hr}$  であるが、解析結果に有意な影響がある値として設定したものであり、何らかの理論的な根拠に基づくものではない。

試験体下部から冷却水が流入することで、試験開始から約 100 秒以降でのボイド率が小さくなり、TC1 から TC4 の温度上昇開始が遅くなり、また、TC5 及びそれより下部では温度上昇が見られない。

この解析結果から、試験体下部での冷却水の流動は、空間的及び時間的に広い範囲に対して影響を及ぼしていると考えられる。

(2) 複合体系

複合体系を用いた再現解析結果を図 3.3.4-7 に示す。この解析では模擬燃料棒温度が  $300^\circ\text{C}$  を超えなかったため、スプレーは行っていない。

試験開始直後の試験体上部で温度上昇した後、冠水するまでの挙動は、解析結果でも同様の挙動となっている。約 100 秒以降のボイド率について、Section 3 から Section 6 までは解析結果の方が試験結果より大きい、Section 1 では解析結果の方が小さい。また、試験結果では Section 2 及び Section 3 のボイド率がスプレー開始まで大きくなっているのに対し、解析結果ではそのような傾向が見られない。また、別途コード出力で確認したところ、チャンネルボックス上端における液相流速は、ほぼ全ての時間で下向きになっていた。このことから、試験結果ではチャンネルボックス上端から冷却水が溢れた状態となっていたが、解析結果ではこの状態を再現しておらず、加えて、この溢れがないことにより上部容器での凝縮水が試験体へと流入していると考えられる。すなわち、解析結果では試験結果より試験体からの冷却水の流出が少なく、試験体上部が露出せず模擬燃料棒温度が上昇しない結果となったと考えられる。

このように、模擬燃料棒温度の上昇を予測するためには、試験体上部の流動状態を精度よく

模擬する必要がある。試験体上部の流動状態には種々の要因が影響するが、試験体内のボイド率分布及び圧力損失、上部容器における蒸気凝縮などが重要と考えられる。

ここで示した解析では、模擬燃料棒温度が 300℃を超えずスプレイを行わなかったため、次のような感度解析により複合体系におけるスプレイ時の挙動を確認した。

#### a) 感度解析 3：連通弁を閉止

連通弁を閉止することで補助容器から模擬ラック及び試験体への流入を遮断し、試験体からの冷却水の正味の流出を大きくした感度解析を実施した。感度解析結果を図 3.3.4-8 に示す。

補助容器からの流入がないため、試験開始から約 100 秒以降でボイド率が増加し、約 200 秒以降、TC1 から TC4 の模擬燃料棒温度が上昇する。TC1 が 300℃を超えた 370 秒でスプレイ開始として、体系上部の FILL コンポーネントに試験仕様のスプレイ水量である 0.2m<sup>3</sup>/hr を与えた。スプレイ開始直後に TC1 の温度は低下するが、150℃程度を約 80 秒間維持し、その後 100℃まで低下する。TC2 においても約 240℃を維持するような傾向が見られる。

試験結果ではスプレイ開始後、TC1 が 300℃以上を約 200 秒維持しており、解析結果はこれより低い温度及び短い時間となっている。このことから、解析では発熱部に到達するスプレイ水の量及び／又はスプレイ水による冷却効果を大きく見積もっている可能性が考えられる。また、解析結果では、模擬燃料棒温度が下部側から順に約 100℃まで低下しており、クエンチによる温度低下ではなく、スプレイ水の流入により下部側でボイド率が小さくなったことが影響している可能性がある。

### 3.3.4.4 課題検討

使用済み燃料プールが、冷却機能を喪失し、使用済み燃料の崩壊熱によって水位が徐々に減少する過程を対象とした場合、ここで示した試験及び解析例の結果を踏まえて、当該過程をシミュレーションする場合の課題を検討する。

安全性の評価においては、使用済み燃料が放射性物質の閉じ込め機能を喪失しないことが重要となる。したがって、冷却機能の喪失に対しては、被覆管温度が崩壊熱によって高温となり、被覆管が損傷することを防止し得るかが一つの判断基準となる。このため、被覆管温度をシミュレーションによって評価する場合は、a) 燃料の露出範囲及びタイミングを適正に予測し得るか、及び、b) 露出後の被覆管温度の上昇挙動を適正に予測し得るか、c) 事故防止対策として期待されるスプレイ冷却により、被覆管温度の上昇から低下までの挙動を適正に予測し得るかの、主として 3 点の確認すべき点がある。3.3.4.3 に示したスプレイ冷却試験に対する解析評価例の傾向から、以下では、この 3 点に対して、それぞれ、シミュレーションにおける課題を中心に考察する。

#### a) 燃料の露出範囲及びタイミングの予測性

燃料の露出及びタイミングは、二相水位の予測性と関連する。したがって、二相水位を予測と関連の深い現象とそのシミュレーションにおけるモデリングの関連性について、現象ごとに考察する。

### 一気液界面せん断力

気液界面せん断力は、気相及び液相の運動量交換に関連し、気相速度及び液相速度に影響を及ぼす。気液の流速比として知られるスリップ比は、計算体系におけるボイド率を評価する際に重要なパラメータであり、気液界面せん断力モデルはボイド率との関連性が高い。このことから、二相水位を評価する上で、気液界面せん断力は重要度が高い現象として取り扱う必要がある。

気液界面せん断力の構成式として、種々の構成式が考えられるが、TRAC-BF1, TRACE などでは、ドリフトフラックスパラメータを用いた構成式が用いられる。定常・加速なしの条件の場合は、ドリフトフラックスパラメータにより界面せん断力を表現した場合に評価されるボイド率とドリフトフラックスモデルにより評価されるボイド率は同等となる。すなわち、簡易的には、ボイド率は、以下の式で評価できる。

$$\frac{j_g}{\alpha} = C_0 j + V_{gj} \quad (3.3.4-1)$$

ここで、 $j_g$ 、 $\alpha$ 、 $C_0$ 、 $j$ 及び $V_{gj}$ は、それぞれ、気相の見かけ速度、ボイド率、分布定数、体積流束及びドリフト速度である。このうち、 $j_g$ 及び $j$ は、試験条件（境界条件）で定まるため、ボイド率は、 $C_0$ 及び $V_{gj}$ によって決まると言える。すなわち、分布定数が大きい場合、又は、ドリフト速度が大きい場合、ボイド率は小さく評価し、この逆の場合は、ボイド率を大きく評価する。

原燃工のTRAC-BF1は、ロッドバンドル向けの分布定数及びドリフト速度について、NUPEC 管群ボイド試験で得られた断面平均ボイド率のデータベースに基づいてモデル化しており、分布定数は以下の構成式で与えている<sup><15></sup>。

$$C_0 = 1.1 - 0.1 \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_f}} \quad (3.3.4-2)$$

ここで、 $\rho$ は密度を表し、添え字、g及びfは、それぞれ、気相及び液相を表す。(3.3.4-2)式のデータベース範囲は、圧力が約1~9 MPa、流量は強制対流条件である（8×8燃料集合体で10 t/hが下限）が、使用済み燃料プールの条件は、大気圧かつプール条件である。

大気圧、プール条件の二相流動を想定した場合、比較的大きな気泡が中央部に集積し、二次流れを形成する状態が想定され、(3.3.4-2)式のデータベースで見られる現象とは乖離が生じていると考えられる。大気圧、プール条件の二相流動における分布定数の傾向は、Clark et al.<sup><17></sup>が評価しており、図3.3.4-9のような傾向を示すことが明らかとなっている。

低圧条件及び低流量時の特徴的な流速及びボイド率分布も考慮した分布定数モデルは、Schlegel and Hibiki<sup><18></sup>及びKinoshita et al.<sup><19></sup>のモデルが下記のように提案されており、使用済み燃料プールにおける水位挙動の予測評価に適用することも一案である。

$$C_0 = C_\infty - C_\infty \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_f}} \quad (3.3.4-3)$$

$$C_\infty = \begin{cases} C_{\infty L} & \text{for } \langle j^+ \rangle \leq \langle j^+ \rangle_{C_{\infty \max}} \\ C_{\infty H} & \text{for } \langle j^+ \rangle > \langle j^+ \rangle_{C_{\infty \max}} \end{cases} \quad (3.3.4-4)$$

$$C_{\infty H} = 1.1 + (1.84e^{-0.1\langle j^+ \rangle}) \cdot F \left( \frac{\rho_g}{\rho_f} \right) \quad (3.3.4-5)$$

$$F = \min \begin{cases} 1 \\ \max \left\{ 1.70 - 582 \left( \frac{\rho_g}{\rho_f} \right) \right. \\ \left. 0 \right\} \end{cases} \quad (3.3.4-6)$$

$$C_{\infty L} = \left[ \frac{C_{\infty H} \langle j^+ \rangle_{C_{\infty \max}} - 1}{\langle j^+ \rangle_{C_{\infty \max}} - \langle j_f^+ \rangle} \right] (\langle j_g^+ \rangle) + 1 \quad (3.3.4-7)$$

$$\langle j^+ \rangle_{C_{\infty \max}} = m \langle j_f^+ \rangle + b, \quad m = \frac{1}{1 - \langle \alpha \rangle_{crit} C_0}, \quad b = \frac{\langle \langle V_{gj}^+ \rangle \rangle \langle \alpha \rangle_{crit}}{1 - \langle \alpha \rangle_{crit} C_0}, \quad (3.3.4-8)$$

$$\langle j^+ \rangle \equiv \frac{\langle j \rangle}{\left( \frac{\Delta \rho g \sigma}{\rho_f^2} \right)^{1/4}}, \quad \langle j_f^+ \rangle \equiv \frac{\langle j_f \rangle}{\left( \frac{\Delta \rho g \sigma}{\rho_f^2} \right)^{1/4}} \quad (3.3.4-8)$$

$$\langle \alpha \rangle_{crit} = \min(0.0284 \langle j_f^+ \rangle + 0.125, 0.52) \quad (3.3.4-9)$$

一方、分布定数を大きくすることは、構成式モデルに起因する数値計算の安定性に影響を与える場合があり、注意が必要である。界面せん断力は、抗力係数に相対速度の自乗を乗じて与えられるが、この相対速度は、分布定数を用いて、以下のように断面平均相当の値として与えられる。

$$v_r = \frac{1 - C_0 \alpha}{1 - \alpha} v_g - C_0 v_f \quad (3.3.4-10)$$

(3.3.4-10)式から、分布定数の大きさによっては、断面平均相対速度が負値として評価される。このとき、界面せん断力は逆方向に作用する（気相速度 > 液相速度のとき、界面せん断力は、気相速度を抑制する方向に通常は作用するが、逆に、加速させる方向となる）ことから、数値計算上も適切ではない。したがって、(3.3.4-3)～(3.3.4-9)式に示したモデルは、ドリフトフラックスモデルとしては有効であるが、二流体コードに組み込む場合には、適当ではない可能性がある。

Schlegel and Hibiki<sup>(18)</sup>及び Kinoshita et al.<sup>(19)</sup>のモデルはドリフト速度を固定した上で、分布定数を大きくしてモデリングを行っているが、プール条件で二次流れが強まる条件では、ドリフト速度についても相応に大きくなることが想定される。このことから、分布定数を仮定した上で、ドリフト速度モデルを改良することにより、二流体コードにも適用可能な低圧・プール沸騰モデルが構築できると考えられ、上述した課題を解決する方針となる。

#### －気液界面熱伝達及び蒸気凝縮

気液界面熱伝達は、界面間のエネルギー交換を表す。気液界面熱伝達の駆動力は、界面と各相の温度差であるが、被覆管が露出するまでの時間領域では、気液各相は飽和温度近くで推移する。このため、界面熱伝達率については、当該時間領域及びチャンネル内では重要度は低いと考えられる。

一方、チャンネルボックスから上方に蒸気が流出した後は、その空間の空気によって蒸気凝縮が生じる。凝縮によって生じた液相（液滴）は、一部はチャンネル内に戻ることが想定される。したがって、チャンネルボックス上方の空間における空気と蒸気の相互作用については、重要度が高いと考えられる。TRAC-BF1では、空気を取り扱えるものの、基本的には1成分系の

取扱いであり、空気と蒸気は同じ温度として取り扱われる。TRAC-BF1 の CHAN コンポーネントから流出する蒸気は、この CHAN コンポーネントと境界を挟んで隣接する VESSEL コンポーネントのセル要素に流出する（このセルを流出セルと呼ぶ）。TRAC-BF のような離散化コードでは、セル中心変量はセル体積平均の値として代表させて与えられることから、流出セルの取り方を極端に大きく採った場合には、空気の顕熱上昇が緩やかとなるため、この流出セルのみが凝縮に寄与するような振る舞いとなる。実際の物理挙動としては、100 度以上の蒸気と常温の空気までの温度勾配が連続的に生じているため、比較的狭い領域で、不均一な温度分布が生じていると考えられる。解析では、セル分割によって、このような不均一性を再現できるかが課題となる。この課題の解決のためには、チャンネルボックスより上方の空間の温度分布情報が参考となる。

さらに、凝縮した液相の様態についても、検討が必要である。凝縮した液相は、液滴として空間中を浮遊する、これらが合体して液塊となり、重力によって落下するなどの振る舞いが考えられる。一方、解析では、液相のセル空間内での体積割合に応じて、流動様式が定まり、特定された流動様式に対して与えられる構成式によって、液相の運動が決まるのみである。すなわち、セル内の凝縮量の相違により、噴霧流のような液相分散流となるか、気泡流のような液相が連続した様態となるかが異なると考えられる。また、液滴となった場合でも、周囲の気相と液滴との界面抗力、液滴密度に応じた液滴の合体、液滴径分布などの現象が、液相の運動様態に大きく影響すると考えられる。現状の解析コードでは、これらの構成式については、精緻化されているとは言えず、観察される挙動から推定される物理現象に基づき、構成式の構築・改良を検討する必要がある。

また、蒸気の凝縮挙動については、構造材との熱交換による凝縮も考えられる。ただし、構造材において生じる凝縮は、チャンネル内への戻り水への寄与は小さいと考えられるため、重要度は高くないと推定される。

#### －壁面摩擦及び局所圧損

複合体系によって系をモデル化する場合、模擬ラックとチャンネルボックス間の水頭、補助容器との水頭は、チャンネル内の圧力損失とバランスする。このことから、チャンネル内の壁面摩擦及び局所圧損の大小によっては、水位に影響を及ぼすことが考えられる。しかしながら、燃料プールの流動条件は、流量が小さい条件であり、圧力損失の水頭成分に対する、これらの動圧成分は十分に小さいと考えられるため、壁面摩擦及び局所圧損の重要度も高くないと言える。

#### －壁面熱伝達

壁面熱伝達は、バルク冷却水温度と壁面温度との関係を表す。被覆管が露出するまでの時間領域では、加熱面が冠水しており、相応に高い熱伝達が期待できる。このため、多少の被覆管熱伝達率の不確かさは、冠水時の被覆管温度に大きな影響を与えることはなく、重要度は低いと言える（試験開始直後に見られる被覆管の温度上昇については、比較的短時間に二相水位の上昇によって冠水することが解析においても確認されているため、考察の対象とはしない）。

なお、ここでのシミュレーションは、TRAC-BF1 のようなシステム解析コードを前提とし、このようなコードでは、実現象として考えられる二相水位の揺動については、陽に取扱うことは

できない。また、実験で観測される測定値についても、基本的には、時間平均化された挙動となる。すなわち、水位揺動の範囲で露出が一時的に起きるようになった場合に、計測温度は、露出時間と冠水時間で重みづけされた時間平均的な温度となる。このことから、シミュレーションにおいては、水位揺動の効果は、b)の露出後の被覆管温度上昇挙動の特性として、実態としては反映されることとなる。

#### b) 露出後の被覆管温度の上昇挙動の予測性

被覆管が露出した後の温度挙動については、壁面と冷却材との熱伝達及び発熱体に含まれる構造材への熱伝導が主要な現象となる。以下では、熱エネルギーの輸送に関する現象に対する課題点を検討する。

##### －気液界面熱伝達

露出後の加熱面は、揺動により冠水する時間域を除いてドライである。このとき、壁面から冷却材への熱伝達は、気相への熱伝達となることから、気相の温度が壁面温度に対して重要となる。気相の温度は、冷却材のエンタルピの増大により、過熱状態となることが想定されるため、過熱気相と飽和液相は、熱的に非平衡状態となる。すなわち、気相から液相（この場合は、液滴）への熱輸送が生じるため、気相から界面への熱伝達が気相温度に影響を及ぼす。

気相から界面への熱伝達は、液滴レイノルズ数に依存する界面熱伝達率及び界面積濃度によって計算される。TRAC-BF1などのシステム解析コードでは、液滴径は構成式で代表値が与えられ、界面積濃度及び液滴レイノルズ数が計算されるため、これらの構成式の燃料プール条件に対する妥当性を検討することが望ましい。試験では、非加熱ロッドに取り付けた熱電対の温度挙動が計測されており、このような計測データについても、妥当性確認のための有力な情報となり得ると考えられる。

##### －壁面熱伝達

ここでは、壁面熱伝達率に関する課題を検討する。壁面熱伝達率は、壁面と接する冷却材の流動状態によって変化するが、特に、水位が揺動する場合には、冠水時と露出時の熱伝達が大きく異なる。水位の揺動は、下流側におけるボイド率の時間変動に起因して生じ、このボイド率変動は、ボイドの生成、壁面及び界面せん断力に伴うボイドの滞留、ボイドの合体、浮力及び流れによるボイドの移送などの現象に関連し、ボイドの3次元的な分布及び流動状態に大きく依存すると考えられる。このため、1次元解析コードで現象論的に水位の揺動を再現することは困難である。ただし、冠水時の熱伝達率が大きいことから、試験での温度上昇開始時点を完全露出として捉えて、解析上は露出時の熱伝達率として評価することで、被覆管温度上昇を保守的に取扱うことは可能である。

また、液滴の壁面熱伝達への寄与（直接接触、温度境界層内の蒸発による冷却、二相増倍効果など）についても、現状のシステム解析コードでは取扱いが直接的ではないため、構成式の適用範囲外である可能性が高い。

##### －構造材への熱伝導

図 3.3.4-4 と図 3.3.4-5 に示した発熱上端部に取り付けた熱電対 (TC1) の挙動から、非発熱部への伝熱が温度上昇に一定の寄与を与えることが示されている。解析上、TC1 の温度上昇が



小さい現象については、構造材を考慮することによりある程度再現できていること、及び、仮に構造材への伝熱を無視して断熱として取り扱った場合には保守的な結果を得ることから、シミュレーションに対するこの現象の課題は少ない。

#### c) スpray冷却後の被覆管温度挙動の予測性

Sprayからの噴霧液滴は、チャンネルボックス上方の空間に放出され、一部はチャンネルボックス内に落水し、被覆管の冷却に直接的に寄与する。また、過熱した空気及び蒸気を冷却し、バルク温度を低下させるため、間接的に被覆管を冷却する効果もある。

##### －気液界面せん断力（Spray液滴の拡散）

Sprayから放出された液滴は、放出口で初期に持つ運動量及び重力によって下方に落下する挙動となる。落下流速及び横方向への拡散挙動は、界面せん断力が支配することから、液滴と界面間の界面せん断力の取扱いがSpray液滴の拡散現象と関連が深い現象となる。

TRAC-BF1などのシステム解析コードでは、放出口の特徴によって定まる液滴径分布から、平衡状態の液滴径分布までの遷移を取り扱うことはできず、代表的な液滴径（Sauter径）を構成式から同定するのが現状である。したがって、界面せん断力の取扱いは、実現象とは相違する可能性があり、Spray水のチャンネル内への落水量が大きくなる場合があると考えられる。また、Spray水によって、液相割合の分布は非均質となることから、セル分割によっても、Spray口付近の非均質性を適当に再現するかなどの課題がある。

##### －気液界面熱伝達

Spray水の温度は、特にチャンネル内及びチャンネル上方の冷却材温度と比較して低いため、特に露出部においては、空気及び蒸気とSpray水との熱伝達が顕著となると想定される。Spray水と気相間の熱伝達は、熱伝達後のSpray水の顕熱上昇に寄与し、Spray水の空間温度分布に影響を及ぼす。Spray水が、チャンネルに流入して、壁面を直接冷却する場合には、Spray水の温度が壁面熱伝達に大きく影響する。また、Spray水との熱伝達により、気相部の顕熱低下が壁面冷却に間接的に寄与する。さらに、気相部を冷却し、蒸気が液相に凝縮する場合には、凝縮液相が壁面の直接冷却にも寄与すると考えられる。このことから、特に、チャンネル内及びチャンネル出口近傍における界面熱伝達現象は、Spray後の被覆管温度評価に対して重要な物理現象であると考えられる。

なお、現状の解析コードが有する課題については、b)の気液界面熱伝達に示した課題と同様である。

##### －壁面熱伝達

壁面熱伝達については、Spray開始直後から冠水して核沸騰冷却に至るまでの間の温度挙動の予測性に大きく影響する。解析予測に対する課題については、b)の気液界面熱伝達に示した課題と同様である。

表 3.3.4-1 解析対象としたスプレイ熱伝達試験の主要な仕様  
(ケース 1-4, 目標燃料最高温度 300℃)

項目	値
初期水位	2 m
出力	2 %
初期冷却水温度	95 °C
スプレイ水温度	30 °C
スプレイ流量	0.2 m <sup>3</sup> /h
目標燃料最高温度	300 °C

表 3.3.4-2 試験設備を模擬するコンポーネント

試験設備	単チャンネル体系	複合体系
試験体 ・有効発熱部 ・非発熱部 ・軸方向出力分布 ・径方向出力分布  ・チャンネルボックス	CHAN により模擬 ・24 セル分割 ・上部 2 セル及び下部 1 セル ・一様 ・4 ロッドグループ (高出力, 平均出力, 低出力, 非加熱 ) ・CHAN 壁面として模擬, 外表面は断熱条件	同左 ・同左 ・同左 ・同左 ・同左  ・CHAN 壁面として模擬, 外表面は VESSEL との伝熱を考慮
上部容器	なし	VESSEL, PIPE 及び BREAK により模擬
模擬ラック	なし	VESSEL により模擬
スプレイノズル	FILL により模擬	PIPE 及び FILL により模擬
連通管及び連通弁	なし	VALVE により模擬
補助容器	なし	PIPE 及び BREAK により模擬
ドレンタンク	なし	PIPE 及び BREAK により模擬

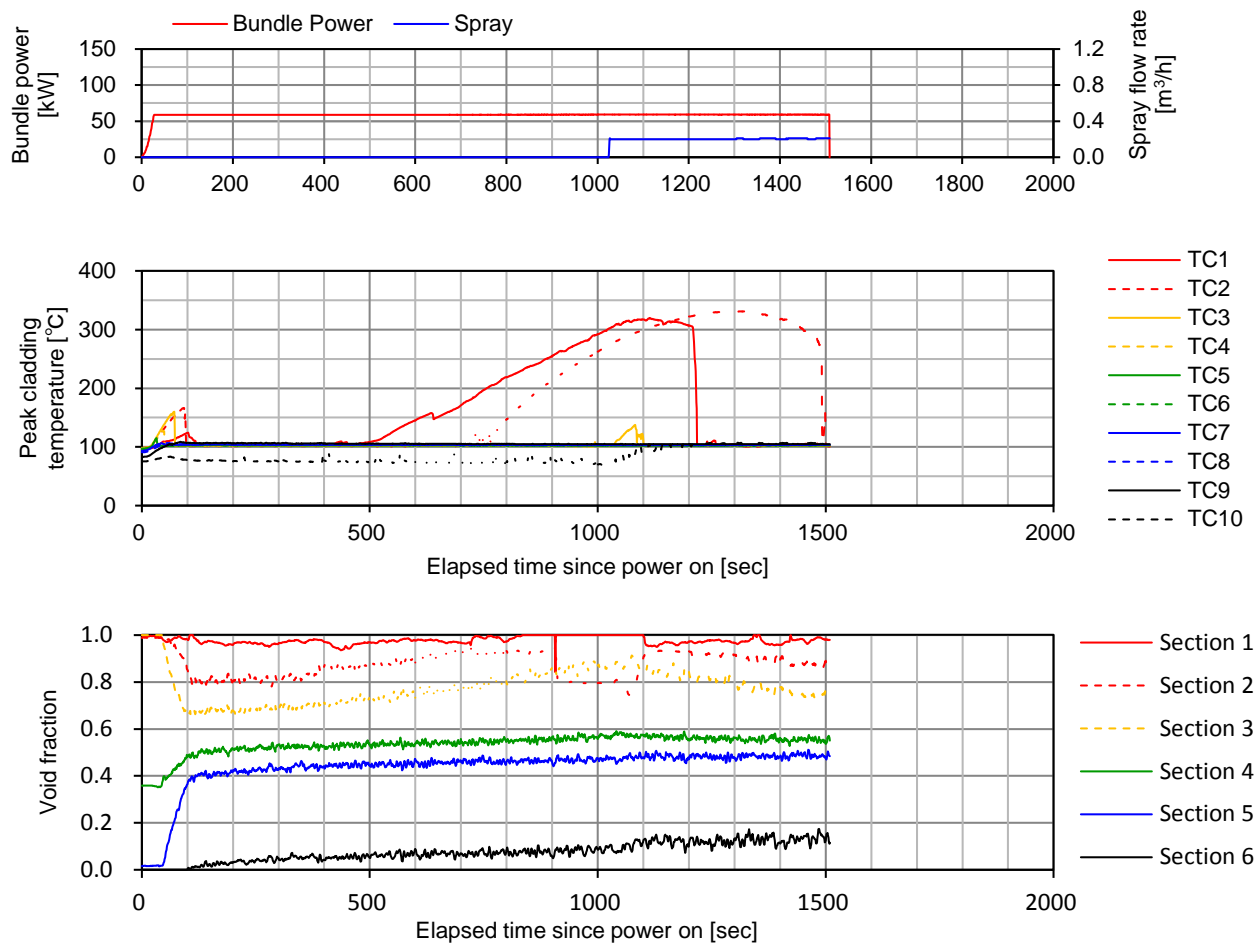


図 3.3.4-1 解析対象としたスプレイ熱伝達試験の主要な結果  
(ケース 1-4, 目標燃料最高温度 300°C)

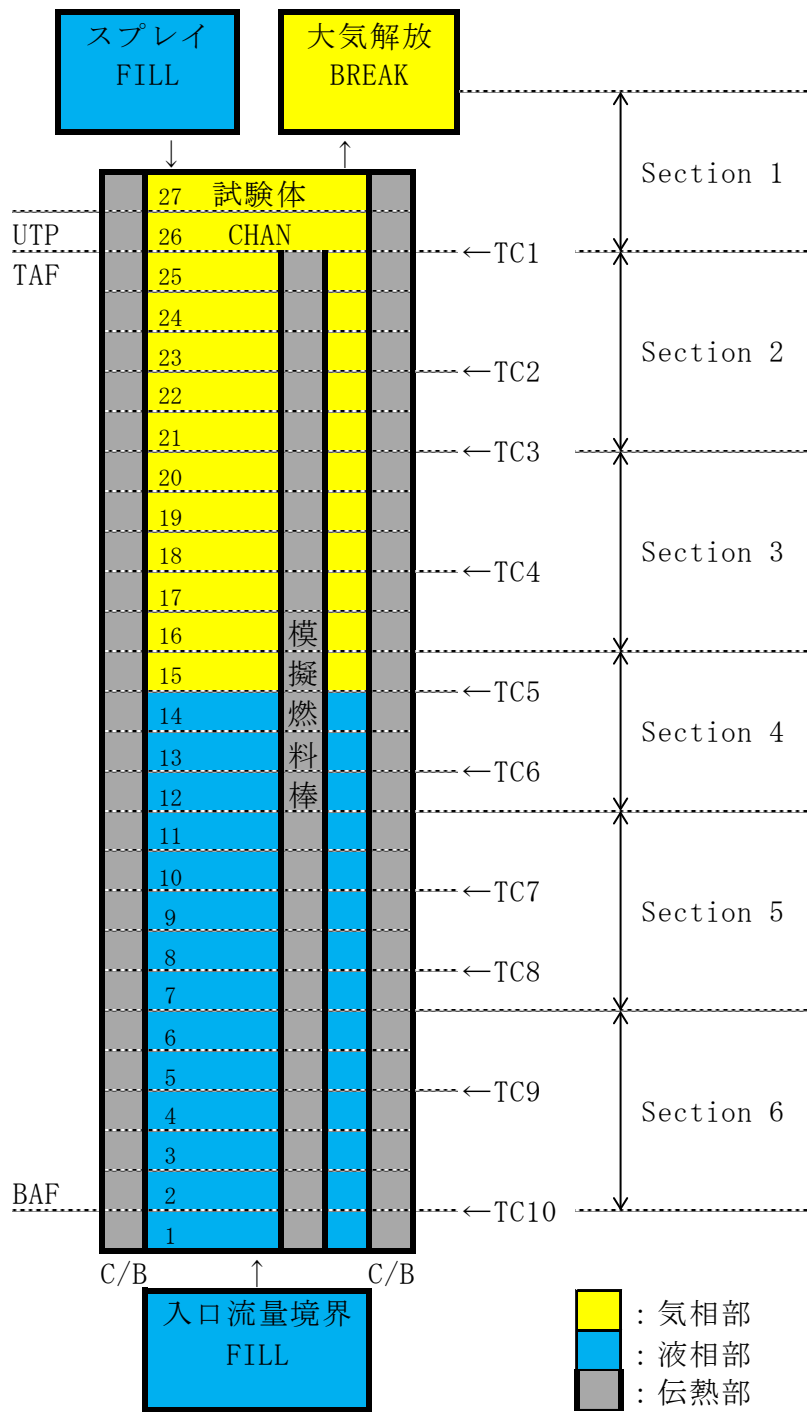


図 3.3.4-2 再現解析体系 (単チャンネル体系)

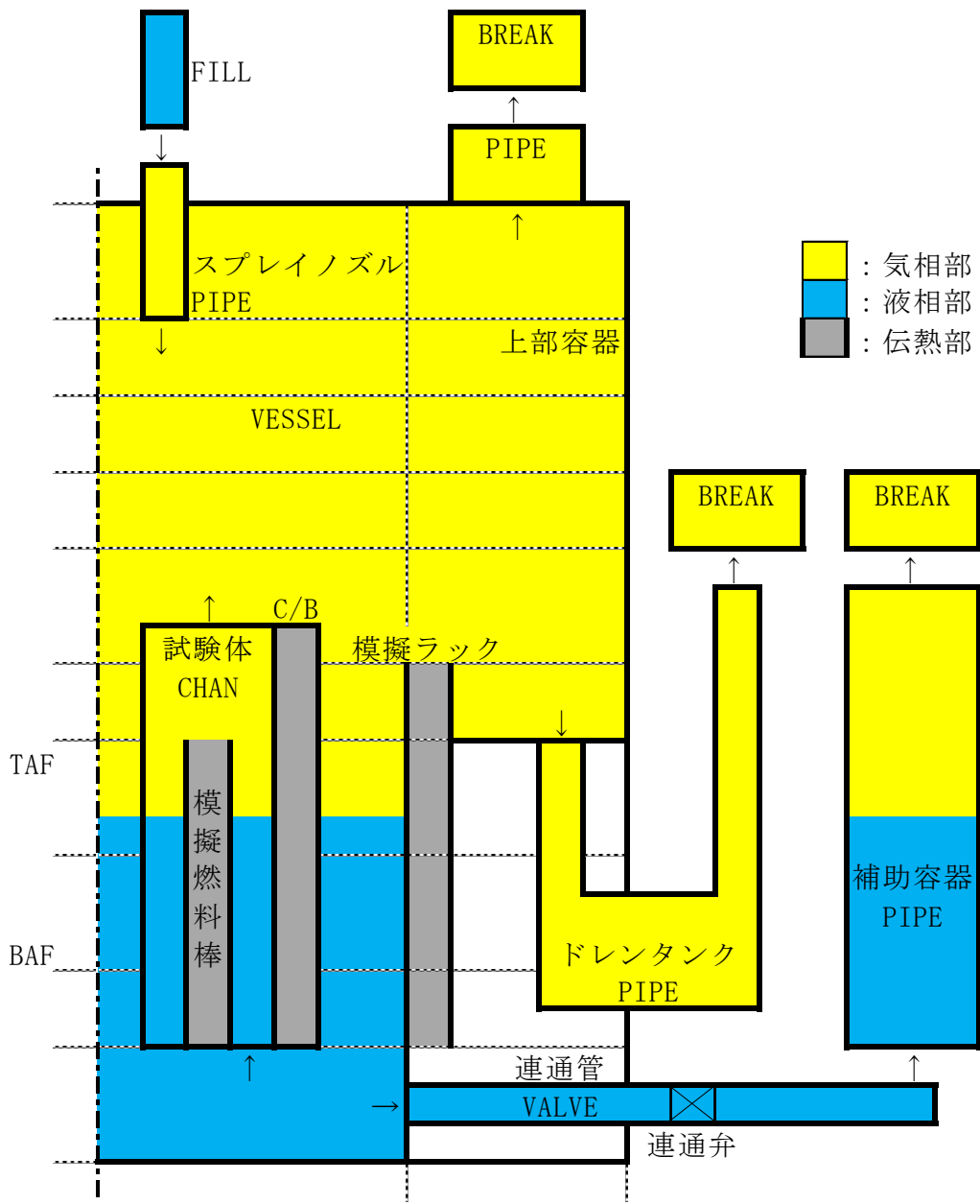


図 3.3.4-3 再現解析体系（複合体系）

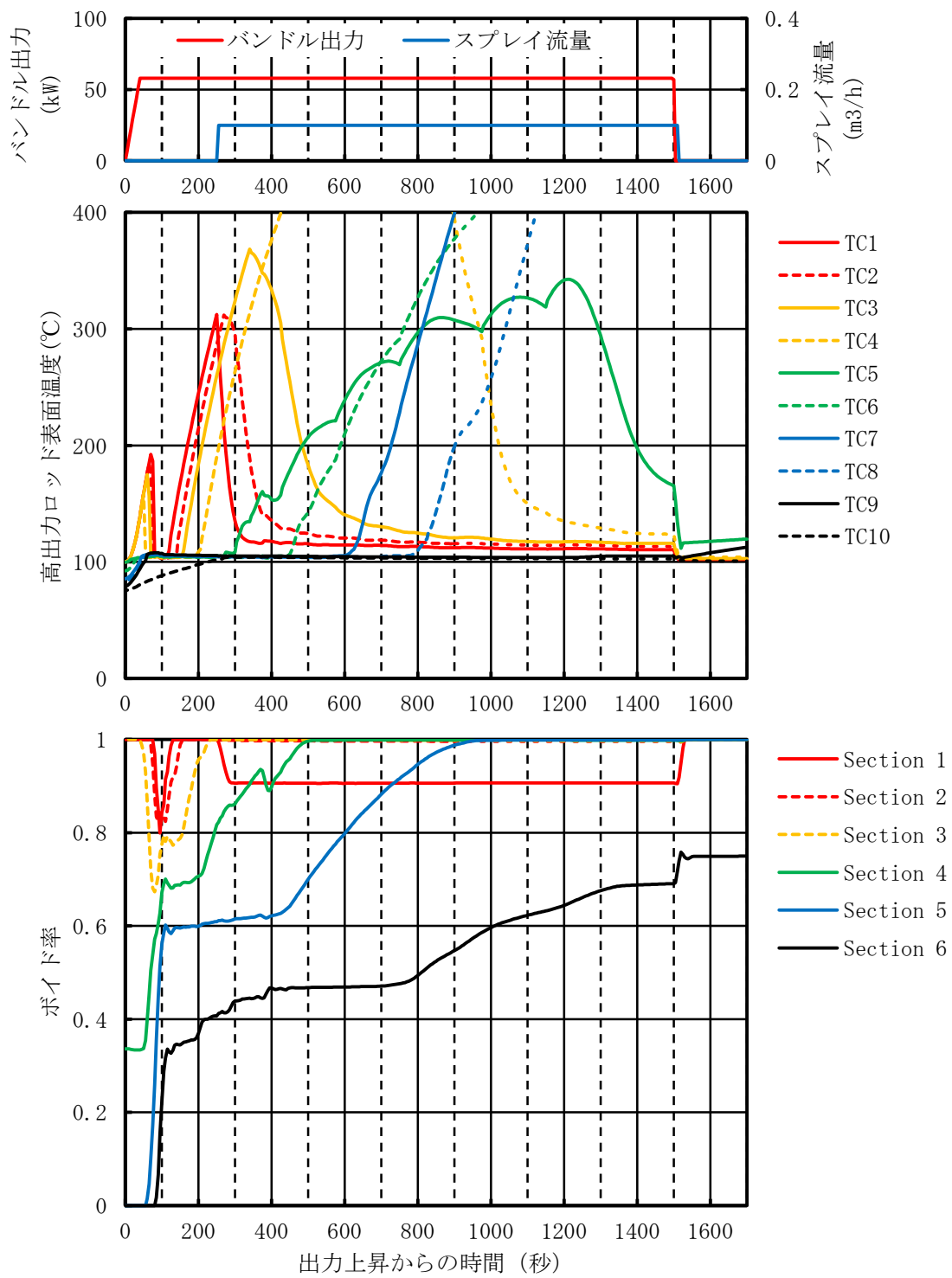


図 3.3.4-4 再現解析結果 (単チャンネル体系)

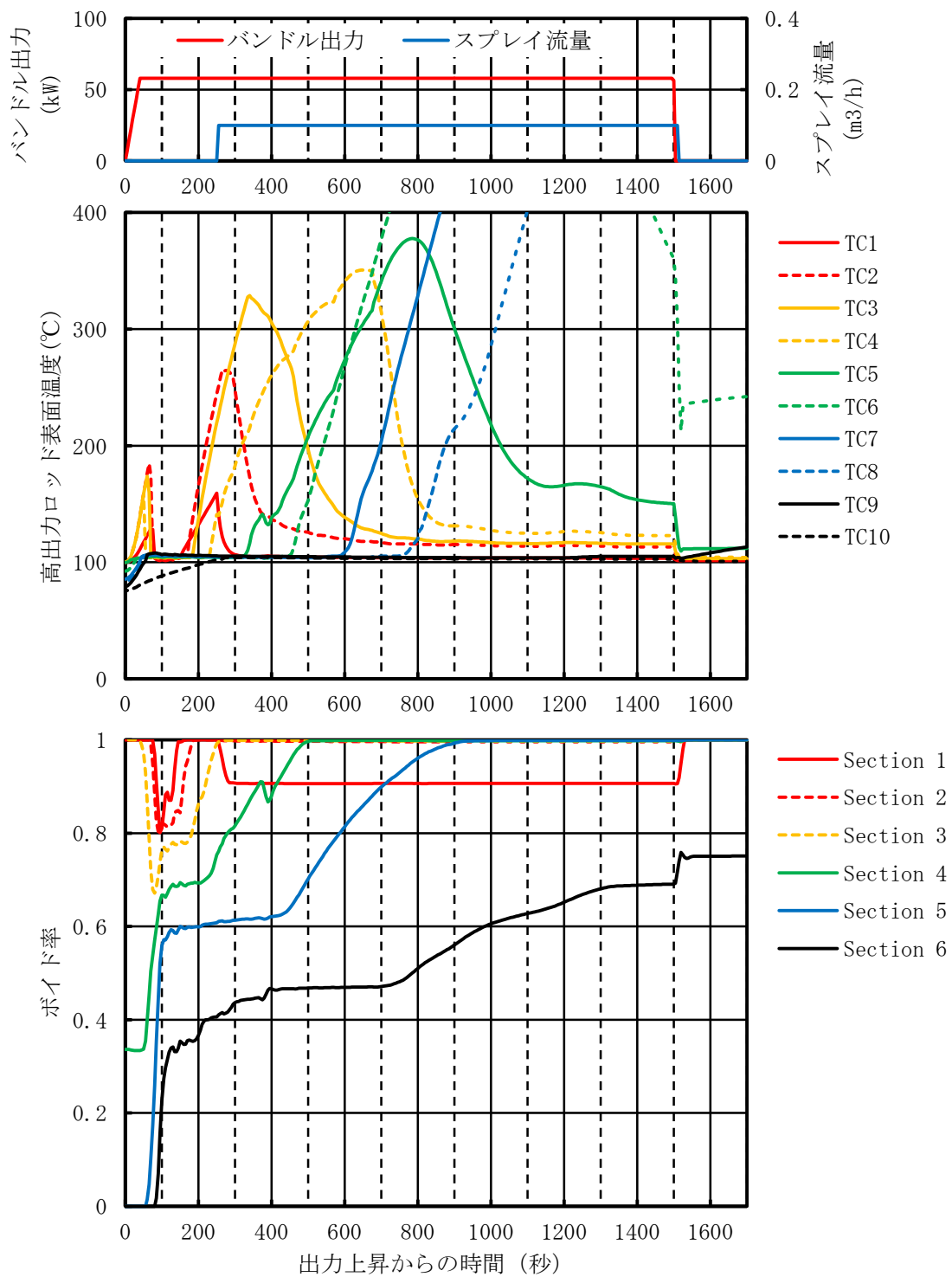


図 3.3.4-5 感度解析 1 解析結果 (単チャンネル体系, 上部非発熱部を考慮)

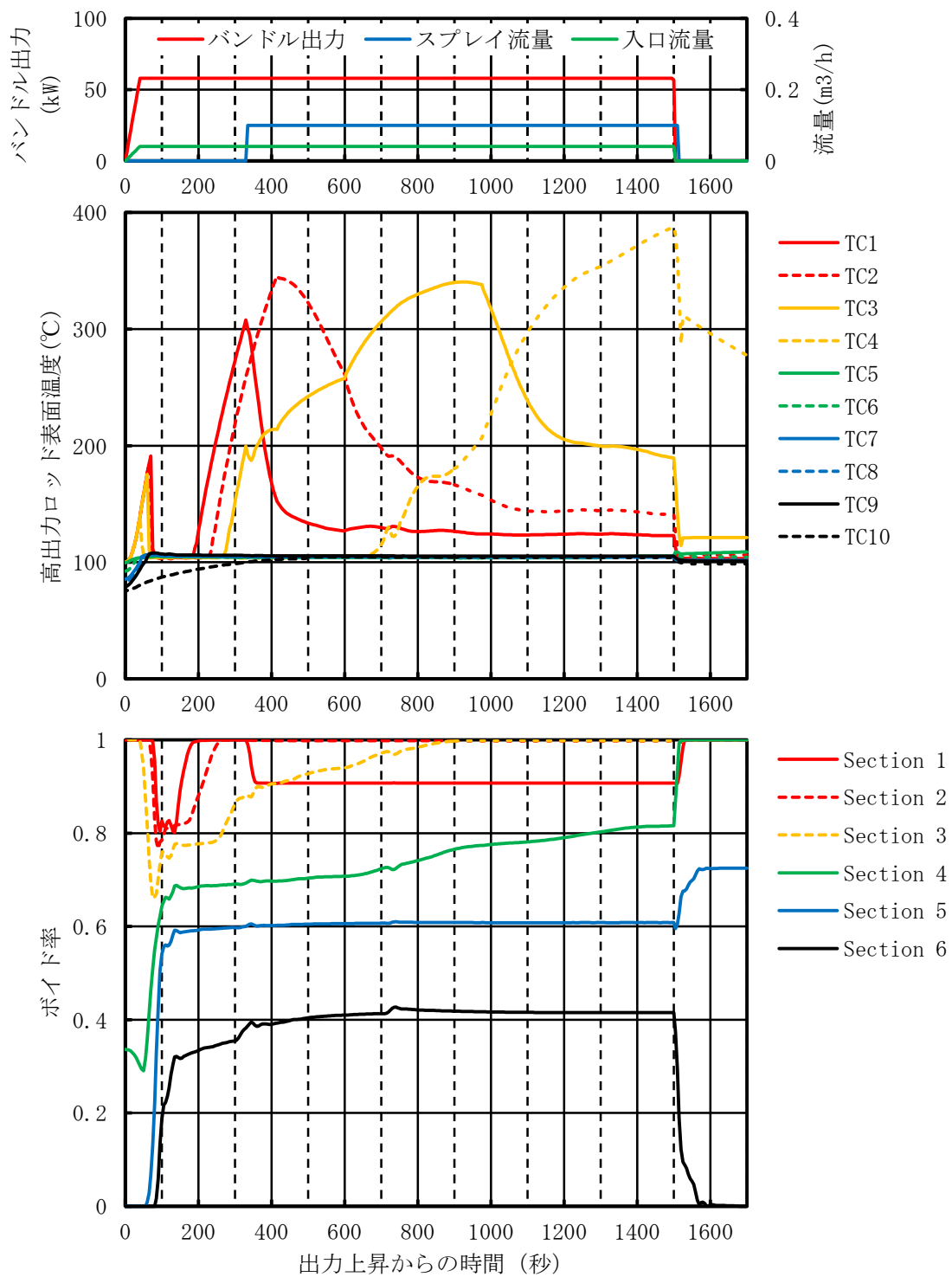


図 3.3.4-6 感度解析 2 解析結果 (単チャンネル体系, 試験体下端からの流入を考慮)



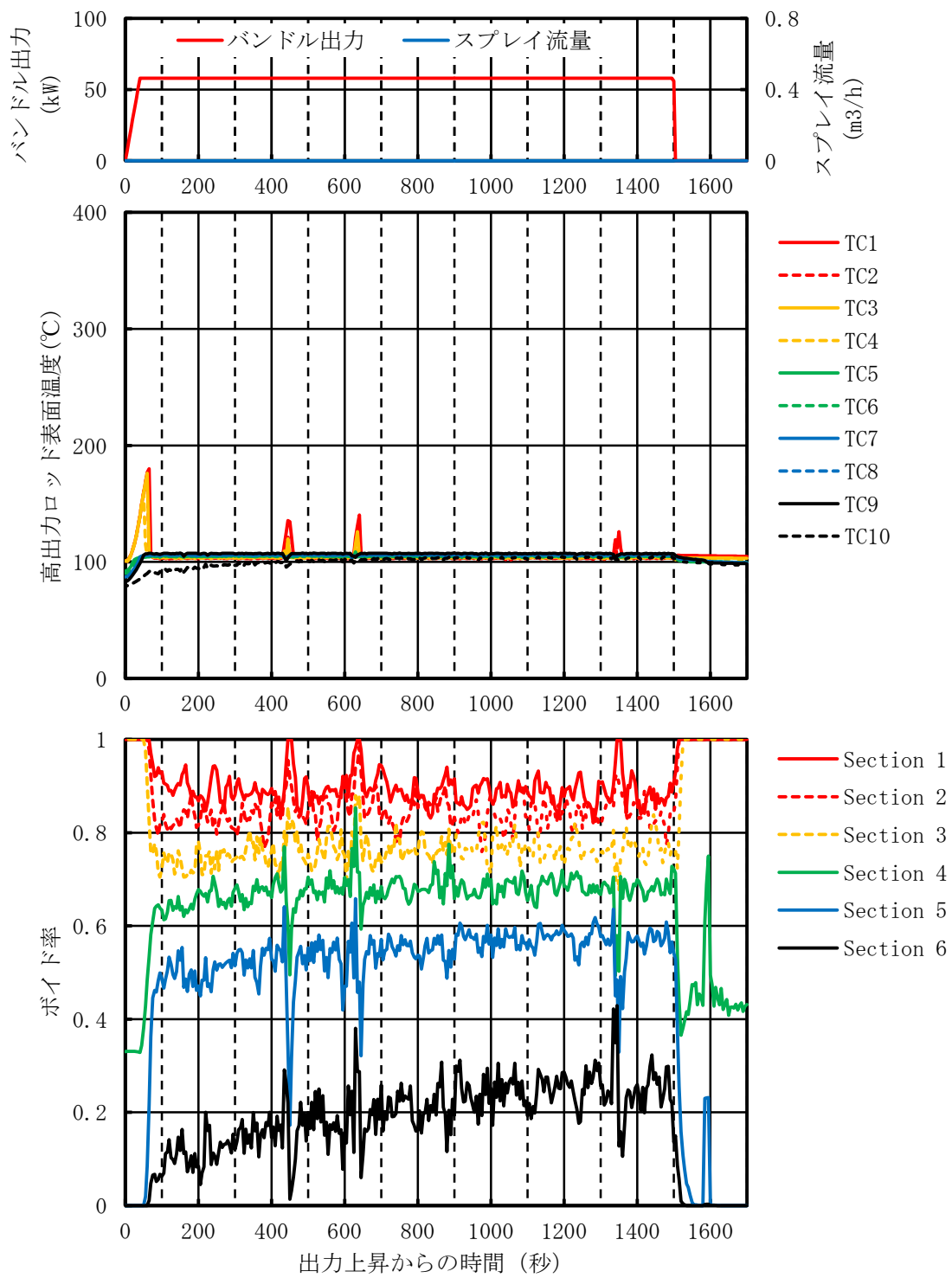


図 3.3.4-7 再現解析結果 (複合体系)

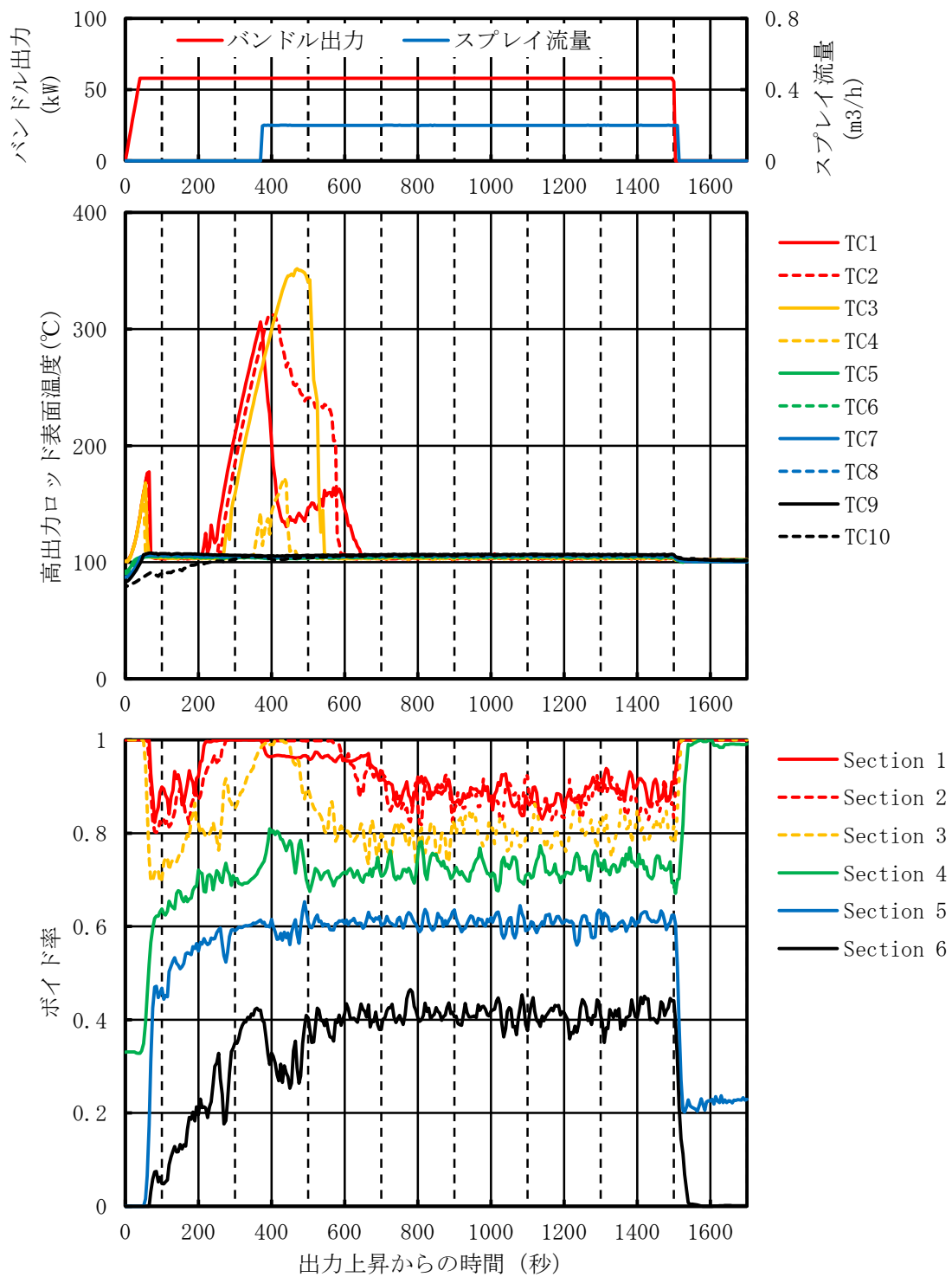


図 3.3.4-8 感度解析 3 結果 (複合体系, 連通弁を閉止)

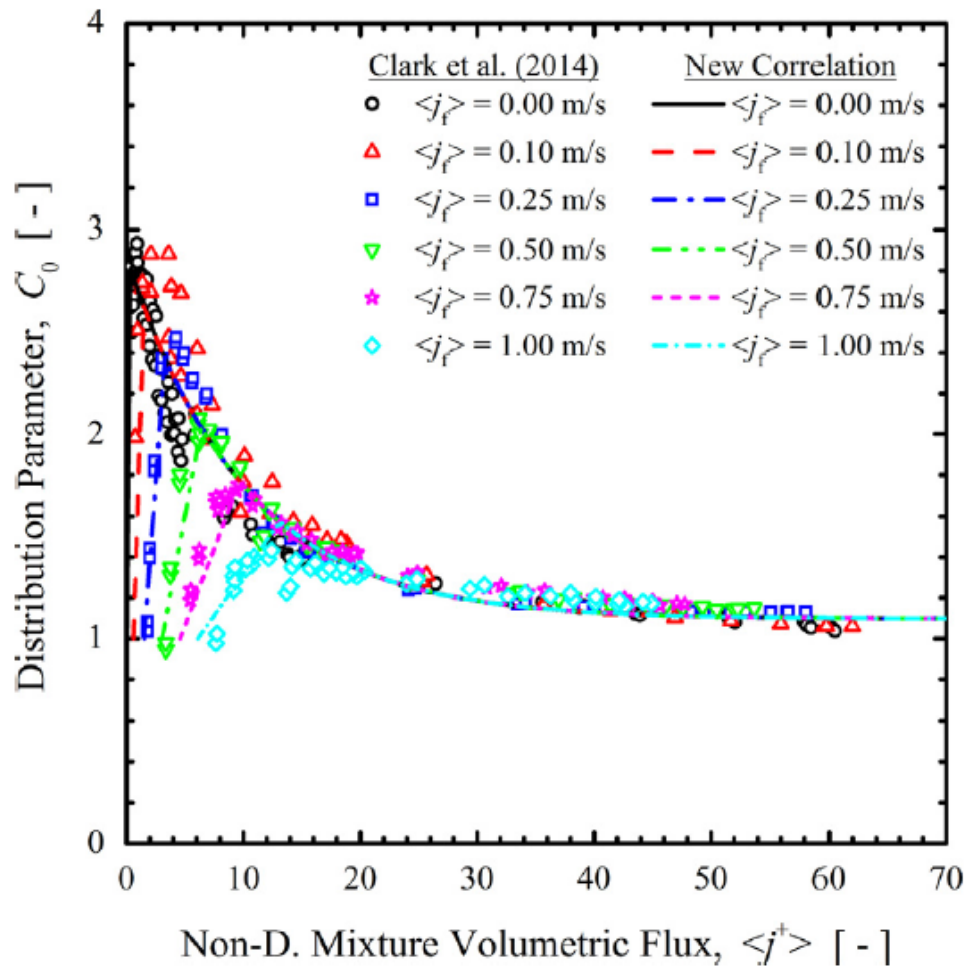


図 3.3.4-9 大気圧下における低流量時の分布定数の流速依存性（8×8バンドル条件）〈17〉

## 参考文献

- <13> J. A. Borkowski and N. L. Wade, Eds., TRAC-BF1/MOD1: AN ADVANCED BEST-ESTIMATE COMPUTER PROGRAM FOR BOILING WATER REACTOR ACCIDENT ANALYSIS, VOLUME 1: MODEL DESCRIPTION, NUREG/CR-4356, EGG-2626, May 1992.
- <14> W. H. Rettig and N. L. Wade, Eds., TRAC-BF1/MOD1: AN ADVANCED BEST-ESTIMATE COMPUTER PROGRAM FOR BOILING WATER REACTOR ACCIDENT ANALYSIS, VOLUME 2: USER'S GUIDE, NUREG/CR-4356, EGG-2626, June 1992.
- <15> T. Ozaki and T. Hibiki, Drift-flux model for rod bundle geometry. Progress in Nuclear Energy 83, 229-247, 2015.
- <16> A. Ui and T. Miyaji, Peach Bottom 2 Turbine Trip Simulation Using TRAC-BF1/COS3D, a Best-Estimate Coupled Core and Thermal-Hydraulic Code System, Nuclear Science and Engineering 148, 281-290, 2004.
- <17> C. Clark, M. Griffiths, S. W. Chen, T. Hibiki, M. Ishii, T. Ozaki, I. Kinoshita, Y. Yoshida, Drift-flux correlation for rod bundle geometries. International Journal of Heat and Fluid Flow 48, 1-14, 2014.
- <18> J. P. Schlegel and T. Hibiki, A correlation for interfacial area concentration in high void fraction flows in large diameter channels. Chemical Engineering Science 31, 172-186, 2015.
- <19> I. Kinoshita, T. Torige, J. P. Schlegel, T. Hibiki, Development of a new drift flux model for rod bundle geometries at low flow and pressure conditions (1) New drift flux model development and validation. Proceedings of 2017 Annual Meeting of Atomic Energy Society of Japan, Mar. 27-29 2017, Kanagawa, Japan.

### 3.4 外部評価委員会の開催

学識経験者1名、専門家2名から構成される外部評価委員会を設置し、平成29年6月6日、平成29年10月2日及び平成30年2月22日の計3回、外部評価委員会会合を開催し、事業実施内容等への評価、助言等を受けた。

以下、外部評価委員会の議事を示す。

#### (1) 第1回外部評価委員会（平成29年6月6日）

平成28年度事業の成果概要、平成29年度事業の実施内容について説明し、外部委員による評価を実施した。あわせて、平成29年度に実施する多バンドルスプレー分配試験の試験装置を見学いただいた。平成29年度事業については、試験マトリクスを含む実施計画を説明し、了解を得た。また現在までに得られている試験結果を説明し、外部評価委員長より整合性の高いデータが得られているとの講評を頂いた。

主な質疑及び議論は以下のとおり。

空気を用いた一部の試験でスプレー水の蒸発により空気温度が低下する可能性があるとの説明について、飽和蒸気圧を考慮すると空気中へのスプレー水の蒸発は小さいのではないかとのコメントを頂いた。NFIからは、流入するスプレー水も少なく計算上は湿度上昇によりスプレー流入割合が1%程度変化する可能性があることを回答した。

スプレー水の温度上昇に基づく蒸気凝縮量の評価を検討していることをNFIから説明し、非平衡二相流での凝縮熱伝達を解析で求めることは難しいため、熱バランスに基づく評価は有意義との見解を頂いた。

蒸気及び空気過熱度をパラメータとした条件については、スプレー開始後早期に雰囲気は飽和温度まで低下するため、スプレー分配への影響を確認することが難しいことをNFIから説明したところ、当該条件についてもスプレー冷却の有効性を示す上では有用なデータであるとの見解を頂いた。

単バンドル試験においてSCVSによる気泡上昇速度の整理が難しいことをNFIから説明し、サブチャンネルを跨る気泡の存在や、スプレー後の気泡サイズの変化を整理するだけでも有意義な情報となるとのコメントを頂いた。

#### (2) 第2回外部評価委員会（平成29年10月2日）

多バンドルスプレー流量配分試験結果、平成28年度単バンドルスプレー熱伝達試験の分析、平成29年度単バンドルスプレー熱伝達試験の追加試験内容について説明し、外部委員による評価を実施した。外部評価委員長より実用的、学問的に価値のあるデータが得られており、引き続き精緻なデータの取得と分析を望むとの講評を頂いた。

主な質疑及び議論は以下のとおり。

多バンドルスプレー流量配分試験結果について、実機の使用済み燃料貯蔵プールで想定される蒸気流量範囲ではCCFLは発生しないとの説明に対し、空気自然循環の条件ではどうかとの質問があった。電中研の評価レポートを参考に実機で想定される空気自然対流の流量条件でのCCFL発生有無を評価すると回答した。また、隣接位置に集合体が配置されていることの影響について質問があり、一部条件について特異な傾向があり今後データを詳細に見る必要があるが、基本的には隣接する集合体の影響はなく、単バンドルで傾向を評価すれば良いとの結論になる

と考えると回答した。

平成28年度単バンドルスプレイ熱伝達試験の分析について、スプレイ前の熱伝達係数が既存の相関式とよく一致すること、及び冷却の成否にクエンチフロント進展速度と二相水位が重要との説明に対し、重要な知見であり、整合性のある分析であるとの評価をいただいた。また、局所熱伝達、断面熱伝達の違いが評価・現象論に影響するため、注意深く評価を進めるようにとのコメントをいただいた。

平成29年度単バンドルスプレイ熱伝達試験の追加試験内容については、低出力・低スプレイ流量試験では出力と落水量が小さくなり、ばらつきの影響が出やすいと考えられるため、評価の際に考慮するようにとのコメントをいただいた。

### (3) 第3回外部評価委員会（平成30年2月22日）

多バンドルスプレイ流量分配試験の分析、平成29年度単バンドルスプレイ熱伝達試験結果及び単バンドルスプレイ熱伝達試験の分析について説明し、外部委員による評価を実施した。外部評価委員長より、安全性向上の観点のみならず学術的にも意義のあるデータが得られているとの講評を頂いた。

主な質疑及び議論は以下のとおり。

多バンドルスプレイ流量分配試験の分析について、CCFL発生位置に関し質問があり、Wallisプロットでの傾向を見ると最終的なCCFLは上部タイプレートで発生していると考えているが、スパーサ等の断面やバンドル入口部でフラッディングが起こっている可能性は否定できないと回答し、下までクエンチフロントが進展するようなCCFLについてはTexas A&M大のKaren Vierow先生の研究動向を確認したほうがよいとの助言をいただいた。また、CCFLは液膜のフラッディングによると考えているという説明に対し、液滴が飛ばされる影響も考えられるため確認したほうがよいとのコメントをいただき、今後液滴径ごとの速度を評価する予定であると回答した。

平成29年度単バンドルスプレイ熱伝達試験結果について、冷却水／空気冷却試験共にスプレイ開始後にBAF部で温度が上がっている理由に関し質問があり、空気冷却試験では蒸気発生により圧力が高まることで蒸気下降→集合体下端→ラック部にて上昇流という経路を気体を通り、冷却水試験ではスプレイが落水することで水面より下の冷却水が流動するためと考えていると回答した。

熱伝達及びクエンチフロント進展の分析について、クエンチフロント進展の整理にはスプレイ開始時の温度を用いているという説明に対し、クエンチするまでの温度上昇は影響について質問があった。クエンチするまでの温度上昇は影響を与えられられるが、今年度の試験においては出力が低いため、スプレイ後に温度はあまり変わらずクエンチするまでの温度変化を考慮しても傾向に大きな差はないと考えられる一方、昨年度の高出力試験ではクエンチするまでに各部の温度が上がっており、温度上昇を考慮することでより山内の式に合う可能性があるとの回答した。また、「自然循環が起きない」との説明について、本装置特有での現象を指しているのであれば実機における自然循環が起きないとの誤解を生むため、記載を改めたほうがよいとのコメントをいただいた。

ボイド率分布の分析について、SCVS断面平均ボイド率のデータが差圧計のデータより低いとの説明に対し、スラッグ通過による変動は周波数が早いとボイド上昇がローパスフィルタによりカットされている可能性があり、また液膜のスラッグ長さ等の情報も重要なため確認できるようにであれば見たほうがよいとの助言をいただいた。

TRAC-BF1による単バンドル熱伝達試験の再現解析について、TRACのドリフトフラックスモデルならプール沸騰でボイド率が大きくなる傾向があるが、よく一致した解析結果であるとのコメントをいただいた。また、CCFL計算に際しては非加熱部を最低2ノード分割、上下2番目のエッジでCCFLを計算するのが一般的であるとの助言をいただいた。

#### 4 まとめ

平成27年度原子力施設等防災対策等委託費（使用済み燃料貯蔵プール冷却試験）事業の下で設計・製作した単バンドル用の実験装置を用いて、スプレー熱伝達実験を実施してスプレー冷却特性等の定量化のための実験データを取得するとともに、平成28年度原子力施設等防災対策等委託費（使用済み燃料貯蔵プール冷却試験）事業の下で2×2バンドル向けに改造した実験装置を用いて、4バンドル体系下でのスプレー流量配分実験を実施してスプレー分配特性の定量化のための実験データを取得した。更に、取得した実験データを分析し、スプレー冷却等を解析コード等で評価するための手法及び課題について検討を行った。

以上