原子力規制庁　長官官房技術基盤グループ　安全技術管理官殿

平成 28 年度
事故時ボイド挙動解明試験

成果報告書

平成 29 年 3 月

一般財団法人　電力中央研究所

原子力技術研究所

CRIEPI

Central Research Institute of
Electric Power Industry

目次

表目次

図目次

1. 緒言

沸騰水型軽水炉の低温時の制御棒落下事故時などにおいて，炉心の発熱量が急速に上昇した際の燃料集合体断面内での蒸気泡（ボイド）の横方向伝播挙動に関しては，ボイド挙動が把握されていない．このため，急速発熱時における減速材密度反応度フィードバック特性を始めとする 3 次元核熱結合特性の評価，その不確かさなどを裏付ける技術的知見が不十分な状況にある．

急速発熱事故時における安全対策の有効性を適確に評価するためには，3 次元核熱結合解析コードを一層高度化する必要がある．そのため未解明なボイド挙動に関する実験データの拡充が重要であり，とりわけ横方向のボイド伝播挙動に関する実験データを拡充する必要がある．

平成 27 年度には，このような実験データの取得を目的とした急速発熱時熱流動実験装置を設計し製作した．

平成 28 年度は，平成 27 年度に設計・製作した急速発熱時熱流動実験装置を用いて，大気圧条件下の急速発熱時の燃料集合体内ボイド挙動，特に断面内での横方向伝播を定量的に評価するためのベンチマークデータを取得する．

2. 設計・製作した実験装置の概要

この章では，模擬燃料集合体，熱水力実験ループ，ボイド率計測装置などの計測部からなる急速発熱時熱流動実験装置の概要をまとめる．主な仕様を**表 1**，試験体及び実験ループの外観を**図 2-1** 及び**図 2-2**，試験部の全体構成及び計測項目を**図 2-4** に示す．また，同実験装置中の枢要部について以下に整理する．

なお，実験装置の詳細については，H27 年度実施研究の成果をまとめた報告書 [1)] を参照されたい．

2.1 5×5 バンドル試験ループ

この実験ループは，直接発熱ヒータロッド 9 本及び非加熱ロッド 16 本から構成される 5×5 バンドル試験体を含む実験ループとして製作したものである．

ヒータロッドは，低温時の制御棒落下事故時に生じる落下制御棒側コーナ部の典型的な断面内の局所出力ピーキングパターン（**図 2-3**）に従い，ヒータの肉厚を変えてロッドごとの発熱分布を決定した．なお，ヒータロッドの加熱部長さは 0.45 m，全長は 1.45 m である．

2.2 可視化計測装置

発熱部下端より設定した可視化計測領域（約 930 mm）を可視化計測するために，差圧計，熱電対，ワイアメッシュセンサ（以下“**WMS**”という．），高速度カメラ及びレーザを用いた PIV，LIF の計 6 種の計測器及び計測手法を導入した．**図 2-5** に概要を示す．

熱電対による計測では，応答性のよい極細シース K 型熱電対を用い，発熱部の金属薄肉管の内管側に埋め込む構造を採用した．

レーザ装置は，連続運転が可能な場所に固定設置し，光ファイバで試験部まで引き込む仕組みとした．

高速度カメラ，光ファイバ及びレーザシート光学系から構成される光計測設備は試験体に隣接してトラバース機構に固定した．

表 1　事故時ボイド挙動解明試験装置の設計・製作時の主な仕様

項目	内容	備考
装置構成	5 行 5 列の模擬燃料集合体（9 本の直接発熱ヒータロッド，16 本の非加熱ロッド），冷却水循環ポンプ，直流電源，予熱器，凝縮器，実験部容器，配管，制御装置，計測器，データ取得装置から構成される実験ループ	大気圧条件下で常温から飽和温度まで制御可能，かつ冷却水質量流束が最大600kg/m^2/sの範囲で制御可能な試験ループ並びに直流電源を製作
計測機器	高速度カメラ，ワイアメッシュボイド率計，熱電対，差圧計，PIV・LIFシステム	レーザを用いた温度計測手法として，新たにLIF及び寿命法を提案
実験条件	圧力：大気圧 冷却水温度：常温～373K 冷却水質量流束： 0～600 kg/m^2-s 熱流束： 最大3 MW/m^2（10秒維持が可能） 軸方向分布：一様 局所出力ピーキング： 5 段階（**図 2-3** 参照）	複数のサブクール度でのサブクール沸騰可視化計測試験を実施する予定
作動流体	水－蒸気，水は純水相当	
実験パラメータ	熱流束をステップ的及びランプ状に制御して事故時の急速加熱を模擬	ノイズ低減を目的に，シリーズレギュレータ電源を導入
計測項目	• ボイド率分布（サブチャンネルレベル） （可視化領域に等間隔に9断面設置） • 伝熱面温度（発熱部伝熱面に軸方向に3箇所設置） • 可視化画像（高速度カメラを使用） • 液相場流速分布（PIV），温度分布（LIF）	

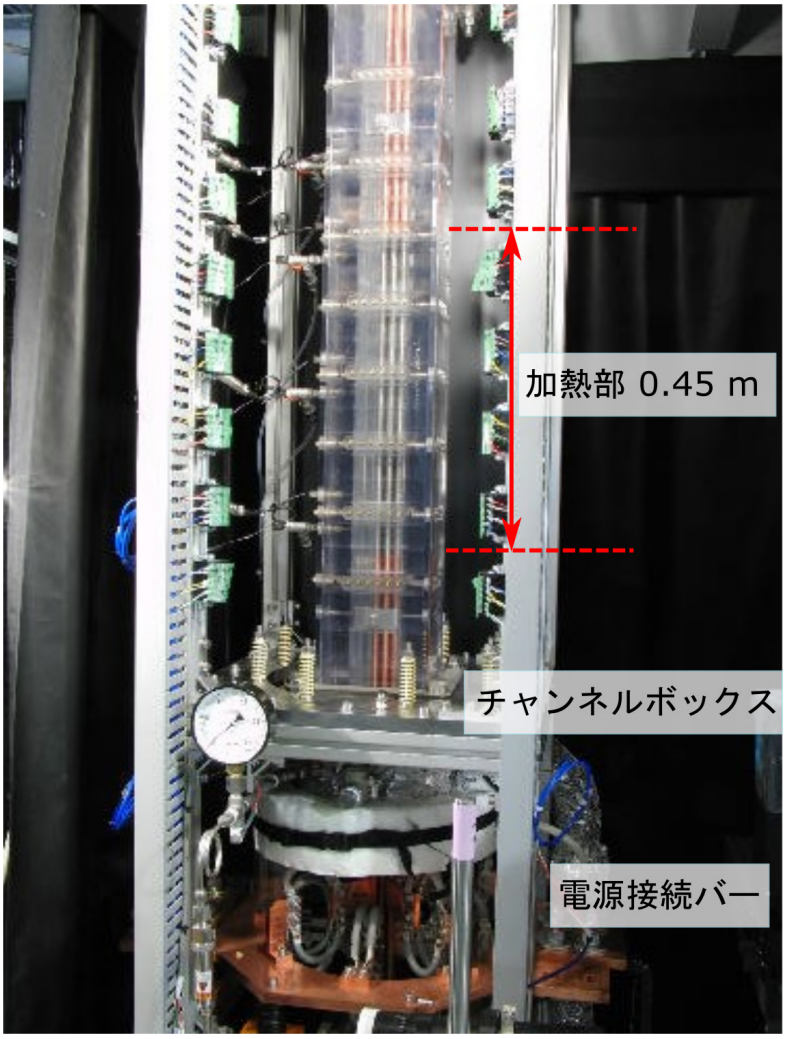


図 2-1　試験体外観

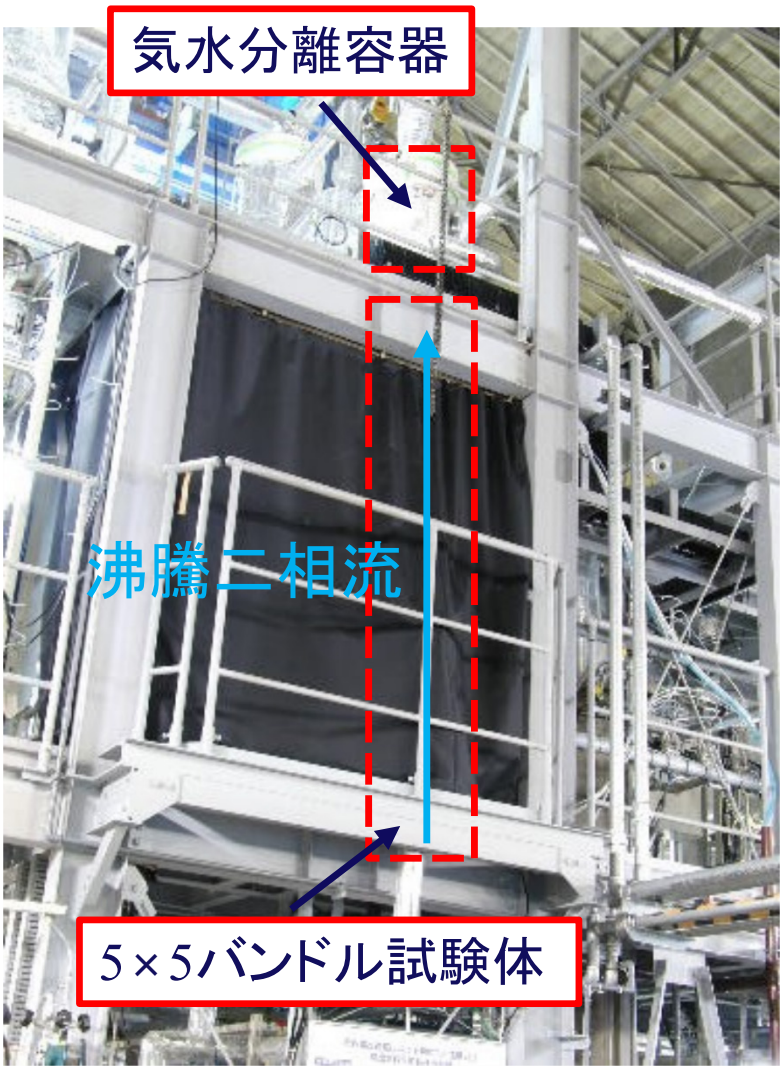
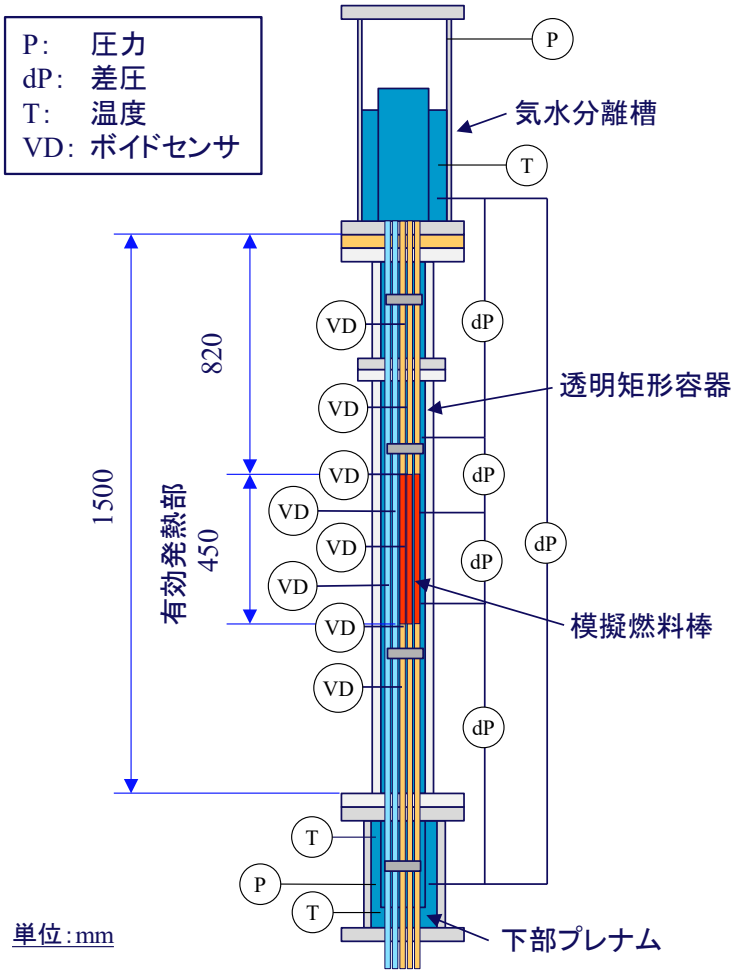


図 2-2　実験ループ外観

	1	2	3	4	5
1	1.00	0.96	0.91	0.00	0.00
2	0.96	0.91	0.87	0.00	0.00
3	0.91	0.87	0.83	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

図 2-3　5×5 ヒータロッドの局所出力ピーキング



項目	計測方法	計測箇所
ボイド率	直接通電加熱用ボイドセンサ	32点×8断面
ロッド温度	埋込K型シース熱電対	6点×7ロッド
液体温度	K型シース熱電対	試験部入口 試験部2点 下流域1点
液体温度	LIF，光ファイバ	任意高さ
液相流速	PIV	任意高さ
圧力	圧力センサ	上下部プレナム 発熱部3点 下流域1点
局所差圧	差圧計	試験部出入口各1区間 発熱部2区間 全体1区間
入口流量	電磁流量計	試験部入口

図 2-4　試験部の全体構成及び計測項目

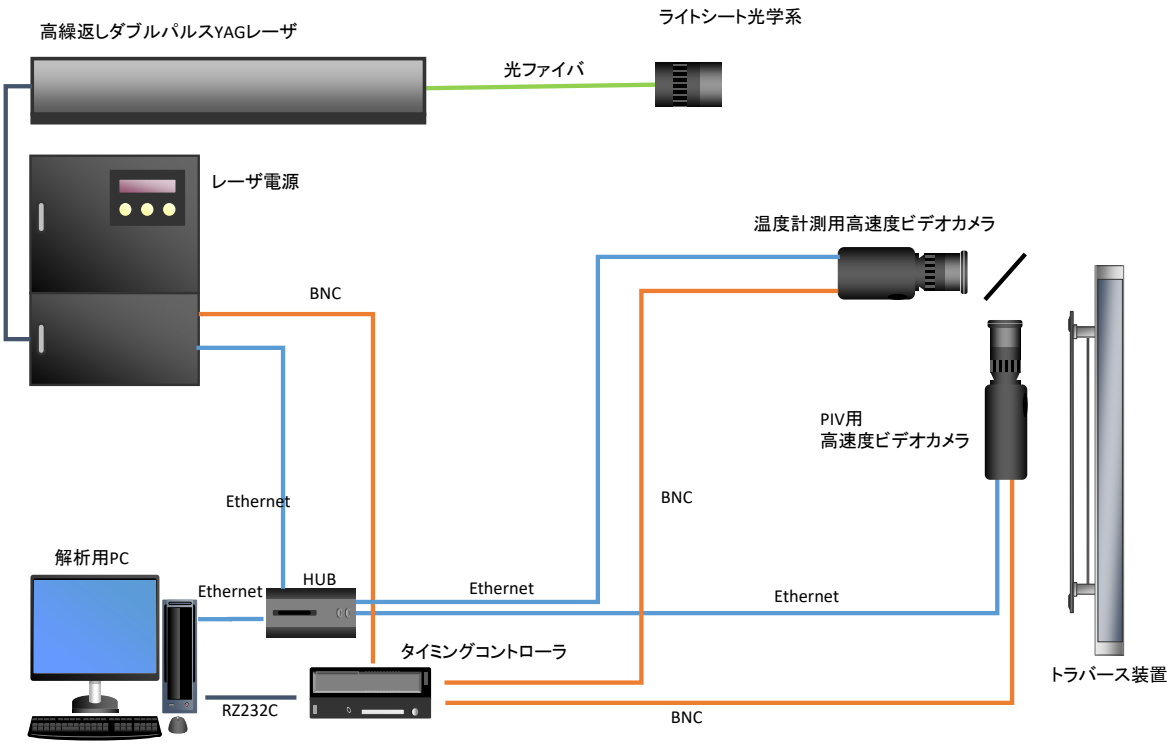


図 2-5　可視化計測装置の概要

3. 実験

実験に当たっては，報告対象とする実験の実施に先立って，その実験条件を定めるとともに，最新の計測法として導入する計測技術の適用性を検討するために，予備実験を種々実施した．

しかし，予備実験の結果，サブチャンネルを跨いだボイドの突沸的な発生など，実験計画段階で事前に想定された実験条件の効果的な設定によるボイド発生状況の制御が困難なこと，最新の計測技術である LIF（Laser Induced Fluorescence）及び光ファイバ温度計による温度測定に更なる検討が必要であることが判明した．

平成 28 年度は昨年度に設計・製作した実験装置を用い，これらの状況の下で効果的な実験条件を設定して，大気圧条件下の急速発熱時の燃料集合体内のボイド挙動，特に断面内での横方向伝播を定量的に評価するためのベンチマークデータを取得し，ボイドの 3 次元的な挙動の解明を進めた．以下に報告する．

3.1 実験の実施

3.1.1. 実施に当たっての要求事項

要求事項は次の通りである．

大気圧時の急速発熱事象中の BWR の燃料集合体内におけるボイドの発生・増加，その横方向伝播などの 3 次元的なボイド挙動に係る実験データを取得する．主な仕様は**表 2** に示す通りである．

なお，実験条件の決定に際しての考え方について次のように要求がなされている．

この実験では，ボイドが合体して形成される大気泡塊が，急速加熱による急激な蒸気発生と相まって，軸方向だけでなく，燃料棒間のギャップ部を超えて横方向にも伝播し拡大して行く．このとき，最大出力レベル，並びに加熱部入口における冷却水流速レベル及び冷却水温度レベルの 3 条件をパラメータにサーベイして，大気泡塊の横方向への拡がりの有無の分岐条件，すなわち限界条件に係る熱流束（又は出力）条件の組合せを前述の冷却水流速，冷却水温度のそれぞれの条件ごとに特定し整理することが重要である．

このため，実験条件に関しては，特定の冷却水流速及び冷却水温度の条件を設定して，まず熱流束条件に係る限界条件を見出したうえで，その限界条件相当並びに限界条件よりもボイドの横方向伝播量の小さい熱流束条件及び大きい熱流束条件の少なくとも 3 熱流束条件に関する実験を実施してデータを取得するものとする．

PIV による液相流速及び LIF による冷却水温度の詳細計測については，実験データが極めて膨大となること及び CFD グレードの実験データを取得する観点から実施するものであることの二つを考慮して，実施する実験ケースを 3 ケース程度に限定する．詳細計測を実施する実験ケースについては，原子力規制庁の担当者と協議して選定するものとする．

また，スペーサの影響を評価する実験を少なくとも 1 ケース実施するものとする．こちらも，詳細については原子力規制庁の担当者との協議のうえで決定するものとする．

なお，この事業では，新たに光ファイバ温度計を導入し実験装置に追設してサブチャンネル単位の分解能で冷却水温度を計測できるようにする．

3.1.2.　実験条件の設定

実験条件の設定に当たっては，加熱部入口断面における冷却水の流速条件及び温度条件を決定した後に，前項の要求事項を満足する設定出力条件及び効果的な実験条件マトリックスのサーベイのため，予備的な実験を多数回実施し，実験条件の変更に伴うボイド発生状況及び横方向伝播を含むボイド特性への影響を広範に調べた．

ただし，これら一連の予備的な実験では，計測装置の調整・校正も併せて実施しており，実験条件の十分な安定化など，実験結果の信頼性を裏付けるための必要な措置を講じていないことから，この報告書ではその結果について具体的な言及は行わない．

以下，冷却水の流速条件及び温度条件，出力条件，効果的な実験条件マトリックスの設定について，この順で説明する．

3.1.2.1.　流速条件

流速条件については，低温時から高温待機時の制御棒落下事故時の場合に，集合体 BAF（Bottom of Active Fuel）部における典型的な流速 0.35 m/s を挟む二つの条件として，0.3 m/s 及び 0.5 m/s を設定した．

3.1.2.2.　温度条件

温度条件には，炉心（燃料集合体）入口冷却水温度を 293 K（20ºC）に設定する低温時の制御棒落下事故の安全解析条件を念頭に，313 K（40ºC）及び 333 K（60ºC）の二つの条件を設定した．なお，高めの温度条件を設定したのは，次の理由による．

1) この実験で用いる試験体は，**図 2-1** に示されるように加熱部を 0.45 m とし，極めて軸方向ピーキングの大きなトップピークの軸方向出力分布 [1] を呈する実機燃料を対象とした低温時制御棒落下事故時のピーク部を切り出し，その発熱状況を模擬したものである．

2) 実機燃料ではこのピーク出力部より下部，すなわち上流側に 3 m の出力の低い発熱領域が存在するが，この区間でボイドが発生することはなく，その発熱は燃料集合体中を流れる冷却水を昇温することに費やされるだけにとどまる．

3) 簡単な計算によりこの昇温量を 20 K～40 K と評価できることから，前述の 0.45 m 部分のピーク出力領域に流入する冷却水の温度を，安全解析条件から 20 K～40 K 高めるのが，安全解析条件の下でのピーク部の冷却水の条件に実験条件を相当させることになる．

3.1.2.3.　設定出力の時間応答曲線

設定出力の時間応答曲線については，3 次元核熱結合解析コードによる低温時制御棒落下

---

[1] 低温時制御棒落下事故時の炉心出力ピーク時刻におけるシステム解析コードなどによる 3 次元核熱結合解析結果に基づく

事故時の表面熱流束の時間応答を考慮して，**図 3-1** のように，時刻 0.2 秒で最大出力レベルまで直線的に増加するものとした．さらに最大出力については，前述した一連の予備実験の過程などで得られた次の知見：

1) 比較的低い最大出力レベルを設定した場合でも，ボイドが突沸的に発生する状況が観察されたこと

2) 設定出力の時間応答曲線にて，最大出力保持時間を長くすると（例えば 1 秒程度），低い最大出力レベルでも，最大出力保持期間の終了時刻付近でボイドが発生し大きく増加する状況が観察された．入口流速 0.3 m/s の場合は有効加熱長の 2/3，0.5 m/s の場合は有効加熱長の 1.1 倍もの範囲を冷却水が移動することになることから [2]，1 秒にもわたる最大出力保持時間は，軸方向のマクロな熱輸送の観点で，出力レベル（≈熱流束（直接通電加熱））が一定であることと相まって，当該出力レベル一定として定常加熱する場合と相違が実質的になくなってしまう．

3) 実際の（安全評価解析上の）低温時制御棒落下事故では，このような定常的な加熱状況は現出せず，CHF 相関式の妥当性の問題はあるものの，1 秒も経過しない間に膜沸騰が生じて熱流束が急低下する．

4) **2)** 及び **3)**に示した状況から，**3.1.1** 項に掲げた要求事項に示された限界条件の特定のためには，出力上昇期間又はこれに続く最大出力保持期間の早期の段階で有意にボイドの発生する最大出力レベル及びその保持時間を設定する必要がある．

に基づいて，平成 28 年度に実施する一連の実験においては，その保持時間をすべて 0.5 秒に統一して設定することとした．

3.1.2.4. 実験条件マトリックス

3.1.2.1 及び **3.1.2.2** の検討より，流速条件を 2 レベル，温度条件を 2 レベル設定できた．また **3.1.2.3** の検討から，設定出力の時間応答曲線の時間パターンが決定できたことから，設定出力条件の自由度は最大出力レベルに残るのみとなった．最大出力レベルについては，**3.1.1** 項に示した要求事項に基づくと，限界条件 [3] を挟んで 3 レベル想定すればよい．

このため実験条件マトリックスは，流速条件，温度条件及び最大出力レベルの 3 パラメータに対し，順に 2 通り，2 通り，3 通りの条件設定を組み合わせ，計 12 通りの組合せを考えればよい．

なお，流速条件及び温度条件については，それぞれ 2 通りの条件が決定済みである．一方，3 通りの最大出力レベルについては，**3.1.1** 項に掲げた要求事項に示された限界条件の特定のため，予備的な実験結果に基づいて効果的な条件を決定する必要がある．

このため，最大出力レベルについて予備的な実験結果に基づいてそれぞれの流速条件及

---

[2] ボイドが発生すれば流速が増加するので，入口流速 0.3 m/s の場合でも，冷却水（液相）の 1 秒間の移動距離（＝温度，エンタルピなどの熱力学的な物理量の輸送距離）は有効加熱長 0.45 m より大きくなると考えられる．

[3] 大気泡塊の横方向への拡がりの有無を分岐させるしきい条件に相当する実験条件

び温度条件に応じた 3 条件の設定を行う．しかし，

1) 実機の燃料集合体では，W/R（ウォータロッド又はウォータボックス）を除くすべてのロッドが加熱されるため，ヒータロッドが配置された領域内での横方向のボイド伝播の特徴・特性の把握が重要であり，これを実験的に捉えることが望ましい．

との目標があるものの，次に示す理由：

2) 加熱サブチャンネル間でボイド初生時刻の差が小さい．これは，4 本のヒータロッドに囲まれたサブチャンネル並びに 2 本のヒータロッド及びチャンネルボックス内壁に囲まれたサブチャンネル（以下“**加熱サブチャンネル**”という．）の単位流路断面積当たりの加熱量の相違が，実験体系の加熱領域が 3×3 格子分と小さいことから，最大で 10%程度[4] しかないためである．

3) また，OSV（Onset of Significant Void）条件に至って冷却水中にボイドが初生すると，直ちにボイド率が急激に増加してサブチャンネルを跨ぐ巨大気泡に成長する様子がしばしば観察された．

4) 観察結果を交えたこのような状況から，特定の加熱サブチャンネルで発生したボイドの横方向伝播を特定しがたい．

5) 加えて，仮に特定できたとしても横方向伝播に要する時間と，当該加熱サブチャンネルに隣接する加熱サブチャンネルにおけるボイド初生時刻の差とを区別しにくい状況が生じる．

6) 以上から，加熱サブチャンネル領域内で横方向伝播挙動を捉えるのが困難となる．

などの理由により，加熱サブチャンネルにおける限界条件を明確に見出し難い事実が予備実験から判明した．

このような状況の下で横方向伝播を含めたボイドの 3 次元挙動を捉えるためには，次のようにすることが望ましいと考える．

7) ボイド率の横方向伝播挙動については，3×3 格子の外側に設けた 2 列分の格子幅の非加熱領域，すなわちサブクール水が流れると想定される非加熱ロッド周りのサブチャンネル（以下“**非加熱サブチャンネル**”という．）への加熱サブチャンネルからのボイドの伝播状況に基づいて代替的に評価する．

ただし，このようにして判明するボイドの横方向伝播挙動は，加熱ロッドがほとんどを占める実機の燃料集合体内の挙動とはやや異なったものとなる．しかし，この非加熱サブチャンネルでは，実機の燃料集合体内で落下制御棒側のコーナ部近傍の加熱によりボイドが発生する領域の外側からボイドが発生せずサブクール状態が継続する反対側のコーナ部[5] ま

---

[4] 実規模の燃料集合体では最大で 80%程度の相違が生じ得るが，3×3 規模では小さい値となる．

[5] 多バンドルを扱える格子計算コードを用いた解析によると，低温時の制御棒落下事故でボイドが初生する時刻付近においては，落下制御棒の反対側のコーナ部のロッド出力は，落下制御棒側のコーナ部と比較して 50%近く低下する．

での領域の熱水力的な状況を反映するとみなすことができる[6]ことから，非加熱サブチャンネルの領域，特に加熱サブチャンネルから遠い側の 2 層目までボイドの横方向伝播が観察された場合には，十分な横方向伝播が生じると判定でき，この実験の実施目的に即した有用な情報を取得できる．

したがって，3 条件の最大出力レベルの設定については次のように整理できる．

8) 実機燃料においてボイドの横方向伝播の影響が問題となるのは，落下制御棒に近い側の高出力ロッド領域にボイド発生が限定される状況であり，このような状況が生じる範囲に加熱条件を押さえるためには，高出力側コーナ部，すなわち本実験装置の 3×3 格子部でボイドが初生した最大出力レベルに対して，その 5 割を超える最大出力レベルを設定してはならない[7]．

9) 高出力側コーナ部からみて実機の集合体幅の 1/2 程度までにボイド発生が局在する状況がボイドの横方向伝播を考える上での最も熱的に厳しいものであることを考慮すると，高出力側コーナ部のみでボイドが初生する出力レベルに対し，高々2～3 割程度増加させた出力レベルを最大出力の許容上限として制限することが望ましい．

10) 一方，加熱サブチャンネルにおいては，予備実験の知見として前述したようにボイドが流路中に初生すると直ちに高ボイド率に至る特性をもつ．したがって，当該領域内のボイド率のケースごとの変化を調べる観点からも，100%ボイド率より手前の中間的なボイド率を最大ボイド率の目標値とする範囲に最大出力レベルを押さえることが望ましい．

以上から，実機燃料のボイド発生領域を限定すると想定される実験条件を選定し，同時に加熱サブチャンネルにおけるボイド挙動の差を区別できるように，予備実験結果を参考に比較的狭い範囲の最大出力レベルを 3 条件設定する．このとき，OSV（Onset of Significant Void）条件に至った実験条件を 3 条件の中の起点となる最小の最大出力レベル条件とする．

なお，このような条件設定は，実験装置及び計測装置に過度の負荷を課さずに，安定した再現性のある実験及び計測を実施する観点からも重要であり，結果として，実験及び実験装置の信頼性及び安全性の確保の面からも有益なものとなる．

以上の検討及び予備実験の結果に基づいて，最大出力レベル 3 条件を決定した．集合体加

---

[6] 実機燃料においてボイドの横方向伝播の影響が問題となるのは，落下制御棒側の高出力側コーナ部の一部領域のみでボイドが発生し，落下制御棒の反対側の低出力側コーナ部などの相対的に熱出力の小さな領域でボイドが発生しない状況である．このとき，低出力側領域中の冷却水は比較的深いサブクール度の状態にある．

[7] 実機燃料でボイドの横方向伝播挙動の解明が重要となるのは，最も熱出力レベルの低い燃料棒，すなわち燃料集合体断面内で落下制御棒側コーナと正反対のコーナ部を始めとする横方向断面内における低出力領域でボイドが発生しない場合に限られる．前述の脚注に示したように，反対側コーナでは燃料棒出力が 50%弱低下することから，一定の余裕をもって当該ロッド及びその周りの低出力領域でボイドが発生しない条件を設定するためには，OSV 初生が初めて観測される最大出力レベル，すなわち最低の最大出力レベル条件に対して 5 割増の最大出力レベルの範囲にとどめることが必要となる．

熱部入口の冷却水温度及び冷却水流速のそれぞれ 2 条件を加えて構成した実験条件マトリックスを**表 3** に示す.

なお，**表 3** に整理した実験条件マトリックスは，原子力規制庁の本研究担当者に予備実験のデータとともに示し，了解を得ている.

3.1.3. 実験結果

表 3 に示す実験条件マトリックスに従って実験条件を設定した全 12 ケースの実験結果を，集合体加熱部入口の冷却水温度及び条件の組合せに従って 4 グループに分けて実験結果を報告する．また，液相の流速場及び温度場に関する詳細な測定データについても，実施した 3 ケースをまとめて報告する．さらに，スペーサ追設後の実験結果についても項を設けて報告する.

なお，**表 4** に WMS の軸方向位置を示す．また，実験結果を示す図中では**図 3-2** 及び**図 3-3** に示すロッド番号及び WMS の識別番号を用いている．**図 3-3** では模擬燃料棒の局所出力係数も合わせて示している．**図 3-4** ではサブチャンネルのタイプ分け [8] を示す．同図中でコーナサブチャンネルをタイプ分けしていないのは，**図 3-3** に示されるように，ワイヤの交点がポリカーボネイトの部材中にあるため，WMS で測定されないサブチャンネルであることによる.

また，以下では，3 次元ボイド率分布，伝熱面温度，可視化画像などすべての実験ケースで取得した測定データを“**基本測定結果**”，一部の実験ケースを対象に PIV 及び LIF を用いて取得した液相の流速場及び温度場の詳細な測定データを“**詳細流動測定結果**”と呼称する.

3.1.3.1. 冷却水温度 40ºC，冷却水流速 0.3 m/s の 3 ケースの基本測定結果

表 3 の実験条件マトリックス中の Run No. 1～Run No. 3 の実験結果を示す.

図 3-5（Run No. 1），**図 3-14**（Run No. 2）及び**図 3-24**（Run No. 3）にロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化，**図 3-6**（Run No. 1），**図 3-15**（Run No. 2）及び**図 3-25**（Run No. 3）に高さごとの燃料被覆管温度の時間変化，**図 3-7**（Run No. 1），**図 3-16**（Run No. 2）及び**図 3-26**（Run No. 3）に入口圧力，高さごとの圧力及び差圧の時間変化，並びに**図 3-8**（Run No. 1），**図 3-17**（Run No. 2）及び**図 3-27**（Run No. 3）に高さごとの水温（非加熱側チャンネルボックス内面）及び入口流速の時間変化の測定結果を示す．また，**図 3-9**～**図 3-12**（Run No. 1），**図 3-18**～**図 3-22**（Run No. 2）及び**図 3-28**～**図 3-32**（Run No. 3）に，ボイドの発生が WMS にて確認された断面についてその格子点ごとのボイド率の時間変化の測定結果を示す．さらに，**図 3-13**（Run No. 1），**図 3-23**（Run No. 2）及び**図 3-33**（Run No. 3）にボイド挙動の可視化画像を示す.

---

[8] **3.1.2.4** に示した非加熱サブチャンネルに関する説明を再整理すると，非加熱サブチャンネルタイプ 1 がボイド発生領域に隣接又は近接するサブチャンネル，非加熱サブチャンネルタイプ 2 がボイド発生領域から遠い領域，例えば落下制御棒側コーナと対角位置にあるコーナ部近傍領域を表す.

ボイドの初生から消失に至るまでのボイド挙動は次のように整理できる．

1) WMS にて観測されたボイドの軸方向の発生領域又は伝播領域は，加熱部下端からの高さで，Run No. 1 が 0.15 m（第 3 段 WMS）～0.45 m（第 6 段 WMS），Run No. 2 及び Run No. 3 では 0.05 m（第 2 段 WMS）～0.45 m（第 6 段 WMS）であった．

2) 横方向の発生領域又は伝播領域については，Run No.1 では加熱サブチャンネルタイプ 1 及び加熱サブチャンネルタイプ 2 の一部に発生領域が限定された．一方, Run No. 2 及び Run No. 3 では，非加熱サブチャンネルタイプ 2 にはボイドが到達しなかったものの，その 1 列分内側の非加熱サブチャンネルタイプ 1 までボイドが横方向伝播していた．

3) Run No. 1 の一連の可視化画像からは，時刻 0.45 秒から時刻 0.55 秒までの間のボイド挙動が把握でき，有効加熱長の中央高さより上部で一部のサブチャンネル流路に流路幅の数倍の長さの巨大な気泡が形成されている様子が見て取れる．時刻 0.6 秒以降では，凝縮のため，ボイドの存在を画像からは確認できない．

4) Run No. 2 の一連の可視化画像からは，時刻 0.40 秒から時刻 0.70 秒までの間のボイド挙動が把握でき，有効加熱長の中で最も下部の第 2 段 WMS 付近から有効加熱長の上端（第 6 段 WMS）のわずかに下までの領域内でのボイドの挙動，例えば，サブチャンネル流路内からボイドが横方向に拡がって加熱サブチャンネル内にわたって横方向に連結した巨大気泡が形成される様子，軸方向には巨大気泡の領域とボイド率の小さい領域とが交番的に流れる様子，時刻 0.50 秒からは巨大気泡が非加熱サブチャンネルタイプ 1 の領域にまで拡がって行く様子などが見て取れる．また，ボイドの凝縮に関しては，時刻 0.65 秒から 0.70 秒にかけて，下方及び上方から有効加熱長の中央高さより上部（第 4 段 WMS と第 5 段 WMS の間の領域）に凝縮面が進展して行く様子が見て取れる．

5) Run No. 3 の一連の可視化画像からは，時刻 0.35 秒から時刻 0.70 秒までの間のボイド挙動が把握でき，有効加熱長の中で最も下部の第 2 段 WMS 付近から有効加熱長の上端（第 6 段 WMS）のわずかに下までの領域内でのボイドの挙動，例えば，サブチャンネル流路内からボイドが横方向に拡がって加熱サブチャンネル内にわたって横方向に連結した巨大気泡が形成される様子，軸方向には巨大気泡の領域とボイド率の小さい領域とが交番的に流れる様子（時刻 0.35 秒～0.40 秒），時刻 0.45 秒からは軸方向に連なった巨大気泡が形成され，当該巨大気泡が非加熱サブチャンネルタイプ 1 の領域にまで拡がって行く様子などが見て取れる．また，ボイドの凝縮に関しては，時刻 0.55 秒から 0.70 秒にかけて，下方及び上方から有効加熱長の中央高さより上部（第 3 段 WMS と第 4 段 WMS の間の領域）に凝縮先端面が進展して行く様子及び時刻 0.70 秒で進展する二つの凝縮先端面が衝突する様子が見て取れる．時刻 0.69 秒付近において入口部の圧力センサで 0.5MPa を超える圧力パルスが観測されたことを考慮すると，凝縮誘起水撃現象の発生が可視化画像からも示されたとしてよい．

なお，Run No. 2 及び Run No. 3 において凝縮誘起水撃と考えられる圧力パルスが生じている．凝縮誘起水撃については，実験データの整理に係る **3.2.2.5** にて検討する．

3.1.3.2. 冷却水温度 40ºC，冷却水流速 0.5 m/s の 3 ケースの基本測定結果

表 3 の実験条件マトリックス中の Run No. 4～Run No. 6 の実験結果を示す．

図 3-34（Run No. 4），**図 3-42**（Run No. 5）及び**図 3-53**（Run No. 6）にロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化，**図 3-35**（Run No. 4），**図 3-43**（Run No. 5）及び**図 3-54**（Run No. 6）に高さごとの燃料被覆管温度の時間変化，**図 3-36**（Run No. 4），**図 3-44**（Run No. 5）及び**図 3-55**（Run No. 6）に入口圧力，高さごとの圧力及び差圧の時間変化，並びに**図 3-37**（Run No. 4），**図 3-45**（Run No. 5）及び**図 3-56**（Run No. 6）に高さごとの水温（非加熱側チャンネルボックス内面）及び入口流速の時間変化の測定結果を示す．また，**図 3-38**～**図 3-40**（Run No. 4），**図 3-46**～**図 3-51**（Run No. 5）及び**図 3-57**～**図 3-60**（Run No. 6）に，ボイドの発生が WMS にて確認された断面についてその格子点ごとのボイド率の時間変化の測定結果を示す．さらに，**図 3-41**（Run No. 4），**図 3-52**（Run No. 5）及び**図 3-61**（Run No. 6）にボイド挙動の可視化画像を示す．

ボイドの初生から消失に至るまでのボイド挙動は次のように整理できる．

1) WMS にて観測されたボイドの軸方向の発生領域又は伝播領域は，加熱部下端からの高さで，Run No. 4 が 0.25 m（第 3 段 WMS）～0.45 m（第 6 段 WMS），Run No. 5 が 0.05 m（第 2 段 WMS）～0.60 m（第 7 段 WMS），Run No. 6 では 0.15 m（第 3 段 WMS）～0.45 m（第 6 段 WMS）であった．

2) 横方向の発生領域又は伝播領域については，Run No.4 では加熱サブチャンネルタイプ 3 までの領域に発生範囲がほぼ限定された．一方，Run No. 5 では，非加熱サブチャンネルタイプ 2 にはボイドが到達しなかったものの，その 1 列分内側の非加熱サブチャンネルタイプ 1 までボイドが横方向伝播した．さらに Run No. 6 では，反対側チャンネルボックスに接する非加熱サブチャンネルタイプ 2 にまでボイドが横方向伝播していた．

3) Run No. 4 の一連の可視化画像からは，時刻 0.45 秒から時刻 0.65 秒までの間のボイド挙動が把握でき，有効加熱長の中央高さの第 4 段 WMS 付近から有効加熱長の上端（第 6 段 WMS）のわずかに下までの領域内でのボイドの挙動が見て取れる．例えば，入口流速 0.3 m/s の Run No. 1～No. 3 までと異なり，下流側の有効加熱長の上端付近でボイドが初生し，時刻が進むにつれ上流側にボイド初生領域が拡大して行く様子が見られた．WMS ではボイドを検出していないが，時刻 0.45 秒で第 4～第 5WMS の間にボイドが存在するようにも見える．また，サブチャンネル流路内からボイドが横方向に拡がって加熱サブチャンネル内にわたって横方向に連結した巨大気泡が形成される様子（時刻 0.50 秒～0.60 秒）は同様であったが，巨大気泡の横方向への拡大範囲は加熱サブチャンネルタイプ 3 の領域にまでである．一方，ボイドの凝縮に関し

ては，時刻 0.60 秒から 0.65 秒にかけて，下方及び上方から有効加熱長の上部（第 5 段 WMS 付近）に凝縮面が進展して行く様子が見て取れる．

4) Run No. 5 の一連の可視化画像からは，時刻 0.40 秒から時刻 0.65 秒までの間のボイド挙動が把握でき，有効加熱長下端の第 2 段 WMS 付近から有効加熱長の上端（第 6 段 WMS）のわずかに下までの領域内でのボイドの挙動が見て取れる．例えば，入口流速 0.3 m/s の Run No. 1～No. 3 までと異なり，下流側の有効加熱長の上端付近でボイドが初生する点が見られたのは Run No. 4 と同様である．ただし，ほぼ同時に第 4 段 WMS までボイドが初生している様子も見られた．また，サブチャンネル流路内からボイドが横方向に拡がって加熱サブチャンネル内にわたって横方向に連結した巨大気泡が形成される様子（時刻 0.45 秒～0.65 秒）は他のケースと同様である．軸方向には巨大気泡の領域とボイド率の小さい領域とが交番的に流れる様子（時刻 0.40 秒～0.45 秒）も見られた．巨大気泡の横方向への拡大範囲は非加熱サブチャンネルタイプ 1 の領域にまで及んでいる．一方，ボイドの凝縮に関しては，時刻 0.60 秒から 0.65 秒にかけて，下方及び上方から有効加熱長の上部（第 4 段から第 5 段 WMS の間の領域）に凝縮面が進展して行く様子が見て取れる．

5) Run No. 6 の一連の可視化画像からは，時刻 0.35 秒から時刻 0.70 秒までの間のボイド挙動が把握でき，有効加熱長下端の第 2 段 WMS 付近から有効加熱長の上端（第 6 段 WMS）のわずかに下までの領域内でのボイドの挙動が見て取れる．例えば，Run No. 5 と同様に下流側の有効加熱長の上端付近でボイドが初生するが，ほぼ同時に第 4 段 WMS までボイドが初生している様子が見られた．また，サブチャンネル流路内からボイドが横方向に拡がって加熱サブチャンネル内にわたって横方向に連結した巨大気泡が形成される様子（時刻 0.45 秒～0.65 秒）は他のケースと同様である．軸方向には巨大気泡の領域とボイド率の小さい領域とが交番的に流れる様子（時刻 0.35 秒～0.45 秒）も見られた．巨大気泡の横方向への拡大範囲は非加熱サブチャンネルタイプ 2 の領域にまで及び，一連の実験ケースの中では最も横方向伝播の顕著な実験ケースの一つとなっている．一方，ボイドの凝縮に関しては，時刻 0.55 秒から 0.65 秒にかけて，主に下方から有効加熱長の上部（第 5 段 WMS 付近の領域）に凝縮面が進展して行く様子が見て取れる．

また，Run No. 6 において凝縮誘起水撃と考えられる圧力パルスが生じている．Run No. 5 においても圧力のパルス的増減が生じている．凝縮誘起水撃については，実験データの整理に係る **3.2.2.5** にて検討する．

3.1.3.3. 冷却水温度 60ºC，冷却水流速 0.3 m/s の 3 ケースの基本測定結果

表 3 の実験条件マトリックス中の Run No. 7～Run No. 9 の実験結果を示す．

図 3-62（Run No. 7），**図 3-67**（Run No. 8）及び**図 3-76**（Run No. 9）にロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化，**図 3-63**（Run No. 7），**図 3-68**（Run No. 8）及び**図 3-77**（Run No.

9）に高さごとの燃料被覆管温度の時間変化，**図 3-64**（Run No. 7），**図 3-69**（Run No. 8）及び**図 3-78**（Run No. 9）に入口圧力，高さごとの圧力及び差圧の時間変化，並びに**図 3-65**（Run No. 7），**図 3-70**（Run No. 8）及び**図 3-79**（Run No. 9）に高さごとの水温（非加熱側チャンネルボックス内面）及び入口流速の時間変化の測定結果を示す．また，**図 3-71**～**図 3-74**（Run No. 8）及び**図 3-80**～**図 3-84**（Run No. 9）に，ボイドの発生が WMS にて確認された断面についてその格子点ごとのボイド率の時間変化の測定結果を示す．Run No. 7 については，WMS ではボイドの発生を検出していない．さらに，**図 3-66**（Run No. 7），**図 3-75**（Run No. 8）及び**図 3-85**（Run No. 9）にボイド挙動の可視化画像を示す．

ボイドの初生から消失に至るまでのボイド挙動は次のように整理できる．

1) Run No. 7 では WMS でボイドは検出されなかった．一方，Run No. 8 及び Run No. 9 ではボイドが検出された．WMS にて観測されたボイドの軸方向の発生領域又は伝播領域は，加熱部下端からの高さで，Run No. 8 が 0.15 m（第 3 段 WMS）～0.45 m（第 6 段 WMS），Run No. 6 では 0.15 m（第 3 段 WMS）～0.60 m（第 7 段 WMS）であった．

2) 横方向の発生領域又は伝播領域については，Run No. 8 では，加熱サブチャンネルタイプ 3 までの範囲にとどまり，非加熱サブチャンネルにはボイドが到達しなかった．一方 Run No. 9 では非加熱サブチャンネルタイプ 1 にまでボイドが横方向伝播し，ごく一部（1 点のみ）ではあるが，反対側チャンネルボックスに接する非加熱サブチャンネルタイプ 2 にもボイドが横方向伝播していた．

3) WMS ではボイドの発生が検出されなかったが，Run No. 7 の一連の可視化画像から，出力急減後の時刻 0.50 秒から時刻 0.55 秒までの間のボイド挙動が把握できる．同画像からは，有効加熱長の中央高さの第 4 段 WMS から 0.10 m 上方の第 5 段 WMS までの狭い軸方向領域で，加熱サブチャンネルタイプ 1（時刻 0.55 秒では加熱サブチャンネルタイプ 2 も含まれるかも知れない）内でのボイドの挙動が見て取れる．ただし，ボイドは個々のサブチャンネル内に偏在しており，サブチャンネルを跨がる巨大気泡にまでは発達していない様子である．また軸方向のボイド分布については，この実験ケースにおいても，ボイド率の高い領域とボイド率の小さい領域とが交番的に流れる様子（時刻 0.50 秒）が観測されている．

4) Run No. 8 の一連の可視化画像からは，時刻 0.45 秒から時刻 0.70 秒までの間のボイド挙動が把握でき，有効加熱長下端の第 2 段 WMS 付近から有効加熱長の上端（第 6 段 WMS）のわずかに下までの領域内でのボイドの挙動が見て取れる．例えば，ボイドの初生が下流側の有効加熱長の上端付近から始まり，ほぼ同時に第 4 段 WMS までの範囲でボイドが初生している．サブチャンネル流路内からボイドが横方向に拡がって加熱サブチャンネル内にわたって横方向に連結した巨大気泡が形成される様子（時刻 0.50 秒～0.70 秒）は他のケースと同様である．なお，このケースでは，時刻 0.50 秒から 0.70 秒にかけて，第 2－第 3WMS 間の領域から第 5WMS 付近にまで巨大気泡

が 0.1 m/s 程度の流速で上昇する様子が確認できる．軸方向には，入口温度 40ºC のときに見られた巨大気泡の領域とボイド率の小さい領域とが交番的に流れる流況というよりは，スラグ流的なテイラ気泡が発達する様子（時刻 0.45 秒～0.50 秒）が見られた．巨大気泡の横方向への拡大範囲は加熱サブチャンネルタイプ 1 の領域にとどまっている．一方，ボイドの凝縮に関しては，時刻 0.65 秒から 0.70 秒にかけて，下方及び上方から有効加熱長の中央部から上部の領域（第 4 段から第 5 段 WMS の間の領域）に凝縮面が進展して行く様子が見て取れる．

5) Run No. 9 の一連の可視化画像からは，時刻 0.40 秒から時刻 0.70 秒までの間のボイド挙動が把握でき，有効加熱長下端の第 2 段 WMS 付近から有効加熱長の上端（第 6 段 WMS）のわずかに下までの領域内でのボイドの挙動が見て取れる．例えば，Run No. 8 と同様に下流側の有効加熱長の上端付近でボイドが初生するが，ほぼ同時に第 4 段 WMS までボイドが初生している様子が見られた．また，加熱サブチャンネルの各流路内からボイドが横方向に拡がって非加熱サブチャンネルに至るまで横方向伝播する様子，及び形成された横方向に連結した巨大気泡が上方に流れる様子（時刻 0.45 秒～0.70 秒）がはっきりと示されている．軸方向にはスラグ流的なテイラ気泡が発達する様子（時刻 0.40 秒～0.45 秒）も見られた．巨大気泡の横方向への拡大範囲は非加熱サブチャンネルタイプ 2 の領域にまで及び，一連の実験ケースの中では最も横方向伝播の顕著な実験ケースの一つとなっている．一方，ボイドの凝縮に関しては，下方及び上方から有効加熱長の中央部の領域（第 3 段から第 5 段 WMS の間の領域）に凝縮面が進展して行く様子が見て取れる．

なお，この 3 ケースにおいては，Run No. 9 で若干の圧力のパルス的挙動が観測されたが，他の 2 ケースでは有意な圧力の変化は生じてなかった．

3.1.3.4. 冷却水温度 60ºC，冷却水流速 0.5 m/s の 3 ケースの基本測定結果

表 3 の実験条件マトリックス中の Run No. 10～Run No. 12 の実験結果を示す．

図 3-86（Run No. 10），**図 3-94**（Run No. 11）及び**図 3-104**（Run No. 12）にロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化，**図 3-87**（Run No. 10），**図 3-95**（Run No. 11）及び**図 3-105**（Run No. 12）に高さごとの燃料被覆管温度の時間変化，**図 3-88**（Run No. 10），**図 3-96**（Run No. 11）及び**図 3-106**（Run No. 12）に入口圧力，高さごとの圧力及び差圧の時間変化，並びに**図 3-89**（Run No. 10），**図 3-97**（Run No. 11）及び**図 3-107**（Run No. 12）に高さごとの水温（非加熱側チャンネルボックス内面）及び入口流速の時間変化の測定結果を示す．また，**図 3-90**～**図 3-92**（Run No. 10），**図 3-98**～**図 3-102**（Run No. 11）及び**図 3-108**～**図 3-112**（Run No. 12）に，ボイドの発生が WMS にて確認された断面についてその格子点ごとのボイド率の時間変化の測定結果を示す．さらに，**図 3-93**（Run No. 10），**図 3-103**（Run No. 11）及び**図 3-113**（Run No. 12）にボイド挙動の可視化画像を示す．

ボイドの初生から消失に至るまでのボイド挙動は次のように整理できる．

1) WMS にて観測されたボイドの軸方向の発生領域又は伝播領域は，加熱部下端からの高さで，Run No. 10 が 0.20 m（第 4 段 WMS）～0.45 m（第 6 段 WMS），Run No. 11 及び Run No. 12 がともに 0.15 m（第 3 段 WMS）～0.60 m（第 7 段 WMS）であった．

2) 横方向の発生領域又は伝播領域については，Run No. 10 では，一部（2 点のみ）を除いて概ね加熱サブチャンネルタイプ 3 までの拡がりにとどまる状況であった．Run No. 11 では非加熱サブチャンネルタイプ 1 にまでボイドが横方向伝播し，ごく一部（1 点のみ）ではあるが，反対側チャンネルボックスに接する非加熱サブチャンネルタイプ 2 にもボイドが伝播していた．Run No. 12 では非加熱サブチャンネルタイプ 2 までボイドが横方向伝播していた．

3) Run No. 10 の一連の可視化画像から，時刻 0.45 秒から時刻 0.65 秒までの間のボイド挙動が把握できる．同画像からは，有効加熱長の中央高さの第 4 段 WMS から有効加熱長の上端（第 6 段 WMS）のわずかに下までの領域内でのボイドの挙動が見て取れる．例えば，時刻 0.45 秒から 0.50 秒の間，ボイドは個々のサブチャンネル内に偏在し，その横方向の拡がりも加熱サブチャンネル 2 までの範囲に限られる．時刻 0.50 秒を過ぎるとサブチャンネルを跨ぐ巨大気泡が形成され，加熱サブチャンネルタイプ 3 内にもボイドが拡がる．なお，可視化画像では確認できないが，WMS による測定結果によると，時刻 0.60 秒以降に非加熱サブチャンネルタイプ 1 のごく一部（2 点のみ）にボイドが横方向伝播している．また軸方向のボイド分布については，ボイドが単一のサブチャンネルに局在する場合，サブチャンネルを跨ぐ巨大気泡に成長する場合のどちらにおいても，テイラ気泡状のボイド塊が形成されている．なお，ボイドの凝縮に関しては明瞭ではないが，時刻 0.55 秒から 0.65 秒にかけて，主に下方から有効加熱長の上部（第 5 段 WMS 付近の領域）に向けて気泡塊の移動とともに凝縮面が進展して行く様子が見て取れる．

4) Run No. 11 の一連の可視化画像からは，時刻 0.40 秒から時刻 0.70 秒までの間のボイド挙動が把握でき，有効加熱長下部領域の第 3 段 WMS 付近から有効加熱長の上端（第 6 段 WMS）のわずかに下までの領域内でのボイドの挙動が見て取れる．例えば，ボイドの初生が下流側の有効加熱長の上端付近から始まり，ほぼ同時に第 4 段 WMS 及びその上流までの範囲でボイドが初生している．加熱サブチャンネル内にわたって横方向に連結した巨大気泡の形成は時刻 0.50 秒頃に始まり，その結果として時刻 0.55 秒には非加熱サブチャンネルタイプ 1 の領域までボイドが横方向伝播している．一方，ボイドの凝縮に関しては，時刻 0.55 秒から 0.70 秒にかけて，主に下方及び上方から有効加熱長の上部の第 5 段 WMS 付近の領域に，巨大気泡塊の移動とともに凝縮面が進展して行く様子が見て取れる．

5) Run No. 12 の一連の可視化画像からは，時刻 0.35 秒から時刻 0.70 秒までの間のボイド挙動が把握でき，有効加熱長下部領域の第 3 段 WMS 付近から有効加熱長の上端（第 6 段 WMS）のわずかに下までの領域内でのボイドの挙動が見て取れる．例えば，

有効加熱長の上端付近から第 4 段 WMS まで, ほぼ同時にボイドが初生する様子が見られた．また，加熱サブチャンネル内にわたって横方向に連結した巨大気泡は時刻 0.45 までに形成され，時刻 0.50 秒までには非加熱サブチャンネルタイプ 1 の領域まで横方向伝播する．画像からは明確ではないが，その後時刻 0.60 秒付近で第 6 段 WMS にてチャンネルボックスに隣接する非加熱サブチャンネルタイプ 2 までボイドの横方向伝播が及んでいる．この実験ケースも，一連のケースの中では最も横方向伝播の顕著なケースの一つとなっている. 一方, ボイドの凝縮に関しては, 0.60 秒以降, 主に下方から気泡塊の移動とともに上方に凝縮面が進展して行く様子が見て取れる．

また，Run No. 12 において凝縮誘起水撃と考えられる圧力パルスが生じている．Run No. 11 においても圧力のパルス的増減が生じている．凝縮誘起水撃については，実験データの整理に係る **3.2.2.5** にて検討する．

3.1.3.5. 詳細流動測定結果

a) 実験ケース

表 3 の実験条件マトリックス中の Run No. 1～Run No. 3 のそれぞれと同一の実験条件として 3 ケースの実験ケースを選定し, PIV 及び LIF により液相の流速場及び温度場の測定を実施した．それぞれのケースを Run No. の順にケース A, B, C とする．

b) PIV による液相流速測定結果

PIV による液相流速測定では，現象の解明及び CFD 解析の妥当性確認に非常に有用なデータが得られている．以下，その一部を説明し，横方向及び軸方向の流速場の発達に係る特徴について示す.

PIV の測定を実施した 3 ケースの代表としてケース B（Run No. 2 相当）の結果について，特徴的な流況を呈するボイド初生期, 非加熱部へのボイド横流れ期, 逆流期の 3 期間に分けて示す．なお，以下に示す PIV 測定結果は，いずれも第 5 段 WMS の下端からその 0.065 m 上流部（下方）までの範囲に対して，**図 3-3** の T5 のワイアに沿って横から鉛直面のレーザシートを照射し，同レーザシート上の液相流速場を**図 3-3** の左方向から見た画像として示したものである．各図には，左図に同一視野及び時刻の可視化画像，右図に PIV 測定結果が示される．右図の左側には 3 本のヒータロッドが鉛直に並んでおり，黒の縦縞の入らない右側の幅広い領域が非加熱領域を表す．流速はベクトルとして有向矢印で表されるが，補助的に右端の色スケールに応じた着色によってもその大きさが示される．

なお各図中には，液相流れにトレーサ粒子が輸送されることによる同粒子の数密度のむらにより，流速が測定されない黒い領域（以下“**暗部**”という.）が点在したり大きな面積を占めたりする．この暗部については，それぞれの期間において特徴的な流れを表す場合があり，必要に応じて説明を加える．ただし，以下では暗部の境界近傍で複雑な液相速度場がみられる場合に暗部を気泡又は気泡塊と判定し，境界付近で特に特徴的な液相速度場の相

違がみとめられない場合には液相流中のトレーサ粒子数密度の揺らぎと判定する．

- **ボイド初生期**

図 3-114 から**図 3-119** は，ボイドが初生しボイド率が高まった時刻 0.45 秒から時刻 0.5 秒までの時間領域について，0.01 秒間隔で液相流速場の変化の過程を示している．

この中で，2 列のヒータロッドの間に見える速度場中の暗部領域は蒸気泡が占める領域に相応に対応しているものと思われる．一方，右側の非加熱領域には蒸気泡がないと考えらえることから[9]，暗部は液相中の粒子密度のむらによるものである可能性が高いと考えられる．

6 枚の図では，ボイド率が増加した結果，加熱部から非加熱部に液相が流れる様子が示されている．非加熱部の平均的な流速は 0.7～1.0 m/s 程度であり，入口流速 0.3 m/s の 2.3～3.3 倍と流速が増加している．また，特に流速の速い黄色ベクトルの領域（1.5m/s 近く）では 5 倍に達している．これは，加熱部でボイドが発生しボイド率が増加したために，同部で排除された液相が非加熱部に流れ込んだ結果と考えられる．また，非加熱部の液相流速場は全体として流速の大きさが揺動する傾向があり，例えば，**図 3-114** では高流速，**図 3-115**～**図 3-117** では低流速，**図 3-118** 及び**図 3-119** では再び高流速と，流速の大きさが増減を繰り返す様子が示されている．

- **非加熱部へのボイド横流れ期**

Run No. 2 の可視化画像を表す**図 3-23** に示されるように時刻 0.55 秒以降は第 4 段 WMS と第 5 弾 WMS との間で非加熱領域にボイドが横方向伝播している．この時期の可視化画像及び PIV による液相流速場を**図 3-120**～**図 3-123** の 4 枚の図に示す．

4 枚の図により，気泡塊（暗部）が非加熱部に侵入する際の流況及び上流側から気泡塊を追って非加熱部に流入する液相の流況の様子が把握できる．特に，大きな気泡塊の上部で液相が加速される様子，界面付近及び気泡塊の後流側で液相が激しく乱される様子，これらにより気泡が変形する様子などが示されている．

- **逆流期**

Run No. 2 の可視化画像を表す**図 3-23** によると，時刻 0.65 秒から 0.70 秒にかけて第 5 段 WMS を上方から凝縮面が通過している．この時刻領域の PIV 測定結果として，**図 3-124** から**図 3-128** に液相流れが上昇流から下降流に転じる状況及び下降流中でボイド率が減少する様子を示す．

時刻 0.63 秒（**図 3-124**）では，非加熱部に大きな気泡塊が存在し，複雑な流れとなっているが，加熱領域も非加熱領域も流れは概ね上昇流となっている．非加熱領域には大きな気泡塊と推定される広い暗部が存在する．時刻 0.64 秒（**図 3-125**）では，非加熱領域が下降流に転じ始め，これとともに気泡塊と推測される領域の割合が大きく減少するが，加熱領域では，気泡塊が残るためか，上昇流と下降流とが混在する複雑な流れを呈している．時刻 0.65 秒（**図 3-126**）では，非加熱領域で下降流が発達して下向き流速が増加するとともに，気泡塊

[9] 時刻 0.45 秒から時刻 0.5 秒までの時間範囲では，非加熱サブチャンネルタイプ 1，2 のどちらの領域においても，5 段目 WMS でボイドはほとんど検出されていない．

がほぼ消滅する．一方，加熱領域でも下降流が優越し始めるが，気泡塊が残っているためか複雑な流況を呈している．時刻 0.66 秒（**図 3-127**）及び時刻 0.67 秒（**図 3-128**）では，非加熱領域の下降流が一層発達するが，加熱領域では気泡塊の影響のためか，上昇流と下降流とか混在する複雑な流況を呈している．

因みに，第 4 段及び第 5 段の WMS の測定結果によると，第 5 段 WMS では時刻 0.60 秒までにはボイドが消失し，一方，第 4 段 WMS では時刻 0.70 秒までボイドが残っている．この状況が PIV による液相流速場の測定によっても見て取ることができている．

なお，有効加熱長上部からの逆流に伴う凝縮先端面と入口部から上昇する液相による凝縮先端面が衝突することによって凝縮誘起水撃現象が生じる場合がある．**図 3-16** に示したように，ケース B と同じ実験条件の Run No. 2 では時刻 0.70 秒付近の時刻で凝縮誘起と推測される圧力パルスが発生している．

c) LIF による液相温度測定結果

LIF（レーザ誘起蛍光法，Laser-Induced Fluorescence）による液相温度の測定は，**表 3** の実験条件マトリックス中の 3 ケース（ケース A，B 及び C）[10] のすべてを対象として実施し，実験データを取得した．

しかし，以下に示す理由により，今年度は十分に有効なデータが取得できていない．次年度の実験に向けて課題を解決し，有効なデータの取得を図りたい．

ただし，これは提案した技術 [11] が無効であったこと，基本技術に係る事項で LIF の適用に開発要素が残っていたなどの根本的な不確実要素があったことなどを意味するものではない．LIF は最新の計測技術ではあるものの，後述する 2 色 LIF 法を含めて既に 2 相流場を含む流れ場の詳細な温度計測に多くの適用例 [12] があり，計測技術として基本的に確立しているといってよい．このため，以下に説明するように複雑な形状及び 2 相流流れ場に対する計測法の工夫などが課題として残されているが，これらの課題の解決により有効な計測が可能と考えている．

まず，測定方法を概説し，続いて測定の過程で見出された課題を示す．

- **測定方法**

LIF 法としては，2 色 LIF 法を用いている．

LIF は，レーザによる励起光をある種のトレーサ粒子に照射し，そのエネルギを吸収したトレーサ粒子が蛍光を発する際の輝度が温度に相関を持つ特性を利用して，その光度を測定し，さらに光度を温度に変換することで温度情報を取得する手法である．2 相流を含む流

---

[10] Run No. 1～Run No. 3 のそれぞれと同一の実験条件とした

[11] 原子力規制庁の一般競争入札（総合落札方式）“平成 27 年度原子力施設等防災対策等委託費（事故時ボイド挙動解明試験）事業”に係る公募において提出した当所からの提案書に記載した LIF に係る提案

[12] http://www.kz.tsukuba.ac.jp/~sakakiba/lif.html ； P. Lavieille, *et. al.*, “*Evaporating and combusting droplet temperature measurements using two-color laser-induced fluorescence*,” Experiments in Fluids, 31 (2001), pp. 44-55. など．

れ場における液相場の詳細な温度分布の測定に有効とされている．ただし，対象とする液相温度領域で優れた感度をもつトレーサ粒子を選ばなくてはならない．このようなトレーサ粒子として，緑色レーザの励起の下で赤色の蛍光を発するローダミン B を塗布した粒子（以下“**ローダミン B 粒子**”という.）を選定している．

しかし，今回の実験装置のように 5×5 の模擬燃料棒及びチャンネルボックスからなる複雑な幾何形状の下で，極めて複雑で入り組んだ反射面となる界面形状をもつ気泡塊を伴い，非一様な密度場，すなわち屈折場をもつ 2 相流が流れる模擬燃料棒間の 3 mm 程度の狭いギャップの間にシートレーザを通さなければならないことから，位置によるレーザ照度のむら，レーザ光及びトレーサからの蛍光の反射・屈折・散乱などによってローダミン B 粒子の蛍光光度が不測の影響を受けた．このため，そのままでは，補正の困難な計測上の不確かさが蛍光の温度感度を超えて大きくなってしまうことが判明した．

このため次の工夫を加えた．

すなわち，蛍光輝度に温度による感度のないローダミン 110 を塗布した粒子（以下“**ローダミン 110 粒子**”という.）を参照粒子としてローダミン B 粒子と一緒に液相中に流し，ローダミン B 粒子の蛍光のみを検出するフィルタなどを前置したカメラ及びローダミン 110 粒子の蛍光のみを検出するフィルタなどを前置したカメラの 2 台のカメラを測定に用いて同時計測する 2 色 LIF 法を採用することとした．この手法により，この 2 種のトレーサ粒子が発する蛍光の光度の比を任意の位置で調べることで，原理的には，ローダミン B 粒子の本来の輝度を評価することができる．

図 3-129 に 2 色 LIF 法による取得画像を示す．左がローダミン B 粒子の蛍光の光度，右がローダミン 110 粒子の蛍光の光度を横方向からの画像として捉えたものである．なお，紺色でマスクした 3 列の部分はヒータロッドによる陰に相当する．

2 色 LIF 法は，一例として示した**図 3-129** のような画像情報から，ローダミン 110 粒子の光度をローダミン B 粒子の光度で除した光度比を画面内の各所で算出し，温度分布に変換する方法であるが，原理的に除去できるはずの照射方向に由来する照度むら [13] の影響が残るなどの問題が確認された．他にもいくつか問題があり，次項に課題として整理する．

- **課題**

課題としては次があり，次年度に向けて更なる改善を図りたい．

- ➢ 二つのカメラの位置ずれ ← 数ピクセル分しかないことを確認し，位置ずれ補正を行った．（完了）
- ➢ 光度比に残る照度むらの補正 ← 等温条件で光度比を算出し，光度比を断面上の位置（2 次元）の関数として最小 2 乗によりマッピングして照度むらに関する光度比関数を作成し，以降の光度比測定値に対し，この関数を用いて逆補正をかけた．（等温条件での逆補正後の光度比の分布を示す画像を**図 3-130** に示す．なお，**図 3-130** の撮像範囲及び向きはと**図 3-129** 同じ）ただし，照度むらによる補正の要否

[13] 模擬燃料集合体の右側からレーザを照射する場合，集合体の右端が明るく，左端が暗くなる

を含め，更なる検討が必要．（未完）

- 光度比の温度感度自体が小さく，不確かさの影響を受けやすい　←　温度情報の抽出箇所・平均化に係る手法，不確かさの低減手法などを更に高度化する．（未完）

3.1.3.6.　スペーサの追設後の基本測定結果

- **スペーサ追設理由及び追設スペーサの概要**

実験装置内に設置した試験部は，スペーサによる沸騰挙動への影響のない状態におけるボイド挙動を測定するために，**図 2-4** に示されるように有効発熱部の上下端から離れた高さ位置に肉厚及び高さが 0.4，30 mm[14] の二つの丸セルスペーサを設置していた．しかし，ヒータロッドが直接通電加熱であったため，すべて同方向に電流が流れる設計が不可避となり，かつ大電流を流すことで必要な発熱量が得られるものであったことから，パルス的な発熱の負荷時に最大でヒータロッド間の間隔が 1.2 mm 弱 [15] 縮まる瞬時ロッド曲がりが生じることとなった．

これにより，最大出力レベルが最大となる Run No. 3 において，最大出力の負荷時にヒータロッド同士のロッド間ギャップが 3.1 mm から 1.91 mm に，4 本のヒータロッドに囲まれた加熱サブチャンネルタイプ 1 の流路面積が 105.97 mm^2 から 73.31 mm^2 に変化する．

このように瞬時ロッド曲がりによる形状の変化量が少なくないことから，ボイド挙動に対する瞬時ロッド曲がりの影響を把握する必要が生じた．また，実機燃料では，スペーサが約 0.5 m 間隔で設置されていることから，実機で生じる現象を網羅する観点から，ボイド挙動へのスペーサの影響の把握も重要となる．

このため，有効加熱部の軸方向加熱長さ 0.45 m の中央高さよりやや上流側（下方）の第 3 段 WMS と第 4 段 WMS の中間高さ位置に丸セルスペーサを追設して瞬時ロッド曲がりを抑制し，ボイド挙動への影響を把握することとした．なお，ボイド挙動に及ぼす影響を可能な限り小さくするため，追設した丸セルスペーサの肉厚，高さを 0.4，10 mm とし，高さを 1/3 に縮めた．

- **実験結果**

表 3 の実験条件マトリックス中の Run No. 2 記載の実験条件と同一の条件にてスペーサ追設後の実験を実施した．出力，流量及び冷却水温度に対する実験条件の等しい Run No. 2 の実験結果，**図 3-14**～**図 3-23** と異なる挙動が観測されたパラメータに関する実験結果を**図 3-131**～**図 3-137** に示す．また，**図 3-138** 及び**図 3-139** に PIV による液相流速測定結果を示す．

3 段目と 4 段目の WMS の中間高さ位置に丸セルスペーサを追設したことで，ボイド挙動

---

[14] 9×9 燃料（A 型）燃料に装荷される丸セルスペーサの肉厚及び高さは約 0.5 及び 30 mm である．肉厚を 0.4 mm と 2 割ほど薄くしたのは，必要な強度を確保しつつも，有効加熱部内の流れへの影響を低減するためである．

[15] 最大出力レベルの最大値 1450 kW/m^2 を課す Run No. 3 で 1.19 mm 程度．時刻 0.5 秒で加熱が終わると同時に瞬時に元に戻り，曲がりがなくなる．

が有意に変化し，ボイドの発生及びボイド率の上昇が抑制された．詳細は後述するが，この結果，Run No. 2 で観測された圧力パルスが見られなくなるとともに，非加熱側チャンネルボックス内壁面に設置された温度計が計測した水温の変化も大きく抑制された．

ボイド挙動の変化については，スペーサの上流側の第 3 段 WMS を含め，第 4 段から第 6 段の WMS の範囲でボイド初生時刻の遅れなど，ボイド率が全般的に大きく低下するとともに，スペーサの影響が大きく現れた結果となった．その機構については **3.2.2.6** に詳細を説明することとして，ここでは実験結果を WMS の高さレベルごとに説明する．

第 2 段 WMS においては，Run No. 2 では R5-T5（加熱サブチャンネルタイプ 1）及び R6-T5（加熱サブチャンネルタイプ 2）の二つのワイア交点でボイドが検出されたにもかかわらず，スペーサ追設後では観測されなかった．

追設スペーサの下端から 0.035 m 上流側（下方）に位置する第 3 段 WMS においては，**図 3-133**（スペーサ追設後）と**図 3-19**（Run No. 2）との比較により，ボイド初生時刻には差異が見られないが，スペーサ追設後のボイド率の増加量，ボイド発生の持続時間及びボイド発生を検出したワイア交点の数が減少している．

追設スペーサの上端から 0.035 m 下流側（上方）に位置する第 4 段 WMS においては，**図 3-134**（スペーサ追設後）と**図 3-20**（Run No. 2）との比較により，スペーサ追設後のボイド初生時刻に 0.15～0.2 秒もの顕著な遅れが生じるとともに，ボイド率，ボイド発生の持続時間，ボイド発生を検出したワイア交点数ともに顕著な減少がみとめられる．

第 5 段 WMS においても，**図 3-135**（スペーサ追設後）と**図 3-21**（Run No. 2）との比較により，スペーサ追設後のボイドの挙動に第 4 段 WMS ほど顕著ではないが，同様な傾向が現れている．

第 6 段 WMS においても，**図 3-136**（スペーサ追設後）と**図 3-22**（Run No. 2）との比較により，スペーサ追設後のボイドの挙動に第 5 段 WMS より更に相違が小さいが，概ね同様な傾向が現れている．なお，ボイド初生時刻については，スペーサ追設の前後でほとんど相違がなくなっており，一部のワイア交点ではスペーサ追設後の方が，初生時刻が早まる結果も生じている．

なお，可視化画像（**図 3-137**）では，残念ながら，ボイドの挙動が不鮮明であり明確ではない．

図 3-138 及び**図 3-139** に示す PIV による液相流速測定結果は，時刻 0.56 秒及び 0.65 秒の結果であるが，ともに非加熱領域での液相流速が遅く，加熱領域でのボイド発生量が少ないため，非加熱領域への液相流の流れ込みが少ないことを示している．また，時刻 0.65 秒の結果（**図 3-139**）では，非加熱領域の上端及び下端に気泡塊の存在に由来すると考えらえる液相流速の乱れが観測されているが，総じて非加熱領域へのボイドの流れ込み（横方向伝播）が小さい様子が見て取れる．

表 2　事故時ボイド挙動解明実験の実施に当たっての主な仕様

項目	内容	備考
装置構成	5 行 5 列の模擬燃料集合体（9 本の直接発熱ヒータロッド（軸方向分布：一様），16 本の非加熱ロッド）；冷却水循環ポンプ，直流電源，予熱器，凝縮器，実験部容器，配管，制御装置，計測器，データ取得装置などから構成される実験ループなど	
計測機器	高速度カメラ，ワイアメッシュボイド率計（複数段），液相の流速計（PIV）及び温度計（LIF），光ファイバ温度計，熱電対，圧力センサなど	
実験条件	圧力：大気圧 冷却水温度：常温～373K 冷却水質量流束： 0～600 kg/m^2-s 熱流束： 最大3 MW/m^2	
作動流体	水－蒸気，水は純水又は純粋相当水	
実験 パラメータ	• 0.5秒程度の最大出力持続時間のパルス出力を与えて事故時の急速加熱時の熱流束を模擬．出力の最大値はそれぞれの実験条件でOSV（Onset of Significant Void）以降でボイドの横方向拡がりに係る限界条件が効率的に評価できる値に設定 • 加熱部入口の冷却水流速：0.3 m/s～0.5 m/sの範囲で2段階 • 冷却水温度：293K～353Kの範囲で2段階以上	熱流束の最大値及びその持続時間については，制御棒落下事故時に想定される条件の範囲内で設定するものとする．詳細は規制庁担当者と調整の上決定すること．
計測項目	• 3 次 元 ボイド率分布 • 伝熱面温度 • 可視化画像（高速度カメラを使用） • 液相場の流速及び温度の分布	伝熱面温度は，模擬燃料集合体内の流路を代表する中央領域，外周領域，コーナ領域のそれぞれで，軸方向の3か所計測．

表 3　実験条件マトリックス

Run No.	Case	初期水温 ℃	入口流束 m/s	熱流束　kW/m^2 （電気出力　kW）	PIV, LIF 選出
1	1	40	0.3	1100（198）	A
2	1	40	0.3	1325（238）	B
3	1	40	0.3	1450（261）	C
4	2	40	0.5	1205（217）	
5	2	40	0.5	1320（237）	
6	2	40	0.5	1435（258）	
7	3	60	0.3	805（145）	
8	3	60	0.3	895（161）	
9	3	60	0.3	1005（181）	
10	4	60	0.5	900（162）	
11	4	60	0.5	995（179）	
12	4	60	0.5	1115（200）	(D)

表 4　WMS の軸方向位置

WMS の段数（下から）	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
加熱部下端からの高さ(m)	-0.100	0.050	0.150	0.250	0.350	0.450	0.600	0.800

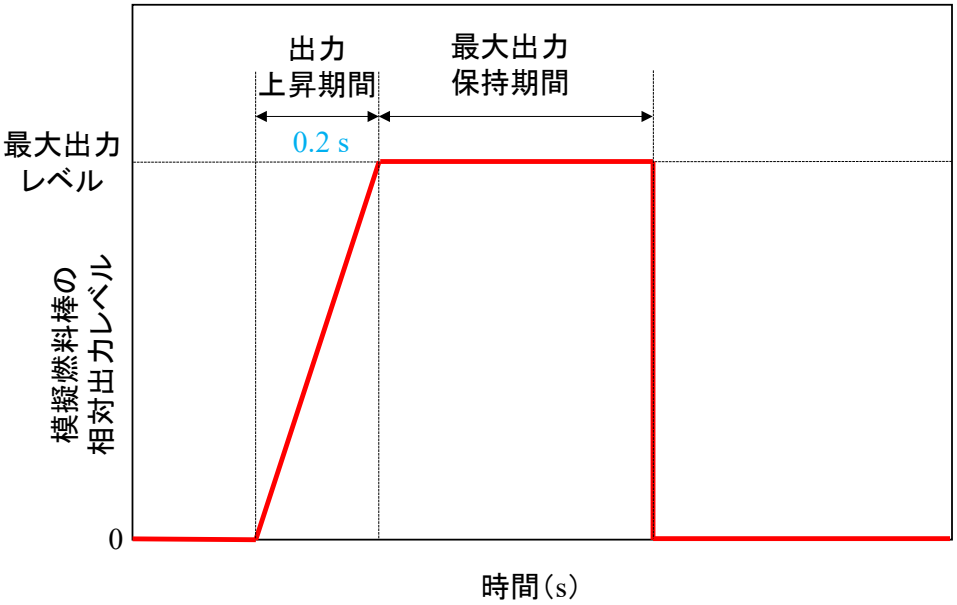


図 3-1　設定出力の時間応答曲線

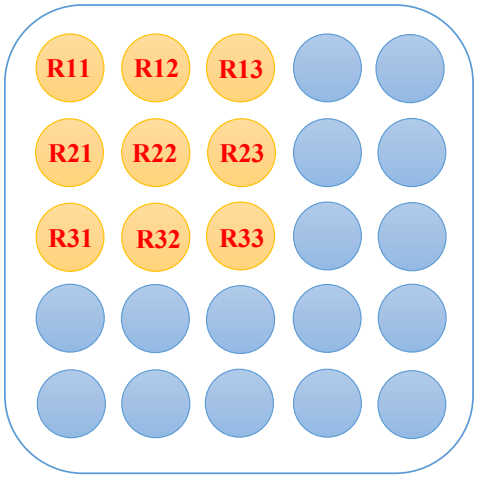


図 3-2　ロッド番号の割振り

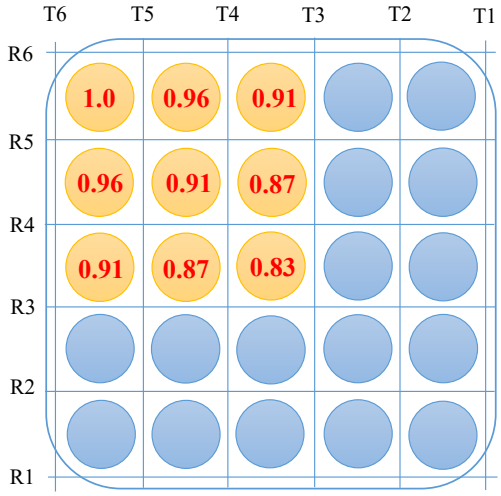


図 3-3　模擬燃料棒の局所出力係数及び WMS の識別番号

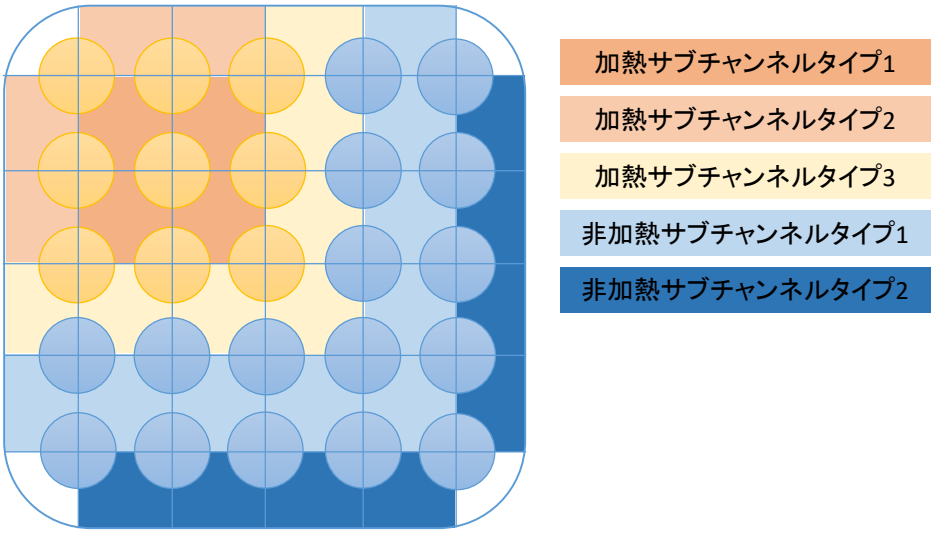


図 3-4　サブチャンネルのタイプ分け

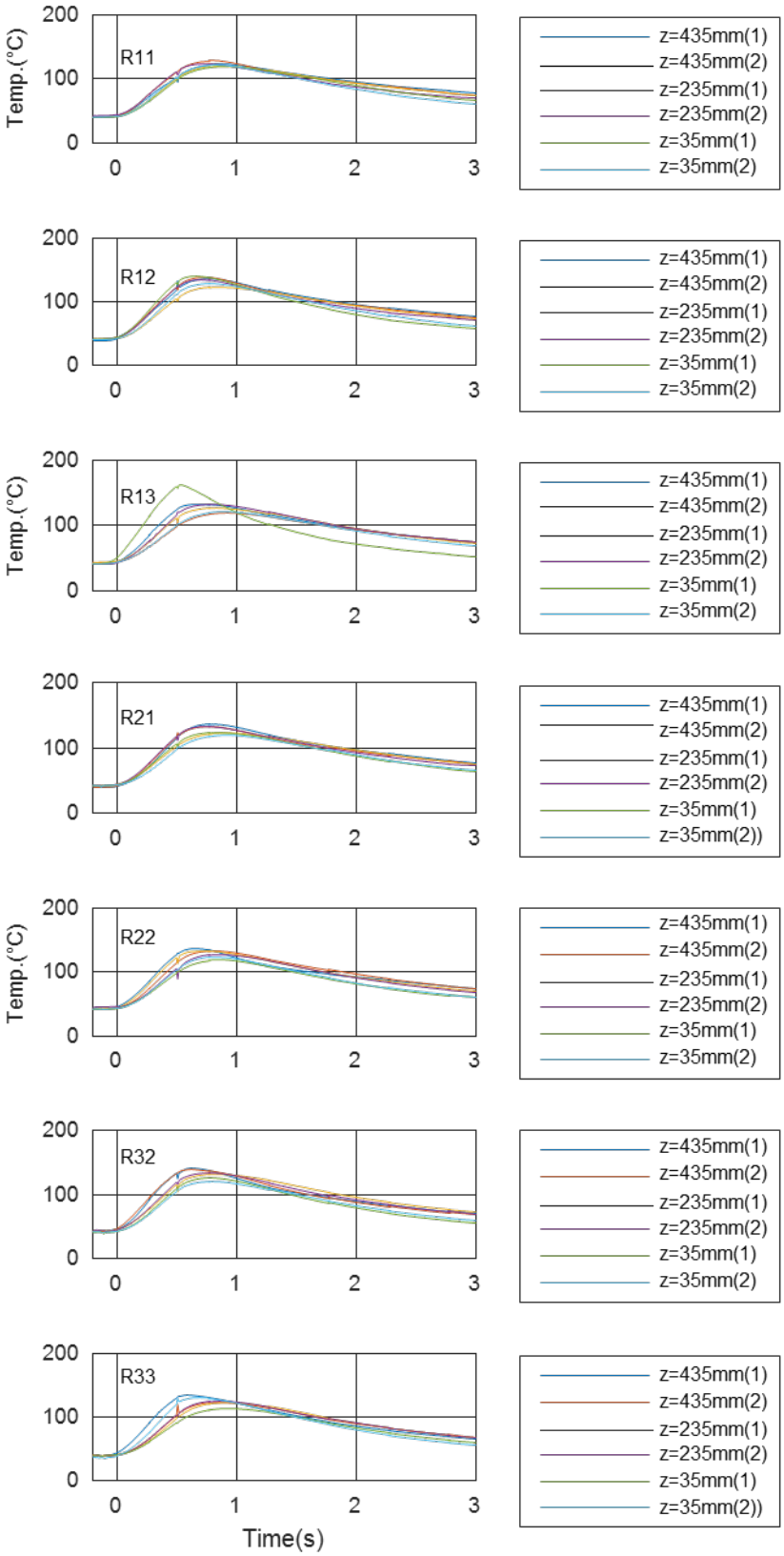


図 3-5　ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化（Run No.1）

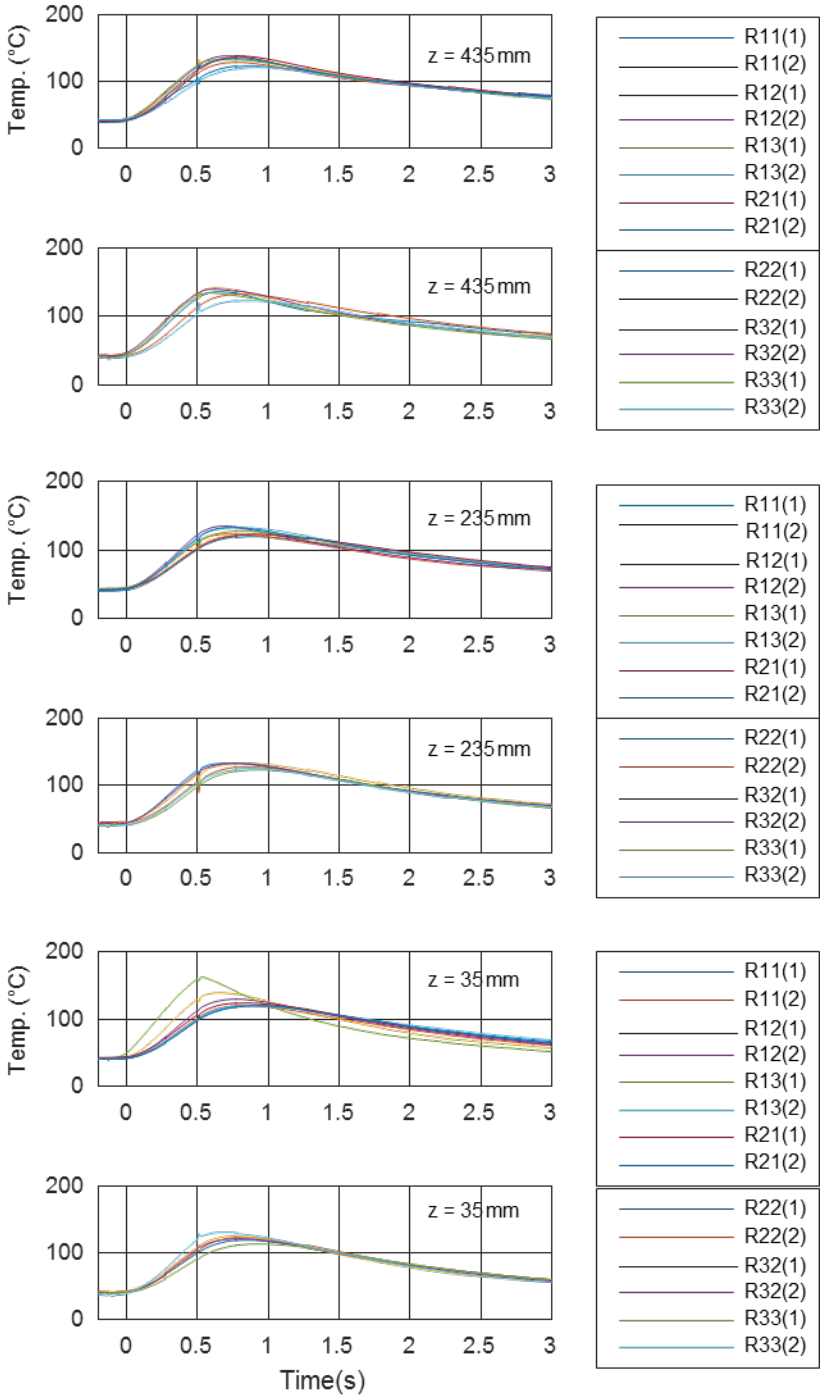


図 3-6　高さごとの燃料被覆管温度の時間変化（Run No.1）

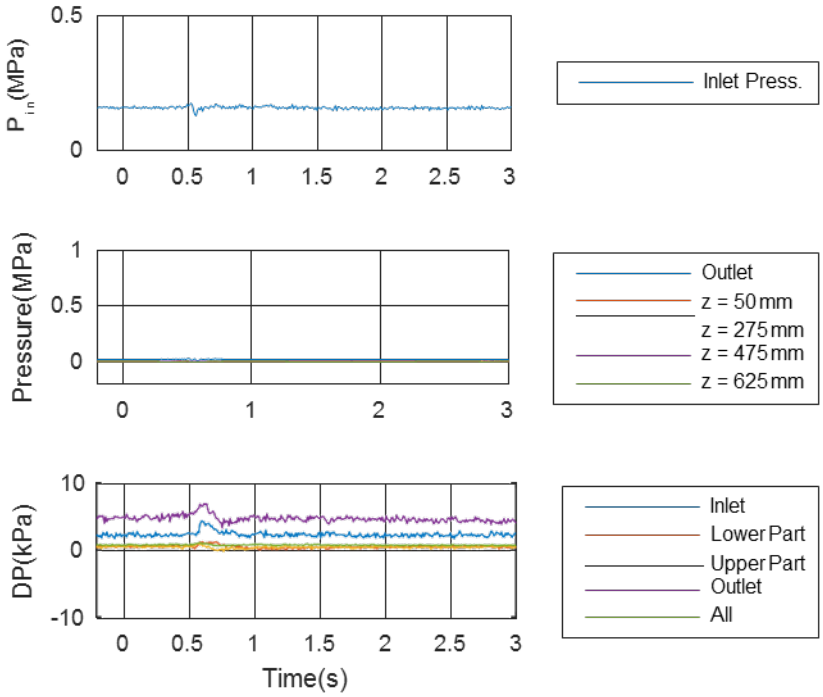


図 3-7　入口圧力，高さごとの圧力，差圧の時間変化（Run No.1）

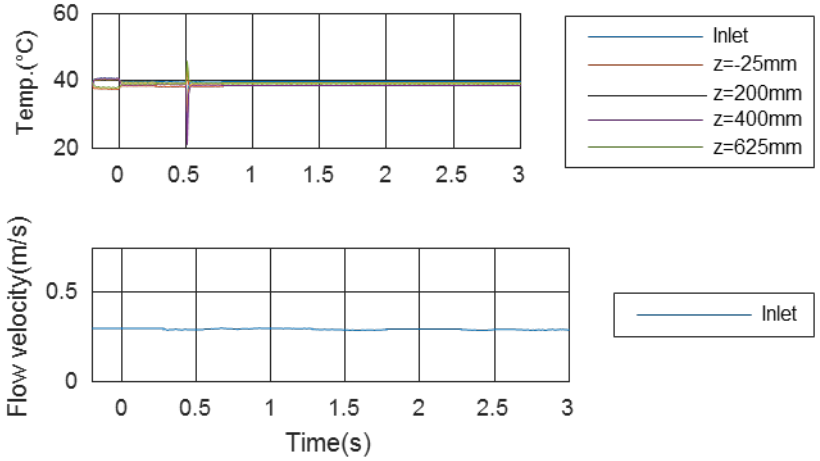


図 3-8　高さごとの水温，入口流速の時間変化（Run No.1）

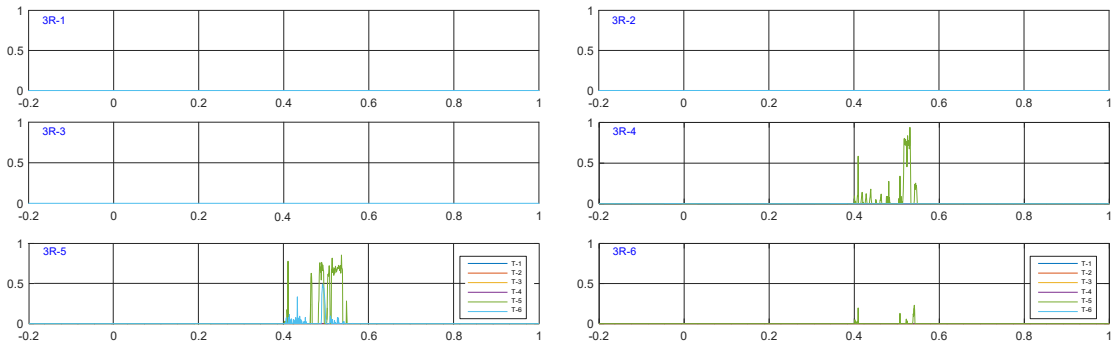


図 3-9　ボイド率の時間変化（Run No. 1，3 段目の WMS）

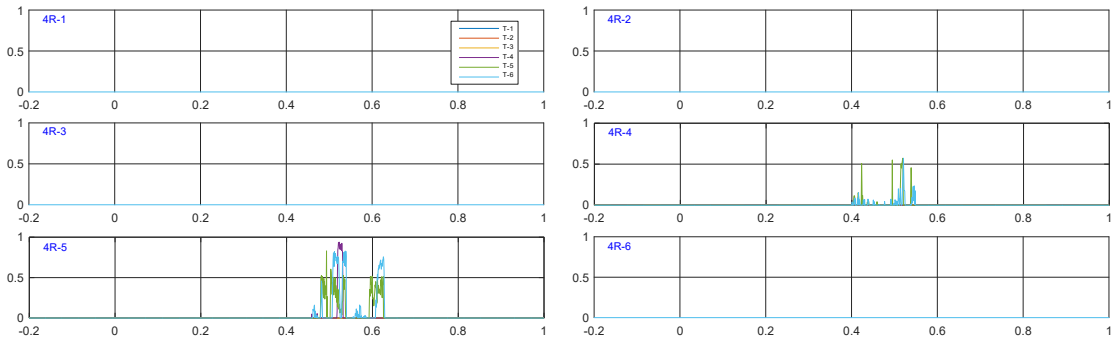


図 3-10　ボイド率の時間変化（Run No. 1，4 段目の WMS）

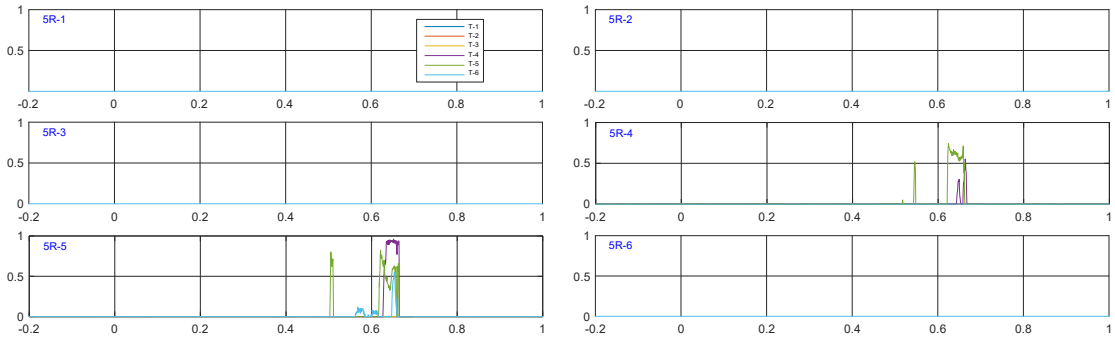


図 3-11　ボイド率の時間変化（Run No. 1，5 段目の WMS）

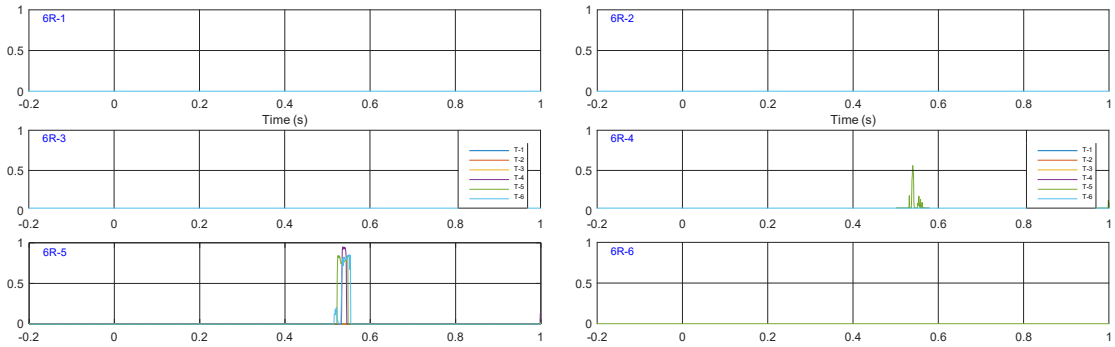


図 3-12　ボイド率の時間変化（Run No. 1，6 段目の WMS）

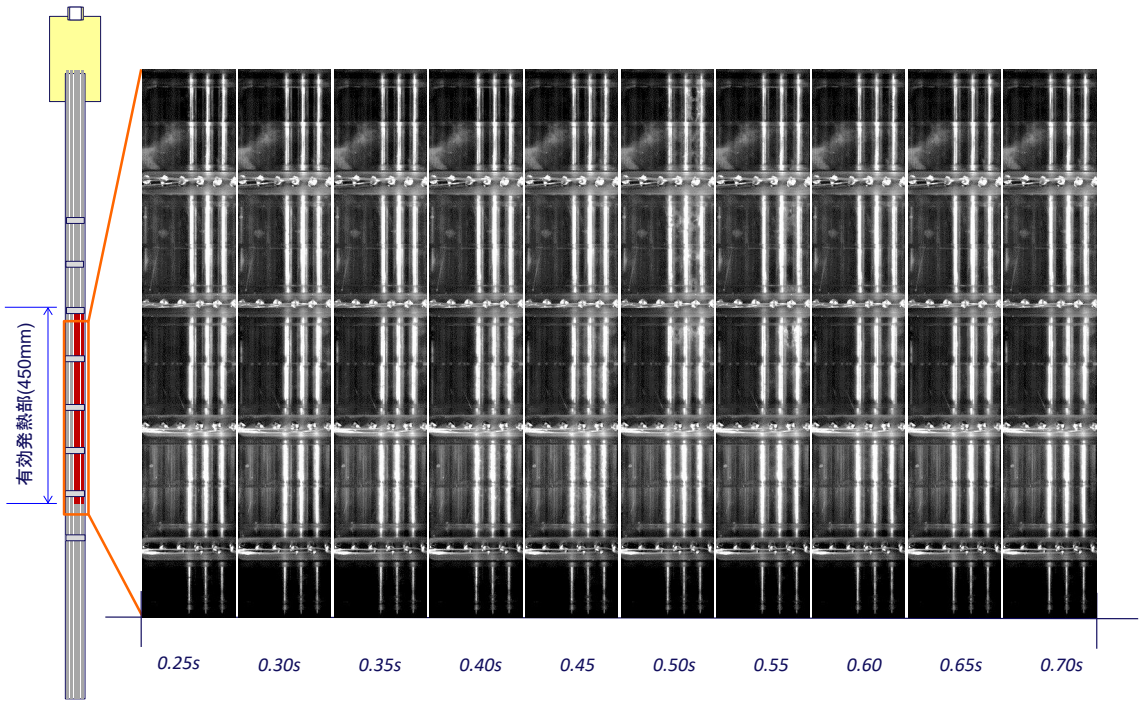


図 3-13　ボイド挙動の可視化画像（Run No. 1）

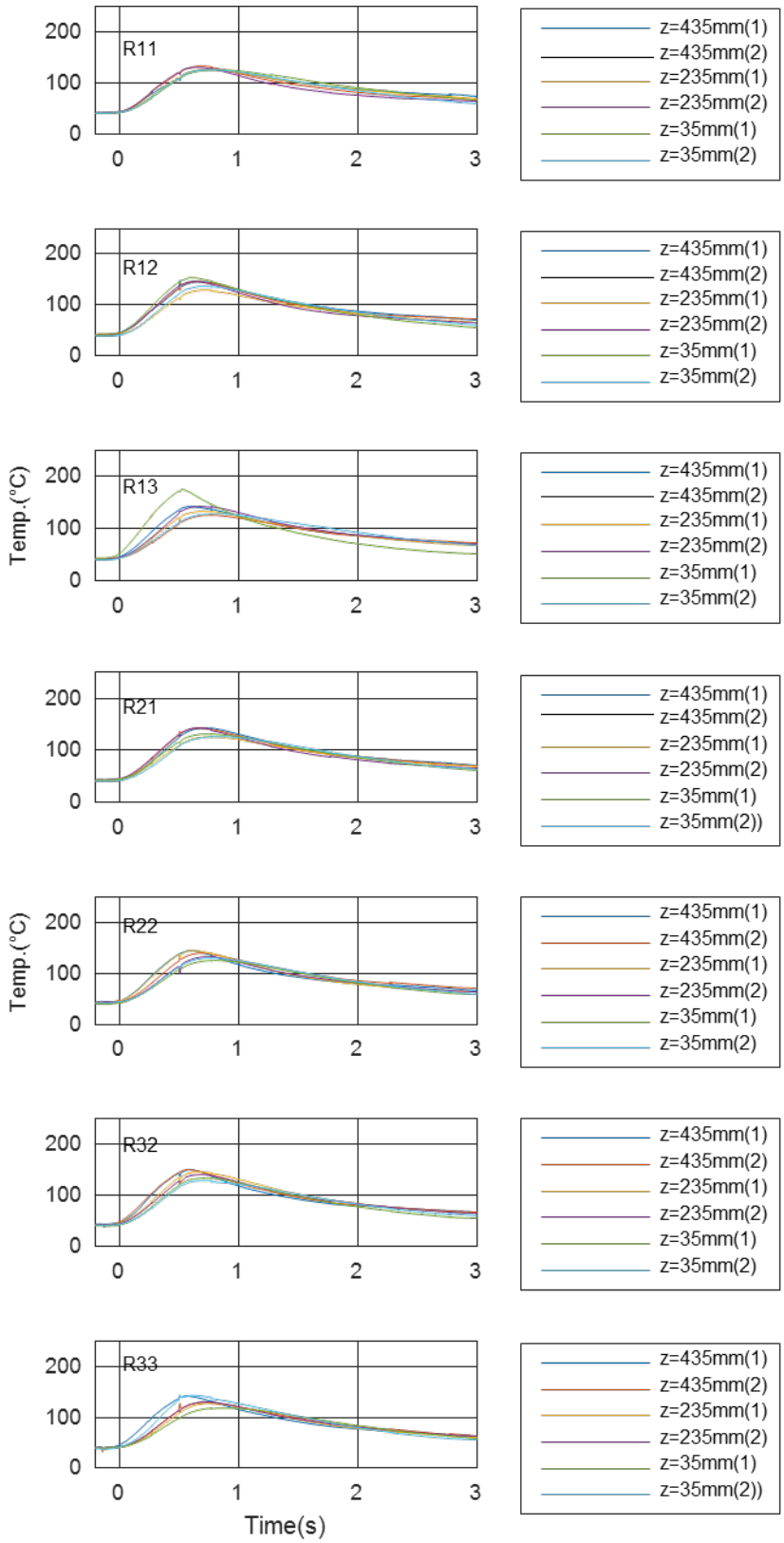


図 3-14　ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化（Run No.2）

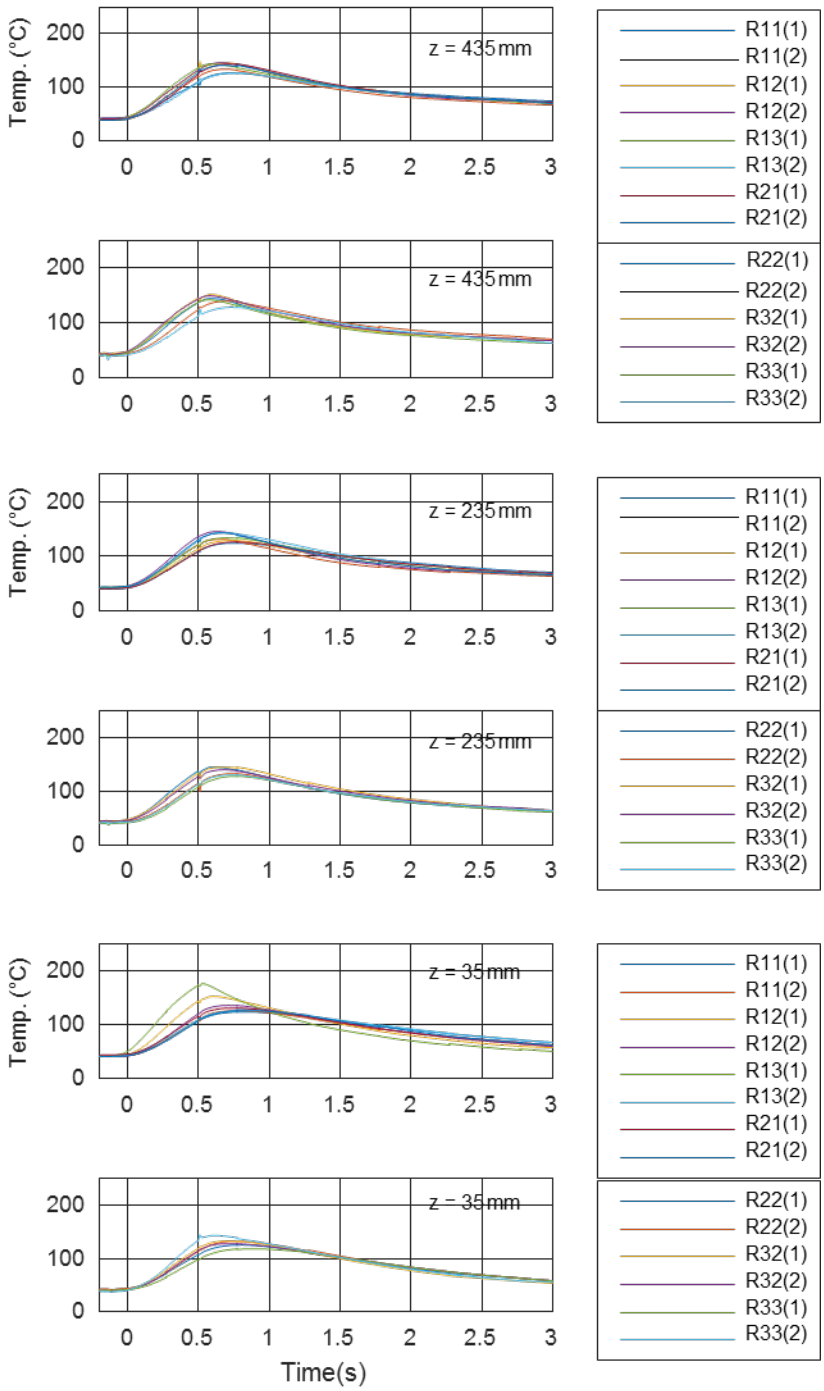


図 3-15　高さごとの燃料被覆管温度の時間変化（Run No.2）

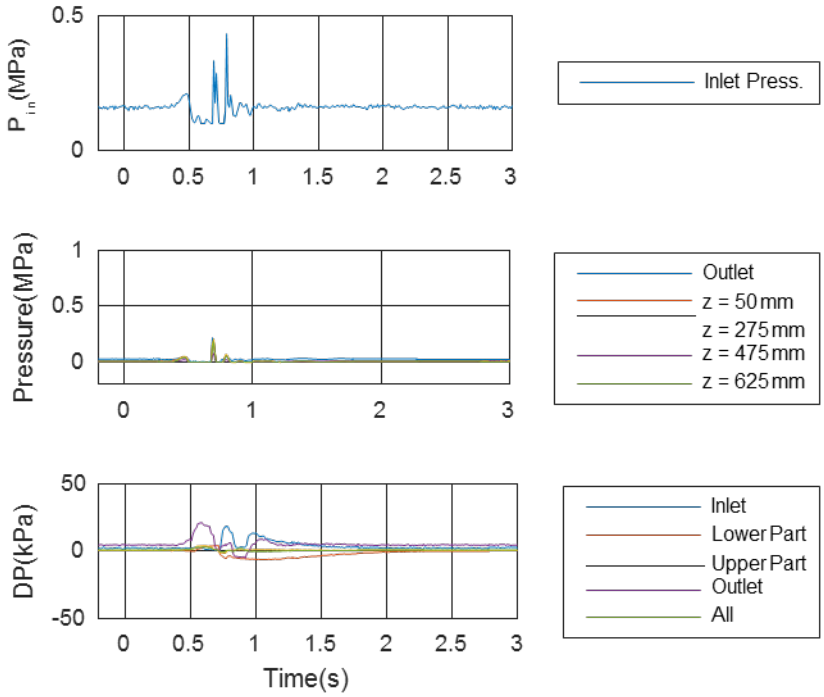


図 3-16　入口圧力，高さごとの圧力，差圧の時間変化（Run No.2）

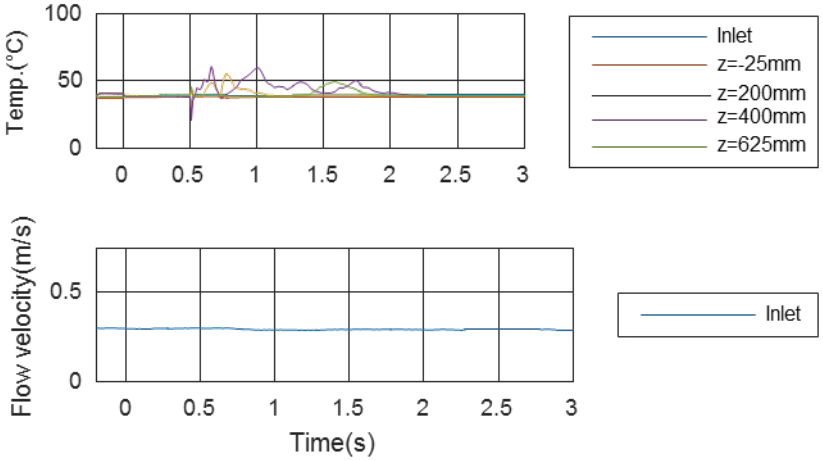


図 3-17　高さごとの水温，入口流速の時間変化（Run No.2）

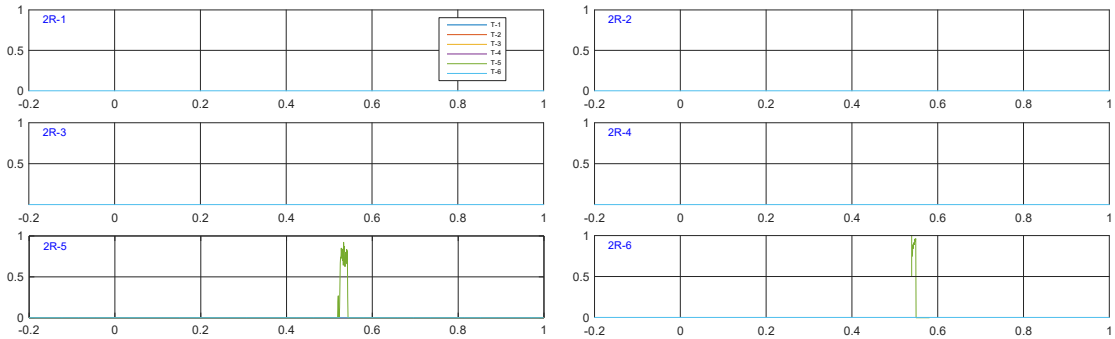


図 3-18　ボイド率の時間変化（Run No. 2，2 段目の WMS）

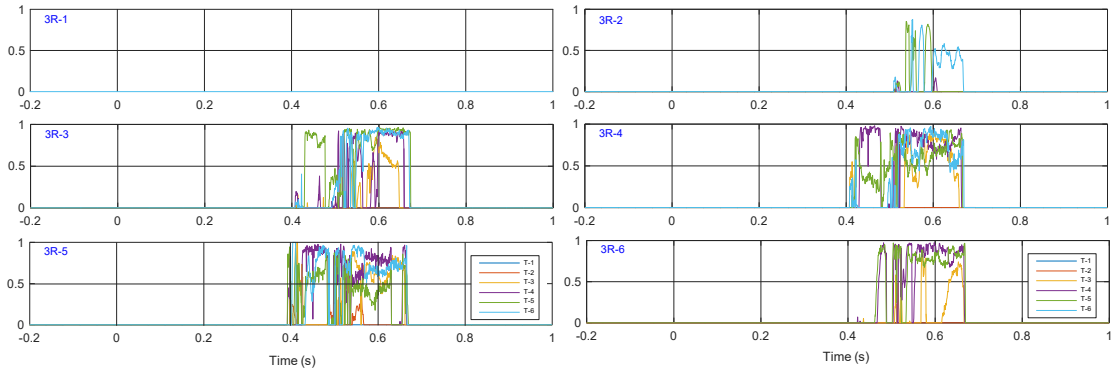


図 3-19　ボイド率の時間変化（Run No. 2，3 段目の WMS）

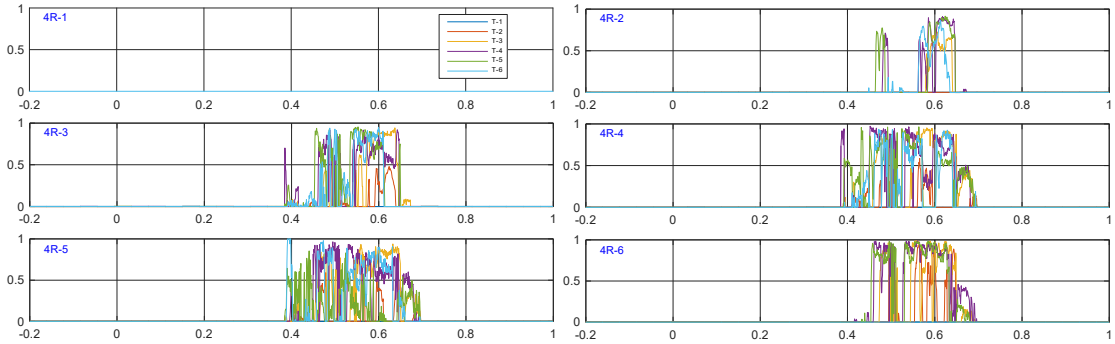


図 3-20　ボイド率の時間変化（Run No. 2，4 段目の WMS）

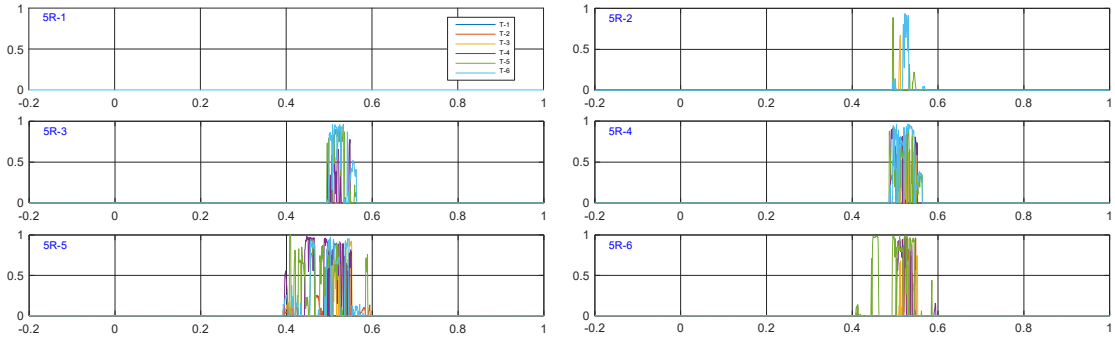


図 3-21　ボイド率の時間変化（Run No. 2，5 段目の WMS）

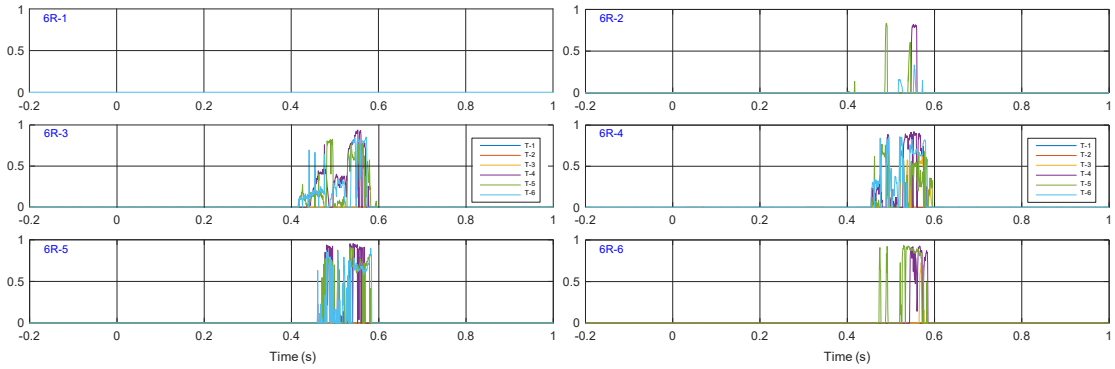


図 3-22　ボイド率の時間変化（Run No. 2，6 段目の WMS）

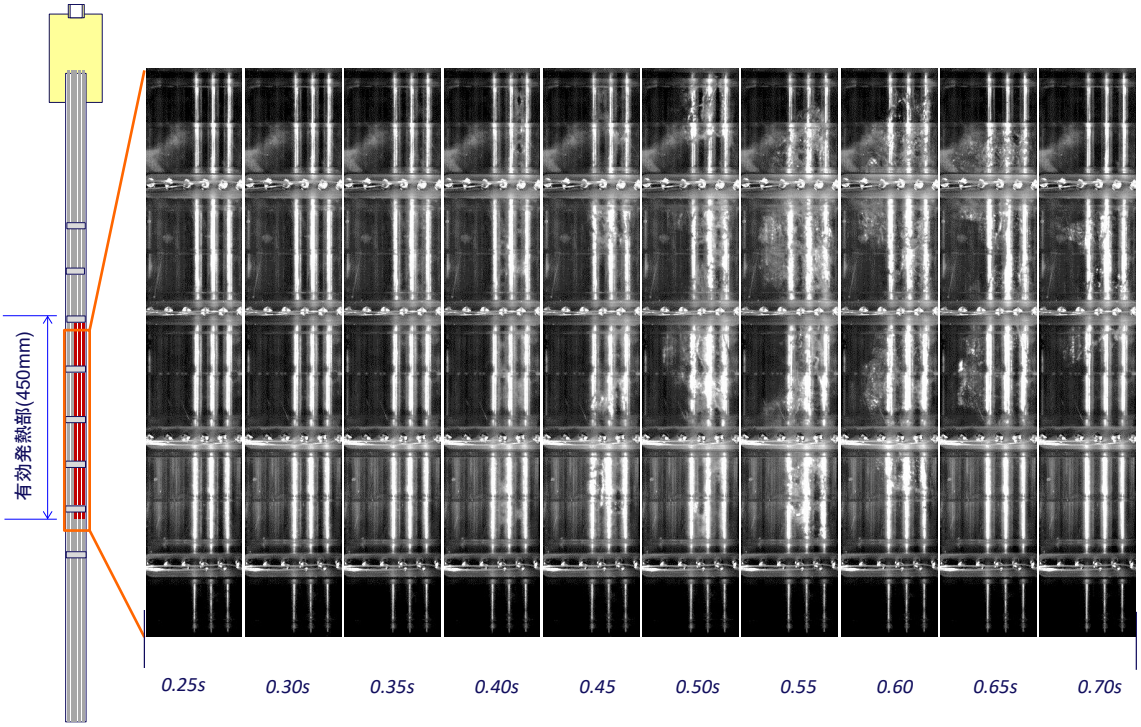


図 3-23　ボイド挙動の可視化画像（Run No. 2）

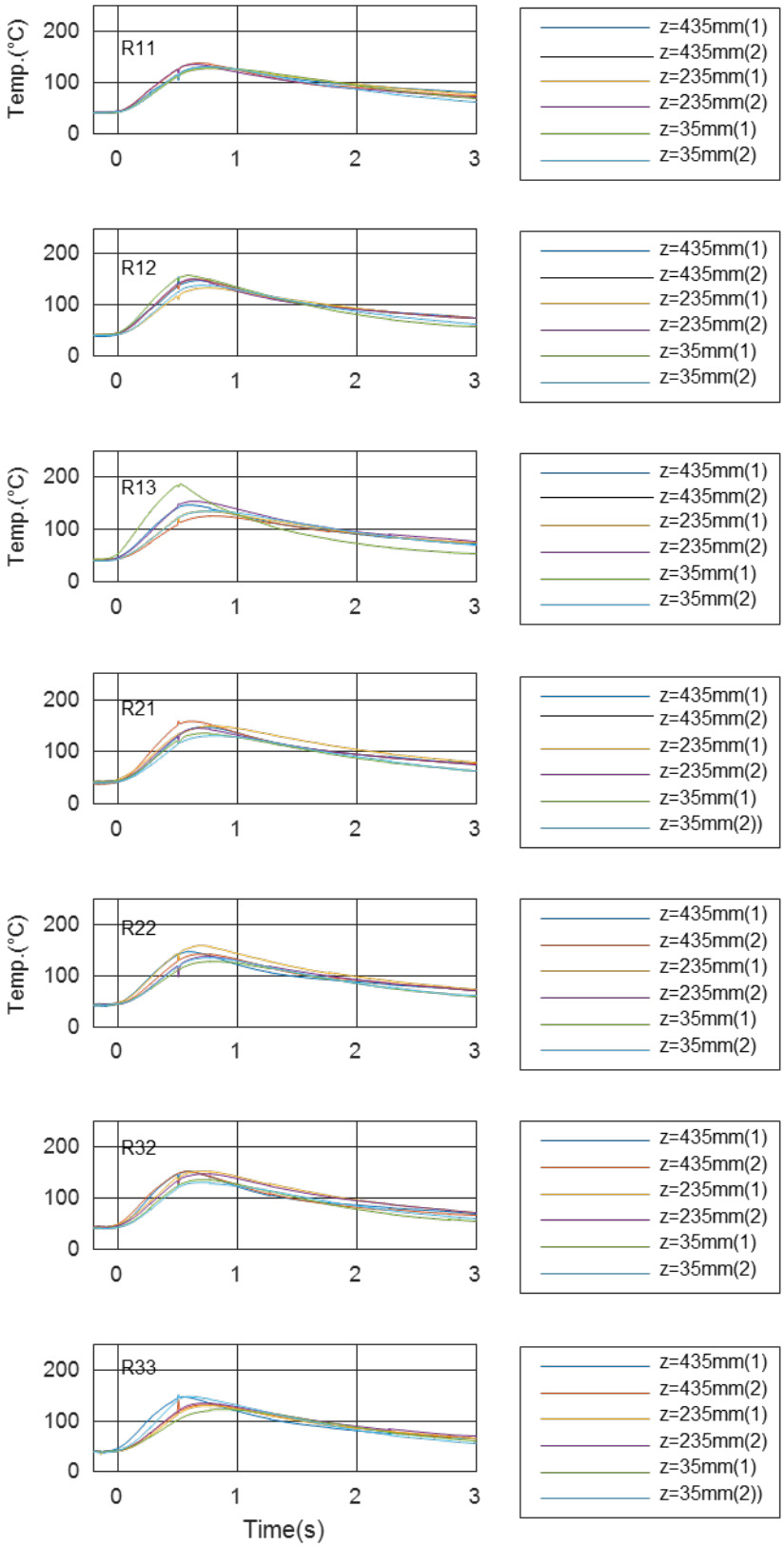


図 3-24　ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化（Run No.3）

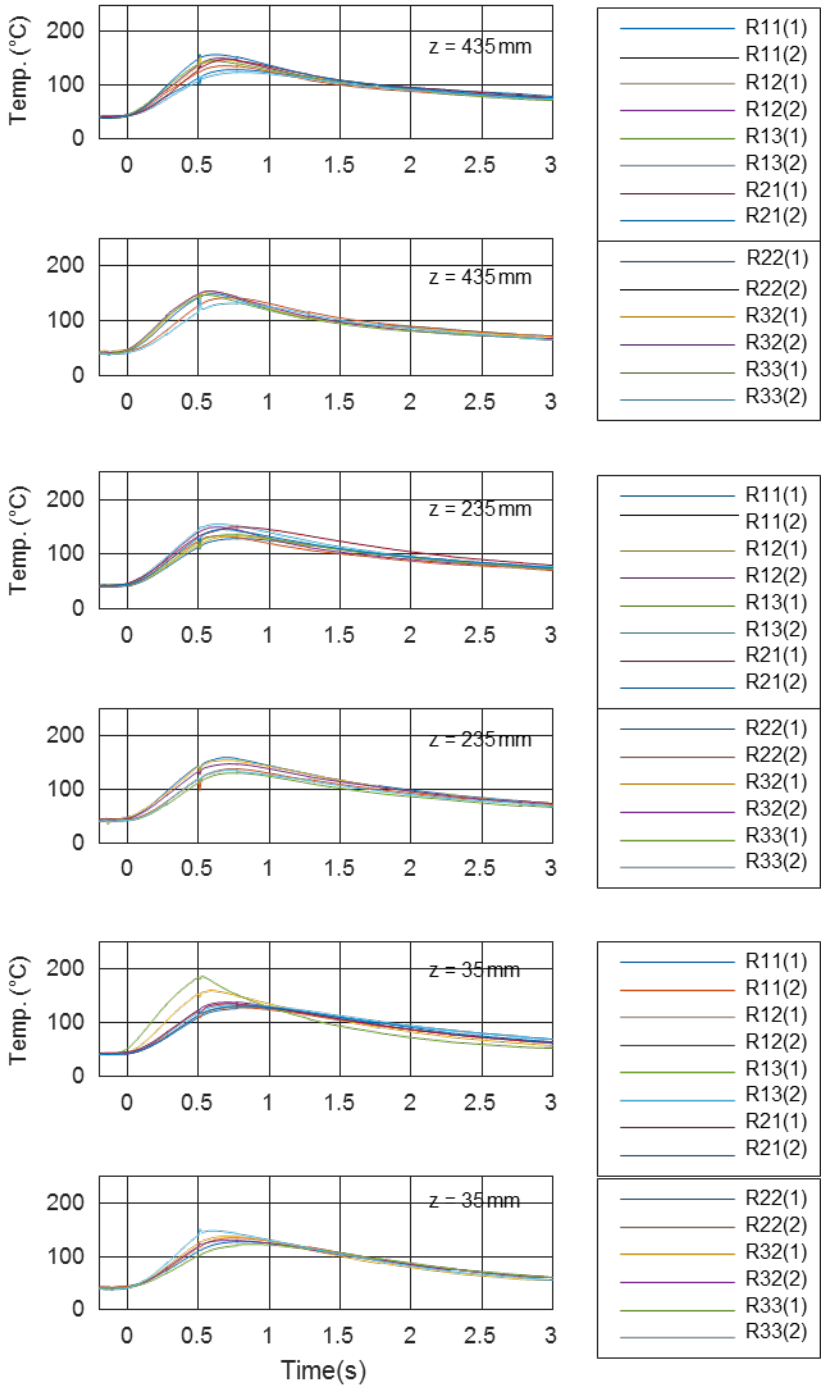


図 3-25　高さごとの燃料被覆管温度の時間変化（Run No.3）

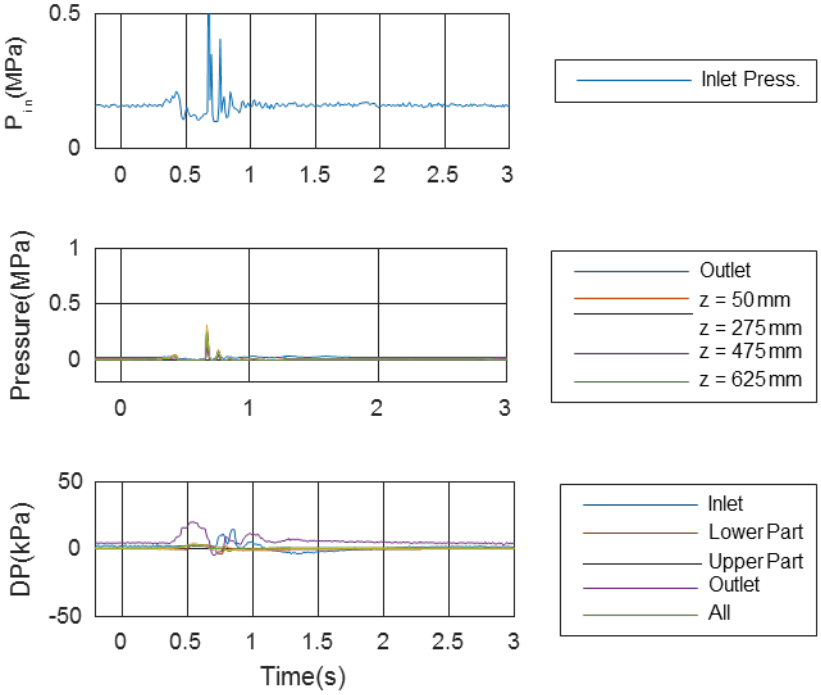


図 3-26　入口圧力，高さごとの圧力，差圧の時間変化（Run No.3）

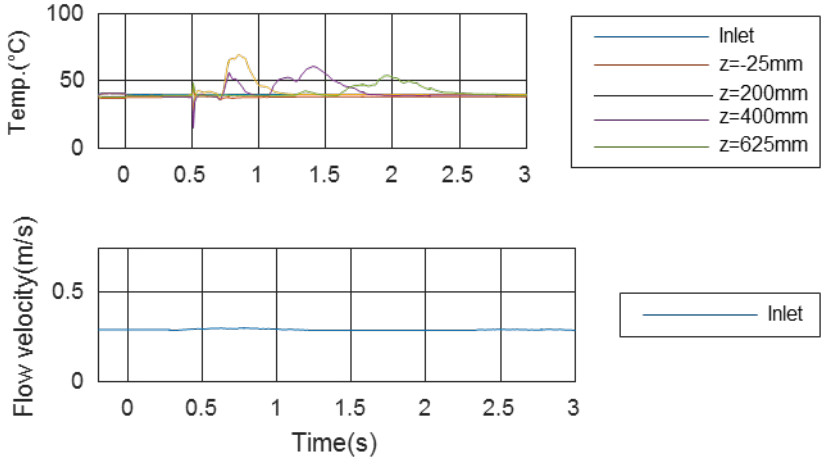


図 3-27　高さごとの水温，入口流速の時間変化（Run No.3）

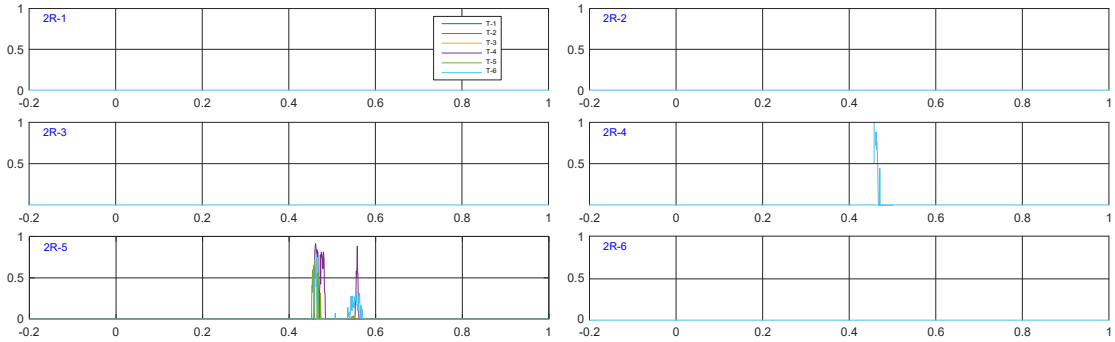


図 3-28　ボイド率の時間変化（Run No.3，2 段目の WMS）

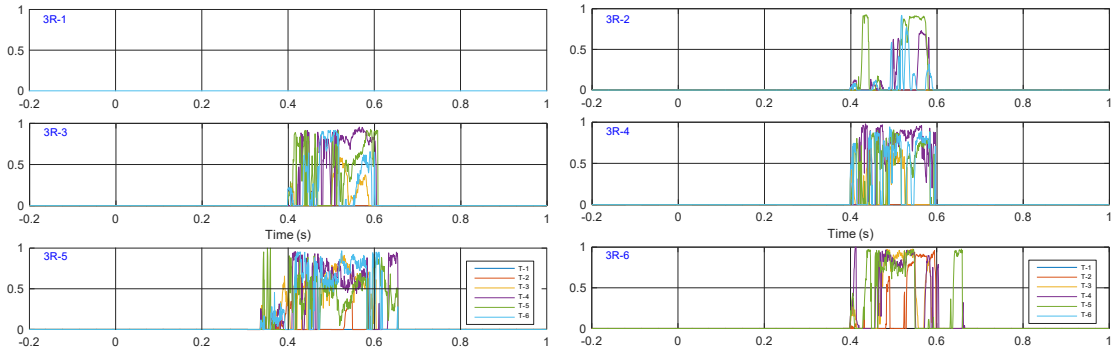


図 3-29　ボイド率の時間変化（Run No.3，3 段目の WMS）

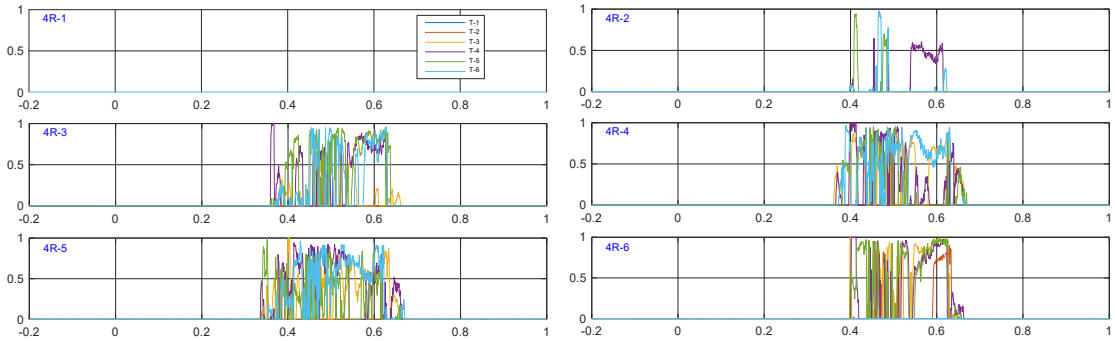


図 3-30　ボイド率の時間変化（Run No.3，4 段目の WMS）

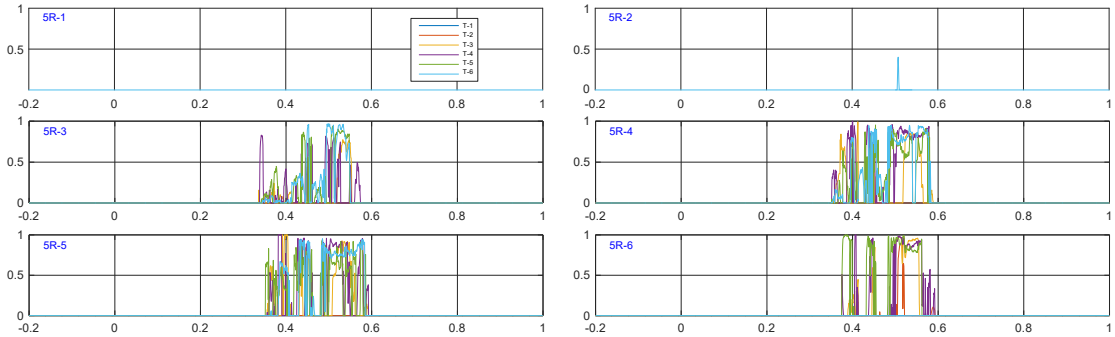


図 3-31　ボイド率の時間変化（Run No.3，5 段目の WMS）

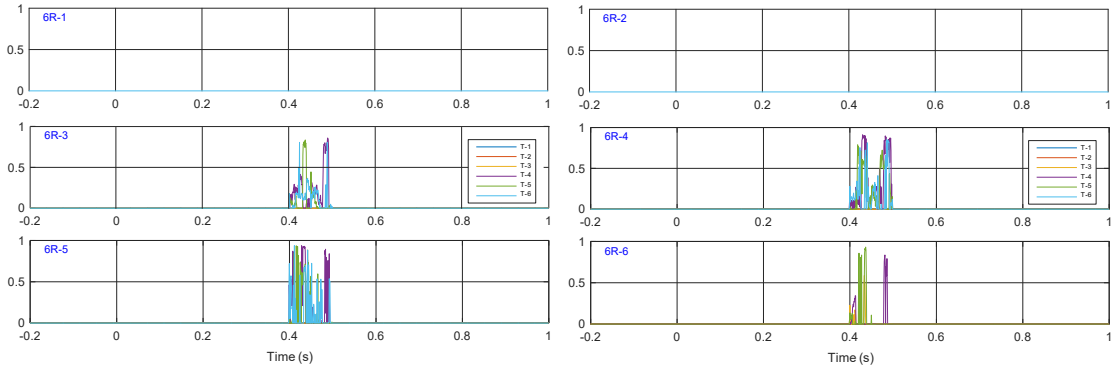


図 3-32　ボイド率の時間変化（Run No.3，6 段目の WMS）

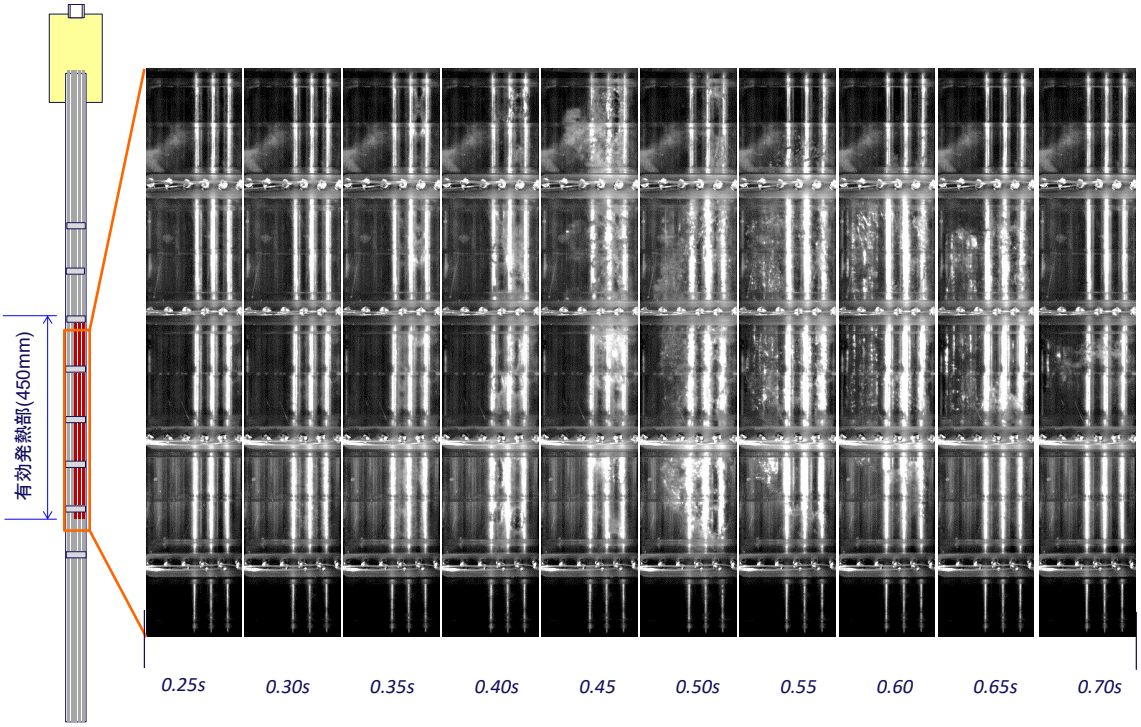


図 3-33　ボイド挙動の可視化画像（Run No. 3）

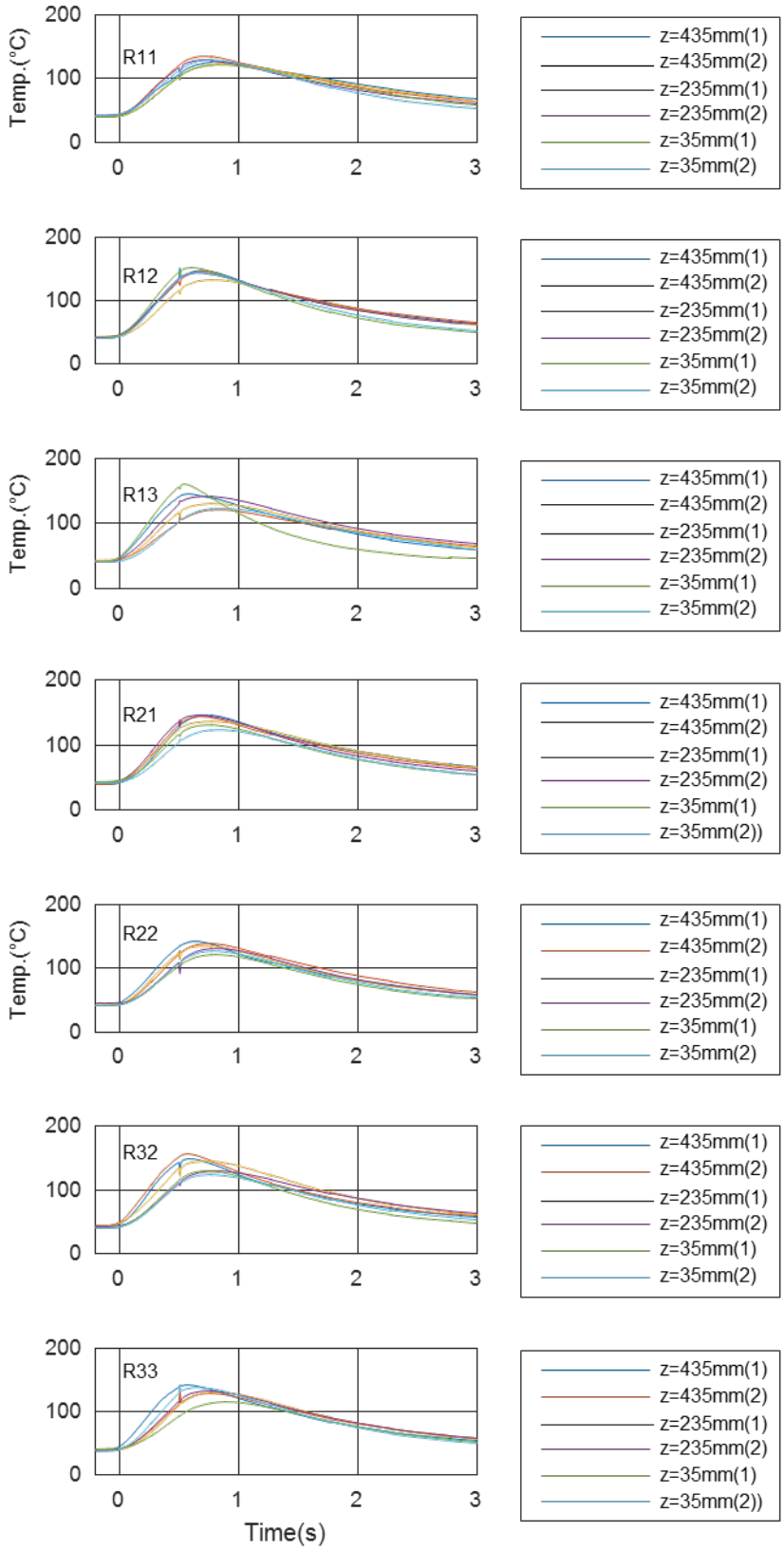


図 3-34　ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化（Run No.4）

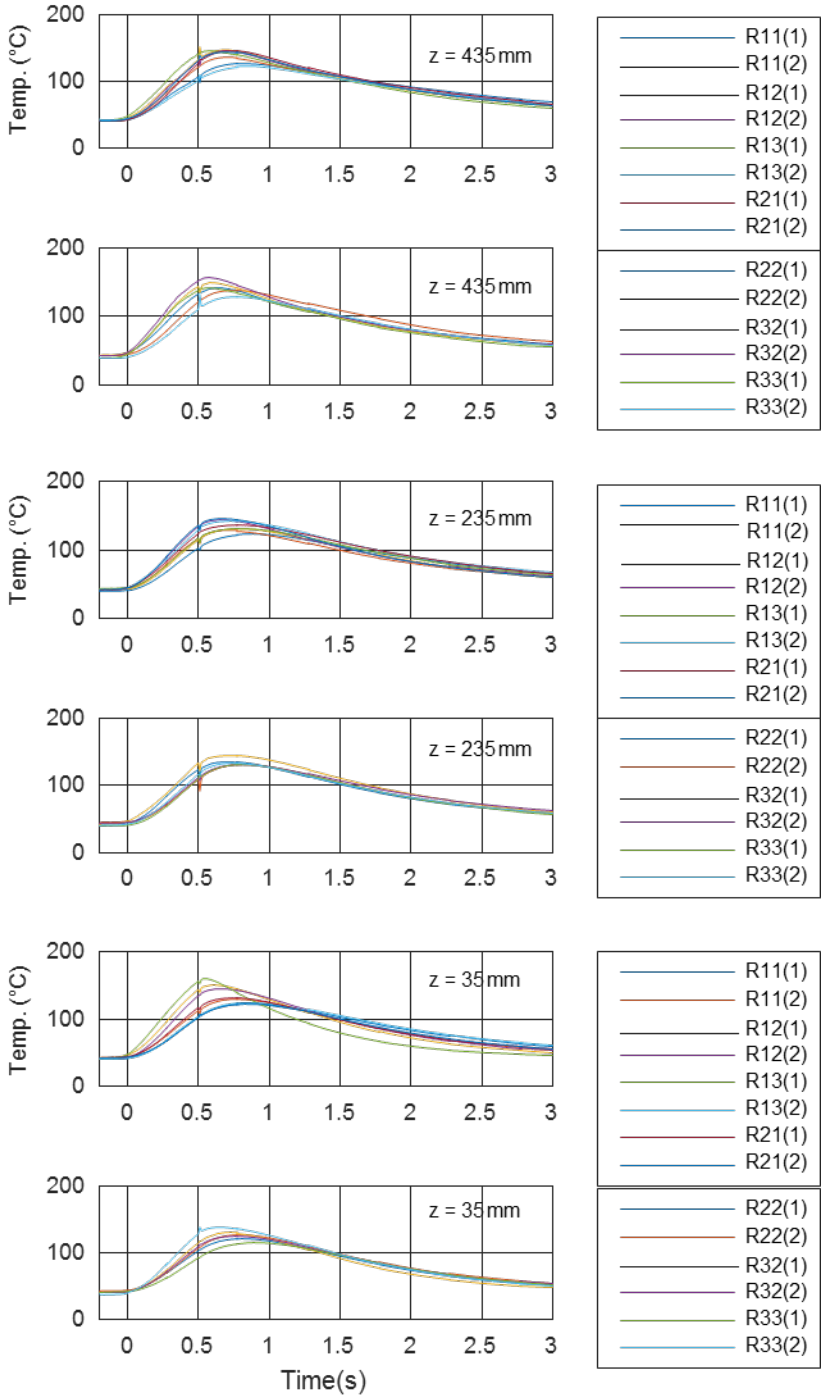


図 3-35　高さごとの燃料被覆管温度の時間変化（Run No.4）

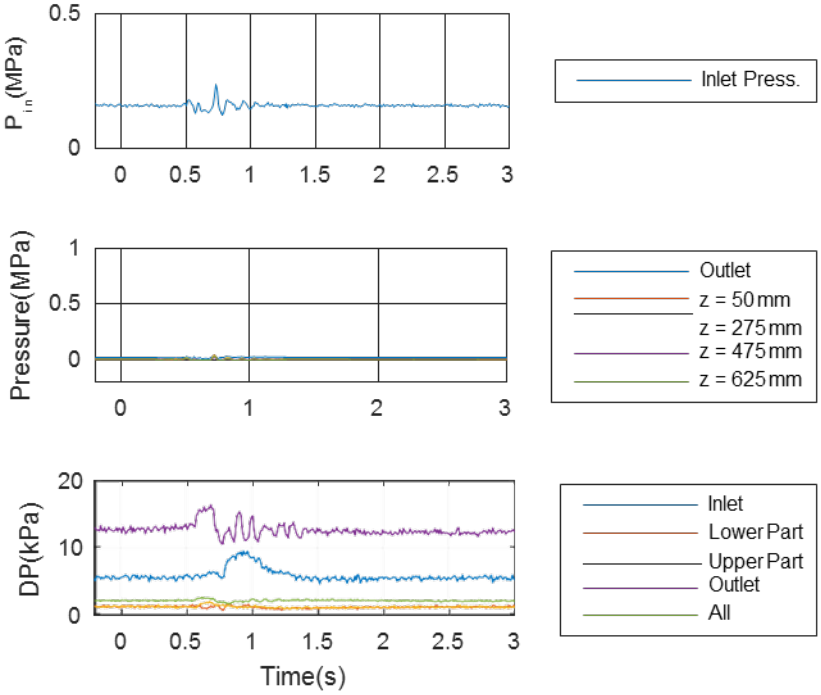


図 3-36　入口圧力，高さごとの圧力，差圧の時間変化（Run No.4）

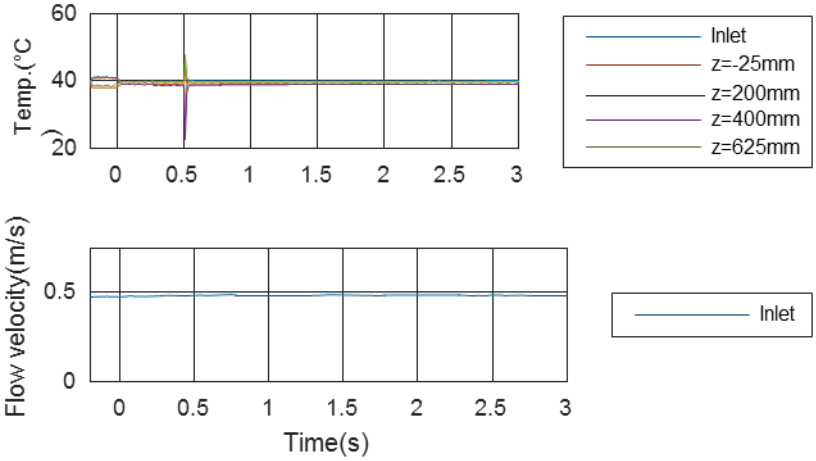


図 3-37　高さごとの水温，入口流速の時間変化（Run No.4）

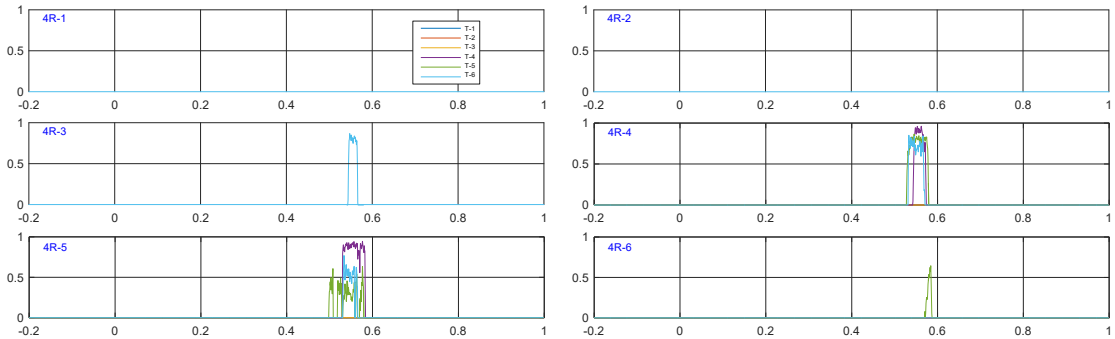


図 3-38　ボイド率の時間変化（Run No.4，4 段目の WMS）

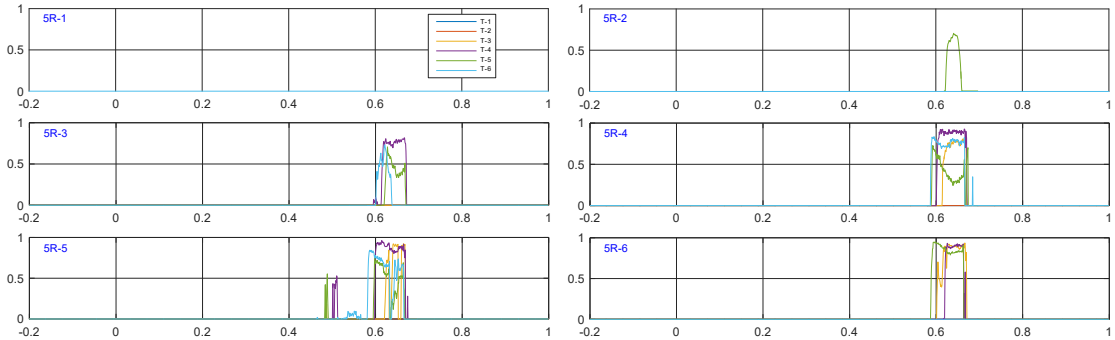


図 3-39　ボイド率の時間変化（Run No.4，5 段目の WMS）

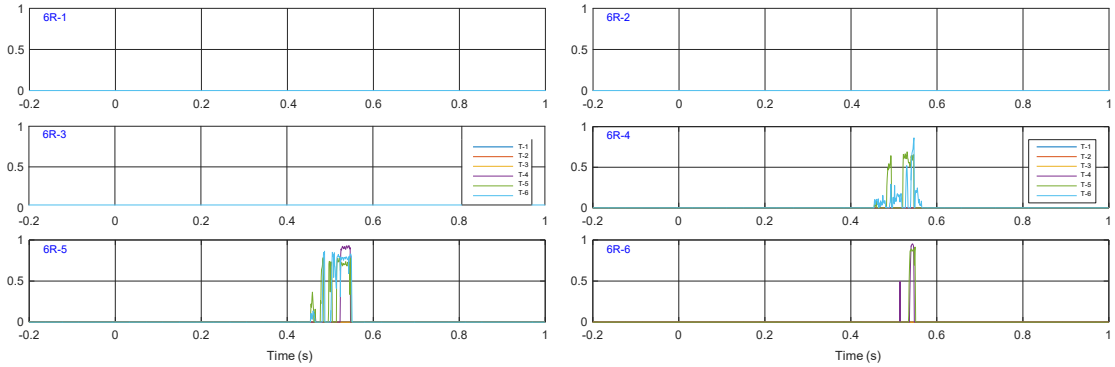


図 3-40　ボイド率の時間変化（Run No.4，6 段目の WMS）

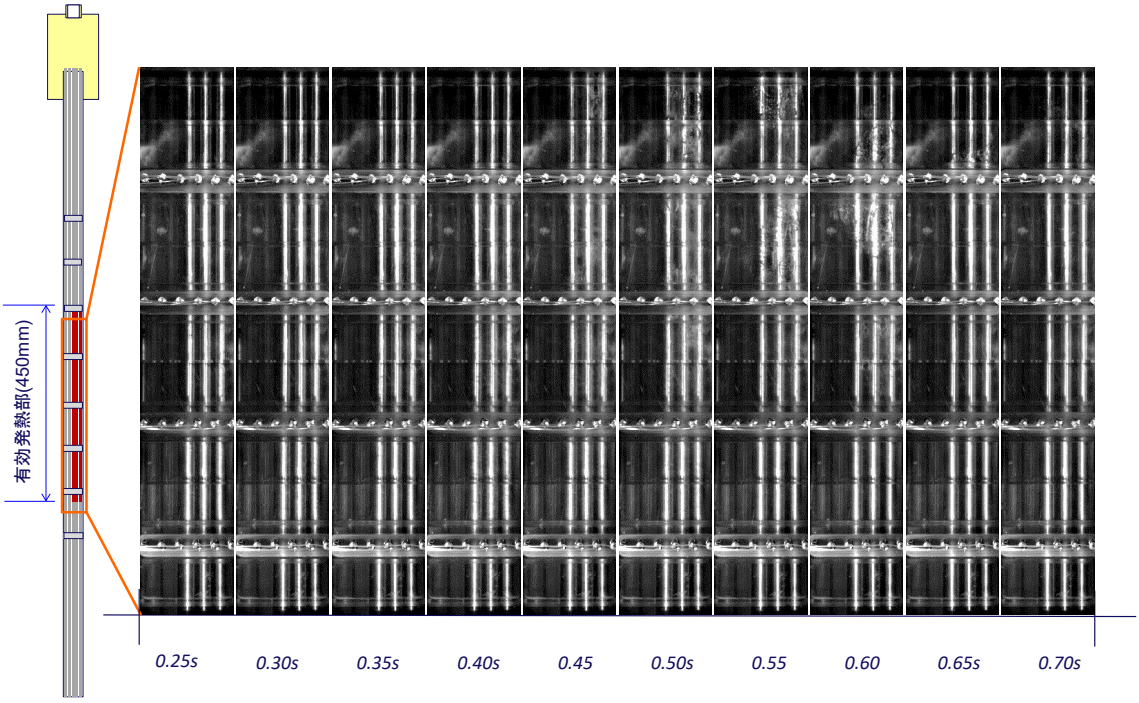


図 3-41　ボイド挙動の可視化画像（Run No. 4）

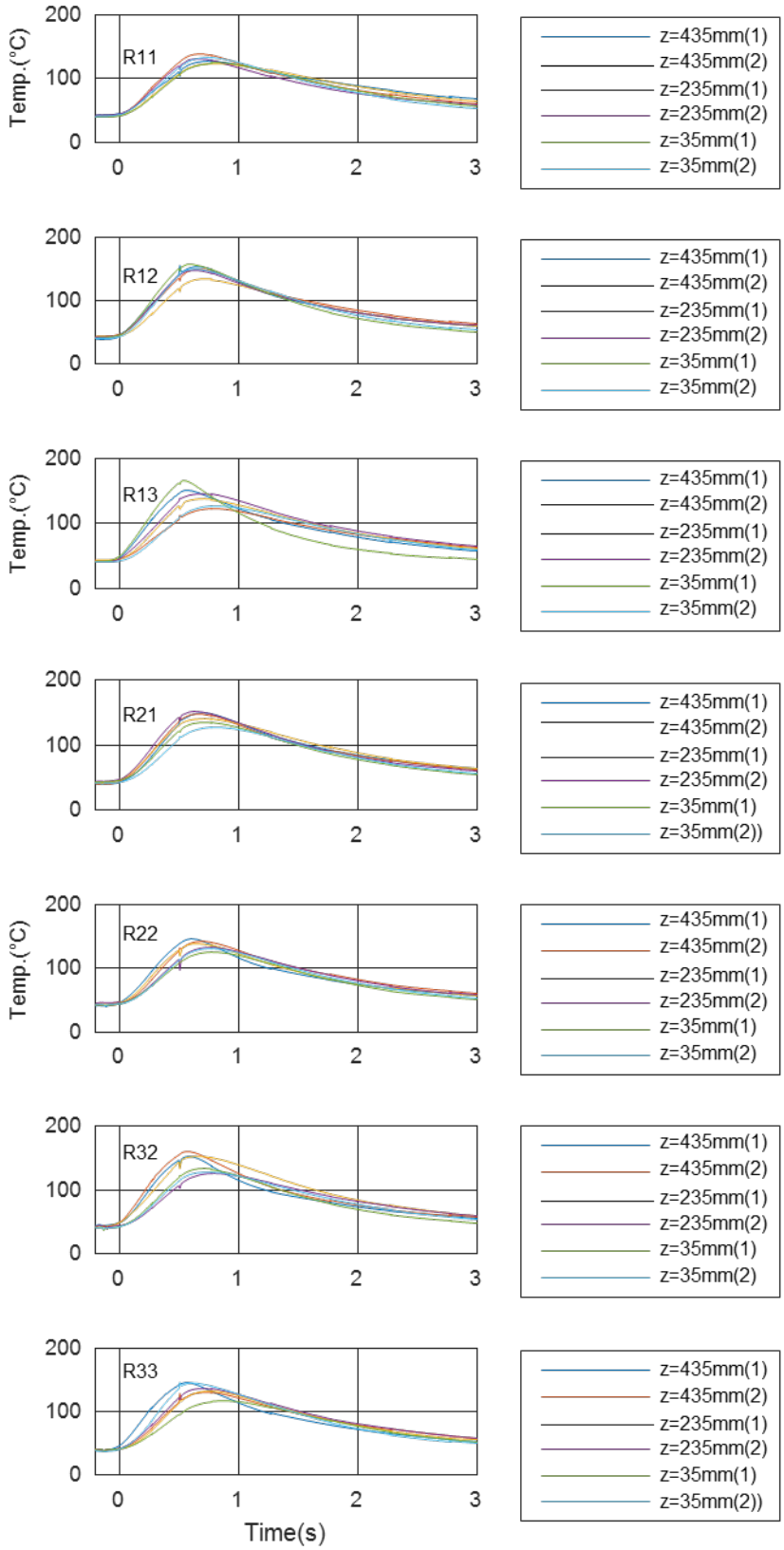


図 3-42　ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化（Run No.5）

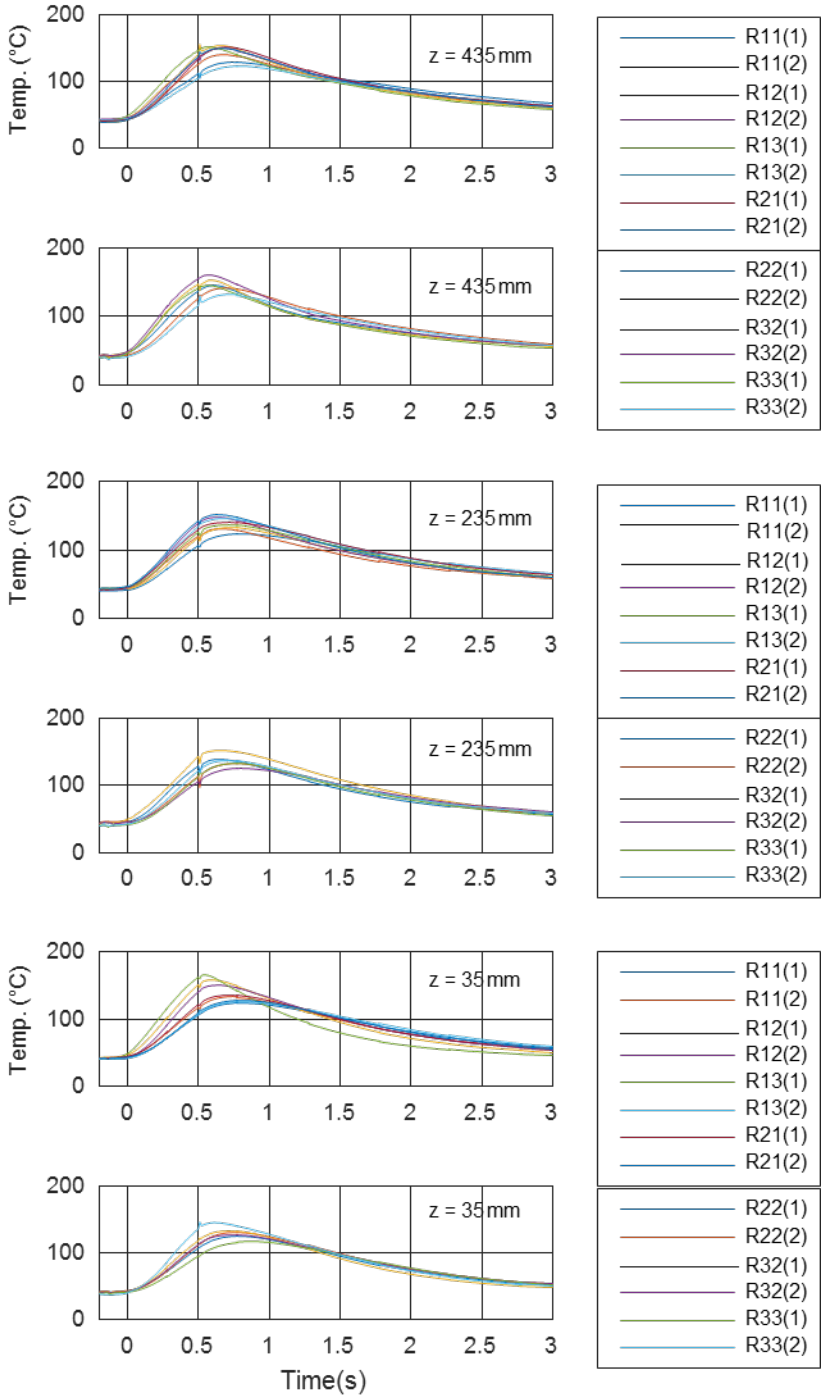


図 3-43　高さごとの燃料被覆管温度の時間変化（Run No.5）

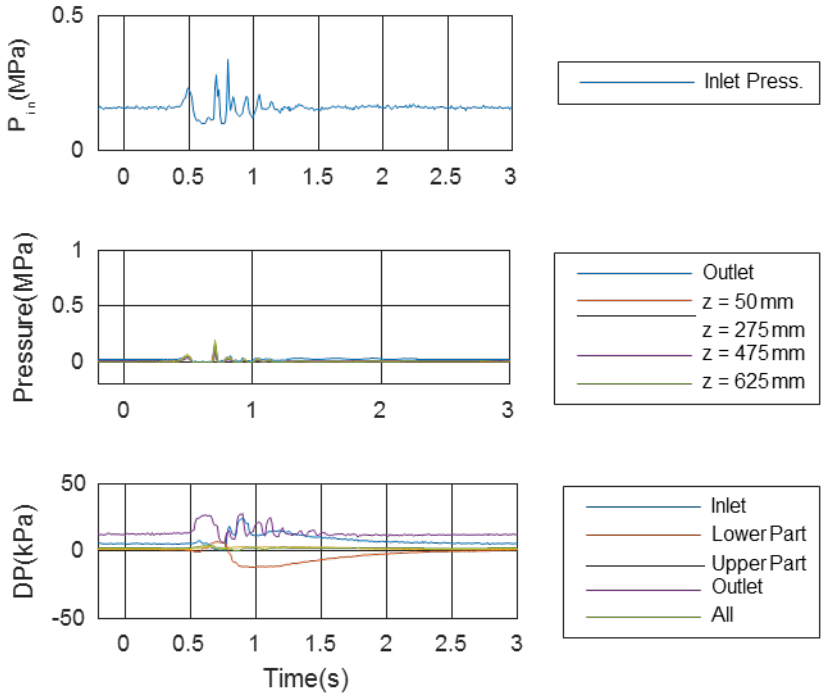


図 3-44　入口圧力，高さごとの圧力，差圧の時間変化（Run No.5）

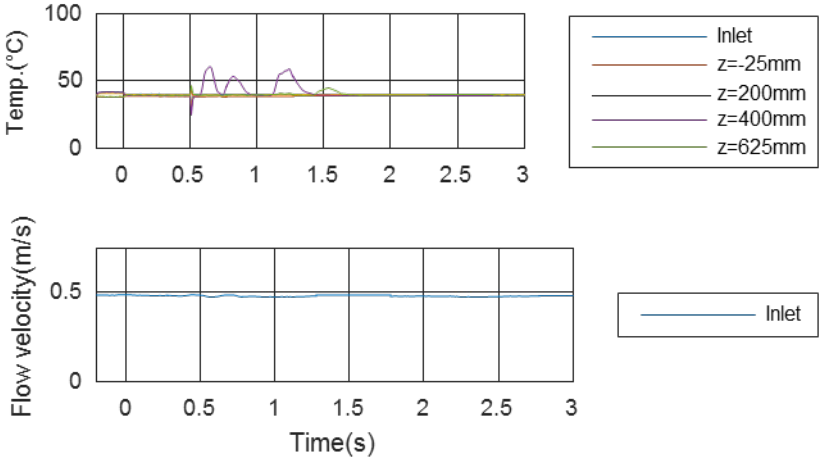


図 3-45　高さごとの水温，入口流速の時間変化（Run No.5）

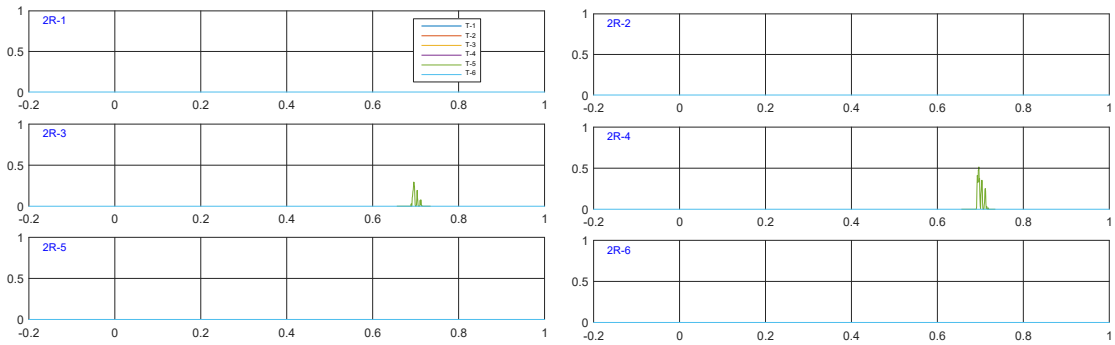


図 3-46　ボイド率の時間変化（Run No.5，2 段目の WMS）

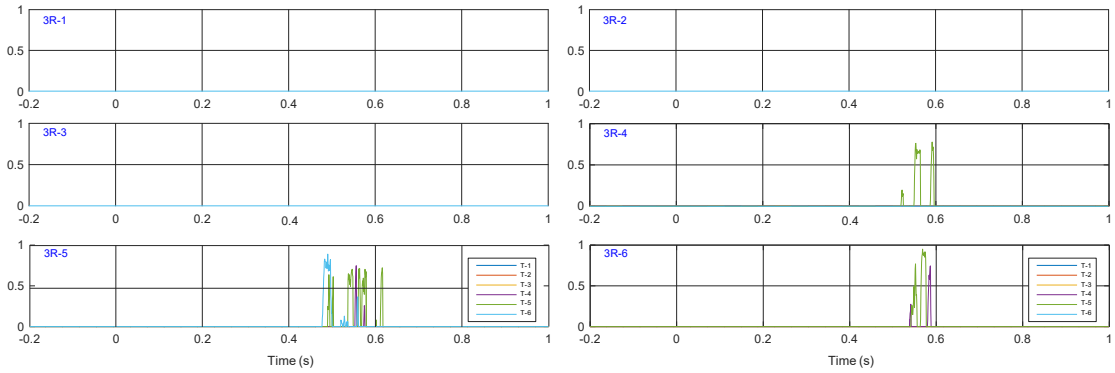


図 3-47　ボイド率の時間変化（Run No.5，3 段目の WMS）

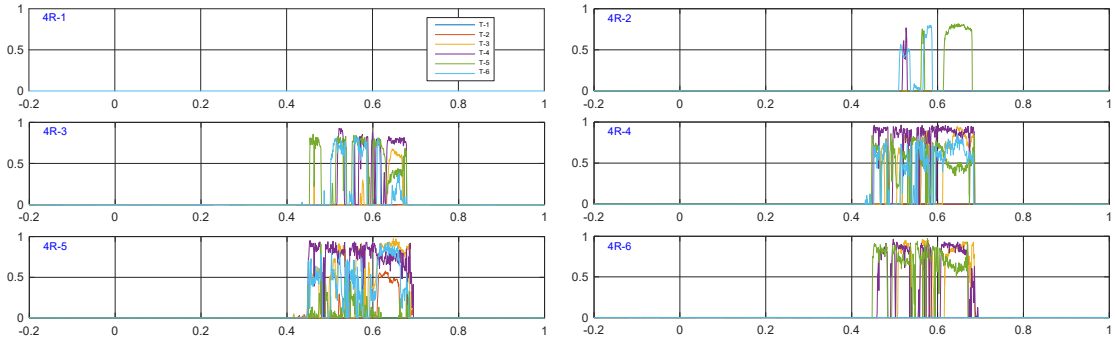


図 3-48　ボイド率の時間変化（Run No.5，4 段目の WMS）

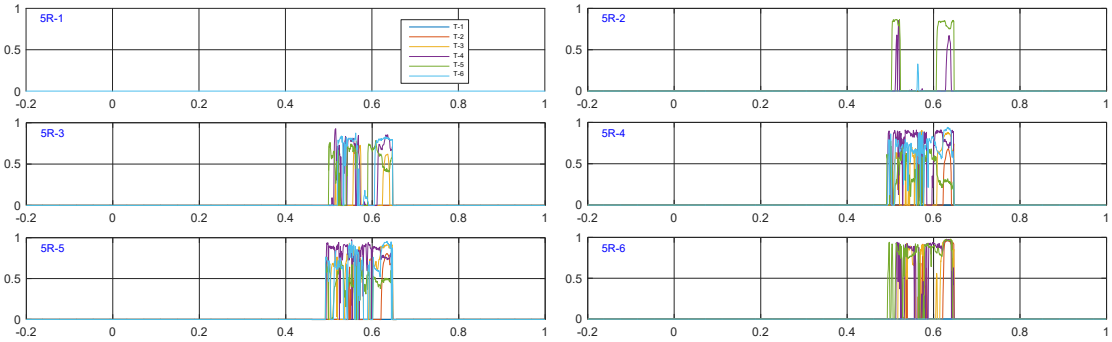


図 3-49　ボイド率の時間変化（Run No.5，5 段目の WMS）

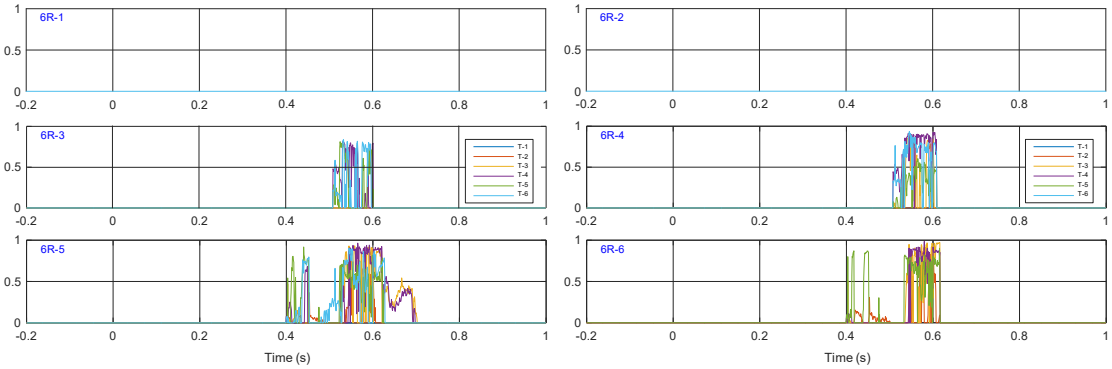


図 3-50　ボイド率の時間変化（Run No.5，6 段目の WMS）

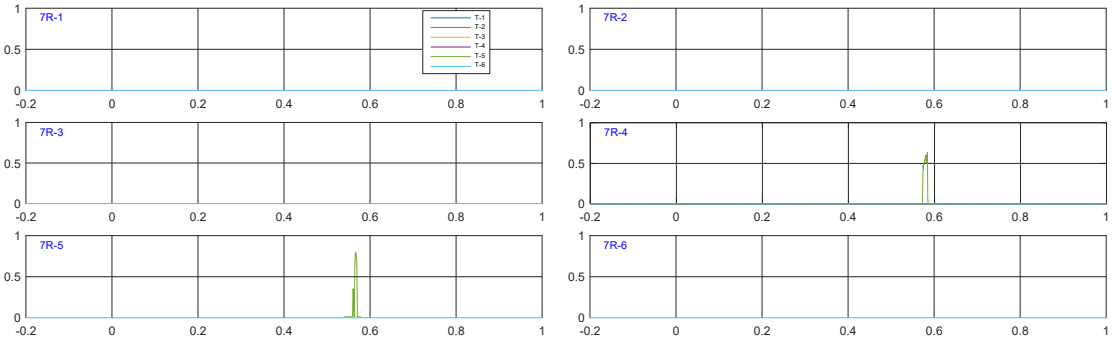


図 3-51　ボイド率の時間変化（Run No.5，7 段目の WMS）

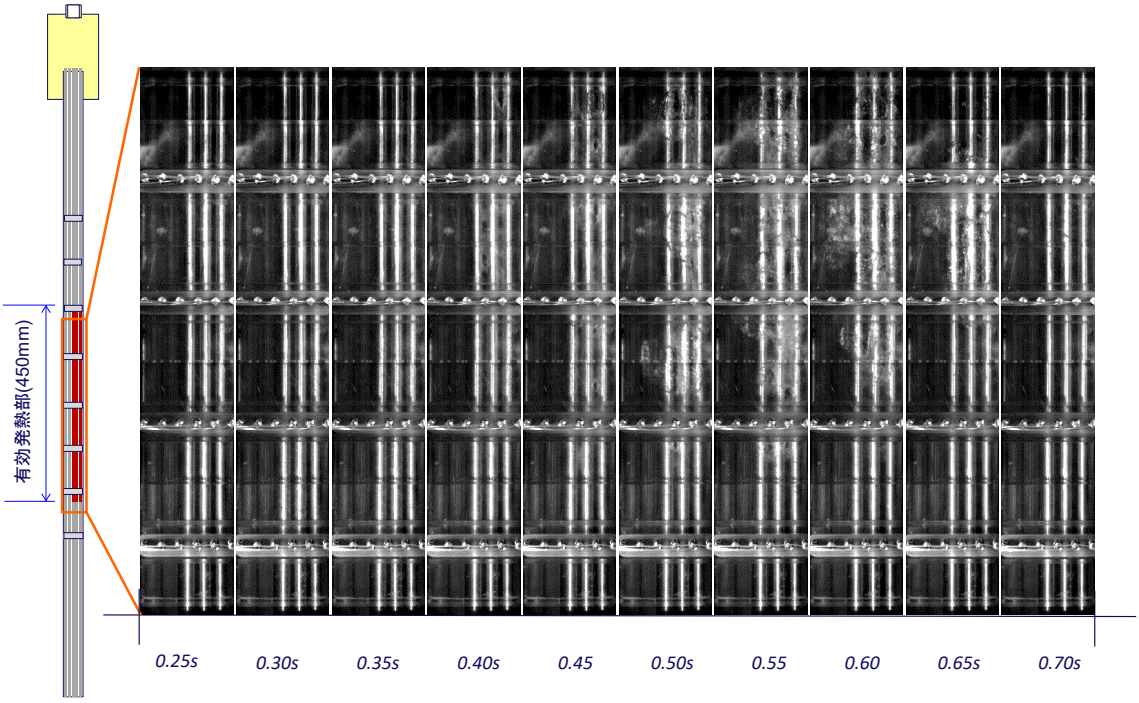


図 3-52　ボイド挙動の可視化画像（Run No. 5）

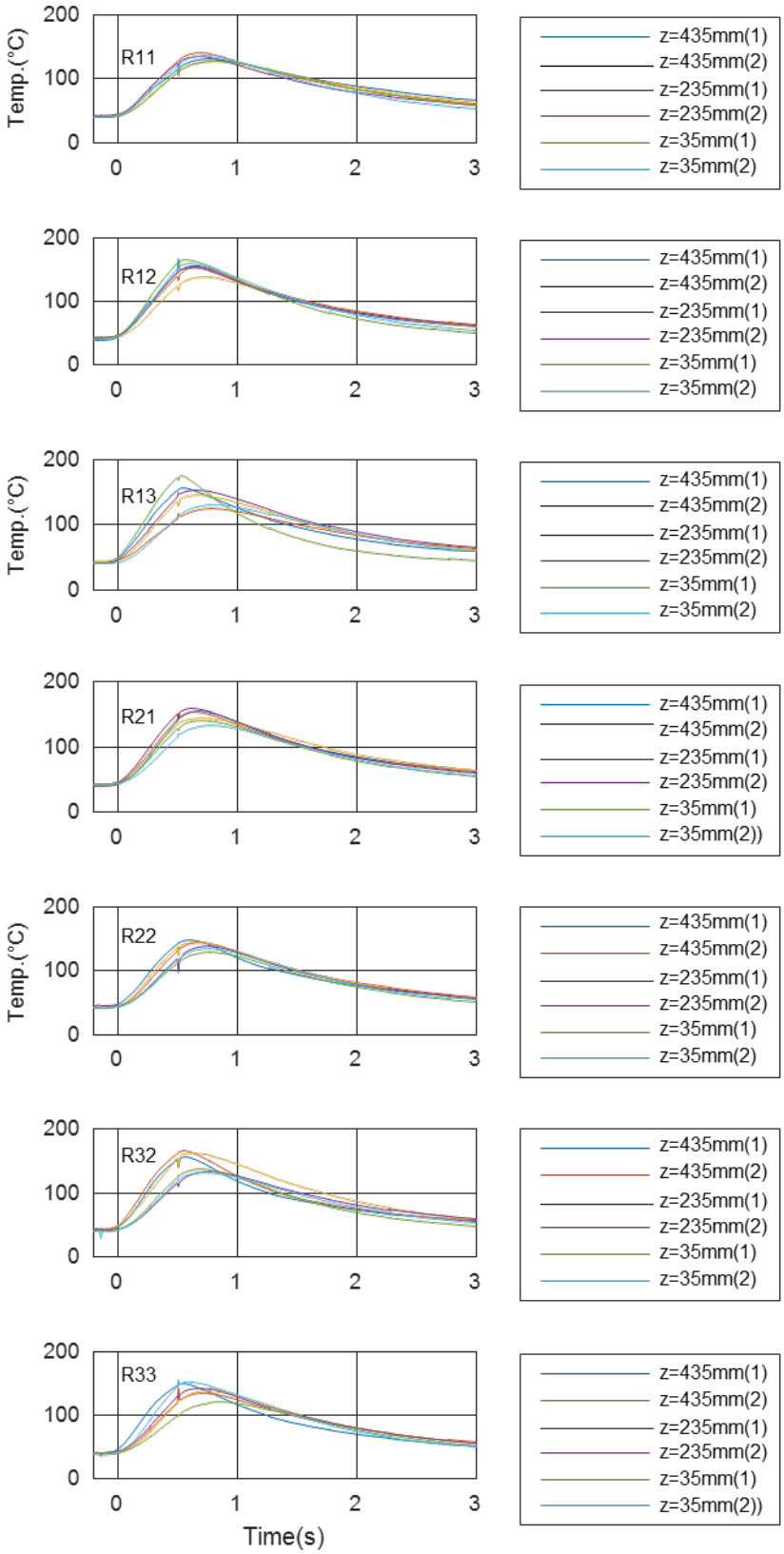


図 3-53　ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化（Run No.6）

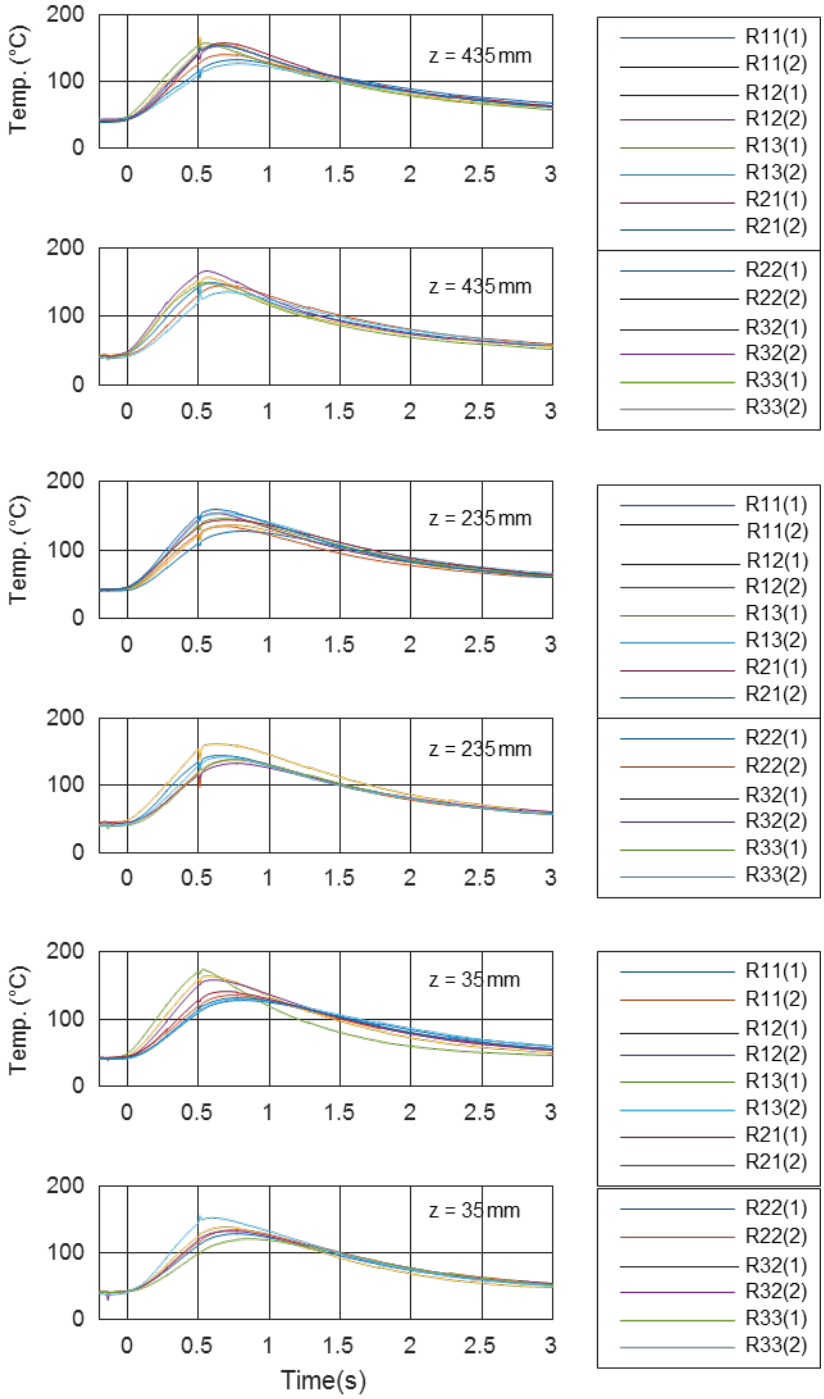


図 3-54　高さごとの燃料被覆管温度の時間変化（Run No.6）

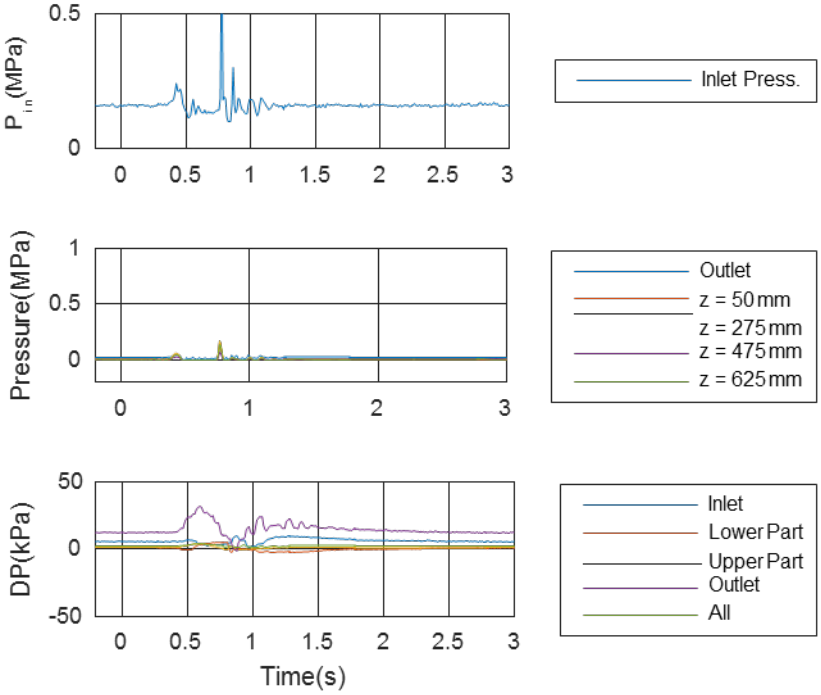


図 3-55　入口圧力，高さごとの圧力，差圧の時間変化（Run No.6）

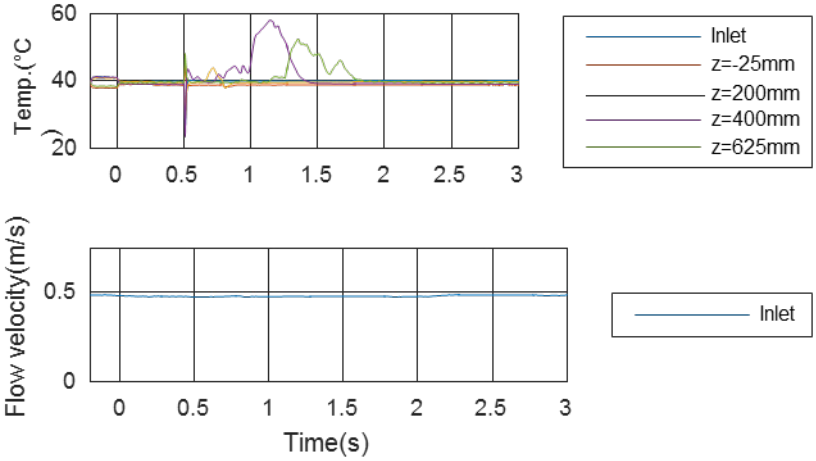


図 3-56　高さごとの水温，入口流速の時間変化（Run No.6）

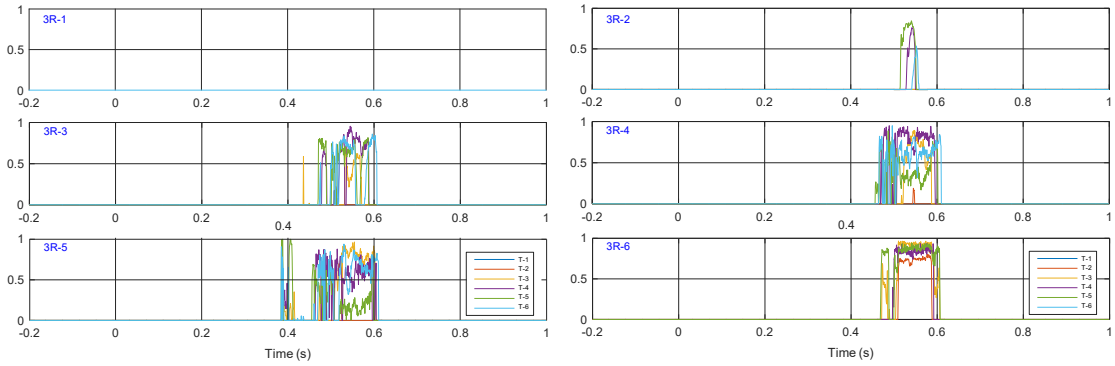


図 3-57　ボイド率の時間変化（Run No.6，3 段目の WMS）

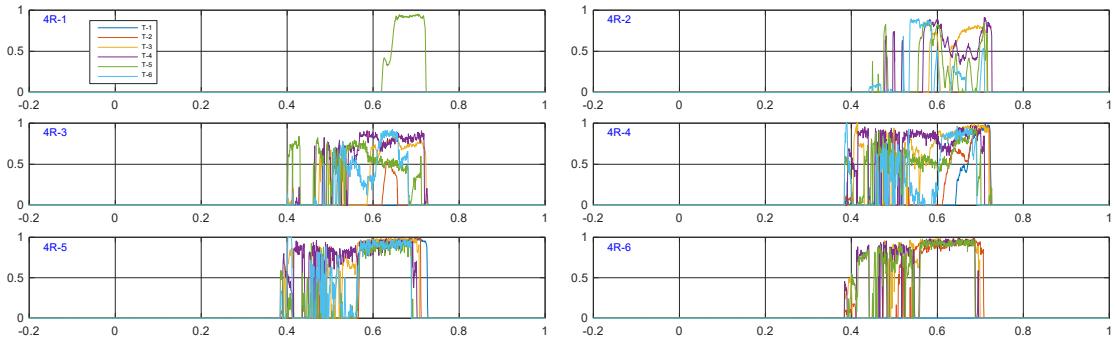


図 3-58　ボイド率の時間変化（Run No.6，4 段目の WMS）

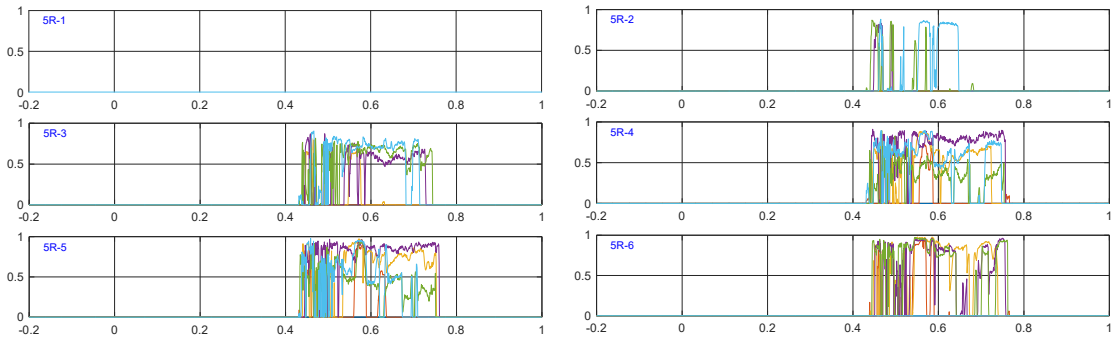


図 3-59　ボイド率の時間変化（Run No.6，5 段目の WMS）

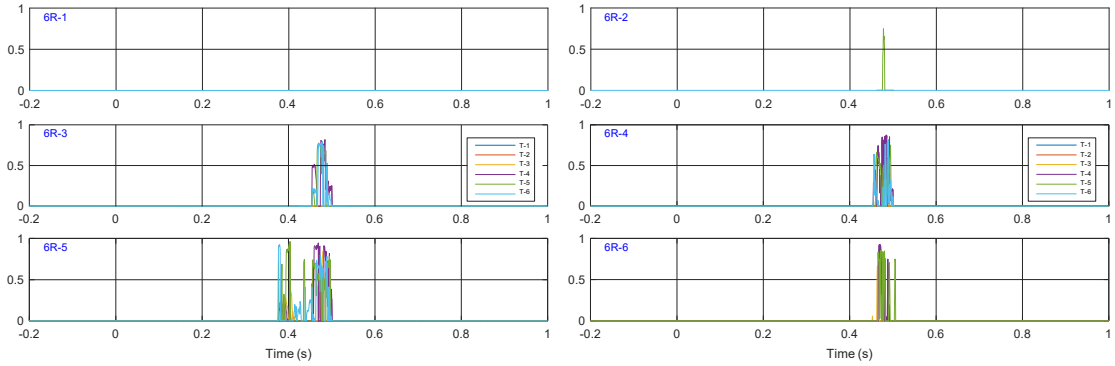


図 3-60　ボイド率の時間変化（Run No.6，6 段目の WMS）

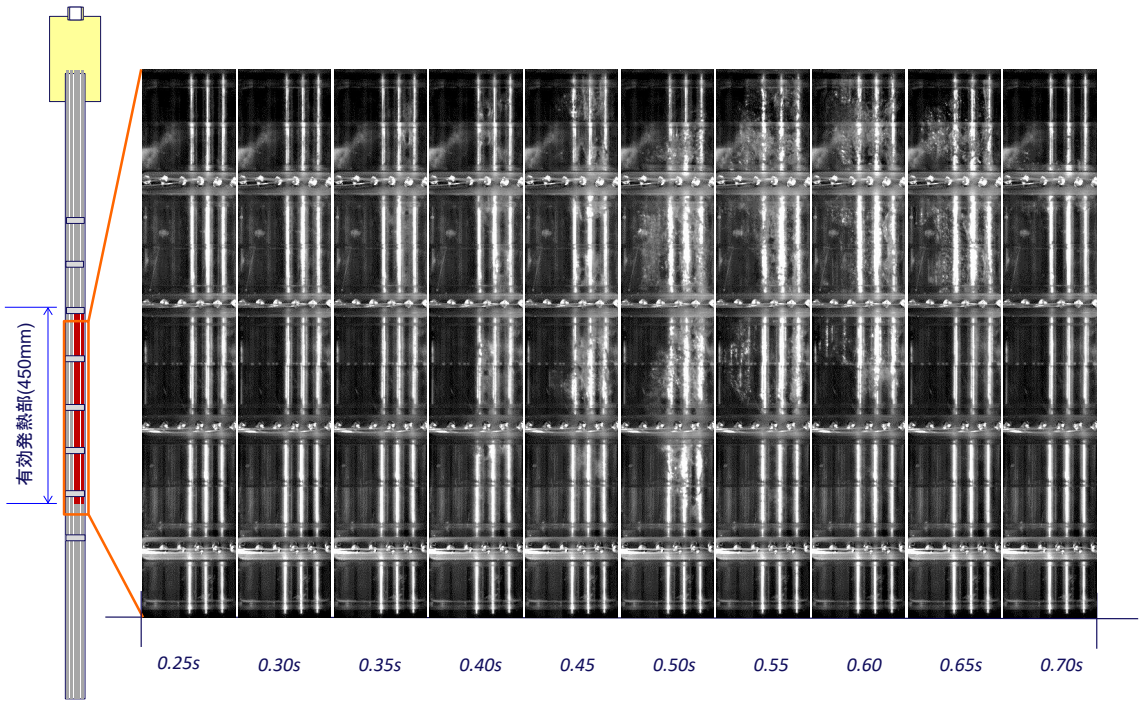


図 3-61　ボイド挙動の可視化画像（Run No. 6）

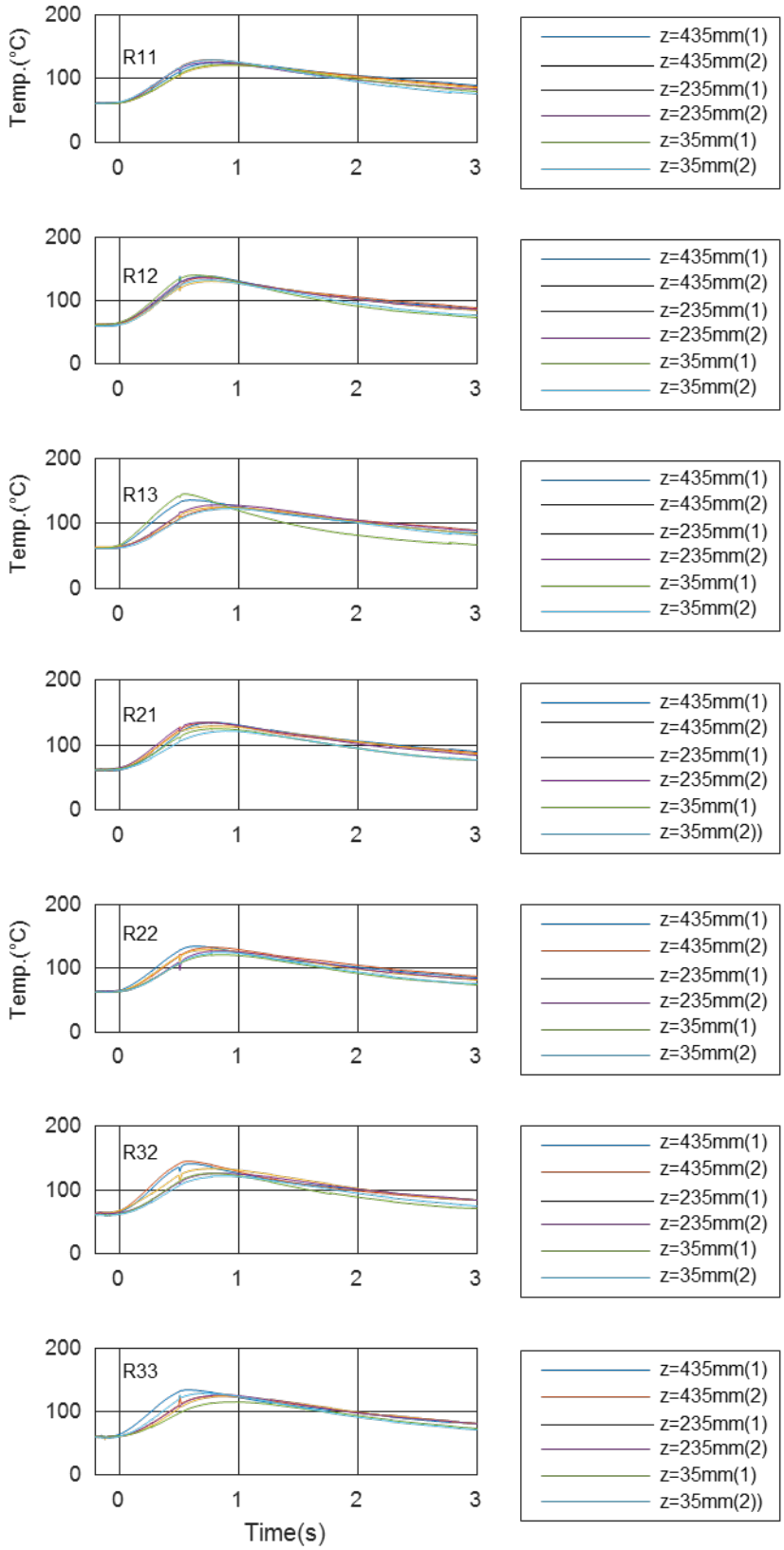


図 3-62　ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化（Run No.7）

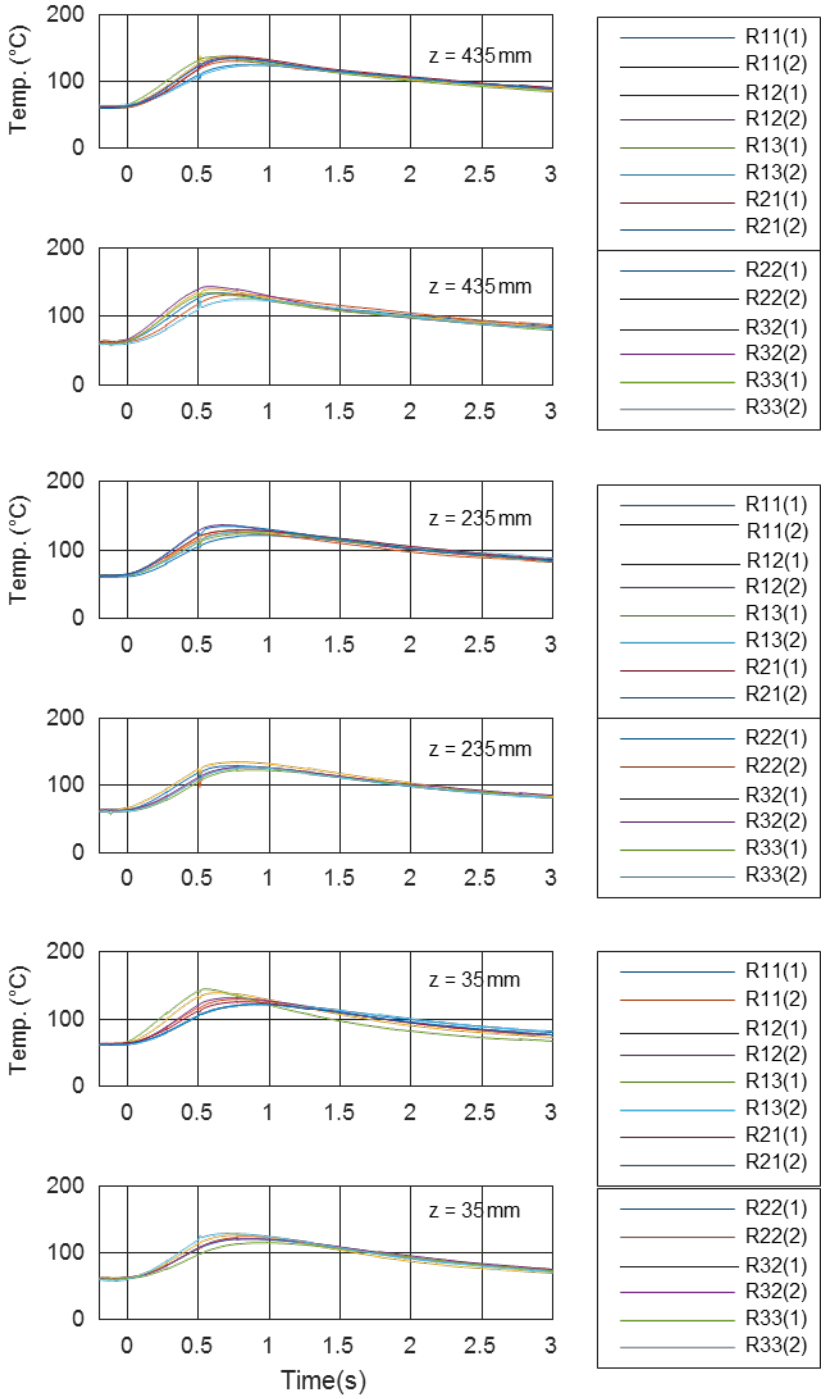


図 3-63　高さごとの燃料被覆管温度の時間変化（Run No.7）

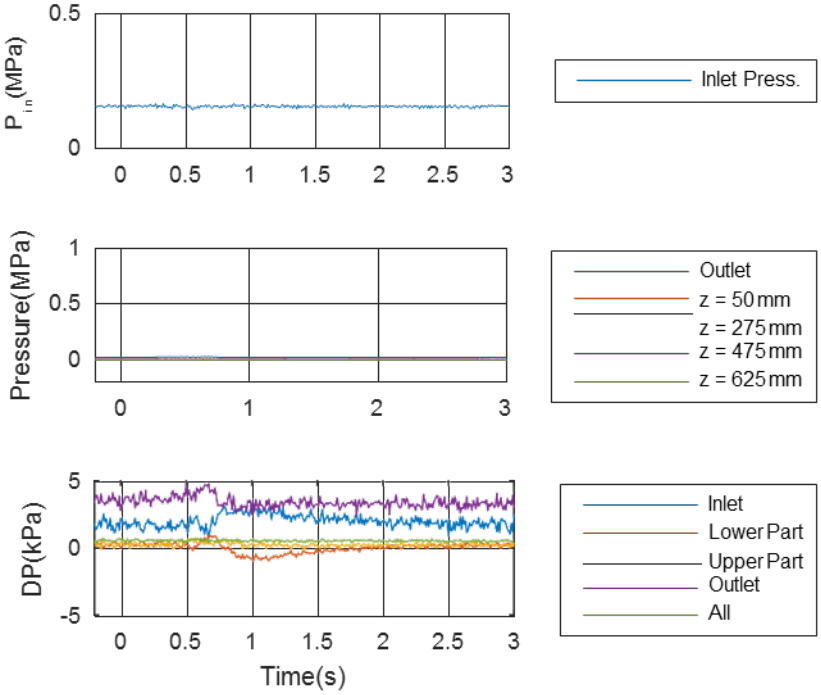


図 3-64　入口圧力，高さごとの圧力，差圧の時間変化（Run No.7）

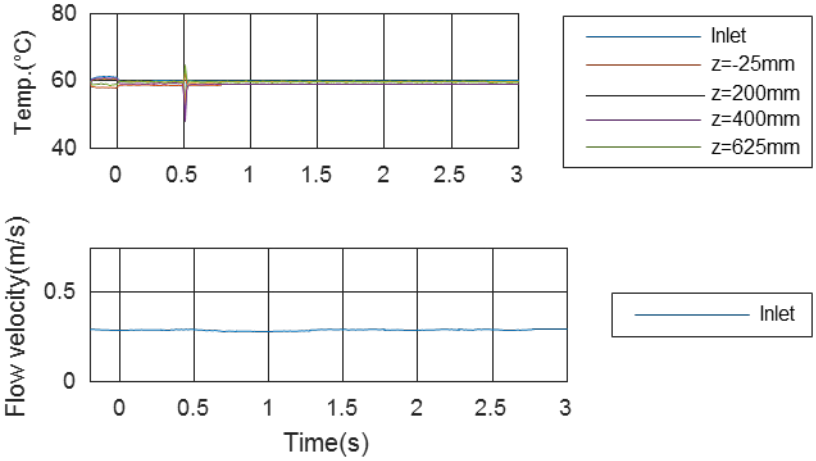


図 3-65　高さごとの水温，入口流速の時間変化（Run No.7）

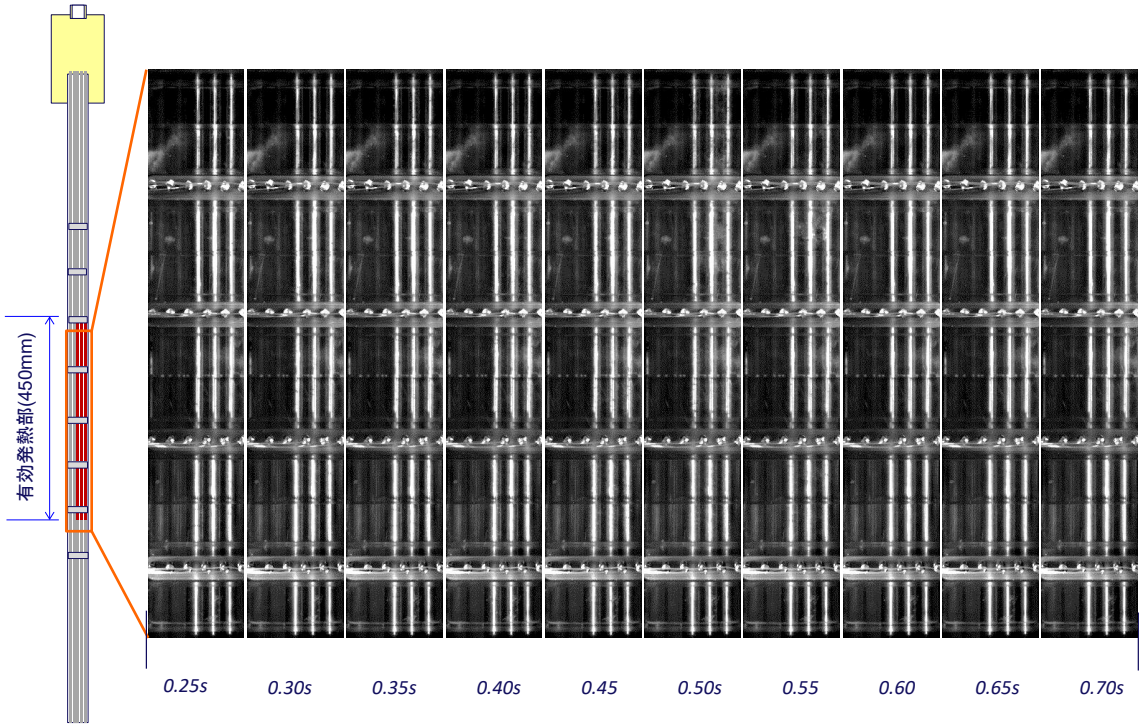


図 3-66　ボイド挙動の可視化画像（Run No. 7）

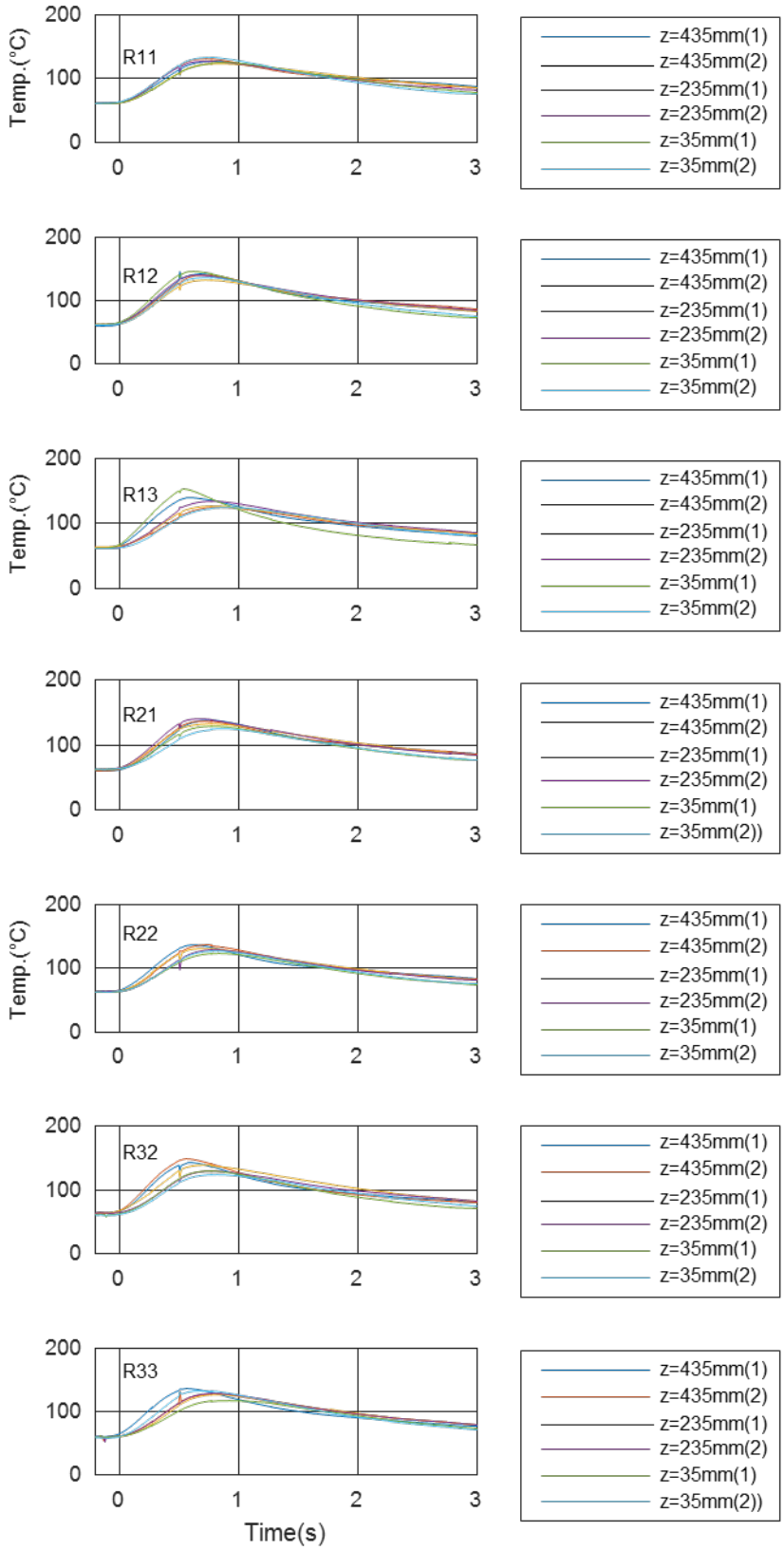


図 3-67　ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化（Run No.8）

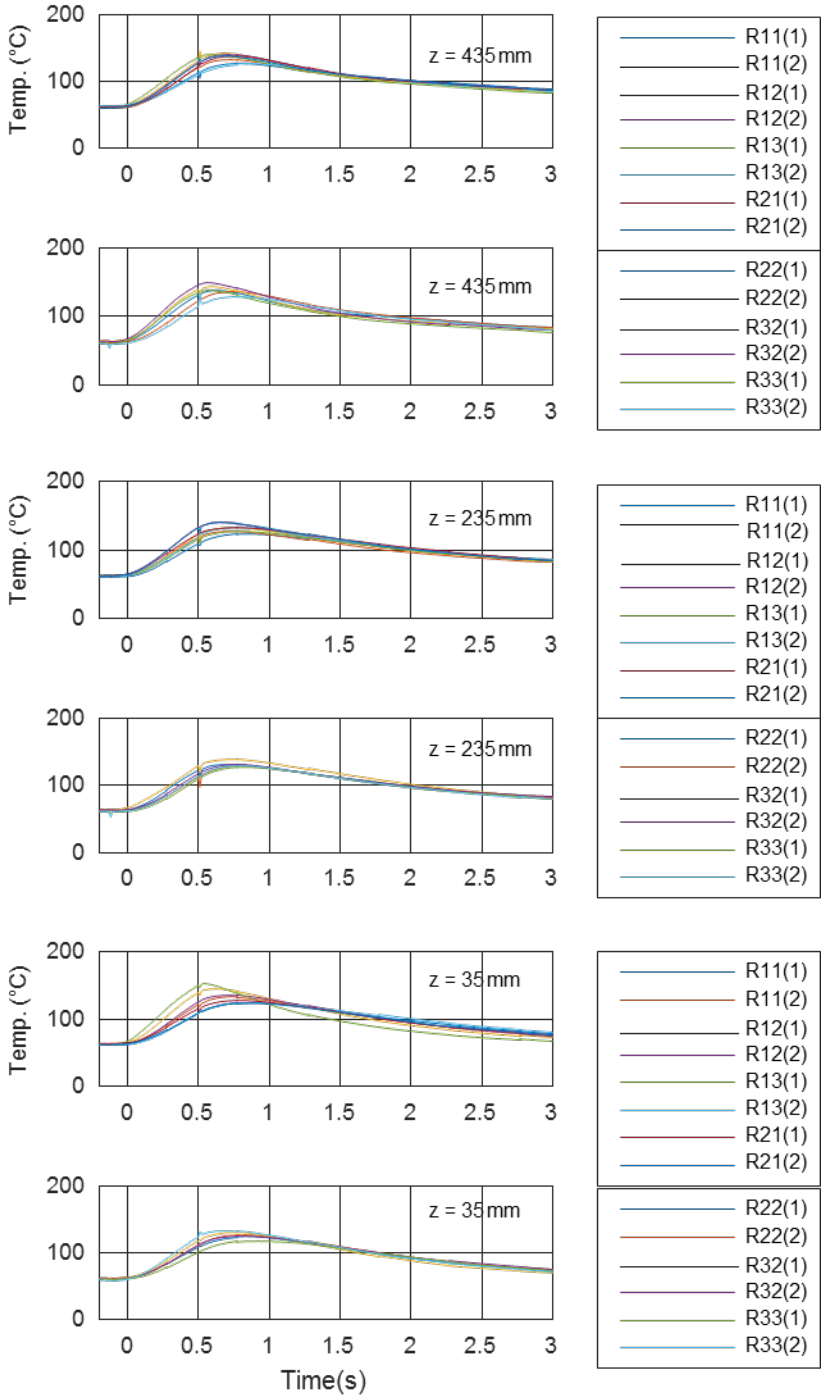


図 3-68　高さごとの燃料被覆管温度の時間変化（Run No.8）

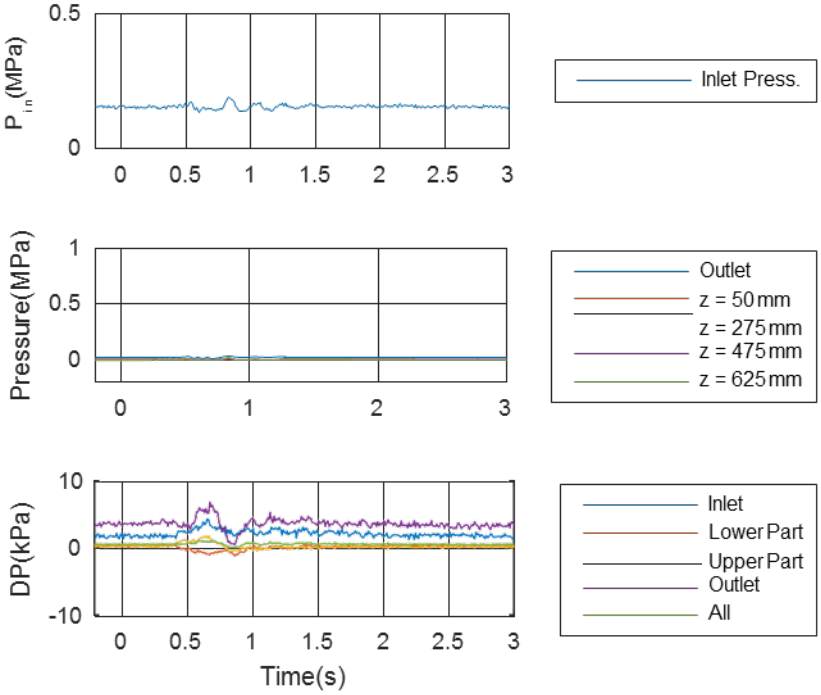


図 3-69　入口圧力，高さごとの圧力，差圧の時間変化（Run No.8）

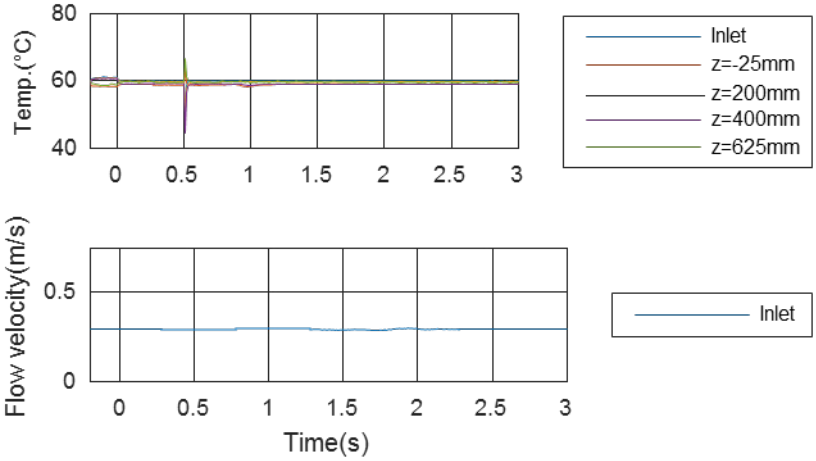


図 3-70　高さごとの水温，入口流速の時間変化（Run No.8）

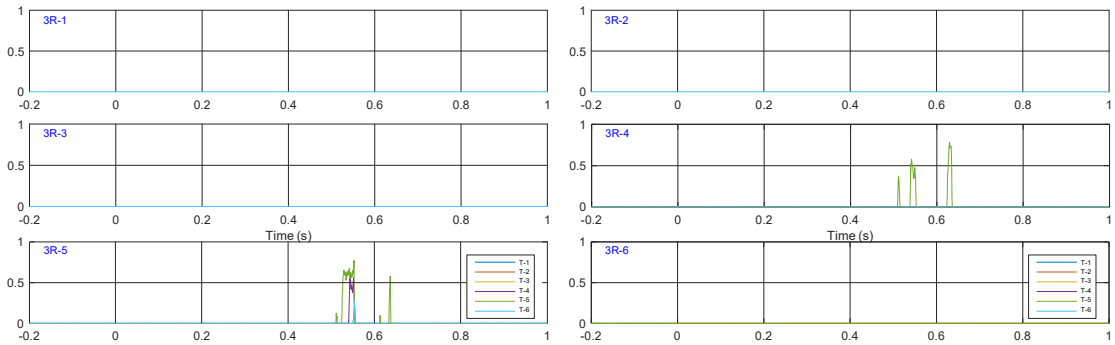


図 3-71　ボイド率の時間変化（Run No.8，3 段目の WMS）

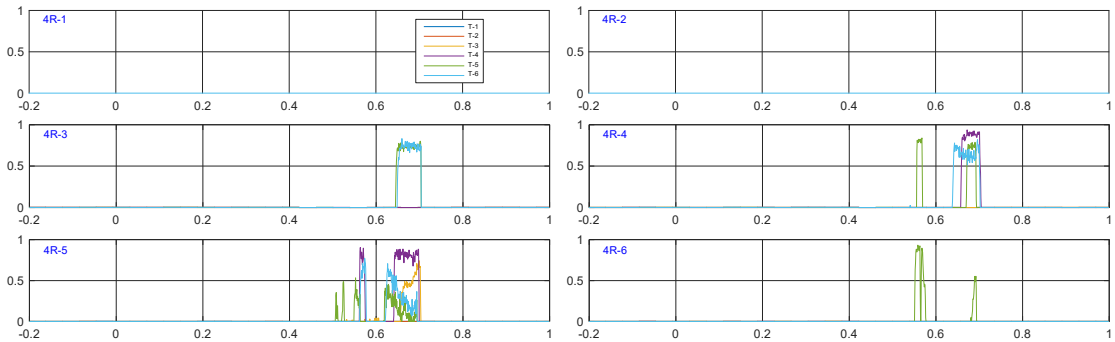


図 3-72　ボイド率の時間変化（Run No.8，4 段目の WMS）

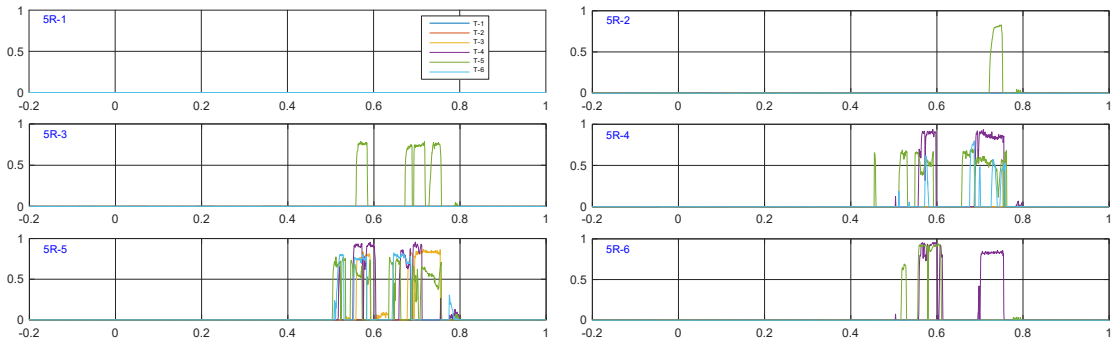


図 3-73　ボイド率の時間変化（Run No.8，5 段目の WMS）

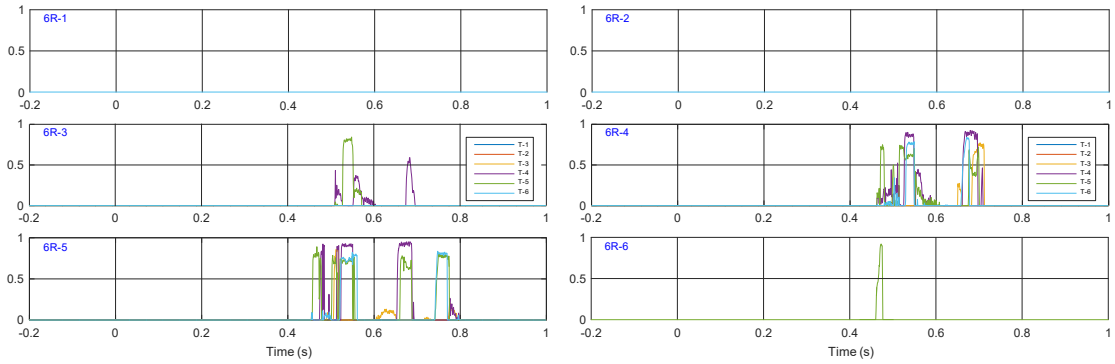


図 3-74　ボイド率の時間変化（Run No.8，6 段目の WMS）

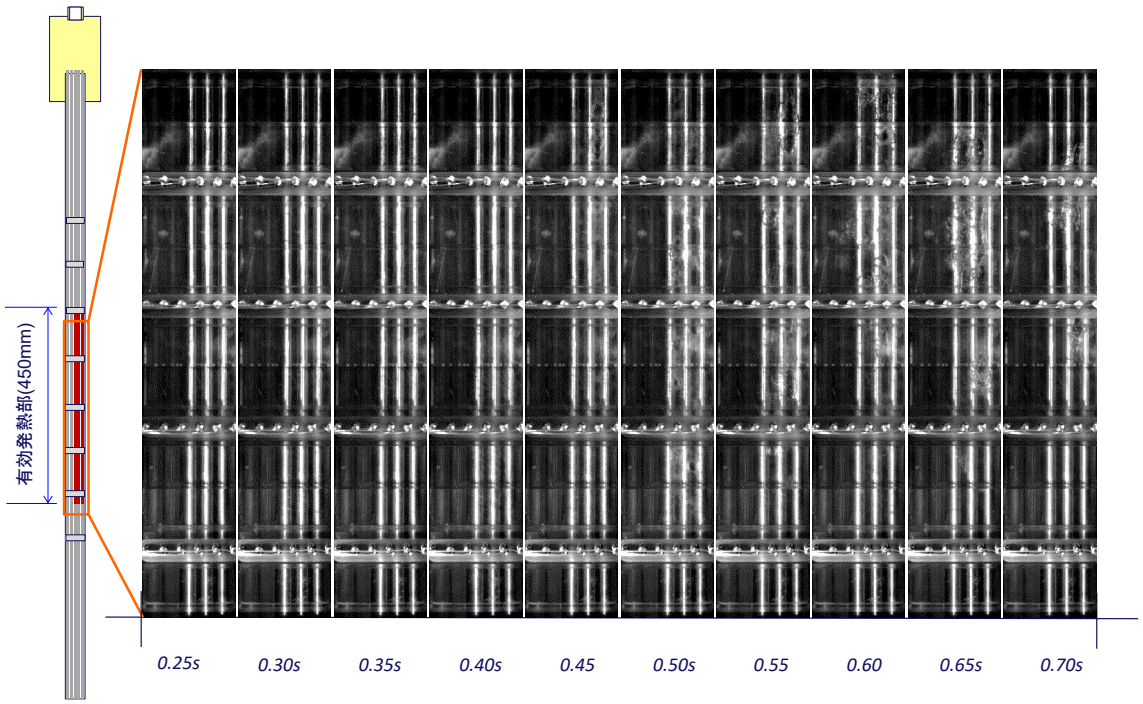


図 3-75　ボイド挙動の可視化画像（Run No. 8）

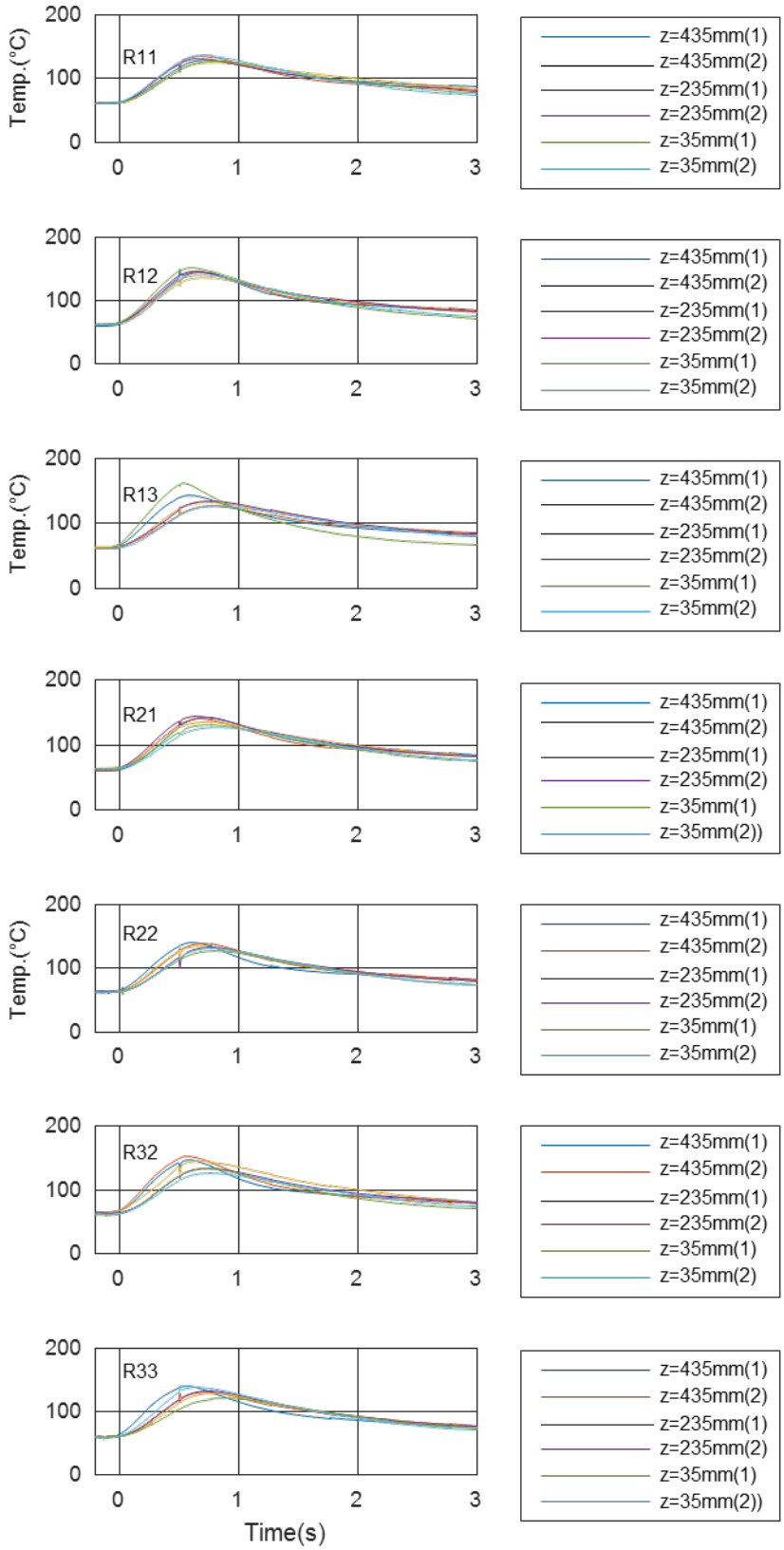


図 3-76　ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化（Run No.9）

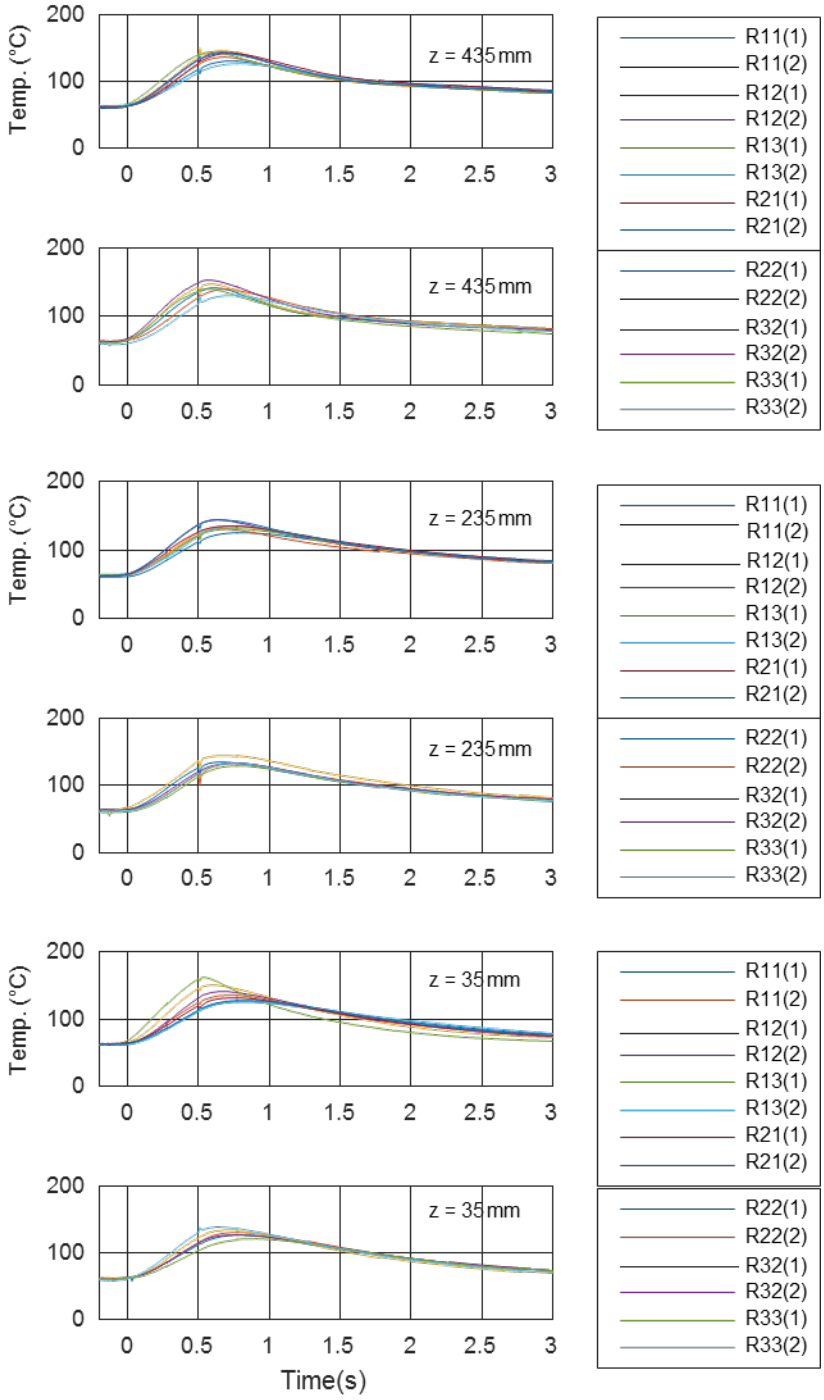


図 3-77　高さごとの燃料被覆管温度の時間変化（Run No.9）

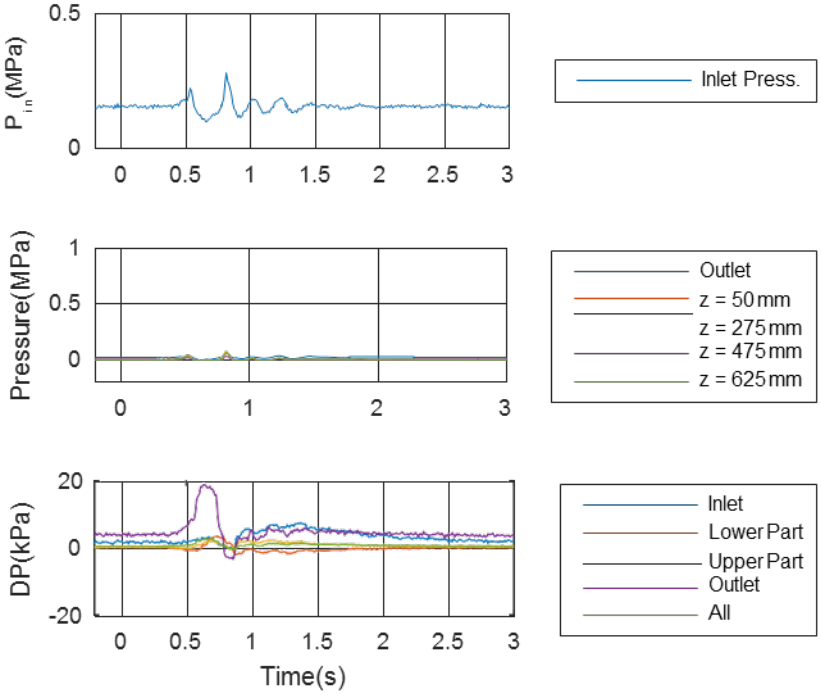


図 3-78　入口圧力，高さごとの圧力，差圧の時間変化（Run No.9）

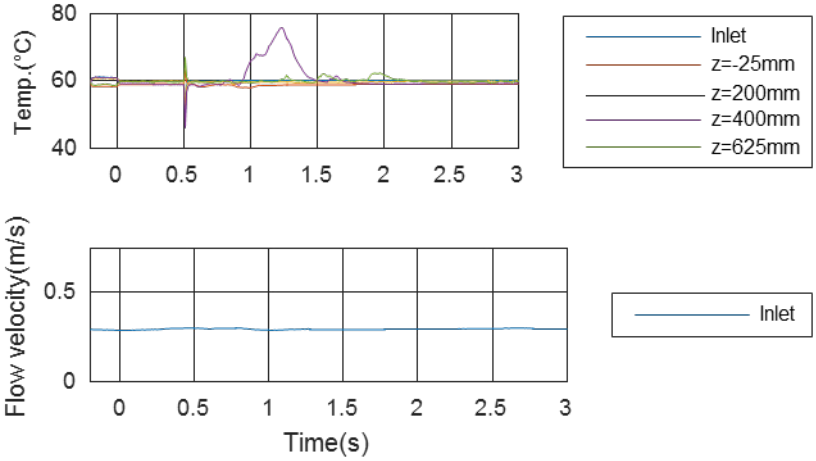


図 3-79　高さごとの水温，入口流速の時間変化（Run No.9）

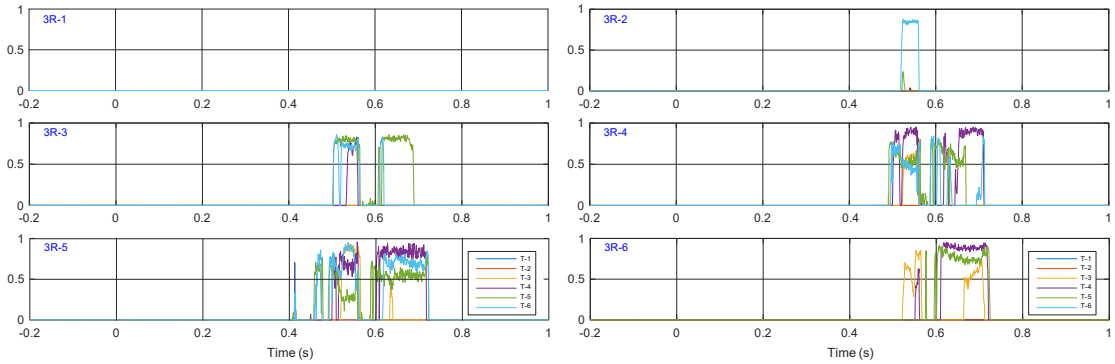


図 3-80　ボイド率の時間変化（Run No.9，3 段目の WMS）

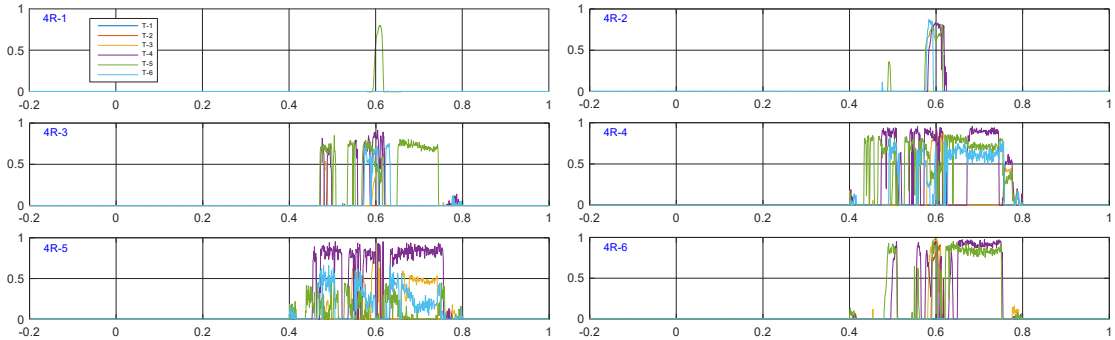


図 3-81　ボイド率の時間変化（Run No.9，4 段目の WMS）

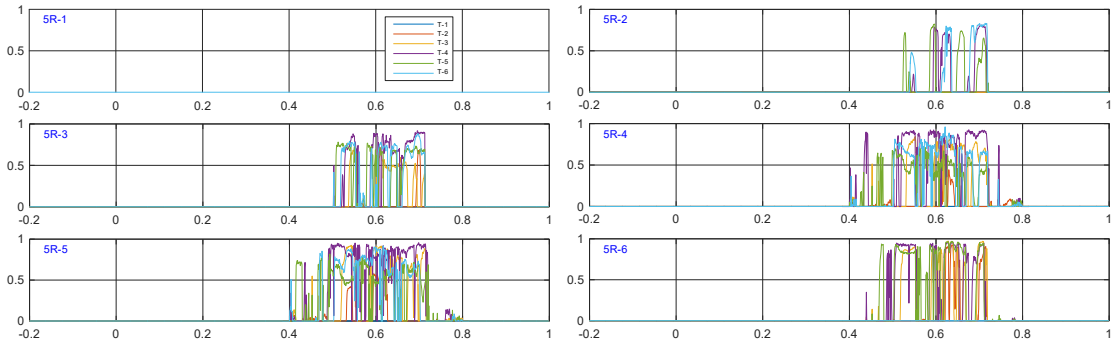


図 3-82　ボイド率の時間変化（Run No.9，5 段目の WMS）

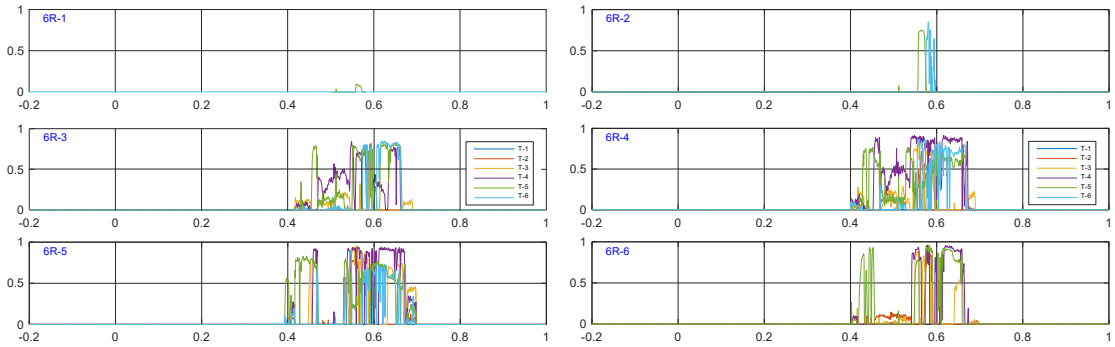


図 3-83　ボイド率の時間変化（Run No.9，6 段目の WMS）

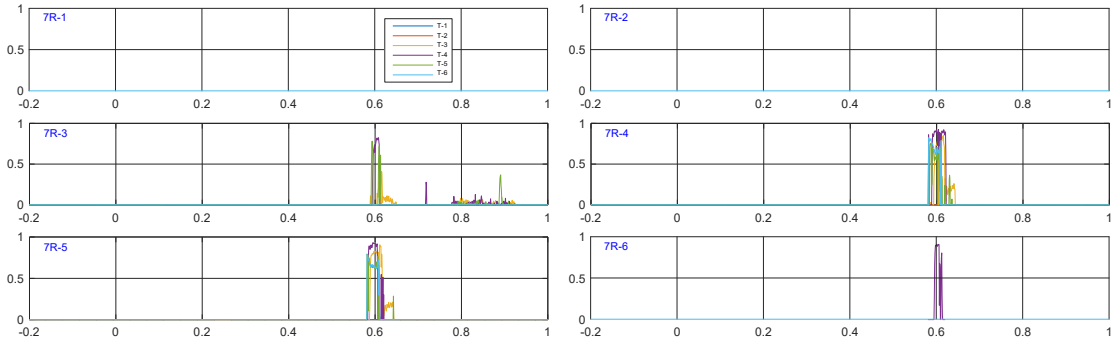


図 3-84　ボイド率の時間変化（Run No.9，7 段目の WMS）

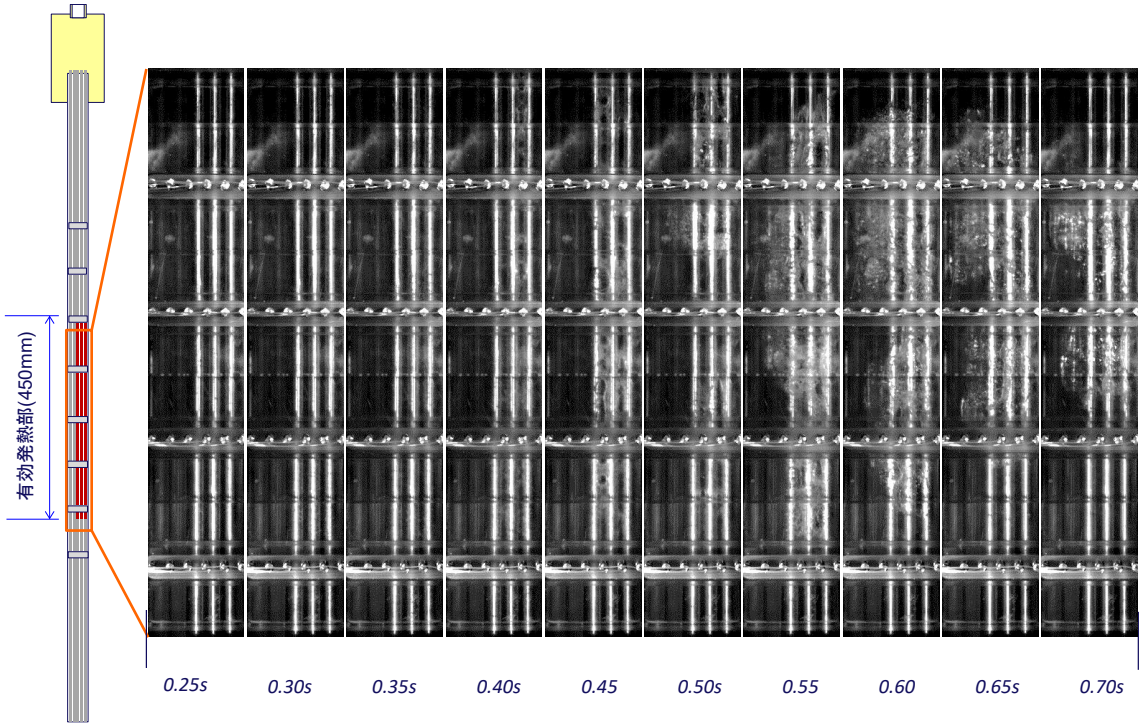


図 3-85　ボイド挙動の可視化画像（Run No. 9）

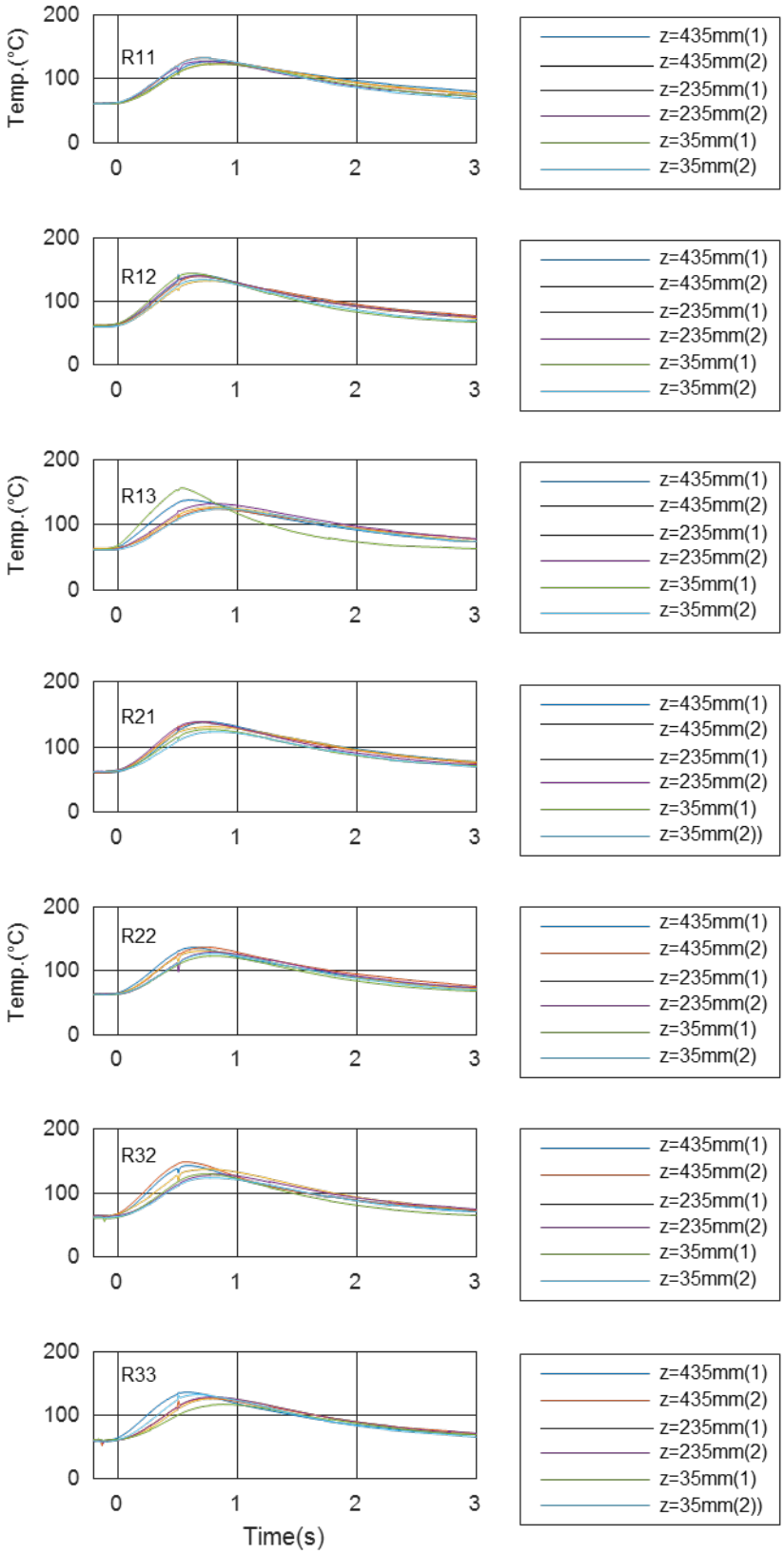


図 3-86　ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化（Run No.10）

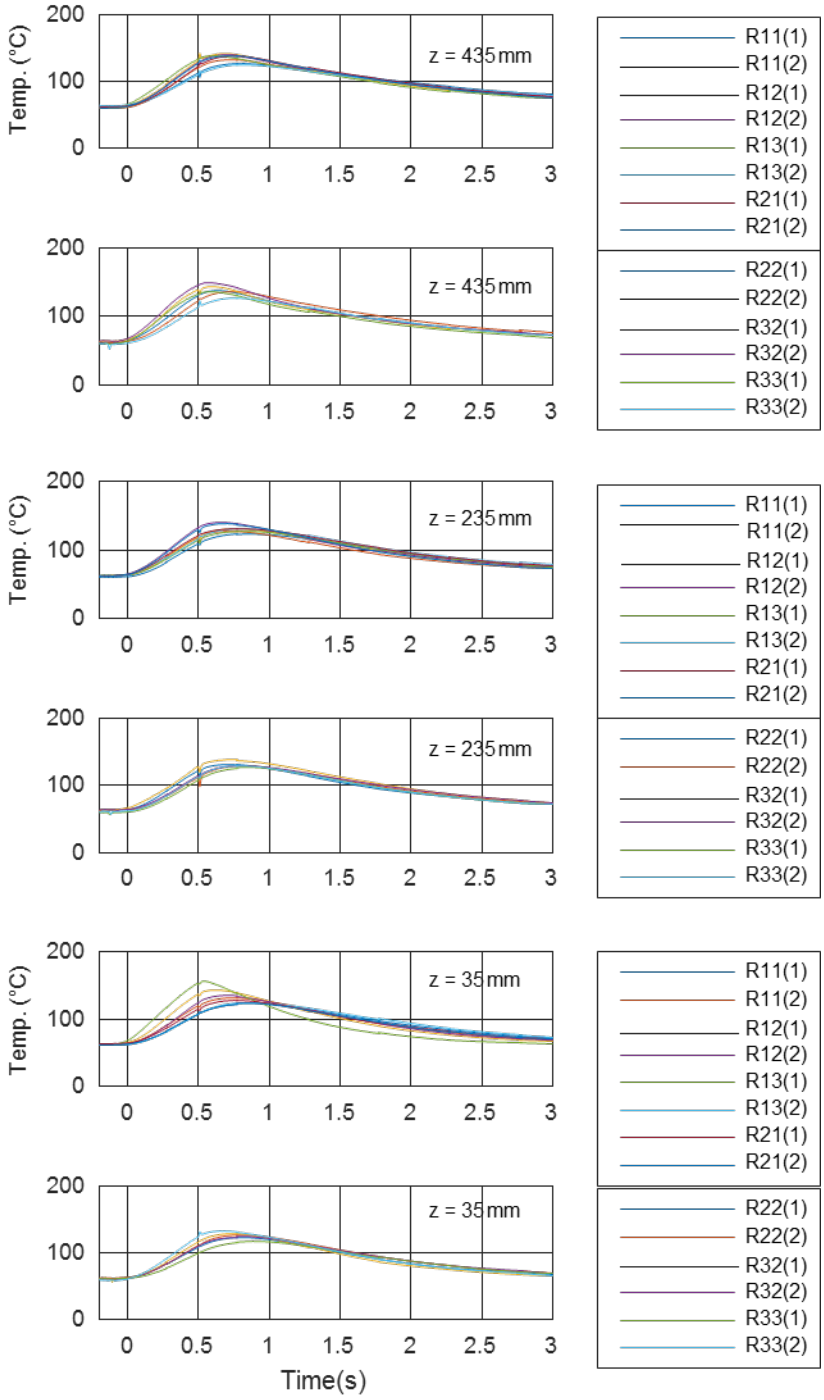


図 3-87　高さごとの燃料被覆管温度の時間変化（Run No.10）

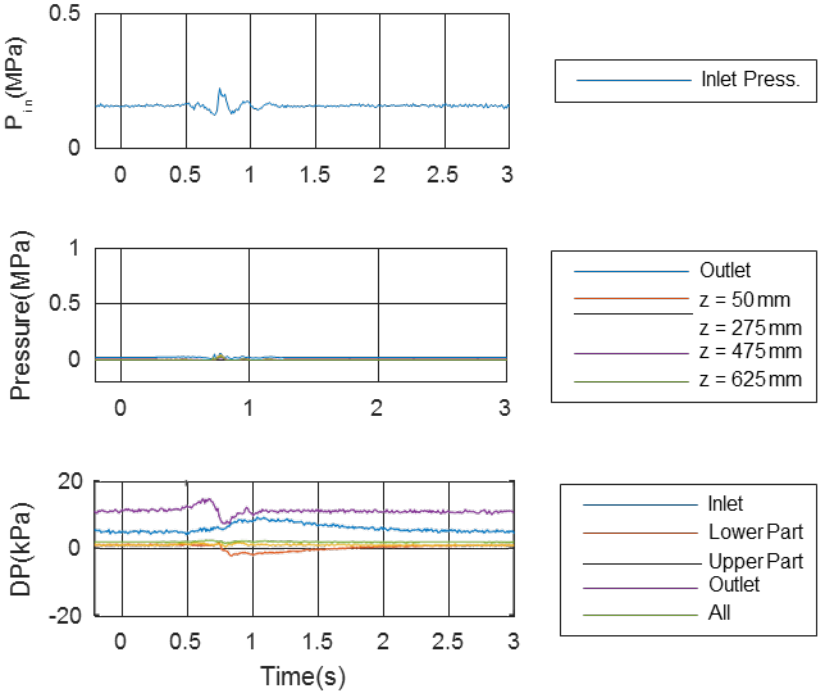


図 3-88　入口圧力，高さごとの圧力，差圧の時間変化（Run No.10）

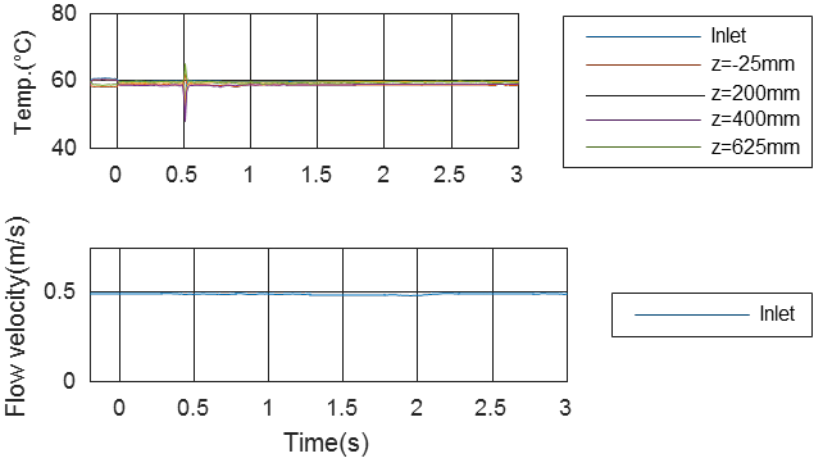


図 3-89　高さごとの水温，入口流速の時間変化（Run No.10）

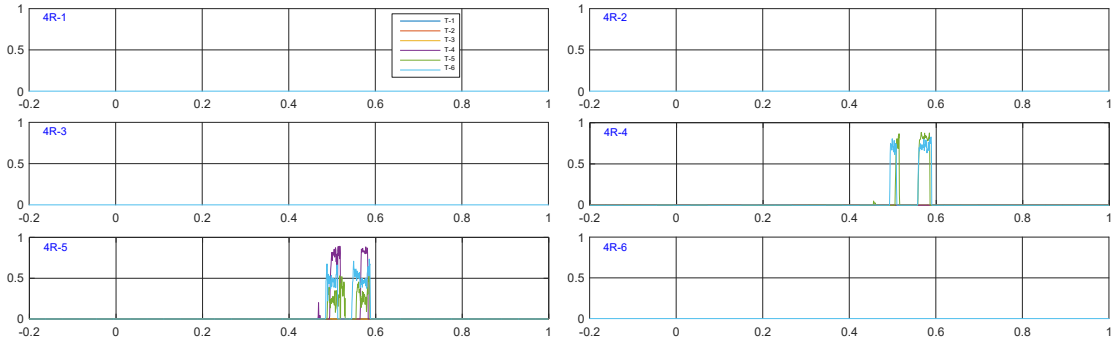


図 3-90　ボイド率の時間変化（Run No.10，4 段目の WMS）

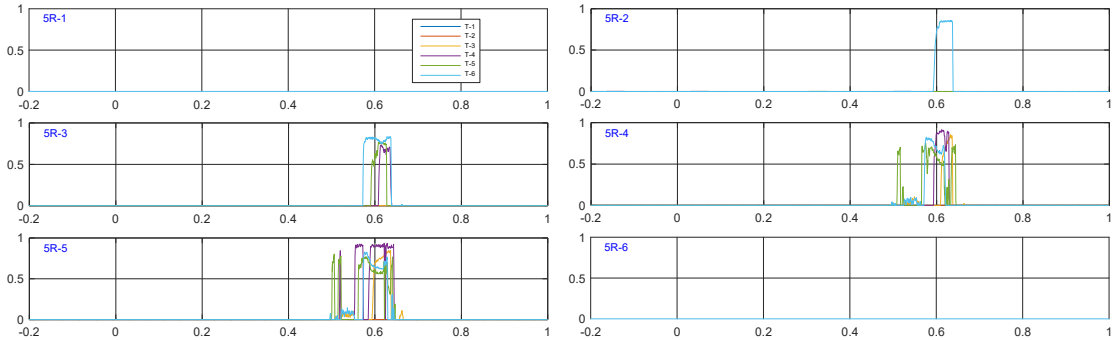


図 3-91　ボイド率の時間変化（Run No.10，5 段目の WMS）

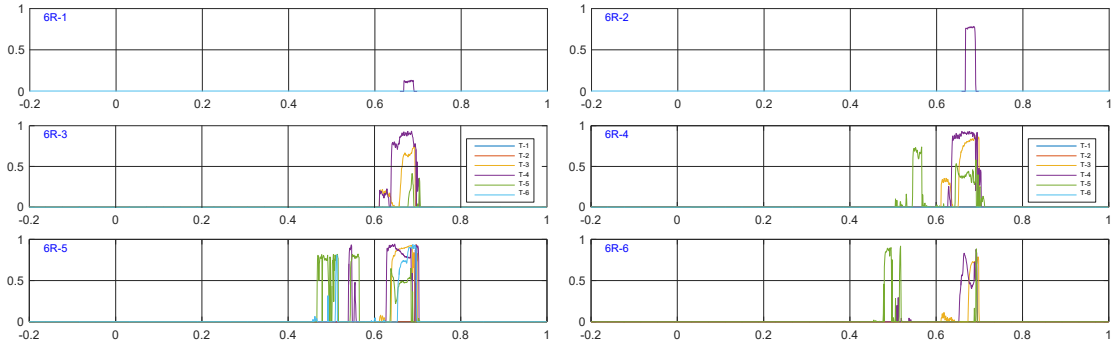


図 3-92　ボイド率の時間変化（Run No.10，6 段目の WMS）

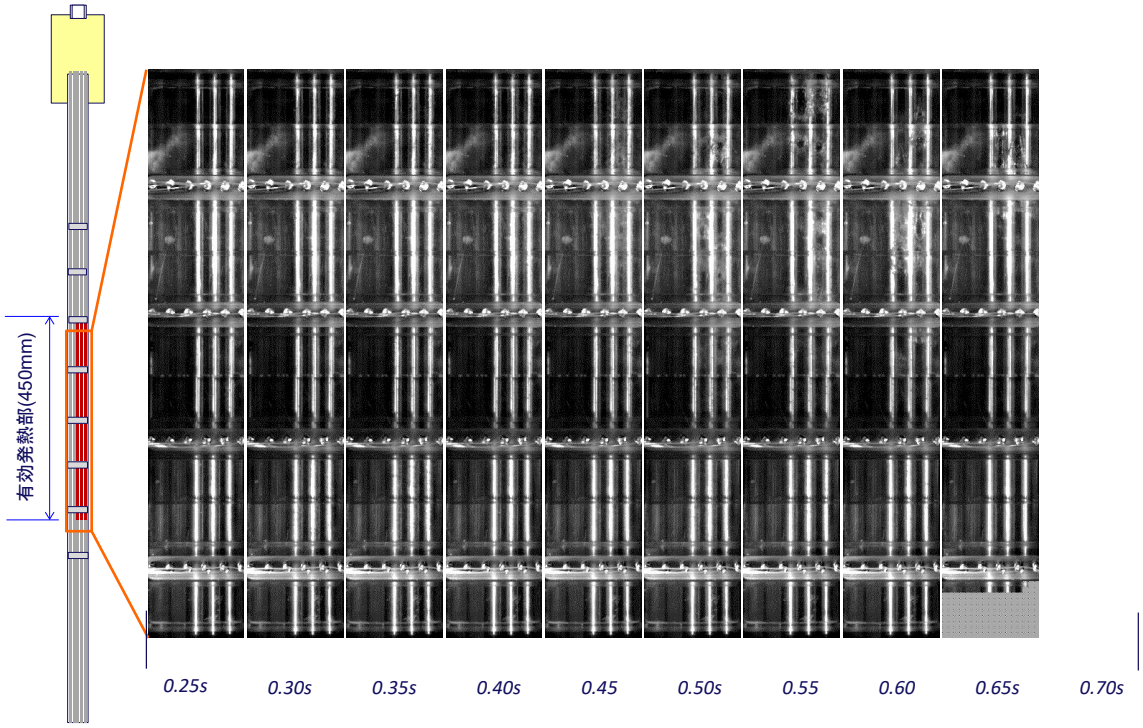


図 3-93　ボイド挙動の可視化画像（Run No. 10）

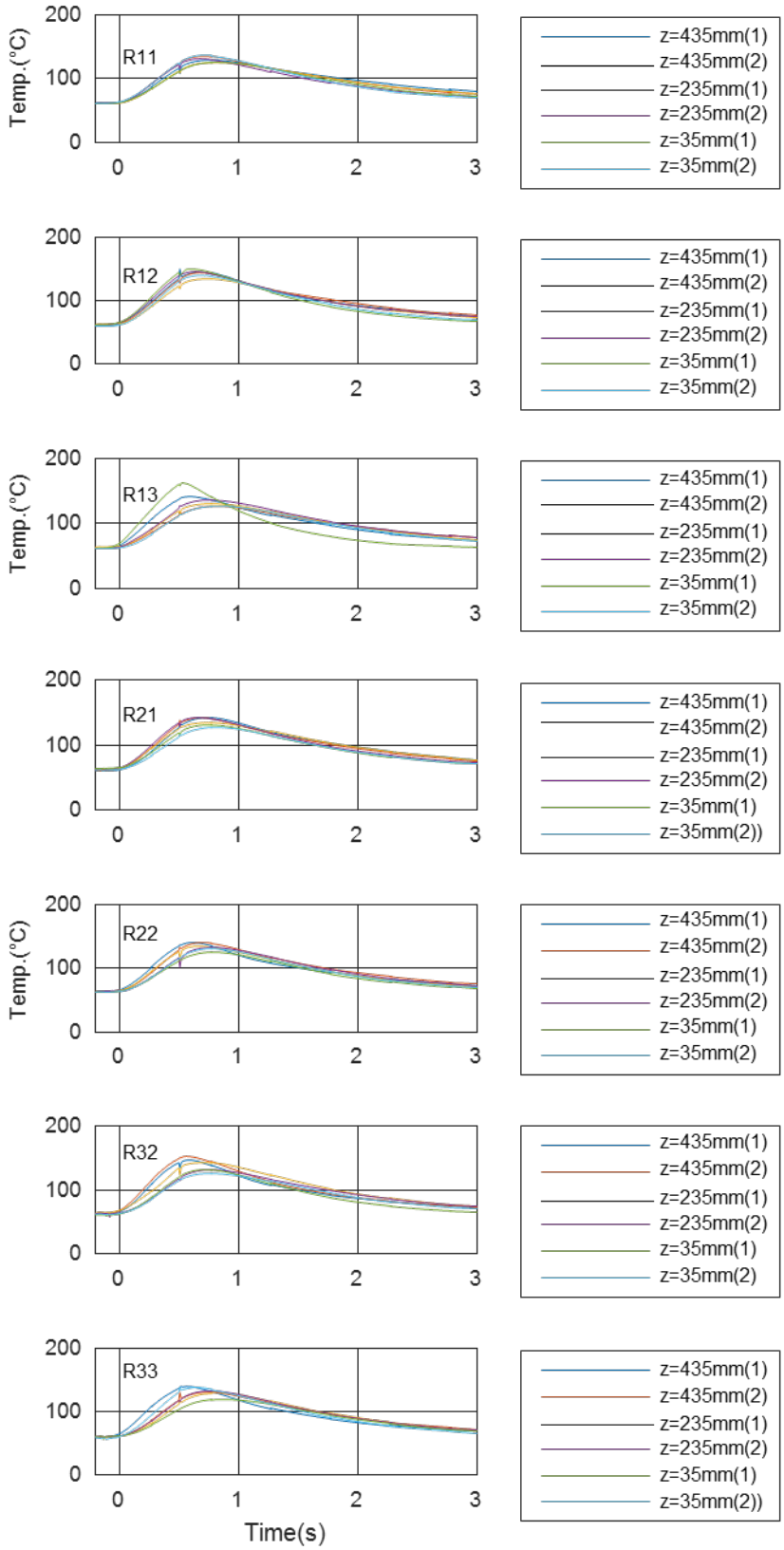


図 3-94　ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化（Run No.11）

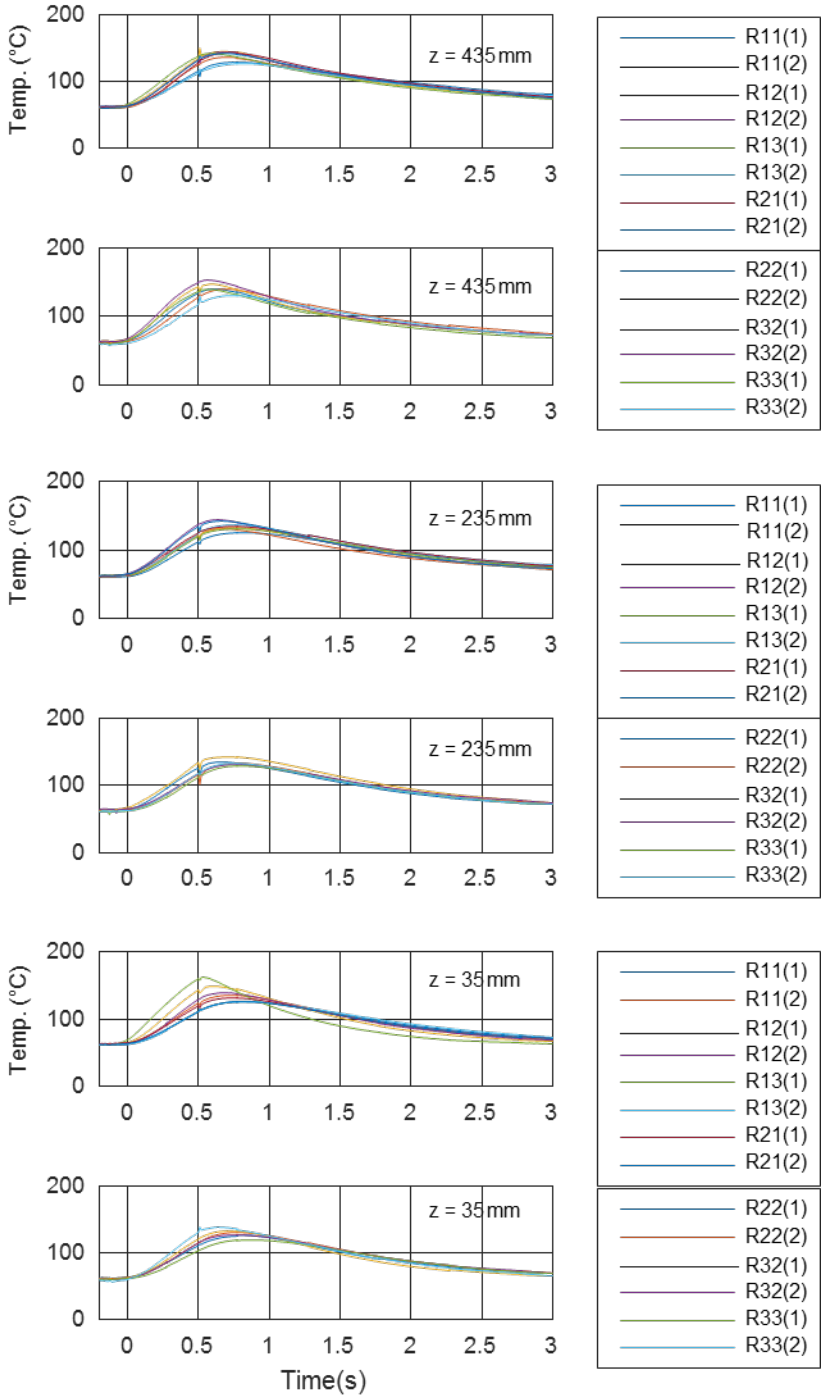


図 3-95　高さごとの燃料被覆管温度の時間変化（Run No.11）

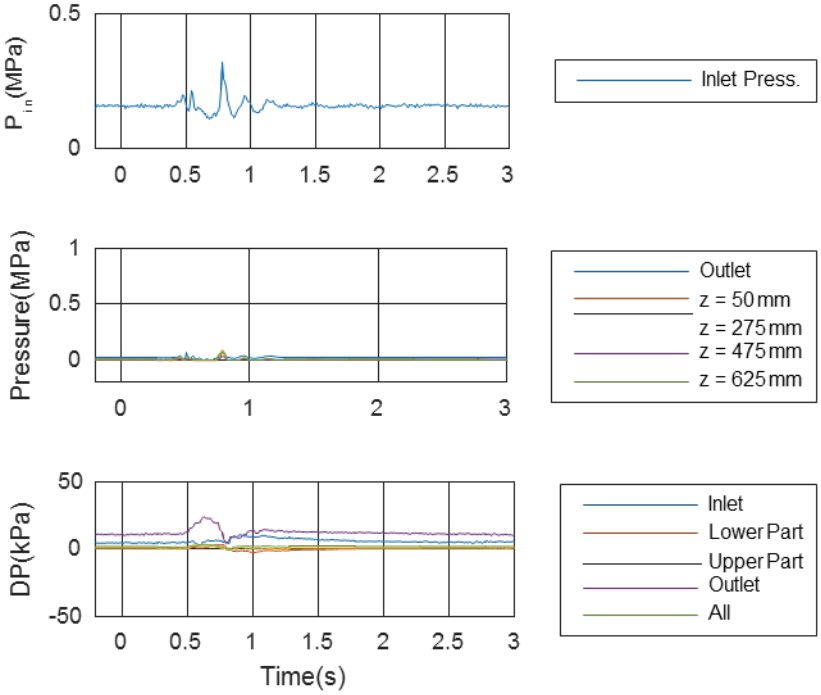


図 3-96　入口圧力，高さごとの圧力，差圧の時間変化（Run No.11）

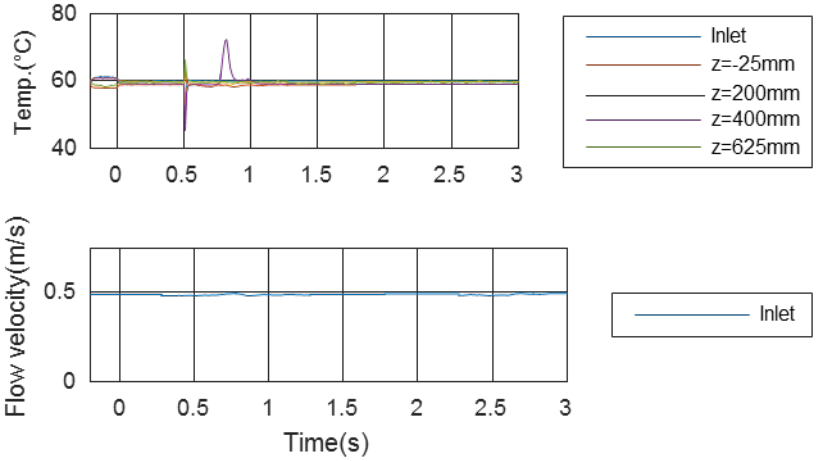


図 3-97　高さごとの水温，入口流速の時間変化（Run No.11）

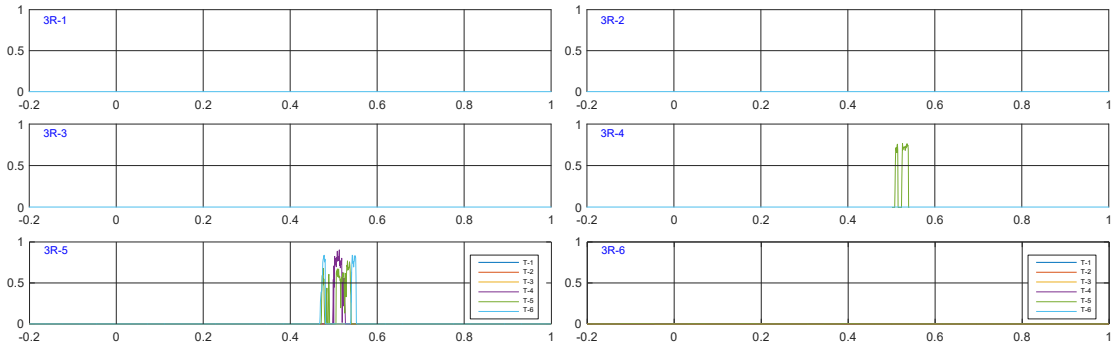


図 3-98　ボイド率の時間変化（Run No.11，3 段目の WMS）

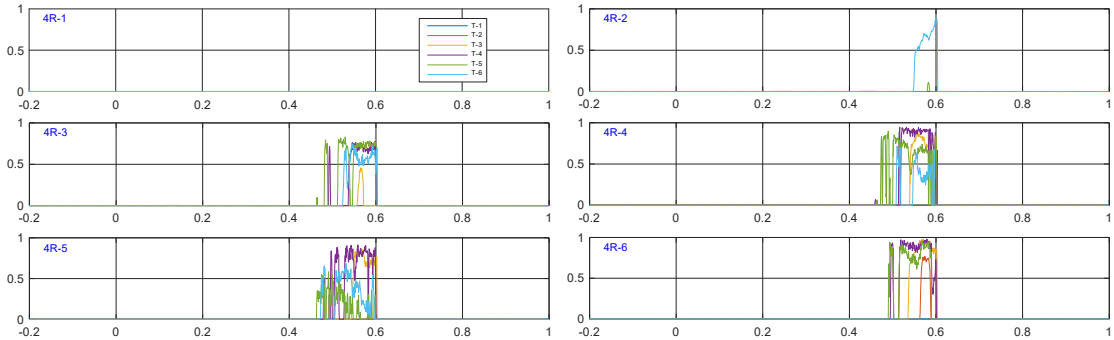


図 3-99　ボイド率の時間変化（Run No.11，4 段目の WMS）

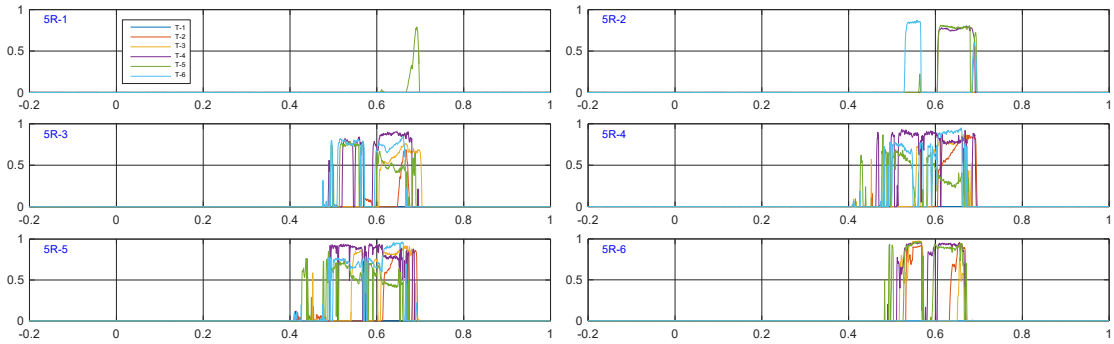


図 3-100　ボイド率の時間変化（Run No.11，5 段目の WMS）

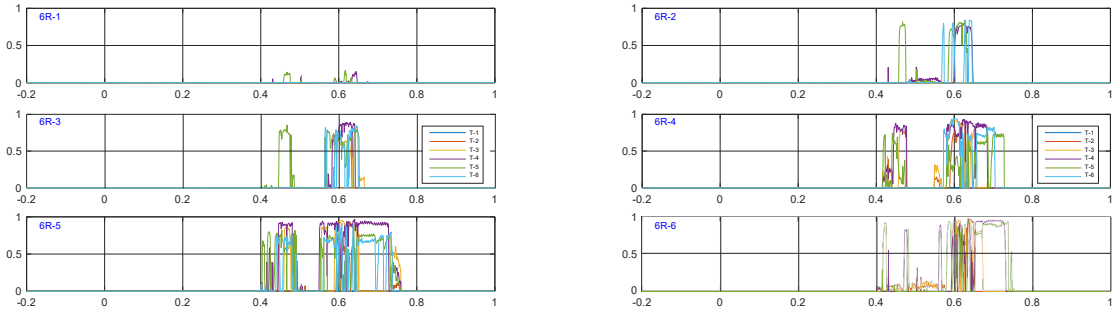


図 3-101　ボイド率の時間変化（Run No.11，6 段目の WMS）

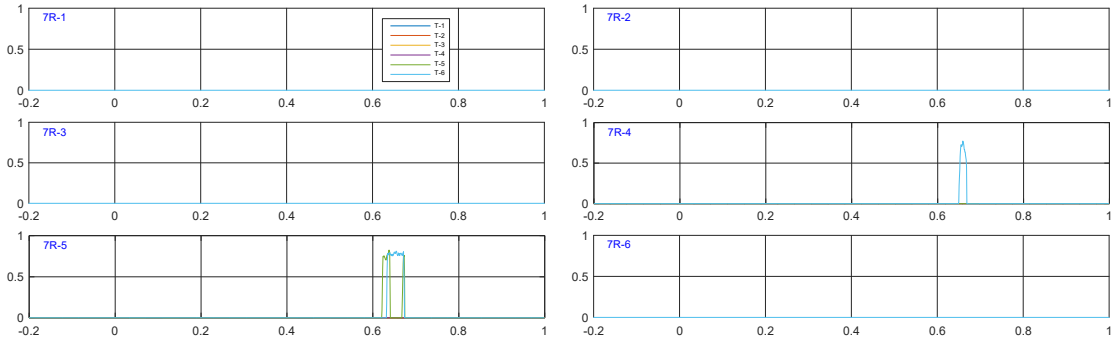


図 3-102　ボイド率の時間変化（Run No.11，7 段目の WMS）

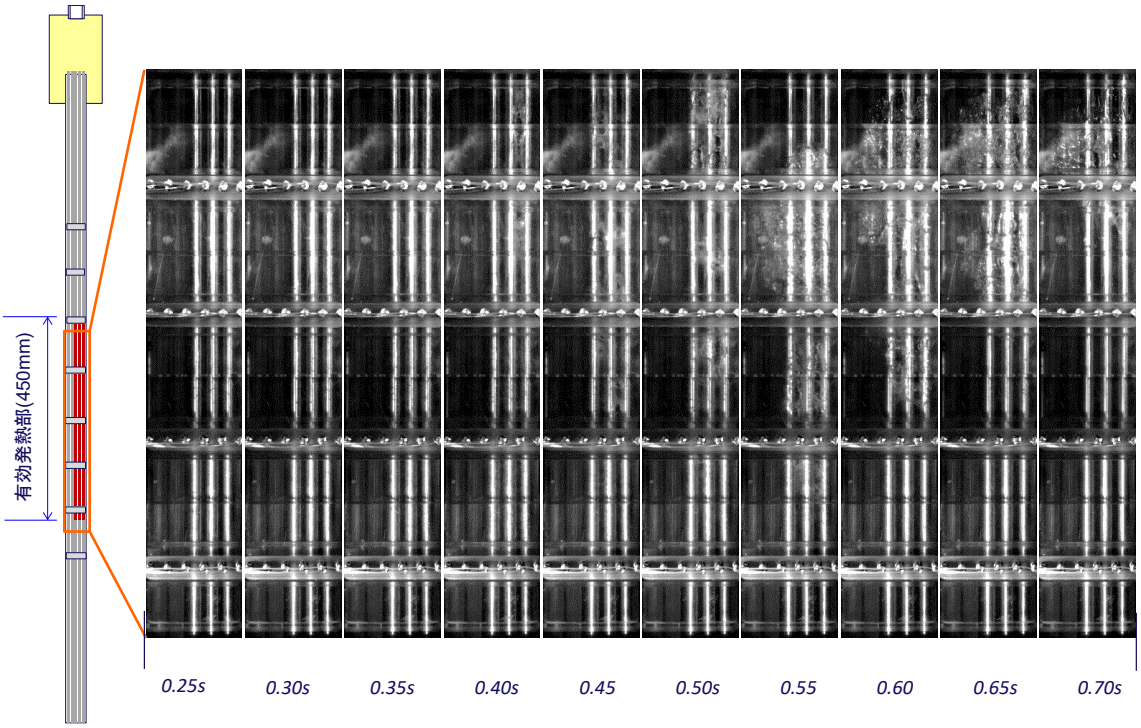


図 3-103　ボイド挙動の可視化画像（Run No. 11）

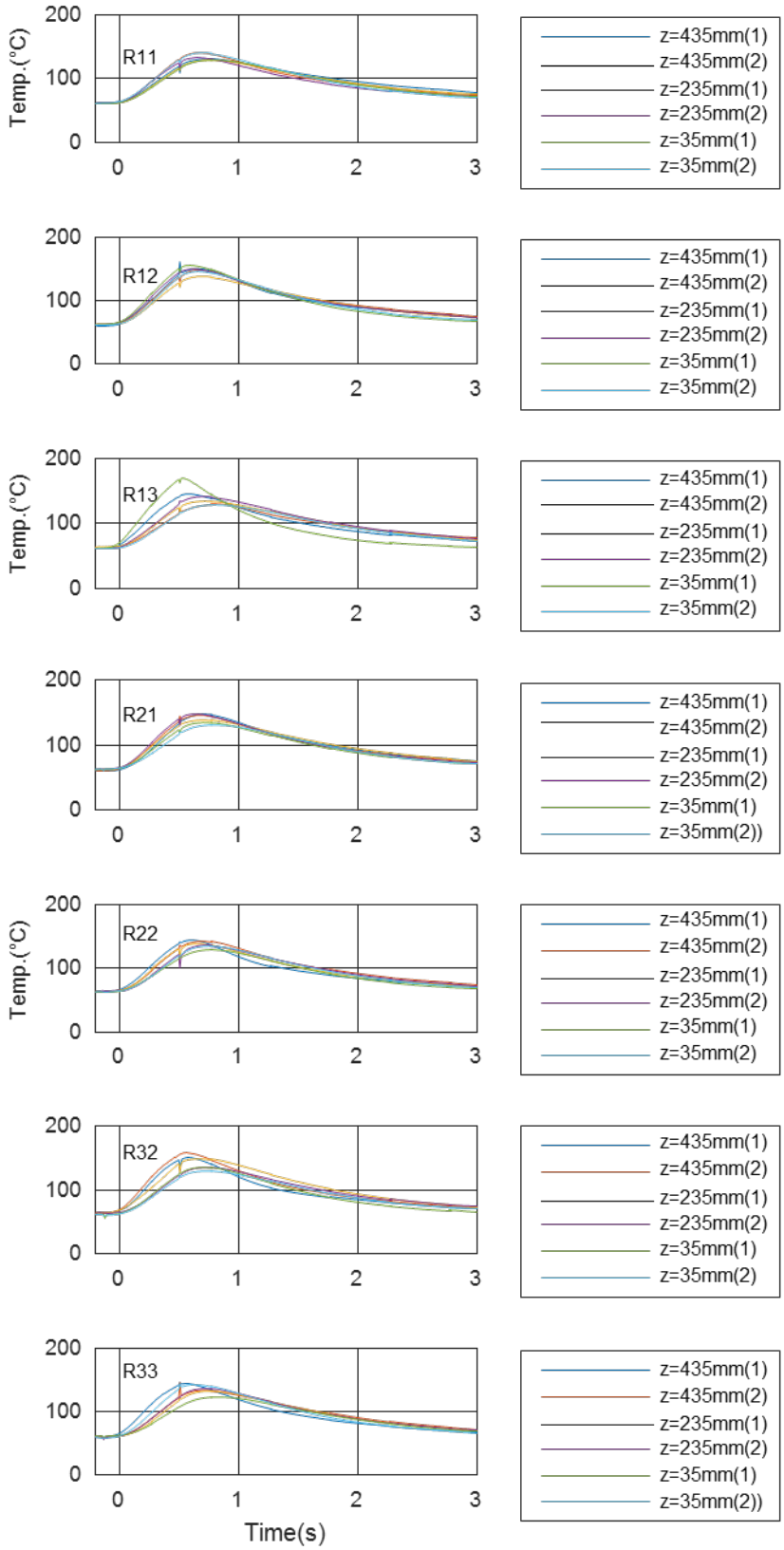


図 3-104　ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化（Run No.12）

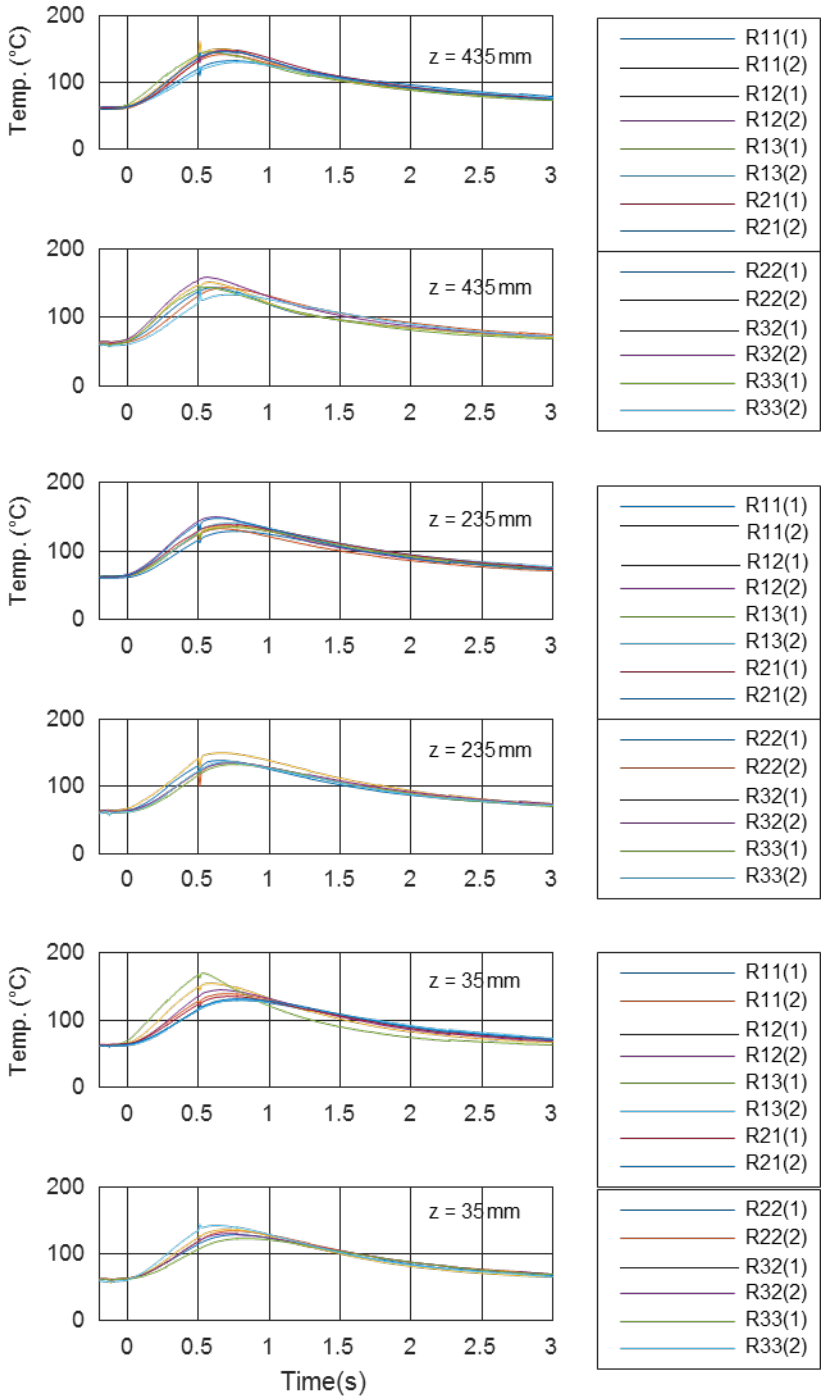


図 3-105　高さごとの燃料被覆管温度の時間変化（Run No.12）

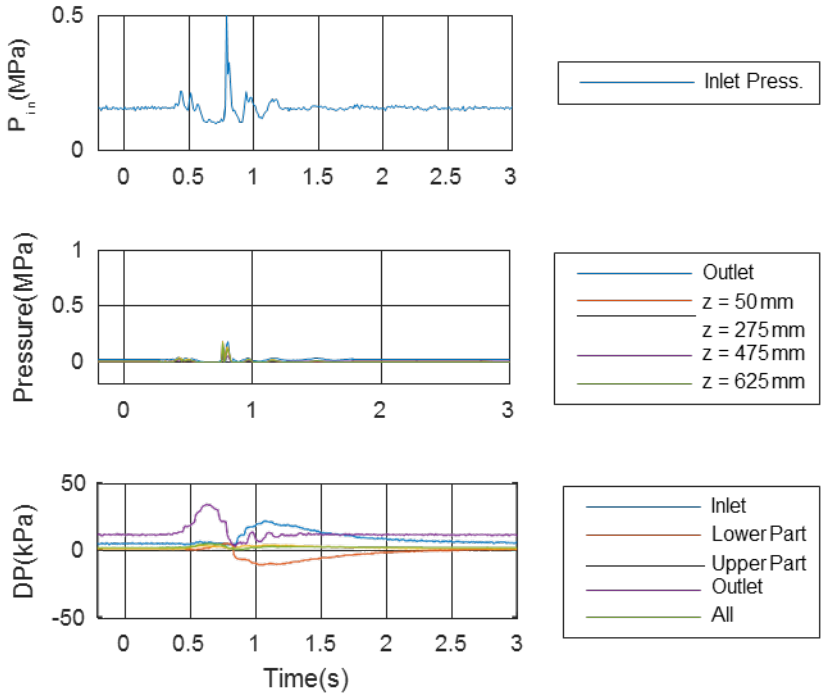


図 3-106　入口圧力，高さごとの圧力，差圧の時間変化（Run No.12）

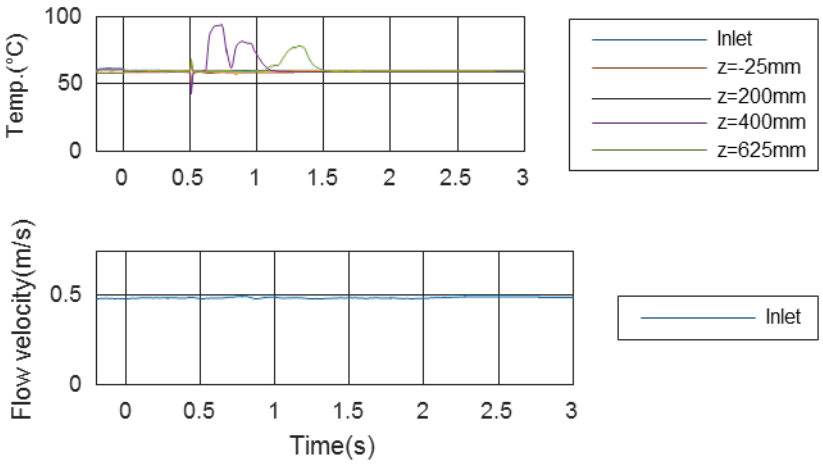


図 3-107　高さごとの水温，入口流速の時間変化（Run No.12）

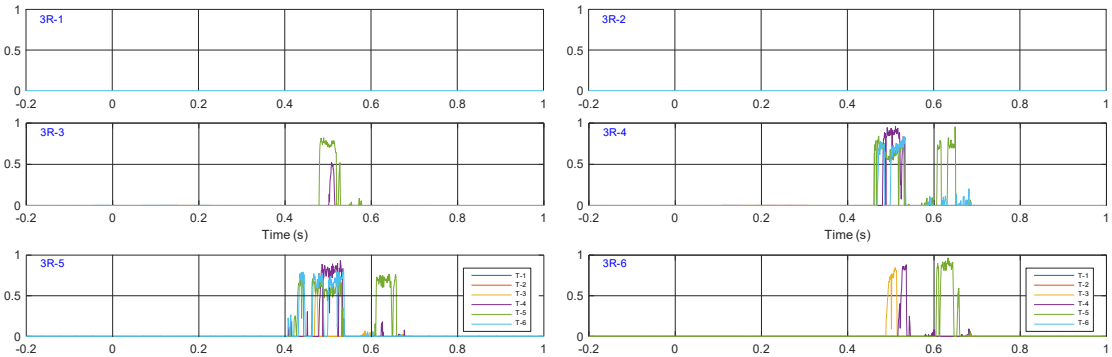


図 3-108　ボイド率の時間変化（Run No.12，3 段目の WMS）

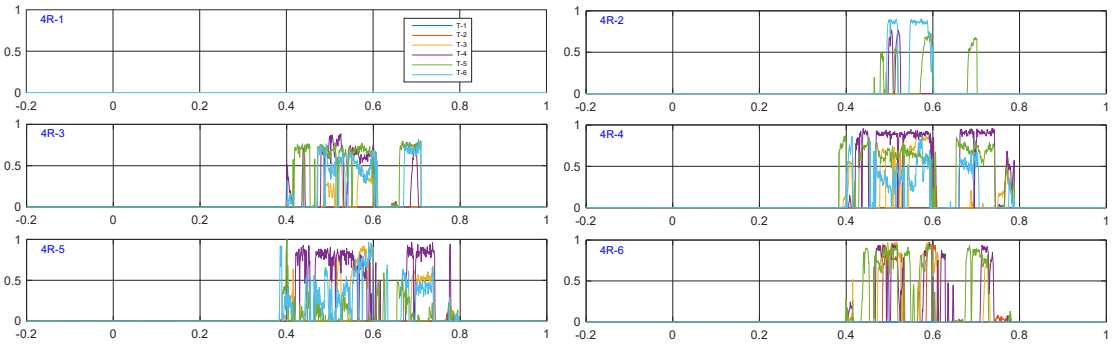


図 3-109　ボイド率の時間変化（Run No.12，4 段目の WMS）

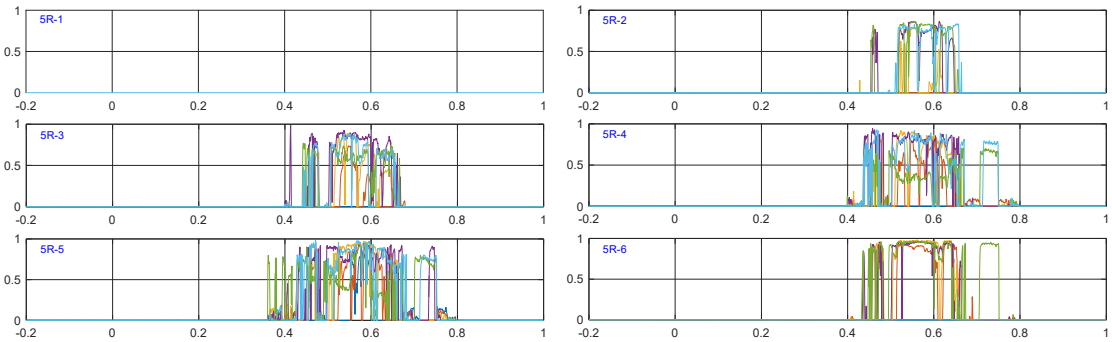


図 3-110　ボイド率の時間変化（Run No.12，5 段目の WMS）

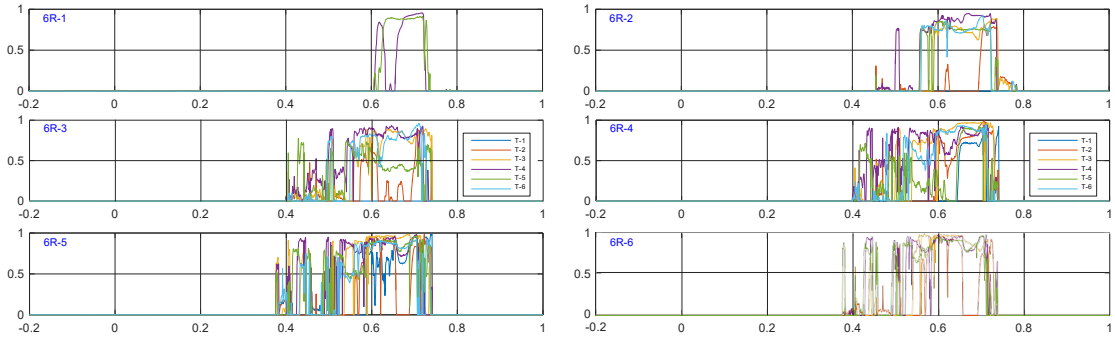


図 3-111　ボイド率の時間変化（Run No.12，6 段目の WMS）

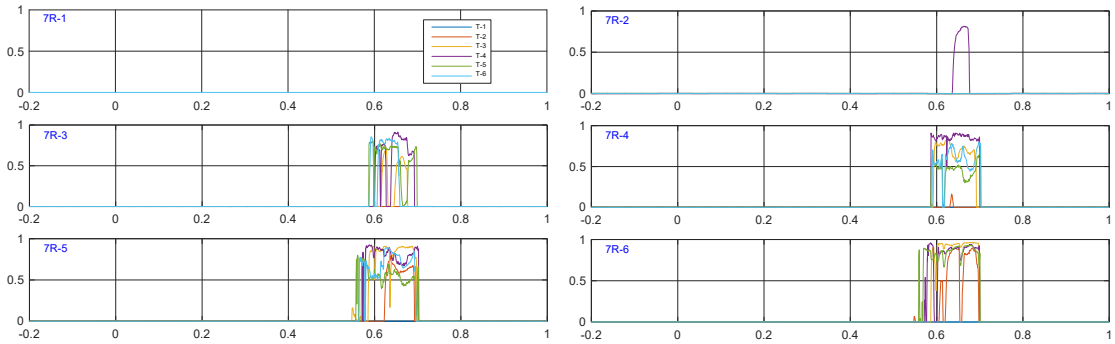


図 3-112　ボイド率の時間変化（Run No.12，7 段目の WMS）

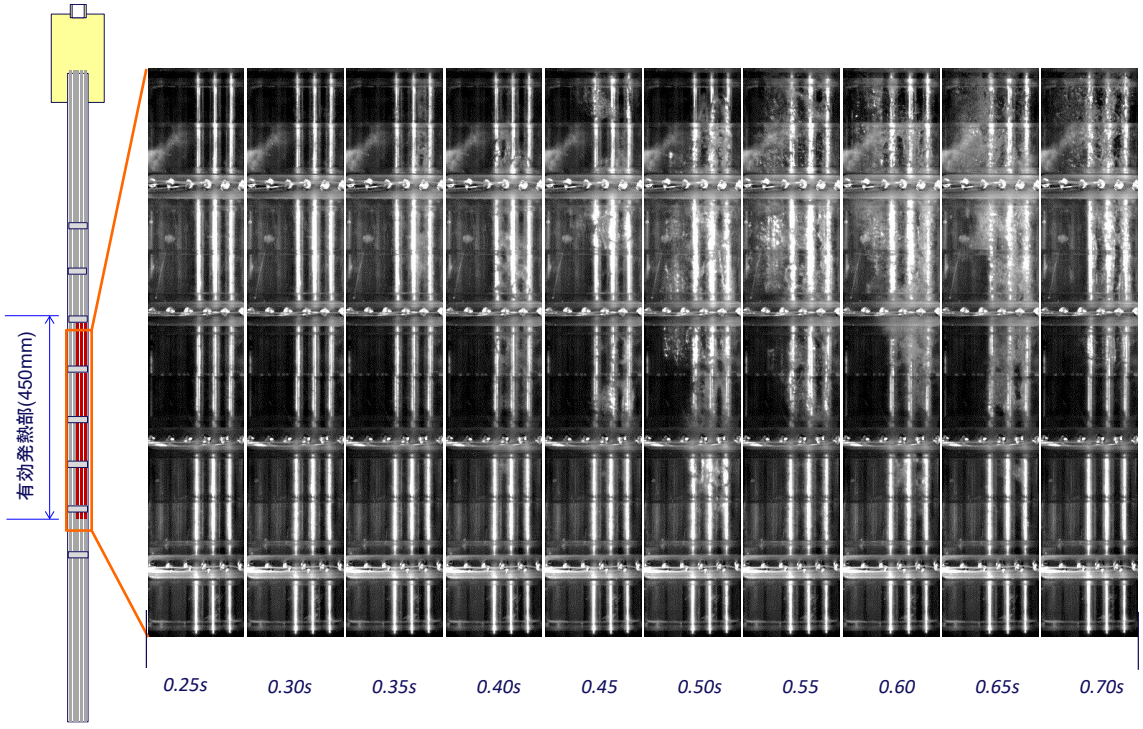


図 3-113　ボイド挙動の可視化画像（Run No. 12）

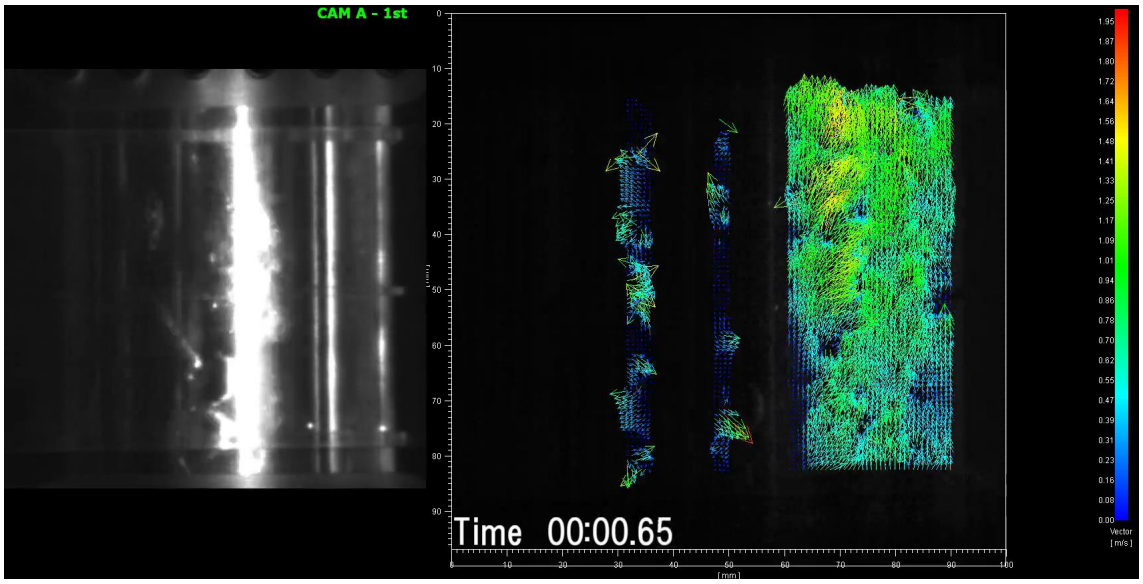


図 3-114　PIV による液相流速分布（ケース B，時刻 0.45 秒，第 5 段 WMS 上流部）

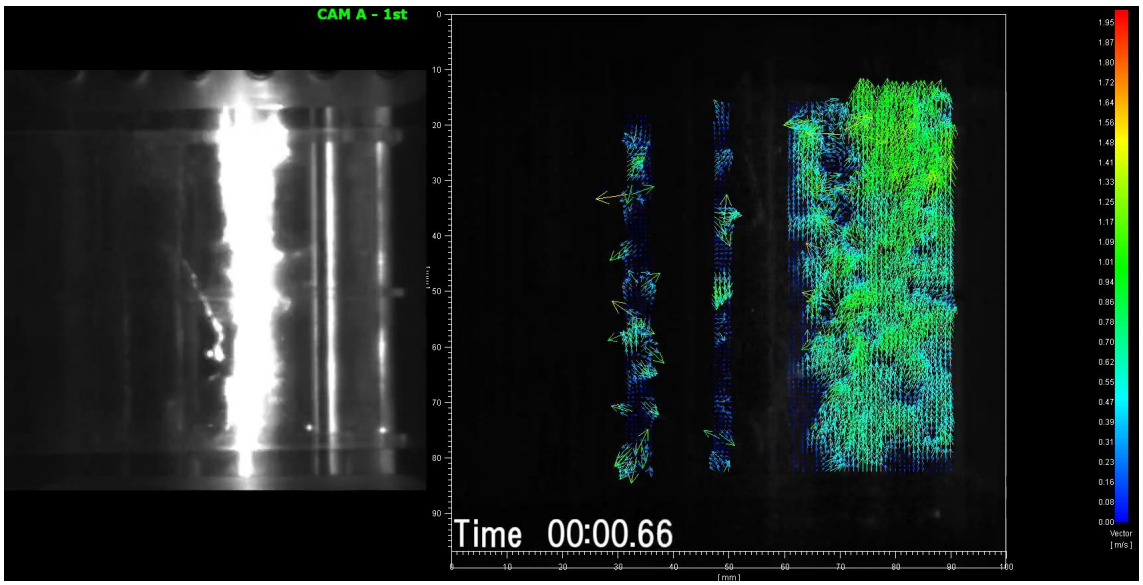


図 3-115　PIV による液相流速分布（ケース B，時刻 0.46 秒，第 5 段 WMS 上流部）

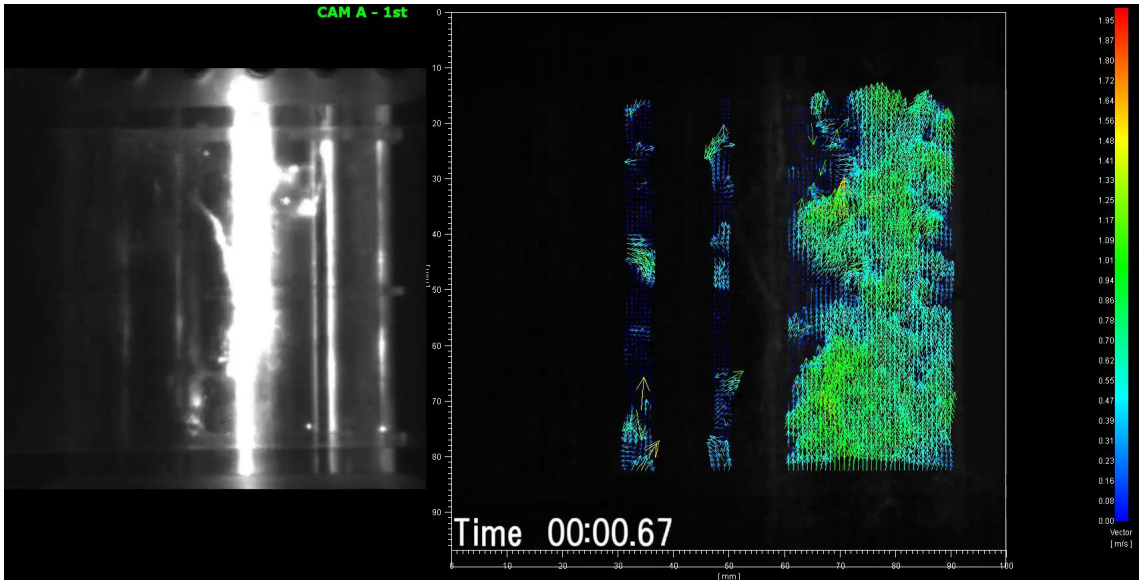


図 3-116　PIV による液相流速分布（ケース B，時刻 0.47 秒，第 5 段 WMS 上流部）

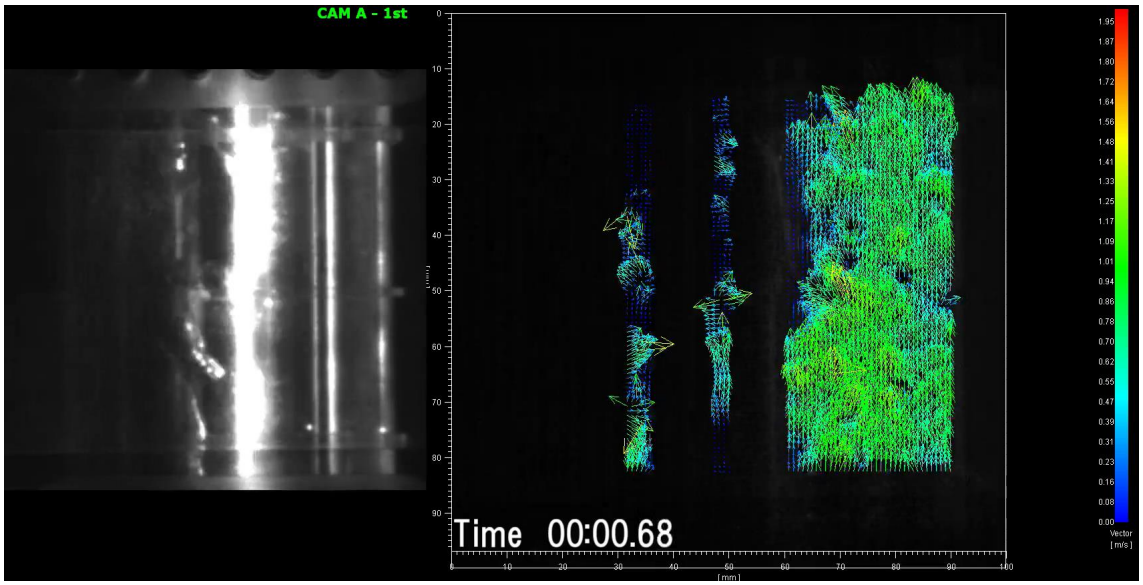


図 3-117　PIV による液相流速分布（ケース B，時刻 0.48 秒，第 5 段 WMS 上流部）

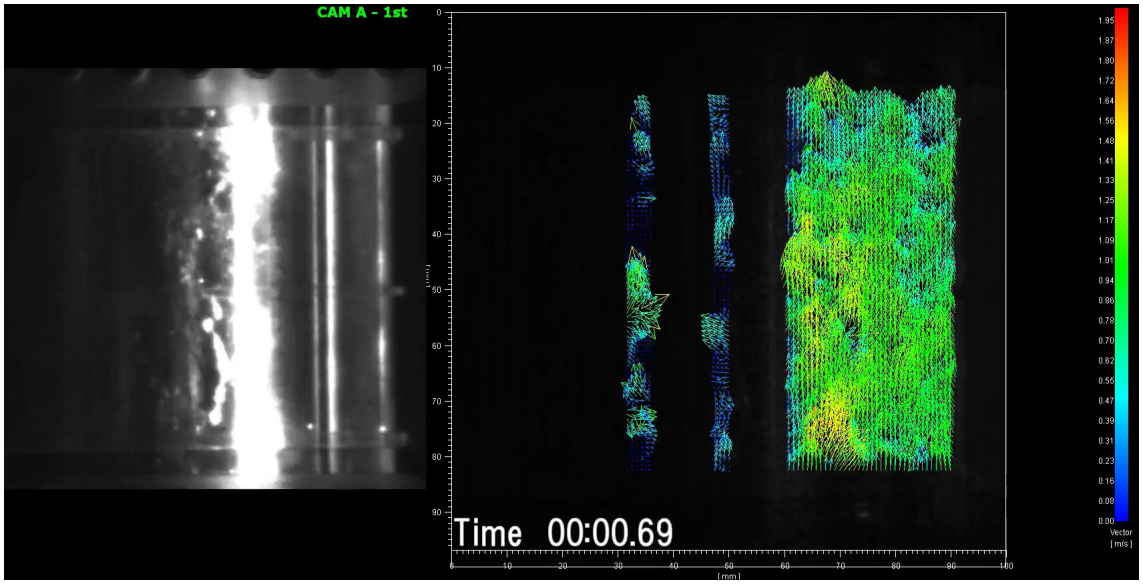


図 3-118　PIV による液相流速分布（ケース B，時刻 0.49 秒，第 5 段 WMS 上流部）

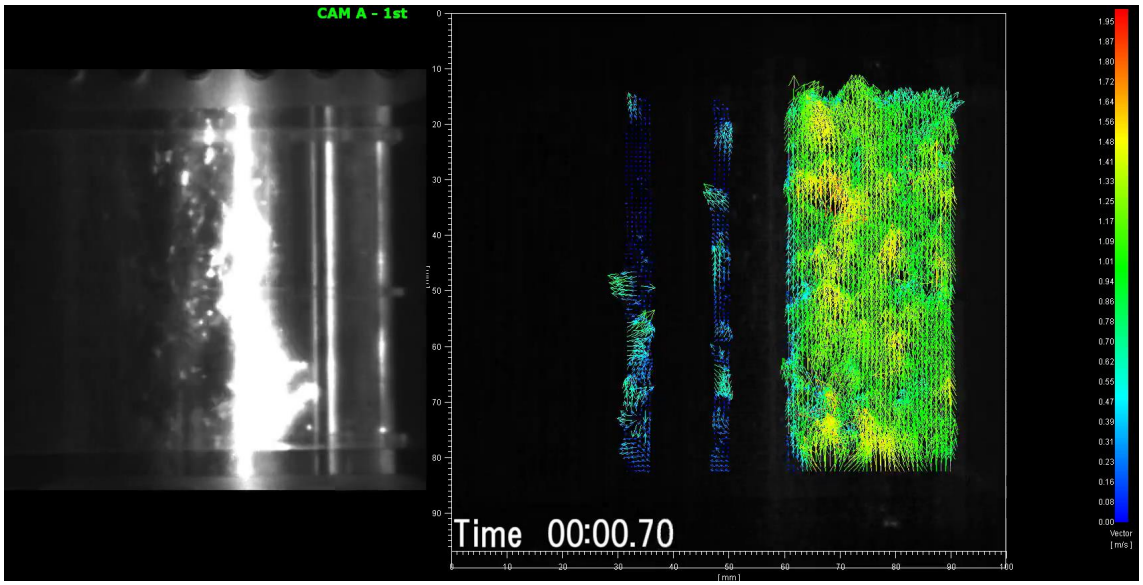


図 3-119　PIV による液相流速分布（ケース B，時刻 0.50 秒，第 5 段 WMS 上流部）

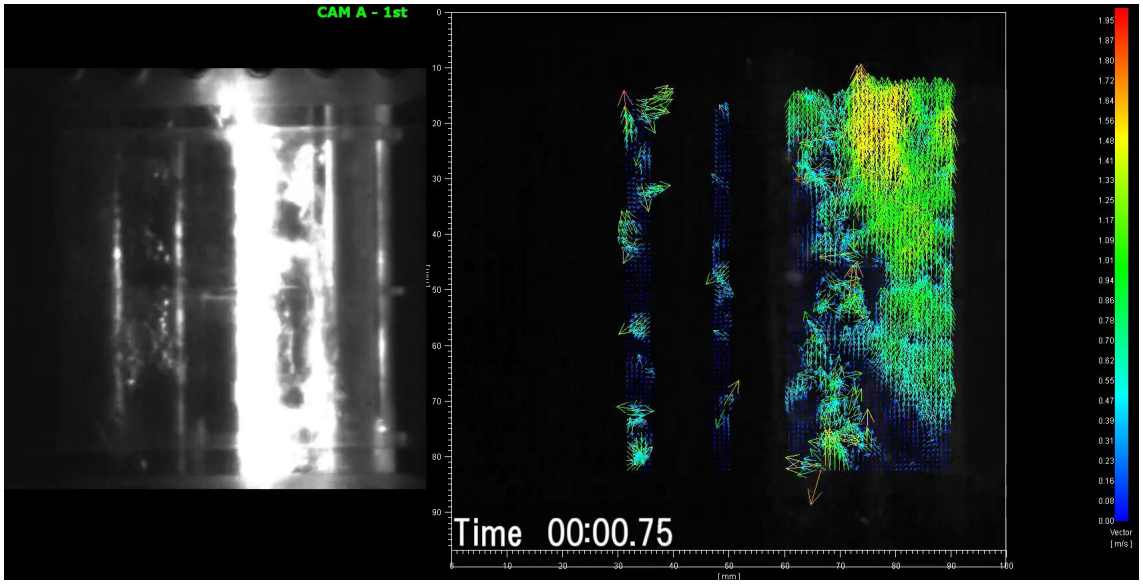


図 3-120　PIV による液相流速分布（ケース B，時刻 0.55 秒，第 5 段 WMS 上流部）

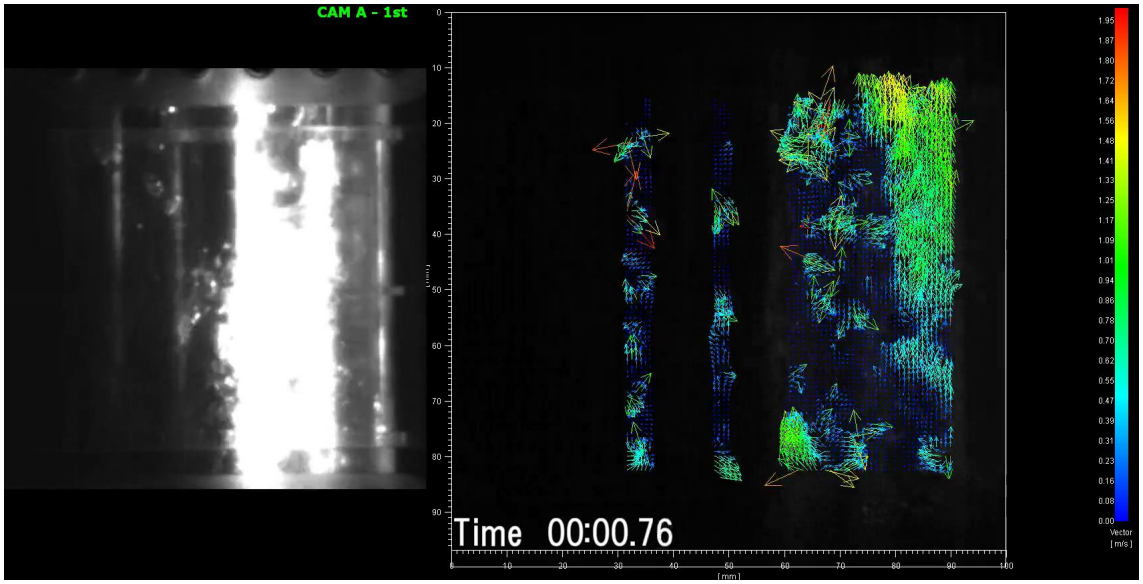


図 3-121　PIV による液相流速分布（ケース B，時刻 0.56 秒，第 5 段 WMS 上流部）

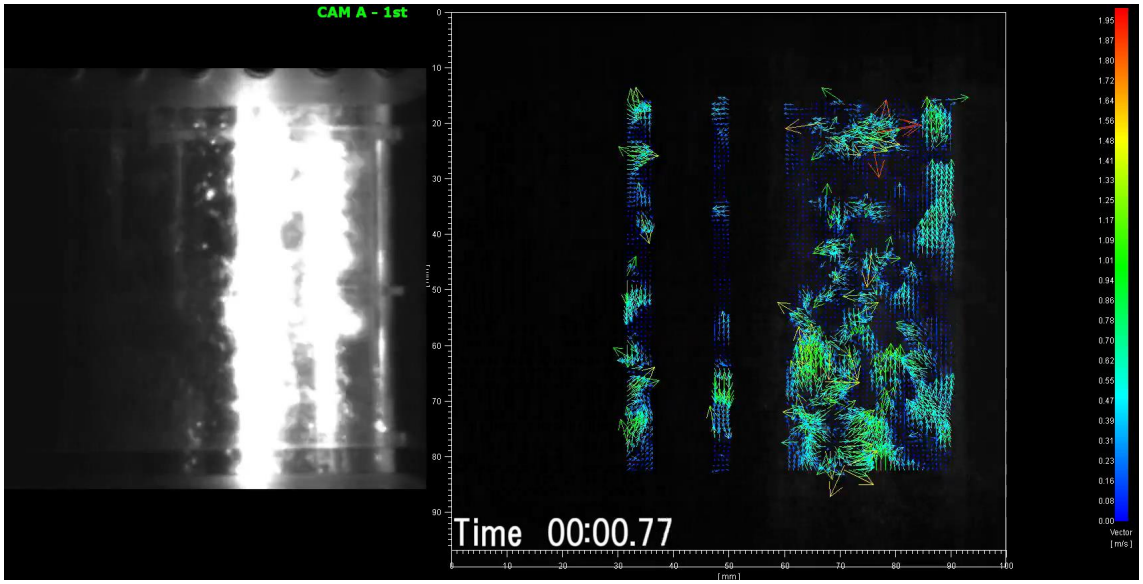


図 3-122　PIV による液相流速分布（ケース B，時刻 0.57 秒，第 5 段 WMS 上流部）

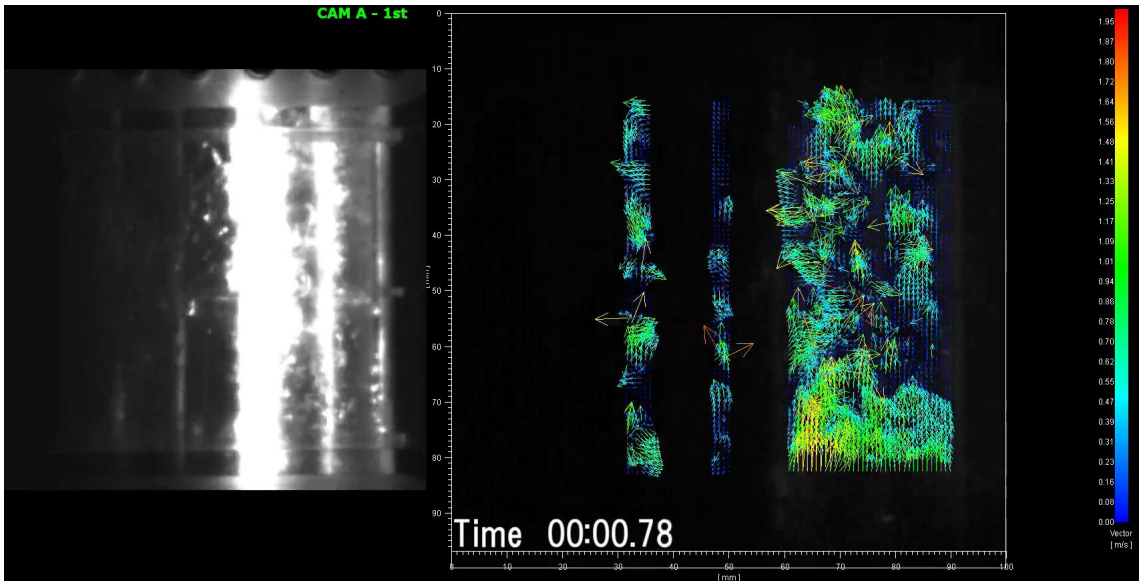


図 3-123　PIV による液相流速分布（ケース B，時刻 0.58 秒，第 5 段 WMS 上流部）

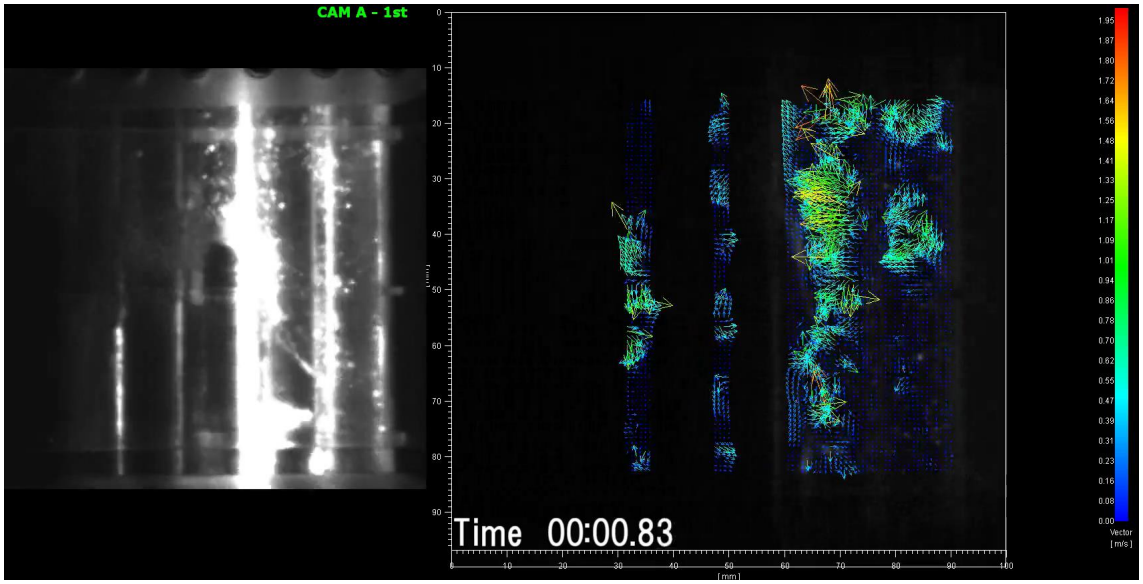


図 3-124　PIV による液相流速分布（ケース B，時刻 0.63 秒，第 5 段 WMS 上流部）

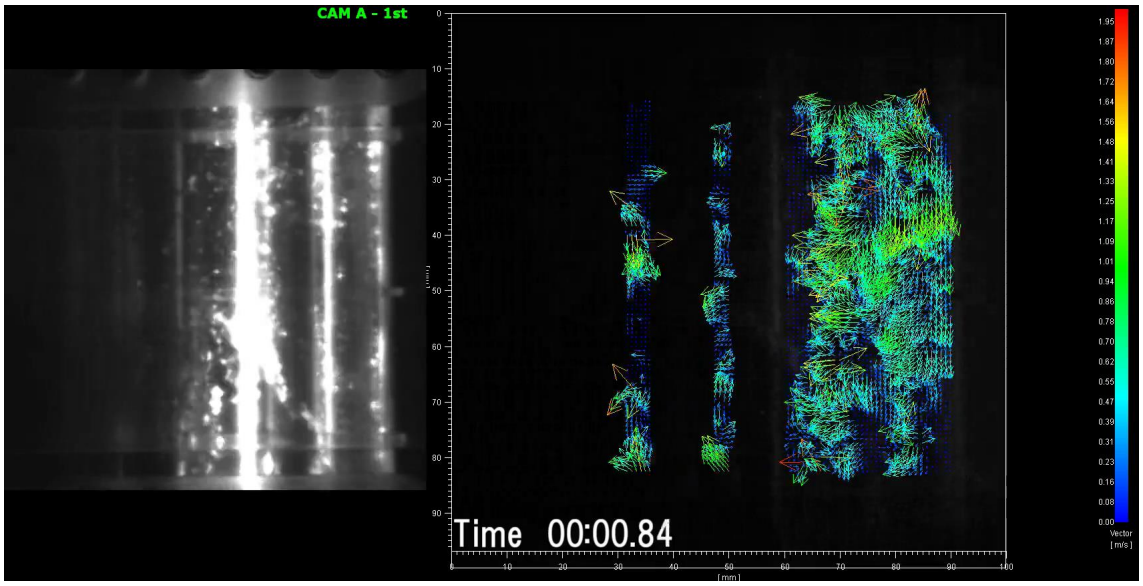


図 3-125　PIV による液相流速分布（ケース B，時刻 0.64 秒，第 5 段 WMS 上流部）

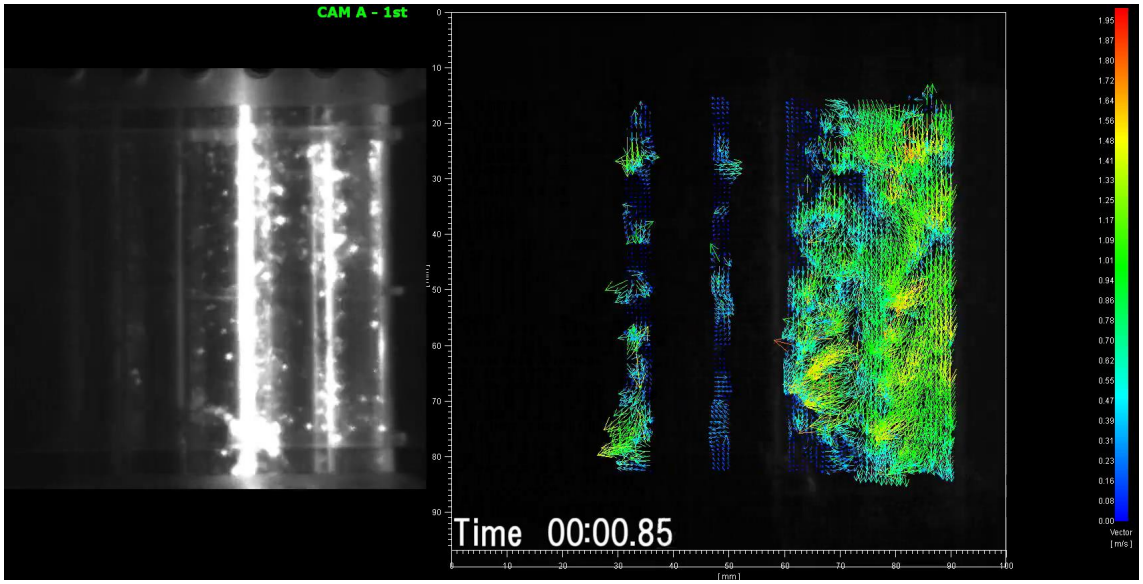


図 3-126　PIV による液相流速分布（ケース B，時刻 0.65 秒，第 5 段 WMS 上流部）

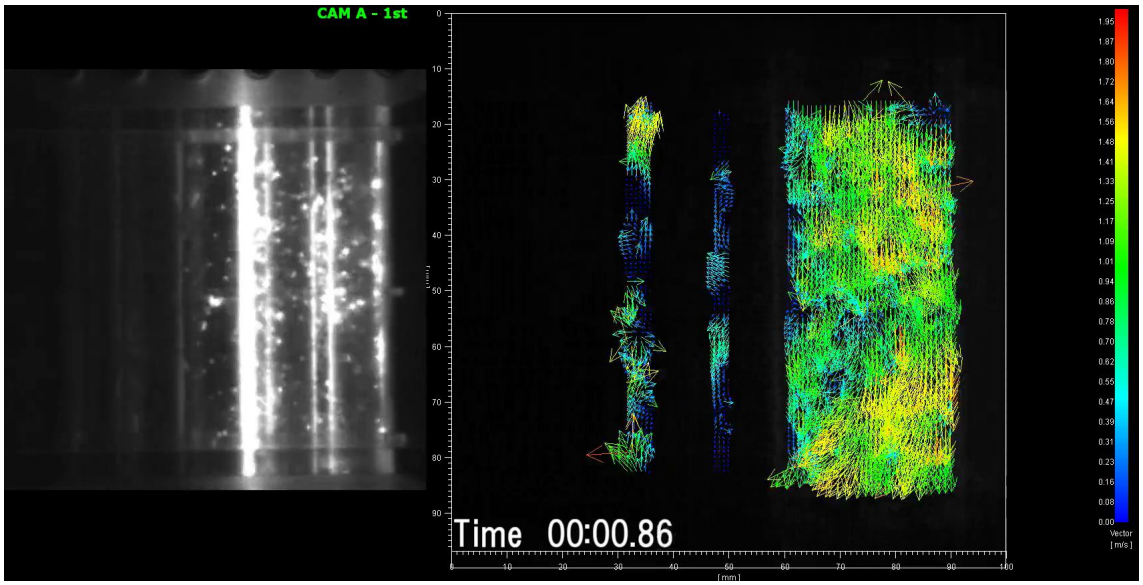


図 3-127　PIV による液相流速分布（ケース B，時刻 0.66 秒，第 5 段 WMS 上流部）

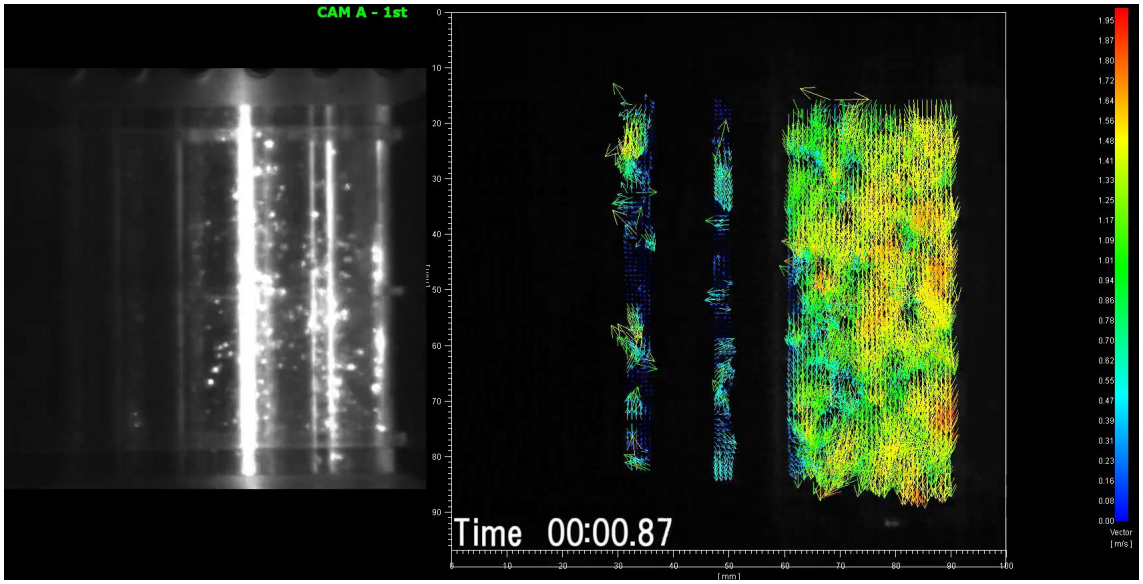


図 3-128　PIV による液相流速分布（ケース B，時刻 0.67 秒，第 5 段 WMS 上流部）

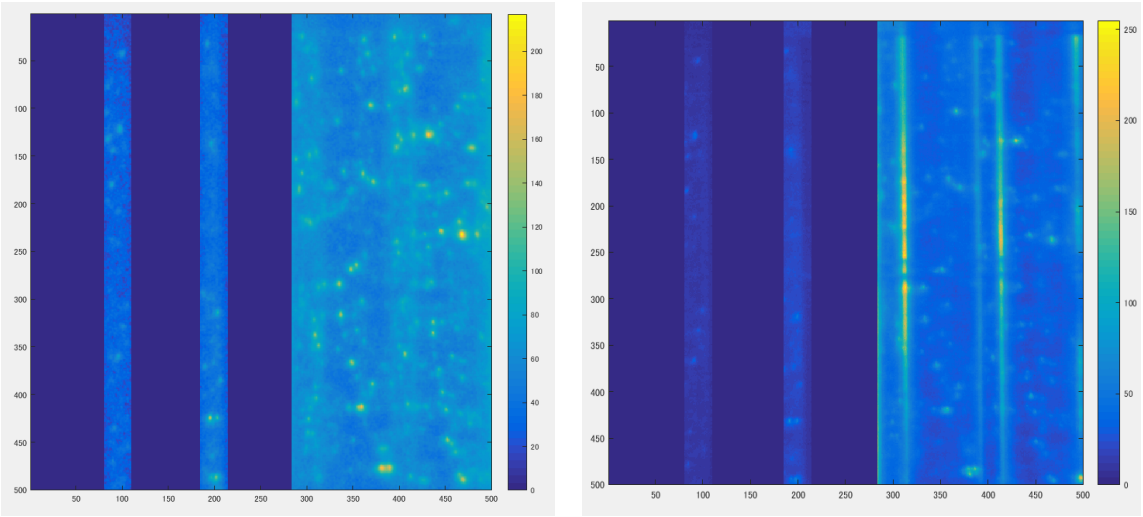


図 3-129　2 色 LIF 法による取得画像（左；ローダミン B 粒子，右：ローダミン 110 粒子）

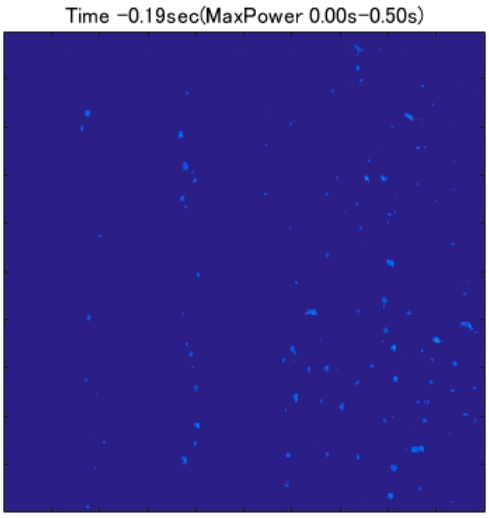


図 3-130　LIF による光度比の分布（ケース B，時刻-0.19 秒，第 5 段 WMS 上流部）

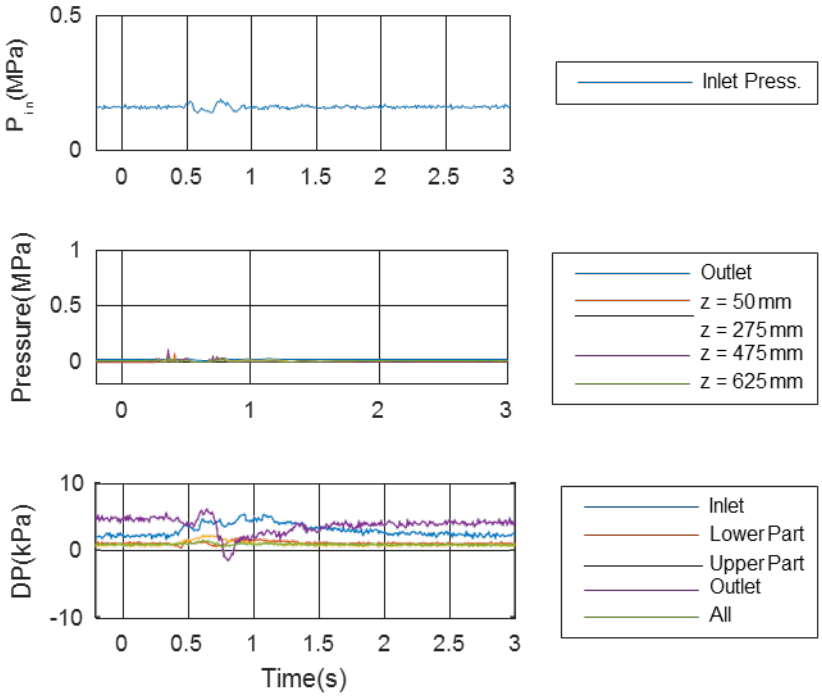


図 3-131　入口圧力，高さ毎の圧力，差圧時間変化（スペーサ追設後，Run No.2 相当）

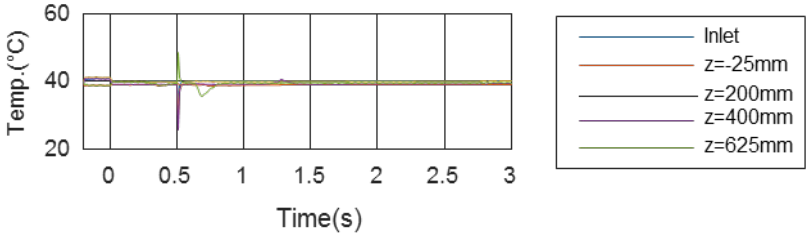


図 3-132　高さごとの水温の時間変化（スペーサ追設後，Run No.2 相当）

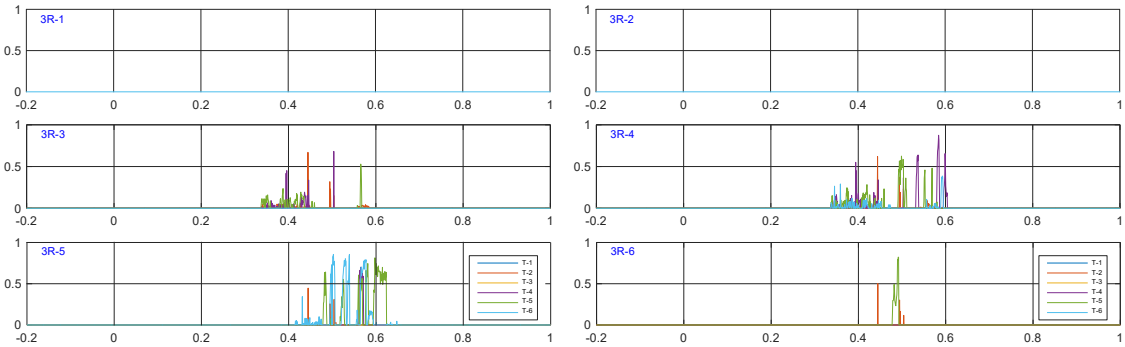


図 3-133　ボイド率の時間変化（スペーサ追設後，Run No.2 相当，3 段目の WMS）

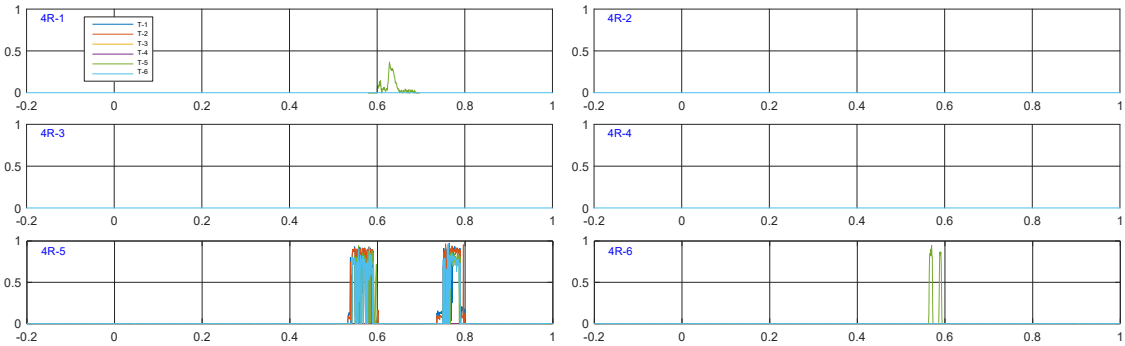


図 3-134　ボイド率の時間変化（スペーサ追設後，Run No.2 相当，4 段目の WMS）

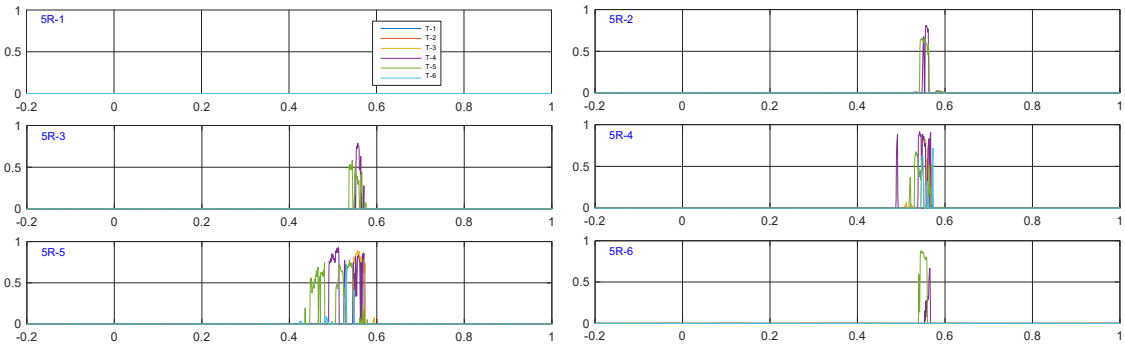


図 3-135　ボイド率の時間変化（スペーサ追設後，Run No.2 相当，5 段目の WMS）

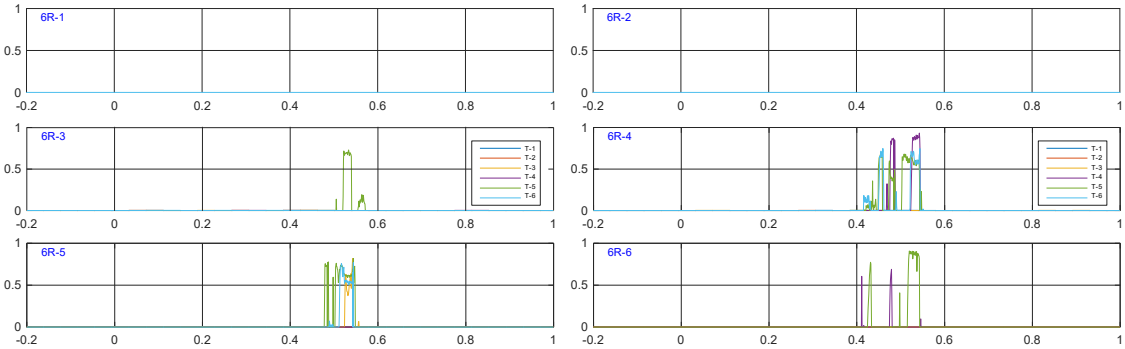


図 3-136　ボイド率の時間変化（スペーサ追設後，Run No.2 相当，6 段目の WMS）

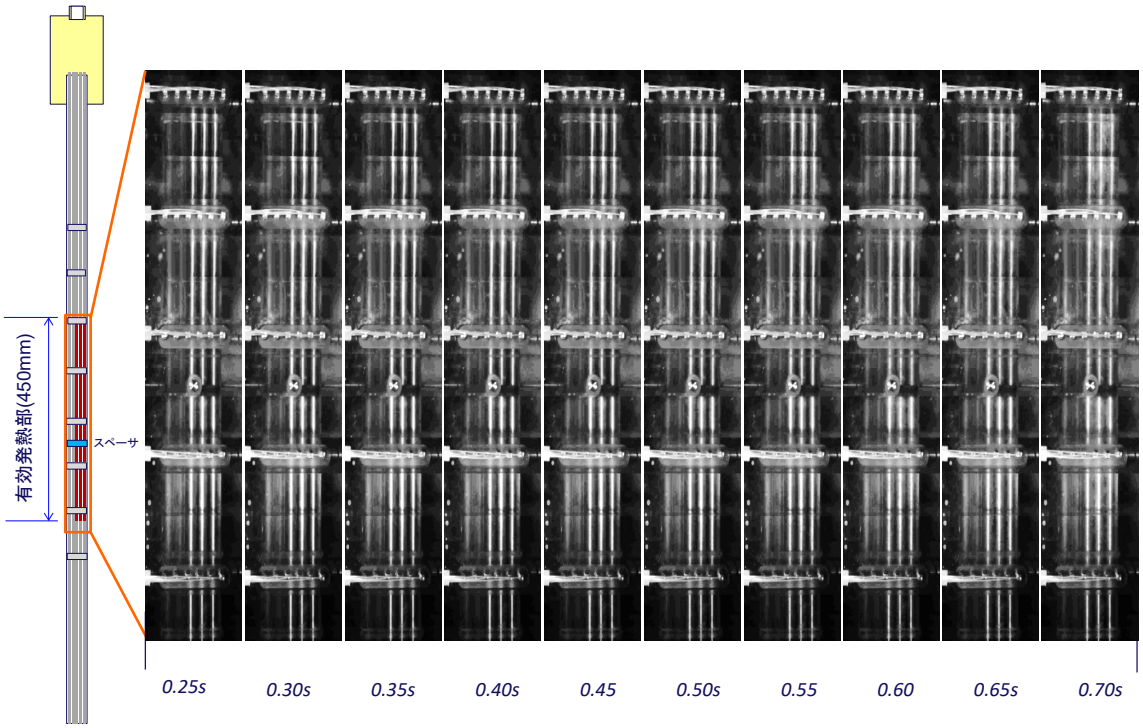


図 3-137　ボイド挙動の可視化画像（スペーサ追設後，Run No.2 相当）

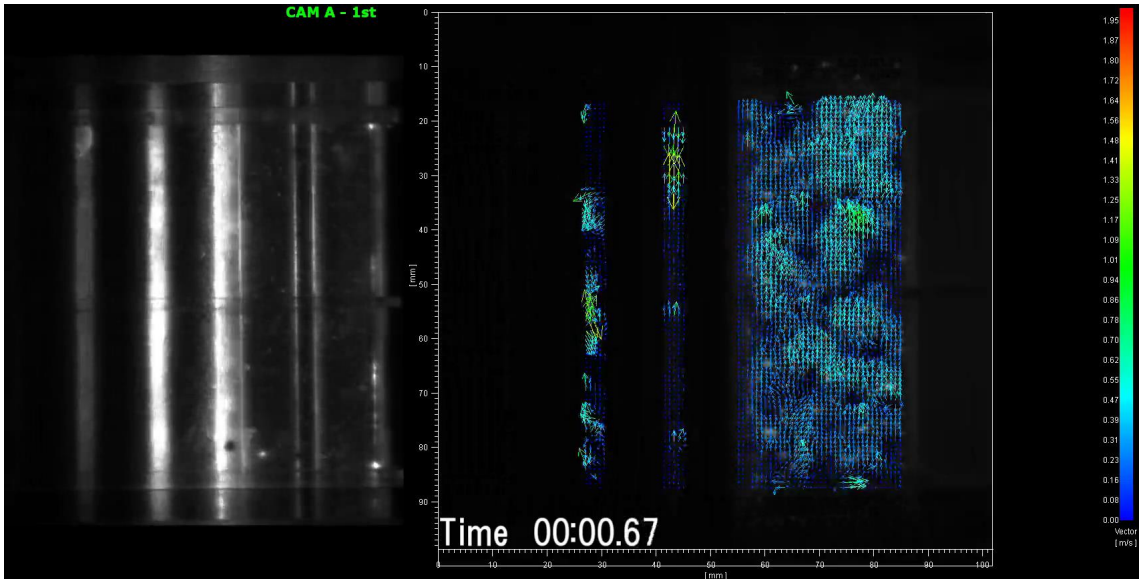


図 3-138　PIV による液相流速分布（スペーサ追設後，Run No.2 相当，時刻 0.47 秒，第 5 段 WMS 上流部）

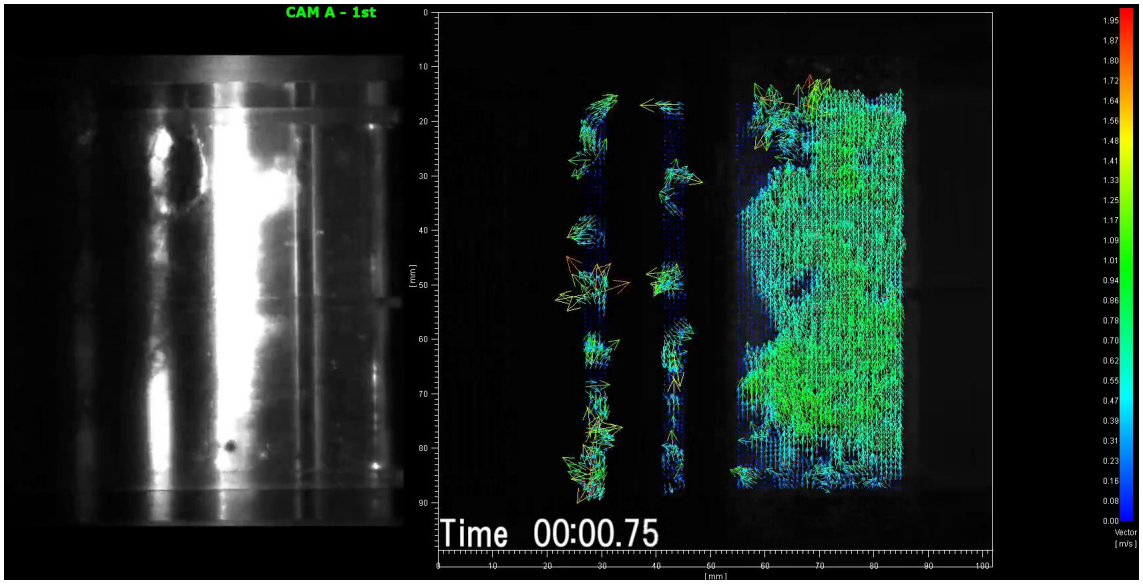


図 3-139　PIV による液相流速分布（スペーサ追設後，Run No.2 相当，時刻 0.55 秒，第 5 段 WMS 上流部）

3.2　実験データの整理及び検討

3.2.1.　データ整理に当たっての要求事項

要求事項は次のとおりである．

3.1 節にて実施した実験にて取得したデータを整理するに当たっては，次の点に留意すること．

- 熱流束レベル，並びに加熱部入口の冷却水の流速及び温度の三つのパラメータ空間上で限界条件が構成する 2 次元部分空間（面）を特定する．
- 各実験ケースにおいて，WMS などによる取得情報から，各 WMS の設置断面におけるボイドの横方向伝播の発生の有無及びその時々刻々の伝播速度の定量化を実施する．また，OSV 条件への到達時刻の差異が観測された場合，その時刻の差異及び該当する高さの熱電対があれば，OSV 到達時の当該熱電対の温度も定量化する．
- 各実験ケースにおいて，WMS などによる取得情報から，大気泡塊が横方向及び軸方向に発達する様子を時々刻々のボイド率と関連付けて示す．ただし，WMS に過度な変形，振動等が重畳せず，有効なデータが得られる見込みがあれば，界面移動速度，気泡コード長などの副次的な情報も考慮して整理する．
- 各実験ケースにおいて，光ファイバ温度計による液相温度計測結果については，非加熱サブチャンネル領域における温度の加熱サブチャンネル領域との差異及び非加熱サブチャンネル領域内での横方向温度勾配とボイドの横方向伝播との関係に着目して結果を整理する．
- 各実験ケースにおいて，差圧計測値を計測区間内のボイド率挙動と関連付けて整理する．
- PIV による液相の流速及び LIF による温度の分布を計測する実験ケースにおいては，横方向及び軸方向の流速場及び温度場の発達とボイド率の横方向及び軸方向の伝播との関係を整理する．
- 高速度ビデオ画像による可視化情報はすべての実験ケースで取得する．
- 凝縮誘起水撃（CIWH）現象については，圧力計測値を可視化情報と共に整理する．

3.2.2.　実験データの整理及び検討

取得した実験データについては，**3.2.1** 項記載の要求事項に従って整理する．

3.2.2.1.　OSV 初生時刻

a)　はじめに

WMS による計測を通じて OSV の初生時刻を厳密に決定することは原理的に不可能である．これは，WMS がワイヤの交点，すなわち各サブチャンネル流路の中心軸上のボイド率を計測することから，伝熱面から気泡が離脱する状態・条件を正確に測定・解明できないためである．例えば，**3.1.3.3** で説明したように，Run No. 7 においては，WMS ではボイドが検

出されていないが，可視化画像（**図 3-66**）では，出力急減後の時刻 0.50 秒から時刻 0.55 秒までの間，ボイドの発生がみとめられるといった状況が生じていた．なお，出力急減後にサブチャンネル流路中心にまで至らないボイドが発生していたということは，Run No. 7 で設定した出力レベルが，当該の入口冷却水温度及びその流量の条件に対して，ボイド発生にギリギリの最小条件であったことを意味する．

一方，Run No. 7 以外のケースでは，WMS でボイドの初生が検出された時刻は，最も遅いケースでも時刻 0.46 秒より前であり，最大出力レベルの熱負荷が更に続く状況にあった．このような条件の下では，低温時制御棒落下事故における冷却水中のボイド挙動を評価の対象とした本報告記載の実験においては，冷却水に負荷される熱流束のレベルが，実機燃料の定格条件時のレベルの 2～3 倍もあることと相まって，OSV 条件に達した後，ボイド率が急昇して直ちに大きな値に至ると同時に，流路中心にもボイドが流れる状態に至ると考えられる．したがって，Run No. 7 を除く他の実験ケースでは，WMS でボイドの初生を観測した時刻を OSV 時刻と等しいとして差し支えないと判断する．

なお，WMS で検出されるボイドの初生時刻には，

- 隣接サブチャンネルから気泡塊が拡がって当該サブチャンネルの WMS で検出される場合
- 上流側から気泡塊が凝縮せずに WMS に到達して検出される場合

などの OSV にかかわる伝熱面上からの蒸気泡離脱ではなく，気泡塊の変形及び／又は輸送に伴う誤検出されたデータが含まれる．このような誤検出データを除外する必要があるが，除外するためには十分な現象理解が必要であるため，まずは除外せずに取得した初生時刻のデータを機械的に整理し，それに基づいて現象を把握することとする．そのうえで，除外ルールを定めて誤検出データを除外し，再整理する．

b) WMS でのボイド初生に係る実験データの整理

ここでは，WMS でボイドが初生した時刻[16] を，冷却水に負荷される加熱量と除熱量とのバランスを図る指標として後述のように定義する“相対的なサブチャンネルへの熱負荷”（以下“**相対熱負荷**”という．）のサブチャンネルごとの相違に着目して整理する．ここで，相対熱負荷を次式で評価する．相対熱負荷は，サブチャンネルに負荷される相対的な熱出力を，当該サブチャンネルを流れる冷却水流量の相対値を表す指標で除した量に相当する．

$$\text{相対熱負荷}_i \equiv \left(\frac{\sum_{k\in Sub,i} LPF_k}{A_{sub}\ \sqrt{D_h}}\right)_i \Bigg/ max\left[\left(\frac{\sum_{k\in Sub,i} LPF_k}{A_{sub}\ \sqrt{D_h}}\right)_i\right]$$

WMS でボイドが検出されなかった Run No. 7 を除く各ケースについて，ボイド初生時刻と相対熱負荷との関係をプロットして**図 3-140**～**図 3-150** に示す．なお，各図において，相

[16] 初生時刻は次のようして評価した．WMS では同一の格子点に対しで 0.78 ms の時間間隔（1 サイクル）でデータを取得する．1 サイクルだけボイド率が計測され，前後がほぼゼロのデータは計測上のノイズである可能性が高いことから，ある格子点で 3 サイクル平均して 0.3（30%）以上のボイド率が最初に計測された時刻を当該格子点におけるボイド初生時刻とした．

対熱負荷と**図 3-4**に示したサブチャンネルタイプとの関係は**図 3-151**のようになっている．

各図から次のことが分かる．

- 同一の入口温度条件及び入口流速条件の下では，最も早いボイド初生時刻は負荷される出力レベルの増加に応じて早まる．
- ボイド初生時刻の早い WMS に着目すると，概ね，ボイド初生時刻は相対熱負荷が大きいほど早まる．
- 例えば，**図 3-145**（Run No. 6）の第 4 段 WMS のように，相対熱負荷が低いにもかかわらず，最も相対熱負荷の高い加熱サブチャンネルタイプ 1 とほぼ同一のボイド初生時刻となっているサブチャンネルが存在する．これは相対熱負荷の高いサブチャンネルから，当該の相対熱負荷の低いサブチャンネルへボイドが横方向に流出した可能性又は相対熱負荷の高いサブチャンネルからの高温の液相流の流出がトリガとなった可能性を示唆する．（類似の状況は**図 3-141**（Run No. 2）の第 3 段 WMS 及び第 4 段 WMS，**図 3-142**（Run No. 3）の第 4 段 WMS 及び第 5 段 WMS，**図 3-144**（Run No. 5）の第 4 段 WMS 及び第 5 段 WMS，**図 3-149**（Run No. 11）の第 6 段 WMS，**図 3-150**（Run No. 12）の第 4 段 WMS，第 5 段 WMS 及び第 6 段 WMS などのボイド初生時刻にもみられる．）
- 例えば，**図 3-149**（Run No. 11）の第 6 段 WMS のように，ボイド初生時刻が，相対熱負荷が高いサブチャンネルでは各段の WMS の中で概ね最も早い側となるものの，相対熱負荷が小さくなると各段の中で最も遅い側となる．前者は OSV との関係が深いが，後者は上流側又は隣接サブチャンネルから輸送されたボイドが検知された可能性が高いと考えられる．（類似の状況は**図 3-144**（Run No. 5）の第 6 段 WMS，**図 3-145**（Run No. 6）の第 6 段 WMS，**図 3-148**（Run No. 10）の第 6 段 WMS などのボイド初生時刻にもみられる．）
- 主に第 6 段 WMS において，相対熱負荷が同一のサブチャンネルタイプ内でボイド初生時刻が早いグループと遅いグループの二つに分かれる場合がある．例えば，**図 3-149**（Run No. 11）の第 6 段 WMS のように，加熱サブチャンネルタイプ 3 及び加熱サブチャンネルタイプ 2 に属する第 6 段 WMS のワイア交点では，早遅両方のタイプの初生時刻が混在している．（類似の状況は**図 3-144**（Run No. 5）の加熱サブチャンネルタイプ 1 の第 6 段 WMS，**図 3-145**（Run No. 6）の加熱サブチャンネルタイプ 1～3 の第 6 段 WMS，**図 3-147**（Run No. 9）の加熱サブチャンネルタイプ 3 の第 6 段 WMS などのボイド初生時刻にもみられる．）
- 非加熱サブチャンネル（タイプ 1，タイプ 2 のどちらも）では，そもそも OSV を含めサブチャンネル内で沸騰気泡が発生しないので，検知されたボイドは加熱サブチャンネルから流出したボイドとなる．

c) 実験装置における OSV 初生時刻のサブチャンネル間の比較に関する事前検討

5×5 試験体では，3×3 のヒータロッドの熱出力のヒータロッド間の相対的な比率（以下“**局所ピーキングファクタ**”という.）を**図 3-3** に示したように左上コーナ側を高くし，右下コーナに向けて段階的に低下させる配置としている.

ヒータロッドは速い時間応答を実現するために直接通電により被覆管材を加熱する設計とすることが必須であり，**表 1** に記載した昨年度の試験装置の設計・製作時の仕様においても“直接発熱”が明記されている．一方，ヒータロッドの局所ピーキングファクタをヒータロッドごとに変えるには，直接通電加熱の場合には，被覆管材の断面当たりの電気抵抗を変える以外になく，このためには，局所ピーキングファクタに反比例するようにヒータロッドの抵抗値を設定する必要がある．これは被覆管材の断面積を局所ピーキングファクタに比例させることに等しい.

このようなヒータロッドでは，急速加熱時に実機燃料と異なる特徴的な温度挙動を呈する．それは，沸騰前のように除熱量が小さいとき，すなわち加熱量に対して除熱量が無視できるときには，ヒータロッドの温度上昇特性が局所ピーキングファクタによらずに同一になるということである[17].

これは，ボイド初生，正確には OSV がヒータロッドの温度上昇過程で生じる場合，そのときまでは，ヒータロッドの温度が局所ピーキングファクタによらず一律に上昇し，冷却水への熱流束もヒータロッドによらず同一となることを意味する．このため，例えば加熱サブチャンネルタイプ 1 に属する各サブチャンネルのように，同一の流路面積，濡れ縁長さ及び加熱周長をもつサブチャンネルでは，ある高さ位置での OSV 時刻はヒータロッドによらずに同一となると考えられる.

さらに，低温時制御棒落下事故に対する安全評価条件における液相流速に対応する 70000 より小さい Pe 数に対応する Saha-Zuber 式,

$$\mathrm{Nu} = \frac{q'' D_h}{k_l \left(T_{sat} - T_{l,OSV}\right)} = 455$$

が考慮する凝縮 Nu 数を一定とした OSV 条件ように，液相流速に依存せずに熱流束に支配される形で OSV 条件が定まる場合には，同一高さ断面での OSV 初生時刻は加熱サブチャンネルタイプ 1～3 のすべてで同じとなる．ただし，これはサブチャンネルタイプによらずに同一高さ断面の液相温度が等しくなる場合に限られる.

なお，実機燃料のように熱出力に応じて初生時刻が定まる場合には，4 本のヒータロッドに囲まれるサブチャンネルタイプ 1 においても，最も熱負荷の高いサブチャンネルに対して，熱負荷が 2 番目，3 番目のサブチャンネルでは，OSV 初生時刻がそれぞれ 0.2 秒，0.4 秒遅れることになると推定される.

d) 誤検出データの除外ルール

ここでは，伝熱面からの沸騰によらずに，上流側で発生した蒸気泡の到達又は隣接するサ

[17] 実機燃料では，同様な条件のとき，温度上昇速度は局所ピーキングファクタに比例する.

ブチャンネルからの蒸気泡の流れ込みに伴うボイド率の増加を OSV の初生と判断しないように，誤検出データを除外するための下記の判断基準を設ける．ただし，**c)** で検討したように，同一の高さ断面ではサブチャンネルによらずに OSV 初生時刻が同じとなる可能性があることから，横方向からの蒸気泡の流入については，現段階では除外ルールを設けないこととする．

- 上流側からの蒸気泡の流入を次のルールにて判定し，流入と判断されたデータを除外する．ただし，疑わしきは除外しない．
  - 1 段上流側の WMS の同一のサブチャンネル領域にてボイド初生が検知されていること．
  - 1 段上流側の WMS と当該 WMS との間のボイド初生時刻の差が，蒸気塊の上昇速度（1～2 m/s 程度）に相当する 0.05～0.1 秒程度あること．
  - 特に，電気出力が瞬時にカットされる時刻 0.50 秒以降には沸騰よる除熱に伴ってヒータロッド表面の温度が低下するために，伝熱面からのボイド発生が生じにくいと考えられることから，上記の第 1 項目に該当するデータは，初生時刻の差が上記の第 2 項目との相違が多少大きくても除外対象とする．
- 非加熱領域（非加熱サブチャンネルタイプ 1 及び 2 に属する WMS の交点，並びに有効加熱部上端より上方に位置する第 7 段 WMS）で検出されたボイド初生時刻を除外する．
- 加熱サブチャンネル内においても，電気出力が瞬時にカットされる時刻 0.50 秒から十分に遅れてボイド初生が観測されたデータは除外する．ここで十分に遅れるとは，0.15 秒とする．種々の断面でボイド率が増加して液相流れをブロックするなどして，その上流側，下流側などで一時的にボイドが生じやすい条件に至る場合があり，実機燃料との特性上の差[18] が大きくなる可能性があるためである．

なお，今回は採用しないが，隣接サブチャンネルからの蒸気泡の流入の有無を評価する際の判定ルールには次のようなものが想定されると考える．

- 隣接サブチャンネルの中で当該サブチャンネルよりも早い時刻に OSV の初生が生じているかを判断する．
- 生じた隣接サブチャンネルがない場合には，ボイド率が有意に増加した時刻をもって OSV 初生時刻とする．
- 生じた隣接サブチャンネルがある場合には，隣接サブチャンネルのボイド率変化との相関の有無を，時間変化特性の独立性，類似性などを尺度に判断する．
- 相関が相応にあると判断される場合，当該サブチャンネルでのボイド率増加の初生を OSV と評価しない．
- 相関がないと判断される場合，当該サブチャンネルでのボイド率増加の初生時刻を

[18] ボイド反応度フィードバックへの影響の観点でも，遅い時刻のボイド初生は，炉心出力ピーク及び燃料エンタルピの抑制効果がなくなることから，考慮不要である．

OSV の初生時刻とする．

e)　実験データの再整理

d)で定めた誤検出データの除外ルールに従って実験データを再整理し，OSV 初生時刻を評価すると，有効加熱長の範囲に設置した第 2 段 WMS から第 6 段 WMS から得られたボイド初生時刻に基づいて，**図 3-152～図 3-162** のように整理できる．

なお，OSV 条件への到達時刻の差異が観測された場合，その時刻の差異及び該当する高さの熱電対があれば，OSV 到達時の当該熱電対の温度も定量化するとの仕様上の要求がなされていた．しかし，同一高さでは OSV 初生時の時刻及びヒータロッド温度に有意な差異のないことがヒータロッドの仕様に由来することが原理的に分かったこと，実験データからも初生時刻に 0.05 秒を超える差異が生じていないものが多いことが分かったことから，このばらつきの原因及びその影響については，現象の分析を次年度に更に進めた結果，改めて重要な相違と判断されるなどの見直しがなされたときに，検討の要否を判断することとする．

f)　OSV 条件の検討

ここでは，有効加熱長の範囲に設置した第 2 段 WMS 位置から第 6 段 WMS 位置の OSV 初生時刻が WMS の軸方向位置によって有意な相違が生じた点について検討する．

そもそも，流れによるエネルギなどの輸送効果が無視できる瞬時的な現象である場合には，WMS の軸方向位置によらずにすべての WMS 位置で同時に OSV が初生することになる．一方，流れによる液温の上昇が重要となる場合には，液温の上昇が最も進むと見込まれる最下流位置，すなわち有効加熱部最上部に位置する第 6 段 WMS で OSV が最も早く初生することになる．

実際には，**図 3-152～図 3-162** に見られるように，一部の例外ケースを除き，第 4 段から第 6 段の WMS の間で OSV 初生が最も早く生じている．第 2 段 WMS 位置では OSV 初生が見られないか，又は生じた場合でも OSV 初生時刻が遅い状況となっている．一方，第 3 段 WMS 位置では，第 4～第 6 段 WMS 位置のように OSV 初生が振舞う場合と第 2 段 WMS のように遅れて OSV が初生する場合が混在している．特に，集合体入口流速が 0.3 m/s の Run No. 1～Run No. 3 並びに Run No. 7 及び Run No. 8 では，第 3 段 WMS 位置は第 4～第 6 段 WMS 位置と同様な OSV 初生特性を示すが，集合体入口流速を 0.5 m/s に増加させた Run No. 4 ～Run No. 6 及び Run No. 10～Run No. 12 では，OSV 初生が生じない Run No. 4 及び Run No. 10 を除いて，OSV 初生は概して第 4～第 6 段 WMS 位置での初生時刻よりも遅れている．

このような特性が生じた理由は次のように説明できる．

第 2 段 WMS から第 6 段 WMS のすべて位置の OSV 初生時刻の中の最も早い時刻より前の時間領域では，流路には液単相流が流れているとしてよい．このとき，例えばすべての OSV 初生時刻の中の最初の OSV 初生時刻（以下“**最速 OSV 初生時刻**”という．）として最

も多く見られる時刻 0.4 秒までには，0.5 秒間[19] の最大出力レベルでの加熱がなされる．この間に液単相流が上昇する距離（以下“**液単相上昇長さ**”という.）は流速 0.3 m/s のケースでは 0.15 m，流速 0.5 m/s のケースでは 0.25 m/s 上昇する[20].

表 4 に示したように，第 4 段 WMS から第 6 段 WMS は，それぞれの有効加熱部下端からの高さ，すなわちそれぞれの WMS より上流側の加熱部長さ（以下，“**上流加熱長さ**”という.）が 0.25 m，0.35 m，0.45 m でとなっている．これらの上流加熱長さは，流速 0.3 m/s，0.5 m/s のどちらの場合でも液単相上昇長さと同等か又はこれを上回る．液相温度の上昇量は，液単相上昇長さに占める加熱領域長さの割合で定まることから，上流加熱長さが液単相上昇長さを下回らないということは，当該の WMS に到達する液相がすべて加熱領域を通ってきたことを意味する．したがって，軸方向の出力分布が一定であること及び初期の液相温度が位置によらず同一であることを考慮すると，時刻 0.4 秒の最速 OSV 初生時刻における第 4 段 WMS から第 6 段 WMS 位置の液相温度はすべて等しいことが結論できる．ヒータロッド表面温度も同一であることから，第 4 段 WMS 位置から第 6 段 WMS 位置では，OSV 初生時刻が原理的には同じになる．

ただし，ある段の WMS で最初に OSV 初生すると，高い熱流束の下で，当該位置のボイド率が直ちにかつ大きく増加するため，上流側，下流側のどちらの方向に対しても，当該及び近傍のサブチャンネル流路の流れに影響を及ぼすことから，第 4 段 WMS 位置から第 6 段 WMS 位置の他の段の OSV 初生時刻はこの影響の大小によりばらつくことになる．**図 3-152**～**図 3-162** では，第 4 段 WMS 位置から第 6 段 WMS 位置の OSV 初生時刻が，同時から 0.05～0.07 秒遅れ程度の範囲でばらつく結果となっている．

続いて，他の段の WMS 位置の OSV 初生時刻の特徴について説明する．

第 2 段 WMS では有効加熱部下端からの高さが 0.05 m しかないため，流速 0.3 m/s，0.5 m/s のどちらの場合でも，最速 OSV 初生時刻における液単相上昇長さが上流加熱部長さより 3 倍～5 倍大きく，同時刻における液温の温度上昇量が第 4 段 WMS 位置から第 6 段 WMS 位置の液温上昇量と比較して（以下“**液温上昇比**”という.）1/3～1/5 と小さい．この結果，OSV 初生が非常に生じにくい熱流動条件となる．

なお，流速 0.3 m/s の 2 ケース（Run No. 2 及び Run No. 3）では，最速 OSV 初生時刻から 0.12 秒～0.15 秒と大きく遅れて第 2 段 WMS においても OSV 初生が生じているが，これは液温上昇比が 1/3 と相対的には大きい条件であったことに加えて，下流側（上方）の第 3 段 WMS から第 6 段までの WMS で既に OSV 初生後の高ボイド率状態となっているため，これらの領域から 0.1 m 下方の第 2 段 WMS 位置においても液相流れが非加熱領域に流れ込んで加熱領域の液相流れが減少したことが重なったことによると考えられる．

有効加熱部下端からの高さが 0.15 m の第 3 段 WMS 位置では，流速 0.3 m/s のケースでは

---

[19] 最大出力レベルの出力の持続時間に換算した．最大出力レベルでの 0.4 秒間 ＋0.2 秒間のランプ増加期間（最大出力レベルで 0.1 秒間とした）

[20] 時刻 0.45 秒がすべての WMS の最初の初生時刻となる場合には，最大出力レベルでの加熱時間 0.55 秒，液単相上昇長さが流速 0.3 m/s では 0.165 m，流速 0.5 m/s では 0.275 m となる．

液温上昇比が 1 となるが，流速 0.5 m/s のケースでは液温上昇比が 0.6 程度となる．このため，流速 0.3 m/s の条件では Run No.1～Run No. 3 及び Run No. 8～Run No. 9 のどのケースにおいても，OSV 初生時刻が最速 OSV 初生時刻と同等か又は第 4 段 WMS～第 6 段 WMS 位置の OSV 初生時刻のばらつきの範囲に入っている．さらに，流速 0.5 m/s の条件では，このために第 3 段 WMS で OSV 初生が観測されないケース（Run No. 4 及び Run No. 10）が生じたり，第 3 段で OSV 初生が観測された Run No. 5，Run No. 11 及び Run No. 12 の 3 ケースにおいても第 4 段 WMS～第 6 段 WMS 位置の OSV 初生時刻より概して OSV 初生時刻が遅くなっている．

ただし，Run No. 6 では第 3 段 WMS 位置における例外的な特性が現れている．**図 3-157** を詳細に調べると，流速 0.5 m/s の条件であるにもかかわらず，第 3 段 WMS 位置の 3 点の WMS ワイアの交点におけるデータ [21] の OSV 初生時刻が，最速 OSV 初生時刻と同等なものとなっている．Run No. 6 における第 3 段 WMS 位置のボイド率挙動を示した**図 3-57** を調べると，最速 OSV 初生時刻，0.38 秒付近で第 3 段 WMS の R5 ワイアの前記 3 交点において，0.13 秒程度継続し直ちにボイド率ゼロまで落ちる突発的かつ孤立したボイド率の上昇（OSV）（以下“**孤立パルス**”という.）がみとめられる．この孤立パルスを除くと，第 3 段 WMS 位置におけるボイド率の急速な上昇は，孤立パルスを観測した 3 点のワイア交点を含め，共通に時刻 0.47 秒付近となっている．また，孤立パルスは流速 0.5 m/s の他の 3 ケース（Run No. 5，Run No. 11 及び Run No. 12）には見られない特殊なものである．この孤立パルスは，**図 3-58** に示されるように，0.1 m 下流側（上方）に位置する第 4 段 WMS 位置における広範なワイア交点位置（サブチャンネル）にわたる OSV 及び直ちに続く瞬時的なボイド率上昇と呼応している．このため，第 4 段 WMS 上で同時に広範なサブチャンネルでボイドが急成長したことの影響と思われるが，第 3 段 WMS の 3 交点のボイド上昇が同時に生じているため，ある程度の遅れをもって上流側に影響が伝播してボイドの発生を説明するときに用いる次の仮説，すなわち第 4 段 WMS 高さ位置で広範に発生したボイドがサブチャンネル流路に栓をしたために，第 3 段 WMS の 3 交点に対応する熱的に厳しいサブチャンネルの液相流れが低下したとの仮説をそのまま適用できるとは考えられない．現段階では，ボイドの横方向伝播に直結しないこの現象の解明が重要な課題となるとは考えにくいが，今後，重要度が見直された場合には，必要に応じて再検討することとしたい．

以上に説明したように，有効加熱長の範囲に設置した第 2 段 WMS 位置から第 6 段 WMS 位置の OSV 初生時刻が WMS の軸方向位置によって有意な相違が生じた理由について検討し，液温上昇比を指標として相違の傾向が，Run No. 6 の第 3 段 WMS の 3 ワイア交点のデータを除いて，もれなく整理できることが分かった．また，この 3 交点については，例外的なボイド挙動が観測されていたことが確認できた．

---

[21] R5-T5，R5-T6 及び R5-T4 の 3 点

3.2.2.2. 液相の詳細な流速場及び温度場の観測結果による現象の理解

3.1.3.5 において，**表 3** の実験条件マトリックス中のケース A～C で取得した PIV による液相の流速場及びその変化の特徴について，ケース B（Run No. 2 に相当）を代表として三つの期間，ボイド初生期，非加熱部へのボイド横流れ期及び逆流期を対象に，横方向及び軸方向の流速場の発達と関連付けて整理した．一方，LIF による温度場の計測については，今年度は十分に有効なデータが取得できていないことから，次年度の実験に向けた課題を整理した．

ここでは，**3.1.3.5** と同様にケース B の PIV 測定結果を用いて，OSV の発生及び加熱部内でのボイド率の増加に伴う非加熱部の流速の変化の二つの特徴的な挙動について，これらにかかわる横方向及び軸方向の流速場の発達とともに，高速度ビデオ画像による可視化情報と突き合わせて説明し，現象理解を深める．

なお，以下に示す PIV 測定結果は，いずれも各段 WMS の下端からその 0.065 m 上流部（下方）までの範囲に対して，**図 3-3** の T5 のワイヤに沿って横から鉛直面のレーザシートを照射し，同レーザシート上の液相流速場を**図 3-3** の左方向から見た画像として示したものである．各図には，左図に同一視野及び時刻の可視化画像，右図に PIV 測定結果が示される．右図の左側には 3 本のヒータロッドが鉛直に並んでおり，黒の縦縞の入らない右側の幅広い領域が非加熱領域を表す．流速はベクトルとして有向矢印で表されるが，補助的に右端の色スケールに応じた着色によってもその大きさが示される．また，左図の可視化画像の中で中央付近に鉛直に広がる最も明るい白線が 3 列のヒータロッド中で非加熱領域に最も近い最右翼のロッドの右側境界から若干左側までの伝熱面（以下“**右伝熱面**”という．）を表している．この左側に位置する鉛直に広がる灰色領域は同ロッドと 3 列中の中央列のヒータロッドとの間のギャップ部分（以下“**左ギャップ部**”という．）を表す．

a) OSV 条件及び OSV の発生

図 3-163～**図 3-167** に，時刻 0.40 秒における第 2 段 WMS 直上流部から第 6 段 WMS 直上流部までの 5 点の PIV 測定結果を，可視化画像と並べて示す．

ケース B と出力レベル，冷却水の温度及び流速の条件が一致する Run No. 2 の WMS データによれば，時刻 0.40 秒では第 3 段 WMS で複数のサブチャンネルにおいて約 0.01 秒前にボイド初生が観測され，ほぼ同時に第 4 段 WMS においても同様のボイド初生が観測されている．一方，第 5 段 WMS では最も早いサブチャンネルでもボイド初生は 0.01 秒ほど経過しないと生じない．第 6 段 WMS では最速で 0.05 秒後，第 2 段 WMS では最速で 0.13 秒後であった．

このような WMS の観測結果を踏まえて，軸方向及び横方向への流れの発達を，OSV などのボイド発生状況と関連付けて以下に説明する．

第 2 段 WMS の直上流部（**図 3-163**）から第 3 段 WMS の直上流部（**図 3-164**）までは，非加熱部の流速に大きな変化はなく，模擬燃料集合体入口部の平均流速 0.3 m/s と同等なも

のとなっている．

だたし，第 3 段 WMS においてボイドの初生が観測されており，**図 3-164** の加熱部内の液相流速にこれに対応した激しい変化が局所的に数か所現れている．左図の可視化画像では右伝熱面に若干の揺らぎが生じている．ただし，PIV 結果の非加熱部左端にはボイド発生を特徴づける局所的な液相流速の変化が生じていないことから，温度境界層が発達し始めたことによる光の散乱による揺らぎと判断できる．

第 4 段 WMS の直上流部（**図 3-165**）では第 3 段 WMS 直上流部（**図 3-164**）と概ね同様な流況であるが，非加熱部の液相流の流速がわずかに増加している様子である．これは加熱部でボイドが発生したために，加熱部内を流れる液相流量が低下したためと考えられる．なお，可視化画像では，右伝熱面の高輝度領域の幅が増加し，一部に点状の高輝度部も生じている．これは温度境界層が一層発達したことと同時に伝熱面上に蒸気泡が生じたことを表している．ただし，非加熱部の PIV 結果の左端に特徴的な局所的変化が生じていないことから，OSV には至っていないと判断できる．

第 5 段 WMS の直上流部（**図 3-166**）では，PIV 画像から非加熱部の流速が一層増加していること，可視化画像から右伝熱面上の蒸気泡発生が一層増加している様子が分かる．ただし，ここでも非加熱部の PIV 結果の左端に特徴的な局所的変化が生じていないことから，OSV には至っていないと判断できる．

第 6 段 WMS の直上流部（**図 3-167**）も上記の第 5 段 WMS 直上流部の流況と同様である．

なお，**図 3-169** に第 3 列目のヒータロッドが OSV に至ったと思われる図を示す．左図の可視化画像において右伝熱面から蒸気泡が冷却水中に離脱した様子，左ギャップ部の第 3 列ヒータロッド側に連結した気泡塊が見えている．また，右図の PIV 結果においても，非加熱部左端の液相流速に局所的に大きな変化が生じており，その左側のヒータロッドの 3 列目と 2 列目のギャップ部分でも局所的に大きな液相流速の変化が生じている．

b) ボイド率が上昇した後の流況（ボイド率の増加に伴う非加熱部の流速の変化）

図 3-168～図 3-172 に，種々のサブチャンネルでボイドが初生し，非加熱部までボイドが横方向に伝播していないものの，加熱部内のボイド率がある程度高まった時刻 0.46 秒における第 2 段 WMS 直上流部から第 6 段 WMS 直上流部までの 5 点の PIV 測定結果を，可視化画像と並べて示す．

時刻 0.40 秒における 5 点の図（**図 3-163～図 3-167**）と比較し，右図の PIV 結果中の非加熱部の流速及びその軸方向変化に着目すると，入口部に相当する第 2 段 WMS 直上流部と比較して第 3 段 WMS の直上流部で既に非加熱部の流速が増加していること，及び下流側に進むにつれて同部の流速が一層増加する状況がみてとれる．

加熱部内のボイド率増加に伴う非加熱部におけるこのような流速の変化は，**3.2.2.6** に後述するスペーサ追設の有無の影響を検討するうえで有用な情報になる．

3.2.2.3. ボイドの横方向伝播に関する検討

各実験ケースにおいて，WMS などによる取得情報から，各 WMS の設置断面におけるボイドの横方向伝播の発生の有無及びその時々刻々の伝播速度を定量化する．ただし，横方向伝播速度については，加熱サブチャンネルにおける最も早いボイド初生時刻からの遅れ時間を指標として整理する．

なお，横方向伝播の遅れ時間については，低温時制御棒落下事故時のピーク出力後，ランアウト出力が高い時期（熱流束が最大となる期間）の約 0.3 秒間をボイド反応度フィードバックが有効となる期間と想定し，この 0.3 秒間（以下“**有効時間**”という．）で十分なボイドの横方向伝播があるかどうかを遅れ時間との対比で評価するために導入した．このため，以下では横方向伝播の遅速又はその遅れの大小を，遅れ時間と 0.3 秒とを比較して記している．

3.1.3.1～**3.1.3.4** に示した実験結果の説明から，ボイドの横方向の伝播領域についての知見を抜き出し，内容を補足して次にまとめる．また，横方向伝播の有無に着目して次の内容を整理すると，**表 5** のようになる．

- **Run No. 1～3**： Run No.1 では加熱サブチャンネルタイプ 1 及び加熱サブチャンネルタイプ 2 の一部に発生領域が限定され，横方向伝播が生じていない．一方，Run No. 2 及び Run No. 3 では，非加熱サブチャンネルタイプ 2 にはボイドが到達しなかったものの，その 1 列分内側の非加熱サブチャンネルタイプ 1 までボイドが横方向伝播した．

  横方向伝播の遅れについては，**図 3-141** から Run No. 2 では，非加熱サブチャンネルタイプ 1（相対熱負荷量が 0 及び 0.05）に対して，第 3 段 WMS で 0.15 秒，第 4 段 WMS で 0.08 秒，第 5 段 WMS で 0.09 秒，第 6 段 WMS では 0.05 秒の遅れと遅れ時間が小さい．また**図 3-142** から，Run No. 3 では非加熱サブチャンネルタイプ 1 に対して，第 3 段 WMS で 0.06 秒，第 4 段 WMS で 0.07 秒，第 5 段 WMS で 0.15 秒の遅れであり，第 5 段 WMS を除くと遅れ時間が小さい．このため，Run No. 2，Run No. 3 のどちらのケースとも，有効時間と比較して横方向伝播が概ね極めて速くが進んだことが分かる．

- **Run No. 4～6**： Run No.4 では加熱サブチャンネルタイプ 3 までの領域に発生範囲がほぼ限定され，横方向伝播の発生がないとしてよい．一方，Run No. 5 では，非加熱サブチャンネルタイプ 2 にはボイドが到達しなかったものの，その 1 列分内側の非加熱サブチャンネルタイプ 1 までボイドが横方向伝播した．さらに Run No. 6 では，反対側チャンネルボックスに接する非加熱サブチャンネルタイプ 2 にまでボイドが横方向伝播した．

  横方向伝播の遅れについては，**図 3-144** から Run No. 5 では，非加熱サブチャンネル

タイプ 1 では第 4 段 WMS で 0.05 秒，第 5 段 WMS では遅れなし[22]，第 6 段 WMS では 0.1 秒の遅れと遅れ時間が小さい．また**図 3-145** から，Run No. 6 では第 4 段 WMS で 0.08 秒，第 5 段 WMS では遅れなし，第 6 段 WMS では 0.09 秒しか遅れておらず，遅れ時間が小さい．非加熱サブチャンネルタイプ 2（相対熱負荷量 -0.1）に対しては Run No. 6 では第 4 段 WMS 位置のみで横方向伝播が観測されているが，遅れ時間は 0.18 秒とやや大きくなっている．以上から，Run No. 5，Run No. 6 とも非加熱サブチャンネルタイプ 1 に対しては，有効時間と比較して概ね極めて速く横方向伝播が進むこと，Run No. 6 だけであるが，サブチャンネルタイプ 2 に対しては横方向伝播がより遅れる傾向があり，有効時間に対し有意となる可能性が想定されることが分かった．

- **Run No. 7～9**：Run No. 8 では，加熱サブチャンネルタイプ 3 までの範囲にとどまり，非加熱サブチャンネルにはボイドが到達しておらず，横方向伝播が生じていない．一方 Run No. 9 では非加熱サブチャンネルタイプ 1 にまでボイドが横方向伝播し，ごく一部（1 点のみ）ではあるが，反対側チャンネルボックスに接する非加熱サブチャンネルタイプ 2 にもボイドが横方向伝播した．
  なお，非加熱サブチャンネルタイプ 2 への伝播については，**図 3-81**（Run No. 9）に示されるように第 4 段 WMS における 1 交点（R1-T5）のみであり，時刻 0.6 秒から持続時間が 0.03 秒に満たない単発のパルス的なボイド率の増減が見られたのみであることから，有意な横方向伝播として取り扱わない．
  また，横方向伝播の遅れについては，**図 3-147**（Run No. 9）から，非加熱サブチャンネルタイプ 1 への遅れが第 4 段 WMS で 0.08 秒，第 5 段 WMS で 0.13 秒，第 6 段 WMS では 0.15 秒となっている．有効時間に対し，比較的速く横方向伝播が進むとしてよいものの，ややその影響がやや有意となる可能性も想定される．

- **Run No. 10～12**：Run No. 10 では，一部（2 点のみ）を除いて概ね加熱サブチャンネルタイプ 3 までの拡がりにとどまり，横方向伝播が生じていないとしてよい．Run No. 11 では非加熱サブチャンネルタイプ 1 にまでボイドが横方向伝播し，ごく一部（1 点のみ）ではあるが，反対側チャンネルボックスに接する非加熱サブチャンネルタイプ 2 にもボイドが伝播していた．Run No. 12 では非加熱サブチャンネルタイプ 2 までボイドが伝播した．
  横方向伝播の遅れについては，**図 3-149** から Run No. 11 では，非加熱サブチャンネルタイプ 1 に対して，第 4 段 WMS で 0.09 秒，第 5 段 WMS で 0.10 秒，第 6 段 WMS では 0.17 秒の遅れと遅れ時間が小さい．また**図 3-150** から，Run No. 12 では非加熱

[22] 加熱サブチャンネル内では，第 5 段 WMS 位置よりも第 4 段 WMS 位置の方が 0.05 秒ボイド初生が早い．第 5 段 WMS 位置の非加熱サブチャンネルタイプ 1 内で同じ高さの加熱サブチャンネルのボイド初生時刻からの遅れがなかったのは，より早く初生した第 4 段 WMS の加熱サブチャンネルから伝播したボイドが計測されたことが原因である可能性がある．

サブチャンネルタイプ 1 に対して，第 4 段 WMS で 0.09 秒，第 5 段 WMS で 0.09 秒，第 6 段 WMS で 0.12 秒の遅れとなっている．したがって，どちらのケースにおいても，サブチャンネルタイプ 1 に対しては，有効時間に対して比較的速く横方向伝播が進んだことが分かる．一方，非加熱サブチャンネルタイプ 2 に対しては，Run No. 12 では第 5 段 WMS で 0.19 秒，第 6 段 WMS で 0.20 秒と遅れ時間がやや大きくなっており，横方向伝播の影響がやや有意となる可能性が想定される．

また，Run No. 2 においては，PIV による液相の流速分布の計測結果が得られていることから，これをボイドの横方向伝播との関連で整理する．

Run No. 2 の可視化画像を表す**図 3-23** に示されるように時刻 0.55 秒以降は第 4 段 WMS と第 5 弾 WMS との間で非加熱領域にボイドが横方向伝播している．この時期の可視化画像及び PIV による液相流速場を**図 3-120**～**図 3-123** の 4 枚の図に示す．

4 枚の図により，気泡塊（暗部）が非加熱部に侵入する際の流況及び上流側から気泡塊を追って非加熱部に流入する液相の流況の様子が把握できる．特に，大きな気泡塊の上部で液相が加速される様子，界面付近及び気泡塊の後流側で液相が激しく乱される様子，これらにより気泡が変形する様子などが示されていることが判明した．このように，PIV による液相の流速分布の計測結果と同時に撮影した高速度ビデオ画像による可視化情報とを突き合わせることで，横方向及び軸方向の流速場の発達とボイド率の横方向及び軸方向の伝播との関係が整理でき，現象の理解・解明に活用することができた．

なお，LIF 及び光ファイバ温度計による液相温度計測については，**3.1.3.5** に述べたように次年度の課題としたい．

3.2.2.4. 限界条件に関する検討

限界条件に関する検討として，ボイドの横方向伝播に関する整理結果及び高速度ビデオ画像による可視化情報に基づいて，熱流束レベル，並びに加熱部入口の冷却水の流速及び温度の三つのパラメータ空間上で限界条件が構成する 2 次元部分空間（面）を特定するとの要求がなされていた．

しかし，**表 3** に示した今回実験を実施した 12 の実験条件の下では，**3.2.2.3** にて説明したように，

- 非加熱サブチャンネルタイプ 1 にボイドが横方向伝播する場合には，その伝播に要する時間は有効時間と比較して十分に短い．
- 最大出力レベルが大きく非加熱サブチャンネルタイプ 2 までボイドの横方向伝播が及ぶ場合には，その伝播時間は有効時間と比較して半分から 2/3 になる．

などの特性が得られた．

3.1.3.1 に示したように，それぞれのタイプの非加熱サブチャンネルは，

- 非加熱サブチャンネルタイプ 1 が，加熱サブチャンネルからなるボイド発生領域に隣接又は近接するサブチャンネル

・　非加熱サブチャンネルタイプ 2 が，上記のボイド発生領域から遠い領域，例えば落下制御棒側コーナと対角位置にあるコーナ部近傍領域

を表すものであることから，限界条件については，

・　限界条件 1：　非加熱サブチャンネルタイプ 1 にボイドが到達しないことが確認できた最も熱的に厳しい条件

・　限界条件 2：　非加熱サブチャンネルタイプ 2 にボイドが到達しないことが確認できた最も熱的に厳しい条件

と定義して，実験結果を整理する．ここでは，冷却水温度及び冷却水流速をパラメータに，限界条件を各実験ケースの最大出力レベルとして整理した結果を**表 6** に示す．

同表から分かるように，どちらの限界条件（最大出力レベル）とも，冷却水温度の増加により減少する特性を示す．一方，流速に対する依存性はどちらの限界条件についても明確ではない．

3.2.2.5.　凝縮誘起水撃現象に関する検討

ここでは，凝縮誘起水撃が生じたケースについて，圧力計測値の時間変化特性をボイド率の変化及び高速度ビデオ画像による可視化情報に基づいて整理する．

入口部の圧力の時間変化から，水撃現象が生じたと判断できるのは，Run No. 2, 3, 6, 12 の 4 ケースであった．また，圧力パルスの大きさが小さいものの，パルス的な圧力挙動が現れたのは，Run No. 5 及び 11 の 2 ケースであった．有効加熱部入口の冷却水温度及び流速で分けた 4 実験条件グループのうち，No. 7～9 までの 60ºC 及び 0.3 m/s のグループを除く 3 グループの熱流束が高い側の実験条件のケースで水撃現象又はパルス的な圧力挙動が生じている．

このように，熱流束が高くなるほど，すなわちボイド率が高くなるほど，水撃が明確になる特徴をもつことから，一連の実験で得られた圧力パルスは凝縮誘起現象である可能性が高いといえる．

以下，圧力パルスが生じたケースについて個々に説明する．

1)　この中で水撃の発生が観測された二つのケース，40ºC 及び 0.5 m/s の実験条件グループ中の最大の熱流束レベルの Run No. 6，並びに 60ºC 及び 0.5 m/s の実験条件グループ中の最大熱流束レベルの Run No. 12 では，前者が 5 段目の WMS 高さの各サブチャンネルで一斉にボイドが急減し消失した時刻，後者が 4 段目の WMS の高さの多くのサブチャンネルで一斉にボイドが急減し消失した時刻に水撃が発生した時刻が重なっている．このため，凝縮誘起水撃が発生した可能性が，ボイドの瞬時消失と同期して観測されたことにより裏付けられたとしてよい．

2)　水撃の発生が観測された残りの 2 ケース，40ºC 及び 0.3 m/s の実験条件グループ中の Run No.2 及び Run No. 3 で取得された実験データの間では，凝縮と水撃との時刻上の関係性は強くない．また，両ケースとも水撃発生に相当する圧力パルスが二つの

ピークからなっている点に特徴がある．パルスの大きな順に二つのピーク時刻を並べると，Run No.2 で 0.78 秒及び 0.70 秒，Run No. 3 で 0.69 秒及び 0.76 秒であった．観測されたボイド急減・凝縮の最も遅い時刻が，Run No.2 で 0.70 秒，Run No. 3 で 0.66 秒であったが，どちらも 1 サブチャンネルのみの凝縮時刻であった．したがって，WMS が設置された断面以外の高さ領域で凝縮誘起水撃が発生したことが推測されるが，Run No.2 での最大圧力パルス発生時刻の 0.78 秒，Run No. 3 での第 2 の大きさの圧力ピーク発生時刻の 0.76 秒は，観測された最も遅いボイド凝縮時刻から約 0.1 秒遅れており，取得したボイドデータの範囲では，少なくとも WMS を設置した範囲内で生じた凝縮誘起水撃と限定するのは困難である．

3) 圧力パルスの大きさが小さいものの，パルス的な圧力挙動が現れた 2 ケース，40ºC 及び 0.5 m/s の実験条件グループ中の中間の熱流束レベルの Run No. 5，並びに 60ºC 及び 0.5 m/s のグループ中の中間熱流束レベルの Run No. 11 では，圧力パルスの大きさが小さいだけでなく，観測されたボイドの凝縮との関係も明瞭ではない．例えば，Run No. 5 では，圧力パルス発生時刻が大きいほうから順に 0.71 秒及び 0.79 秒，最も遅いボイド急減・凝縮時刻が 6 段目の WMS における 0.69 秒[23] であった．また，Run No. 11 では，圧力パルス発生時刻が 0.76 秒から 0.77 秒までの間，最も遅いボイド急減・凝縮時刻がこれも 6 段目の WMS における 0.75 秒（ただし，1 サブチャンネルのみ）であった．

以上の検討結果を整理すると，次のようになる．

- 圧力パルスの原因は凝縮誘起水撃と推測される．
- ただし，実験データから直接に裏付けられるのは，Run No. 6 及び Run No. 12 の 2 ケースのみ

3.2.2.6. スペーサ追設によるボイド挙動の変化に関する検討

3.1.3.6 に示したように，**表 3** の実験マトリックスに示された一連の実験を実施した後に，有効加熱部（長さ 0.45 m）の中央高さよりやや上流側（下方）の 3 段目と 4 段目の WMS のちょうど中間の高さ位置に肉厚及び高さが 0.4，30 mm の短尺薄肉の丸セルスペーサを追設した．

これにより，例えば Run No. 2 と出力，冷却水の温度及び流速が等しい実験条件との間でも，ボイド挙動が有意に変化し，スペーサ追設後の結果が，スペーサの上流側を含め，ボイド率が全般的に大きく低下するとともに，スペーサによるボイドの横方向流れの抑制を示唆する結果となった．また，スペーサより下流側ではボイド初生時刻の遅れもみとめられた．特にスペーサ上端より 0.035 m 下流（上方）に位置する第 4 段 WMS のボイド挙動測定結果に最も大きくスペーサ追設の影響が表れた．また，下流側への影響は第 5 段，第 6 段とスペ

[23] ボイド率の低い第 2 段目の WMS では，時刻 0.72 秒でボイド凝縮が生じている．

ーサからの距離が離れるにつれて減少する傾向がみられた．一方，スペーサ下端から 0.035 m 上流（下方）に位置する第 3 段 WMS の測定結果にも影響が現れた．

スペーサを追設したのは，実機燃料では発生しない瞬時ロッド曲がりを防止すること及びスペーサがボイド挙動に及ぼす影響を把握するためであった．このため，以下では，ボイド挙動に及ぼす瞬時ロッド曲がりの影響をまず検討して影響のないことを明らかにし，次いでスペーサ追設後のボイド挙動の変化がすべてスペーサの流れ場に対する影響に帰着されるとして，影響及びその機構を定性的に検討する．

- **瞬時ロッド曲がりの影響**

丸セルスペーサの追設の前後で同一の出力レベル，冷却水の温度及び流速の下でも，ボイド挙動に位置によっては大きな影響が生じることが判明した．このため，瞬時ロッド曲がりのボイド挙動に対する影響についても，詳細に検討する必要が生じた．

なお，ボイド挙動に対する瞬時ロッド曲がりの影響の把握は，スペーサの追設なしの場合の実験データの有効性の有無の観点からも非常に重要である．

瞬時ロッド曲がりの影響の検討を次の二つの観点で実施する．

1) 高ボイド率状態への影響（横方向伝播を含む）

2) ボイド初生時刻への影響

1)の高ボイド率状態への影響については，スペーサ追設の前後でボイド挙動が大きく変わるため，前後の実験結果を比較することでは影響を特定することはできない．しかし，スペーサ追設前の瞬時ロッド曲がりが生じたケースの実験結果を分析することで，影響の特定が可能であることが分かった．以下に説明する．

スペーサ追設前の一連の実験においては，ヒータロッドはアンペール力による引力のため，最大出力レベルに比例した変位[24]で互いに近づき合っていた．この変位は有意であるが，時刻 0.5 秒で加熱量（電流）がゼロとなるとともに瞬時に元に戻りゼロとなる．そこで，時刻 0.5 秒を境にボイド率及びボイド挙動に有意な変化が生じたか否かを，WMS により取得したボイド率実験データの時間変化から評価する．例えば高出力のため曲がりが大きい Run No. 2 の**図 3-14～図 3-23**, Run No. 3 の**図 3-28～図 3-32**, Run No. 6 の**図 3-57～図 3-60**, Run No. 9 の**図 3-80～図 3-84**，Run No. 12 の**図 3-108～図 3-112** などの複数のケース及び第 3 段から第 6 段までの複数の WMS 断面で測定された数多くの結果を調べてみる．この結果，WMS の交点上のボイド率測定結果の時間変化特性の上で，時刻 0.5 秒を境に特徴的な変化が生じた結果はほぼ皆無であることが分かった．このため，高ボイド率状態における瞬

[24] 変位量は，高速度ビデオ画像による目視での確認では，最も変位量が大きいと目される最大出力レベルの大きな Run No. 3 のケース（1450 kW/m^2 相当）の有効加熱長の中央高さ断面でロッド間隔を約 8.3%縮めるものであった．これは 4 本のロッドで囲まれるサブチャンネルに対し，その流路断面積を 31%，ロッド間ギャップ幅を 38%縮小させる．また，スペーサ追設後のボイド挙動を取得した Run No. 2（1325 kW/m^2 相当）においては，流路断面積を 28%，ロッド間ギャップ幅を 35%縮小させる．なお，3×3 格子の側面を左右対称に見る方向から見た場合，対称軸上のヒータロッドは一切変位せず，左右のロッドが対称軸に近づく変位をするように見える点に留意すること．

時ロッド曲がりの影響は有意ではないと結論してよい．

なお，時刻 0.5 秒を境にその前後のボイド率に有意な変化が生じないのは次の理由によると考えられる．

- 有効加熱部の両端の高さ位置に既設のスペーサがあるため，瞬時ロッド曲がりは有効加熱部の中央高さを腹とした 1 次モードの変位に従うと考えられる．
- 第 3 段 WMS 及び第 4 段 WMS については次の通りである．すなわち，有効加熱部の中央高さに位置する第 4 段 WMS までの区間では，瞬時ロッド曲がりにより下流側（上方）に進むにつれサブチャンネル流路断面積が減少（最大熱流束レベルの高い厳しいケースだと中央高さ位置で 3 割減少）する．これに伴って，当該サブチャンネルを流れる冷却水の流量が，流路面積減少割合とほぼ同じ割合だけ減少する．これにより，ボイド挙動に対して相反する影響を及ぼす二つの過程が生じる．
    - 流量が減少することで，加熱による冷却水の温度上昇幅が増加するため，発生後のボイドが凝縮しにくくなることから，結果的にボイド率が増加しやすい．
    - 流量の減少に伴って加熱サブチャンネルから流出する冷却水はロッド間ギャップを通るが，当該ギャップが狭いため，その液温は当該サブチャンネルの中心のバルク部と比較してより高温となる．特に，瞬時ロッド曲がりによりロッド間ギャップ幅も狭まる（最大熱流束レベルの高い厳しいケースだと 3.5 割減少して 2.0 mm まで狭まる）ことから，流出水は一層高温化すると考えられる．また，このような流出は当該サブチャンネル内のヒータロッド表面近傍に形成される温度境界層の成長も阻害すると考えられる．このため，ボイドの発生が阻害され，ボイド率の増加が抑制される．
    - ボイド挙動に有意な変化が生じないのは，上記の二つの過程がボイド率の変化を相殺した結果と考えられる．
- 一方，有効加熱部中央高さより上方にある第 5 段 WMS 及び第 6 段 WMS でボイド率に有意な変化が生じないのは，瞬時ロッド曲がりに伴って，第 4 段 WMS までと正反対の変化が流れに生じるためである．

2)のボイド初生時刻への影響については，初生がボイドの有無にかかわる変化であることから，**1)**の高ボイド率状態への影響を評価したときのように，時刻 0.5 秒の前後でボイド挙動に変化のないことを基準として判断することはできない．このため，スペーサの追設の有無でボイド初生への影響の存否を，両者を比較できる Run No. 2 の実験条件に対する実験結果同士を比較することで評価する必要がある．

このとき，ボイド初生時刻を含め，追設スペーサの影響が明確に表れる第 4 段 WMS より下流側のボイド挙動を比較対象とすることはできず，これら下流側のボイド発生状況に影響されない第 3 段 WMS の測定結果を比較対象とする必要がある．ただし後述するように，下流側でのボイド発生の影響は，ボイドによる流路のプラグを通じて上流側の流量配分を変えるため，第 3 段 WMS のボイド率にも影響が生じる．しかし，Run No. 2 の実験条件に

対するスペーサ追設の有無に係るそれぞれの実験結果においては，第 3 段 WMS で計測したボイドの初生について，スペーサ追設なしでは各段の WMS の中で第 4 段 WMS と並んで最も早い時刻に生じ，一方，スペーサ追設後の結果では概ね第 3 段 WMS で最も早い時刻に初生が生じている．したがって，第 3 段 WMS の結果を比較材料として選定することができる．

3.1.3.6 に示したように，第 3 段 WMS に対しては，スペーサ追設の有無でボイド初生時刻にほとんど相違が生じていないことが分かっている．

一方，ボイド初生時刻はどちらのケースにおいても時刻 0.4 秒よりわずかに前，すなわち出力が最大出力レベルとなり瞬時曲がりが最も大きい時間帯に当たっている．また，第 3 段 WMS は有効加熱部中央に位置するため最も瞬時ロッド曲がりによる変位が大きいと考えられる第 4 段 WMS から 0.1 m 上流に隣接する WMS であるため，第 5 段 WMS とともに，これに次いで大きな変位が生じる WMS である．このため，仮に他の WMS 及び／又は他の時刻で最初にボイド初生が生じても，ロッド曲がりの影響は観測された第 3 段 WMS の結果と同様か又はこれより小さくなると考えられる．

以上から，ボイド初生時刻についても，瞬時ロッド曲がりによる影響はないと結論できる．

- **スペーサがボイド挙動に及ぼす影響**

前項で瞬時ロッド曲がりによるボイド挙動への影響がないことが評価できた．したがって，Run No. 2 の実験条件に対するボイド追設の有無による実験結果の相違を，すべてスペーサが流れ場に及ぼす影響に帰着できる．

スペーサ追設の影響をまとめると，次のとおりであった．

- スペーサの上流側を含め，ボイド率が全般的に大きく低下するとともに，スペーサによるボイドの横方向流れの抑制も示唆された．
- スペーサより下流側ではボイド初生時刻の遅れもみとめられた．
- スペーサ上端より 0.035 m 下流（上方）に位置する第 4 段 WMS のボイド挙動測定結果に最も大きく影響が表れた．
- 下流側への影響は第 5 段，第 6 段とスペーサからの距離が離れるにつれて減少する傾向がみられた．
- スペーサ下端から 0.035 m 上流（下方）に位置する第 3 段 WMS の測定結果にも影響が現れた．

上記の丸セルスペーサの追設によるボイド挙動の影響について，ボイド率低下の原因として想定される要因を次に示す．ただし，実験結果と詳細に突き合わせる具体的な分析は，必要に応じて，次年度に実施し，本報告では現象論的な観点で定性的な影響を整理し検討することにとどめる．

1) 丸セルスペーサ追設によるその後流側の連続相への撹拌効果

2) 丸セルスペーサ追設によるその後流側の蒸気に対する凝縮促進効果

3) **1)**及び **2)**に起因する同スペーサの後流側への流量配分の変化

4) 追設丸セルスペーサの存在又はその後流側の状態変化に起因するその上流側流れに及ぼす変化

5) その他の影響

以下，現象論的な観点で上記の影響について説明する．

1) の連続相への撹拌効果による影響については，丸セルスペーサのスペーサ上端から上方の後流側における液相に対する撹拌効果，特に強制対流サブクール沸騰における伝熱面近傍流れに対する撹拌効果の影響が挙げられる．

すなわち，強制対流サブクール沸騰現象において，伝熱面近傍の離脱気泡に対する凝縮効果の促進，伝熱面へのサブクール水供給の促進などが考えられ，同沸騰モードにおける離脱気泡生成を抑制する結果につながる．これは，OSV 初生の遅れ及びボイド率の低下の双方を引き起こす因子となる．この効果はスペーサから離れるにつれて散逸のため減少するので，スペーサに近い第 4 段 WMS にて最も大きく影響が現れる．

2) の蒸気に対する凝縮促進効果については，丸セルスペーサのセル部が蒸気流中の気泡，特に大きな径の気泡の分断・分裂に寄与する障害物となるため，スペーサ部を蒸気泡が通過することにより気泡径が減少し，サブクール水中での界面積濃度が増加するため，凝縮が促進されることから，OSV 後のボイド率の上昇を抑制するとともに，その低下を早める結果につながる．気泡径の減少はスペーサ部に限定されるが，減少した気泡径に起因する凝縮促進効果はスペーサから離れるにつれて減少するので，スペーサに近い第 4 段 WMS にて最も大きく影響が現れる．

3) の後流側の流量配分の変化については，スペーサがない場合には，第 4 段 WMS 位置及びその上方の第 5 段 WMS 位置などの，スペーサが追設されたときにその後流側となる加熱サブチャンネル領域において，急発生するボイドが当該のサブチャンネル流路に栓をするためにそこを流れる液相流量を減少させたと考えられる．さらに，これにより当該領域のボイドの発生が一層促されるとともに，液相流量の減少を一層進める結果にもつながったと考えられる．なお，液相流量の減少については，**3.2.2.2 b)**に示したボイド率増加に伴う非加熱部の液相流速の増加に係る PIV 結果の分析により間接的に裏付けられている．

一方，スペーサを追設すると，**1)** 及び **2)**で説明したメカニズムのため，加熱サブチャンネル領域内の第 4 段 WMS 位置でのボイド発生及びボイド率の上昇がともに大きく抑制されることになり，液相流量の低下が生じなくなるため，当該領域内の冷却性能が向上し，ボイド初生が遅れるとともにボイド発生量が減少する．この結果，巨大気泡塊も形成されにくくなるため，ボイドの横方向伝播も抑制されるようになる．

4) の上流側流れに及ぼす変化については，追設スペーサ下端からわずか 3.5cm 上流に位

置する第 3 段 WMS 近傍の領域に対する影響を中心に説明する．**3)** で説明したように，スペーサ追設がない場合に，ボイドの急発生後に生じる第 4 段 WMS 位置などの第 3 段 WMS の下流側の加熱サブチャンネル領域内で生じる液相流量の低下は，第 3 段 WMS 位置においても加熱サブチャンネル領域内の液相流量を大きく低下させる結果につながっていたと考えられる．

一方，スペーサを追設した場合には，**3)** で説明したように，第 3 段 WMS の下流側の加熱サブチャンネル領域におけるボイドの急発生及び液相流量の低下が抑制されることから，第 3 段 WMS に位置においても液相流量の低下が促進されなくなる．

このようにして，スペーサを追設することにより，スペーサがない場合と比較して第 3 段 WMS 位置の液相流量が増加するため，ボイドの発生及びボイド率増加が減少するとともに，ボイドの凝縮が増加する結果となった．なお，瞬時ロッド曲がりによる影響の分析の項で述べたように，第 3 段 WMS 位置でのボイド初生は，スペーサの追設の有無にかかわらず，これより上部に位置する下流側の WMS 位置におけるボイド急発生より早い時刻に生じるので，流量配分の変化の影響，すなわちスペーサ追設の影響を受けない．

最後に，第 2 段 WMS で検出されたボイド挙動についても簡単に説明する．スペーサが追設されない場合（Run No. 2）では，第 2 段 WMS においても熱負荷の高いごく一部の加熱サブチャンネル領域に時刻 0.53 秒から 0.55 秒の間に 0.3 秒前後の持続時間のパルス的なボイド率の上昇が観察された．このパルス的ボイド率上昇が生じたのは，下流側の第 3 段 WMS から第 6 段 WMS において加熱サブチャンネル領域内のほとんどでボイド率が高ボイド率で推移していた時刻範囲に当たり，巨大気泡塊が流路に栓をしていたことから，第 3 段 WMS 位置で既に加熱サブチャンネル領域内の液相流量が低下していたために，第 2 段 WMS 位置においても加熱サブチャンネル内で液相流量の低下が生じ，結果的に熱的に厳しいサブチャンネルでボイドが発生したものと考えられる．一方，スペーサ追設後に第 2 段 WMS 位置でボイド発生が観測されなかったのは，追設スペーサの下流側での加熱サブチャンネル領域内の液相流量の低下が抑制されたために，同領域における第 3 段 WMS でのボイド率上昇及び液相流量の低下が緩和され，結果的に同領域の第 2 段 WMS 位置においても液相流量の低下が減少したためと考えられる．

5) のその他の影響としては，スペーサによる除熱の影響が挙げられるが，スペーサ温度が冷却水温度と同程度であること及びボイド挙動が熱伝導に係る時定数と比較して時間的変化の速い現象であることから，その影響は小さいものと考えられる．

以上から，スペーサの追設によるボイド挙動の変化への影響として，**1)**，**2)**，**3)** 及び **4)** に示した後流側の連続相撹拌効果，蒸気凝縮促進効果及び流量配分の変化，並びに上流側流れの変化の 4 点を挙げることでスペーサ追設前後のボイド挙動の相違がよく説明できることが分かった．

また，瞬時ロッド曲がりの影響が有意でないと結論できたことを踏まえると，スペーサ追

設なしの場合の実験データが有効であること，さらにスペーサの影響を定量化するうえで，スペーサ追設の有無によるボイド率実験データの相違に関する特性及び特徴を活用できることが結論できる．

ただし，スペーサの影響を定量化するうえでは，今回の追設スペーサが実機燃料の丸セルスペーサと比較して短尺かつ薄肉[25]であるため，肉厚の影響が支配的と推測されるものの，高さの影響も無視できないことから，実機スペーサの方が強い影響が生じる可能性のあることに留意する必要がある．このとき，実機スペーサではスペーサの設置間隔が大きいこと[26]，**3.1.3.6** に示した結果から，追設スペーサから 23.5 cm 下流側の第 6 段スペーサでは影響が小さくなるなど，実機燃料におけるスペーサの影響を過大視しなくてもよい可能性もある点に留意したうえで，低温時制御棒落下事故時の軸方向出力分布のピーク高さとスペーサ高さとの位置関係を考慮して検討することが重要である．

---

[25] 実機燃料では肉厚及び高さが約 0.5 mm 及び 30 mm であるが，追設スペーサでは熱流動上の及ぼす影響を低減するため，0.4 mm 及び 10 mm としている．

[26] 実機燃料（例えば 9×9（A 型））ではスペーサの軸方向の設置間隔が 50cm 超と今回の試験体の有効加熱部の長さを超える．

表 5　実験ケースごとの横方向伝播の有無

	冷却水温度 冷却水流速	3 ケース中での最大出力レベル		
		低出力ケース	中出力ケース	高出力ケース
Run No. 1～3	40ºC 0.3 m/s	なし	非加熱サブチャンネルタイプ 1 まで	同左
Run No. 4～6	40ºC 0.5 m/s	なし	非加熱サブチャンネルタイプ 1 まで	非加熱サブチャンネルタイプ 2 まで
Run No. 7～9	60ºC 0.3 m/s	なし	なし	概ね非加熱サブチャンネルタイプ 1 まで
Run No. 10～12	60ºC 0.5 m/s	なし	概ね非加熱サブチャンネルタイプ 1 まで	非加熱サブチャンネルタイプ 2 まで

表 6　限界条件（出力レベル）の整理

冷却水温度 冷却水流速	限界条件内にボイドの横方向伝播が収まる最大出力レベル（kW/m^2）	
	限界条件 1	限界条件 2
40ºC 0.3 m/s	1100	1450
40ºC 0.5 m/s	1205	1320
60ºC 0.3 m/s	895	1005
60ºC 0.5 m/s	900	995

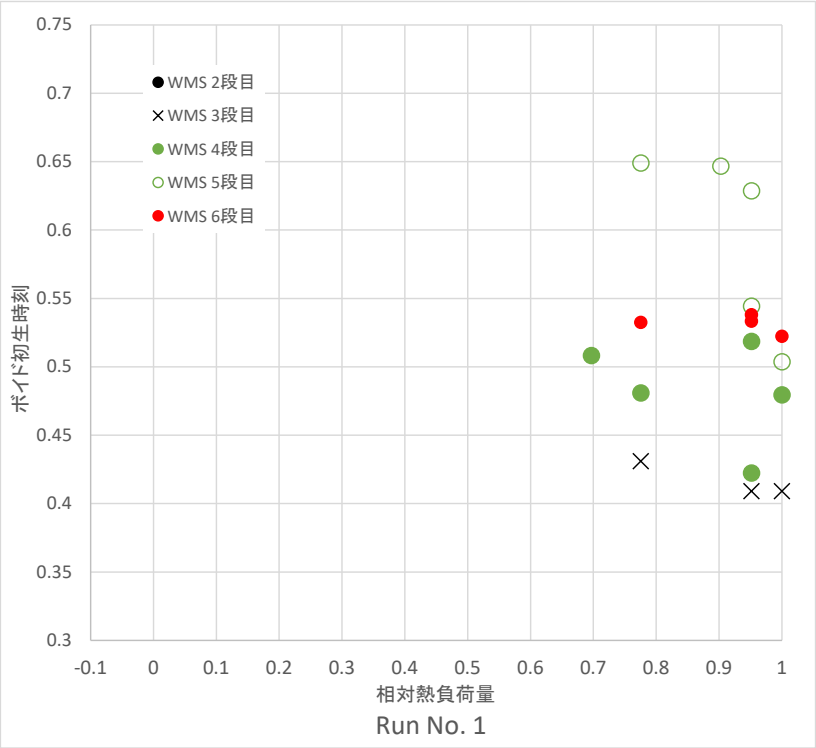


図 3-140　WMS によるボイド初生時刻（Run No.1）

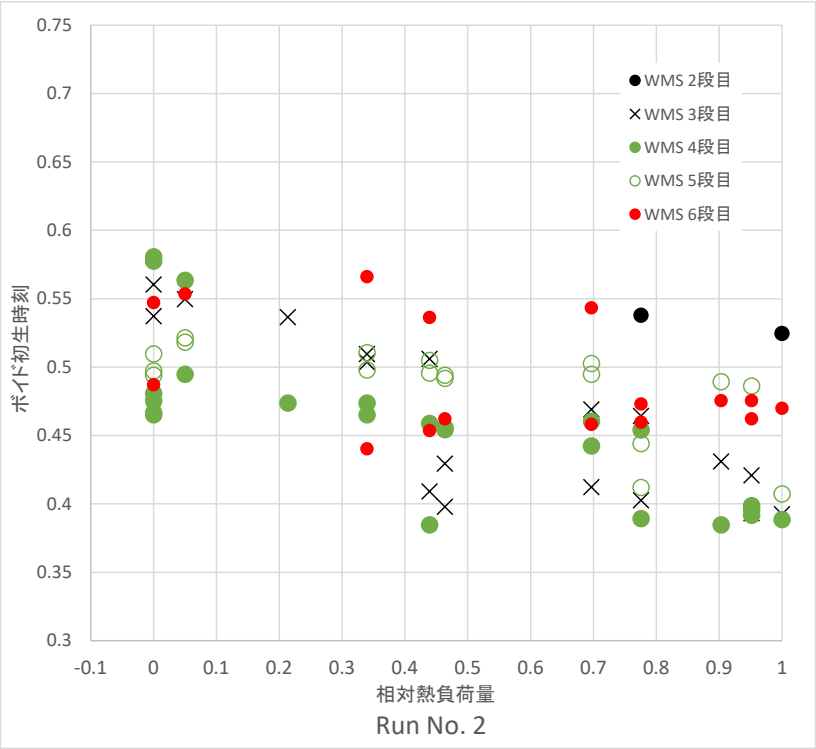


図 3-141　WMS によるボイド初生時刻（Run No.2）

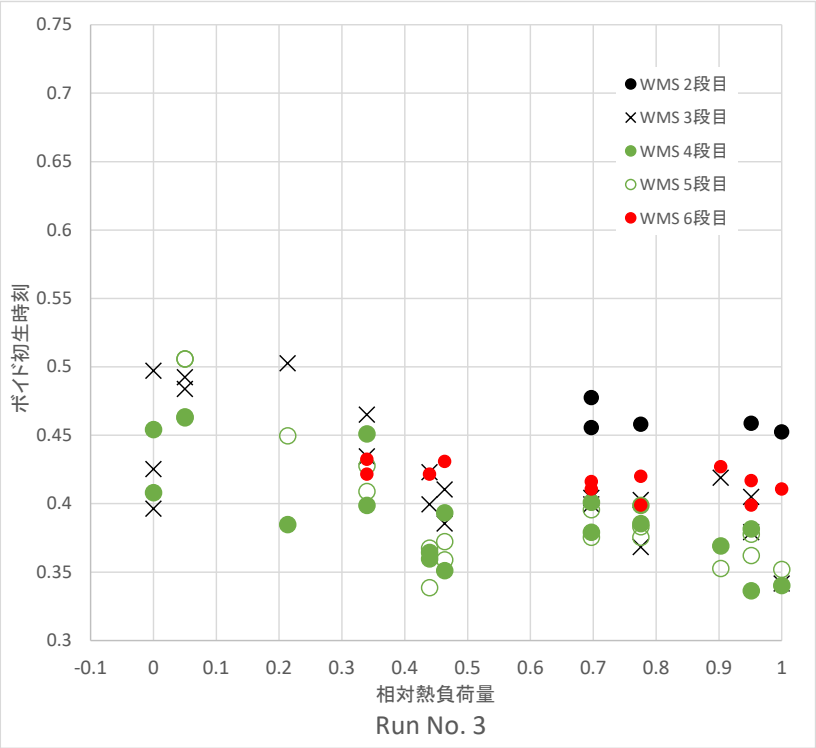


図 3-142　WMS によるボイド初生時刻（Run No.3）

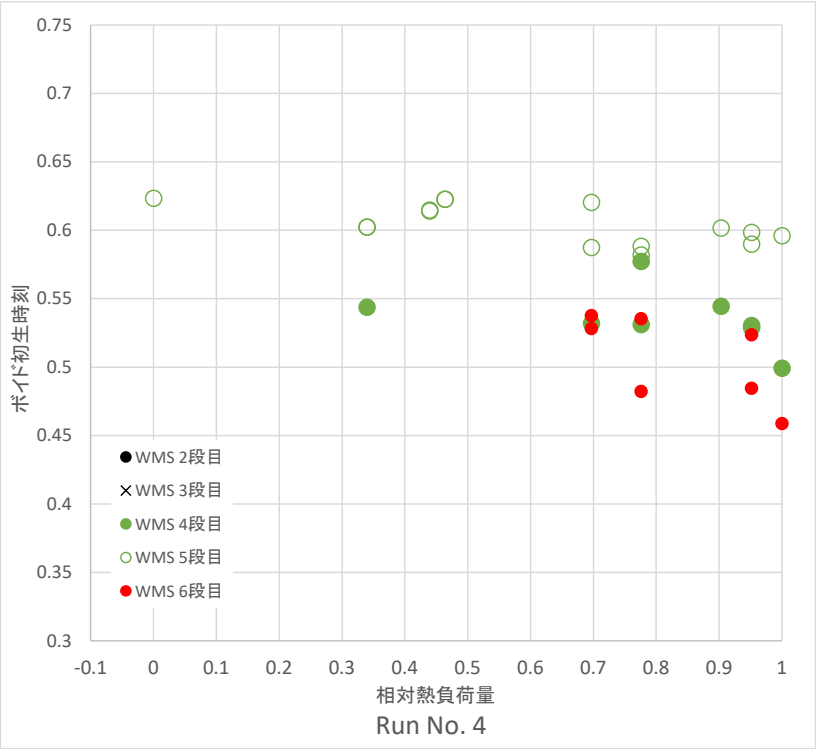


図 3-143　WMS によるボイド初生時刻（Run No.4）

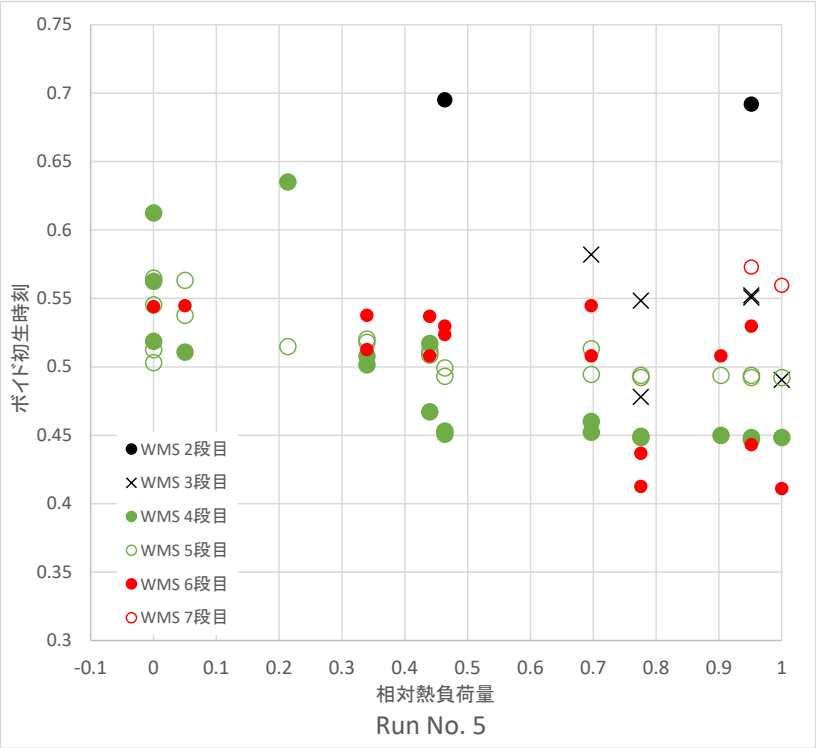


図 3-144　WMS によるボイド初生時刻（Run No.5）

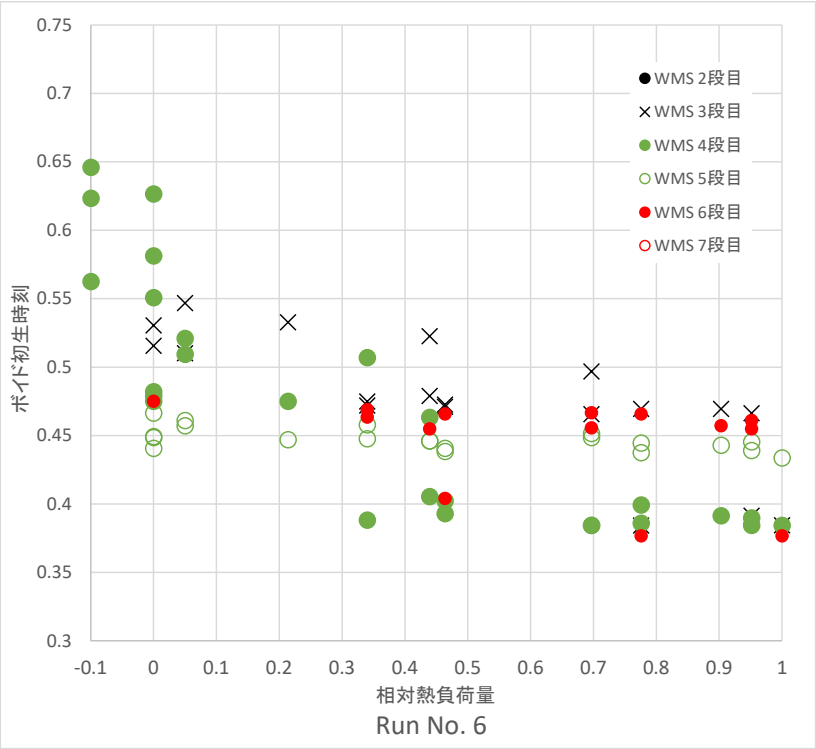


図 3-145　WMS によるボイド初生時刻（Run No.6）

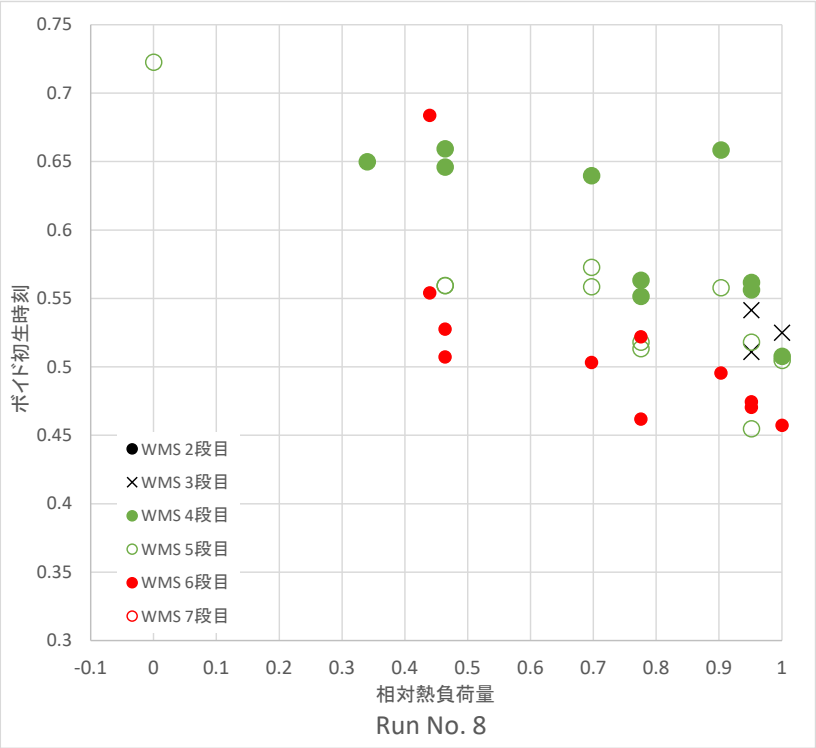


図 3-146　WMS によるボイド初生時刻（Run No.8）

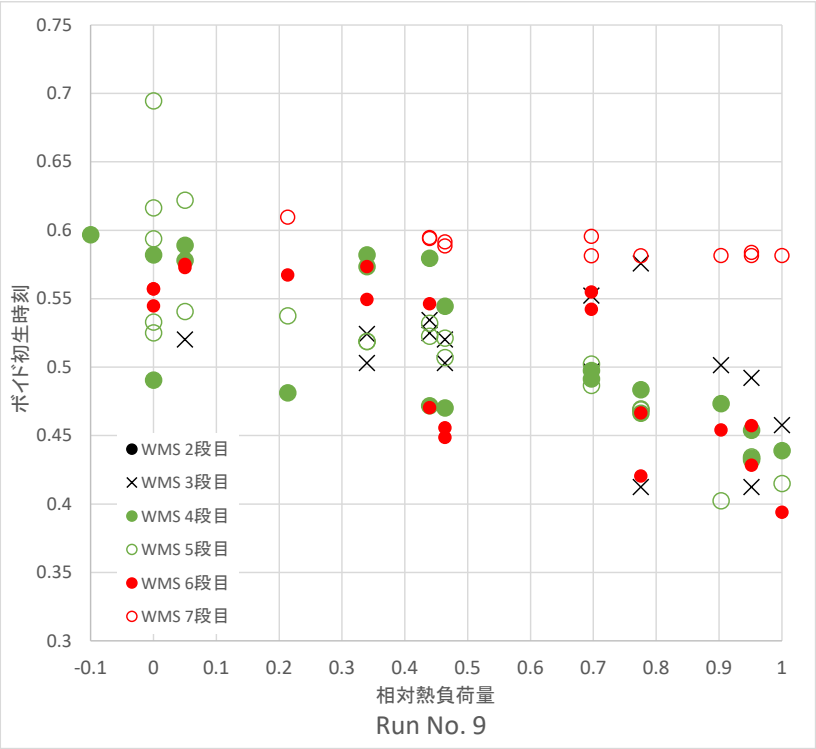


図 3-147　WMS によるボイド初生時刻（Run No.9）

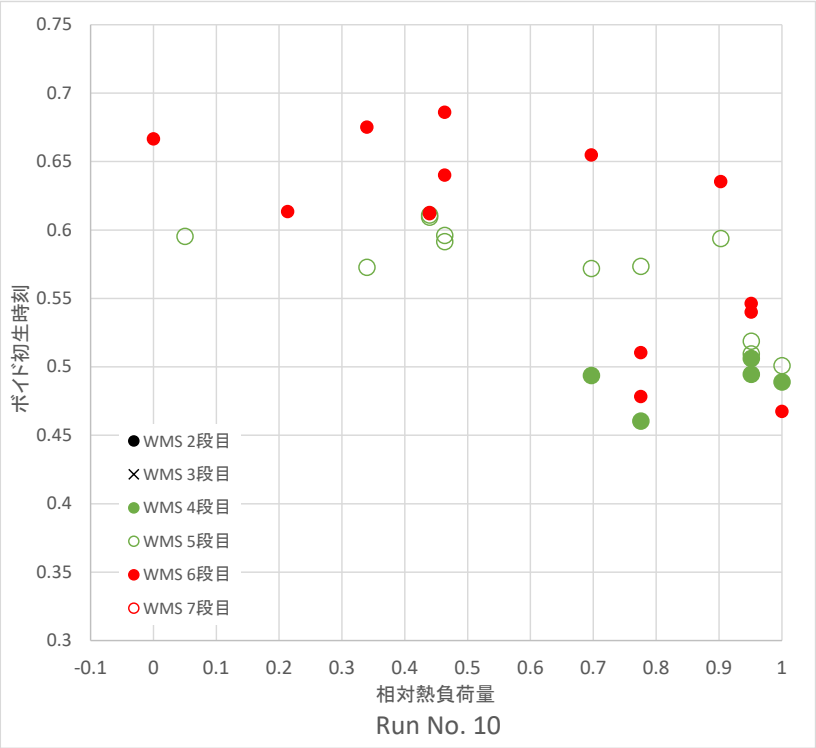


図 3-148　WMS によるボイド初生時刻（Run No.10）

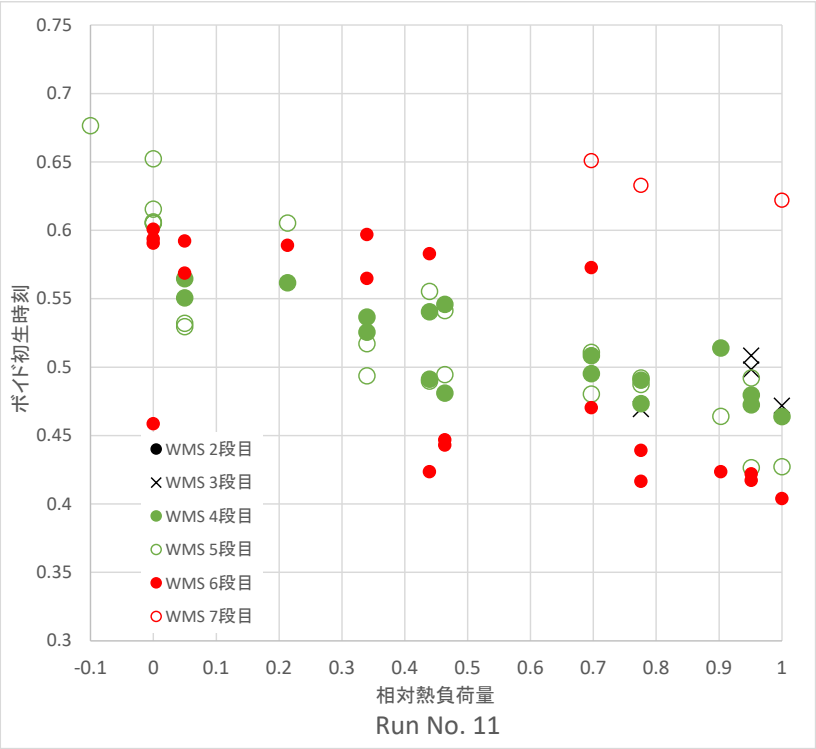


図 3-149　WMS によるボイド初生時刻（Run No.11）

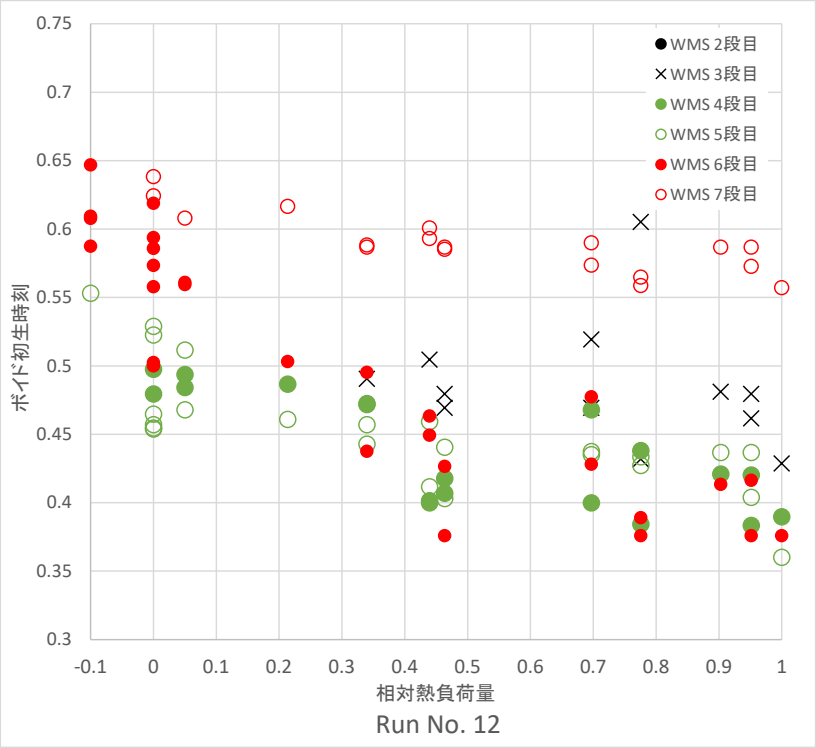


図 3-150　WMS によるボイド初生時刻（Run No.12）

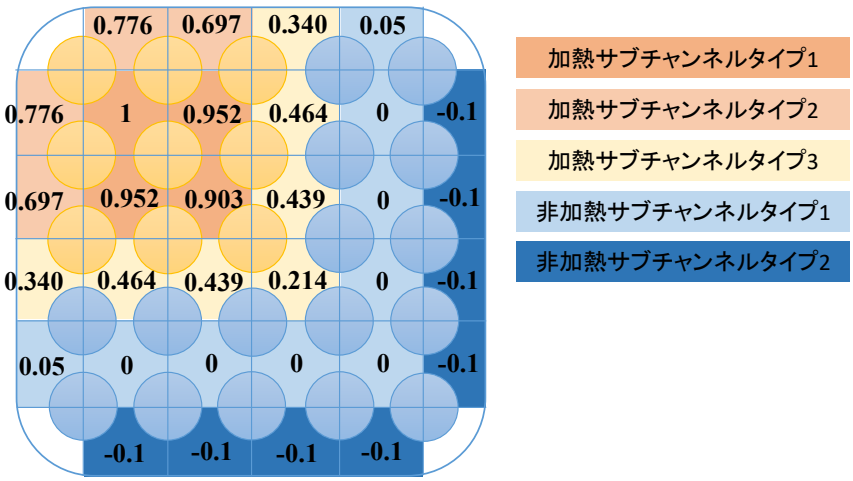


図 3-151　サブチャンネルタイプ分割とサブチャンネル相対熱負荷量との関係

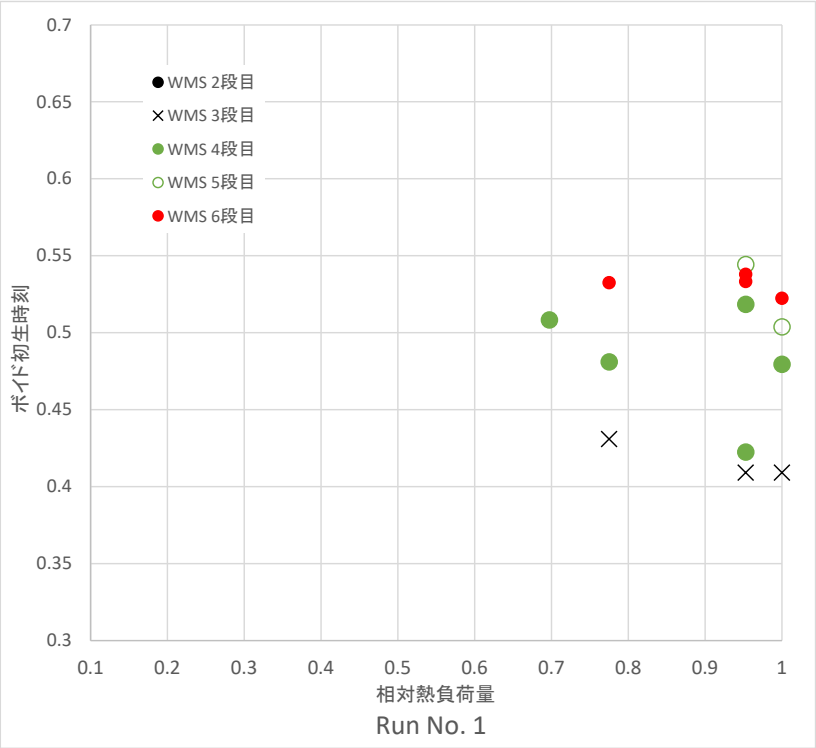


図 3-152　WMS による OSV 初生時刻（Run No.1）

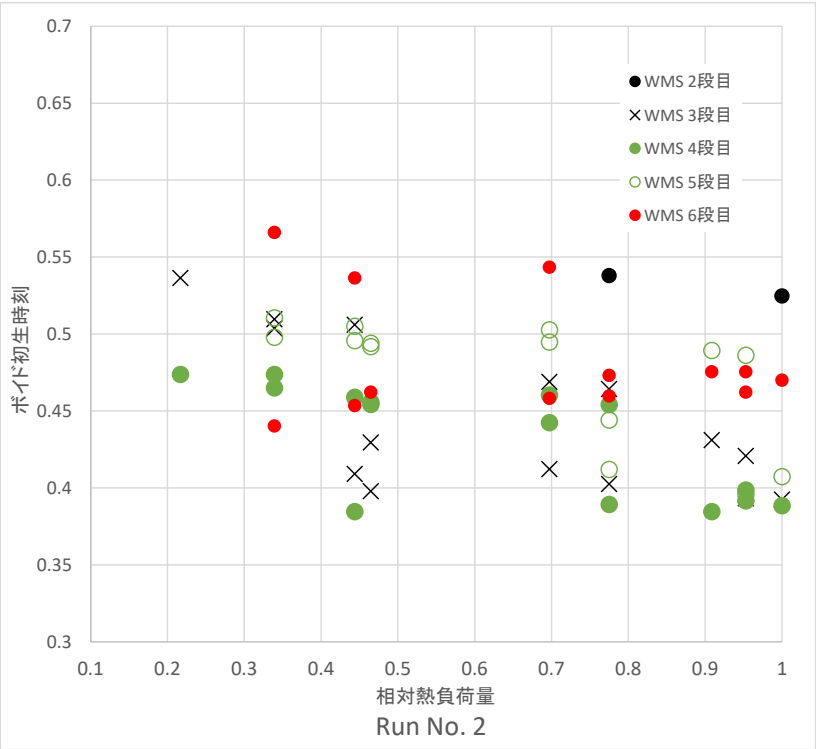


図 3-153　WMS による OSV 初生時刻（Run No.2）

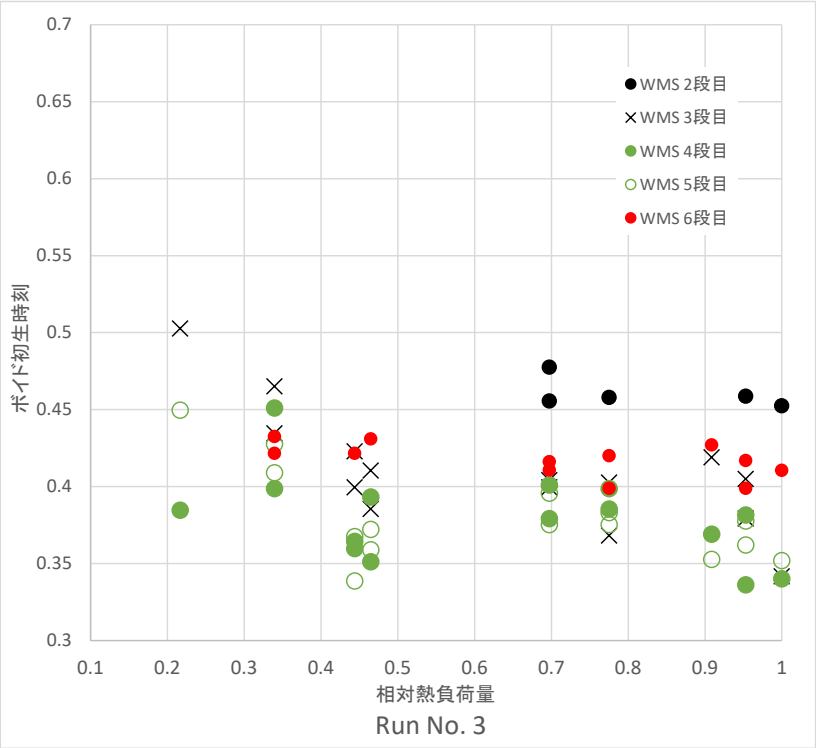


図 3-154　WMS による OSV 初生時刻（Run No.3）

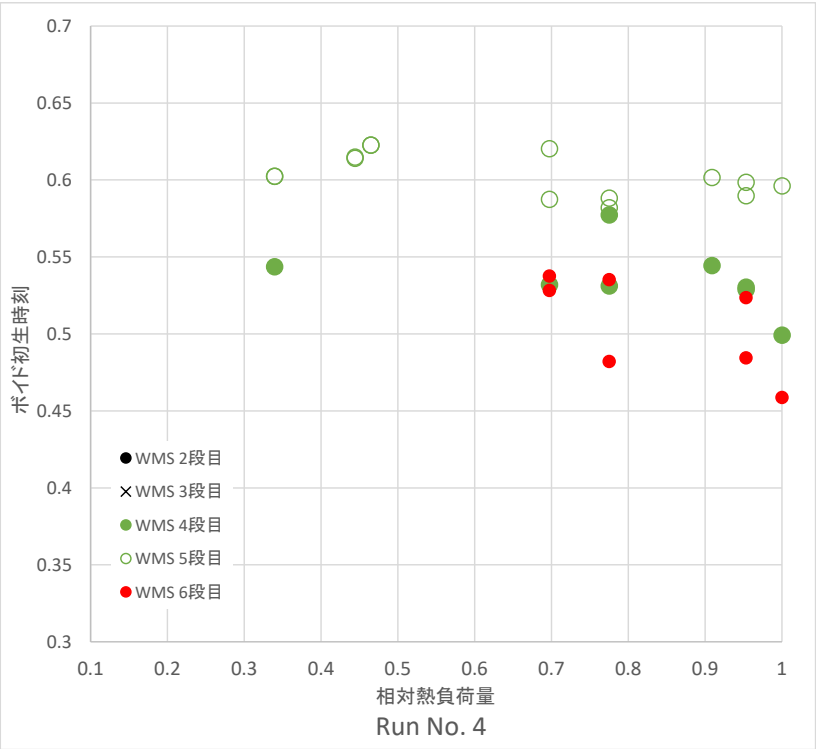


図 3-155　WMS による OSV 初生時刻（Run No.4）

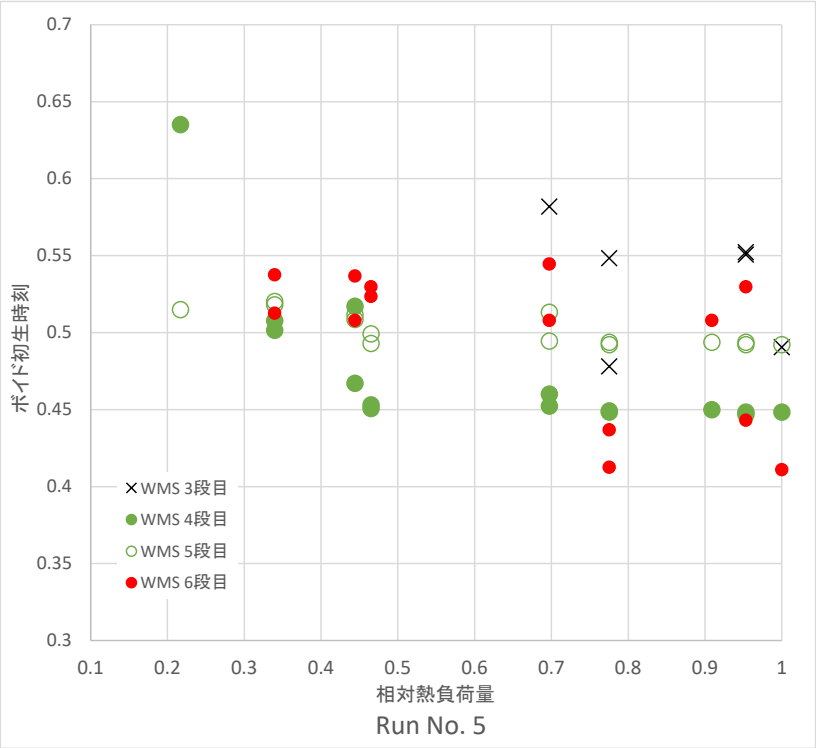


図 3-156　WMS による OSV 初生時刻（Run No.5）

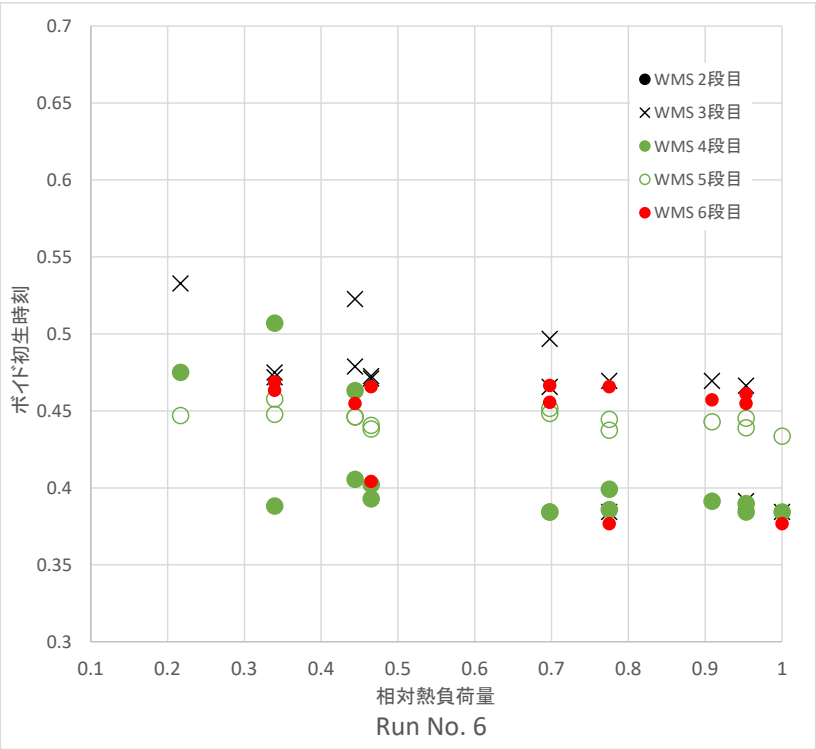


図 3-157　WMS による OSV 初生時刻（Run No.6）

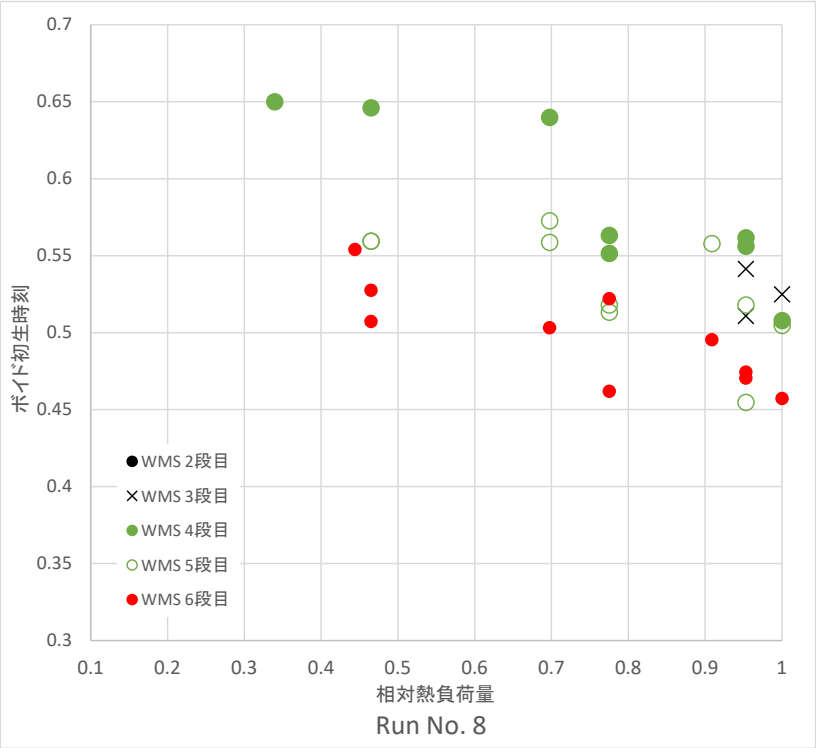


図 3-158　WMS による OSV 初生時刻（Run No.8）

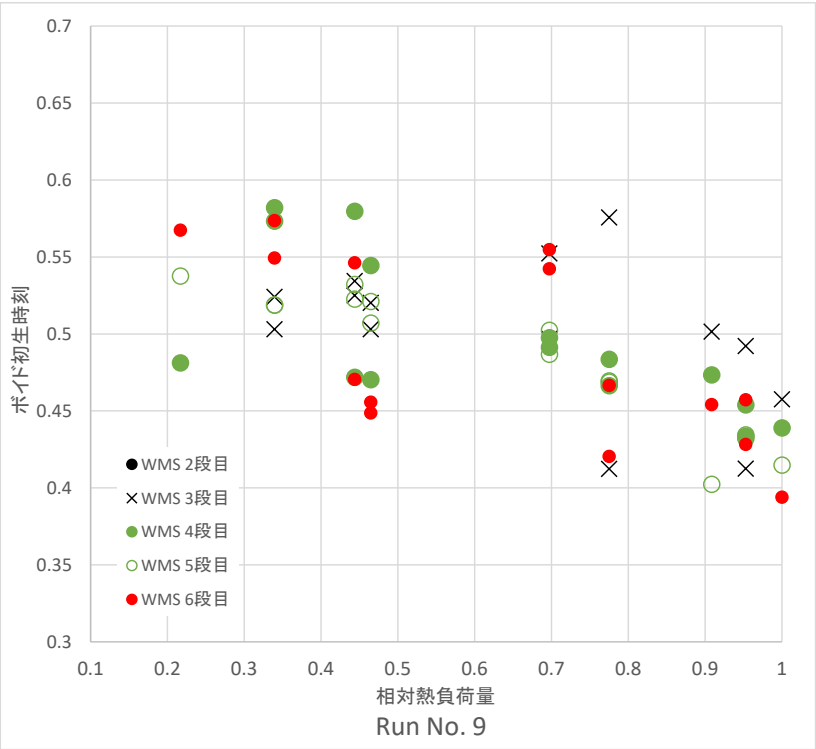


図 3-159　WMS による OSV 初生時刻（Run No.9）

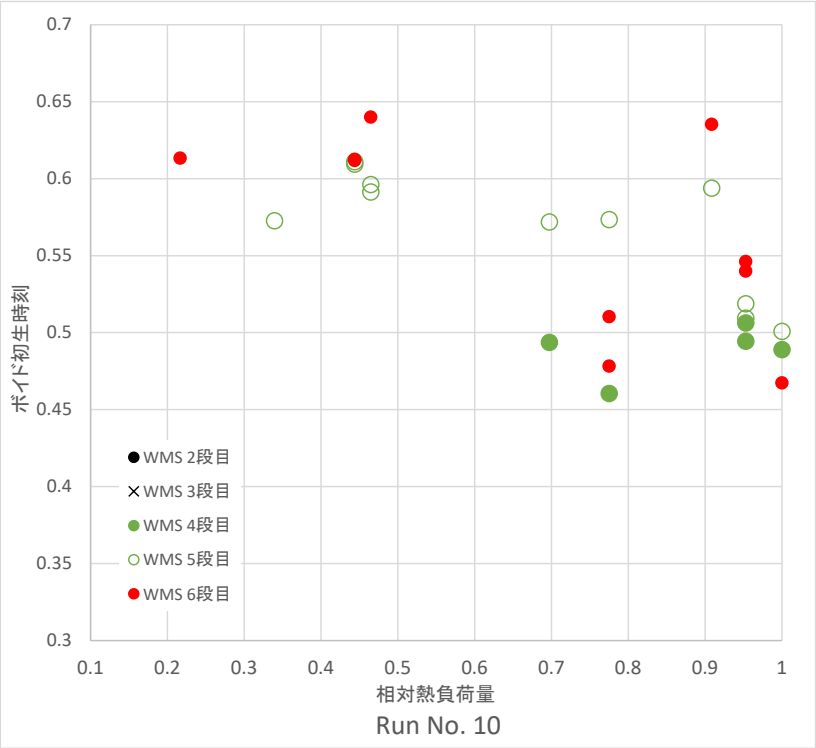


図 3-160　WMS による OSV 初生時刻（Run No.10）

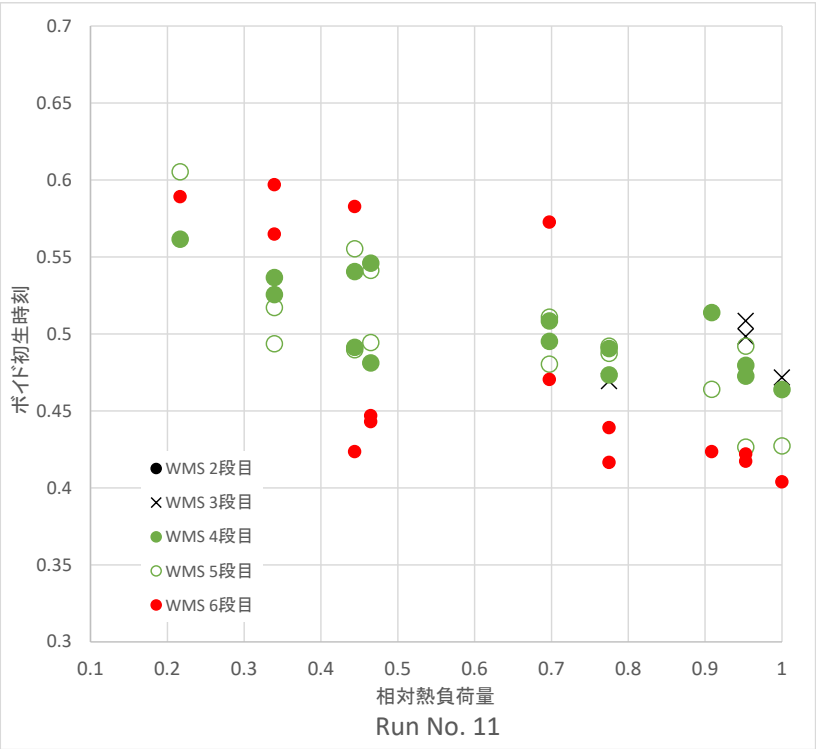


図 3-161　WMS による OSV 初生時刻（Run No.11）

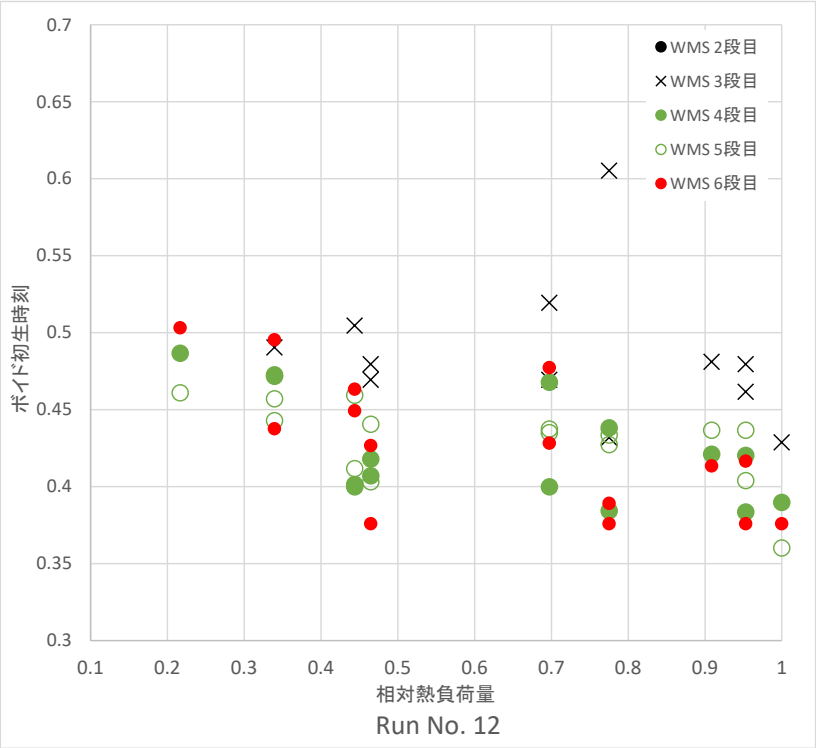


図 3-162　WMS による OSV 初生時刻（Run No.12）

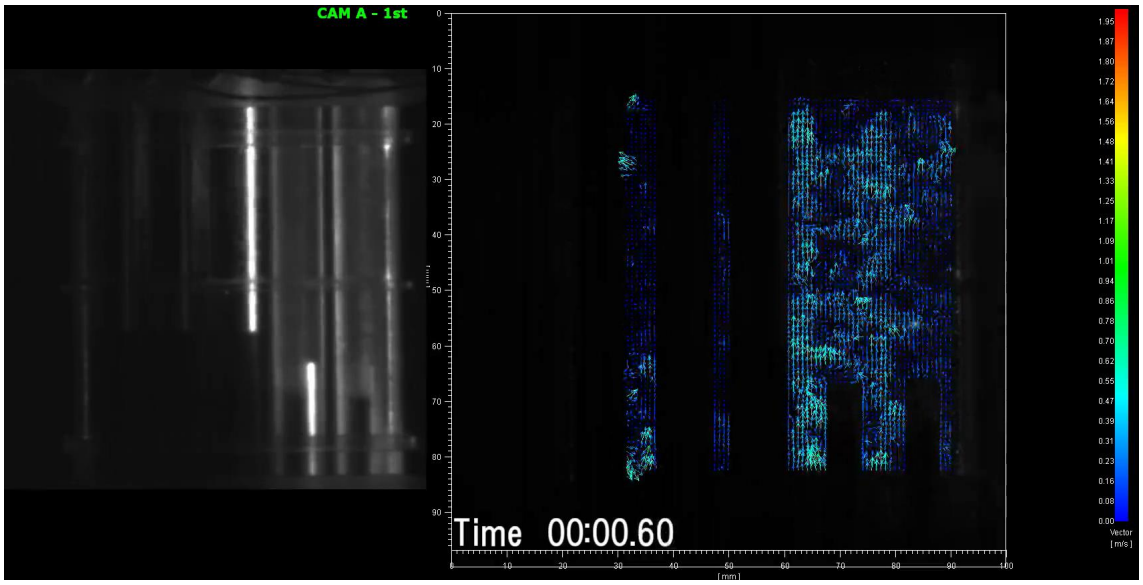


図 3-163　PIV による液相流速分布（ケース B，時刻 0.40 秒，第 2 段 WMS 上流部）

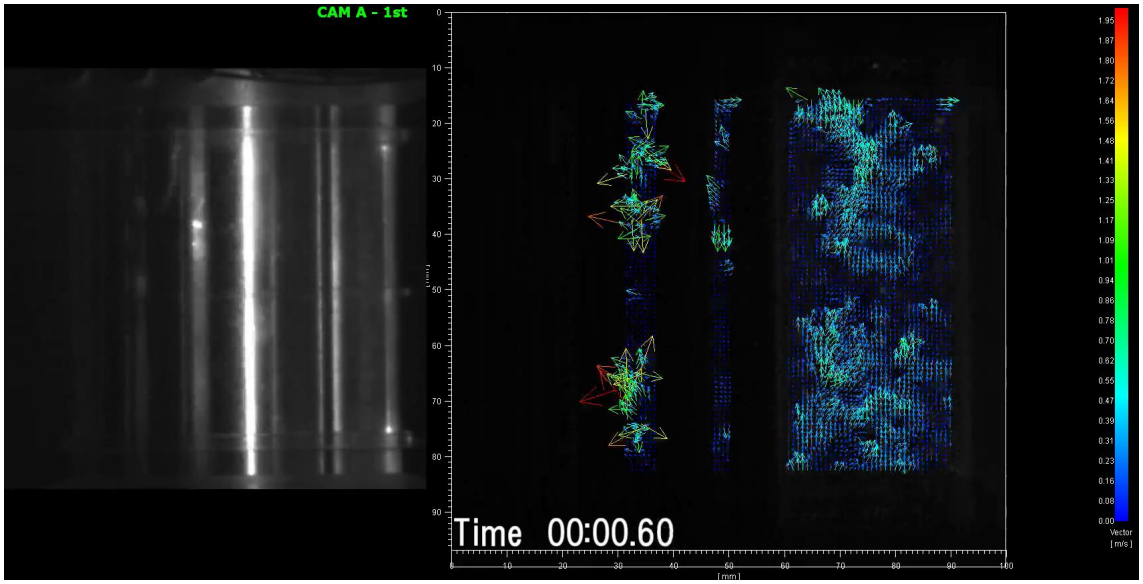


図 3-164　PIV による液相流速分布（ケース B，時刻 0.40 秒，第 3 段 WMS 上流部）

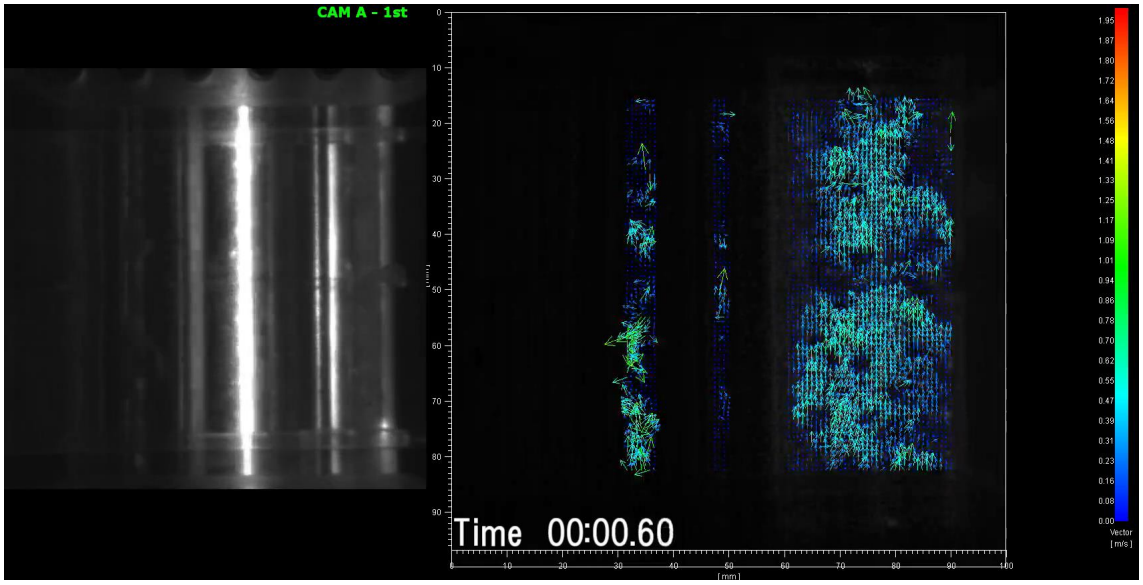


図 3-165　PIV による液相流速分布（ケース B，時刻 0.40 秒，第 4 段 WMS 上流部）

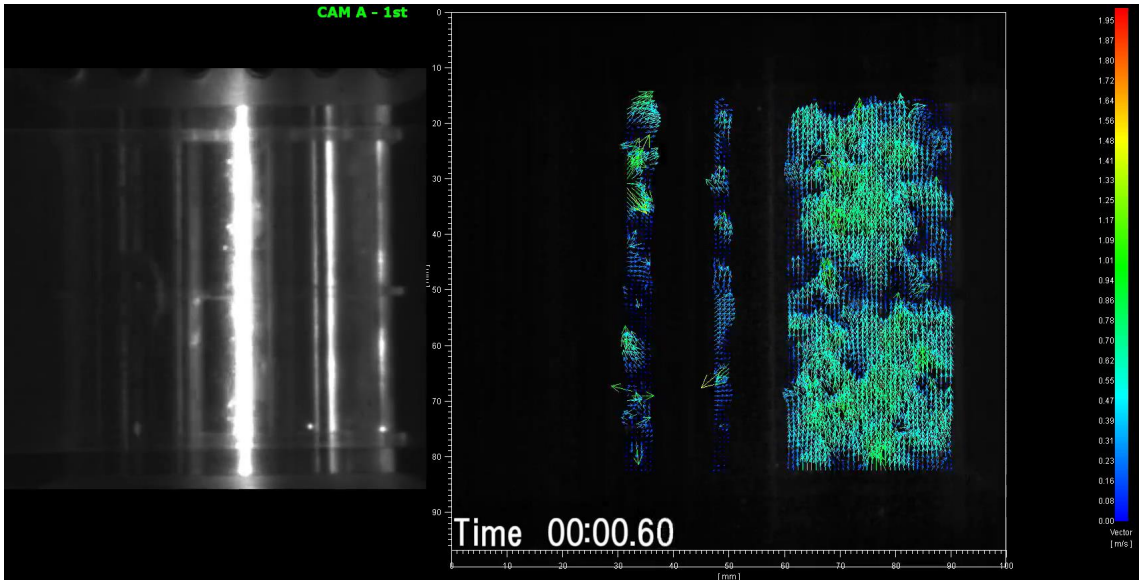


図 3-166　PIV による液相流速分布（ケース B，時刻 0.40 秒，第 5 段 WMS 上流部）

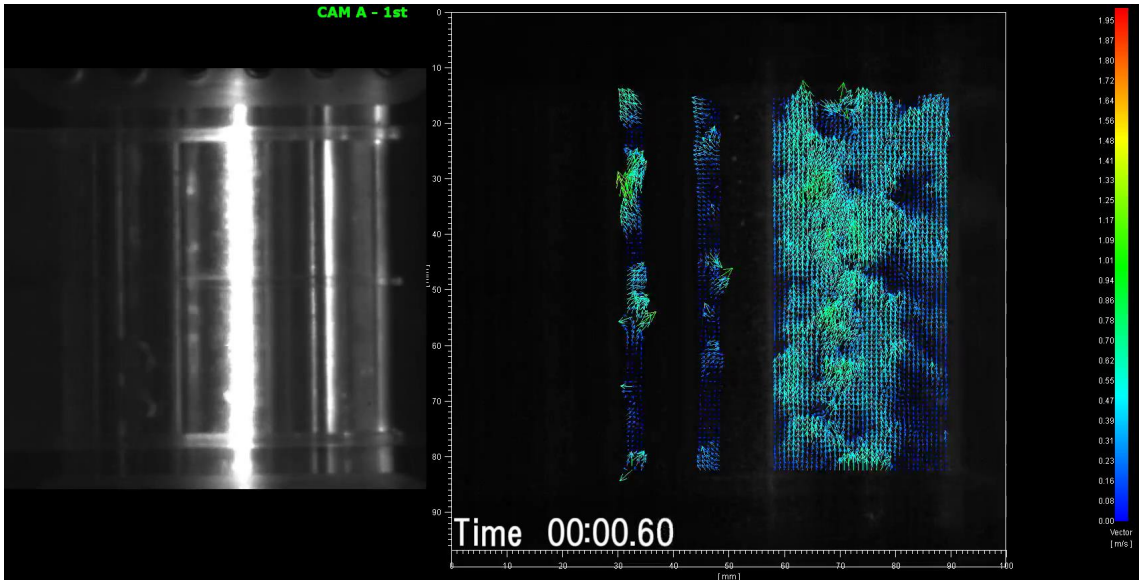


図 3-167　PIV による液相流速分布（ケース B，時刻 0.40 秒，第 6 段 WMS 上流部）

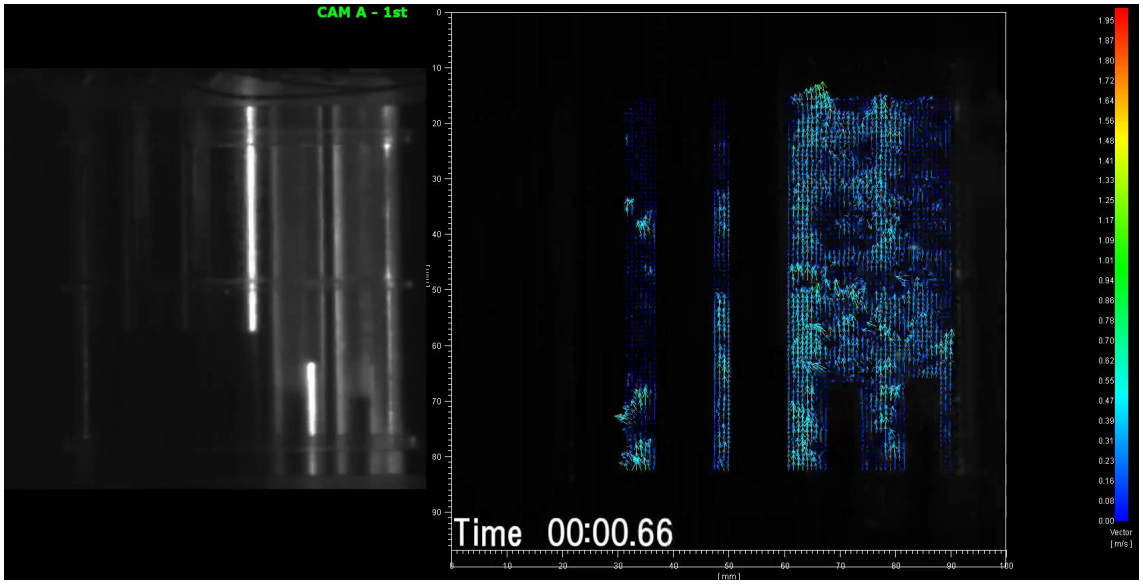


図 3-168　PIV による液相流速分布（ケース B，時刻 0.46 秒，第 2 段 WMS 上流部）

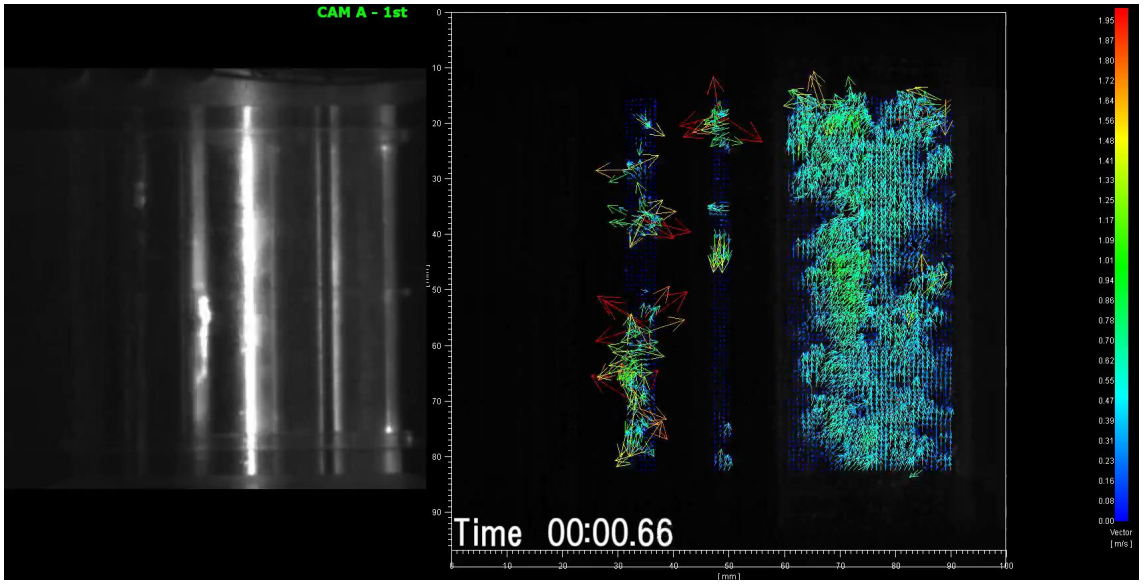


図 3-169　PIV による液相流速分布（ケース B，時刻 0.46 秒，第 3 段 WMS 上流部）

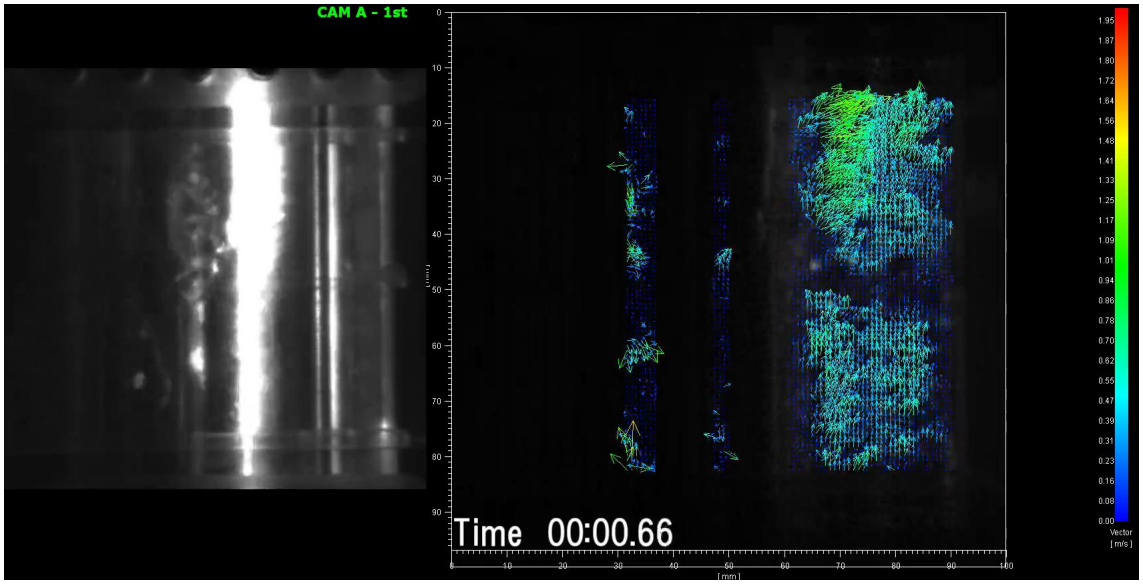


図 3-170　PIV による液相流速分布（ケース B，時刻 0.46 秒，第 4 段 WMS 上流部）

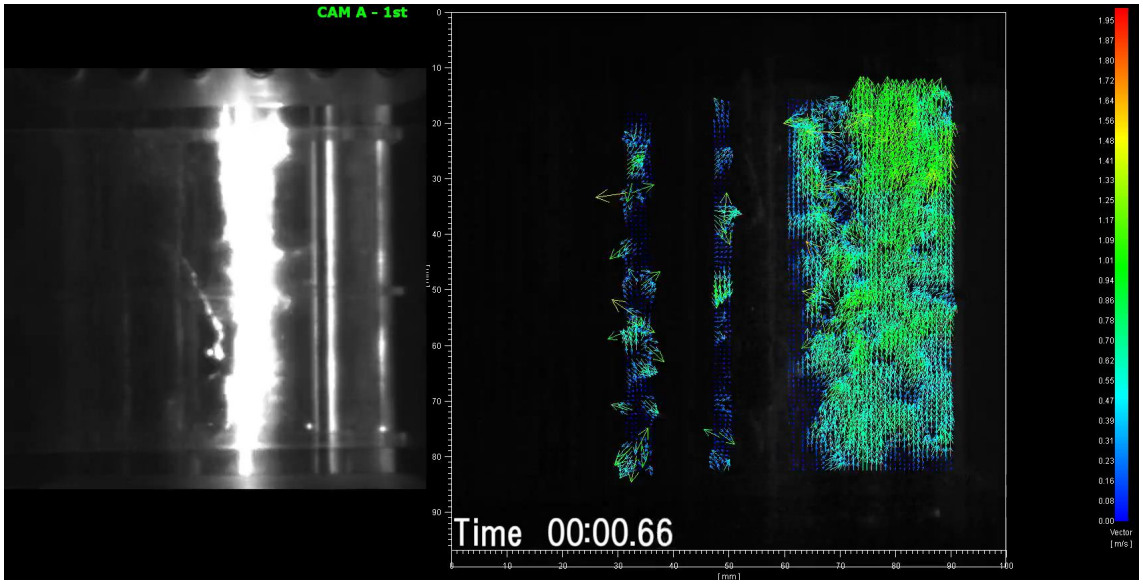


図 3-171　PIV による液相流速分布（ケース B，時刻 0.46 秒，第 5 段 WMS 上流部）

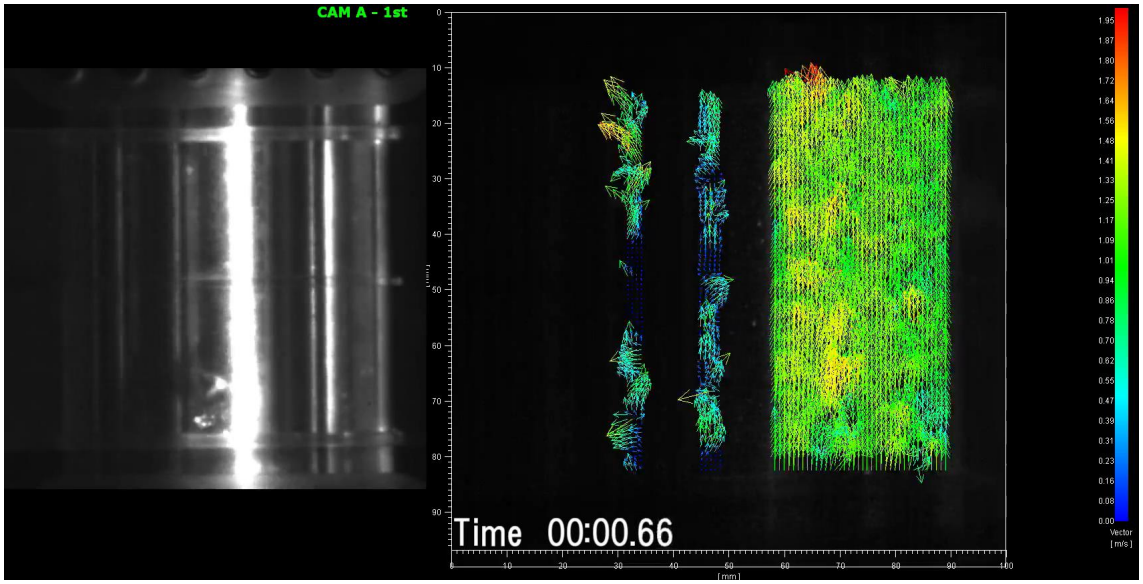


図 3-172　PIV による液相流速分布（ケース B，時刻 0.46 秒，第 6 段 WMS 上流部）

4. まとめ

平成 28 年度の事故時ボイド挙動解明試験として受託した大気圧時の急速発熱事象中の BWR の燃料集合体内におけるボイドの発生・増加，その横方向伝播などの 3 次元的なボイド挙動に係る実験について，実施計画書（仕様書）に従って，最大出力レベル，並びに加熱部入口における冷却水流速レベル及び冷却水温度レベルの 3 条件をパラメータに実験を実施してデータを取得した．また，実施計画書（仕様書）に従い，実験条件による大気泡塊の横方向への拡がりの相違，可視化画像，PIV による液相流速場との関係などを整理した．

得られた成果を個別に示すと次のようになる．

- 熱流束レベル，並びに加熱部入口の冷却水の流速及び温度の三つの条件を振った 12 ケースの実験の結果に基づいて限界条件を整理した．
- すべての実験ケースで高速度ビデオ画像を取得し，その可視化画像と WMS による美度率データを突き合わせ，ボイド挙動を示した．
- OSV 条件への到達時刻の差異については，ヒータロッドの特性上，これが生じにくいものとなったが，到達時刻を実験ケースごとに各段の WMS で各ワイヤメッシュの交点ごとに整理した．
- 各実験ケースにおいて，WMS などによる取得情報から，各 WMS の設置断面におけるボイドの横方向伝播の発生の有無について整理した．
- 一部の実験ケースについて，WMS によるボイド率，可視化画像及び PIV による液相流速結果を突き合わせ，大気泡塊が横方向及び軸方向に発達する様子を時々刻々のボイド率と関連付けて示した．
- 各実験ケースにおいて，差圧計測値を計測区間内のボイド率挙動と関連付けて整理し，ボイド率の増加に応じて差圧が増加することを確認した．
- 凝縮誘起水撃（CIWH）現象については，圧力計測値に基づいて，この現象が生じたケースを特定した．また，WMS によるボイド挙動と突き合わせてボイド凝縮に起因した結果と判定できるケースがあることを確認した．一部のケースについては，可視化情報及び PIV 解析結果も含めて突き合わせ，逆流状況と関連する結果を提示した．
- スペーサの影響を評価する実験を 1 ケース実施して，WMS によるボイド率分布，可視化画像，PIV による液相流速などを取得し，スペーサの有無による影響を整理した．
- 最新の計測技術である LIF（Laser Induced Fluorescence）及び光ファイバ温度計による温度測定については，更なる検討が必要であることが判明した．LIF による温度場の計測については，今年度は十分に有効なデータが取得できていないが，取得したデータに基づいて，次年度実験に向けた課題を整理した．光ファイバ温度計については，大電流が流れる加熱サブチャンネル内の計測の際に電気ノイズが重畳し，S/N が大き

く劣化することが判明し，次年度に向けてこの課題を解決する．

- 本年度取得した液相温度データは，上述した実験的かつ解析的な課題を洗い直し解決した上で有効なデータが取得できたかの確認を行う．また，次年度予定される高熱流束条件での試験に関しては，課題解決で得られた知見を活かした実験ならびに解析手法から有効なデータの取得を実施する．

以上に述べたように，平成 28 年度の事故時ボイド挙動解明試験として受託した実験について，研究計画書（仕様書）に従った成果が得られた．

参考文献

1) “平成 27 年度　事故時ボイド挙動解明試験　成果報告書”,（一財）電力中央研究所原子力技術研究所，平成 28 年 3 月

紙へリサイクル可