

平成 29 年度原子力規制庁委託成果報告書

事故時ボイド挙動解明試験

一般財団法人 電力中央研究所
原子力技術研究所
平成 30 年 3 月

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

本報告書に関する問い合わせは、原子力規制庁までお願いします。

目次

目次	i
1. 緒言	1
2. 実験装置	2
2.1 5×5 バンドル試験ループ	2
2.2 可視化計測装置	2
3. 実験	8
3.1 実験の実施	8
3.1.1 実施に当たっての要求事項	8
3.1.2 実験条件の設定	9
3.1.3 実験結果	13
3.2 実験データの整理及び検討	137
3.2.1 データ整理に当たっての要求事項	137
3.2.2 実験データの整理及び検討	137
4. まとめ	151

表目次

表 1	実験装置の仕様	3
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	26
表 3	実験条件マトリックス	27
表 4	WMS の軸方向位置	27
表 5	実験ケースごとの横方向伝播の有無	143
表 6	限界条件（出力レベル）の整理	143

図目次

図 2-1	大気圧実験ループ	4
図 2-2	試験部計測位置	5
図 2-3	試験部断面と 5×5 ヒータロッドの局所出力ピーキング	5
図 2-4	試験部の全体構成及び計測項目	6
図 2-5	可視化計測システム	7
図 3-1	設定出力の時間応答曲線	28
図 3-2	ロッド番号の割振り	28
図 3-3	模擬燃料棒の局所出力係数及び WMS の識別番号	29
図 3-4	サブチャンネルのタイプ分け	29
図 3-5	ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化（Run No.1）	30
図 3-6	高さごとの燃料被覆管温度の時間変化（Run No.1）	31
図 3-7	その他計測値の時間変化（Run No.1）	32
図 3-8	ボイド率の時間変化（Run No. 1/①）	33
図 3-9	ボイド率の時間変化（Run No. 1/②）	34
図 3-10	ボイド率の時間変化（Run No. 1/③）	35
図 3-11	ボイド挙動の可視化画像（Run No. 1）	36
図 3-12	ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化（Run No.2）	37
図 3-13	高さごとの燃料被覆管温度の時間変化（Run No.2）	38
図 3-14	その他計測値の時間変化（Run No.2）	39
図 3-15	ボイド率の時間変化（Run No. 2/①）	40
図 3-16	ボイド率の時間変化（Run No. 2/②）	41
図 3-17	ボイド率の時間変化（Run No. 2/③）	42
図 3-18	ボイド挙動の可視化画像（Run No. 2）	43
図 3-19	ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化（Run No.3）	44
図 3-20	高さごとの燃料被覆管温度の時間変化（Run No.3）	45

図 3-21	その他計測値の時間変化 (Run No.3)	46
図 3-22	ボイド率の時間変化 (Run No.3①)	47
図 3-23	ボイド率の時間変化 (Run No.3②)	48
図 3-24	ボイド率の時間変化 (Run No.3③)	49
図 3-25	ボイド挙動の可視化画像 (Run No. 3)	50
図 3-26	ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.4)	51
図 3-27	高さごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.4)	52
図 3-28	その他計測値の時間変化 (Run No.4)	53
図 3-29	ボイド率の時間変化 (Run No.4①)	54
図 3-30	ボイド率の時間変化 (Run No.4②)	55
図 3-31	ボイド率の時間変化 (Run No.4③)	56
図 3-32	ボイド挙動の可視化画像 (Run No. 4)	57
図 3-33	ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.5)	58
図 3-34	高さごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.5)	59
図 3-35	その他計測値の時間変化 (Run No.5)	60
図 3-36	ボイド率の時間変化 (Run No.5①)	61
図 3-37	ボイド率の時間変化 (Run No.5②)	62
図 3-38	ボイド率の時間変化 (Run No.5③)	63
図 3-39	ボイド挙動の可視化画像 (Run No. 5)	64
図 3-40	ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.6)	65
図 3-41	高さごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.6)	66
図 3-42	その他計測値の時間変化 (Run No.6)	67
図 3-43	ボイド率の時間変化 (Run No.6①)	68
図 3-44	ボイド率の時間変化 (Run No.6②)	69
図 3-45	ボイド率の時間変化 (Run No.6③)	70
図 3-46	ボイド挙動の可視化画像 (Run No. 6)	71
図 3-47	ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.7)	72
図 3-48	高さごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.7)	73
図 3-49	その他計測値の時間変化 (Run No.7)	74
図 3-50	ボイド率の時間変化 (Run No.7①)	75
図 3-51	ボイド率の時間変化 (Run No.7②)	76
図 3-52	ボイド率の時間変化 (Run No.7③)	77
図 3-53	ボイド挙動の可視化画像 (Run No. 7)	78
図 3-54	ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.8)	79
図 3-55	高さごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.8)	80
図 3-56	その他計測値の時間変化 (Run No.8)	81

図 3-57	ボイド率の時間変化 (Run No.8/①)	82
図 3-58	ボイド率の時間変化 (Run No.8/②)	83
図 3-59	ボイド率の時間変化 (Run No.8/③)	84
図 3-60	ボイド挙動の可視化画像 (Run No. 8)	85
図 3-61	ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.9)	86
図 3-62	高さごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.9)	87
図 3-63	その他計測値の時間変化 (Run No.9)	88
図 3-64	ボイド率の時間変化 (Run No.9/①)	89
図 3-65	ボイド率の時間変化 (Run No.9/②)	90
図 3-66	ボイド率の時間変化 (Run No.9/③)	91
図 3-67	ボイド挙動の可視化画像 (Run No. 9)	92
図 3-68	ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.10)	93
図 3-69	高さごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.10)	94
図 3-70	その他計測値の時間変化 (Run No.10)	95
図 3-71	ボイド率の時間変化 (Run No.10/①)	96
図 3-72	ボイド率の時間変化 (Run No.10/②)	97
図 3-73	ボイド率の時間変化 (Run No.10/③)	98
図 3-74	ボイド挙動の可視化画像 (Run No. 10)	99
図 3-75	ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.11)	100
図 3-76	高さごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.11)	101
図 3-77	その他計測値の時間変化 (Run No.11)	102
図 3-78	ボイド率の時間変化 (Run No.11/①)	103
図 3-79	ボイド率の時間変化 (Run No.11/②)	104
図 3-80	ボイド率の時間変化 (Run No.11/③)	105
図 3-81	ボイド挙動の可視化画像 (Run No. 11)	106
図 3-82	ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.12)	107
図 3-83	高さごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.12)	108
図 3-84	その他計測値の時間変化 (Run No.12)	109
図 3-85	ボイド率の時間変化 (Run No.12/①)	110
図 3-86	ボイド率の時間変化 (Run No.12/②)	111
図 3-87	ボイド率の時間変化 (Run No.12/③)	112
図 3-88	ボイド挙動の可視化画像 (Run No. 12)	113
図 3-89	PIV による液相流速分布 (ケース C, 時刻 0.37 秒, 第 4 段 WMS 上流部)	114
図 3-90	PIV による液相流速分布 (ケース C, 時刻 0.45 秒, 第 4 段 WMS 上流部)	114

図 3-91	PIV による液相流速分布 (ケース C, 時刻 0.54 秒, 第 4 段 WMS 上流部)	115
図 3-92	PIV による液相流速分布 (ケース C, 時刻 0.55 秒, 第 4 段 WMS 上流部)	115
図 3-93	PIV による液相流速分布 (ケース B, 時刻 0.56 秒, 第 4 段 WMS 上流部)	116
図 3-94	PIV による液相流速分布 (ケース C, 時刻 0.57 秒, 第 4 段 WMS 上流部)	116
図 3-95	PIV による液相流速分布 (ケース C, 時刻 0.59 秒, 第 4 段 WMS 上流部)	117
図 3-96	PIV による液相流速分布 (ケース C, 時刻 0.65 秒, 第 4 段 WMS 上流部)	117
図 3-97	PIV による液相流速分布 (ケース C, 時刻 0.66 秒, 第 4 段 WMS 上流部)	118
図 3-98	PIV による液相流速分布 (ケース C, 時刻 0.67 秒, 第 4 段 WMS 上流部)	118
図 3-99	PIV による液相流速分布 (ケース C, 時刻 0.72 秒, 第 6 段 WMS 上流部)	119
図 3-100	PIV による液相流速分布 (ケース C, 時刻 0.73 秒, 第 6 段 WMS 上流部)	119
図 3-101	PIV による液相流速分布 (ケース B, 時刻 0.74 秒, 第 6 段 WMS 上流部)	120
図 3-102	PIV による液相流速分布 (ケース C, 時刻 0.75 秒, 第 6 段 WMS 上流部)	120
図 3-103	PIV による液相流速分布 (ケース C, 時刻 0.76 秒, 第 6 段 WMS 上流部)	121
図 3-104	光ファイバによる液相流速分布 (ケース A, 第 4 段 WMS 部 / T6 ライン)	122
図 3-105	光ファイバによる液相流速分布 (ケース A, 第 4 段 WMS 部 / T5 ライン)	122
図 3-106	光ファイバによる液相流速分布 (ケース A, 第 4 段 WMS 部 / T4 ライン)	123
図 3-107	光ファイバによる液相流速分布 (ケース A, 第 4 段 WMS 部 / T3 ライン)	123
図 3-108	光ファイバによる液相流速分布 (ケース A, 第 4 段 WMS 部 / T2 ライン)	124

図 3-109	光ファイバによる液相流速分布（ケース A, 第 4 段 WMS 部 / T1 ライン）	124
図 3-110	光ファイバによる液相流速分布（ケース B, 第 4 段 WMS 部 / T6 ライン）	125
図 3-111	光ファイバによる液相流速分布（ケース B, 第 4 段 WMS 部 / T5 ライン）	125
図 3-112	光ファイバによる液相流速分布（ケース B, 第 4 段 WMS 部 / T4 ライン）	126
図 3-113	光ファイバによる液相流速分布（ケース B, 第 4 段 WMS 部 / T3 ライン）	126
図 3-114	光ファイバによる液相流速分布（ケース B, 第 4 段 WMS 部 / T2 ライン）	127
図 3-115	光ファイバによる液相流速分布（ケース B, 第 4 段 WMS 部 / T1 ライン）	127
図 3-116	光ファイバによる液相流速分布（ケース C, 第 4 段 WMS 部 / T6 ライン）	128
図 3-117	光ファイバによる液相流速分布（ケース C, 第 4 段 WMS 部 / T5 ライン）	128
図 3-118	光ファイバによる液相流速分布（ケース C, 第 4 段 WMS 部 / T4 ライン）	129
図 3-119	光ファイバによる液相流速分布（ケース C, 第 4 段 WMS 部 / T3 ライン）	129
図 3-120	光ファイバによる液相流速分布（ケース C, 第 4 段 WMS 部 / T2 ライン）	130
図 3-121	光ファイバによる液相流速分布（ケース C, 第 4 段 WMS 部 / T1 ライン）	130
図 3-122	LIF 法によるトレーサ静止画像	131
図 3-123	メディアンフィルタによるトレーサ領域の抽出	131
図 3-124	トレーサ部輝度値とトレーサ径の関係（流体温度 30 °C）	132
図 3-125	トレーサ部輝度値とトレーサ径の関係（流体温度 40 °C）	132
図 3-126	トレーサ部輝度値とトレーサ径の関係（流体温度 50 °C）	133
図 3-127	トレーサ部輝度値とトレーサ径の関係（流体温度 60 °C）	133
図 3-128	トレーサ部輝度値とトレーサ径の関係（流体温度 70 °C）	134
図 3-129	トレーサ部輝度値とトレーサ径の関係（流体温度 80 °C）	134
図 3-130	トレーサ部輝度値とトレーサ径の関係（流体温度 90 °C）	135
図 3-131	トレーサ部輝度値とトレーサ径の関係のまとめ	135

図 3-132	30mm スペーサ条件による PIV による液相流速分布	136
図 3-133	WMS によるボイド初生時刻 (Run No.1)	144
図 3-134	WMS によるボイド初生時刻 (Run No.2)	144
図 3-135	WMS によるボイド初生時刻 (Run No.3)	145
図 3-136	WMS によるボイド初生時刻 (Run No.4)	145
図 3-137	WMS によるボイド初生時刻 (Run No.5)	146
図 3-138	WMS によるボイド初生時刻 (Run No.6)	146
図 3-139	WMS によるボイド初生時刻 (Run No.7)	147
図 3-140	WMS によるボイド初生時刻 (Run No.8)	147
図 3-141	WMS によるボイド初生時刻 (Run No.9)	148
図 3-142	WMS によるボイド初生時刻 (Run No.10)	148
図 3-143	WMS によるボイド初生時刻 (Run No.11)	149
図 3-144	WMS によるボイド初生時刻 (Run No.12)	149
図 3-145	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	150

1. 緒言

沸騰水型軽水炉の低温時の制御棒落下事故など，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していくためには，3次元核熱結合解析コードを一層高度化していく必要がある．このような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）の横方向伝播挙動は，ボイド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において重要であるが，そのボイド挙動の詳細は十分に把握されていない．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，過渡安全解析上で必要となる実験条件において，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した．

本年度は，発熱部に可視化重視の10 mm長の丸セルスペーサ等を設置し，双方のスペーサがボイド横流れに及ぼす影響を明らかにすると共に，スペーサ設置条件下におけるベンチマークデータを取得することを目的とする．

2. 実験装置

本章は、模擬燃料集合体、熱水力実験ループ、直接通電加熱ボイドセンサ、光ファイバ温度計測法などの計測部から構成される急速発熱時熱流動実験装置の概要について示す。主な仕様を表 1、実験ループおよび試験部についてを図 2-1、図 2-2 および図 2-3 に、計測項目の一覧を図 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ている。図 2-5 にレーザ計測システムの概要を示す。

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ている。

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ている。

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ている。

表 1 実験装置の仕様

項目	内容	備考
装置構成	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 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) 及びチャンネルボックス ➤ 冷却水循環ポンプ ➤ 直流電源 ➤ 予熱器 ➤ 凝縮器 ➤ 制御器, 計測器, データ記録器など 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 大気圧条件下で常温から飽和温度まで温度制御可能, かつ試験部最大600kg/m²/sの範囲で冷却水質量流束を制御可能な試験ループ ➤ 直接通電による過渡沸騰伝熱の模擬
計測機器	高速度カメラ, 直接通電加熱ボイドセンサ, 光ファイバ温度センサ, 熱電対, 圧力計, 差圧計, PIV・LIF	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 急速加熱により生じるボイド量および流体温度, ロッド表面温度の定量化 ➤ 液相流速分布の計測
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)	実験条件は過渡安全解析条件の入口温度と入口流速を元に決定
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, シリコンレギュレータ電源を導入
計測項目	<ul style="list-style-type: none"> • 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8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 (光ファイバ, LIF) 	

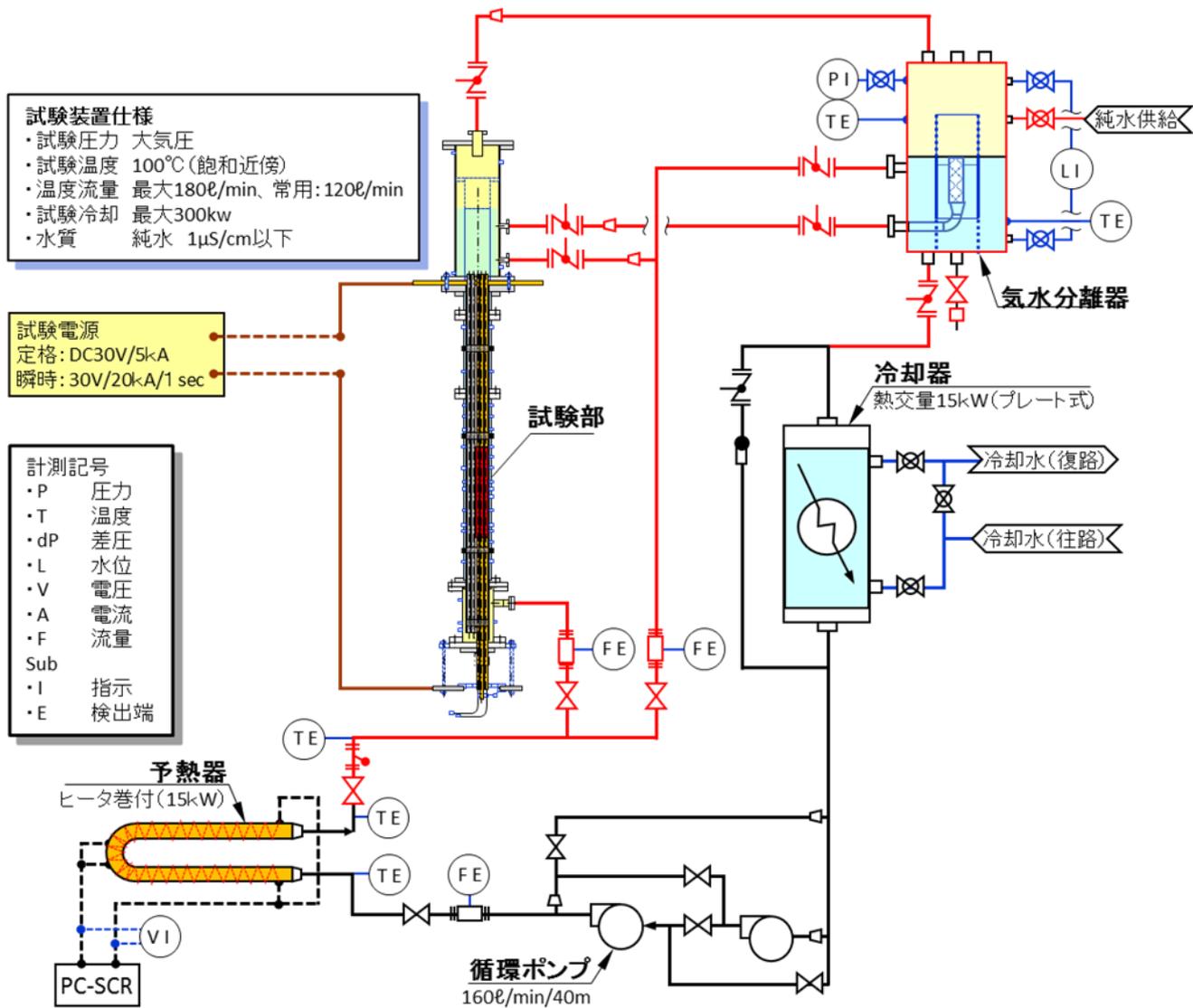


図 2-1 大気圧実験ループ

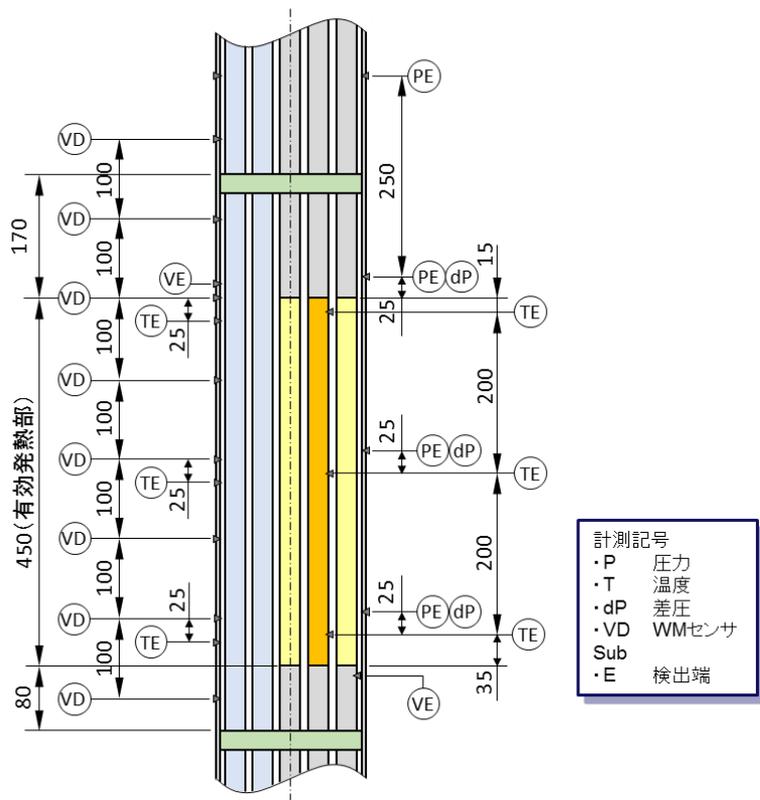
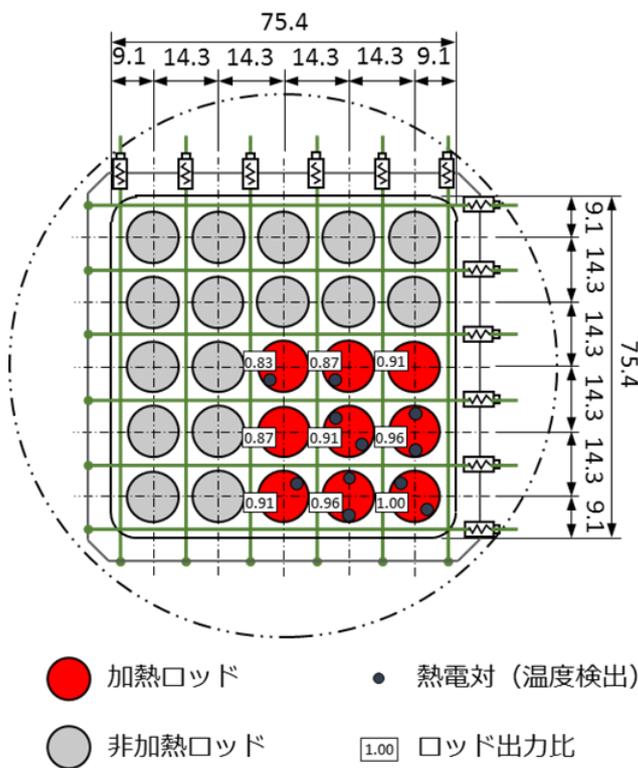
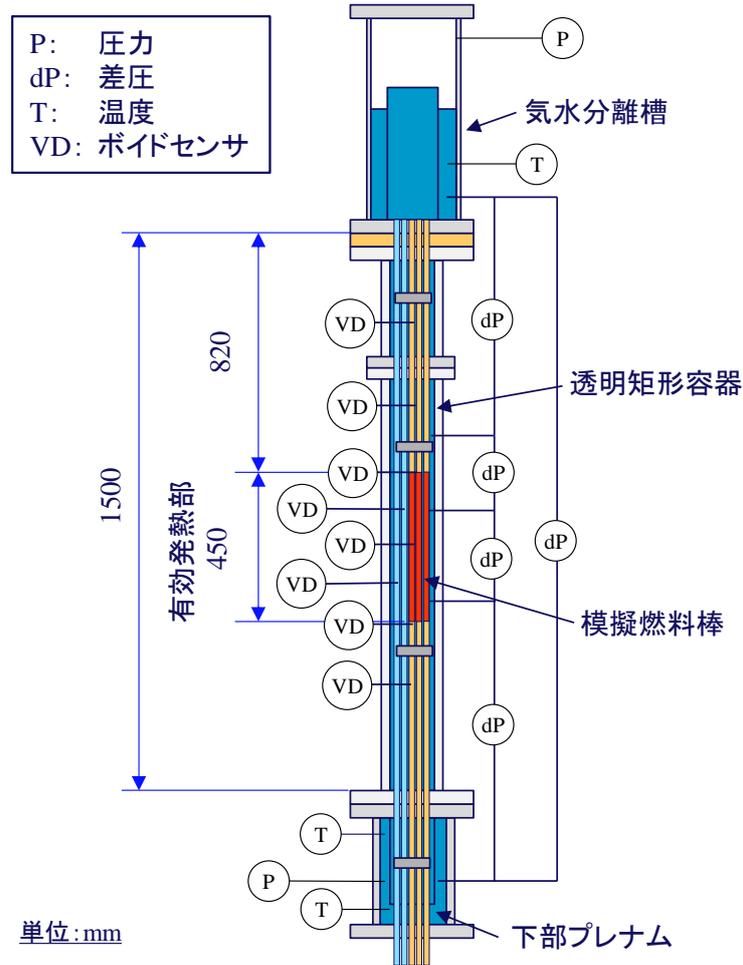


図 2-2 試験部計測位置



- 加熱ロッド
- 熱電対 (温度検出)
- 非加熱ロッド
- ロッド出力比

図 2-3 試験部断面と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

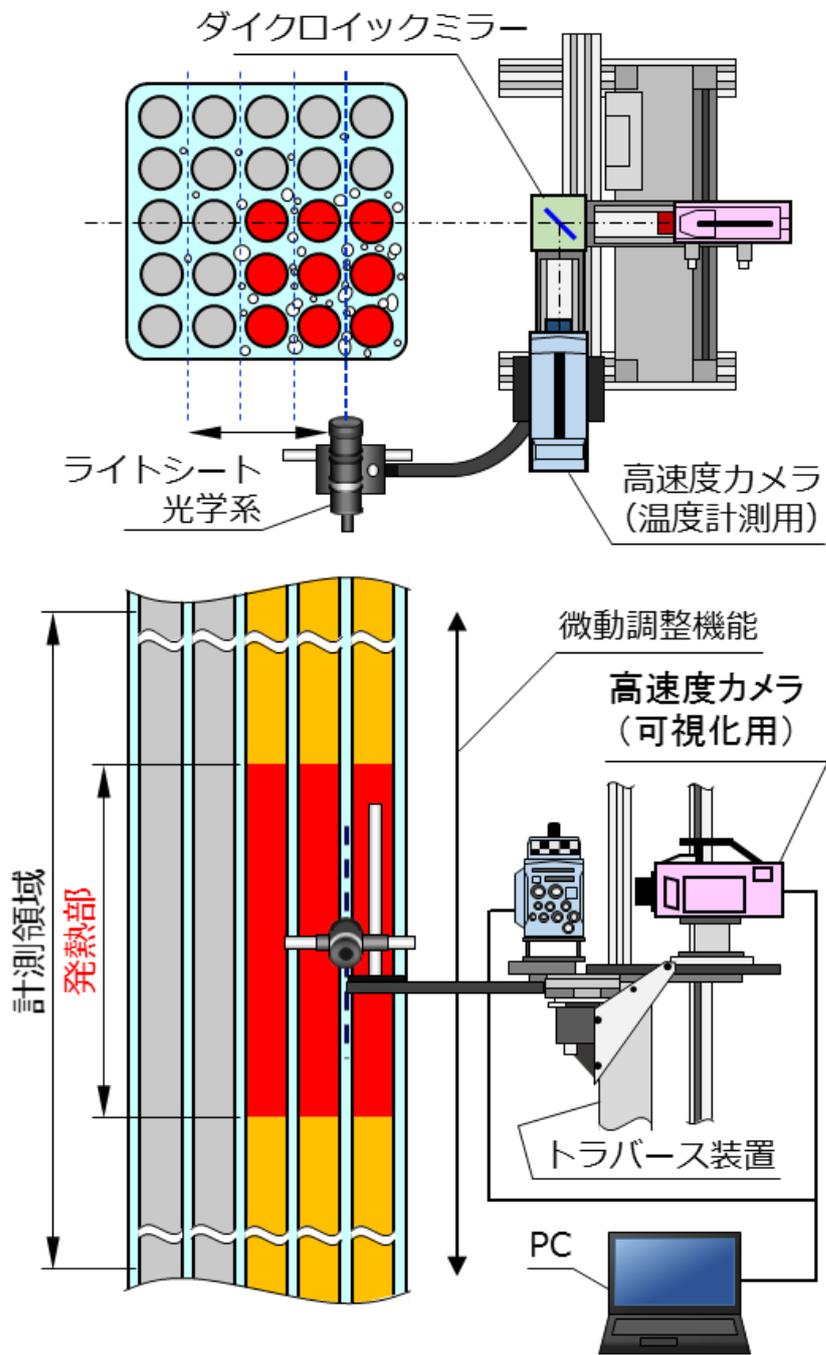


図 2-5 可視化計測システム

3. 実験

平成 29 年度は新たに発熱長 10mm (可視化重視用) の丸セルスペーサを発熱部に導入し、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へのスペーサがもたらす影響を明らかにするとともに、OSV ならびにボイド横流れが生じる熱出力条件におけるベンチマークデータを取得し、前年度からの継続としてボイドの 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。上記を本年度は発熱部 10 mm 長スペーサを設置した環境にて実施する。

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。

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、新たにスペーサ設置時に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・校正も並行して実施しており、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。

また、スペーサの発熱部長さの影響を確認するため、発熱長 30mm のスペーサによる実験を追加として実施した。

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 (20°C) 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 (40°C) 及び 333 K (60°C) 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 2-2**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い、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留まる。
- 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。

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

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) スペーサ追設下において比較的低い最大出力レベルを設定した場合でも、ボイドが突発的に発生する状況が観察された。
- 2) 設定出力の時間応答曲線にて、最大出力保持時間が長い場合（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る。
- 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 関連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 29 年度に実施する一連の実験においては、昨年度と同様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 レベル設定した。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を決定したため、設定出力条件の自由度は最大出力レベルにある。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き、限界条件³を挟んで 3 レベル想定する。

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 通りの組合せを設定する。

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

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

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

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。

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

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。

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。

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、30mm長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及び光ファイバによる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 40°C、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3-12 (Run No. 2) 及び図3-19 (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3-13 (Run No. 2) 及び図3-20 (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3-14 (Run No. 2) 及び図3-21 (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、WMS格子点ごとのボイド率の時間変化の測定結果を図3-8～図3-10 (Run No. 1)、図3-15～図3-17 (Run No. 2) 及び図3-22～図3-24 (Run No. 3) 示す。さらに、図3-11 (Run No. 1)、図3-18 (Run No. 2) 及び図3-25 (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）～0.35 m（第5段 WMS）、Run No. 2及びRun No. 3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.1ではデータより極めてOSVに近い条件であったことが推測され、最も上流側の0.15m（第3段 WMS）地点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、スぺーサ直下流部の0.25m（第4段 WMS）地点では核沸騰レベルの小さな気泡が非加熱サブチャンネルタイプ2まで伝播していると予想され、スぺーサの気液攪拌効果によるものであると考えられる。一方、Run No. 2では加熱サブチャンネルタイプ2までにボイド伝播が留まった。Run No. 3では、スぺーサ直下流部の0.25m（第4段 WMS）地点ではスぺーサの気液攪拌効果により非加熱サブチャンネルタイプ2までボイドが進展した。その他の高さでは、非加熱サブチャンネルタイプ1までボイドが伝播した。
- 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0.60秒までの間のボイド挙動が把握でき、スぺーサ上流域で生じたOSVレベルの小さな蒸気泡がスぺーサ通貨と共に気液攪拌効果によって画像から確認できないレベルで消滅する様子、発熱部中央より上部域で発熱ロッド表面に僅かに生じる蒸気泡が見て取れる。時刻0.6秒以降では、急冷凝縮のため、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、スぺーサを挟んで上流側と下流側に分かれて蒸気泡が発生する様子、上流部の蒸気泡の塊がスぺーサに衝突し上流側で横流れを起こす一方で下流側では気液攪拌効果によりボイドが消滅する様子、発熱部中央部より下流側では非加熱領域側への横流れ伝播が確認された。また、ボイドの凝縮に関しては、時刻0.70秒にかけて、下方及び上方からスぺーサの直上部（第3段 WMSと第4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、スぺーサを挟むように上流側と下流側の双方で蒸気泡が生成され、横方向に連結した巨大気泡が生じる様子、スぺーサ上流側ではスぺーサ手前で非加熱側への横流れ伝播が見られ、発熱ロッド領域では上流側気泡がスぺーサを通過して下流側へ流れる様子、それら気泡と合体し巨大な蒸気泡が結果的にスぺーサ下流部では生じ非加熱側のチャンネルボックスまで横流れする様子が確認された。最初にスぺーサ下流側で生じた

気泡塊は単独で流入する冷却水と共に下流へ流れる様子が見られた。また、ボイドの凝縮に関しては、時刻 0.70 秒過ぎに、下方及び上方から 0.25m (第 4 段 WMS) 地点付近に凝縮先端面が進展して行く様子及び時刻 0.75 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 0.80 秒付近において入口部の圧力センサで僅かな圧力上昇 (0.2MPa) が観測されたことを考慮すると、凝縮誘起水撃現象が発生した可能性がある。なおこのとき、スぺーサ部分で凝縮水撃で生じる力を吸収していると考えられる。

なお、Run No. 3 のみ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 3.2.2.4 にて検討する。

3.1.3.2. 冷却水温度 40°C, 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 3-26 (Run No. 4), 図 3-33 (Run No. 5) 及び図 3-40 (Run No. 6) にロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化, 図 3-27 (Run No. 4), 図 3-34 (Run No. 5) 及び図 3-41 (Run No. 6) に高さごとの燃料被覆管温度の時間変化, 図 3-28 (Run No. 4), 図 3-35 (Run No. 5) 及び図 3-42 (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, WMS 格子点ごとのボイド率の時間変化の測定結果を図 3-29~図 3-31 (Run No. 4), 図 3-36~図 3-38 (Run No. 5) 及び図 3-43~図 3-45 (Run No. 6) 示す。さらに, 図 3-32 (Run No. 4), 図 3-39 (Run No. 5) 及び図 3-46 (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 0.35 m (第 5 段 WMS) ~0.45 m (第 6 段 WMS), Run No. 5 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.4 では No.1 に比べると OSV よりも高いレベルで蒸気泡が生じたことが確認でき, また No.1 との相違点はスぺーサの下流側だけにボイドが生じた点にある。これは入口流速が相対的に速いためスぺーサより上流側では OSV レベルまでにも達せず, 下流側のみに結果的にボイドが生じたと考えられる。横方向の伝播レベルについても, 入口流速が速いため No.1 に比べて抑制されたため, 加熱サブチャンネルタイプ 2 までに留まった。この傾向は Run No.5 についても類似した結果が得られている。スぺーサの直上流部で僅かな気泡が発生し, スぺーサの気液攪拌効果によりスぺーサ直下流部の 0.25m (第 4 段 WMS) では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。また, スぺーサより下流側の第 5 段および第 6 段 WMS では相対的に大きな蒸気泡が生成されたと考えられ, この領域では加熱サブチャンネルタイプ 3 までで留まった。Run No. 6 では,

スパーサ下流側から非加熱サブチャンネルタイプ 1 まで横方向伝播が見られ、スパーサ直下流部の第 4 段 WMS では気液攪拌効果により非加熱サブチャンネルタイプ 2 までボイド横流れした様子が確認された。スパーサ下流側の第 5 段および第 6 段 WMS では非加熱サブチャンネルタイプ 1 までの横流れが生じた。また、入口流速が速いため第 7 段 WMS までボイドが進展した。

- 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、スパーサ直下流側の第 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、有効加熱長の下流側半分の領域でボイドが初生し、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が、スパーサより上流側ではボイドは観察されなかった。また、サブチャンネル流路内からボイドが横方向に広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 0.55 秒～0.65 秒で発熱長上流側半分で観察された）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 0.65 秒から 0.70 秒にかけて、下方及び上方から第 4 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 0.75 秒までの間のボイド挙動が把握でき、有効加熱長下端のスパーサ付近から有効加熱長より下流の第 7 段 WMS 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 3 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広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 0.55 秒～0.70 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 0.55 秒～0.65 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。特にスパーサ上流部で発生したボイドがスパーサに衝突する様子、発熱部上端付近では顕著な大蒸気泡の横流れ伝播が見られている。一方、ボイドの凝縮に関しては、時刻 0.75 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 の間の領域近く）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 0.75 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 3 段 WMS 上流域から有効加熱長より下流の第 7 段 WMS 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、ほぼ同時にスパーサ付近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

が横方向に広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 0.55 秒～0.65 秒）は他のケースと同様である。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、Run No.3 との相違点は入口流速の増大により気泡発生領域が下流側に移動している点である。一方、ボイドの凝縮に関しては、時刻 0.75 秒にかけて、主に下方から有効加熱長の上部（第 5 段 WMS 付近の近傍）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の増減が生じている。凝縮誘起水撃については、実験データの整理に係る 3.2.2.4 にて検討する。

3.1.3.3. 冷却水温度 60°C, 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 3-47 (Run No. 7), 図 3-54 (Run No. 8) 及び図 3-61 (Run No. 9) にロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化, 図 3-48 (Run No. 7), 図 3-55 (Run No. 8) 及び図 3-62 (Run No. 9) に高さごとの燃料被覆管温度の時間変化, 図 3-49 (Run No. 7), 図 3-56 (Run No. 8) 及び図 3-63 (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, WMS 格子点ごとのボイド率の時間変化の測定結果を図 3-50～図 3-52 (Run No. 7), 図 3-57～図 3-59 (Run No. 8) 及びエラー! 参照元が見つかりません。～図 3-66 (Run No. 9) 示す。さらに, 図 3-53 (Run No. 7), 図 3-60 (Run No. 8) 及び図 3-67 (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) 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. 7 が 0.15 m（第 3 段 WMS）～0.45 m（第 6 段 WMS）、Run No. 8 も 0.15 m（第 3 段 WMS）～0.45 m（第 6 段 WMS）、Run No. 9 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. 7 では、概ね OSV レベルでボイド発生であることが推測され、スペーサ直下流部の第 4 段 WMS はスペーサ攪拌効果により非加熱サブチャンネルタイプ 1 にのみボイドが検知される結果となった。Run No. 8 でも、類似した傾向となり、発熱部全体にわたり加熱サブチャンネル 3 までにボイドが留まる一方、スペーサ直下流の第 4 段 WMS のみ非加熱サブチャンネル 2 までの横流れが生じる結果を得た。Run No. 9 でも同じ傾向が見られており、特に非加熱サブチャンネル 2 の領域ではスペーサの気液攪拌効果により第 5 段および第 6 段 WMS に時間的に遅れてボイドが流入している様子が見られた。
- 3) 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 3 段 WMS

から第 6 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 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。

- 4) Run No. 8 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、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広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。また、時刻 0.55 秒から 0.60 秒にかけてスパーサ上流部で生じた大気泡がスパーサに流入することで気液攪拌され、結果的に下流側ではボイド率が低下する様子を確認できる。軸方向には、入口温度 40°C 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～0.55 秒）が見られた。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 の領域にまで進展している。一方、ボイドの凝縮に関しては、時刻 0.70 秒過ぎから、下方及び上方から有効加熱長の第 5 段 WMS 付近に凝縮面が進展して行く様子が見て取れる。
- 5) Run No. 9 の一連の可視化画像からは、時刻 0.35 秒から時刻 0.75 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）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（時刻 0.35 秒）が、時刻 0.40 秒までには第 3 段 WMS 下流部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広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を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。

なお、この 3 ケースにおいては、Run No. 8 および 9 では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. 7 においても圧力のパルスの増減が生じている。

3.1.3.4. 冷却水温度 60°C, 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 3-68 (Run No. 10), 図 3-75 (Run No. 11) 及び図 3-82 (Run No. 12) にロッドごとの

燃料被覆管温度の時間変化, 図 3-69 (Run No. 10), 図 3-76 (Run No. 11) 及び図 3-83 (Run No. 12) に高さごとの燃料被覆管温度の時間変化, 図 3-70 (Run No. 10), 図 3-77 (Run No. 11) 及び図 3-84 (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, WMS 格子点ごとのボイド率の時間変化の測定結果を図 3-71~図 3-73 (Run No. 10), 図 3-78~図 3-80 (Run No. 11) 及び図 3-85~図 3-87 (Run No. 12) 示す. さらに, 図 3-74 (Run No. 10), 図 3-81 (Run No. 11) 及び図 3-88 (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 0.15 m (第 3 段 WMS) ~0.45 m (第 6 段 WMS), Run No. 11 は 0.25 m (第 4 段 WMS) ~0.45 m (第 6 段 WMS), Run No. 9 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. 10 では, 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ものの, スペーサ直下流部の第 4 段 WMS では非加熱サブチャンネルタイプ 2 まで伝播した. 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, 入口流速が相対的に速いために横流れレベルは弱かった. Run No. 12 ではスペーサ直下流部の第 4 段 WMS において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おり, 入口流速が速い影響により発熱部よりも下流側の第 7 段 WMS までボイドが進展した.
- 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, 有効加熱長のスペーサ上流側の第 3 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 0.60 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 0.65 秒付近で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. 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 0.70 秒にかけて, スペーサよりも下流側で生じた気泡が冷却水の流れにのって発熱部よりも下流側に流されていく過程で行ったと考えられ, 直接的に凝縮面は観察されなかった.
- 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, 約 0.05 秒後には第 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 0.55 秒頃に始まり、その結果として時刻 0.60 秒には第 5 段および 6 段 WMS の領域にて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 0.70 秒を過ぎて、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 0.40 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、有効加熱長の上端付近から第 3 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 0.55 秒までに形成され、時刻 0.60 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 0.65 秒付近で第 5 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、0.70 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。
- 6) なお、この 3 ケースにおいては、Run No. 11 および 12 では凝縮誘起水撃と考えられる圧力パルスが生じた。Run No. 10 においても圧力のパルスの増減が生じている。凝縮誘起水撃については、実験データの整理に係る 3.2.2.4 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、光ファイバおよび 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、特にスペーサ部における液相分布の特徴的な部分を説明し、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 C (Run No. 3 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 4 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～非加熱部へボイド横流れ期**

図 3-89 から図 3-94 は、ボイドが初生しボイド率が高まった時刻 0.37 秒から時刻 0.67 秒までの時間領域について、特徴的な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強い強度で乱反射している領域を除けば蒸気泡がないと考えられることから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。特に 10mm スペーサが及ぼす特徴として、スペーサ直上流部でボイドが非加熱部へ横流れし、スペーサに流入する様子が確認され、結果的に下流側へ最もボイドが通過し領域において下流部で液相流速が顕著に上昇（2m/s 近く）することが確認された。従って、スペーサ無条件よりも顕著に横方向の液相流速勾配が瞬間的に生じる傾向があると言える。

Run No. 3 の可視化画像を表す図 3-18 に示されるように時刻 0.55 秒以降はスペーサ部で非加熱領域にボイドが横方向伝播している。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. 3 の可視化画像を表す図 3-18 によると、時刻 0.70 秒過ぎに第 4 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 3-99 から図 3-103 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。

⁹ 当該時刻範囲において、WMS および可視観察結果からも確認した。

逆流が生じた後は、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。

c) 光ファイバ・LIFによる液相温度測定結果

①光ファイバ

サブチャンネル毎の流体温度分布を計測するため、光ファイバを導入した。近赤外領域1510~1570 nmの光源を光ファイバに入射させ、ファイバ内のガラス分子によって反射する微小なレイリー散乱光の周波数の温度依存性から温度を推定する手法である。本実験では、**図 3-3**に示すボイドセンサの格子配列に従い、ボイドセンサの代わりに光ファイバを設置し、同じ実験条件での計測を実施した。実験条件はRun No.1~3 (A~C)である。計測結果**図 3-104**から**図 3-121**に示した。計測周波数は100Hzであり、当該設定における空間分解能は約2.6 mmである。グラフでは、ボイドセンサの計測点にあたる地点を代表して示した。100Hzで得られるプロットを線で結んだグラフとしており、異常値を数点含んでいる部分は、折れ線など不自然に見えるものもある。この異常値の原因は、数値処理上のエラーである。結果より出力の違いによる温度分布の違い、最も熱的に厳しいT5R5地点で最大値をとりその値は熱出力に依存すること、また非加熱領域においては入口温度と同程度であること、加熱ロッドと非加熱ロッドの境界では最大で60 °C、つまり20 °C程度昇温されていることなどの知見が得られている。

②LIF (レーザ誘起蛍光法, Laser-Induced Fluorescence)

LIFによる液相温度の測定は、昨年度から本年度まででクリアとなった課題を纏めることとしたい。ただし、これは提案した技術¹⁰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相流れ場を含む流れ場の詳細な温度計測に多くの適用例¹¹があり、計測技術として基本的に確立しているといつてよい。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。

• LIF 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、そのエネルギー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

¹⁰ 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

¹¹ <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。

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 粒子の蛍光強度が不測の影響を受ける。そのため、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。

昨年度から今年度、上記手法を本実験系に適用し検討した内容と課題を以下に纏める。

上記の原理説明の通り、強度差分をとることで原理的には気泡の影響を排除できるはずであるが、ある一定の強度以上の乱反射をかぶると、温度に係わる強度がノイズに埋もれるかのような振る舞いをするのがわかった。その根拠に至る検討内容について以下に示す。

□ メディアンフィルタによりトレーサ領域抽出プロセス

→現画像とその二値化画像を用いてメディアンフィルタを施し、現画像から背景画像の差分を抽出し、不均一なトレンド成分を取り除き、結果的にトレーサ部を浮き立たせる。基礎データとして、発熱部よりも上流側の地点で LIF 法による撮影を実施し、得られた静止画を **図 3-122** に示し、メディアンフィルタ処理したものを併せて **図 3-123** に示す。

□ 各トレーサ部の輝度値と流体温度の相関性の確認

→非加熱・定常状態で冷却水温度のみを変化させて、各トレーサ部の最大輝度値とトレーサ径について纏めた。流体温度 30 °C から 98 °C までの結果を **図 3-123** から **図 3-123** に示す。

本来ならばトレーサ部の輝度は、**図**に示すトレーサー径の範囲内において温度に対して負の相関を持っているが、**図 3-123** から得られるトレンドはそれに従うものの感度が小さく、温度を推定するには精度が足りなく、誤認識を招く可能性が大きい。

上記の課題として、本来直径 10 ミクロンのトレーサが凝集することにあると考える。この対策として、まずハード側でフィルタをして極力トレーサ径のばらつきを抑えること、そ

してソフト側でも解析対象とするトレーサ径を検討すべきであると考えられる。本知見を今後の課題として今年度はここで留めたい。

3.1.3.6. 30mm 長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

当初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、エラー! 参照元が見つかりません。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 mm¹² 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¹³ 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 mm² から 73.31 mm² 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したもの（肉厚、高さを 0.4, 10 mm）、及び実機相当のもの（同 0.4, 30 mm）で比較実験を行った。

• 実験結果

表 3 の実験条件マトリックス中の Run No. 3 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。本報告書では、スペーサが液相流速分布に及ぼす影響に着眼し、10 mm スペーサと 30 mm スペーサ双方の PIV 結果の比較について記述する。

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、スペーサの上流部と下流部で特異な流動現象が観察された。具体的には 10mm スペーサの場合には図 3-93 に示されるように、スペーサの上流側で発生した蒸気泡がスペーサ直前で非加熱ロッド領域へ横流れ伝播し、スペーサ下流部近傍では気液攪拌による乱れが生じながら気泡の存在により液相速度が上昇した。それに対して、30 mm スペーサでは図 3-132 のようにスペーサの上流側と下流側で独立してボイド横流れ伝播が生じた。

¹² 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。

¹³ 最大出力レベルの最大値 1450 kW/m² を課す Run No. 3 (@スペーサ無条件) 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、曲がりなくなる。

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	PIV: Particle Image Velocimetry LIF: Laser Induced Fluorescence
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	<ul style="list-style-type: none"> 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	<ul style="list-style-type: none"> 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 ℃	入口流速 m/s	熱流束 kW/m ² (電気出力 kW)	PIV, LIF 選出
1	1	40	0.3	1206 (218)	A
2	1	40	0.3	1327 (238)	B
3	1	40	0.3	1435 (258)	C
4	2	40	0.5	1326 (237)	
5	2	40	0.5	1432 (258)	
6	2	40	0.5	1555 (280)	
7	3	60	0.3	897 (161)	
8	3	60	0.3	992 (179)	
9	3	60	0.3	1094 (197)	
10	4	60	0.5	998 (181)	
11	4	60	0.5	1050 (189)	
12	4	60	0.5	1116 (198)	(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

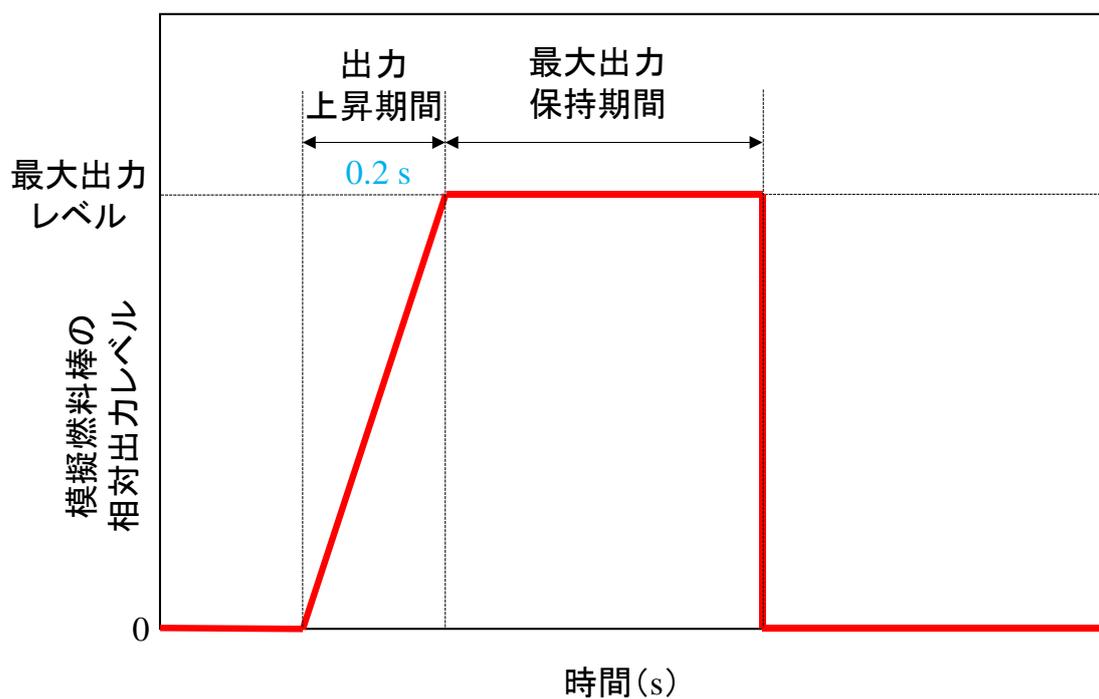


図 3-1 設定出力の時間応答曲線

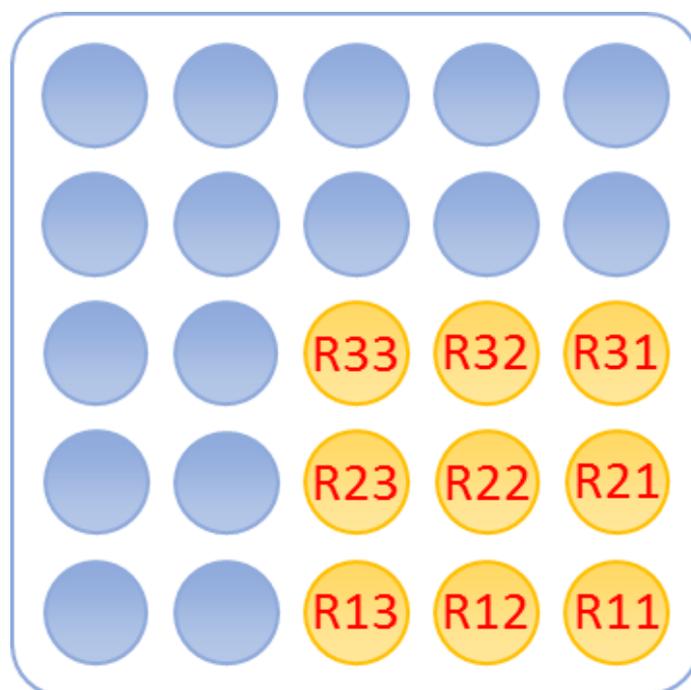


図 3-2 ロッド番号の割振り

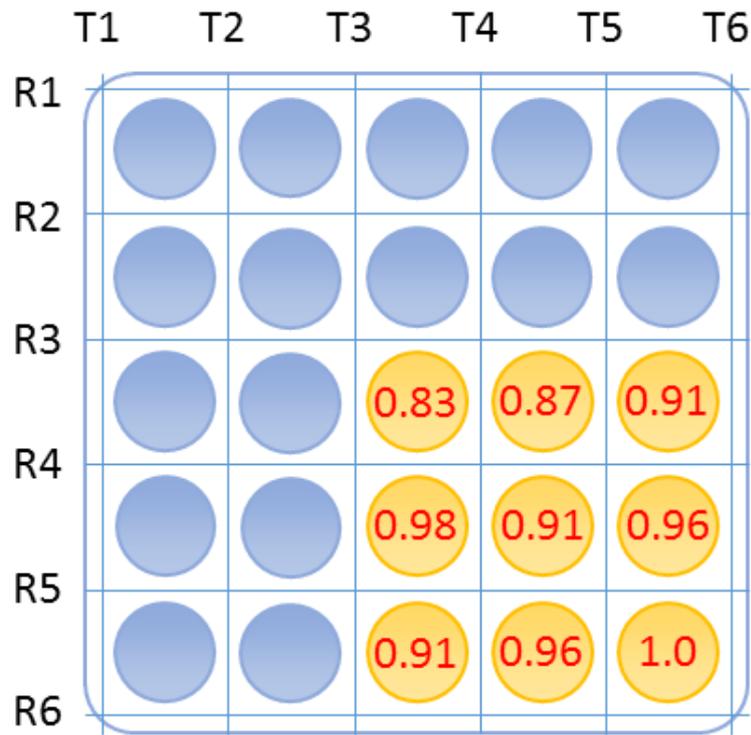


図 3-3 模擬燃料棒の局所出力係数及び WMS の識別番号

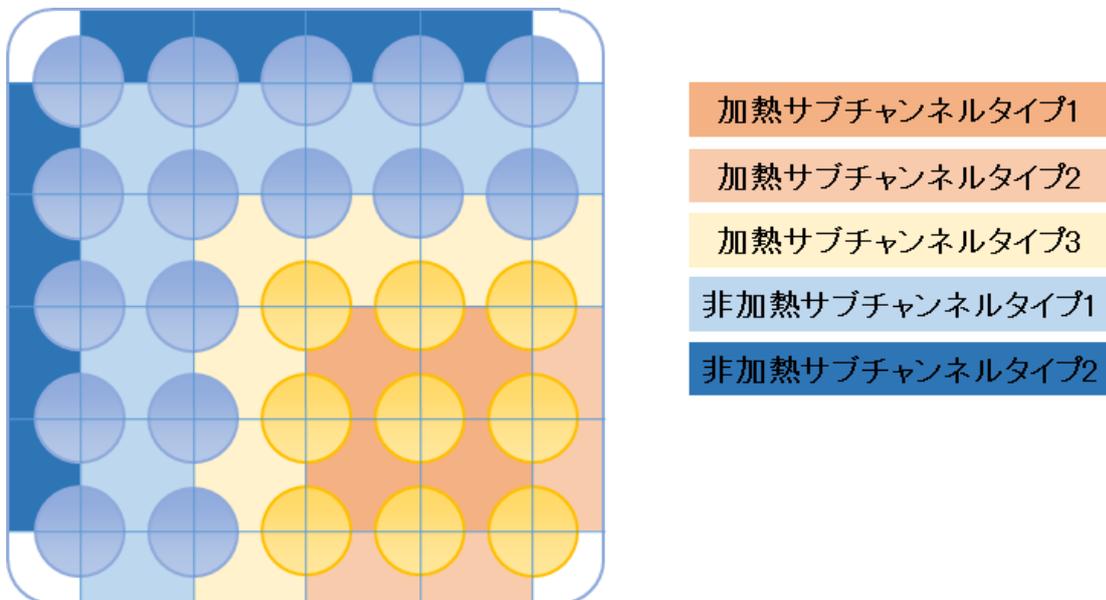


図 3-4 サブチャンネルのタイプ分け

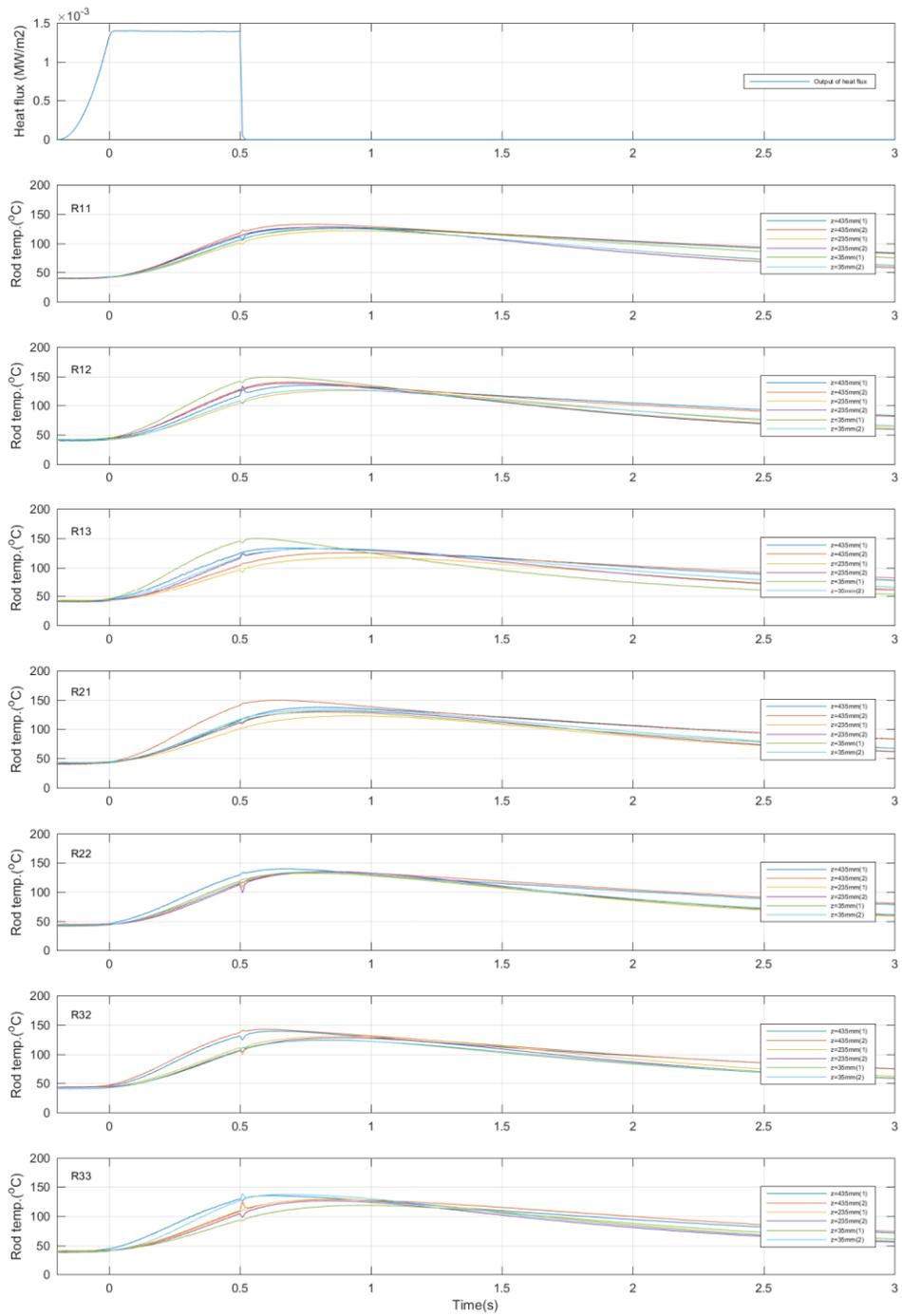


図 3-5 ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.1)

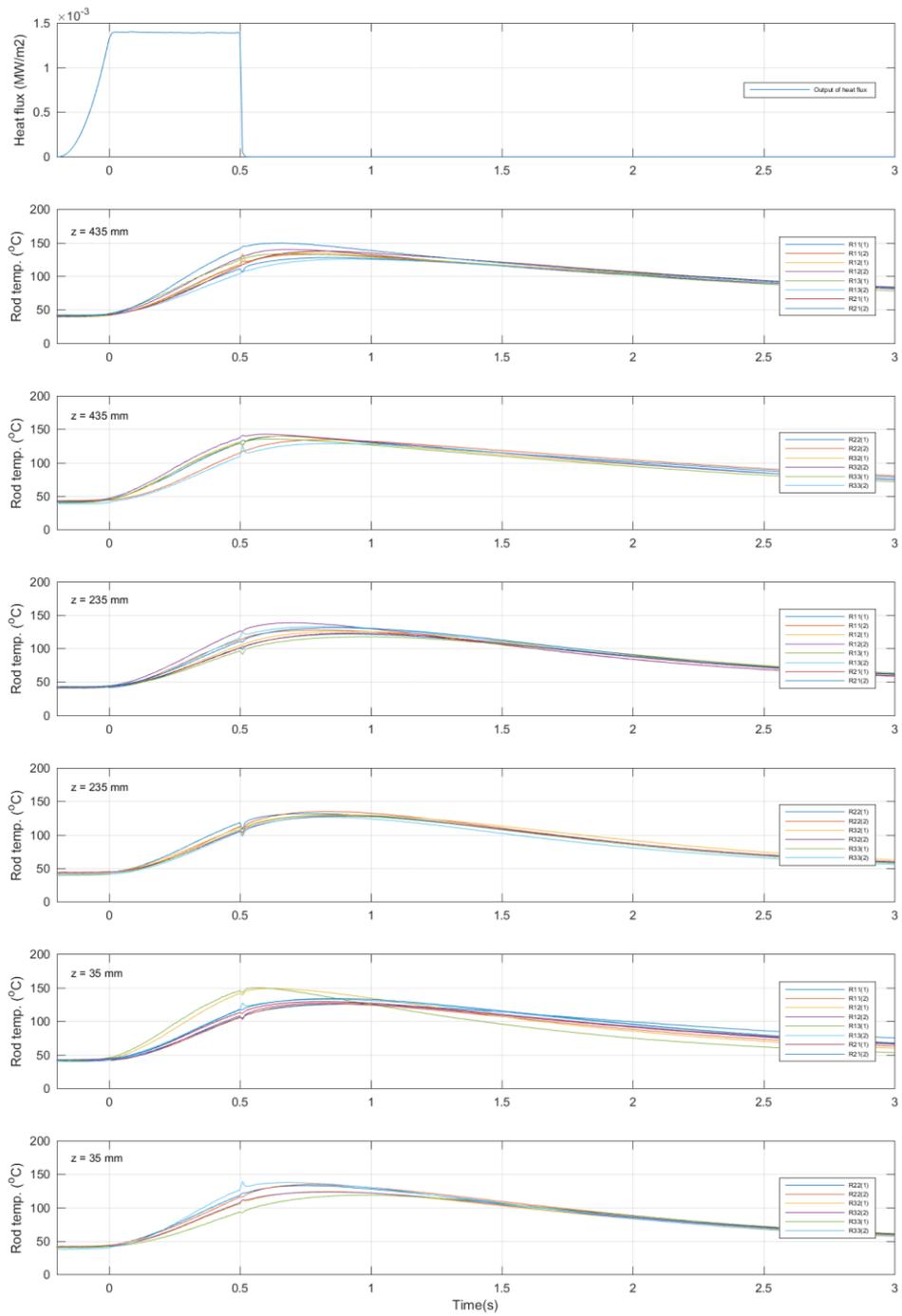


図 3-6 高さごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.1)

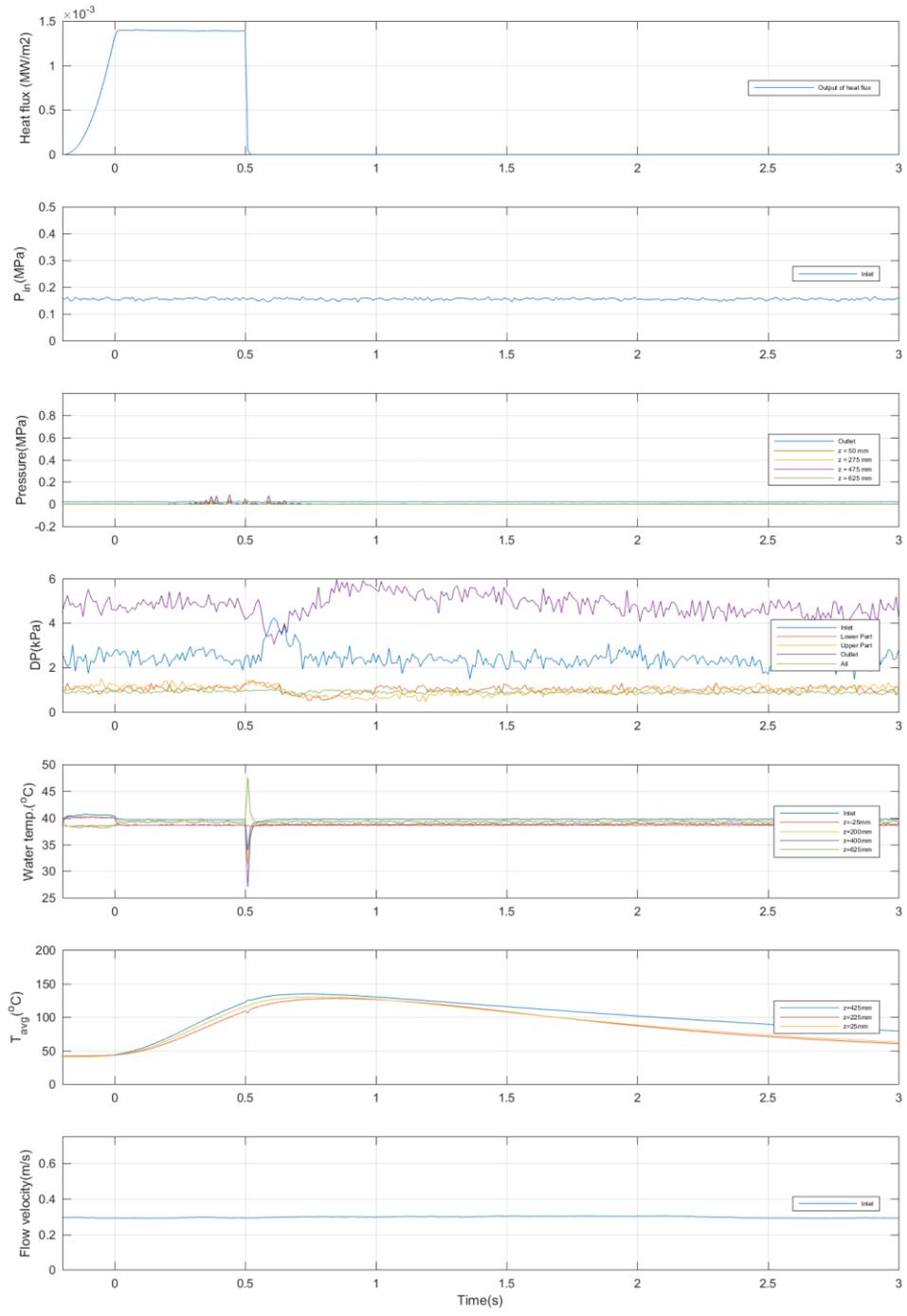


図 3-7 その他計測値の時間変化 (Run No.1)

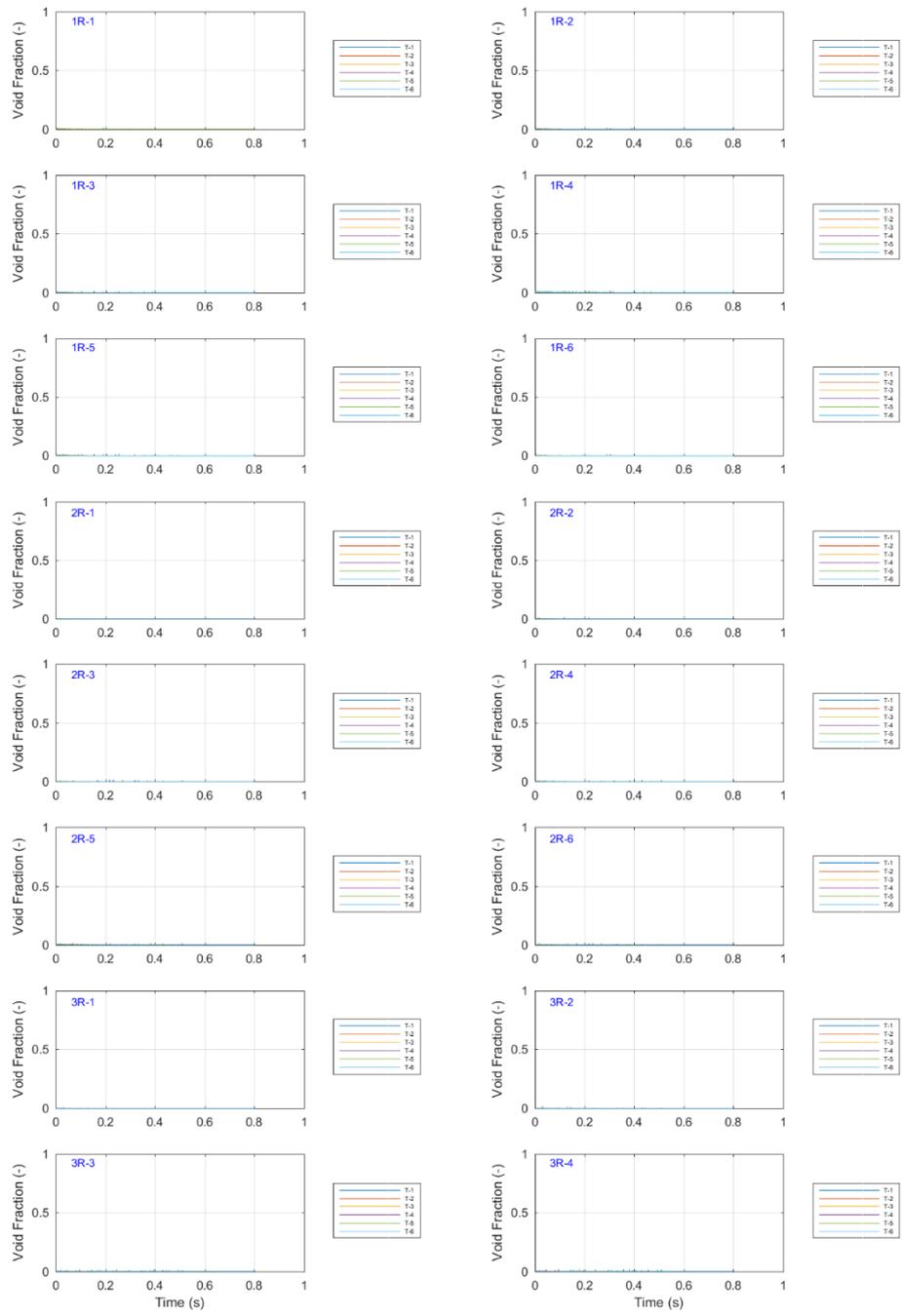


図 3-8 ボイド率の時間変化 (Run No. 1①)

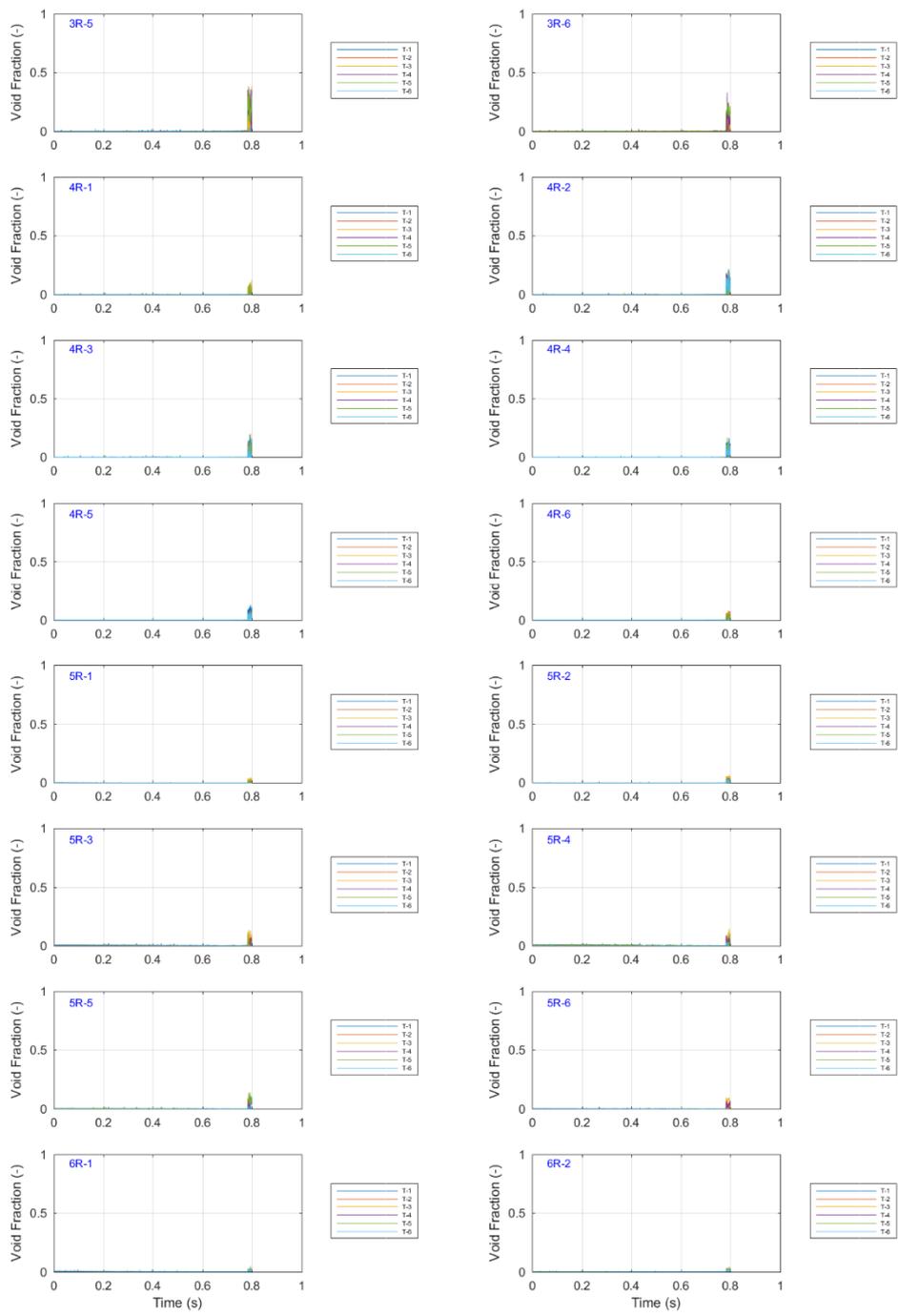


図 3-9 ボイド率の時間変化 (Run No. 1/2)

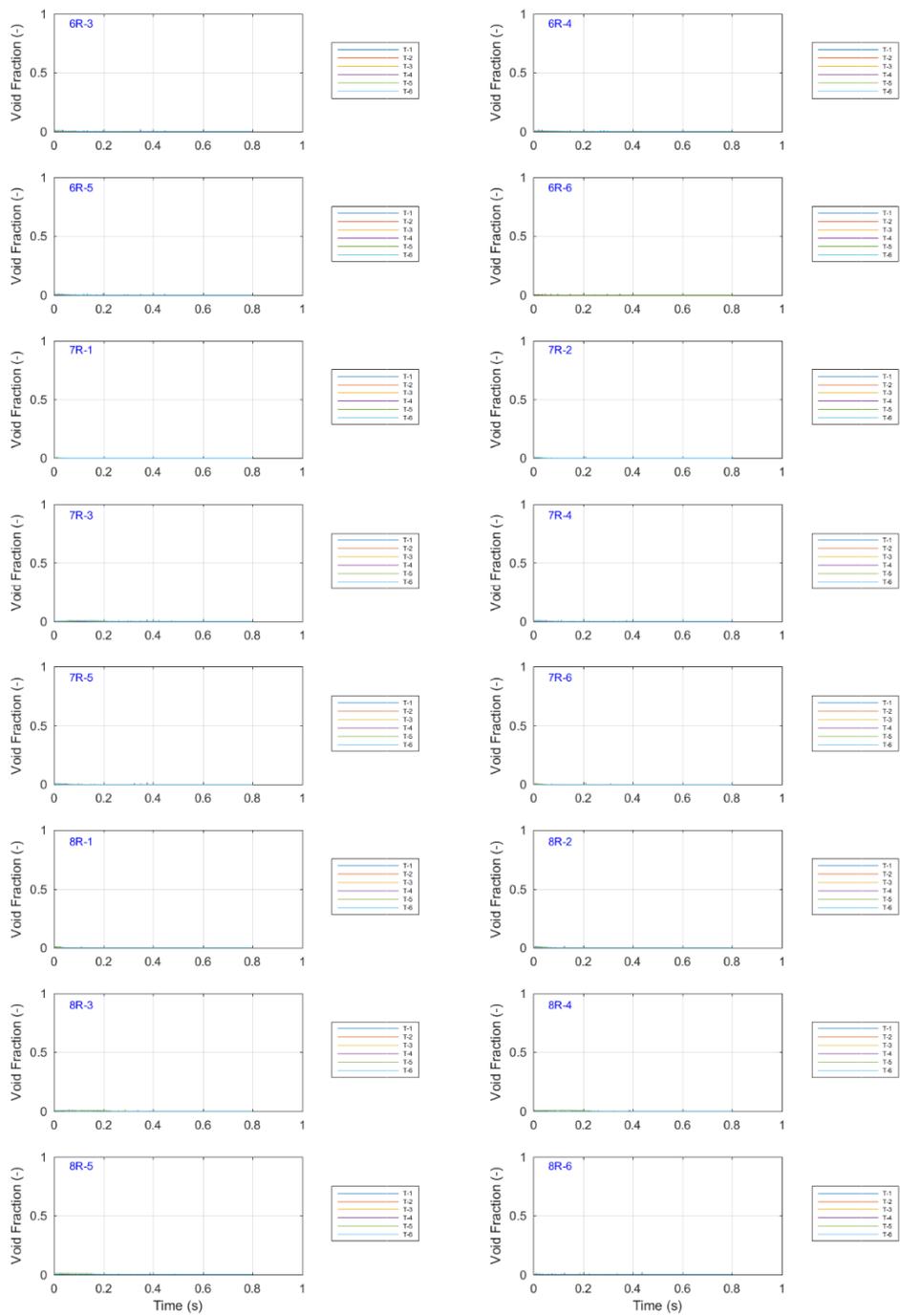


図 3-10 ボイド率の時間変化 (Run No. 1/③)

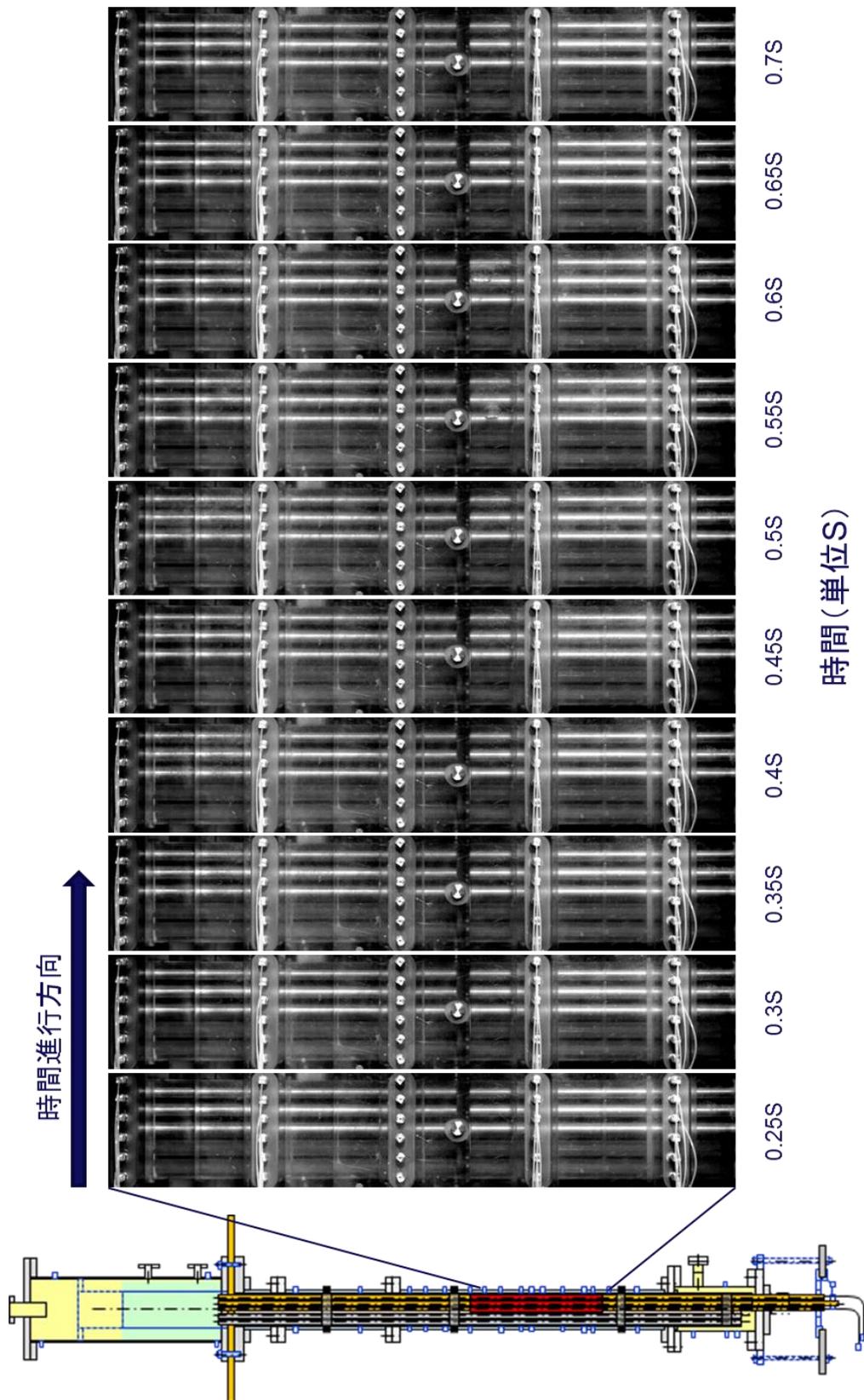


図 3-11 ポイド挙動の可視化画像 (Run No. 1)

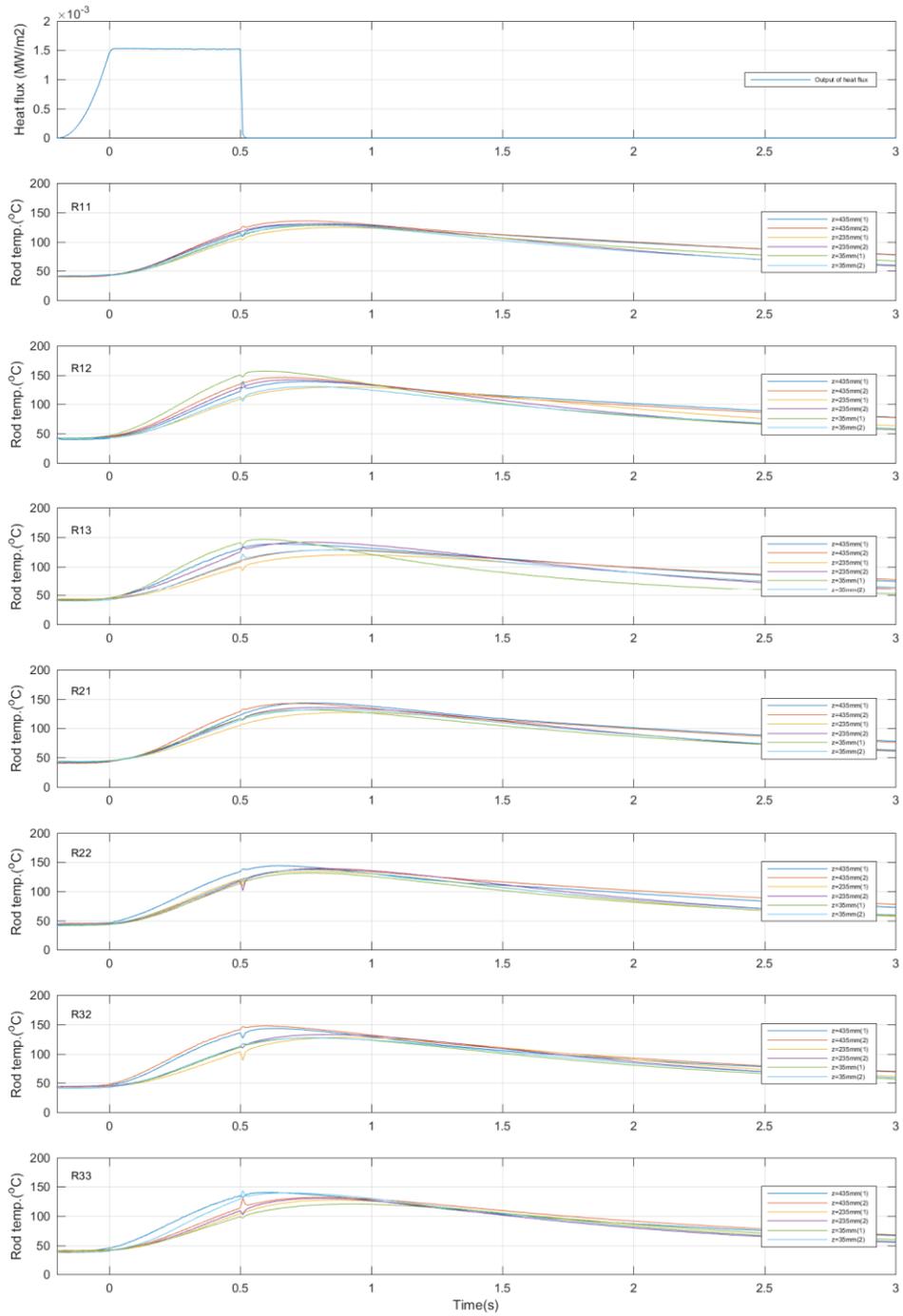


図 3-12 ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.2)

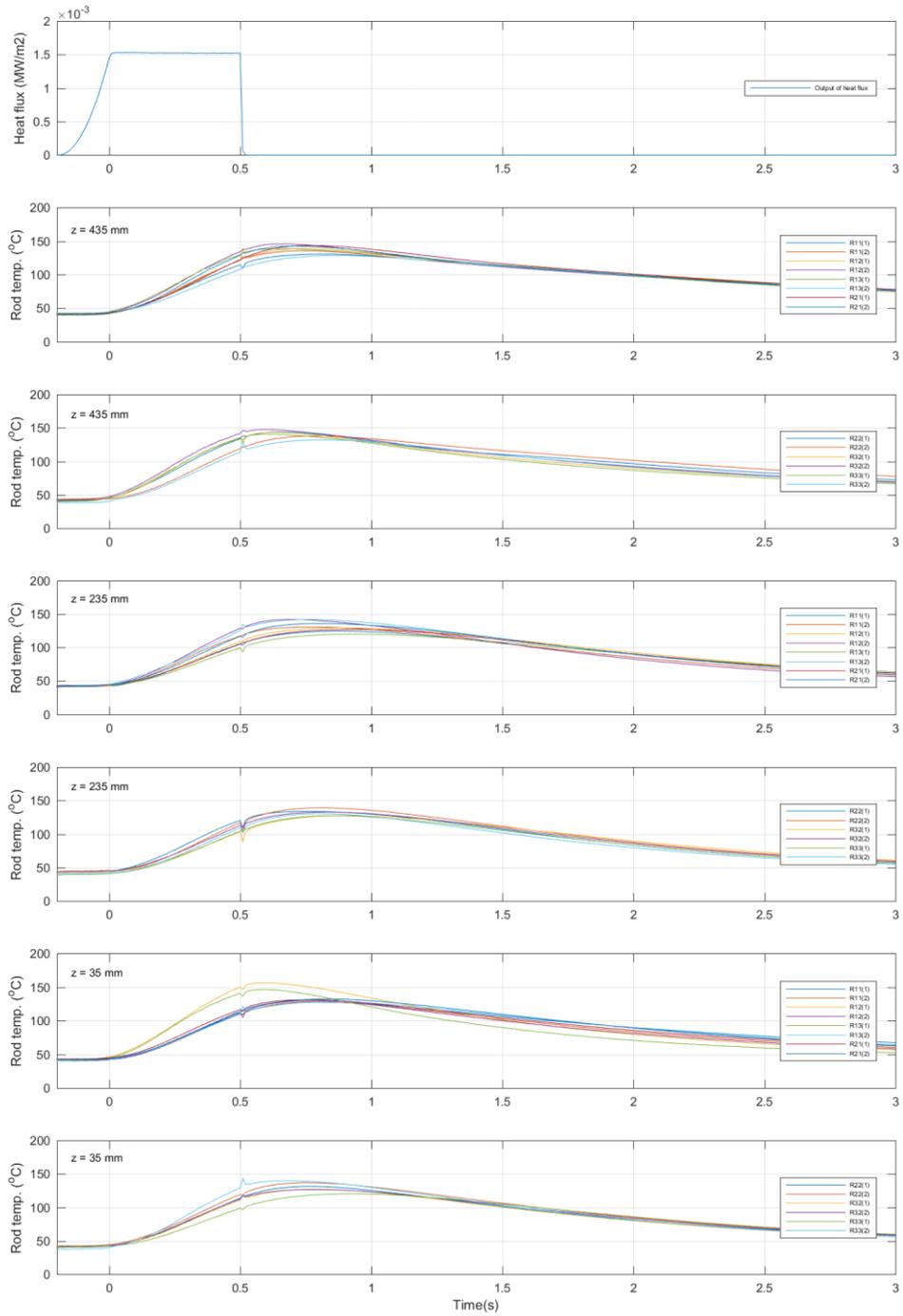


図 3-13 高さごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.2)

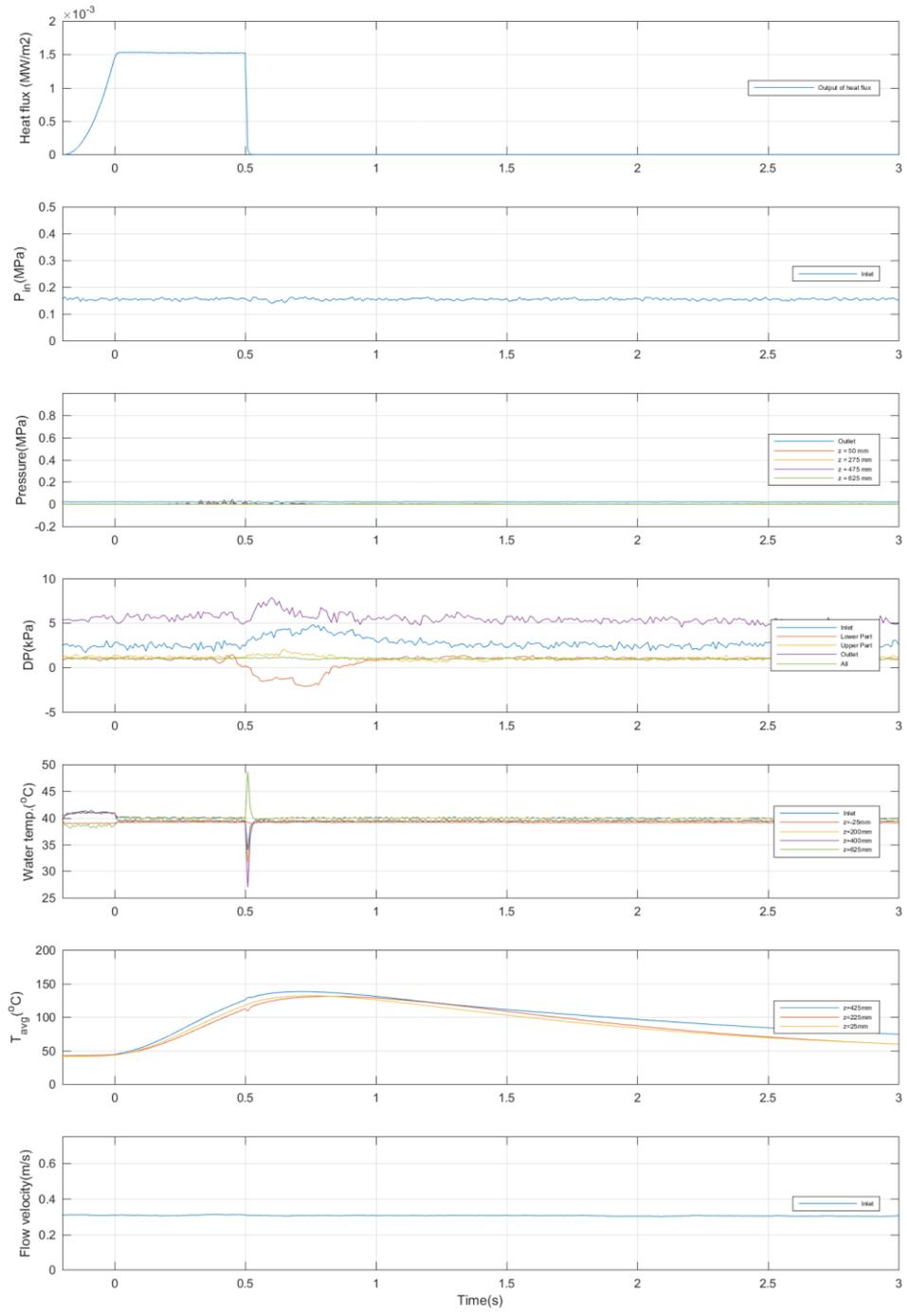


図 3-14 その他計測値の時間変化 (Run No.2)

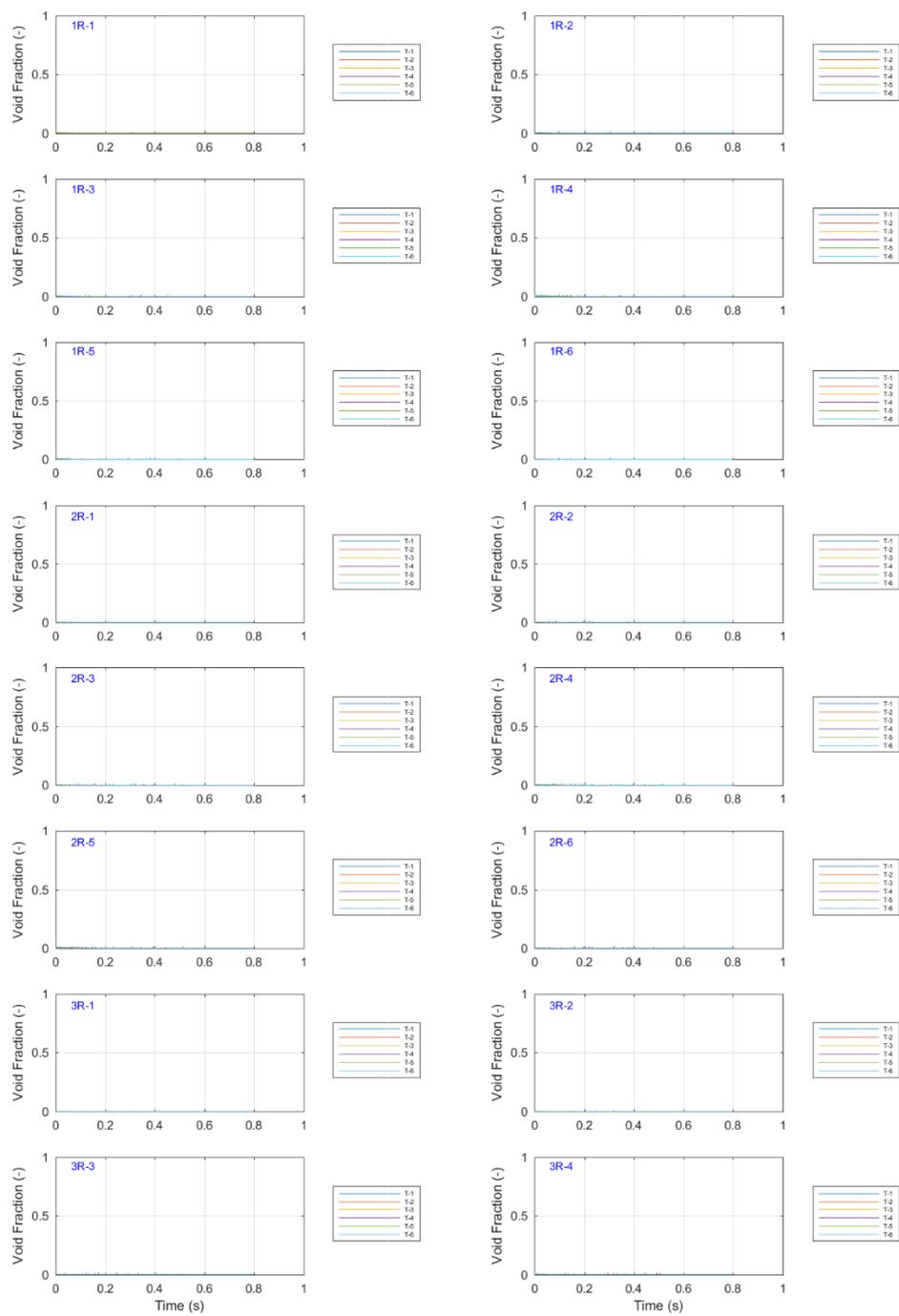


図 3-15 ボイド率の時間変化 (Run No. 2/①)

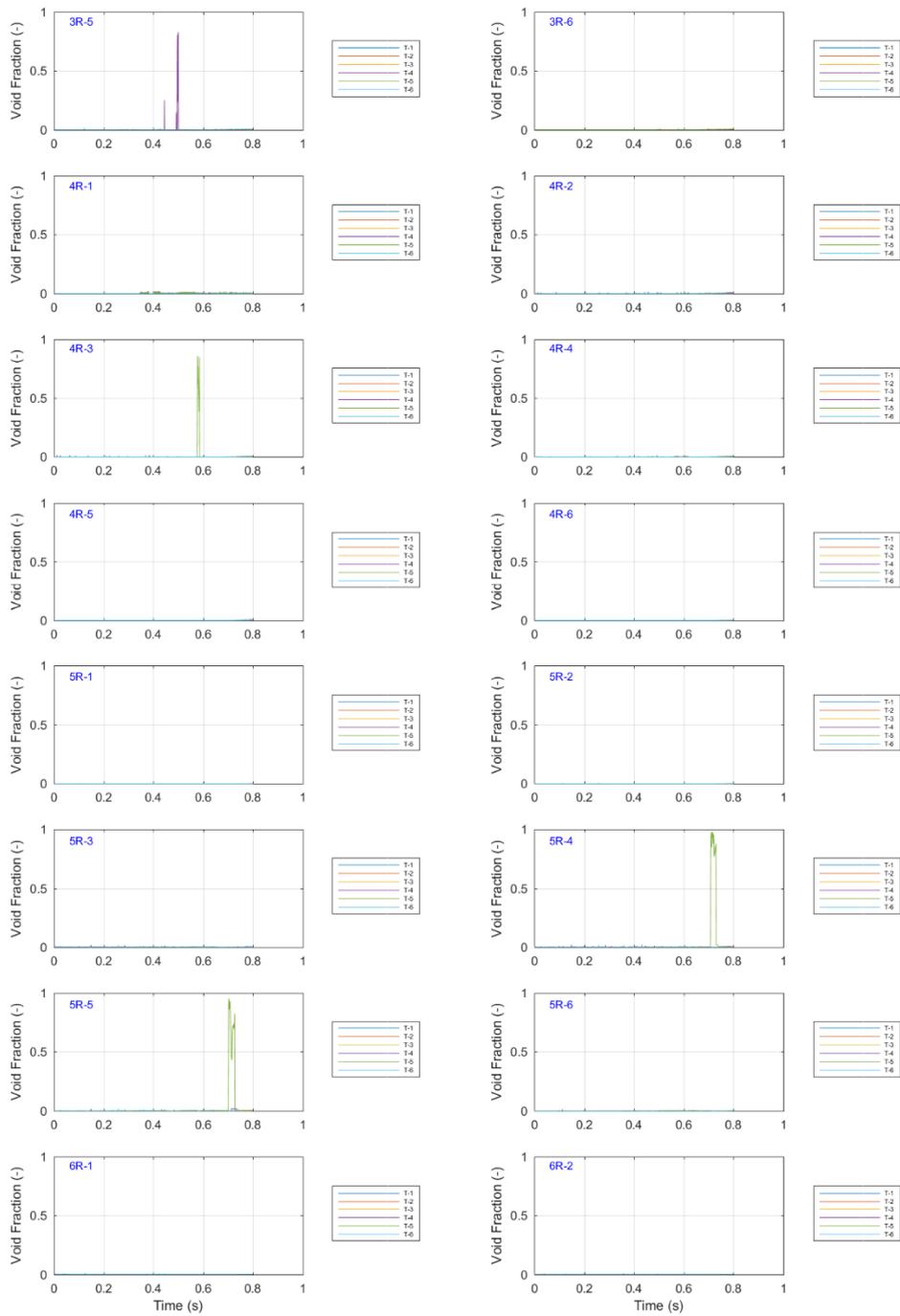


図 3-16 ボイド率の時間変化 (Run No. 2/②)

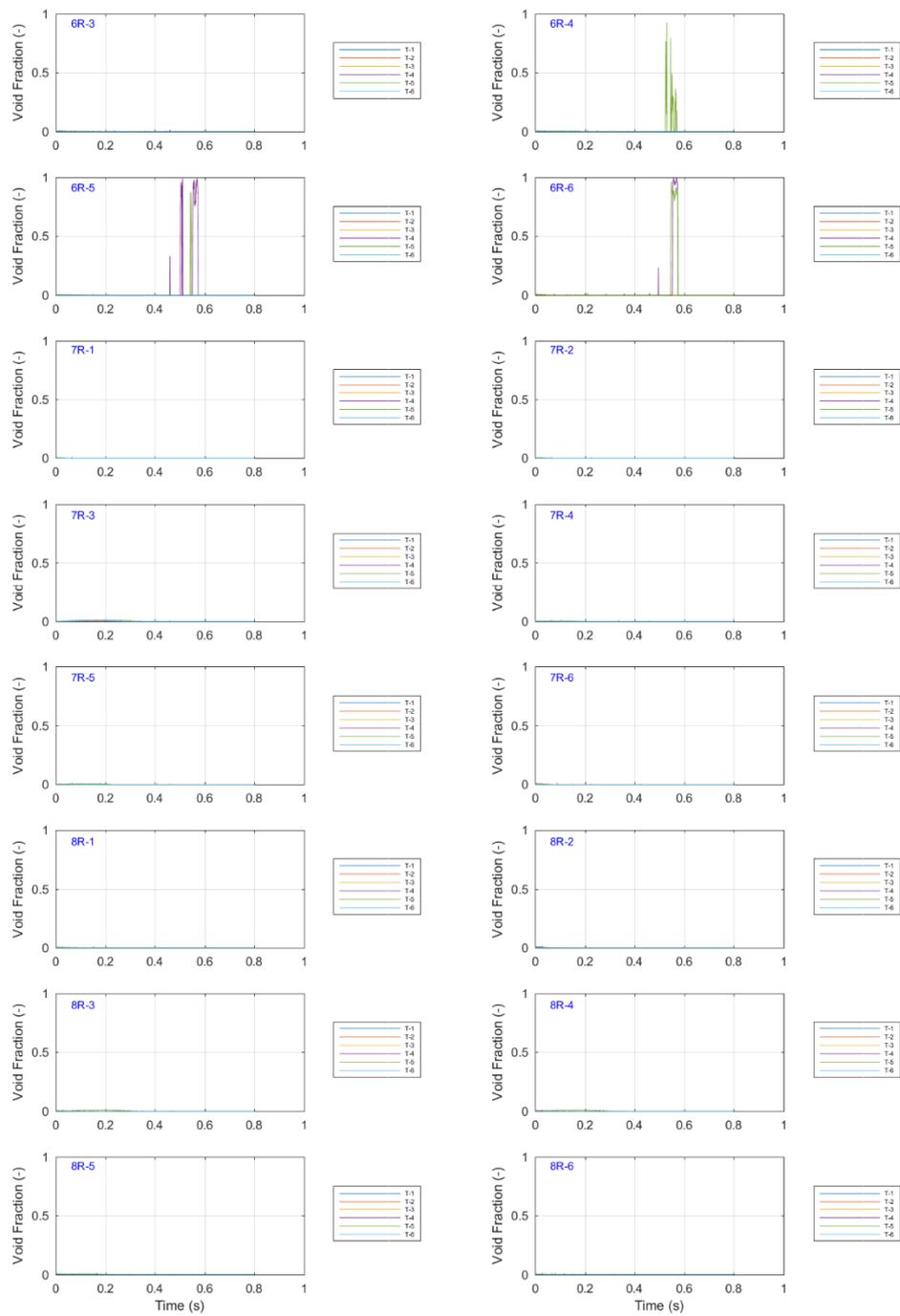


図 3-17 ボイド率の時間変化 (Run No. 2/③)

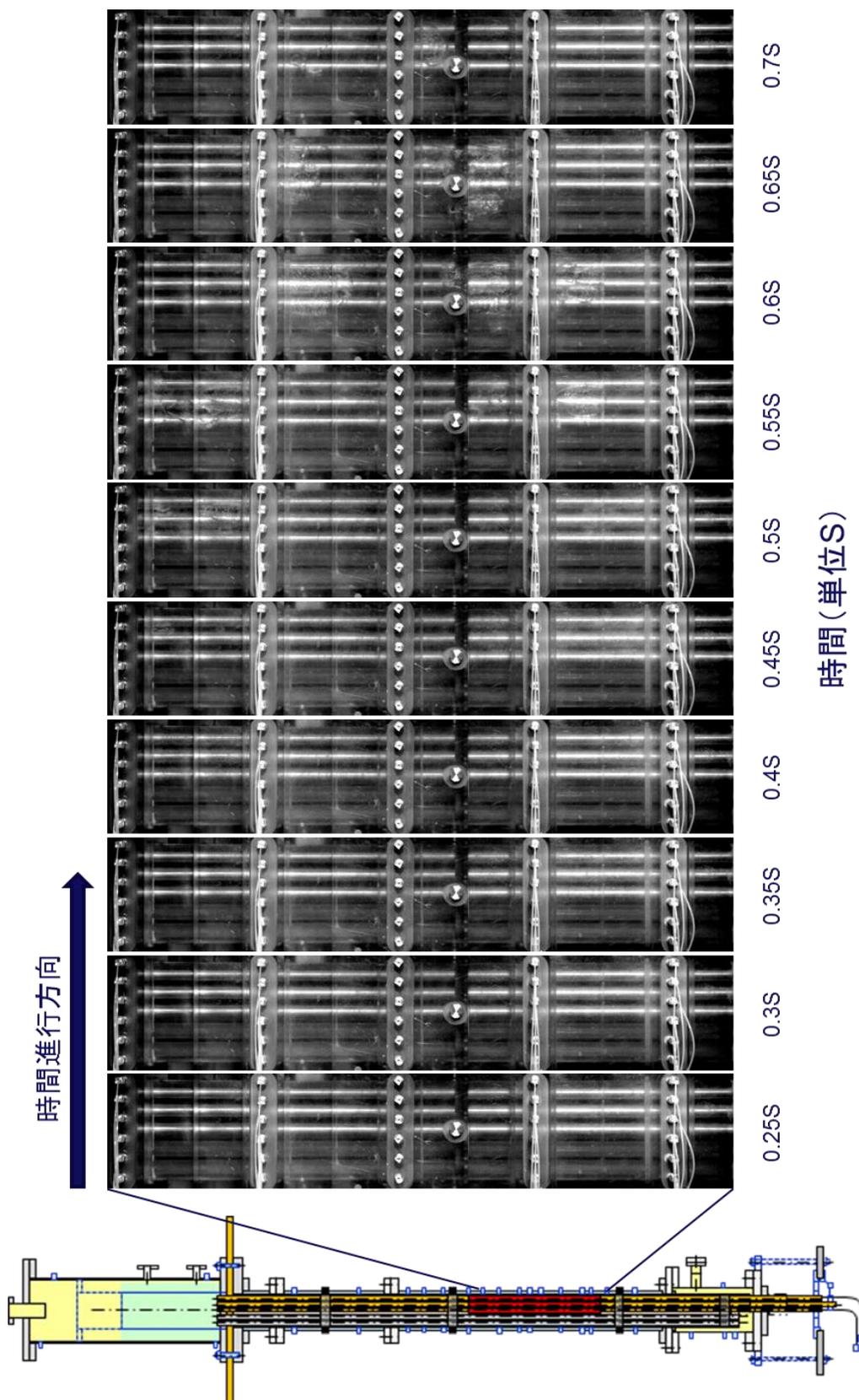


図 3-18 ポイド挙動の可視化画像 (Run No. 2)

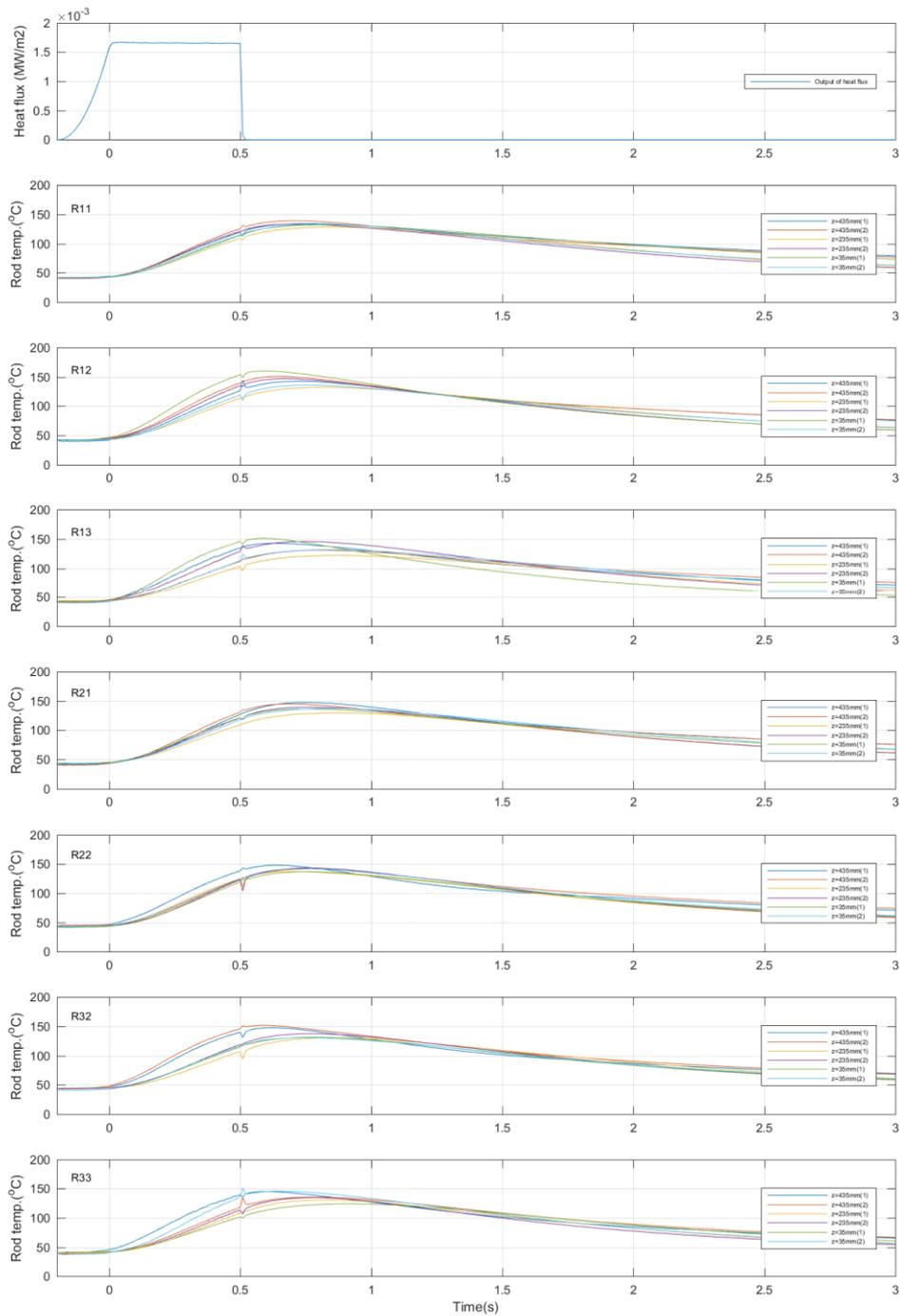


図 3-19 ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.3)

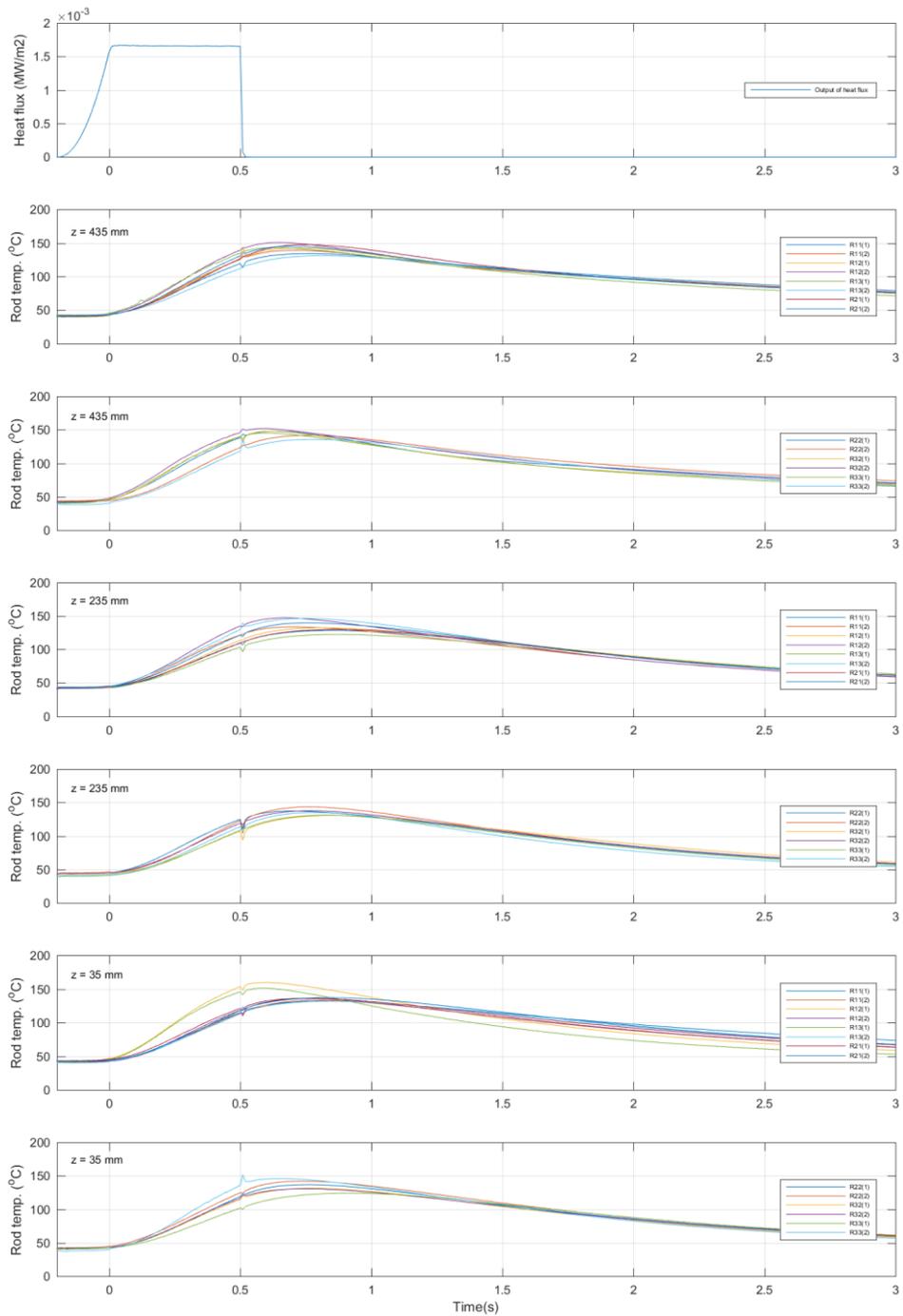


図 3-20 高さごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.3)

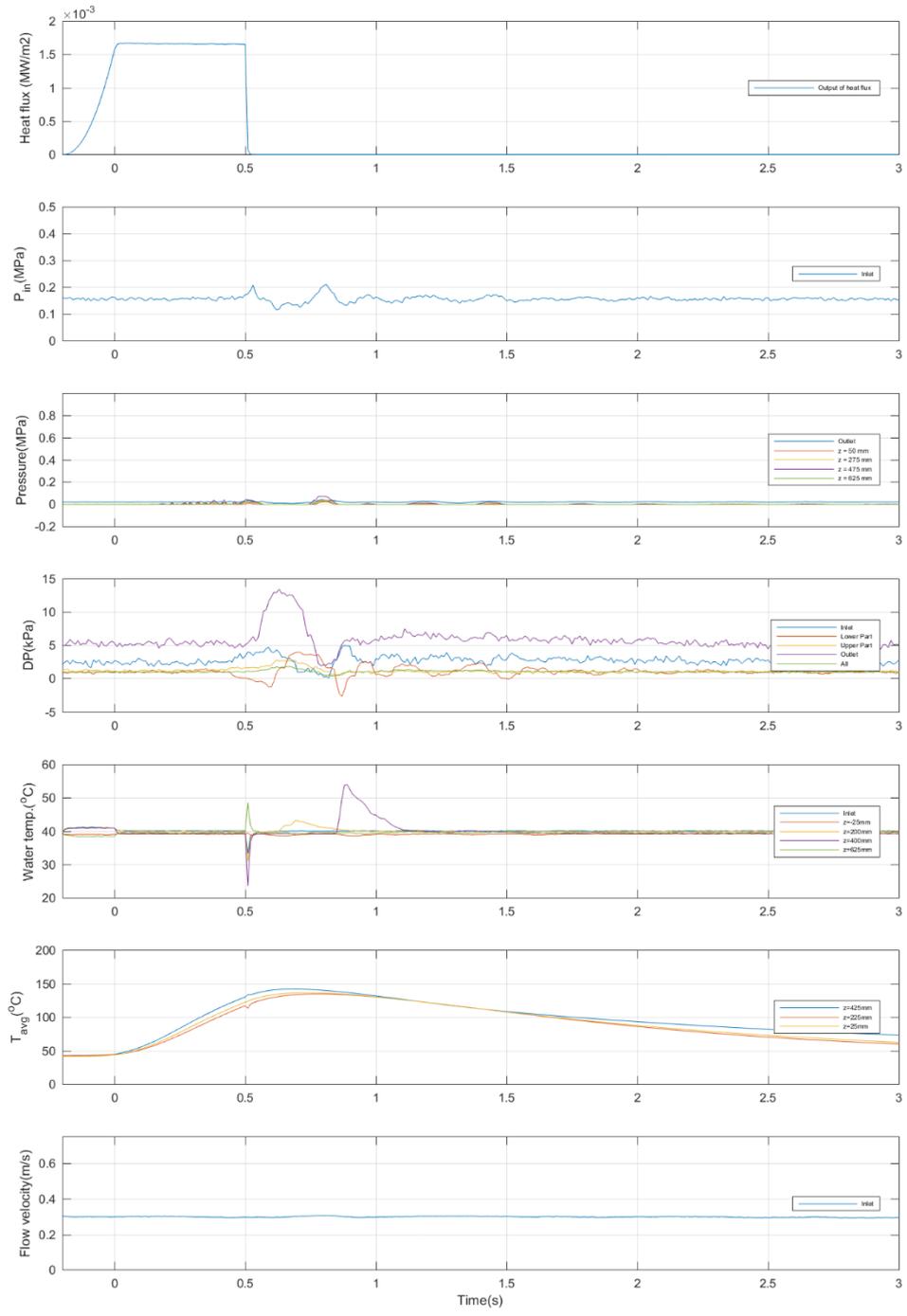


図 3-21 その他計測値の時間変化 (Run No.3)

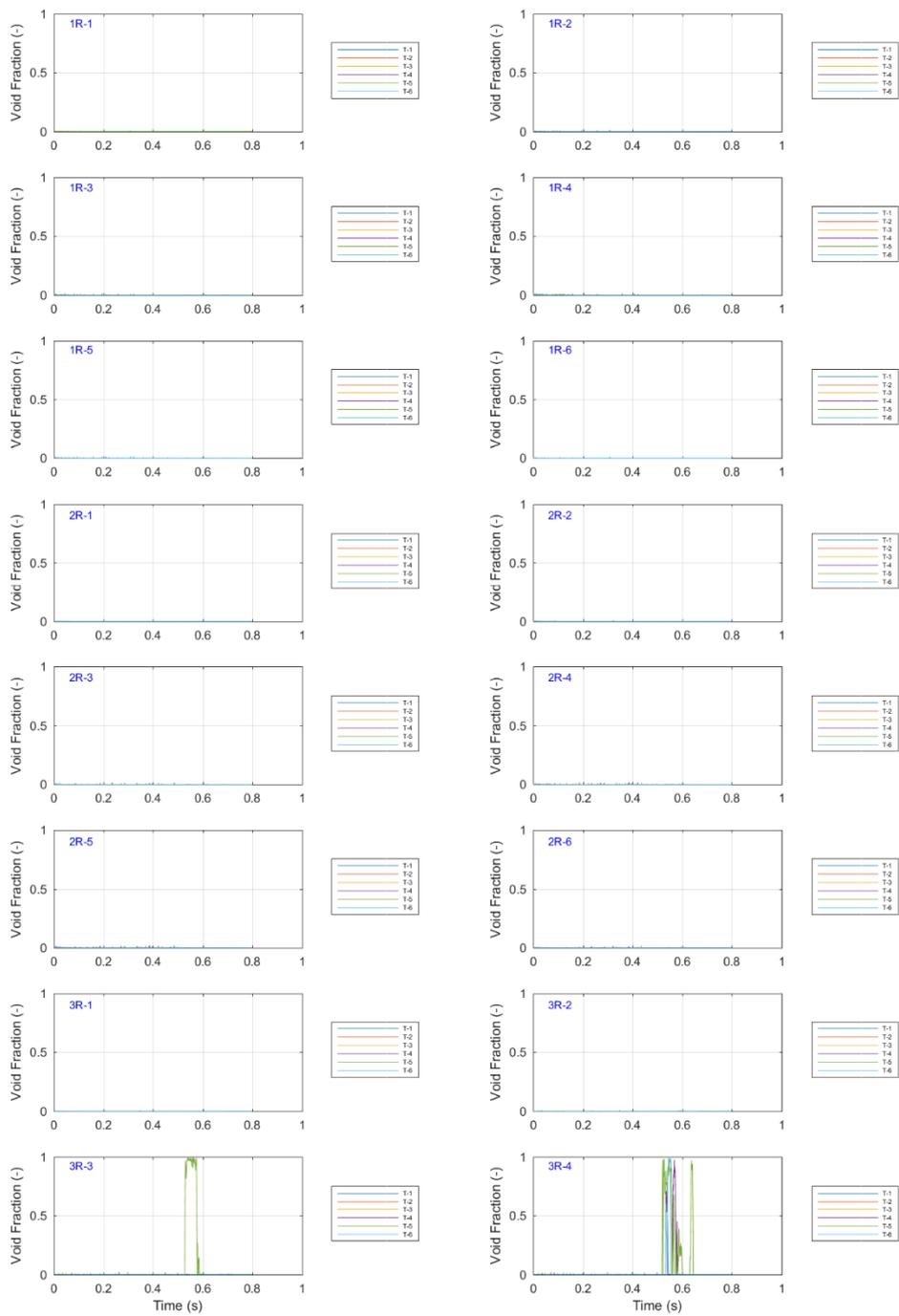


図 3-22 ボイド率の時間変化 (Run No.3/①)

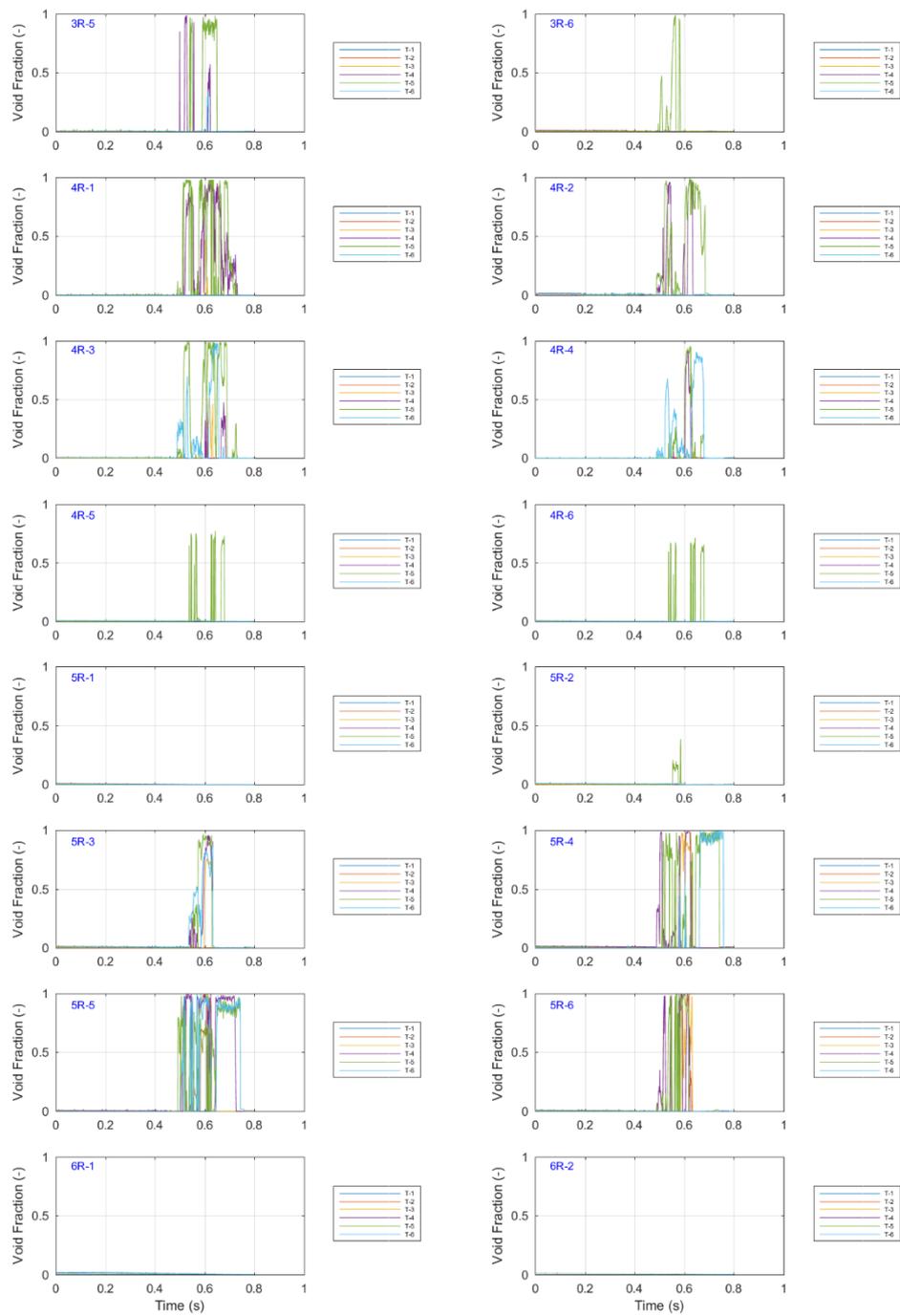


図 3-23 ボイド率の時間変化 (Run No.3/②)

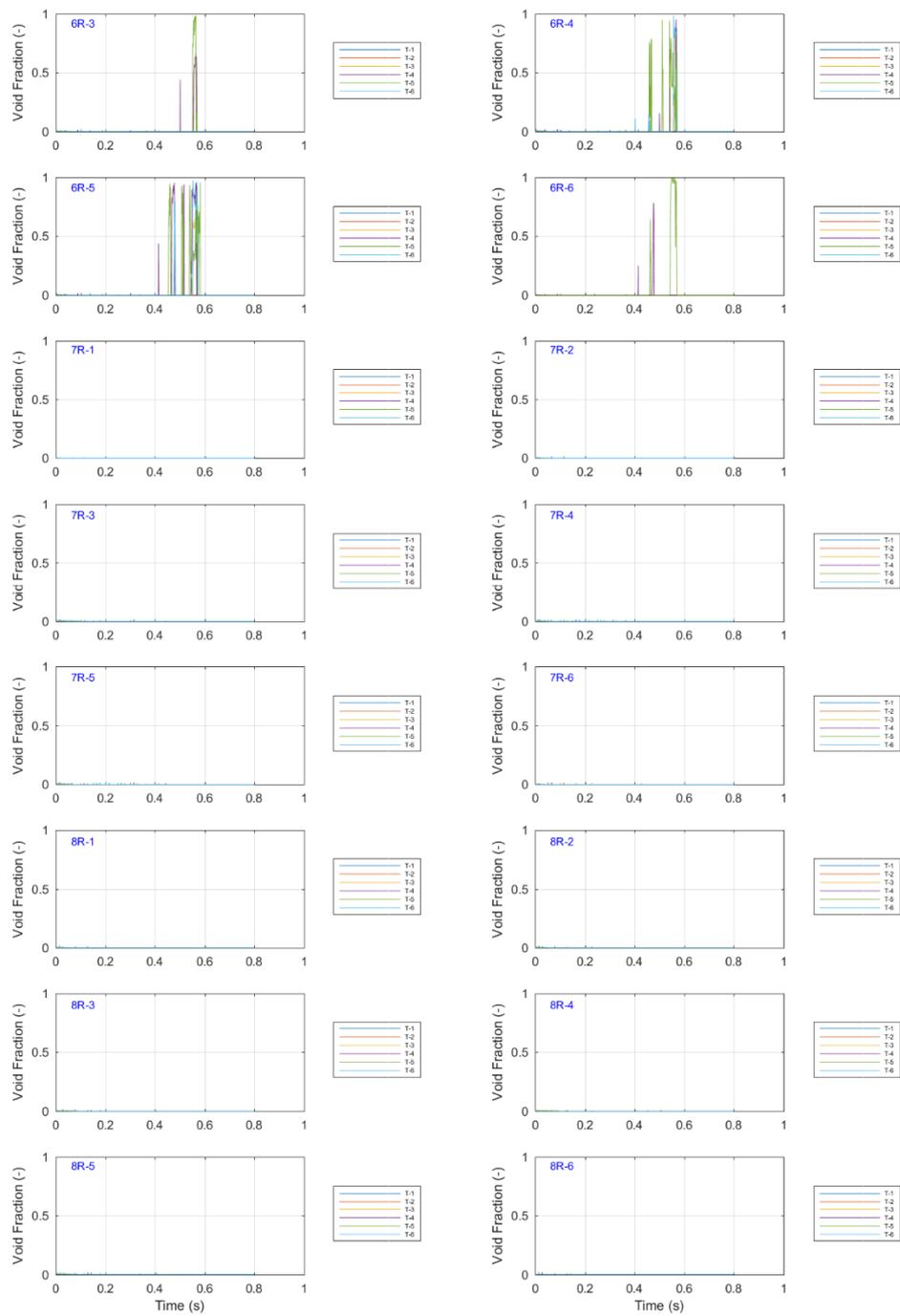


図 3-24 ボイド率の時間変化 (Run No.3/③)

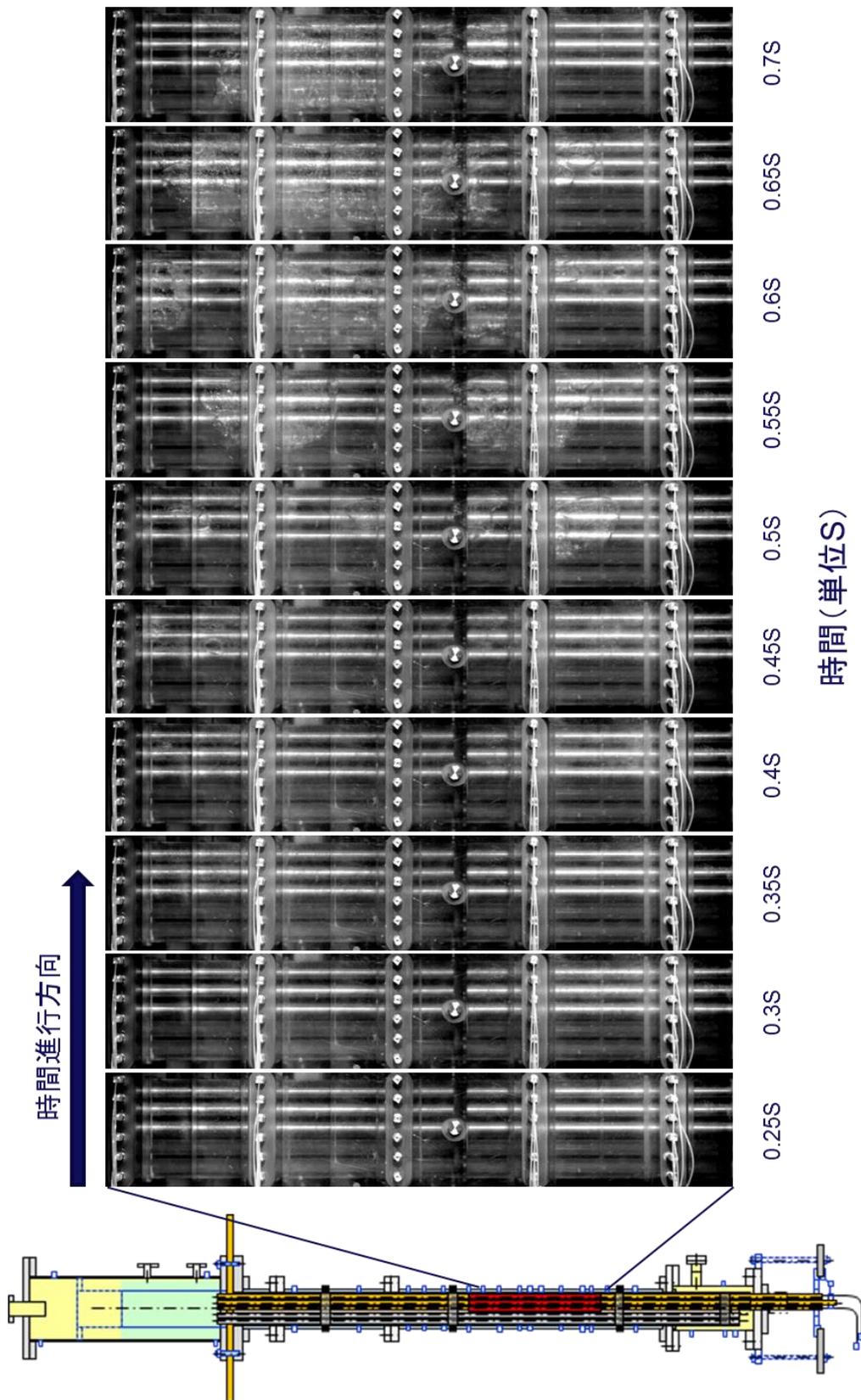


図 3-25 ポイド挙動の可視化画像 (Run No. 3)

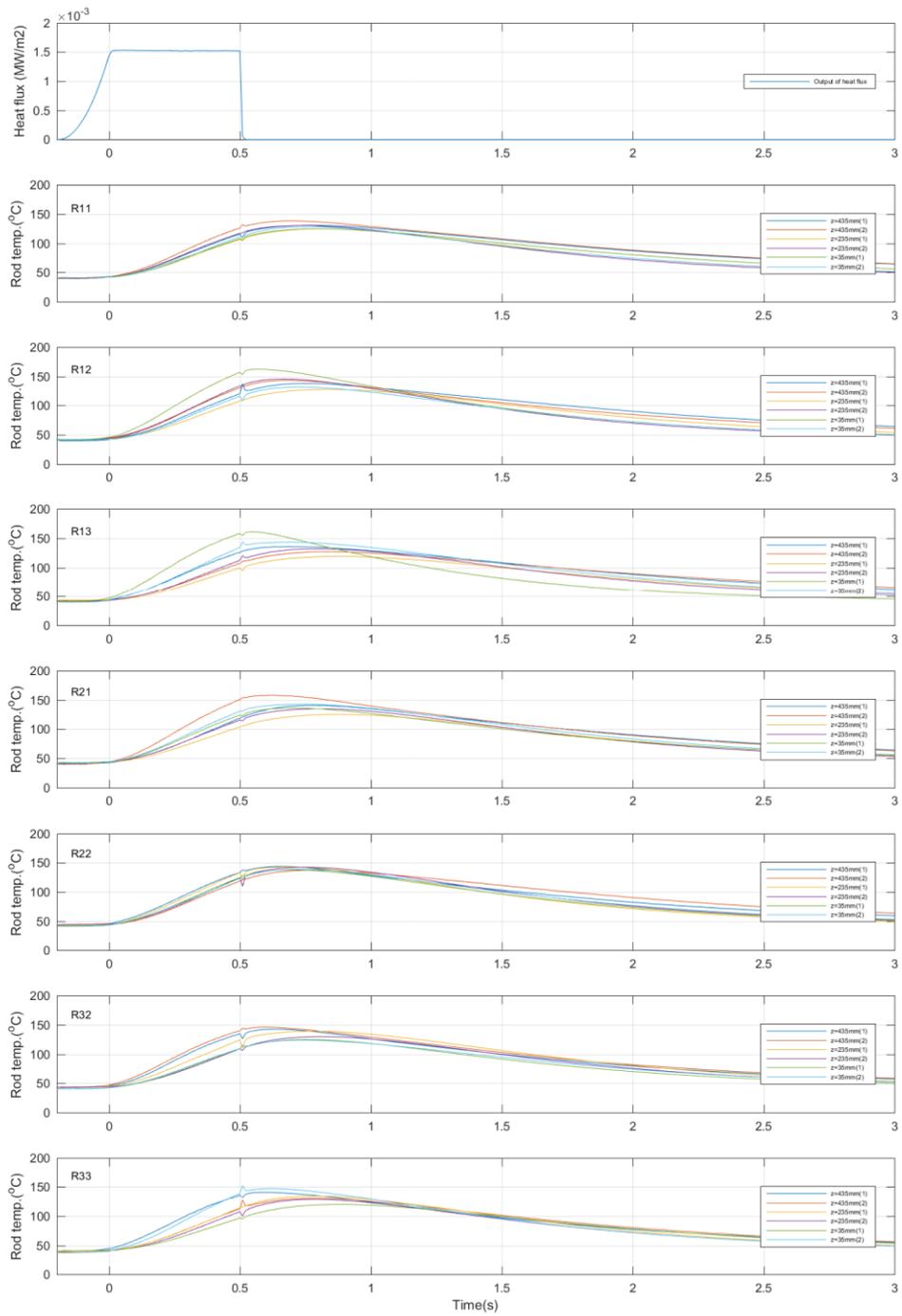


図 3-26 ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.4)

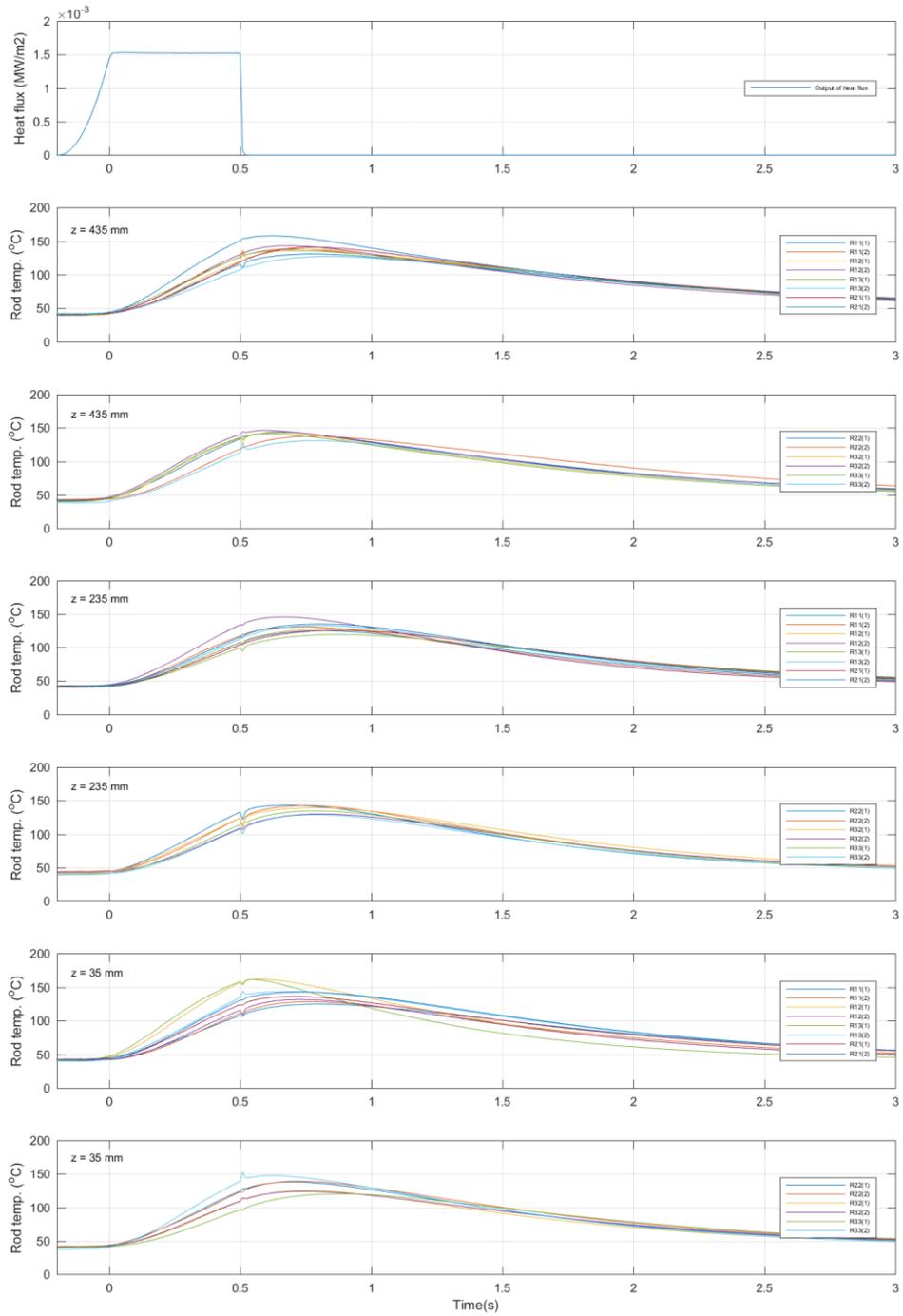


図 3-27 高さごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.4)

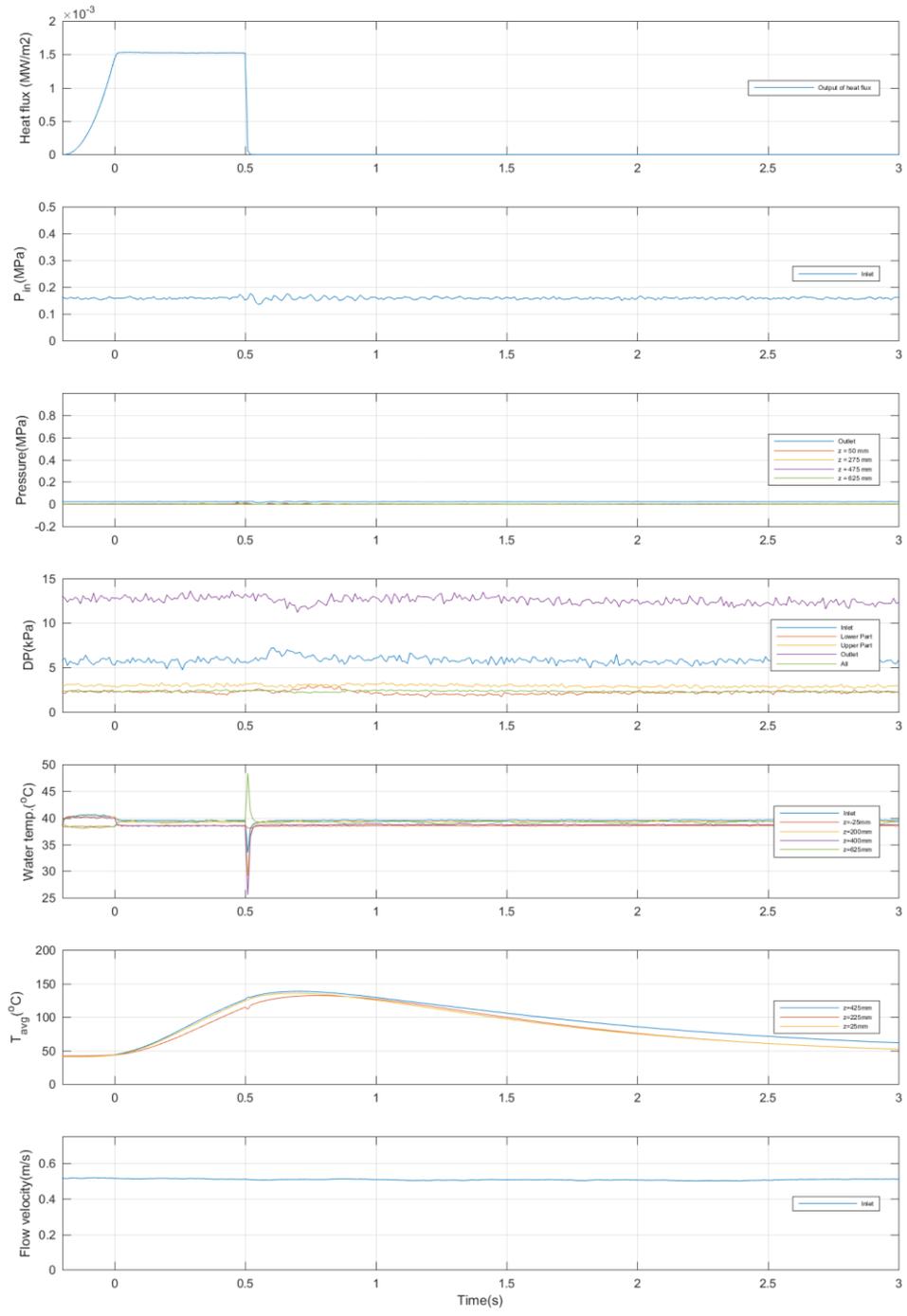


図 3-28 その他計測値の時間変化 (Run No.4)

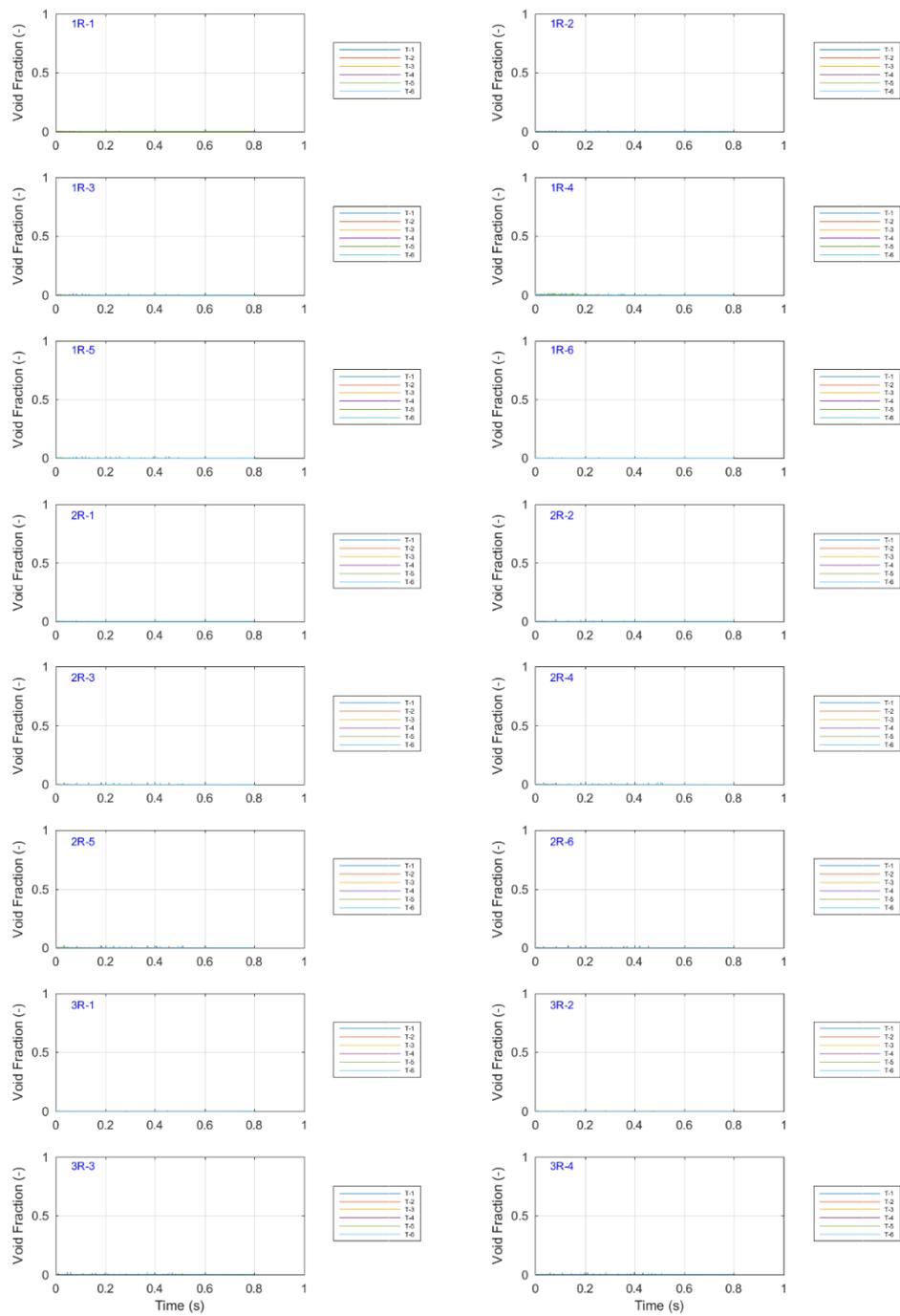


図 3-29 ボイド率の時間変化 (Run No.4/①)

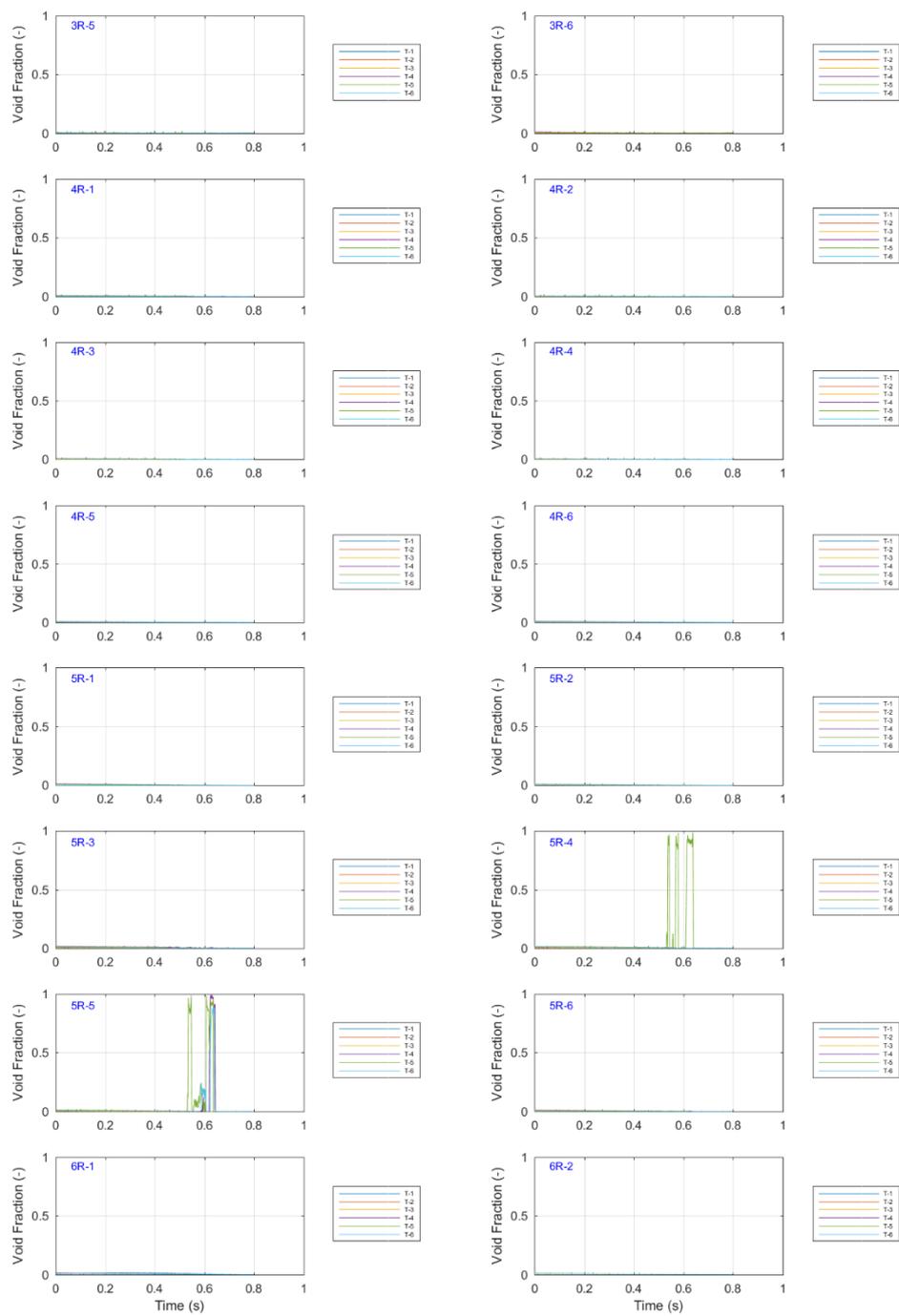


図 3-30 ボイド率の時間変化 (Run No.4/②)

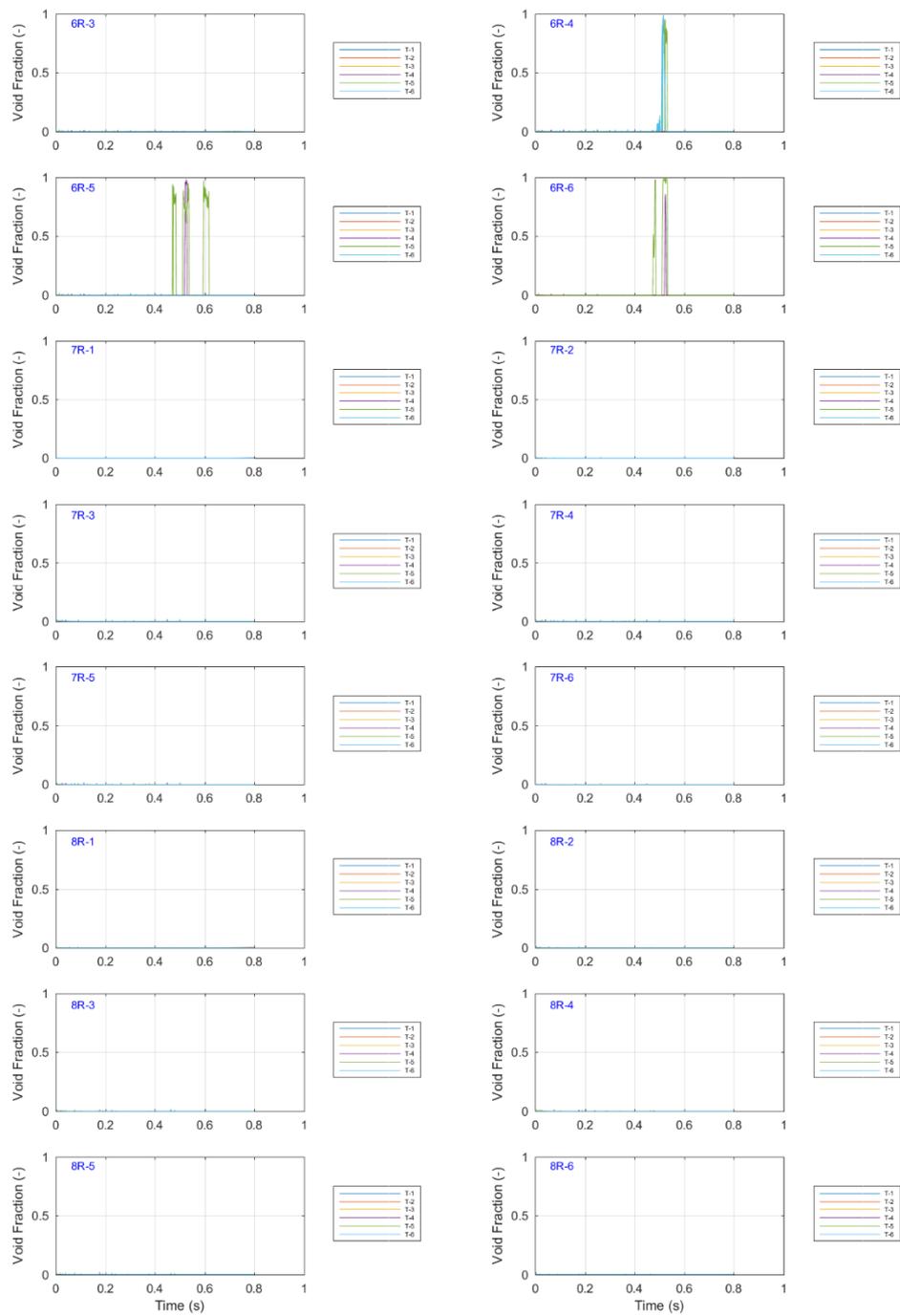


図 3-31 ボイド率の時間変化 (Run No.4/③)

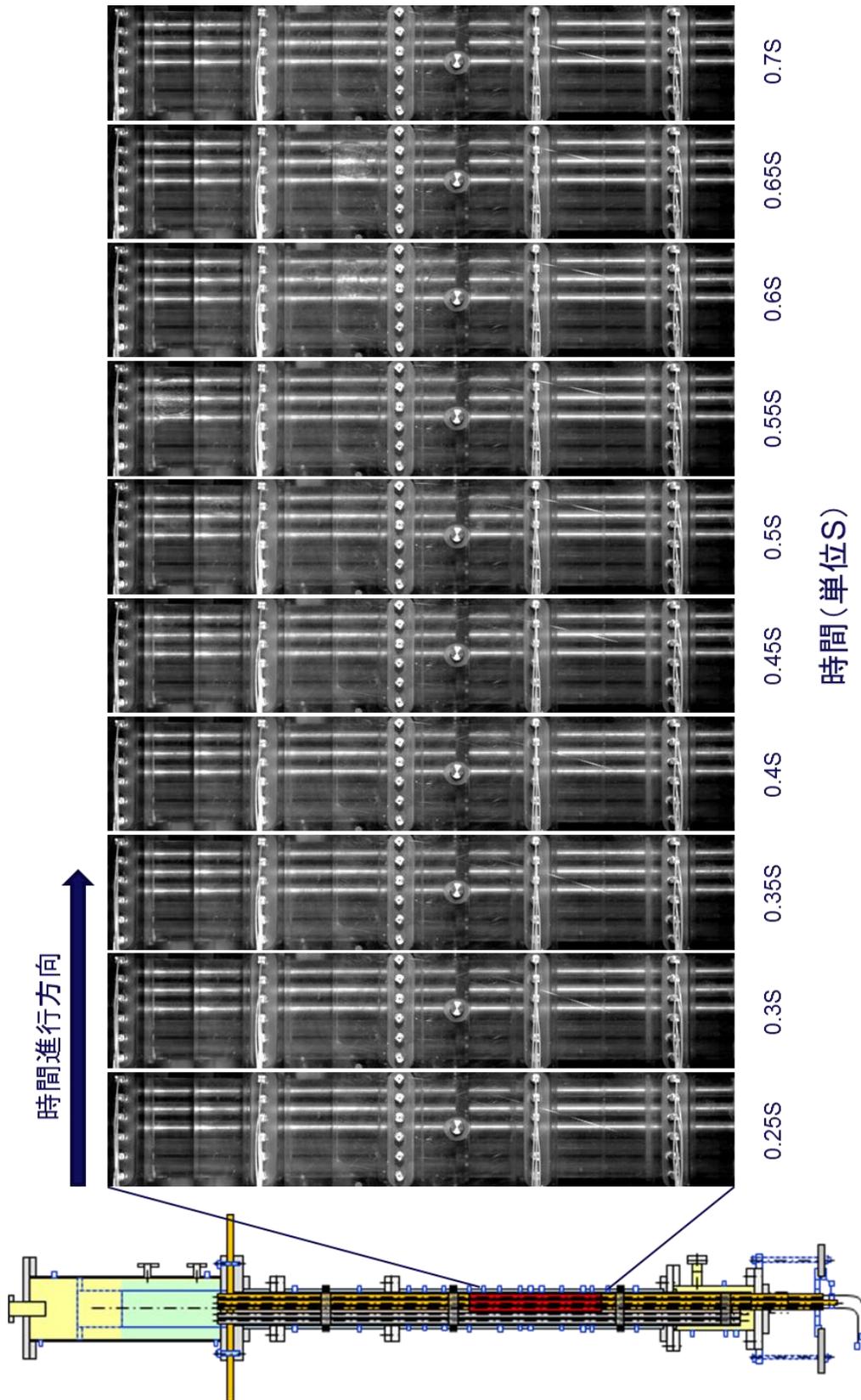


図 3-32 ポイド挙動の可視化画像 (Run No. 4)

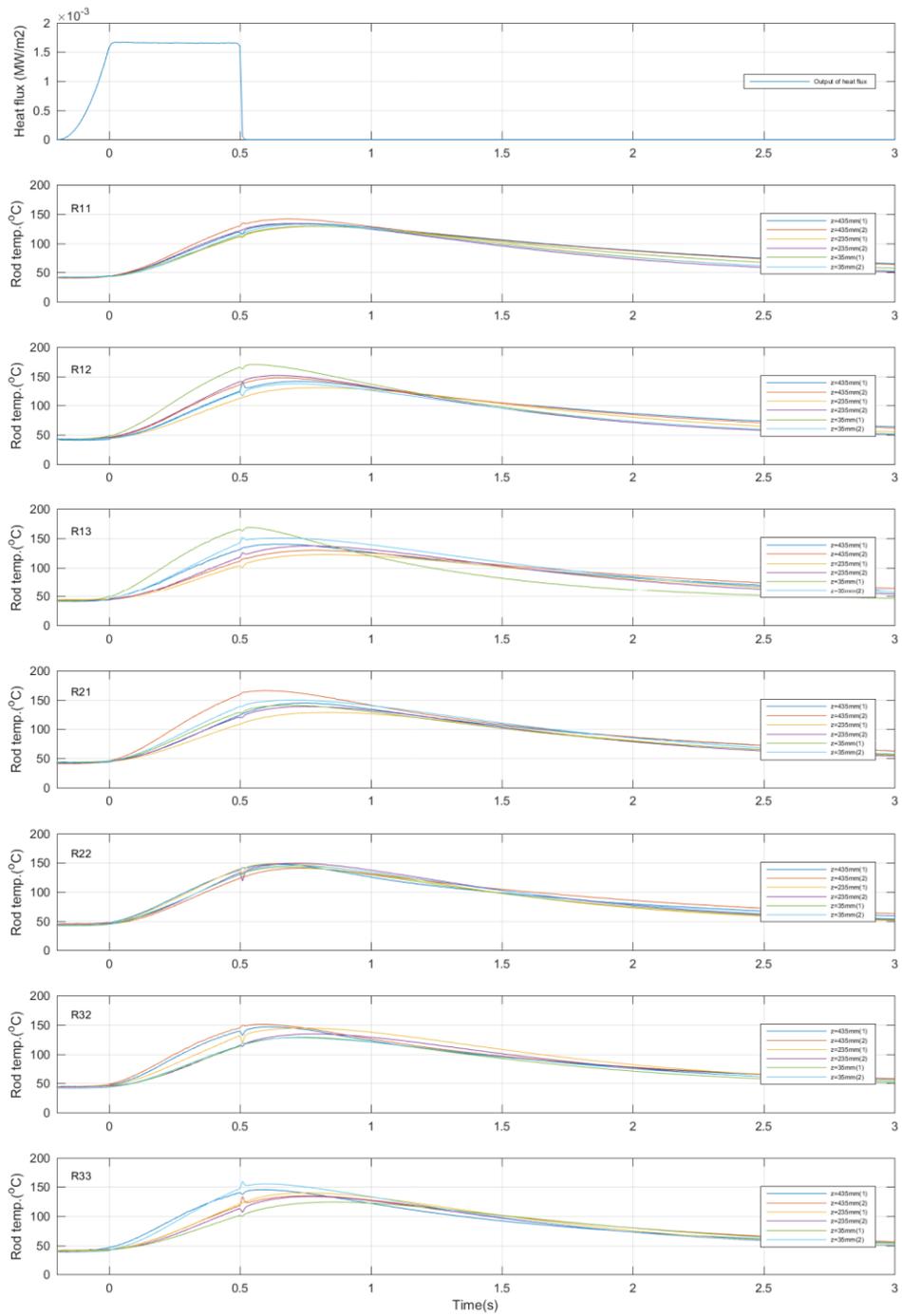


図 3-33 ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.5)

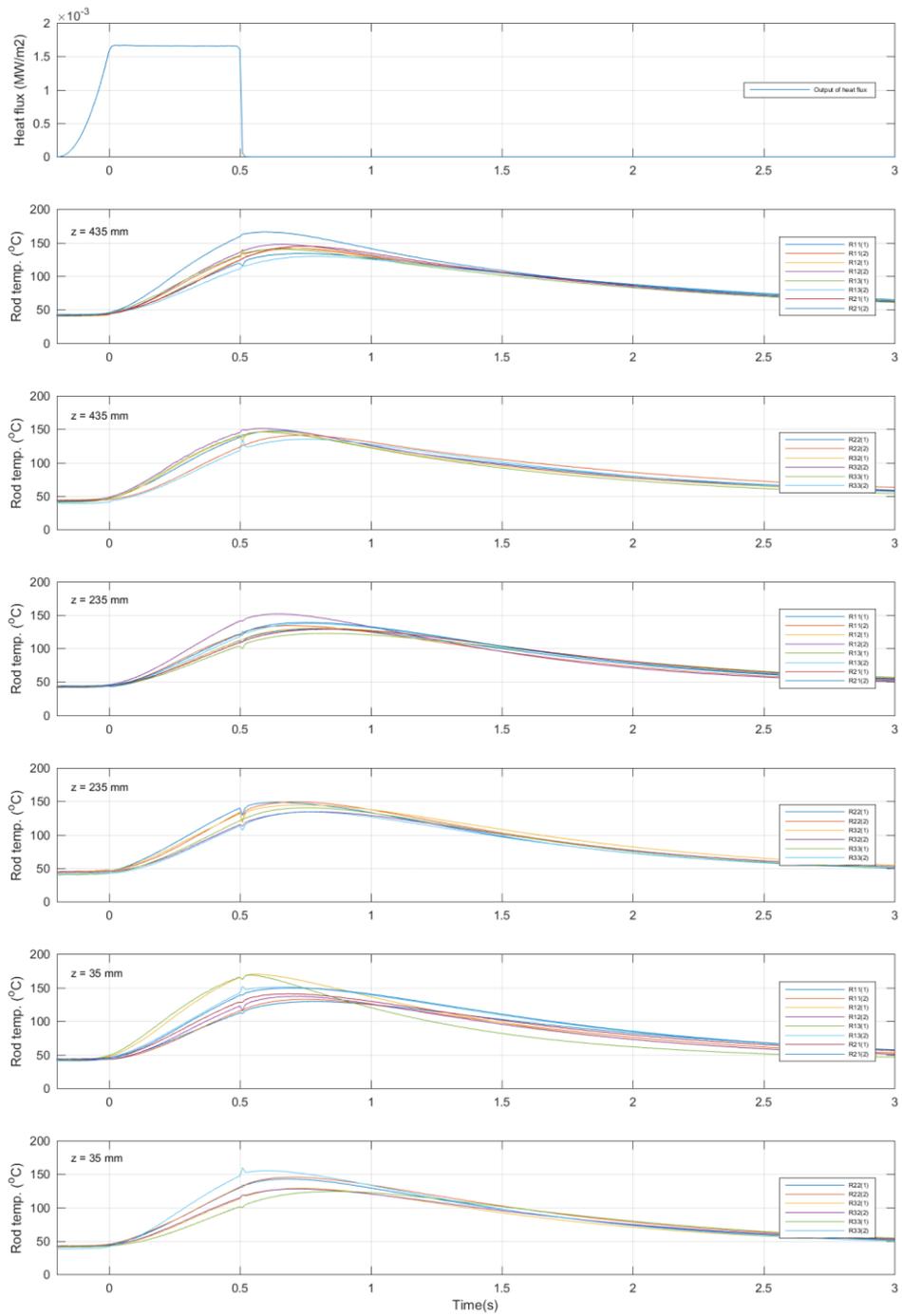


図 3-34 高さごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.5)

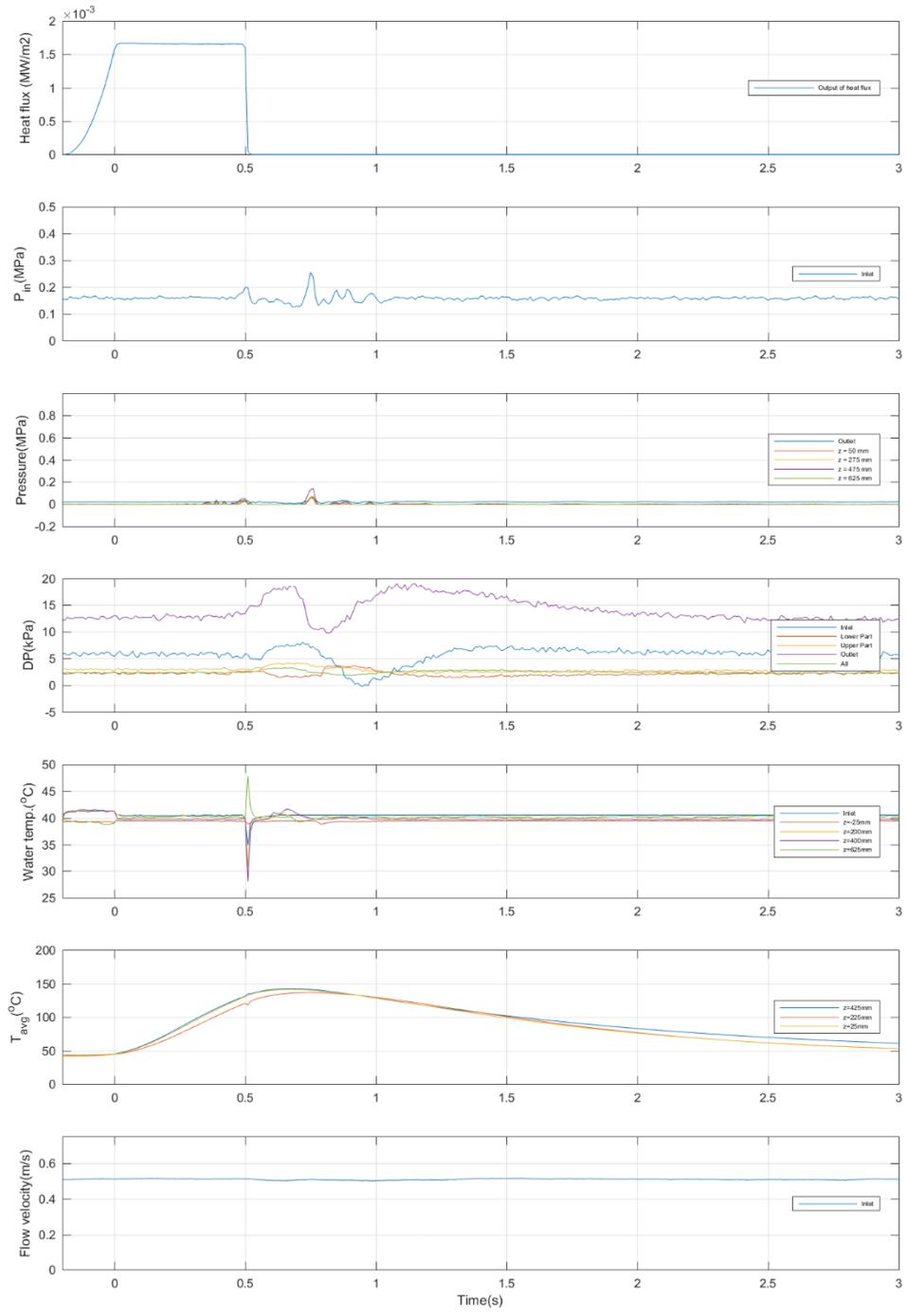


図 3-35 その他計測値の時間変化 (Run No.5)

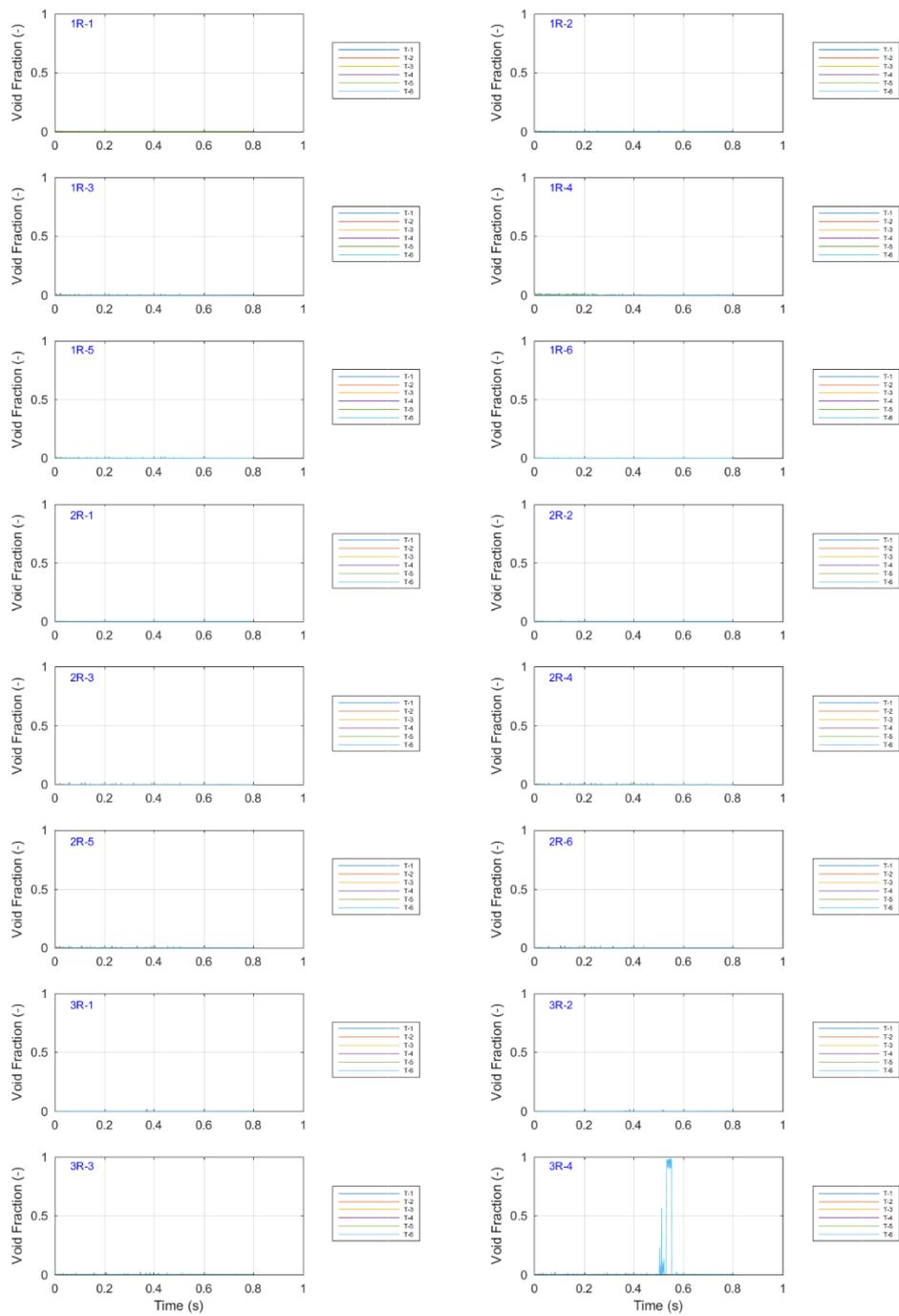


図 3-36 ボイド率の時間変化 (Run No.5/①)

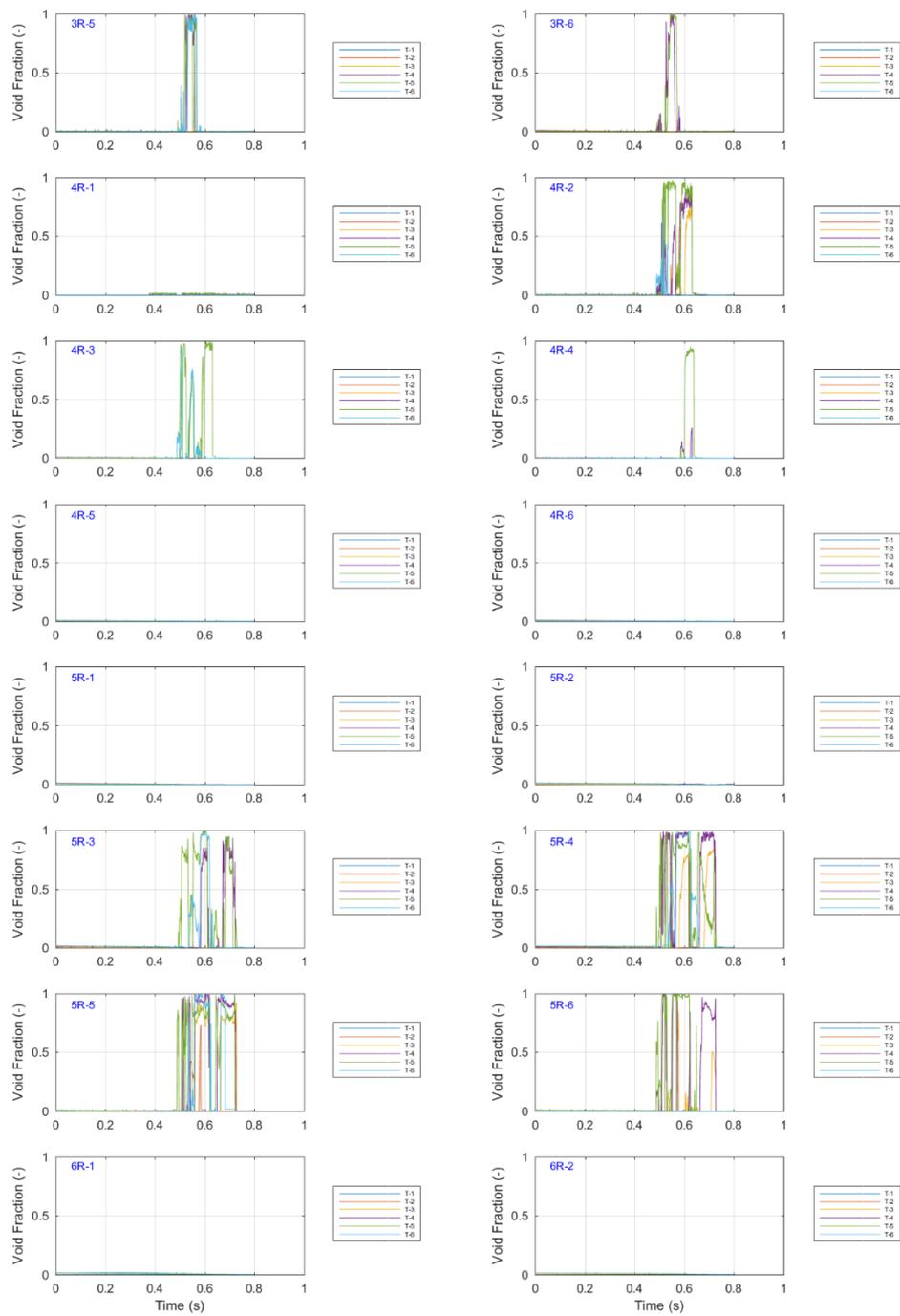


図 3-37 ボイド率の時間変化 (Run No.5/②)

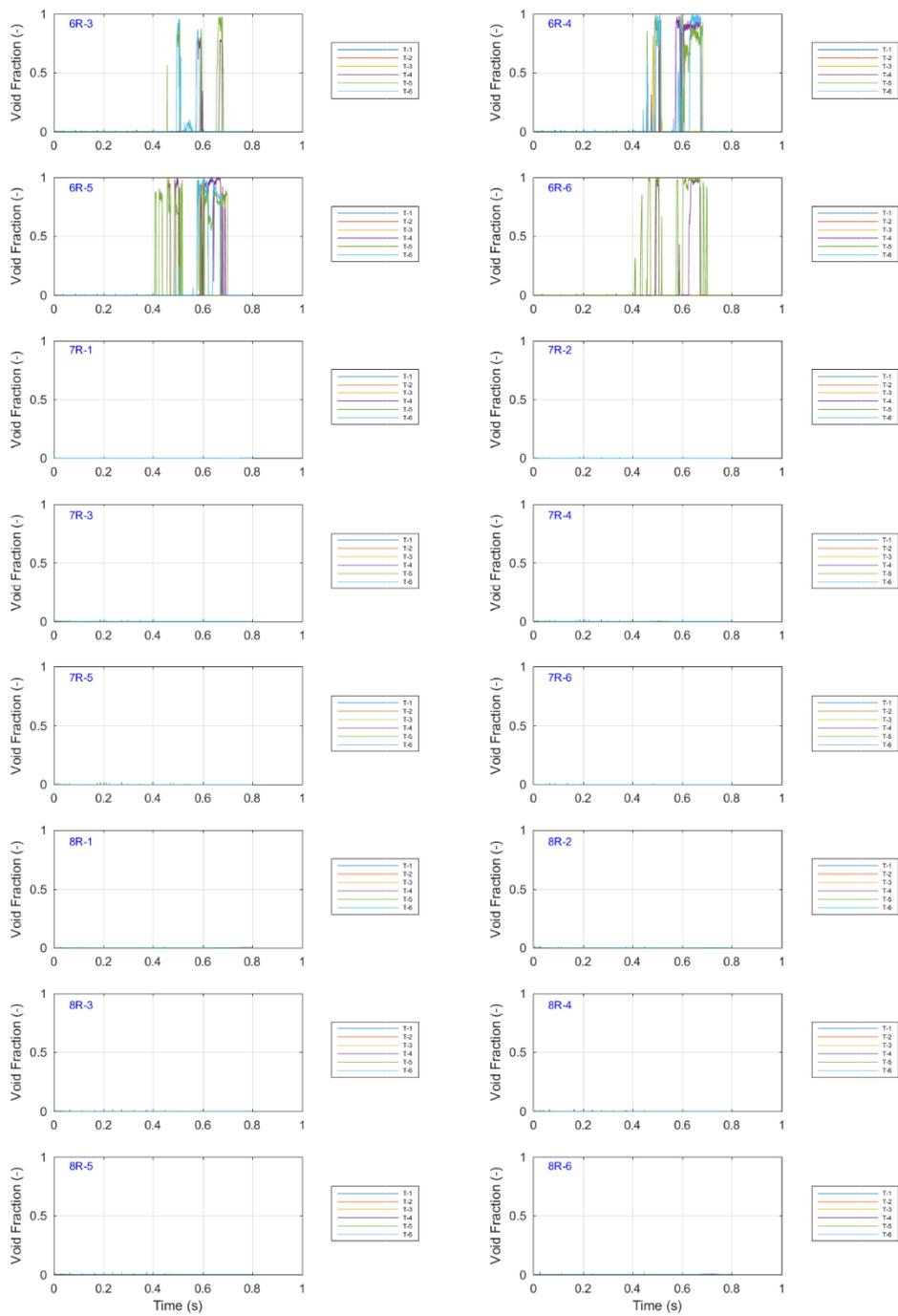


図 3-38 ボイド率の時間変化 (Run No.5/③)

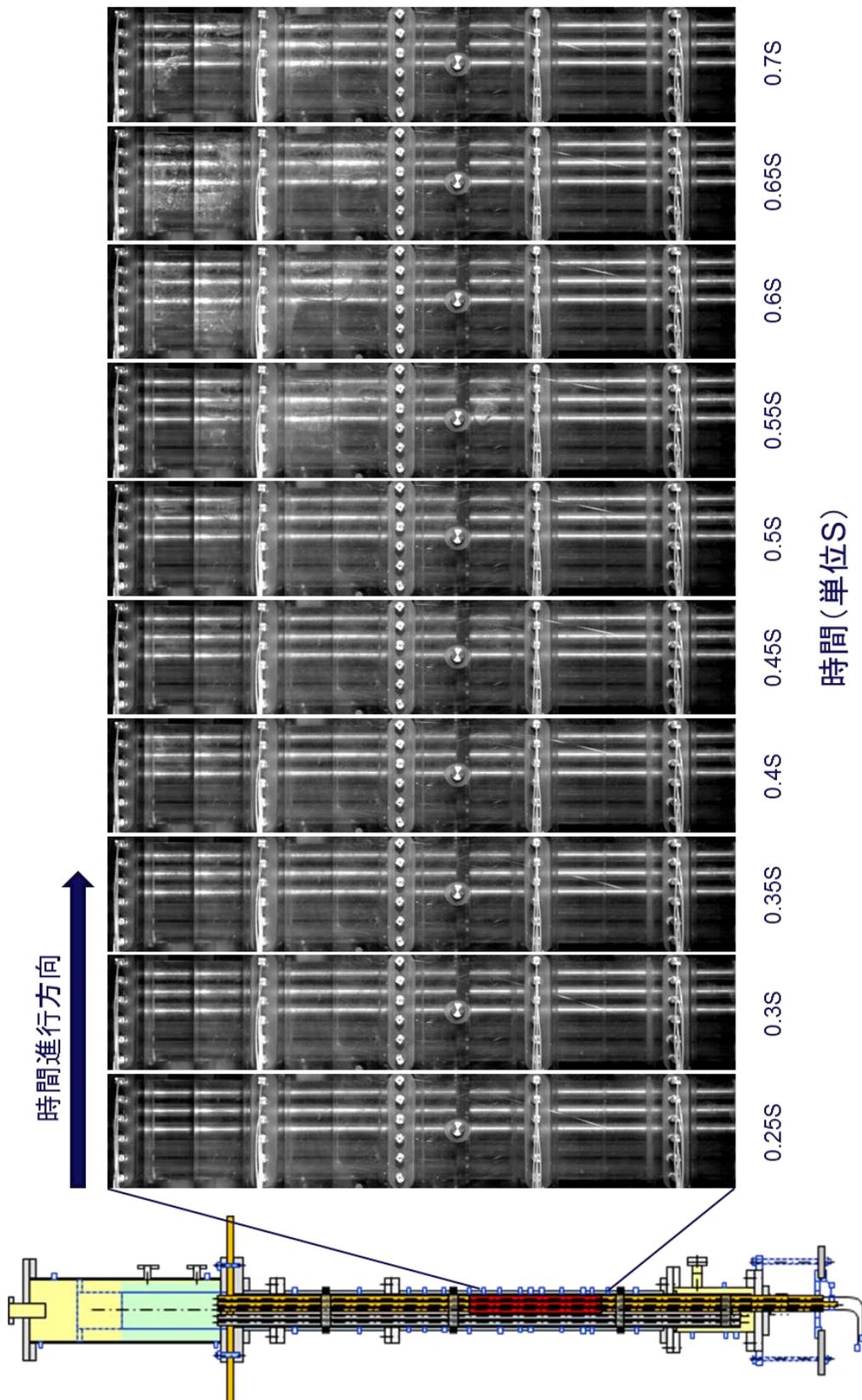


図 3-39 ポイド挙動の可視化画像 (Run No. 5)

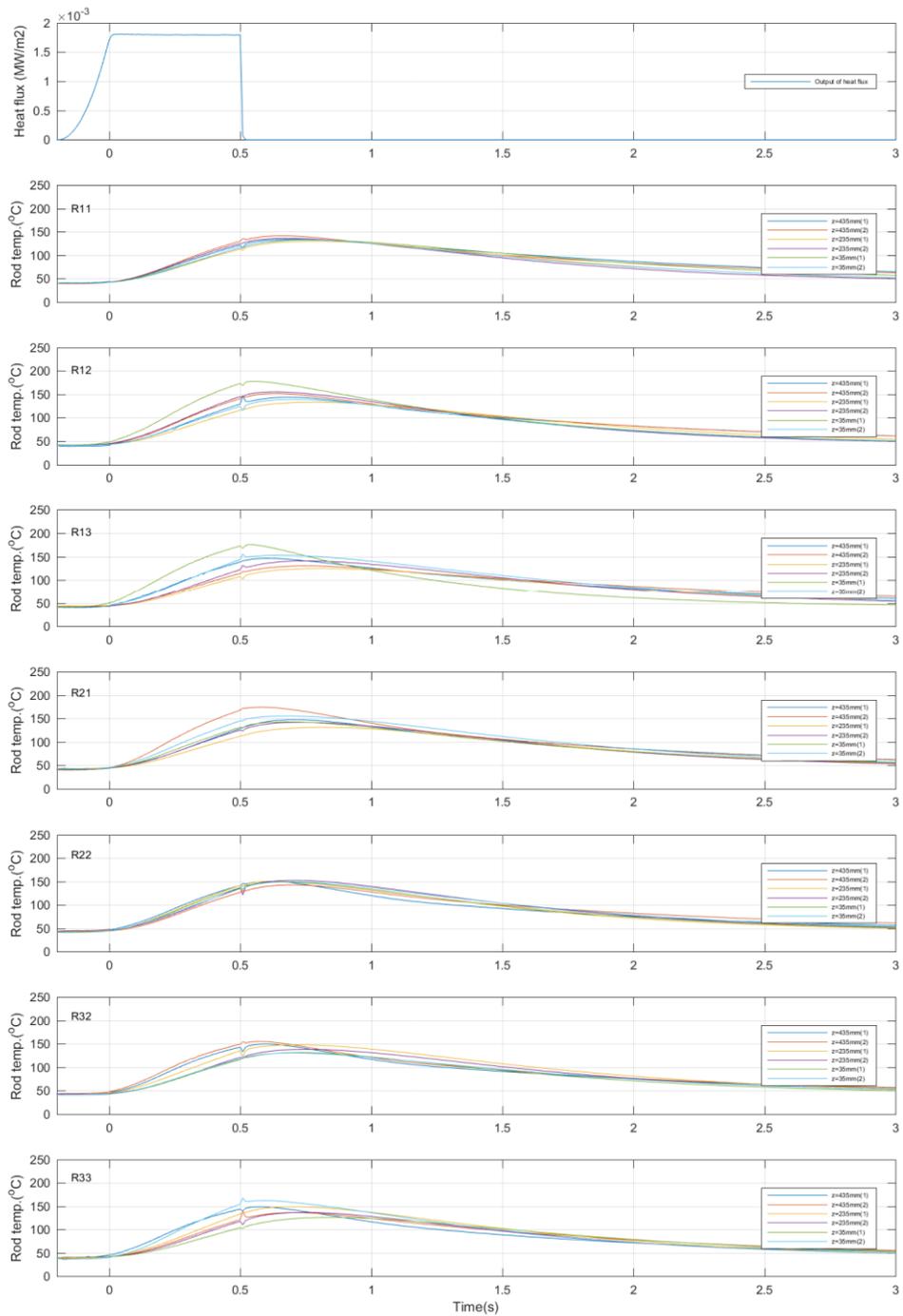


図 3-40 ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.6)

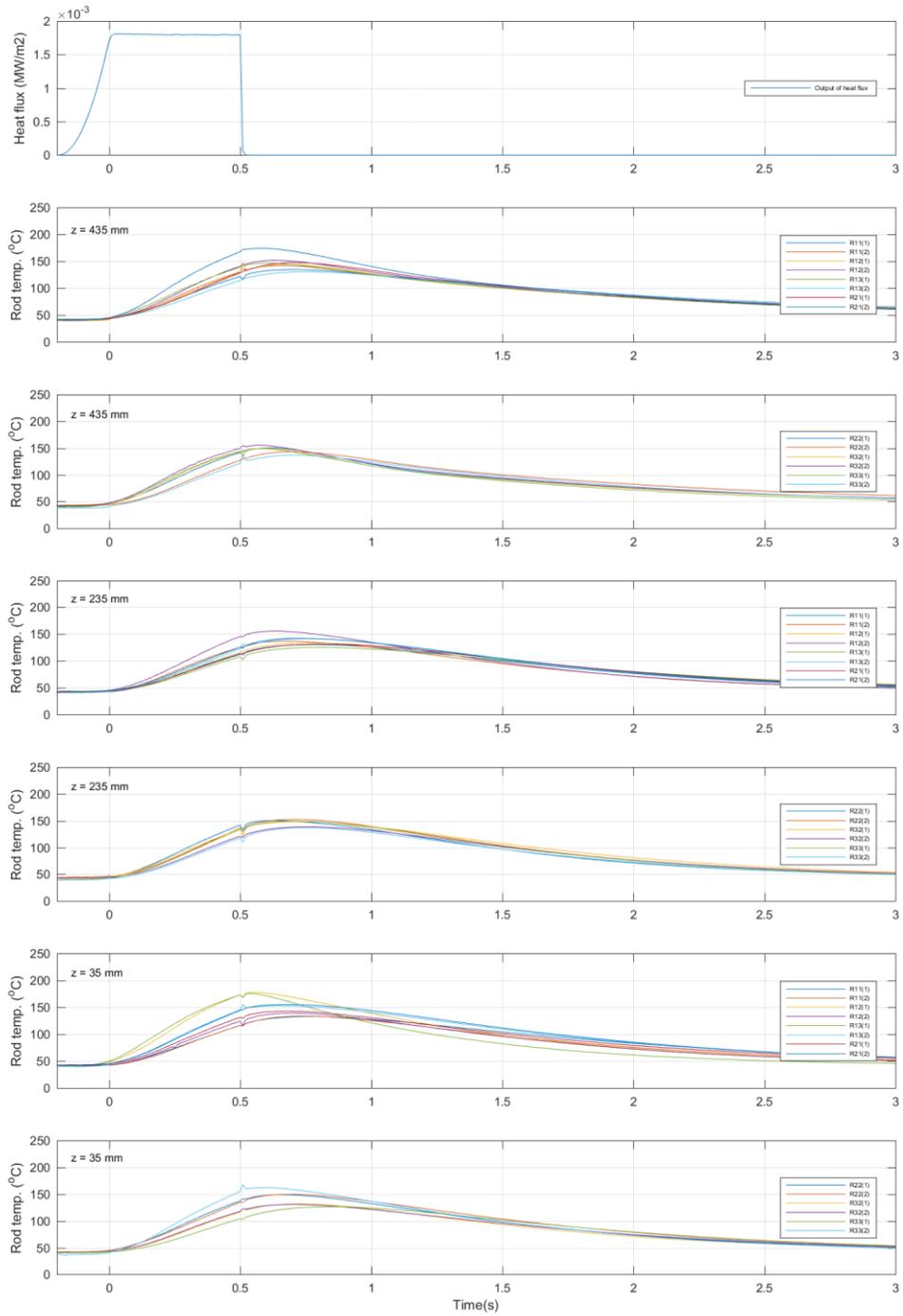


図 3-41 高さごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.6)

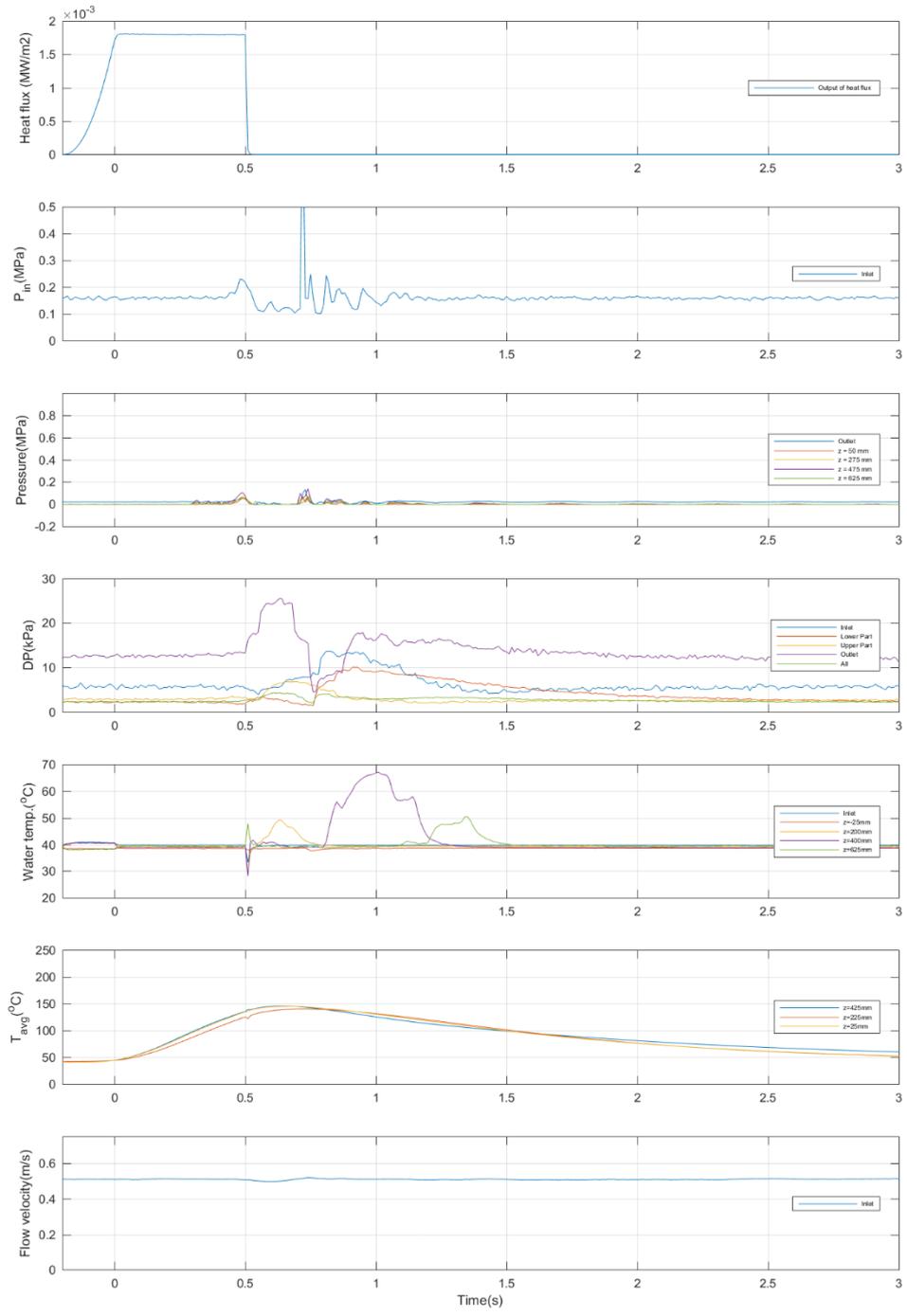


図 3-42 その他計測値の時間変化 (Run No.6)

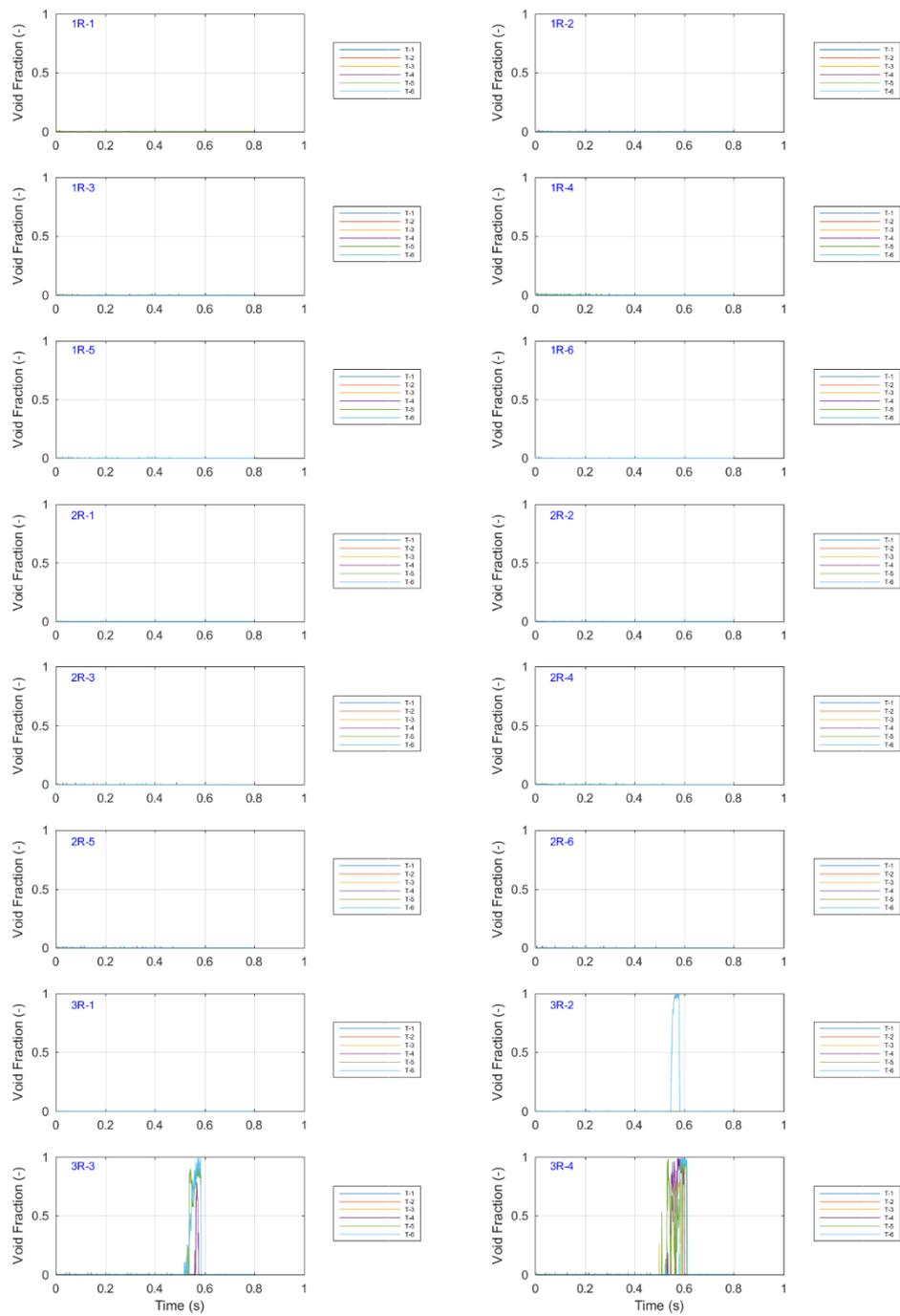


図 3-43 ボイド率の時間変化 (Run No.6/①)

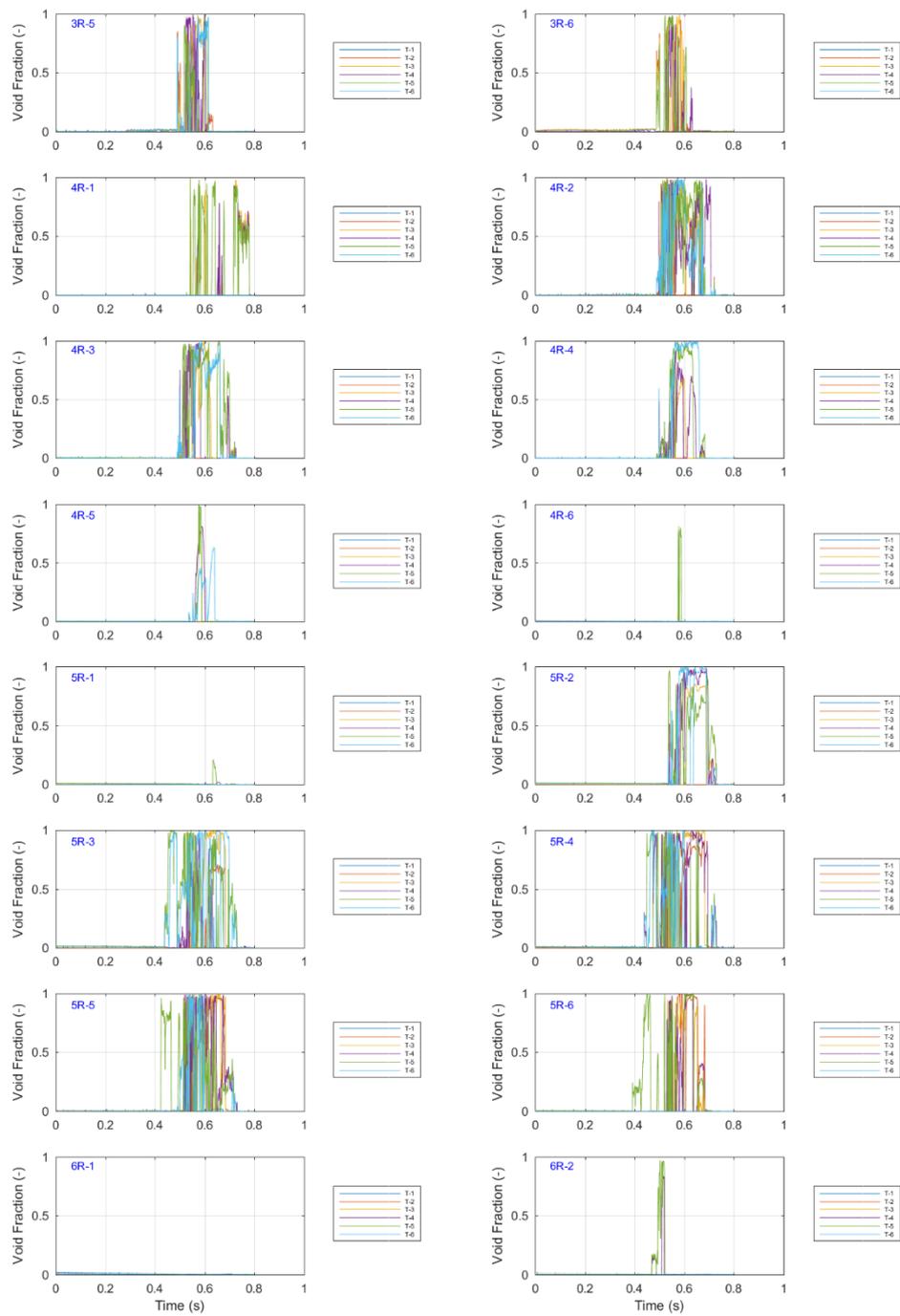


図 3-44 ボイド率の時間変化 (Run No.6/②)

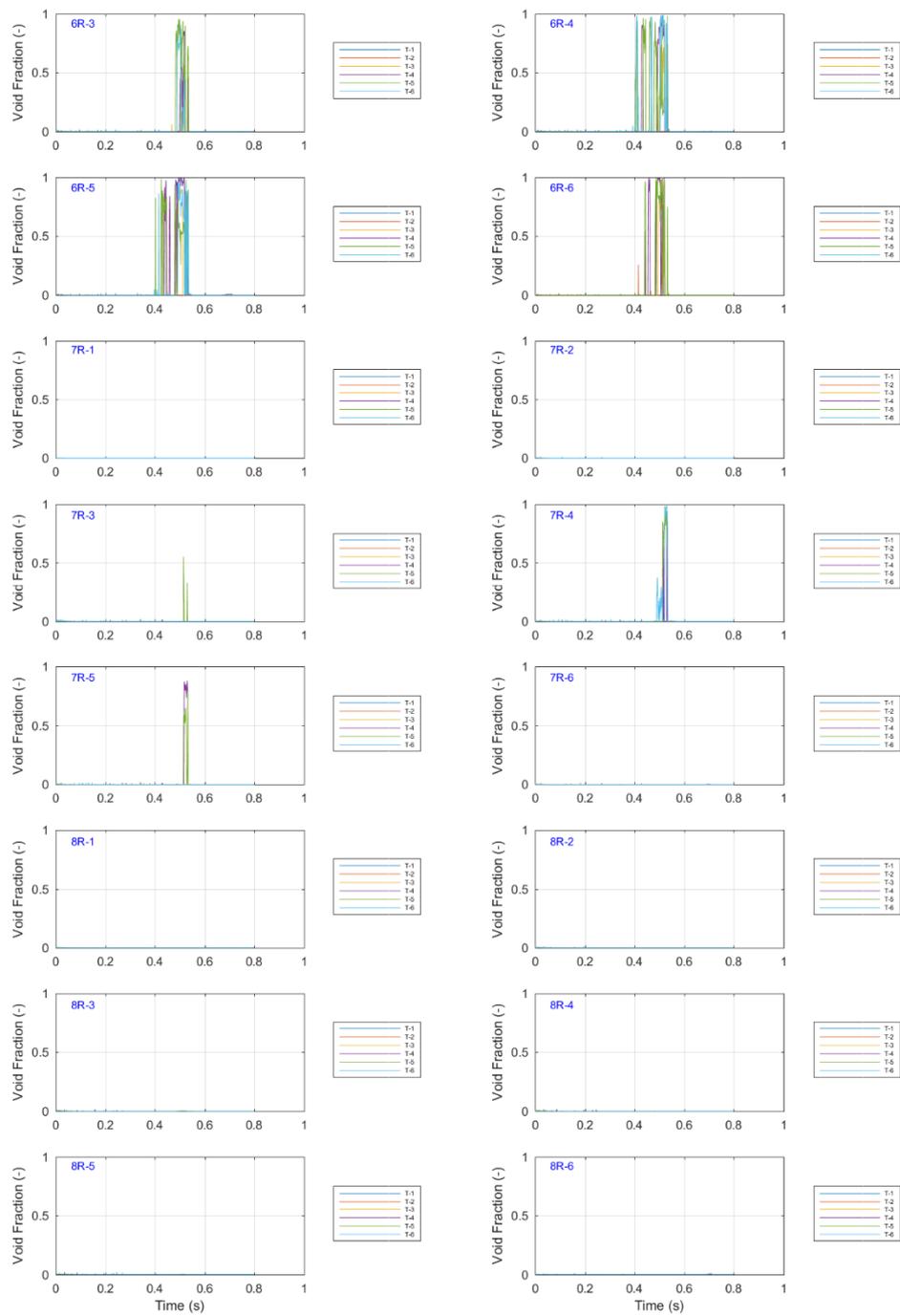


図 3-45 ボイド率の時間変化 (Run No.6/③)

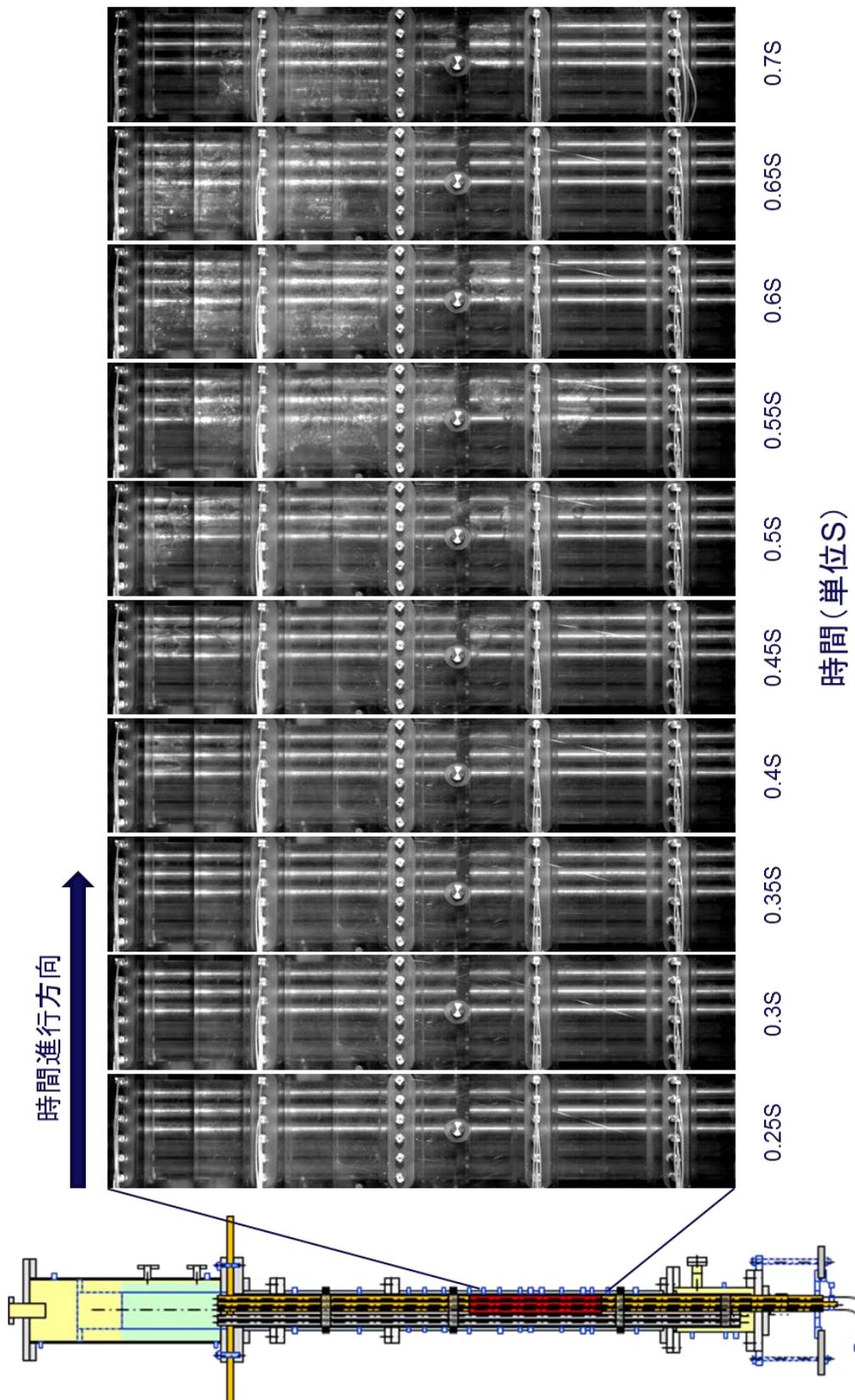


図 3-46 ポイド挙動の可視化画像 (Run No. 6)

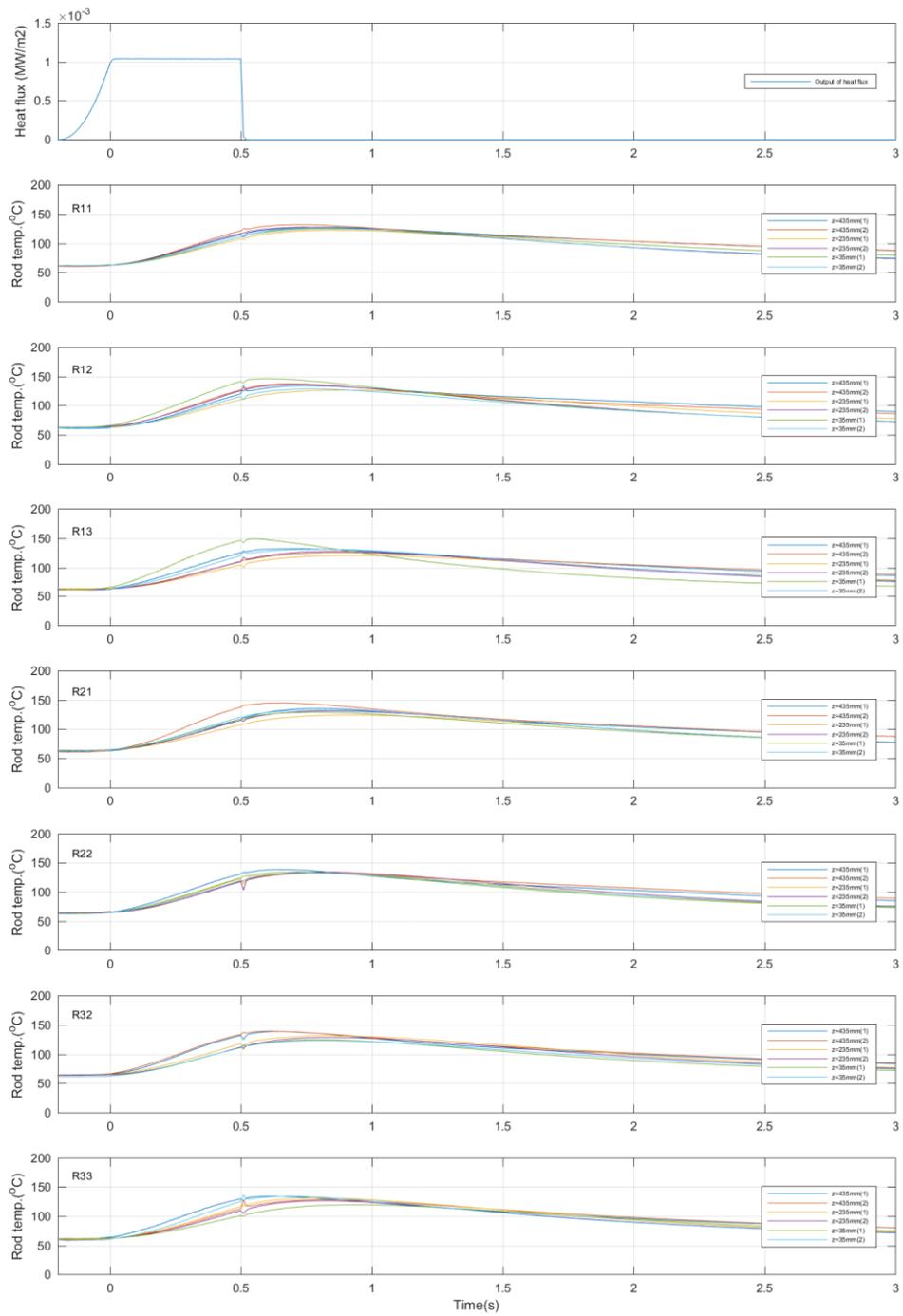


図 3-47 ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.7)

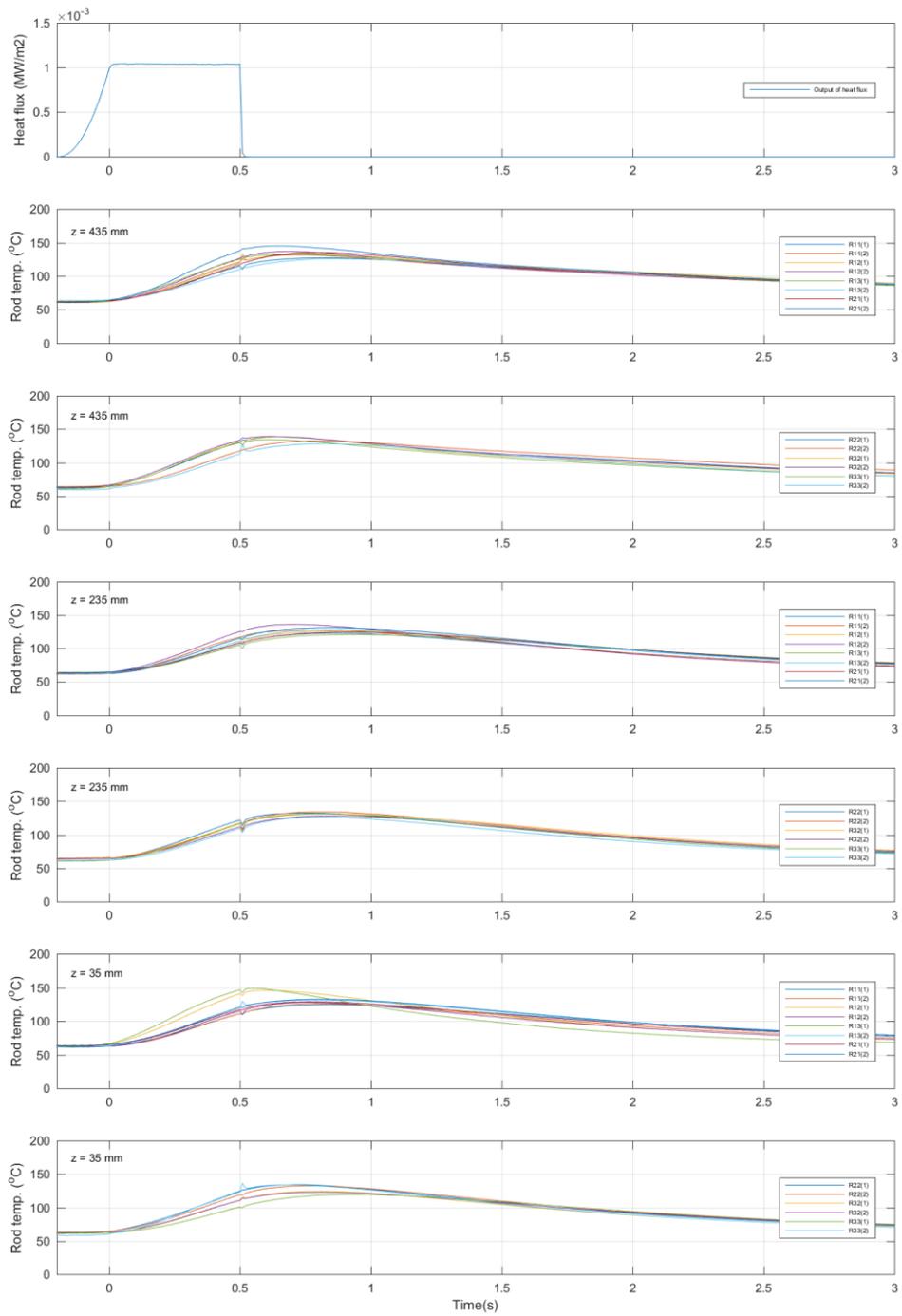


図 3-48 高さごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.7)

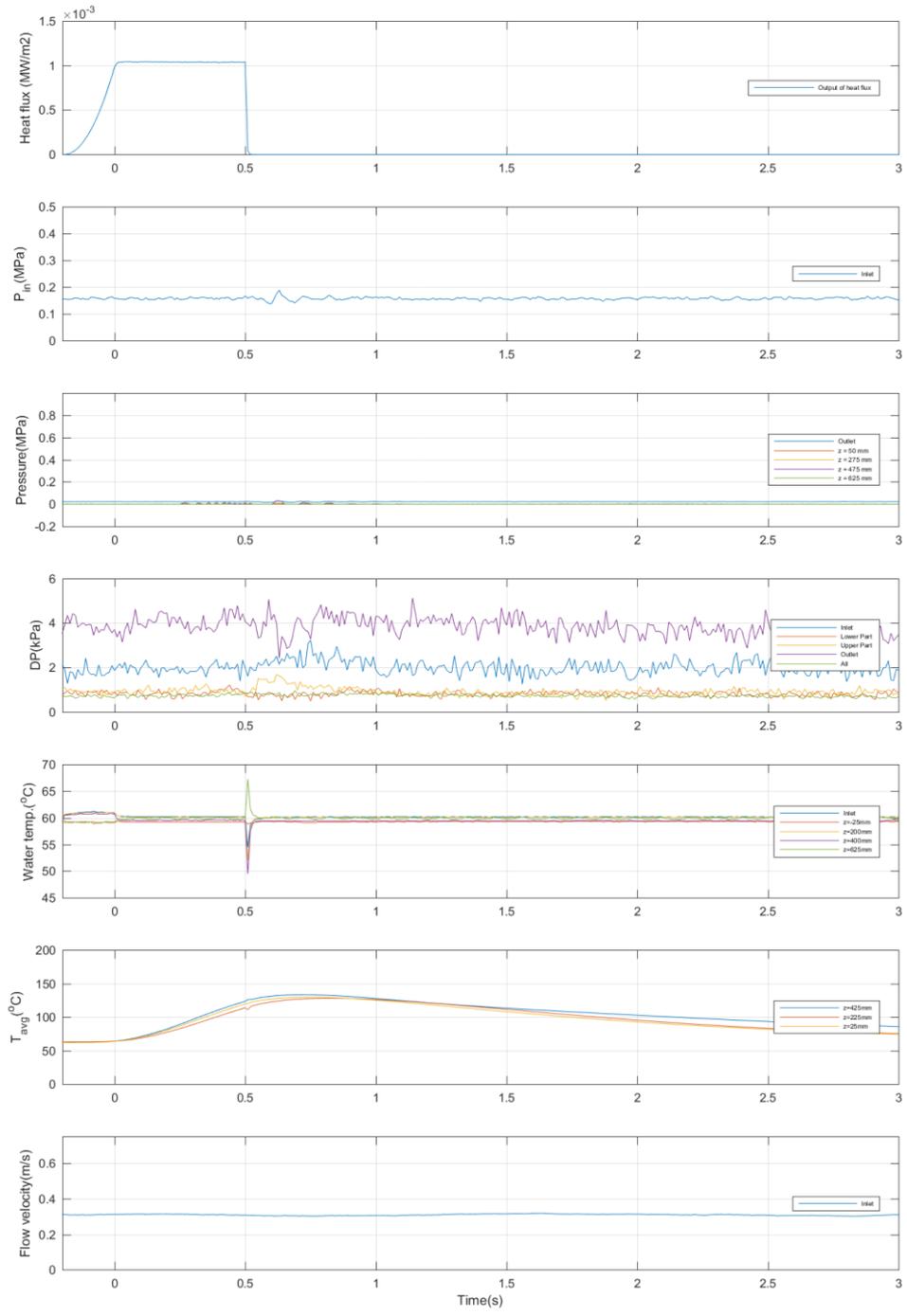


図 3-49 その他計測値の時間変化 (Run No.7)

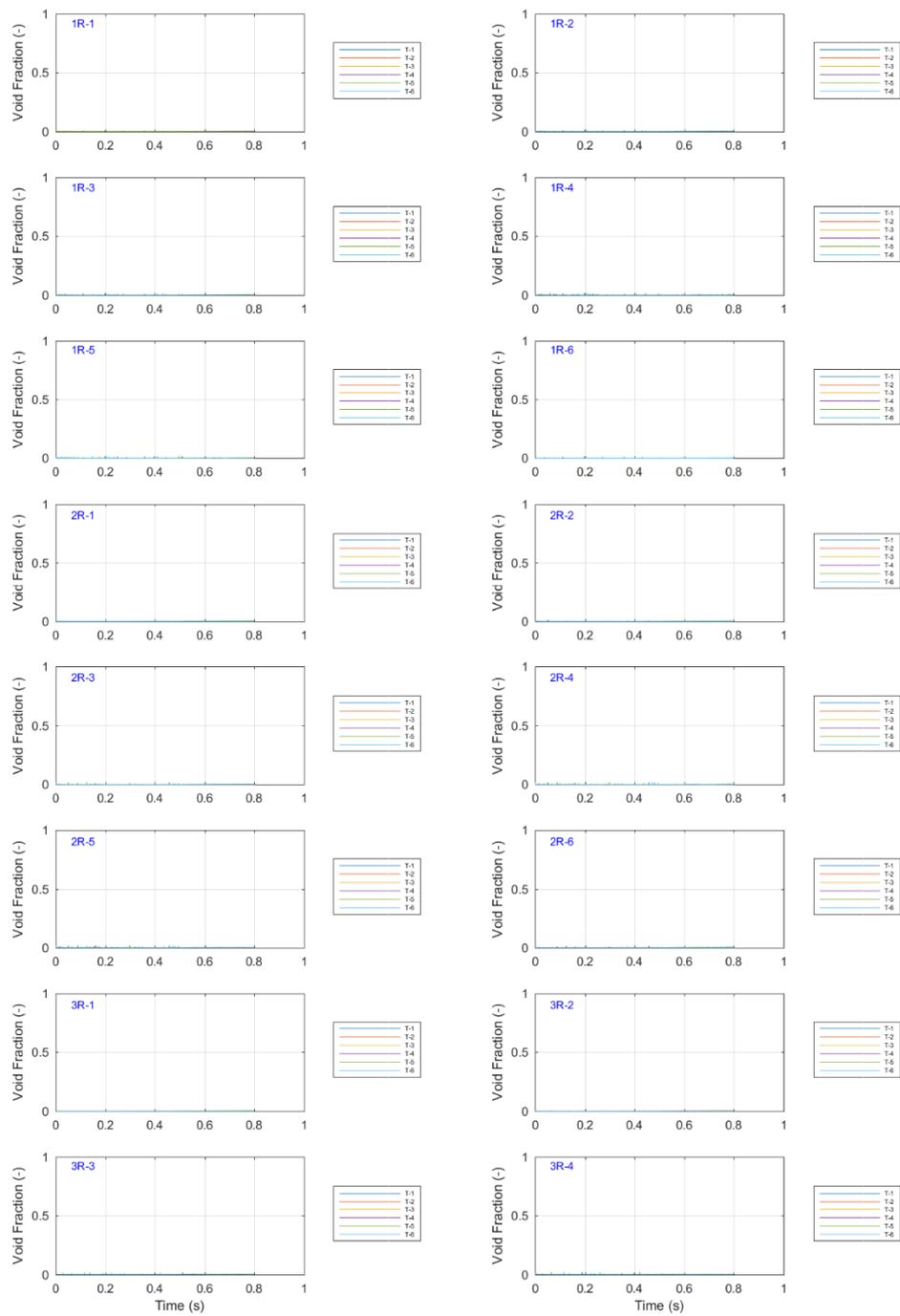


図 3-50 ボイド率の時間変化 (Run No.7/①)

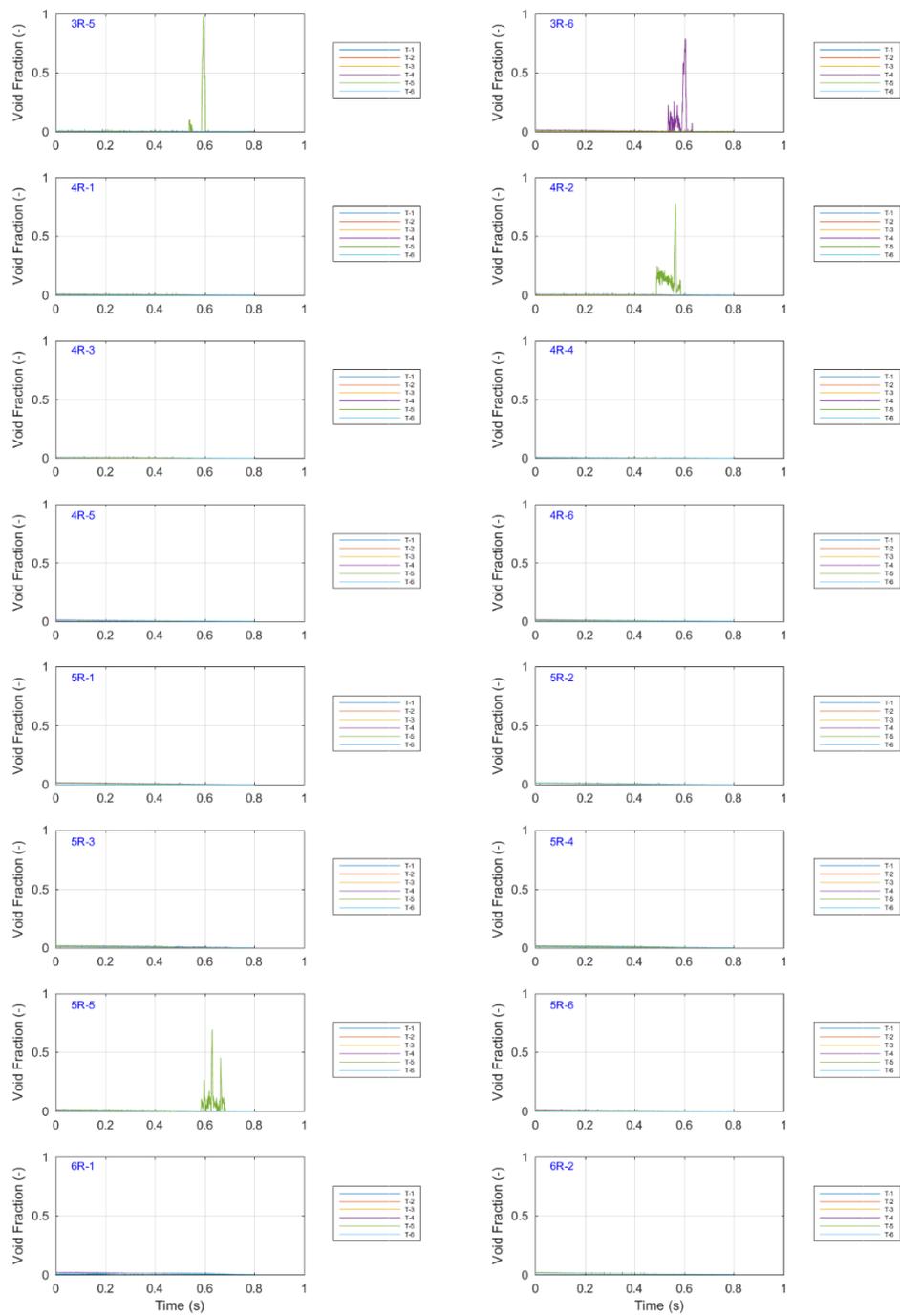


図 3-51 ボイド率の時間変化 (Run No.7/②)

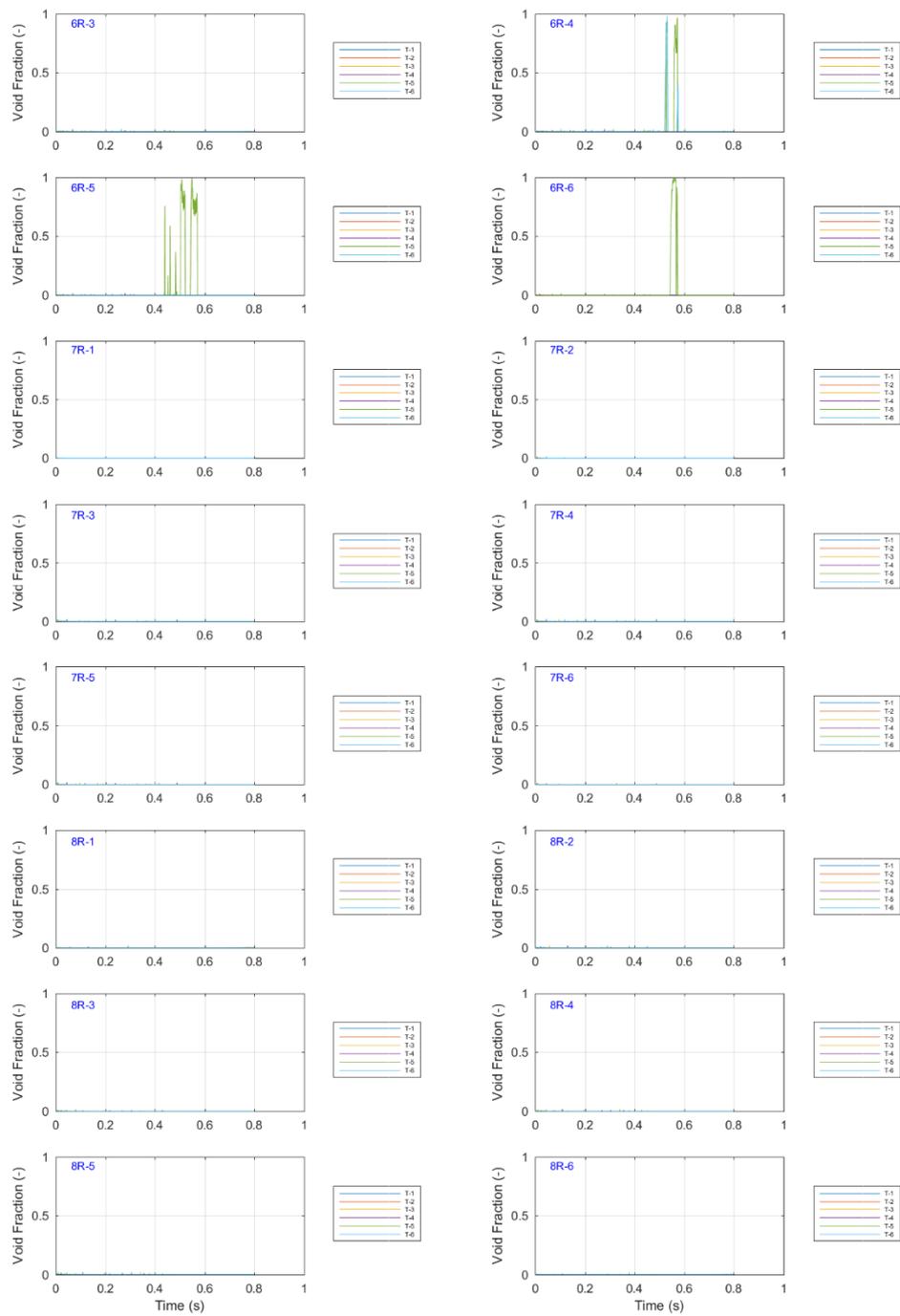


図 3-52 ボイド率の時間変化 (Run No.7/③)

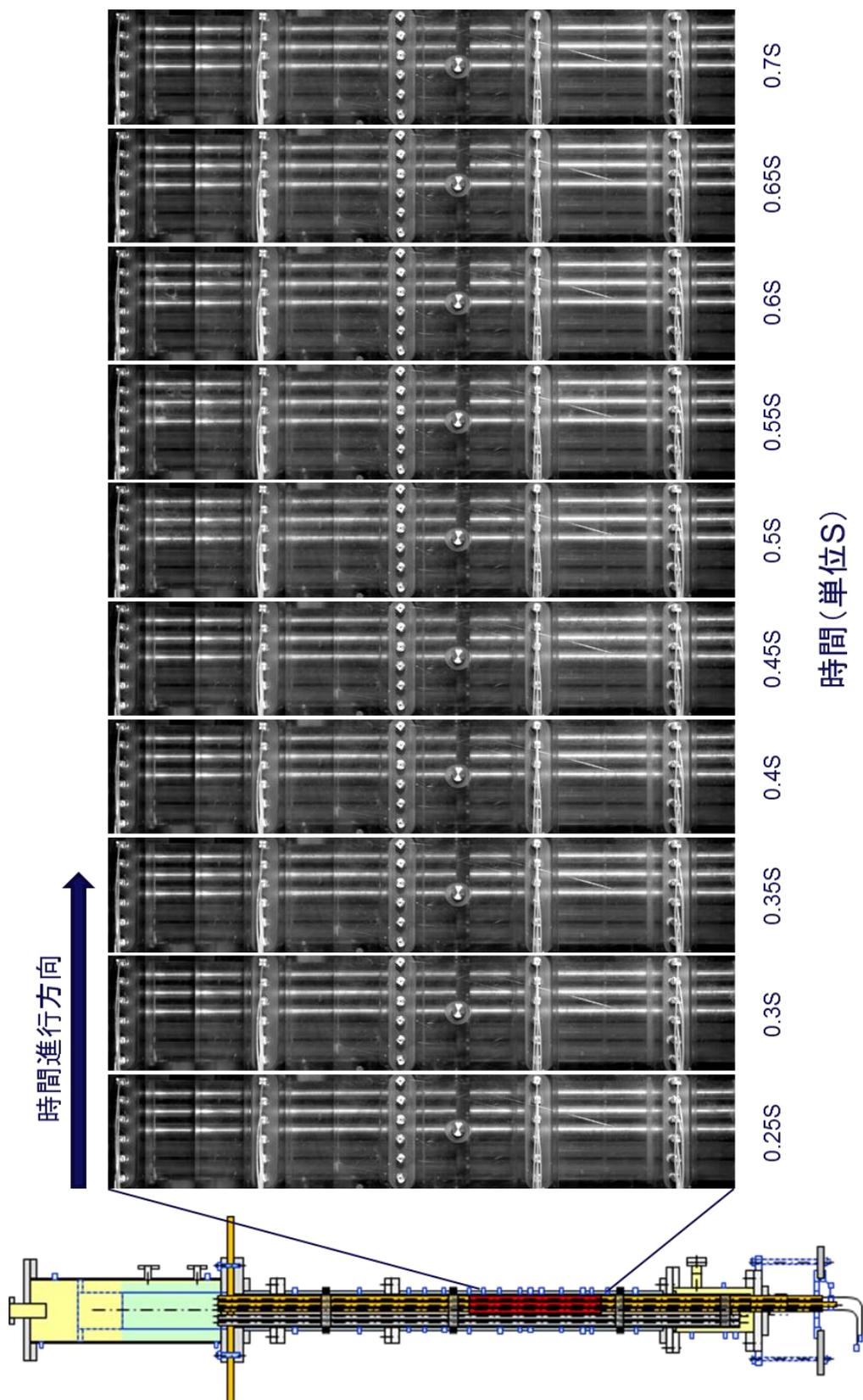


図 3-53 ポイド挙動の可視化画像 (Run No. 7)

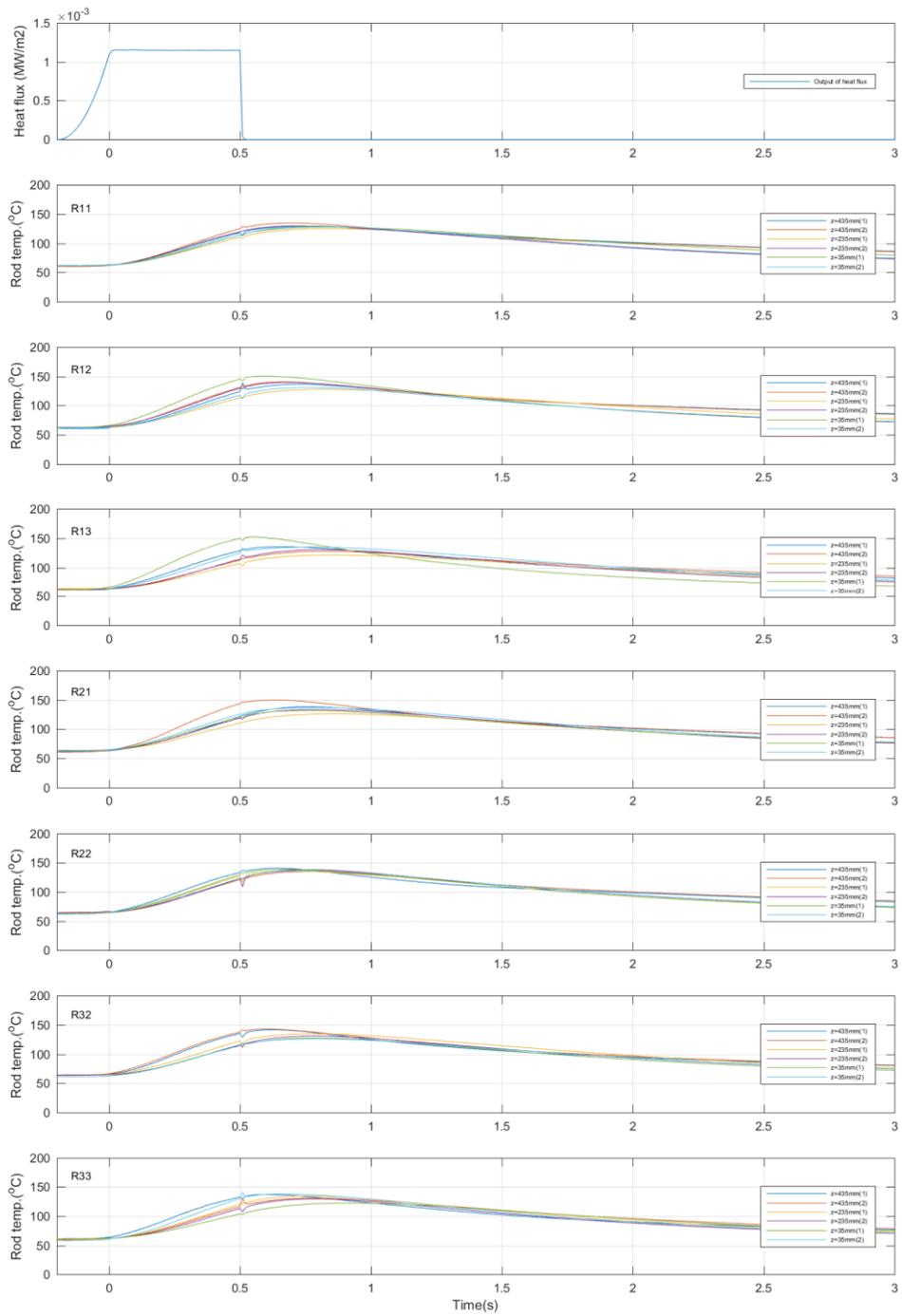


図 3-54 ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.8)

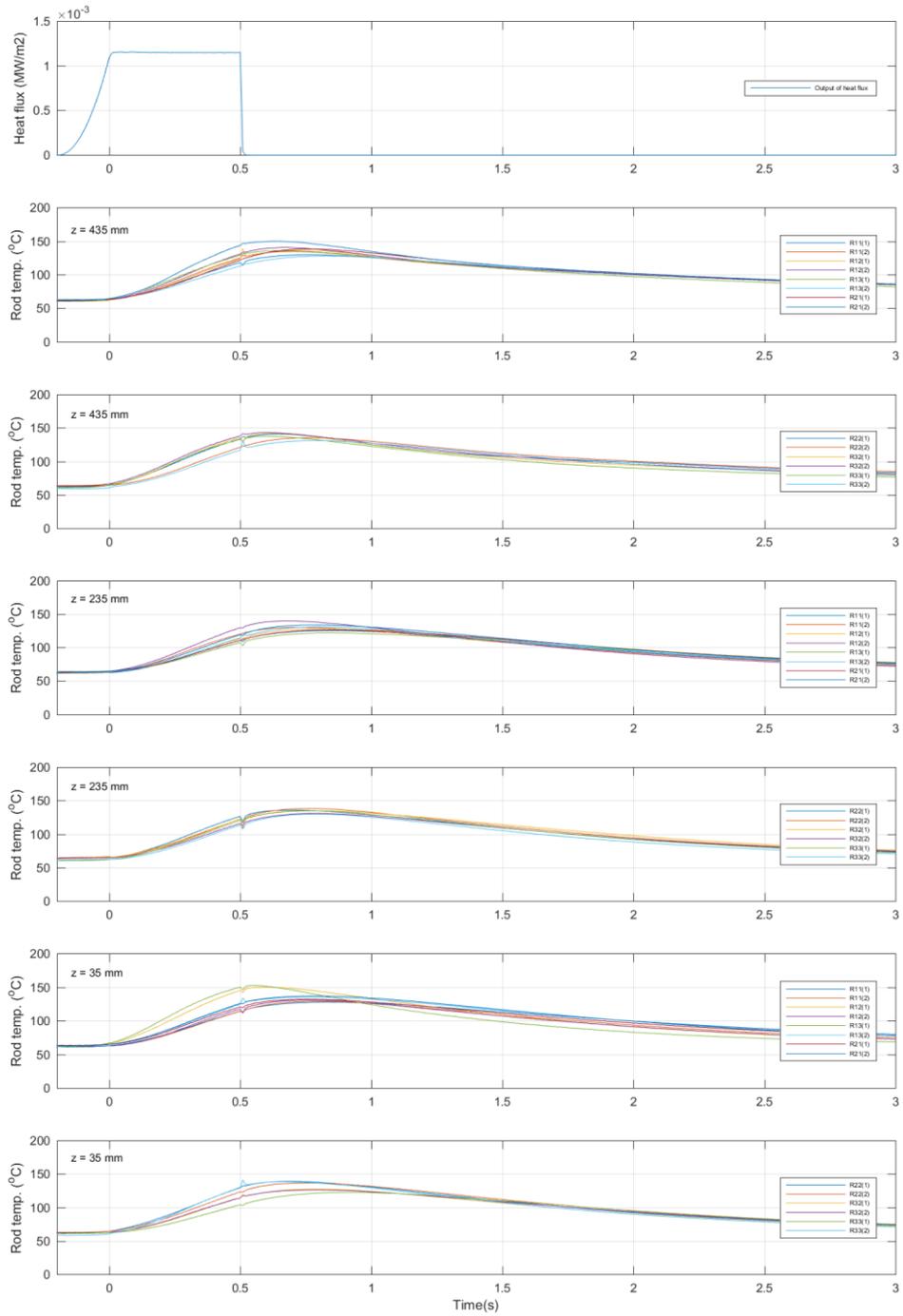


図 3-55 高さごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.8)

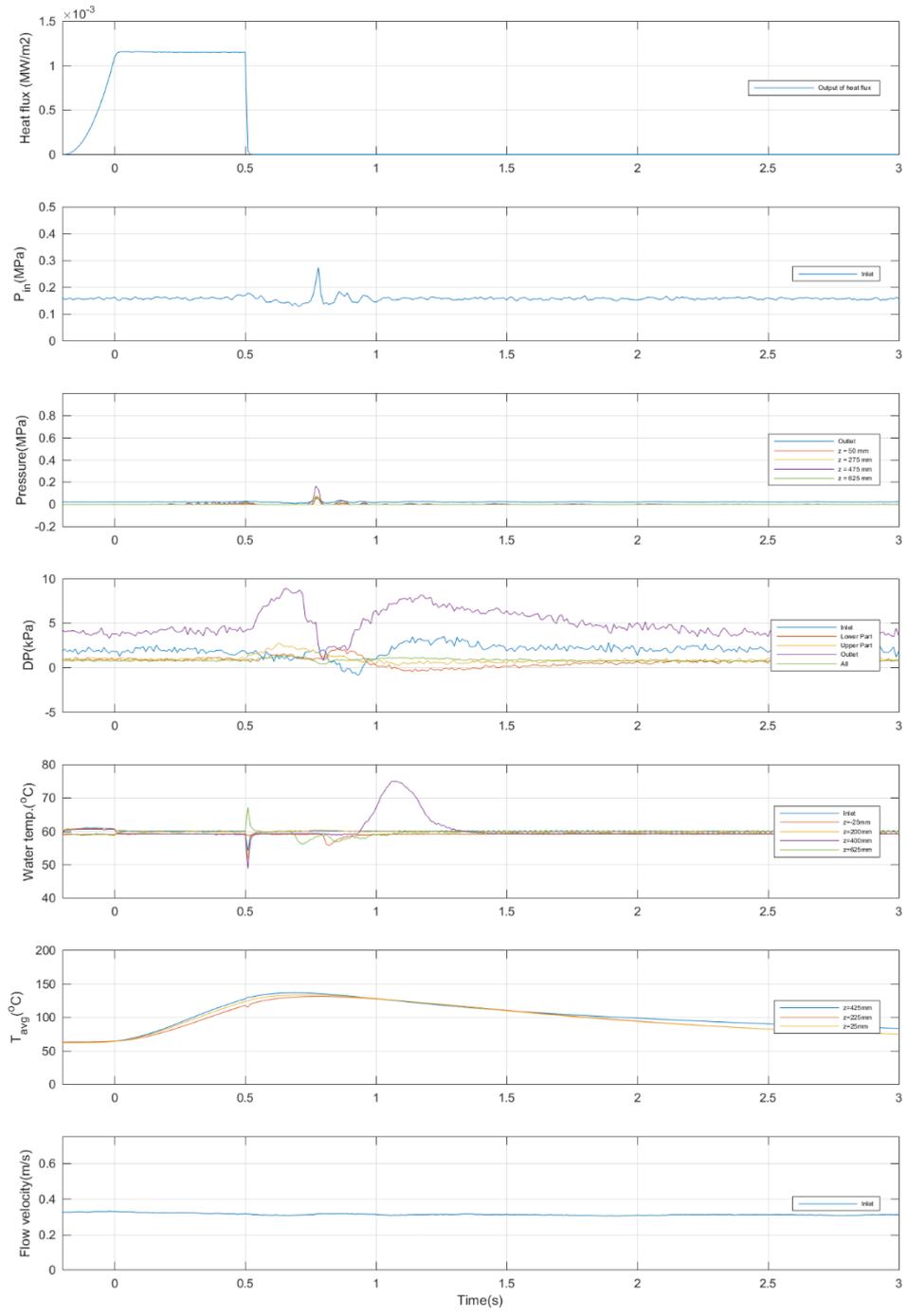


図 3-56 その他計測値の時間変化 (Run No.8)

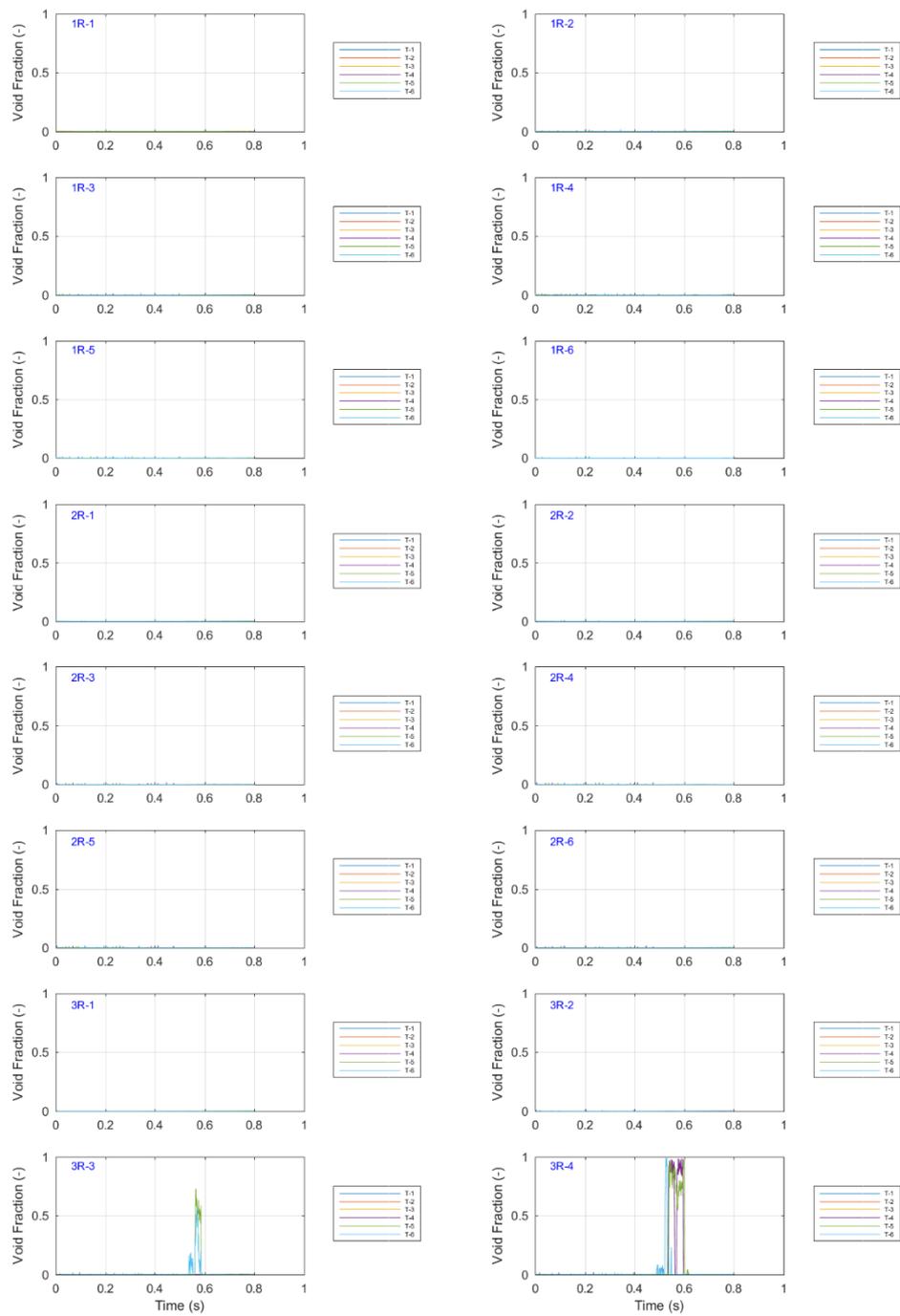


図 3-57 ボイド率の時間変化 (Run No.8/①)

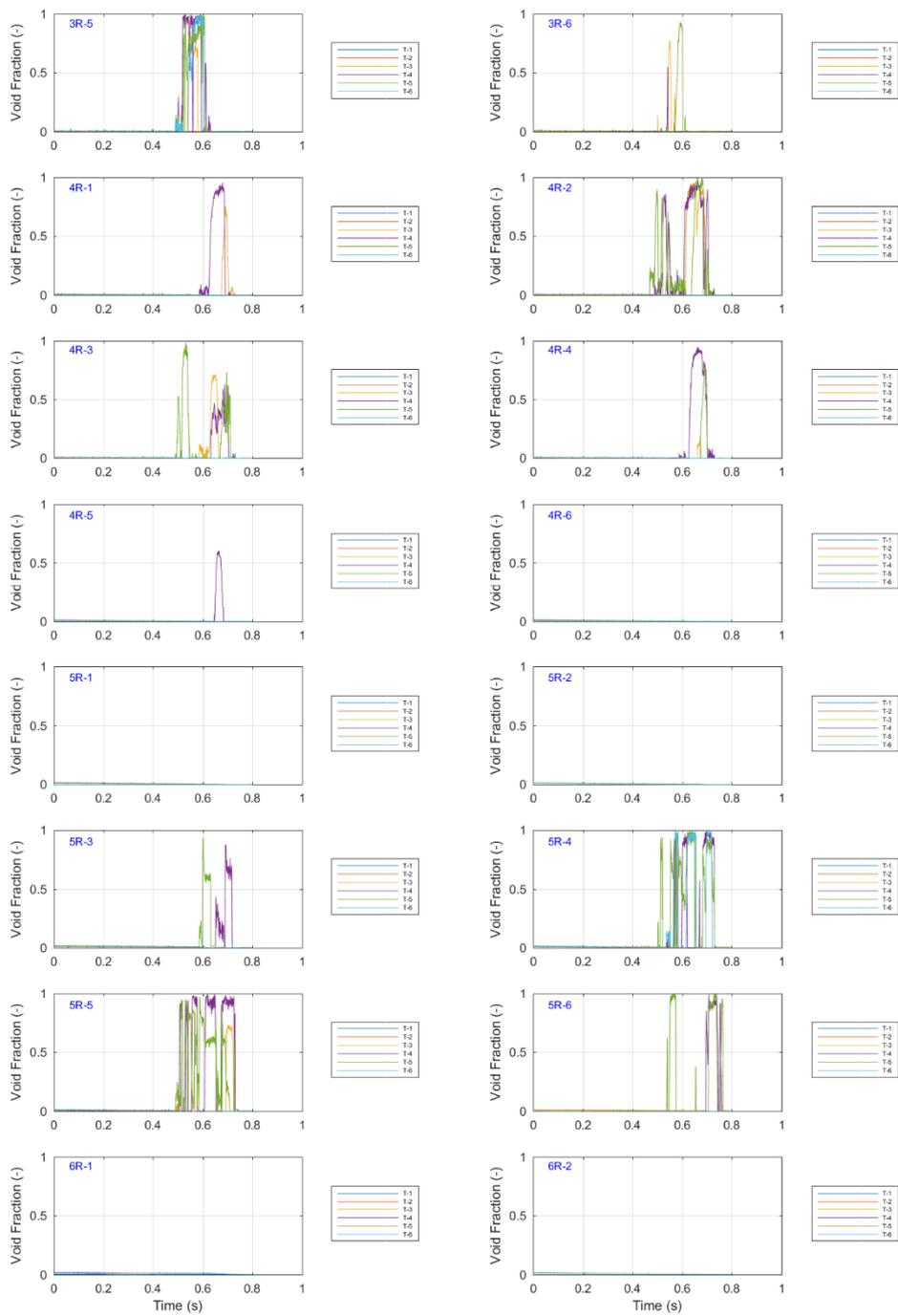


図 3-58 ボイド率の時間変化 (Run No.8/②)

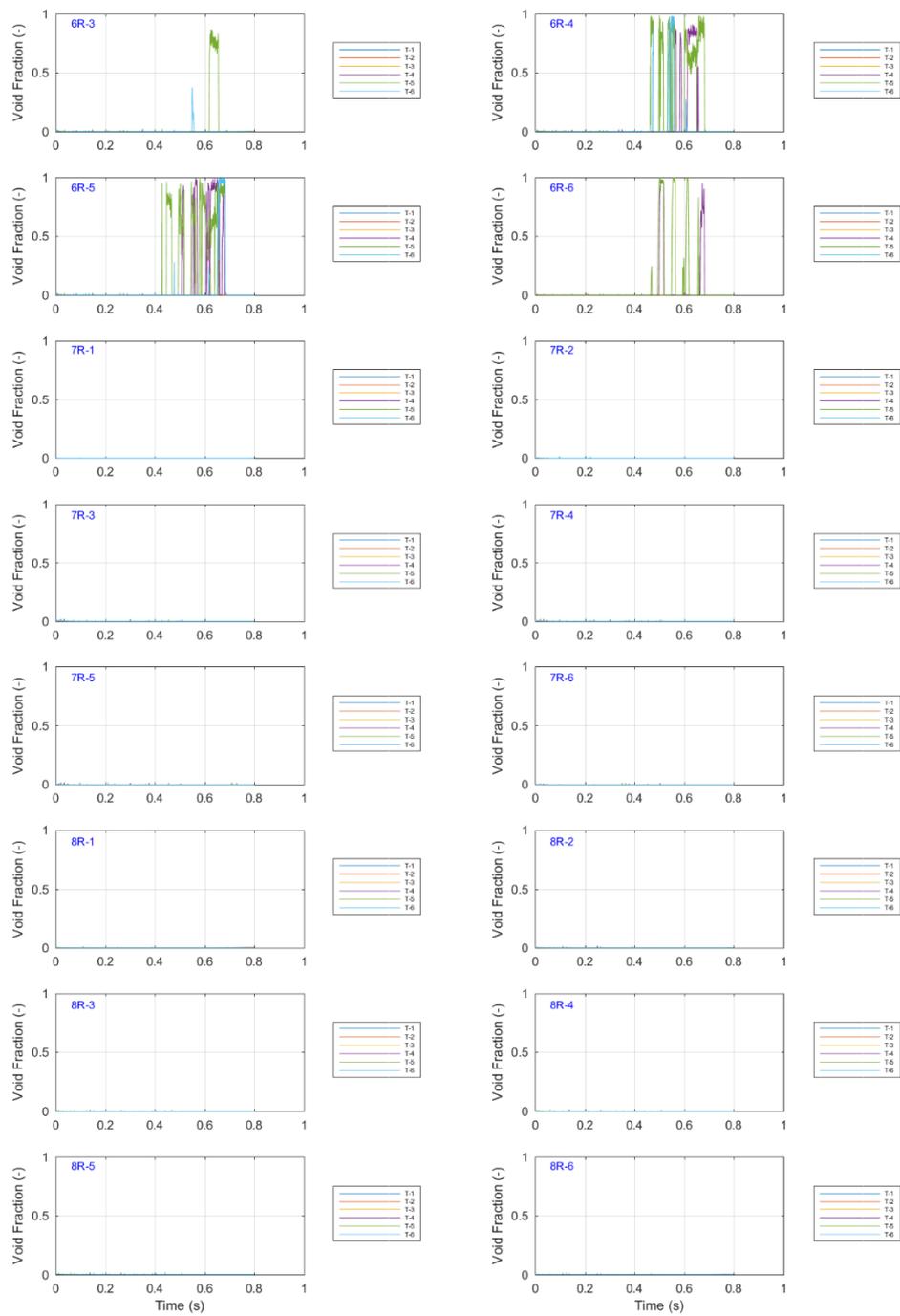


図 3-59 ボイド率の時間変化 (Run No.8/③)

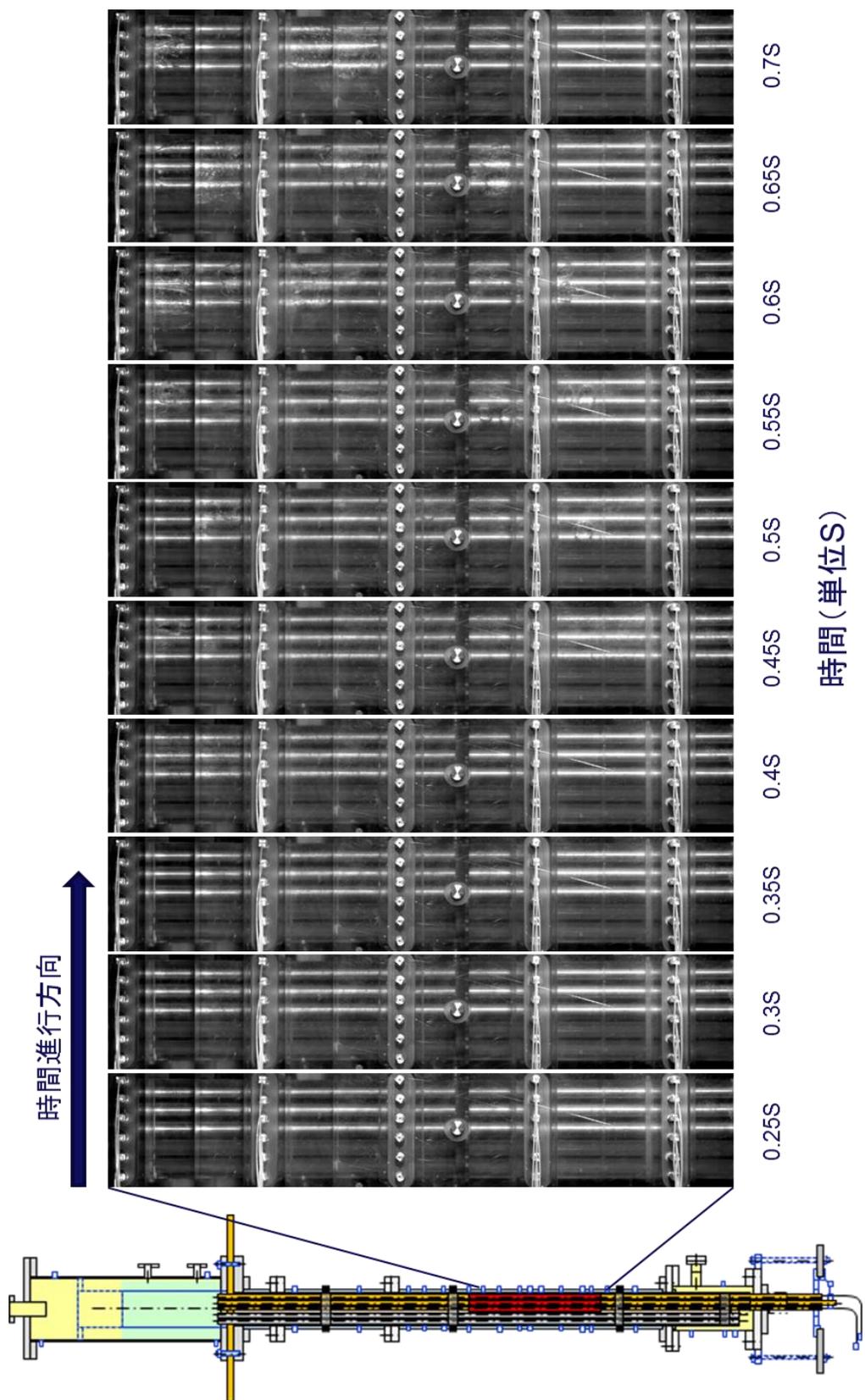


図 3-60 ポイド挙動の可視化画像 (Run No. 8)

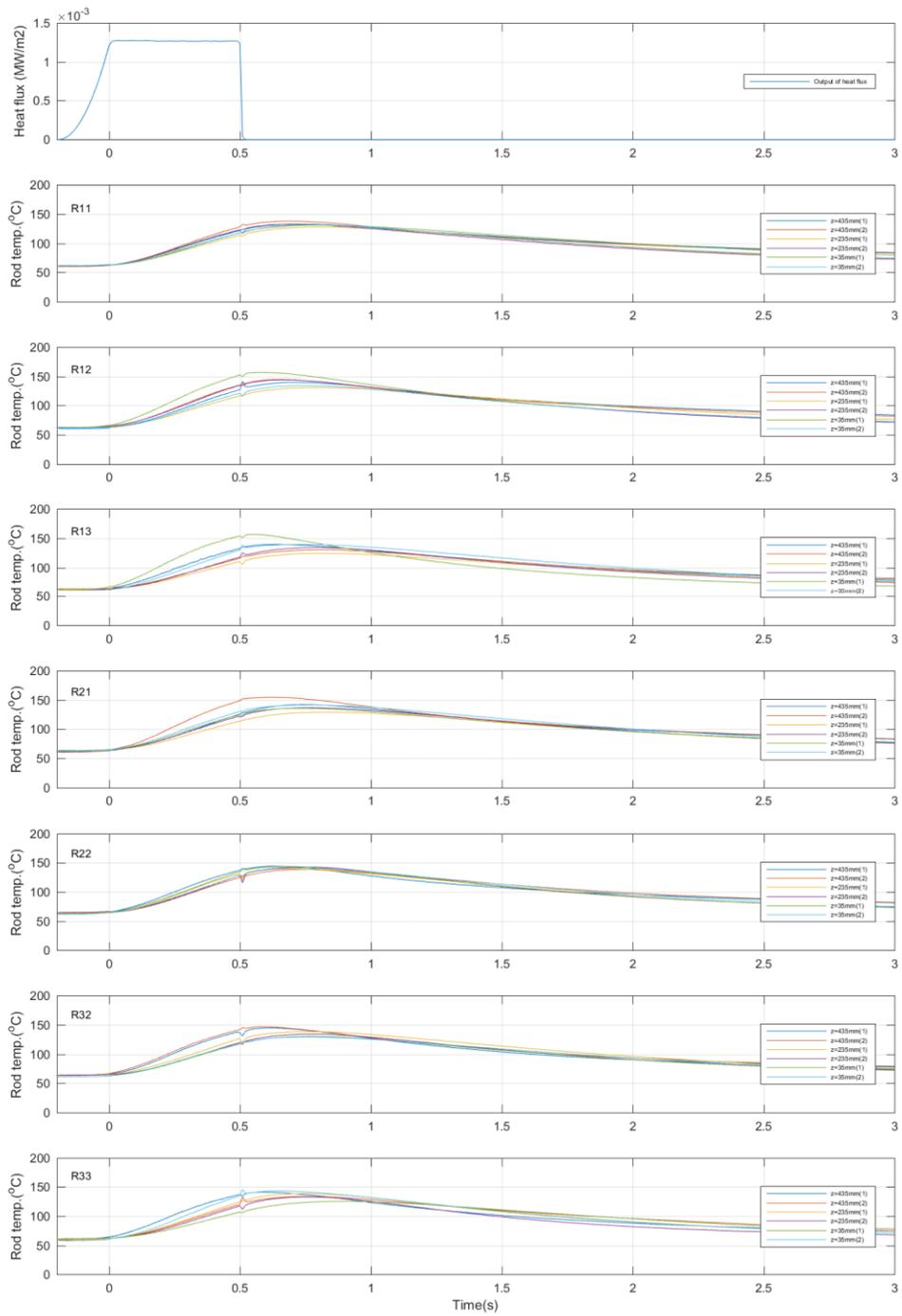


図 3-61 ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.9)

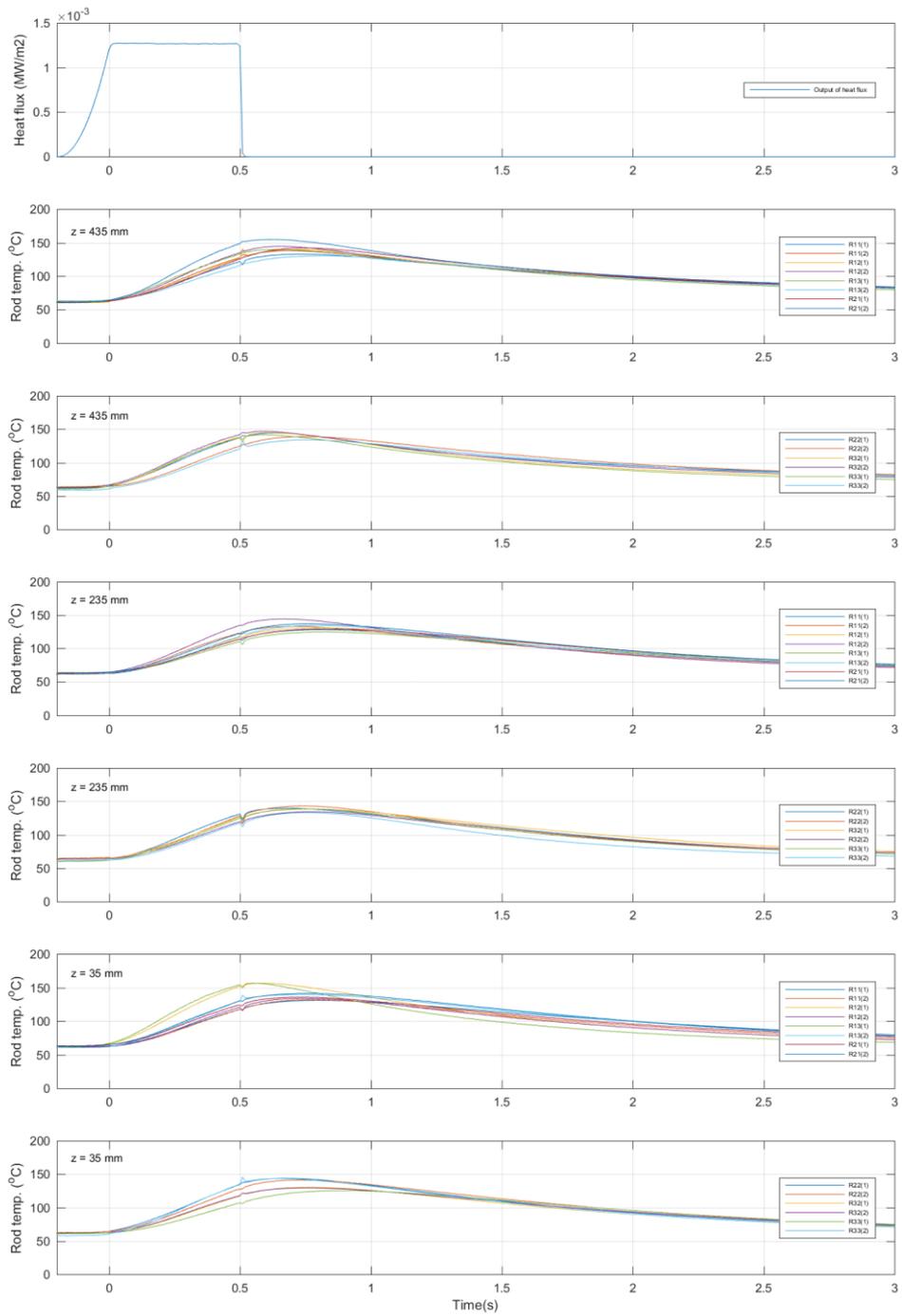


図 3-62 高さごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.9)

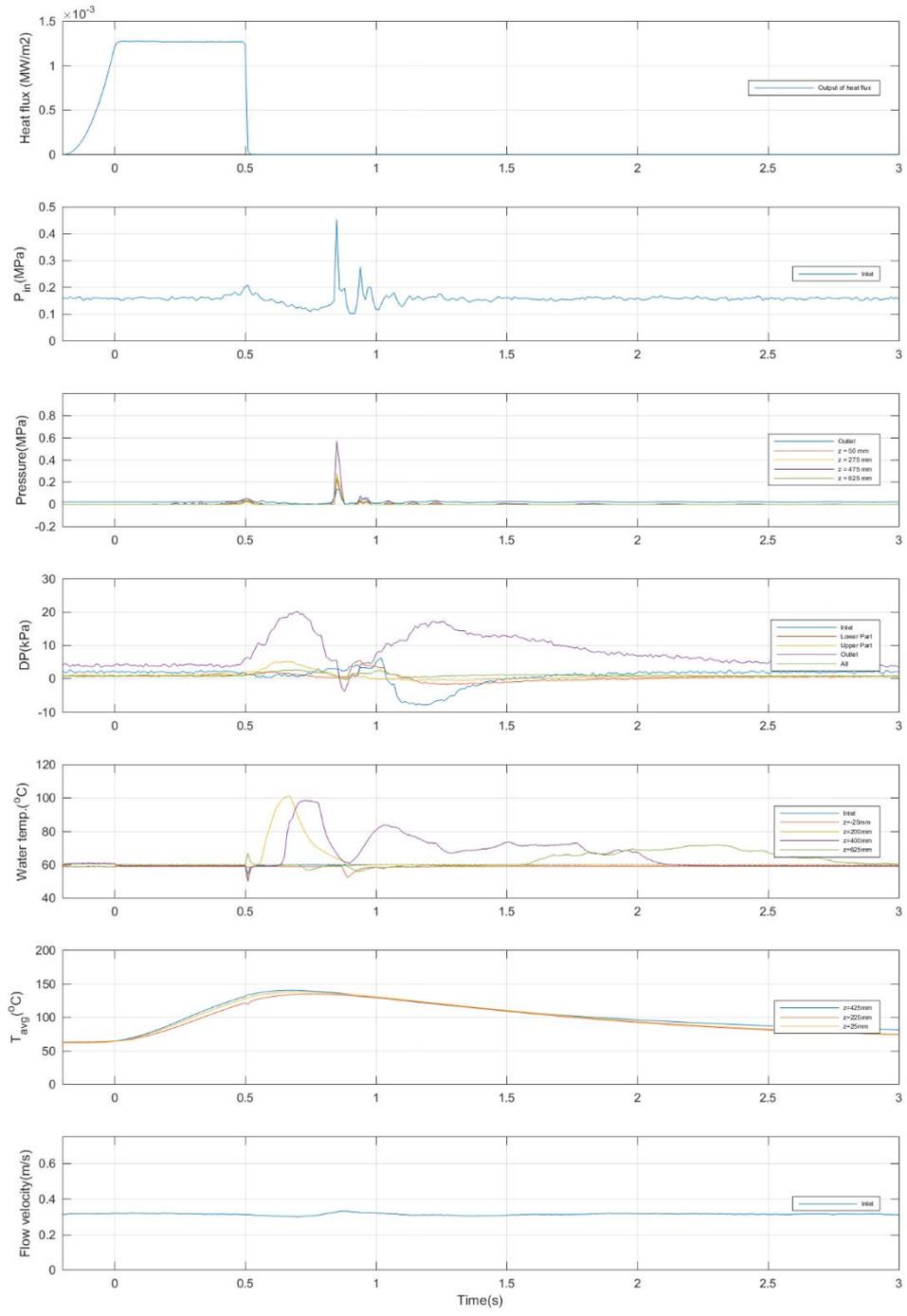


図 3-63 その他計測値の時間変化 (Run No.9)

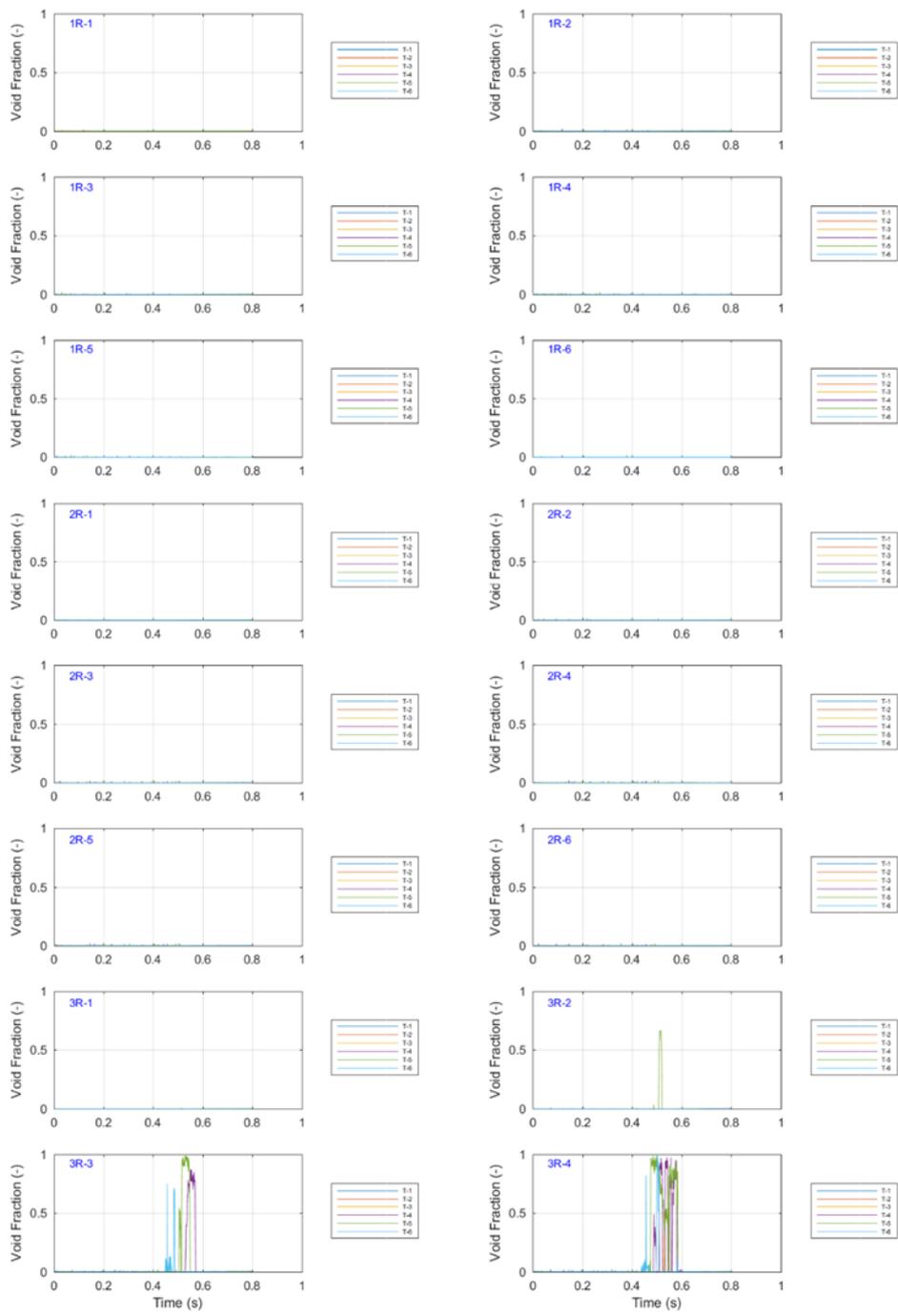


図 3-64 ボイド率の時間変化 (Run No.9/①)

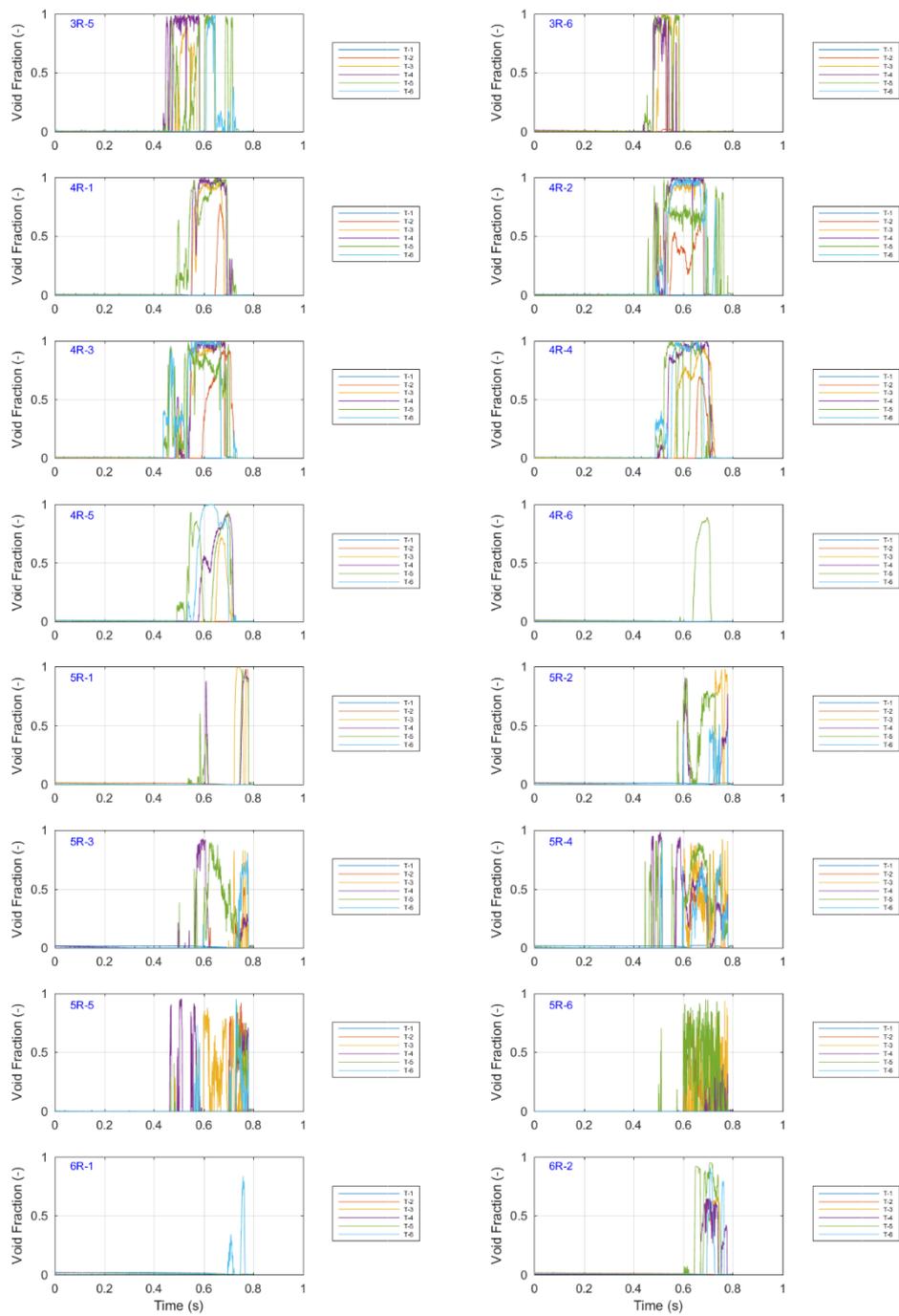


図 3-65 ボイド率の時間変化 (Run No.9/2)

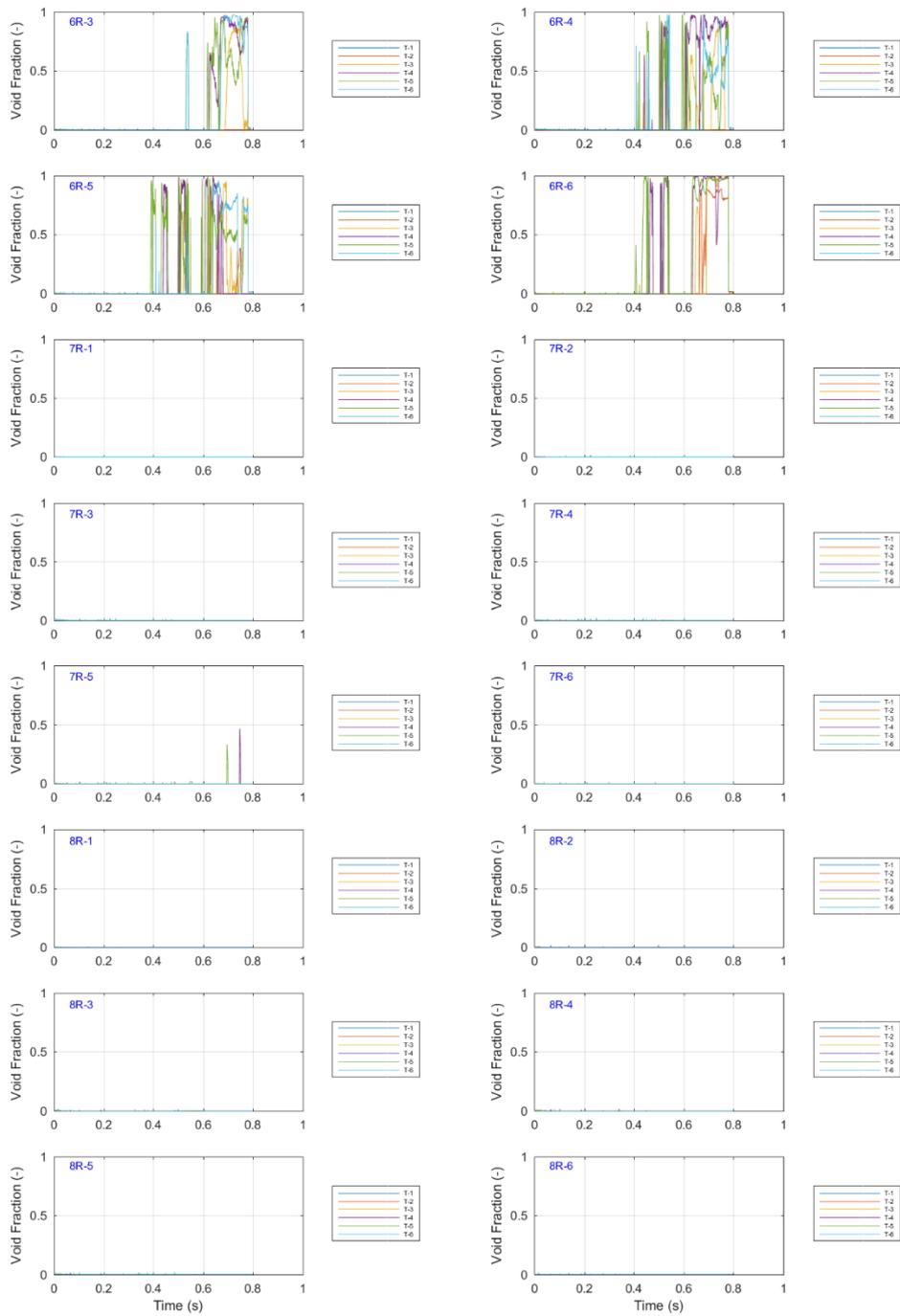


図 3-66 ボイド率の時間変化 (Run No.9/③)

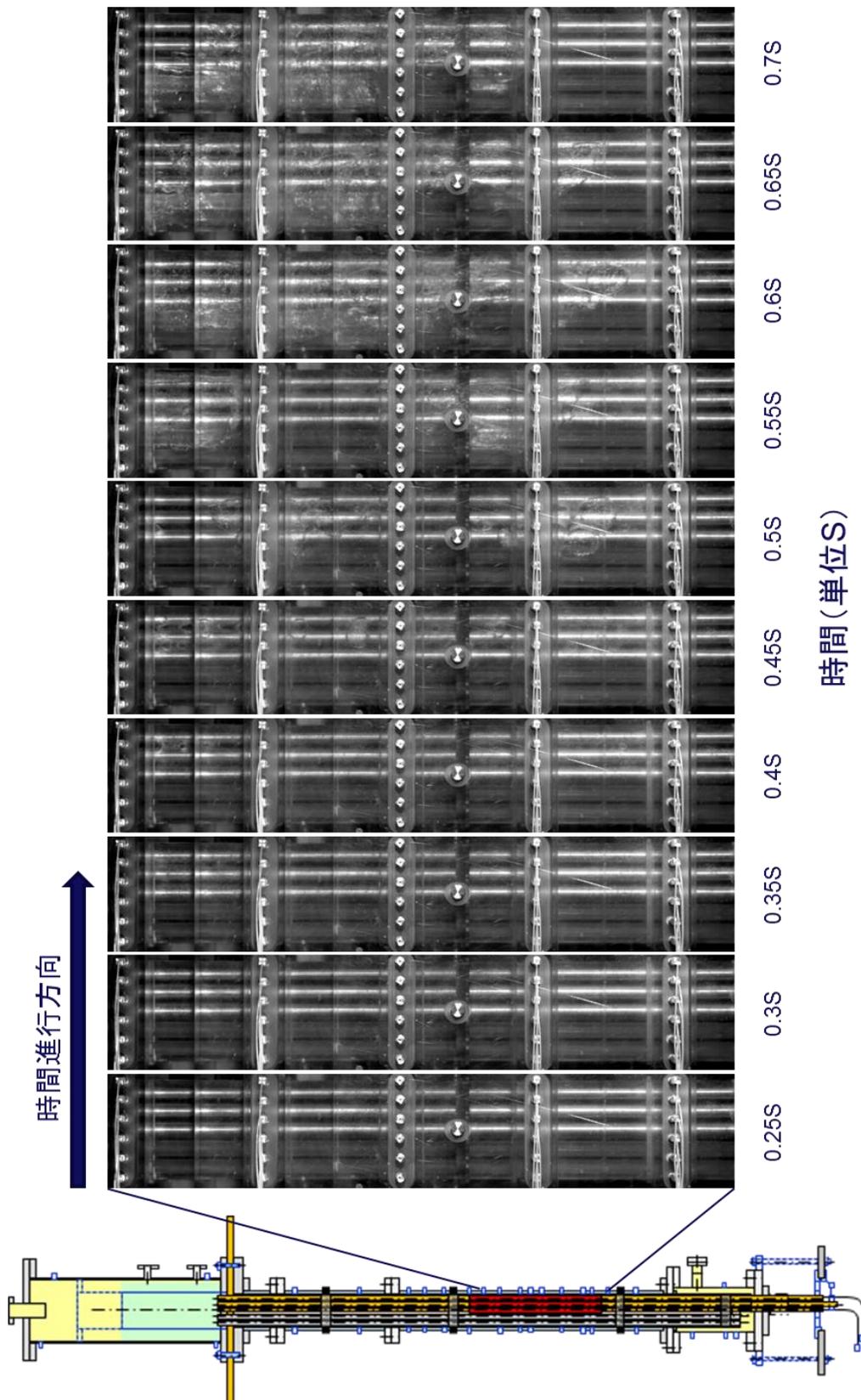


図 3-67 ポイド挙動の可視化画像 (Run No. 9)

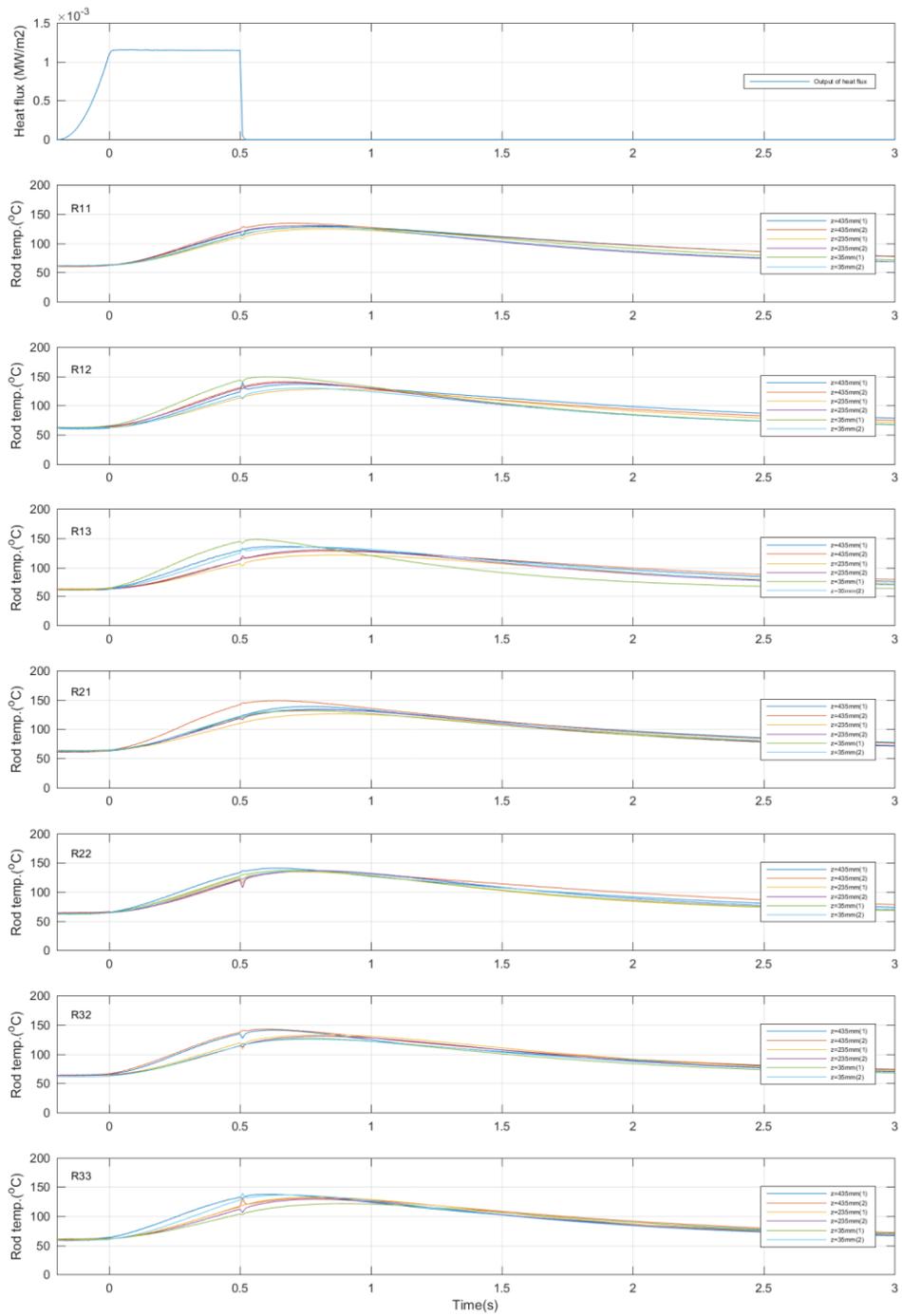


図 3-68 ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.10)

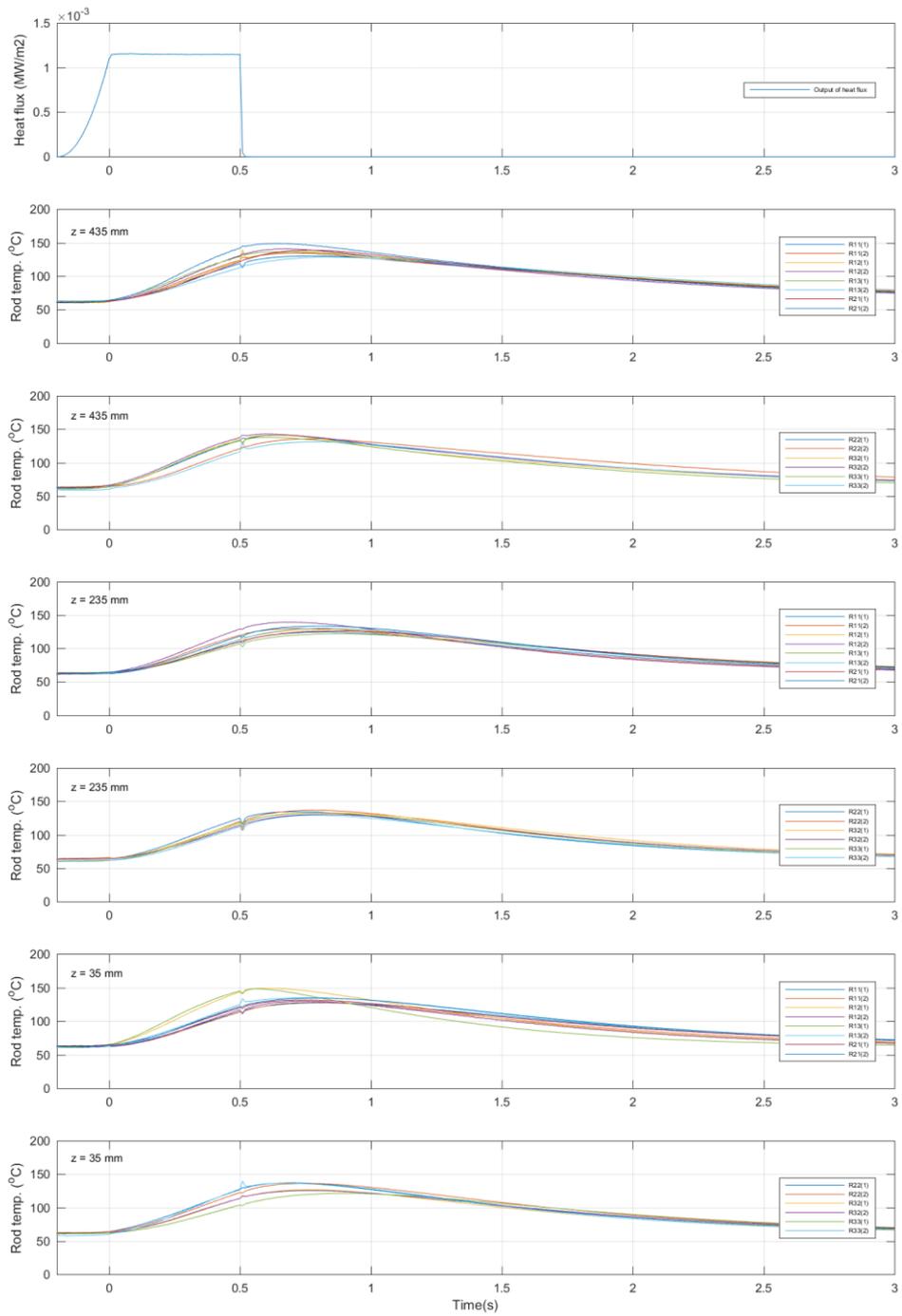


図 3-69 高さごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.10)

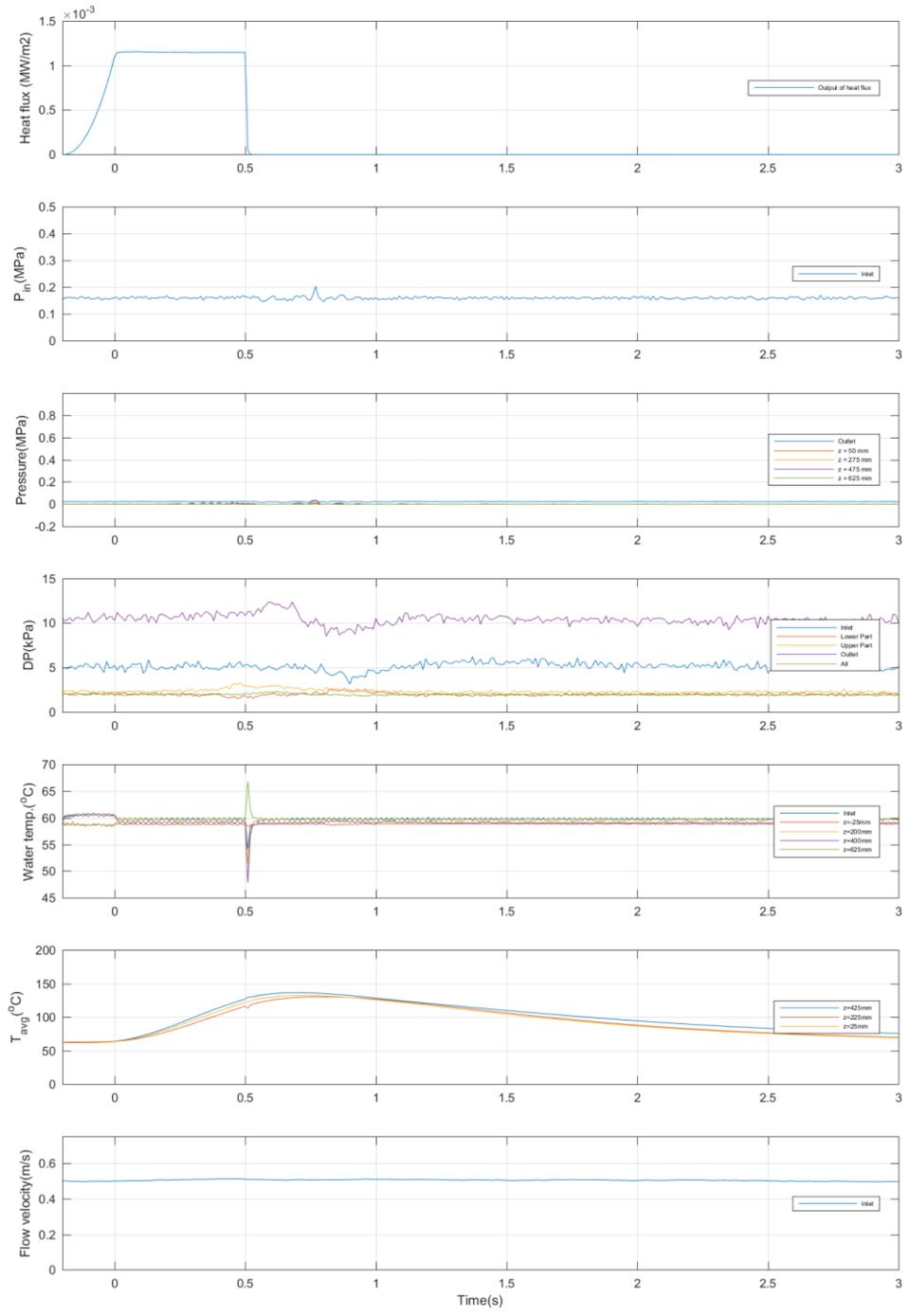


図 3-70 その他計測値の時間変化 (Run No.10)

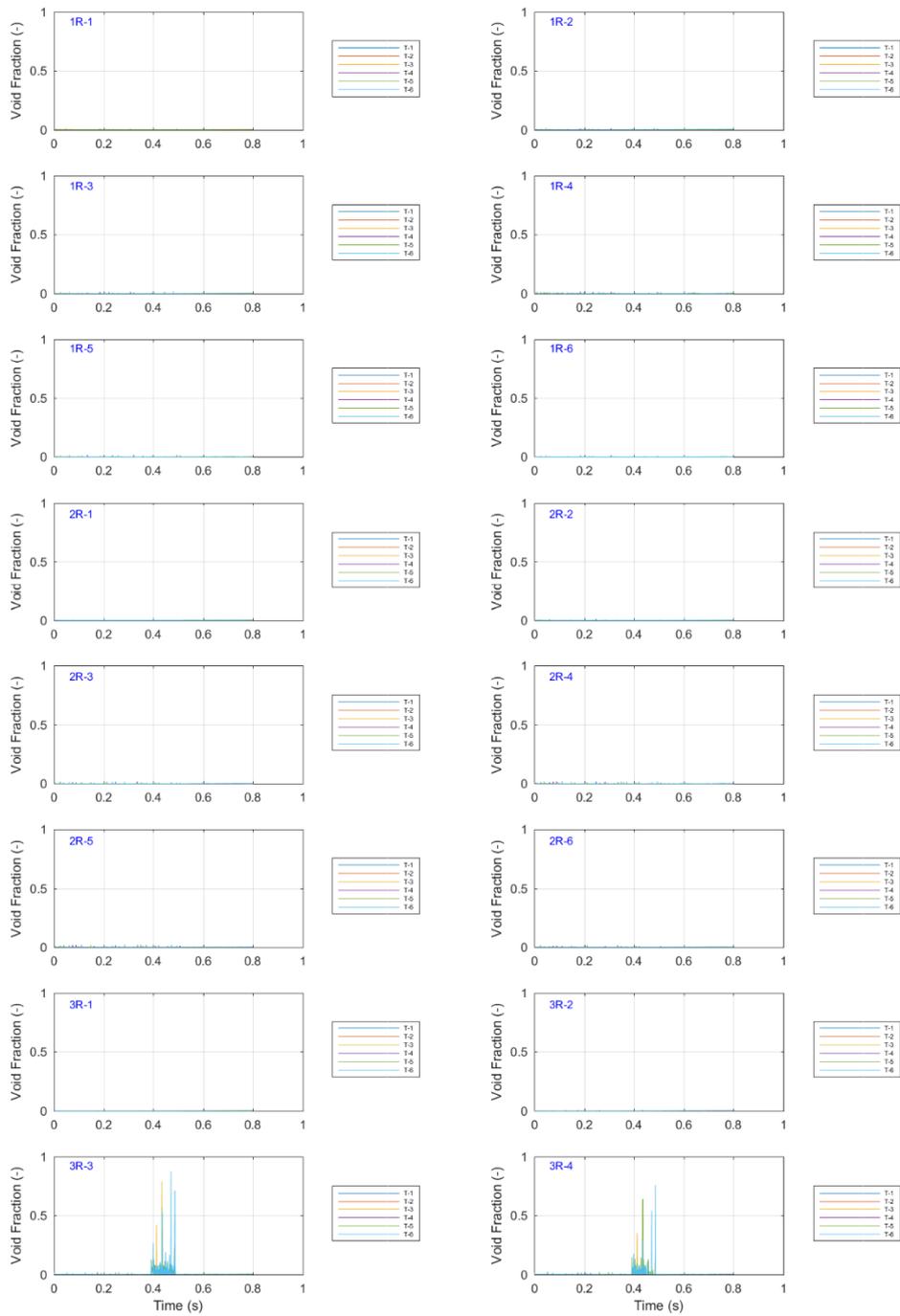


図 3-71 ボイド率の時間変化 (Run No.10/①)

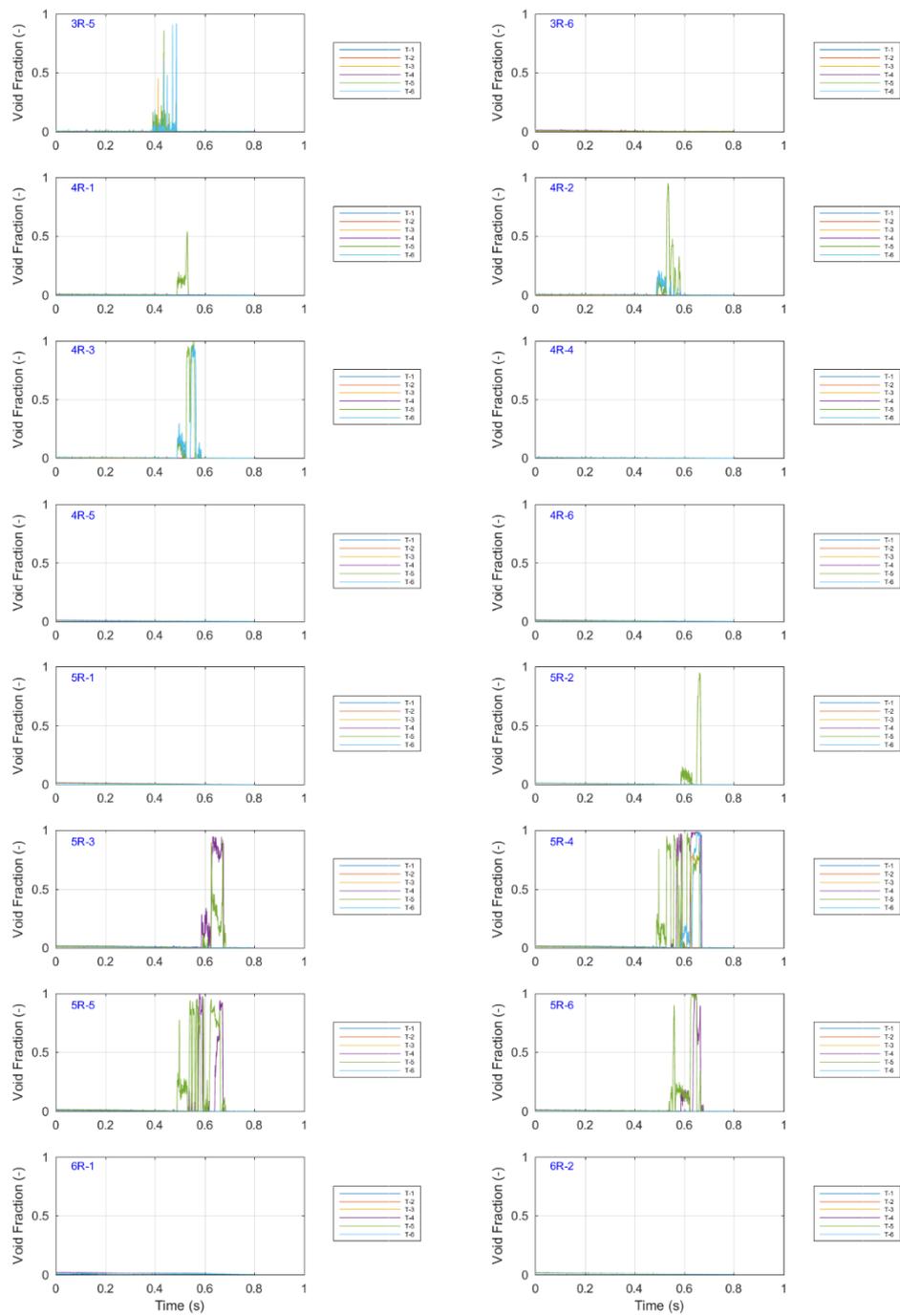


図 3-72 ボイド率の時間変化 (Run No.10/②)

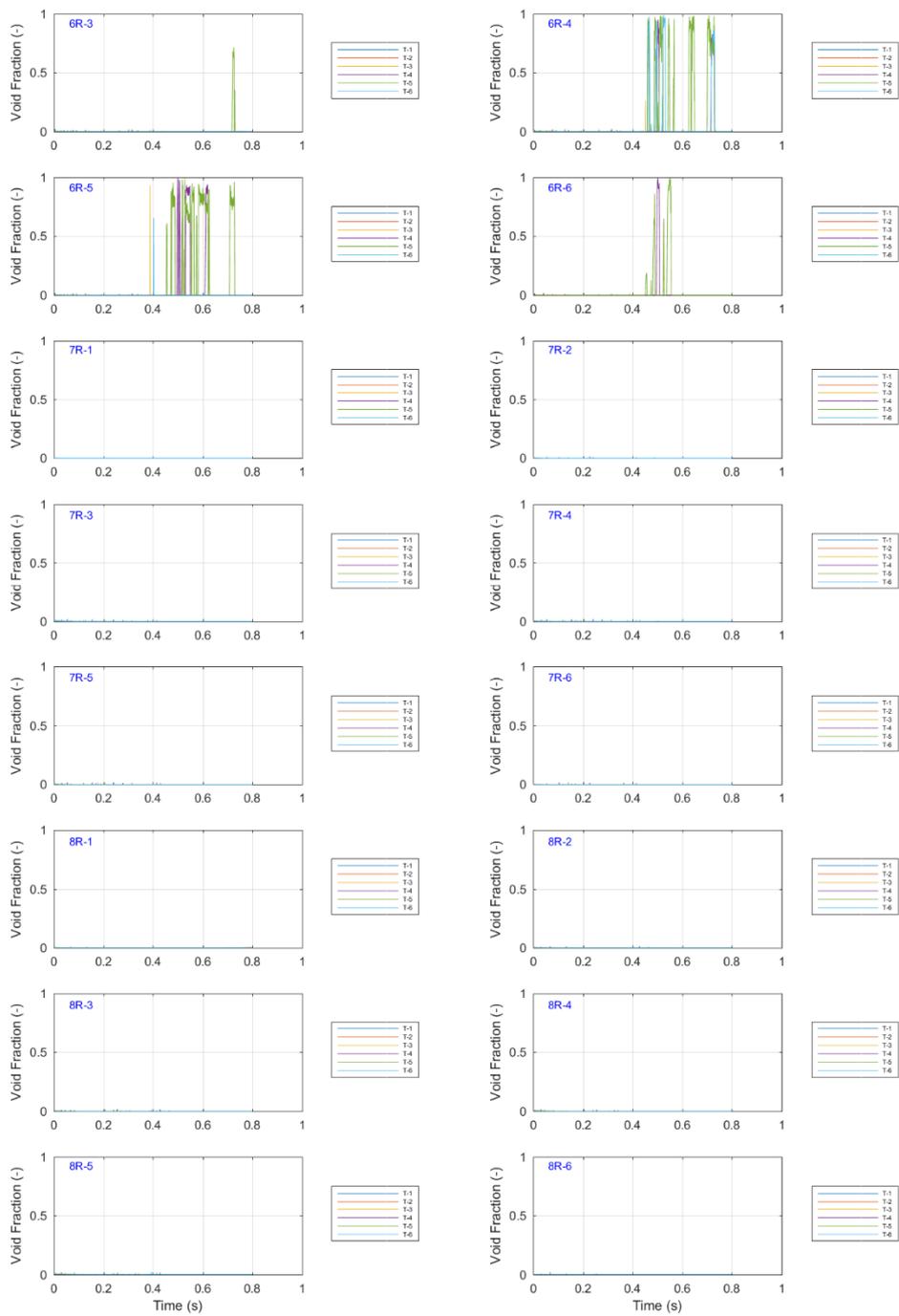


図 3-73 ボイド率の時間変化 (Run No.10/③)

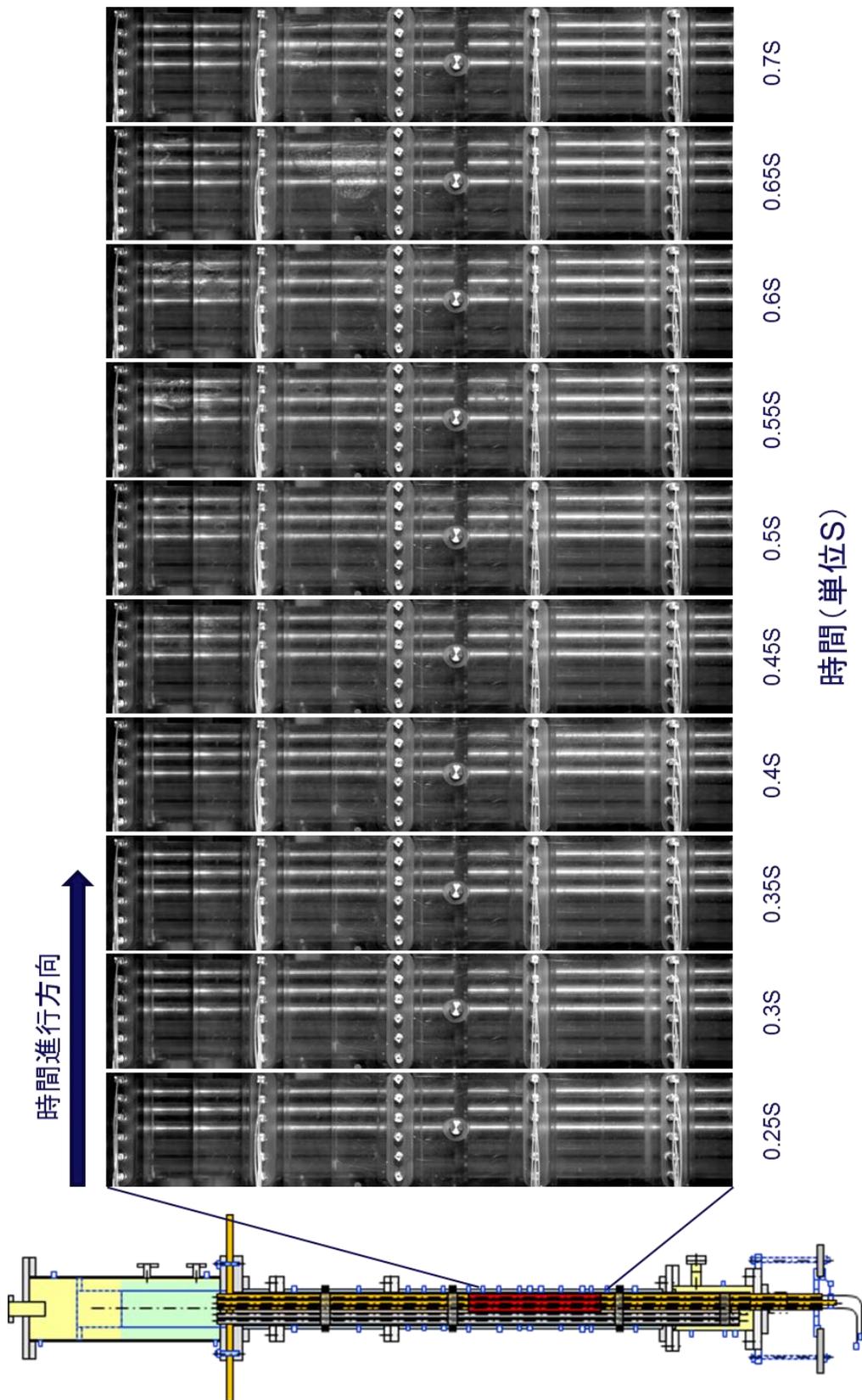


図 3-74 ポイド挙動の可視化画像 (Run No. 10)

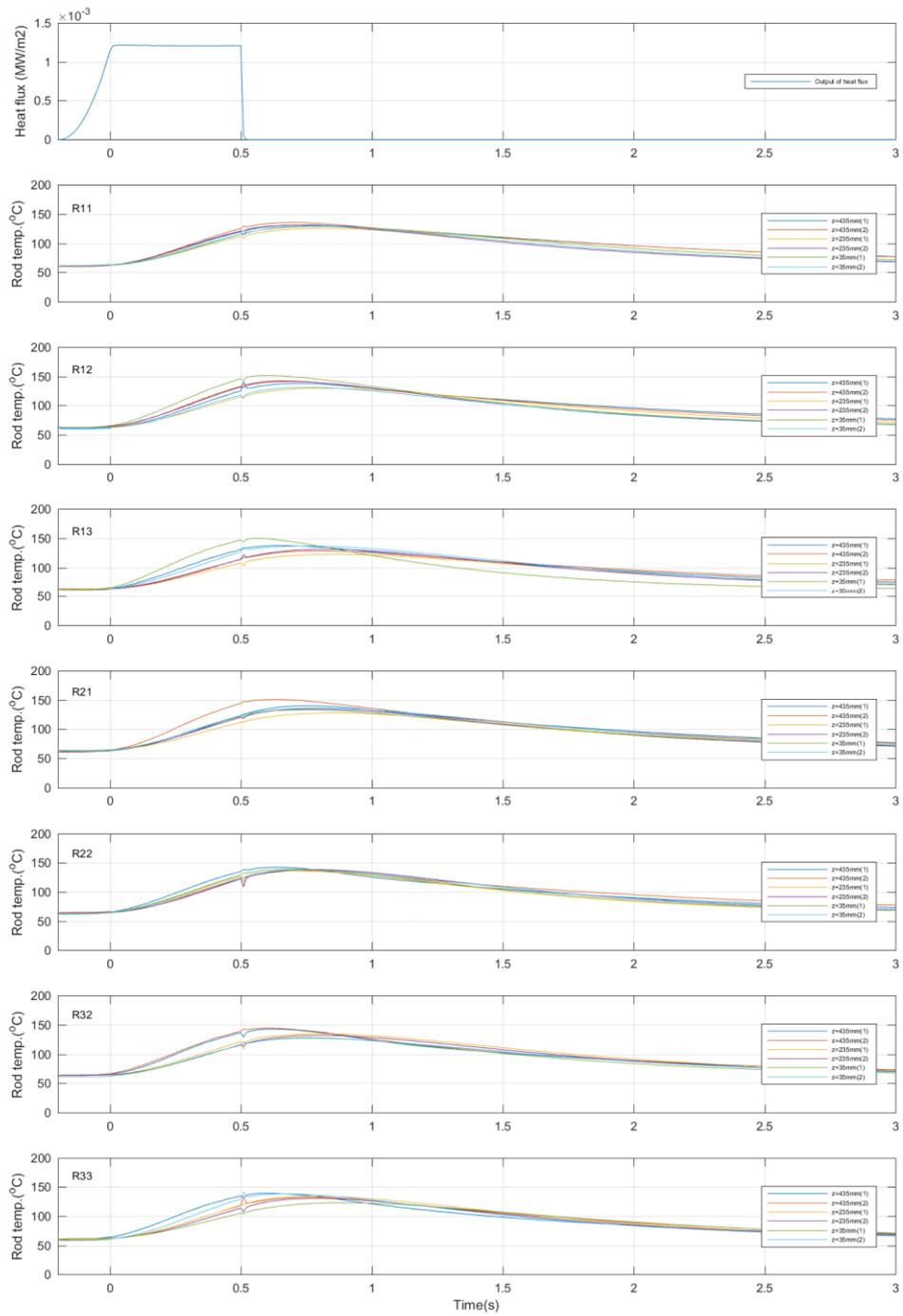


図 3-75 ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.11)

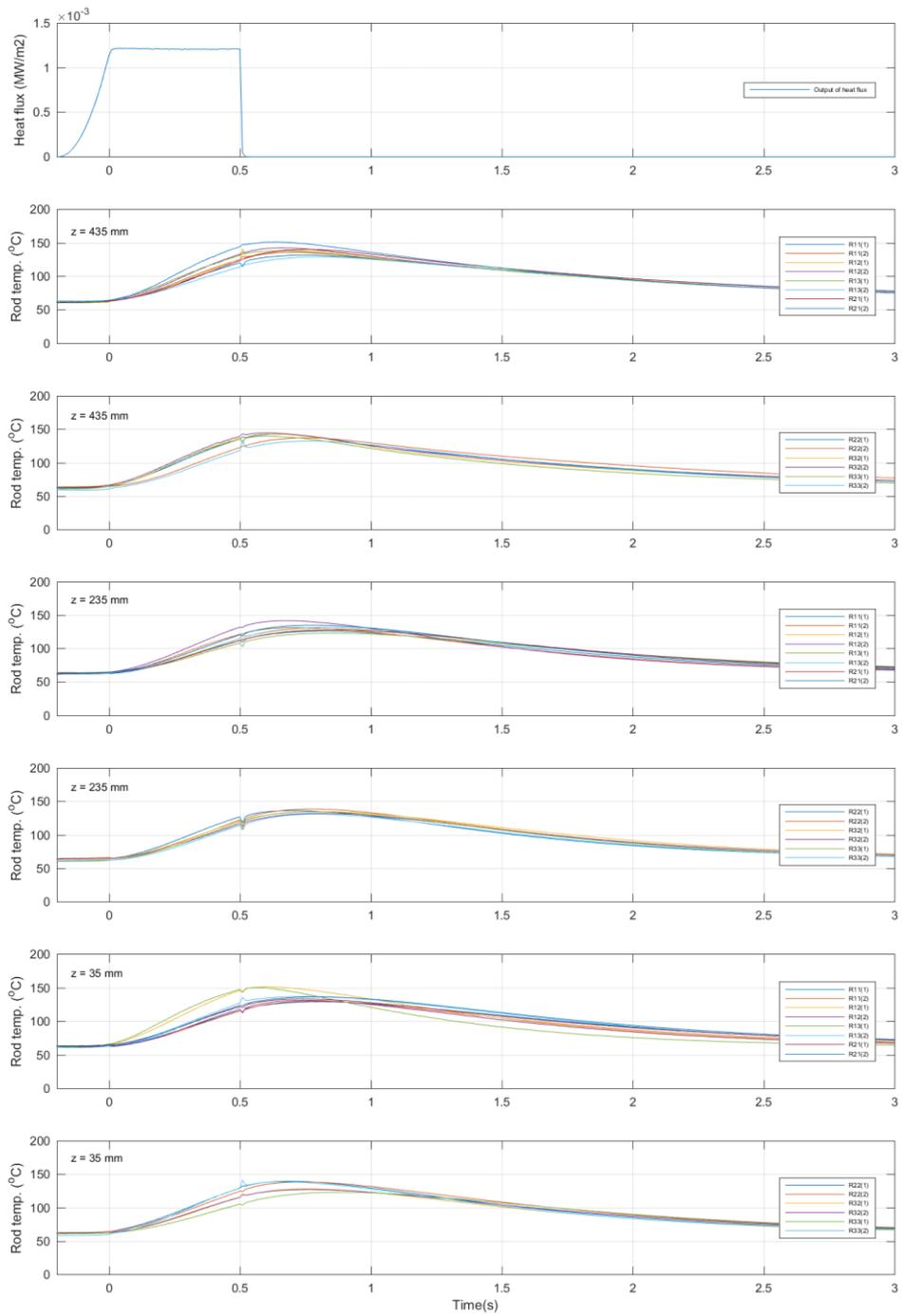


図 3-76 高さごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.11)

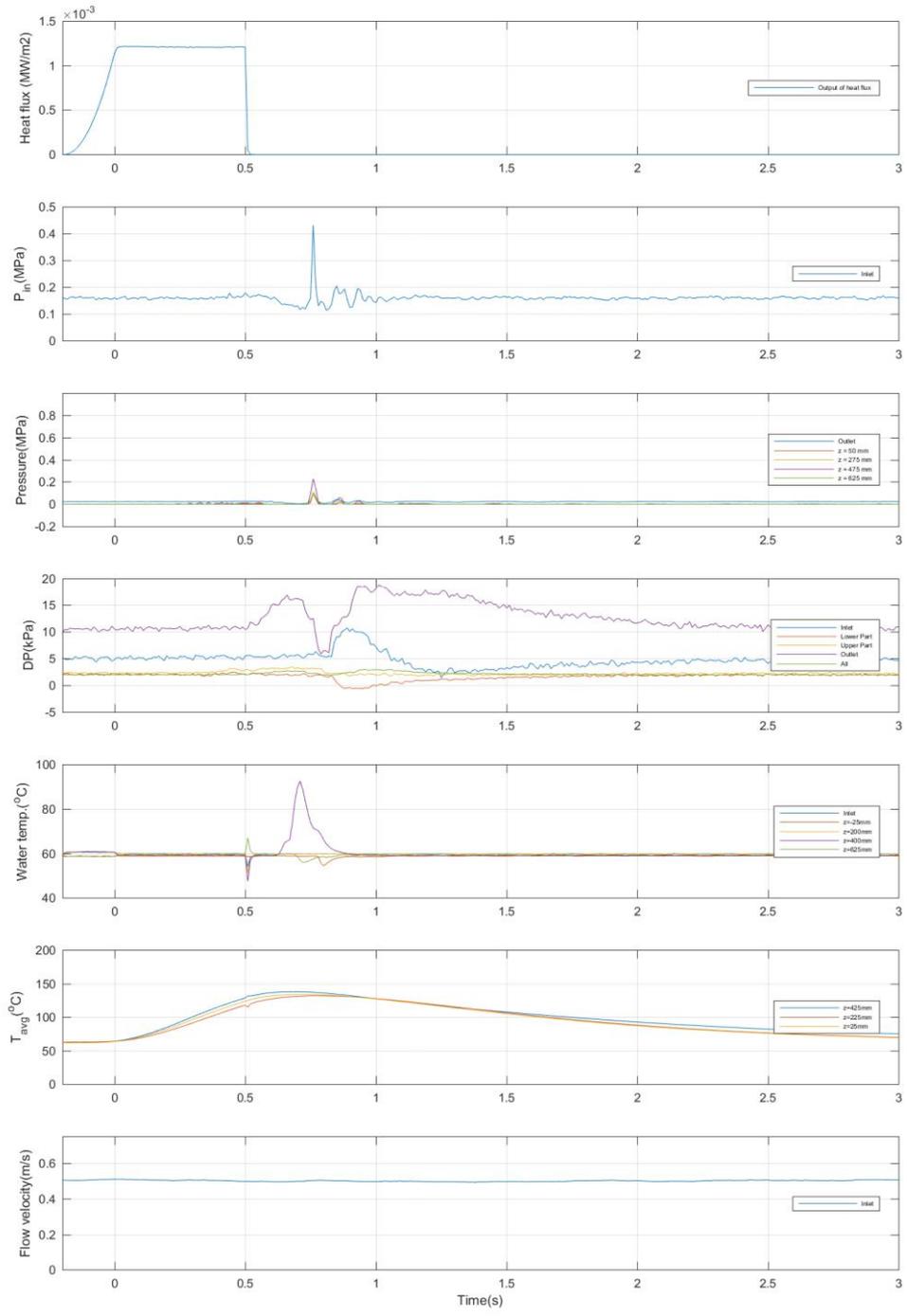


図 3-77 その他計測値の時間変化 (Run No.11)

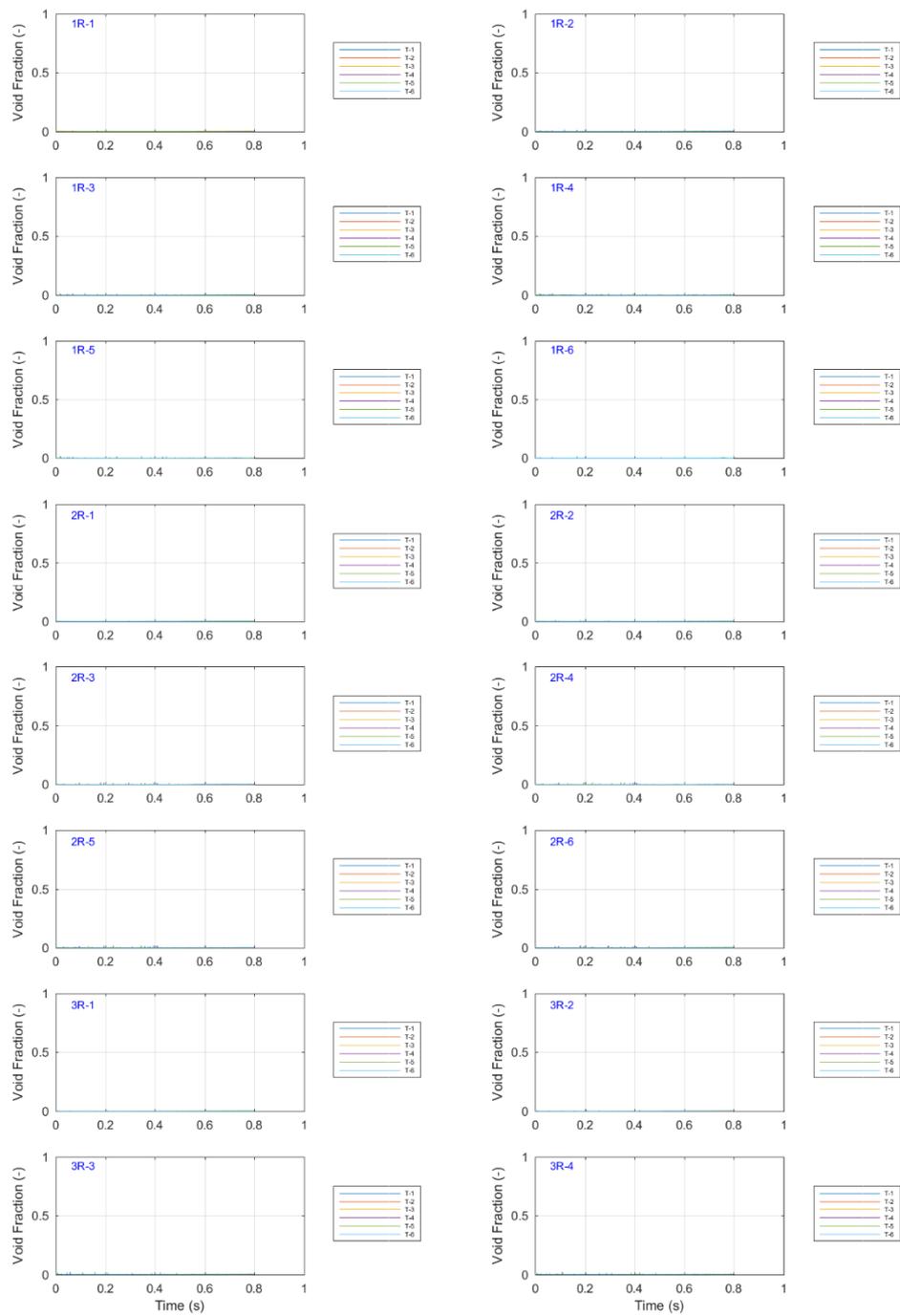


図 3-78 ボイド率の時間変化 (Run No.11/①)

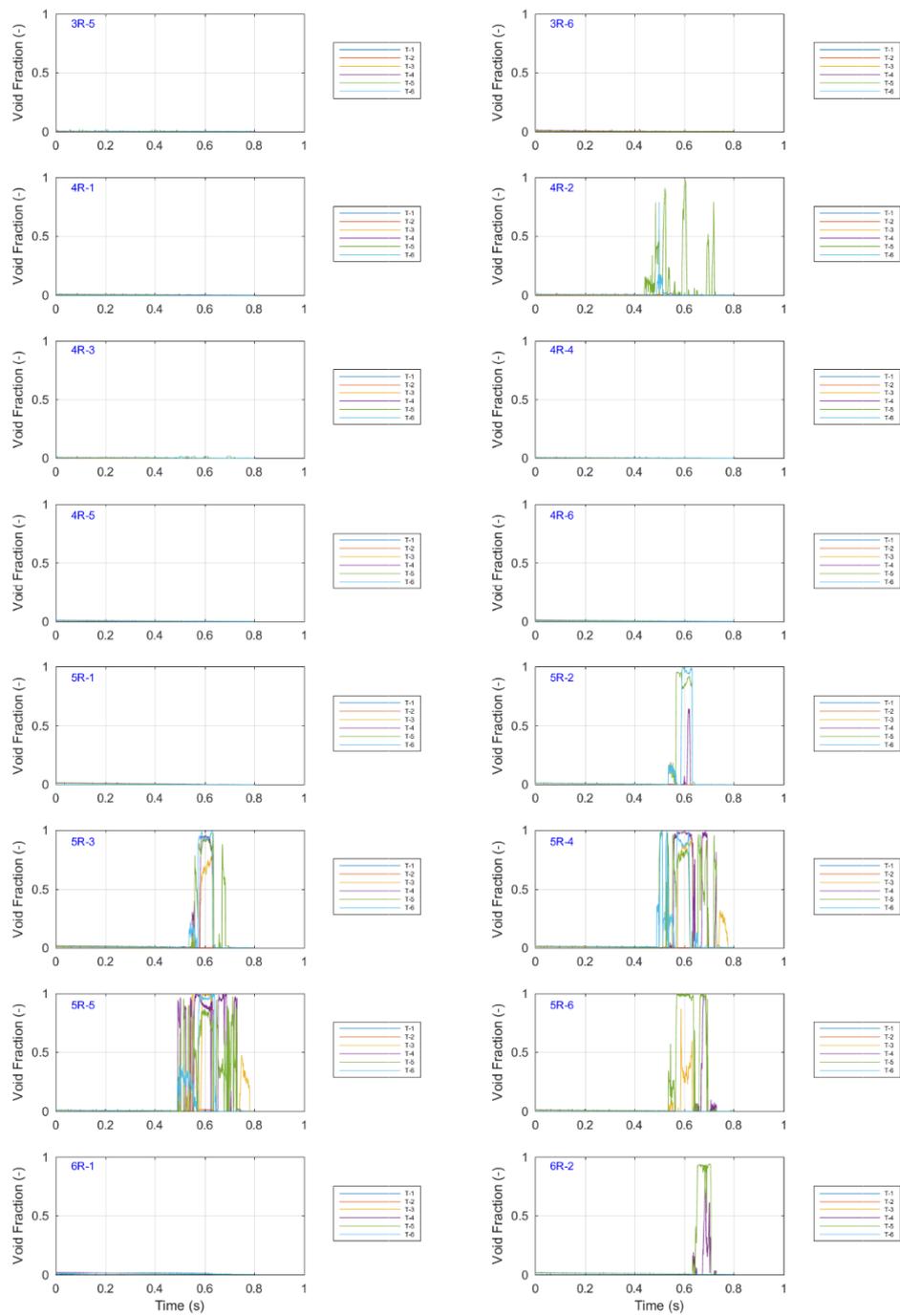


図 3-79 ボイド率の時間変化 (Run No.11/②)

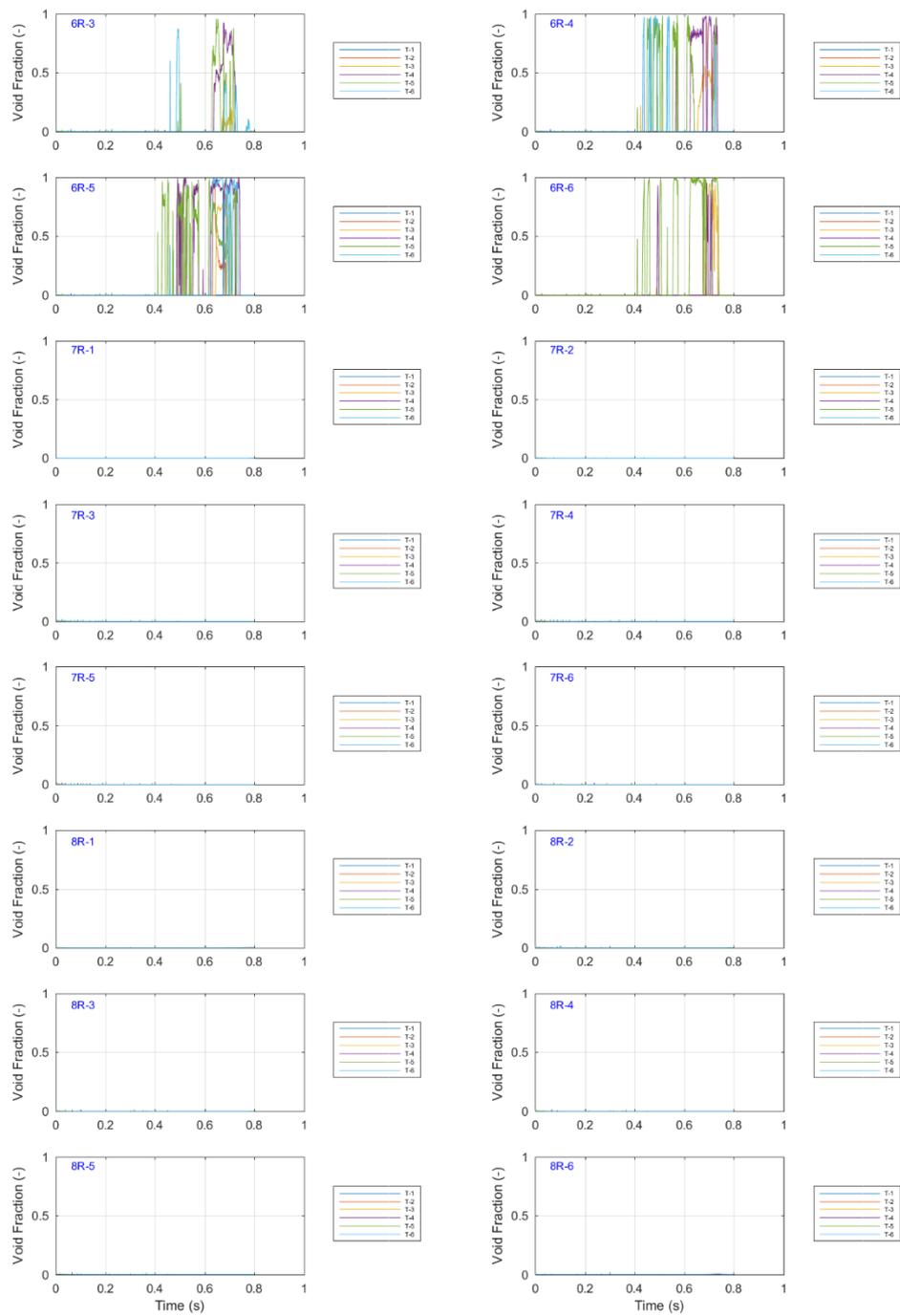


図 3-80 ボイド率の時間変化 (Run No.11/③)

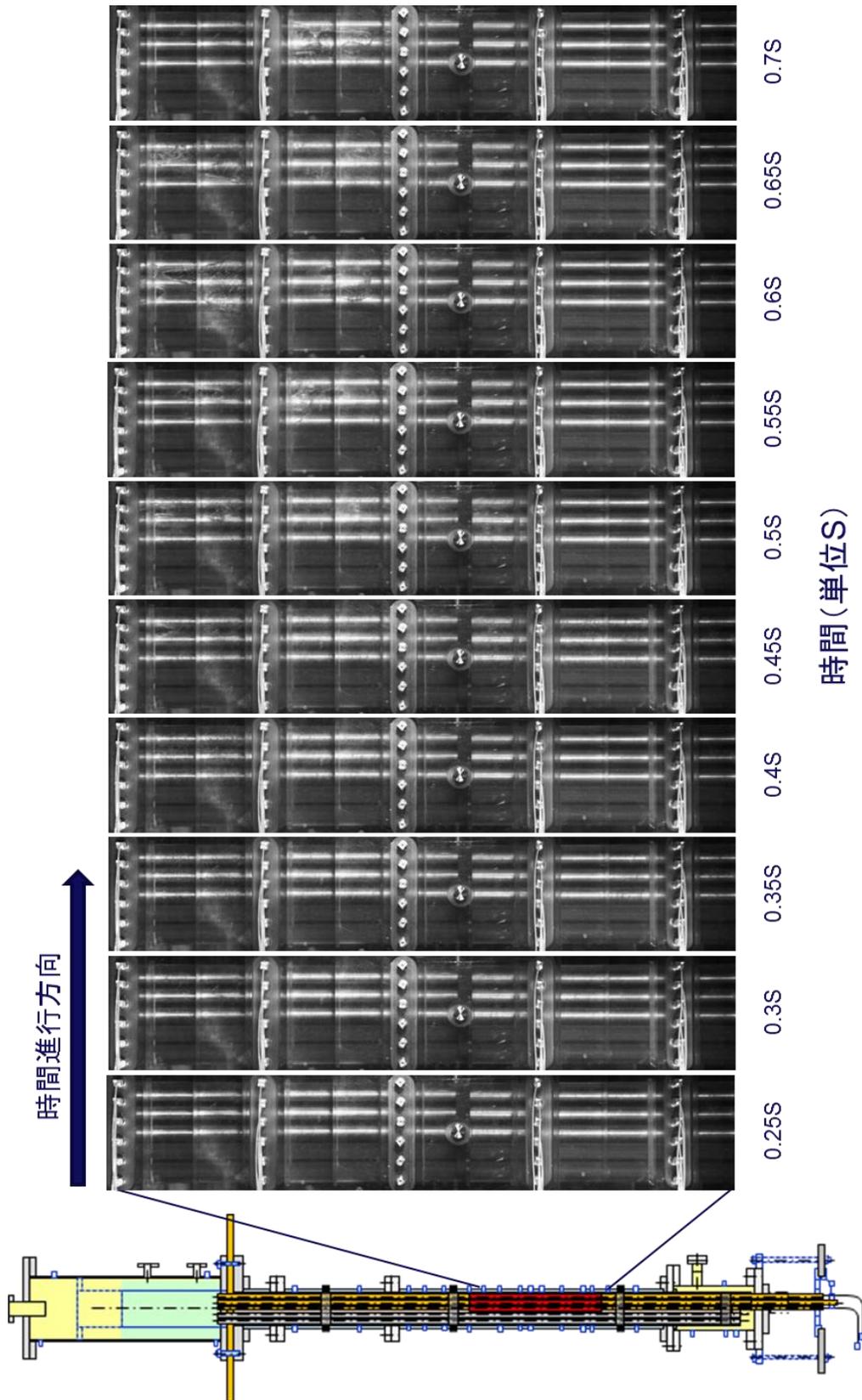


図 3-81 ボイド挙動の可視化画像 (Run No. 11)

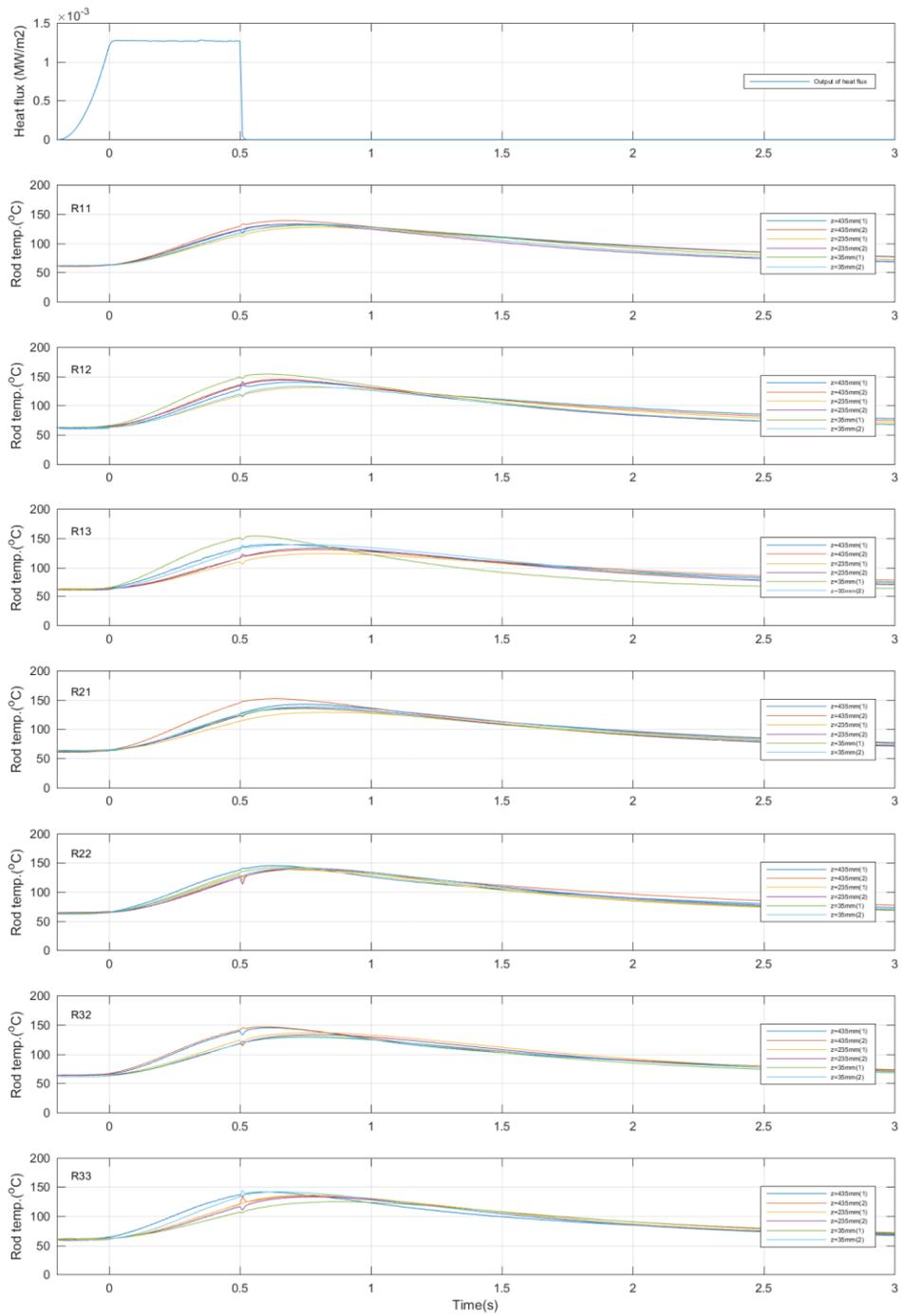


図 3-82 ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.12)

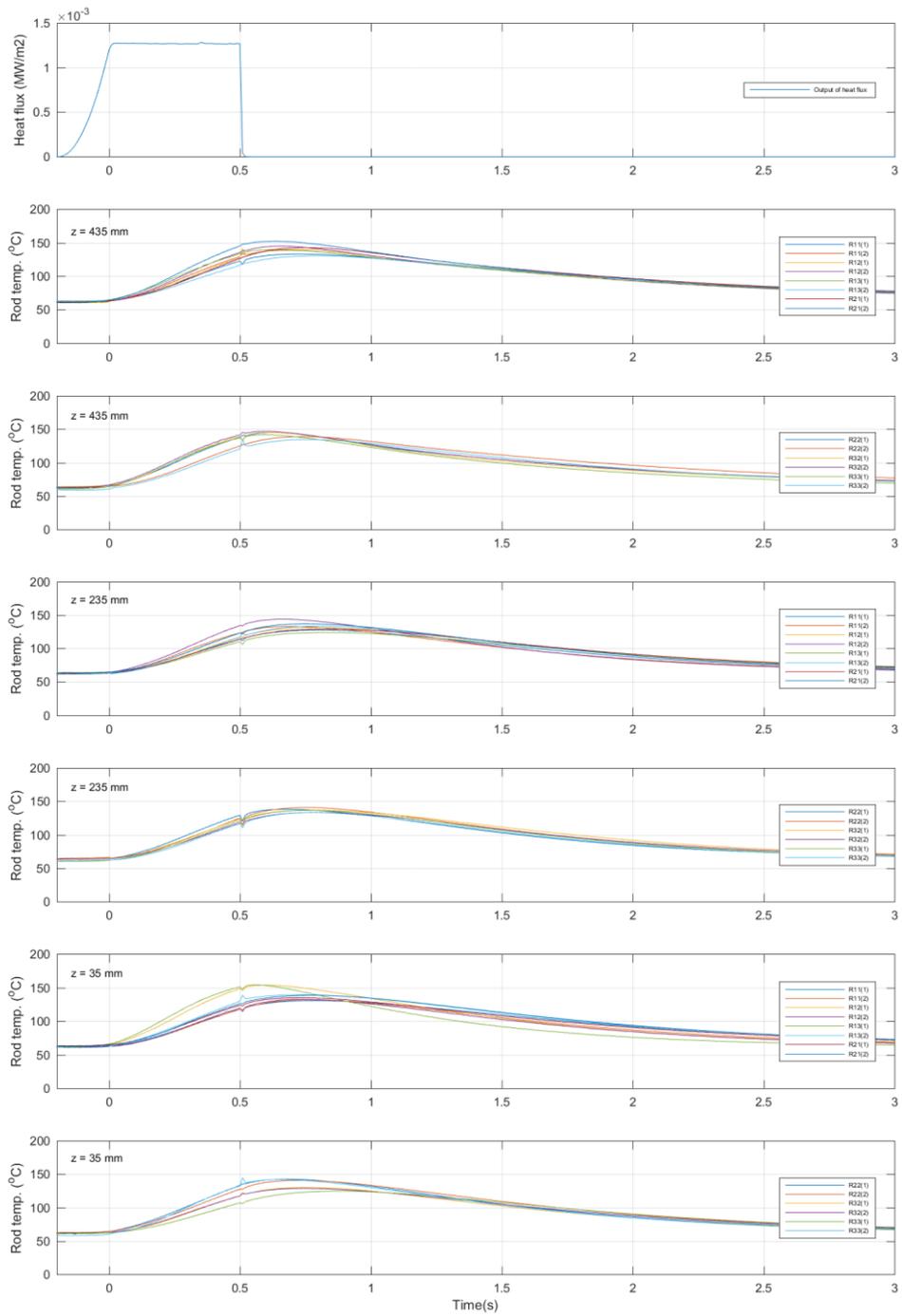


図 3-83 高さごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.12)

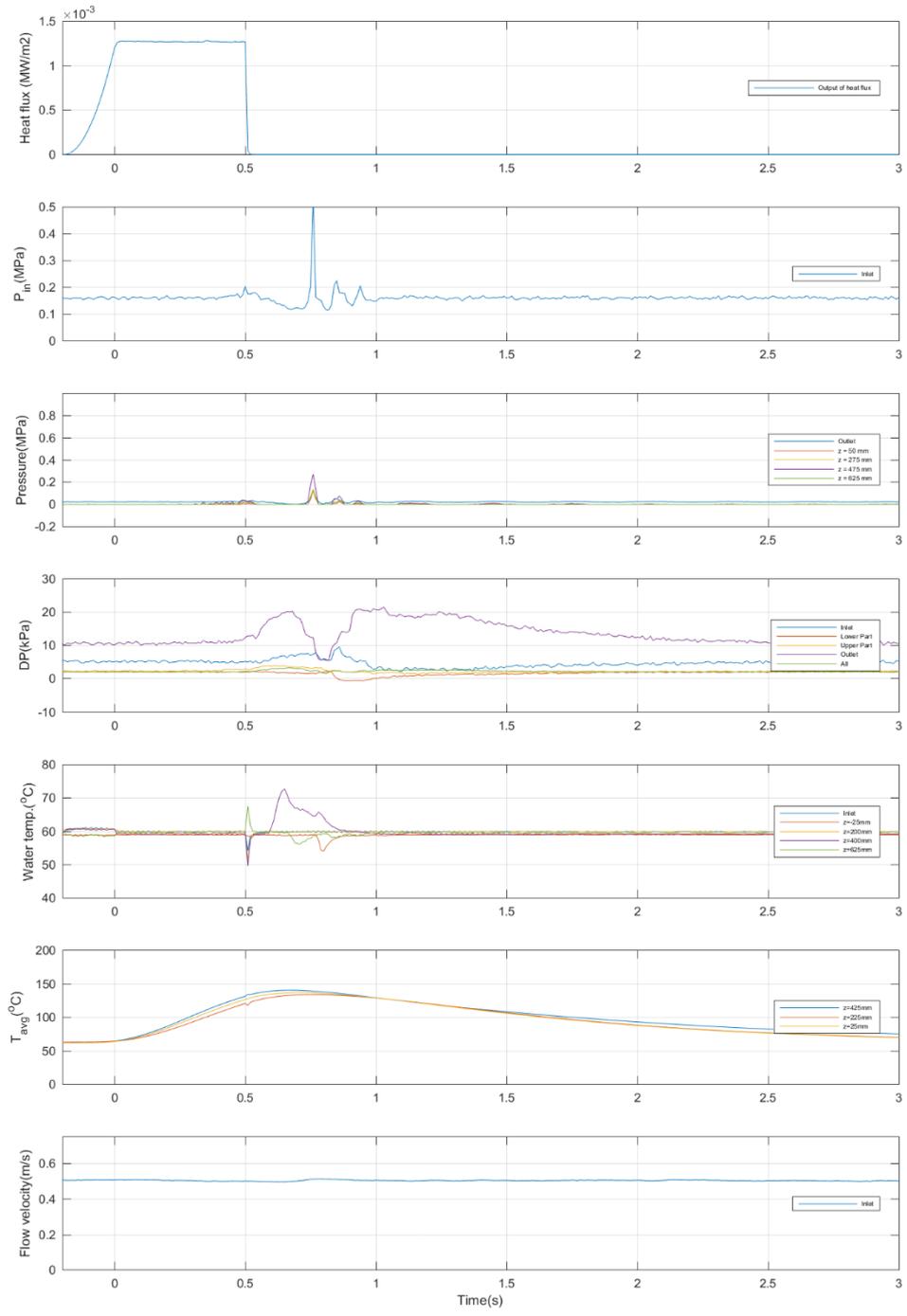


図 3-84 その他計測値の時間変化 (Run No.12)

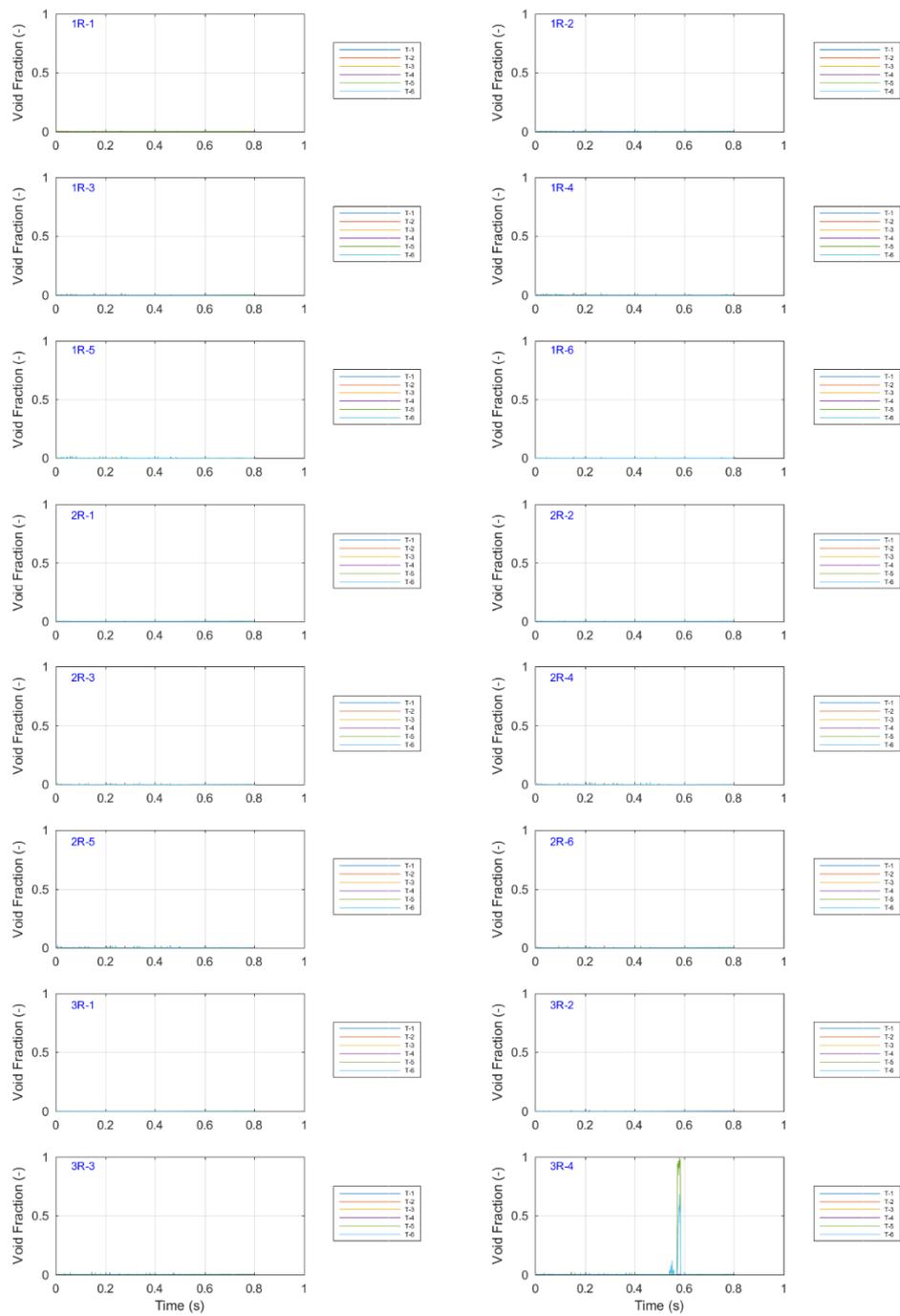


図 3-85 ボイド率の時間変化 (Run No.12/①)

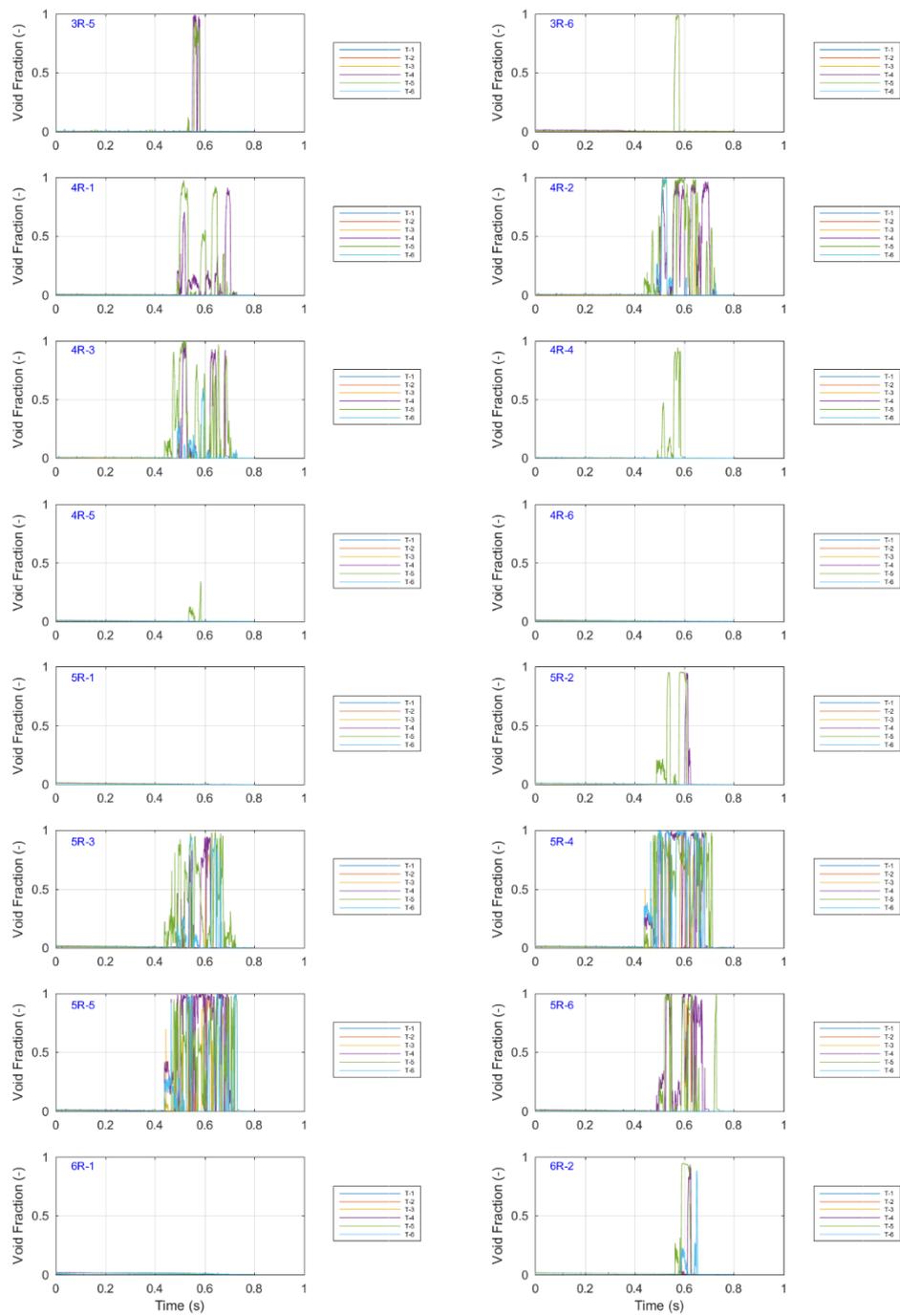


図 3-86 ボイド率の時間変化 (Run No.12/②)

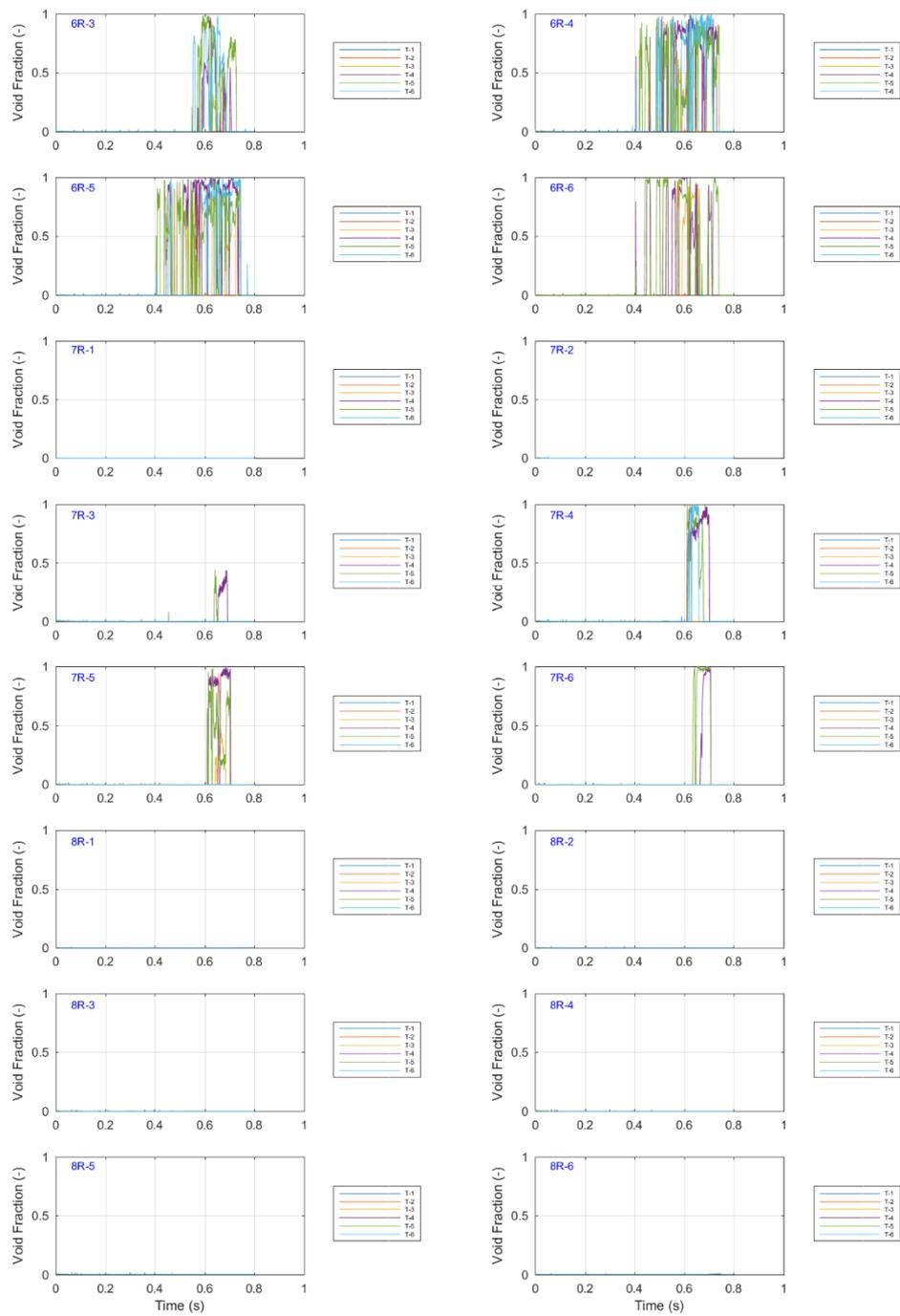


図 3-87 ボイド率の時間変化 (Run No.12/③)

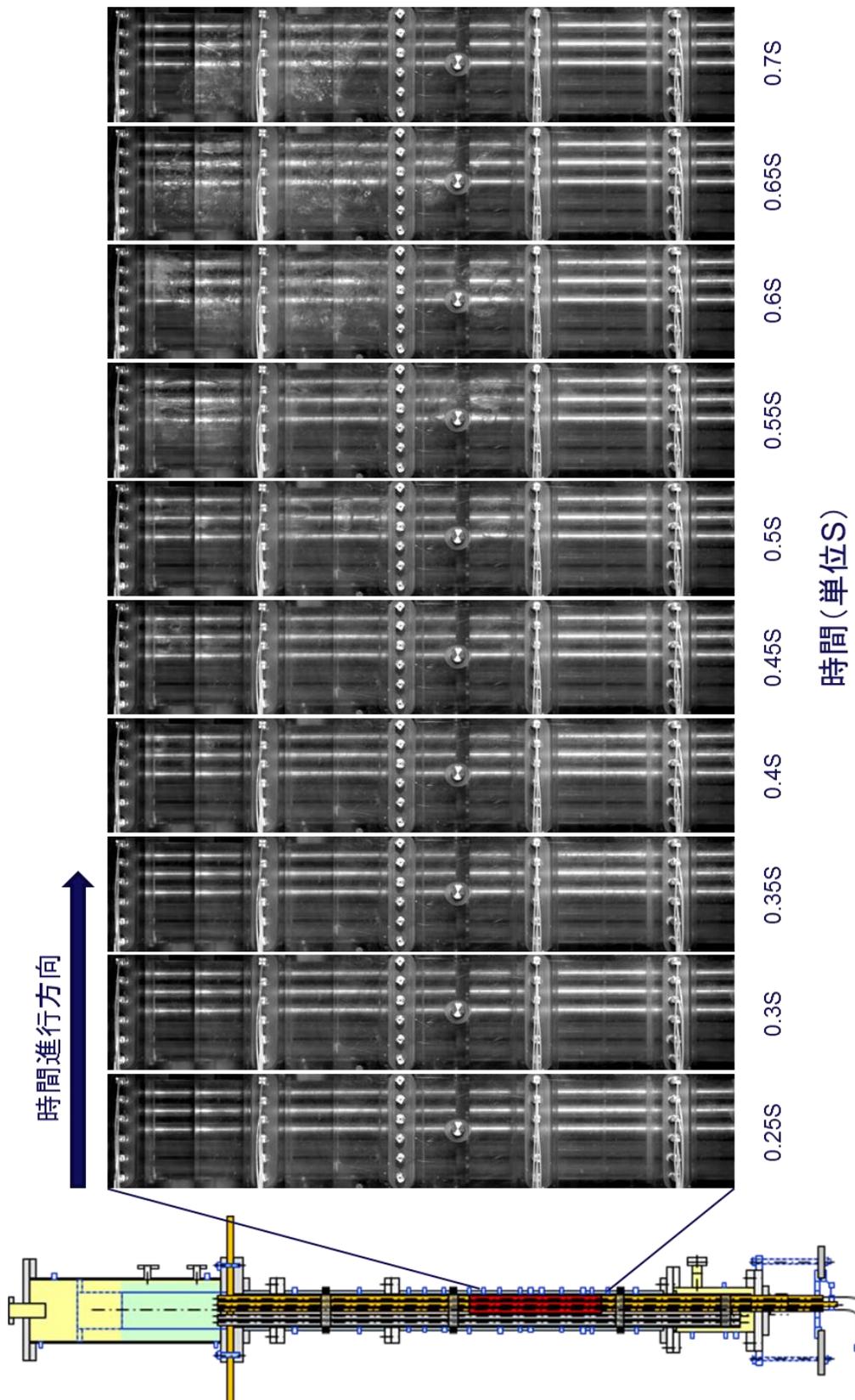


図 3-88 ボイド挙動の可視化画像 (Run No. 12)

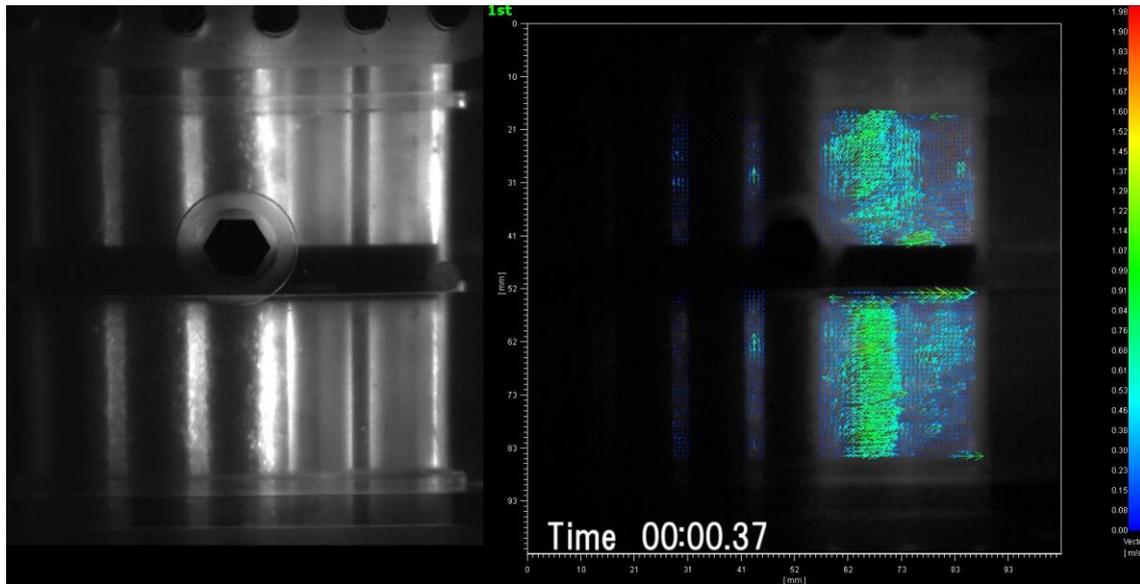


図 3-89 PIV による液相流速分布（ケース C, 時刻 0.37 秒, 第 4 段 WMS 上流部）

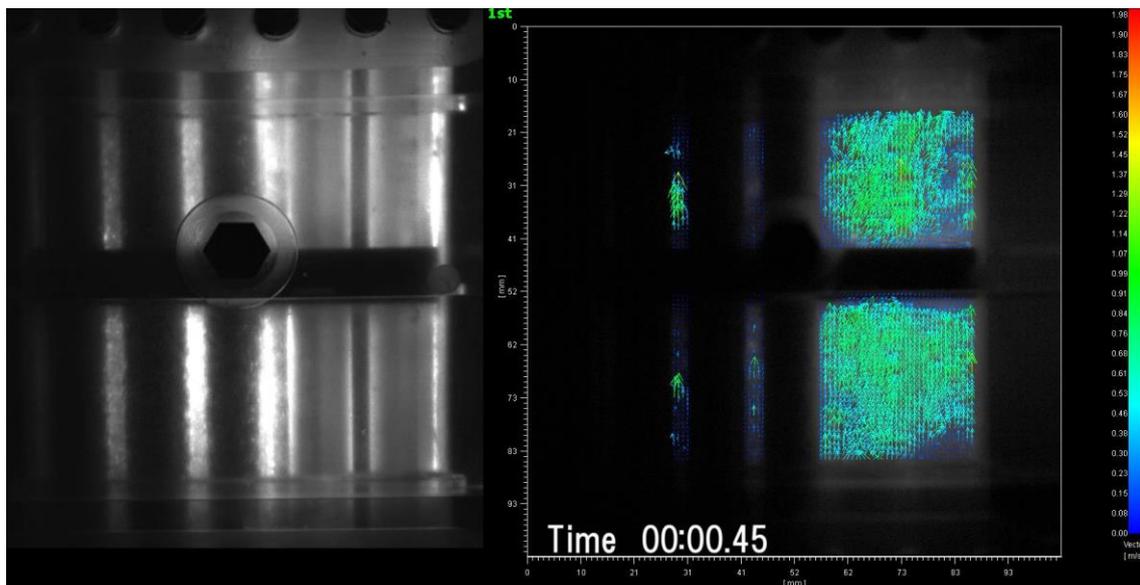


図 3-90 PIV による液相流速分布（ケース C, 時刻 0.45 秒, 第 4 段 WMS 上流部）

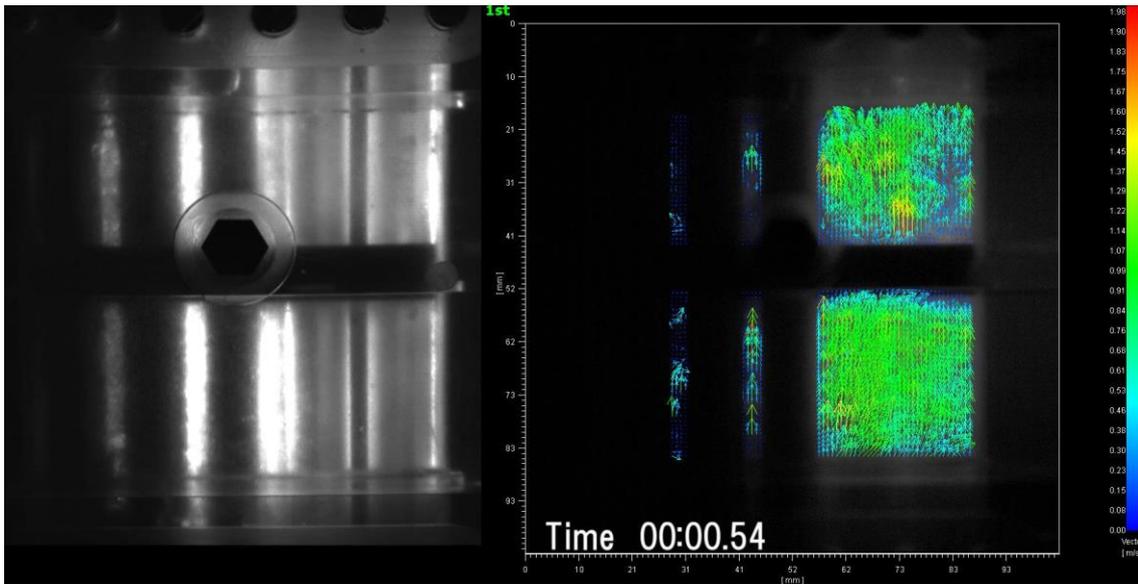


図 3-91 PIV による液相流速分布（ケース C，時刻 0.54 秒，第 4 段 WMS 上流部）

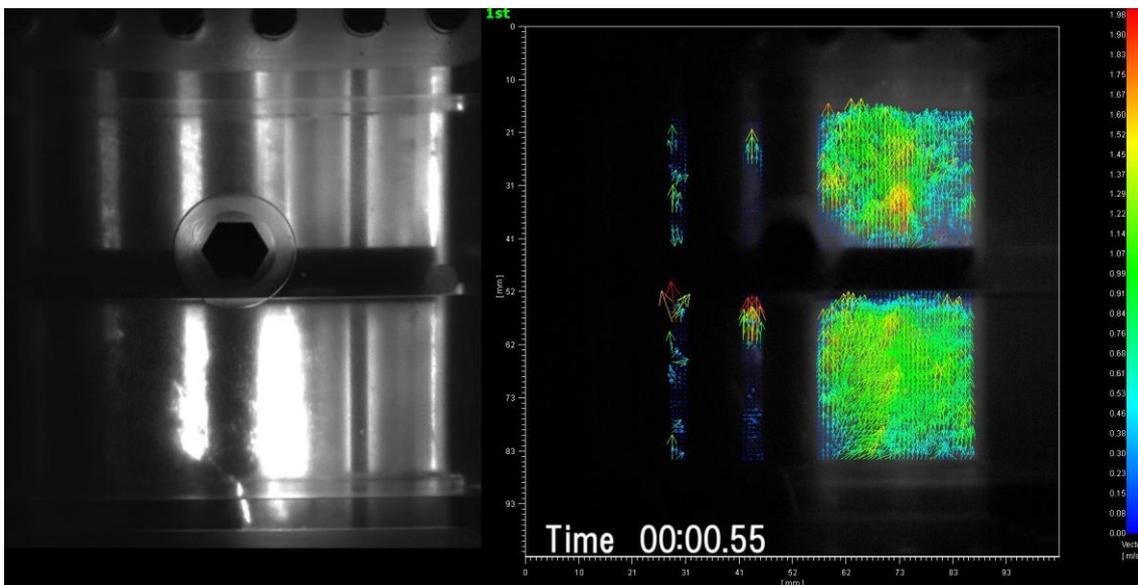


図 3-92 PIV による液相流速分布（ケース C，時刻 0.55 秒，第 4 段 WMS 上流部）

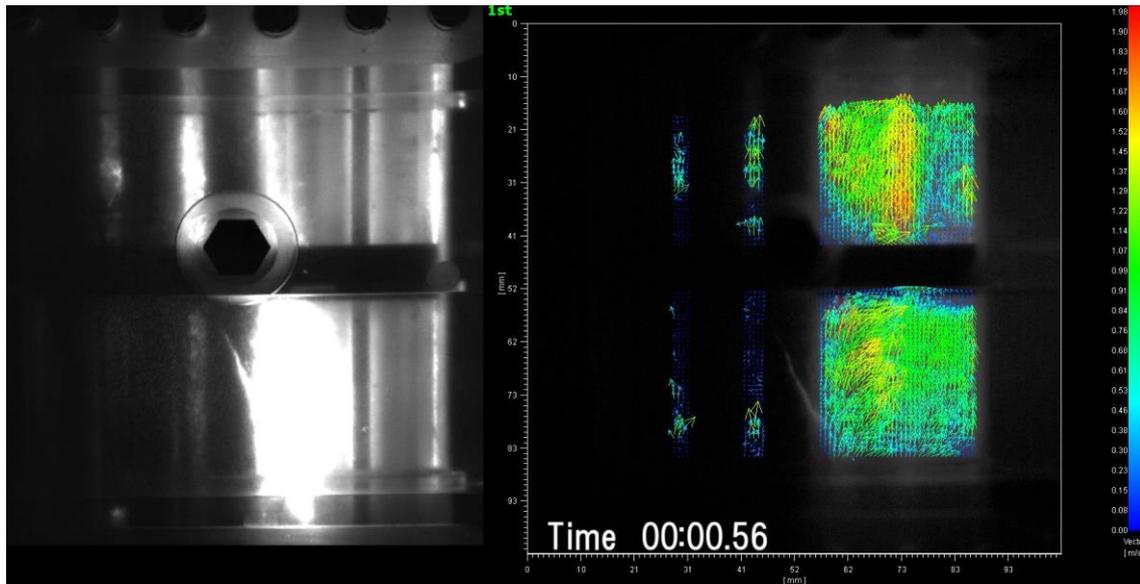


図 3-93 PIV による液相流速分布（ケース B，時刻 0.56 秒，第 4 段 WMS 上流部）

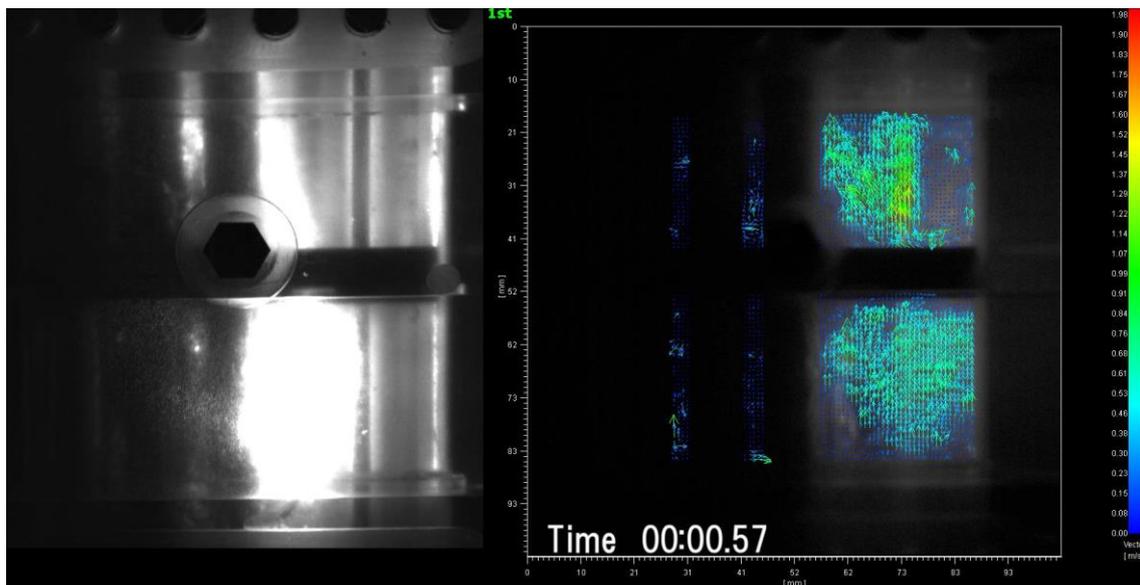


図 3-94 PIV による液相流速分布（ケース C，時刻 0.57 秒，第 4 段 WMS 上流部）

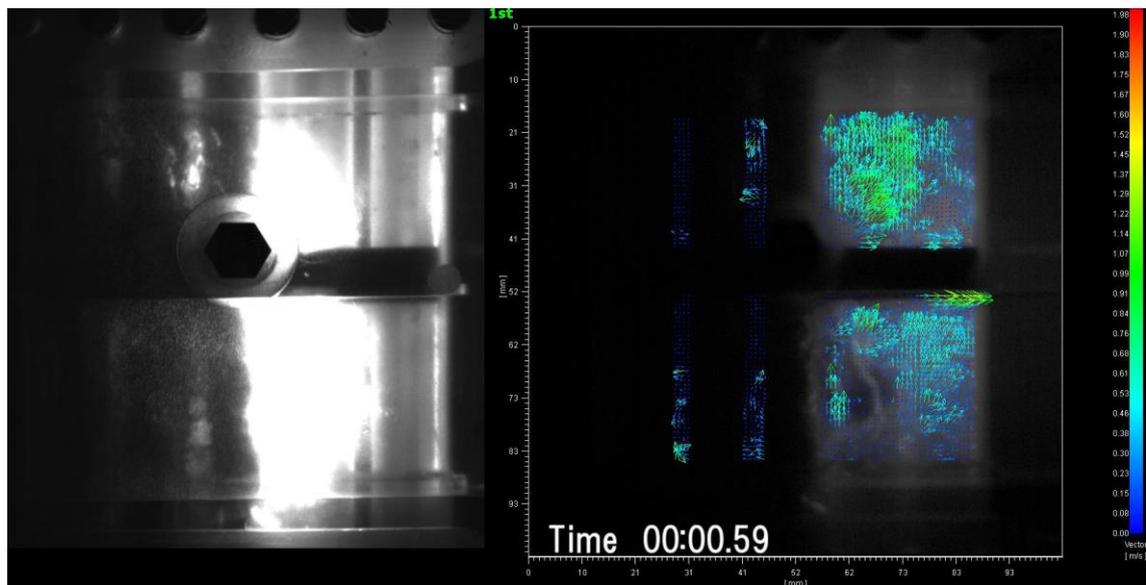


図 3-95 PIV による液相流速分布 (ケース C, 時刻 0.59 秒, 第 4 段 WMS 上流部)

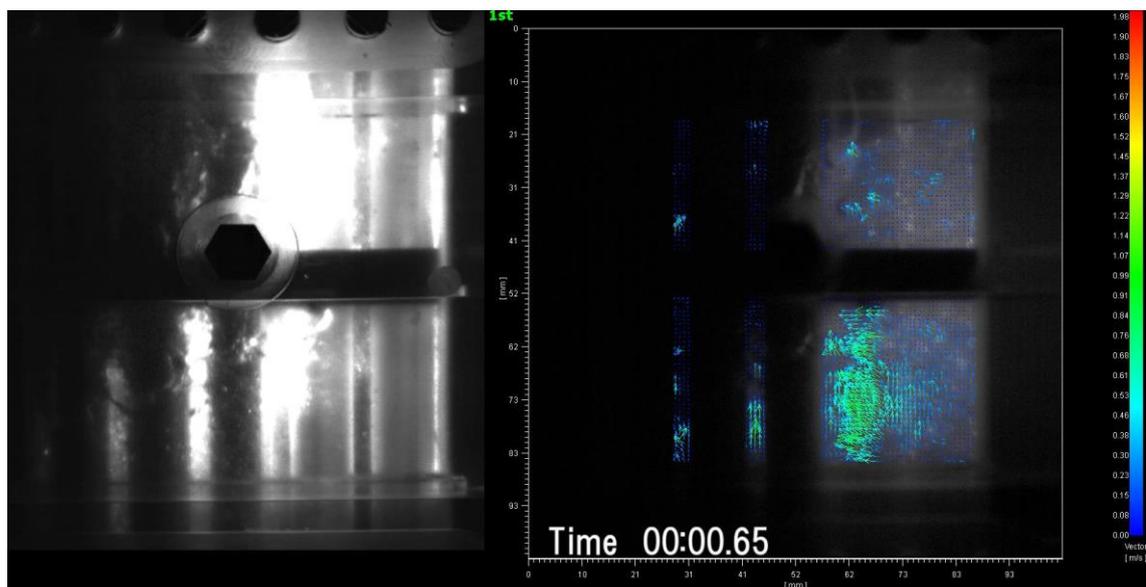


図 3-96 PIV による液相流速分布 (ケース C, 時刻 0.65 秒, 第 4 段 WMS 上流部)

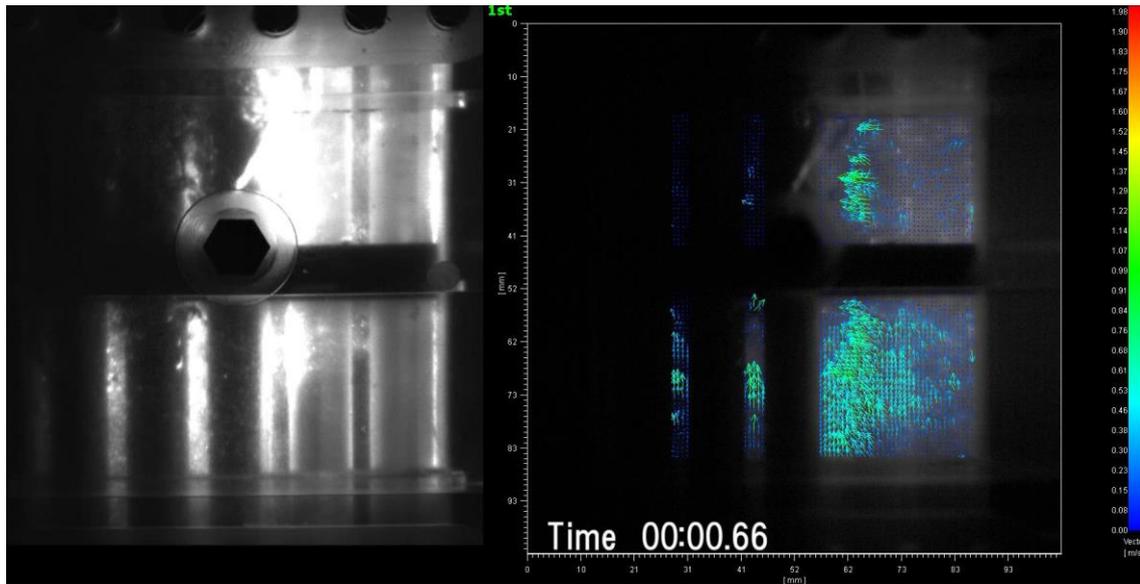


図 3-97 PIV による液相流速分布（ケース C, 時刻 0.66 秒, 第 4 段 WMS 上流部）

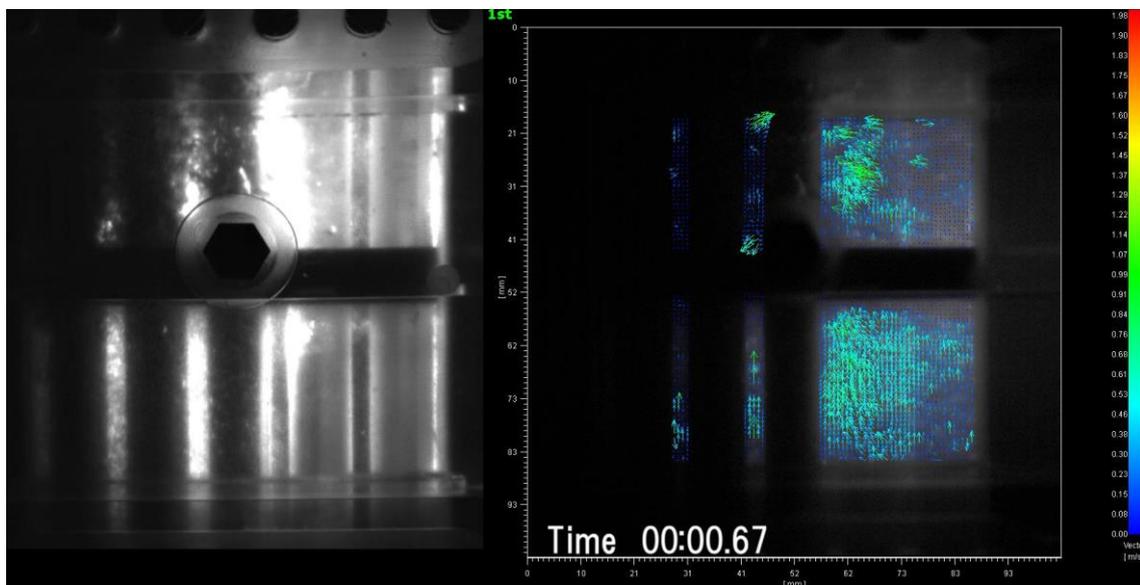


図 3-98 PIV による液相流速分布（ケース C, 時刻 0.67 秒, 第 4 段 WMS 上流部）

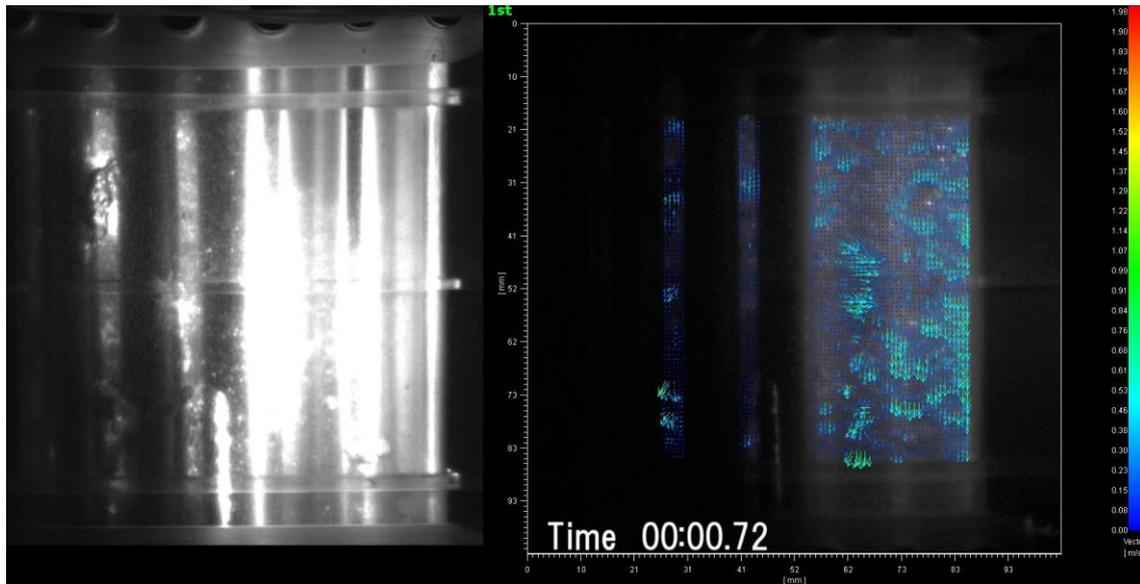


図 3-99 PIVによる液相流速分布（ケース C, 時刻 0.72 秒, 第 6 段 WMS 上流部）

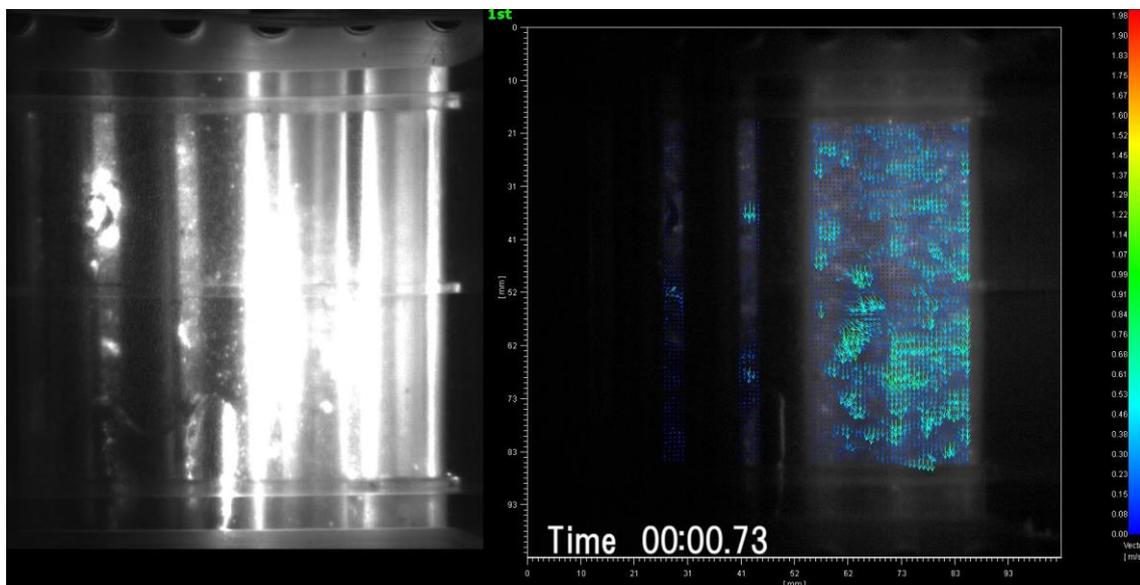


図 3-100 PIVによる液相流速分布（ケース C, 時刻 0.73 秒, 第 6 段 WMS 上流部）

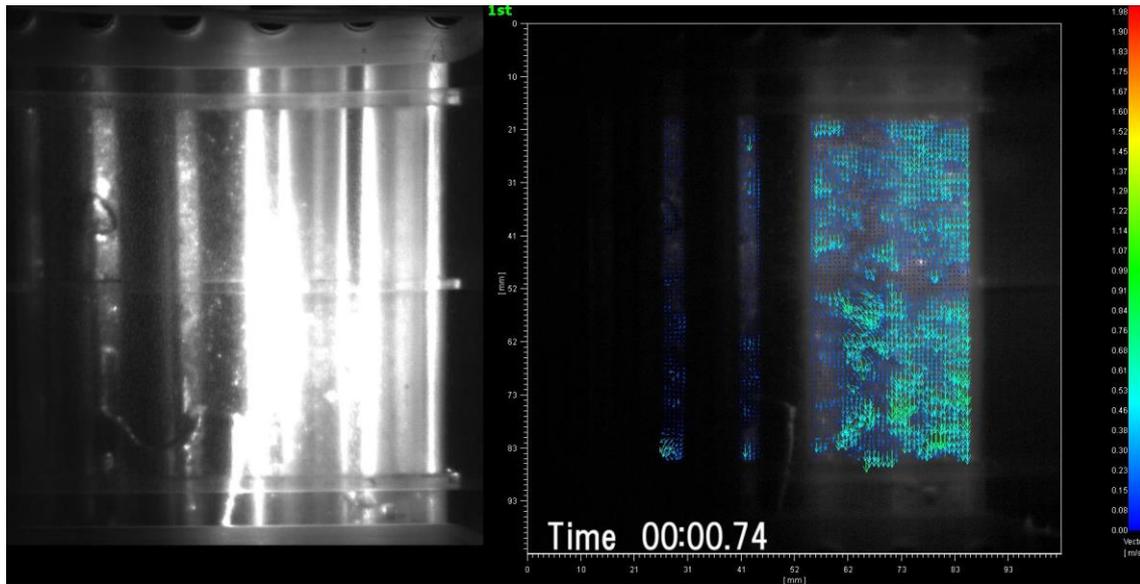


図 3-101 PIVによる液相流速分布（ケース B, 時刻 0.74 秒, 第 6 段 WMS 上流部）

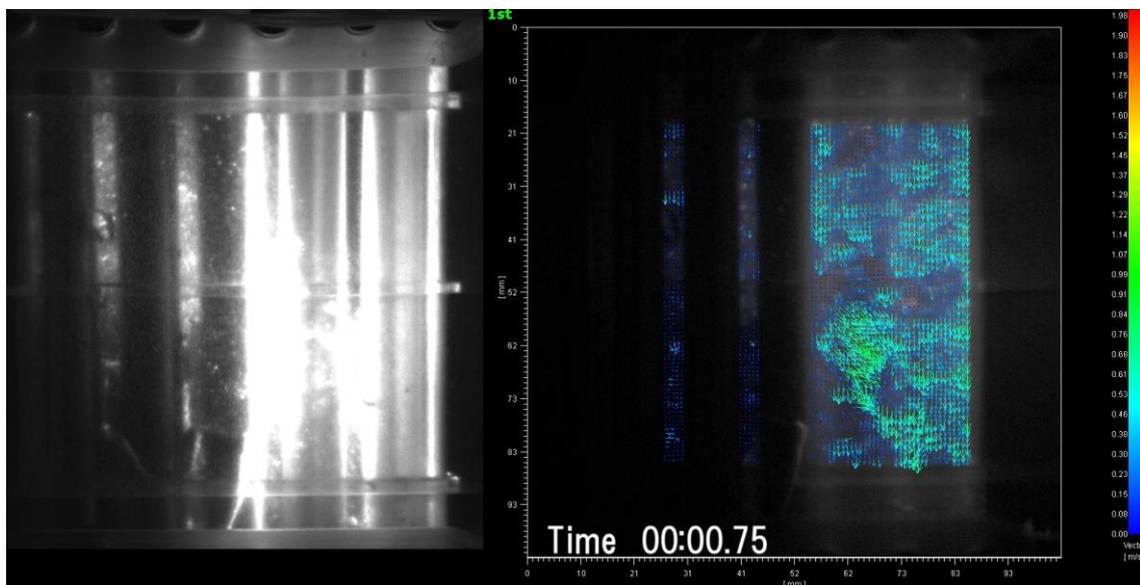


図 3-102 PIVによる液相流速分布（ケース C, 時刻 0.75 秒, 第 6 段 WMS 上流部）

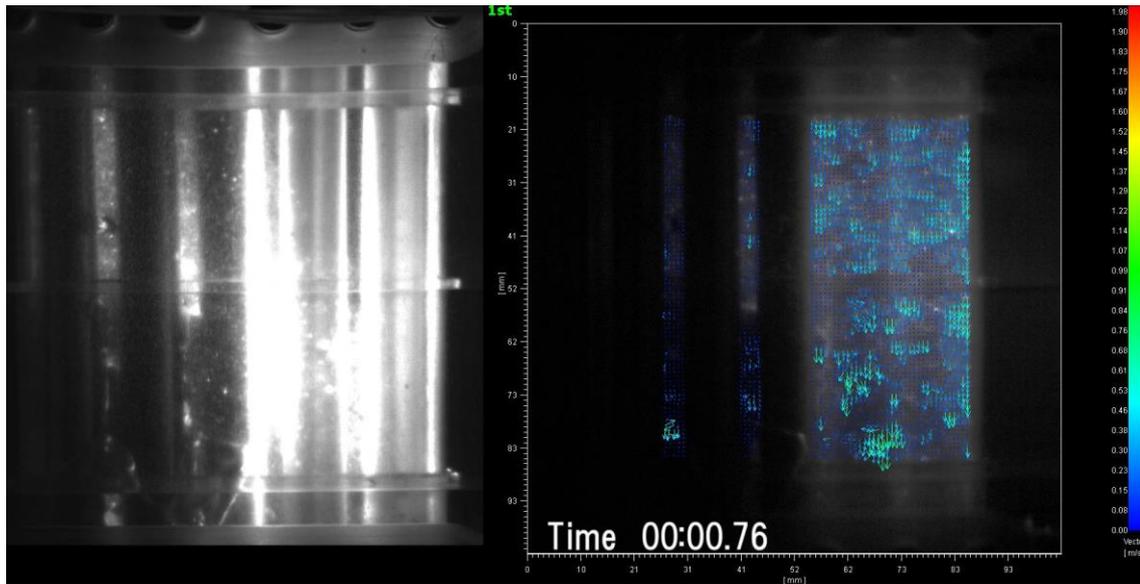


図 3-103 PIVによる液相流速分布（ケース C, 時刻 0.76 秒, 第 6 段 WMS 上流部）

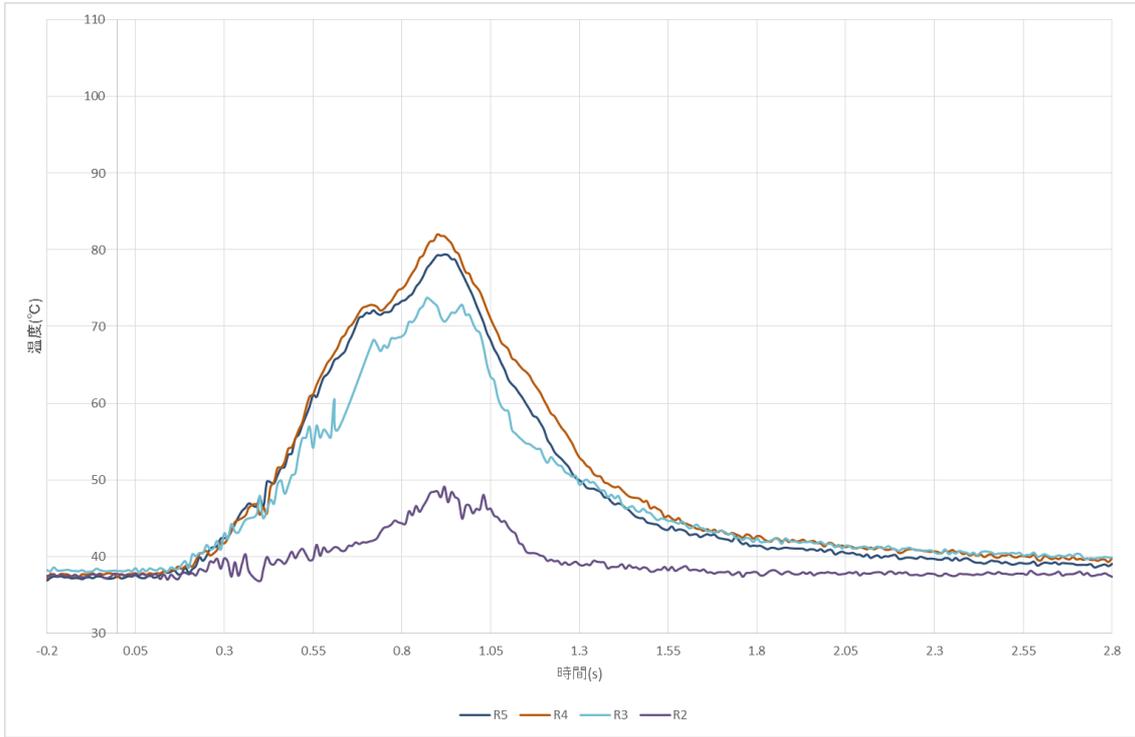


図 3-104 光ファイバによる液相温度（ケース A, 第 4 段 WMS 部 / T6 ライン）

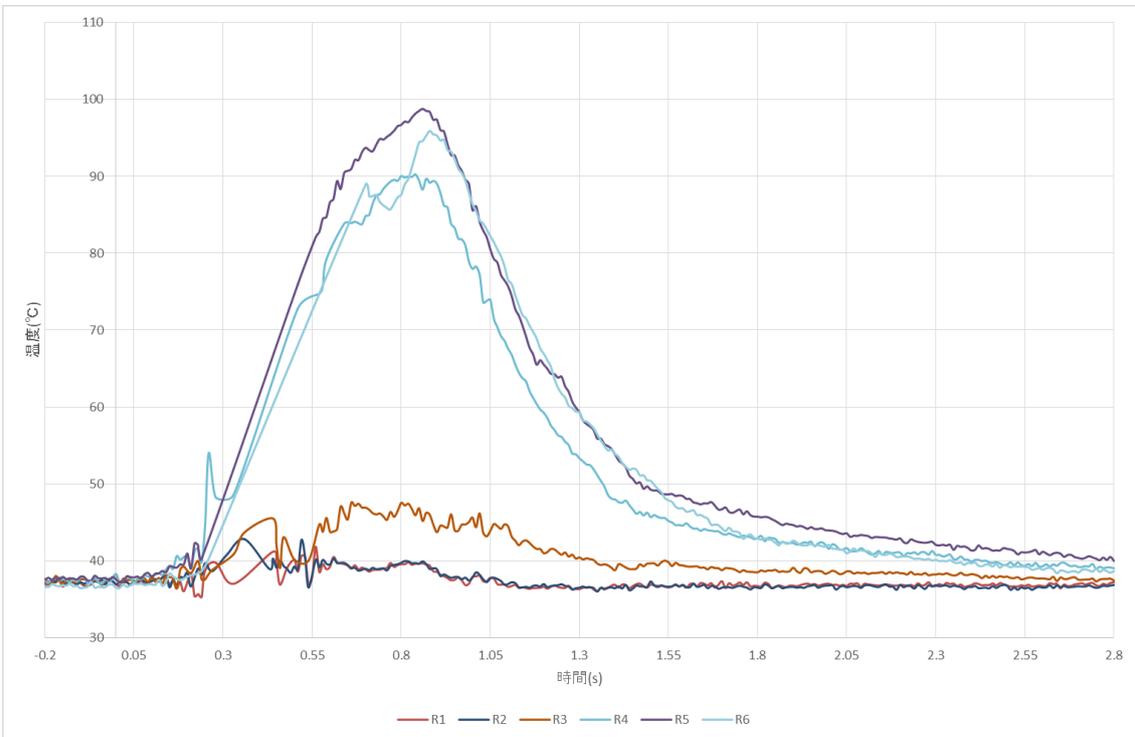


図 3-105 光ファイバによる液相温度（ケース A, 第 4 段 WMS 部 / T5 ライン）

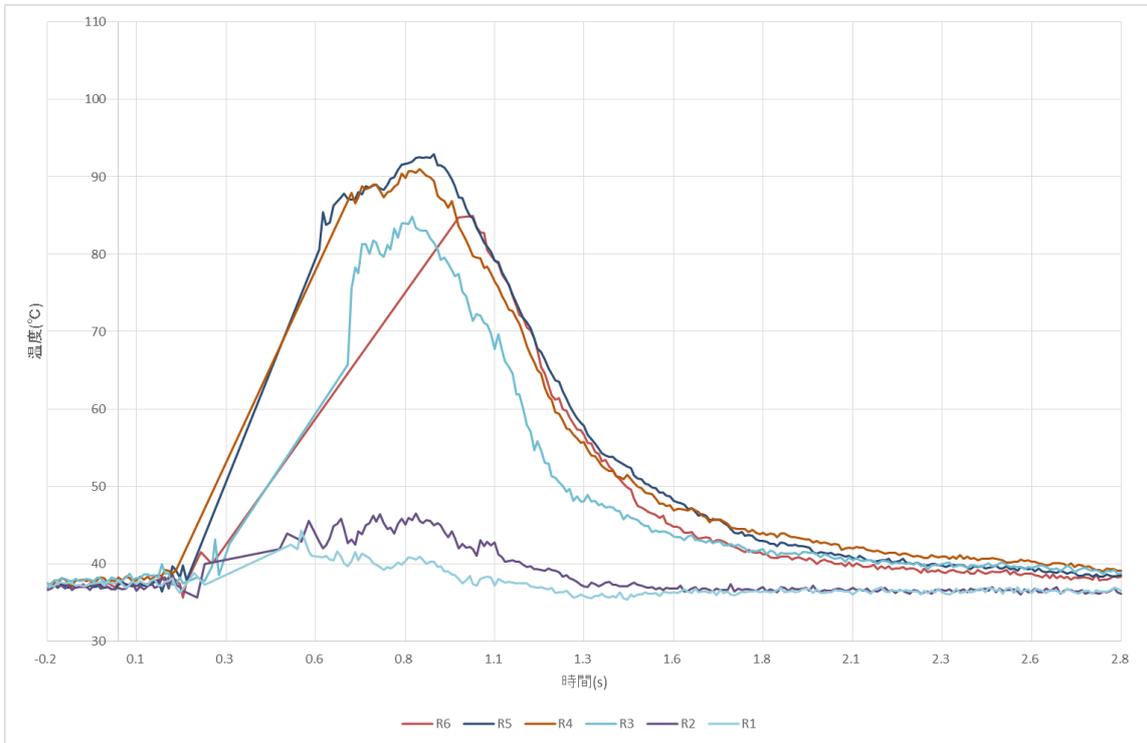


図 3-106 光ファイバによる液相温度（ケース A, 第 4 段 WMS 部 / T4 ライン）

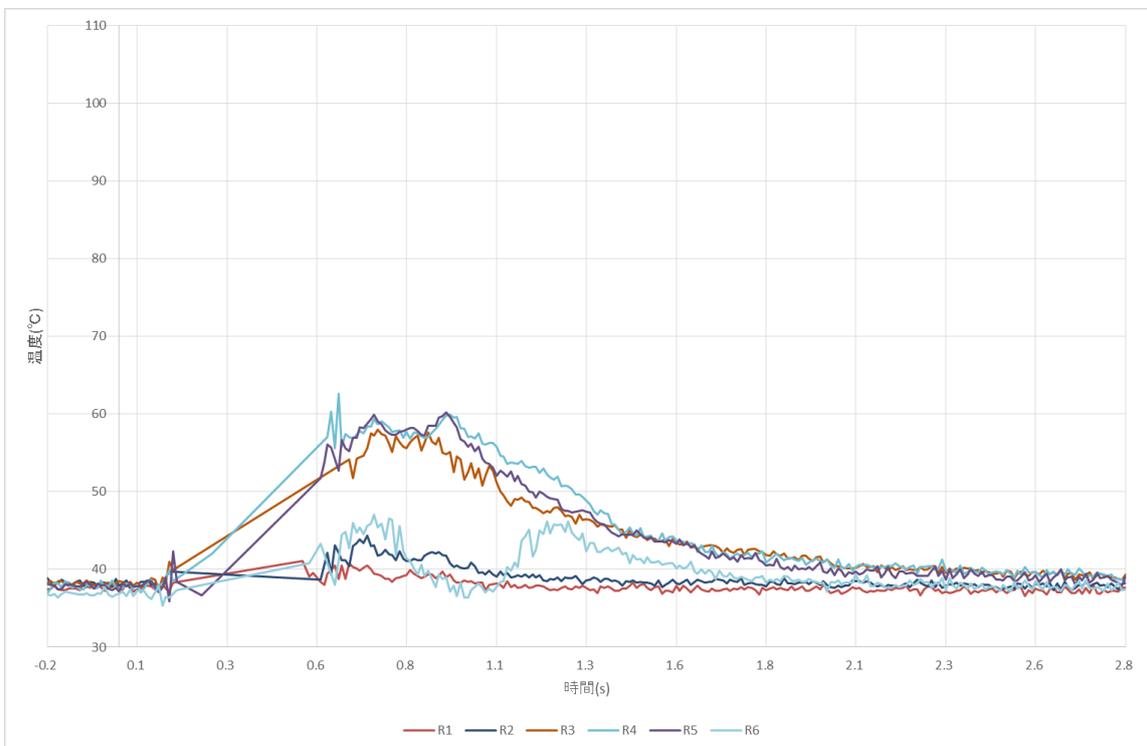


図 3-107 光ファイバによる液相温度（ケース A, 第 4 段 WMS 部 / T3 ライン）

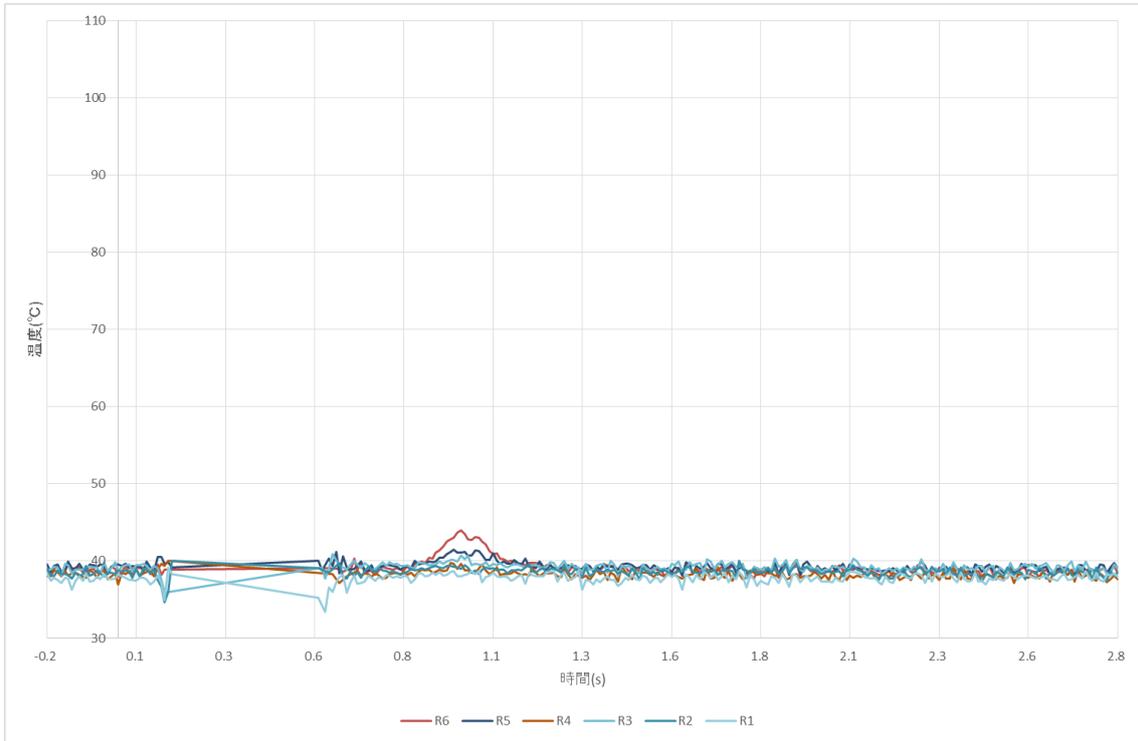


図 3-108 光ファイバによる液相温度（ケース A, 第 4 段 WMS 部 / T2 ライン）

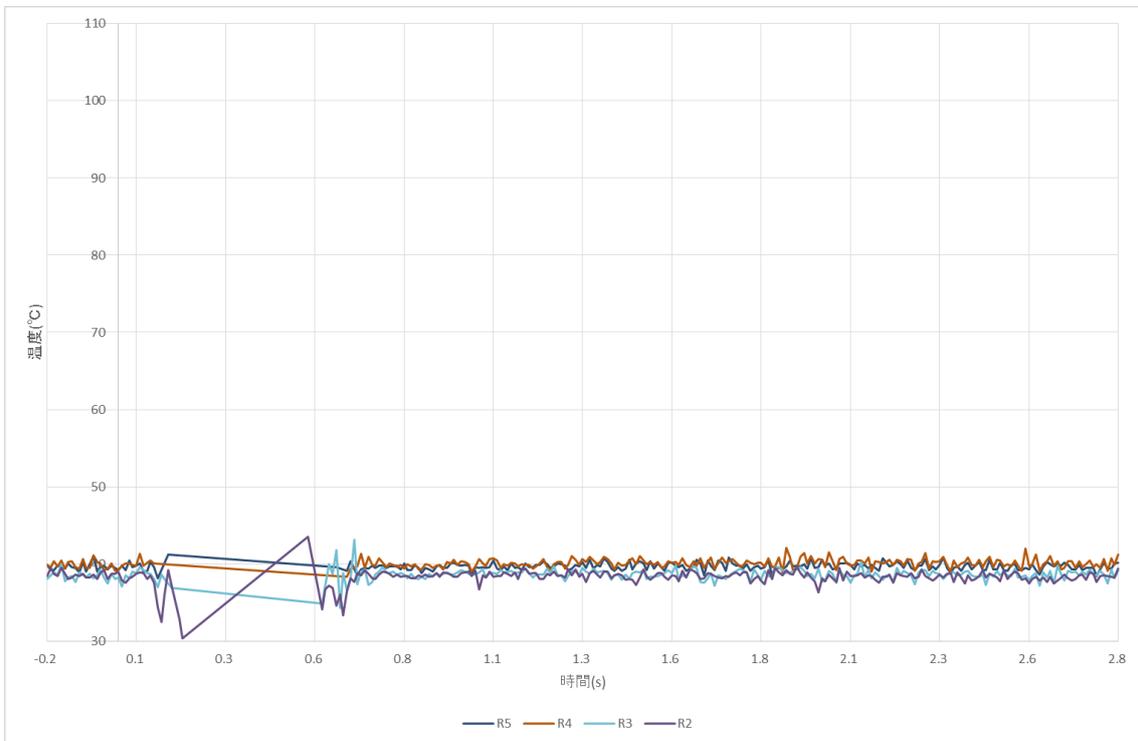


図 3-109 光ファイバによる液相温度（ケース A, 第 4 段 WMS 部 / T1 ライン）

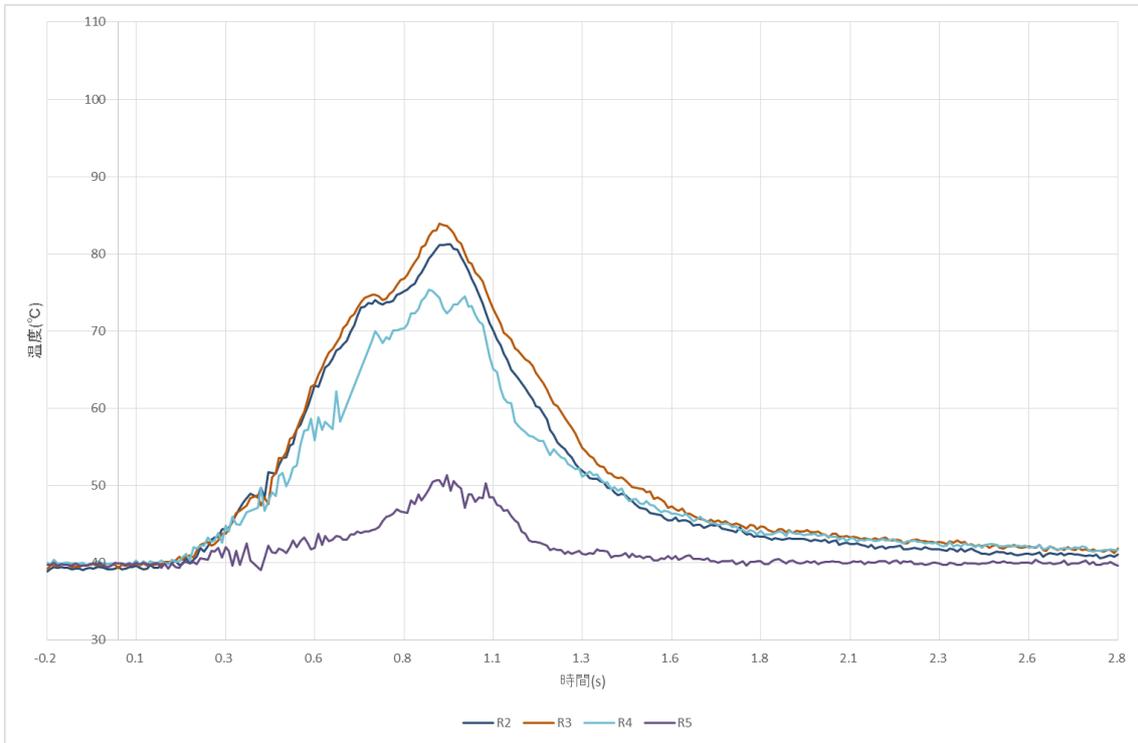


図 3-110 光ファイバによる液相温度（ケース B, 第 4 段 WMS 部 / T6 ライン）

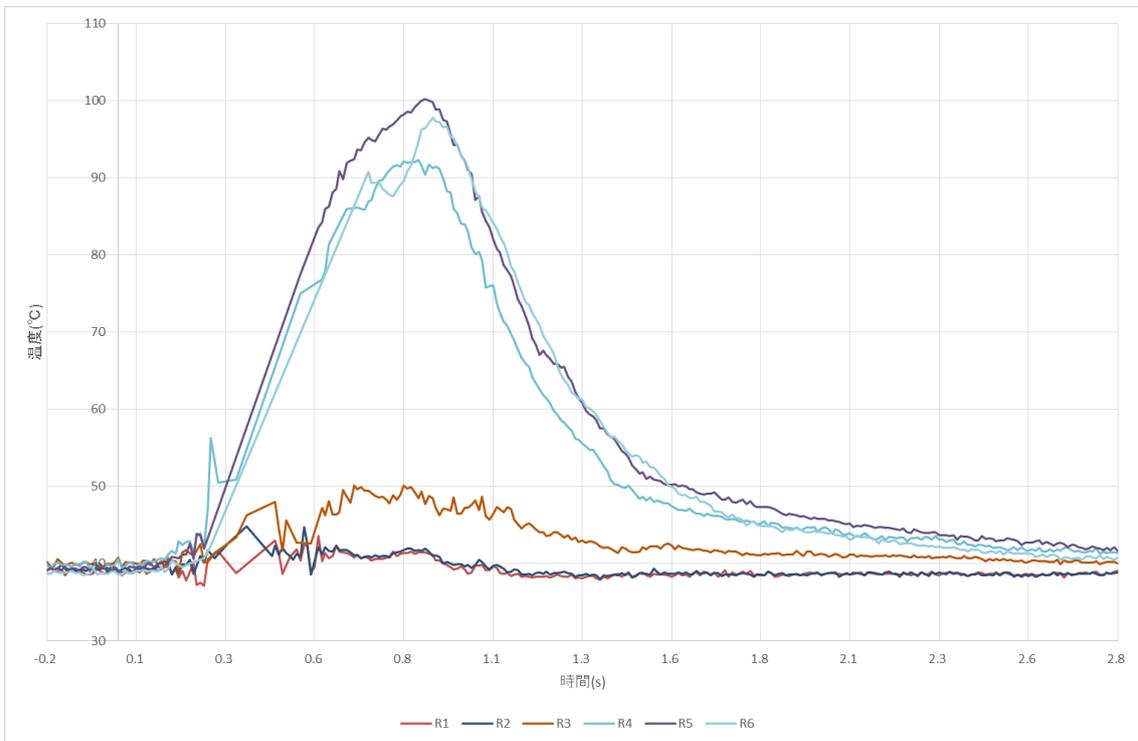


図 3-111 光ファイバによる液相温度（ケース B, 第 4 段 WMS 部 / T5 ライン）

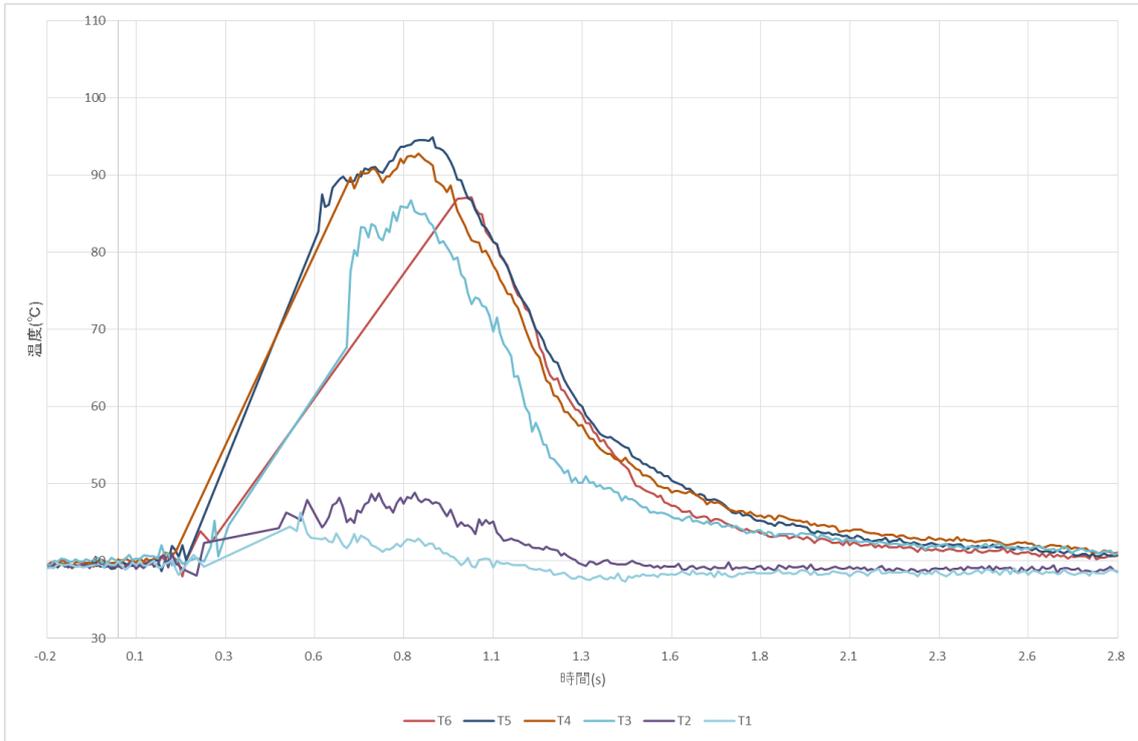


図 3-112 光ファイバによる液相温度（ケース B, 第 4 段 WMS 部 / T4 ライン）

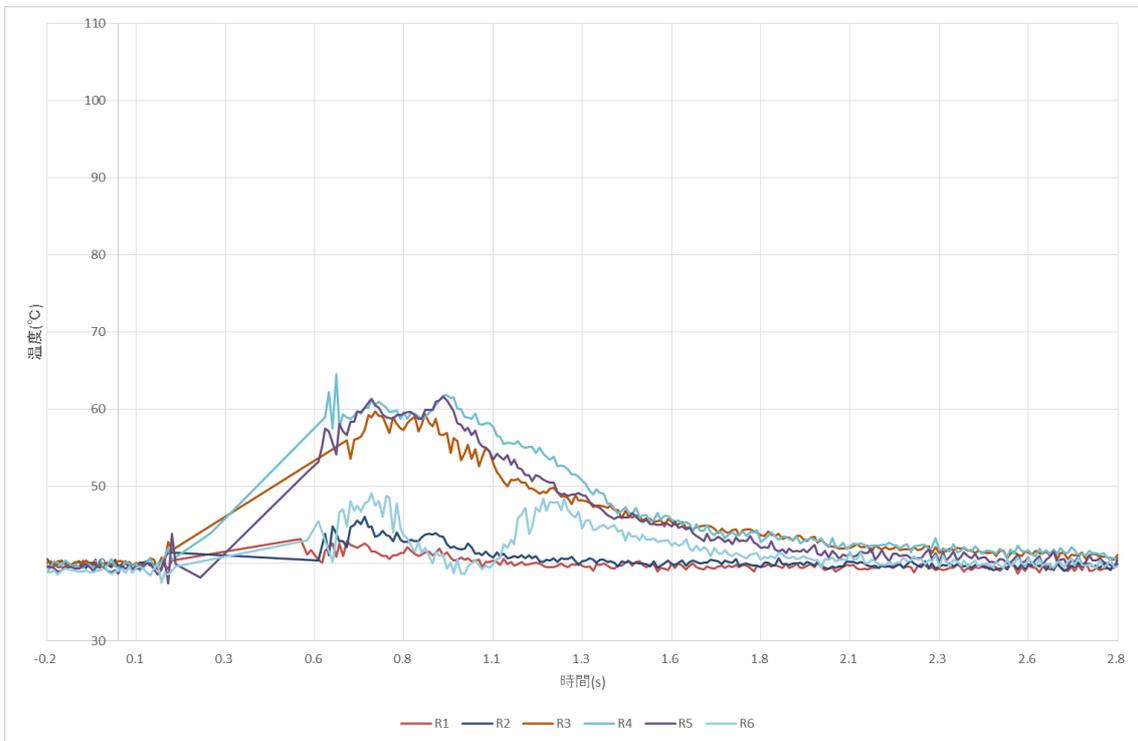


図 3-113 光ファイバによる液相温度（ケース B, 第 4 段 WMS 部 / T3 ライン）

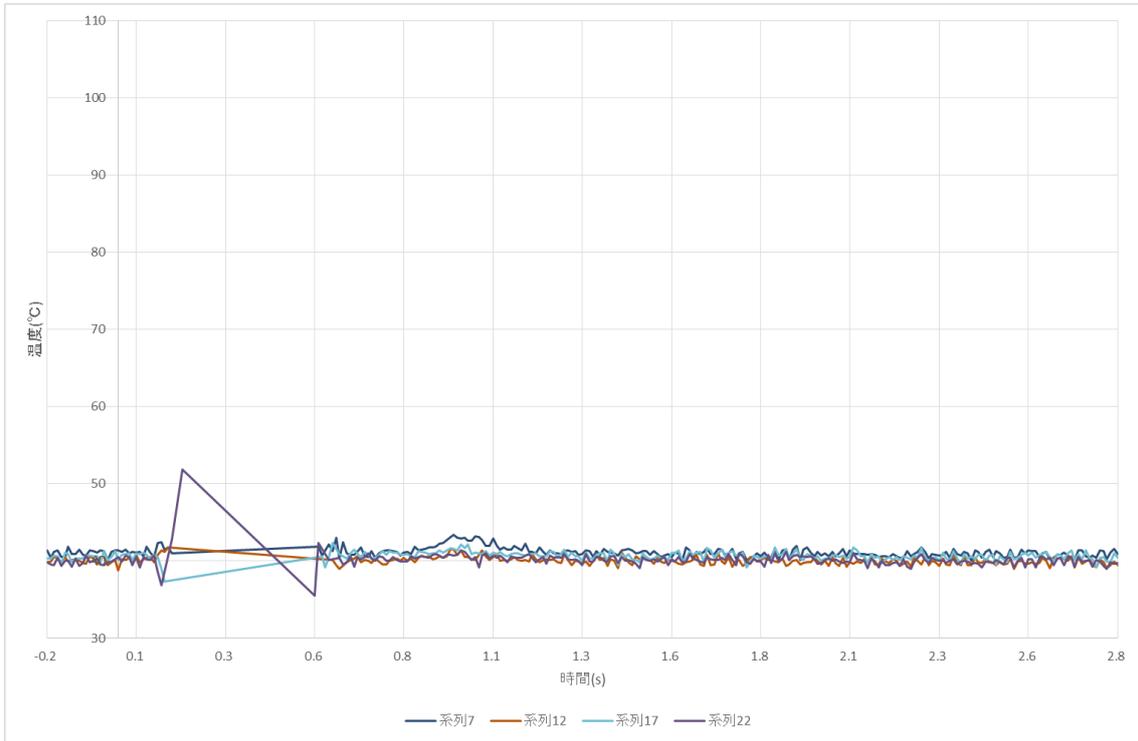


図 3-114 光ファイバによる液相温度（ケース B, 第 4 段 WMS 部 / T2 ライン）

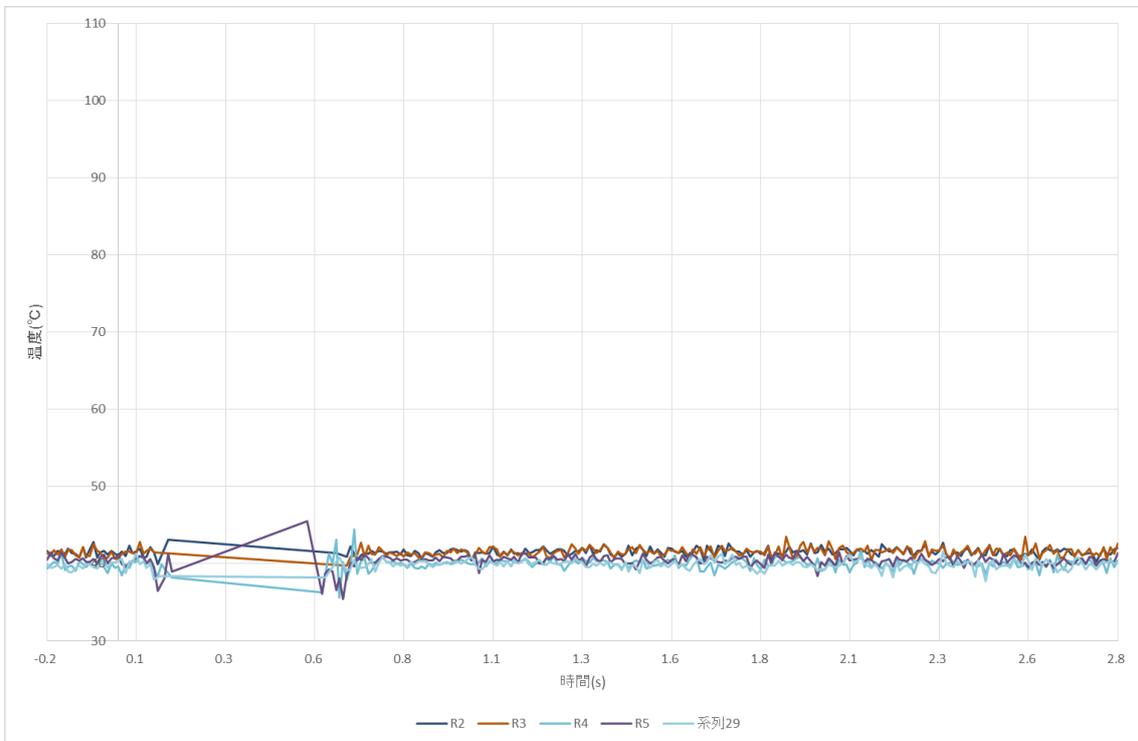


図 3-115 光ファイバによる液相温度（ケース B, 第 4 段 WMS 部 / T1 ライン）

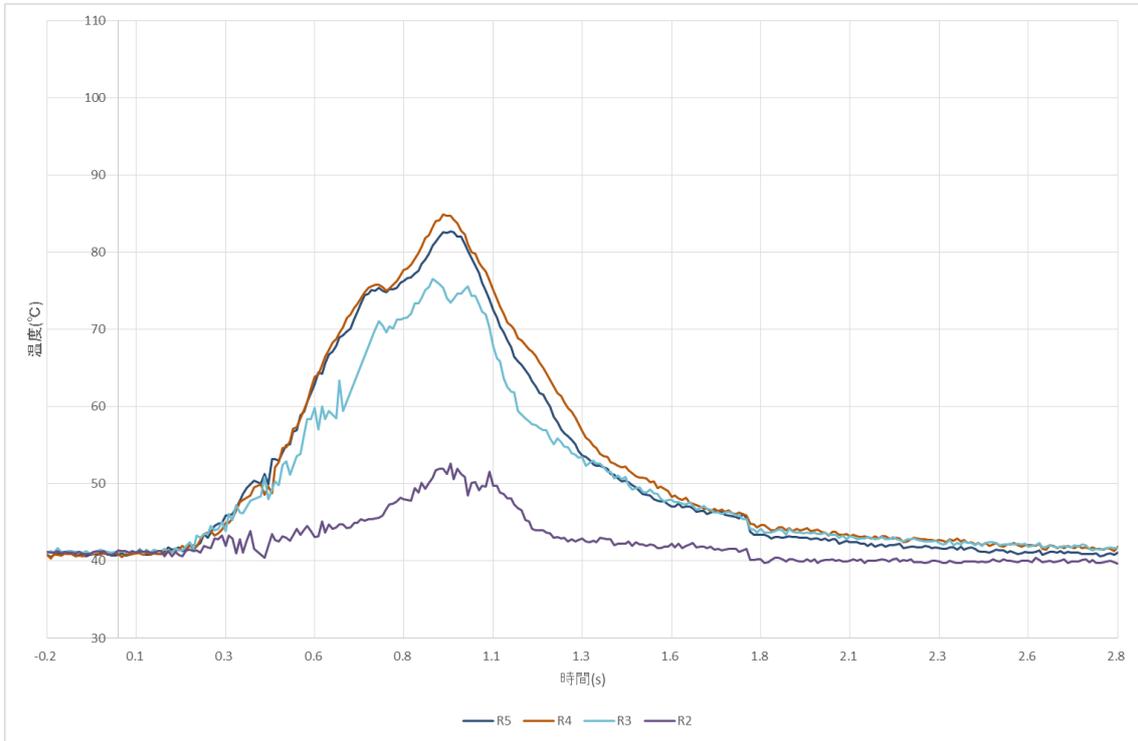


図 3-116 光ファイバによる液相温度（ケース C, 第 4 段 WMS 部 / T6 ライン）

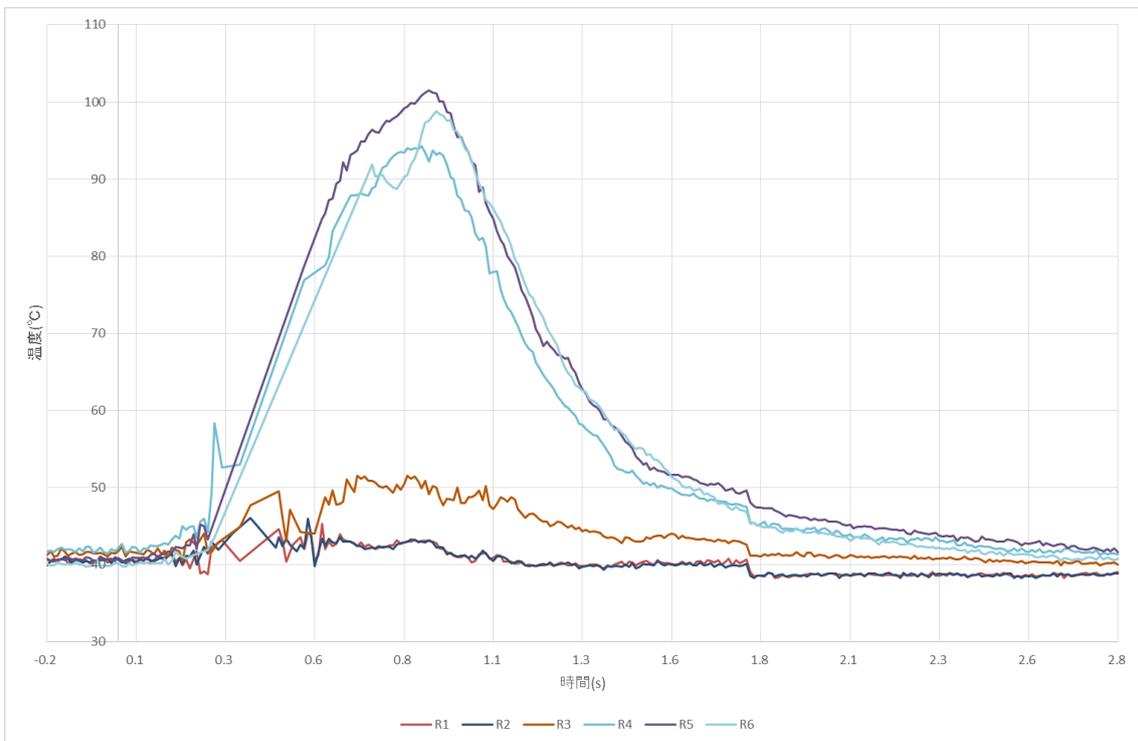


図 3-117 光ファイバによる液相温度（ケース C, 第 4 段 WMS 部 / T5 ライン）

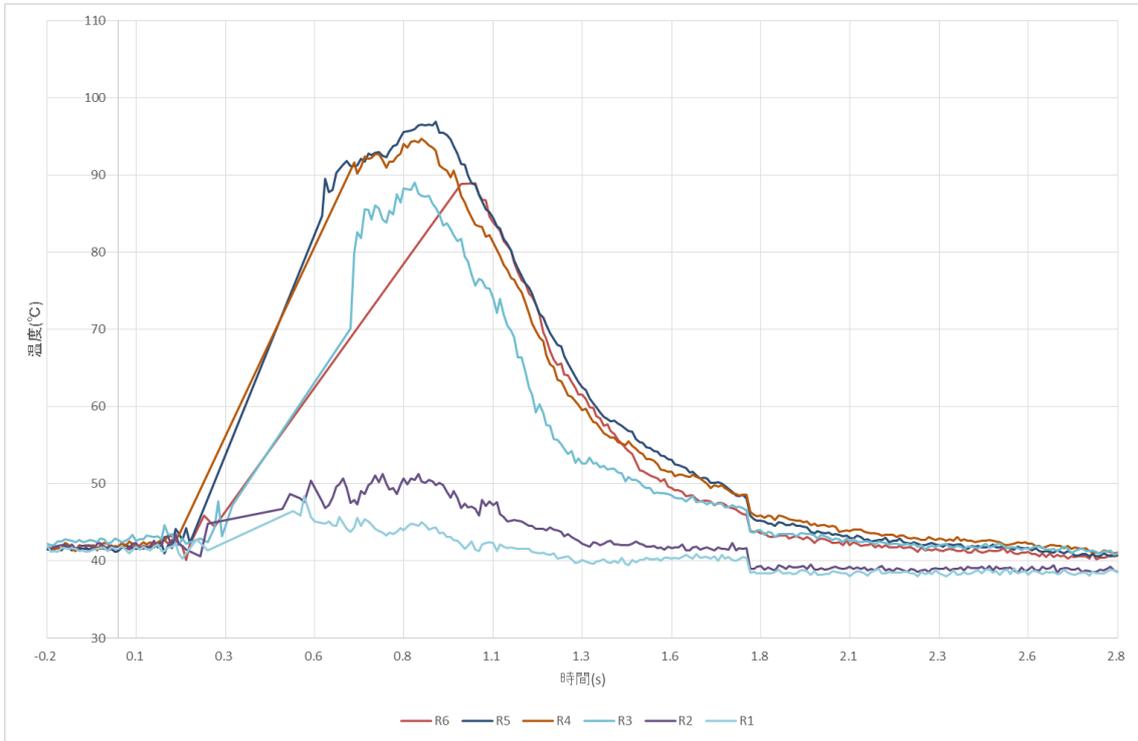


図 3-118 光ファイバによる液相温度 (ケース C, 第 4 段 WMS 部 / T4 ライン)

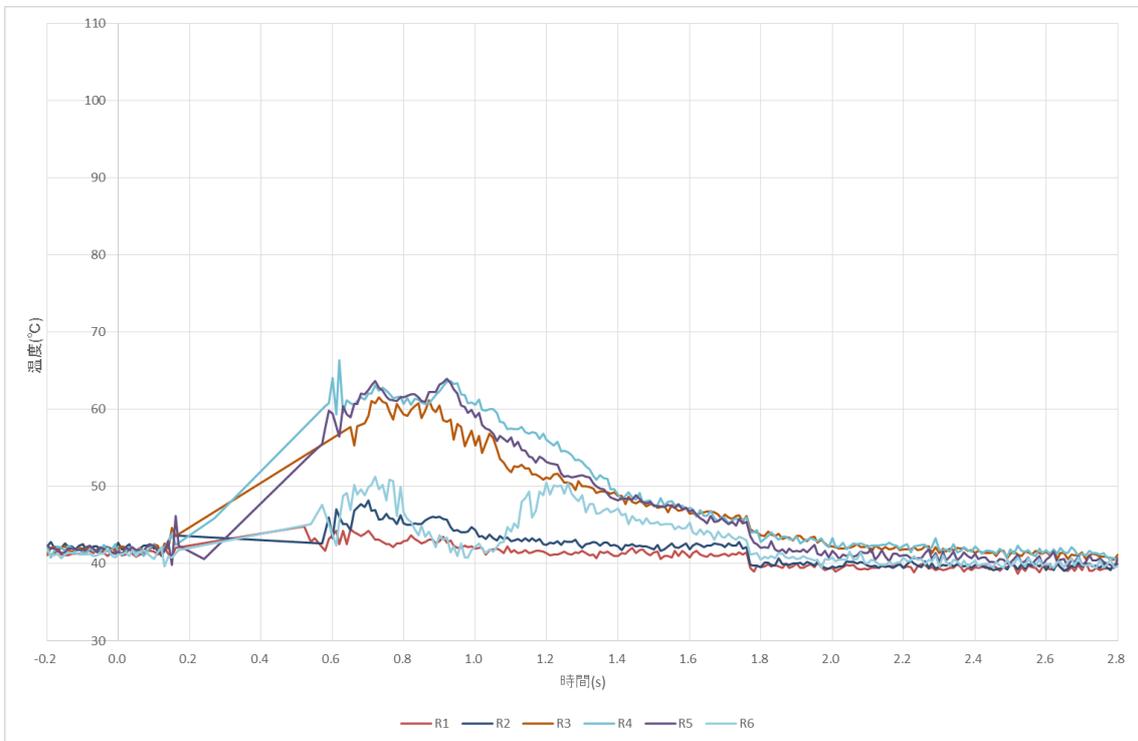


図 3-119 光ファイバによる液相温度 (ケース C, 第 4 段 WMS 部 / T3 ライン)

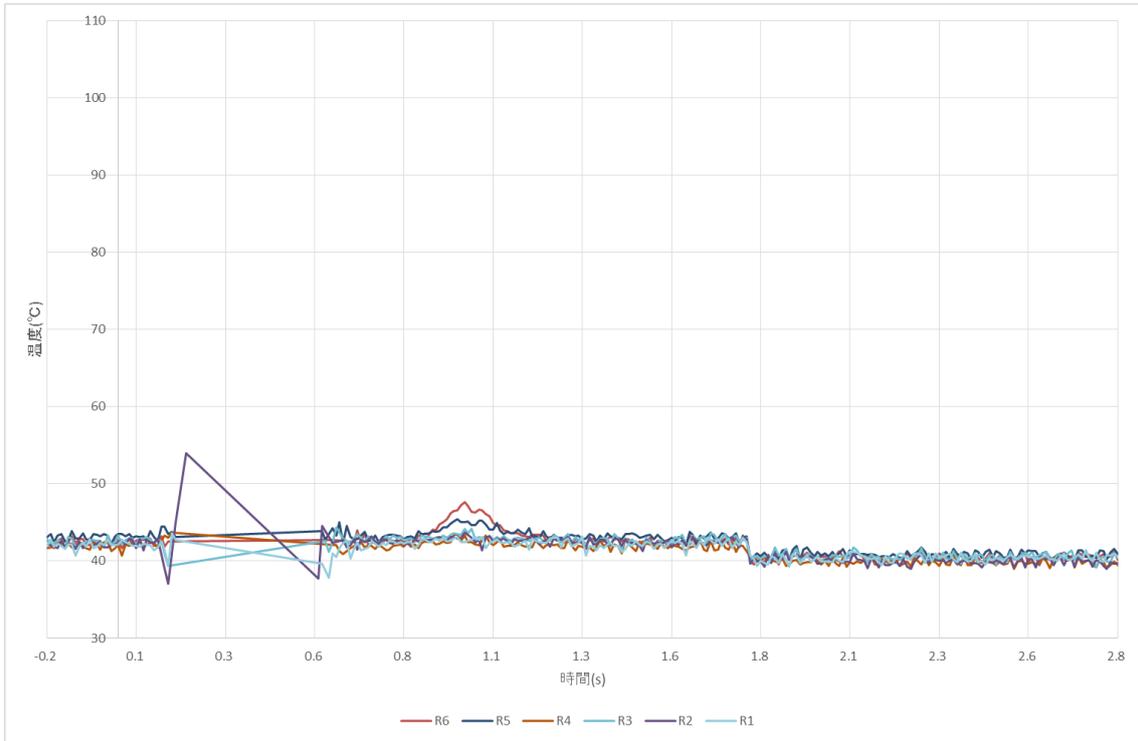


図 3-120 光ファイバによる液相温度（ケース C, 第 4 段 WMS 部 / T2 ライン）

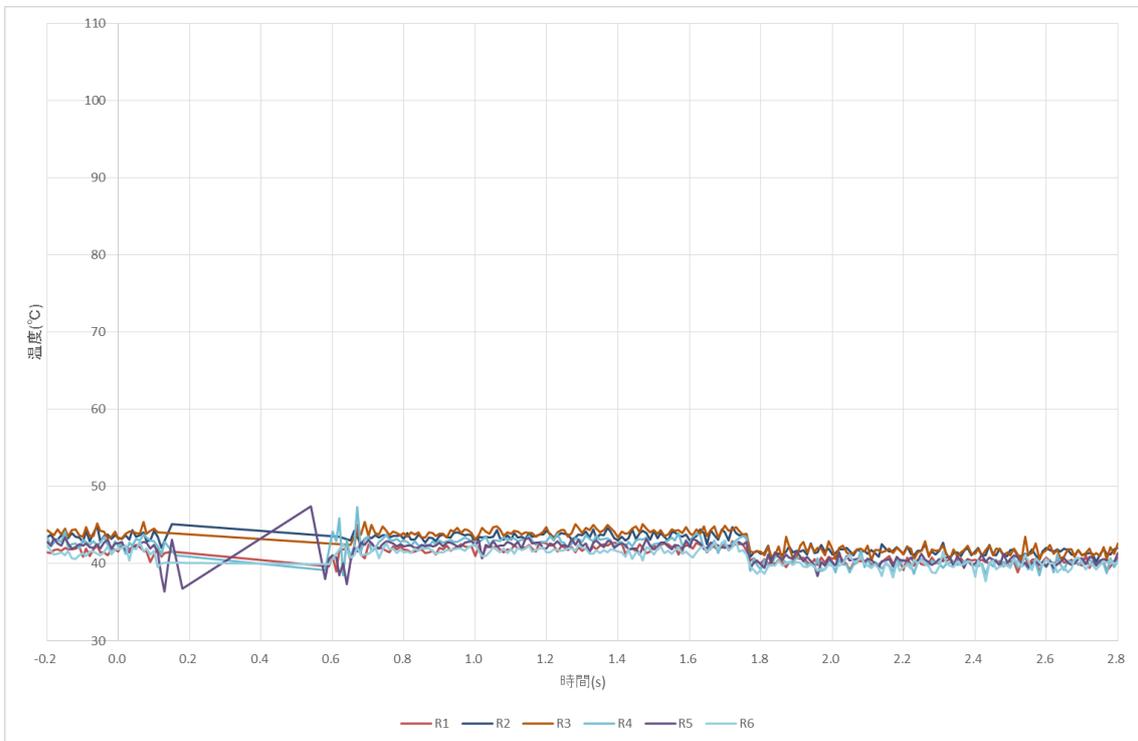


図 3-121 光ファイバによる液相温度（ケース C, 第 4 段 WMS 部 / T1 ライン）

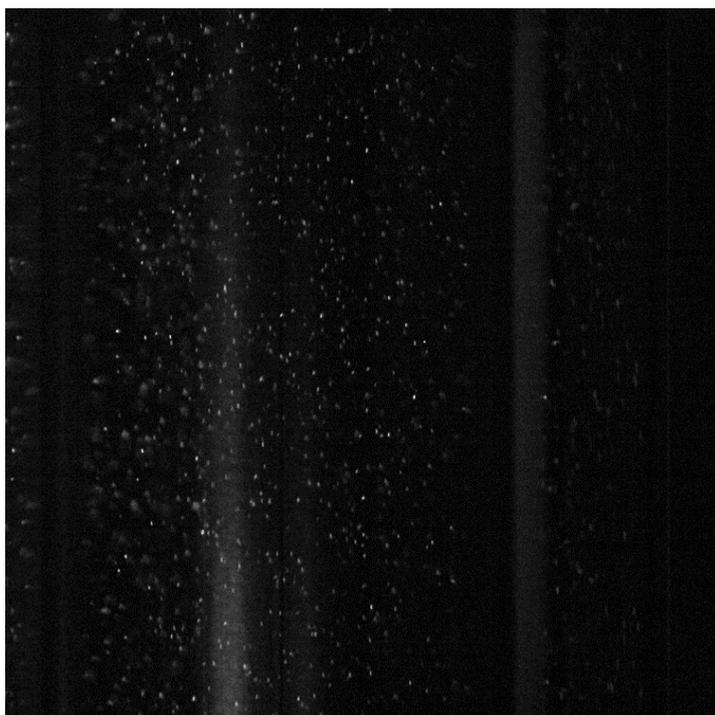


図 3-122 LIF 法によるトレーサ静止画像

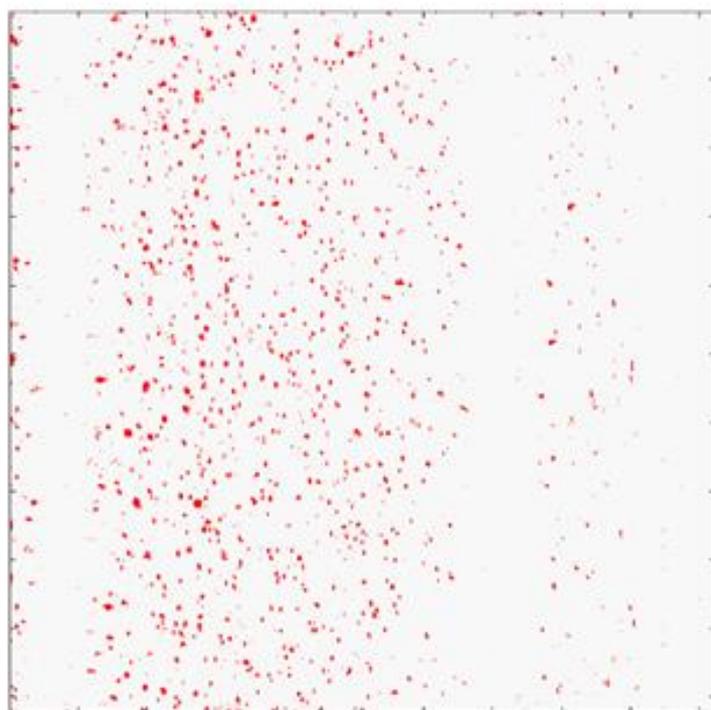


図 3-123 メディアンフィルタによるトレーサ領域の抽出

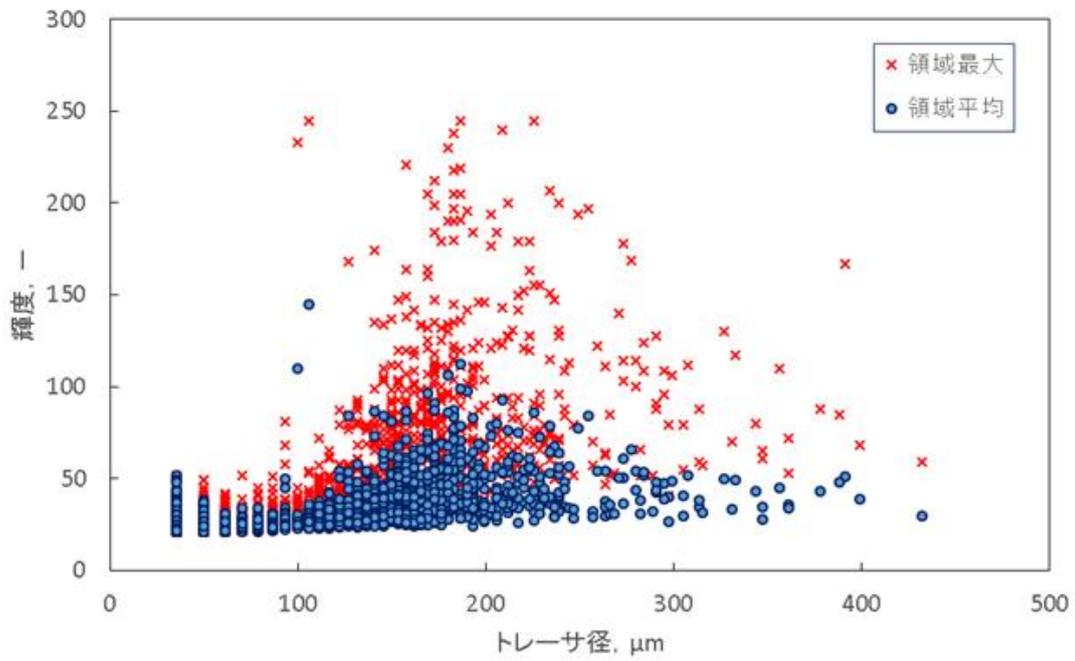


図 3-124 トレーサ部輝度値とトレーサ径の関係 (流体温度 30 °C)

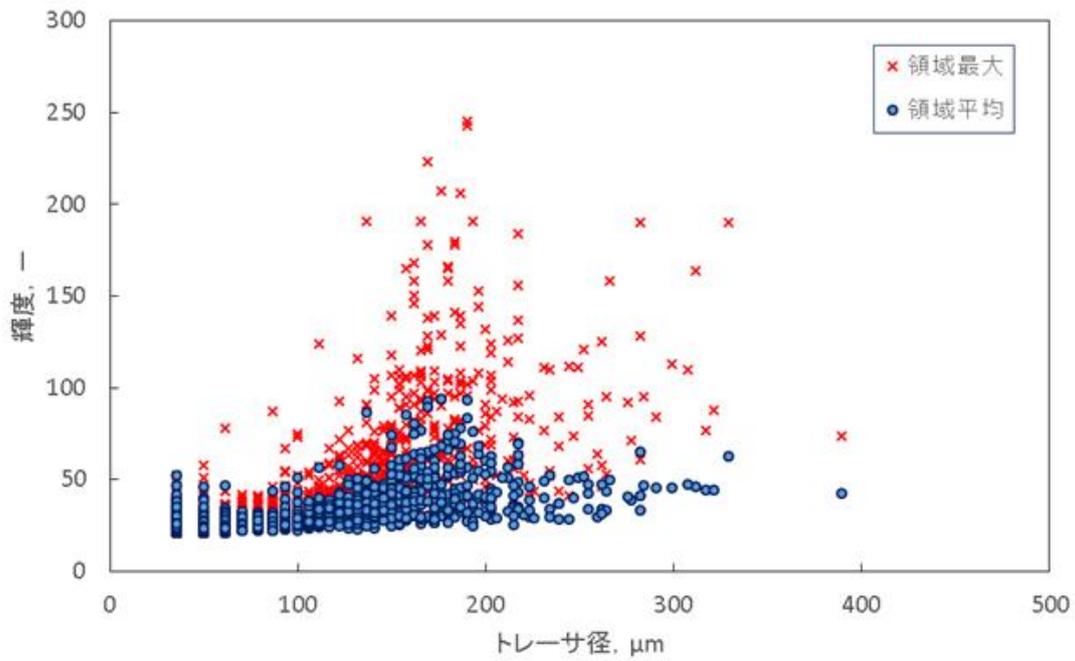


図 3-125 トレーサ部輝度値とトレーサ径の関係 (流体温度 40 °C)

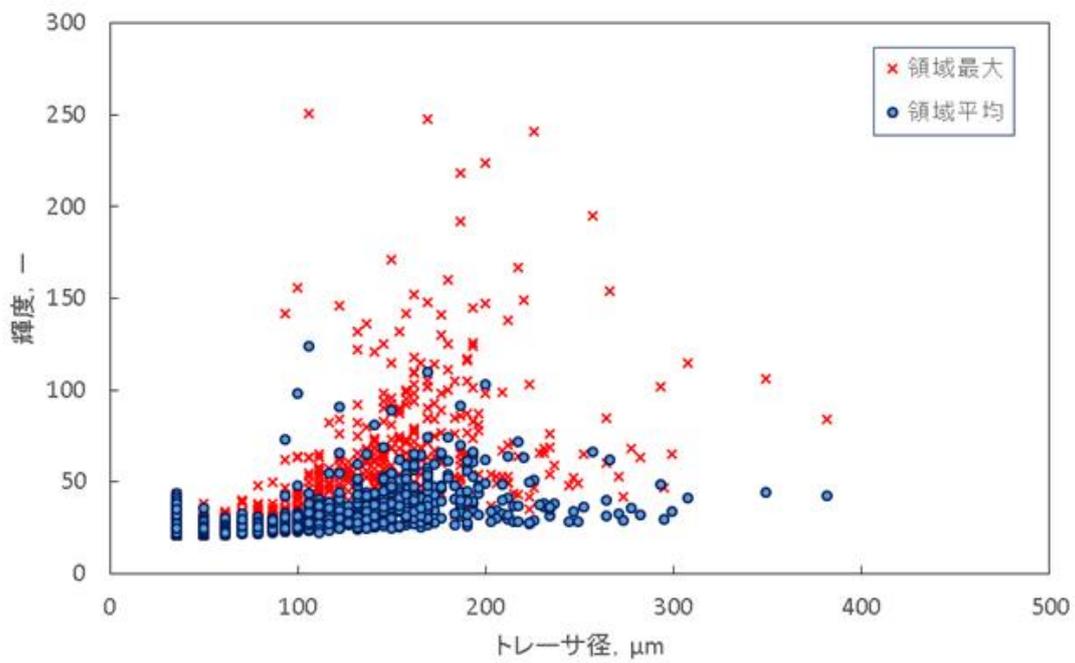


図 3-126 トレーサ部輝度値とトレーサ径の関係 (流体温度 50 °C)

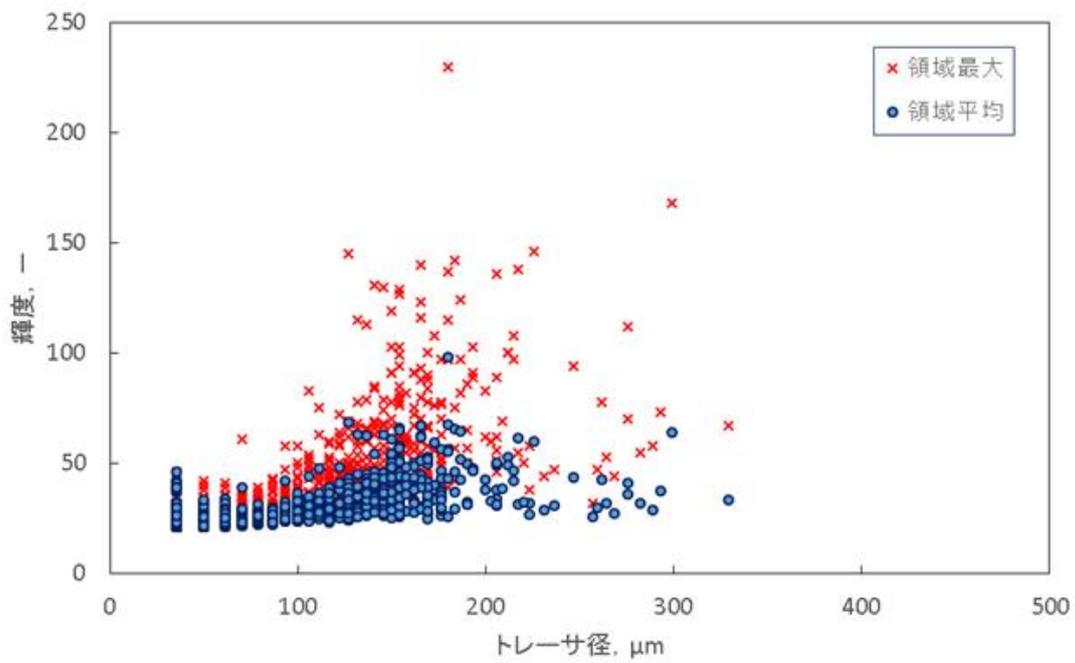


図 3-127 トレーサ部輝度値とトレーサ径の関係 (流体温度 60 °C)

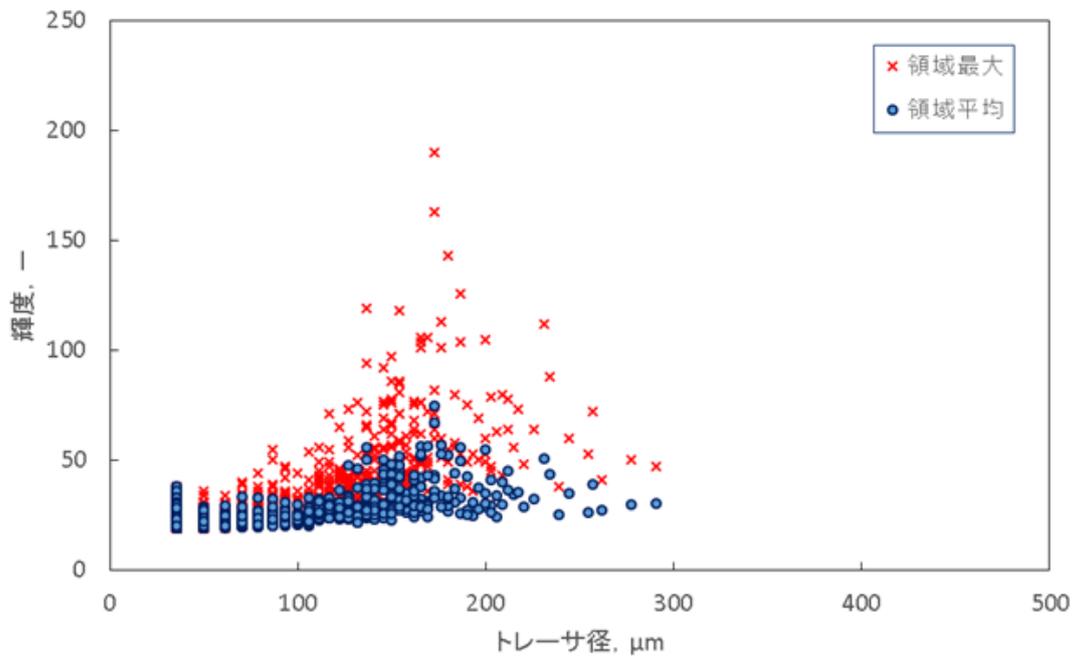


図 3-128 トレーサ部輝度値とトレーサ径の関係 (流体温度 70 °C)

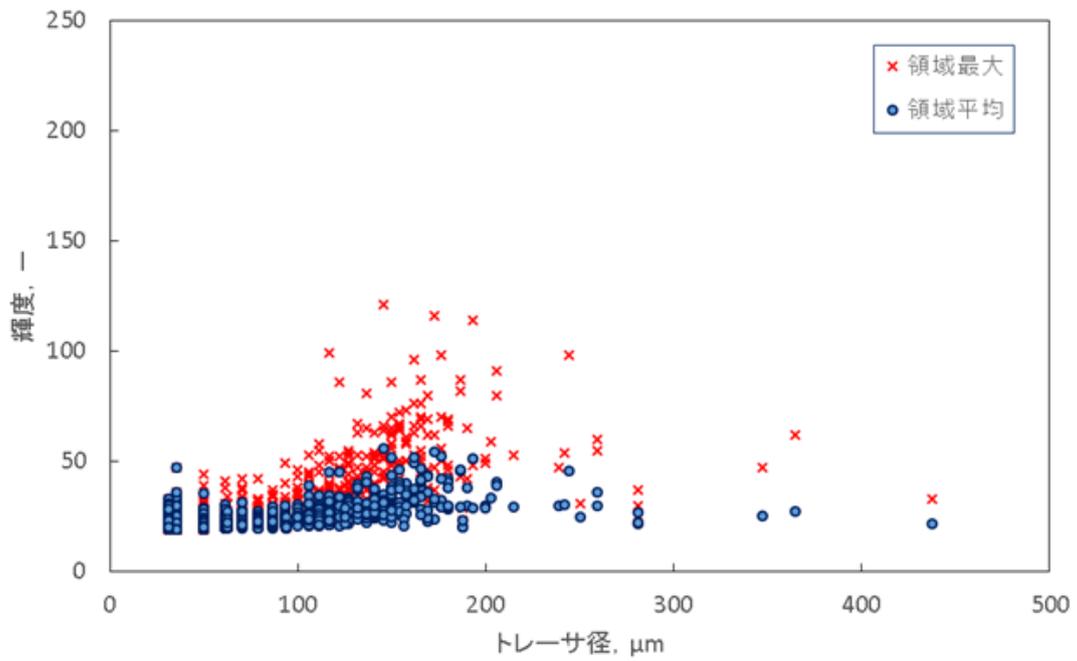


図 3-129 トレーサ部輝度値とトレーサ径の関係 (流体温度 80 °C)

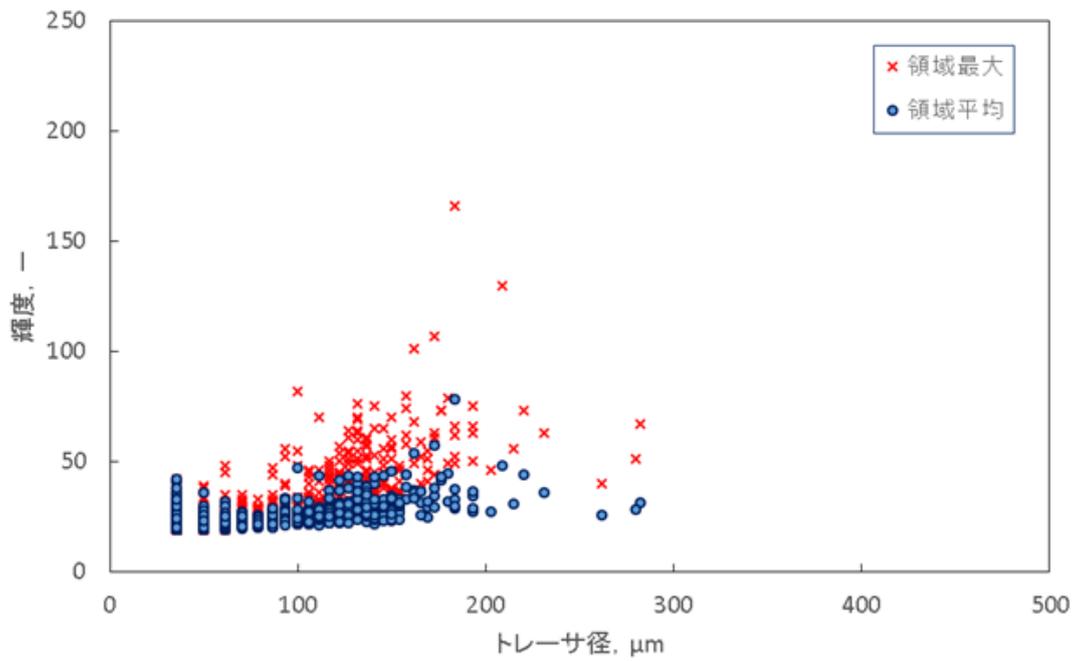


図 3-130 トレーサ部輝度値とトレーサ径の関係 (流体温度 90 °C)

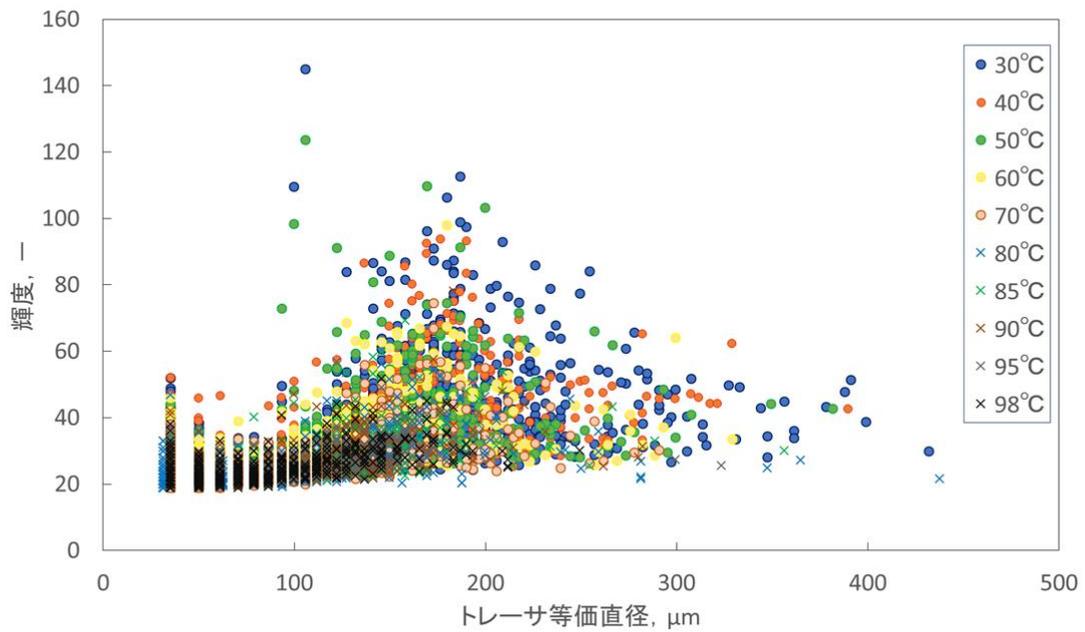


図 3-131 トレーサ部輝度値とトレーサ径の関係のまとめ

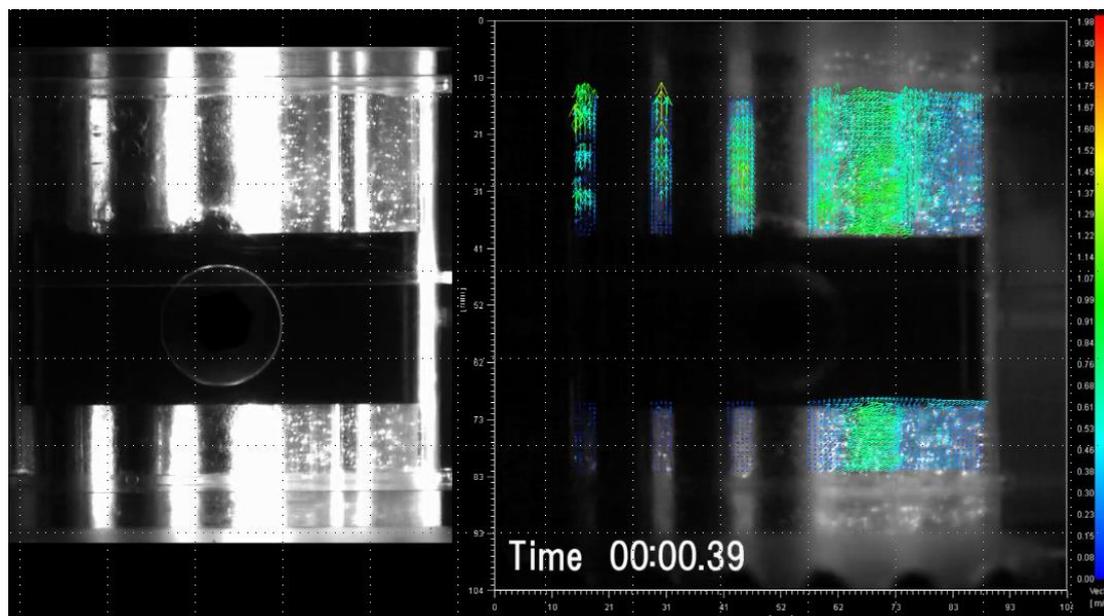


図 3-132 30mm スペース条件による PIV による液相流速分布
 (ケース C, 時刻 0.39 秒, 第 4 段 WMS 上流部)

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。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、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している。

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¹⁴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。

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

WMSでボイドが検出された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3-133~図3-143に示す。なお、各図において、相対熱負荷と図3-4に示したサブチャンネルタイプとの関係は図3-145のようになっている。

各図から次のことが分かる。

- ・ スペーサ部の上流側の第2段WMSおよび下流側の発熱部上端に当たる第6段WMSから最初にOSVが見られる。
- ・ スペーサ無条件に比べてスペーサの設置により、流れは複雑化し、スペーサによる気液攪拌効果によって遅れて上流側のボイドが流入したり、また逆流が起こったりする。
- ・ Run No.9の第5段WMSでは、当該部でのOSVによる横流れ伝播とスペーサの気液

¹⁴ 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て0.78ms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。

攪拌効果により上流側から流れ来るものには、時間差が 0.2 秒ほどある。上記のようなスぺーサの影響が顕著に見られるケースもあった。

3.2.2.2. 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 では極めて OSV レベルのボイド発生量であると考えられ、スぺーサによる気液攪拌効果により瞬間的に逆流したボイドをスぺーサ上流側の第 2 段 WMS で検知したものと考えられる。可視化画像の結果も考慮すると、本条件は加熱サブチャンネル 1 に留まったとするのが妥当である。一方、Run No. 2 は加熱サブチャンネル 3 まで到達すると共に、スぺーサを除けるように上流側と下流側でスラグ的なボイドが初生し、特にスぺーサの上流側で生じたボイドは約 0.2 秒後に下流側で検出された。Run No. 3 では、非加熱サブチャンネルタイプ 2 までボイドが到達すると共に、発熱部上端とスぺーサ上流部からボイド初生が検出された。スぺーサ下流部の第 4 段 WMS では非加熱領域の方が早くボイドが検出される傾向があり、これはより上流部で生じたボイドが流入したと思われ、その後に当該高さの加熱サブチャンネルでボイドが初生したと解釈するのが妥当である。

横方向伝播の遅れについては、Run No. 1 では、スぺーサよりも上流側でのみ加熱サブチャンネルと非加熱サブチャンネルでボイドが検出されたが、出力停止の時刻 0.5 秒から 0.3 秒ほど遅れた時刻であり、かつ加熱サブチャンネルと非加熱サブチャンネルで時間差がないことから、OSV レベルで生じた気泡がスぺーサ部での攪拌により逆流して戻ってきたものの可能性が高い。そのため横流れではなく、スぺーサによる影響である。Run No. 2 では、スぺーサ直上流部と発熱部上端で出力停止時の 0.5 秒でボイドが初生し、加熱サブチャンネル 3 まで横流れすると共に、スぺーサの気液攪拌効果により 0.2 秒後にスぺーサ下流部でボイドが確認された。この傾向は Run No.

3も見られ、スぺーサ直下流部の第4段 WMS では加熱サブチャンネルと非加熱サブチャンネルともに最も遅れた時刻でボイドが観察されている。このときの時間遅れは約0.1秒ほどである。スぺーサ直下流部では横流れ効果はなく、スぺーサによる気液攪拌効果により、上流側で生じたボイドが遅れて流れてくることがわかる。

- ・ **Run No. 4~6**： Run No.4 では加熱サブチャンネルタイプ2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、Run No.4 では、加熱サブチャンネル内であるため遅れはほぼなし、Run No. 5では、スぺーサ直下流部の第4段 WMS で逆に非加熱側でボイドが初生する特異な傾向が見られ、これは上流部で生じたボイドがスぺーサを通じて横流れして流れ込んだものであり、スぺーサ直下流部で見られる現象である。その場で初生するボイドとスぺーサ効果により流入するボイドの時間遅れは約0.1秒である。

- ・ **Run No. 7~9**： Run No.7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. 8では非加熱サブチャンネルタイプ1にまで、Run No. 9では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。また、横方向伝播の遅れについては、先述した傾向に従うものであった。
- ・ **Run No. 10~12**： Run No.10では、非加熱サブチャンネルタイプ1にまで、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、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。また、横方向伝播の遅れについては、先述した傾向に従うものであった。

また、光ファイバによる液相温度計測結果から、横方向伝播との関係について以下にまとめる。

- ・ 流体温度の時間履歴は、ロッド表面温度のものと同様になる（緩やかに上昇し、出力停止後も上昇し、やがて緩やかに減少する）。
- ・ 加熱バンドル間隙では、飽和温度を超えるが、非加熱バンドル間隙では、ボイドが横流れ伝播しても流体温度には影響がなく、最大入口温度を20℃程度上昇させるに留まる。
- ・ 熱出力を変えると温度の絶対値は多少上下するものの、時間履歴については同じ傾向を示した。

3.2.2.3. 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、

- ・ スペーサが発熱部に存在すると、スペーサを挟むように上流部と下流部でボイドが生じ、下流部では横流れが見られるものの、上流部ではスペーサ直下で横流れしスペーサに流入し下流域で非加熱側と加熱側問わずに低ボイド率で流入する

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。

3.2.2.4. 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. 3, 5, 6, 8, 9, 11, 12の7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. 4, 7, 10の3ケースであった。

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。

3.2.2.5. 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、スペーサの下流側でボイド率が全般的に大きく低下し非加熱側にも拡散するとともに、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認められた。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。

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	40°C 0.3 m/s	なし	なし	非加熱サブチャンネルタイプ 2 まで
Run No. 4～6	40°C 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	60°C 0.3 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
Run No. 10～12	60°C 0.5 m/s	概ね非加熱サブチャンネルタイプ 1 まで	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
40°C 0.3 m/s	-	1435
40°C 0.5 m/s	1432	1555
60°C 0.3 m/s	992	1094
60°C 0.5 m/s	998	1116

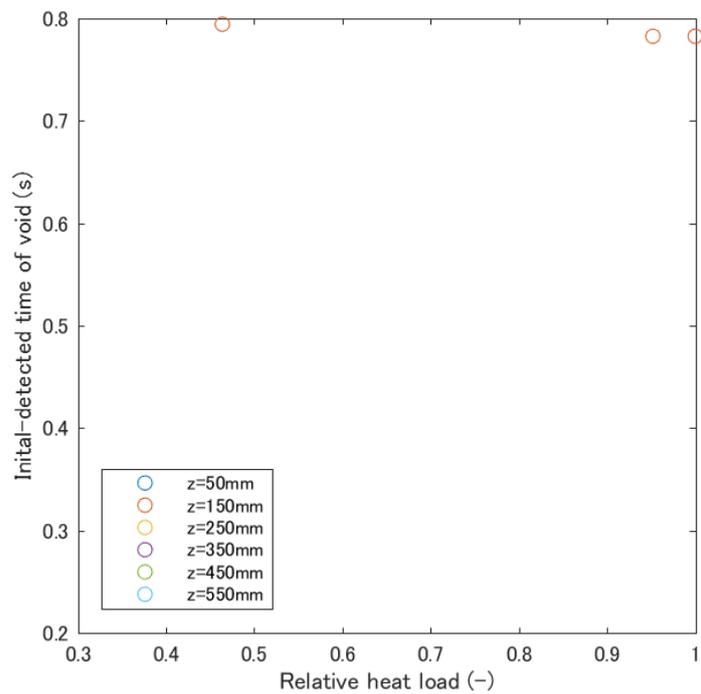


図 3-133 WMS によるポイド初生時刻 (Run No.1)

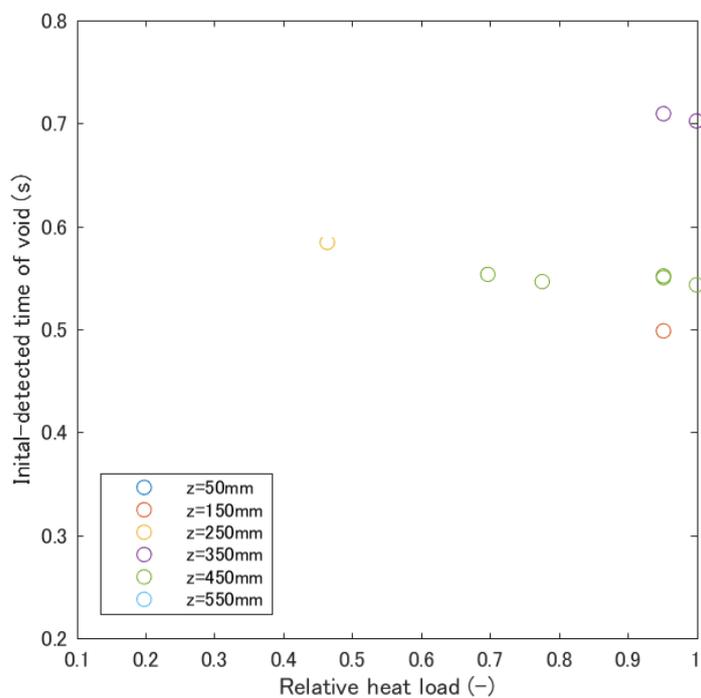


図 3-134 WMS によるポイド初生時刻 (Run No.2)

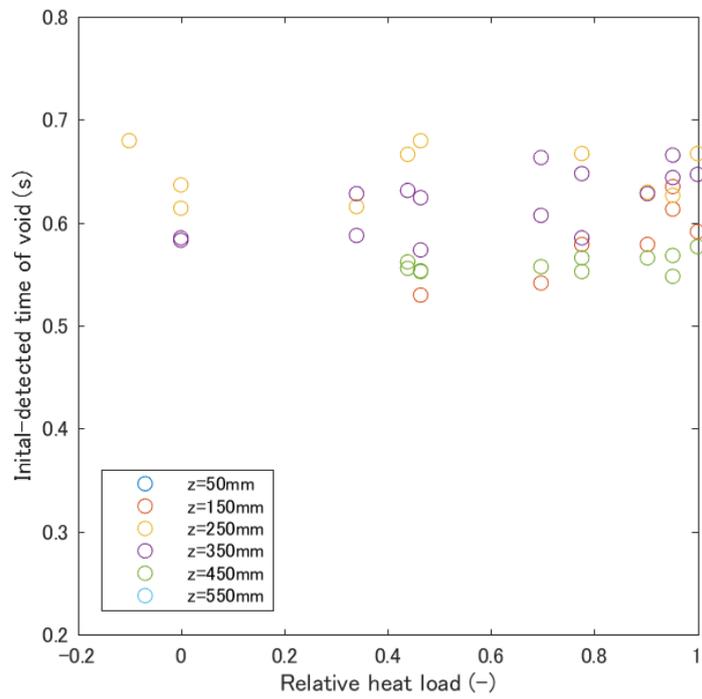


図 3-135 WMS によるボイド初生時刻 (Run No.3)

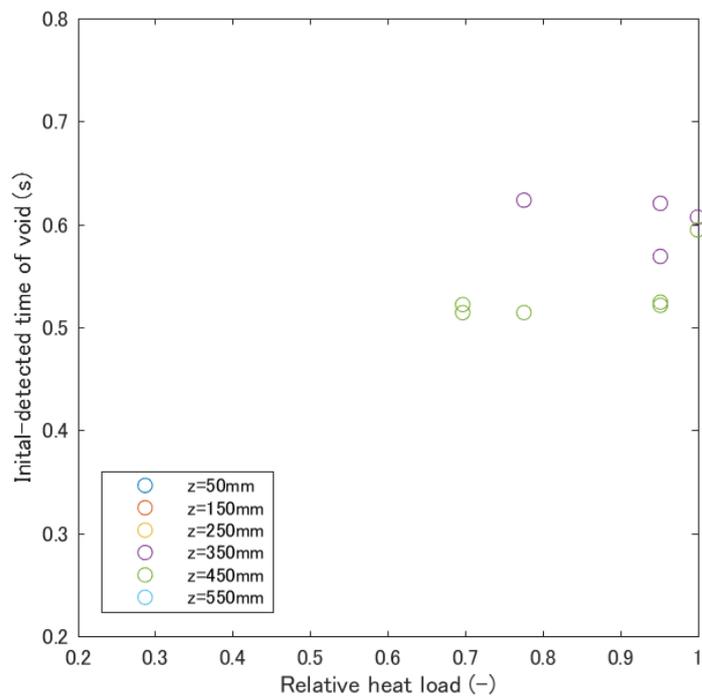


図 3-136 WMS によるボイド初生時刻 (Run No.4)

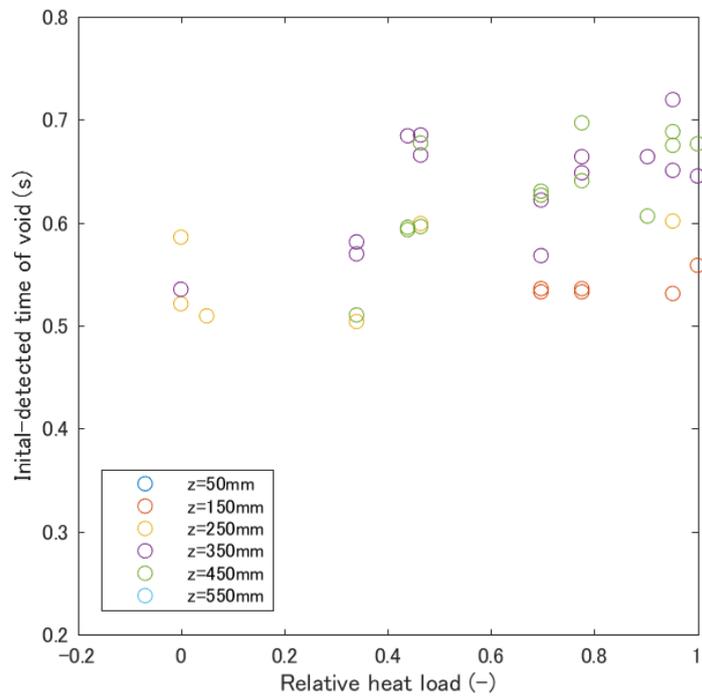


図 3-137 WMS によるボイド初生時刻 (Run No.5)

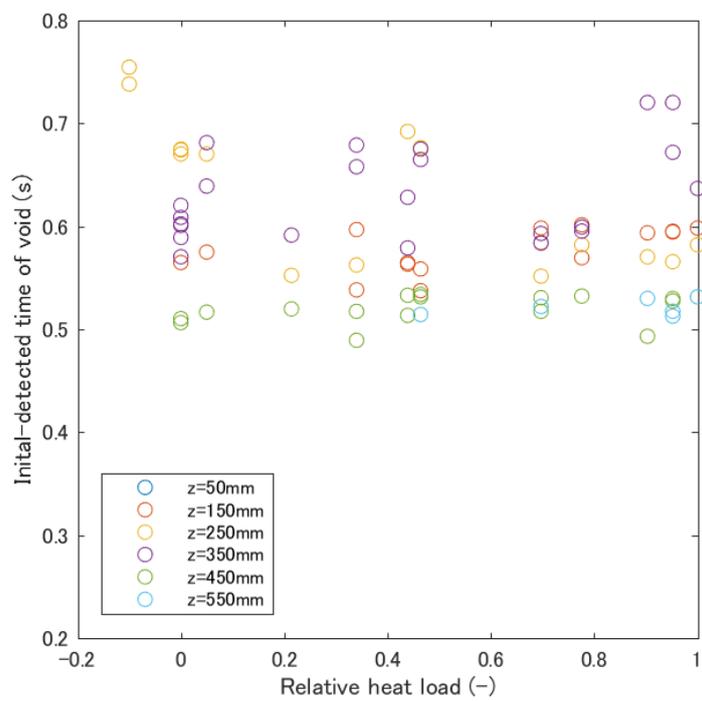


図 3-138 WMS によるボイド初生時刻 (Run No.6)

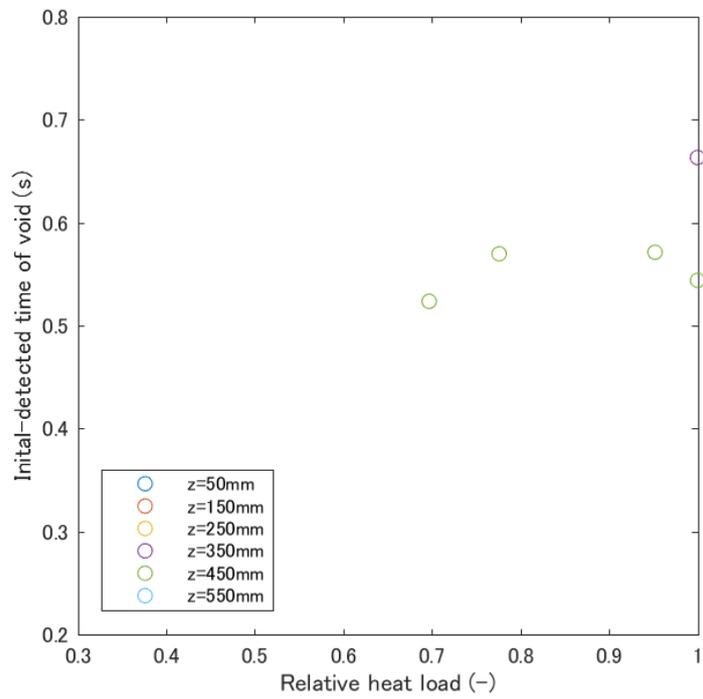


図 3-139 WMS によるボイド初生時刻 (Run No.7)

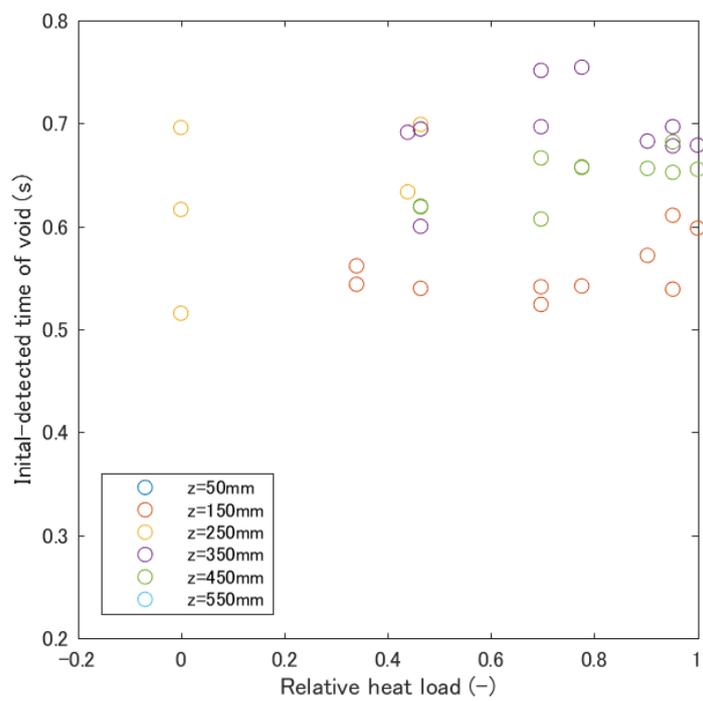


図 3-140 WMS によるボイド初生時刻 (Run No.8)

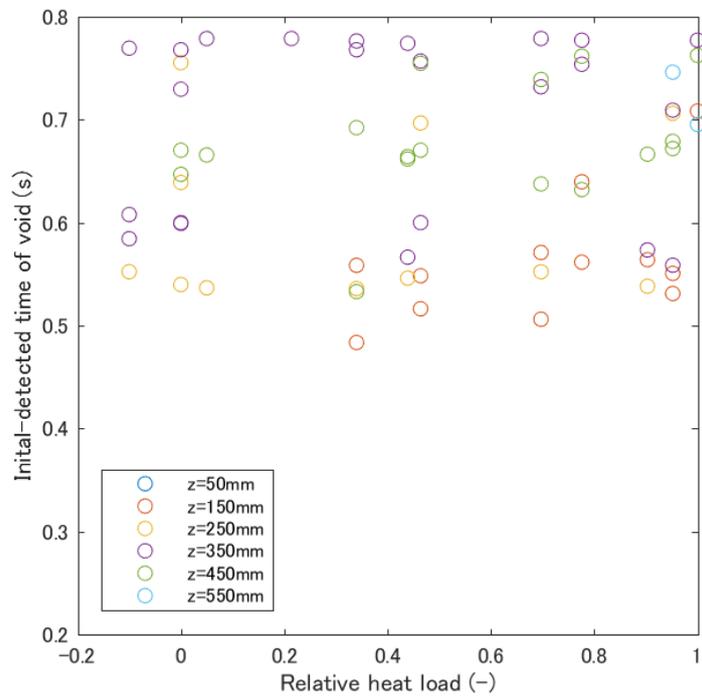


図 3-141 WMS によるボイド初生時刻 (Run No.9)

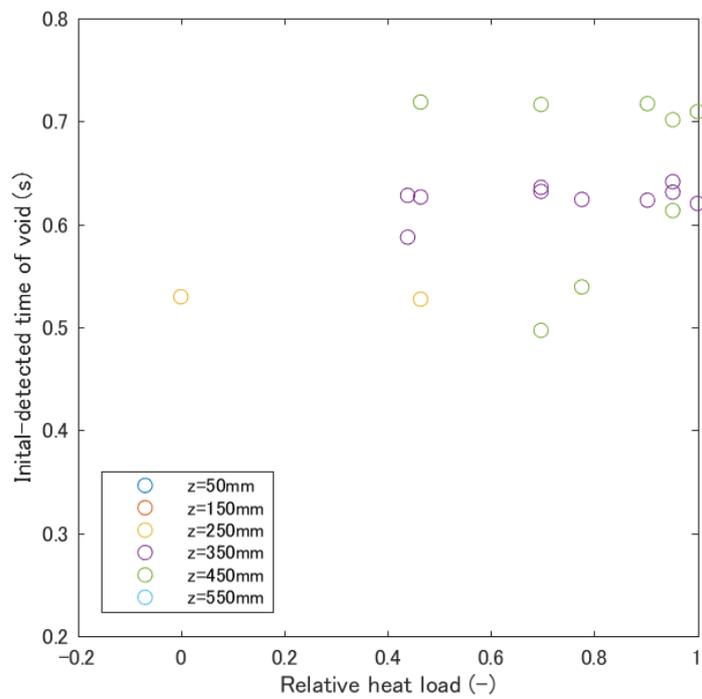


図 3-142 WMS によるボイド初生時刻 (Run No.10)

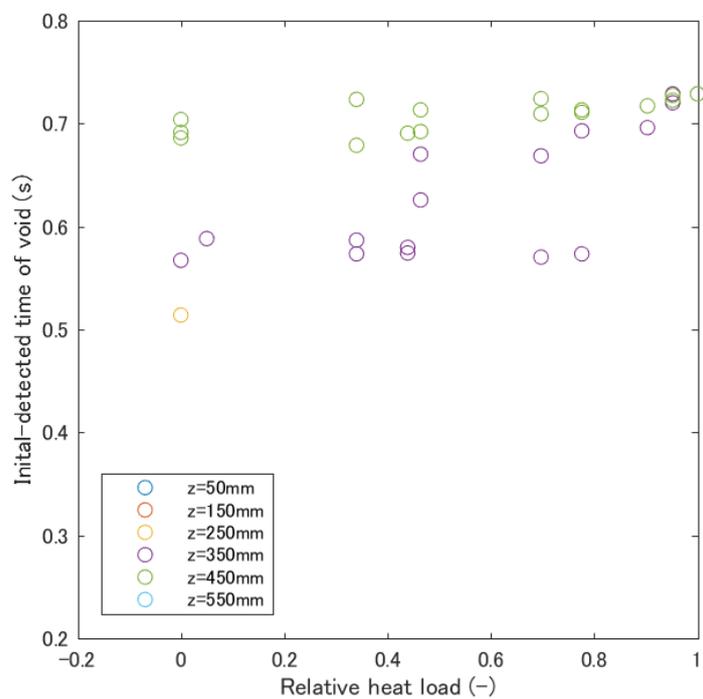


図 3-143 WMS によるボイド初生時刻 (Run No.11)

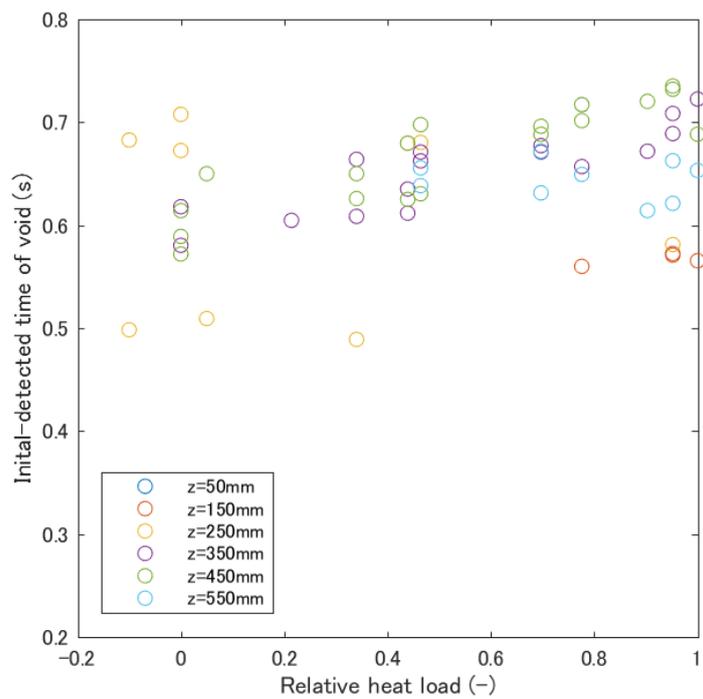


図 3-144 WMS によるボイド初生時刻 (Run No.12)

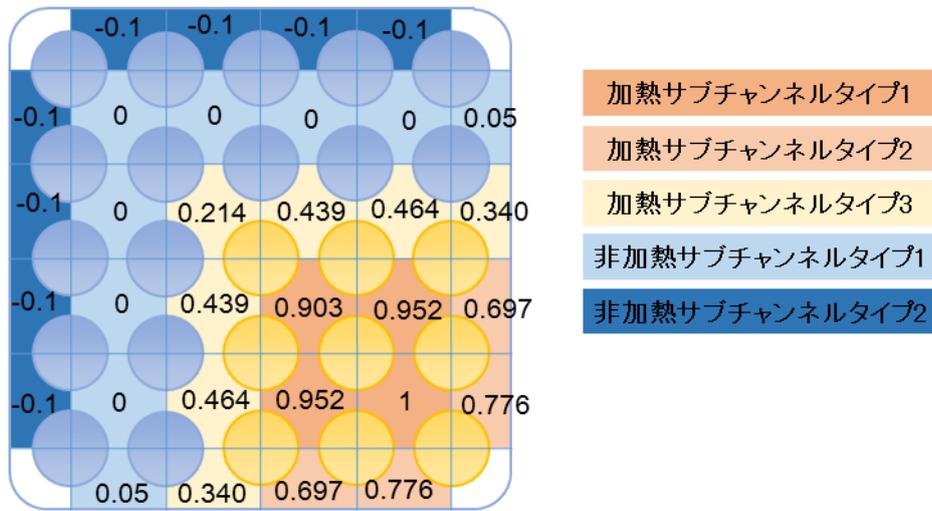


図 3-145 サブチャンネルタイプ分割とサブチャンネル相対熱負荷量との関係

4. まとめ

平成 29 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．

- 発熱部に 10mm 長スペーサを設置した条件における，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 によるボイド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，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．
- 一部の实验ケースについて，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．
- 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．
- 実機相当の 30mm 長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，まず LIF に関しては流体温度のキャリブレーション結果と共に現状の課題を言及し，次年度に向けた改善点を纏めた．光ファイバは流体温度分布計測を行い，出力に応じた違いや加熱・非加熱サブチャンネルによる違いを明らかにした．

以上に述べたように，平成 29 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
- 2) “平成 28 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 29 年 3 月

紙へリサイクル可