

平成 30 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 31 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 .....	10
3.1 実験の実施 .....	10
3.1.1 実施に当たっての要求事項 .....	10
3.1.2 実験条件の設定 .....	11
3.1.3 実験結果 .....	15
3.2 実験データの整理及び検討 .....	294
3.2.1 データ整理に当たっての要求事項 .....	294
3.2.2 実験データの整理及び検討 .....	294
4. まとめ .....	315

## 表目次

表 2.2-1	実験装置の仕様	3
表 3.1-1	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	31
表 3.1-2	実験条件マトリックス (30mm スペーサ)	32
表 3.1-3	実験条件マトリックス (スペーサ無し)	33
表 3.1-4	WMS の軸方向位置	33
表 3.2-1	実験ケースにおけるスペーサ有無での沸騰挙動の比較	300
表 3.2-2	各限界条件内にボイド横方向伝播が収まる最大熱出力 (スペーサ無し)	301
表 3.2-3	各限界条件内にボイド横方向伝播が収まる最大熱出力 (30mm スペーサ)	301

## 図目次

図 2.2-1	5×5 模擬燃料棒集合体実験ルーブ	4
図 2.2-2	試験部計測位置	5
図 2.2-3	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 2.2-4	試験体発熱部スペーサ位置	6
図 2.2-5	30mm スペーサ寸法図	7
図 2.2-6	試験部の全体構成及び計測項目	8
図 2.2-7	可視化計測システム	9
図 3.1-1	設定出力の時間応答曲線	34
図 3.1-2	ロッド番号の割振り	34
図 3.1-3	模擬燃料棒の局所出力係数及び WMS の識別番号	35
図 3.1-4	サブチャンネルのタイプ分け	35
図 3.1-5	ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.1)	36
図 3.1-6	高さごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.1)	37
図 3.1-7	その他計測値の時間変化 (Run No.1)	38
図 3.1-8	ボイド率の時間変化 (Run No.1/①)	39
図 3.1-9	ボイド率の時間変化 (Run No.1/②)	40
図 3.1-10	ボイド率の時間変化 (Run No.1/③)	41
図 3.1-11	ボイド率の時間変化 (Run No.1/④)	42
図 3.1-12	ボイド挙動の可視化画像 (Run No.1)	43
図 3.1-13	ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.2)	44
図 3.1-14	高さごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.2)	45
図 3.1-15	その他計測値の時間変化 (Run No.2)	46

図 3.1-16	ボイド率の時間変化 (Run No. 2/①)	47
図 3.1-17	ボイド率の時間変化 (Run No. 2/②)	48
図 3.1-18	ボイド率の時間変化 (Run No. 2/③)	49
図 3.1-19	ボイド率の時間変化 (Run No. 2/④)	50
図 3.1-20	ボイド挙動の可視化画像 (Run No. 2)	51
図 3.1-21	ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.3)	52
図 3.1-22	高さごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.3)	53
図 3.1-23	その他計測値の時間変化 (Run No.3)	54
図 3.1-24	ボイド率の時間変化 (Run No.3/①)	55
図 3.1-25	ボイド率の時間変化 (Run No.3/②)	56
図 3.1-26	ボイド率の時間変化 (Run No.3/③)	57
図 3.1-27	ボイド率の時間変化 (Run No.3/④)	58
図 3.1-28	ボイド挙動の可視化画像 (Run No.3)	59
図 3.1-29	ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.4)	60
図 3.1-30	高さごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.4)	61
図 3.1-31	その他計測値の時間変化 (Run No.4)	62
図 3.1-32	ボイド率の時間変化 (Run No.4/①)	63
図 3.1-33	ボイド率の時間変化 (Run No.4/②)	64
図 3.1-34	ボイド率の時間変化 (Run No.4/③)	65
図 3.1-35	ボイド率の時間変化 (Run No.4/④)	66
図 3.1-36	ボイド挙動の可視化画像 (Run No. 4)	67
図 3.1-37	ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.5)	68
図 3.1-38	高さごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.5)	69
図 3.1-39	その他計測値の時間変化 (Run No.5)	70
図 3.1-40	ボイド率の時間変化 (Run No.5/①)	71
図 3.1-41	ボイド率の時間変化 (Run No.5/②)	72
図 3.1-42	ボイド率の時間変化 (Run No.5/③)	73
図 3.1-43	ボイド率の時間変化 (Run No.5/④)	74
図 3.1-44	ボイド挙動の可視化画像 (Run No. 5)	75
図 3.1-45	ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.6)	76
図 3.1-46	高さごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.6)	77
図 3.1-47	その他計測値の時間変化 (Run No.6)	78
図 3.1-48	ボイド率の時間変化 (Run No.6/①)	79
図 3.1-49	ボイド率の時間変化 (Run No.6/②)	80
図 3.1-50	ボイド率の時間変化 (Run No.6/③)	81
図 3.1-51	ボイド率の時間変化 (Run No.6/④)	82

図 3.1-52	ボイド挙動の可視化画像 (Run No. 6)	83
図 3.1-53	ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.7)	84
図 3.1-54	高さごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.7)	85
図 3.1-55	その他計測値の時間変化 (Run No.7)	86
図 3.1-56	ボイド率の時間変化 (Run No.7/①)	87
図 3.1-57	ボイド率の時間変化 (Run No.7/②)	88
図 3.1-58	ボイド率の時間変化 (Run No.7/③)	89
図 3.1-59	ボイド率の時間変化 (Run No.7/④)	90
図 3.1-60	ボイド挙動の可視化画像 (Run No. 7)	91
図 3.1-61	ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.8)	92
図 3.1-62	高さごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.8)	93
図 3.1-63	その他計測値の時間変化 (Run No.8)	94
図 3.1-64	ボイド率の時間変化 (Run No.8/①)	95
図 3.1-65	ボイド率の時間変化 (Run No.8/②)	96
図 3.1-66	ボイド率の時間変化 (Run No.8/③)	97
図 3.1-67	ボイド率の時間変化 (Run No.8/④)	98
図 3.1-68	ボイド挙動の可視化画像 (Run No. 8)	99
図 3.1-69	ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.9)	100
図 3.1-70	高さごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.9)	101
図 3.1-71	その他計測値の時間変化 (Run No.9)	102
図 3.1-72	ボイド率の時間変化 (Run No.9/①)	103
図 3.1-73	ボイド率の時間変化 (Run No.9/②)	104
図 3.1-74	ボイド率の時間変化 (Run No.9/③)	105
図 3.1-75	ボイド率の時間変化 (Run No.9/④)	106
図 3.1-76	ボイド挙動の可視化画像 (Run No. 9)	107
図 3.1-77	ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.10)	108
図 3.1-78	高さごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.10)	109
図 3.1-79	その他計測値の時間変化 (Run No.10)	110
図 3.1-80	ボイド率の時間変化 (Run No.10/①)	111
図 3.1-81	ボイド率の時間変化 (Run No.10/②)	112
図 3.1-82	ボイド率の時間変化 (Run No.10/③)	113
図 3.1-83	ボイド率の時間変化 (Run No.10/④)	114
図 3.1-84	ボイド挙動の可視化画像 (Run No. 10)	115
図 3.1-85	ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.11)	116
図 3.1-86	高さごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.11)	117
図 3.1-87	その他計測値の時間変化 (Run No.11)	118

図 3.1-88	ボイド率の時間変化 (Run No.11/①)	119
図 3.1-89	ボイド率の時間変化 (Run No.11/②)	120
図 3.1-90	ボイド率の時間変化 (Run No.11/③)	121
図 3.1-91	ボイド率の時間変化 (Run No.11/④)	122
図 3.1-92	ボイド挙動の可視化画像 (Run No.11)	123
図 3.1-93	ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.12)	124
図 3.1-94	高さごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.12)	125
図 3.1-95	その他計測値の時間変化 (Run No.12)	126
図 3.1-96	ボイド率の時間変化 (Run No.12/①)	127
図 3.1-97	ボイド率の時間変化 (Run No.12/②)	128
図 3.1-98	ボイド率の時間変化 (Run No.12/③)	129
図 3.1-99	ボイド率の時間変化 (Run No.12/④)	130
図 3.1-100	ボイド挙動の可視化画像 (Run No. 12)	131
図 3.1-101	ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.13)	132
図 3.1-102	高さごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.13)	133
図 3.1-103	その他計測値の時間変化 (Run No.13)	134
図 3.1-104	ボイド率の時間変化 (Run No.13/①)	135
図 3.1-105	ボイド率の時間変化 (Run No.13/②)	136
図 3.1-106	ボイド率の時間変化 (Run No.13/③)	137
図 3.1-107	ボイド率の時間変化 (Run No.13/④)	138
図 3.1-108	ボイド挙動の可視化画像 (Run No.13)	139
図 3.1-109	ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.14)	140
図 3.1-110	高さごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.14)	141
図 3.1-111	その他計測値の時間変化 (Run No.14)	142
図 3.1-112	ボイド率の時間変化 (Run No.14/①)	143
図 3.1-113	ボイド率の時間変化 (Run No.14/②)	144
図 3.1-114	ボイド率の時間変化 (Run No.14/③)	145
図 3.1-115	ボイド率の時間変化 (Run No.14/④)	146
図 3.1-116	ボイド挙動の可視化画像 (Run No.14)	147
図 3.1-117	ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.15)	148
図 3.1-118	高さごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.15)	149
図 3.1-119	その他計測値の時間変化 (Run No.15)	150
図 3.1-120	ボイド率の時間変化 (Run No.15/①)	151
図 3.1-121	ボイド率の時間変化 (Run No.15/②)	152
図 3.1-122	ボイド率の時間変化 (Run No.15/③)	153
図 3.1-123	ボイド率の時間変化 (Run No.15/④)	154

図 3.1-124	ボイド挙動の可視化画像 (Run No.15)	155
図 3.1-125	ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.16)	156
図 3.1-126	高さごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.16)	157
図 3.1-127	その他計測値の時間変化 (Run No.16)	158
図 3.1-128	ボイド率の時間変化 (Run No.16/①)	159
図 3.1-129	ボイド率の時間変化 (Run No.16/②)	160
図 3.1-130	ボイド率の時間変化 (Run No.16/③)	161
図 3.1-131	ボイド率の時間変化 (Run No.16/④)	162
図 3.1-132	ボイド挙動の可視化画像 (Run No.16)	163
図 3.1-133	ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.17)	164
図 3.1-134	高さごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.17)	165
図 3.1-135	その他計測値の時間変化 (Run No.17)	166
図 3.1-136	ボイド率の時間変化 (Run No.17/①)	167
図 3.1-137	ボイド率の時間変化 (Run No.17/②)	168
図 3.1-138	ボイド率の時間変化 (Run No.17/③)	169
図 3.1-139	ボイド率の時間変化 (Run No.17/④)	170
図 3.1-140	ボイド挙動の可視化画像 (Run No.17)	171
図 3.1-141	ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.18)	172
図 3.1-142	高さごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.18)	173
図 3.1-143	その他計測値の時間変化 (Run No.18)	174
図 3.1-144	ボイド率の時間変化 (Run No.18/①)	175
図 3.1-145	ボイド率の時間変化 (Run No.18/②)	176
図 3.1-146	ボイド率の時間変化 (Run No.18/③)	177
図 3.1-147	ボイド率の時間変化 (Run No.18/④)	178
図 3.1-148	ボイド挙動の可視化画像 (Run No.18)	179
図 3.1-149	PIV による液相流速分布 (ケース A, 時刻 0.45 秒, 第 3 段 WMS 上流部)	180
図 3.1-150	PIV による液相流速分布 (ケース A, 時刻 0.48 秒, 第 3 段 WMS 上流部)	180
図 3.1-151	PIV による液相流速分布 (ケース A, 時刻 0.49 秒, 第 3 段 WMS 上流部)	181
図 3.1-152	PIV による液相流速分布 (ケース A, 時刻 0.51 秒, 第 3 段 WMS 上流部)	181
図 3.1-153	PIV による液相流速分布 (ケース A, 時刻 0.52 秒, 第 3 段 WMS 上流部)	182
図 3.1-154	PIV による液相流速分布 (ケース A, 時刻 0.53 秒, 第 3 段 WMS 上流部)	182

.....	182
図 3.1-155 PIV による液相流速分布 (ケース A, 時刻 0.56 秒, 第 3 段 WMS 上流部)	183
.....	183
図 3.1-156 PIV による液相流速分布 (ケース A, 時刻 0.59 秒, 第 3 段 WMS 上流部)	183
.....	183
図 3.1-157 PIV による液相流速分布 (ケース A, 時刻 0.62 秒, 第 3 段 WMS 上流部)	184
.....	184
図 3.1-158 PIV による液相流速分布 (ケース A, 時刻 0.64 秒, 第 3 段 WMS 上流部)	184
.....	184
図 3.1-159 PIV による液相流速分布 (ケース A, 時刻 0.51 秒, 第 6 段 WMS 上流部)	185
.....	185
図 3.1-160 PIV による液相流速分布 (ケース A, 時刻 0.52 秒, 第 6 段 WMS 上流部)	185
.....	185
図 3.1-161 PIV による液相流速分布 (ケース A, 時刻 0.53 秒, 第 6 段 WMS 上流部)	186
.....	186
図 3.1-162 PIV による液相流速分布 (ケース A, 時刻 0.54 秒, 第 6 段 WMS 上流部)	186
.....	186
図 3.1-163 PIV による液相流速分布 (ケース A, 時刻 0.55 秒, 第 6 段 WMS 上流部)	187
.....	187
図 3.1-164 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)	188
.....	188
図 3.1-165 PIV による液相流速分布 (ケース B, 時刻 0.42 秒, 第 3 段 WMS 上流部)	188
.....	188
図 3.1-166 PIV による液相流速分布 (ケース B, 時刻 0.47 秒, 第 3 段 WMS 上流部)	189
.....	189
図 3.1-167 PIV による液相流速分布 (ケース B, 時刻 0.51 秒, 第 3 段 WMS 上流部)	189
.....	189
図 3.1-168 PIV による液相流速分布 (ケース B, 時刻 0.56 秒, 第 3 段 WMS 上流部)	190
.....	190
図 3.1-169 PIV による液相流速分布 (ケース B, 時刻 0.58 秒, 第 3 段 WMS 上流部)	190
.....	190
図 3.1-170 PIV による液相流速分布 (ケース B, 時刻 0.59 秒, 第 3 段 WMS 上流部)	191
.....	191
図 3.1-171 PIV による液相流速分布 (ケース B, 時刻 0.61 秒, 第 3 段 WMS 上流部)	191
.....	191
図 3.1-172 PIV による液相流速分布 (ケース B, 時刻 0.65 秒, 第 3 段 WMS 上流部)	

.....	192
図 3.1-173 PIV による液相流速分布 (ケース B, 時刻 0.69 秒, 第 3 段 WMS 上流部)	192
.....	192
図 3.1-174 PIV による液相流速分布 (ケース B, 時刻 0.62 秒, 第 6 段 WMS 上流部)	193
.....	193
図 3.1-175 PIV による液相流速分布 (ケース B, 時刻 0.63 秒, 第 6 段 WMS 上流部)	193
.....	193
図 3.1-176 PIV による液相流速分布 (ケース B, 時刻 0.64 秒, 第 6 段 WMS 上流部)	194
.....	194
図 3.1-177 PIV による液相流速分布 (ケース B, 時刻 0.67 秒, 第 6 段 WMS 上流部)	194
.....	194
図 3.1-178 PIV による液相流速分布 (ケース B, 時刻 0.68 秒, 第 6 段 WMS 上流部)	195
.....	195
図 3.1-179 PIV による液相流速分布 (ケース C, 時刻 0.32 秒, 第 3 段 WMS 上流部)	196
.....	196
図 3.1-180 PIV による液相流速分布 (ケース C, 時刻 0.33 秒, 第 3 段 WMS 上流部)	196
.....	196
図 3.1-181 PIV による液相流速分布 (ケース C, 時刻 0.37 秒, 第 3 段 WMS 上流部)	197
.....	197
図 3.1-182 PIV による液相流速分布 (ケース C, 時刻 0.43 秒, 第 3 段 WMS 上流部)	197
.....	197
図 3.1-183 PIV による液相流速分布 (ケース C, 時刻 0.45 秒, 第 3 段 WMS 上流部)	198
.....	198
図 3.1-184 PIV による液相流速分布 (ケース C, 時刻 0.47 秒, 第 3 段 WMS 上流部)	198
.....	198
図 3.1-185 PIV による液相流速分布 (ケース C, 時刻 0.49 秒, 第 3 段 WMS 上流部)	199
.....	199
図 3.1-186 PIV による液相流速分布 (ケース C, 時刻 0.51 秒, 第 3 段 WMS 上流部)	199
.....	199
図 3.1-187 PIV による液相流速分布 (ケース C, 時刻 0.53 秒, 第 3 段 WMS 上流部)	200
.....	200
図 3.1-188 PIV による液相流速分布 (ケース C, 時刻 0.55 秒, 第 3 段 WMS 上流部)	200
.....	200
図 3.1-189 PIV による液相流速分布 (ケース C, 時刻 0.69 秒, 第 6 段 WMS 上流部)	201
.....	201
図 3.1-190 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)	

.....	201
図 3.1-191 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)	202
.....	202
図 3.1-192 PIV による液相流速分布 (ケース C, 時刻 0.74 秒, 第 6 段 WMS 上流部)	202
.....	202
図 3.1-193 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)	203
.....	203
図 3.1-194 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)	204
図 3.1-195 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)	204
図 3.1-196 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)	205
図 3.1-197 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)	205
図 3.1-198 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)	206
図 3.1-199 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)	206
図 3.1-200 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)	207
図 3.1-201 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)	207
図 3.1-202 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)	208
図 3.1-203 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)	208
図 3.1-204 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)	209
図 3.1-205 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)	209
図 3.1-206 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)	210
図 3.1-207 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)	210
図 3.1-208 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)	211
図 3.1-209 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)	211
図 3.1-210 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)	212
図 3.1-211 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)	212
図 3.1-212 光ファイバによる液相温度 (ケース D, 第 4 段 WMS 部 / T6 ライン)	213
図 3.1-213 光ファイバによる液相温度 (ケース D, 第 4 段 WMS 部 / T5 ライン)	213
図 3.1-214 光ファイバによる液相温度 (ケース D, 第 4 段 WMS 部 / T4 ライン)	214
図 3.1-215 光ファイバによる液相温度 (ケース D, 第 4 段 WMS 部 / T3 ライン)	214
図 3.1-216 光ファイバによる液相温度 (ケース D, 第 4 段 WMS 部 / T2 ライン)	215
図 3.1-217 光ファイバによる液相温度 (ケース D, 第 4 段 WMS 部 / T1 ライン)	215
図 3.1-218 光ファイバによる液相温度 (ケース E, 第 4 段 WMS 部 / T6 ライン)	216
図 3.1-219 光ファイバによる液相温度 (ケース E, 第 4 段 WMS 部 / T5 ライン)	216
図 3.1-220 光ファイバによる液相温度 (ケース E, 第 4 段 WMS 部 / T4 ライン)	217
図 3.1-221 光ファイバによる液相温度 (ケース E, 第 4 段 WMS 部 / T3 ライン)	217
図 3.1-222 光ファイバによる液相温度 (ケース E, 第 4 段 WMS 部 / T2 ライン)	218

図 3.1-223	光ファイバによる液相温度 (ケース E, 第 4 段 WMS 部 / T1 ライン)	218
図 3.1-224	光ファイバによる液相温度 (ケース F, 第 4 段 WMS 部 / T6 ライン)	.219
図 3.1-225	光ファイバによる液相温度 (ケース F, 第 4 段 WMS 部 / T5 ライン)	.219
図 3.1-226	光ファイバによる液相温度 (ケース F, 第 4 段 WMS 部 / T4 ライン)	.220
図 3.1-227	光ファイバによる液相温度 (ケース F, 第 4 段 WMS 部 / T3 ライン)	.220
図 3.1-228	光ファイバによる液相温度 (ケース F, 第 4 段 WMS 部 / T2 ライン)	.221
図 3.1-229	光ファイバによる液相温度 (ケース F, 第 4 段 WMS 部 / T1 ライン)	.221
図 3.1-230	光ファイバによる液相温度 (ケース G, 第 4 段 WMS 部 / T6 ライン)	222
図 3.1-231	光ファイバによる液相温度 (ケース G, 第 4 段 WMS 部 / T5 ライン)	222
図 3.1-232	光ファイバによる液相温度 (ケース G, 第 4 段 WMS 部 / T4 ライン)	223
図 3.1-233	光ファイバによる液相温度 (ケース G, 第 4 段 WMS 部 / T3 ライン)	223
図 3.1-234	光ファイバによる液相温度 (ケース G, 第 4 段 WMS 部 / T2 ライン)	224
図 3.1-235	光ファイバによる液相温度 (ケース G, 第 4 段 WMS 部 / T1 ライン)	224
図 3.1-236	光ファイバによる液相温度 (ケース H, 第 4 段 WMS 部 / T6 ライン)	225
図 3.1-237	光ファイバによる液相温度 (ケース H, 第 4 段 WMS 部 / T5 ライン)	225
図 3.1-238	光ファイバによる液相温度 (ケース H, 第 4 段 WMS 部 / T4 ライン)	226
図 3.1-239	光ファイバによる液相温度 (ケース H, 第 4 段 WMS 部 / T3 ライン)	226
図 3.1-240	光ファイバによる液相温度 (ケース H, 第 4 段 WMS 部 / T2 ライン)	227
図 3.1-241	光ファイバによる液相温度 (ケース H, 第 4 段 WMS 部 / T1 ライン)	227
図 3.1-242	光ファイバによる液相温度 (ケース I, 第 4 段 WMS 部 / T6 ライン)	.228
図 3.1-243	光ファイバによる液相温度 (ケース I, 第 4 段 WMS 部 / T5 ライン)	.228
図 3.1-244	光ファイバによる液相温度 (ケース I, 第 4 段 WMS 部 / T4 ライン)	.229
図 3.1-245	光ファイバによる液相温度 (ケース I, 第 4 段 WMS 部 / T3 ライン)	.229
図 3.1-246	光ファイバによる液相温度 (ケース I, 第 4 段 WMS 部 / T2 ライン)	.230
図 3.1-247	光ファイバによる液相温度 (ケース I, 第 4 段 WMS 部 / T1 ライン)	.230
図 3.1-248	光ファイバによる液相温度 (ケース J, 第 4 段 WMS 部 / T6 ライン)	.231
図 3.1-249	光ファイバによる液相温度 (ケース J, 第 4 段 WMS 部 / T5 ライン)	.231
図 3.1-250	光ファイバによる液相温度 (ケース J, 第 4 段 WMS 部 / T4 ライン)	.232
図 3.1-251	光ファイバによる液相温度 (ケース J, 第 4 段 WMS 部 / T3 ライン)	.232
図 3.1-252	光ファイバによる液相温度 (ケース J, 第 4 段 WMS 部 / T2 ライン)	.233
図 3.1-253	光ファイバによる液相温度 (ケース J, 第 4 段 WMS 部 / T1 ライン)	.233
図 3.1-254	ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化 (スペーサ無し, Run No.1)	.234
図 3.1-255	高さごとの燃料被覆管温度の時間変化 (スペーサ無し, Run No.1)	.....235
図 3.1-256	その他計測値の時間変化 (スペーサ無し, Run No.1)	.....236
図 3.1-257	ボイド率の時間変化 (スペーサ無し, Run No.1/①)	.....237
図 3.1-258	ボイド率の時間変化 (スペーサ無し, Run No.1/②)	.....238

図 3.1-259	ボイド率の時間変化（スぺーサ無し， Run No.1/③）	239
図 3.1-260	ボイド率の時間変化（スぺーサ無し， Run No.1/④）	240
図 3.1-261	ボイド挙動の可視化画像（スぺーサ無し， Run No.1）	241
図 3.1-262	ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化（スぺーサ無し， Run No.2）	242
図 3.1-263	高さごとの燃料被覆管温度の時間変化（スぺーサ無し， Run No.2）	243
図 3.1-264	その他計測値の時間変化（スぺーサ無し， Run No.2）	244
図 3.1-265	ボイド率の時間変化（スぺーサ無し， Run No.2/①）	245
図 3.1-266	ボイド率の時間変化（スぺーサ無し， Run No.2/②）	246
図 3.1-267	ボイド率の時間変化（スぺーサ無し， Run No.2/③）	247
図 3.1-268	ボイド率の時間変化（スぺーサ無し， Run No.2/④）	248
図 3.1-269	ボイド挙動の可視化画像（スぺーサ無し， Run No.2）	249
図 3.1-270	ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化（スぺーサ無し， Run No.3）	250
図 3.1-271	高さごとの燃料被覆管温度の時間変化（スぺーサ無し， Run No.3）	251
図 3.1-272	その他計測値の時間変化（スぺーサ無し， Run No.3）	252
図 3.1-273	ボイド率の時間変化（スぺーサ無し， Run No.3/①）	253
図 3.1-274	ボイド率の時間変化（スぺーサ無し， Run No.3/②）	254
図 3.1-275	ボイド率の時間変化（スぺーサ無し， Run No.3/③）	255
図 3.1-276	ボイド率の時間変化（スぺーサ無し， Run No.3/④）	256
図 3.1-277	ボイド挙動の可視化画像（スぺーサ無し， Run No.3）	257
図 3.1-278	光ファイバによる液相温度（スぺーサ無し， ケース A， 第 4 段 WMS 部 / T6 ライン）	258
図 3.1-279	光ファイバによる液相温度（スぺーサ無し， ケース A， 第 4 段 WMS 部 / T5 ライン）	258
図 3.1-280	光ファイバによる液相温度（スぺーサ無し， ケース A， 第 4 段 WMS 部 / T4 ライン）	259
図 3.1-281	光ファイバによる液相温度（スぺーサ無し， ケース A， 第 4 段 WMS 部 / T3 ライン）	259
図 3.1-282	光ファイバによる液相温度（スぺーサ無し， ケース A， 第 4 段 WMS 部 / T2 ライン）	260
図 3.1-283	光ファイバによる液相温度（スぺーサ無し， ケース A， 第 4 段 WMS 部 / T1 ライン）	260
図 3.1-284	光ファイバによる液相温度（スぺーサ無し， ケース B， 第 4 段 WMS 部 / T6 ライン）	261
図 3.1-285	光ファイバによる液相温度（スぺーサ無し， ケース B， 第 4 段 WMS 部 / T5 ライン）	261
図 3.1-286	光ファイバによる液相温度（スぺーサ無し， ケース B， 第 4 段 WMS 部 /	

T4 ライン)	262
図 3.1-287 光ファイバによる液相温度 (スペーサ無し, ケース B, 第 4 段 WMS 部 / T3 ライン)	262
図 3.1-288 光ファイバによる液相温度 (スペーサ無し, ケース B, 第 4 段 WMS 部 / T2 ライン)	263
図 3.1-289 光ファイバによる液相温度 (スペーサ無し, ケース B, 第 4 段 WMS 部 / T1 ライン)	263
図 3.1-290 光ファイバによる液相温度 (スペーサ無し, ケース C, 第 4 段 WMS 部 / T6 ライン)	264
図 3.1-291 光ファイバによる液相温度 (スペーサ無し, ケース C, 第 4 段 WMS 部 / T5 ライン)	264
図 3.1-292 光ファイバによる液相温度 (スペーサ無し, ケース C, 第 4 段 WMS 部 / T4 ライン)	265
図 3.1-293 光ファイバによる液相温度 (スペーサ無し, ケース C, 第 4 段 WMS 部 / T3 ライン)	265
図 3.1-294 光ファイバによる液相温度 (スペーサ無し, ケース C, 第 4 段 WMS 部 / T2 ライン)	266
図 3.1-295 光ファイバによる液相温度 (スペーサ無し, ケース C, 第 4 段 WMS 部 / T1 ライン)	266
図 3.1-296 光ファイバによる液相温度 (スペーサ無し, ケース D, 第 4 段 WMS 部 / T6 ライン)	267
図 3.1-297 光ファイバによる液相温度 (スペーサ無し, ケース D, 第 4 段 WMS 部 / T5 ライン)	267
図 3.1-298 光ファイバによる液相温度 (スペーサ無し, ケース D, 第 4 段 WMS 部 / T4 ライン)	268
図 3.1-299 光ファイバによる液相温度 (スペーサ無し, ケース D, 第 4 段 WMS 部 / T3 ライン)	268
図 3.1-300 光ファイバによる液相温度 (スペーサ無し, ケース D, 第 4 段 WMS 部 / T2 ライン)	269
図 3.1-301 光ファイバによる液相温度 (スペーサ無し, ケース D, 第 4 段 WMS 部 / T1 ライン)	269
図 3.1-302 光ファイバによる液相温度 (スペーサ無し, ケース E, 第 4 段 WMS 部 / T6 ライン)	270
図 3.1-303 光ファイバによる液相温度 (スペーサ無し, ケース E, 第 4 段 WMS 部 / T5 ライン)	270
図 3.1-304 光ファイバによる液相温度 (スペーサ無し, ケース E, 第 4 段 WMS 部 /	

T4 ライン)	271
図 3.1-305 光ファイバによる液相温度 (スペーサ無し, ケース E, 第 4 段 WMS 部 / T3 ライン)	271
図 3.1-306 光ファイバによる液相温度 (スペーサ無し, ケース E, 第 4 段 WMS 部 / T2 ライン)	272
図 3.1-307 光ファイバによる液相温度 (スペーサ無し, ケース E, 第 4 段 WMS 部 / T1 ライン)	272
図 3.1-308 光ファイバによる液相温度 (スペーサ無し, ケース F, 第 4 段 WMS 部 / T6 ライン)	273
図 3.1-309 光ファイバによる液相温度 (スペーサ無し, ケース F, 第 4 段 WMS 部 / T5 ライン)	273
図 3.1-310 光ファイバによる液相温度 (スペーサ無し, ケース F, 第 4 段 WMS 部 / T4 ライン)	274
図 3.1-311 光ファイバによる液相温度 (スペーサ無し, ケース F, 第 4 段 WMS 部 / T3 ライン)	274
図 3.1-312 光ファイバによる液相温度 (スペーサ無し, ケース F, 第 4 段 WMS 部 / T2 ライン)	275
図 3.1-313 光ファイバによる液相温度 (スペーサ無し, ケース F, 第 4 段 WMS 部 / T1 ライン)	275
図 3.1-314 光ファイバによる液相温度 (スペーサ無し, ケース G, 第 4 段 WMS 部 / T6 ライン)	276
図 3.1-315 光ファイバによる液相温度 (スペーサ無し, ケース G, 第 4 段 WMS 部 / T5 ライン)	276
図 3.1-316 光ファイバによる液相温度 (スペーサ無し, ケース G, 第 4 段 WMS 部 / T4 ライン)	277
図 3.1-317 光ファイバによる液相温度 (スペーサ無し, ケース G, 第 4 段 WMS 部 / T3 ライン)	277
図 3.1-318 光ファイバによる液相温度 (スペーサ無し, ケース G, 第 4 段 WMS 部 / T2 ライン)	278
図 3.1-319 光ファイバによる液相温度 (スペーサ無し, ケース G, 第 4 段 WMS 部 / T1 ライン)	278
図 3.1-320 光ファイバによる液相温度 (スペーサ無し, ケース H, 第 4 段 WMS 部 / T6 ライン)	279
図 3.1-321 光ファイバによる液相温度 (スペーサ無し, ケース H, 第 4 段 WMS 部 / T5 ライン)	279
図 3.1-322 光ファイバによる液相温度 (スペーサ無し, ケース H, 第 4 段 WMS 部 /	

T4 ライン)	280
図 3.1-323 光ファイバによる液相温度 (スペーサ無し, ケース H, 第 4 段 WMS 部 / T3 ライン)	280
図 3.1-324 光ファイバによる液相温度 (スペーサ無し, ケース H, 第 4 段 WMS 部 / T2 ライン)	281
図 3.1-325 光ファイバによる液相温度 (スペーサ無し, ケース H, 第 4 段 WMS 部 / T1 ライン)	281
図 3.1-326 光ファイバによる液相温度 (スペーサ無し, ケース I, 第 4 段 WMS 部 / T6 ライン)	282
図 3.1-327 光ファイバによる液相温度 (スペーサ無し, ケース I, 第 4 段 WMS 部 / T5 ライン)	282
図 3.1-328 光ファイバによる液相温度 (スペーサ無し, ケース I, 第 4 段 WMS 部 / T4 ライン)	283
図 3.1-329 光ファイバによる液相温度 (スペーサ無し, ケース I, 第 4 段 WMS 部 / T3 ライン)	283
図 3.1-330 光ファイバによる液相温度 (スペーサ無し, ケース I, 第 4 段 WMS 部 / T2 ライン)	284
図 3.1-331 光ファイバによる液相温度 (スペーサ無し, ケース I, 第 4 段 WMS 部 / T1 ライン)	284
図 3.1-332 光ファイバによる液相温度 (スペーサ無し, ケース J, 第 4 段 WMS 部 / T6 ライン)	285
図 3.1-333 光ファイバによる液相温度 (スペーサ無し, ケース J, 第 4 段 WMS 部 / T5 ライン)	285
図 3.1-334 光ファイバによる液相温度 (スペーサ無し, ケース J, 第 4 段 WMS 部 / T4 ライン)	286
図 3.1-335 光ファイバによる液相温度 (スペーサ無し, ケース J, 第 4 段 WMS 部 / T3 ライン)	286
図 3.1-336 光ファイバによる液相温度 (スペーサ無し, ケース J, 第 4 段 WMS 部 / T2 ライン)	287
図 3.1-337 光ファイバによる液相温度 (スペーサ無し, ケース J, 第 4 段 WMS 部 / T1 ライン)	287
図 3.1-338 光ファイバによる液相温度 (スペーサ無し, ケース K, 第 4 段 WMS 部 / T6 ライン)	288
図 3.1-339 光ファイバによる液相温度 (スペーサ無し, ケース K, 第 4 段 WMS 部 / T5 ライン)	288
図 3.1-340 光ファイバによる液相温度 (スペーサ無し, ケース K, 第 4 段 WMS 部 /	

T4 ライン)	289
図 3.1-341 光ファイバによる液相温度 (スペーサ無し, ケース K, 第 4 段 WMS 部 / T3 ライン)	289
図 3.1-342 光ファイバによる液相温度 (スペーサ無し, ケース K, 第 4 段 WMS 部 / T2 ライン)	290
図 3.1-343 光ファイバによる液相温度 (スペーサ無し, ケース K, 第 4 段 WMS 部 / T1 ライン)	290
図 3.1-344 光ファイバによる液相温度 (スペーサ無し, ケース L, 第 4 段 WMS 部 / T6 ライン)	291
図 3.1-345 光ファイバによる液相温度 (スペーサ無し, ケース L, 第 4 段 WMS 部 / T5 ライン)	291
図 3.1-346 光ファイバによる液相温度 (スペーサ無し, ケース L, 第 4 段 WMS 部 / T4 ライン)	292
図 3.1-347 光ファイバによる液相温度 (スペーサ無し, ケース L, 第 4 段 WMS 部 / T3 ライン)	292
図 3.1-348 光ファイバによる液相温度 (スペーサ無し, ケース L, 第 4 段 WMS 部 / T2 ライン)	293
図 3.1-349 光ファイバによる液相温度 (スペーサ無し, ケース L, 第 4 段 WMS 部 / T1 ライン)	293
図 3.2-1 WMS によるボイド初生時刻 (Run No.1)	302
図 3.2-2 WMS によるボイド初生時刻 (Run No.2)	302
図 3.2-3 WMS によるボイド初生時刻 (Run No.3)	303
図 3.2-4 WMS によるボイド初生時刻 (Run No.4)	303
図 3.2-5 WMS によるボイド初生時刻 (Run No.5)	304
図 3.2-6 WMS によるボイド初生時刻 (Run No.6)	304
図 3.2-7 WMS によるボイド初生時刻 (Run No.7)	305
図 3.2-8 WMS によるボイド初生時刻 (Run No.8)	305
図 3.2-9 WMS によるボイド初生時刻 (Run No.9)	306
図 3.2-10 WMS によるボイド初生時刻 (Run No.10)	306
図 3.2-11 WMS によるボイド初生時刻 (Run No.11)	307
図 3.2-12 WMS によるボイド初生時刻 (Run No.12)	307
図 3.2-13 WMS によるボイド初生時刻 (Run No.13)	308
図 3.2-14 WMS によるボイド初生時刻 (Run No.14)	308
図 3.2-15 WMS によるボイド初生時刻 (Run No.15)	309
図 3.2-16 WMS によるボイド初生時刻 (Run No.16)	309
図 3.2-17 WMS によるボイド初生時刻 (Run No.17)	310

図 3.2-18	WMS によるボイド初生時刻 (Run No.18) .....	310
図 3.2-19	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.....	311
図 3.2-20	“低”出力レベルにおいてスパーサが沸騰挙動にもたらす影響 .....	311
図 3.2-21	“中”出力レベルにおいてスパーサが沸騰挙動にもたらす影響 .....	312
図 3.2-22	“高”出力レベルにおいてスパーサが沸騰挙動にもたらす影響 .....	312
図 3.2-23	“低”出力レベルにおいてスパーサが液相流速にもたらす影響 .....	313
図 3.2-24	“中”出力レベルにおいてスパーサが液相流速にもたらす影響 .....	313
図 3.2-25	“高”出力レベルにおいてスパーサが液相流速にもたらす影響 .....	314

## 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、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[1]には、当該目的に資する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[2]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。

平成 29 年度[3]は、実機仕様相当よりも短い 10 mm 長の丸セルスペーサを有効発熱部に設置し、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した。

本年度は、実機仕様相当の高さ 30 mm の丸セルスペーサを有効発熱部に設置し、スペーサがボイド横流れに及ぼす影響について明らかにすると共に、当該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した。

## 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 2.2-1、実験ループおよび試験部についてを図 2.2-1、図 2.2-2 および図 2.2-3 に、計測項目の一覧を図 2.2-6 に示す。また、同実験装置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、平成 27 年度実施研究の成果をまとめた報告書[1]<sup>1)</sup>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。

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 2.2-3）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、ロッドの全長は 1.45 m である。5×5 バンドル試験体は、この加熱部長さ 0.45m 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 30mm スペーサを設置している（図 2.2-4）。図 2.2-5 に 30mm スペーサの寸法図を示す。

### 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、ワイヤメッシュセンサ（以下“WMS”という。）、高速度カメラ及びレーザーシートを用いた PIV、LIF の計 6 種の計測器及び計測手法を導入している。図 2.2-7 にレーザー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。

レーザー装置は、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ー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 2.2-1 実験装置の仕様

項目	内容	備考
装置構成	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 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</li> <li>➤ 冷却水循環ポンプ</li> <li>➤ 直流電源</li> <li>➤ 予熱器</li> <li>➤ 凝縮器</li> <li>➤ 制御器，計測器，データ記録器など</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 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/m<sup>2</sup>/sの範囲で冷却水質量流束を制御可能な試験ループ</li> <li>➤ 直接通電による過渡沸騰伝熱の模擬</li> </ul>
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"> <li>➤ 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</li> <li>➤ 液相流速分布の計測</li> </ul>
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 <sup>2</sup> -s 熱流束：最大3 MW/m <sup>2</sup> （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（  2.2-3 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，シリーズレギュレータ電源を導入
計測項目	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 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）</li> <li>• 伝熱面温度（発熱部伝熱面に軸方向に3箇所設置）</li> <li>• 可視化画像（高速度カメラを使用）</li> <li>• 液相場流速分布（PIV）</li> <li>• 温度分布（光ファイバ，LIF）</li> </ul>	

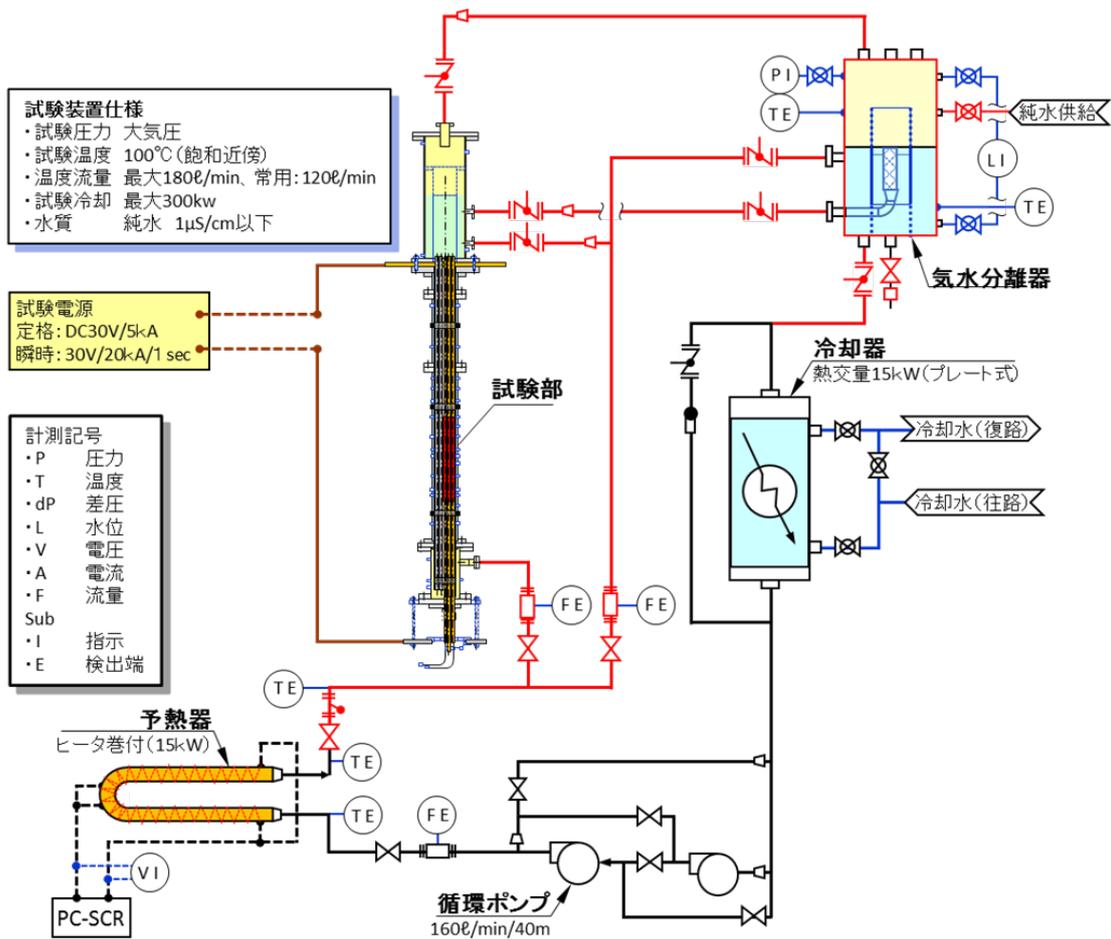


図 2.2-1 5×5 模擬燃料棒集合体実験ループ

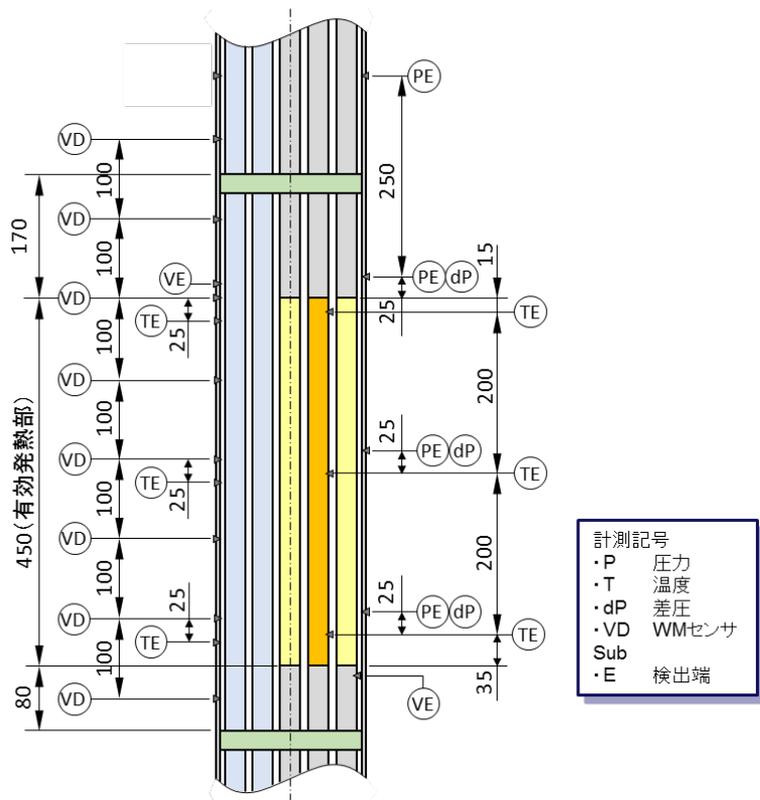


図 2.2-2 試験部計測位置

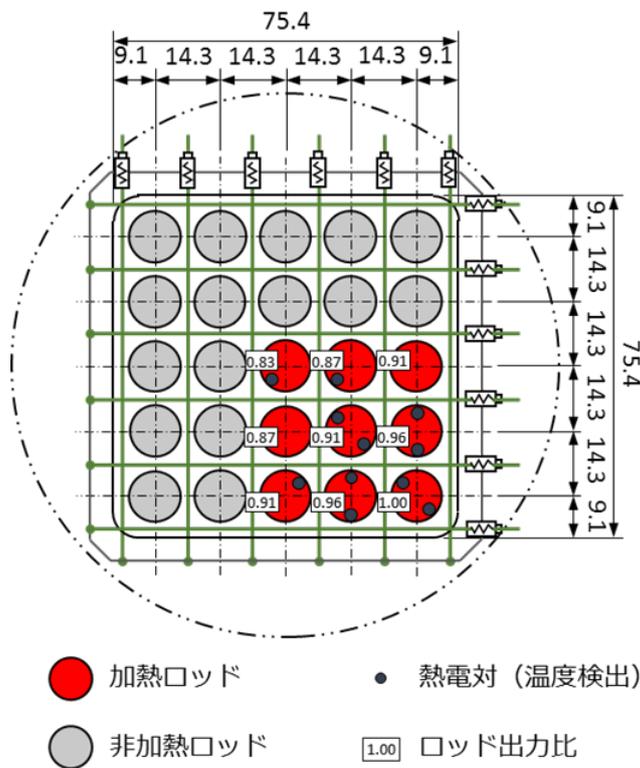


図 2.2-3 試験部断面と5×5ヒータロッドの局所出力ピーキング

30mmスペーサ仕様	
形式	: 丸セルスペーサ
内幅	: 72.6mm×72.6mm
高さ	: 30mm
セル外径	: 14.3mm
セル厚み	: 0.4mm

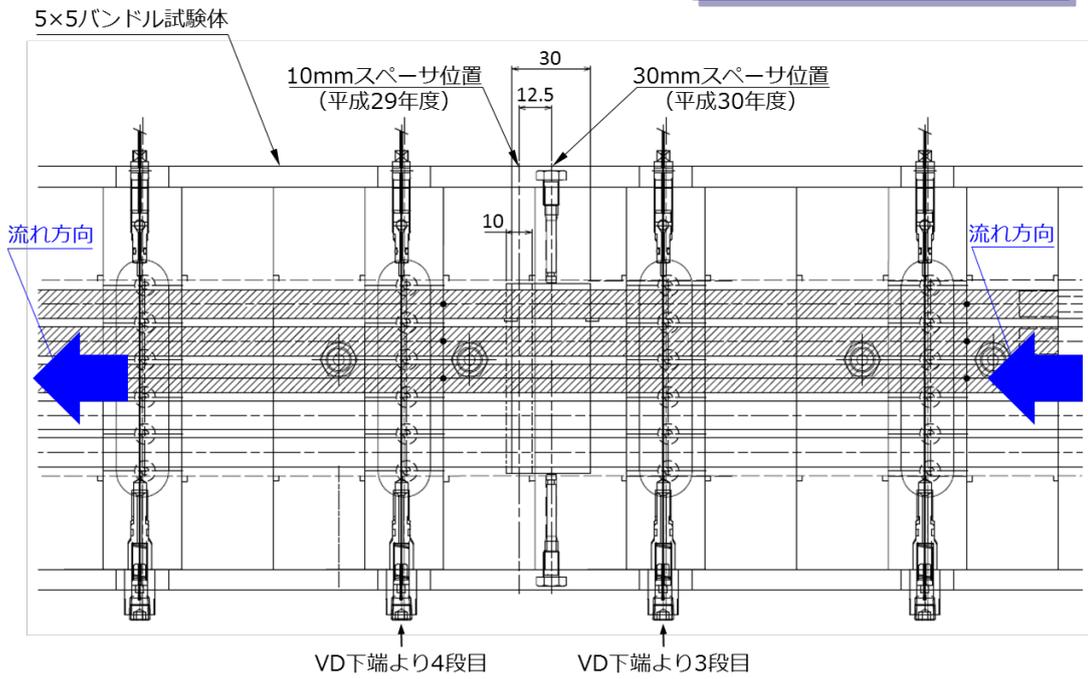


図 2.2-4 試験体発熱部スペーサ位置

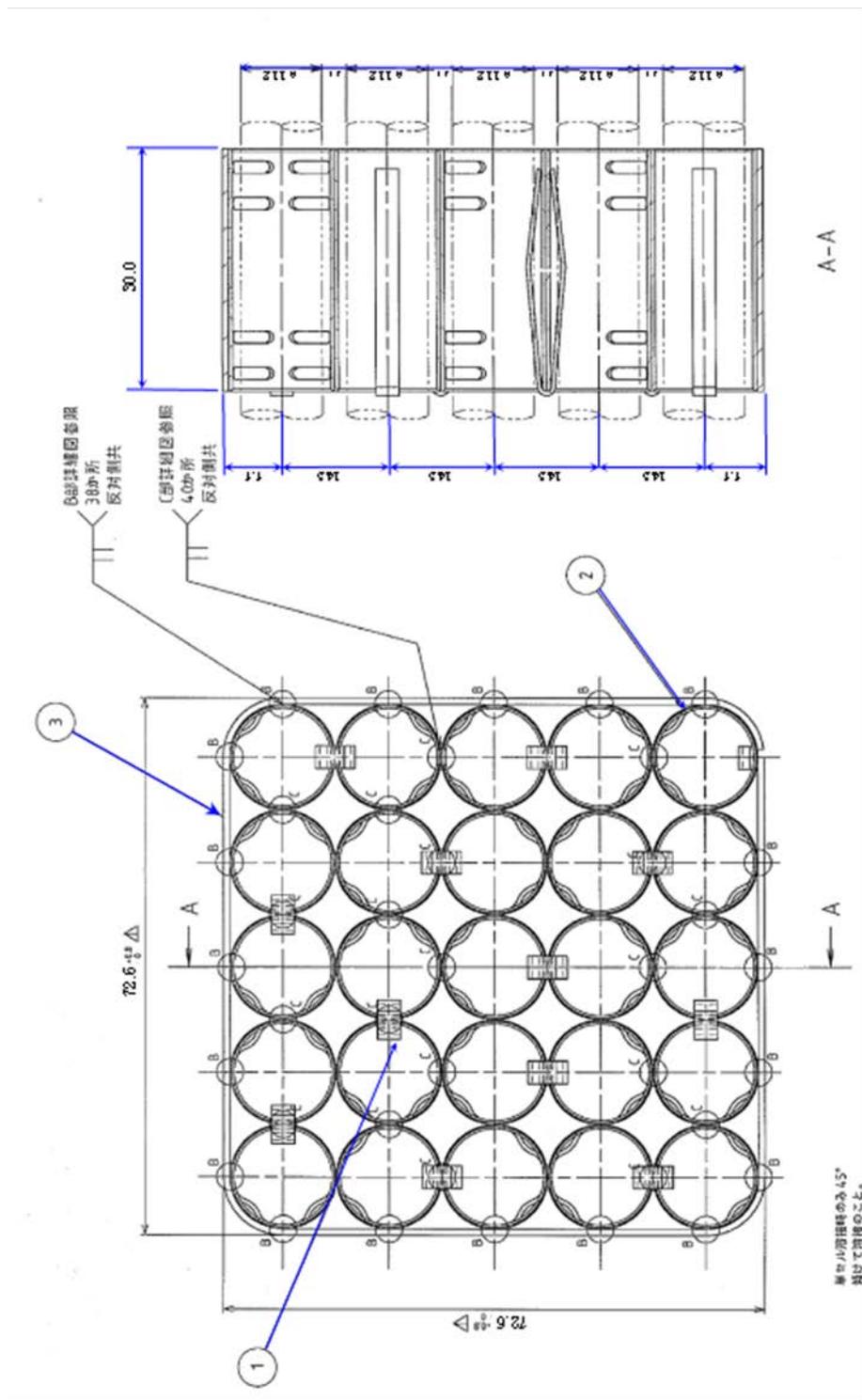
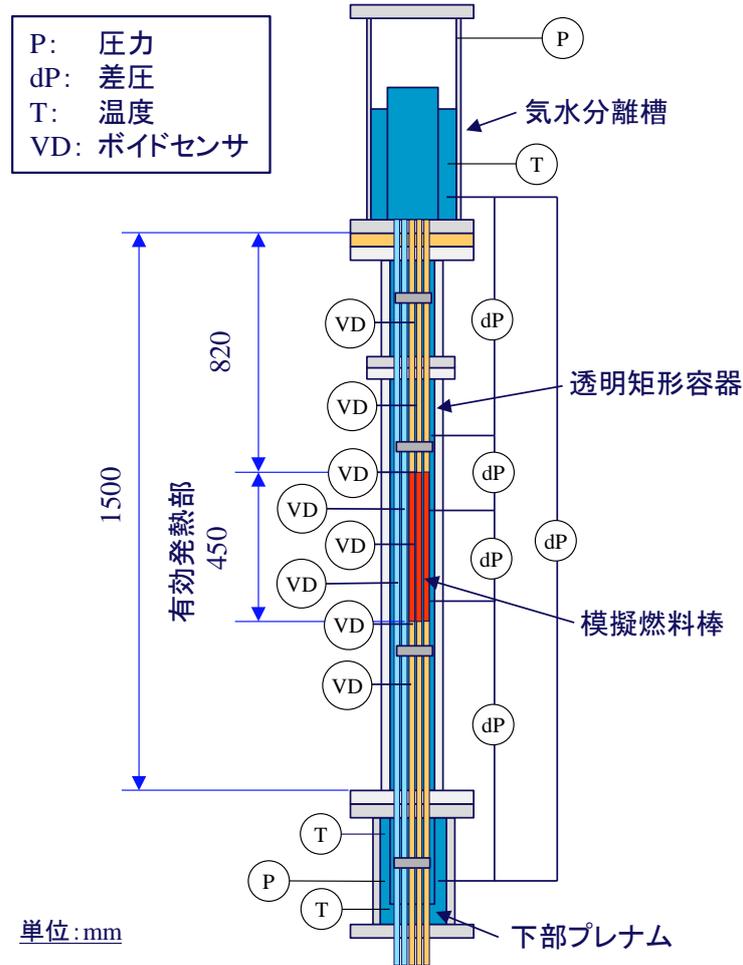


図 2.2-5 30mm スペース寸法図



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 2.2-6 試験部の全体構成及び計測項目

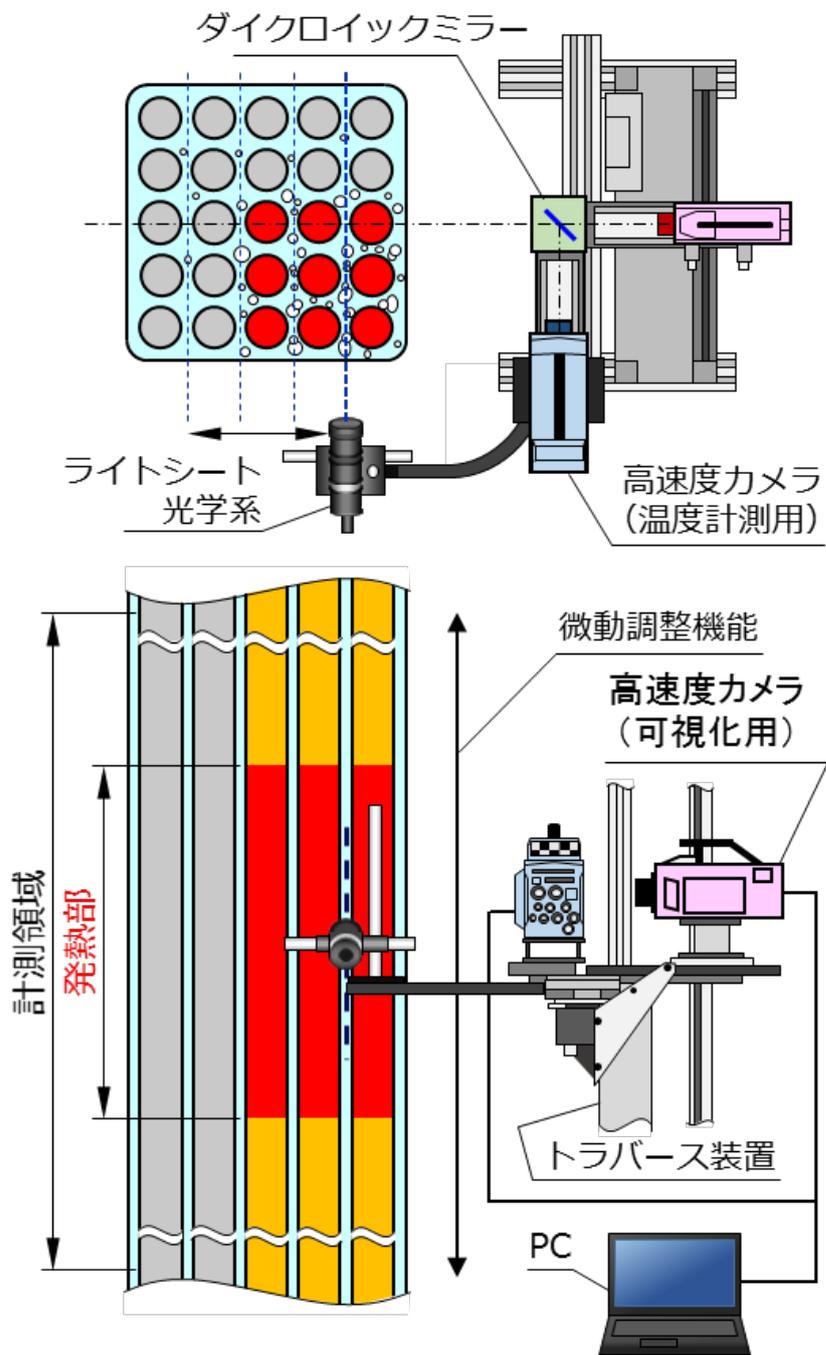


図 2.2-7 可視化計測システム

### 3. 実験

平成 30 年度は新たに 30 mm（実機相当）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 3.1-1 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に高さ 30 mm 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、原子力規制庁担当者と協議して選定するものとする。なお、原子力規制庁担当者ととの協議の結果、冷却水温度の詳細計測については光ファイバー計測を実施していることから、PIV による液相流速計測のみ実施することとした。

### 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、本年度ではスペーサ有無の影響を確認するため発熱部スペーサ無しの実験を追加した。これは平成28年度に実施したスペーサ無しの実験[2]に対し、次の二つの改善を行ったことによる。1つは、スコープコードの時間遅れの問題を解消し再度ボイド率計測を行えるようにしたこと、もう一つは、本年度新たに光ファイバを導入して流体温度分布を計測できるようにしたことである。

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, 発熱下端) 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 2.2-2** に示されるように加熱部長さを 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<sup>1</sup>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

<sup>1</sup> 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分布である。

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対応させることになる。

### 3.1.2.3. 設定出力の時間応答曲線

3次元核熱結合解析コードによる低温時の制御棒落下事故時の表面熱流束の時間応答を考慮して、時刻0.2秒で最大熱出力レベルまで直線的に増加するものとした。さらに最大熱出力の保持時間については、以下の点を考慮して決定した。

- (1) 1秒にも亘る保持時間は、軸方向のマクロな熱輸送の観点で出力レベルが一定であると解釈され、つまり出力レベル一定として定常加熱する場合と相違がない。
- (2) 安全評価解析上の低温時制御棒落下事故では、上記のような定常加熱状況は現出せず、一秒も経たない間に膜沸騰が生じて熱流束が急低下する。

上述の観点を考慮し、保持時間を0.5秒に統一して設定した。さらに、出力レベルは各流動条件（流速および温度）において、3レベルで評価することとした。設定に関する考慮点は以下となる。

- (1) 実機燃料においてボイドの横方向伝播の影響が顕著になるのは、落下制御棒側に近い領域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、このような状況の加熱条件を模擬するために図 2.2-3 で示すような25本のうち9本に限定して加熱する体系を採用した。
- (2) このとき高出力側コーナー部、本実験装置の3×3格子部でボイドが初生した最大熱出力レベルに対してその5割を超えないレベルに設定する。
- (3) 高出力側コーナー部から見て実機の燃料集合体幅の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評価する上での最も熱的に厳しいものであることを考慮し、高出力側コーナー部のみでボイドが初生する出力レベルに対して、2～3割程度増加させた出力レベルを最大熱出力の許容上限として制限することが望ましい。

上記を指標として、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た。このときOSV (Onset of Significant Void) 条件に至った実験条件を三条件の中の起点となる最小の最大熱出力レベル条件とする。以上より図 3.1-1 で示すような時間応答曲線として、熱出力パターンを決定した。

### 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、スペーサ無しの場合は平成29年度[3]と同じ、流速条件を2レベル、温度条件を2レベル、30mmスペーサの場合は、流速条件を2レベル、温度条件には20℃を追加し3レベルに設定した。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<sup>2</sup>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、スペーサ無しの場合、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、30mmスペーサの場合、2通り、3通り、3通りの計18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び温度条件に応じた3条件の設定を行う。しかしながら、

- (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<sup>3</sup>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。

---

<sup>2</sup> 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

<sup>3</sup> 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。

- (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<sup>4</sup>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<sup>5</sup>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<sup>6</sup>。
- (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

---

<sup>4</sup> 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。

<sup>5</sup> 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。

<sup>6</sup> 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。

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としてスペーサ無しの場合を表 3.1-2、30mm スペーサの場合を表 3.1-3 に示す。

なお、表 3.1-2 と表 3.1-3 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 3.1-2 と表 3.1-3 に示す実験条件マトリックスに従って実験結果を報告する。表 3.1-2 の 30mm スペーサについては、これまでと同様に実験条件を設定した全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。表 3.1-3 のスペーサ無しについては、本年度導入した光ファイバによる液相温度の測定結果のみを示す。

表 3.1-4 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 3.1-2 及び図 3.1-3 に示すロッド番号及び WMS の識別番号を用いている。図 3.1-3 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 3.1-4 ではサブチャンネルのタイプ分け<sup>7</sup>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 3.1-3 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。

<sup>7</sup> 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。

### 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 3.1-2 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 3.1-5 (Run No. 1), 図 3.1-13 (Run No. 2) 及び図 3.1-21 (Run No. 3) にロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化, 図 3.1-6 (Run No. 1), 図 3.1-14 (Run No. 2), 及び図 3.1-22 (Run No. 3) に高さごとの燃料被覆管温度の時間変化, 図 3.1-7 (Run No. 1), 図 3.1-15 (Run No. 2), 及び図 3.1-23 (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 3.1-8～図 3.1-11 (Run No.1), 図 3.1-16～図 3.1-19 (Run No.2) 及び図 3.1-24～図 3.1-27 (Run No.3) に示す。さらに, 図 3.1-12 (Run No. 1), 図 3.1-20 (Run No. 2) 及び図 3.1-28 (Run No. 3, 熱入力 24.5(C)) 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. 1 (熱入力 22.0 及び 22.5(A)), Run No. 2 (熱入力 23.5(B)及び 24.5(B)) 及び Run No. 3 (熱入力 24.5(C)及び 25.0) とともに-0.1 m (第 1 段 WMS) ～0.8 m (第 8 段 WMS) であった。
- (2) Run No.1 では, スペーサ直上流部の 0.15m (第 3 段 WMS) 地点から, 加熱サブチャンネル 1～3 の領域で顕著に発生し, 非加熱サブチャンネルタイプ 1 及び 2 の領域にボイドが伝播しているのが確認できる。スペーサ直下流部の 0.25m (第 4 段 WMS) では, スペーサ直上流部 (第 3 段 WMS) と比較してグラフの形が大きく変化していないことから, スペーサによって横方向へのボイドの伝播が抑えられているのが分かる。0.35m (第 5 段 WMS) になると非加熱サブチャンネルタイプ 1 及び 2 の領域に伝播が起きている。Run No.2 では, スペーサ直上流部の 0.15m (第 3 段 WMS) の加熱サブチャンネルタイプ 3 (WMS 識別番号 R3-T5) に一部大きなボイドの発生が見られ, それがスペーサ直下流部の 0.25m (第 4 段 WMS) の非加熱サブチャンネルタイプ 1 (WMS 識別番号 R2-T5) に伝播しているのが分かる。それ以外のスペーサの前後については, Run No.1 と同様にグラフの形がスペーサ前後で大きく変化していないことから, スペーサによってボイドの伝播が抑えられている。0.35m (第 5 段 WMS) になると Run No.1 と同様に非加熱サブチャンネルタイプ 1 及び 2 の領域に伝播が起きている。Run No.3 では, スペーサ直下流部の 0.25m (第 4 段 WMS) の非加熱サブチャンネルタイプ 1 (WMS 識別番号 R2-T4, T5, T6) に顕著にボイドの伝播が起きているのが確認できる。スペーサ前後 (0.15m (第 3 段 WMS) と 0.25m (第 4 段 WMS)) と 0.35m (第 5 段 WMS) については Run No.1 と同様である。
- (3) Run No.1 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, スペーサ上流域で生じた OSV レベルの小さな蒸気泡がスペーサ通過

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生じる蒸気泡が見て取れる。時刻 0.55 秒で上方から凝縮面があり、時刻 0.65 秒では下方からも凝縮面が進展している。時刻 0.70 秒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、特にスパ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パーサに衝突し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 0.60 秒の画像で上方から、時刻 0.65 秒で下方からもスパーサの前後（第 3 段 WMS と第 4 段 WMS の間の領域）に凝縮面があり、時刻 0.70 秒で第 4 段 WMS から第 5 段 WMS 付近へ凝縮面が進展している。
- (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 0.65 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、特にスパ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、横方向に伝播した気泡が生じる様子、スパーサ上流側ではスパ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パーサを通過して下流側へ流れる様子、第 4 段 WMS 下流ではそれら気泡と合体し大きな蒸気泡が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。また、ボイドの凝縮に関しては、時刻 0.55 秒過ぎから 0.65 秒に、下方及び上方から凝縮先端面が 0.25m（第 4 段 WMS）付近に進展して行く様子及び時刻 0.7 秒で進展する二つの凝縮先端面が衝突しているのが見て取れる。このとき凝縮誘起水撃現象が発生した可能性がある。なお、スパ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。

この 3 ケースにおいては、Run No.2 及び Run No.3 で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.1 においても圧力のパルスの増減が生じている。

### 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 3.1-2 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 3.1-29 (Run No. 4)、図 3.1-37 (Run No. 5) 及び図 3.1-45 (Run No. 6) にロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化、図 3.1-30 (Run No.4)、図 3.1-38 (Run No. 5) 及び図 3.1-46 (Run No. 6) に高さごとの燃料被覆管温度の時間変化、図 3.1-31 (Run No. 4)、図 3.1-39 (Run No. 5) 及び図 3.1-47 (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 3.1-32～図 3.1-35 (Run

No. 4), 図 3.1-40~図 3.1-43 (Run No. 5), 図 3.1-48~図 3.1-51 (Run No. 6, 熱入力 24.5) に示す. さらに, 図 3.1-36 (Run No. 4), 図 3.1-44 (Run No. 5) 及び図 3.1-52 (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, Run No. 2 及び Run No. 3 とともに -0.1 m (第 1 段 WMS) ~0.8 m (第 8 段 WMS) であった.
- (2) Run No.4 では同じ熱流束の No.2 に比べ流速が速くなっていることから, No.2 の OSV よりも高いレベルで蒸気泡が生じている. 特に No.4 では 0.35m (第 5 段 WMS) で加熱サブチャンネルタイプ 1 に顕著に気泡が発生している (No.2 では 0.15m (第 3 段) の加熱サブチャンネルタイプ 1 及び 2). スペーサの前後では, スペーサ直上流部の 0.15m (第 3 段 WMS) 地点から, 加熱サブチャンネル 1~3 の領域で顕著に発生し, 非加熱サブチャンネルタイプ 1 及び 2 の領域にボイドが伝播しているのが確認できる. スペーサ直下流部の 0.25m (第 4 段 WMS) では, 加熱サブチャンネルタイプ 1 (WMS 認識番号 R5-T5) で一部顕著にボイドが発生しているが, スペーサ直上流部 (第 3 段 WMS) と比較してグラフの形が大きく変化していないことから, スペーサによって横方向へのボイドの伝播が抑えられているのが分かる. 0.35m (第 5 段 WMS) になると非加熱サブチャンネルタイプ 1 及び 2 の領域にも横方向への伝播が起きている. Run No.5 については, スペーサの直上流部 0.15m (第 3 段) の加熱サブチャンネルタイプ 1 で一部顕著にボイドが発生し, スペーサ直下流部の 0.25m (第 4 段 WMS) では加熱サブチャンネルタイプ 1 で顕著に発生するようになっている. また, 第 4 段 WMS では, 非加熱サブチャンネルタイプ 1 及び 2 の領域への横方向伝播は抑えられている. 0.35m (第 5 段 WMS) については No.4 と同様に横方向への伝播が顕著になっている. Run No. 6 についても, 類似した結果が得られている.
- (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, スペーサ直下流側の第 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. 特に, 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るが, スペーサより上流側ではボイドは観察されなかった. 巨大気泡の横方向への伝播も確認できない. 一方, ボイドの凝縮に関しては, 時刻 0.60 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分かる.
- (4) Run No. 5 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, スペーサ下流から第 6 段 WMS までの領域内でのボイドの挙動が見て取れる. 特に, 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。また、スぺーサ上流ではボイドは観察されなかった。時刻 0.55 秒で加熱サブチャンネルから横方向に気泡が形成される様子が 0.45m (第 6 段 WMS) の上流側で確認できる。ボイドの凝縮に関しては、時刻 0.65 秒～0.70 秒にかけて、下方及び上方から有効加熱長の上部 (第 4 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 0.40 秒から時刻 0.7 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 6 段 WMS までの領域内でのボイドの挙動が見て取れる。特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、ほぼ同時にスぺーサ付近までボイドが初生している。時刻 0.65 秒ではスぺーサ上流でもボイドが確認できる。時刻 0.55 秒～0.65 秒ではサブチャンネル流路内からボイドが横方向に広がっている様子が分かる。時刻 0.65 秒では、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 の領域にまで及んでいる、同じ熱流束の 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。ボイドの凝縮に関しては、時刻 0.70 秒に、主に上方から有効加熱長の上部 (第 5 段 WMS 付近の近傍) に、また下方からスぺーサ直下流の第 4 段 WMS 近傍に凝縮面が進展して行く様子が見て取れる。

この 3 ケースにおいては、Run No.5 及び Run No.6 で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.4 においても圧力のパルスの増減が生じている。

### 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 3.1-2 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 3.1-53 (Run No. 7)、図 3.1-61 (Run No. 8) 及び図 3.1-69 (Run No. 9) にロードごとの燃料被覆管温度の時間変化、図 3.1-54 (Run No. 7)、図 3.1-62 (Run No. 8) 及び図 3.1-70 (Run No. 9) に高さごとの燃料被覆管温度の時間変化、図 3.1-55 (Run No. 7)、図 3.1-63 (Run No. 8) 及び図 3.1-71 (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 3.1-56～図 3.1-59 (Run No. 7)、図 3.1-64～図 3.1-67 (Run No. 8) 及び図 3.1-72～図 3.1-75 (Run No. 9) に示す。さらに、図 3.1-60 (Run No. 7)、図 3.1-68 (Run No. 8) 及び図 3.1-76 (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、Run No. 8 及び Run No. 9 とともに -0.1 m (第 1 段 WMS) ～0.8 m (第 8 段 WMS) であった。

- (2) Run No.7 では、スぺーサ直上流部 0.15m (第 3 段 WMS) の加熱サブチャンネルタイプ 1 及び 2 で蒸気泡が生じ、非加熱サブチャンネルタイプ 1 及び 2 の横方向の領域にも伝播している。スぺーサ直下流部 0.25m (第 4 段 WMS) では第 3 段 WMS の加熱サブチャンネルタイプ 1 及び 2 に比べ大きな蒸気泡が減っているが、非加熱サブチャンネルタイプ 1 及び 2 の領域では、第 3 段 WMS と同様に加熱サブチャンネルタイプ 1 及び 2 でボイドが発生しているが、さほど変わらないことから、スぺーサによってボイドの攪拌が起こり、横方向へのボイドの伝播が抑えられているのが分かる。0.35m (第 5 段 WMS) になると非加熱サブチャンネルタイプ 1 及び 2 の領域にも横方向への伝播が起きている。Run No.8 については、No.7 と同様にスぺーサの直上流部 0.15m (第 3 段) の加熱サブチャンネルタイプ 1 及び 2 で蒸気泡が生じ、非加熱サブチャンネルタイプ 1 及び 2 の領域ではさほど変わらないことから、スぺーサによって横方向へのボイドの伝播が抑えられているのが分かる。0.35m (第 5 段 WMS) では、No.7 と同様に非加熱サブチャンネルタイプ 1 及び 2 の領域にも横方向への伝播が起きている。Run No.9 については、スぺーサ前後 (0.15m (第 3 段 WMS) と 0.25m (第 4 段 WMS)) で加熱サブチャンネルタイプ 3 まで一部顕著に発生しているが、それ以外は No.8 と類似した結果が得られている。
- (3) Run No.7 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、スぺーサ上流の第 3 段 WMS の下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。時刻 0.65 秒の第 5 段 WMS の下付近で巨大気泡の横方向への伝播も確認できる。一方、ボイドの凝縮に関しては、下方及び上方から第 5 段 WMS 近傍に凝縮面が進展して行く様子が見て取れる。
- (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 0.7 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 6 段 WMS までの領域内でのボイドの挙動が見て取れる。特に下流側の有効加熱長の上端側でボイドが初生するが、ほぼ同時にスぺーサ直下付近でボイドが初生している。時刻 0.45 秒ではスぺーサ上流でもボイドが確認できる。時刻 0.65 秒～0.70 秒では第 4 段 WMS～第 5 段 WMS の間でサブチャンネル流路内からボイドが横方向に拡がっている様子が分かる。ボイドの凝縮に関しては、時刻 0.65 秒に、上方から有効加熱長の上端 (第 5 段 WMS 付近の近傍) に、また下方からスぺーサ直下流の第 4 段 WMS 近傍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、スぺーサ上流の第 3 段 WMS の下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。時刻 0.55 から巨大気泡の横方向への伝播も確認できる。一方、ボイドの凝縮に関しては、上方からの凝縮面の進展は確認できないが、時刻 0.70 秒でから第 3 段 WMS の下から第 3 段

WMS にかけて凝縮面が進展している様子が分かる。

この3ケースにおいては、Run No.8 及び Run No.9 で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 3.1-2 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 3.1-77 (Run No. 10), 図 3.1-85 (Run No. 11) 及び図 3.1-93 (Run No. 12) にロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化, 図 3.1-78 (Run No. 10), 図 3.1-86 (Run No. 11) 及び図 3.1-94 (Run No. 12) に高さごとの燃料被覆管温度の時間変化, 図 3.1-79 (Run No. 10), 図 3.1-87 (Run No. 11) 及び図 3.1-95 (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 3.1-80~図 3.1-83 (Run No. 10), 図 3.1-88~図 3.1-91 (Run No. 11) 及び図 3.1-96~図 3.1-99 (Run No. 12) に示す。さらに, 図 3.1-84 (Run No. 10), (Run No. 11, 熱入力 20.5), 図 3.1-92 (Run No. 11,) 及び図 3.1-100 (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, Run No. 12 及び Run No. 13 とともに-0.1 m (第1段 WMS) ~0.8 m (第8段 WMS) であった。
- (2) Run No. 10 では, 同じ熱流束の No.8 に比べ流速が速くなっていることから, No.8 の OSV よりも高いレベルで蒸気泡が生じている。特に No.10 では 0.25m(第4段 WMS) で加熱サブチャンネルタイプ 1 に顕著に気泡が発生している (No.8 では 0.15m (第3段)の加熱サブチャンネルタイプ 1)。スペーサの前後では, スペーサ直上流部の 0.15m (第3段 WMS) 地点から, 加熱サブチャンネル 1~3 の領域で発生し, 非加熱サブチャンネルタイプ 1 及び 2 の領域にボイドが伝播しているのが確認できる。スペーサ直下流部の 0.25m (第4段 WMS) では, 加熱サブチャンネルタイプ 1 で一部顕著にボイドが発生(上述)しているが, スペーサ直上流部(第3段 WMS)と比較してグラフの形が大きく変化していないことから, スペーサによって横方向へのボイドの伝播が抑えられているのが分かる。0.35m (第5段 WMS) になると非加熱サブチャンネルタイプ 1 及び 2 の領域にも横方向への伝播が起きている。Run No.11 については, スペーサの直上流部 0.15m (第3段)の加熱サブチャンネルタイプ 1 で一部顕著にボイドが発生し, スペーサ直下流部の 0.25m (第4段 WMS) では加熱サブチャンネルタイプ 1~3 で顕著に発生するようになっている。また, 第4段 WMS では, WMS 識別番号 T1, T2 のグラフが第3段 WMS に比べ大きな変化がないことから非加熱サブチャンネルタイプ 1 及び 2 の領域への横方向伝播は抑えられていることが分かる。0.35m (第5段 WMS) については No.4 と同様に横方向への伝播が顕著になっ

ている。Run No. 12 についても、類似した結果が得られている。

- (3) Run No. 10 の一連の可視化画像からは、時刻 0.4 秒から時刻 0.6 秒までの間のボイド挙動が把握でき、有効加熱長の中でスぺーサ下流から第 6 段 WMS までの領域内でのボイドの挙動が見て取れる。また、スぺーサ上流ではボイドは観察されなかった。時刻 0.4 秒から時刻 0.6 秒まででは、加熱サブチャンネルから横方向に気泡が形成される様子も観察されなかった。第 4 段 WMS より下流では、第 4 段 WMS～第 5 段 WMS よりも第 5 段 WMS～第 6 段 WMS のほうが気泡の発生を顕著に確認できた。ボイドの凝縮に関しては、時刻 0.65 秒～0.70 秒にかけて、下方及び上方から有効加熱長の上部（第 4 段 WMS）に向けて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 0.35 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 下流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。特に、時刻 0.35 秒でスぺーサ直下流でボイドが初生し、時刻 0.45 秒では下流側の有効加熱長の上端側でボイドが初生している。時刻 0.55 秒でスぺーサ直上流にボイドが確認できる。時刻 0.55 秒では第 4 段 WMS～第 5 段 WMS の間でサブチャンネル流路内からボイドが横方向に拡がり、時刻 0.60 秒～時刻 0.65 秒では第 5 段 WMS～第 6 段 WMS の間でサブチャンネル流路内からボイドが横方向に広がっている。ボイドの凝縮に関しては、時刻 0.65 秒～時刻 0.70 秒で、スぺーサ直上流部から有効加熱長の上部（第 5 段 WMS 付近の近傍）にかけてわずかに凝縮面が進展して行く様子を確認できる。
- (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 下流付近のスぺーサ通過後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。特に、時刻 0.35 秒でスぺーサ直下流でボイドが初生し、時刻 0.45 秒では下流側の有効加熱長の上端側でボイドが初生している。時刻 0.60 秒でスぺーサ直上流にボイドが確認できる。時刻 0.50 秒では第 4 段 WMS～第 5 段 WMS の間でサブチャンネル流路内からボイドが横方向に拡がり、時刻 0.50 秒では第 4 段 WMS～第 6 段 WMS の間でサブチャンネル流路内からボイドが横方向に広がっている。時刻 0.60 秒では第 5 段 WMS～第 6 段 WMS でサブチャンネル流路内からボイドが横方向に拡がり、時刻 0.65 秒～時刻 0.70 秒では第 4 段 WMS～第 6 段 WMS の間でサブチャンネル流路内からボイドが横方向に広がっている。ボイドの凝縮に関しては、時刻 0.65 秒、時刻 0.70 秒の可視化画像からは凝縮面の進展を確認できない。

この 3 ケースにおいては、Run No.11 及び Run No.12 で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.10 においても圧力のパルスの増減が生じている。

### 3.1.3.5. 冷却水温度 20℃, 冷却水流速 0.3 m/s の 3 ケースの基本測定結果

表 3.1-2 の実験条件マトリックス中の Run No. 13～Run No. 15 の実験結果を示す。

図 3.1-101 (Run No. 13), 図 3.1-109 (Run No. 14) 及び図 3.1-117 (Run No. 15) にロードごとの燃料被覆管温度の時間変化, 図 3.1-102 (Run No. 13), 図 3.1-110 (Run No. 14) 及び図 3.1-118 (Run No. 15) に高さごとの燃料被覆管温度の時間変化, 図 3.1-103 (Run No. 13), 図 3.1-111 (Run No. 14) 及び図 3.1-119 (Run No. 15) 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 3.1-104～図 3.1-107 (Run No. 13), 図 3.1-112～図 3.1-115 (Run No. 14) 及び図 3.1-120～図 3.1-123 (Run No. 15,) に示す。さらに, 図 3.1-108 (Run No. 13), 図 3.1-116 (Run No. 14) 及び図 3.1-124 (Run No. 15) 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. 13, Run No. 14 及び Run No. 15 ともに-0.1 m (第 1 段 WMS) ～0.8 m (第 8 段 WMS) であった。
- (2) Run No. 13 では, スペーサの直上流部 0.15m (第 3 段) の加熱サブチャンネルタイプ 1～3 で顕著に気泡が発生し, 非加熱サブチャンネルタイプ 1 及び 2 の領域にボイドが伝播しているのが確認できる。スペーサ直下流部の 0.25m (第 4 段 WMS) では, 加熱サブチャンネルタイプ 1 で一部 (WMS 認識番号 T4 のみ) 顕著にボイドが発生しているだけで, 他 (T5, T6) のボイドの顕著な発生は見られない。非加熱サブチャンネルタイプ 1 及び 2 (WMS 認識番号 T1, T2) についてはスペーサ直上流部 (第 3 段 WMS) と比較してグラフの形が大きく変化していないことから, スペーサによって横方向へのボイドの伝播が抑えられているのが分かる。0.35m (第 5 段 WMS) になると非加熱サブチャンネルタイプ 1 及び 2 の領域にも横方向への伝播が起きている。Run No.14 については, スペーサ直上流の第 3 段 WMS のサブチャンネルタイプ 1～3 で顕著にボイドが発生し, 非加熱サブチャンネルタイプ 1 及び 2 の領域にもボイドが伝播している。スペーサ直下流の第 4 段 WMS では加熱サブチャンネル 1～3 で顕著にボイドが発生しているが, 第 4 段 WMS では, WMS 識別番号 T1, T2 のグラフが第 3 段 WMS に比べ大きな変化がないことから非加熱サブチャンネルタイプ 1 及び 2 の領域への横方向伝播は抑えられていることが分かる。0.35m (第 5 段 WMS) については No.13 と同様に横方向への伝播が顕著になっている。Run No. 15 についても, 類似した結果が得られている。
- (3) Run No. 13 の一連の可視化画像からは, 時刻 0.5 秒から時刻 0.6 秒までの間のボイド挙動が把握でき, 有効加熱長の中で 0.05m (第 2 段 WMS) ～0.15 (第 3 段 WMS) の中間付近から第 6 段 WMS までの領域内でのボイドの挙動が見て取れる。また加熱サブチャンネルから非加熱サブチャンネルへの横方向に気泡が形成される様子は観察

されなかった。時刻 0.50 秒で第 3 段 WMS 上流部，スぺーサ前後，第 5 段 WMS 直下流部及び第 6 段 WMS 直付近でボイドが初生しているのが分かる。また，時刻 0.60 秒で第 4 段 WMS～第 5 段 WMS の間にボイドが発生している。ボイドの凝縮に関しては，時刻 0.60 秒～0.70 秒にかけて，下方及び上方から有効加熱長の上部（第 4 段 WMS）に向けて凝縮面が進展して行く様子が見て取れる。

- (4) Run No. 14 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，有効加熱長下部領域の第 2 段 WMS 下流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。特に，時刻 0.35 秒でスぺーサ直下流でボイドが初生し，時刻 0.45 秒では下流側の有効加熱長の上端側でボイドが初生している。それと同時に第 3 段 WMS 上流付近，スぺーサ下流付近にもボイドが初生しているのが分かる。時刻 0.55 秒では第 3 段 WMS 上流付近と第 6 段 WMS 上流付近でサブチャンネル流路内からボイドが横方向に拡がり，時刻 0.60 秒でスぺーサ上流部でサブチャンネル流路内からボイドが横方向に広がっているのが分かる。ボイドの凝縮に関しては，時刻 0.65 秒～時刻 0.70 秒で，上方及び下方から有効加熱長の上部（第 5 段 WMS 付近の近傍）に向けて凝縮面が進展して行く様子を確認できる。
- (5) Run No.15 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，有効加熱長下部領域の第 2 段 WMS 下流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。特に，時刻 0.45 秒で第 6 段 WMS の上流で大きなボイドが初生し，それと同時にスぺーサ直下流部でもボイドが初生している。時刻 0.55 秒では第 3 段 WMS 上流部付近と第 6 段 WMS 上流付近でサブチャンネル流路内からボイドが横方向に拡がり，時刻 0.60 秒及び時刻 0.65 秒では第 4 段 WMS 下流部付近でサブチャンネル流路内からボイドが横方向に広がっている。ボイドの凝縮に関しては，時刻 0.65 秒，時刻 0.70 秒の画像で上方及び下方から有効加熱長の上部（第 4 段 WMS 付近の近傍）に向けて凝縮面が進展して行く様子を確認できる。

この 3 ケースにおいては，Run No.14 及び Run No.15 で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.13 においても圧力のパルスの増減が生じている。

### 3.1.3.6. 冷却水温度 20℃，冷却水流速 0.5 m/s の 3 ケースの基本測定結果

表 3.1-2 の実験条件マトリックス中の Run No. 16～Run No. 18 の実験結果を示す。

図 3.1-125 (Run No. 16)，図 3.1-133 (Run No. 17) 及び図 3.1-141 (Run No. 18，熱入力 28.0) にロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化，図 3.1-126 (Run No. 16)，図 3.1-134 (Run No. 17)，及び図 3.1-142 (Run No. 18) に高さごとの燃料被覆管温度の時間変化，図 3.1-127 (Run No. 16.)，図 3.1-135 (Run No. 17) 及び図 3.1-143 (Run No. 18) に入力圧力，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 3.1-128～図 3.1-131 (Run No. 16), 図 3.1-136～図 3.1-139 (Run No. 17) 及び図 3.1-144～図 3.1-147 (Run No. 18) に示す。さらに、図 3.1-132 (Run No. 16), 図 3.1-140 (Run No. 17) 及び図 3.1-148 (Run No. 18) 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. 16, Run No. 17 及び Run No. 18 ともに-0.1 m (第 1 段 WMS) ～0.8 m (第 8 段 WMS) であった。
- (2) Run No. 16 では、同じ熱流束の No.14 に比べ流速が速くなっていることから、No.14 の OSV より高いレベルで蒸気泡が発生している。特に No.16 では 0.25m (第 4 段 WMS) で加熱サブチャンネルタイプ 1 に顕著に気泡が発生している (No.14 では 0.15m (第 3 段) の加熱サブチャンネルタイプ 1)。スパーサの前後では、スパーサ直上流部の 0.15m (第 3 段 WMS) 地点から、加熱サブチャンネル 1～3 の領域で発生し、非加熱サブチャンネルタイプ 1 及び 2 の領域にボイドが伝播しているのが確認できる。スパーサ直下流部の 0.25m (第 4 段 WMS) では、加熱サブチャンネルタイプ 1 で一部顕著にボイドが発生 (上述) しているが、スパーサ直上流部 (第 3 段 WMS) と比較して WMS 認識番号 T1, T2 のグラフの形が大きく変化していないことから、スパーサによって横方向へのボイドの伝播が抑えられているのが分かる。0.35m (第 5 段 WMS) になると非加熱サブチャンネルタイプ 1 及び 2 の領域にも横方向への伝播が起きている。Run No.17 については、スパーサの直上流部 0.15m (第 3 段) の加熱サブチャンネルタイプ 1 及び 2 で一部顕著にボイドが発生し、スパーサ直下流部の 0.25m (第 4 段 WMS) では加熱サブチャンネルタイプ 1～3 で顕著に発生するようになっている。また、第 4 段 WMS では、WMS 識別番号 T1, T2 のグラフが第 3 段 WMS に比べ大きな変化がないことから非加熱サブチャンネルタイプ 1 及び 2 の領域への横方向伝播は抑えられていることが分かる。0.35m (第 5 段 WMS) については No.16 と同様に横方向への伝播が顕著になっている。Run No. 18 については、類似した結果が得られているが、0.25m (第 4 段 WMS) の非加熱サブチャンネルタイプ 1 及び 2 (WMS 認識番号 R1-T4, R2-T4) でボイドが発生していることから一部で加熱サブチャンネルからの横方向への伝播が起きているのが確認できる。
- (3) Run No. 16 の一連の可視化画像からは、時刻 0.5 秒から時刻 0.55 までの間のボイド挙動が把握でき、有効加熱長の中で 0.15m (第 3 段 WMS) のスパーサ直下流部から第 6 段 WMS までの領域内でのボイドの挙動が見て取れる。また加熱サブチャンネルから非加熱サブチャンネルへの横方向に気泡が形成される様子は観察されなかった。時刻 0.50 秒で第 3 段 WMS 下流側のスパーサ直下流部、第 6 段 WMS 下流部付近でボイドが同時に初生しているのが分かる。また、時刻 0.55 秒では第 4 段 WMS～第 5

段 WMS の間にもボイドが発生している。ボイドの凝縮に関しては、時刻 0.60 秒～0.70 秒にかけて、上方及び下方から有効加熱長の上部（第 5 段 WMS）に向けて凝縮面が進展して行く様子が見て取れる。

- (4) Run No. 17 の一連の可視化画像からは、時刻 0.40 秒から時刻 0.70 までの間のボイド挙動が把握でき、有効加熱長の中で 0.15m（第 3 段 WMS）のスペーサ直上流部から第 6 段 WMS までの領域内でのボイドの挙動が見て取れる。時刻 0.60 秒の第 5 段 WMS 前後で加熱サブチャンネルから非加熱サブチャンネルへの横方向に気泡が形成される様子が確認できる。時刻 0.4 秒で第 5 段 WMS～第 6 段 WMS の中間付近でボイドが初生し、時刻 0.45 秒で第 3 段 WMS 下流側のスペーサ直下流部にボイドが発生している。ボイドの凝縮に関しては、時刻 0.65 秒～0.70 秒にかけて、上方及び下方から有効加熱長の上部（第 5 段 WMS）に向けて凝縮面が進展して行く様子が見て取れる。
- (5) Run No. 18 の一連の可視化画像からは、時刻 0.40 秒から時刻 0.70 までの間のボイド挙動が把握でき、有効加熱長の中で 0.15m（第 3 段 WMS）直上流部から第 6 段 WMS までの領域内でのボイドの挙動が見て取れる。時刻 0.55 秒の第 5 段 WMS 上流付近で加熱サブチャンネルから非加熱サブチャンネルへの横方向に気泡が形成される様子が確認できる。また、時刻 0.6 時刻、時刻 0.65 秒では、第 5 段 WMS 前後でも加熱サブチャンネルから非加熱サブチャンネルへの横方向に気泡が形成される様子が確認できる。時刻 0.40 秒で第 3 段 WMS 下流側のスペーサ直下流部にボイドが初生し、時刻 0.45 秒で第 6 段上流部付近にもボイドが初生している。ボイドの凝縮に関しては、時刻 0.60 秒～0.70 秒にかけて、上方及び下方から有効加熱長の上部（第 5 段 WMS）に向けて凝縮面が進展して行く様子が見て取れる。

この 3 ケースにおいては、Run No.17 及び Run No.18 で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.16 においても圧力のパルスの増減が生じている。

### 3.1.3.7. 詳細流動測定結果

#### (1) 実験ケース

表 3.1-2 の実験条件マトリックス中の Run No. 1～Run No. 18 のそれぞれと同一の実験条件として実験ケースを選定し、PIV および光ファイバにより液相の流速場及び温度場の測定を実施した。実験ケースは、Run No., 熱出力 の順にケース A から J を割り振っている。実施したケースは、PIV がケース A, B, C, 光ファイバがケース A から J である。

#### (2) 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。測定は、各実験ケースに対して、第 2 段 WMS から第 3 段 WMS までの範囲、第 3 段 WMS から第 4 段 WMS までの範囲、第 4 段 WMS から第 5 段 WMS までの

範囲及び第 5 段 WMS から第 6 段 WMS までの範囲で実施した。

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 の測定を実施した実験ケースの代表としてケース A (Run No. 1), B (Run No. 2), C (Run No. 3) 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、PIV 測定結果は、代表としてボイド初生期～非加熱部へのボイド横流れ期については、第 3 段 WMS から第 4 段 WMS (加熱部下端からの高さ 0.15m から 0.25m) までの範囲を示し、逆流期については、第 5 段 WMS から第 6 段 WMS (加熱部下端からの高さ 0.35m から 0.54m) までの範囲を示す。図 3.1-3 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 3.1-3 の右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。

#### ① ボイド初生～非加熱部へボイド横流れ期

第 3 段 WMS からその第 4 段 WMS (加熱部下端からの高さ 0.15m から 0.25m) までの範囲に対して、ボイドが初生しボイド率が高まった時刻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す。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<sup>8</sup>、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。

ケース A の PIV 測定結果を図 3.1-149～図 3.1-158 に示す。図 3.1-150 の時刻 0.48 秒でスペーサの前後でボイドが初生し、図 3.1-155 の時刻 056 秒付近までボイド率が高まっている。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、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。PIV 測定結果では、ボイド率が増加しても、加熱部から非加熱部に液相が流れる様子は観察されない。加熱部はボイドの増加によって液

<sup>8</sup> 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。

相が緑色から赤色のベクトル (0.9m/s~2.0m/s) がスぺーサ上流, スぺーサ内部, スぺーサ下流で確認できるが, 非加熱部ではスぺーサ内部の一部で黄色から赤色のベクトル (1.5m/s~2.0m/s) が見られるものの, スぺーサ下流では緑色のベクトル (0.7m/s~1.0m/s) で安定し, 非加熱部の流路全体に液相流速ベクトルを確認できる (気泡が確認されない). 30mm スぺーサの場合, スぺーサの攪拌効果によってボイドの非加熱部への横流れが抑制されていると考えられる.

ケース B の PIV 測定結果を図 3.1-164~図 3.1-173 に示す. 図 3.1-164 の時刻 0.40 秒でスぺーサ直上流にボイドが初生し, 図 3.1-165 の時刻 0.42 秒でスぺーサ直下流にボイドが発生している. 図 3.1-169 の時刻 0.58 秒付近までスぺーサ前後でボイド率が高まっている. PIV 測定結果では, ケース A と同様でスぺーサ内部では液相流速が速くなっているが, スぺーサ下流では加熱部と非加熱部で流速に差ができています. ケース B もスぺーサの攪拌効果によってボイドの非加熱部への横流れが抑制されていると考えられる.

ケース C の PIV 測定結果を図 3.1-179~図 3.1-188 に示す. 図 3.1-179 の時刻 0.32 秒でスぺーサ直下流にボイドが初生し, 図 3.1-181 の時刻 0.37 秒からスぺーサ前後にボイドが発生している. 図 3.1-188 の時刻 0.55 秒付近までスぺーサ前後でボイド率が高まっている. PIV 測定結果では, ケース A 及び B と同様でスぺーサ内部では液相流速が速くなっているが, スぺーサ下流では加熱部と非加熱部で流速に差ができています. ケース C もスぺーサの攪拌効果によってボイドの非加熱部への横流れが抑制されていると考えられる.

## ② 逆流期

ケース A の PIV 測定結果を図 3.1-159~図 3.1-163 に示す. 図 3.1-160 の時刻 0.52 秒では右側 PIV 測定画像で左から 2 番目加熱領域の中央部に逆流が見られる. 非加熱領域は流れが乱れているのが分かる. 図 3.1-161 (時刻 0.53 秒) から図 3.1-163 (時刻 0.55 秒) では, 加熱領域の液相に上昇流と逆流が混在し, 非加熱領域ではところどころで流れが乱れている.

ケース B の PIV 測定結果を図 3.1-174~図 3.1-178 に示す. 図 3.1-174 の時刻 0.62 秒では右側 PIV 測定画像の加熱領域の下流側に逆流が見られる. 非加熱領域では流速がほとんどない状態を確認できる. 図 3.1-175 (時刻 0.63 秒) から図 3.1-178 (時刻 0.68 秒) では, 加熱領域のところどころの液相に逆流が見られ, また, 流速がほとんどない状態と中央の加熱部では上昇流が見られる. 非加熱領域ではほとんど流れがない状態となっている. 左側の可視化画像を見ると加熱領域の中央部に大きな気泡塊が出来, わずかな時間の中で縮小し消滅していく様が見られることから, このときの PIV 測定結果は気泡が凝縮していく状態を示しているものと考えられる.

ケース C の PIV 測定結果を図 3.1-189~図 3.1-193 に示す. 図 3.1-189 の時刻 0.69 秒では右側 PIV 測定画像で加熱領域に逆流が見られる. また非加熱領域でも緑色のベクトルについては逆流が見られる. 図 3.1-190 (時刻 0.72 秒) から図 3.1-192 (時刻 0.74 秒) では, 加熱領域の液相に逆流が多く見られるようになり, 非加熱領域も逆流が占めるようになり

ところどころで流れが乱れている。図 3.1-193 の時刻 0.75 秒では非加熱領域の液相が加熱領域への横方向の逆流を示しているのが確認できる。一連の画像の左側可視化画像では、加熱領域にある大きな気泡塊が下方向へ小さくなっていく様から、このときの PIV 測定結果は凝縮面が進展していく状態を示しているものと考えられる。

### (3) 光ファイバによる液相温度測定結果

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 3.1-3 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.1~18 のケース A~J である (表 3.1-2 参照)。光ファイバの測定位置は、第 3 段 WMS 部 (30mm スペーサの上流)、第 4 段 WMS 部 (30mm スペーサの下流)、第 5 段 WMS 部、第 6 段 WMS 部である。光ファイバ測定を実施した実験ケースの代表として第 4 段 WMS 部の測定結果を図 3.1-194 から図 3.1-253 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せるものもある。この異常値の原因は、数値処理上のエラーである。測定結果より、同じ入口温度、入口流速の条件では、出力の違いによる温度分布の違いがあり、最も熱的に厳しい地点は入口温度 40°C と 60°C では T5R5 地点、入口温度 20°C では T5R4 地点で最大値をとりその値は熱出力に依存すること、非加熱領域においては熱出力に関係なく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 (T3-R3) も熱出力に依存していることなどの知見が得られている。また、同じ入口温度、熱出力で、入口流速が異なる条件では (ケース I と J の比較)、T5R4 地点の最大値は共に 95°C だが、加熱ロッドと非加熱ロッドの境界の最大値は I が 80°C と J が 95°C と入口速度の違いによって差が現れている

#### 3.1.3.8. スペーサ無しの追加実験結果

スペーサ有無の影響を確認するため発熱部スペーサ無しの実験を追加した。スペーサ無しについては、スコープコーダの時間遅れの問題を解消して再測定したボイド率計測結果を含む基本測定結果と光ファイバ導入による流体温度分布計測を以下に示す。

#### (1) 基本測定結果 冷却水温度 40°C、冷却水流速 0.3 m/s の 3 ケース

表 3.1-3 の実験条件マトリックス中の Run No. 1~Run No. 3 について実験条件ケース A~C の実験結果を示す。図 3.1-254 (Run No. 1)、図 3.1-262 (Run No. 2) 及び図 3.1-270 (Run No. 3) にロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化、図 3.1-255 (Run No. 1)、図 3.1-263 (Run No. 2)、及び図 3.1-271 (Run No. 3) に高さごとの燃料被覆管温度の時間変化、図 3.1-256

(Run No. 1), 図 3.1-264 (Run No. 2), 及び図 3.1-272 (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 3.1-257~図 3.1-260 (Run No.1), 図 3.1-265~図 3.1-268 (Run No. 2) 及び図 3.1-273~図 3.1-276 (Run No. 3) に示す. さらに, 図 3.1-261 (Run No. 1), 図 3.1-269 (Run No. 2) 及び図 3.1-277 (Run No. 3) にボイド挙動の可視化画像を示す.

## (2) 光ファイバによる液相温度測定結果

表 3.1-3 の実験条件マトリックス中の Run No.1~Run No.12 について実験条件ケース A~L の実験結果を示す. 光ファイバの測定位置は, 第 3 段 WMS 部 (30mm スペーサの上流), 第 4 段 WMS 部 (30mm スペーサの下流), 第 5 段 WMS 部, 第 6 段 WMS 部である. 光ファイバ測定を実施した実験ケースの代表として第 4 段 WMS 部の測定結果を図 3.1-278 から図 3.1-349 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せるものもある. この異常値の原因は, 数値処理上のエラーである. 測定結果より, 同じ入口温度, 入口流速の条件では, 出力の違いによる温度分布の違いがあり, 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, 非加熱領域においては熱出力に関係なく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 (T3-R3) も熱出力に依存していることなどの知見が得られている. また, 同じ入口温度, 熱出力で, 入口流速がことなる条件では (ケース C と E, ケース I と K の比較), ケース C と E では T5R5 地点の最大値は共に 110°C, 加熱ロッドと非加熱ロッドの境界の最大値は共に 110°C と差がないが, ケース I と K では, T5R5 地点の最大値はケース I が 100°C, ケース J が 110°C, 加熱ロッドと非加熱ロッドの境界の最大値はケース I が 75°C, ケース J が 100°C となり, 入口温度 60°C の場合, 入口流速の違いによって差が現れている.

表 3.1-1 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,ワイヤ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 <sup>2</sup> -s 熱流束:最大3 MW/m <sup>2</sup>	
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"> <li>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</li> <li>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</li> <li>冷却水温度:293K~353Kの範囲で2段階以上</li> </ul>	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"> <li>3次元ボイド率分布</li> <li>伝熱面温度</li> <li>可視化画像(高速度カメラを使用)</li> <li>液相場の流速及び温度の分布</li> </ul>	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 3.1-2 実験条件マトリックス (30mm スペーサ)

Run No.	Case	初期水温 °C	入口流速 m/s	熱流束 MW/m <sup>2</sup>	PIV 速度計測	光ファイバ 温度計測
1	1	40	0.3	1.28	A	A
2				1.39	B	B
3				1.51	C	C
4	2	40	0.5	1.39		
5				1.44		D
6				1.51		
7	3	60	0.3	0.96		
8				1.01		E
9				1.06		
10	4	60	0.5	1.01		
11				1.11		F
12				1.17		
13	5	20	0.3	1.69		G
14				1.76		H
15				1.83		I
16	6	20	0.5	1.76		
17				1.83		J
18				1.96		

表 3.1-3 実験条件マトリックス (スペーサ無し)

Run No.	Case	初期水温 ℃	入口流速 m/s	熱流束 MW/m <sup>2</sup>	光ファイバ
1	1	40	0.3	1.11	A
2				1.21	B
3				1.33	C
4	2	40	0.5	1.17	D
5				1.33	E
6				1.39	F
7	3	60	0.3	0.83	G
8				0.86	H
9				0.96	I
10	4	60	0.5	0.86	J
11				0.96	K
12				1.06	L

表 3.1-4 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

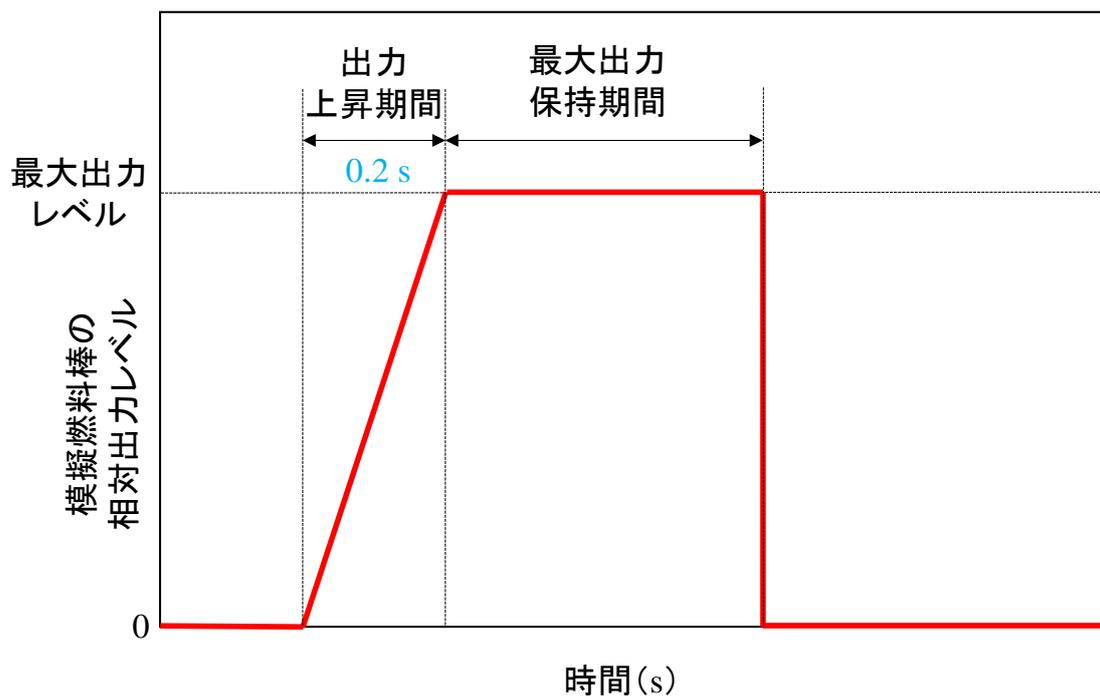


図 3.1-1 設定出力の時間応答曲線

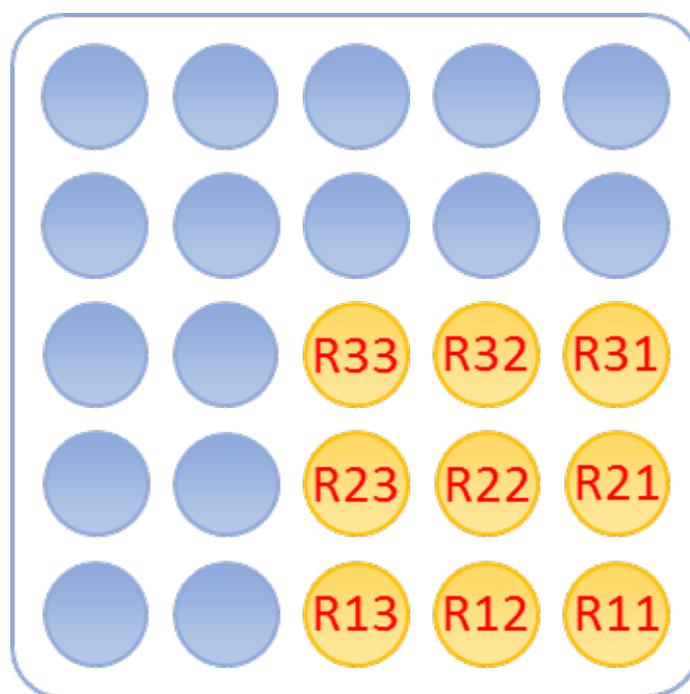


図 3.1-2 ロッド番号の割振り

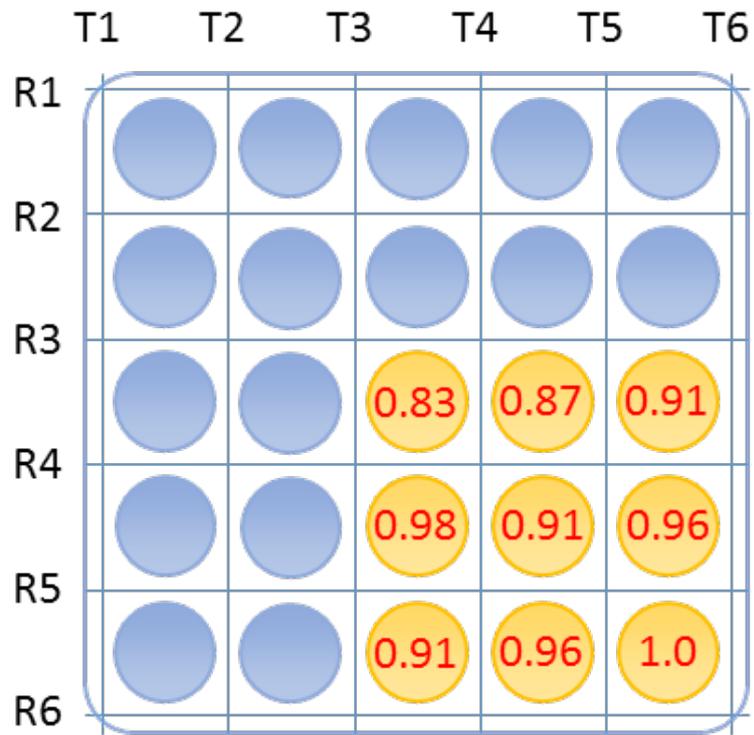


図 3.1-3 模擬燃料棒の局所出力係数及び WMS の識別番号

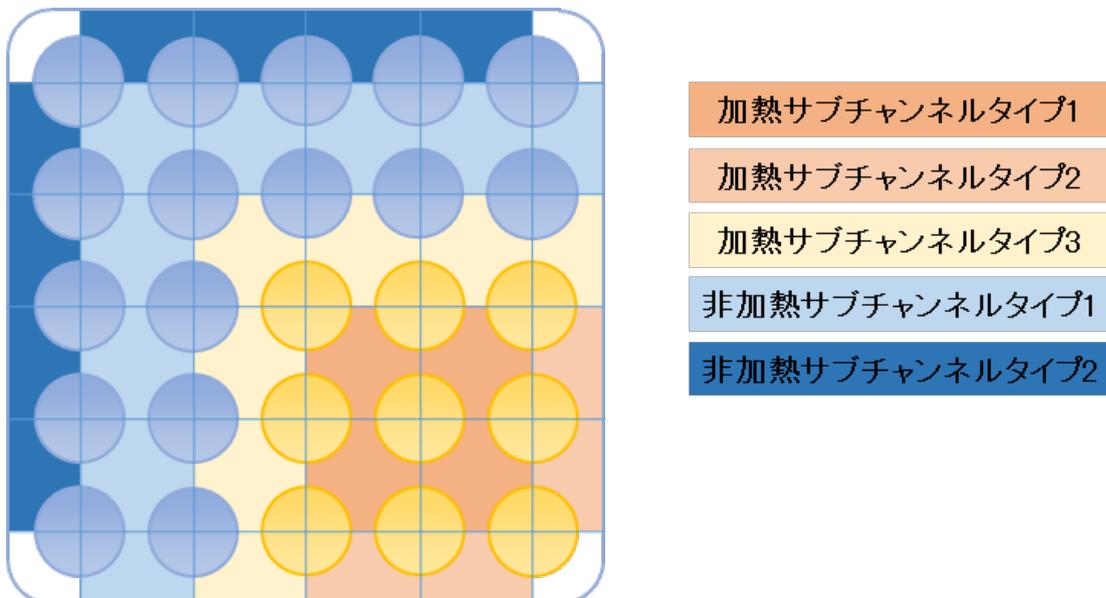


図 3.1-4 サブチャンネルのタイプ分け

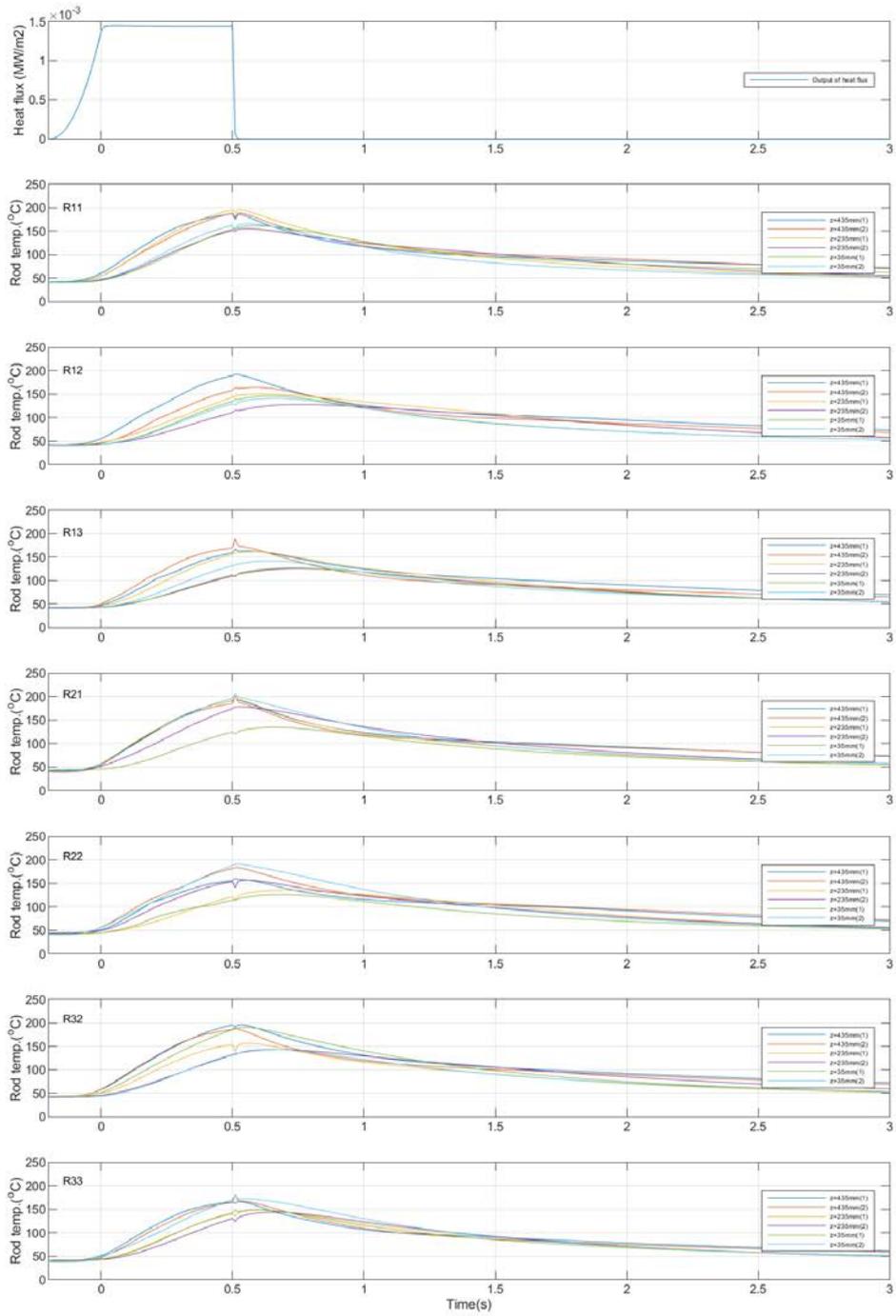


図 3.1-5 ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.1)

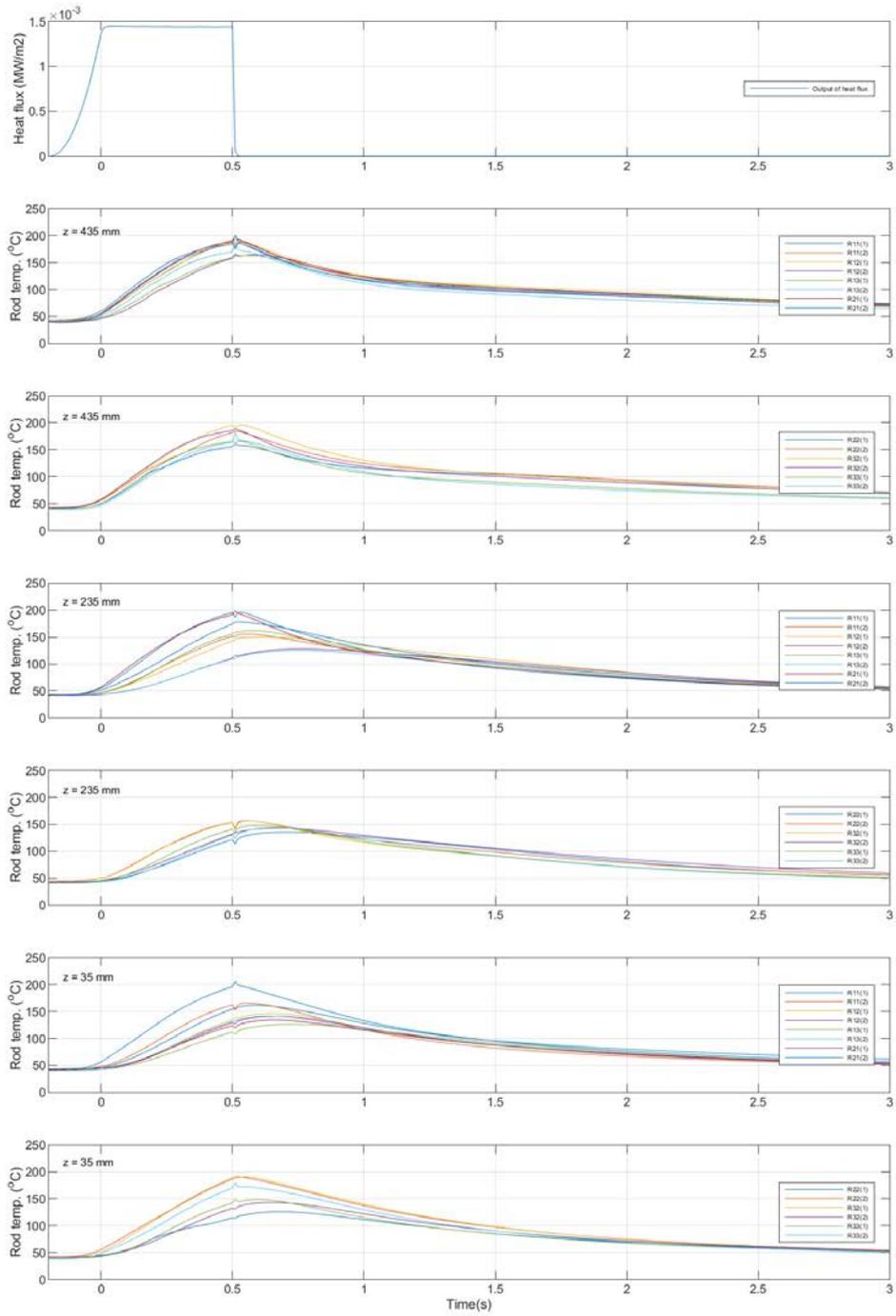


図 3.1-6 高さごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.1)

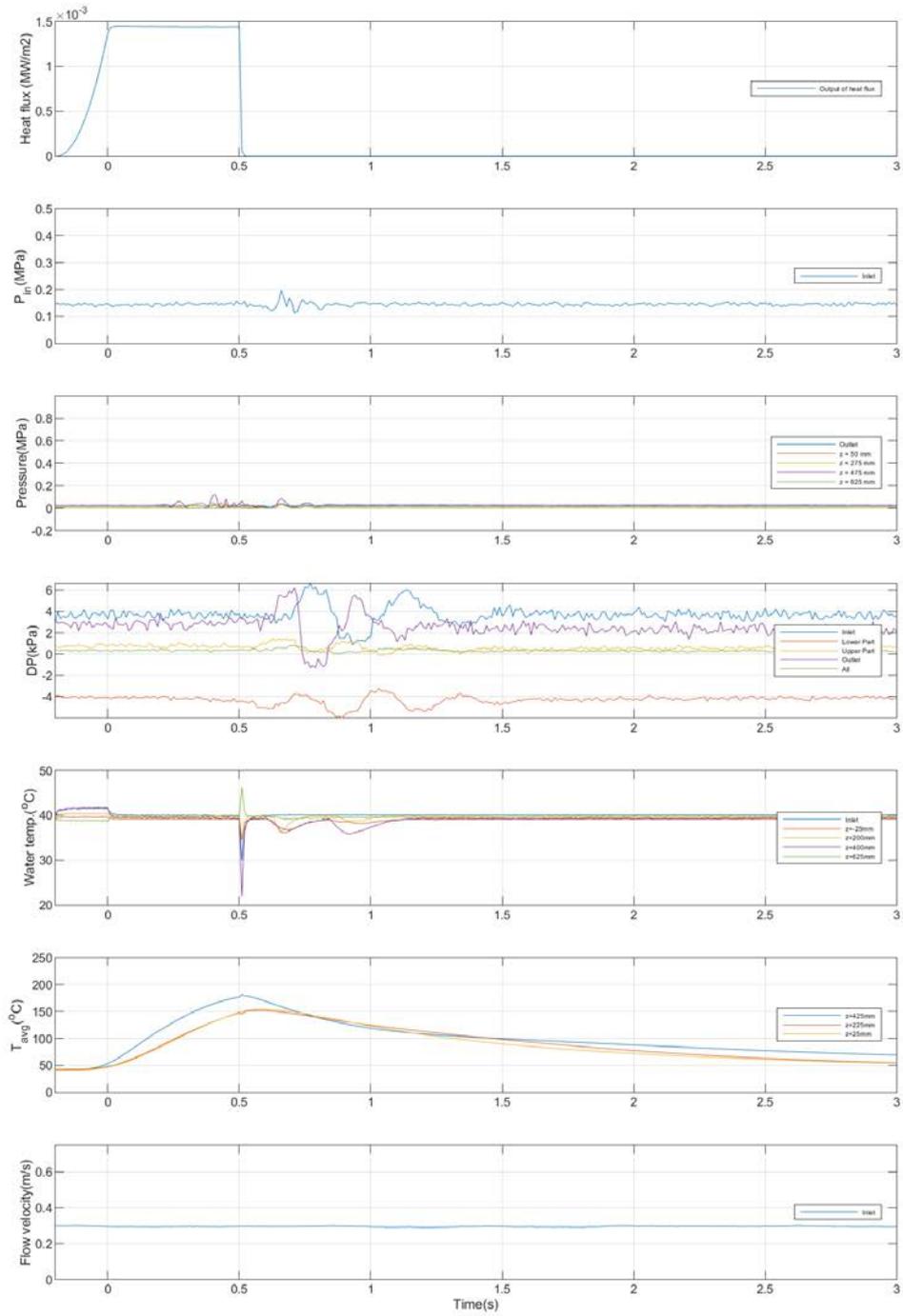


図 3.1-7 その他計測値の時間変化 (Run No.1)

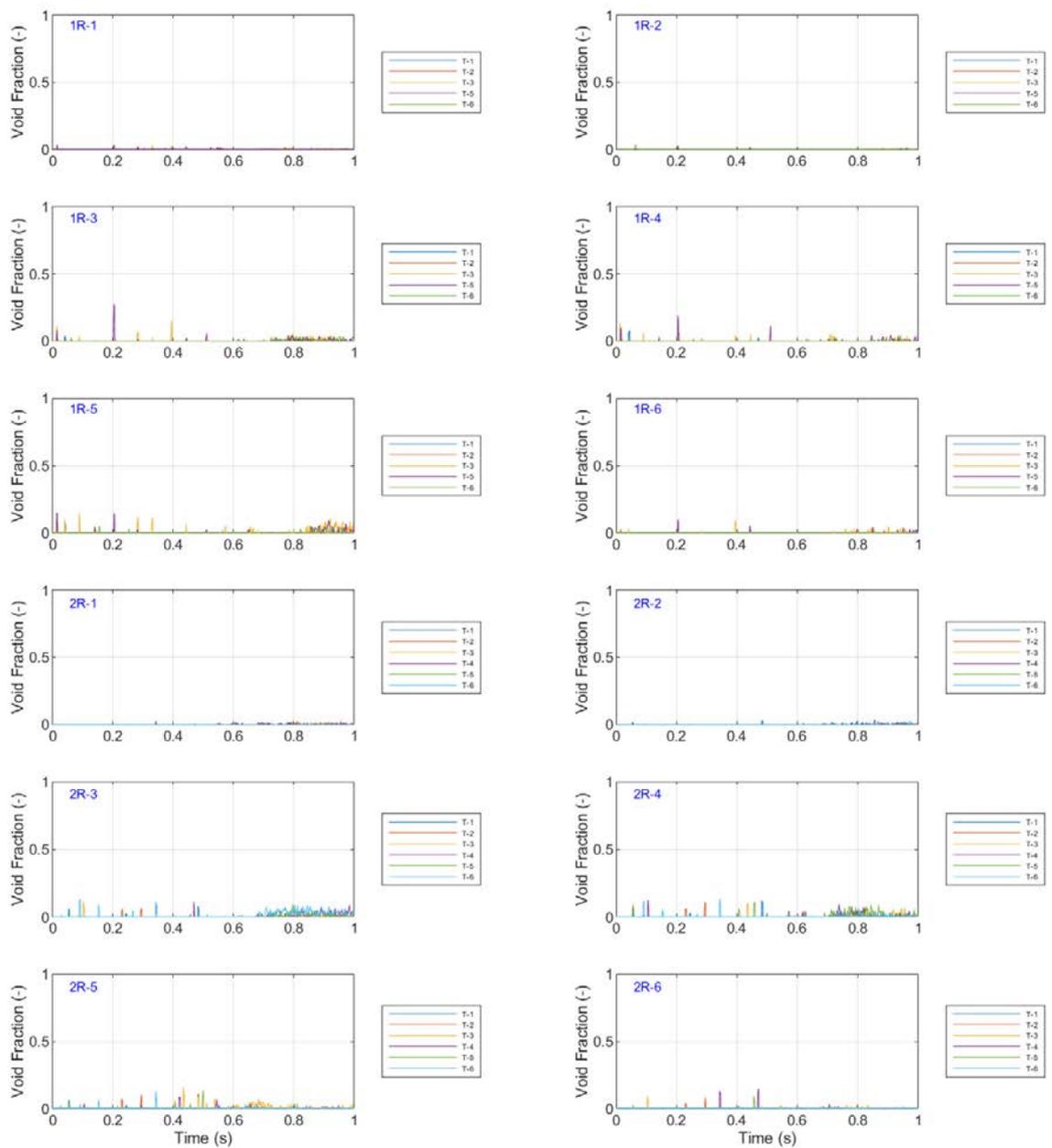


図 3.1-8 ボイド率の時間変化 (Run No.1①)

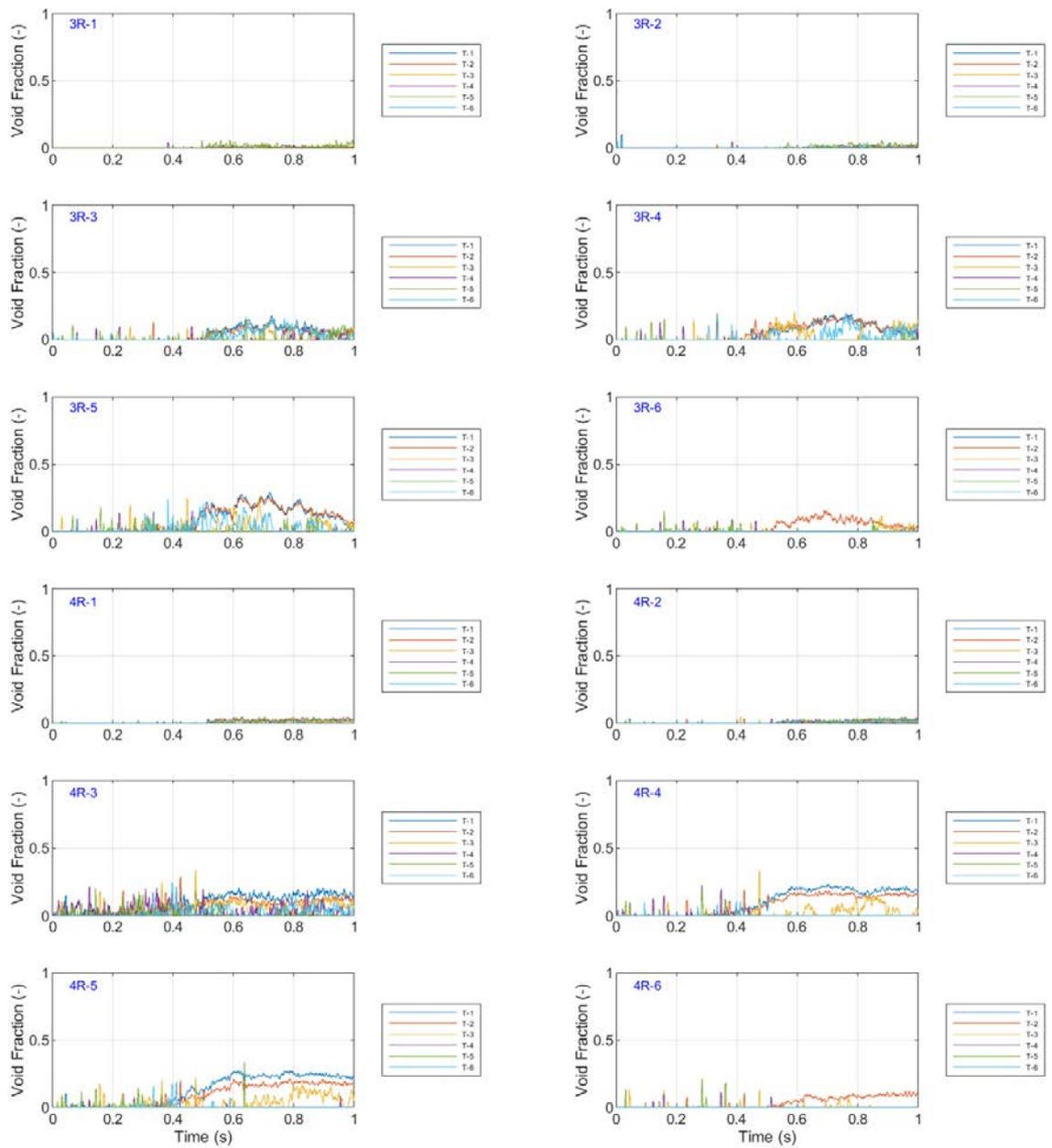


図 3.1-9 ポイド率の時間変化 (Run No.1②)

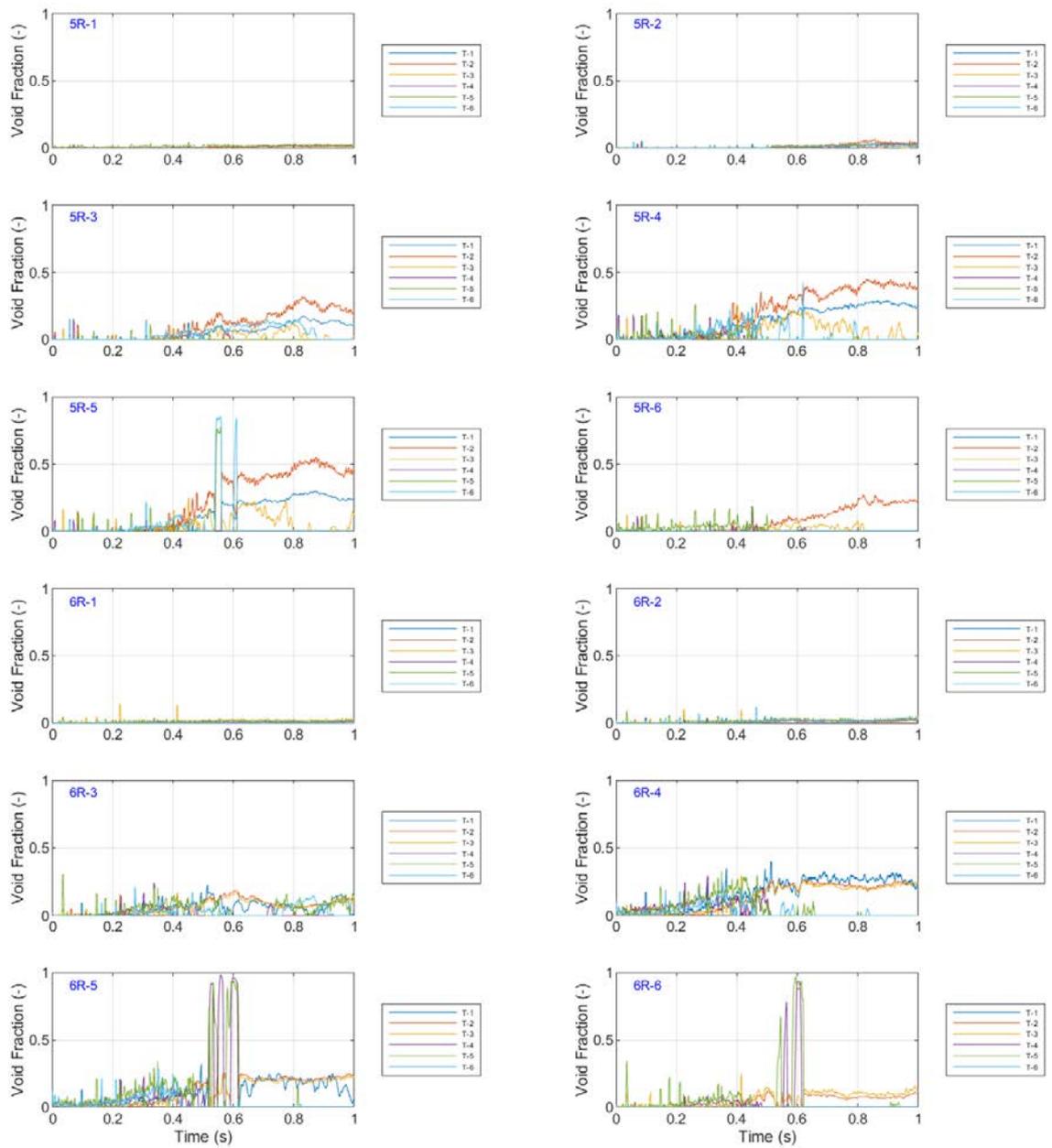


図 3.1-10 ボイド率の時間変化 (Run No.1/③)

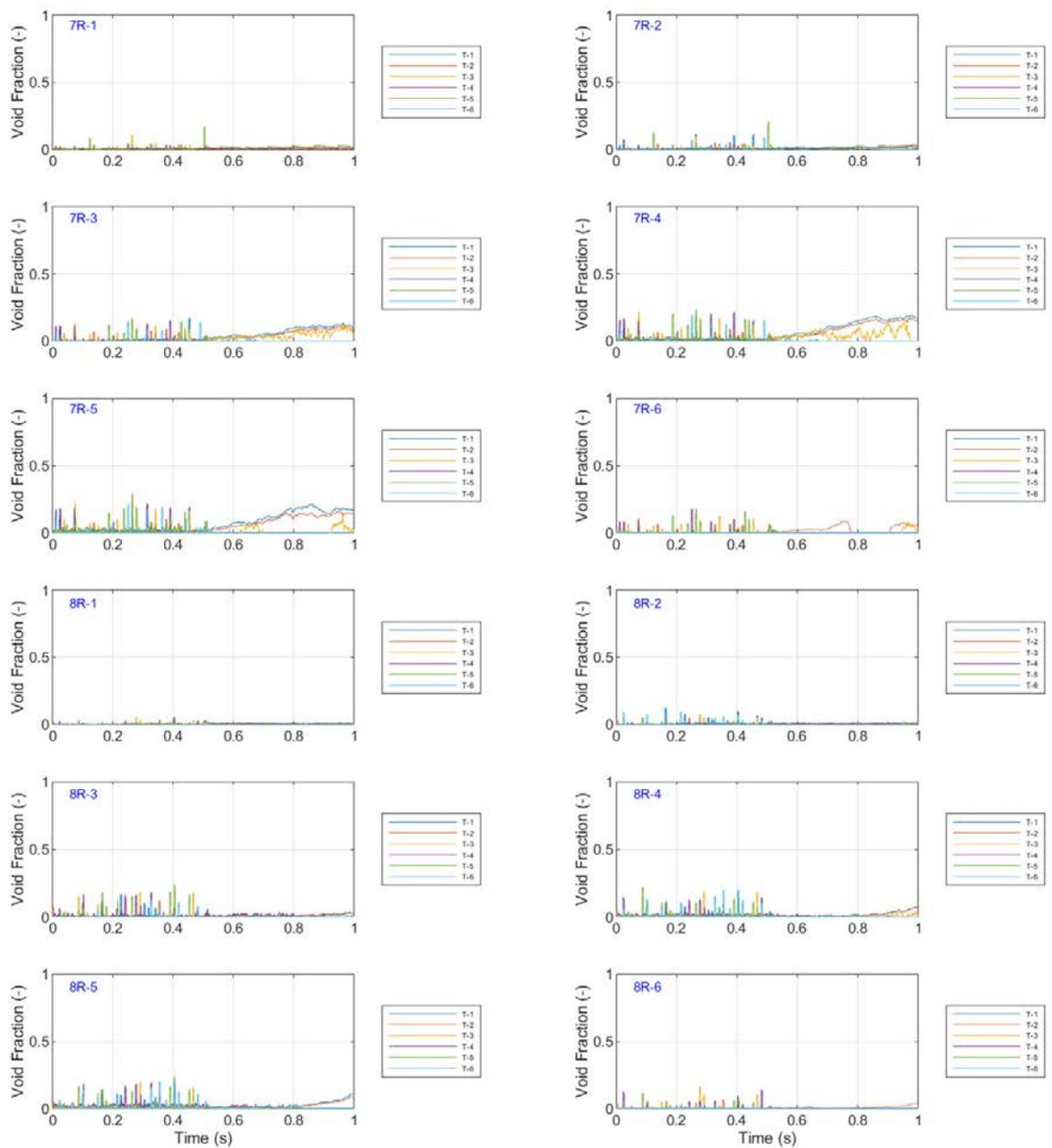


図 3.1-11 ボイド率の時間変化 (Run No.1/④)

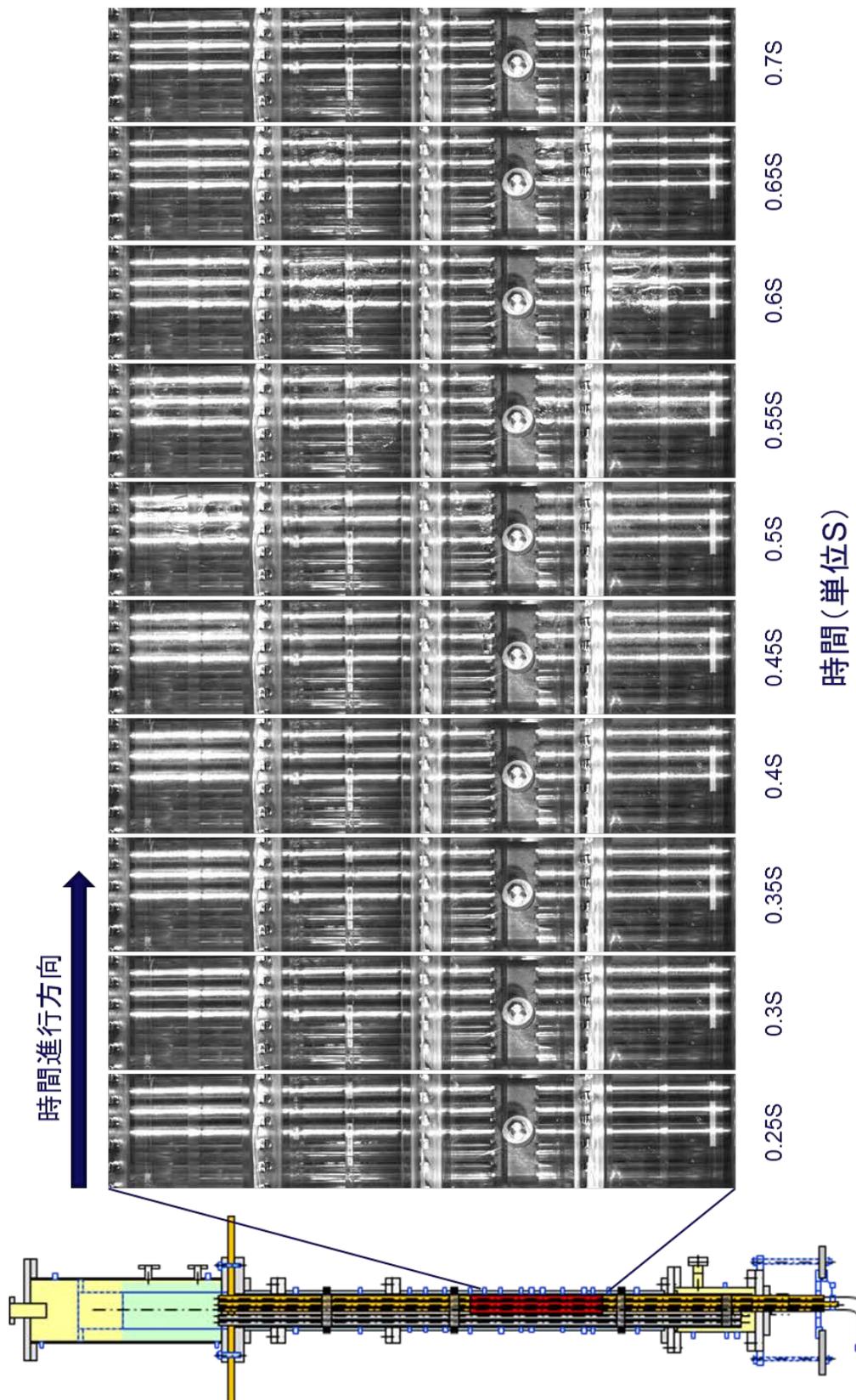


図 3.1-12 ボイド挙動の可視化画像 (Run No.1)

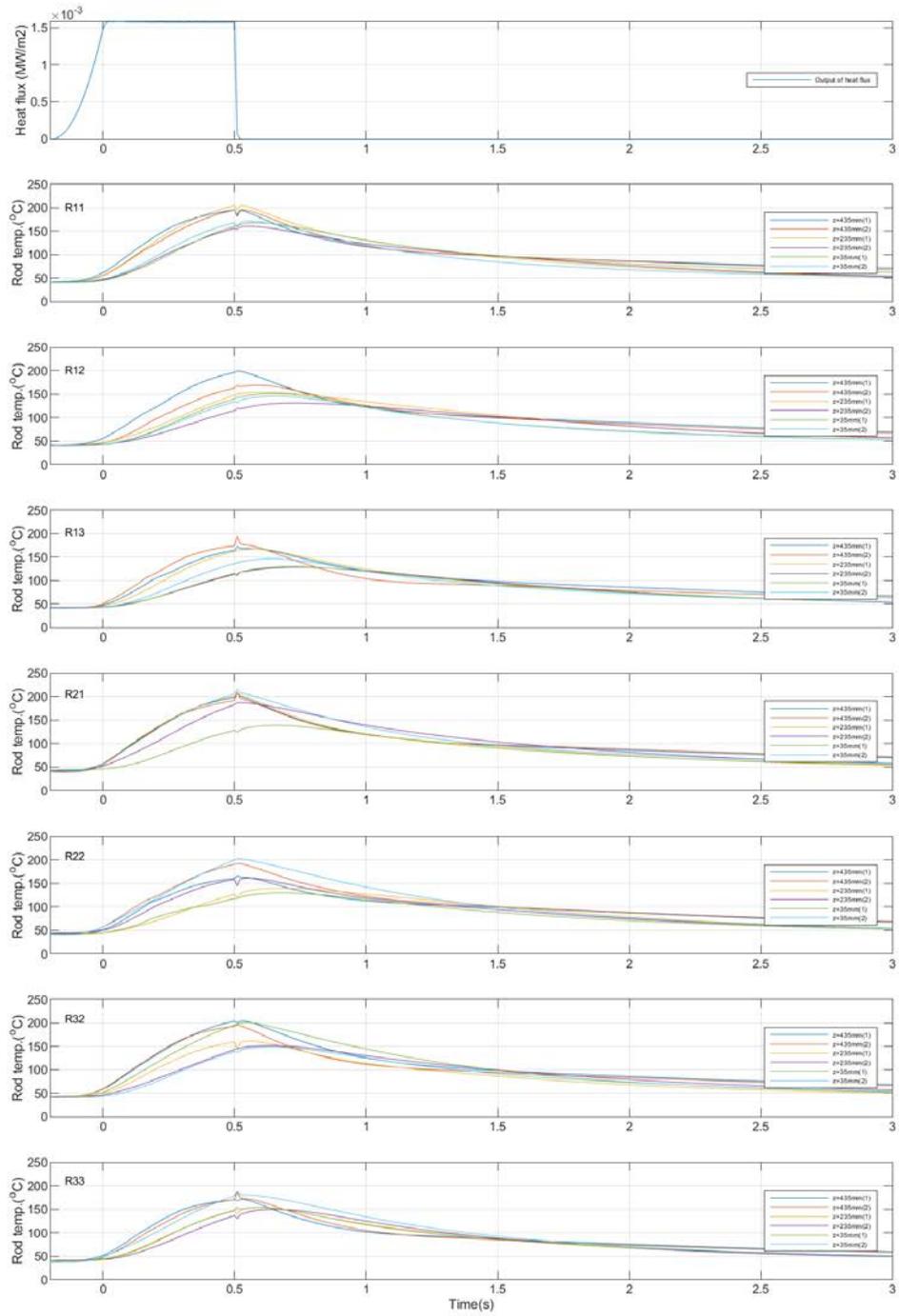


図 3.1-13 ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.2)

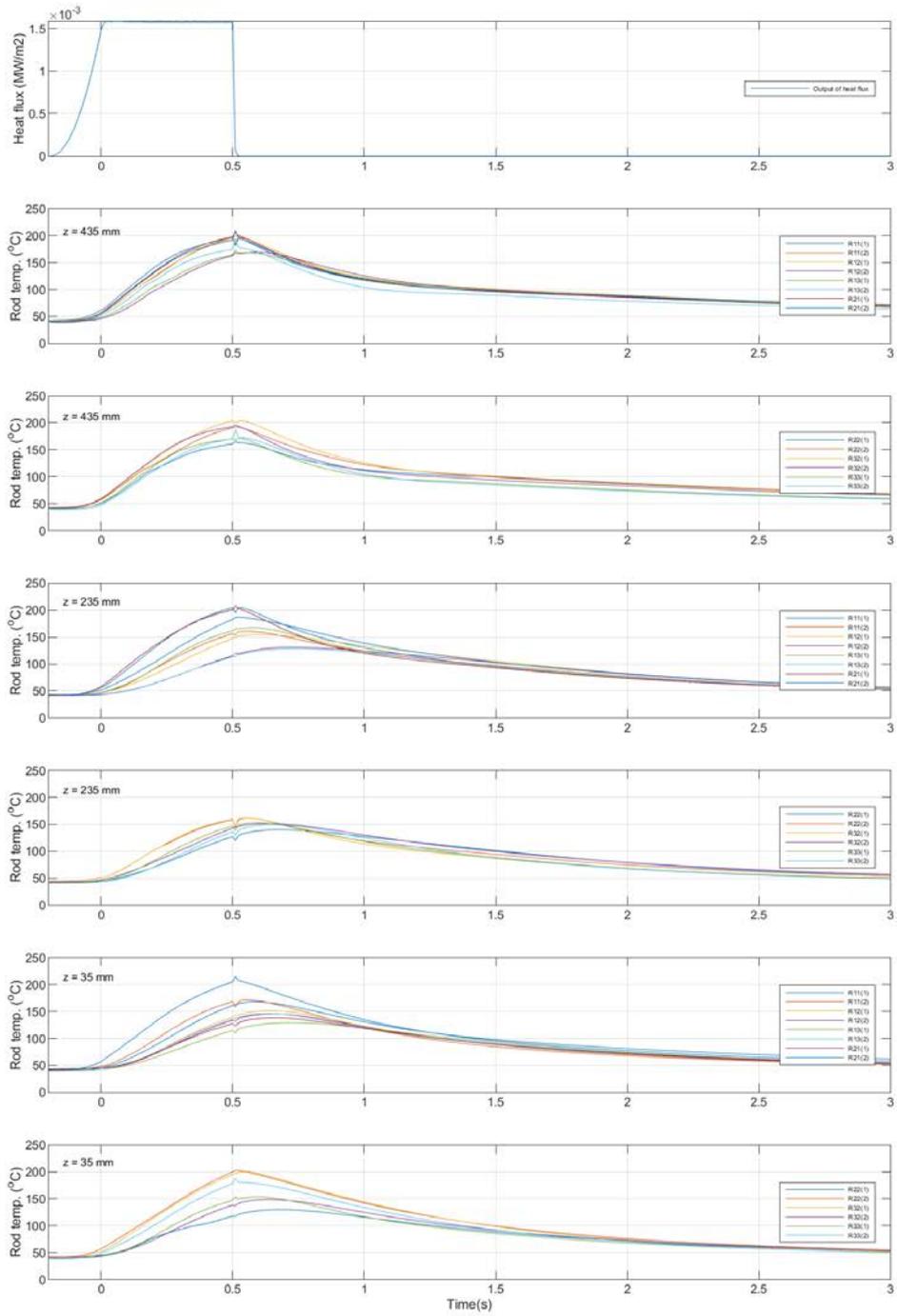


図 3.1-14 高さごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.2)

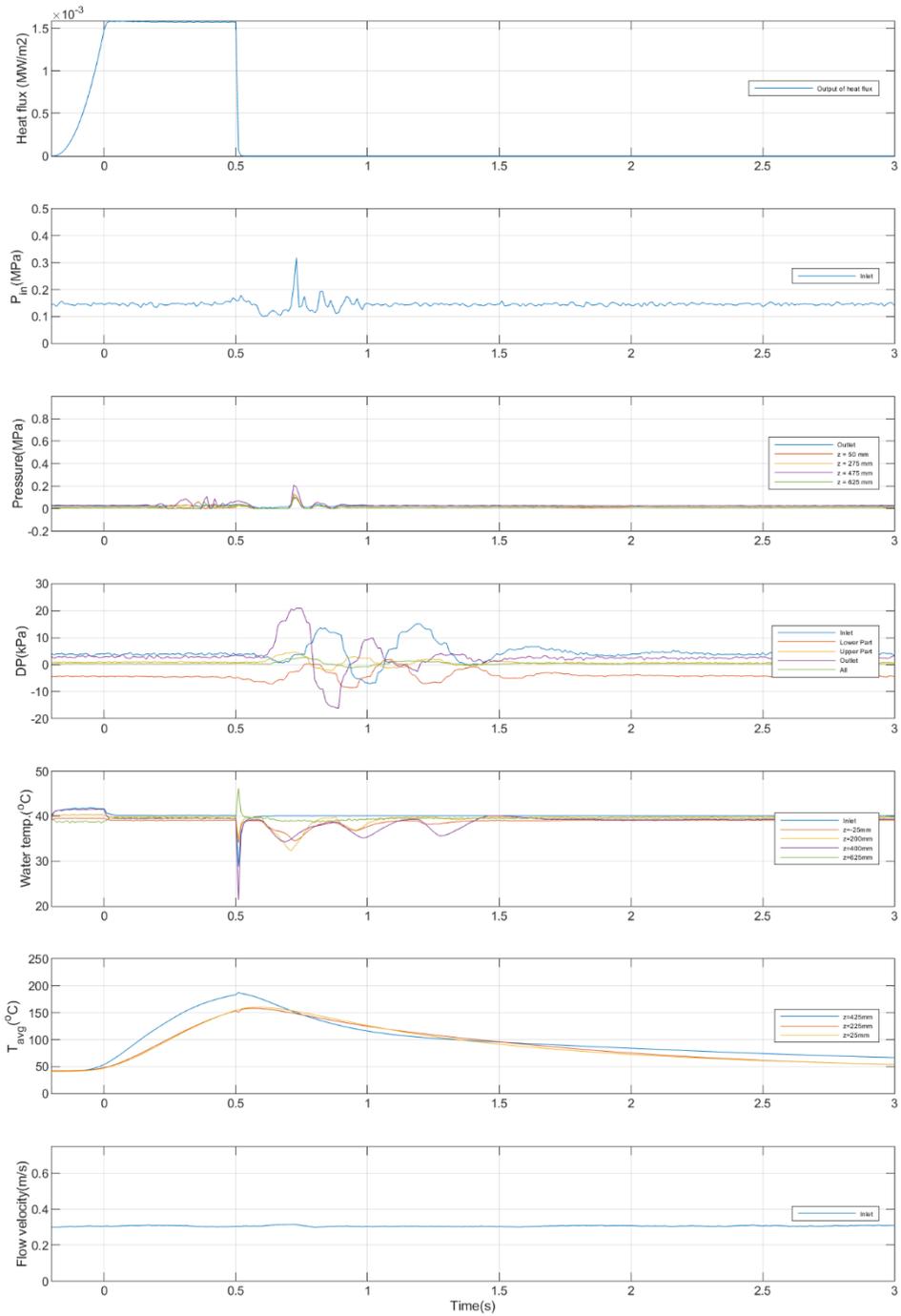


図 3.1-15 その他計測値の時間変化 (Run No.2)

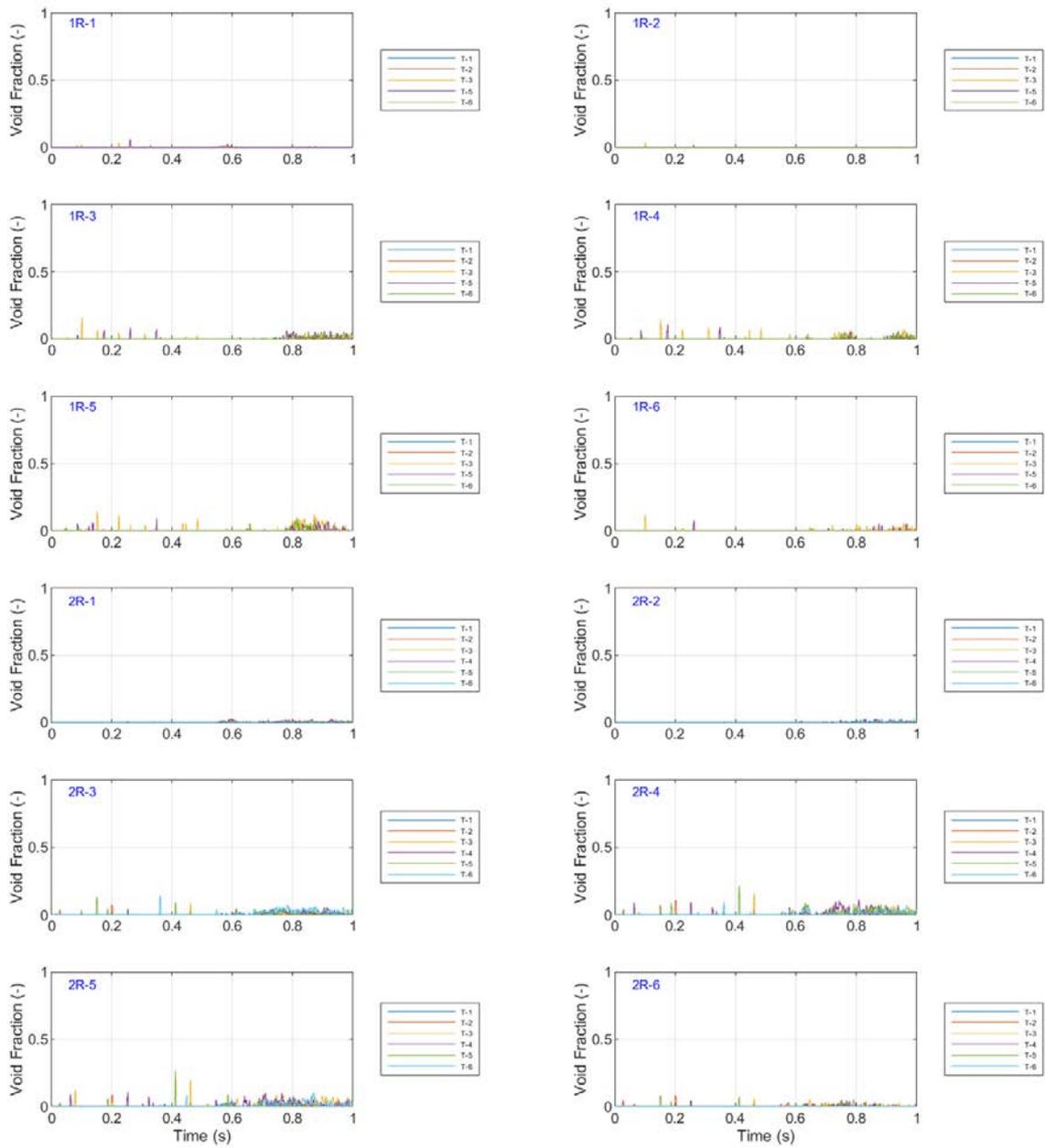


図 3.1-16 ポイド率の時間変化 (Run No. 2/①)

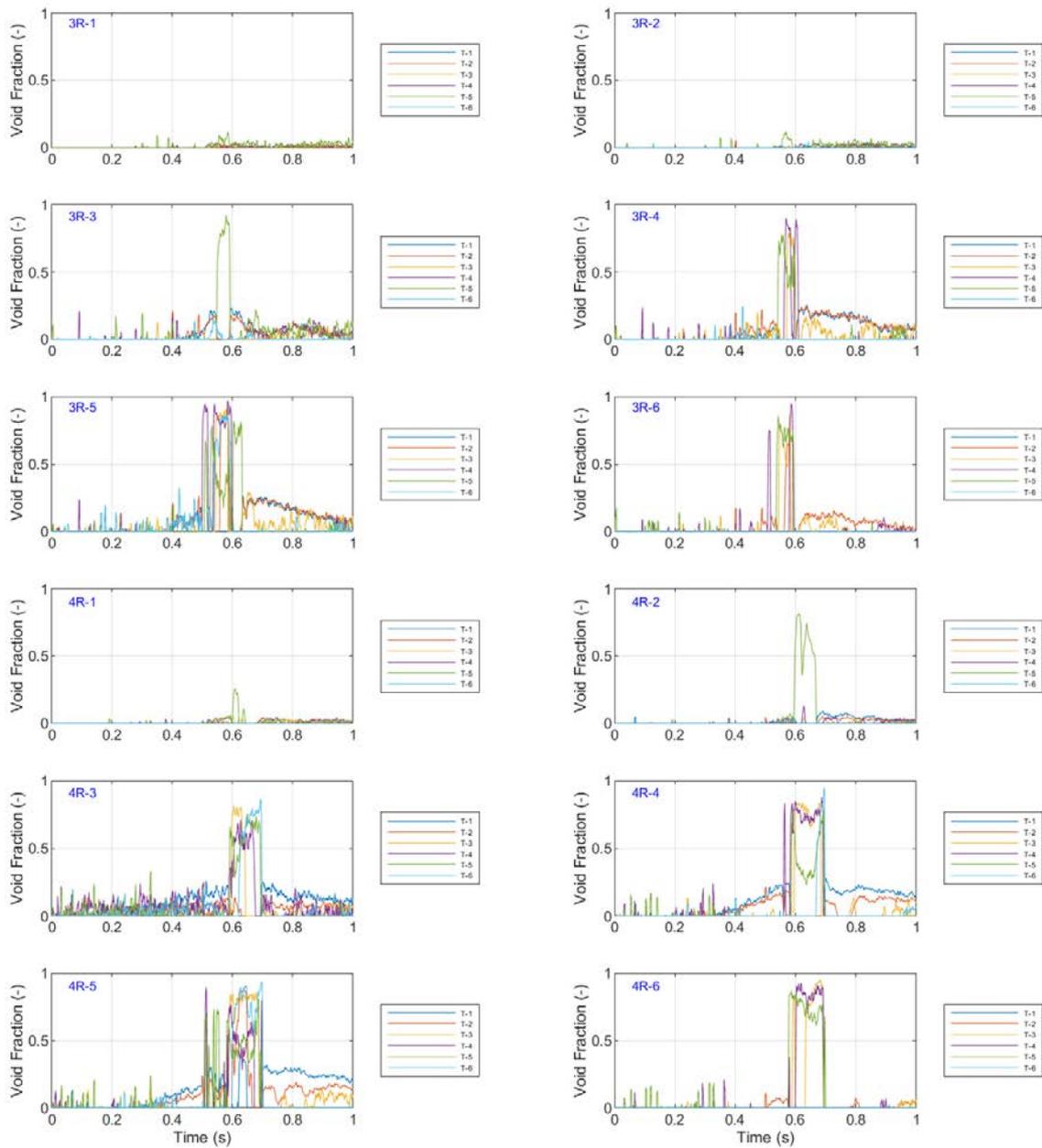


図 3.1-17 ポイド率の時間変化 (Run No. 2/2)

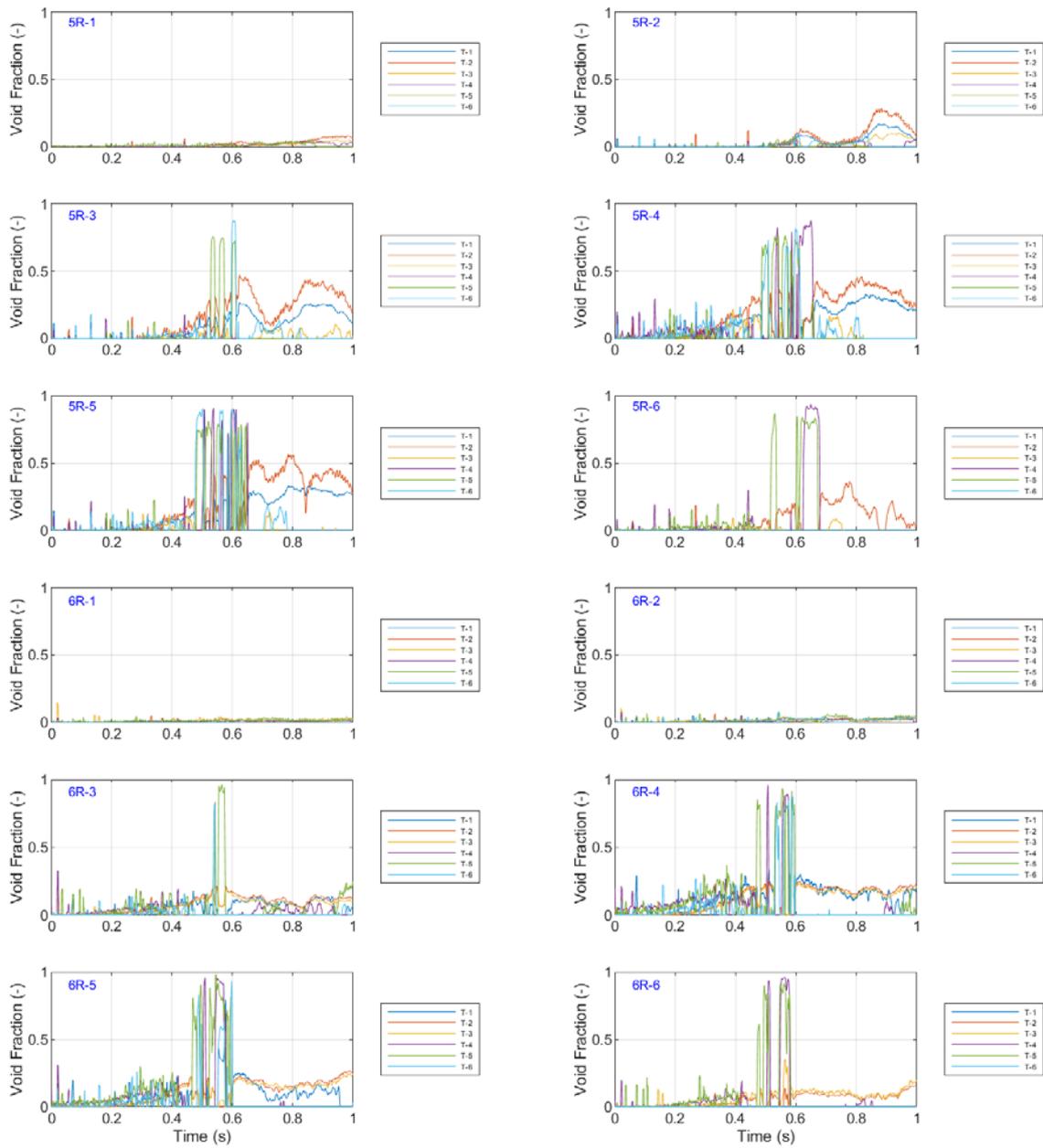


図 3.1-18 ポイド率の時間変化 (Run No. 2/③)

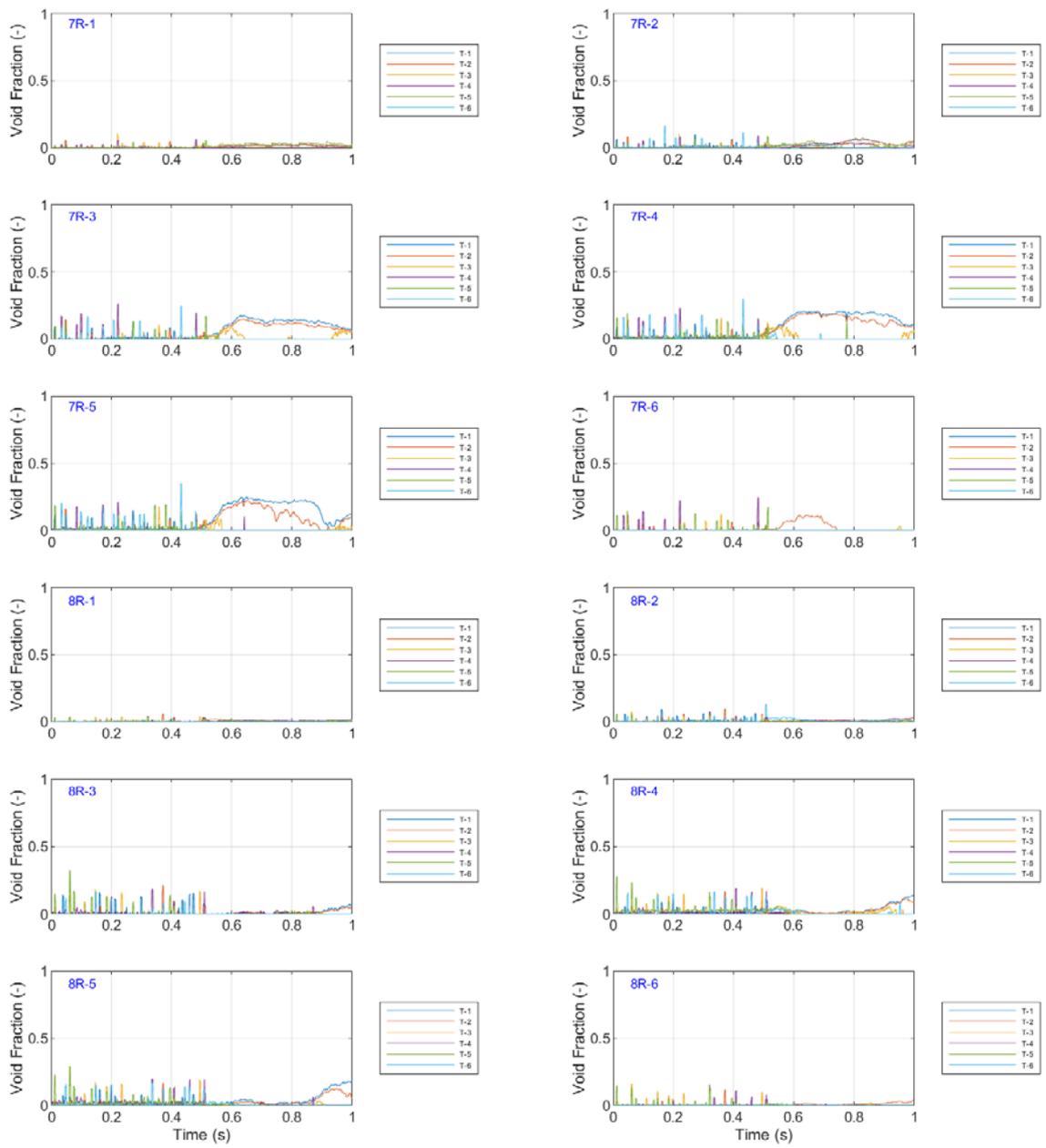


図 3.1-19 ポイド率の時間変化 (Run No. 2/④)

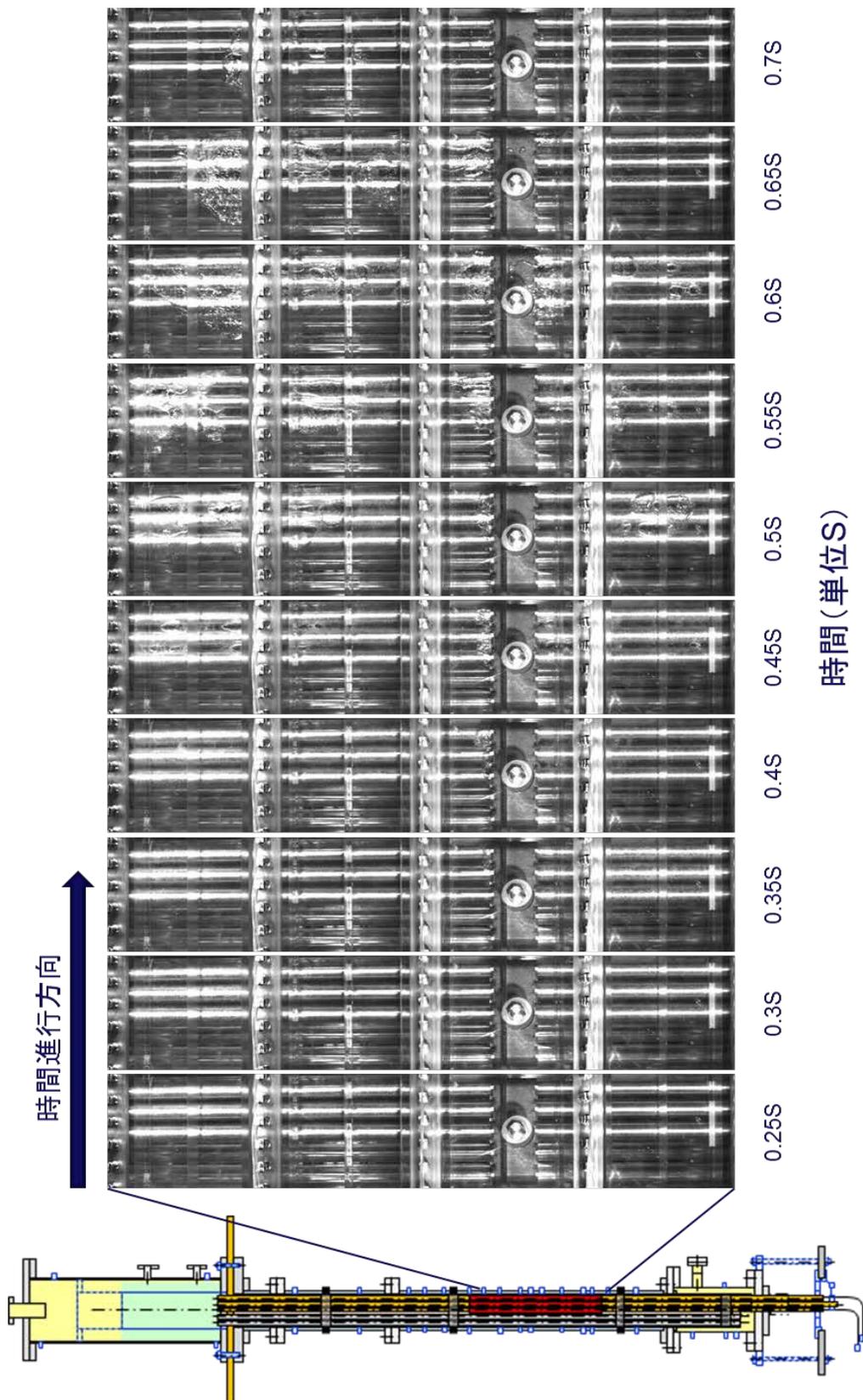


図 3.1-20 ポイド挙動の可視化画像 (Run No. 2)

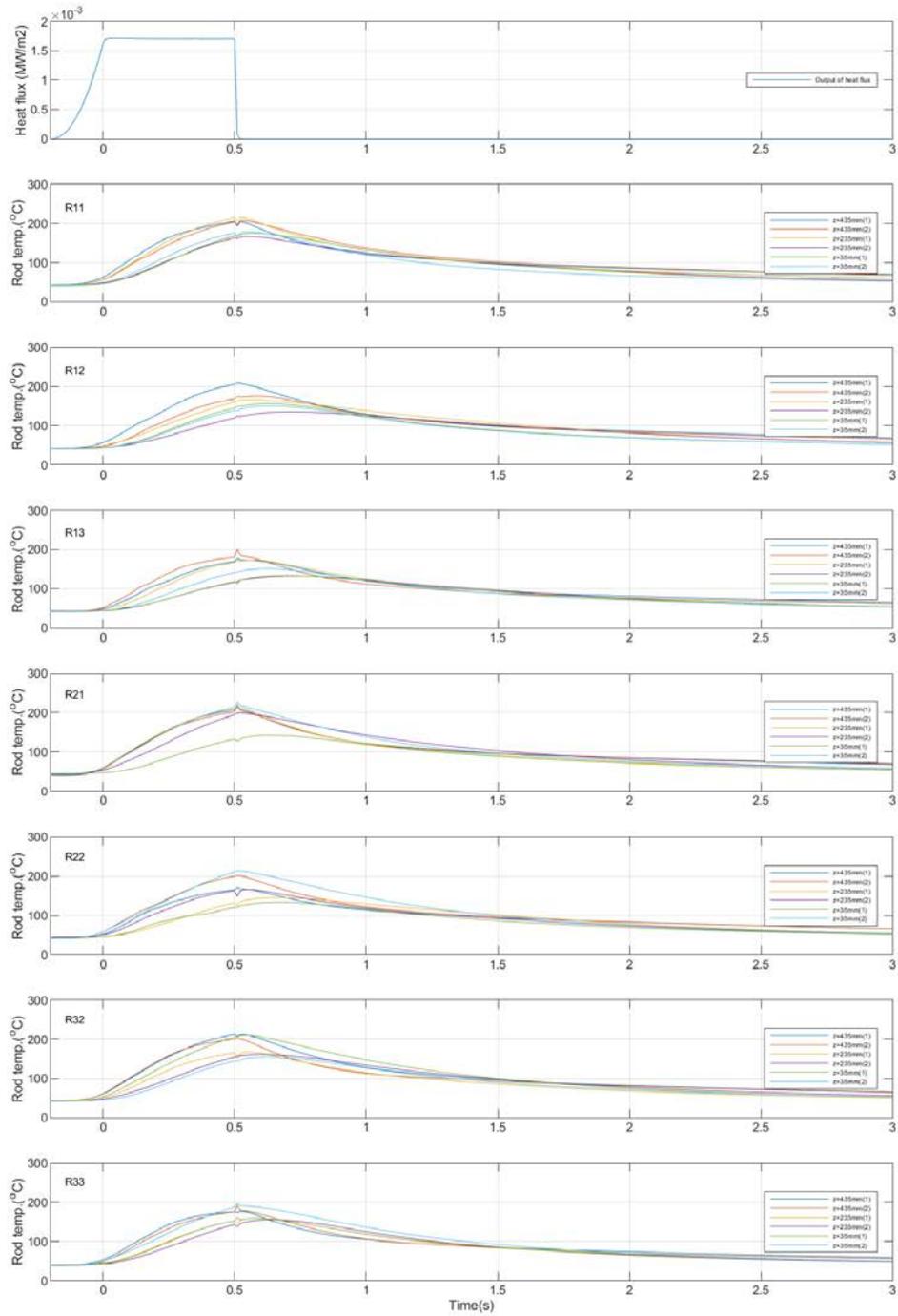


図 3.1-21 ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.3)

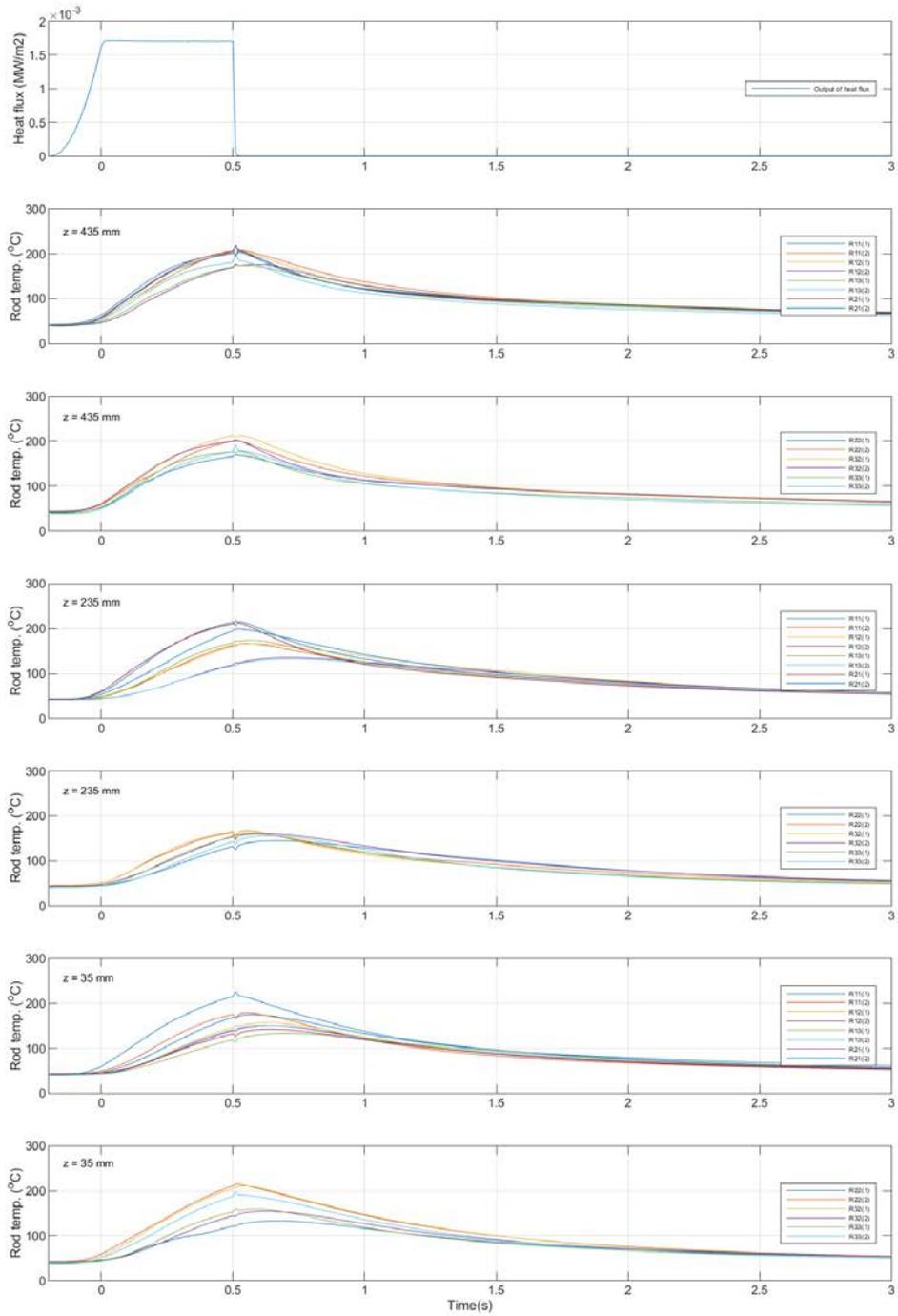


図 3.1-22 高さごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.3)

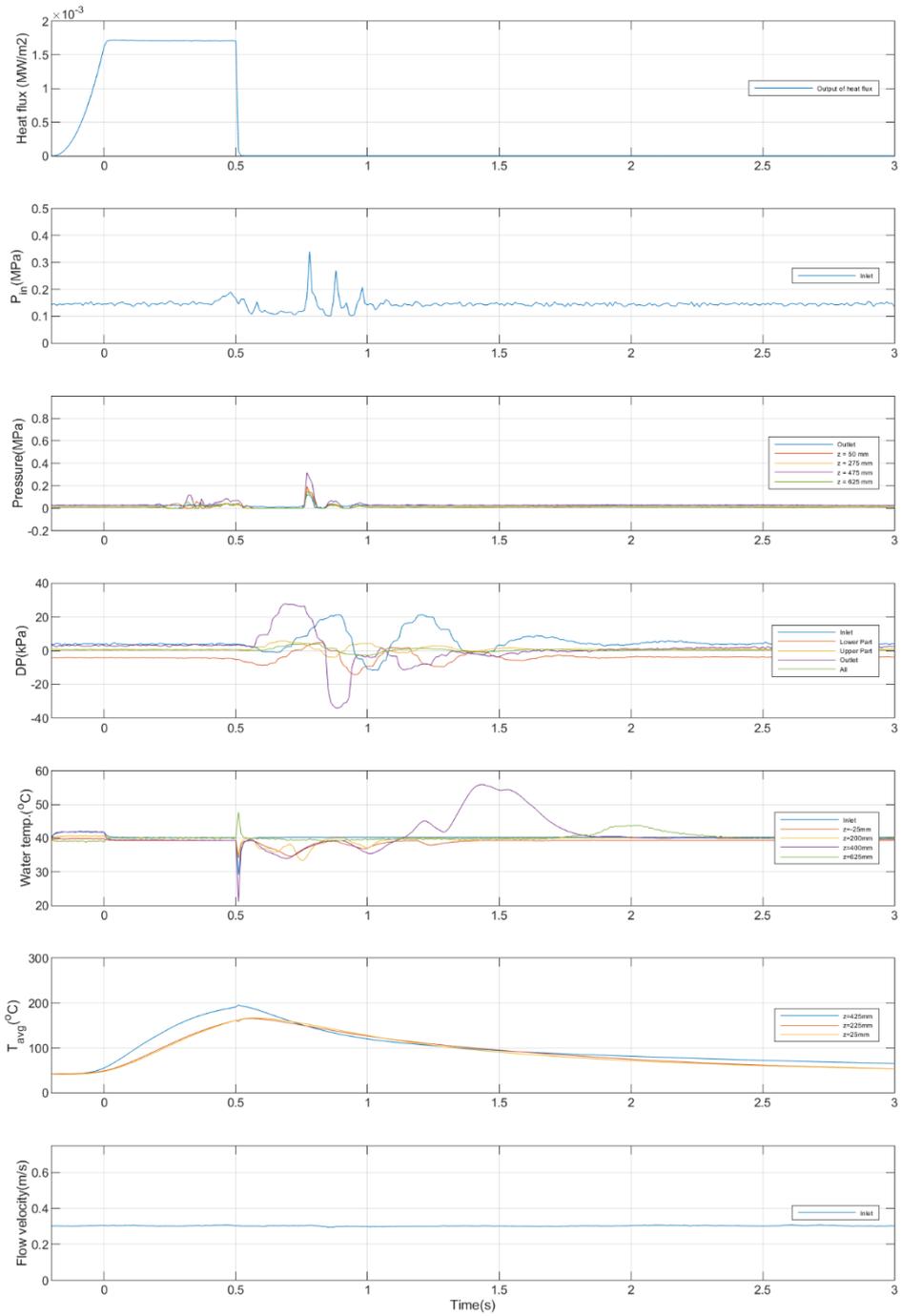


図 3.1-23 その他計測値の時間変化 (Run No.3)

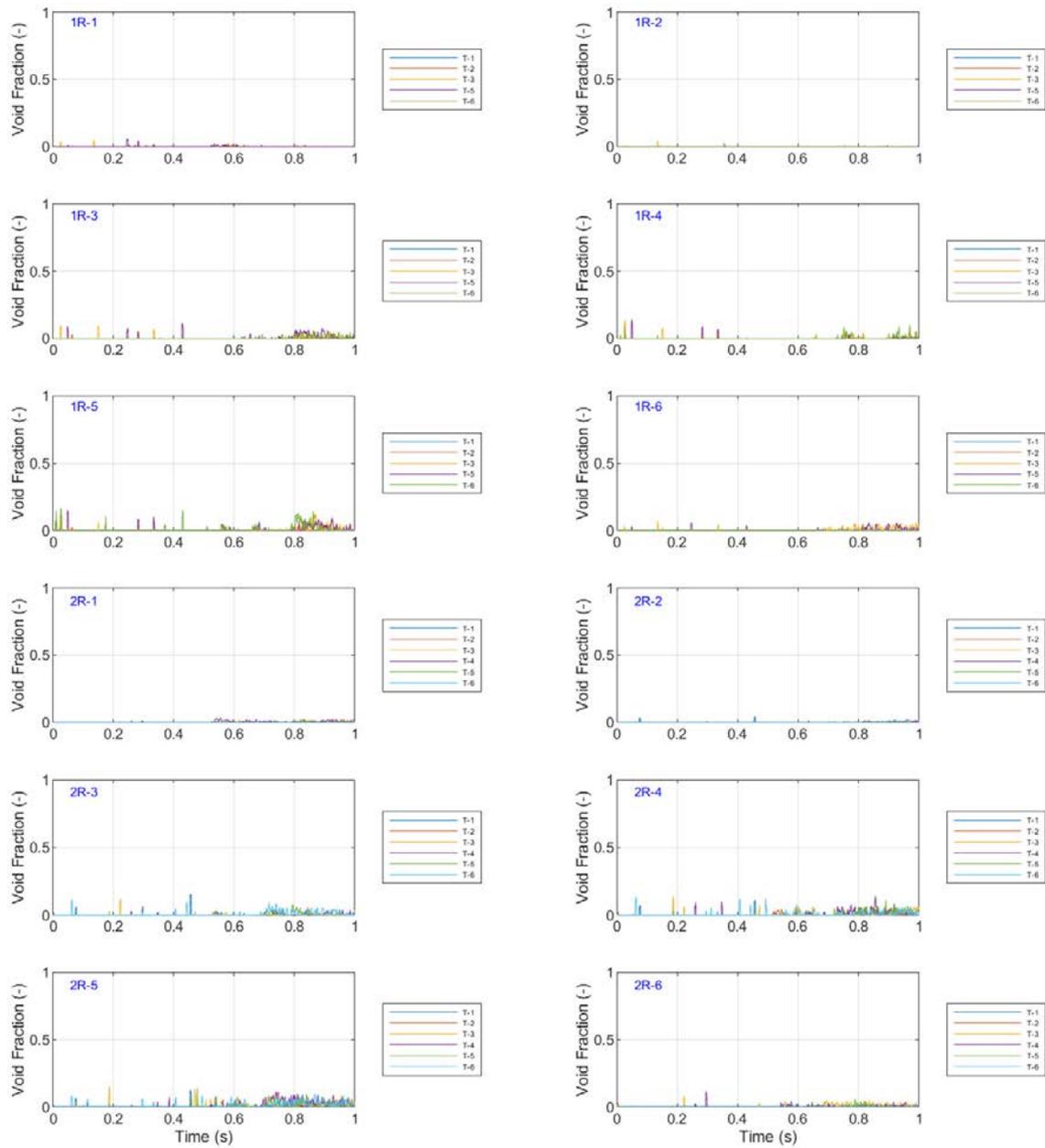


図 3.1-24 ボイド率の時間変化 (Run No.3/①)

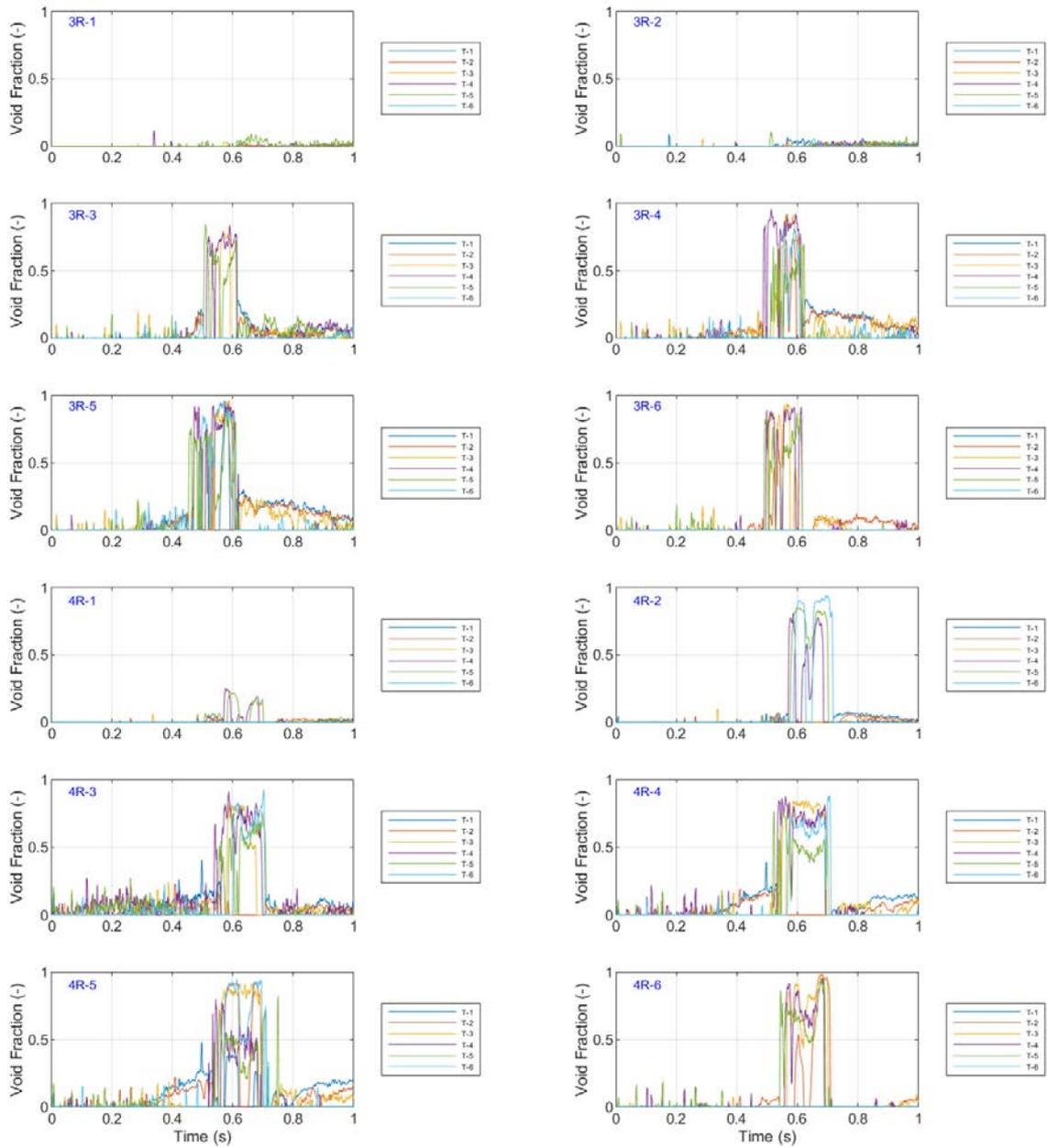


図 3.1-25 ボイド率の時間変化 (Run No.3/②)

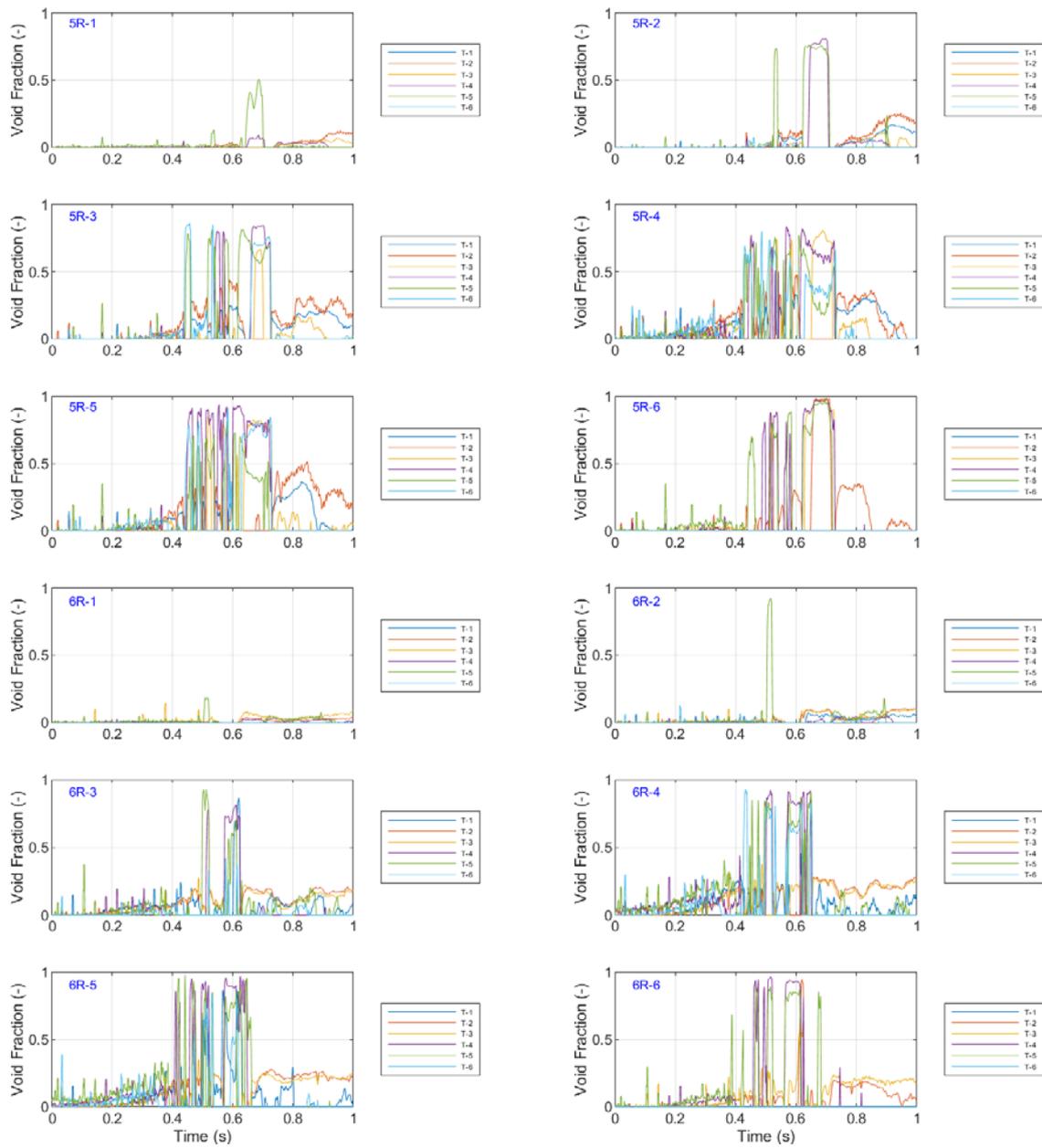


図 3.1-26 ボイド率の時間変化 (Run No.3/③)

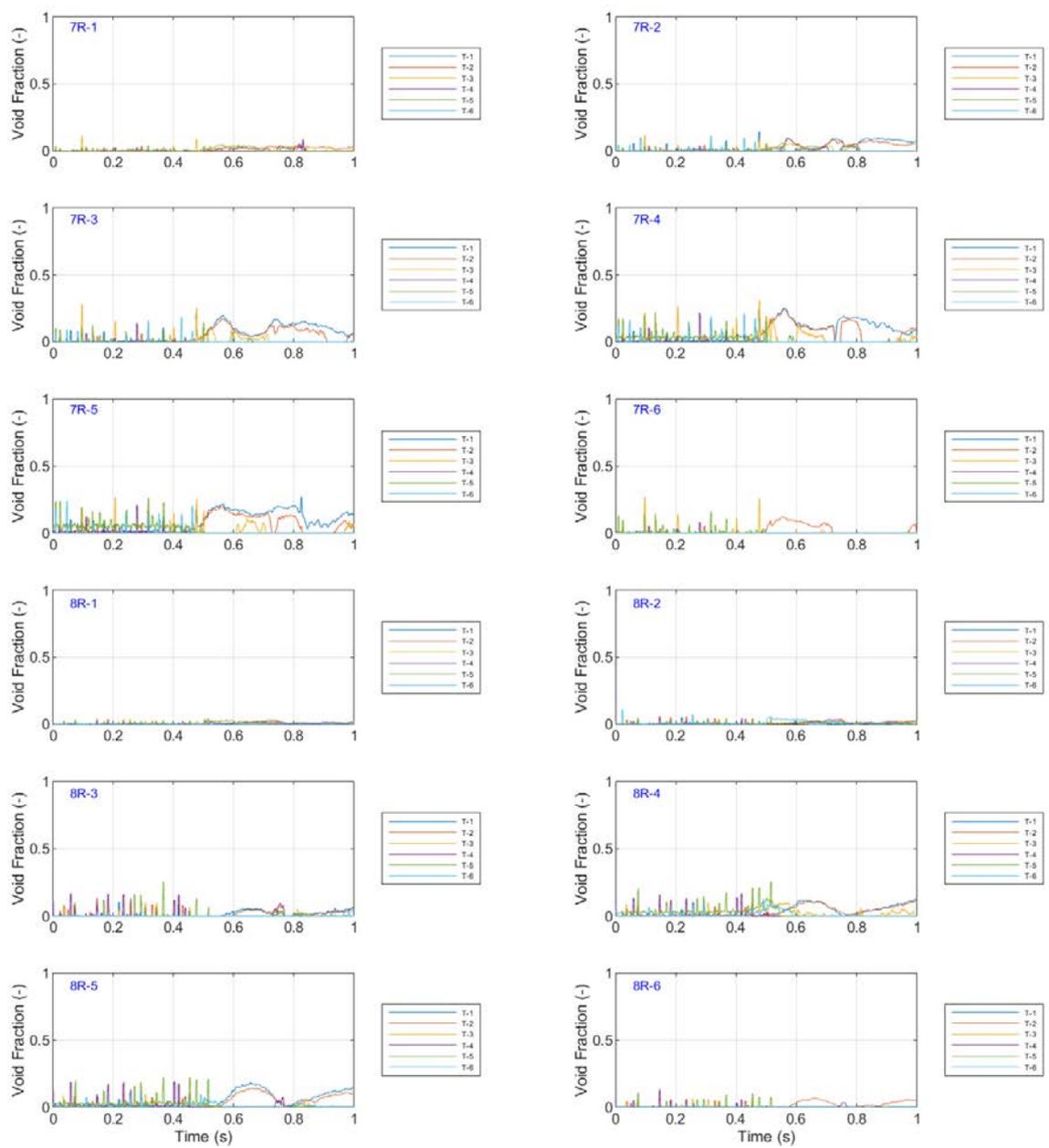


図 3.1-27 ボイド率の時間変化 (Run No.3/④)

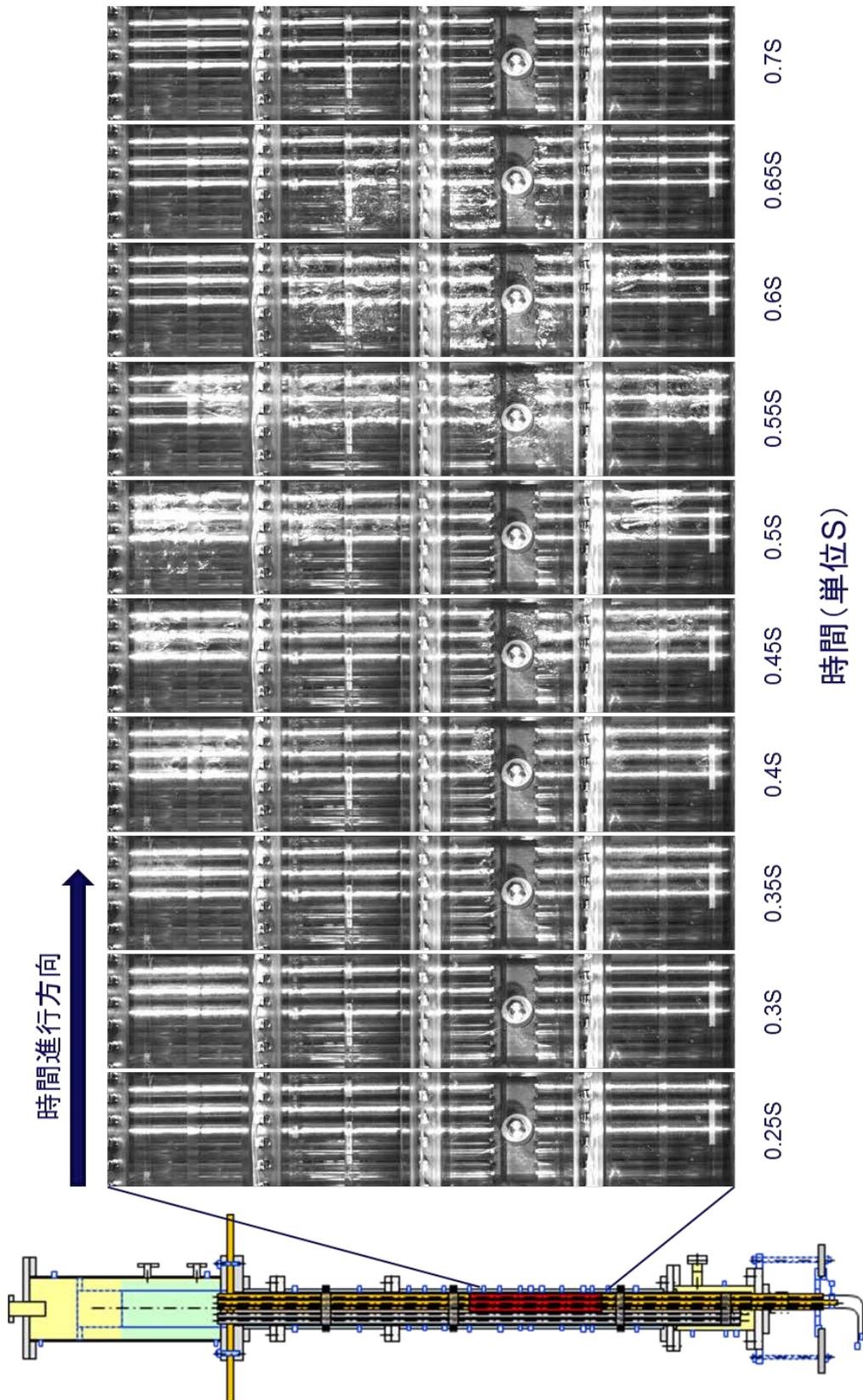


図 3.1-28 ボイド挙動の可視化画像 (Run No.3)

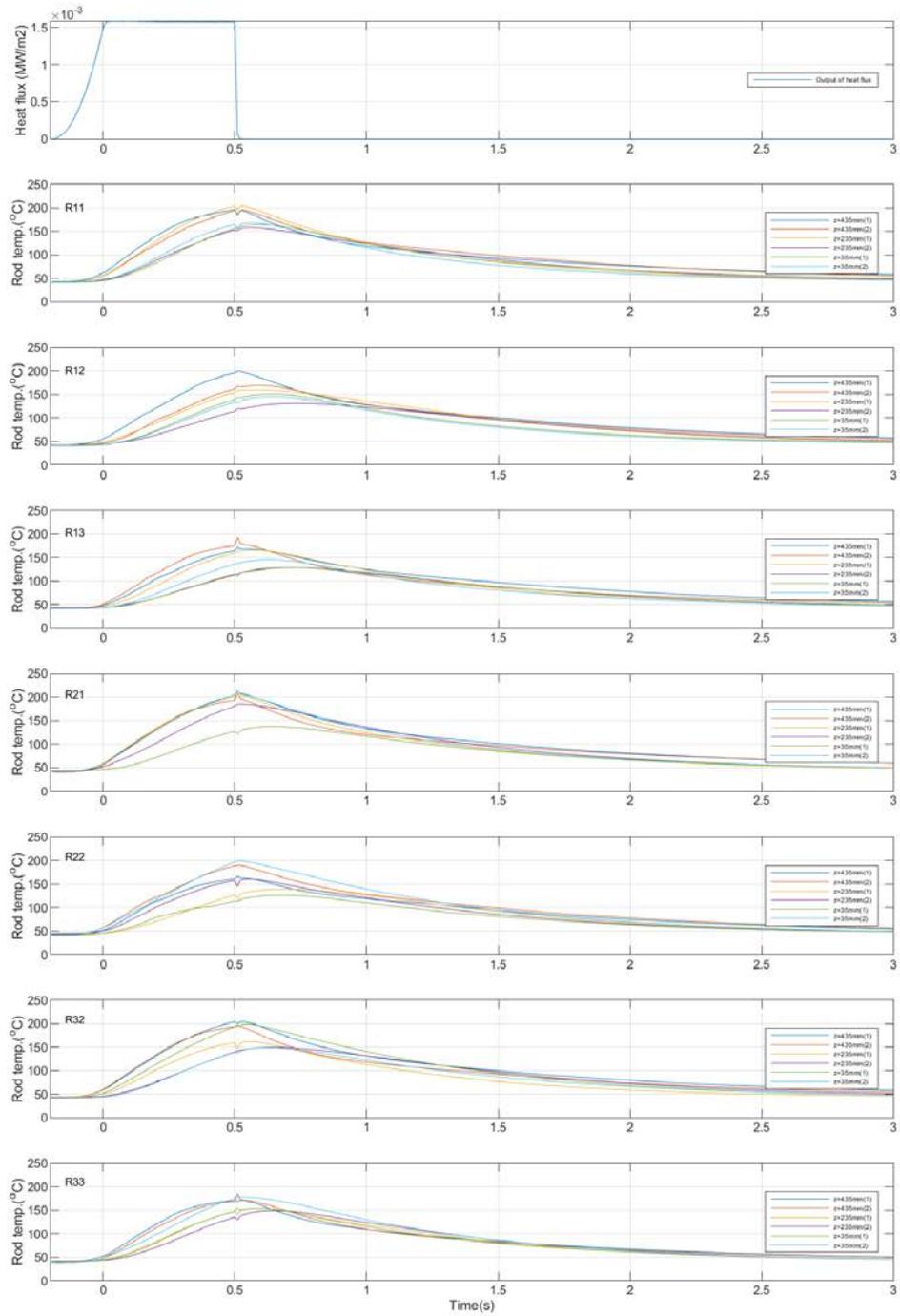


図 3.1-29 ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.4)

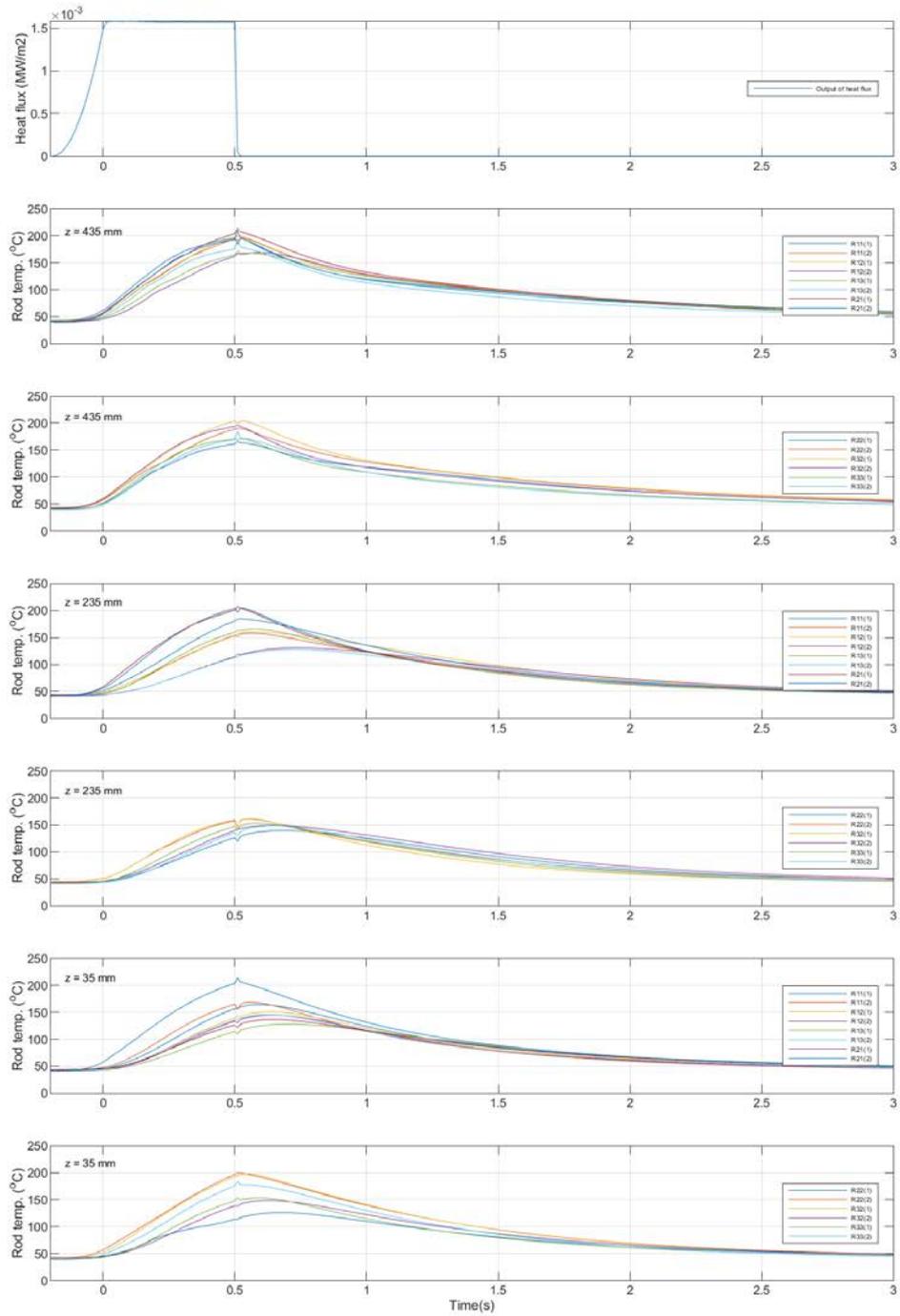


図 3.1-30 高さごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.4)

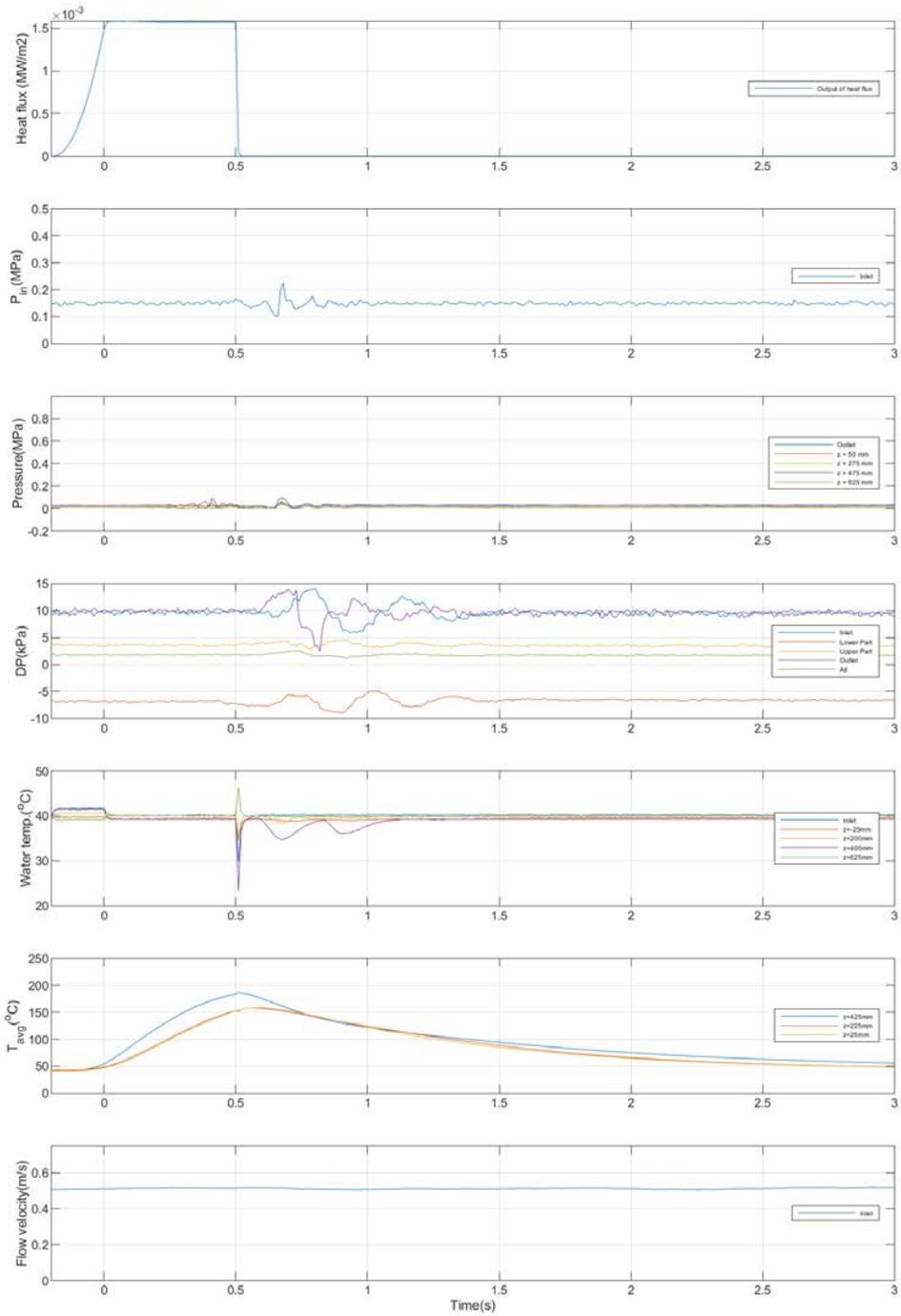


図 3.1-31 その他計測値の時間変化 (Run No.4)

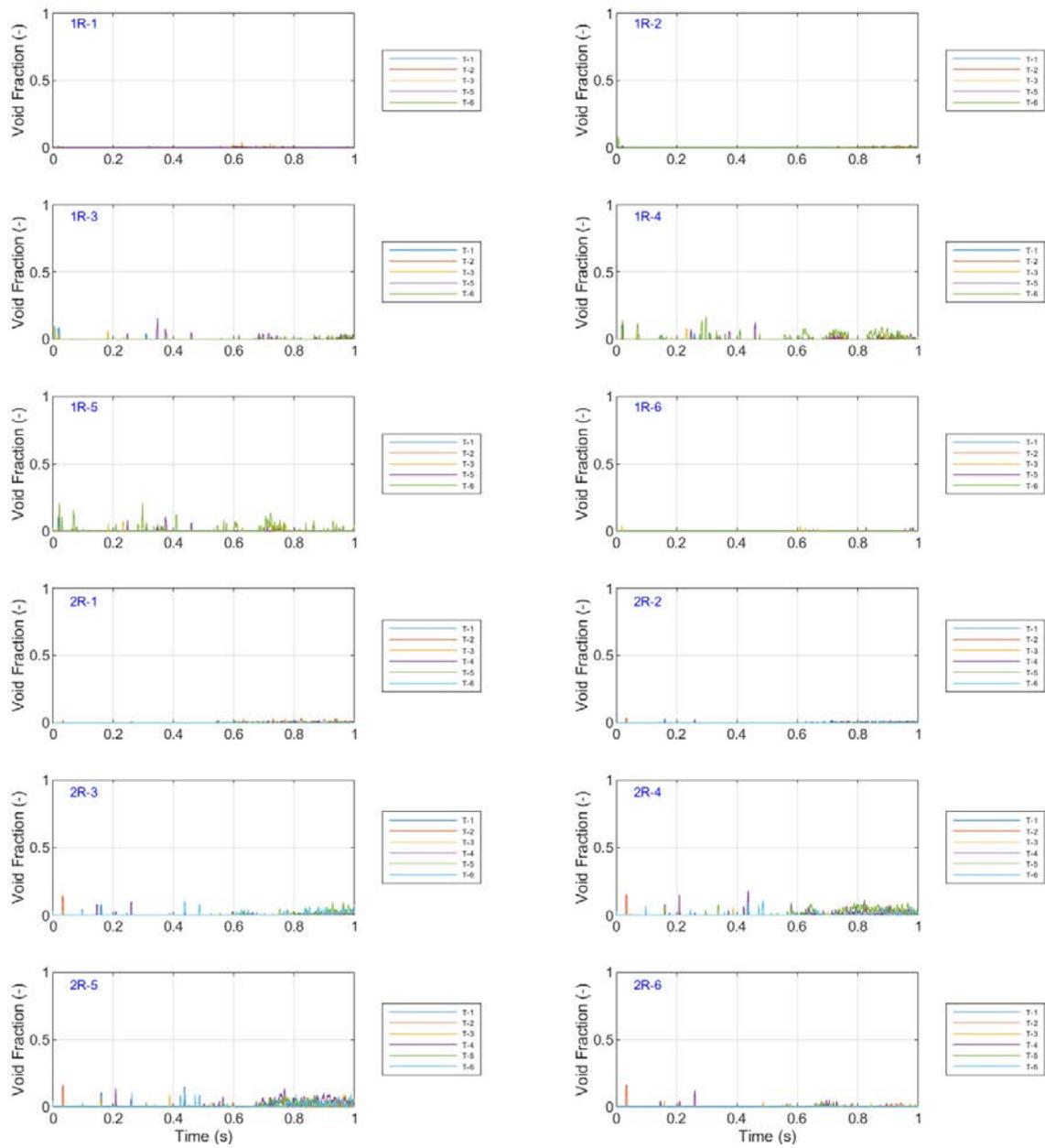


図 3.1-32 ボイド率の時間変化 (Run No.4①)

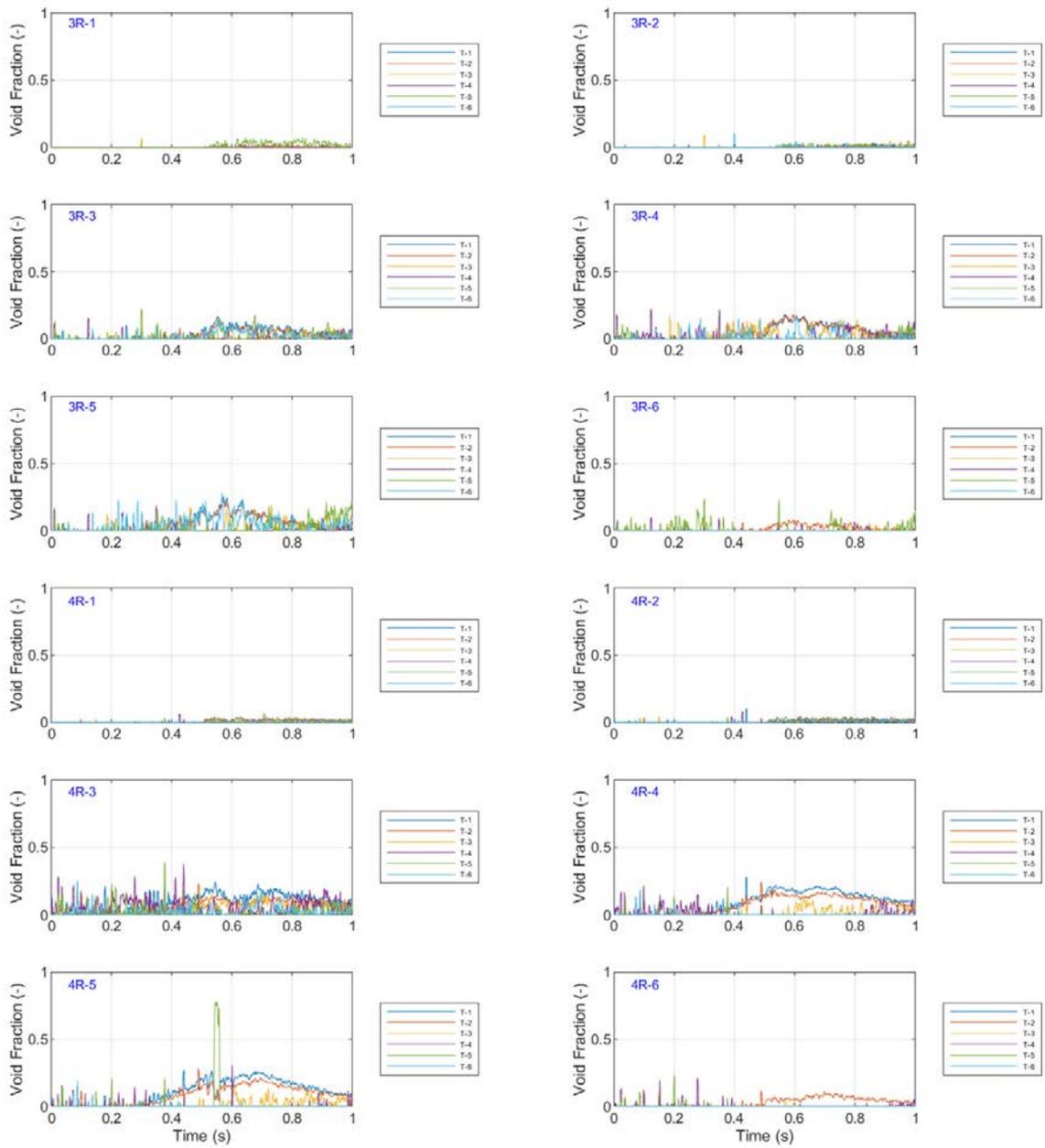


図 3.1-33 ボイド率の時間変化 (Run No.4②)

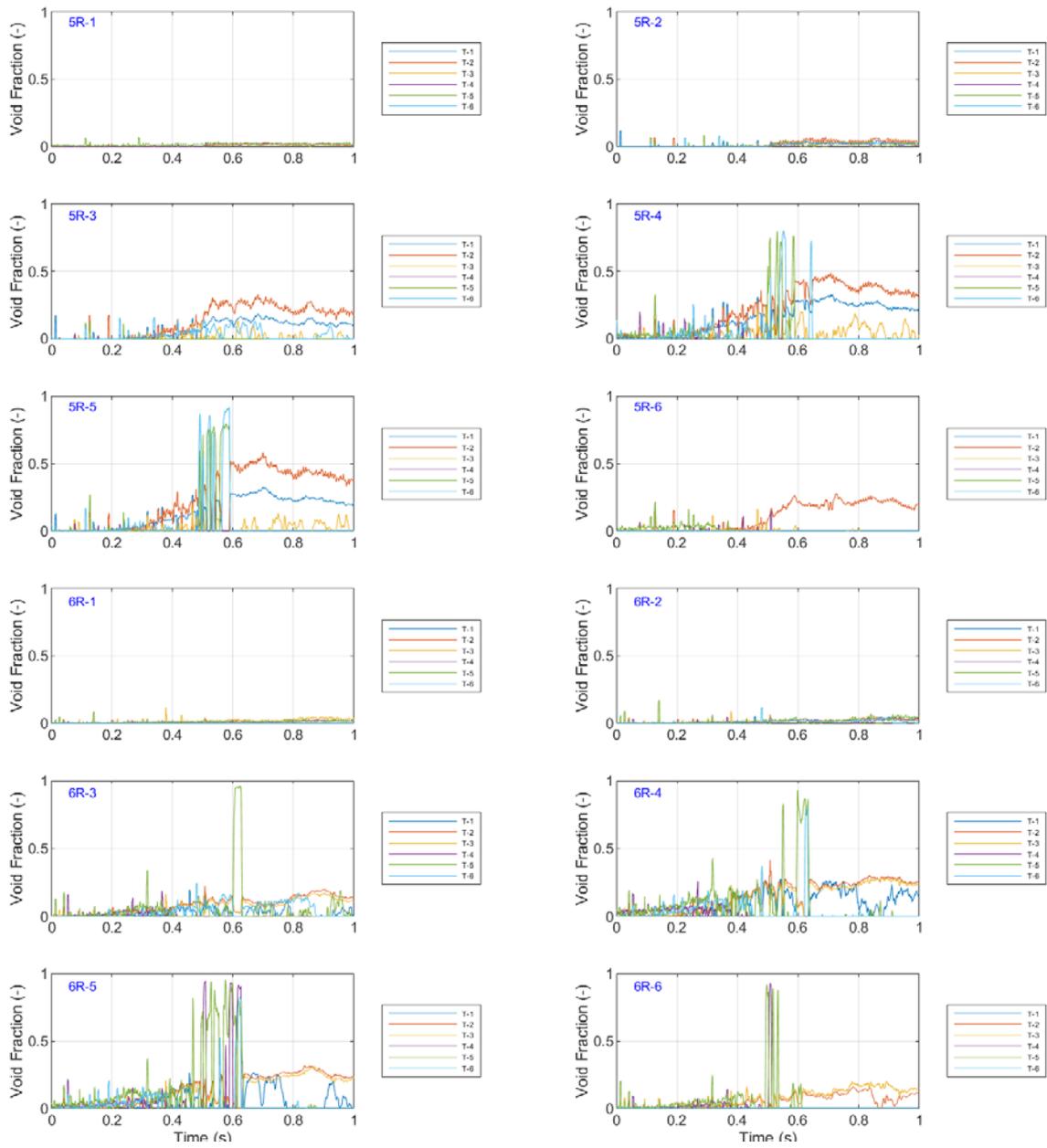


図 3.1-34 ボイド率の時間変化 (Run No.4/③)

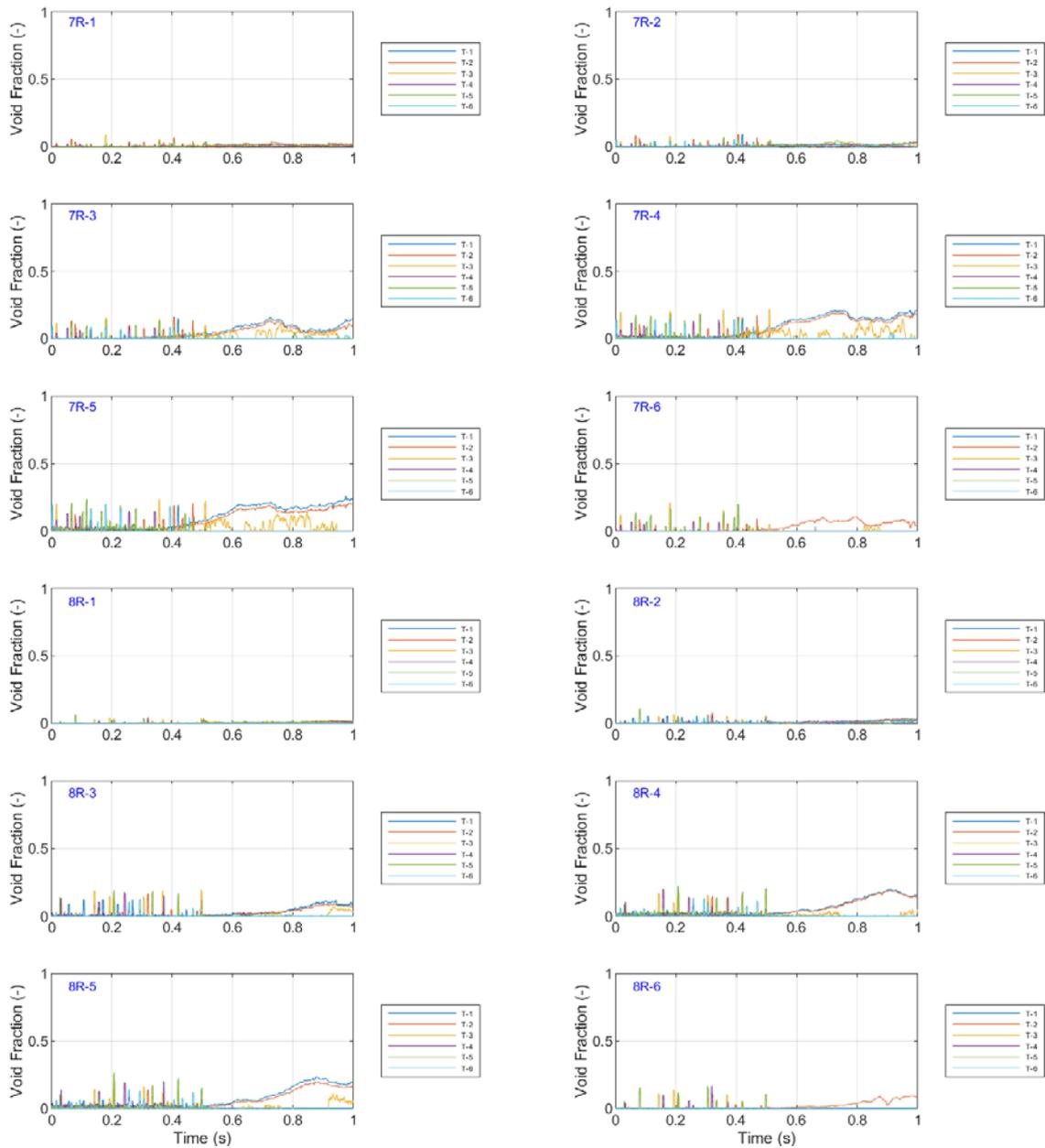


図 3.1-35 ボイド率の時間変化 (Run No.4/④)

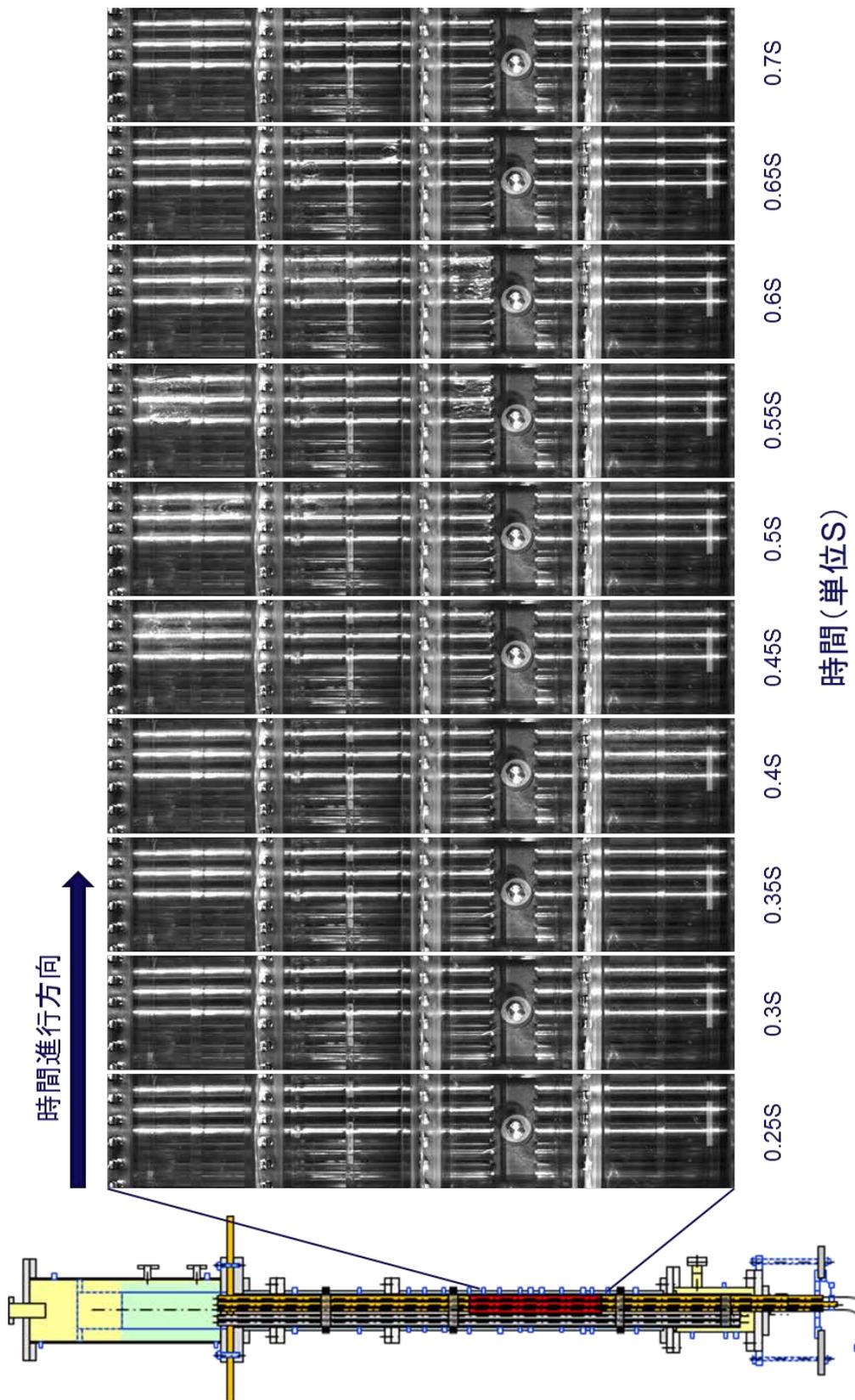


図 3.1-36 ポイド挙動の可視化画像 (Run No. 4)

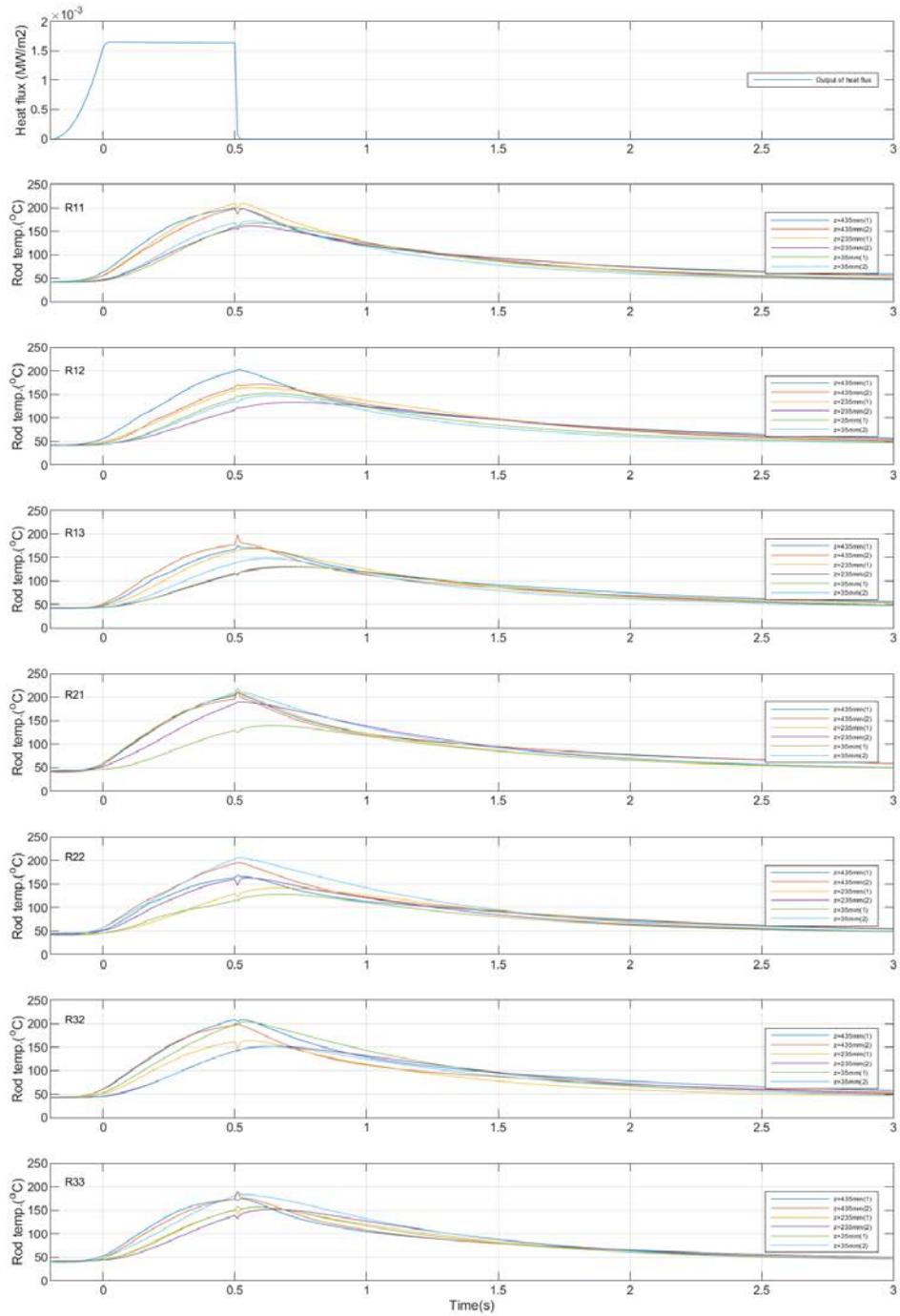


図 3.1-37 ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.5)

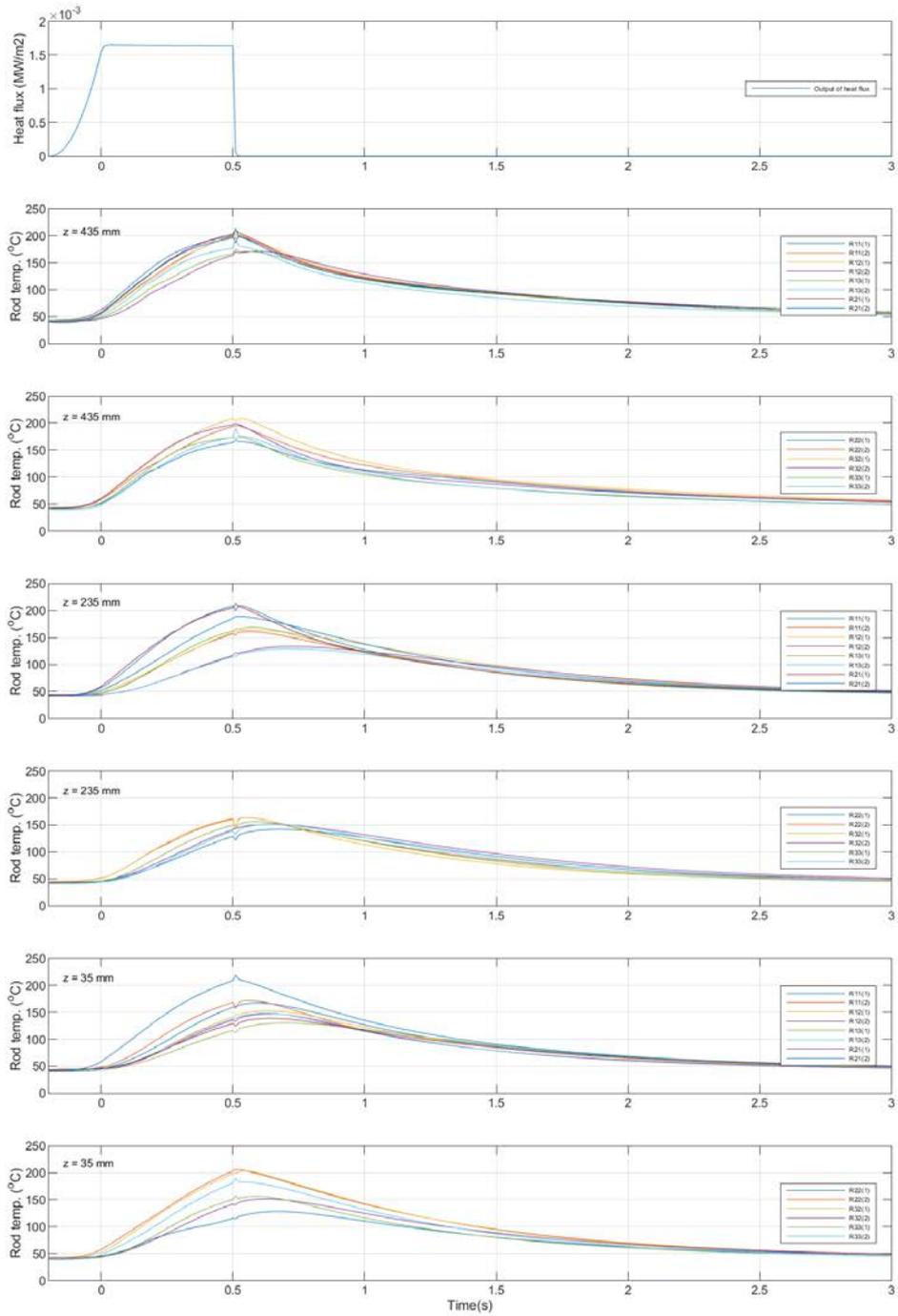


図 3.1-38 高さごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.5)

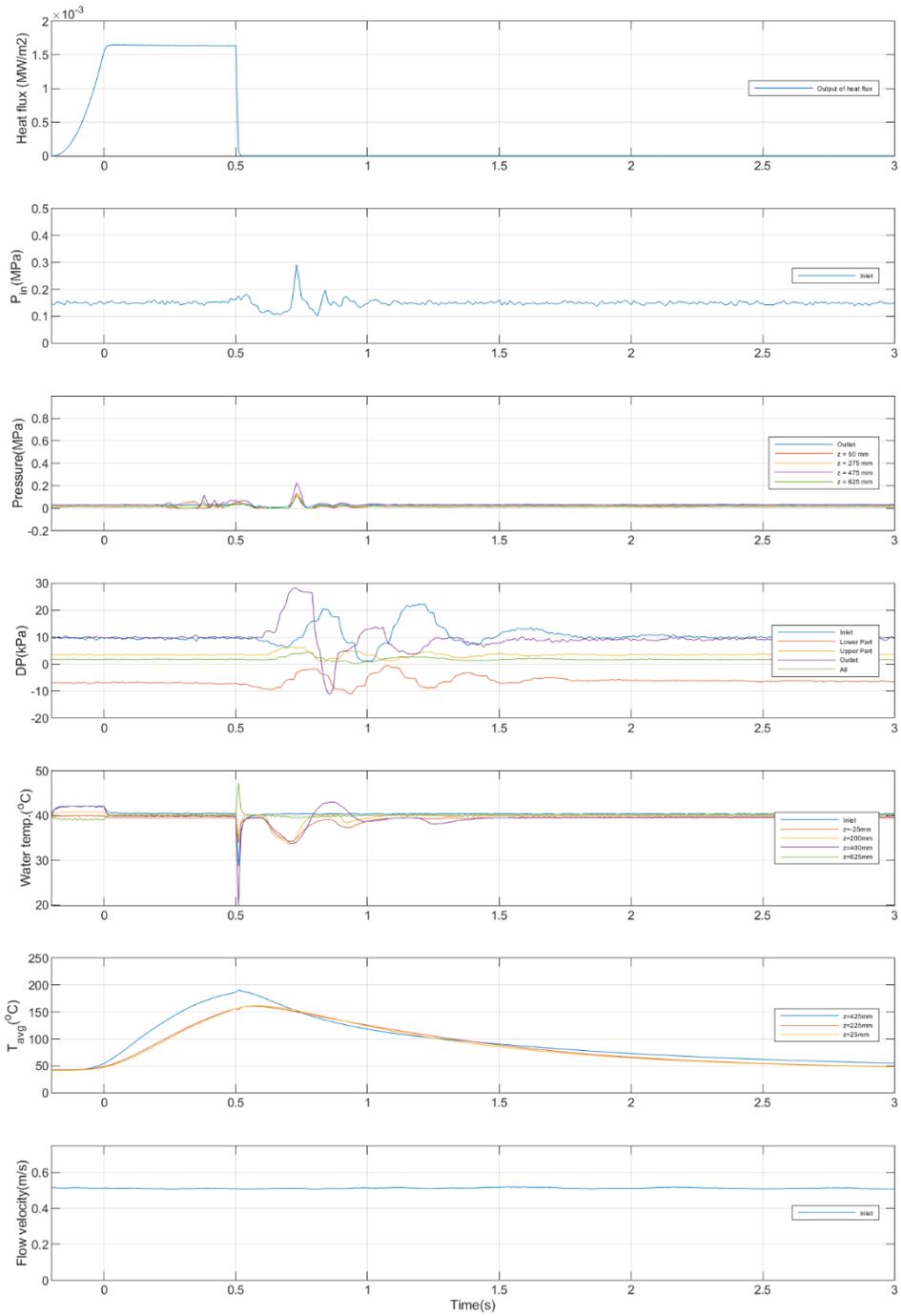


図 3.1-39 その他計測値の時間変化 (Run No.5)

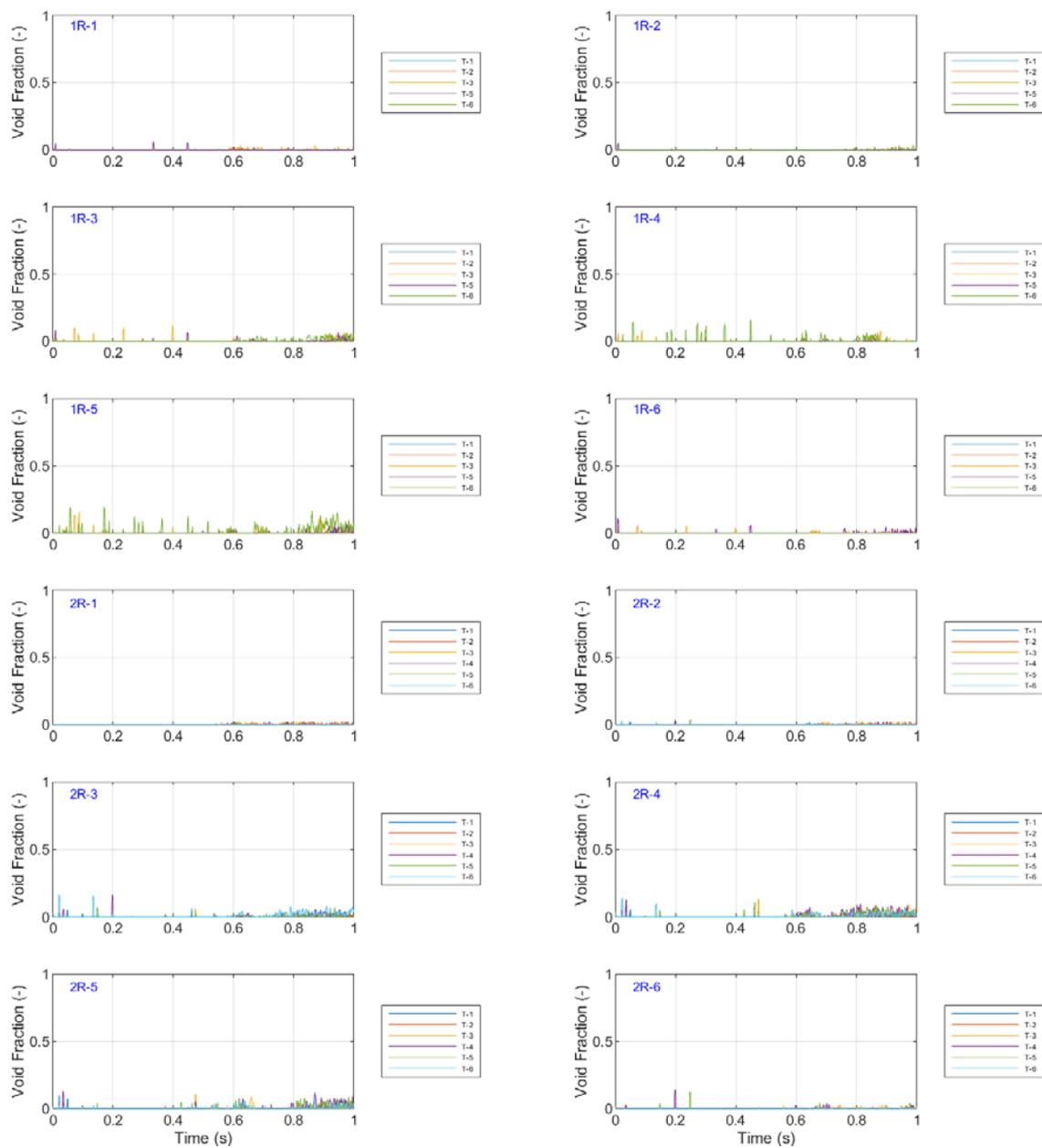


図 3.1-40 ボイド率の時間変化 (Run No.5/①)

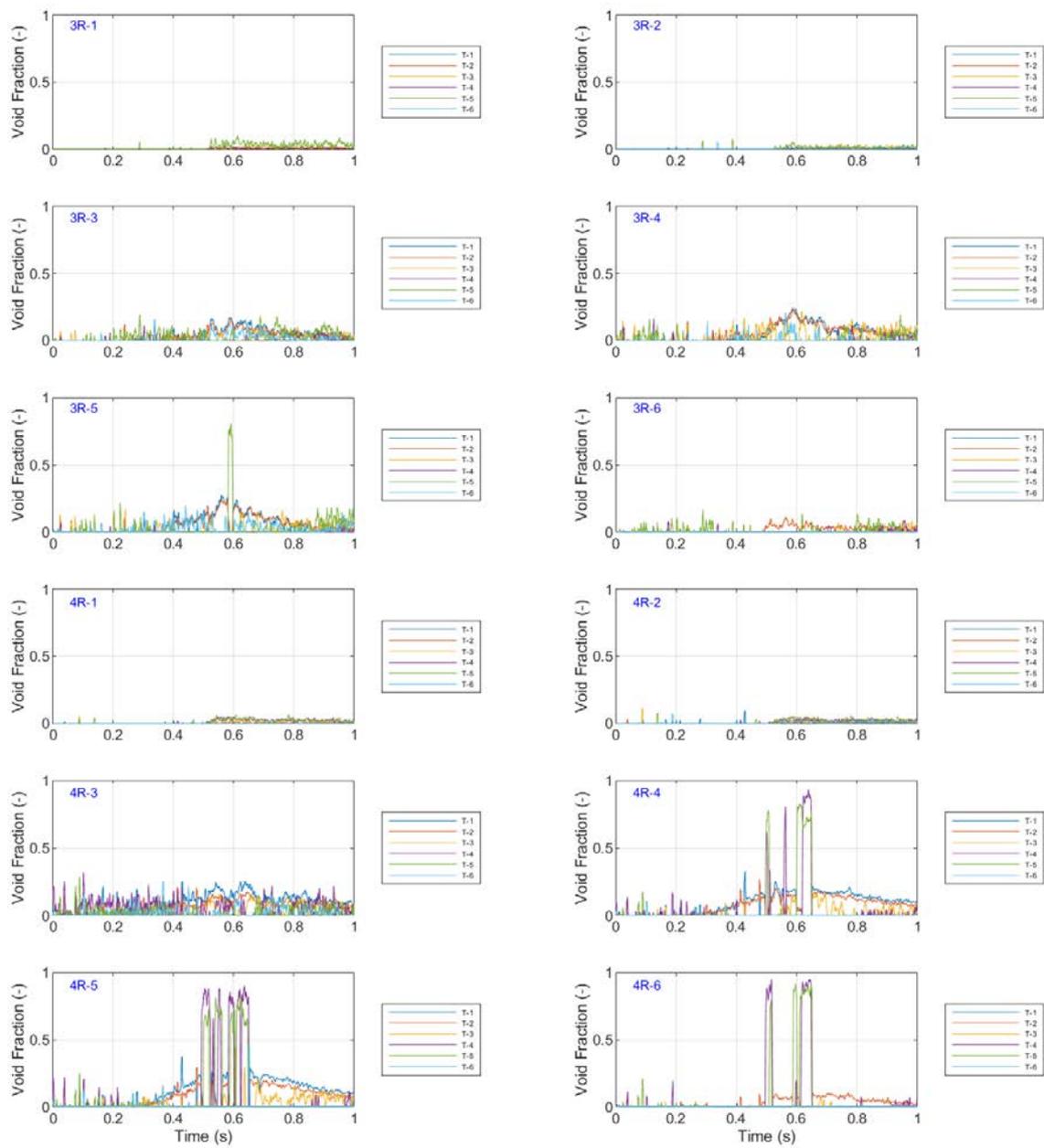


図 3.1-41 ボイド率の時間変化 (Run No.5/②)

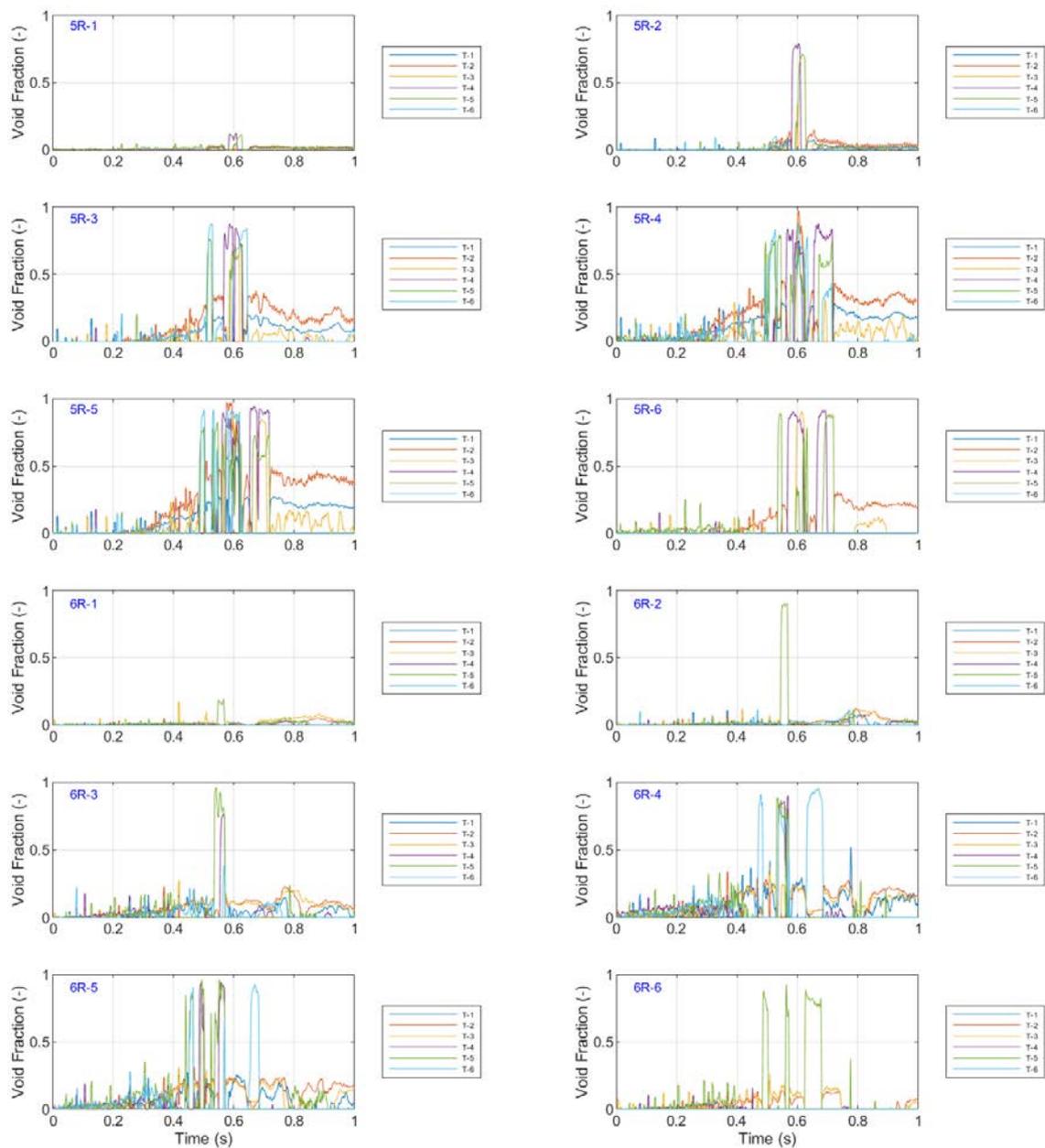


図 3.1-42 ボイド率の時間変化 (Run No.5/③)

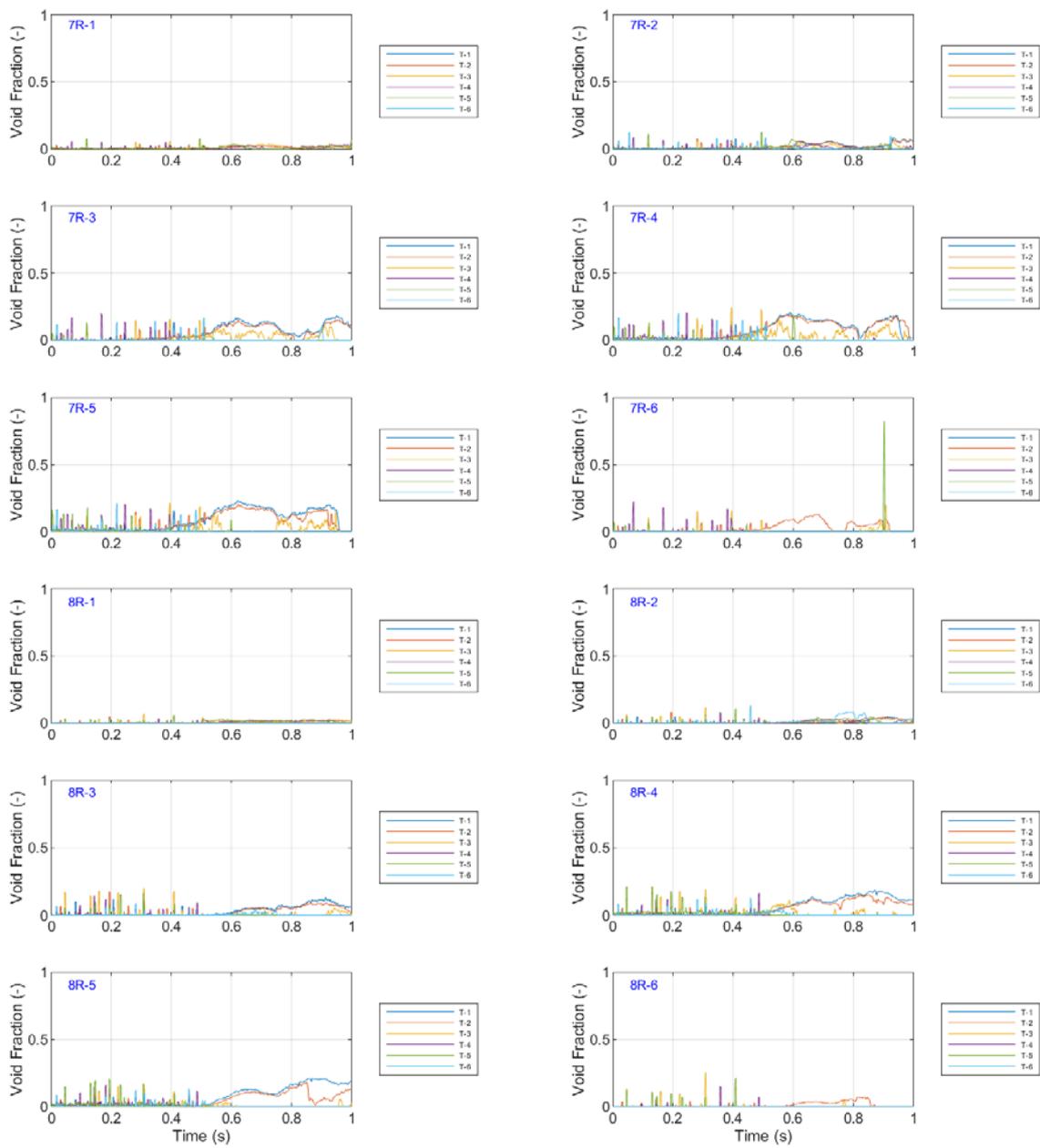


図 3.1-43 ボイド率の時間変化 (Run No.5/④)

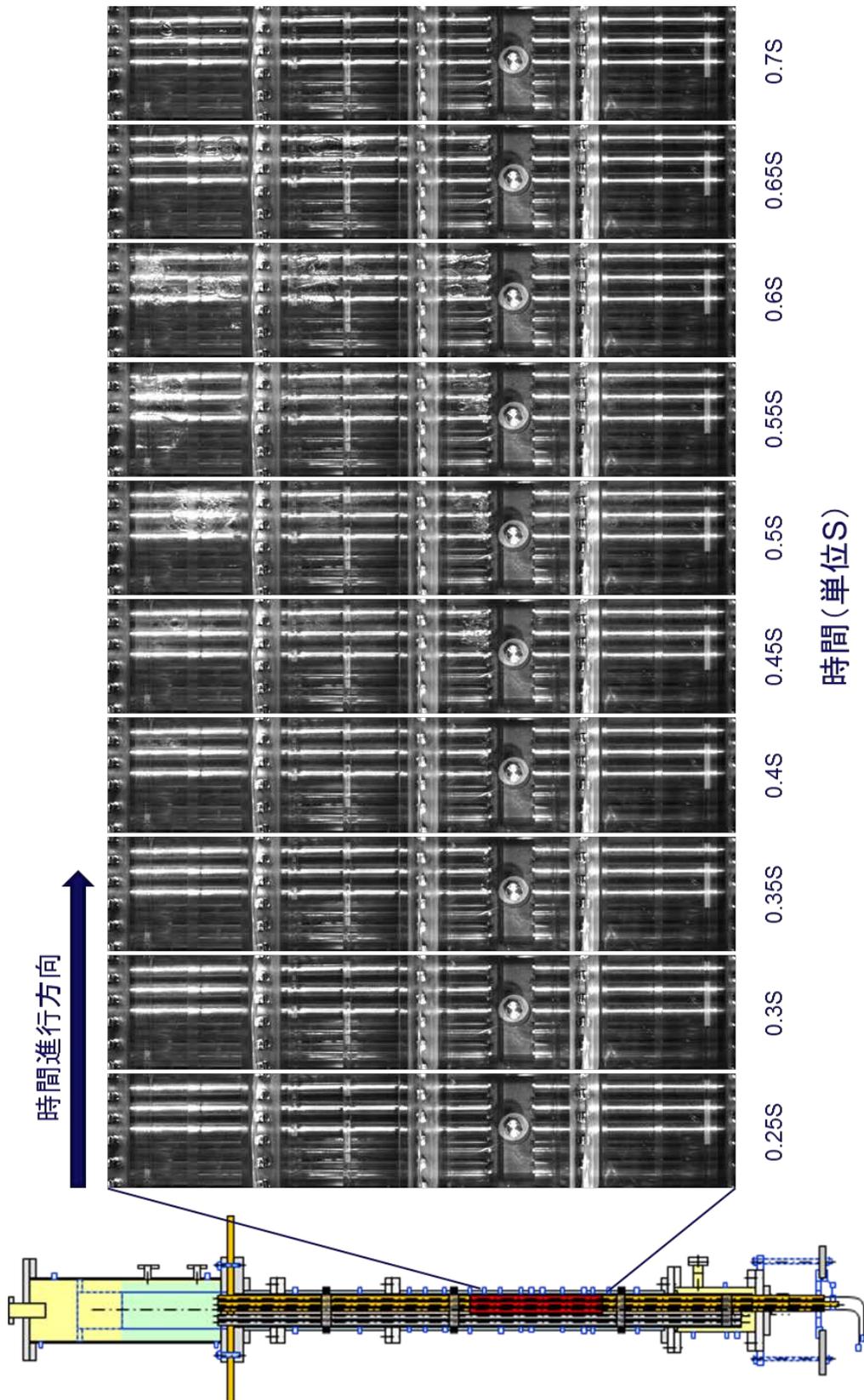


図 3.1-44 ポイド挙動の可視化画像 (Run No. 5)

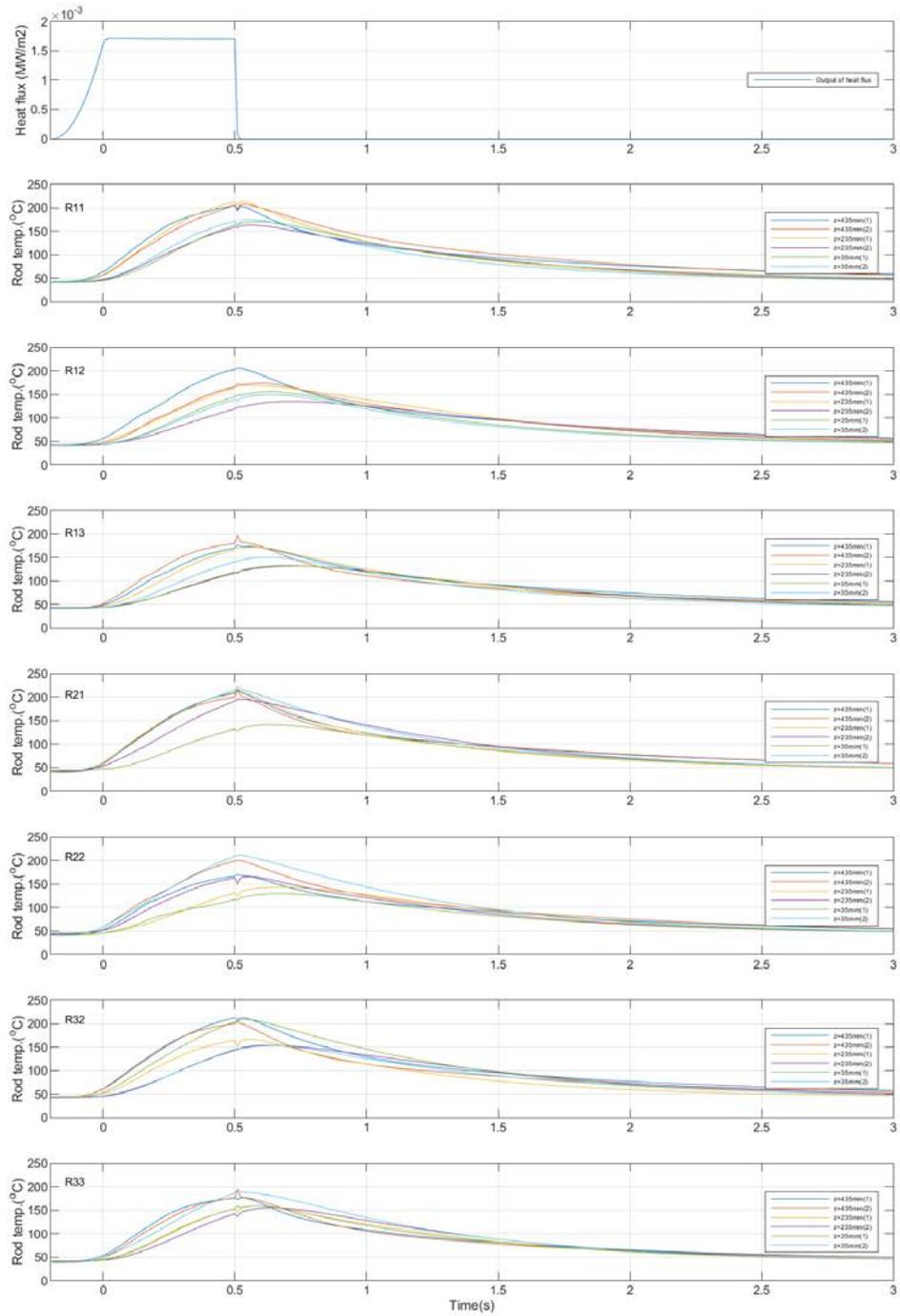


図 3.1-45 ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.6)

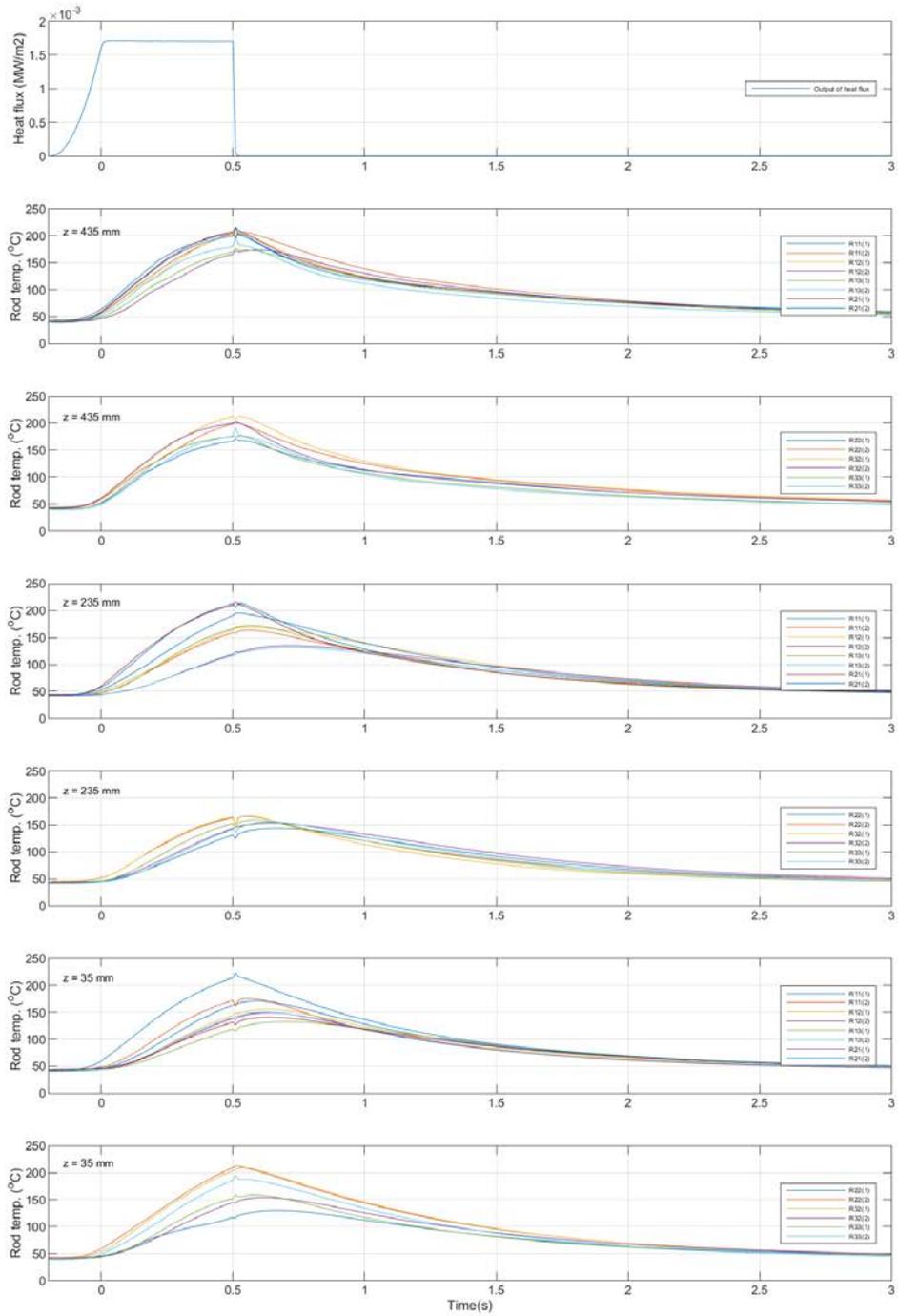


図 3.1-46 高さごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.6)

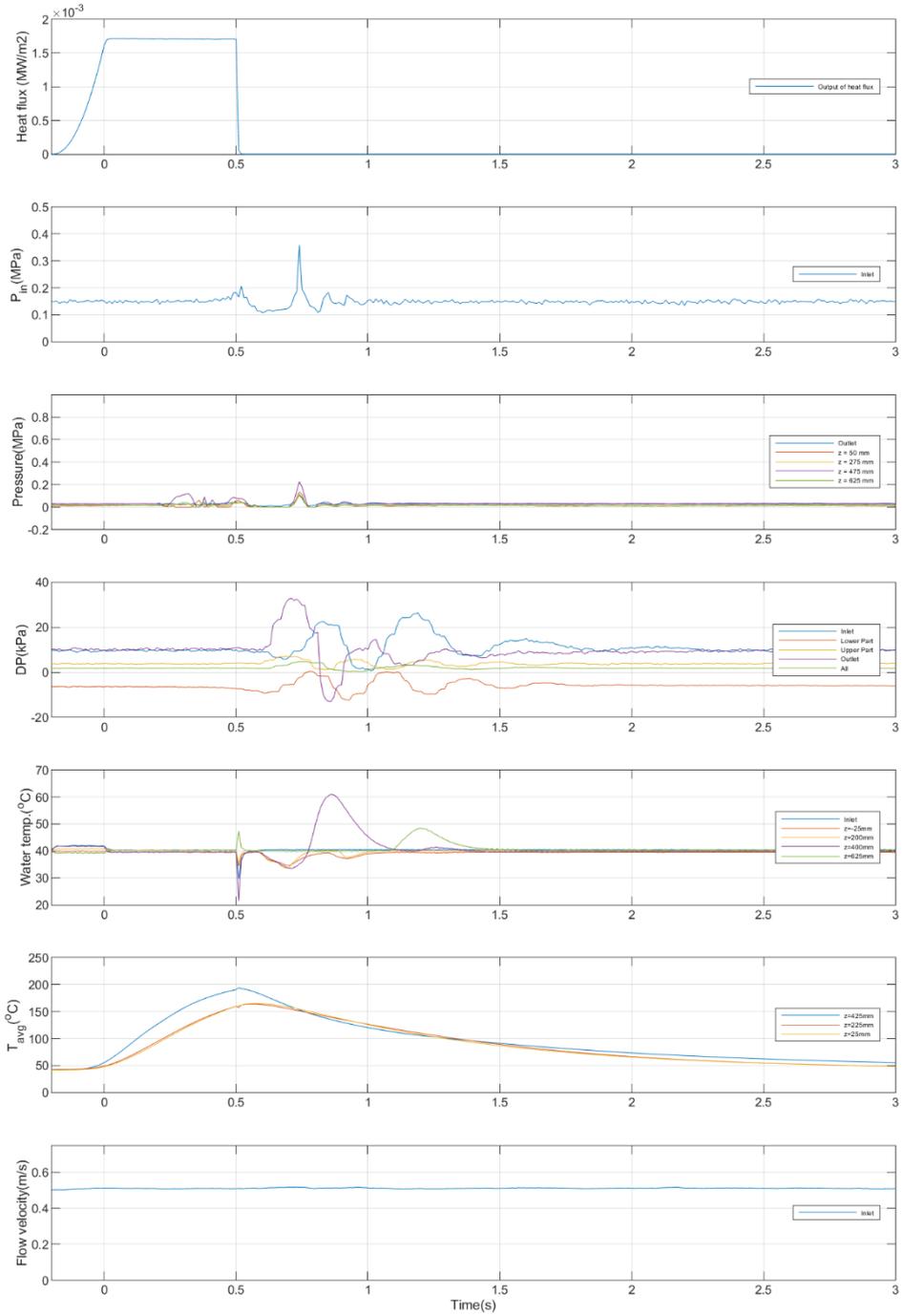


図 3.1-47 その他計測値の時間変化 (Run No.6)

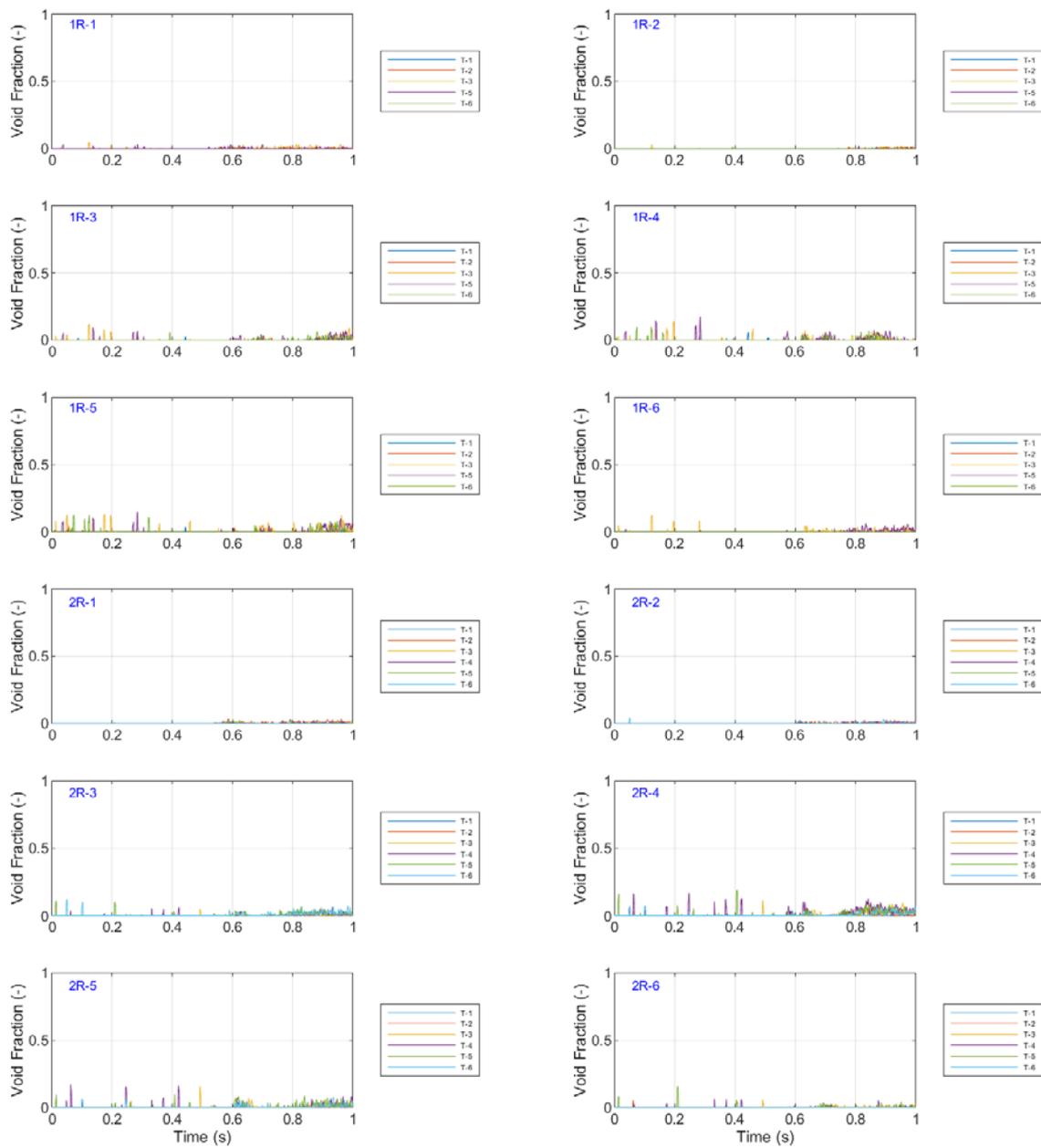


図 3.1-48 ボイド率の時間変化 (Run No.6/①)

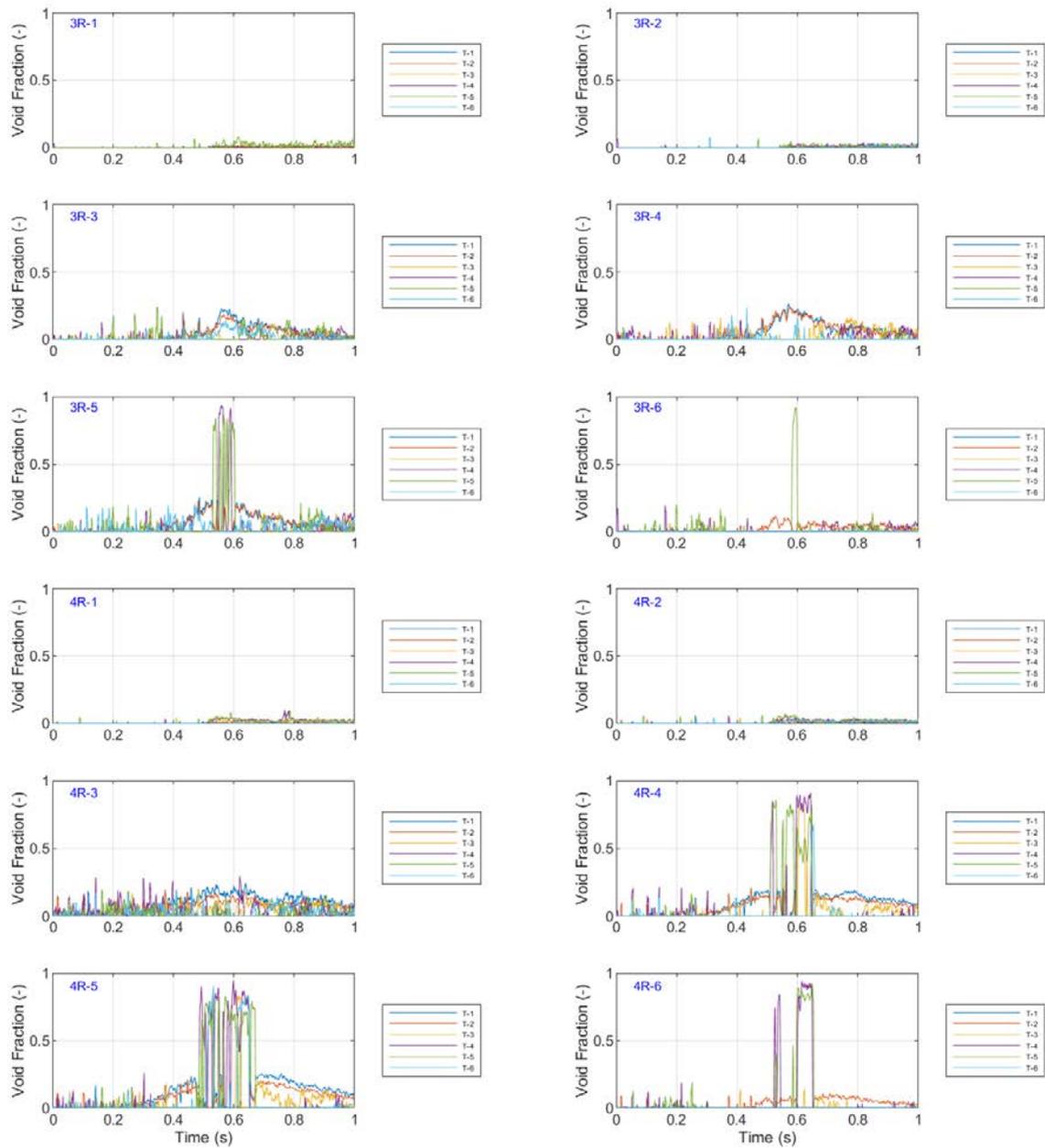


図 3.1-49 ボイド率の時間変化 (Run No.6(2))

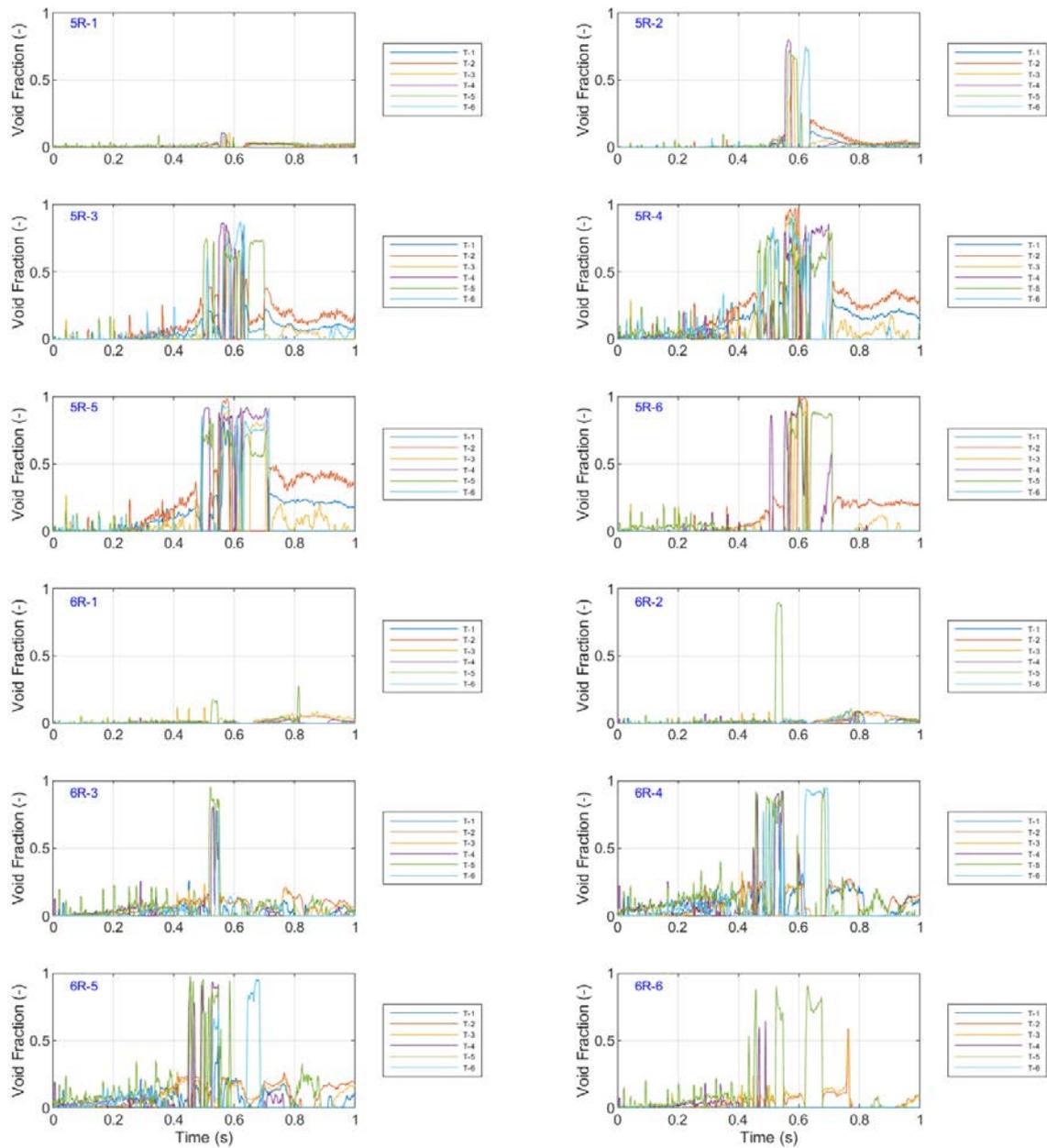


図 3.1-50 ボイド率の時間変化 (Run No.6/③)

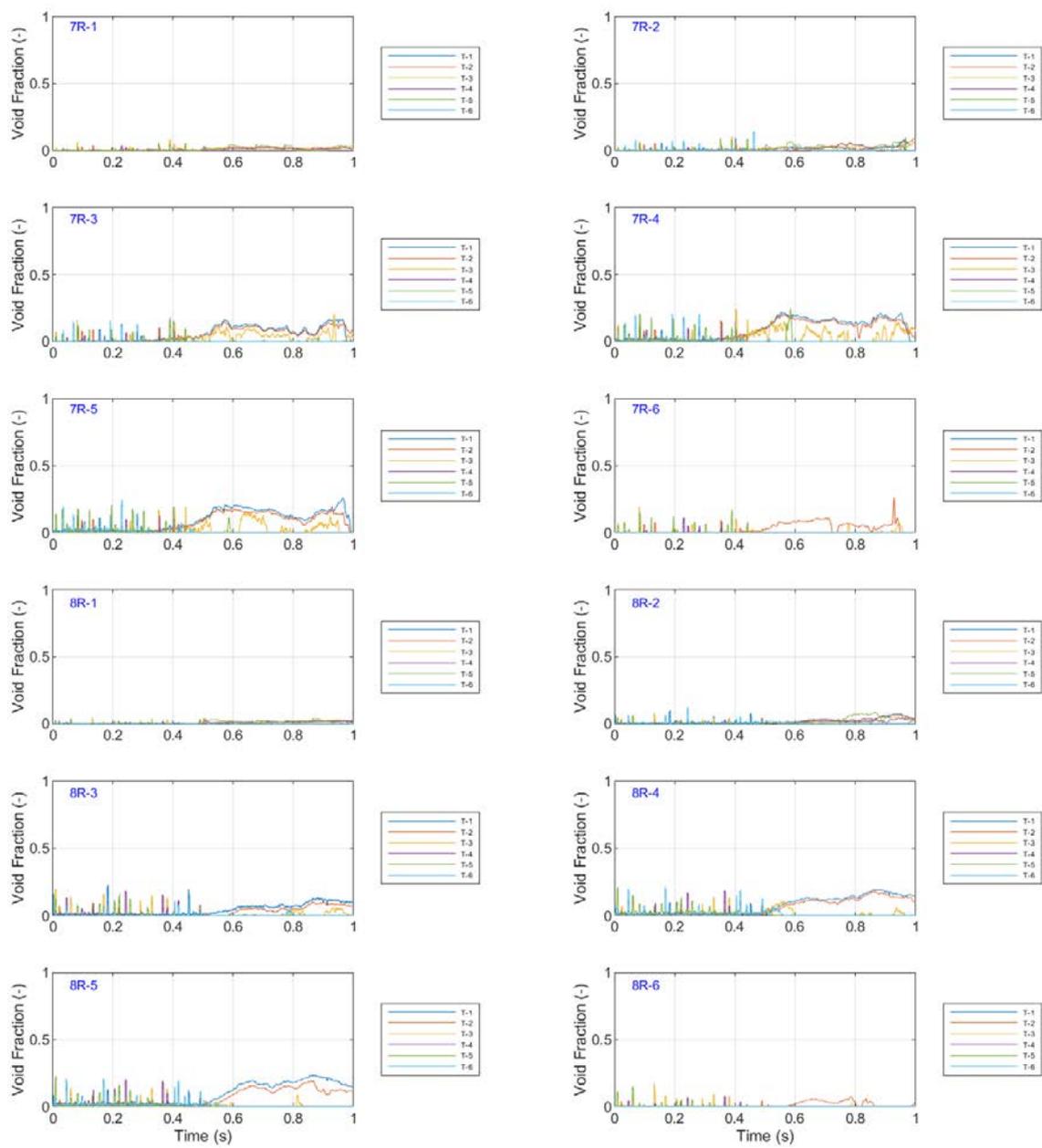


図 3.1-51 ボイド率の時間変化 (Run No.6/④)

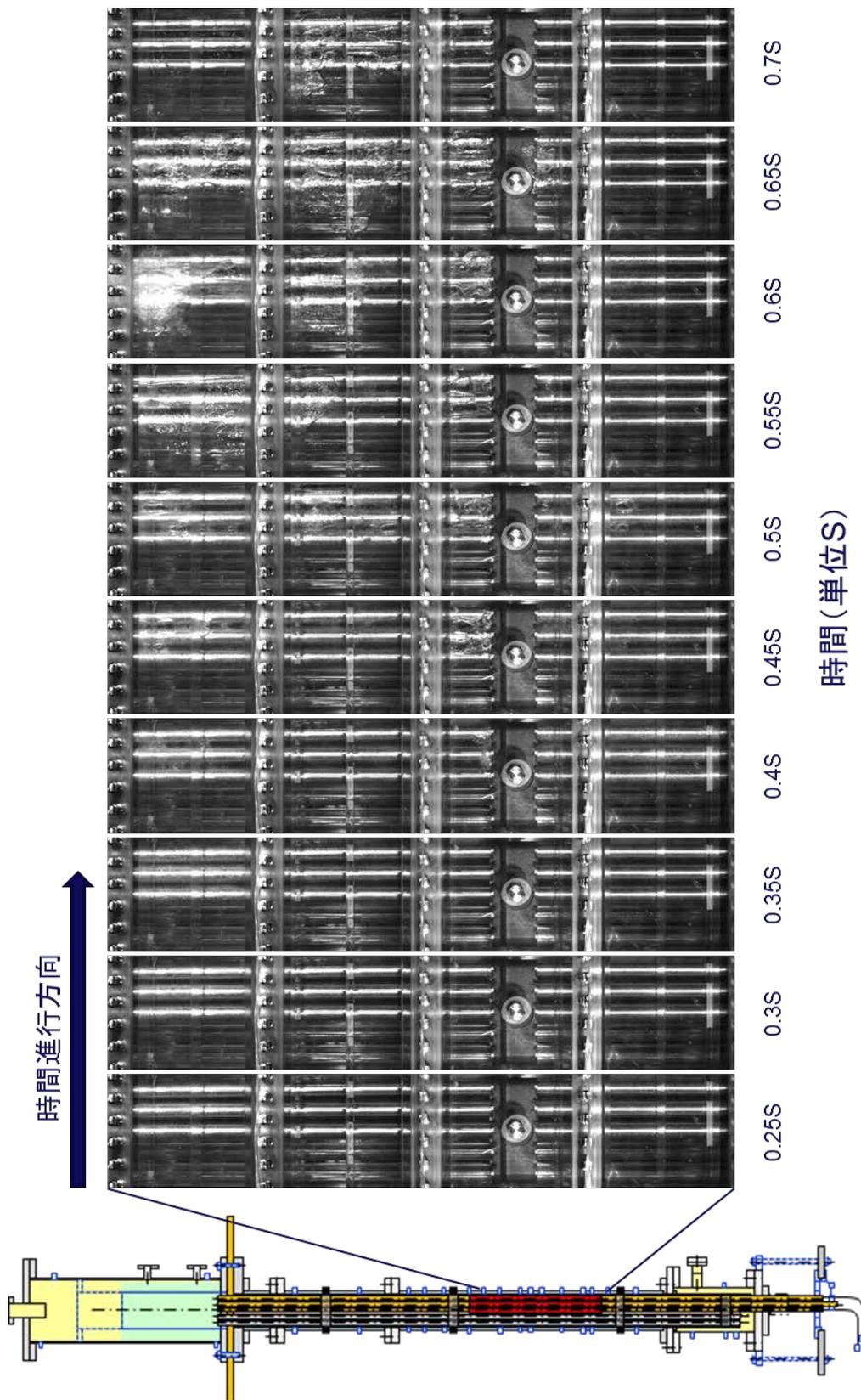


図 3.1-52 ポイド挙動の可視化画像 (Run No. 6)

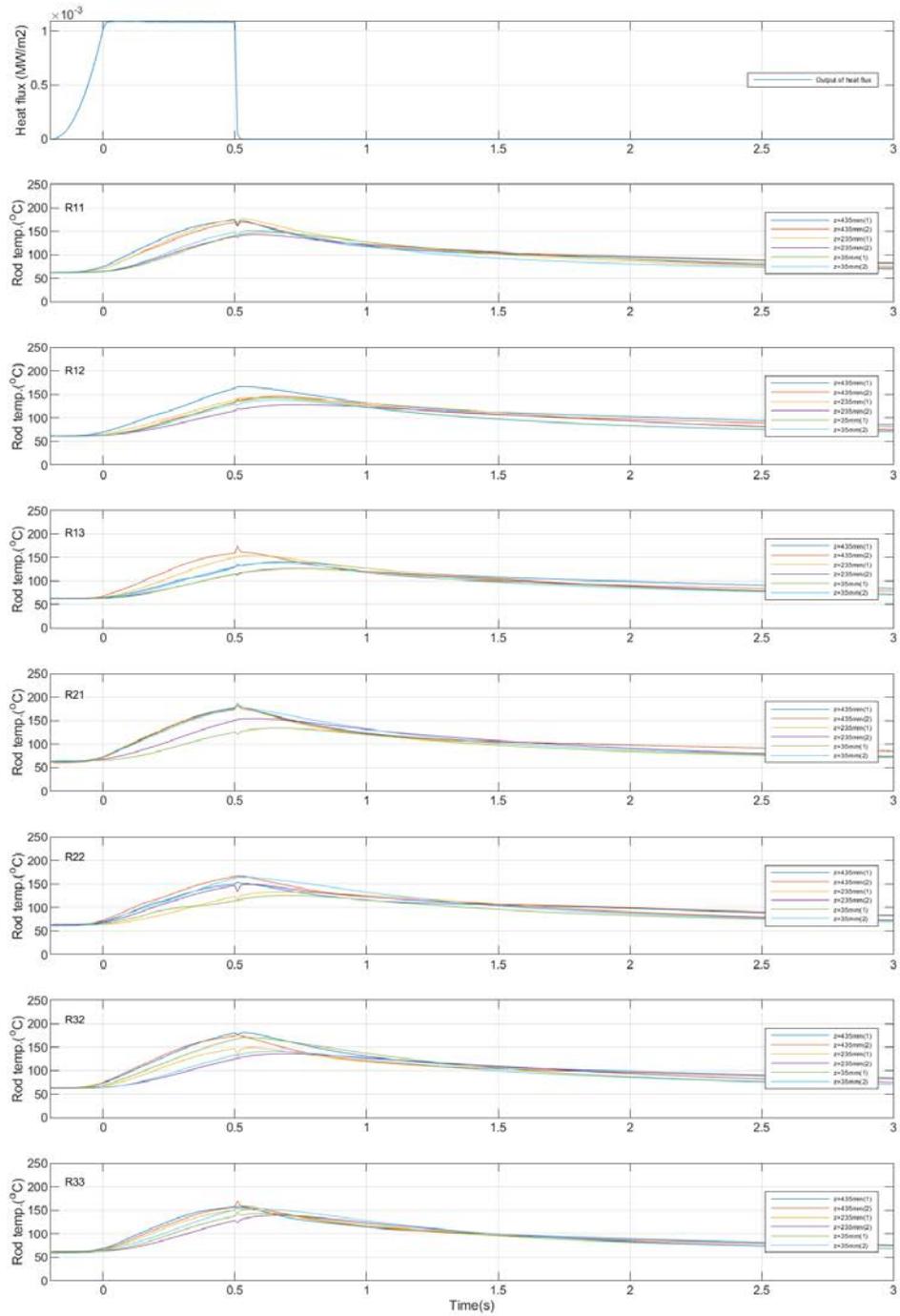


図 3.1-53 ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.7)

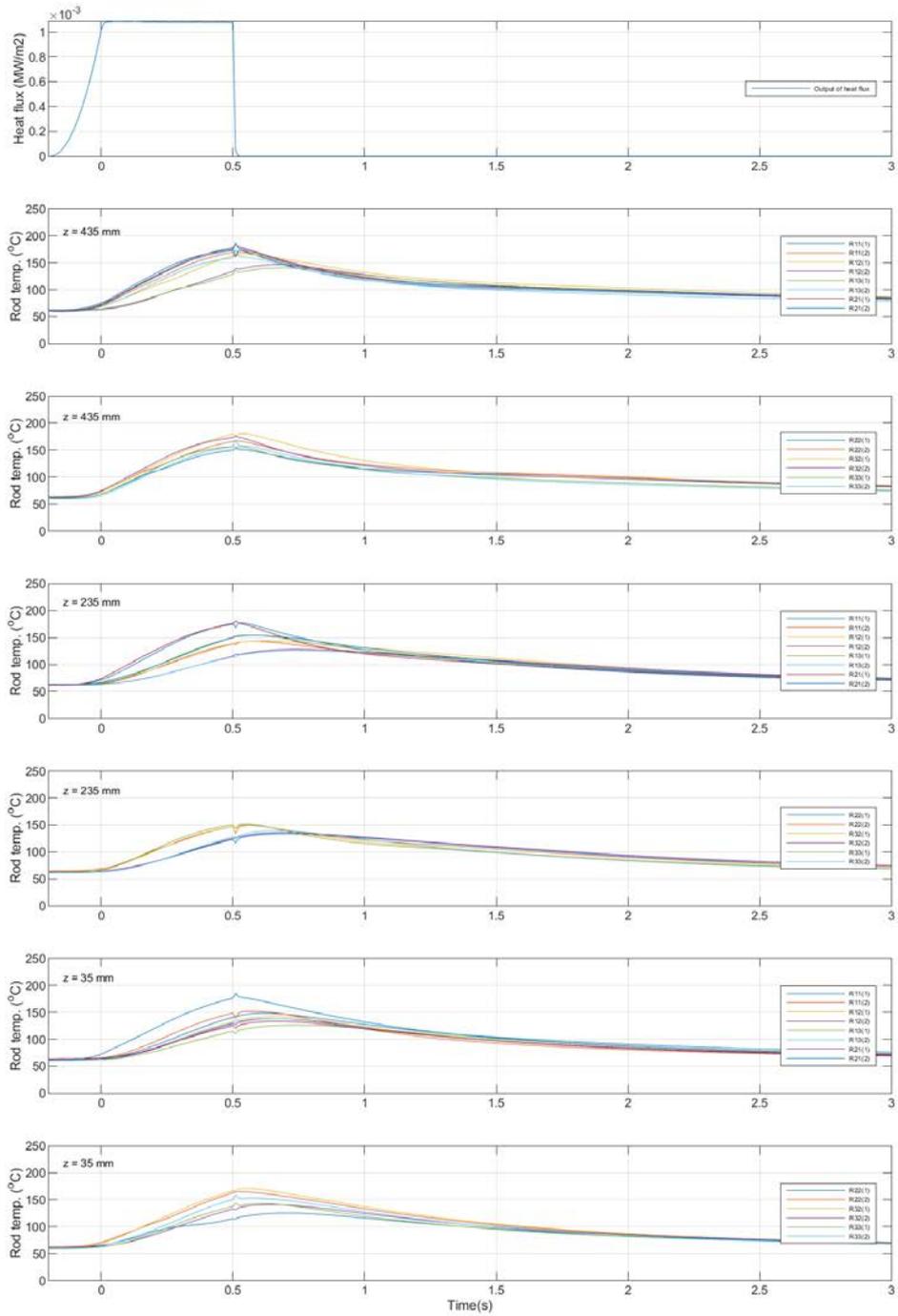


図 3.1-54 高さごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.7)

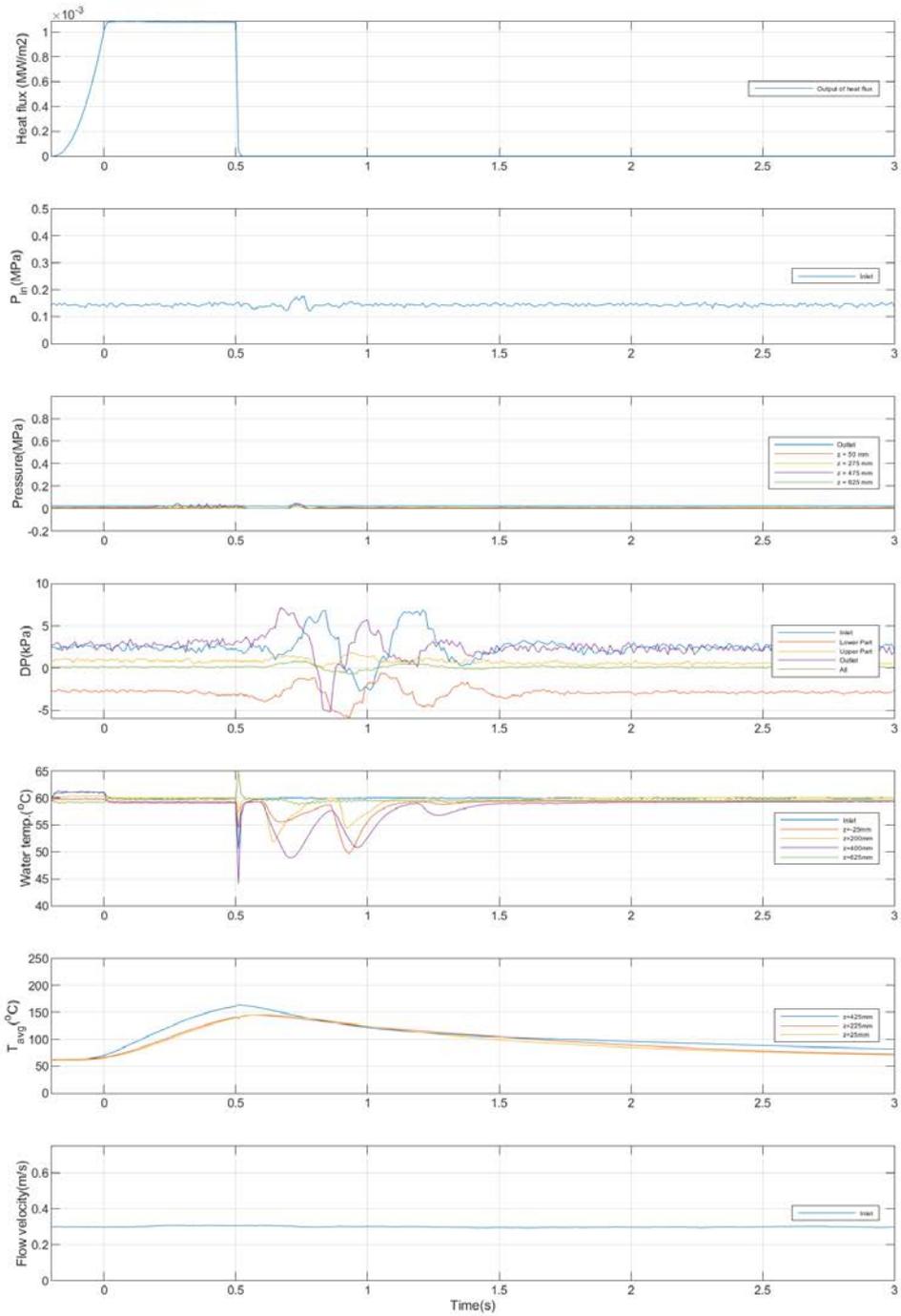


図 3.1-55 その他計測値の時間変化 (Run No.7)

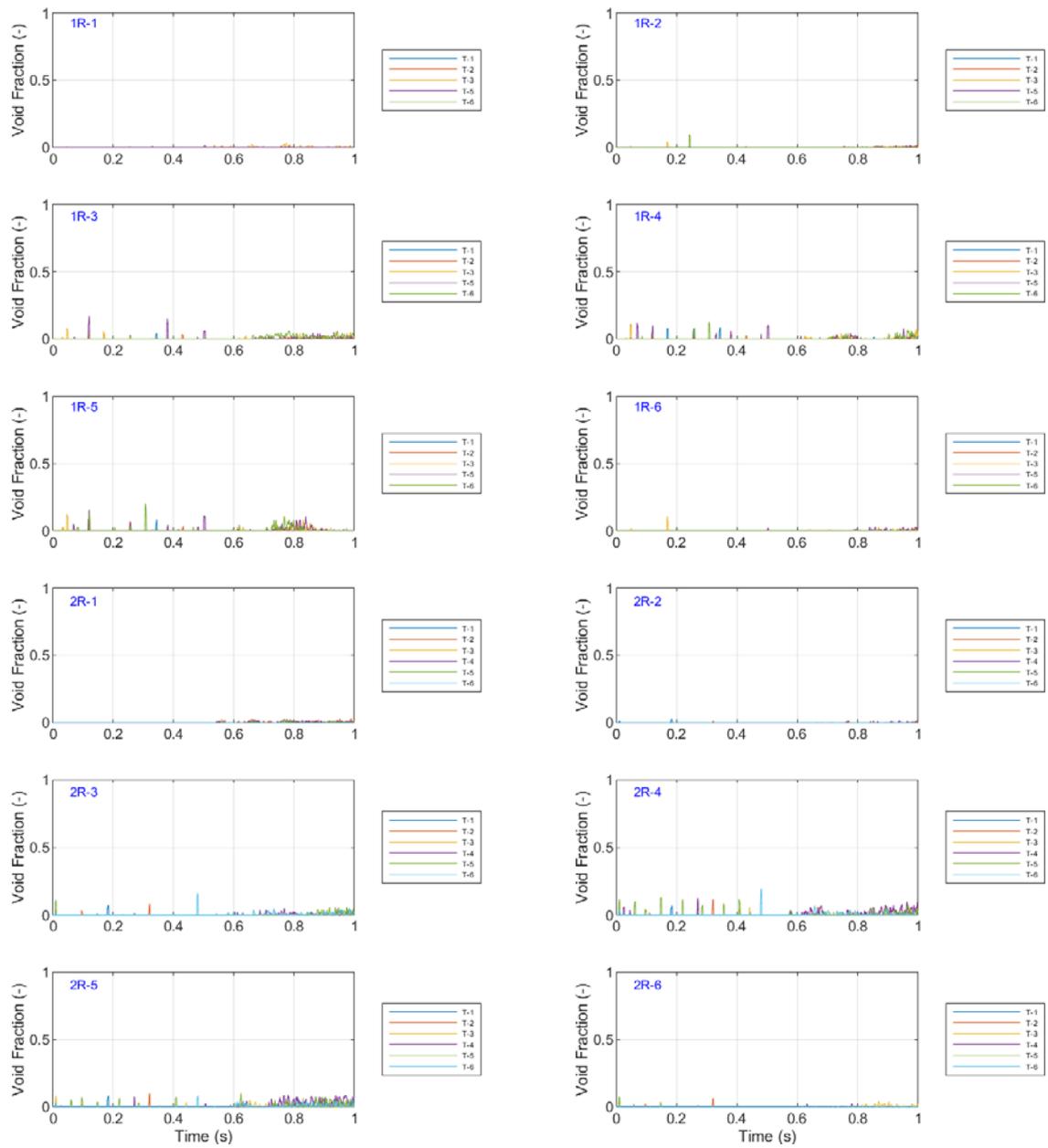


図 3.1-56 ボイド率の時間変化 (Run No.7/①)

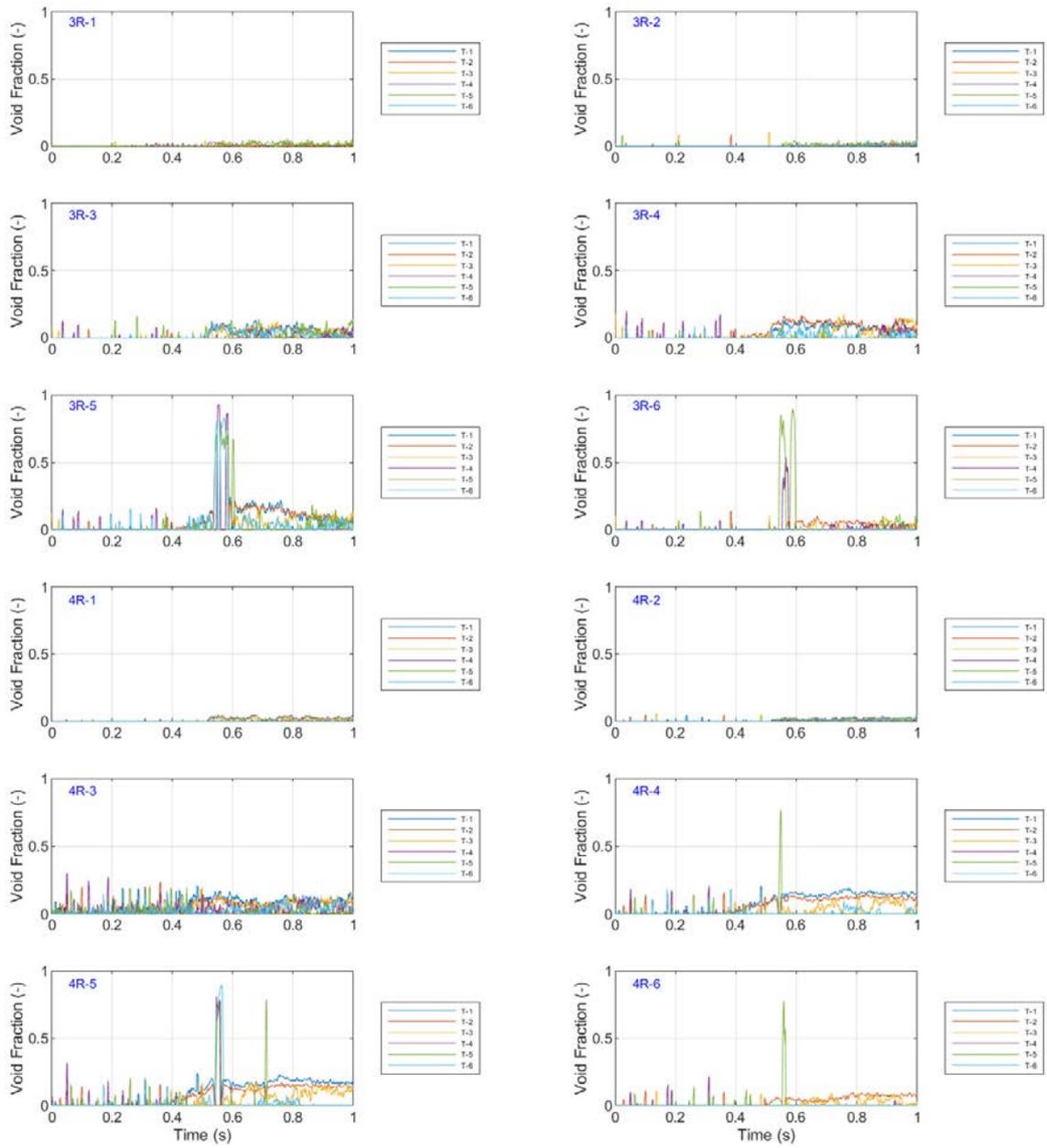


図 3.1-57 ボイド率の時間変化 (Run No.7(2))

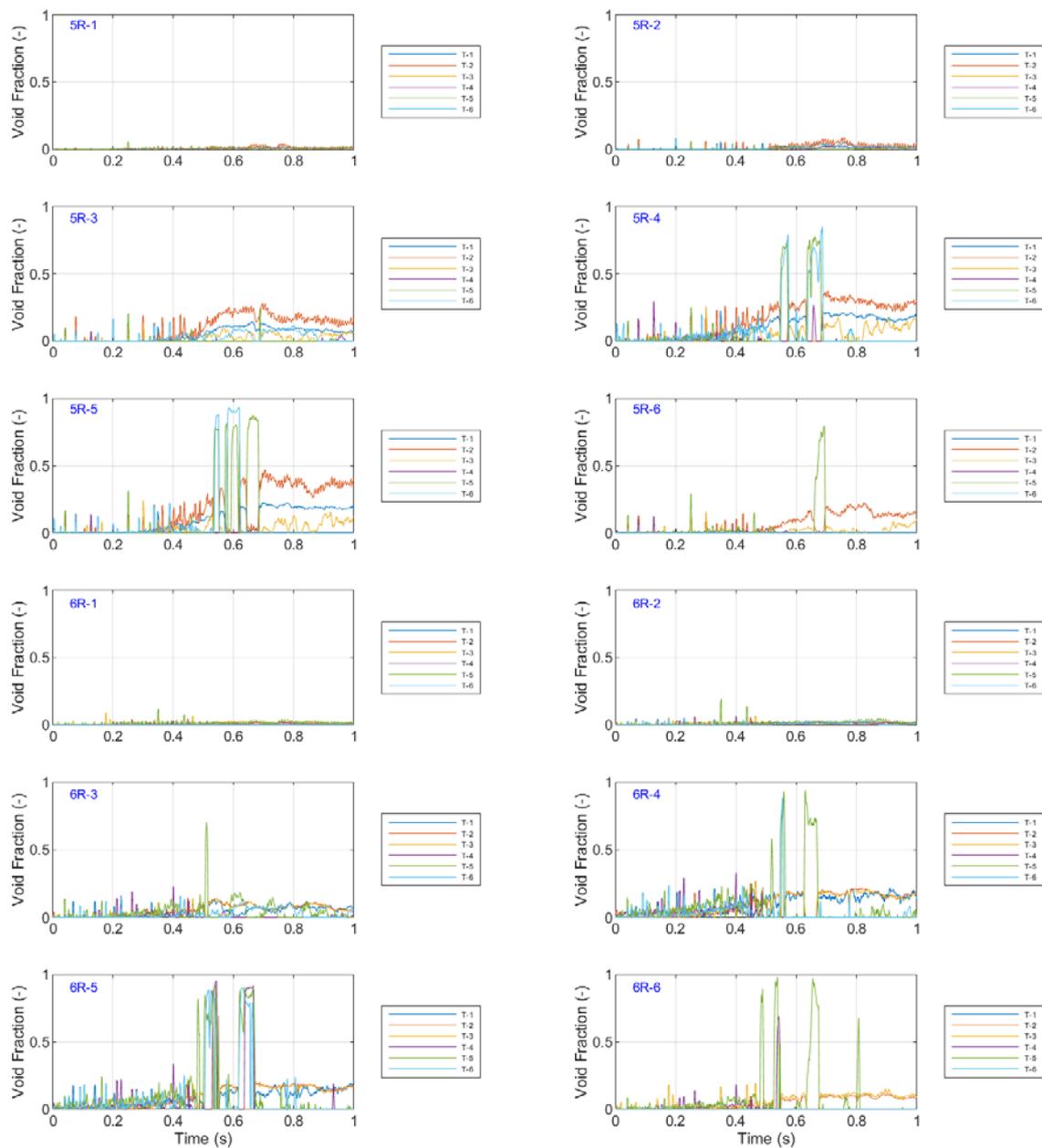


図 3.1-58 ボイド率の時間変化 (Run No.7/③)

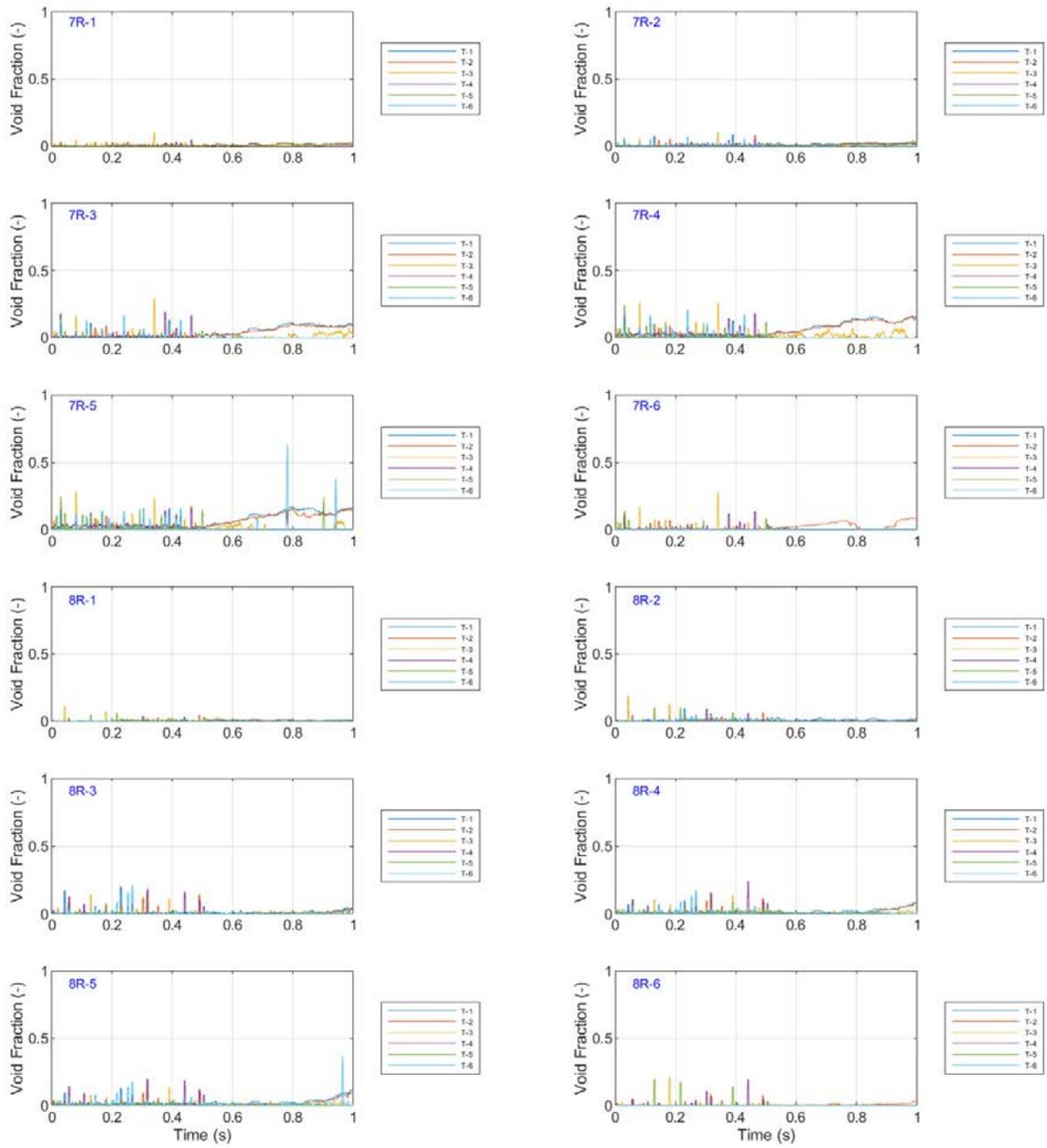


図 3.1-59 ボイド率の時間変化 (Run No.7/④)

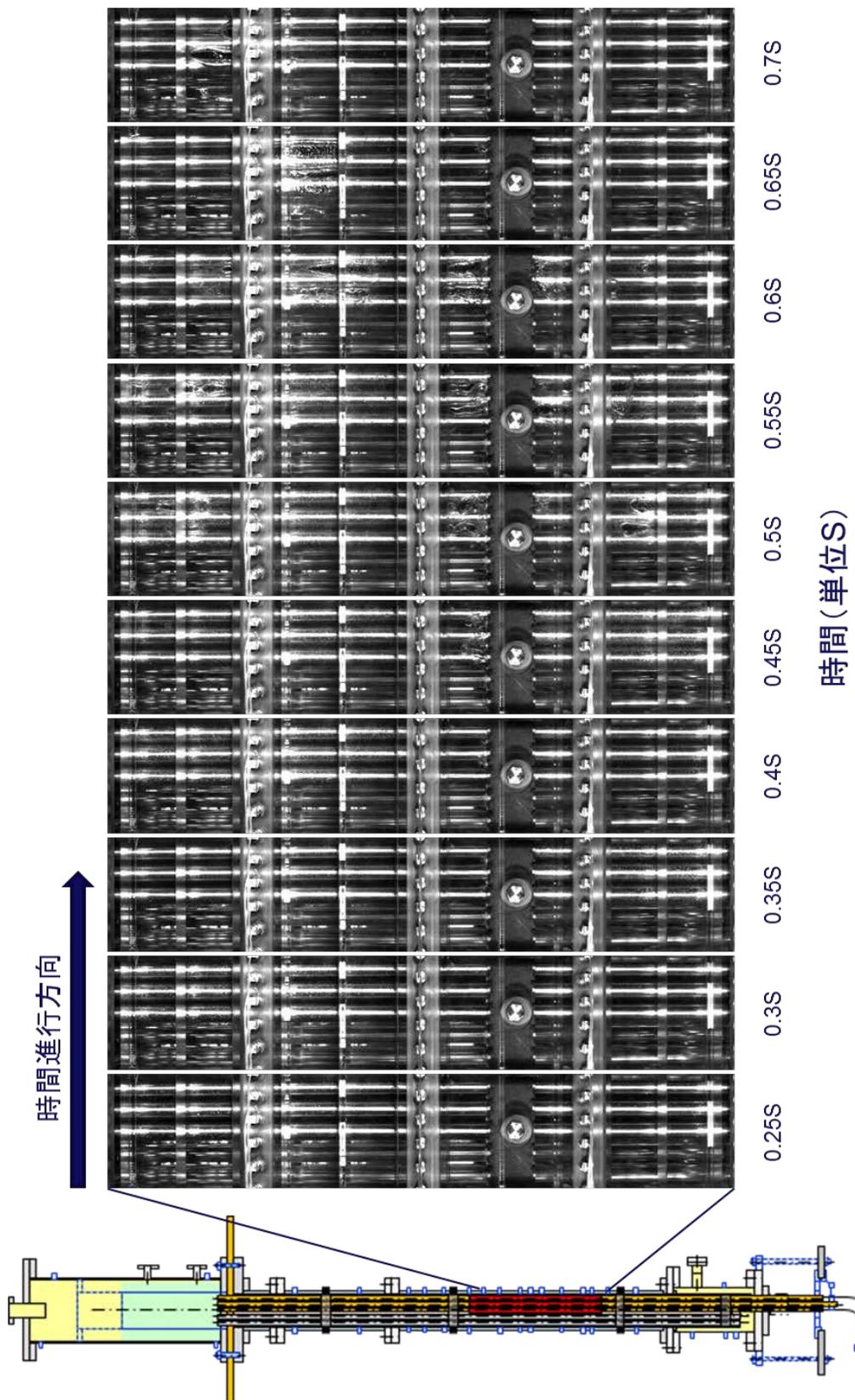


図 3.1-60 ボイド挙動の可視化画像 (Run No. 7)

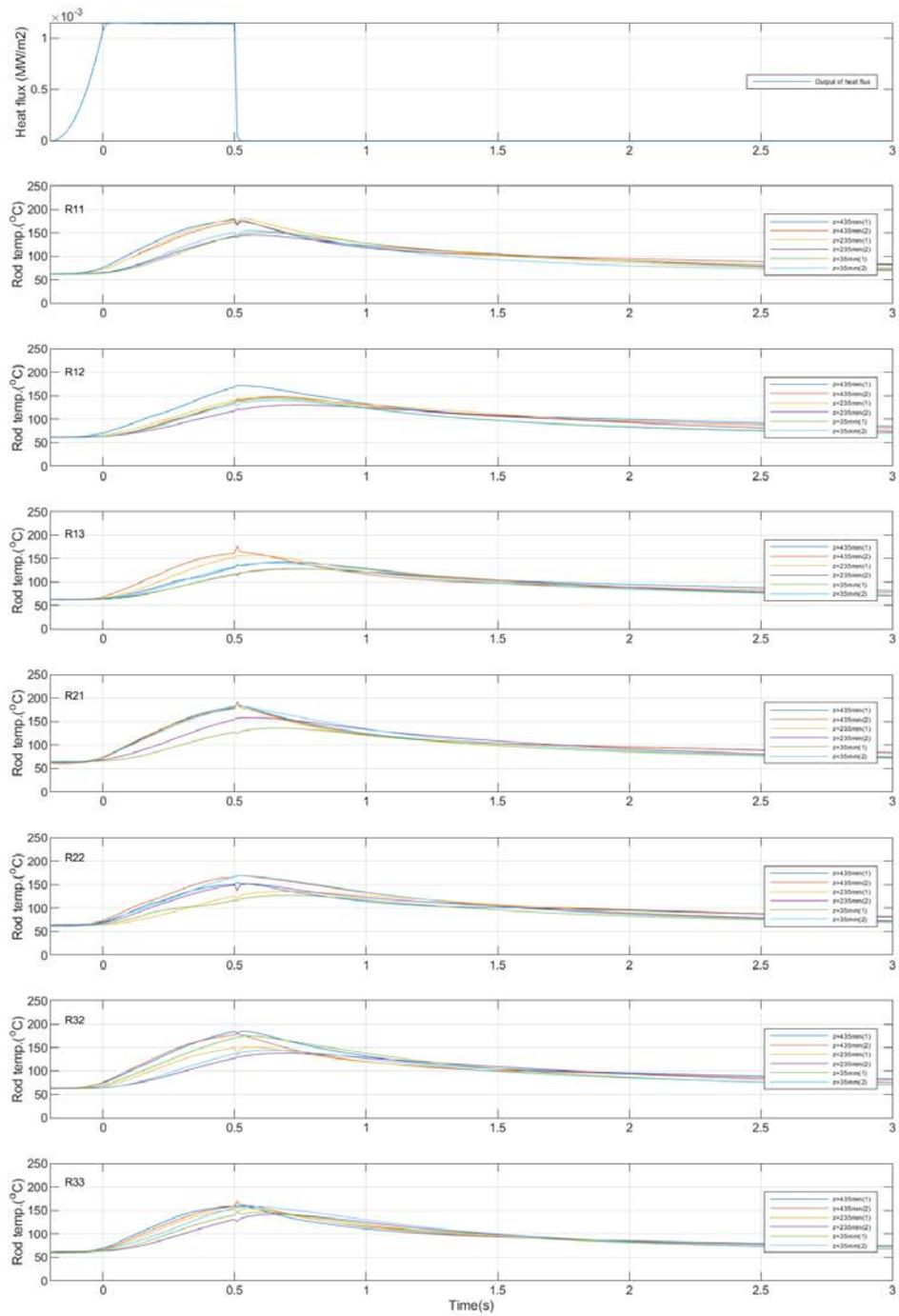


図 3.1-61 ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.8)

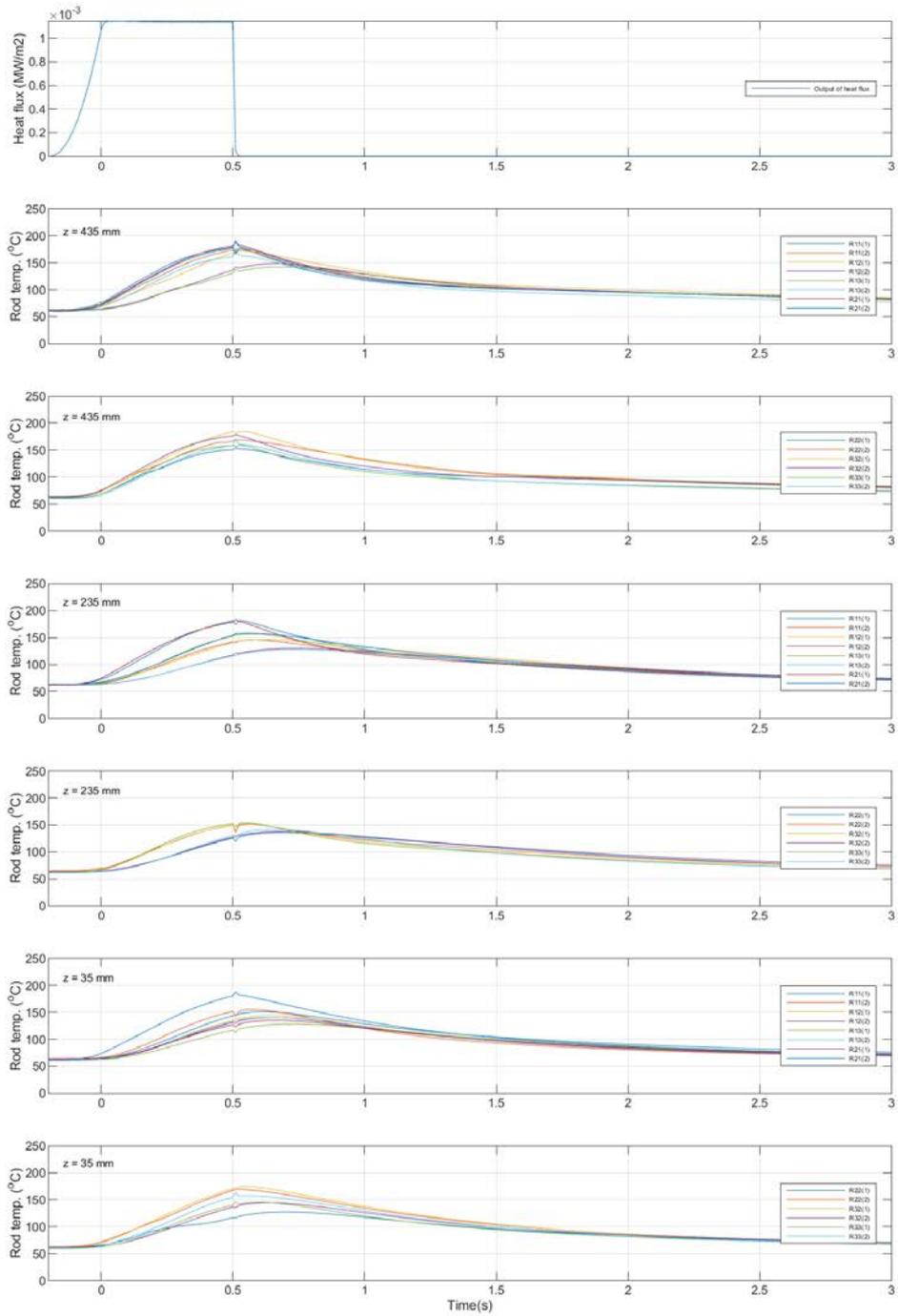


図 3.1-62 高さごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.8)

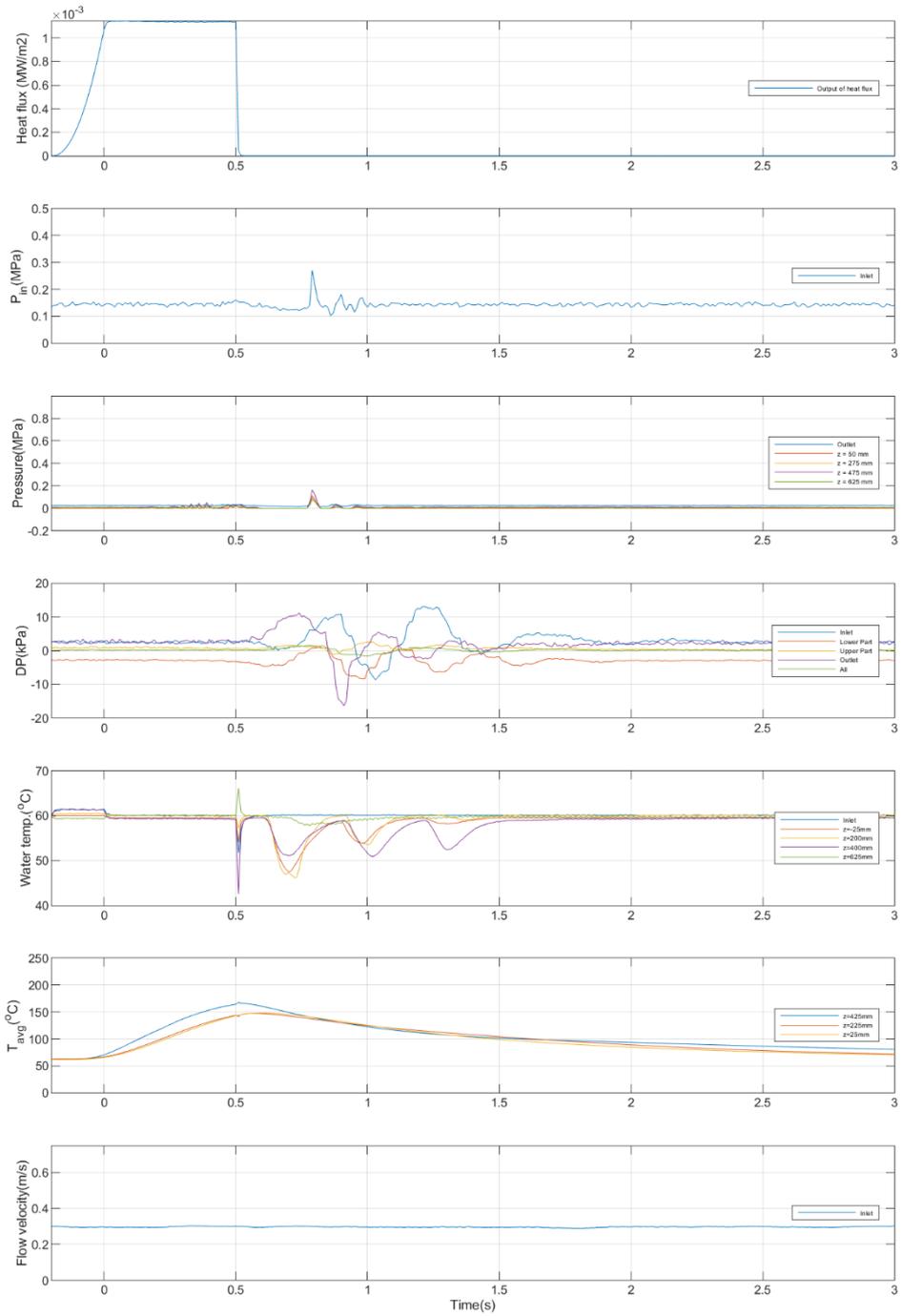


図 3.1-63 その他計測値の時間変化 (Run No.8)

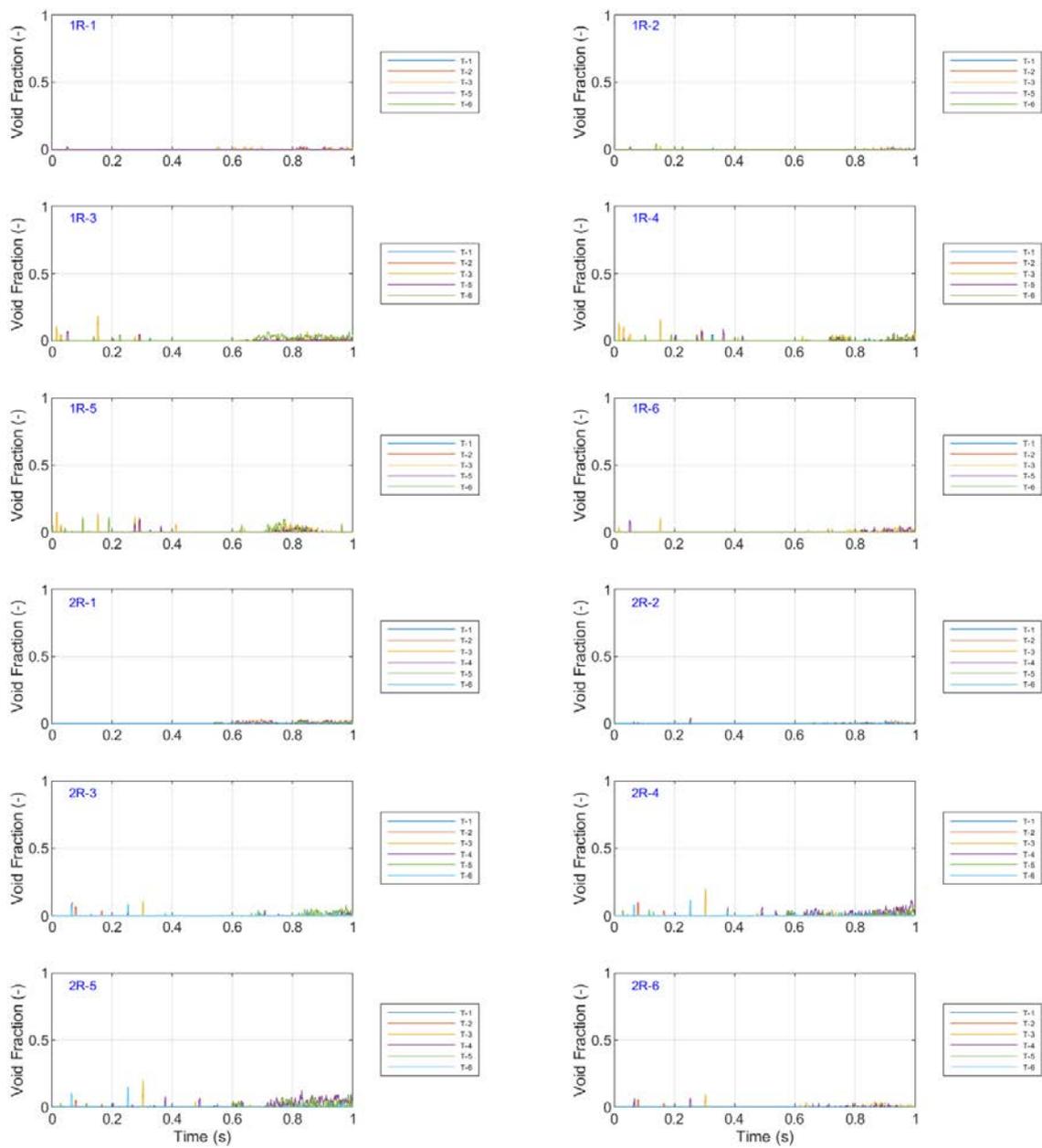


図 3.1-64 ボイド率の時間変化 (Run No.8/①)

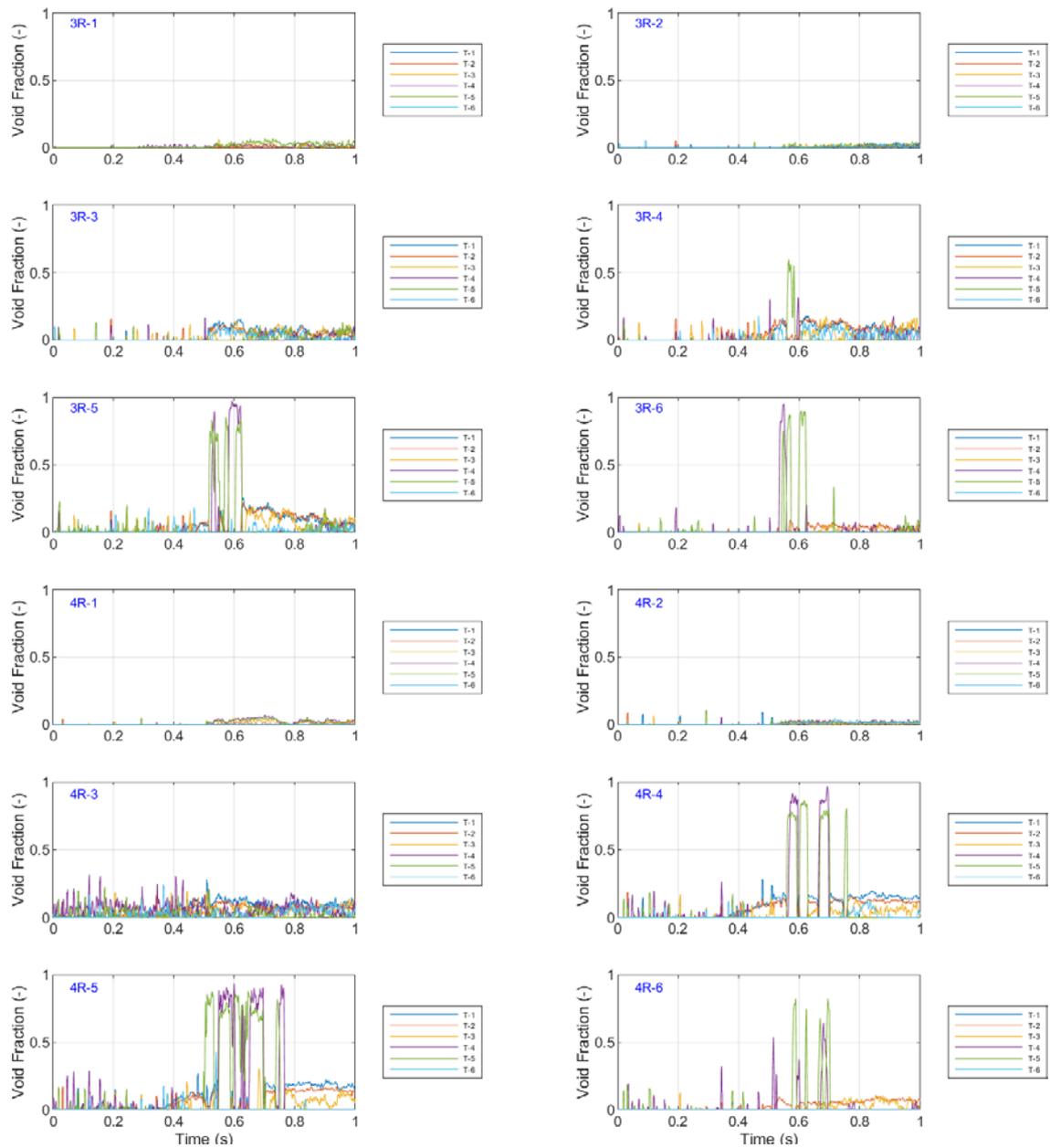


図 3.1-65 ボイド率の時間変化 (Run No.8/②)

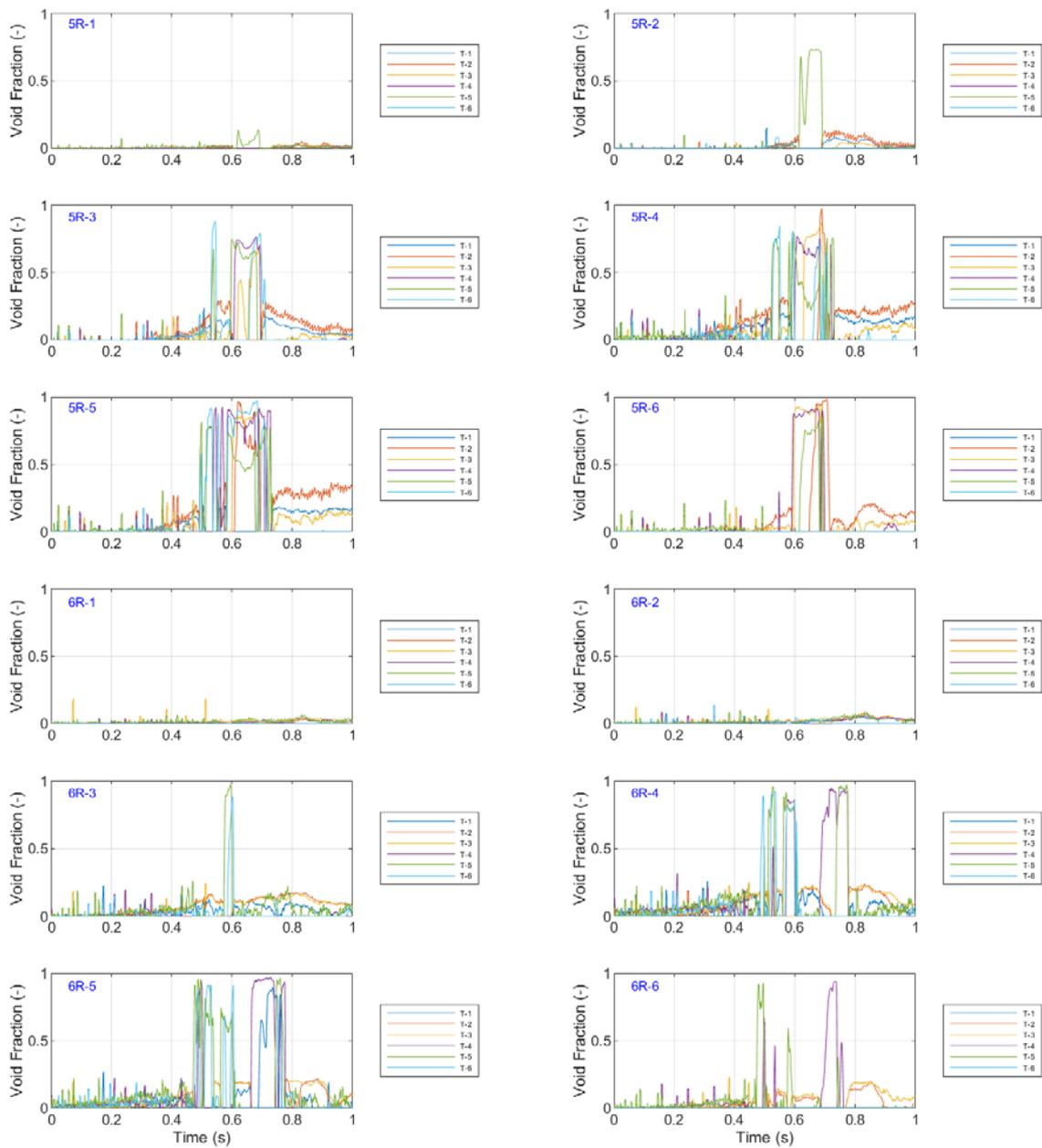


図 3.1-66 ボイド率の時間変化 (Run No.8/③)

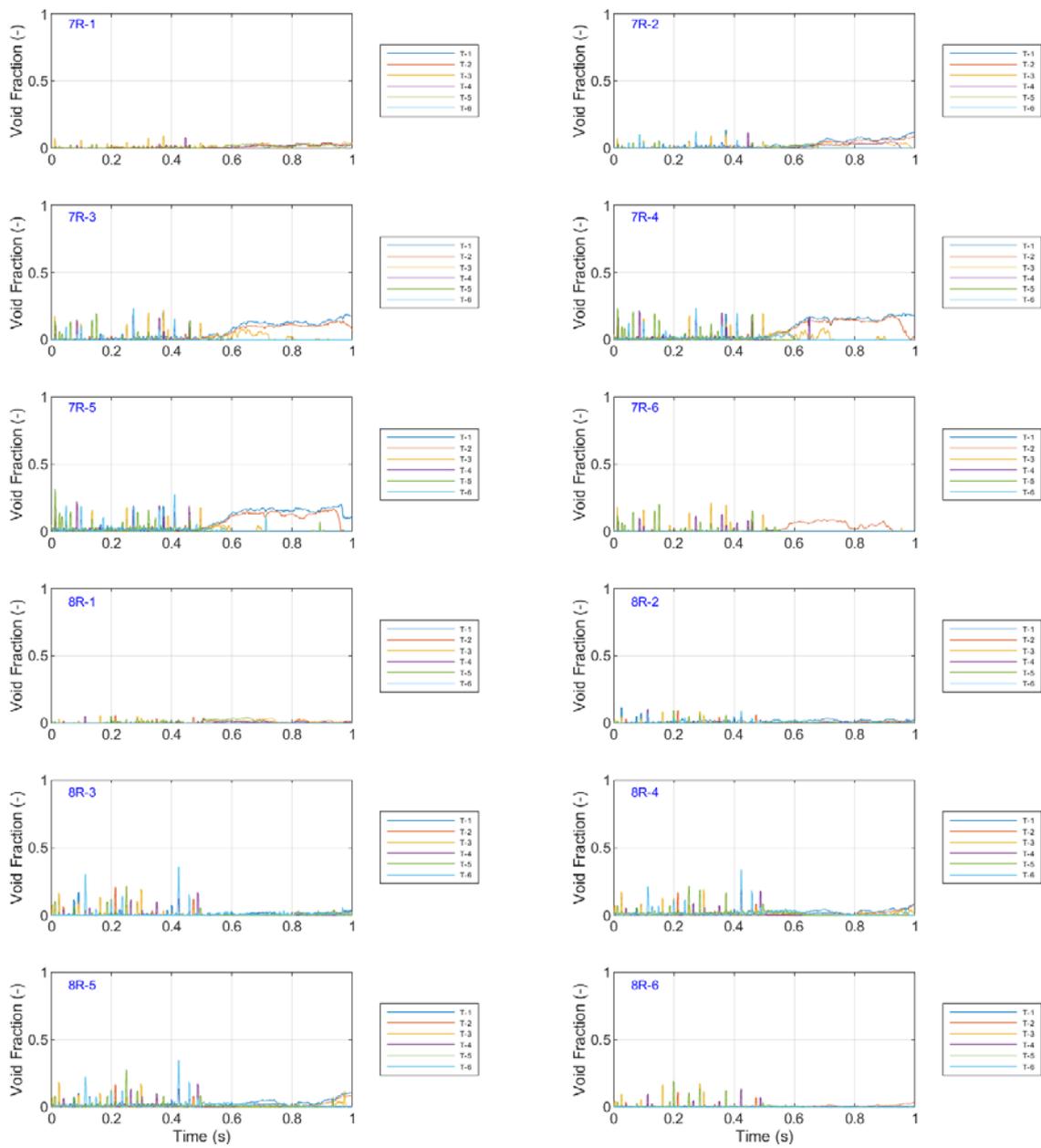


図 3.1-67 ボイド率の時間変化 (Run No.8/④)

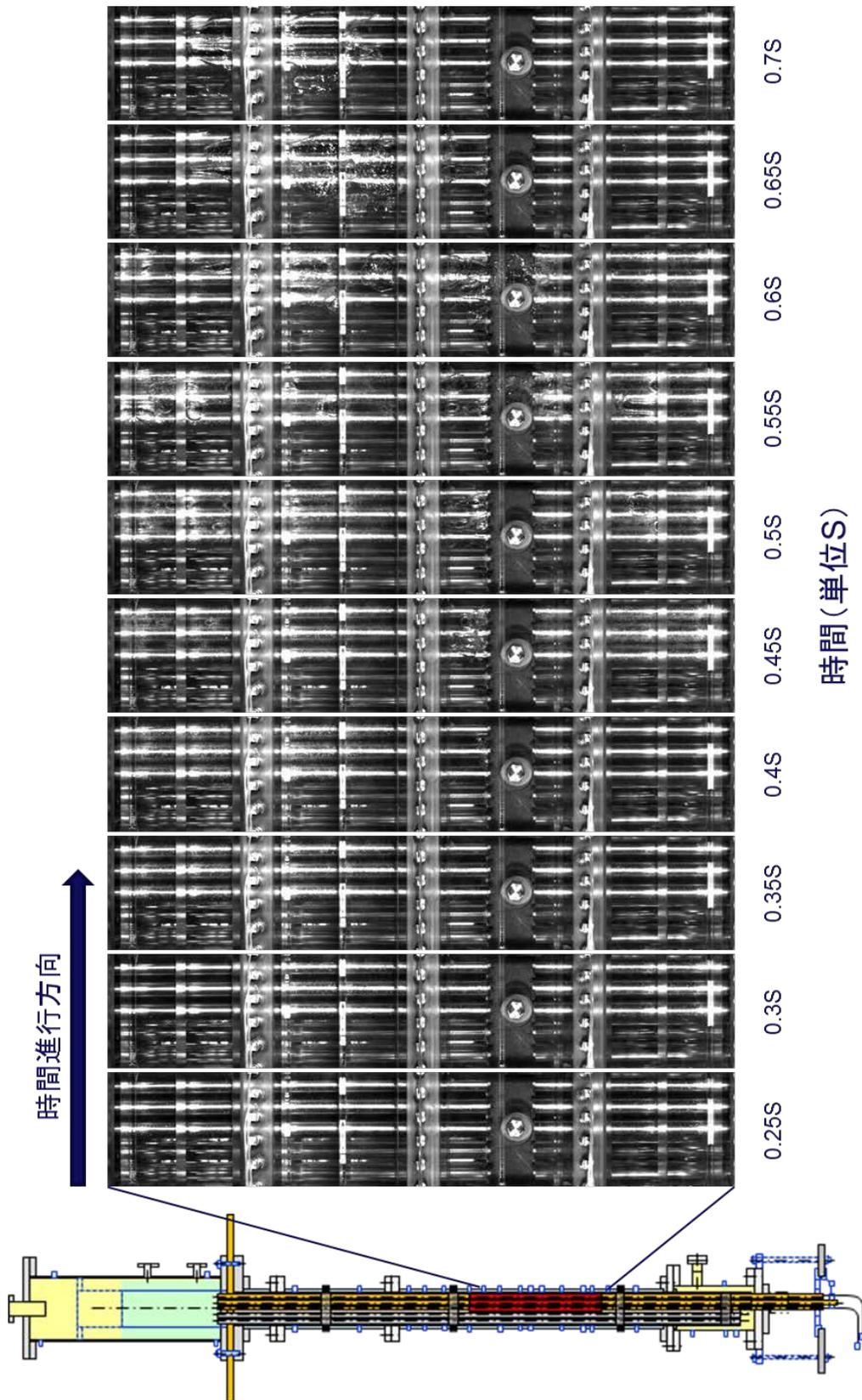


図 3.1-68 ボイド挙動の可視化画像 (Run No. 8)

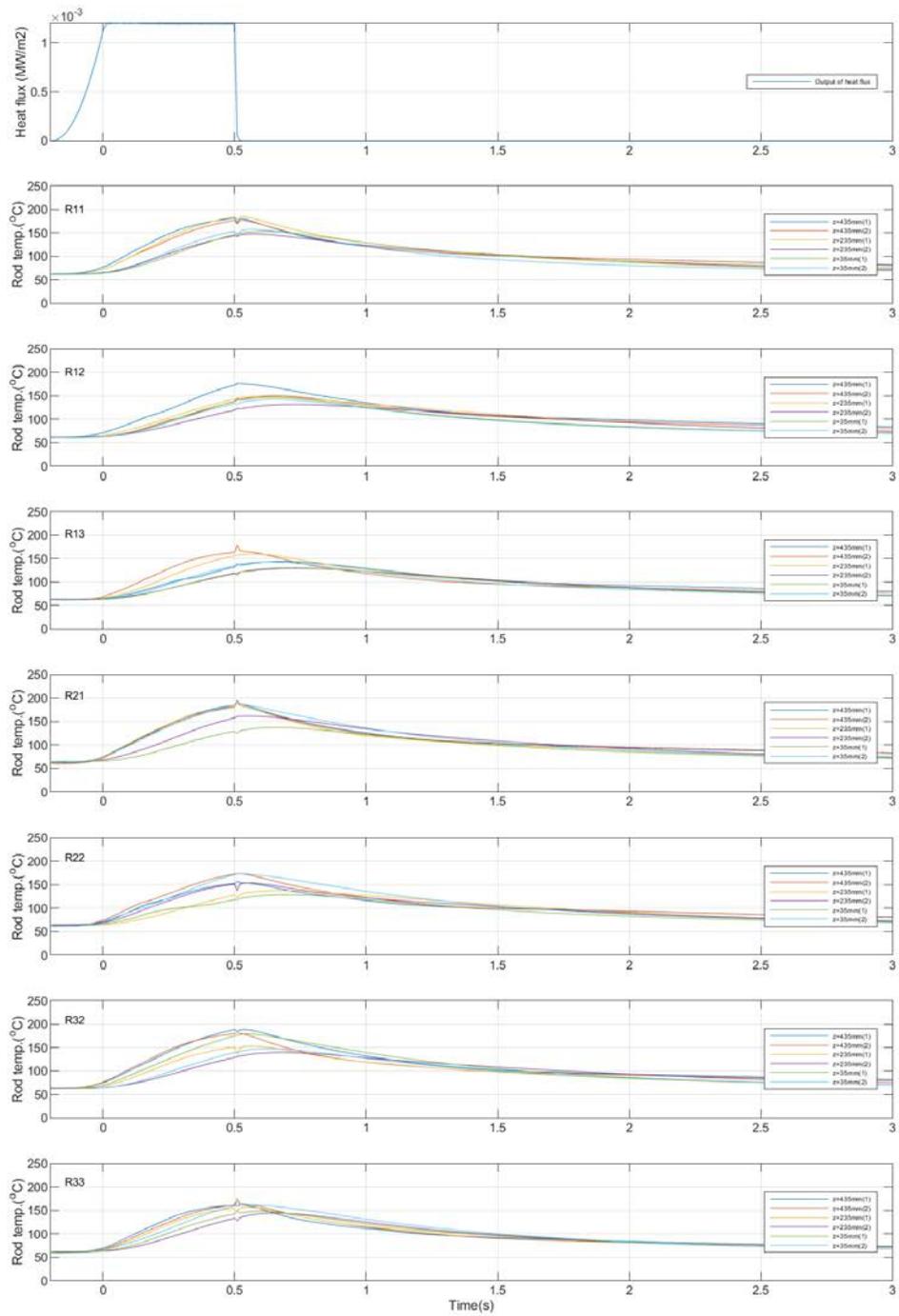


図 3.1-69 ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.9)

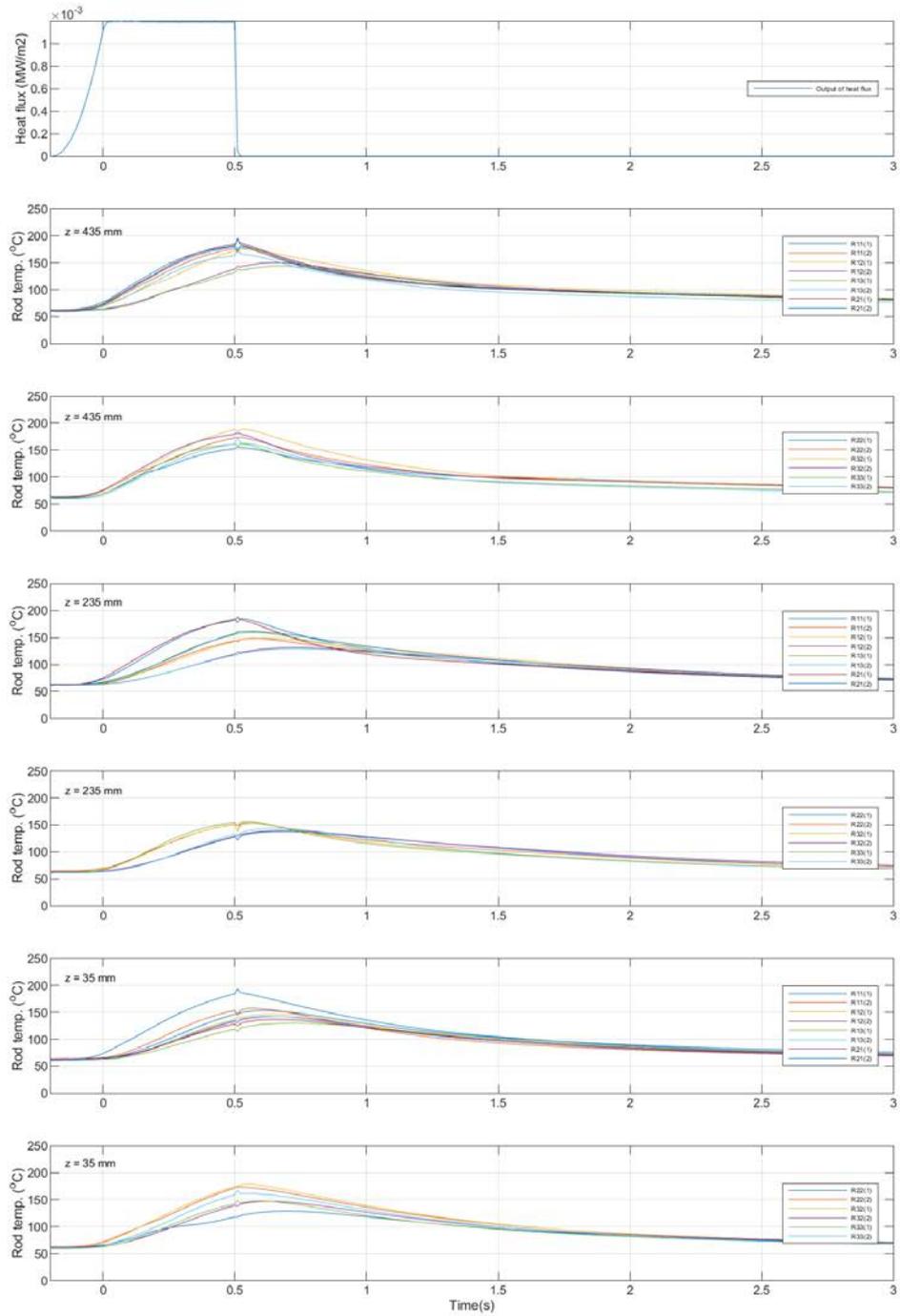


図 3.1-70 高さごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.9)

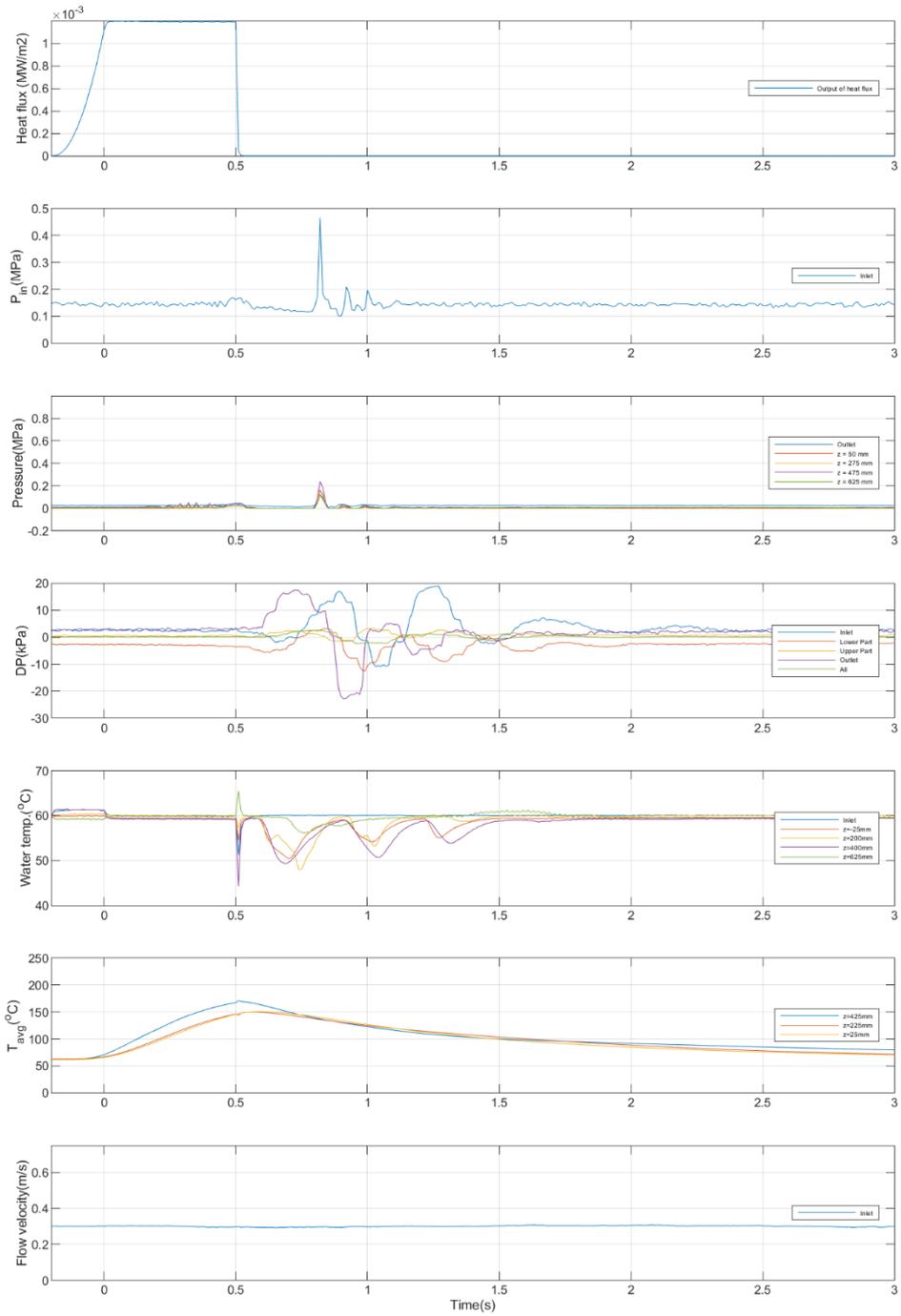


図 3.1-71 その他計測値の時間変化 (Run No.9)

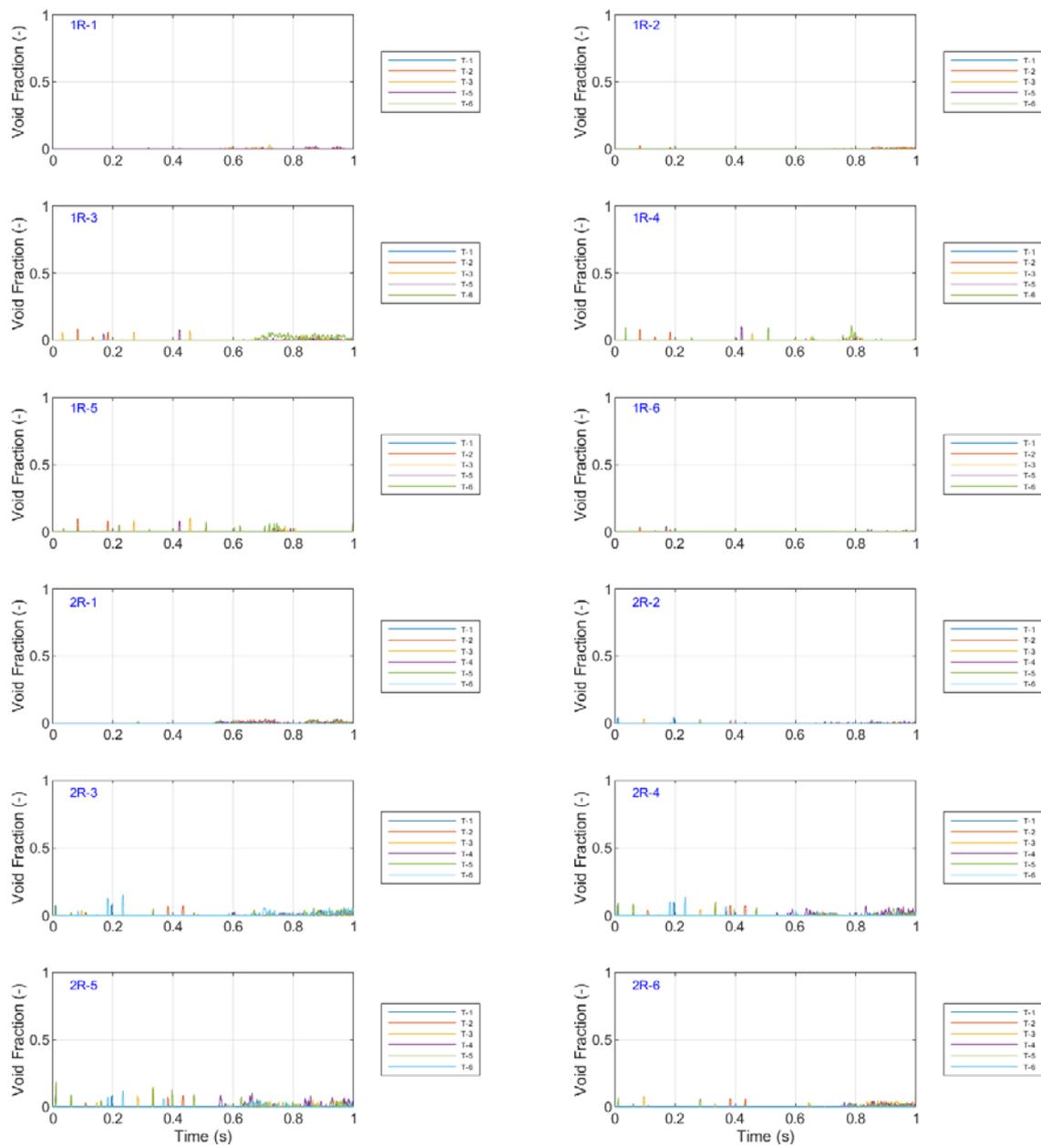


図 3.1-72 ボイド率の時間変化 (Run No.9/①)

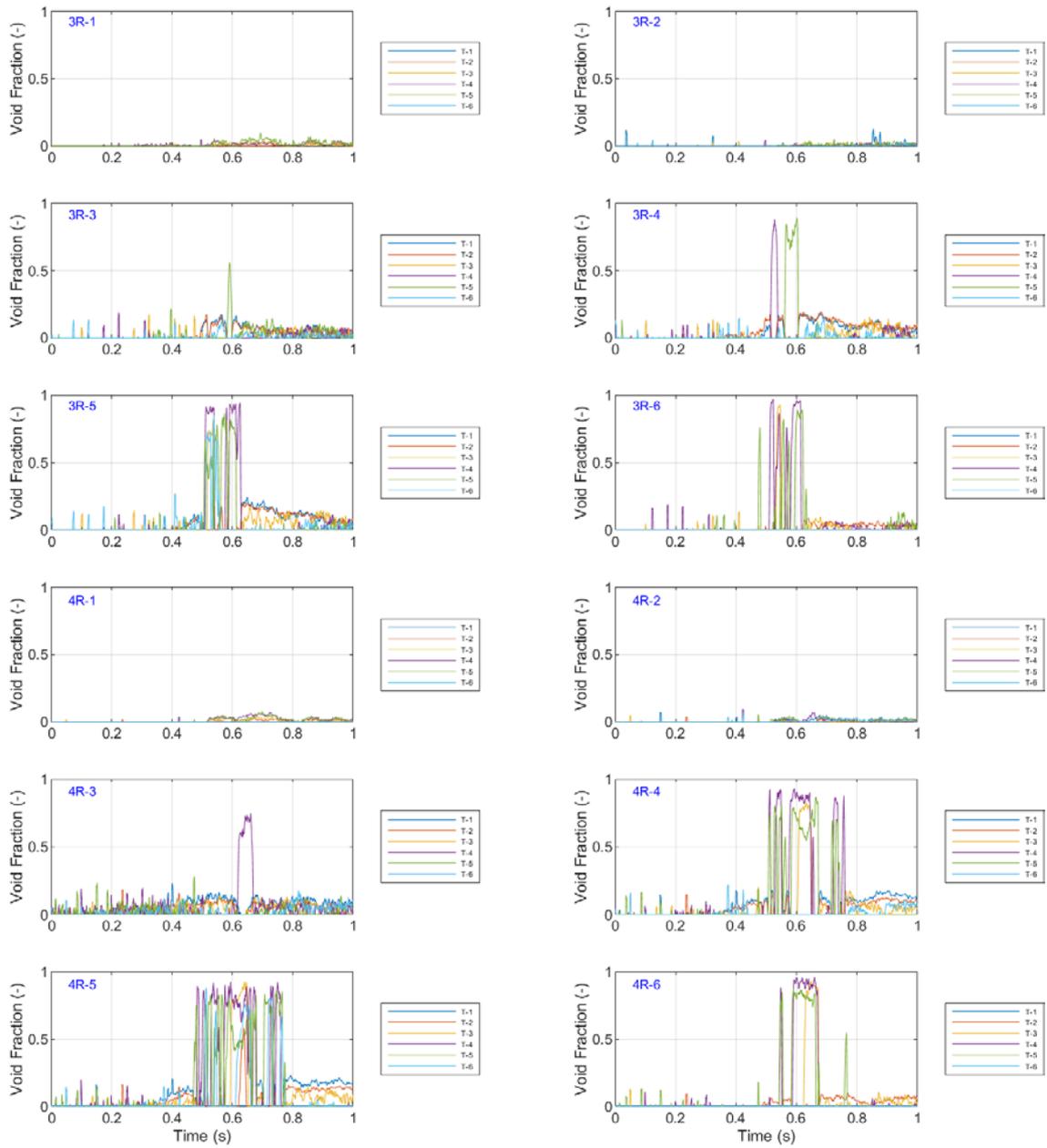


図 3.1-73 ボイド率の時間変化 (Run No.9②)

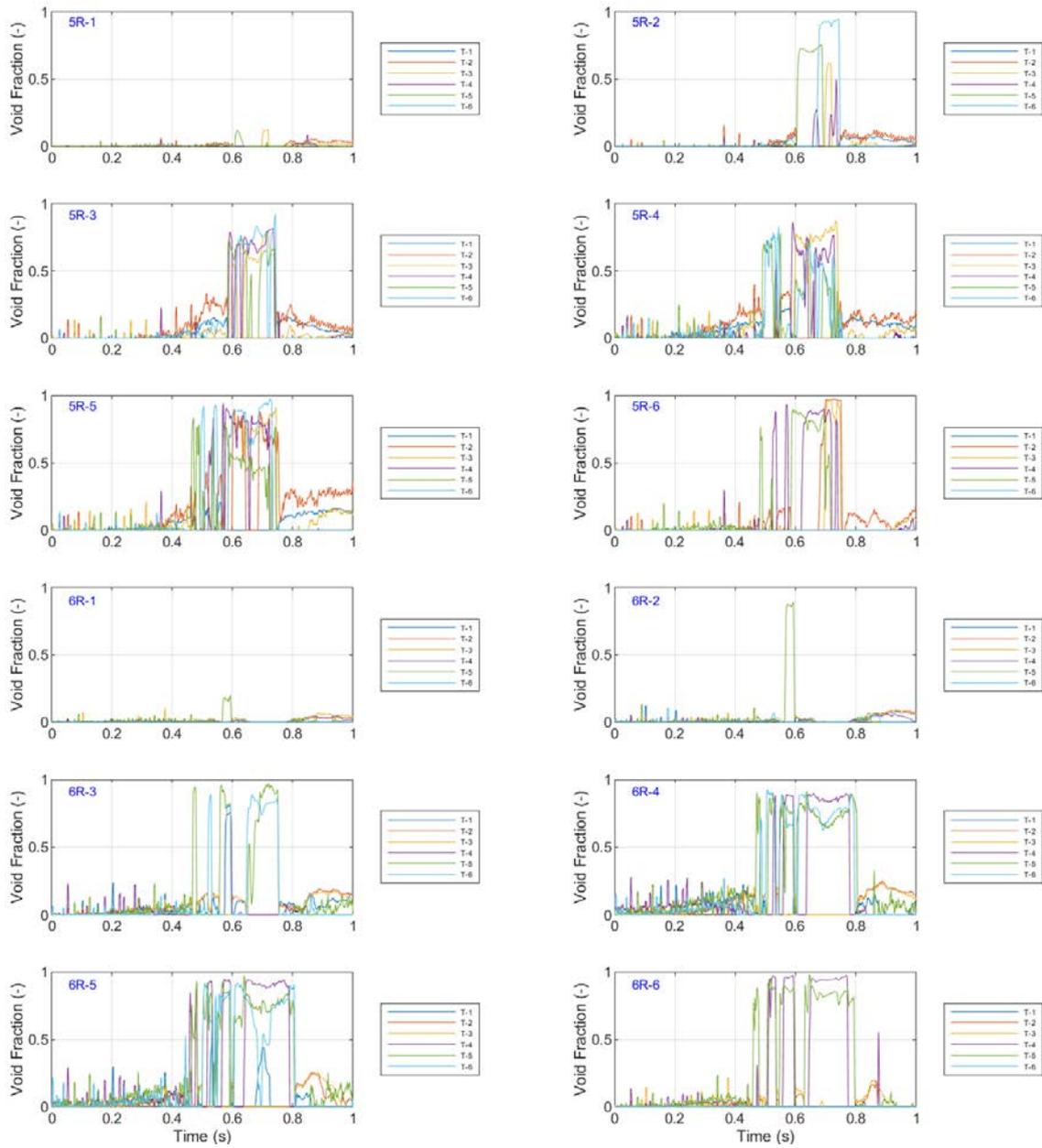


図 3.1-74 ボイド率の時間変化 (Run No.9)③

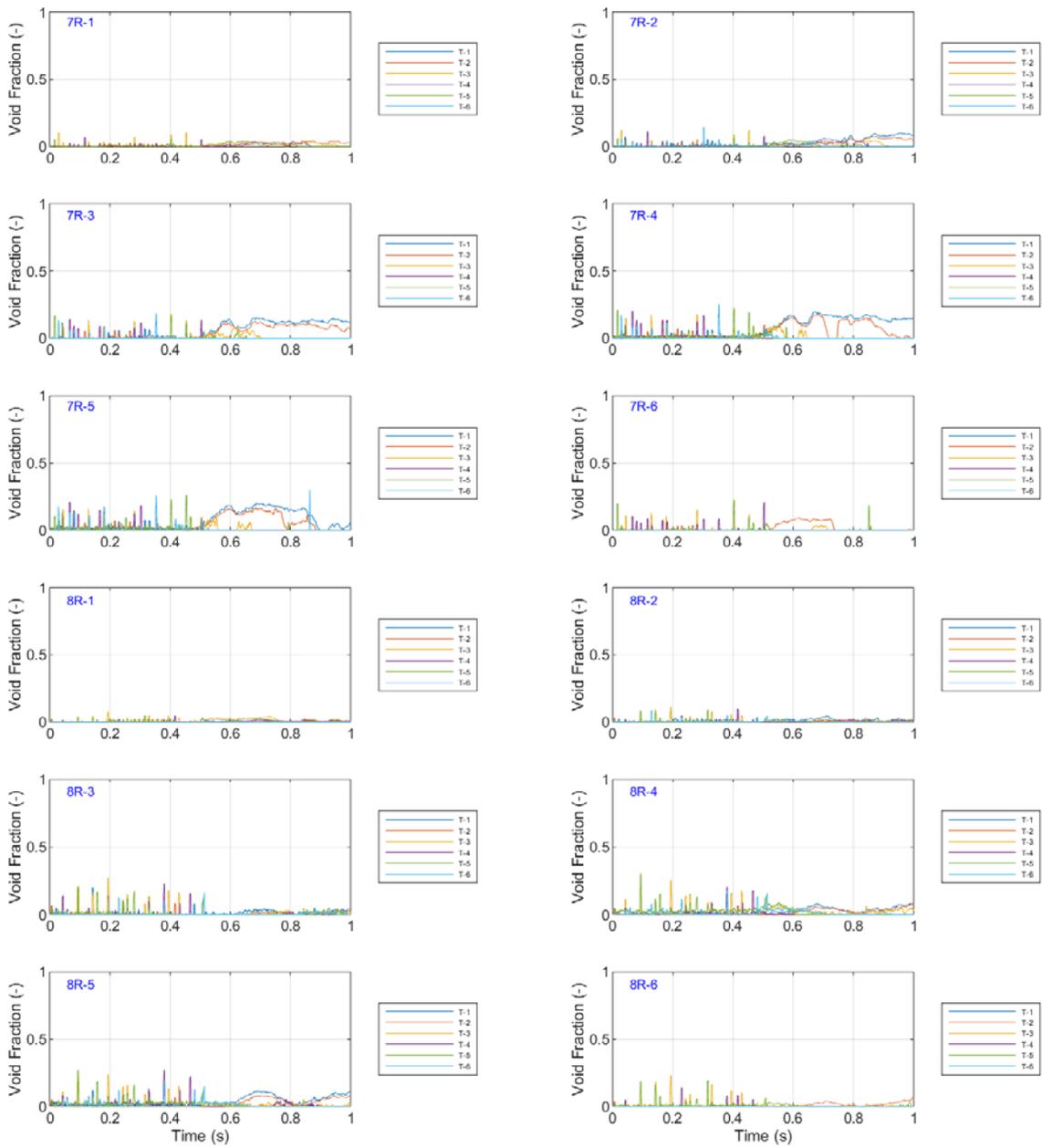


図 3.1-75 ボイド率の時間変化 (Run No.9)④

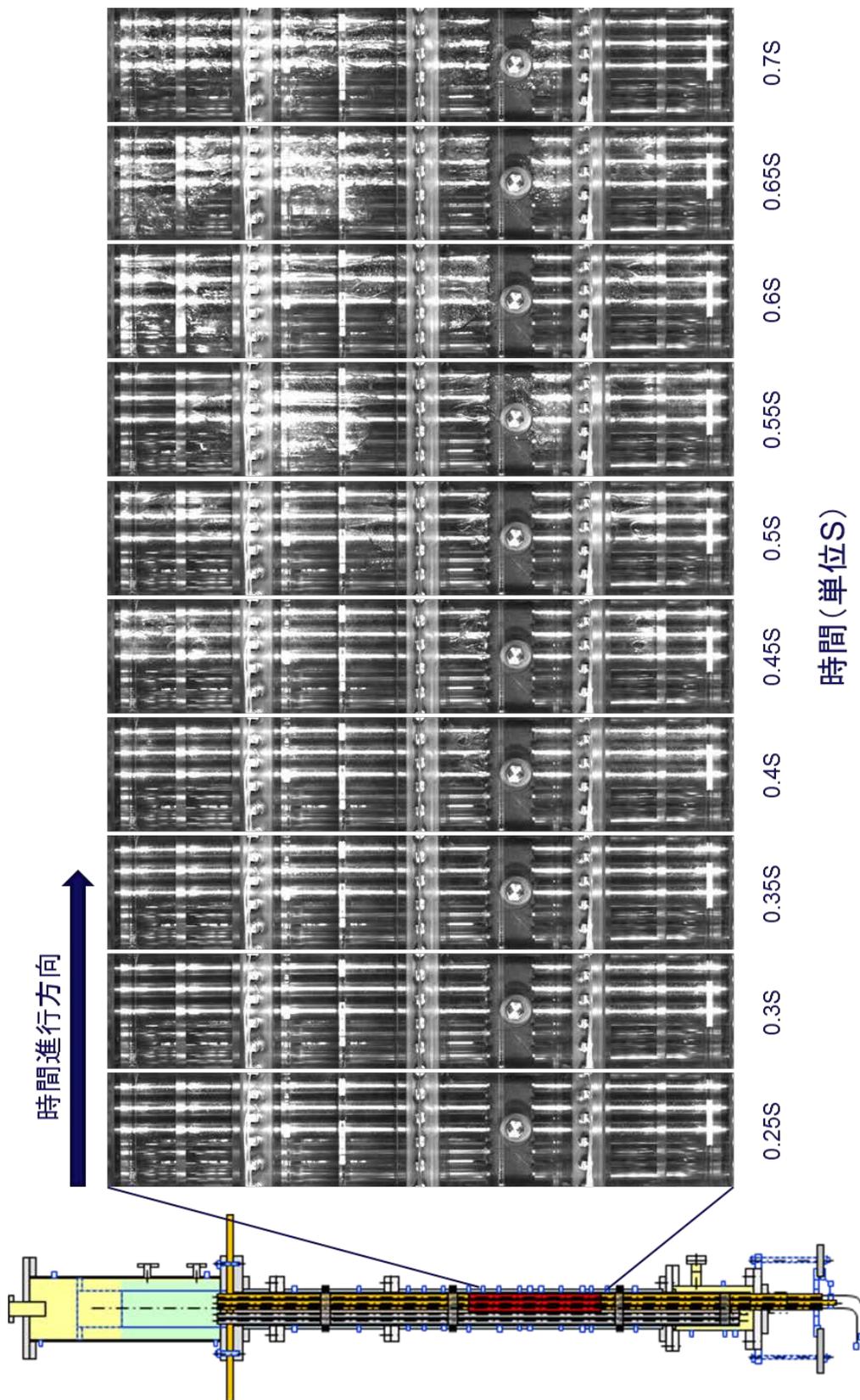


図 3.1-76 ポイド挙動の可視化画像 (Run No. 9)

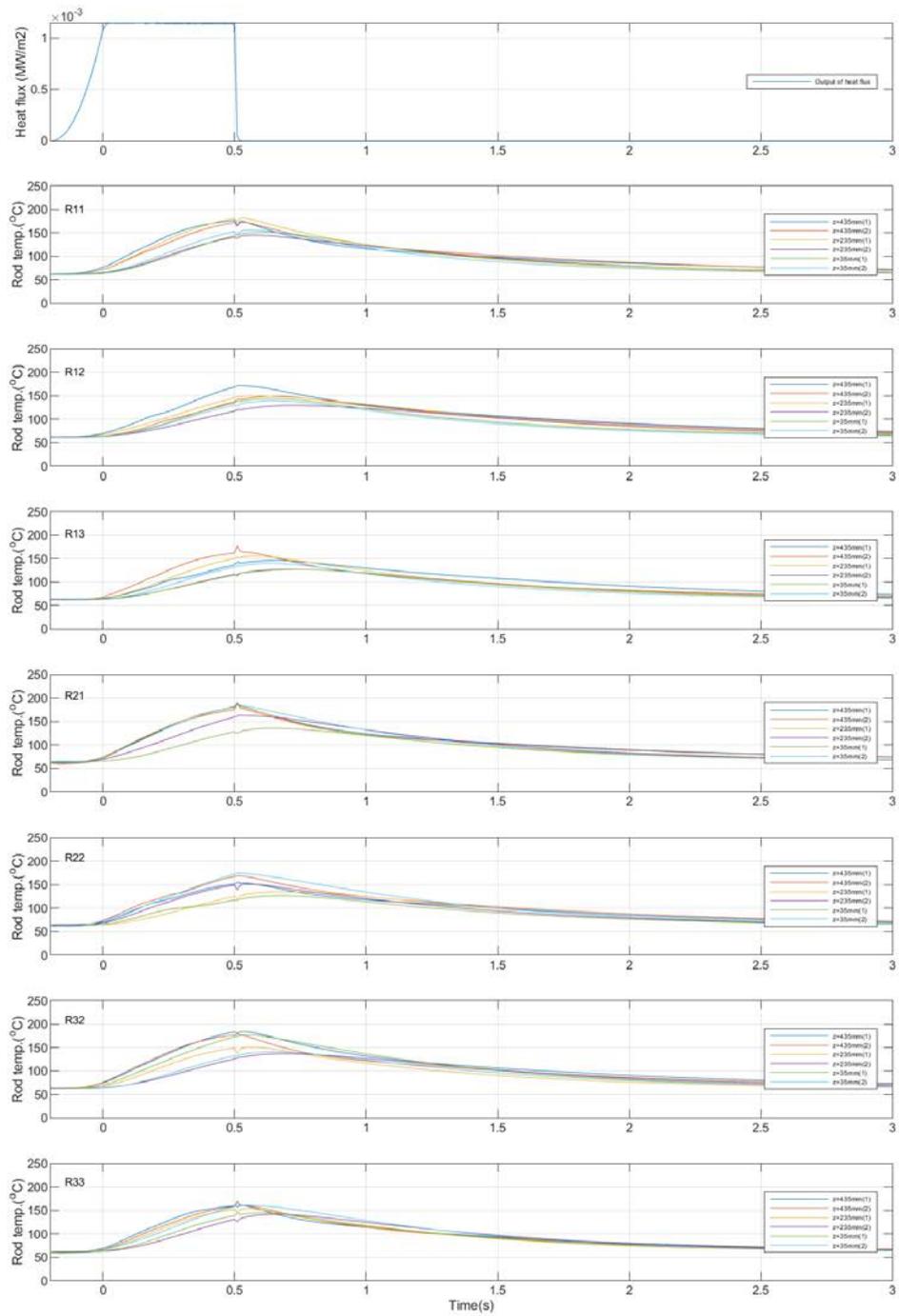


図 3.1-77 ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.10)

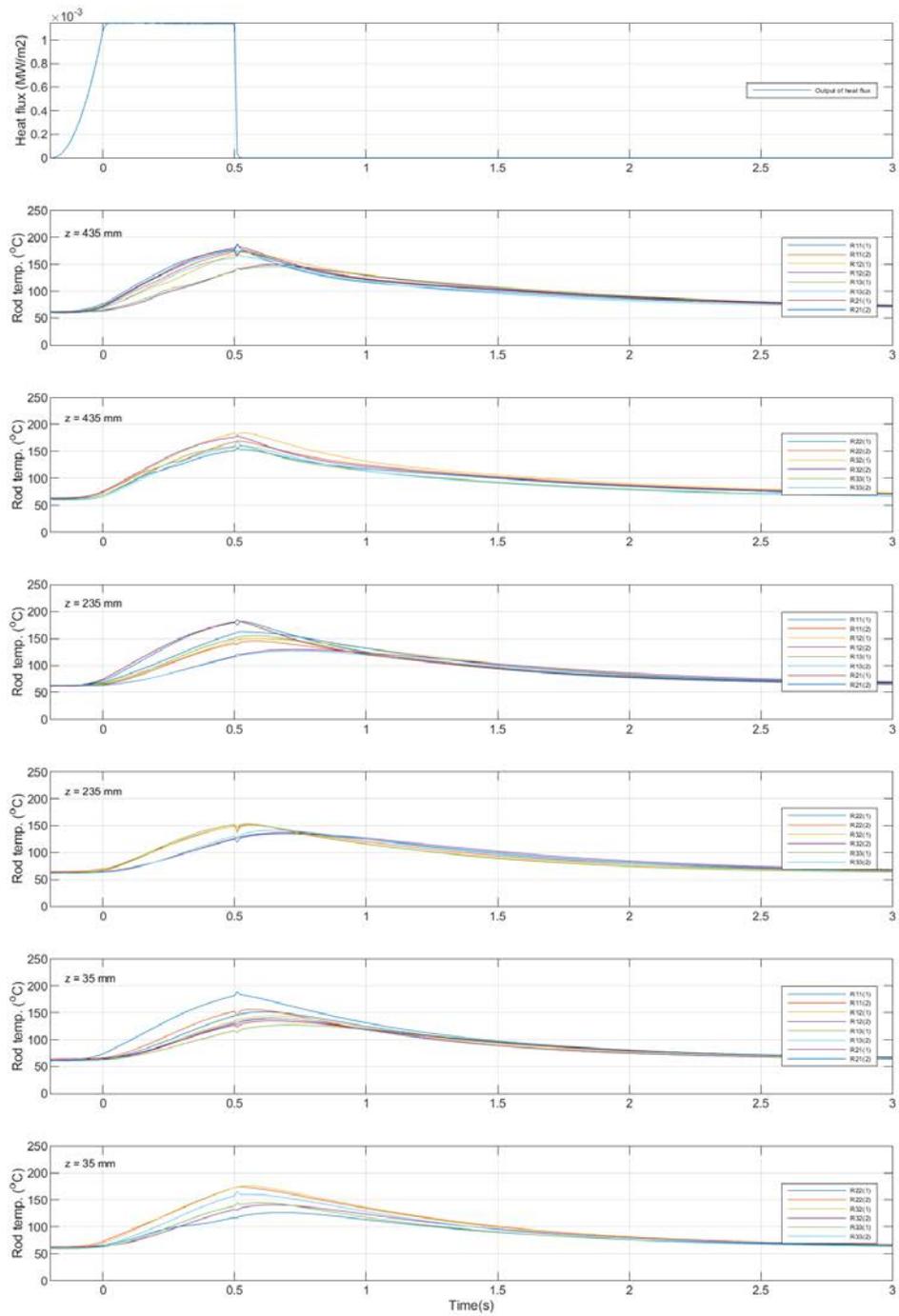


図 3.1-78 高さごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.10)

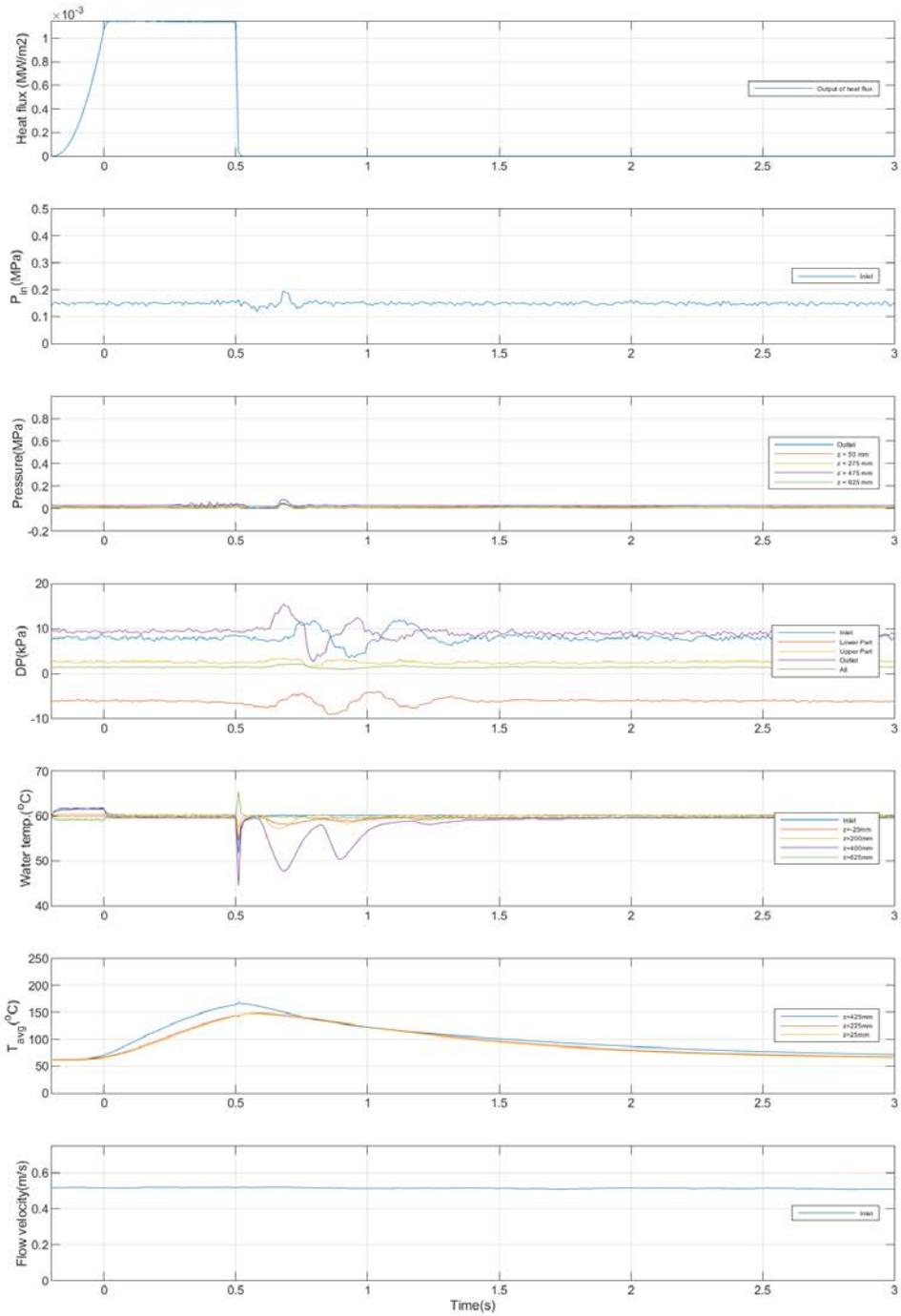


図 3.1-79 その他計測値の時間変化 (Run No.10)

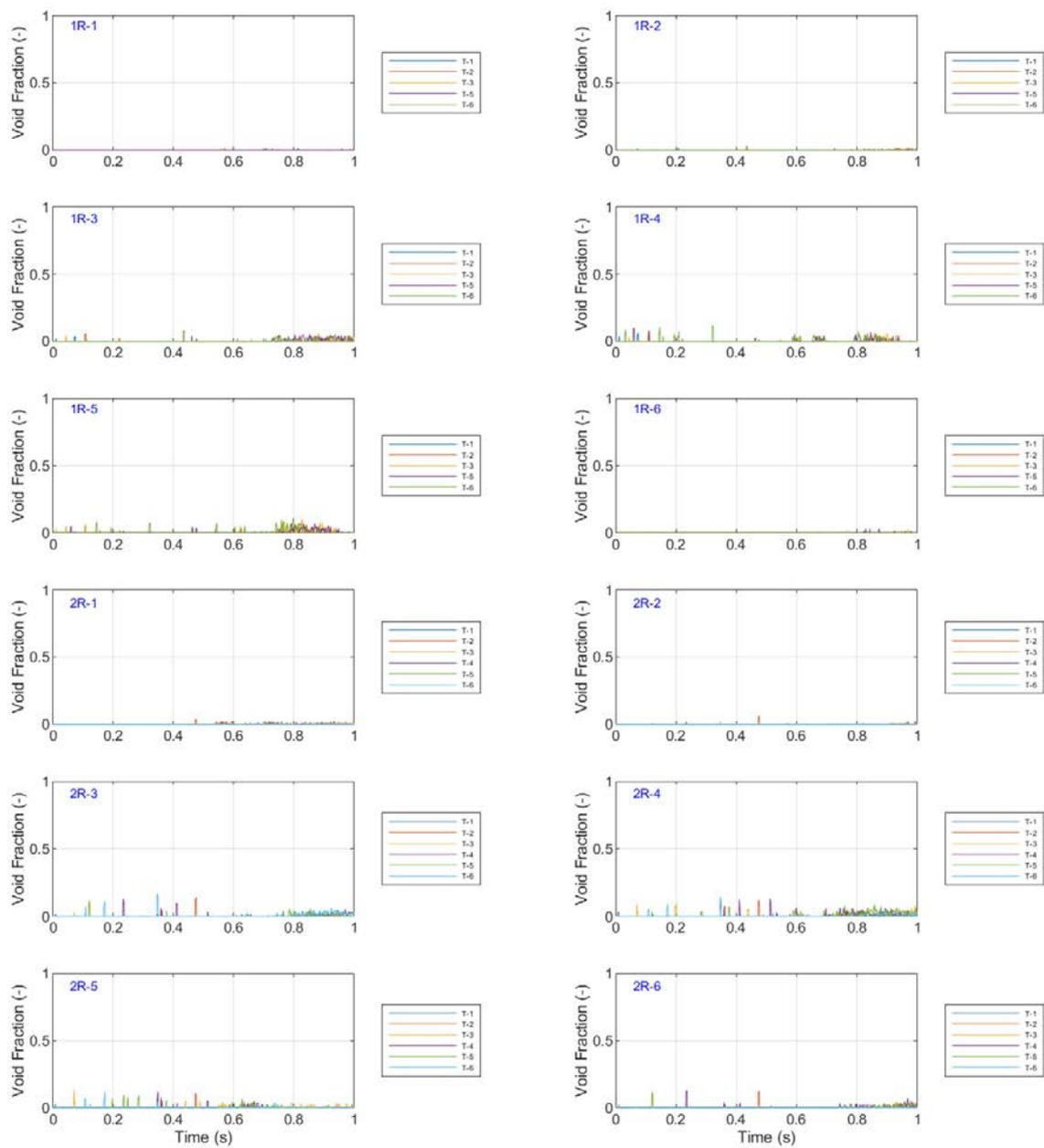


図 3.1-80 ポイド率の時間変化 (Run No.10①)

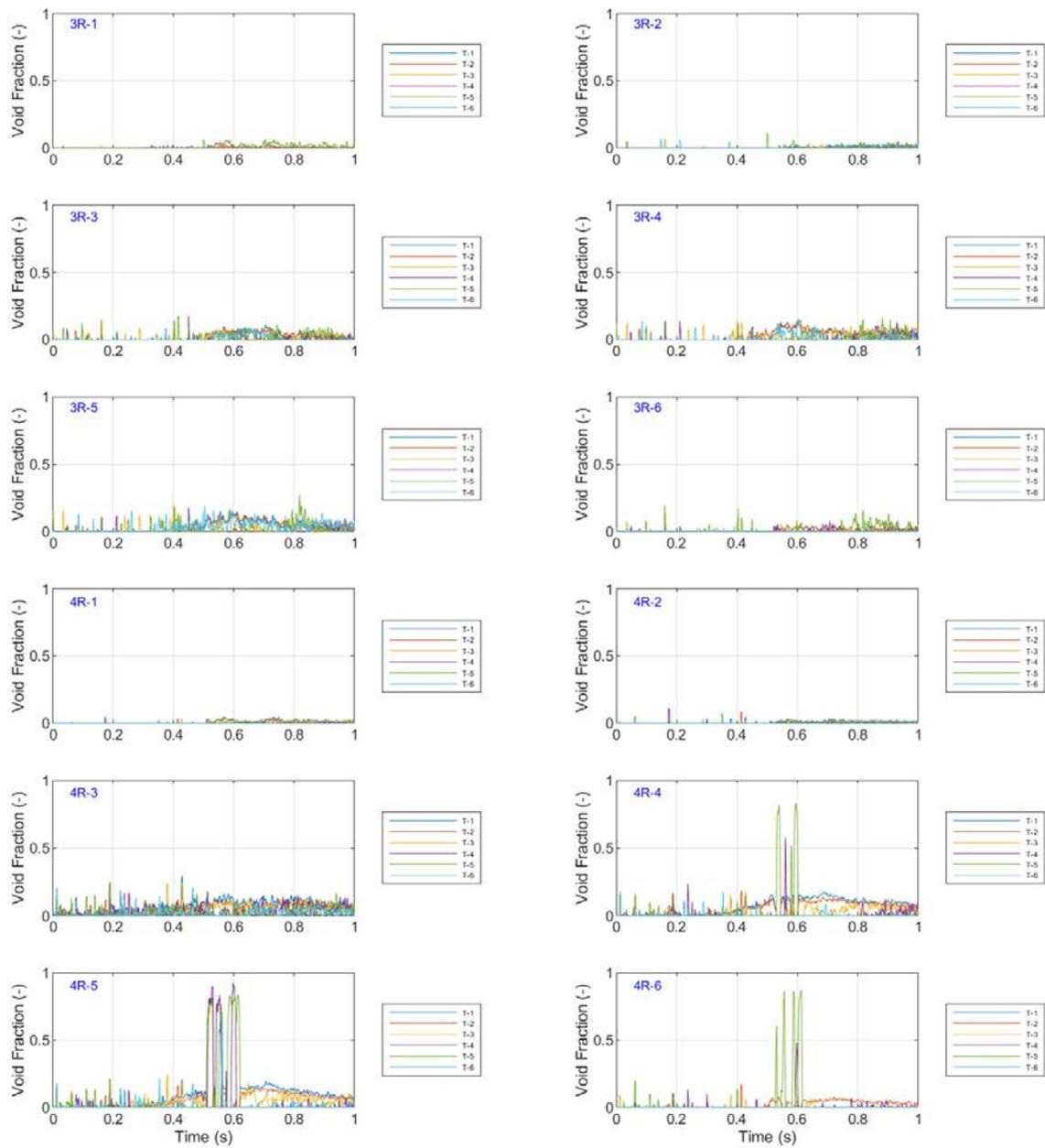


図 3.1-81 ボイド率の時間変化 (Run No.10②)

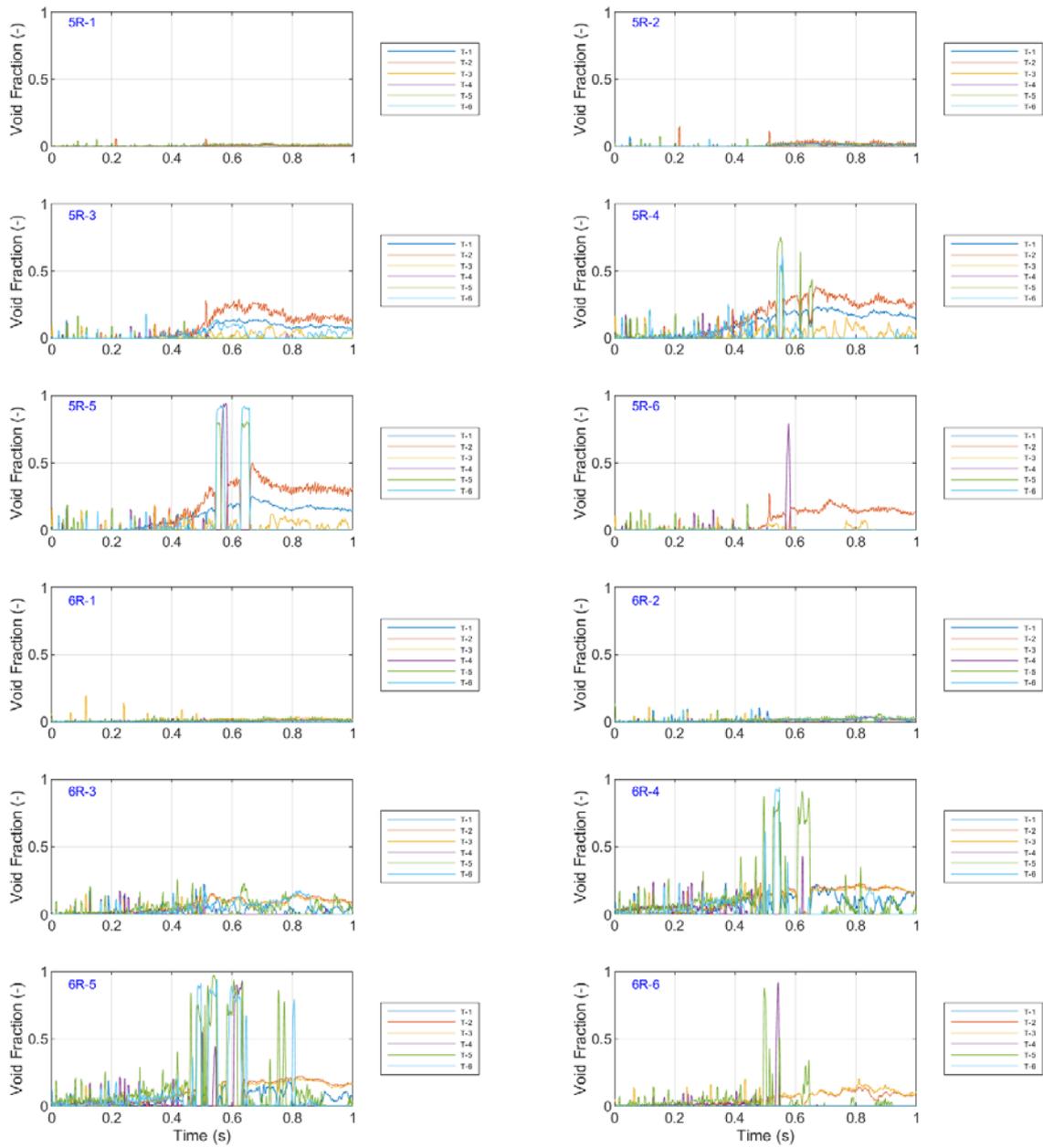


図 3.1-82 ポイド率の時間変化 (Run No.10③)

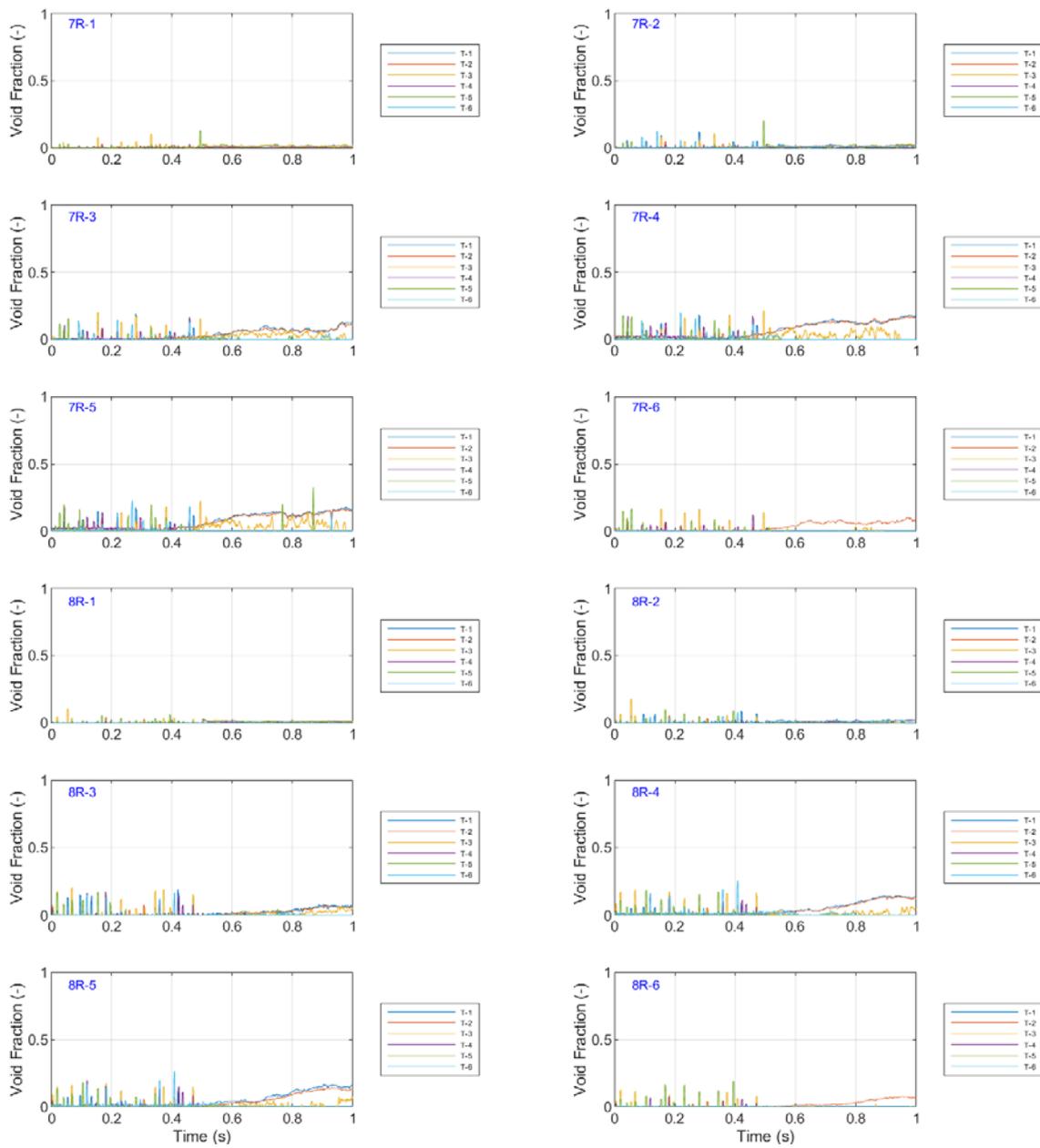


図 3.1-83 ボイド率の時間変化 (Run No.10④)

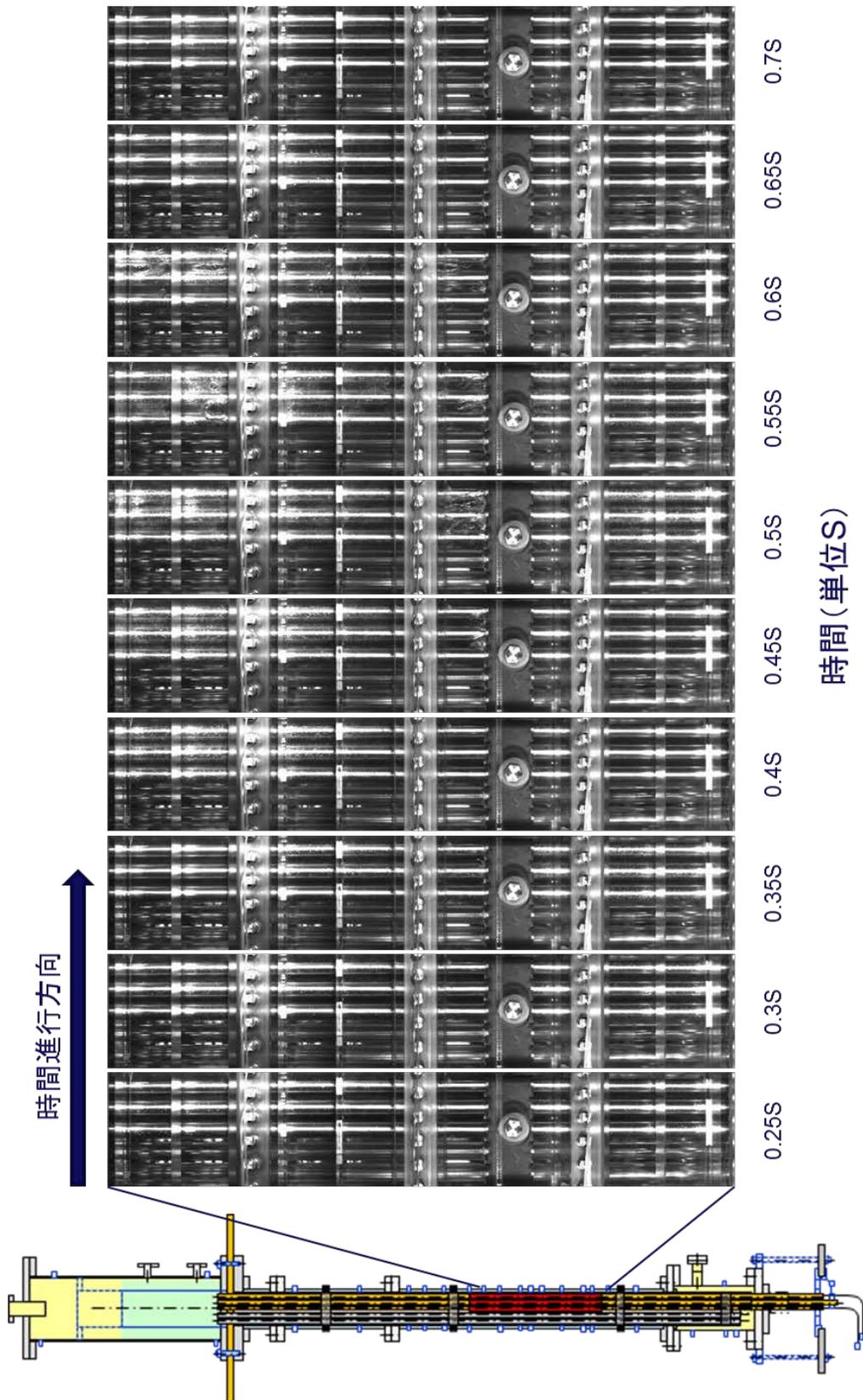


図 3.1-84 ポイド挙動の可視化画像 (Run No. 10)

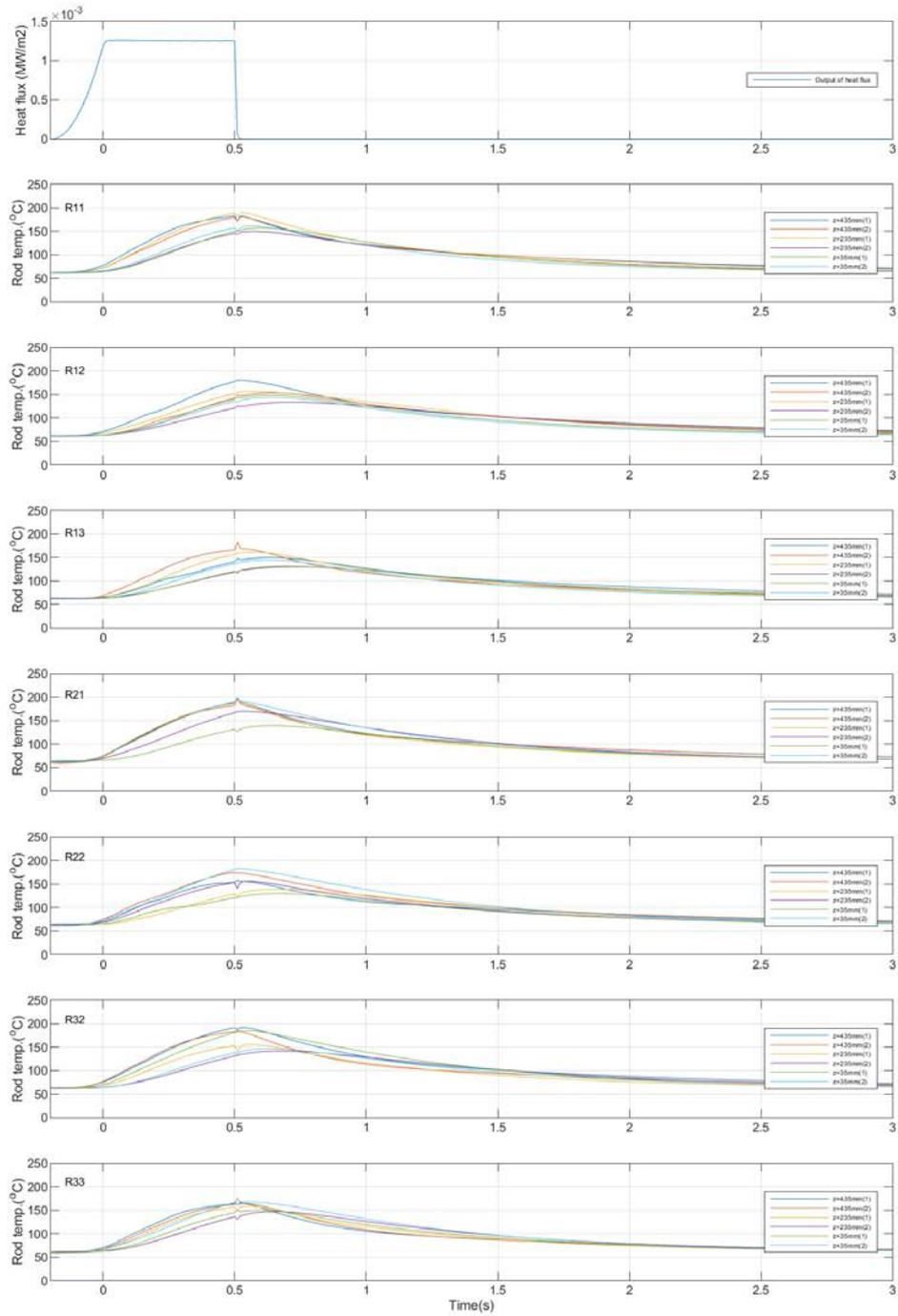


図 3.1-85 ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.11)

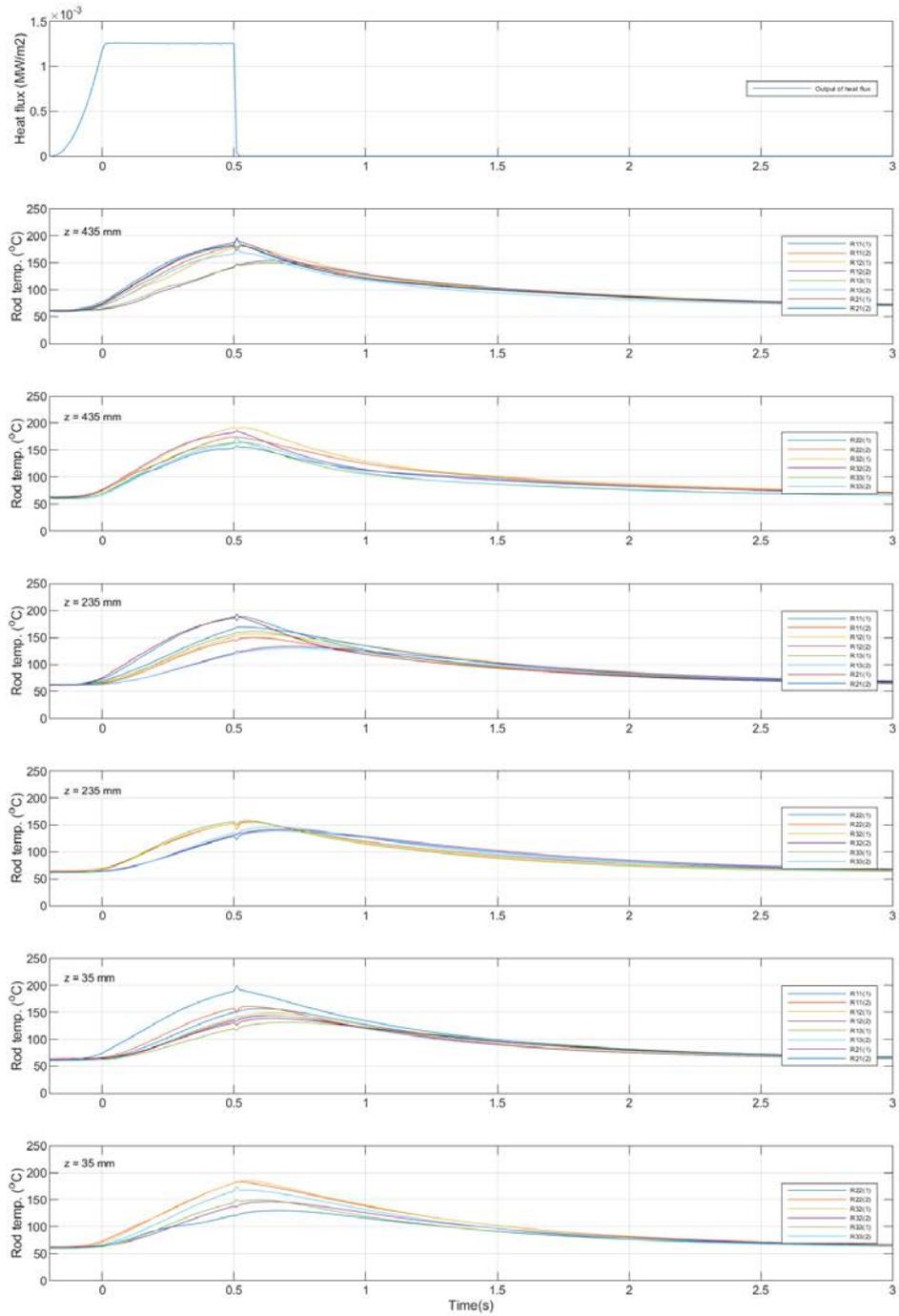


図 3.1-86 高さごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.11)

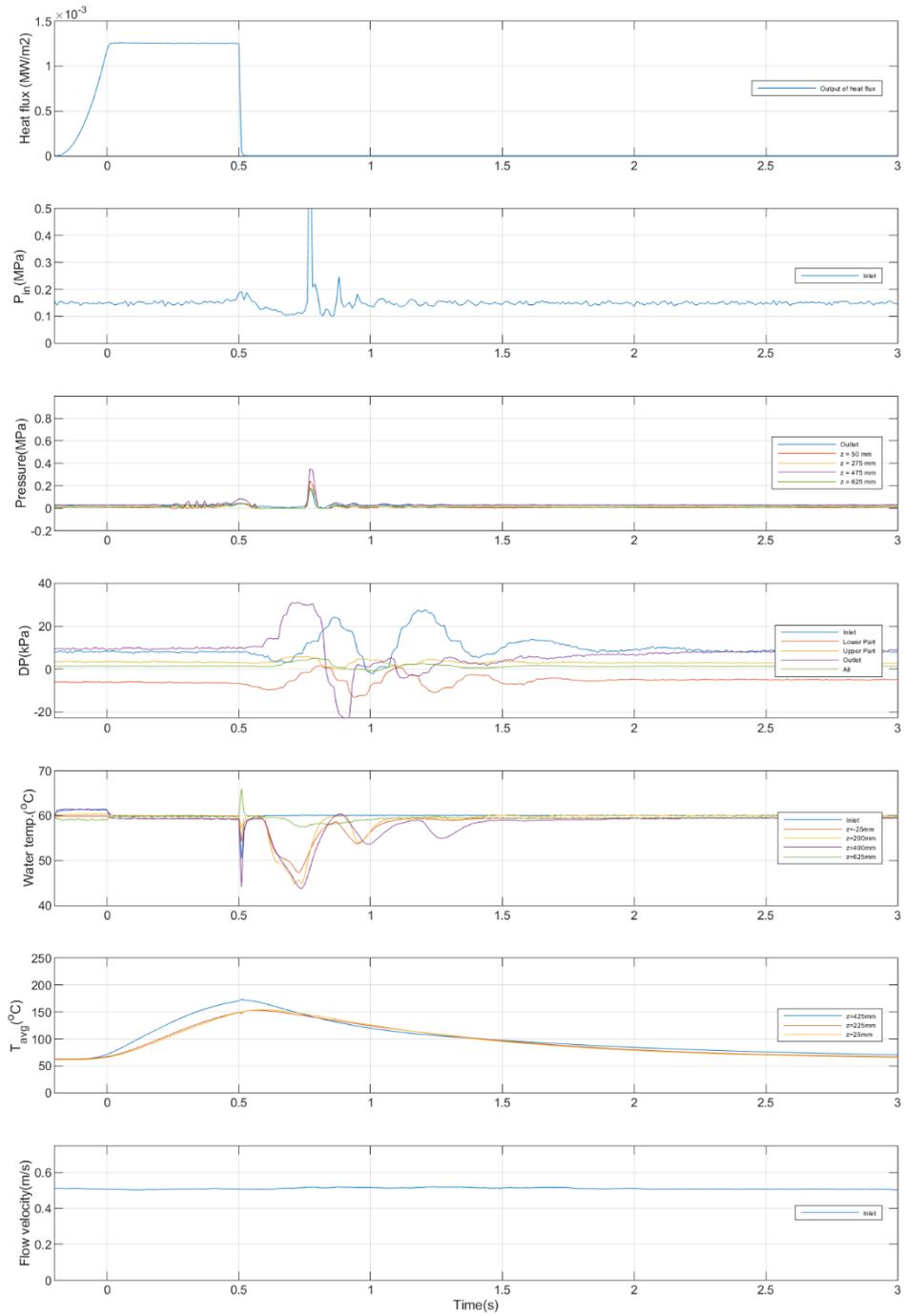


図 3.1-87 その他計測値の時間変化 (Run No.11)

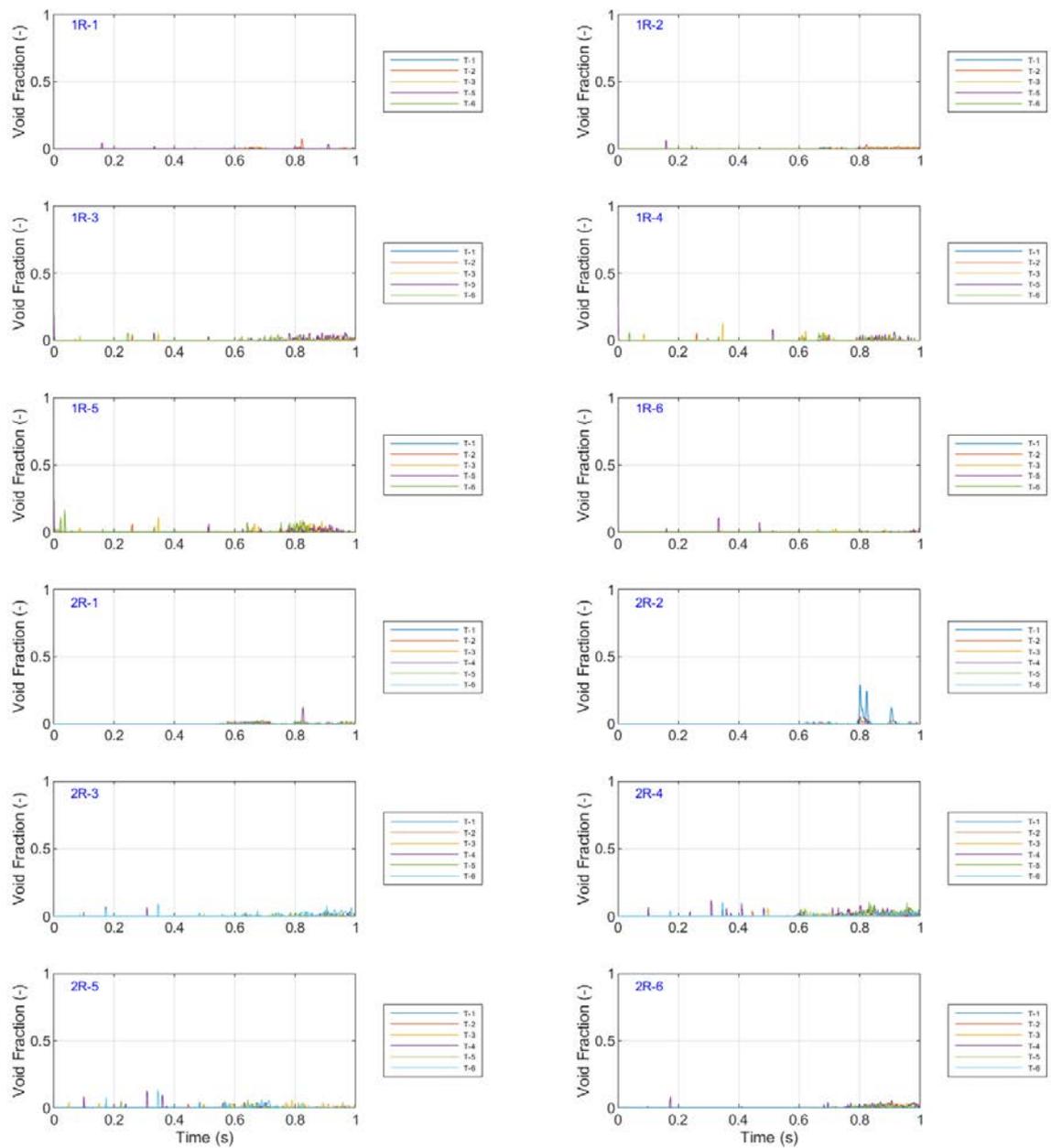


図 3.1-88 ボイド率の時間変化 (Run No.11/①)

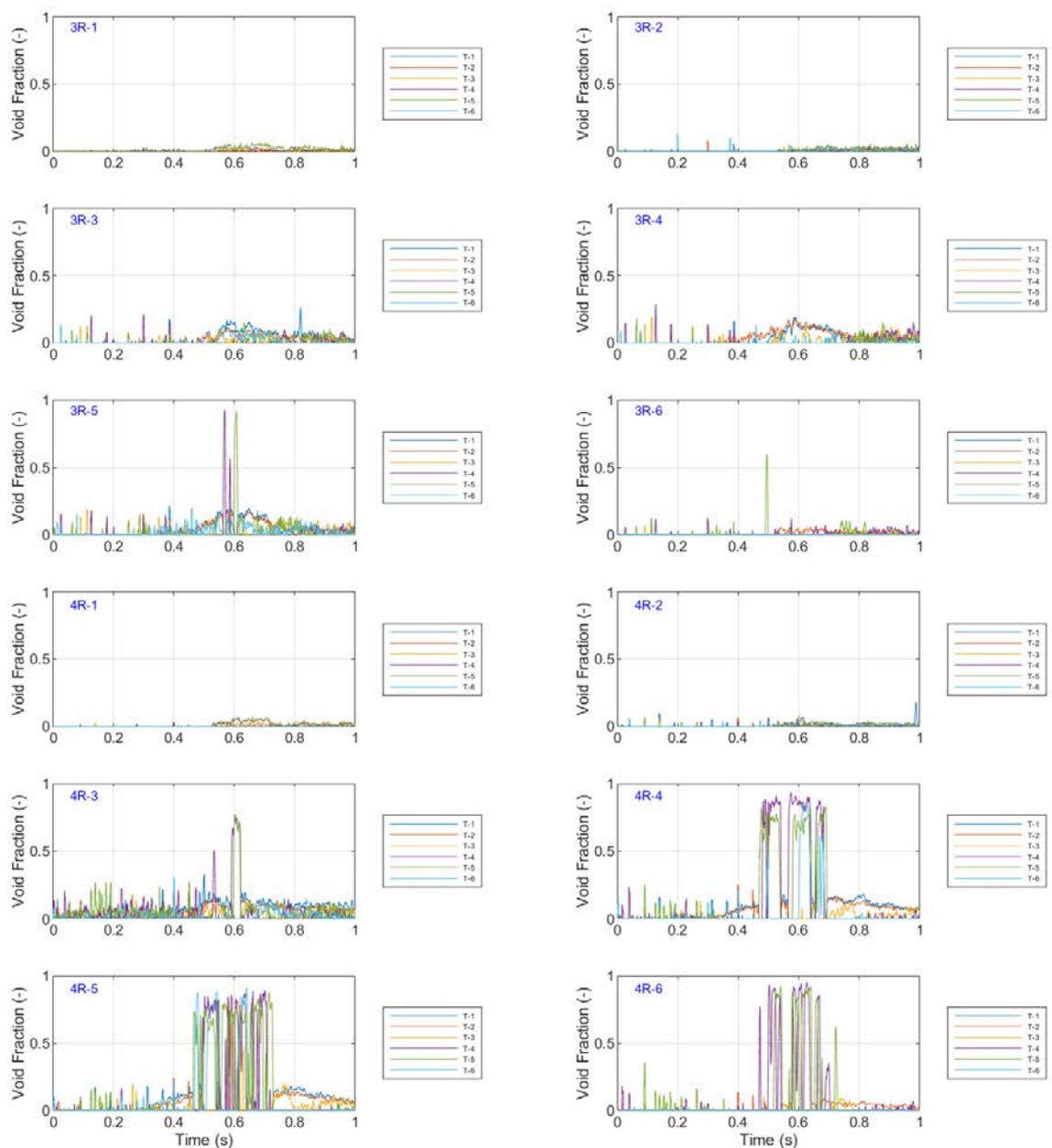


図 3.1-89 ポイド率の時間変化 (Run No.11/②)

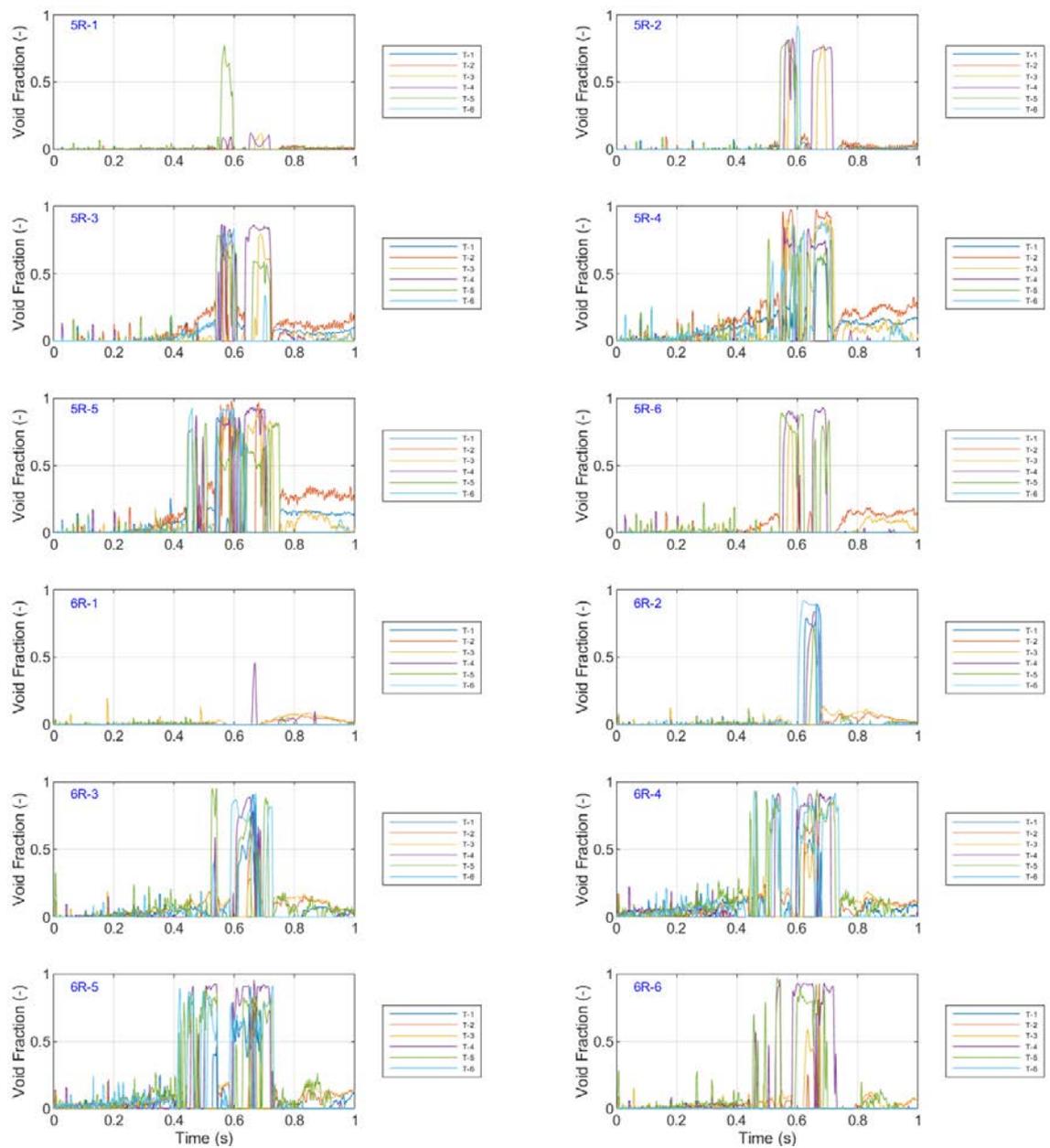


図 3.1-90 ボイド率の時間変化 (Run No.11/③)

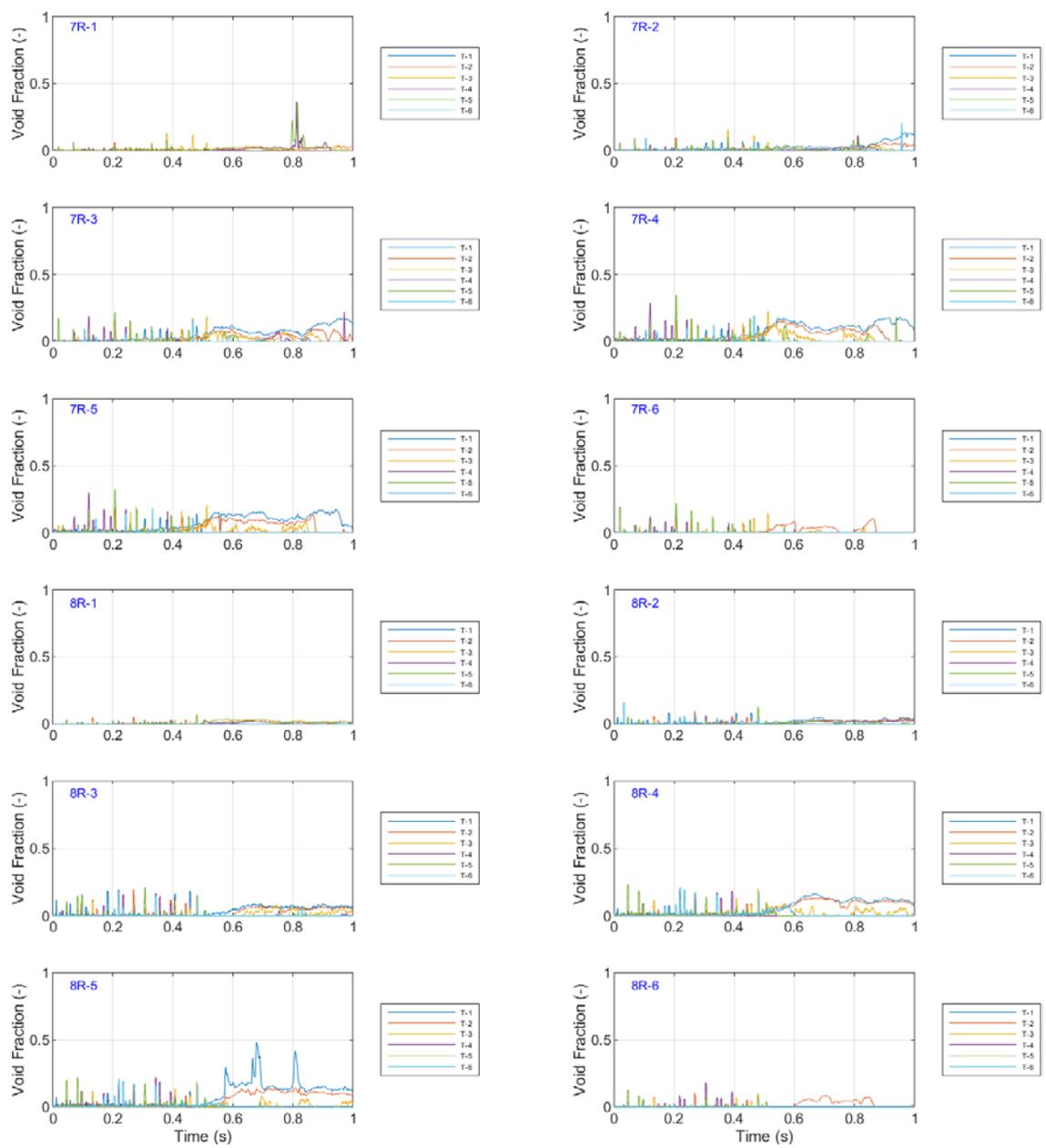


図 3.1-91 ボイド率の時間変化 (Run No.11/④)

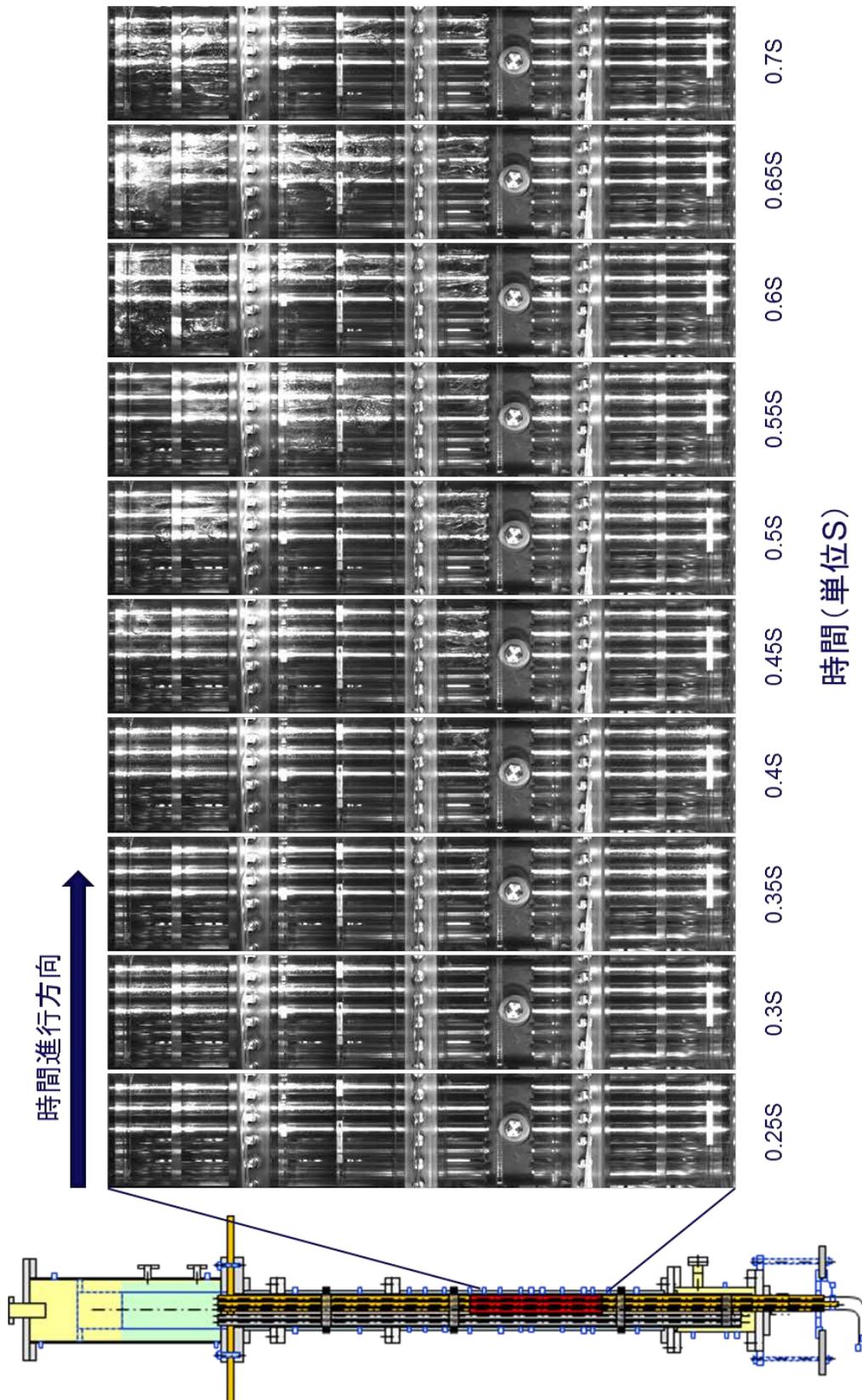


図 3.1-92 ポイド挙動の可視化画像 (Run No.11)

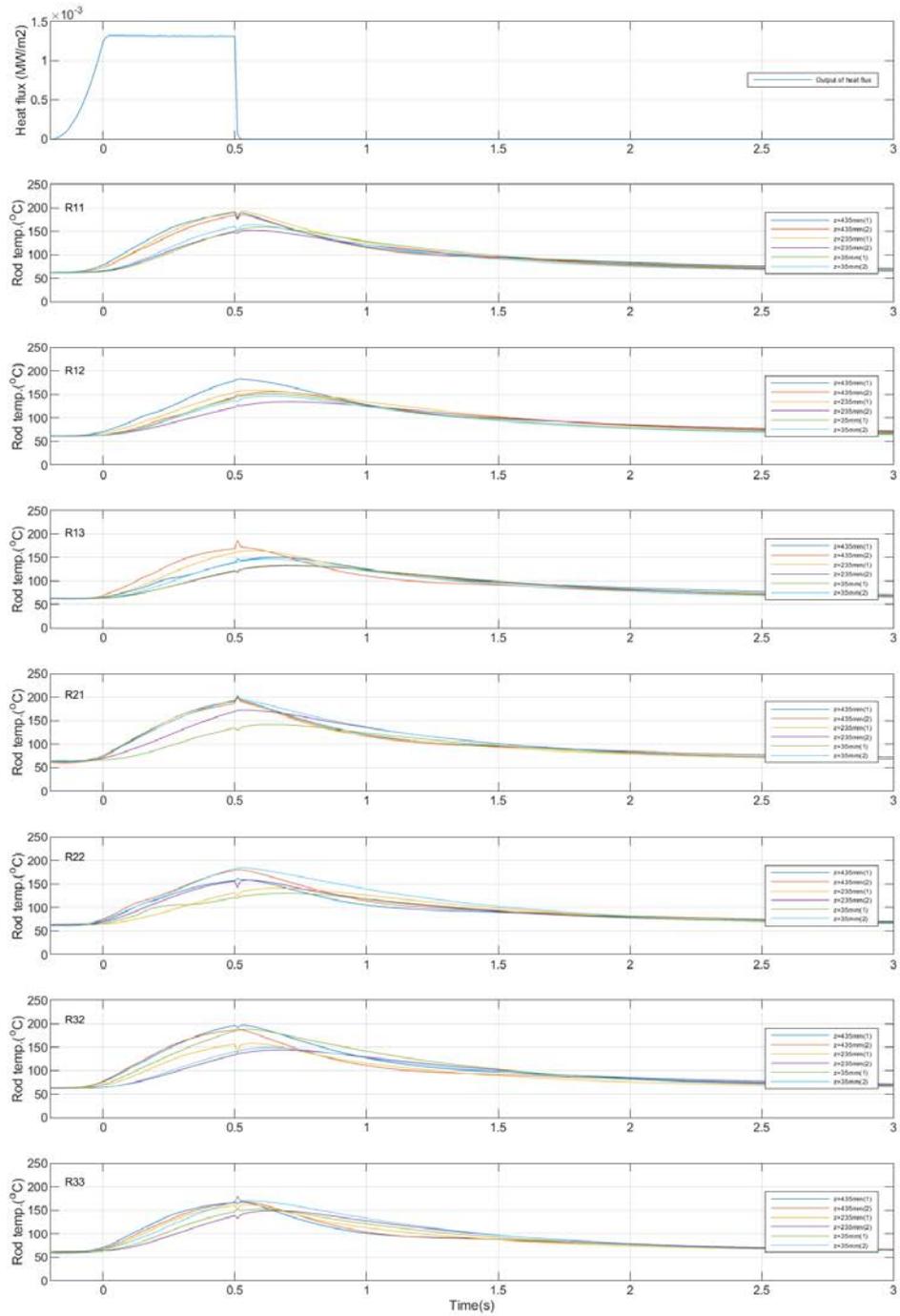


図 3.1-93 ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.12)

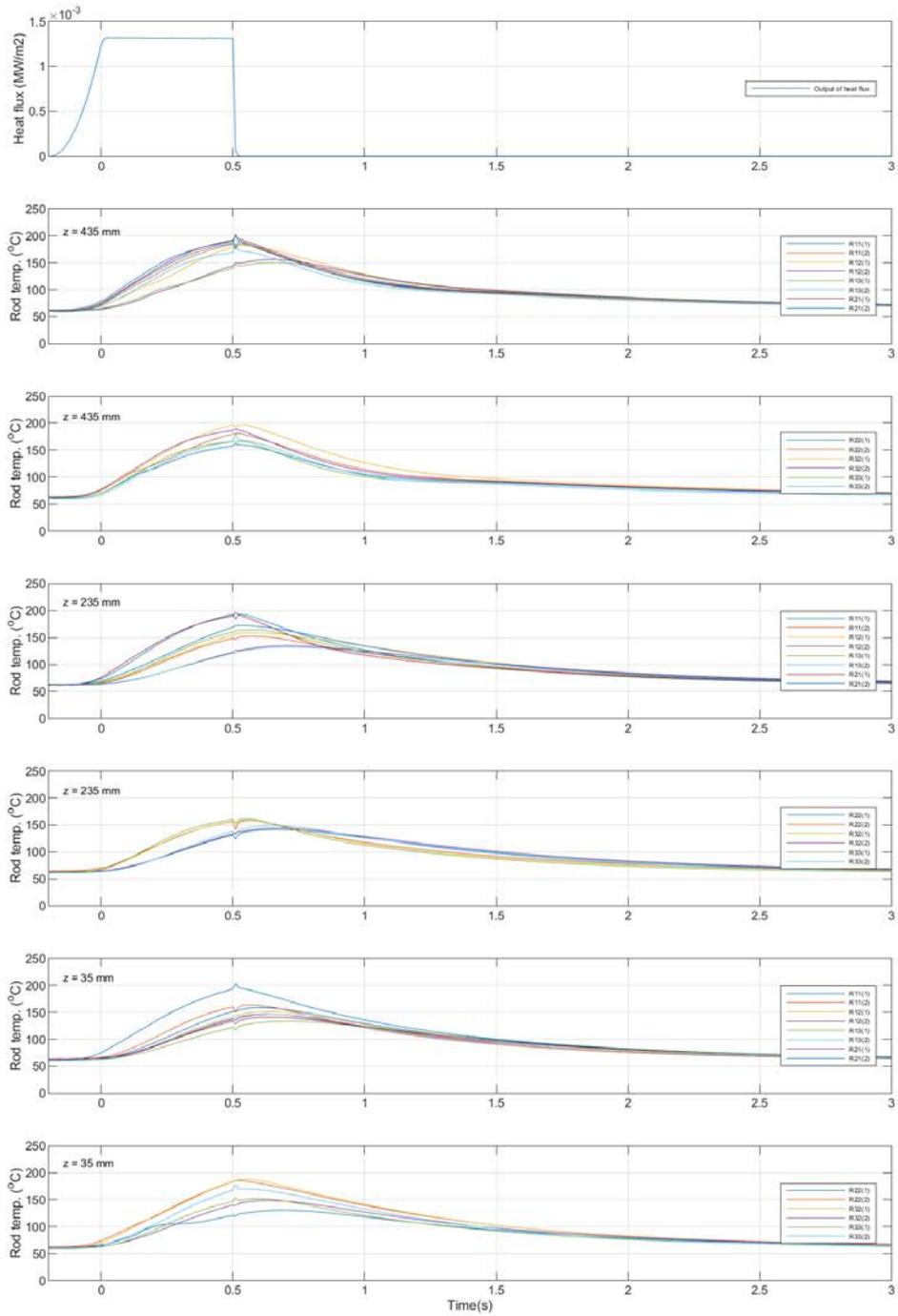


図 3.1-94 高さごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.12)

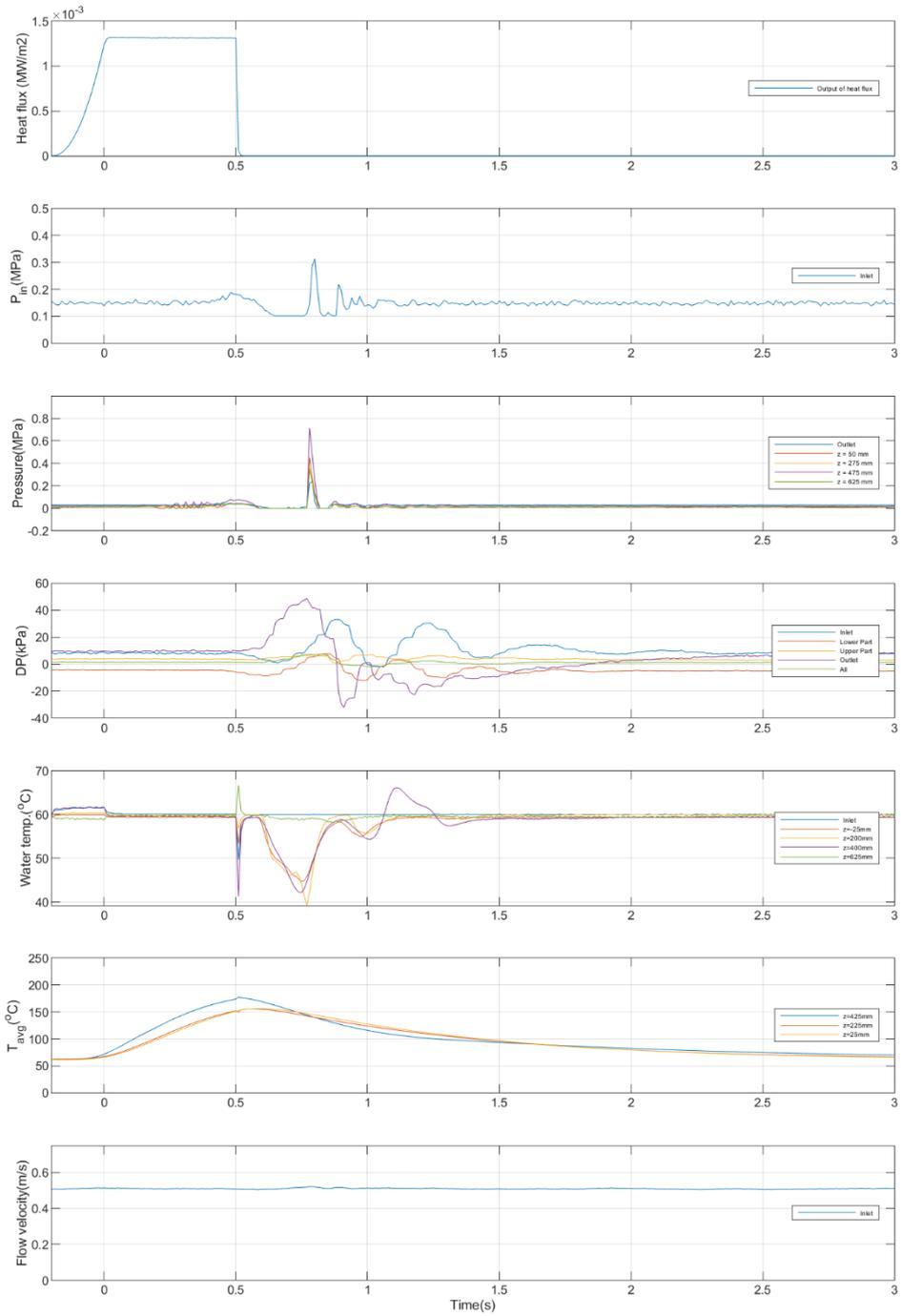


図 3.1-95 その他計測値の時間変化 (Run No.12)

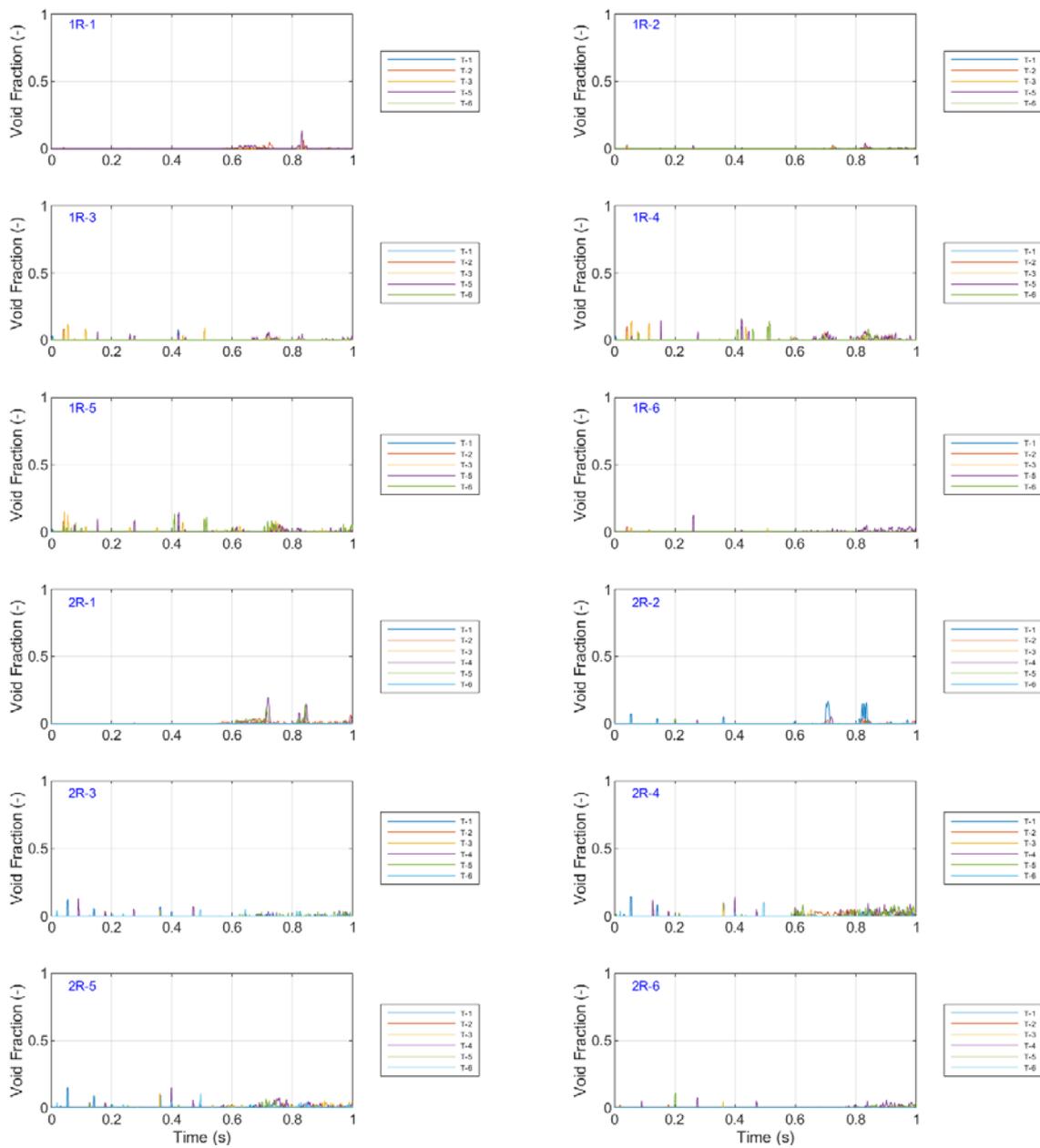


図 3.1-96 ボイド率の時間変化 (Run No.12/①)

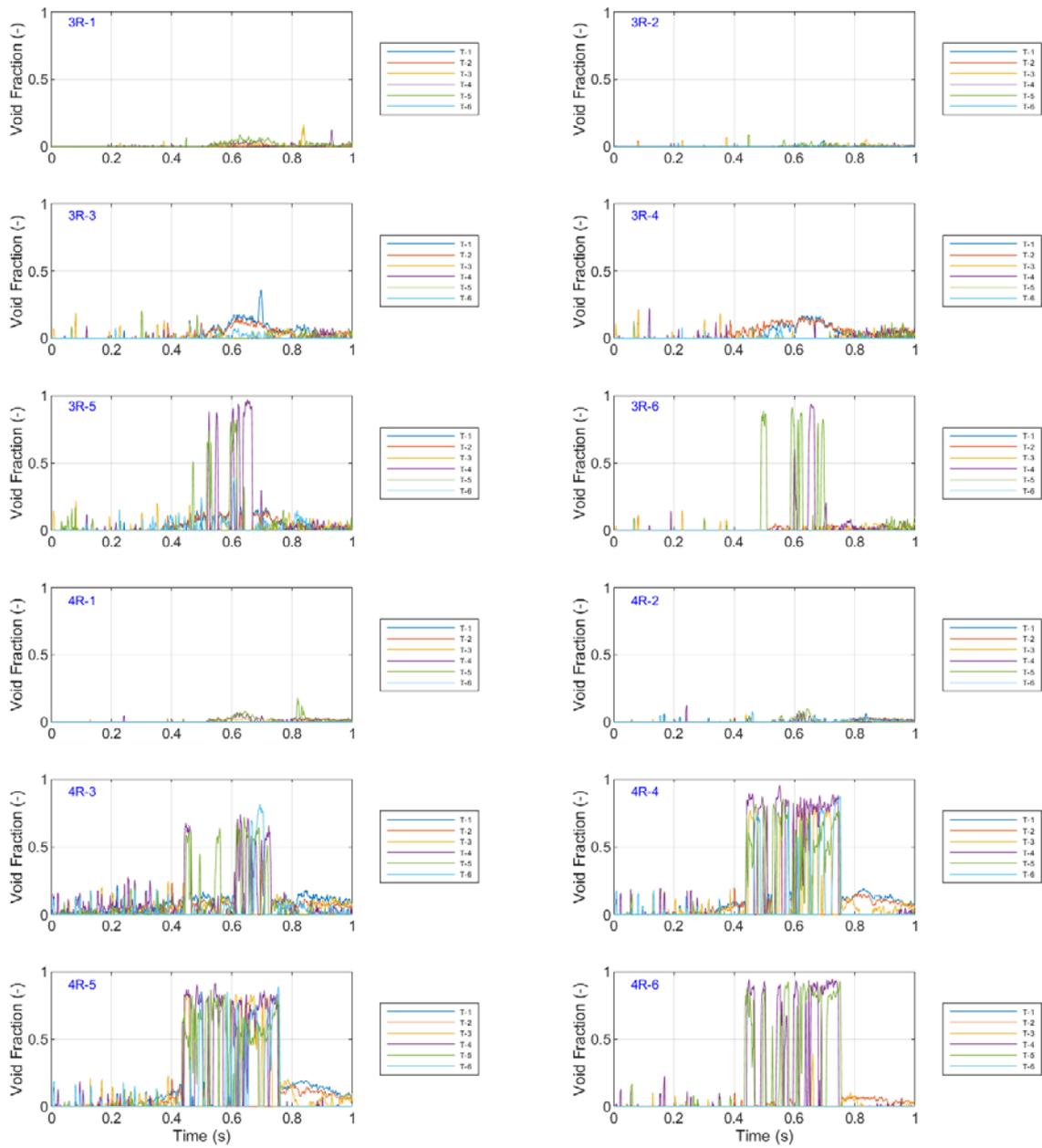


図 3.1-97 ボイド率の時間変化 (Run No.12/②)

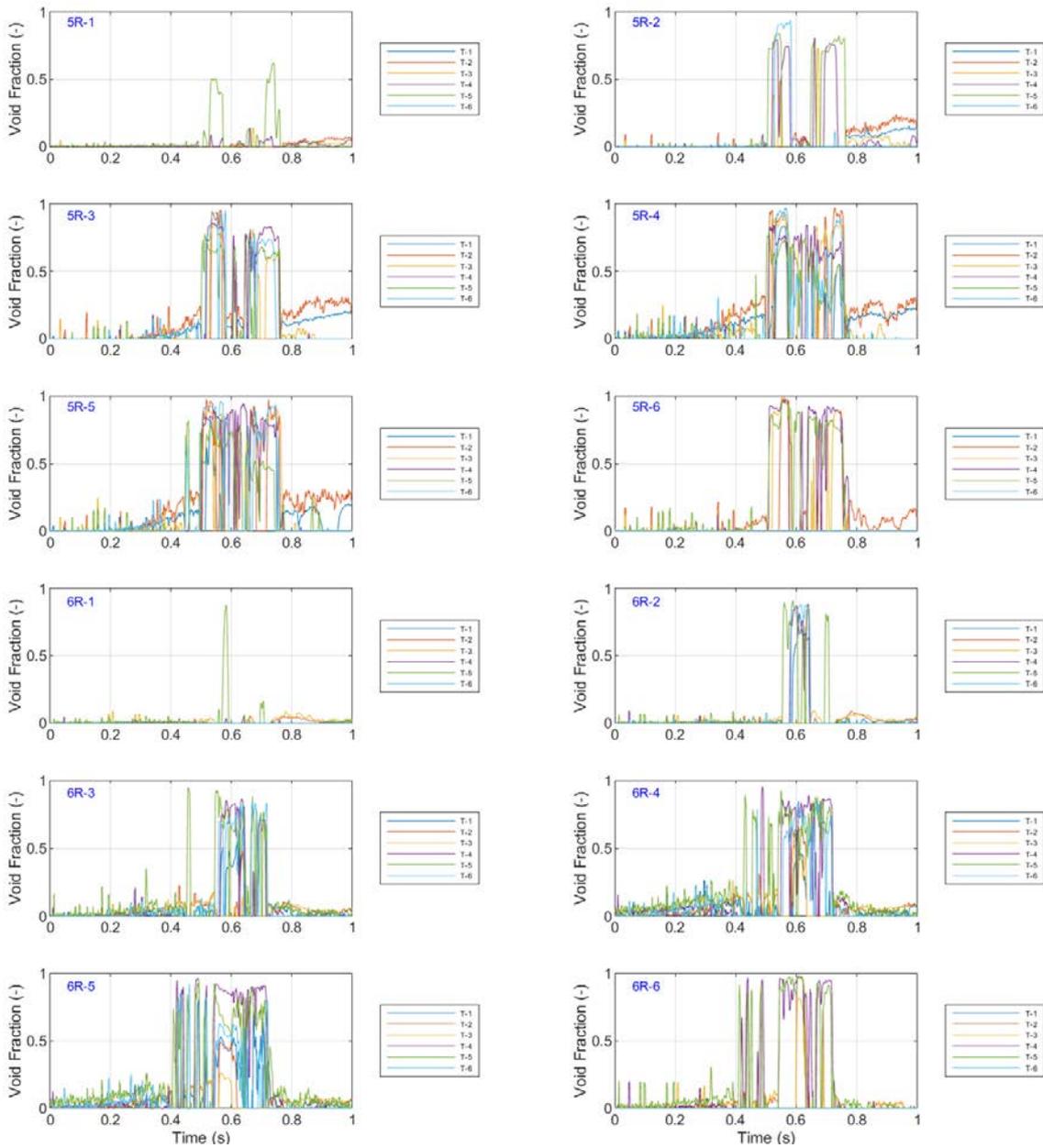


図 3.1-98 ボイド率の時間変化 (Run No.12/③)

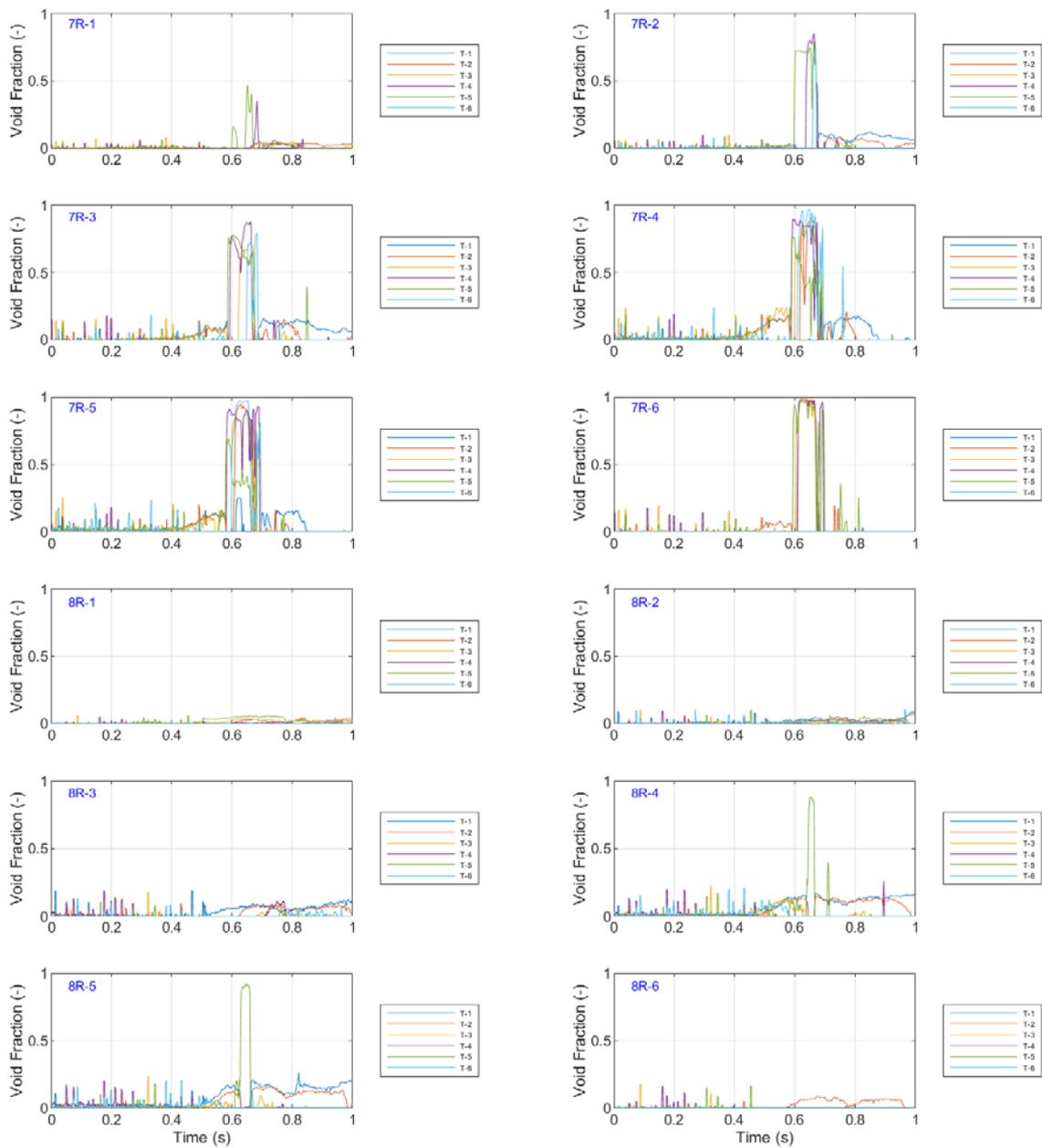


図 3.1-99 ボイド率の時間変化 (Run No.12/④)

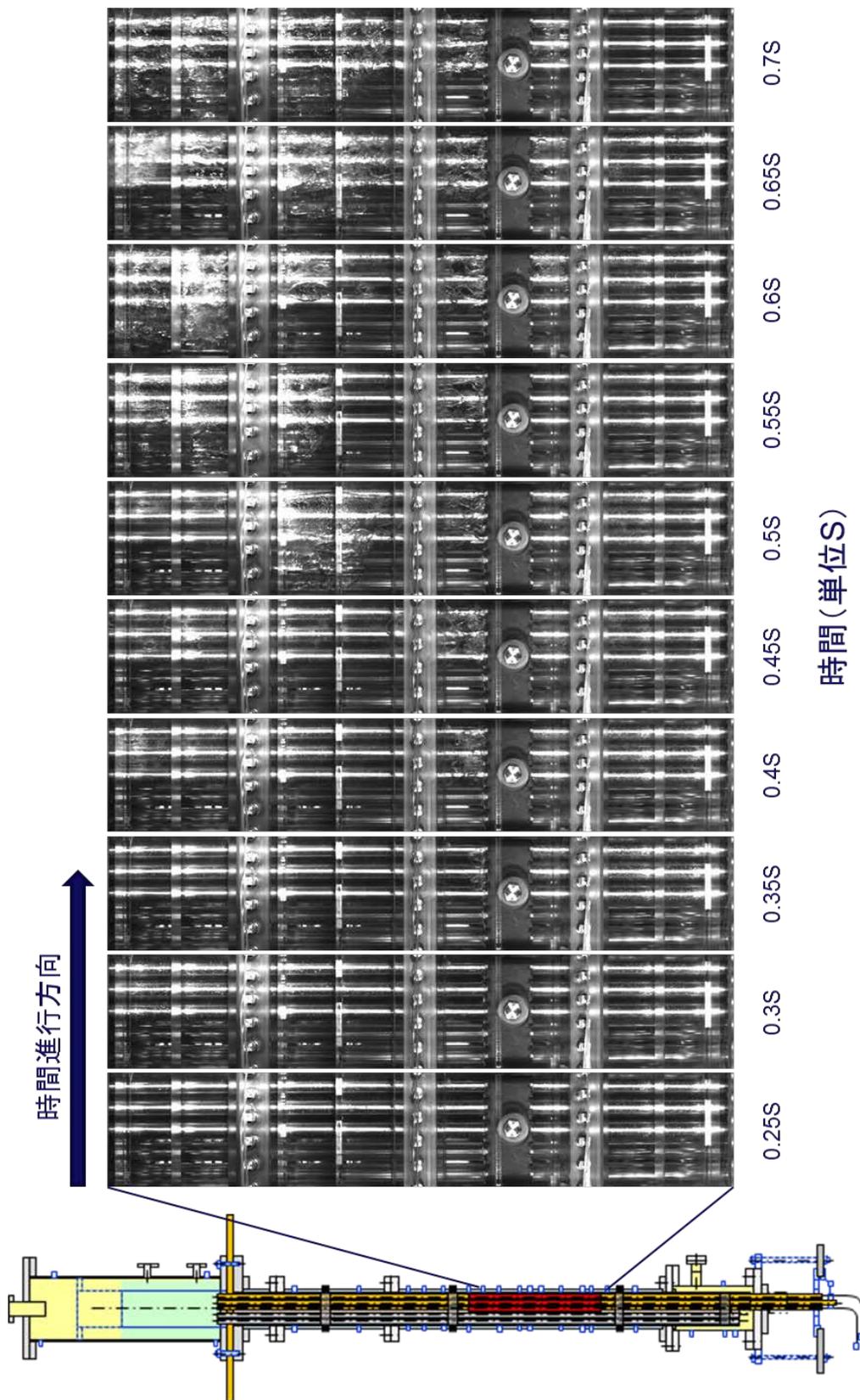


図 3.1-100 ボイド挙動の可視化画像 (Run No. 12)

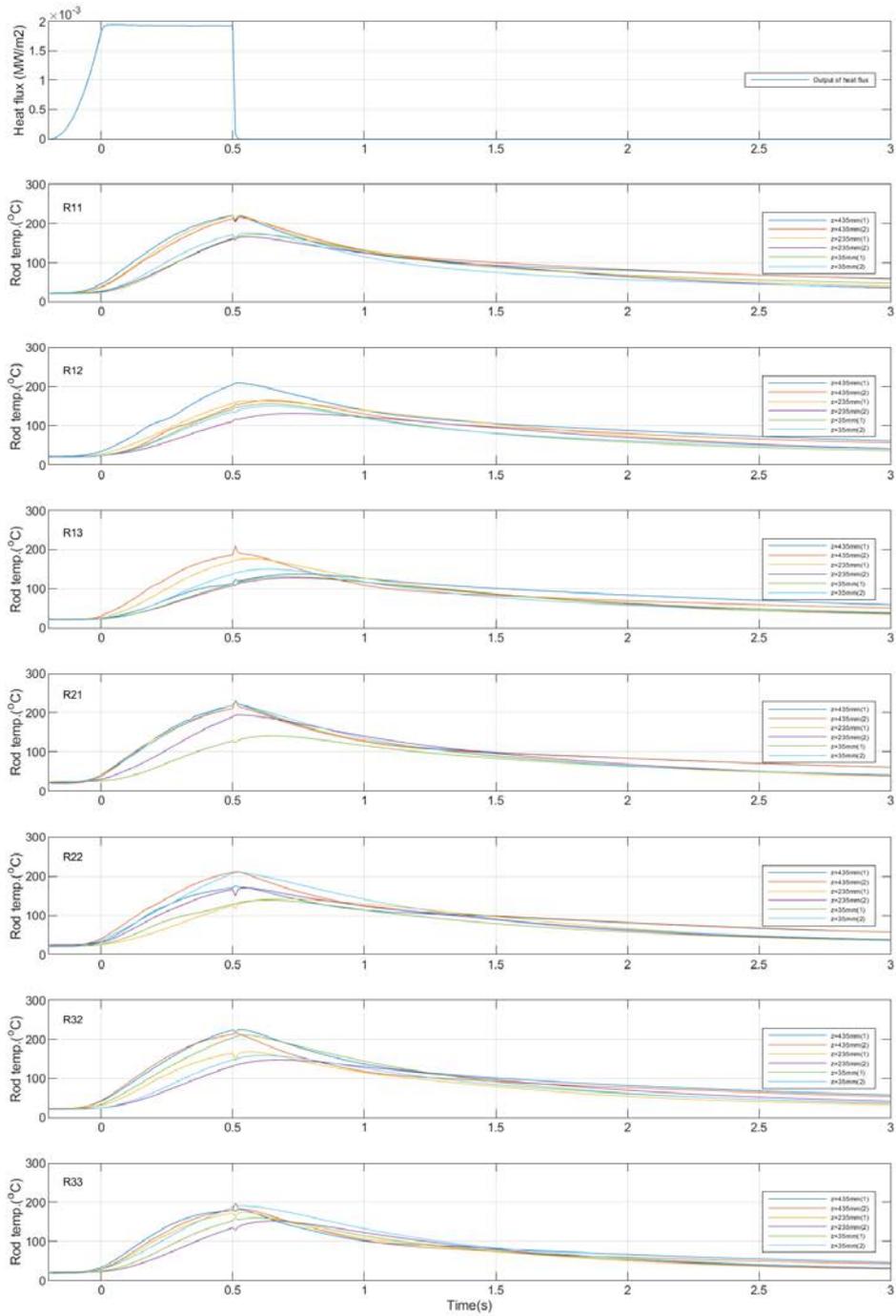


図 3.1-101 ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.13)

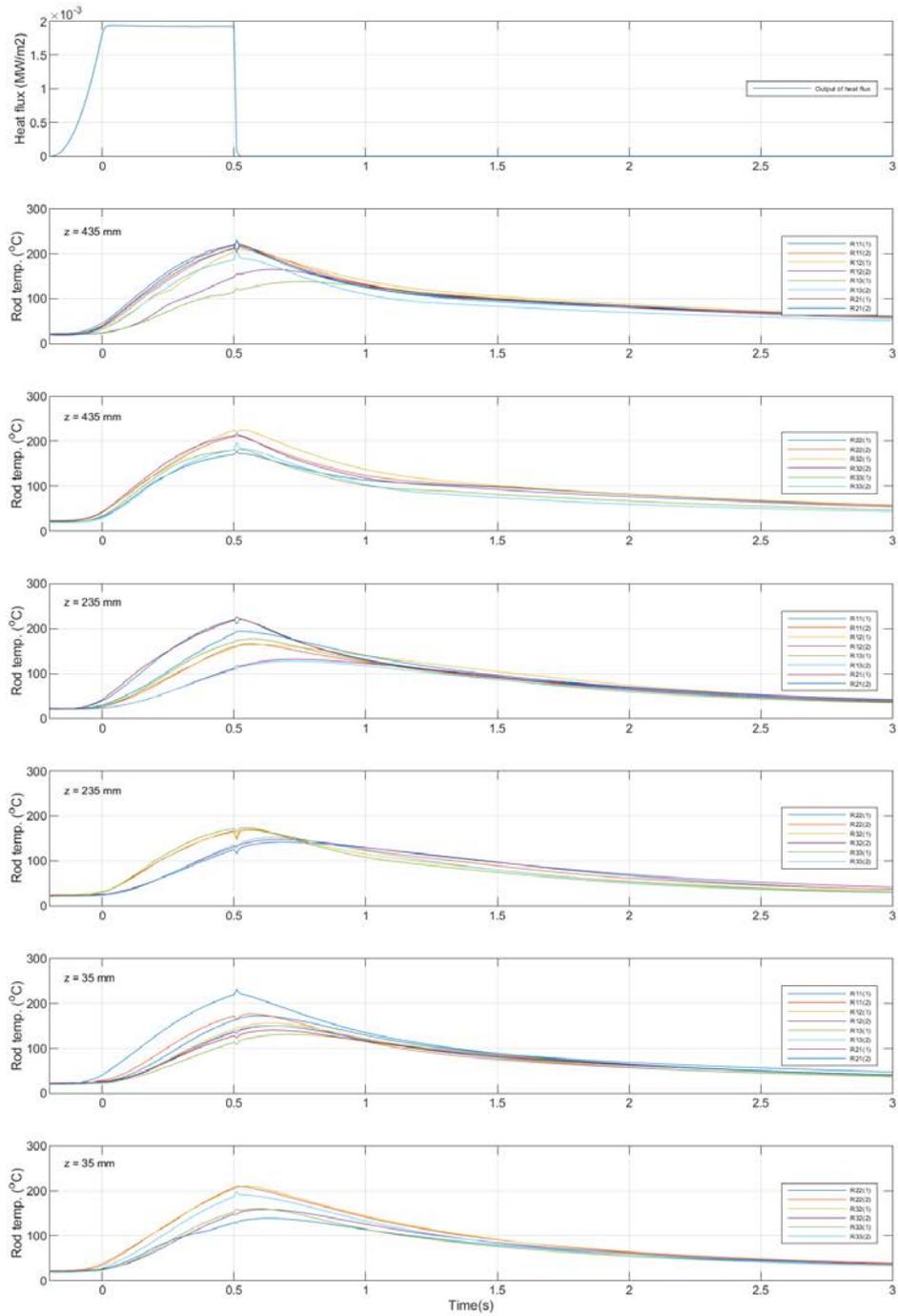


図 3.1-102 高さごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.13)

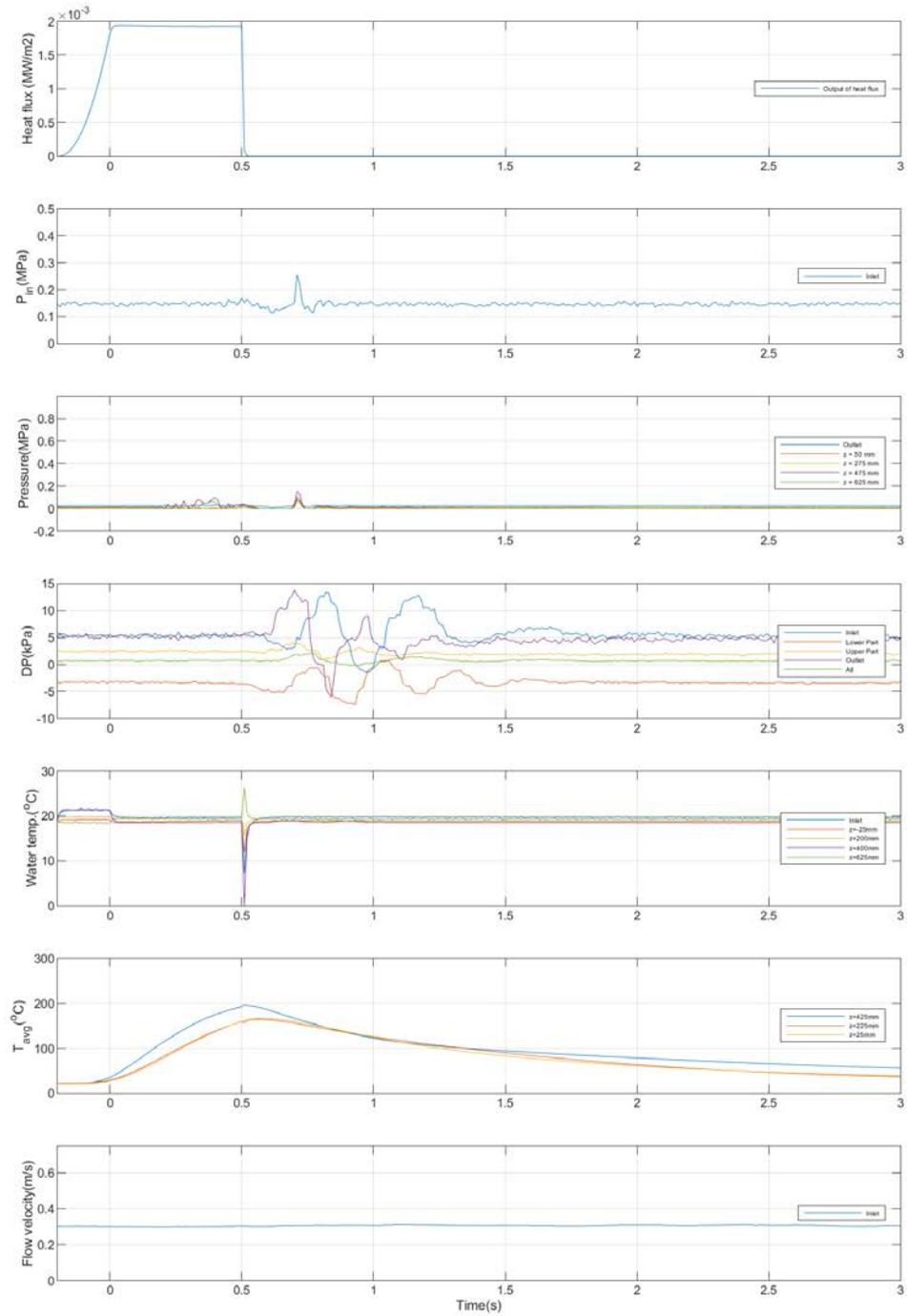


図 3.1-103 その他計測値の時間変化 (Run No.13)

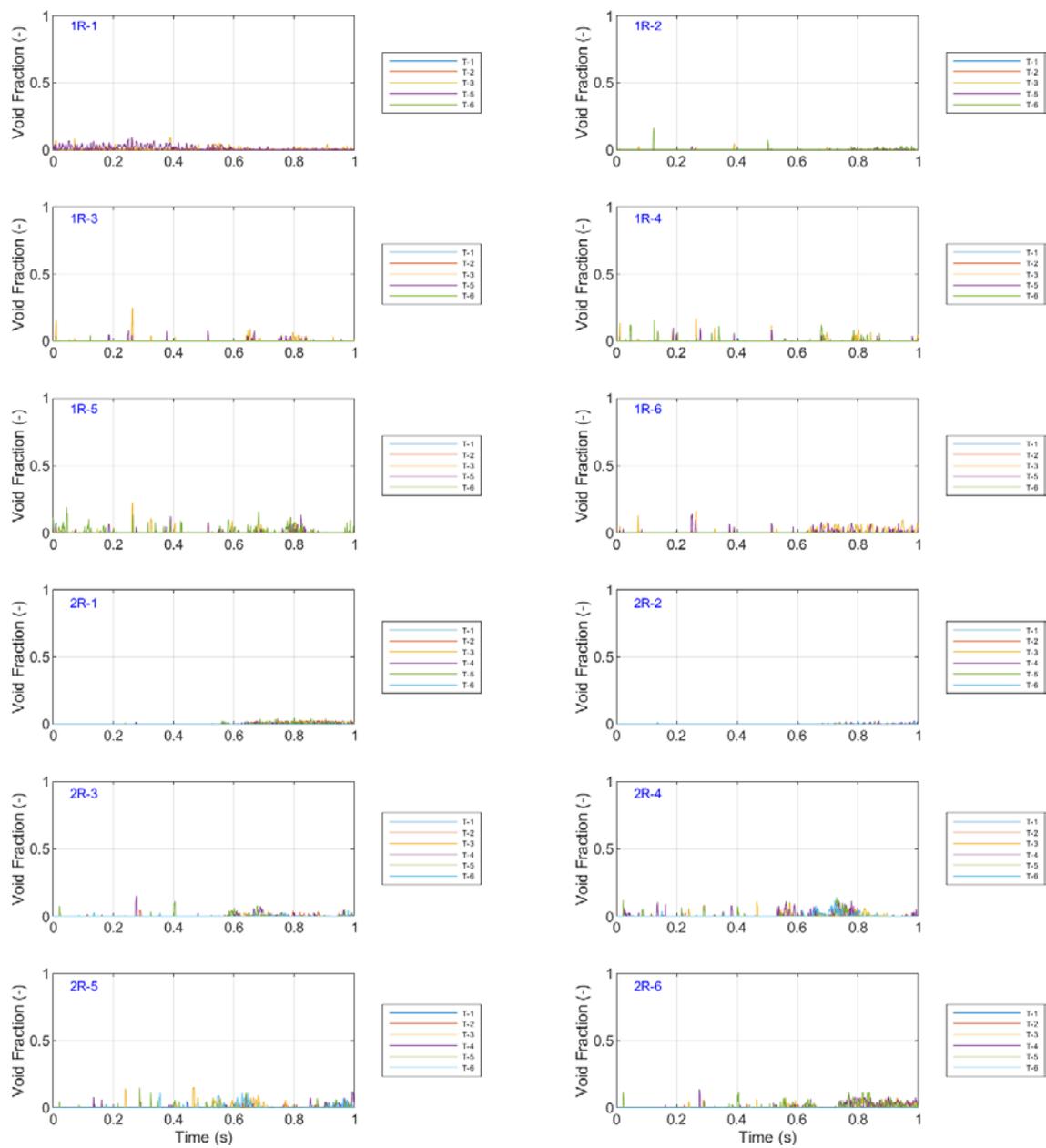


図 3.1-104 ボイド率の時間変化 (Run No.13①)

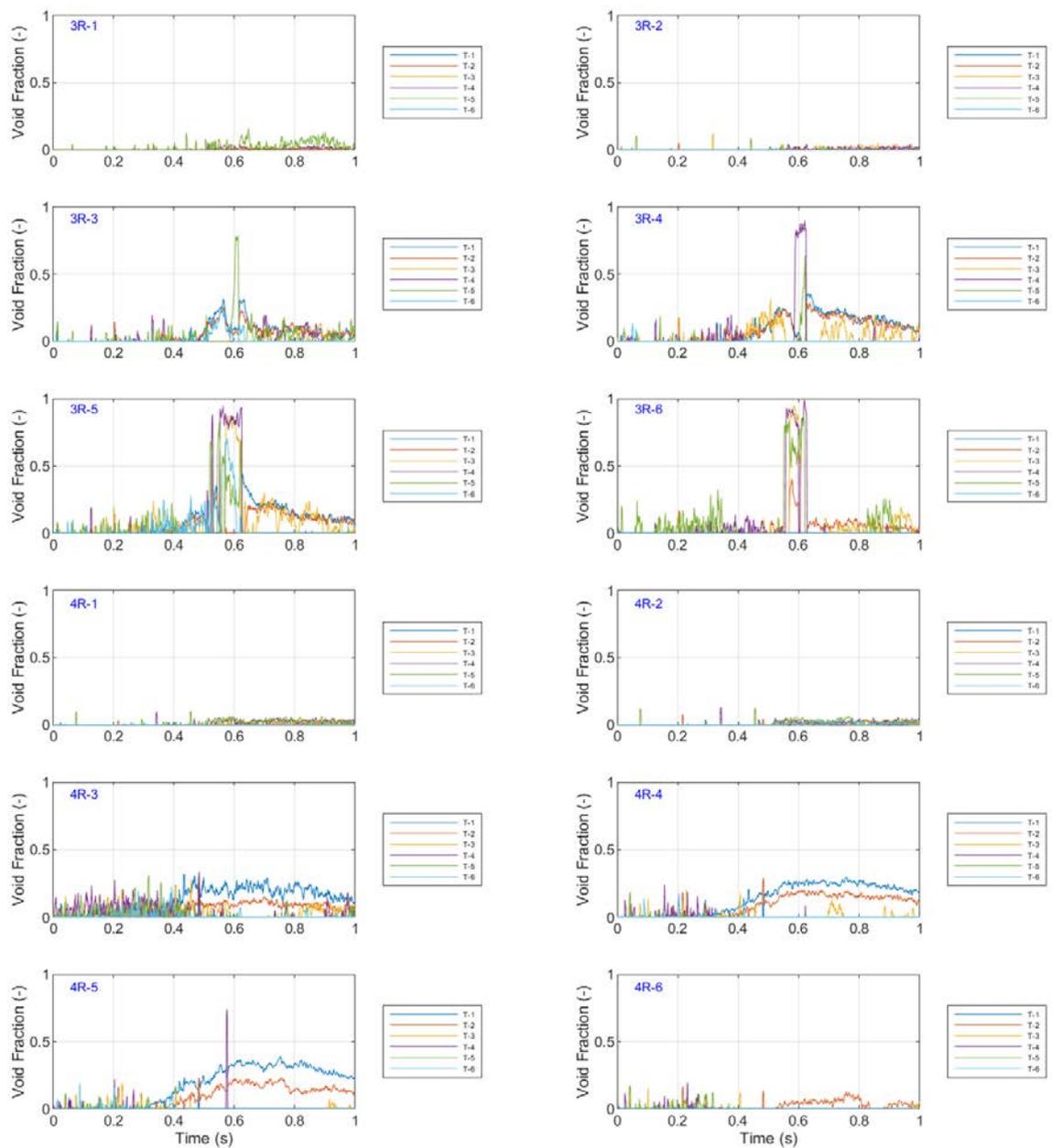


図 3.1-105 ボイド率の時間変化 (Run No.13/②)

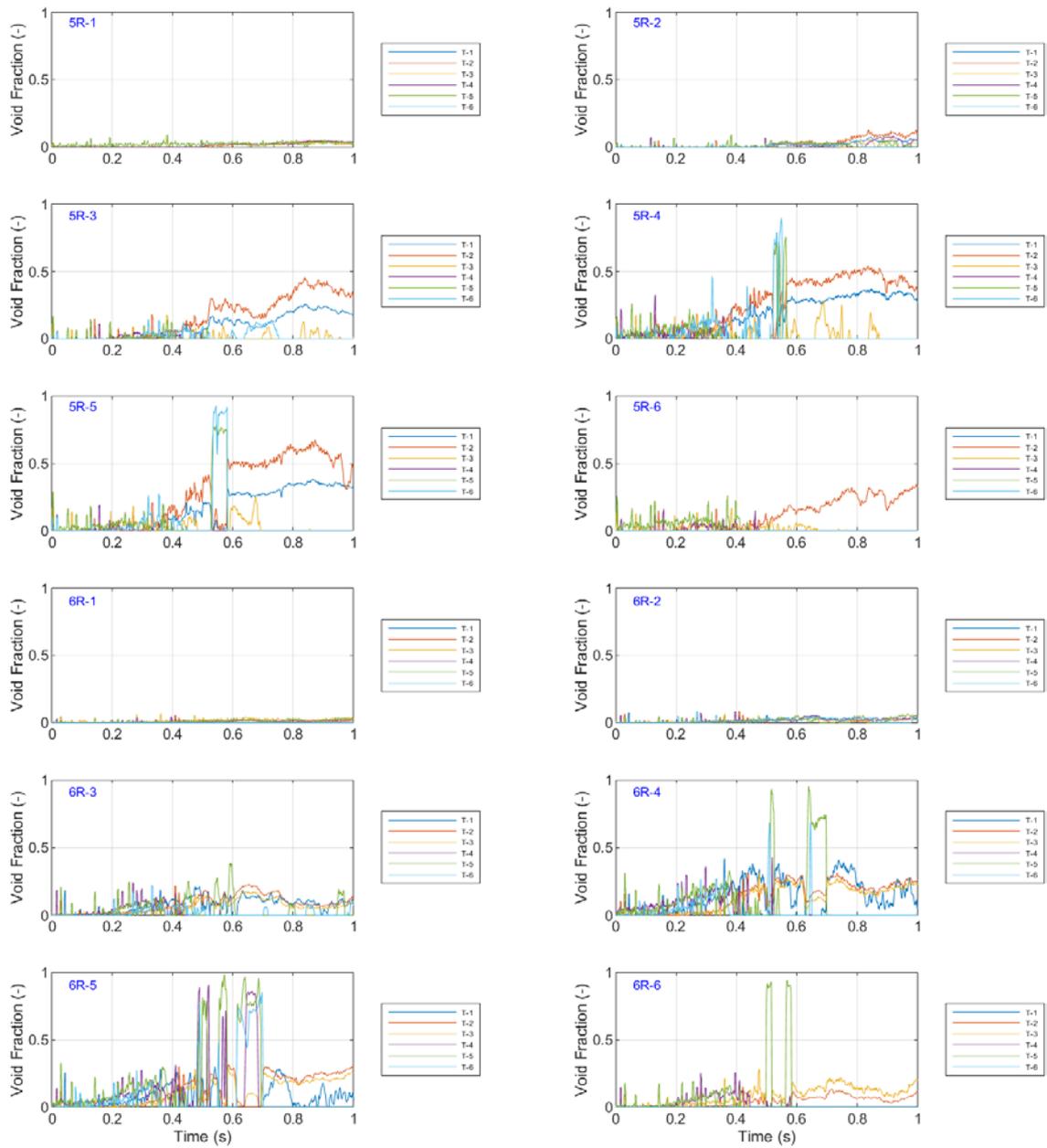


図 3.1-106 ボイド率の時間変化 (Run No.13/③)

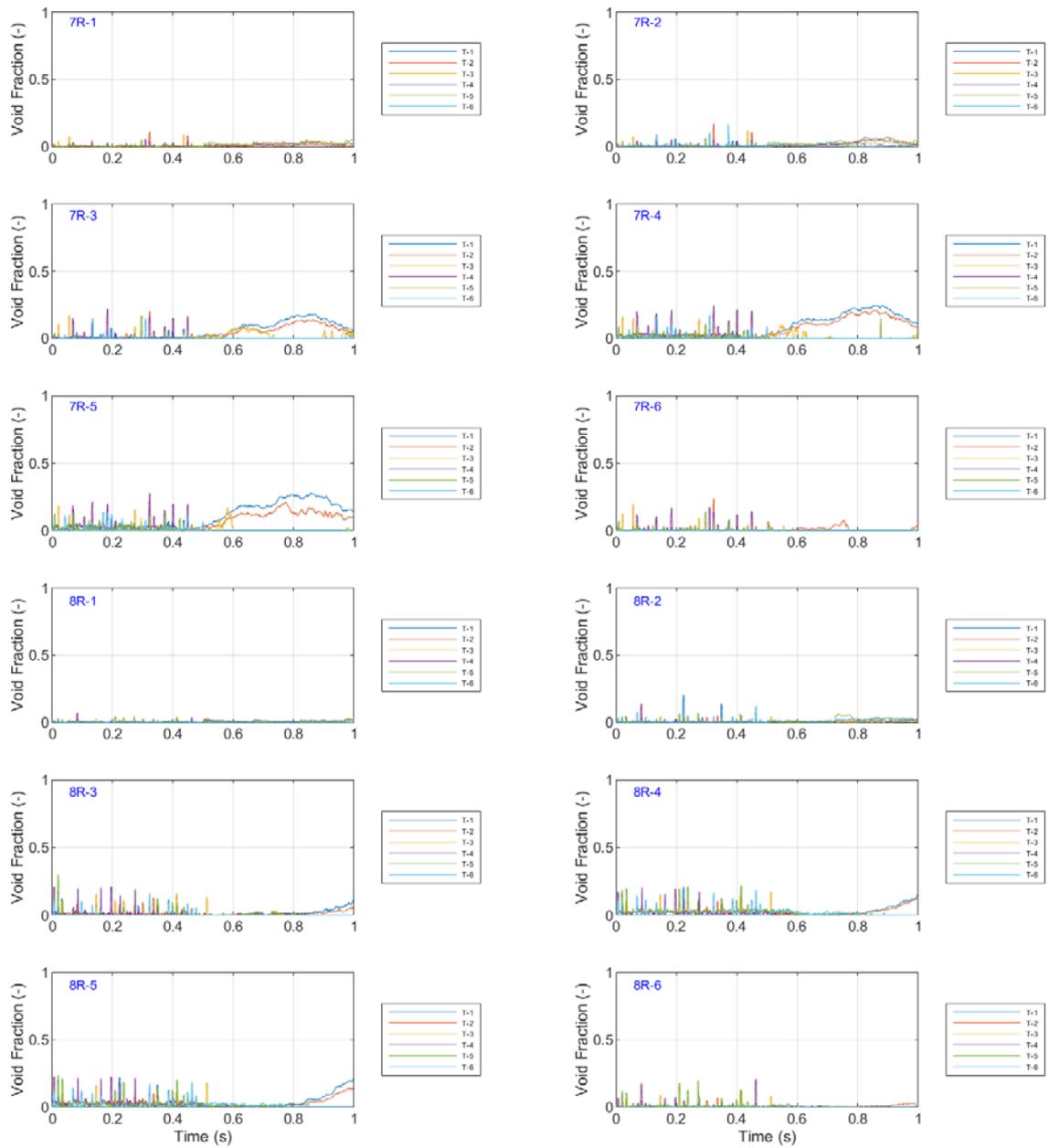


図 3.1-107 ボイド率の時間変化 (Run No.13/④)

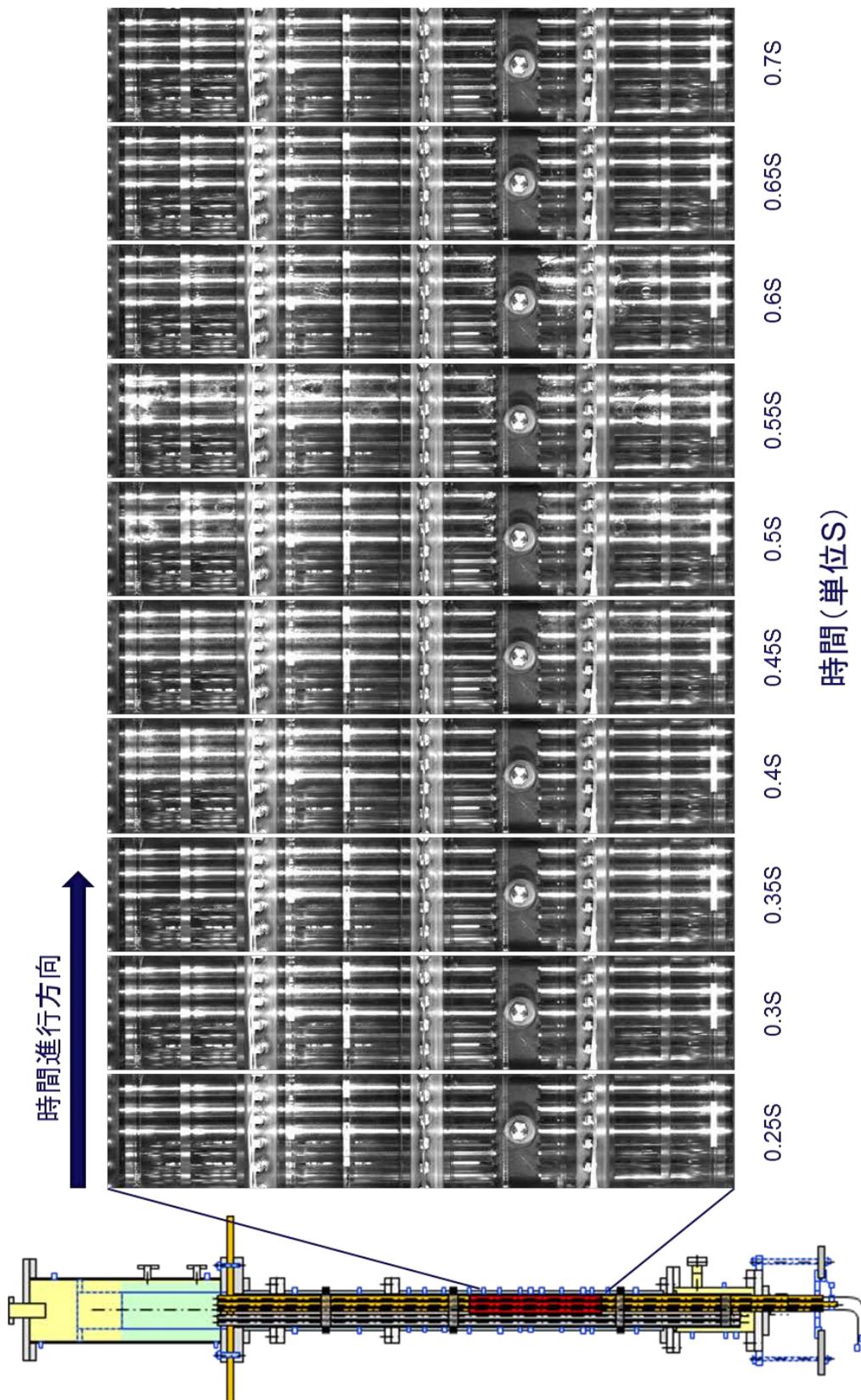


図 3.1-108 ボイド挙動の可視化画像 (Run No.13)

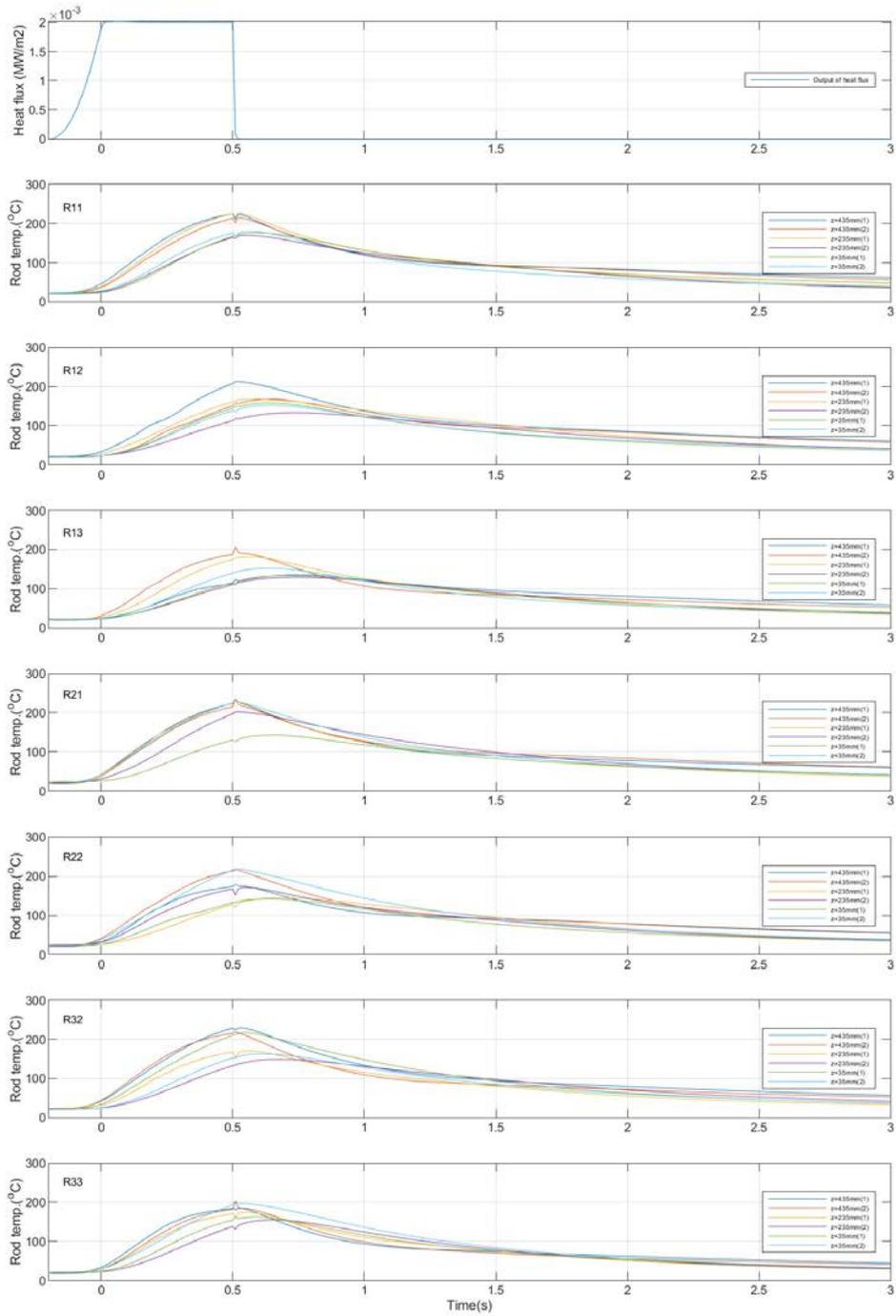


図 3.1-109 ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.14)

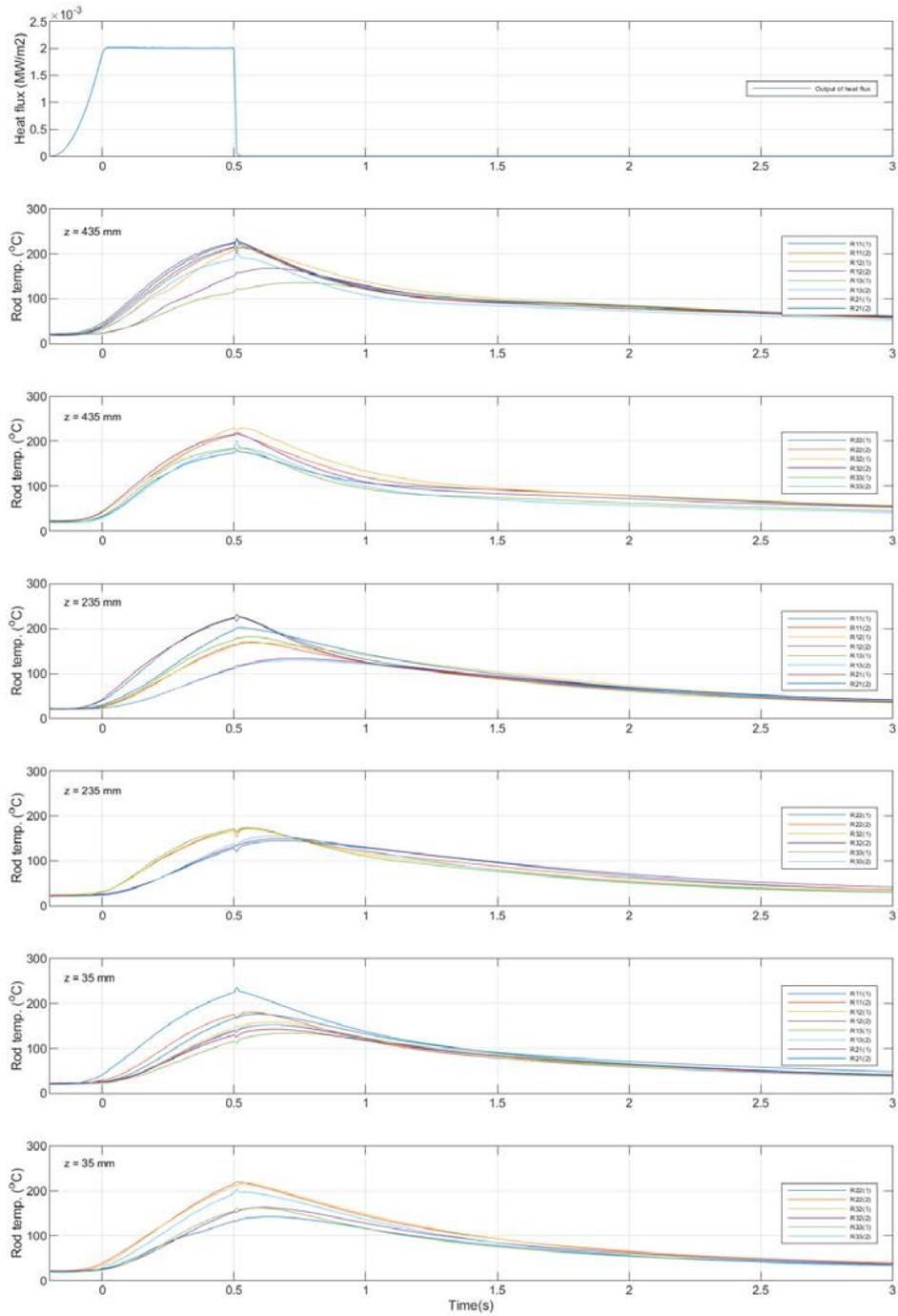


図 3.1-110 高さごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.14)

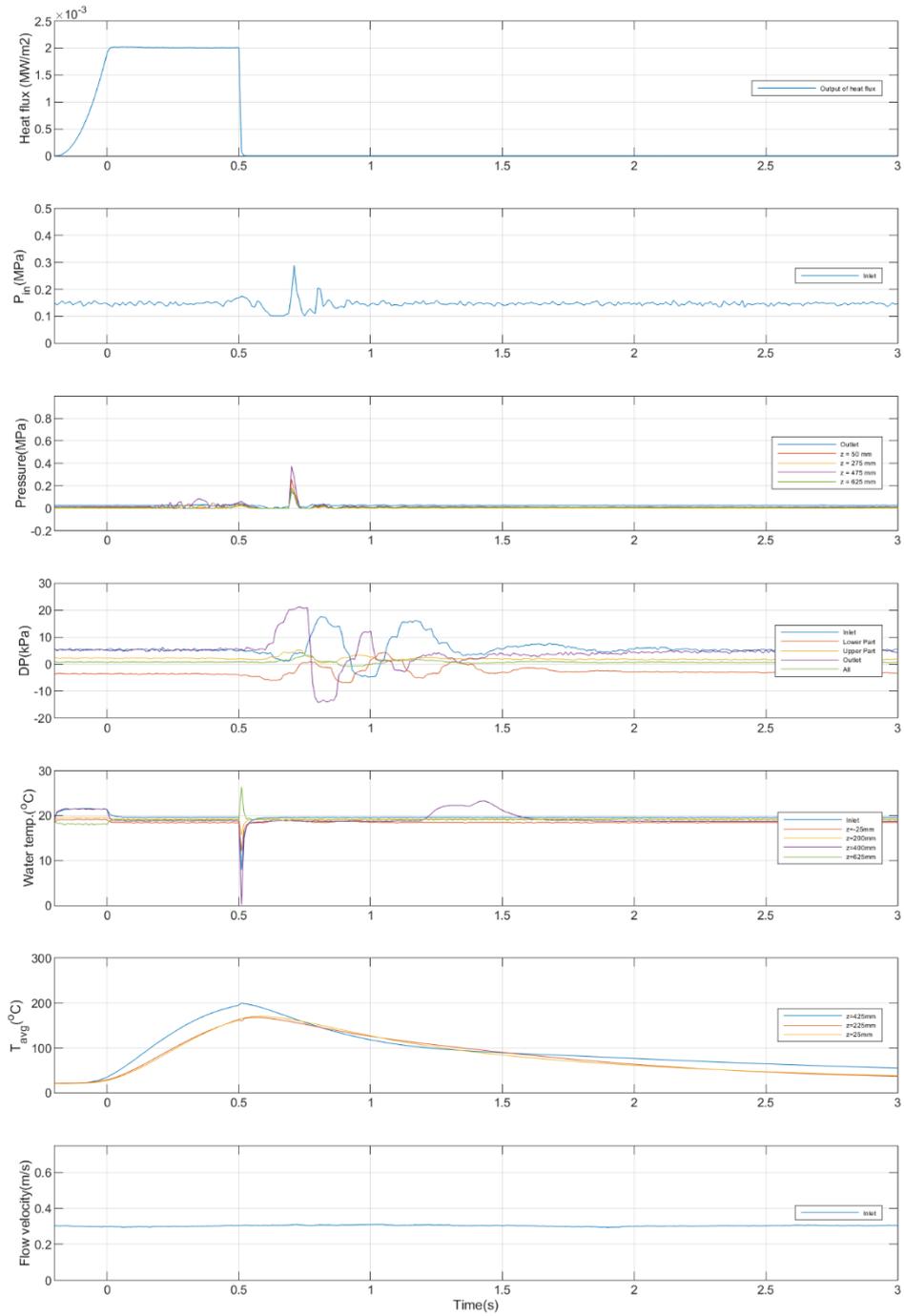


図 3.1-111 その他計測値の時間変化 (Run No.14)

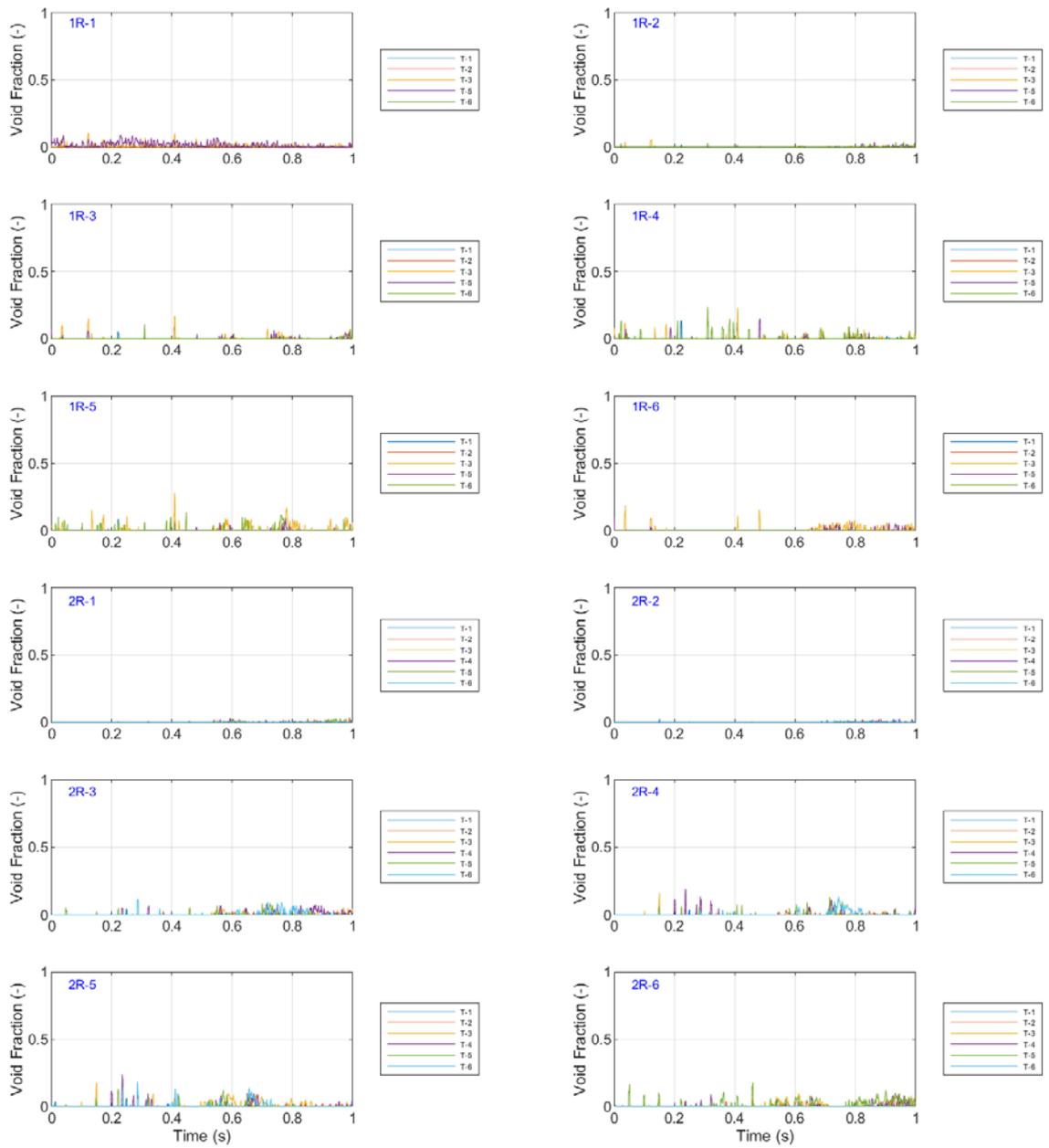


図 3.1-112 ボイド率の時間変化 (Run No.14/①)

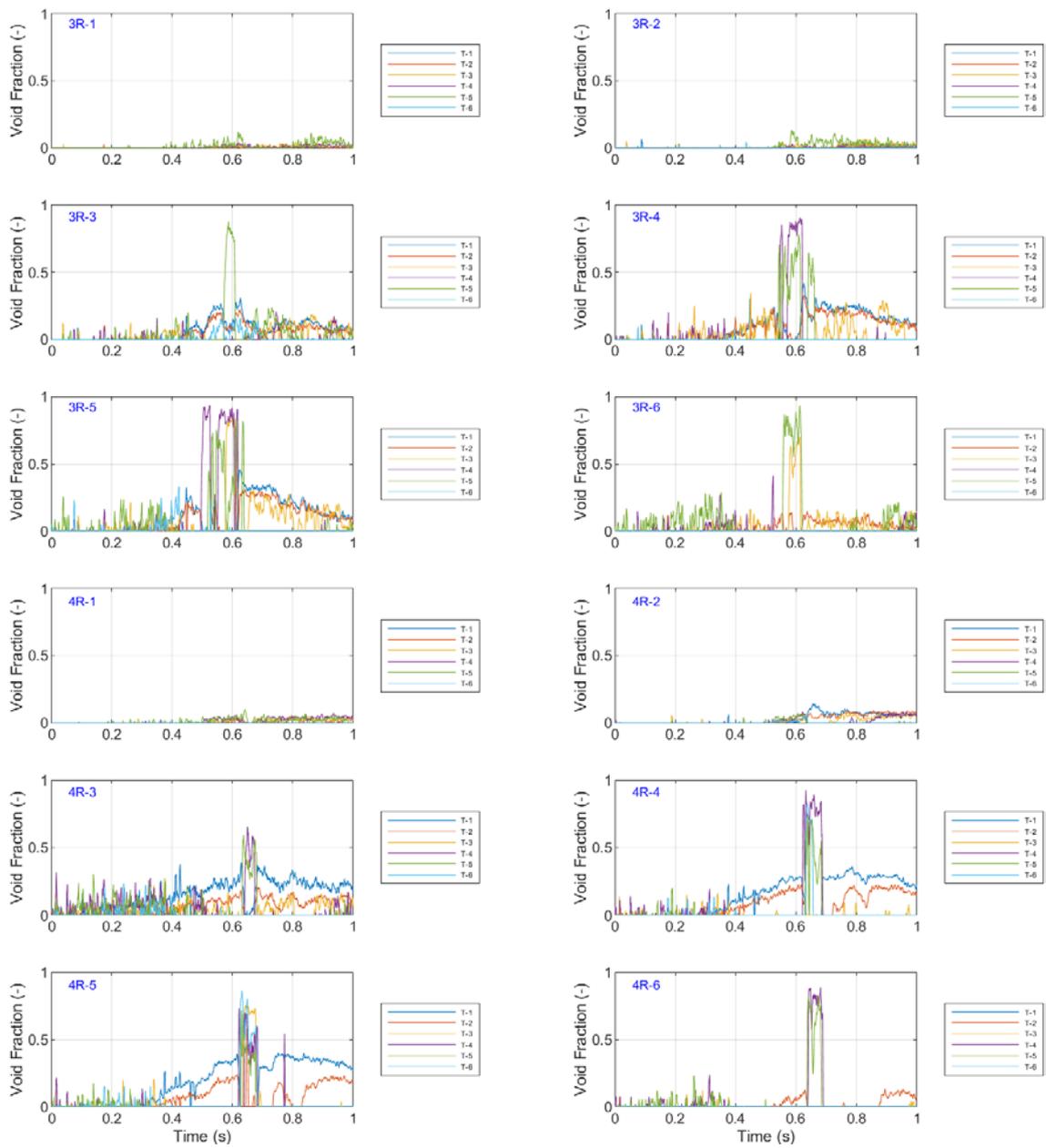


図 3.1-113 ボイド率の時間変化 (Run No.14/②)

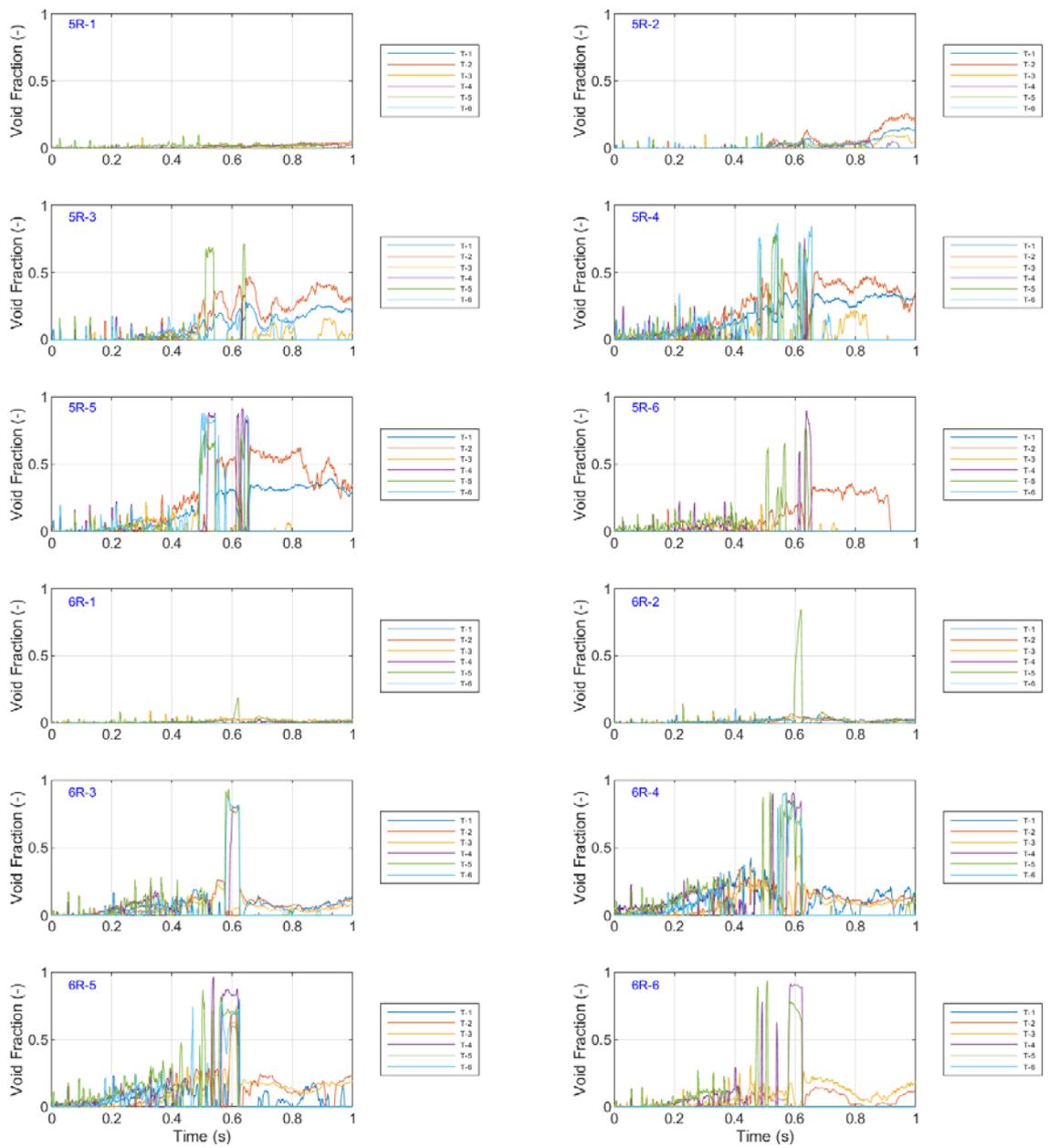


図 3.1-114 ボイド率の時間変化 (Run No.14/③)

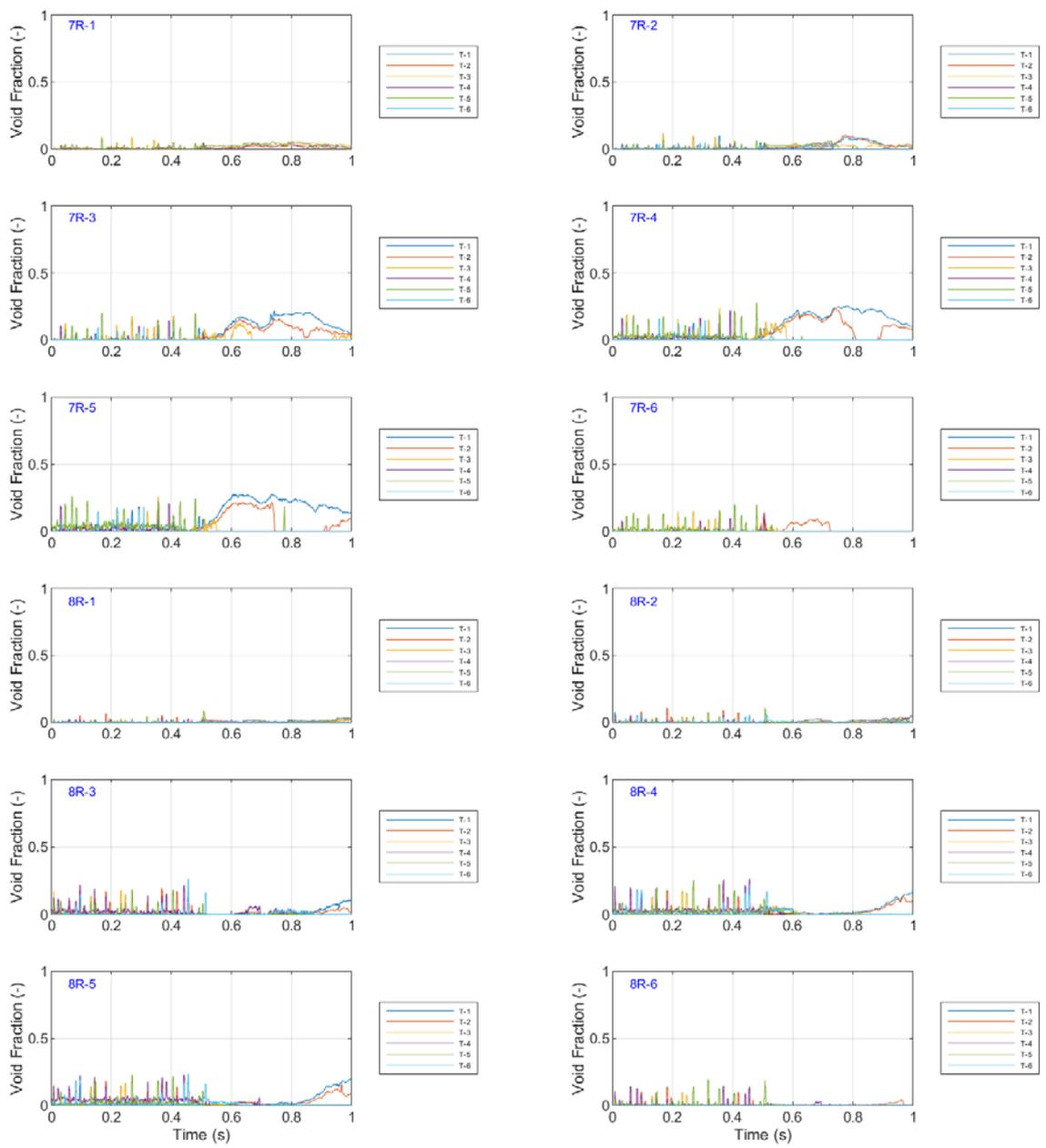


図 3.1-115 ボイド率の時間変化 (Run No.14/④)

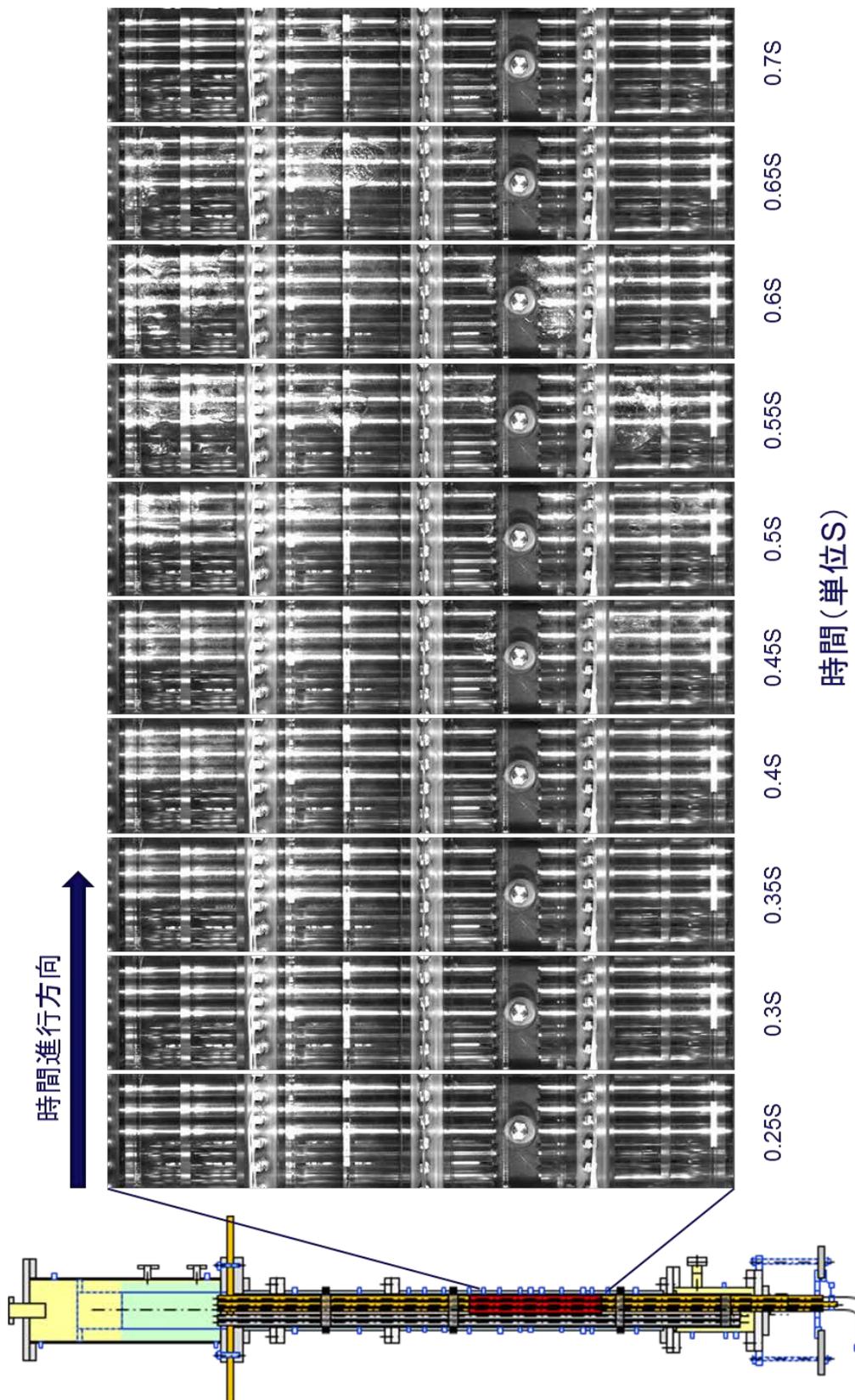


図 3.1-116 ボイド挙動の可視化画像 (Run No.14)

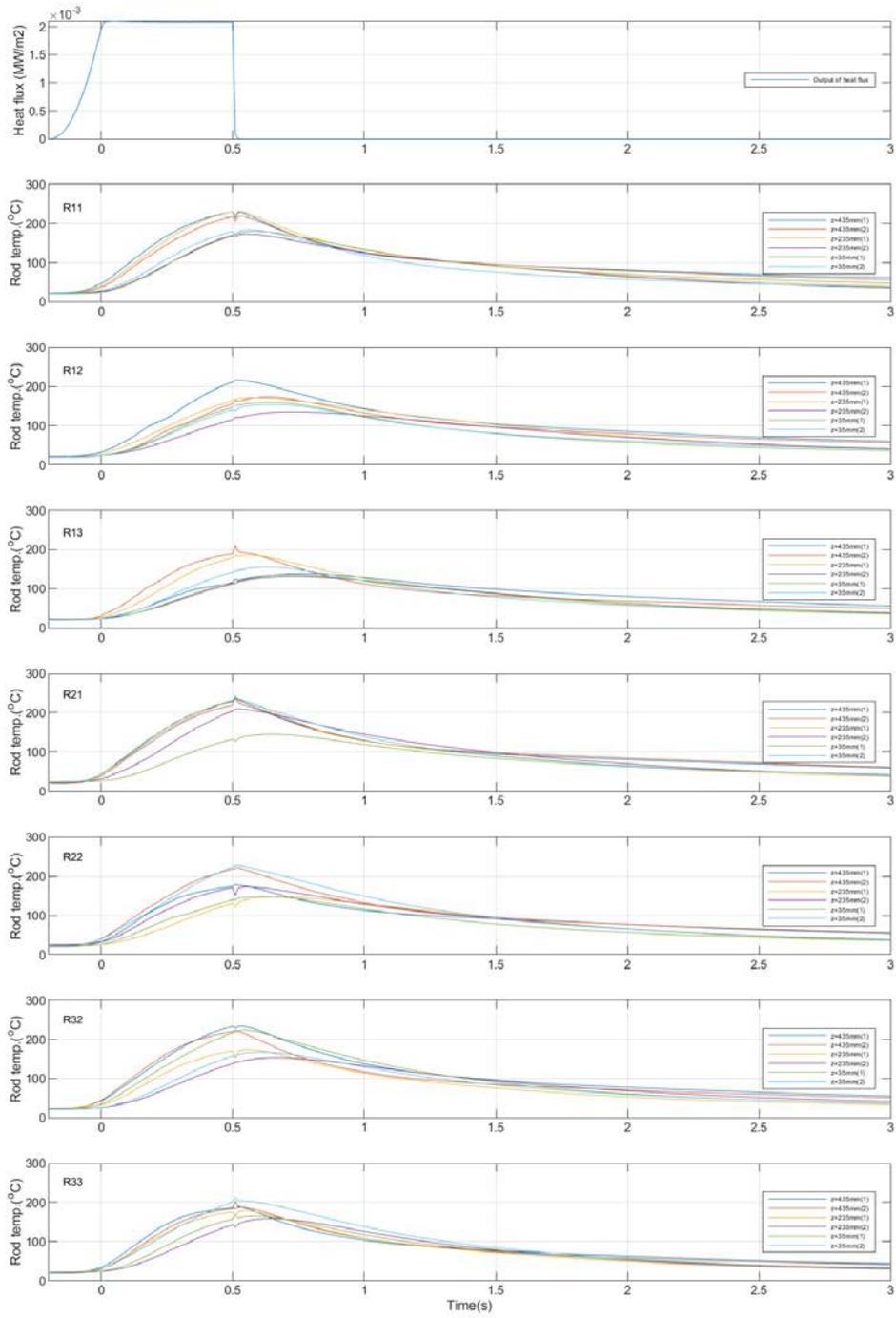


図 3.1-117 ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.15)

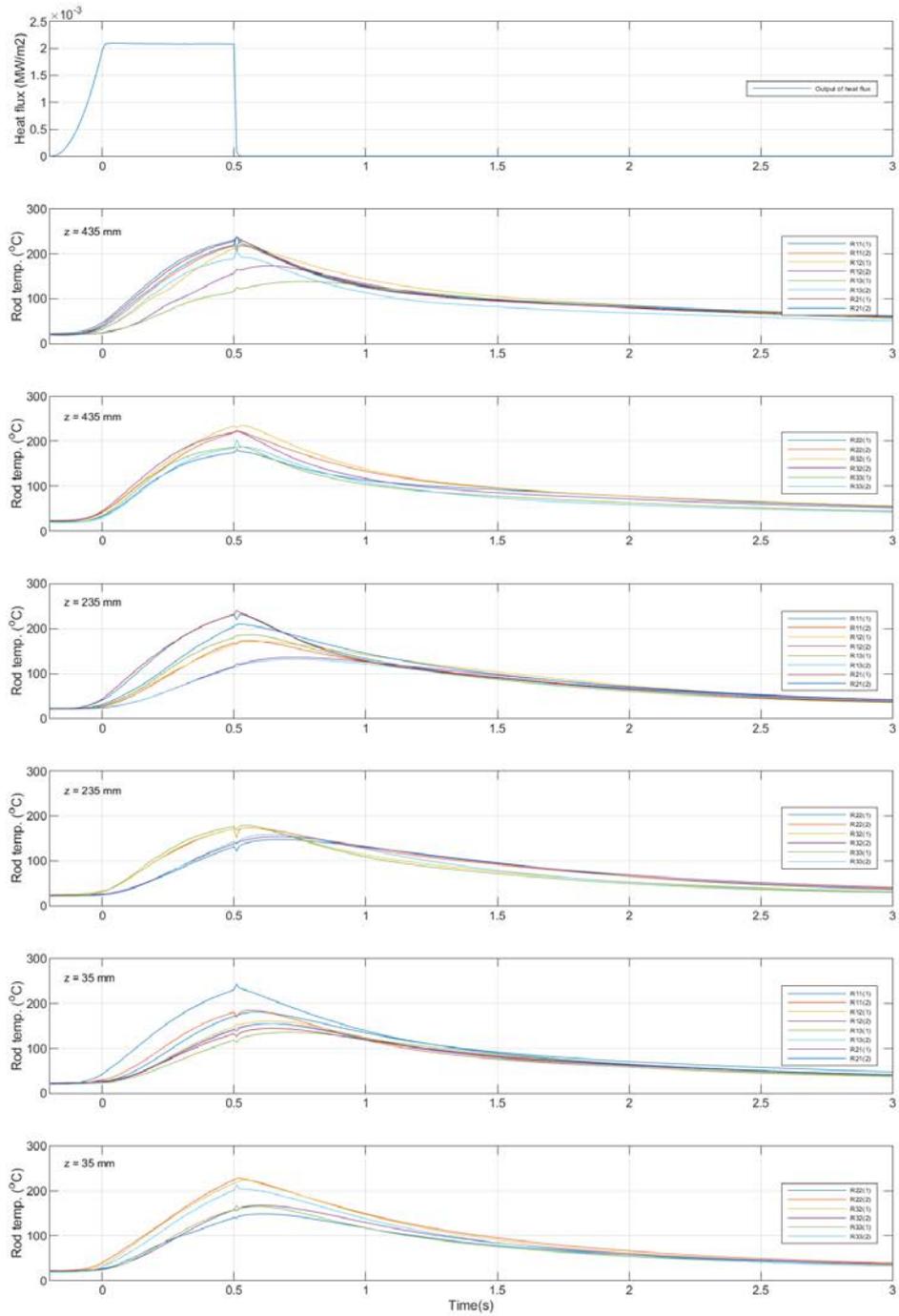


図 3.1-118 高さごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.15)

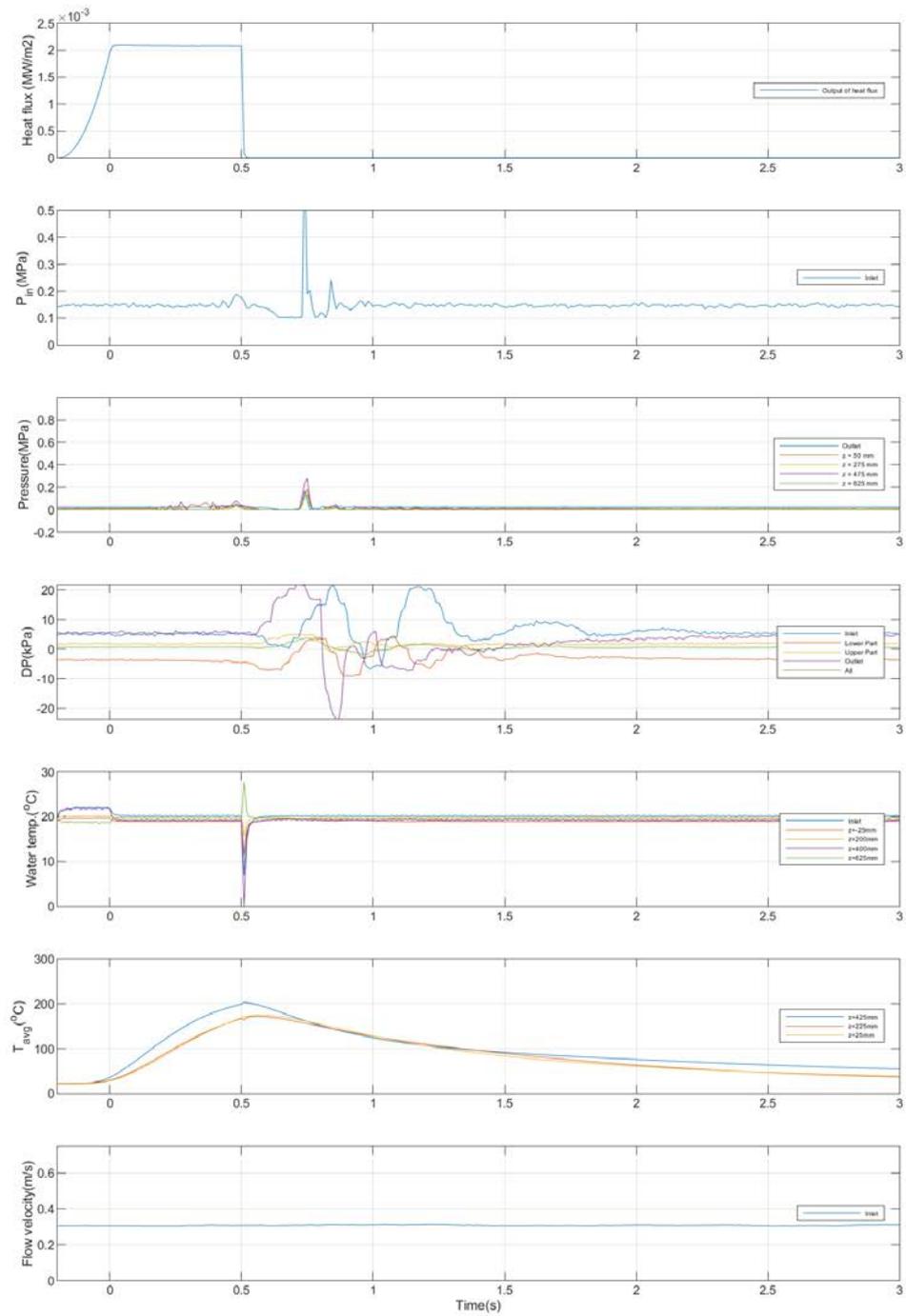


図 3.1-119 その他計測値の時間変化 (Run No.15)

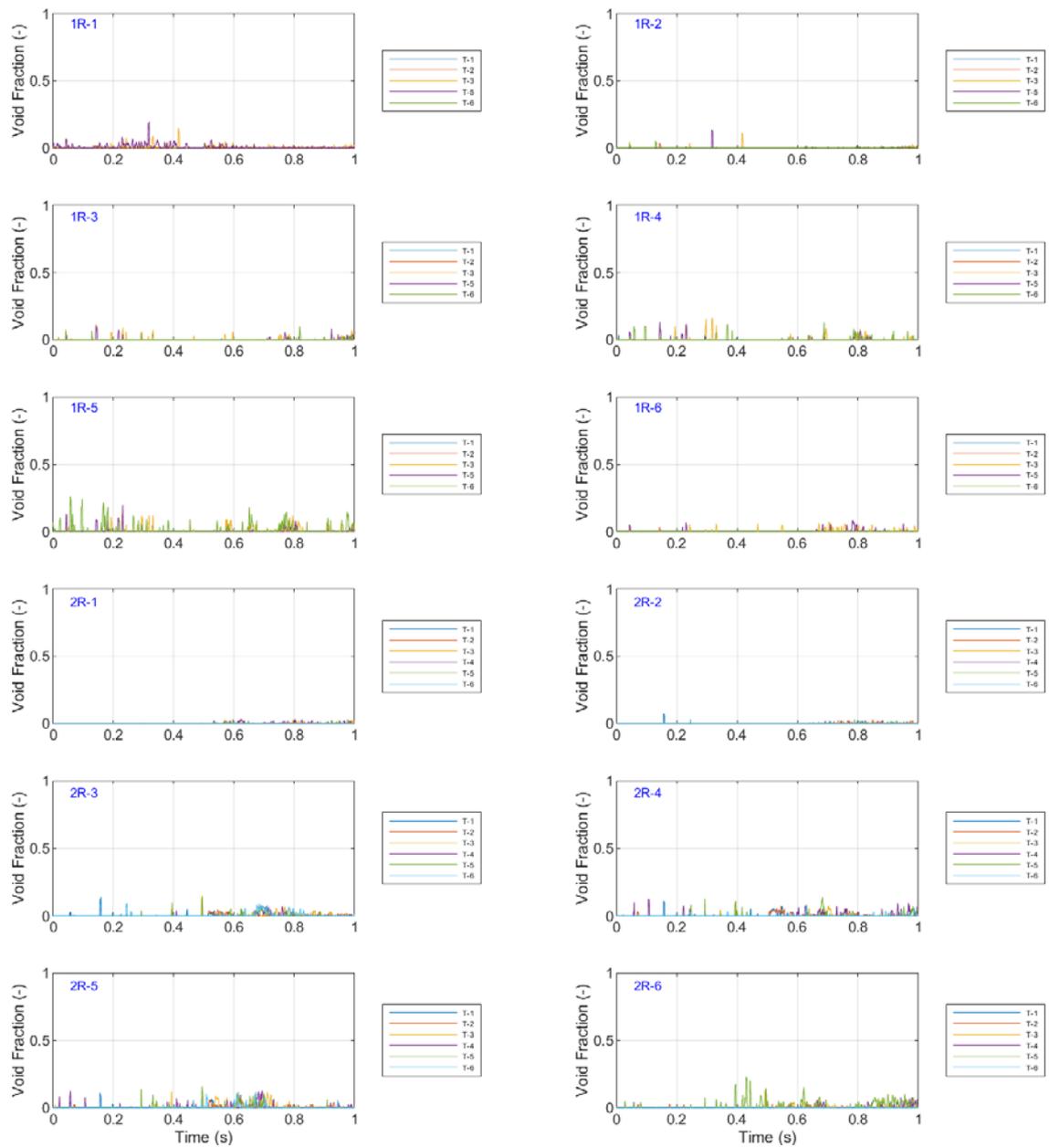


図 3.1-120 ボイド率の時間変化 (Run No.15/①)

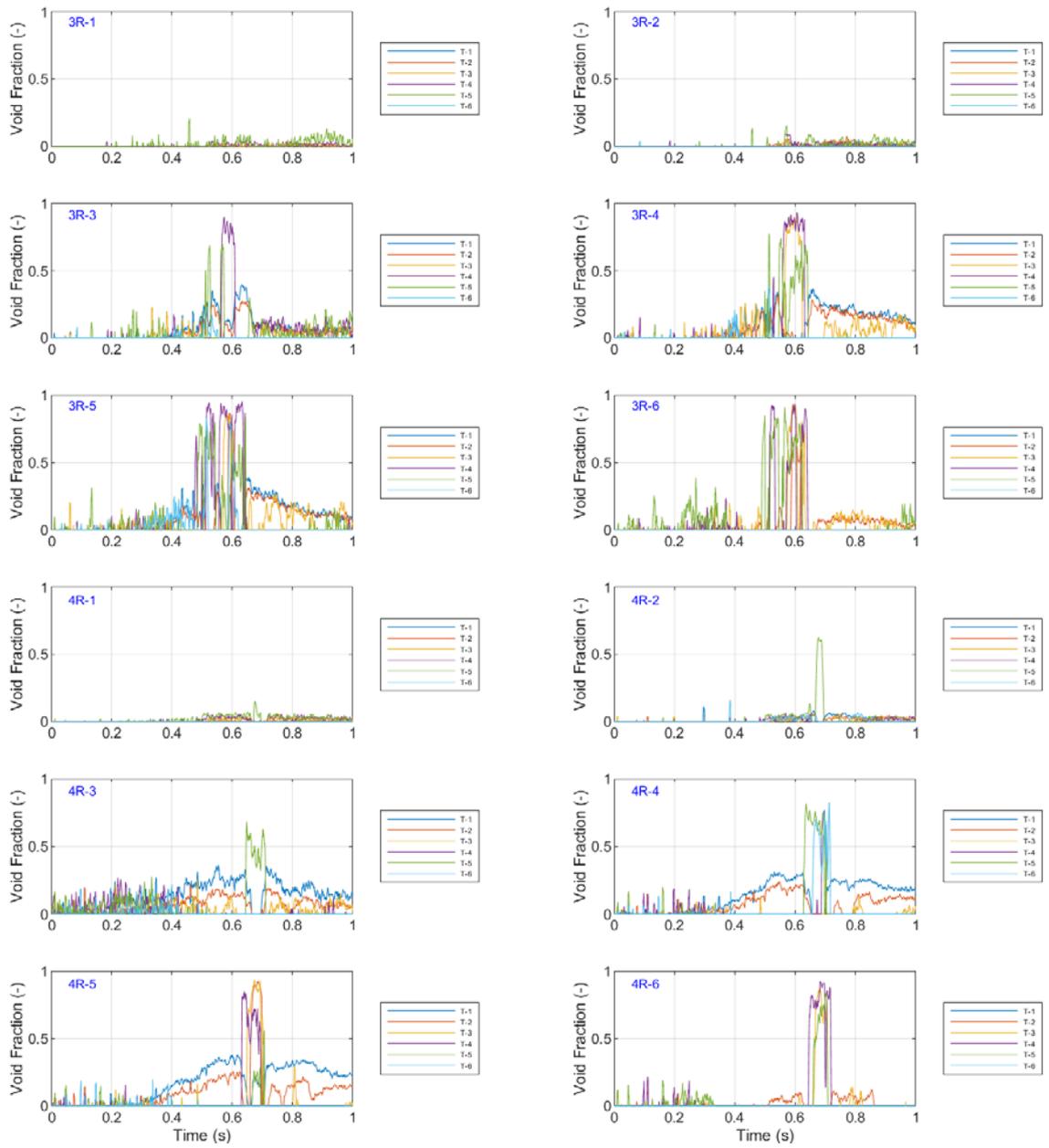


図 3.1-121 ボイド率の時間変化 (Run No.15/②)

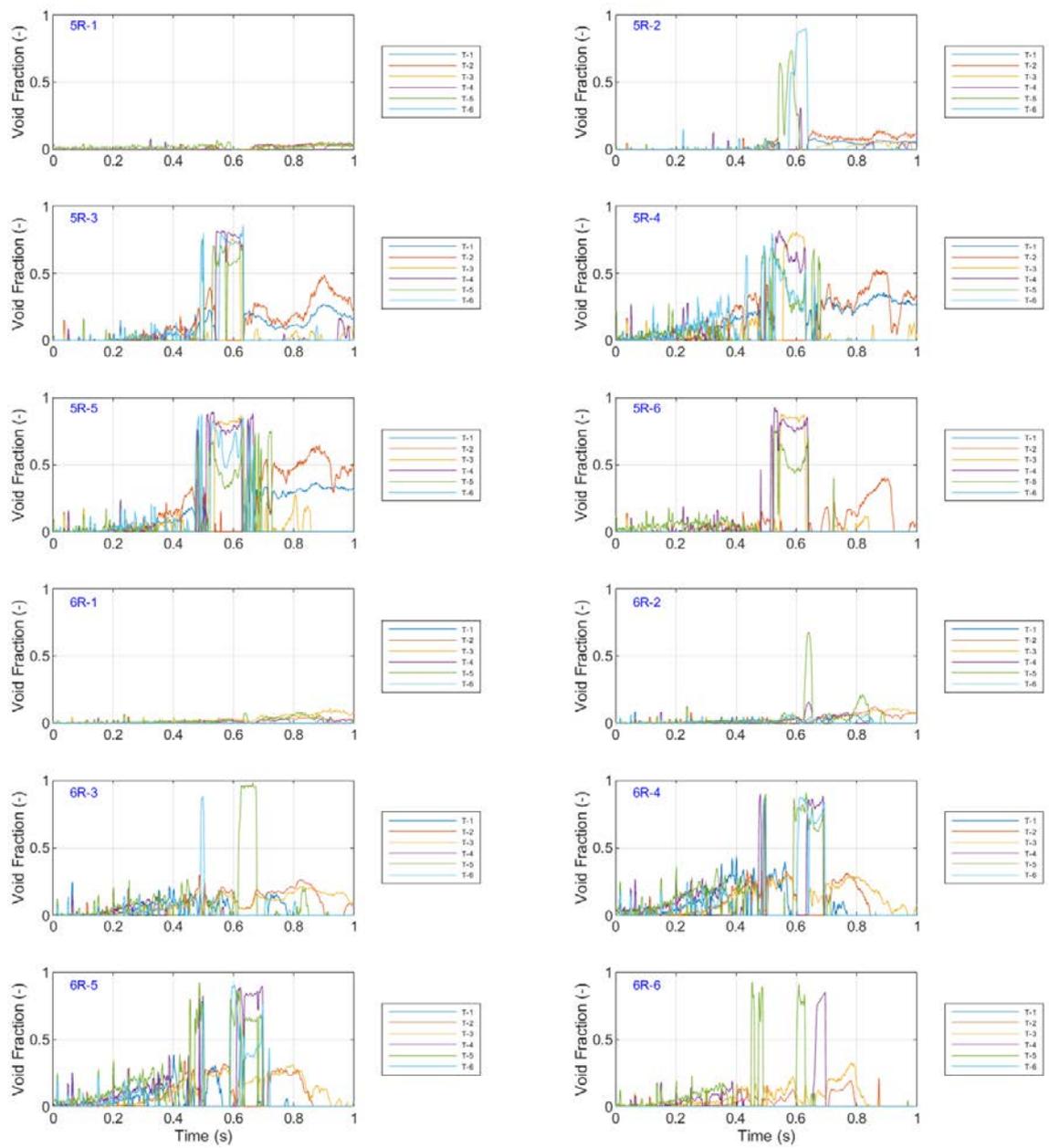


図 3.1-122 ボイド率の時間変化 (Run No.15/③)

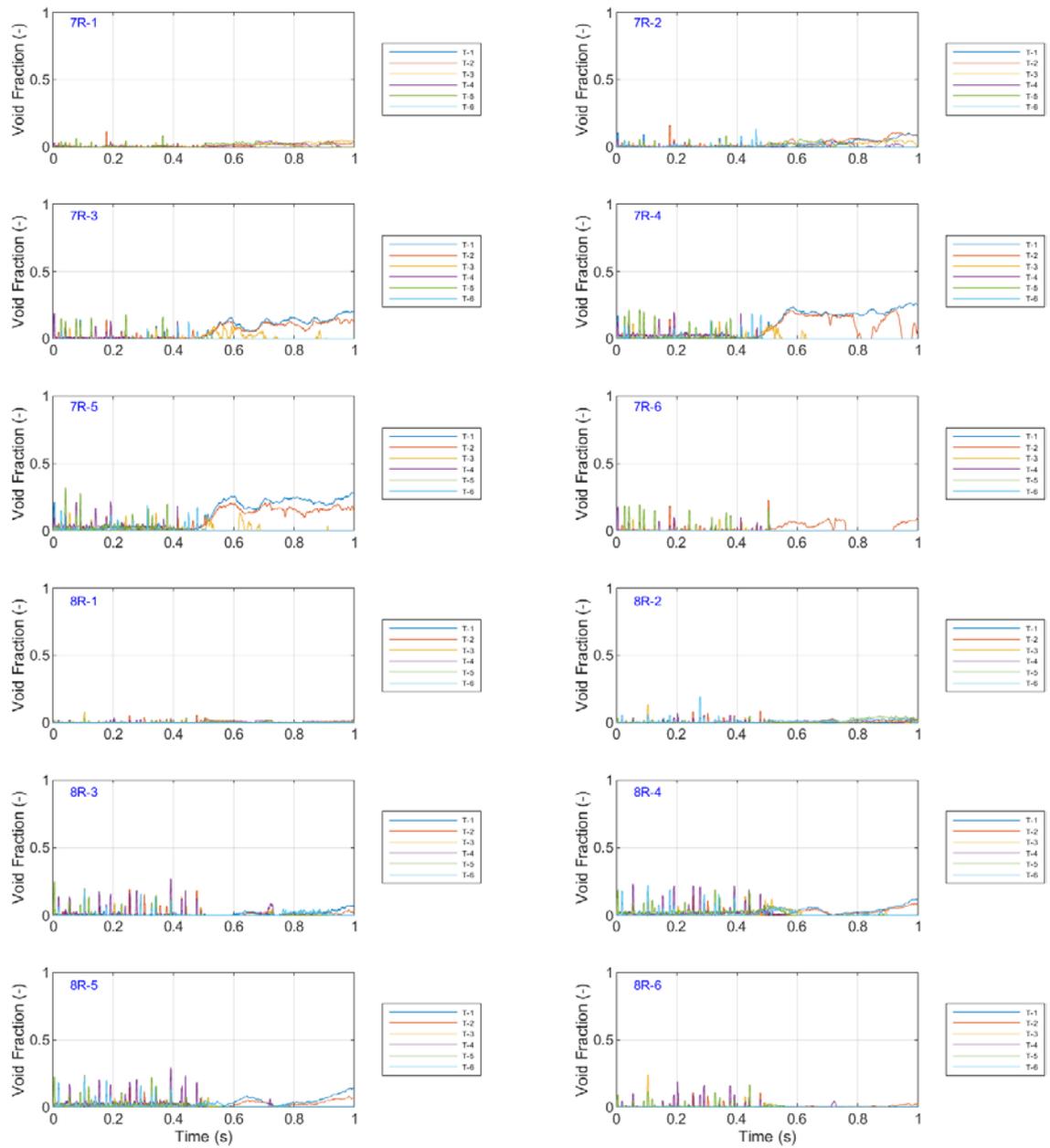


図 3.1-123 ボイド率の時間変化 (Run No.15/④)

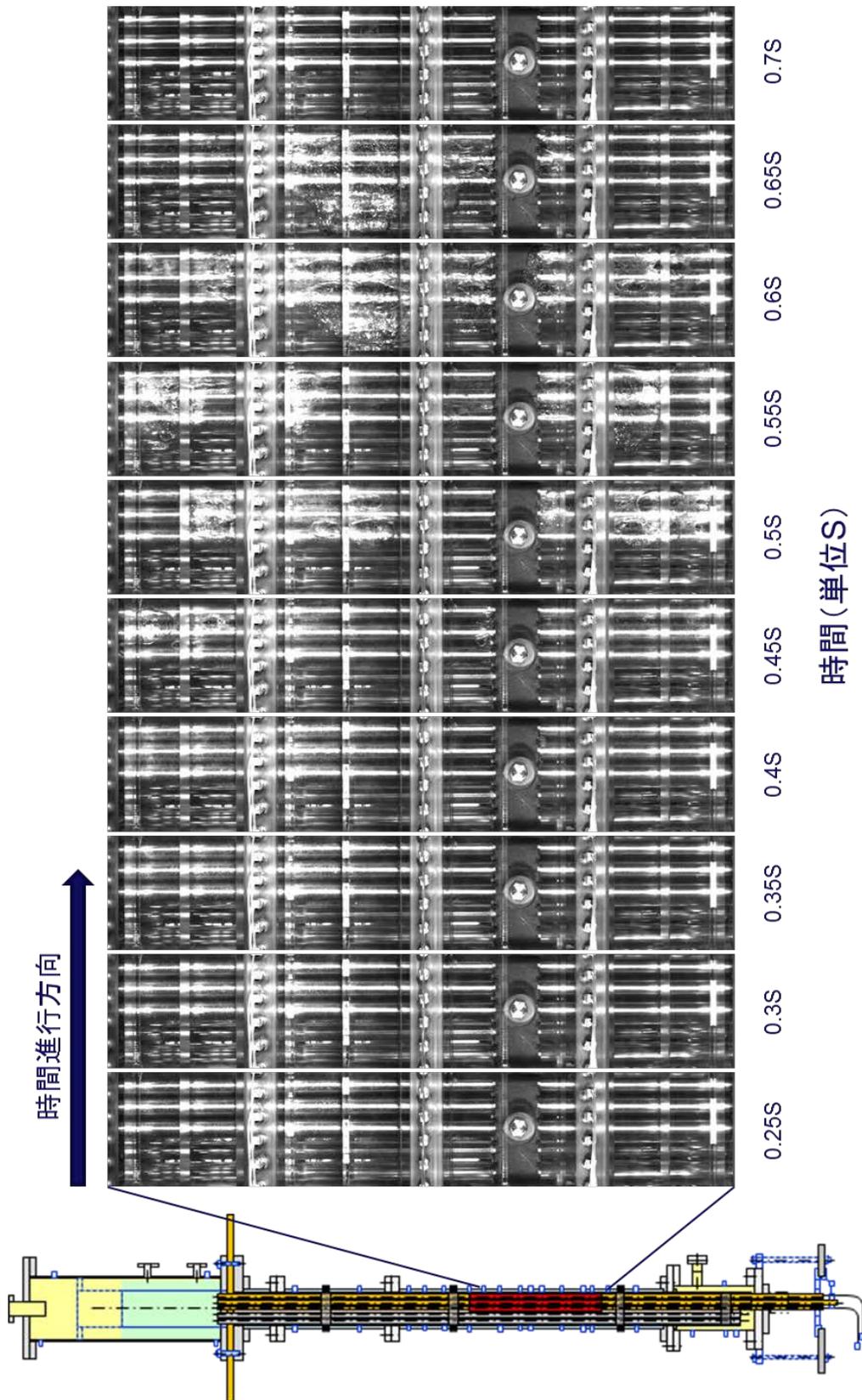


図 3.1-124 ボイド挙動の可視化画像 (Run No.15)

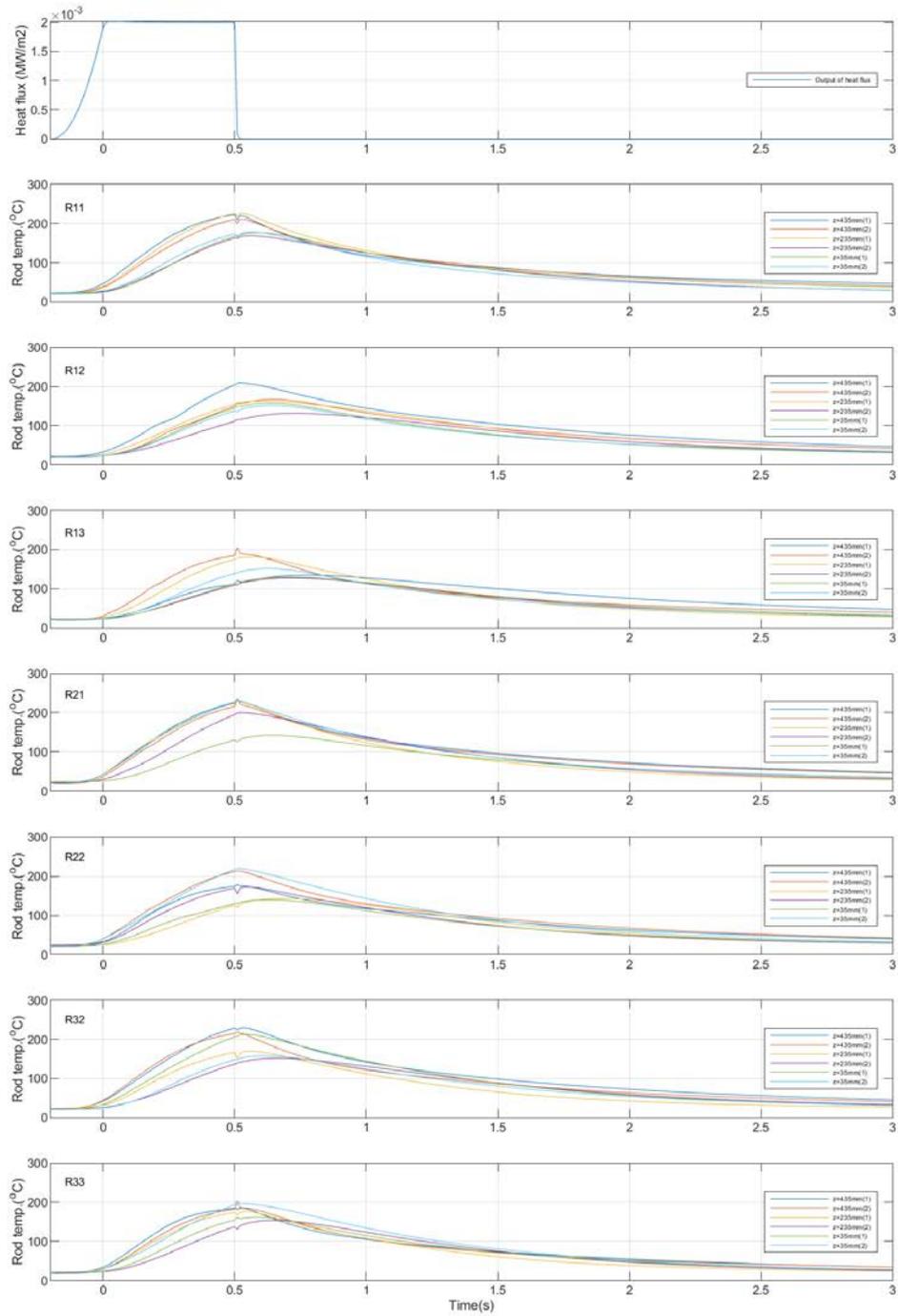


図 3.1-125 ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.16)

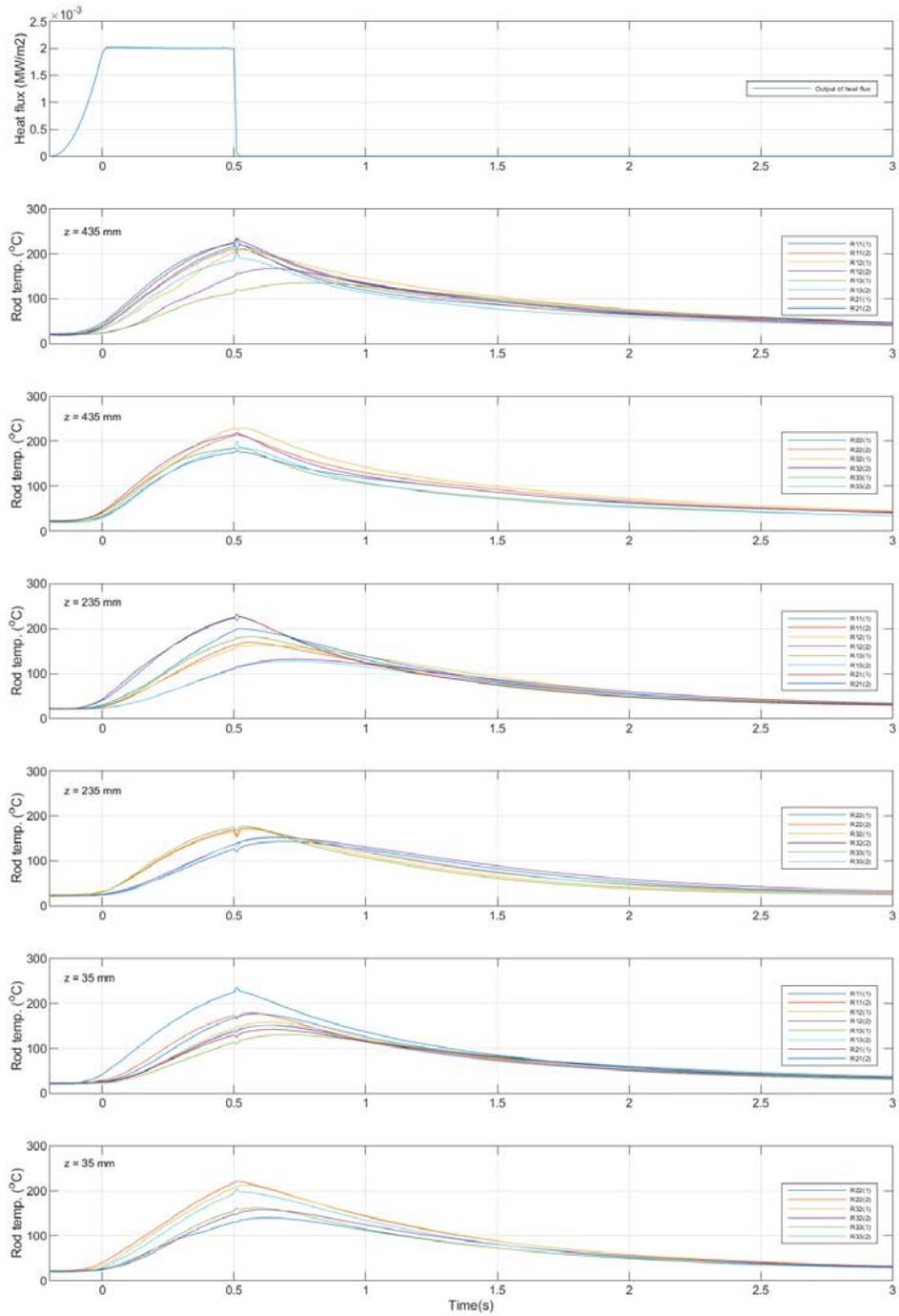


図 3.1-126 高さごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.16)

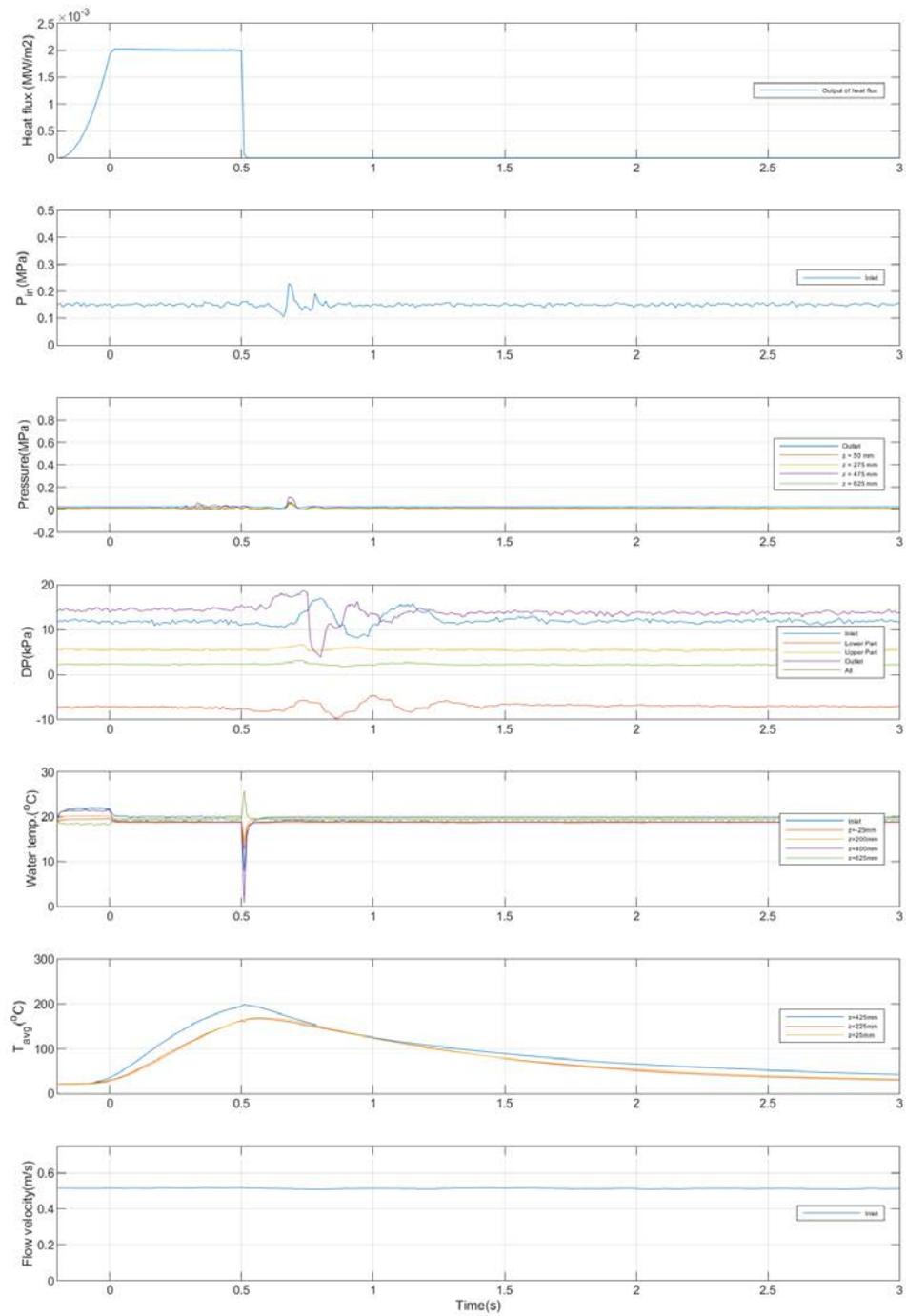


図 3.1-127 その他計測値の時間変化 (Run No.16)

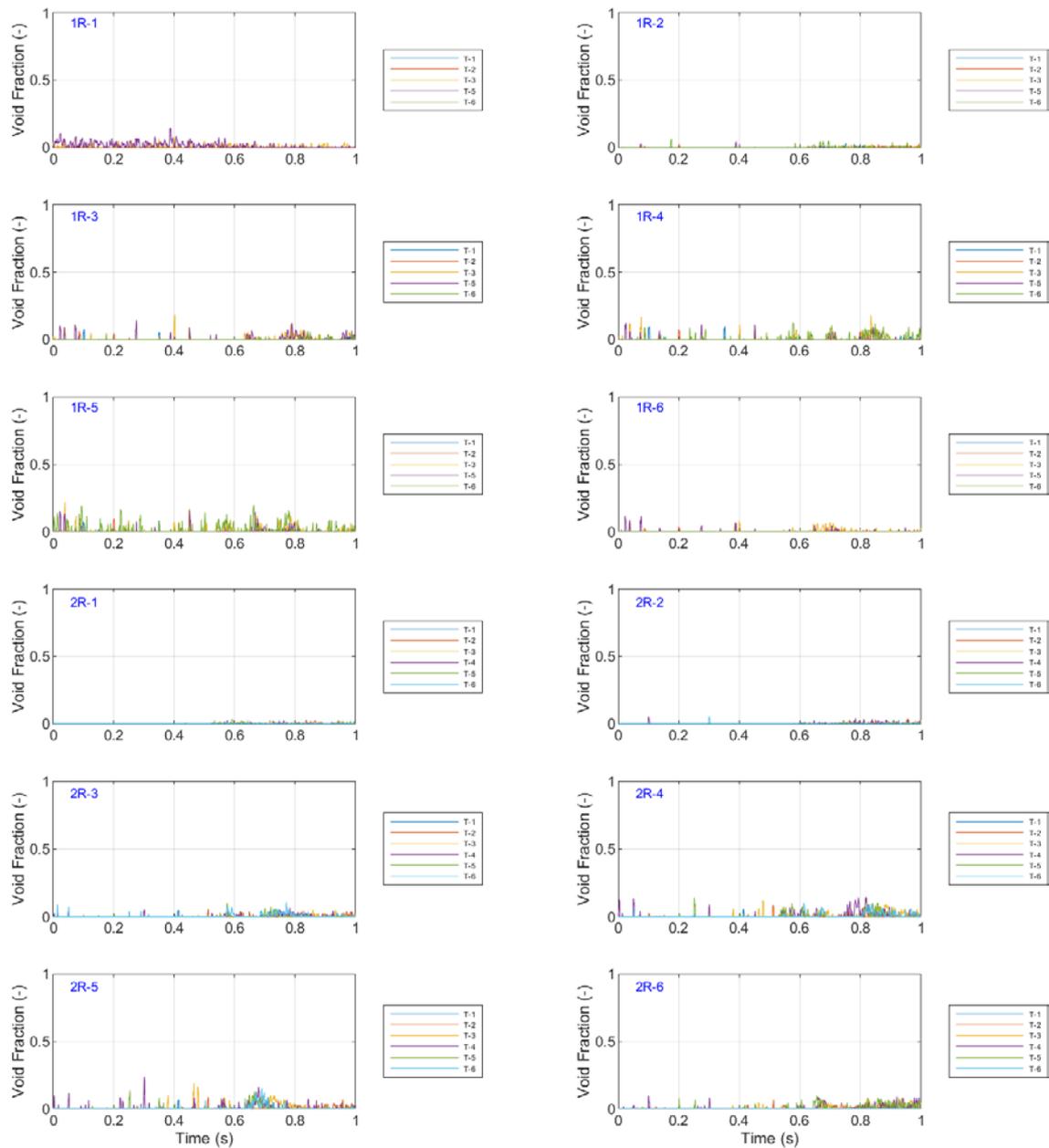


図 3.1-128 ボイド率の時間変化 (Run No.16①)

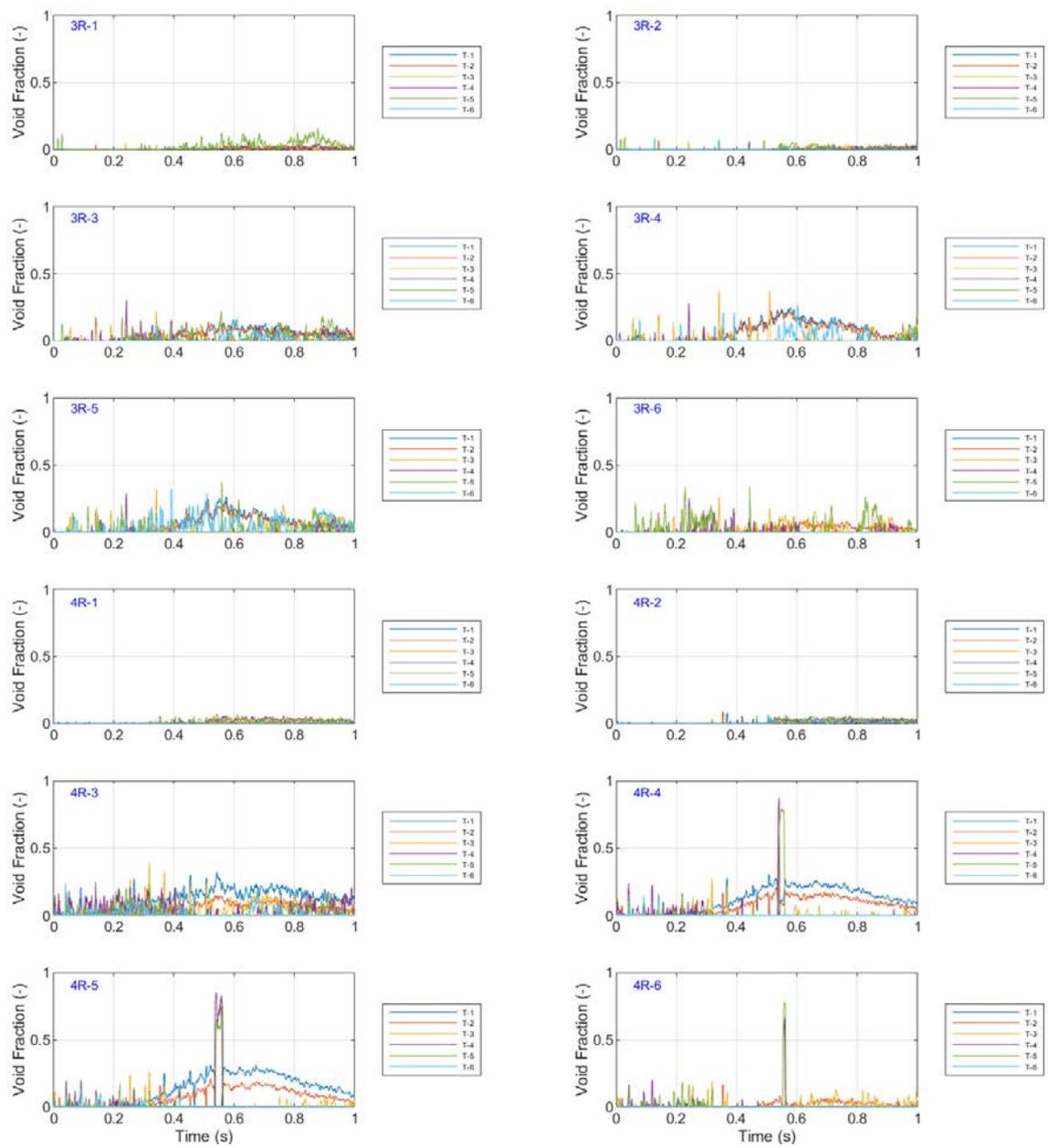


図 3.1-129 ボイド率の時間変化 (Run No.16/②)

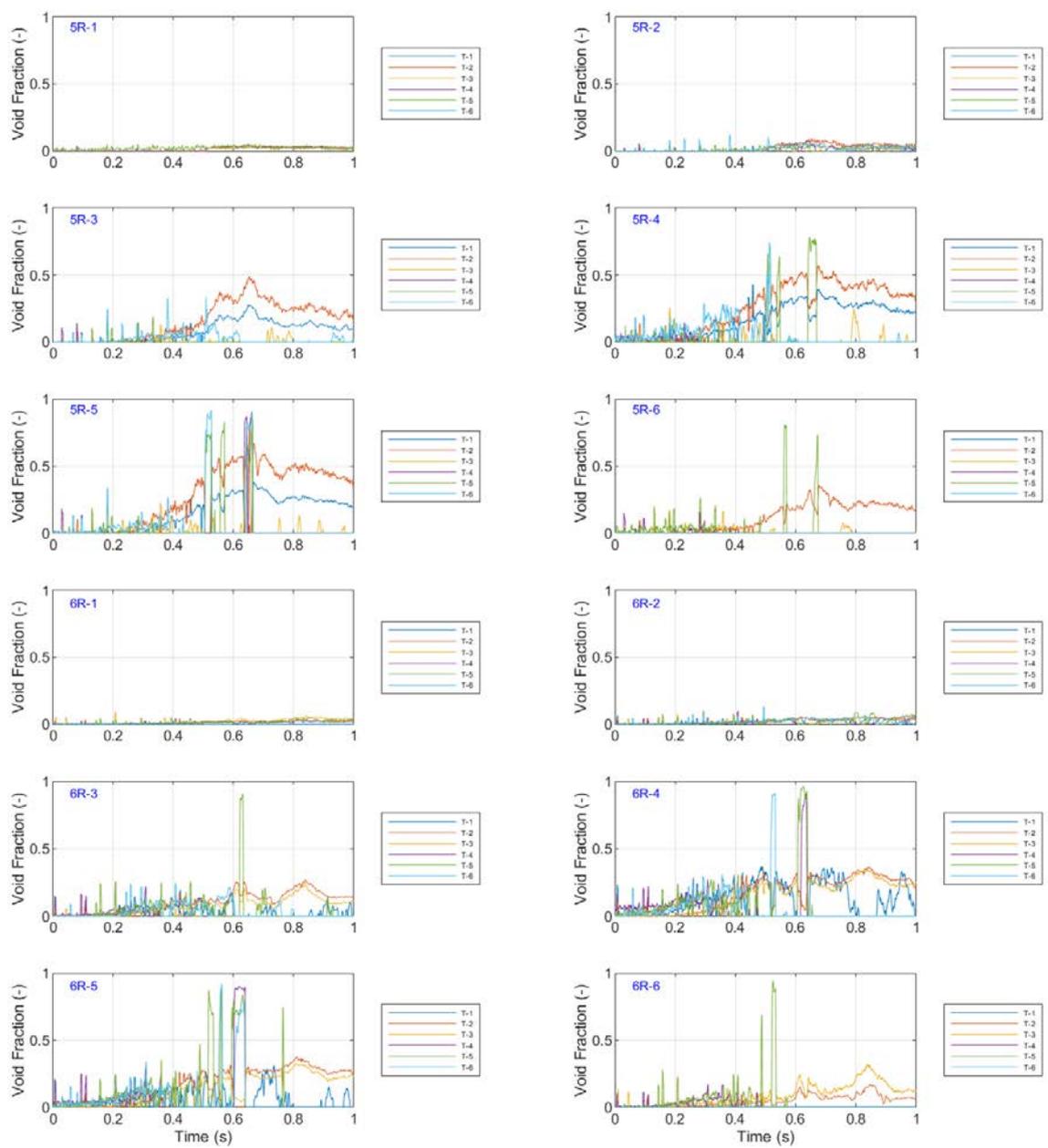


図 3.1-130 ポイド率の時間変化 (Run No.16③)

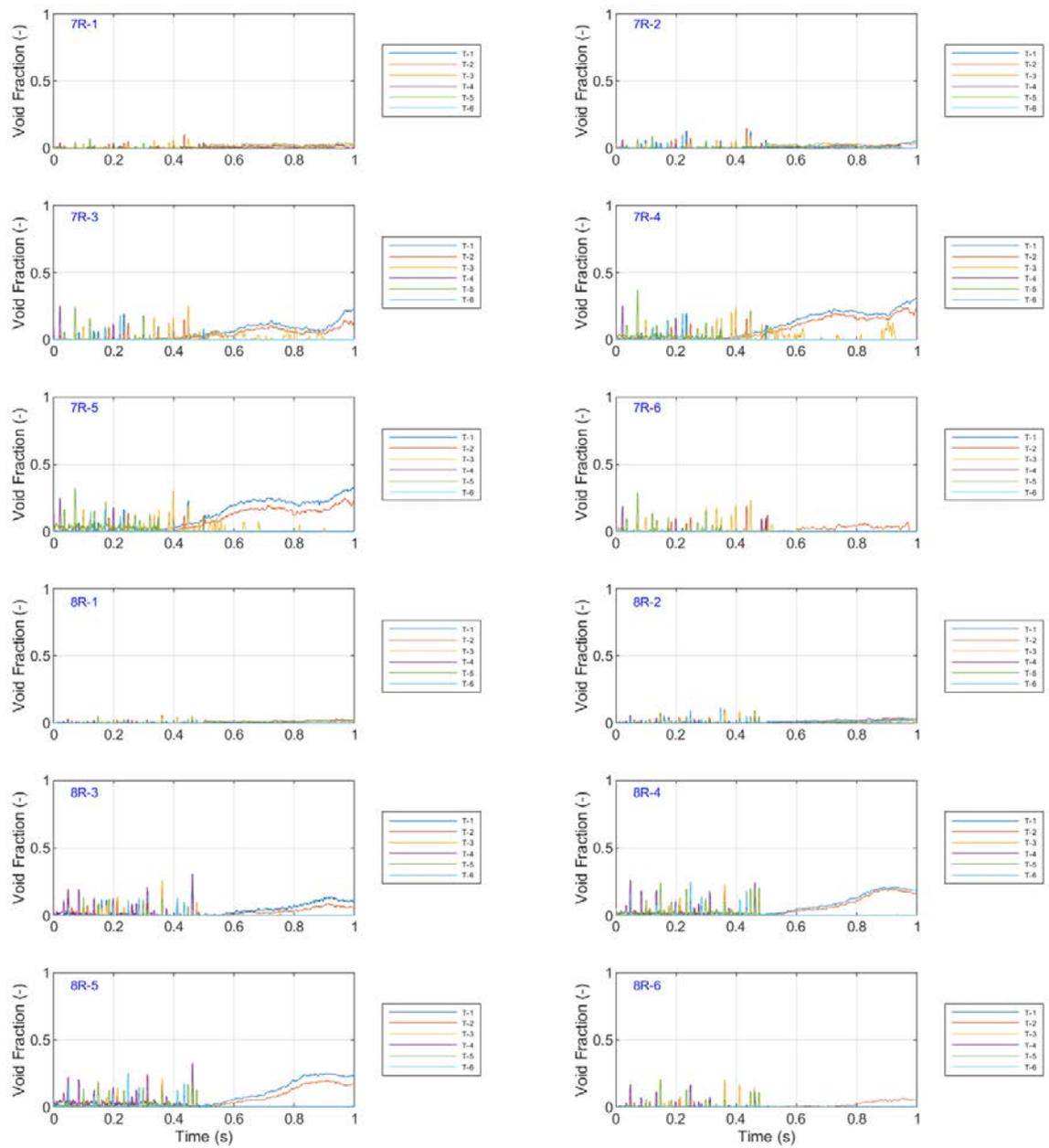


図 3.1-131 ボイド率の時間変化 (Run No.16/④)

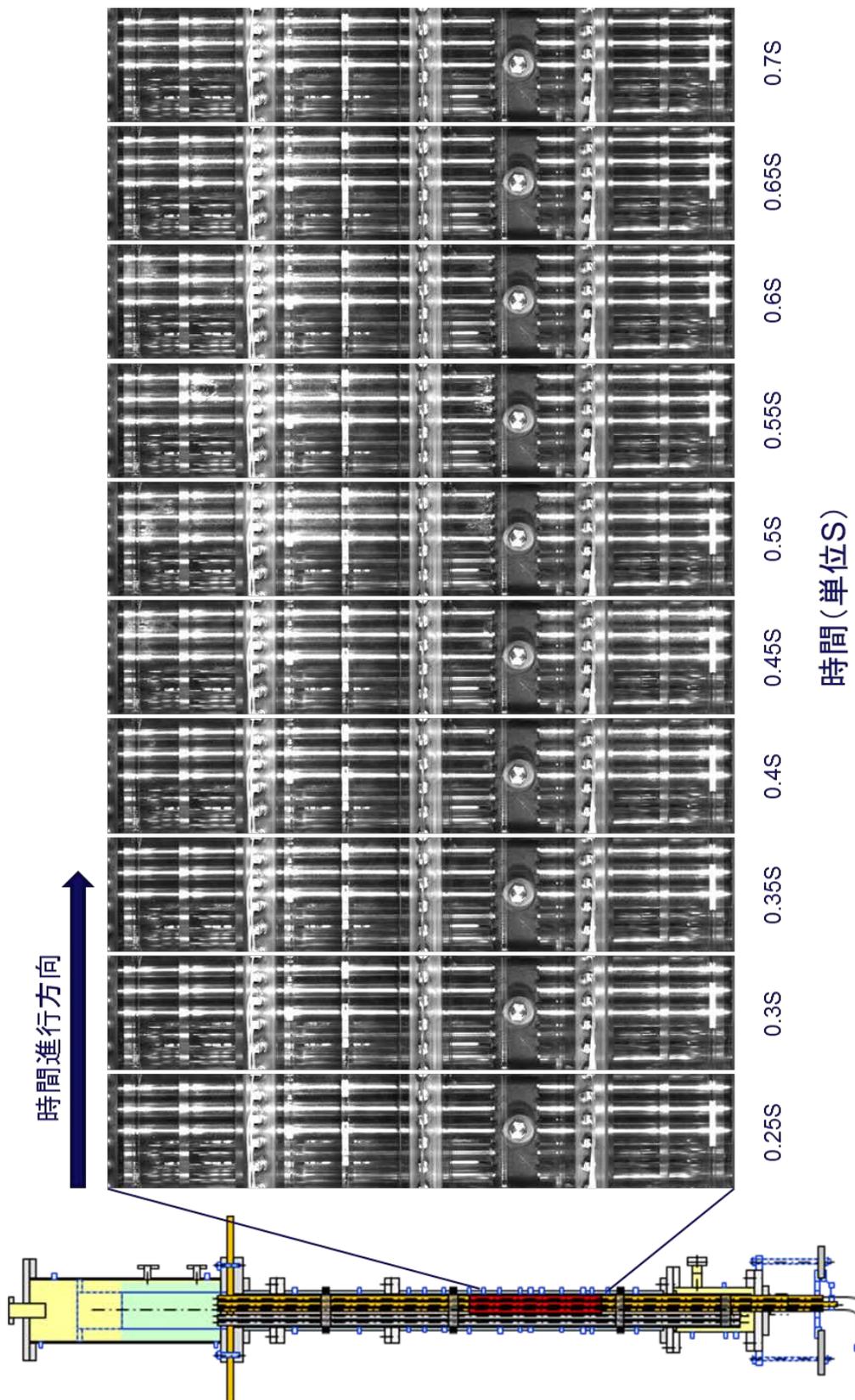


図 3.1-132 ボイド挙動の可視化画像 (Run No.16)

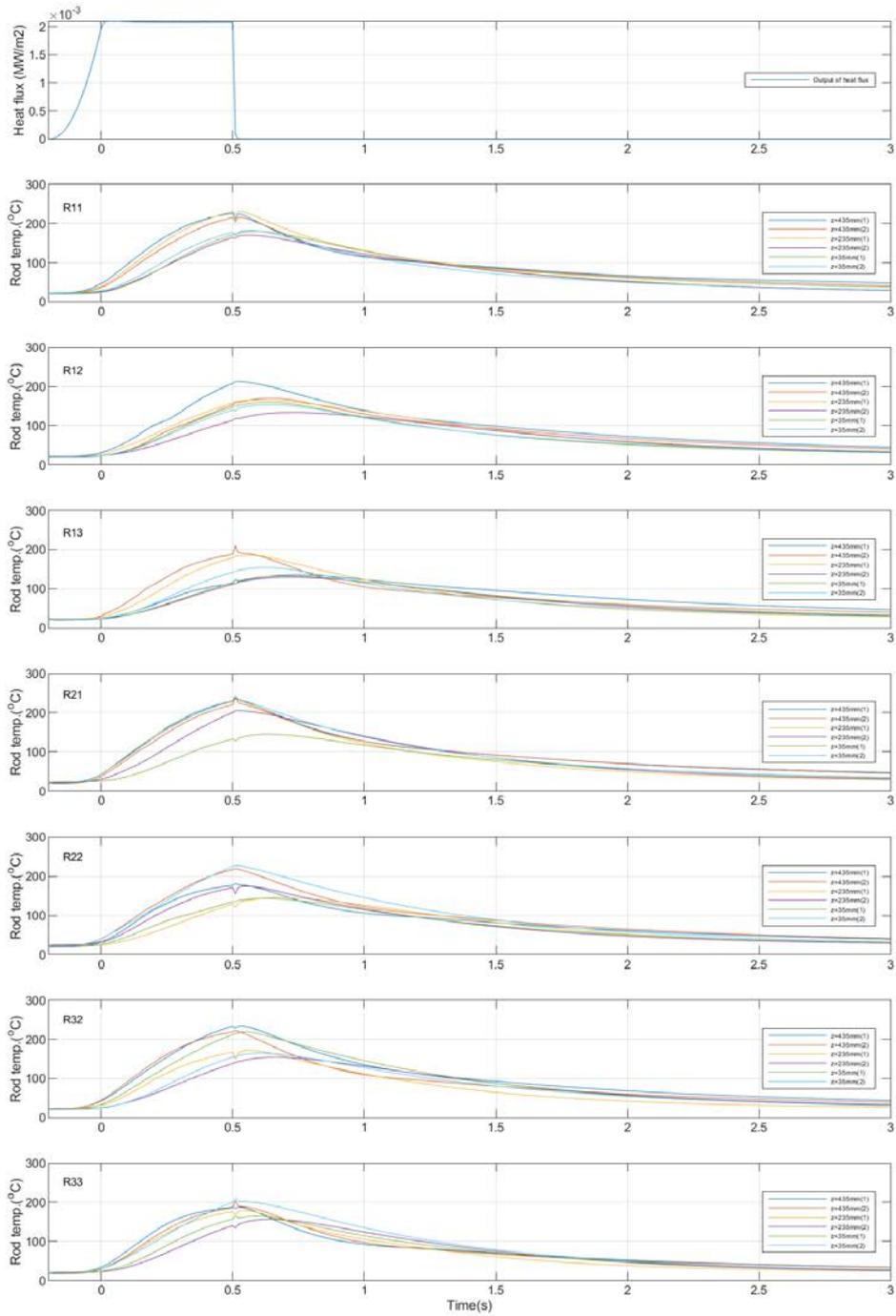


図 3.1-133 ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.17)

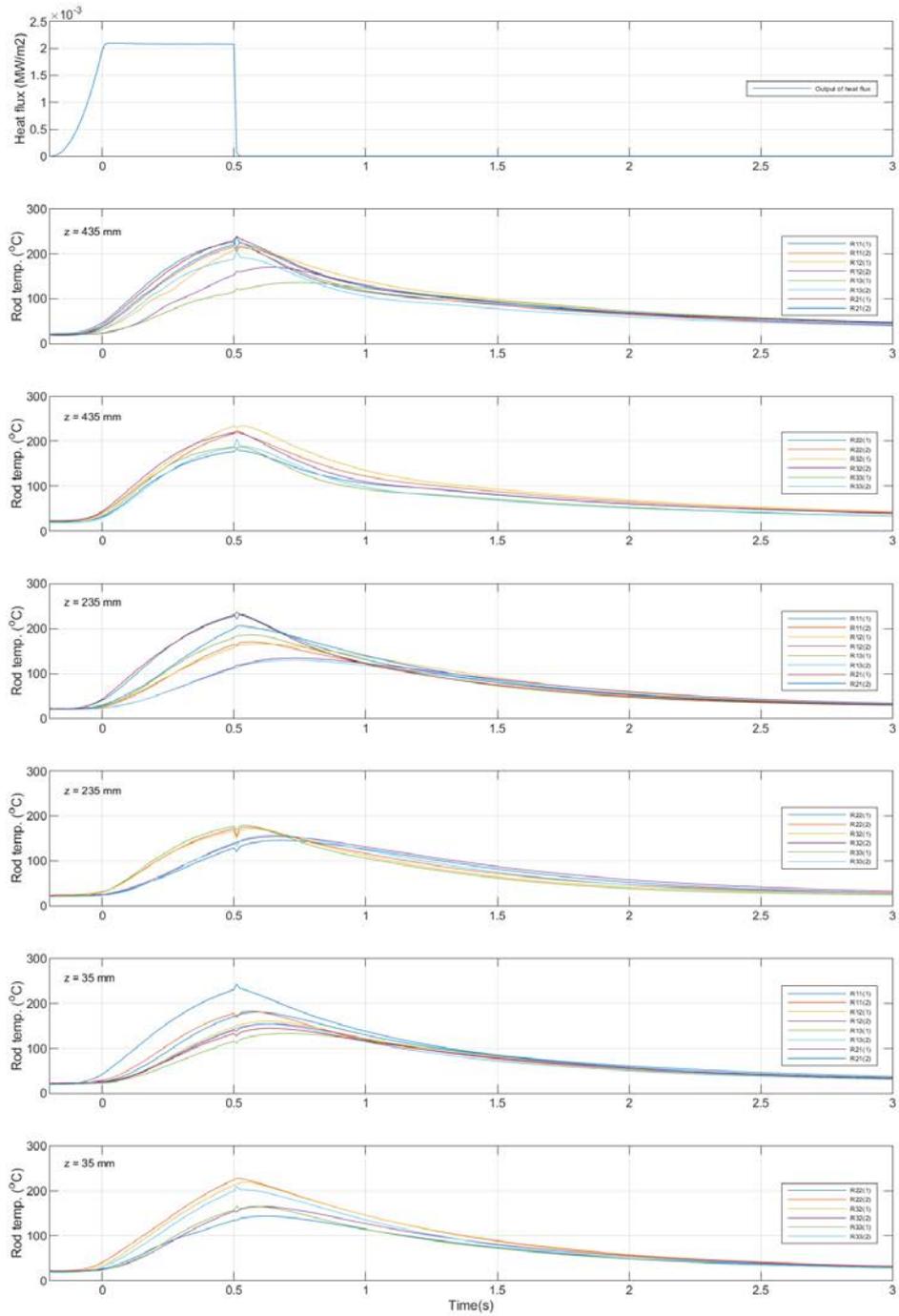


図 3.1-134 高さごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.17)

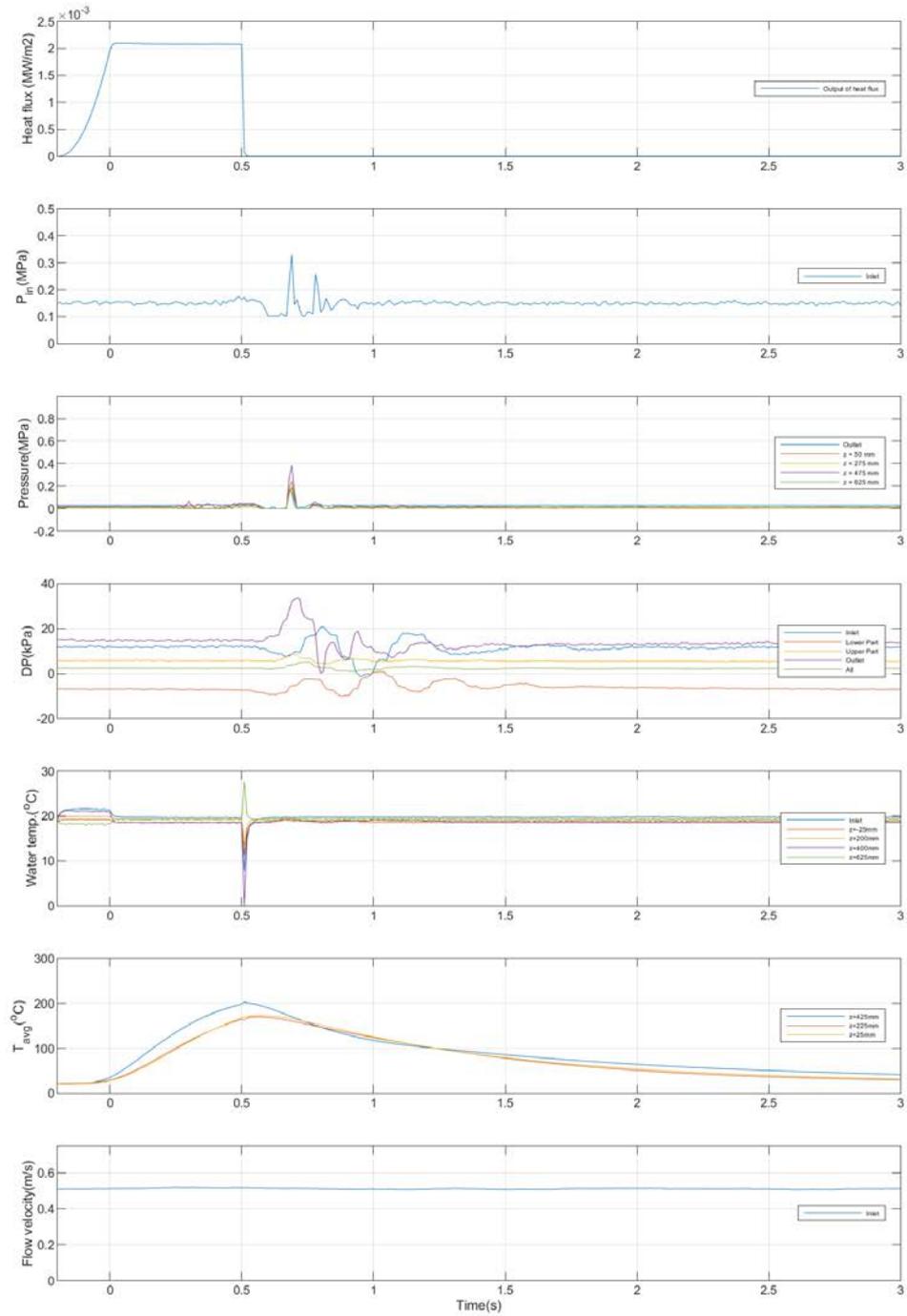


図 3.1-135 その他計測値の時間変化 (Run No.17)

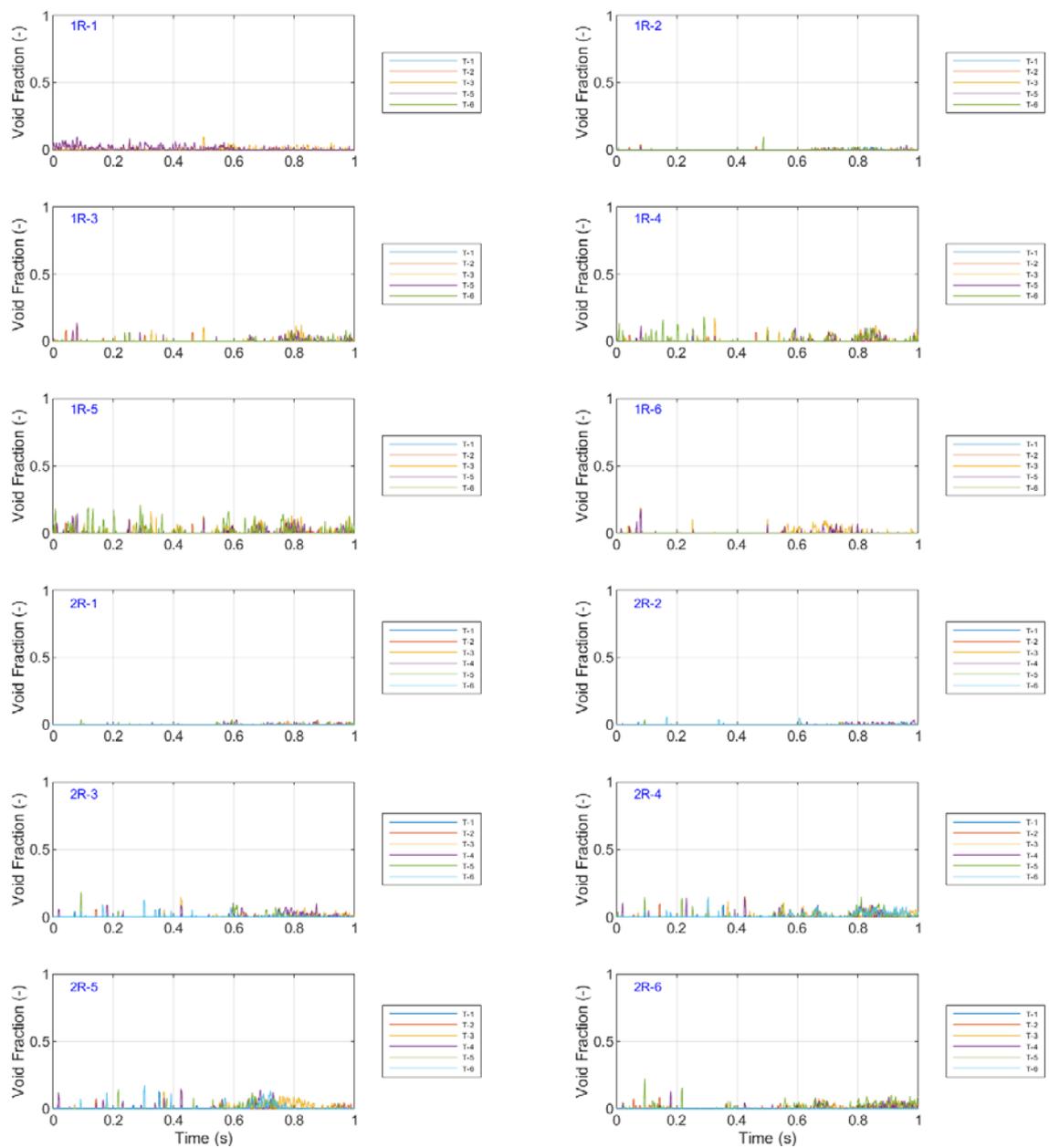


図 3.1-136 ボイド率の時間変化 (Run No.17/①)

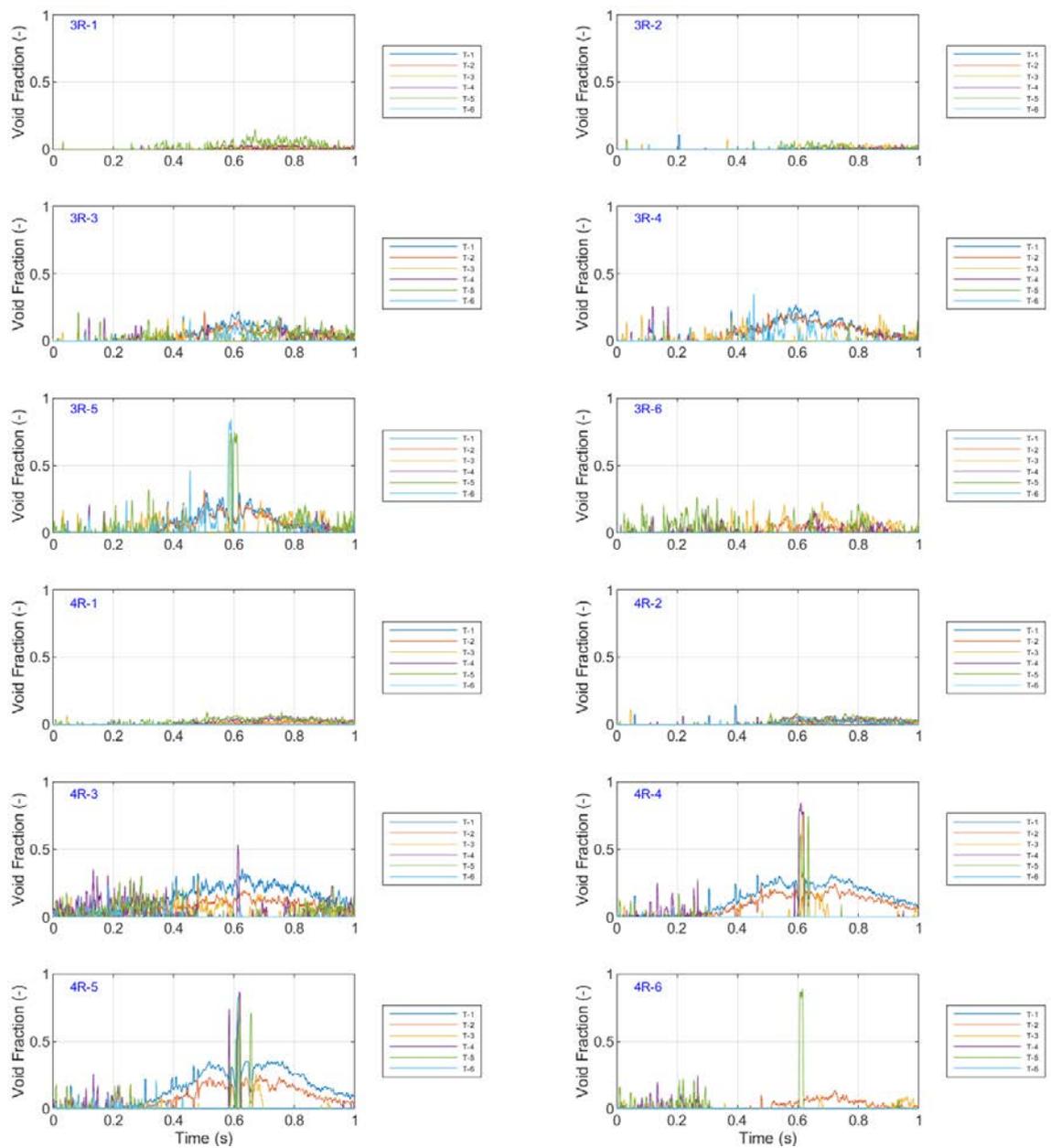


図 3.1-137 ボイド率の時間変化 (Run No.17/②)

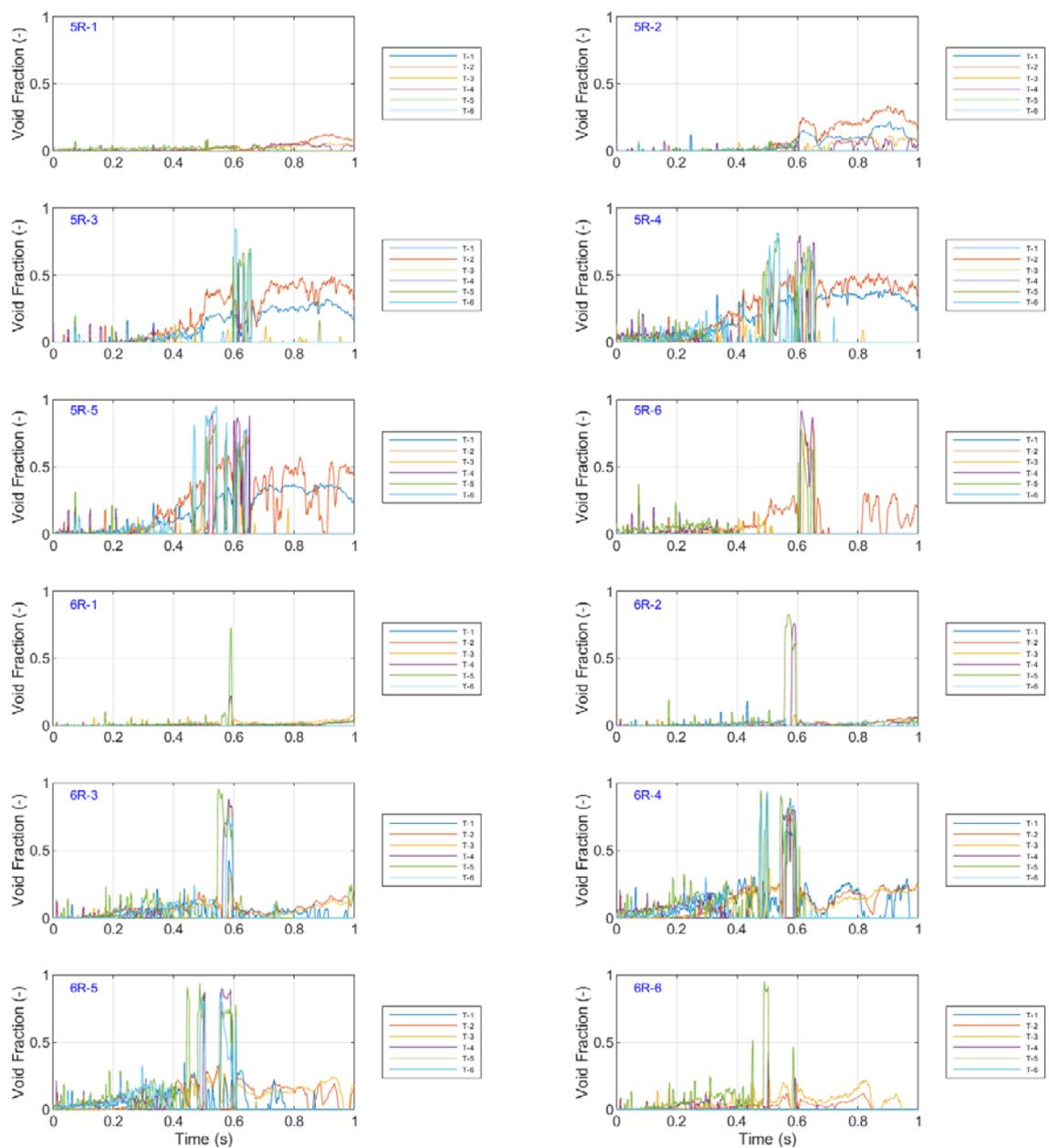


図 3.1-138 ボイド率の時間変化 (Run No.17/③)

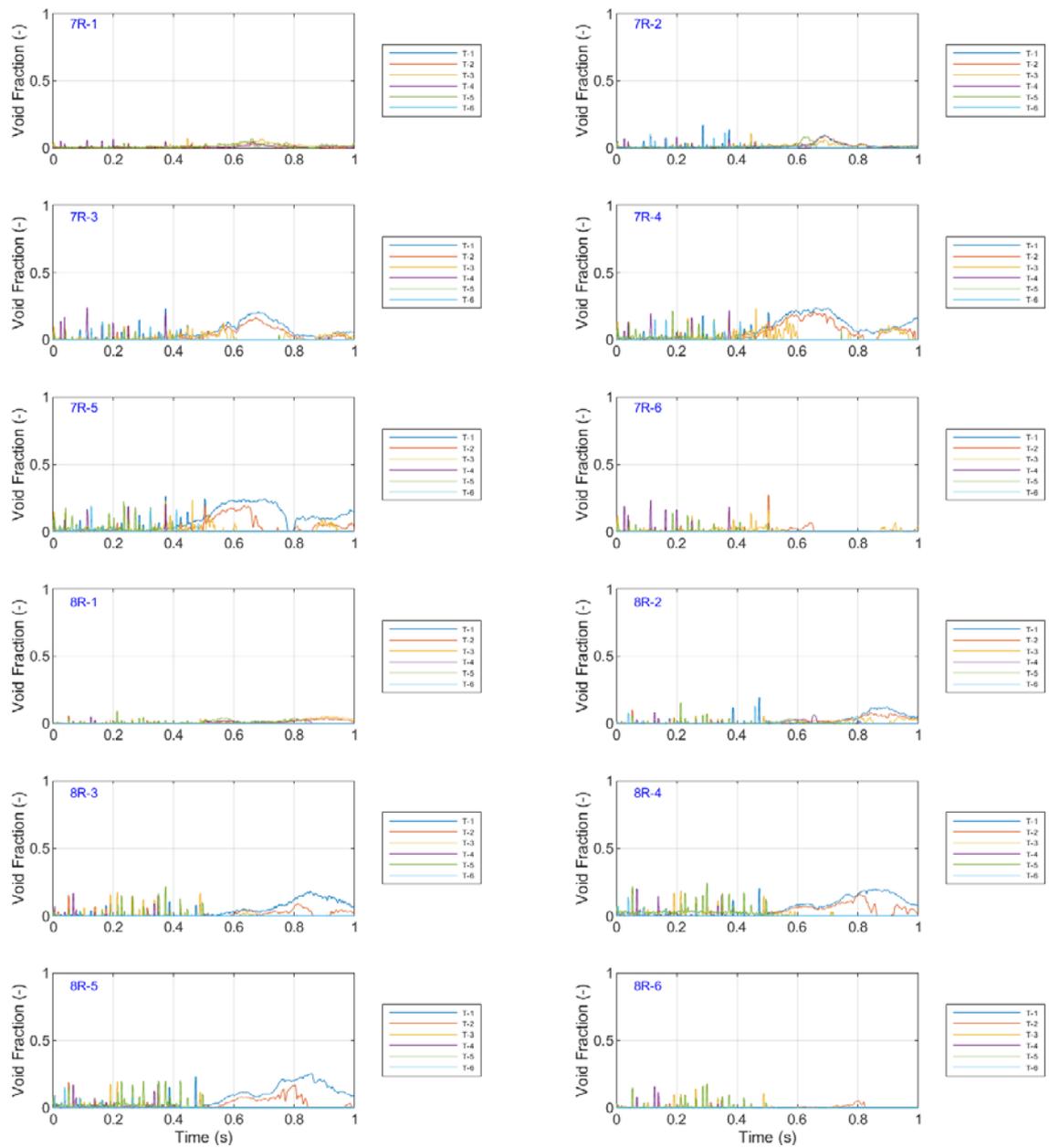


図 3.1-139 ボイド率の時間変化 (Run No.17/④)

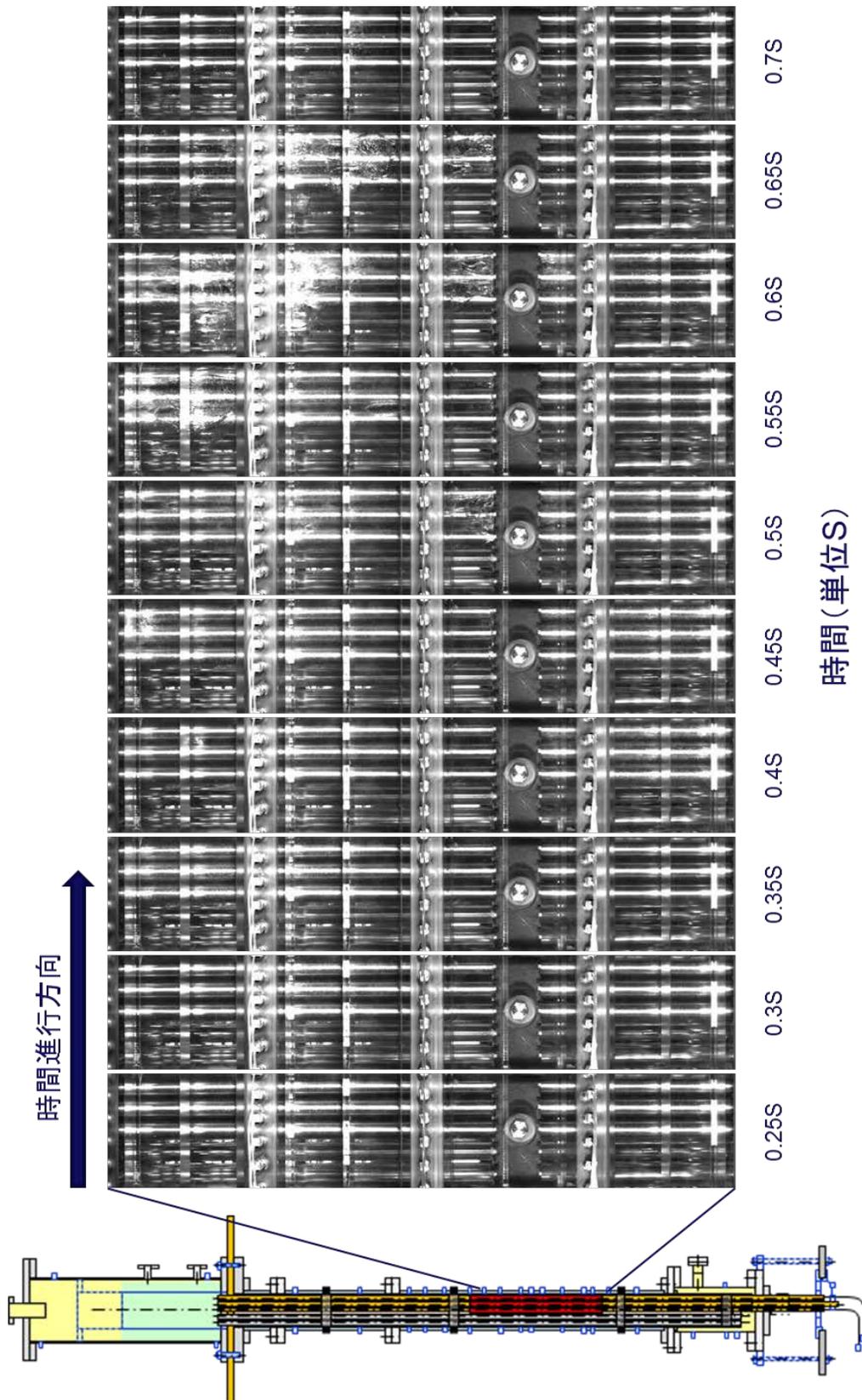


図 3.1-140 ボイド挙動の可視化画像 (Run No.17)

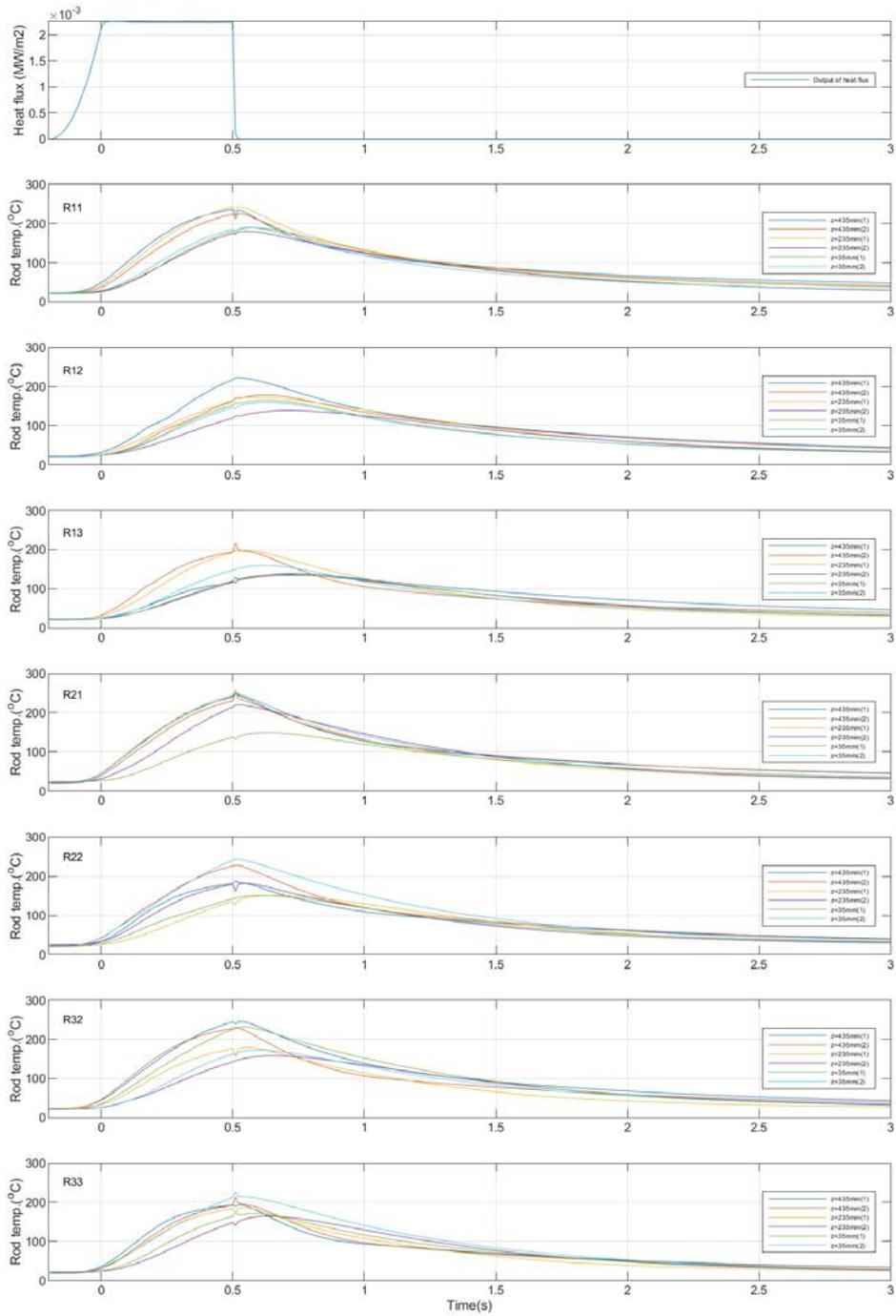


図 3.1-141 ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.18)

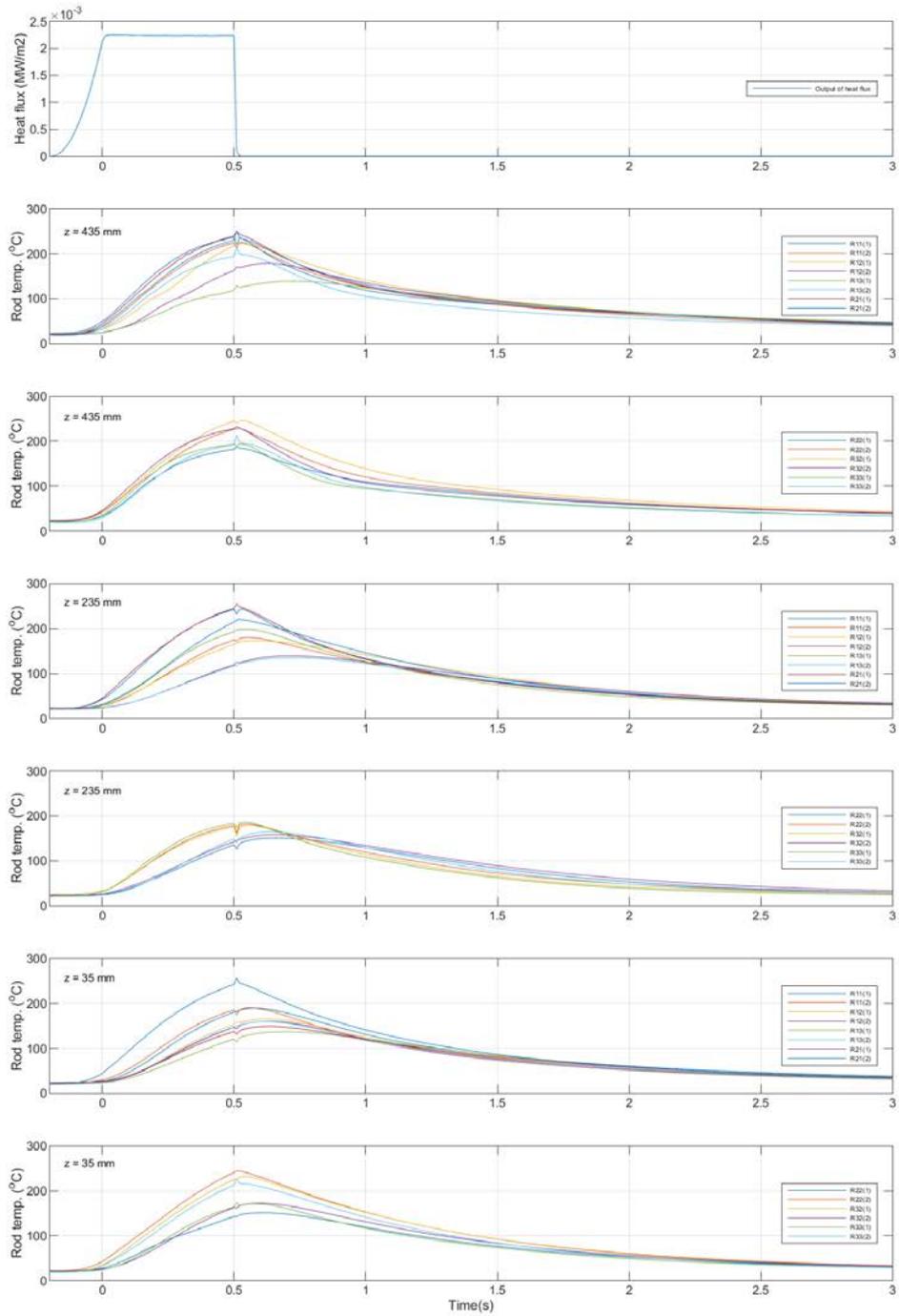


図 3.1-142 高さごとの燃料被覆管温度の時間変化 (Run No.18)

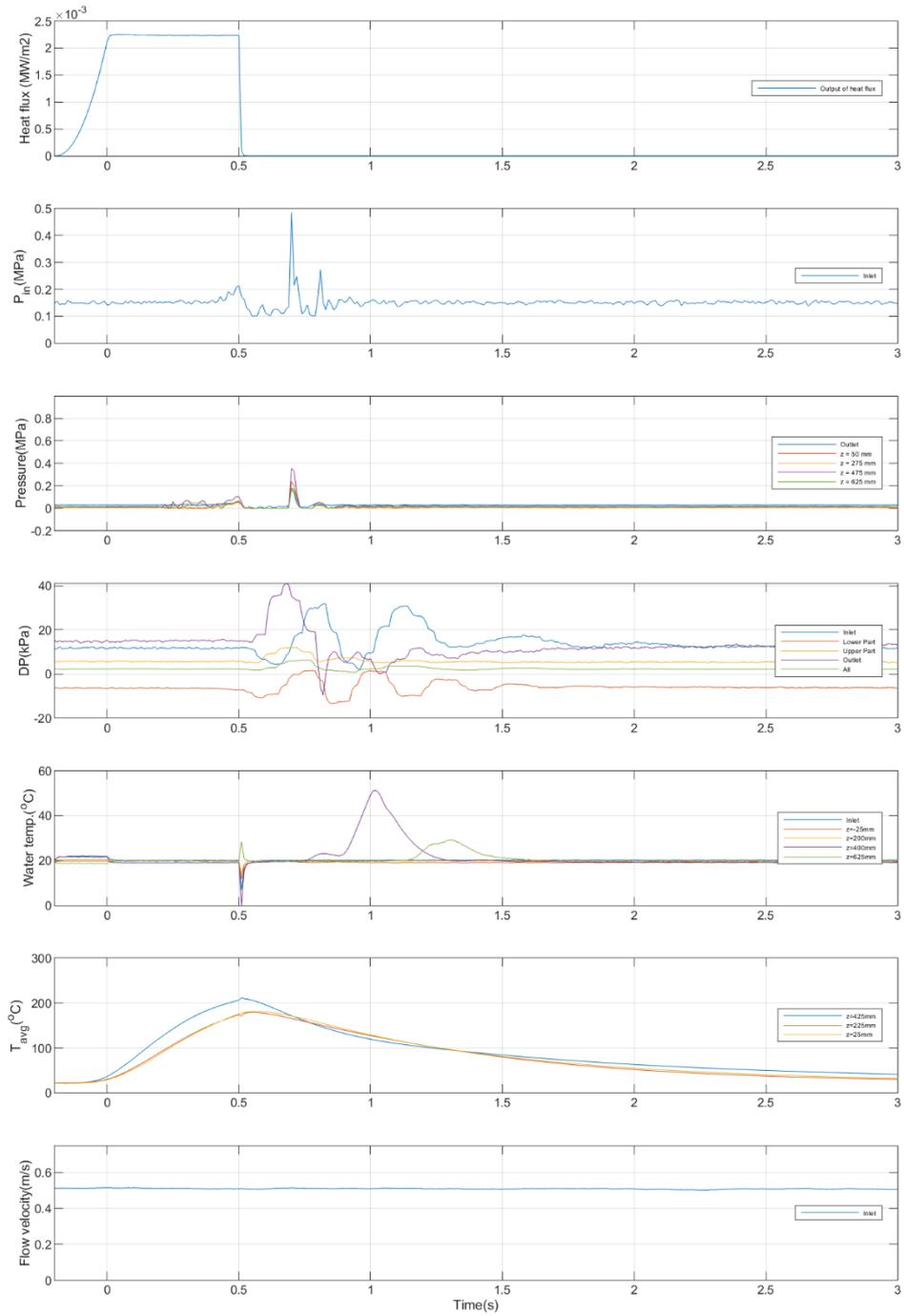


図 3.1-143 その他計測値の時間変化 (Run No.18)

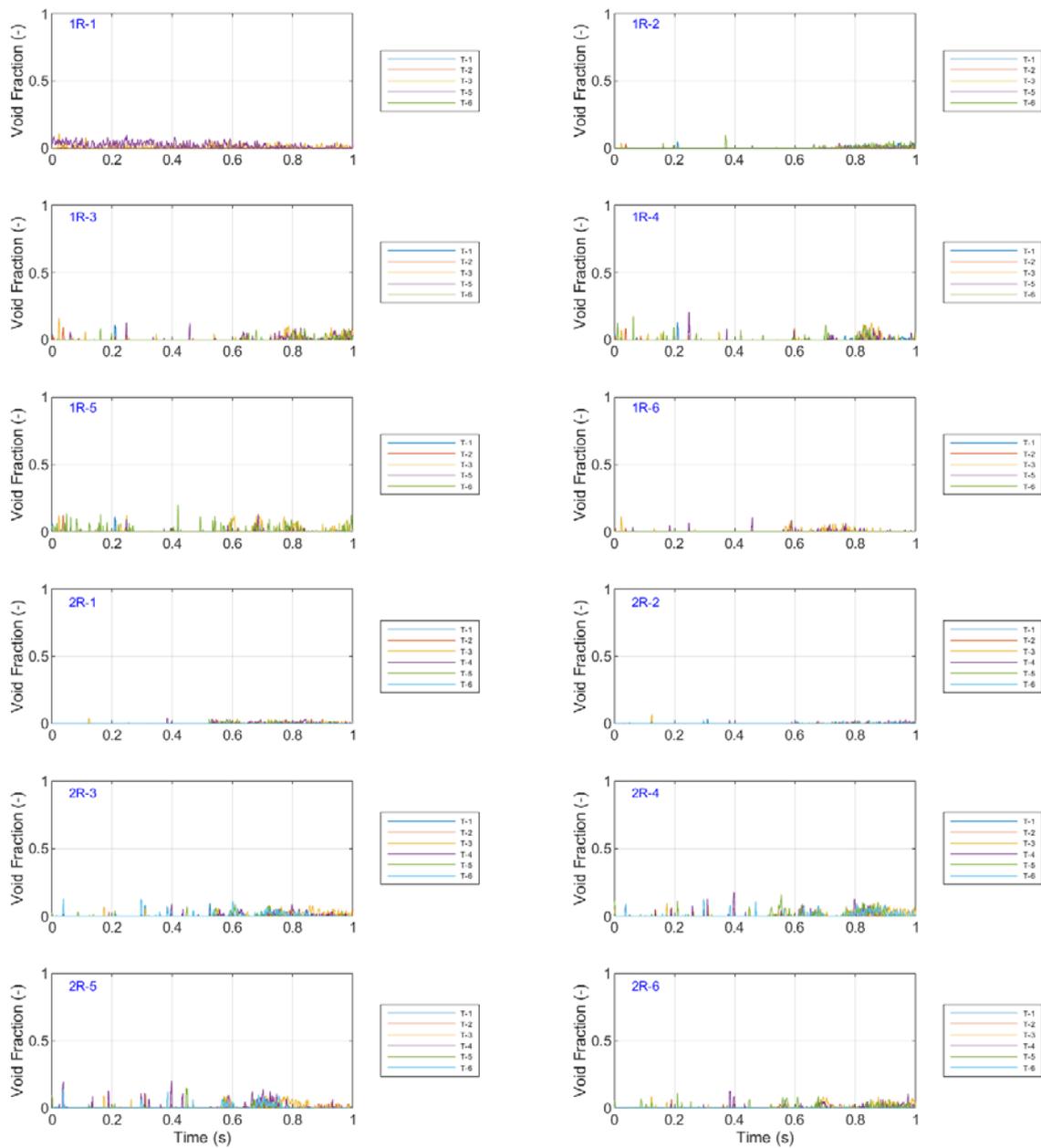


図 3.1-144 ボイド率の時間変化 (Run No.18/①)

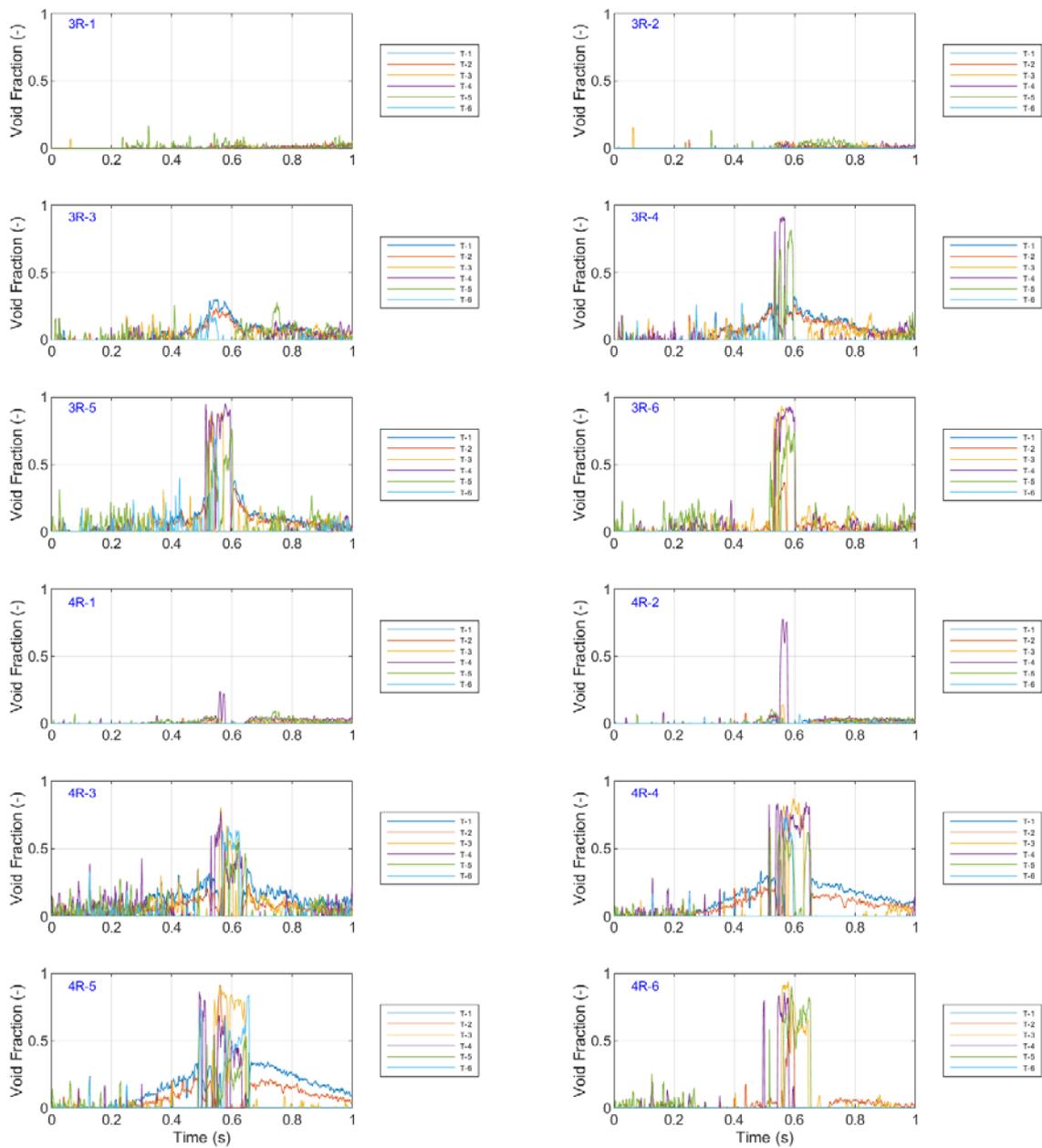


図 3.1-145 ボイド率の時間変化 (Run No.18/②)

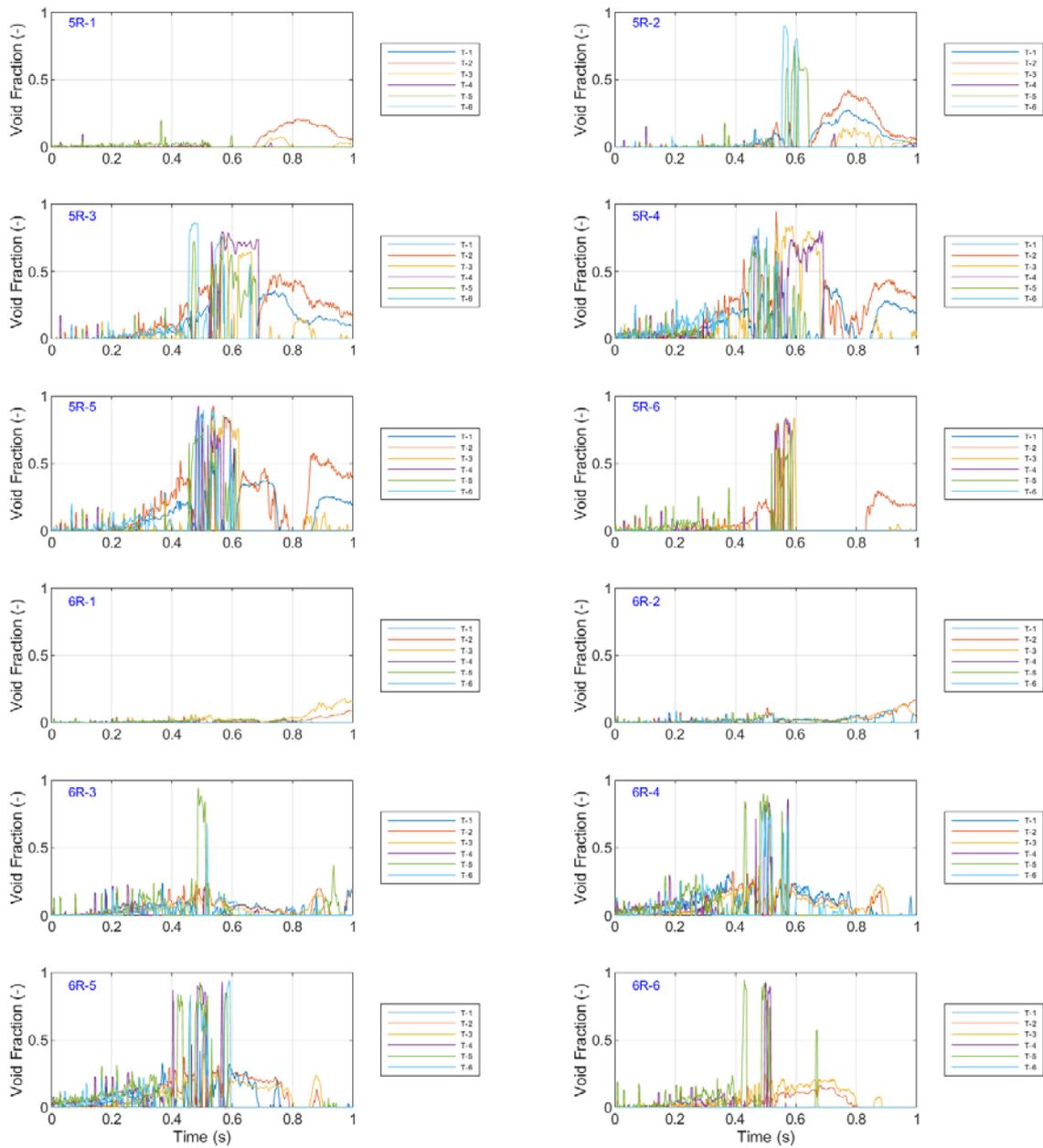


図 3.1-146 ボイド率の時間変化 (Run No.18/③)

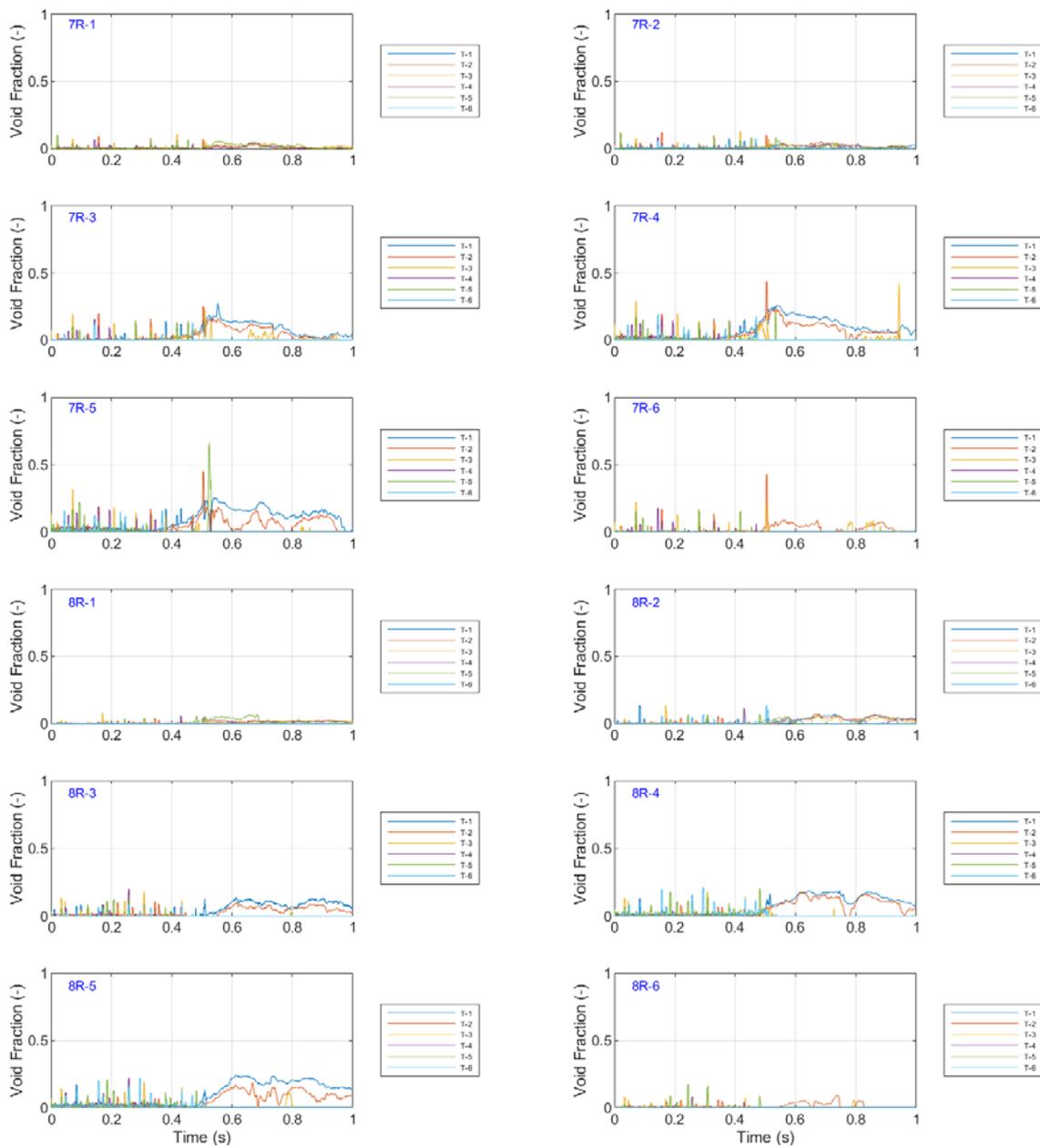


図 3.1-147 ボイド率の時間変化 (Run No.18/④)

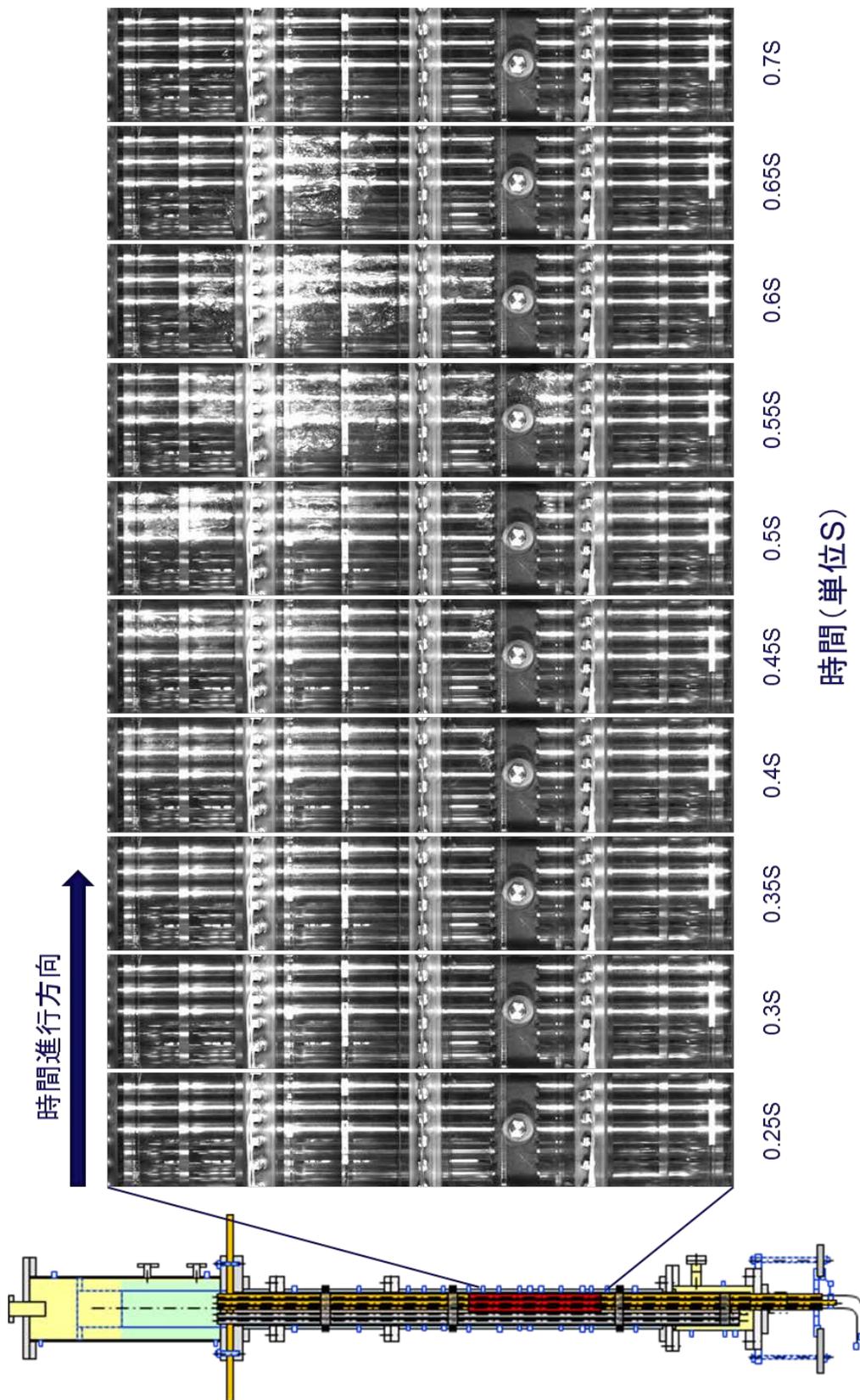


図 3.1-148 ボイド挙動の可視化画像 (Run No.18)

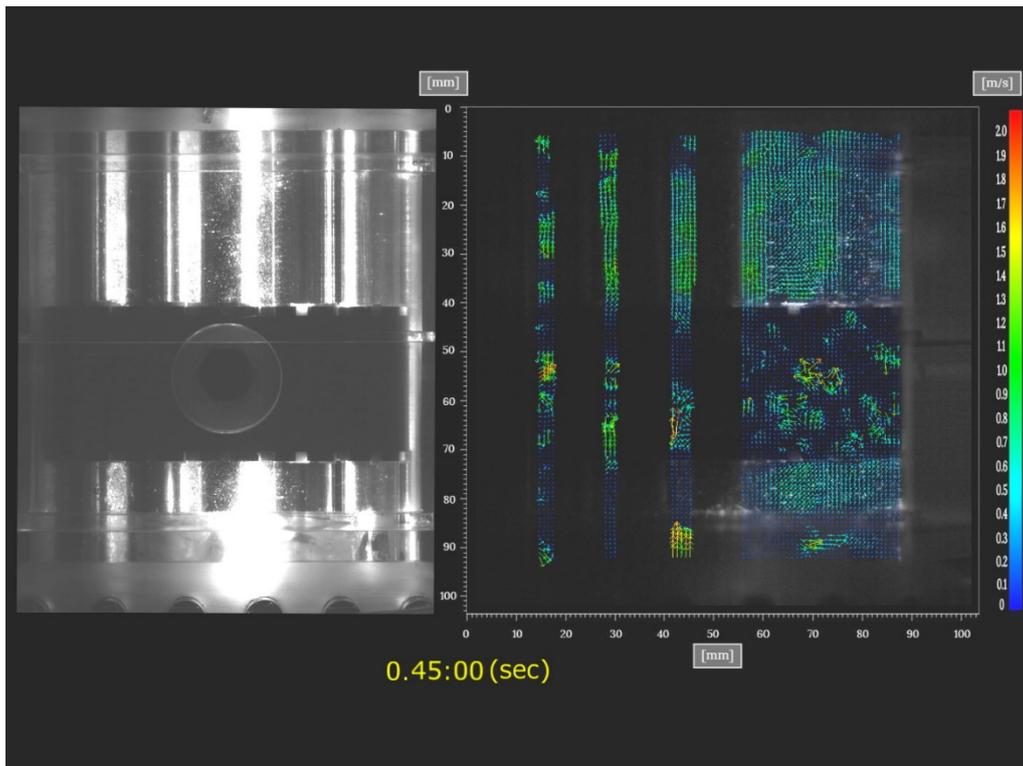


図 3.1-149 PIVによる液相流速分布（ケース A, 時刻 0.45 秒, 第 3 段 WMS 上流部）

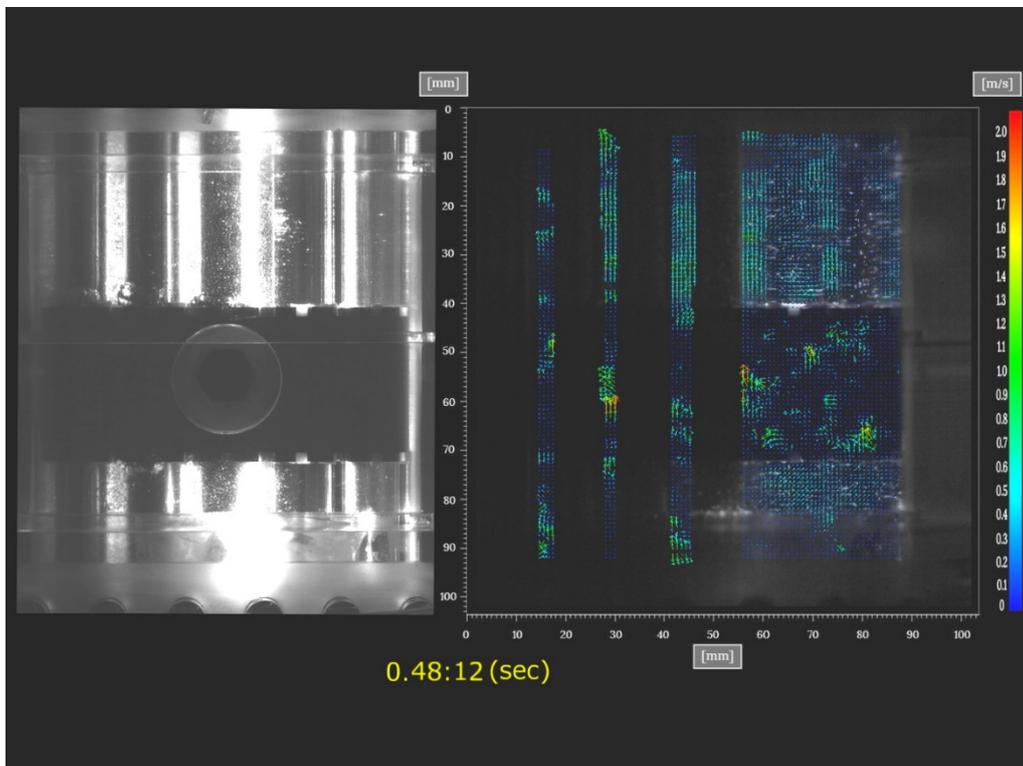


図 3.1-150 PIVによる液相流速分布（ケース A, 時刻 0.48 秒, 第 3 段 WMS 上流部）

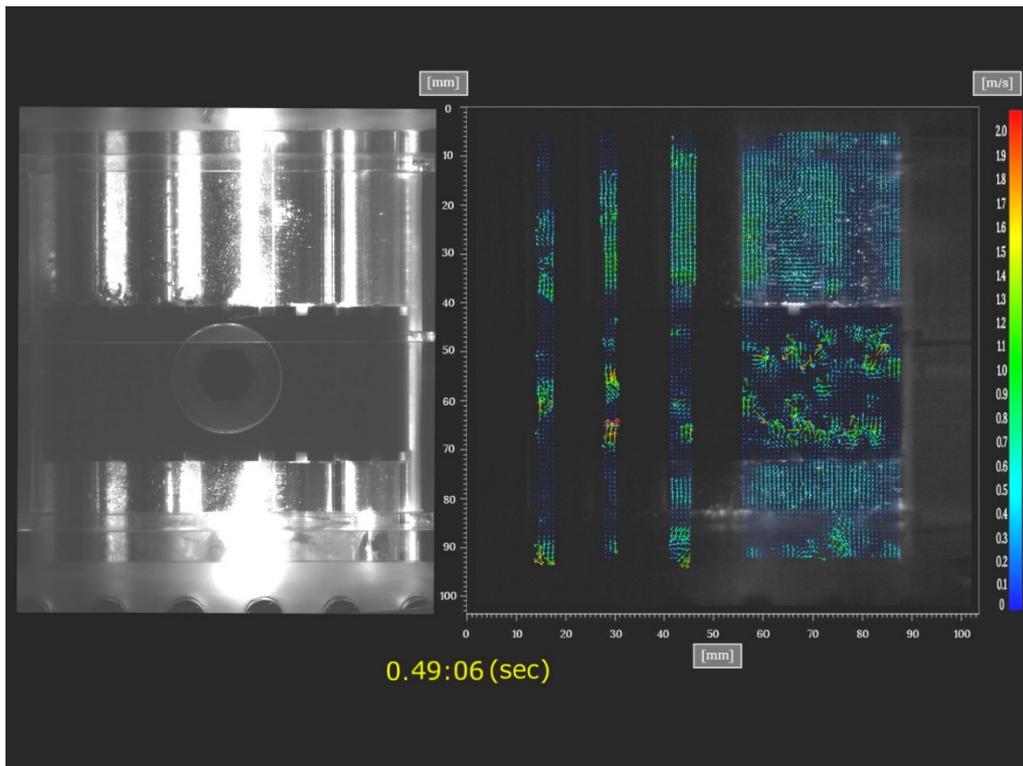


図 3.1-151 PIVによる液相流速分布（ケース A, 時刻 0.49 秒, 第 3 段 WMS 上流部）

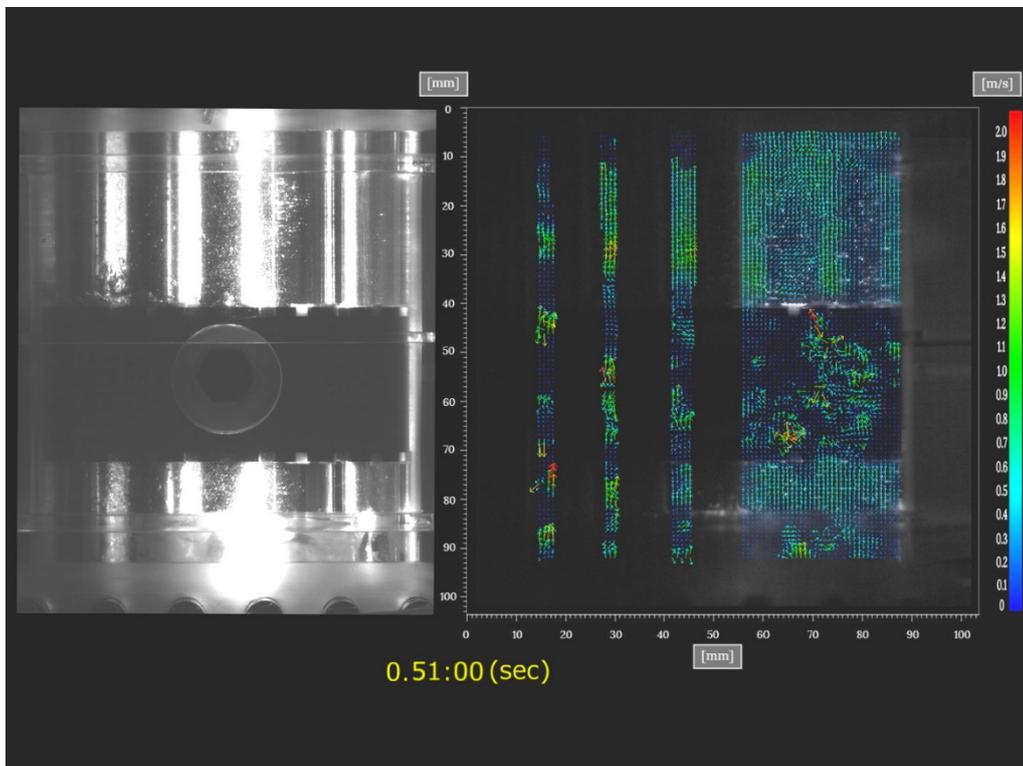


図 3.1-152 PIVによる液相流速分布（ケース A, 時刻 0.51 秒, 第 3 段 WMS 上流部）

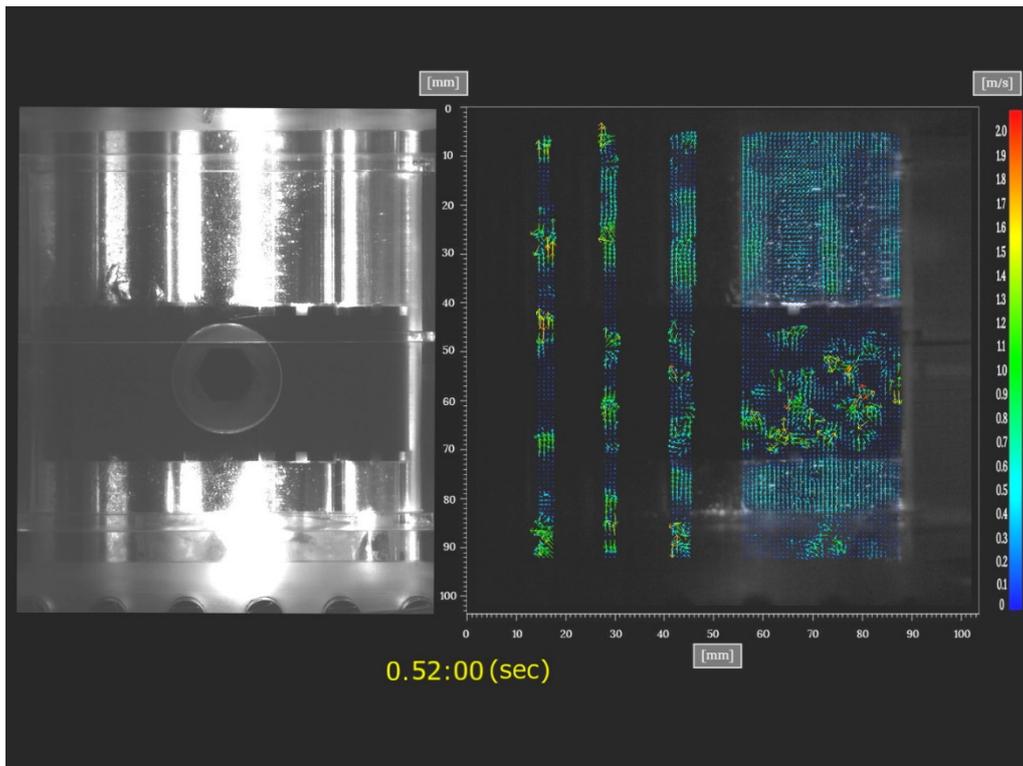


図 3.1-153 PIVによる液相流速分布（ケース A，時刻 0.52 秒，第 3 段 WMS 上流部）

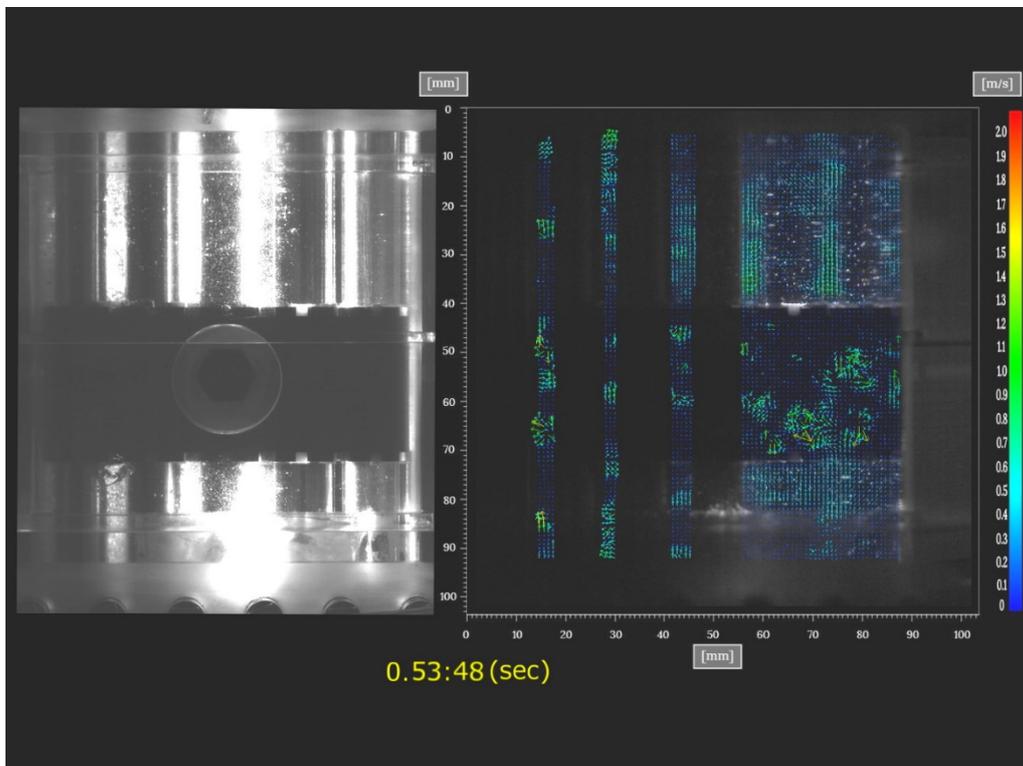


図 3.1-154 PIVによる液相流速分布（ケース A，時刻 0.53 秒，第 3 段 WMS 上流部）

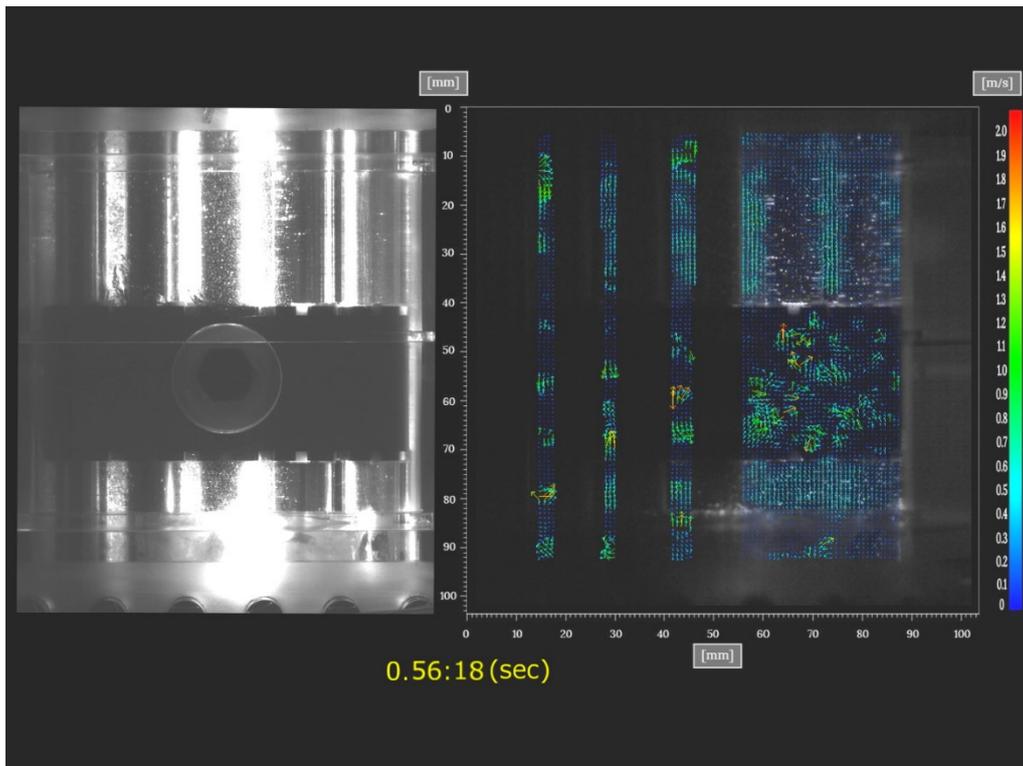


図 3.1-155 PIVによる液相流速分布（ケース A, 時刻 0.56 秒, 第 3 段 WMS 上流部）

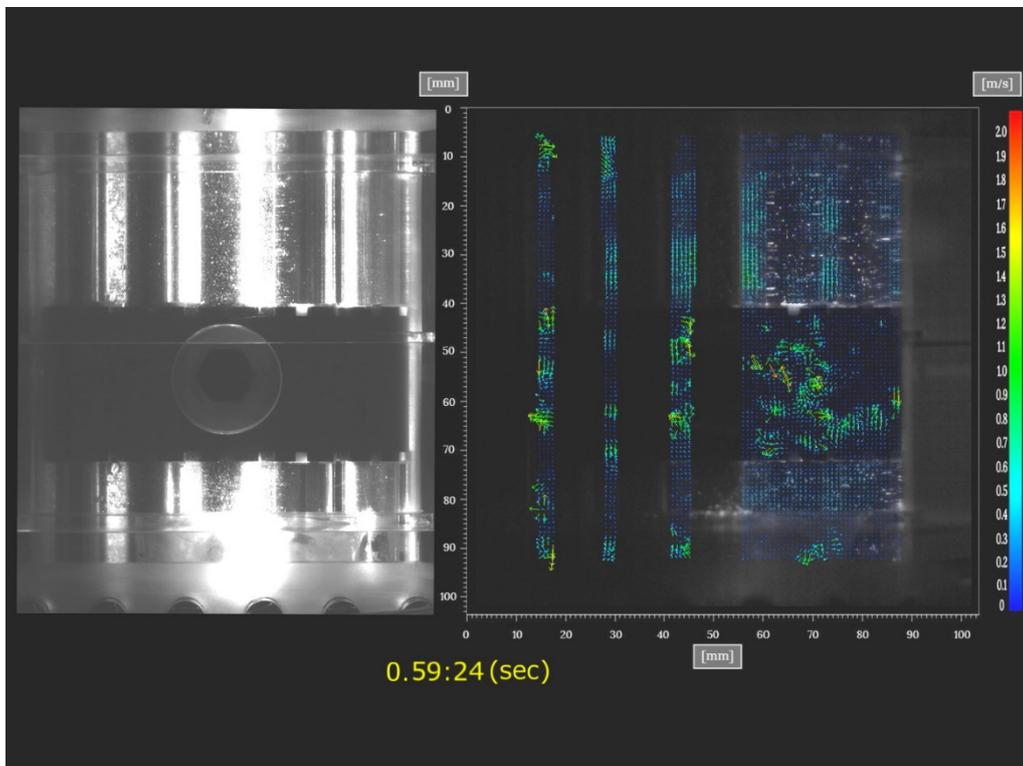


図 3.1-156 PIVによる液相流速分布（ケース A, 時刻 0.59 秒, 第 3 段 WMS 上流部）

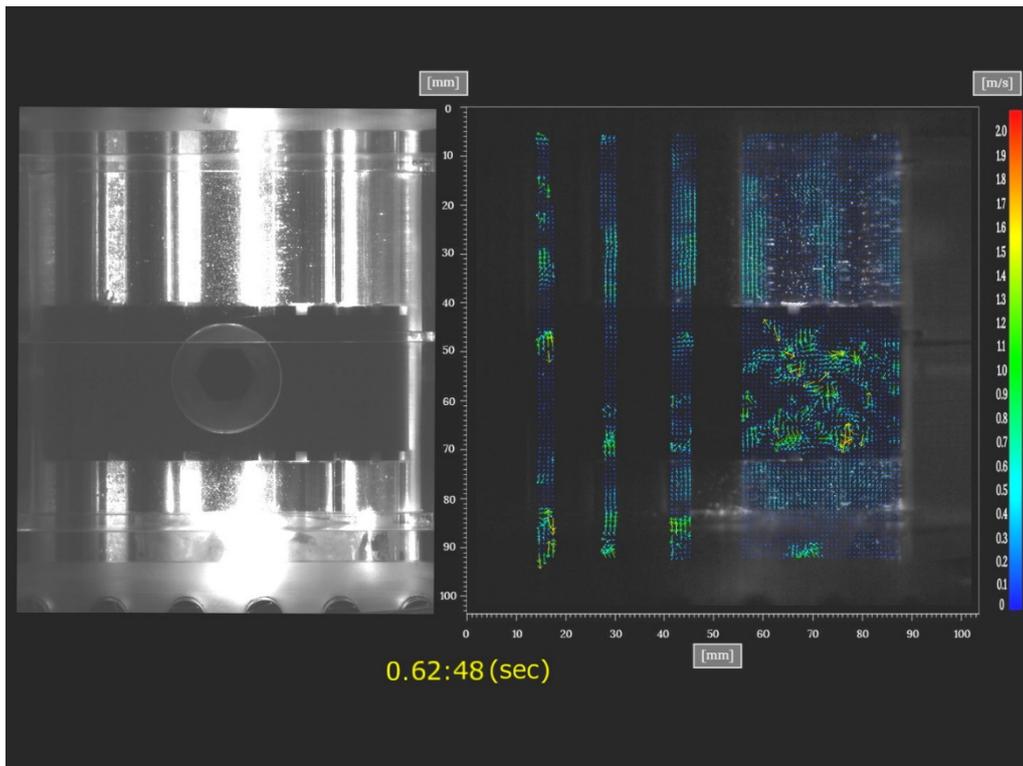


図 3.1-157 PIVによる液相流速分布（ケース A，時刻 0.62 秒，第 3 段 WMS 上流部）

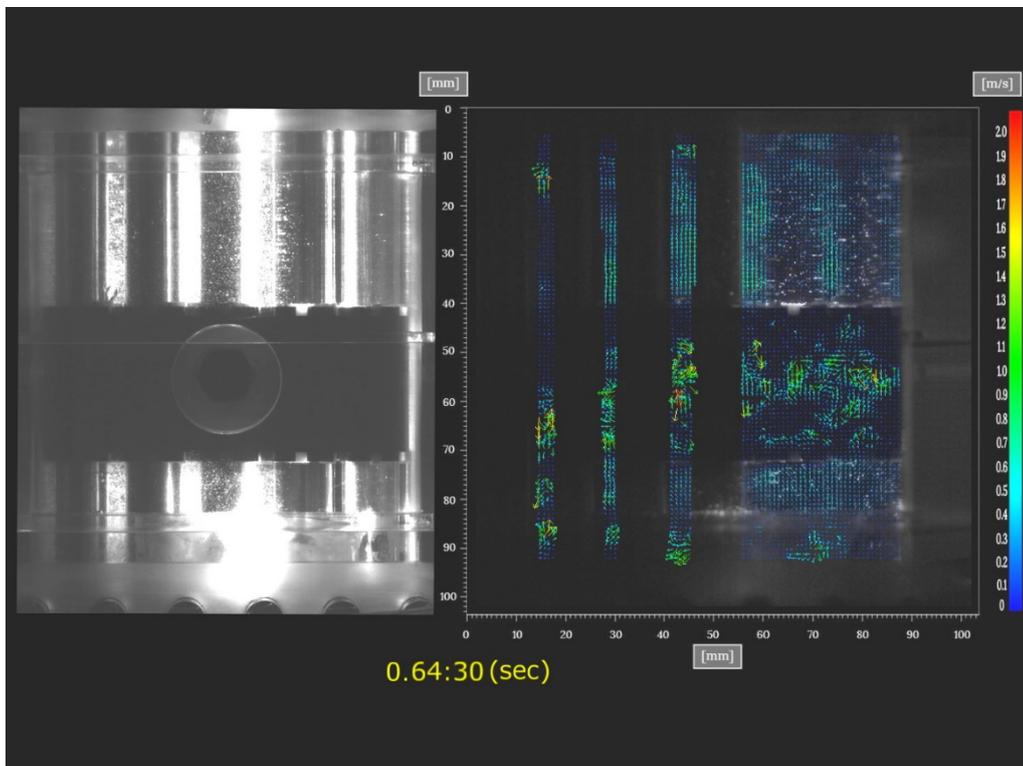


図 3.1-158 PIVによる液相流速分布（ケース A，時刻 0.64 秒，第 3 段 WMS 上流部）

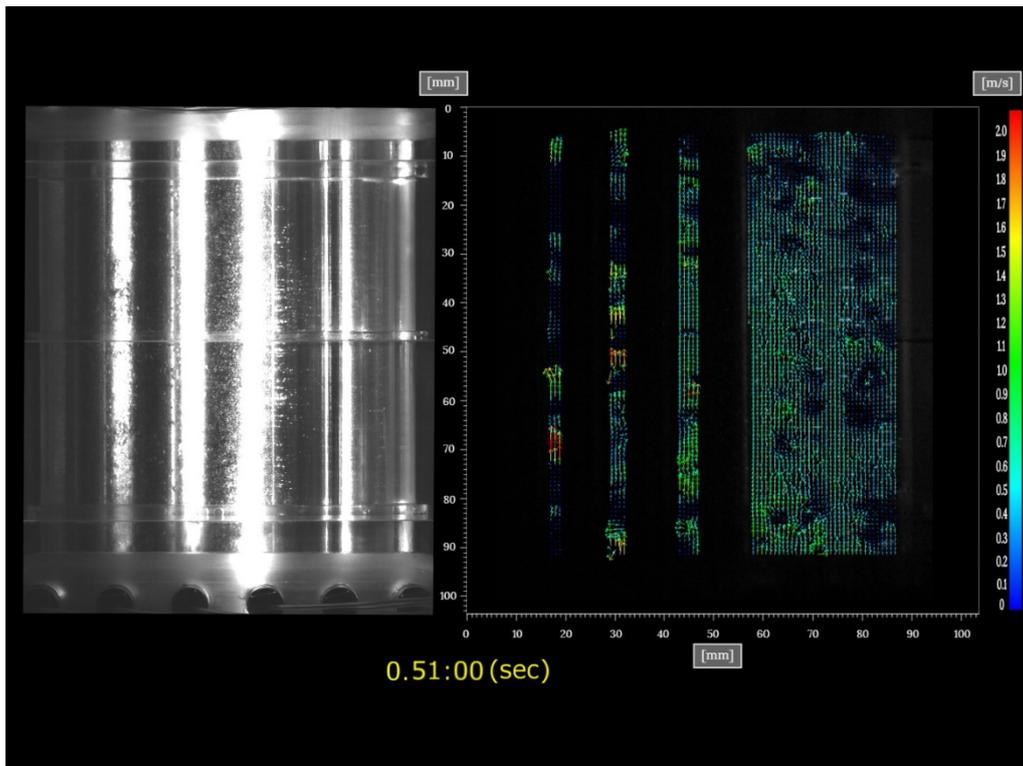


図 3.1-159 PIVによる液相流速分布（ケース A, 時刻 0.51 秒, 第 6 段 WMS 上流部）

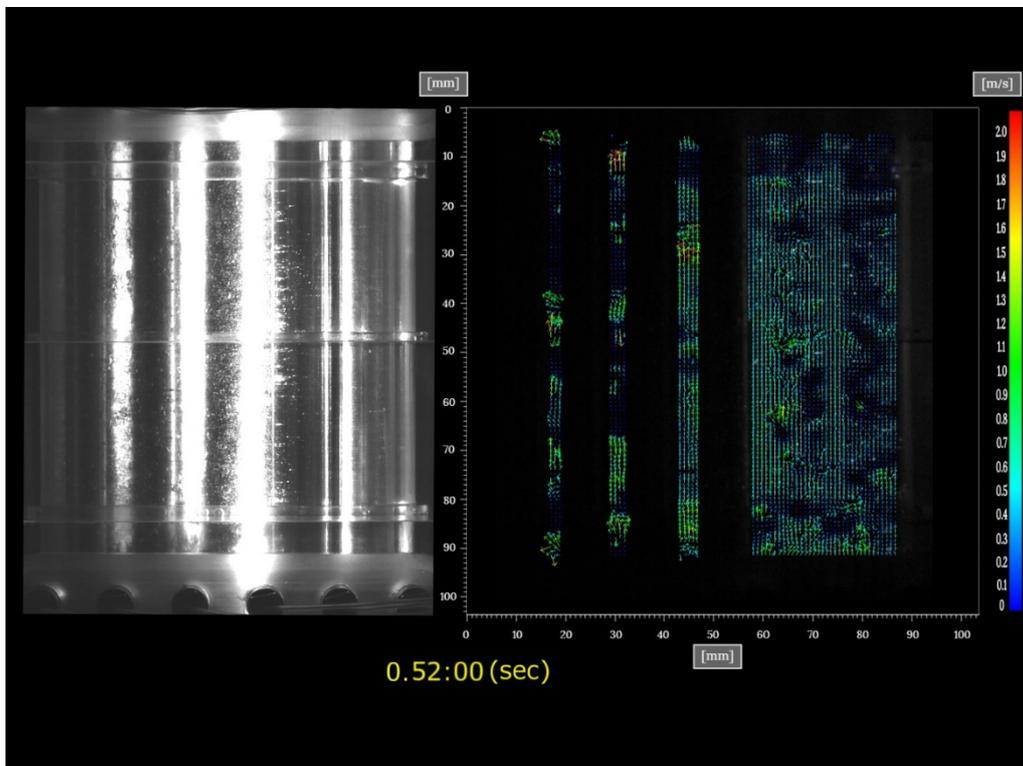


図 3.1-160 PIVによる液相流速分布（ケース A, 時刻 0.52 秒, 第 6 段 WMS 上流部）

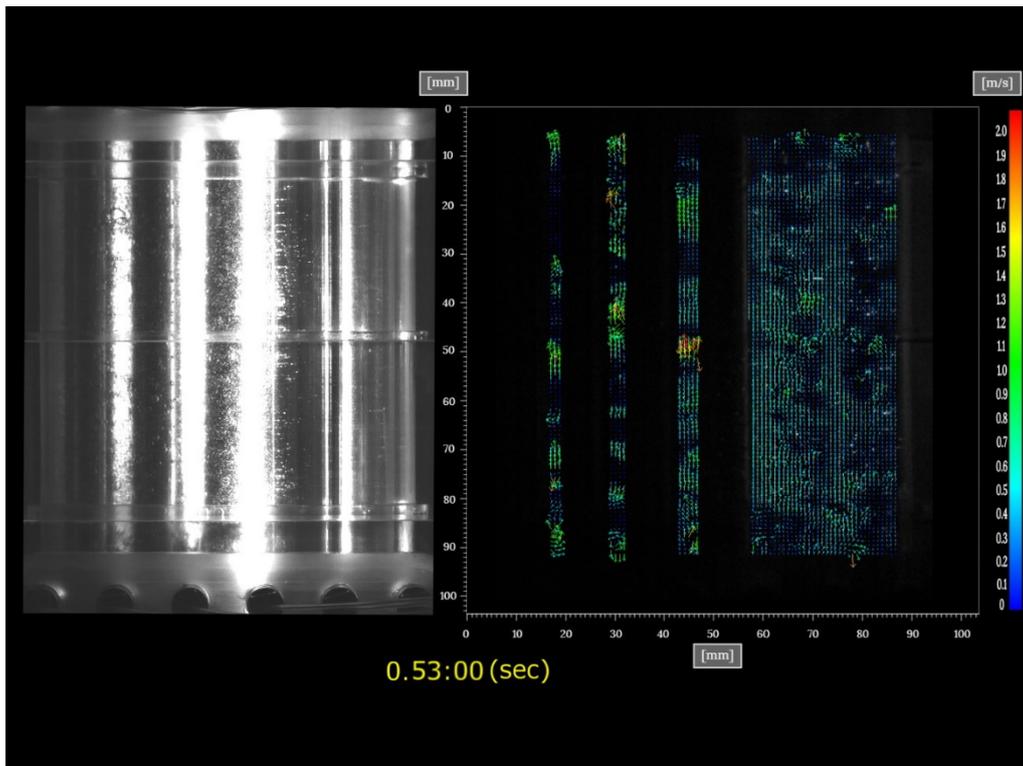


図 3.1-161 PIVによる液相流速分布（ケース A，時刻 0.53 秒，第 6 段 WMS 上流部）

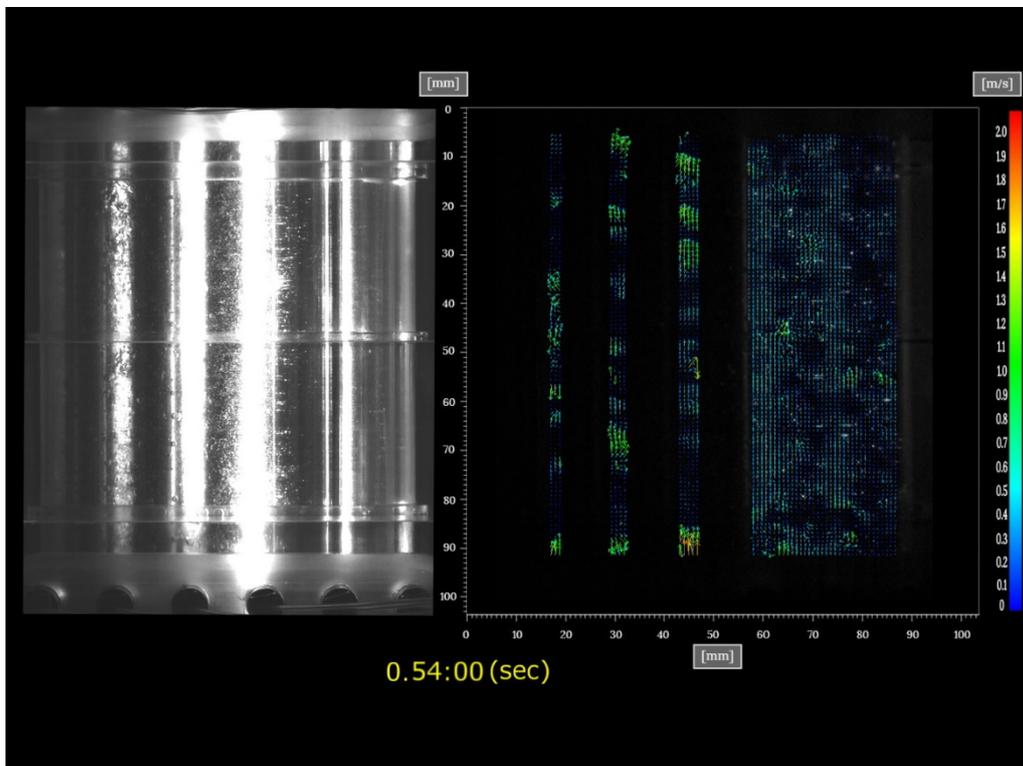


図 3.1-162 PIVによる液相流速分布（ケース A，時刻 0.54 秒，第 6 段 WMS 上流部）

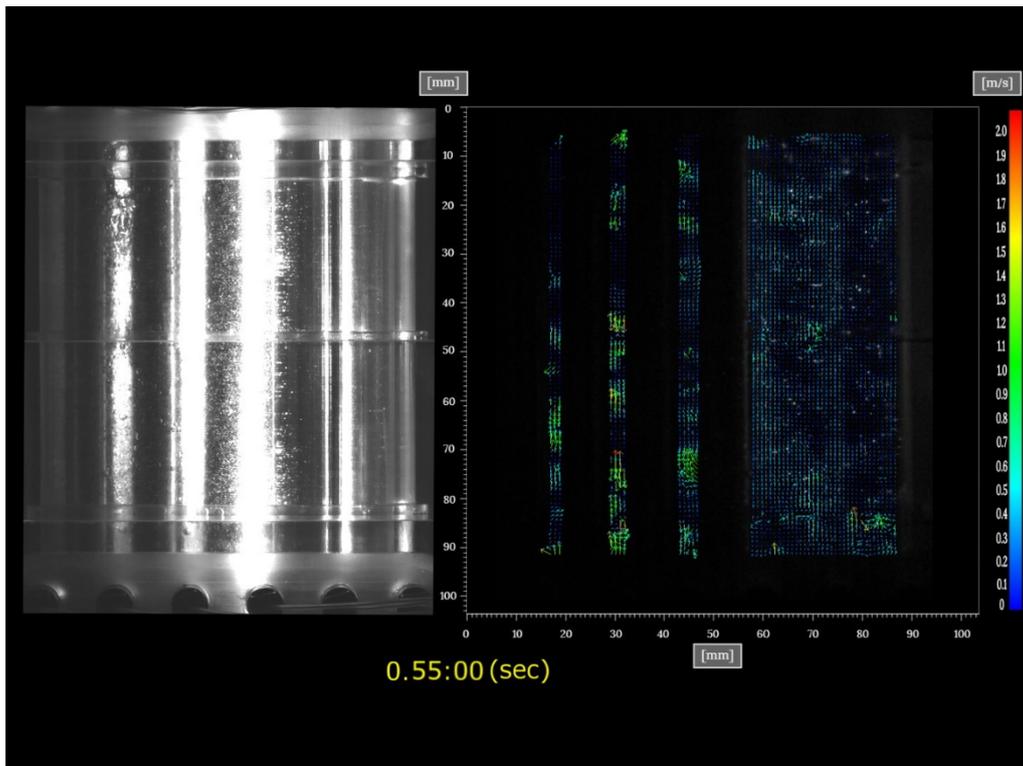


図 3.1-163 PIVによる液相流速分布（ケース A, 時刻 0.55 秒, 第 6 段 WMS 上流部）

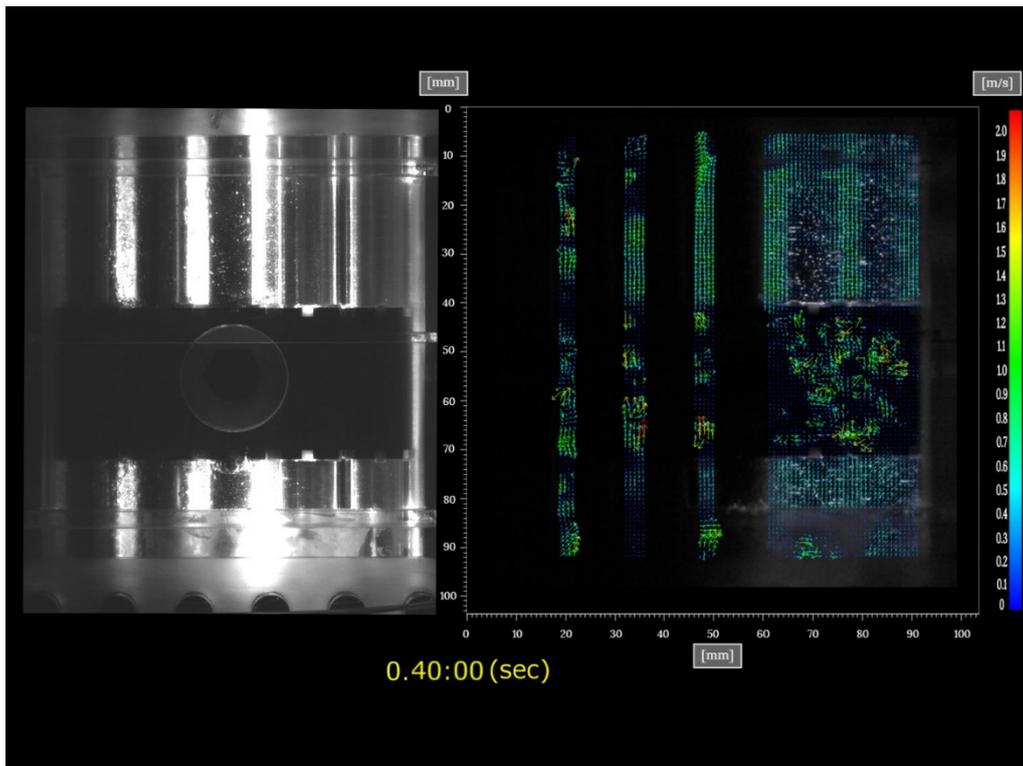


図 3.1-164 PIVによる液相流速分布（ケース B, 時刻 0.40 秒, 第 3 段 WMS 上流部）

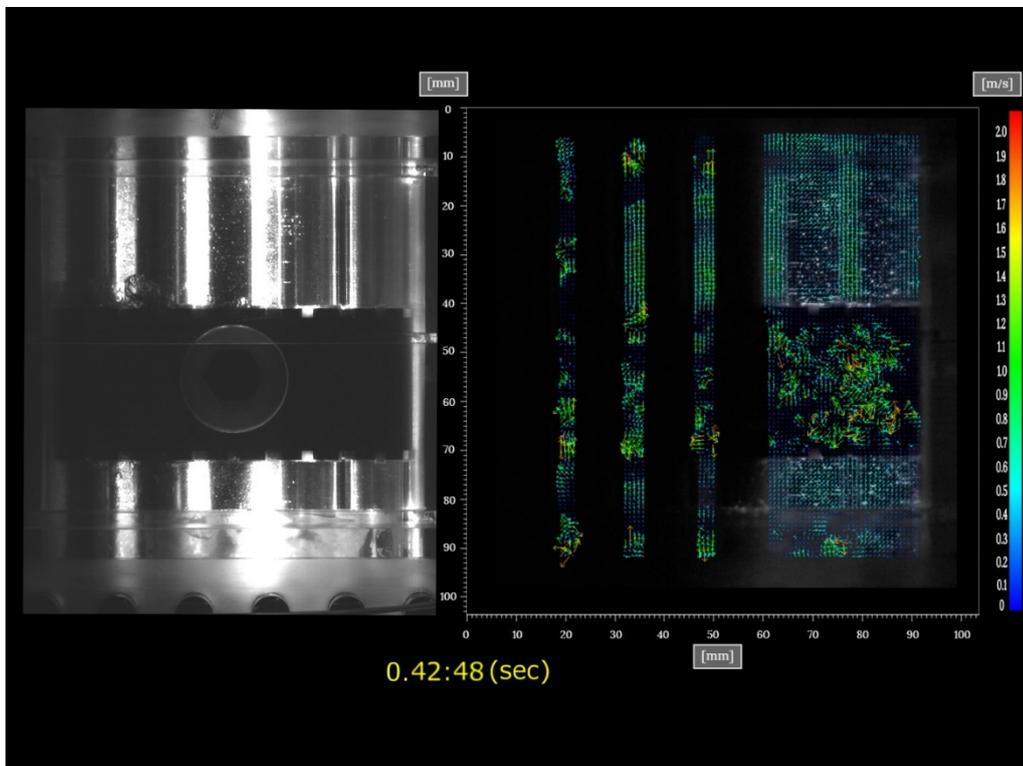


図 3.1-165 PIVによる液相流速分布（ケース B, 時刻 0.42 秒, 第 3 段 WMS 上流部）

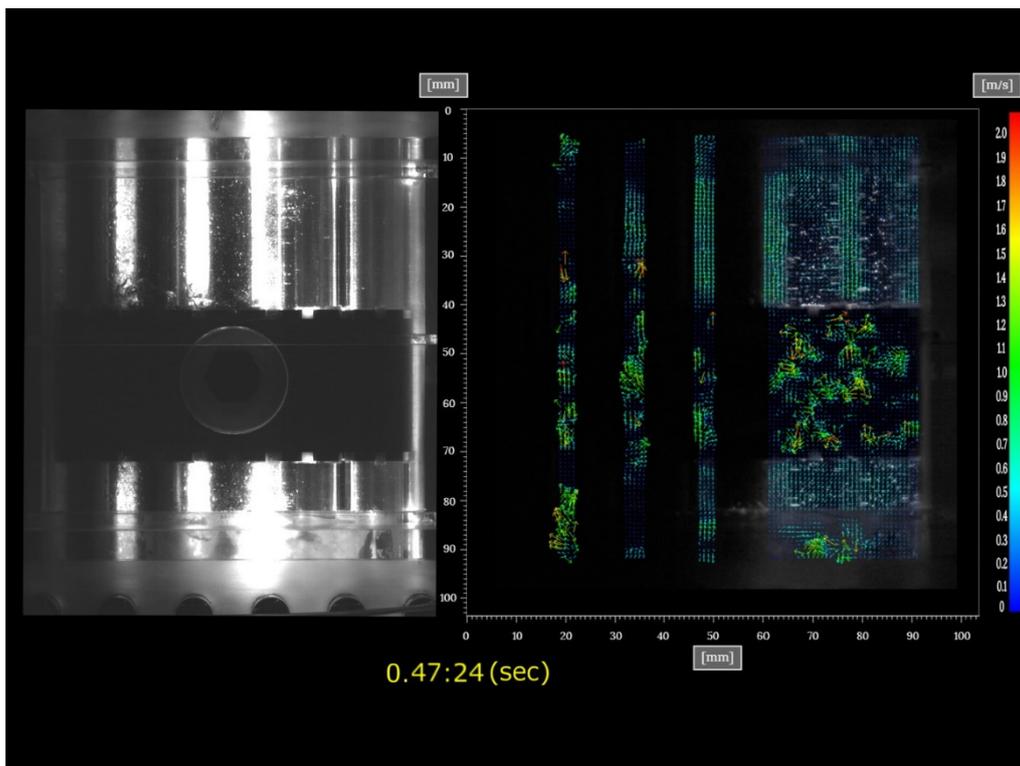


図 3.1-166 PIVによる液相流速分布（ケース B, 時刻 0.47 秒, 第 3 段 WMS 上流部）

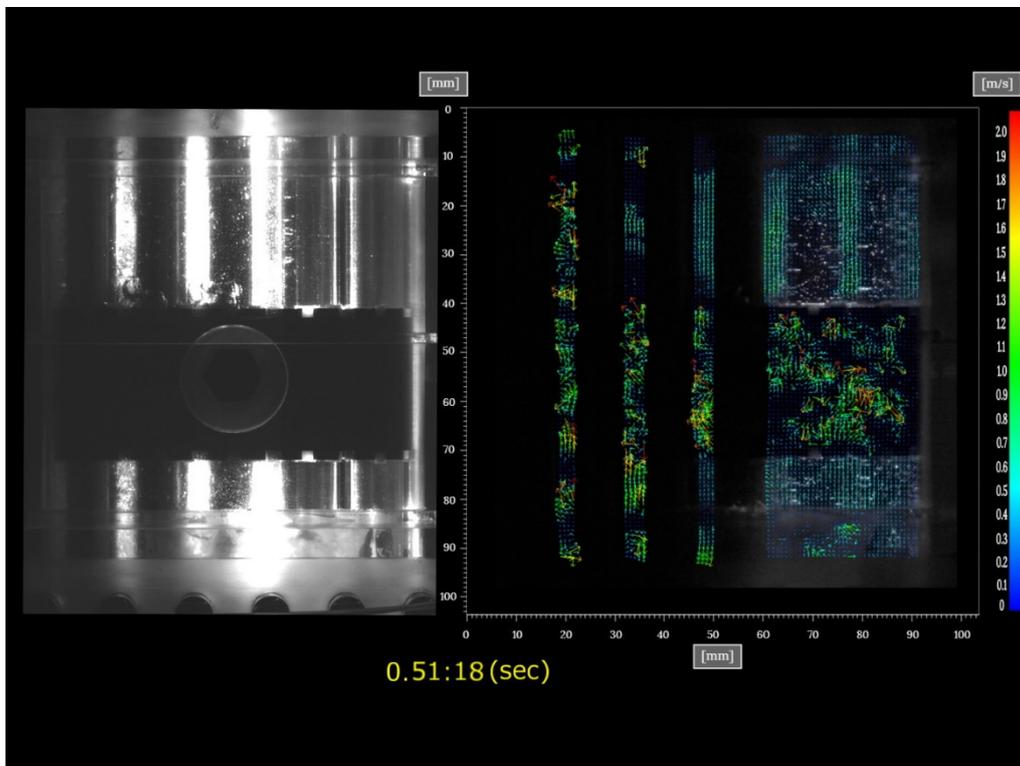


図 3.1-167 PIVによる液相流速分布（ケース B, 時刻 0.51 秒, 第 3 段 WMS 上流部）

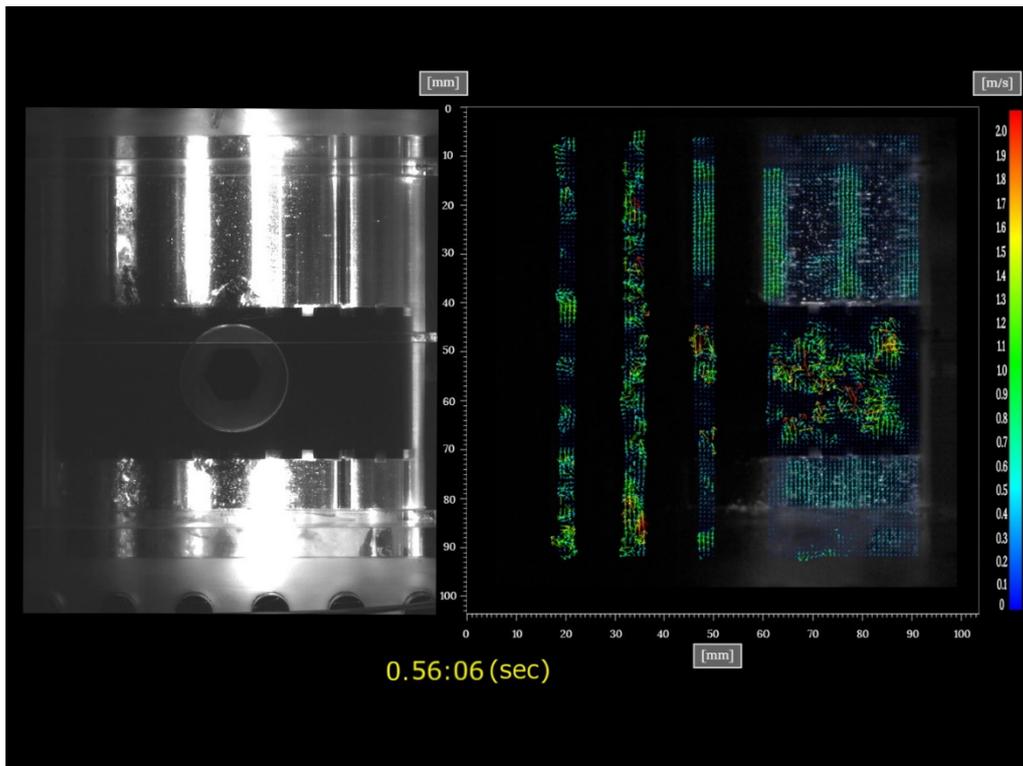


図 3.1-168 PIVによる液相流速分布（ケース B, 時刻 0.56 秒, 第 3 段 WMS 上流部）

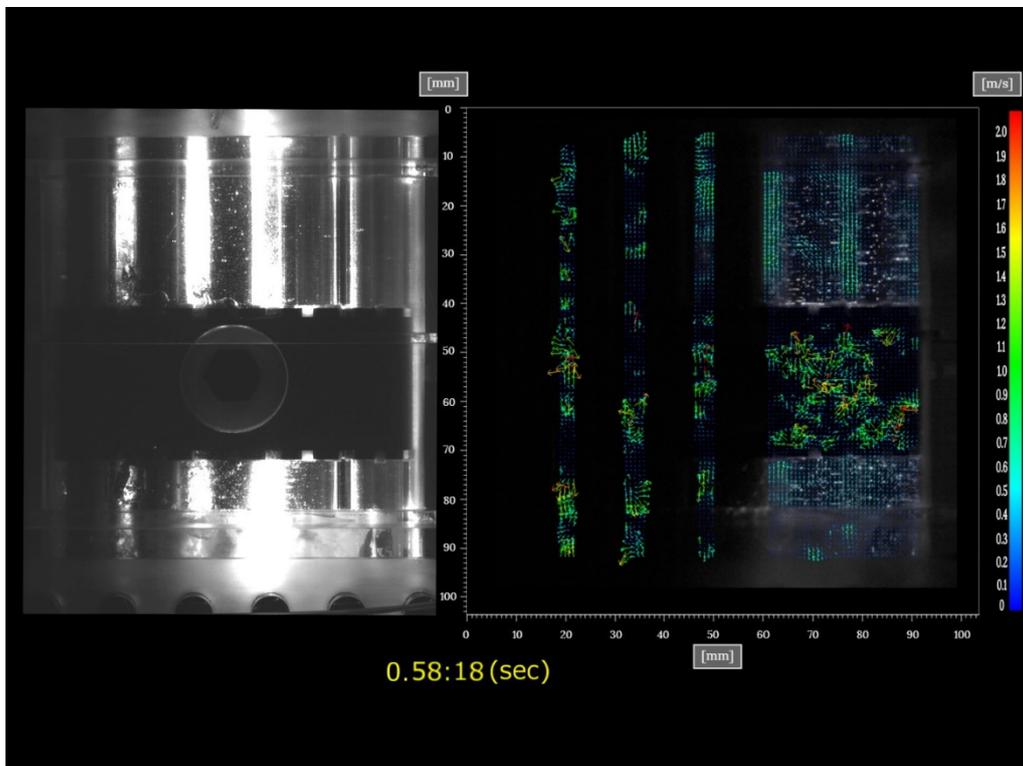


図 3.1-169 PIVによる液相流速分布（ケース B, 時刻 0.58 秒, 第 3 段 WMS 上流部）

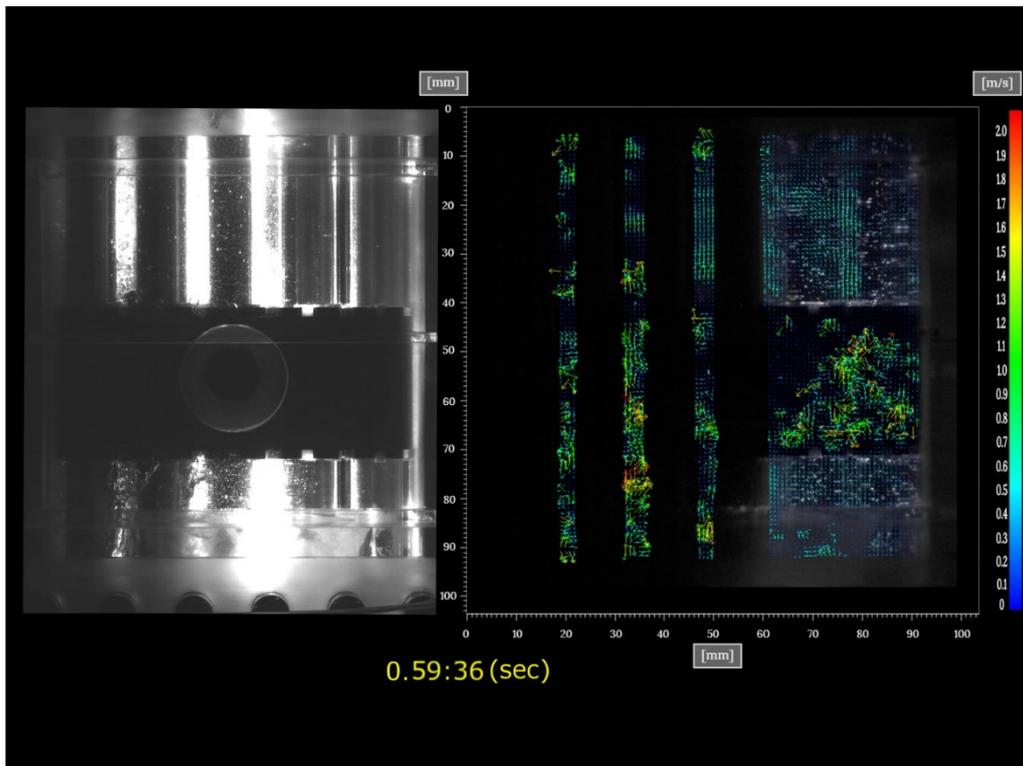


図 3.1-170 PIVによる液相流速分布（ケース B, 時刻 0.59 秒, 第 3 段 WMS 上流部）

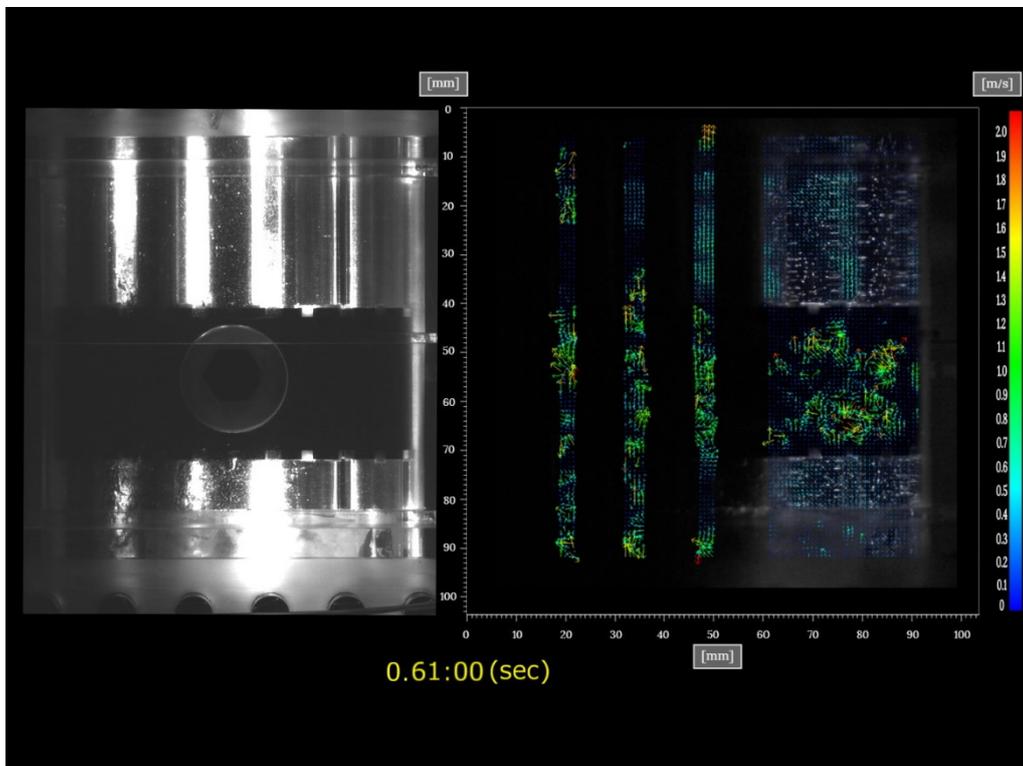


図 3.1-171 PIVによる液相流速分布（ケース B, 時刻 0.61 秒, 第 3 段 WMS 上流部）

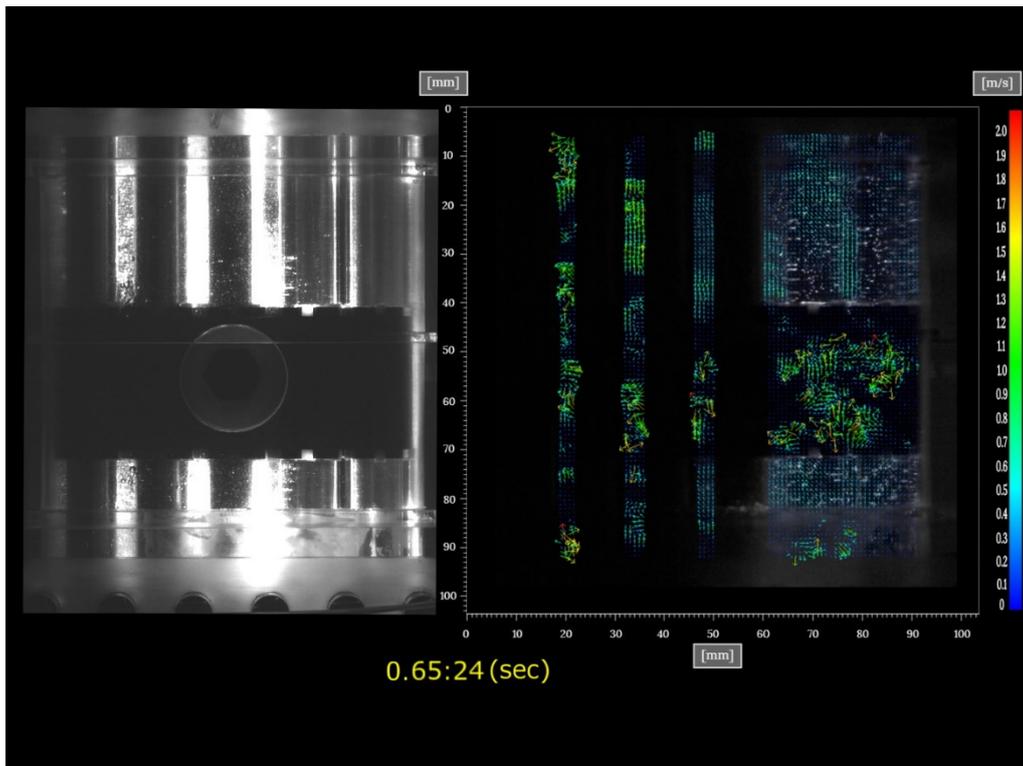


図 3.1-172 PIVによる液相流速分布（ケース B, 時刻 0.65 秒, 第 3 段 WMS 上流部）

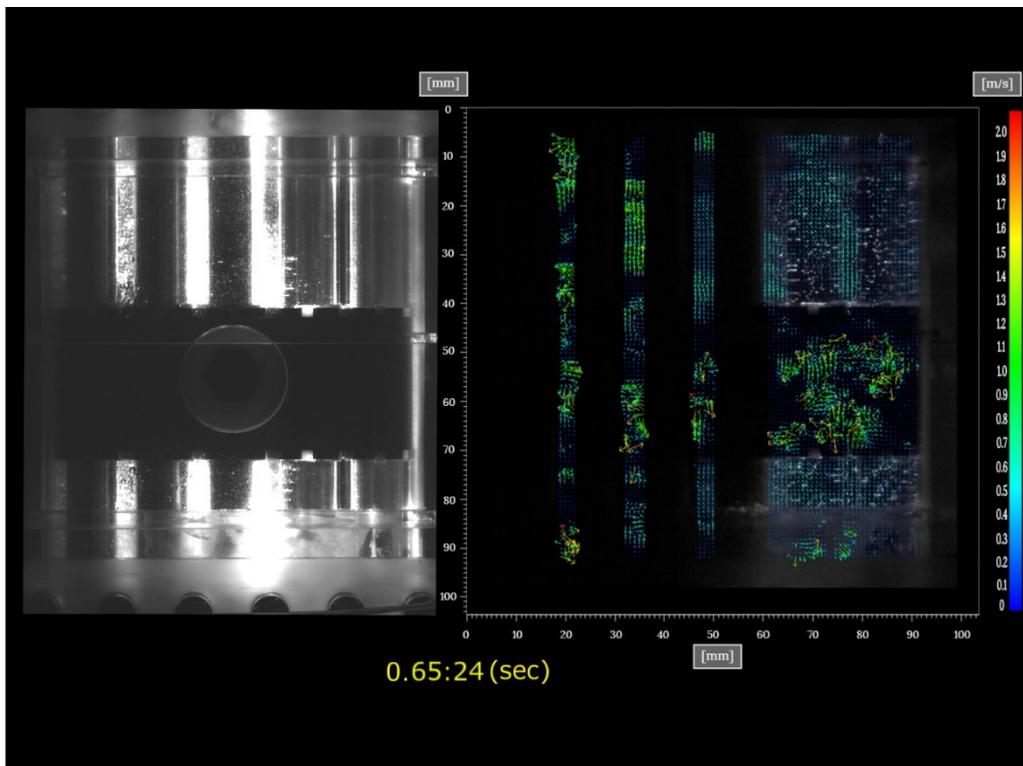


図 3.1-173 PIVによる液相流速分布（ケース B, 時刻 0.69 秒, 第 3 段 WMS 上流部）

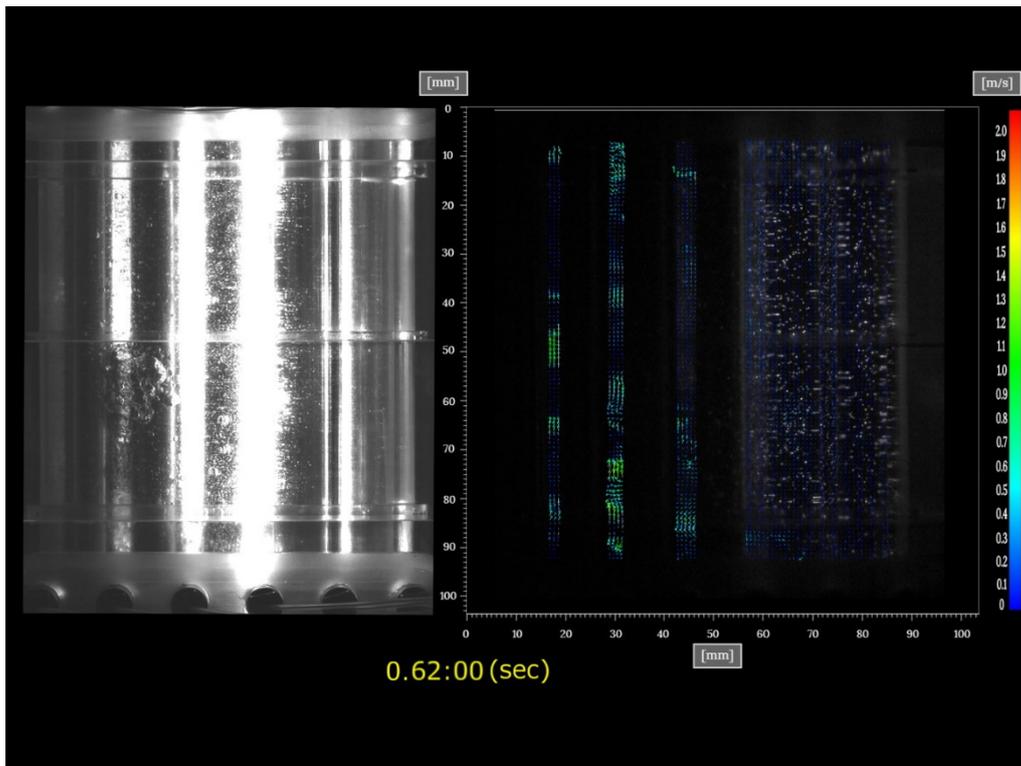


図 3.1-174 PIVによる液相流速分布（ケース B, 時刻 0.62 秒, 第 6 段 WMS 上流部）

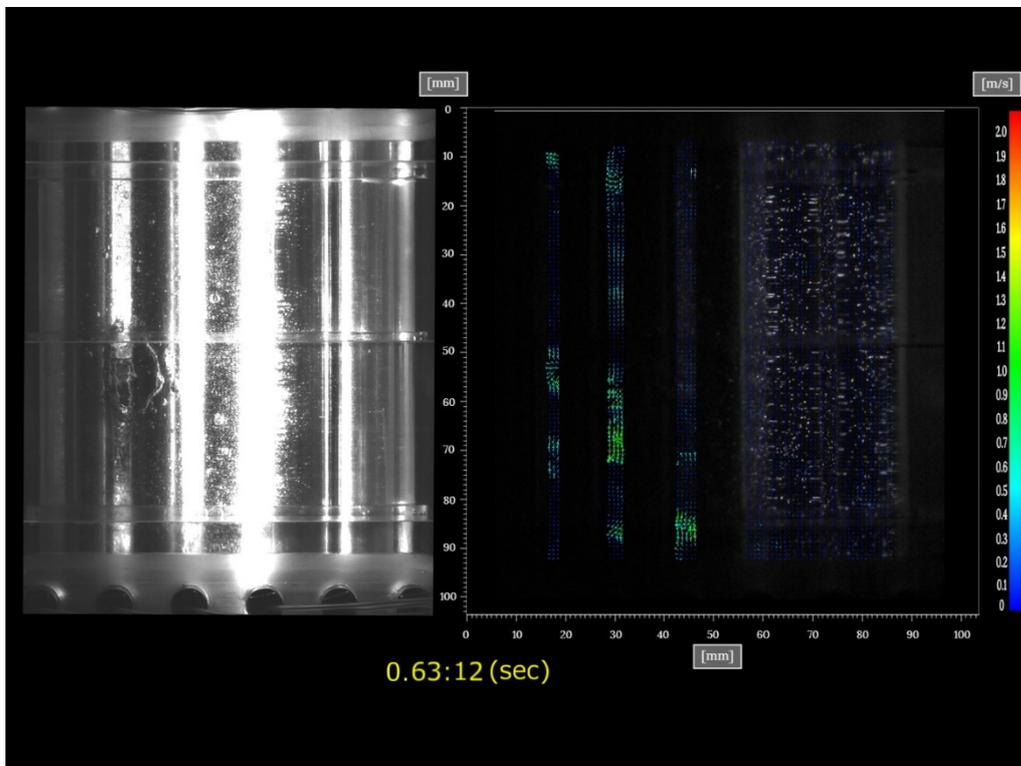


図 3.1-175 PIVによる液相流速分布（ケース B, 時刻 0.63 秒, 第 6 段 WMS 上流部）

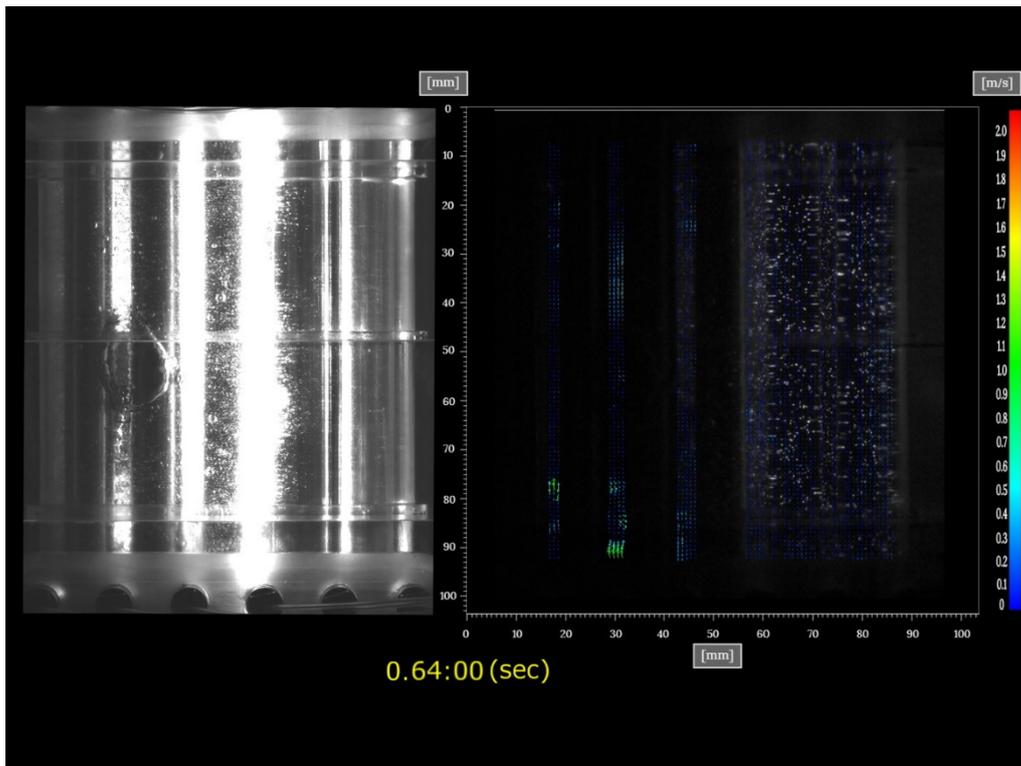


図 3.1-176 PIVによる液相流速分布（ケース B, 時刻 0.64 秒, 第 6 段 WMS 上流部）

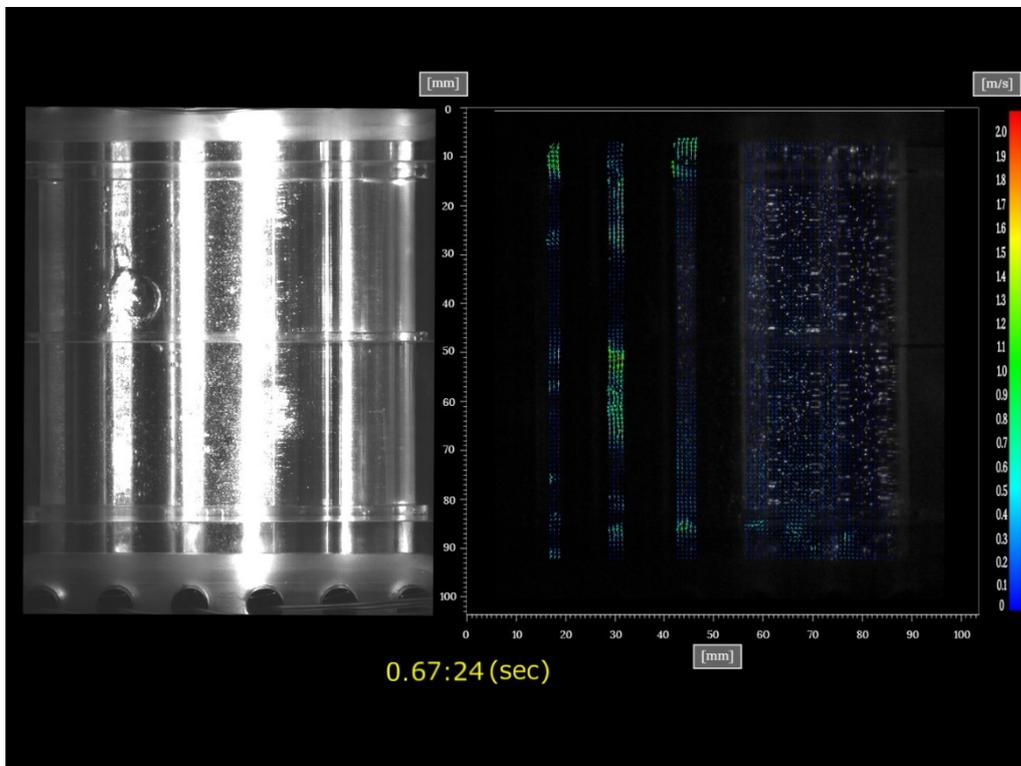


図 3.1-177 PIVによる液相流速分布（ケース B, 時刻 0.67 秒, 第 6 段 WMS 上流部）

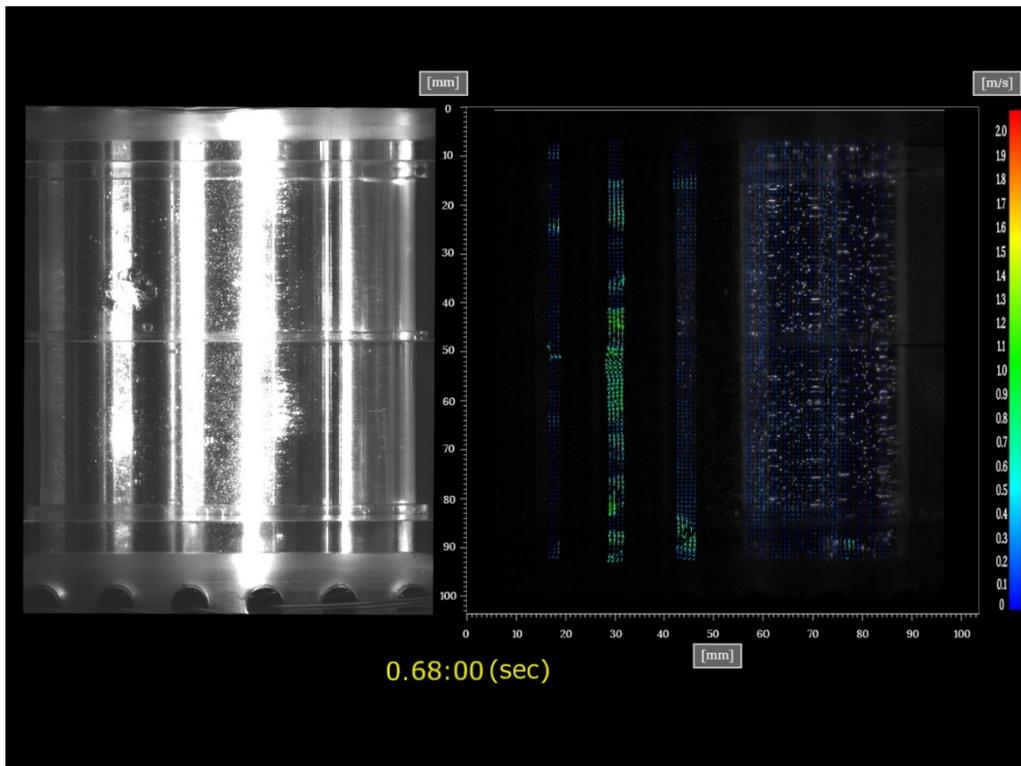


図 3.1-178 PIVによる液相流速分布（ケース B，時刻 0.68 秒，第 6 段 WMS 上流部）

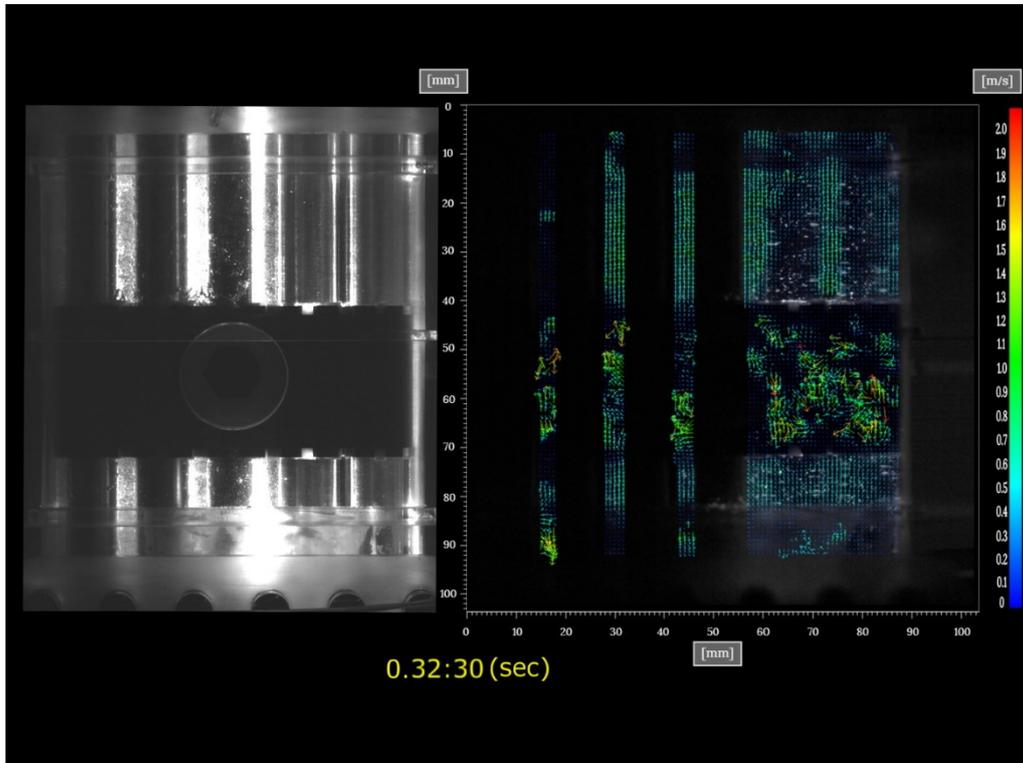


図 3.1-179 PIVによる液相流速分布（ケース C, 時刻 0.32 秒, 第 3 段 WMS 上流部）

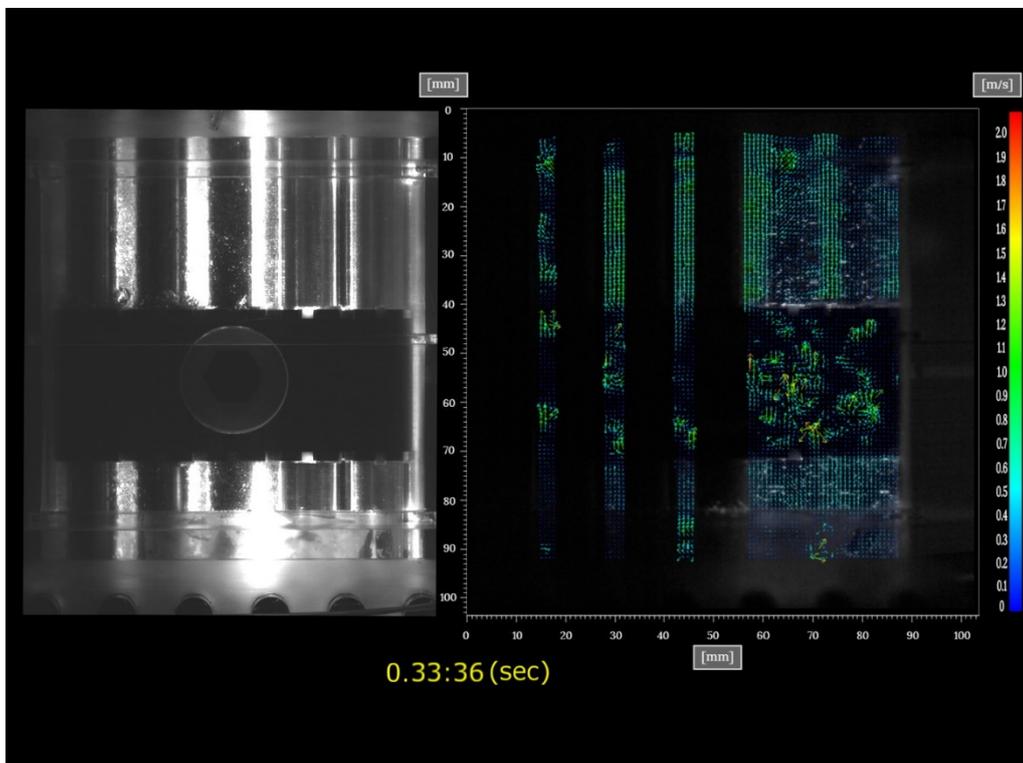


図 3.1-180 PIVによる液相流速分布（ケース C, 時刻 0.33 秒, 第 3 段 WMS 上流部）

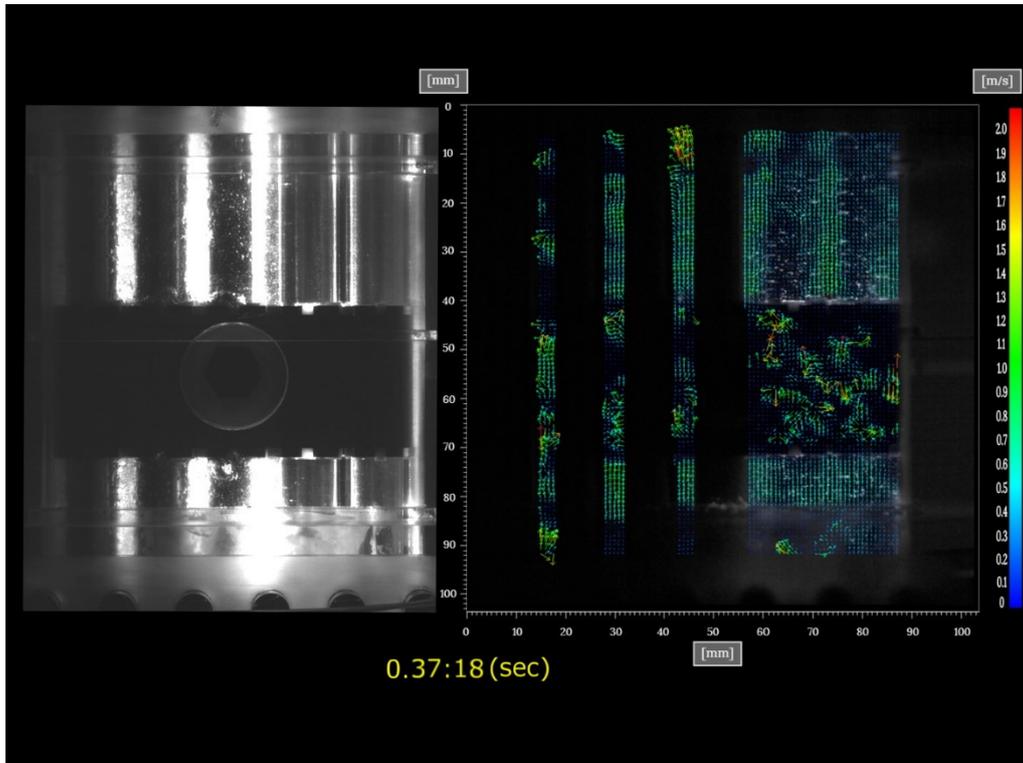


図 3.1-181 PIVによる液相流速分布（ケース C，時刻 0.37 秒，第 3 段 WMS 上流部）

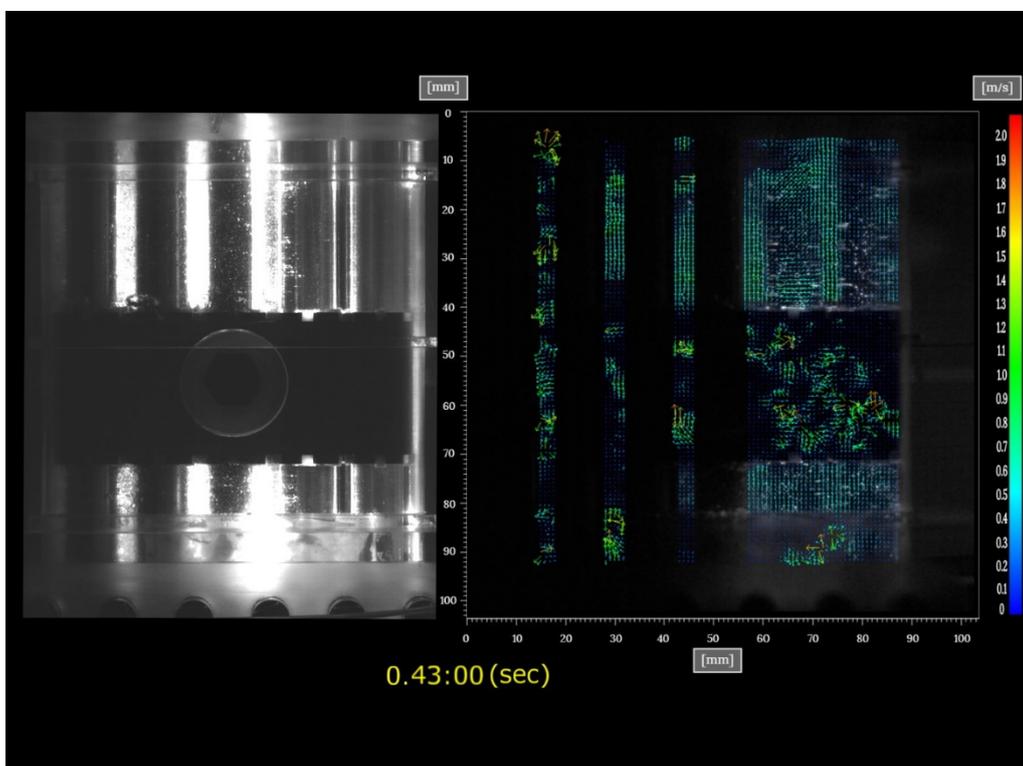


図 3.1-182 PIVによる液相流速分布（ケース C，時刻 0.43 秒，第 3 段 WMS 上流部）

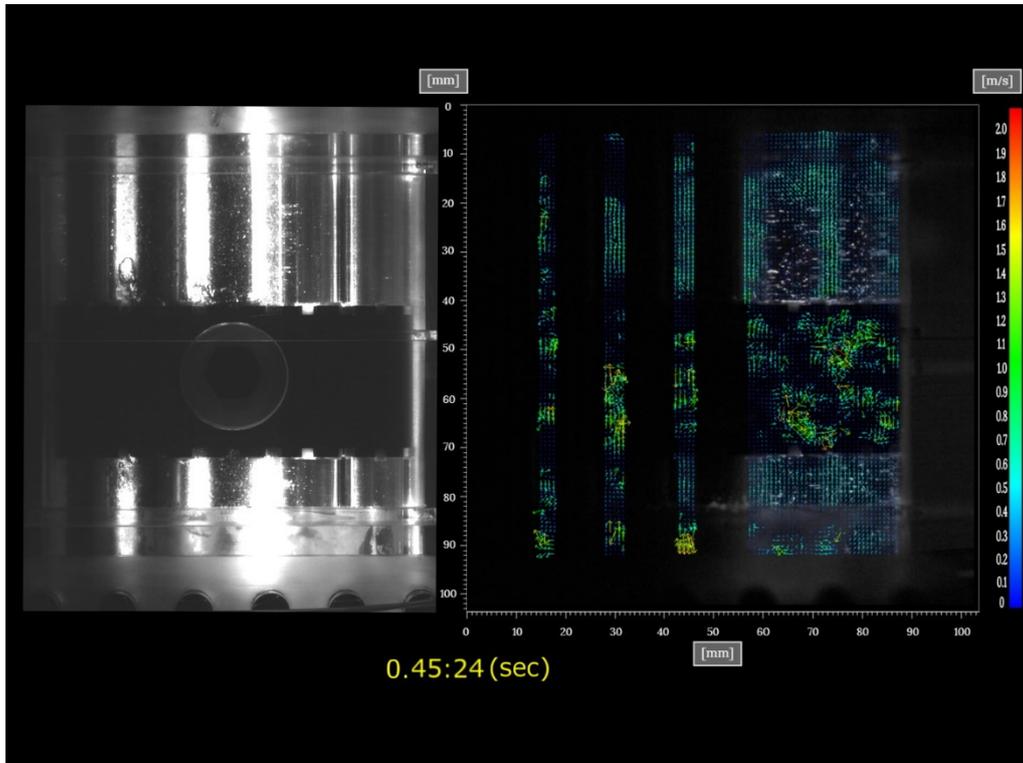


図 3.1-183 PIVによる液相流速分布（ケース C, 時刻 0.45 秒, 第 3 段 WMS 上流部）

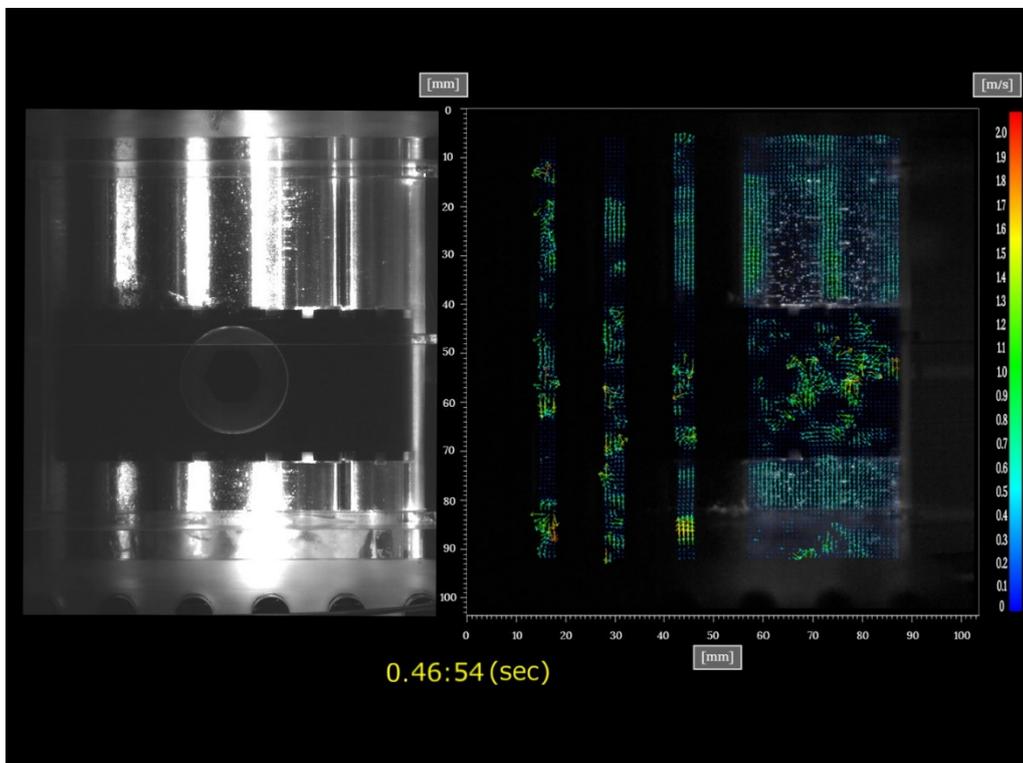


図 3.1-184 PIVによる液相流速分布（ケース C, 時刻 0.47 秒, 第 3 段 WMS 上流部）

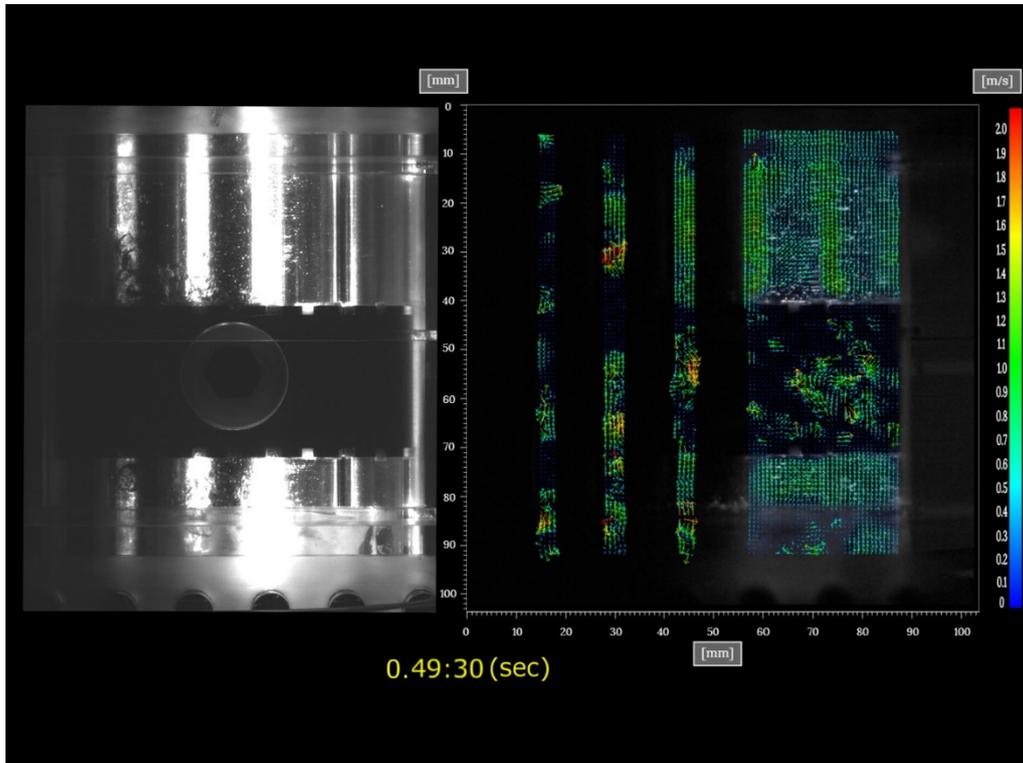


図 3.1-185 PIVによる液相流速分布（ケース C, 時刻 0.49 秒, 第 3 段 WMS 上流部）

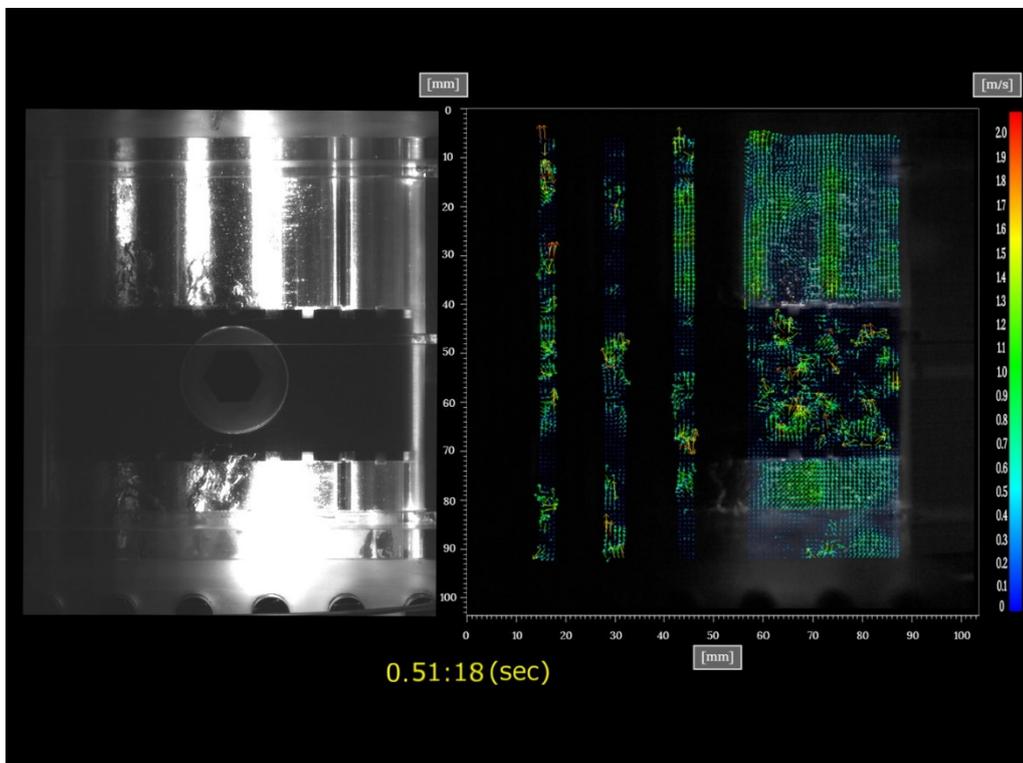


図 3.1-186 PIVによる液相流速分布（ケース C, 時刻 0.51 秒, 第 3 段 WMS 上流部）

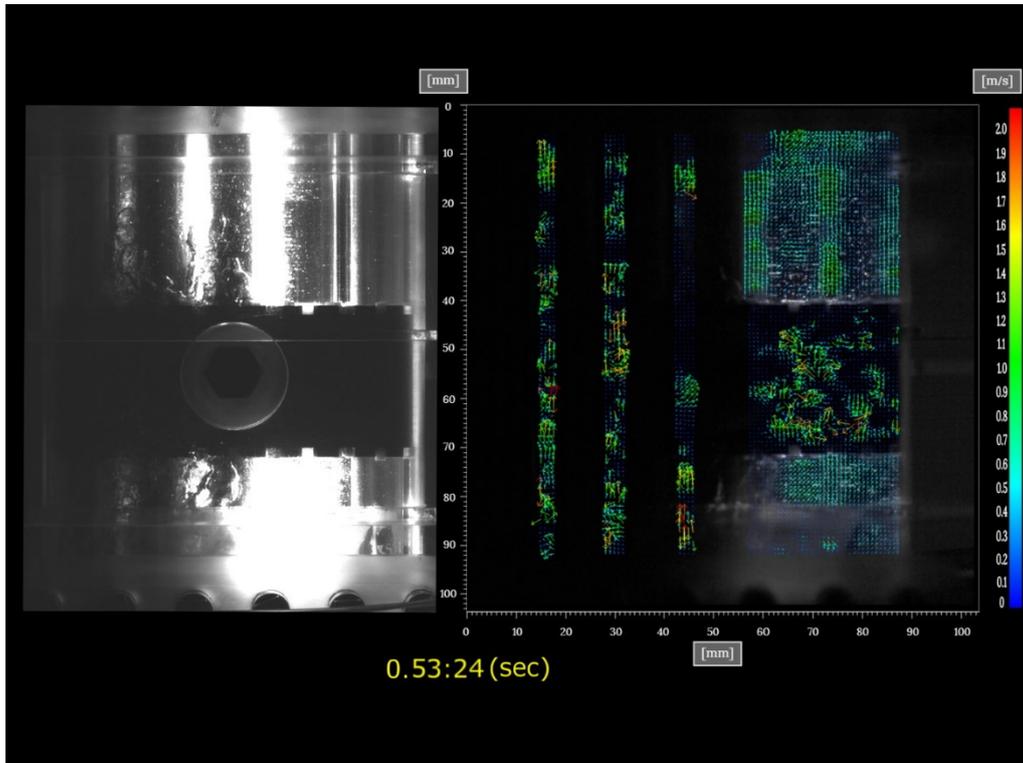


図 3.1-187 PIVによる液相流速分布（ケース C, 時刻 0.53 秒, 第 3 段 WMS 上流部）

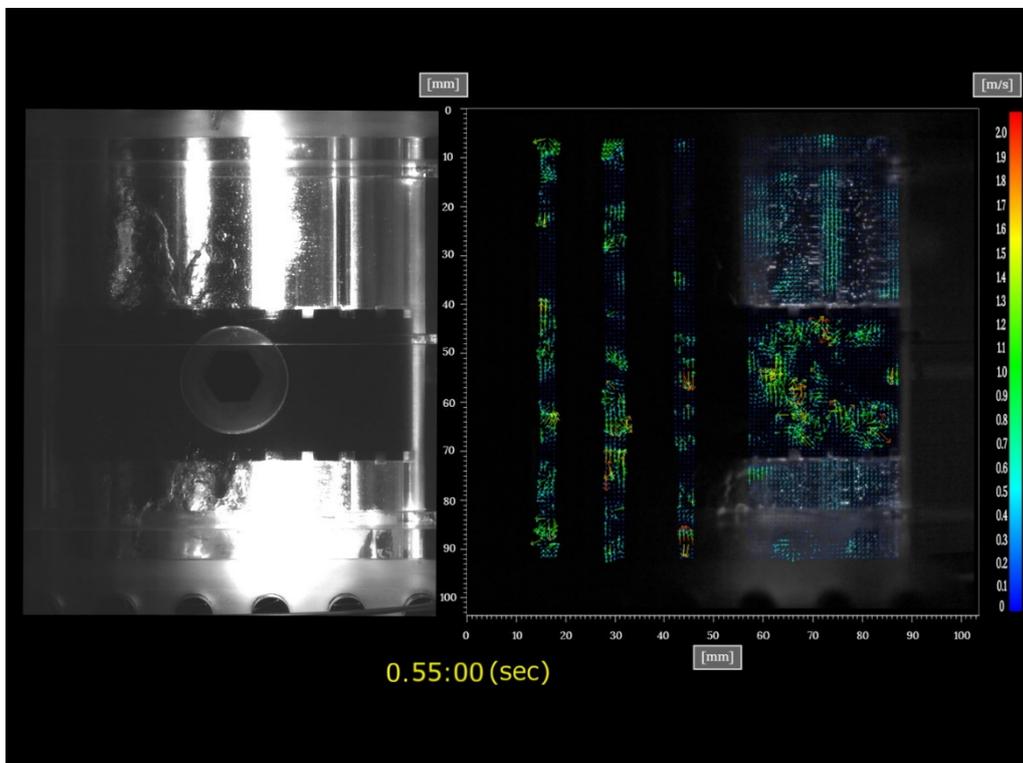


図 3.1-188 PIVによる液相流速分布（ケース C, 時刻 0.55 秒, 第 3 段 WMS 上流部）

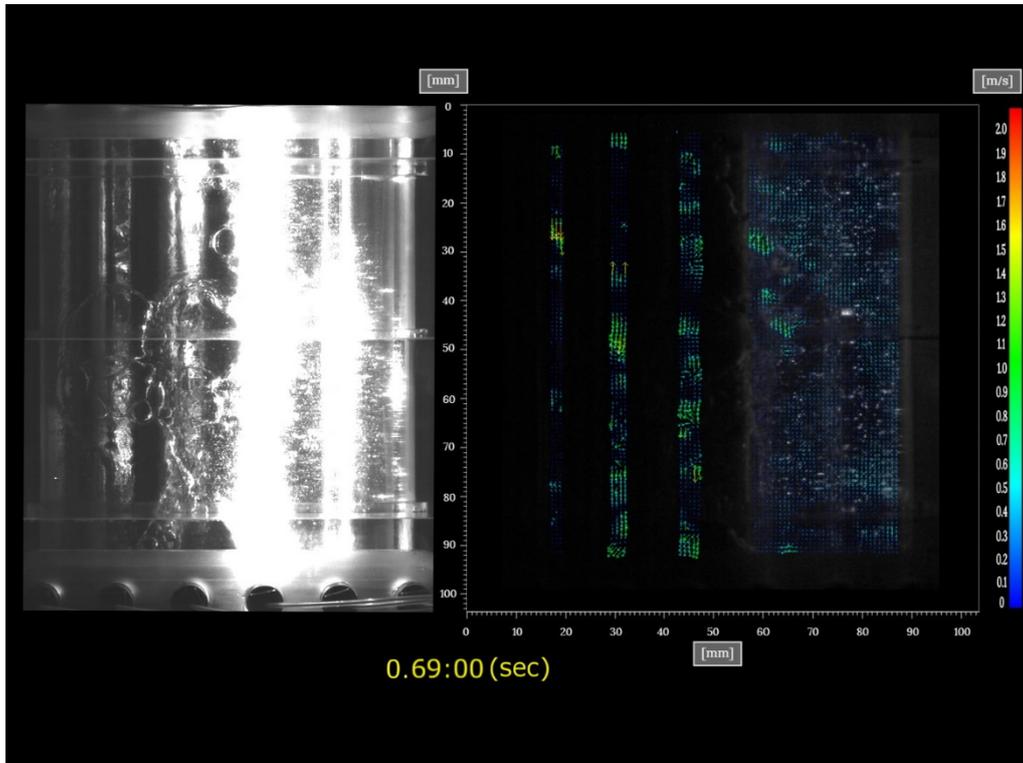


図 3.1-189 PIVによる液相流速分布（ケース C, 時刻 0.69 秒, 第 6 段 WMS 上流部）

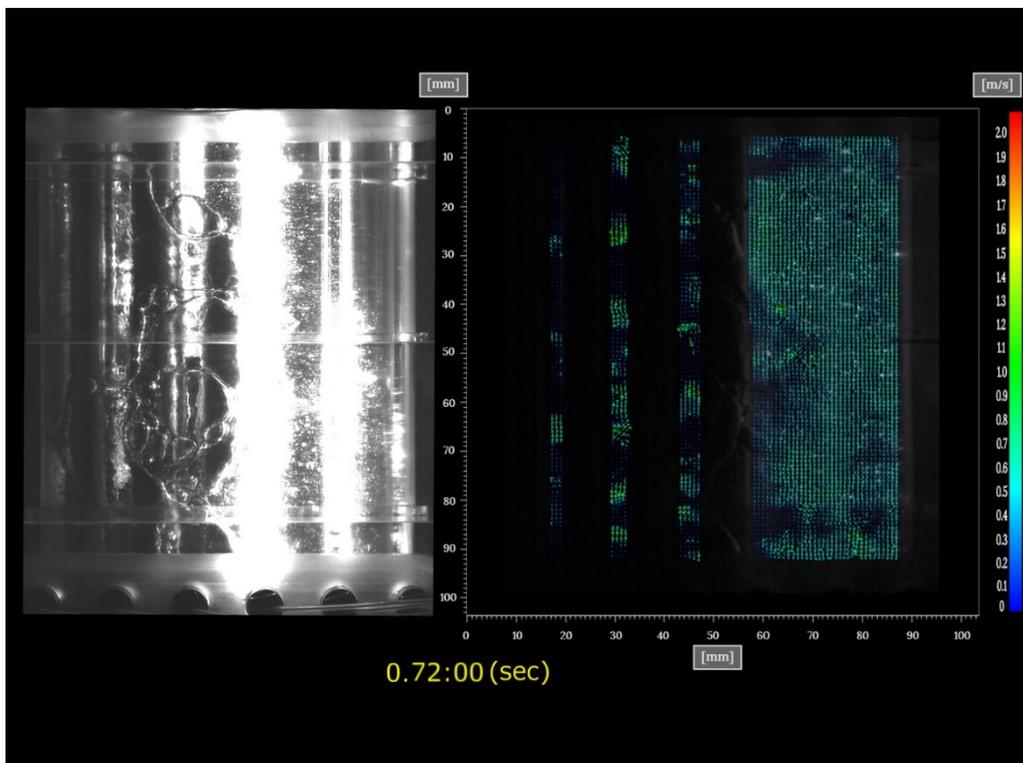


図 3.1-190 PIVによる液相流速分布（ケース C, 時刻 0.72 秒, 第 6 段 WMS 上流部）

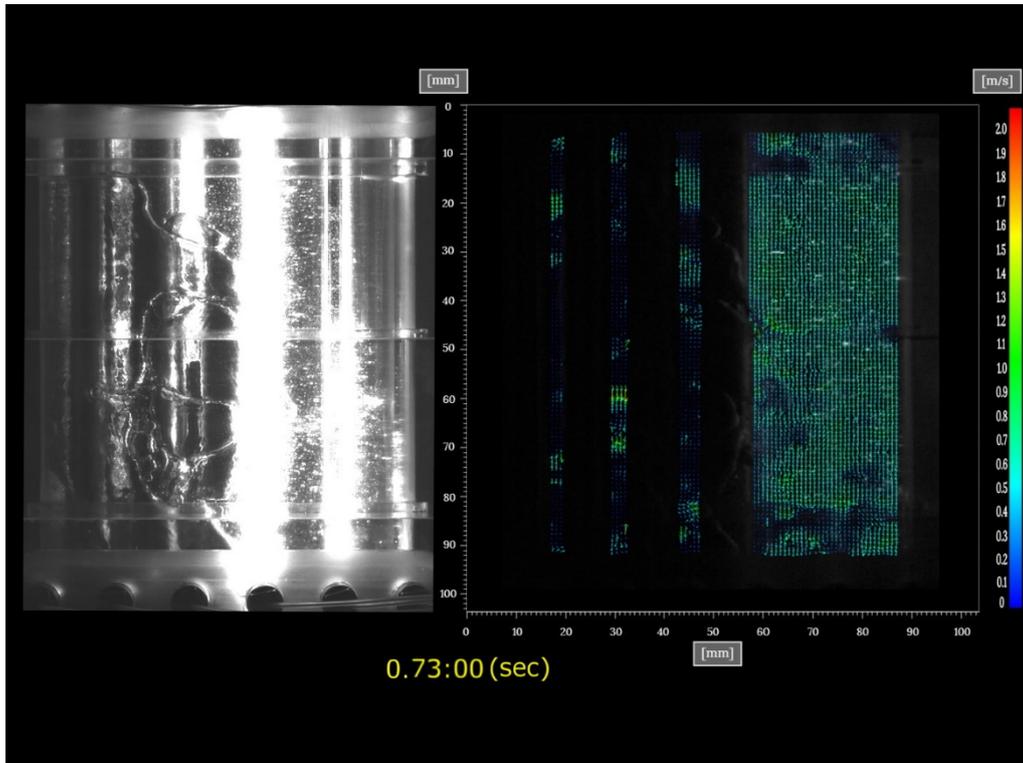


図 3.1-191 PIVによる液相流速分布（ケース C, 時刻 0.73 秒, 第 6 段 WMS 上流部）

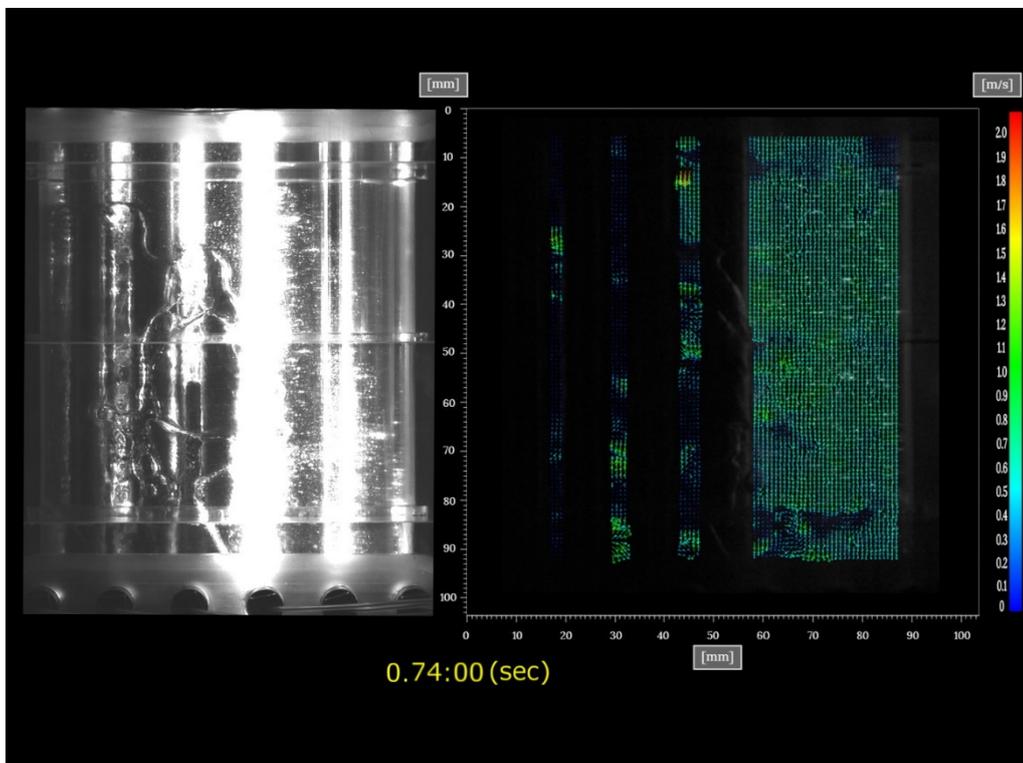


図 3.1-192 PIVによる液相流速分布（ケース C, 時刻 0.74 秒, 第 6 段 WMS 上流部）

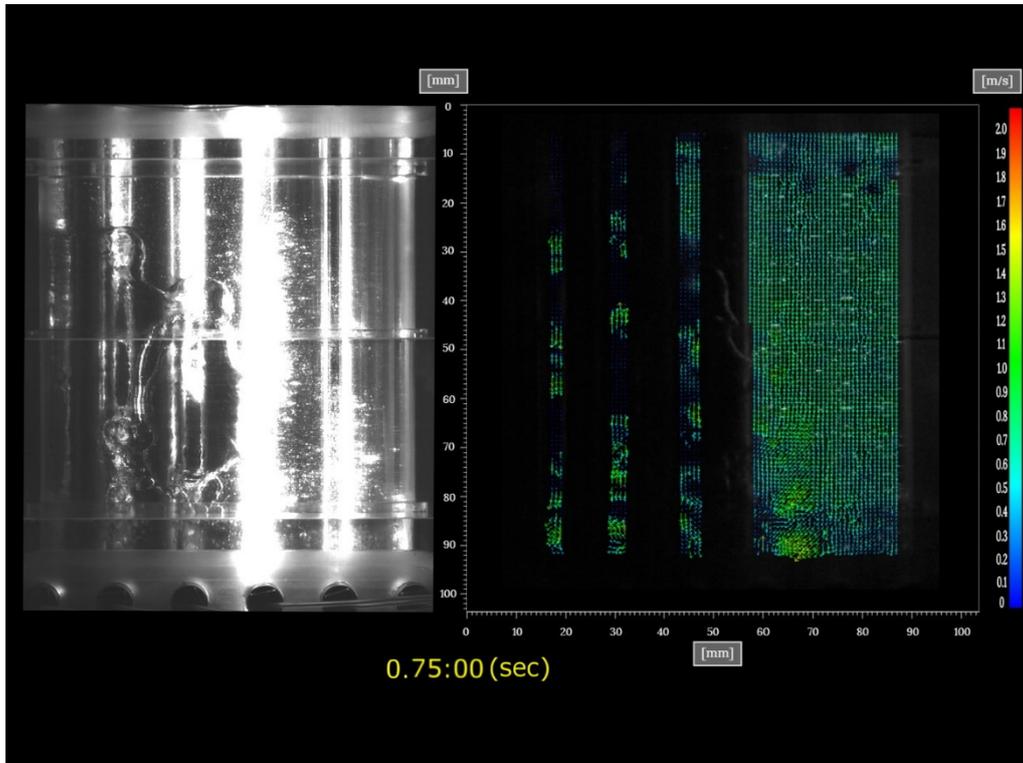


図 3.1-193 PIVによる液相流速分布（ケース C, 時刻 0.75 秒, 第 6 段 WMS 上流部）

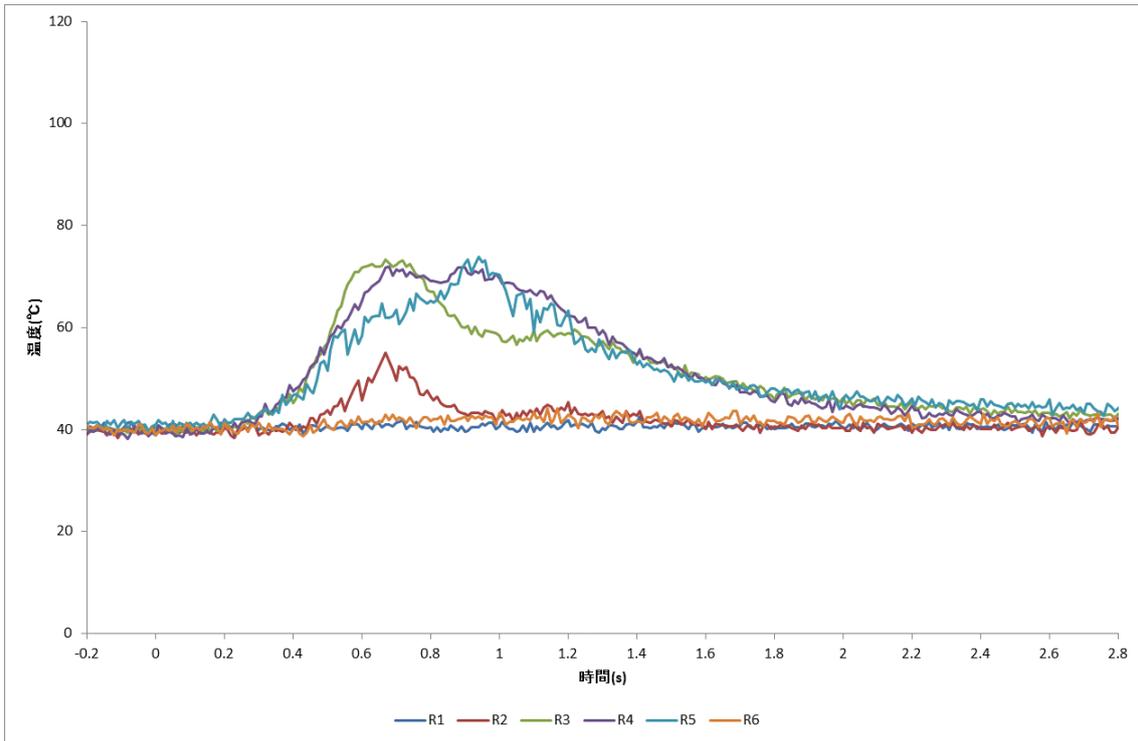


図 3.1-194 光ファイバによる液相温度（ケース A, 第 4 段 WMS 部 / T6 ライン）

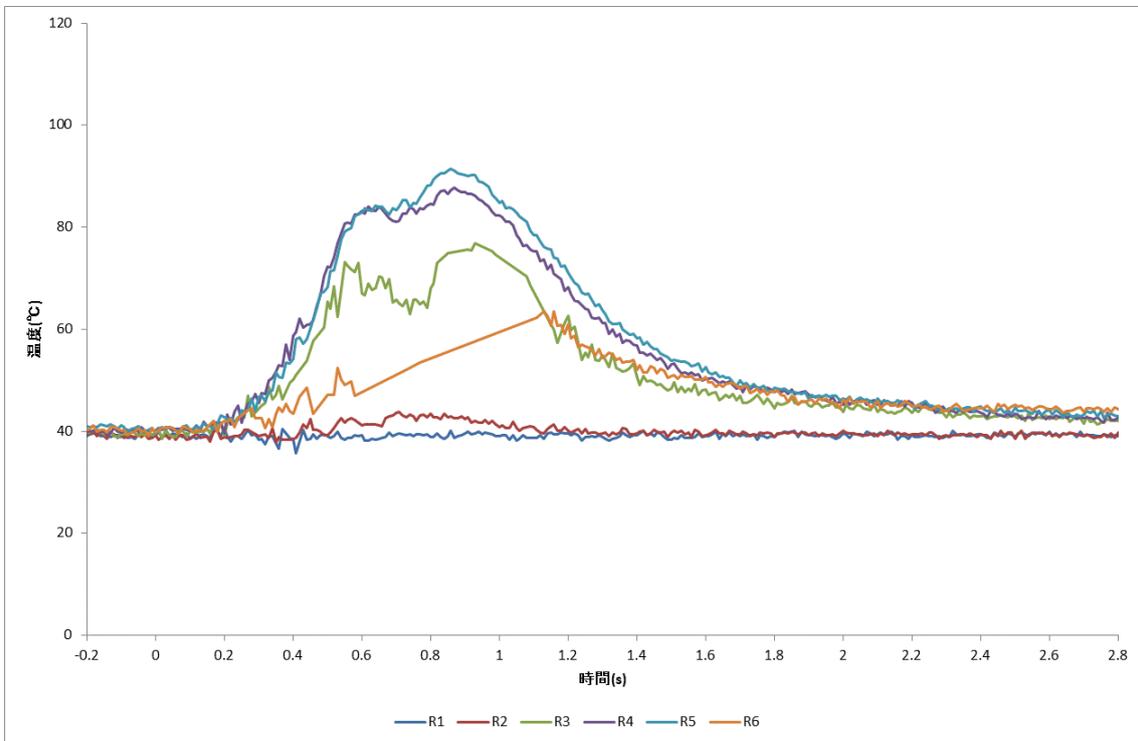


図 3.1-195 光ファイバによる液相温度（ケース A, 第 4 段 WMS 部 / T5 ライン）

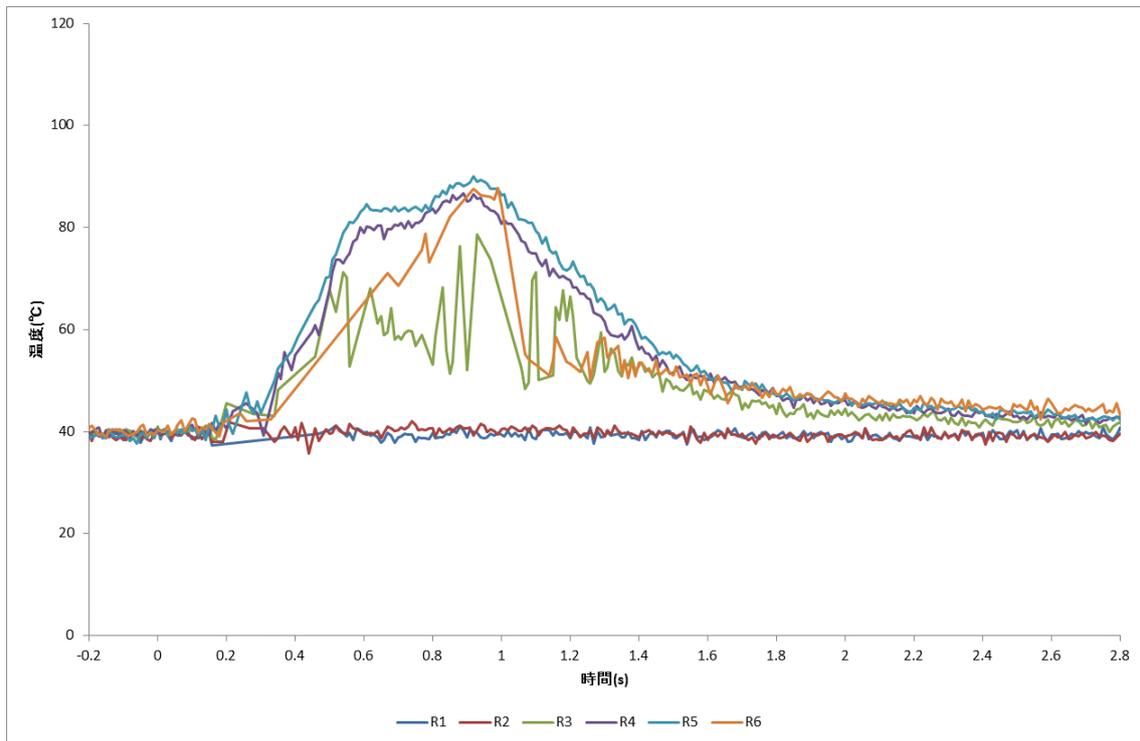


図 3.1-196 光ファイバによる液相温度（ケース A, 第 4 段 WMS 部 / T4 ライン）

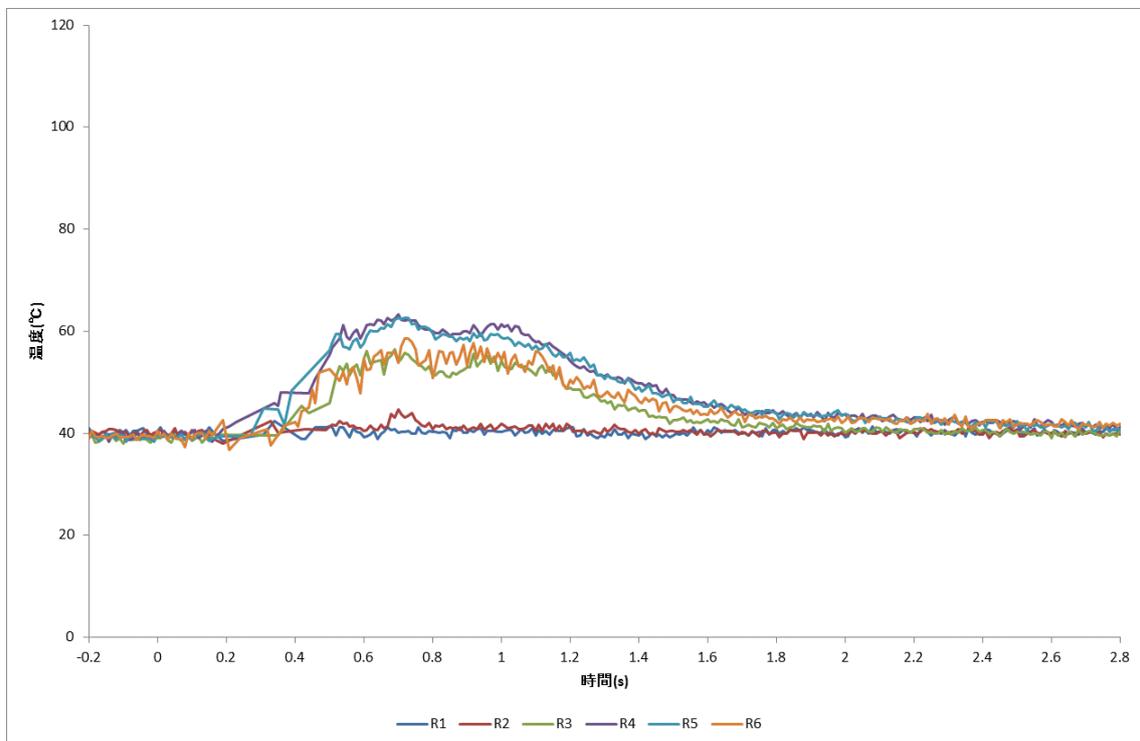


図 3.1-197 光ファイバによる液相温度（ケース A, 第 4 段 WMS 部 / T3 ライン）

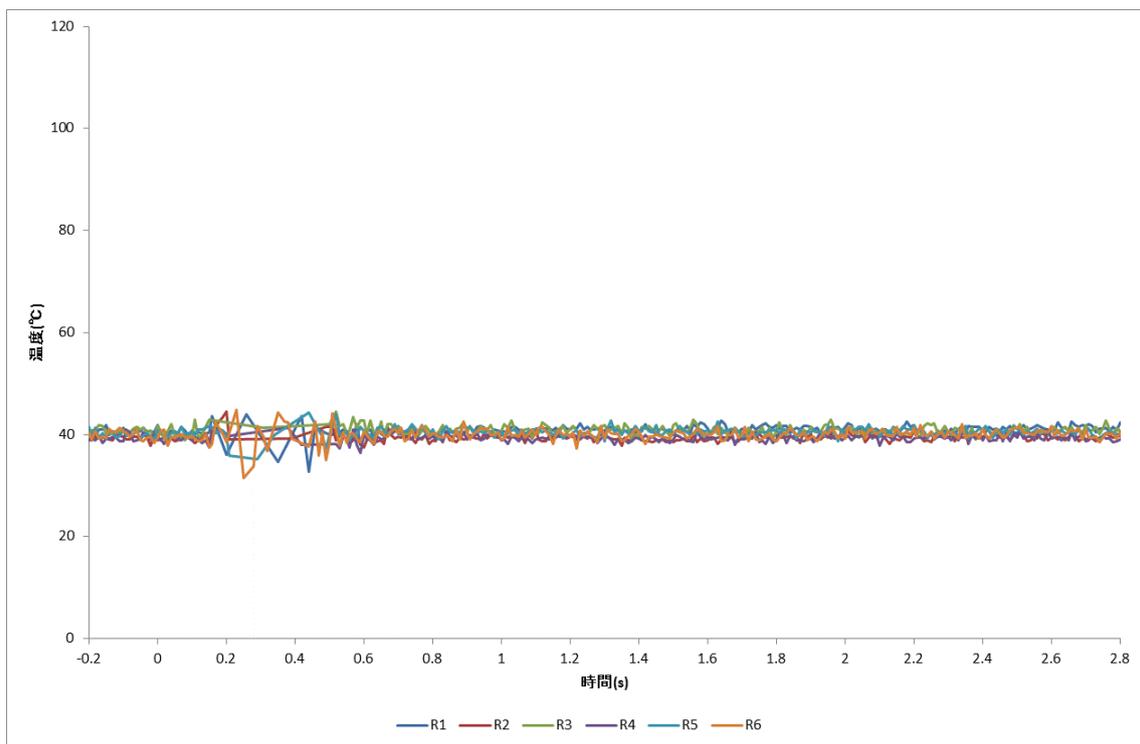


図 3.1-198 光ファイバによる液相温度（ケース A, 第 4 段 WMS 部 / T2 ライン）

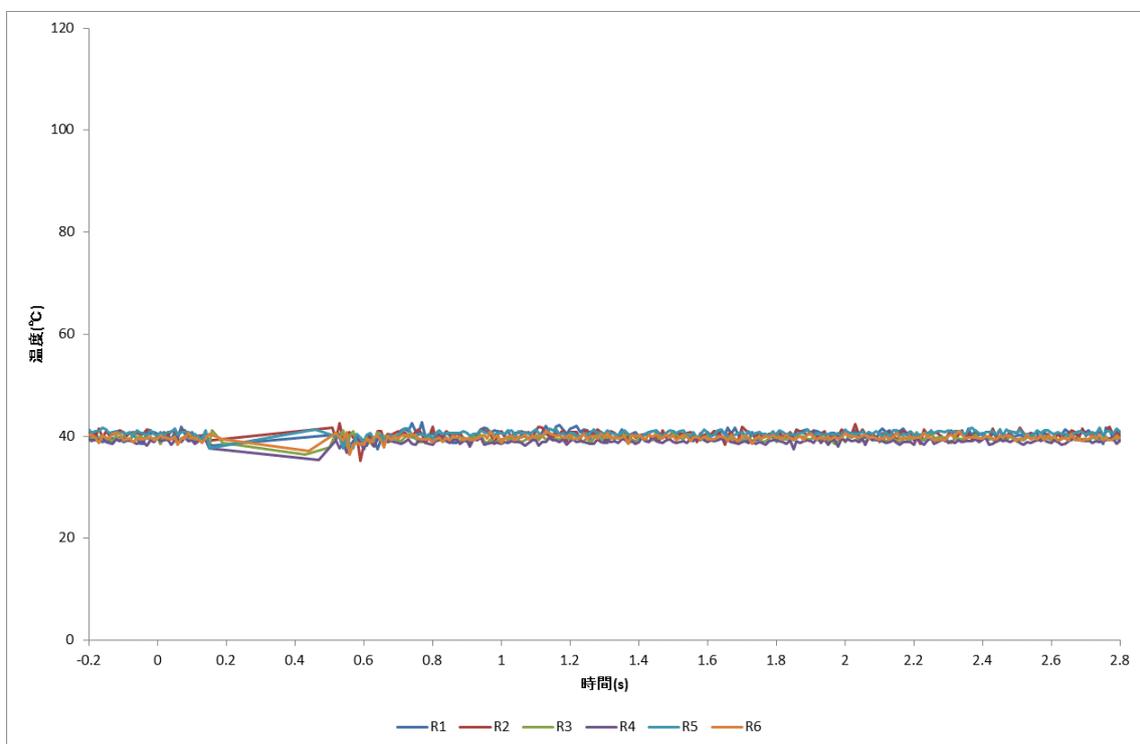


図 3.1-199 光ファイバによる液相温度（ケース A, 第 4 段 WMS 部 / T1 ライン）

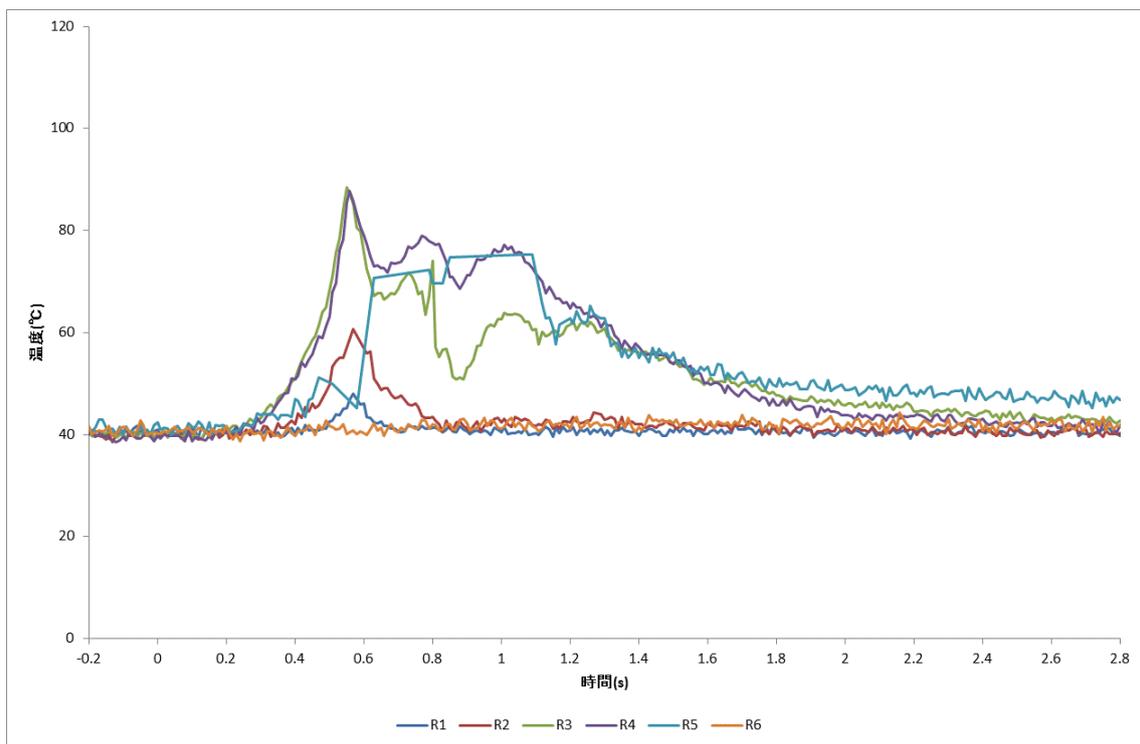


図 3.1-200 光ファイバによる液相温度（ケース B, 第 4 段 WMS 部 / T6 ライン）

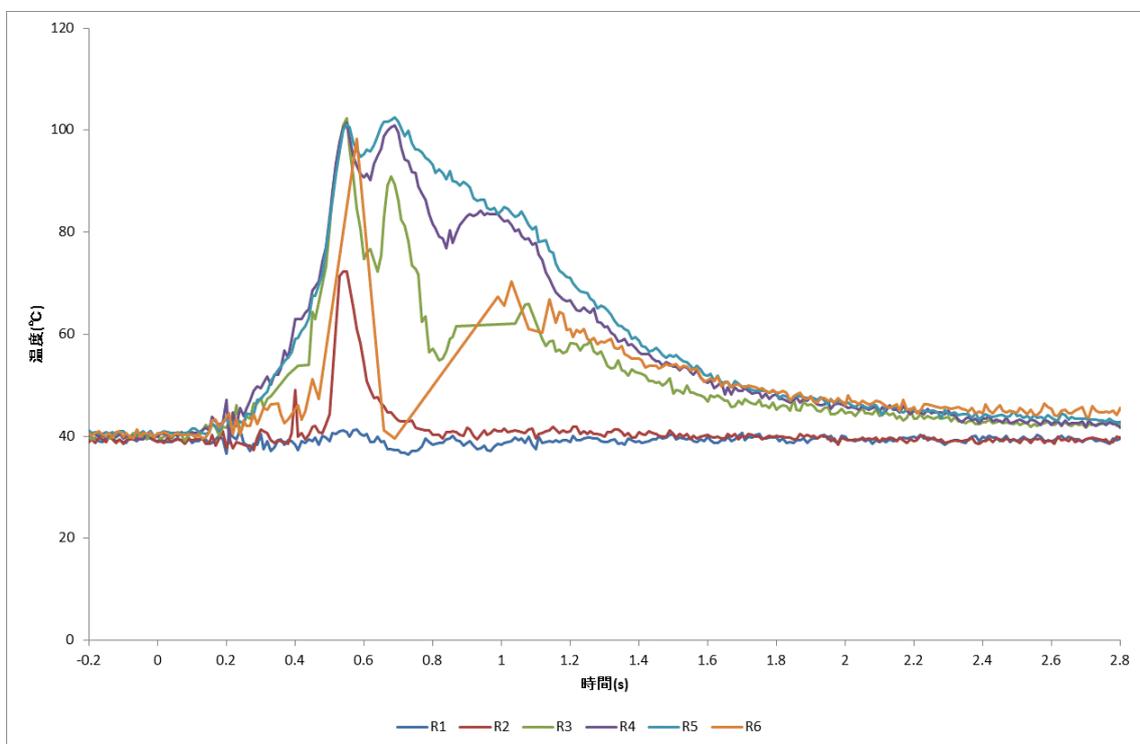


図 3.1-201 光ファイバによる液相温度（ケース B, 第 4 段 WMS 部 / T5 ライン）

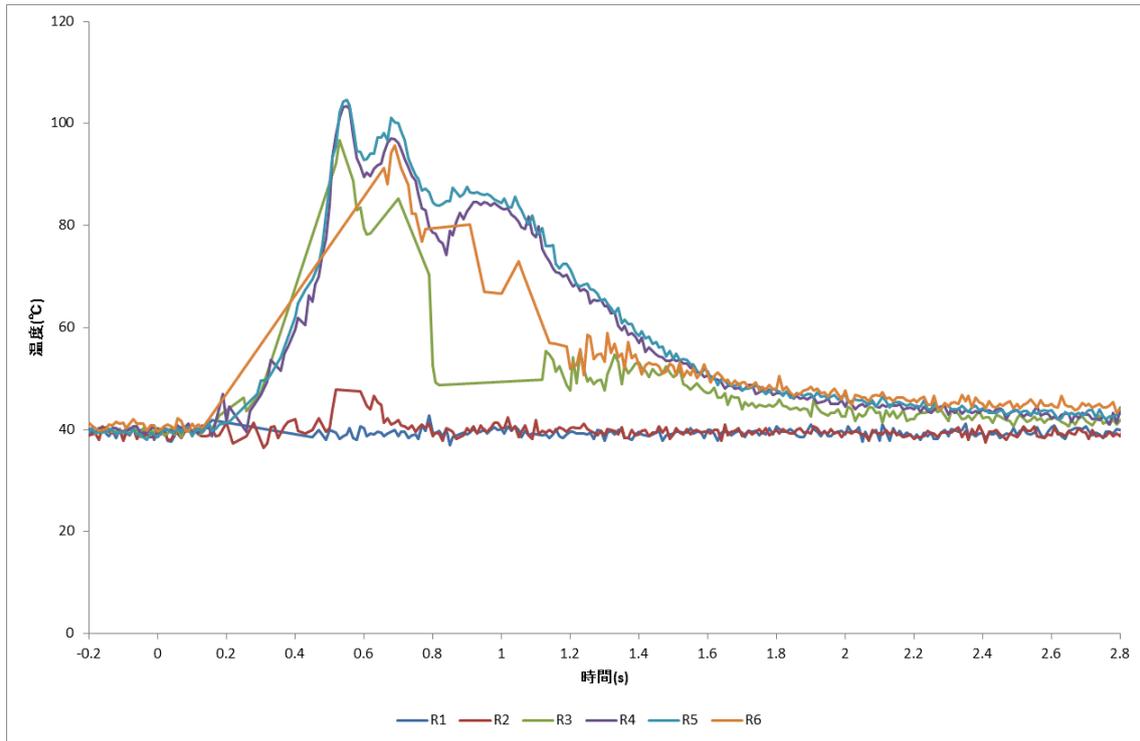


図 3.1-202 光ファイバによる液相温度（ケース B, 第 4 段 WMS 部 / T4 ライン）

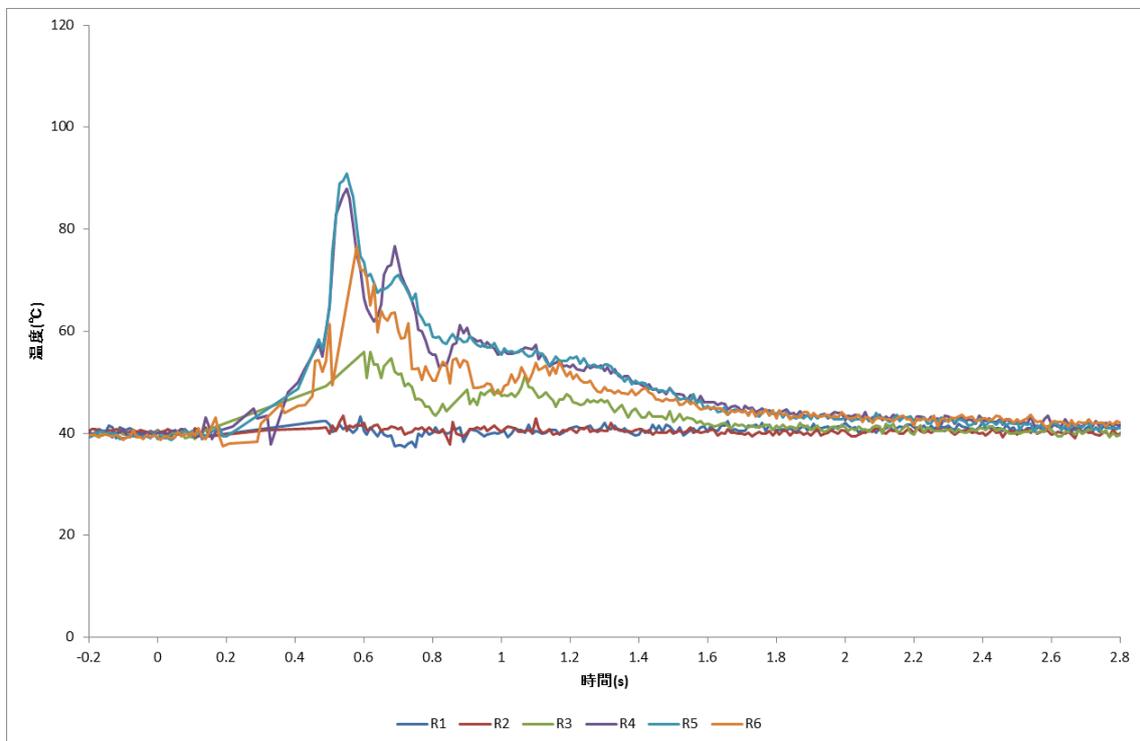


図 3.1-203 光ファイバによる液相温度（ケース B, 第 4 段 WMS 部 / T3 ライン）

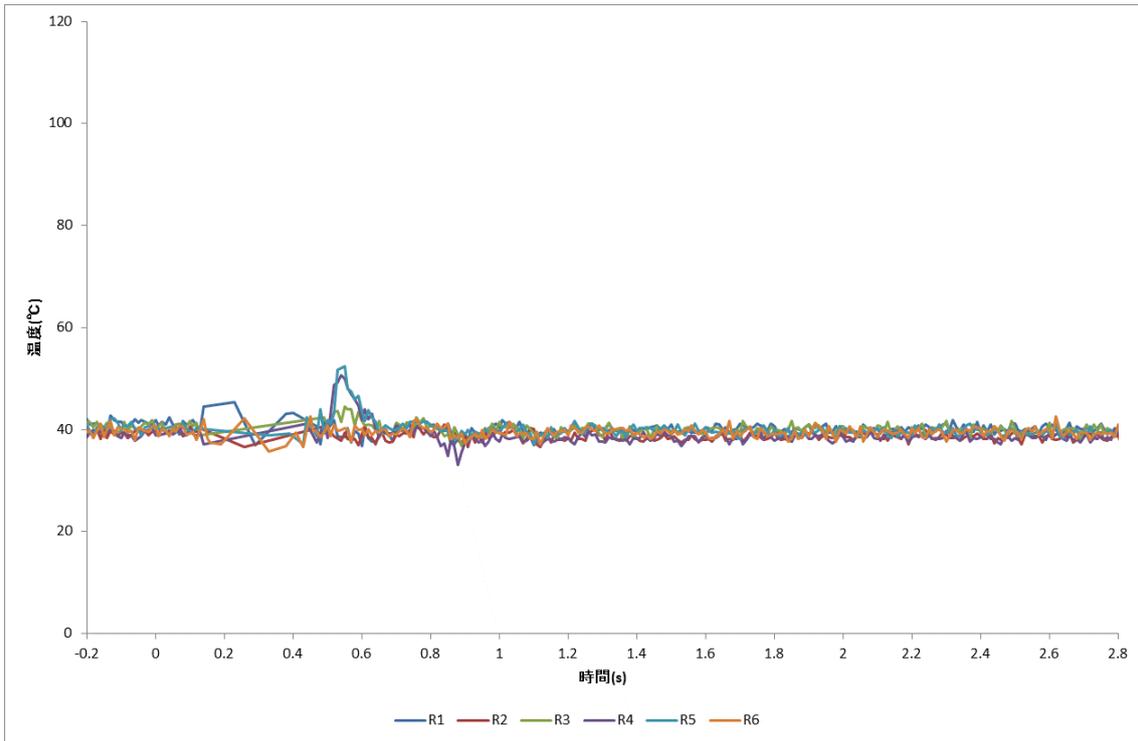


図 3.1-204 光ファイバによる液相温度（ケース B, 第 4 段 WMS 部 / T2 ライン）

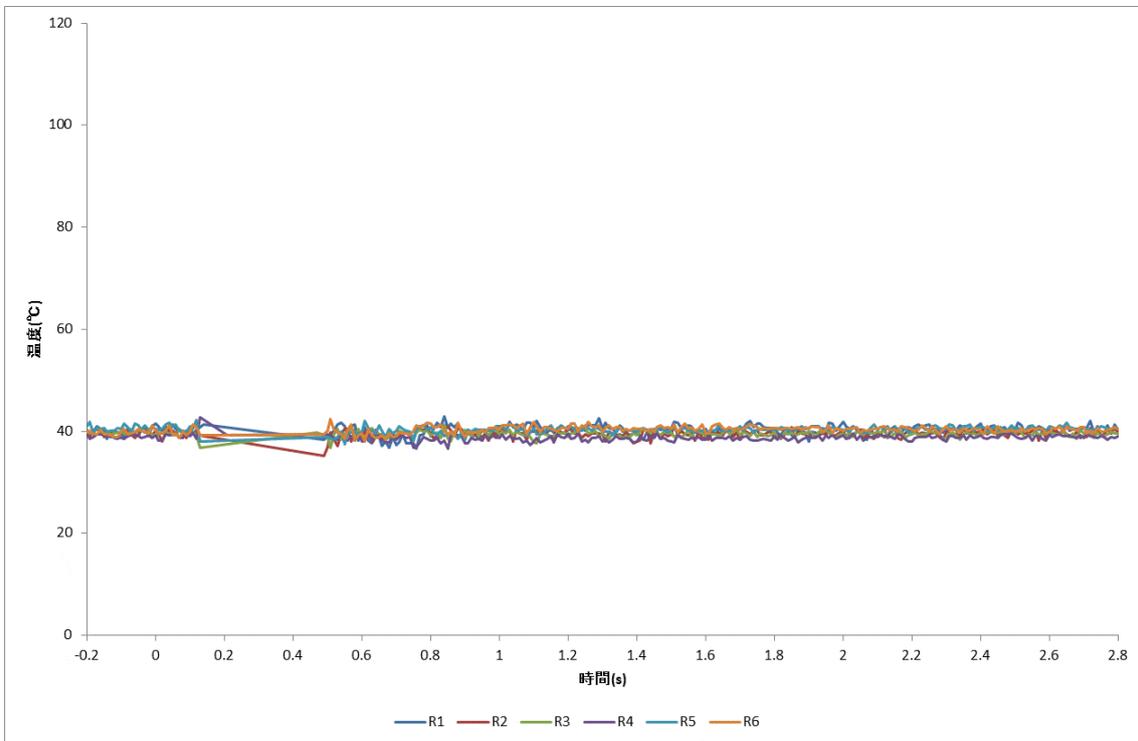


図 3.1-205 光ファイバによる液相温度（ケース B, 第 4 段 WMS 部 / T1 ライン）

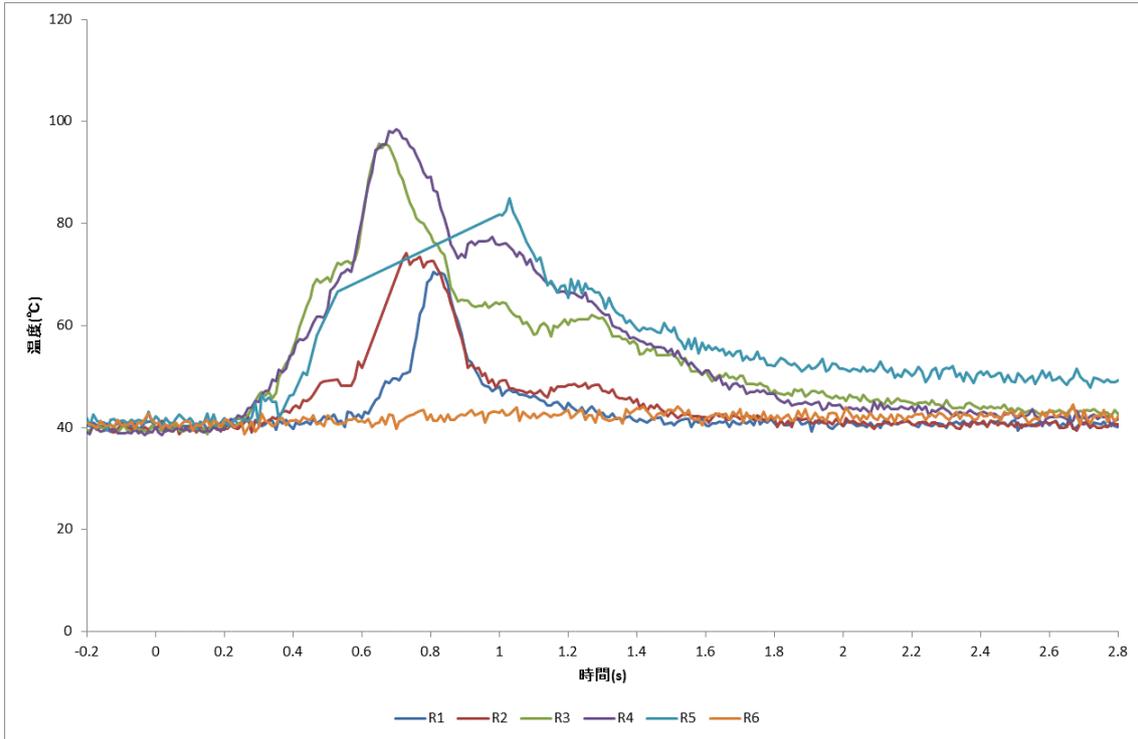


図 3.1-206 光ファイバによる液相温度（ケース C, 第 4 段 WMS 部 / T6 ライン）

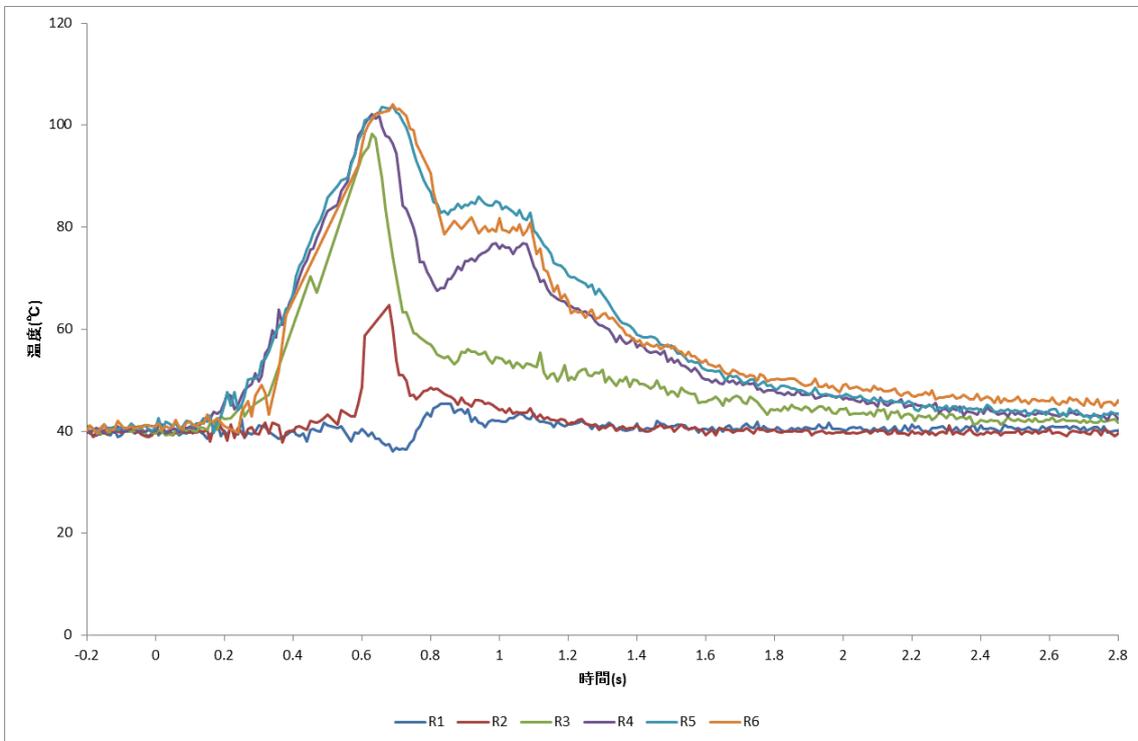


図 3.1-207 光ファイバによる液相温度（ケース C, 第 4 段 WMS 部 / T5 ライン）

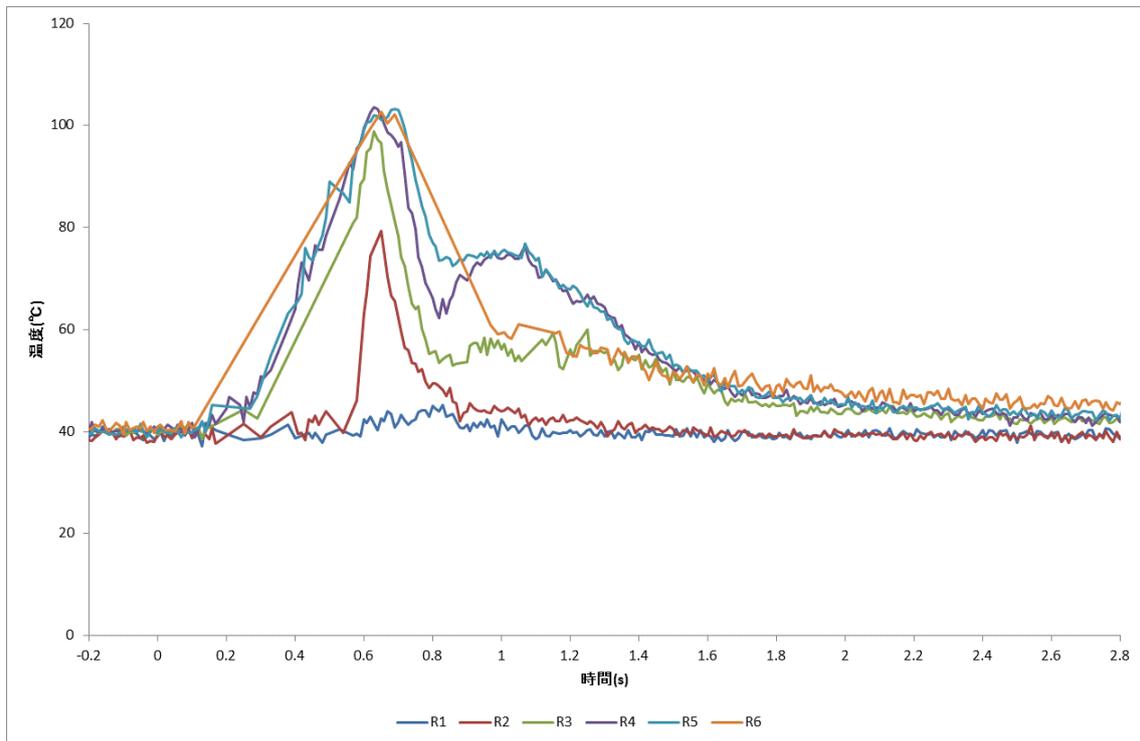


図 3.1-208 光ファイバによる液相温度（ケース C, 第 4 段 WMS 部 / T4 ライン）

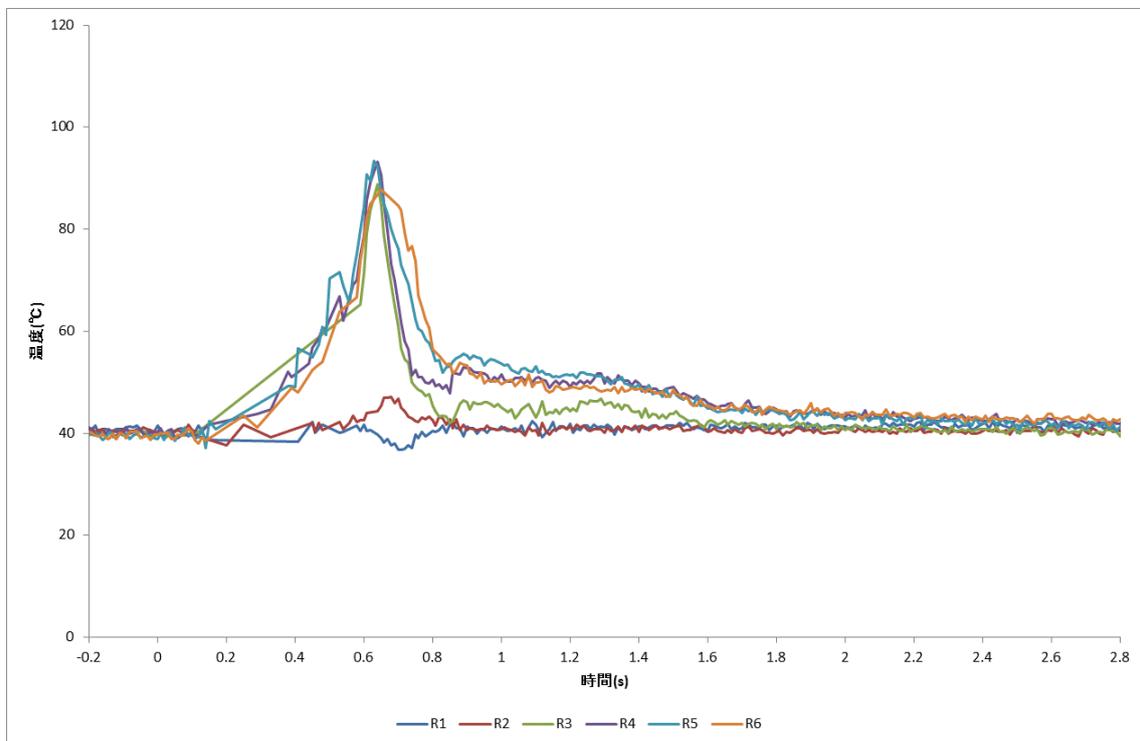


図 3.1-209 光ファイバによる液相温度（ケース C, 第 4 段 WMS 部 / T3 ライン）

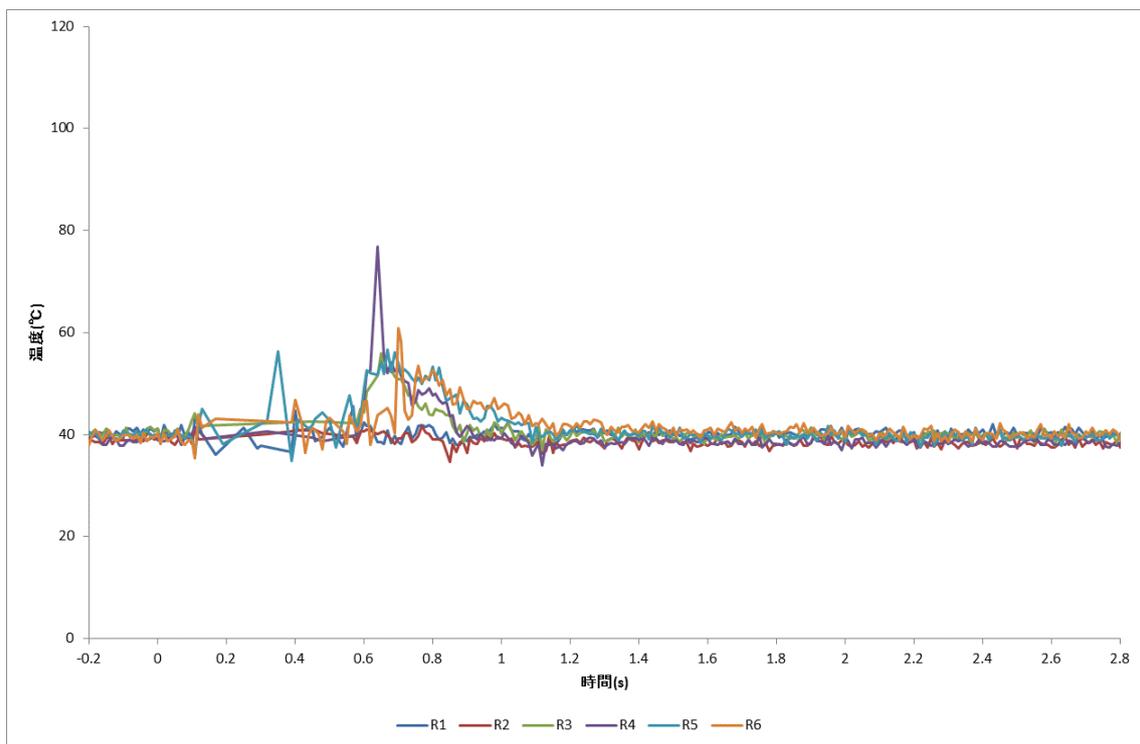


図 3.1-210 光ファイバによる液相温度（ケース C, 第 4 段 WMS 部 / T2 ライン）

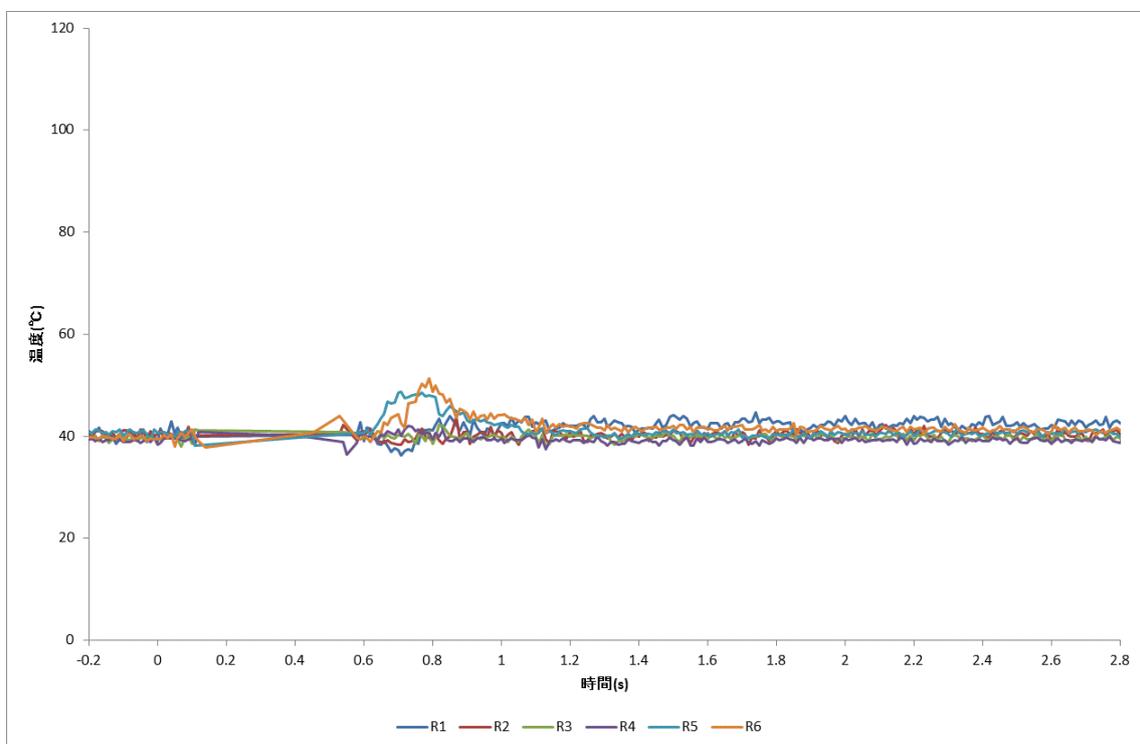


図 3.1-211 光ファイバによる液相温度（ケース C, 第 4 段 WMS 部 / T1 ライン）

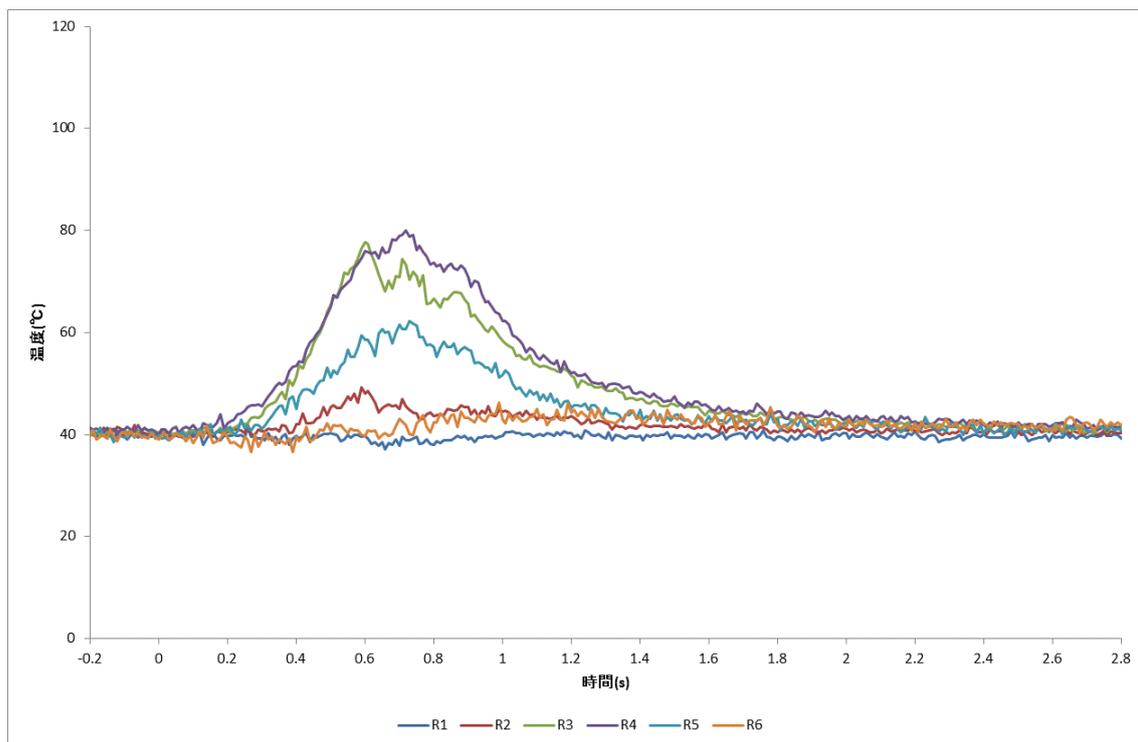


図 3.1-212 光ファイバによる液相温度（ケース D, 第 4 段 WMS 部 / T6 ライン）

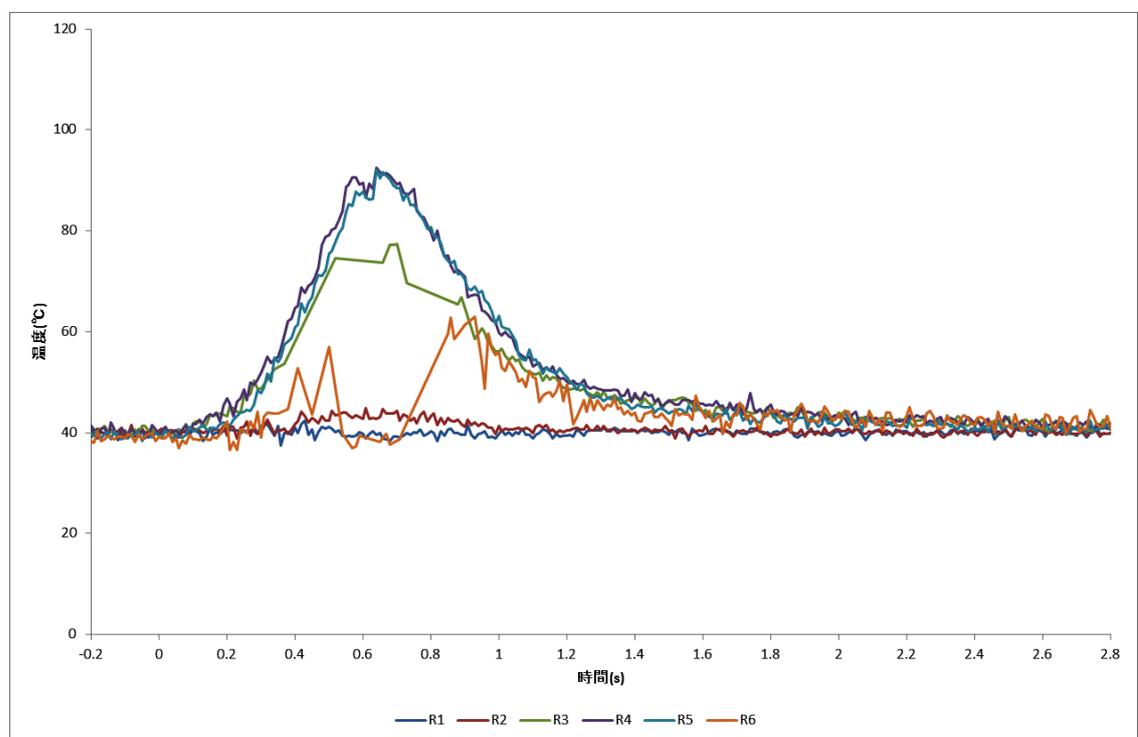


図 3.1-213 光ファイバによる液相温度（ケース D, 第 4 段 WMS 部 / T5 ライン）

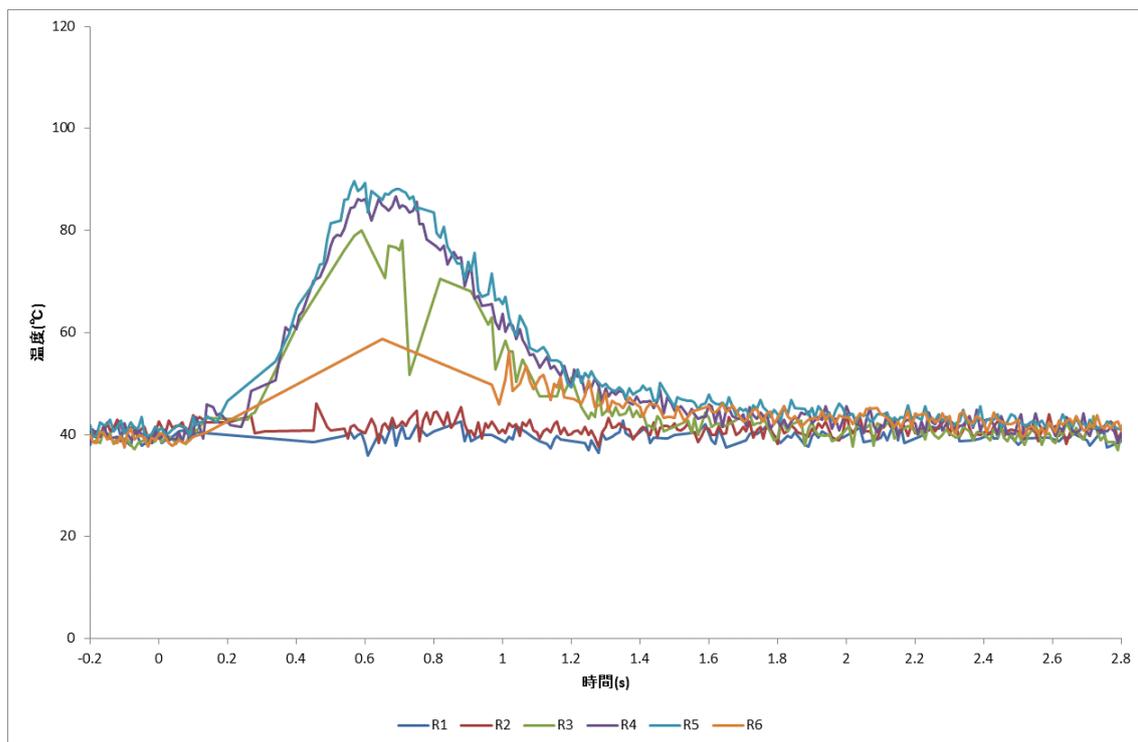


図 3.1-214 光ファイバによる液相温度（ケース D, 第 4 段 WMS 部 / T4 ライン）

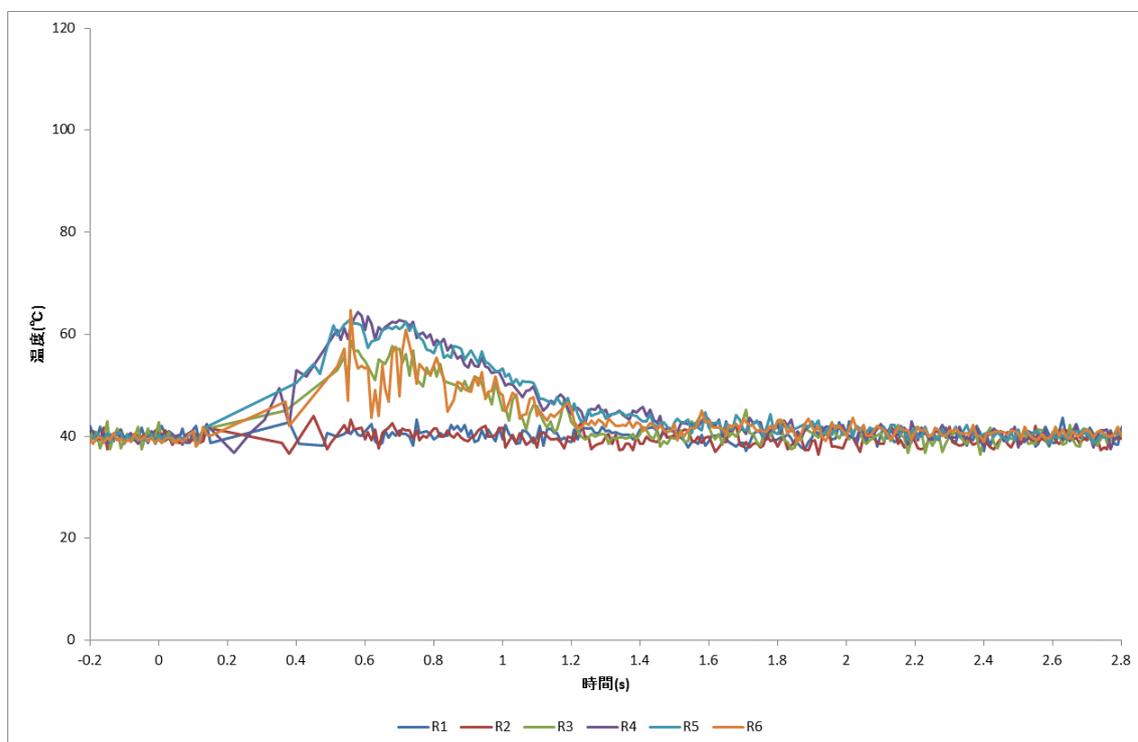


図 3.1-215 光ファイバによる液相温度（ケース D, 第 4 段 WMS 部 / T3 ライン）

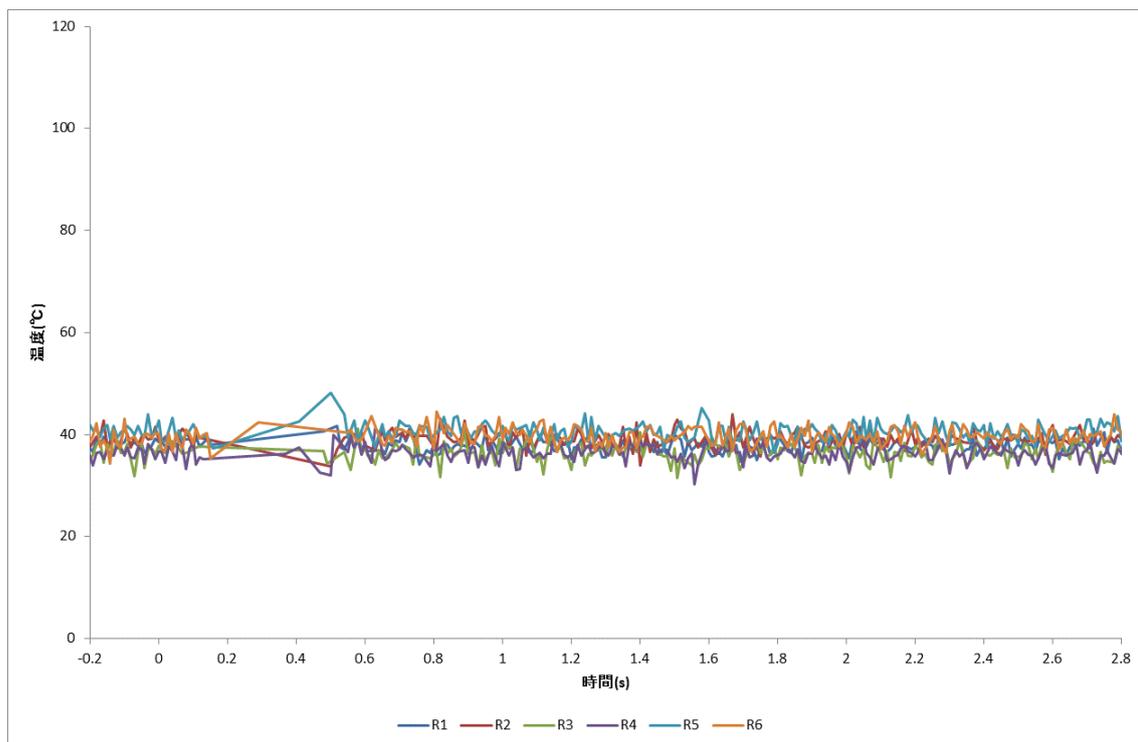


図 3.1-216 光ファイバによる液相温度（ケース D, 第 4 段 WMS 部 / T2 ライン）

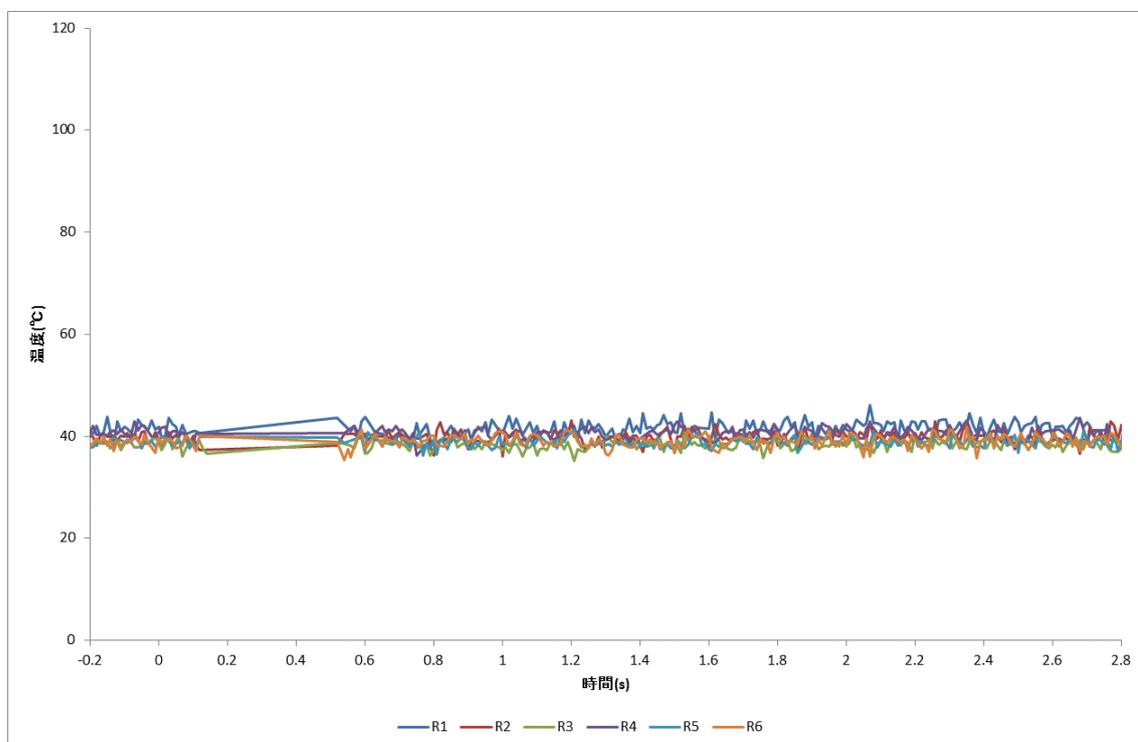


図 3.1-217 光ファイバによる液相温度（ケース D, 第 4 段 WMS 部 / T1 ライン）

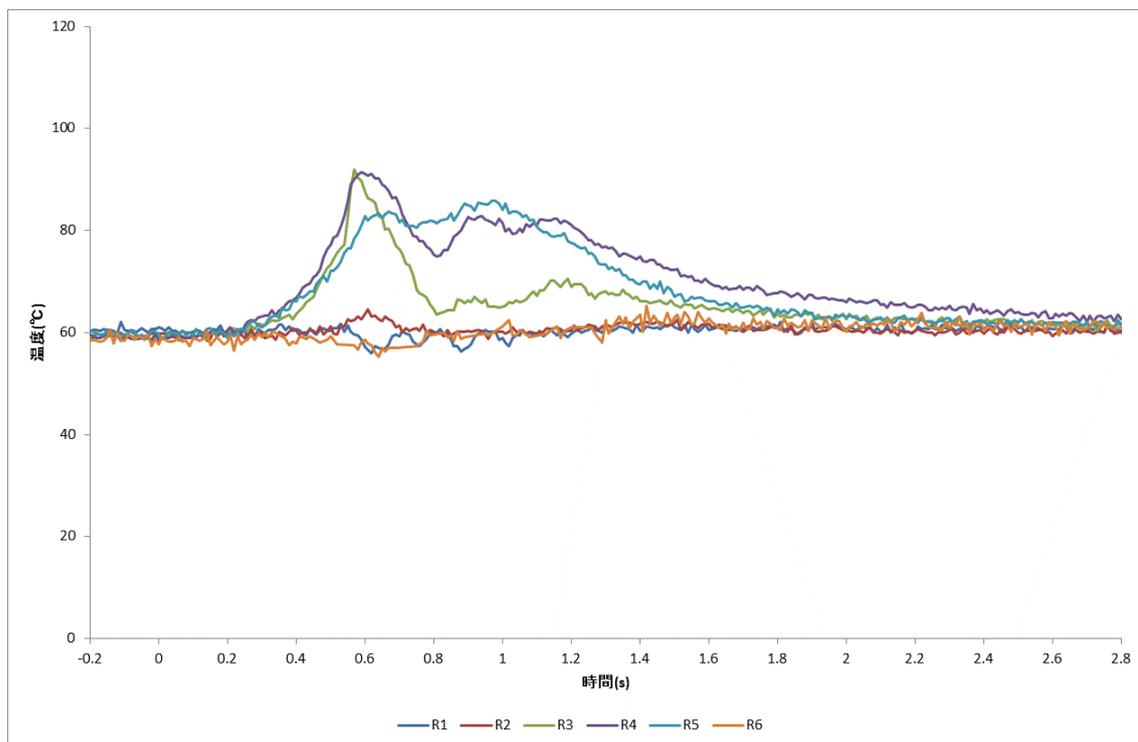


図 3.1-218 光ファイバによる液相温度（ケース E, 第 4 段 WMS 部 / T6 ライン）

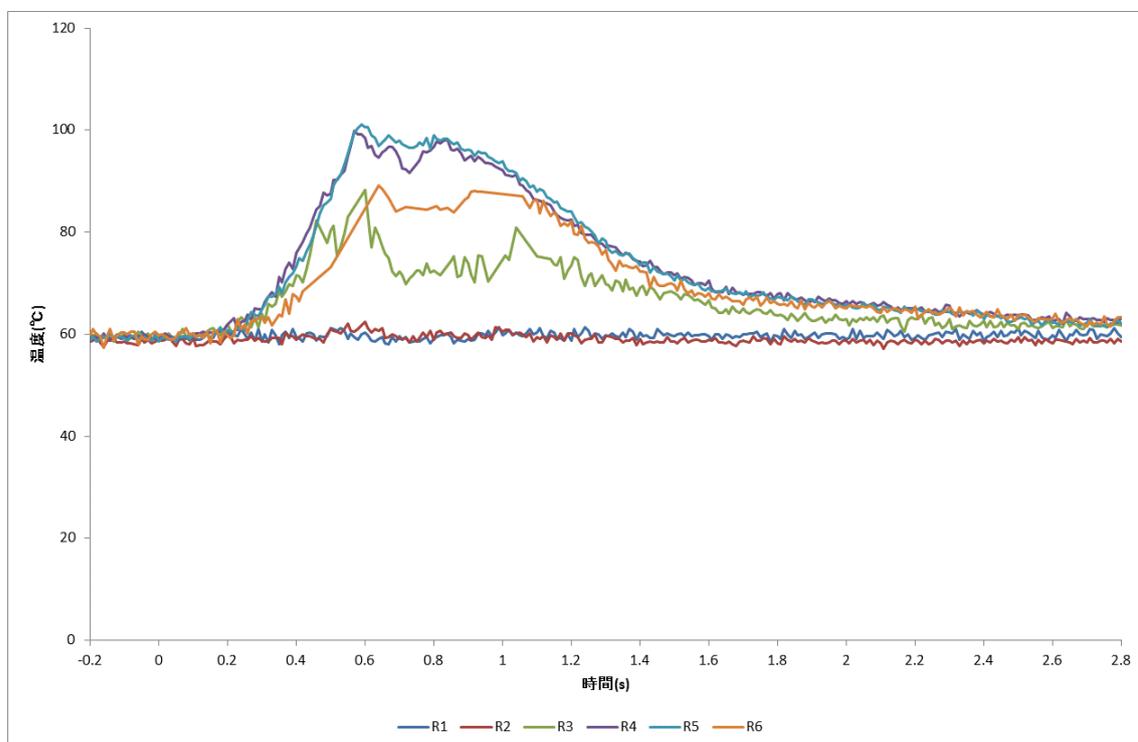


図 3.1-219 光ファイバによる液相温度（ケース E, 第 4 段 WMS 部 / T5 ライン）

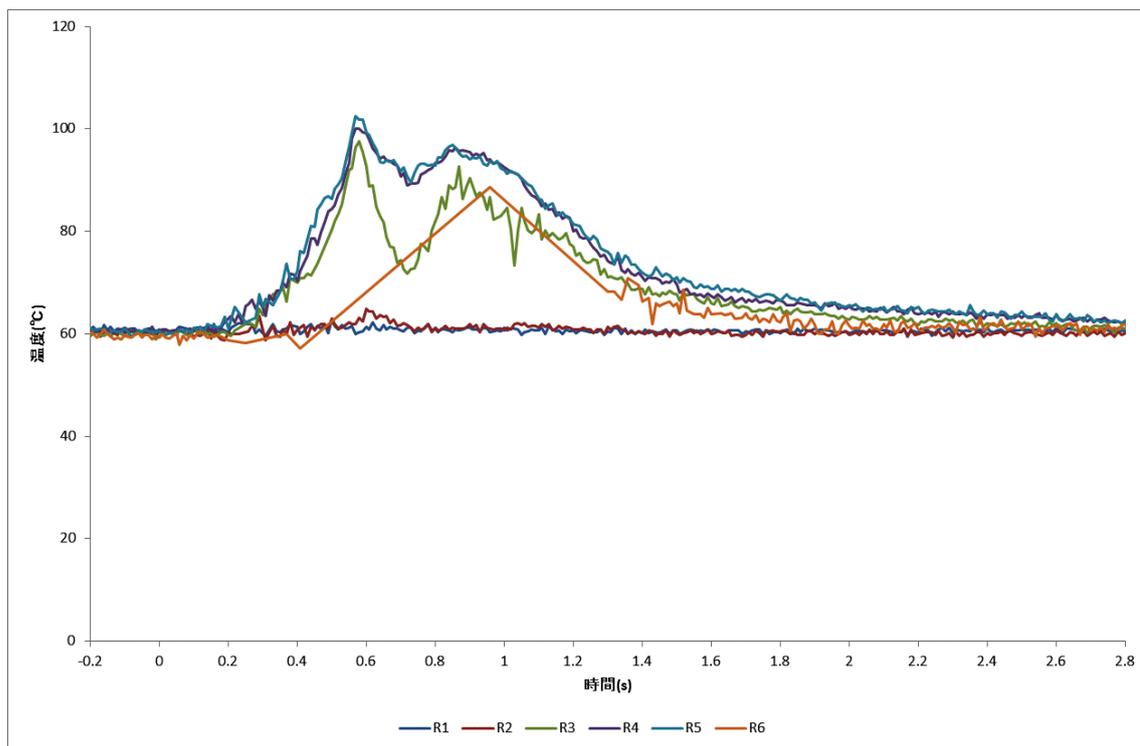


図 3.1-220 光ファイバによる液相温度（ケース E, 第 4 段 WMS 部 / T4 ライン）

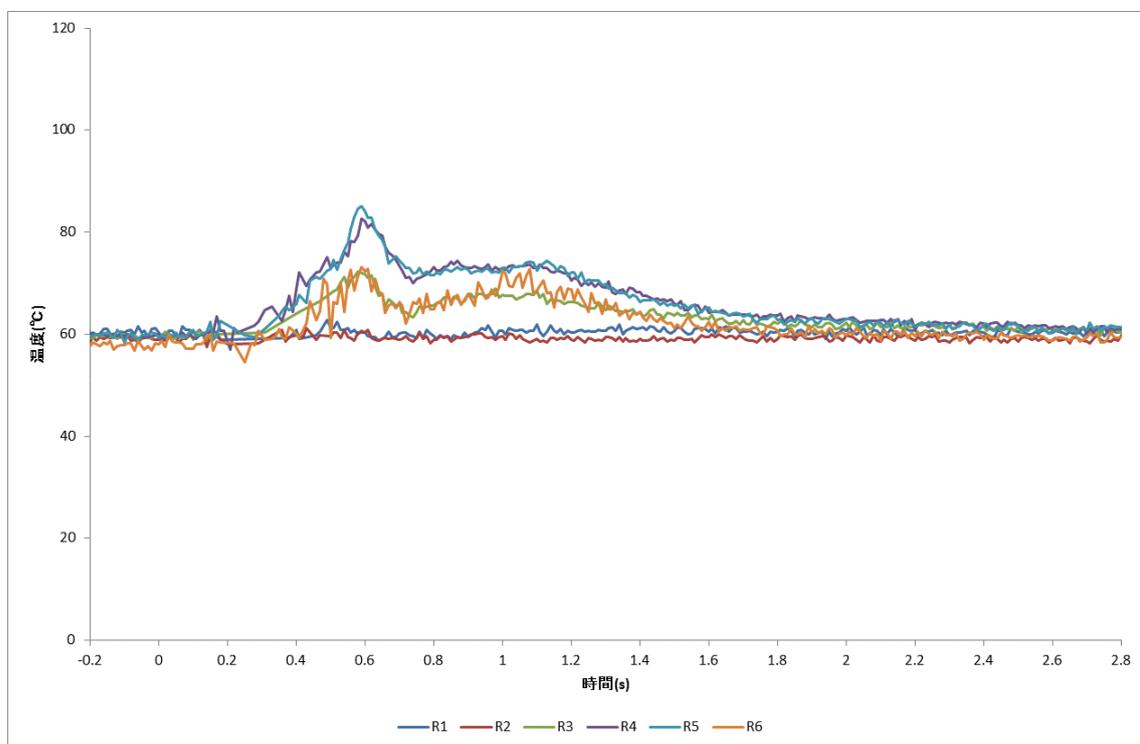


図 3.1-221 光ファイバによる液相温度（ケース E, 第 4 段 WMS 部 / T3 ライン）

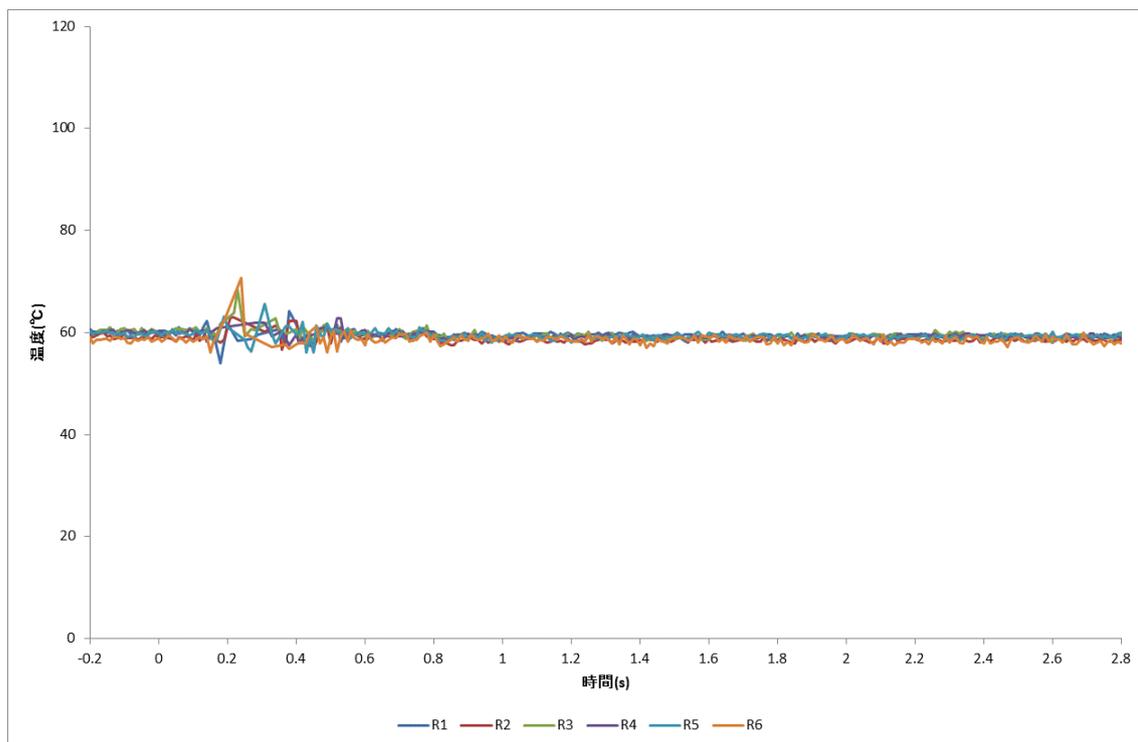


図 3.1-222 光ファイバによる液相温度（ケース E, 第 4 段 WMS 部 / T2 ライン）

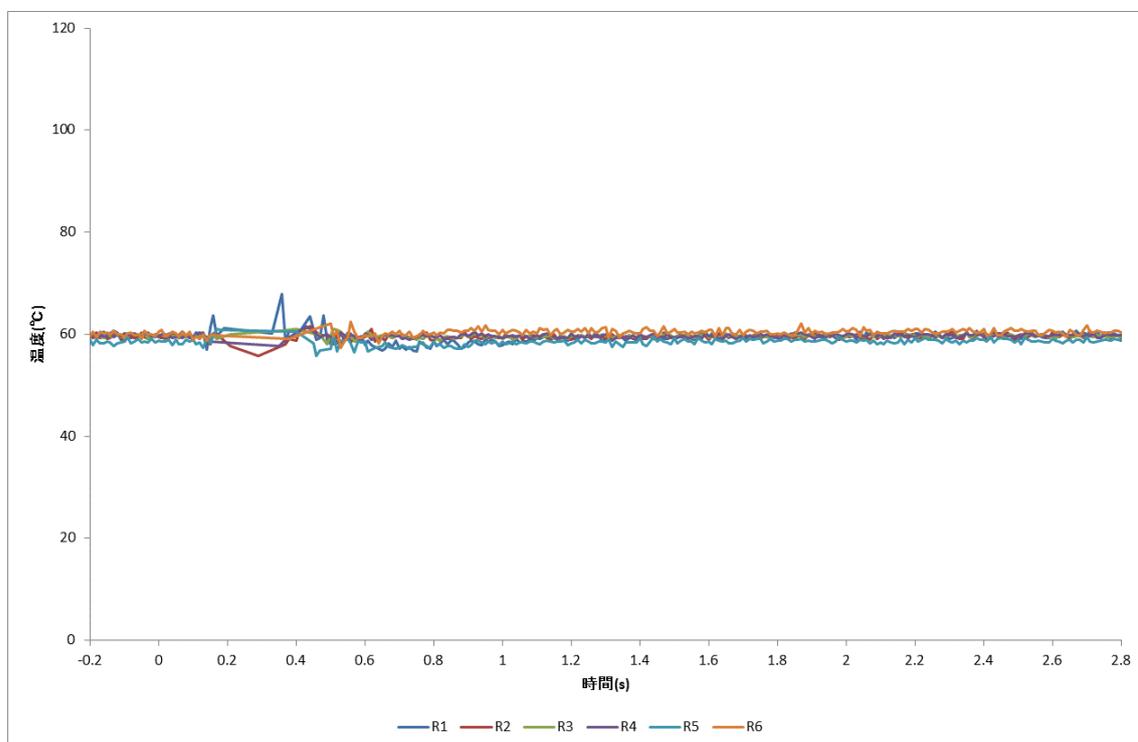


図 3.1-223 光ファイバによる液相温度（ケース E, 第 4 段 WMS 部 / T1 ライン）

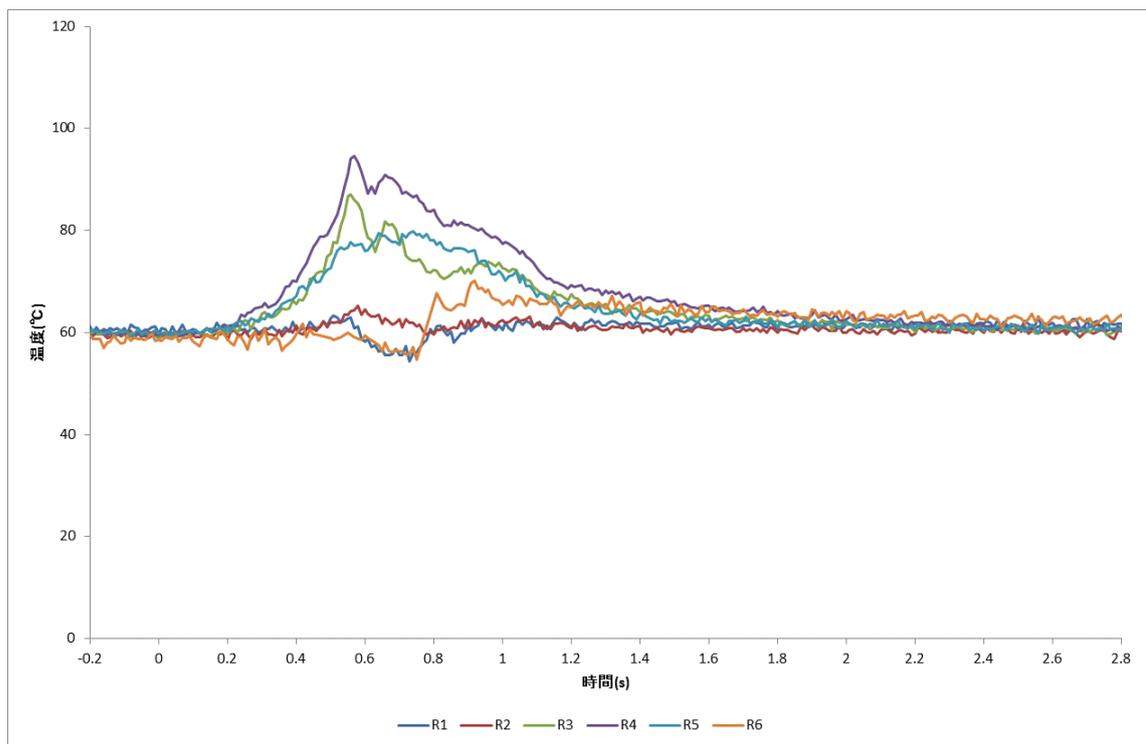


図 3.1-224 光ファイバによる液相温度（ケース F, 第 4 段 WMS 部 / T6 ライン）

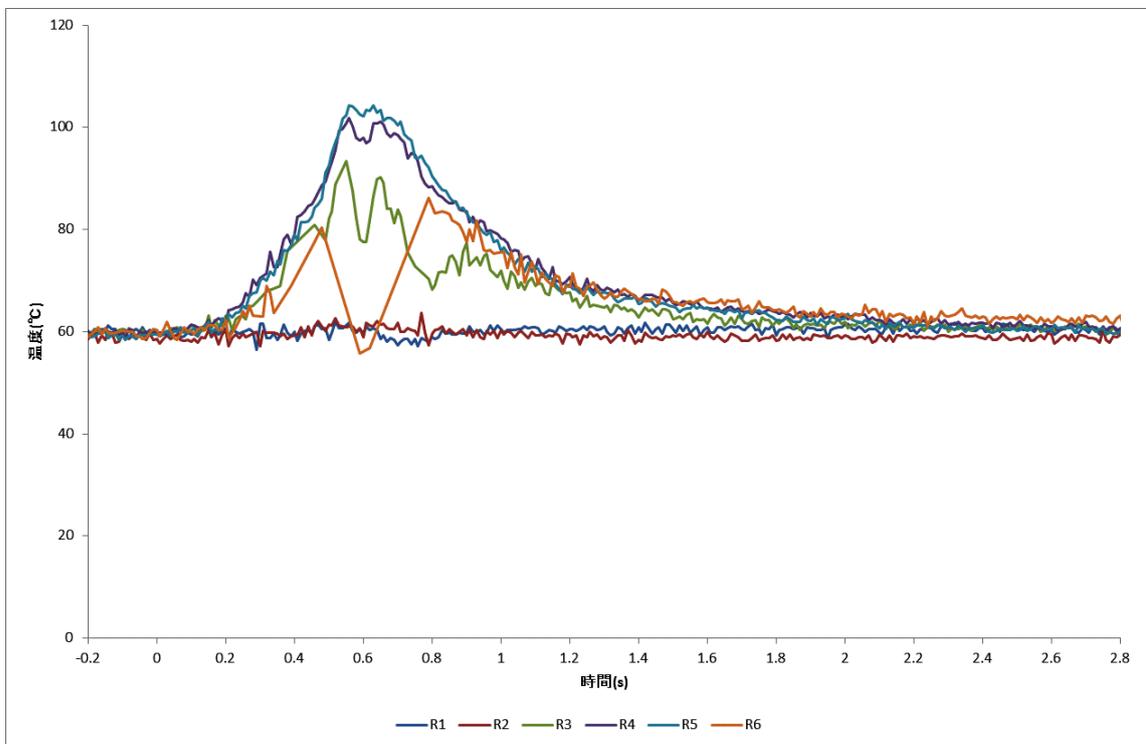


図 3.1-225 光ファイバによる液相温度（ケース F, 第 4 段 WMS 部 / T5 ライン）

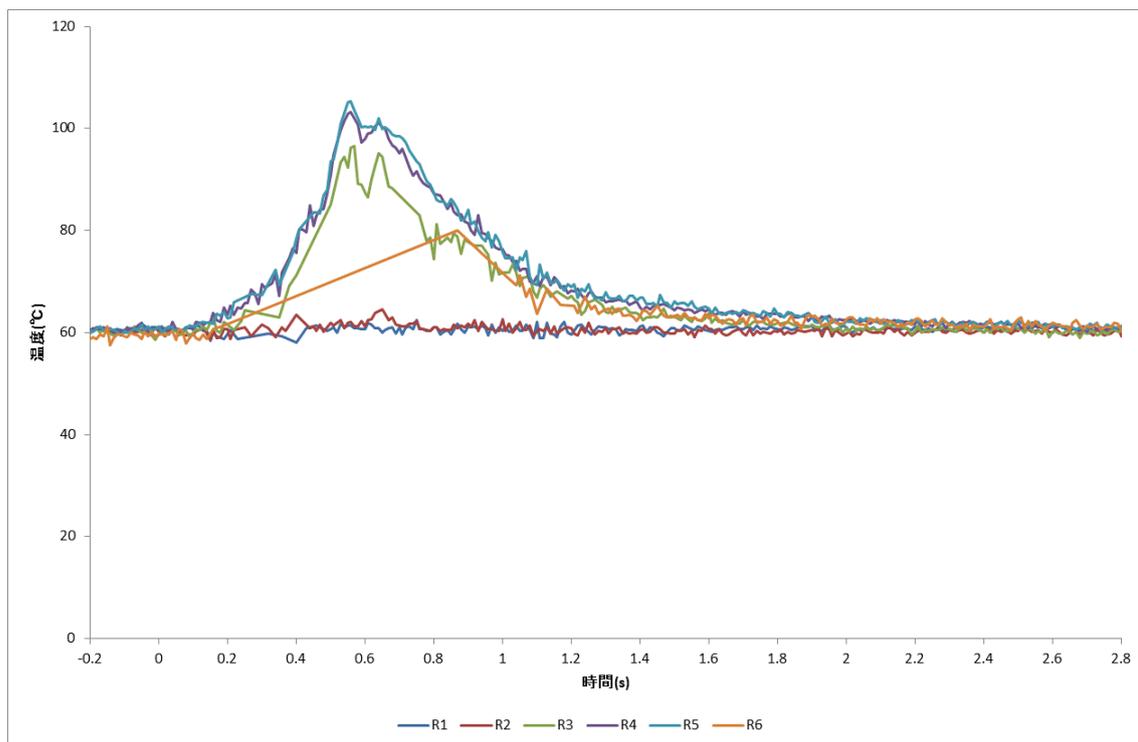


図 3.1-226 光ファイバによる液相温度（ケース F, 第 4 段 WMS 部 / T4 ライン）

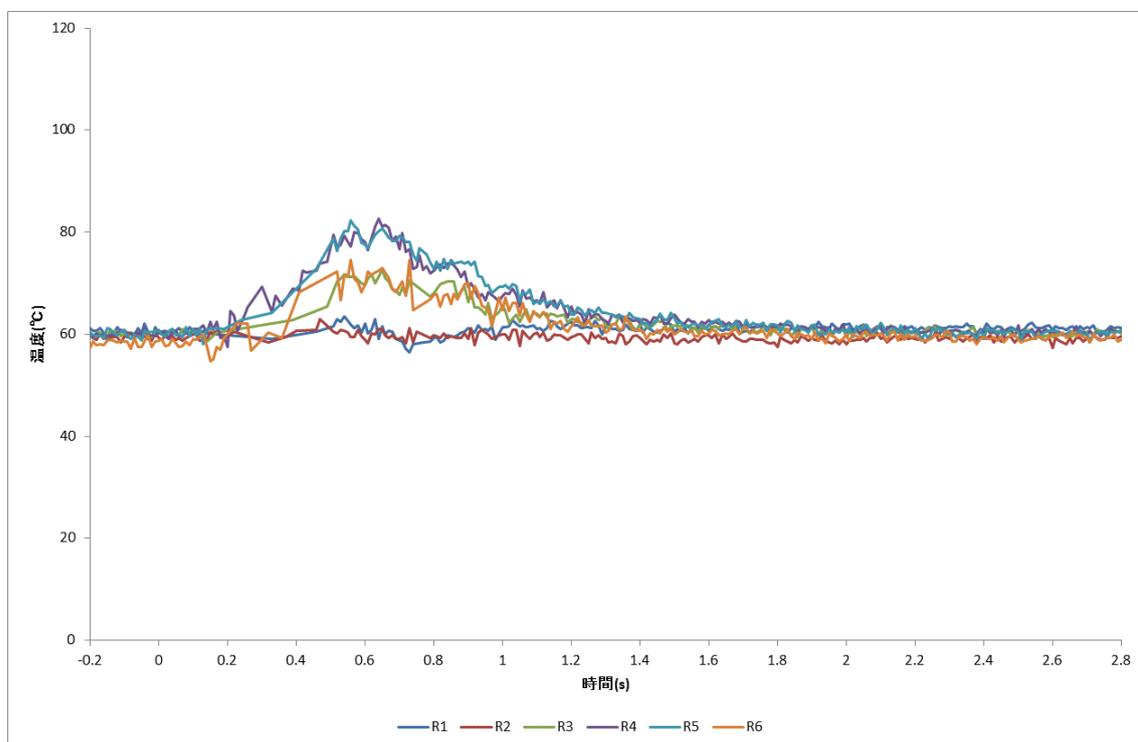


図 3.1-227 光ファイバによる液相温度（ケース F, 第 4 段 WMS 部 / T3 ライン）

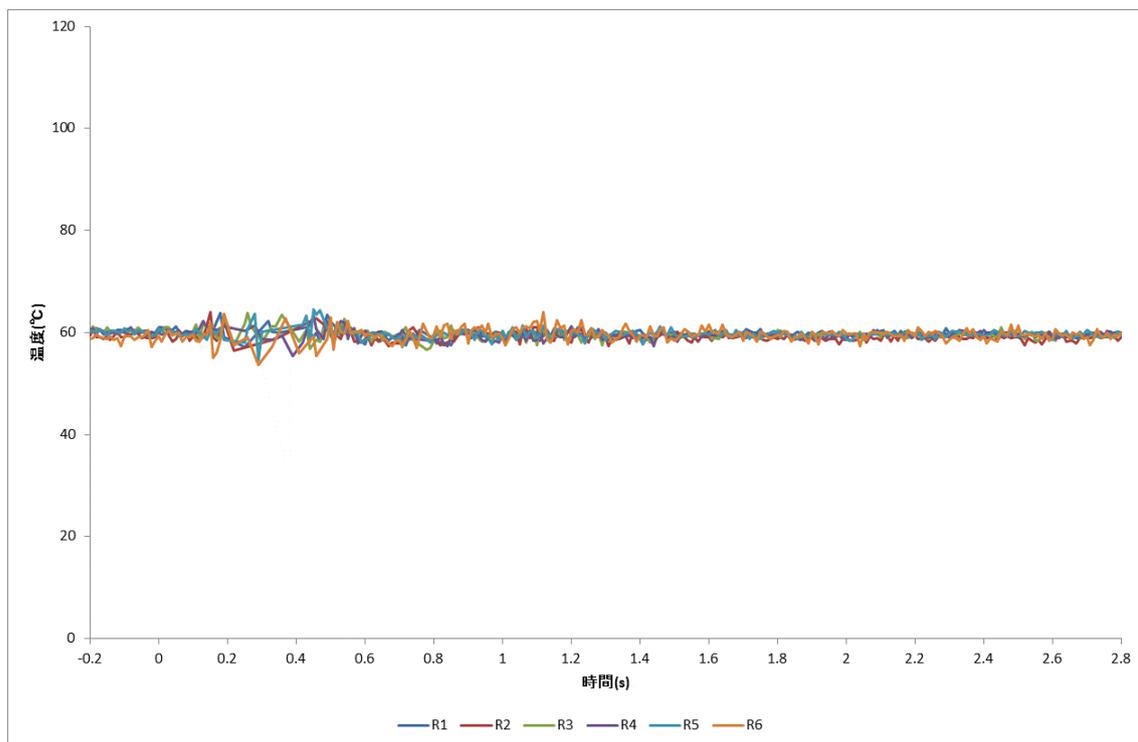


図 3.1-228 光ファイバによる液相温度（ケース F, 第 4 段 WMS 部 / T2 ライン）

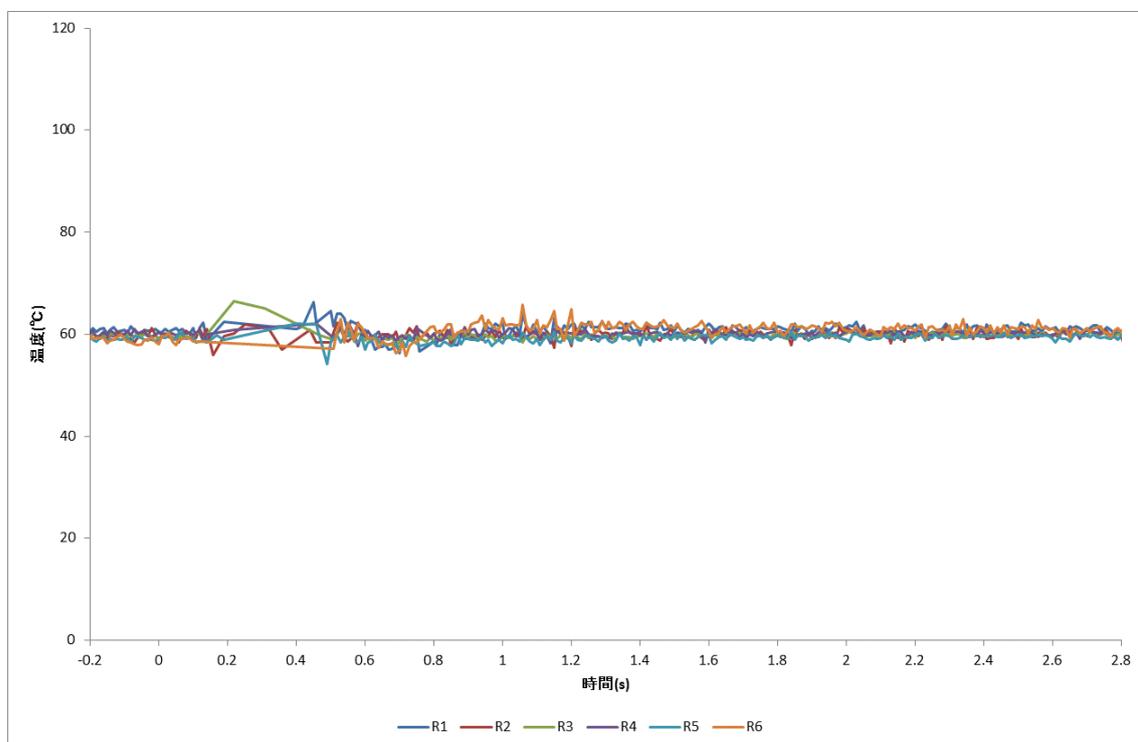


図 3.1-229 光ファイバによる液相温度（ケース F, 第 4 段 WMS 部 / T1 ライン）

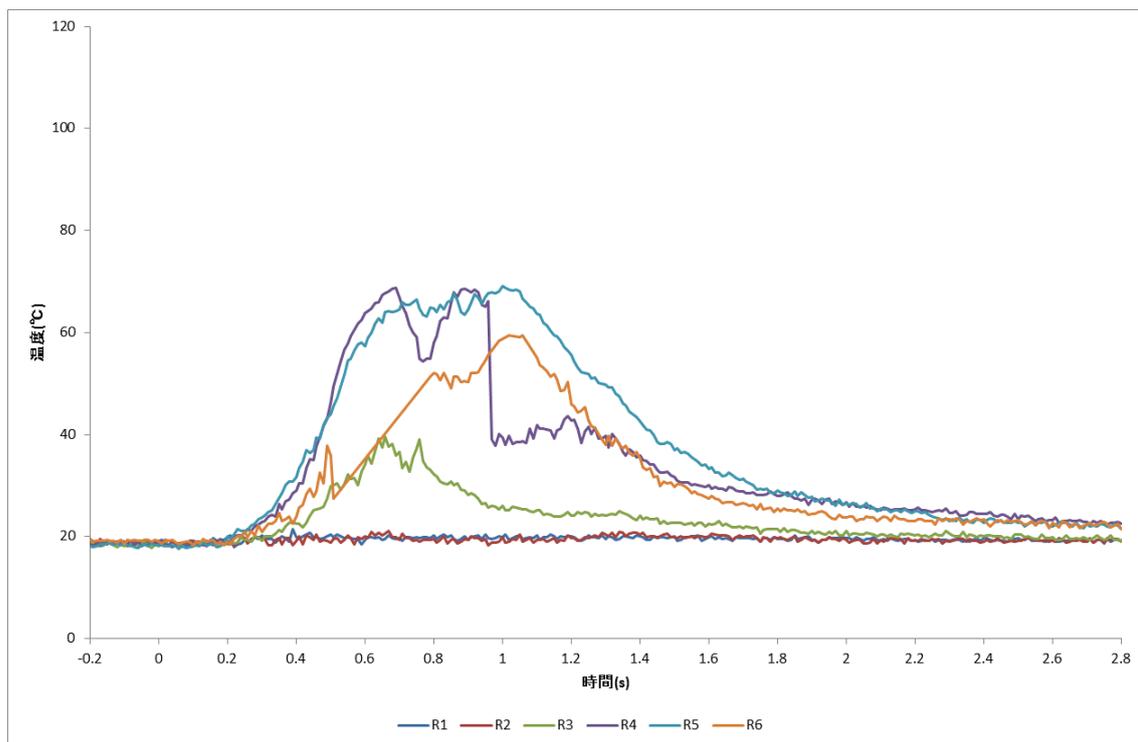


図 3.1-230 光ファイバによる液相温度（ケース G, 第 4 段 WMS 部 / T6 ライン）

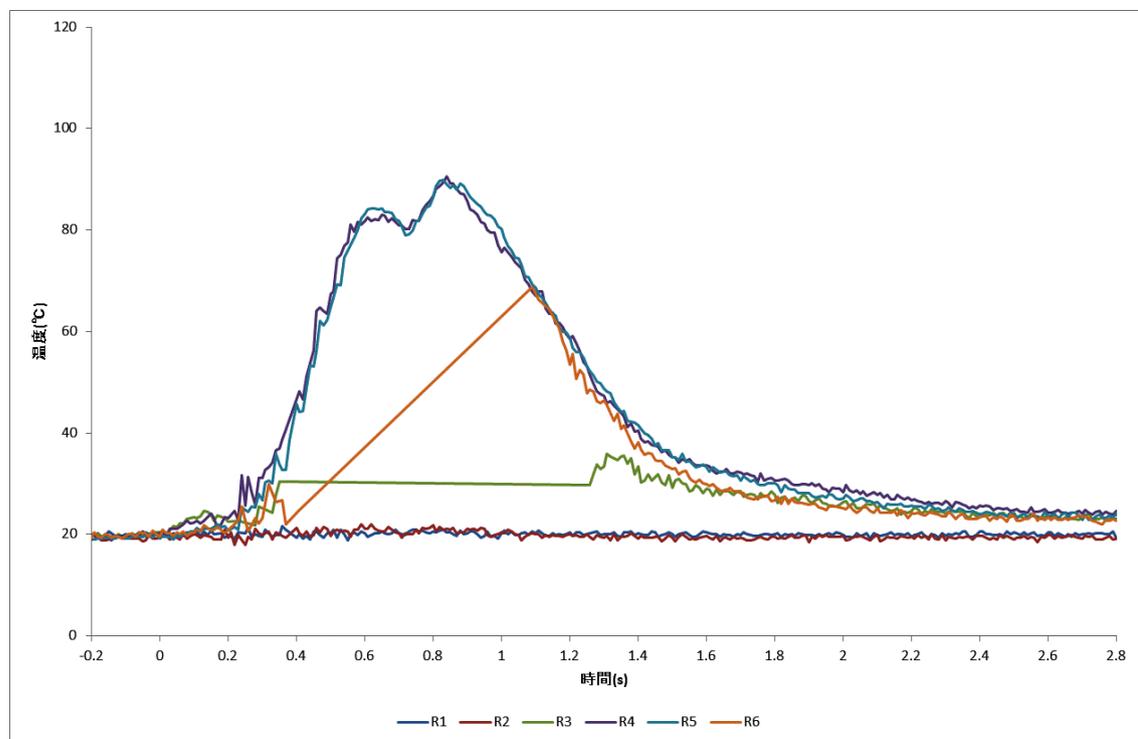


図 3.1-231 光ファイバによる液相温度（ケース G, 第 4 段 WMS 部 / T5 ライン）

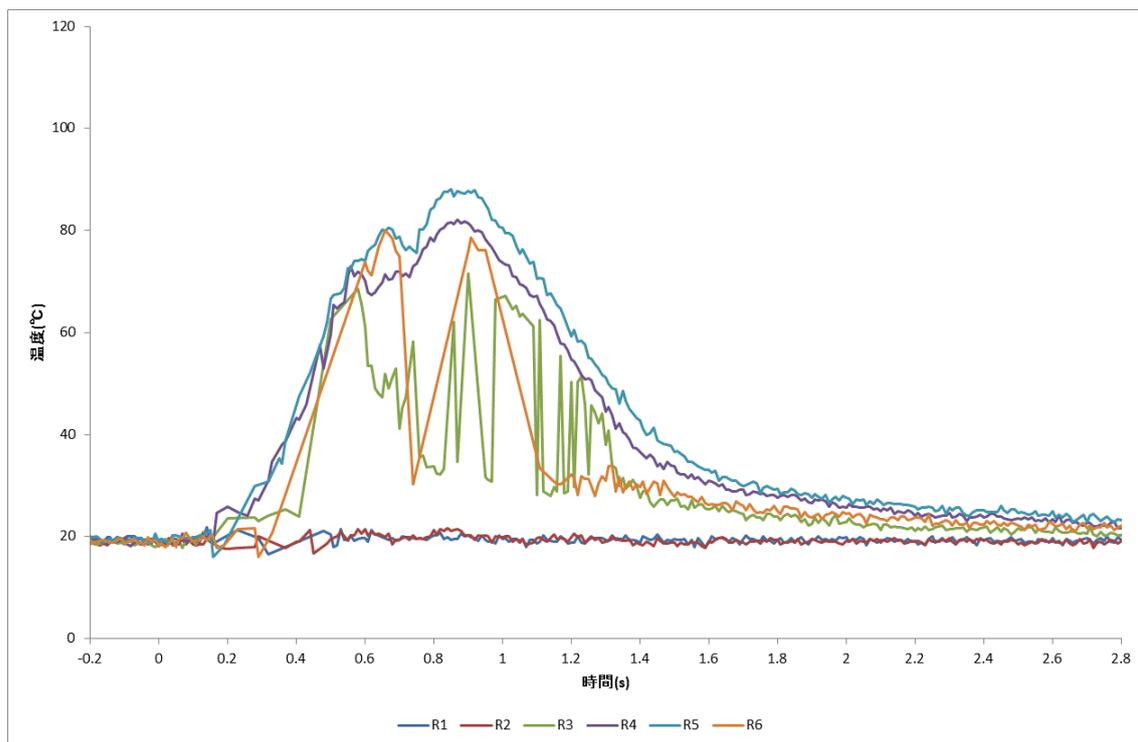


図 3.1-232 光ファイバによる液相温度（ケース G, 第 4 段 WMS 部 / T4 ライン）

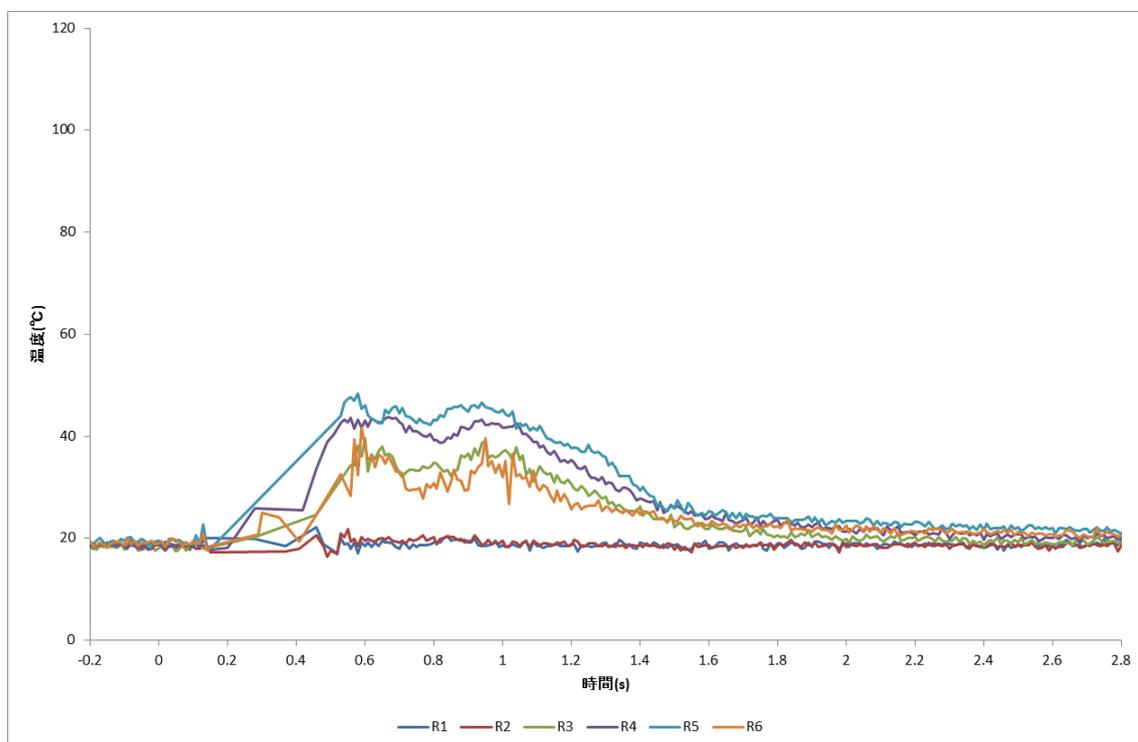


図 3.1-233 光ファイバによる液相温度（ケース G, 第 4 段 WMS 部 / T3 ライン）

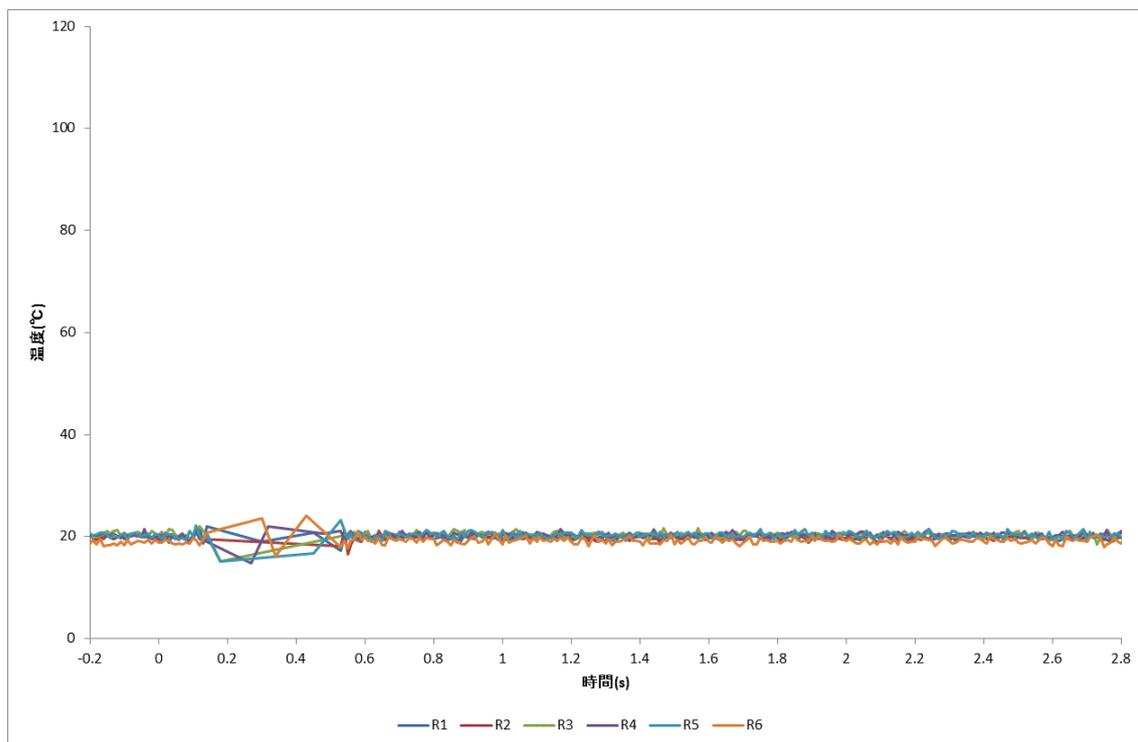


図 3.1-234 光ファイバによる液相温度（ケース G, 第 4 段 WMS 部 / T2 ライン）

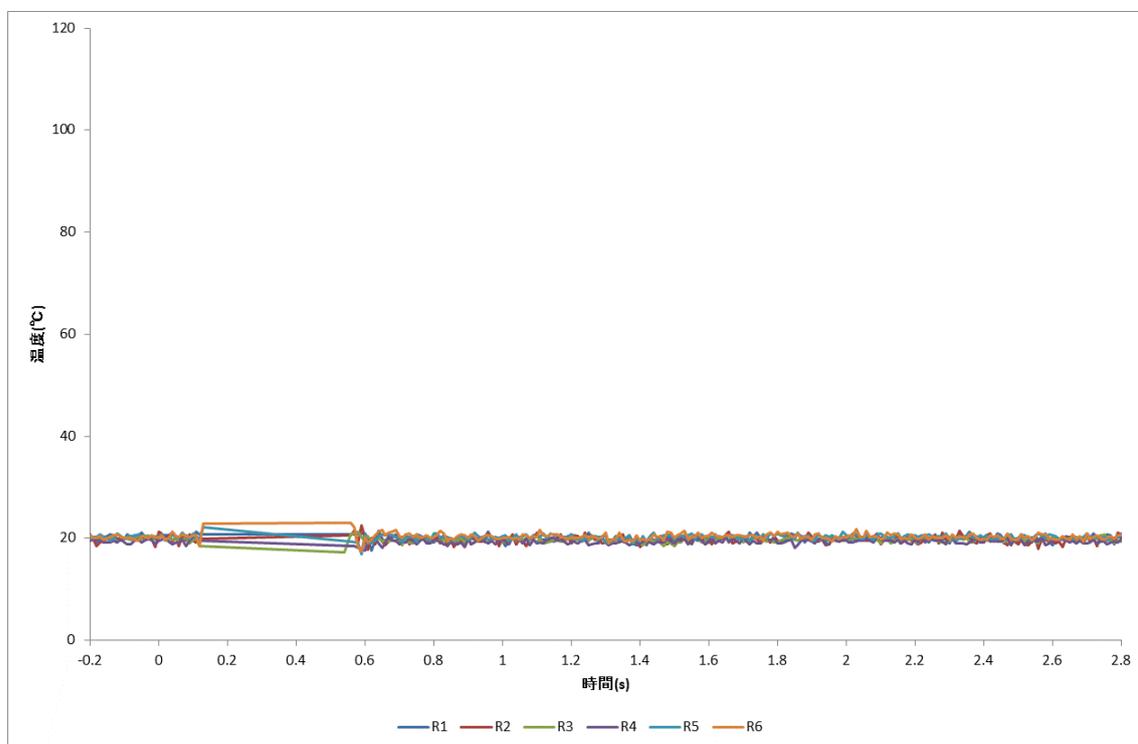


図 3.1-235 光ファイバによる液相温度（ケース G, 第 4 段 WMS 部 / T1 ライン）

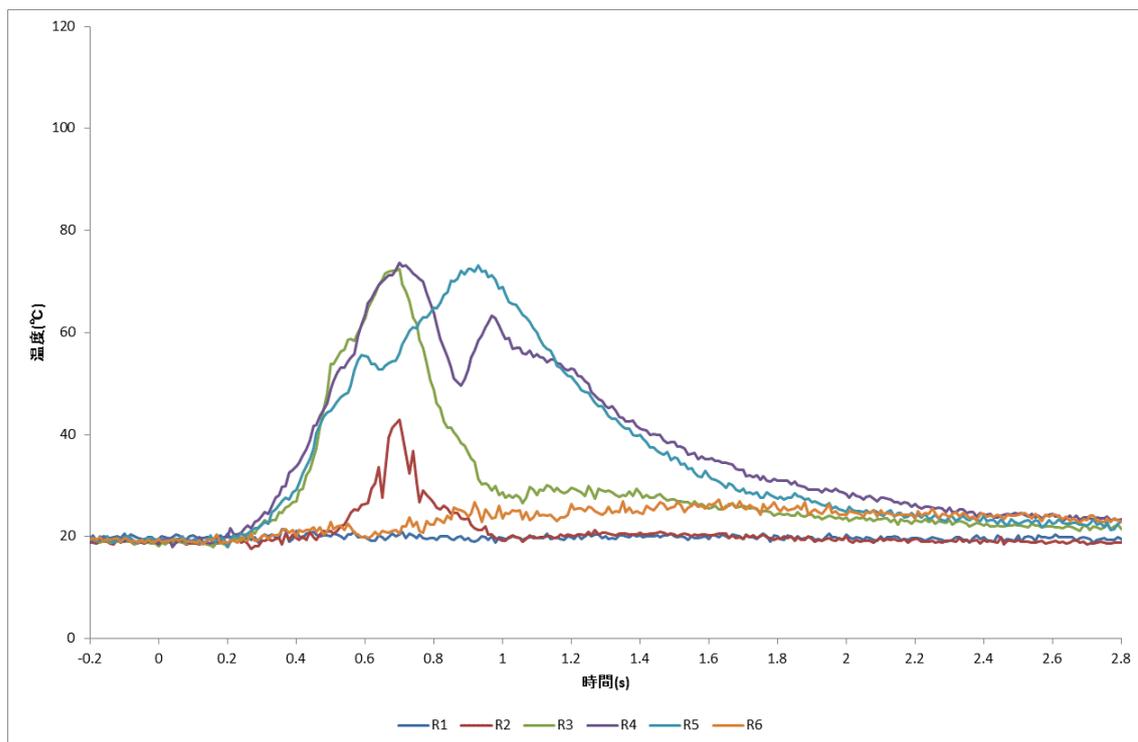


図 3.1-236 光ファイバによる液相温度（ケース H, 第 4 段 WMS 部 / T6 ライン）

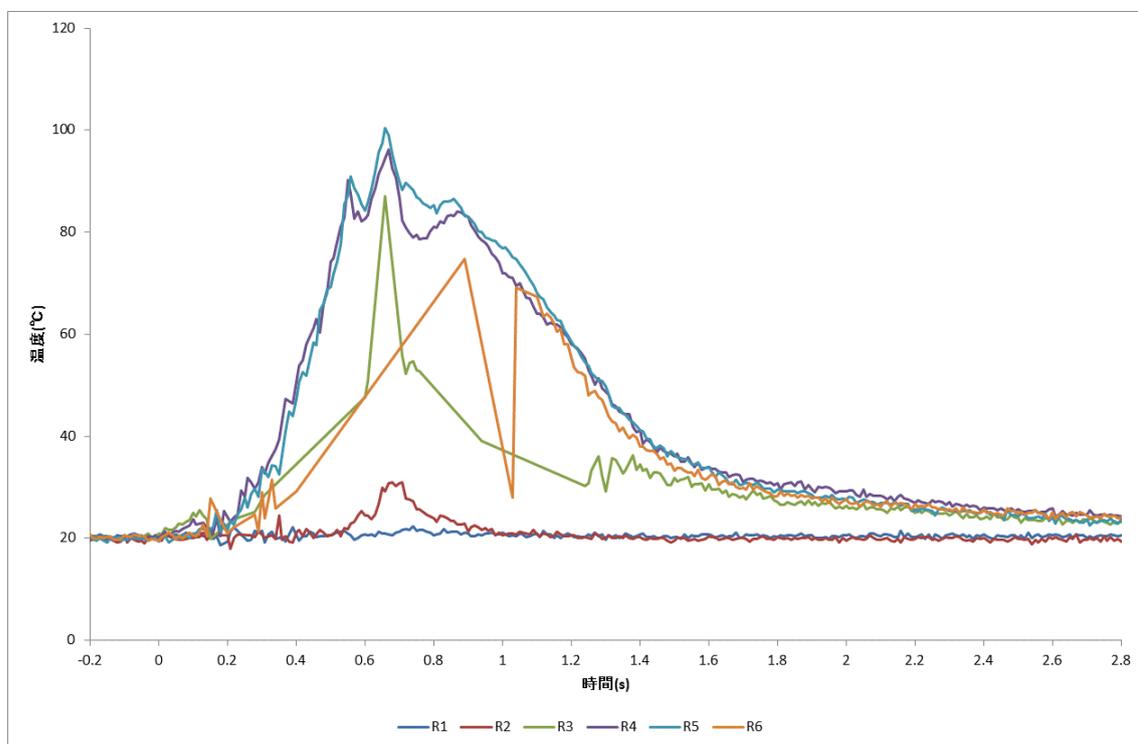


図 3.1-237 光ファイバによる液相温度（ケース H, 第 4 段 WMS 部 / T5 ライン）

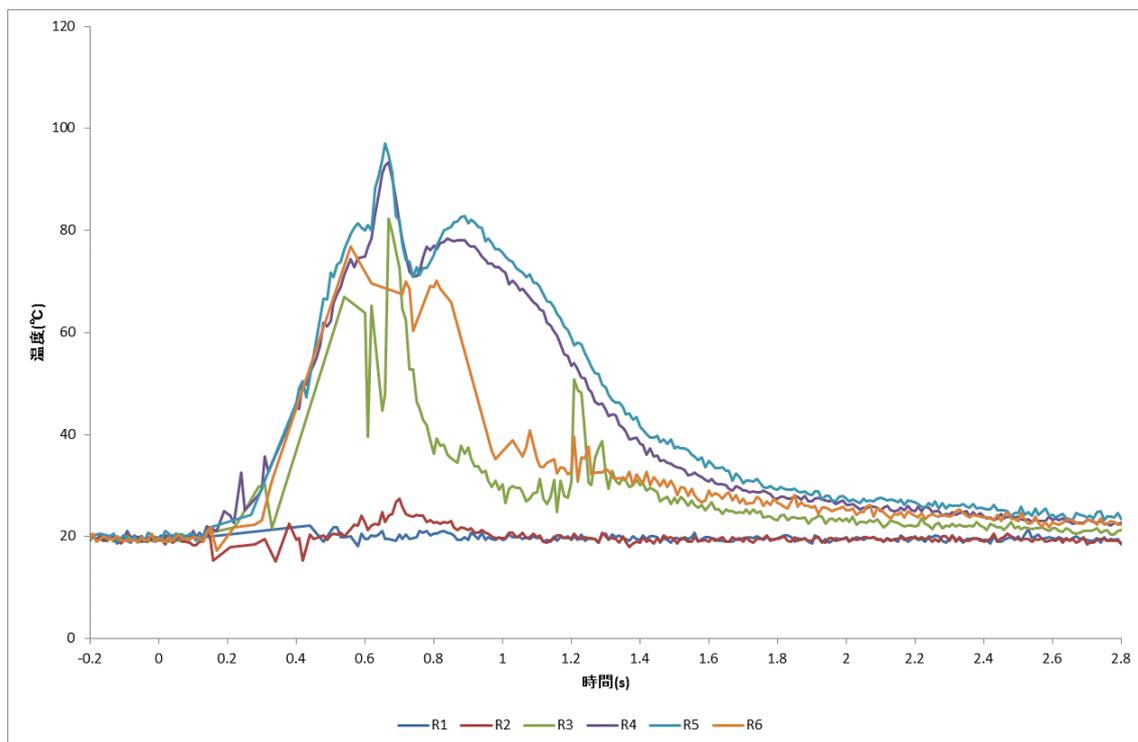


図 3.1-238 光ファイバによる液相温度（ケース H, 第 4 段 WMS 部 / T4 ライン）

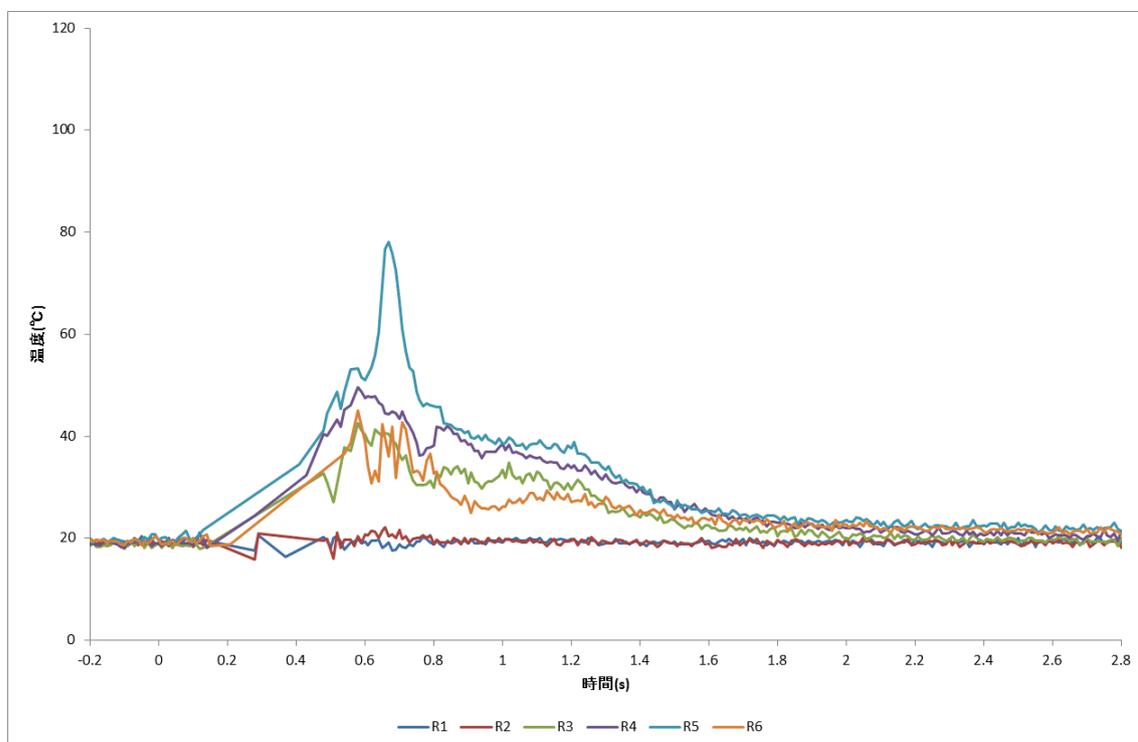


図 3.1-239 光ファイバによる液相温度（ケース H, 第 4 段 WMS 部 / T3 ライン）

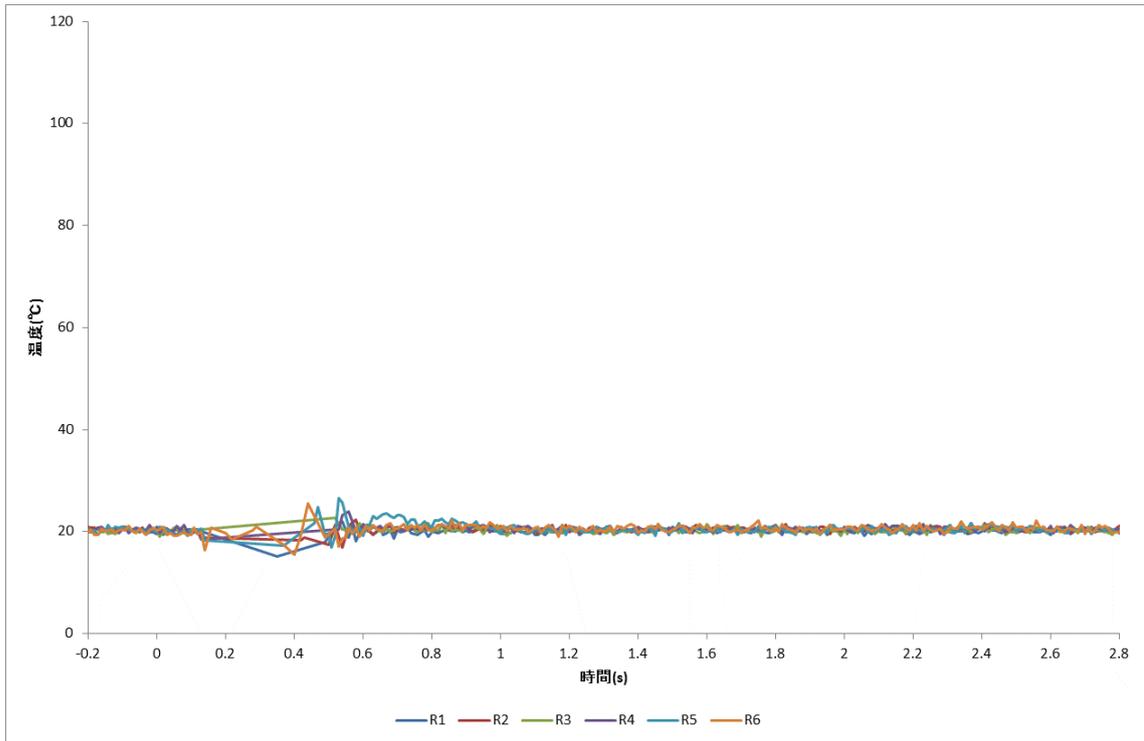


図 3.1-240 光ファイバによる液相温度（ケース H, 第 4 段 WMS 部 / T2 ライン）

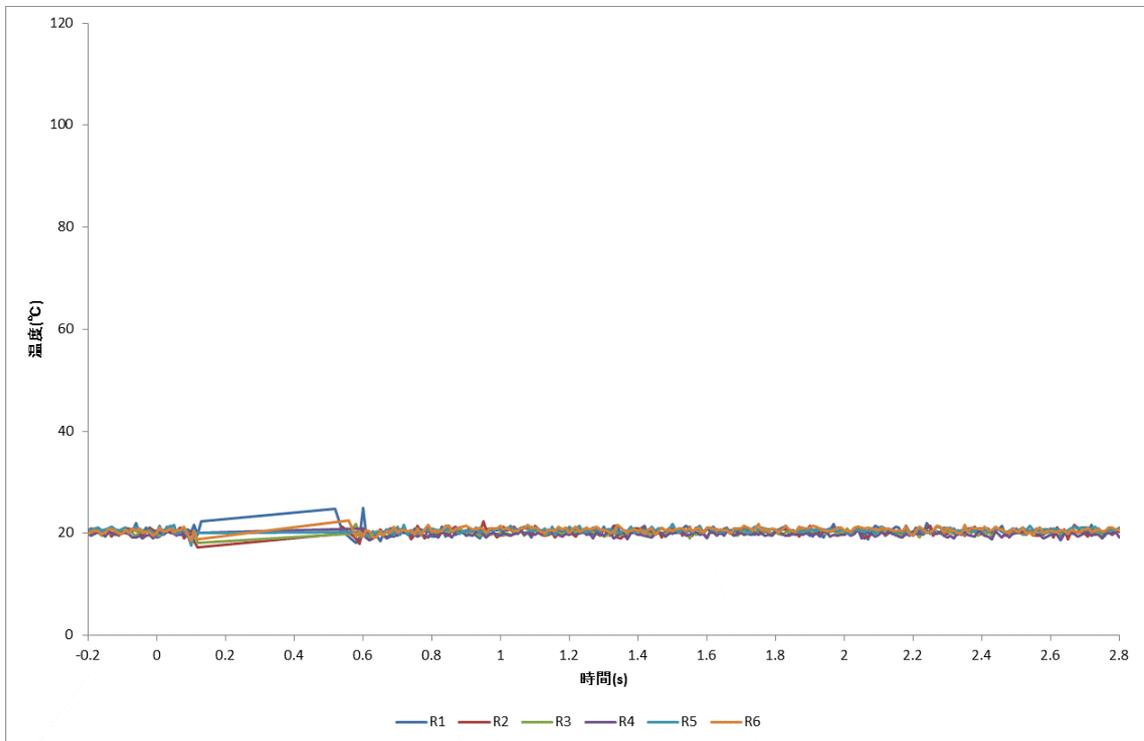


図 3.1-241 光ファイバによる液相温度（ケース H, 第 4 段 WMS 部 / T1 ライン）

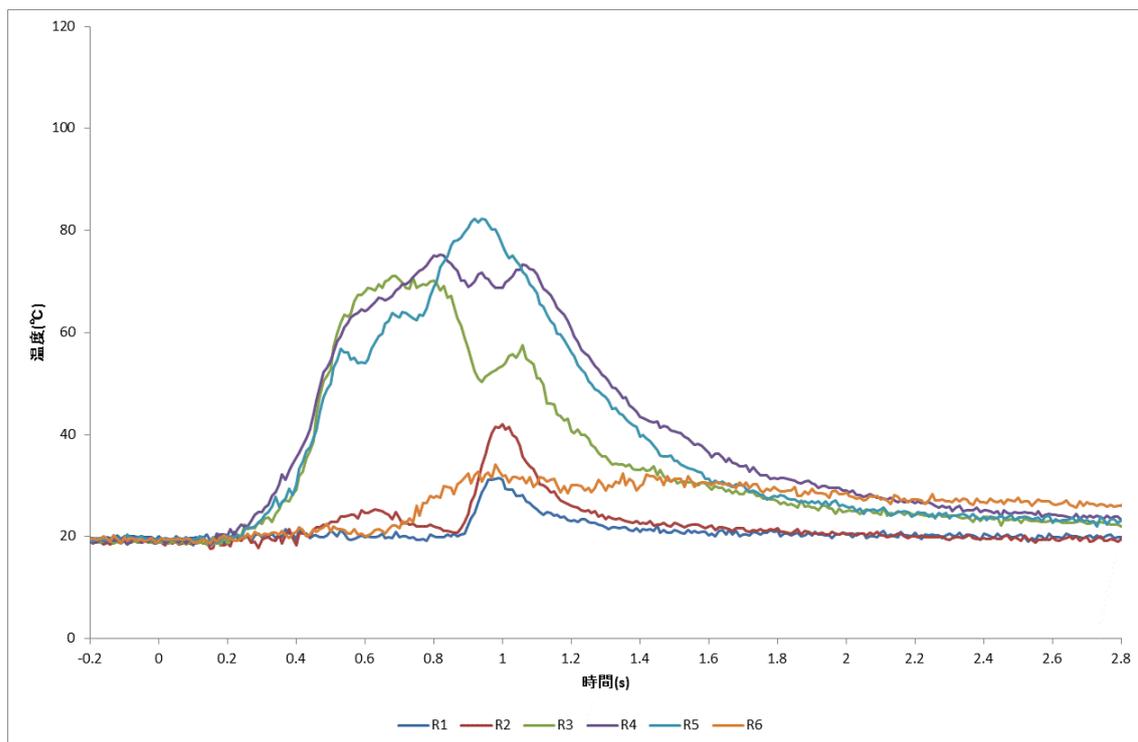


図 3.1-242 光ファイバによる液相温度（ケース I, 第 4 段 WMS 部 / T6 ライン）

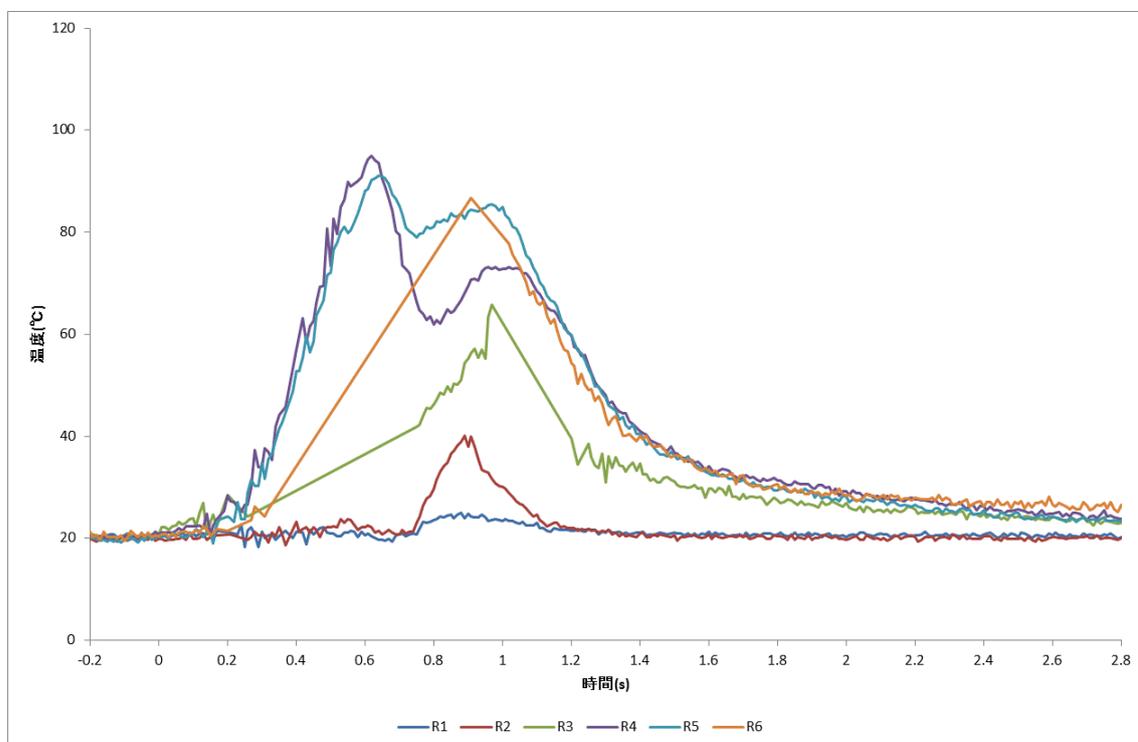


図 3.1-243 光ファイバによる液相温度（ケース I, 第 4 段 WMS 部 / T5 ライン）

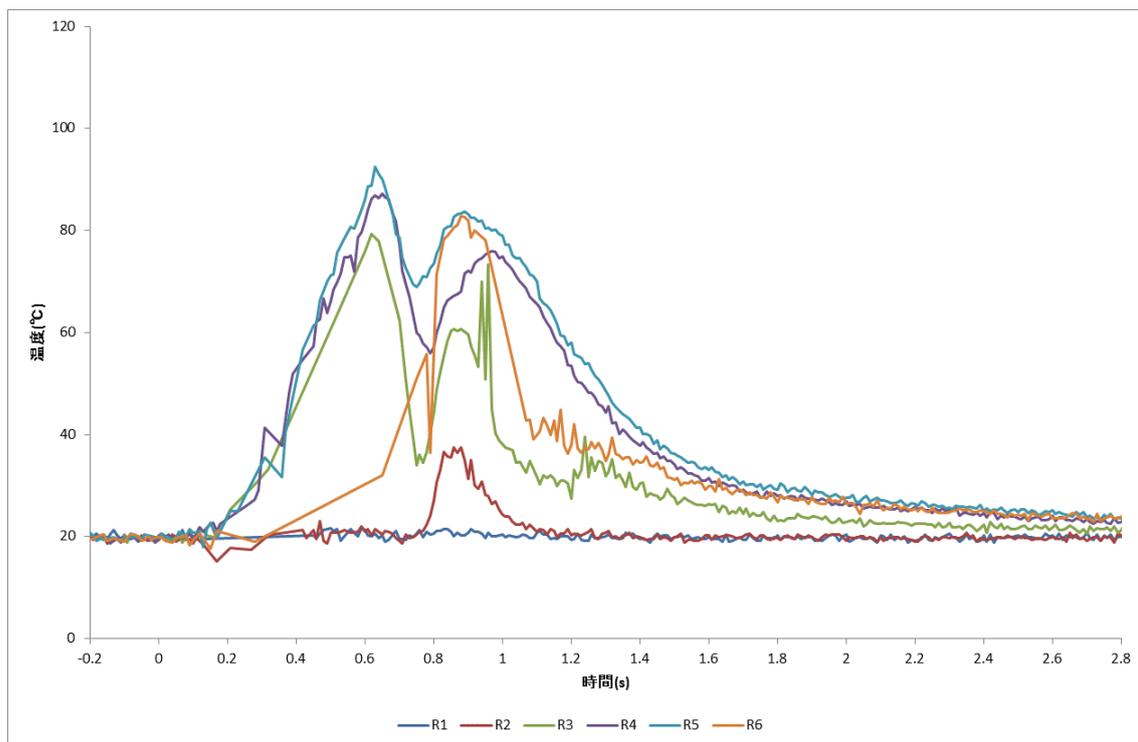


図 3.1-244 光ファイバによる液相温度（ケース I, 第 4 段 WMS 部 / T4 ライン）

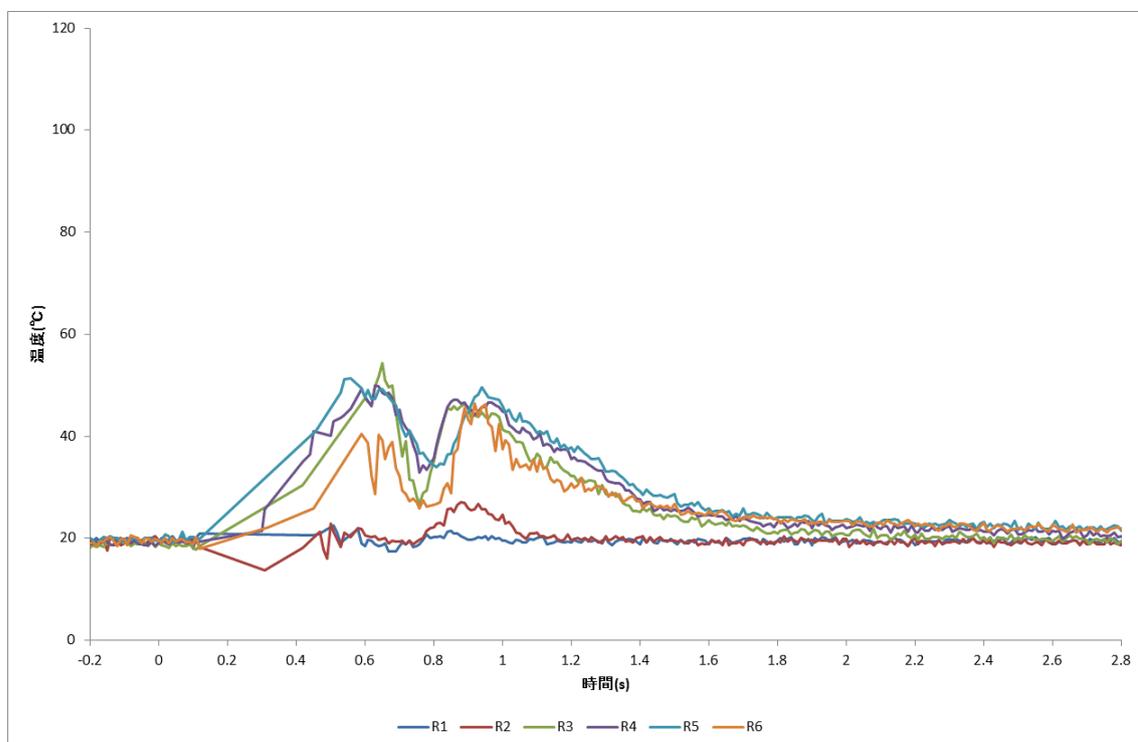


図 3.1-245 光ファイバによる液相温度（ケース I, 第 4 段 WMS 部 / T3 ライン）

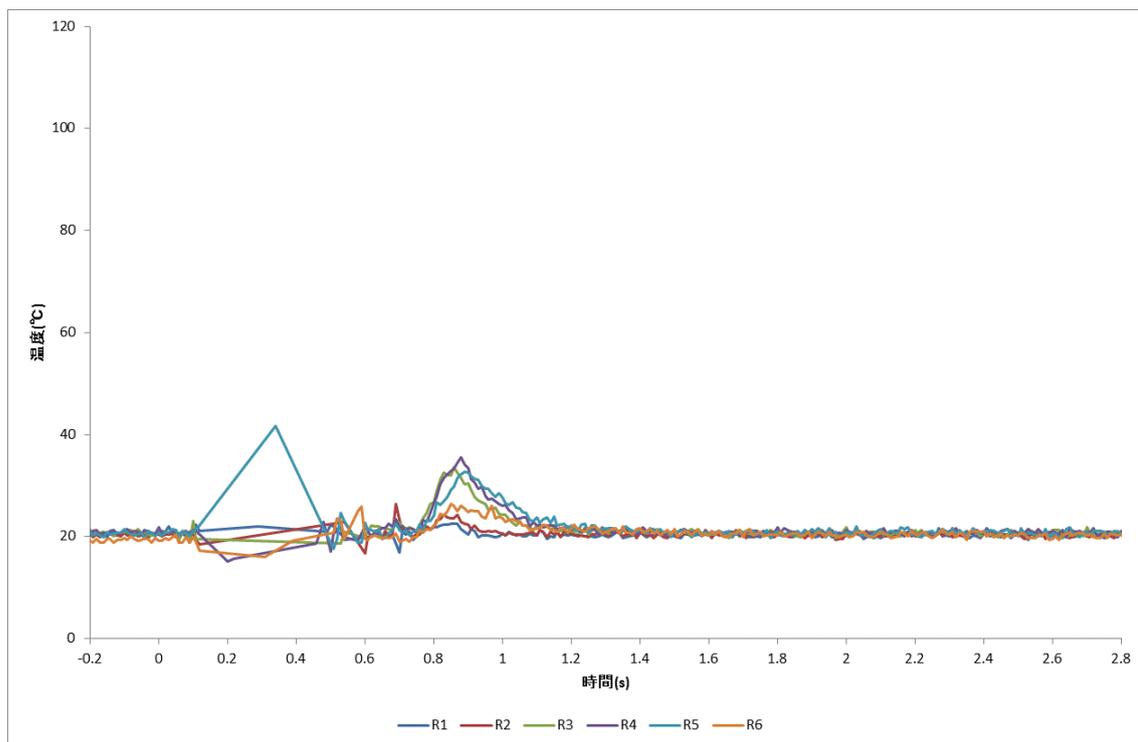


図 3.1-246 光ファイバによる液相温度（ケース I, 第 4 段 WMS 部 / T2 ライン）

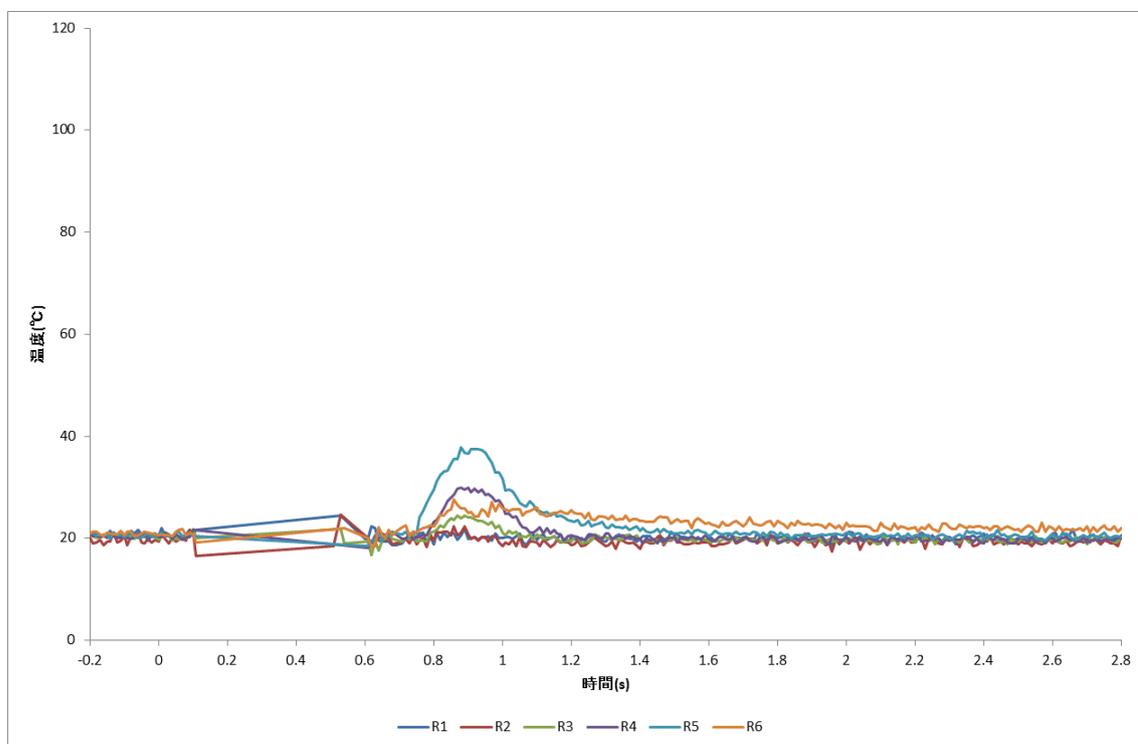


図 3.1-247 光ファイバによる液相温度（ケース I, 第 4 段 WMS 部 / T1 ライン）

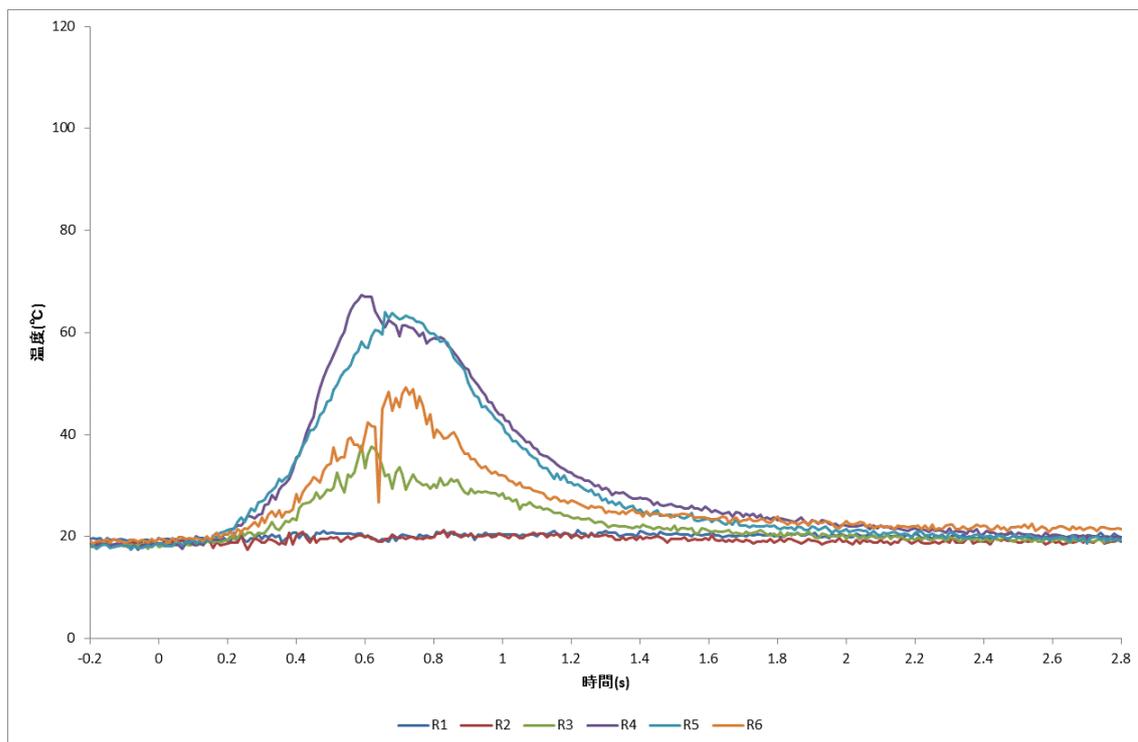


図 3.1-248 光ファイバによる液相温度（ケース J, 第 4 段 WMS 部 / T6 ライン）

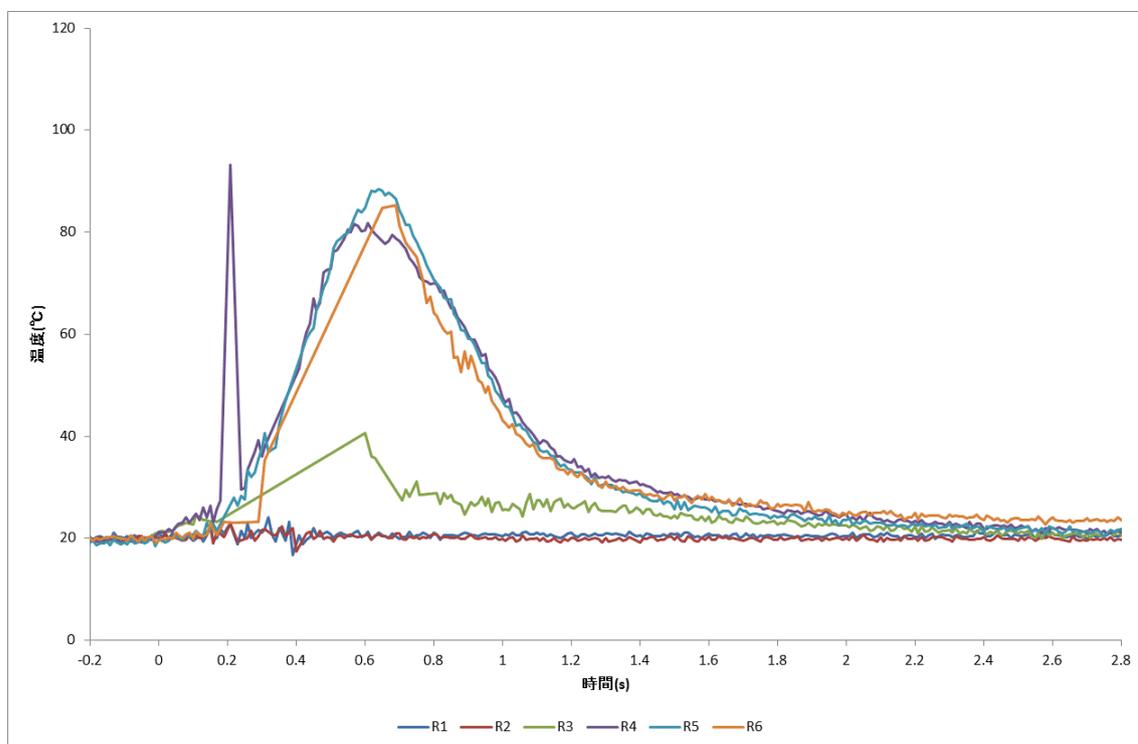


図 3.1-249 光ファイバによる液相温度（ケース J, 第 4 段 WMS 部 / T5 ライン）

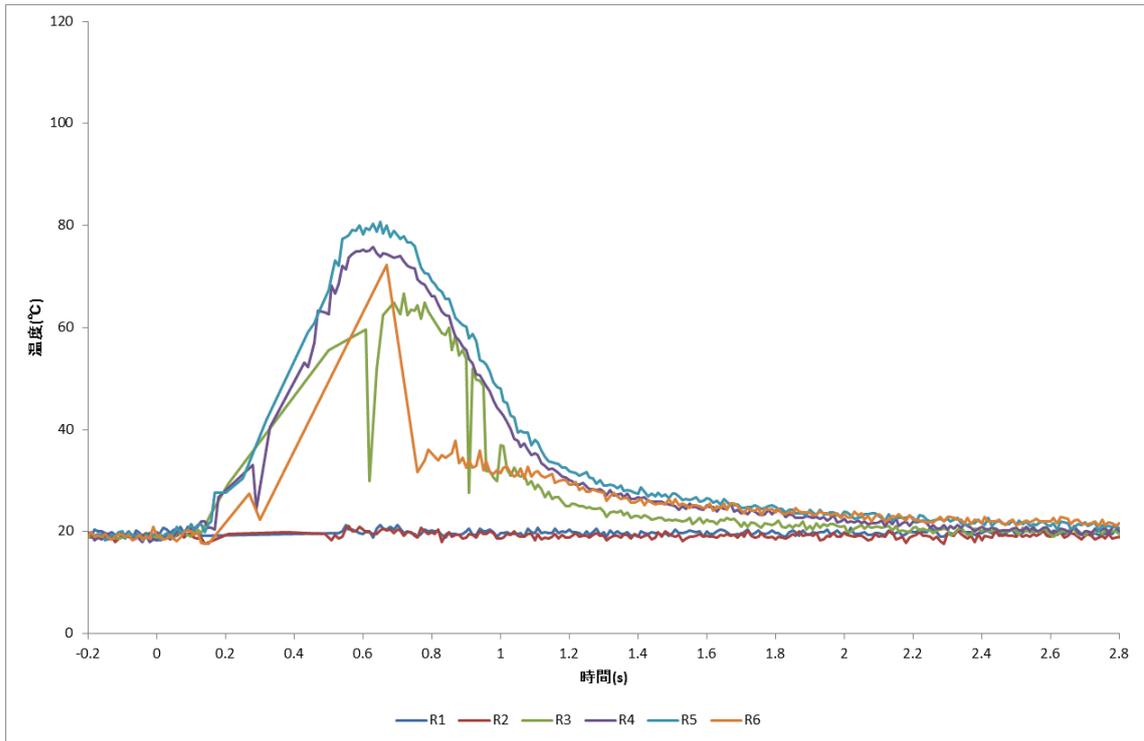


図 3.1-250 光ファイバによる液相温度（ケース J, 第 4 段 WMS 部 / T4 ライン）

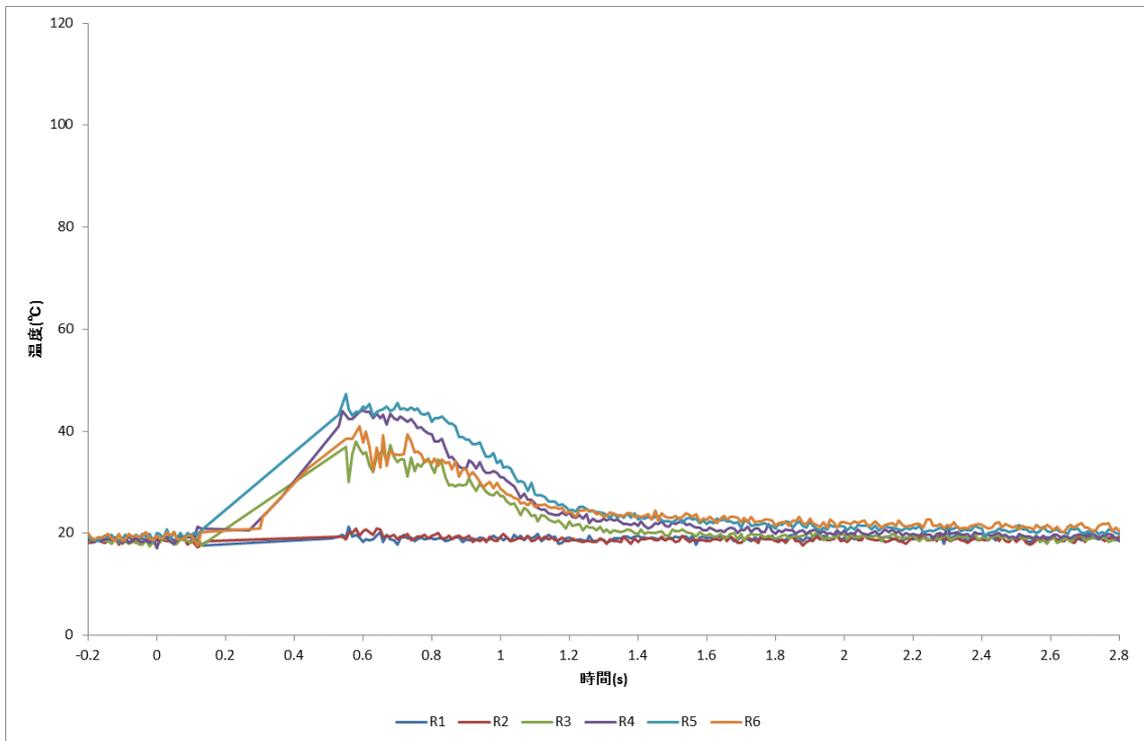


図 3.1-251 光ファイバによる液相温度（ケース J, 第 4 段 WMS 部 / T3 ライン）

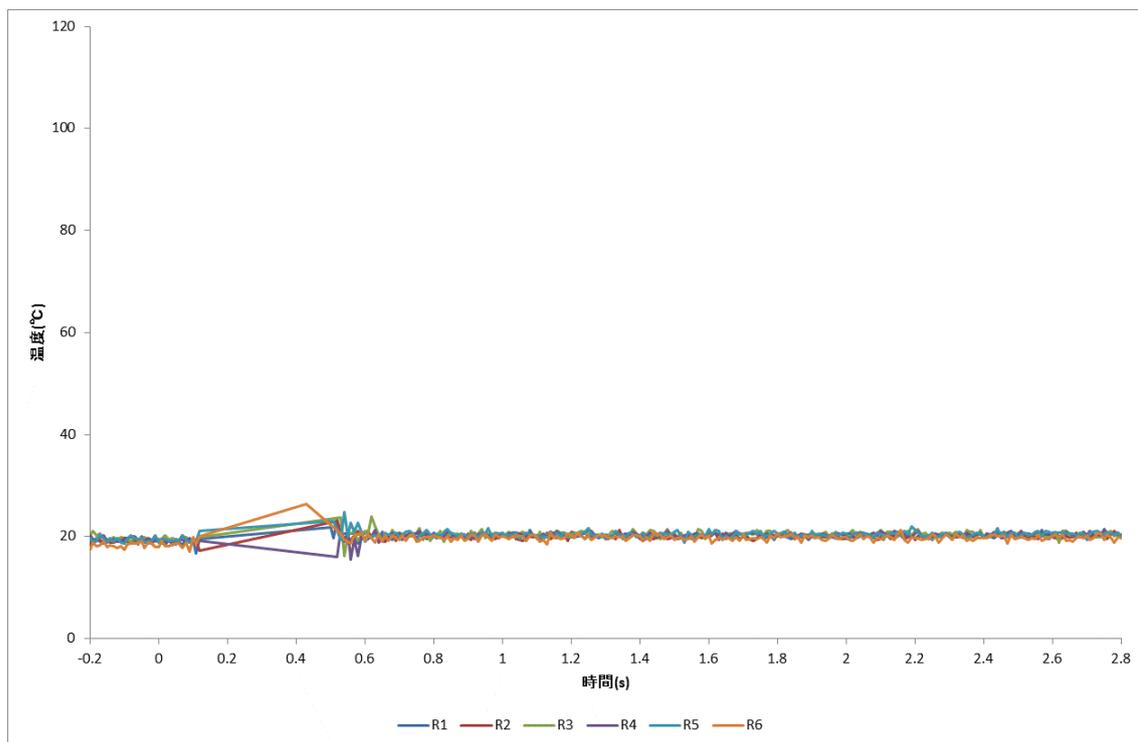


図 3.1-252 光ファイバによる液相温度（ケース J, 第 4 段 WMS 部 / T2 ライン）

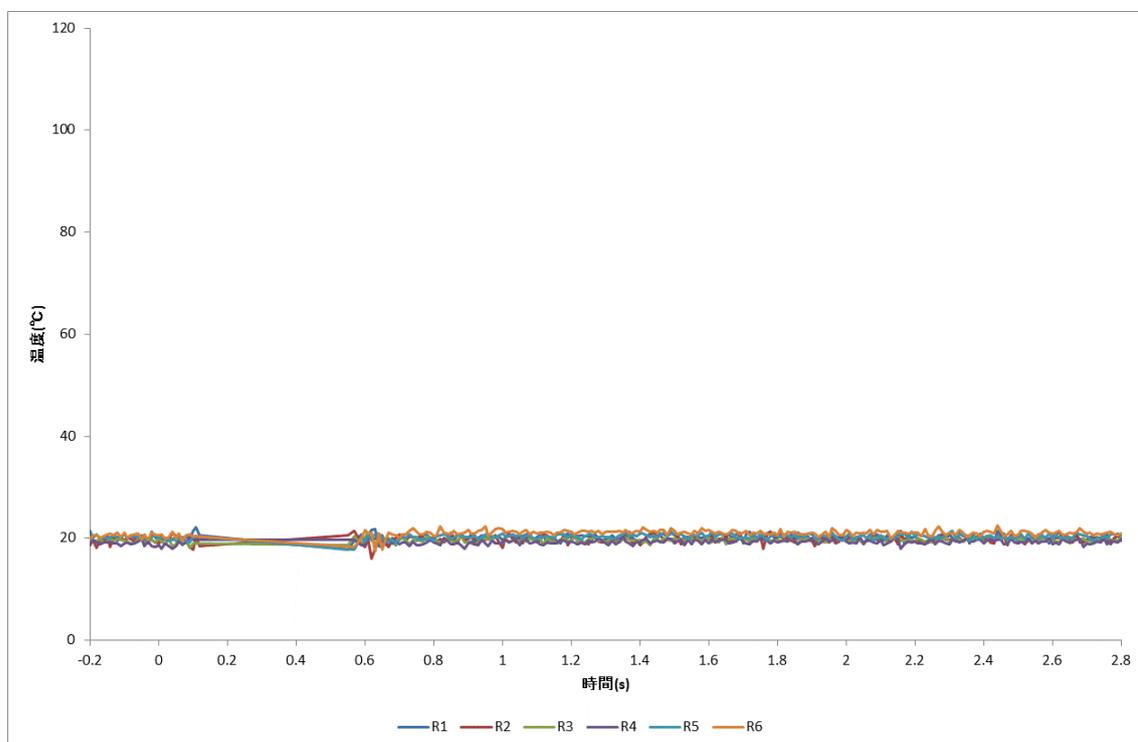


図 3.1-253 光ファイバによる液相温度（ケース J, 第 4 段 WMS 部 / T1 ライン）

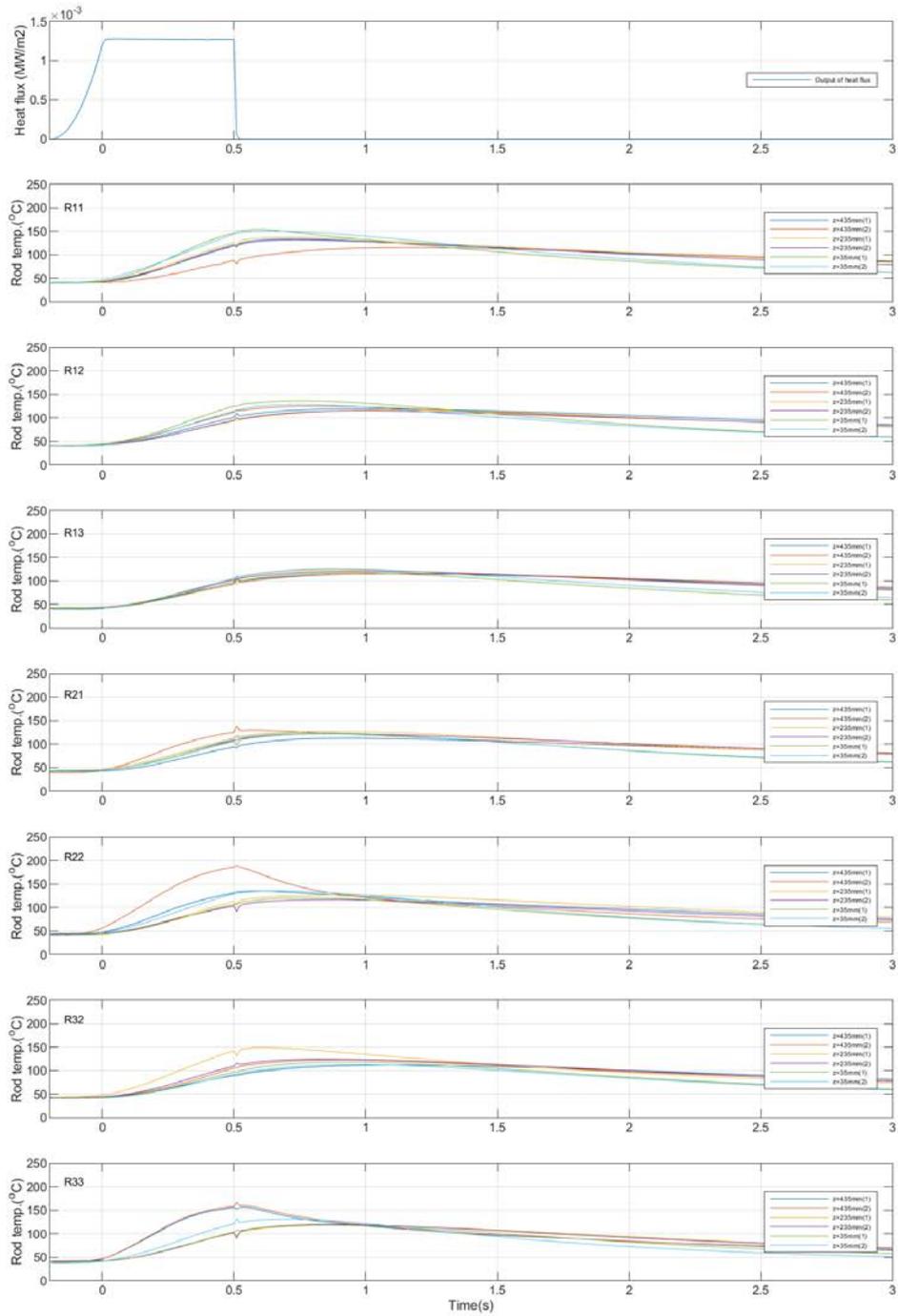


図 3.1-254 ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化（スペーサ無し， Run No.1）

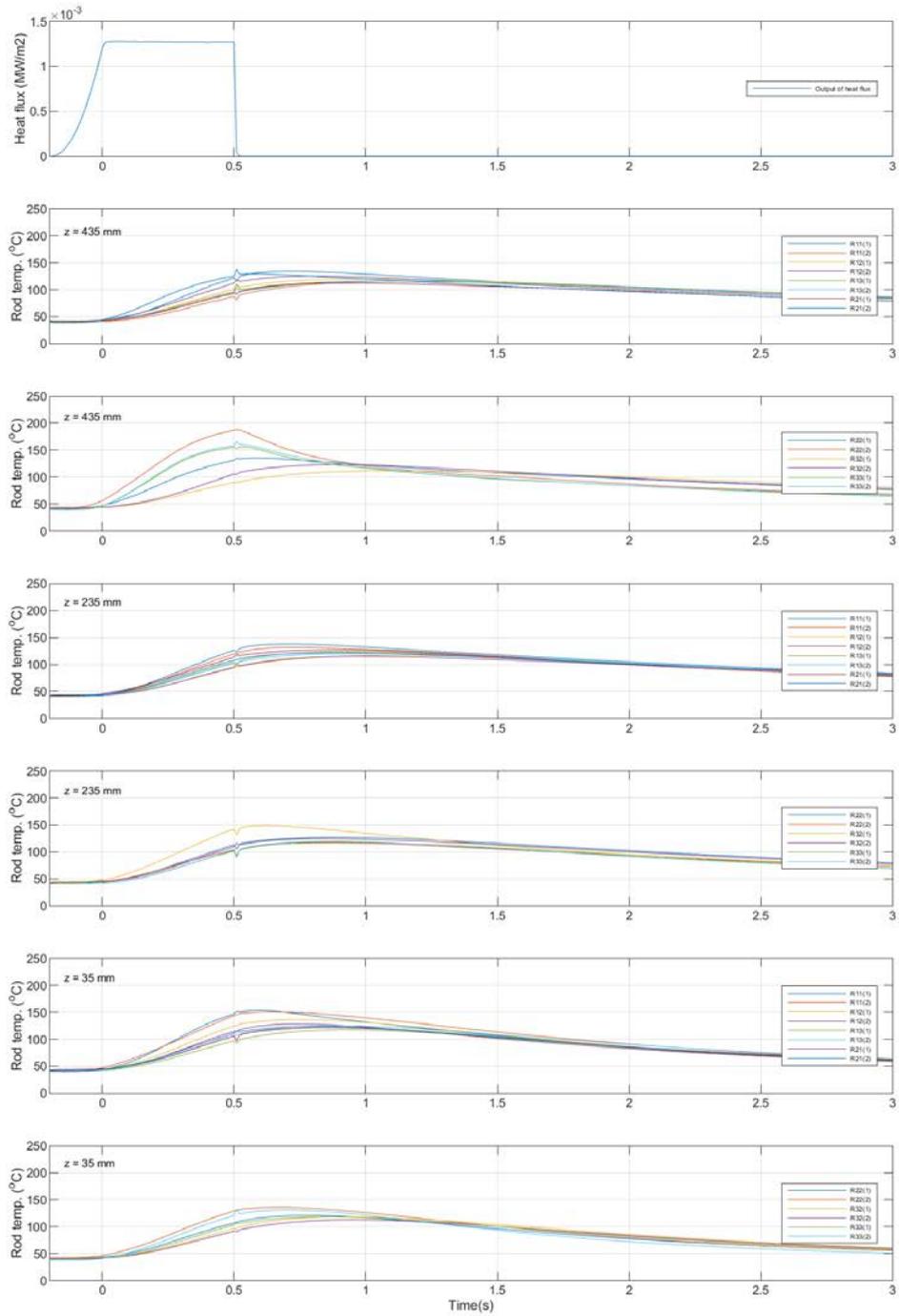


図 3.1-255 高さごとの燃料被覆管温度の時間変化 (スぺーサ無し, Run No.1)

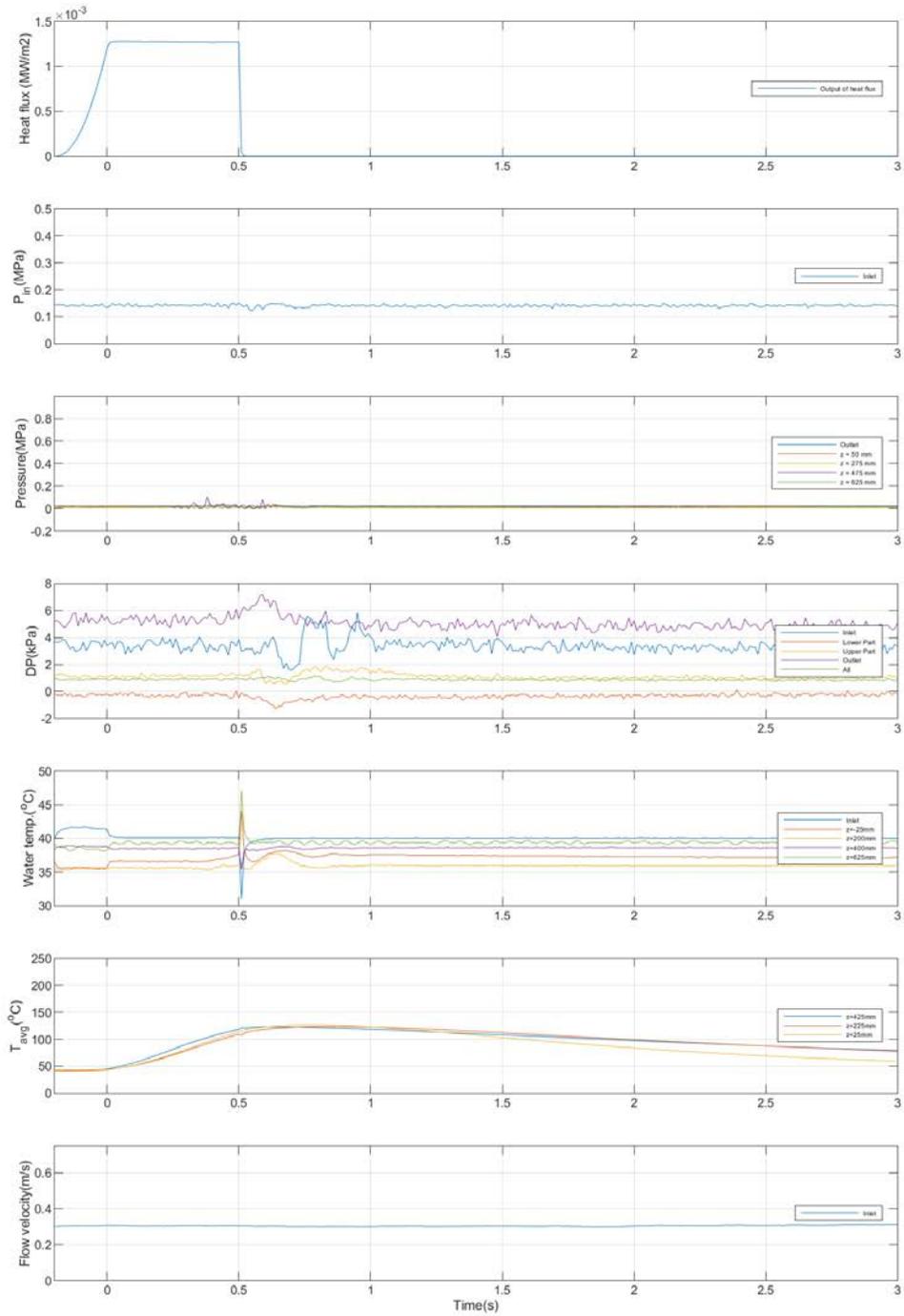


図 3.1-256 その他計測値の時間変化 (スペーサ無し, Run No.1)

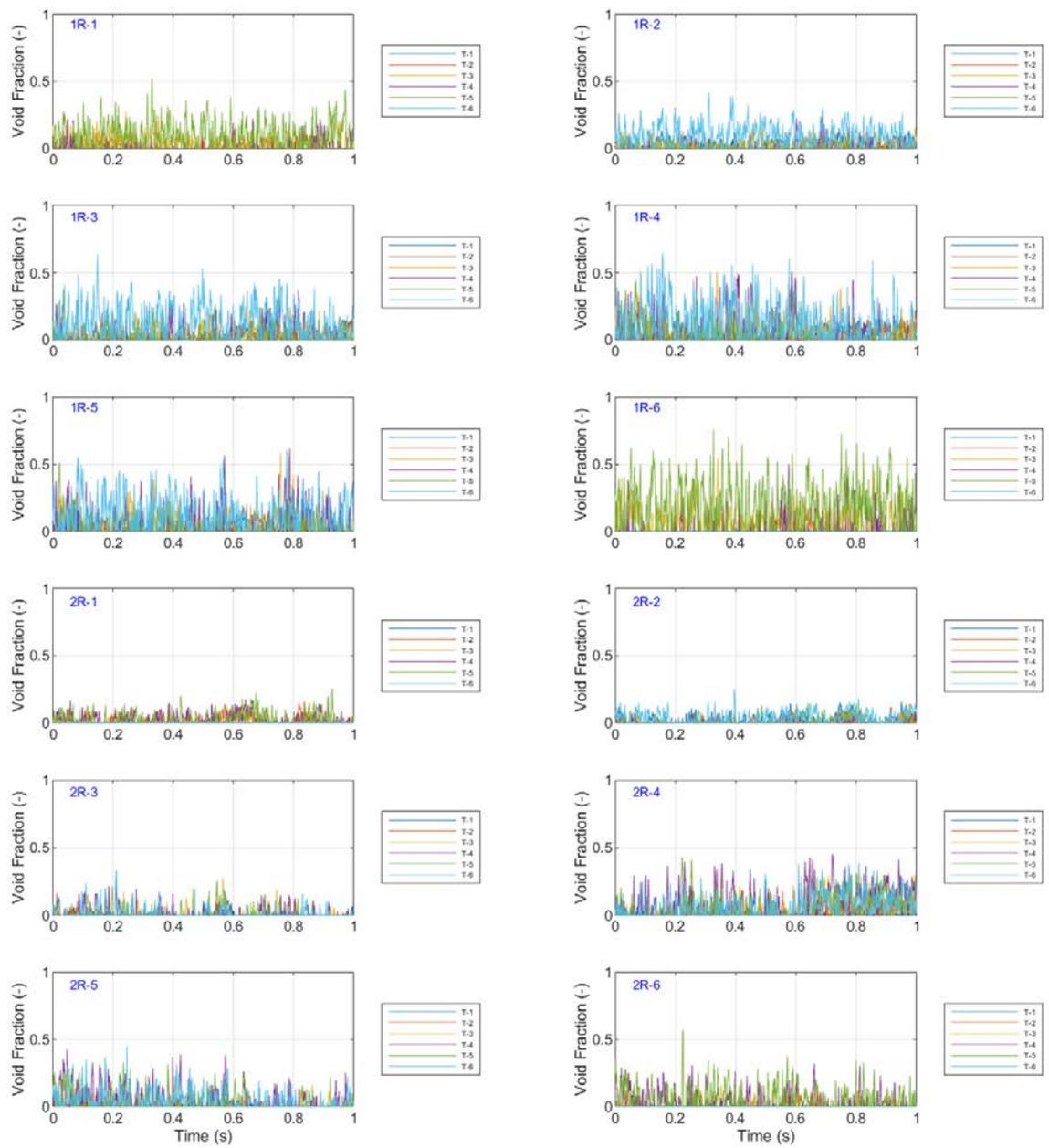


図 3.1-257 ボイド率の時間変化 (スパーサ無し, Run No.1/①)

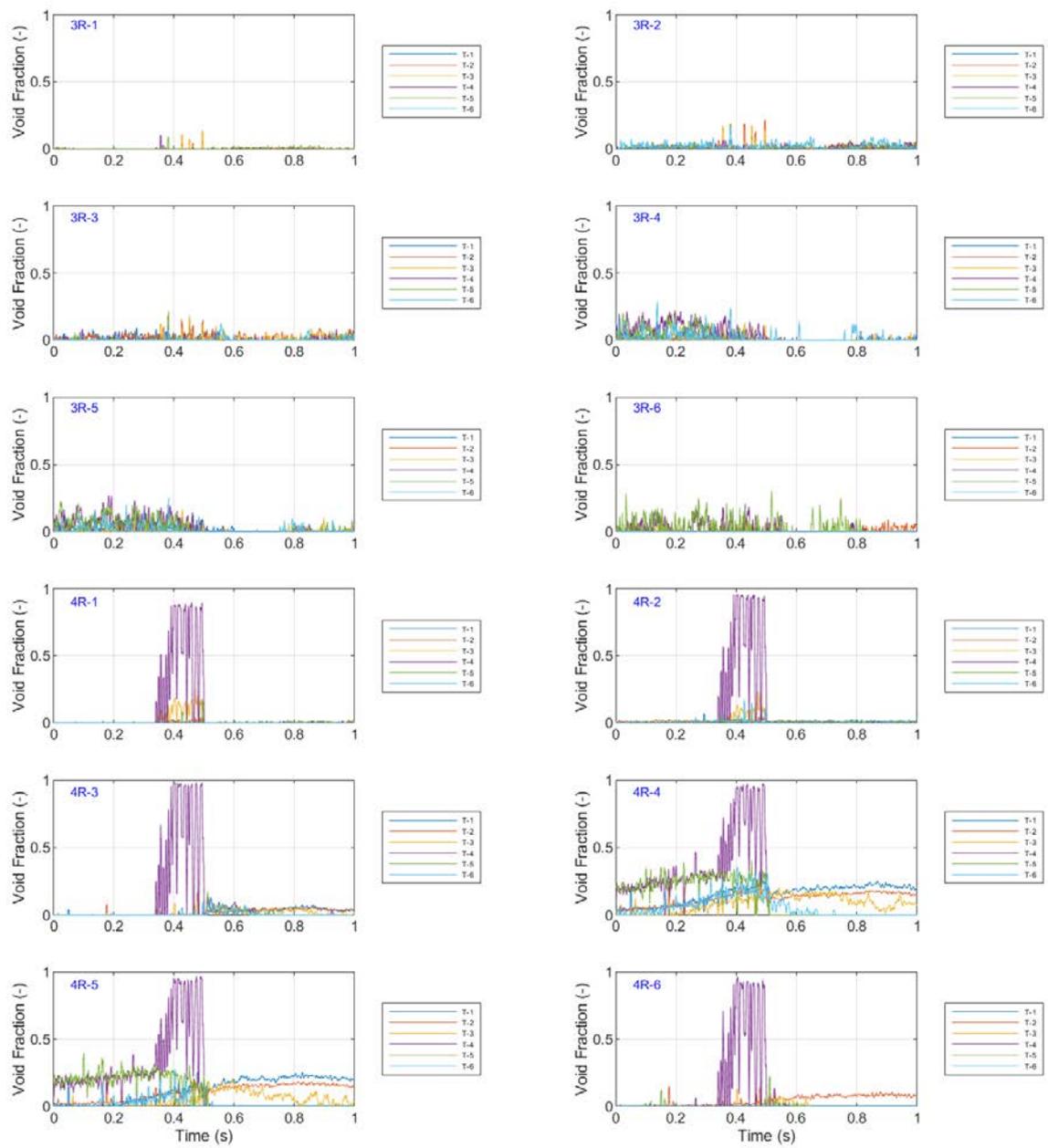


図 3.1-258 ボイド率の時間変化 (スパーサ無し, Run No.1/②)

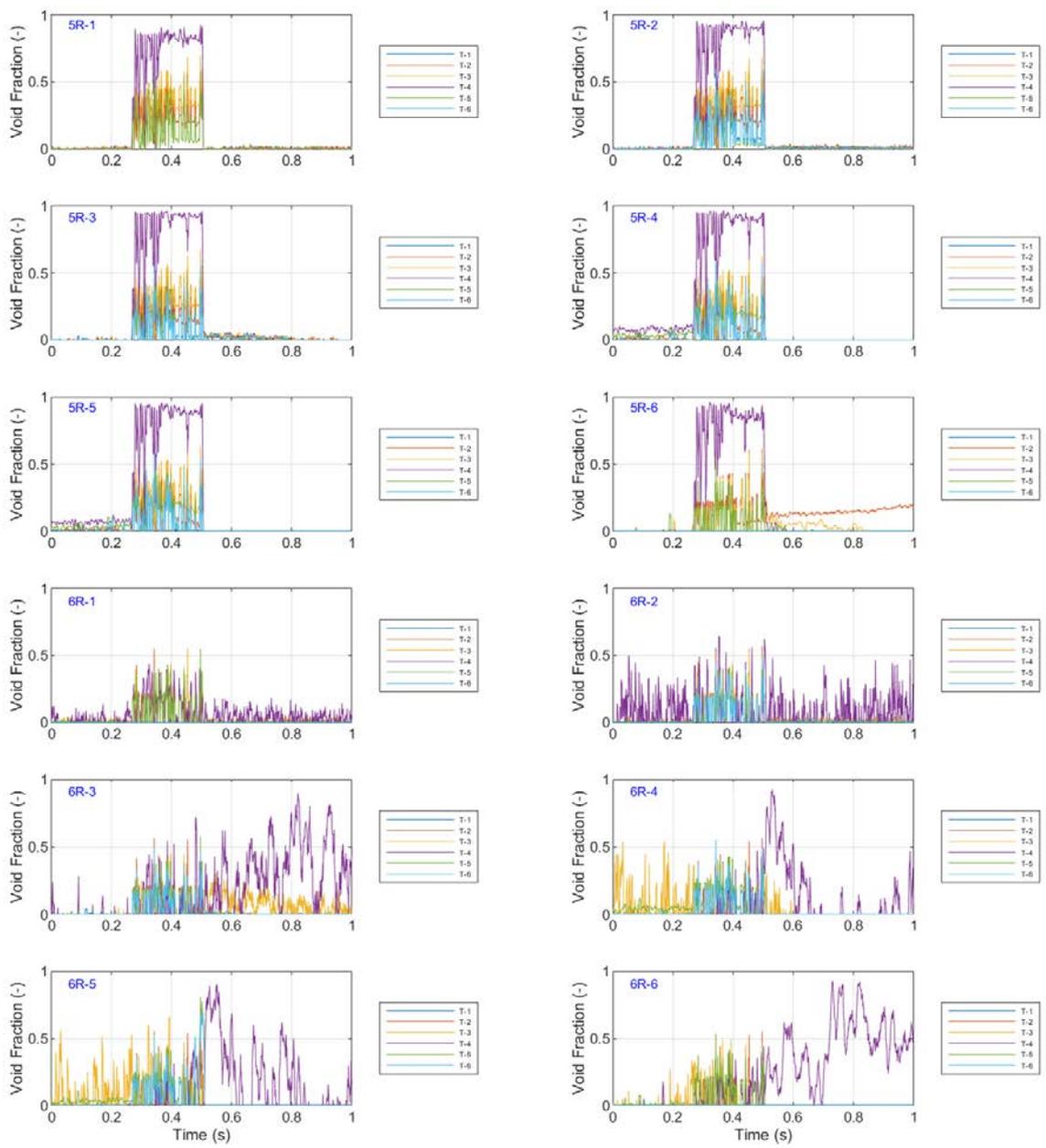


図 3.1-259 ボイド率の時間変化（スパーサ無し， Run No.1/③）

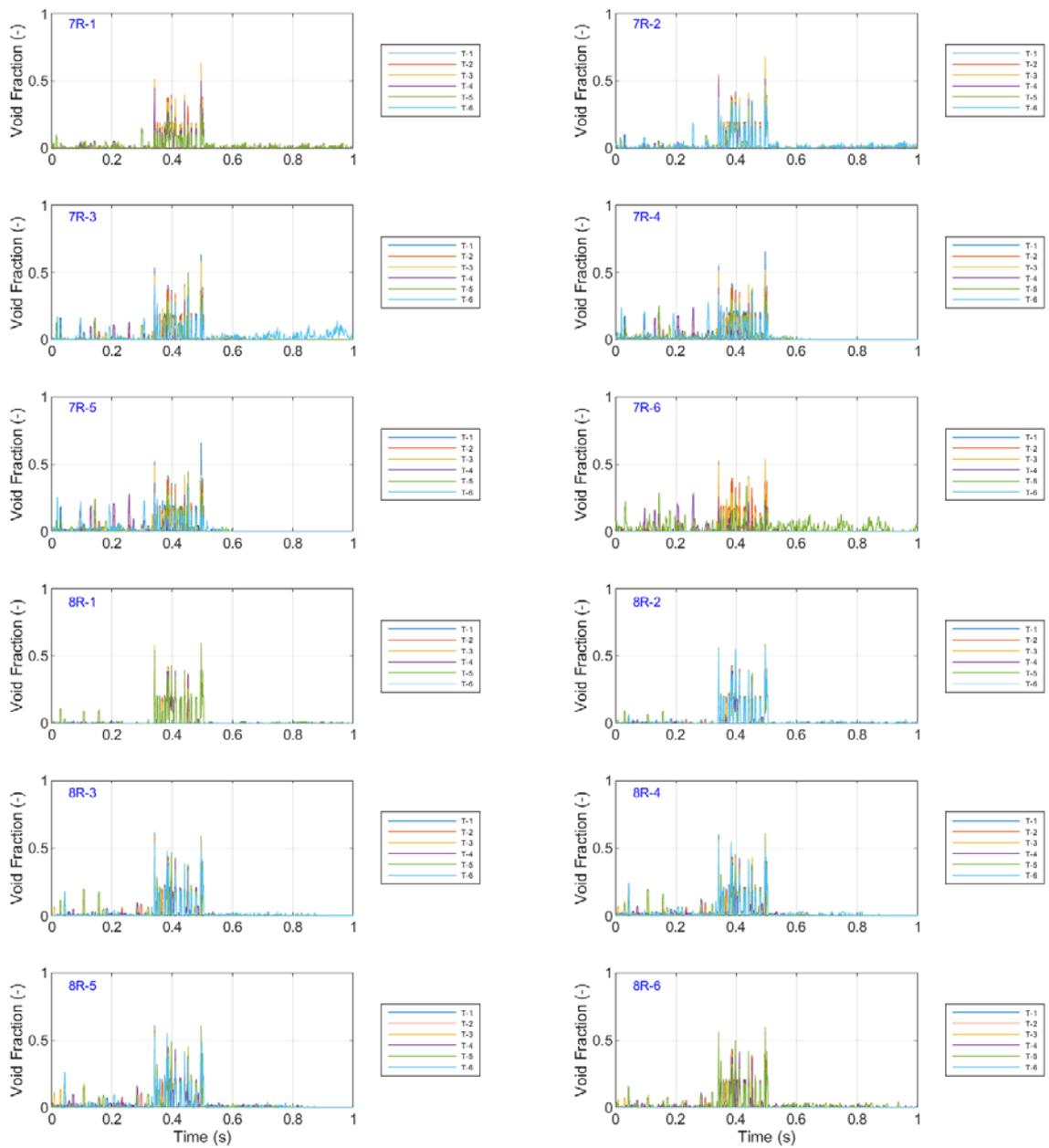


図 3.1-260 ボイド率の時間変化（スパーサ無し， Run No.1/④）

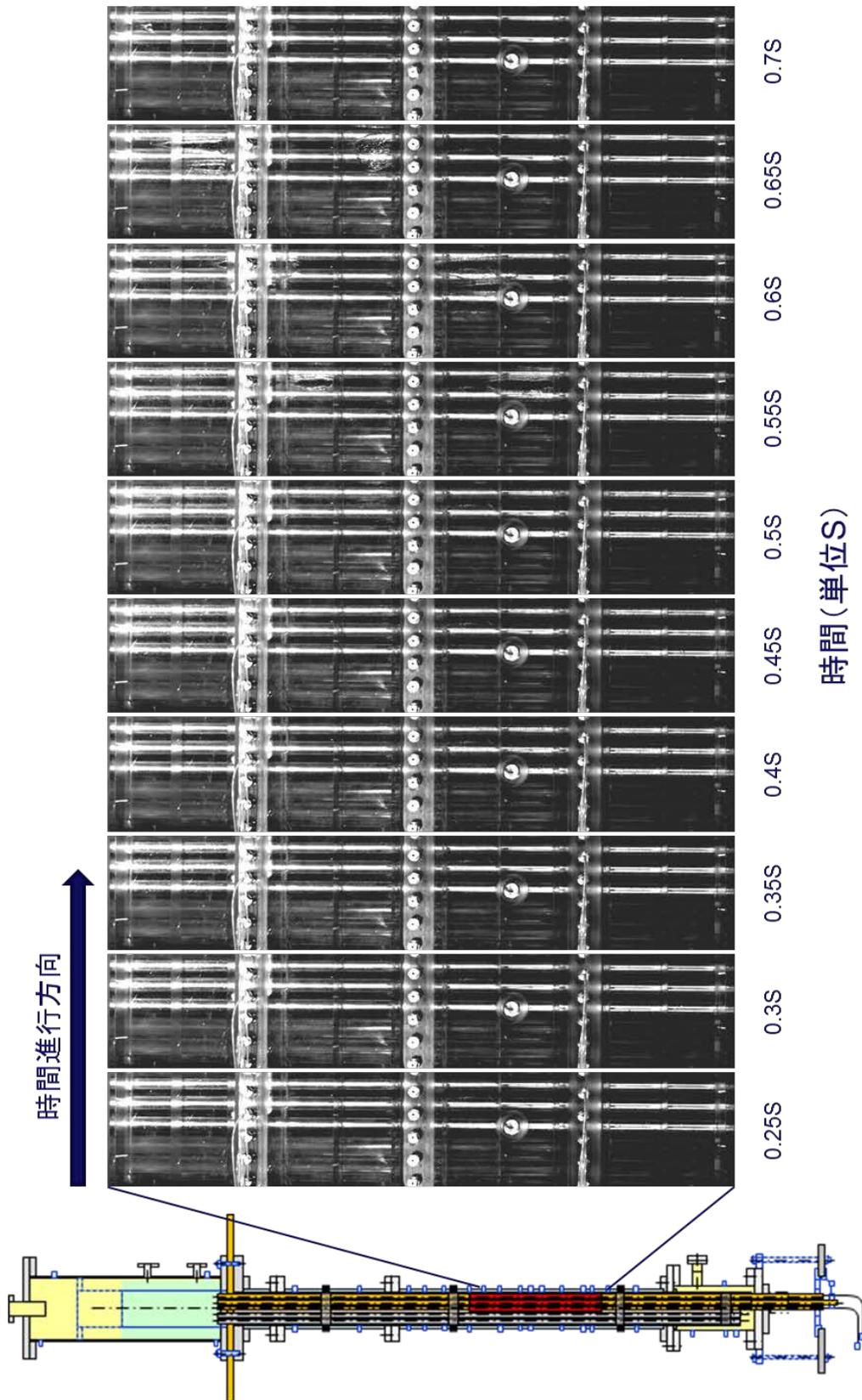


図 3.1-261 ポイド挙動の可視化画像 (スペーサ無し, Run No.1)

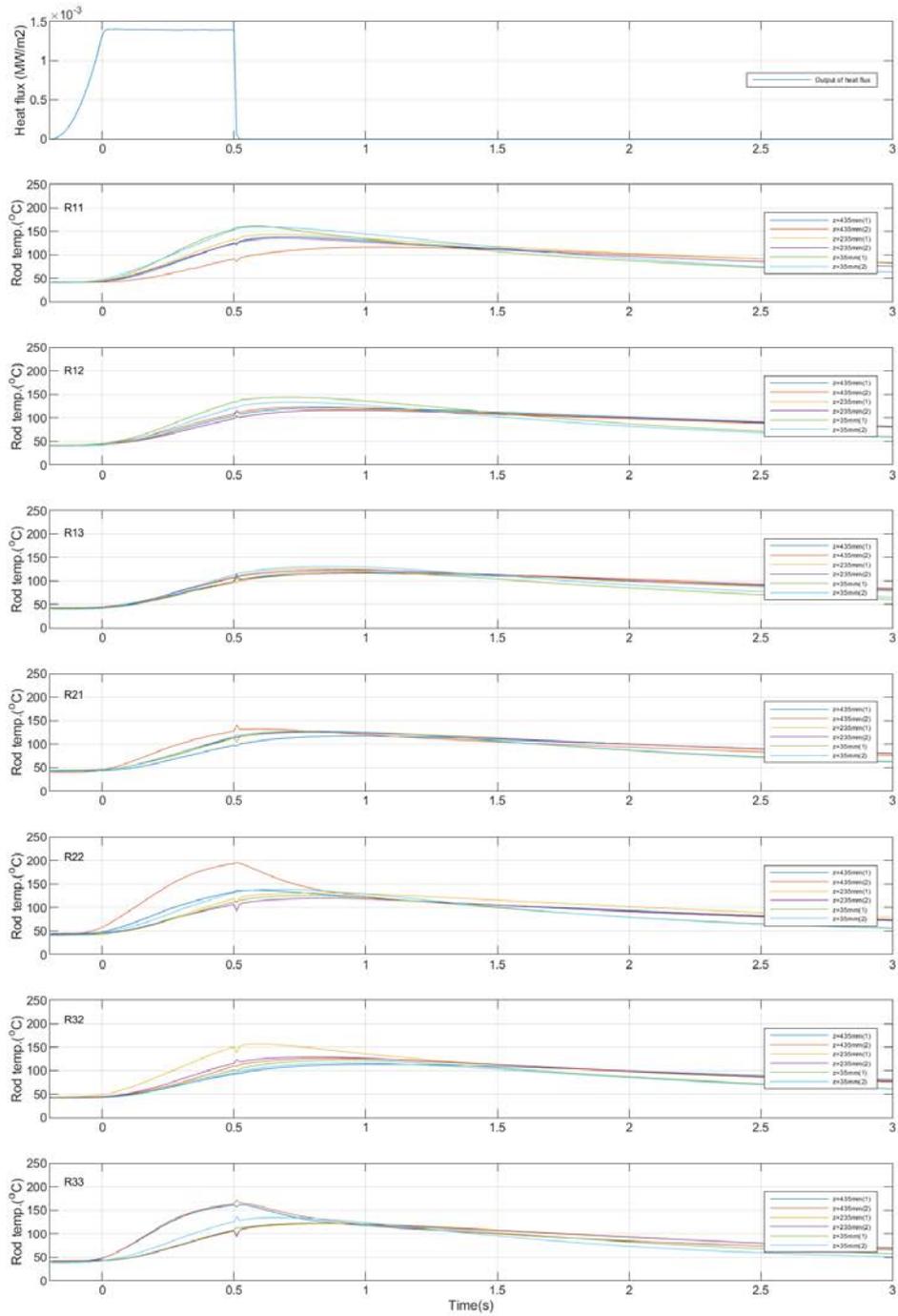


図 3.1-262 ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化（スペーサ無し， Run No.2）

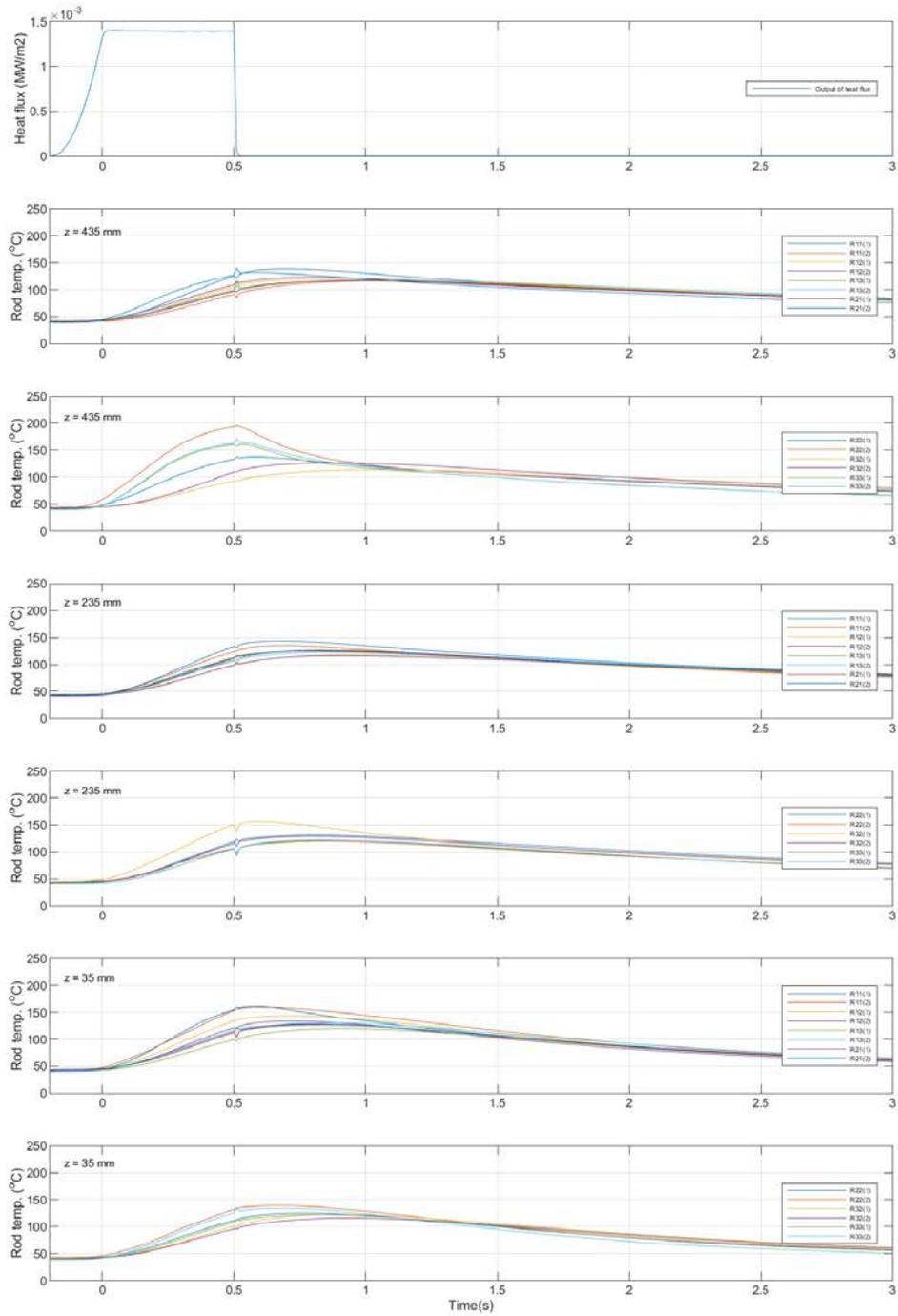


図 3.1-263 高さごとの燃料被覆管温度の時間変化（スぺーサ無し，Run No.2）

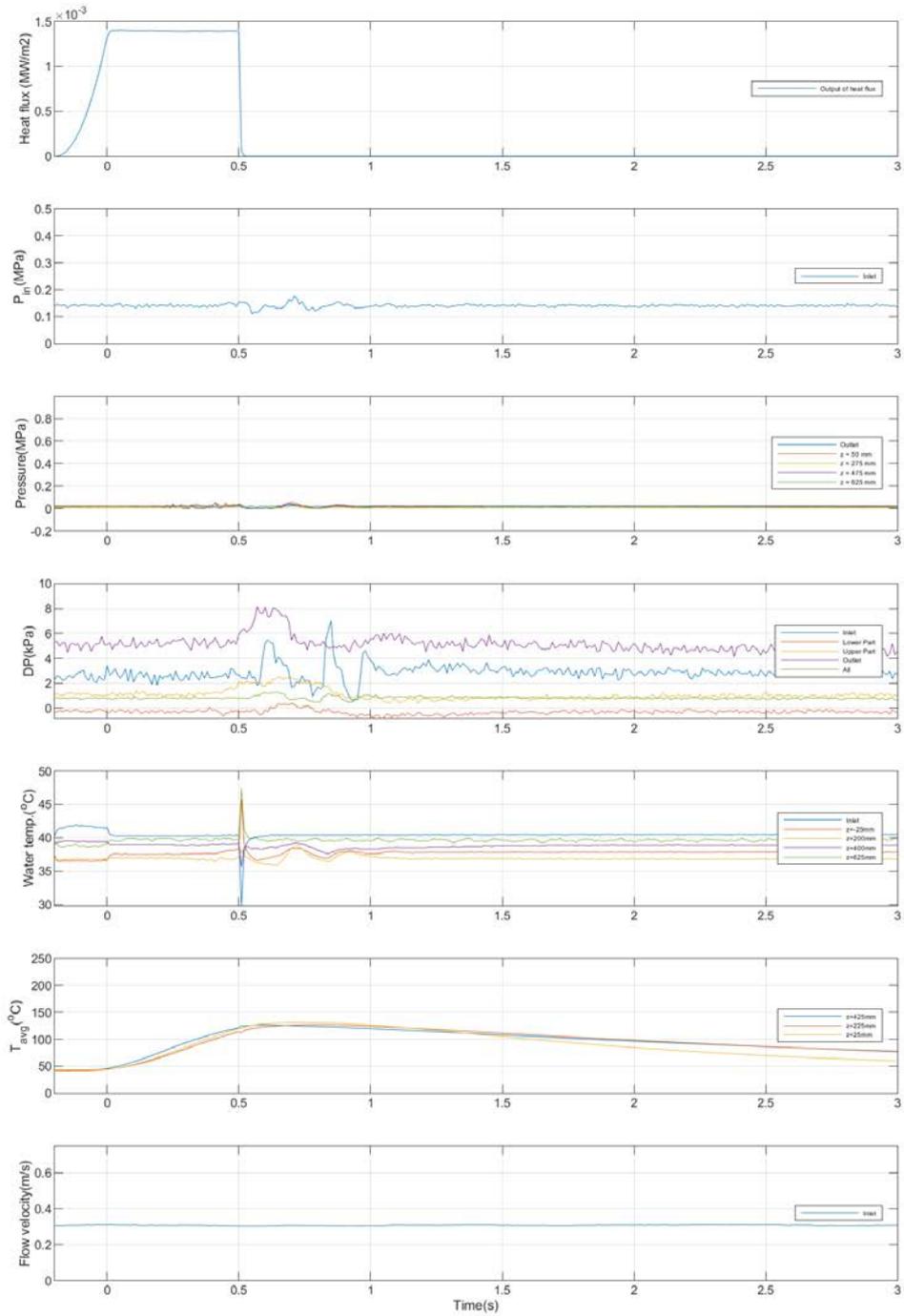


図 3.1-264 その他計測値の時間変化 (スペーサ無し, Run No.2)

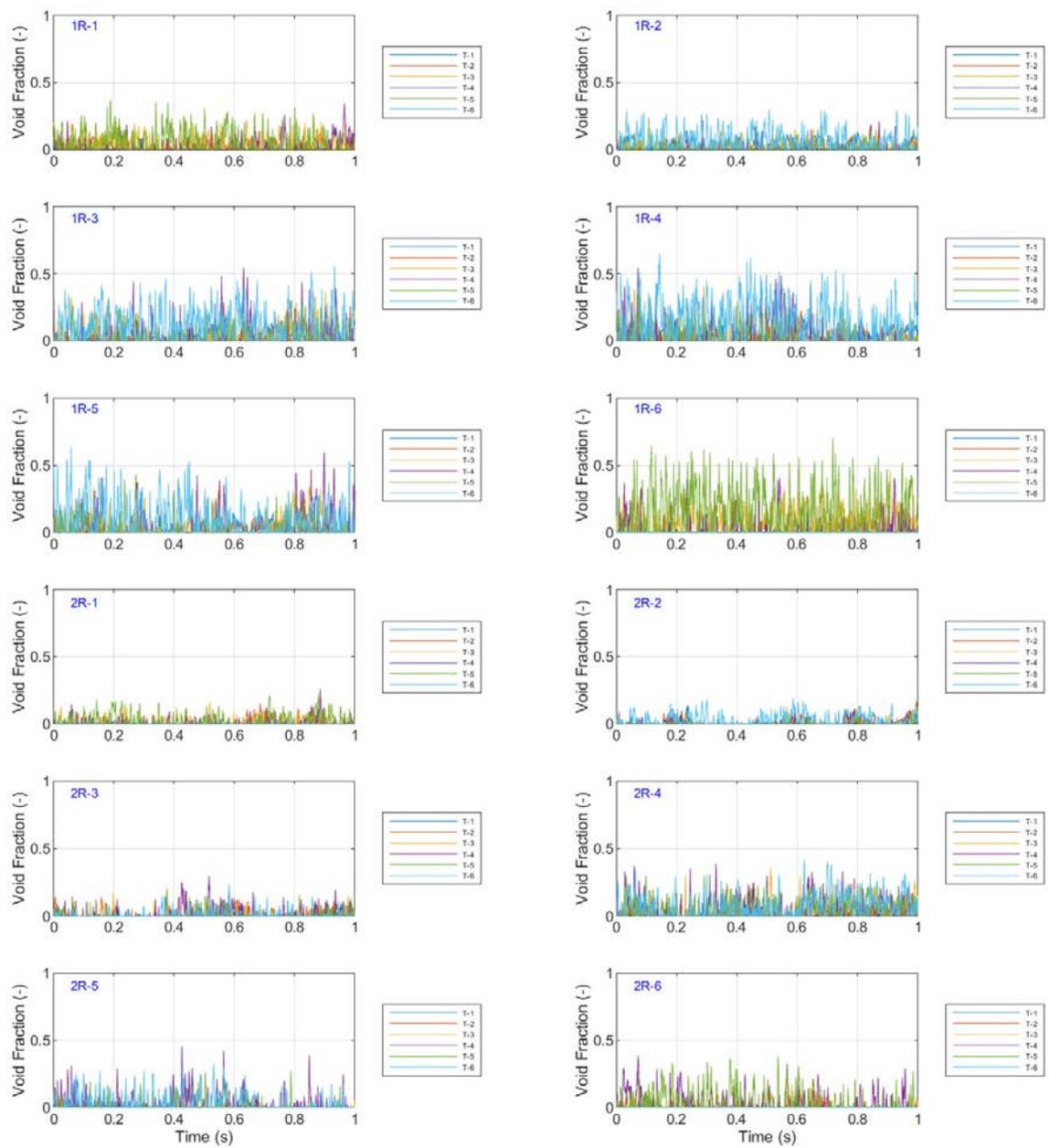


図 3.1-265 ボイド率の時間変化 (スパーサ無し, Run No.2/①)

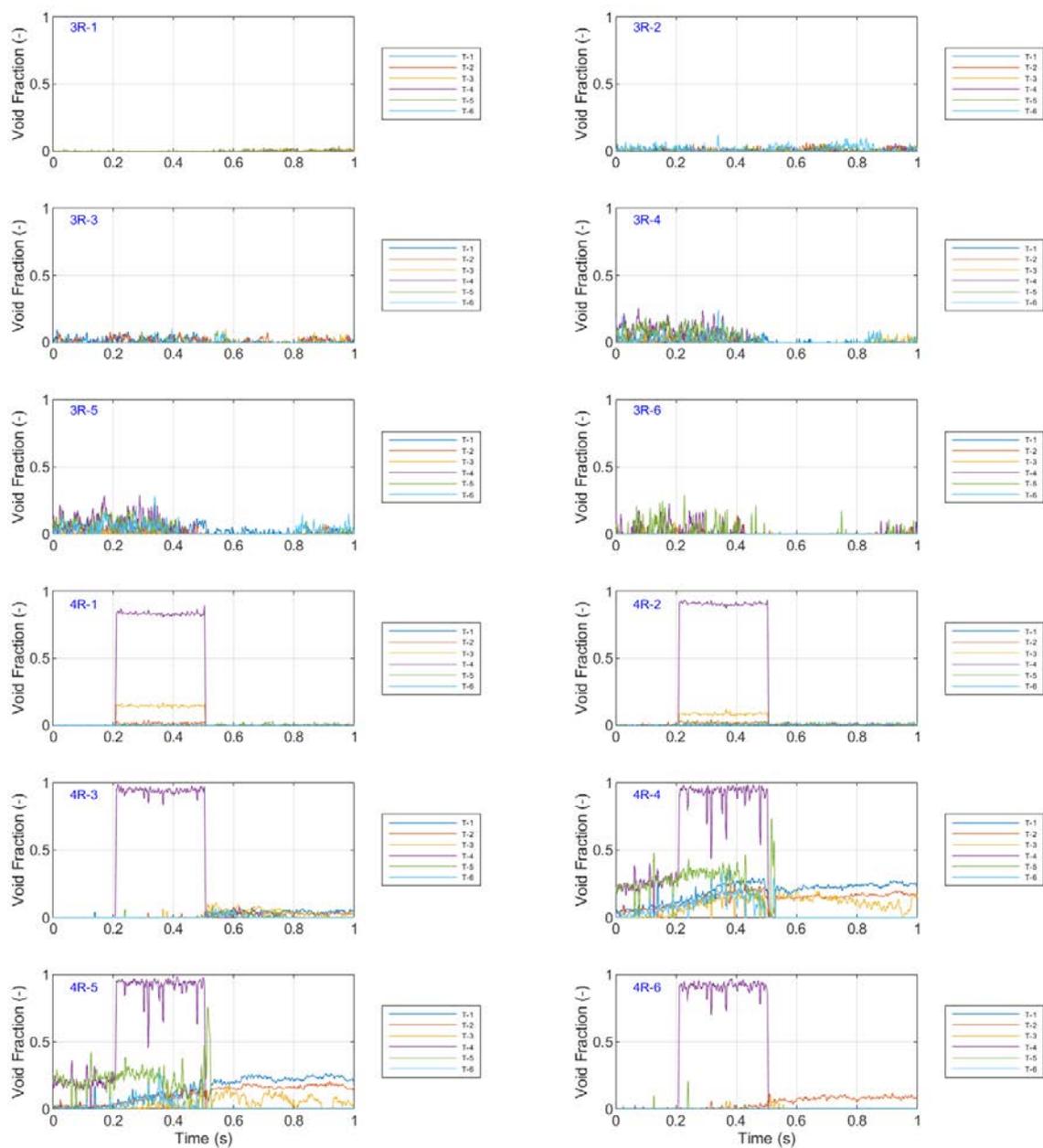


図 3.1-266 ボイド率の時間変化 (スパーサ無し, Run No.2/②)

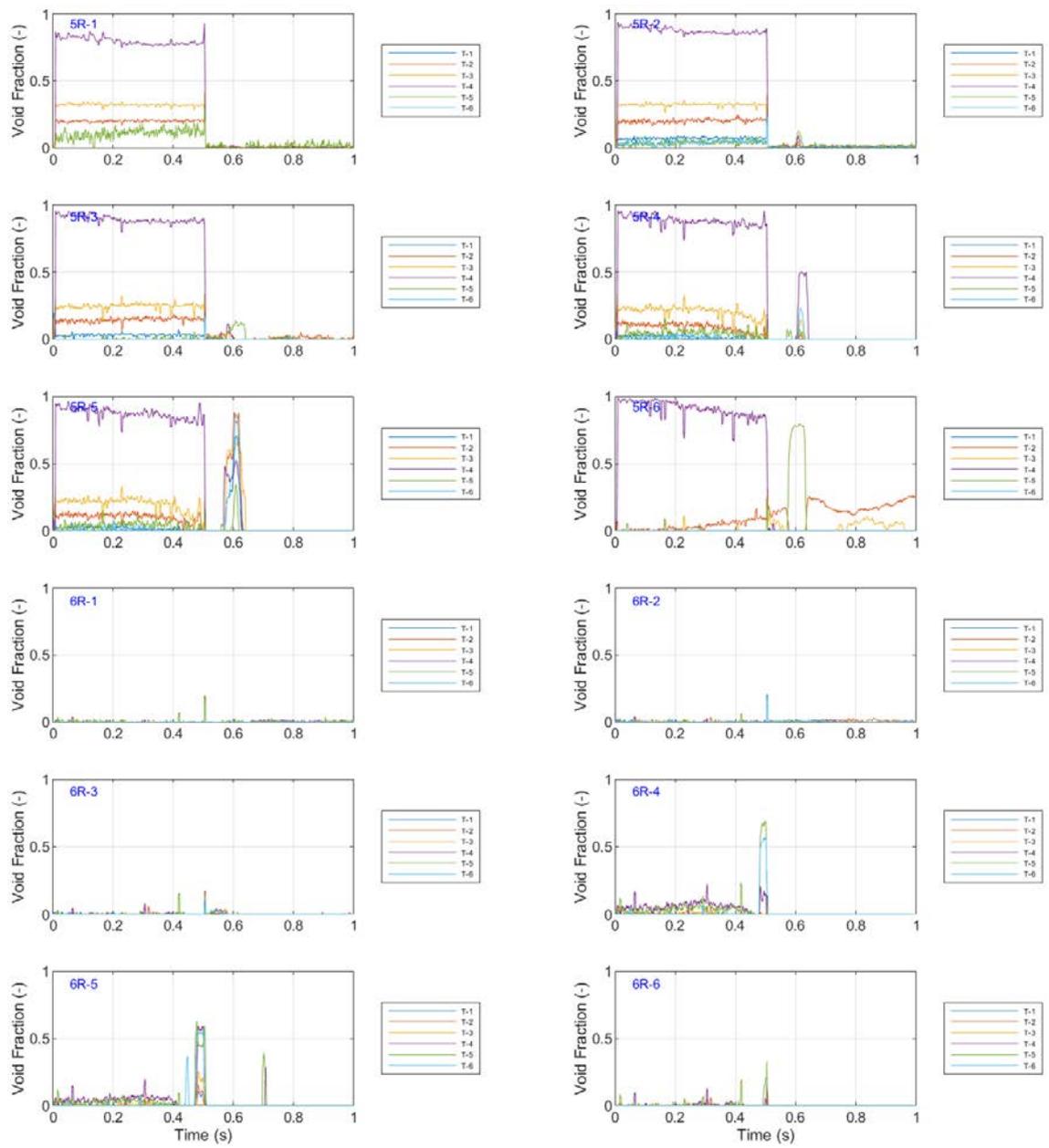


図 3.1-267 ボイド率の時間変化 (スパーサ無し, Run No.2/③)

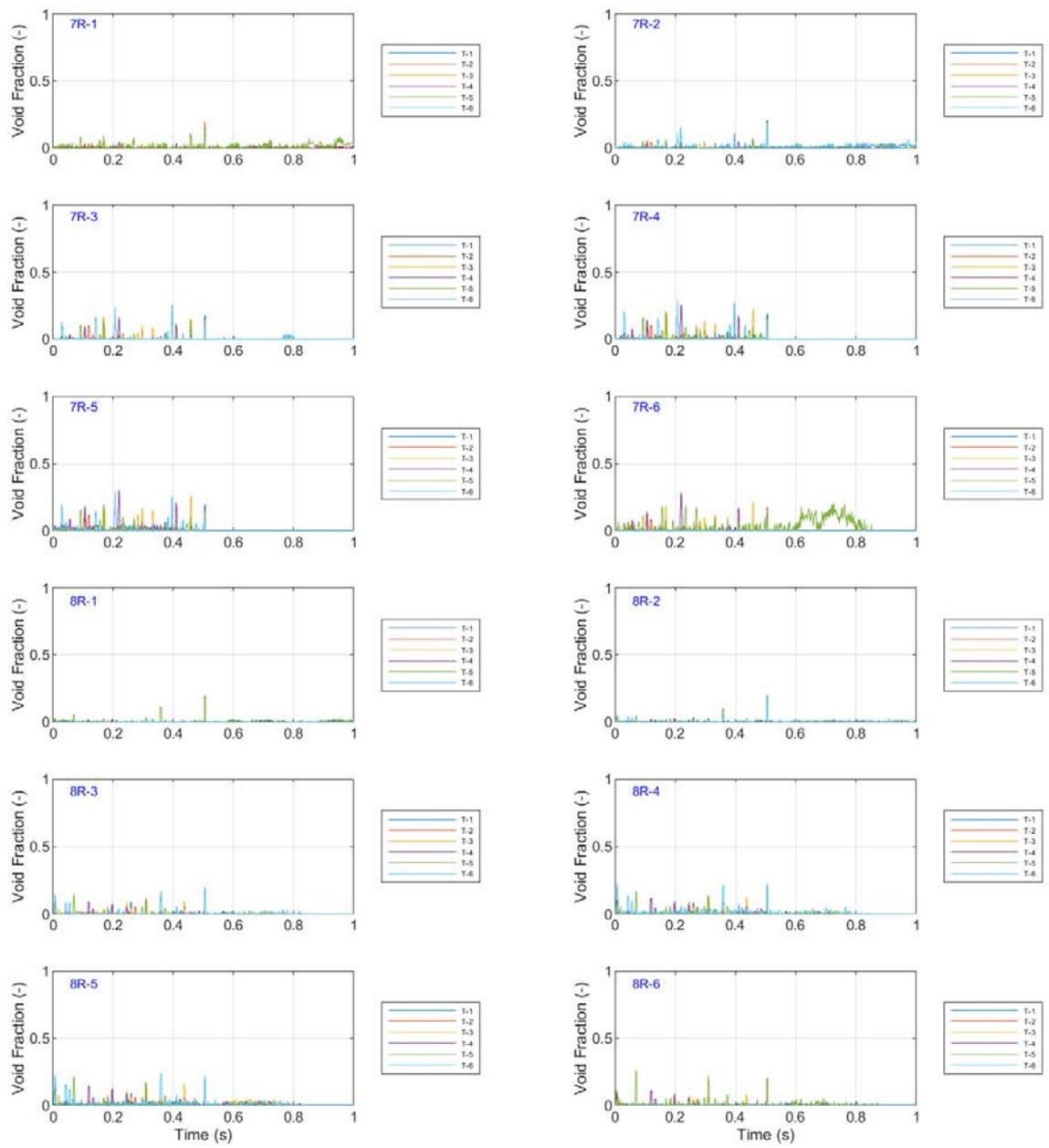


図 3.1-268 ボイド率の時間変化（スパーサ無し， Run No.2/④）

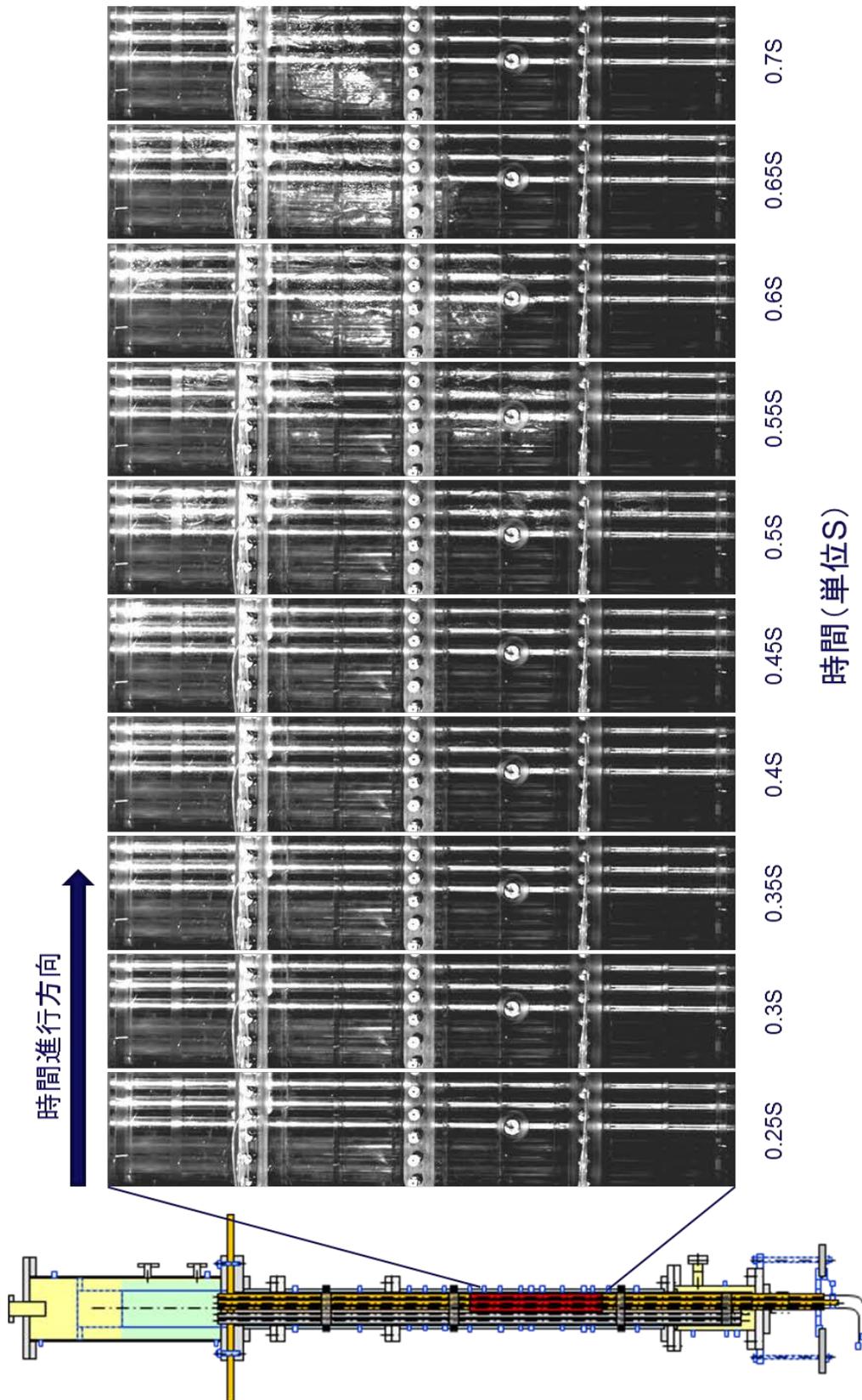


図 3.1-269 ポイド挙動の可視化画像 (スパーサ無し, Run No.2)

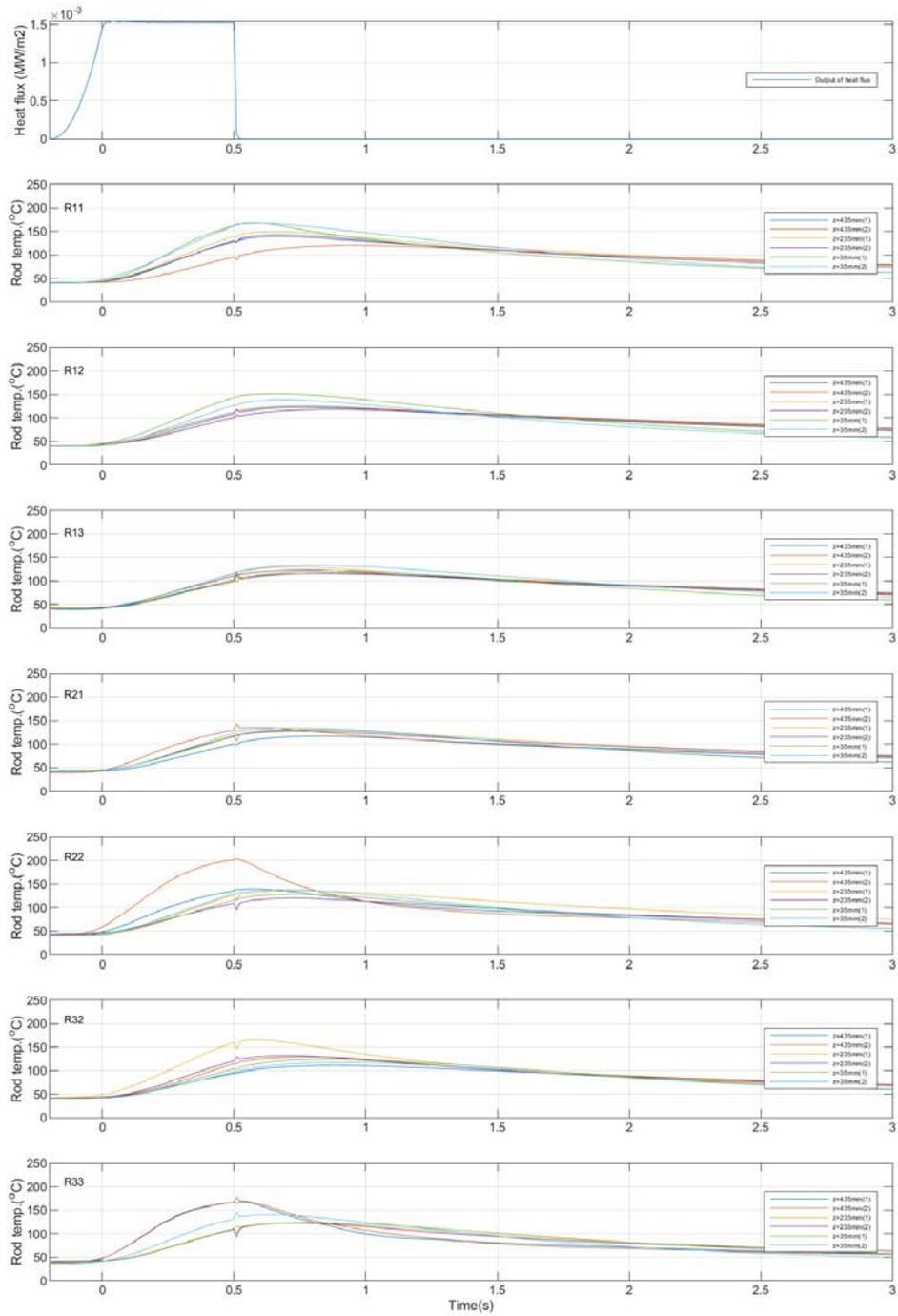


図 3.1-270 ロッドごとの燃料被覆管温度の時間変化（スペーサ無し， Run No.3）

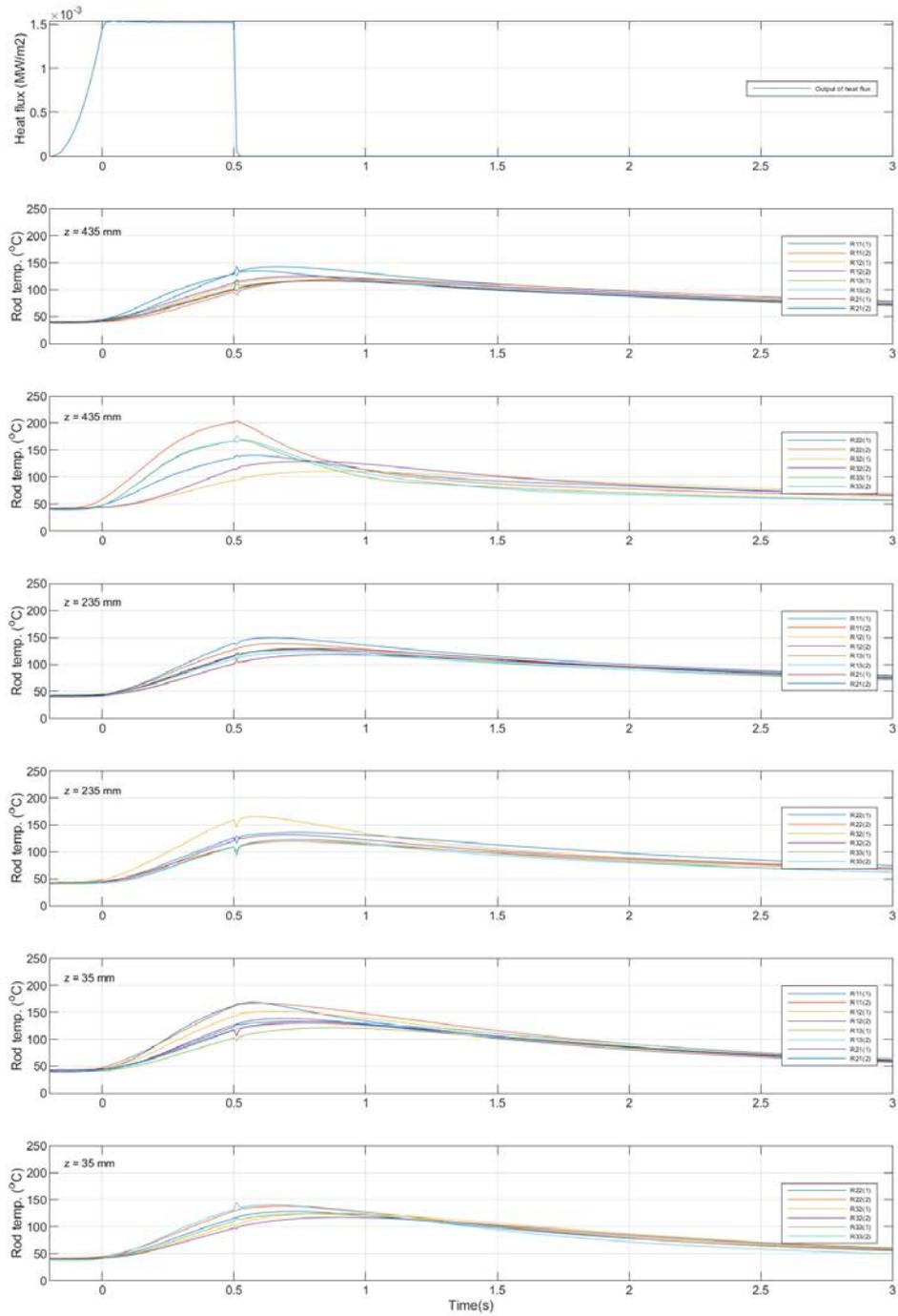


図 3.1-271 高さごとの燃料被覆管温度の時間変化（スぺーサ無し，Run No.3）

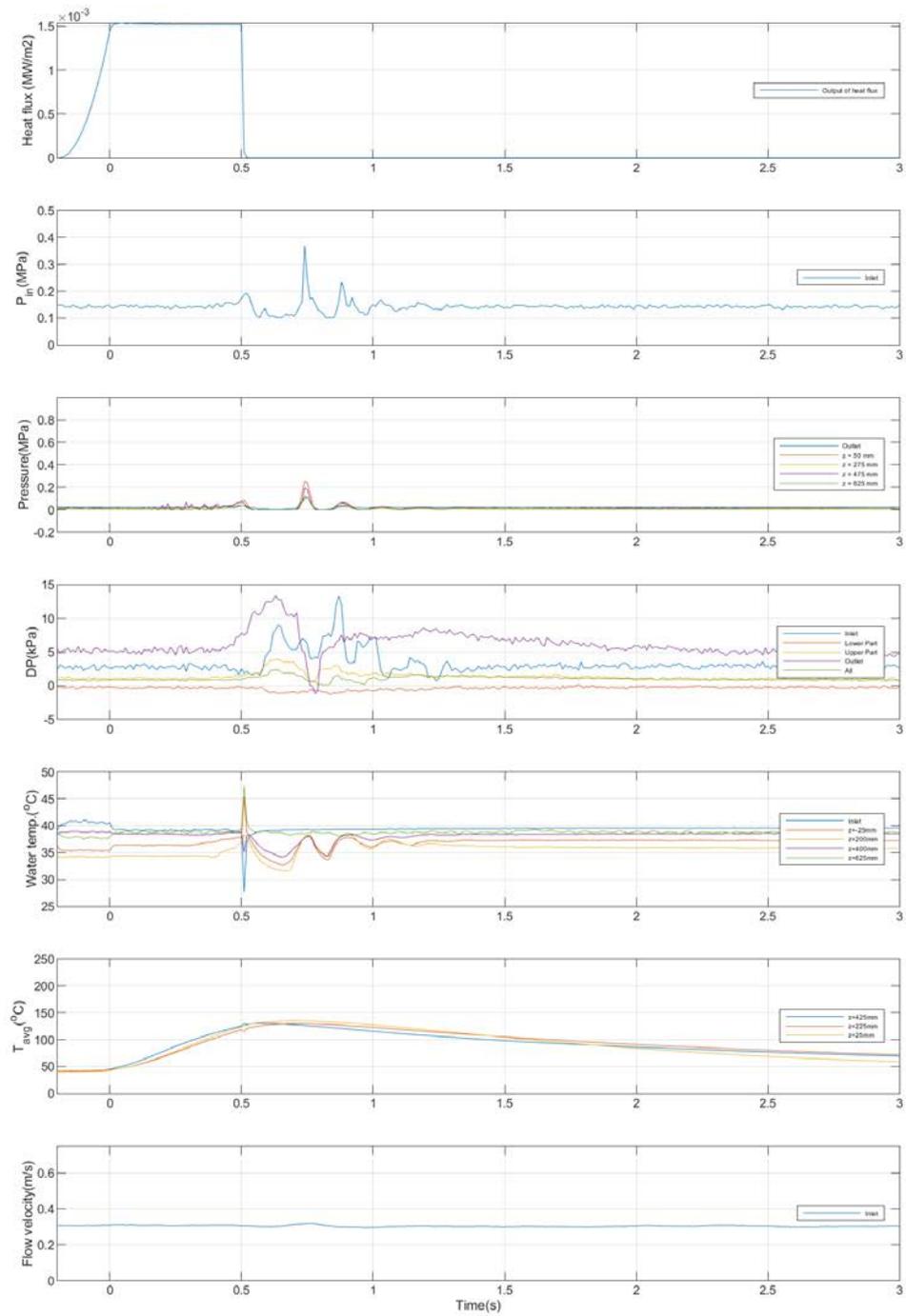


図 3.1-272 その他計測値の時間変化（スペーサ無し， Run No.3）

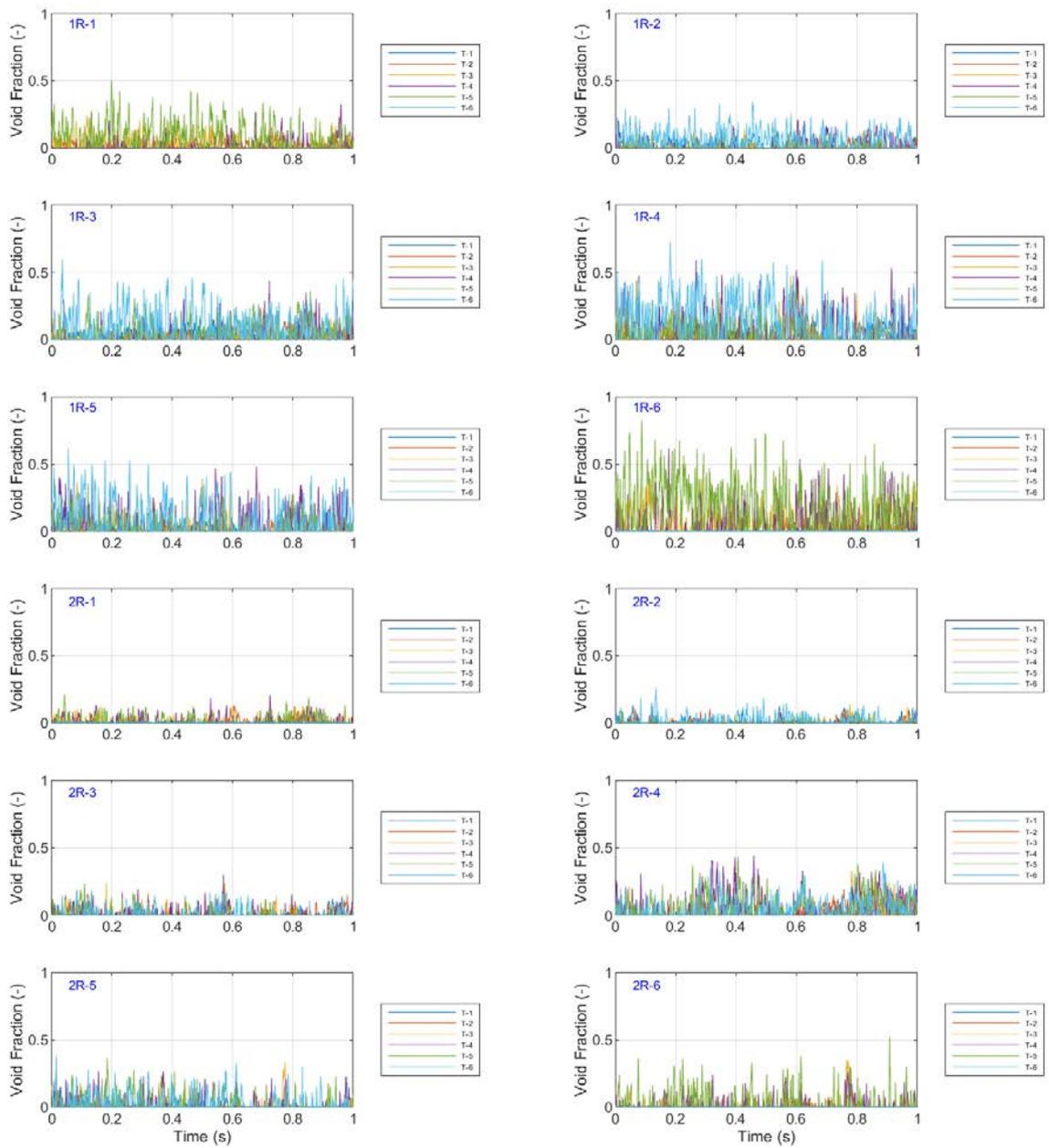


図 3.1-273 ボイド率の時間変化 (スパーサ無し, Run No.3/①)

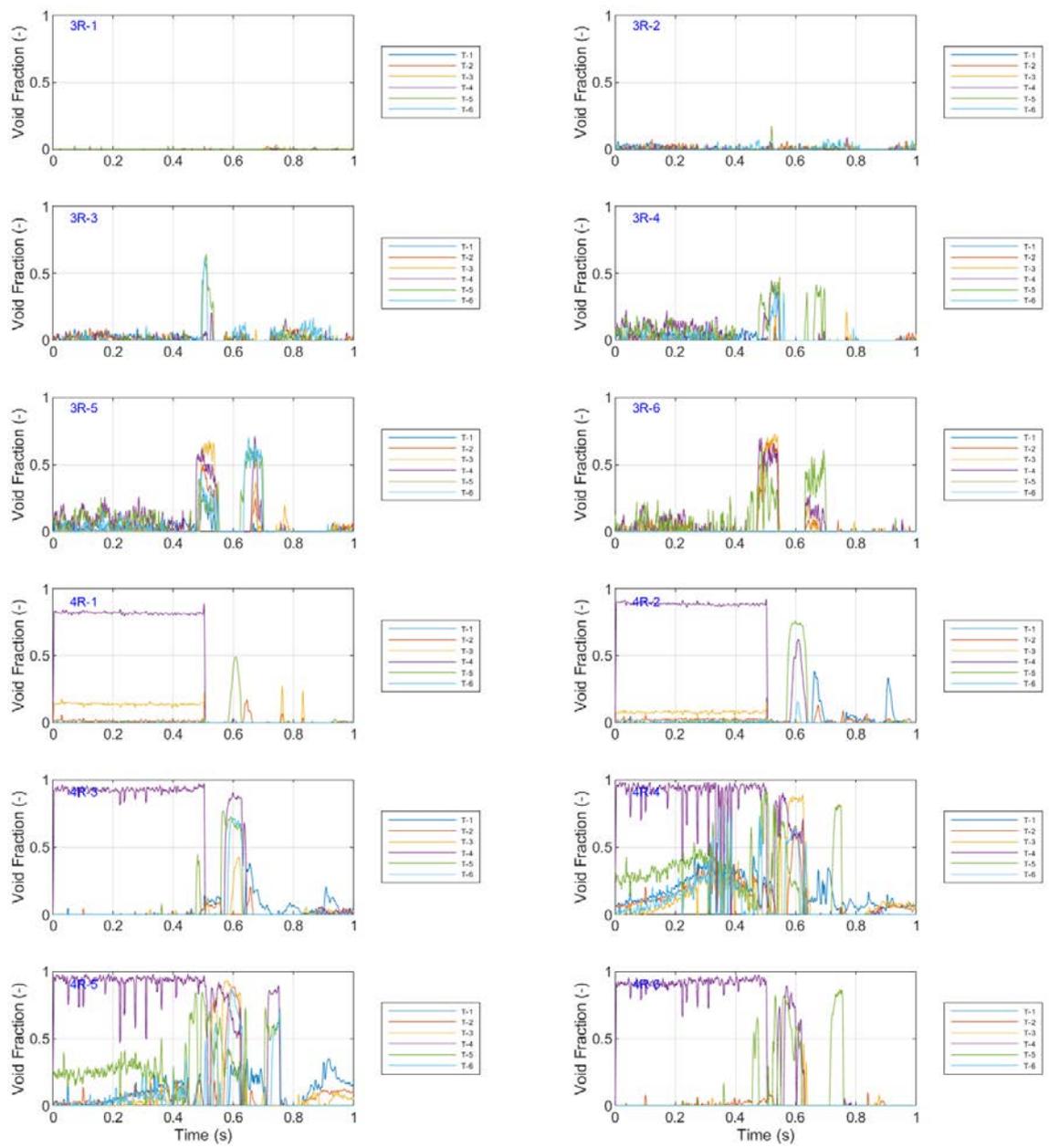


図 3.1-274 ボイド率の時間変化 (スパーサ無し, Run No.3/②)

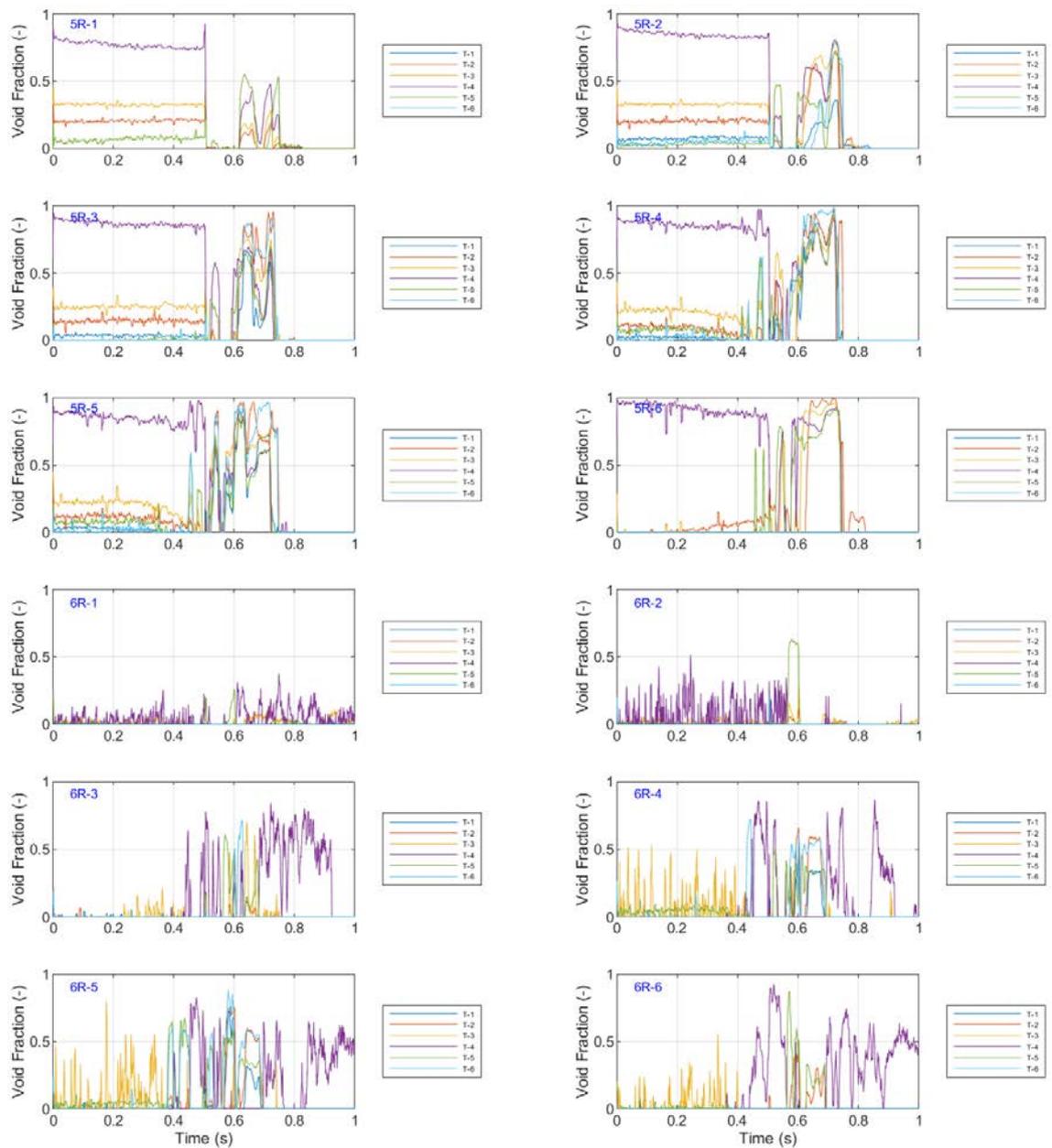


図 3.1-275 ボイド率の時間変化 (スパーサ無し, Run No.3/③)

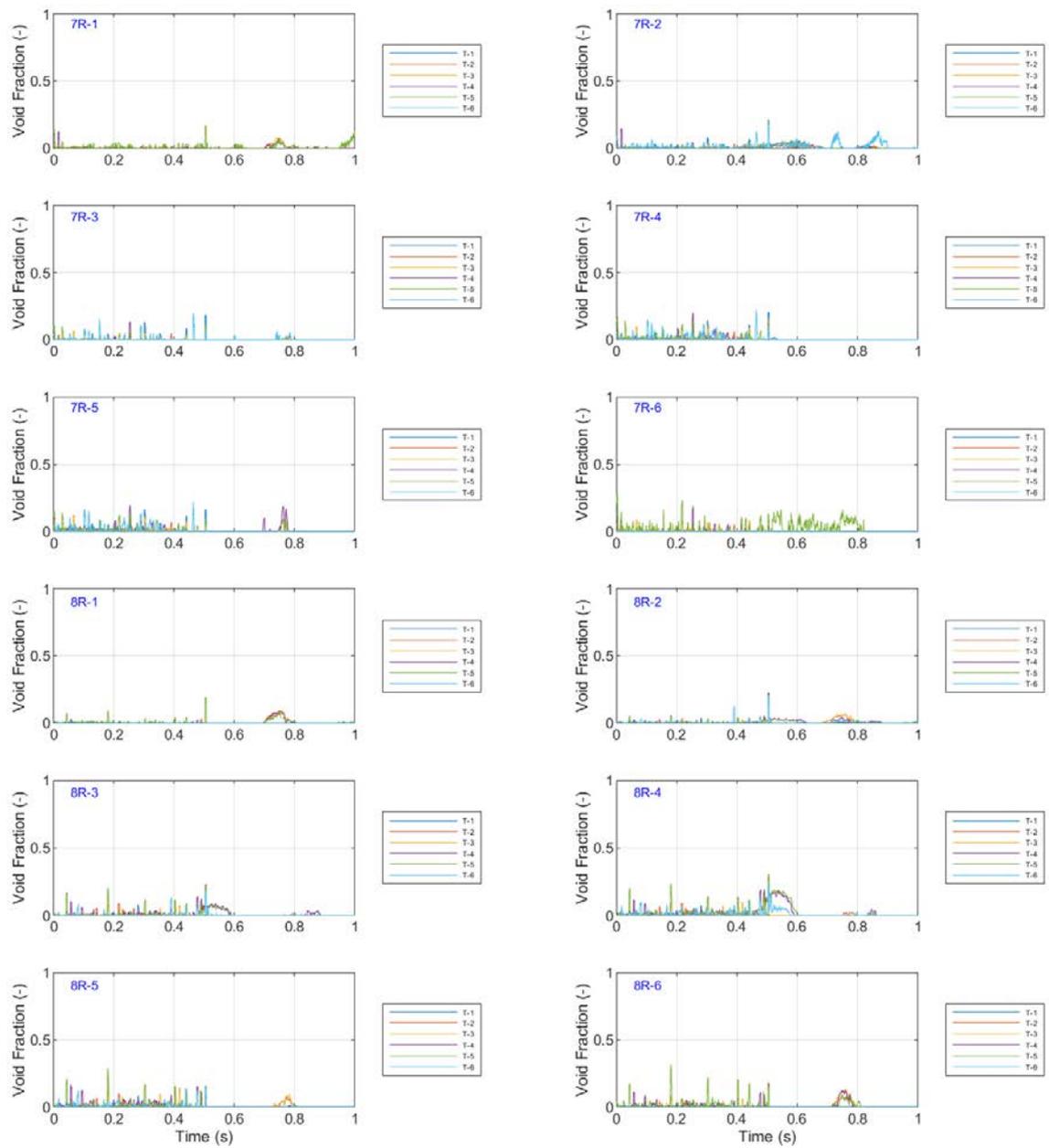


図 3.1-276 ボイド率の時間変化 (スパーサ無し, Run No.3/④)

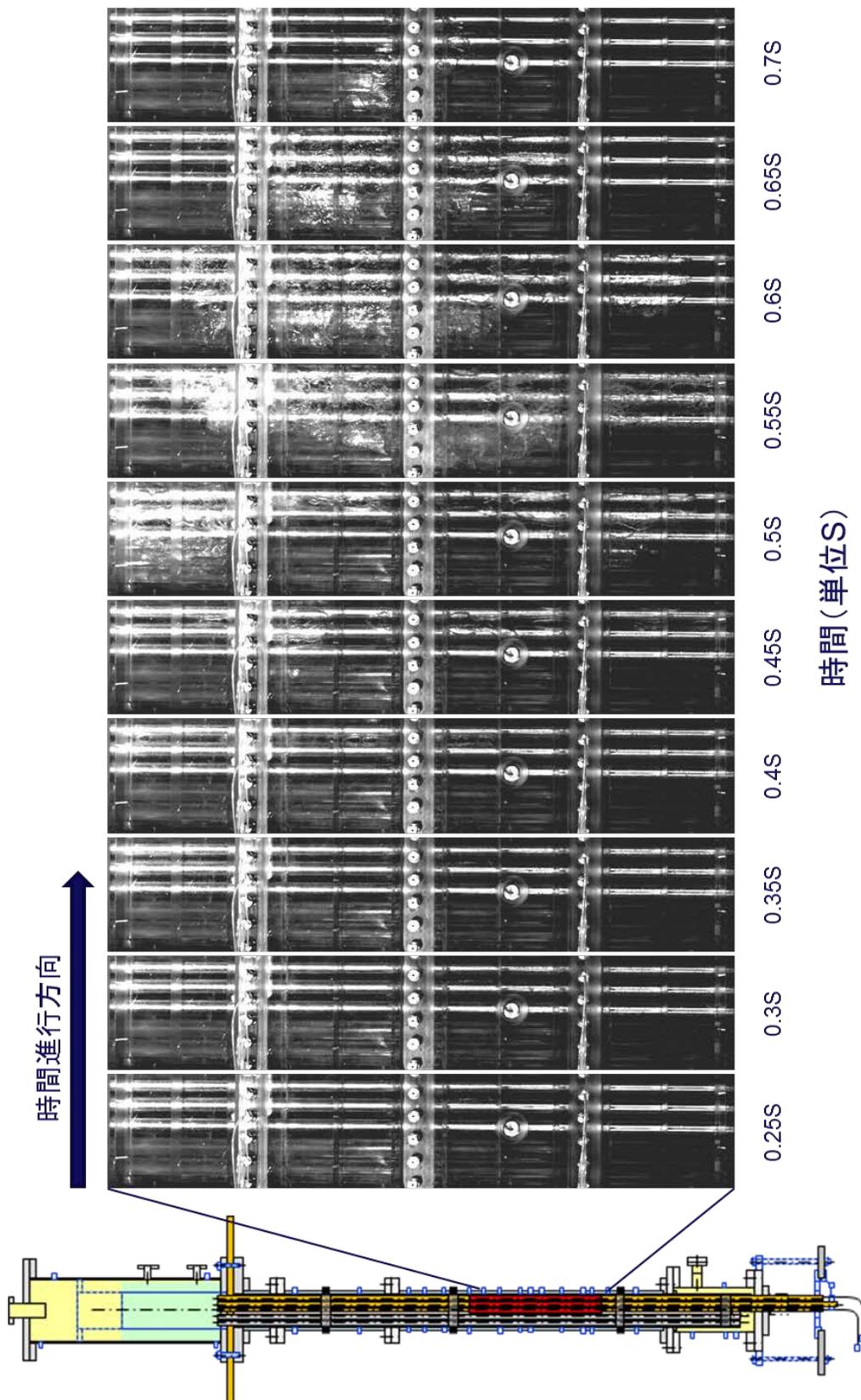


図 3.1-277 ポイド挙動の可視化画像 (スパーサ無し, Run No.3)

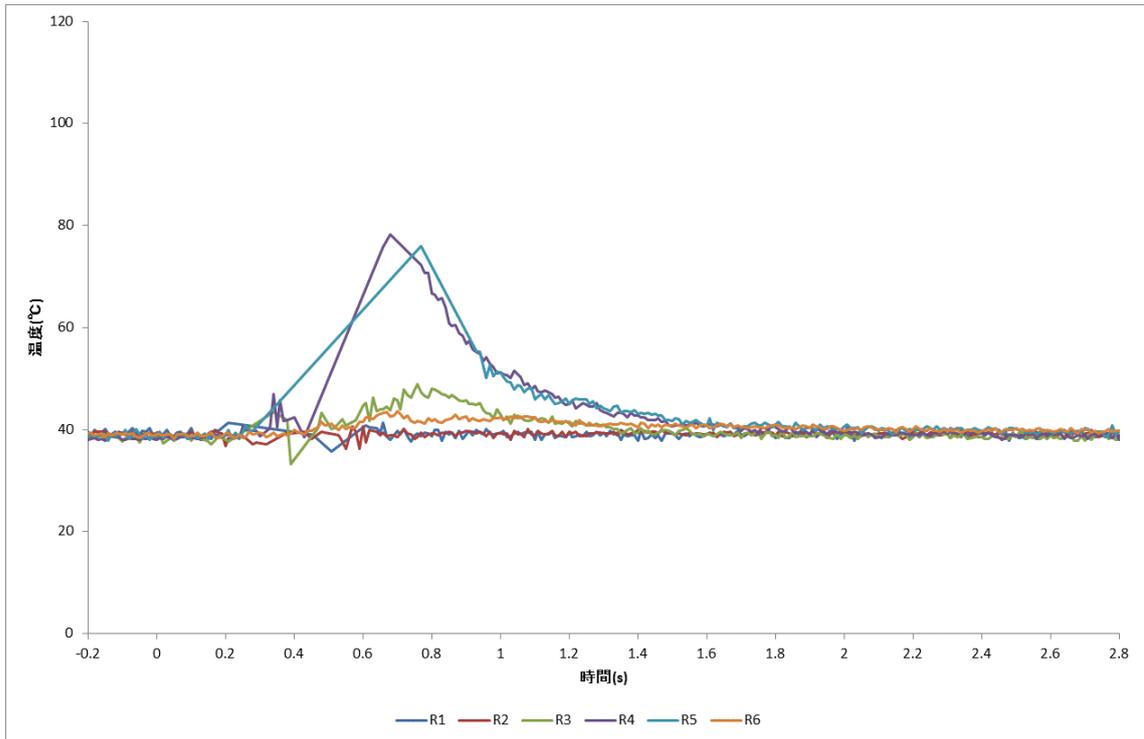


図 3.1-278 光ファイバによる液相温度（スパーサ無し，ケース A，第 4 段 WMS 部 / T6 ライン）

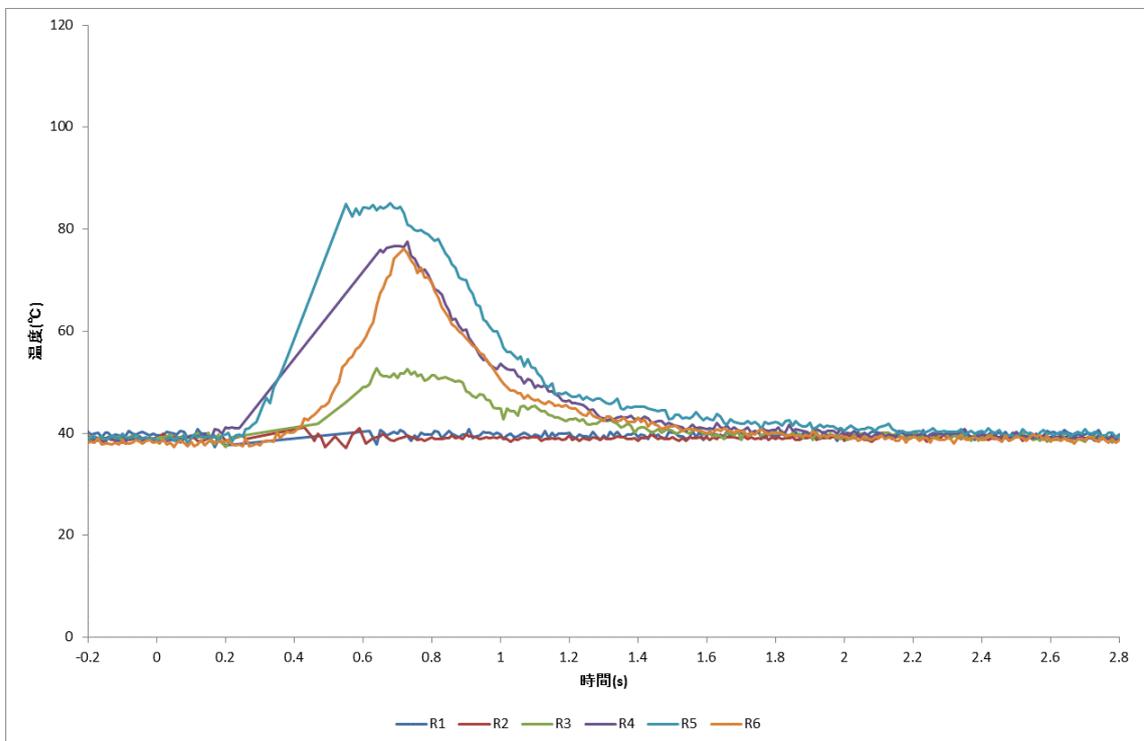


図 3.1-279 光ファイバによる液相温度（スパーサ無し，ケース A，第 4 段 WMS 部 / T5 ライン）

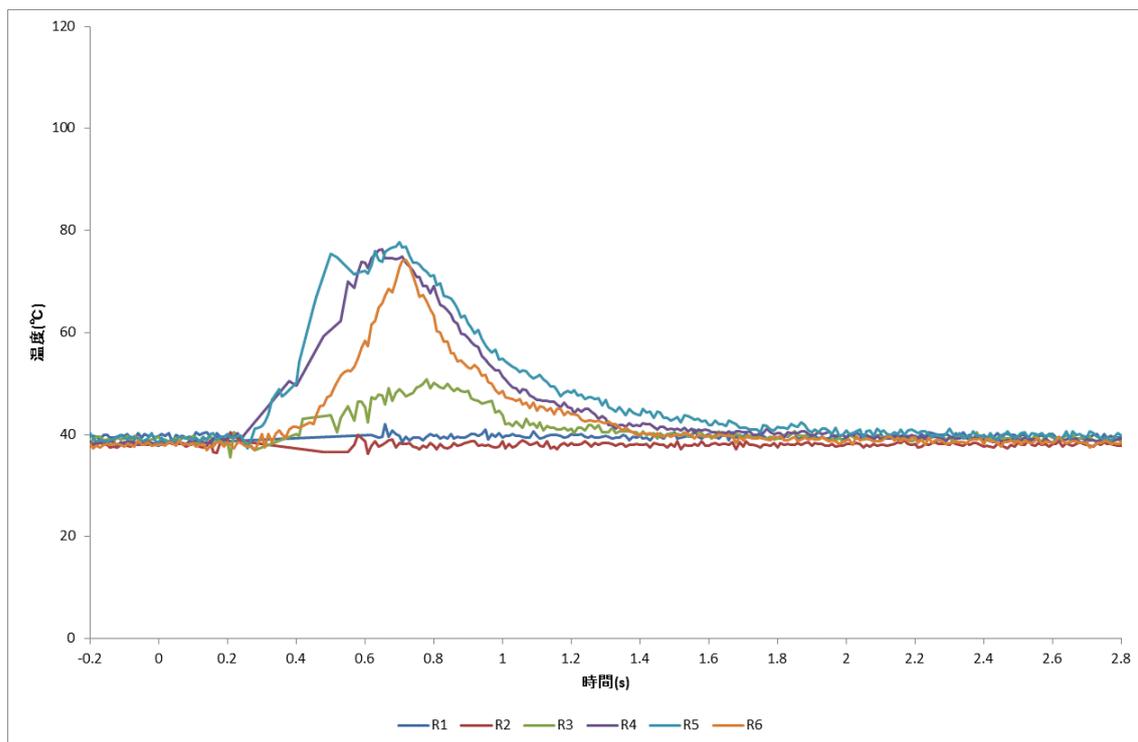


図 3.1-280 光ファイバによる液相温度（スペーサ無し，ケース A，第 4 段 WMS 部 / T4 ライン）

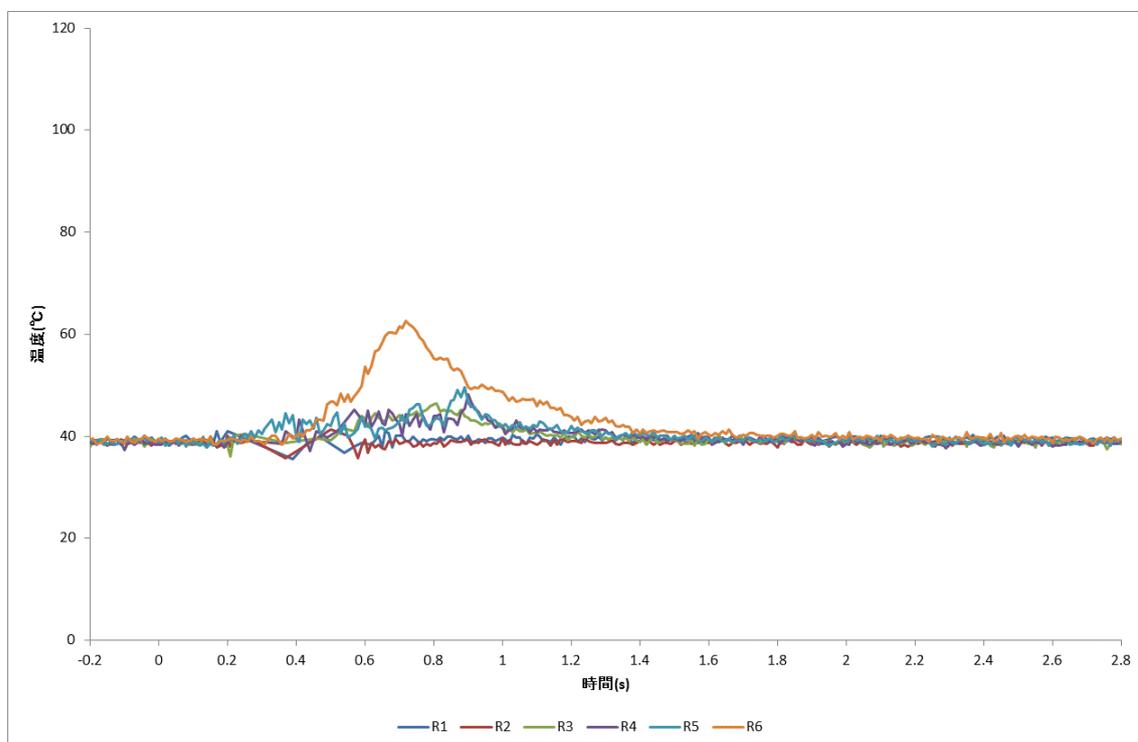


図 3.1-281 光ファイバによる液相温度（スペーサ無し，ケース A，第 4 段 WMS 部 / T3 ライン）

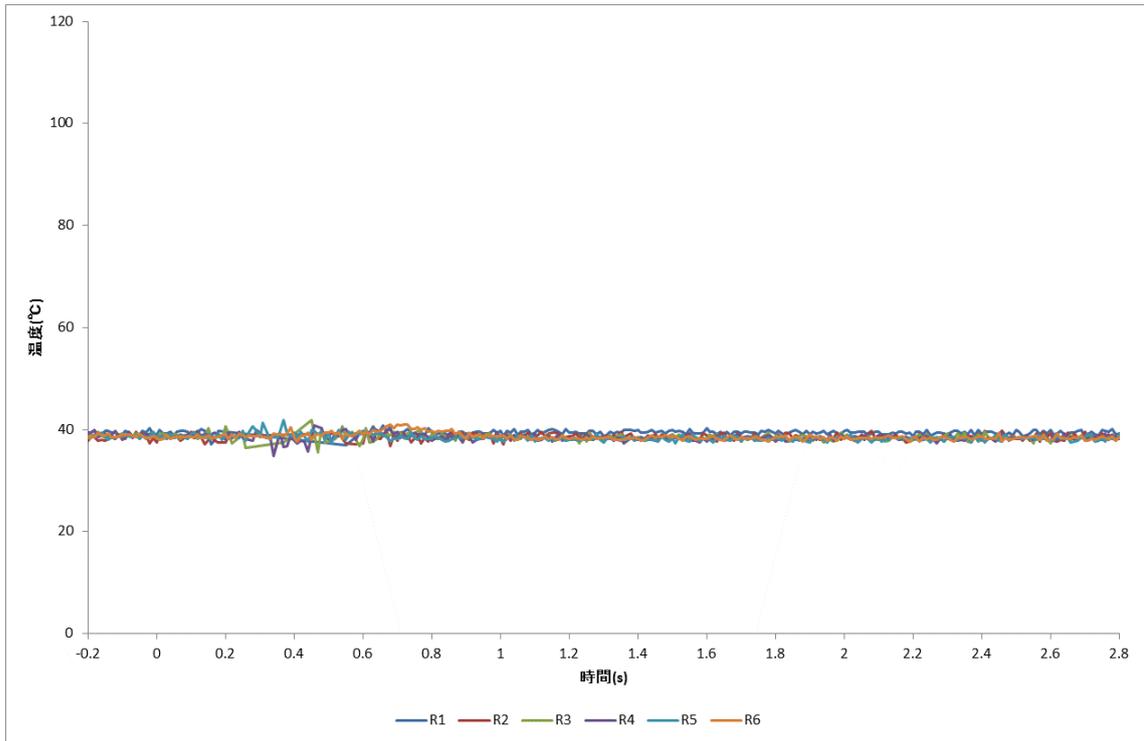


図 3.1-282 光ファイバによる液相温度（スペーサ無し，ケース A，第 4 段 WMS 部 / T2 ライン）

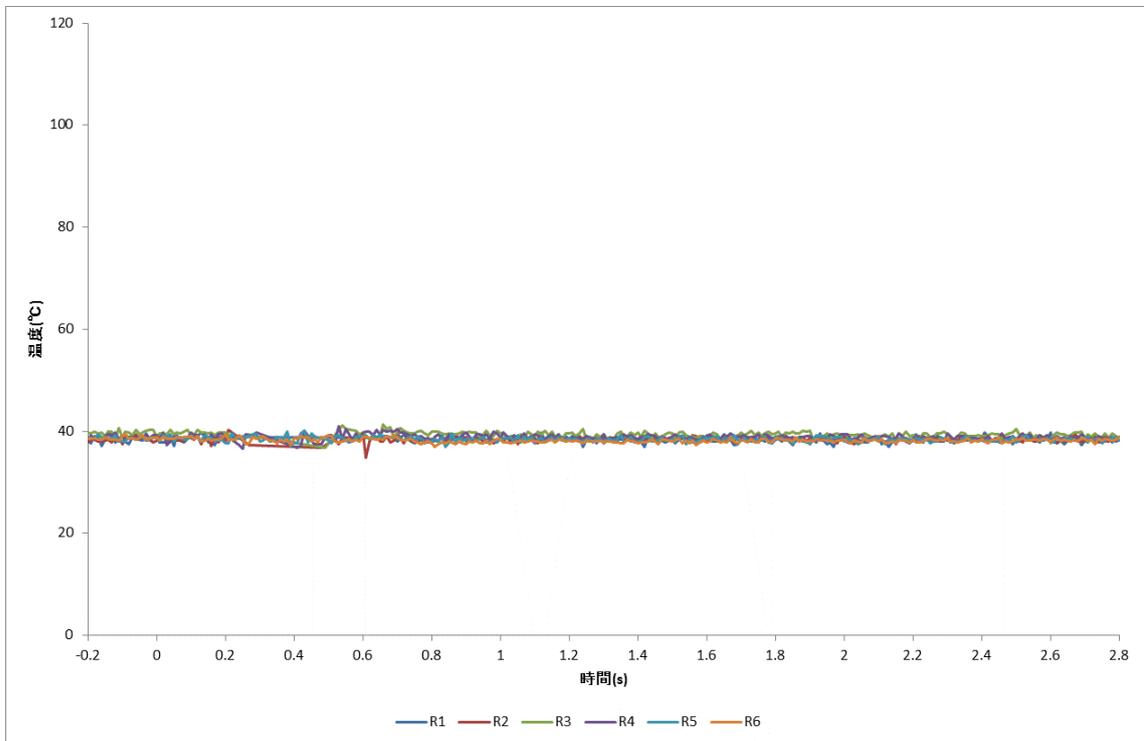


図 3.1-283 光ファイバによる液相温度（スペーサ無し，ケース A，第 4 段 WMS 部 / T1 ライン）

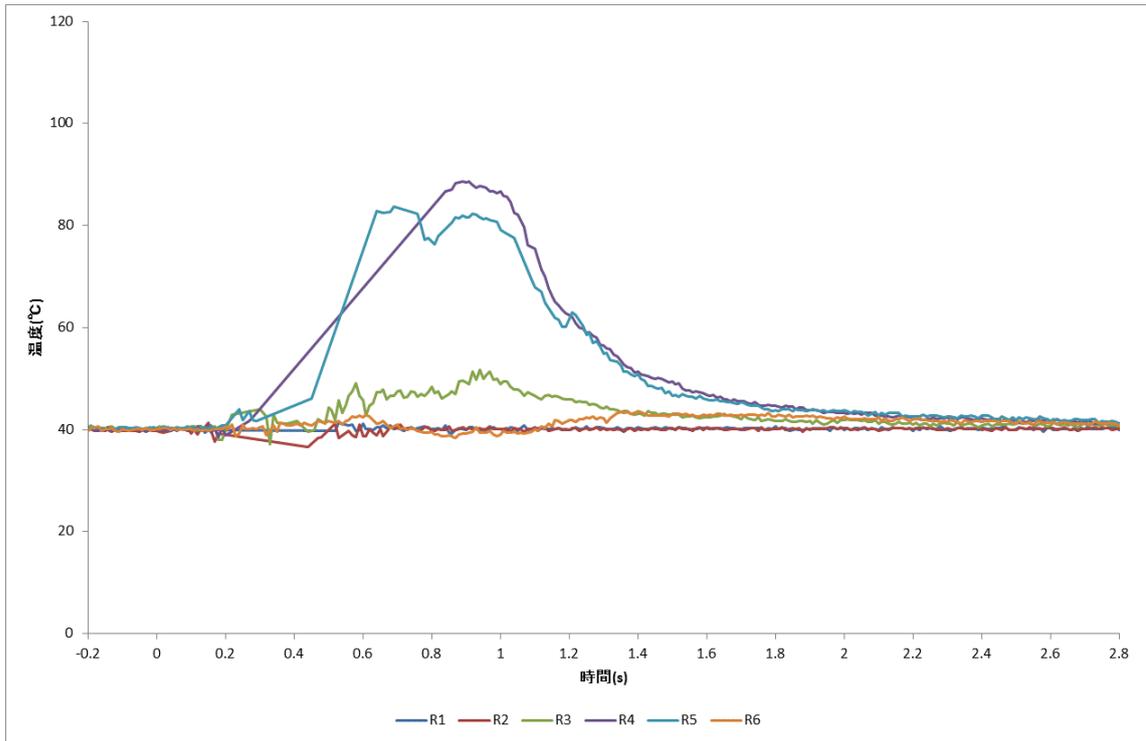


図 3.1-284 光ファイバによる液相温度（スぺーサ無し，ケース B，第 4 段 WMS 部 / T6 ライン）

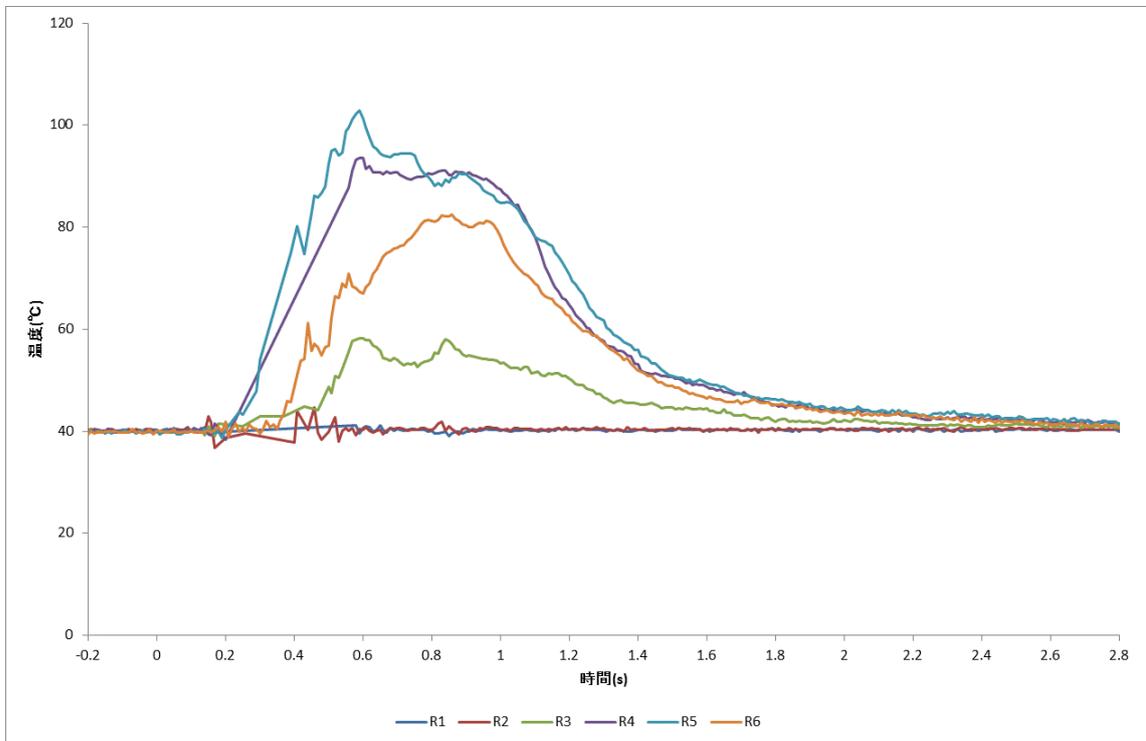


図 3.1-285 光ファイバによる液相温度（スぺーサ無し，ケース B，第 4 段 WMS 部 / T5 ライン）

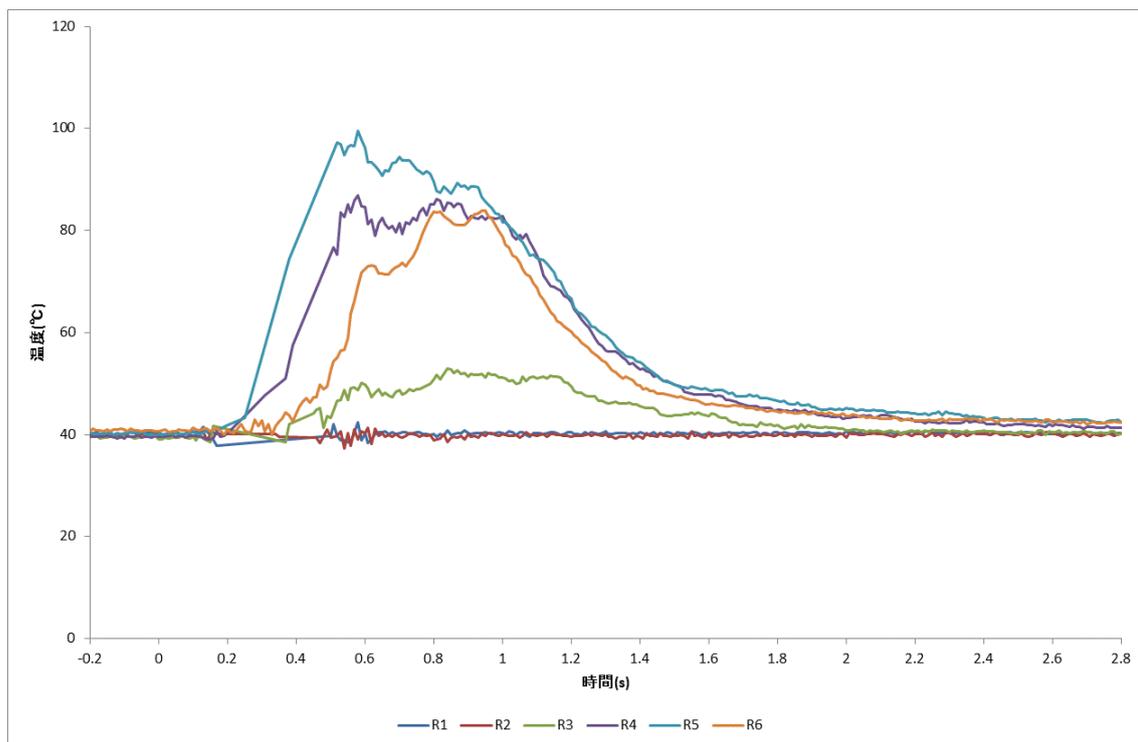


図 3.1-286 光ファイバによる液相温度（スパーサ無し，ケース B，第 4 段 WMS 部 / T4 ライン）

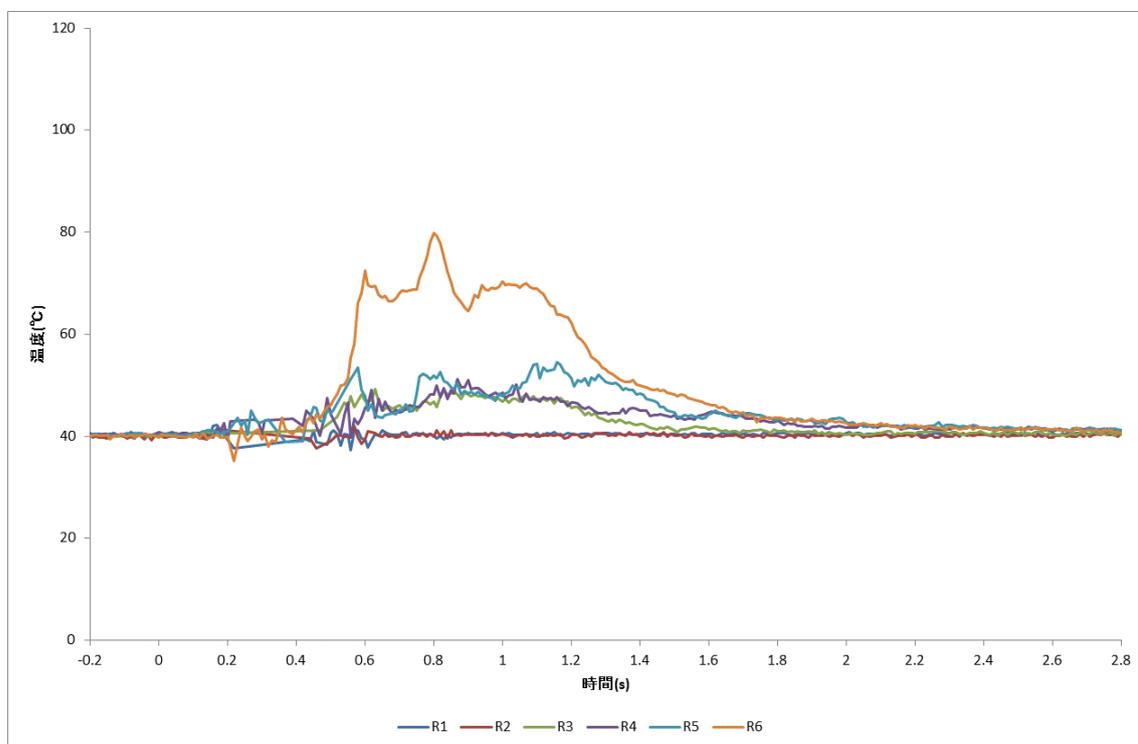


図 3.1-287 光ファイバによる液相温度（スパーサ無し，ケース B，第 4 段 WMS 部 / T3 ライン）

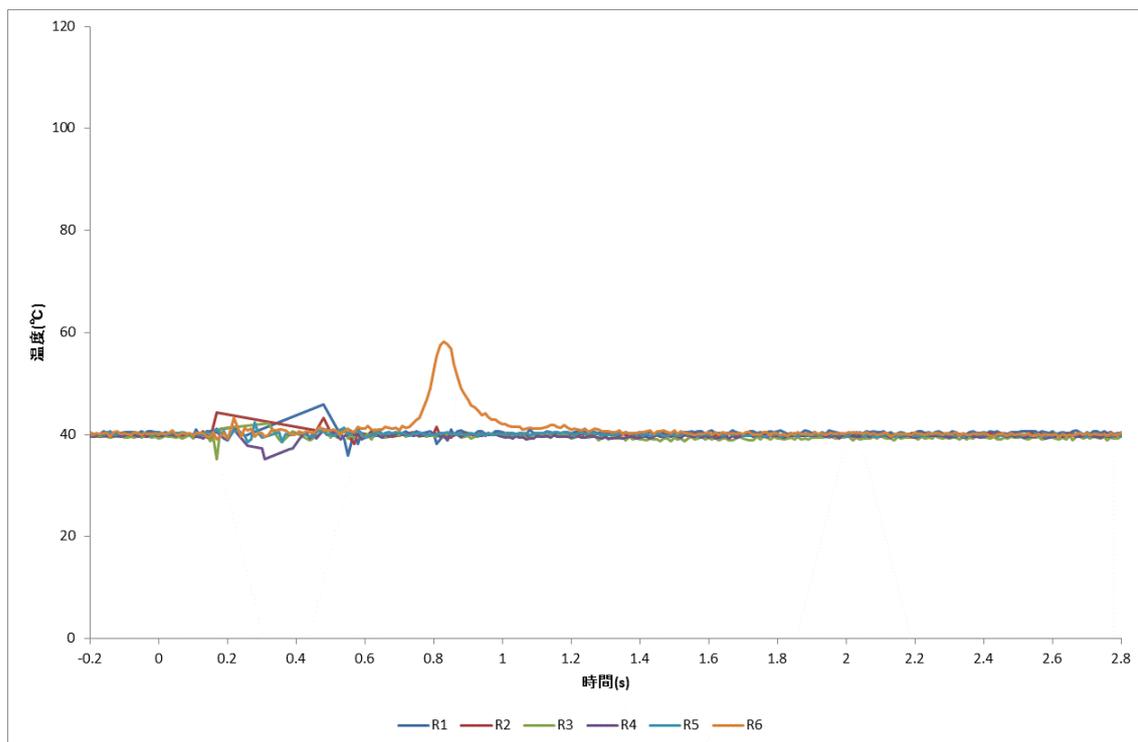


図 3.1-288 光ファイバによる液相温度（スパーサ無し，ケース B，第 4 段 WMS 部 / T2 ライン）

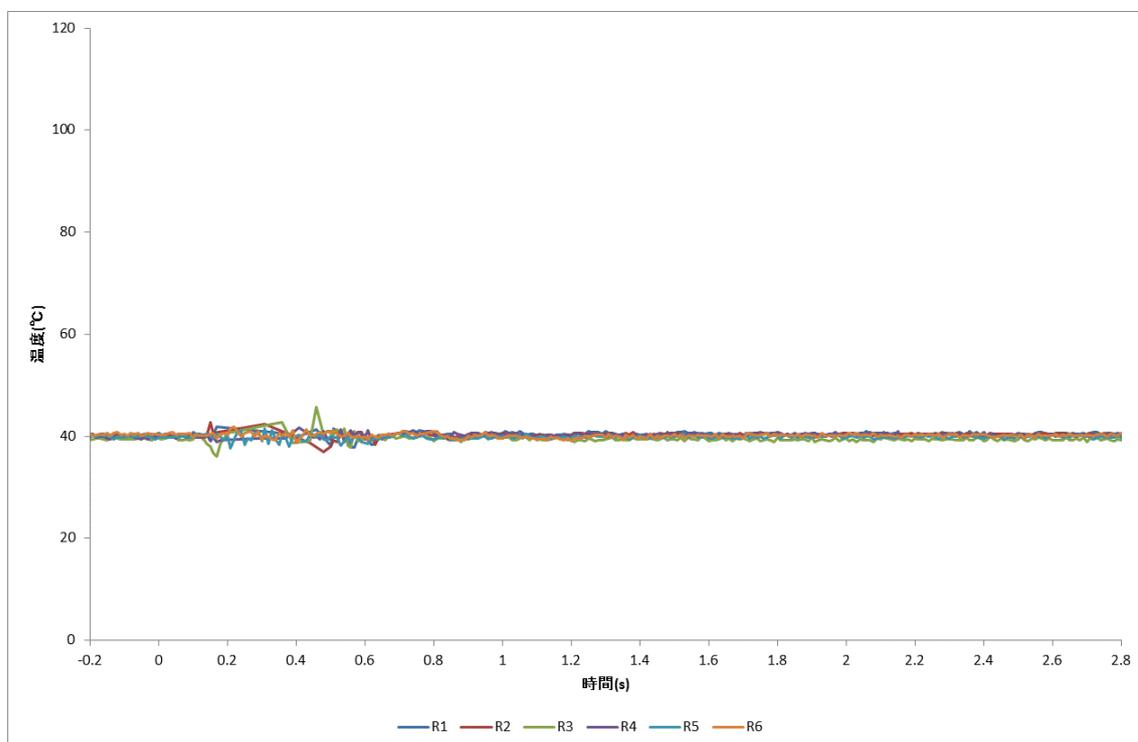


図 3.1-289 光ファイバによる液相温度（スパーサ無し，ケース B，第 4 段 WMS 部 / T1 ライン）

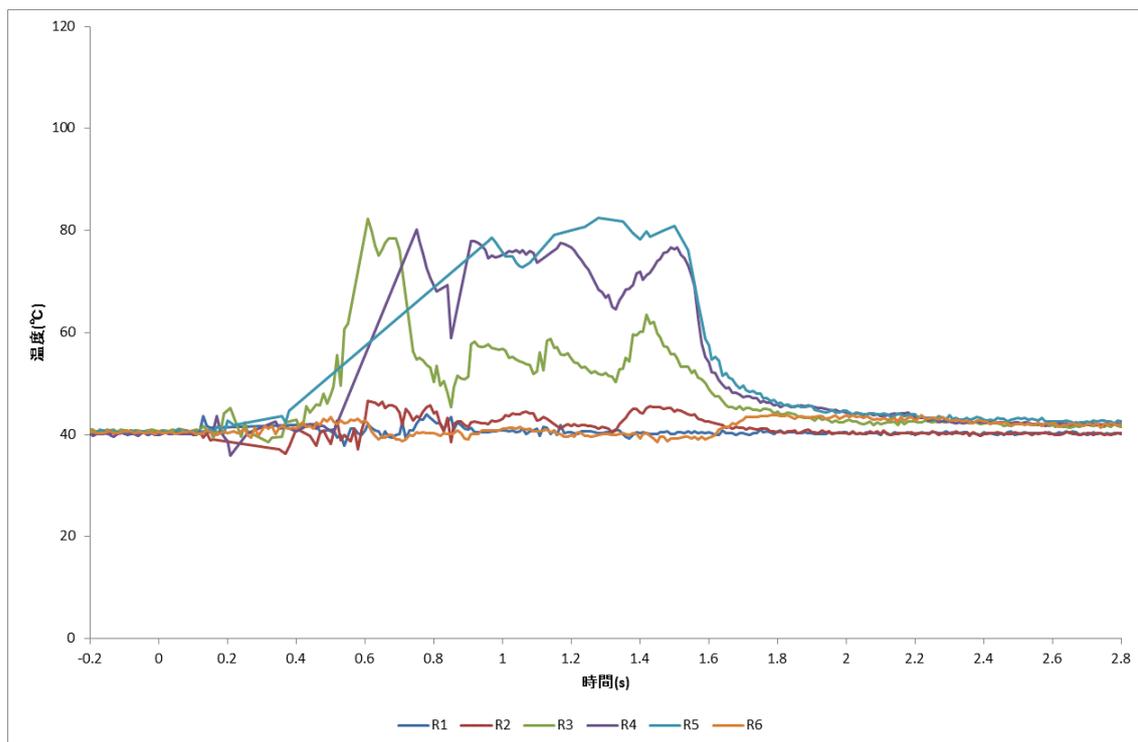


図 3.1-290 光ファイバによる液相温度（スぺーサ無し，ケース C，第 4 段 WMS 部 / T6 ライン）

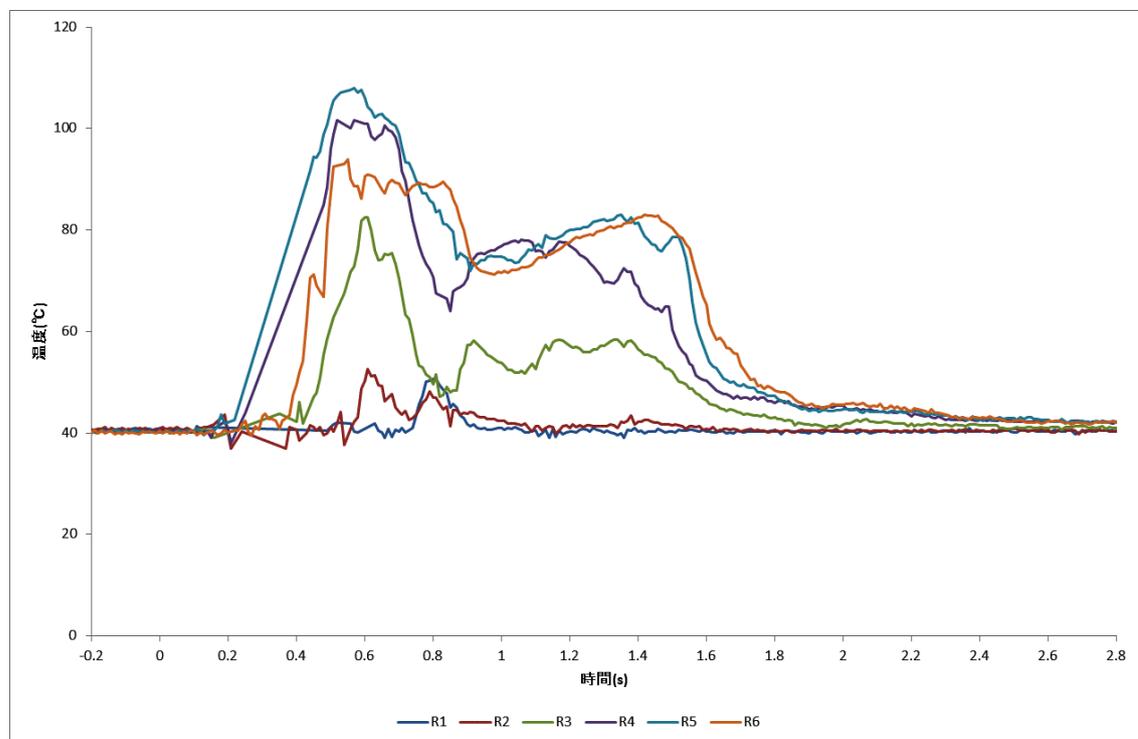


図 3.1-291 光ファイバによる液相温度（スぺーサ無し，ケース C，第 4 段 WMS 部 / T5 ライン）

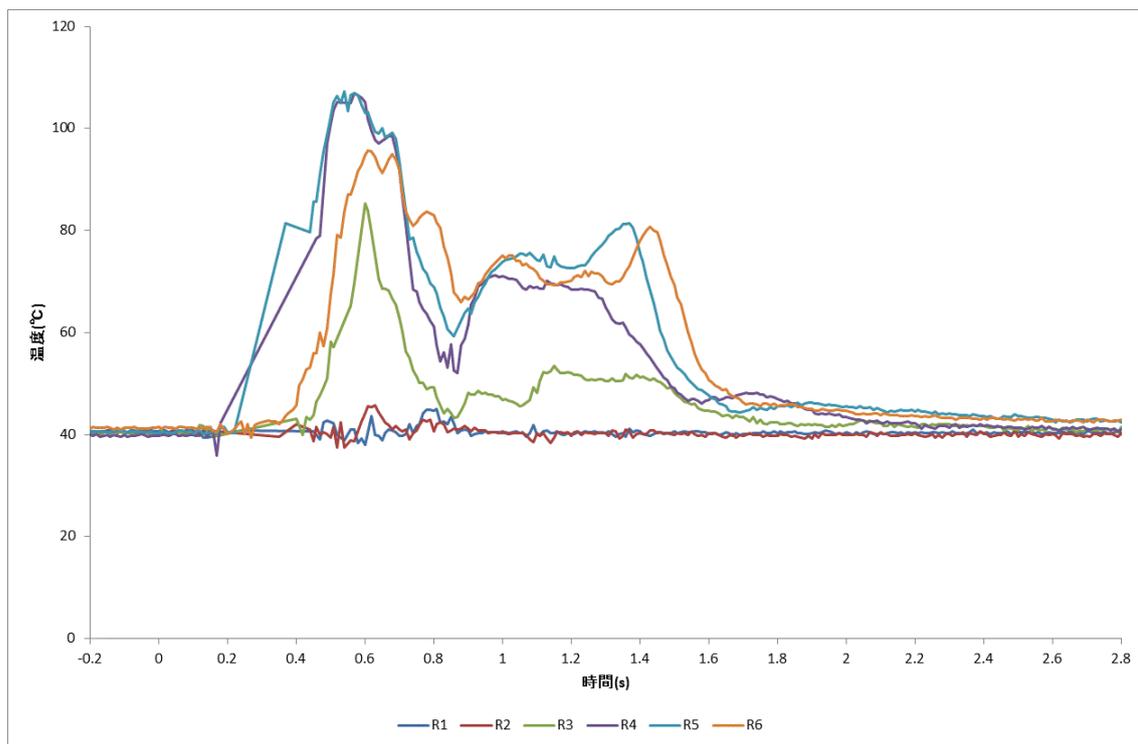


図 3.1-292 光ファイバによる液相温度（スぺーサ無し，ケース C，第 4 段 WMS 部 / T4 ライン）

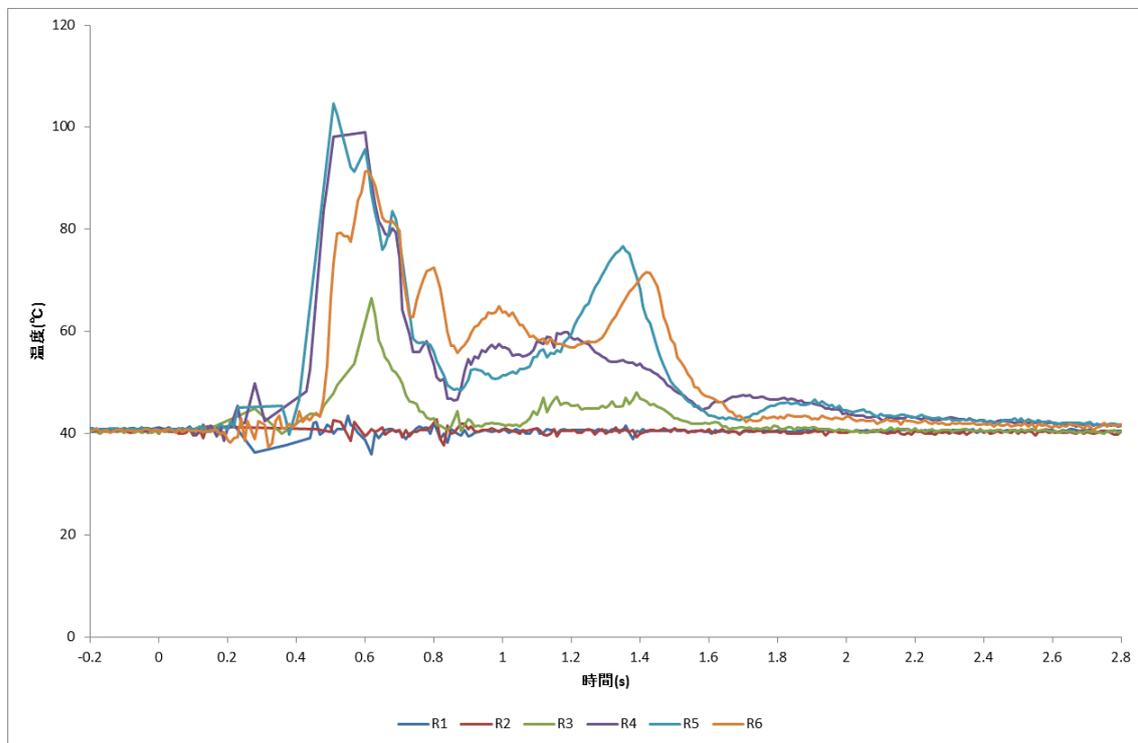


図 3.1-293 光ファイバによる液相温度（スぺーサ無し，ケース C，第 4 段 WMS 部 / T3 ライン）

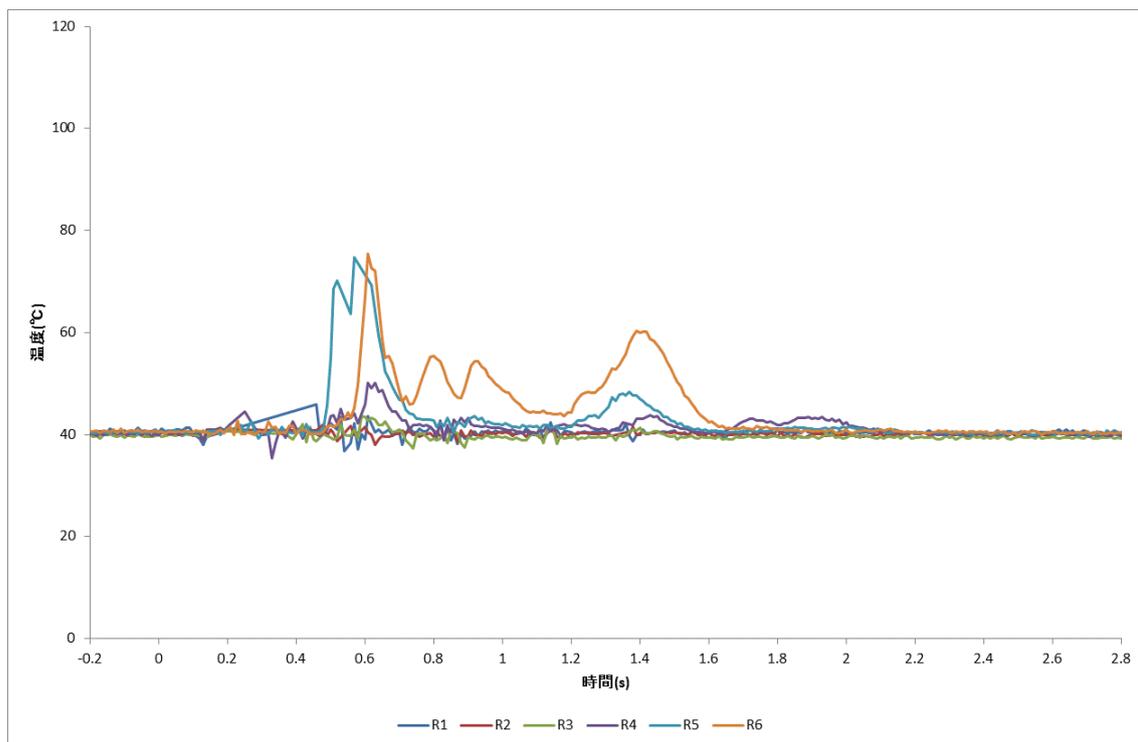


図 3.1-294 光ファイバによる液相温度（スペーサ無し，ケース C，第 4 段 WMS 部 / T2 ライン）

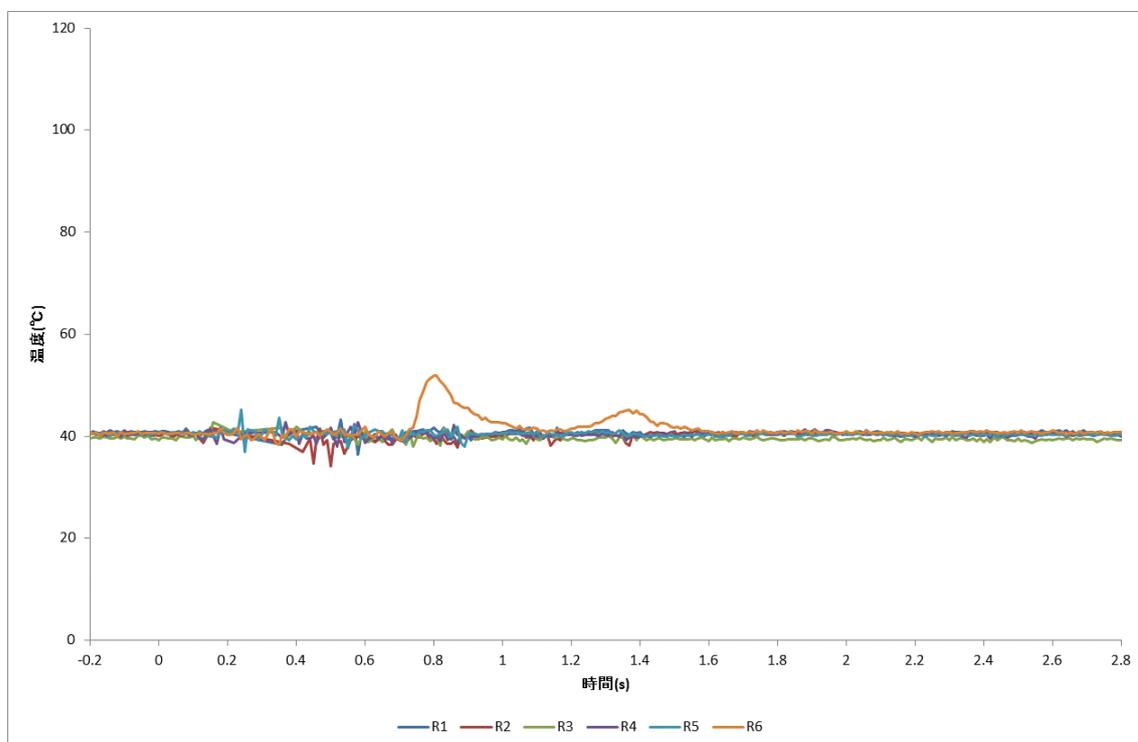


図 3.1-295 光ファイバによる液相温度（スペーサ無し，ケース C，第 4 段 WMS 部 / T1 ライン）

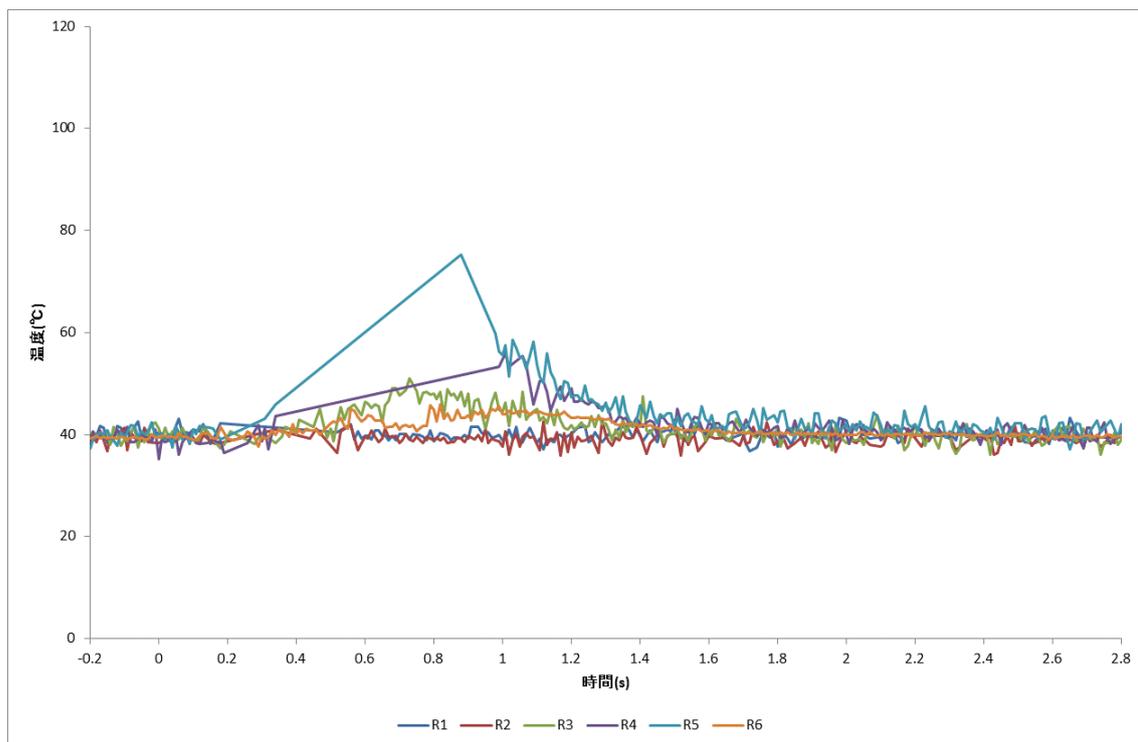


図 3.1-296 光ファイバによる液相温度（スパーサ無し，ケース D，第 4 段 WMS 部 / T6 ライン）

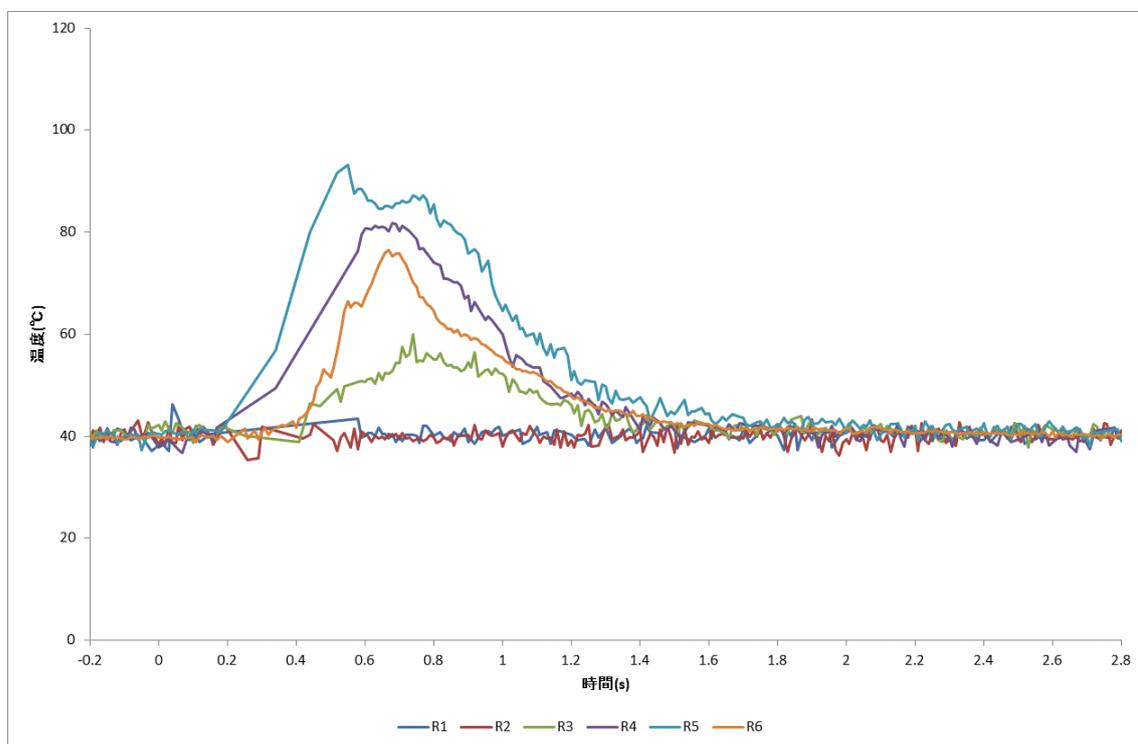


図 3.1-297 光ファイバによる液相温度（スパーサ無し，ケース D，第 4 段 WMS 部 / T5 ライン）

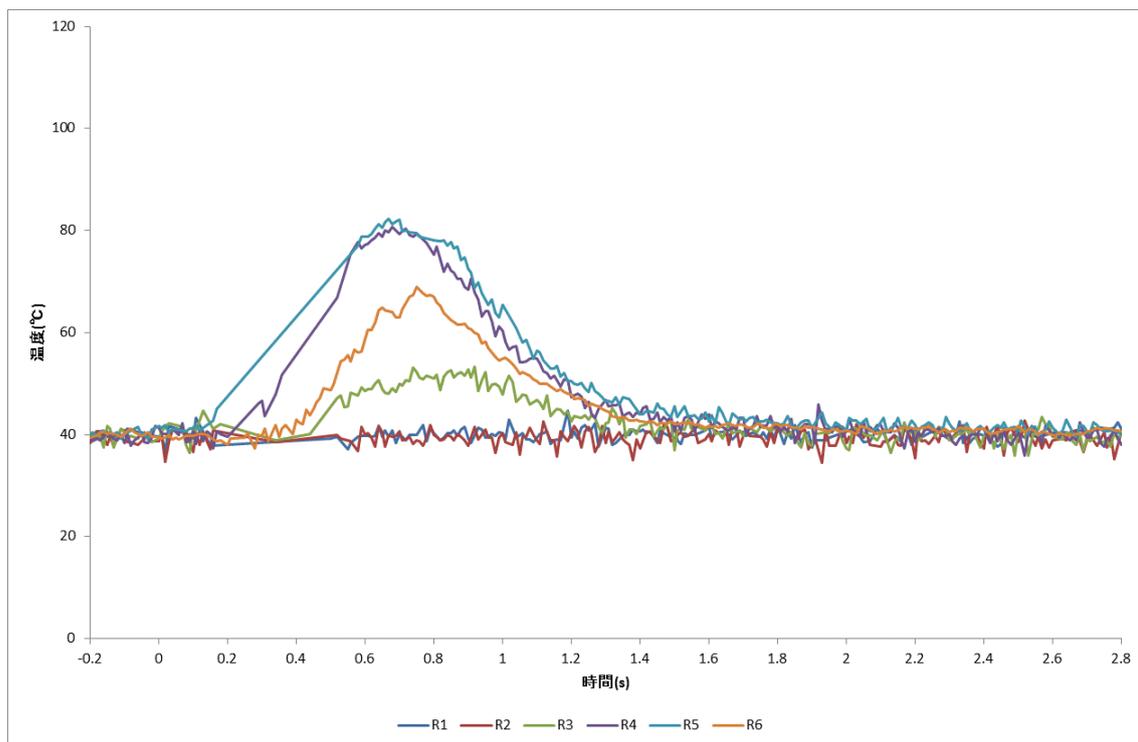


図 3.1-298 光ファイバによる液相温度（スペーサ無し，ケース D，第 4 段 WMS 部 / T4 ライン）

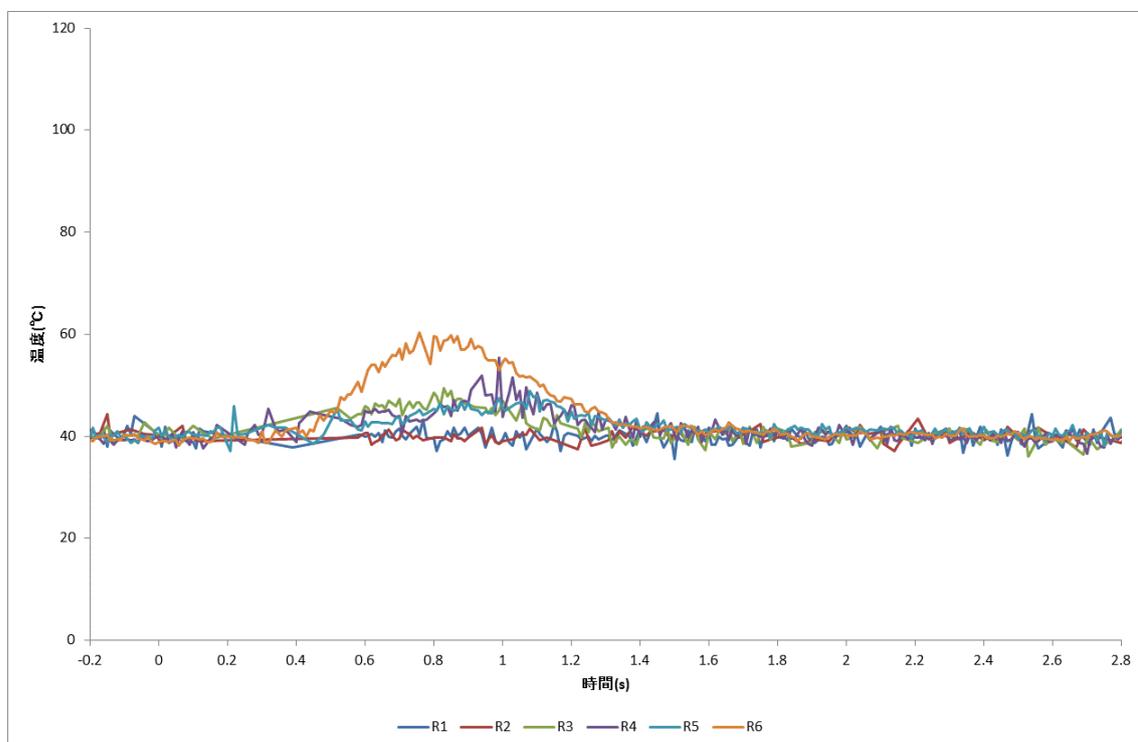


図 3.1-299 光ファイバによる液相温度（スペーサ無し，ケース D，第 4 段 WMS 部 / T3 ライン）

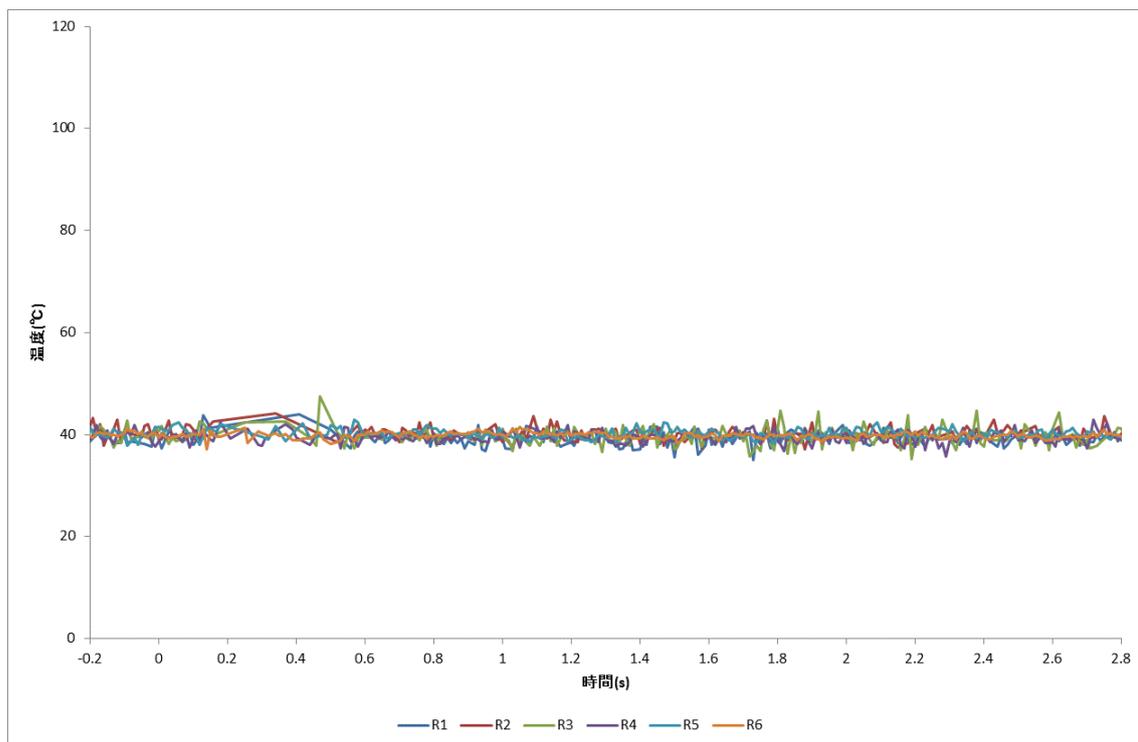


図 3.1-300 光ファイバによる液相温度（スペーサ無し，ケース D，第 4 段 WMS 部 / T2 ライン）

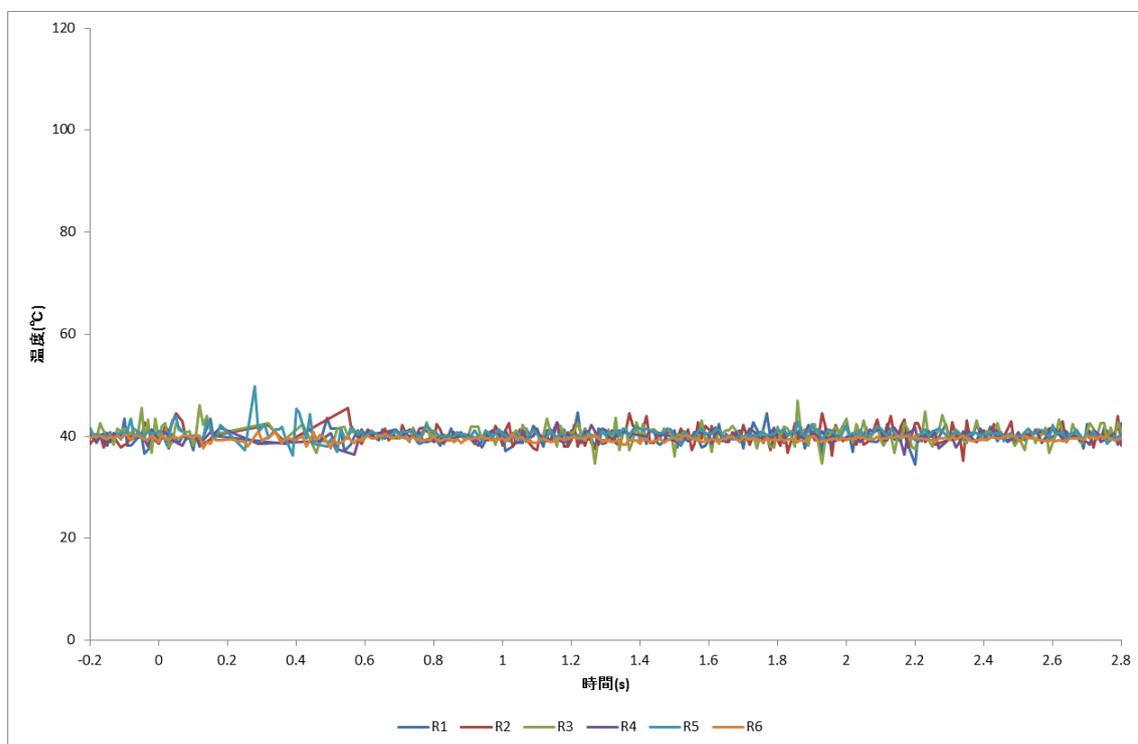


図 3.1-301 光ファイバによる液相温度（スペーサ無し，ケース D，第 4 段 WMS 部 / T1 ライン）

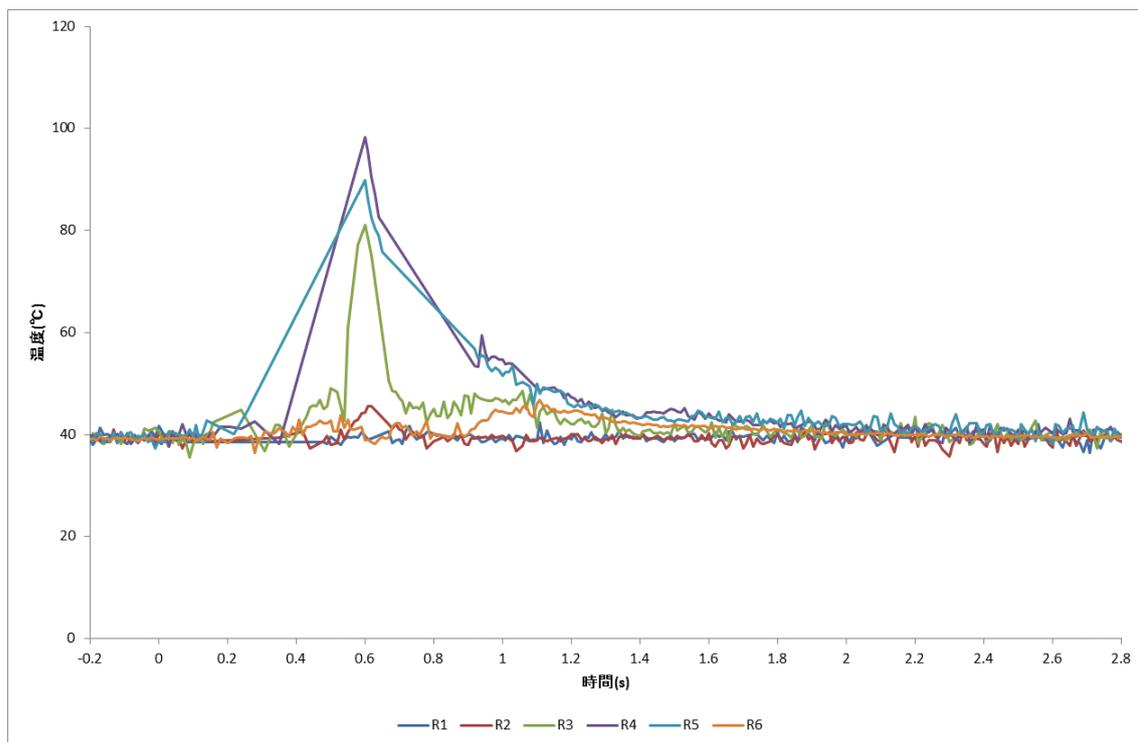


図 3.1-302 光ファイバによる液相温度（スペーサ無し，ケース E，第 4 段 WMS 部 / T6 ライン）

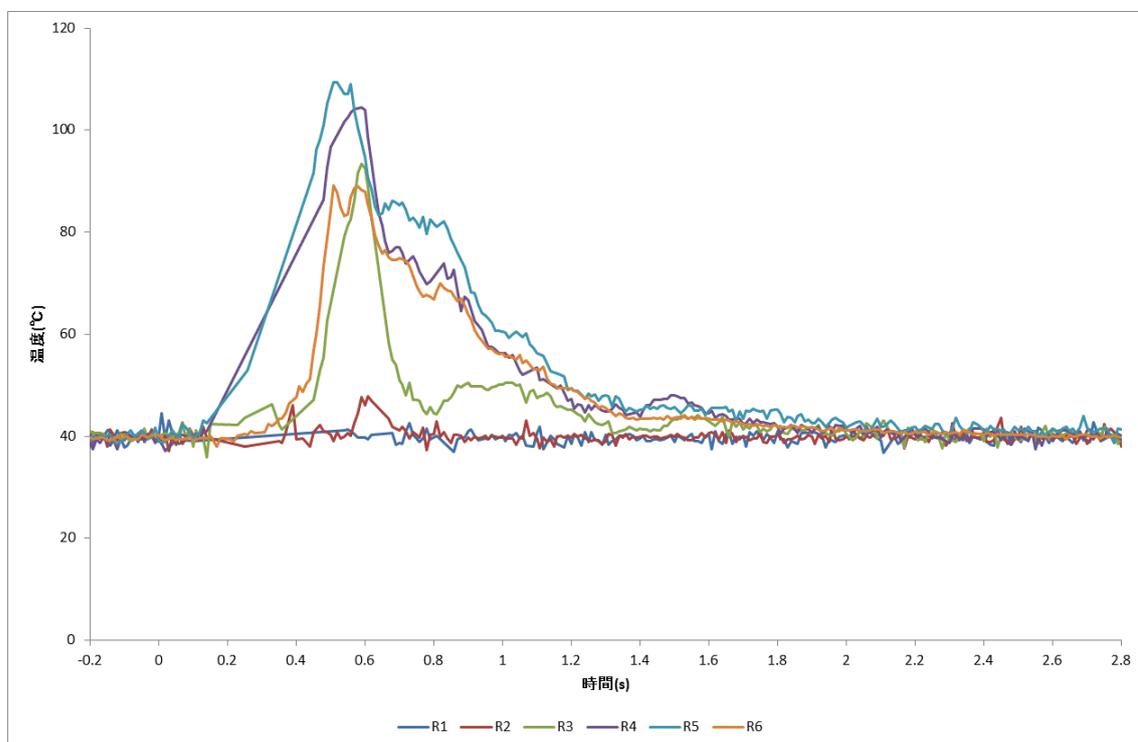


図 3.1-303 光ファイバによる液相温度（スペーサ無し，ケース E，第 4 段 WMS 部 / T5 ライン）

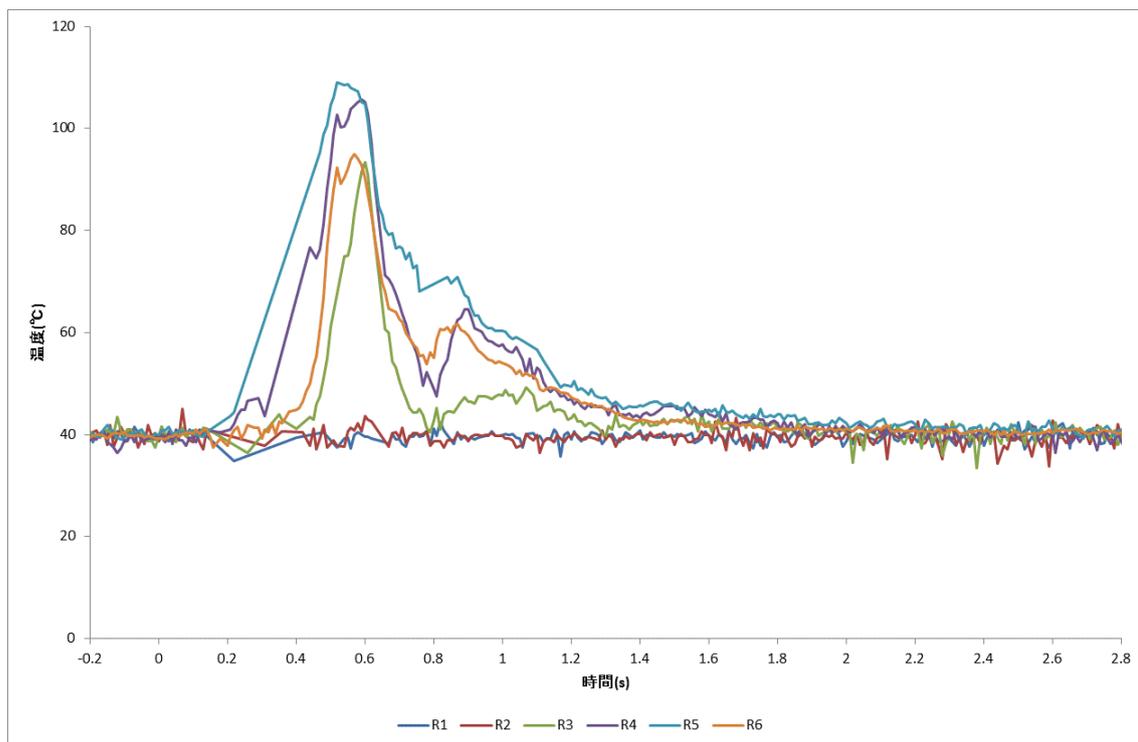


図 3.1-304 光ファイバによる液相温度（スペーサ無し，ケース E，第 4 段 WMS 部 / T4 ライン）

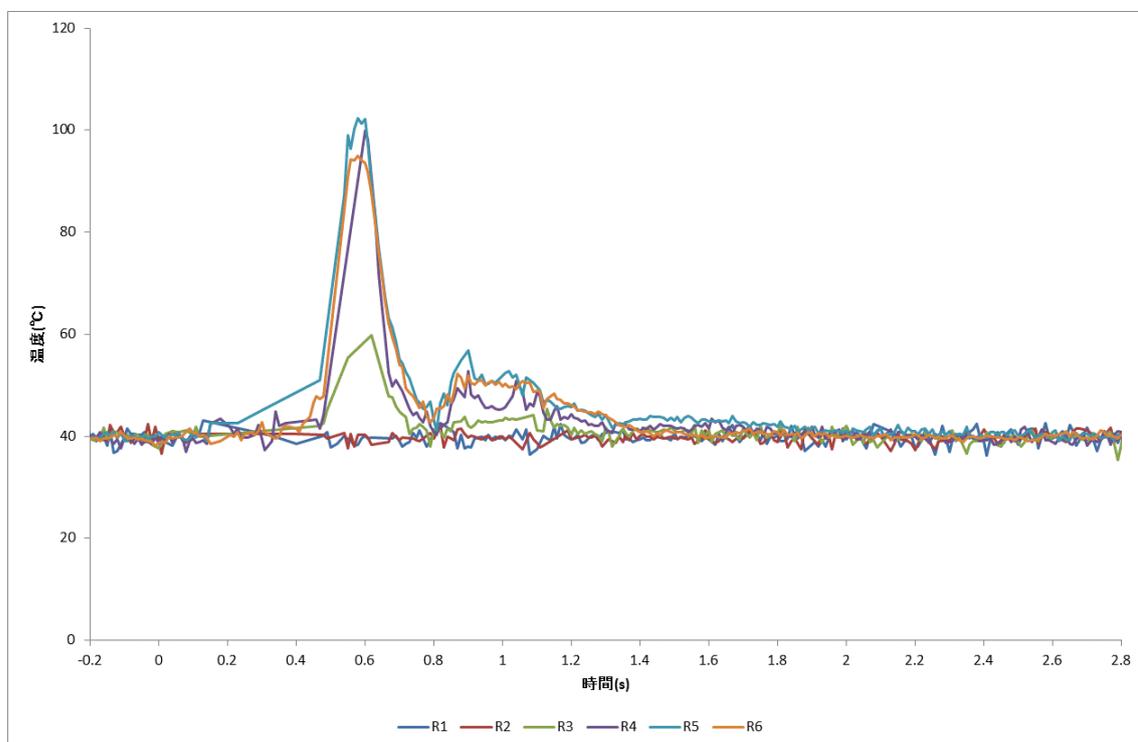


図 3.1-305 光ファイバによる液相温度（スペーサ無し，ケース E，第 4 段 WMS 部 / T3 ライン）

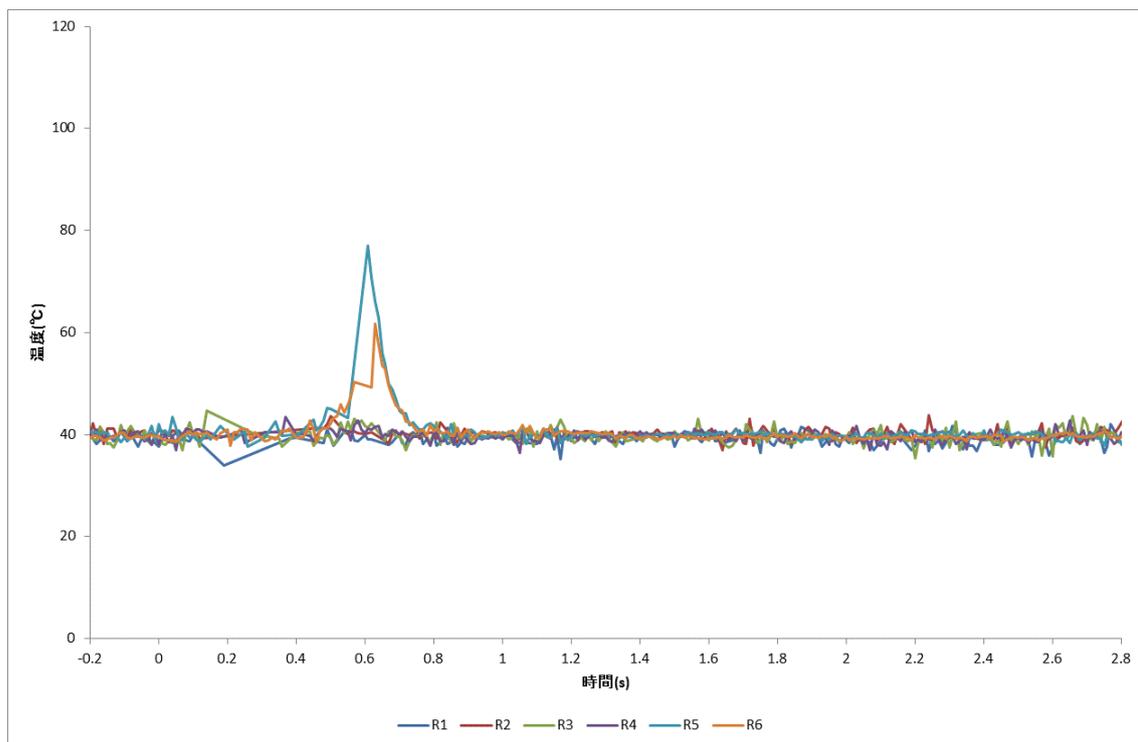


図 3.1-306 光ファイバによる液相温度（スペーサ無し，ケース E，第 4 段 WMS 部 / T2 ライン）

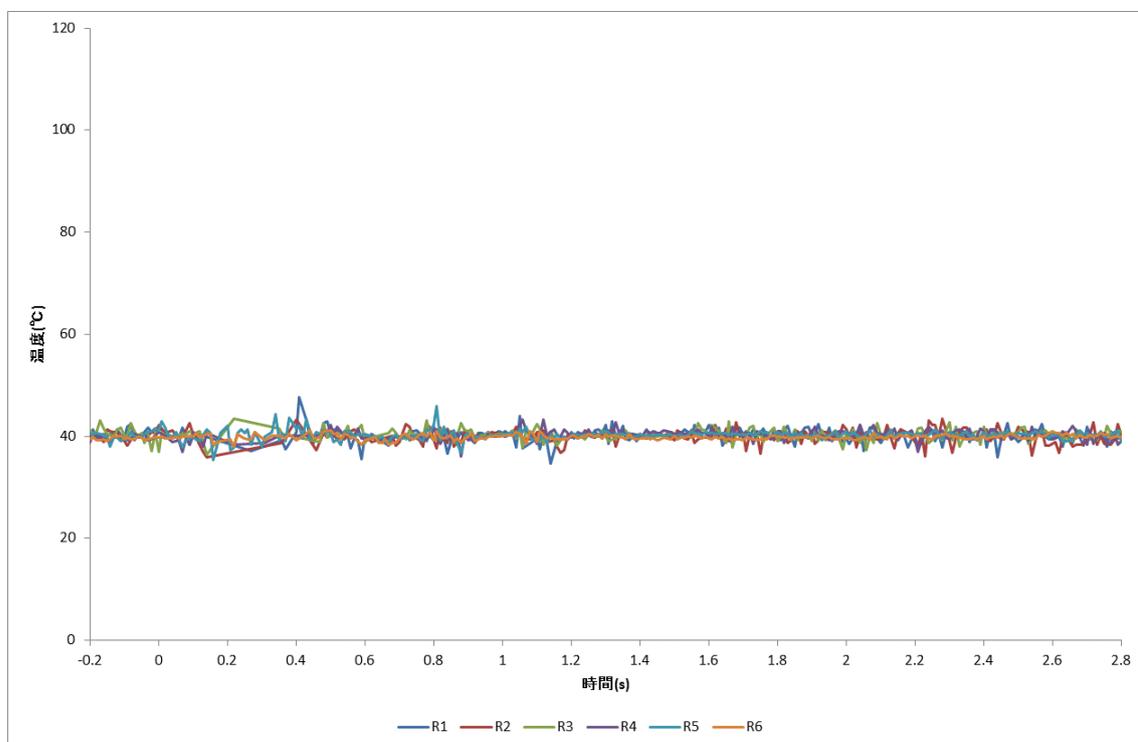


図 3.1-307 光ファイバによる液相温度（スペーサ無し，ケース E，第 4 段 WMS 部 / T1 ライン）

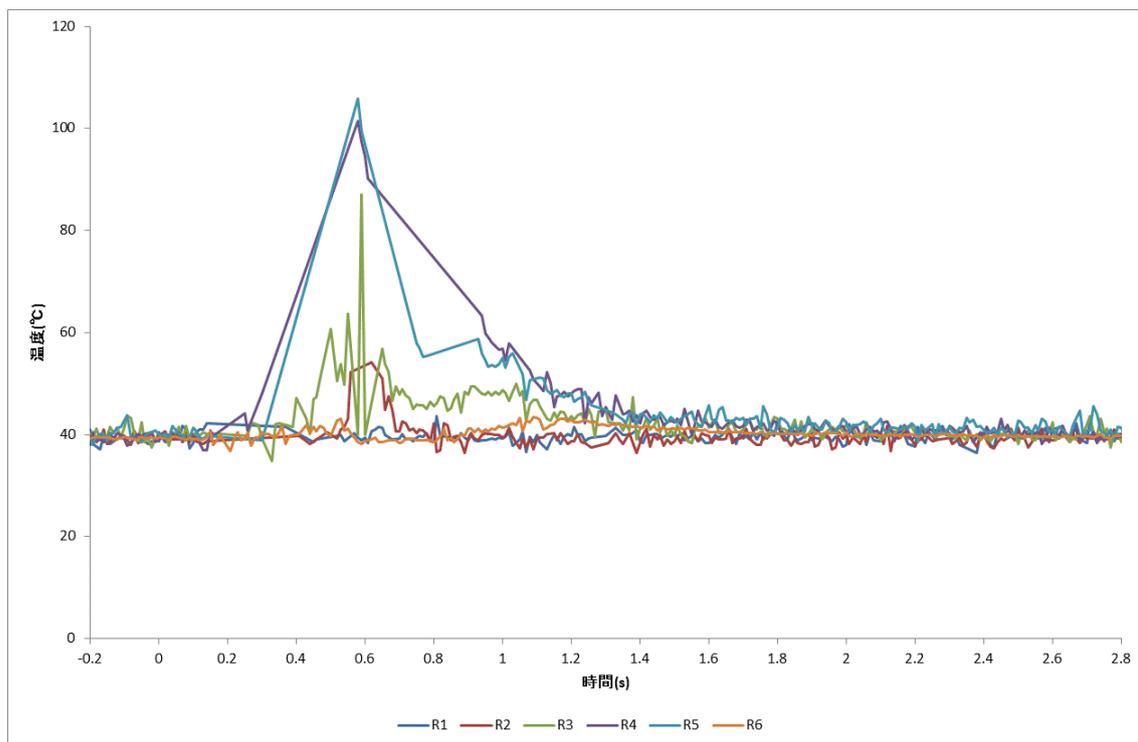


図 3.1-308 光ファイバによる液相温度（スペーサ無し，ケース F，第 4 段 WMS 部 / T6 ライン）

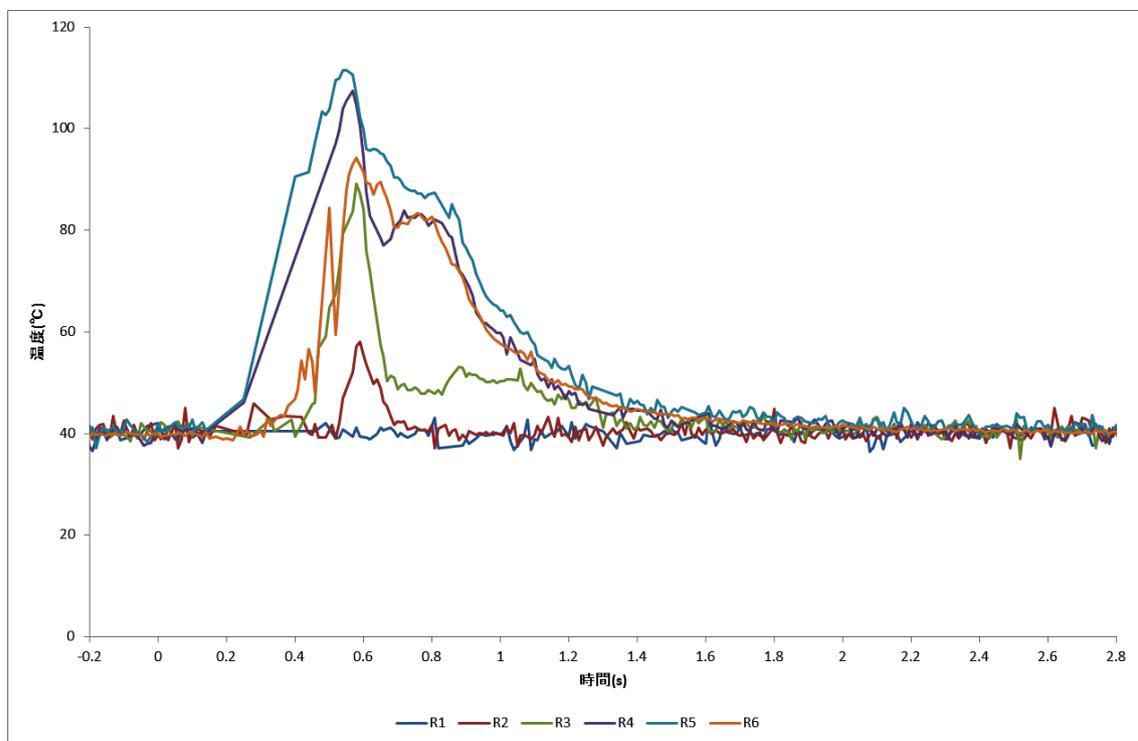


図 3.1-309 光ファイバによる液相温度（スペーサ無し，ケース F，第 4 段 WMS 部 / T5 ライン）

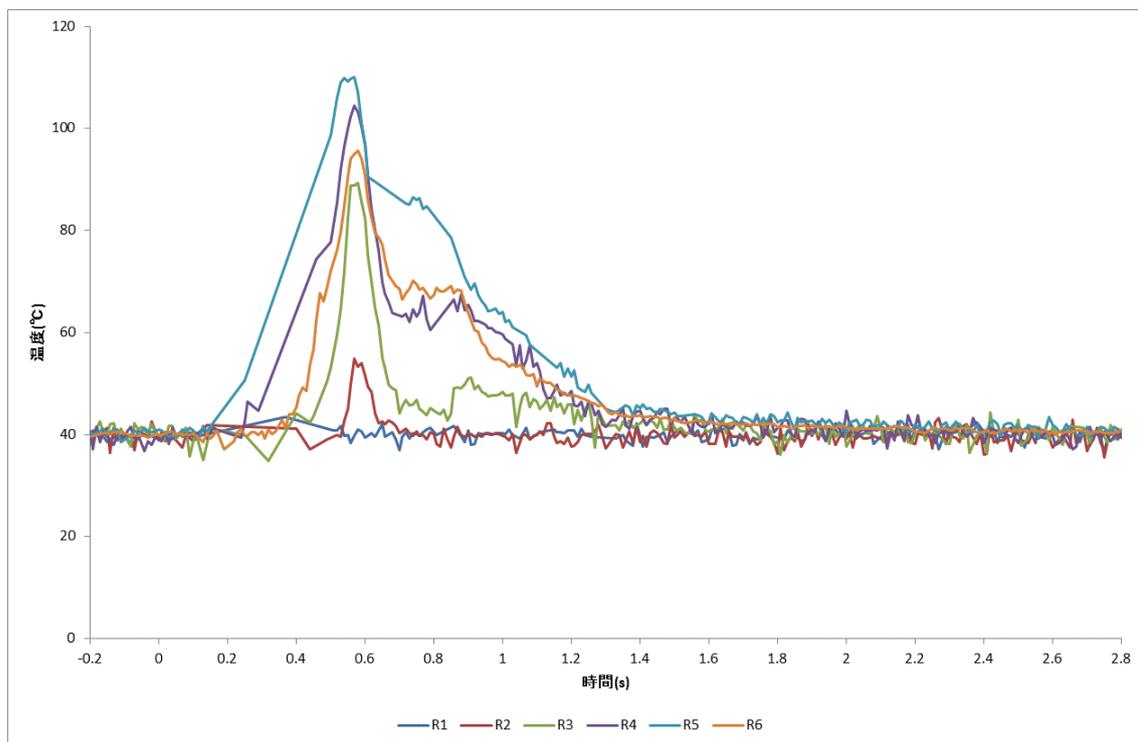


図 3.1-310 光ファイバによる液相温度（スペーサ無し，ケース F，第 4 段 WMS 部 / T4 ライン）

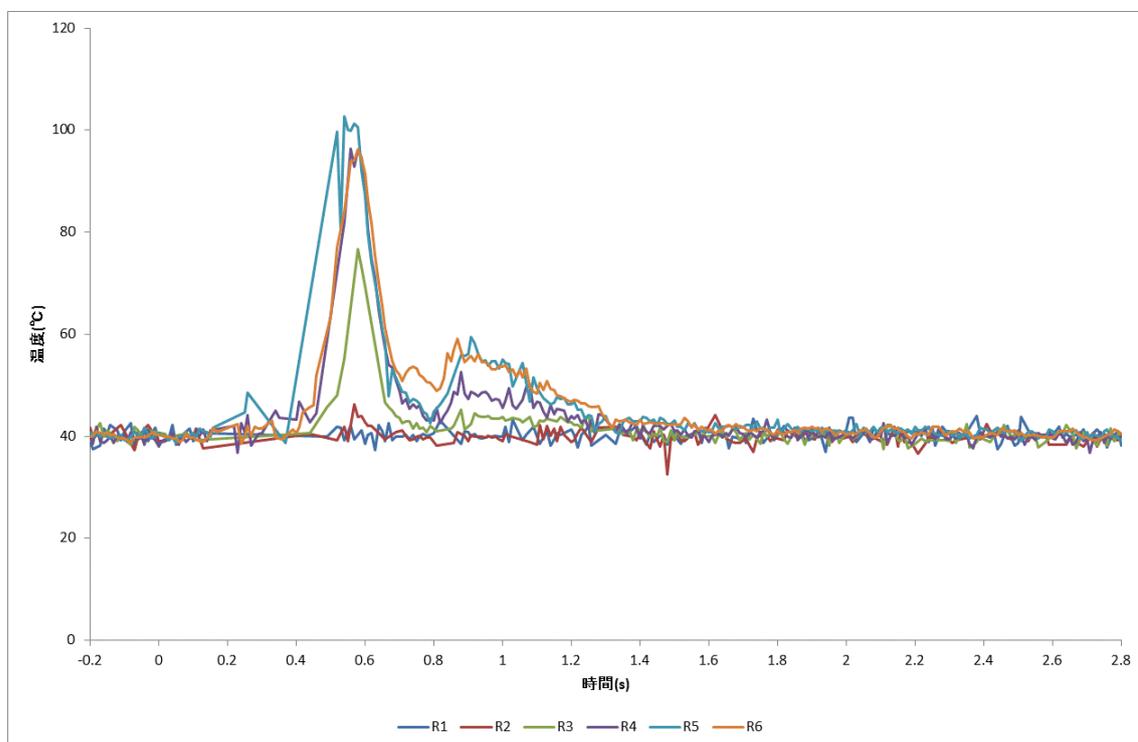


図 3.1-311 光ファイバによる液相温度（スペーサ無し，ケース F，第 4 段 WMS 部 / T3 ライン）

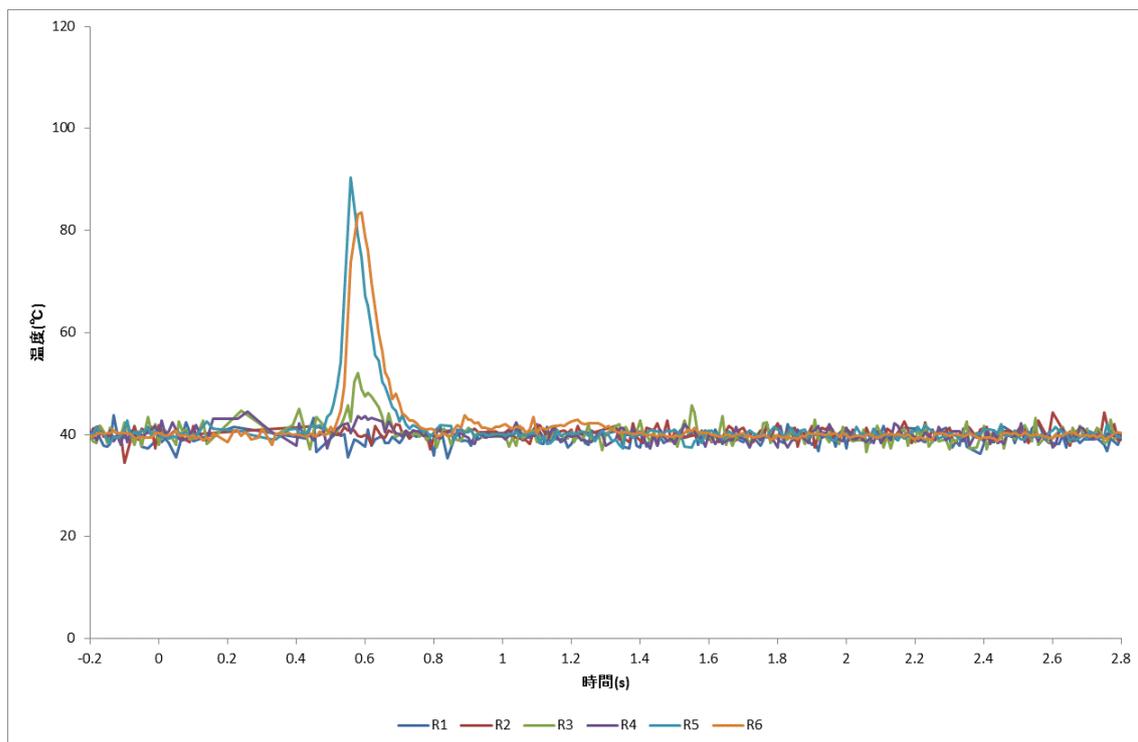


図 3.1-312 光ファイバによる液相温度（スパーサ無し，ケース F，第 4 段 WMS 部 / T2 ライン）

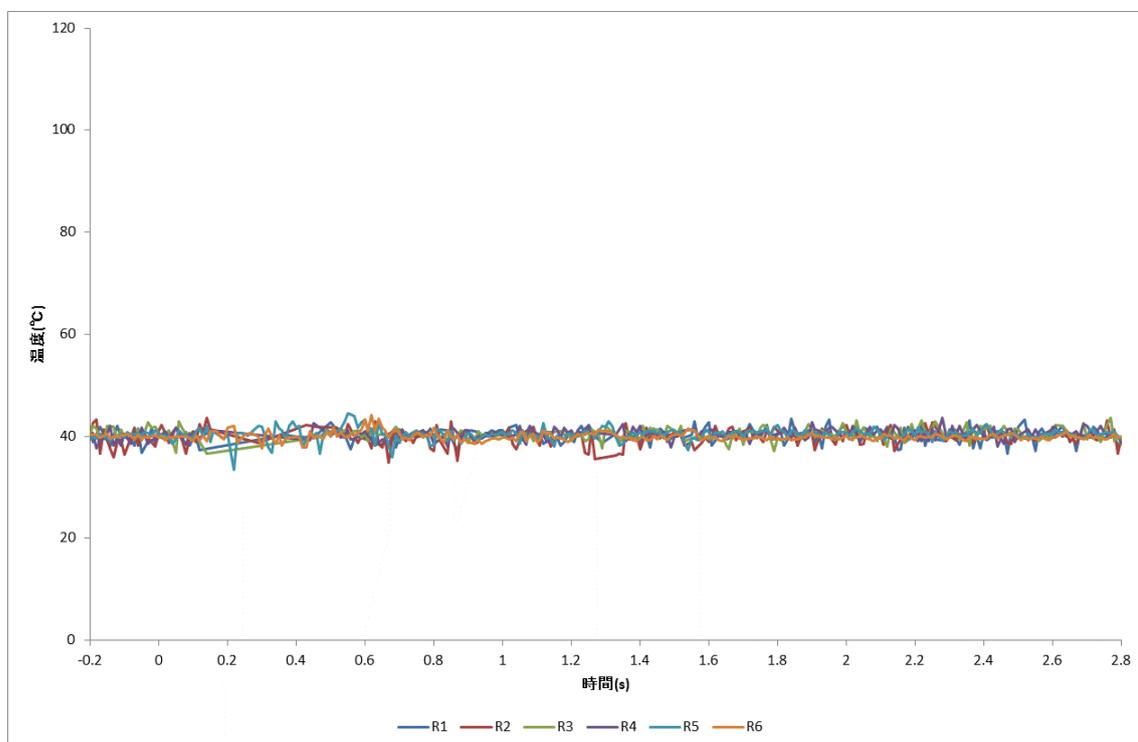


図 3.1-313 光ファイバによる液相温度（スパーサ無し，ケース F，第 4 段 WMS 部 / T1 ライン）

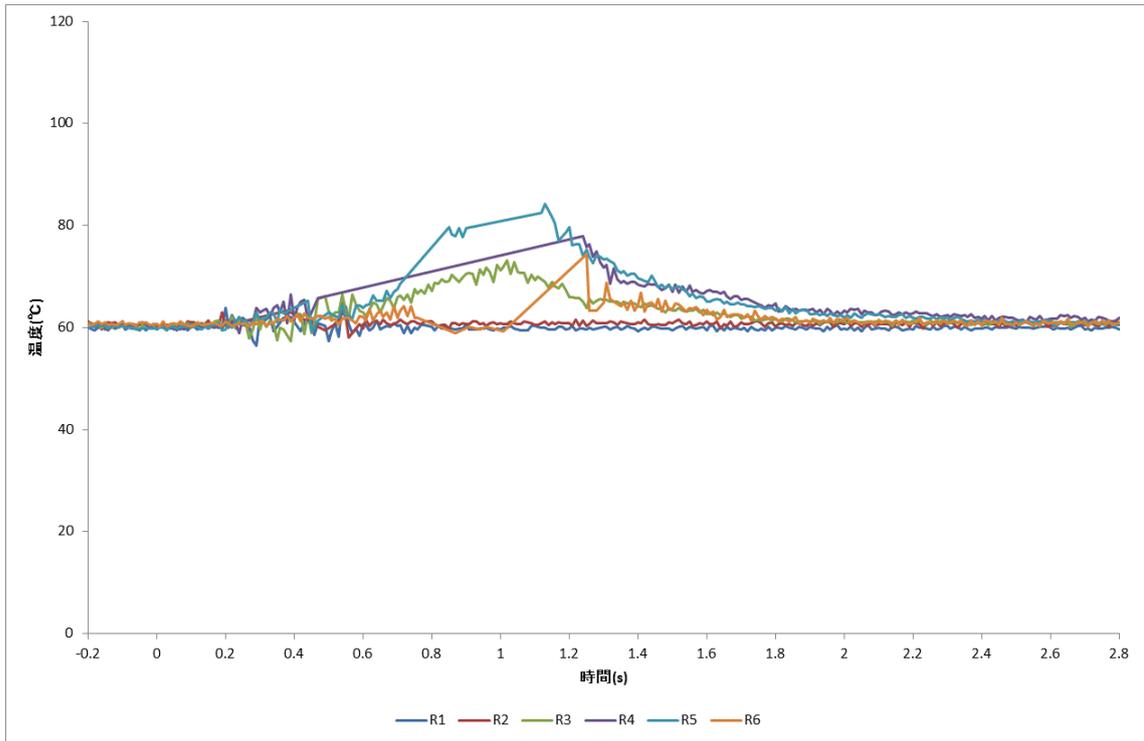


図 3.1-314 光ファイバによる液相温度（スペーサ無し，ケース G，第 4 段 WMS 部 / T6 ライン）

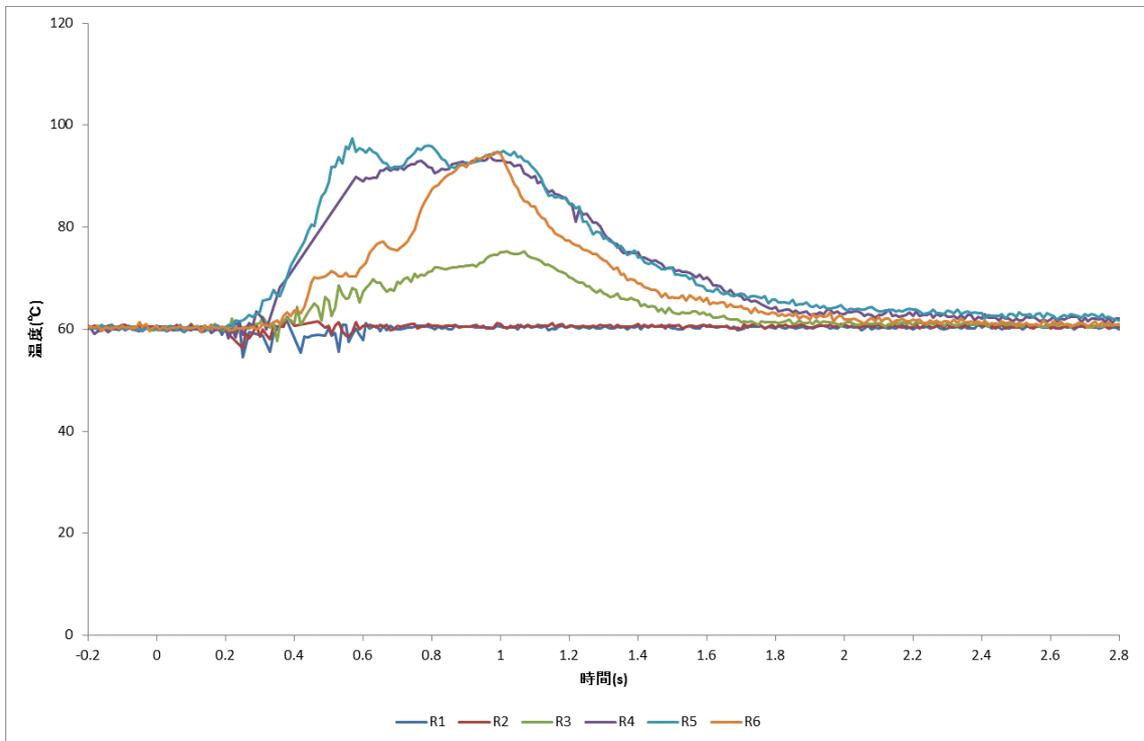


図 3.1-315 光ファイバによる液相温度（スペーサ無し，ケース G，第 4 段 WMS 部 / T5 ライン）

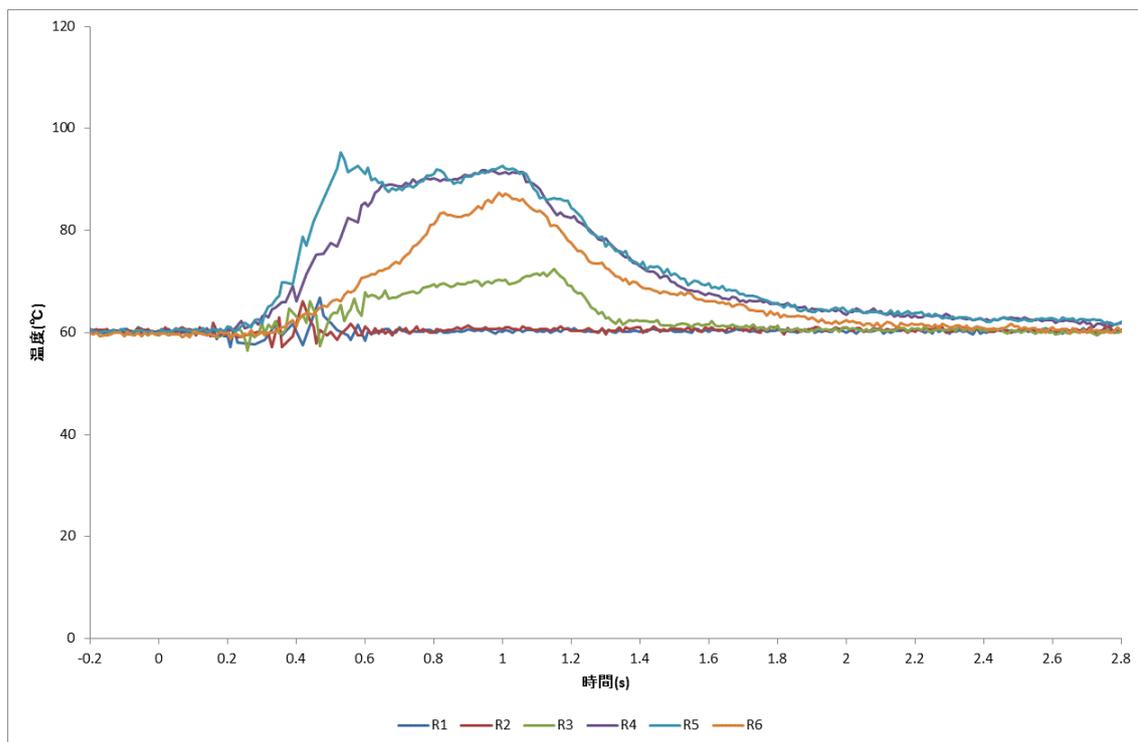


図 3.1-316 光ファイバによる液相温度（スペーサ無し，ケース G，第 4 段 WMS 部 / T4 ライン）

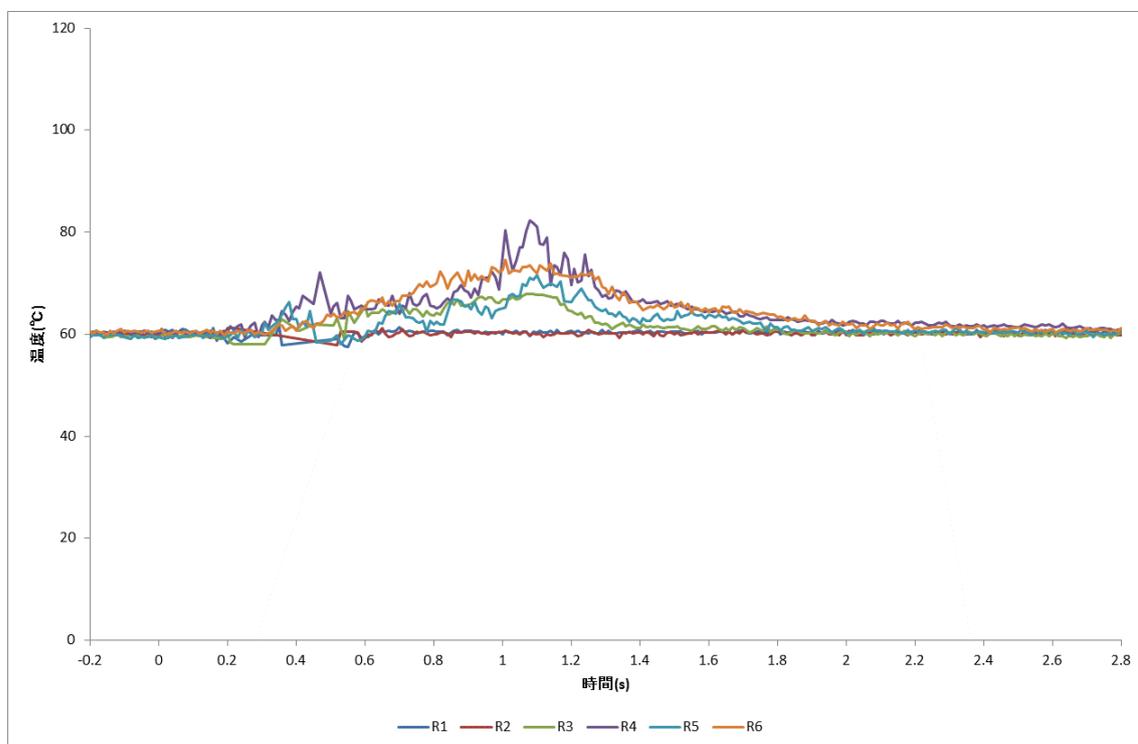


図 3.1-317 光ファイバによる液相温度（スペーサ無し，ケース G，第 4 段 WMS 部 / T3 ライン）

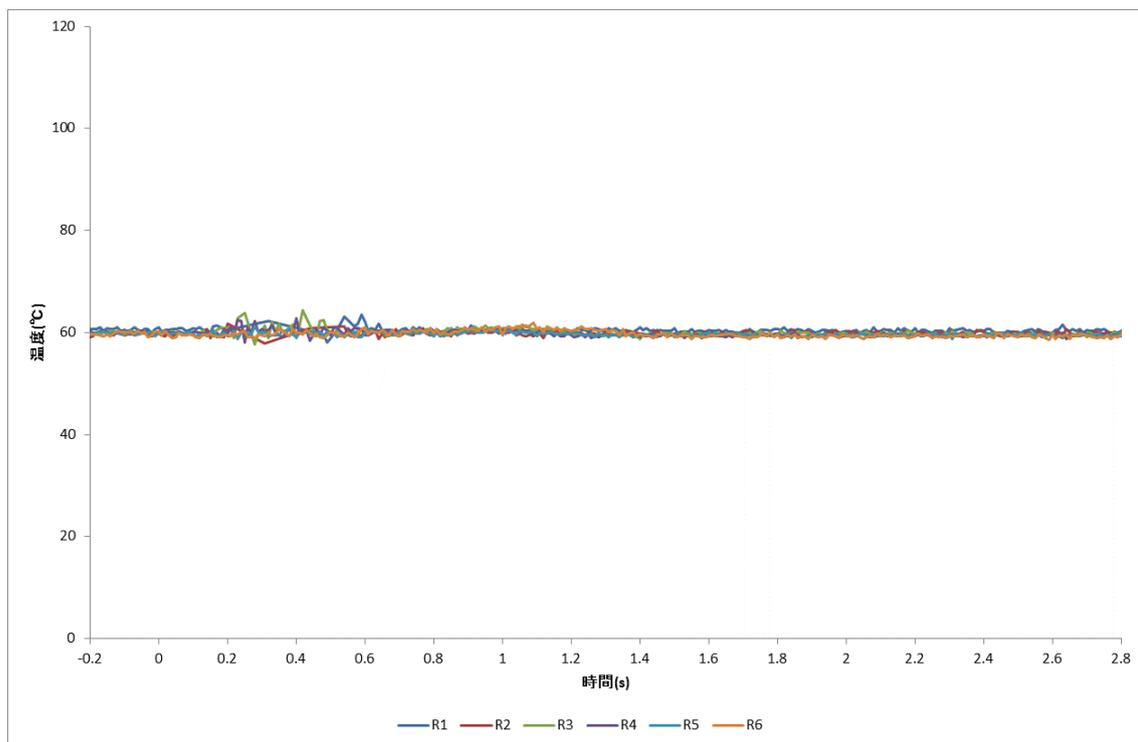


図 3.1-318 光ファイバによる液相温度（スペーサ無し，ケース G，第 4 段 WMS 部 / T2 ライン）

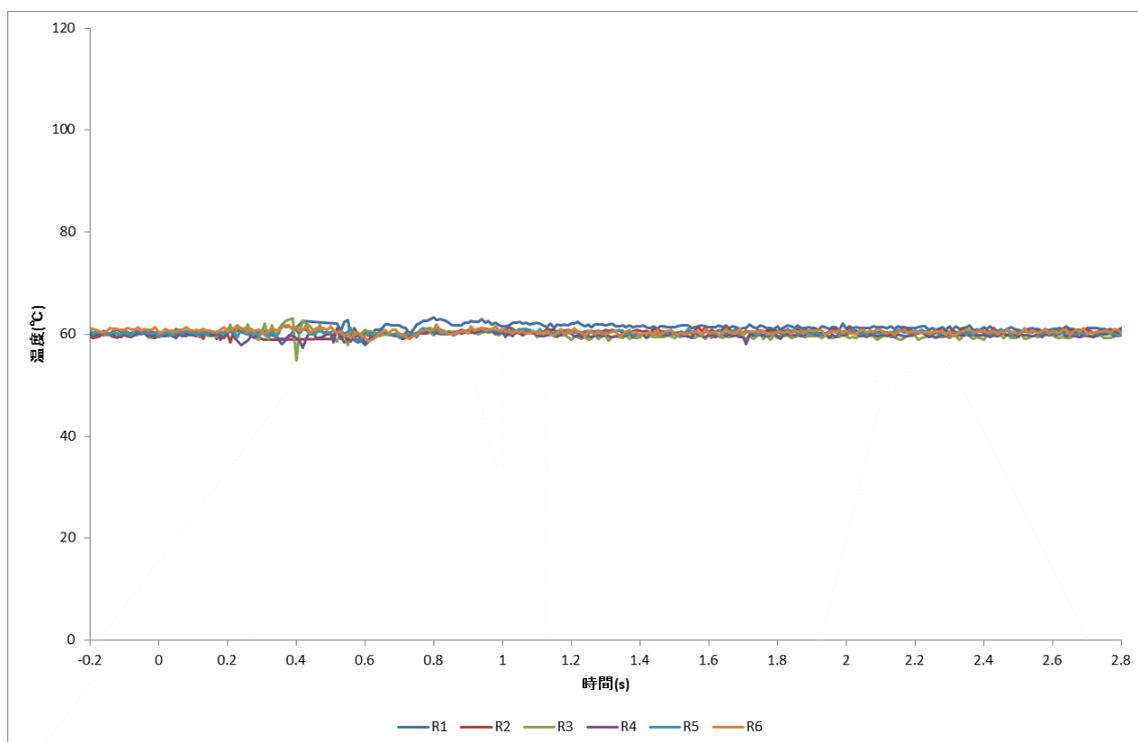


図 3.1-319 光ファイバによる液相温度（スペーサ無し，ケース G，第 4 段 WMS 部 / T1 ライン）

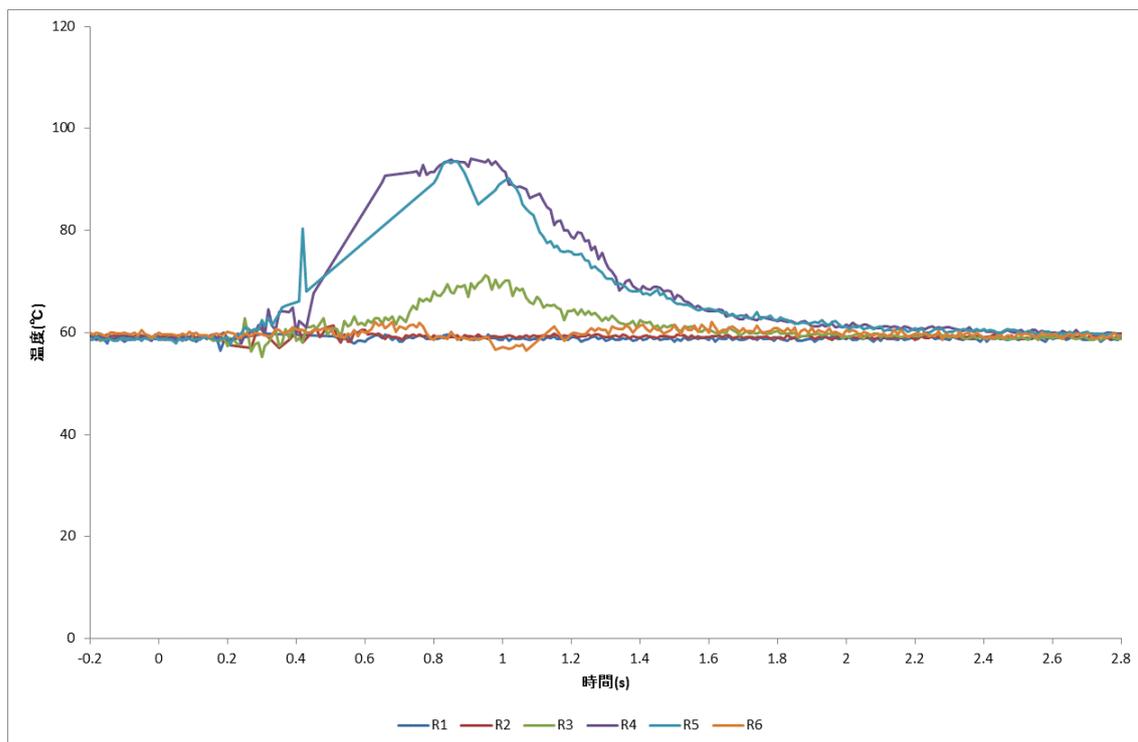


図 3.1-320 光ファイバによる液相温度（スペーサ無し，ケース H，第 4 段 WMS 部 / T6 ライン）

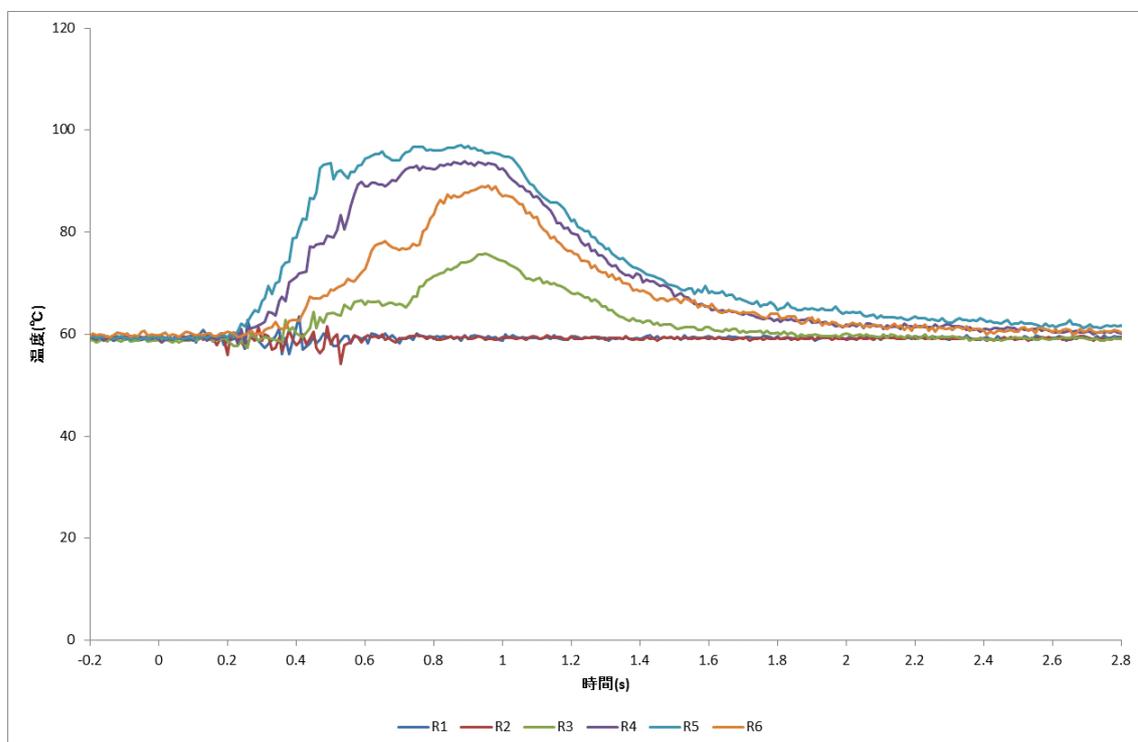


図 3.1-321 光ファイバによる液相温度（スペーサ無し，ケース H，第 4 段 WMS 部 / T5 ライン）

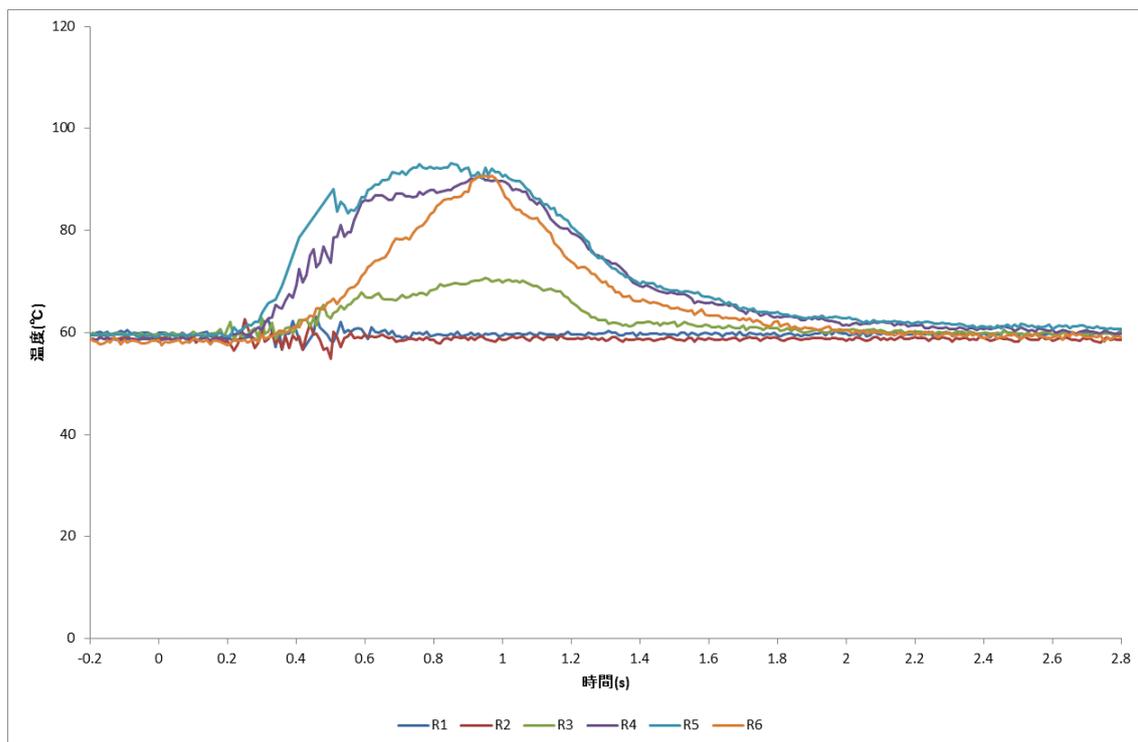


図 3.1-322 光ファイバによる液相温度（スペーサ無し，ケース H，第 4 段 WMS 部 / T4 ライン）

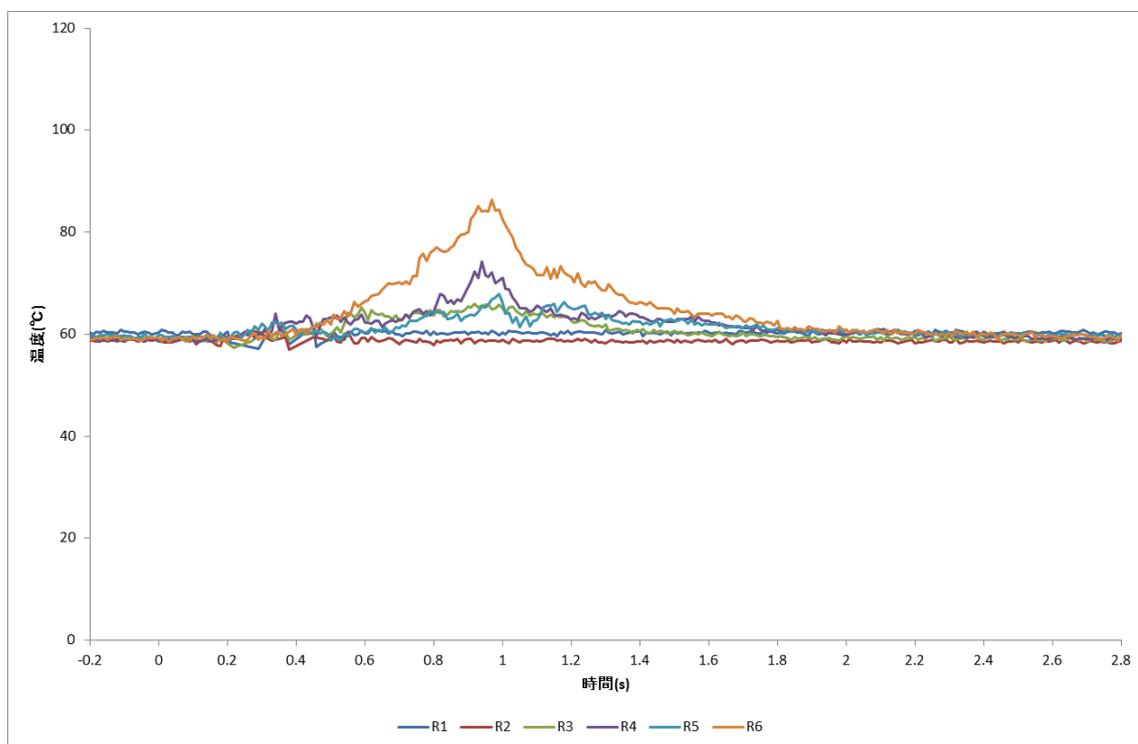


図 3.1-323 光ファイバによる液相温度（スペーサ無し，ケース H，第 4 段 WMS 部 / T3 ライン）

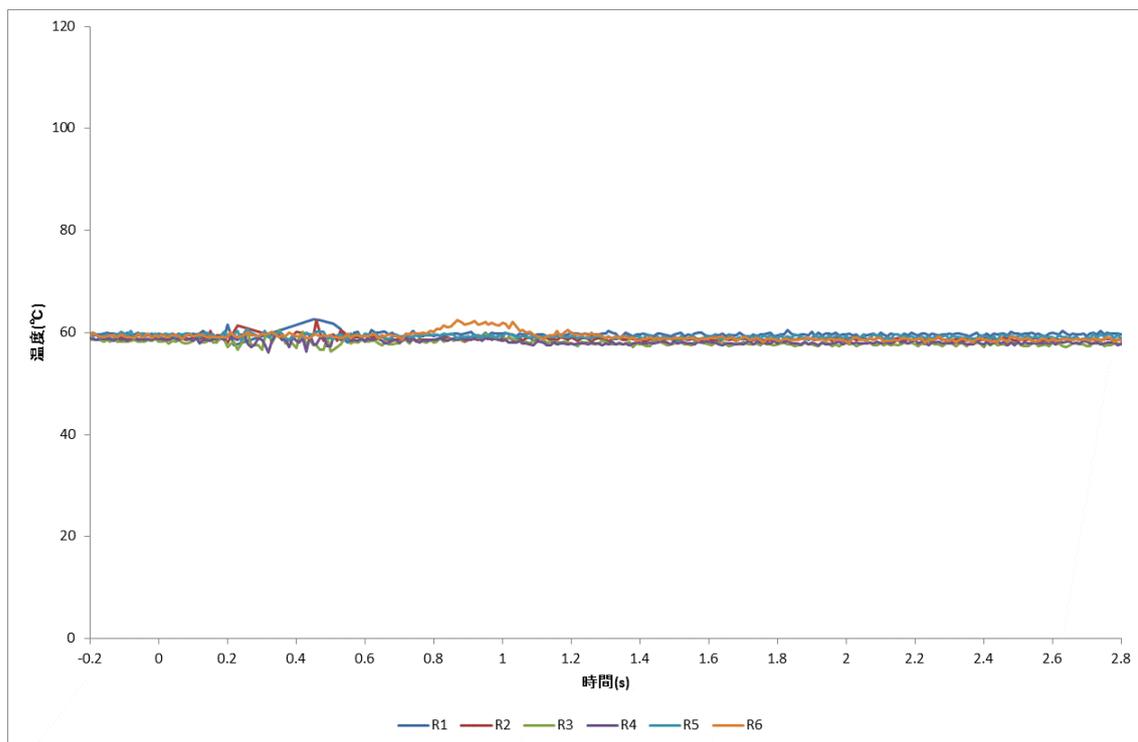


図 3.1-324 光ファイバによる液相温度（スペーサ無し，ケース H，第 4 段 WMS 部 / T2 ライン）

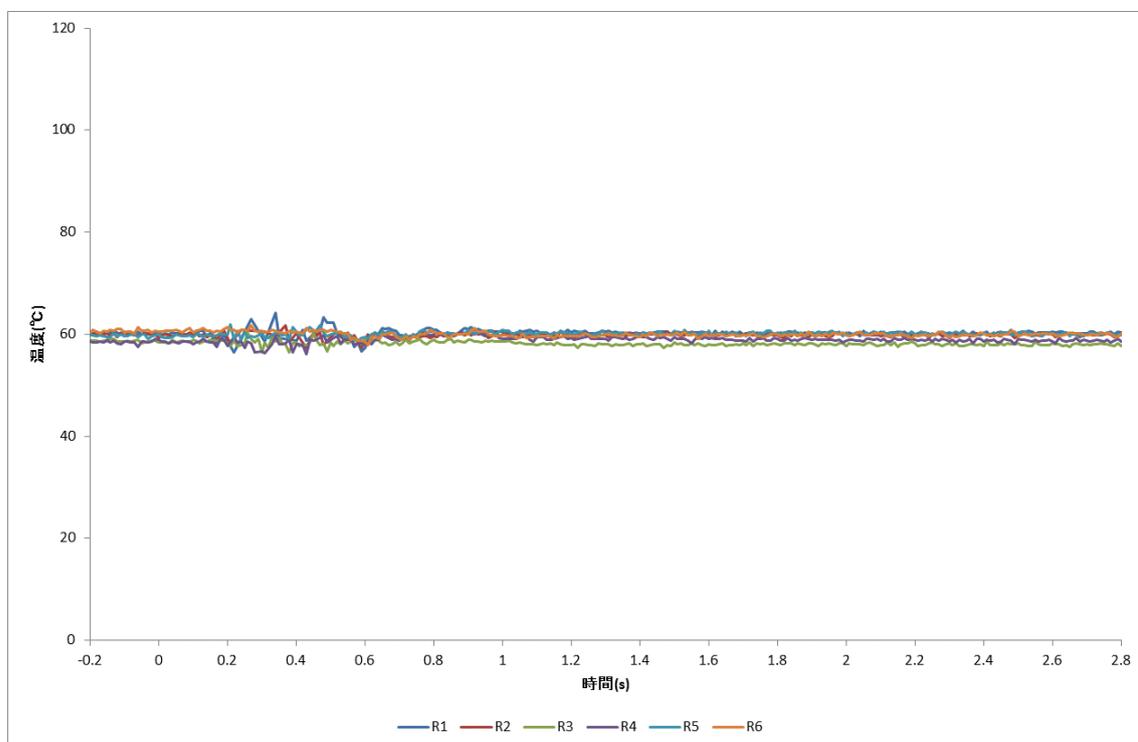


図 3.1-325 光ファイバによる液相温度（スペーサ無し，ケース H，第 4 段 WMS 部 / T1 ライン）

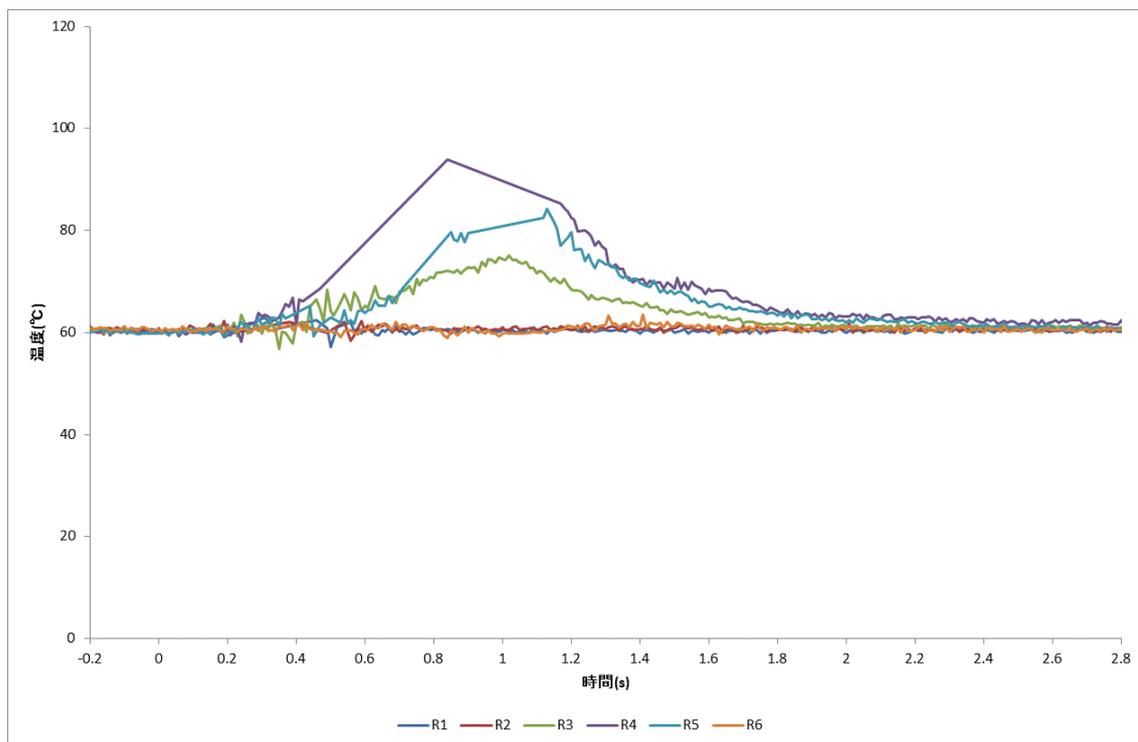


図 3.1-326 光ファイバによる液相温度（スペーサ無し，ケース I，第 4 段 WMS 部 / T6 ライン）

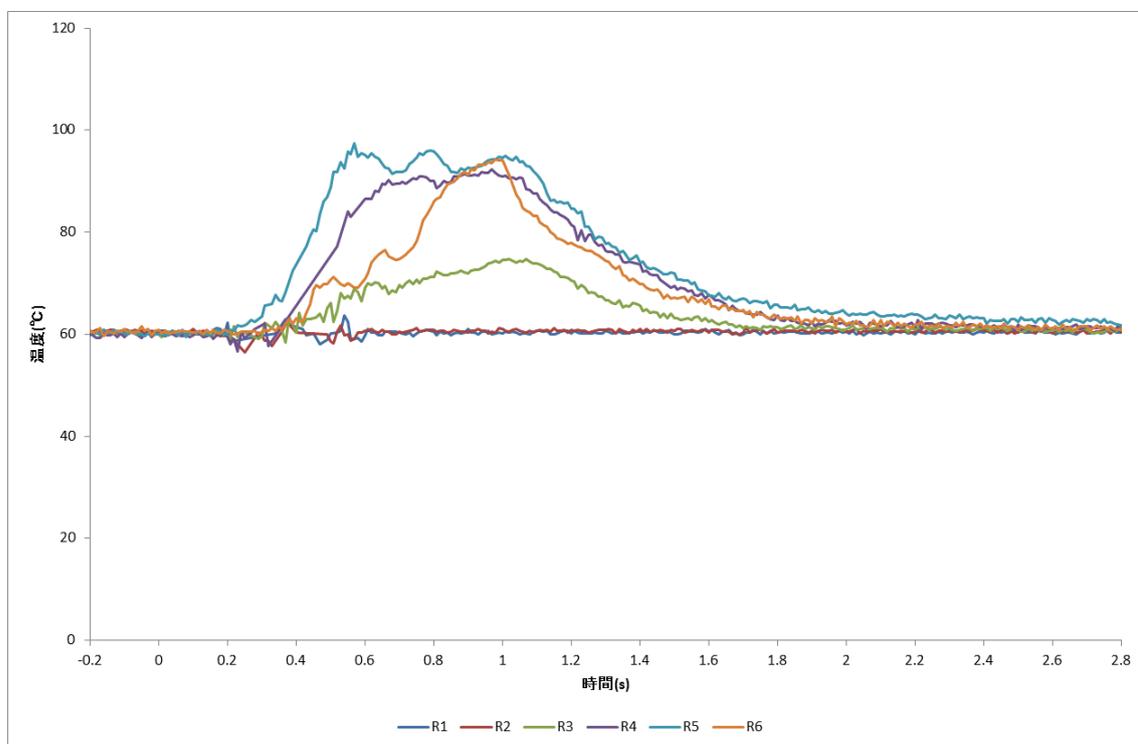


図 3.1-327 光ファイバによる液相温度（スペーサ無し，ケース I，第 4 段 WMS 部 / T5 ライン）

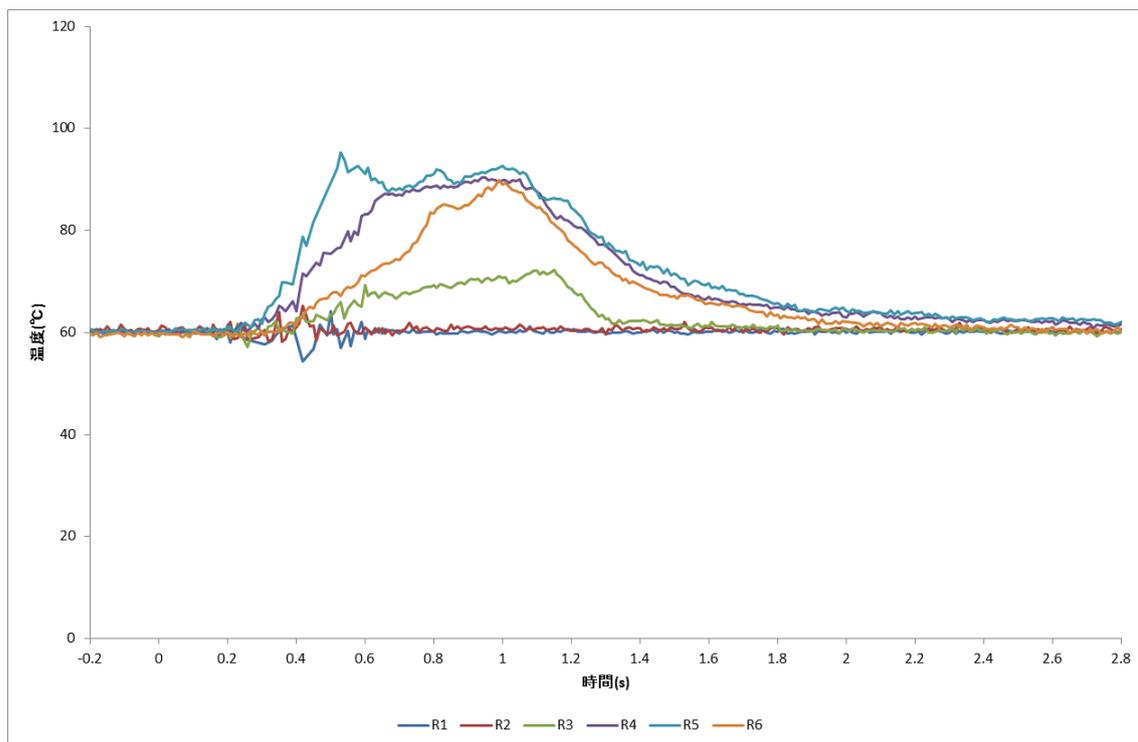


図 3.1-328 光ファイバによる液相温度（スペーサ無し，ケース I，第 4 段 WMS 部 / T4 ライン）

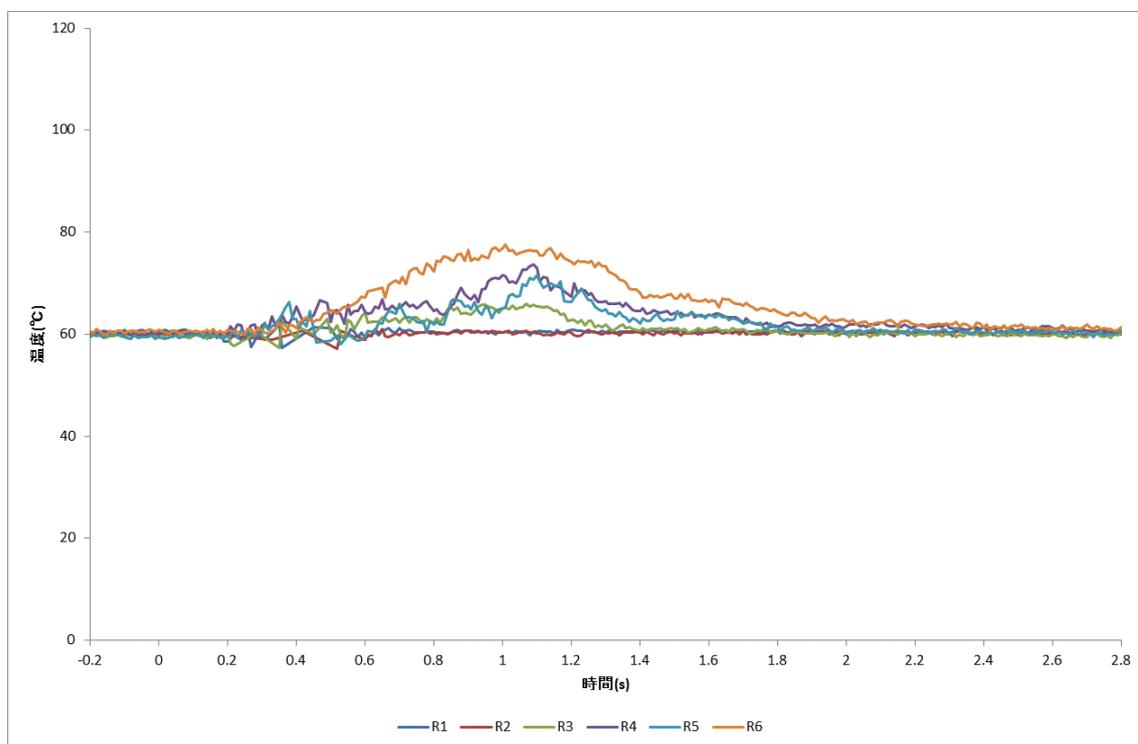


図 3.1-329 光ファイバによる液相温度（スペーサ無し，ケース I，第 4 段 WMS 部 / T3 ライン）

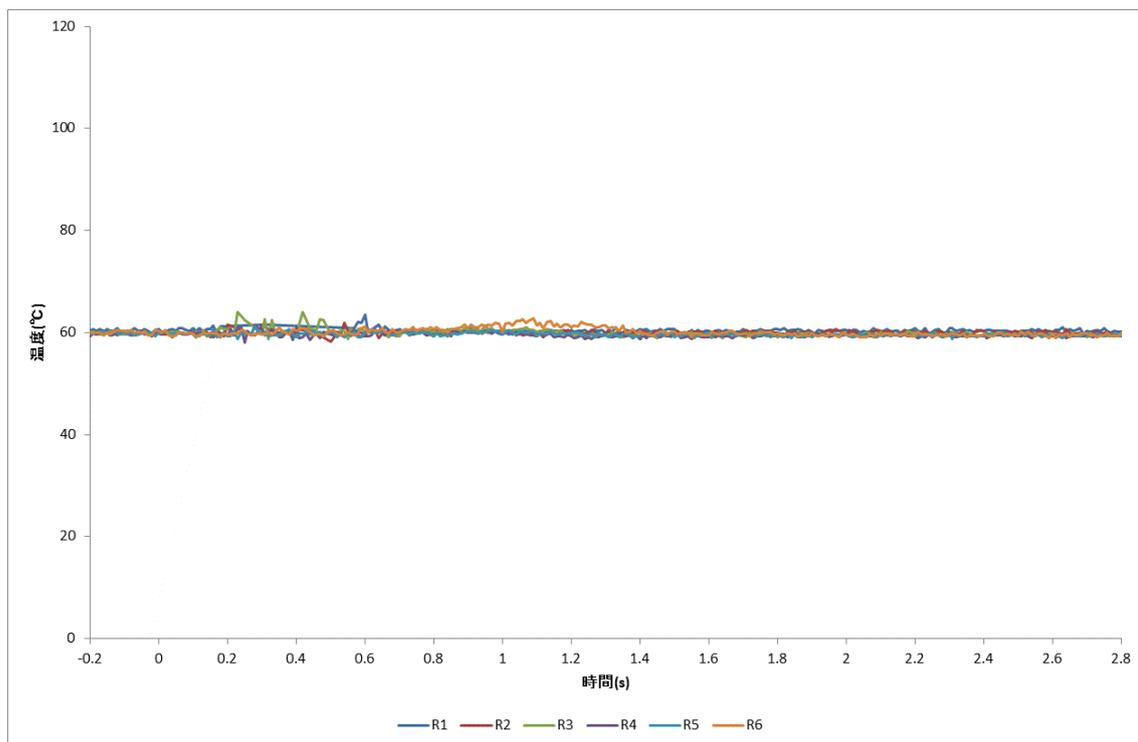


図 3.1-330 光ファイバによる液相温度（スペーサ無し，ケース I，第 4 段 WMS 部 / T2 ライン）

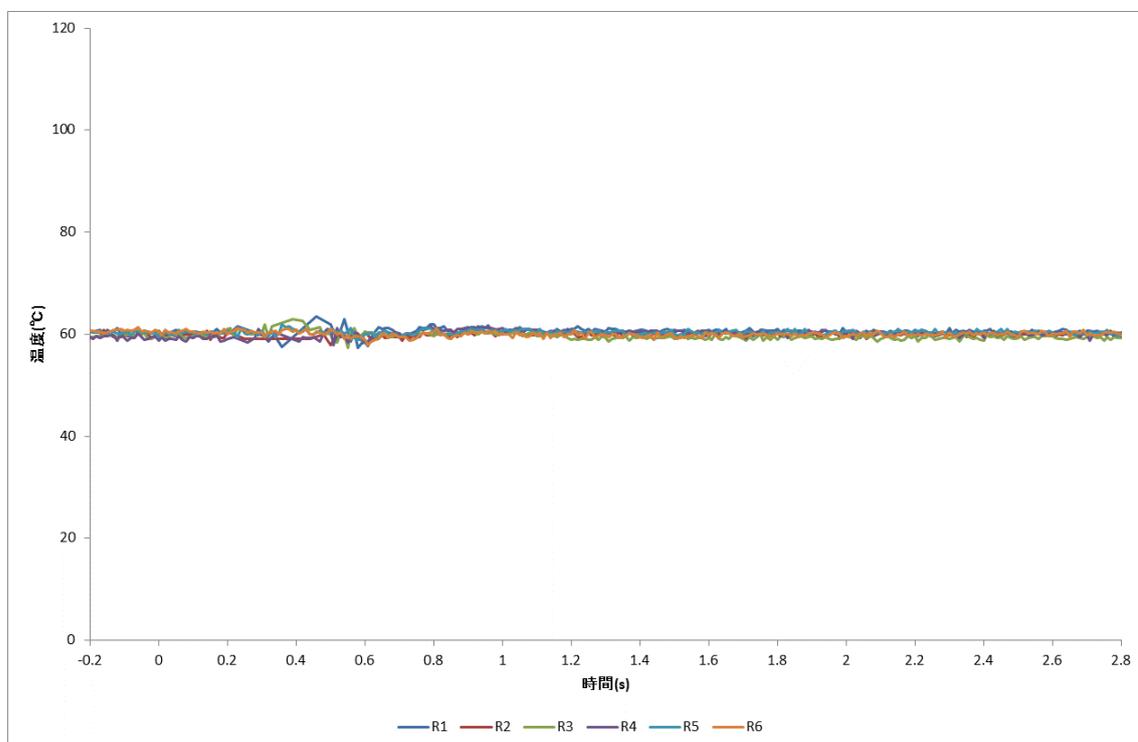


図 3.1-331 光ファイバによる液相温度（スペーサ無し，ケース I，第 4 段 WMS 部 / T1 ライン）

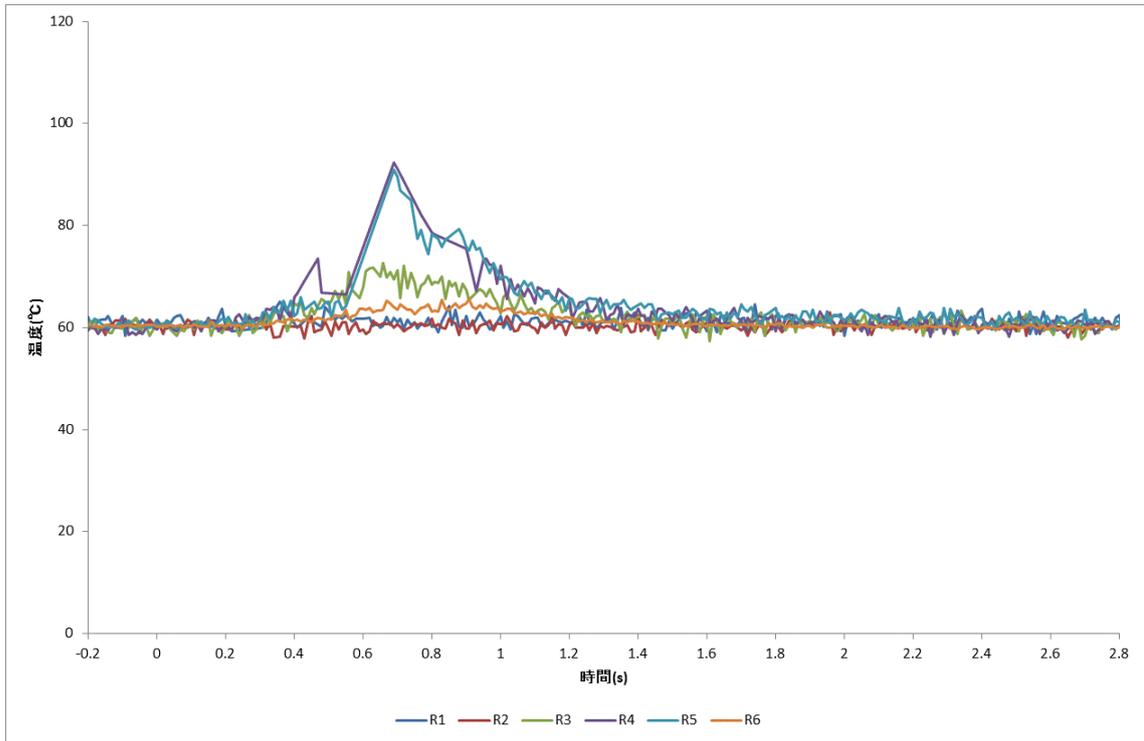


図 3.1-332 光ファイバによる液相温度（スペーサ無し，ケース J，第 4 段 WMS 部 / T6 ライン）

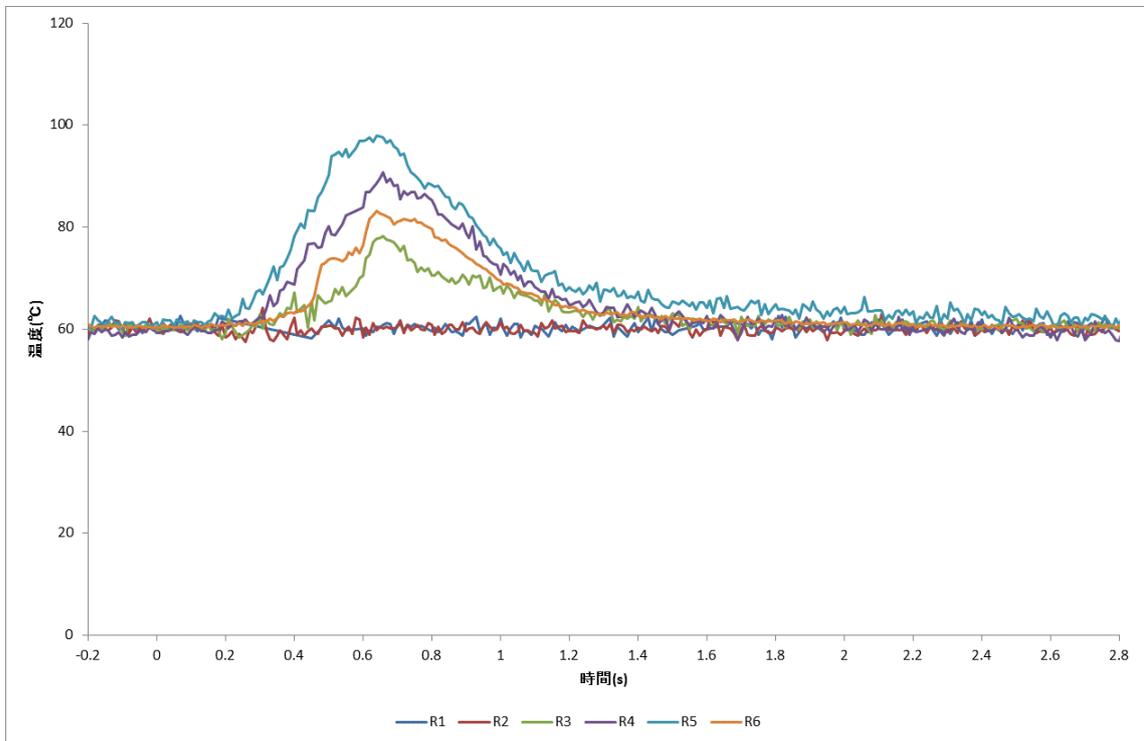


図 3.1-333 光ファイバによる液相温度（スペーサ無し，ケース J，第 4 段 WMS 部 / T5 ライン）

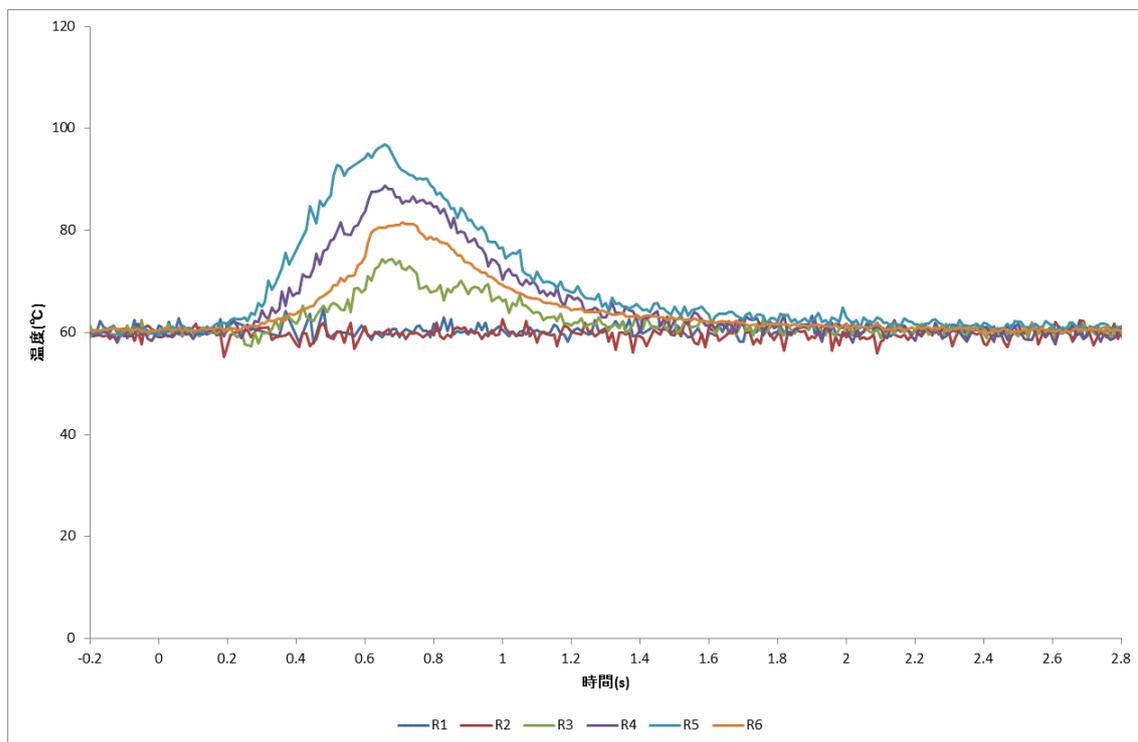


図 3.1-334 光ファイバによる液相温度（スペーサ無し，ケース J，第 4 段 WMS 部 / T4 ライン）

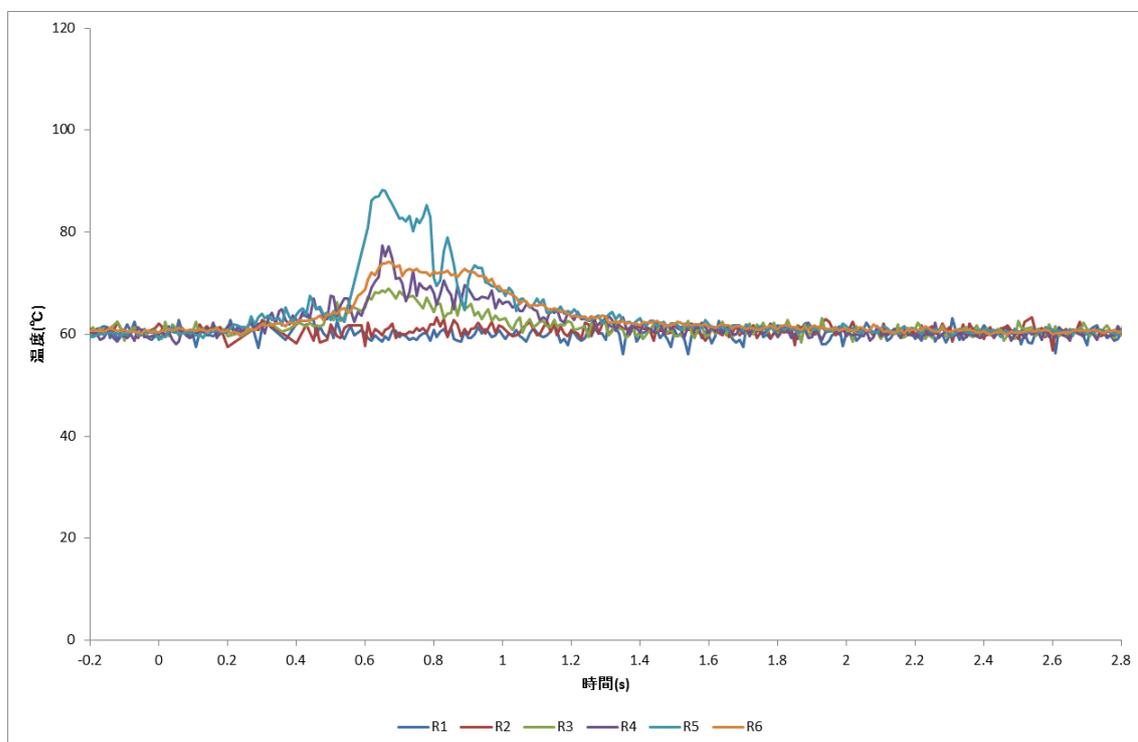


図 3.1-335 光ファイバによる液相温度（スペーサ無し，ケース J，第 4 段 WMS 部 / T3 ライン）

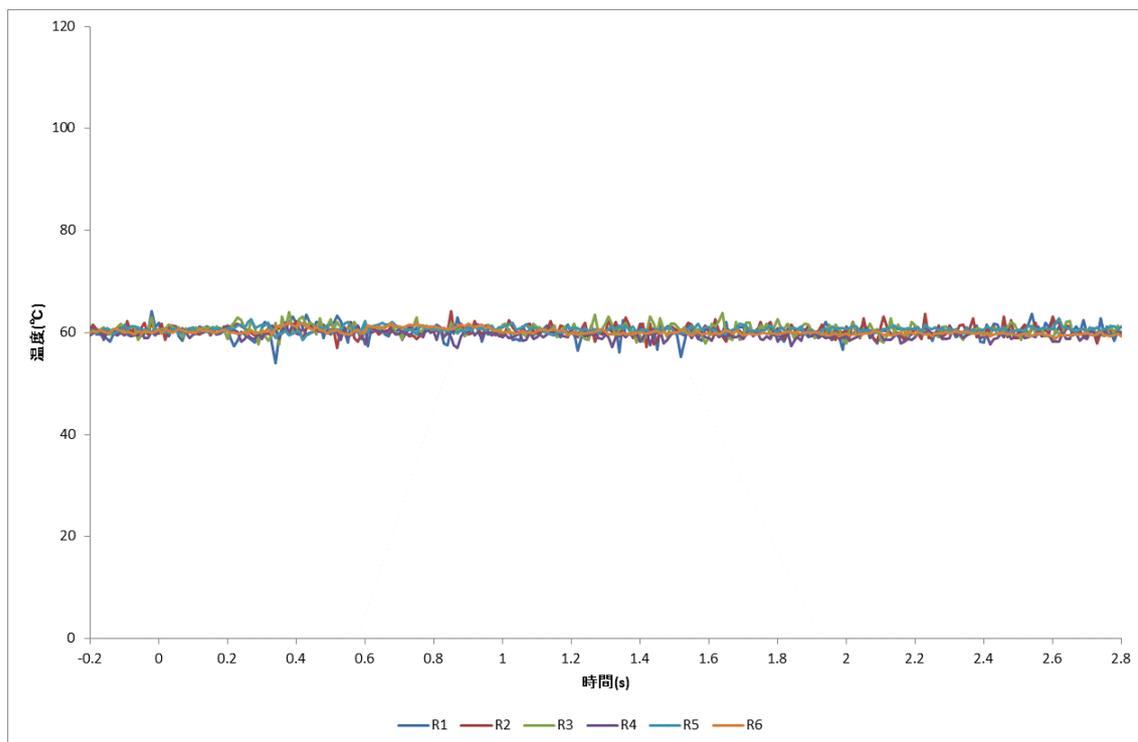


図 3.1-336 光ファイバによる液相温度（スペーサ無し，ケース J，第 4 段 WMS 部 / T2 ライン）

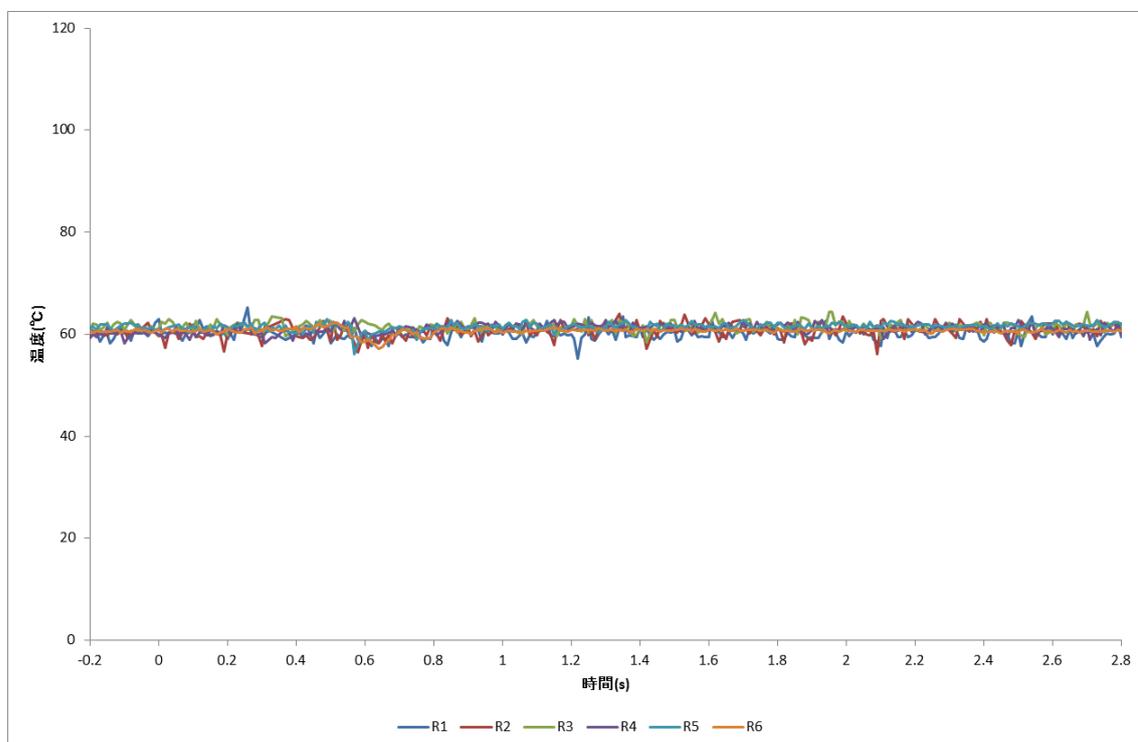


図 3.1-337 光ファイバによる液相温度（スペーサ無し，ケース J，第 4 段 WMS 部 / T1 ライン）

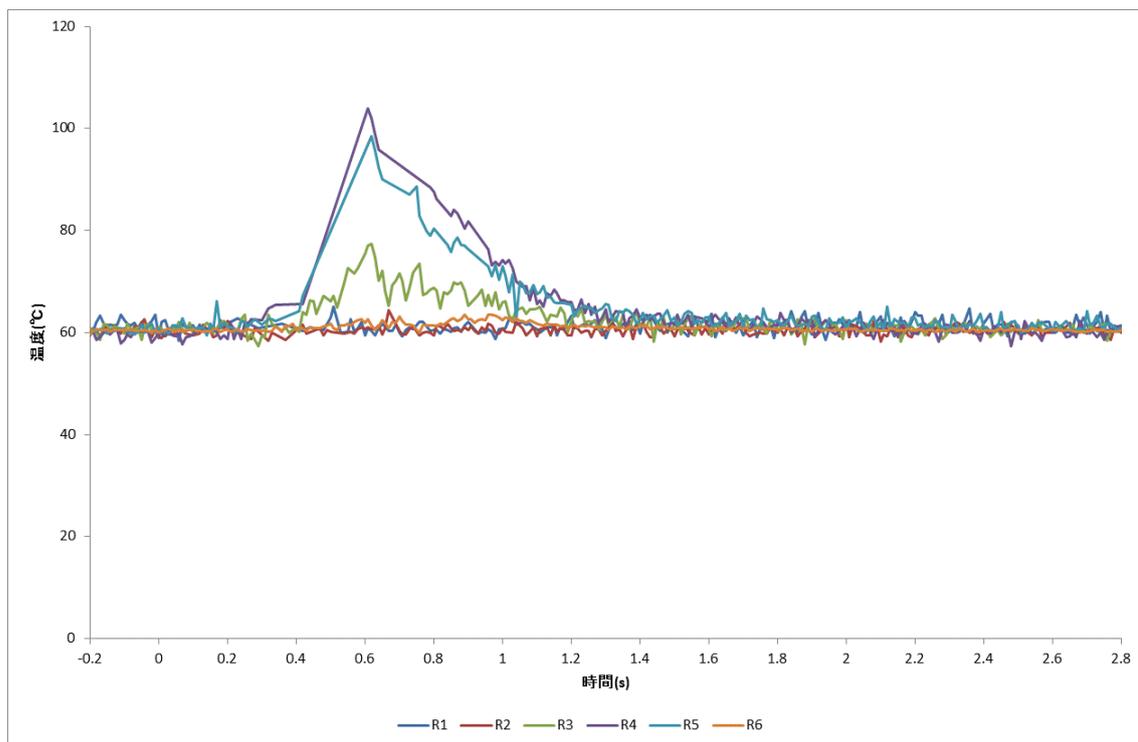


図 3.1-338 光ファイバによる液相温度（スペーサ無し，ケース K，第 4 段 WMS 部 / T6 ライン）

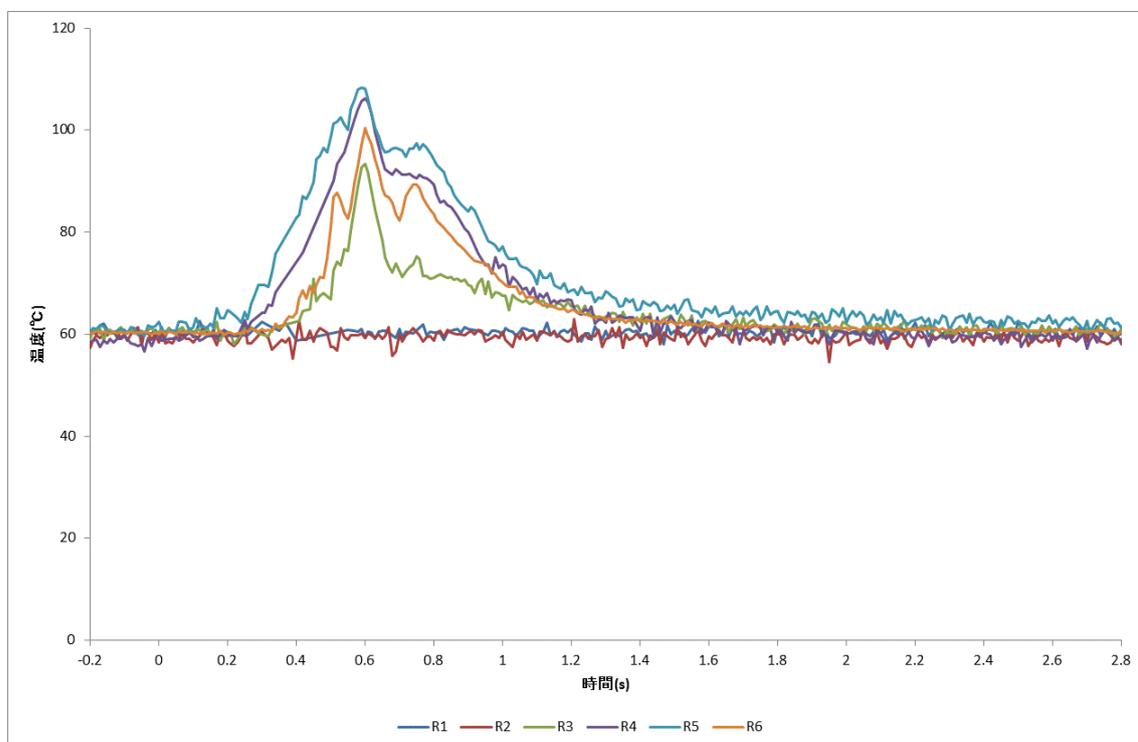


図 3.1-339 光ファイバによる液相温度（スペーサ無し，ケース K，第 4 段 WMS 部 / T5 ライン）

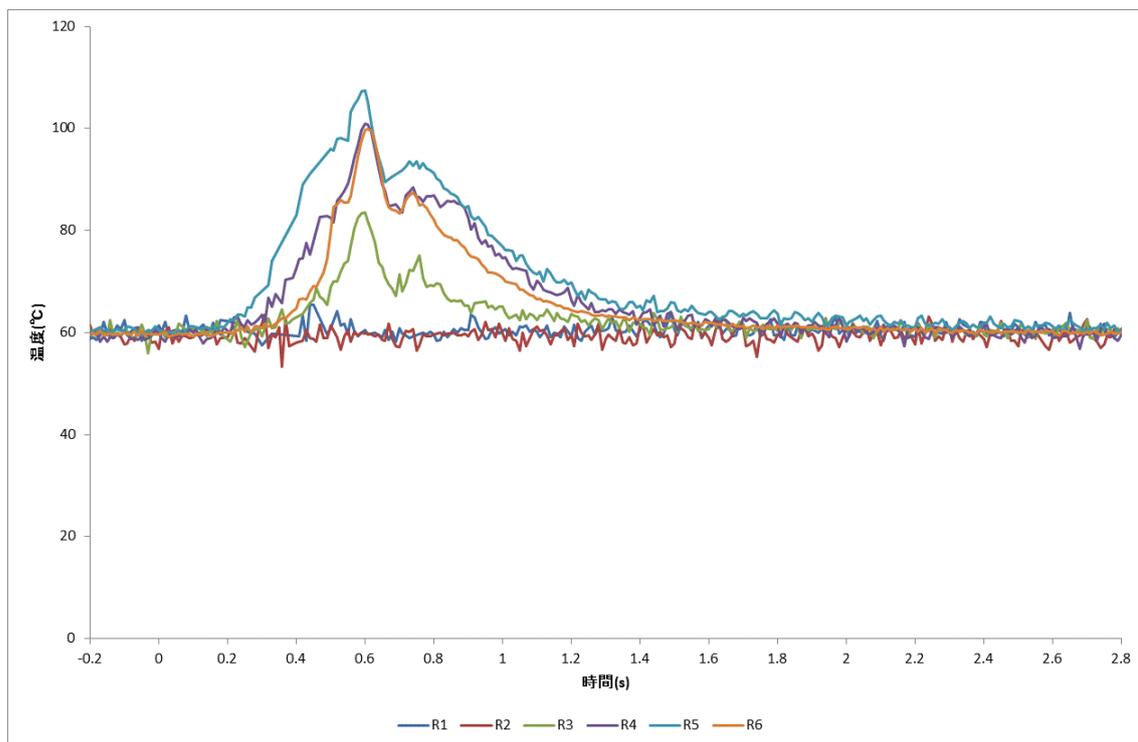


図 3.1-340 光ファイバによる液相温度（スペーサ無し，ケース K，第 4 段 WMS 部 / T4 ライン）

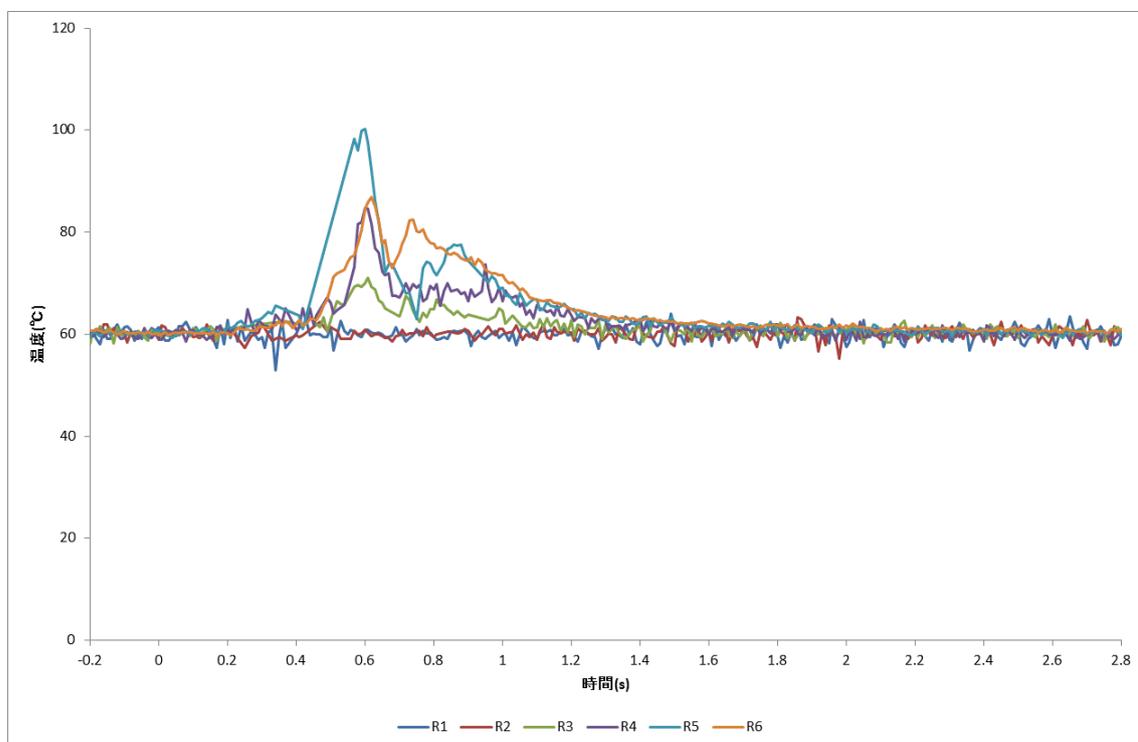


図 3.1-341 光ファイバによる液相温度（スペーサ無し，ケース K，第 4 段 WMS 部 / T3 ライン）

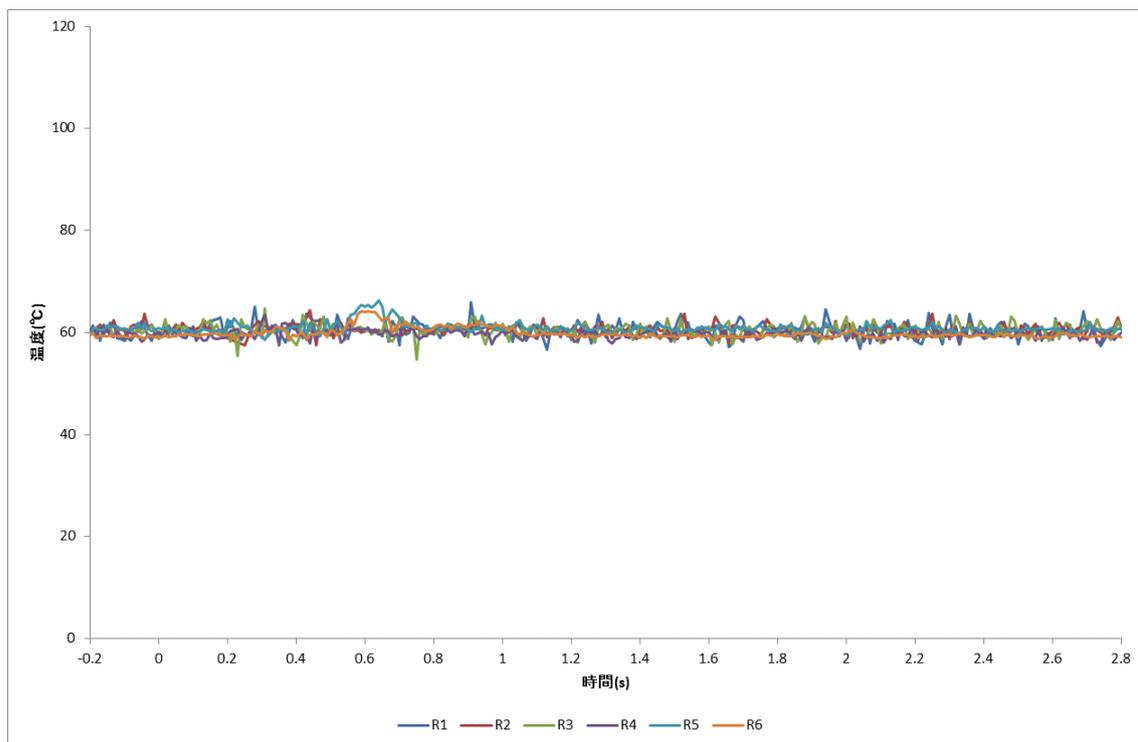


図 3.1-342 光ファイバによる液相温度（スペーサ無し，ケース K，第 4 段 WMS 部 / T2 ライン）

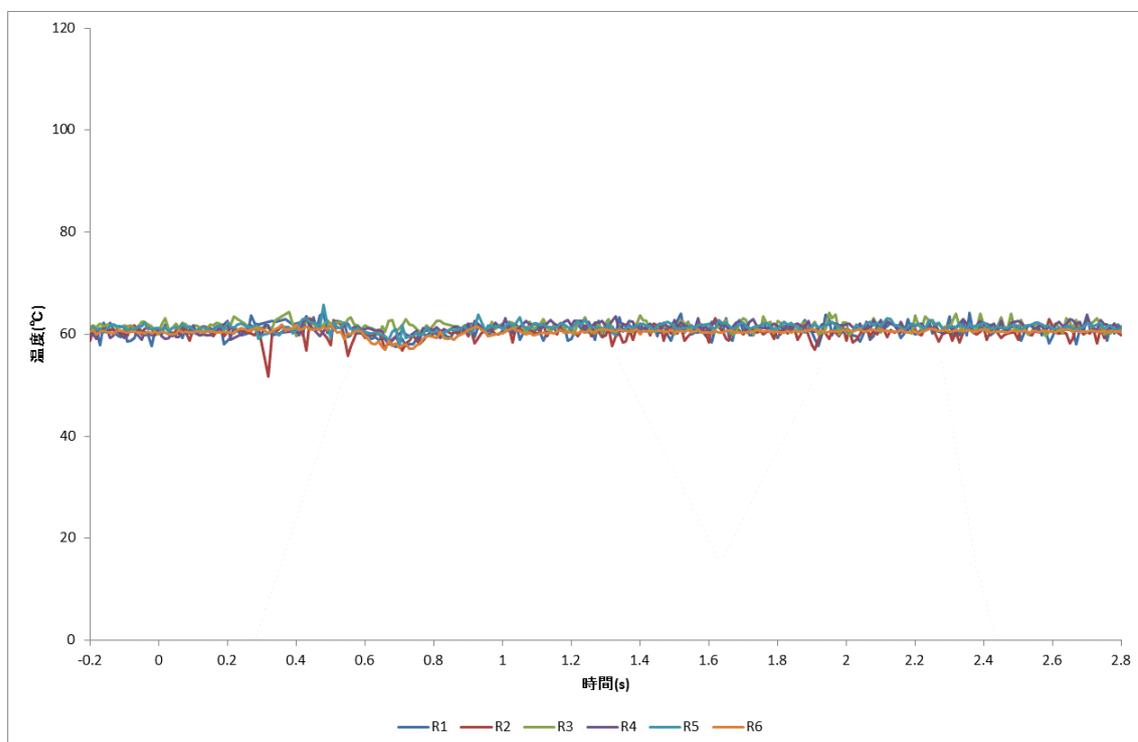


図 3.1-343 光ファイバによる液相温度（スペーサ無し，ケース K，第 4 段 WMS 部 / T1 ライン）

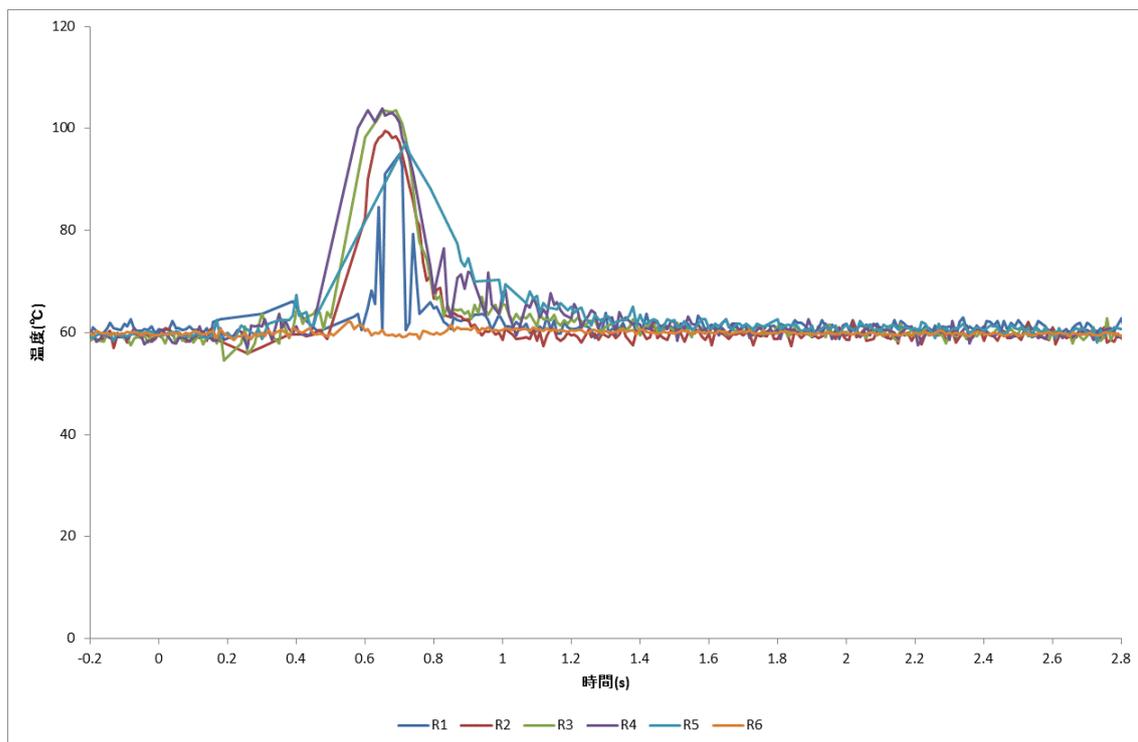


図 3.1-344 光ファイバによる液相温度（スペーサ無し，ケースL，第4段WMS部 / T6ライン）

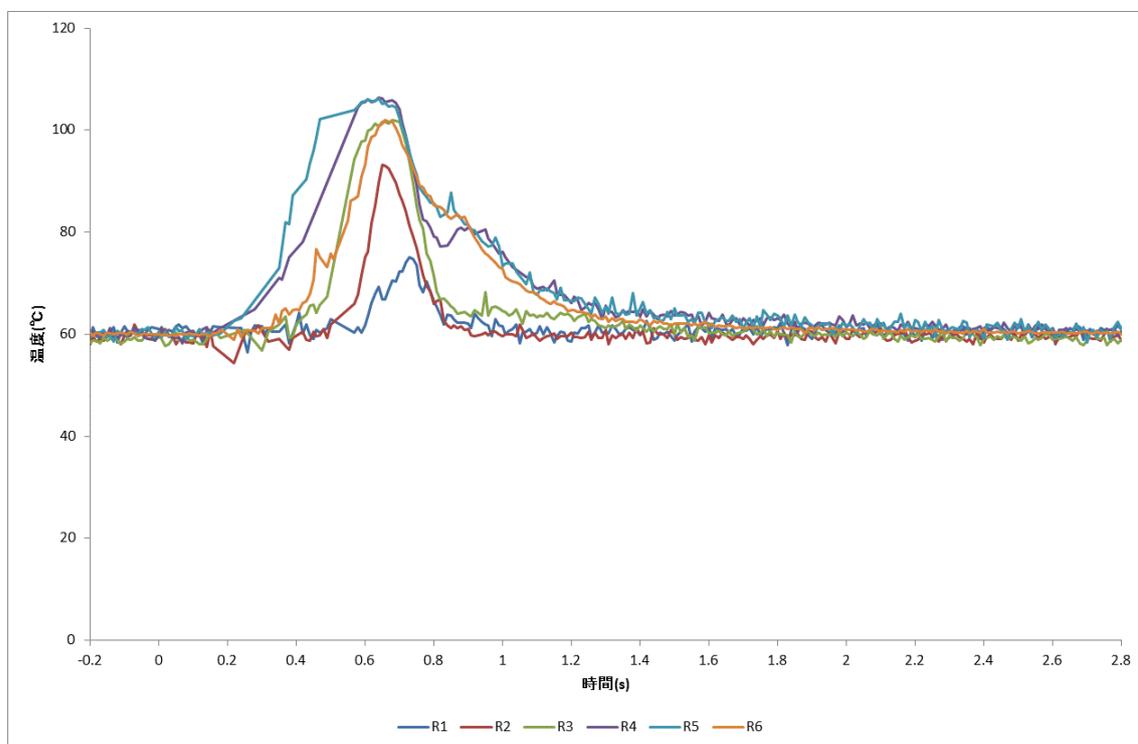


図 3.1-345 光ファイバによる液相温度（スペーサ無し，ケースL，第4段WMS部 / T5ライン）

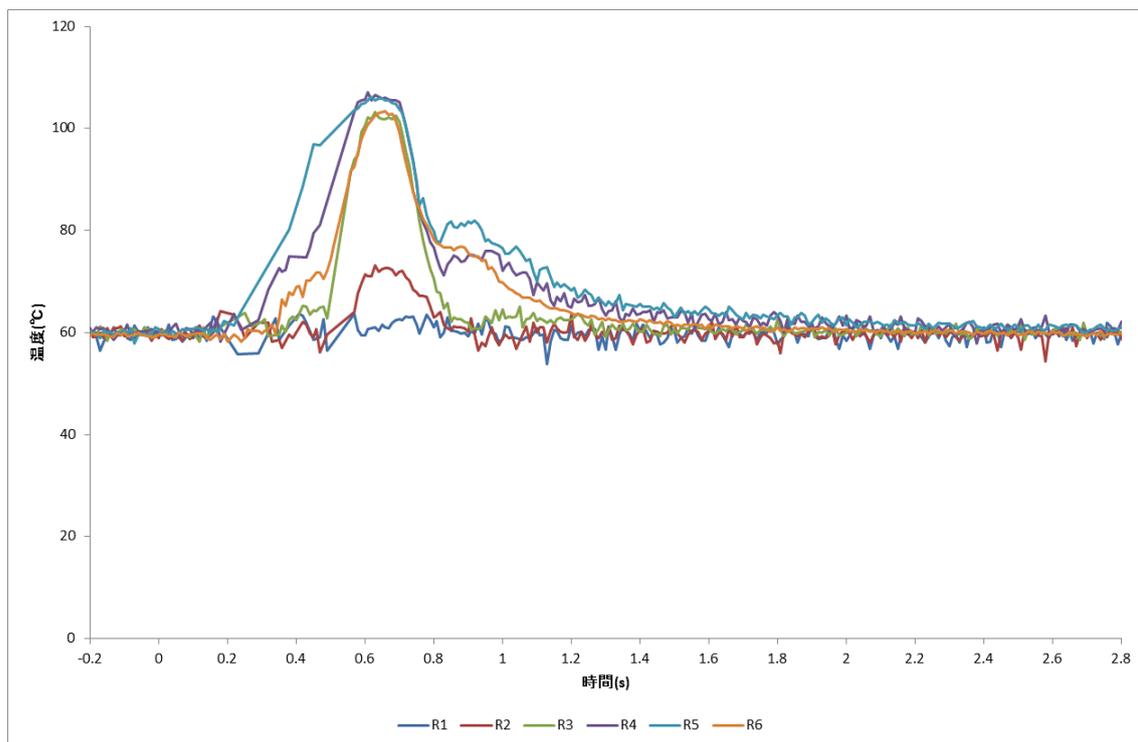


図 3.1-346 光ファイバによる液相温度（スペーサ無し，ケースL，第4段 WMS 部 / T4 ライン）

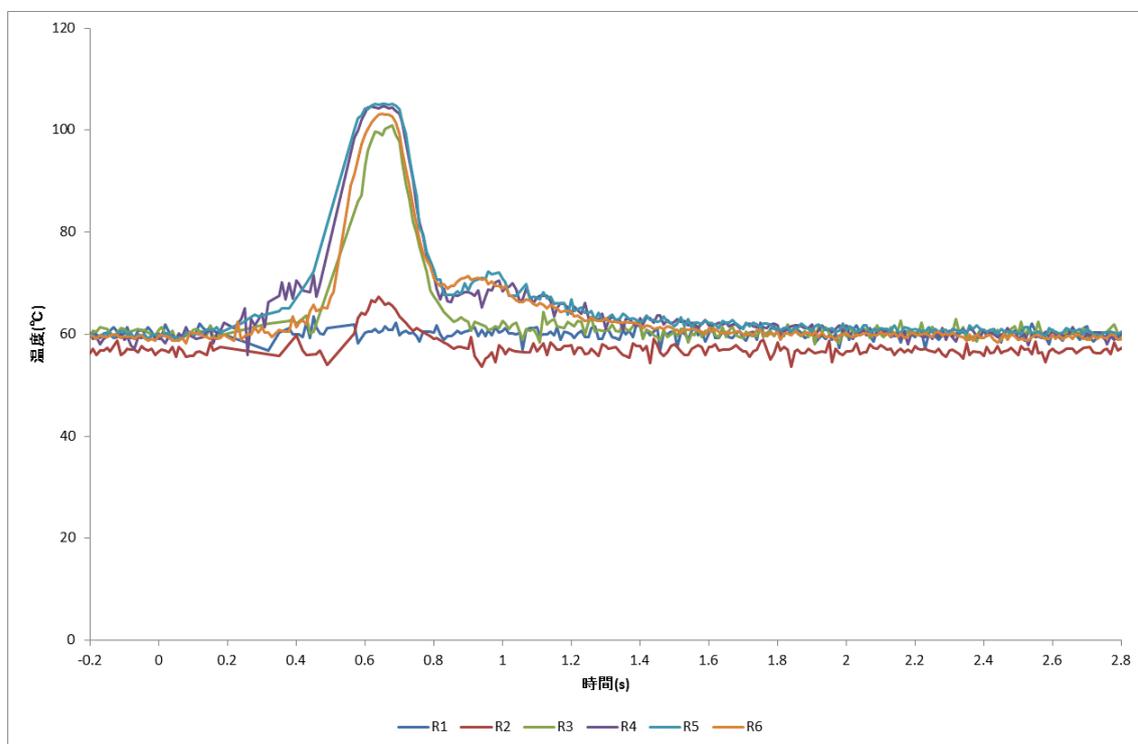


図 3.1-347 光ファイバによる液相温度（スペーサ無し，ケースL，第4段 WMS 部 / T3 ライン）

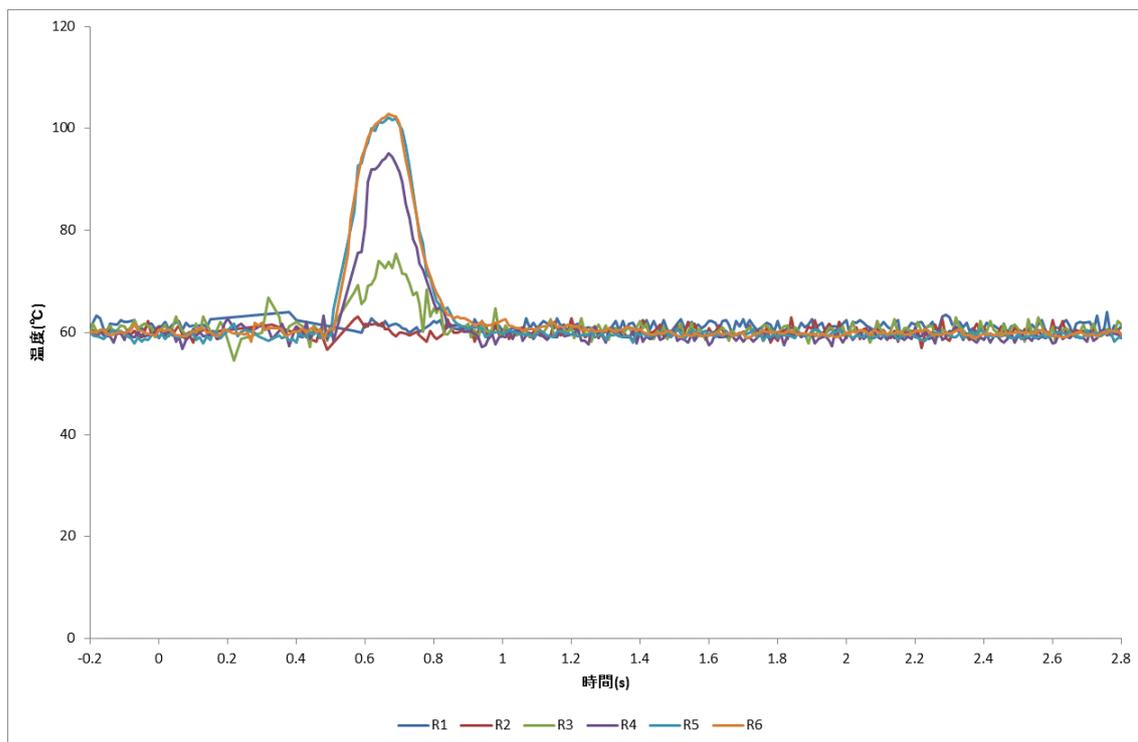


図 3.1-348 光ファイバによる液相温度（スペーサ無し，ケースL，第4段 WMS 部 / T2 ライン）

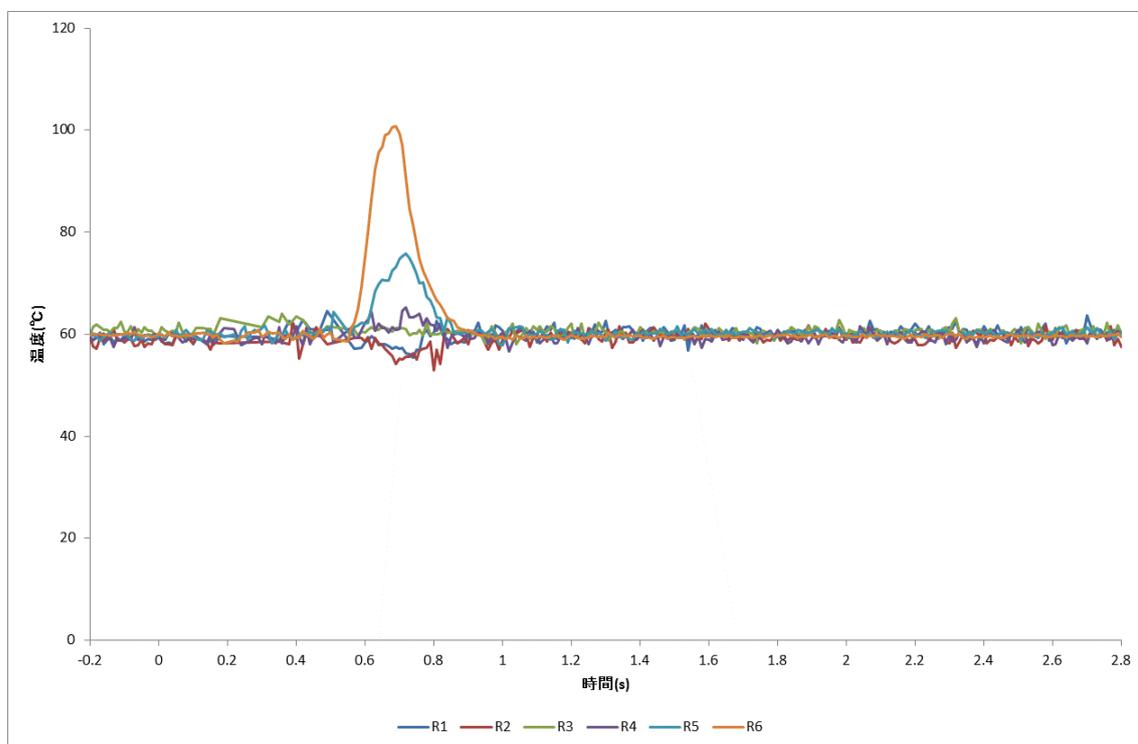


図 3.1-349 光ファイバによる液相温度（スペーサ無し，ケースL，第4段 WMS 部 / T1 ライン）

## 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

本事業における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。実験結果はデジタルデータとして別添のメディアに格納されている。

#### 3.2.2.1 OSV 初生時刻

##### (1) 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

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。

## (2) WMSでのボイド初生に係る実験データの整理<sup>[1]</sup>

ここでは、WMSでボイドが初生した時刻<sup>9</sup>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した。ここで、初生時刻の定義について記述する。WMSでは同一の格子点に対して0.78msの時間サイクルで計測する。このとき、ある格子点で三サイクル平均して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。また、相対熱負荷については次式で評価する。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。

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

**表 3.1-2**の実験マトリックスの各条件について、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、**図 3.2-1**~**図 3.2-18**に示す。なお、各図において、相対熱負荷と**図 3.1-4**に示したサブチャンネルタイプとの関係は**図 3.2-19**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および入口流速の下では、最も早いボイド初生時刻は負荷さ

<sup>9</sup> 初生時刻は次のようにして評価した。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。

れる出力レベルの増加に応じて早まる。

- ・ 非加熱サブチャンネルでは、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、検出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。
- ・ 有効発熱部より下流域（WMS 七段目）では、上記同様に有効発熱部から流出したボイドのみを検出するため、サブチャンネルによるボイド初生時刻の差異は小さく、かつ遅くなる。

上記については、これまで（平成 28 年度[2]，平成 29 年度[3][4]）と同様の知見である。

以下に本掲載図から新たに得られた知見を示す。

- ・ スペーサ直下流（Z=250mm）では、**図 3.2-3**（Run No.3）で非加熱サブチャンネルにボイドが初生（時刻 0.57 秒）しているが、これはスペーサ上流（Z=15mm）で初生（時刻 0.54 秒）したボイドが下流へ運ばれたものと考えられる。他のケースではスペーサ直下流でボイドの初生がないことから、スペーサ部では加熱サブチャンネルからのボイドの横流れが抑えられている。
- ・ 同一の入口温度，出力レベルで入口速度が異なる場合，入口温度が 40℃の**図 3.2-3**（Run No.3：0.3m/s）と**図 3.2-6**（Run No.6：0.5m/s）では，流速が速いとボイドの初生がより下流側で発生するようになる。これは，入口温度が 60℃の**図 3.2-8**（Run No.8：0.3m/s）と**図 3.2-10**（Run No.10：0.5m/s），入口温度 20℃の**図 3.2-15**（Run No.15：0.3m/s）と**図 3.2-17**（Run No.17：0.5m/s）も同様の傾向を示している。

以上よりボイド初生時刻と相対熱負荷の相関を定量化し，有効発熱部を中心とするボイド横流れ挙動及びスペーサによる影響に関する知見を得た。

### 3.2.2.2. ボイドの横方向伝播に関する検討

実験条件となる流速条件（0.3 m/s および 0.5 m/s）と温度条件（20℃，40℃および 60℃）で構成するマトリクスに従い設定した全十八ケースの実験結果について，燃料集合体加熱部入口の冷却水の流速と温度の組み合わせにおける基準ケース（0.3 m/s，40℃）を代表結果として記述する。当該流動条件に対して，沸騰挙動と液相流速分布を比較しながら，熱出力レベルの違いによるボイドの横流れについて纏める。また，高さ 30 mm スペーサ（以下，スペーサ）が発熱部領域の当該挙動に及ぼす影響についても考察する。

なお，最大熱出力レベル（限定条件）については3ケースとし，**3.1.2.3**でも記述したように，低出力条件が OSV レベルと定義すると共に，中出力レベルは二列で構成する非加熱ロッド間隙までボイドが横流れする最低出力レベル，高出力レベルは非加熱ロッド側のチャンネルボックスまでボイドが到達する最低出力レベルとここで定義したい。また，以下**(1)**項と**(2)**項記載の限定条件はスペーサ無し条件を基準とする。当該流動条件である，冷却水入口流速 0.3 m/s，冷却水入口温度 40℃に対して，スペーサ無および高さ 30 mm スペーサの双方の場合における，有効発熱部領域における沸騰挙動の可視化結果を**図 3.2-20**～**図**

3.2-22 に示す、なお、双方の条件で最もボイド挙動に違い生じる経過時間に限定して示している。

#### (1) スペーサ有無による沸騰挙動への影響

図 3.2-20 では、最大熱出力レベルが最も低いケース、つまり OSV レベルを狙った熱出力のケースについて記述する。スペーサ無し条件では、有効発熱部上端から気泡が生成される様子が見て取れる。この理由は、発熱部上端から下流方向には入口温度よりも温まった冷却水が流入することから、発熱部上端ほど沸騰しやすいためである。生成された小さな気泡群が時間の経過と共に合体し、ヒータロッド間で気泡膜へ成長しながら有効発熱部より下流側へ流れていく。このときスペーサ有無による相違点を考察する。スペーサ無の場合では、有効発熱部内の上流側で形成された気泡が下流側へ運ばれ凝縮するのに対して、スペーサが存在する場合、スペーサより上流側で生成された気泡はスペーサ内で攪拌、凝縮され、結果的にスペーサ内で消滅した。

続いて図 3.2-21 では、最大熱出力レベルにおいて真ん中のケース、二列で構成する非加熱ロッド間隙までボイドが横流れするケースについて説明する。スペーサが無い場合、有効発熱部上端から気泡が検出されたとほぼ同時に、上流側でも気泡が検出された。小さい気泡群が時間と共に合体し、ヒータロッド間で気泡塊となり上流側に移行するに従い、非加熱ロッド領域へ横流れを起こした。上流側から流入する冷却水に冷やされ 0.1 m 程度の移動の末に凝縮、消滅した。それに対してスペーサが存在する場合、本来有効発熱部中央より上流側で形成される気泡塊は次第に合体して大きくなり、非加熱ロッド領域へ横流れしようとするが、スペーサ部へ流入すると整流され、攪拌されると共に、上流側から流入する冷却水の冷却効果と相まって、スペーサ直下流部でほぼ凝縮、消滅した。

非加熱ロッド側のチャンネルボックスまでボイドが横流れする高出力ケースである図 3.2-22 においても、非加熱ロッド領域へのボイドの横流れまでのプロセスは条件 B (図 3.2-21) に共通するが、最大熱出力が条件 B より高まると有効発熱部全体にわたり気泡塊によって瞬時に覆われ、やがて凝縮する傾向に遷移した。このときスペーサが攪拌、整流する効果は熱出力が高くなっても同様の効果となり、つまりスペーサによりボイドの横流れ効果が抑制されることが確認できた。また、上記内容については表 3.2-1 のように整理した。

#### (2) スペーサ有無による液相流速分布への影響

本項では、(1)項で示した最大熱出力レベル三ケースにおいて、PIV 計測を用いて液相流速分布を計測した結果について図 3.2-23～図 3.2-25 に示す。なお、経過時刻は(1)項の図 3.2-20～図 3.2-22 とほぼ同時刻を、撮影位置はスペーサ設置部に限定して抜粋している。また、計測システムの幾何学的理由から、図 3.2-20～図 3.2-22 と撮影アングルが異なり、ヒータロッド三列分が画面に対して左側になる。いずれの結果共に、画面上側がスペーサ無の場合、下側にスペーサ有の場合を示しており、それぞれの条件において左手に沸騰挙動の様

子を、右側に PIV による液相流速の結果を示している。流速を示すカラーマップを右側に示しており、当該流動ケースにおいては入口流速が 0.3 m/s であるため、水色のカラーコンタとなる。

条件 A ならびに B については、入口流速に対して顕著な上昇は見られなかったが、最も高い熱出力条件 C に関してはボイド横流れに起因して生じる液相分布の横流れが確認され、瞬間的に入口流速の 6 倍以上にも上昇することが明らかとなった。それに対してスぺーサの存在によって、ボイド横流れの抑制効果と共に、流速の増大も抑制され、これはスぺーサがもたらす攪拌、整流効果に起因するものであると考えられる。

### 3.2.2.3. 光ファイバ温度計による液相温度計測結果の整理

3.1.3.7(3)に示したように、第 4 段部の測定結果図 3.1-194～図 3.1-253 より、同じ入口温度、入口流速の条件では、出力の違いによる温度分布の違いが出ている。最も熱的に厳しい地点は入口温度 40℃と 60℃では T5R5 地点、入口温度 20℃では T5R4 地点で最大値をとっている。その値は熱出力に依存し、非加熱領域においては熱出力に関係なく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 (T3-R3) も熱出力に依存していることなどの知見が得られている。また、同じ入口温度、熱出力で、入口流速が異なる条件では (ケース I と J の比較)、T5R4 地点の最大値は共に 95℃だが、加熱ロッドと非加熱ロッドの境界の最大値は I が 80℃と J が 95℃と入口速度の違いによって差が現れている。

### 3.2.2.4. 差圧計測値と計測区間内のボイド率挙動との関連付け

図 3.1-5～図 3.1-148 に示す基本測定結果のうち差圧計測値差圧計測とボイド率の時間変化から、すべてのケースにおいて出口側の差圧計測値が最初にピーク (時刻 0.6 秒～時刻 0.7 秒あたり) に達し、その後入口側の差圧計測値がピークになっている (時刻 0.7 秒～時刻 0.8 秒あたり)。このときのボイド率の変化は、時刻 0.4 秒～時刻 0.6 秒あたりで第 6 段 WMS の加熱サブチャンネル領域のボイド率が大きくなり、時刻が少しずつ遅れて第 5 段 WMS、第 4 段 WMS、第 3 段 WMS の順で加熱サブチャンネル領域のボイド率が大きくなる傾向を示している。ただし各実験ケースとも最大出力レベルが低い場合は、第 3 段 WMS でのボイド率の変化があまり見られない。これらのことから差圧計測値と計測区間内のボイド率挙動との関連付けをすると、

- ・ヒータロッド加熱部上段 (第 6 段 WMS) からボイド率が大きく変化することで、その影響により出口側差圧が高くなる。
- ・その後、ヒータロッド加熱部の下段側へ第 5 段 WMS、第 4 段 WMS、第 3 段 WMS の順でボイド率が大きくなるに従い、出口側差圧計測値は小さくなり、それと同時に入口側差圧計測値が大きくなる。
- ・出口側差圧計測値が底に達したとほぼ同時に、入口側差圧計測値がピークになる。
- ・最大熱出力レベルが低い場合は、ヒータロッド加熱部下段側 (第 3 段 WMS) のボイド

率の変化があまり見られなくなる。

### 3.2.2.5. 限界条件に関する検討

ボイドの横流れについて限界条件を3つに分けて設定する。

- ・ 限界条件1：OSV レベルでボイドが生じる（=9本のヒータロッド領域内に限定してボイドが局在する）ケース。
- ・ 限界条件2：2列分の非加熱ロッド領域までボイドが横方向伝播するケース。
- ・ 限界条件3：非加熱ロッド領域のチャンネルボックスまでボイドが進展するケース。

上記3つの限界条件をもとに、ボイドの横流れの判断基準となる模擬燃料集合体のヒータロッドに印加する最大熱出力について整理した。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まとめた結果を表 3.2-2 および表 3.2-3 に示す。前者は有効発熱部内にスぺーサが無い場合、後者は 30 mm スぺーサを設置した場合である。表から分かるように、限界条件1~3（最大熱出力レベル）とも、特定の冷却水温度では流速が増加すると、最大熱出力が増加する特性を示す。一方特定の冷却水流速では温度が増加すると、最大熱出力が減少する特性を示している。スぺーサ無しと 30mm スぺーサでは、各限界条件とも 30mm スぺーサのほうがスぺーサ無しよりも最大熱出力が大きい値を示している。

### 3.2.2.6. 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, 5, 6, 8, 9, 11, 12, 14, 15, 17, 18 の12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. 1, 4, 7, 13, 10, 16 の6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。

表 3.2-1 実験ケースにおけるスぺーサ有無での沸騰挙動の比較

Run No.	冷却水温度 冷却水流速	最大出力 レベル	有効発熱部上流側で形成された気泡の挙動	
			スぺーサ無	スぺーサ有
1	40°C 0.3 m/s	低出力 レベル	有効発熱部上部から気泡が検出される 小さい気泡群が時間と共に合体し、ロッド間で気泡の膜となりながら、下流側へ推移する	
			発熱部内蒸留側で形成された気泡が下流側へ運ばれ凝縮する	発熱部内上流側で発生する気泡は、スぺーサ内で攪拌・凝縮され消滅する
中出力 レベル		有効発熱部上端から気泡が検出された途端、上流側でもほぼ同時に、気泡が検出される		発熱部中央より上流側で形成される気泡塊は次第に大きくなり、非加熱部へ横流れする。
		小さい気泡群が時間と共に合体し、ロッド間で気泡塊となり、下流側に行くに従い非加熱領域へ横流れを起こす		
		上流側からの冷却水により 0.1m 程度の移動の末に凝縮・消滅する	スぺーサ内部へ流入すると整流され、攪拌、上流部から流入する冷却水と相まって、スぺーサ直下流部でほぼ凝縮・消滅する	
3		高出力 レベル	非加熱ロッド側チャンネルボックスまで横流れを起こし、有効発熱部全体にわたり気泡塊に瞬時に覆われ、やがて凝縮する	

表 3.2-2 各限界条件内にボイド横方向伝播が収まる最大熱出力（スペーサ無し）

実験条件		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 (MW/m <sup>2</sup> )		
冷却水温度	冷却水流速	限界条件 1 (OSV)	限界条件 2	限界条件 3
20°C	0.3 m/s			
	0.5 m/s			
40°C	0.3 m/s	1.12	1.23	1.29
	0.5 m/s	1.17	1.35	1.41
60°C	0.3 m/s	0.79	0.82	0.94
	0.5 m/s	0.82	0.94	1.00

- ・ 限界条件 1：加熱ロッド領域内でボイド初生が確認できる
- ・ 限定条件 2：加熱ロッド領域外にボイド伝播が確認できる
- ・ 限定条件 3：非加熱領域壁付近にボイド伝播が確認できる

表 3.2-3 各限界条件内にボイド横方向伝播が収まる最大熱出力（30mm スペーサ）

実験条件		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 (MW/m <sup>2</sup> )		
冷却水 温度	冷却水 流速	限界条件 1 (OSV)	限界条件 2	限界条件 3
20°C	0.3 m/s	1.70	1.76	1.82
	0.5 m/s	1.76	1.82	1.93
40°C	0.3 m/s	1.29	1.41	1.53
	0.5 m/s	1.41	1.47	1.59
60°C	0.3 m/s	0.94	1.00	1.06
	0.5 m/s	1.00	1.16	1.17

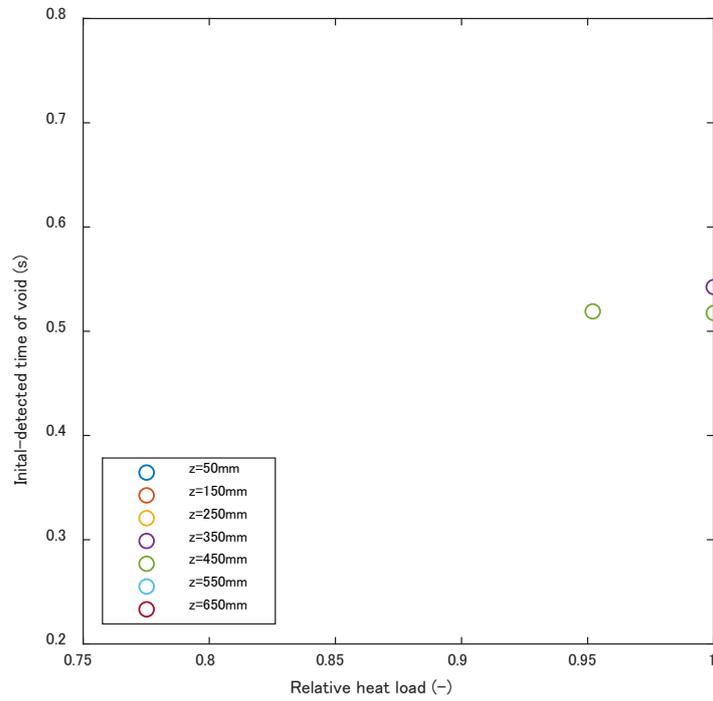


図 3.2-1 WMS によるボイド初生時刻 (Run No.1)

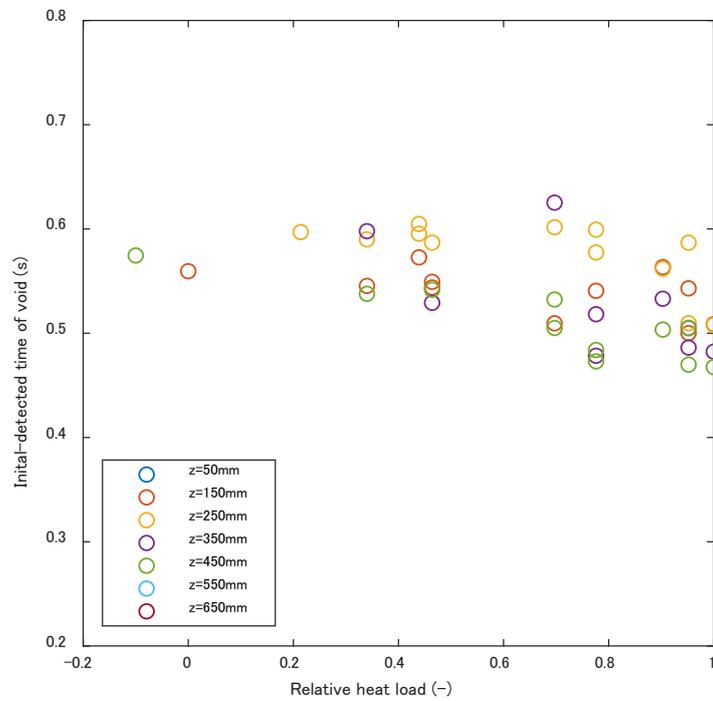


図 3.2-2 WMS によるボイド初生時刻 (Run No.2)

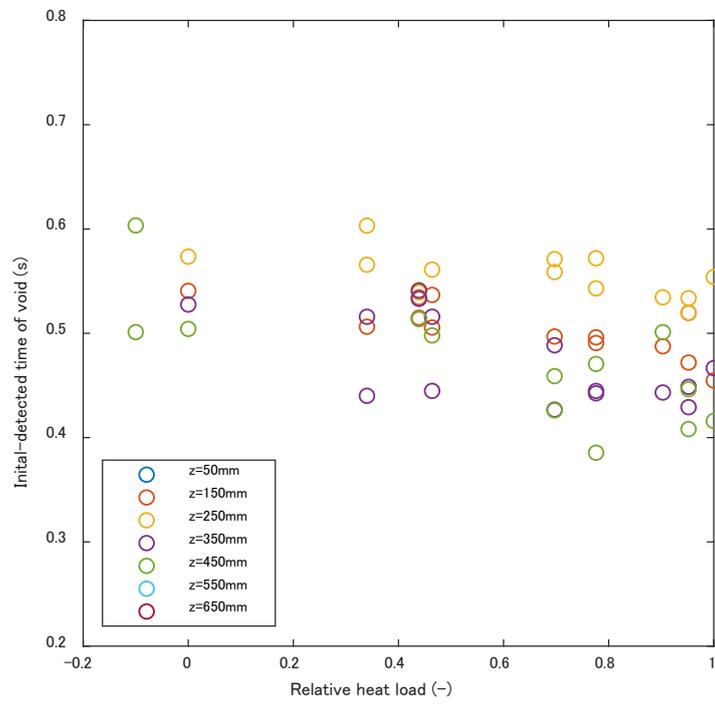


図 3.2-3 WMS によるボイド初生時刻 (Run No.3)

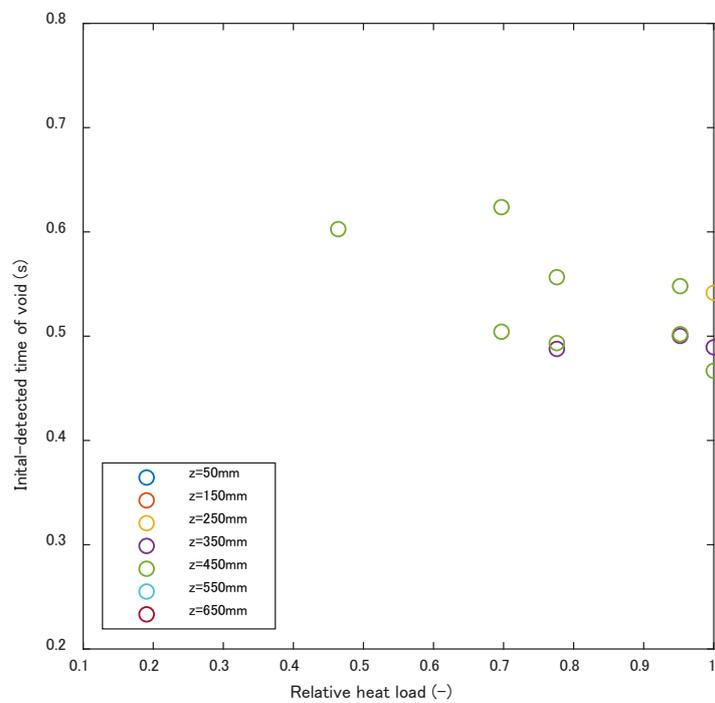
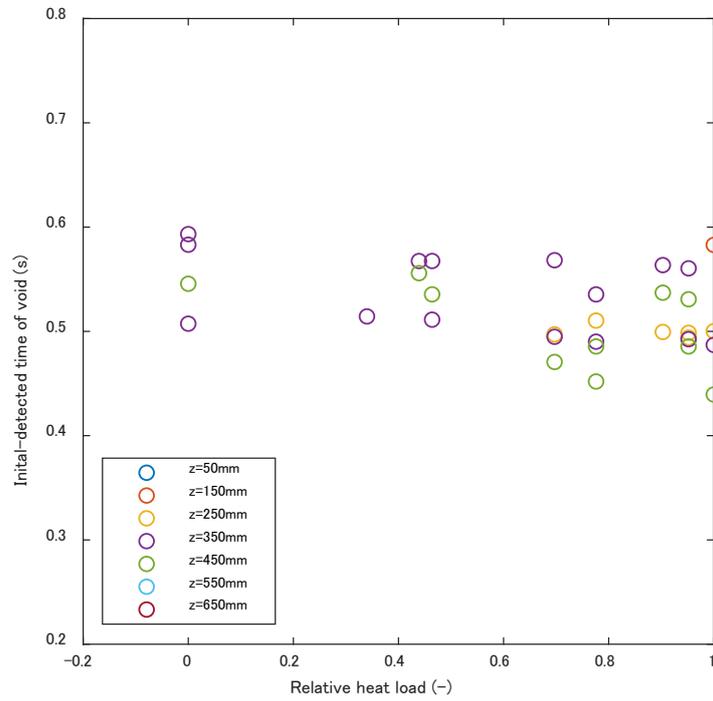


図 3.2-4 WMS によるボイド初生時刻 (Run No.4)



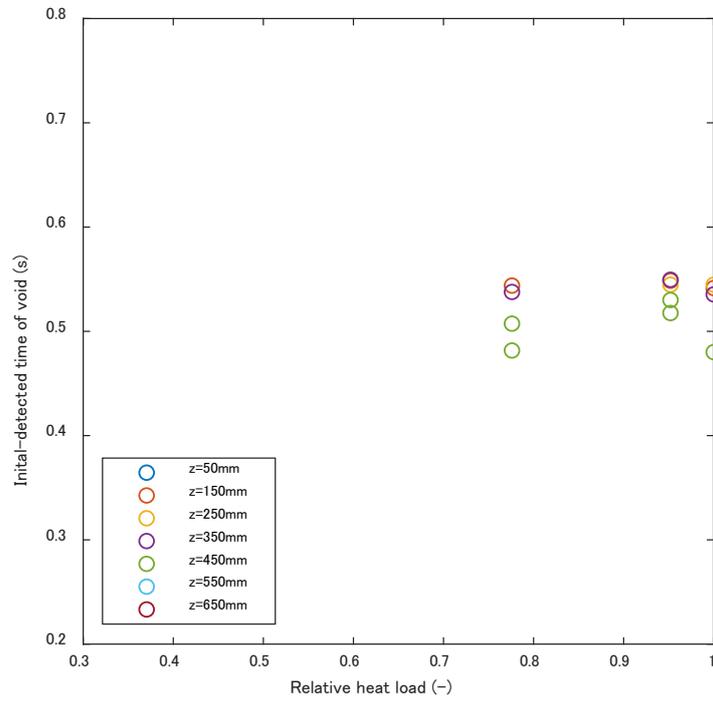


図 3.2-7 WMS によるボイド初生時刻 (Run No.7)

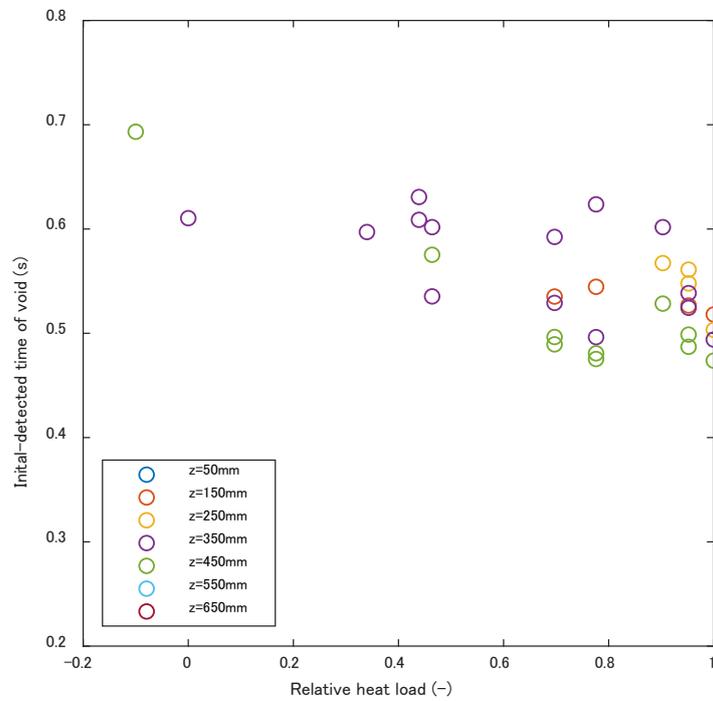


図 3.2-8 WMS によるボイド初生時刻 (Run No.8)

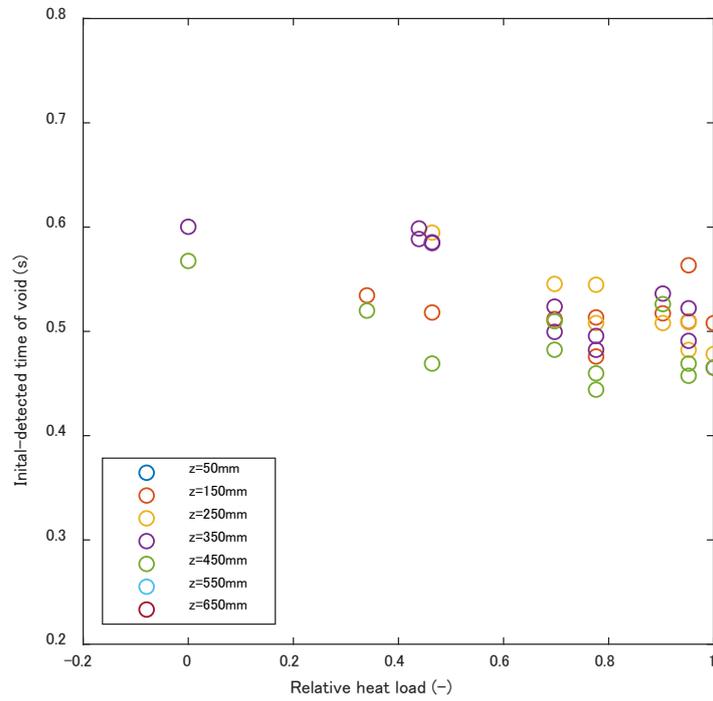


図 3.2-9 WMS によるボイド初生時刻 (Run No.9)

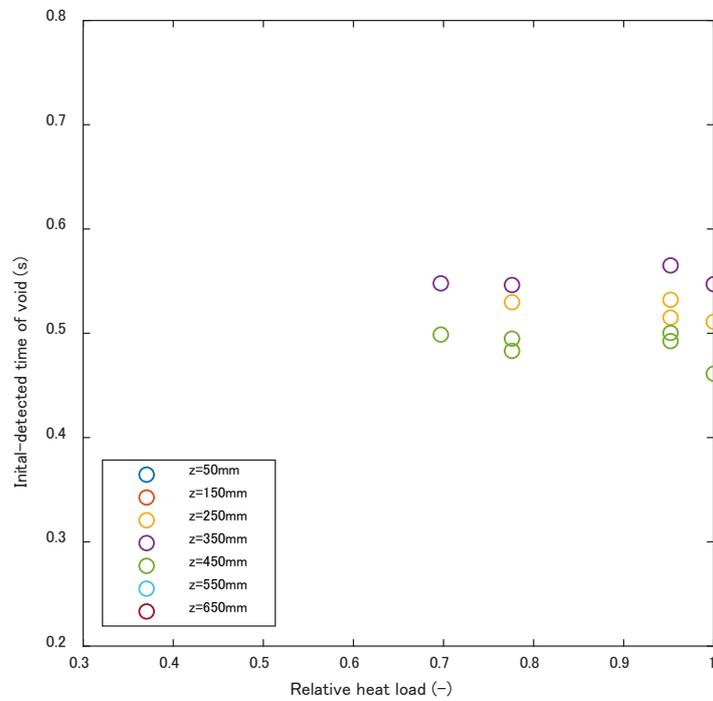


図 3.2-10 WMS によるボイド初生時刻 (Run No.10)

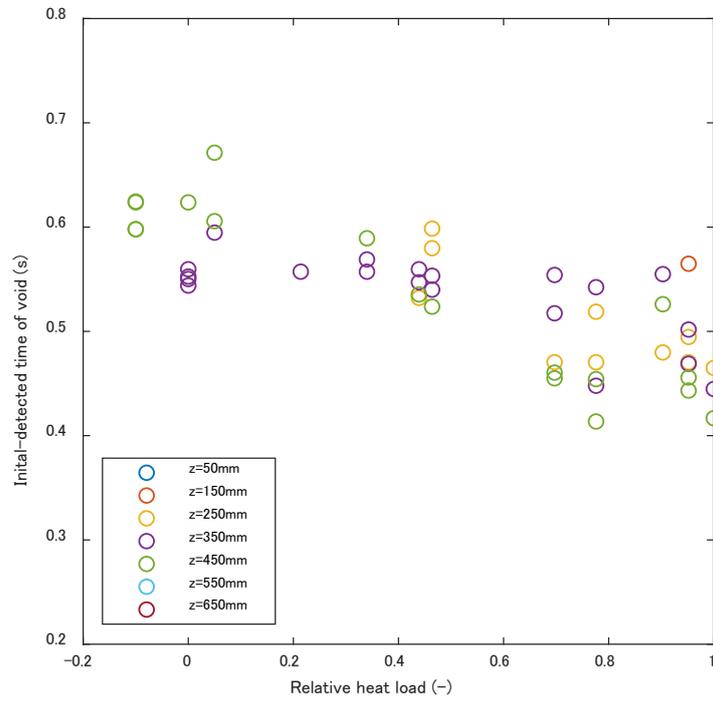


図 3.2-11 WMS によるボイド初生時刻 (Run No.11)

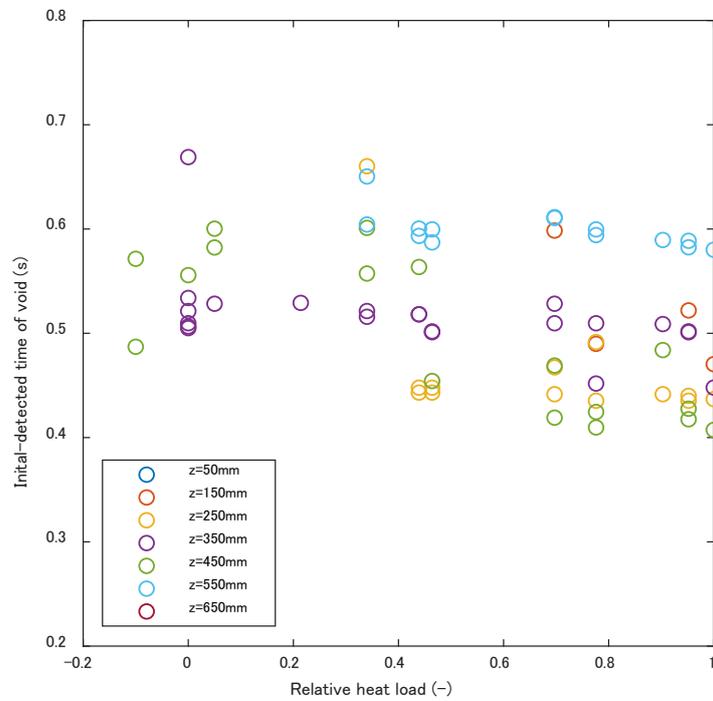


図 3.2-12 WMS によるボイド初生時刻 (Run No.12)

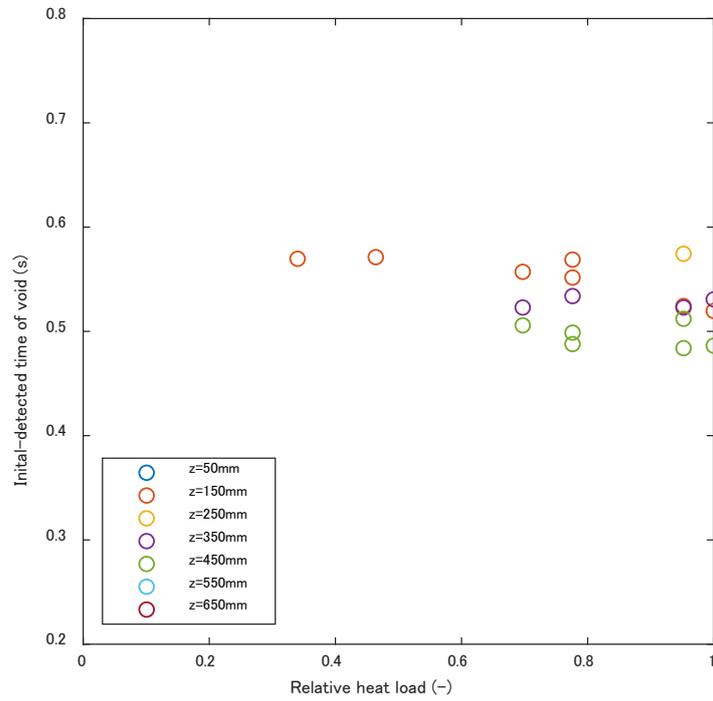


図 3.2-13 WMS によるボイド初生時刻 (Run No.13)

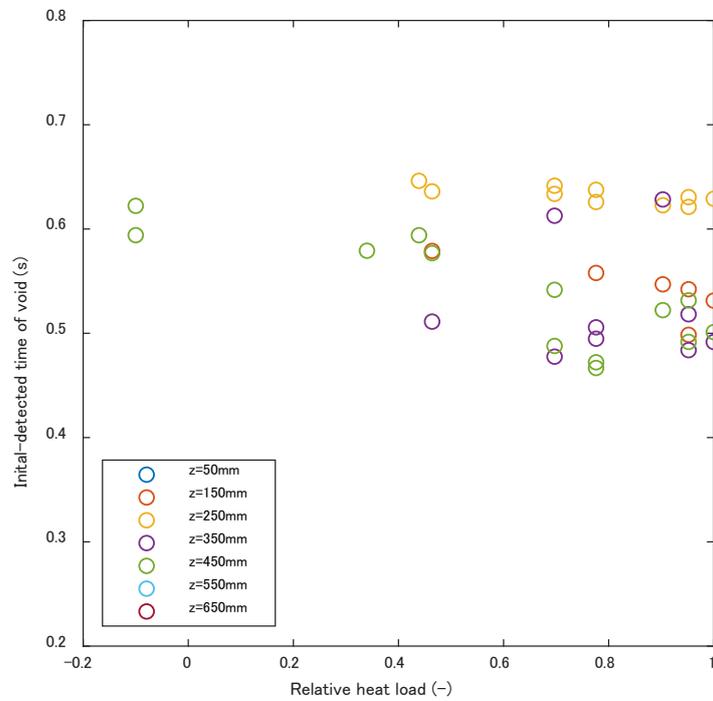


図 3.2-14 WMS によるボイド初生時刻 (Run No.14)

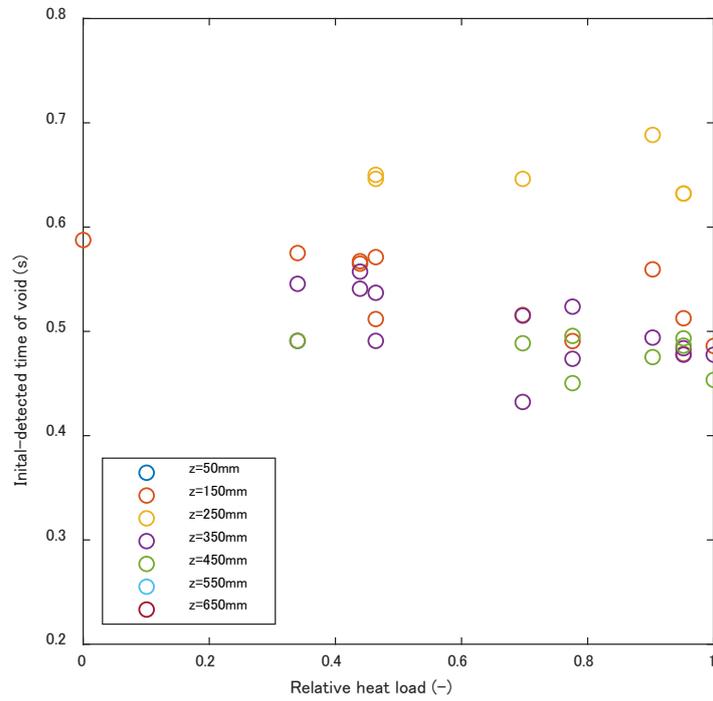


図 3.2-15 WMS によるボイド初生時刻 (Run No.15)

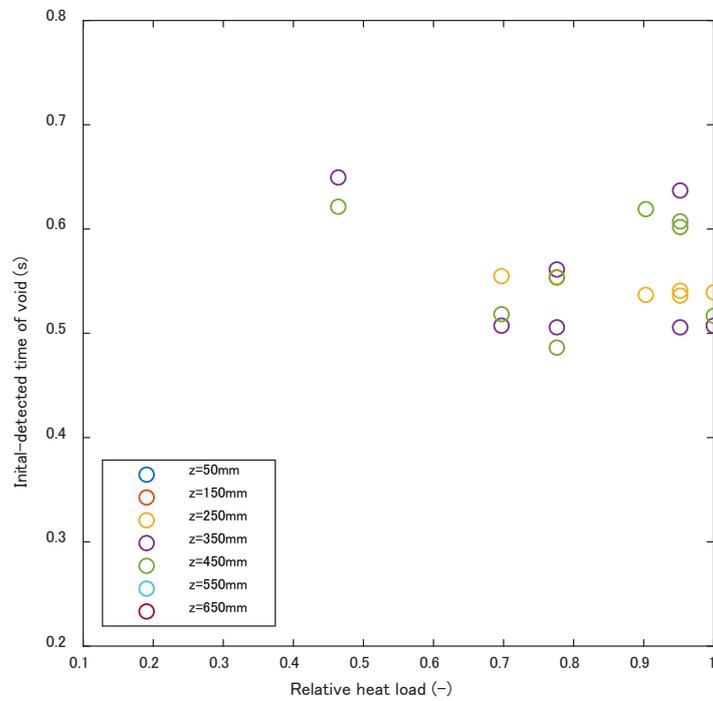


図 3.2-16 WMS によるボイド初生時刻 (Run No.16)

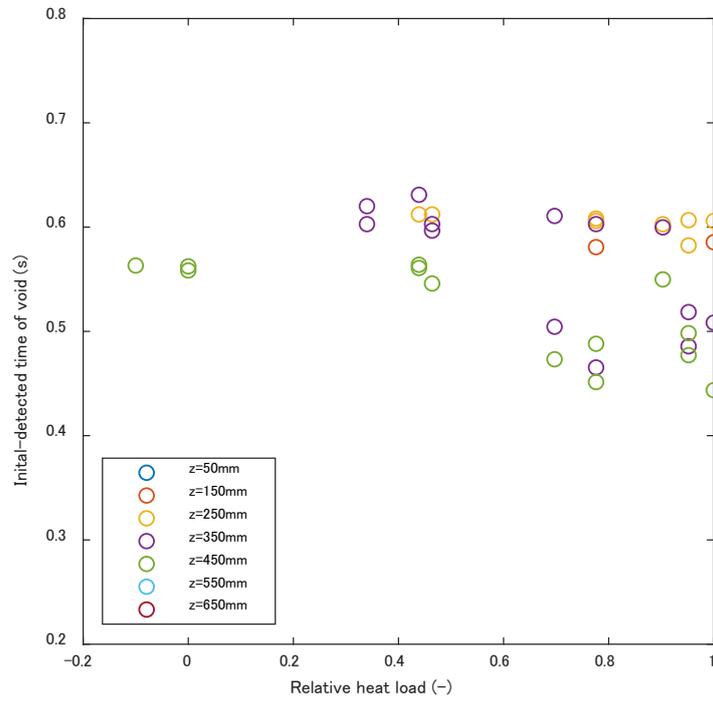


図 3.2-17 WMS によるボイド初生時刻 (Run No.17)

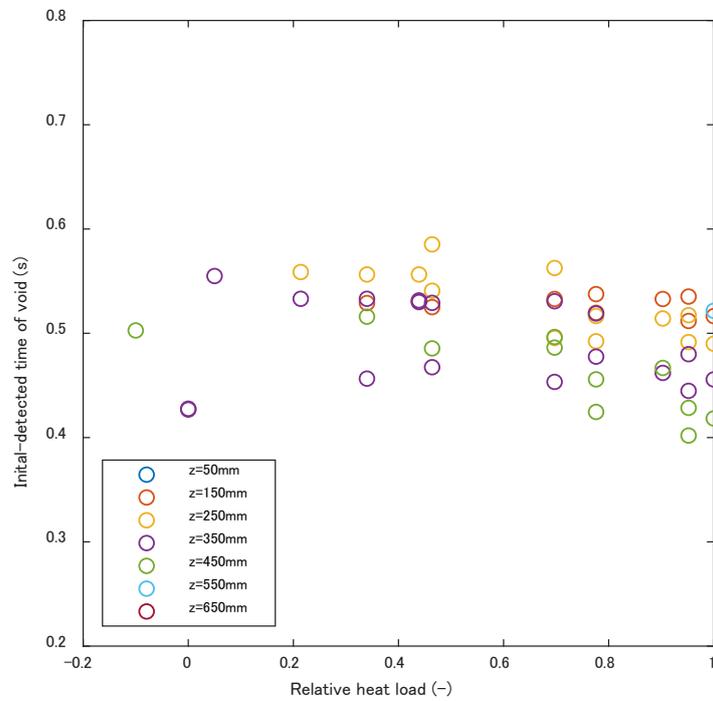


図 3.2-18 WMS によるボイド初生時刻 (Run No.18)

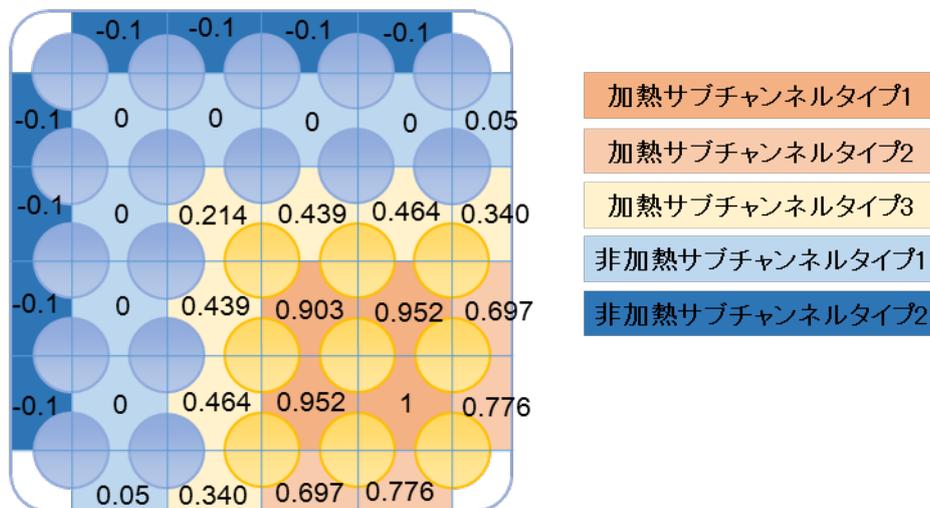


図 3.2-19 サブチャンネルタイプ分割とサブチャンネル相対熱負荷量との関係

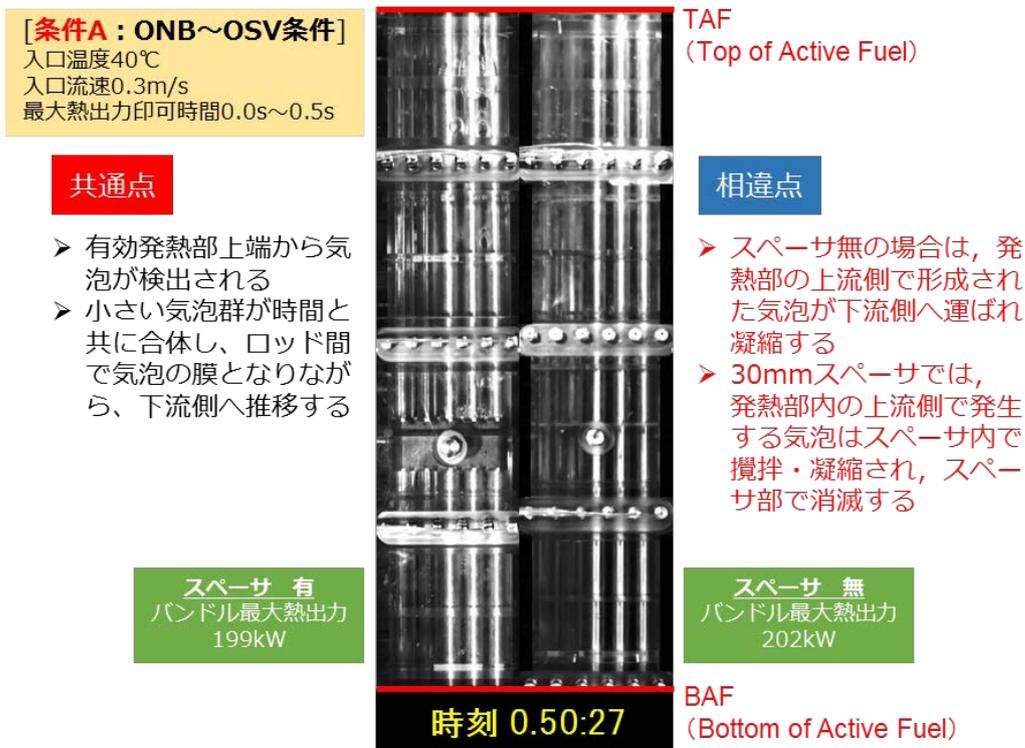


図 3.2-20 “低”出力レベルにおいてスペーサが沸騰挙動にもたらす影響

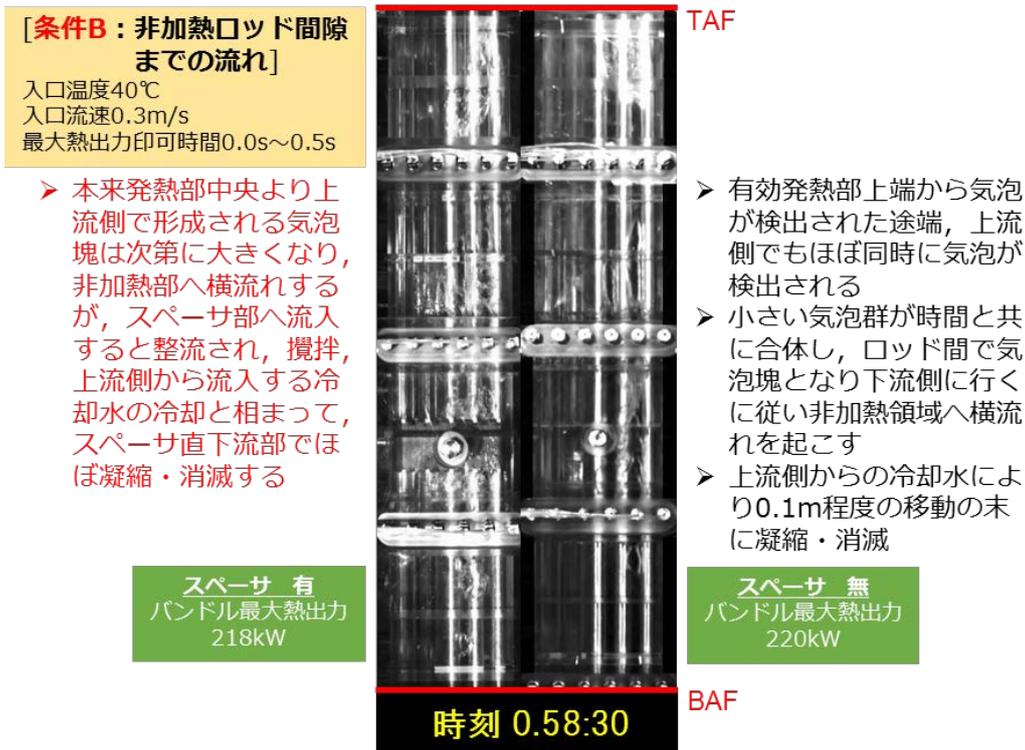


図 3.2-21 “中” 出力レベルにおいてスパーサが沸騰挙動にもたらす影響

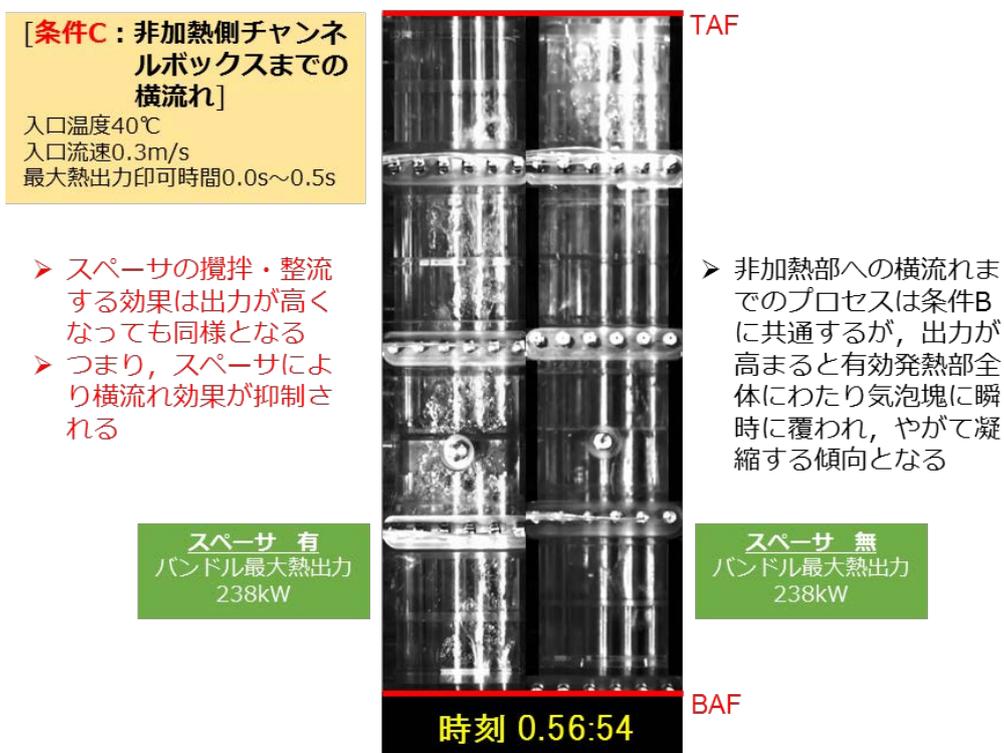


図 3.2-22 “高” 出力レベルにおいてスパーサが沸騰挙動にもたらす影響

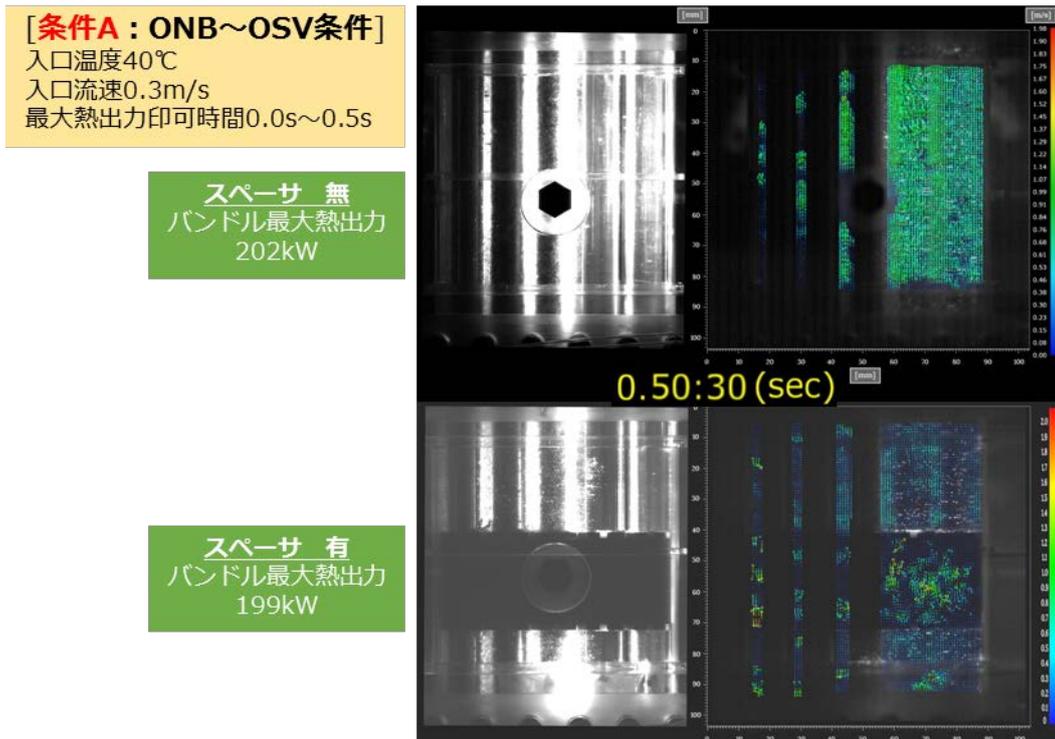


図 3.2-23 “低” 出力レベルにおいてスパーサが液相流速にもたらす影響

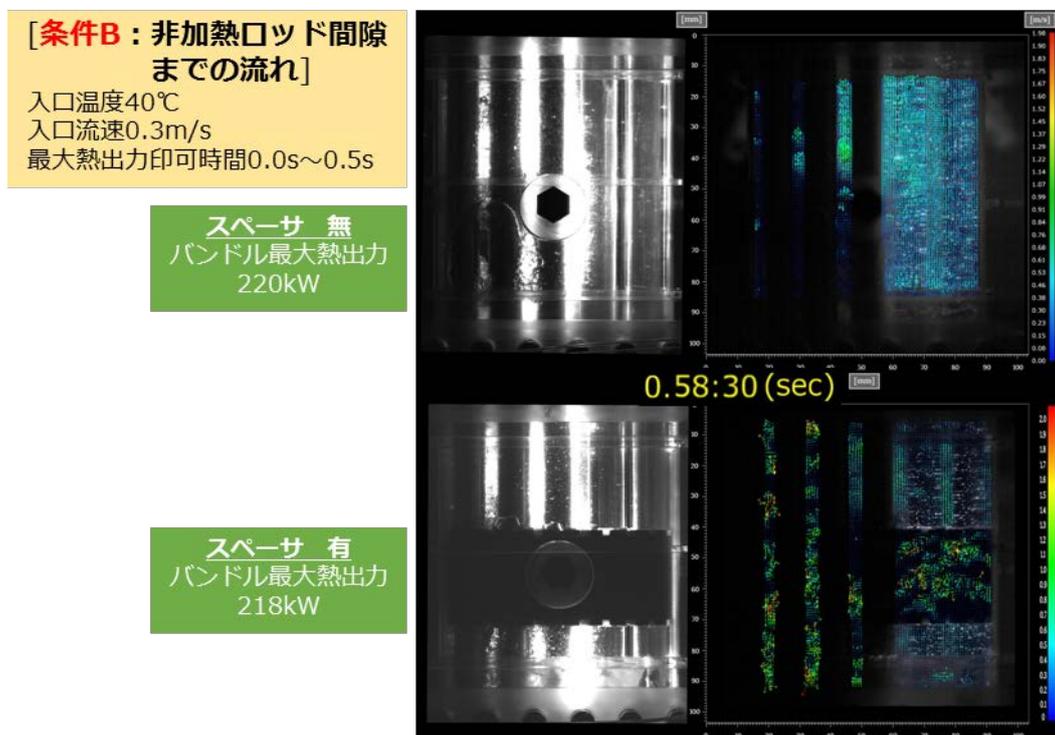


図 3.2-24 “中” 出力レベルにおいてスパーサが液相流速にもたらす影響

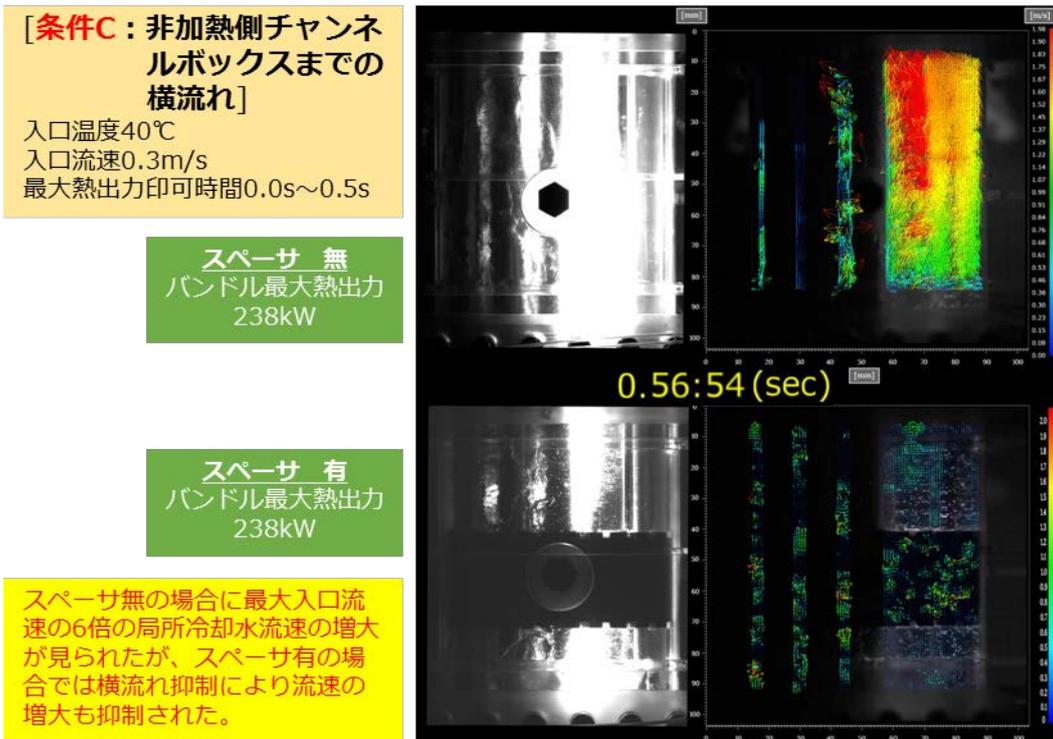


図 3.2-25 “高” 出力レベルにおいてスパーサが液相流速にもたらす影響

#### 4. まとめ

平成 30 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，実施計画書の仕様に従って，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，実施計画書の仕様に従い，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．

- 発熱部に高さ 30mm 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 18 ケースの実験の結果に基づいて限界条件を整理した．同様に発熱部にスペーサ無しの条件においても限界条件を整理した．また，各限定条件における最大熱出力は冷却水温度の低下に伴い，また入口流速の増大に伴い増大する．
- 各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 によるボイド率の時系列を対比し，OSV 条件への到達時刻を実験ケースにおいて各段の WMS で各ワイヤメッシュの交点毎に推定し，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対比し，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の関連を考察した．
- 凝縮誘起水撃 (CIWH) 現象について，圧力計測値に基づき発生条件を同定した．また，WMS によるボイド挙動と対比させ，ボイド凝縮に起因して CIWH が発生したケースを同定した．一部のケースについては，可視化情報及び PIV 解析結果と共に対比し，逆流と CIWH との関連が示唆される結果を得た．
- 最新の計測技術である光ファイバ温度計による温度測定については，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 30 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，研究計画書の仕様に従った成果が得られた．これらのことから有効発熱部に設置した実機相当の高さ 30mm スペーサは冷却剤の攪拌により凝縮が促進され，その結果としてスペーサがボイドの横流れを抑制する効果があることが明らかとなった．

## 参考文献

- [1] (一財)電力中央研究所原子力技術研究所「平成27年度 事故時ボイド挙動解明試験成果報告書」, 平成28年3月.
- [2] (一財)電力中央研究所原子力技術研究所「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.
- [3] (一財)電力中央研究所原子力技術研究所「平成29年度 事故時ボイド挙動解明試験成果報告書」, 平成30年3月.
- [4] Hiroki Takiguchi, Msahiro Furuya, Takahiro Arai and Kenetsu Shirakawa, “Transient boiling flow in 5x5 rod bundle under non-uniform rapid heating,” Nuclear Engineering and Design, Vol. 340, 447-456, 2018.

紙へリサイクル可