

水プール直接貯蔵方式における 使用済燃料冷却特性の検討

(研究報告)

2002年9月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section.

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

2002

水プール直接貯蔵方式における使用済燃料冷却特性の検討 (研究報告)

藤井 正¹⁾、堀 徹¹⁾、此村 守¹⁾、堺 公明²⁾、
小川 伸太³⁾、大木 義久³⁾、大久保 良幸³⁾

要 旨

実用化戦略調査研究において概念設計を進めているナトリウム冷却大型炉では、燃料取扱設備の簡素化を図る候補概念として、水プール直接貯蔵方式を検討している。本概念では、取扱う集合体の崩壊熱量が比較的高い条件（実証炉の炉外貯蔵方式の約 4.5 倍である 18kW）となるため、通常時でのプール浸漬過程や、プール移送中の事故を想定した上部からの注水過程における冷却特性に関する知見が不足している。このため、高発熱燃料の冷却特性を把握することが、プラント概念の成立性を左右する熱流動課題の一つとして指摘されていた。

今回、単ピン体系での試験装置を用いて、燃料ピンの熱的条件、集合体出口形状、浸漬速度等をパラメータとした試験を実施し、冷却特性に関して、実機設計に反映できる以下のような基礎的データを取得した。

- ・通常浸漬時の沸騰挙動の可視化やヒータピンの温度変化等より、通常浸漬時と注水時の冷却形態を同定した。
- ・ヒータ初期温度と出口部閉塞率が、発熱部全体の冷却終了時間に対する支配因子となる。
- ・試験中のヒータ温度上昇の最大値は、通常浸漬時で約 4 K、注水時に約 6 K と小さく、有意な温度上昇を伴うことなく冷却できる。
- ・通常浸漬時には、出口部閉塞率を大きくした条件でも、試験体上部圧力が下部圧力を上回ることはなく、発熱部への水位上昇は阻害されない。

1)大洗工学センター システム技術開発部 FBR システムグループ

2)大洗工学センター 要素技術開発部 流体計算工学研究グループ

3)三菱重工業株式会社

WBS 番号：121250「燃料取扱設備簡素化に関する技術開発」

本研究は、実用化戦略調査研究フェーズの一環として実施したものである。

Study on Cooling Characteristics for Spent Fuel in Direct Water Pool Storage System

Tadashi Fujii¹⁾, Toru Hori¹⁾, Mamoru Konomura¹⁾, Takaaki Sakai²⁾,
Shinta Ogawa³⁾, Yoshihisa Ohki³⁾, Yoshiyuki Ohkubo³⁾

Abstract

The conceptual design study of the large-scale sodium-cooled reactor is in progress in the “Feasibility Study on Commercialized Fast Reactor Cycle Systems (F/S)”. The direct water pool storage system is being examined as a candidate concept to simplify the fuel handling facility for the sodium-cooled reactor. In this concept, the decay heat of a fuel subassembly is relatively higher (18kW which is about 4.5 times of the Ex-Vessel Storage Tank system in the demonstration FBR). Therefore, the information about the cooling characteristics of the fuel subassembly are lacking in cases of submergence process at a normal operation and cooling water injection process from upper part of the subassembly at a transfer accident. Accordingly, the understanding of the cooling characteristics of the fuel subassembly in higher decay heat condition was pointed out as one of the thermal hydraulic problems which influence the realization of the plant concept.

Using the single heater pin equipment, fundamental tests were conducted with the parameters of the thermal conditions of a fuel pin, the outlet shapes of it, the submergence speeds and so on. Then, following basic data were acquired to be reflected in the actual plant design.

- Cooling modes of the normally submergence tests and water injection tests were identified by visualization of the boiling behavior in the test section and the temperature change of the heater pin.
- The initial temperature of the heater surface and the blockage size of the outlet of test section were dominating factors to the cooling completion time.
- Maximum temperature rise of the heater surface was about 4K in normally submergence tests and 6K in water injection tests, respectively. Therefore, the heater was well cooled without significant temperature rise.
- In the normally submergence tests, the pressure of the upper part of the test section did not exceed the lower part pressure and a water level rise in the test section was not obstructed even in the higher outlet blockage rate condition.

1) FBR System Engineering Group, System Engineering Technology Division, OEC
2) Thermal-Hydraulics Research Group, Advanced Technology Division, OEC
3) Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

目 次

要旨	.....
Abstract	.....
表リスト	.....
図リスト	.....
1 . 緒言	.....	1
2 . 冷却特性試験の概要	.....	2
2.1 試験目的	.....	2
2.2 装置の概要と試験パラメータ	.....	8
2.2.1 試験装置の概要	.....	8
2.2.2 試験パラメータ	.....	9
3 . 試験結果の検討	.....	14
3.1 通常浸漬特性試験	.....	14
3.1.1 試験条件	.....	14
3.1.2 試験手順	.....	14
3.1.3 冷却挙動の概要	.....	15
3.1.4 流路形成管内の沸騰挙動	.....	17
3.1.5 各試験パラメータの影響	.....	18
3.1.6 冷却特性のまとめ	.....	19
3.2 事故時水注入特性試験	.....	42
3.2.1 試験装置及び試験条件	.....	42
3.2.2 試験手順	.....	42
3.2.3 冷却挙動の概要	.....	43
3.2.4 各試験パラメータの影響	.....	44
3.2.5 冷却特性のまとめ	.....	47
3.3 結果のまとめと実機設計への反映	.....	66
4 . 結言	.....	71
5 . 参考文献	.....	72

表リスト

表 2.1-1	水プール直接貯蔵方式における冷却上の課題と試験の必要性・狙い	4
表 2.1-2	従来の再冠水試験条件との比較	5
表 2.2-1	試験装置寸法仕様	11
表 3.1-1	通常浸漬特性試験 試験マトリクス	22
表 3.1-2	通常浸漬特性試験でのヒータ温度上昇	23
表 3.2-1	事故時水注入特性試験 試験マトリクス	49
表 3.2-2	事故時水注入特性試験でのヒータ温度上昇	50
表 3.3-1	試験結果のまとめ	69
表 3.3-2	試験体系と実機との相違	70

図リスト

図 2.1-1	燃料取扱設備の概略構成と集合体の冷却方法	6
図 2.1-2	再冠水冷却時の被覆管表面温度の経時変化（模式図）	7
図 2.1-3	高転換 PWR の再冠水試験でのヒータ表面温度変化の一例	7
図 2.2-1	試験装置構成図	12
図 2.2-2	計測点の設置位置	13
図 3.1-1	ヒータ表面温度の時間変化	24
図 3.1-2	流路温度の時間変化（1/2）	25
図 3.1-2	流路温度の時間変化（2/2）	26
図 3.1-3	ヒータ表面温度、流路温度の高さ方向温度分布の時間変化	27
図 3.1-4	試験部圧力の時間変化	28
図 3.1-5	通常浸漬試験 可視化結果	29
図 3.1-6	ヒータ温度の時間変化（流路形成管の材質の影響）	30
図 3.1-7	ヒータ温度の時間変化（初期温度の影響）	31
図 3.1-8	ヒータ温度の時間変化（浸漬速度の影響）	32
図 3.1-9	試験部の圧力変化（浸漬速度の影響）	33
図 3.1-10	ヒータ温度の時間変化（出口部閉塞率の影響）	34
図 3.1-11	試験部の圧力変化（出口部閉塞率の影響）	35
図 3.1-12	ヒータ温度の時間変化（発熱量の影響）	36
図 3.1-13	冠水終了時間、上部圧力の比較（1/2） （初期温度、浸漬速度、出口部閉塞率の影響）	37
図 3.1-14	冠水終了時間、上部圧力の比較（2/2） （発熱量、出口部閉塞率の影響、浸漬速度 70mm/s 一定）	38
図 3.1-15	クエンチ点の推移に関する神永らの試験結果	39
図 3.1-16	クエンチ点の時間的推移（初期温度、出口部閉塞率の影響）	40
図 3.1-17	クエンチ点上昇速度の比較（初期温度、出口部閉塞率の影響）	41
図 3.2-1	注水系の概略系統図、ノズル部構造	51
図 3.2-2	ヒータ温度、注水量、圧力、プール高さの時間変化	52
図 3.2-3	流下液膜による冷却メカニズム	53
図 3.2-4	流路温度の時間変化（1/2）	54
図 3.2-4	流路温度の時間変化（2/2）	55
図 3.2-5	ヒータ表面温度、流路温度の高さ方向温度分布の時間変化	56
図 3.2-6	ヒータ温度、圧力の比較（初期温度の影響）	57
図 3.2-7	ヒータ温度、圧力の比較（注水量の影響）	58
図 3.2-8	ヒータ温度、圧力の比較（浸漬位置の影響）	59
図 3.2-9	ヒータ高さ方向温度分布の比較（浸漬位置の影響）	60
図 3.2-10	ヒータ温度、圧力の比較（出口部閉塞率の影響）	61

図 3.2-11	ヒータ温度、圧力の比較（発熱量の影響）	62
図 3.2-12	発熱部全体の冷却時間、圧力の比較（1/3） [閉塞率高：ヒータ温度、注水量、浸漬位置の影響]	63
図 3.2-13	発熱部全体の冷却時間、圧力の比較（2/3） [閉塞率中：ヒータ温度、注水量、浸漬位置の影響]	64
図 3.2-14	発熱部全体の冷却時間、圧力の比較（3/3） [閉塞率中：発熱量の影響]	65

1. 緒言

実用化戦略調査研究において概念設計を進めているナトリウム冷却大型炉（アドバンスト・ループ型炉）^[1]では、燃料取扱設備の簡素化を図る候補概念として、炉外燃料貯蔵槽(EVST)及びその冷却系を削除し、使用済燃料集合体を水プールに直接浸漬・貯蔵する方式を検討している。

本概念では、炉外における使用済燃料の崩壊熱減衰待ちを行わずに、ナトリウム洗浄後、ガス中裸状態での高発熱燃料集合体（発熱量約18kW：実証炉のEVST方式の4.5倍）を水プールに直接浸漬・貯蔵する。しかし、ワイヤスペーサを有する稠密燃料集合体の体系において、水プールに浸漬する際の燃料ピンの沸騰現象や集合体内水位の上昇挙動、さらに移送中の昇降機スティックを想定した場合に集合体上部から注水する際の冷却特性に関する知見は限られている。このため、プラント概念の成立性を左右する熱流動課題の一つとして、高発熱燃料の冷却特性を把握する必要性が社内のナトリウム炉設計検討会で指摘されている。

今回、燃料取扱設備の設計検討に資することを目的に、燃料ピン単体系の試験体を用いて、燃料ピンの熱的条件（発熱量、被覆管温度）、集合体出口の圧力損失（発生蒸気の排出流路面積）、浸漬速度等をパラメータとした基礎試験により、本概念の冷却特性を評価した。

2. 冷却特性試験の概要

2.1 試験目的

アドバンスト・ループ型炉の炉外燃料取扱設備の候補概念として検討している水プール直接貯蔵方式の概略系統構成と集合体の冷却方法を図 2.1-1 に示す。

本概念では、まず原子炉から取り出したナトリウムポット入りの使用済燃料集合体を燃料洗浄室に移送する。ナトリウムポットから集合体を取り出し、付着したナトリウムを洗浄後、アルゴンガスで強制冷却しながら洗浄室内の移送機により、集合体を使用済燃料プールへ直接装荷して冷却する。これにより、EVST 関連設備の物量を削減できるとともに、ナトリウムバウンダリの縮小化が可能となる。

一方、EVST 内での崩壊熱の減衰待ち貯蔵・冷却を実施しないため、集合体を使用済燃料プールに浸漬・冷却する際の熱的条件（崩壊熱量 18kW：実証炉の EVST 方式の 4.5 倍）が厳しくなる。このため、燃料集合体の冷却特性上の観点から次の課題が指摘されていた。

課題 1：集合体を水プールに浸漬する過程で、初期温度 250 の燃料ピン周りから大量の蒸気が発生する。集合体を懸垂するグリッパには、蒸気を排出するための開口部を設けるが、排出パスの圧損が大きい場合、発生蒸気が集合体内部から十分に排出できなくなり集合体内圧が増大して浸水（水位上昇）が遅れ、燃料の冷却が困難になることが懸念される。

課題 2：集合体を移送する昇降機が浸漬過程でスティックした場合、燃料ピンの温度上昇を防止するため集合体上部より発熱部に注水する対応を図る。しかし、発生蒸気（水プール浸漬部分からの蒸気と上部冷却水の蒸発分）の排出が充分に行えない場合には、集合体内部への注水が困難となり燃料ピンの冷却不能に陥る可能性がある。

上記の課題を解決し、本概念の冷却特性を把握するため以下の 2 種類の試験を計画した。今回の試験では、まず燃料ピン周りの沸騰現象の把握が不可欠であることから、冷却挙動の可視化が容易なことも考慮し、燃料ピン単体での試験体系とした。また、表 2.1-1 に冷却特性上の課題と計画した試験の必要性・狙いをまとめる。

(1) 通常浸漬特性試験

集合体を水プールへ浸漬する場合、集合体内の水位上昇を支配する因子には以下が考えられる。

- ・ 集合体浸漬速度（水供給量）
- ・ 発生蒸気量（被覆管初期温度、燃料ピン発熱量、水プール水温）
- ・ 発生蒸気排出パス圧損

本試験では、課題 1 への対応として、通常浸漬時における集合体内の水位上昇（またはクエンチ点^(注1)の上昇）速度と発生蒸気の排出パスの圧損の相関を把握することを目的とし、主に集合体浸漬速度と発生蒸気排出パス圧損（グリッパ部閉塞率で代表）をパラメータとした試験を行った。

また、取扱う燃料集合体の熱的条件（被覆管初期温度や発熱量）をパラメータとした試験も行い、水プール浸漬前段階でのアルゴンガス強制冷却設備の減容化や、集合体の早期取り出しに伴う将来の定検期間短縮化の検討に資するデータを取得した。

冷却特性上の判断指標としては、燃料ピン発熱部の浸漬時間（発熱部上端をクエンチ点が通過するまでの時間）及び被覆管の温度上昇の程度を考慮した。

（注 1 クエンチ点：図 2.1-2 に示すように、高温壁の冷却開始に伴い、伝熱形態が膜沸騰から遷移沸騰、核沸騰に至り、壁温が急低下をはじめめる点）

(2)事故時水注入特性試験

前述のように、本概念では、高発熱集合体の水プール装荷中（集合体エントランスノズル着水後）に昇降機がスティックする事故時を想定した場合、集合体上部（グリッパ部）より注水し燃料ピンを冷却する対応策を検討している。

昇降機スティック時には、既に浸漬した発熱部から発生する蒸気（スティック時の水位に依存）と、上部からの注水により発生する蒸気による集合体内の圧力の上昇により、場合によっては注水が困難になることが考えられる。

したがって、課題 2 への対応として、スティックした場合の初期水位及び蒸気排出パス圧損と注水量との相関を把握し、燃料ピンの冷却に必要な注水系設備の設計要件を明らかにすることを目的とした。

前項と同様、燃料ピン発熱部の浸漬時間及び被覆管の温度上昇の程度を冷却特性上の判断指標として考慮した。

なお、試験実施に先立って、軽水炉を対象とした冷却材喪失事故時の冷却特性（再冠水）試験結果を概略調査した。代表的な再冠水試験^{[2] [3]}と本概念での試験条件を表 2.1-2 に比較して示す。また、高転換 PWR 体系での再冠水試験データの一例を図 2.1-3 に示す。

従来の再冠水試験と比較すると、燃料ピンの幾何形状（ピン間のギャップ、流路面積、スペーサの有無）や熱的条件（被覆管初期温度、熱流束）、注水方法・注水温度（ポンプによる強制注水の有無、サブクール度）の相違に加え、本概念では、特に燃料ピン冷却時に発生する蒸気がグリッパ部の開口を介して排出される体系となっている。このグリッパ部の閉塞率（圧力損失）が通常浸漬時の集合体内の水位上昇速度や事故時に作動する上部注水系の注入圧力設定等に大きく影響すると考えられるため、本概念での燃料ピン形状、熱的条件及びグリッパ部閉塞率を模擬した試験が必要と判断した。

表 2.1-1 水プール直接貯蔵方式における冷却上の課題と試験の必要性・狙い

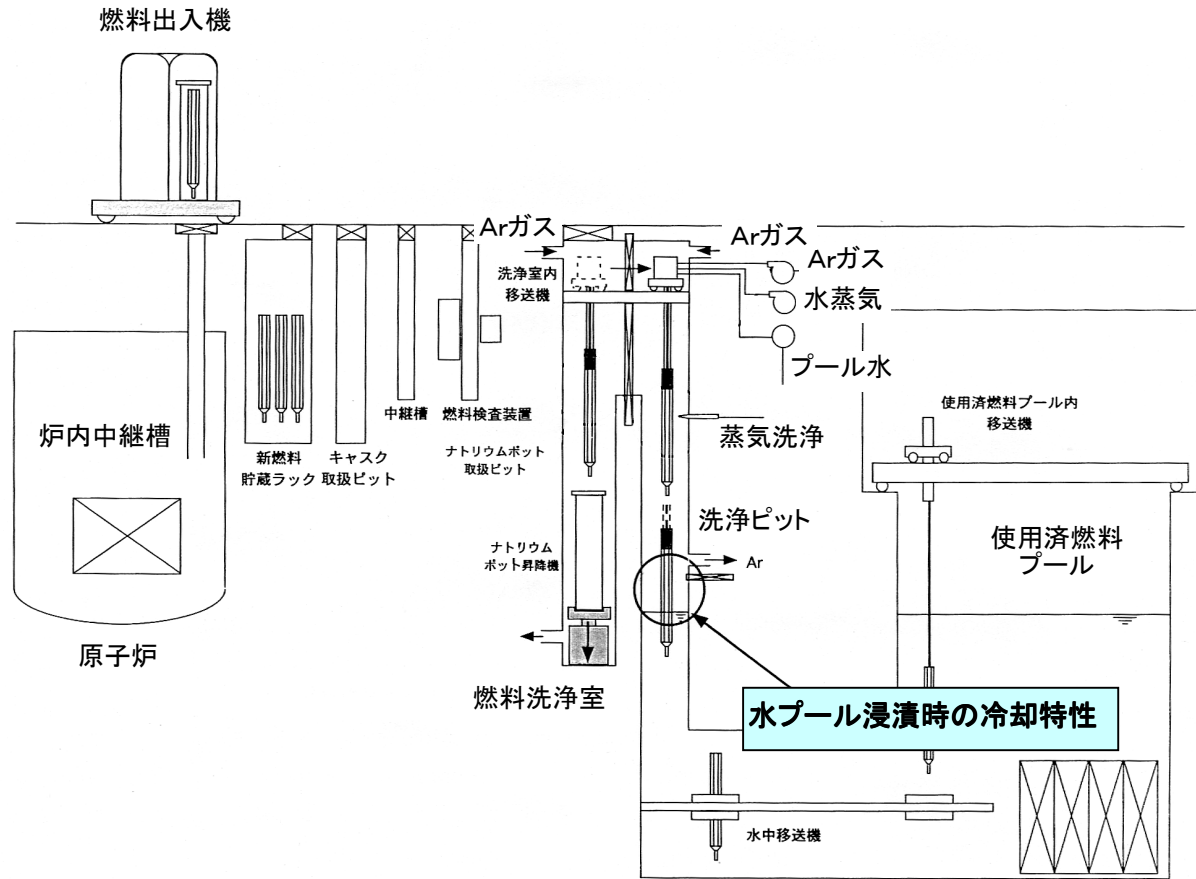
水浸漬時の冷却上の課題	現行設計の対応	設計上の課題	試験の必要性	試験及び試験パラメータ	試験の狙い	設計への反映
<p>[通常取扱時] ● Arガス強制冷却 却停止後の冷却 機能確保</p>	<p>①無冷却状態で水プールへ装着する。 Arガス強制冷却時の被覆管温度は250℃以下に維持される。冷却を停止した場合、被覆管温度は100℃/minで上昇する。従って、被覆管温度制限目安値550℃に達するまで3分間の猶予があり、この間に集合体を水プールへ浸漬する必要がある。</p>	<p>・発生する蒸気の排出パサの圧損が大きい場合、液面上昇が遅れ、被覆管温度は上昇する可能性がある。 従って、水浸漬時の冷却特性を把握した後、発生蒸気の排出パサが確保できる冷却系(含グリッパ部)の設計が必要である。</p>	<p>・集合体水浸漬時の液面上昇(クエンチ点上昇)速度と発生蒸気の排出パサの圧損の相関を把握する必要がある。</p>	<p>◎通常浸漬特性試験 [パラメータ] ・集合体浸漬速度: 25、50、70 mm/s ・初期被覆管温度: 250、300、350℃ ・集合体出口(蒸気排出口)閉塞率: 96、87%</p>	<p>・制限時間内で集合体発熱部が冠水することを確認。また、冠水過程で被覆管最高温度が制限目安値(550℃)以上とならないことを確認。 ・集合体出口閉塞率をパラメータとした集合体浸漬速度と初期被覆管温度に関する相関を求めめる。</p>	<p>・冷却系の設計(グリッパ部を含む)</p>
<p>[事故時] ● 水浸漬過程における昇降機スティック時の対応</p>	<p>②水プール浸漬前(集合体エントランスノズル着水前)に注水を開始し、水冷却を行いながら水プールへ装着する。</p>	<p>・注水設備(常用系)が必要となり、系統設備が増える。</p>	<p>・集合体着水前に注水による冷却の必要がないことを上記欄の試験で確認する必要がある。 (Arガス冷却停止後、水冷却なしで水プールへの装着が確認する)</p>	<p>◎水注入特性試験 [パラメータ] ・ステイック時点の発熱部浸漬位置 ・集合体出口閉塞率 96、87% ・注水量:10、20g/s</p>	<p>・水プール装荷前の注水との確認。 ・注水による冷却が可能であることを確認。 ・集合体出口閉塞率をパラメータとした注水量と初期被覆管温度に関する相関を求めめる。</p>	<p>・注水設備(常用系)の削除</p>
	<p>①注水系(待機系2系統)を起動し、水冷却を行う。</p>	<p>・燃料被覆管が高温状態に至った状態で注水を行う場合の注水系の設計要件(注水量、注水圧等)が明確でない。</p>	<p>・上部からの注水による冷却特性を把握する必要がある。 ・注水量と蒸気排出パサ圧損との相関の把握が必要である。</p>	<p>・通常水浸漬時の冷却特性試験(最上欄の試験に同じ)</p>	<p>・水プール装荷前の注水による冷却が必要ないことを確認。</p>	<p>・注水系設備要件の把握</p>
	<p>②水プール浸漬前(集合体エントランスノズル着水前)に注水を開始し、水冷却を行いながら水プールへ装着するため、昇降機スティック時でも冷却機能は確保される。但し、注水系は常用系、待機系2系統の合計3系統で対応する。</p>	<p>・注水系設備が3系統必要となる。</p>	<p>・集合体着水前に注水による必要がないこと(Arガス冷却停止後、水冷却なしで水プールへの装着ができること)を確認する必要がある。これにより注水系1系統(常用系)を削減できる。</p>			<p>・注水系設備(常用系)の削除</p>

表2.1-2 従来の再冠水試験条件との比較

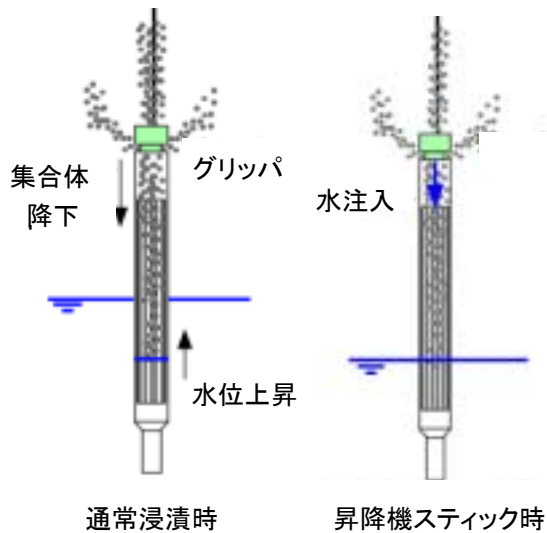
項目	単位	高転換PWR稠密格子体系での再冠水試験 ^[*2]	単一加熱管の再冠水現象に関する研究 ^[*3]	本試験 (Na冷却大型炉)	備考
テストセクション		3角配列4×4 (開放系)	単一環状流路 (開放系)	単一環状流路 (閉塞系近似)	本試験は、集合体をプールに浸漬する際に発生する蒸気量と蒸気排出パスの圧損、液面上昇速度に着目しており、閉じた系に近い体系で試験を行う。
試験部圧力	MPa	0.2	大気圧	蒸気排出パス圧損に依存	
ヒータピン径	mm	9.5	10.0	8.5	
ピン間ギャップ	mm	0.5	5.0 ^[注1]	1.0 ^[注1]	[注1] ヒータピンと外管とのギャップ
ピッチ/ピン径 (P/D)	(-)	1.05	1.5	1.18	
流路面積 ^[注2]	mm ²	524	236	29	
水力等価直径 ^[注2]	mm	3.2	10.0	2.0	[注2] 4×流路面積/全ぬれぶち長さ
加熱等価直径 ^[注3]	mm	4.4	30.0	4.5	[注3] 4×流路面積/加熱部ぬれぶち長さ
スペーサ型式		ワイヤ/グリッド	なし	ワイヤ	
注水方法		給水ポンプ	給水ポンプ	プール浸漬	軽水炉の非常用炉心冷却系のような強制的な注水でないため、クエンチ点の上昇速度は一定とならない可能性がある。
注水圧	MPa	0.2以上	0.4	最大0.05 ^[注4]	[注4] 集合体浸漬時の最大水頭圧
注水速度	mm/s	10~81	12~103	25~70 ^[注5]	[注5] 集合体の浸漬速度であり、非常用炉心冷却系での注水速度と等価か否か不明。
注水温度	°C	サブクール度10K (110°C)	16~86	40	
初期温度	°C	600~950	250~800	250~350	クエンチ点の上昇速度に影響。
発熱量/ピン	W	最大1700	950	75~165	
発熱長	mm	1500	1000	800	
平均熱流束	W/m ²	3.80E+04	3.02E+04	2.49E+03	

[*2] K.Hori et al., :Experiment Study on Reflooding in Advanced Tight Lattice PWR, NTHAS2, pp303-308, Oct.15-18, 2000

[*3] 神永、内田：単一加熱管の再冠水現象に関する研究(第1報)、日本機械学会論文集 44巻387号、pp3875-3883、S53.11



(a) 燃料取扱設備概念



(b) 集合体の冷却方法

図 2.1-1 燃料取扱設備の概略構成と集合体の冷却方法

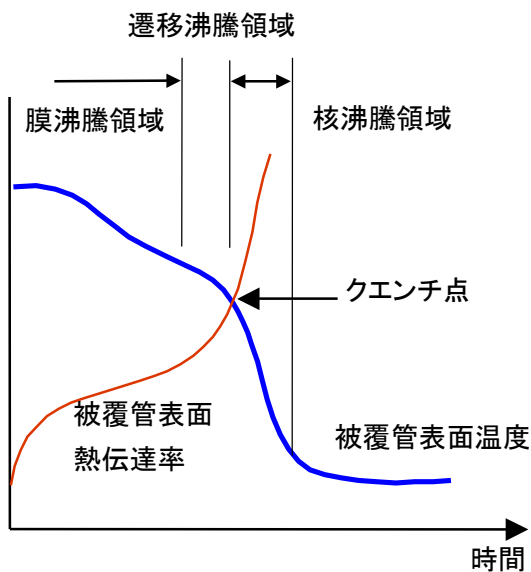


図2.1-2 再冠水冷却時の被覆管表面温度の経時変化(模式図)

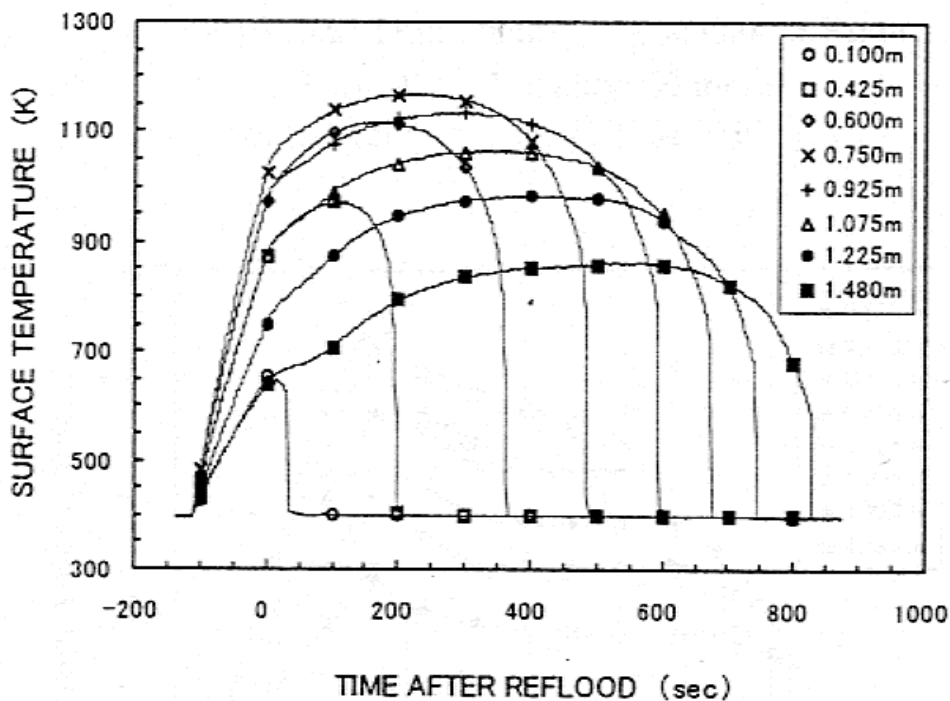


図 2.1-3 高転換PWRの再冠水試験^[2]でのヒータ表面温度変化の一例
 [初期ヒータ温度 750°C、ロッドギャップ 0.5mm、冠水速度 40mm/s]

2.2 装置の概要と試験パラメータ

2.2.1 試験装置の構成

製作した試験装置の概念図を図 2.2-1 に示す。試験装置は、水浸漬時の発生蒸気量及び集合体出入口のエントランスノズルとグリッパ部の圧力損失を模擬できるように、燃料ピンを模擬したヒータピンを収納した流路形成管、上・下部の圧損素子、模擬水プール、巻き上げ装置、検出器、計測設備等から構成される。特に、試験体の寸法仕様は、実機の燃料仕様に基づいて設定した。実機概念と試験体主要部の寸法仕様を表 2.2-1 に比較して示す。

(1)ヒータピン

ヒータピンは、実機燃料ピンと同じ外径 8.5mm、発熱長 0.8m (全長約 2.4m) とした。ヒータ出力は、最大 300W で均一発熱仕様としている。

発熱部表面には、高さ方向に熱電対 5 点を 200mm ピッチで埋め込み、水位上昇に伴うヒータ表面温度変化を計測できるようにした。また、ヒータピンを支持するワイヤスペーサは、外部への放熱の影響や装置の組立性を考慮し、外径 0.7mm の SUS 製ワイヤを 200mm の巻き付けピッチで設置した。

(2)流路形成管

ヒータピンを収納する流路形成管の形状は、燃料ピン 1 本からの蒸気発生量が実機と等価になるように、燃料ピン 1 本当たりの流路面積を実機と等価になるように設定し、内径約 10.5mm とした。流路形成管の材質としては、ヒータピン周りの熱的境界条件を模擬するための SUS 管(外側に断熱材巻きつけ)と沸騰挙動を可視化するための耐熱ガラス管を使用した。

温度計測のため、熱電対を流路形成管とヒータピンの間隙部に 8 点、流路形成管の外表面に 2 点設置した。

(3)模擬水プール

実機では、昇降機で懸垂された集合体を使用済燃料プールに降下・冷却するシステムである。しかし、本試験では、観察性・利便性等の観点から、所定温度に保持した試験体を固定しておき、試験体下部と連通する模擬水プールを一定速度で上昇させることで、試験部への水供給を模擬した。模擬水プールは、内径 300mm の透明樹脂製容器を用いており、水温測定のための温度計及び供給水量測定用の流量計を備えている。

(4)圧損素子

下部圧損素子は、燃料集合体のエントランスノズル部の圧力損失を模擬しており、閉塞率 92% で実機 (閉塞率 60 ~ 80%) より水が入りにくい状態に設定した。

また、上部圧損素子は、燃料集合体のハンドリングヘッド部を燃料取扱装置のグリッパで

懸垂した状態の閉塞率を模擬したもので、上部からの注水管との組合せにより二種類の閉塞率（87% / 96%）を設定した。これらの圧損素子の上下に、圧力計測管を設け、沸騰に伴う圧力上昇や圧損素子の差圧を計測した。

(5) 巻上げ装置・位置検出器

実機の昇降機に相当する設備として、模擬水プールを上下するための巻上げ装置を設けた。巻上げ装置は、模擬水プールを懸垂して、実機で計画している最低浸漬速度 25mm/s から最大速度 70mm/s までの速度が調節できる無段変速型の電動巻き上げ機を用いた。また、付属設備として、模擬水プールの位置を検出するワイヤ式の位置検出計を備えている。

(6) 計測点

本試験では、ヒータ表面や流路形成管の温度を測定するための熱電対、模擬水プールの位置を検出するワイヤ式位置検出計、燃料集合体の圧力損失を模擬した部位の圧力を測定するための圧力計、ヒータへの印加電力量を検出する電力計、及び浸漬水量を測定する流量計を設置した。各信号は、変換器、データロガーを介し、パソコンに取り込んだ。なお、熱電対、圧力計の設置位置を図 2.2-2 に示す。

2.2.2 試験パラメータ

(1) 燃料ピン発熱量

平成 12 年度のナトリウム冷却大型炉設計では、炉停止 21 日後の集合体 1 体の崩壊熱量は 18kW（燃料ピン 1 本当たり 66.4W）である^[1]。また、ナトリウム冷却中型炉の設計では 16kW（燃料ピン 1 本当たり 73.7W）である。これらを包絡する発熱量を基準とし、将来の定検期間短縮化の検討も視野に入れてパラメータの上限を約 45kW（炉停止 4 日後の崩壊熱：燃料ピン 1 本当たり 166W）とした。したがって、試験における発熱量は以下の 2 ケースを選定した。

発熱量： 75、165（W）

(2) 初期被覆管表面温度

平成 12 年度の設計では、水浸漬前のアルゴンガス強制冷却時の被覆管表面温度を 250 と規定している。この温度を基準とし、集合体裸移送時のガス冷却設備の合理化検討への反映を考慮し、被覆管表面温度のパラメータ上限を 350 とした。

表面温度： 250、300、350（ ）

(3) 集合体出口部閉塞率

ハンドリングヘッドとグリッパ部の蒸気排出パスの閉塞率をパラメータとし、以下の 2 種について試験を行う。

出口部閉塞率： 96、87 (%)

水プールに浸漬する前のガス中裸移送時には、アルゴンガスによる冷却効率を上げるため、できるだけ集合体出口部の閉塞率を高くする必要があり、上記パラメータ上限値 96%はこれを代表する値とした。また閉塞率 87%は上述の上限値に対し閉塞率が低い側を代表した値である。

(4)集合体浸漬速度 (模擬水プール上昇速度：通常浸漬特性試験のみ)

平成 12 年度の設計では、被覆管最高温度が通常取扱時の制限目安である 550 に達するまでに燃料ピン発熱部を冠水させるための集合体浸漬速度の下限値は 24mm/s との結果が得られている。この値をベースに、パラメータ上限を試験用昇降装置の性能上限 70mm/s とした。浸漬速度のパラメータは下記 3 ケースとする。

浸漬速度： 25、50、70 (mm/s)

(5)昇降機スティック発生時の浸漬水位 (水注入特性試験のみ)

集合体を水プールへ装荷中に昇降機がスティックした場合、浸漬水位によって発生蒸気量が異なるとともに、上部からの注水による発熱部の冷却特性 (燃料ピンの温度上昇割合や冷却時間) も変化すると考えられる。そこで、スティック発生時の浸漬水位をパラメータとした試験により、発生蒸気量と排出パスの圧損の関係や、燃料ピン発熱部の冷却時間への影響を把握した。

初期浸漬水位： 発熱部下端、発熱部中央

初期水位が発熱部下端の場合には、プール浸漬部分からの蒸気発生が最小のケースで上部からの注水のための冷却特性を評価する。また、初期水位が発熱部中央の場合には、プール浸漬部分からの蒸気発生を考慮する代表ケースとして設定した。

(6)水注入量 (事故時水注入特性試験のみ)

先に実施する通常浸漬試験での内圧測定結果から、注水量を確保するための圧力を決め、暫定的に下記の流量を設定した。

上部注水量： 10、20(g/s)

表2.2-1 試験装置寸法仕様

項目	単位	実機概念	試験装置	装置寸法／設定根拠
燃料ピン径	mm	8.5	8.5	
燃料ピン全長	mm	2905	2360	下欄の「炉心燃料領域下端から燃料要素下端までの長さ」を参照。
発熱量/燃料ピン	W	66.4	75(レファレンス) 165(最大値)	崩壊熱量を模擬。 レファレンス:炉停止21日後、最大値:炉停止4日後
発熱分布		運転中の分布に相応	軸方向一様	運転中に比べ炉停止後の出力の値は小さく、発熱分布一定としても冷却特性試験への影響は小さいと考える。
被覆管初期温度	°C	250	250~350	設計仕様である250°Cを下限値とし、アルゴンガス冷却設備の合理化検討への反映を勘案して上限を350°Cとする。
燃料ピン熱容量	J/K/m	202	198	数値は単位長さ当たりの熱容量を示す。
発熱長	mm	800	800	
炉心領域上端から燃料要素上端までの長さ	mm	665	665	軸ブランケット領域の発熱量を炉心領域に加え、総発熱量を合わせる。試験装置では軸ブランケット領域の発熱は省略する。
炉心領域下端から燃料要素下端までの長さ	mm	1440	895	炉心下方の非発熱部は冷却特性への影響がないと判断し、試験装置を短尺化する。
流路面積/ピン	mm ²	28.66	28.66	燃料ピン径、発熱長、流路面積、加熱等価直径を実機と一致させて、熱的な境界条件(発生蒸気量)と蒸気の流出流速を模擬する。
加熱等価直径	mm	4.5	4.5	蒸気排出パスの流動抵抗は模擬できないが、試験装置では水力等価直径が実機より小さくなり、圧損の観点からは保守側となる。
水力等価直径	mm	3.66	2.0	
流路形成管内径	mm	—	10.5	実機と流路面積を符合させる外管内径寸法とする。
ワイヤ直径	mm	1.48	0.7	流路面積を合わせるため、製作上ワイヤ直径が小さくなる。
ワイヤ巻きピッチ	mm	200	200	
水プール温度	°C	40~52	40	
浸漬速度	mm/s	24 以上	25~70	昇降装置性能の上限70mm/s

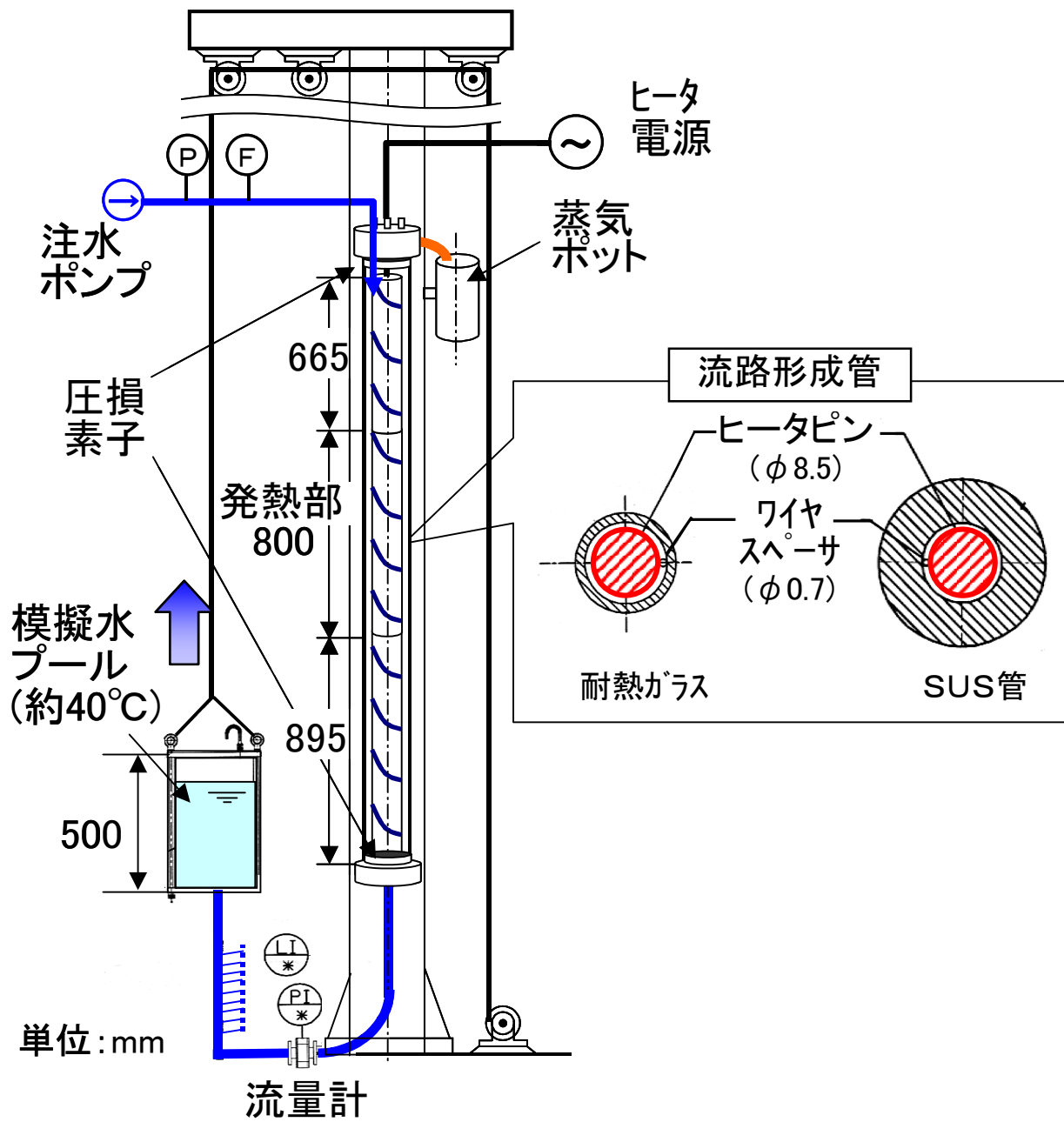


図 2.2-1 試験装置構成図

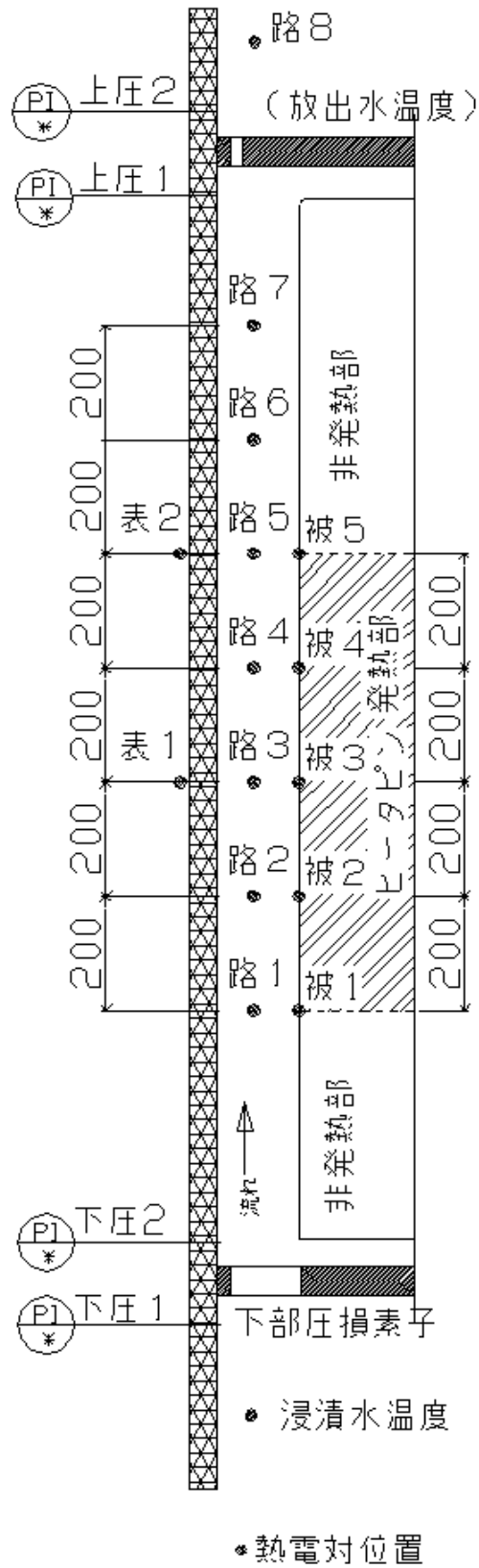


図 2.2-2 計測点の設置位置

3 . 試験結果の検討

3.1 通常浸漬特性試験

3.1.1 試験条件

通常浸漬特性試験では、ヒータ出力、初期ヒータ表面温度、浸漬速度(水プール上昇速度)、出口部閉塞率、流路形成管材質をパラメータとした試験を行った。

試験パラメータ項目は次のとおりである。

- ・ヒータ出力 : 75W (1本ピン当たりの崩壊熱量相当)
: 165W (1本ピン当たりの設計最大発熱量)
- ・初期ヒータ温度 : 250、300、350

なお、300 / 350 の温度設定にあたっては、試運転での結果を反映して、ヒータ出力を調整している。

- ・浸漬速度 : 25mm/s、50mm/s、70mm/s
- ・出口部閉塞率 : 高(96%)、中(87%)
- ・流路形成管 : ステンレス製(通常試験用)、耐熱ガラス製(可視化試験用)

上記の試験パラメータを基に設定した試験マトリクスを表 3.1-1 に示す。各ケースでの着眼点を以下に示す。

- ・ケース q 1 ~ 8 : 初期温度と浸漬速度の相関
- ・ケース q 9 ~ 12 : 出口部閉塞率の影響確認
- ・ケース q 13 ~ 16 : 発熱量の影響確認
- ・ケース q 17 ~ 19 : 耐熱ガラス管による可視化試験

3.1.2 試験手順

試験の手順を以下に示す。

試験条件に基づき試験体を組み上げ、所定温度まで加熱する。

試験条件温度到達直前に、模擬水プールの所定水位まで温水(約 40)を供給する。水位が下部圧損素子の下 30mm 程度のところまで供給できたことを確認した後、試験データ収録の準備を行う。

ヒータ表面温度が所定温度に達したことを確認後、データ収録を開始する。収録サンプリング速度は 0.1s インターバルとする。

データ収録開始から約 3 秒経過後、温度などのモニタを行いながら、巻き上げ機を起動し模擬水プールを上昇させる。

模擬水プールの水位が上部圧損素子の上まで到達したのを確認し、巻き上げ装置を停止する。巻き上げストロークは 2.7m を目標とする。

模擬水プールを停止した状態で、各部の温度・圧力等のデータを収録する。

発熱部の温度が 100 以下になったのを確認して、ヒータへの通電を停止し、試験部の冷却を行うと共に、データの収録を終了する。

3.1.3 冷却挙動の概要

ケース q 6 (初期温度 350 、浸漬速度 25mm/s、閉塞率高、SUS 流路形成管条件) を例に、計測した温度・圧力変化の挙動を以下に述べる。

(1) ヒータ表面温度の変化

ヒータピン表面温度および模擬水プール位置の変化を図 3.1-1 に示す。

試験では、模擬水プールをほぼ一定速度で上昇させており、試験開始後 52 秒でヒータ下端部 (高さ 1.03m) に達し、125 秒以降は所定位置 (高さ 2.7m) で保持される。

プール上昇に伴い、試験体下部から冷却水が流入するので、ヒータ表面温度は、下端部から徐々に低下する。発熱部下端に相当する被 1 では、プール水位が発熱部に到達してから約 5 秒後に飽和温度まで急激に低下する (クエンチ点) 傾向を示す。発熱部上方のヒータ温度 (被 2、被 3、被 4) も初期温度から増加することなく時間とともに徐々に低下し、最終的には飽和温度まで急激に低下する。なお、上端部の被 5 は、軸方向の熱伝導の影響により初期温度より増加する傾向を示すが、試験開始後約 470 秒で 100 以下となった。

このように、水プールが発熱部より上方に達した後、徐々にヒータ表面温度が低下する状態が継続し、その後急激に飽和温度まで低下する傾向が見られ、図 2.1-2 に示すような再冠水冷却における伝熱面温度変化の特徴を示している。また、高さ方向にクエンチ点が上昇する傾向も、定性的には図 2.1-3 に示す高転換 PWR の再冠水試験結果 (4 × 4 バンドル体系) と同様と考える。

(2) 環状流路部の温度変化

流路形成管とヒータピンとの環状流路部の温度変化を、同一高さのヒータ温度と対比して図 3.1-2 に示す。流路内の温度は、模擬水プールがヒータ下端部に達した 52 秒以降、路 1 から路 4 まではほとんど同時に低下し始める。

発熱部下端の路 1 は、水位が到達した 52 秒以降約 100 に低下し、それ以降はほぼヒータ温度に追従している。

発熱部中央の路 2、路 3 では、一旦温度が低下した後、100 ~ 150 K 程度の幅で温度変化を示し、激しい沸騰現象が見られる。路 2 では、約 150 秒時点でヒータ温度がクエンチし、その後はヒータ温度に追従し約 100 で推移する。発熱部中央の路 3 では、約 220 秒時点でヒータ温度がクエンチするが、その後も温度変動が見られる。今回の試験体系では、SUS 流路形成管の熱容量が比較的大きく、破線で示す流路形成管の温度変化 (表 1) が緩慢でヒータ温度がクエンチした後でも 200 以上の高温となっていることから、クエンチ後の沸騰現象は流路形成管側からの伝熱の影響によるものと考えられる。

また、路 4 は上流側の路 2、路 3 の影響もあり、約 300 秒あたりまで温度変動を示す。なお、流路内の水位上昇はプール上昇速度に比べると時間遅れを伴っており、約 200 秒あたりまでは、このレベルまで液単相水位が達していないと考えられるので、おそらくは上流側で発生する飽和蒸気温度を計測しているものと推定される。

同様に、発熱部上端の路 5 では、試験部の圧力上昇に対応した飽和蒸気温度を計測しているものと思われ、冷却開始後 120 秒過ぎから 115 前後で安定した温度を示し、300 秒過ぎに温度が低下し始める。この結果、非加熱部の温度（路 8）は、上流側での蒸気発生によって、試験開始後約 90 秒過ぎから徐々に上昇を始め、約 100 に近い温度になる。

図 3.1-3 には、ヒータ温度及び流路温度の高さ方向分布の時間変化を示す。ヒータ側、流路側とも浸漬開始前の段階（50 秒時点）では、発熱部中央位置が高く、発熱部上下端が低い温度分布となっている。このような温度分布は、ヒータピンの発熱部から非発熱部への軸方向熱伝導の影響によるものであり、全発熱量の 1 割程度が発熱部上下方向に移行したものと考える。また、ヒータ温度設定の間にワイヤスペーサを介して流路形成管の温度も上昇するが、流路形成管の外部に断熱材を巻いているため、試験部全体としては全発熱量が冷却材の温度上昇・沸騰に寄与していると考えられる。

その後、流路内での水位上昇に伴い、ヒータ側では徐々に下部から温度が低下（クエンチ点が上昇）し、最高温度位置が発熱部上方に移行する傾向がわかる。また、流路温度（その時点での瞬時値）も時間経過につれて、ほぼ 100 に漸近していく傾向となっている。

(3) 試験部の圧力変化

図 3.1-4 に試験部の圧力（下部圧損素子下流側の下圧 2、上部圧損素子上流側の上圧 1）の時間変化を示す。試験部入口の下圧 2 は、水プール上昇に伴い水頭圧が加わるため直線的に上昇し、約 52 秒からの沸騰開始以降は、100～200hPa の大きな圧力変動が見られる。水プールの巻上げが終了する 125 秒後に、平均圧力は約 250hPa（プール水位 2.7m にほぼ相当する水頭圧）に達し、ヒータ部での沸騰が収束する 350 秒以降はほぼ一定となる。

試験部出口の上圧 1 は、沸騰開始から 20 秒程度遅れて、試験部での蒸気発生により圧力上昇を開始する。激しい沸騰状態での平均圧力は約 120hPa 程度まで達し、約 380 秒時点での発熱部上端位置（被 5）のクエンチに対応するように、大気圧近傍まで圧力が低下する。

このように、ヒータピンの冷却に伴う蒸気発生により試験部出口圧力（上圧 1）は上昇するが、試験部入口（下圧 2）の圧力を上回ることはなかった。したがって、集合体出口部の閉塞率を 96% まで高くした条件においても、試験体下部からの冷却水流入と、発生した蒸気の放出が継続的に行われており、当初懸念されていた冷却水の流入を阻害するような状況にはなっていないことを確認した。

3.1.4 流路形成管内の沸騰挙動

耐熱ガラス製の流路形成管を用いて、内部の水位上昇 / 沸騰現象をビデオで可視化した。試験は、初期温度 250 、閉塞率高の条件で、浸漬速度をパラメータとして、沸騰挙動に差異があるかを確認した。

図 3.1-5 に、ケース q17 (浸漬速度 25mm/s) における発熱部下端と、発熱部中央での観察結果を示す。観察時刻は、流路形成管内の水位が発熱部下端に達してから、それぞれ 4 秒後と 27 秒後のものであり、楕円の範囲がほぼ沸騰領域となっている。

発熱部下端では、水位到達後、ヒータ表面に高さ約 6cm 程度の蒸気膜が形成されており、神永らの単一加熱管の再冠水試験^[3] (ヒータ温度 400 、注水温度 85) での観察結果とほぼ同様であった。本試験では、表 2.1-2 に示すように平均熱流束が 2.5kW/m² と従来の再冠水試験条件と比較して一桁程度低い条件となっているが、明確な膜沸騰現象が見られており、リフラッディング冷却の場合には、熱流束よりも伝熱面温度が沸騰現象を支配しているものとする。

その後、水プールの上昇に伴い、蒸気膜の先端が上下に振動しながら上方に移行し、ヒータが冷却されていく。しかし、水プールの上昇速度に比べて、ヒータの冷却速度 (クエンチ点の上昇速度) が遅れるため、沸騰領域が拡大する傾向にあり、発熱部中央では、沸騰領域の高さは約 27cm 程度まで拡大している。また、写真では判別しにくいですが、液単相域のやや上方では、ヒータとガラス管のギャップ幅に相当する比較的大きな気泡発生が観察されており、核沸騰領域での特徴を示すものとする。

また、浸漬速度をパラメータとした場合には、水プールの上昇速度が速くなるにつれて、発熱部全体がクエンチするまでの時間が多少短縮される傾向にあるだけで、沸騰現象の観点からは差異は見られなかった。

さらに、ヒータピンと流路形成管のギャップが狭いことから、ワイヤスペーサに沿って旋回流が流路内に形成されるのではないかと指摘もあったが、今回の試験においては見られなかった。

次に、ヒータ温度の時間変化を SUS 管の場合と比較して図 3.1-6 に示す。耐熱ガラス管の場合には、約 100 秒過ぎで発熱部中央 (被 3) がクエンチしている。沸騰状況の観察結果と対応させてみると、100 秒あたりでは大きな気泡発生が見られており、沸騰形態が膜沸騰から核沸騰に移行して熱伝達率が大幅に増加し、ヒータ温度が急激に低下したものとする。

なお、保温材を設置している厚肉の SUS 管に比べて、外部への放熱量が相対的に大きい耐熱ガラス管のほうがヒータ温度の低下が早くなることから、流路形成管外側の熱的境界条件はヒータの冷却速度に影響している。しかし、いずれも水プールの上昇に伴って発熱部上方に冷却が進行しており、冷却特性の観点からは定性的には両者の差異は小さく、ガラス管で観察した挙動が SUS 管内部でも起きているものとする。

3.1.5 各試験パラメータの影響

(1) ヒータ初期温度の影響

図 3.1-7 に、浸漬速度 (25mm/s) 閉塞率高、SUS 流路形成管の条件を一定として、初期温度を 250~350 まで変化させた場合のヒータ温度の時間変化を比較する。

ヒータ初期温度を上昇させるに伴い、発熱部全体が冷却されるまでの時間が延びるとともに、発熱部上端 (被 5) の温度上昇割合が増加する傾向を示している。

沸騰状態の指標として、発熱部下端に水位が到達してから発熱部上端 (被 5) がクエンチするまでの時間を冠水終了時間として考えると、ケース q 1 (250) の場合に約 114 秒、ケース q 4 (300) の場合に約 226 秒 (q 1 の 1.98 倍) ケース q 6 (350) の場合に約 332 秒 (q 1 の 2.91 倍) となっており、ほぼヒータ温度に比例して冠水終了時間が延長している。このように、ヒータ初期温度は冷却特性上支配的な因子となることが明らかになった。

(2) 浸漬速度 (プール上昇速度) の影響

図 3.1-8 に、発熱量 (100W) 初期温度 (350) 閉塞率高、SUS 流路形成管の条件を一定として、浸漬速度を 25~70mm/s まで変化させた場合のヒータ温度の時間変化を比較する。

ケース q 6 (25mm/s) では、発熱部中央の被 2、被 3、被 4 のクエンチ時刻が他のケースより数十秒程度早くなっている。なお、発熱部上端がクエンチするまでの冠水終了時間で見た場合にはケース q 6 (25mm/s) で約 332 秒、ケース q 7 (50mm/s) で約 361 秒、ケース q 8 (70mm/s) で約 339 秒となった。ケース q 7 の場合には、発熱部上端 (被 5) の温度上昇が他のケースよりやや拡大しているため、冠水終了時間が若干増加するが、ヒータ温度変化の傾向は大差ない結果となっている。

また、図 3.1-9 は、ケース q 6 (25mm/s) と q 8 (70mm/s) での圧力変化と水プール水位の変化を比較している。浸漬速度を増加するにしたがって、水プールの水位上昇が加速されるため、沸騰開始が早まるとともに圧力上昇の勾配がきつくなる。しかし、水プール水位が 2.7m 高さに達した後は、供給される冷却水の駆動力 (水頭圧) はほぼ一定となり、沸騰期間中での試験体上部 (上圧 1) の平均圧力も、ケース q 6 (25mm/s) で 127hPa、q 8 (70mm/s) で 134hPa とほぼ一致している。

このように、浸漬速度を増加させることで、沸騰開始時間が短縮され、集合体内の圧力上昇速度が増加する。しかし、水プールが上端位置に達した後は、浸漬速度を変化させた影響は無くなり、ヒータ初期温度が一定であれば、ほぼ同様の冷却特性を示すと考える。

(3) 出口部閉塞率の影響

発熱量 (100W) 初期温度 (350) 浸漬速度 (25mm/s) SUS 流路形成管の条件を一定として、出口部閉塞率を変化させた場合のヒータ温度の時間変化を図 3.1-10 に、圧力変化を図 3.1-11 に比較する。

ケースq11（閉塞率 87%）では、ケースq6（閉塞率 96%）の場合に比べて、冠水終了時間が大幅に短縮（332 - 170 秒）されるとともに、試験体上部の圧力上昇も小さく（127 - 44hPa）なっている。出口部の閉塞率を小さくする場合には、沸騰によって発生した蒸気が集合体から排出されやすくなり、結果として集合体内の水位上昇速度が増加して発熱部の冷却が早く終了したものとする。したがって、集合体出口での蒸気排出部の形状（圧損）はヒータピンの冷却特性に大きく影響することが明らかとなった。

(4) 発熱量の影響

初期温度（350 ）、浸漬速度（70mm/s）、閉塞率高、SUS 流路形成管の条件を一定として、発熱量を変化させた場合のヒータ温度の時間変化を図 3.1-12 に比較する。発熱量を 165W に増大したケースq14 では、発熱量の低いケースq8（100W）に対し、温度変化の傾向は定性的には同様であるが、高さ方向各点のクエンチ時刻は 30～40 秒程度増加するとともに、発熱部上端（被 5）の初期温度からの上昇幅も増大している。しかし、冠水終了時間は発熱量に比例して増加するまでには至らない（q8：339 秒、q14：384 秒）ことから、今回の試験範囲では冷却特性に及ぼす影響は小さいと考える。

3.1.6 冷却特性のまとめ

(1) 冠水終了時間と圧力上昇への影響

冷却特性を表す指標として、冠水終了時間（発熱部下端に水位が到達してから発熱部上端がクエンチするまでの時間）と、集合体上部の圧力上昇（上圧 1：沸騰期間中の平均値）に着目し、ヒータ初期温度、浸漬速度、出口部閉塞率をパラメータとした各ケースのデータを図 3.1-13 にプロットした。図の横軸には、ヒータ初期温度をとっており、実線が閉塞率高、破線が閉塞率中のデータとなっている。

冠水終了時間は、ほぼヒータ初期温度に比例して増加する傾向を示す。また、浸漬速度を 25～70mm/s まで変化させても、冠水終了時間は 20～30 秒程度の差が生じるに留まっている。なお、出口部閉塞率を小さくした場合、冠水終了時間は短縮され、初期温度に対する冠水終了時間の増加割合（勾配）も小さくなる傾向にある。

上部圧力に関しては、出口部閉塞率に依存して大きく変化（閉塞率高：120～130hPa、閉塞率中：38～44hPa）するが、ヒータ温度や浸漬速度の依存性は小さい。

同様に、発熱量と出口部閉塞率をパラメータ（浸漬速度：70mm/s 一定）として、冠水終了時間と上部圧力のデータを図 3.1-14 に比較した。

冠水終了時間は、出口部閉塞率が高いケースで発熱量を 100 - 165W に増加させると約 40 秒伸びる傾向にあるが、閉塞率中の場合にはほぼ一定である。また、上部圧力に関しては、発熱量を増加させても、設定した出口部閉塞率に対応してほぼ一定となっている。

したがって、冠水終了時間に関しては、発熱量や浸漬速度の依存性は小さくなく、ヒータ

初期温度に支配される、いいかえれば冷却水に供給される熱量の観点からヒータ側の熱容量に依存していることがわかる。

上部圧力に関しては、ヒータ初期温度、浸漬速度、発熱量の依存性は小さく、出口部閉塞率に支配され、集合体出口部の形状に大きく依存することがわかる。なお、閉塞率高(96%)の条件においても上部の圧力上昇は約130hPaで下部圧力を上回ることがなく、蒸気発生による圧力上昇によって集合体の水位上昇が阻害されることはなかった。

また、浸漬中におけるヒータ温度の上昇割合も冷却特性上の着目点であった。しかし、本試験では、表3.1-2に示すように初期温度が最も高い点での温度上昇は、ほとんどのケースで1K以内、最大でも3.5Kに留まっており、各ケースとも良好に冷却できる結果となった。これは、今回の試験条件では、発熱量や表面温度が従来の再冠水試験よりも相対的に低いことや、発熱部下端からの冷却に伴って発生する蒸気が発熱部上方を冷却する効果に起因するものと考えられる。

なお、高発熱条件である165Wは、前述のように炉停止4日後の崩壊熱相当であり、通常浸漬での冷却特性の観点からは、将来の定検期間短縮を想定した早期燃料取出しにも対応できる見通しが得られた。

(2)クエンチ点の時間的推移

神永ら^[3]は、単一加熱管を下部から注水して冷却する試験体系において、初期管壁温度等に対して、クエンチ点の時間的推移や上昇速度との相関を調べている。図3.1-15には、代表的な試験結果を示す。初期の管壁温度600、注水温度20の条件で、注水速度を変化させた場合、クエンチ点は高さ方向にほぼ一定速度で上昇する傾向を示す。また、管壁温度を400~800まで変化させた場合、管壁温度の増加に伴い、クエンチ点上昇速度が低下する傾向となっている。神永らの試験と本試験では、熱的な境界条件や懸垂された水プールとの水頭差に依存する注水方法などが異なるが、単ピン体系での冷却特性を検討するうえで、クエンチ点の時間的推移や上昇速度を本試験での測定結果と比較してみる。

熱電対5点の温度計測結果から求めたクエンチ点の時間的推移を、初期温度、出口部閉塞率をパラメータとして図3.1-16に示す。図中の縦軸は、発熱部下端(被1)がクエンチした時刻を0として、そこから発熱部上方の4点がクエンチした時刻をプロットしている。浸漬速度25mm/sで初期温度350、閉塞率高のケースq6は、神永らの試験結果と同様、高さ方向でほぼ一定速度でクエンチ点が上昇する傾向となっている。しかし、他のケースでは、ほぼ発熱部中央までとそれ以降でグラフの勾配が異なっている、すなわち、図3.1-7に示したケースq1やケースq4のヒータ温度変化よりわかるように、発熱部中央まではクエンチ点上昇速度が比較的緩慢となるのに対し、発熱部中央を過ぎると急激に上昇速度が増加する結果となっている。

そこで、クエンチ点の上昇速度に関しては、発熱部下端から中央までの領域での上昇速度

U_{g1} (= 400mm / 発熱部中央がクエンチした時間) と、発熱部下端から上端までの領域での平均値 U_{gav} (= 800mm / 発熱部上端がクエンチした時間) に分けて評価を試みた。

図 3.1-17 に、初期温度を横軸にクエンチ点上昇速度をプロットした。本試験においても、初期温度の増加に伴いヒータ側の蓄熱量 (冷却水に与える熱量) が増大し、その結果冠水終了時間が延長されてクエンチ点上昇速度が低下する傾向を示す。しかし、発熱部平均でのクエンチ点上昇速度 U_{gav} は、出口部閉塞率高の場合で 2.4 ~ 7.5mm/s、閉塞率中の場合 5.0 ~ 15.0mm/s 程度となり、神永らの試験結果と比較すると注水速度が小さい (2cm/s 以下) ケースと同程度の結果となった。

クエンチ点上昇速度 U_{gav} が低い原因としては、本試験では懸垂された水プールから流動抵抗の大きい下部圧損素子を介して冷却水が流入する形態となっていることによるものと考えられる。

また、発熱部中央までのクエンチ速度 U_{g1} が発熱部平均でのクエンチ速度 U_{gav} よりも小さい理由としては、図 3.1-3 に示したように高さ方向のヒータ温度分布に依存するものと考えられる。注水開始前の初期温度分布では、ヒータ下端 / 上端部と中央部の温度差が 75 ~ 130 K 程度あるため、最も高温となる発熱部中央を冷却する時間が律速となり、発熱部中央がクエンチされた後は、上端部に向かってヒータ表面温度が低下しているのでクエンチ速度が加速されるものと推定される。

なお、冷却特性上の観点からは発熱部全体がクエンチする時間が重要となるので、燃料ピンの初期温度に対する発熱部平均でのクエンチ点上昇速度 U_{gav} を把握しておけば、今後の設計に反映できると考える。

表 3.1-1-1 通常浸漬特性試験 試験マトリクス

試験 ケース	ヒータ出力 (W)	初期ヒータ 温度(°C)	浸漬速度 (mm/s)	出口部 閉塞率 ^[注]	流路形成管 材質	備考
q1	75	250	25	高	SUS	初期ヒータ温度、浸漬速度の 影響確認
q2	↑	↑	50	↑	↑	
q3	↑	↑	70	↑	↑	
q4	80	300	25	高	SUS	
q5	↑	↑	70	↑	↑	
q6	100	350	25	高	SUS	
q7	↑	↑	50	↑	↑	
q8	↑	↑	70	↑	↑	
q9	75	250	25	中	SUS	出口閉塞率の影響確認
q10	↑	↑	70	↑	↑	
q11	100	350	25	中	SUS	発熱量の影響確認
q12	↑	↑	70	↑	↑	
q13	165	250	70	高	SUS	
q14	↑	350	↑	↑	↑	
q15	165	250	↑	中	SUS	
q16	↑	350	↑	↑	↑	
q17	90	250	25	高	耐熱ガラス	可視化試験
q18	↑	↑	50	↑	↑	
q19	↑	↑	70	↑	↑	

[注] 閉塞率 高：96%、中：87%

表 3.1-2 通常浸漬特性試験でのヒータ温度上昇

試験 ケース	ヒータ 出力 [W]	初期ヒータ 最高温度 [°C]	浸漬速度 [mm/s]	出口部 閉塞率 [%]	浸漬中 最高温度 [°C]	温度上昇 [K]
q1	75	251.0	27.8	95.8	251.0	0.0
q2	75	254.5	51.7	95.8	255.0	0.6
q3	75	259.5	75.6	95.8	260.0	0.5
q4	80	301.0	26.2	95.8	301.0	0.0
q5	80	300.4	75.2	95.8	300.5	0.1
q6	100	350.4	23.0	95.8	350.5	0.1
q7	100	352.4	56.3	95.8	353.0	0.6
q8	100	351.5	74.7	95.8	351.5	0.0
q9	75	257.0	21.4	86.9	260.5	3.5
q10	75	251.0	70.7	86.9	252.0	1.0
q11	100	352.5	25.2	86.9	353.5	1.0
q12	100	350.6	70.1	86.9	351.0	0.4
q13	165	256.3	68.0	95.8	258.0	1.7
q14	165	359.9	74.4	95.8	360.0	0.1
q15	165	286.5	69.7	86.9	286.5	0.0
q16	165	356.0	70.4	86.9	356.5	0.5

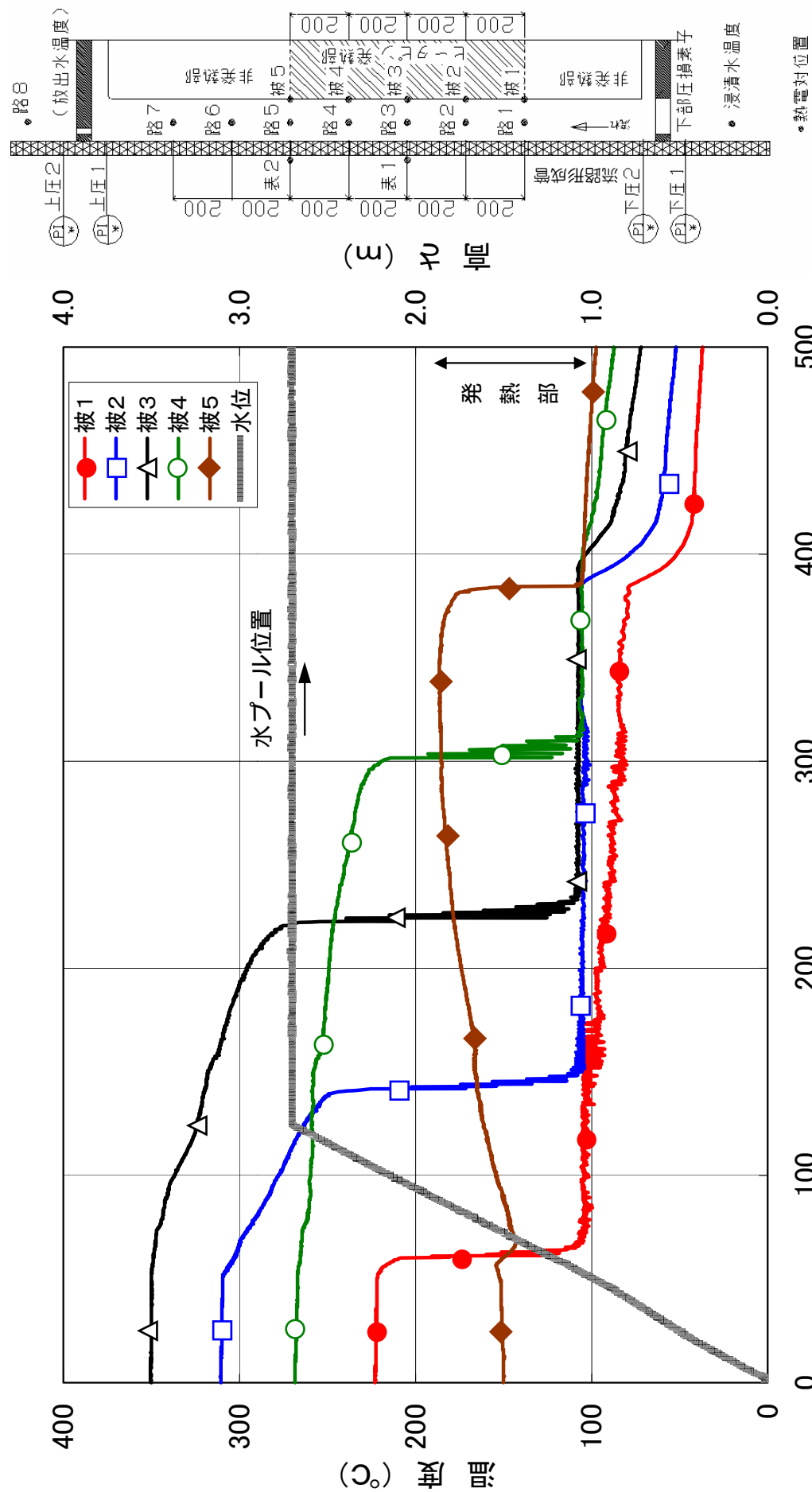


図 3.1-1 ヒータ表面温度の時間変化

[ケース q 6 : 発熱量 100W、初期温度 350、浸漬速度 25mm/s、閉塞率高]

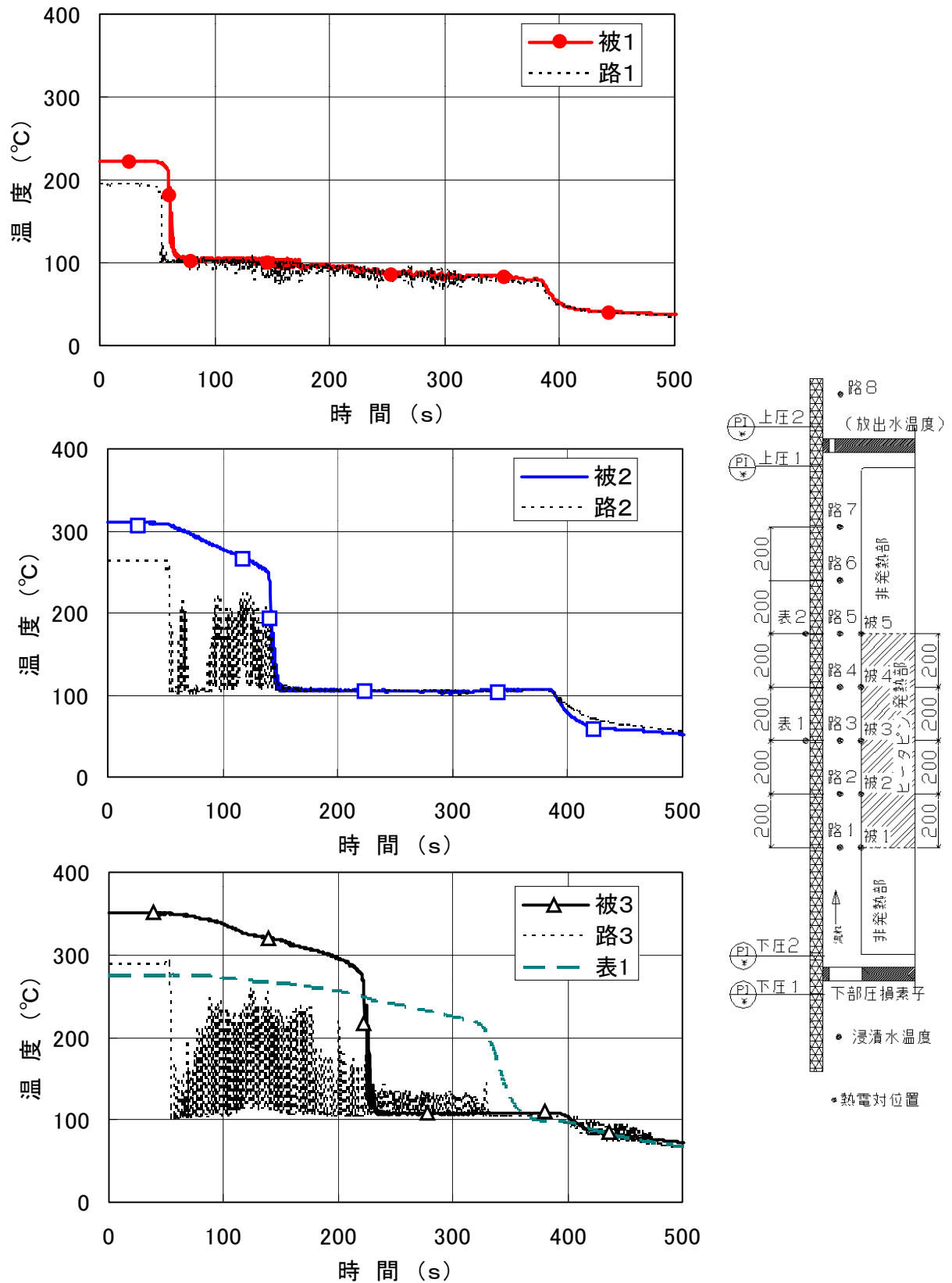


図 3.1-2 流路温度の時間変化 (1/2)

[ケース q 6 : 発熱量 100W、初期温度 350、浸漬速度 25mm/s、閉塞率高]

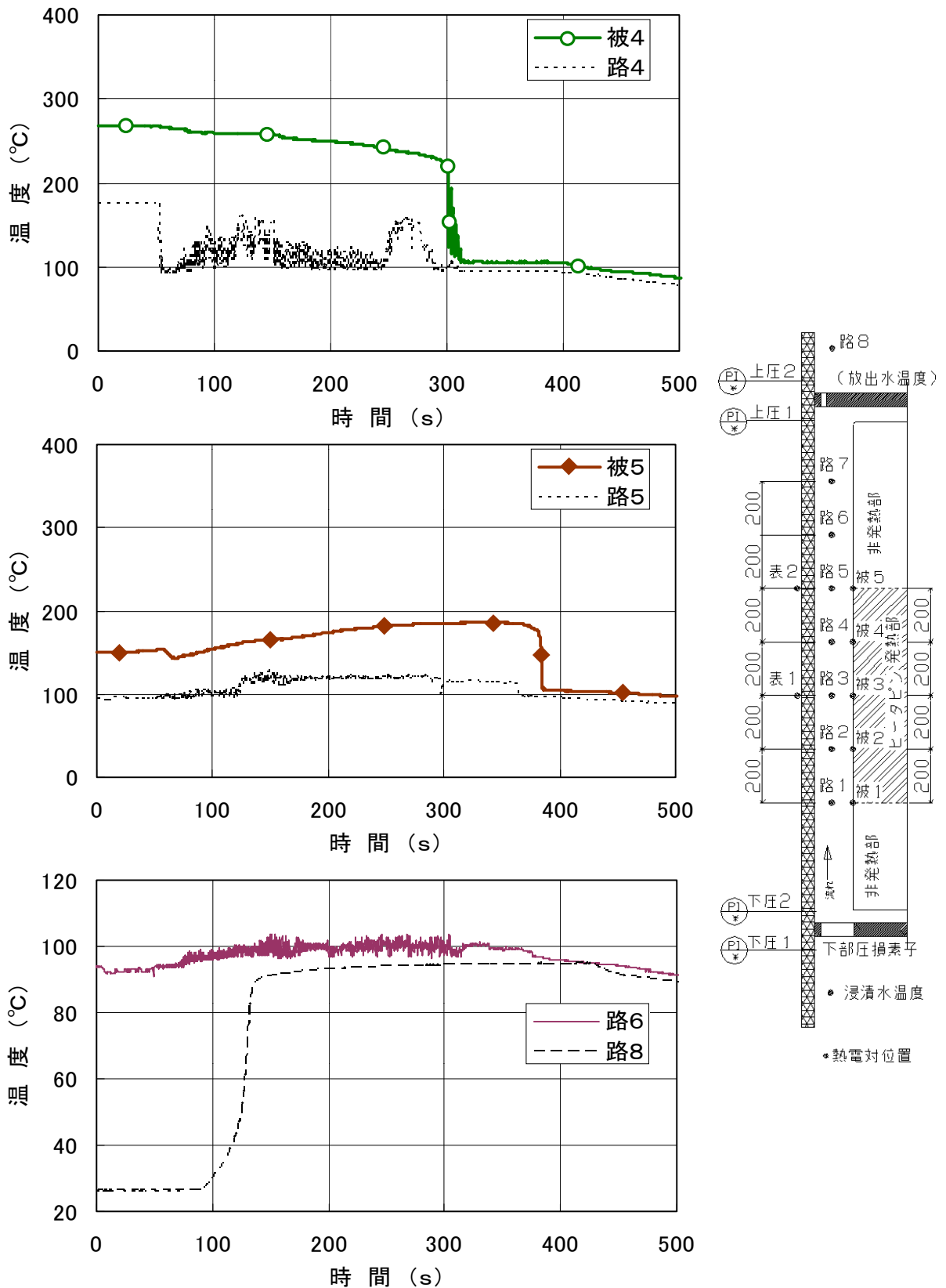


図 3.1-2 流路温度の時間変化 (2/2)

[ケース q 6 : 発熱量 100W、初期温度 350、浸漬速度 25mm/s、閉塞率高]

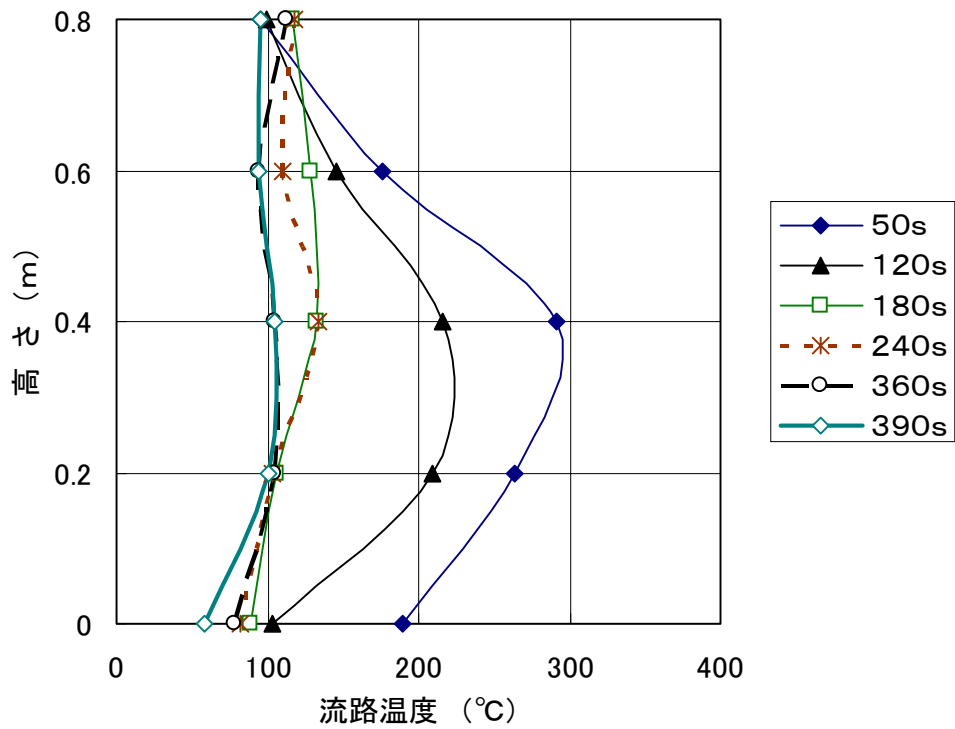
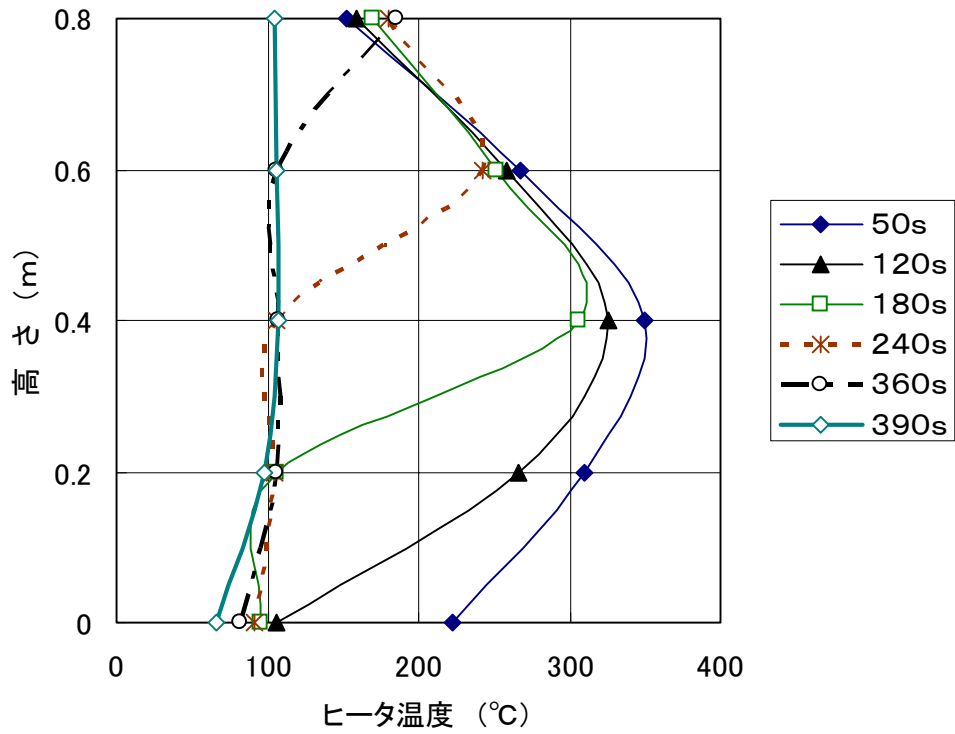


図 3.1-3 ヒータ表面温度、流路温度の高さ方向温度分布の時間変化
 [ケースq6：発熱量 100W、初期温度 350、浸漬速度 25mm/s、閉塞率高]

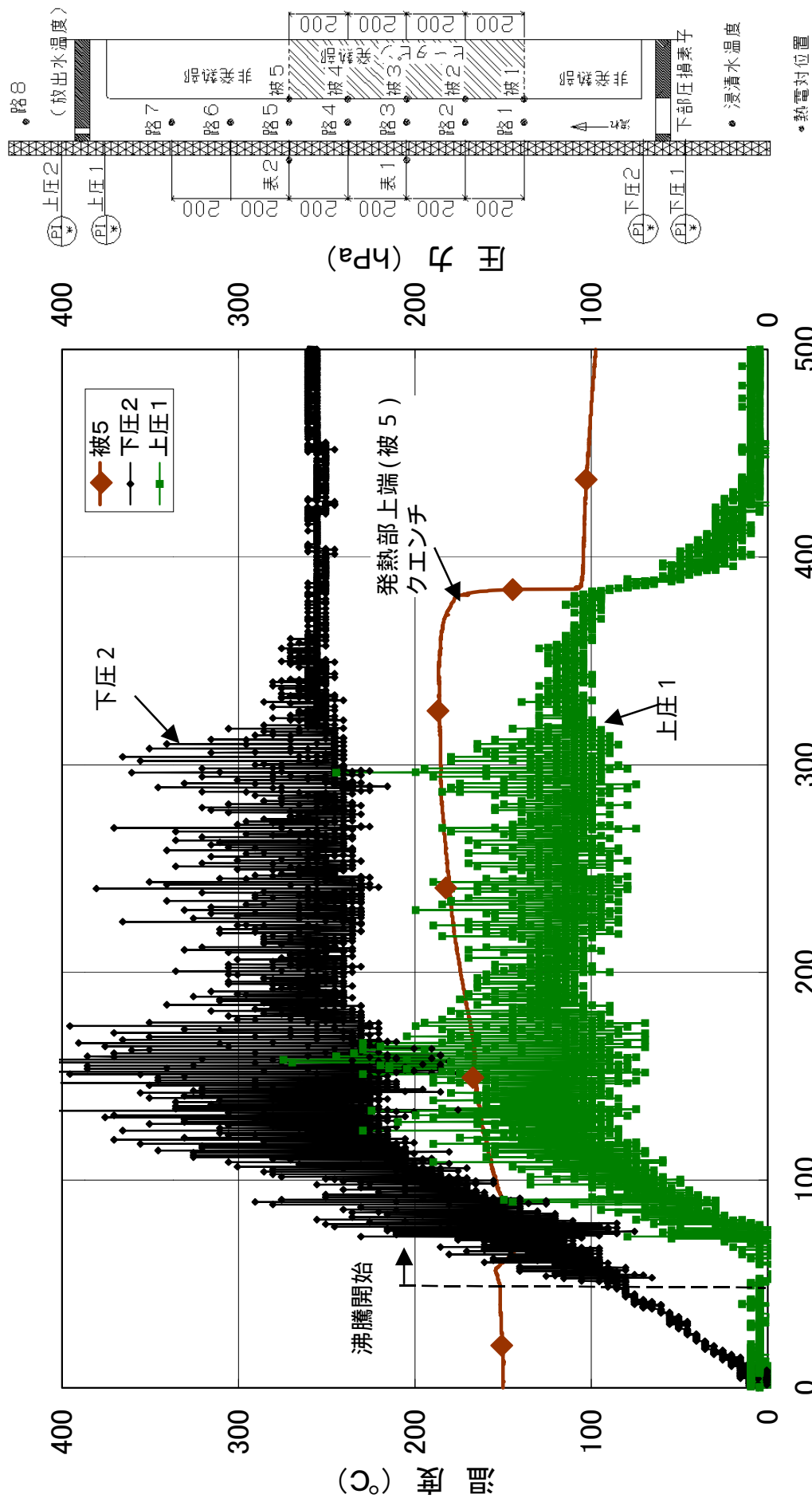


図 3.1-4 試験部圧力の時間変化

[ケース q 6 : 発熱量 100W、初期温度 350、浸漬速度 25mm/s、閉塞率高]

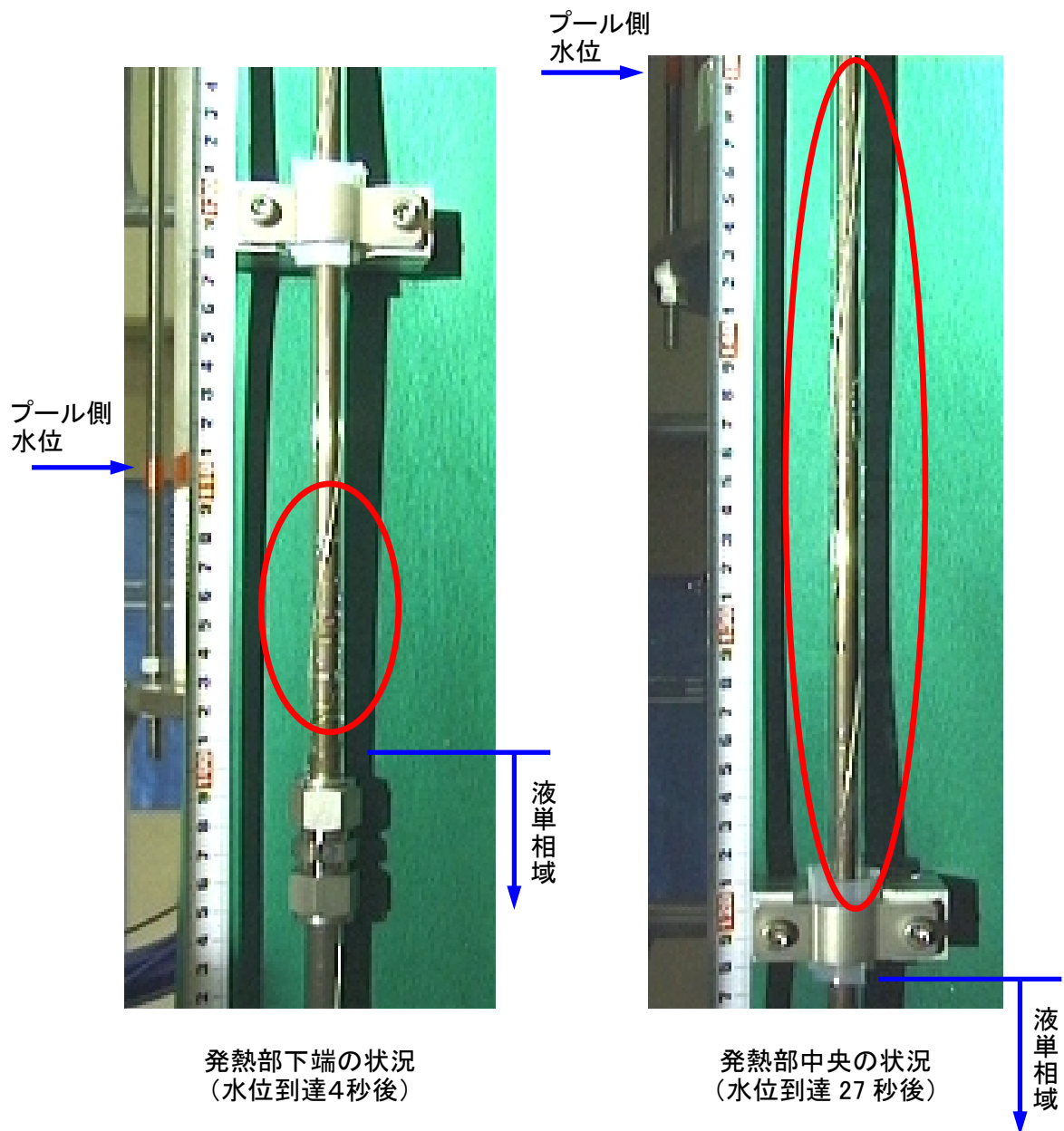


図 3.1-5 通常水浸漬試験 可視化結果
[ケースq17：発熱量 90W、初期温度 250 、浸漬速度 25mm/s、閉塞率高]

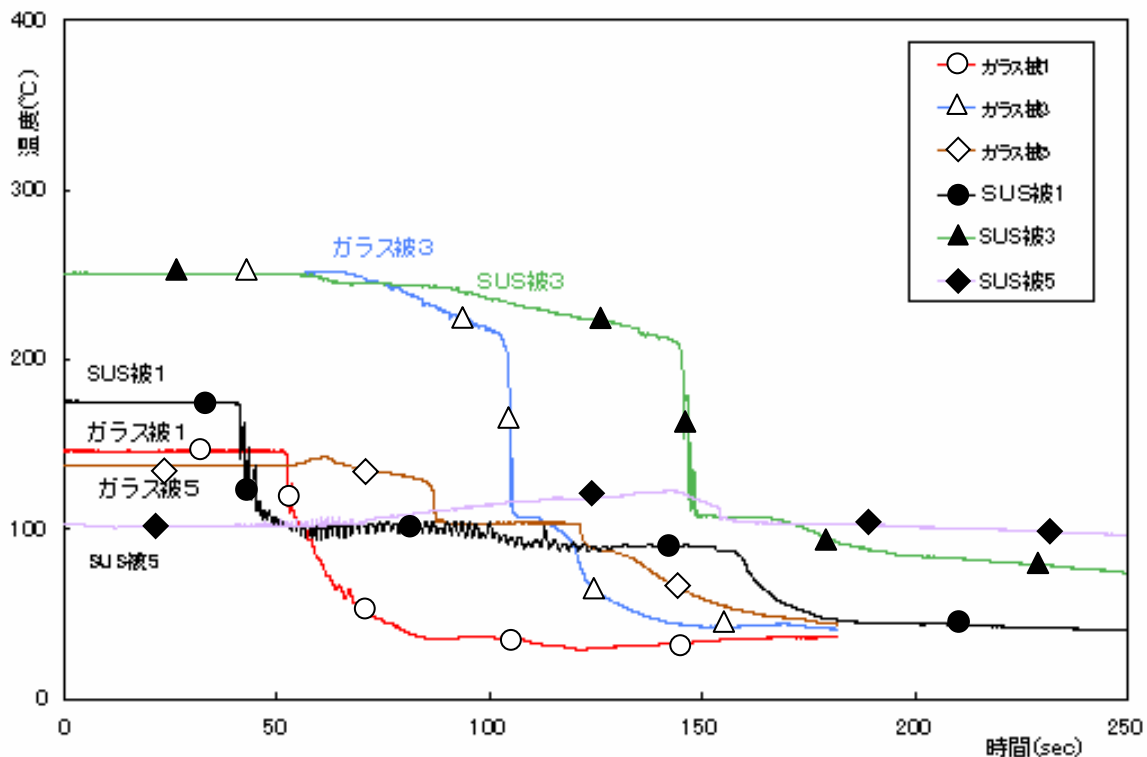


図 3.1-6 ヒータ温度の時間変化（流路形成管の材質の影響）
 [初期温度 250 、浸漬速度 25mm/s、閉塞率高]

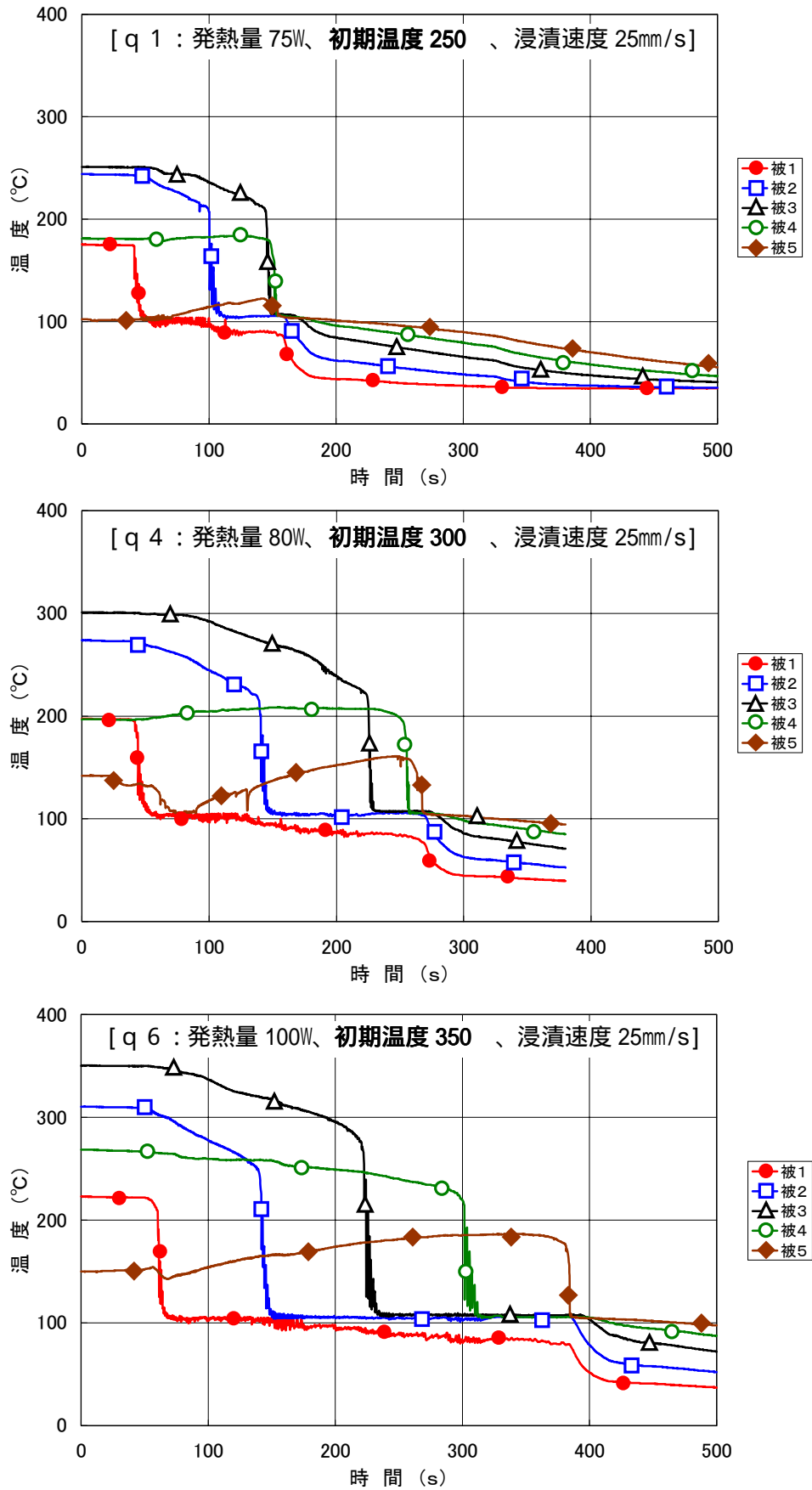


図 3.1-7 ヒータ温度の時間変化 (初期温度の影響)

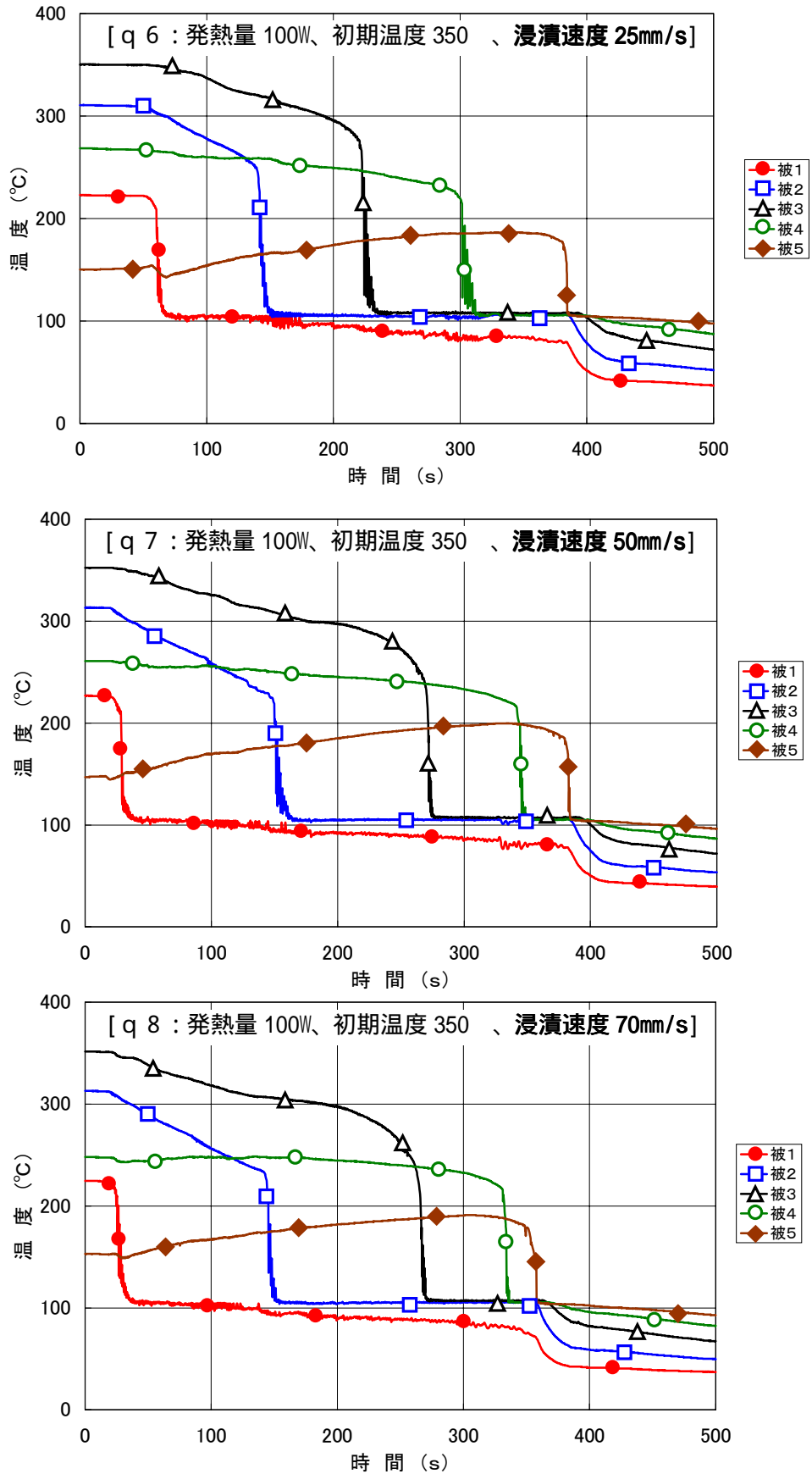


図 3.1-8 ヒータ温度の時間変化 (浸漬速度の影響)

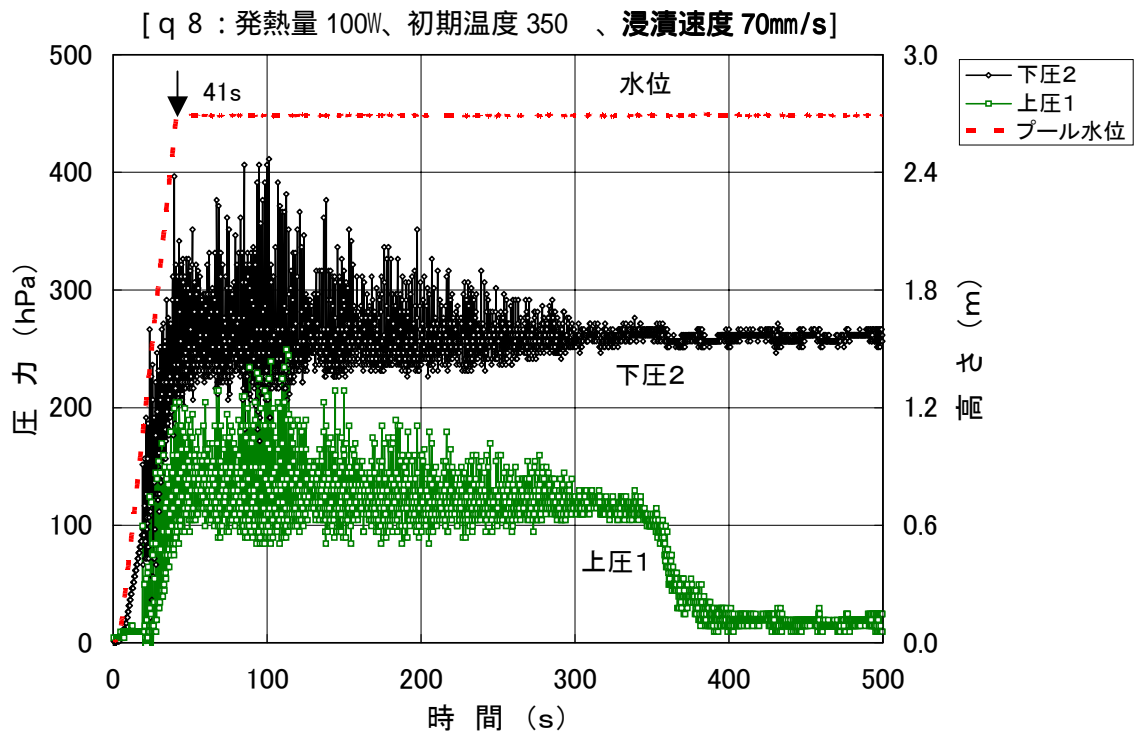
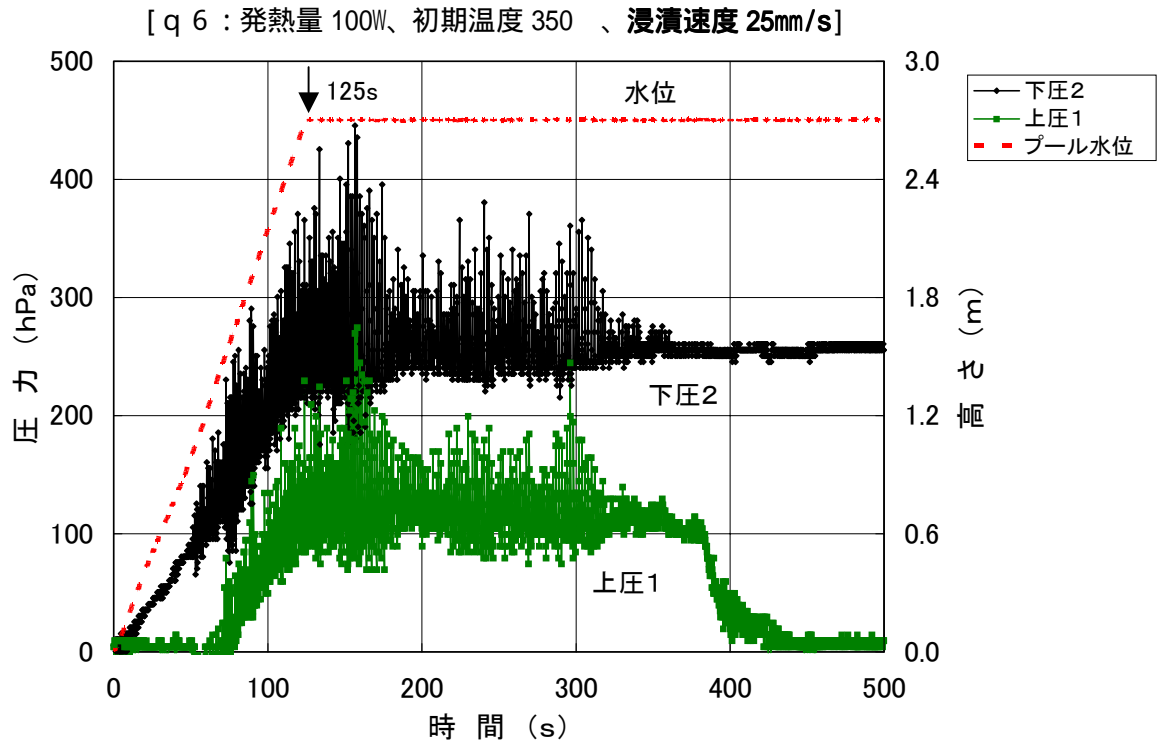


図 3.1-9 試験部の圧力変化 (浸漬速度の影響)

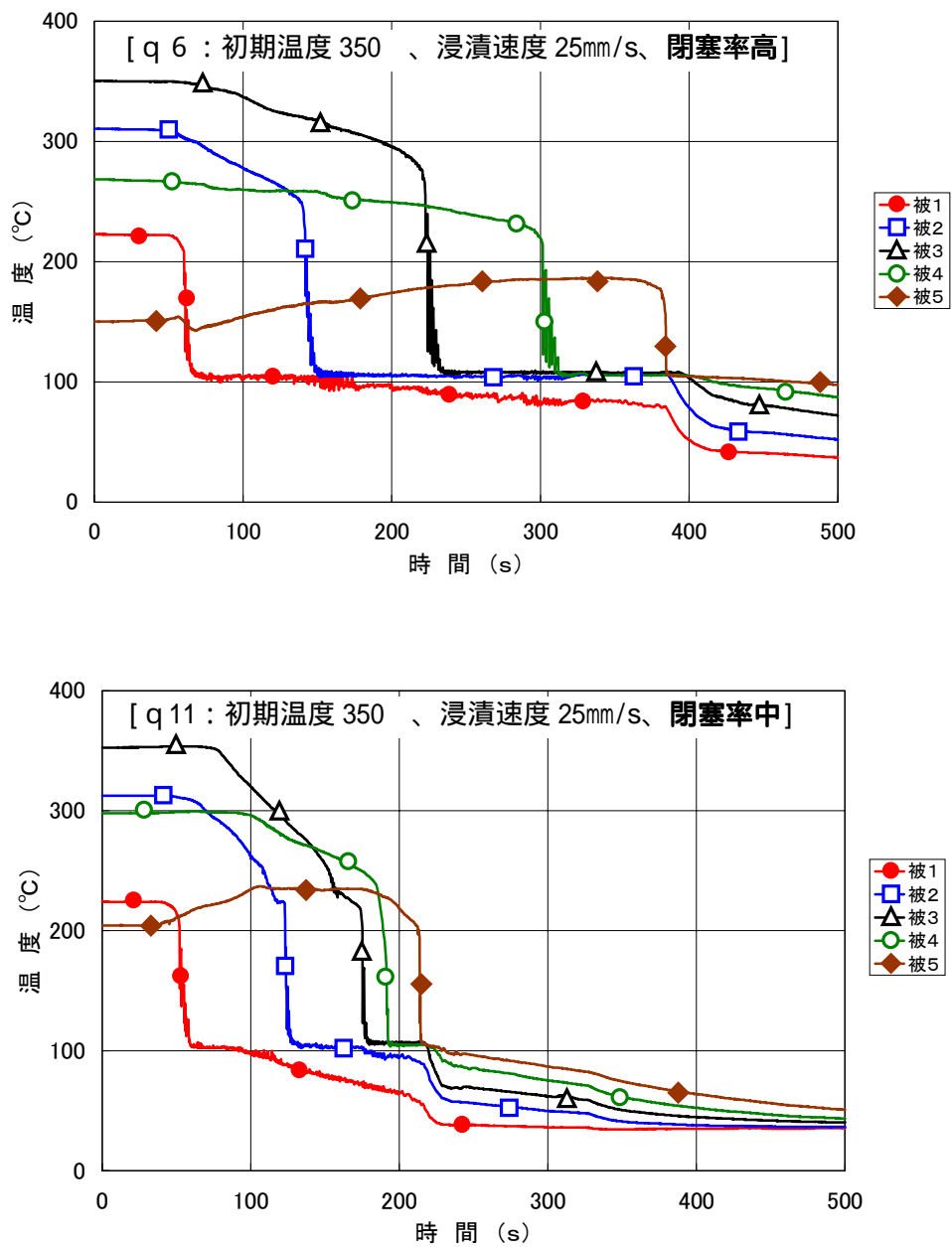


図 3.1-10 ヒータ温度の時間変化 (出口部閉塞率の影響)

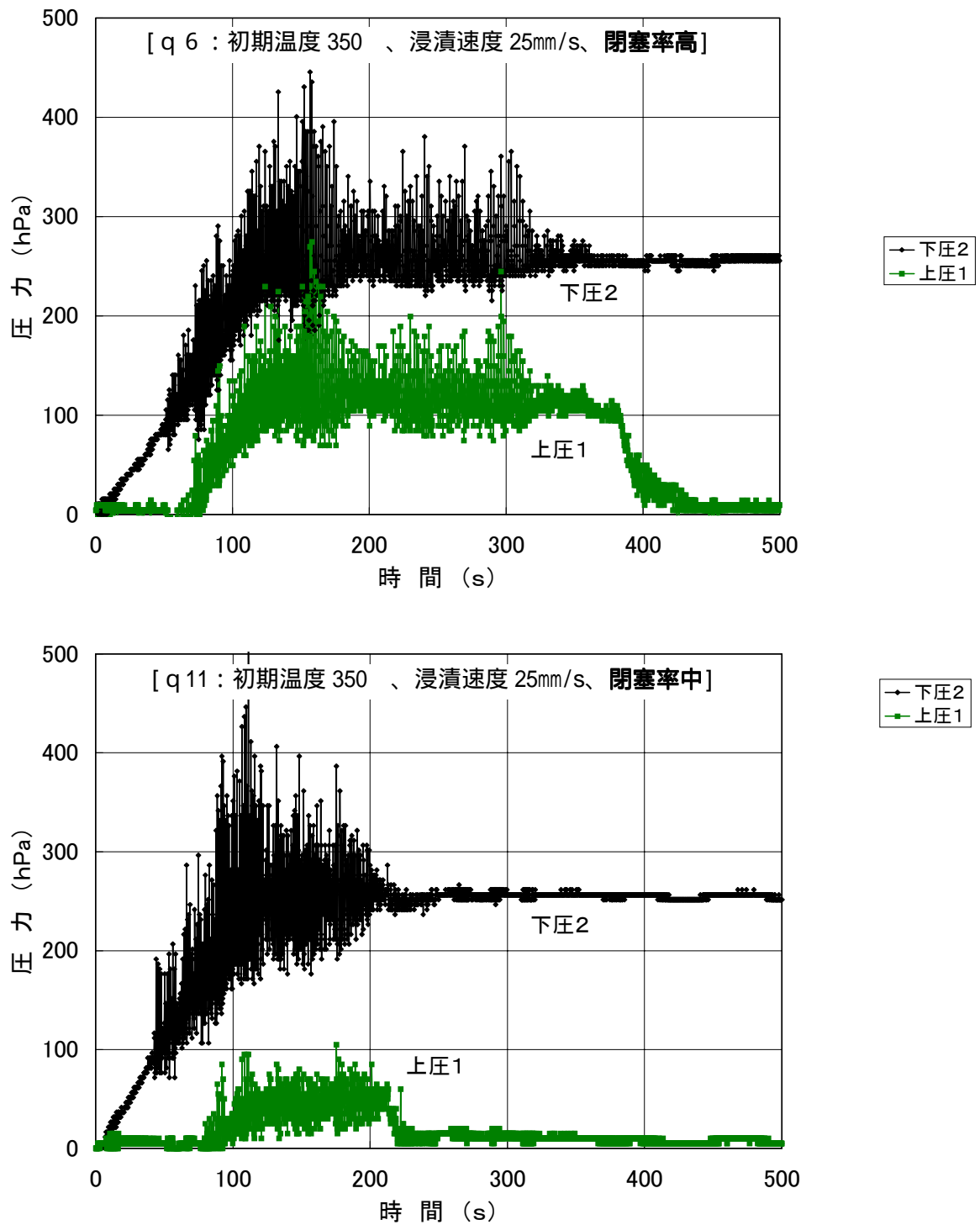


図 3.1-11 試験部の圧力変化 (出口部閉塞率の影響)

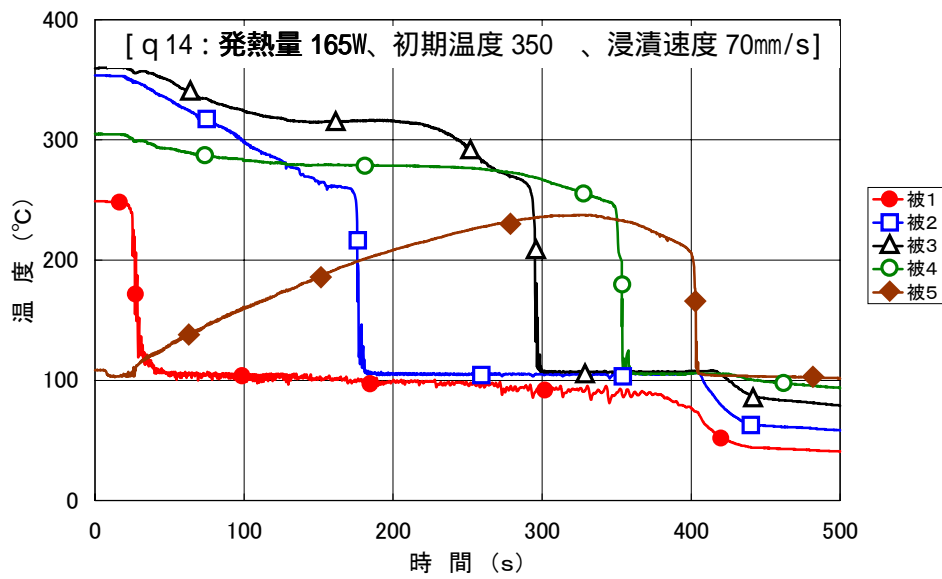
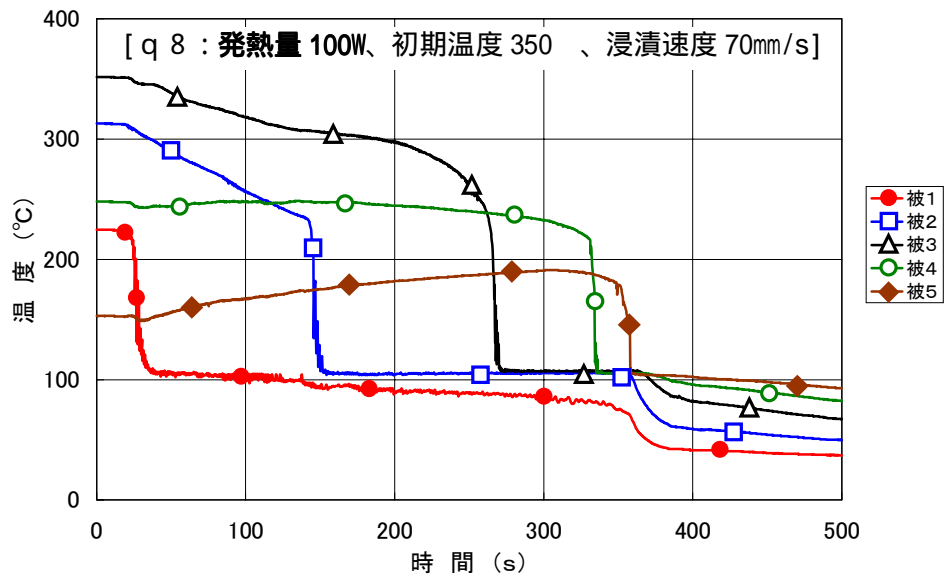


図 3.1-12 ヒータ温度の時間変化 (発熱量の影響)

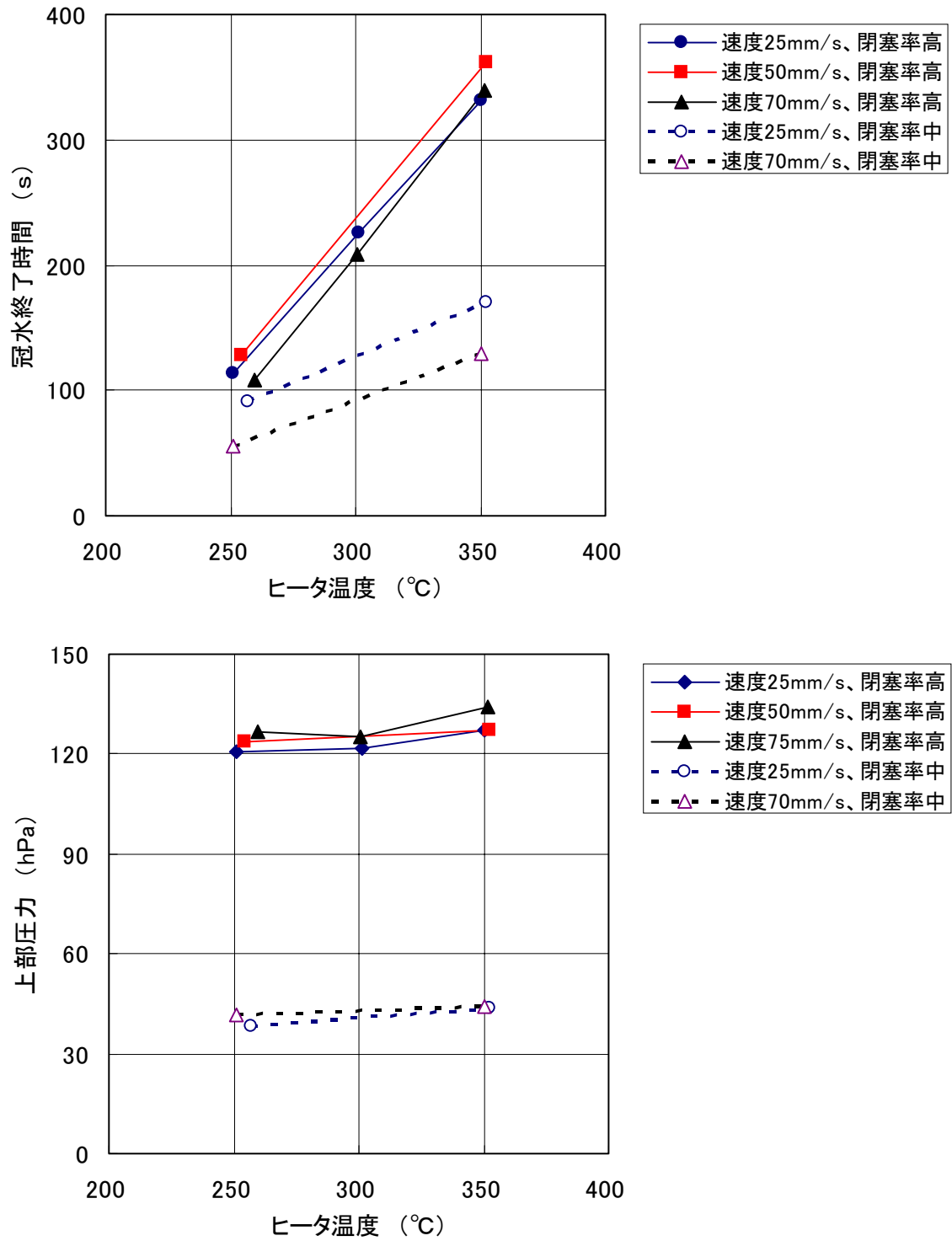


図 3.1-13 冠水終了時間、上部圧力の比較 (1/2)
 (初期温度、浸漬速度、出口部閉塞率の影響)

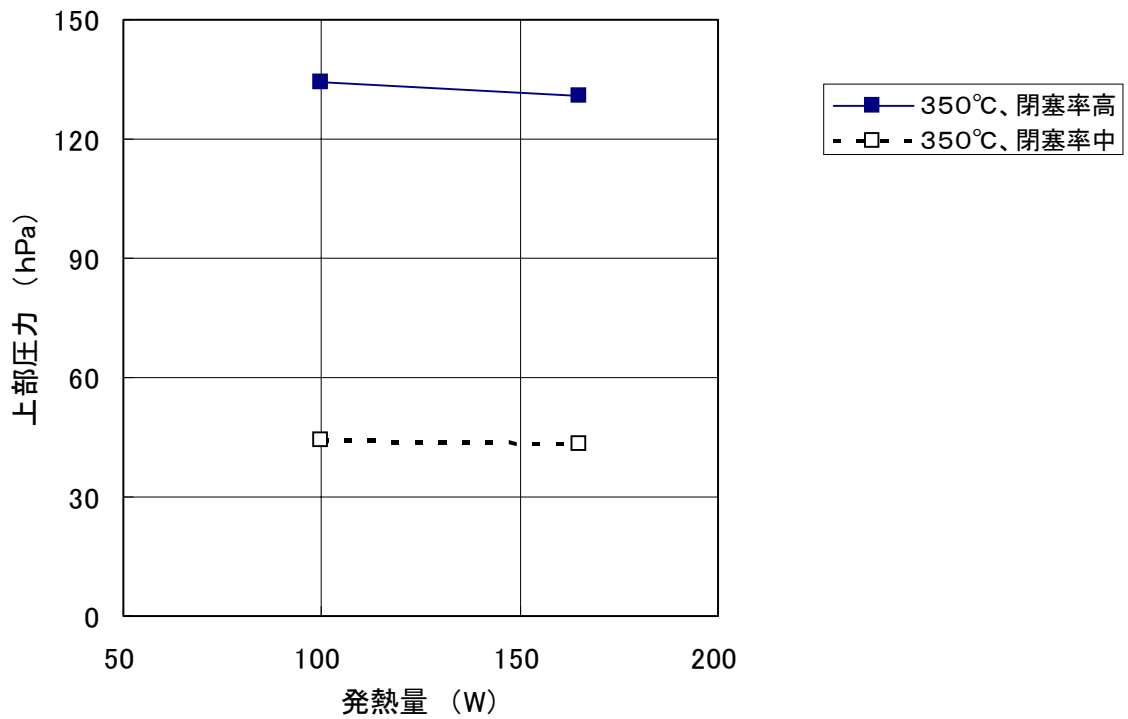
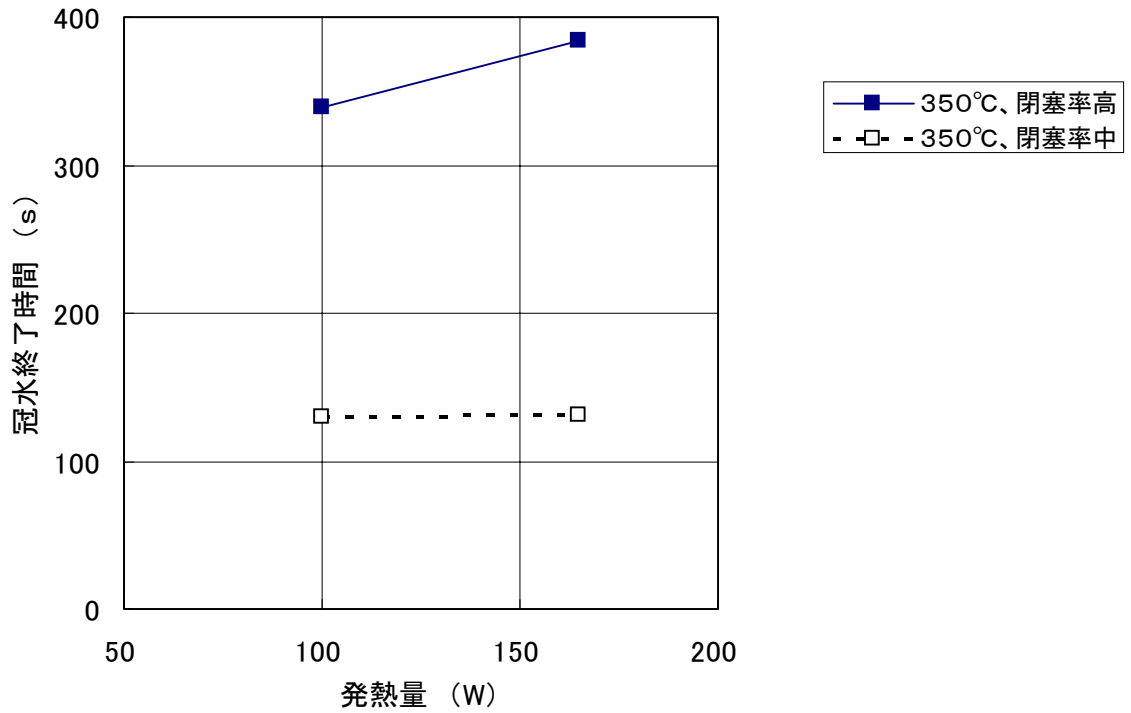
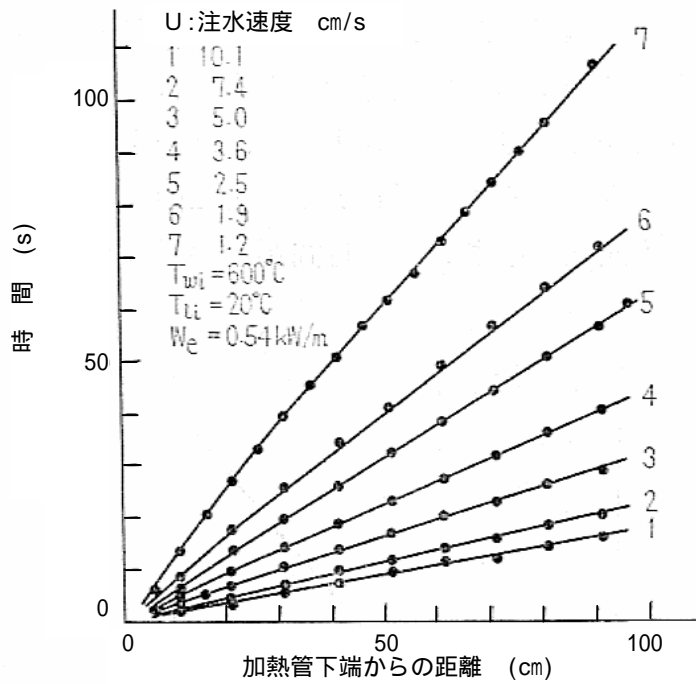
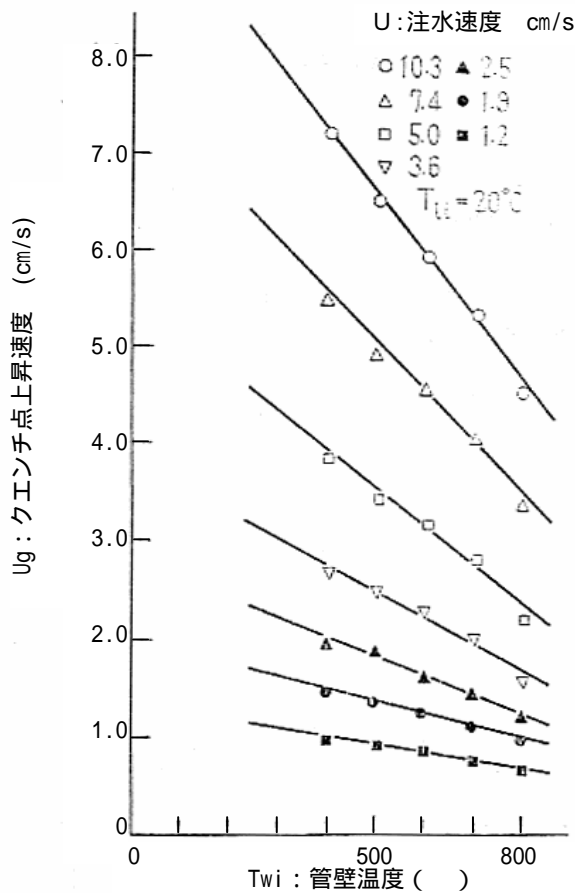


図 3.1-14 冠水終了時間、上部圧力の比較 (2/2)
 (発熱量、出口部閉塞率の影響、浸漬速度 70mm/s 一定)



(a) クエンチ点の時間的推移



(b) クエンチ点の上昇速度と初期管壁温度の関係

図 3.1-15 クエンチ点の推移に関する神永らの試験結果^[3]

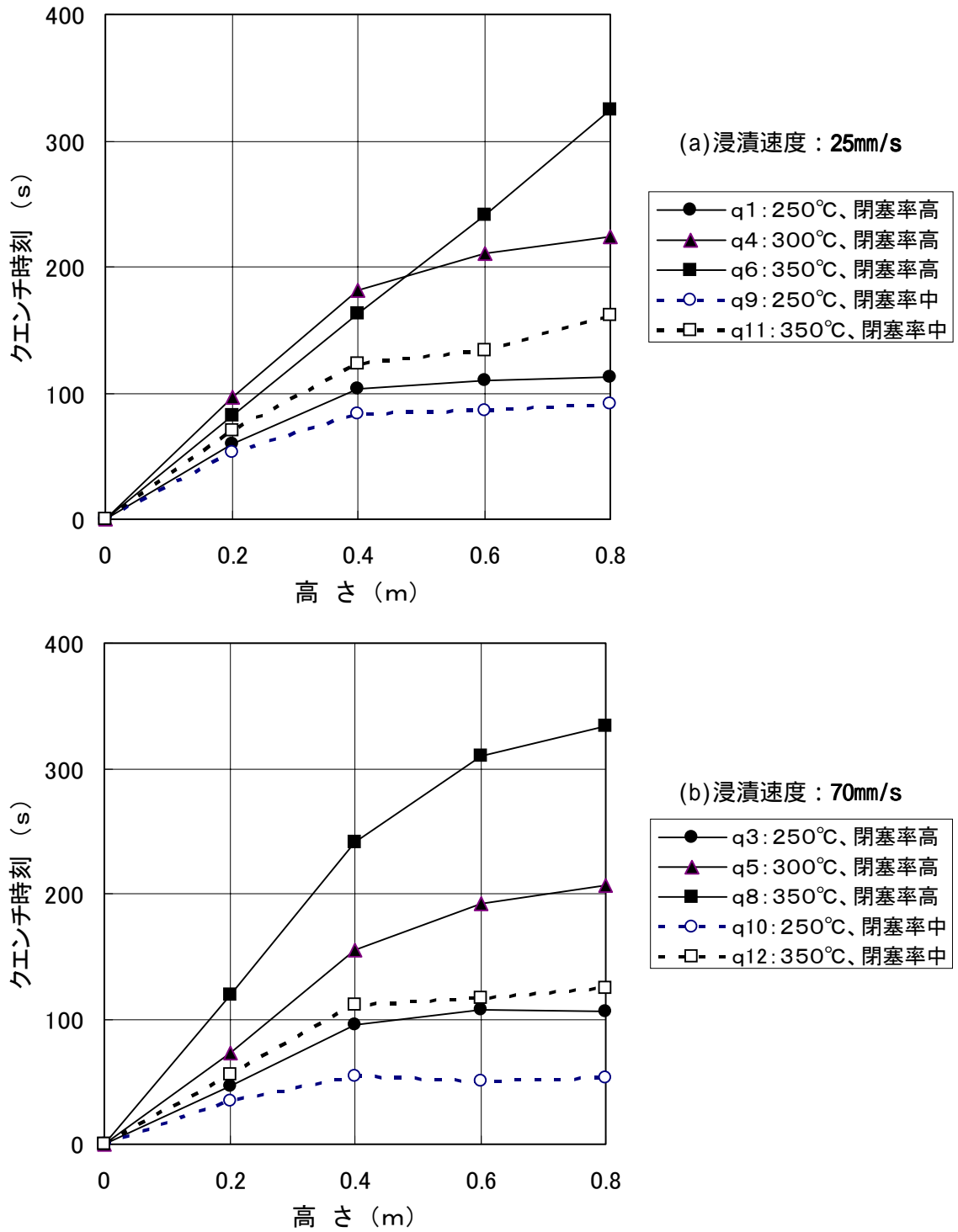
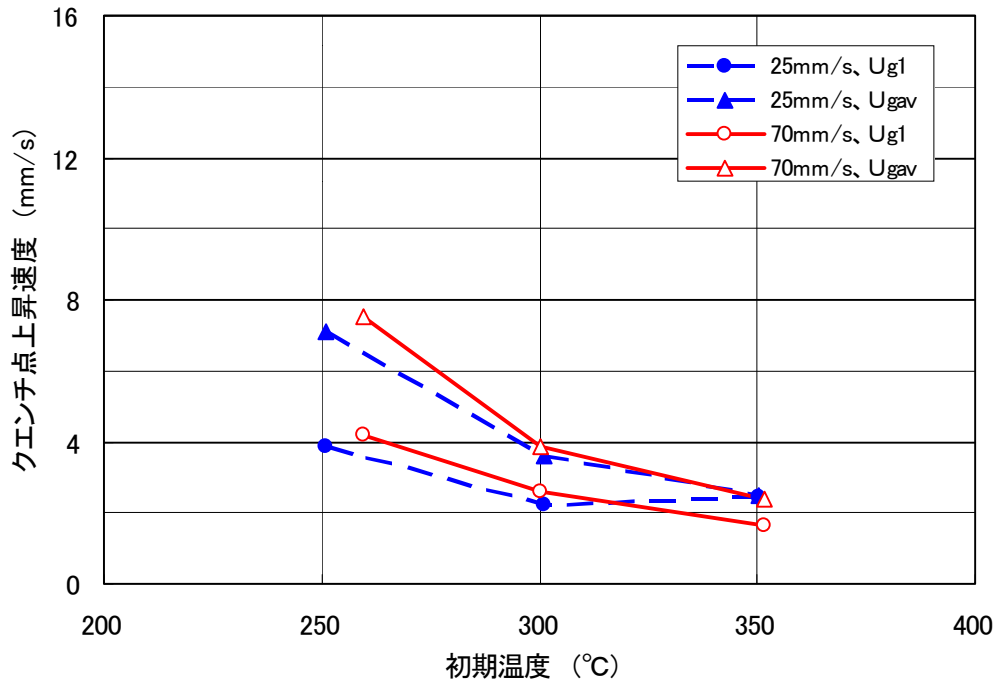
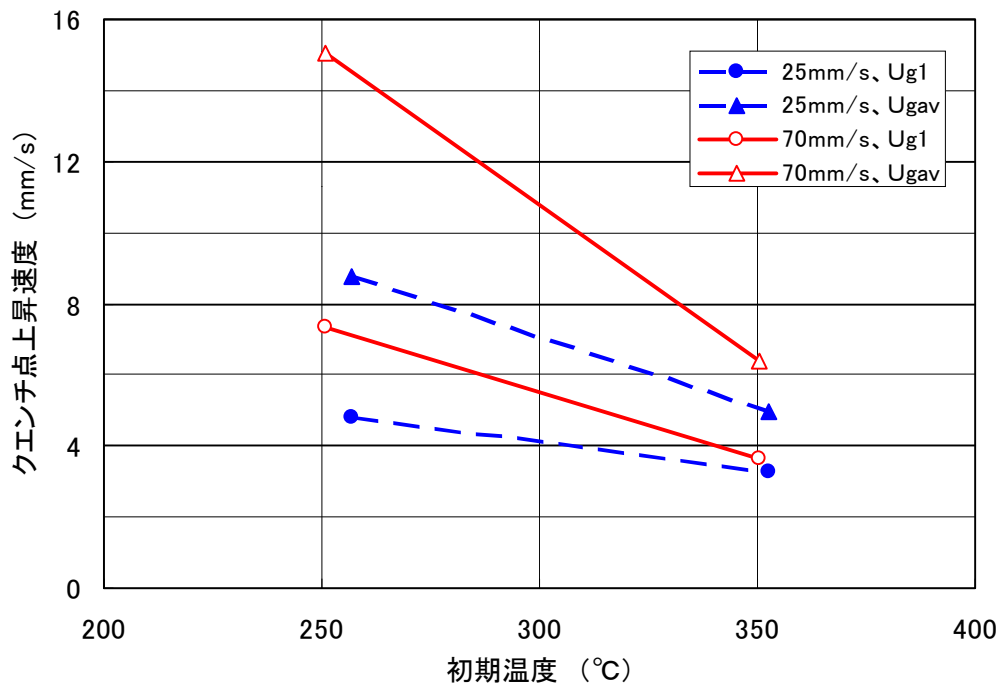


図 3.1-16 クエンチ点の時間的推移
(初期温度、出口部閉塞率の影響)



(a)閉塞率：高



(b)閉塞率：中

図 3.1-17 クエンチ点上昇速度の比較
(初期温度、出口部閉塞率の影響)

3.2 事故時水注入特性試験

3.2.1 試験装置及び試験条件

(1) 試験装置の改造

事故時水注入特性試験では、装置の一部を改造し、試験体上部のスチームジャケット部に水を注入するためのノズルを接続し、水注入のための系統を取り付けた。

図 3.2-1 に水注入系の系統図、及びノズル部の構造を示す。水注入系には、注入流量を測定するための電磁流量計を接続し、供給する模擬水プールからの注入水量、及び注入水温を計測した。また、注入ノズルは、先端部を約 60 度下方向に曲げており、注入水がヒータピンのリード線に沿って流れ込むような構造を採用した。出口部の閉塞率は、注入ノズルの直径を変更して設定し、3.0mm のノズルでは閉塞率 96%、2.0mm のノズルの場合閉塞率 91% となる。

(2) 試験条件

事故時水注入試験では、初期ヒータ表面温度、注入水量、出口部閉塞率、初期浸漬位置をパラメータとして試験を行った。

試験パラメータ項目は次のとおりである。

- ・ヒータ出力 : 165W、75W

前項の通常浸漬試験で冷却できる見通しが得られていることから、ヒータ出力を高め
に設定し安全側の評価ができるように高出力を設定した。なお、ヒータ出力の影響確
認のため 75W での試験も実施した。

- ・初期ヒータ温度 : 250、350
- ・浸漬速度 : 25mm/s 一定
- ・出口部閉塞率 : 高 (96%)、中 (91%)
- ・流路形成管 : ステンレス製
- ・注水量 : 10g/s、20g/s (実機計画値とその 2 倍)
- ・初期浸漬位置 : 発熱領域下端と発熱領域中央 (昇降機スティック位置の模擬)

上記の試験パラメータを基に設定した試験マトリクスを表 3.2-1 に示す。各ケースでの着
眼点を以下に示す。

- ・ケース s 1 ~ 8 : 初期温度、注水量、浸漬位置の影響確認
- ・ケース s 9 ~ 16 : 出口部閉塞率の影響確認
- ・ケース s 17 : 発熱量の影響確認

3.2.2 試験手順

試験の手順は、初期条件の設定までは、通常浸漬試験と同様である。

試験条件に基づき試験体を組み上げ、所定温度まで加熱する。

試験条件温度到達直前に、模擬水プールの所定水位まで温水（約 40℃）を供給する。水位が下部圧損素子の下 30mm 程度のところまで供給できたことを確認した後、試験データ収録の準備を行う。

ヒータ表面温度が所定温度に達したことを確認後、データ収録を開始する。収録サンプリング速度は 0.1s インターバルとする。

データ収録開始から約 3 秒経過後、温度などのモニタを行いながら、巻き上げ機を起動し模擬水プールを上昇させる。

模擬水プールの水位が所定の位置に到達後、巻き上げ装置を停止する。

模擬水プールを停止した状態で、上部からの注水（水温約 40℃）を開始して、各部の温度・圧力等のデータを収録する。

発熱部の温度が 100℃以下になったのを確認して、注水及びヒータへの通電を停止し、データの収録を終了する。

3.2.3 冷却挙動の概要

ケース s 3（初期温度 350℃、閉塞率高、浸漬位置中央、注水量 10g/s）を例に、計測した温度・圧力変化の挙動を以下に述べる。

(1) ヒータ表面温度、圧力の変化

ヒータ温度（5 点）、注水量、圧力（上下 2 点）、及び水プール位置の時間変化を図 3.2-2 に示す。このケースでは、発熱部中央までが浸漬した状態で昇降機がスティックする条件としているので、水プールを巻き上げて発熱部中央レベルで保持する。その後、約 72 秒で試験体上部からの注水を開始する。（グラフ上では、容積流量での表示としている。）

ヒータ側の温度変化に着目すると、発熱部下端の被 1 は、通常浸漬試験時の挙動と同様に、下部からの浸水によって約 50 秒あたりから急激に温度が低下する。しかし、注水開始直後からの発熱部上方（被 4、被 3、被 2）の温度低下に伴い、軸方向の熱移行によって、被 1 では一転して温度が上昇する傾向を示す。その後、約 170 秒で飽和温度レベル（105℃程度）まで低下して発熱部全体の冷却が完了する。

浸漬されていない発熱部上方（被 4、被 3）では、注水開始により初期温度から徐々に低下し始め、270～290℃あたりで急激に飽和温度レベルまで温度が急低下する傾向を示す。このような挙動は、図 3.2-3 に示す流下液膜による冷却メカニズムで説明できると考える。

植田^[4]は、以下のような液膜冷却のメカニズムを説明している。「高温壁に沿って液膜を流下させていくと、高温部に接する液膜先端（ウェット・フロント）では、激しい沸騰により液膜が剥離・飛散（スパッタリング）する現象が見られる。液膜先端の上流側の短い区間で、壁面温度は遷移及び核沸騰により急低下する。液膜先端より下方の乾き領域では、壁表面での蒸気流あるいは噴霧流による冷却と、壁面内の熱伝導によって壁温が低下し、それにつれて液膜先端がほぼ一定速度で下方に移動していく。」

今回の試験では、水注入試験の体系では可視化を実施していないため、ヒータ全周にわたる液膜の形成や液膜先端部での沸騰現象を確認できていない。しかし、被 4 の温度変化から、本試験でも液膜冷却と同様なメカニズムで、発熱部上方から冷却が進行したのと考えられる。一方、水中に浸漬している被 2、被 1 は、通常浸漬試験と同様、リフラディング冷却によりクエンチしたのと思われる。

なお、注水終了後もヒータ加熱を継続しているため、220 秒以降ヒータ温度は徐々に上昇している。したがって、実機を想定した場合には、上部からの注水によって一旦 100 レベルまで燃料ピン温度が低下するので、被覆管制限温度に達するまでの時間的余裕が生じ、その余裕を活用して昇降機の修復手段を講じる、または注水を継続していく必要がある。

圧力に関しては、特に試験体上部の圧力（上圧 1）の挙動が通常浸漬試験時と異なっている。まず、試験体下部の圧力（下圧 2）は、通常浸漬時と同様、水プールの上昇によって水頭圧が増加し、発熱部下端より上方に達した後は沸騰に伴う圧力変動が見られる。一方、上圧 1 は、注水開始後発熱部上方での沸騰により急激に上昇し、短時間だが下圧 2 を上回るようになる。被 4 の温度が急激に低下した後は、一旦上圧 1 は減少するが 110 秒過ぎからやや増加傾向を示し、被 2、被 1 がクエンチした後は大気圧まで減少する。下圧 2 は、浸漬している発熱部下方では 100 秒以降も沸騰が継続しているので、上圧 1 に追従するように圧力が増加したのと考えられる。このように、注水開始後の短時間の激しい沸騰によって試験体上部の圧力が試験体下部の圧力を上回ることがわかった。

次に、流路側の温度変化を図 3.2-4 に示す。浸漬している発熱部下方の路 1、路 2 では、通常浸漬試験時と同様、浸漬開始以降は沸騰による温度変動が見られる。なお、被 1 の温度が注水開始後に上昇に転じるため、通常浸漬試験時とは異なり 160 秒あたりまで沸騰が継続している。また、発熱部中央の路 3 では、試験体内の水位が熱電対設置位置よりもやや低く設定されたため、沸騰による温度変動は見られなかった。路 4 及び路 5 では、浸漬開始直後に下方での沸騰の影響により温度変動が見られるが、注水開始以降はほぼ 100 一定となる。発熱部全体が冷却された 170 秒以降では、注入水温（約 35 ）に追従するように、温度が低下していく。また、下部圧損素子の流路側に設置した浸漬水の温度は、110 秒以降急激に上昇する。これは、上圧 1（上部圧力）が下部圧力を上回ったため、試験体内の高温水が下部圧損素子を抜けて水プール側に逆流したことによるものである。

図 3.2-5 には、ヒータと流路の高さ方向温度分布の推移を示す。浸漬直後の 50 秒時点では、発熱部中央の被 2、被 3、被 4 が 300 以上となっている。注水開始（72 秒）以降、時間経過とともに、通常浸漬試験時とは逆にヒータ側の最高温度位置が上方から下方に移行して、発熱部全体が冷却されることを確認した。

3.2.4 各試験パラメータの影響

(1) ヒータ初期温度の影響

図 3.2-6 に、発熱量 (165W)、閉塞率高、注水量 (10g/s)、浸漬位置 (発熱部中央) の条件を一定として、初期温度 250、350 のケースにおけるヒータ温度、圧力の時間変化を比較する。

初期温度を上昇させた場合、発熱部全体が冷却されるまでの時間が延びている。また、発熱部下端 (被 1) の温度上昇割合が増加し、沸騰中の試験体上部圧力もやや増加する傾向を示している。

冷却特性の指標として、注水開始から発熱部全体が 100 以下に冷却されるまでの時間を考えると、ケース s 1 (250) の場合に約 44 秒、ケース s 3 (350) の場合に約 126 秒となっており、冷却時間が延長している。このように、通常浸漬試験時と同様、ヒータ初期温度は冷却特性上支配的な因子となることが明らかになった。

(2)注水量の影響

図 3.2-7 に、発熱量 (165W)、初期温度 (350)、閉塞率高、浸漬位置 (発熱部中央) の条件を一定として、注水量を 10g/s、20g/s とした場合のヒータ温度、圧力の時間変化を比較する。

注水開始から発熱部全体が 100 以下に冷却されるまでの時間で比較すると、ケース s 3 (10g/s) での約 126 秒に対し、注水量を 20g/s としたケース s 4 では約 61 秒となり、ほぼ半減される結果となった。また、沸騰中の試験体上部圧力の平均値で比較すると、ケース s 4 では 514hPa、ケース s 3 では 207hPa と 2 倍以上の増加となった。

このように、注水量の増加に伴い、発熱部全体の冷却時間が短縮するが、短時間で激しい沸騰が生じることから試験体上部での圧力上昇が大きくなることがわかった。

(3)浸漬位置の影響

発熱量 (165W)、初期温度 (350)、閉塞率高、注水量 (10g/s) の条件を一定として、浸漬位置を発熱部中央、発熱部下端とした場合のヒータ温度、圧力の時間変化を図 3.2-8 に比較する。

ヒータ温度に着目すると、発熱部下端 (被 1) の温度変化が浸漬位置の違いによって大きく異なっている。すなわち、浸漬位置を発熱部中央としたケース s 3 では、約 49 秒で水位が発熱部下端に達するので、前述のように被 1 の温度が 100 近傍まで一旦低下する。注水開始により約 230 まで上昇するが、発熱部上方の冷却が進行してくると約 160 秒で飽和温度レベルに達する。これに対し、浸漬位置を発熱部下端としたケース s 7 では、初期の水浸漬による冷却効果がないため、被 1 の温度は注水開始後から上昇する。この場合でも、注水によって試験体上方から冷却が進行してくるので、被 1 が最後に温度低下を示す。

また、圧力に関しても、ケース s 7 では初期の水浸漬による圧力変動があまり見られず、注水開始以降は、試験体上部圧力の上昇に追従するように下部圧力が変動を伴いながら増加

していく傾向となった。

注水開始から発熱部全体が 100 以下に冷却されるまでの時間で比較すると、ケース s 3 (発熱部中央)での約 126 秒に対し、浸漬位置を発熱部下端としたケース s 7 では約 118 秒とほぼ同程度であった。また、沸騰中の試験体上部圧力の平均値で比較すると、ケース s 3 では 207hPa、ケース s 7 では 196hPa とほぼ同程度の圧力上昇となっている。

また、図 3.2-9 にヒータ高さ方向の温度分布の推移を比較した。注水開始後に軸方向の熱移行の影響を受ける発熱部下端の被 1 を除けば、各時刻でほぼ同様の温度分布を示しており、初期の浸漬位置の相違による差が小さい結果となった。

これらの結果より、発熱部中央まで浸漬した場合でも、浸漬部での冷却より上部からの注水による冷却のほうが支配的になっていると考える。この原因としては、流下液膜による冷却は、前述のように相対的に熱伝達率の大きい遷移沸騰または核沸騰となっているのに対し、通常浸漬時の冷却は、図 2.1-1 に示すように熱伝達率の小さい膜沸騰から開始することに依存すると考える。また、水プールが発熱部中央レベルで保持されているため、水プール側と発熱部下端の高低差が通常浸漬試験時より減少 (1.7m 0.4m) しており、水プールからの注水圧も低下していることが浸漬部での冷却性能に影響しているものと考えられる。

したがって、発熱部浸漬中に任意の位置で昇降機がスティックした場合でも、上部からの注水を実施すれば、発熱部上方からの冷却が支配的となり、浸漬位置の相違が冷却特性に及ぼす影響は小さいものと考えられる。

(4) 出口部閉塞率の影響

発熱量 (165W)、初期温度 (350)、注水量 (10g/s)、浸漬位置 (発熱部中央)の条件を一定として、出口部の閉塞率を 96% (高)、91% (中)とした場合のヒータ温度、圧力の時間変化を図 3.2-10 に比較する。

いずれもケースとも、初期温度から有意な温度上昇は見られず、良好に冷却できている。しかし、閉塞率中のケース s 13 では、グラフの横軸スケールがケース s 3 の 6 倍となっているように、注水開始から発熱部全体が冷却されるまでの時間が大幅に延びている。(ケース s 3 : 126 秒 ケース s 13 : 1442 秒。図示していないが、注水量を 2 倍としたケース s 14 でも、923 秒と大幅な増加となる。) また、圧力に関しては、発熱部全体の冷却が終了するまで試験体上部圧力がほぼ一定値 (平均約 30hPa) で推移し、下部圧力 (平均約 130hPa : ほぼ水頭圧相当) を上回ることはなかった。

このような冷却特性の大きな相違は、以下の原因によるものと考えられる。試験体出口部の閉塞率を小さく (開口割合を 5% 拡大) したケースでは、実験時に試験体からの蒸気が排出されるベントラインから水滴が排出されることが観察されている。ベントラインから水滴が排出される要因は、試験体出口部の開口割合を大きくしたことにより、試験体からの蒸気流出速度が増加して、注入した冷却水の一部が試験体上方に巻き上げられたものと推定される。

その結果、注入した冷却水が発熱部領域まで十分に到達しないため、ヒータの冷却に寄与する実効的な注水量が減少し、発熱部の冷却が緩慢になったものと思われる。また、圧力についても、実効的な注水量の減少によって、準定常的な沸騰が継続したものと思われる。

したがって、水注入試験では、出口部閉塞率設定値のわずかな相違によって、冷却特性が大幅に変化することがわかった。実機での設計具体化を進めるにあたっては、集合体内の全燃料ピンに均等に冷却水を散布できる注水ノズル構造の検討と併せて、出口部の閉塞率設定や注水量・注水圧力に関する最適化検討が今後の課題と考える。

(5) 発熱量の影響

初期温度（250℃）閉塞率中、注水量（10g/s）浸漬位置（発熱部中央）の条件を一定として、発熱量を75W（ケースs17）165W（ケースs14）と変化させた場合のヒータ温度、圧力の時間変化を図3.2-11に比較する。両ケースとも、閉塞率中の条件としているので、閉塞率高の場合に比べると、発熱部全体の冷却時間が延びている。また、圧力に関しては、前項で述べたケースs13と同様、閉塞率設定の影響が大きく、試験体上部圧力がほぼ一定値で推移している。

注水開始から発熱部全体が100℃以下に冷却されるまでの時間で比較すると、ケースs17（75W）での約295秒に対し、ケースs14（165W）では約738秒と2.5倍程度増大する結果となり、通常浸漬試験時よりも発熱量の影響が顕著になることがわかった。

3.2.5 冷却特性のまとめ

冷却特性を表す指標として、注水開始から発熱部全体が冷却される時間と、沸騰期間中の試験部圧力（上下2点）に着目し、ヒータ初期温度、注水量、浸漬位置、出口部閉塞率をパラメータとした各ケースのデータを図3.2-12（閉塞率高）、図3.2-13（閉塞率中）にプロットした。図の横軸には、ヒータ初期温度をとっている。

まず、図3.2-12に示す閉塞率高の条件で比較すると、データ点が限られているが、発熱部全体の冷却時間は、ヒータ温度に比例して増加する。また、同じヒータ温度で比較すると、注水量を10g/sから20g/sに増加させると、冷却時間がほぼ半減する。初期の浸漬位置に関しては、ヒータ温度、注水量が等しければ、発熱部中央位置と下端位置での差がほとんどなく、冷却特性上は影響が小さいことがわかった。

圧力に関しても、ヒータ温度の上昇に伴い、各ケースとも圧力が増加する結果となった。また、閉塞率高の条件では、短時間であるが、いずれも沸騰中の上部圧力が下部圧力を上回っており、注水量を増加させると圧力も増加する傾向を示す。なお、浸漬位置を変化させると、下部圧力は水頭圧の差があるため若干傾向が異なるが、ヒータ温度、注水量が等しければ上部圧力はほぼ同様の値をとっている。

次に、閉塞率中の条件で比較した結果を図3.2-13に示す。この場合でも、発熱部全体の

冷却時間についてはヒータ温度と注水量の依存性を確認したが、閉塞率の相違により大幅に冷却時間が増大する結果となっている。一方、圧力に関しては、各ケースとも下部圧力が上部圧力を上回っており、閉塞率高の場合より圧力上昇は小さくなっている。また、圧力上昇に対しては、ヒータ温度や注水量の依存性は小さく、浸漬位置で比較しても初期の水頭圧の差があるだけで、今回選定したパラメータの影響は小さいと思われる。

さらに、閉塞率中の条件で発熱量を変化させた場合の結果を図 3.2-14 に示す。発熱部全体の冷却時間に関しては発熱量の影響が顕著に表れているが、圧力に関しては閉塞率設定値の影響で発熱量に対する依存性が見られない結果となった。

このように、水注入時の冷却特性については、初期ヒータ温度、注水量、出口部閉塞率の依存性が大きいことを確認した。特に、出口部閉塞率のわずかな差によって、冷却時間や試験体上下の圧力上昇が大きく変化することが明確になった。

最後に、水注入試験各ケースのヒータ温度上昇を表 3.2-2 に示す。発熱部全体の冷却時間が最長となったケース s 13 (初期温度 350 、注入量 10g/s、閉塞率中、浸漬位置中央) の場合でも、初期最高温度点での温度上昇が最大約 6 K となっており、上部からの注入でも十分に燃料ピンを冷却できる見通しが得られた。

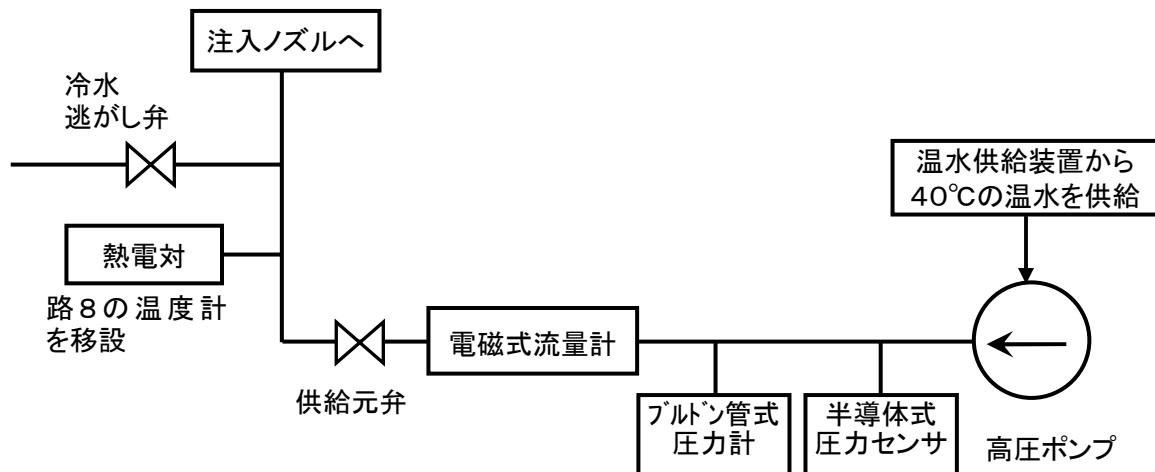
表 3.2-1 事故時水注入特性試験 試験マトリクス

試験 ケース	ヒータ出力 (W)	初期ヒータ 温度(°C)	出口部 閉塞率 ^[注]	注水量 (g/s)	浸漬位置	備 考
s1	165	250	高	10	発熱部中央	初期ヒータ温度、注水量、浸 漬位置の影響確認
s2	↑	↑	↑	20	↑	
s3	↑	350	↑	10	↑	
s4	↑	↑	↑	20	↑	
s5	165	250	高	10	発熱部下端	
s6	↑	↑	↑	20	↑	
s7	↑	350	↑	10	↑	
s8	↑	↑	↑	20	↑	
s9	165	250	中	10	発熱部下端	出口閉塞率の影響確認
s10	↑	↑	↑	20	↑	
s11	↑	350	↑	10	↑	
s12	↑	↑	↑	20	↑	
s13	165	350	中	10	発熱部中央	
s14	↑	250	↑	↑	↑	
s15	↑	350	↑	20	↑	
s16	↑	250	↑	↑	↑	
s17	75	250	中	10	発熱部中央	発熱量の影響確認

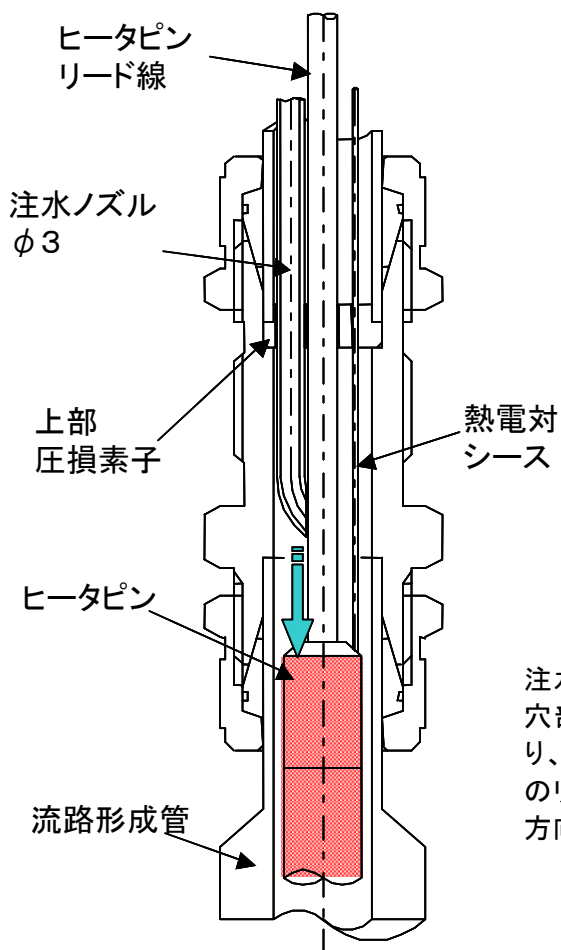
[注] 閉塞率 高：96%、中：91%

表 3.2-2 事故時水注入特性試験でのヒータ温度上昇

試験 ケース	ヒータ 出力 [W]	初期ヒータ 最高温度 [°C]	注入量 [g/s]	出口部 閉塞率 [%]	浸漬位置	注水中 最高温度 [°C]	温度上昇 [K]
s1	165	279	10	95.8	発熱部中央	281	2.0
s2	165	275	20	95.8	発熱部中央	279	4.0
s3	165	365	10	95.8	発熱部中央	369	3.5
s4	165	351	20	95.8	発熱部中央	353	1.2
s5	165	272	10	95.8	発熱部下端	273	1.3
s6	165	277	20	95.8	発熱部下端	279	1.1
s7	165	352	10	95.8	発熱部下端	354	1.6
s8	165	352	20	95.8	発熱部下端	355	2.5
s9	165	262	10	90.9	発熱部下端	264	1.2
s10	165	293	20	90.9	発熱部下端	294	0.1
s11	165	355	10	90.9	発熱部下端	358	2.9
s12	165	354	20	90.9	発熱部下端	355	1.0
s13	165	353	10	90.9	発熱部中央	359	5.3
s14	165	289	10	90.9	発熱部中央	291	1.1
s15	165	358	20	90.9	発熱部中央	361	2.9
s16	165	291	20	90.9	発熱部中央	291	0.0
s17	75	251	10	90.9	発熱部中央	252	0.1



(a) 概略系統図



注水ノズルは、上部圧損素子の穴部を貫通して差し込まれており、先端の曲がり部をヒータピンのリード線に沿わせて配置し、軸方向に注水する構造である。

(b) 注水部の構造

図 3.2-1 注水系の概略系統図、ノズル部構造

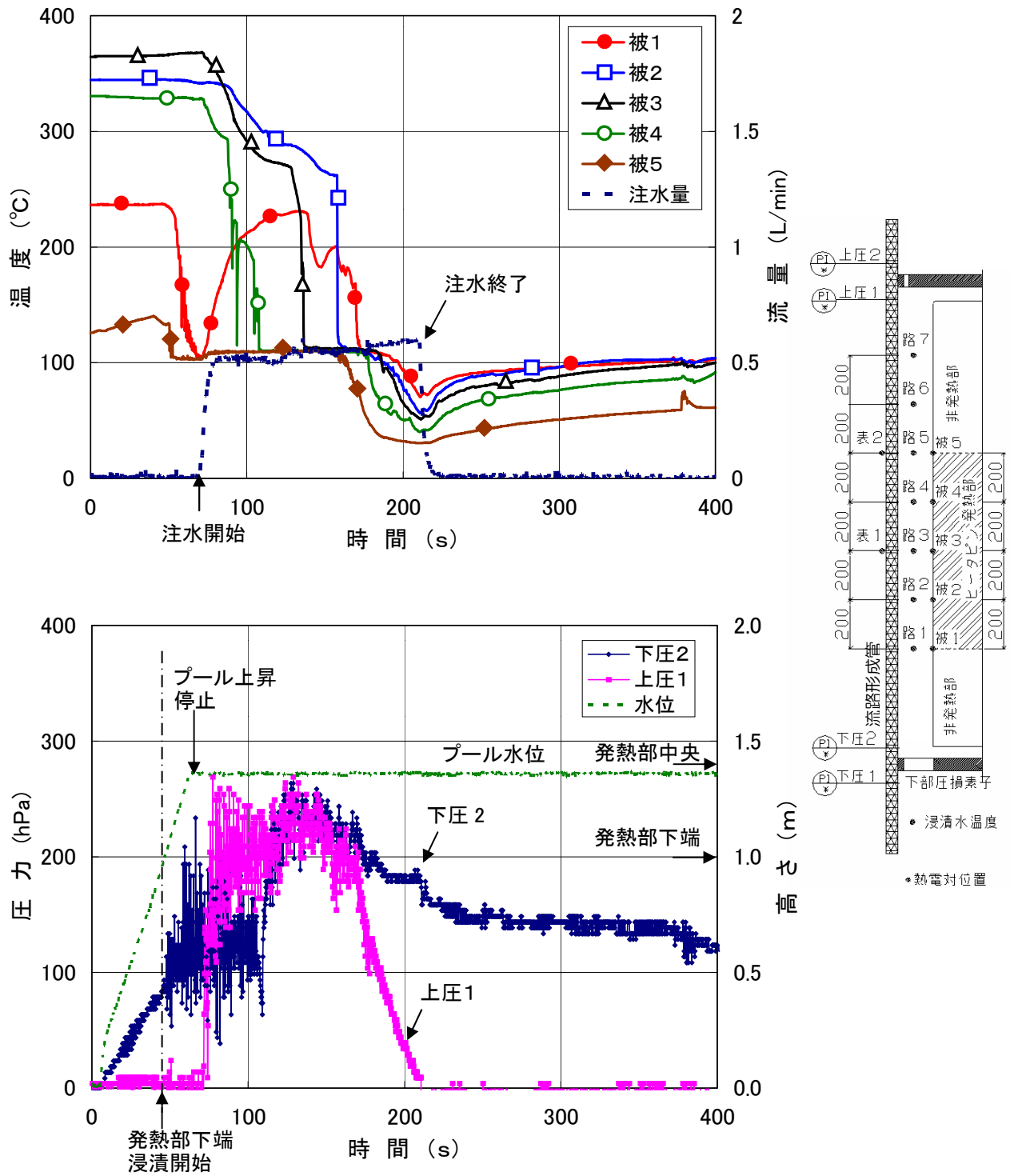


図 3.2-2 ヒータ温度、注水量、圧力、プール高さの時間変化
 [ケース s 3 : 初期温度 350 、閉塞率高、浸漬位置中央、注水量 10g/s]

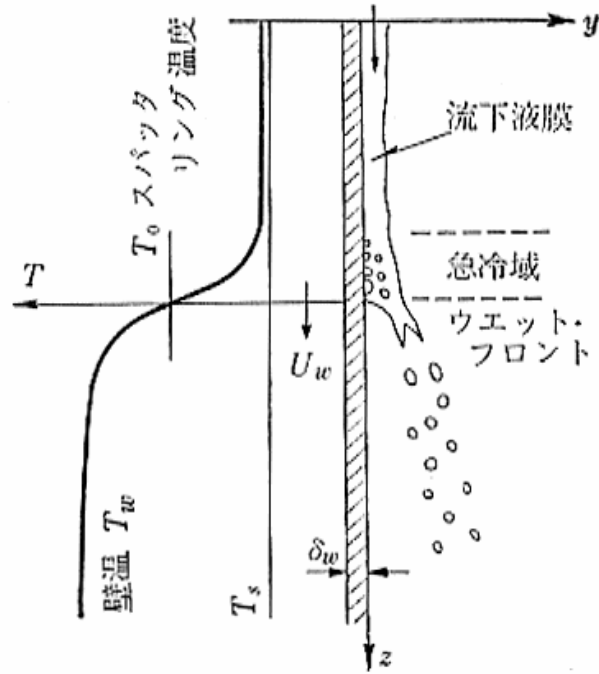


図 3.2-3 流下液膜による冷却メカニズム^[4]

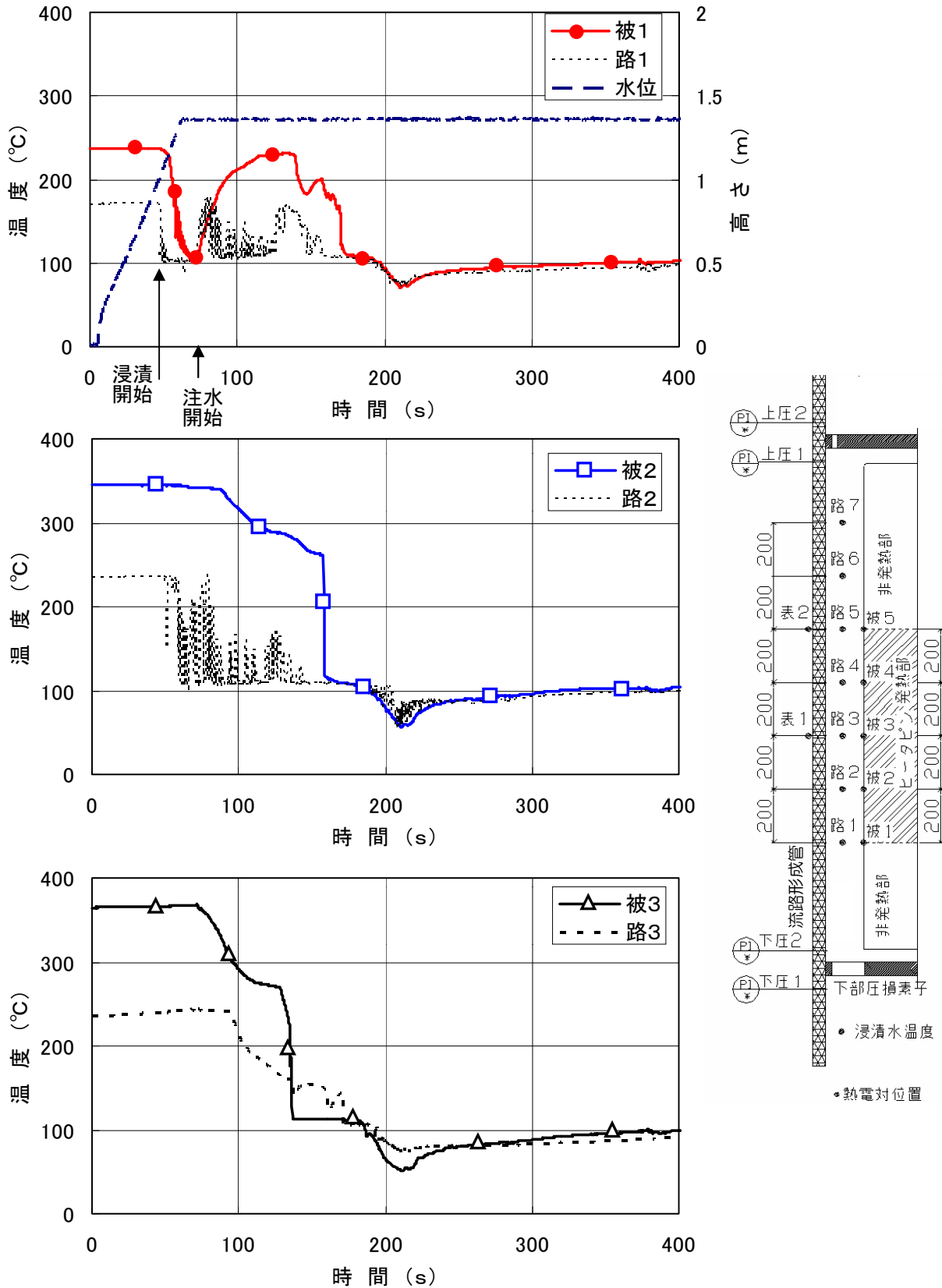


図 3.2-4 流路温度の時間変化 (1/2)

[ケース s 3 : 初期温度 350、閉塞率高、浸漬位置中央、注水量 10g/s]

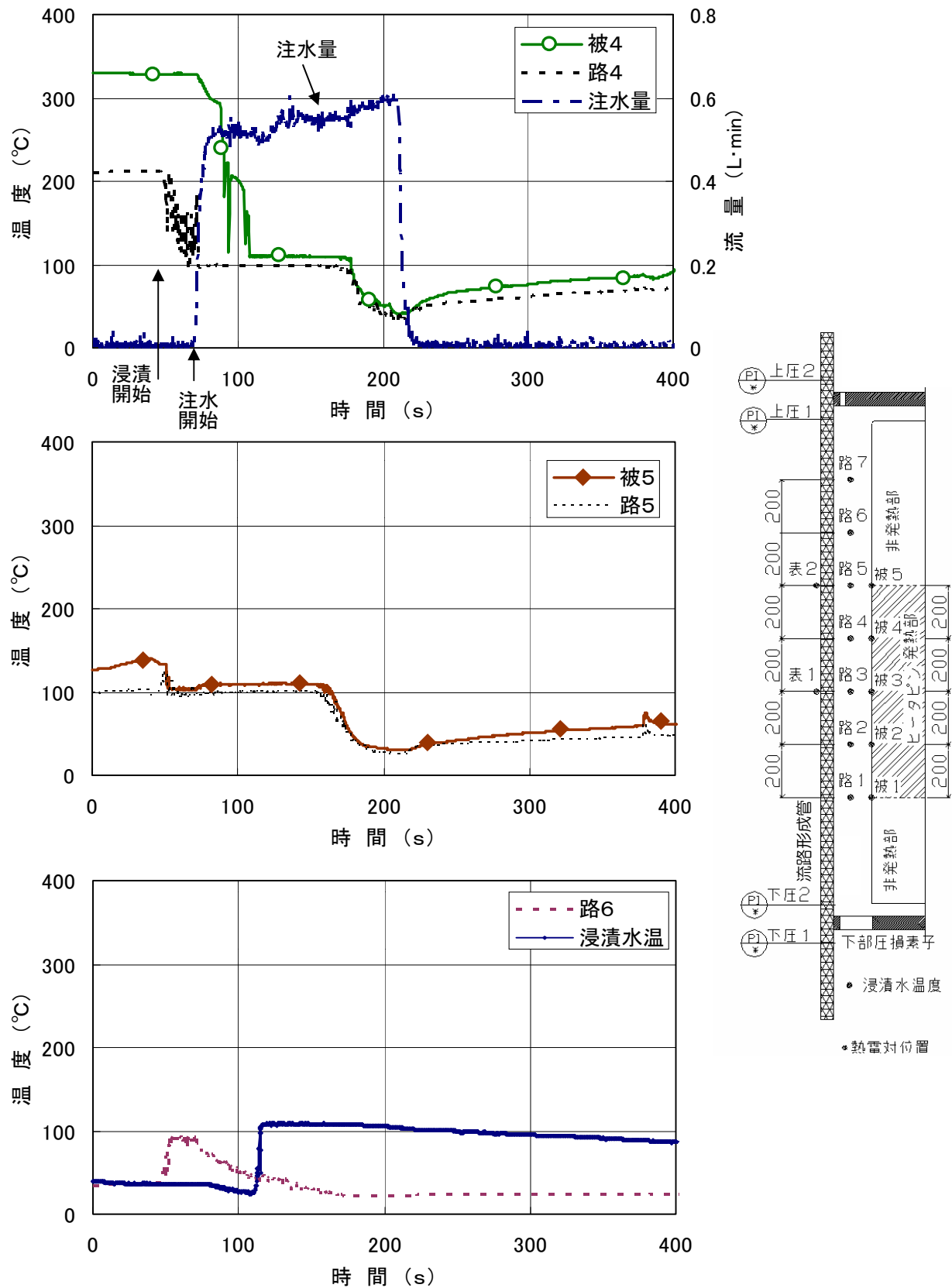


図 3.2-4 流路温度の時間変化 (2/2)

[ケース s 3 : 初期温度 350 、閉塞率高、浸漬位置中央、注水量 10g/s]

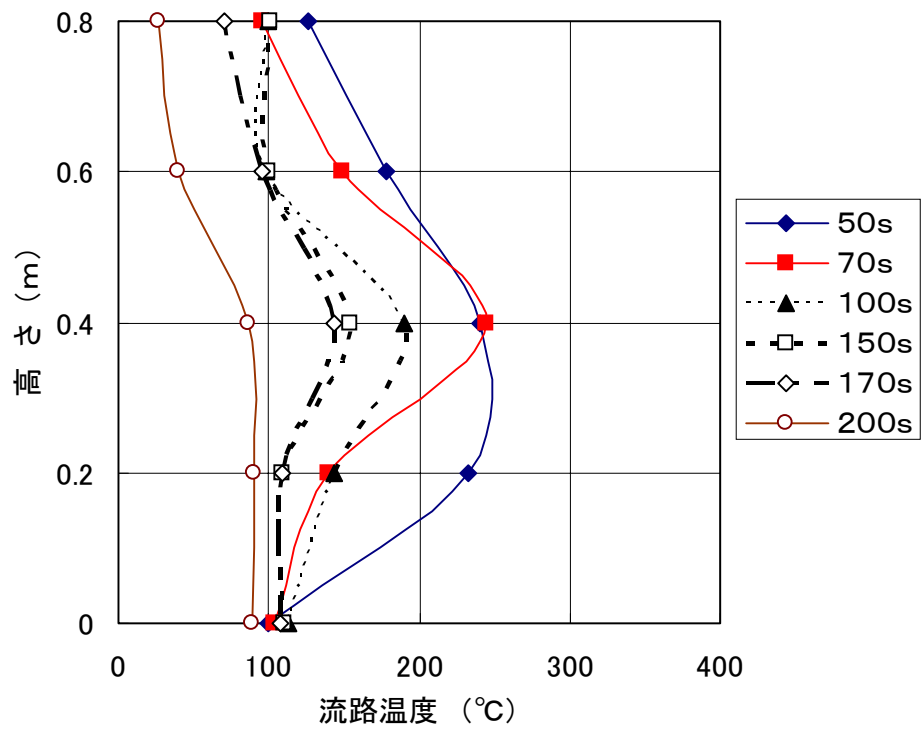
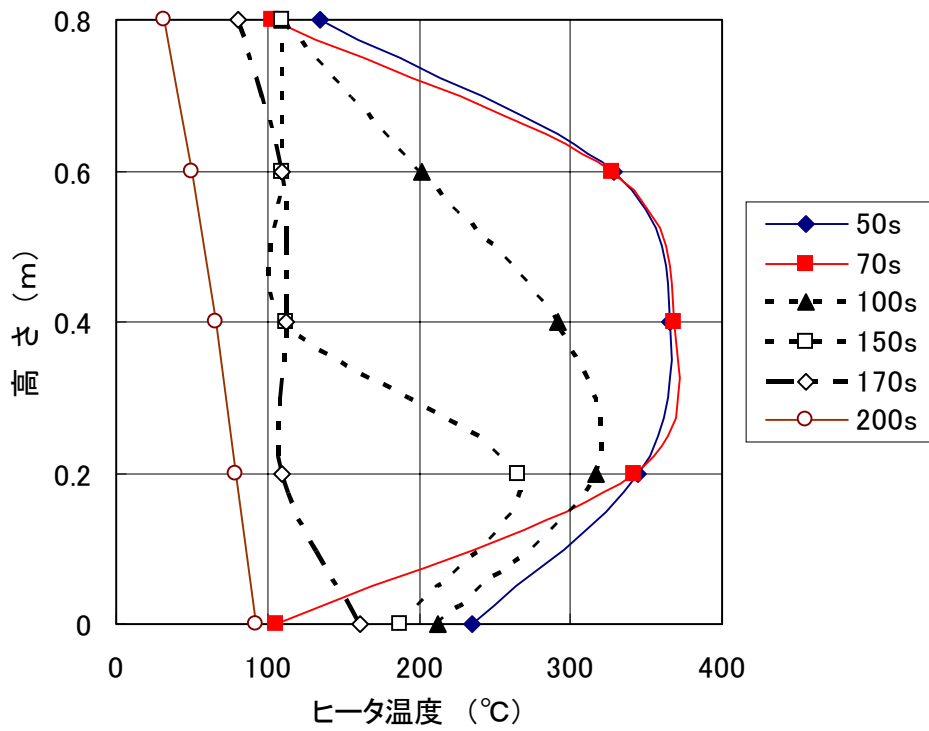


図 3.2-5 ヒータ表面温度、流路温度の高さ方向温度分布の時間変化
 [ケース s 3 : 初期温度 350 、閉塞率高、浸漬位置中央、注水量 10g/s]

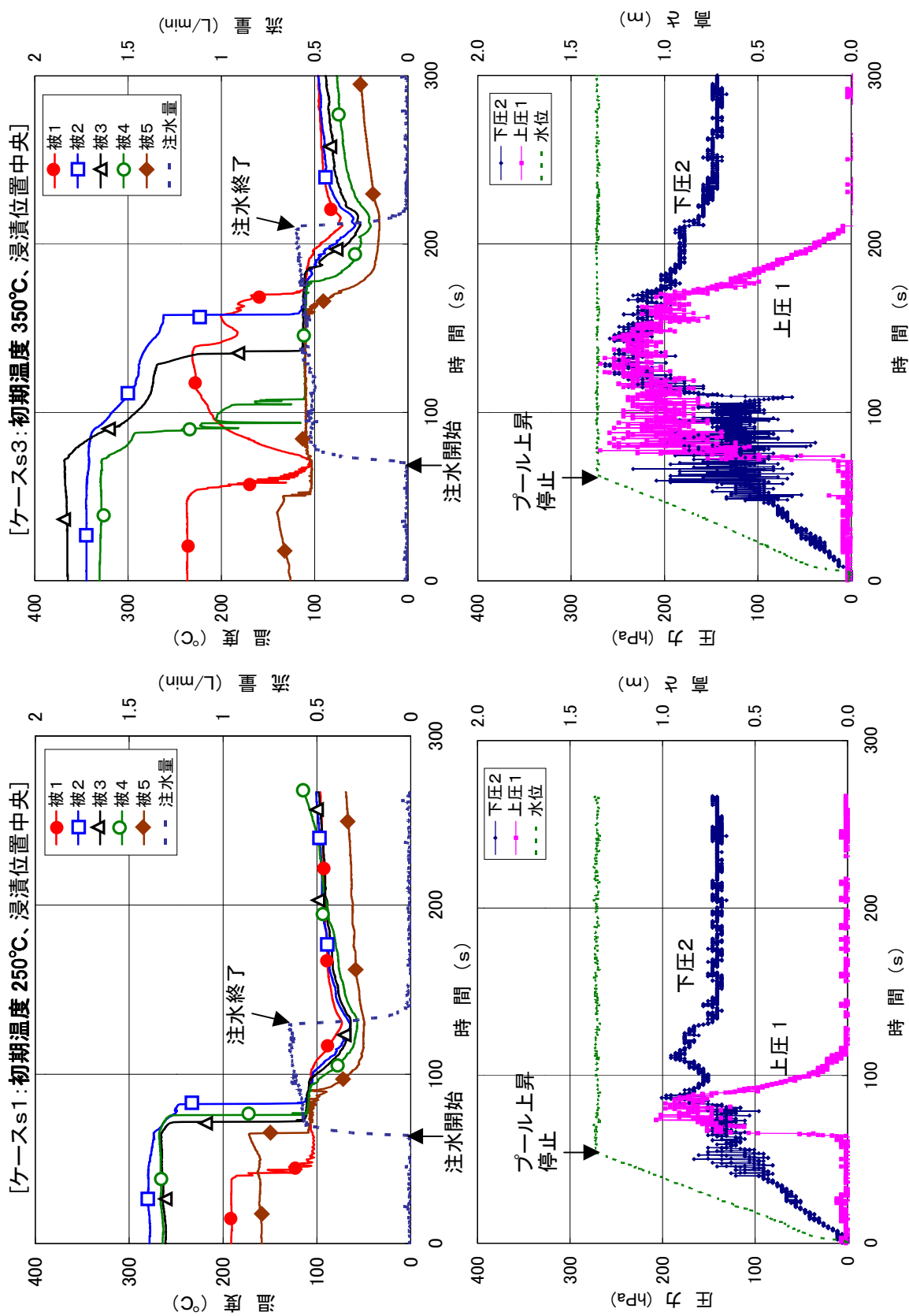


図 3.2-6 ヒータ温度、圧力の比較 (初期温度の影響)

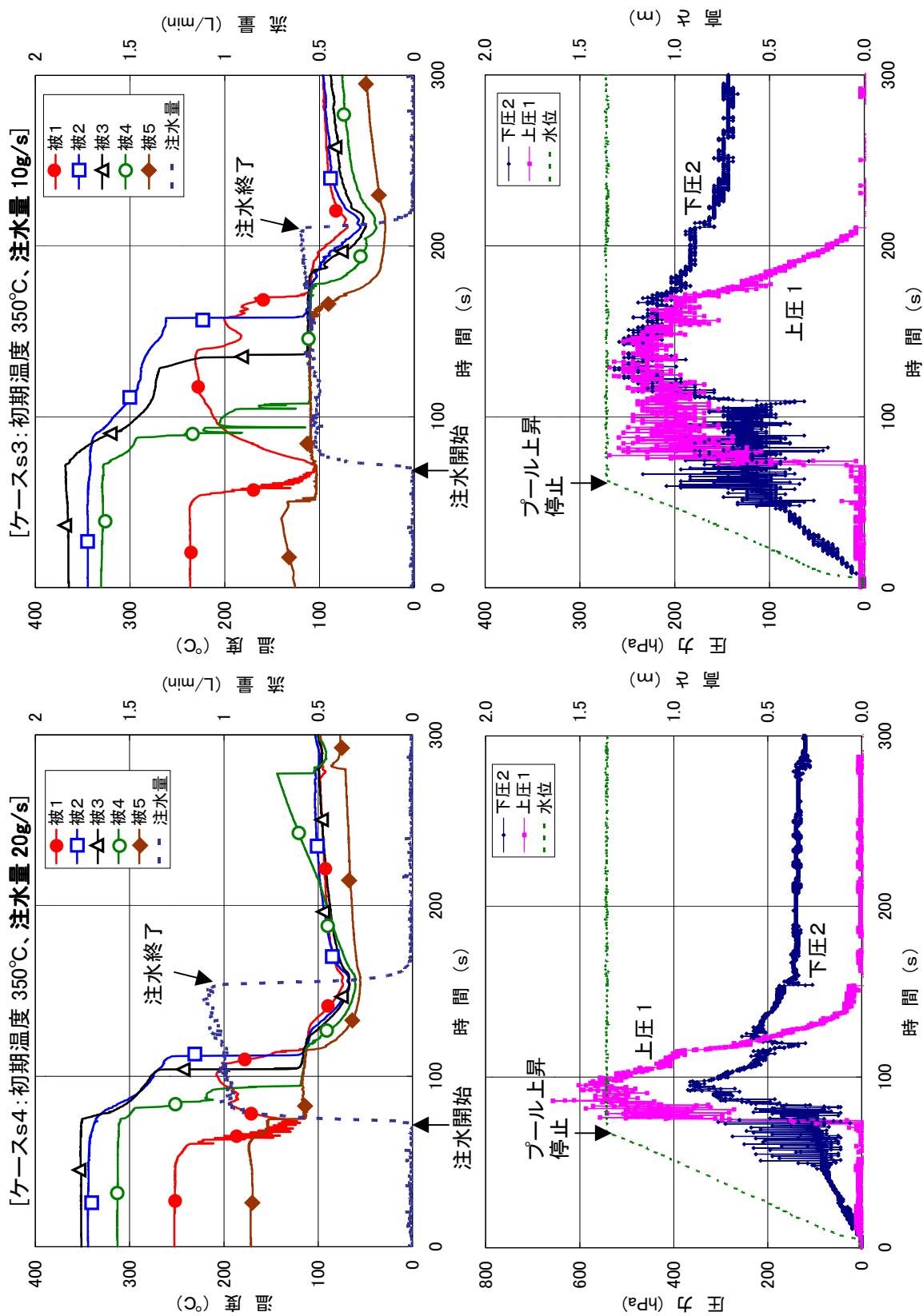


図 3.2-7 ヒータ温度、圧力の比較 (注水量の影響)

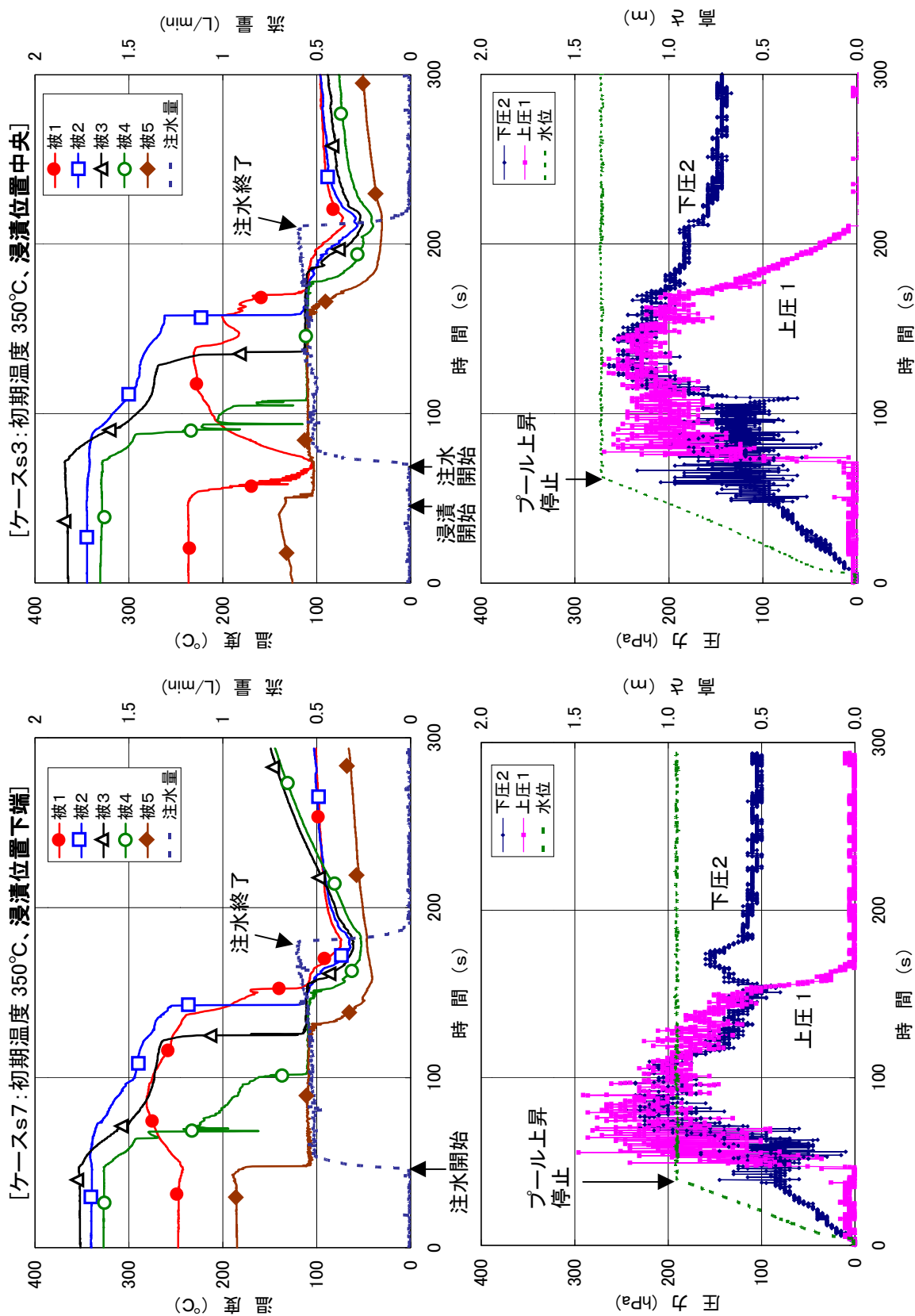


図 3.2-8 ヒータ温度、圧力の比較 (浸漬位置の影響)

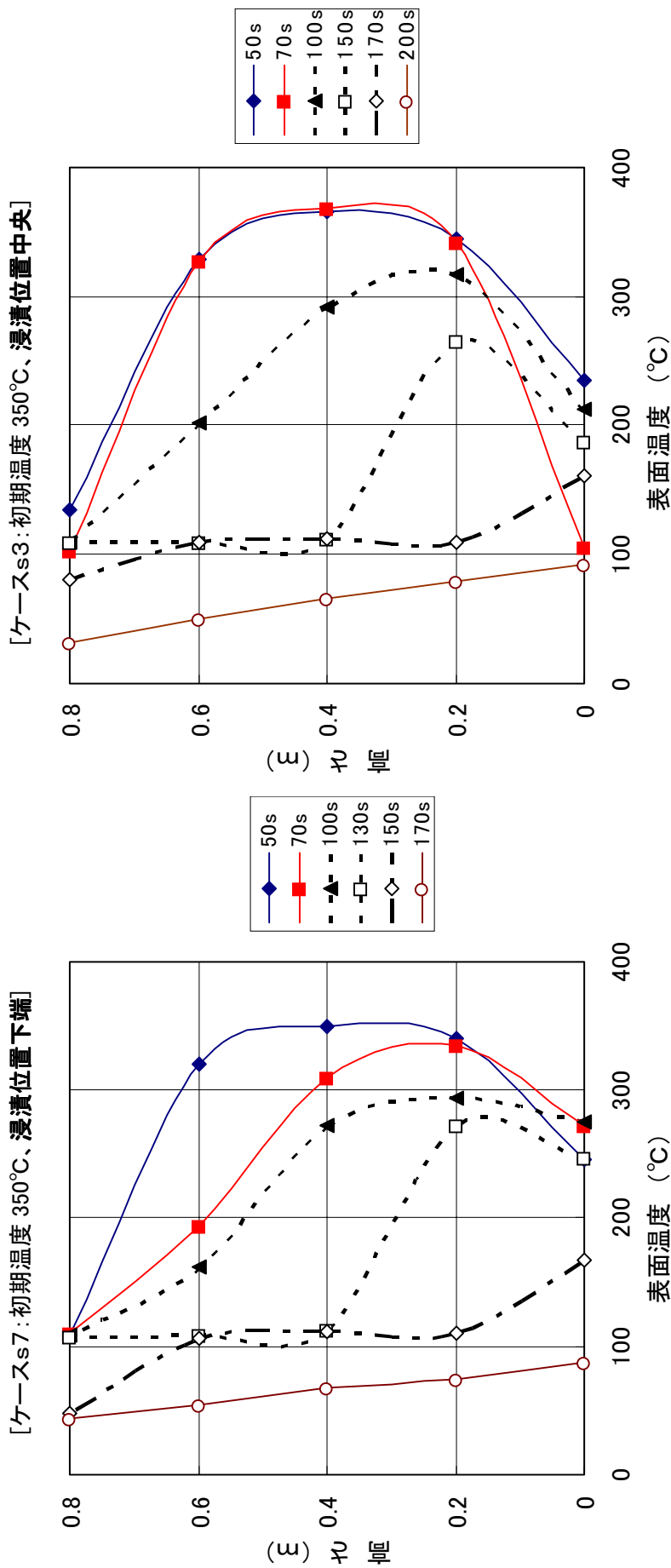


図 3.2-9 ヒータ高さ方向温度分布の比較 (浸漬位置の影響)

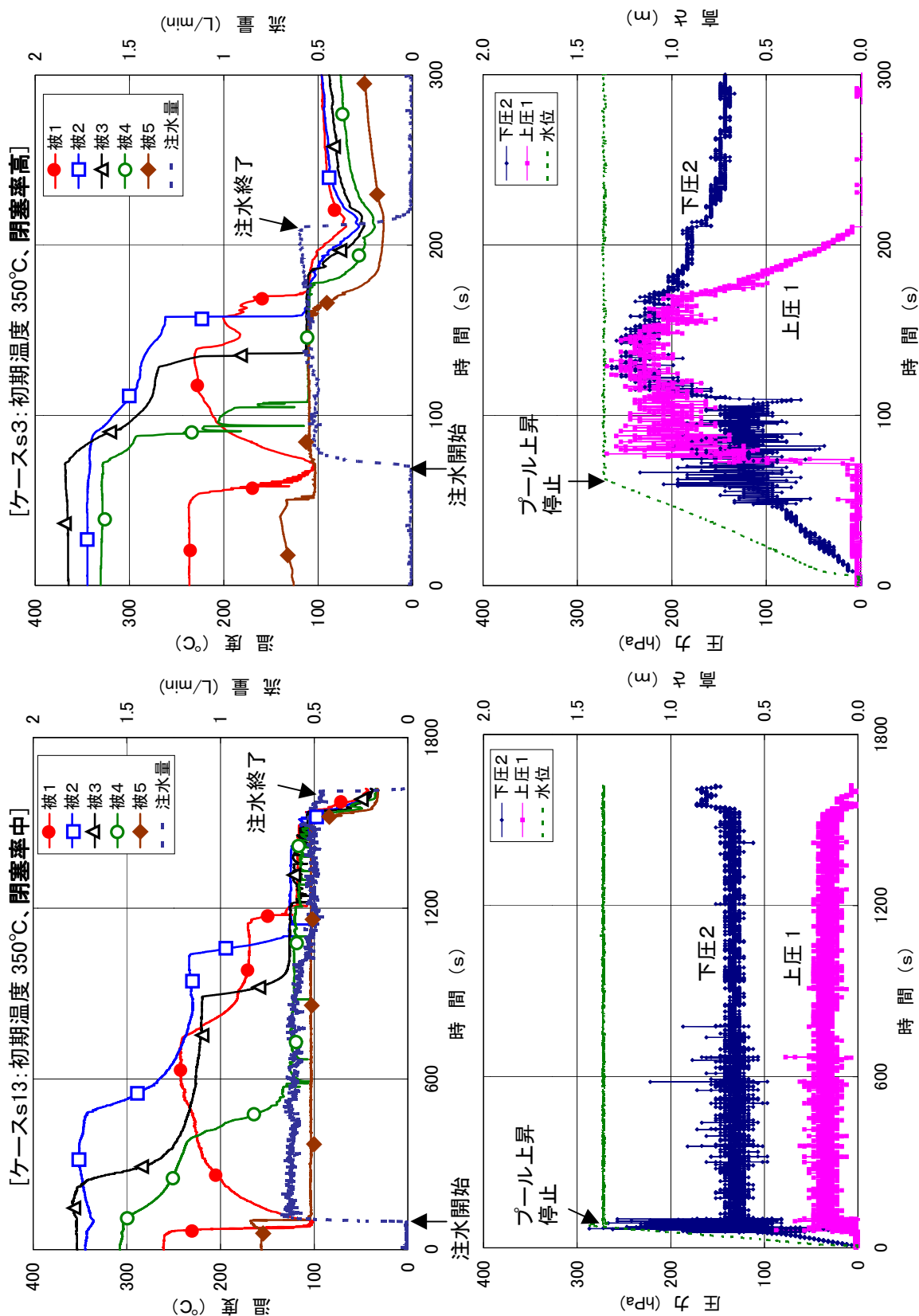


図 3.2-10 ヒータ温度、圧力の比較 (出口部閉塞率の影響)

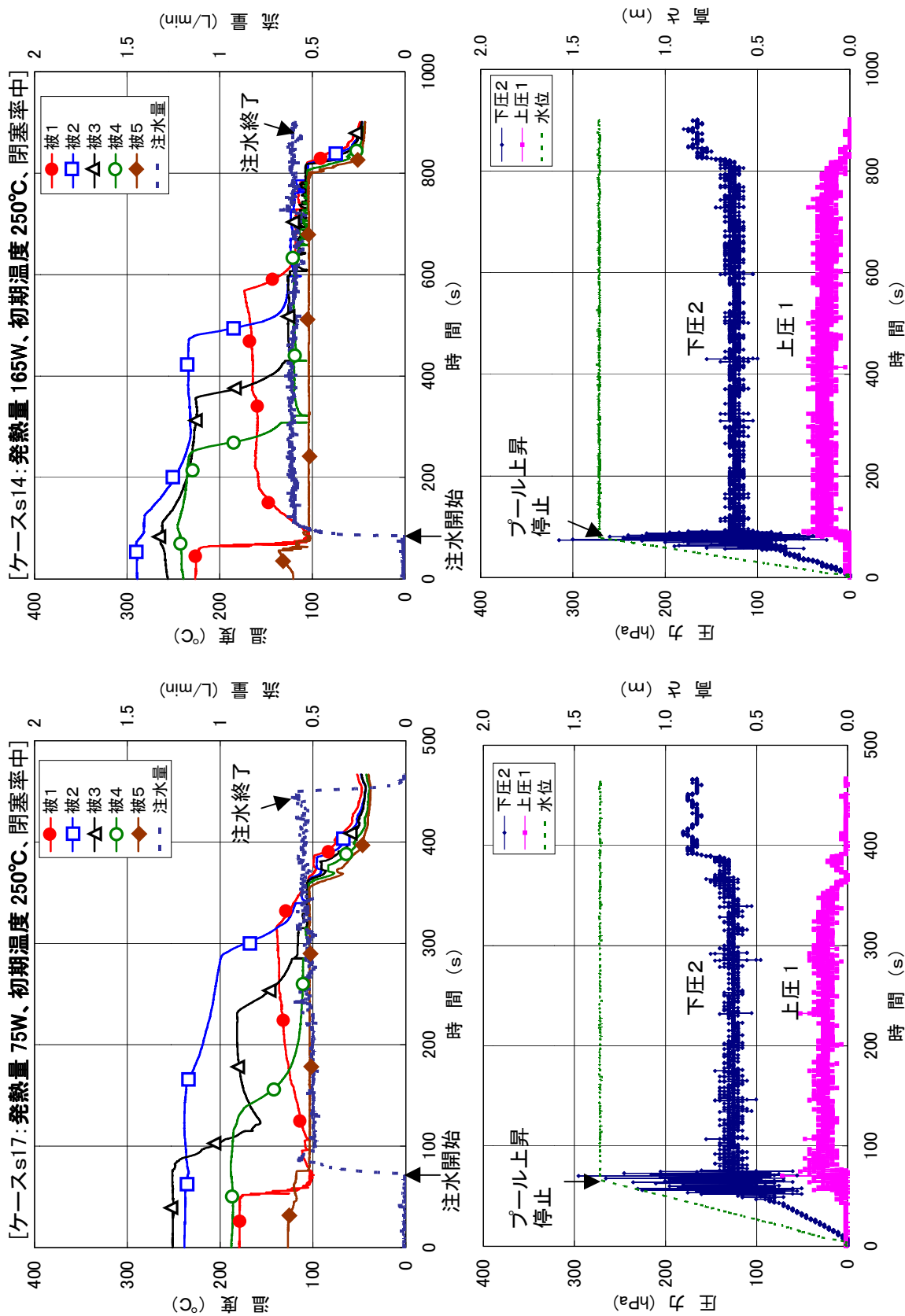


図 3.2-11 ヒータ温度、圧力の比較 (発熱量の影響)

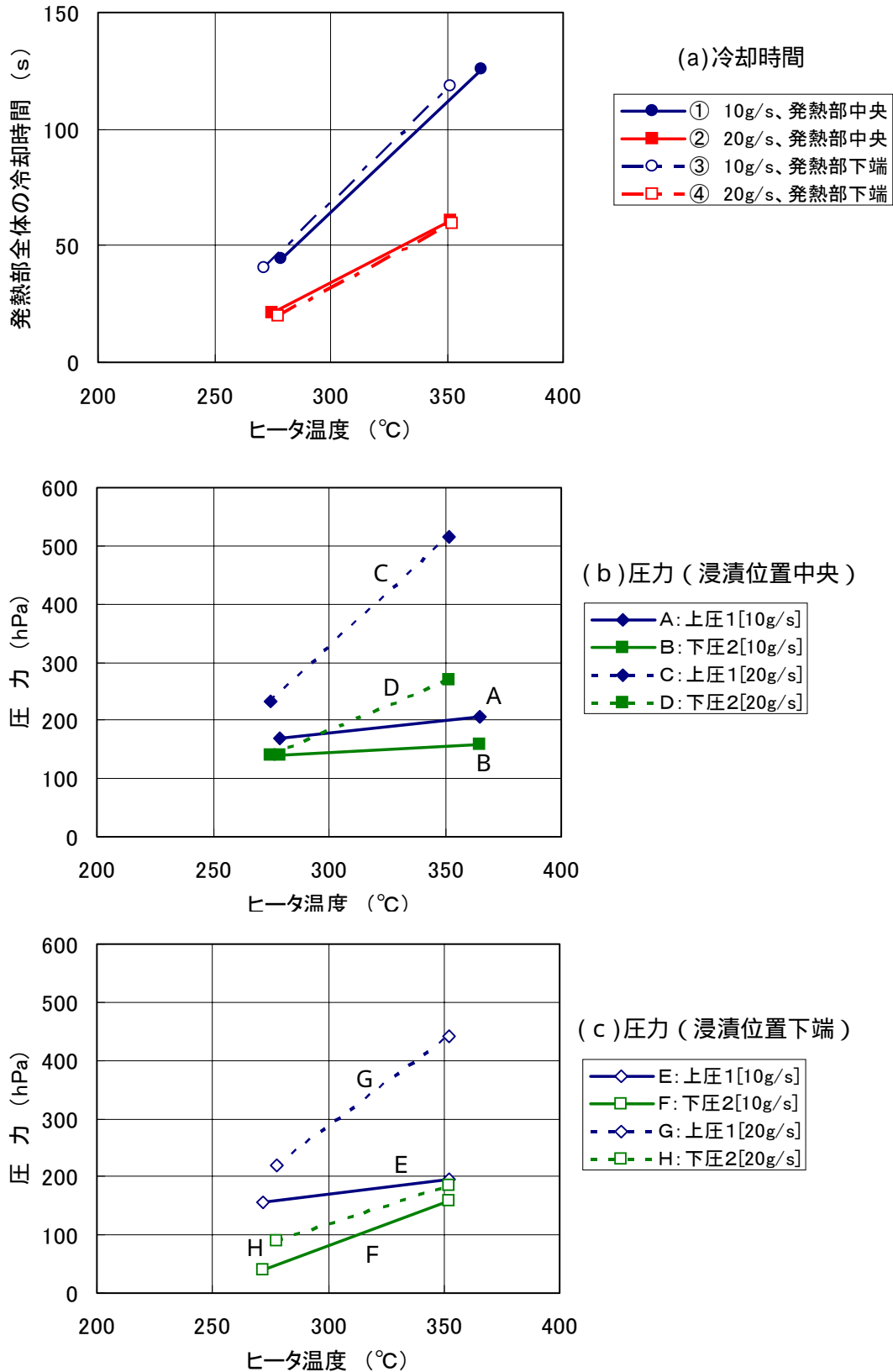


図 3.2-12 発熱部全体の冷却時間、圧力の比較 (1/3)
 [閉塞率高：ヒータ温度、注水量、浸漬位置の影響]

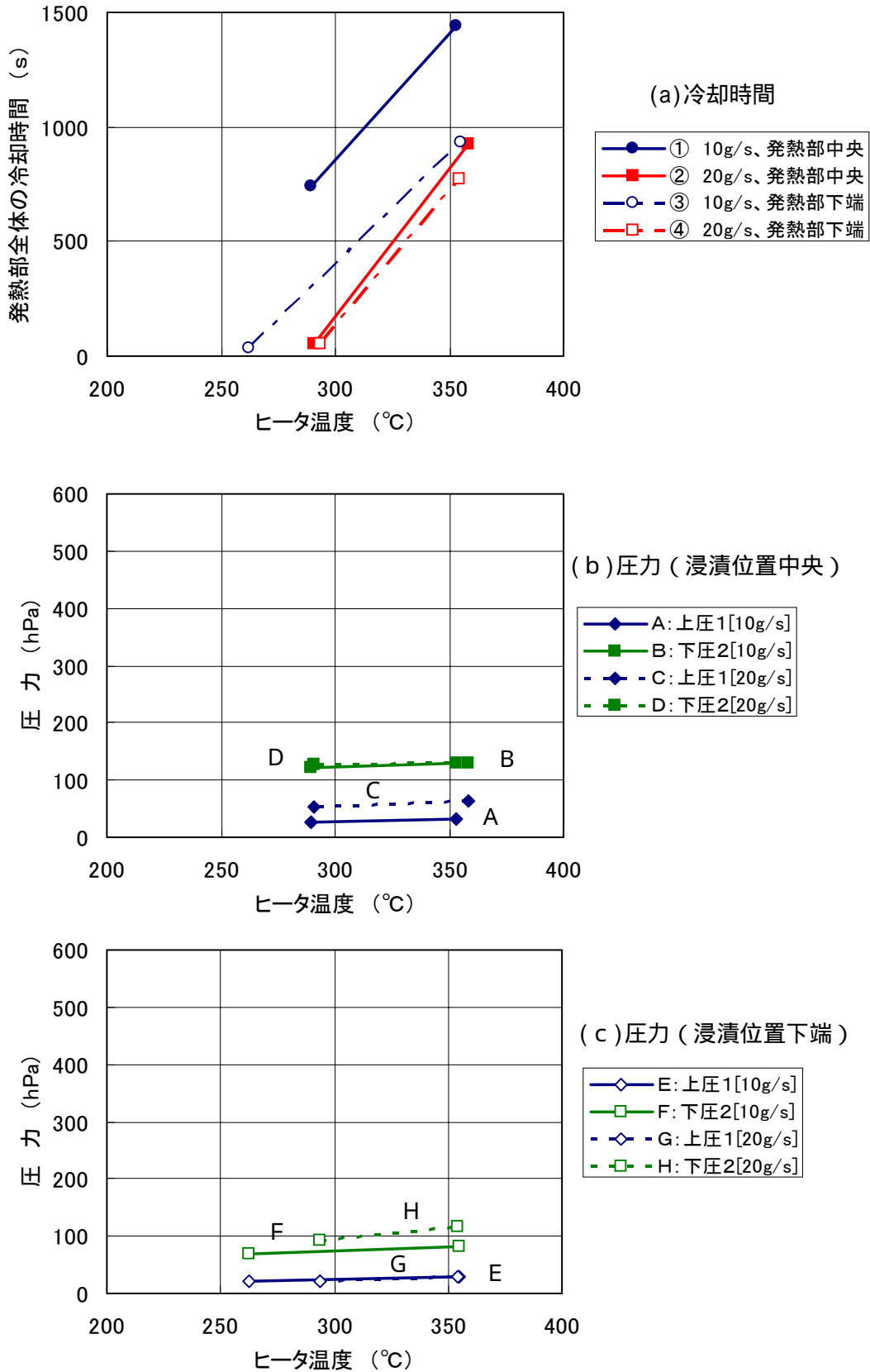


図 3.2-13 発熱部全体の冷却時間、圧力の比較 (2/3)
 [閉塞率中：ヒータ温度、注水量、浸漬位置の影響]

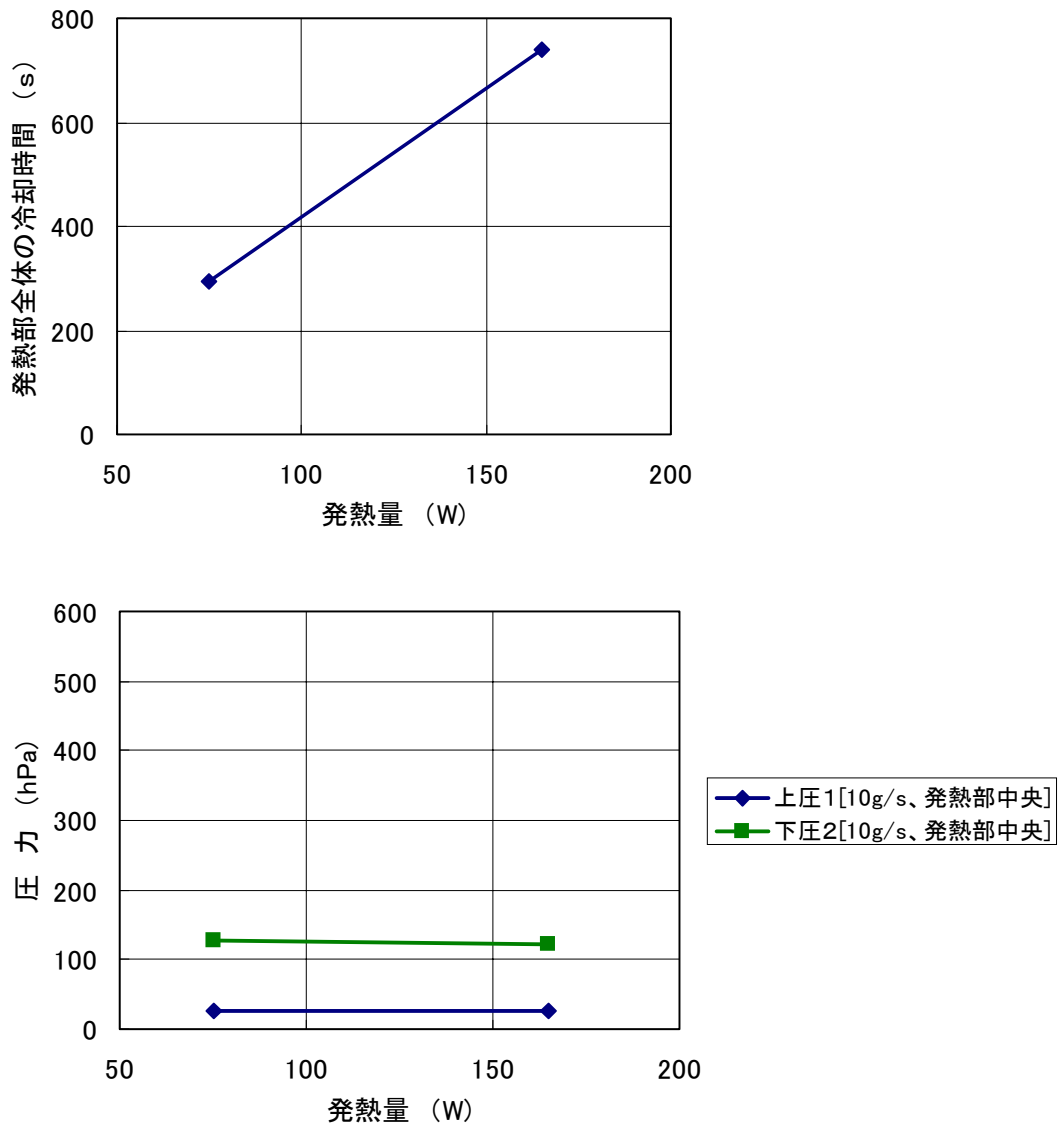


図 3.2-14 発熱部全体の冷却時間、圧力の比較 (3/3)
[閉塞率中：発熱量の影響]

3.3 結果のまとめと実機設計への反映

(1) 試験結果のまとめ

今回実施した通常浸漬試験及び事故時水注入試験における主な結果を表 3.3-1 にまとめる。

単ピン体系の基礎的な試験ではあるが、通常浸漬時の沸騰挙動の可視化も含めて、ヒータ温度変化等から浸漬時 / 注水時の冷却形態を同定した。また、通常浸漬時において蒸気発生に伴う集合体内の圧力上昇により、集合体内の水位上昇が阻害される可能性が当初懸念されていたが、上部の圧力上昇は下部圧力以下となった。さらに、いずれの試験においても、有意な温度上昇を伴うことなくヒータピンを冷却できる結果が得られており、設計ウインドウ拡大の観点も考慮した各種パラメータの影響確認も含めて、基本的な冷却特性を把握できたと考える。

(2) 試験体系と実機との相違

今回の試験結果を実機設計に反映するため、冷却特性の支配因子となる熱的条件や試験部での流入 / 流出条件について、試験体系と実機との相違を表 3.3-2 にまとめる。

熱的な条件としては、ヒータ周りの境界条件（発熱量、熱容量、発熱長、ピン直径、加熱等価直径、流路面積）を実機の燃料ピン 1 本分と同一に設定している。ただし、流路面積を一致させるため水力等価直径が実機より小さくなっており、発熱部での圧損は増加する傾向にあり、蒸気排出抵抗としては実機より大きくなる。また、ヒータピンを囲む SUS 製流路形成管の熱容量が相対的に大きく、ヒータ初期温度設定の間に流路形成管の温度が上昇するため、実機条件よりも発生する蒸気量が増大し、圧力上昇に対しては保守側の条件となる。

単ピン試験体系と実機バンドル体系との相違に関しては、以下の点に着目した。まず、通常浸漬試験時のヒータ温度変化は、水浸漬に伴ってクエンチ点が上昇するリフラディング冷却の特徴が明確に現れており、図 2.1-3 に示したワイヤスペーサを有する 4 × 4 ピンバンドル体系の高転換 PWR 再冠水試験^[2]での温度変化と同様の傾向を示すことから、発熱量や初期温度の相違はあるものの冷却形態としては同等と考える。また、単ピン体系の沸騰挙動の可視化においては、浸漬初期段階の蒸気膜形成や、核沸騰時の気泡発生が観察できており、バンドル体系を想定した場合においても、燃料ピン上方に向う蒸気冷却や気泡発生に伴う気液二相のミキシング効果が期待できるものと考ええる。なお、高転換 BWR を対象として、冷却材喪失事故を想定した場合の集合体内ポイド率を 1 / 6 セクタの 45 ピン体系（グリッドスペーサによる支持）で測定した試験^[5]が実施されているが、稠密格子の集合体内で気泡が偏在するような現象は見られず、集合体内では均一な沸騰挙動を示すものと考ええる。したがって、通常浸漬時の冷却挙動に関しては、今回の単ピン試験の結果はバンドル体系においても定性的には大きな差異がないものと考ええる。

次に、入口部の流入条件に関しては、エントランスノズルでの流動抵抗を模擬するため、

実機条件(閉塞率 60～80%程度)より、開口面積を非常に絞った下部圧損素子(閉塞率 92%)を設置している。また、実機の使用済み燃料プール水深は約 11mとしているのに対し、本試験では吊り上げた水プール高さが最大 2.7mであるため、集合体下部から供給されるプール水の水頭圧が相対的に小さく、水供給の観点からは試験体系のほうが、供給水量を制限して冷却し難い条件になっている。

出口部の流出条件に関しては、ナトリウム洗浄後水プールに浸漬するまでの間、集合体をアルゴンガスで強制冷却するため、ガス冷却の観点からは集合体ハンドリング装置(グリッパ)の閉塞率を高く設定する必要がある。現状、グリッパの具体的な構造概念や冷却系(アルゴンガス/注水)の運用条件が確定していないが、アルゴンガス強制冷却時におけるグリッパ部の漏れ流量を低減することも考慮し、試験では上部圧損素子の閉塞率を 90%以上に設定している。

また、蒸気発生による圧力上昇は、ピンバンドル上部の空間容積に依存し、実機条件では燃料ピン 1 本当たりにして 30cm^3 程度となる。一方、試験体系では装置規模の制約から 3cm^3 となっており、実機条件の約 1/10 と小さい。したがって、燃料ピン 1 本当たりの発生蒸気量が同一条件の場合、集合体内圧力は試験体系の方が高くなり、プール水位上昇への影響を見る観点からは保守側の条件になっている。

ただし、今回の試験からバンドル体系に外挿できない項目としては、事故時の注水方法として各燃料ピンに均等に冷却水を供給できる注水ノズルの性能を確認することや、ナトリウム洗浄過程で除去できなかった残留ナトリウムとプール水の反応時に発生する気泡が冷却特性に及ぼす影響等が考えられる。このため、水プール直接貯蔵方式がレファレンス概念に選定された場合には、最終的には移送中におけるアルゴンガス冷却性能や残留ナトリウムの影響も考慮したバンドル体系での確証試験が必要と考える。

(3)冷却設備設計の方向性

・常用系注水設備の削除

現在の設計案では、アルゴンガス冷却を停止して水プール浸漬(エントランスノズルのオリフィス部着水)前に注水を開始して、水冷却を行いながら使用済み燃料プールへ装荷する方式としていたが、本試験結果から水冷却なしで装荷できる見通しが得られた。したがって、常用系注水設備の削減が可能となる。

・アルゴンガス冷却系の容量低減

今回の通常浸漬/水注入試験では、ヒータ初期温度 350 条件においても有意な温度上昇を招くことなく冷却できる見通しが得られた。浸漬前のアルゴンガス強制冷却時における高発熱燃料の冷却特性評価や水中浸漬に起因する熱衝撃時の被覆管健全性評価は別途

必要であるが、現在の設計で想定している被覆管初期温度より高温条件でも冷却できることから、アルゴンガス冷却系の容量低減の可能性がある。

- ・ 事故時の注水系設備要件

昇降機スティック時対応の注水系設備としては、今回の試験結果を反映し、燃料ピンあたりの注水量として 10g/s 以上、出口部の流路閉塞率を 95%程度とすべきとの方向性が明らかになった。

なお、冷却特性上、特に出口閉塞率設定値の影響が非常に大きいことがわかり、以下の点が今後の課題と考える。

- ・ アルゴンガス冷却設備との取合い条件を明確化し、グリッパ部閉塞率を設定
- ・ 注水ノズルを含めた集合体ハンドリング装置構造概念のさらなる具体化
- ・ 下方からの注水方法の取込みを含めて水注入時の注水量・注水圧力に関する最適化

表 3.3-1 試験結果のまとめ

試験 パラメータ	対応する設計因子	冷却特性への 影響度	主 な 試 験 結 果
通常浸漬試験	発熱量	中	<ul style="list-style-type: none"> ・水浸漬に伴い、従来の再冠水試験と同様、発熱部下方からクエンチ点が上昇するリフレンジング冷却の特徴を確認した。 ・発熱部全体が冷却されるまでの冠水終了時間は、ヒータ初期温度に比例して増加する。 ・熱的に最も厳しい初期温度 350、発熱量 165W（炉停止後 4 日相当）の条件でも、ヒータ温度上昇は数 K に留まり、7 分程度で冷却できる。 ・浸漬（水プール上昇）速度を増加させると、沸騰開始までの時間が短縮され試験部の圧力上昇速度が増加するが、25～70mm/s の範囲では、冠水終了時間や圧力上昇への影響は小さい。 ・閉塞率を 96% から 87% まで変化させると、冠水終了時間が短縮され圧力上昇も低減する。ただし、閉塞率 96% の条件でも、上部圧力が下部圧力を上回ることとはなく、発熱部への水位上昇は阻害されない。
	ヒータ初期温度	大	
	浸漬速度	小	
	出口部閉塞率	大	
	発熱量	中	
事故時水注入試験	ヒータ初期温度	大	<ul style="list-style-type: none"> ・上部からの注水により、発熱部上方から冷却が進行する流下液膜冷却の特徴を確認した。また、浸漬部での冷却より上部からの注水冷却が支配的となるため、初期浸漬位置の相違による影響は小さい。 ・発熱部全体が冷却されるまでの時間は、閉塞率高、初期温度 350 の条件で 3 分以内であり、通常浸漬試験と同様、ヒータ初期温度の増加に伴い増加する。 ・閉塞率高の条件では、短時間だが上部圧力が下部圧力を上回る。また、注水量を 2 倍に増大させると、冷却時間は半減するが、上部圧力が大幅に増大する。 ・閉塞率中の条件では、試験体からの蒸気流出速度が増加し、注入した冷却水の発熱部への到達を抑制するため、冷却時間が最大 24 分程度まで増大する。ただし、ヒータ温度上昇は最大約 6 K に留まり、有意な温度上昇を招くことなく冷却できる。
	注水量	大	
	初期浸漬位置	小	
	出口部閉塞率	特大	
	発熱量	中	

表 3.3-2 試験体系と実機との相違

支配因子	比較項目
熱的条件	<p>ヒータピン周りの熱的境界条件は実機燃料ピンと一致。</p> <p>流路面積を一致させたため水力等価直径が小さく、発熱部の圧損大。</p> <p>流路形成管の熱容量の影響が相対的に大。</p> <p>発生蒸気量が実機より保守側の条件。</p> <p>通常浸漬試験時のヒータ温度変化(クエンチ点の上昇)の傾向が、高転換 PWR の 4 × 4 ピンバンドル再冠水試験結果とほぼ同様。</p> <p>ラッパ管内においても、膜沸騰時の蒸気冷却、核沸騰時の気泡発生による冷却水ミキシングが期待できるので、単ピン試験結果が定性的にはバンドル試験体系と大差ない。</p>
入口部 流入条件	<p>エントランスノズルを模擬した下部圧損素子の閉塞率大。</p> <p>試験では、水プールとの水頭差が相対的に小。</p> <p>集合体下部からの供給水量に関して、実機より保守側の条件。</p>
出口部 流出条件	<p>アルゴンガス冷却時における流れ流量低減の観点から、出口部閉塞率を制限。</p> <p>ヒータピン上部空間容積は、実機の 1/10 程度。</p> <p>蒸気発生に伴う集合体圧力上昇は、実機より保守側の条件。</p>

4．結言

ナトリウム冷却大型炉の使用済み燃料取扱システムの候補概念である水プール直接貯蔵方式を対象に、高発熱燃料を水プールに浸漬する際の冷却特性を把握するため、単ピン体系の試験体を用いて、燃料ピンの熱的条件、集合体出口の圧力損失、浸漬速度等をパラメータとした通常浸漬時／注水時を想定した基礎試験を行い、以下の結果を得た。

- ・通常浸漬時の沸騰挙動の可視化やヒータピンの温度変化等より、通常浸漬時と注水時の冷却形態を同定した。
- ・ヒータ初期温度と出口部閉塞率が、発熱部全体の冷却終了時間に対する支配因子となる。
- ・試験中のヒータ温度上昇の最大値は、通常浸漬時で約 4 K、注水時に約 6 K と小さく、有意な温度上昇を伴うことなく冷却できる。
- ・通常浸漬時には、出口部閉塞率を大きくした条件でも、試験体上部圧力が下部圧力を上回ることはなく、発熱部への水位上昇は阻害されない。

このように、通常浸漬時／注水時の冷却特性に関して、設計ウインドウ拡大の観点も考慮した各種パラメータの影響を確認し、実機設計に反映できる基礎的なデータを取得した。

今後の課題としては、プール浸漬前のアルゴンガス強制冷却系設備の検討と併せて、冷却特性に影響の大きい集合体ハンドリング装置構造の具体化が必要と考える。

5 . 参考文献

- [1] 島川佳郎、他：Na冷却大型炉設計研究，JNC TY9400 2002-007，2002年5月
- [2] K. Hori et al. : "Experimental Study on Reflooding in Advanced Tight Lattice PWR",
Second Japan-Korea Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety, Fukuoka, Japan, October
15-18, 2000
- [3] 神永文人、内田秀雄：単一加熱管の再冠水現象に関する研究（第1報 実験的研究），
日本機械学会論文集 44巻387号，pp3875-3883，S53.11
- [4] 植田辰洋：気液二相流 - 流れと熱伝達 - ，養賢堂，p.332（1981）
- [5] 吉岡仙次、他：稠密格子燃料集合体の停滞水条件におけるボイド率評価，
日本原子力学会 「1996春の年会」 要旨集C 8