

MELT-II 試験装置を用いた再臨界排除可視化基礎試験
— 熔融燃料排出経路の冷却材ボイド化挙動の把握 —
(研究報告)



2001年7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

Inquires 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)
2001

MELT-II 試験装置を用いた再臨界排除可視化基礎試験 — 熔融燃料排出経路の冷却材ボイド化挙動の把握 —

(研究報告)

松場賢一^{*}、今堀真司^{*}、磯崎三喜男^{*}

要 旨

高速増殖炉の炉心損傷事故における再臨界問題を排除するためには、炉心損傷の早期段階に熔融燃料が炉心外へ排出されることを示すことが必要である。本試験研究では、早期燃料排出を達成する上で重要な排出経路内の冷却材ボイド化挙動を把握することを目的とした試験シリーズを実施している。この試験では、熔融した低融点合金 (Wood's Metal: 60%Bi+20%Sn+20%In, m.p.~78.8℃) を水で満たされた冷却材流路 (排出経路を模擬した流路) に放出させている。

本試験により次に示す結果が得られた。

1. 限られた量の冷却材の加熱により効率的な蒸気生成が行われる融体放出位置の近傍において、局所的な冷却材ボイド化が開始される。しかしながら、このボイド化は直ちに冷却材ボイドの拡大に繋がるものではない。
2. 安定な冷却材ボイド化 (非局所的) が実現するためには、融体と冷却材との混合領域において冷却材のサブクール度が十分に減少することが必要である。
3. 安定な冷却材ボイド化が実現すれば、そのボイド化領域へ融体が継続的に放出されることにより冷却材ボイドが拡大する。
4. 冷却材ボイドが拡大する時間スケールは融体のエンタルピーに強く依存する。物性値を考慮すると、実機条件では熔融燃料のエンタルピーが極めて大きいため早期に冷却材ボイドの拡大する可能性が高いと考えられる。

^{*} 大洗工学センター 要素技術開発部 リスク評価研究グループ

Basic Experimental Study with Visual Observation on Elimination of
the Re-criticality Issue using the MELT-II Facility
- Observation of the coolant-voiding behavior
in the simulated melt escape path -

Ken-ichi MATSUBA*, Shinji IMAHORI*
Mikio ISOZAKI**

Abstract

It is necessary to demonstrate massive relocation of molten fuel from the reactor core during an early stage of core disruptive accidents for elimination of the re-criticality issue in fast breeder reactors. In the present study, a series of experiments have been performed aiming at observation of coolant-voiding behavior within a simulated escape path which is important for the early melt relocation. In the tests, molten alloy with low melting temperature (Wood's Metal: 60%Bi+20%Sn+20%In, m.p. $\sim 78.8^{\circ}\text{C}$) is injected into a coolant channel filled with water simulating the escape path.

Through the present test series, the following results have been obtained:

1. Local coolant voiding is initiated in the vicinity of the melt injection site, where melt heats up a limited amount of coolant leading to effective vapor formation. However, this does not directly lead to initiation of the void development.
2. In order to establish a stable coolant voiding (not local), sufficient reduction of coolant subcooling is necessary in the region of melt/coolant mixing.
3. Once the stable coolant voiding is initiated, further development of the voiding zone takes place with a continued melt injection into the void.
4. The time scale for void development is quite dependent on the melt enthalpy. It is suggested from the material-property consideration that early void development should be highly probable under the reactor condition (MOX fuel/sodium coolant) in which the molten fuel has sufficiently large enthalpy.

** Nuclear System Safety Research Group, Advanced Technology Division, O-arai Engineering Center, JNC

目次

要旨	i
Abstract	ii
目次	iii
図表リスト	v
記号リスト	vii
1. 緒言	1
2. 試験装置及び試験方法	3
2-1 試験装置の概要	3
2-2 計測系	4
2-3 試験方法	5
3. 試験条件	6
3-1 模擬物質の選択	6
3-2 試験パラメータ	6
4. 試験結果	8
4-1 リファレンスケースのボイド化挙動	8
4-1-1 試験データの分析	8
4-1-2 冷却材流路のボイド化の事象推移	10
4-2 各ケースのボイド化挙動の比較	10
4-2-1 融体温度が低いケースのボイド化挙動	10
4-2-2 融体温度が高いケースのボイド化挙動	11
4-2-3 冷却材温度が低いケースのボイド化挙動	11
4-2-4 冷却材圧力が低いケースのボイド化挙動	11
5. 考察	12
5-1 ボイド化のメカニズムの推定	12
5-2 冷却材ボイド発生時における「混合領域」の高さの概略的評価	12
5-3 熔融燃料/ナトリウム条件における冷却材ボイド化の可能性の検討	13

5-4 CAMEL C6,C7 試験の冷却材ボイド化挙動の分析	14
5-5 今後の課題	16
6. まとめ	17
謝辞	18
参考文献	19
付録1 冷却材流路のスケーリング	44
付録2 試験データ集	45

図表リスト

表 3-1	模擬物質と実機物質の主な物性値の比較	20
表 3-2	再臨界排除可視化基礎試験の試験条件	20
表 4-1	試験結果の一覧	21
表 5-1	冷却材ボイド発生時における「混合領域」の概略高さ	21
図 1-1	CDA の事象推移と再臨界問題排除の概念	22
図 1-2	早期燃料排出の概念	22
図 1-3	早期燃料排出を実証するために解明すべき主要現象	23
図 1-4	再臨界排除可視化基礎試験の位置付け	23
図 2-1	再臨界排除可視化基礎試験体と計測系配置の概要	24
図 2-2	再臨界排除可視化基礎試験体の全体写真	25
図 2-3	冷却材流路と融体放出ノズルの写真	25
図 3-1	試験温度条件の分布	26
図 3-2	高速炉の CDA 条件において予想される FCI 挙動	26
図 4-1	高速度ビデオカメラにより撮影されたリファレンスケースのボイド化挙動	27
図 4-2	リファレンスケースの融体放出速度の履歴	28
図 4-3	リファレンスケースの冷却材流路の圧力履歴 1	28
図 4-4	リファレンスケースの冷却材流路の圧力履歴 2	29
図 4-5	リファレンスケースの冷却材流路の圧力履歴 3	29
図 4-6	リファレンスケースの冷却材流路の温度履歴 1	30
図 4-7	リファレンスケースの冷却材流路の温度履歴 2	30
図 4-8	リファレンスケースの冷却材流路の液位履歴	31
図 4-9	リファレンスケースのバイパス流路の流量履歴	31
図 4-10	リファレンスケースのボイド化の事象推移	32
図 4-11	リファレンスケースの冷却材流路のボイド率履歴	32
図 4-12	融体温度が低いケースの冷却材流路のボイド率履歴	33
図 4-13	融体温度が高いケースの冷却材流路のボイド率履歴	33
図 4-14	冷却材温度が低いケースの冷却材流路のボイド率履歴	34
図 4-15	冷却材圧力が低いケースの冷却材流路のボイド率履歴	34
図 5-1	冷却材のサブクール度減少によるボイド化の概念	35
図 5-2	リファレンスケースの冷却材ボイド発生時の冷却材温度分布	35
図 5-3	融体温度が低いケースの冷却材ボイド発生時の冷却材温度分布	36

図 5-4	融体温度が高いケースの冷却材ボイド発生時の冷却材温度分布	36
図 5-5	冷却材温度が低いケースの冷却材ボイド発生時の冷却材温度分布	37
図 5-6	冷却材圧力が低いケースの冷却材ボイド発生時の冷却材温度分布	37
図 5-7	冷却材ボイド発生までの融体放出時間 \tilde{t} 、ボイドのし易さに関するパラメータ \tilde{c} 及び混合領域の概略高さ \tilde{h} の関係	38
図 5-8	CAMEL II ループの概略図 ^[2]	39
図 5-9	CAMEL C6,C7 試験のテストセクション (模擬 CRGT) ^[2]	39
図 5-10	CAMEL C6 試験の溶融燃料の放出圧力履歴 ^[2]	40
図 5-11	CAMEL C7 試験の溶融燃料の放出圧力履歴 ^[2]	40
図 5-12	CAMEL C6 試験のテストセクションのナトリウム質量流量履歴 ^[2]	41
図 5-13	CAMEL C7 試験のテストセクションのナトリウム質量流量履歴 ^[2]	41
図 5-14	CAMEL C6,C7 試験のボイド体積履歴 ^[2]	42
図 5-15	CAMEL C6 試験の圧力履歴とナトリウム質量流量履歴 ^[2]	42
図 5-16	CAMEL C6 試験の冷却材ボイド発生までの融体放出時間	43

記号リスト

ΔT_{\min}	蒸気膜が維持されるための融体表面と冷却材バルクとの最小温度差	[°C]
ΔT_{sub}	冷却材のサブクール度	[°C]
T_i	融体と冷却材との瞬時接触境界面温度	[°C]
T_m	融体の初期温度	[°C]
T_c	冷却材の初期温度	[°C]
T_{sat}	冷却材の飽和温度	[°C]
d	冷却材流路の等価直径	[m]
ϕ	融体放出口の等価直径	[m]
\bar{v}	融体の平均放出速度	[m/s]
M	冷却材ボイド発生までの融体放出質量	[kg]
t	冷却材ボイド発生までの融体放出時間	[s]
\tilde{t}	規格化された冷却材ボイド発生までの融体放出時間	[-]
h	「混合領域」の概略高さ	[m]
\tilde{h}	規格化された「混合領域」の概略高さ	[-]
\tilde{C}	ボイド化のし易さに関するパラメータ	[-]
C_{p_m}	融体の定圧比熱	[J/(kg·°C)]
C_{p_c}	冷却材の定圧比熱	[J/(kg·°C)]
ρ_m	融体の液体密度	[kg/m ³]
ρ_c	冷却材の液体密度	[kg/m ³]
k_m	融体の熱伝導率	[W/(m·°C)]
k_c	冷却材の熱伝導率	[W/(m·°C)]

1. 緒言

高速増殖炉（FBR：Fast Breeder Reactor）の炉心損傷事故（CDA：Core Disruptive Accident）においては、溶融した燃料が炉心内で集中することにより炉容器の健全性を脅かすような機械的エネルギーを放出する再臨界が起きる可能性、いわゆる再臨界問題が課題とされてきた。このため、従来のFBRのCDA評価においては、保守的な観点から何らかのエネルギー放出を仮定し、炉容器の健全性を評価する手法が用いられてきた。しかしながら、FBRの実用化段階においては社会受容性の高い安全論理とそれに基づく合理的な設計条件が求められるため、事故の事象推移とその影響を必要な精度で適切に評価できるCDA評価手法を確立するとともに、仮にCDAに至ったとしても有意な再臨界を技術的に回避できること（再臨界問題排除）の見通しを示すことが重要である。本報告書では、CDA評価手法の確立と再臨界問題排除に向けた研究の一環として、核燃料サイクル開発機構（以下、サイクル機構）が実施しているMELT-II試験装置を用いた再臨界排除可視化基礎試験の研究成果について報告する。

CDAの事象推移と再臨界問題排除の概念を図1-1に示す。CDAにおいて溶融した燃料が炉心内で集中し、大規模な溶融燃料プールが生じた場合、有意な機械的エネルギーを放出する厳しい再臨界の発生の可能性を否定できない。一方、溶融燃料が集中する前に核的に不活性な炉心外の広い空間に排出されれば、有意な再臨界を経ずに事故が収束する可能性が高いと考えられる。したがって、仮にCDAに至ったとしても有意な再臨界が回避されることの見通しを得るためには、炉心損傷の早期段階で溶融燃料が炉心領域外へ排出されること（早期燃料排出）を実証することが有効である。

早期燃料排出の概念、及び早期燃料排出を実証するために解明すべき主要現象を、それぞれ図1-2及び図1-3に示す。溶融燃料の排出経路として燃料ピン被覆管構造、燃料ピン束構造及び制御棒案内管を利用できる可能性があるが、大量の溶融燃料を速やかに排出し得る経路としては比較的大きな流路面積と等価直径を有する制御棒案内管（CRGT：Control Rod Guide Tube）が有望と考えられる。また、早期燃料排出を容易にするために、内部ダクトを設置した燃料集合体を採用した炉心設計も検討されている。内部ダクトやCRGTのような比較的大きな等価直径を有する経路を通じての燃料排出に係わる実験的な知見としては、米国アルゴンヌ国立研究所（ANL）で実施されたCAMEL-II C6, C7試験^[1,2]が知られる。CAMEL試験では、少量の溶融燃料がナトリウム冷却材流路に放出されると、燃料の放出位置付近の冷却材が上下方向に押し出されることにより冷却材流路がボイド化しており、そのボイド化領域に大量の溶融燃料が放出され得ることが示唆されている。また、サイクル機構が高速炉の安全評価手法として開発を進めてきたSIMMER-IIIコードによるCAMEL試験解析^[3]では、溶融燃料の放出後に発生する溶融燃料-冷却材熱的相互作用（FCI：Fuel-Coolant Interaction）により冷却材流路がボイド化し、そのボイド化領域に大量の溶融燃料が

放出される挙動が示されている。しかしながら現在までのところ、冷却材で満たされた排出経路を通じて大量の熔融燃料が排出されることを実験的に示した研究例はない。したがって、早期燃料排出による再臨界問題排除が原理的に可能であることの技術的見通しを得るためには、排出経路の壁破損から熔融燃料の排出に至る総合的な実験データベースを取得することが不可欠である。また、実験的研究の成果を実炉条件に適用するためには、個別現象のメカニズムを明らかにするとともに、解析コードを通じて実験データを一般化していくことが併せて必要である。このような課題を解決するため、現在、サイクル機構では日本原子力発電株式会社と協力して EAGLE プロジェクトを実施している。EAGLE プロジェクトでは、カザフスタン共和国・国立原子力センター（NNC/RK）が保有する IGR 試験炉（Impulse Graphite Reactor）を用いた炉内試験及び電気炉を用いて融体を生成する炉外試験（以下、IGR 試験）が実施される。これらの実燃料物質を用いた試験により、早期燃料排出による再臨界問題排除の技術的な見通しとともに、CDA 評価手法の検証と FBR の安全論理の構築に寄与する実験データが得られると期待される。

一方、本報告書に記載する MELT-II 試験装置を用いた再臨界排除可視化基礎試験は模擬物質体系（低融点合金 Wood's Metal / 水）による基礎試験である。再臨界排除可視化基礎試験の位置付けを図 1-4 に示す。再臨界排除可視化基礎試験は、早期燃料排出に係わる基本的現象に着目した基礎データを取得するとともに、IGR 試験を補完するものと位置付けられる。図 1-3 に示したように早期燃料排出を実証するために解明すべき現象は多岐にわたっており、それらを実験的に解明することが必要であることは既に述べた。しかしながら、CAMEL 試験^[1,2]やその試験解析^[3]で示されているように、燃料排出の初期段階で冷却材流路がボイド化することが大量の熔融燃料を速やかに排出する上で重要な要素であるにもかかわらず、これに関する実験的な知見が不足しており、不確定要素となっている。このような背景を踏まえ、再臨界排除可視化基礎試験では冷却材流路のボイド化に係わる基礎データを取得すること、及び様々な境界条件の下でのボイド化挙動を把握することによりボイド化のメカニズムを明らかにすることを第 1 段階の目的として設定した。この目的のため、低融点合金 Wood's Metal（密度 $\sim 8500\text{kg/m}^3$ 、融点 $: 78.8^\circ\text{C}$ ）の融体を模擬熔融燃料、水を模擬冷却材として、融体を水で満たされた冷却材流路（断面 $: 50\text{mm}\times 50\text{mm}$ 、高さ $\sim 1\text{m}$ ）の高さ中心の横方向から放出する試験を実施した。

第 2 章では試験装置及び試験方法の概要を述べる。第 3 章では、模擬物質の選択及び試験条件の選定に係わる検討について述べる。第 4 章では、試験データを分析することによってボイド化の事象推移を明らかにするとともに、各ケースのボイド化挙動を比較検討した。第 5 章では、ボイド化のメカニズムを推定し、試験結果を概略的に評価した。また、試験結果に基づく CAMEL 試験のボイド化挙動の分析、及び今後の課題について述べる。第 6 章では試験のまとめを述べる。

2. 試験装置及び試験方法

2-1 試験装置の概要

再臨界排除可視化基礎試験体は核燃料サイクル開発機構の MELT-II 試験装置に組み込まれており、大きく分けて現象を観察するための試験部と模擬融体を生成するための溶融加熱部で構成され、各部が融体移送配管で結合されている。再臨界排除可視化基礎試験体と計測系配置の概要、及び再臨界排除可視化基礎試験体の全体写真をそれぞれ図 2-1 及び図 2-2 に示す。

(1) 試験部

試験部は、CRGT に相当する排出経路を模擬した冷却材流路、冷却材流路より広い断面を有する上部構造体、融体の固化デブリを回収するための容器を内蔵した下部構造体、及びバイパス流路より構成される。冷却材流路の断面形状は 50 mm×50 mm の正方形、その全長は 1m であり、流路壁面のうち対向面には高速度ビデオカメラによる現象観察のため透明なポリカーボネイト板が取り付けられている。冷却材流路と融体放出ノズルの写真を図 2-3 に示す。溶融加熱部から移送された融体は、冷却材流路の高さ方向の中心に位置する融体放出ノズル（内径 10 mm）を通じて、冷却材流路へジェット状に放出される。なお、冷却材流路の上下方向の圧力損失条件については、流路断面形状の変化による圧力損失のみ注目すれば、融体の放出位置より下側方向の圧力損失が全てを占めている。また、試験において観察するボイド化の挙動は冷却材流路の形状による拘束効果にも影響されると考えられるため、上記の流路断面形状と高さの決定においては実機体系との相似性に留意している。その検討内容については、付録 1 に記した。

上部構造体は 150 mm×150 mm の正方断面を有しており、その内部には冷却材流路と同じ断面形状の延長流路が冷却材流路の延長上に取り付けられている。また、冷却材のカバーガスの圧力を任意に設定するための真空排気ライン、及び冷却材のオーバーフローラインを設けてある。下部構造体も上部構造体と同じ断面形状を有し、その内部に融体の固化デブリを収集するための容器が取り付けられている。バイパス流路は内径 23 mm の円筒管であり、上部構造体と下部構造体を結合している。

(2) 溶融加熱部

溶融加熱部は、融体を生成するためのヒーター容器、及びその融体を保持するとともに任意のタイミングで移送するためのプラグより構成される。ヒーター容器は内径 200 mm、高さ 400 mm のステンレス製の円筒容器であり、その外壁面にはマイクロヒーターが巻き付けられている。ヒーター容器はさらに容積の大きいステンレス容器内に設置されており、試験中は融体の保温と酸化防止のため加熱アルゴンガスの雰囲気としている。この加熱アルゴンガスの供給圧力を変えることにより、融体の駆動圧力を任意に設定できる。融体の放出は、融体移送配管に設置した 2 台のボールバルブを同

時に開くことで開始される。

2-2 計測系

冷却材流路のボイド化を目視観察するためには、まず高速度ビデオカメラ等による撮影が有効であるが、融体、冷却材及び蒸気が混在する多相多成分の現象を通常のカメラ撮影のみで把握することは難しい。本試験では、カメラ撮影による直接目視に加えて、融体の放出速度履歴、冷却材流路の温度変化ならびに圧力変化、及び液位の変化を測定し、これらの試験データを総合することでボイド化の挙動を把握した。

(1) 試験映像の収録

現象の目視観察には、高速度ビデオカメラ（コダック社製、撮影速度 1000frames/sec、画素数 192×240pixel）2 台、及び高解像度カメラ（コダック社製、撮影速度 30frames/sec、画素数 1000×1000pixel）1 台を使用した。これらのカメラを用いて融体の放出位置付近を撮影し、ボイド化の様子を観察した。撮影ではカメラレンズと照明が被写体を挟むように設置されるバックライト法を用いた。また、冷却材流路の液位の変化を観察するため、ハンディー型ビデオカメラ（ナショナル社製、30frames/sec）を使用した。

(2) 融体放出速度の測定

冷却材流路における FCI 挙動とボイド化の挙動が融体の放出挙動に及ぼす影響を調べるため、液体金属用の電磁流量計を融体移送配管に設置し、融体の放出速度を測定した。速度の記録周波数は 10kHz である。

(3) 温度測定

冷却材流路の温度変化を測定するため、熱電対（ $\phi 1.0$ mm 接地型 K 熱電対）を融体放出ノズルの対向壁面に計 7 点設置した。これらの設置位置は、融体放出位置を高さ中心として +594 mm、+435 mm、+261 mm、+87 mm、-87 mm、-261 mm、-435 mm、及び下部構造体内である。熱電対の挿入深さは壁面から 20 mm である。また、融体の初期温度を測定するための熱電対もヒーター容器及び融体移送配管の随所に設置した。温度の記録周波数は 1kHz である。

(4) 圧力測定

FCI 挙動を推定する上で重要な圧力データを得るため、圧力計（ピエゾ圧電型圧力センサー）を冷却材流路の熱電対の反対壁面に設置した。設置高さは熱電対と同様である。上部構造体の冷却材及びカバーガス中にも圧力計を設置した。圧力の記録周波数は 10kHz である。

(5) 液位測定

冷却材流路のボイド率を間接的に得るため、超音波式レベル計を冷却材流路の延長上に設置し、液位の変化を測定した。ただし、超音波式レベル計は液面との間に水蒸気や水滴が存在すると測定不能になる場合がある。これを補償するバックアップとして、ハンディーカメラによる液位の変化の撮影を同時に行った。

(6) バイパス流路の流量測定

ボイド化が下方へ拡大した場合、下部構造体から上部構造体へ向かう冷却材の流れがバイパス流路中に生じる。この流量を測定するため、バイパス流路に水用の電磁流量計を設置した。

2-3 試験方法

(1) 模擬融体の生成及び移送

模擬物質 (Wood's Metal) をヒーター容器内 (アルゴンガス雰囲気) で加熱し、融体を生成する。ヒーター容器に充填する模擬物質の充填量は 13.5kg ($\sim 1.6 \times 10^{-3} \text{m}^3$) である。この量は融体を約 3 秒間放出させるのに十分である。融体の温度が所定の温度に達したらプラグを引き抜き、融体移送配管のヒーター容器に近い側のバルブの手前まで移送する。

(2) 融体放出

融体の放出に先立って、試験部に所定の温度の冷却材を供給する。冷却材流路中の冷却材の温度が安定したら、2 台のバルブを同時に開くことにより融体の放出を開始する。融体の放出開始から約 3 秒間が経過したら、冷却材流路に近い側のバルブを閉じ、融体の放出を終了させる。なお、試験装置の構造上、融体が冷却材流路に流出する前に細径の移送配管内で冷却材と接触し、FCI が発生する可能性がある。これを防ぐため、2 台のバルブ間に予めアルゴンガスを封入している。融体はこのアルゴンガスを押し出すようにして冷却材流路へ放出される。この際、アルゴンガスの存在がボイド化の挙動に何らかの影響を及ぼす可能性を否定できないが、その体積 ($\sim 0.13 \times 10^{-3} \text{m}^3$) は冷却材の体積 ($\sim 2.5 \times 10^{-3} \text{m}^3$) に比べれば少ないためボイド化の全体挙動に対して有意な影響はないと判断した。

3. 試験条件

3-1 模擬物質の選択

冷却材流路のボイド化に対しては FCI が深く関連することが示されていることから^[1,2,3]、模擬試験においては FCI 挙動の基本特性を把握している物質体系を用いることが有効と考えられる。このため、再臨界排除可視化基礎試験では模擬融体として低融点合金 Wood's Metal、冷却材として水を用いることにした。MELT-II 試験施設においては、これらの模擬物質を用いた FCI 基礎試験^[4]の実績があり、これによる実験的知見を試験データの分析に活用できる。

模擬物質と実機物質の主な物性値の比較を表 3-1 に示す。両物質の融体/冷却材の液体密度比はそれぞれ 9 及び 12 と同程度のため、慣性力に基づく融体と冷却材の流力的な挙動、例えば冷却材中での重力と浮力とのバランス、あるいは流路の圧力差に依存する融体落下挙動に大きな違いは生じないと考えられる。しかしながら、水の蒸気密度はナトリウム冷却材の蒸気密度と比べて 2 倍以上大きいため、ナトリウム冷却材の場合と同体積のボイドが形成されるためには 2 倍以上の質量の水が蒸発する必要があり、模擬物質体系はボイド化が起こりにくい体系と言える。また、模擬物質体系では融体が有する熱エネルギー（顕熱及び潜熱）が実機物質に比べてかなり小さく、かつ水の熱伝導率も小さいため、ボイド化が起きるために必要と考えられる融体から冷却材への効率的な熱移行が難しいと考えられる。以上の推定に基づけば、ボイド化のし易さの観点では不利と考えられる水条件であってもボイド化が実現可能であることを示すことで、ナトリウム条件におけるボイド化の実現性を見通しを得ることができると考えられる。

3-2 試験パラメータ

ボイド化の挙動は、融体と冷却材の熱的な条件、及び冷却材流路の形状や圧力損失条件などのジオメトリーに係わる条件に依存すると考えられる。冷却材流路のジオメトリーは試験装置の設計に依存するパラメータであること、及びボイド化の基本的な特性を把握しメカニズムを解明するという試験目的を考慮し、再臨界排除可視化基礎試験ではジオメトリーに依存しない試験温度条件を主なパラメータとした。

再臨界排除可視化基礎試験の試験条件及び試験温度条件の分布をそれぞれ表 3-2 及び図 3-1 に示す。ボイド化が実現するためには融体から冷却材への効率的な熱移行が不可欠であり、その過程においては FCI が重要な役割をもつと考えられる。高速炉の CDA 条件において予想される FCI 挙動を図 3-2 に示す。模擬物質を用いた FCI 基礎試験^[5]によれば、高速炉の CDA 条件（熔融酸化燃料/ナトリウム冷却材）においてはナトリウム冷却材の冷却性が非常に高いため、熔融燃料が効率的にクエンチされる FCI のモードが発生する可能性が高い。この FCI のモードでは冷却材のバルク温度が

上昇しない限り膜沸騰は起こり得ないため、熔融燃料と冷却材との直接接触による最も効率的な熱移行が可能である。したがって、融体が効率的にクエンチされる FCI のモードを模擬できる温度条件、すなわち次式に示す水の最小膜沸騰温度条件¹⁴⁾を下回るような温度条件を設定した。

$$\Delta T_{\min} = 101 + 4.1 \Delta T_{\text{sub}}^{5/4} \quad (1)$$

ΔT_{\min} [°C] は蒸気膜が維持されるための融体表面と冷却材バルクとの最小温度差を表し、融体表面温度は融体の初期温度と関連付けられる。

また、ボイド化の挙動に対しては、次式で決まる融体と冷却材との瞬時接触境界面温度 T_i が係わると考えられる。

$$T_i = \frac{T_c \sqrt{k_c \rho_c c_{p_c}} + T_m \sqrt{k_m \rho_m c_{p_m}}}{\sqrt{k_c \rho_c c_{p_c}} + \sqrt{k_m \rho_m c_{p_m}}} \quad (2)$$

接触境界面温度が自発核生成温度（水では約 300°C）以下の場合、通常の沸騰現象と同様、冷却材の蒸発は接触境界面上においてのみ生じるため、蒸発そのものはマイルドな挙動となる。一方、接触境界面温度が自発核生成温度を超える場合、冷却材側の温度境界層の発達に従って冷却材のバルク中でも蒸発が生じるため、蒸発量が急激に増加する。すなわち、自発核生成温度条件を境界としてボイド化の挙動が変化する可能性がある。そこで、再臨界排除可視化基礎試験においては自発核生成温度条件付近をリファレンス（基準条件）として計 6 点の温度条件（そのうち 1 点は試験装置の動作確認のための予備試験）で試験を行い、ボイド化の基本特性を把握することにした。

融体を排出させるための駆動力となる融体と冷却材との差圧については、リファレンスとなるべき実機の燃料プール側の背圧条件に大きな不確実性がある。このため、本模擬試験では保守性の観点から大きな背圧に期待しないことを前提として、当面は融体の高さヘッド（～1m）だけで得られる最小の差圧を設定した。冷却材側の圧力は基本的に大気圧に設定した。ただし、ナトリウムの蒸気密度を模擬するため、冷却材のカバーガスの圧力を約 0.05MPa まで減圧した条件での試験も行っている。

4. 試験結果

4-1 リファレンスケースのボイド化挙動

4-1-1 試験データの分析

(1) 高速度ビデオカメラによるボイド化挙動の観察

高速度ビデオカメラにより撮影されたリファレンスケースのボイド化挙動を図 4-1 に示す。画像中の黒い影の部分は融体自身あるいは冷却材との混合後に固化した融体を含む冷却材領域を表している。融体放出バルブを開放し始めたのは $t=0.000\text{sec}$ の時点であるが、バルブ（ボール式バルブ）が完全に開ききるまでの時間、及びバルブから冷却材流路までの助走区間（600 mm）があるため、実際に融体が冷却材流路に放出され始めたのは $t=0.748\text{sec}$ の時点である。ただし、 $t=0.668\text{sec}$ の時点で融体放出口の上方に見られる影は、バルブ間に予め封入されていた不活性ガスが融体より先に放出されたことによって現れている。冷却材流路に放出されたジェット状の融体（ $t=0.748\text{sec}$ ）は融体放出口の対向壁と衝突（ $t=0.753\text{sec}$ ）後に上下方向へ分散している（ $t=0.765\text{sec}\sim 0.795\text{sec}$ ）。冷却材ボイドが発生していない時点では、融体を含んだ冷却材のため画像上は影の部分しか確認できない（ $t=3.494\text{sec}$ ）。冷却材ボイドが発生し、拡大すると融体がボイド化領域へ継続的に放出される様子を明瞭に確認できる（ $t=3.624\text{sec}\sim 3.864\text{sec}$ ）。画像上では下方向に拡がったボイド化領域しか確認できないが、後述する冷却材流路の液位履歴（図 4-8 参照）から分かるように、冷却材ボイドの上方への拡大は約 2.2sec の時点で始まっている。バルブの閉止によって融体の放出量が減少すると（ $t=4.234\text{sec}$ ）、上下方向に押し出されていた冷却材スラグがボイド化領域に流入し（ $t=4.294\text{sec}\sim 4.314\text{sec}$ ）、冷却材ボイドが消滅する（ $t=4.409\text{sec}$ ）。なお、本試験では融体放出バルブを閉じて融体の放出を強制的に終了させている。

(2) 融体放出速度履歴

リファレンスケースの融体放出速度の履歴を図 4-2 に示す。融体が冷却材流路に流出できるまでの時間が生じる理由は(1)で述べたとおりである。融体が約 3.3m/s の速度で放出されると（ $t=0.748\text{sec}$ ）、その直後の FCI に伴う圧力上昇のため（図 4-3 参照）、融体の放出が一時的に停止する。このとき放出速度が -2.0m/s 近くまで減少していることから、融体の逆流が生じたことが分かる。融体の放出速度が回復すると、融体が再度放出される（ $t\sim 1.5\text{sec}$ ）。再放出の際にも FCI のため融体の放出速度が一時的に減少するが、これ以降から融体の放出を強制終了させるまで融体は継続的に放出されている。とくにボイド化領域が拡大した後（ $t\sim 2.2\text{sec}$ 以降）では、融体の放出が安定していることが分かる。この結果から、冷却材流路のボイド化が生じれば融体は抵抗なく放出されることが認識される。

(3) 冷却材流路の圧力履歴

リファレンスケースの冷却材流路の圧力履歴を図 4-3、図 4-4 及び図 4-5 に示す。圧力データを分析する際には次のような点に注意した。本模擬試験で使用したピエゾ圧電型圧力計の受圧面（受圧ダイヤフラム）に瞬間的な温度変化があると熱応力が生じ、見掛け上の圧力が変化したような信号が得られる場合がある。これは一般に温度ドリフト現象と呼ばれる。融体と冷却材との混合が著しい融体放出口付近では温度変化が激しくなるため、真の圧力変化に対する温度ドリフト現象の影響を無視できない。ここでは、温度ドリフト現象の影響が少ないと考えられる位置における圧力信号、すなわち融体放出口より 435 mm 上方に設置された圧力センサーによる圧力信号（図 4-3）を基に分析を行う。

融体が冷却材流路に放出されると ($t=0.748\text{sec}$)、FCI によって冷却材流路の圧力が上昇する。(2)で述べたように FCI 圧力のため融体の放出が一時的に停止するが、圧力が緩和され融体が再放出されると ($t\sim 1.5\text{sec}$ 以降)、圧力変動が生じる。この圧力変動は小規模の FCI が連続的に発生したことによるものと考えられる。ボイド化領域が拡大すると圧力変動が比較的穏やかになる ($t\sim 2.2\text{sec}$ 以降)。この変化は融体と冷却材とが混合できる領域が主にボイド化領域と冷却材スラグとの上下境界付近に限られることが原因となって起きた推定される。ボイド化領域が消滅する際には圧力パルスが発生する ($t\sim 4.4\text{sec}$)。

(4) 冷却材流路の温度履歴

リファレンスケースの冷却材流路の温度履歴を図 4-6 及び図 4-7 に示す。後述する冷却材流路の液位履歴（図 4-8 参照）から把握されるボイド化挙動と冷却材流路の温度履歴とを対比させると、温度が水の飽和温度に達した領域はボイド化していると見なせる。図 4-6 及び図 4-7 より、冷却材ボイドは流動抵抗の少ない上方向に対して顕著に拡大していることが把握される。また、融体放出口より 435 mm 上方では冷却材ボイドが拡大した後に温度下降と上昇を繰り返していることから、この高さ付近にボイド化領域の上側境界があることがわかる。

(5) 冷却材流路の液位履歴及びバイパス流路の流量履歴

リファレンスケースの冷却材流路の液位履歴及びバイパス流路の流量履歴をそれぞれ図 4-8 及び図 4-9 に示す。冷却材流路の内側の液位は、冷却材ボイドが上方向へ拡大し、冷却材スラグが押し出されることによって変化する。一方、冷却材流路の外側の液位（上部構造体内の液位）は、ボイド化領域が下方向に拡大することによって変化する。また、ボイド化領域が下方向に拡大することによってバイパス流路における冷却材の流量が増加する。既に述べたように、融体の再放出後にボイド化領域が上方向に対して顕著に拡大していることがわかる。リファレンスケースでは最大で上方向に約 500 mm まで、下方向には約 80 mm までのボイド化領域が生じたことが把握される。

4-1-2 冷却材流路のボイド化の事象推移

この項では、試験データの分析結果から推定されるボイド化の事象推移について述べる。リファレンスケースのボイド化の事象推移を図 4-10 に示す。リファレンスケースのボイド化の事象推移は融体の初期放出過程（図中 1～4）、及び融体の再放出によるボイド化過程（図中 5～8）の 2 つに分けられる。融体の初期放出過程では、バルブ間に予め封入されていた不活性ガスの放出（図中 2）に続いて融体が放出される（図中 3）。融体の放出に伴い FCI が発生するが、この FCI による圧力上昇のため融体が逆流し、融体の放出が停止する（図中 4）。融体の初期放出時に発生した圧力が緩和されると融体が再び放出される（図中 5）。融体の再放出される段階においては既に冷却材スラグ中に FCI による加速度が生じているため、融体は比較的スムーズに放出される。この融体放出によってローカルに冷却材ボイドが発生する（図中 6）。この冷却材ボイド中へ融体が継続的に放出されると、冷却材ボイドが流動抵抗の少ない上方向に拡大する（図中 7）。ボイド化領域の拡大後は、融体と冷却材との混合は主にボイド化領域と冷却材スラグとの上下境界付近に限られる。バルブの閉止に伴って融体の放出量が減少すると、冷却材ボイドが消滅する（図中 8）。融体の放出開始から冷却材ボイドの拡大に至るまでの時間スケールは試験条件によって異なる。

4-2 各ケースのボイド化挙動の比較

4-2-1 融体温度が低いケースのボイド化挙動

試験結果の一覧を表 4-1 に示す。また、リファレンスケース及び融体温度が低いケースの冷却材流路のボイド率履歴をそれぞれ図 4-11 及び図 4-12 に示す。なお、試験結果の分析においては冷却材流路の等価直径（50 mm）程度の高さをもつ冷却材ボイドが発生した時点を「冷却材ボイドの発生」と定義している。この定義の根拠は次のように説明される。すなわち、等価直径 d の冷却材流路において冷却材ボイドが球形状に成長する過程を考えた場合、冷却材ボイドが直径 d まで成長すると冷却材流路の壁による拘束効果が表れ、冷却材ボイドと冷却材との接触面積が制限される。これにより、冷却材ボイドは安定化し、冷却材ボイドが拡大し易い条件になると考えられる。

リファレンスケースと比較すると、融体温度が低いケースでは融体の放出開始（ $t=0.779\text{sec}$ ）から冷却材ボイドが発生（ $t\sim 2.8\text{sec}$ ）するまでの時間が長く（ $\sim 2.04\text{sec}$ ）、冷却材ボイドの拡大も狭い範囲（ $\sim 100\text{mm}$ ）に限られた。このようなボイド化挙動は融体をもつ熱量が小さいことに起因して現れたと考えられる。ただし、FCI 挙動がマイルドであったため融体の放出は比較的スムーズであり、平均放出質量流量は大きな結果となった。

4-2-2 融体温度が高いケースのボイド化挙動

融体温度が高いケースの冷却材流路のボイド率履歴を図 4-13 に示す。融体温度が高いケースでは、融体の放出開始 ($t=0.872\text{sec}$) とともに 0.2MPa 以上の圧力パルスを伴う FCI が発生し (付録の図 C-1 参照)、高さ 50mm 程度の冷却材ボイドが発生した ($t\sim 1.15\text{sec}$)。しかしながら、この冷却材ボイドは拡大できずに消滅していることから、FCI による圧力上昇のため融体が逆流したと推定される。これ以降から融体の放出が終了 ($t\sim 3.9\text{sec}$) するまでに、同様の冷却材ボイドの発生と消滅が 2 度起きている。このケースでは早期に冷却材ボイドが発生するものの、融体の逆流が顕著になり、結果的に冷却材ボイドは維持されず、融体の平均放出質量流量も小さかった。

4-2-3 冷却材温度が低いケースのボイド化挙動

冷却材温度が低いケースの冷却材流路のボイド率履歴を図 4-14 に示す。冷却材温度が低いケースでは、冷却材ボイドが発生するまでに最も長い時間 ($\sim 2.55\text{sec}$) を要した。ただし、冷却材ボイドの拡大範囲はリファレンスケースとほぼ同様であった。また、融体が冷却材流路の壁面にクラスト状に固化する挙動が顕著になった。このケースのボイド化挙動の特徴は、融体の放出とともに融体放出口付近の冷却材の温度が徐々に上昇し (付録の図 D-5 及び図 D-6 参照)、冷却材の温度が 80°C 程度に達した時点で冷却材ボイドが発生することである。このようなボイド化挙動は、安定な冷却材ボイドが発生するためには冷却材のローカルな領域がある温度まで加熱されることが必要であることを示唆している。

4-2-4 冷却材圧力が低いケースのボイド化挙動

冷却材圧力が低いケースの冷却材流路のボイド率履歴を図 4-15 に示す。冷却材圧力が低いケースでは、比較的早期に冷却材ボイドが発生した。また、冷却材ボイドが拡大した後、融体デブリが冷却材流路の上方に噴き上げられる様子が明瞭に観察された ($t\sim 2.8\text{sec}$)。デブリの噴き上がりは、冷却材ボイドと冷却材スラグとの境界付近での FCI に起因して引き起こされたと推定される。

5. 考察

5-1 ボイド化のメカニズムの推定

水流路（断面：50 mm×50 mm）において高さ 50 mm の冷却材ボイドが生じるためには 75mg の水蒸気（密度：0.60kg/m³）が発生すればよい。この蒸発量を得るために必要な熱量は 170J～200J であり、たかだか 4g の Wood's Metal（初期温度：400℃）がもつ熱量に相当する。しかしながら、冷却材ボイドの周囲にサブクール状態の冷却材や流路壁など熱容量をもつ構造材が存在すれば、それらが凝縮場として作用するため冷却材ボイドは不安定である。したがって、冷却材ボイドが拡大するためには、冷却材のサブクール度が消失することにより凝縮場が排除されることが必要と推定される。事実、本試験の多くにおいては大量の融体が冷却材と混合して初めて冷却材ボイドが拡大する結果となっており、この挙動は冷却材が加熱されて最終的にサブクール度が消失するまでの「サブクール度減少過程」の存在を示している。

冷却材のサブクール度減少によるボイド化の概念を図 5-1 に示す。ここで、「混合領域」は融体と冷却材との混合によって冷却材の加熱される（サブクール度が減少する）領域を意味する。融体が冷却材流路へ放出されると、融体の微粒子化を伴う FCI 及びジェット状に放出された融体と流路壁との衝突を経て融体と冷却材が混合され、融体近傍のローカルな領域において冷却材のサブクール度が減少する（図 5-1 中の 1～2 の過程）。この過程では、蒸気泡の発生によりローカルな冷却材ボイドが生じる可能性があるが、混合領域のサブクール度が依然高いため冷却材ボイドは不安定である。融体と冷却材との混合がさらに進行すると、最終的には混合領域においてサブクール度が消失し、冷却材ボイドが安定に存在できる（3 の過程）。安定化した冷却材ボイド中に融体が放出されると冷却材ボイドが拡大する（4 の過程）。ただし、ボイド化領域と冷却材バルクとの境界においてサブクール度を有する冷却材が取り込まれること及び流路壁での熱損失のため、冷却材ボイドの拡大高さには限界があると考えられる。

5-2 冷却材ボイド発生時における「混合領域」の高さの概略的評価

冷却材のサブクール度減少によるボイド化の概念と試験結果との整合性を確認するため、「混合」/「非混合」の 2 領域近似によって冷却材ボイド発生時における冷却材の温度分布を求め、実測の温度分布と比較する。この 2 領域近似においては、「混合領域」の冷却材は全てサブクール度を消失し、「非混合領域」の冷却材は初期温度を維持していると仮定する。すなわち、2 領域近似による冷却材の温度分布は融体と冷却材が混ざり合う「混合領域」の概略的な高さを表す。

冷却材流路中に放出された融体の熱エネルギーと「混合領域」の冷却材がサブクール度を消失するための熱エネルギーとのバランスを用いて冷却材ボイド発生時における「混合領域」の概略高さを次式のように表せる。

$$h = \frac{4C_{p_m}(T_m - T_{sat})M}{\pi\rho_c C_{p_c} \Delta T_{sub} d^2} \quad (3)$$

冷却材流路の断面が正方形の場合、(3)式は次式のように修正される。

$$h = \frac{C_{p_m}(T_m - T_{sat})M}{\rho_c C_{p_c} \Delta T_{sub} d^2} \quad (4)$$

(4)式を用いて計算した試験ケース毎の冷却材ボイド発生時における「混合領域」の概略高さを表5-1に示す。また、冷却材ボイド発生時における冷却材の温度分布を試験ケース毎にそれぞれ図5-2、図5-3、図5-4、図5-5及び図5-6に示す。実測の温度分布は2領域近似の場合よりも軸方向の広い領域にわたって混合が行われ、この混合領域の中でサブクール度が減少することを示している。しかしながら、全ての試験ケースにおいて2領域近似の温度分布は実際の温度分布を十分近似的に代表していると考えられるため、冷却材ボイド発生時における融体と冷却材との混合状態を概略的に把握するための代表値として「混合領域」の概略高さをを用いることができる。

冷却材ボイド発生時における「混合領域」の概略高さをを用いると、試験結果を次のように解釈できる。すなわち、融体温度が低いケースでは、広い領域で混合が行われ、かつその混合領域のサブクール度が十分に減少して初めて冷却材ボイドが発生する。一方、融体温度が高いケースでは狭い領域で混合が行われるだけで早期に冷却材ボイドが発生していることがわかる。また、冷却材温度が低いケースではリファレンスケースよりも広い領域で混合が行われているが、その領域は融体温度が低いケースほど広くはない。しかしながら、冷却材の初期サブクール度が高いため、混合領域のサブクール度を減少させるための時間は長くなる。冷却材の圧力が低いケースでは混合領域の高さはリファレンスケースと同様であるが、冷却材の初期サブクール度が低いため混合領域のサブクール度の減少時間は短くなる。このように、冷却材のサブクール度減少によるボイド化の概念によって試験結果を一貫して解釈でき、この概念は試験結果と整合する。

5-3 溶融燃料/ナトリウム条件における冷却材ボイド化の可能性の検討

冷却材のサブクール度減少によるボイド化の概念に基づき試験結果を整理し、溶融燃料/ナトリウム条件での冷却材ボイド化の可能性について検討する。

冷却材ボイドの発生までの融体放出時間を融体の平均放出速度と冷却材流路の等価直径を用いて次式のように規格化する。

$$\tilde{t} = \frac{\bar{v}t}{d} \quad (5)$$

ここで、 $\tilde{t}=1$ の条件は融体放出口から放出された融体が融体放出口の対向壁と衝突す

るまでの時間に相当する。次に、(3)式で表される混合領域の概略高さを冷却材流路の等価直径を用いて次式のように規格化する。

$$\tilde{h} = \frac{h}{d} = \frac{4C_{p_m}(T_m - T_{sat})M}{\pi \rho_c C_{p_c} \Delta T_{sub} d^2} \quad (6)$$

$$M = \rho_m \pi \left(\frac{\phi}{2}\right)^2 \bar{v} t \quad (7)$$

ここで、 $\tilde{h}=1$ の条件は直径 d の冷却材流路中の冷却材が高さ d まで加熱され、サブクール度を消失する混合の状態を表している。

(5)式、(6)式及び(7)式より、冷却材ボイド発生までの融体放出時間と混合領域の概略高さは次式のように関連付けられる。

$$\tilde{h} = \tilde{C} \times \tilde{t} \quad (8)$$

$$\tilde{C} = \frac{\rho_m C_{p_m} (T_m - T_{sat}) \phi^2}{\rho_c C_{p_c} \Delta T_{sub} d^2} \quad (9)$$

ここで、 \tilde{C} は単位体積の溶融物質がもつ熱量と単位体積の冷却材がサブクール度を消失するまでに必要な熱量との比を溶融燃料の放出口と冷却材流路の幾何形状に係わる無次元数 $(\phi/d)^2$ で重み付けした無次元数であり、多様な試験条件における冷却材ボイド化のし易さを表すためのものである。

冷却材ボイド発生までの融体放出時間 \tilde{t} 、ボイド化のし易さに関するパラメータ \tilde{C} 及び混合領域の概略高さ \tilde{h} の関係を図5-7に示す。図中には本報告の試験結果を併せてプロットしてある。試験結果より評価される冷却材ボイド発生時の混合領域の概略高さ \tilde{h} は1から10程度の範囲内にあり、かつ \tilde{C} 値の増加とともに \tilde{h} が減少する傾向にあることがわかる。すなわち、ボイド化が起こりやすいと考えられる条件ほど、狭い領域での混合により冷却材が加熱され、短時間に冷却材ボイドが発生することがわかる。この傾向に従えば、 \tilde{C} 値が1程度と想定される溶融燃料/ナトリウム条件（内径100 mmから150 mmのCRGT構造を想定）では試験結果より評価された \tilde{h} 値より小さい範囲において冷却材ボイドが発生すること、すなわち少量の冷却材が効率的に加熱されることにより短時間で冷却材ボイドが発生すると推定される。

5-4 CAMEL C6,C7 試験の冷却材ボイド化挙動の分析

ANL で実施された CAMEL C6,C7 試験は、未沸騰のナトリウム冷却材が充填する CRGT を通じての燃料排出を模擬した炉外試験である。CAMEL II ナトリウムループの概略図及び CAMEL C6,C7 試験のテストセクション（模擬 CRGT）をそれぞれ図5-8及び図5-9に示す。下部プレナムの上部の入り口バルブは、実機 CRGT 入り口のオリフィス構造による圧力損失を模擬するために設置されている。入り口バルブによる圧

力損失はテストセクションの全圧力損失のうち約 90%を占めている。テストセクションは制御棒集合体が完全に引き抜かれた状態の CRGT をほぼフルスケールで模擬している。テストセクションの内径は 10.23 cm であり、制御棒集合体による圧力損失を模擬するため熔融燃料の放出位置より上部はレデューサを介して内径 4.089 cm まで狭くなっている。試験では、テルミット反応により生成した熔融燃料（初期温度～3200℃）をナトリウム（初期温度～500℃）で満たされたテストセクションへ横方向から放出させている。熔融燃料の放出口の内径は 2.54 cm である。C6 試験と C7 試験の試験条件の主な違いは熔融燃料の放出圧力（燃料タンクのカバーガス圧力とテストセクションの燃料放出位置における冷却材圧力 0.16MPa との差圧）にあり、それぞれ 0.59MPa 及び 0.31MPa である。CAMEL C6, C7 試験それぞれの熔融燃料の放出圧力履歴を図 5-10 及び図 5-11、テストセクションのナトリウム質量流量履歴を図 5-12 及び図 5-13、ボイド体積履歴を図 5-14、CAMEL C6 試験の圧力履歴とナトリウム質量流量履歴を図 5-15 に示す。図中の時間 0.0sec は熔融燃料がテストセクションへ放出され始めた時刻を表している。

始めに、CAMEL C6 試験の結果から冷却材ボイドが発生するまでの過程を分析する。図 5-12 に示した C6 試験のナトリウム質量流量履歴及び図 5-14 に示したボイド体積履歴から、燃料の放出開始から約 0.05sec の時点で冷却材ボイドが急速に拡大し始めたことを読み取れる。燃料タンク内の充填量である約 4.2 kg の熔融燃料が放出圧力 0.63MPa で駆動される場合について運動方程式（燃料質量×加速度＝放出圧力×放出口面積）を適用すると、冷却材ボイドの拡大が始まる約 0.05sec までの燃料平均放出速度は 1.9m/s、熔融燃料の放出量は約 0.42 kg（～48cc）と見積もれる。ただし、熔融燃料は放出口の隔壁を徐々に溶かしながら放出されるため、実際の放出時間と放出量はさらに少ないと推定される。Wood's Metal/水系の試験結果と同様に評価した CAMEL C6 試験の冷却材ボイド発生までの融体放出時間を図 5-16 に示す。この図より、CAMEL C6 試験の結果は Wood's Metal/水系の試験結果に表れた傾向の延長上にあると言える。また、熔融燃料がテストセクションの対向壁と衝突するタイミング付近に冷却材ボイドが拡大し始めたことと推定できる。図 5-15 に示される約 0.08sec の時点で発生した約 4MPa の圧力パルスは、ボイド化した空間（冷却材の質量流量履歴より上方向に約 4 cm、下方向に約 2 cm までのボイド化したと推定可）に放出された比較的多量の熔融燃料が冷却材ボイドの境界において冷却材と接触したことによるものと考えられる。なお、CAMEL C6 試験では最終的に放出口の位置を高さ中心として冷却材ボイドが上方向に対してはテストセクションのダクト（図 5-8 中の Exit Pipe）の出口まで、下方向に対しては約 30 cm まで拡大したと推定されている。

次に、冷却材ボイド化の全体挙動について分析する。CAMEL C6, C7 試験それぞれのナトリウム質量流量履歴及びボイド体積履歴を比較すると、C6 試験では冷却材ボイドがほぼ一定速度で拡大しているのに対して、C7 試験では冷却材ボイドの拡大が

0.2sec 付近で大きく減速され始め（図 5-13 中の矢印①）、0.5sec 付近で拡大速度が回復し始めていることがわかる（図 5-13 中の矢印②）。熔融燃料の放出圧力履歴を考慮すれば、C6 と C7 試験でポイド化の挙動に違いが生じた原因を次のように推定できる。すなわち、C6 試験では放出圧力がほぼ一様に低下しており、約 1.0sec の時間スケールでは燃料が継続的に放出されていたと推定される。一方、C7 試験では融体の放出とともに低下した融体放出圧力が 0.2sec 付近で上昇し（図 5-11 中の矢印①）、0.5sec の時点で再び低下し始めている（図 5-11 中の矢印②）ことから、熔融燃料が燃料プール側へ逆流したと推定される。Wood's Metal/水系の試験結果を参考にすれば、C7 試験では熔融燃料の逆流が生じたため冷却材ポイドの拡大が制限されたものと考えられる。CAMEL C6,C7 試験から把握されるポイド化の挙動は、ポイド化挙動が熔融燃料の放出圧力あるいは放出速度に強く影響されることを示すとともに、熔融燃料プールと冷却材流路とが薄い壁を隔てて隣接する実機条件において熔融燃料プール側に大きな背圧が存在しない場合には、冷却材流路中での FCI 圧力により冷却材が熔融燃料プール側へ逆流し、熔融燃料プール中に取り込まれる可能性があることを示唆する。

5-5 今後の課題

熔融燃料の早期排出を図る観点では、CRGT 等の排出経路の上部に大きな圧力損失を設けて、冷却材ポイドの拡大を下方へ導くことが前提となる。この前提のため、冷却材流路の上部に圧力損失が生じる境界条件の下で冷却材ポイドが下方へ拡大することを実験的に確認することが必要である。また、実機条件のように熔融燃料プールと冷却材流路とが薄い壁を隔てて隣接するような境界条件では、冷却材流路中での FCI 圧力により冷却材が熔融燃料プール側へ逆流し、熔融燃料プール中に取り込まれる可能性が考えられる。このような境界条件の下では、冷却材が熔融燃料プール中に取り込まれることに起因する FCI 挙動（冷却材逆流型 FCI あるいは冷却材エンタラップ型 FCI）が熔融燃料を冷却材流路へ放出させるための駆動力を与えるメカニズムとして作用すると考えられる。このメカニズムは熔融燃料プール側に大きな背圧が存在しない場合の燃料排出挙動にとって重要である。すなわち、熔融燃料プール側に大きな背圧が存在しない場合であっても、基本的には燃料プールの自重による燃料放出が期待されるが、冷却材が燃料プール中へ取り込まれることに起因する燃料プール圧力の形成は燃料放出を大幅に加速する可能性をもつ。したがって、燃料プールの自重による燃料放出挙動と併せて、冷却材が燃料プール中に取り込まれる場合の燃料プール圧力の形成とそれによる熔融燃料の排出挙動を実験的に把握することも重要である。

6. まとめ

模擬融体（低融点合金 Wood's Metal）を冷却材流路（水流路）に横方向から放出させる試験を実施し、冷却材流路のボイド化挙動を様々な境界条件の下で観察した。本試験により、融体と冷却材が混合されると冷却材ボイドが発生し、流動抵抗の小さい上方向に対して顕著に拡大する挙動、及びボイド化した領域に融体が継続的に放出される挙動を確認できた。また、融体と冷却材との混合領域において冷却材のサブクール度が十分に減少して初めて冷却材ボイドが安定化し、冷却材ボイドの拡大に至ることが把握された。さらに、冷却材のサブクール度減少によるボイド化の概念に基づいて試験結果を評価した結果、冷却材と混合される融体の熱エネルギーが相対的に大きい条件では、狭い領域で融体と冷却材が混合され、少量の冷却材が効率的に加熱されることにより、短時間で冷却材ボイドが発生する特性があることがわかった。このボイド化の特性は、熔融燃料/ナトリウム条件において早期に冷却材ボイドが発生する可能性が高いことを示すものである。

謝辞

本試験の計画、実施及び試験結果の分析評価において終始、佐藤一憲リスク評価研究グループリーダーに多大なご協力を頂きました。また、FBR サイクル安全設計グループの神山健司副主任研究員には本試験の全般にわたって有益なご助言を頂きました。試験の実施及び試験データ処理は、東興機械工業（株）の牛木伸行氏、高羽高氏、千葉敏夫氏、原子力システム（株）の佐藤俊一氏の貢献によるものであります。ご協力、ご助言頂いた方々に感謝いたします。

参考文献

- [1] Spencer, B.W. et al., "Results of Recent Reactor-Material Tests on Dispersal of Oxide Fuel from a Disrupted Core", Proc. International Topical Meeting on Fast Reactor Safety, vol.2, 877, Knoxville, Tennessee, April 21-25, (1985)
- [2] DeVault, G.P., "SIMMER-II Analysis of the CAMEL II C6 and C7 Experiments (Simulated Fuel Penetration into a Primary Control Assembly)", Los Alamos National Laboratory report LA-10280-MS
- [3] 山野秀将 他, "SIMMER-IIIによる CAMEL C6,C7 試験解析", JNC TN 9400 98-002, November, (1998)
- [4] Kondo, Sa. et al., "Experimental study on simulated molten jet-coolant interactions", Nuclear Engineering and Design, 155, 73-84 (1995).

表3-1 模擬物質と実機物質の主な物性値の比較

	Material	Melting / Boiling Point (°C)	Latent Heat of Fusion / Vaporization (kJ/kg)	Liquid / Vapor Density (kg/m ³)	Heat Capacity of Liquid / Vapor (kJ/kg/°C)	Thermal Conductivity of Liquid / Vapor (W/m/°C)
Molten Material	Wood's Metal ^{※1}	78.8 / (-)	47.30 / (-)	8560 / (-)	0.19 / (-)	13 / (-)
	Fuel ^{※2}	2790 / (-)	277.2 / (-)	8750 / (-)	0.50 / (-)	2.8 / (-)
Coolant	Water	(-) / 100	(-) / 2257	958 / 0.60	4.2 / 2.0	0.68 / 0.024
	Sodium	(-) / 881	(-) / 3900	740 / 0.28	1.3 / 2.5	53 / (-)

※1 低融点合金 (60%Bi + 20%Sn + 20%In)

※2 混合酸化物燃料 (80%UO₂ + 20%PuO₂)

表3-2 再臨界排除可視化基礎試験の試験条件

試験ナンバー	融体/冷却材の初期温度 (°C)	融体/冷却材の差圧 (MPa)	融体の放出圧力 [※] (MPa)	冷却材の圧力 (MPa)	冷却材流路上部のオリフィス構造	備考
MER2-10-0A	191 / 68	0.1	0.2	0.1	なし	予備試験
MER2-10-1A	300 / 73	0.1	0.2	0.1	なし	融体温度低
MER2-10-2A	400 / 63	0.1	0.2	0.1	なし	リファレンス
MER2-10-3A	550 / 61	0.1	0.2	0.1	なし	融体温度高
MER2-10-4A	400 / 35	0.1	0.2	0.1	なし	冷却材温度低
MER2-10-5A	400 / 55	0.15	0.2	0.05	なし	冷却材圧力低

※ 融体放出口の高さから融体プールまでのヘッド(約1m)を含む絶対圧力

表4-1 試験結果の一覧

試験条件			試験結果			
	融体/冷却材 の初期温度 (°C)	融体/冷却材 の差圧 (MPa)	融体放出量(kg) / 融体放出時間※1 (sec)	平均放出 質量流量 (kg/sec)	ボイド発生※2ま での融体放出 時間 (sec)	ボイド発生まで の融体放出量 (kg)
リファレンス	400 / 63	0.1	4.40 / 3.60	1.22	1.45	1.71
融体温度低	300 / 73	0.1	5.95 / 3.12	1.91	2.04	3.12
融体温度高	550 / 61	0.1	2.50 / 3.00	0.83	0.28	0.21
冷却材温度 低	400 / 35	0.1	4.44 / 3.45	1.29	2.55	4.14
冷却材圧力 低	400 / 55	0.15	3.38 / 2.56	1.32	0.75	0.96

※1 融体の放出開始時刻から放出終了時刻までの時間

※2 融体の放出開始時刻からボイドの高さが冷却材流路の等価直径程度(50mm)に達した時刻までの時間

表5-1 冷却材ボイド発生時における「混合領域」の概略高さ

	融体/冷却材 の初期温度 (°C)	ボイド発生 までの融体 放出時間 t (sec)	ボイド発生まで の融体放出量 M (kg)	混合領域の概略高さ h (mm) $h = \frac{C_{pm}(T_m - T_{sat})M}{\rho_c C_{pc} \Delta T_{sub} d^2}$
リファレンス	400 / 63	1.45	1.71	234
融体温度低	300 / 73	2.04	3.12	406
融体温度高	550 / 61	0.28	0.21	39
冷却材温度 低	400 / 35	2.55	4.14	320
冷却材圧力 低	400 / 55	0.75	0.96	194

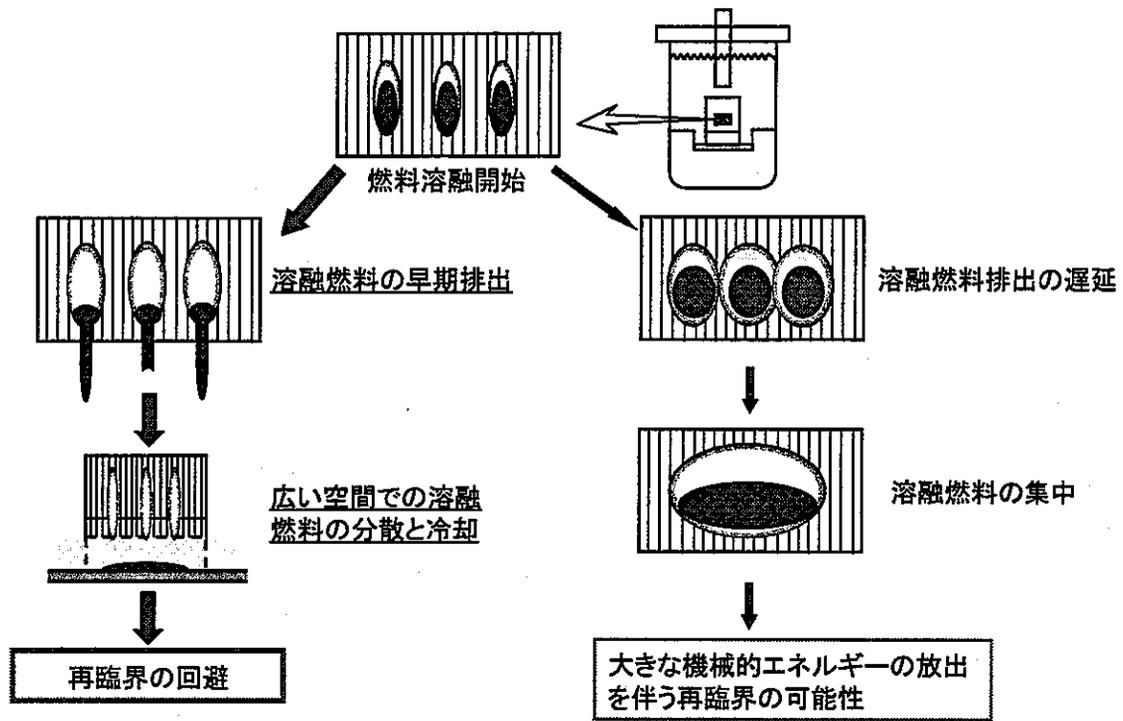


図1-1 CDAの事象推移と再臨界問題排除の概念

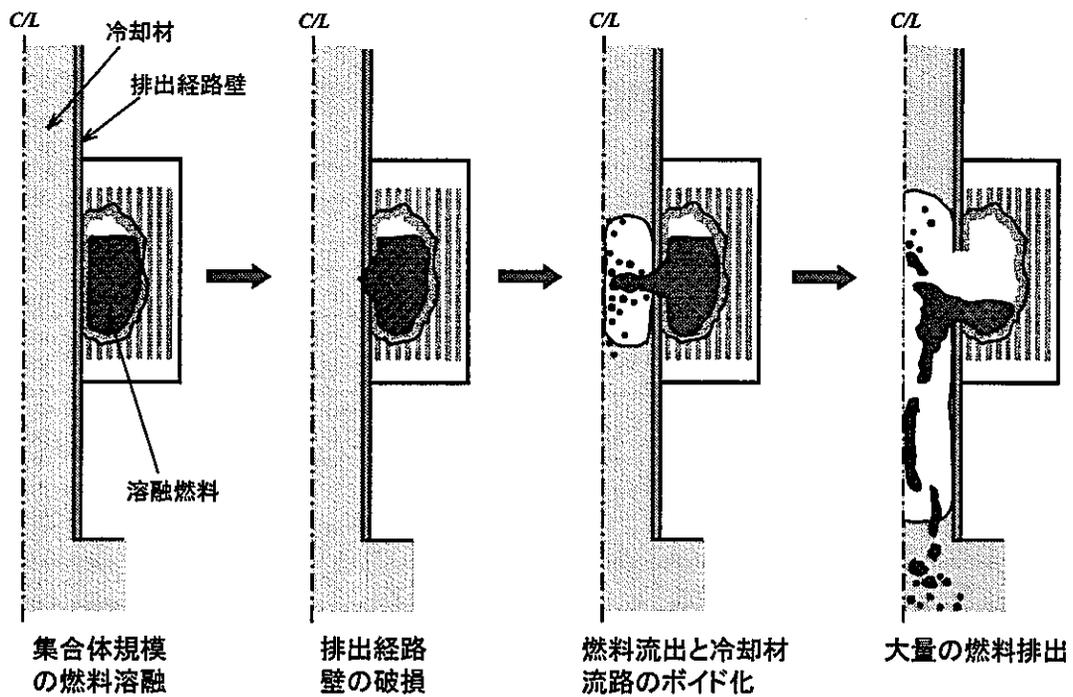


図1-2 早期燃料排出の概念

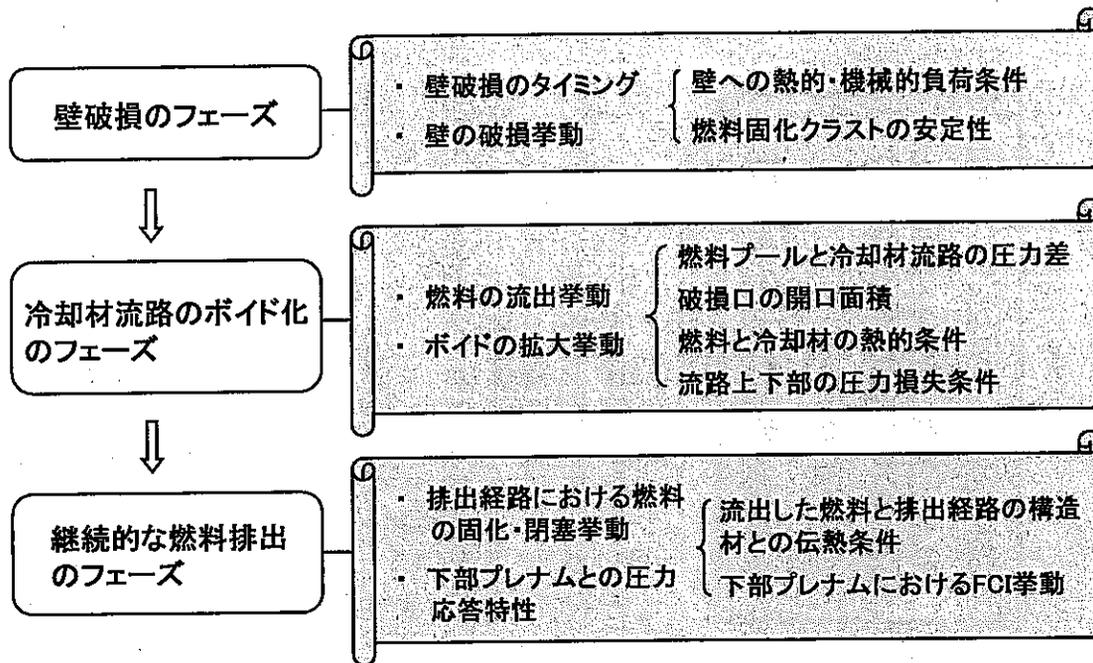


図1-3 早期燃料排出を実証するために解明すべき主要現象

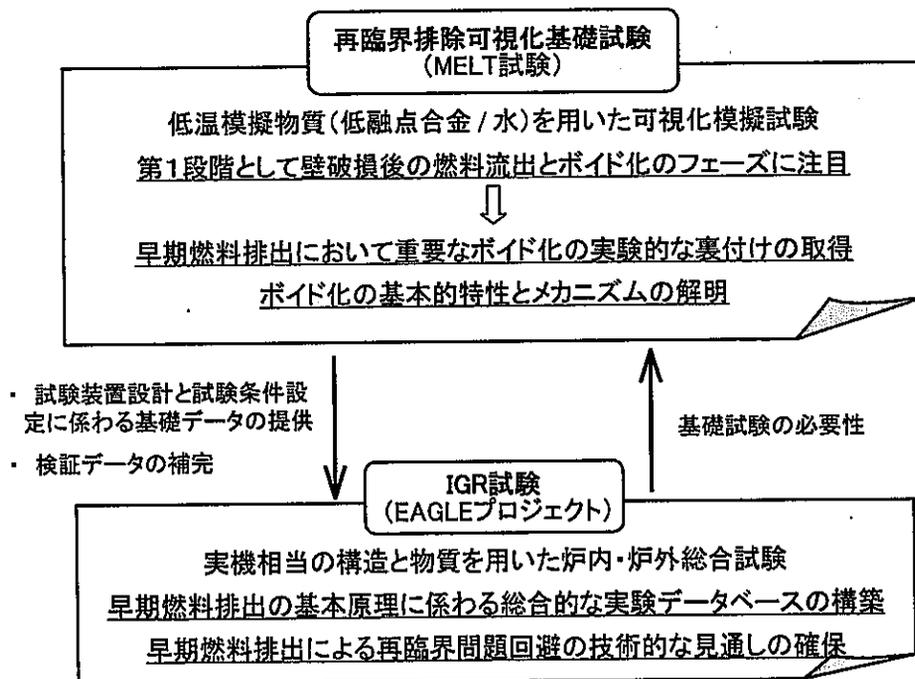
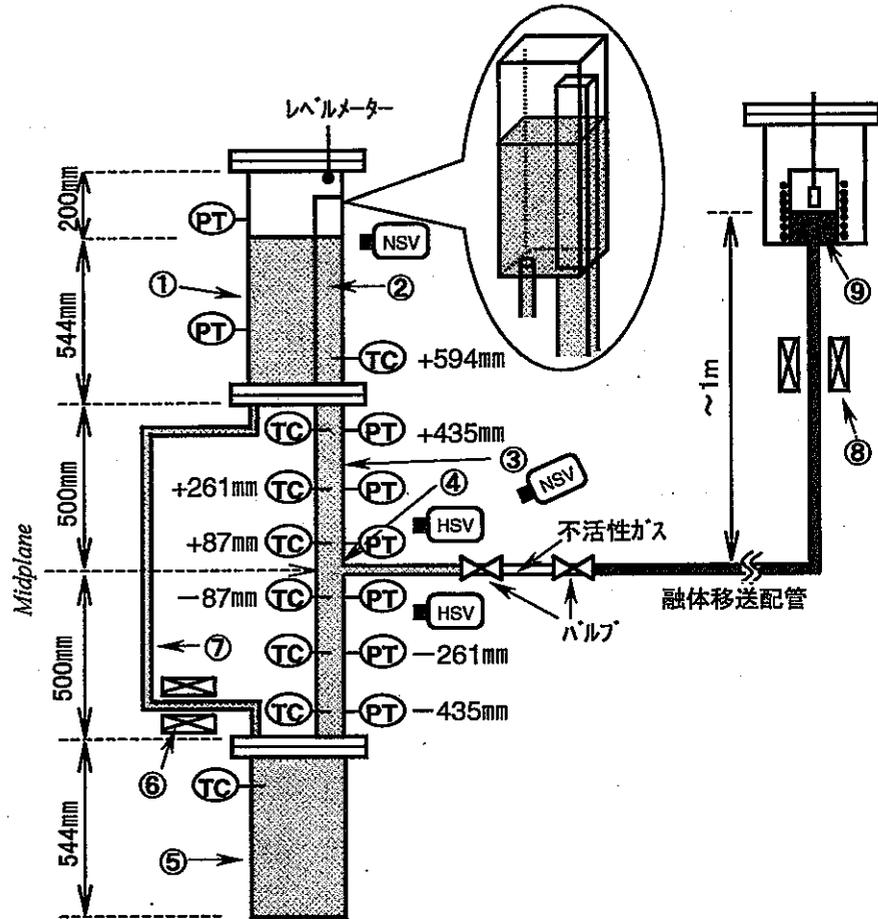


図1-4 再臨界排除可視化基礎試験の位置付け



模擬融体 : Wood's Metal
 (融点: 78.8°C, 密度 ~ 8500kg/m³,
 組成 [Bi: 60%, Sn: 20%, In: 20%])
 模擬冷却材 : 水
 融体放出時間* : ~3秒間

* バルブの開放時間

- ① 上部構造体 (断面150mm × 150mm)
- ② 延長冷却材流路 (断面50mm × 50mm)
- ③ 冷却材流路 (断面50mm × 50mm)
- ④ 融体放出ノズル (φ10mm)
- ⑤ 下部構造体 (断面150mm × 150mm)
- ⑥ 電磁流量計
- ⑦ バイパス流路 (φ23mm)
- ⑧ 液体金属用電磁流量計
- ⑨ 融体加熱用ヒーター容器
- TC 熱電対
- PT 圧力計

図2-1 再臨界排除可視化基礎試験体と計測系配置の概要

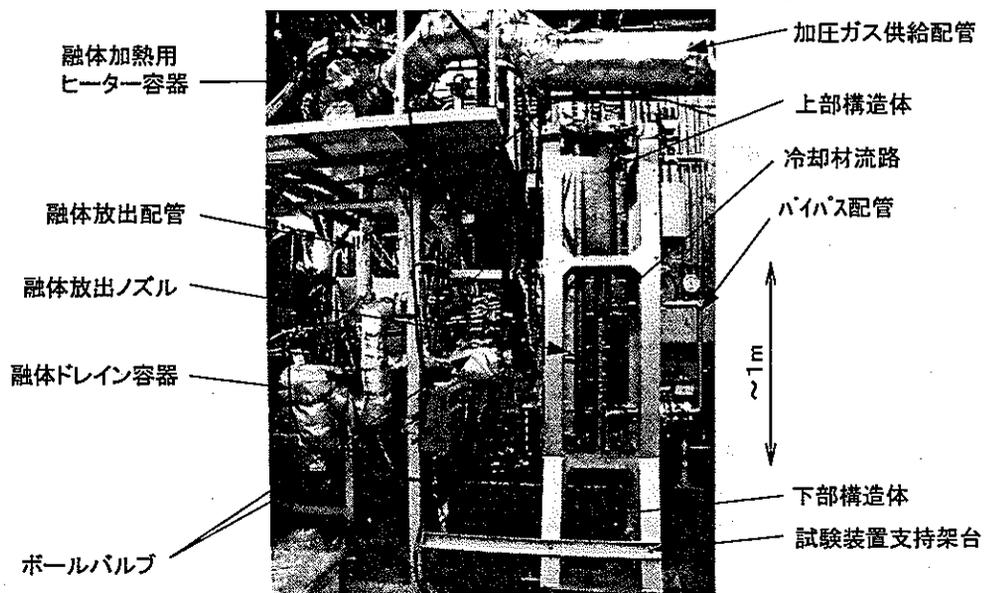


図2-2 再臨界排除可視化基礎試験体の全体写真

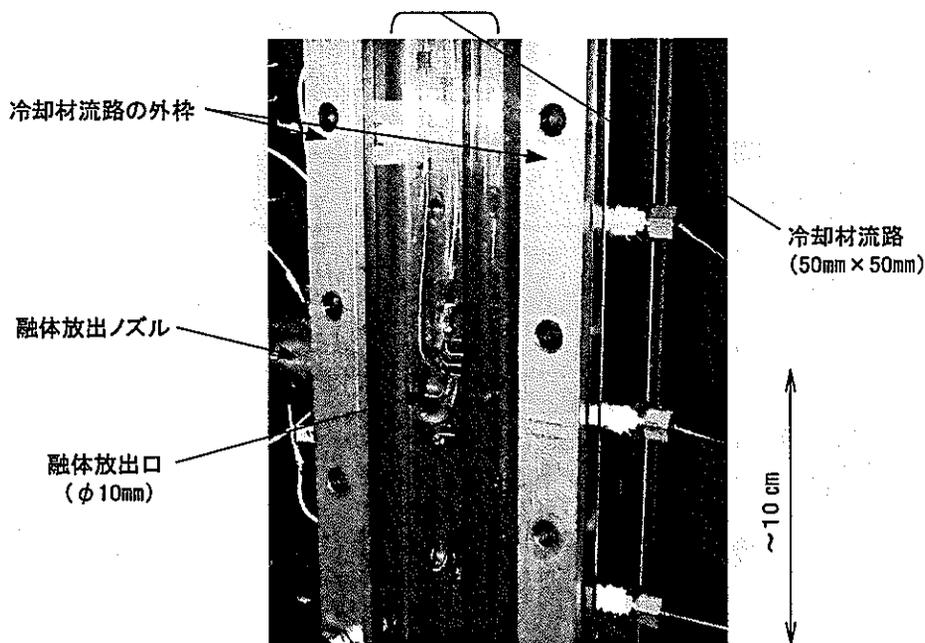


図2-3 冷却材流路と融体放出ノズルの写真

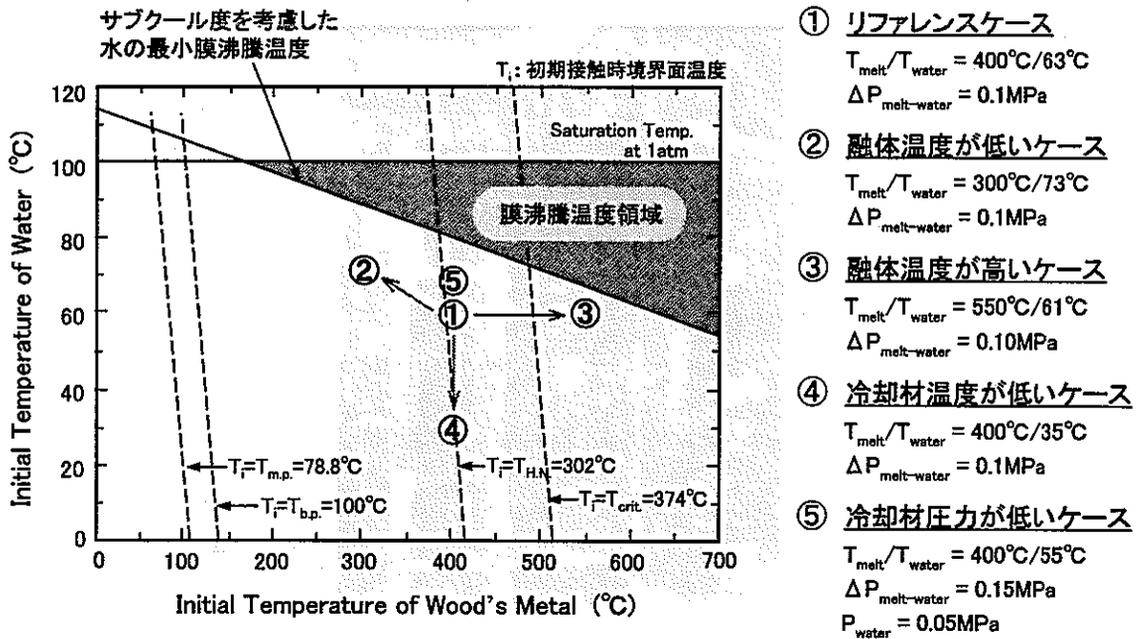


図3-1 試験温度条件の分布

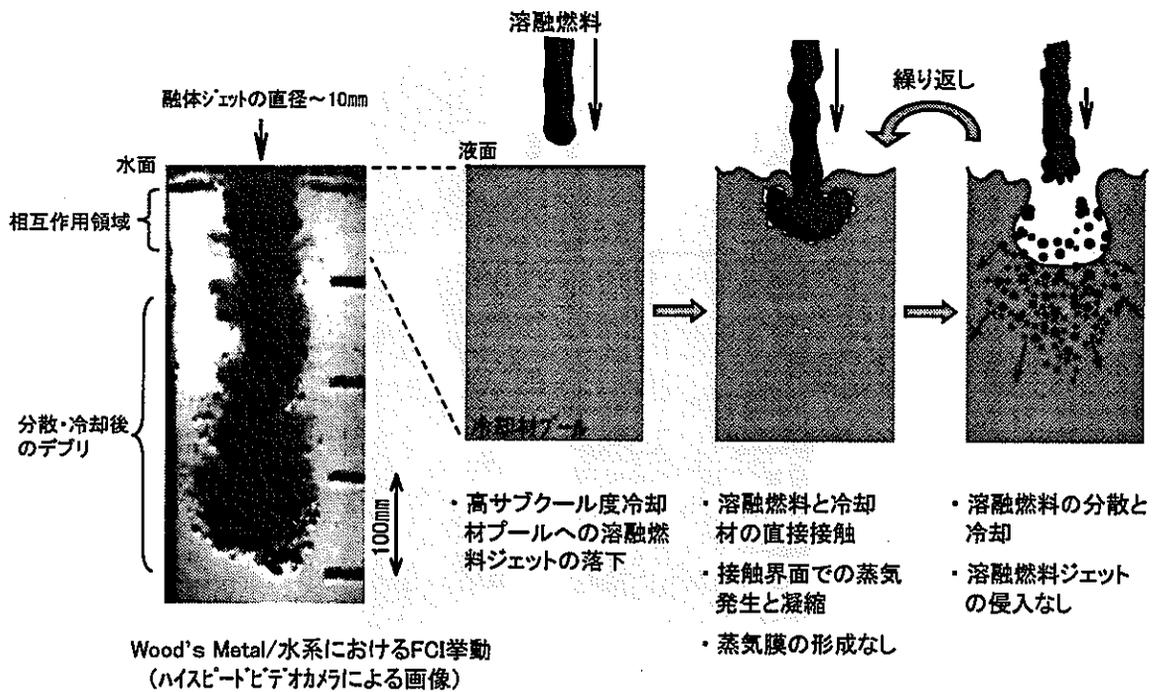


図3-2 高速炉のCDA条件において予想されるFCI挙動

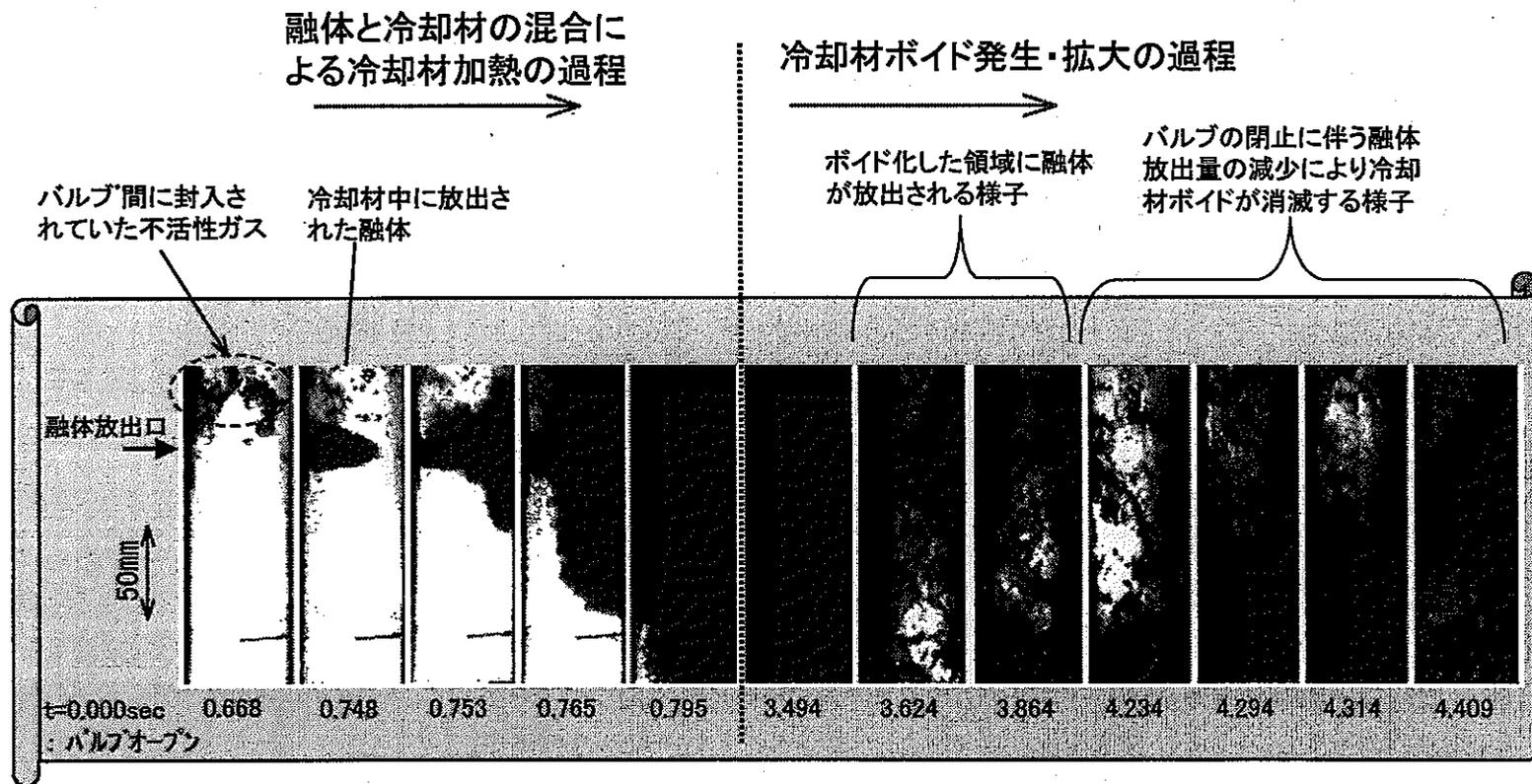


図4-1 高速度ビデオカメラにより撮影されたリファレンスケースのボイド化挙動

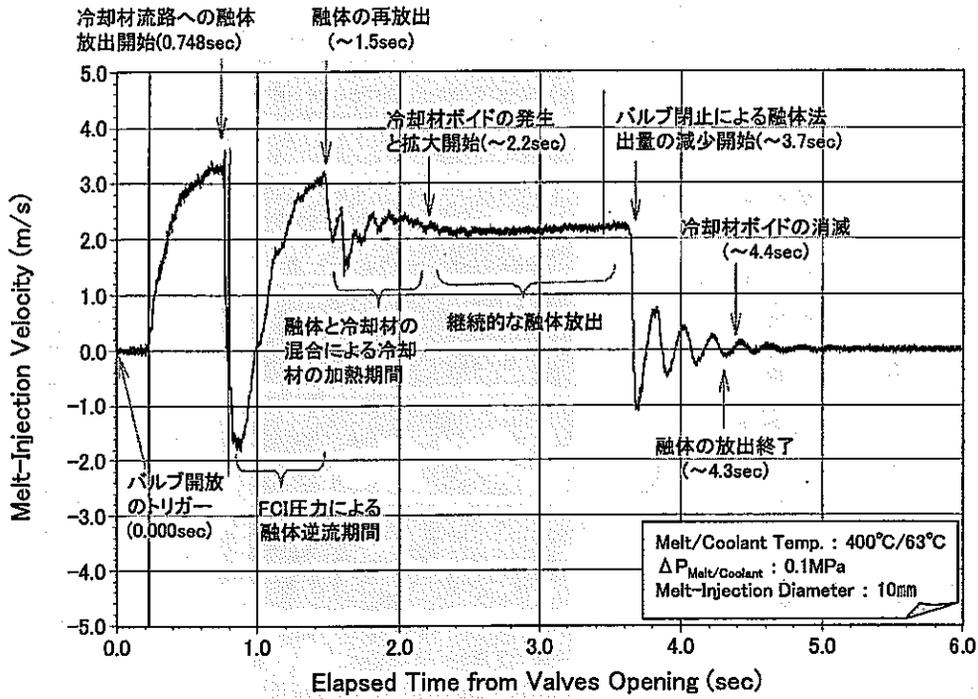


図4-2 リファレンスケースの融体放出速度の履歴

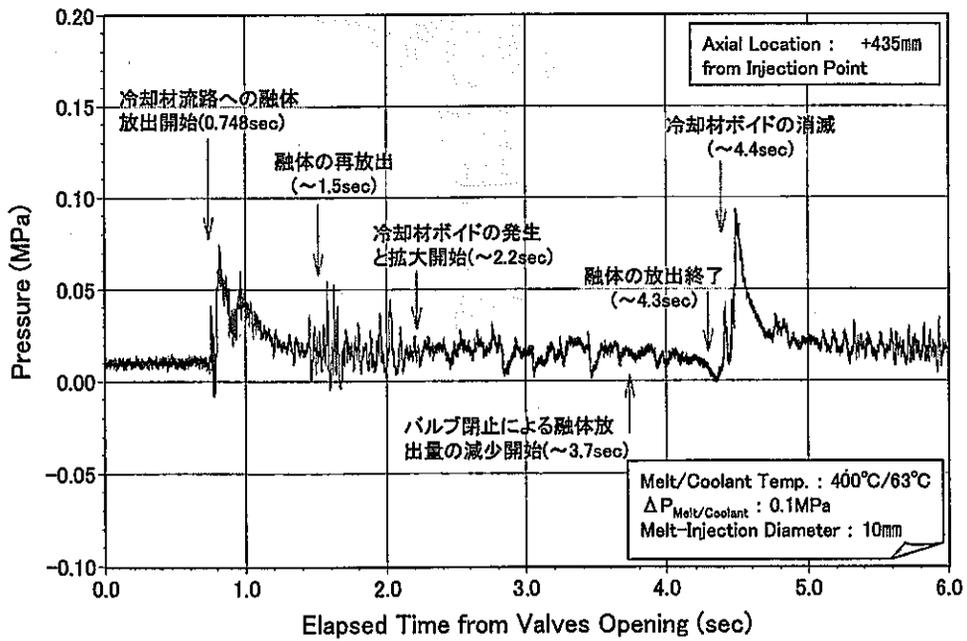


図4-3 リファレンスケースの冷却材流路の圧力履歴1

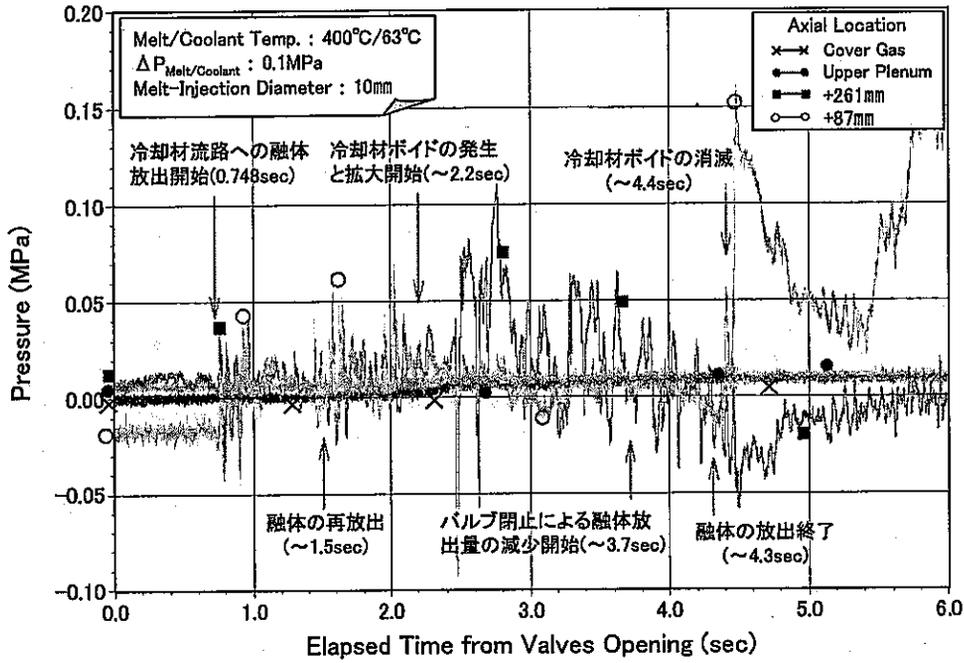


図4-4 リファレンスケースの冷却材流路の圧力履歴2

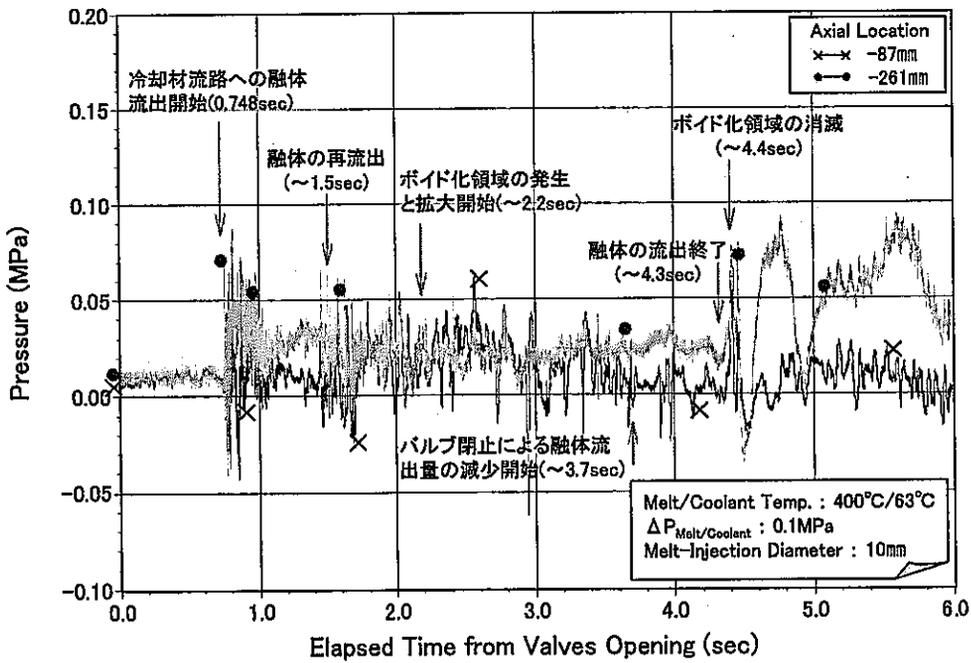


図4-5 リファレンスケースの冷却材流路の圧力履歴3

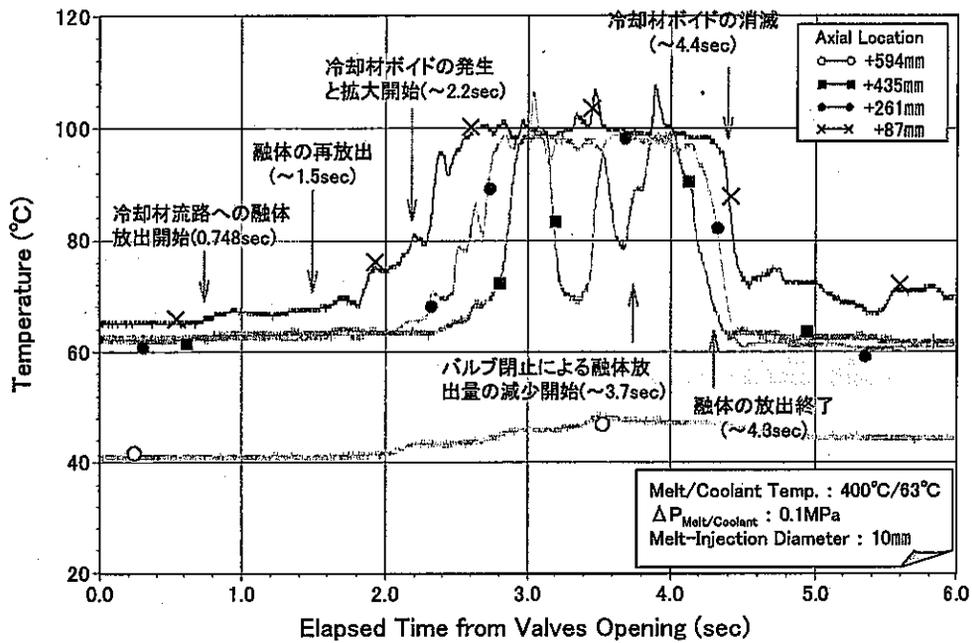


図4-6 リファレンスケースの冷却材流路の温度履歴1

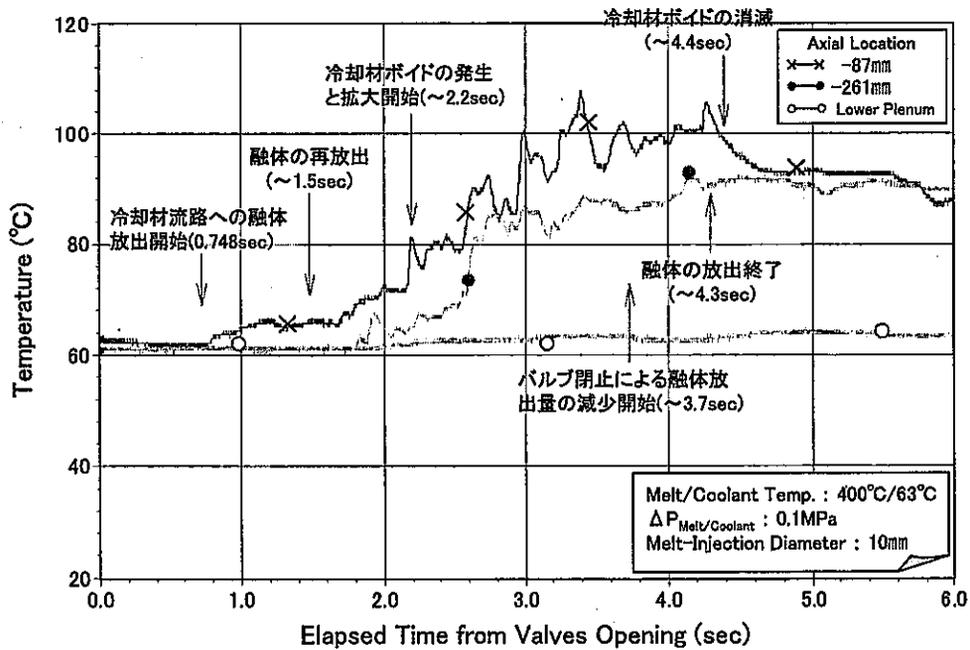


図4-7 リファレンスケースの冷却材流路の温度履歴2

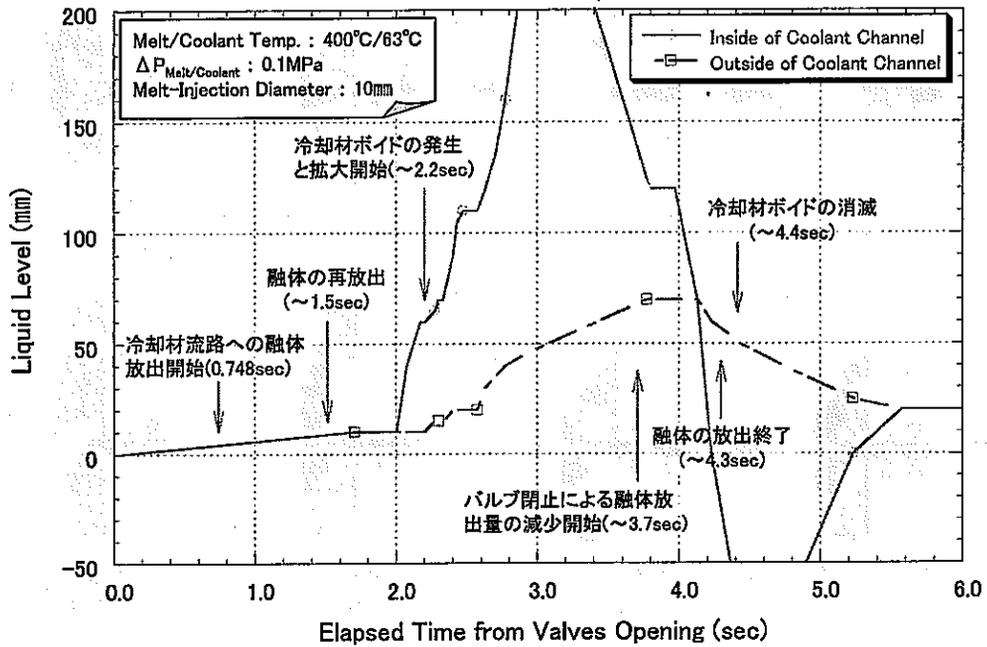


図4-8 リファレンスケースの冷却材流路の液位履歴

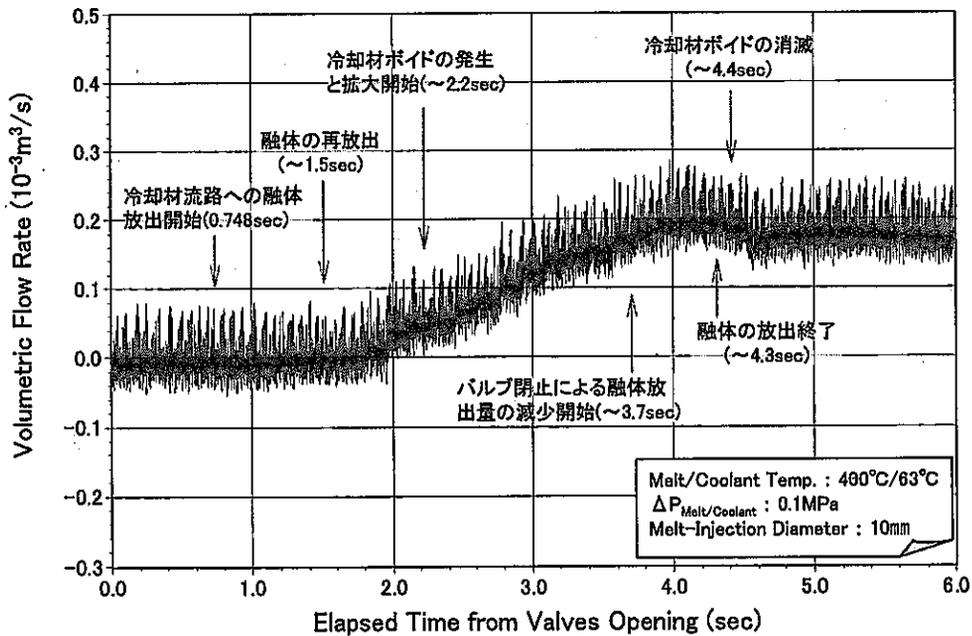


図4-9 リファレンスケースのバイパス流路の流量履歴

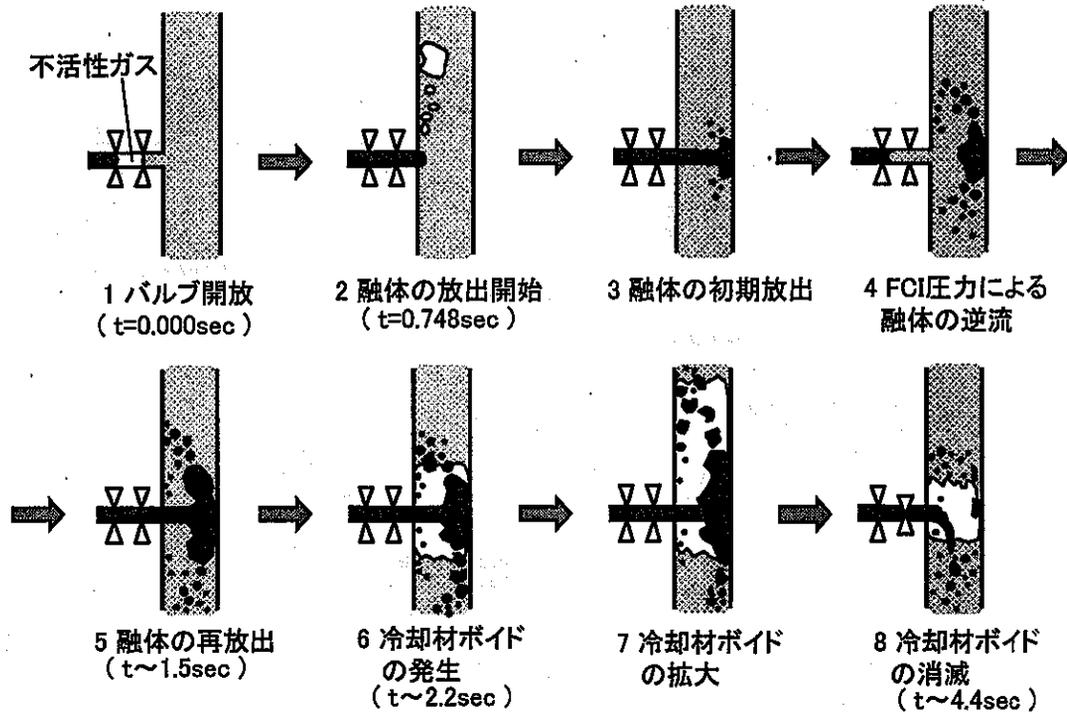


図4-10 リファレンスケースのボイド化の事象推移

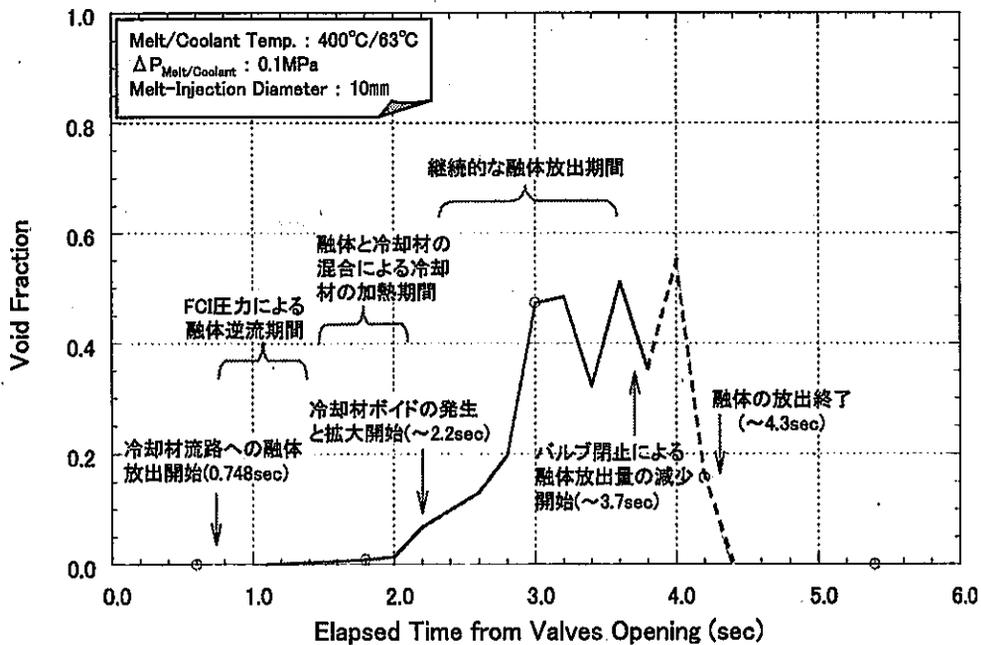


図4-11 リファレンスケースの冷却材流路のボイド率履歴

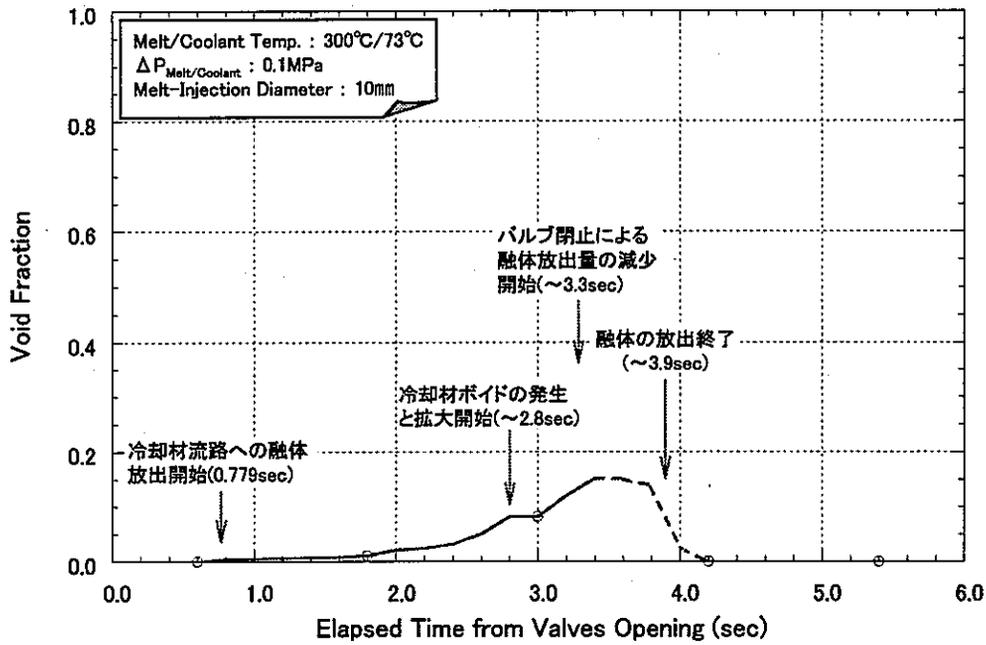


図4-12 融体温度が低いケースの冷却材流路のボイド率履歴

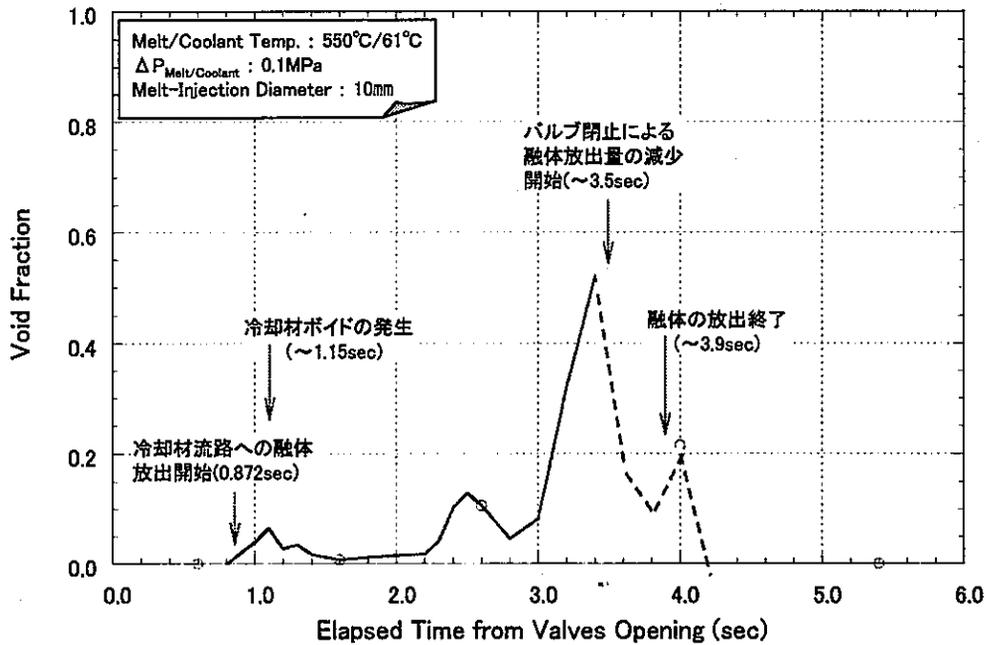


図4-13 融体温度が高いケースの冷却材流路のボイド率履歴

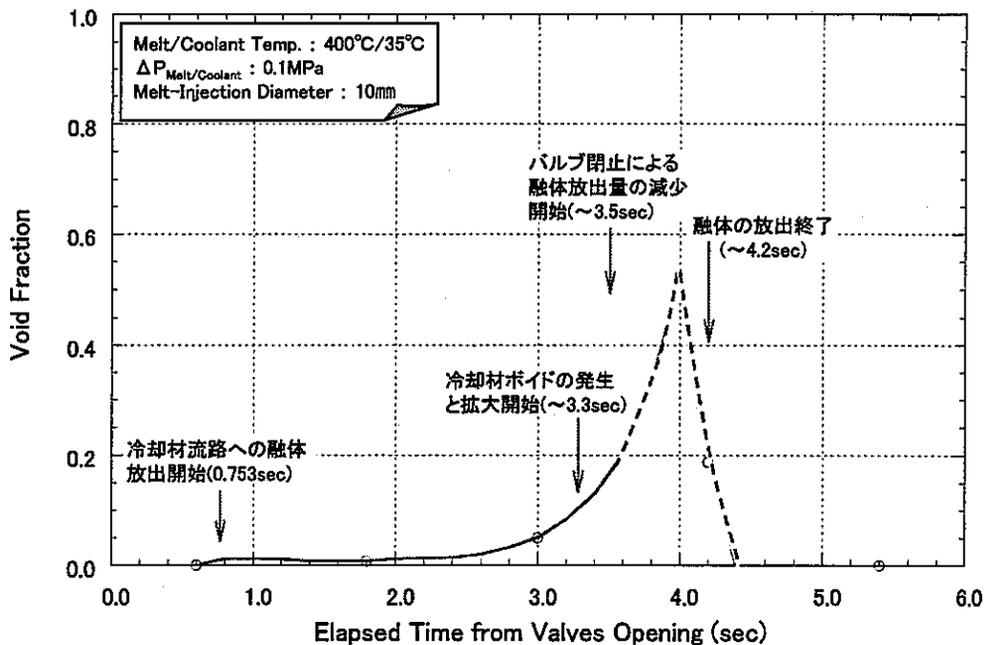


図4-14 冷却材温度が低いケースの冷却材流路のボイド率履歴

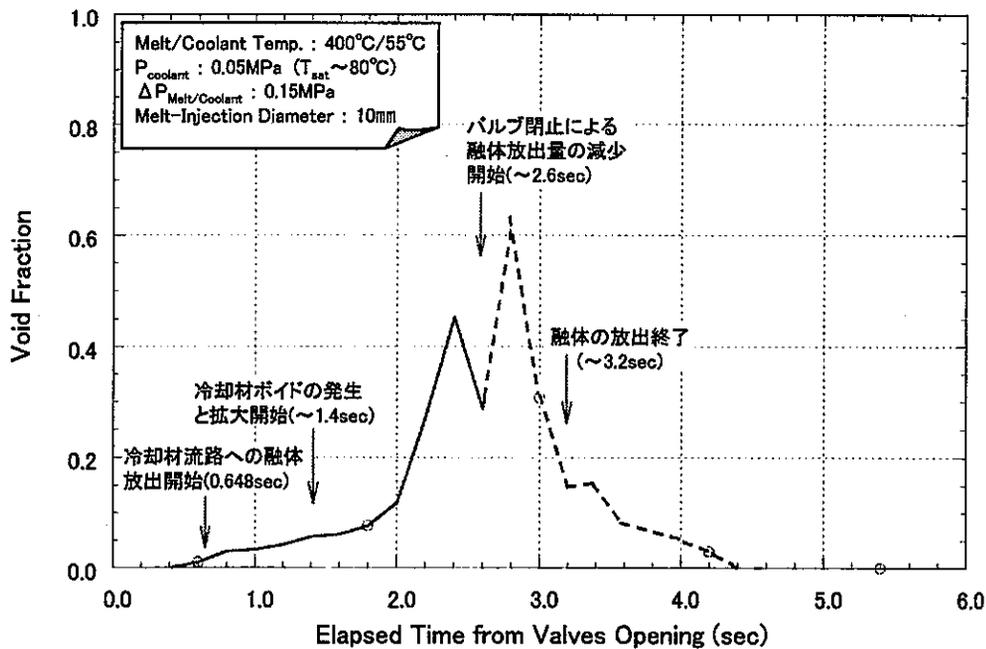


図4-15 冷却材圧力が低いケースの冷却材流路のボイド率履歴

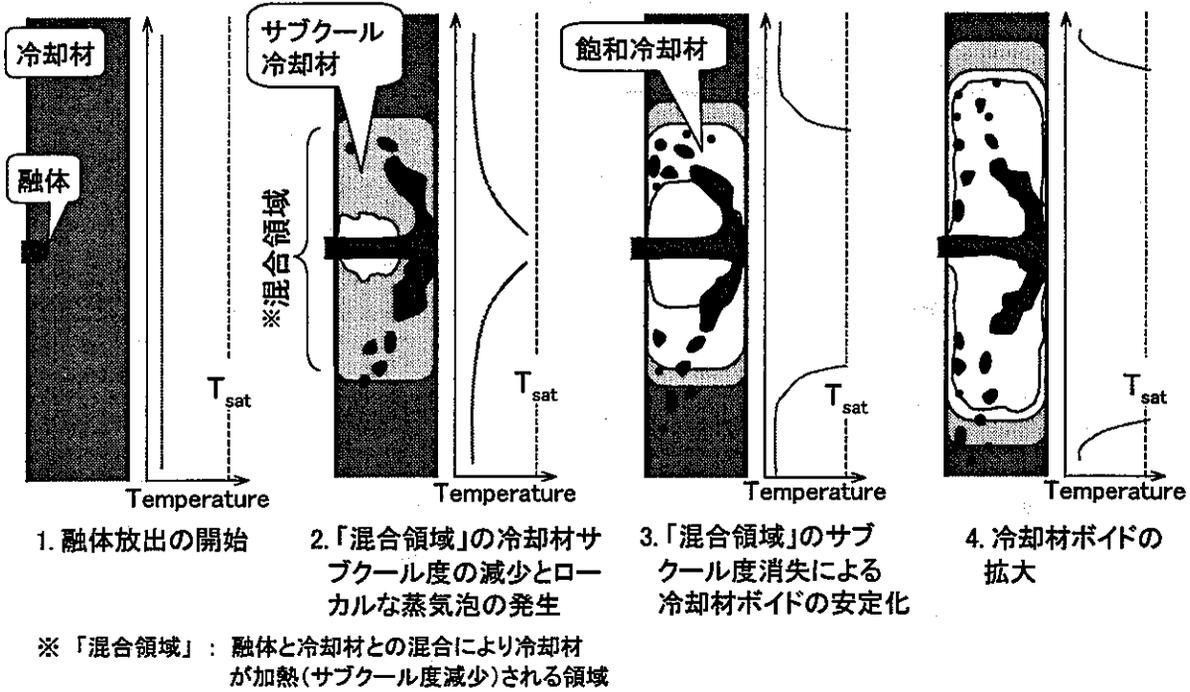


図5-1 冷却材のサブクール度減少によるボイド化の概念

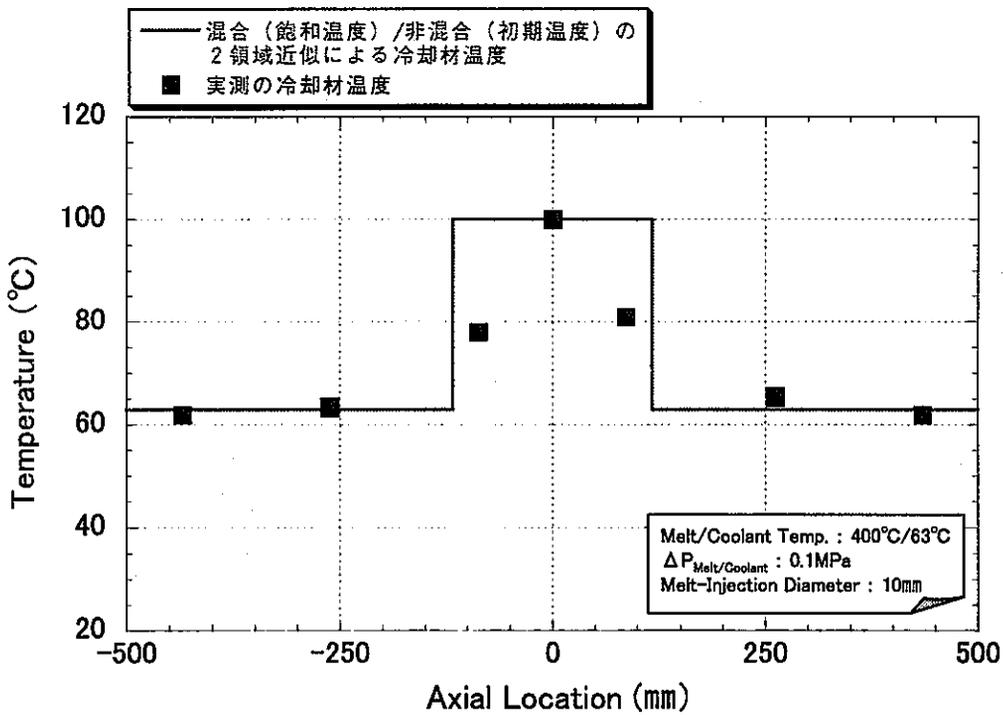


図5-2 リファレンスケースの冷却材ボイド発生時の冷却材温度分布

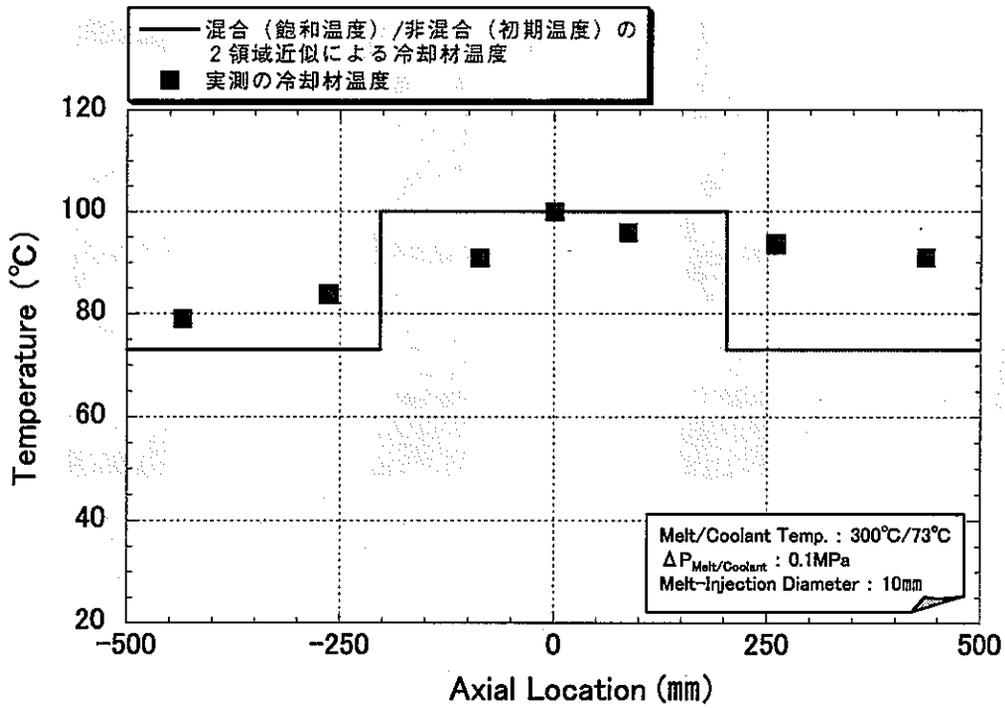


図5-3 融体温度が低いケースの冷却材ボイド発生時の冷却材温度分布

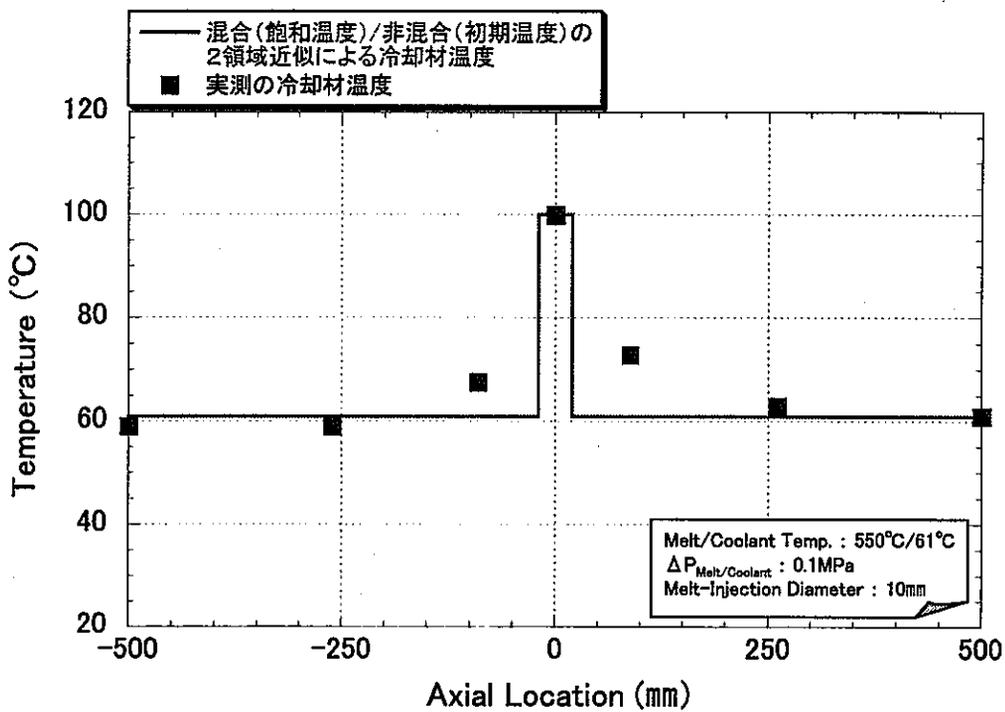


図5-4 融体温度が高いケースの冷却材ボイド発生時の冷却材温度分布

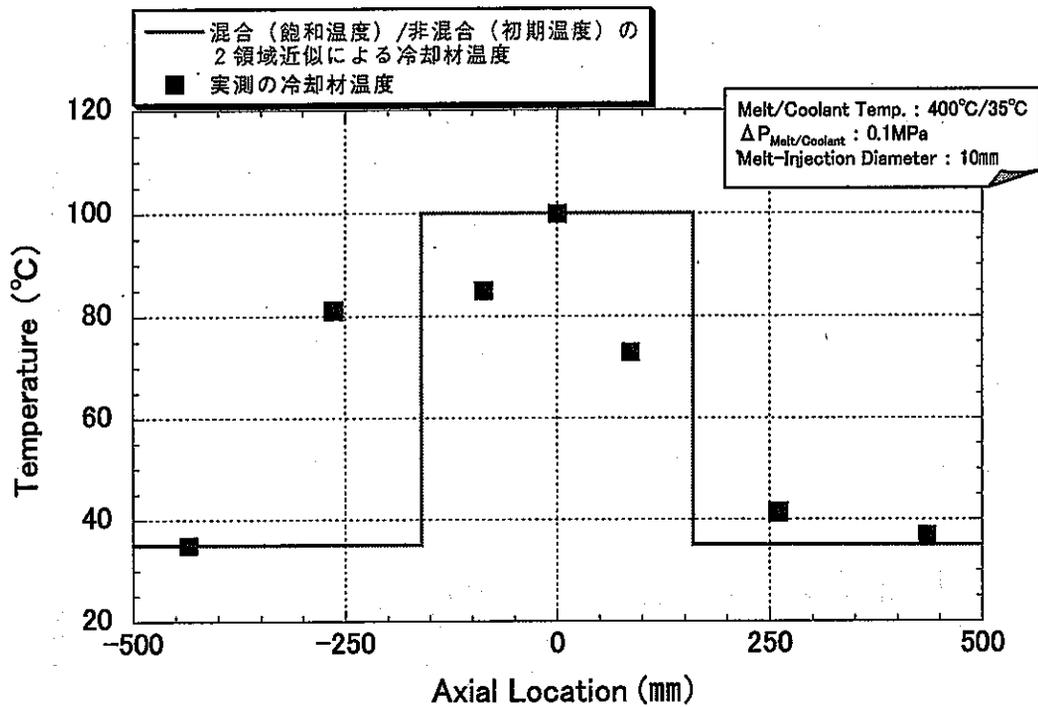


図5-5 冷却材温度が低いケースの冷却材ボイド発生時の温度分布

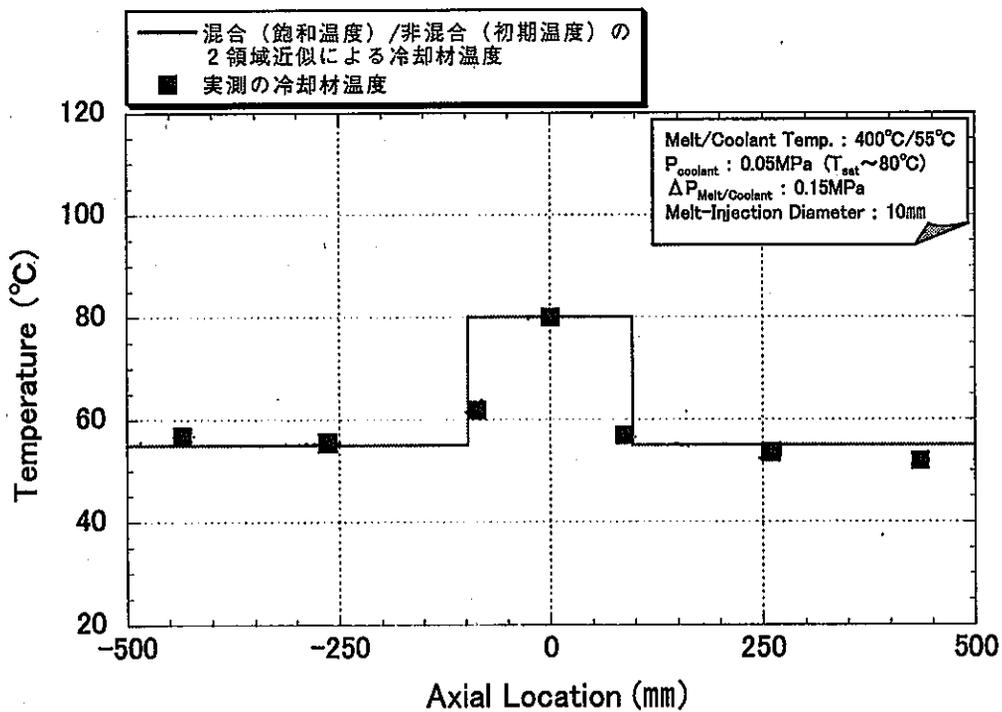


図5-6 冷却材圧力が低いケースの冷却材ボイド発生時の冷却材温度分布

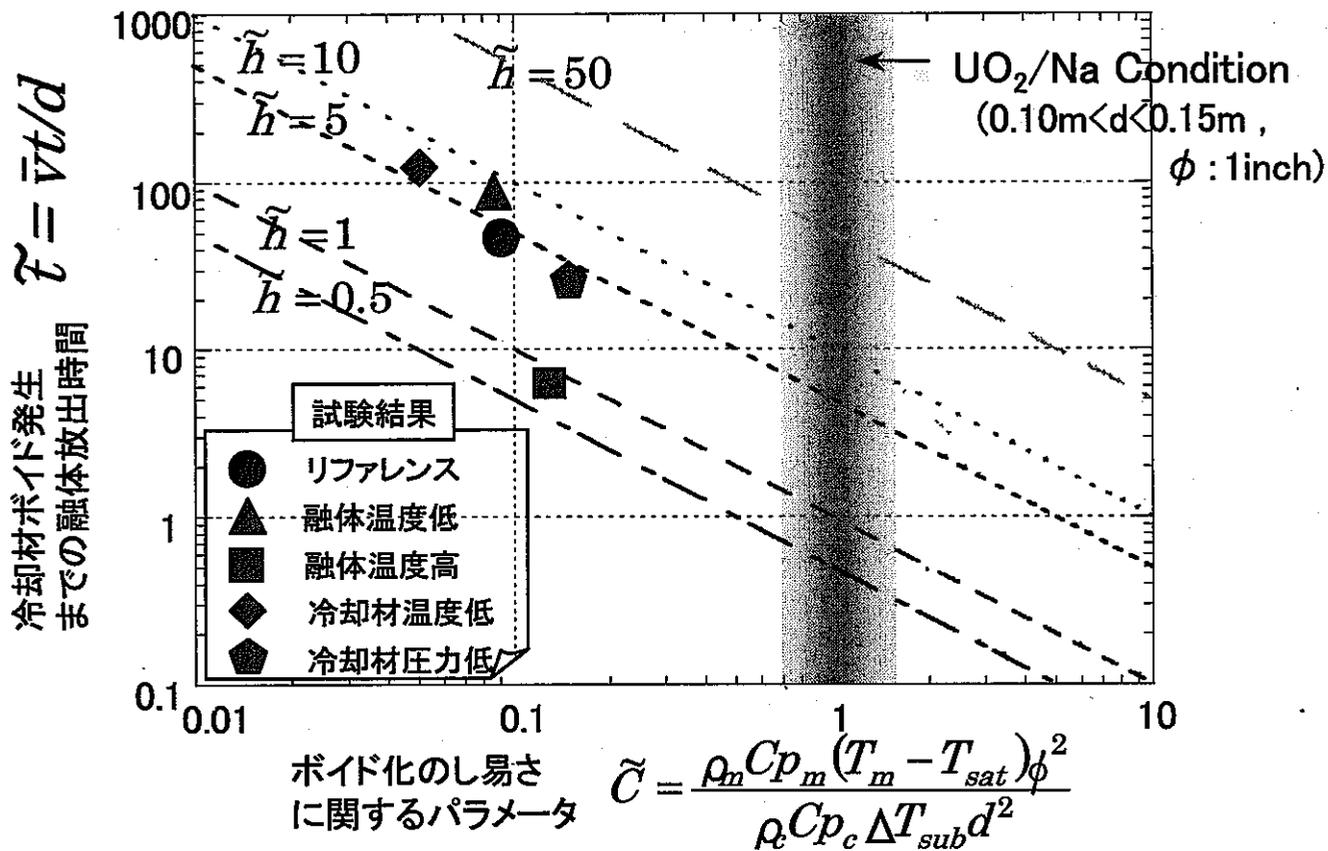


図5-7 冷却材ボイド発生までの融体放出時間 \tilde{t} 、ボイド化のし易さに関するパラメータ \tilde{C} 及び混合領域の概略高さ \tilde{h} の関係

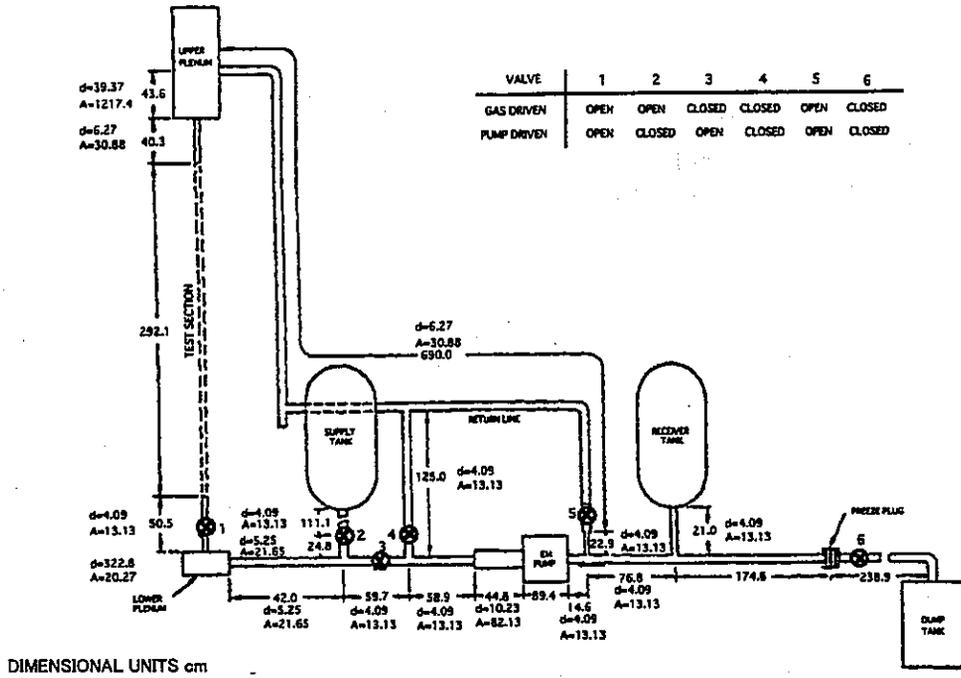


図5-8 CAMEL II ループの概略図[2]

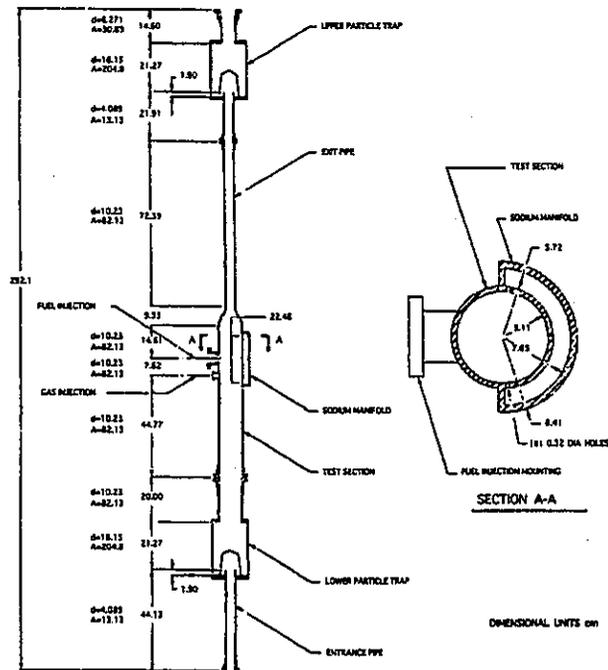


図5-9 CAMEL C6, C7試験のテストセクション(模擬CRGT) [2]

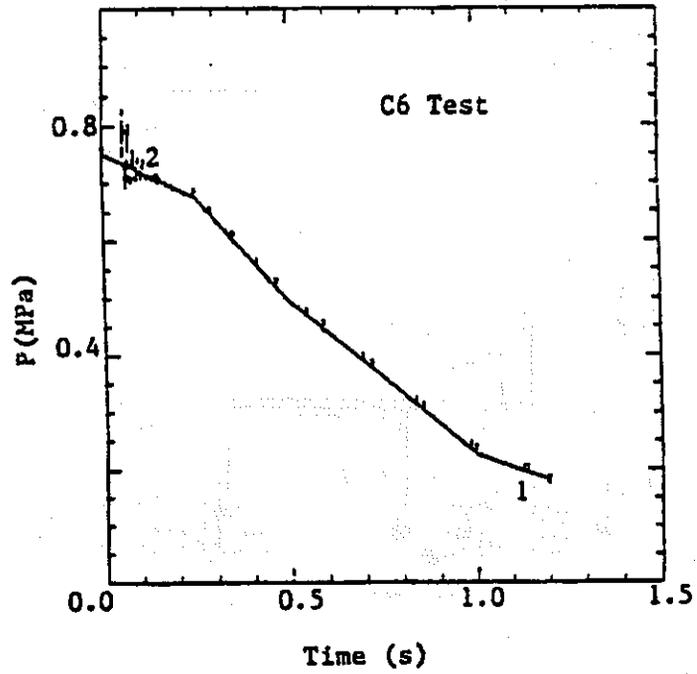


図5-10 CAMEL C6試験の溶融燃料の放出圧力履歴^[2]

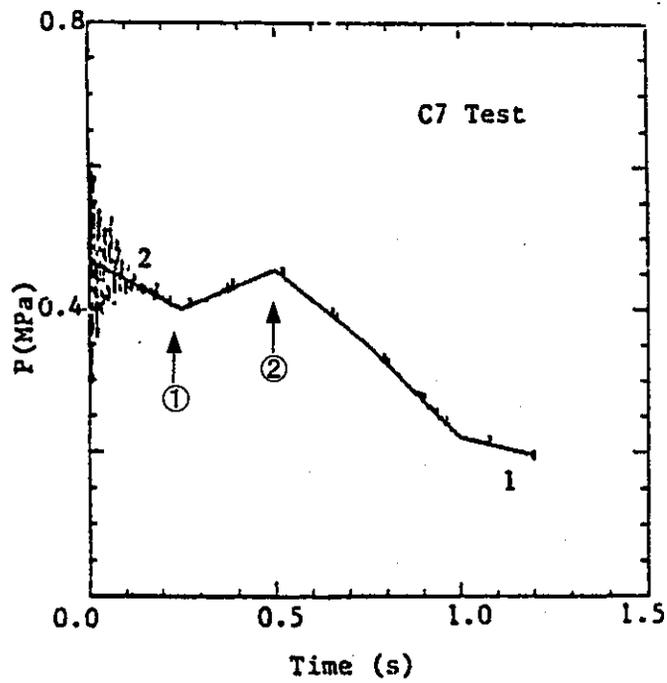


図5-11 CAMEL C7試験の溶融燃料の放出圧力履歴^[2]

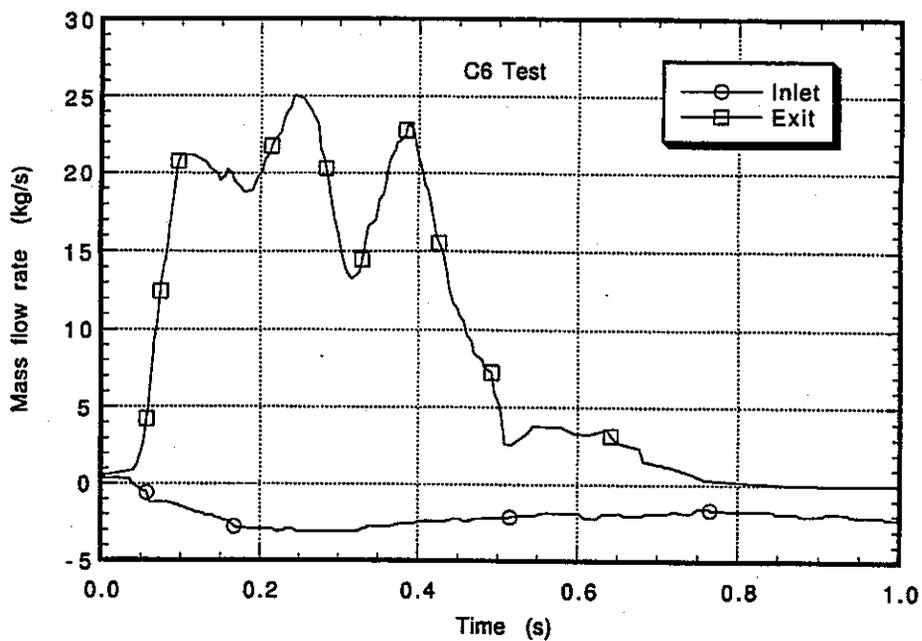


図5-12 CAMEL C6試験のテストセクションのナトリウム質量流量履歴^[2]

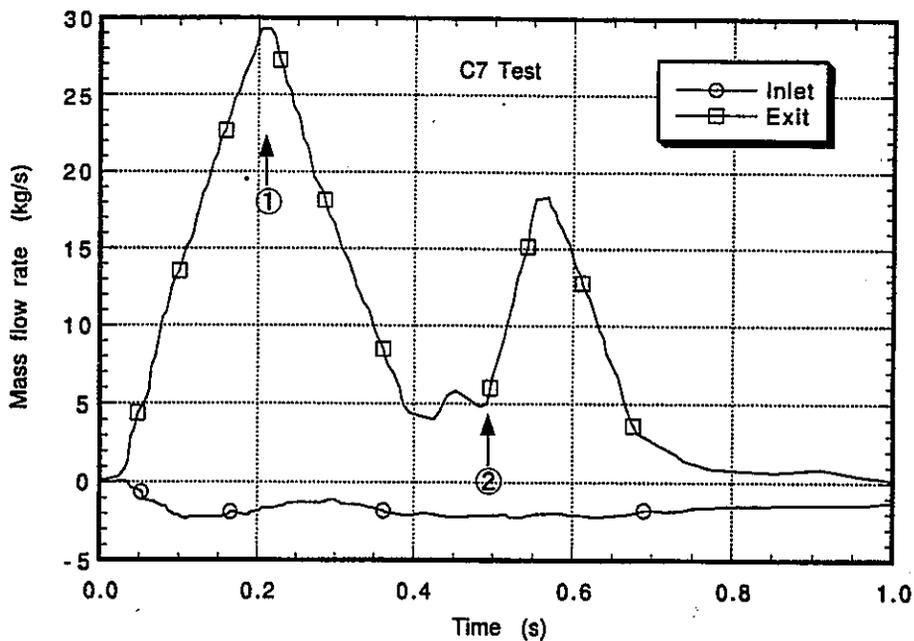


図5-13 CAMEL C7試験のテストセクションのナトリウム質量流量履歴^[2]

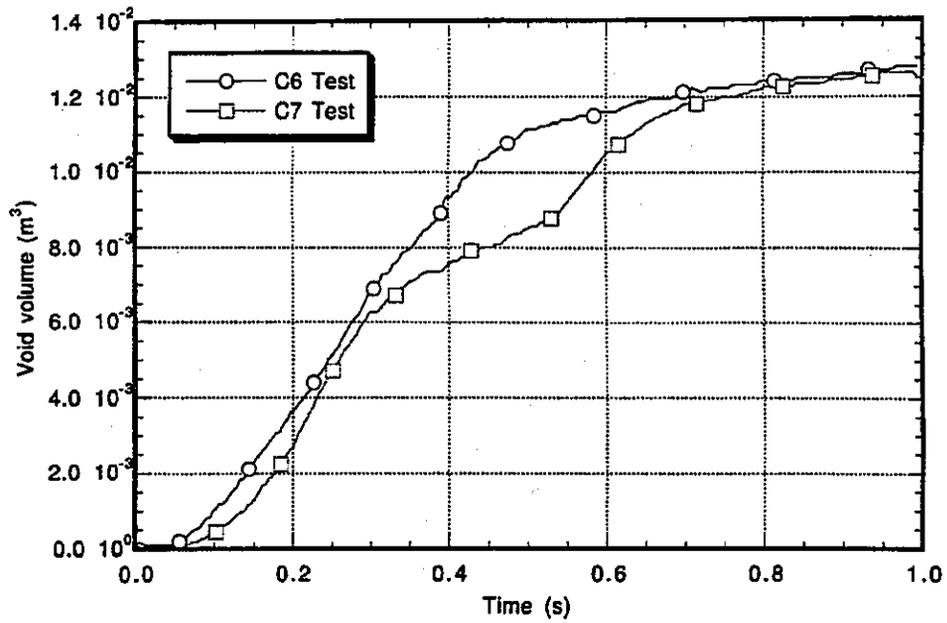


図5-14 CAMEL C6, C7試験のボイド体積履歴^[2]

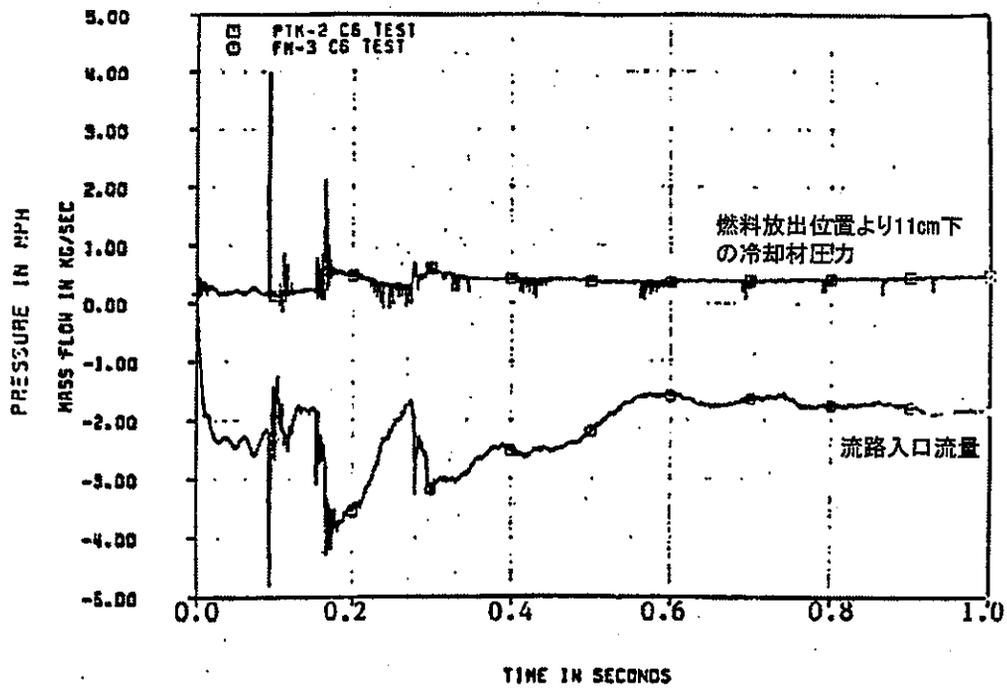


図5-15 CAMEL C6試験の圧力履歴とナトリウム質量流量履歴^[2]

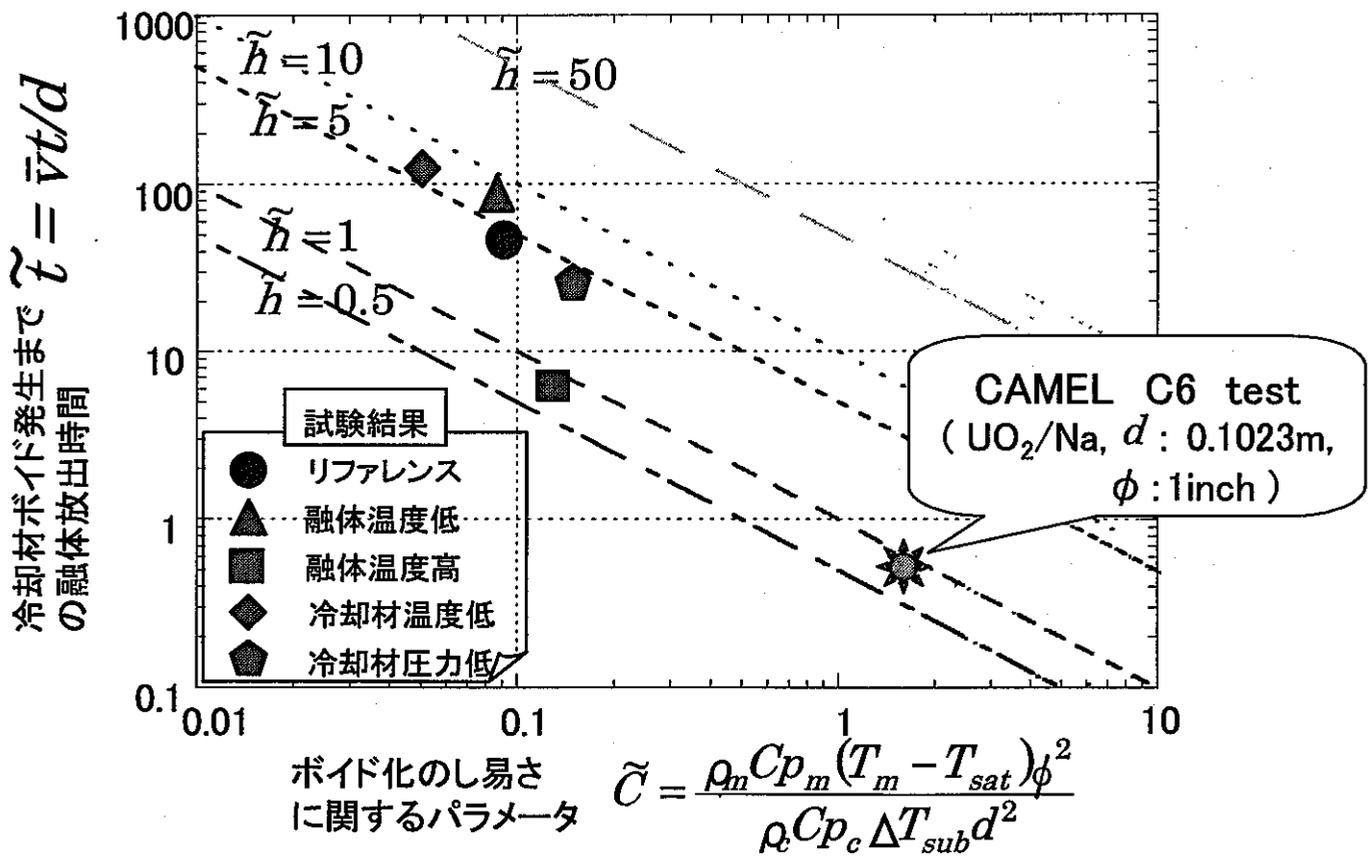


図5-16 CAMEL C6試験の冷却材ボイド発生までの融体放出時間

付録 1 冷却材流路のスケーリング

冷却材流路のボイド化が実現するためには冷却材が効率的に蒸発することが必要であることから、冷却材流路の直径が小さいほど熔融燃料との混合割合が大きくなり、ボイド化に有利になると考えられる。すなわち、模擬試験においてボイド化を実現するためには、流路の直径をできるだけ小さくすれば良いと考えられる。しかしながら、あまりにも狭い流路では冷却材に比べて模擬融体の割合が多くなりすぎ、比較的大きな等価直径をもつ排出経路構造の模擬性が損なわれる可能性がある。ここでは、模擬試験においてボイド化を実現し、かつ CRGT 相当の排出経路構造との相似性を得るためのスケーリングについて検討する。

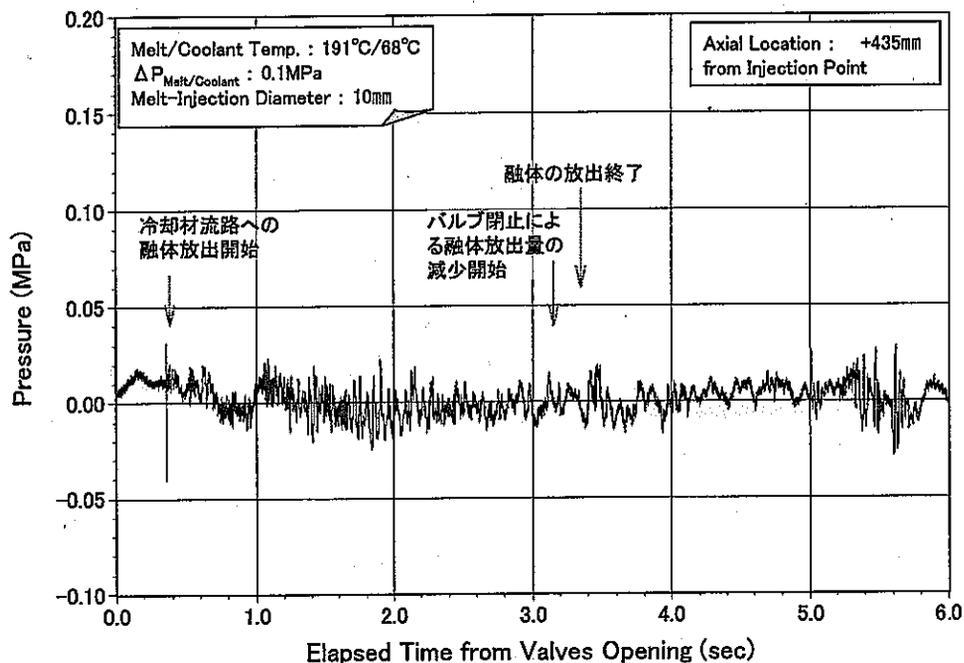
単位体積 (1m^3) の熔融燃料 ($\sim 3000^\circ\text{C}$) は 500°C のナトリウム冷却材を 2.11kg だけ蒸発させる熱量をもつ。 2.11kg のナトリウムが蒸発した場合のナトリウム蒸気 (蒸気密度: $0.28\text{kg}/\text{m}^3$) の体積は 7.53m^3 である。一方、単位体積の模擬融体 Wood's Metal ($\sim 400^\circ\text{C}$) は 60°C の水を 0.201kg だけ蒸発させる熱量をもつ。 0.201kg の水が蒸発した場合の水蒸気 (蒸気密度: $0.60\text{kg}/\text{m}^3$) の体積は 0.34m^3 である。すなわち、模擬融体と水との混合によって、熔融燃料とナトリウムが混合される場合と同等の蒸気体積を得るには、約 22 倍 ($\sim 7.53\text{m}^3 / 0.34\text{m}^3$) の体積の模擬融体が冷却材と混合する混合割合が必要と考えられる。そこで模擬試験においては、冷却材の体積を実機条件の $1/22$ 程度まで少なくすることによって必要な混合割合を得る狙いとした。

上述の検討にしたがって、模擬冷却材流路の形状として選択し得る範囲を定める。600MWe 級炉心概念の CRGT 構造を実機排出経路のリファレンスとした場合、排出経路の等価直径 150mm 、高さ 4300mm 、体積 $76 \times 10^{-3}\text{m}^3$ より、模擬冷却材流路の体積は $3.5 \times 10^{-3}\text{m}^3$ となる。直径/高さの比を実機体系程度 ($\sim 1/30$) にあわせると模擬冷却材流路の直径 0.053m 、高さ 1.6m を得る。同様に、再臨界問題排除のための有力な方策の一つとして提案されている燃料排出用内部ダクト付き集合体炉心概念 (FAIDUS: Fuel Assembly with Inner Duct Structure) をリファレンスとした場合、排出経路の等価直径 110mm 、高さ 2000mm 、体積 $19 \times 10^{-3}\text{m}^3$ より、模擬冷却材流路の直径 0.033m 、高さ 0.99m を得る。よって、模擬冷却材流路の等価直径としては 30mm から 50mm 、高さとしては 1000mm から 2000mm 程度を選択することが妥当である。

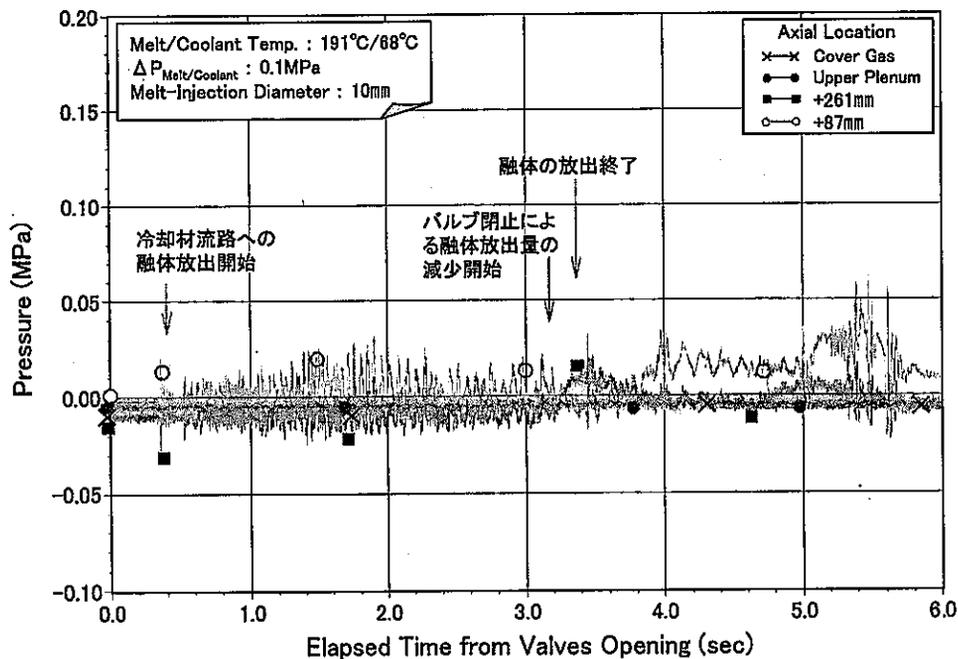
付録 2 試験データ集

図 A-1	予備試験の冷却材流路の圧力履歴 1	47
図 A-2	予備試験の冷却材流路の圧力履歴 2	47
図 A-3	予備試験の冷却材流路の圧力履歴 3	48
図 A-4	予備試験の冷却材流路の温度履歴 1	48
図 A-5	予備試験の冷却材流路の温度履歴 2	49
図 A-6	予備試験の冷却材流路の液位履歴	49
図 A-7	予備試験のバイパス流路の流量履歴	50
図 B-1	融体温度が低いケースの冷却材流路の圧力履歴 1	51
図 B-2	融体温度が低いケースの冷却材流路の圧力履歴 2	51
図 B-3	融体温度が低いケースの冷却材流路の圧力履歴 3	52
図 B-4	融体温度が低いケースの冷却材流路の温度履歴 1	52
図 B-5	融体温度が低いケースの冷却材流路の温度履歴 2	53
図 B-6	融体温度が低いケースの冷却材流路の液位履歴	53
図 B-7	融体温度が低いケースのバイパス流路の流量履歴	54
図 C-1	融体温度が高いケースの冷却材流路の圧力履歴 1	55
図 C-2	融体温度が高いケースの冷却材流路の圧力履歴 2	55
図 C-3	融体温度が高いケースの冷却材流路の圧力履歴 3	56
図 C-4	融体温度が高いケースの冷却材流路の温度履歴 1	56
図 C-5	融体温度が高いケースの冷却材流路の温度履歴 2	57
図 C-6	融体温度が高いケースの冷却材流路の液位履歴	57
図 C-7	融体温度が高いケースのバイパス流路の流量履歴	58
図 D-1	冷却材温度が低いケースの融体放出速度履歴	59
図 D-2	冷却材温度が低いケースの冷却材流路の圧力履歴 1	59
図 D-3	冷却材温度が低いケースの冷却材流路の圧力履歴 2	60
図 D-4	冷却材温度が低いケースの冷却材流路の圧力履歴 3	60
図 D-5	冷却材温度が低いケースの冷却材流路の温度履歴 1	61
図 D-6	冷却材温度が低いケースの冷却材流路の温度履歴 2	61
図 D-7	冷却材温度が低いケースの冷却材流路の液位履歴	62
図 D-8	冷却材温度が低いケースのバイパス流路の流量履歴	62

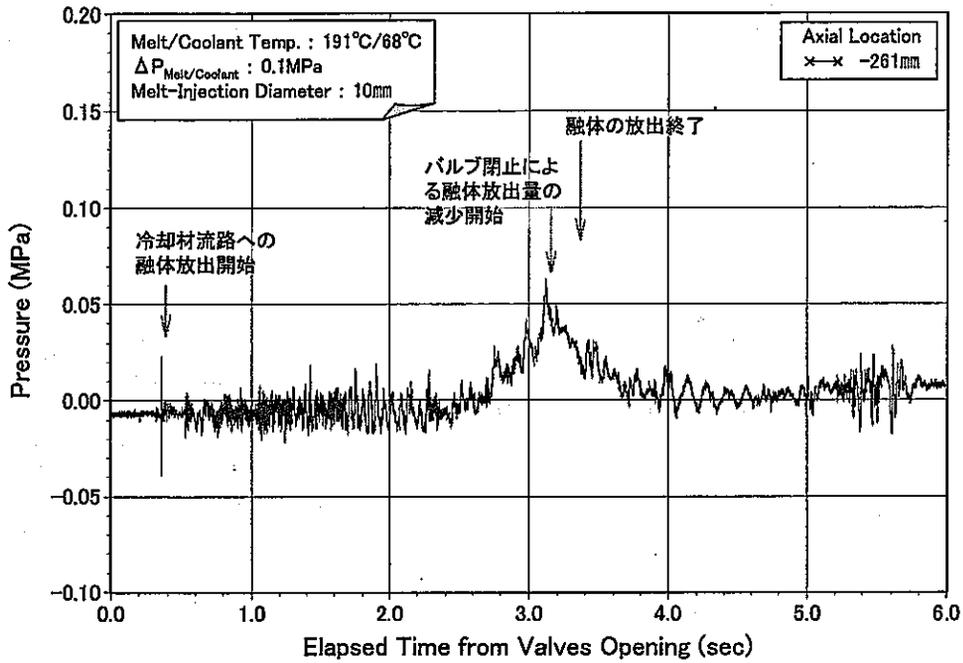
図 E-1	冷却材圧力が低いケースの融体放出速度履歴	63
図 E-2	冷却材圧力が低いケースの冷却材流路の圧力履歴 1	63
図 E-3	冷却材圧力が低いケースの冷却材流路の圧力履歴 2	64
図 E-4	冷却材圧力が低いケースの冷却材流路の圧力履歴 3	64
図 E-5	冷却材圧力が低いケースの冷却材流路の温度履歴 1	65
図 E-6	冷却材圧力が低いケースの冷却材流路の温度履歴 2	65
図 E-7	冷却材圧力が低いケースの冷却材流路の液位履歴	66
図 E-8	冷却材圧力が低いケースのバイパス流路の流量履歴	66



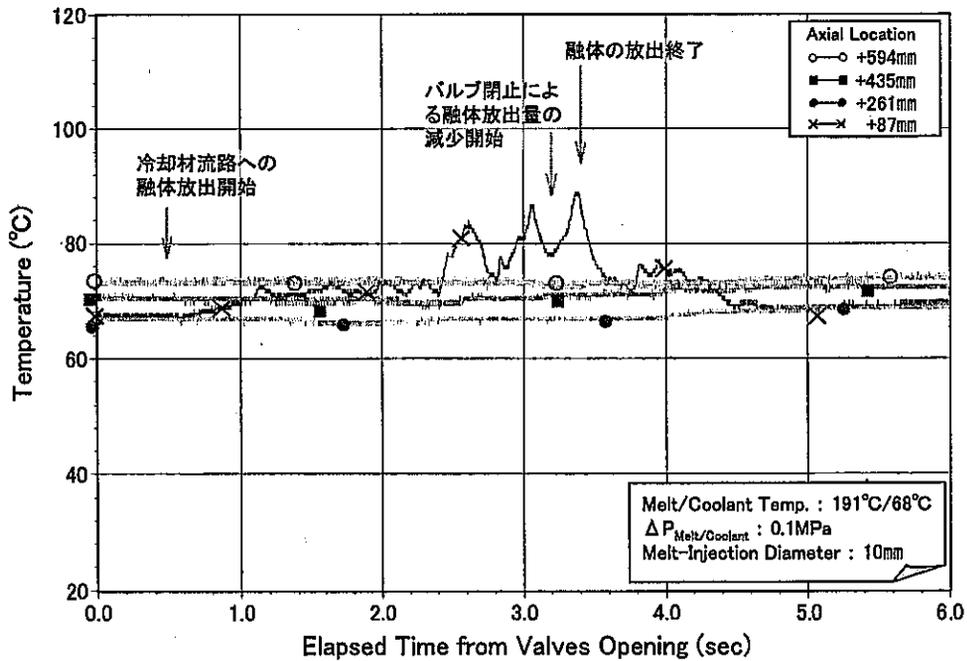
図A-1 予備試験の冷却材流路の圧力履歴1



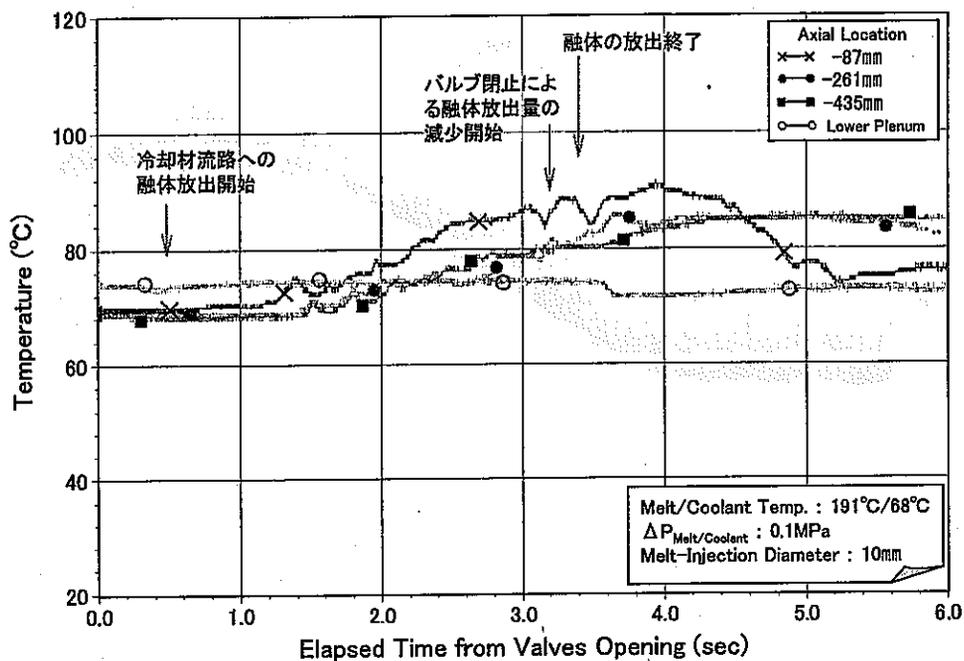
図A-2 予備試験の冷却材流路の圧力履歴2



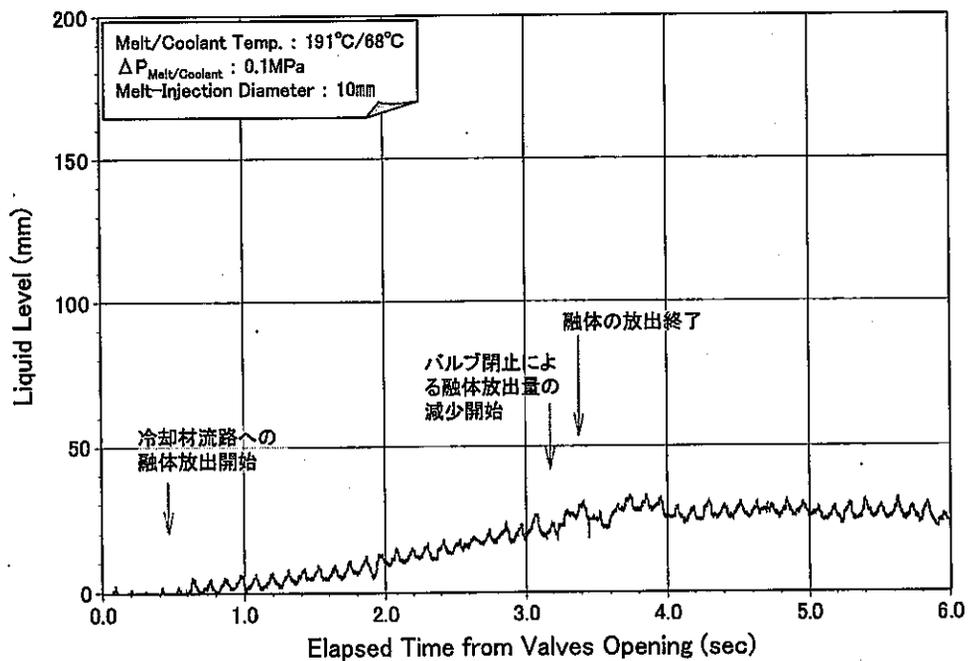
図A-3 予備試験の冷却材流路の圧力履歴3



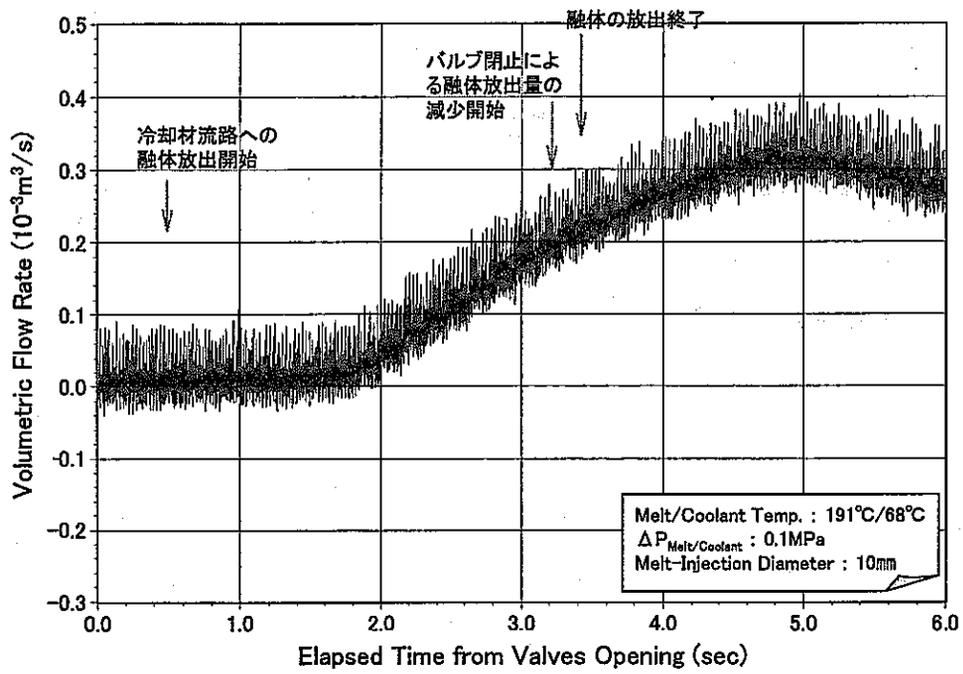
図A-4 予備試験の冷却材流路の温度履歴1



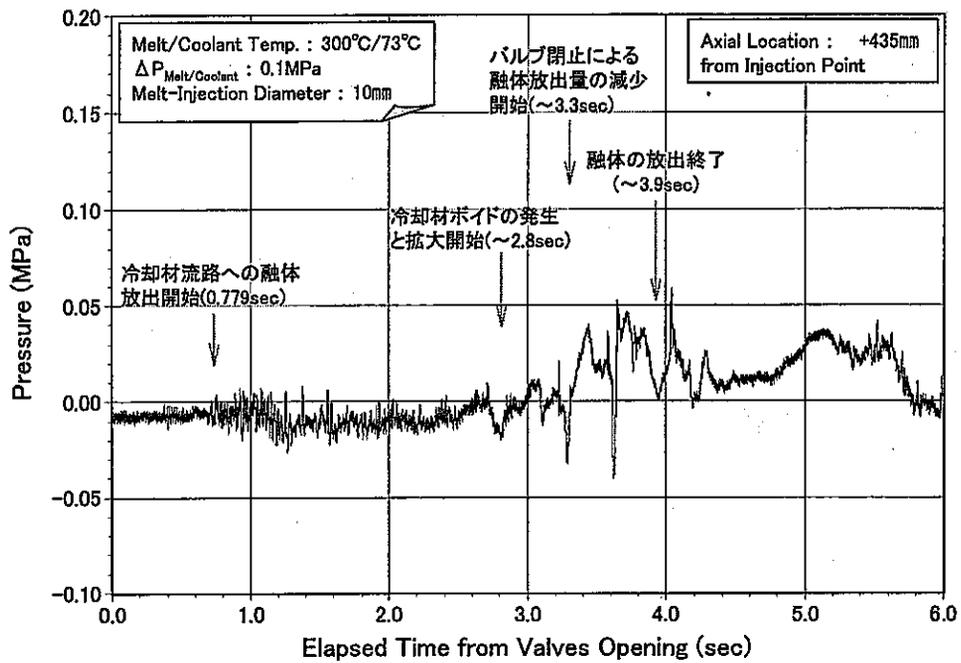
図A-5 予備試験の冷却材流路の温度履歴2



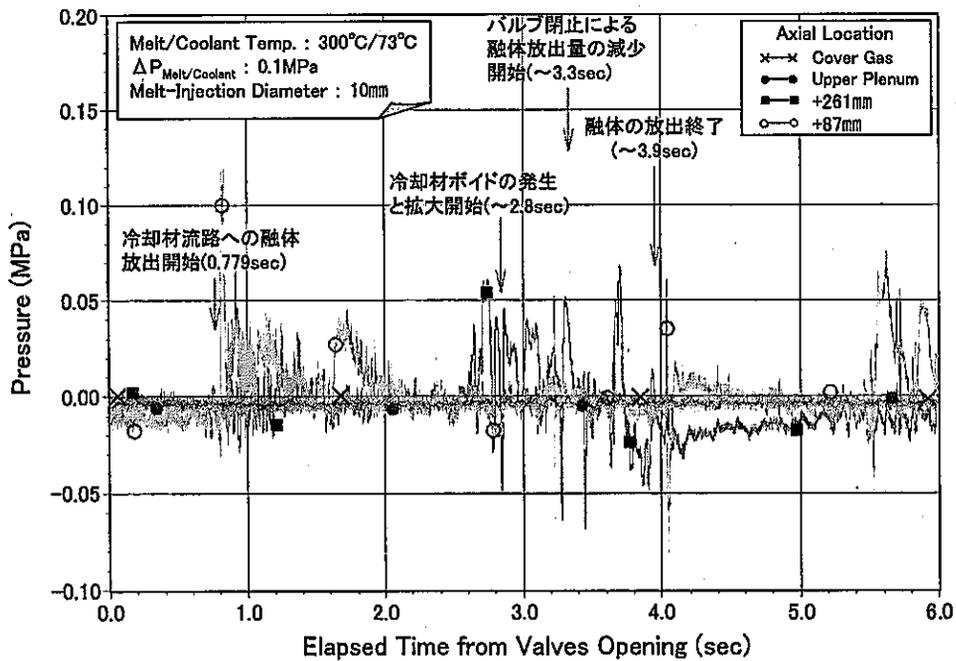
図A-6 予備試験の冷却材流路の液位履歴



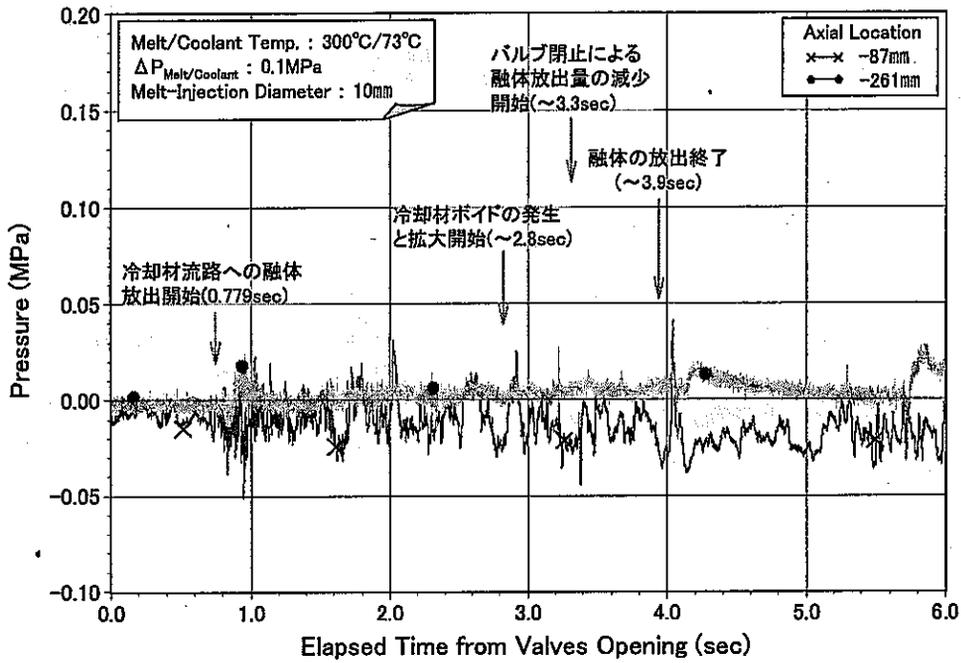
図A-7 予備試験のバイパス流路の流量履歴



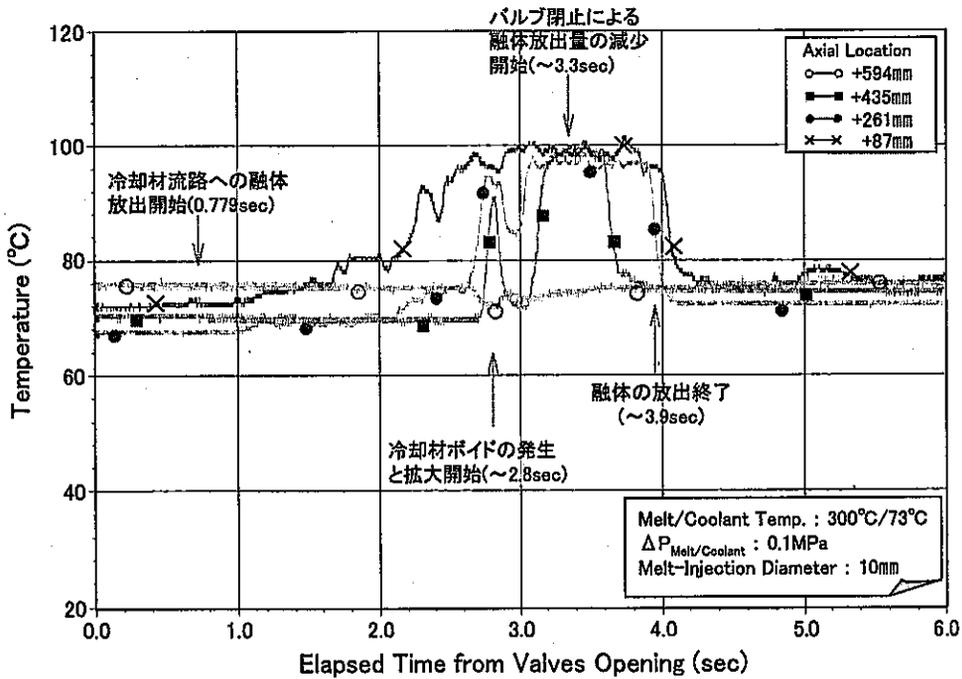
図B-1 融体温度が低いケースの冷却材流路の圧力履歴1



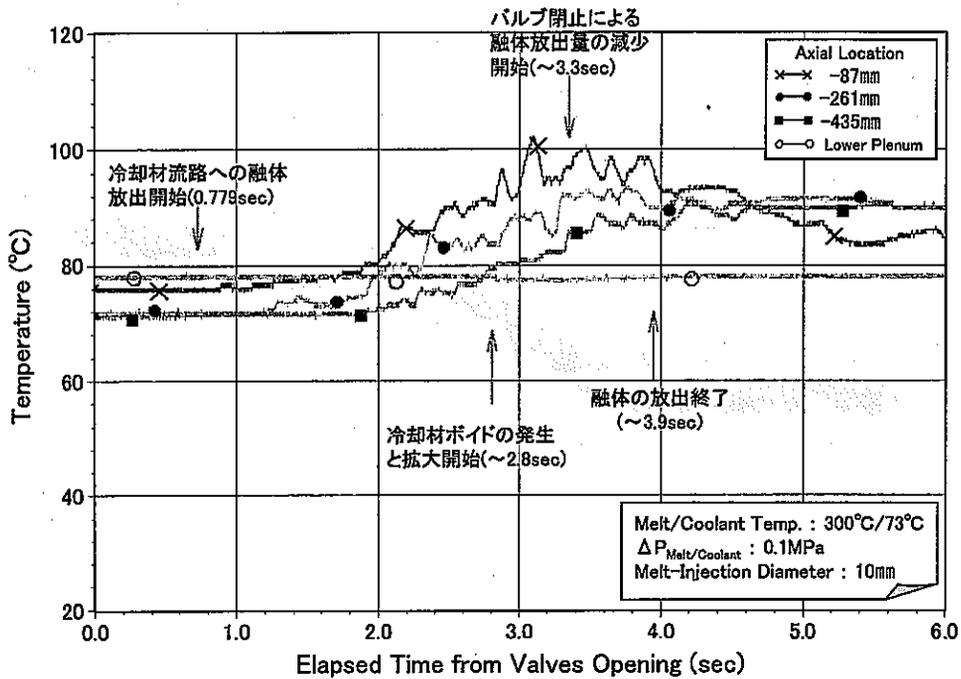
図B-2 融体温度が低いケースの冷却材流路の圧力履歴2



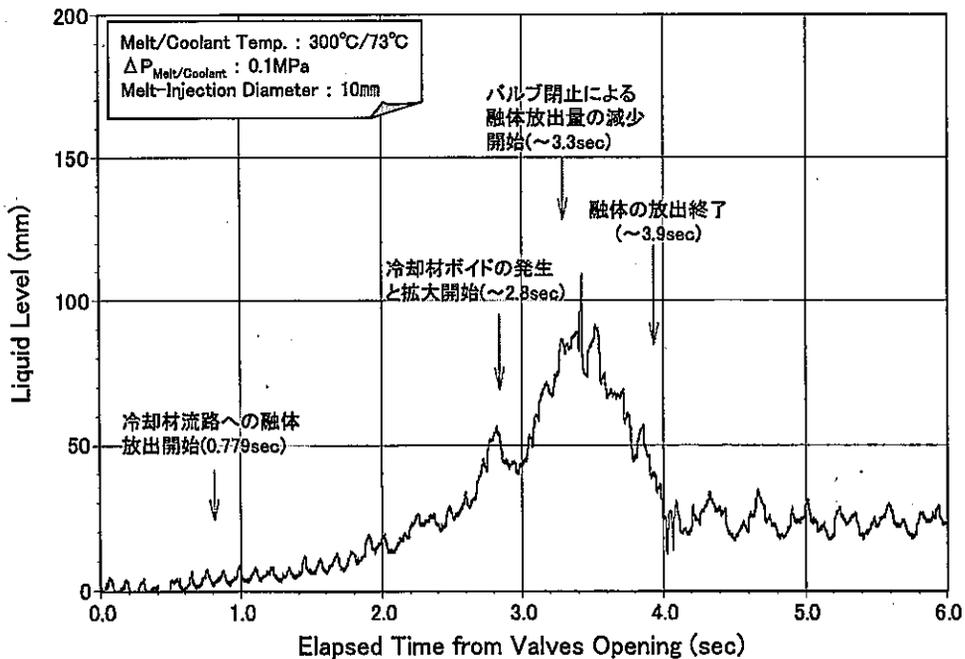
図B-3 融体温度が低いケースの冷却材流路の圧力履歴3



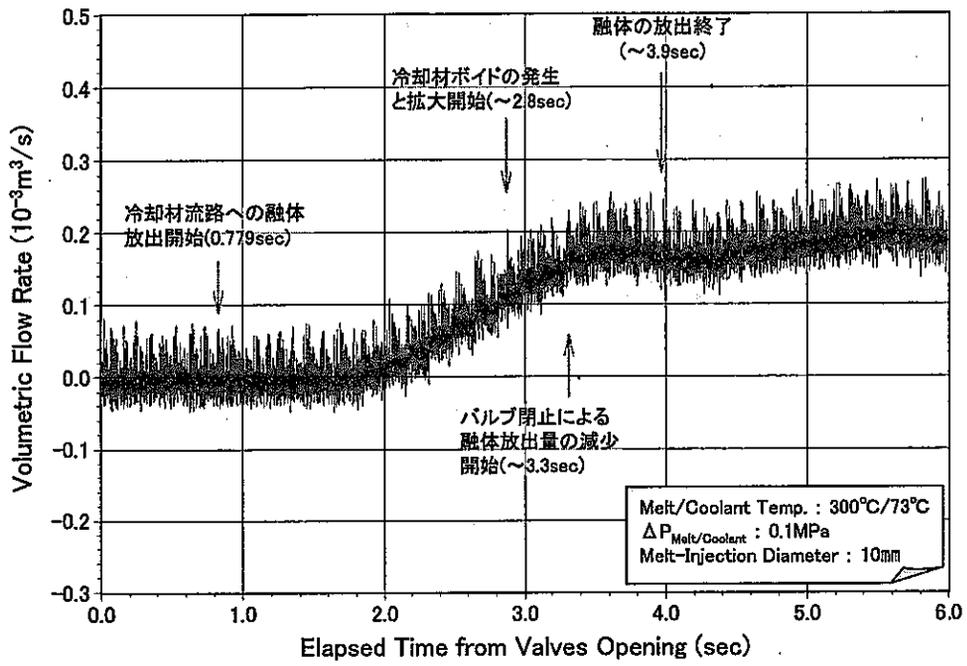
図B-4 融体温度が低いケースの冷却材流路の温度履歴1



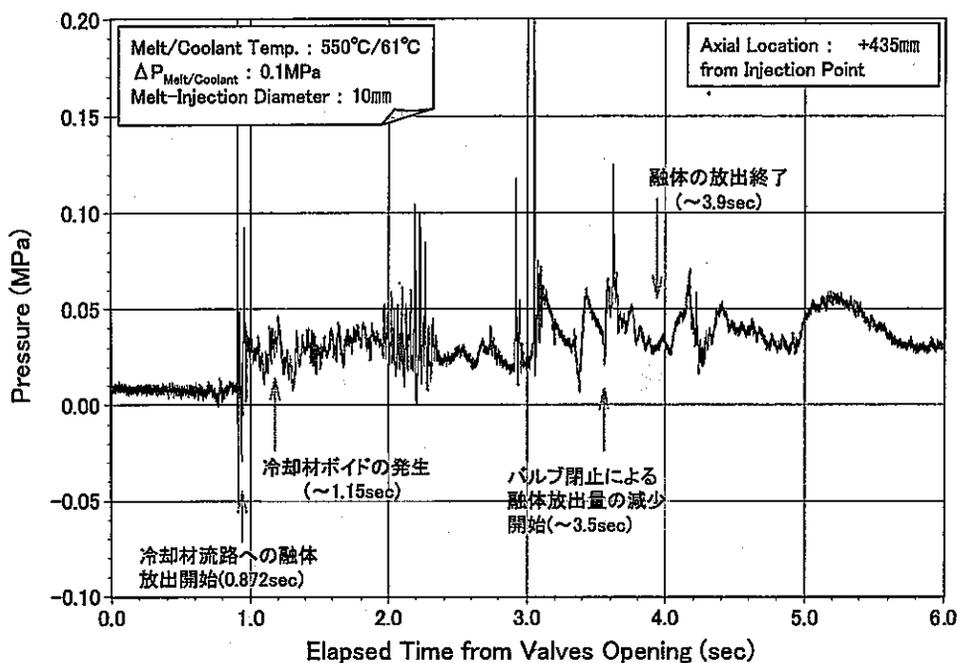
図B-5 融体温度が低いケースの冷却材流路の温度履歴2



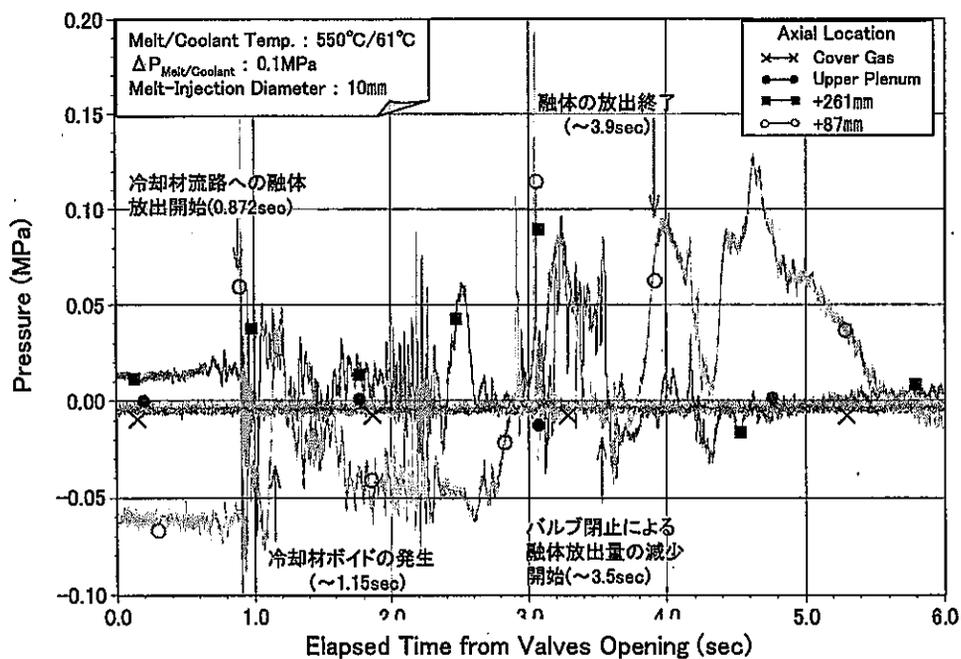
図B-6 融体温度が低いケースの冷却材流路の液位履歴



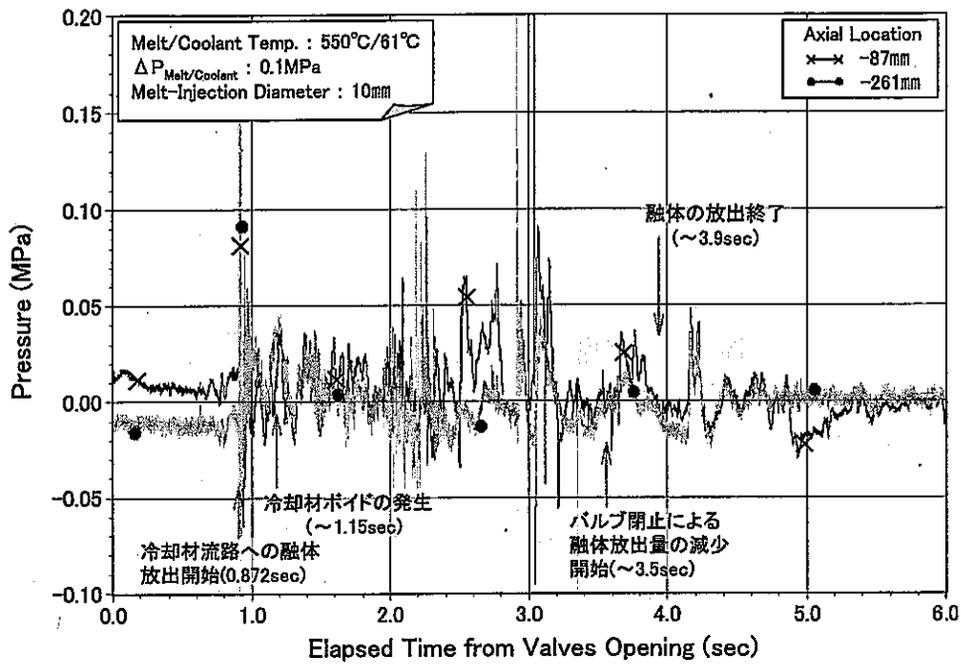
図B-7 融体温度が低いケースのバイパス流路の流量履歴



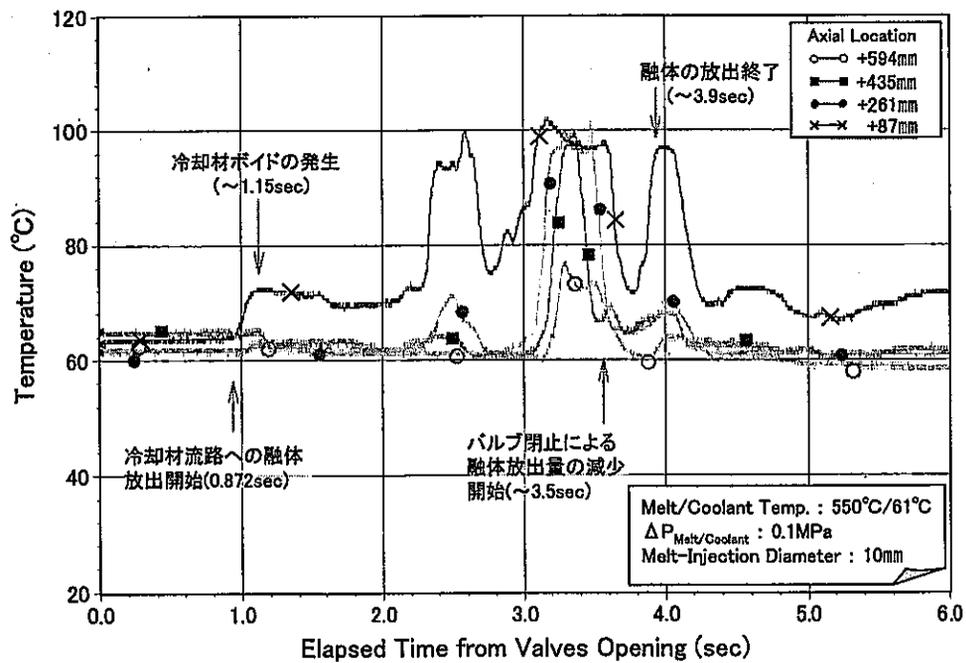
図C-1 融体温度が高いケースの冷却材流路の圧力履歴1



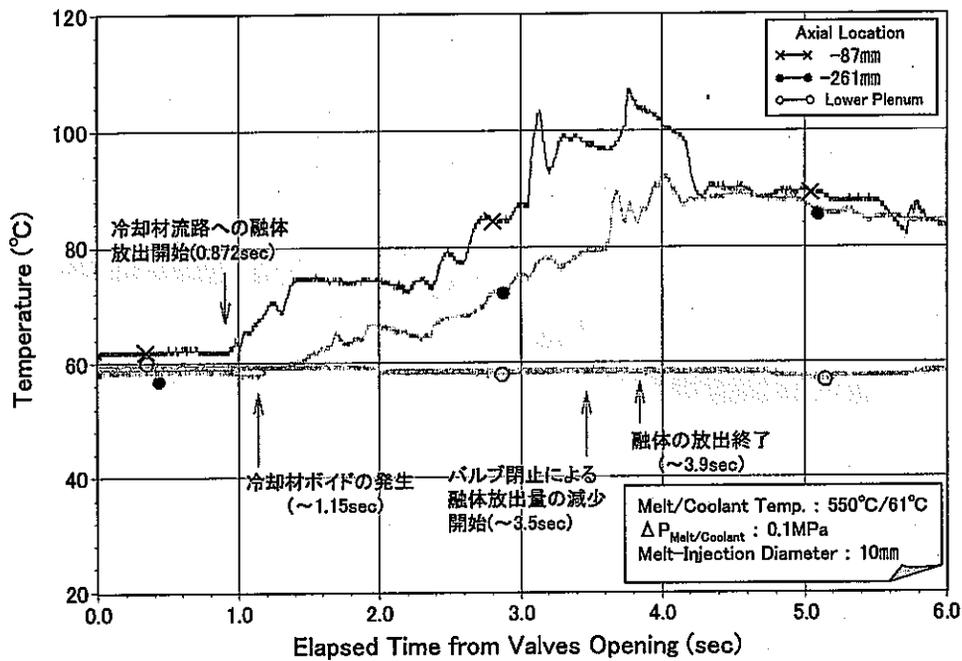
図C-2 融体温度が高いケースの冷却材流路の圧力履歴2



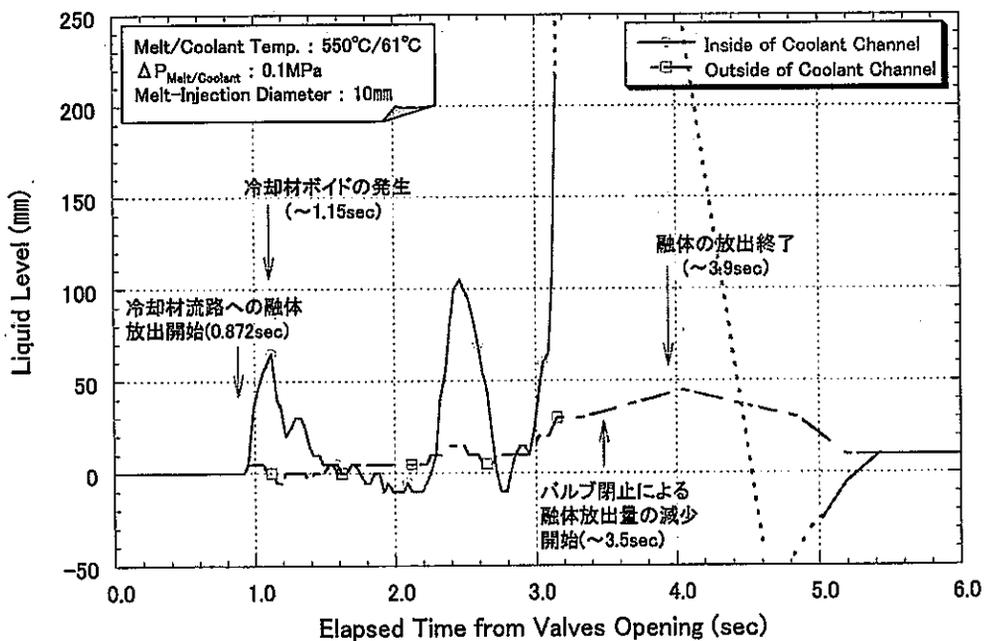
図C-3 融体温度が高いケースの冷却材流路の圧力履歴3



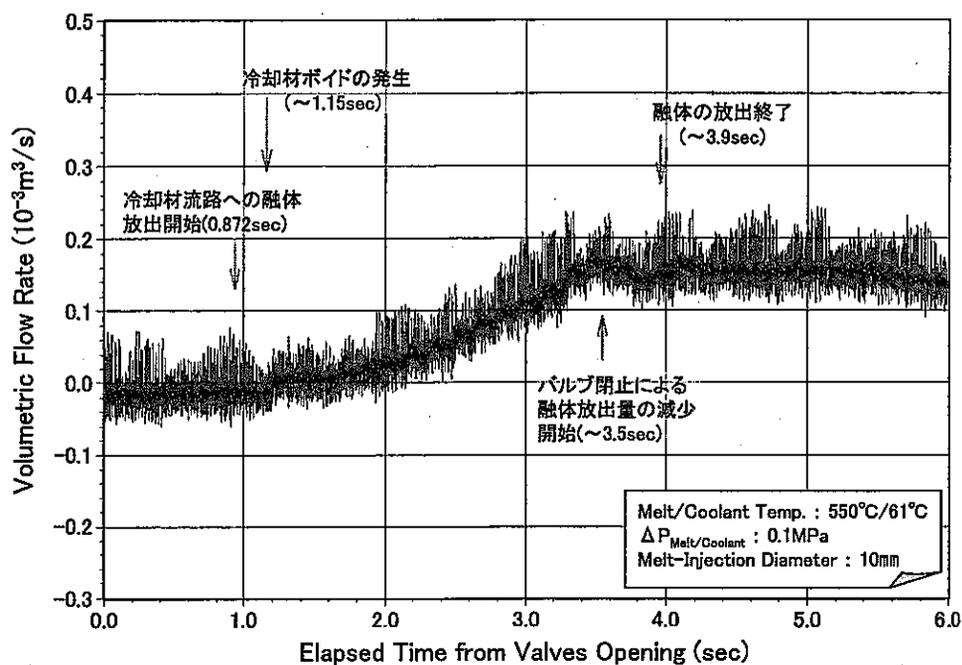
図C-4 融体温度が高いケースの冷却材流路の温度履歴1



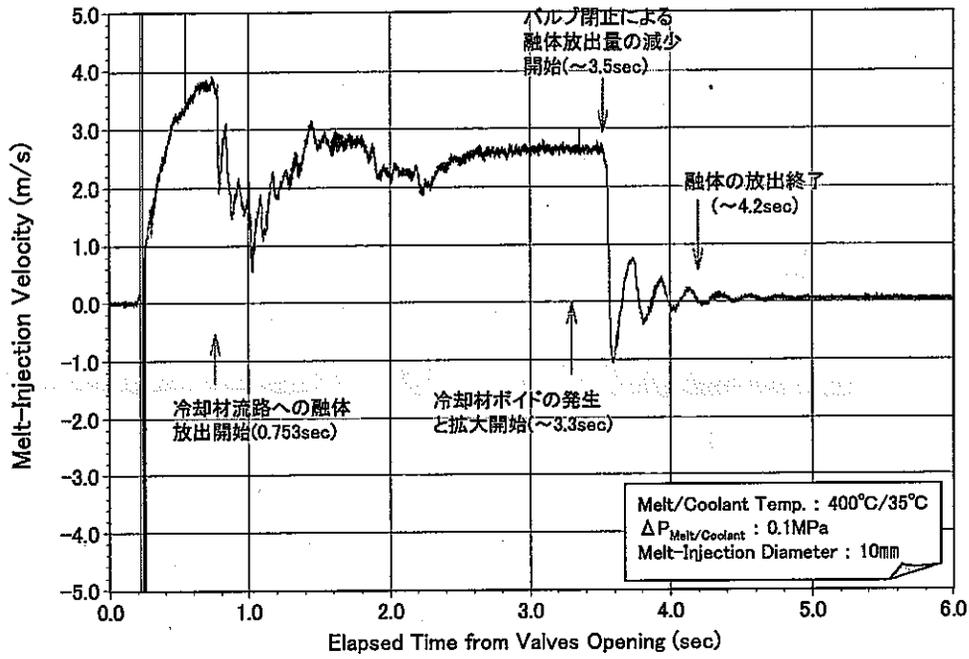
図C-5 融体温度が高いケースの冷却材流路の温度履歴2



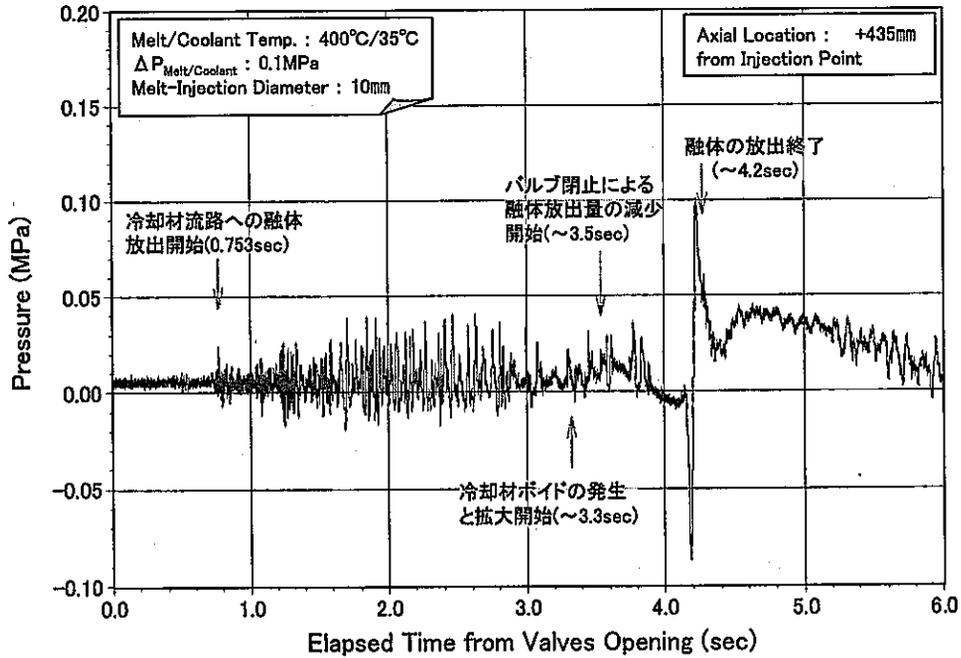
図C-6 融体温度が高いケースの冷却材流路の液位履歴



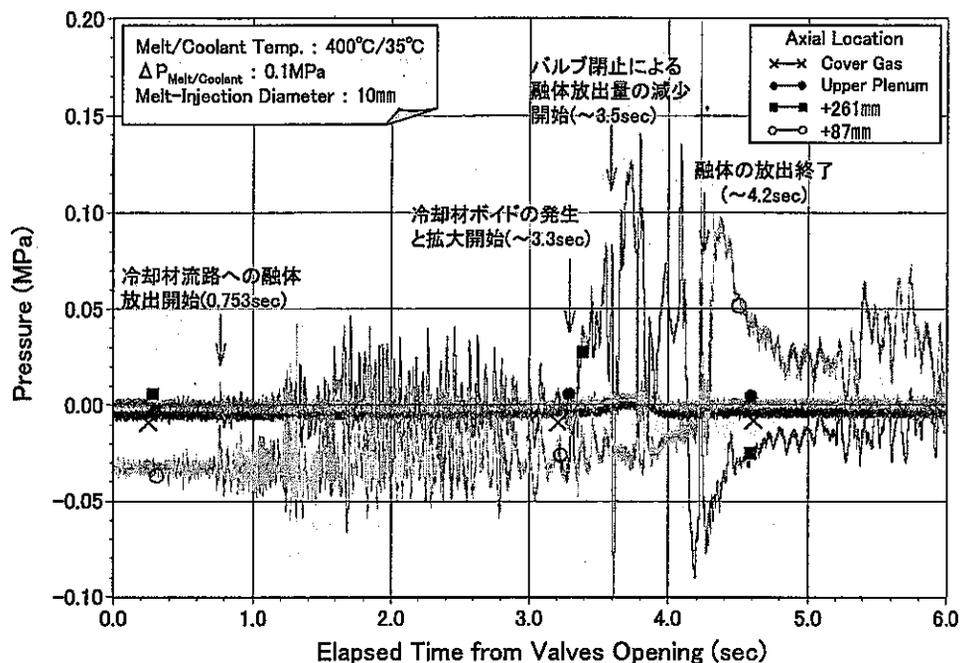
図C-7 融体温度が高いケースのバイパス流路の流量履歴



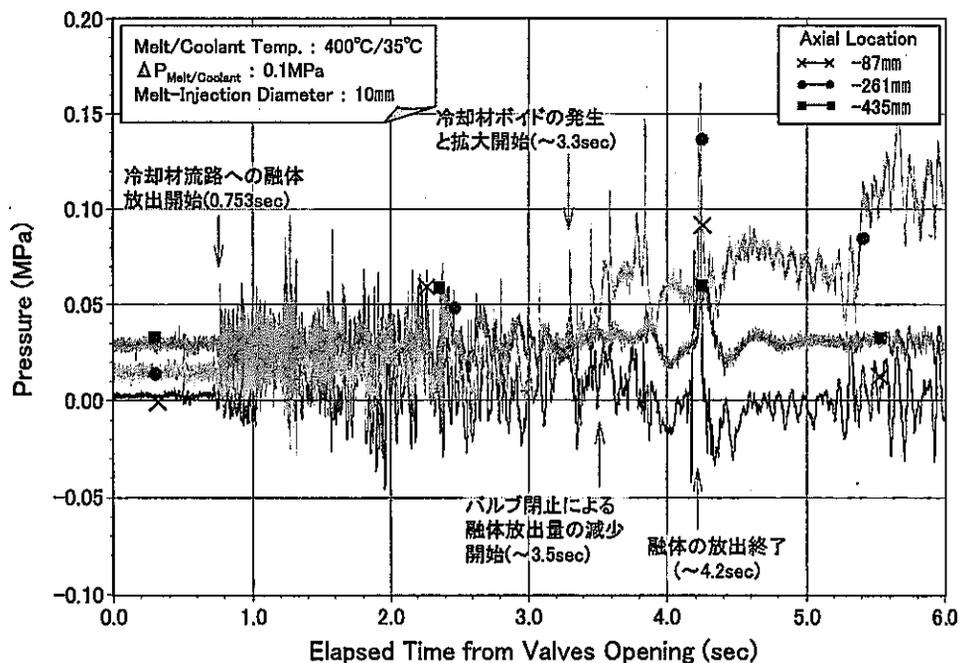
図D-1 冷却材温度が低いケースの融体放出速度の履歴



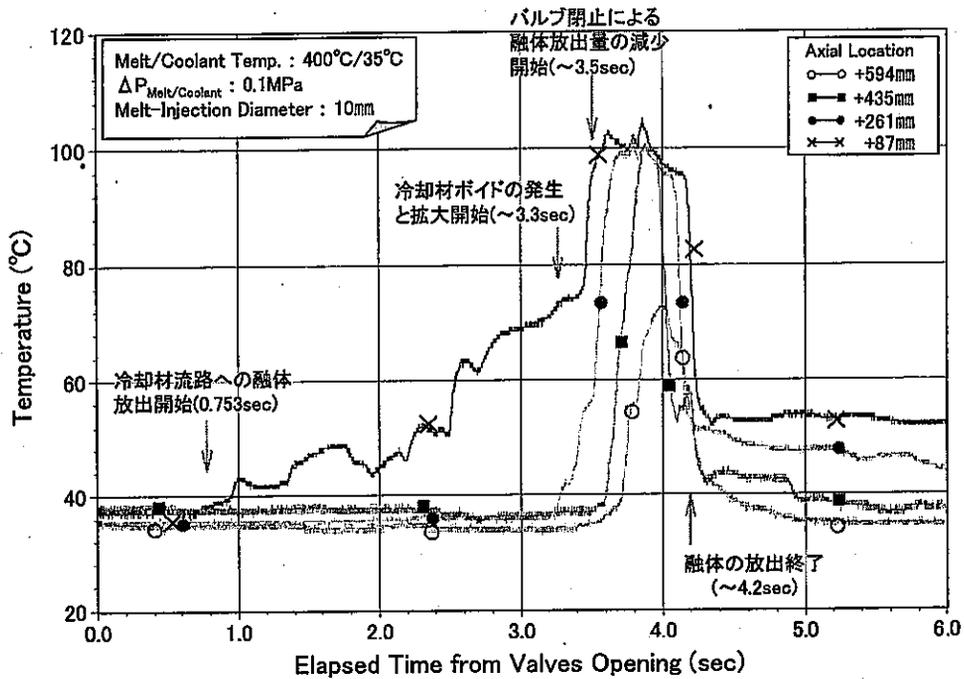
図D-2 冷却材温度が低いケースの冷却材流路の圧力履歴1



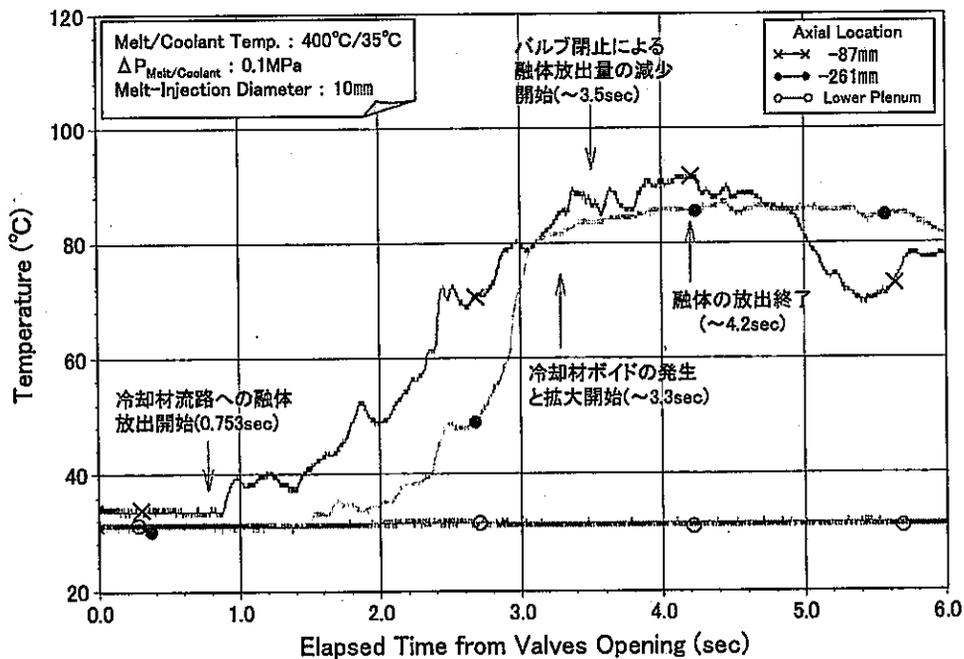
図D-3 冷却材温度が低いケースの冷却材流路の圧力履歴2



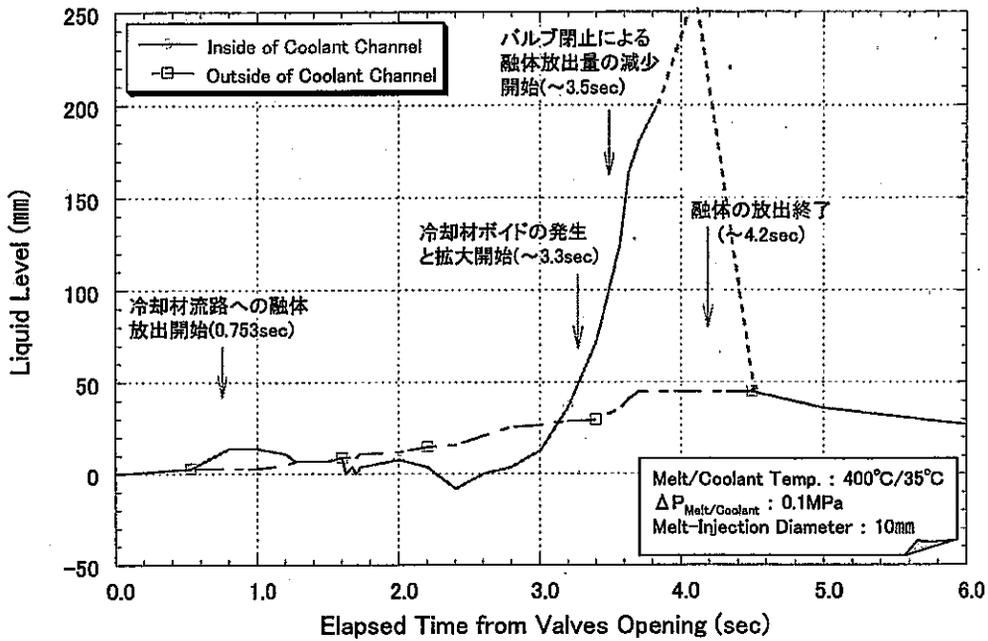
図D-4 冷却材温度が低いケースの冷却材流路の圧力履歴3



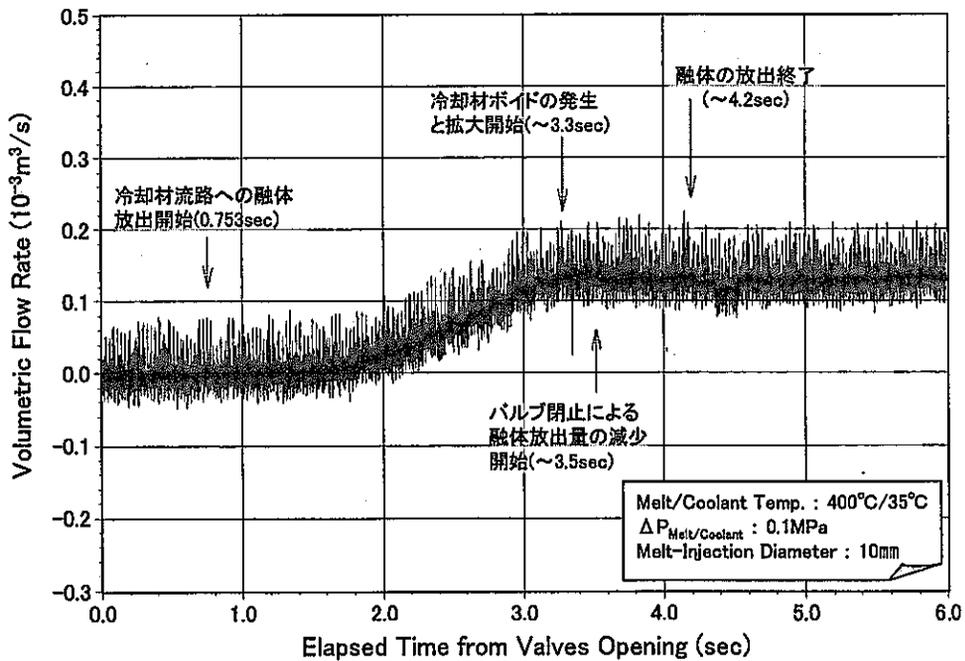
図D-5 冷却材温度が低いケースの冷却材流路の温度履歴1



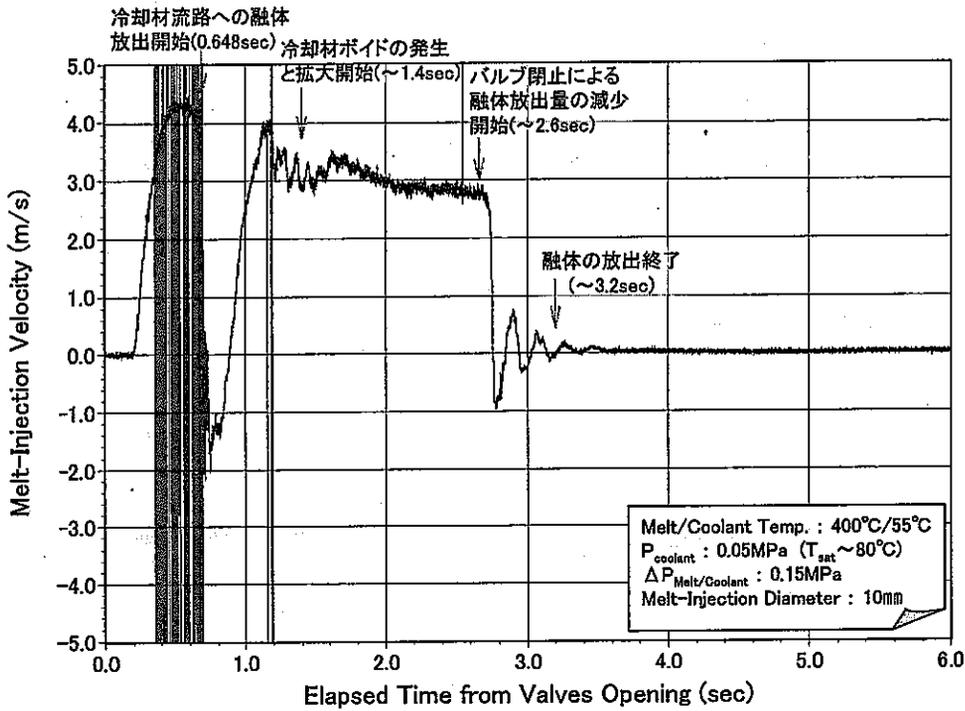
図D-6 冷却材温度が低いケースの冷却材流路の温度履歴2



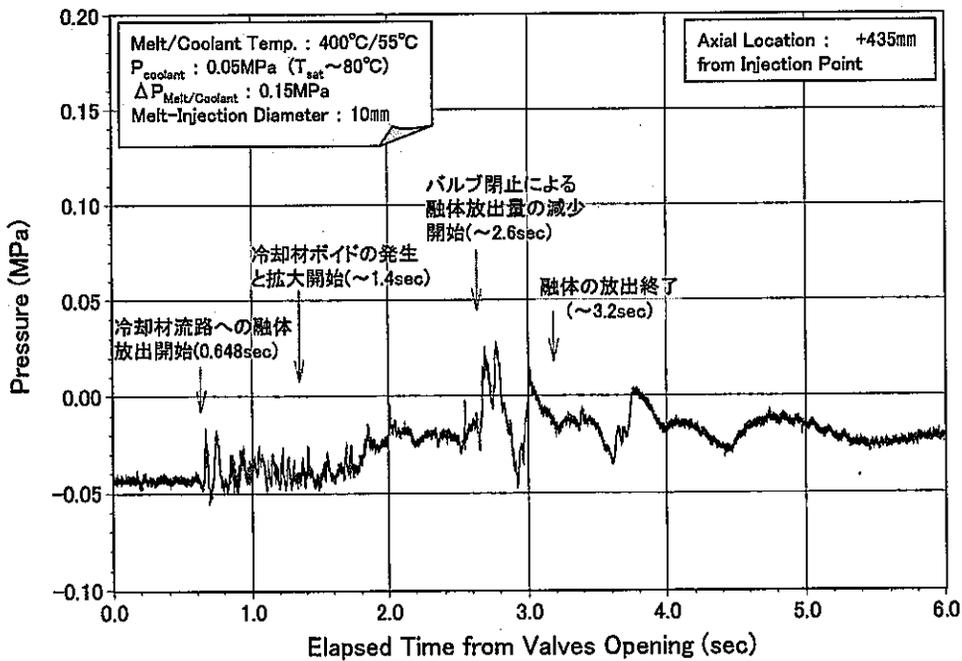
図D-7 冷却材温度が低いケースの冷却材管路の液位履歴



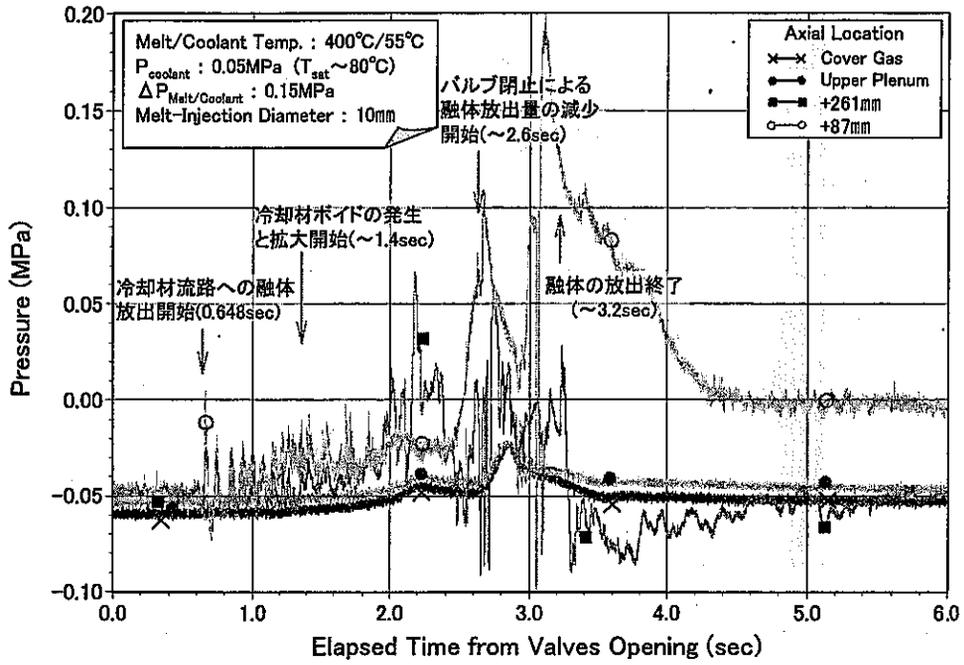
図D-8 冷却材温度が低いケースのバイパス流路の流量履歴



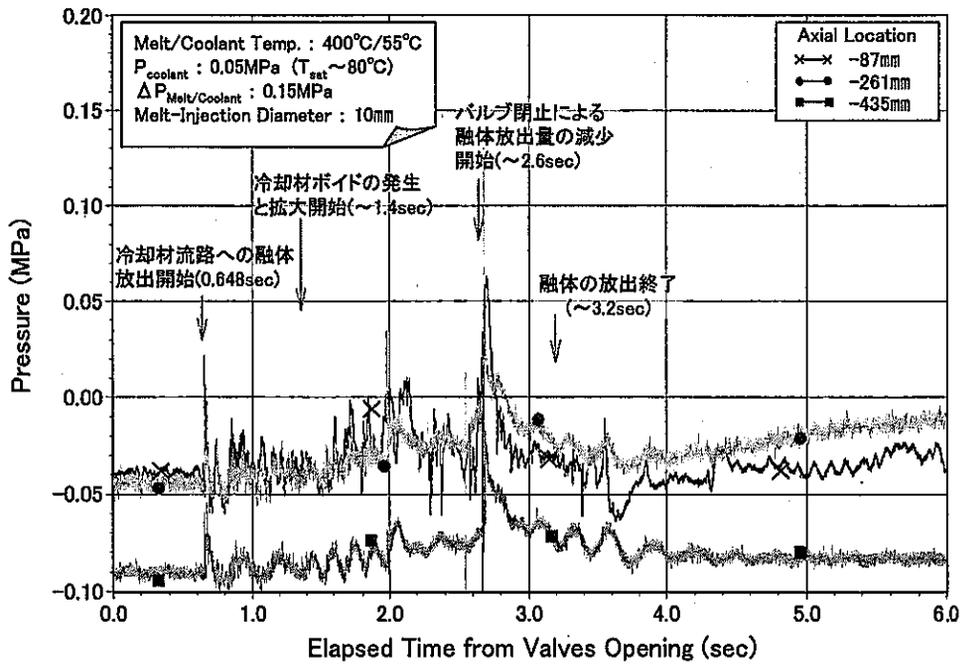
図E-1 冷却材圧力が低いケースの融体放出速度の履歴



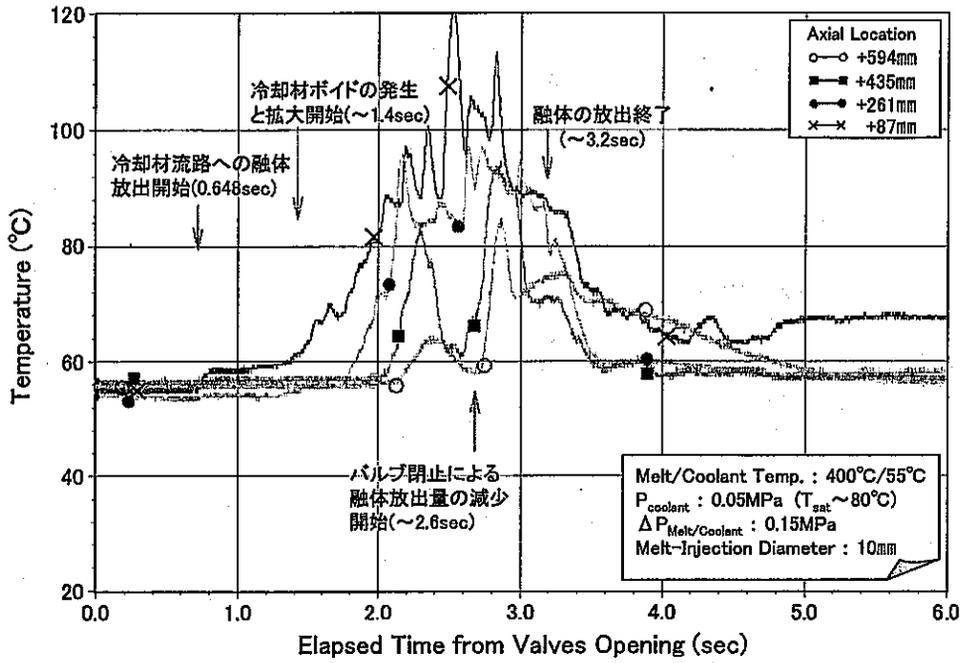
図E-2 冷却材圧力が低いケースの冷却材流路の圧力履歴1



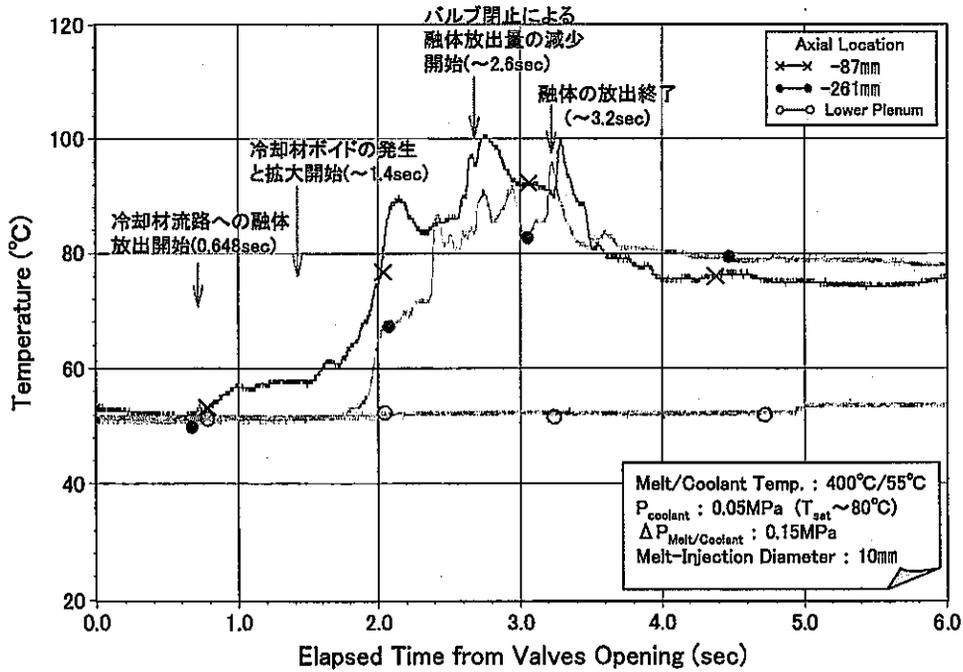
図E-3 冷却材圧力が低いケースの冷却材流路の圧力履歴2



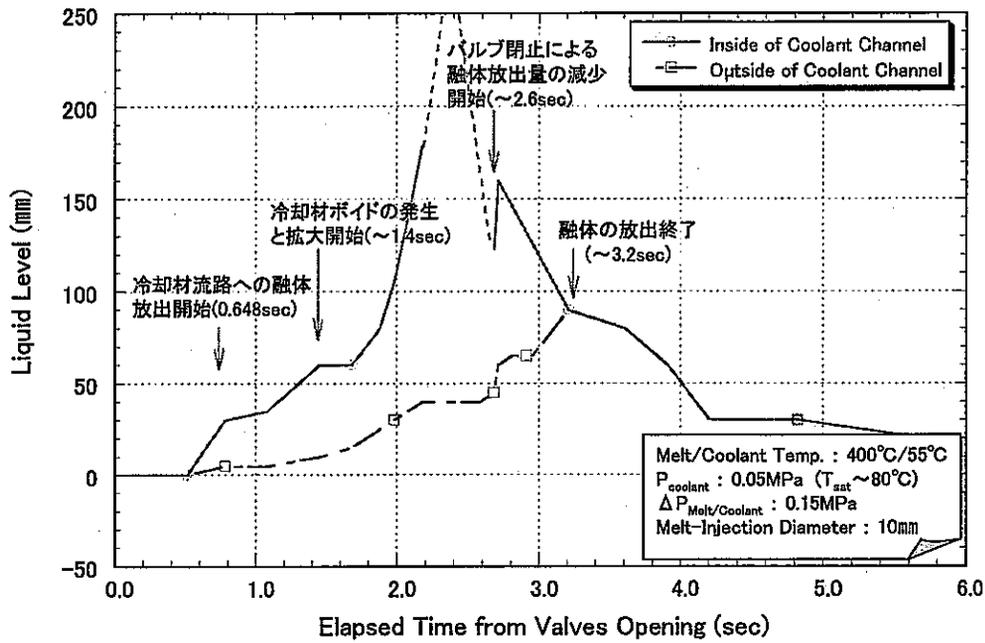
図E-4 冷却材圧力が低いケースの冷却材流路の圧力履歴3



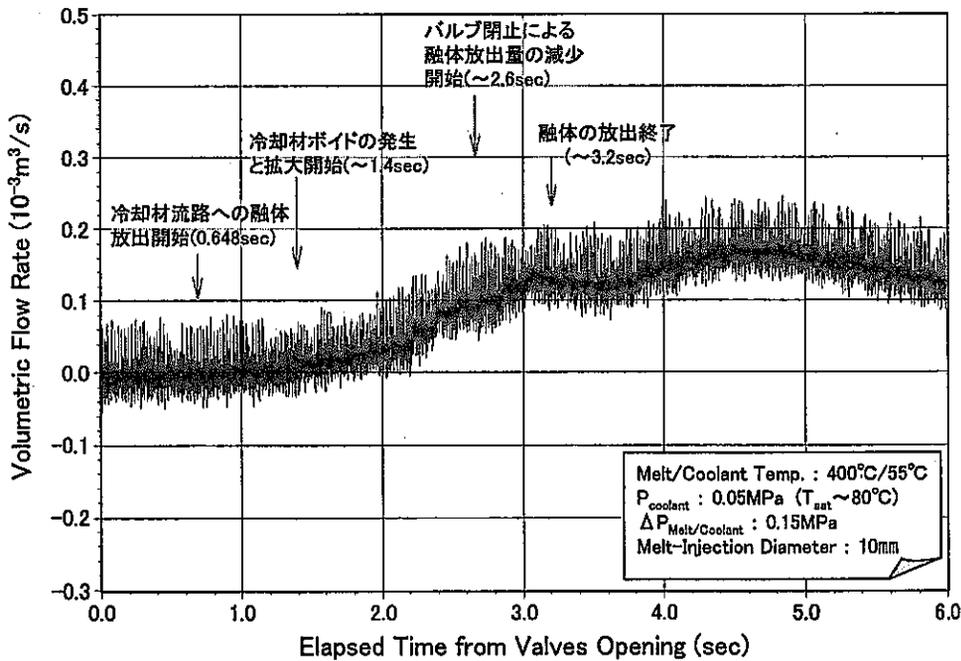
図E-5 冷却材圧力が低いケースの冷却材流路の温度履歴1



図E-6 冷却材圧力が低いケースの冷却材流路の温度履歴2



図E-7 冷却材圧力が低いケースの冷却材流路の液位履歴



図E-8 冷却材圧力が低いケースのバイパス流路の流量履歴