

平成 30 年度原子力規制庁委託成果報告書

原子力施設等防災対策等委託費
(シビアアクシデント時格納容器内溶融炉心
冷却性評価技術高度化) 事業

国立研究開発法人
日本原子力研究開発機構
平成 31 年 3 月

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

本報告書に関する問い合わせは、原子力規制庁までお願いします。

目次

1. はじめに	1-1
2. DEFOR-A 実験の解析	2-1
2.1 粒子群の表面からの熱伝達量の影響	2-1
2.2 アグロメレーションモデルの概要	2-1
2.3 解析対象とする実験	2-5
2.4 解析条件	2-9
2.5 解析結果	2-11
2.6 考察	2-14
2.7 まとめ	2-15
3. PULiMS 実験の解析	3-1
3.1 JASMINE コードの改良	3-1
3.1.1 溶融物先端部の凝固モデル	3-1
3.1.2 数値計算の精度向上	3-2
3.1.3 プログラム可読性の向上	3-3
3.2 対象実験ケースと入力条件	3-3
3.3 解析の結果と考察	3-13
3.3.1 JASMINE による解析結果の例	3-13
3.3.2 最終的な拡がり面積の評価	3-15
3.3.3 過渡変化に関する実験値と解析値の比較	3-16
3.4 気相中実験に適用するための改良	3-40
3.5 まとめ	3-42
4. 実機冷却性評価	4-1
4.1 解析条件の設定	4-1
4.2 不確かさを考慮する入力条件の確率分布	4-8
4.3 入力条件の抽出	4-10
4.4 解析結果	4-18
4.5 初期水位の影響	4-27
4.6 デブリ堆積高さの支配因子	4-33
4.7 デブリの冷却成功確率	4-38
4.8 MELCOR コードを用いた溶融物冷却挙動評価に係る調査	4-42
5. おわりに	5-1
付録 A DEFOR-A 実験の解析結果	A-1
付録 B PULiMS 実験の解析結果	B-1

付録 C	実機解析結果	-----	C-1
付録 D	冷却可能な最大デブリ堆積高さの評価	-----	D-1
付録 E	JASMINE コードの概要	-----	E-1
付録 F	出張報告	-----	F-1

1. はじめに

軽水炉のシビアアクシデントにおいて、原子炉圧力容器の下部ヘッドが溶融炉心との相互作用により破損すると、溶融炉心が格納容器の原子炉キャビティ（PWR）あるいはペDESTAL（BWR）に移行し、これらの構造材であるコンクリートとの相互作用が発生し得る。この溶融炉心／コンクリート相互作用（MCCI：Molten Core/Concrete Interaction）が継続すると、コンクリートの溶融浸食あるいはそれに伴う非凝縮性気体や可燃性気体（二酸化炭素、一酸化炭素及び水素）の発生による過圧等に起因して格納容器の健全性が脅かされる。東京電力福島第一原子力発電所（1F）の事故においては、長時間にわたり炉心の冷却が確保できなかったため、相当量の溶融炉心がペDESTALに移行したと推定され[1.1]、宇宙線ミュオンを用いた測定によっても溶融炉心の移行が裏付けられた [1.2]。また、2018年1月に撮影された2号機格納容器内の映像により燃料集合体の一部をなす部材がペDESTALに落下したことが確認されており、圧力容器に比較的大きな開口が生じたことが示唆された [1.3]。

1F事故を踏まえて原子力規制委員会により新たに策定された規制基準では、申請者に対して、シビアアクシデント（重大事故）に適切に対応することを求めている。MCCIに係わる対策は、溶融炉心が格納容器に移行した後に溶融炉心上に注水する対策と溶融炉心が格納容器に落下する前に格納容器内に先行的に注水する対策に大別され、我が国の事業者は後者を採ることとしている。この対策は、溶融炉心が格納容器内の水プール中を落下する間に、その全てあるいは一部がブレイクアップ（粒子化）し、冷却可能なデブリベッドが格納容器の床面上に形成されることを期待するものである。

しかしながら、現時点では、この対策による溶融炉心の冷却性を評価する科学的・合理的な手法は確立されていない。このような状況を鑑み、本事業においては、図 1.1 に示すようなアプローチに基づいて、格納容器内における溶融炉心の冷却性を評価する手法の構築を目指す。具体的には、以下の項目を進める計画である。

- (a) 機構論的な溶融炉心／冷却材相互作用解析コード JASMINE [1.4]を改良し、溶融炉心の冷却性を支配すると考えられる水プール中における溶融炉心ジェットのブレイクアップ、ブレイクアップで生じた粒子同士の結合による塊状デブリ（アグロメレーションデブリ）の生成及び溶融炉心の床面上における拡がり挙動に係わる予測性能の向上を図る。
- (b) 冷却性の観点で特に重要と考えられるアグロメレーションデブリの重量 M_a 及び床面に拡がって連続層状に堆積する溶融炉心の重量 M_c の合計（または合計体積 V_d ）を JASMINE コードの解析により求める。複雑な溶融炉心の堆積状態を単純かつ保守的な体系に置き換えて、溶融炉心とコンクリートとの境界における最高温度 T_{max} （ま

たは溶融炉心の堆積深さ h_d) を算出する。

- (c) JASMINE コードによる解析には、初期及び境界条件や解析モデルに含まれる不確かさが存在するため、これらの不確かさを考慮して(b)の解析を繰り返し実施する。一連の解析により、溶融炉心とコンクリートとの境界における最高温度 T_{max} (または堆積深さ h_d) の不確かさ分布を得る。この分布とコンクリートの溶融浸食温度 T_{abl} (または冷却可能な最大堆積深さ h_{cool}) を比較することにより、溶融炉心の冷却に成功する確率を評価する。
- (d) 上記の(b)及び(c)を格納容器内に形成される水プールの水深をパラメータとして実施することにより、溶融炉心の冷却性を高い確度で達成するために必要な水プールの水深を評価する。

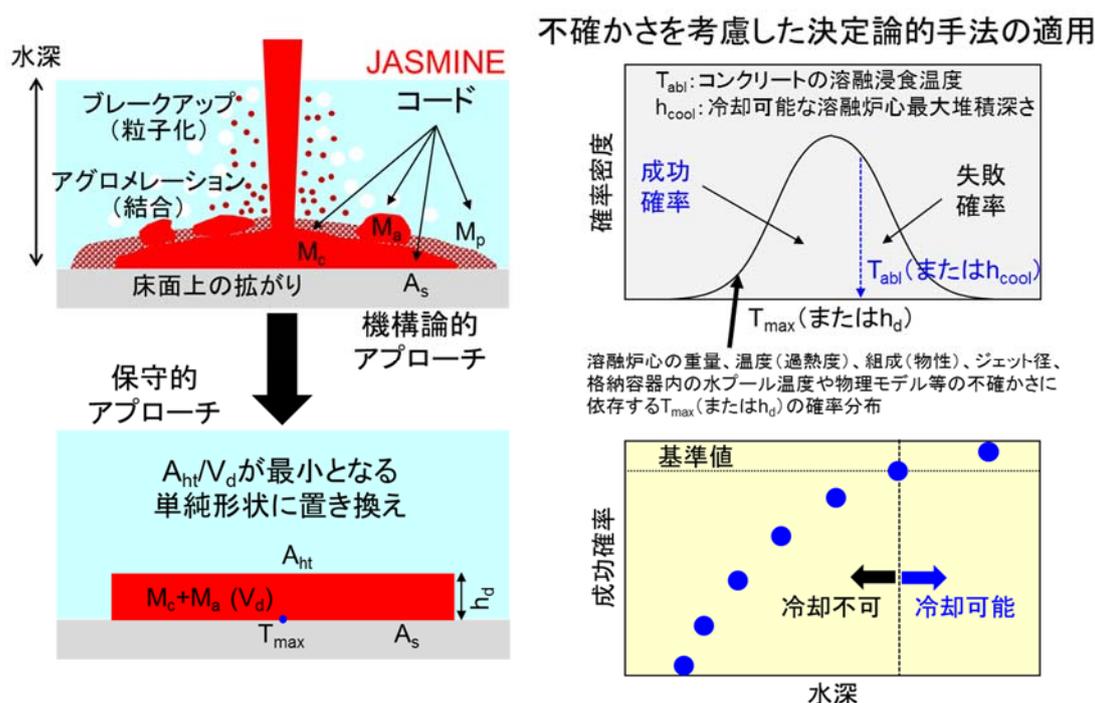


図 1.1 格納容器内溶融炉心冷却性評価のアプローチ及びアウトプット

今年度の事業においては、JASMINE コードの高度化に向けて、平成 29 年度に引き続き、溶融炉心の水プールへの落下で生じたブレイクアップ粒子の格納容器床面上でのアグロメレーション挙動及び格納容器床面上における溶融炉心の拡がり挙動に係わる実験結果の再現性の向上を進めた。また、図 1.1 に示したアプローチによる実機評価の一環として、事故

条件の不確かさを考慮した予備的解析を JASMINE コードにより実施した。今年度の具体的な実施項目は以下のとおりである。

- ① 熔融炉心のブレイクアップで生じた粒子のうち、冷却されて固化する前に他の粒子と結合してアグロメレーションデブリを形成するものの割合（アグロメレーション割合）を評価するため、平成 29 年度までに JASMINE コードに組み込んだアグロメレーションモデルのパラメータを調整し、スウェーデン王立工科大学 (KTH) で実施された高温熔融酸化物ジェットブレイクアップ実験 (DEFOR-A 実験) [1.5] の解析に適用した。これにより、ブレイクアップやブレイクアップ後の粒子挙動に係わるモデルの予測性能を検証した。
- ② 格納容器床面上での熔融炉心拡がり挙動の評価精度を向上させるため、熔融物先端部の表面固化及び固相の引張強度の考慮等といった改良を JASMINE コードに対して加え、KTH で実施された高温熔融酸化物ジェットの水中床面拡がり実験 (PULiMS 実験) [1.6] の解析に適用した。これにより、熔融物の床面拡がりモデルの予測性能を検証した。
- ③ 原子炉圧力容器破損時に格納容器内に流出する熔融炉心の量、温度、熔融炉心ジェット径といった JASMINE 解析への入力パラメータについて確率分布を仮定し、抽出した 59 ケースの事故条件に対して予備的な実機解析を実施することで入力パラメータの不確かさを考慮したデブリ冷却成功確率の評価を行った。さらに、格納容器の初期水位を変えることにより、デブリ冷却成功確率への影響を調べた。これらにより、格納容器内における熔融炉心の冷却可能性評価への JASMINE コードを用いた確率論的評価手法の適用性を検討した。

参考文献

- [1.1] M. Pellegrini, et al., “Benchmark Study of the Accident at the Fukushima Daiichi NPS Best Estimate Case Comparison”, NURETH-16, 13743, Chicago, IL, August 30-September 4, 2015.
- [1.2] 東京電力ホールディングス, 福島第一 1～3 号機ミュオン測定による燃料デブリ分布の把握について, 2017 年 8 月 30 日, http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/handouts/2017/images2/handouts_170830_09-j.pdf
- [1.3] 東京電力ホールディングス, 福島第一原子力発電所 2 号機原子炉格納容器内部調査実施結果 (速報), 2017 年 2 月 20 日, http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/handouts/2018/images1/handouts_180119_08-j.pdf.

- [1.4] K. Moriyama, Y. Maruyama and H. Nakamura, “ Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User’s Guide”, JAEA-Data/Code 2008-014, Japan Atomic Energy Agency, July, 2008.
- [1.5] P. Kudinov and M. Davydov, “ Development and Validation of Conservative-Mechanistic and Best Estimate Approaches to Quantifying Mass Fractions of Agglomerated Debris”, Nucl. Eng. Des., Vol. 262, pp. 452-461, 2013.
- [1.6] A. Konovalenko, A. Karbojian and P. Kudinov, “ Experimental Results on Pouring and Underwater Liquid Melt Spreading and Energetic Melt-coolant Interaction”, NUTHOS-9, N9P0303, Kaohsiung, Taiwan, September, 2012.

2. DEFOR-A 実験の解析

2.1. 粒子群の表面からの熱伝達量の影響

原子炉圧力容器の破損により、格納容器下部（キャビティまたはペデスタル）に熔融物がジェット状に落下する可能性がある。格納容器下部に先行注水されていた場合には、熔融物はジェットブレイクアップにより粒子化する。粒子状の熔融物が固化することにより形成された粒子状デブリは、比表面積（重量当たりの表面積）が大きいため容易に冷却される。一方、粒子状の熔融物が固化する前に他の粒子同士と結合することにより形成された塊状のデブリ（アグロメレーションデブリ）は、粒子状デブリと比較して比表面積が小さいために冷却され難く、連続層状デブリとともに MCCI を引き起こし得る。このことから、熔融炉心冷却性評価では、アグロメレーションデブリの生成割合を評価することが重要である。

平成 28 年度は、JASMINE コードに対してアグロメレーションモデルを導入した。本モデルは、アグロメレーションデブリの生成割合を相関式等で与えるのではなく、熔融ジェットより生成した多数の粒子を代表する「粒子群」同士の重なり状態に基づき判定する機構論的なモデルであり、粒子群の位置及び大きさの情報に基づく粒子群同士の重なり状態が判定基準を上回る場合にアグロメレーションが発生するという考え方に基づく。平成 29 年度は、粒子群同士の重なり状態を判定する方法は変更せず、判定基準を粒子群の平均エンタルピの関数とすることにより、熔融物の過熱度が高いほどアグロメレーションし易いという定性的な予測を反映したモデルに改良した。本モデルでは、アグロメレーションによる粒子群の比表面積の減少を考慮し、粒子群の表面熱伝達量を調整するための係数 k_{qht} (< 1) が導入されている。平成 30 年度は、平成 29 年度に改良したアグロメレーションモデルを用いて、粒子群の表面からの熱伝達量がアグロメレーションデブリの生成割合に与える影響を検討した。このことにより、DEFOR-A 実験の再現度の検証を行うとともに、アグロメレーションモデルの調整係数の適切な設定値を決定する。

2.2. アグロメレーションモデルの概要

JASMINE コードでは、同一の物理量（直径、温度等）を持つ多数の粒子を代表して粒子群として取扱う。ここで、粒子群は質点ではなく有限の体積を持ち、粒子群が占める空間領域に粒子が均等に存在すると仮定する。このとき、粒子の数密度が変化することは、粒子群が占める空間領域を拡大または縮小することで表現される。アグロメレーションの判定は、以下に示す (1) から (4) の手順で実施する。

(1) アグロメレーションの判定対象とする粒子群

着目する粒子群が床面に到達（落下）した時点で、落下点近傍に先行して落下した粒子群とのアグロメレーションを判定する。粒子群が熔融物プールの上面に落下した場合は、熔融物プールに取り込まれるかを判定した後に、熔融物プールへの取り込みを免れた粒子を対象に床面と同様にアグロメレーションを判定する。

判定対象とする粒子群は、①熔融物プールが無い床に着地した粒子群、②固化した熔融物プールの上面に着地した粒子群、③熔融しているが上面に厚いクラストが生成した熔融物

プールの上に着地した粒子群とする。平成 28 年度のモデルでは、上記の①～③に示す粒子群のうち融点以上の粒子群のみを判定対象としていた。平成 29 年度のモデルでは、固化した粒子群が着地した場合でも、先行して床に落下した融点以上の粒子群とアグロメレーションする可能性があることから、融点以上という条件を除外した。

(2) アグロメレーションの相手となる粒子群の探索

判定対象である落下した粒子群の床への投影面積（粒子群が含まれる空間領域を真上から見たときの面積）と重なりを持つ他の粒子群を探索する。複数の粒子群が該当する場合は、(3) 及び (4) を実施する。

(3) 粒子群の重なり状態の定量化

落下した粒子群を grp1、grp1 の床への投影面積と重なりを持つ先行して床に落下した粒子群を grp2 とする。図 2.2.1 に示すように、粒子群 grp1 及び grp2 にそれぞれに含まれる粒子の断面積の合計を以下に示す通りに定義する。

$$S_{par1} = (\text{grp1 に含まれる粒子 1 個の断面積}) \times (\text{grp1 に含まれる粒子の個数})$$

$$S_{par2} = (\text{grp2 に含まれる粒子 1 個の断面積}) \times (\text{grp2 に含まれる粒子の個数})$$

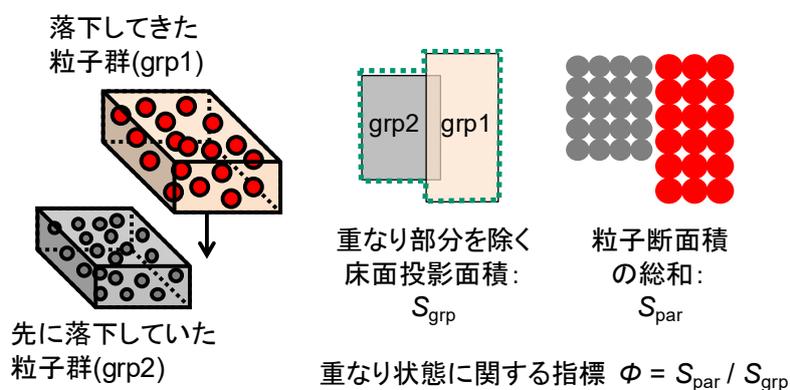


図 2.2.1 粒子群の重なり状態の定義

粒子群 grp1 及び grp2 のそれぞれに含まれる粒子の断面積の合計の和を S_{par} とする。

$$S_{par} = S_{par1} + S_{par2}$$

重なり部分を除いた 2 つの粒子群の床への投影面積の合計を S_{grp} とする。

$$S_{grp} = (\text{grp1 空間領域の投影面積}) + (\text{grp2 空間領域の投影面積}) - (\text{重なり部分の面積})$$

これらを用いて、粒子群の重なり状態を表す指標を $\Phi = S_{par} / S_{grp}$ と定義する。

(4) アグロメレーションの判定基準

アグロメレーションの判定基準 Φ_{lim} を以下に示す通りに定義する。

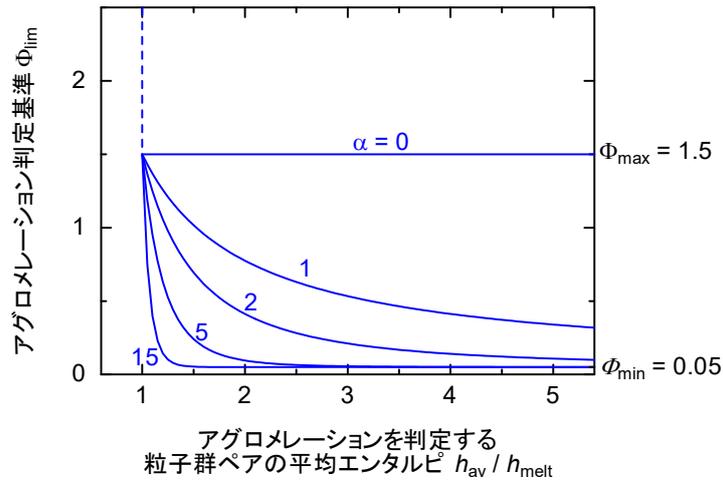
$$\begin{aligned}\Phi_{lim} &= \infty && \text{for } h_{av}/h_{melt} \leq 1 \\ \Phi_{lim} &= \Phi_{min} + (\Phi_{max} - \Phi_{min}) / (h_{av}/h_{melt})^\alpha && \text{for } h_{av}/h_{melt} > 1\end{aligned}$$

ここで、 h_{av} は粒子群 grp1 及び grp2 の平均エンタルピー、 h_{melt} は溶融物の溶融エンタルピーを示す。 Φ_{min} 、 Φ_{max} 及び α は調整係数である。このとき、粒子群 grp2 が既にその他の粒子群とアグロメレーションしている場合でも、その他の粒子群のエンタルピーは平均エンタルピー算出に対して考慮しないものとする。

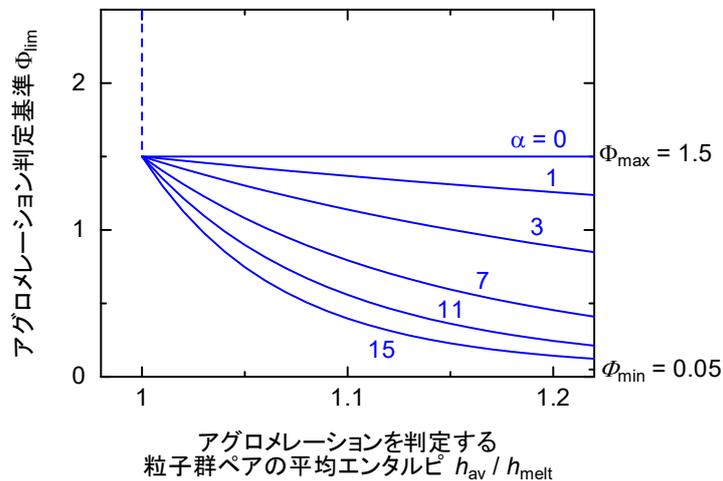
(3) で評価した指標を判定基準と比較した結果、以下に示す関係を満足した場合にアグロメレーションが生じると判定する。

$$\Phi > \Phi_{lim}$$

図 2.2.2 に $\Phi_{min} = 0.05$ 、 $\Phi_{max} = 1.5$ としたときのアグロメレーションの判定基準の値を示す。図より、溶融エンタルピーに対する平均エンタルピーの割合 (h_{av}/h_{melt}) が 1 を下回る場合にはアグロメレーションが発生せず、 h_{av}/h_{melt} が 1 を超える程度が大きくなるほど判定基準が小さくなることにより、アグロメレーションし易くなることが分かる。ここで、判定基準を固定値とした平成 28 年度モデルは、 $\alpha = 0$ とした場合に対応する。



(1) 広範囲の h_{av}/h_{melt} に対する判定基準の傾向



(2) DEFOR-A 実験で有効な範囲の h_{av}/h_{melt} に対する判定基準の傾向

図 2.2.2 アグロメレーションの判定基準の例

アグロメレーションの判定基準が取り得る範囲は調整係数 Φ_{min} 及び Φ_{max} で与えられる。このとき、 h_{av}/h_{melt} に対する依存性を与える α がより重要な調整係数となる。本事業で解析対象とした DEFOR-A 実験では、熔融物の過熱度が最も高いケースでも h_{av}/h_{melt} が 1.2 程度となることから、アグロメレーション判定の際に参照される範囲は、図 2.2.2 (2) に示す範囲となる。

アグロメレーションにより粒子群の比表面積が減少し、熱伝達量が低下すると考えられる。しかしながら、その効果を定量的に評価することが困難であるためことから、本モデルでは熱伝達量を調整するための係数 k_{qht} (< 1) を導入した。

2.3. 解析対象とする実験

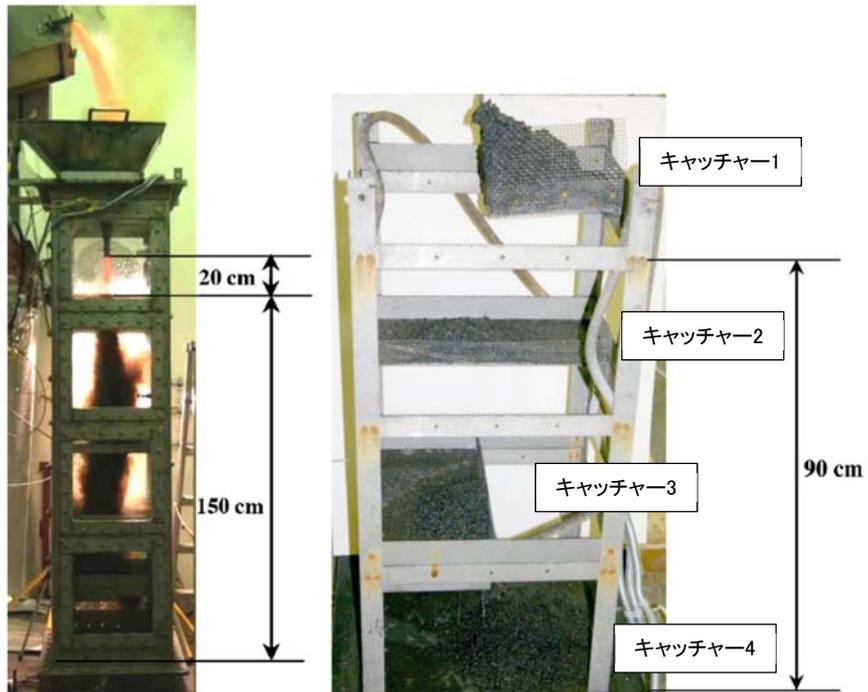
スウェーデン王立工科大学（KTH）では、高温の溶融物を水プールにジェット状に落下させることにより、溶融ジェットが水中で粒子化することで生成した粒子同士の結合（アグロメレーション）を解明することを目的とした DEFOR（DEbris bed FORmation）実験を実施している。本事業では、アグロメレーションを対象とした DEFOR-A 実験 [2.1] [2.2] を解析対象とした。

DEFOR-A 実験で用いられている実験装置の概略を図 2.3.1 に示す。実験装置は、模擬物質を溶融させるための高周波誘導加熱炉、溶融物ジェットを形成するための漏斗及び溶融物のジェットを落下させる水プールから構成される。装置上部に設置された高周波誘導加熱炉で模擬物質を加熱し溶融させた後に、加熱炉を傾けることで溶融物を漏斗に落下させる。漏斗の下部に設置されたノズルを通して溶融物がジェット状に水中に落下する。水プールの断面は 0.45 m × 0.5 m の矩形、高さは 2 m となっている。実験では、透明なプール壁を通して、水中を落下する溶融物を観察できる。

水プールの内部には、水中で生成した粒子を捕獲するために 0.3 m 間隔で 4 つの異なる水深にキャッチャーが備えられている。図 2.3.2 は水プールを上面から見たときのキャッチャーの配置を示す。水中で生成した溶融物の粒子を各キャッチャーが 4 分の 1 ずつ受け止めるように設計されている。このために、1 回の実験で 4 通りの水深での実験データを取得できる。このとき、水中に侵入した溶融ジェットをキャッチャーに到達するまでにすべて粒子化させるために、キャッチャー1 の水深がジェットブレイクアップ長さ（溶融物ジェットが完全に粒子化する深さ）を上回るよう設計されている。ここで、ジェットブレイクアップ長さは以下に示す Saito の式 [2.3] で推定される。

$$\frac{L_{brk}}{D_{jet}} = 2.1 \sqrt{\frac{\rho U_{jet}^2}{\rho_w g D_{jet}}}$$

ここで、 L_{brk} : ブレイクアップ長さ、 D_{jet} : 溶融ジェットの入水直径、 ρ : 溶融物密度、 ρ_w : 水密度、 U_{jet} : ジェット入水速度、 g : 重力である。



(1) 水プール (2) 水プール内に設置されるキャッチャー

図 2.3.1 DEFOR-A 実験装置 [2.1]

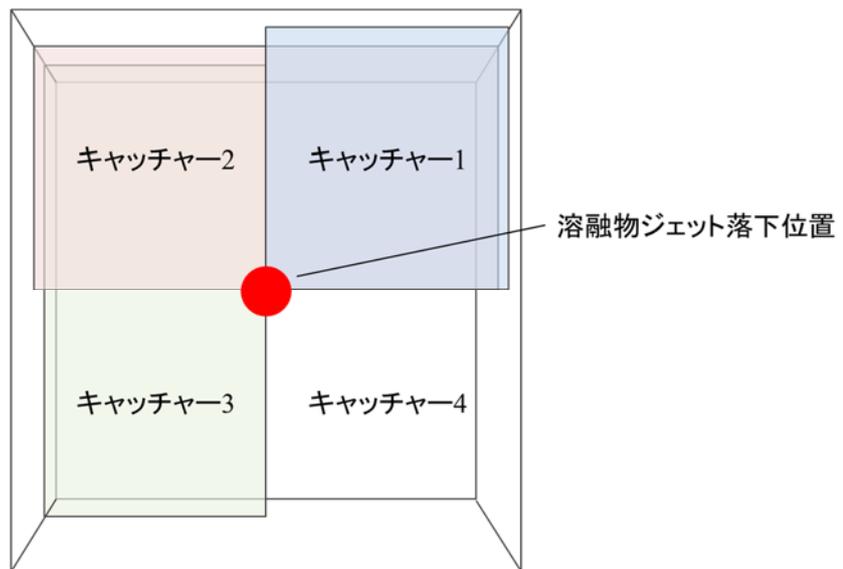


図 2.3.2 DEFOR-A 実験でのキャッチャーの配置

溶融物として酸化ビスマスと酸化タングステンの共晶点混合物 ($\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-WO}_3$) を用いた DEFOR-A1~9 実験及び A23~26 実験を解析対象とした。主要な実験条件は、溶融物の温度 (過熱度)、溶融ジェット直径、水温 (サブクール度) である。表 2.3.1 及び表 2.3.2 に DEFOR-A1~9 実験及び A23~26 実験の条件をそれぞれ示す。なお、DEFOR-A3 実験では、途中で溶融物の放出が止まったと報告されているため解析対象から除外した [2.1]。

表 2.3.1 DEFOR-A1~9 実験条件 [2.2]

実験番号	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
溶融物温度 [K]	1253	1246	1483	1221	1245	1279	1349	1255	1343
溶融物過熱度 [K]	110	103	-	78	102	136	206	112	200
溶融物ジェット直径 [mm]	10	20	20	20	10	12	25	25	20
ジェット放出時間 [s]	38	11	-	11	38	20	10	10	11
ジェット放出高さ [m]	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.62	1.62	1.7
ジェット自由落下距離 [m]	0.18	0.18	0.18	0.2	0.18	0.18	0.2	0.2	0.18
水プール深さ [m]	1.52	1.52	1.52	1.5	1.52	1.52	1.42	1.42	1.52
水初期温度 [K]	346	366	345	346	364	346	356	355	355
水サブクール度 [K]	27	7	28	27	9	27	17	18	18
回収デブリ重量 [kg]	20.8	21.0	4.3	21.3	21.0	21.7	21.1	21.2	19.9
重量平均直径 [mm]	4	3.7	-	3	4.4	3.1	4.8	3.9	4.3

表 2.3.2 DEFOR-A23~26 実験条件

実験番号	A23	A24	A25	A26
溶融物温度 [K]	1280	1248	1216	1299
溶融物過熱度 [K]	137	105	73	156
溶融物ジェット直径 [mm]	25	34	34	34
ジェット放出時間 [s]	5.8	5.3	5.7	5.5
ジェット放出高さ [m]	1.72	1.77	1.77	1.77
ジェット自由落下距離 [m]	0.205	0.17	0.17	0.17
水プール深さ [m]	1.515	1.6	1.6	1.6
水初期温度 [K]	332	346	363	346
水サブクール度 [K]	41	27	10	27
回収デブリ重量 [kg]	23.6	24.9	22.7	24.1
重量平均直径 [mm]	-	-	-	-

DEFOR-A1~9 実験及び A23~26 実験で得られたアグロメレーション質量割合を表 2.2.3 及び表 2.2.4 に示す。表に示す値は、キャッチャーに堆積したすべてデブリのうち、アグロメレーションデブリの占める質量割合を示す。

表 2.3.3 DEFOR-A1~9 実験アグロメレーション質量割合 [2.1]

実験番号	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
キャッチャー1 [%]	81.9	43.4	44	23.9	26.5	80.9	79.5	78.8	70
キャッチャー2 [%]	14.5	7.5	14.2	6.1	8.3	10.5	91.1	15.8	89.8
キャッチャー3 [%]	3.7	0	0	0	0	0	67	8.2	82.3
キャッチャー4 [%]	0	0	0	0	0	0	21	0	5.8

表 2.3.4 DEFOR-A23~26 実験アグロメレーション質量割合

実験番号	A23	A24	A25	A26
キャッチャー1 [%]	48.1	65.4	19.4	96.4
キャッチャー2 [%]	19.0	12.6	22.6	46.6
キャッチャー3 [%]	6.4	1.1	5.8	11.5
キャッチャー4 [%]	0	0	0	0

2.4. 解析条件

解析条件は、平成 28 年度及び平成 29 年度の解析条件と同一とした。改良したアグロメレーションモデルに関する調整係数の値はアグロメレーションした粒子群の表面からの熱伝達量を調整する係数 k_{qht} を除き、平成 29 年度と同一とした。

(1) 解析体系

DEFOR-A 実験では、異なる高さに設置した 4 つのキャッチャーを実験装置に設置することで、1 回の実験で 4 通りの水深についてデータを取得する。JASMINE コードによる解析では 4 通りの水深を個別の解析で実施する。DEFOR-A 実験の水プールの水平断面は $0.5 \text{ m} \times 0.45 \text{ m}$ の矩形であるが、JASMINE コードによる解析では水プールの形状を、実験装置と水平断面積が等しい円筒形とした。解析では、実験と異なり水プール上方及び外側の気相部分の体積が有限であるものの、水蒸気発生等により解析体系の圧力が有意に上昇することを避けるため、気相部分に十分に大きな解析体系を設定した。図 2.4.1 に DEFOR-A2 の解析体系を例として示す。

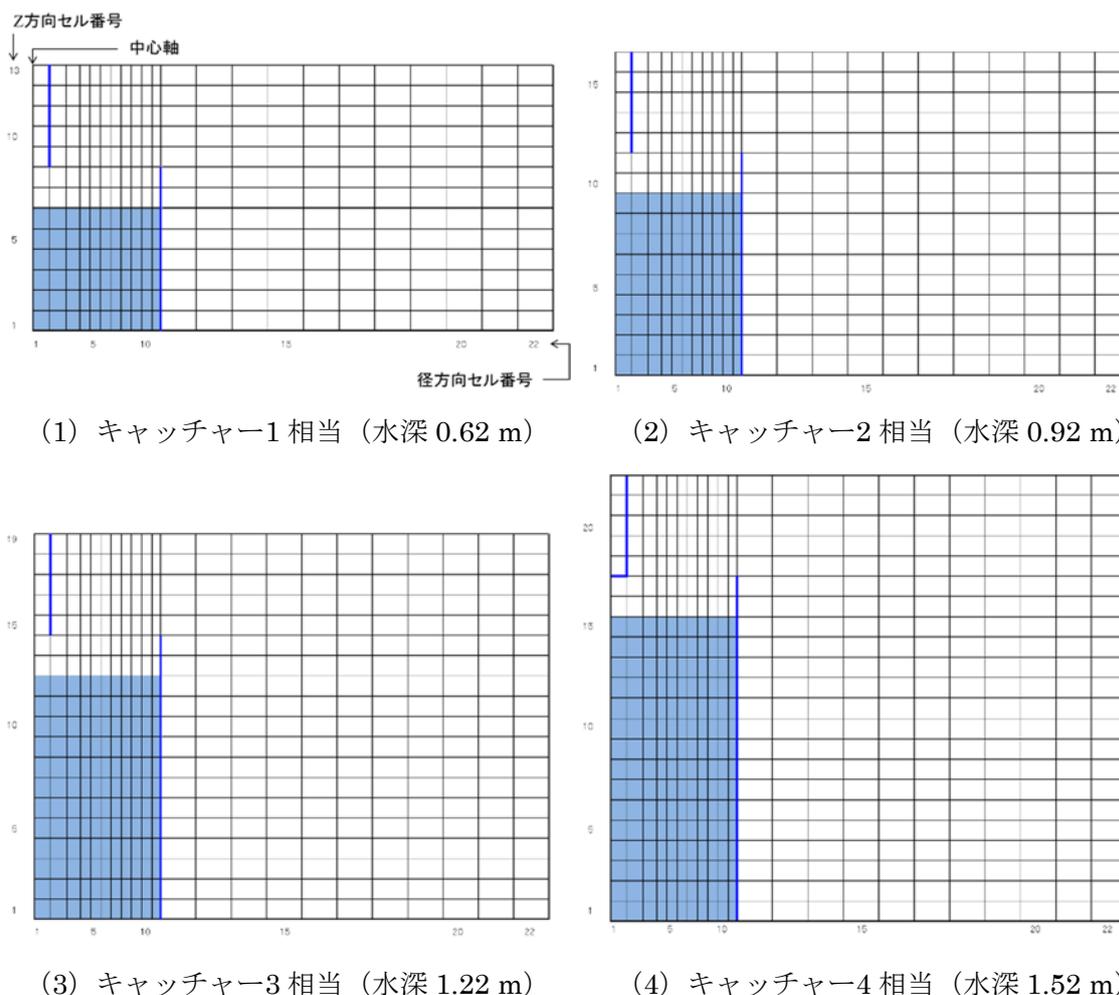


図 2.4.1 DEFOR-A2 実験での解析体系

(2) 溶融物の物性値

DEFOR-A 実験で使用された溶融物である $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-WO}_3$ 共晶物質（モル比 27 : 73）の物性値として、表 2.4.1 に示す値を用いた。

表 2.4.1 $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-WO}_3$ の物性値 [2.1] [2.4] [2.5]

変数名	物性 [単位]	値
TMELT	溶融物融点 [K]	1143
TSOLI	溶融物固相線温度 [K]	1138
TLIQU	溶融物液相線温度 [K]	1148
CPLIQ	液相比熱 [J/kg/K]	280.0
CPSOL	固相比熱 [J/kg/K]	390.6
LHEAT	凝固潜熱 [J/k]	170000.0
RHOLIQU	液相密度 [kg/m ³]	6876
RHOSOL	固相密度 [kg/m ³]	7811
LAMLIQU	液相熱伝導率 [W/m/K]	5.3
LAMSOL	固相熱伝導率 [W/m/K]	5.3

(3) Rosin-Rammler 分布の調整係数

溶融ジェットより生成する粒子直径の分布として、以下の式に示す Rosin-Rammler 分布を用いた。

$$F = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{D_p}{D_e}\right)^n\right\}$$

ここで、 D_p は粒子直径、 F は直径が D_p 以下の粒子の累積質量分布である。 D_e は粒子直径の絶対値に関する定数、 n は分布に関する定数である。平成 28 年度及び平成 29 年度と同様に、DEFOR-A1~9 実験で得られた粒子直径の分布に基づき、以下に示す通りとした。

$$D_p = 4.0, n = 1.87$$

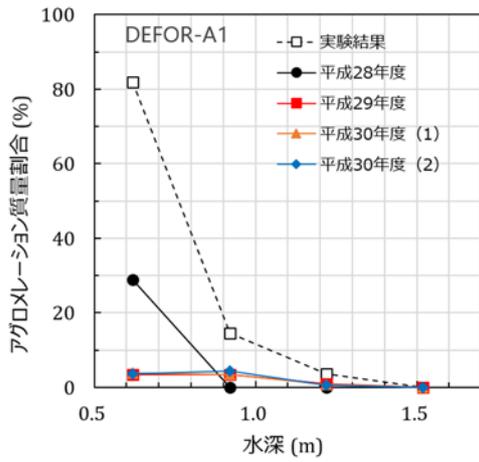
(4) アグロメレーション判定の調整係数及び熱伝達調整係数

平成 29 年度の解析結果に基づき、調整係数をそれぞれ $\Phi_{min} = 0.05$ 、 $\Phi_{max} = 1.5$ 、 $\alpha = 15$ とした。さらに、熱伝達を調整するための係数は、平成 28 年度及び平成 29 年度の解析結果より $k_{qht} = 0.8$ を基準として変更することで DEFOR-A1~A9 及び A23~A26 実験をよく再現する値を調べた。

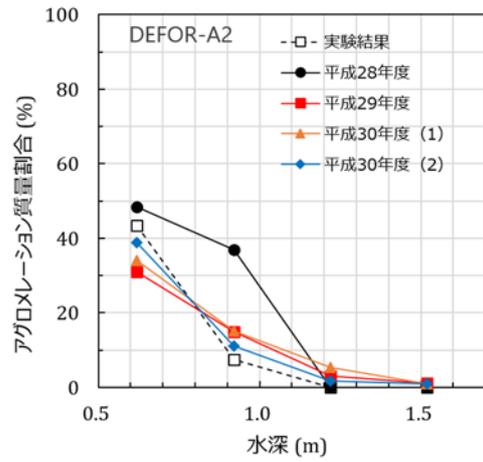
2.5. 解析結果

JASMINE コードによる DEFOR-A 実験の解析結果と実験結果の比較を図 2.5.1 と図 2.5.2 に示す。A1～A9 実験（A3 を除く）に関する比較は図 2.5.1 に、A23～A26 実験に関する比較は図 2.5.2 にそれぞれ示す。平成 29 年度に改良したアグロメレーションモデルを適用した JASMINE コードによる解析結果が DEFOR-A 実験を最も良く再現した条件は調整係数の値を $\Phi_{min} = 0.05$, $\Phi_{max} = 1.5$, $\alpha = 15.0$ とした条件であった。このことから、平成 30 年度では、平成 29 年度での調整係数の値を基準として、アグロメレーションした粒子群の表面からの熱伝達量を調整する係数 k_{qhtr} を変更した(平成 30 年度(1)及び(2))。参考として、平成 28 年度に実施した解析結果の値を記載する。

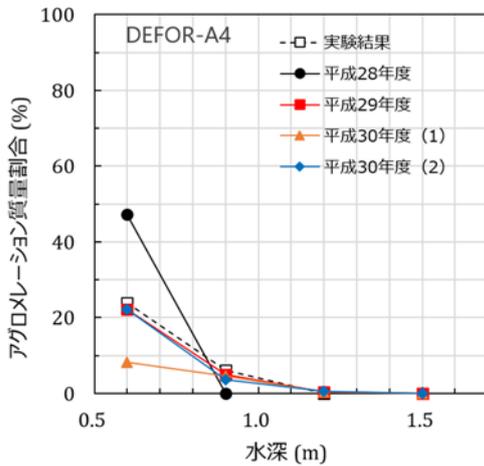
平成 28 年度 :	$\Phi_{lim} = 1.5, k_{qhtr} = 0.8$
平成 29 年度 :	$\Phi_{min} = 0.05, \Phi_{max} = 1.5, \alpha = 15.0, k_{qhtr} = 0.8$
平成 30 年度 (1) :	$\Phi_{min} = 0.05, \Phi_{max} = 1.5, \alpha = 15.0, k_{qhtr} = 0.4$
平成 30 年度 (2) :	$\Phi_{min} = 0.05, \Phi_{max} = 1.5, \alpha = 15.0, k_{qhtr} = 0.1$



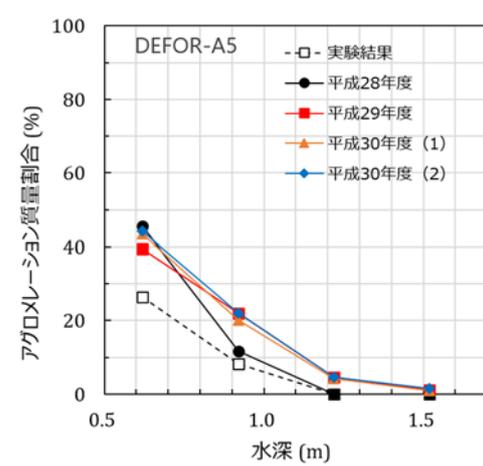
(1) DEFOR-A1 実験



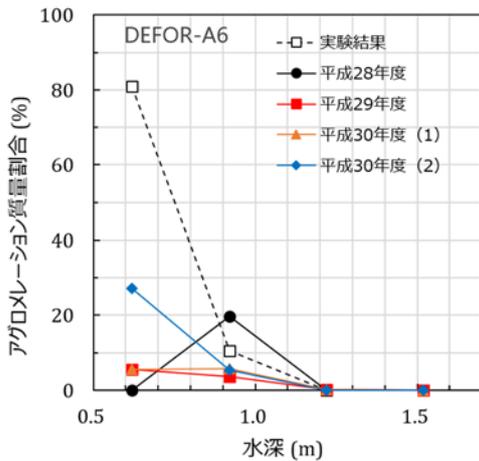
(2) DEFOR-A2 実験



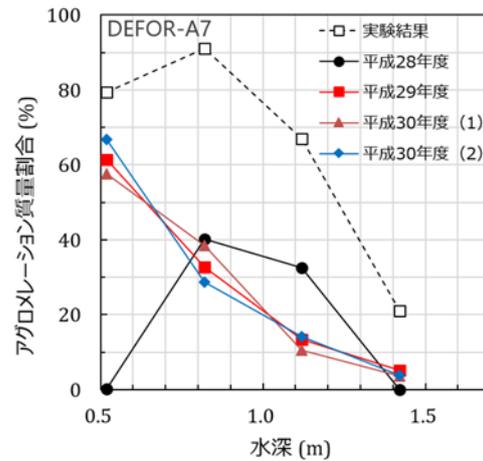
(3) DEFOR-A4 実験



(4) DEFOR-A5 実験

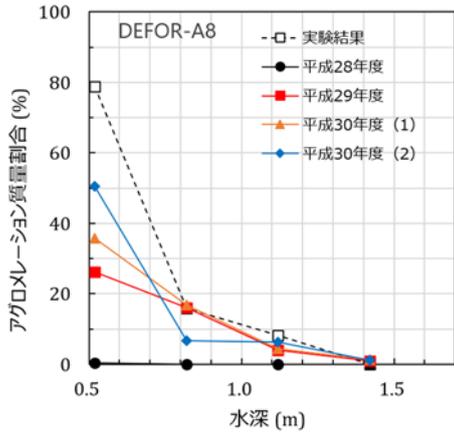


(5) DEFOR-A6 実験

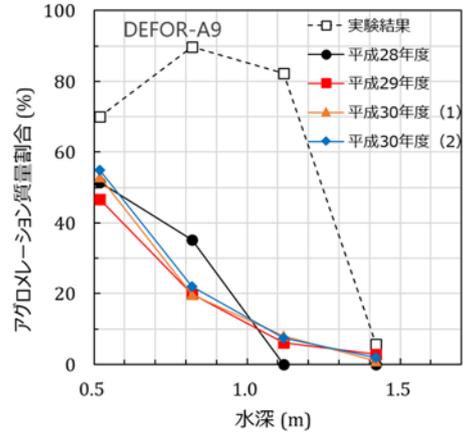


(6) DEFOR-A7 実験

図 2.5.1 DEFOR-A1～A9 実験のアグロメレーション質量割合

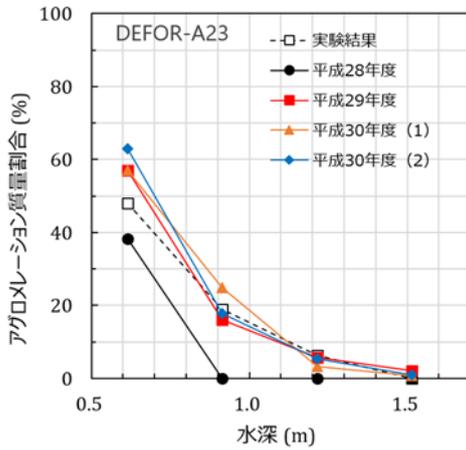


(7) DEFOR-A8 実験

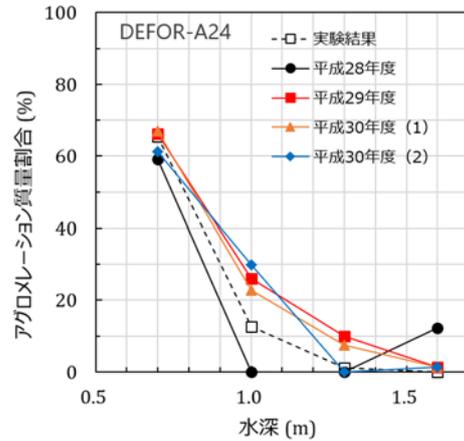


(8) DEFOR-A9 実験

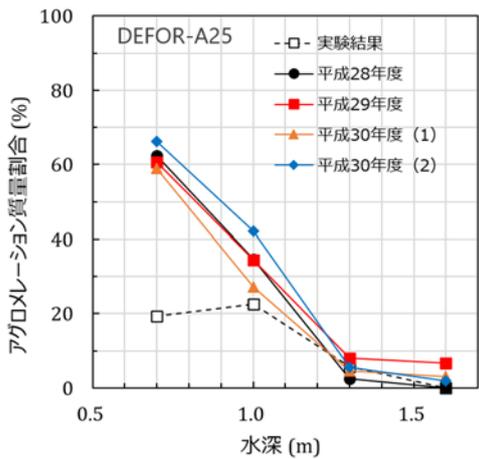
図 2.5.1 DEFOR-A1~A9 実験のアグロメレーション質量割合 (続き)



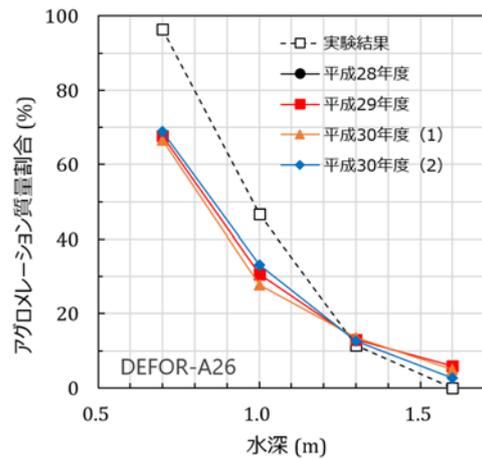
(1) DEFOR-A23 実験



(2) DEFOR-A24 実験



(3) DEFOR-A25 実験



(4) DEFOR-A26 実験

図 2.5.2 DEFOR-A23~A26 実験のアグロメレーション質量割合

2.6. 考察

(1) DEFOR-A1～A9 実験

水中を落下する粒子の冷却を考慮すると、アグロメレーション質量割合が水深の増大に対して単調に減少することが想定できる。想定通りに実験結果が得られた DEFOR-A2、A4 及び A5 実験に関して、平成 29 年度では、解析結果と実験結果とが良く一致する結果が得られている。平成 30 年度では、調整係数 k_{qht} を小さくすることで DEFOR-A2 実験の再現度がわずかに向上した。しかしながら、調整係数 k_{qht} は DEFOR-A4 及び A5 実験でのアグロメレーション質量割合にほとんど影響しない結果が得られた (図 2.5.1 (2)～(4))。

DEFOR-A7 及び A9 実験では、解析結果が実験結果を大幅に過小評価している。実験結果はキャッチャー1よりもキャッチャー2の方が高いアグロメレーション割合を示すことから、アグロメレーションの質量割合の分布が上向きに凸となっている。平成 30 年度では、調整係数 k_{qht} を小さくすることによりアグロメレーションの質量がわずかに増加したものの、実験結果の再現度は、平成 29 年度の結果と同様であった (図 2.5.1 (6) 及び (8))。文献 [2.1] により、DEFOR-A7 及び A9 実験では、キャッチャー1で捕集されたデブリの割合が極端に小さかったことが報告されている。このとき、溶融物の射出後、水槽内に設置されたキャッチャー1の縁が水槽の壁面側に折れ曲がっていたことが確認されている。このことから、文献 [2.1] は、DEFOR-A7 及び A9 実験において、キャッチャー1の縁が水中に侵入した溶融ジェットを弾くことにより、デブリが適切に捕集されなかった可能性を指摘している。よって、DEFOR-A7 及び A9 実験でのアグロメレーション質量割合を再現する必要はないものと考えられる。

DEFOR-A1、A6 及び A8 実験では、キャッチャー1でのアグロメレーション質量割合が約 80% 程度となる一方で、キャッチャー2でのアグロメレーション割合が 20% 以下に減少する傾向を示した。平成 29 年度では、アグロメレーションの質量割合の分布が水深に対して極端に下向きの凸となる傾向を再現できていない。平成 30 年度では、調整係数 k_{qht} を小さくすることで DEFOR-A6 及び A8 実験の再現度がわずかに向上した (図 2.5.1 (1), (5) 及び (7)) もの、調整係数 k_{qht} はアグロメレーション質量割合にほとんど影響しない結果が得られた。文献 [2.1] により、DEFOR-A6 実験では、キャッチャー1で捕集されたデブリの割合が極端に大きかったことが報告されている。このとき、溶融物の射出後、水槽内に設置されたキャッチャー1の縁が水槽の中央側に折れ曲がっていたことが確認されている。このことから、文献 [2.1] は、DEFOR-A6 実験において、キャッチャー1が水中に侵入した溶融ジェットを過剰に捕集した可能性を指摘している。よって、DEFOR-A6 実験でのアグロメレーション質量割合を再現する必要はないものと考えられる。

(2) DEFOR-A23～A26 実験

平成 29 年度では、DEFOR-A23～A26 実験を解析結果は良く再現する結果が得られている。ただし、DEFOR-A25 実験では、アグロメレーション質量割合がキャッチャー1よりもキャッチャー2の方が高い傾向が得られており、キャッチャー1の再現度は低い。平成 30 年度では、調整係数 k_{qht} を小さくすることによりアグロメレーションの質量がわずかに

増加したものの、平成 29 年度と同様の再現度となった。

DEFOR-A26 実験は溶融物の過熱度が高い条件で実施されたが、DEFOR-A1～A9 実験とは異なり、アグロメレーション質量割合が単調に減少する傾向が得られていることから、平成 29 年度と同様に解析結果の再現度は良好であった。

2.7. まとめ

平成 29 年度に改良したアグロメレーションモデルを用いて、アグロメレーションした粒子群の表面からの熱伝達量を調整する係数 k_{qht} を調整した。調整係数 k_{qht} はほとんどの条件でアグロメレーション質量割合に影響せず、再現度を極端に向上させるものではないことを確認した。

アグロメレーションデブリ生成割合の予測モデルは、DEFOR-A 実験データを用いて改良及び検証を行う限りにおいては、目標とした水準に概ね達したと考えられる。実機評価への適用を踏まえたさらなる高度化を進めるためには、他の溶融物や体系について取得された多様な実験データが必要である。

参考文献

- [2.1] P. Kudinov, et al., “Agglomeration and size distribution of debris in DEFOR-A experiments with $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-WO}_3$ corium simulant melt”, Nucl. Eng. Des., 263, 284-295, 2013.
- [2.2] P. Kudinov, M. Davydov, “Development and validation of conservative-mechanistic and best estimate approaches to quantifying mass fractions of agglomerated debris”, Nucl. Eng. Des., 262, 452-461, 2013.
- [2.3] M. Saito, K. Sato, S. Imahori, “Experimental study on penetration behaviors of water jet into Freon-11 and liquid nitrogen [I]”, PNC SN9410, 88-014, 198
- [2.4] P. Kudinov, A. Karbojian, W. Ma, “The DEFOR-S experimental study of debris formation with corium simulant materials”, Nucl. Technol., 170, 219-230, 2010
- [2.5] P. Kudinov, et al., “Validation of the FCI codes against DEFOR-A data on the mass fraction of agglomerated debris”, In: 5th European Review Meeting on Severe Accident Research (ERMSAR-2012), Cloyne, Germany, March 21-23, 2012

3. PULiMS 実験の解析

3.1 JASMINE コードの改良

PULiMS 実験を JASMINE コードで解析するにあたり溶融物の拡がりモデル及びプログラミングに関して、以下の点について変更・修正を行った。

3.1.1 溶融物先端部の凝固モデル

(1) モデルの概要

床面上に落下した溶融物が拡がる過程において、上部のクラストと底面に挟まれた中央部を溶融物が流れ、拡がりの先端部において初めて水と接触する。このため先端部の温度が上面よりも高くなる (図 3.1 参照)。このことは PULiMS 実験を撮影したビデオにおいて先端部が赤く発光していることから判断でき、JASMINE においてもそのようなモデルとなっている。

平成 29 年度の解析により、溶融物の拡がりの先端部の表面が凝固して物性値としての表面張力以上の張力が作用すると想定すると、JASMINE による拡がり面積の計算結果を PULiMS 実験における溶融物の拡がり面積と一致させることができることが分かった。今回、この先端部の表面凝固を次のようにしてモデル化して JASMINE に組み込んだ。

(2) 具体的なモデルの説明

溶融物の拡がりの先端部の温度は次式で評価できる。

$$C_p \rho v \Delta T = q \quad \text{①}$$

ここで、 C_p 、 ρ 、 v は、溶融物の比熱、密度、速度であり、 q は水による除熱熱流束、 ΔT が表面における局所的な温度低下 (主流温度 - 表面温度) である。この式は先端表面の除熱熱流束が、溶融物に輸送される単位面積当たりの熱量に等しいとして導いた。JASMINE による計算において、表面の温度が凝固点に達した時すなわち、 ΔT が溶融物のスーパーヒート (溶融物温度 - T_m) に等しくなった時に、次のように溶融物の表面張力を増加させる。

①式により溶融物先端温度が凝固点に達したと判定されたとき、溶融物の先端部の表面での張力の大きさを次式により修正して、溶融物が移動可能な最小厚さを計算する。

溶融物先端の固相厚さを d_{edge} とする。凝固点に達したと判定されたときに $d_{edge} = 0$ として出発し以下の式により厚さの増加を求める。

$$\rho \frac{d d_{edge}}{dt} = \frac{q - h \Delta T}{\Delta H} \quad \text{②}$$

ここで ΔH は、溶融物の凝固潜熱であり、 h は溶融部から先端固相内側への熱伝達率で次式の平面衝突噴流のよどみ点の伝熱相関式を用いて計算する。

$$Nu = 0.535 Re^{0.5} Pr^{0.4} \quad \text{③}$$

ここで、レイノルズ数 : $Re = vB/\nu$ 、ヌセルト数 : $Nu = hB/\lambda_{liq}$ 、プラントル数 : Pr で

あり、また、代表長さ B は、溶融部厚さをとる。 ν 、 λ_{liq} は溶融物の粘性係数、熱伝導率で

ある。

また、 q は、沸騰曲線 $q_{boil}(T)$ と固相内の熱伝導のバランスから表面温度 T_{srf} の収束計算によって求める。

$$q = \lambda_{sol} \frac{T_m - T_{srf}}{d_{edge}} = q_{boil}(T_{srf}) \quad (4)$$

得られた固相厚さ d_{edge} 及び単位面積当たりの引っ張り強度 τ_{sol} を用いて、溶融物の先端部の表面での張力 σ_{edge} を計算する。 τ_{sol} は入力値である。

$$\sigma_{edge} = \tau_{sol} * d_{edge} \quad (5)$$

溶融物先端部が移動するのに必要な最小厚さは従来と同様に次式で計算する。

$$h_{min} = \sqrt{\frac{4\sigma_{edge}}{(\rho_p - \rho_a)g}} \quad (6)$$

ここで、 σ_{edge} は、先端部の移動挙動を計算するためだけに使用し、他のところでは、物性値関数の値を使用する。

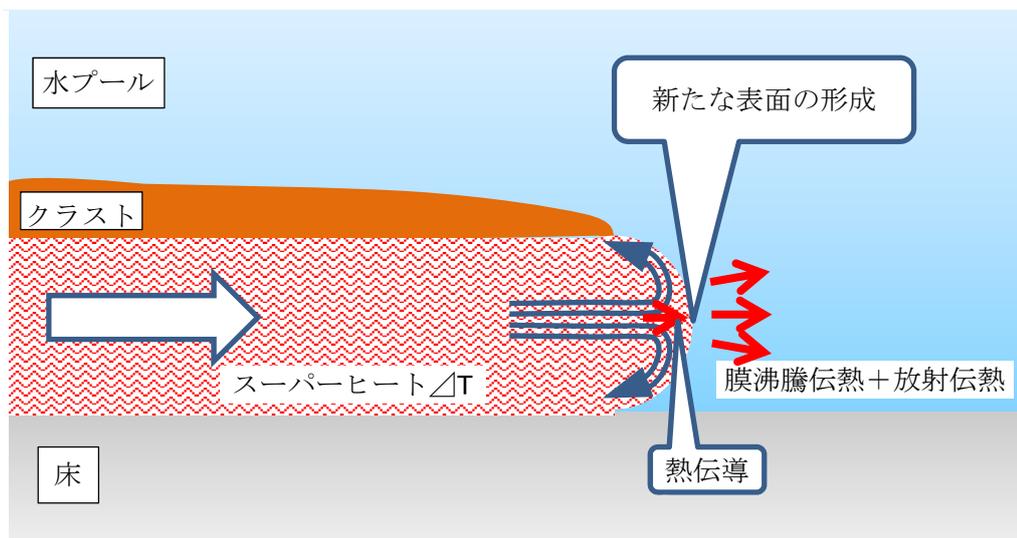


図 3.1 溶融物先端の伝熱モデル

3.1.2 数値計算の精度向上

数値計算上の誤差を少なくする目的で以下の項目の改良を行った。

- (a) 溶融物計算用メッシュを水・蒸気二相流計算用のメッシュよりも細かくする。

これは、溶融物ジェット及び溶融物プールの計算が一次元座標で行われるので、計算時間の増加に縛られずに細かいメッシュを設けることができる利点を生かしたものである。二相流計算用メッシュをさらに細かく分割して使用する。

- (b) 溶融物ジェット流入ノズル部での計算式の変更。

ジェットの流動計算においては **staggered mesh** を用いているため、ジェット径とジェット流入速度の定義位置が半メッシュだけ異なり、意図した溶融物流入流量とならない場合があった。この誤差をなくすため、ノズル部の境界条件を、質量保存則を満足する

ように与える。具体的にはジェットノズル部のメッシュにおいて、計算セル上面の流入量 すなわち入力で指定した溶融物落下量と計算セル下面の流出量の差と、実際に CIP 法で計算された計算セル内質量の変化量を比較して、誤差の分だけ元のセル上面流入量に足し込むことで質量保存するように補正する。

3.1.3 プログラム可読性の向上

JASMINE は、そのモデル・計算機能を段階的に改良・変更してきたためプログラムの構造が煩雑で可読性に欠けるところがあった。これを改めるため以下の変更を行った。

- (a) サブプログラム `particle` の分割：溶融物粒子の生成、移動、温度変化を扱っていたサブプログラム `particle` を、その計算機能ごとに分割し、これらを独立したサブプログラムとして `particle` が必要に応じて呼び出すようにした。
- (b) サブプログラム `pool` の分割：溶融物プールの運動と温度変化を扱っていた `pool` を整理し、クラスト表面温度計算部を独立したサブプログラムとして `pool` が呼び出すようにした。
- (c) 粒子状態を記述する変数のデータ構造及び変数名の変更：これまで `particle` で使用される主要な変数 `rpargrp` 等は、変数種別を表す番号と粒子番号の 2 次元配列となっていたが、これを改め構造体表現とした。すなわち (a) で作成されたサブプログラムの引数を構造体配列要素として、液滴グループ番号に関するループの `do` 文及び `end do` 文は `particle` 内に残し、分割したサブプログラム内部ではスカラー演算の記述とした。構造体メンバー名または変数名は番号で識別するのをやめ、物理量の種類（位置か速度か温度か等）と定義位置・方向（平均か表面か）と対象（粒子の属性か粒子グループの属性か）の順に並べて表し、変数の定義が容易に推察できるものとした。

3.2 対象実験ケースと入力条件

スウェーデン王立工科大学 (KTH) では、水プール内での溶融物拡がり実験を、PULiMS 装置を用いて進めている [3.1]。この実験では、ステンレス製床面を有する深さ 0.1~0.2 m の水プールに、数十 kg の高温の模擬溶融物を落下させる。床面近傍には多数の熱電対が設けられており、この床面上に電気炉で溶融させた模擬溶融物を、漏斗を通じて落下させている。漏斗の下部の出口ノズルの径は~0.03 m であり、水面からノズル下端までの距離は~0.2 m となっている。

平成 29 年度までの JASMINE による解析では、E1,E4,E8,E9 実験を対象とした。これは、水蒸気爆発の生じなかった実験ケースを選んだものである。今年度はこれに加えて新たに実施された E10,E11,E12,E13,E14,E15 実験を対象とした。E10~E15 実験のための装置の外観写真を図 3.2 に、装置の概略構造を図 3.3 示す。

実験装置の床の Spreading Plate の形状を図 3.4~3.6 に示す。E1、E4 実験では長方形、E8、E9 実験は正方形、E10~E15 実験では再度長方形の形状をしている。E10~E15 実験では、ノズル出口に観察窓を兼ねた石英ガラス製の板（壁）を設け、溶融物の拡がり半円形となるようにした。この壁を対称面と考えると、実効的な溶融物量は 2 倍、拡がり面

積も 2 倍として考えることができる。

E10 実験では図 3.5 に示すように熱電対配置の中心位置に溶融物の落下点に来るようになっているが、E11～E15 実験では図 3.6 にあるように溶融物の落下点が 100 mm ほど左にずれている。

計算対象とした実験ケースの主要な条件と JASMINE の入力値を表 3.1 に示す。使用された模擬溶融物は、 $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-WO}_3$ の混合物であり、共晶を形成する混合比 (42.64 : 57.36 wt%) である。JASMINE による計算に使用した物性値を表 3.2 に示す。これらの値は JASMINE 入力の `datain` オプションを利用して指定した。固相線温度と液相線温度は、溶融物が共晶体であるから一致するはずであるが、JASMINE の計算が不安定となるため、融点に対してそれぞれ 1 K の差を設けた。床材のステンレス鋼に伝熱にかかわる物性の入力値については表 3.3 に示す[3.2]。

溶融物の温度は、供給に使用した漏斗で測定された最高温度を使用した。但し、E12 実験については 2 つある熱電対のうち、最高温度が低かった方の値を使用した。これは、後述のように、高い方の値は局所的・瞬間的に漏斗内の温度を拾ったものだと考えたためである。他の実験ケースでは、溶融物温度と凝固点との差が大きく、どちらの熱電対の値を採用しても大差がないと考えられる。

落下溶融物量は、実験後に床面上に残された固化物の重量が測定・報告されているものはその値、それ以外は漏斗の重量の変化幅から決定した。

E1,E4 実験は水プールの形状が 1×2 m の長方形であり、E8,E9 実験は 1×1 m の正方形である。これを軸対称 2 次元コードである JASMINE で解析するため、計算体系は水プールの底の面積が実験と同一となるように選定した。E10～E15 実験に対しては、前述のように石英ガラス板を対称面と考え、実際の水プール底面積を 2 倍して計算し JASMINE の入力値とした。これにより初期水位を実験と同一とさせることにより、水の全量と溶融物の量の比を解析と実験とで一致させることができ、伝熱量の評価が正しければ水温の上昇幅も同一となる。

E1,E4 実験 :

$$R = \sqrt{1 \times 2 / \pi} = 0.79788 \doteq 0.8 \text{ m}$$

E8,E9 実験 :

$$R = \sqrt{1 \times 1 / \pi} \doteq 0.565 \text{ m}$$

E10～E15 実験 :

$$R = \sqrt{2 \times 0.9 \times 1.6 / \pi} \doteq 0.958 \text{ m}$$

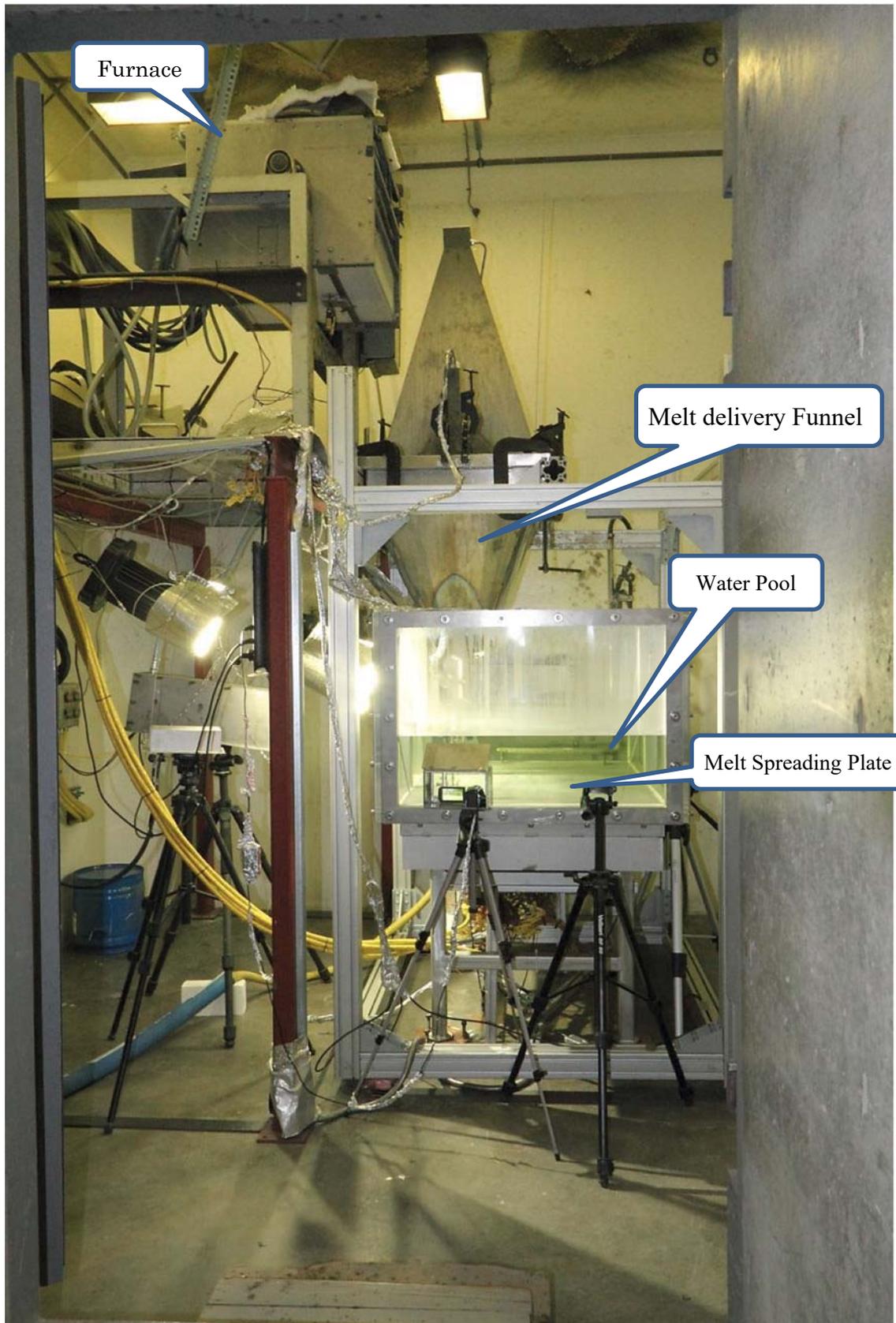


図 3.2 PULiMS 実験装置全体写真 (E10~E15 実験用)

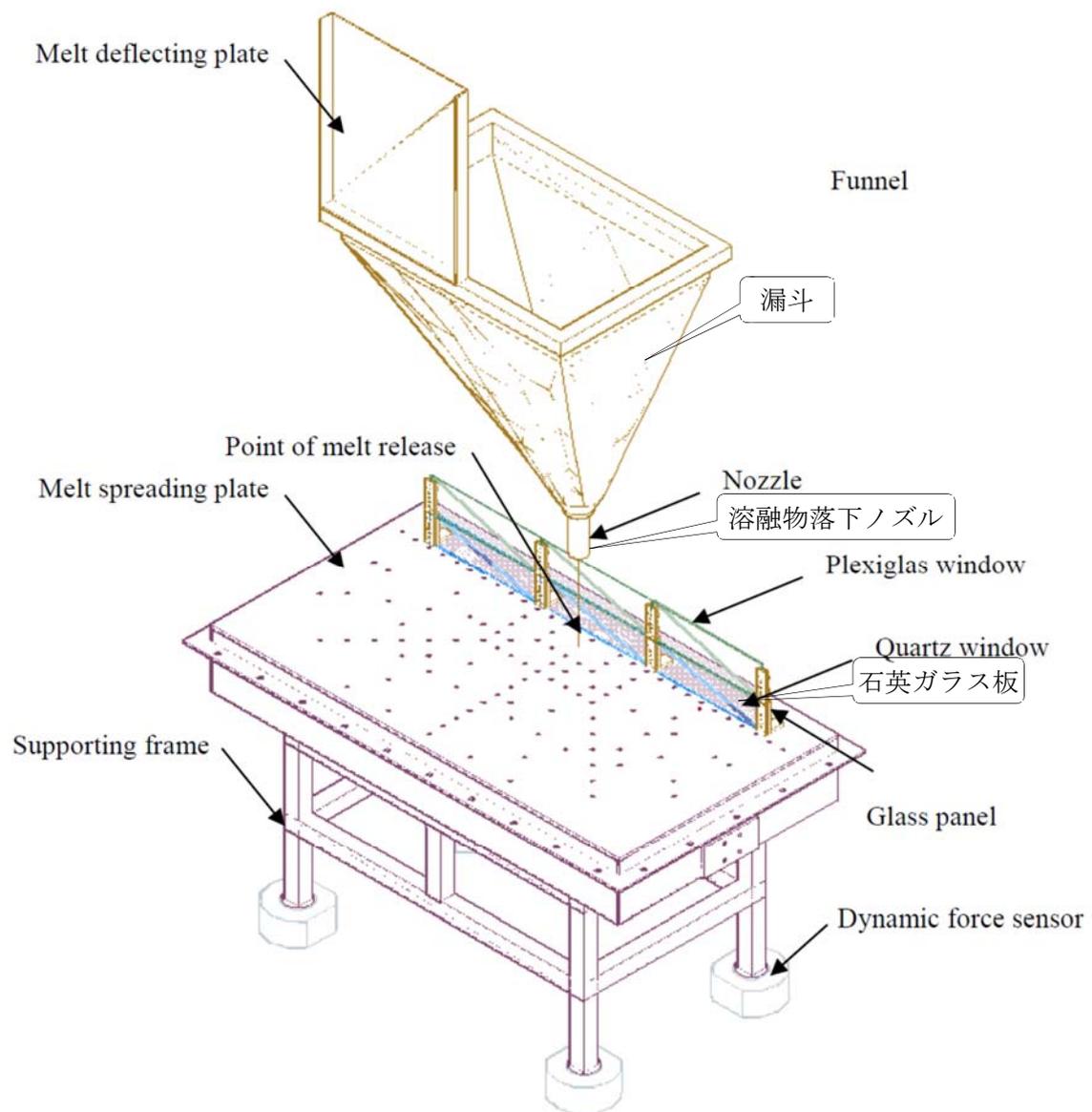


図 3.3 PULiMS 実験装置の概略構造

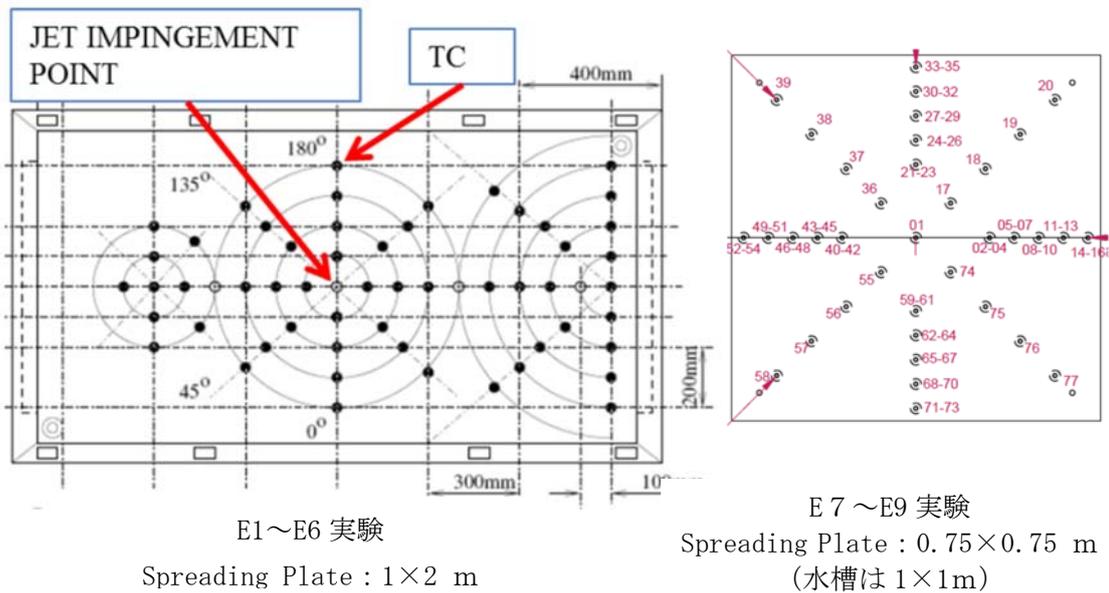


図 3.4 PULiMS 全円状拡がり実験のテストセクション平面図

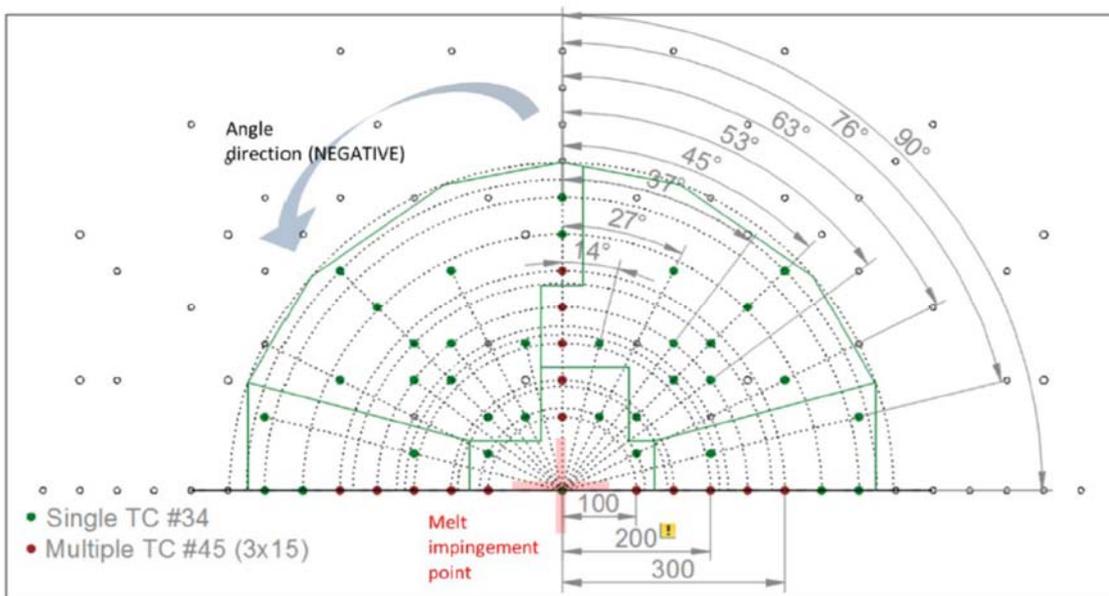


図 3.5 PULiMS 半円状拡がり実験のテストセクション平面図 (E10 実験)

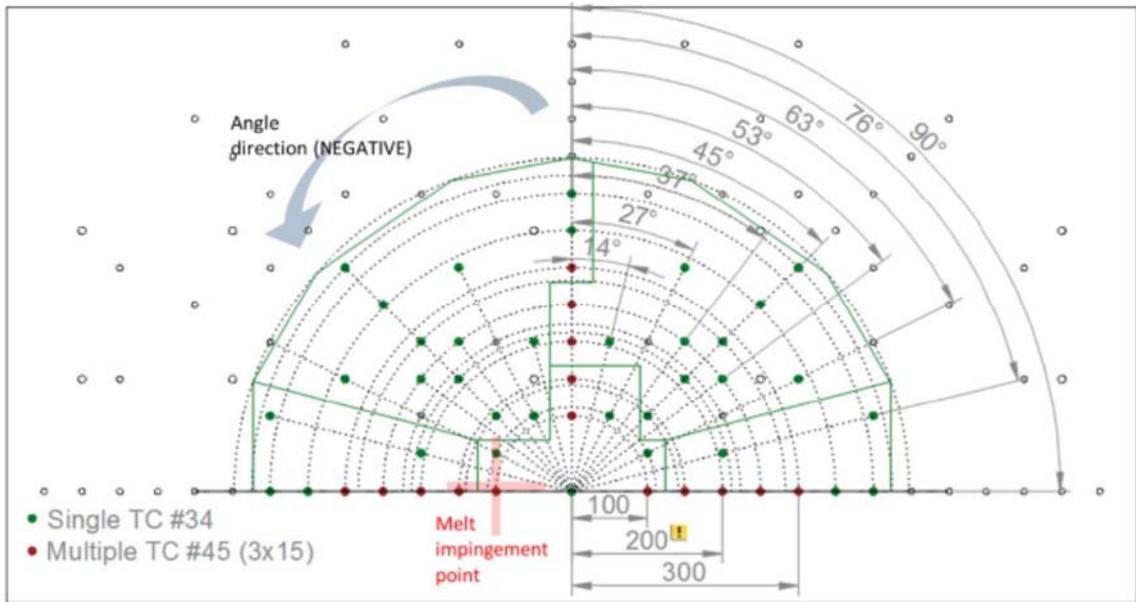


図 3.6 PULiMS 半円状拡がり実験のテストセクション平面図 (E11~E15 実験)

表 3.1 PULiMS 実験の解析における入力値

実験番号	E1	E4	E8	E9	E10	E11	E12	E13	E14	E15
試験部形状	長方形		正方形		1/2 対称 (半円状の拡がり)					
熔融物組成	Bi ₂ O ₃ ·WO ₃ 共晶組成									
熔融物温度 (K)	1279	1213	1168	1182.15	1178.65	1189	1148.55	1218.55	1181.65	1293.15
落下熔融物量 (kg)	23.4	46.9	23.2	26.8	30.761	39.25	32.60	23.79	27.176	44.22
落下継続時間 (s)	10	12	17.6	24.9	17	10.63	55	21.9	22.4	16.3
ノズル位置(床からの高さ mm)	400	400	400	400	290	255	272	272	272	272
ノズル径 (mm)	20	20	20	15	20	30	15	15	15	17
水プール寸法	1 m × 2 m		1 m × 1 m		0.9 m × 1.6 m					
水プール半径の入力値	0.8 m		0.565 m		0.958 m					
床板厚さ	10 mm		10 mm		10 mm					
水プール初期深さ(mm)	200	200	200	200	200	190	150	200	200	168
初期水温 (K)	352	350.15	368.15	369	363.15	364.15	367.75	369.15	368.65	364.95
熔融物中ボイド率	0.29	0.36	0.3	0.281	0.259	0.348	0.249	0.234	0.281	0.293

床面と熔融物間の熱抵抗は平成 28 年度と同様に $2 \times 10^{-2} \text{ Km}^2/\text{W}$ を使用した。これは、床面と熔融物間の伝熱が熱伝導だけと想定した場合、熔融物と床の間に約 0.5mm の蒸気膜がある場合に相当する。

熔融物中のボイド率については、実験後の観察結果が報告されておりその値を使用した。

クラストの流動／固着の条件については、形成されたクラストは熔融部と同じ速度で流動するが所定の厚み (0.5mm) に達すると固定されるというオプションを選択した。平成 28 年度までの解析において、クラスト拘束条件が熔融物拡がりにほとんど影響を与えなかったことが分かっている。

熔融物ジェットが水中を落下する過程で生じた液滴粒子が熔融物プールに達した時にはクラストに付着するか、熔融部に流入するかが判定される。このとき、クラストを貫通できる粒子の径とクラストの厚みの比 β_{in} を入力で指定するようになっている。この値として $\beta_{in} = 10^{-12}$ を採用した (ほとんどの液滴粒子は、熔融部に流入しクラストには付着しない)。

水への伝熱に関する入力値は入力値を表 3.4 に示すように、伝熱表面積増加の係数を除き平成 29 年度のものと同じである。

表 3.2 PULiMS 実験の解析で使した物性値

変数	タイプ	説明	Bi ₂ O ₃ -WO ₃ 42.64 : 57.36wt%
tmelt	実数	溶融物融点[K]	1143
tsoli	実数	溶融物固相線温度[K]	1142
tliqu	実数	溶融物液相線温度[K]	1144
rhosol	実数	固相密度[kg/m ³]	7811
rholiq	実数	液相密度[kg/m ³]	6876
cpsol	実数	固相比熱[J/kg/K]	390.6
cpliq	実数	液相比熱[J/kg/K]	280
lheat	実数	凝固潜熱[J/kg]	170E3
lamsol	実数	固相熱伝導率[W/m/K]	5.3
lamliq	実数	液相熱伝導率[W/m/K]	5.3
viscmm	実数	粘性係数[Pa s]	1.5E-2
sftnmm	実数	表面張力[N/m]	0.18
emssmm	実数	輻射率[-]	0.7
cf_dens	実数	液相密度の温度依存性の係数 (温度の1次式の係数)	0
cf_visc	実数	粘性係数の温度依存性の係数 (温度の1次式の係数)	0
cf_sftn	実数	表面張力の温度依存性の係数 (温度の1次式の係数)	0
cf_emss	実数	輻射率の温度依存性の係数 (温度の1次式の係数)	0

表 3.3 入力した床ステンレス等の物性値

項目	数値				
放射率 (床/溶融物)	0.4 / 0.7				
接触熱抵抗 (Km ² /W)	0.02				
温度 (K)	300	400	600	800	1000
密度 (kg/m ³)	7920				
比熱 (J/kg.K)	499	511	556	620	644
熱伝導率 (W/m.K)	16	16.5	19	22.5	25.7

表 3.4 PULiMS 解析の計算条件 (沸騰曲線に関連する入力)

項目	数値
伝熱表面積増加の係数 : multsurf	8.0
限界熱流束	1.0E6 W/m ²
限界熱流束のサブクール度依存性係数	-5.7E4,
限界熱流束の圧力依存性係数	2.5
極小熱流束点温度と飽和温度の差	283.0 K
極小熱流束点温度のサブクール度依存性係数	-8.0
極小熱流束点温度の圧力依存性係数	0

3.3 解析の結果と考察

3.3.1 JASMINE による解析結果の例

溶融物拡がり過程の JASMINE コードによる計算例として PULiMS E10 実験に対する解析結果を示す。図 3.7 は、E-10 ケースについて計算した結果のうち、水プールのボイド率、溶融物の液位・クラスト厚さの 0、0.5、1、5、10、20、50、100 s の状況を示したものである。これらの図はわかりやすくするために、高さ方向の座標を極端に拡大して表示している（水平方向は 70cm まで表示しているのに対して、高さ方向は 10 cm までしか表示していない）。初期状態 0 s では全体が水中にあり溶融物は表示されていない。0.5 s では、溶融物ジェットが床まで達し溶融物プールの形成が始まる。また多数の液滴が水プール中に生じ、これに伴いジェット近傍のボイド率が高くなっている。5 s では、溶融物が 0.17 m まで拡がり又上面に固相が形成され始めており、また溶融物からの伝熱により水中のボイド率が高くなる。なお、黄色線がクラストの上面を表し、赤線が溶融部の上面を表す。また、先端部の固相はこの図には表示されない。

10 s、20 s と経過するに従い溶融物プールは 0.25 m、0.32 m と拡がり、表面クラストも厚くなってゆき、又床面との接触部には底クラストも生じる。溶融物の供給は 17 s で終わるので 20 s の図には液滴が表示されていない。50 s では拡がりも停止し、表面クラストが約 1 cm と著しく厚くなる。100 s では、溶融部がほとんど残っていない。なお、50 s、100 s の図にボイド率の高い部分が筋状に示されている（位置 0.2 m 付近）が、この筋の右側の水中では時計回りの、筋の左側の水中では反時計回りの循環が生じており、クラスト表面でわずかに生成された蒸気がこの部分に集まり上昇するためである。

図 3.8 に PULiMS 実験でビデオにより観察された落下点近傍の溶融物の状況を示す。これは、溶融物の先端が床面に接してから 0.469 s 後の画像で、図 3.7 の 0.5 s に近い状態である。このビデオ画像から分かるように溶融物の先端は 200 mm 近くにまで広がっており JASMINE の結果とは異なる。また、JASMINE でモデル化しているように溶融物がプール状の連続相を形成しておらず落下ジェットの運動エネルギーを保持して飛び散っているように見える。

今回導入した溶融物先端の固相の厚さに関する計算結果を図 3.9 に示す。これは先端部に形成される固相の厚み d_{edge} の時間変化を示したもので、2 s とかなり早い段階で凝固が始まっており、その後単調に増加する。40 s にある変曲点は沸騰遷移によるものであり、膜沸騰から核沸騰に移行すると熱流束が増すので固化相厚みの増加速度が速くなる。100 s で約 2 cm に達するが、これは表面クラストの厚みに近い。高温側が溶融物融点であり外部の冷却が同じプール沸騰なので、当然の結果と言える。

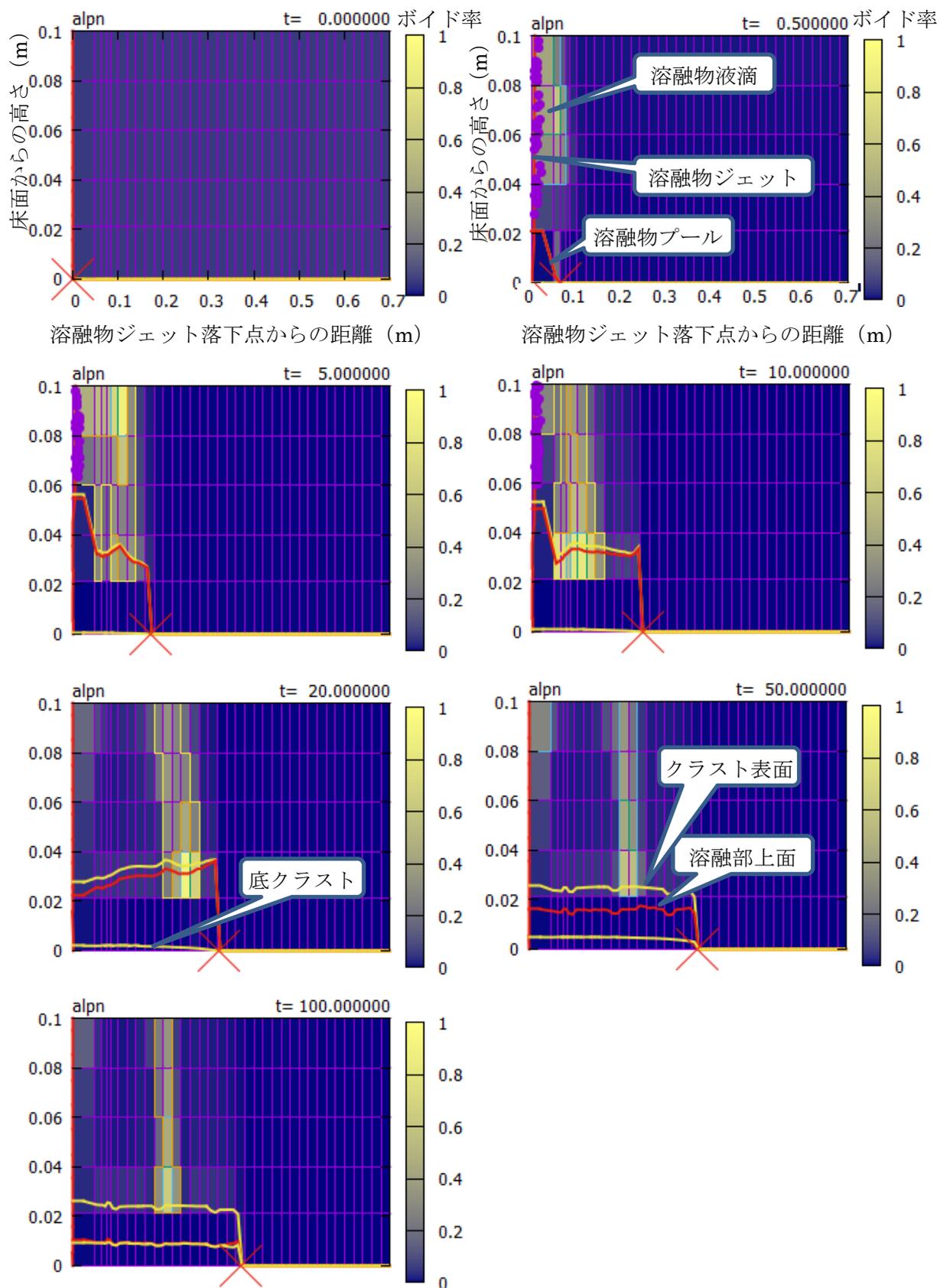


図 3.7 E10 実験の溶融物と水プールの時間変化の解析結果

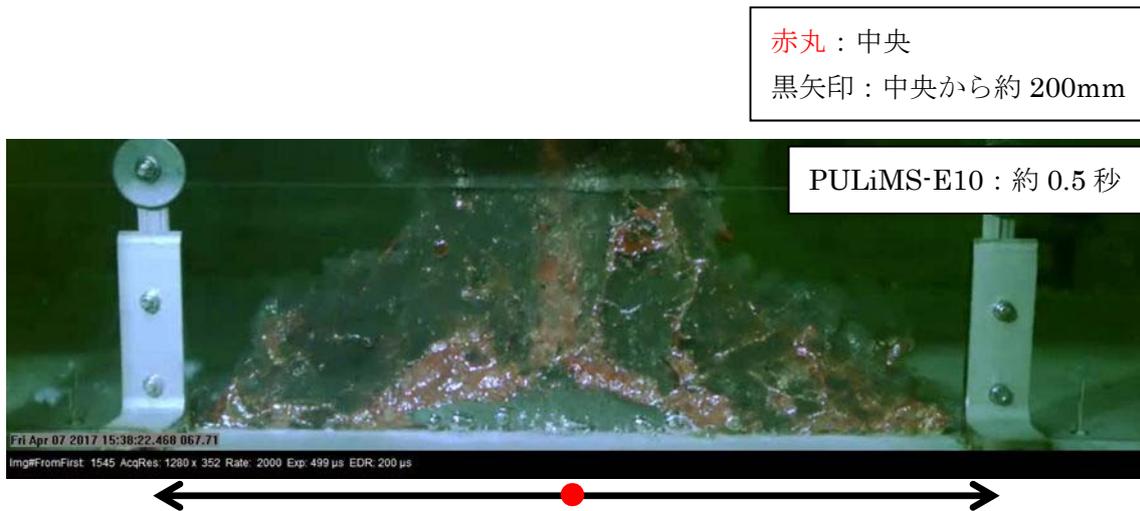


図 3.8 PULiMS-E10 でビデオ撮影により観察されたの熔融物の状況

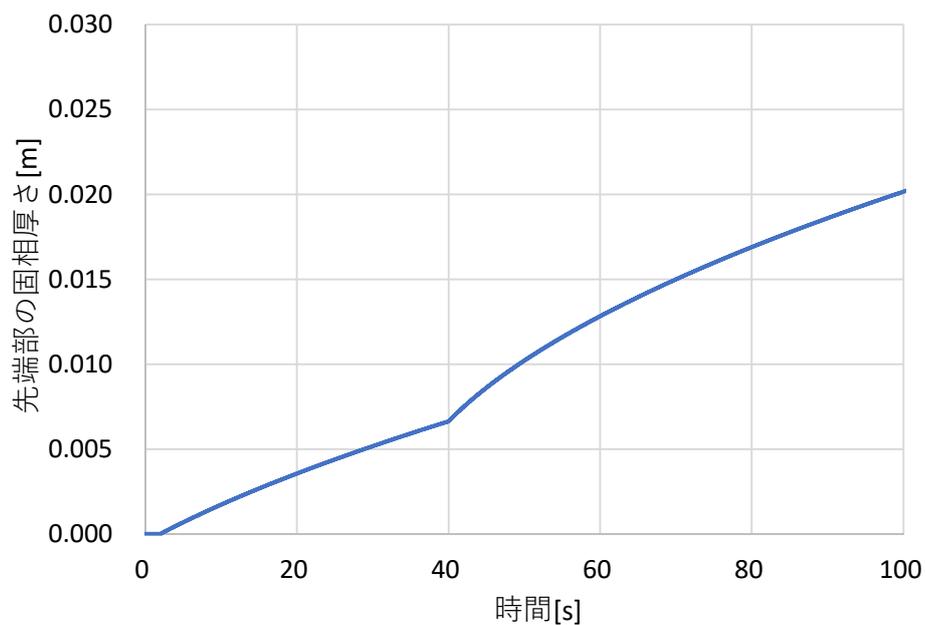


図 3.9 熔融物拡がり先端部の固相の厚さの変化の解析結果 (E10 実験)

3.3.2 最終的な拡がり面積の評価

前述のように E1,E4,E8~E15 実験に対する解析を行った。E10~E15 試験はノズル近傍に設置された石英ガラス壁のために熔融物は半円状に拡がり、JASMINE による解析ではこれを対称境界として水プール容積を 2 倍にし、熔融物量の供給量も 2 倍としていた。一方、熔融物の拡がり面積を実測値と比較するにあたっては、計算結果を 1/2 として表示する。

溶融物が固化した時の引張り強度を表す τ_{sol} を、 100 N/m^2 、 1000 N/m^2 と変えて計算した。その時の溶融物拡がり面積の計算値を実験値と比較してプロットした結果を図 3.10 に示す。同図にあるように $\tau_{sol}=1000 \text{ N/m}^2$ としたときに、JASMINE による拡がり面積の解析結果は実験値と比較的良好に一致する。全周に拡がる実験 E1～E9 と半円状に広がる実験での差は顕著ではない。

以下の解析では $\tau_{sol}=1000 \text{ N/m}^2$ として計算を行う。ここで得られた表面固相の強度 $\tau_{sol}=1000 \text{ N/m}^2$ という値は、他の酸化物の曲げ強度（キャストブルの曲げ強度： $8 \sim 14 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ や Al_2O_3 の引張強度： $2.6 \sim 5 \times 10^8$ 、 ZrO_2 引張強度： $1.5 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ ）[3.3]に比べて著しく小さい。これは、融点に近い高温であること、凝固を開始したばかりの状態で作成された固相結晶が完全な連続層を形成してないことなどが原因と考えられる。

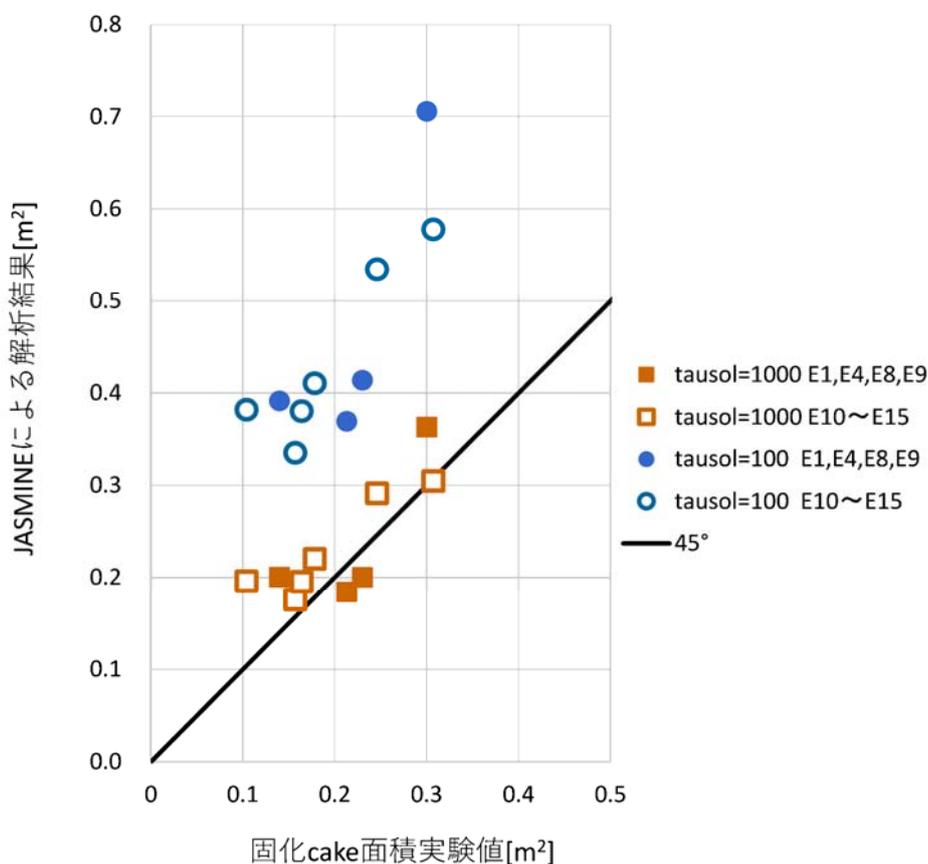


図 3.10 溶融物拡がり面積の実験値・解析値の比較

3.3.3 過渡変化に関する実験値と解析値の比較

(a) E8 E9 実験

図 3.11 に、E8 実験の溶融物の拡がり速度の実験値と解析値の比較を示す。実験値の方は床面近傍に設けた熱電対の指示値が所定の値を超えたタイミングとその位置（中心からの

距離) をプロットしたものである。グラフの凡例のところに記した数値は熱電対位置の方向であり、その方向によってプロット位置がばらついていることから分かるように、熔融物の拡がり方は同心円状ではなく時間的に偏りがある。また、実験終了後固化したデブリの大きさを測定しているが、半径に換算するためその寸法を 1/2 とした値を図の右端に示した。JASMINE による解析結果は、熱電対指示値から推定した実測値と著しく離れているわけではなく、拡がり速度については妥当な評価をしていると考えることができる。特に固化後の大きさとは良く一致している

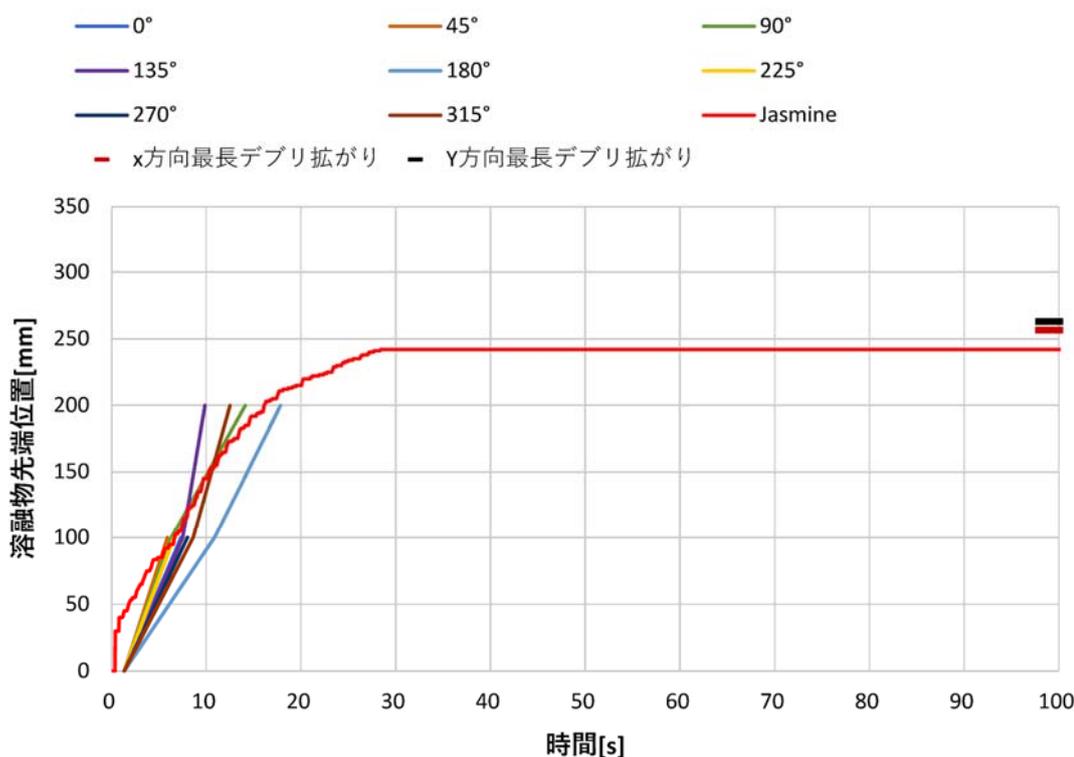


図 3.11 熔融物の先端部の拡がり 実験値と解析値の比較 (E8)

図 3.12 に E8 実験の水温 (熔融物落下点から 400~410 mm、床からの高さ 10 mm) との比較を示す。破線が実測値で、黒実線で JASMINE による計算値である。凡例に示した A***の数値は熱電対位置の方向を示している。JASMINE による解析では熔融物はこの位置までは拡がらない。また、全体的に温度上昇が小さく、且つ初期における温度上昇立ち上がりが遅れて計算されている。水温に大きく影響する現象として、熔融物からの伝熱量が挙げられるが、PULiMS 実験では、熔融物プールの固化表面は凹凸が激しく、実効的な伝熱面積は計算で使用されている床面への投影面積溶離も著しく大きくなる。これを反映するために平成 29 年度から伝熱表面積増加の係数 **multsurf** を導入した。この値を変えた計算 (平成 29 年度と同じ **multsurf**=16) の結果を同じく図 3.12 のオレンジ色の実線に示す。ここにあるように、水温はさらに低くなっている。これはクラスト上面からの冷却が進んだため熔融物の拡がりが抑えられ、高温である熔融物プールから熱電対の

位置が離れてしまい低い温度を示したものである。この溶融物拡がり大きさの影響を排除するため τ_{sol} を 200N/m^2 とした計算を行った。その結果を同図茶色の線で示す。20~40 s の温度上昇幅はわずかに大きくなっただけで温度上昇開始が実験における 10 s 前後よりはるかに遅いこと、20~180 s の長期間にわたり実験値が計算値を上回っていることが解消されていない。この原因を解明するため、水プールを撮影したビデオ映像を詳しく観察した。

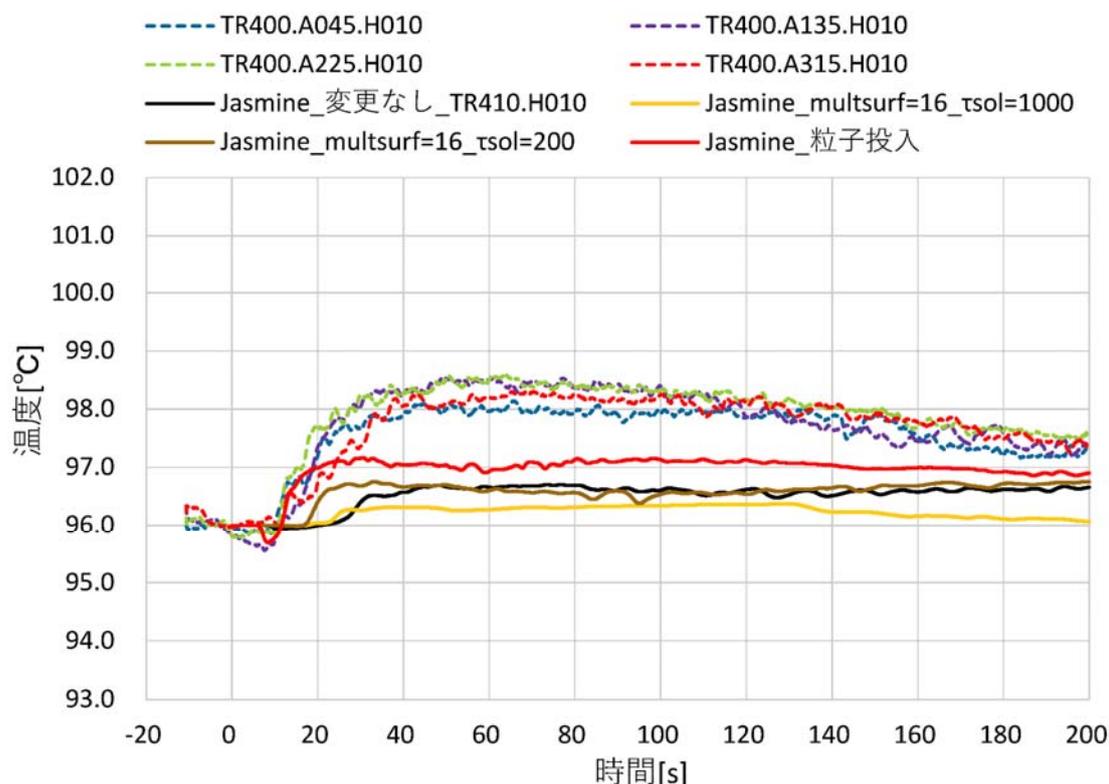


図 3.12 水温の比較 E8 実験 中央から 400mm, 床板表面から 10mm

E8 実験では、溶融物供給用の漏斗の下部に設けられたプラグが直ちには全開にならず初期の約 6 s まで低流量の期間があり、JASMINE の入力もそれを模擬している。この期間の水プールの状況は図 3.13 に示すように、中心部にわずかに溶融物の液滴が発生している状態である（溶融物液滴の周囲には蒸気膜があり、その蒸気と水の界面が写真に写っているため、撮影されているものが溶融物液滴の大きさを表しているわけではない）。その 6 s 後の状態を示したのが図 3.14 であり、多くの液滴が広範囲にわたって落下しているのが分かる。この液滴は JASMINE でモデル化されているような、水中の溶融物ジェットから水-溶融物の相互作用により発生したものではなく、水面に達する前に広がって発生していたのが分かる。

このメカニズムを理解するためにノズル部の映像を調べると、図 3.15 のようになっている。左側が溶融物液滴が拡がっていない時間範囲で、きわめて細い溶融物ジェットが落下

している。一方右側が、液滴が広範囲に広がった時間帯で、水面が盛り上がり、観察が困難な状況になっている。これは増加した落下溶融物により多量の蒸気が発生し水が上方に押し上げられたものであり、この水塊がジェット衝突することによりジェットが乱れ多数の液滴が生じ且つ水平方向の運動を与えたものと考えられる。JASMINE でも蒸気発生や水面の上昇は考慮されているが、軸対称の仮定を設けているため、ジェットの位置（対称の中心軸）では上下方向の運動しか生じず、観察されたような多数の液滴発生と拡がりには計算されない。

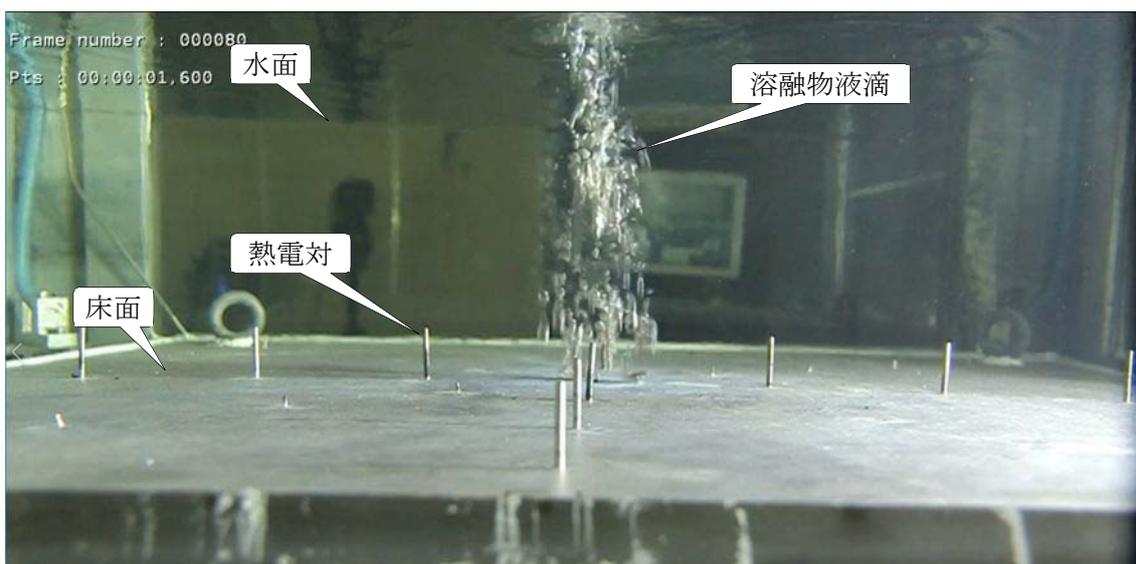


図 3.13 E8 実験の初期における溶融物落下状況

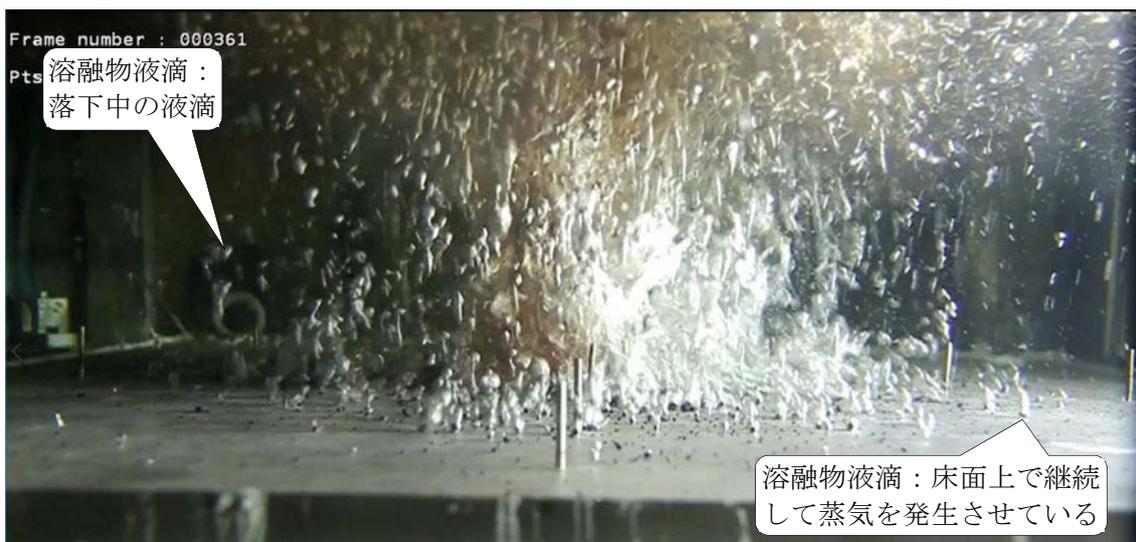


図 3.14 E8 実験の溶融物落下状況（図 3.13 の約 6 s 後）

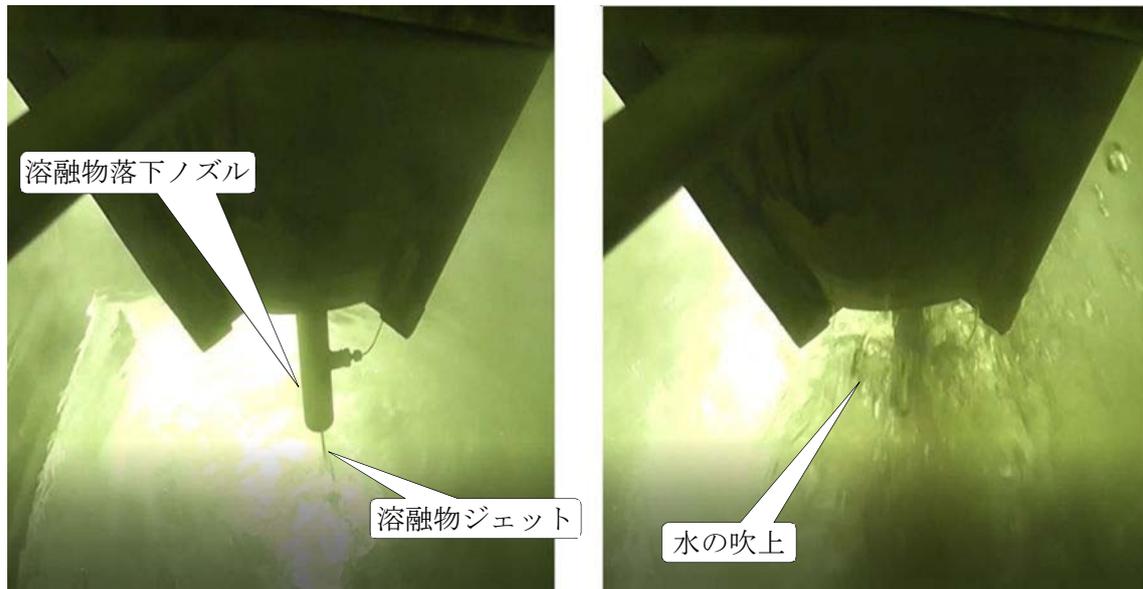


図 3.15 E8 実験の溶融物落下ノズルの状況 (左 4.52 s 右 7.28 s)

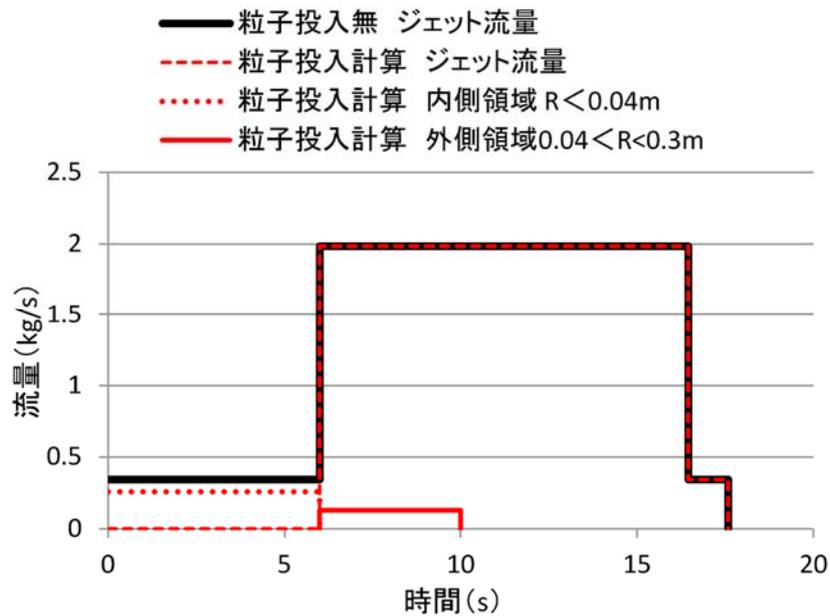


図 3.16 E8 実験の解析 溶融物の流量の入力値

この広範囲の液滴落下を模擬するため JASMINE に備わっている粒子投入オプションを利用した。これは任意の溶融物量を、時間範囲と投入範囲及び初期温度を決めて溶融物粒子として上方から落下させることができる機能である。E8 粒子投入の計算ではビデオ画像から推定して、図 3.16 に示すように初期の低流量の時間帯 (~6 s) はジェットがなく、中心部 (半径 4 cm 以内 : 図 3.13 の状況の模擬) に液滴として落下するとし、且つ 6~10s

では半径 4~30 cm の範囲（図 3.14 の状況の模擬）に液滴が落下するとした。このとき、ジェット流量がその分だけ減るとし、投入する溶融物の全質量は同じとなるようにした。

計算結果を図 3.12 の赤実線で示す。温度上昇のタイミングは早まり、実測値と同様に 10 s 程度から始まり、水温も高くなるが、20 s 以降の約 98℃という高い水温は計算されていない。粒子量を増やした計算や粒子の投入範囲を増やした計算も試してみたが、この時間範囲の実験・解析の差は解消されなかった。

E9 実験においても水温実測値と JASMINE の結果に同様な差がみられる。この原因としては E8 と同様、溶融物の床面上の拡がりではなく液滴上の溶融物が水面に達する以前に広がって落下したものと推定される。図 3.17 は実験開始直後の水プール内の状況であるが広範囲に溶融物液滴が落下しているのが分かる。図 3.18 は、溶融物落下ノズルの映像であるが 1.4 s には、ノズル径に近い太さの溶融物のジェットが落下しており、その 0.4 s 後には蒸気発生による水面の盛り上がりによりほとんど見えなくなっている。E8 と同様に水塊との衝突により液滴が発生飛散したものと考えることができる。E9 の解析においても図 3.19 に示すように初期に粒子の投入を行った。これらの仮定もビデオ画像に基づいたが、定量的には厳密でなく、特に液滴流量は不明で、E8 の場合の半分の流量としてある。また、ジェットの流量は、全投入質量が同じとなるよう 0~25s の間、一様に減らしている。



図 3.17 E9 実験の溶融物落下状況



図 3.18 E9 実験溶融物落下ノズルの状況 (左 1.4 s 右 1.8 s)

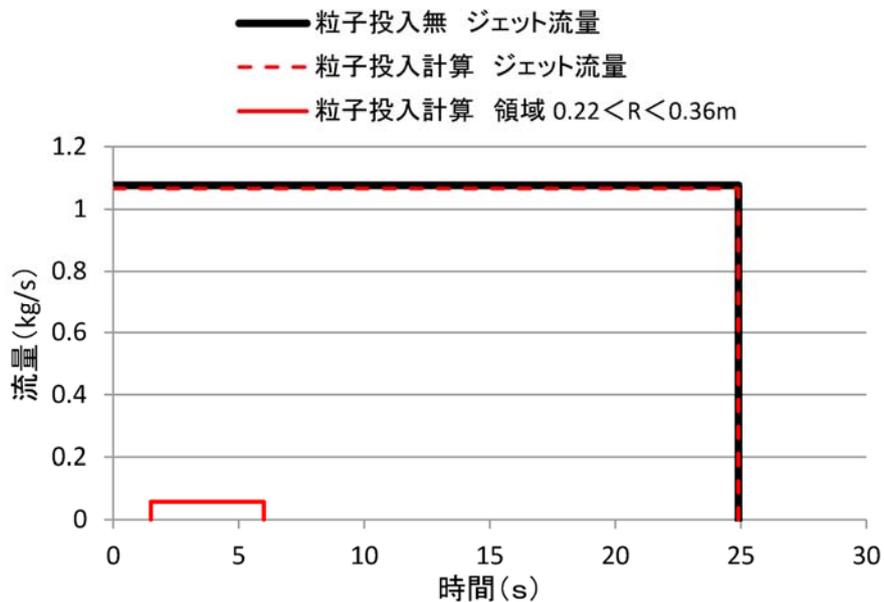


図 3.19 E9 実験の解析 溶融物の流量の入力値

図 3.20 に溶融物先端位置の変化を、図 3.21 に水温の変化を示した。E8 の解析と同様、溶融物の拡がりの計算結果は実験値のバラつきの範囲内に入っている。又水温についても粒子投入によって温度上昇のタイミングは説明できるようになったが、40 s 以降の高温を説明できる結果は得られていない。

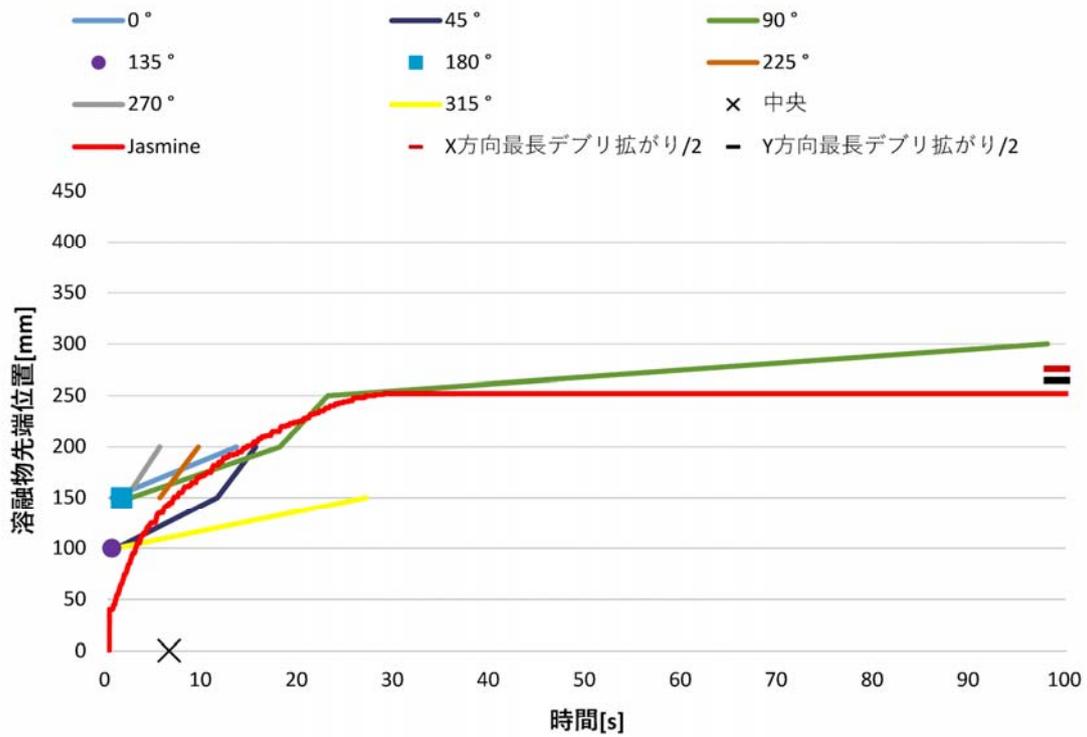


図 3.20 溶融物の先端部の拡がり 実験値と解析値の比較 (E9)

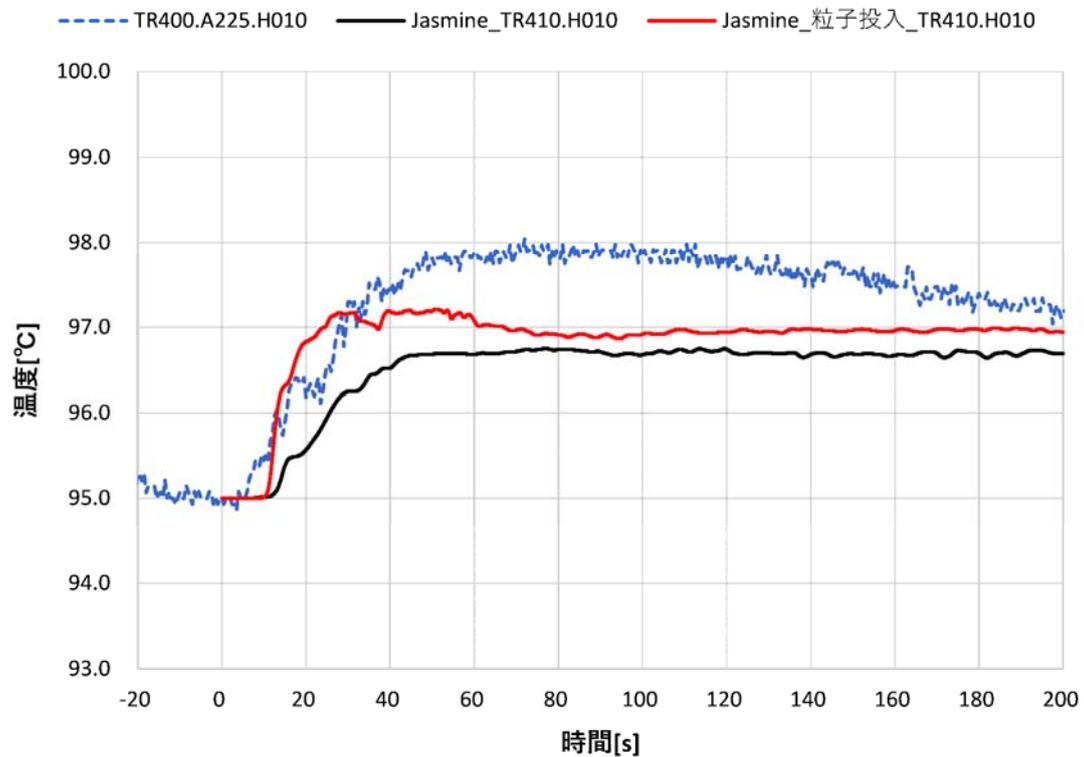


図 3.21 水温の比較 E9 実験 中央から 400mm, 床板表面から 10mm

(b) 今回新たに行われた実験との比較

今回報告された E10～E15 実験では、多数の熱電対が設置されているが、溶融物の拡がり範囲が広くかつ溶融物プールの液深も大きいので、JASMINE の計算上、低い位置にある熱電対に対応する水側計算セルが溶融物に占められ、温度計算の意味を失ってしまう場合がある（存在しない水の温度をダミー値として出力する）。以下、水が存在する計算セルの値と対応する位置の実測値の比較を示す。このため溶融物落下点近傍では高い位置の熱電対のグラフが多く、落下点から離れると低い位置の熱電対のグラフが表示される（落下点から距離がある位置には高い位置の温度測定箇所が少ない）。E11～E15 実験は、熱電対の位置表示の番号の基準点と溶融物落下点が一致していないので、各熱電対位置と溶融物落下点との距離を計算し、最も近い計算セルの値と比較した。計算セルの大きさは半径方向、高さ方向とも 20 mm なので、例えば、高さ 5mm の位置の熱電対指示値は、一番下の計算セル（中心高さ 10 mm）のものと比較することになる。

① E10 実験

E10 実験は、観察窓を兼ねた石英ガラス板を有する新しい実験体系が適切に機能するか試験することを目的としている。

図 3.22 に、溶融物の拡がりの変化を示す。実験における溶融物先端部の位置は、高速度ビデオで石英ガラス越しに撮影された溶融物の先端位置から求めたものと、熱電対の温度上昇から判断したのものがある。熱電対は応答速度が遅く、又溶融物が到達しても高温の溶融物と低温の熱電対のシースが完全に密着するわけではなく、溶融物とシースの間に隙間が生じ、水膜が形成されるようで、沸点（100 °C）にまで達しない場合が多い。測定値を見ると図 3.23 に例を示すように、単調増加するわけではなく温度の上下動がある。これは高温となった水が通過した後に低温の水が来るとこのような変動が生じると解釈できる。そこで、溶融物の到達判定として次の条件（and 条件）を仮定した。

- (i) 床面から 10 mm 以下の高さの熱電対を対象とする。
- (ii) プール水初期温度と飽和温度の中間の温度（E10 の例では 95 °C）に達する。
- (iii) この温度を一定時間（10 s と仮定）以上維持する。

例として図 3.23 には、この時刻を丸印で記入してある。

このようにして求めた溶融物の到着時刻と溶融物落下点から熱電対までの距離を図 3.22 にプロットしてある。溶融物の拡がりは一様ではないため、プロット点は大きくばらつく。(i)～(iii)の条件を満たさない場合には溶融物はこの熱電対位置には到達しなかったと判断し、図 3.22 に右端にその熱電対の位置をオレンジ色の横線で示した。

このほか実験終了後、固化物の cake の寸法を測定している。固化物の長辺（石英ガラス板と平行な方向）の半分（拡がりの半径に相当すると仮定した）と短辺（石英ガラス板と直交する方向）をそれぞれ図 3.22 の右端に赤黒の横線で示した（赤：短辺、黒：長辺の 1/2）。

高速度ビデオで観察された溶融物の拡がり速度は初期に著しく大きく、JASMINE では表現されていない。しかし、温度データから算出した先端位置や固化後の寸法データとは比較的良好に一致している。石英ガラス板を設置することによりその方向の拡がり速度が

大きくなる、又は大きく観察されるメカニズムがある可能性がある。

図 3.24 に示した水中温度の測定値は、20 s 以降、緩やかに低下していくもの (TR400.A000.H005 や TR412.A076.H005 など) と 40 s 以降変動しながら急速に低くなっていくもの (TR400.A-90.H005 や TR400.A090.H005 など) に分けられる。急速に低くなるものは、初期温度よりも低くなっているが、複数の熱電対が同様の傾向を示すことから、熱電対の断線や計測系の故障ではなく、初期に水が十分に一樣温度となっておらず、実験開始後に低温の水がセンサー部に流入したものと考えられる。また、溶融物落下前の水温データのバラつきも他の実験ケースよりも大きい。

JASMINE による水温の計算結果は、初期の温度上昇が小さいが 140 s 以降は実測値よりも高くなっている。これは、落下点より 0.4 m ほどかなり離れているにもかかわらず水温上昇開始が早いことからわかるように、実験開始直後には E8 や E9 実験であったように溶融物粒子が多数発生し且つ広い範囲に広がったためと推定される。

② E11 実験

E11 実験は、E10 実験よりも溶融物量を増し、また供給速度を増加させその効果を調べた。図 3.25 は溶融物拡がりの先端位置の変化を示す。このケースでは実測値のバラつきも比較的小さくまた JASMINE による解析値は、実測値に良好に一致している。

図 3.26 は、溶融物落下点から 500 から 520 mm 離れた位置における水温の比較である。解析結果は E-10 実験の時と同様、実験開始直後の水温上昇を低めに見積もっている。

③ E12 実験

E12 実験ではマイルドな条件、すなわち小過熱度・小流量の溶融物を小口径のノズルから低サブクールの水へ落下させ、その効果を調べた。溶融物のスーパーヒートが小さいため、わずかな初期温度評価の影響が大きく現れる。溶融物供給漏斗には二つの熱電対が設けられており、その一方の指示値の最高温度は 885.2 °C であるが、他方の最高温度指示値は 875.4 °C であった。低温側の値 875.4 °C は比較的長時間維持されるが、高温の値 885.2 °C を示すのは短時間であり直ぐに低温側の指示値に近づく。そこで、このケースの解析では、低温側の値 875.4 °C (1148.55 K) を溶融物温度初期値として採用した。他の実験ケースの解析では、溶融物のスーパーヒートが大きく初期温度に計算結果が敏感でないので、常に最高温度を入力値として使用している。

図 3.27 は、溶融物拡がりの先端位置の変化を示したもので測定値のバラつきが比較的大きいが、JASMINE による解析値はほぼ中央の値を与えている。ビデオ画像から算出した拡がりは極めて大きく、固化後に測定された長辺 (ビデオで観察された方向) の 1/2 よりもさらに大きい。これは溶融物流れが対称でなく、ビデオによる先端位置の算出に使用された方向に特異的に多く流れたことを示している。

図 3.28 は、溶融物落下点に近い 180~200 mm の距離の高い位置 (床から 25~30 mm) での水温の比較である。JASMINE による解析では水温は飽和温度に達しているが、実測値ではそこまでは高い値を示していない。図 3.29 は、落下点中心からの距離 400~410 mm、

床からの高さ 5~30 mm の位置での水温の比較である。これまでと同様 JASMINE の解析結果は立ち上がりが遅く、且つ 100 s 以降は実測値よりも高く計算している。また実験・解析とも、高さの差による影響は小さい。

④ E13 実験

E13 試験では、熔融物温度を高くしてその影響を調べた。図 3.30 は熔融物拡がりの先端位置の変化を示したもので、JASMINE の解析値は、バラつきの範囲に収まっている。ビデオ映像から推定した拡がり速度が大きいのは他の実験ケースと同様である。

図 3.31 は、熔融物落下点の近くの 220~240 mm の距離で、高い位置（床面から 25~30 mm）の水温である。JASMINE では飽和温度に達しているが実測値はわずかにサブクールがある。また温度上昇の開始は実験によるものの方が早い。

図 3.32 は、落下点中心からの距離 400~420 mm、床からの高さ 5~30 mm の位置での水温の比較である。これまでと同様 JASMINE の解析結果は初期の立ち上がり幅が小さく、且つ後期（このケースでは 140 s）は実測値よりも高く計算している。また E12 と同様、実験・解析とも高さの差による影響は小さい。

⑤ E14 実験

E14 実験で採用された実験条件は、他の実験ケースの中間の値となっているものが多い。図 3.33 に、熔融物の拡がり先端位置の変化を、図 3.34 に熔融物落下点近傍の高い位置（距離 240~260 mm、高さ 25~30 mm）の水温を、図 3.35 に熔融物落下点から離れた場所（距離 400~420 mm）の水温を示す。これまでと同様 JASMINE は、熔融物が到達した距離では水温を高く、熔融物が到達しない距離では立ち上がりをゆっくり計算している。このケースでは 200 s に遠距離での水温が JASMINE と実測値で一致している。

⑥ E15 実験

E15 実験では、熔融物温度を高くし又供給量も最大とした。図 3.36 に、熔融物の拡がり先端位置の変化を、図 3.37 に熔融物が到達した距離の高い位置（距離 400~420 mm、高さ 25~30 mm）の水温を、図 3.38 に熔融物が到達しない場所（距離 400~420 mm、高さ 5~10 mm）の水温を示す。これまでと同様 JASMINE は、熔融物が到達した距離では水温を高く、熔融物が到達しない距離では立ち上がりをゆっくり計算している。このケースでは 200 s に E14 と同様、遠距離での水温が JASMINE と実測値で一致している。

なお、図 3.36 の拡がり先端位置の立ち上がりの時刻が、ビデオ画像からの線と熱電対から得たプロット点がずれていることから分かるように、熱電対温度履歴の時刻原点が 5 s ほどずれているようである。入手資料に記載されたタイミングテーブルの数値をもとに原点時刻を決定したが、どこかに過誤があった可能性がある。

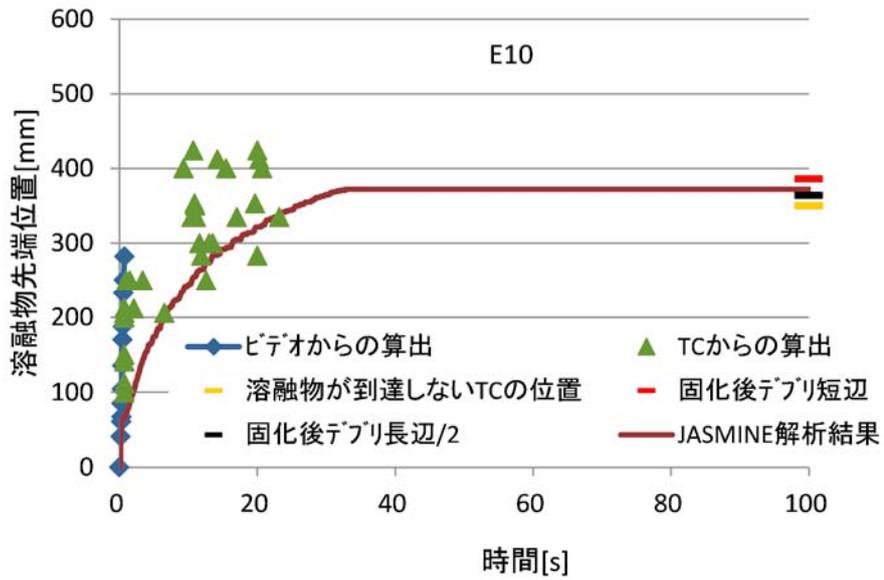


図 3.22 溶融物の先端部の拡がり 実験値と解析値の比較 (E10)

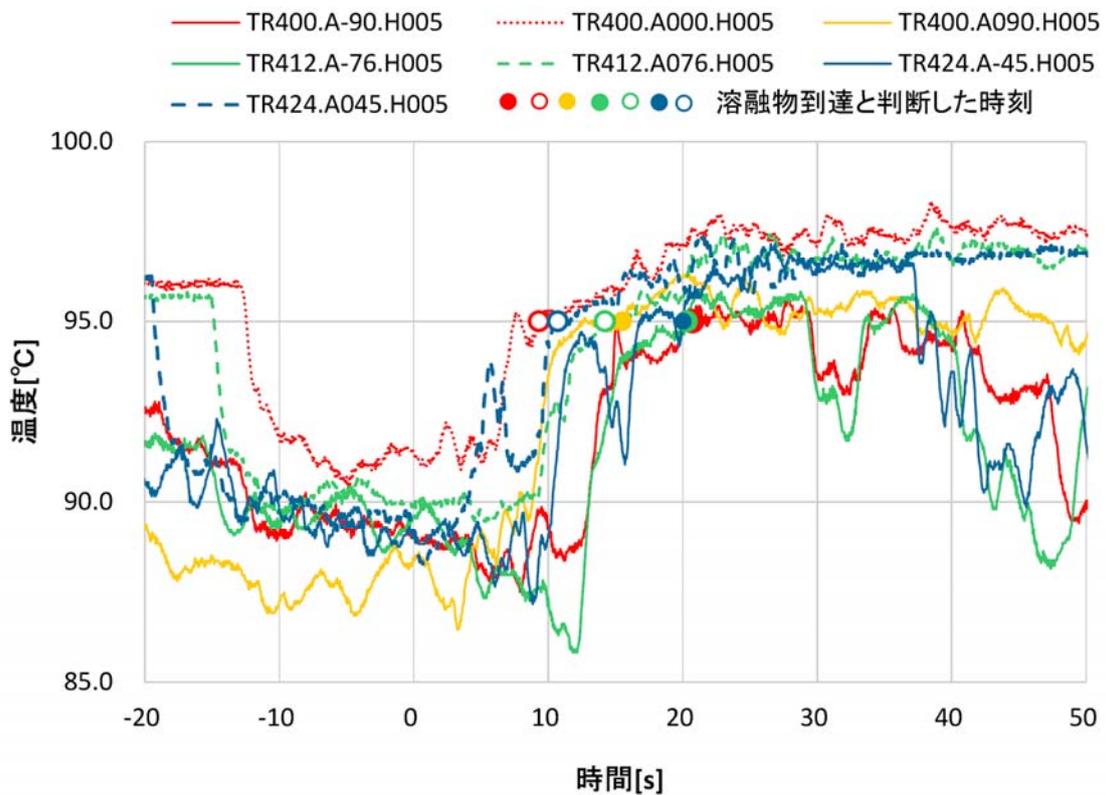


図 3.23 水中温度の測定値と溶融物到達判定時刻の例 (E10、R=400~424 mm H=5 mm)

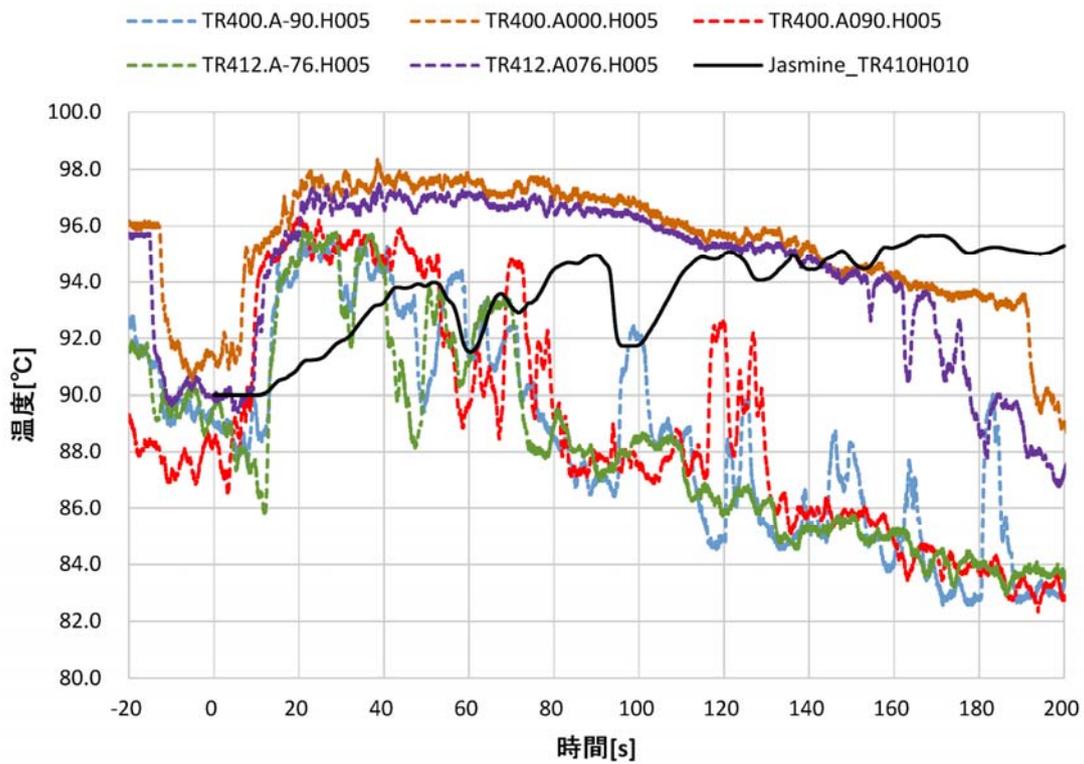


図 3.24 水中温度の実験値と解析値の比較 (E10、R=400~420 mm H=5~10 mm)

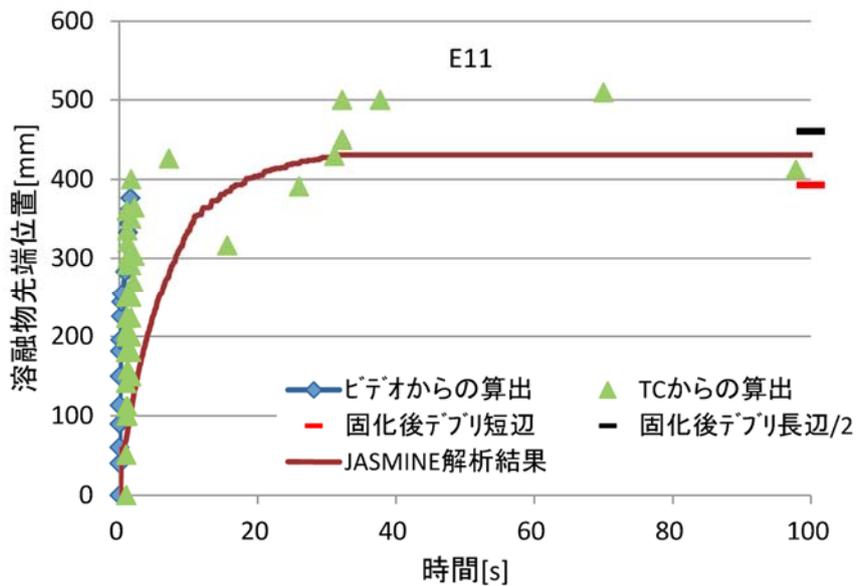


図 3.25 溶融物の先端部の拡がり 実験値と解析値の比較 (E11)

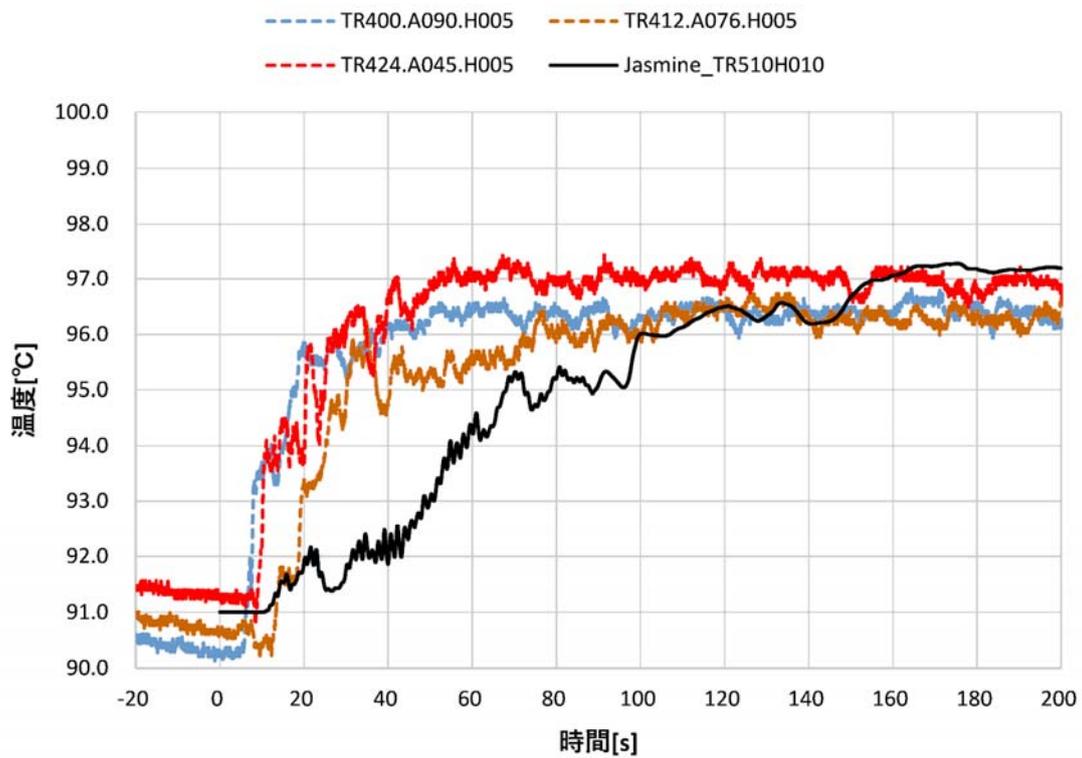


図 3.26 水中温度の実験値と解析値の比較 (E11、R=500~520 mm H=5~10 mm)

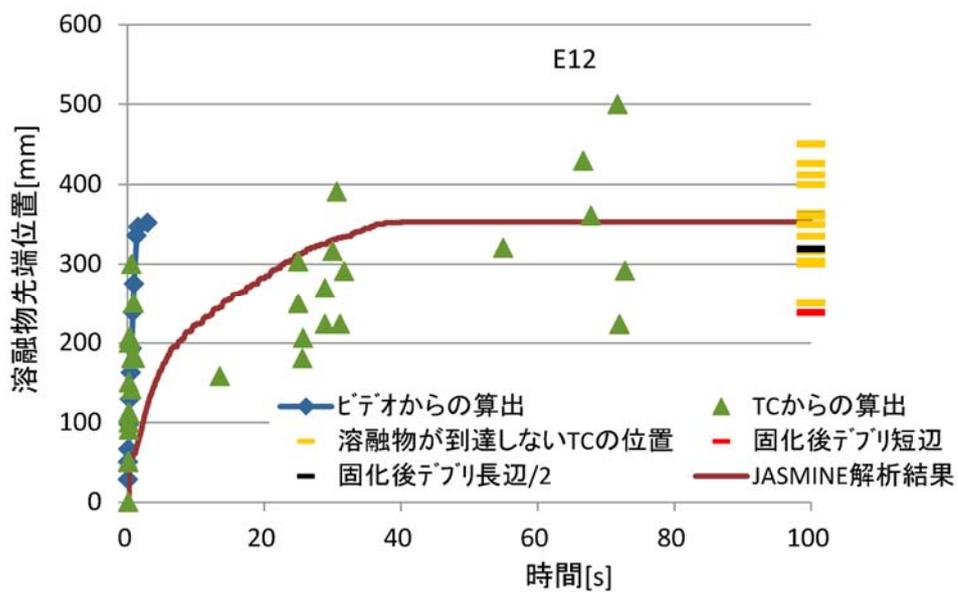


図 3.27 溶融物の先端部の拡がり 実験値と解析値の比較 (E12)

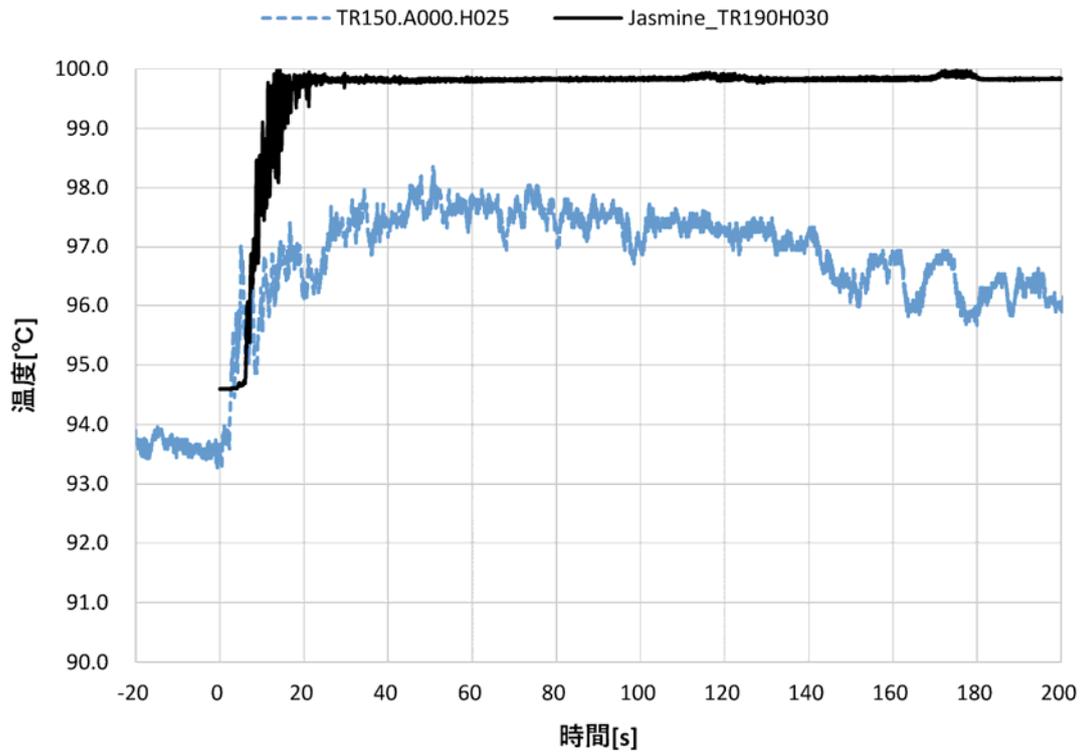


図 3.28 水中温度の実験値と解析値の比較 (E12、R=180~200 mm H=25~30 mm)

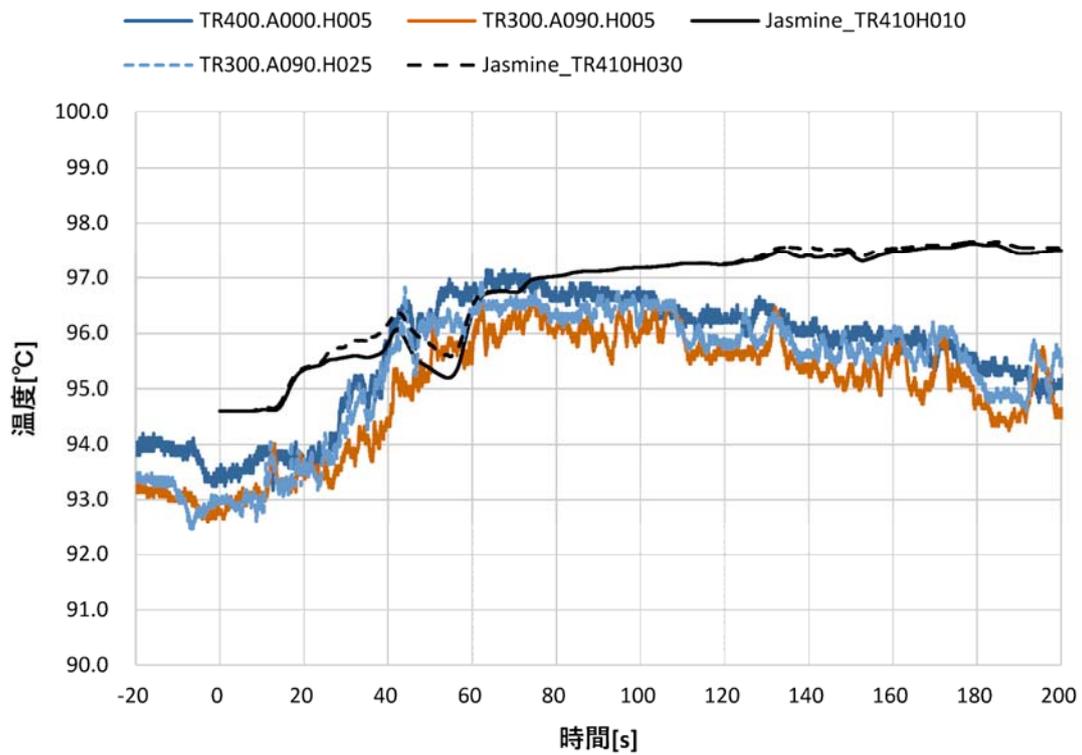


図 3.29 水中温度の実験値と解析値の比較 (E12、R=400~410 mm H=5~10 mm)

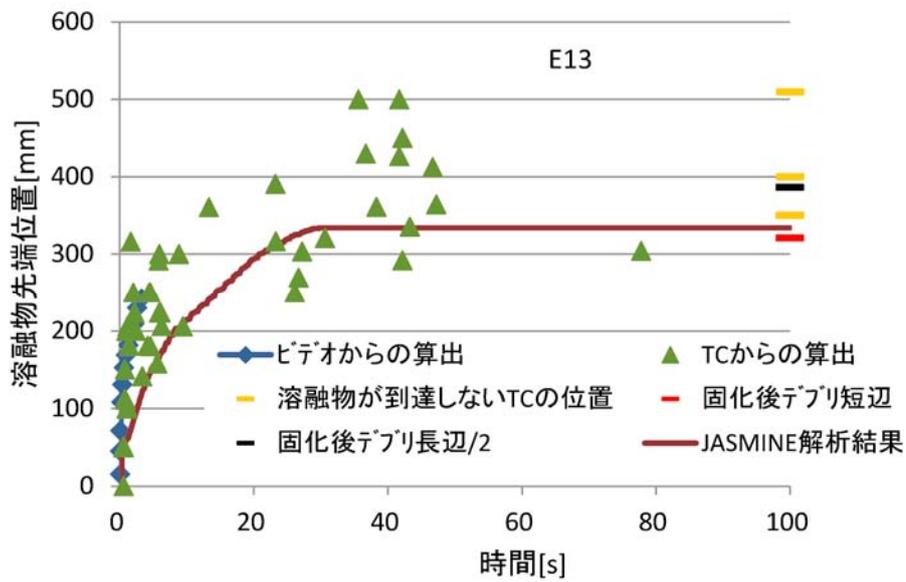


図 3.30 溶融物の先端部の拡がり 実験値と解析値の比較 (E13)

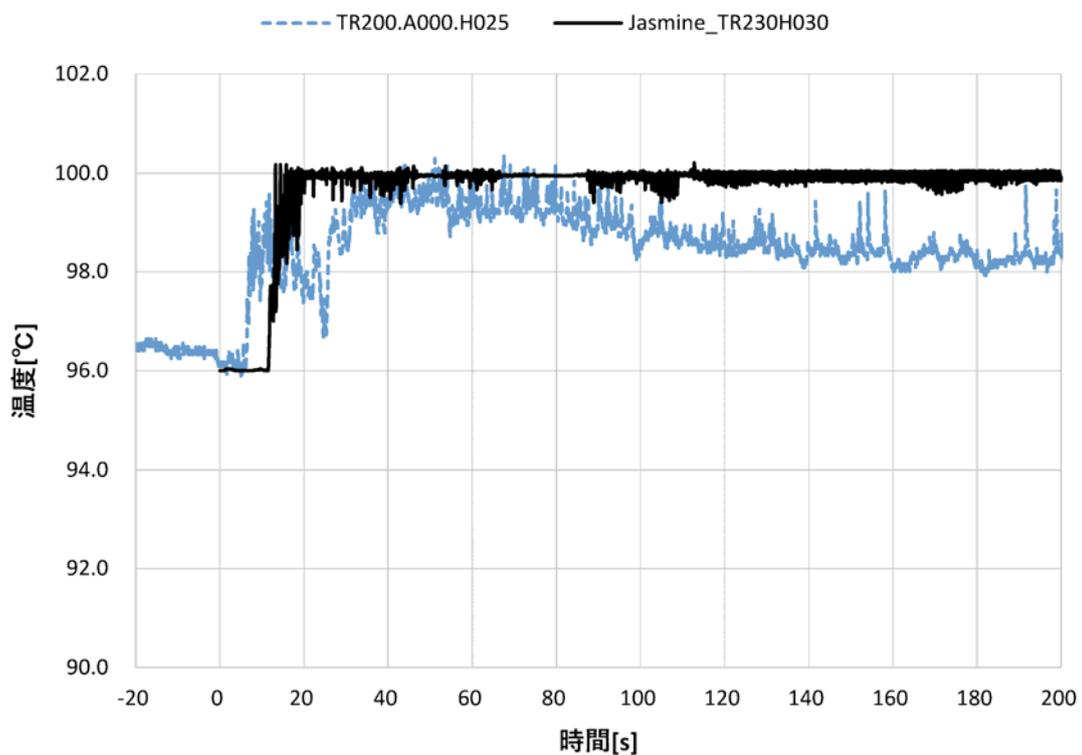


図 3.31 水中温度の実験値と解析値の比較 (E13、R=220~240 mm H=25~30 mm)

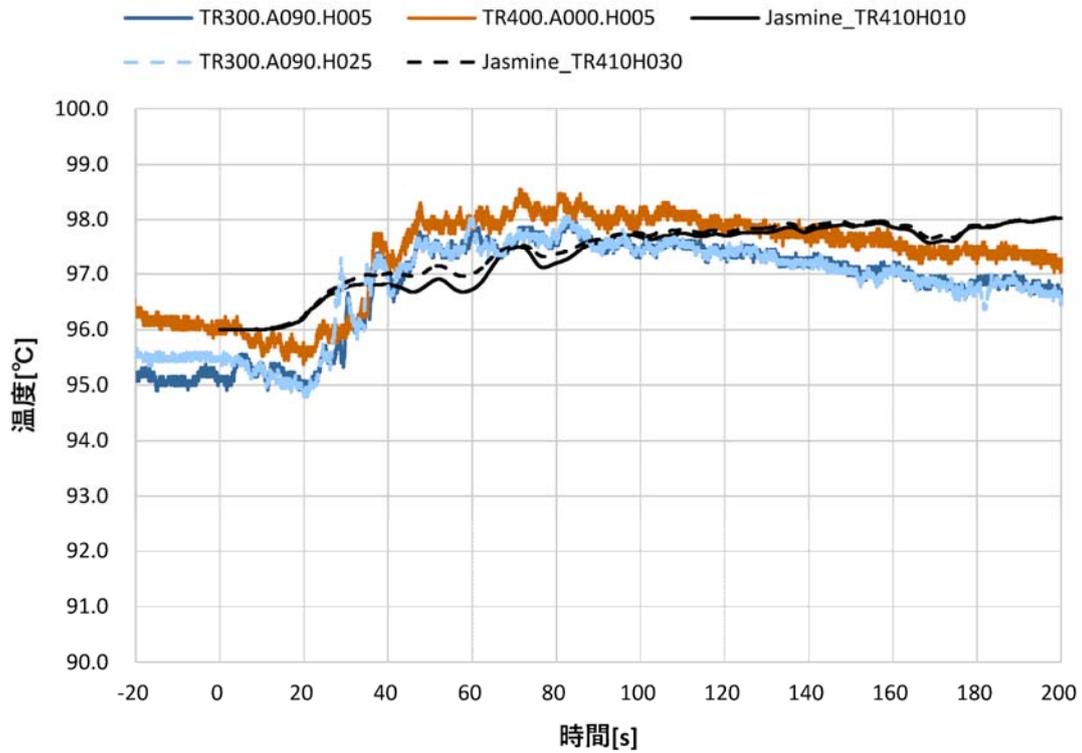


図 3.32 水中温度の実験値と解析値の比較 (E13、R=400~420 mm H=5~30 mm)

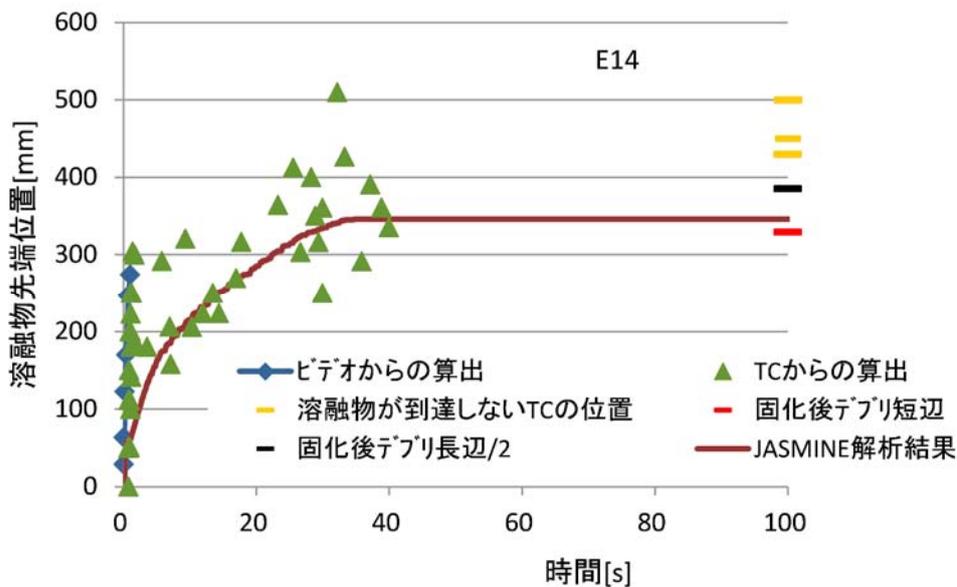


図 3.33 溶融物の先端部の拡がり 実験値と解析値の比較 (E14)

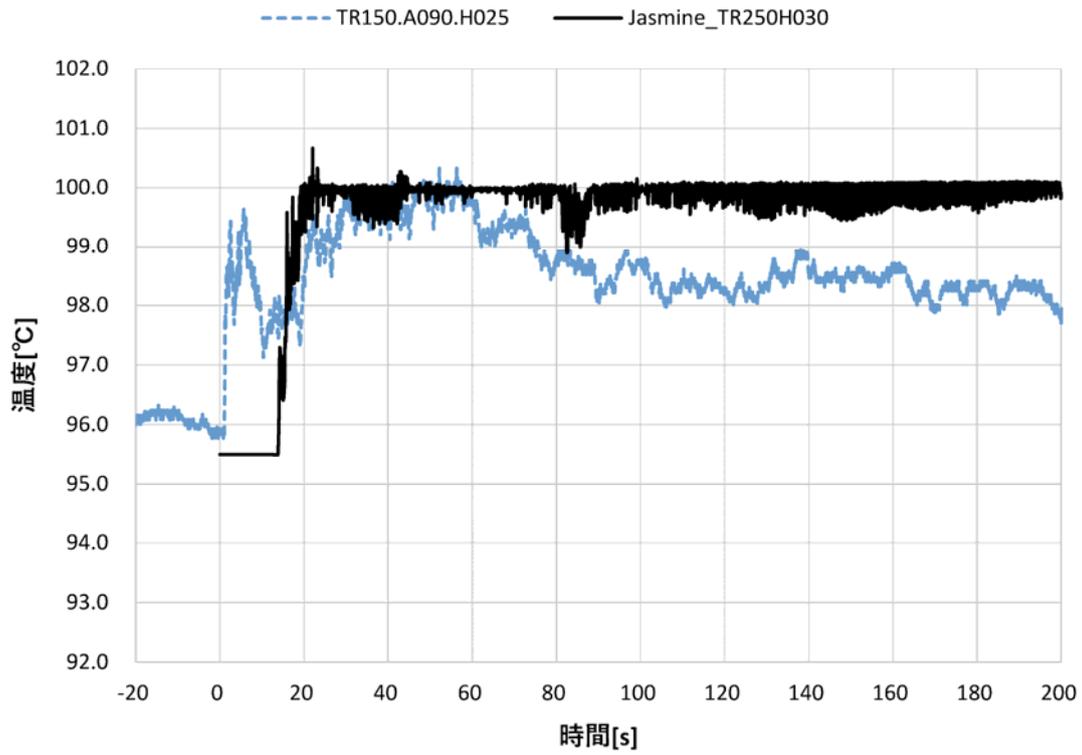


図 3.34 水中温度の実験値と解析値の比較 (E14、R=240~260 mm H=25~30 mm)

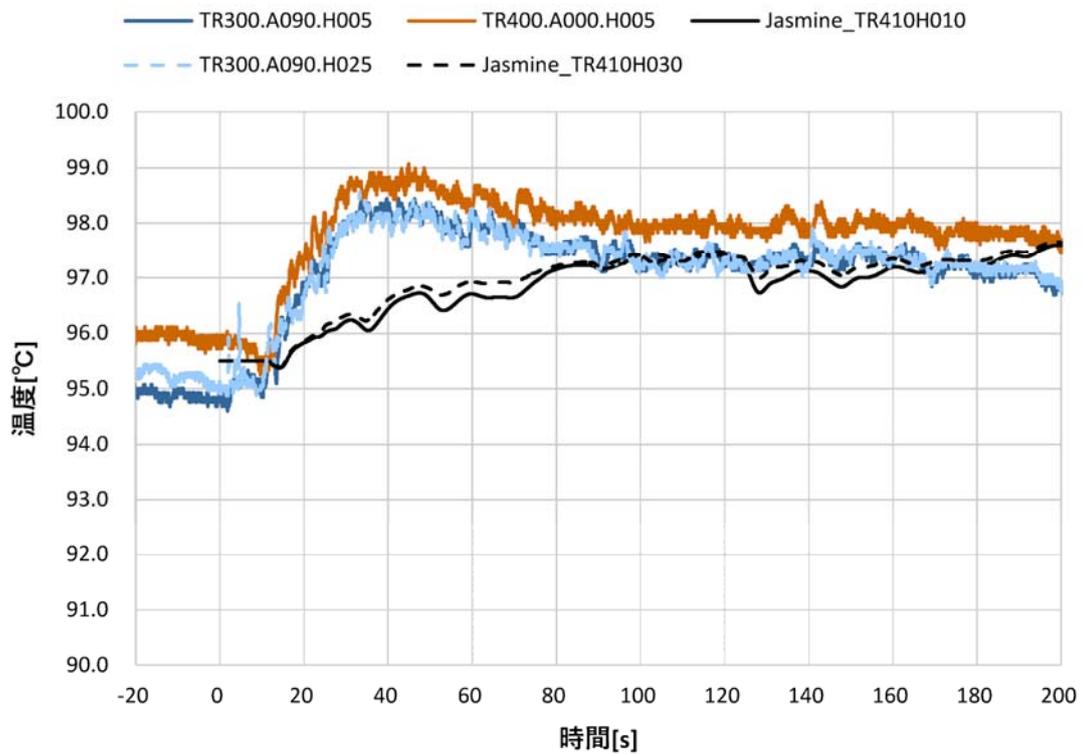


図 3.35 水中温度の実験値と解析値の比較 (E14、R=400~420 mm H=5~30 mm)

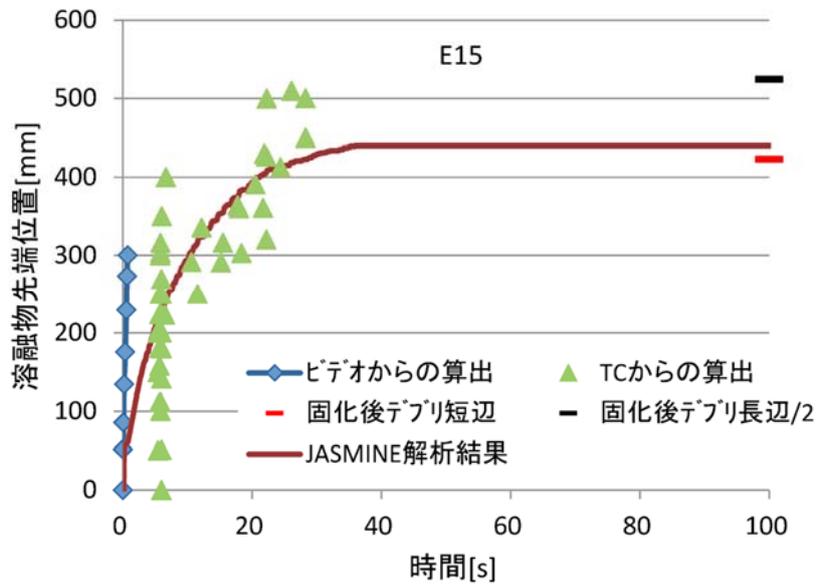


図 3.36 溶融物の先端部の拡がり 実験値と解析値の比較 (E15)

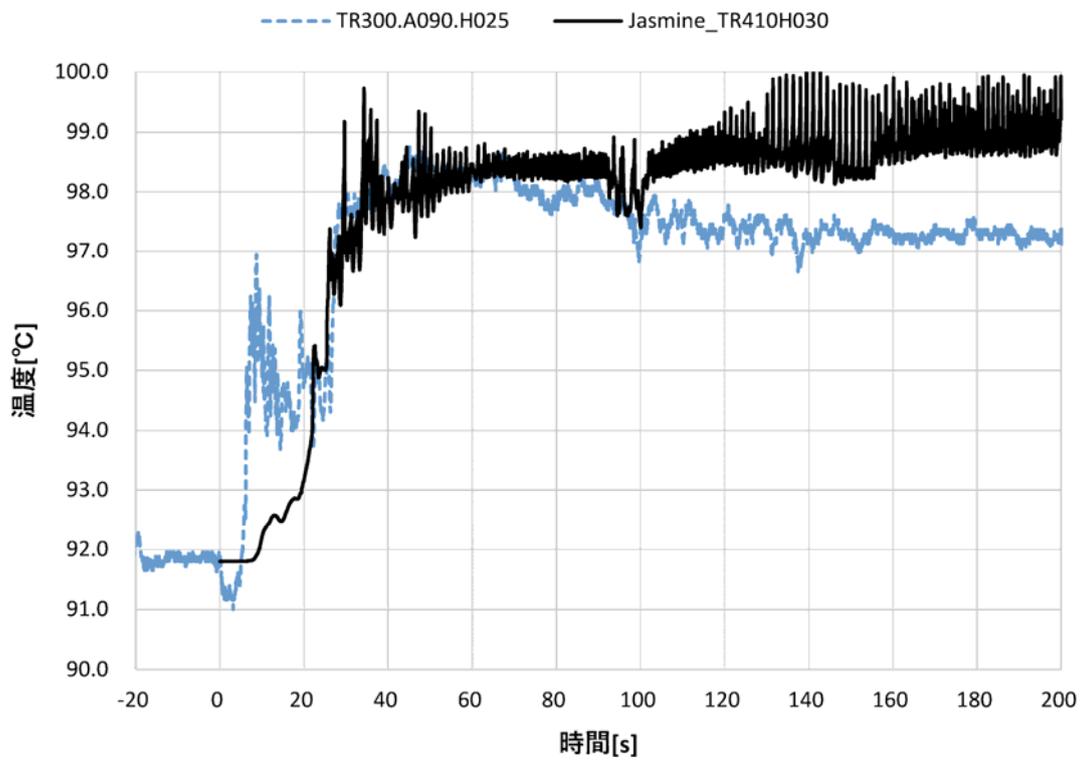


図 3.37 水中温度の実験値と解析値の比較 (E15、R=400~420 mm H=25~30 mm)

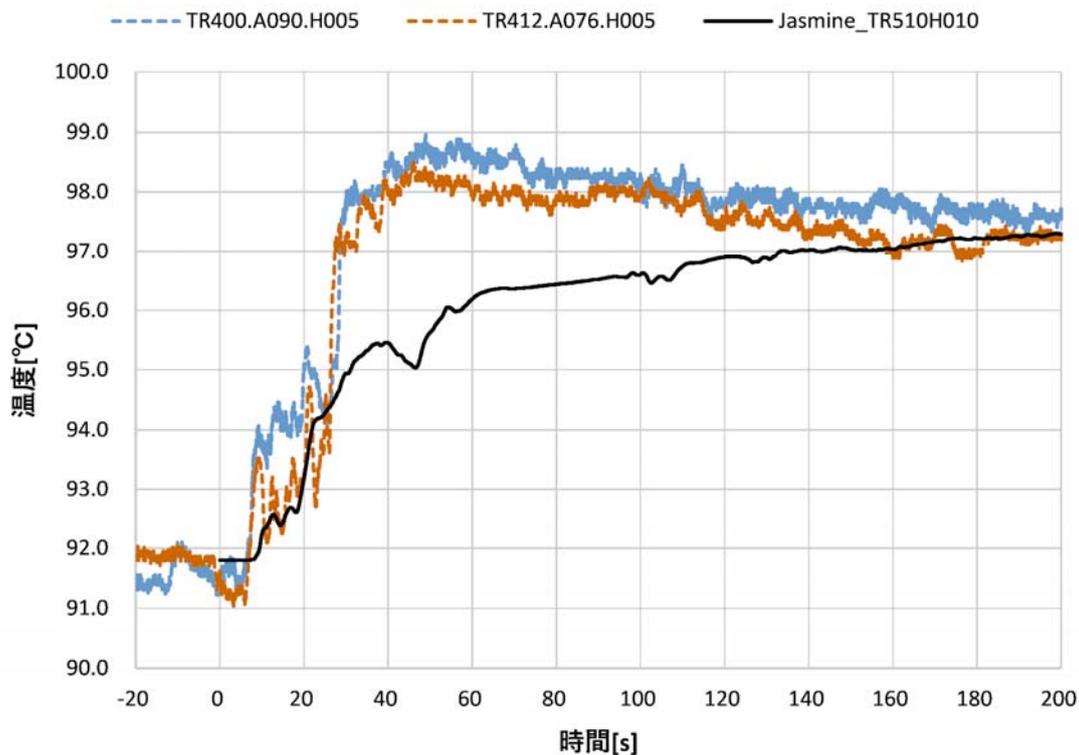


図 3.38 水中温度の実験値と解析値の比較 (E15、R=500～520 mm H=5～10 mm)

(c) 溶融物拡がり速度と水温解析結果のまとめ

これまで述べた JASMINE による溶融物先端の拡がりの過渡変化をまとめると以下のようになる。

- ・実験開始直後の拡がりにはビデオ映像から得られているが、この拡がり速度は JASMINE によるものよりも大きい。
- ・温度計測から得られた拡がりには、方向によってばらつきが大きい JASMINE の結果とかけ離れたものではない。
- ・固化後のデブリの寸法計測値は JASMINE の結果と良好に一致する。

実験開始直後の拡がりの不一致の原因は、溶融物ジェットが床面に衝突した時のモデルが適切でないためと考えられる。液位が低いときには床面への衝突噴流は運動エネルギーを失うことがないので、落下速度と同じ速度で水平方向の速度を持ち、流れモードは射流（流速が表面波速度よりも大きい）となる。JASMINE ではジェット衝突時の運動量変化が、中央の計算セル表面に働く力積となるとして中心部の境界条件を与える。

$$P_{jin} = \frac{1}{2} \frac{\rho v_j^2 D_j^2}{4x_1^2}$$

ここで、 P_{jin} : 溶融物プール計算第 1 セルの表面に加わる圧力、 ρ : 溶融物密度、 v_j : ジェット落下速度、 D_j : ジェット直径、 x_1 : 第 1 セル寸法である。

このため、ジェットの半径が中央セルの大きさに等しい場合は妥当であるが、計算セル

が著しくジェット半径よりも大きくなると水平方向速度を過小評価するようになる。

水中温度の計算結果をまとめると

- ・ 溶融物が拡がった領域の上方の温度は、JASMINE では飽和温度を示すが、実測値ではそこまで上がらず数度のサブクールがある。

- ・ 溶融物が到達しない場所の低い位置での温度については、JASMINE は初期には低めに評価するが、100~200 s 以降は高めに計算する。

溶融物が到達しない位置での初期の温度上昇には、溶融物ジェットノズルからの液滴発生が原因している可能性がある。定常流の安定したジェット形成の前の過渡的な乱れた状態での液滴発生や、水面の盛り上がりでジェットを乱して多数の液滴粒子が発生しそれが広い範囲に飛び散って水温を上昇させたと考えられる。

後期の実測値における水温低下について検討するため長時間にわたる温度変化を調べてみた。図 3.39 は E8、E13、E14 の、いずれも溶融物ジェット落下点から 400~420 mm、高さ 5~10 mm における水温の測定値を 1000 s までグラフにしたものである。赤線が E8、緑線が E13、青線が E14 の結果を表す。0~50 s の溶融物供給で温度が急上昇するがその後は緩やかに低下していき初期温度よりも低くなる。この温度低下は自然冷却、すなわち実験容器の周囲への放射と対流による除熱、水プール表面での蒸発の潜熱、水プール表面からの放射伝熱があるが、これらはいずれも JASMINE では考慮されていない。温度低下速度は E13 が最も早く、E8 が遅い。これらの実験の初期プール水深さは 200 mm と同一であり、容器寸法の小さい E8 よりも E13、E14 の方が、温度低下が早いということは自然冷却以外の影響があることを示している。

E13、E14 実験では体系を 1/2 とするためと観察のために石英ガラス板を設けている。この板の実験領域の反対側の温度は測定されておらず、実験開始時に実験領域よりも低くなっていた可能性がある。すなわち実験が始まり、溶融物落下側の水温が上昇すると、密度差により石英ガラス外側の低温の水が緩やかに流れ込んできたものである。この外側の初期水温が異なると温度の低下速度も異なる。これが、E13、E14 で温度低下速度が異なることの説明となる。

なお、解析対象での時間範囲では、水温は初期温度と飽和温度の間であり、PULiMS 実験では小サブクール条件で実験しているため、温度の絶対値の変化幅は小さい。従って JASMINE と実測値との誤差といっても最大で 2~3 °C 程度の小ささである。

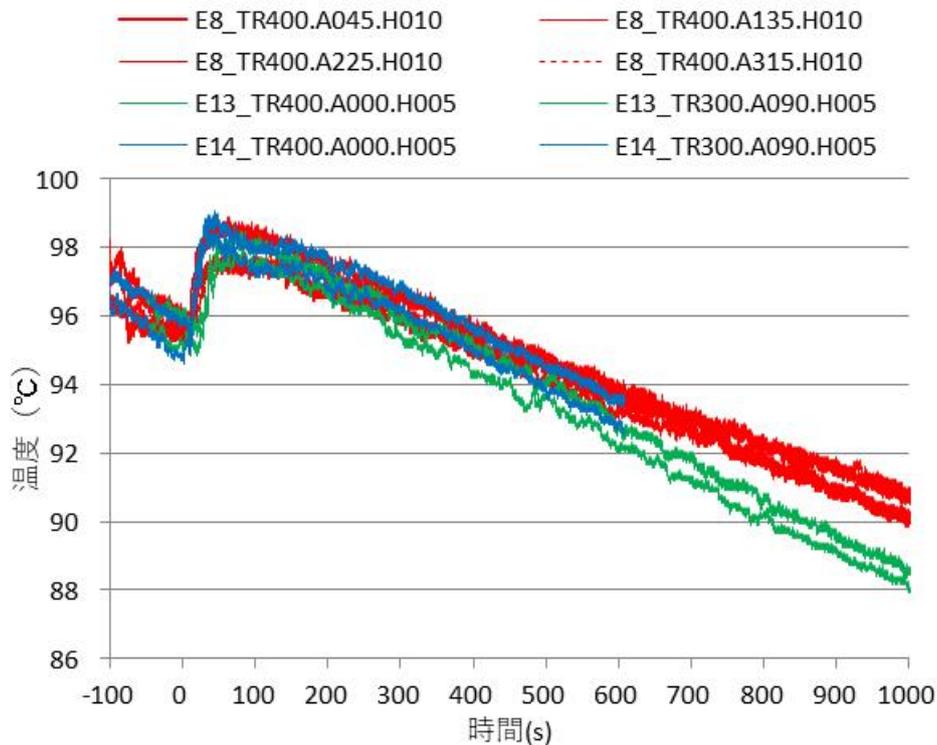


図 3.39 水プール温度測定値の長期的変化（落下点からの距離 400～420 mm）

(d) 伝熱表面積増加係数の検討

溶融物表面のクラストに生じる凹凸が水への伝熱面積を増加させる現象を考慮するために JASMINE では伝熱表面積増加係数（実効伝熱面積のクラストの床面投影面積に対する比）を入力できるようになっている。

図 3.40 に、PULiMS 装置 E8 実験の後の溶融物の固化状況を示す。このようにクラストの表面は平坦でない。このために実効的な熱伝達表面積は、溶融物が床上状で占めた面積（投影面積）よりもかなり大きくなる。そこで昨年度の改良により、実効表面積と投影面積の比 S_m を入力で与えるようにした。JASMINE 内部では、沸騰熱伝達相関式による熱流束の値を S_m 倍する。ただし、クラスト内部の蒸気と水の対向流の圧力損失の大きさが限界となるドライアウト熱流束は、この値の影響を受けないとした。

なお、クラスト表面の凹凸を半球で近似すると、「半球表面積+円面積」より、この比は 2 となる（図 3.41 参照）。

$$S_m = 2\pi r^2 / \pi r^2 = 2$$

同様に半球表面にさらに小さい凹凸（半球）があれば、 S_m は $2 \times 2 = 4$ となる。



図 3.40 PULiMS 実験の溶融物表面形状 (E8 試験)

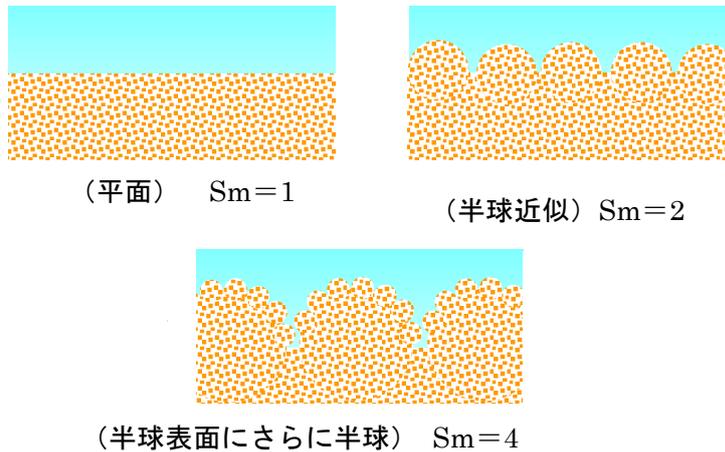


図 3.41 クラストの表面形状の近似

今回の解析では、この値として 8 を使用した。この値により水温の計算結果が実測値よりも高いところや低いところが生じるからである。この値が PULiMS 以外の条件に適用できるか検討する。

PULiMS 実験によって作られたクラストの写真 (図 3.42、図 3.43) を観察すると以下のようなメカニズムで凹凸が作られたと推測できる。

- (1) 溶融物流れが均一でないための凹凸。先端部の不均一や、乗り越え流れのある場所とない場所の高低差など。
- (2) メルトエラプションによるもの。半球での近似は困難である。形成点の間隔は離れているが、エラプションで作られる塔状の構造の伝熱表面積/床面投影面積は半球の場合よりかなり大きい。
- (3) 表面張力に起因するもの (溶融物粒子が表面に付着固化した上を溶融物が流れたような場合や流れの先端部)。曲率半径は重力と表面張力で決まる。

(4) 溶融物粒子が付着・固化したもの。曲率半径は溶融物ジェットからの粒子生成時に決まる。

形成される凹凸のスケール（曲率半径）は、これらの写真から判断すると（1）≒（2）≫（3）≫（4）となる。

一つのメカニズムで形成される凹凸の形状が半球で近似できるとすると、前述のように伝熱表面積増加係数は2となる。またスケールの異なる凹凸が重畳すると、伝熱表面積増加係数は積で表される。従って上記のすべてのメカニズムによる凹凸が半球で近似でき且つ隙間なくクラスト表面を覆うとすると伝熱表面積増加係数は $2^3 = 8$ となる。

もし、上記のように3種の異なるメカニズムで3種の異なるスケールの凹凸が生じるといふ仮定が正しいとすると、物性値に依らず伝熱表面積増加係数は同程度になると推定され、 $2^3 = 8$ に近い値が実機解析にも使用できることになる。但し、凹凸のある表面での沸騰熱伝達において、凹凸の曲率半径によらず単純に面積に比例した伝熱量が得られるか、さらに検討が必要である。膜沸騰等において表面に形成される蒸気膜の厚み等が凹凸のスケールに近づけばこれらの仮定が成立しなくなるからである。

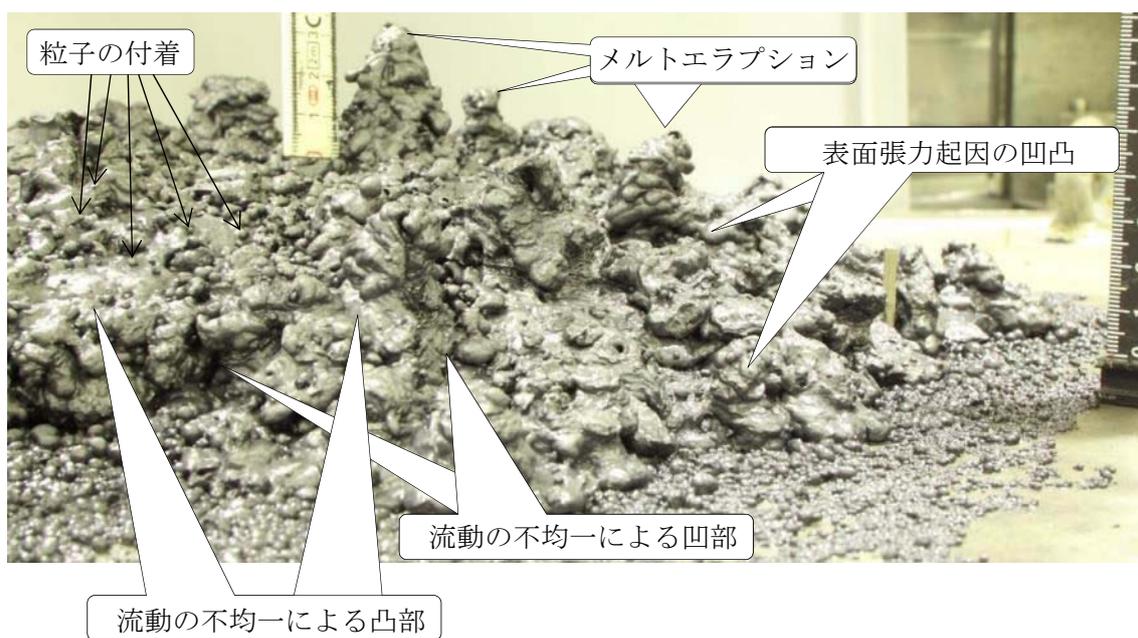


図 3.42 固化デブリの拡大写真（E8 実験の例）



図 3.43 固化デブリの拡大写真 (E11 実験の例)

3.4 気相中実験に適用するための改良

(1) 計算機能の追加

これまで述べたように PULiMS 実験は体系が小さいために溶融物の表面における張力が現象を支配している。JASMINE を検証する上で実機と同様な重力と慣性力が主要な力となる大きな体系で比較することが望ましい。これまでの大規模試験は、床上に水プールの存在しないドライ条件で行われるものが多かった。そこでドライ条件での溶融物挙動解析ができるよう、水プールがない状態での溶融物挙動解析機能を付与する。溶融物ジェットからの液滴発生、液滴挙動、水プールの挙動を計算する部分をスキップし、また、溶融物表面からの伝熱に放射、気体への対流熱伝達相関式を使用できるようにする。このために、周囲の壁面の温度と放射率を入力できるようにした。

放射伝熱は、無限平行平板の式を使用する。

$$q = \sigma(T_m^4 - T_a^4) \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_m} + \frac{1}{\varepsilon_a} - 1}$$

ここで、 q は表面熱流束、 σ はステファン・ボルツマン常数、 ε は放射率、 T は温度、添字の m は溶融物・クラスト、 a は壁面を表す。

対流伝熱は、水平平板上向き加熱面の自然対流の乱流熱伝達率相関式を使用する。

$$Nu = 0.14Ra^{1/3}$$

ここで、 Ra はレイリー数であり、代表長さは溶融物拡がりの直径とする。

(2) 計算機能の確認

ドライ条件での解析機能検証のため、PULiMS 実験解析 E9 を計算対象としてドライ条件を設定した場合の計算結果を示す。図 3.44 はドライ条件における溶融物拡がりの 2 次元

表示である。これまでとは異なり系のボイド率がすべて 1 であり、また溶融物の液滴発生がない。時間の経過とともに溶融物が広がっていく様子が計算されているのが分かる。これらの結果から、ドライ条件を設定した場合でも問題なく動作することが確認できた。

以上は数値計算上の問題がないことを確認したのみであり、現在の JASMINE のドライ条件での計算モデルの妥当性を確認するために注水のない実験との比較による検証が必要である。

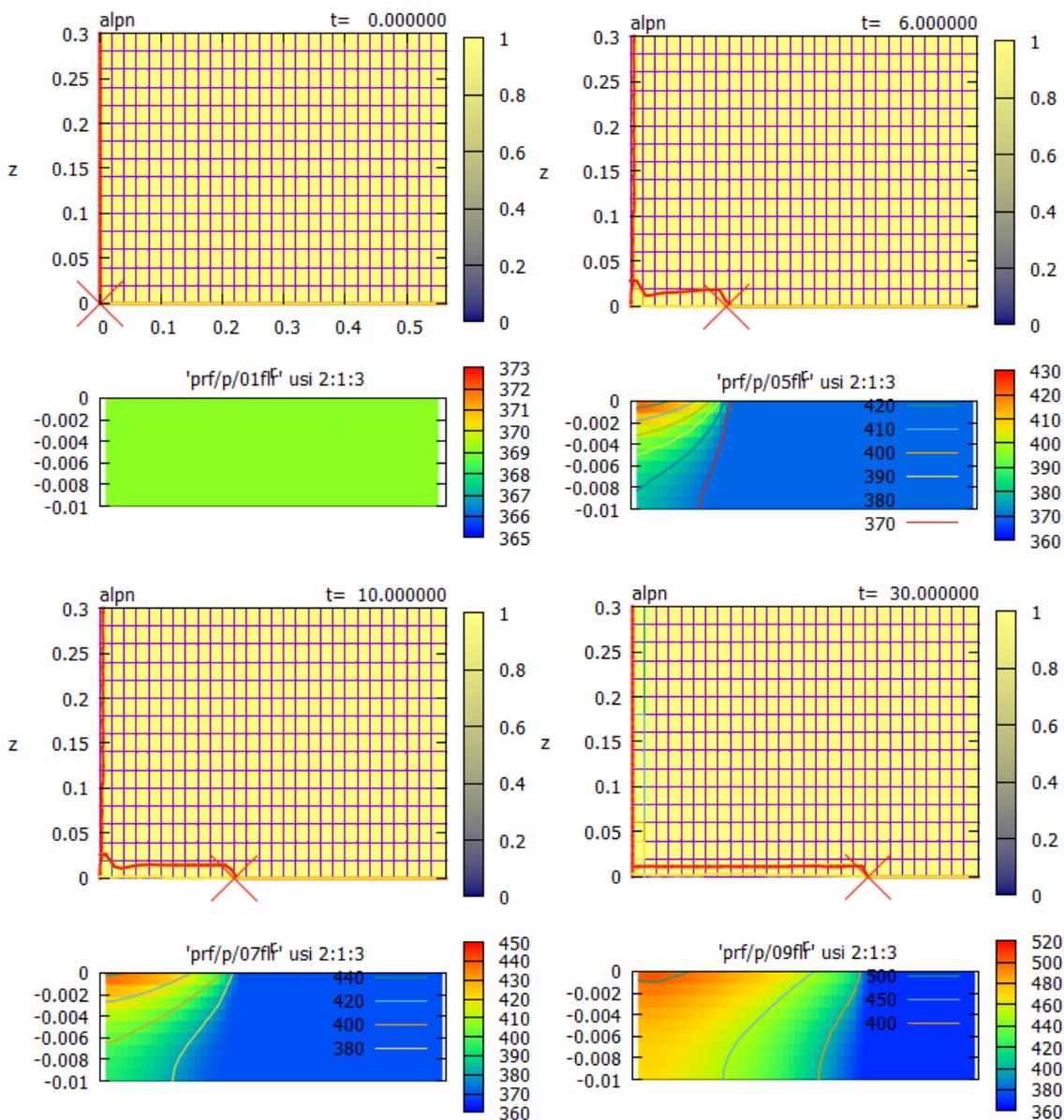


図 3. 44 プール水がない条件での計算例 (形状、溶融物条件は PULiMS E9 実験と同一)

3.5 まとめ

JASMINE コードに、水中での冷却により溶融物の拡がりの先端部に固相が形成され、その引張強度が溶融物の拡がりを妨げるというモデルを組み込んだ。PULiMS 実験の E1, E4, E8~E15 実験と比較して、溶融物固相の引張強度を単位面積当たり 1000 N/m^2 とすると実験における溶融物の最終的な拡がり面積が JASMINE の結果と良好に一致することが分かった。これにより溶融物の拡がり制限の支配因子として、拡がり先端部の凝固と固相の強度が挙げられることが分かった。

このほか、拡がり速度や水温の過渡変化について PULiMS 実験値と比較した。溶融物落下初期の拡がり速度はビデオ映像から推定したものより JASMINE によるものは小さく、その原因はジェット流から溶融物プール拡がり流れへ移る過程の境界条件に与え方に問題があることを示した。

水温の変化の実験値と JASMINE 解析値を比較すると

- (i) 実測値の方が温度上昇の立ち上がりが早い。
- (ii) 落下点近傍の高い位置では JASMINE は水温を高く計算する。
- (iii) 落下点から離れた位置では、JASMINE は初期に低めに評価するが、その後実測値の方が早く水温が下がる。

その原因として

- (イ) 溶融物供給ノズルから直接発生する液滴
- (ロ) 初期プール水温の不均一
- (ハ) 実験装置からの放熱

が考えられることを示した。

今後の課題として次の点が挙げられる。

- ① PULiMS E16 以降の実験との比較
- ② ドライ条件での実験との比較
- ③ 溶融物先端での伝熱評価の精度向上（今回のモデル改良ではその重要性が分からなかったため、比較的単純な溶融物の一次元流れが輸送する熱量と水側への沸騰伝熱量が等しいというモデルを採用したが、実際には軸対称を仮定しても、体系は二次元であり改良の余地がある。）

なお、ここで解析対象とした PULiMS 実験の内 E-8~E15 実験は、原子力規制委員会原子力規制庁がスウェーデン王立工科大学に委託して実施したものである。

参考文献

- [3.1] A. Konovalenko, A. Karbojian, P. Kudinov, “Experimental Results on Pouring and Underwater Liquid Melt Spreading and Energetic Melt-coolant Interaction”, NUTHOS-9, Kaohsing, Taiwan, (Sep. 2012),N9P0303
- [3.2] 日本機械学会、“伝熱工学資料 改訂第 5 版”、P.100、2009
- [3.3] 日本機械学会、“機械工学便覧 改訂第 6 版”、P.5-148～149、昭和 52-7

4 実機冷却性評価

4.1 解析条件の設定

(1) 解析対象とする原子炉

実機の設計値に近い仮想プラントを解析対象とした。平成 29 年度と同様に 820 MW 級の Mark-I 改良型格納容器を有する BWR プラントを仮定し、格納容器の床直径、上部自由空間容積及び溶融物落下量の最大値を決定した。主要な実機解析の条件を表 4.1.1 に示す。格納容器内の床面はサンプルピット等がない水平な平面とした。溶融物が落下する際にペDESTAL に水プールが形成される状況を仮定し、格納容器内の圧力上昇を模擬するために上部自由空間の容積を実機の設計値に近い値とした。格納容器内の初期圧力は格納容器の設計圧とした。表 4.1.1 に示す解析条件のうち、溶融物落下量、溶融物温度、溶融物初速、原子炉圧力容器破損部の開口直径及び原子炉格納容器内の冷却水温を、不確かさを考慮する入力条件として選定した。このとき、溶融物の落下継続時間は、溶融物落下量、原子炉圧力容器破損の開口直径及び溶融物初速から求める必要がある。

平成 30 年度では、原子炉格納容器内の初期水位を表 4.1.1 に示すりに変化させた解析を実施することで、初期水位の変化がデブリの冷却性に与える影響を調査した。

表 4.1.1 実機冷却性評価の主要な入力条件

項目	数値
床直径	6 m
上部自由空間容積	8000 m ³
初期圧力	0.5 MPa ($T_{\text{sat}} = 424.986 \text{ K}$)
溶融物落下量 *	最大 (全量落下時) 157.1 t
溶融物落下継続時間	溶融物落下量・開口面積・初速から計算
溶融物ノズル位置	床から 4 m
溶融物初速 *	$X_{50} = 5 \text{ m/s}$, $EF = 2$
原子炉圧力容器破損部の開口直径 *	$X_{50} = 0.1 \text{ m}$, $EF = 2$ (最大 0.3 m)
溶融物温度 *	過熱度: $X_{50} = 50 \text{ K}$, $EF = 2$
溶融物発熱量	100 W/kg
原子炉格納容器内の冷却水温 *	300±10 K
原子炉格納容器内の初期水位	0.5, 1.0, 2.0 m
表面クラストドライアウト熱流束	500 kW /m ²
クラスト拘束条件	流動、所定の厚みで固定

* 不確かさを考慮するパラメータ

格納容器の床材として、珪岩質 (Siliceous) 骨材を使用したコンクリートを仮定する。ここでは、OECD/MCCI 計画の CCI-3 試験 [4.1] で使用されたコンクリートと同様の熱分解ガス成分含有量を仮定した。コンクリートの組成に関する入力条件を表 4.1.2 に示す。

表 4.1.2 コンクリートの組成に関する入力条件

	温度	相変化の吸熱量	放出ガス／量
自由水蒸発	373.15 K	40.64 kJ/mol	H ₂ O／2.293%
結合水放出	688.65 K	104.7 kJ/mol	H ₂ O／1.4%
CO ₂ 放出	1065.65 K	167.5 kJ/mol	CO ₂ ／9.8%
溶融	1523.15 K	29.49 kJ/kg(初期コンクリート質量に対する比)	

コンクリート密度：2300 kg/m³

コンクリートを溶融するのに必要な熱量：1.72 MJ/kg

(2) 溶融物の組成

格納容器内に落下する溶融物の物性値として、融点に関連するもの以外は JASMINE コードに組み込まれている CORIUM3 と同じ物性値を使用した。溶融物の組成は UO₂ (70%) -ZrO₂ (30%) の混合物と仮定する。溶融物落下量の最大値は炉心燃料の UO₂ 保有量と仮定した溶融物の組成から 157.1 t と仮定した。溶融物の物性値を表 4.1.3 に示す。

本事業でこれまでに実施した JASMINE コードによる解析結果より、溶融物が液相単相の場合 (高温の共晶組成の場合など) には、格納容器に落下した溶融物は格納容器内の壁面に達するために、デブリの冷却性に対して溶融物の拡がり面積を評価する意義が低くなるということが判明している。よって、溶融物の過熱度が低く、液相線温度と固相線温度が一致しない固液二相状態で溶融物の見かけの粘性が著しく増加する条件を仮定する。原子炉容器を構成する鉄の融点 1,811 K と比較して溶融物の融点は高いことから、溶融物の過熱度が低い場合でも、原子炉圧力容器の熱的破損による溶融物の格納容器への落下は生じ得る。

溶融物の固液二相状態の固相率・凝固点は、以下に示す通りに求めた。

(a) 構成物質及び組成比の仮定

- (i.) 溶融物の U と Zr の比は CORIUM3 (UO₂:ZrO₂ = 70:30 wt%) と同じとする。よって、原子数比を求めると原子モル分率 (U/(U + Zr)) は 0.516 となる。
- (ii.) 相図として JAEA が報告した“二酸化ウランとジルカロイの熱力学的に妥当な状態図”を参考とする (図 4.1.1) [4.2]。(ただし、酸素飽和ジルコニウムと UO₂ の相図であることから、部分酸化の溶融炉心を想定する)。
- (iii.) 図 4.1.1 では、2000℃ 以下で溶融部の左右両側が固相線となるために、固相率を求められない。固相率が大きく流動不可能となり、解析に影響しないと考えられるために、固相率は固相線温度に至るまで単純に線形に増加させる。

- (iv.) 流動不可能になる固相体積率は、0.4~0.6 程度の範囲とされる。JASMINE コードによる解析では、0.55 と固定した。固相体積率を変更すると、解析での凝固点 (T_{melt}) が変化するものの、溶融物の過熱度で入力条件として与えているために、解析結果に著しい影響はないと考えられる。
- (v.) 図 4.1.1 に示す相図より、固相・液相の割合（原子モル分率）が求められる。これを重量率に換算する際には、単純化のために固相は UO_2 、液相は ZrO_2 とする。

(b) 液相線温度、固相線温度及び融点の決定

図 4.1.1 より、 $U/(U + Zr) = 0.516$ での液相線温度及び固相線温度を読み取るとそれぞれ 2170°C 及び 1730°C となる。約 2000°C での固相率と液相率が等しくなる（固相率 = 0.5）ことから、この点及び液相線温度（固相率 0.0）、固相線温度（固相率 1.0）を基準として、高温側、低温側に直線で固相モル分率・温度の関係を補間する。表 4.1.4 に示す通り、モル分率 0.1 ピッチのデータを JASMINE コードへの入力値とする。

凝固点 T_{melt} は、溶融物の流動が不可能になる温度である。このことから、溶融物の粘性が無窮大となる固相体積率は 0.55 となる。解析では、発散を避けるために、固相体積率が 0.55 よりわずかに小さくなる 2309.1 K を T_{melt} とする。入力した固相重量率及び JASMINE コード内部で計算される固相体積率及び粘性係数の増倍率（液相単相の場合の何倍の粘性を示すか）を温度の関数として図 4.1.2 に示す。

表 4.1.3 解析で使用する溶融物の物性値

変 数	タイプ	説 明	U-Zr-O 系
tmelt	実数	溶融物融点[K]	2309.1
tsoli	実数	溶融物固相線温度[K]	2003
tliq	実数	溶融物液相線温度[K]	2443
rhosol	実数	固相密度[kg/m ³]	8285.1
rholiq	実数	液相密度[kg/m ³]	7121.6
cpsol	実数	固相比熱[J/kg/K]	566.2
cpliq	実数	液相比熱[J/kg/K]	680.7
lheat	実数	凝固潜熱[J/kg]	428.0E3
lamsol	実数	固相熱伝導率[W/m/K]	1.911
lamliq	実数	液相熱伝導率[W/m/K]	3.601
viscmm	実数	粘性係数[Pa·s]	3.489E-3
sftnmm	実数	表面張力[N/m]	0.45
emssmm	実数	輻射率[-]	0.79
cf_dens	実数	液相密度の温度依存性の係数 (温度の 1 次式の係数)	0
cf_visc	実数	粘性係数の温度依存性の係数 (温度の 1 次式の係数)	0
cf_sftn	実数	表面張力の温度依存性の係数 (温度の 1 次式の係数)	0
cf_emss	実数	輻射率の温度依存性の係数 (温度の 1 次式の係数)	0

表 4.1.4 JASMINE に入力した温度と固相重量率の関係

tempmat (n) : 実数 溶融物温度 (K)	weightfr (n) : 実数 固相重量率 (-)
2409	0.19581
2375	0.353941
2341	0.484314
2307	0.593649
2273	0.686657
2219	0.766741
2165	0.83642
2111	0.897599
2057	0.951743

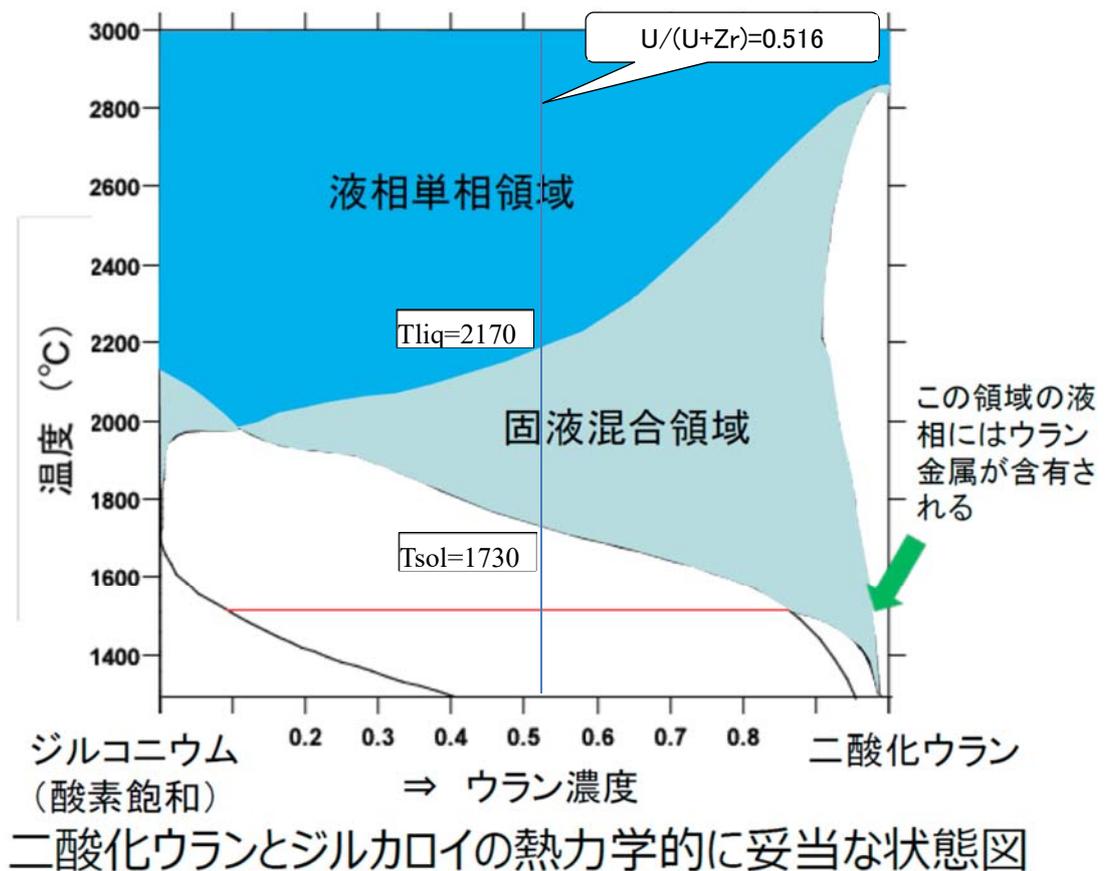


図 4.1.1 溶融物の組成比に関する相図 [4.2]

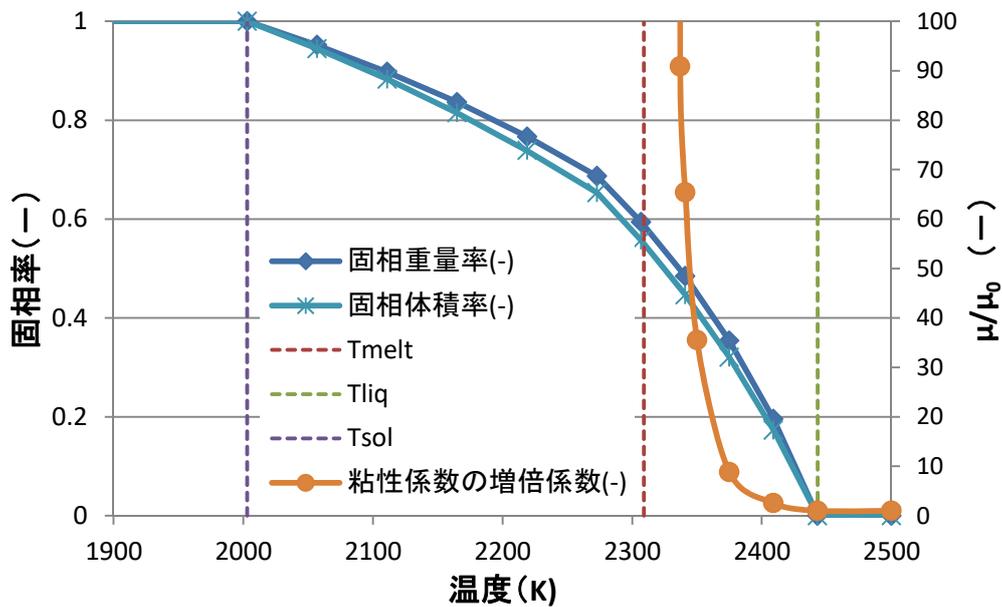


図 4.1.2 落下溶融物の温度と固相率の関係の入力値と粘性係数増倍係数

(3) 溶融物プール及び粒子の入力条件

(a) 溶融物プールの沸騰熱伝達

溶融物プールの沸騰熱伝達に関する入力値は表 4.1.5 に示す通りとする。このとき、溶融物プールと冷却材との相互作用に起因する伝熱面積の増加を表現する調整係数の入力値を 4 とした。表 4.1.5 に示す入力値は、格納容器内の圧力が 0.5 MPa であることを前提とする。極小熱流束点温度のプール水温依存性は、大気圧での値とした。またこれの圧力依存性を 0 としてあるために、圧力変化の影響は、飽和温度の変化としてだけ現れる。

表 4.1.5 沸騰熱伝達に関連する入力値

項目	数値
伝熱表面積増加の係数	4.0
限界熱流束	2.0E6
限界熱流束のサブクール度依存性係数	-4.0E4
限界熱流束の圧力依存性係数	2.5
極小熱流束点温度と飽和温度の差	250.0 K ($T_{mhtf} = 401.8^{\circ}\text{C}$)
極小熱流束点温度のサブクール度依存性係数	-8.0
極小熱流束点温度の圧力依存性係数	0

(b) 溶融物プールのボイド率

コンクリートから発生するガスにより、溶融物プールの表面が変動する現象を解析するために必要な数値である。溶融物プールのボイド率 α は次式で表現されるドリフトフラク

クスモデル [4.3] を用いて、コンクリートより発生したガスの見かけ速度（容積流速） j_g より求める。使用する定数は昨年度と同様、 $C_0 = 1.198$ 、 $v_g = 0.2231$ m/s とする。

$$\alpha = j_g / (C_0 j_g + v_g)$$

(c) 粒子の粒径と溶融物プールへの堆積

溶融物ジェットから発生する粒子の粒径分布の設定及び液滴が溶融物プールの表面に生成したクラストに到達したときの貫通条件に関する入力条件を表 4.1.6 に示す。

表 4.1.6 粒子の粒径分布と溶融物プールへの体積に関する入力条件

項目	入力値
液滴発生	Rosin-Rammler
粒子のクラスト貫通条件*	$\beta_{in} = 5$

*粒子の径/クラスト厚さ > β_{in} となる粒子はクラストを貫通して溶融物プールに流入

(d) 原子炉格納容器内の初期水位

平成 29 年度では、原子炉格納容器内初期水位は 1.0 m の条件にて JASMINE コードによる解析を実施している。平成 30 年度では、原子炉格納容器内初期水位が 1.0 m の条件に加えて、2.0 m 及び 0.5 m の条件にて解析を実施する。初期水位が 2.0 m となる条件では、1.0 m の条件より初期水位のみを変更した。初期水位が 0.5 m となる条件では、高さ 1.0 m までの格子の分割幅を、初期水位が 1.0 m の条件の半分とした。格子の分割数を変更することにより、冷却材プールの分割数を十分に確保するためである。

溶融物ジェットは水中で水との相互作用によりブレイクアップするが、完全にブレイクアップするときの長さは Saito の式により推定される (2.3 参照)。JASMINE コードもこの式を基にしてブレイクアップ量と水中への溶融粒子放出量が計算する。初期水位を大きくすると粒子化の割合が増え、冷却には有利となる。しかしながら、やみくもに水位を大きくすると、多量の溶融粒子が存在することになり、水蒸気爆発が生じた場合にはその爆発の威力が大きくなる恐れがあるため、そのための評価は別に行われなければならない。本解析の 59 ケースの条件下では、水位 0.5 m、1.0 m 及び 2.0 m という水位は Saito の式から推定したブレイクアップ長さより短くなり、完全にブレイクアップしているケースはない (後述 4.3)。これらの水位条件は溶融物広がりに着目するという方針に合致している。

4.2 不確かさを考慮する入力条件の確率分布

表 4.1.1 に示した不確かさを考慮する入力条件に対して確率分布を仮定する。平成 30 年度は、平成 29 年度と同様に、確率分布を工学的判断や文献 [4.4] に基づき便宜的に仮定した。本来は、起因事象の発生頻度や事象発生時の原子炉状態の不確かさを考慮したシビアアクシデント解析により決定する必要がある。

(1) 原子炉圧力容器破損時の溶融物温度

融点を 2309.1 K として、溶融物の過熱度が $X_{50} = 50$ K, $EF = 2$ の対数正規分布となると仮定する。図4.2.1 (1) に確率分布を示す。

(2) 原子炉圧力容器破損時の溶融物初速

溶融物初速が $X_{50} = 5$ m/s, $EF = 2$ の対数正規分布となると仮定する。図4.2.1 (2) に確率分布を示す。

(3) 原子炉圧力容器破損部の開口直径

開口直径が $X_{50} = 0.1$ m, $EF = 2$ の対数正規分布となると仮定する。ただし、開口直径の最大値を 0.3 m とする。図4.2.1 (3) に確率分布を示す。

(4) 溶融物落下量

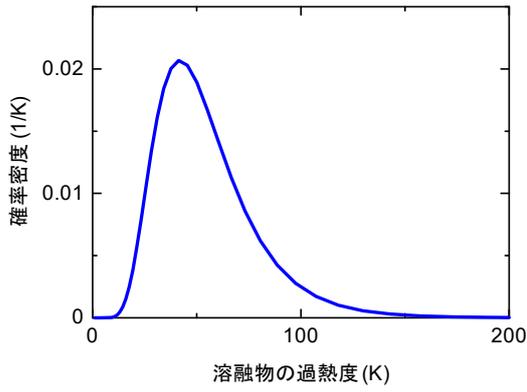
溶融物落下量の最大値 157.1 t が、以下に示す3段階の確率分布となると仮定する。図 4.2.1 (4) に確率分布を示す。

落下割合	0.0 – 0.6	0.6 – 0.8	0.8 – 1.0
区間の累積確率	0.89	0.1	0.01

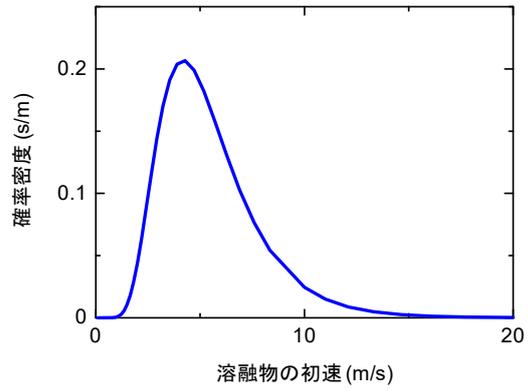
(5) 原子炉格納容器内冷却水温

300 ± 10 K の範囲で一様な確率分布を仮定する。図 4.2.1 (5) に確率分布を示す。

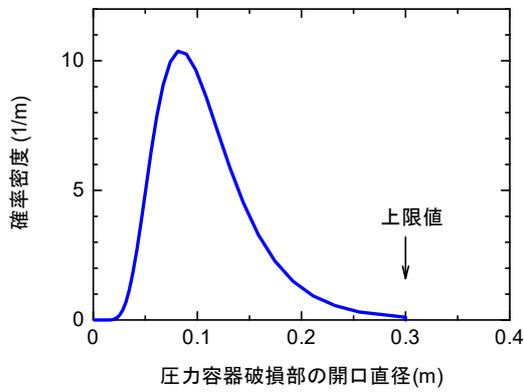
対数正規分布では、 X_{50} は平均値 (累積確率 50% 値)、 X_{95} は累積確率 95% 値を意味する。このとき、 $EF = X_{95}/X_{50} = X_{50}/X_{05} = \sqrt{(X_{95}/X_{05})}$ である。



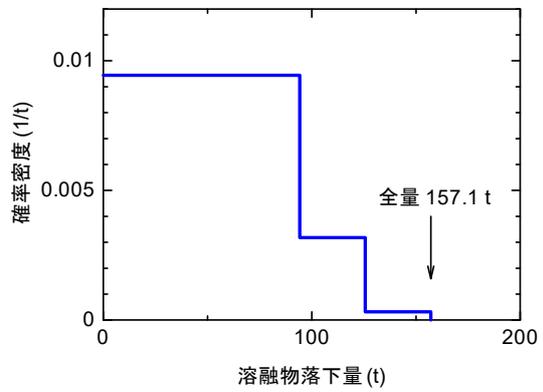
(1) 溶融物過熱度



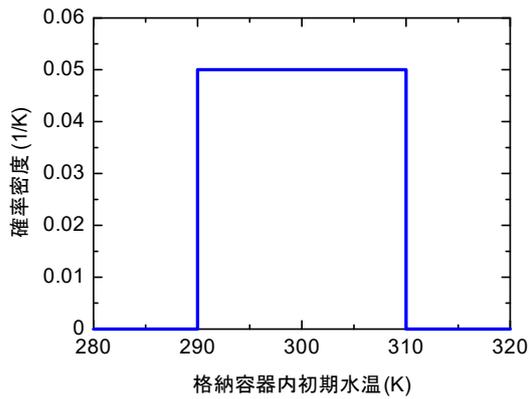
(2) 溶融物初速



(3) 開口直径



(4) 溶融物落下量



(5) 冷却水温度

図 4.2.1 不確かさを考慮する入力条件の確率分布

4.3 入力条件の抽出

前節に示す入力条件で仮定する確率分布に従う入力条件の抽出を PREP コード [4.5] を用いて実施した。抽出された 59 ケースの入力条件を表4.3.1に示す。抽出した入力条件の一部を JASMINE コードの入力条件に変換したものを表4.3.2に示す。熔融物温度 (K) 及び熔融物の落下継続時間 (s) は以下に示す通りに変換した。

$$\text{熔融炉心温度 (K)} = \text{熔融物の融点 (2309.1K)} + \text{熔融炉心過熱度}$$

$$\text{継続時間(s)} = \text{熔融物落下量(kg)} / (\text{開口面積(m}^2\text{)} \times \text{熔融物初速(m/s)} \times \text{熔融物密度(kg/m}^3\text{)})$$

ここで、熔融物密度 (kg/m³) は JASMINE コードに組み込まれている densm_datain2 関数を用いて、各入力条件での熔融炉心温度 (K) での熔融物密度を算出した。図4.3.1は PREP コードにより抽出した入力条件のヒストグラムと確率分布を示す。図4.3.1より、抽出したパラメータセットが確率分布に従っていることが確認できる。ここで、59 というケース数は、95% の累積確率で 95% の信頼水準を達成するために必要なサンプル数という観点で決定した [4.6]。原子炉格納容器内の初期水位を変更する場合には、PREP コードで生成した59 ケースの入力条件を基準として水位を変更した。よって、表4.3.2に示す不確かさを考慮した入力条件は、異なる水位となる条件でも同一となる。

抽出された59ケースの入力条件下でSaitoの式による熔融物ジェットブレークアップ長さの推定値を求めた。各ケースでの入水時の条件として、入水時の速度と直径は、熔融物ノズル位置4 mから水位の位置まで落下した場合の速度を初期速度と重力を考慮して求めた。熔融物密度は、固相線温度・密度と液相線温度・密度から直線補間した、熔融物温度における値を使用した。水密度は290 Kにおける一定値[4.7]を用いた。水位が0.5、1.0、2.0 mのときのブレークアップ長さに加えて、参考として水位3.0および3.8 mのときのブレークアップ長さを表4.3.3に示す。合わせて、完全にブレークアップしているケース数を示した。

表 4.3.1 PREP コードにより生成した入力条件一覧 (1/2)

ケース 番号	熔融物過熱度 (K)	熔融物初速 (m/s)	開口直径 (m)	熔融物落下割合 (-)	初期水温 (K)
1	36.88	5.105	0.09005	0.41	296.2
2	61.24	11.310	0.18240	0.07	297.6
3	50.73	8.116	0.11220	0.58	302.4
4	30.98	5.894	0.29120	0.52	293.6
5	58.09	4.844	0.12920	0.26	290.7
6	40.89	1.000	0.1245	0.10	290.2
7	27.26	5.924	0.06873	0.31	301.7
8	73.98	3.453	0.08294	0.17	301.5
9	51.35	3.259	0.06375	0.34	299.7
10	47.23	2.518	0.09079	0.36	305.6
11	65.03	3.524	0.12030	0.05	294.8
12	68.07	7.995	0.07455	0.47	304.0
13	21.31	6.052	0.10030	0.31	303.0
14	101.60	4.581	0.08072	0.42	291.6
15	30.76	9.068	0.13560	0.15	297.0
16	34.90	3.841	0.11410	0.68	300.1
17	37.78	6.322	0.07967	0.29	297.4
18	25.29	2.775	0.06472	0.32	293.1
19	53.72	4.501	0.06594	0.39	304.6
20	59.07	2.280	0.16070	0.24	294.0
21	78.01	5.574	0.16590	0.45	292.4
22	78.31	3.594	0.14070	0.71	295.8
23	44.84	3.060	0.10930	0.22	308.8
24	52.36	1.906	0.15240	0.23	307.8
25	56.19	7.477	0.05143	0.18	299.0
26	147.00	4.702	0.09309	0.28	296.5
27	82.11	4.028	0.08637	0.20	298.8
28	55.64	4.353	0.09575	0.09	302.8
29	54.29	5.759	0.04202	0.73	295.4
30	35.74	3.299	0.07223	0.12	293.0

表 4.3.1 PREP コードにより生成した入力条件一覧 (2/2)

ケース 番号	熔融物過熱度 (K)	熔融物初速 (m/s)	開口直径 (m)	熔融物落下割合 (-)	初期水温 (K)
31	39.31	2.697	0.25250	0.03	300.6
32	94.73	4.972	0.11120	0.78	309.2
33	49.53	9.777	0.10210	0.54	300.4
34	45.52	5.436	0.11790	0.34	309.4
35	27.57	3.778	0.08772	0.44	305.1
36	69.02	3.696	0.10720	0.18	297.9
37	62.46	6.447	0.13810	0.59	300.9
38	88.51	4.255	0.12360	0.08	292.6
39	48.63	5.046	0.22450	0.56	306.5
40	73.39	7.741	0.16790	0.51	304.5
41	119.70	13.070	0.12760	0.37	306.7
42	38.75	3.927	0.08856	0.62	291.2
43	42.60	4.228	0.08459	0.07	302.1
44	32.32	8.660	0.09239	0.46	299.4
45	40.14	6.232	0.17690	0.27	294.1
46	41.77	6.655	0.10530	0.48	309.7
47	46.09	5.198	0.04746	0.55	306.1
48	86.14	4.787	0.09901	0.53	298.5
49	34.41	6.712	0.14550	0.43	305.3
50	63.82	9.175	0.06144	0.13	290.4
51	48.21	3.108	0.19280	0.61	291.8
52	65.92	7.053	0.11890	0.01	308.1
53	43.59	4.120	0.07645	0.21	308.4
54	23.41	4.453	0.13320	0.95	296.0
55	112.70	2.924	0.05455	0.16	303.4
56	57.58	7.181	0.09763	0.03	303.6
57	33.76	5.325	0.07031	0.38	294.7
58	29.35	5.472	0.14960	0.02	307.4
59	70.36	6.990	0.07669	0.50	307.0

表 4.3.2 JASMINE コードへの入力条件一覧 (1/2)

ケース 番号	溶融物温度 (K)	溶融物初速 (m/s)	開口直径 (m)	落下継続時間 (s)	初期水温 (K)
1	2345.98	5.105	0.09005	258.42	296.2
2	2370.34	11.310	0.18240	4.67	297.6
3	2359.83	8.116	0.11220	149.70	302.4
4	2340.08	5.894	0.29120	27.08	293.6
5	2367.19	4.844	0.12920	86.10	290.7
6	2349.99	1.000	0.1245	175.70	290.2
7	2336.36	5.924	0.06873	286.16	301.7
8	2383.08	3.453	0.08294	191.63	301.5
9	2360.45	3.259	0.06375	670.93	299.7
10	2356.33	2.518	0.09079	457.04	305.6
11	2374.13	3.524	0.12030	23.93	294.8
12	2377.17	7.995	0.07455	283.53	304.0
13	2330.41	6.052	0.10030	132.86	303.0
14	2410.70	4.581	0.08072	380.49	291.6
15	2339.86	9.068	0.13560	22.92	297.0
16	2344.00	3.841	0.11410	357.74	300.1
17	2346.88	6.322	0.07967	190.74	297.4
18	2334.39	2.775	0.06472	724.63	293.1
19	2362.82	4.501	0.06594	531.88	304.6
20	2368.17	2.280	0.16070	108.96	294.0
21	2387.11	5.574	0.16590	79.58	292.4
22	2387.41	3.594	0.14070	269.16	295.8
23	2353.94	3.060	0.10930	161.96	308.8
24	2361.46	1.906	0.15240	137.01	307.8
25	2365.29	7.477	0.05143	246.69	299.0
26	2456.10	4.702	0.09309	194.46	296.5
27	2391.21	4.028	0.08637	178.65	298.8
28	2364.74	4.353	0.09575	60.89	302.8
29	2363.39	5.759	0.04202	1906.94	295.4
30	2344.84	3.299	0.07223	183.83	293.0

表 4.3.2 JASMINE コードへの入力条件一覧 (2/2)

ケース 番号	溶融物温度 (K)	溶融物初速 (m/s)	開口直径 (m)	落下継続時間 (s)	初期水温 (K)
31	2348.41	2.697	0.25250	4.54	300.6
32	2403.83	4.972	0.11120	346.89	309.2
33	2358.63	9.777	0.10210	139.74	300.4
34	2354.62	5.436	0.11790	120.21	309.4
35	2336.67	3.778	0.08772	394.29	305.1
36	2378.12	3.696	0.10720	112.54	297.9
37	2371.56	6.447	0.13810	128.56	300.9
38	2397.61	4.255	0.12360	33.54	292.6
39	2357.73	5.046	0.22450	58.32	306.5
40	2382.49	7.741	0.16790	63.14	304.5
41	2428.80	13.070	0.12760	48.07	306.7
42	2347.85	3.927	0.08856	526.74	291.2
43	2351.70	4.228	0.08459	64.50	302.1
44	2341.42	8.660	0.09239	164.49	299.4
45	2349.24	6.232	0.17690	36.67	294.1
46	2350.87	6.655	0.10530	172.50	309.7
47	2355.19	5.198	0.04746	1237.95	306.1
48	2395.24	4.787	0.09901	306.46	298.5
49	2343.51	6.712	0.14550	79.83	305.3
50	2372.92	9.175	0.06144	98.53	290.4
51	2357.31	3.108	0.19280	139.01	291.8
52	2375.02	7.053	0.11890	2.37	308.1
53	2352.69	4.120	0.07645	230.38	308.4
54	2332.51	4.453	0.13320	314.59	296.0
55	2421.80	2.924	0.05455	505.41	303.4
56	2366.68	7.181	0.09763	13.36	303.6
57	2342.86	5.325	0.07031	378.98	294.7
58	2338.45	5.472	0.14960	4.42	307.4
59	2379.46	6.990	0.07669	326.47	307.0

表 4.3.3 ジェットのブレイクアップ長さの推定値 (1/2)

水位 [m]	0.5	1.0	2.0	3.0	3.8
ケース番号	ブレイクアップ長さ[m]				
1	7.40	6.98	6.00	4.62	2.53
2	17.31	16.34	14.03	10.82	5.92
3	11.03	10.41	8.95	6.90	3.77
4	14.55	13.74	11.80	9.10	4.98
5	8.58	8.09	6.95	5.36	2.93
6	3.14	2.96	2.55	1.96	1.07
7	7.09	6.69	5.75	4.43	2.43
8	5.56	5.25	4.51	3.48	1.90
9	4.70	4.44	3.81	2.94	1.61
10	4.78	4.51	3.87	2.99	1.63
11	6.78	6.40	5.50	4.24	2.32
12	8.91	8.41	7.22	5.57	3.05
13	8.68	8.20	7.04	5.43	2.97
14	6.55	6.18	5.31	4.09	2.24
15	13.00	12.27	10.54	8.13	4.44
16	6.97	6.58	5.65	4.36	2.38
17	7.95	7.51	6.45	4.97	2.72
18	4.29	4.04	3.47	2.68	1.46
19	5.85	5.52	4.74	3.66	2.00
20	5.97	5.64	4.84	3.73	2.04
21	10.61	10.01	8.60	6.63	3.63
22	7.43	7.01	6.02	4.64	2.54
23	5.92	5.59	4.80	3.70	2.02
24	5.20	4.91	4.22	3.25	1.78
25	7.10	6.70	5.75	4.44	2.43
26	7.15	6.74	5.79	4.47	2.44
27	6.25	5.90	5.07	3.91	2.14
28	6.91	6.52	5.60	4.32	2.36
29	5.45	5.14	4.42	3.41	1.86
30	5.04	4.76	4.09	3.15	1.72

*赤字は水位より小さい (完全ブレイクアップ) ケース

表 4.3.3 ジェットの分ブレークアップ長さの推定値 (2/2)

水位 [m]	0.5	1.0	2.0	3.0	3.8
ケース番号	ブレークアップ長さ[m]				
31	8.31	7.85	6.74	5.20	2.84
32	8.09	7.63	6.56	5.06	2.76
33	11.82	11.16	9.59	7.39	4.04
34	8.80	8.31	7.14	5.50	3.01
35	6.05	5.71	4.90	3.78	2.07
36	6.60	6.23	5.35	4.12	2.26
37	10.60	10.01	8.59	6.63	3.62
38	7.74	7.30	6.27	4.84	2.64
39	11.60	10.95	9.40	7.25	3.96
40	13.10	12.37	10.62	8.19	4.48
41	15.85	14.96	12.85	9.91	5.42
42	6.23	5.88	5.05	3.89	2.13
43	6.37	6.02	5.17	3.98	2.18
44	10.43	9.84	8.45	6.52	3.56
45	11.75	11.09	9.52	7.34	4.02
46	9.44	8.91	7.65	5.90	3.23
47	5.43	5.13	4.40	3.40	1.86
48	7.45	7.03	6.04	4.66	2.55
49	11.16	10.53	9.05	6.98	3.81
50	8.82	8.32	7.15	5.51	3.01
51	7.94	7.49	6.44	4.96	2.71
52	10.40	9.82	8.43	6.50	3.56
53	5.96	5.63	4.83	3.73	2.04
54	8.26	7.80	6.70	5.16	2.82
55	4.06	3.84	3.30	2.54	1.39
56	9.53	9.00	7.73	5.96	3.26
57	6.71	6.34	5.44	4.20	2.29
58	9.96	9.40	8.07	6.23	3.40
59	8.31	7.84	6.74	5.19	2.84
完全ブレークアップのケース数	0	0	0	5	50

*赤字は水位より小さい(完全ブレークアップ) ケース

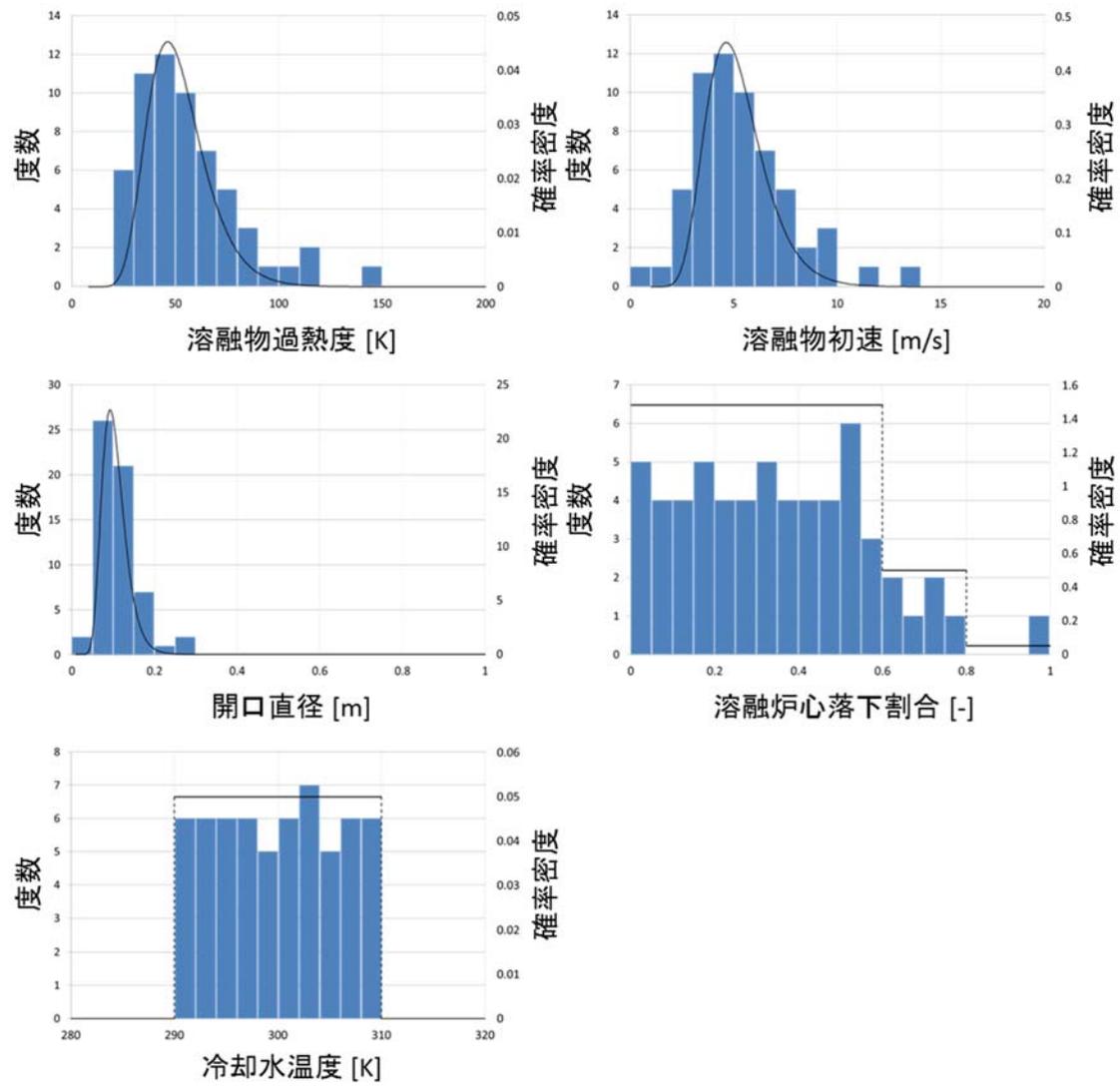


図 4.3.1 抽出した入力条件のヒストグラム及び確率分布

4.4 解析結果

JASMINE コードを用いた解析結果のうち、粒子状デブリ、アグロメレーションデブリ、連続層状デブリの質量、原子炉格納容器床面における拡がり半径及びデブリ堆積高さを表4.4.1から表4.4.2に示す。表4.4.1は、原子炉格納容器内初期水位が 0.5 m の条件での解析結果を、表4.4.2は初期水位が 1.0 m の条件での解析結果を、表4.4.3は初期水位が 2.0 m の条件での解析結果をそれぞれ示す。

一部のケースでは設定した時間に達する前に解析が途中停止した（表4.4.1から表4.4.2の解析状況が×のケース）ものの、溶融物が格納容器内の壁面まで到達する場合には、解析が停止した時点での連続層状デブリ質量に未落下分の溶融物質量を加算してデブリ堆積高さを求めることとする。JASMINE コードでは中心角 0.1 rad の円筒形の領域を解析体系としている。表4.4.1から表4.4.2のデブリの質量は中心角 2π rad の円筒形の領域に換算した値である。

デブリ堆積高さの算出では、連続層状デブリ及びアグロメレーションデブリが一体化して円筒を形成すると仮定する。連続層状デブリ質量 M_c (kg) 及びアグロメレーションデブリ質量 M_a (kg) より円筒の体積 V (m³) を次式で得る。

$$V = (M_c + M_a)/\rho$$

水プール床面におけるデブリ拡がり半径 R_c (m) より、円筒の高さ（すなわちデブリ堆積高さ） h_d (m) を次式で得る。

$$h_d = V/\pi R_c^2 = (M_c + M_a)/\rho\pi R_c^2$$

図4.4.1から図4.4.2に溶融物の液位とクラスト厚さ並びに床材内温度の半径方向分布に関する解析結果の例を示す。ここで、図の縦軸、横軸はそれぞれ解析体系の高さ方向と半径方向の座標 (m) を示す。図中の赤い×印は溶融物の先端位置を示している。解析結果より、ケース 49、50 及び 51 では原子炉格納容器内の壁面まで溶融物が到達していることがわかる。ケース 52 に示す通り、拡がり半径が原子炉格納容器内の壁面まで到達しないケースは、溶融物落下割合の小さいケースであることが分かる。

表 4.4.1 実機体系での解析結果一覧：初期水位 0.5 m (1/2)

ケース 番号	解析状況 ○: 完了 ×: 途中停止	粒子状 デブリ質量 (kg)	アグロメレー ションデブリ 質量 (kg)	連続層状 デブリ質量 (kg)	未落下分の 溶融物質 質量 (kg)	拡がり 半径 (m)	デブリ 堆積高さ (m)
1	○	0.28	0.00	63774.3	0.0	3.00	0.272
2	○	0.00	0.00	11510.8	0.0	3.00	0.049
3	○	7.11	0.00	90729.2	0.0	3.00	0.387
4	×	5.43	0.00	40677.3	40585.1	3.00	0.347
5	○	0.57	0.00	40935.0	0.0	3.00	0.175
6	○	0.20	0.00	14137.2	0.0	3.00	0.060
7	○	0.15	0.00	48204.6	0.0	3.00	0.206
8	○	0.04	0.00	26621.9	0.0	3.00	0.114
9	○	8.23	0.00	52119.0	0.0	3.00	0.222
10	○	24.17	0.00	54946.5	0.0	3.00	0.235
11	○	0.03	0.00	7250.8	0.0	3.00	0.031
12	○	2.47	0.00	73638.9	0.0	3.00	0.314
13	○	0.28	0.00	48990.0	0.0	3.00	0.209
14	○	0.23	0.00	56020.9	0.0	3.00	0.239
15	○	0.01	0.00	23687.6	0.0	3.00	0.101
16	○	20.65	0.00	105683.2	0.0	3.00	0.451
17	○	0.25	0.00	45848.4	0.0	3.00	0.196
18	○	8.65	0.00	49919.9	0.0	3.00	0.213
19	○	176.24	0.00	61003.4	0.0	3.00	0.260
20	○	0.37	0.00	37146.2	0.0	3.00	0.159
21	○	0.98	0.00	71000.0	0.0	3.00	0.303
22	○	6.61	0.00	110081.4	0.0	3.00	0.470
23	○	0.38	0.00	35041.3	0.0	3.00	0.150
24	○	0.49	0.00	34601.5	0.0	3.00	0.148
25	○	0.02	0.00	29154.0	0.0	3.00	0.124
26	○	0.44	0.00	44126.8	0.0	3.00	0.188
27	○	0.10	0.00	31158.3	0.0	3.00	0.133
28	○	0.02	0.00	15111.1	0.0	3.00	0.065
29	○	32.14	0.00	109453.1	0.0	3.00	0.467
30	○	0.02	0.00	19421.3	0.0	3.00	0.083

表 4.4.1 実機体系での解析結果一覧：初期水位 0.5 m (2/2)

ケース 番号	解析状況 ○: 完了 ×: 途中停止	粒子状 デブリ質量 (kg)	アグロメレー ションデブリ 質量 (kg)	連続層状 デブリ質量 (kg)	未落下分の 溶融物質 質量 (kg)	拡がり 半径 (m)	デブリ 堆積高さ (m)
31	○	0.05	0.00	4556.6	0.0	2.65	0.025
32	○	22.73	0.00	120574.3	0.0	3.00	0.515
33	○	12.86	0.00	84634.5	0.0	3.00	0.361
34	○	0.75	0.00	54035.4	0.0	3.00	0.231
35	○	6.33	0.00	68298.2	0.0	3.00	0.292
36	○	0.07	0.00	28023.0	0.0	3.00	0.120
37	○	3.05	0.00	92928.3	0.0	3.00	0.397
38	○	0.01	0.00	13138.1	0.0	3.00	0.056
39	○	1.65	0.00	87084.9	0.0	3.00	0.372
40	×	4.59	0.00	26615.6	54066.4	3.00	0.344
41	○	0.47	0.00	49536.6	0.0	3.00	0.211
42	○	176.18	0.00	95567.2	0.0	3.00	0.408
43	○	0.07	0.00	12616.6	0.0	3.00	0.054
44	○	0.39	0.00	72884.9	0.0	3.00	0.311
45	○	0.01	0.00	43102.7	0.0	3.00	0.184
46	○	0.44	0.00	75900.9	0.0	3.00	0.324
47	○	50.91	0.00	85011.5	0.0	3.00	0.363
48	○	6.50	0.00	82686.7	0.0	3.00	0.353
49	○	0.71	0.00	68046.9	0.0	3.00	0.290
50	○	0.08	0.00	20577.4	0.0	3.00	0.088
51	○	0.93	0.00	94122.1	0.0	3.00	0.402
52	○	0.04	0.00	1394.9	0.0	1.59	0.021
53	○	0.23	0.00	33143.8	0.0	3.00	0.141
54	×	442.46	0.00	115484.9	33851.7	3.00	0.637
55	○	12.84	0.00	21545.0	0.0	3.00	0.092
56	○	0.06	0.00	5423.6	0.0	2.88	0.025
57	○	0.21	0.00	59589.7	0.0	3.00	0.254
58	○	0.00	0.00	3234.0	0.0	2.24	0.025
59	○	97.01	0.00	78288.5	0.0	3.00	0.334

表 4.4.2 実機体系での解析結果一覧：初期水位 1.0 m (1/2)

ケース 番号	解析状況 ○: 完了 ×: 途中停止	粒子状 デブリ質量 (kg)	アグロメレー ションデブリ 質量 (kg)	連続層状 デブリ質量 (kg)	未落下分の 溶融物質 質量 (kg)	拡がり 半径 (m)	デブリ 堆積高さ (m)
1	○	0.9789	0.00	63962.8	0.0	3.00	0.273
2	○	0.0858	0.00	11322.3	0.0	3.00	0.048
3	○	1.8736	0.00	90603.5	0.0	3.00	0.387
4	×	17.3856	0.00	52665.7	29009.0	3.00	0.349
5	○	0.0269	0.00	41035.5	0.0	3.00	0.175
6	○	0.0021	0.00	14357.1	0.0	3.00	0.061
7	○	3.1209	0.00	48569.0	0.0	3.00	0.207
8	○	0.0884	0.00	26747.5	0.0	3.00	0.114
9	○	72.5080	0.00	52106.5	0.0	3.00	0.222
10	○	72.8849	0.00	55172.7	0.0	3.00	0.236
11	○	0.1153	0.00	7244.5	0.0	3.00	0.031
12	×	1605.9822	0.00	65282.3	6948.7	3.00	0.308
13	○	0.0777	0.00	49040.3	0.0	3.00	0.209
14	○	1079.4512	0.00	63648.7	0.0	3.00	0.272
15	○	0.0176	0.00	23555.7	0.0	3.00	0.101
16	○	1020.3893	0.00	104929.2	0.0	3.00	0.448
17	○	0.0870	0.00	46068.3	0.0	3.00	0.197
18	○	13.1444	0.00	50045.6	0.0	3.00	0.214
19	×	1592.1592	0.00	54230.2	5446.7	3.00	0.255
20	○	0.0351	0.00	36907.4	0.0	3.00	0.158
21	○	1.1913	0.00	71000.0	0.0	3.00	0.303
22	○	744.2320	11.01	109327.4	0.0	3.00	0.467
23	○	0.0674	0.00	35167.0	0.0	3.00	0.150
24	○	0.1191	0.00	34746.0	0.0	3.00	0.148
25	○	7.1754	0.00	29279.6	0.0	3.00	0.125
26	○	0.1182	0.00	44189.6	0.0	3.00	0.189
27	○	0.0070	0.00	31290.3	0.0	3.00	0.134
28	○	0.1069	0.00	15048.2	0.0	3.00	0.064
29	○	8494.8665	0.00	105180.5	0.0	3.00	0.449
30	○	0.0742	0.00	19452.7	0.0	3.00	0.083

表 4.4.2 実機体系での解析結果一覧：初期水位 1.0 m (2/2)

ケース 番号	解析状況 ○: 完了 ×: 途中停止	粒子状 デブリ質量 (kg)	アグロメレー ションデブリ 質量 (kg)	連続層状 デブリ質量 (kg)	未落下分の 溶融物質 質量 (kg)	拡がり 半径 (m)	デブリ 堆積高さ (m)
31	○	0.0692	0.00	4582.3	0.0	2.63	0.025
32	○	879.6459	0.00	120951.3	0.0	3.00	0.516
33	○	0.3895	0.00	84508.8	0.0	3.00	0.361
34	○	0.0938	0.00	53916.0	0.0	3.00	0.230
35	○	246.4894	0.00	68361.1	0.0	3.00	0.292
36	○	0.0656	0.00	28054.4	0.0	3.00	0.120
37	○	7.3827	0.00	92928.3	0.0	3.00	0.397
38	○	0.0102	0.00	13081.6	0.0	3.00	0.056
39	○	0.5902	0.00	87650.4	0.0	3.00	0.374
40	○	1.0882	0.00	80550.4	0.0	3.00	0.344
41	○	0.3062	0.00	57824.2	0.0	3.00	0.247
42	×	1141.5473	8.28	81492.9	14759.3	3.00	0.411
43	○	0.0389	0.00	12283.6	0.0	3.00	0.052
44	○	0.6692	0.00	73010.6	0.0	3.00	0.312
45	○	0.1034	0.00	42769.6	0.0	3.00	0.183
46	○	241.0858	0.00	75586.7	0.0	3.00	0.323
47	×	71.6911	0.00	30379.2	55954.1	3.00	0.369
48	○	715.6548	0.00	82184.1	0.0	3.00	0.351
49	○	0.1394	0.00	67858.4	0.0	3.00	0.290
50	○	0.1212	0.00	20571.1	0.0	3.00	0.088
51	○	0.5789	0.00	94059.3	0.0	3.00	0.402
52	○	0.1012	0.00	1394.2	0.0	1.58	0.021
53	○	3.0486	0.00	33300.9	0.0	3.00	0.142
54	×	938.7079	0.00	117181.4	31124.9	3.00	0.633
55	○	1.3056	0.00	24956.8	0.0	3.00	0.107
56	○	0.0971	0.00	5456.9	0.0	2.88	0.025
57	○	46.5961	0.00	59809.6	0.0	3.00	0.255
58	○	0.0380	0.00	3237.1	0.0	2.24	0.025
59	×	1838.4600	0.00	73638.9	3072.6	3.00	0.327

表 4.4.3 実機体系での解析結果一覧：初期水位 2.0 m (1/2)

ケース 番号	解析状況 ○: 完了 ×: 途中停止	粒子状 デブリ質量 (kg)	アグロメレー ションデブリ 質量 (kg)	連続層状 デブリ質量 (kg)	未落下分の 溶融物質 質量 (kg)	拡がり 半径 (m)	デブリ 堆積高さ (m)
1	×	1949.04	0.00	58622.1	3447.1	3.00	0.265
2	○	0.09	0.00	10970.4	0.0	3.00	0.047
3	×	2786.59	0.00	79859.3	8157.9	3.00	0.376
4	○	15.57	0.00	80990.3	0.0	3.00	0.346
5	○	6.87	0.00	41236.5	0.0	3.00	0.176
6	○	61.64	0.00	13986.4	0.0	2.30	0.102
7	○	558.89	0.00	47852.7	0.0	3.00	0.204
8	○	256.86	0.00	26791.5	0.0	3.00	0.114
9	○	921.11	0.00	51415.3	0.0	3.00	0.219
10	○	1108.35	0.00	54368.4	0.0	3.00	0.232
11	○	32.92	0.00	7200.5	0.0	3.00	0.031
12	×	1840.97	0.00	51082.3	21118.0	3.00	0.308
13	○	105.24	0.00	49423.5	0.0	3.00	0.211
14	×	2260.69	0.00	47167.9	15799.4	3.00	0.269
15	○	1.10	0.00	23788.1	0.0	3.00	0.102
16	×	1162.39	0.00	71314.2	34697.1	3.00	0.453
17	×	2537.78	0.00	41123.4	2117.7	3.00	0.185
18	○	211.81	0.00	50315.7	0.0	3.00	0.215
19	×	1621.69	0.00	41399.9	18671.6	3.00	0.256
20	○	2.45	0.00	37315.8	0.0	3.00	0.159
21	○	46.09	0.00	71000.0	0.0	3.00	0.303
22	×	1416.23	0.00	68926.5	41418.2	3.00	0.471
23	○	191.83	0.00	35317.8	0.0	3.00	0.151
24	○	4.72	0.00	35085.3	0.0	3.00	0.150
25	○	595.90	0.00	28764.4	0.0	3.00	0.123
26	○	312.21	0.00	43919.5	0.0	3.00	0.187
27	○	278.47	0.00	31390.8	0.0	3.00	0.134
28	○	55.68	0.00	14193.7	0.0	2.70	0.075
29	×	10593.45	0.00	76843.4	27450.4	3.00	0.445
30	○	414.69	0.00	18673.6	0.0	3.00	0.080

表 4.4.3 実機体系での解析結果一覧：初期水位 2.0 m (2/2)

ケース 番号	解析状況 ○: 完了 ×: 途中停止	粒子状 デブリ質量 (kg)	アグロメレー ションデブリ 質量 (kg)	連続層状 デブリ質量 (kg)	未落下分の 溶融物質質量 (kg)	拡がり 半径 (m)	デブリ 堆積高さ (m)
31	○	2.45	0.00	4556.6	0.0	2.58	0.026
32	×	1693.01	6.59	64088.5	57299.8	3.00	0.518
33	×	2016.90	0.00	81618.6	978.6	3.00	0.353
34	○	101.66	0.00	54242.7	0.0	3.00	0.232
35	○	1251.61	0.00	67104.4	0.0	3.00	0.286
36	○	68.93	0.00	28481.7	0.0	3.00	0.122
37	○	888.44	0.00	92174.3	0.0	3.00	0.393
38	○	2.66	0.00	13257.5	0.0	3.00	0.057
39	○	65.28	0.00	87713.3	0.0	3.00	0.374
40	○	0.95	0.00	80613.3	0.0	3.00	0.344
41	○	0.08	0.00	49297.9	0.0	3.00	0.210
42	×	1149.82	0.00	65596.5	30231.6	3.00	0.409
43	○	64.78	0.00	11448.0	0.0	2.70	0.060
44	×	1507.34	0.00	65659.3	5790.6	3.00	0.305
45	○	0.13	0.00	42958.1	0.0	3.00	0.183
46	×	1178.73	0.00	67921.2	6857.9	3.00	0.319
47	×	7615.22	0.00	70497.3	8166.8	3.00	0.336
48	×	1676.35	0.00	54714.0	27092.6	3.00	0.349
49	○	1.39	0.00	68046.9	0.0	3.00	0.290
50	○	59.79	0.00	20106.2	0.0	3.00	0.086
51	○	19.63	0.00	94310.6	0.0	3.00	0.403
52	○	0.15	0.00	1394.2	0.0	1.52	0.023
53	○	277.65	0.00	33231.8	0.0	3.00	0.142
54	×	2941.79	0.00	80487.6	66349.7	3.00	0.627
55	○	285.21	16.95	20885.3	0.0	3.00	0.089
56	○	10.67	0.00	5391.0	0.0	2.73	0.028
57	×	1962.87	0.00	43806.4	14038.7	3.00	0.247
58	○	0.07	0.00	3231.4	0.0	2.10	0.028
59	×	2043.29	0.00	48110.3	28600.6	3.00	0.327

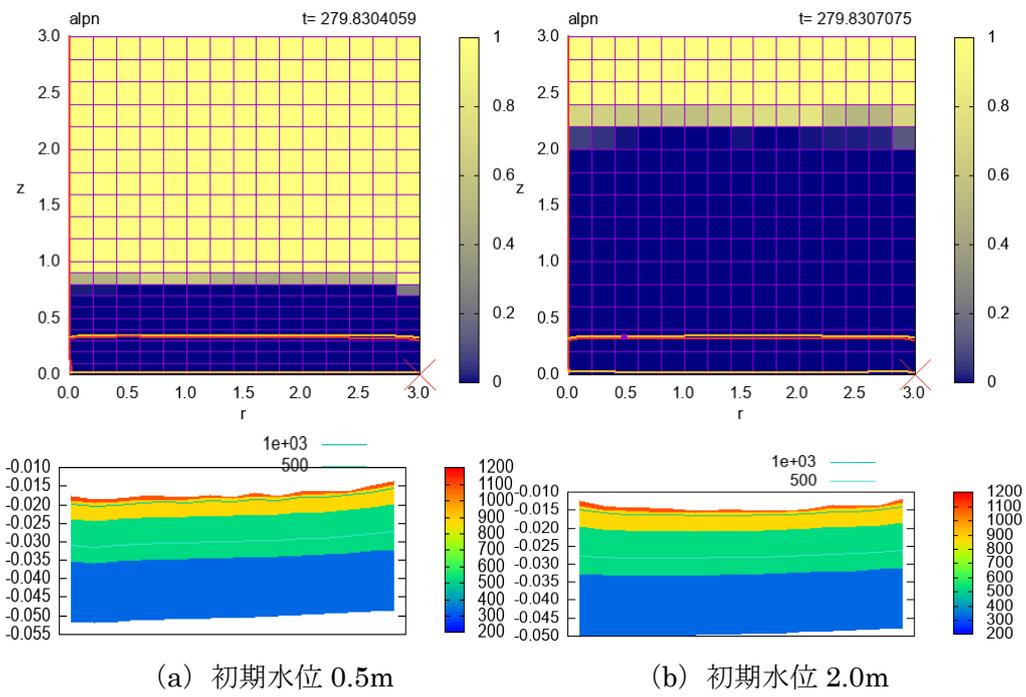


図 4.4.1 溶融物プールとクラスト厚さの半径方向分布 (ケース 49)

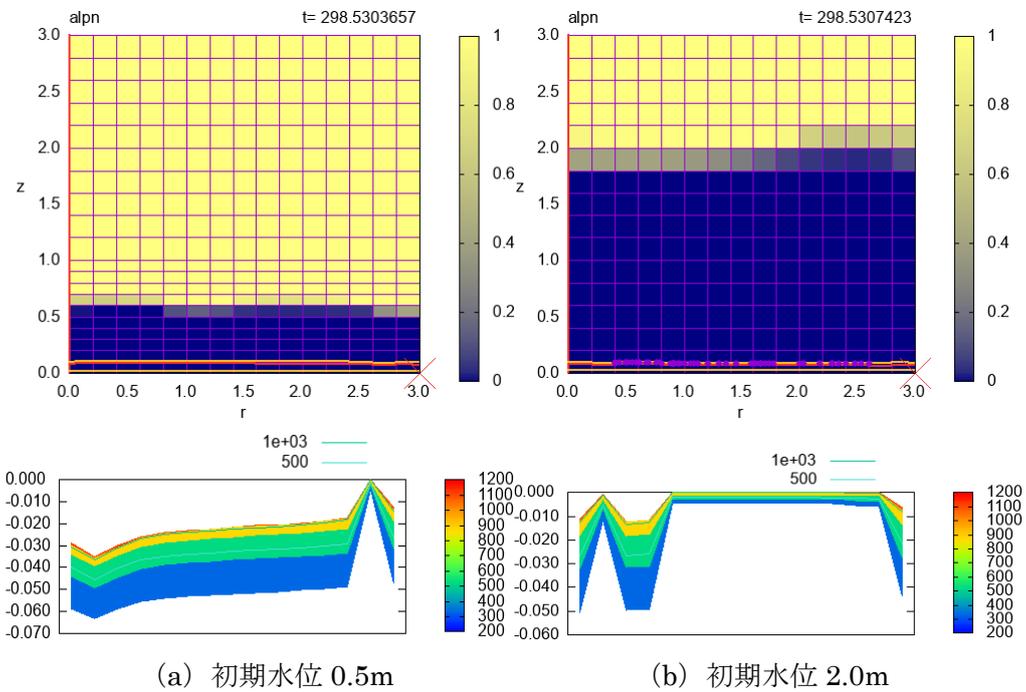


図 4.4.2 溶融物プールとクラスト厚さの半径方向分布 (ケース 50)

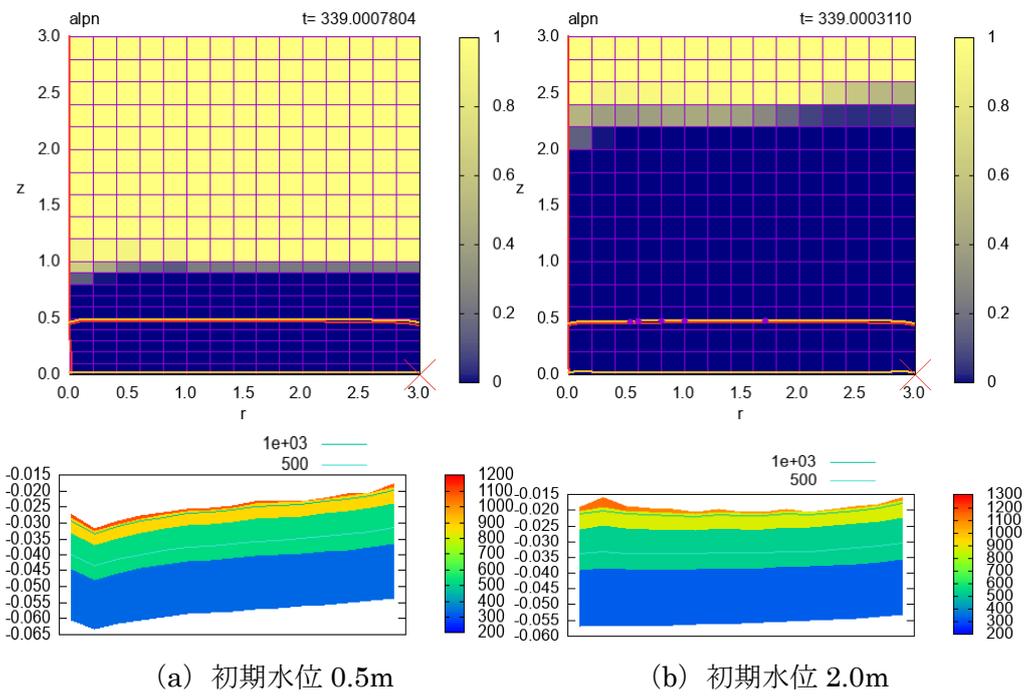


図 4.4.3 溶融物プールとクラスト厚さの半径方向分布 (ケース 51)

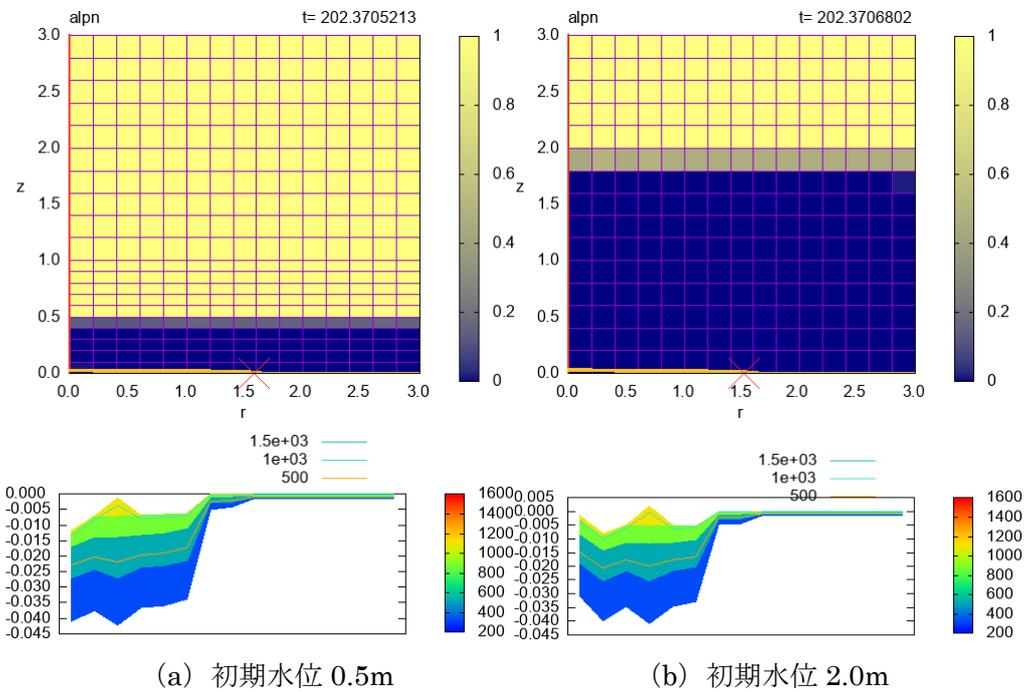


図 4.4.4 溶融物プールとクラスト厚さの半径方向分布 (ケース 52)

4.5 初期水位の影響

図 4.5.1 から図 4.5.3 に、原子炉格納容器内初期水位がそれぞれ 0.5 m、1.0 m、2.0 m となる条件で、59 ケースの JASMINE コードによる解析より得られたデブリ拡がり半径を示す。解析結果より、初期水位が増加すると、デブリ拡がり半径が小さくなることが分かる。このことは、初期水位が増加することにより、溶融物が冷却され易くなるために溶融物の拡がりが抑制された結果であると考えられる。

図 4.5.4 から図 4.5.6 に、初期水位がそれぞれ 0.5 m、1.0 m、2.0 m となる条件で、59 ケースの JASMINE コードによる解析より得られたデブリ堆積高さを示す。初期水位が増加することにより、拡がり半径が小さくなるために、デブリ堆積高さは大きくなることが推定できる。しかしながら、解析結果より、初期水位が増加すると、堆積高さ小さくなることが分かる。このことは、図 4.5.7 から図 4.5.9 に示す、水位がそれぞれ 0.5 m、1.0 m、2.0 m となる条件で得られた粒子状デブリの質量で説明できる。解析結果より、初期水位が増加すると、生成する粒子状デブリの質量が増加することが分かる。初期水位が小さい条件では、水中に侵入した溶融ジェットが十分に粒子化する前に原子炉格納容器内の床面に到達するために、粒子の発生が抑制される。一方で、初期水位の大きい条件では、溶融ジェットの粒子化により、粒子の生成が促進されるために、連続層状デブリの質量が減少した結果として、デブリの堆積高さが減少する。

表 4.4.1 から表 4.4.4 より、初期水位がそれぞれ 0.5 m、1.0 m、2.0 m となる条件では、生成するアグロメレーションデブリの質量は極めて少量であることが分かる。特に、初期水位が 0.5 m となる条件では、アグロメレーションデブリは生成しなかった。初期水位が小さい条件では、溶融ジェットより生成する粒子が少なく、粒子が生成した場合でも十分に冷却される前に、原子炉格納容器内の床面に拡がった溶融物プールの表面に到達するために、溶融物プールと一体化するものと考えられる。

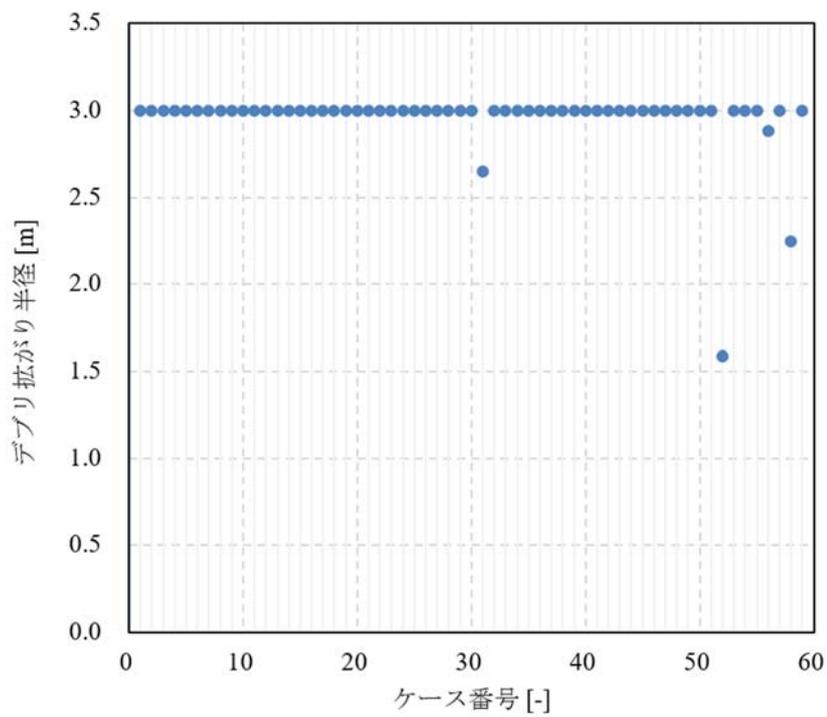


図 4.5.1 デブリ拡がり半径（初期水位 0.5 m）

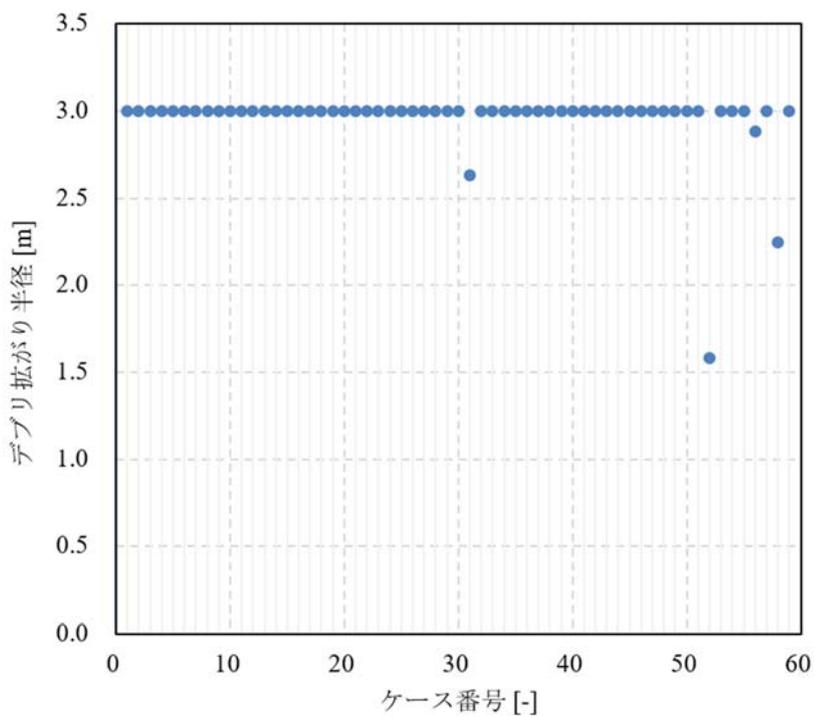


図 4.5.2 デブリ拡がり半径（初期水位 1.0 m）

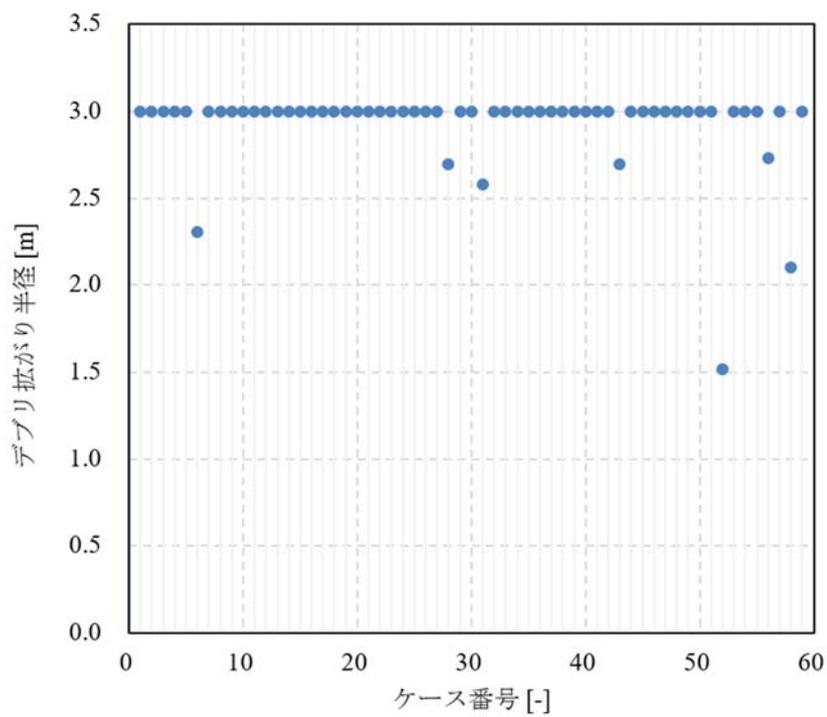


図 4.5.3 デブリ拡がり半径（初期水位 2.0 m）

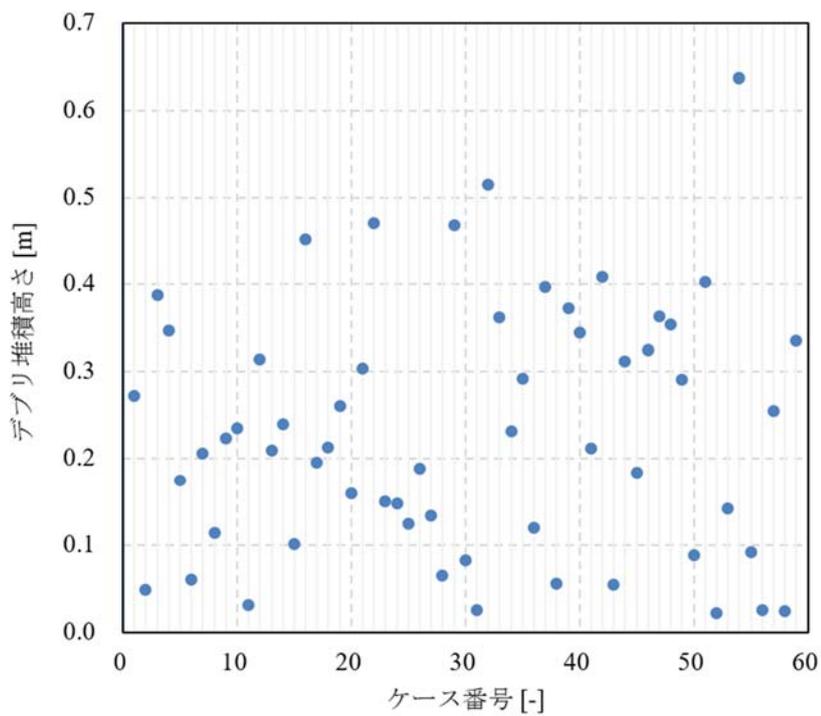


図 4.5.4 デブリ堆積高さ（初期水位 0.5 m）

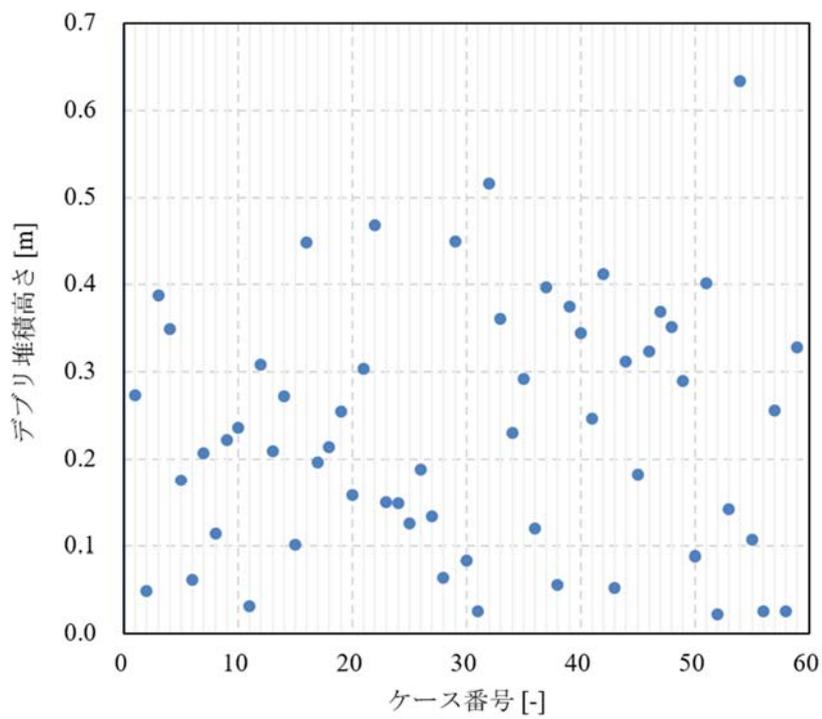


図 4.5.5 デブリ堆積高さ (初期水位 1.0 m)

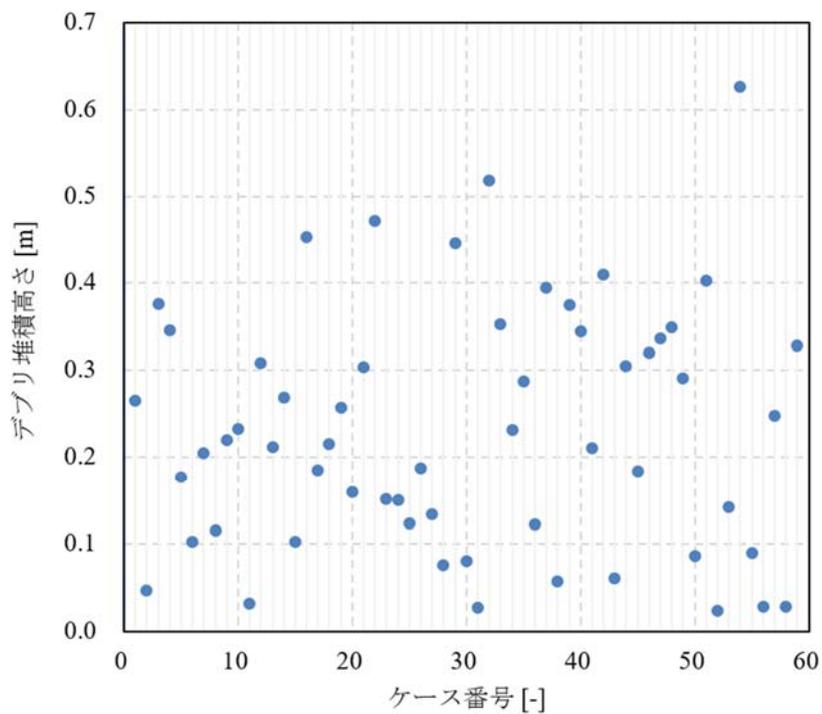


図 4.5.6 デブリ堆積高さ (初期水位 2.0 m)

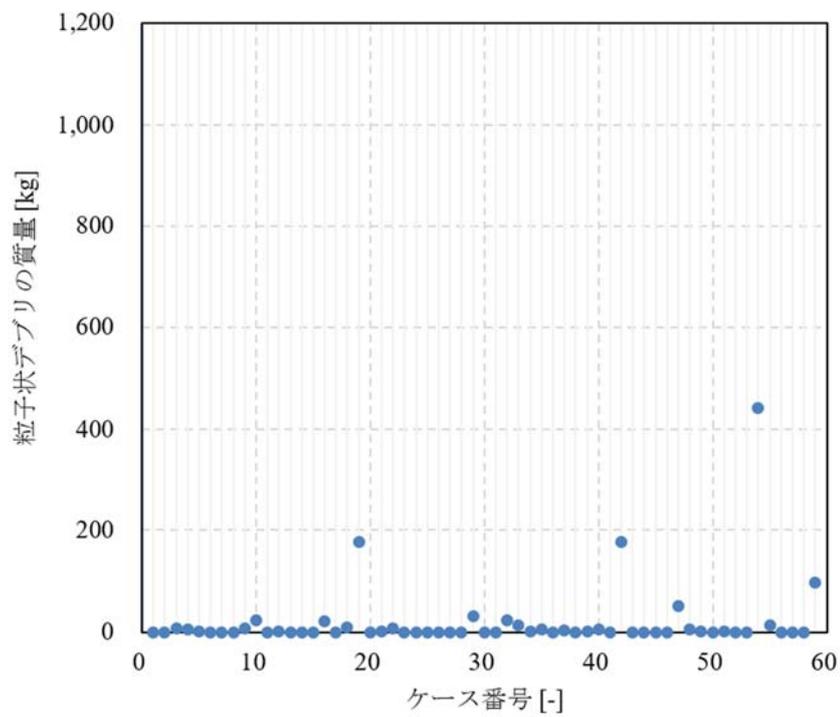


図 4.5.7 粒子状デブリの質量（初期水位 0.5 m）

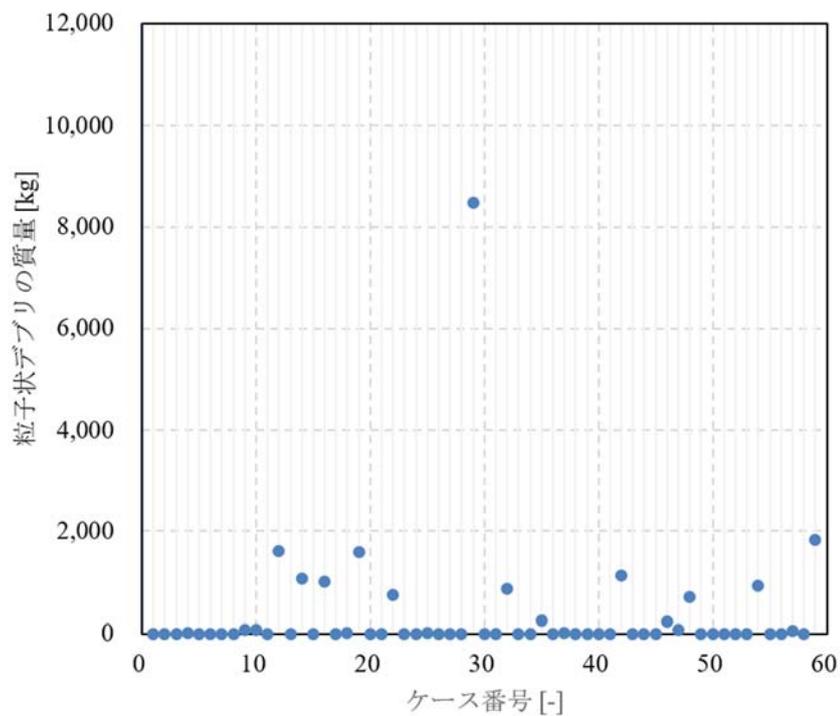


図 4.5.8 粒子状デブリの質量（初期水位 1.0 m）

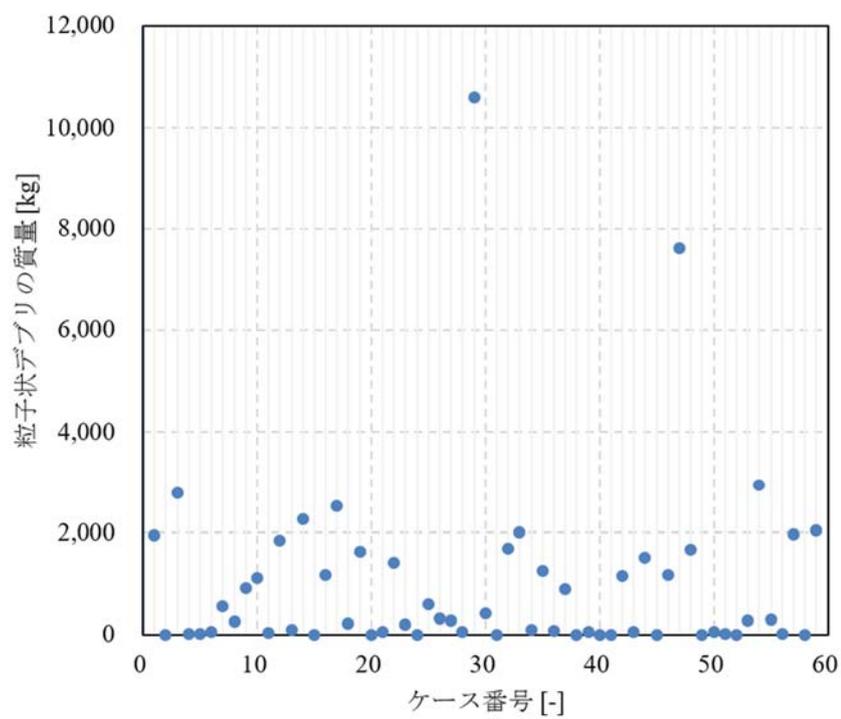


図 4.5.9 粒子状デブリの質量（初期水位 2.0 m）

4.6 デブリ堆積高さの支配因子

図 4.6.1 から図 4.6.6 に、不確かさを考慮する入力条件とデブリ堆積高さの関係を示す。解析結果より、デブリ堆積高さは溶融物落下割合に比例する結果となった。一方で、溶融炉心温度、溶融物初速、放出時間、開口直径、冷却水温はデブリ堆積高さに影響しない結果となった。ほぼすべての条件で原子炉格納容器内に落下した溶融物は壁面に到達するために、最終的なデブリ堆積高さは落下した溶融物の総量で決定されることが分かる。

図 4.6.7 から図 4.6.7 に、不確かさを考慮する入力条件とデブリ堆積高さの関係を定量的に評価するために両者の相関係数を求めた結果を示す。ここで、入力条件を溶融物加熱度：MS、溶融物初速：IV、開口直径：PO、溶融物落下割合：IF、冷却水温：CT と表記する。相関係数は以下の通りに示すピアソンの積率相関係数（PEC）、スピアマンの順位相関係数（SPRC）を求めた。

- ・ ピアソンの積率相関係数

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}$$

ここで、 y は評価する出力（ここではデブリ堆積高さ）、 x は入力条件を、 n は入力条件と出力条件の組数（ここでは 59 組）を示す。

- ・ スピアマンの順位相関係数

$$\rho = 1 - 6 \frac{\sum_{i=1}^n (d_{xi} - d_{yi})^2}{n(n^2 - 1)}$$

ここで、 d_{yi} は評価する出力（ここではデブリ堆積高さ）の順位、 d_{xi} は入力条件の順位を、 n は入力条件と出力条件の組数（ここでは 59 組）を示す。

SPRC は、変数の値を順位に変換し、変数の順位に対して PEC を求めたものである。PEC 出力と入力の相関関係における線形性を評価する指標である。SPRC は出力と入力の相関関係における単調性を評価する指標である。

図より、デブリ堆積高さに対して、溶融物落下割合が強い正の相関（溶融物落下割合が増加するとデブリ堆積高さが増加する）を示すことが分かる。また、デブリ堆積高さに対して、溶融物加熱度が弱い負の相関、溶融物初速が弱い正の相関、開口直径が弱い正の相関、冷却水温が弱い正の相関を示すことが分かる。しかしながら、これらの入力条件はデブリ堆積高さとはほぼ相関しないと判断できる。

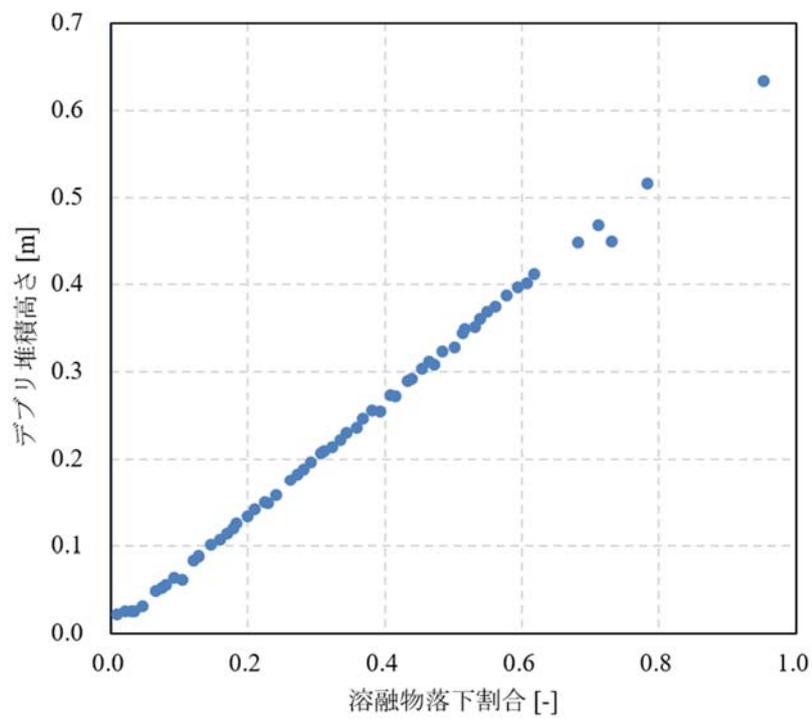


図 4.6.1 デブリ堆積高さと溶融物落下割合の関係（初期水位 1.0 m）

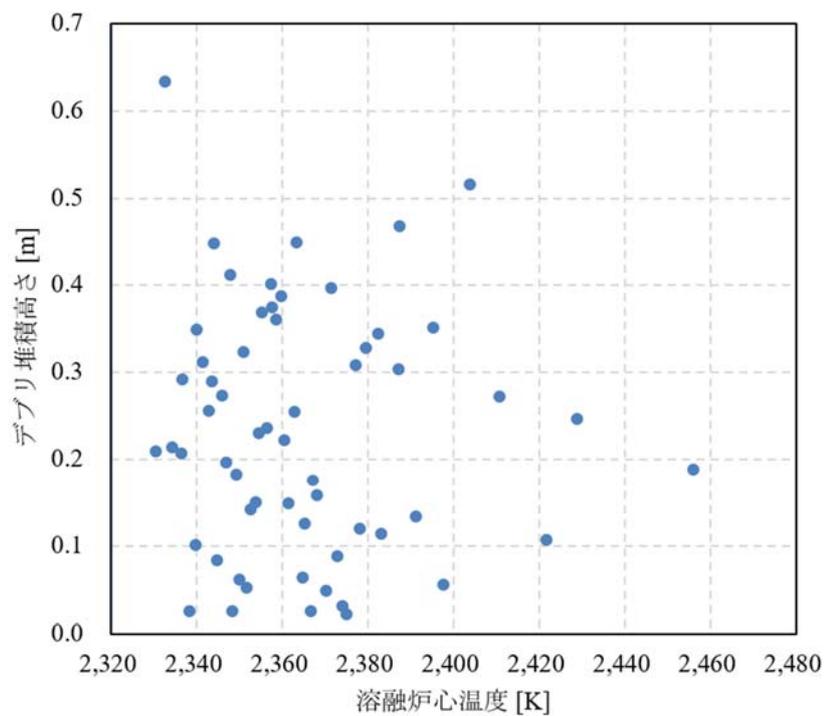


図 4.6.2 デブリ堆積高さと溶融炉心温度の関係（初期水位 1.0 m）

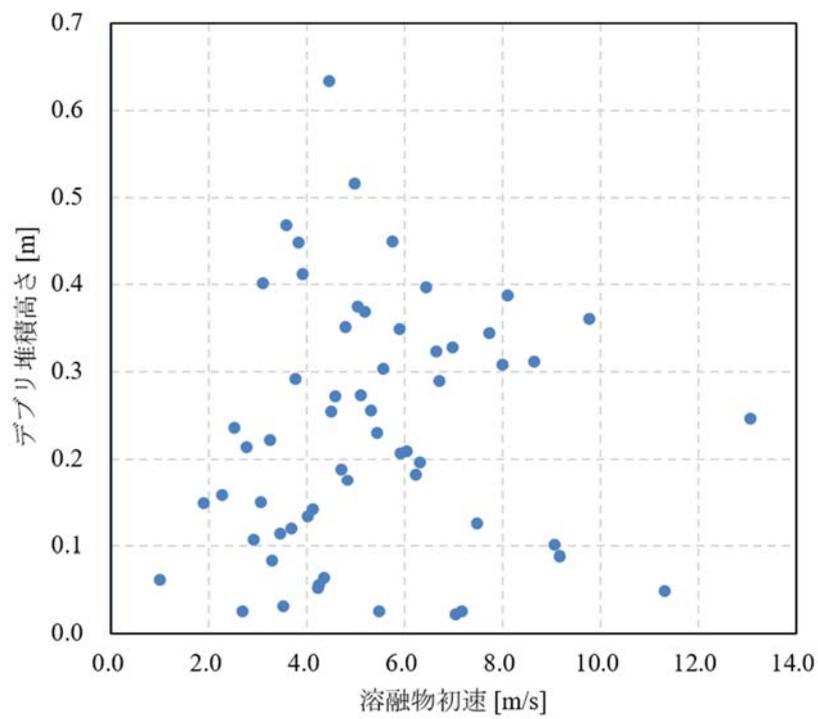


図 4.6.3 デブリ堆積高さと溶融物初速の関係（初期水位 1.0 m）

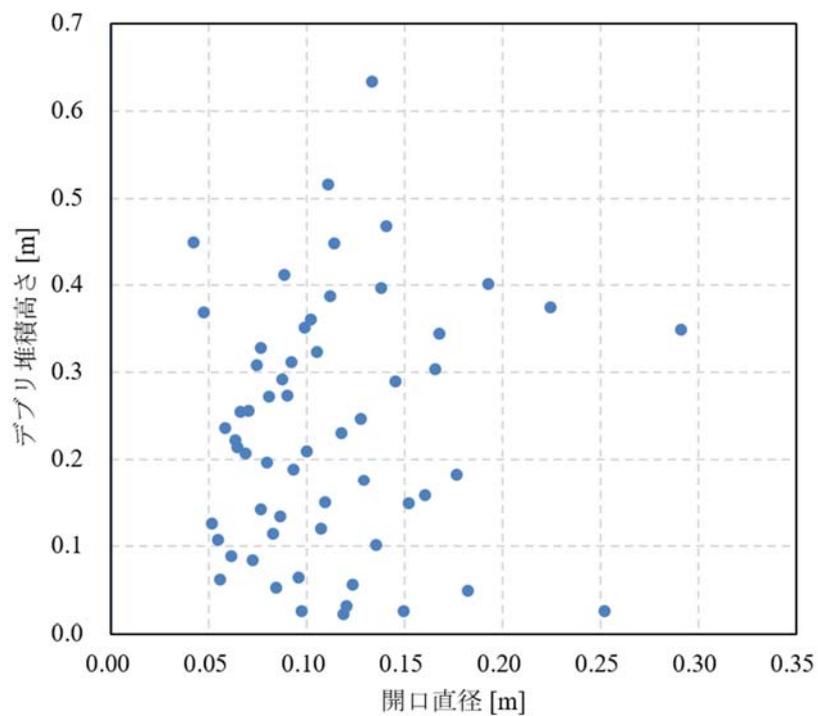


図 4.6.4 デブリ堆積高さと開口直径の関係（初期水位 1.0 m）

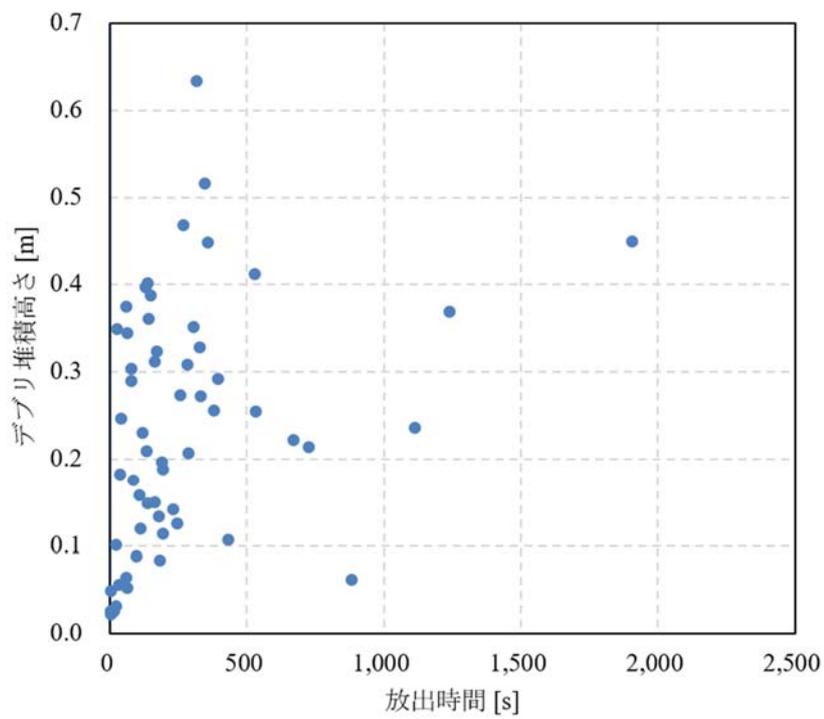


図 4.6.5 デブリ堆積高さと放出時間の関係（初期水位 1.0 m）

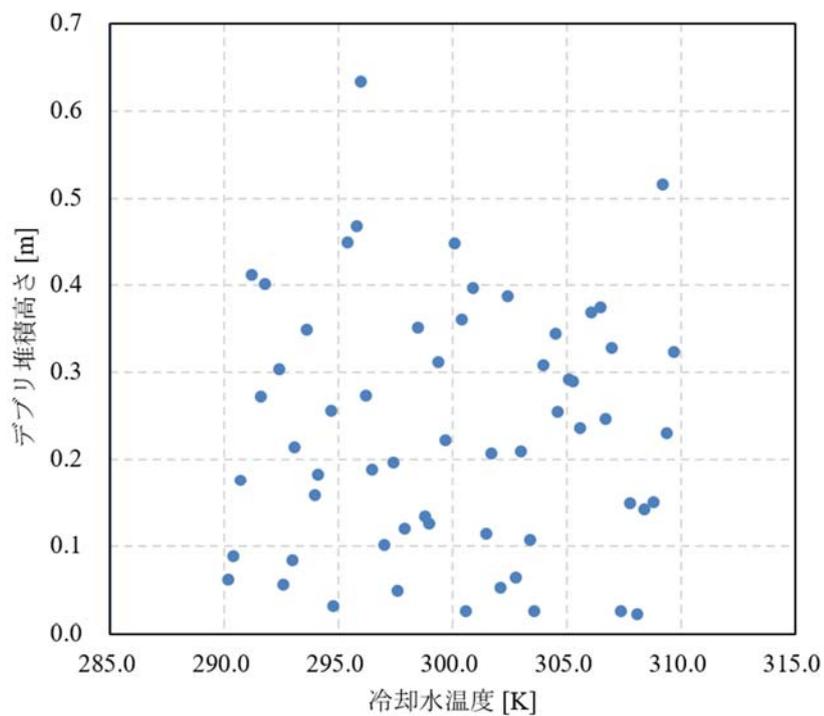


図 4.6.6 デブリ堆積高さと冷却水温度の関係（初期水位 1.0 m）

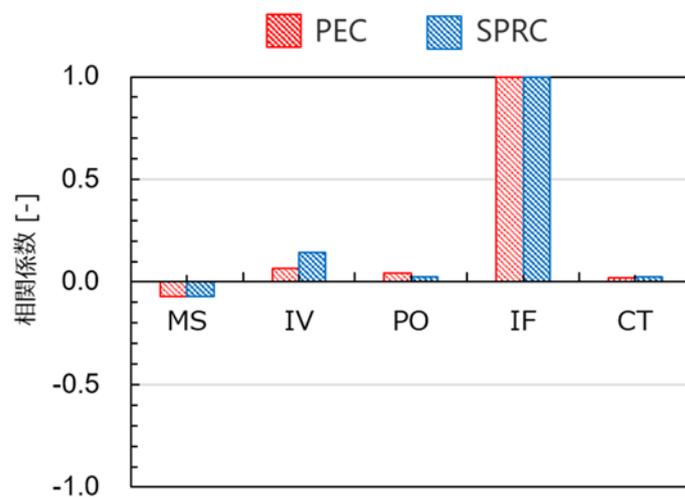


図 4.6.7 デブリ堆積高さに対する相関係数（初期水位 0.5 m）

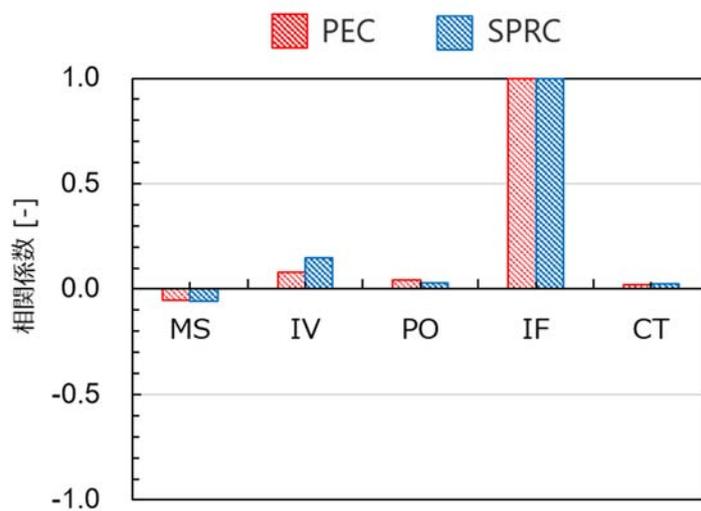


図 4.6.8 デブリ堆積高さに対する相関係数（初期水位 1.0 m）

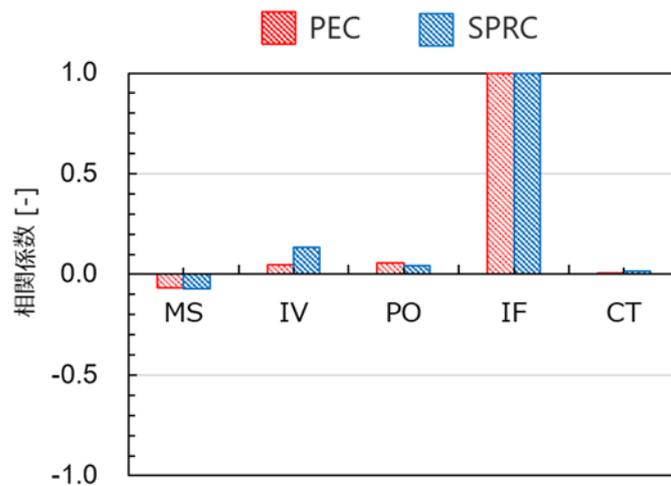


図 4.6.9 デブリ堆積高さに対する相関係数（初期水位 2.0 m）

4.7 デブリの冷却成功確率

JASMINE コードによる解析で得たデブリ堆積高さ h_{max} と冷却可能な最大デブリ堆積高さ h_{max} とを比較することにより、デブリの冷却成功(MCCI回避の成功/失敗)を判定する。ここで、 h_{max} は表4.7.1に示す条件に基づき、付録Dに示す方法で算出する。このことにより、冷却可能な最大デブリ堆積高さは、表4.7.2に示す通り 0.466 m と求めることができる。

図4.7.1から図4.7.3に、原子炉格納容器内初期水位がそれぞれ 0.5 m、1.0 m、2.0 mとなる条件で、59ケースの JASMINE コードによる解析より得られたたデブリ堆積高さの度数分布を示す。初期水位が 0.5 m の条件では4ケース、初期水位が 1.0 m の条件では 3 ケース、初期水位が 2.0 m の条件では3ケースでデブリ堆積高さが h_{max} を上回る。よって、各初期水位でのデブリの冷却成功確率 P は以下の通りに求めることができる。

- ・ 初期水位 0.5 m

$$P = 55/59 = 0.932$$

- ・ 初期水位 1.0 m

$$P = 56/59 = 0.949$$

- ・ 初期水位 2.0 m

$$P = 56/59 = 0.949$$

ここで、デブリの冷却成功確率は、入力条件に対して便宜的に確率分布を仮定した結果として得られたものである。よって、実機でのデブリ冷却成功確率を意味しないことに留意する必要がある。

図4.7.4に初期水位の変化によるデブリの冷却成功確率の推移を示す。解析結果より、デブリの冷却成功確率は、初期水位の増加によりわずかに増加することが示されたが、わずか1ケース分の違いに過ぎなかった。よって、今回仮定した入力パラメータの不確かさの条件において、0.5 mから2.0 mの範囲の初期水位の変動がデブリ冷却成功確率に及ぼす影響は限定的であることが明らかになった。一方、いずれの水位においても、冷却失敗となる条件は溶融物落下量が多い条件であった。この条件では、溶融物は原子炉格納容器の壁面まで拡がる。このことから、溶融物落下量が多い条件でデブリ冷却成功確率を上げるためには、初期水位を増加させることにより、溶融ジェット粒子化を促進させる（連続層状デブリとして堆積する溶融物の質量を抑制する）ことが有効である。

今回は便宜的に与えた仮想的な確率分布に対して評価を行ったものであり、得られた数値は実機におけるデブリ冷却成功確率を意味するものではないが、本解析によりJASMINEコードを用いた確率論的評価手法の成立性を見通しを得た。入力パラメータの選定及び確率分布の仮定をより適切に行うためには、1ステップ遡り、不確かさを考慮したシビアアクシデント解析が必要である。

表4.7.1 冷却可能な最大デブリ堆積高さの評価に用いる入力条件一覧

変数	説明	値
λ	デブリ熱伝導率 (固相) [W/m·K]	1.911
ρ	デブリ密度 (固相) [kg/m ³]	8285.1
Q_d	デブリ崩壊熱 [W/m ³]	828510
Q_w	浸水層崩壊熱 [W/m ³]	828510
T_{sat}	水飽和温度 [K] (0.5MPa を仮定)	424.986
T_{abl}	コンクリート溶融浸食温度 [K]	1600
q_{dry}	ドライアウト熱流束 [W/m ²]	350000 *
T_{melt}	デブリ融点 [K]	2003

*文献 [4.8] に基づき保守的に設定

表4.7.2 冷却可能な最大デブリ堆積高さの評価結果

項目	値
デブリ高さ L [m]	0.128
浸水層高さ δ [m]	0.337
最大堆積高さ h_{max} [m]	0.466

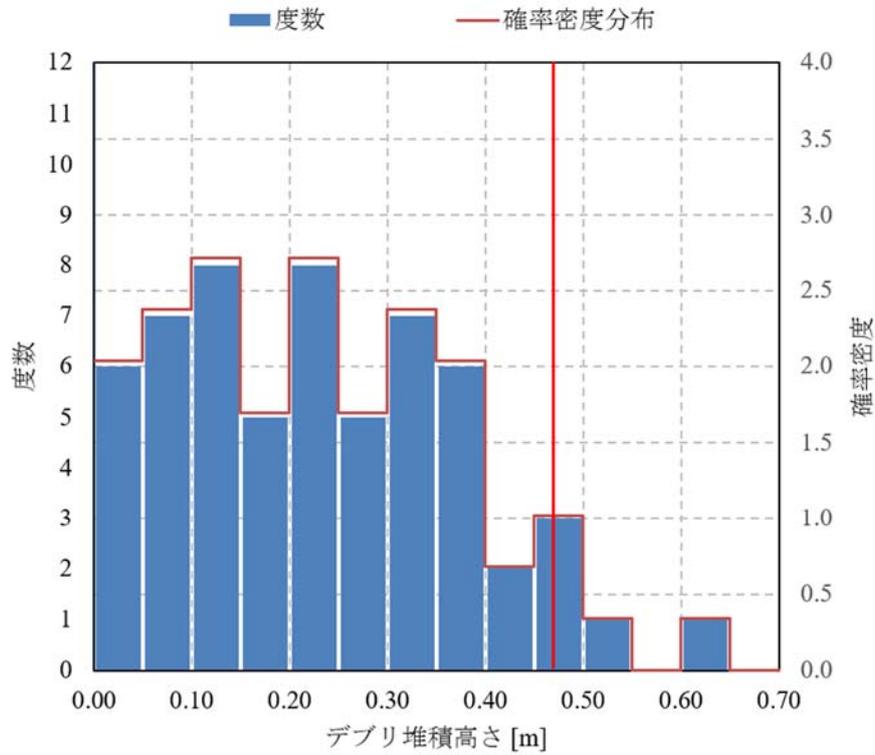


図 4.7.1 デブリ堆積高さのヒストグラム及び確率分布（初期水位 0.5 m）

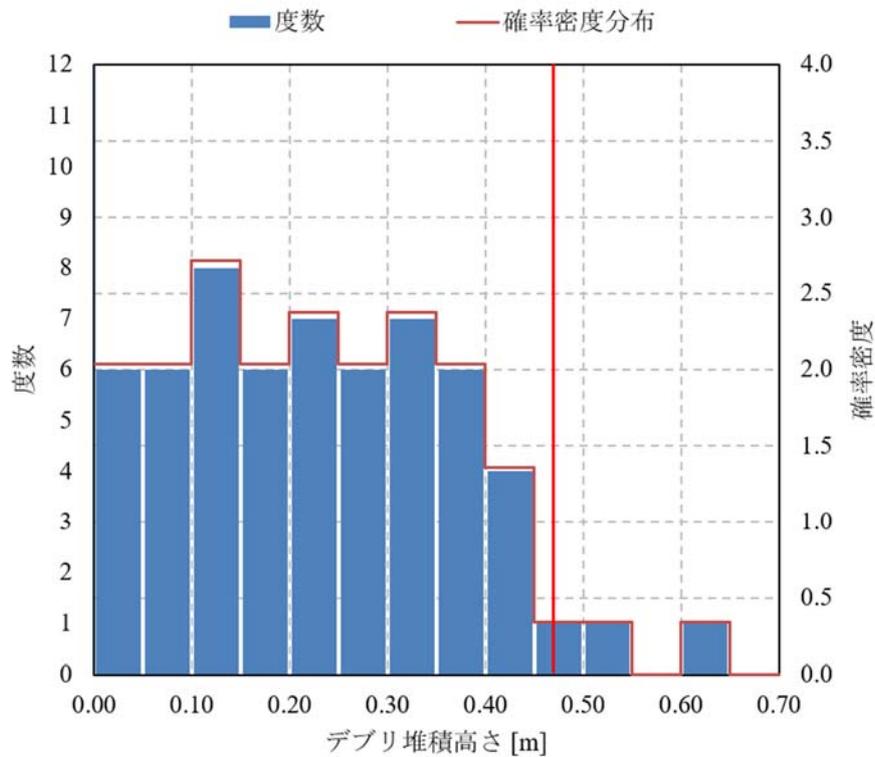


図 4.7.2 デブリ堆積高さのヒストグラム及び確率分布（初期水位 1.0 m）

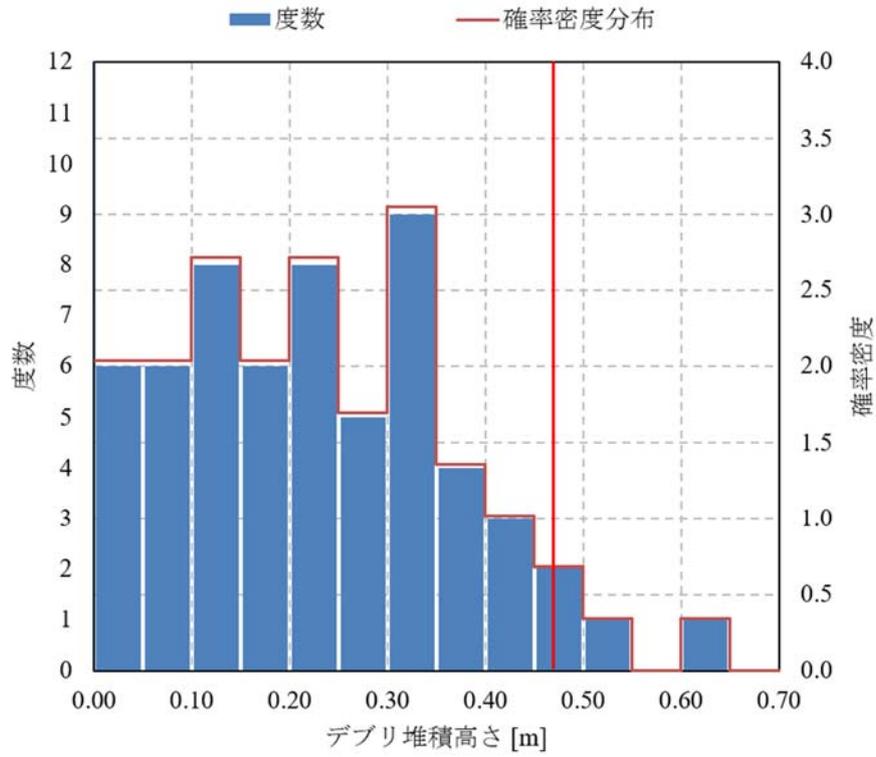


図 4.7.3 デブリ堆積高さのヒストグラム及び確率分布（初期水位 2.0 m）

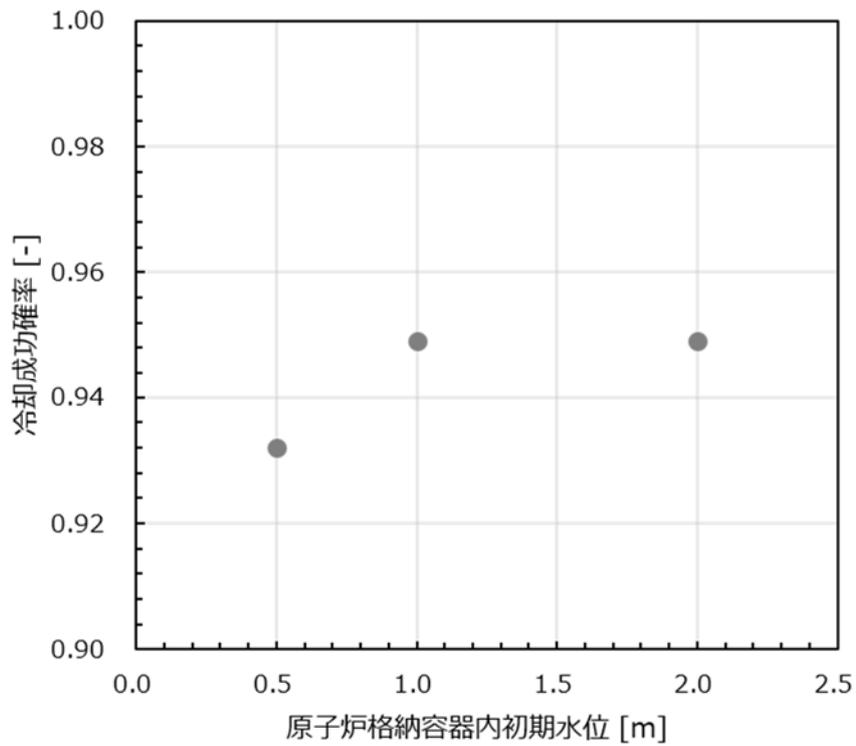


図 4.7.4 水位の変化による冷却成功確率の推移

4.8 MELCOR コードを用いた溶融物冷却挙動評価に係る調査

米国 Sandia National Laboratory (SNL) では、軽水炉事故時に関する現実的な解析結果に関する知見を得ることを目的とした State-of-the-Art Reactor Consequence Analyses (SOARCA) プロジェクトが進められている。SOARCA プロジェクトでは、重大事故進展解析コード MELCOR コードを用いた事故進展解析が行われていることから、SNL を訪問し、同析時における格納容器内溶融物冷却挙動に係る解析パラメータの調整、及び MELCOR を用いた不確かさ評価について調査した。

(1) MELCOR 解析における熱輸送パラメータの調整

2014 年の SOARCA プロジェクトにおいては、キャビティ内の熱伝達に関する最適条件を設定するために、Melt Attack and Coolability Experiments (MACE) 実験の結果との比較によりデブリ表層から冷却水への熱伝達率及びデブリの熱伝導率を高める形で調整が行われている [4.9]。

MELCOR コードによるデフォルト値を使用して MACE 実験の解析評価を実施したところ、MACE 実験において観察された熱流束を過小評価する傾向がみられた。MACE 実験では、デブリ上面クラストのひび割れによる水の侵入により、クラストへ水が浸入することによる冷却効果の促進が示されており、この現象は従来の MELCOR コードでは考慮されていなかった。MELCOR 解析による MACE 試験解析の結果、1 * K 曲線で表されるデフォルト値を用いた場合の熱流束は、MACE 実験の熱流束データ (1000~5000 kW/m²) と一致せず、熱伝達率を 10~100 倍向上させることにより、MACE 試験のデータと一致する傾向がみられた。この結果に基づき、デブリの熱伝導率および冷却水への熱伝達率に乗数を適用することにより MELCOR 解析における熱伝達計算の精度を向上させる修正が加えられた。SOARCA におけるベストプラクティスにおいては、冷却水への熱伝達率 (BOILING) に対して 10 倍の乗数および溶融デブリの熱伝導率 (COND.OX、COND.MET) に対して 5 倍の乗数が適用された。

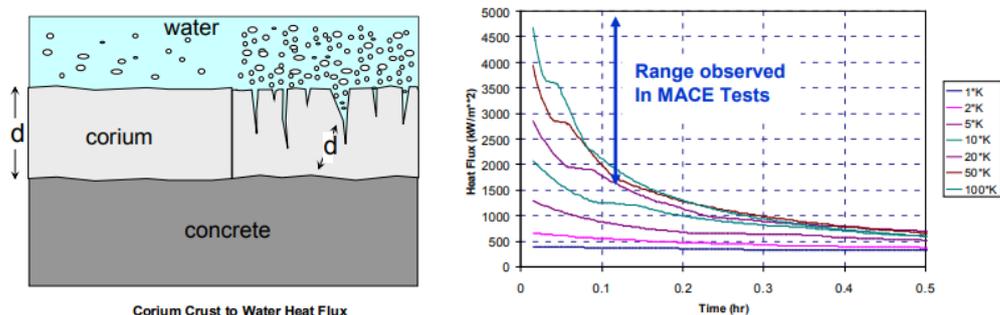


図 4.8.1 デブリベッドから水プールへの熱移行[4.8]

しかし、その後の研究により、溶融デブリの熱伝導率に乗数を適用することは、液相領域だけでなくすべての固相領域の熱伝導特性に影響を及ぼすことが判明し、溶融デブリの熱伝導率とは独立にクラストの熱伝導率や溶融物-上部クラスト界面における熱伝達率に乘

数を設定できるように MELCOR コードが修正された。コード修正後のクラストの熱伝導率と熔融物-上部クラスト界面における熱伝達率に対する乗数のベース値については、OECD/MCCI プロジェクトにおける実験結果 (CCI-1、CCI-2 及び CCI-3) [4.1]との比較により検討され、クラストの熱伝導率 (COND.CRUST) に対して 3 倍の乗数、熔融物-上部クラスト界面における熱伝達率 (HTINT) に対して 5 倍の乗数が適用された。

(2) MELCOR を用いた熔融物挙動に係る不確かさ解析条件

SNL では、SOARCA プロジェクトとは別に、MELCOR コードを用いた APR1400 型 PWR におけるキャビティ内での熔融物挙動に着目した不確かさ解析が行われている。APR1400 における不確かさ評価を実施した際の不確かさパラメータや確率分布等に係る情報を得た。不確かさパラメータとしては、初期デブリ温度、コンクリート侵食温度、熱伝達や粘性に係る乗数などのキャビティ内におけるデブリの熱移送や拡がりへ影響を与えるパラメータが選定されている。不確かさパラメータとして選定されたパラメータに関する確率分布については、感度解析や実験データなどに基づいてそれぞれ設定されている。

参考文献

- [4.1] M. T. Farmer, S. Lomperski, D. J. Kilsdonk, and R. W. Aeschlimann, OECD MCCI Project 2-D Core Concrete Interaction (CCI) Tests: Final Report, OECD/MCCI-2005 -TR05, February 28, 2006
- [4.2] 国立研究法人日本原子力研究開発機構, ” 原子力の安全性に資する共通基盤整備のための技術開発委託事業 (シビアアクシデント時の燃料破損・熔融過程解析手法の高度化) ”, 委託事業報告資料 www.nsr.go.jp/data/000182517.pdf, 平成 29 年 2 月
- [4.3] 日本機械学会編, “気液二相流技術ハンドブック”, コロナ社, 1989 年 5 月
- [4.4] K. Moriyama, Y. Maruyama and H. Nakamura, Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA-DATA/Code 2008-014, July 2008, Japan Atomic Energy Agency.
- [4.5] T. Homma and A. Saltelli, LISA package user guide, Part 1: PREP (Statistical PRE Processor) preparation of input sample for Monte Carlo simulations program description and user guide, EUR-13922, Commission of the European Communities, 1992.
- [4.6] 日本原子力学会, 統計的安全評価の実施基準, AESJ-SC-S001:2008, 日本原子力学会標準委員会 システム安全専門部会 統計的安全評価手法標準分科会, 2009.
- [4.7] 日本機械学会, 技術資料 流体の熱物性値集, 昭和 58 年, P.210
- [4.8] S. Lomperski, M.T. Farmer, “Experimental evaluation of the water ingress mechanism for corium cooling”, Nucl. Eng. Des., 237, 2905-917, 2007.
- [4.9] K. Ross et al, MELCOR Best Practices as Applied in the State-of-the-Art Reactor Consequence Analyses (SOARCA) Project, NUREG/CR-7008, 2014.

5. おわりに

本事業においては、シビアアクシデント時における溶融炉心／コンクリート相互作用（MCCI：Molten Core/Concrete Interaction）を回避あるいはその影響を緩和する対策の有効性を評価する手法を高度化し、基準適合性審査等における規制判断の根拠となる技術的知見を提供することを目的に、溶融炉心が格納容器に落下する前に格納容器内に先行的に注水する場合における溶融炉心の冷却性を科学的・合理的に評価する手法を構築する。今年度の事業では、主に、格納容器内溶融炉心冷却性評価手法において中心的な役割を果たす溶融炉心／冷却材相互作用解析コード JASMINE の高度化に向けて、格納容器床面上における溶融炉心の拡がりに係わるモデルの改良を進め、さらに、入力パラメータの不確かさを考慮した予備的な実機解析により JASMINE コードを用いた確率論的評価手法の溶融炉心冷却性評価への適用性評価を行った。主要な成果は以下のとおりである。

5.1 DEFOR-A 実験解析

JASMINE コードを用いて、高温溶融酸化物ジェットブレイクアップ現象を対象としてスウェーデン王立工科大学（KTH）で行われた DEFOR-A1、A2、A4～A9、A23～A26 実験の解析を行った。冷却性評価においてはブレイクアップにより生じた粒子同士が結合して塊状になる割合（アグロメレーション質量割合）が重要となることから、同実験シリーズでは水プール深さとアグロメレーション質量割合の関係に関するデータが取得されている。平成 29 年度に JASMINE コードに導入したアグロメレーションモデルについてアグロメレーション後の伝熱量に関する調整パラメータの影響を検討した結果、結果に対する感度が低いことを確認した。現状のモデルは、DEFOR-A 実験データを用いて改良及び検証を行う限りにおいては、目標とした水準に概ね達したと考えられる。実機評価への適用を踏まえたさらなる高度化を進めるためには、他の溶融物や体系について取得された多様な実験データが必要である。

5.2 PULiMS 実験解析

JASMINE コードを用いて、高温溶融酸化物の水中床上拡がり現象に着目して KTH で実施された PULiMS-E1、E4、及び E8～E15 実験の解析を行った。格納容器に落下した溶融物がより大きく拡がるほど冷却され易くなり、MCCI 回避の成功確率が高くなることから、冷却性評価においては格納容器床面上での溶融炉心拡がり面積の評価が重要となる。そこで、JASMINE コードの溶融物拡がりモデルについて、特に溶融物の拡がり先端部における固相形成及び固相の引張強度を考慮したモデルの改良を進めて PULiMS 実験解析に適用した結果、実験で計測された拡がり面積の再現性が向上したことを確認した。

また、実験例が比較的多いドライ条件での溶融物拡がり実験データを活用するため、気相中での拡がりを扱えるように JASMINE コードの機能拡張を行った。ただし、十分な検証が必要である。

5.3 予備的実機解析

格納容器内に流出する溶融炉心の量、温度、溶融炉心ジェット径といった事故解析における入力パラメータについて確率分布を仮定し、抽出した 59 ケースの事故条件に対して予備的な実機解析を実施することで入力パラメータの不確かさを考慮したデブリ冷却成功確率の評価を行った。平成 29 年度は格納容器内の初期水位を 1.0 m としたケースについて評価を行ったが、今年度はこれに加えて 0.5 m 及び 2.0 m のケースについて評価を行った。その結果、今回仮定した入力パラメータの不確かさの条件に対し、この範囲の初期水位の変動がデブリ冷却成功確率に及ぼす影響は限定的であることが明らかになった。今回は便宜的に与えた仮想的な確率分布に対して評価を行ったものであり、得られた数値は実機におけるデブリ冷却成功確率を意味するものではないが、本解析により JASMINE コードを用いた確率論的評価手法の成立性を見通しを得た。

引き続き、JASMINE コードのアグロメレーションモデル及び溶融物床面拡がりモデルのさらなる改良により評価自体の不確かさ低減を図るとともに、実機評価への適用性について完成度を高め、事業目的の達成を図る。

付録 A DEFOR-A 実験の解析結果

本文第 2 章において実施した JASMINE コードによる DEFOR-A 実験の解析の結果を掲載する。掲載対象は DEFOR-A1～A9 実験（A3 は解析対象外）及び A23～A26 実験の解析結果である。なお、各実験について 4 つの水深（キャッチャー位置）の結果を示す。水プールの上側からキャッチャー1（C1）、キャッチャー2（C2）、キャッチャー3（C3）、キャッチャー4（C4、水プールの床と同じ高さ）である。

共通解析条件

- ・ JASMINE 4.2
- ・ アグロメレーション調整パラメータ： $\Phi_{min} = 0.05$, $\Phi_{max} = 1.5$, $\alpha = 15.0$
- ・ 熱伝達調整係数： $kqhtr = 0.1$

掲載データ

- ・ デブリの状態別質量の履歴
- ・ ボイド率及び溶融物粒子分布図（図中において、橙色はアグロメレーション粒子群、黒は固化した粒子群を意味する）

DEFOR-A1 (キャッチャー1)

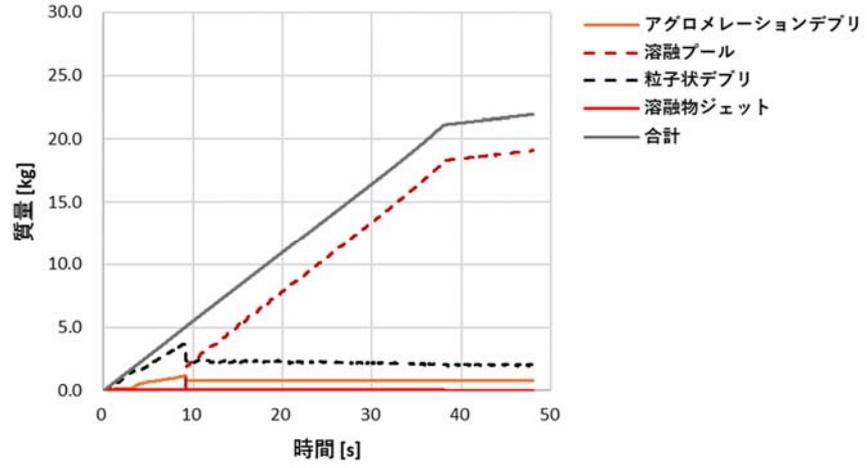


図 A1-C1-1 デブリの状態別質量の履歴

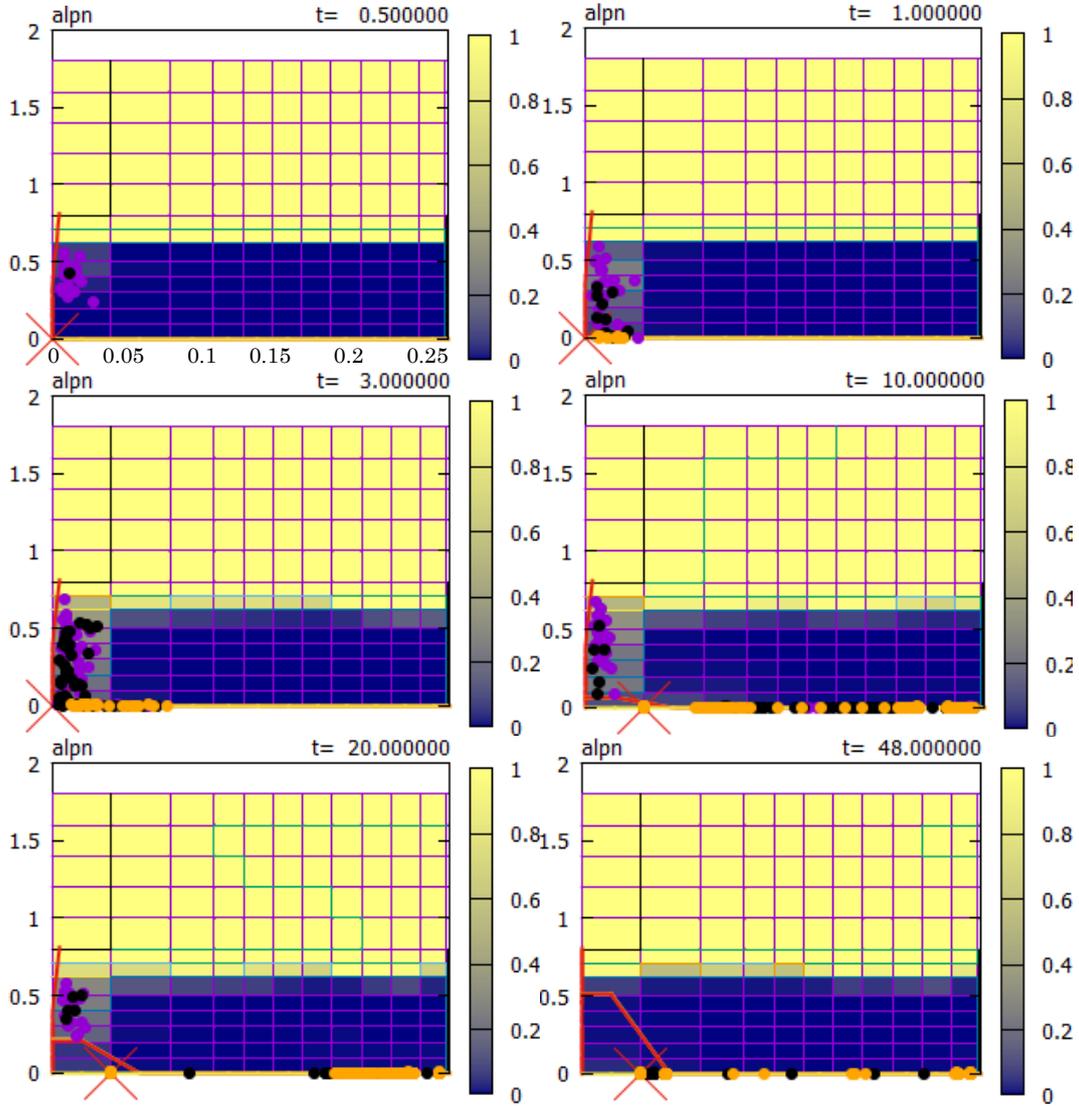


図 A1-C1-2 ボイド率及び熔融物粒子分布図

DEFOR-A1 (キャッチャー2)

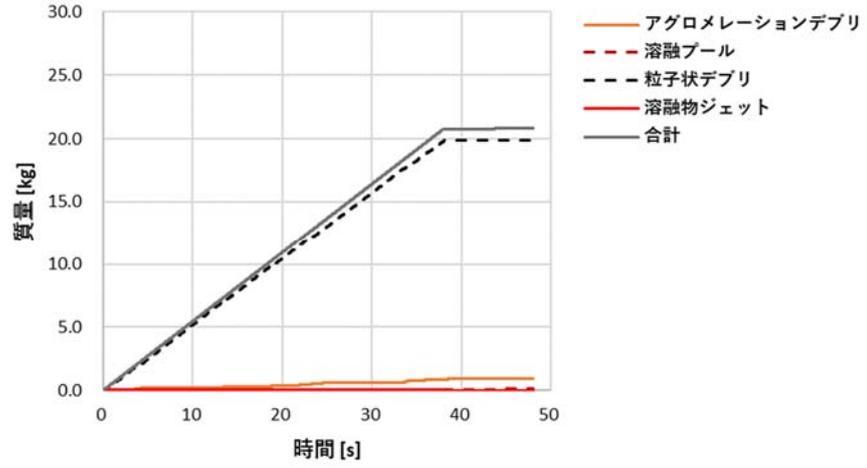


図 A1-C2-1 デブリの状態別質量の履歴

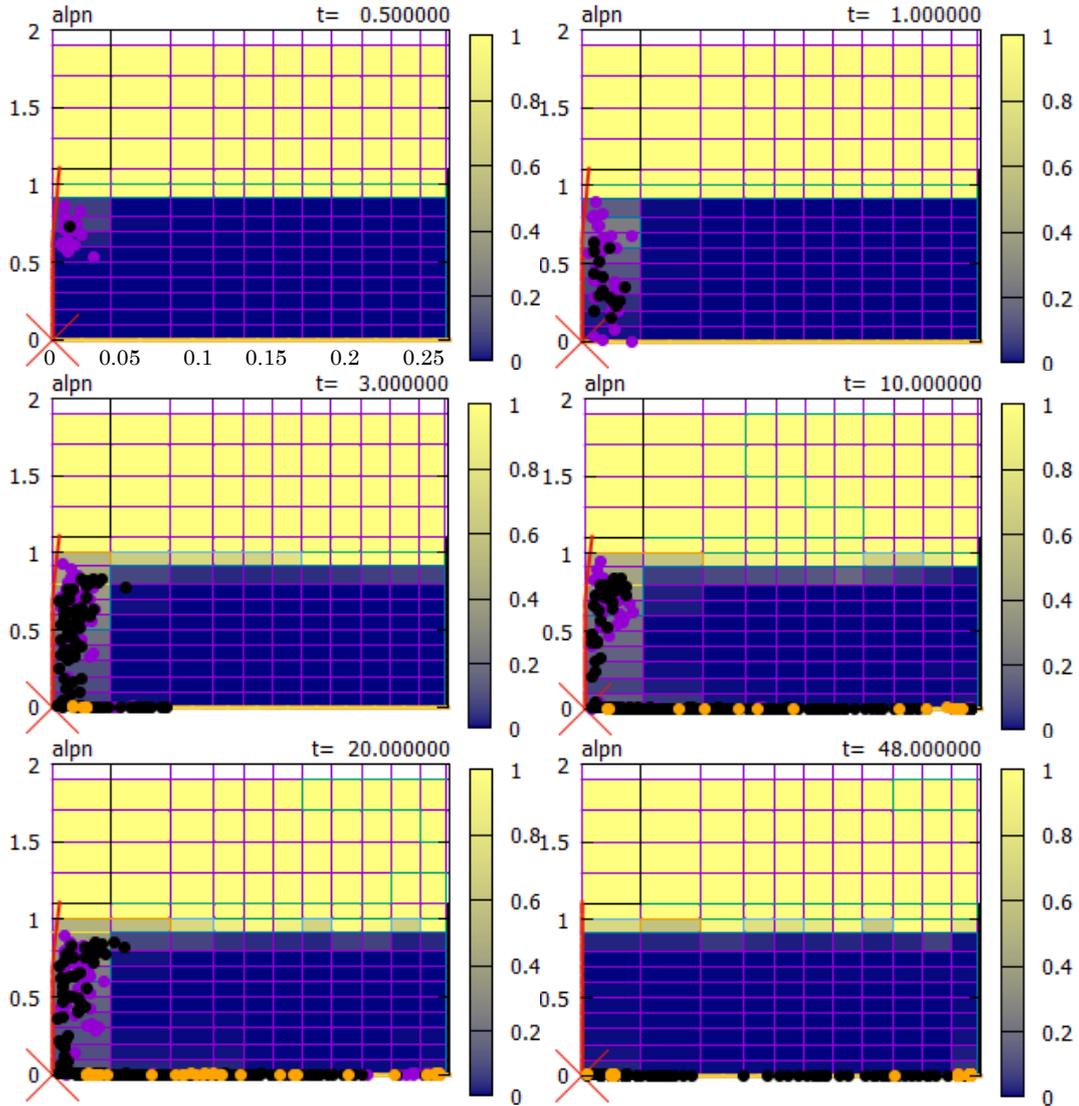


図 A1-C2-2 ボイド率及び熔融物粒子分布図

DEFOR-A1 (キャッチャー3)

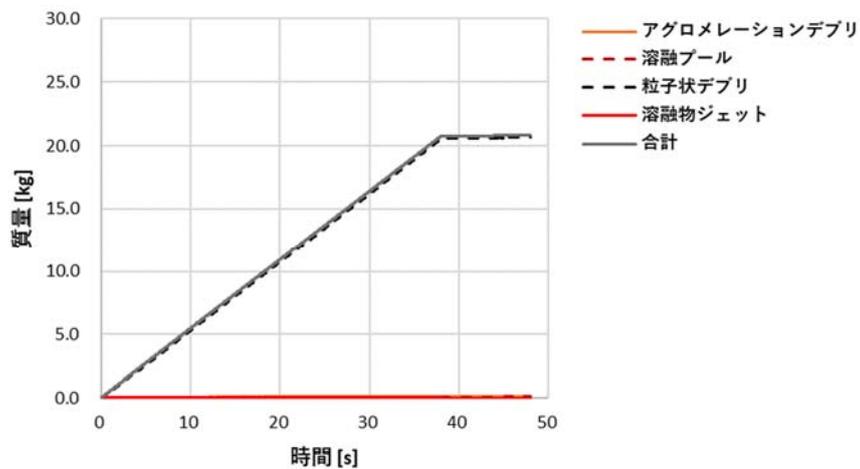


図 A1-C3-1 デブリの状態別質量の履歴

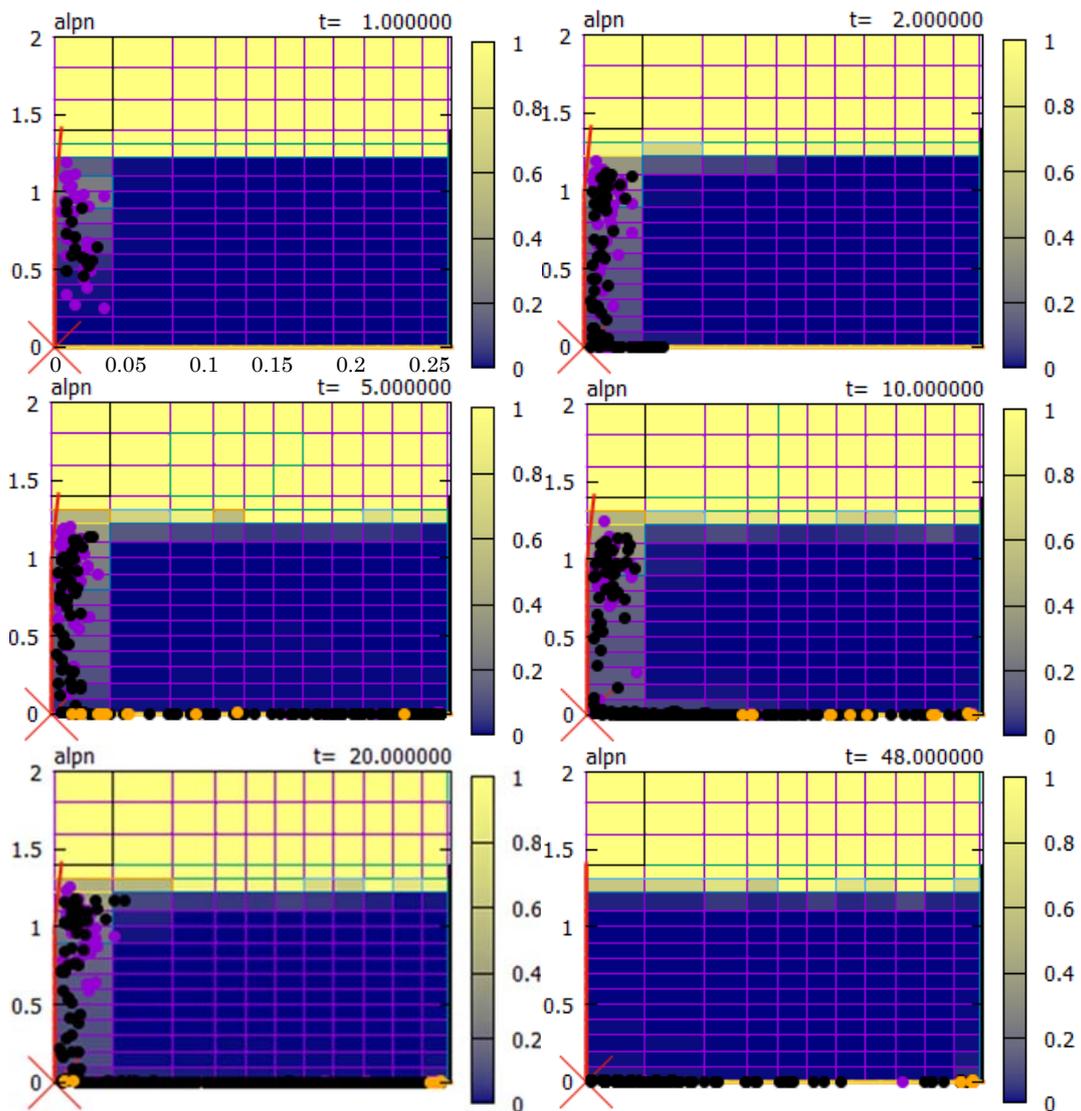


図 A1-C3-2 ボイド率及び熔融物粒子分布図

DEFOR-A1 (キャッチャー4)

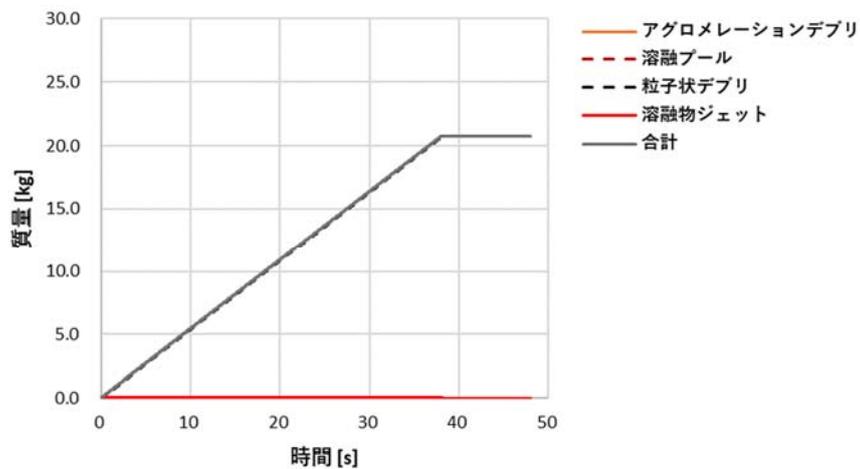


図 A1-C4-1 デブリの状態別質量の履歴

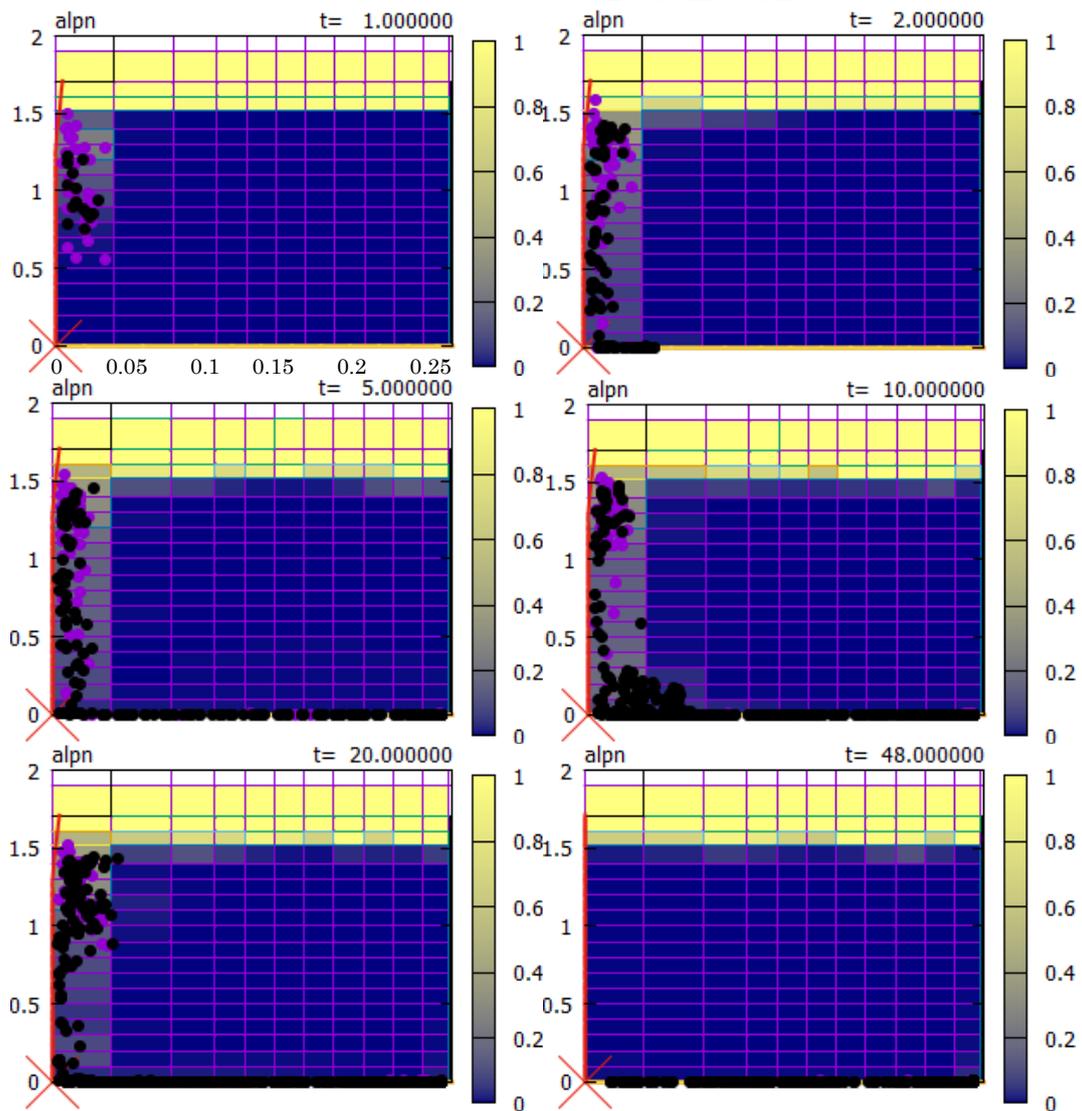


図 A1-C4-2 ボイド率及び熔融物粒子分布図

DEFOR-A2 (キャッチャー1)

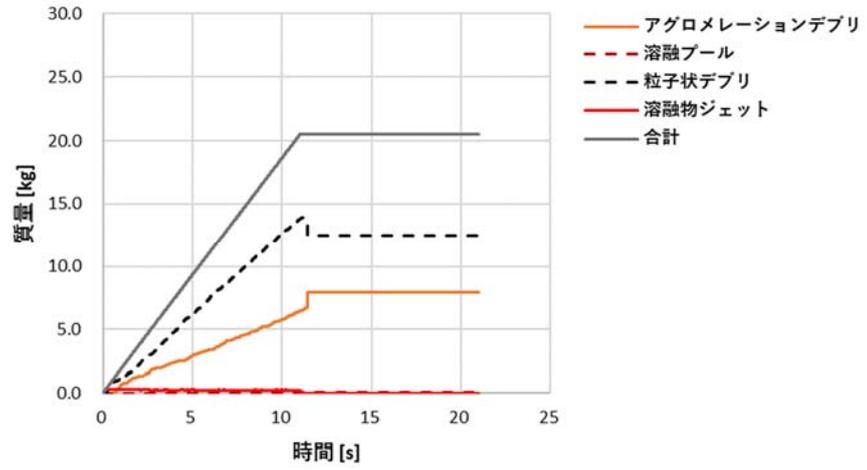


図 A2-C1-1 デブリの状態別質量の履歴

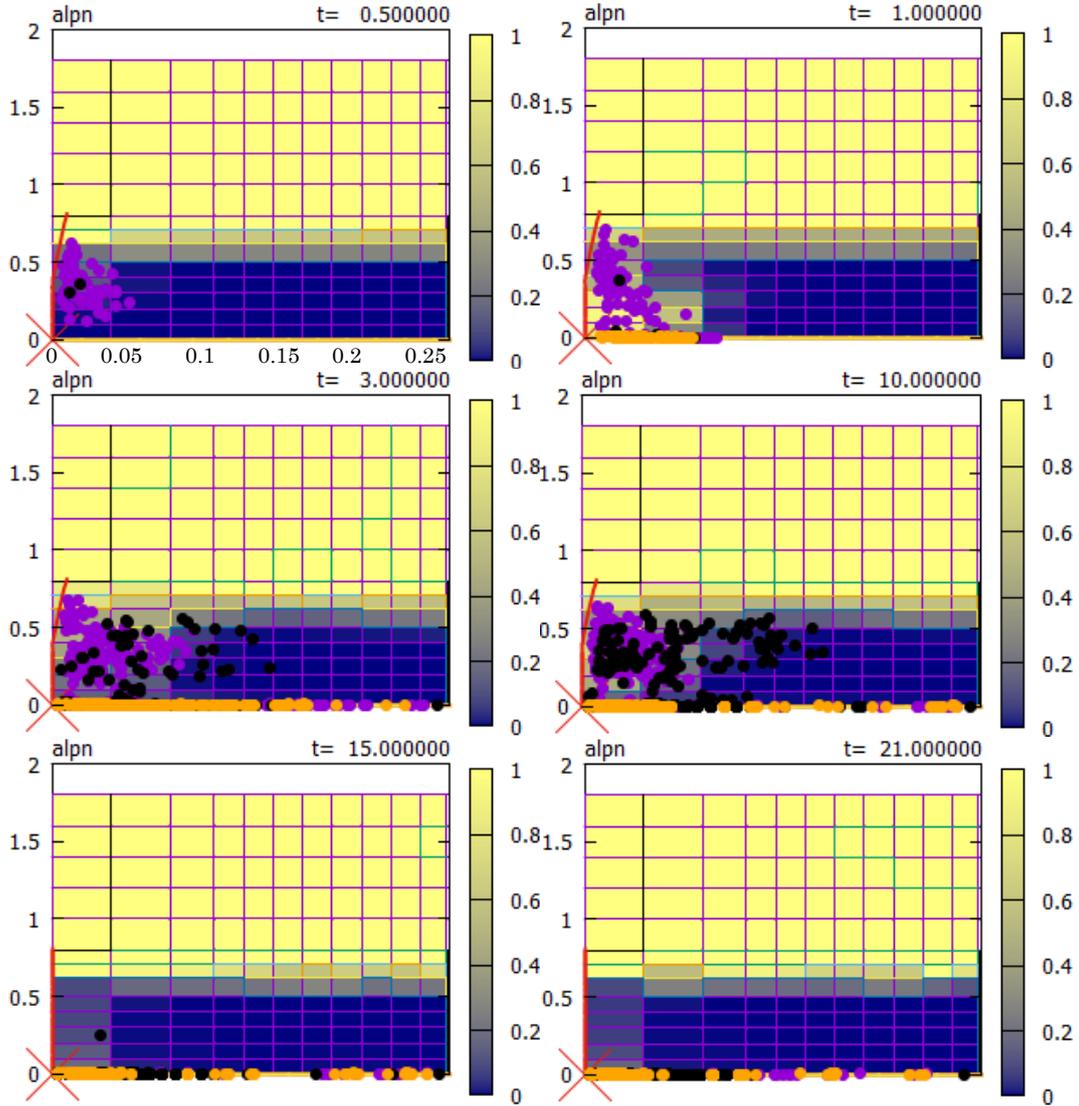


図 A2-C1-2 ボイド率及び熔融物粒子分布図

DEFOR-A2 (キャッチャー2)

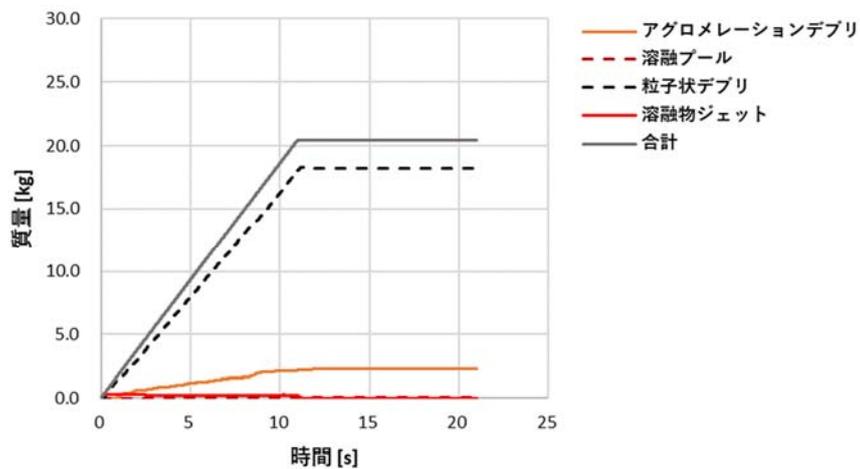


図 A2-C2-1 デブリの状態別質量の履歴

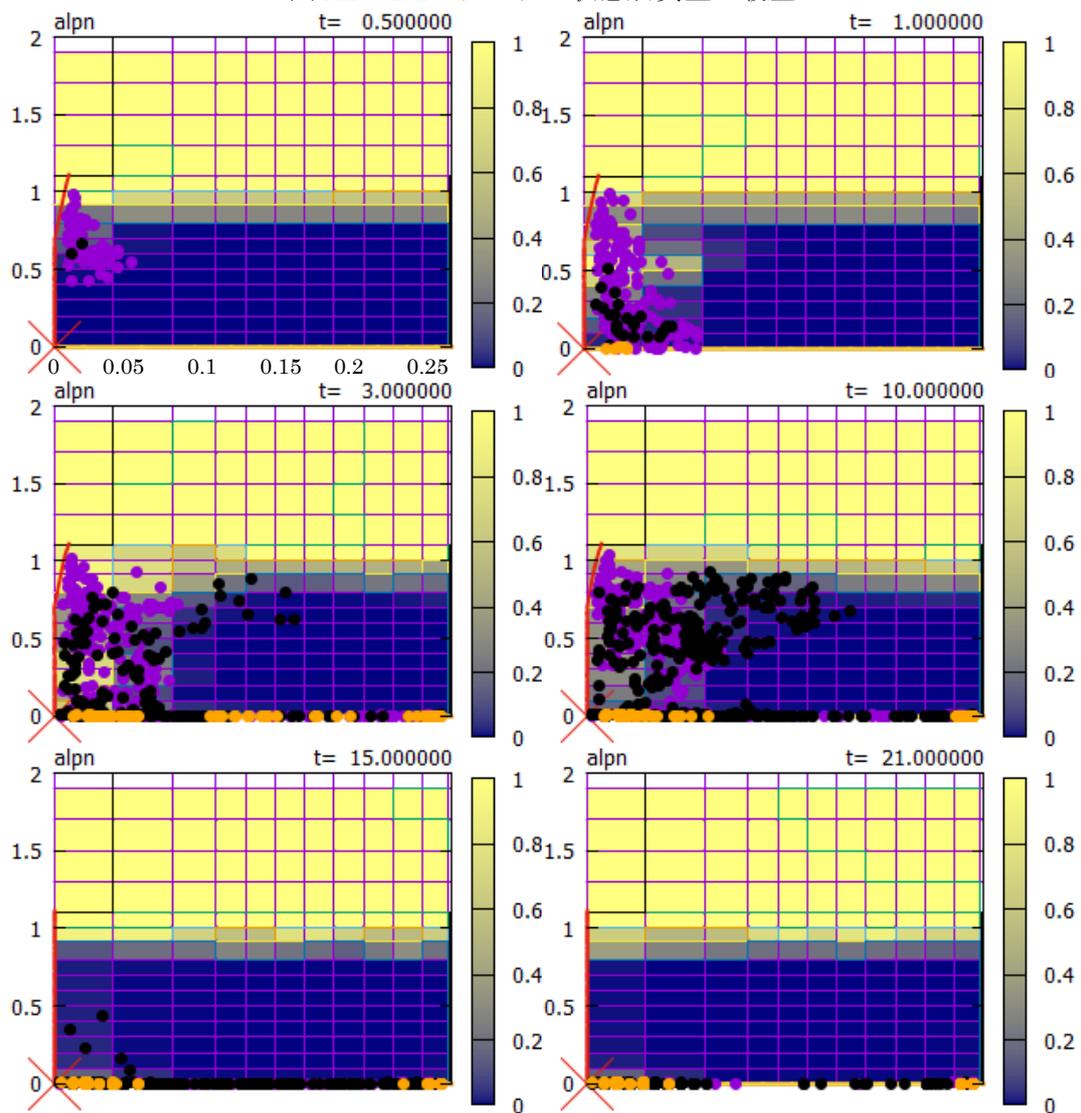


図 A2-C2-2 ボイド率及び溶融物粒子分布図

DEFOR-A2 (キャッチャー3)

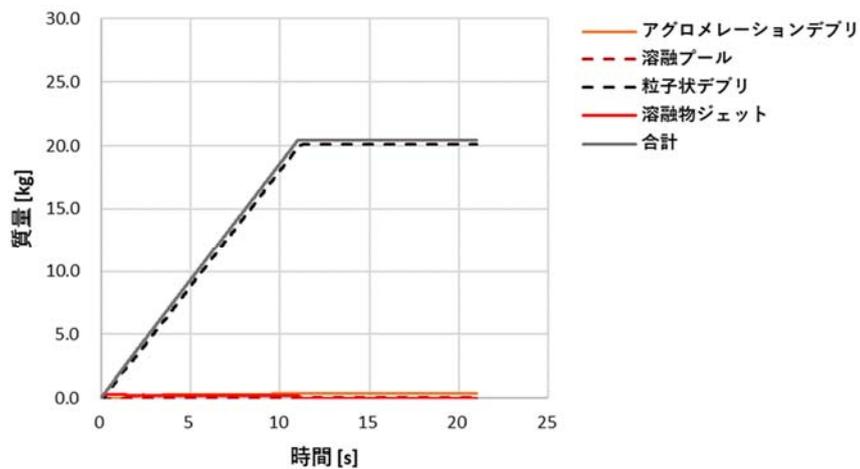


図 A2-C3-1 デブリの状態別質量の履歴

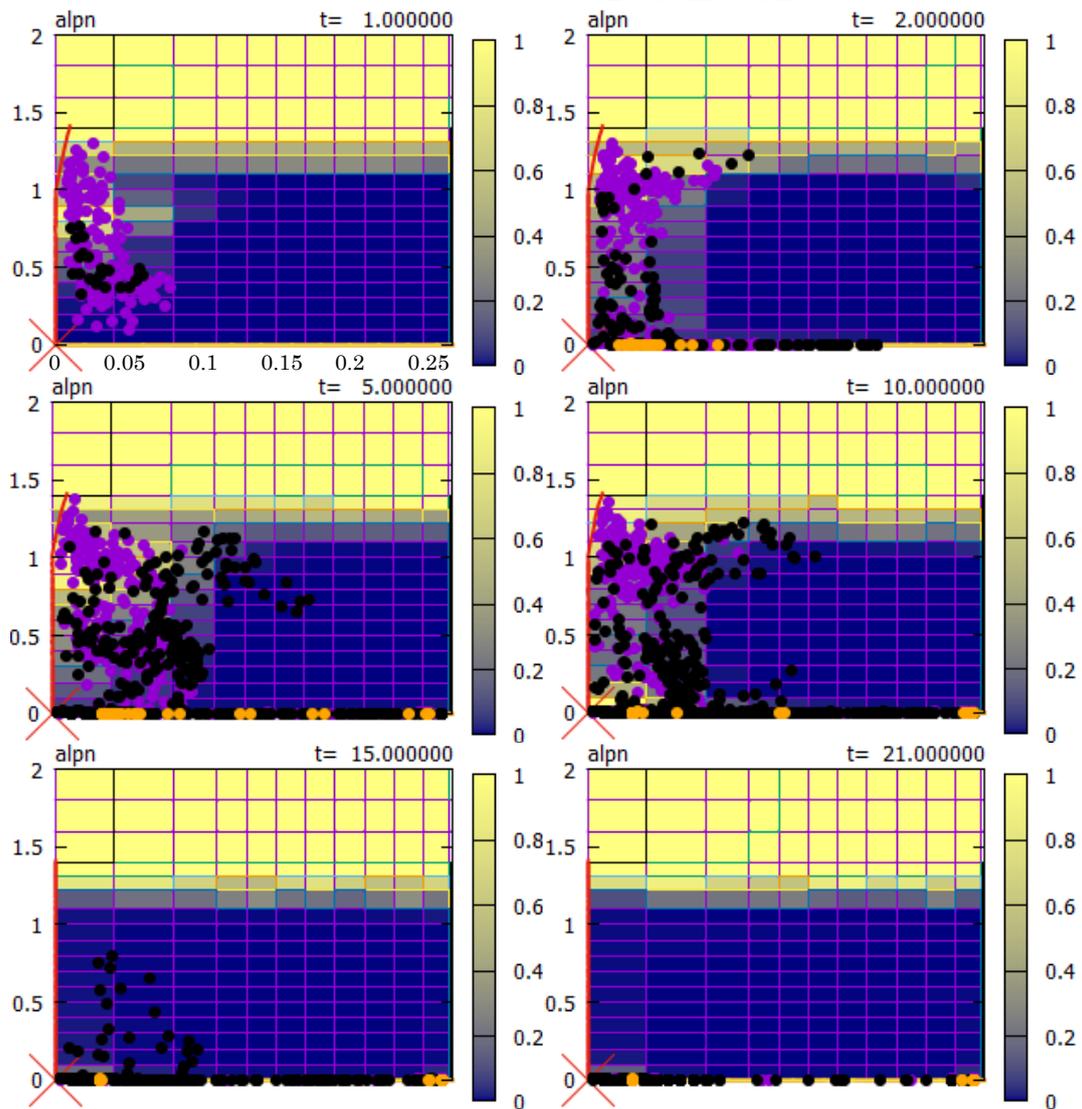


図 A2-C3-2 ボイド率及び溶融物粒子分布図

DEFOR-A2 (キャッチャー4)

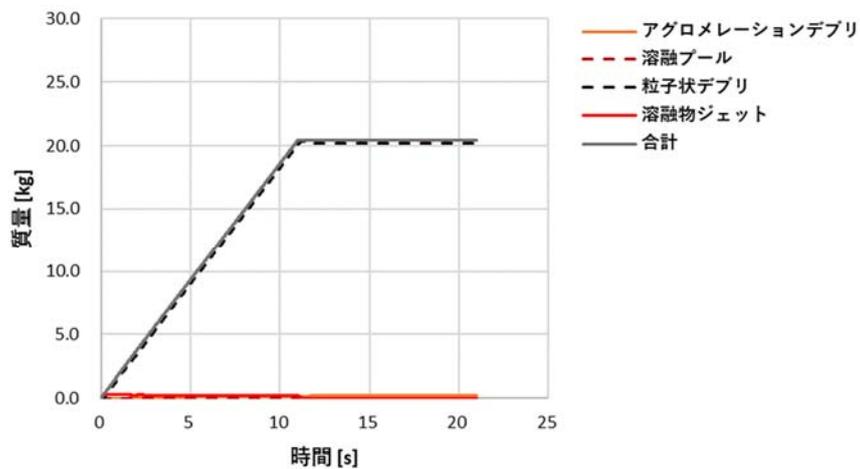


図 A2-C4-1 デブリの状態別質量の履歴

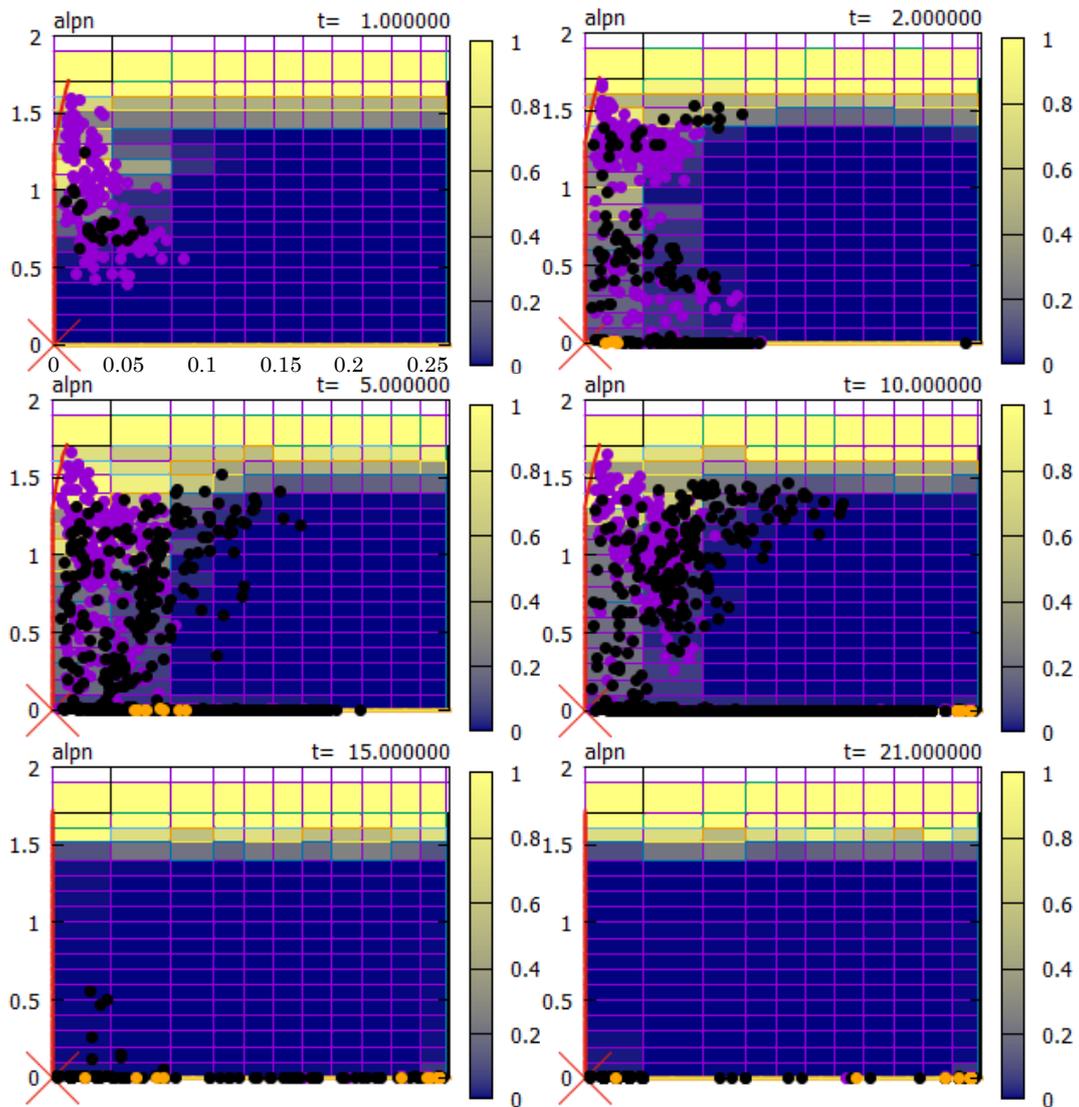


図 A2-C4-2 ボイド率及び溶融物粒子分布図

DEFOR-A4 (キャッチャー1)

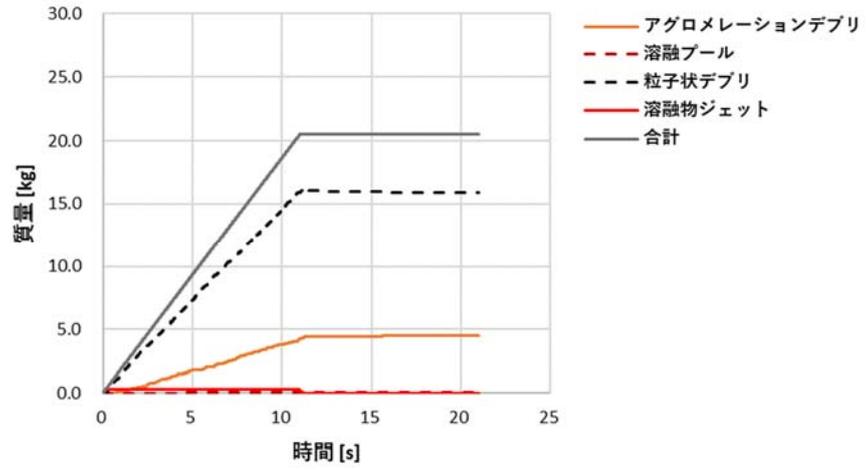


図 A4-C1-1 デブリの状態別質量の履歴

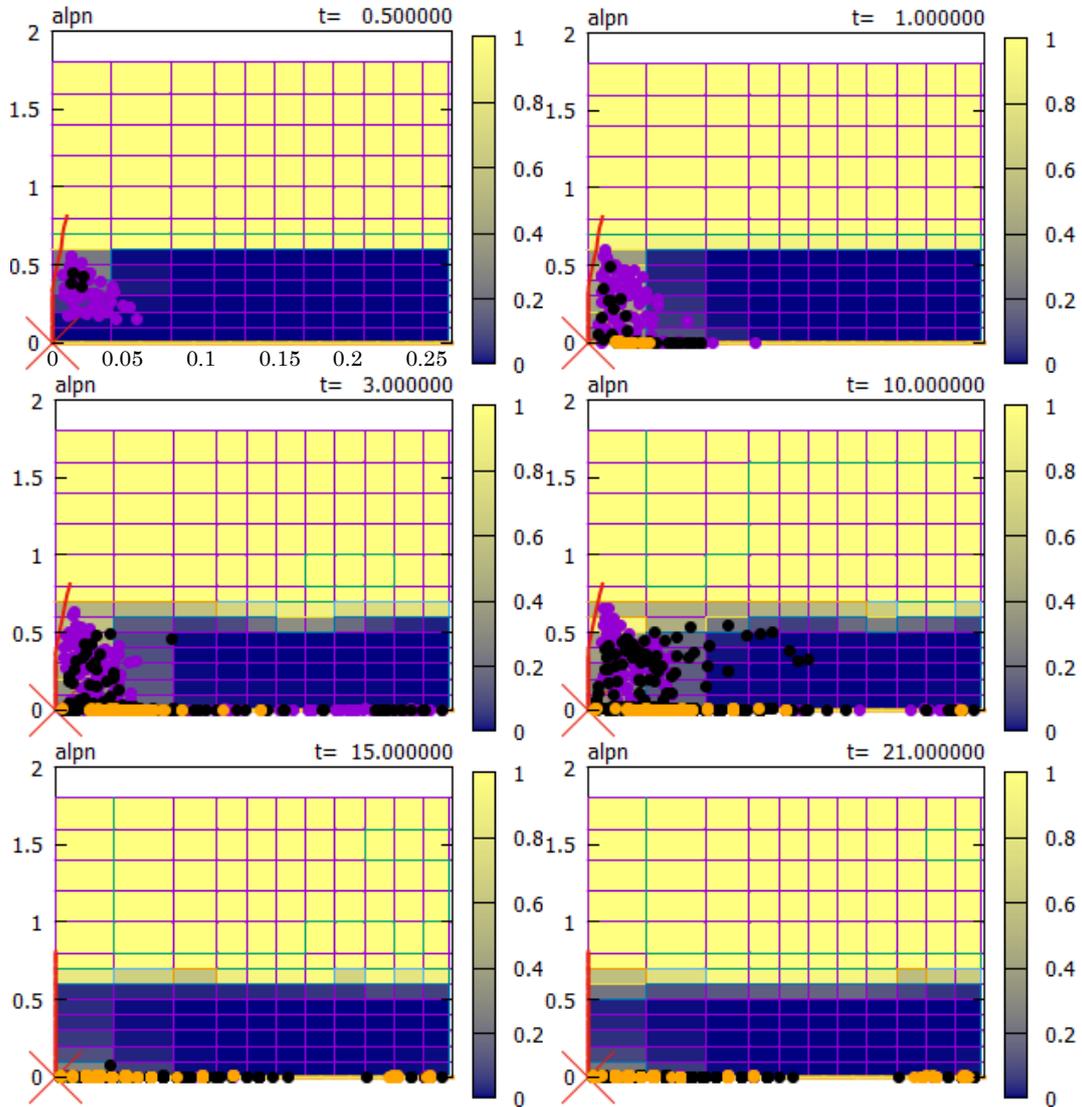


図 A4-C1-2 ボイド率及び溶融物粒子分布図

DEFOR-A4 (キャッチャー2)

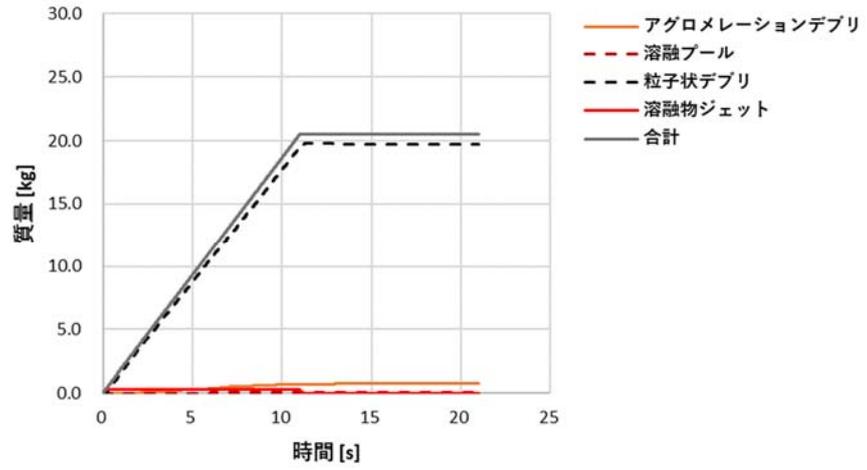


図 A4-C2-1 デブリの状態別質量の履歴

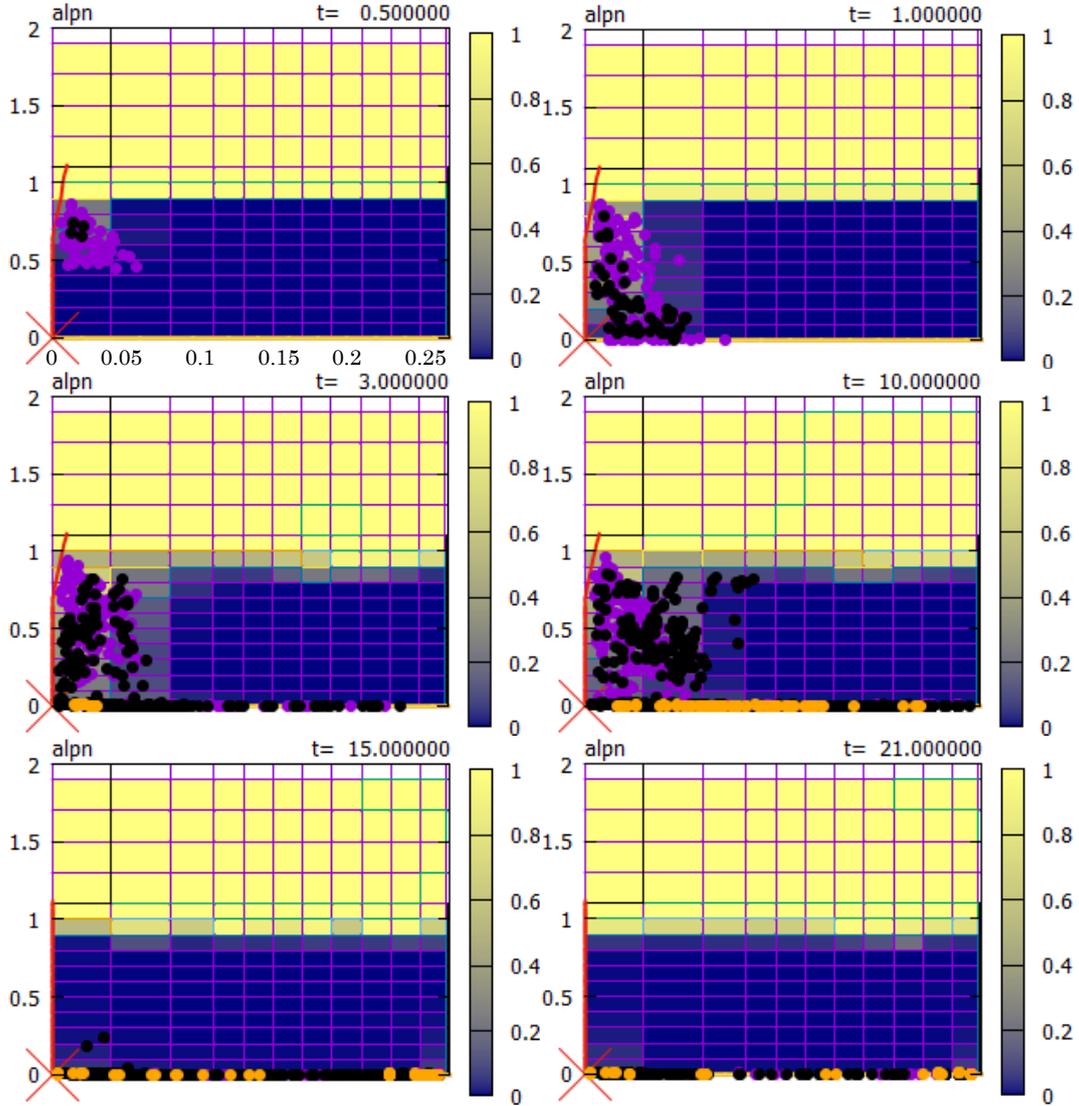


図 A4-C2-2 ボイド率及び溶融物粒子分布図

DEFOR-A4 (キャッチャー3)

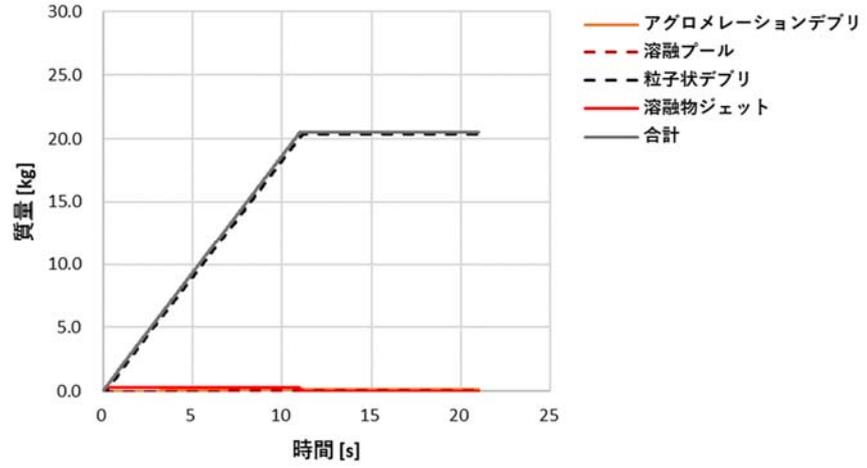


図 A4-C3-1 デブリの状態別質量の履歴

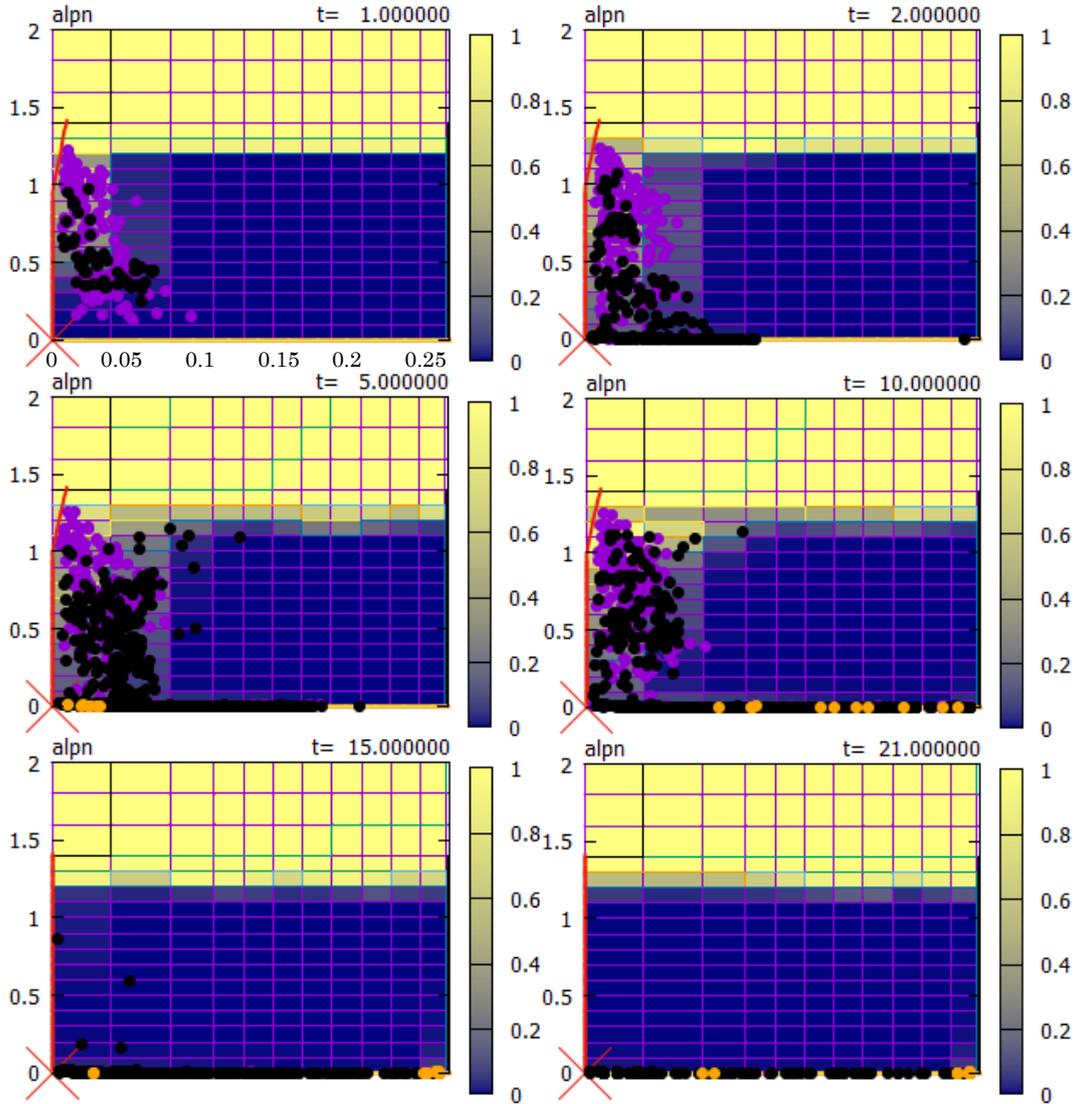


図 A4-C3-2 ボイド率及び溶融物粒子分布図

DEFOR-A4 (キャッチャー4)

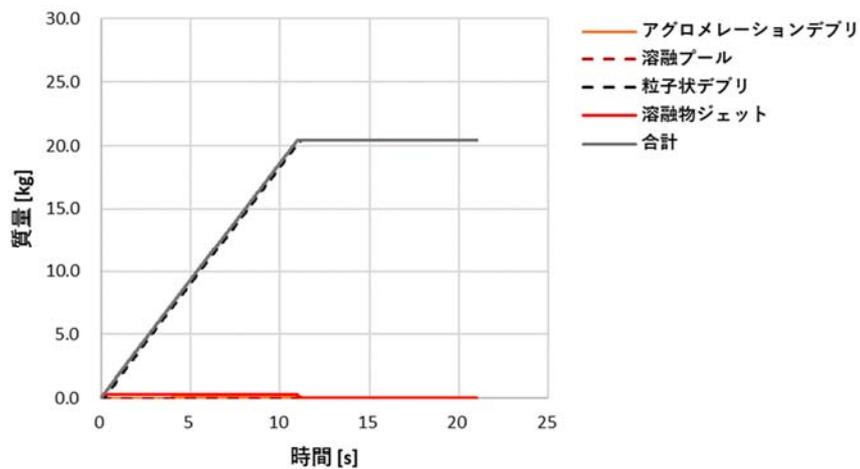


図 A4-C4-1 デブリの状態別質量の履歴

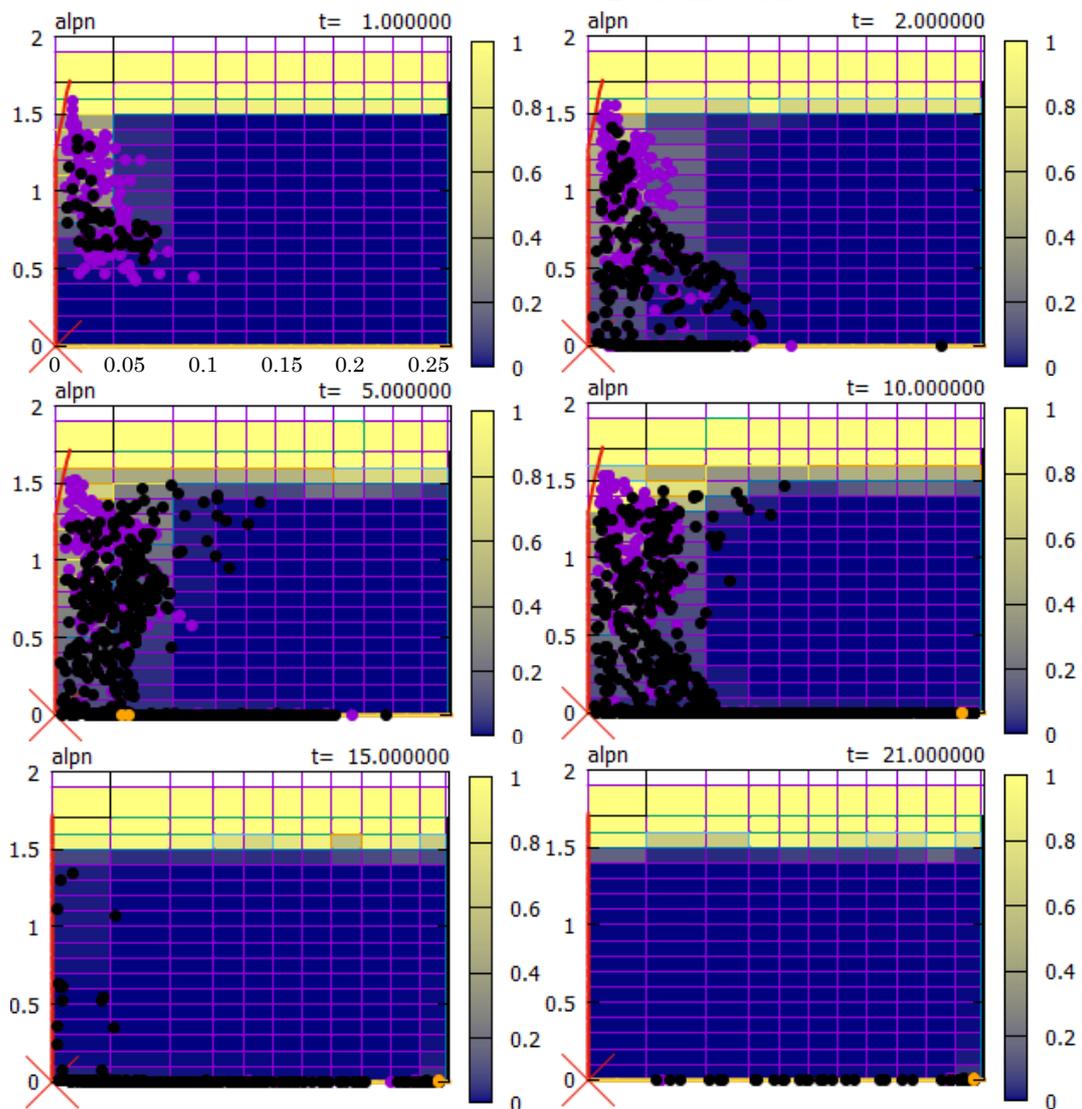


図 A4-C4-2 ボイド率及び溶融物粒子分布図

DEFOR-A5 (キャッチャー1)

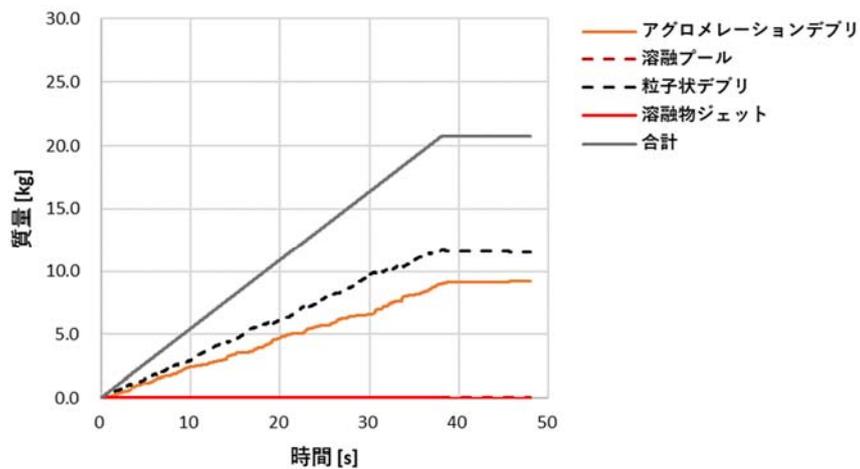


図 A5-C1-1 デブリの状態別質量の履歴

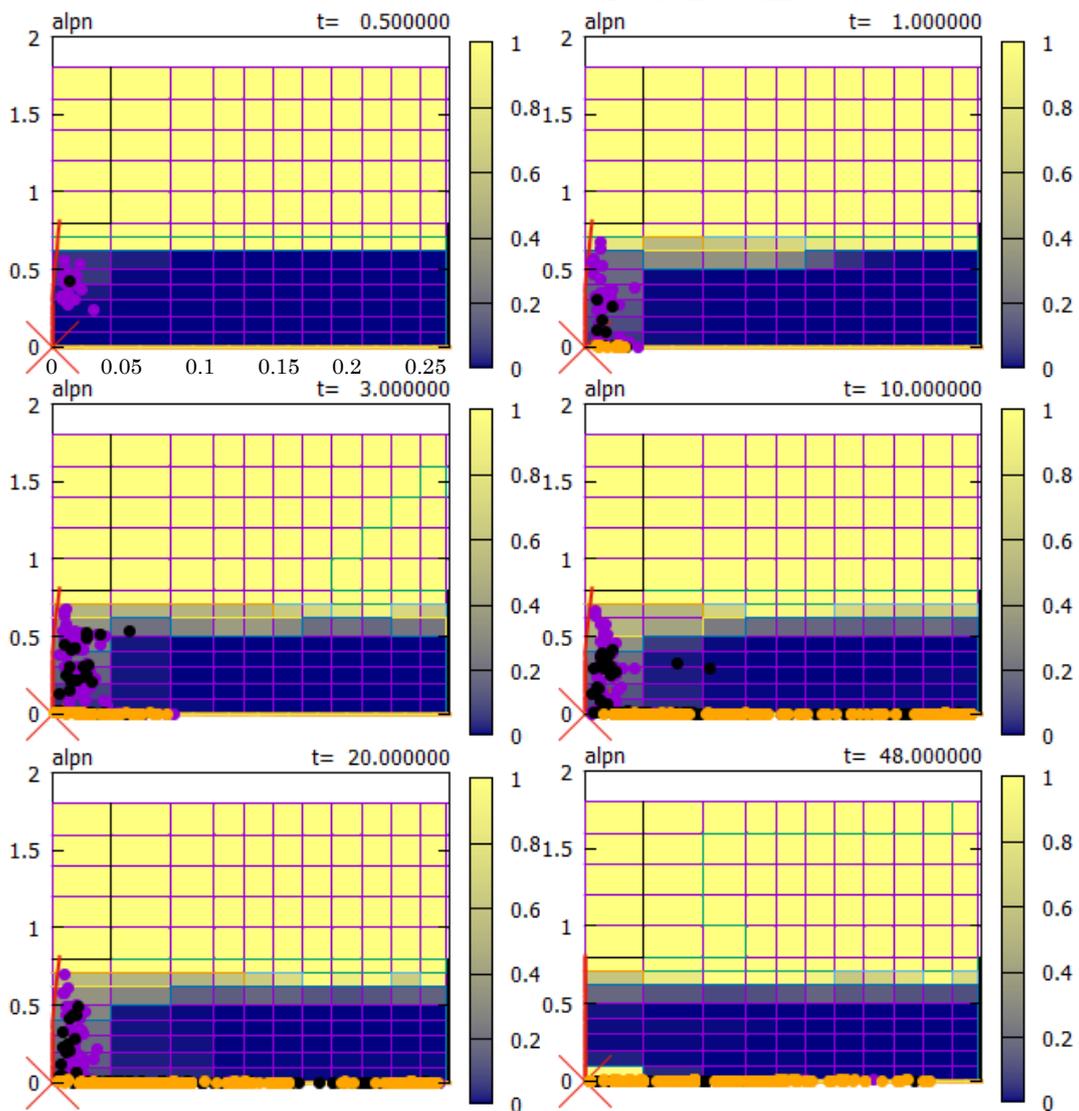


図 A5-C1-2 ボイド率及び熔融物粒子分布図

DEFOR-A5 (キャッチャー2)

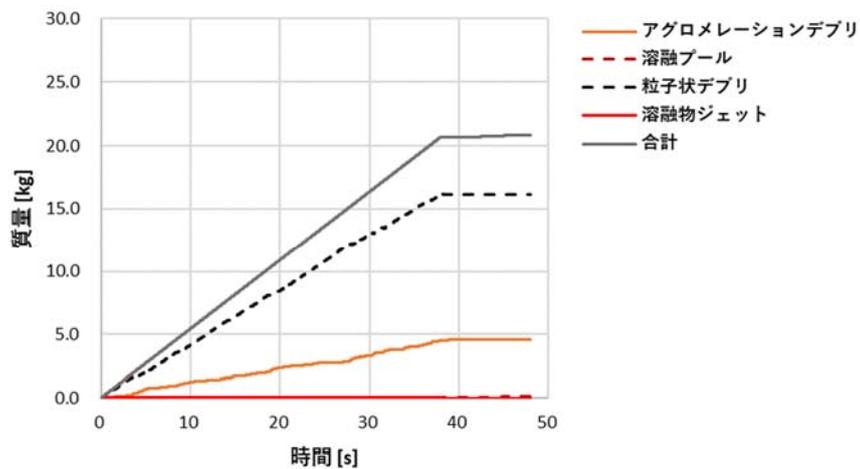


図 A5-C2-1 デブリの状態別質量の履歴

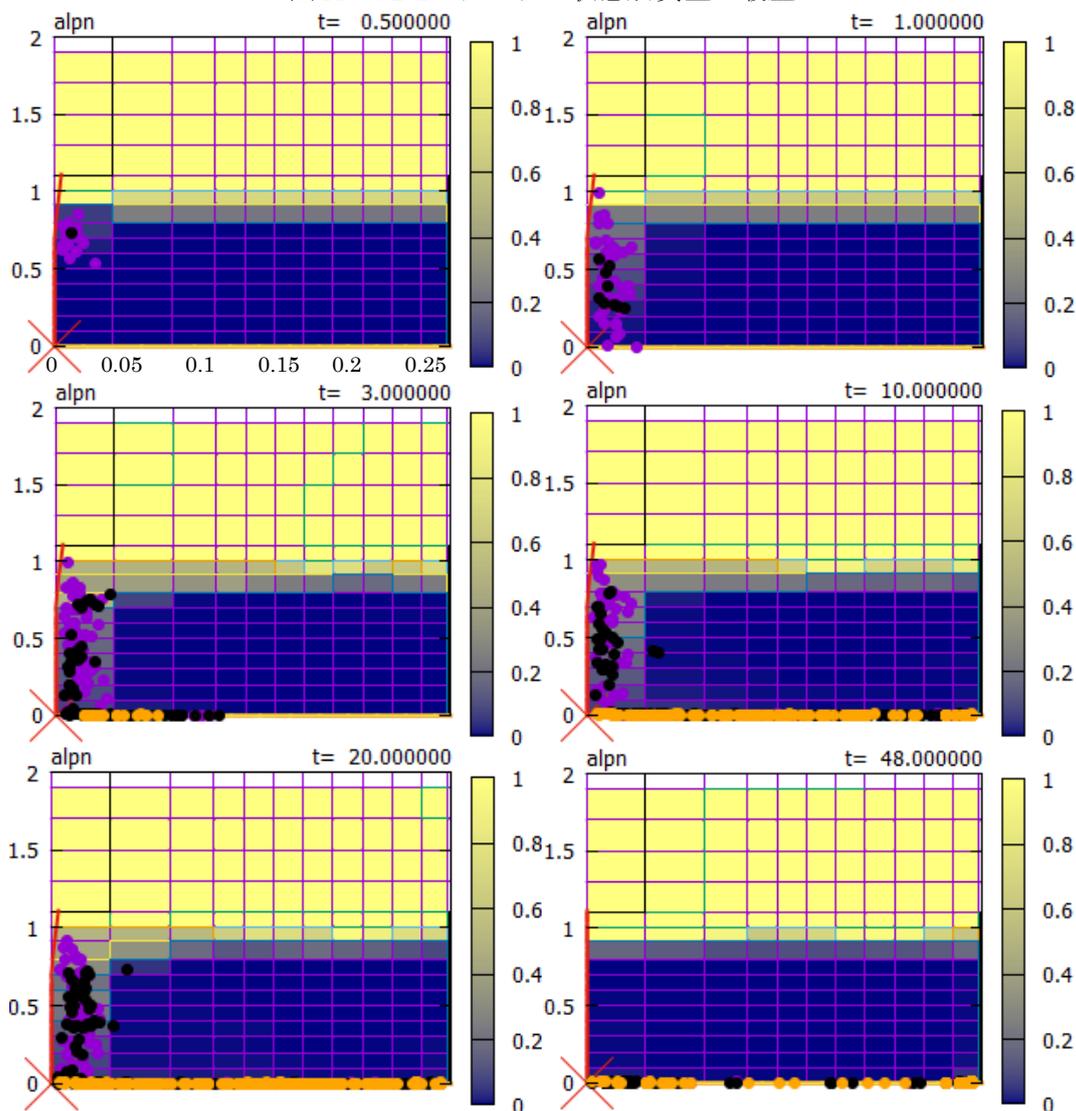


図 A5-C2-2 ボイド率及び熔融物粒子分布図

DEFOR-A5 (キャッチャー3)

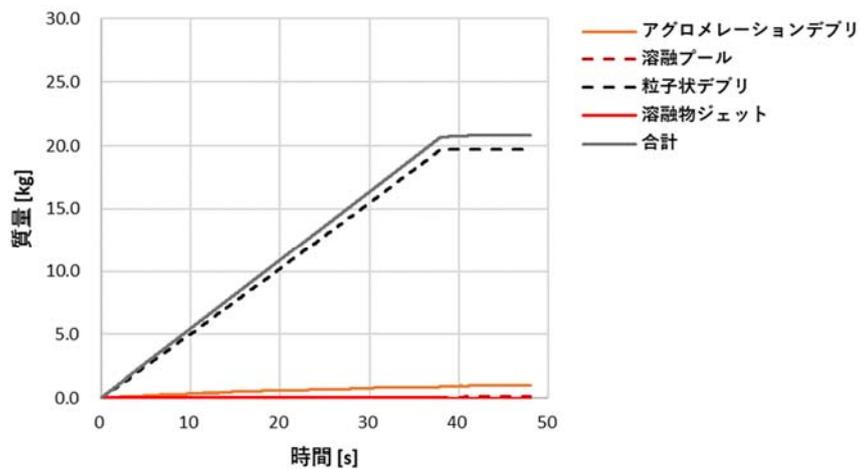


図 A5-C3-1 デブリの状態別質量の履歴

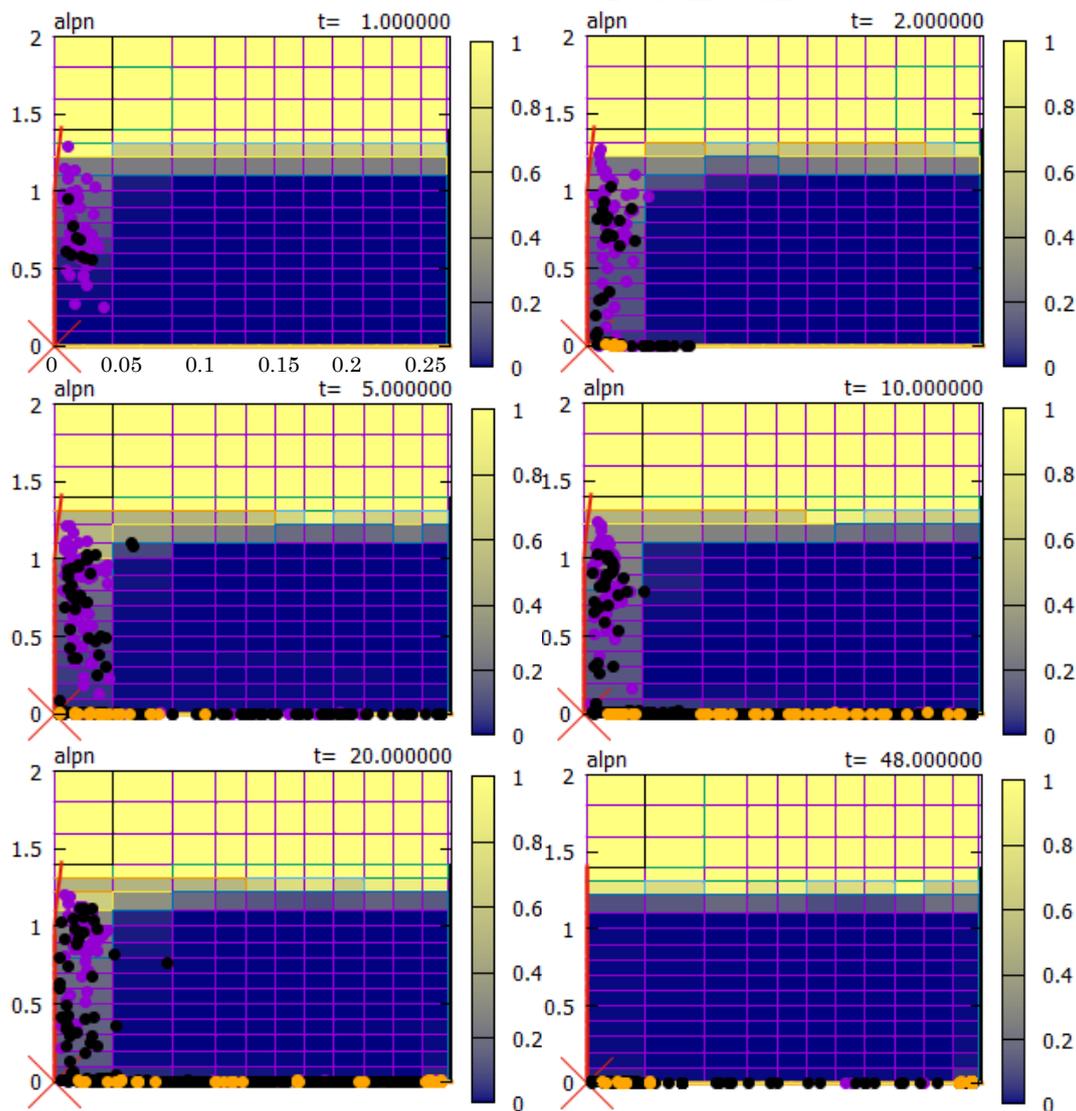


図 A5-C3-2 ボイド率及び熔融物粒子分布図

DEFOR-A5 (キャッチャー4)

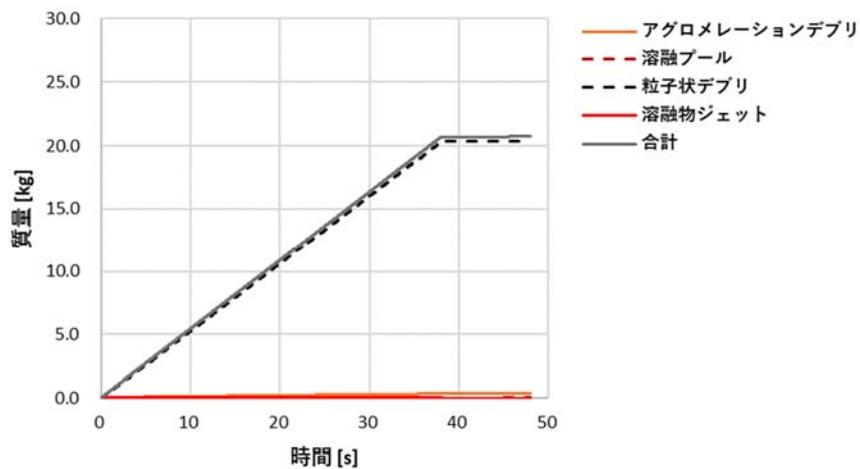


図 A5-C4-1 デブリの状態別質量の履歴

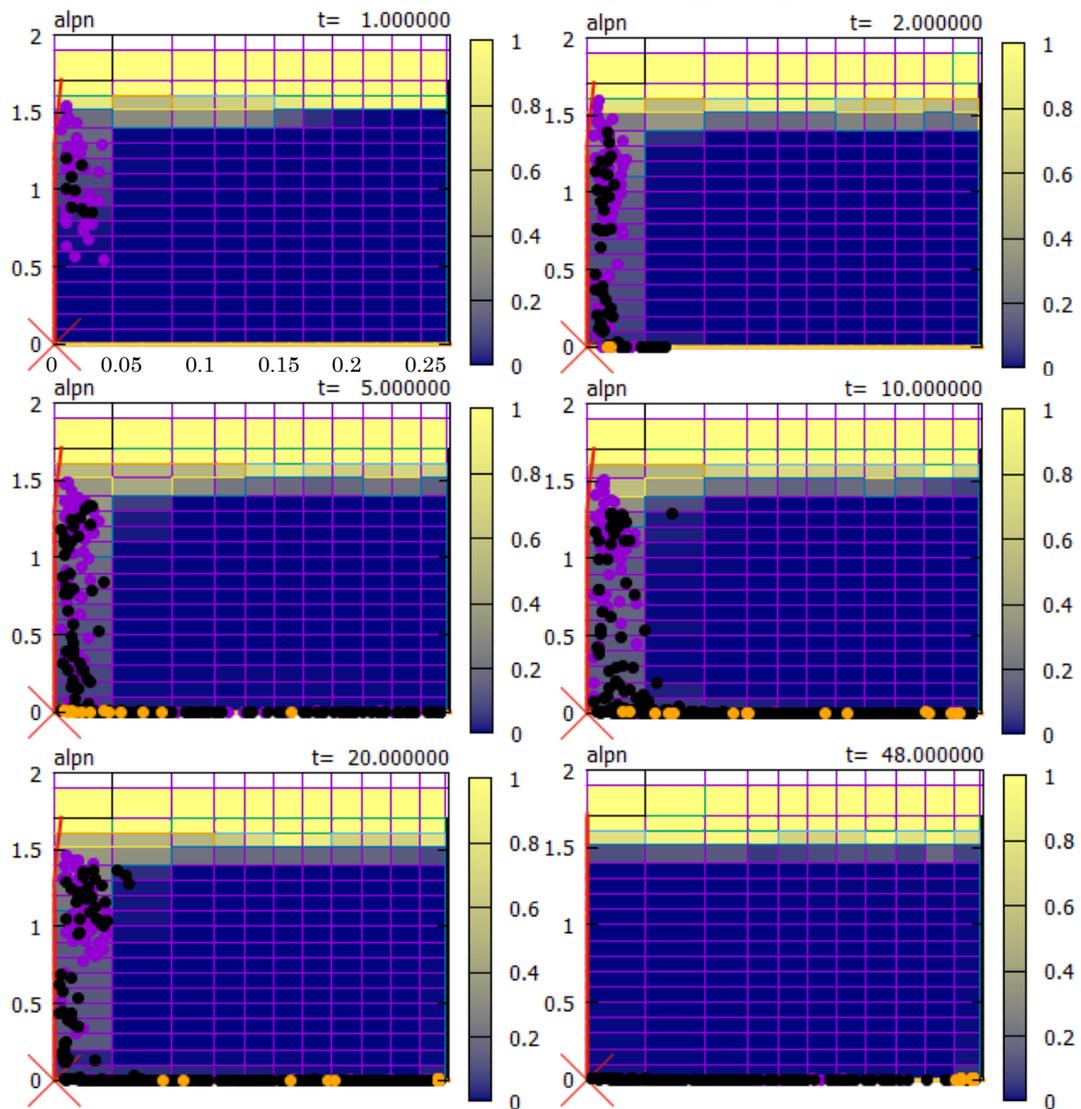


図 A5-C4-2 ボイド率及び溶融物粒子分布図

DEFOR-A6 (キャッチャー1)

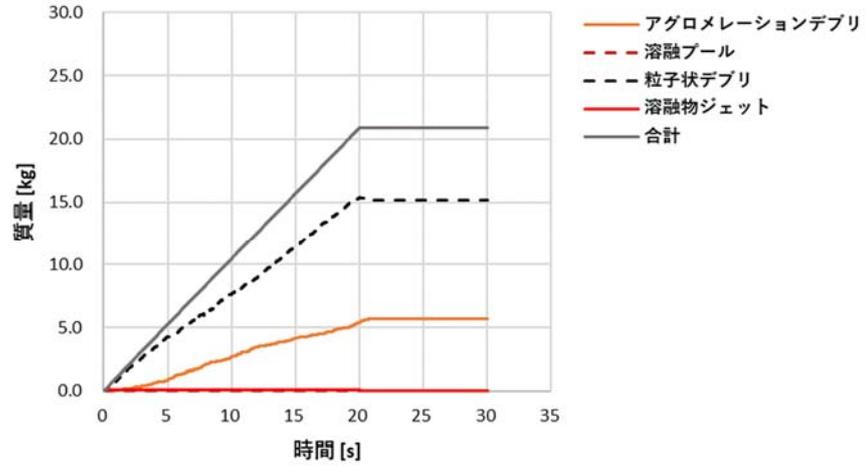


図 A6-C1-1 デブリの状態別質量の履歴

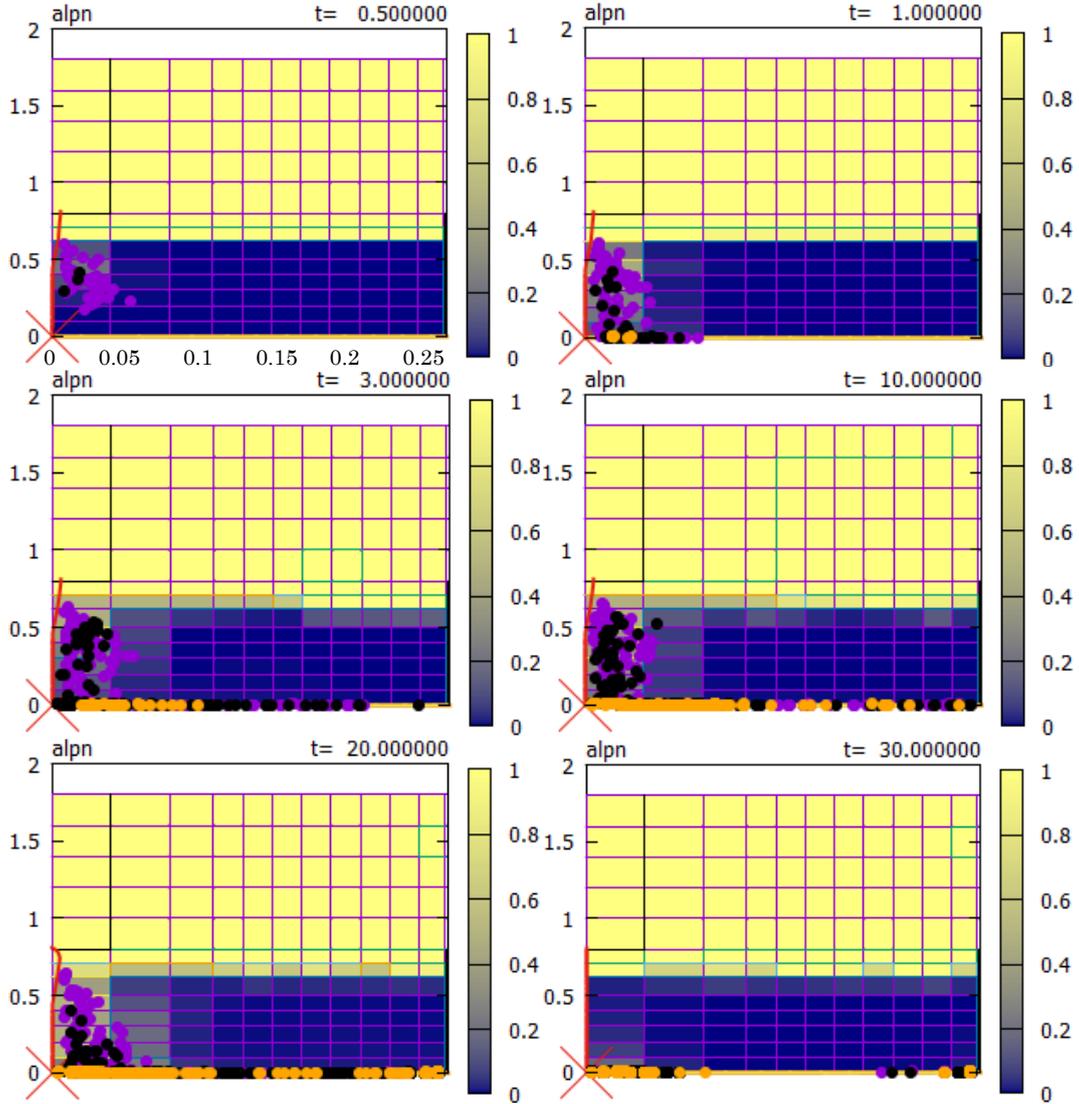


図 A6-C1-2 ボイド率及び溶融物粒子分布図

DEFOR-A6 (キャッチャー2)

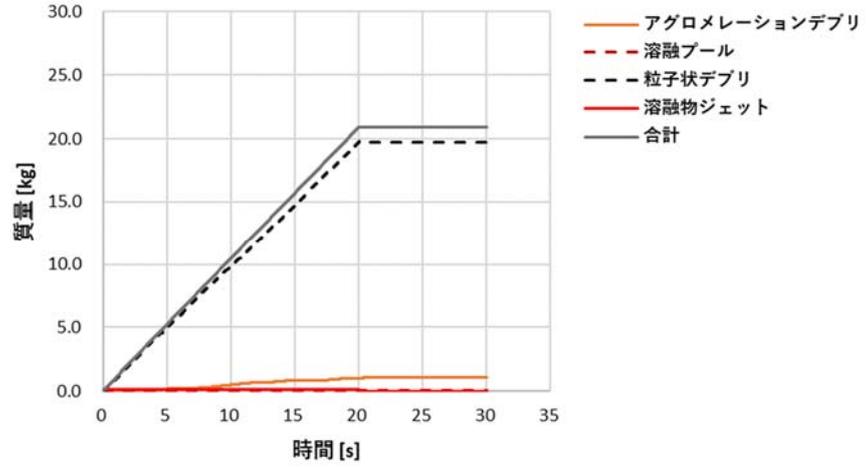


図 A6-C2-1 デブリの状態別質量の履歴

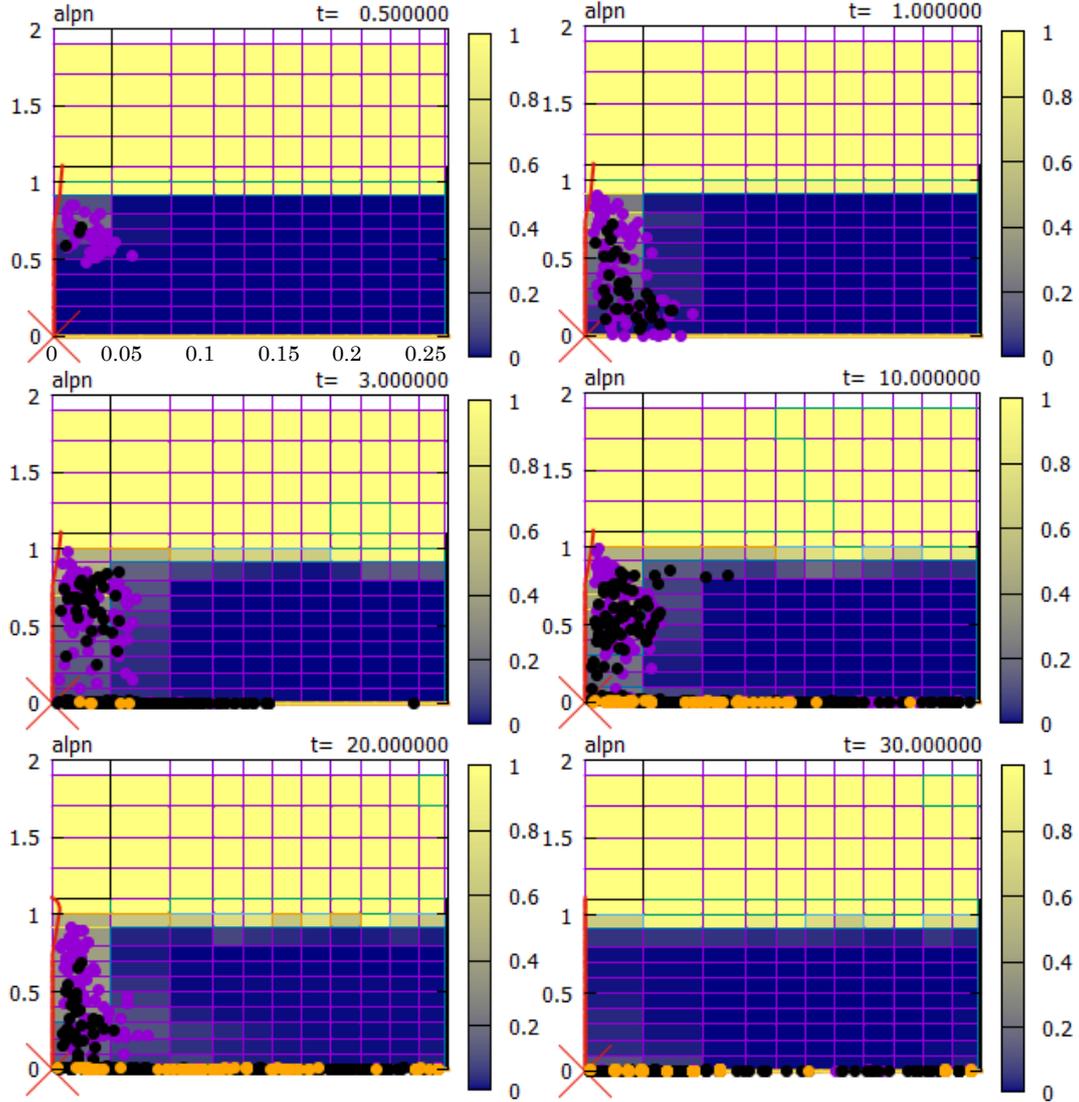


図 A6-C2-2 ボイド率及び溶融物粒子分布図

DEFOR-A6 (キャッチャー3)

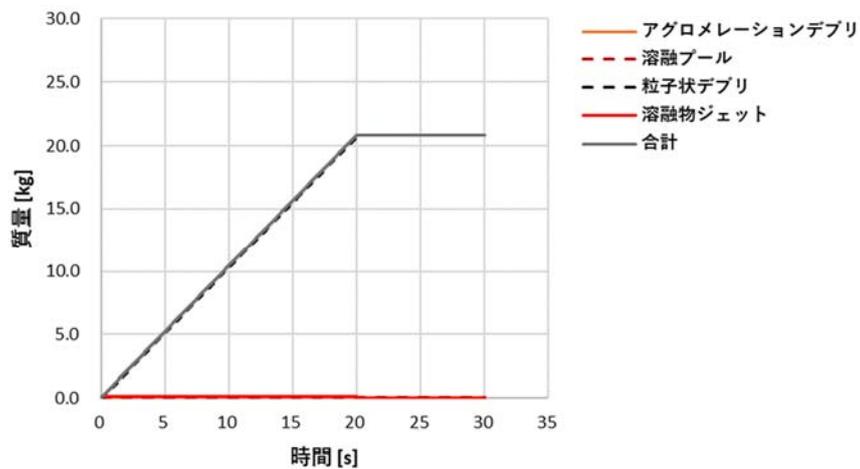


図 A6-C3-1 デブリの状態別質量の履歴

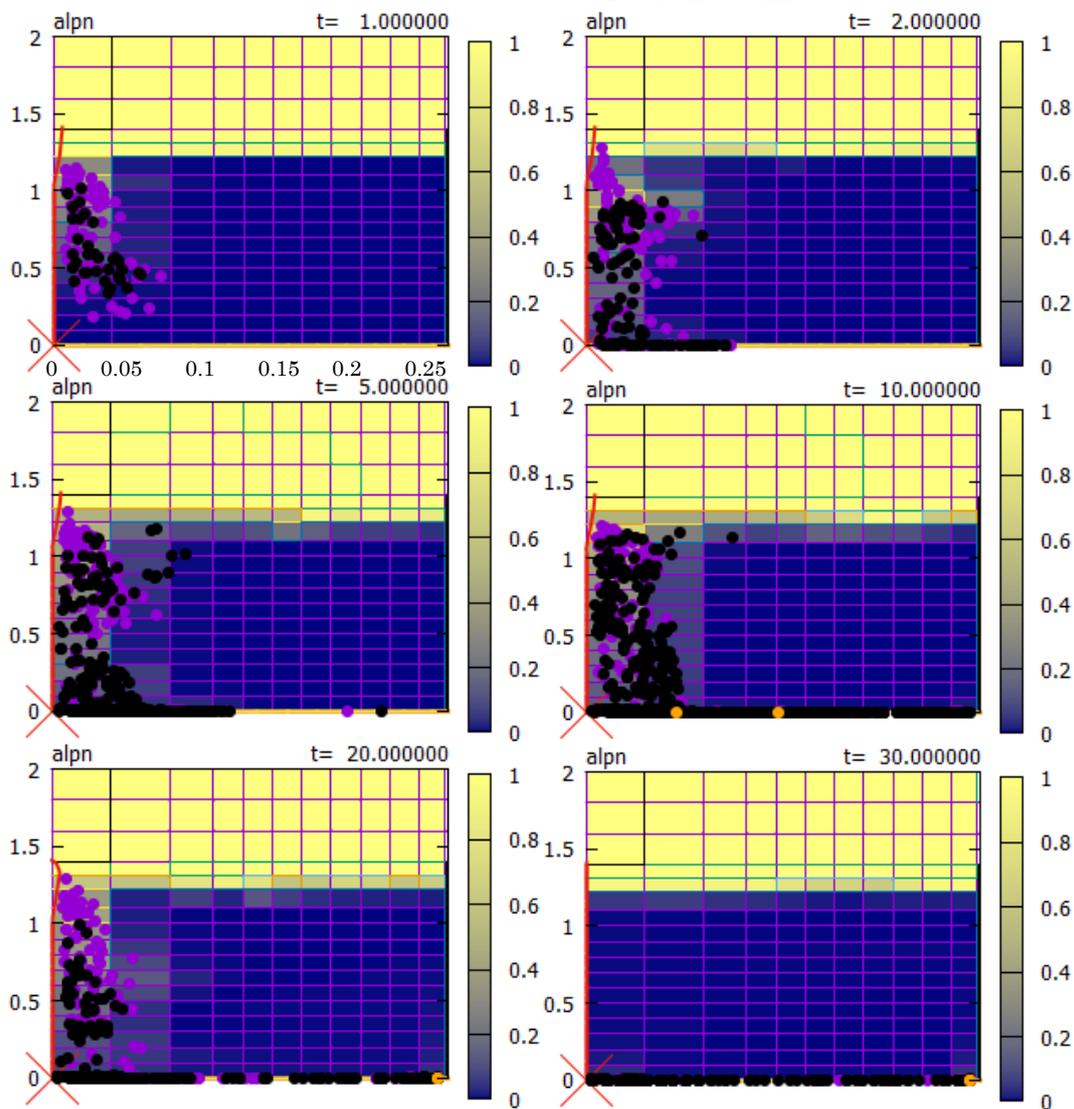


図 A6-C3-2 ボイド率及び熔融物粒子分布図

DEFOR-A6 (キャッチャー4)

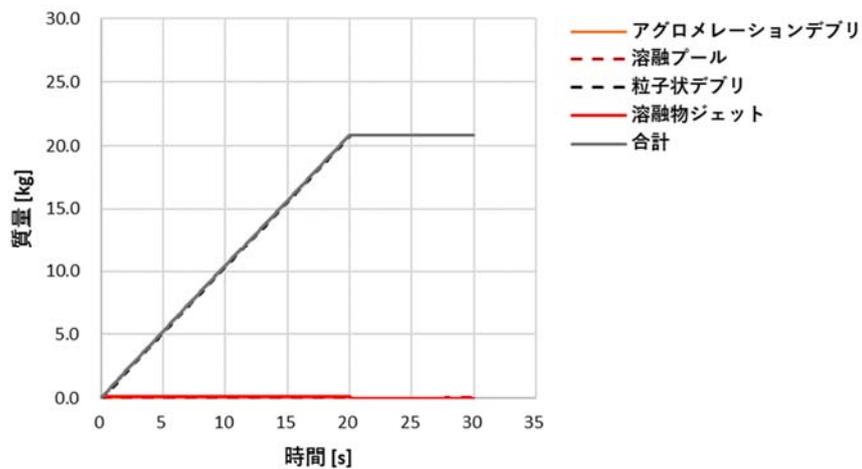


図 A6-C4-1 デブリの状態別質量の履歴

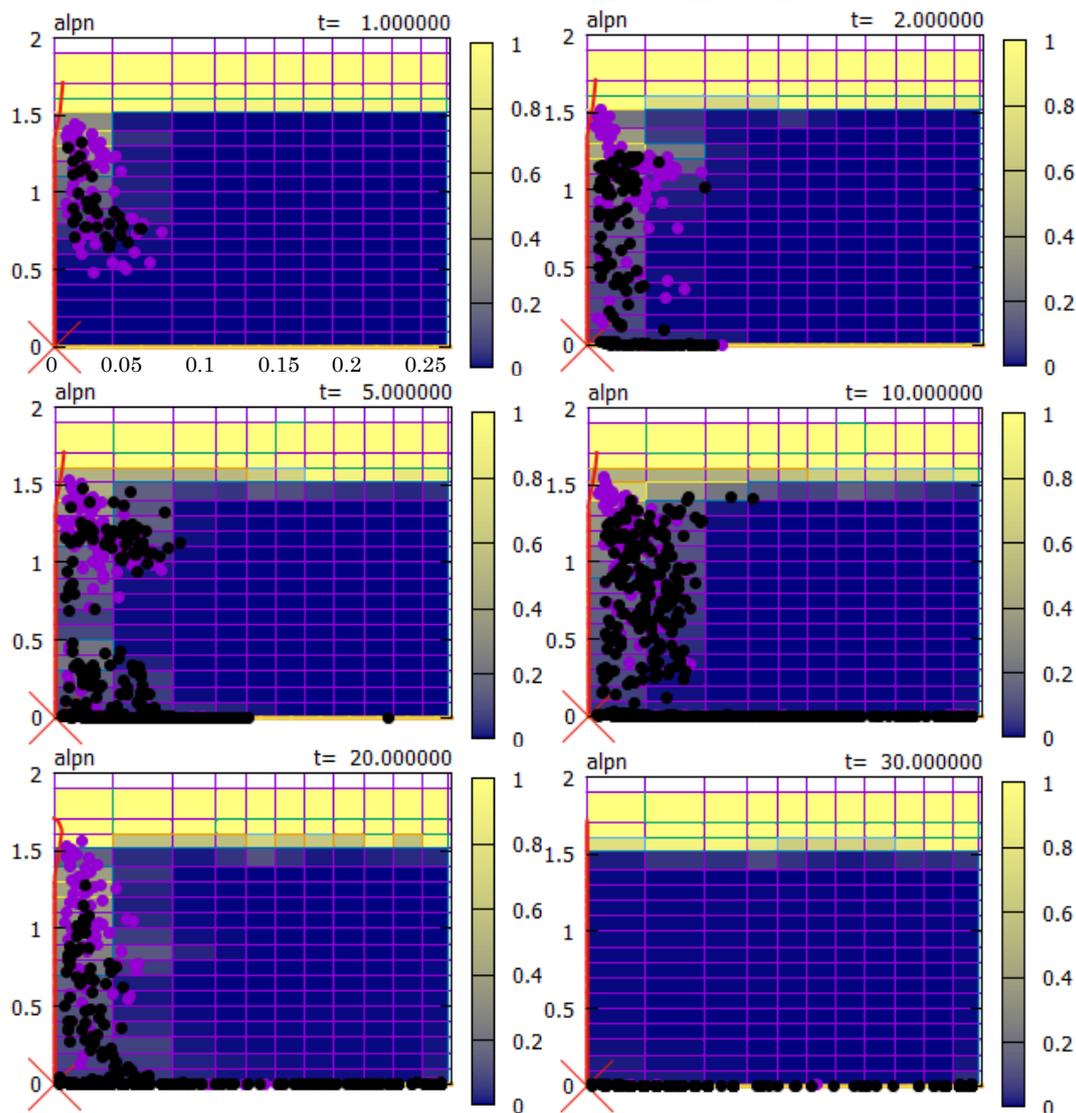


図 A6-C4-2 ボイド率及び溶融物粒子分布図

DEFOR-A7 (キャッチャー1)

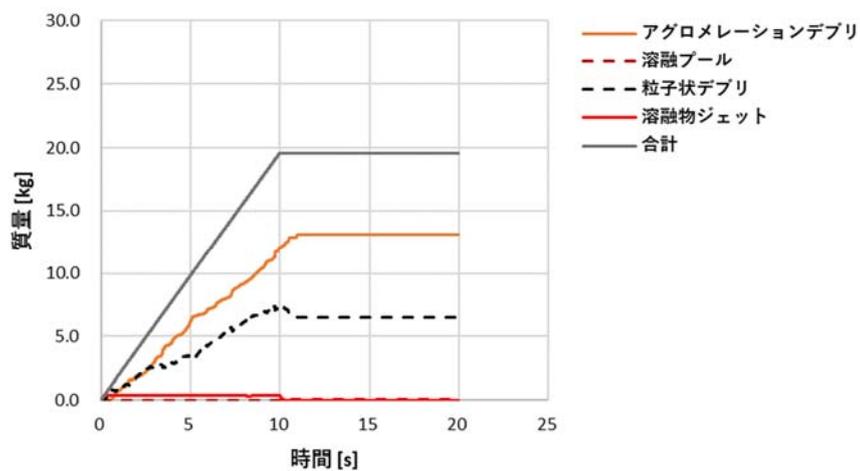


図 A7-C1-1 デブリの状態別質量の履歴

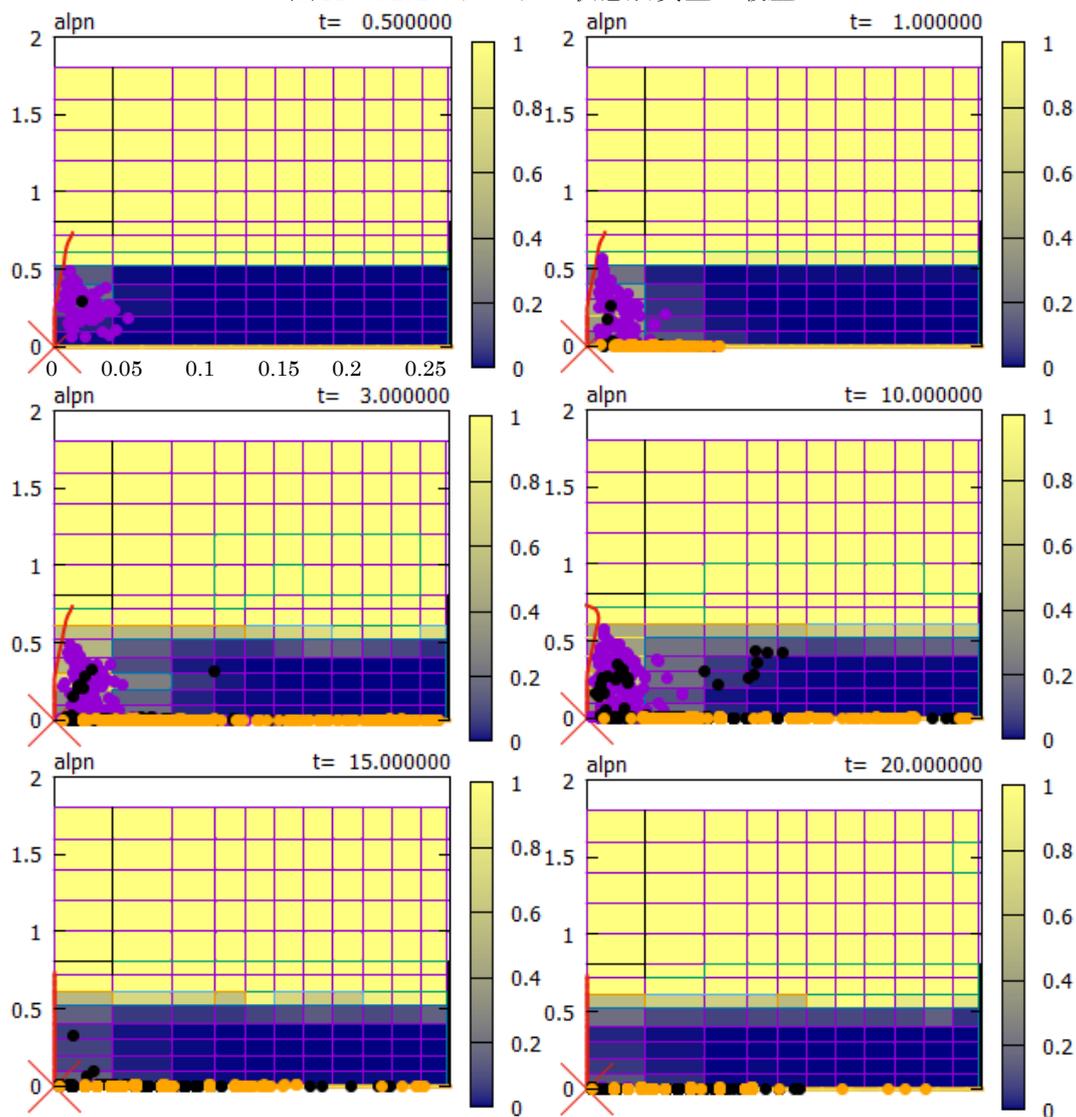


図 A7-C1-2 ボイド率及び熔融物粒子分布図

DEFOR-A7 (キャッチャー2)

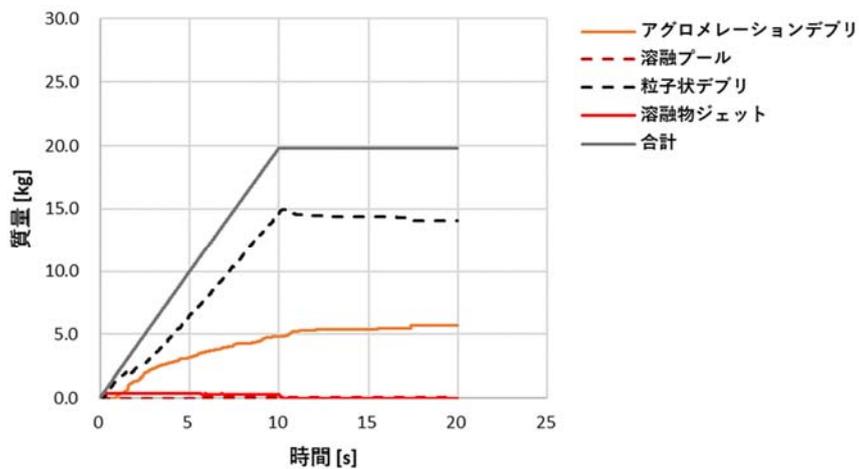


図 A7-C2-1 デブリの状態別質量の履歴

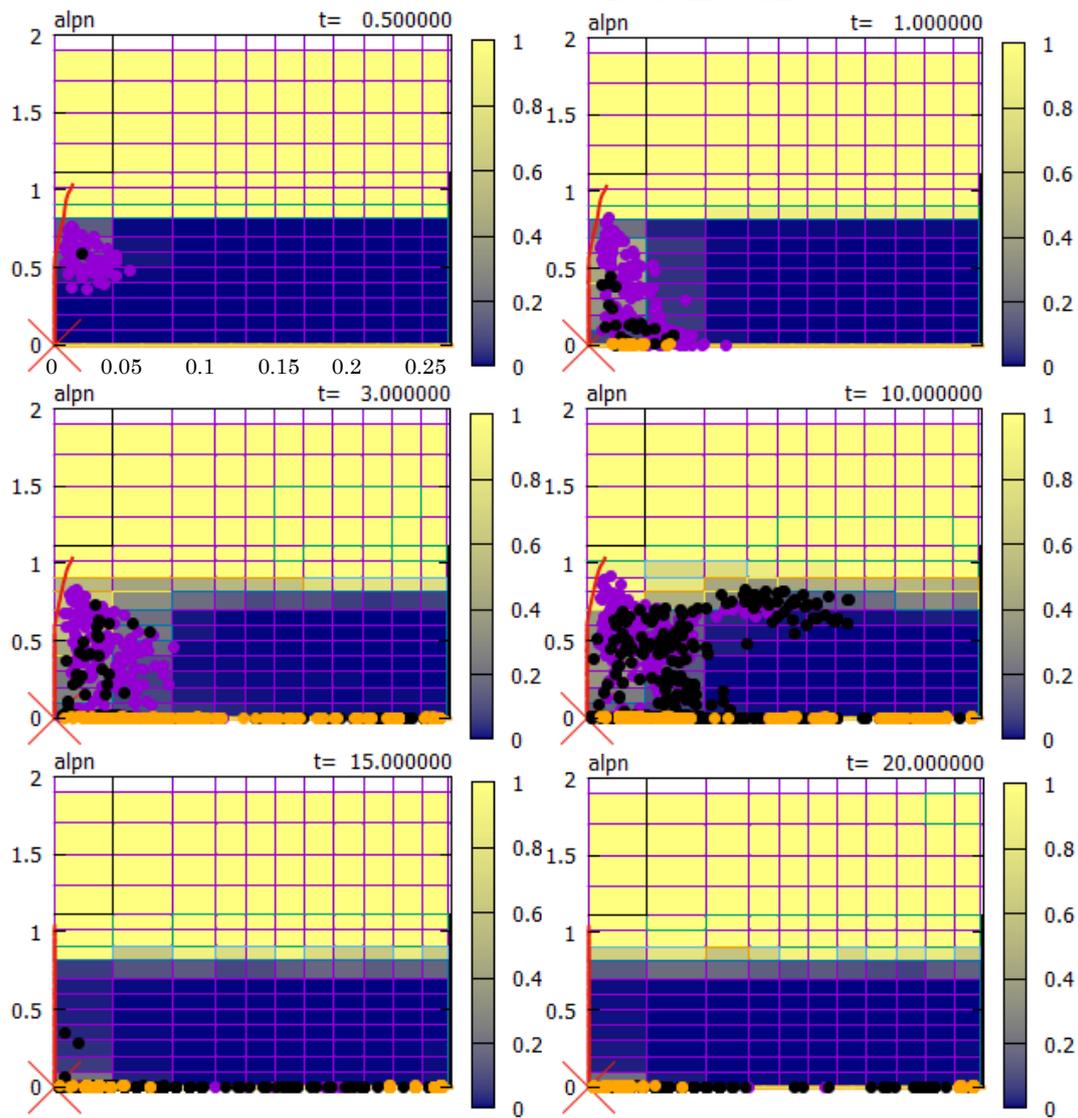


図 A7-C2-2 ボイド率及び熔融物粒子分布図

DEFOR-A7 (キャッチャー3)

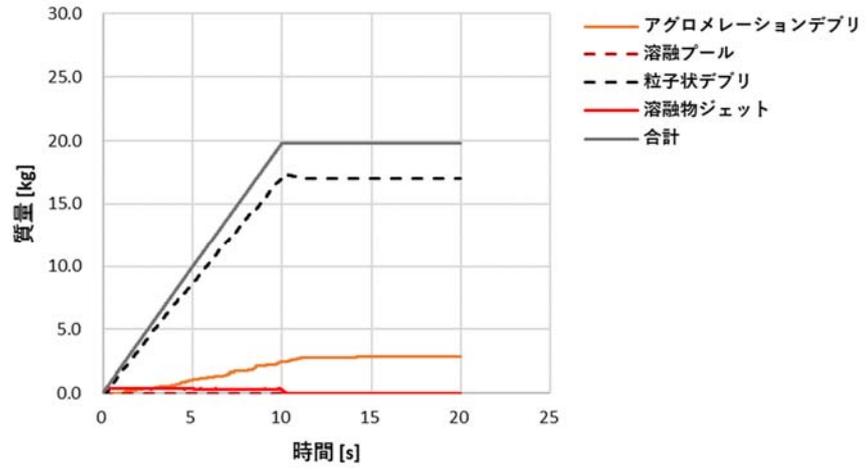


図 A7-C3-1 デブリの状態別質量の履歴

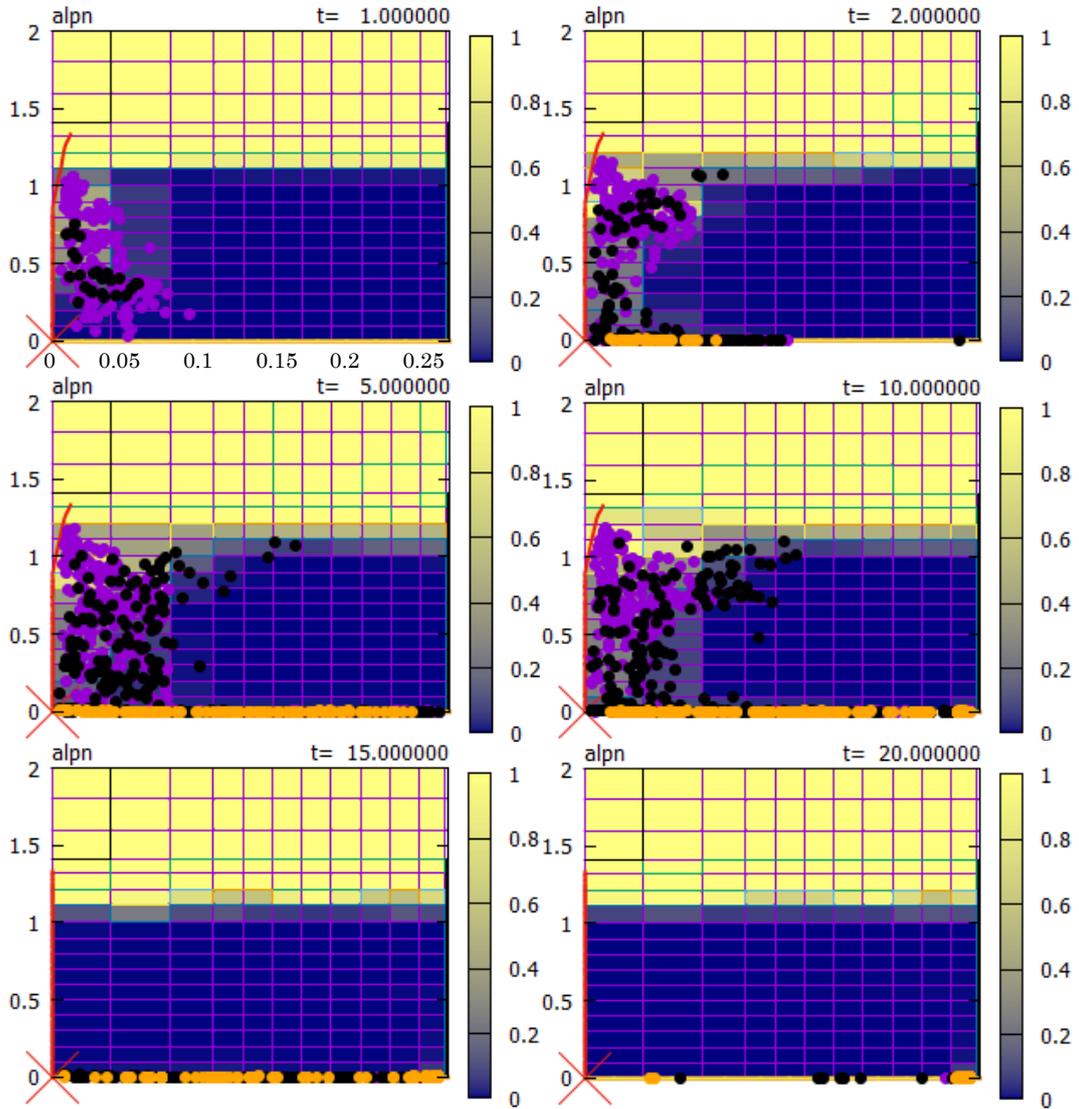


図 A7-C3-2 ボイド率及び溶融物粒子分布図

DEFOR-A7 (キャッチャー4)

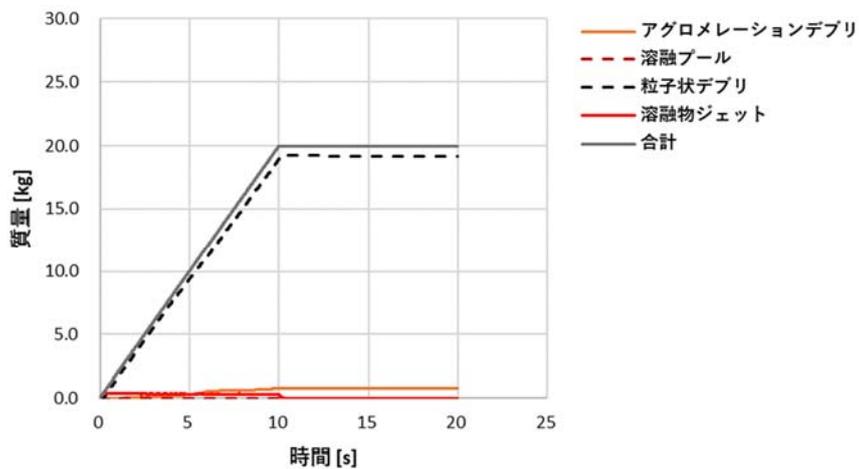


図 A7-C4-1 デブリの状態別質量の履歴

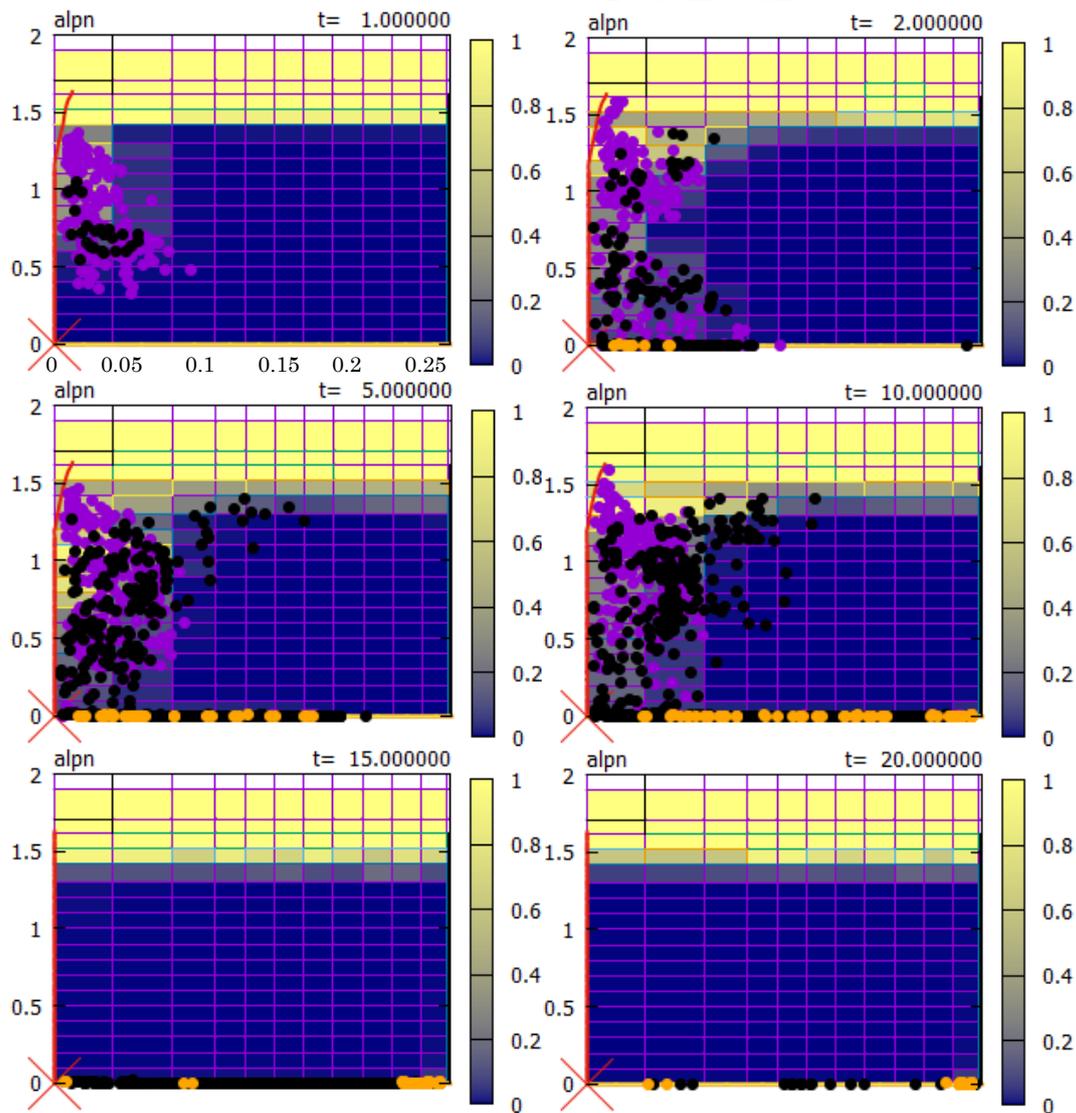


図 A7-C4-2 ボイド率及び熔融物粒子分布図

DEFOR-A8 (キャッチャー1)

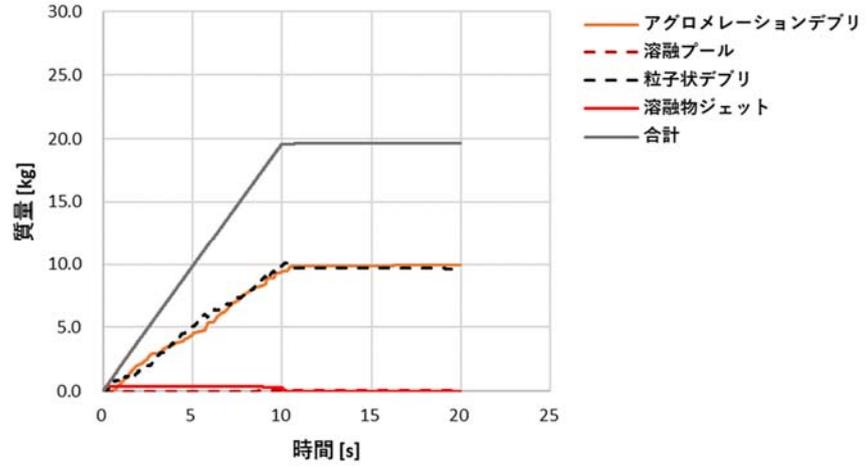


図 A8-C1-1 デブリの状態別質量の履歴

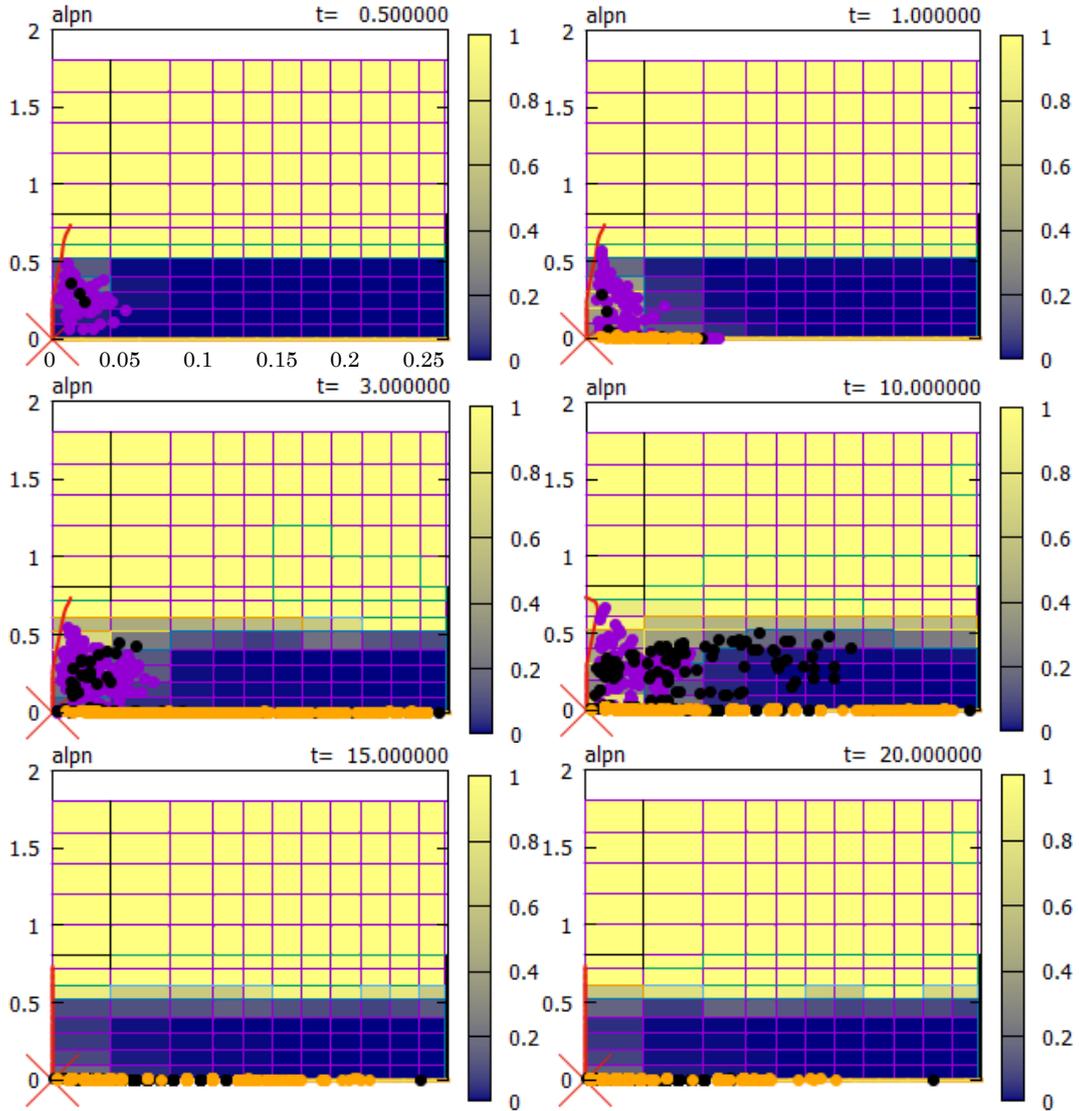


図 A8-C1-2 ポイド率及び熔融物粒子分布図

DEFOR-A8 (キャッチャー2)

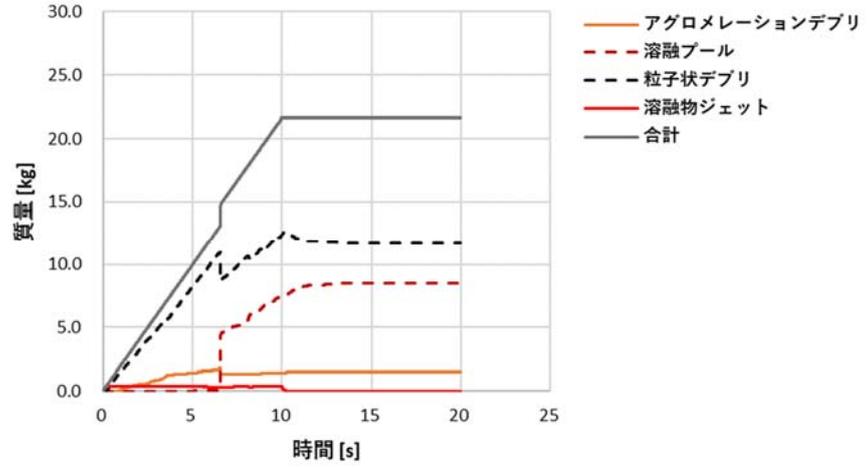


図 A8-C2-1 デブリの状態別質量の履歴

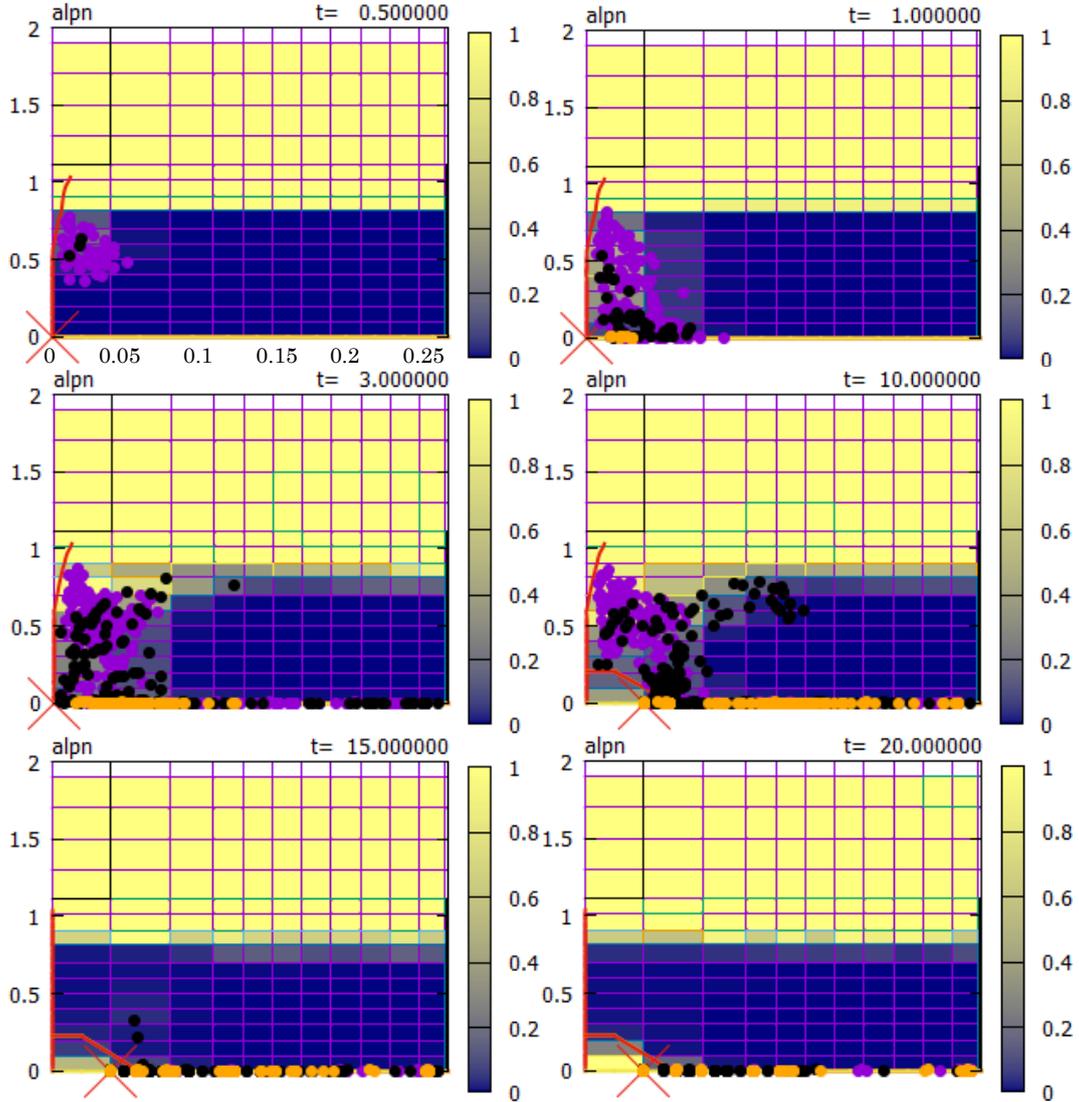


図 A8-C2-2 ボイド率及び溶融物粒子分布図

DEFOR-A8 (キャッチャー3)

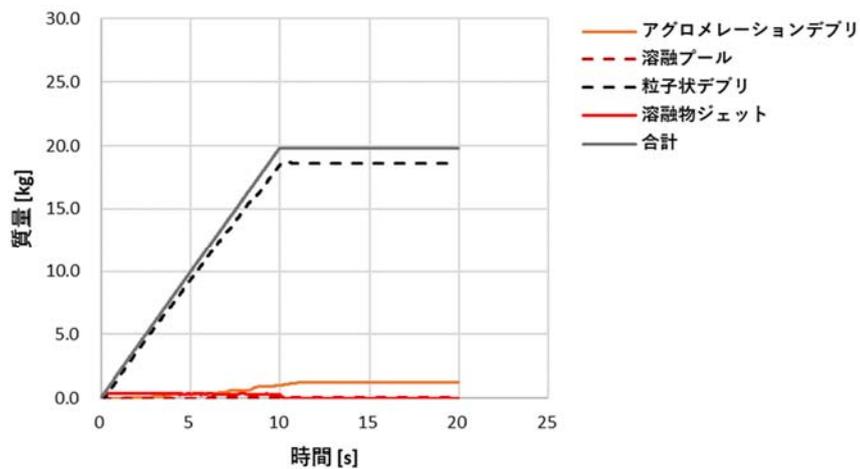


図 A8-C3-1 デブリの状態別質量の履歴

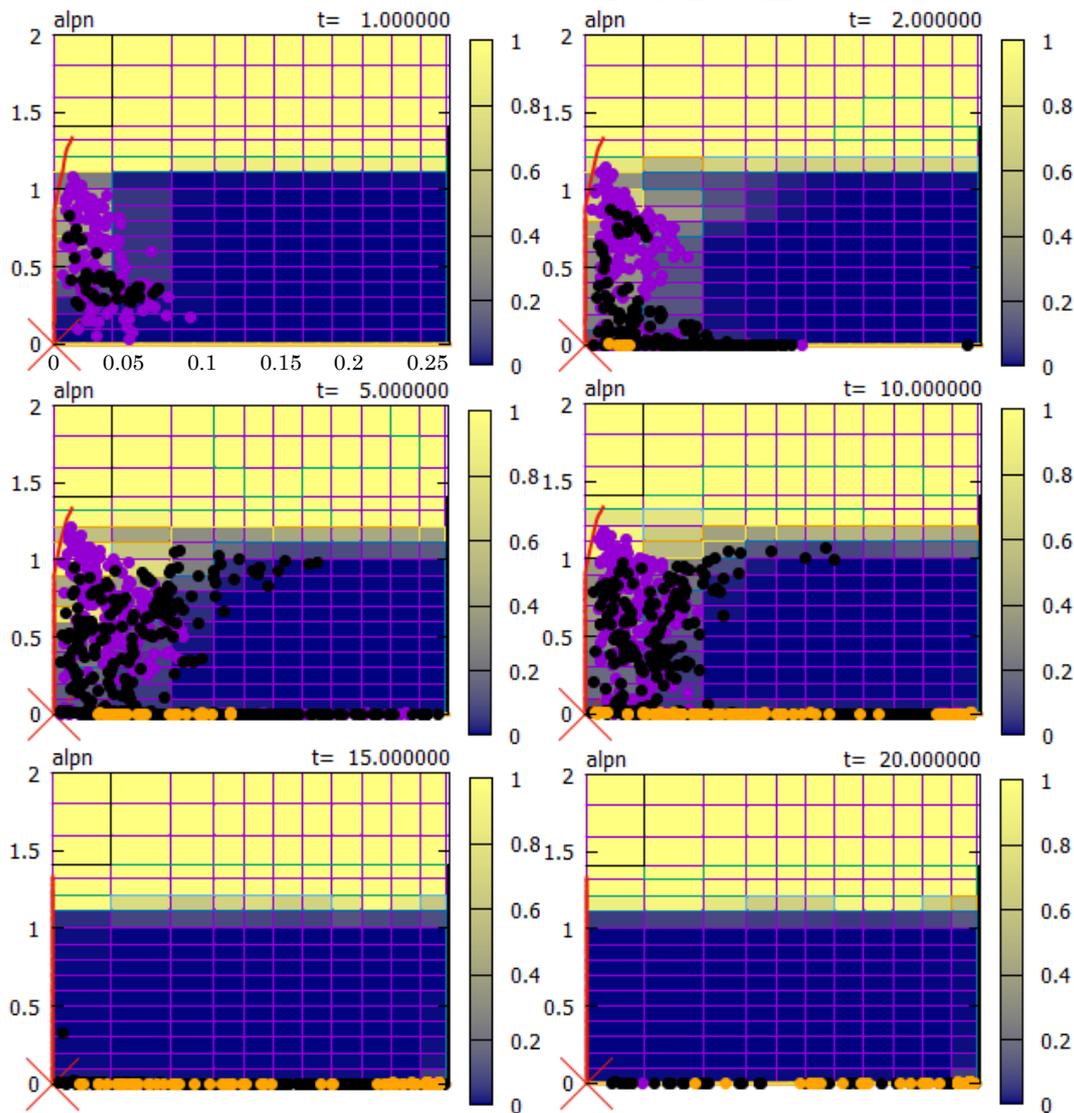


図 A8-C3-2 ボイド率及び溶融物粒子分布図

DEFOR-A8 (キャッチャー4)

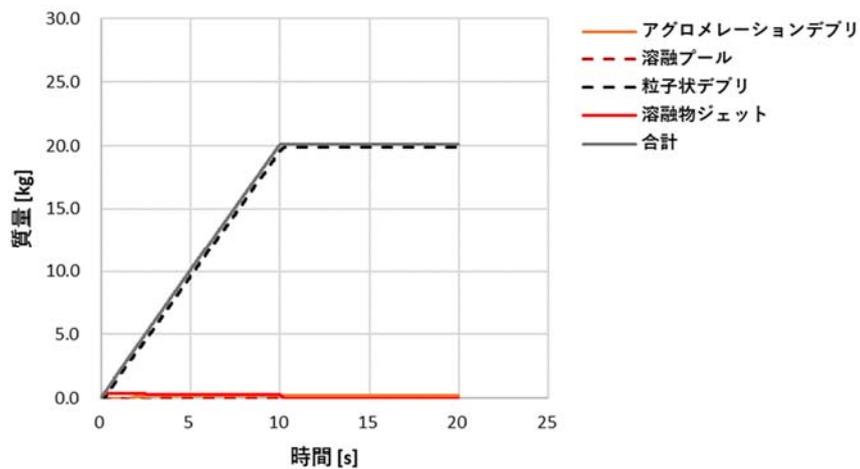


図 A8-C4-1 デブリの状態別質量の履歴

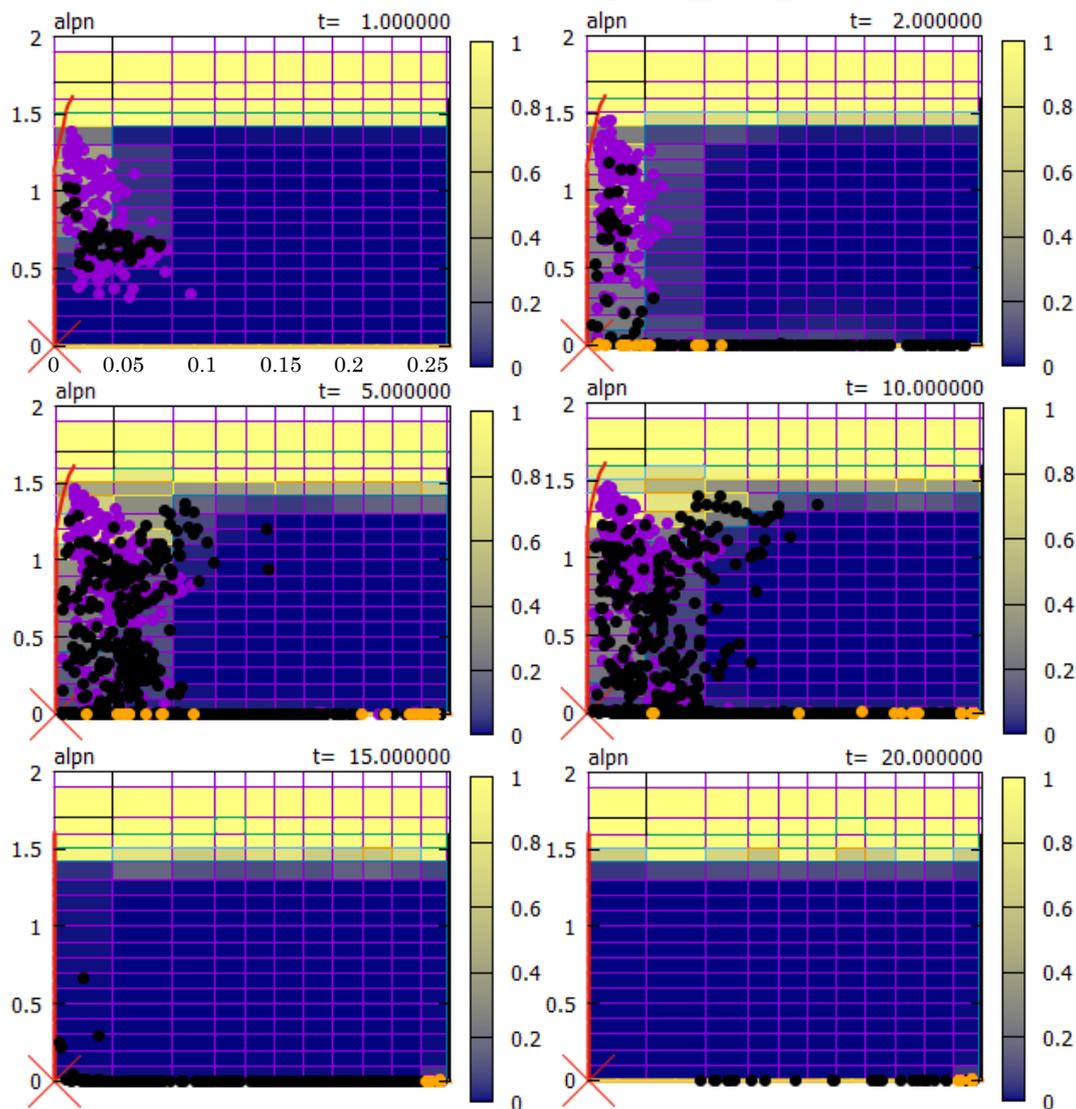


図 A8-C4-2 ボイド率及び溶融物粒子分布図

DEFOR-A9 (キャッチャー1)

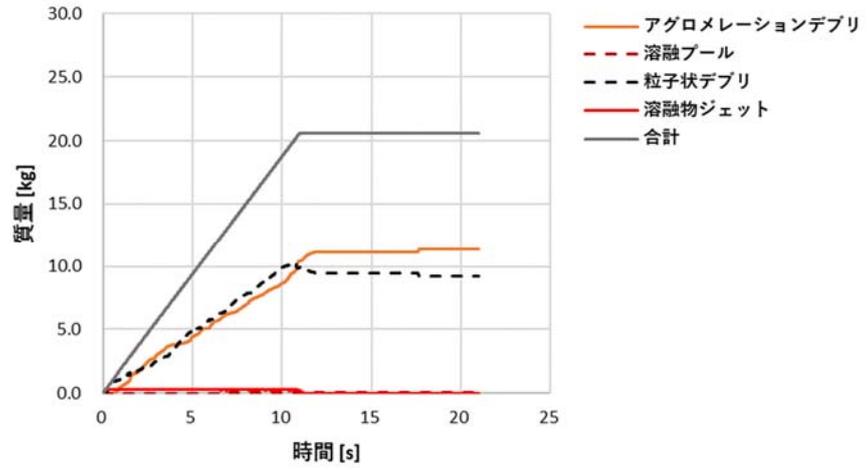


図 A9-C1-1 デブリの状態別質量の履歴

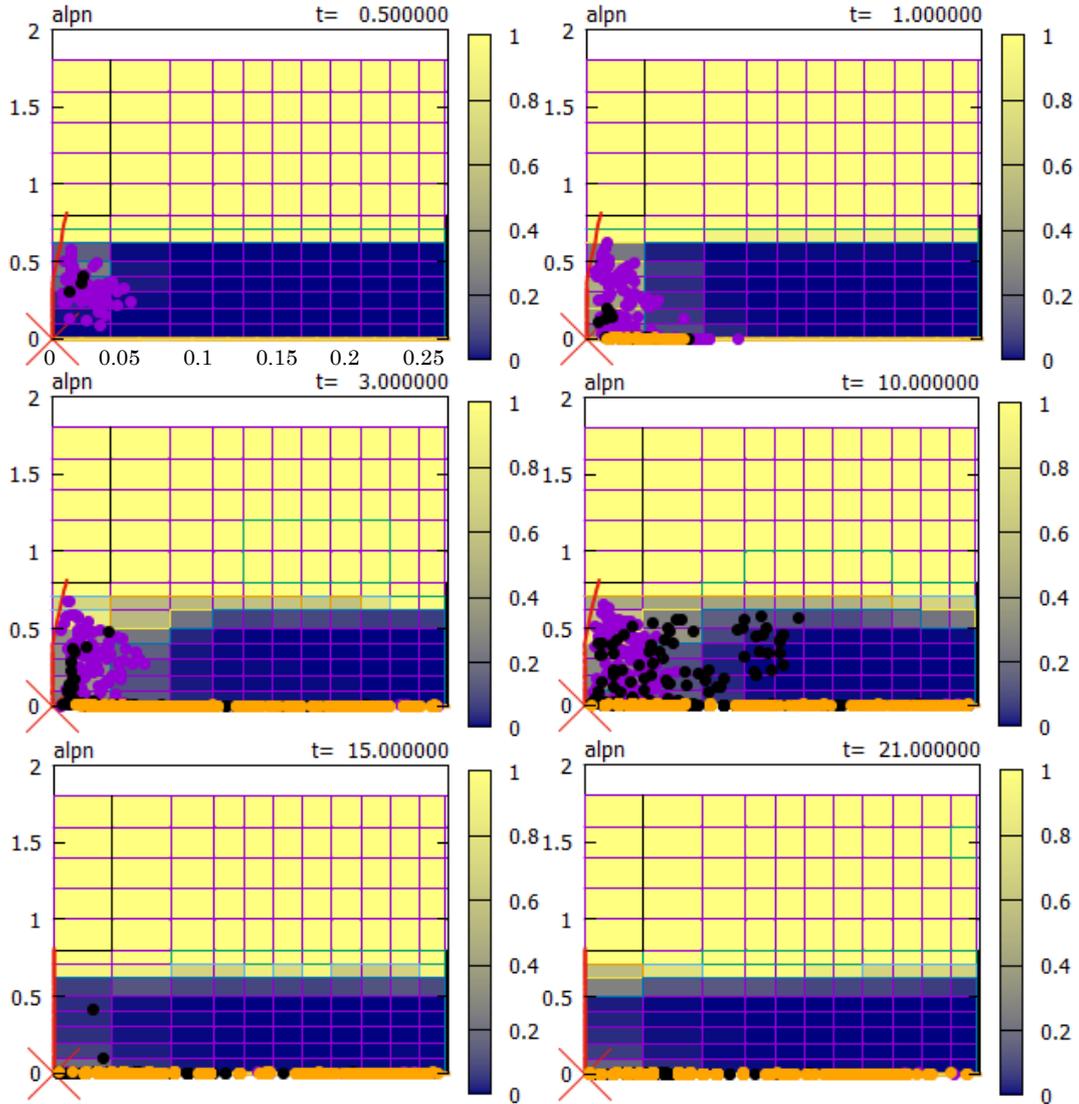


図 A9-C1-2 ボイド率及び熔融物粒子分布図

DEFOR-A9 (キャッチャー2)

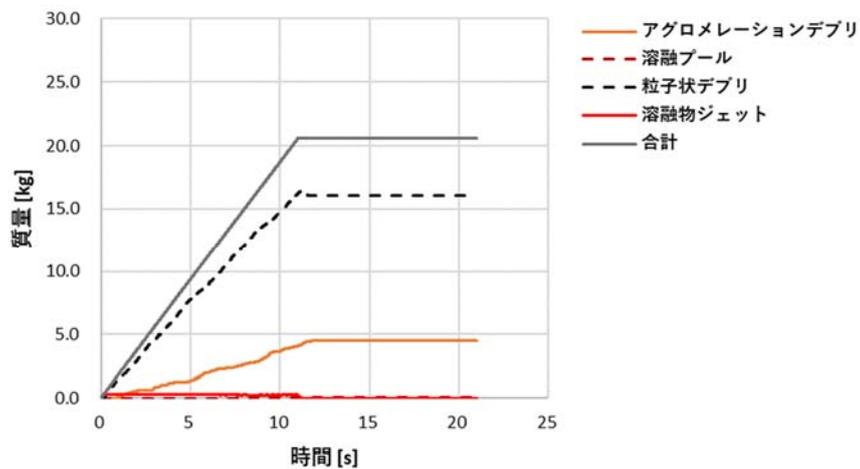


図 A9-C2-1 デブリの状態別質量の履歴

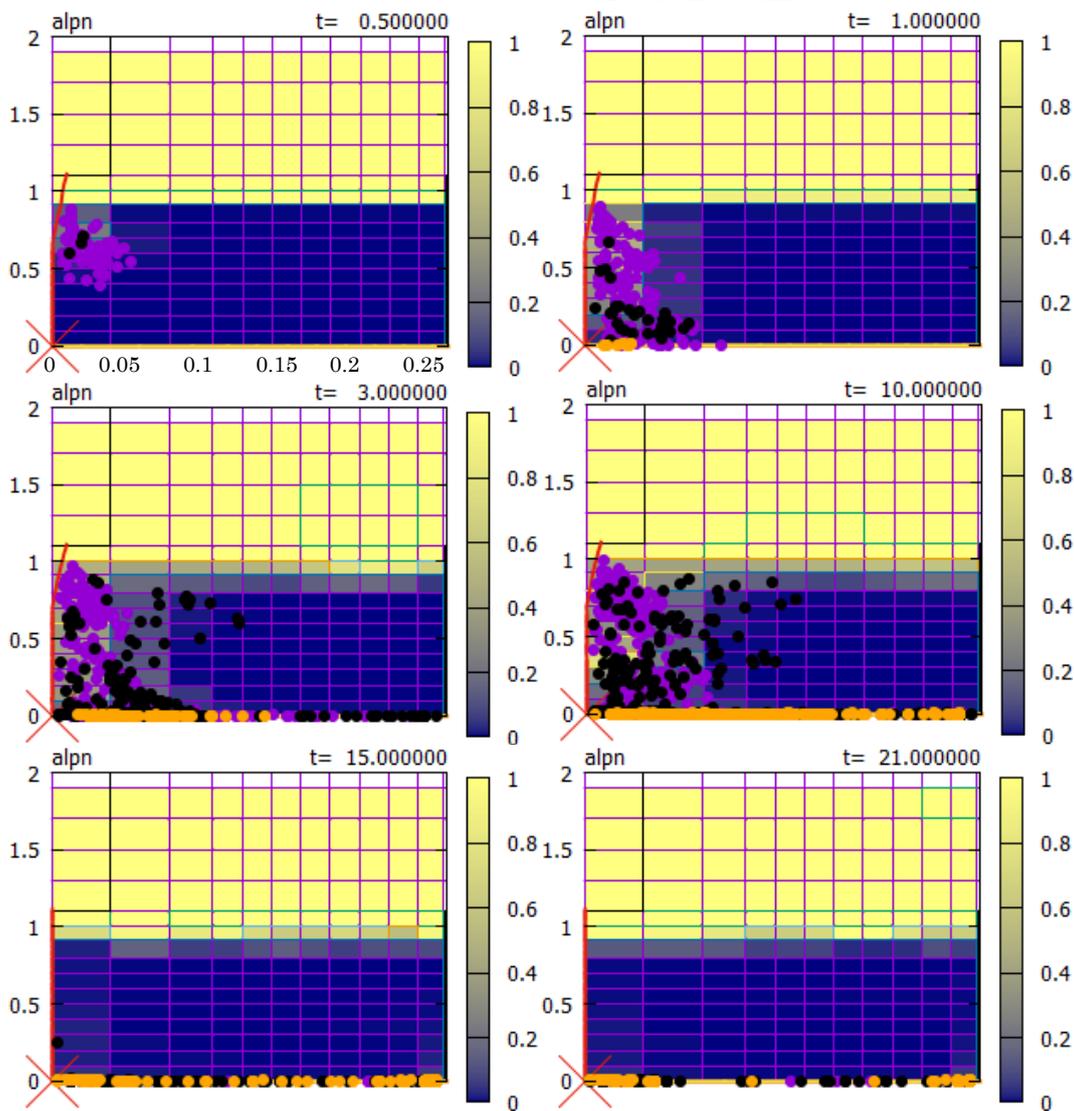


図 A9-C2-2 ボイド率及び溶融物粒子分布図

DEFOR-A9 (キャッチャー3)

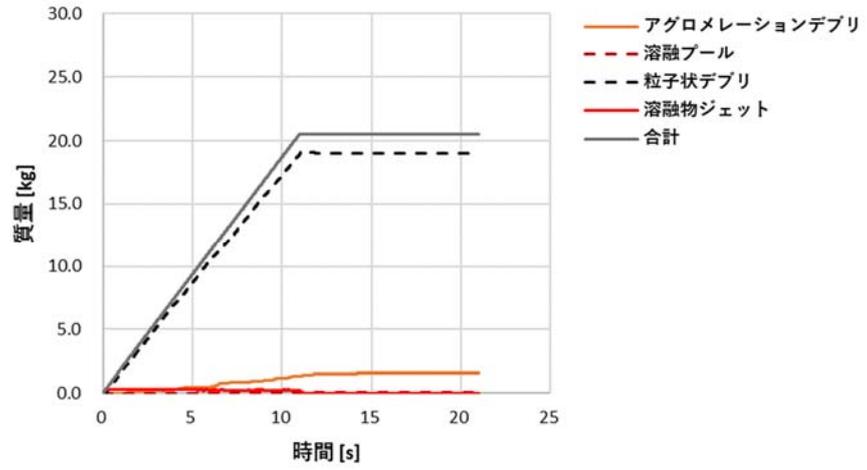


図 A9-C3-1 デブリの状態別質量の履歴

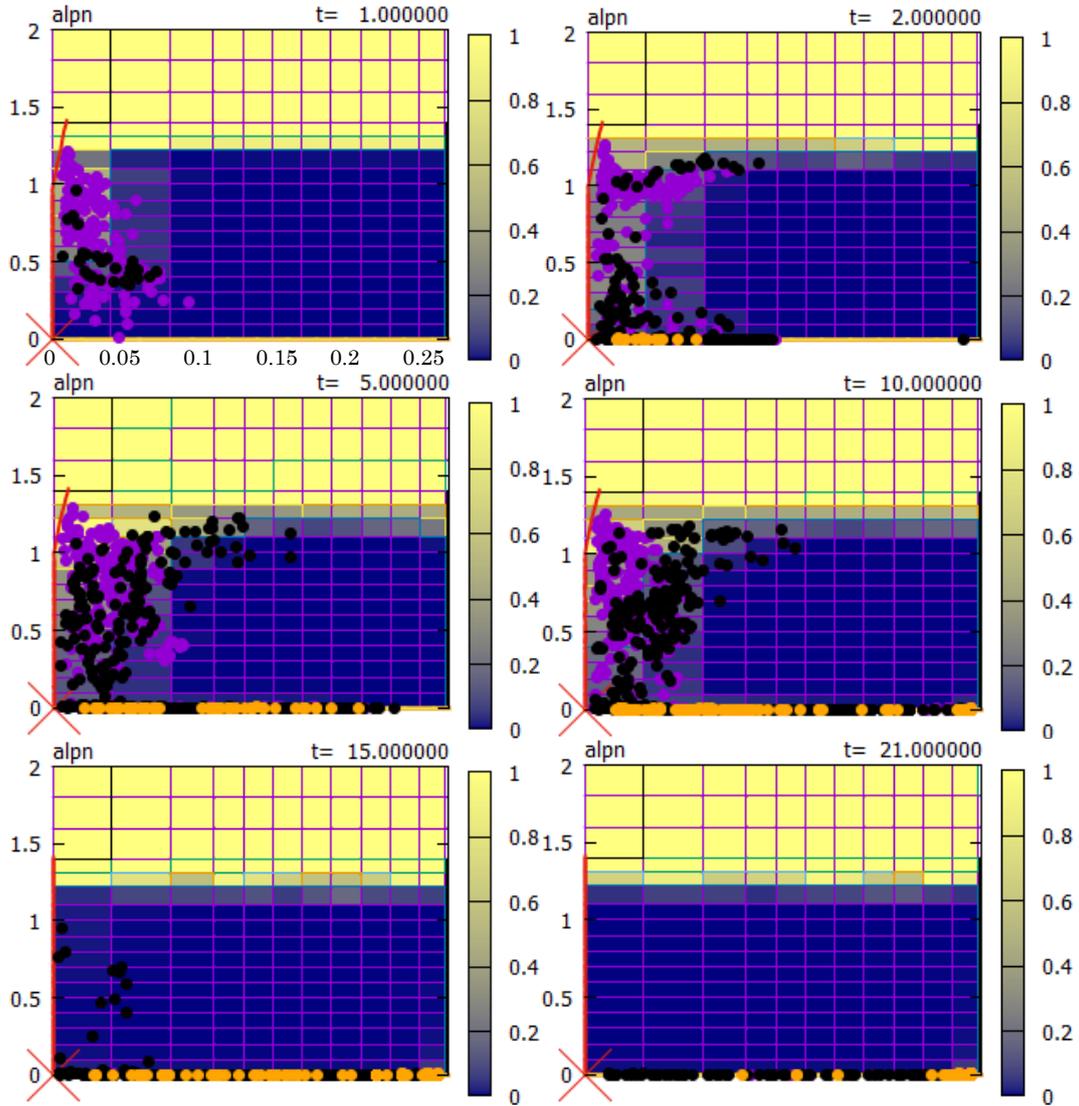


図 A9-C3-2 ボイド率及び熔融物粒子分布図

DEFOR-A9 (キャッチャー4)

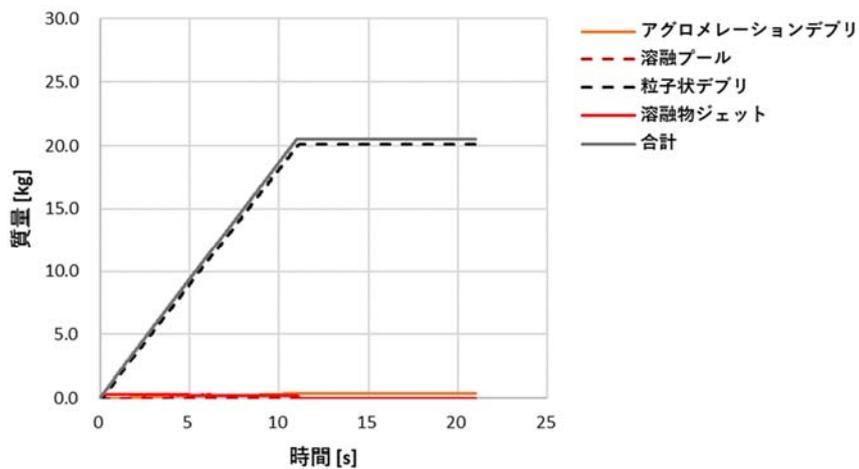


図 A9-C4-1 デブリの状態別質量の履歴

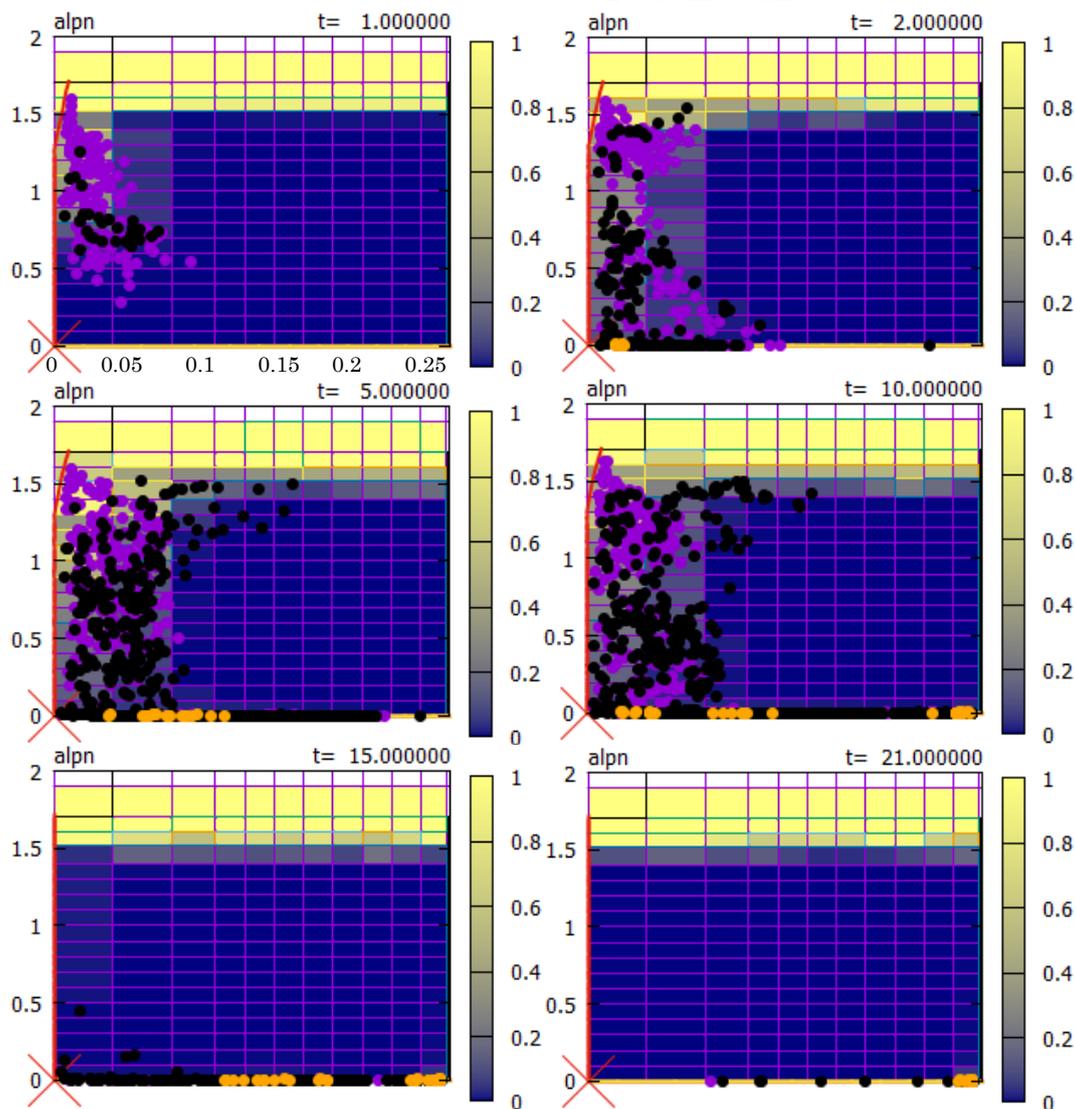


図 A9-C4-2 ボイド率及び溶融物粒子分布図

DEFOR-A23 (キャッチャー1)

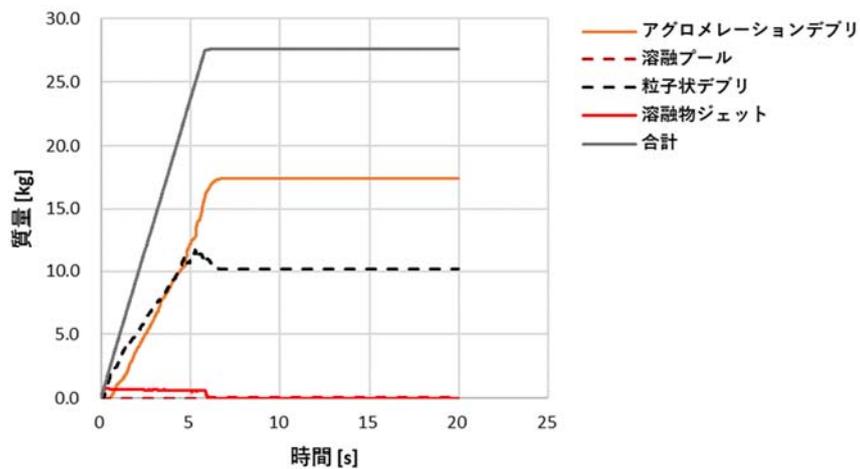


図 A23-C1-1 デブリの状態別質量の履歴

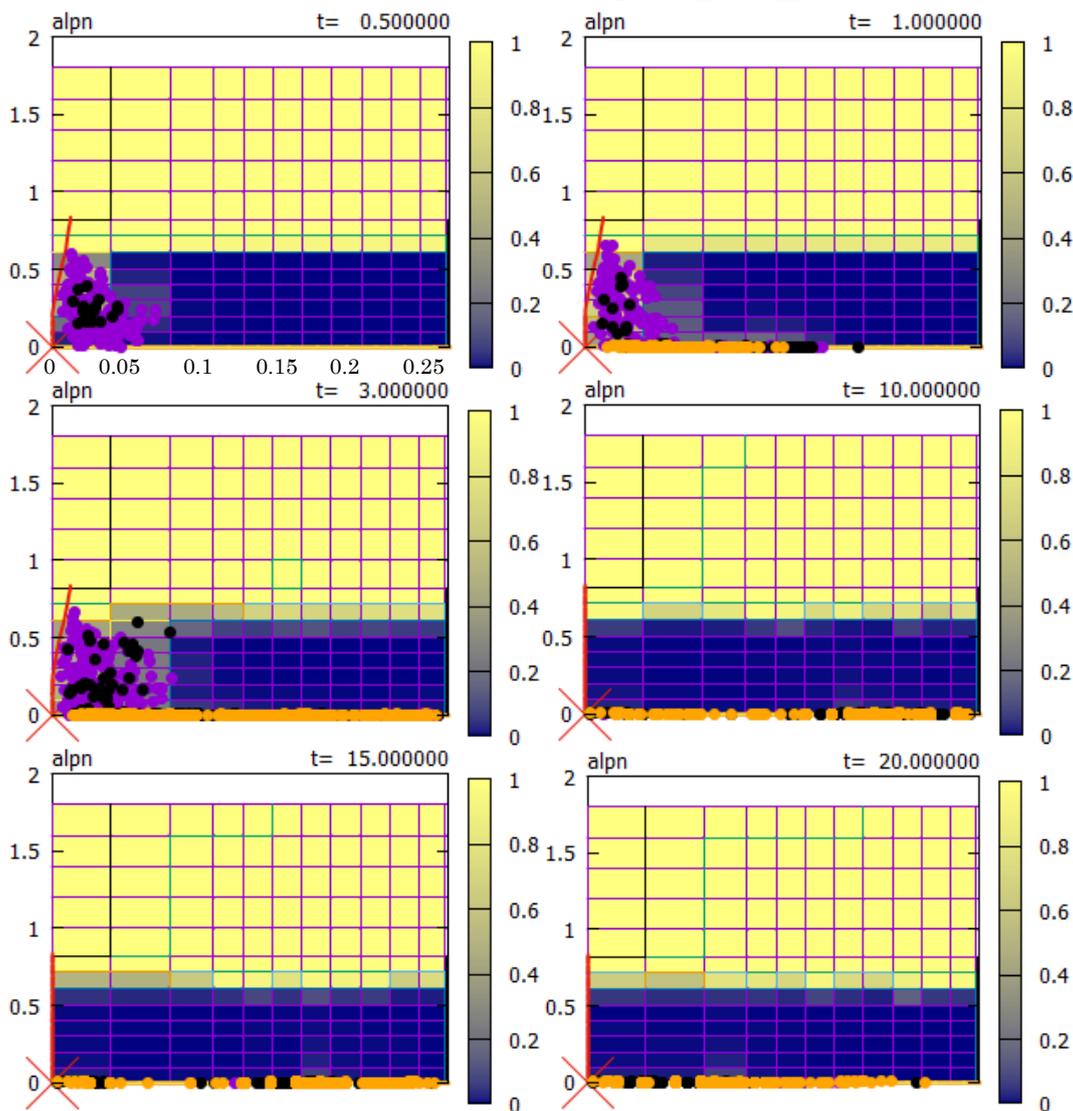


図 A23-C1-2 ボイド率及び熔融物粒子分布図

DEFOR-A23 (キャッチャー2)

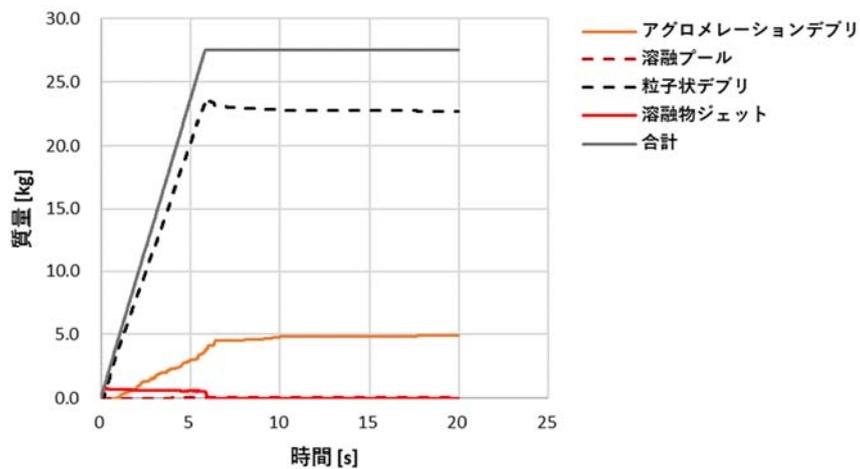


図 A23-C2-1 デブリの状態別質量の履歴

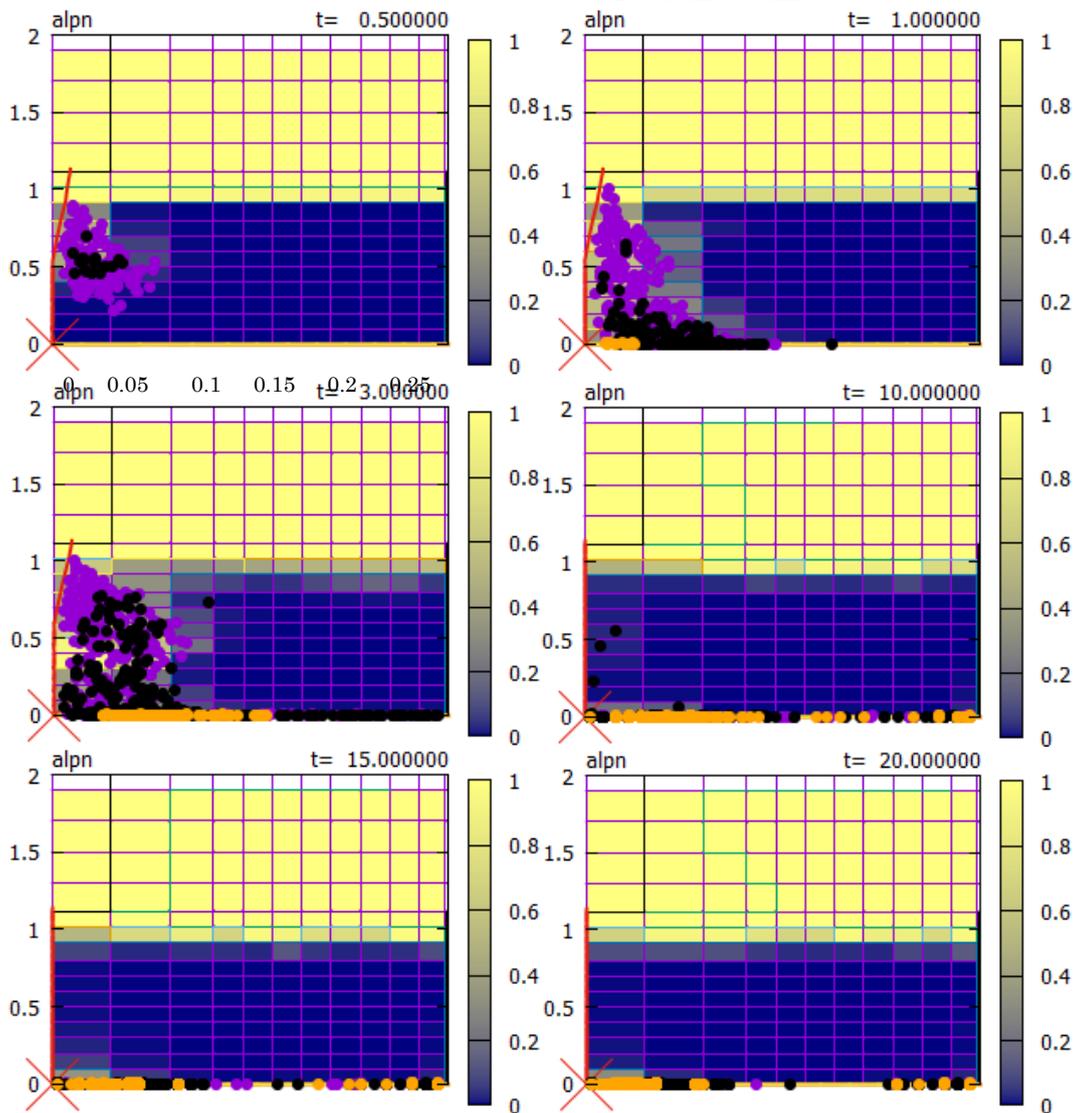


図 A23-C2-2 ボイド率及び熔融物粒子分布図

DEFOR-A23 (キャッチャー3)

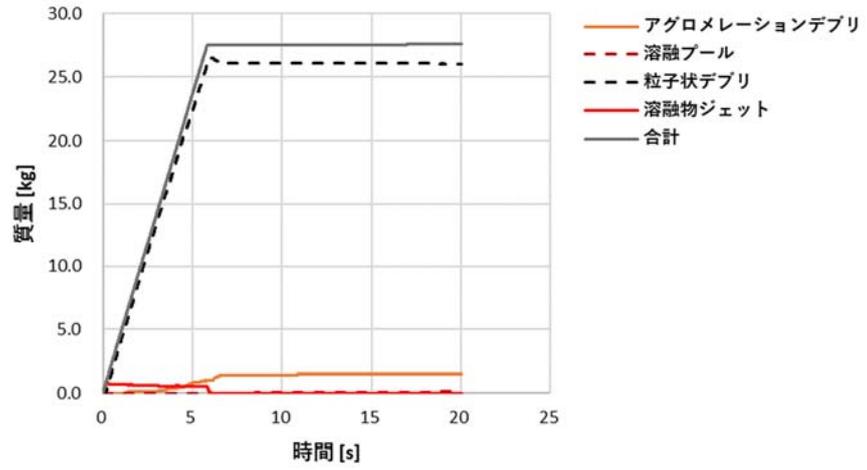


図 A23-C3-1 デブリの状態別質量の履歴

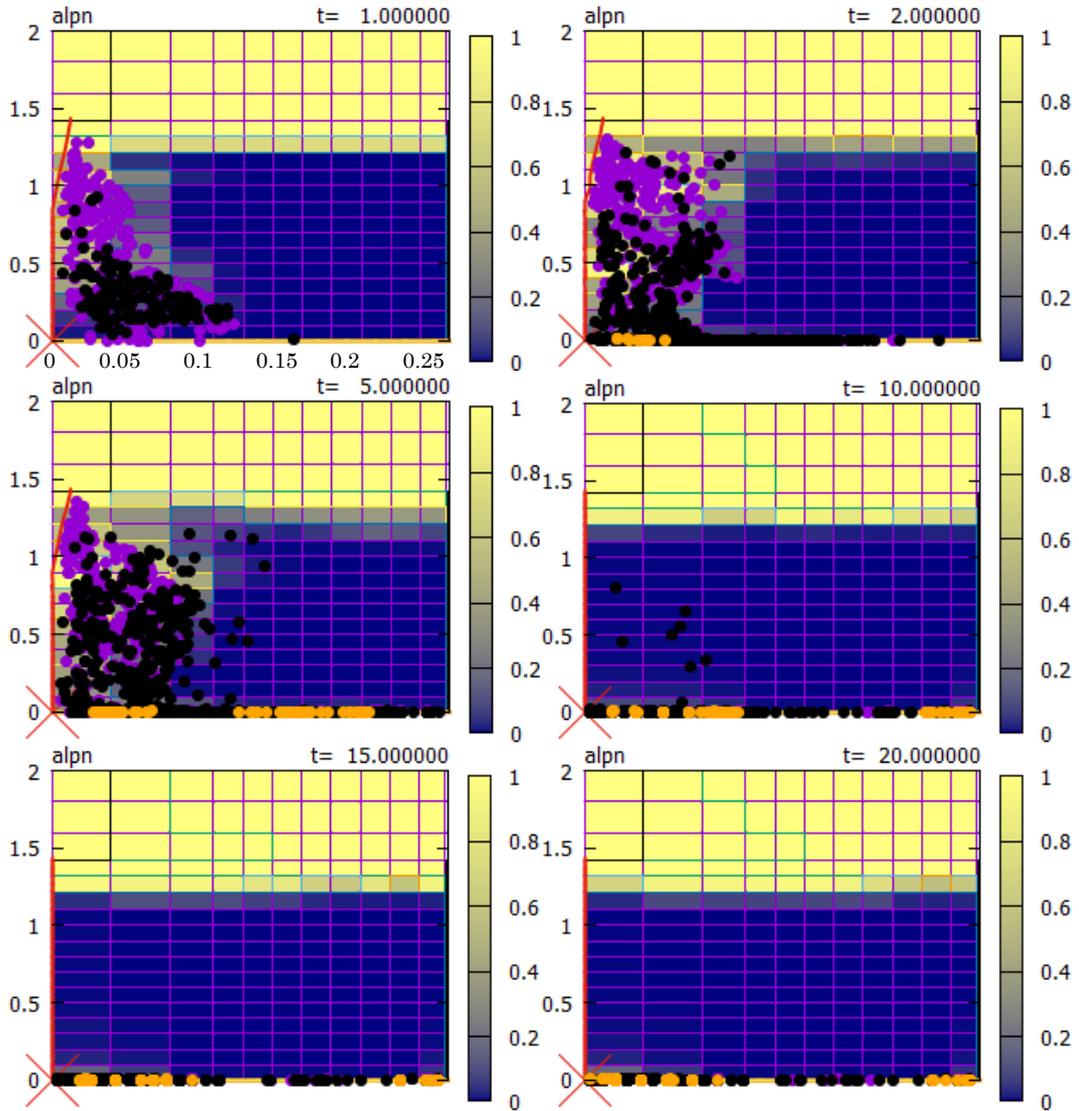


図 A23-C3-2 ボイド率及び熔融物粒子分布図

DEFOR-A23 (キャッチャー4)

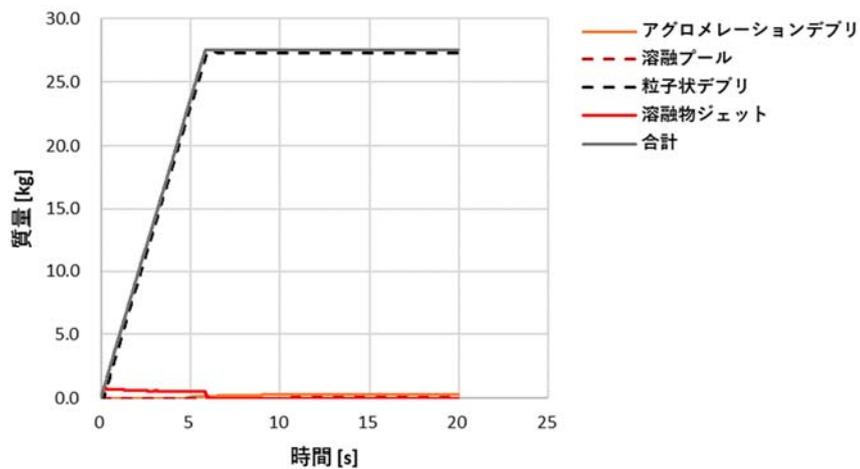


図 A23-C4-1 デブリの状態別質量の履歴

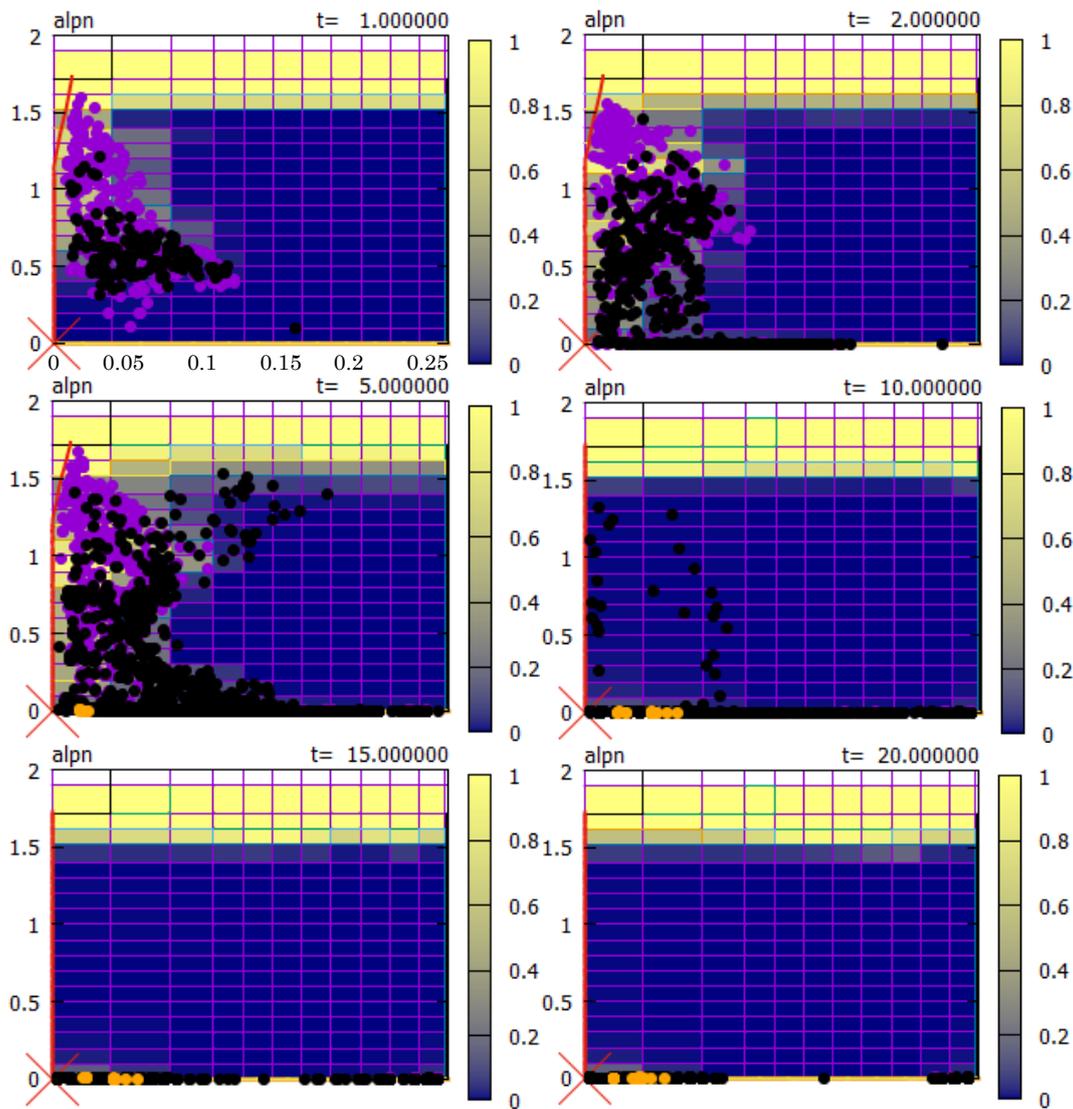


図 A23-C4-2 ボイド率及び溶融物粒子分布図

DEFOR-A24 (キャッチャー1)

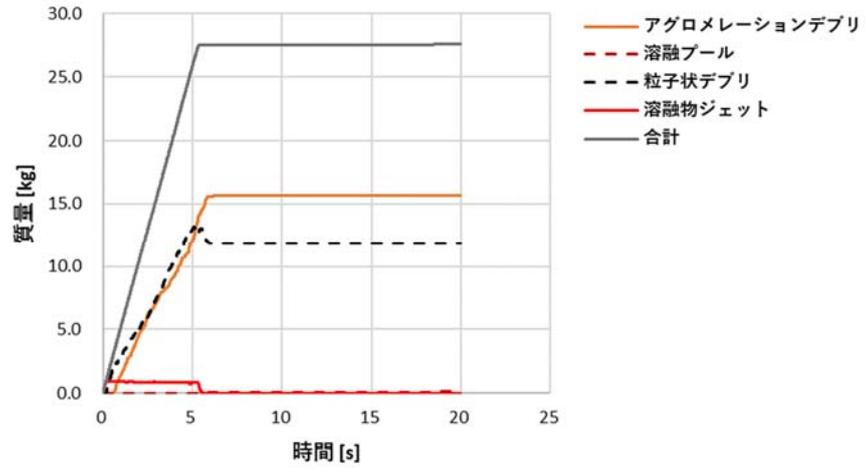


図 A24-C1-1 デブリの状態別質量の履歴

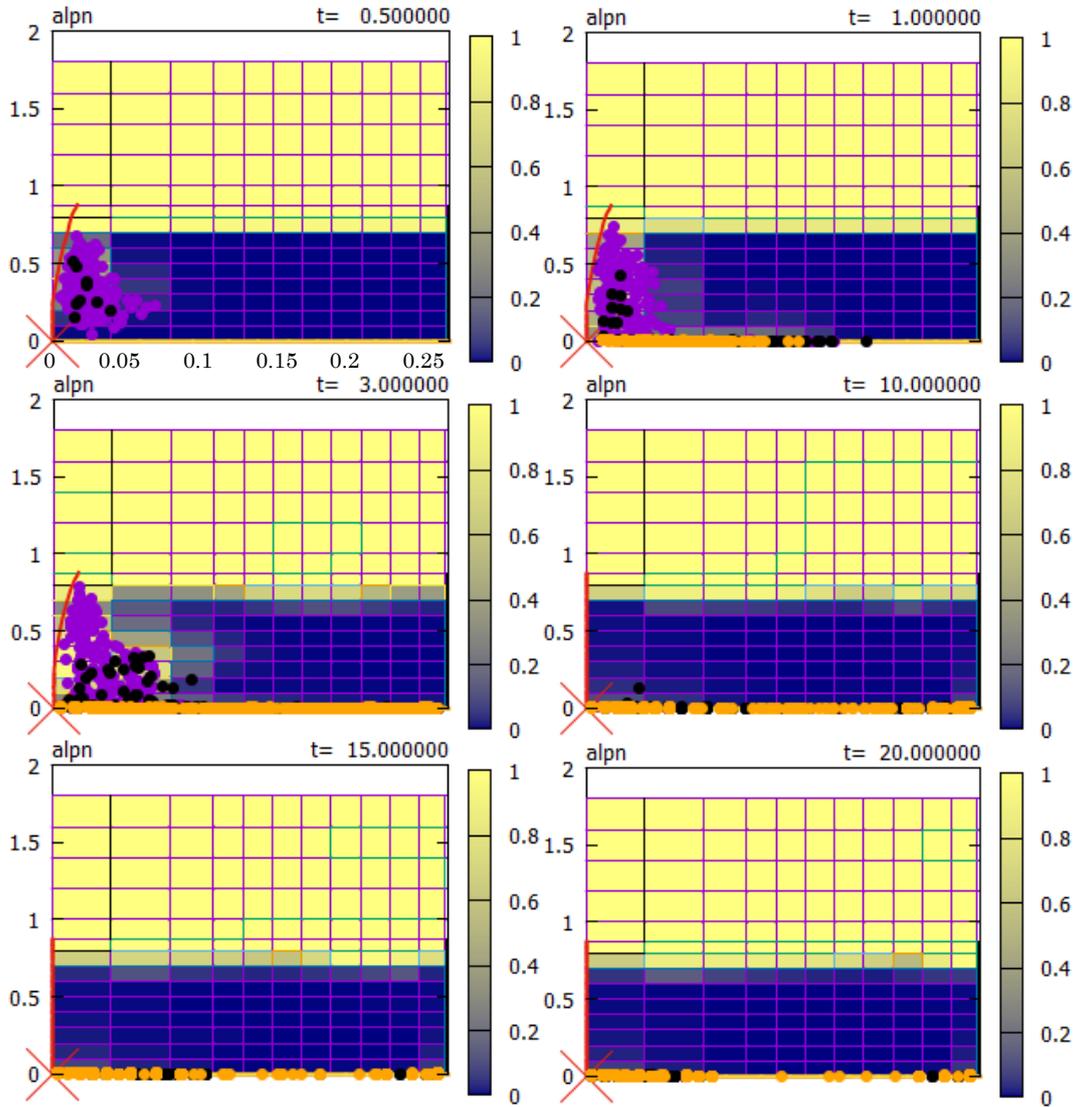


図 A24-C1-2 ボイド率及び熔融物粒子分布図

DEFOR-A24 (キャッチャー2)

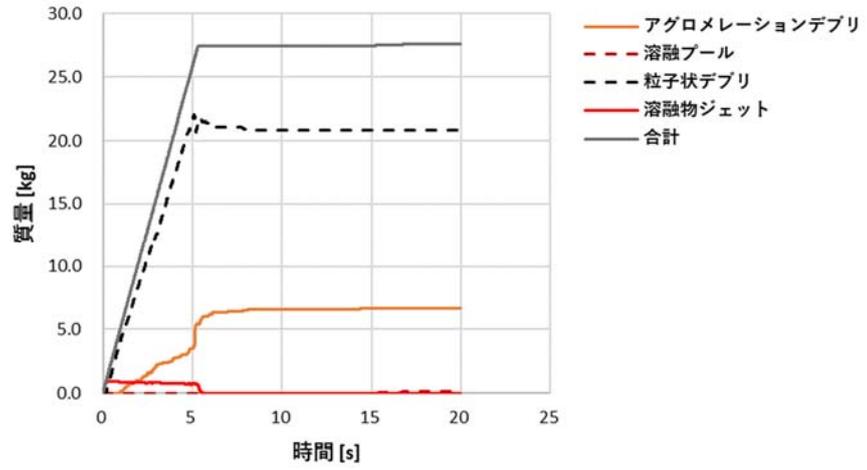


図 A24-C2-1 デブリの状態別質量の履歴

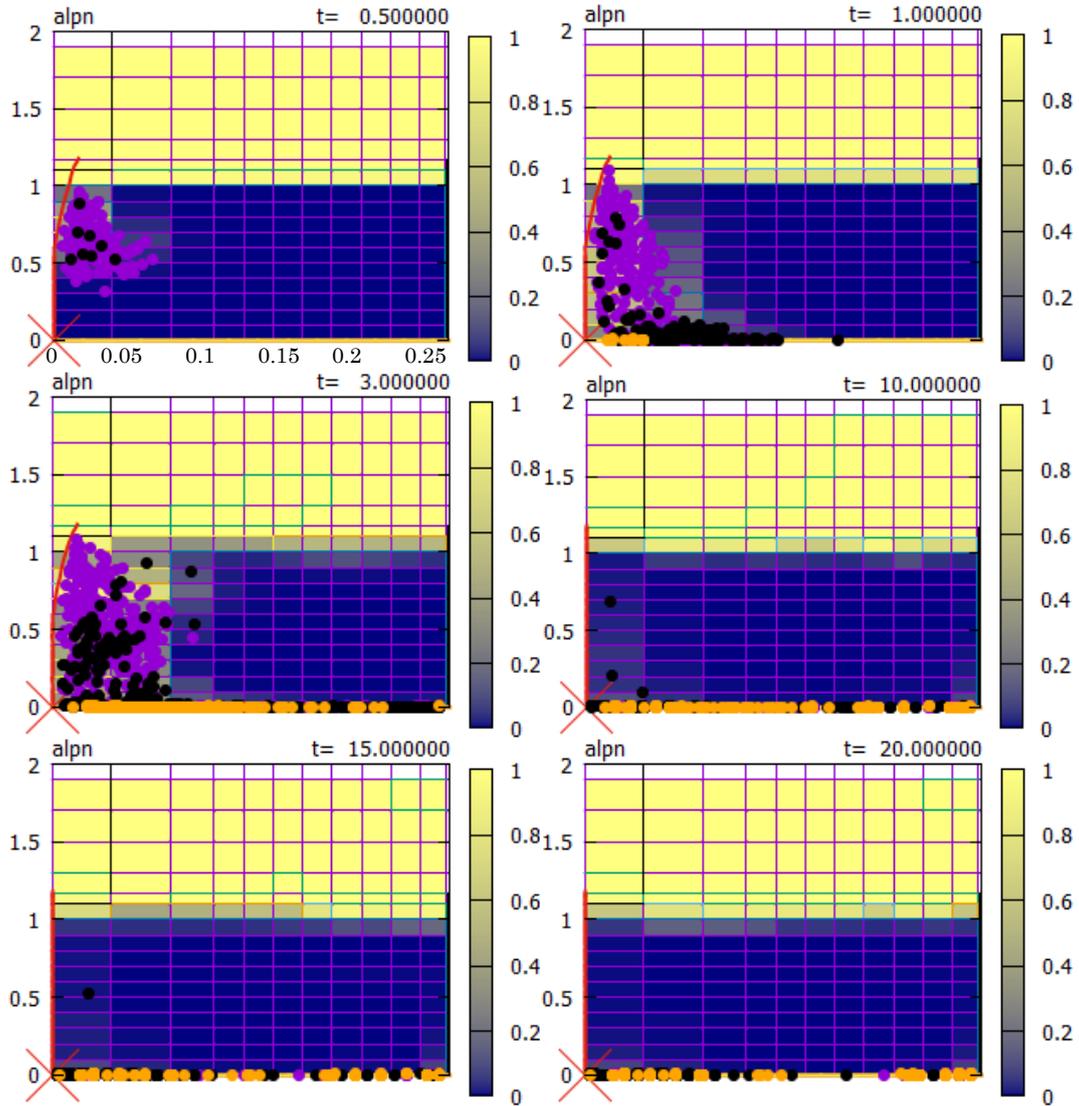


図 A24-C2-2 ポイド率及び熔融物粒子分布図

DEFOR-A24 (キャッチャー3)

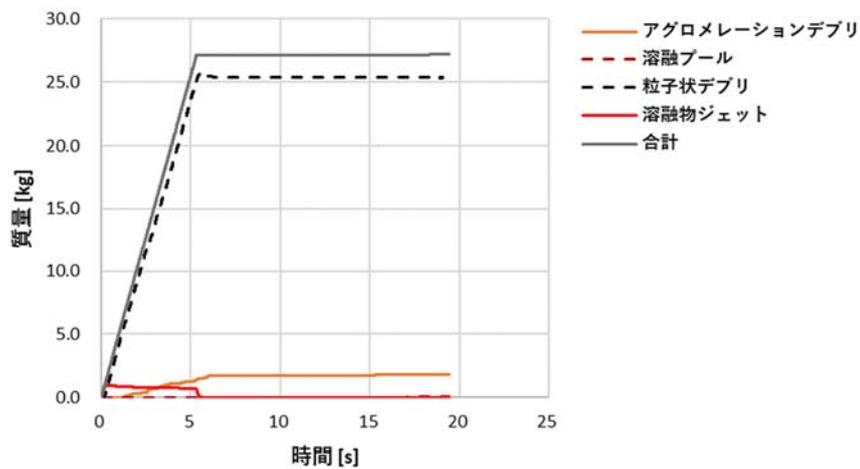


図 A24-C3-1 デブリの状態別質量の履歴

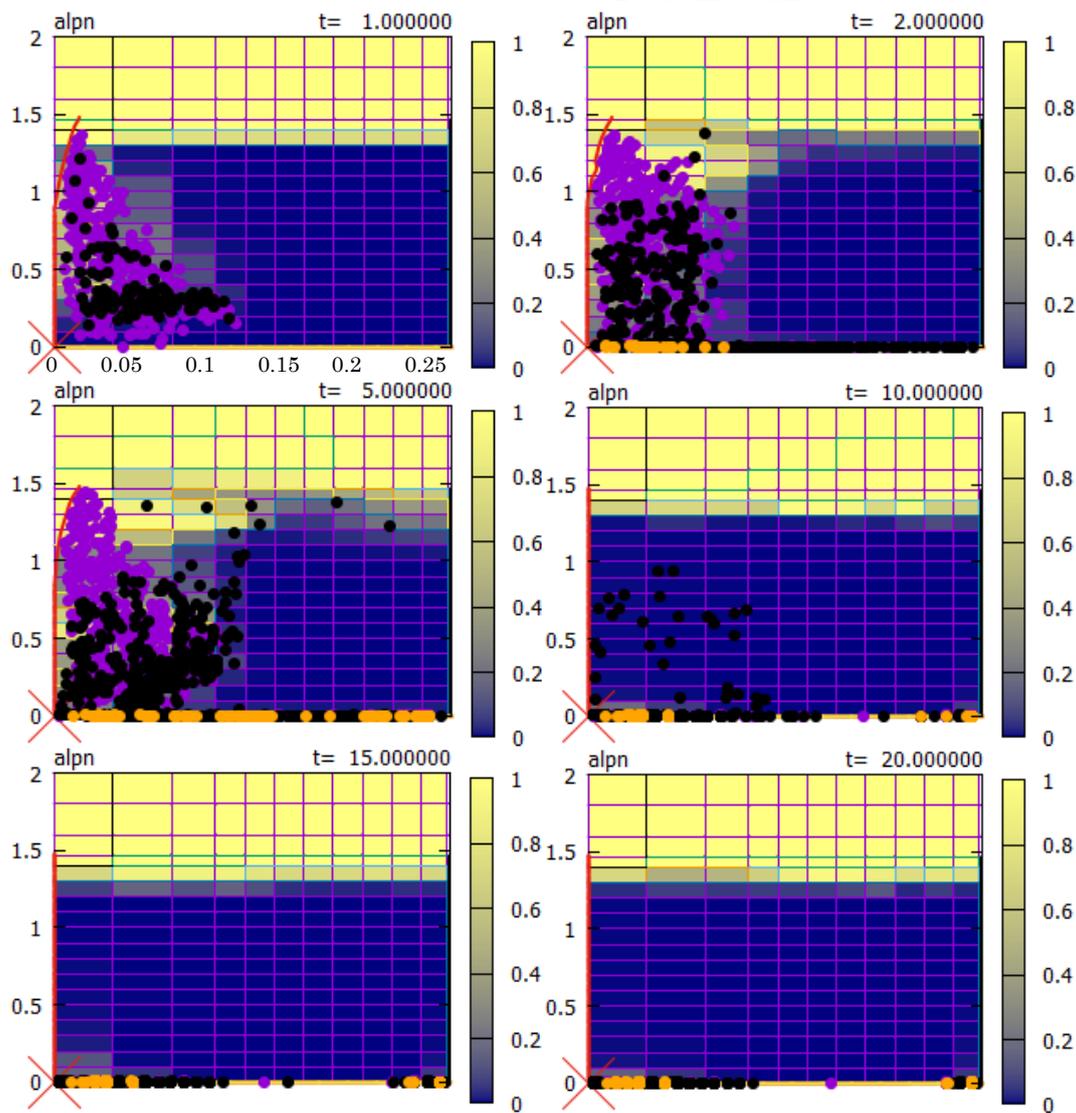


図 A24-C3-2 ボイド率及び溶融物粒子分布図

DEFOR-A24 (キャッチャー4)

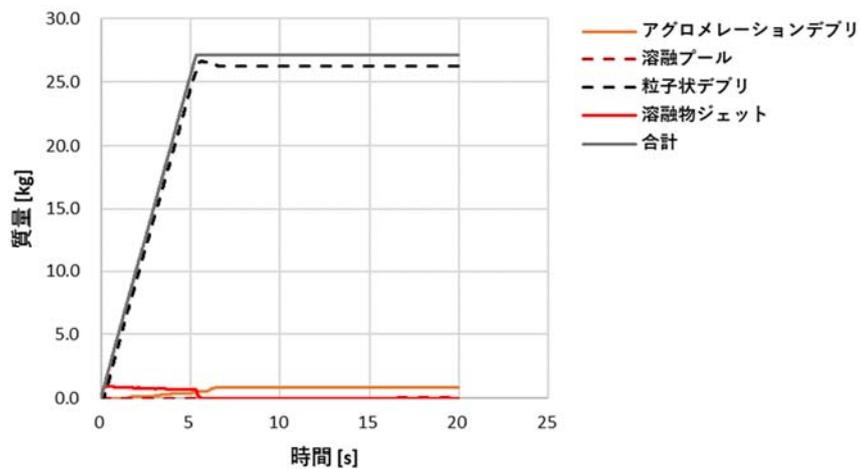


図 A24-C4-1 デブリの状態別質量の履歴

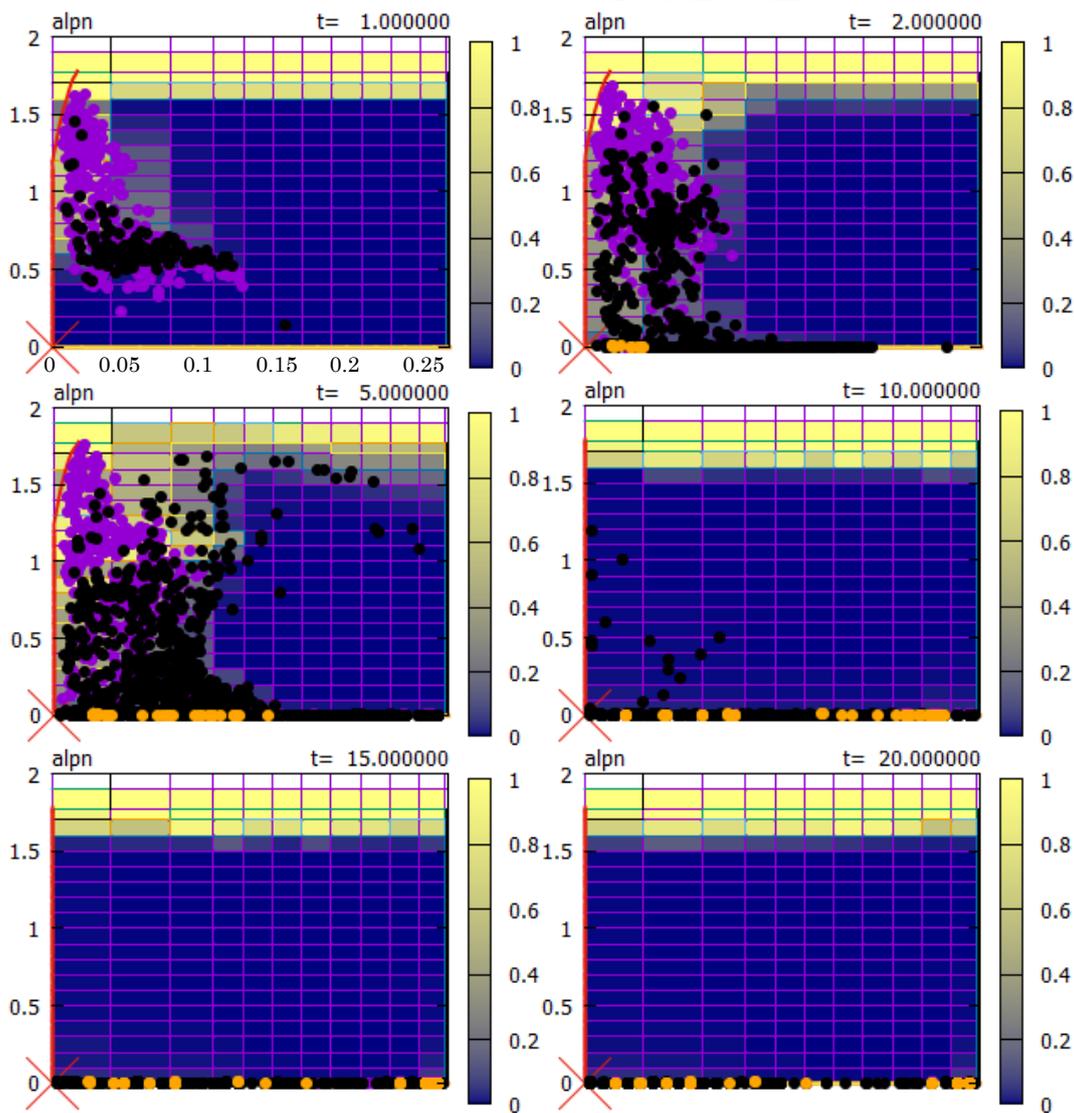


図 A24-C4-2 ポイド率及び溶融物粒子分布図

DEFOR-A25 (キャッチャー1)

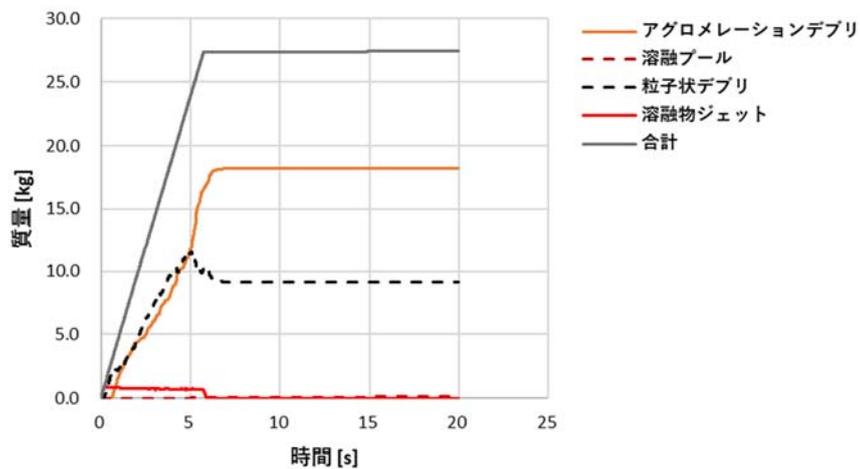


図 A25-C1-1 デブリの状態別質量の履歴

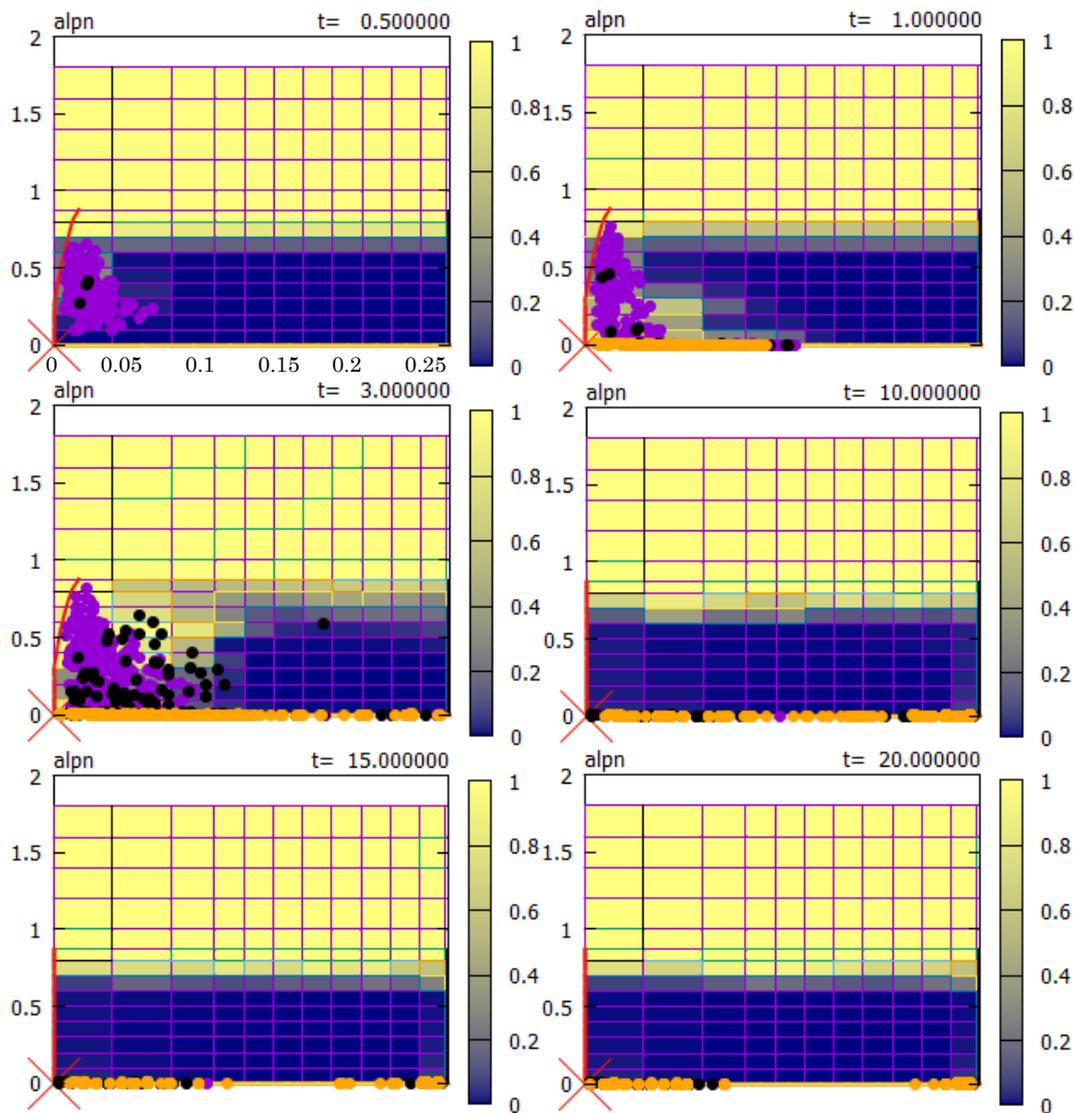


図 A25-C1-2 ボイド率及び溶融物粒子分布図

DEFOR-A25 (キャッチャー2)

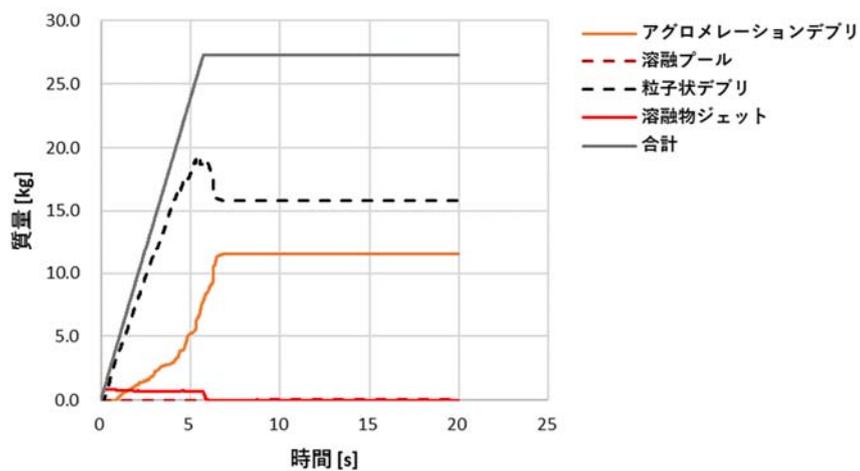


図 A25-C2-1 デブリの状態別質量の履歴

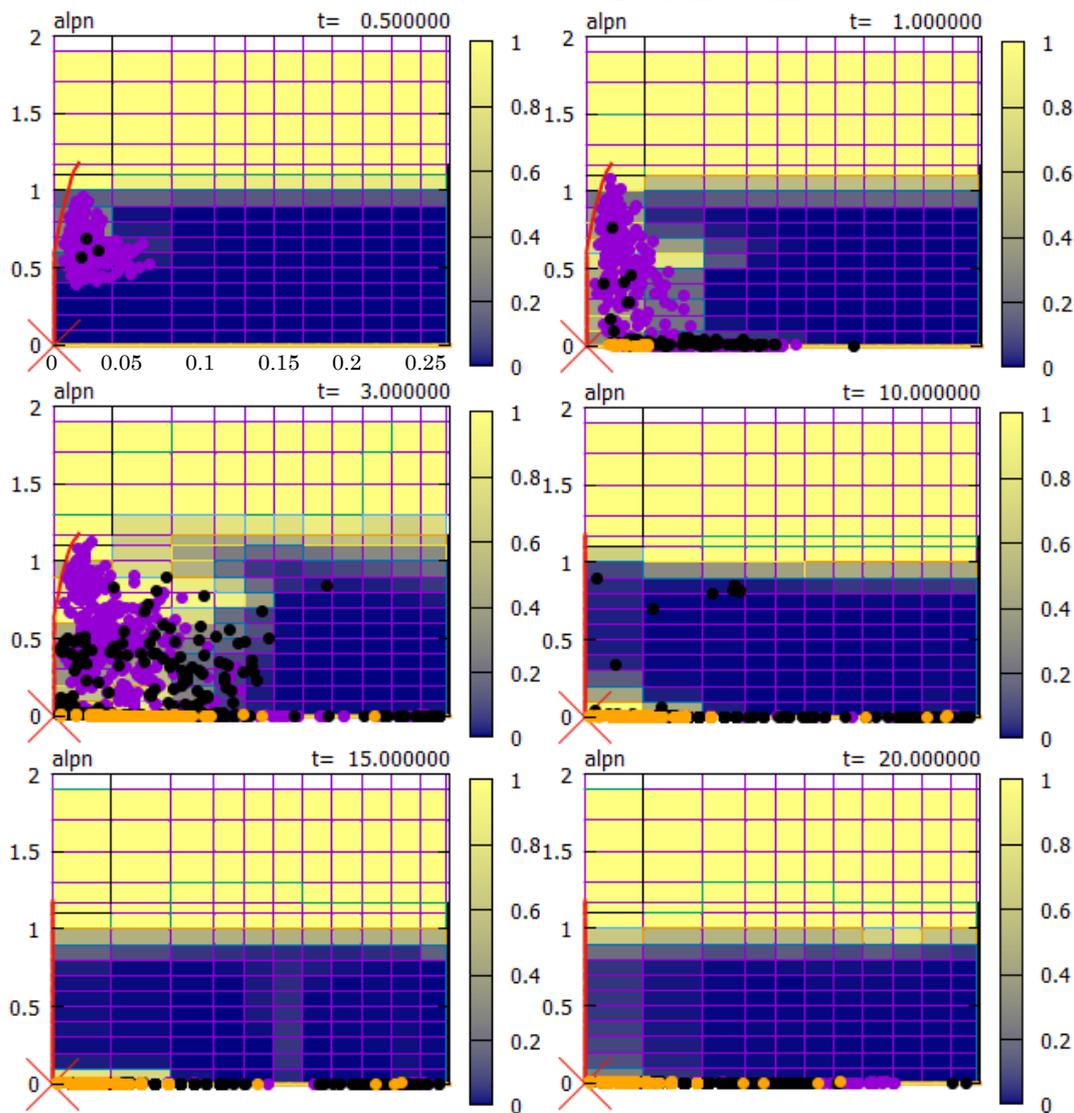


図 A25-C2-2 ボイド率及び溶融物粒子分布図

DEFOR-A25 (キャッチャー3)

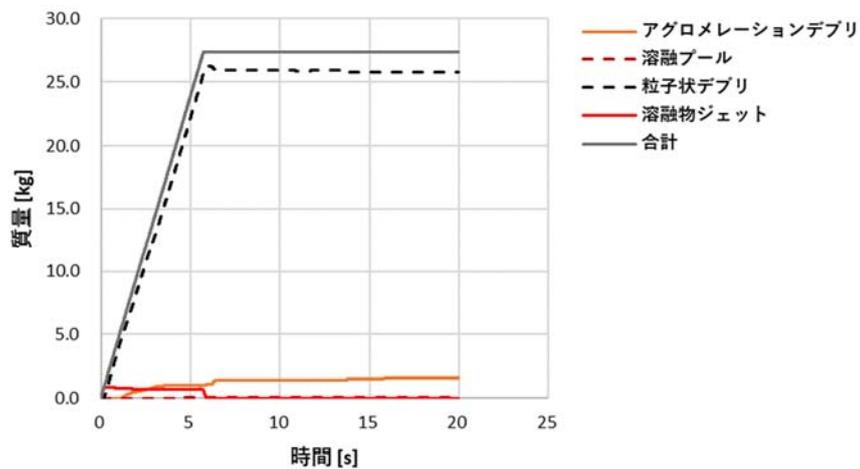


図 A25-C3-1 デブリの状態別質量の履歴

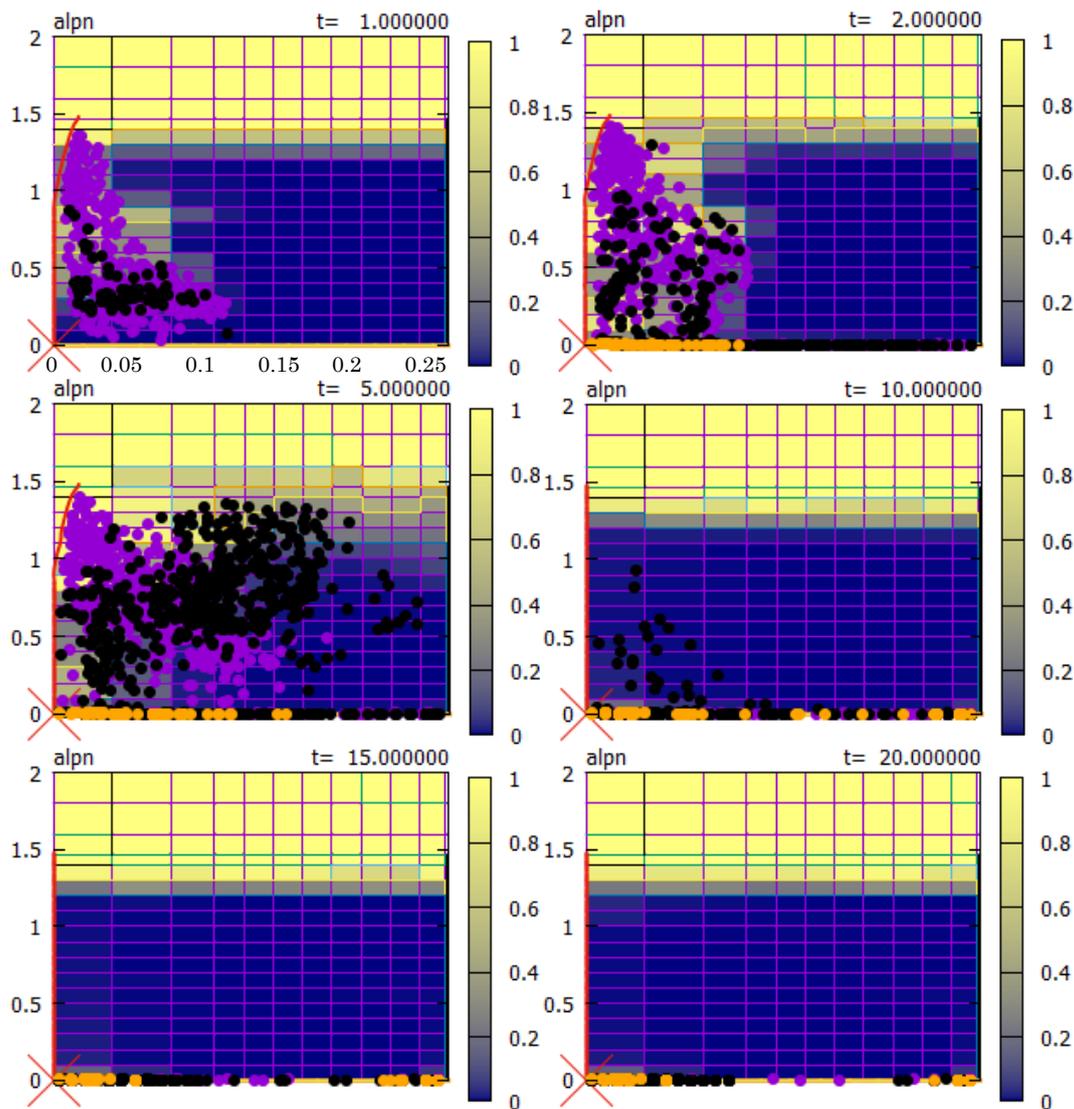


図 A25-C3-2 ボイド率及び熔融物粒子分布図

DEFOR-A25 (キャッチャー4)

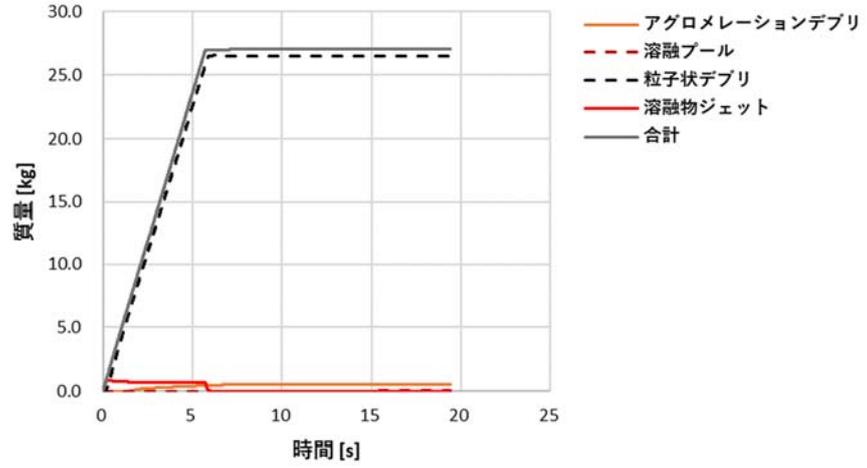


図 A25-C4-1 デブリの状態別質量の履歴

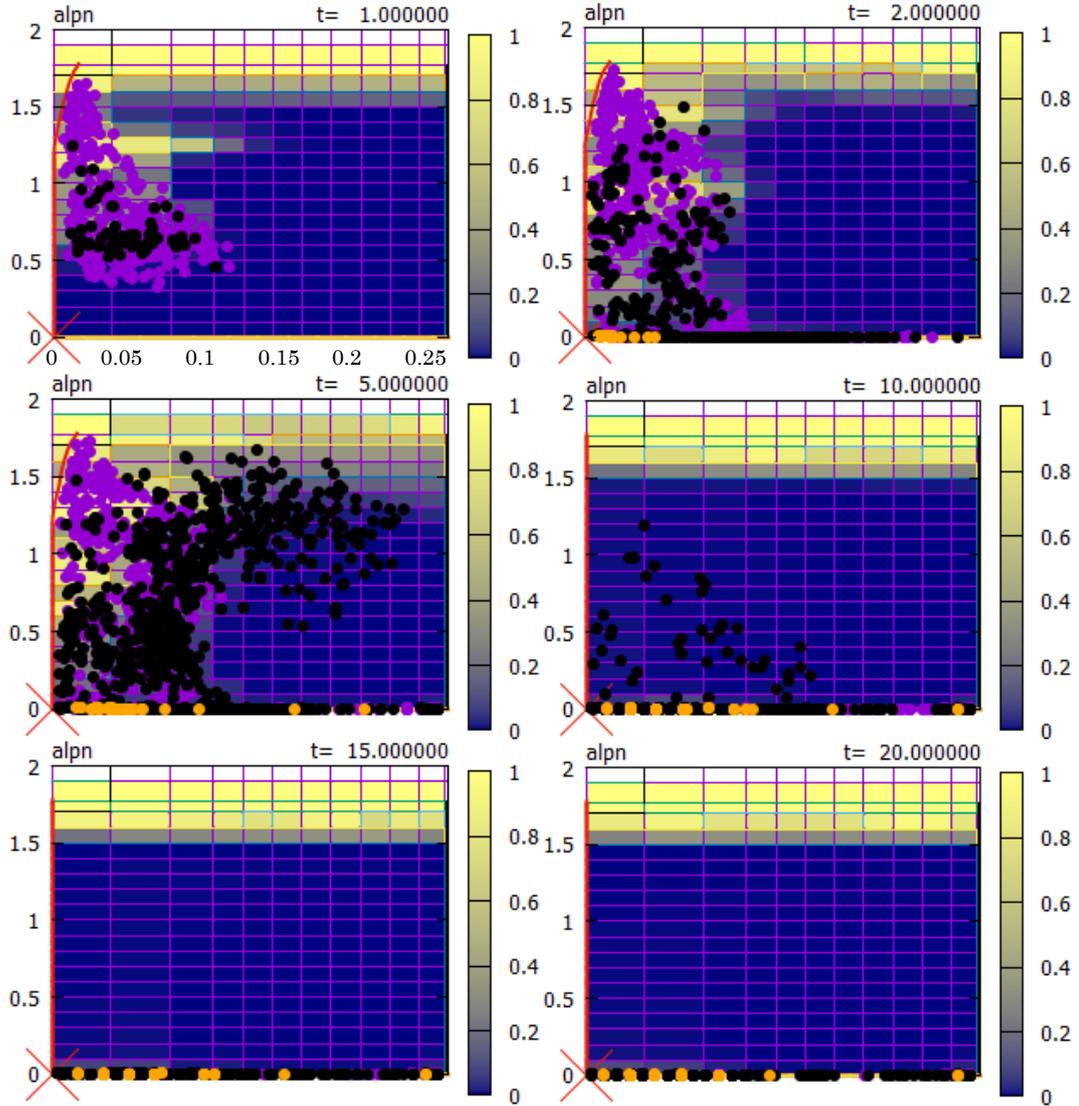


図 A25-C4-2 ボイド率及び溶融物粒子分布図

DEFOR-A26 (キャッチャー1)

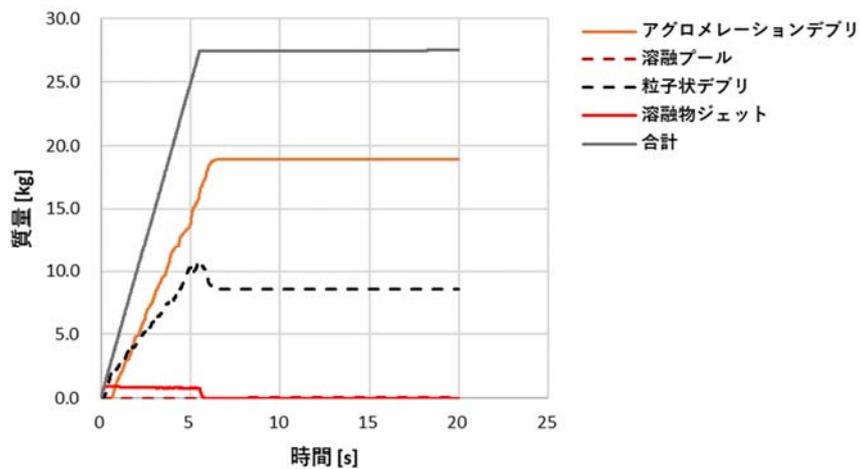


図 A26-C1-1 デブリの状態別質量の履歴

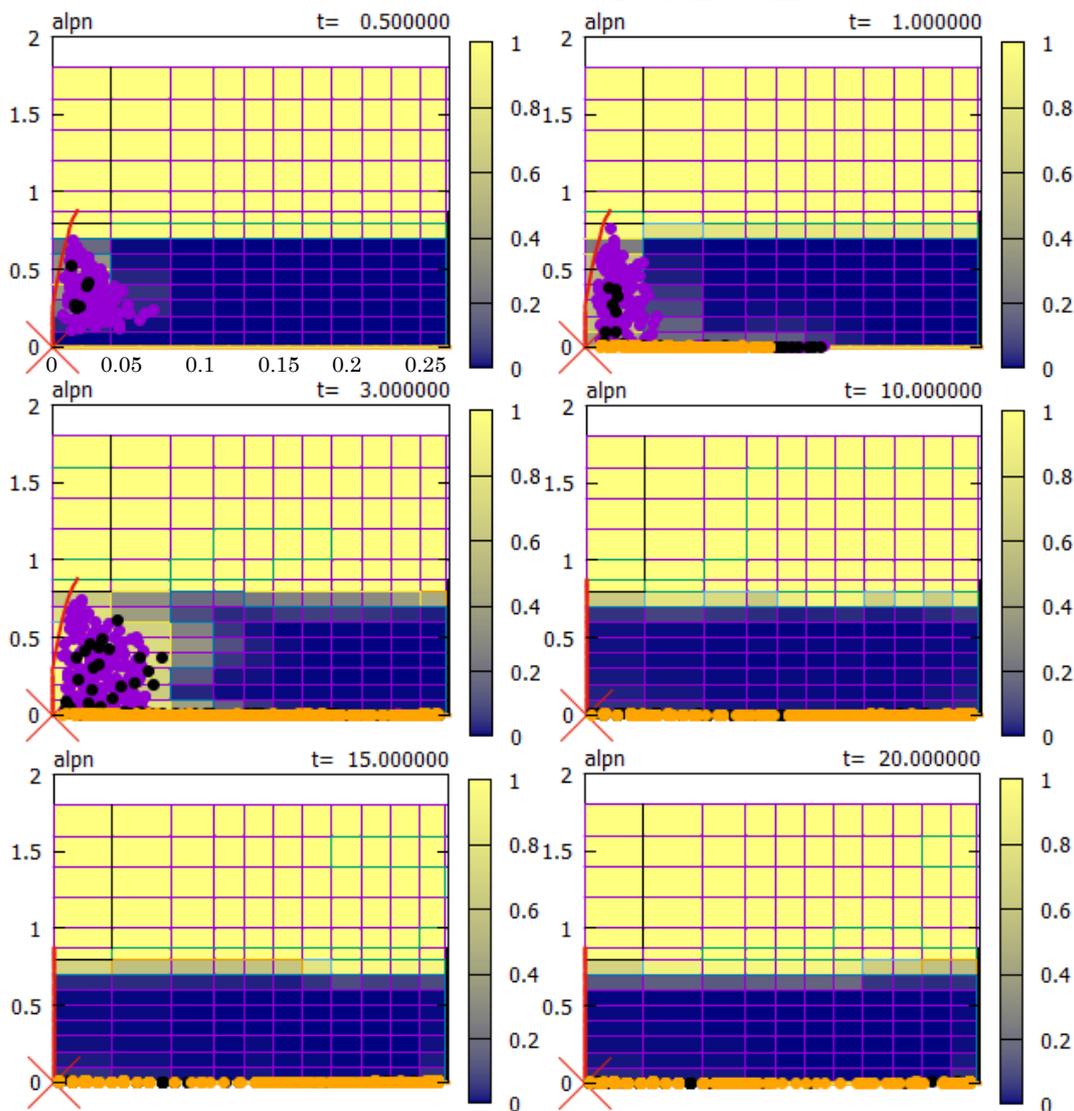


図 A26-C1-2 ボイド率及び溶融物粒子分布図

DEFOR-A26 (キャッチャー2)

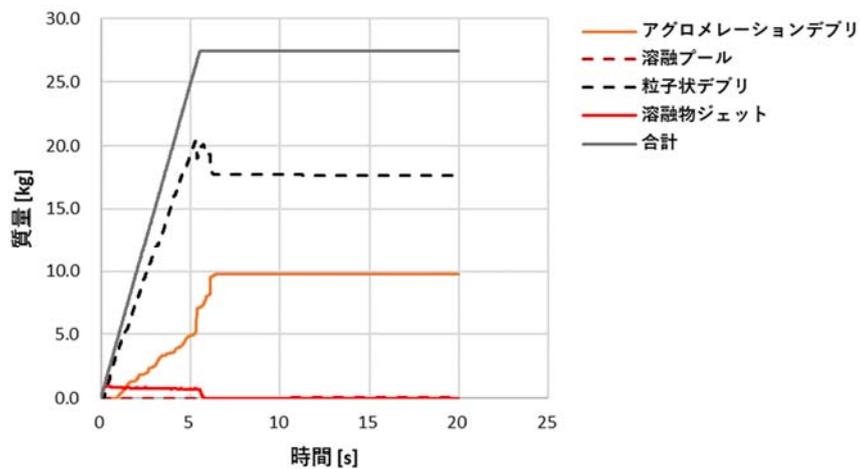


図 A26-C2-1 デブリの状態別質量の履歴

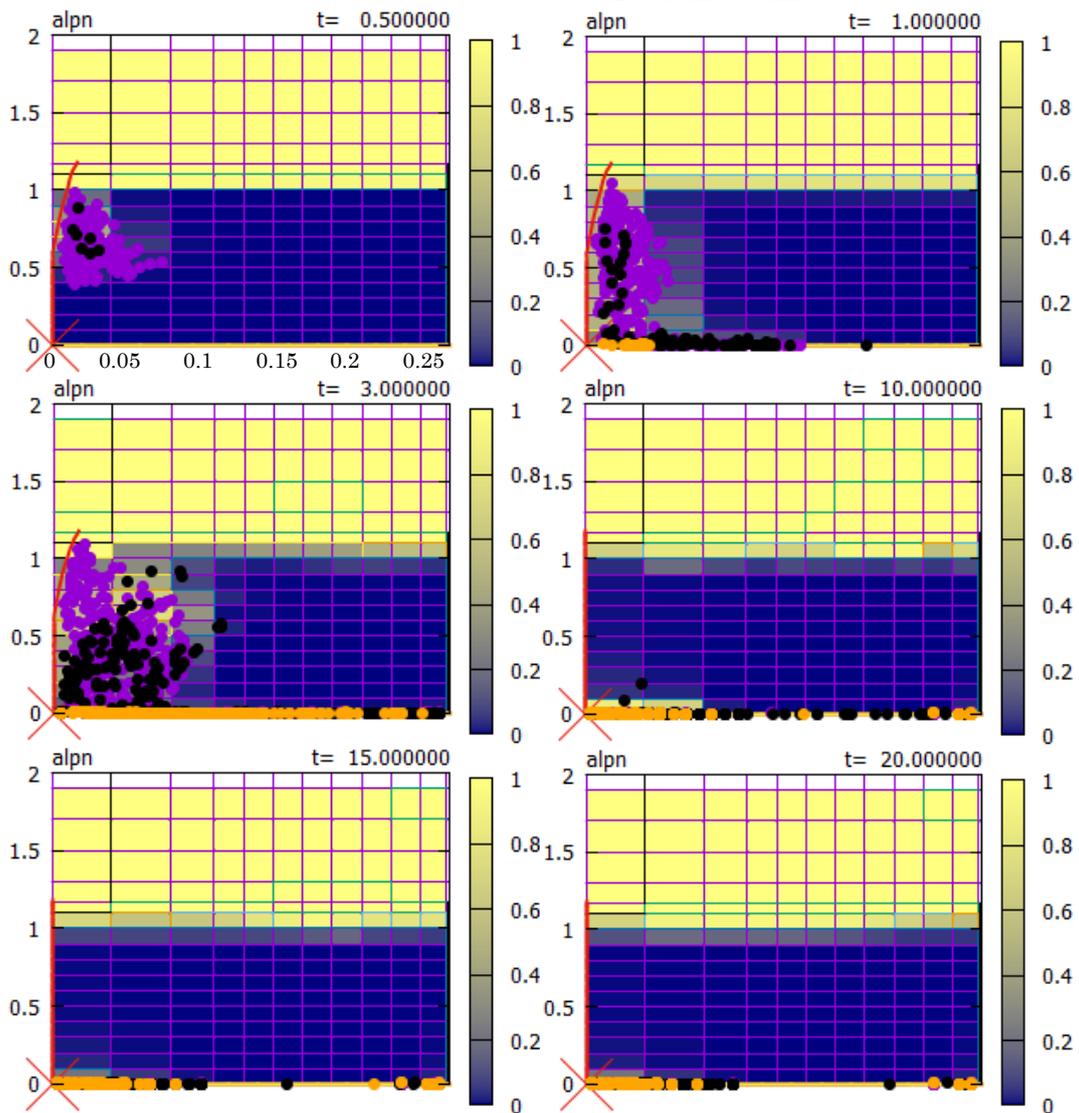


図 A26-C2-2 ポイド率及び溶融物粒子分布図

DEFOR-A26 (キャッチャー3)

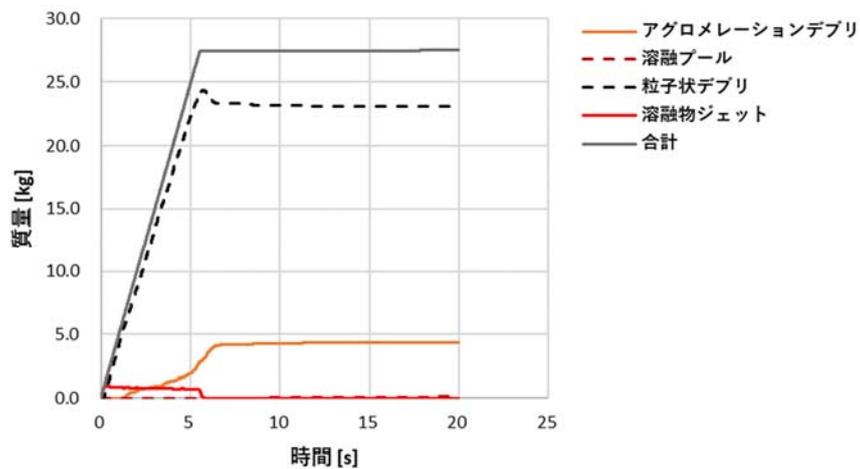


図 A26-C3-1 デブリの状態別質量の履歴

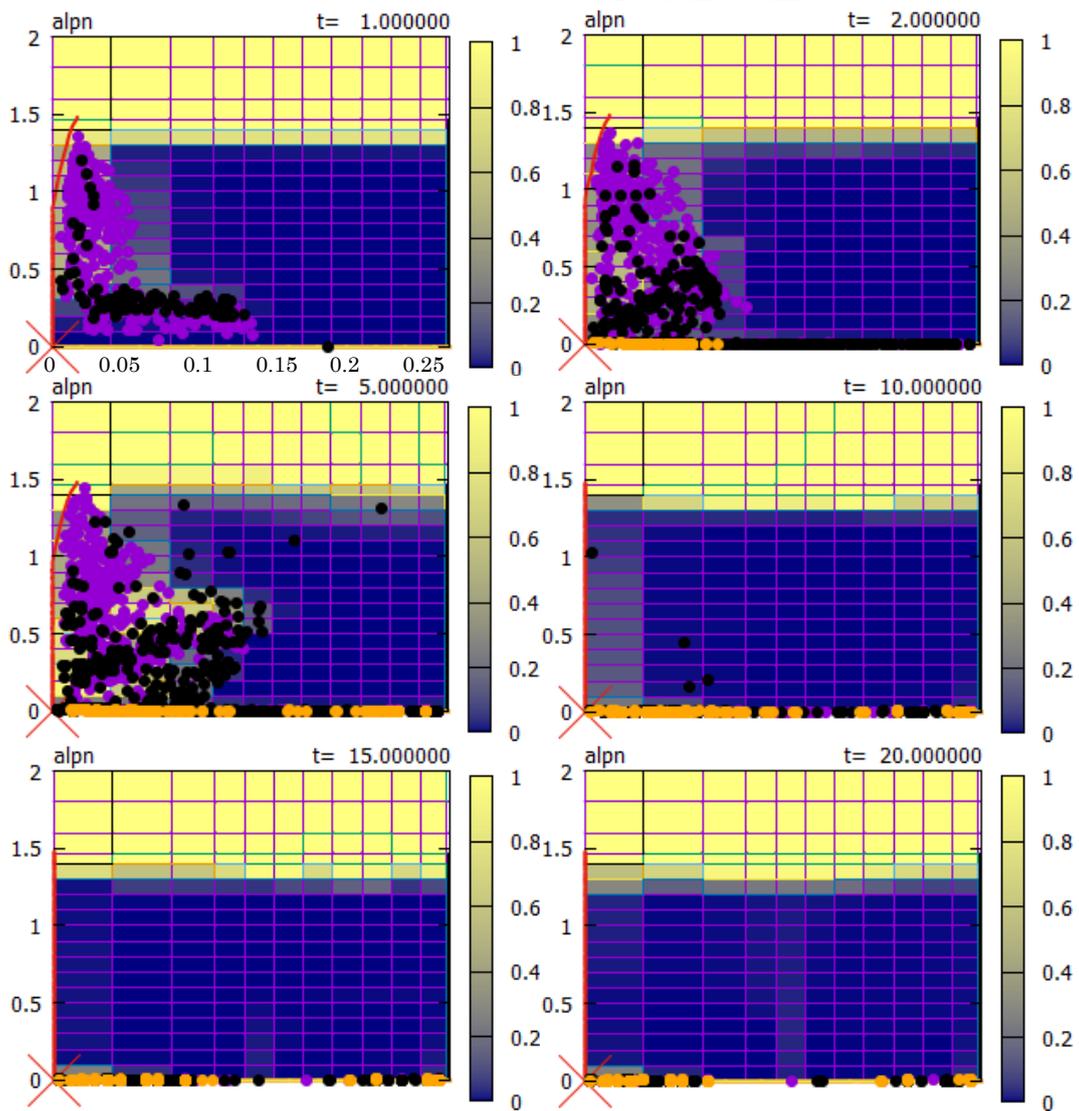


図 A26-C3-2 ボイド率及び熔融物粒子分布図

DEFOR-A26 (キャッチャー4)

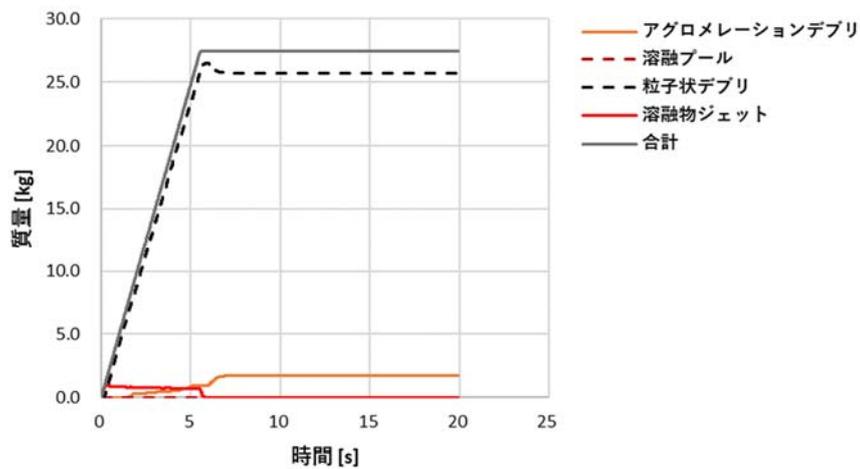


図 A26-C4-1 デブリの状態別質量の履歴

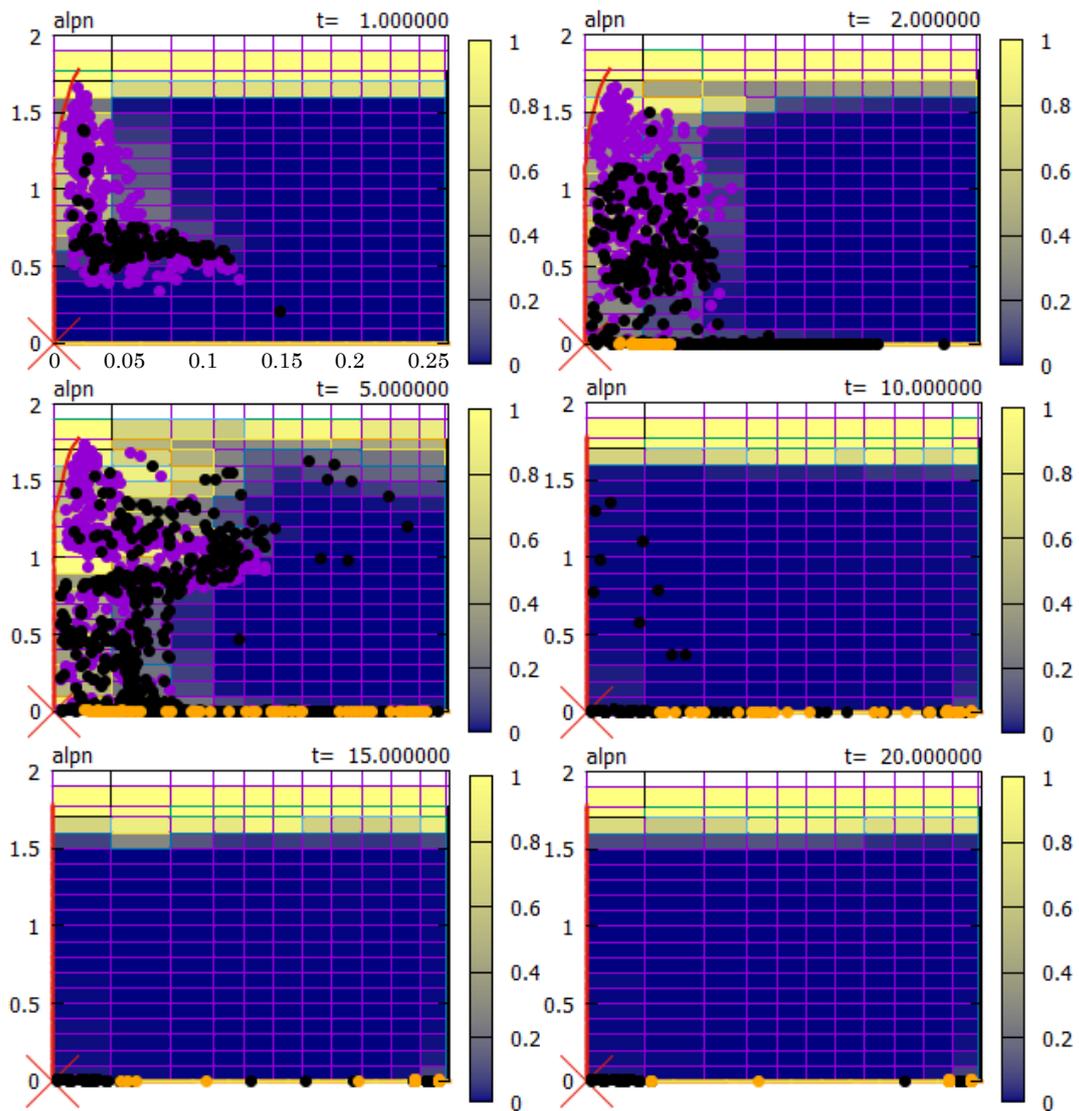


図 A26-C4-2 ポイド率及び熔融物粒子分布図

付録 B PULiMS 実験の解析結果

B.1 温度測定値の比較

本文中に記載できなかったプール水温及び床板裏面温度に関する実測値と JASMINE コードによる解析結果の比較を示す。

① E8 実験

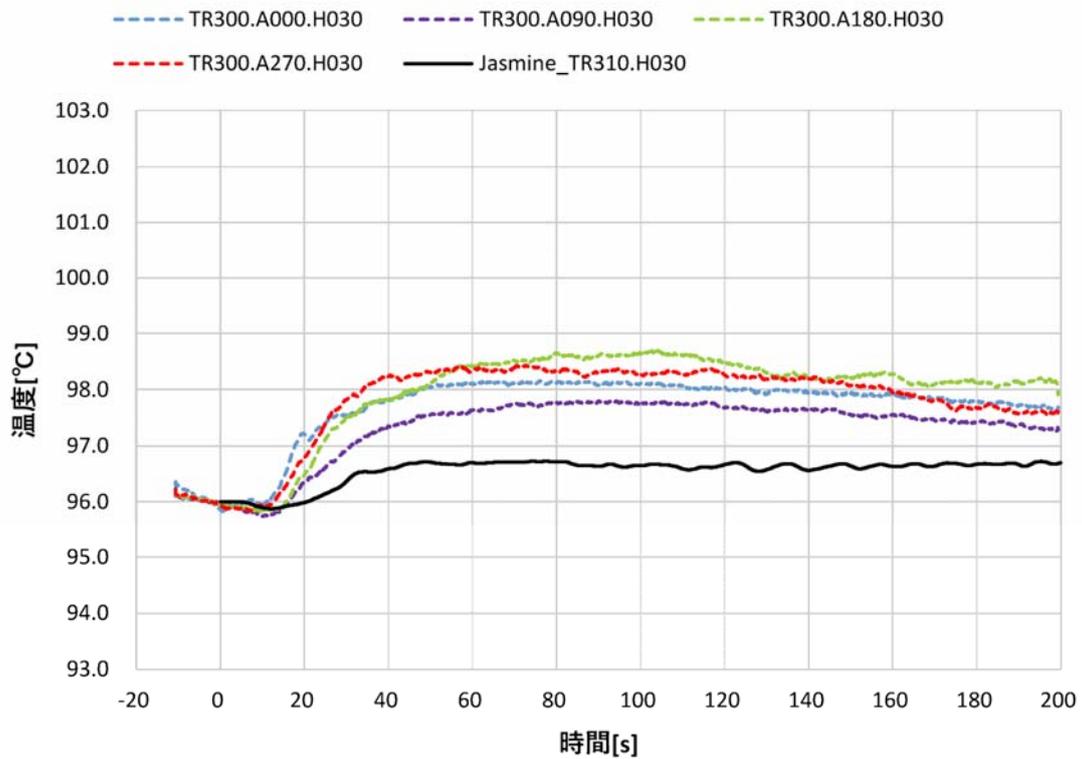


図 B1.1 E8 実験の水プール温度の比較 (R=300~310 mm、H=30 mm)

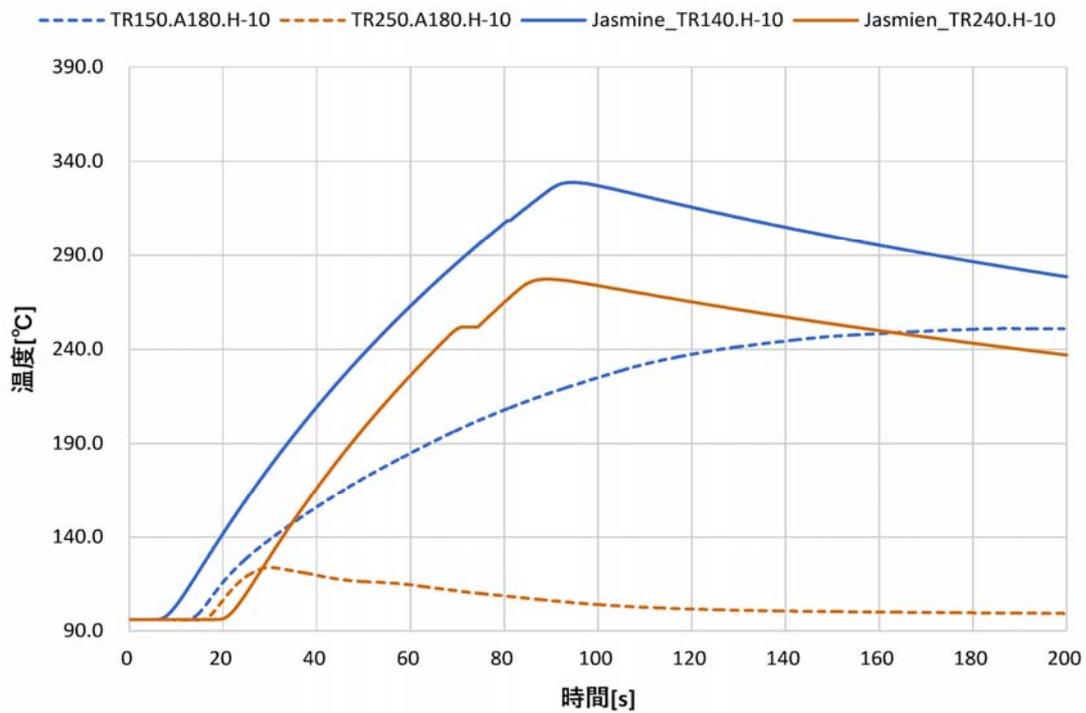


図 B1.2 E8 実験の床板裏面温度の比較 (R=140 mm 及び R=250 mm)

② E9 実験

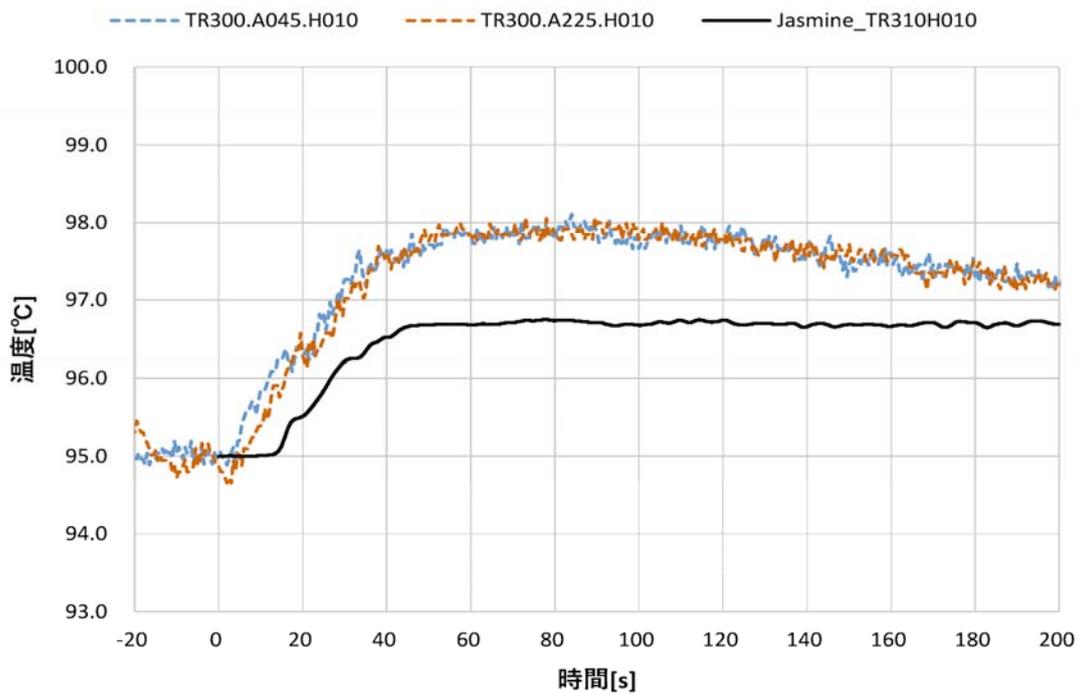


図 B1.3 E9 実験の水プール温度の比較 (R=300~310 mm、H=10 mm)

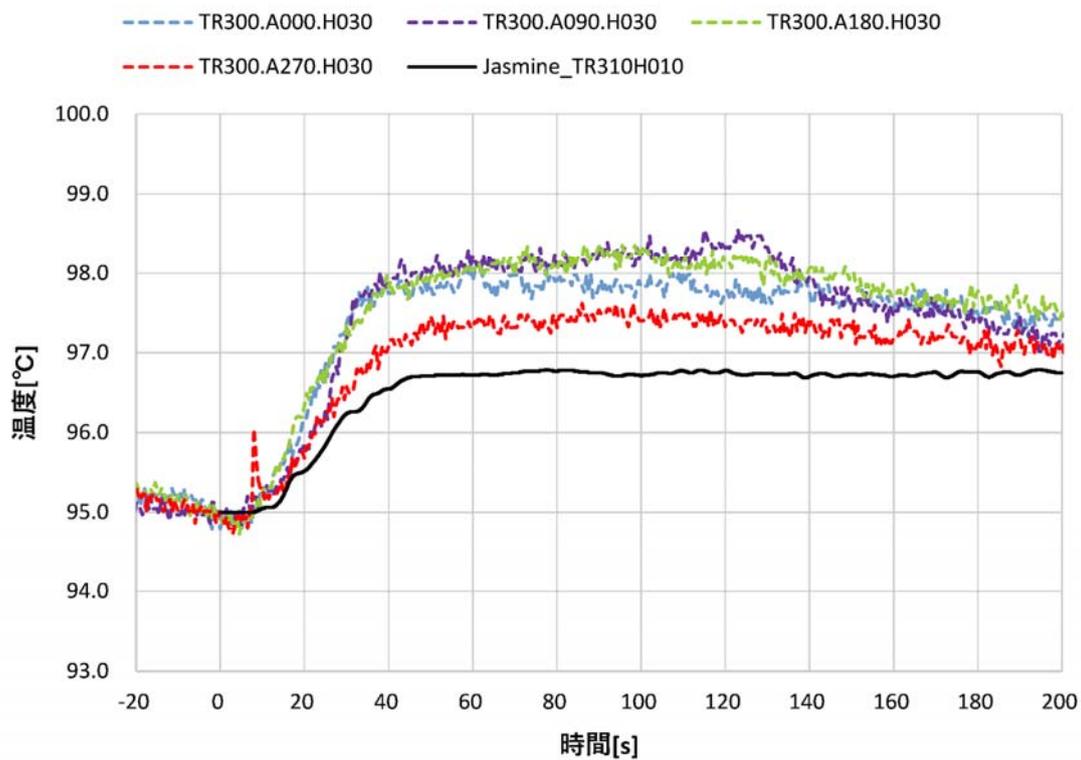


図 B1.4 E9 実験の水プール温度の比較 (R=300~310 mm、H=30 mm)

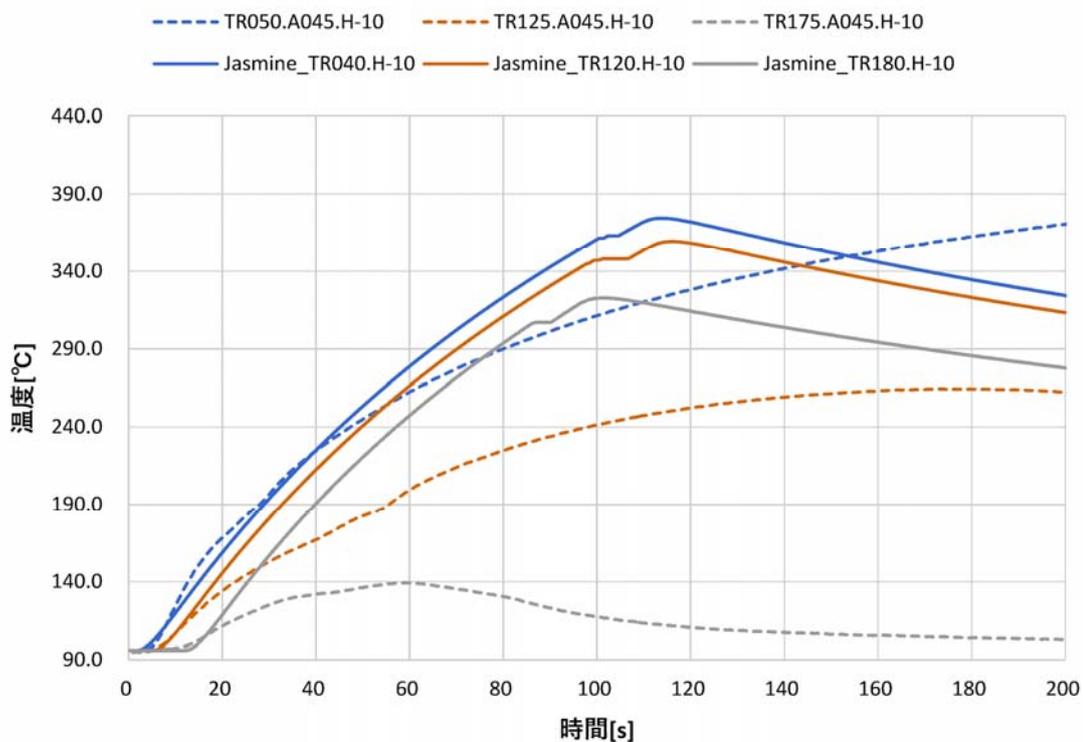


図 B1.5 E9 実験の床板裏面温度の比較 (R=50、125、175 mm)

③ E10 実験

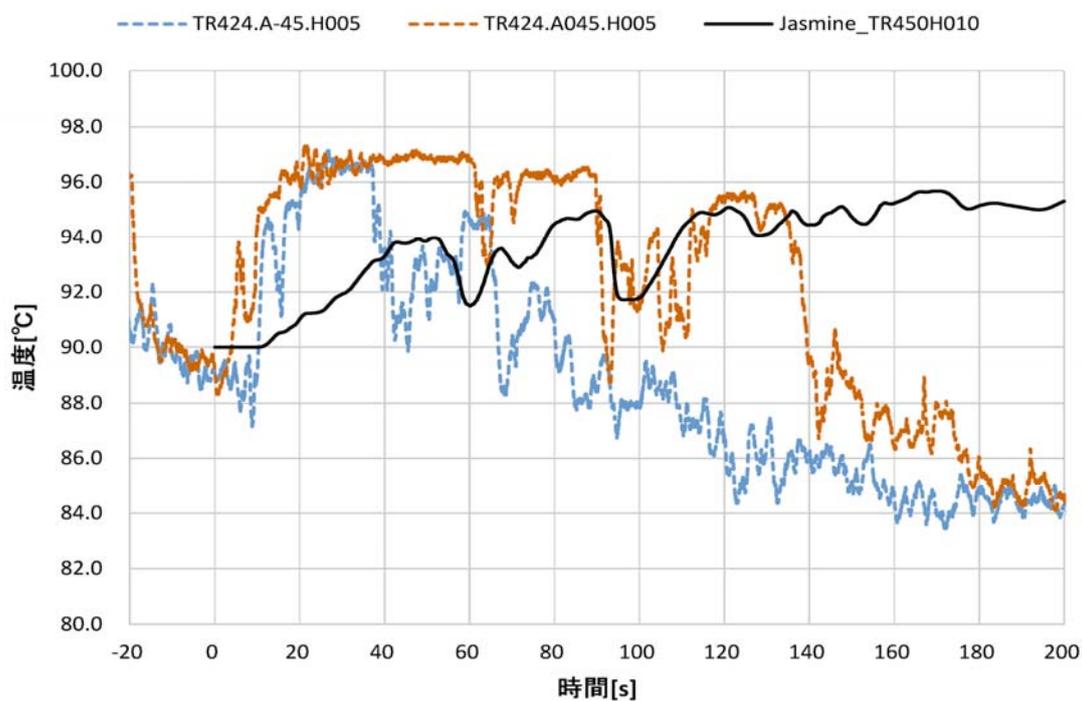


図 B1.6 水中温度の実験値と解析値の比較 (E10、R=424~430 mm H=5~10 mm)

④ E11 実験

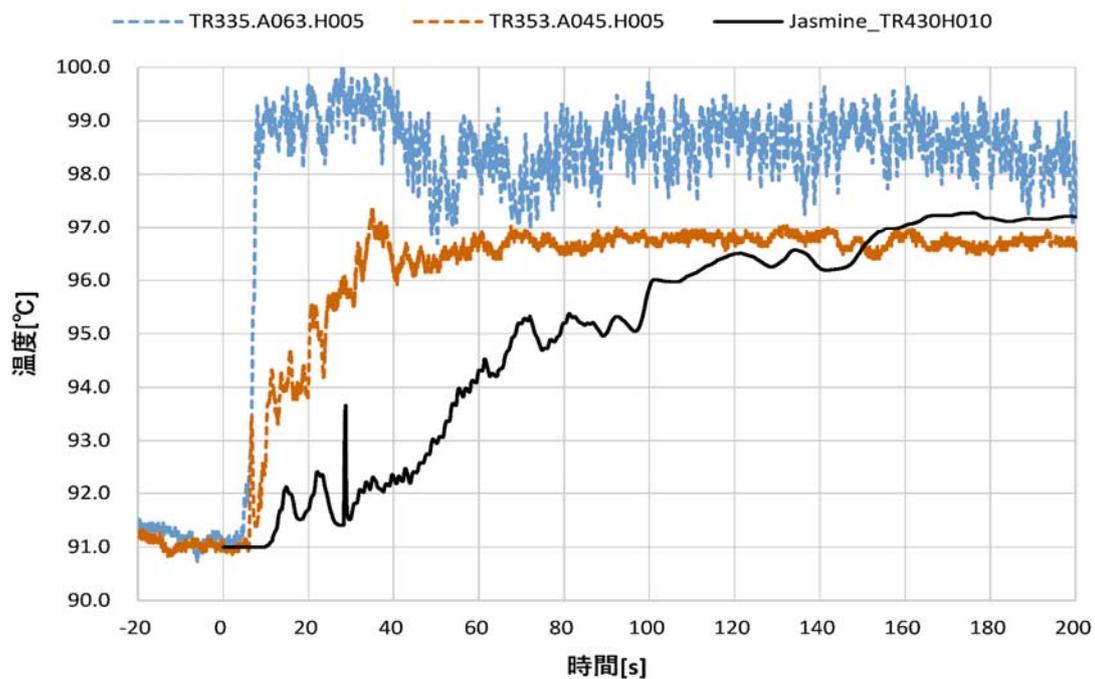


図 B1.7 水中温度の実験値と解析値の比較 (E11、R=420~440 mm H=5~10 mm)

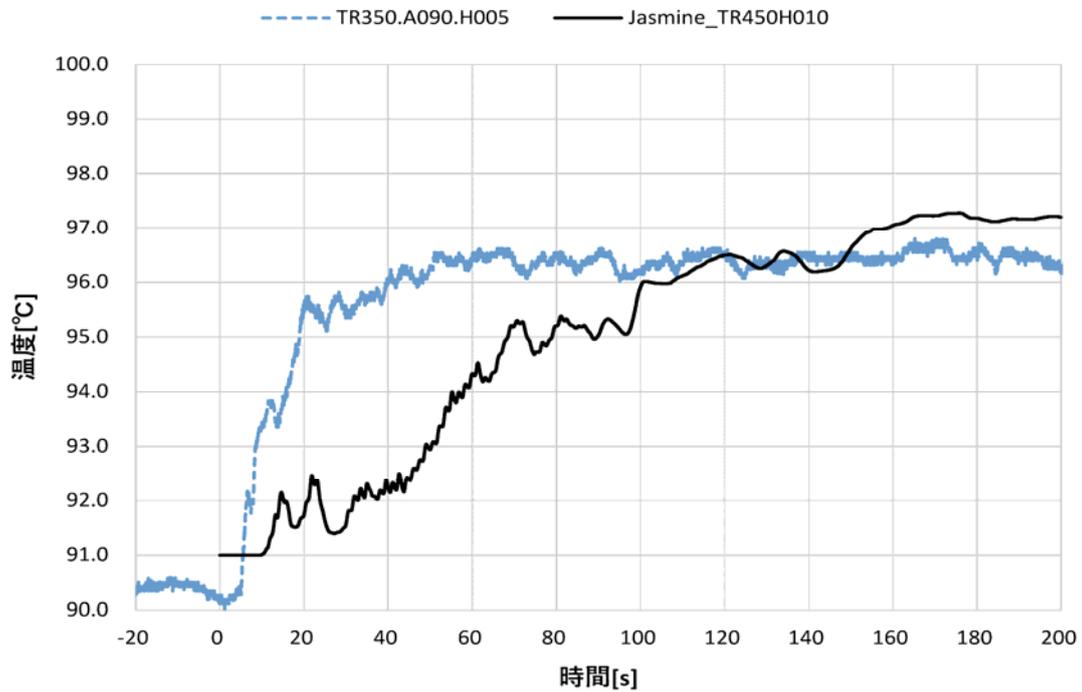


図 B1.8 水中温度の実験値と解析値の比較 (E11、R=440~460 mm H=5~10 mm)

⑤ E12 実験

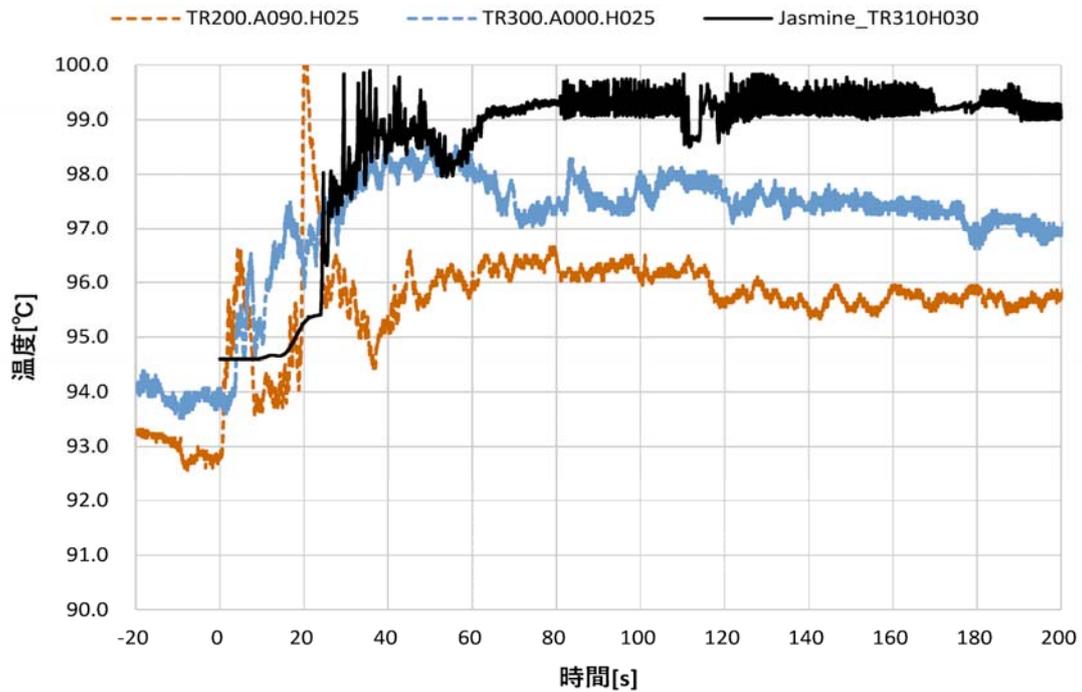


図 B1.9 水中温度の実験値と解析値の比較 (E12、R=300~320 mm H=25~30 mm)

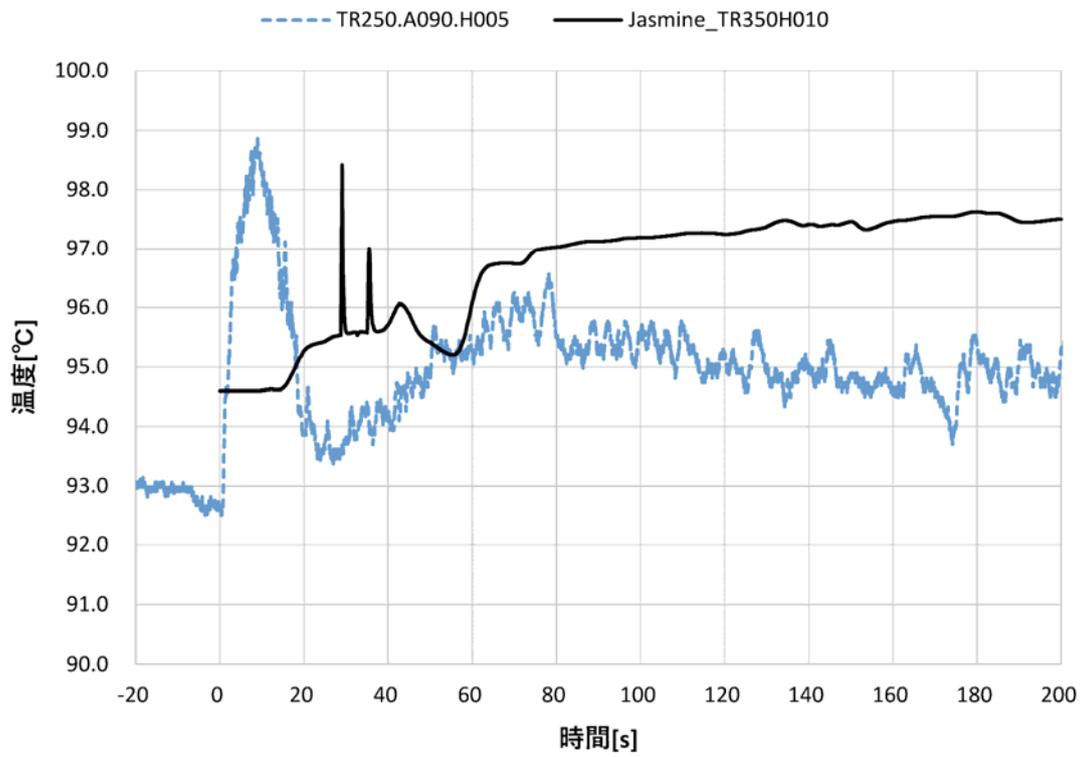


図 B1.10 水中温度の実験値と解析値の比較 (E12、R=340~360 mm H=5~10 mm)

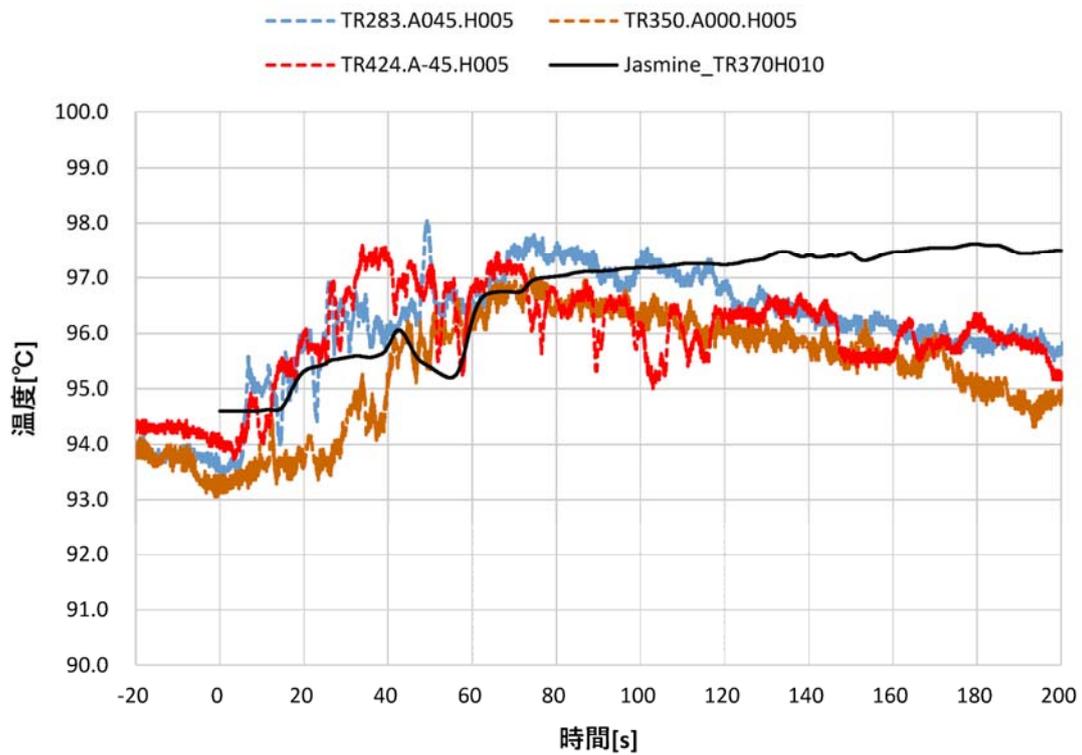


図 B1.11 水中温度の実験値と解析値の比較 (E12、R=360~380 mm H=5~10 mm)

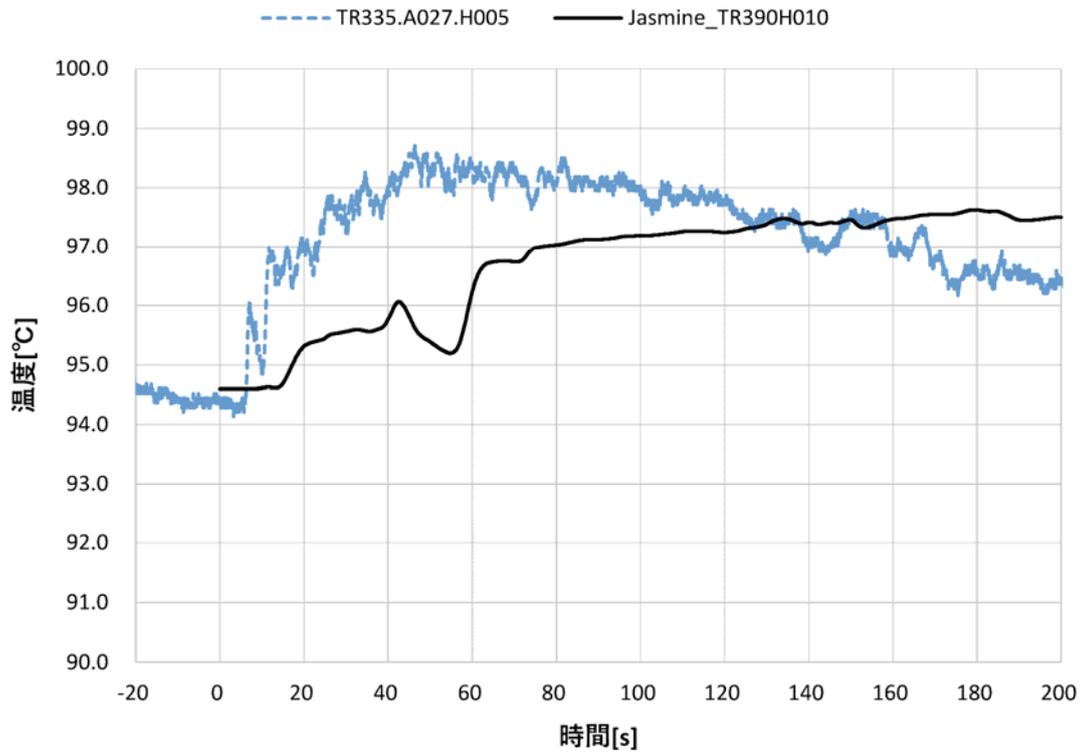


図 B1.12 水中温度の実験値と解析値の比較 (E12、R=380~400 mm H=5~10 mm)

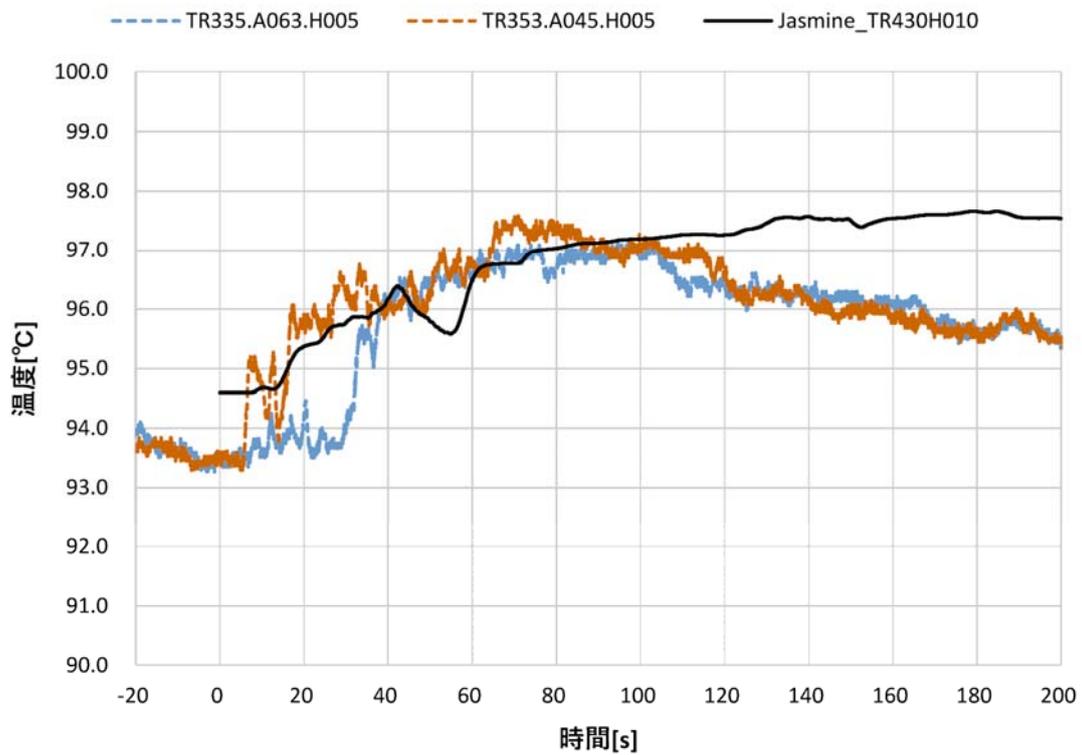


図 B1.13 水中温度の実験値と解析値の比較 (E12、R=420~440 mm H=5~10 mm)

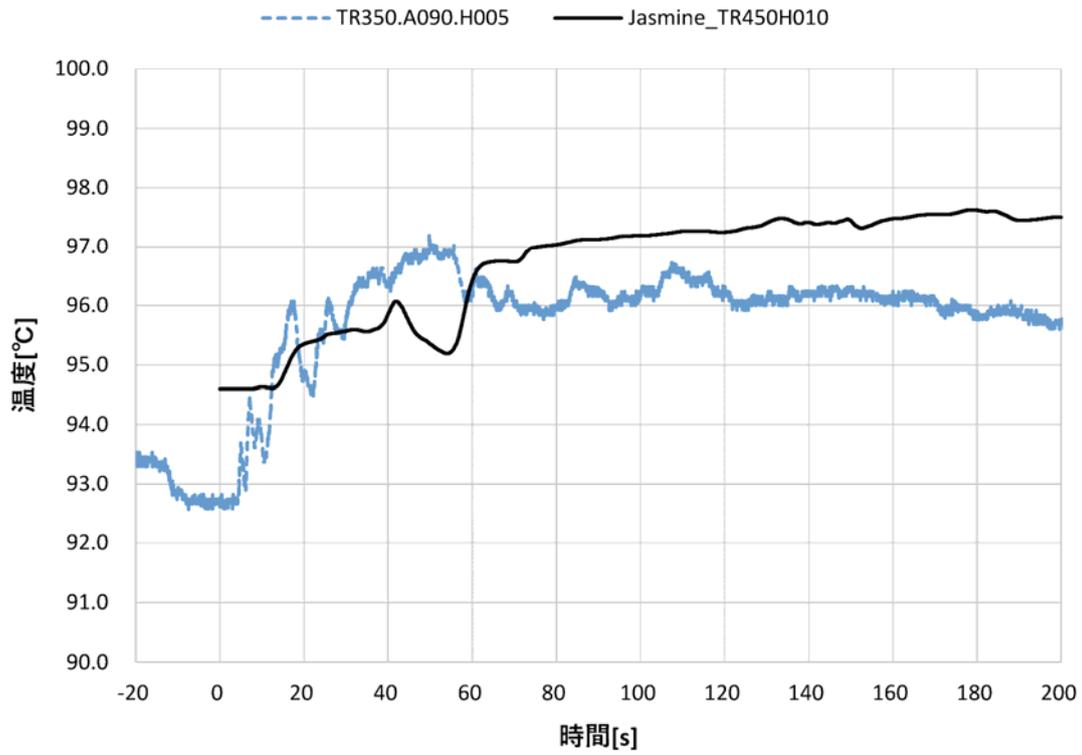


図 B1.14 水中温度の実験値と解析値の比較 (E12、R=440~460 mm H=5~10 mm)

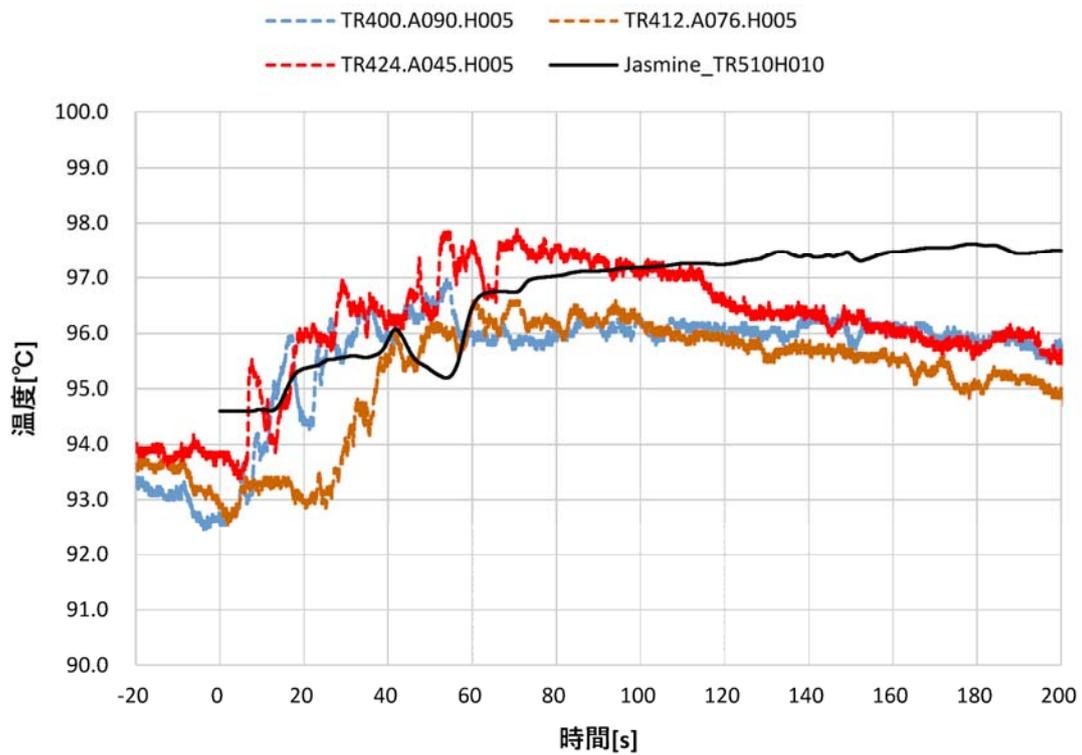


図 B1.15 水中温度の実験値と解析値の比較 (E12、R=500~510 mm H=5~10 mm)

⑥ E13 実験

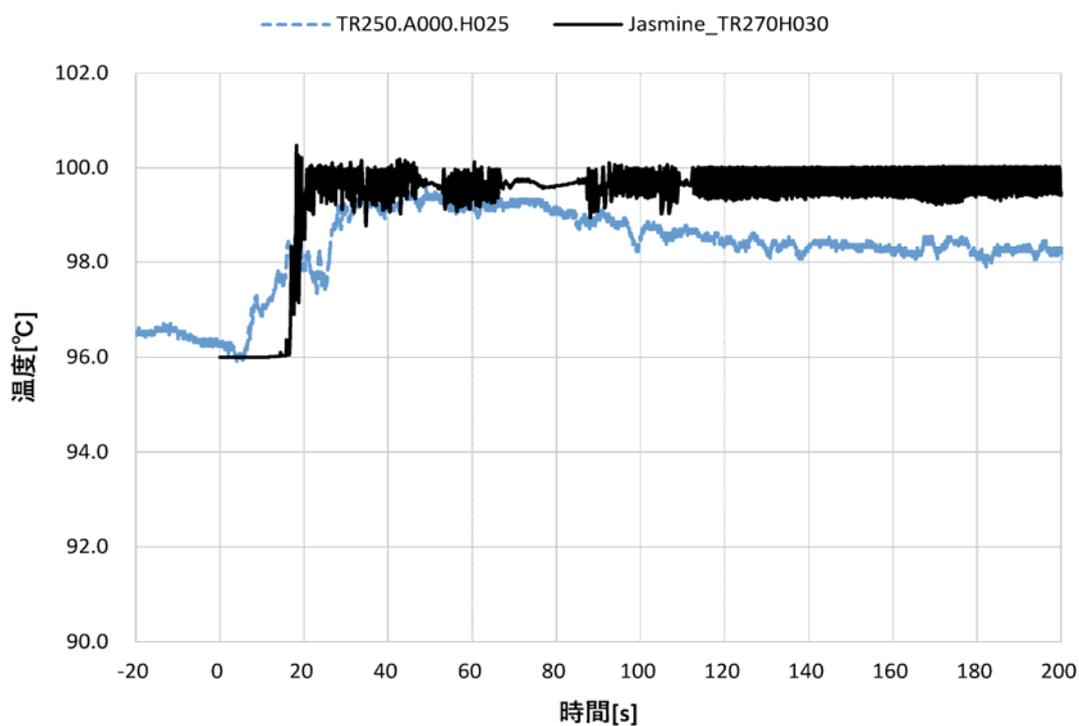


図 B1.16 水中温度の実験値と解析値の比較 (E13、R=260~280 mm H=25~30 mm)

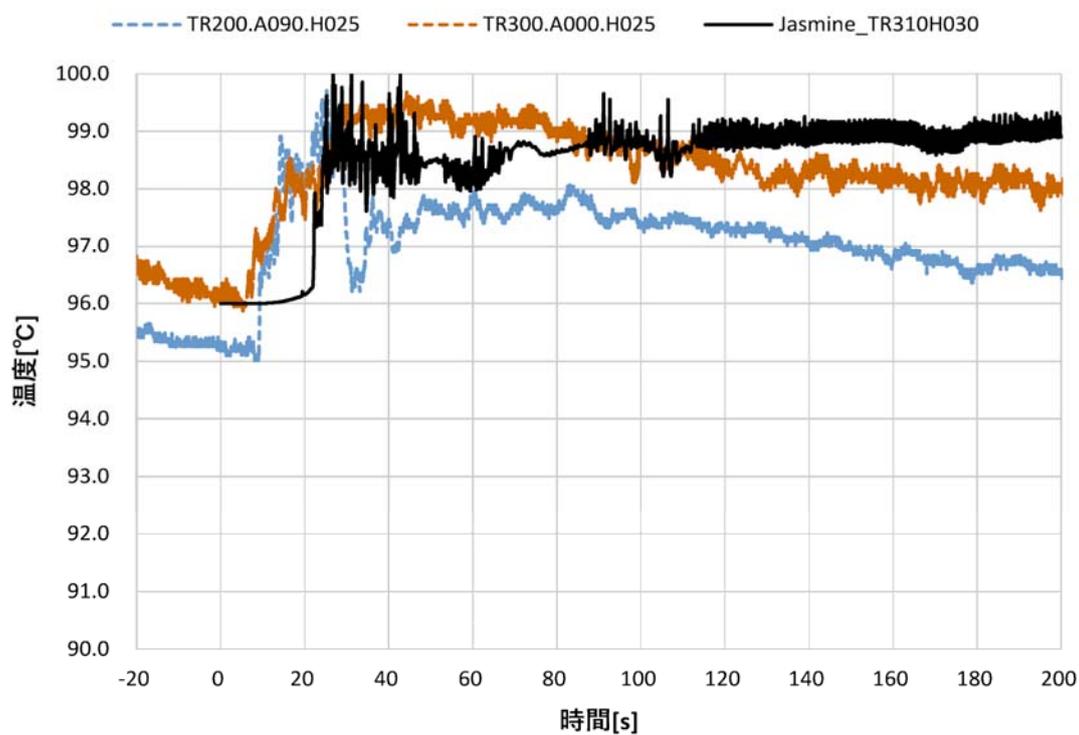


図 B1.17 水中温度の実験値と解析値の比較 (E13、R=300~320 mm H=25~30 mm)

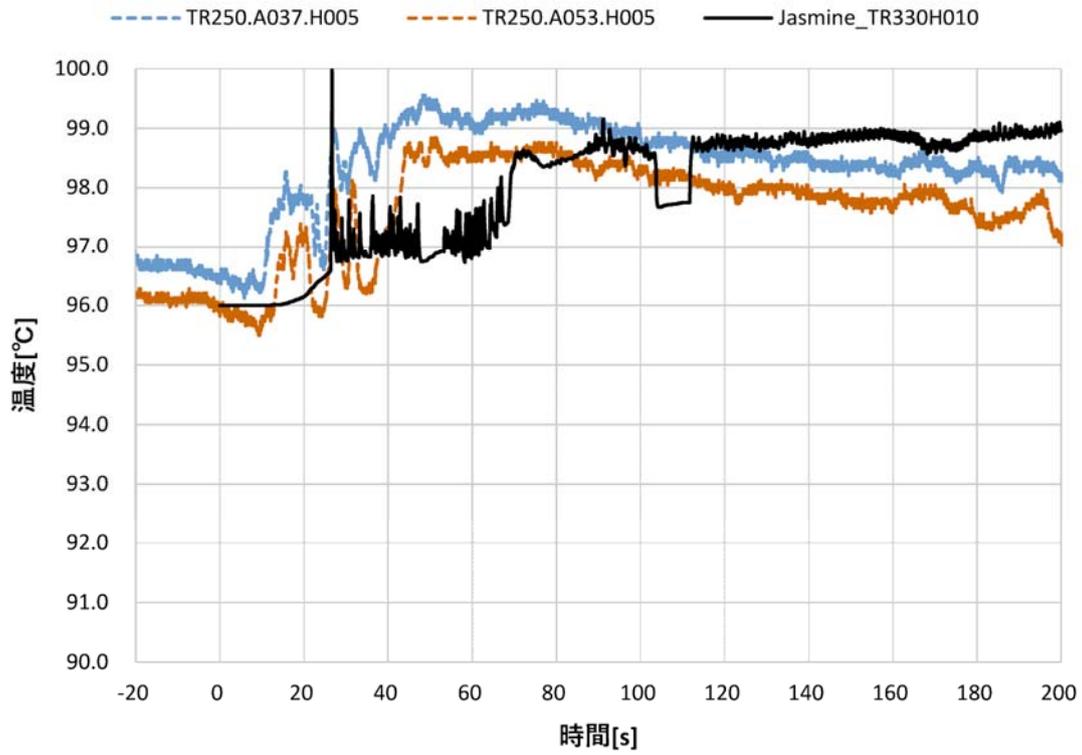


図 B1.18 水中温度の実験値と解析値の比較 (E13、R=310~340 mm H=5~10 mm)

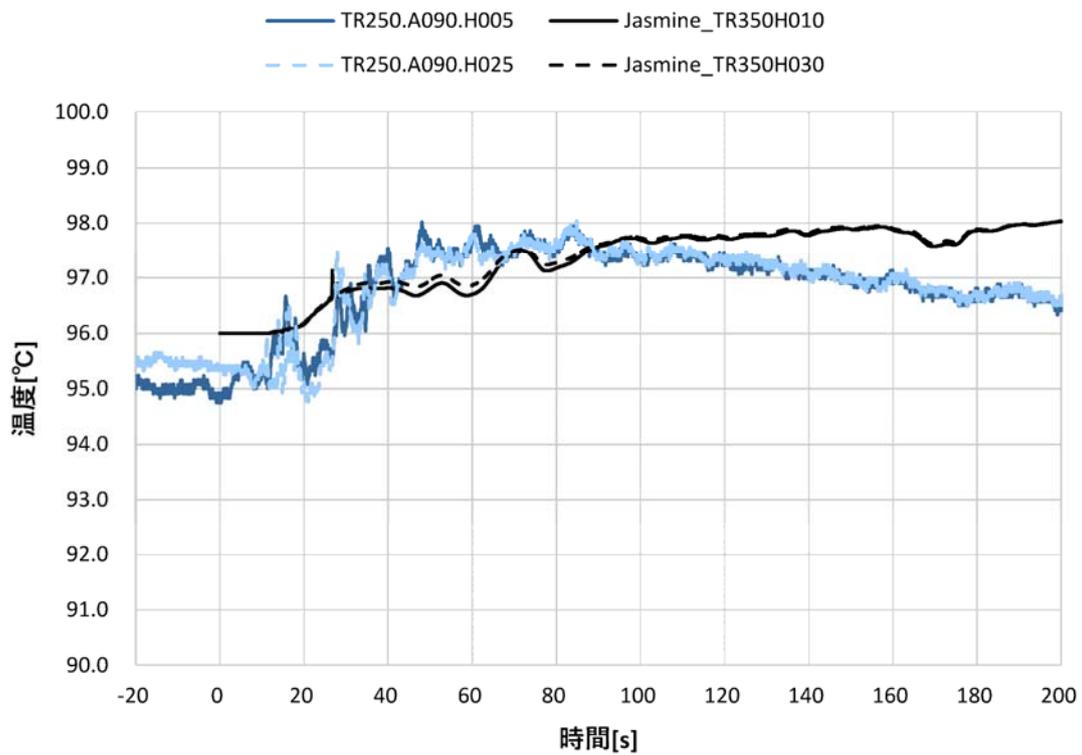


図 B1.19 水中温度の実験値と解析値の比較 (E13、R=340~360 mm H=5~30 mm)

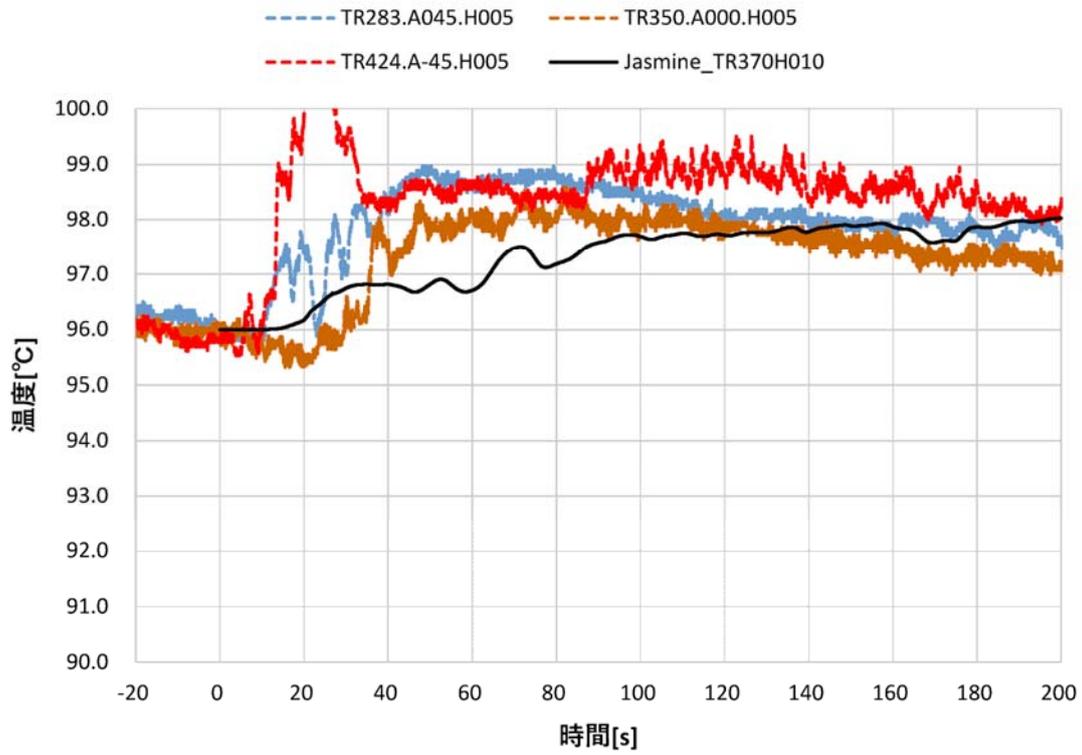


図 B1.20 水中温度の実験値と解析値の比較 (E13、R=360~380 mm H=5~10 mm)

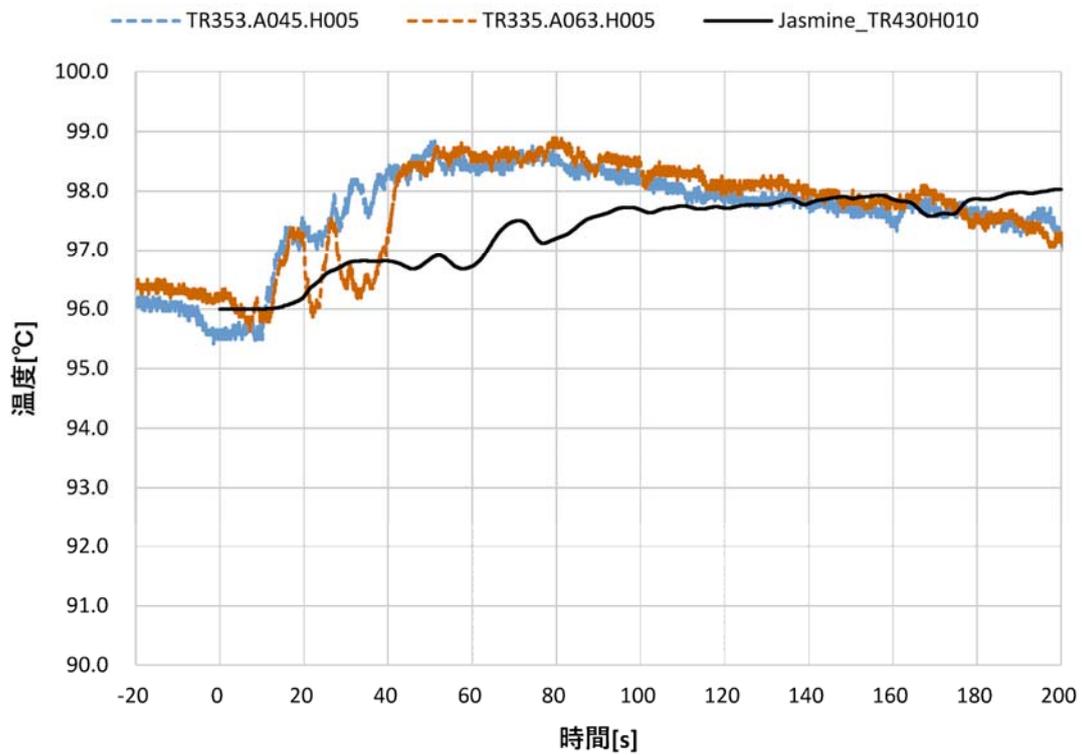


図 B1.21 水中温度の実験値と解析値の比較 (E13、R=420~440 mm H=5~10 mm)

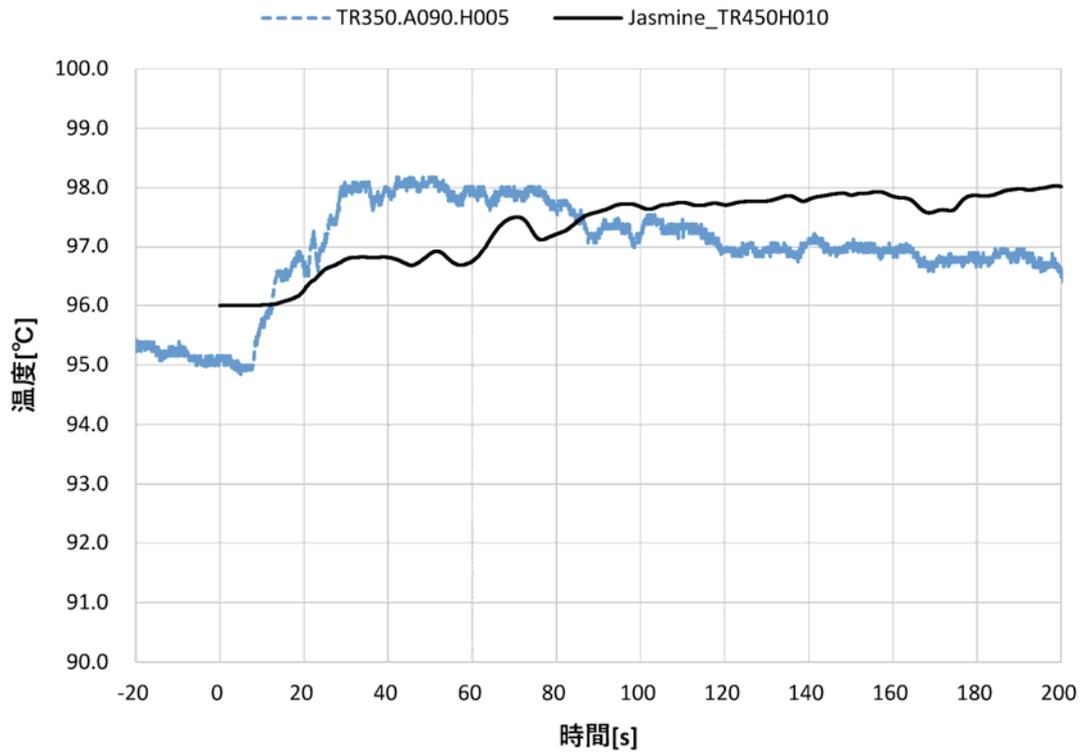


図 B1.22 水中温度の実験値と解析値の比較 (E13、R=440～460 mm H=5～10 mm)

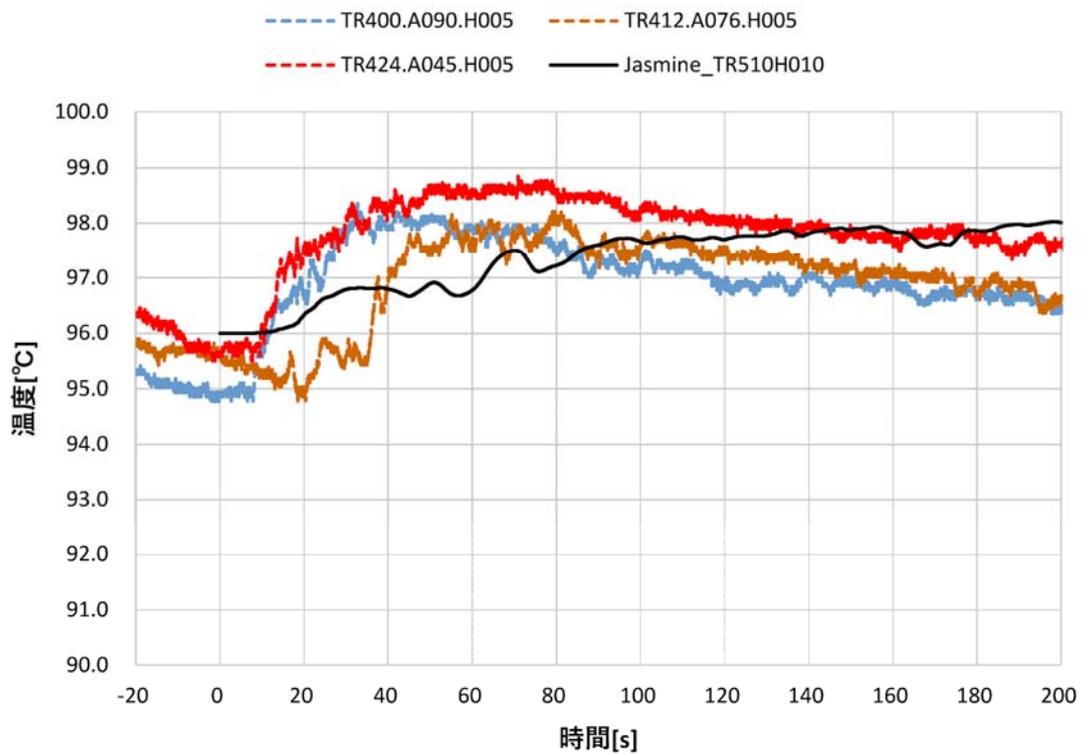


図 B1.23 水中温度の実験値と解析値の比較 (E13、R=500～520 mm H=5～10 mm)

⑦ E14 実験

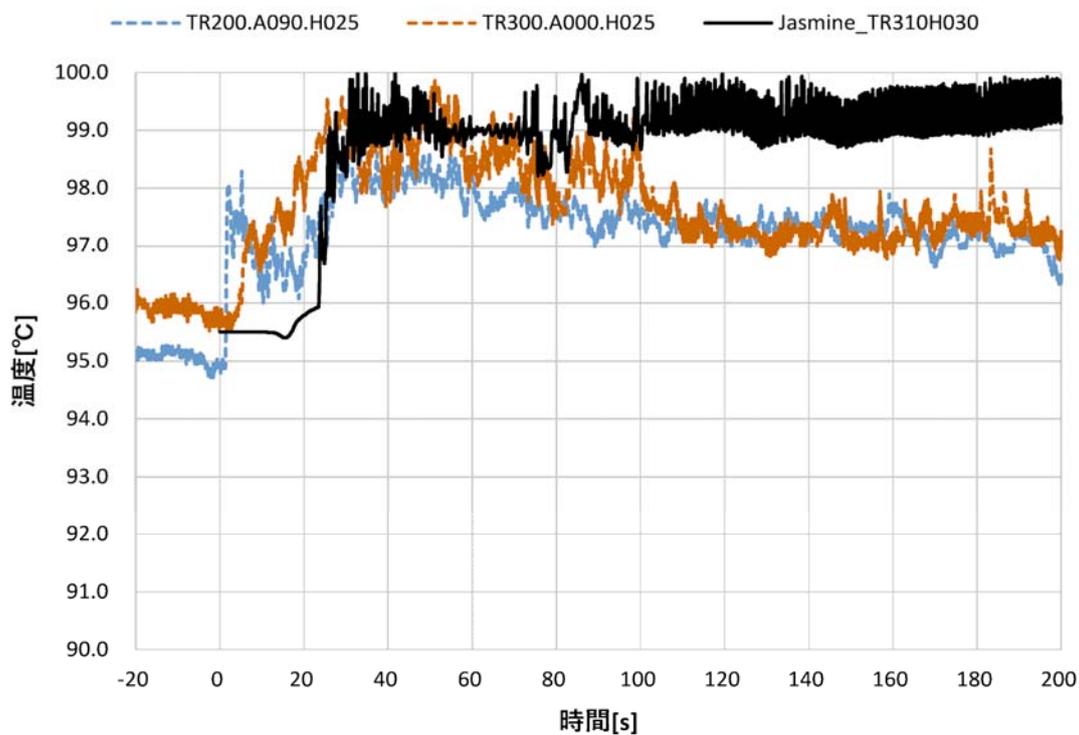


図 B1.24 水中温度の実験値と解析値の比較 (E14, R=300~320 mm H=25~30 mm)

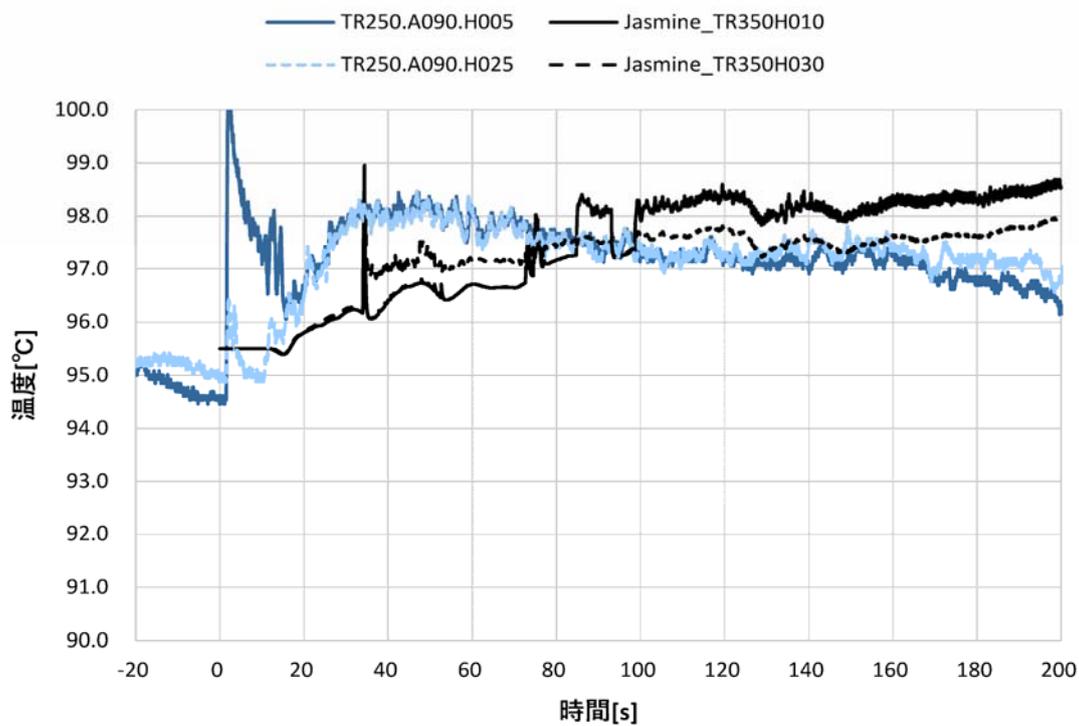


図 B1.25 水中温度の実験値と解析値の比較 (E14, R=340~360 mm H=5~30 mm)

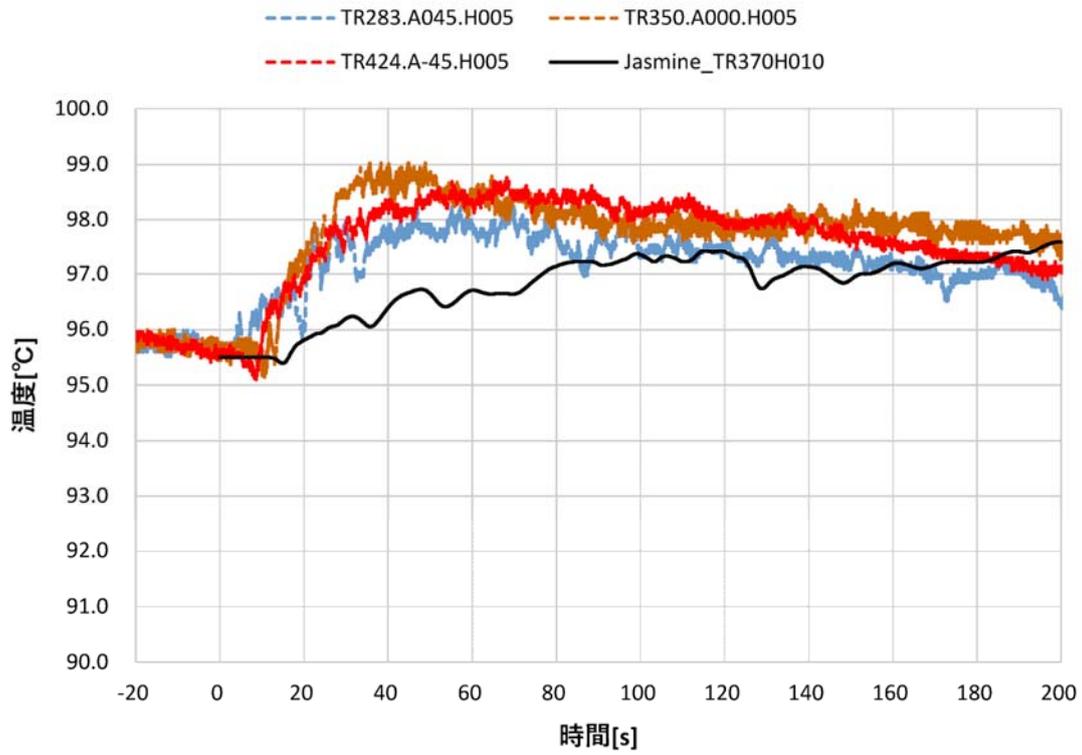


図 B1.26 水中温度の実験値と解析値の比較 (E14、R=360~380 mm H=5~10 mm)

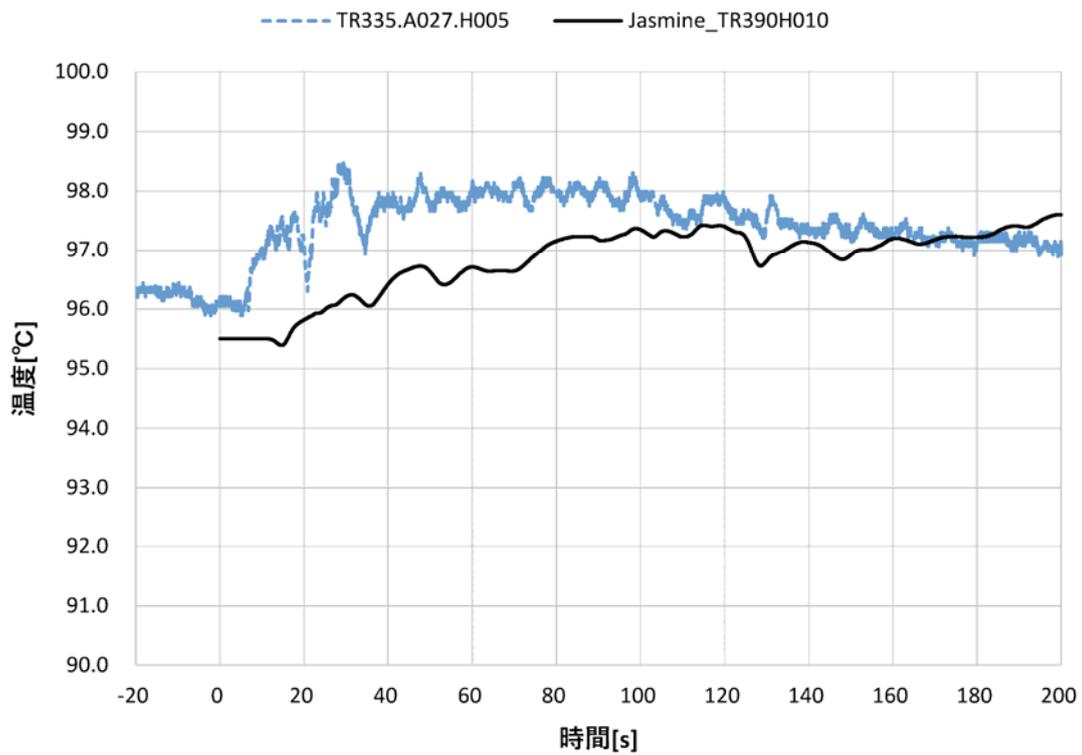


図 B1.27 水中温度の実験値と解析値の比較 (E14、R=380~400 mm H=5~10 mm)

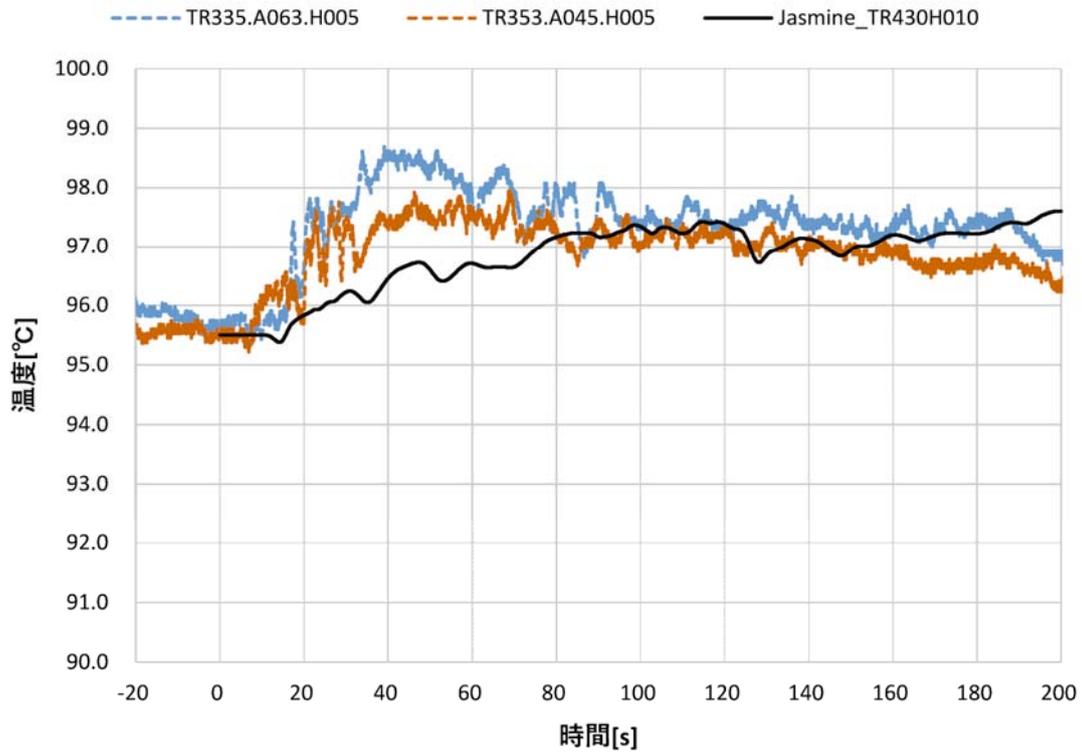


図 B1.28 水中温度の実験値と解析値の比較 (E14、R=420~440 mm H=5~10 mm)

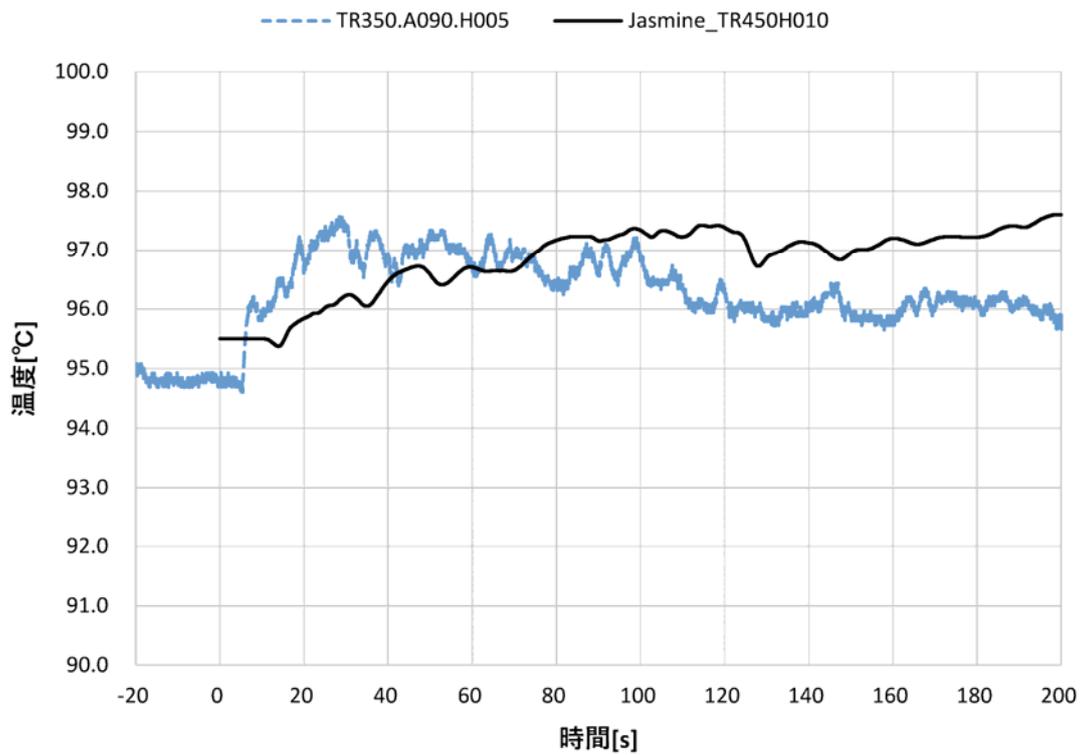


図 B1.29 水中温度の実験値と解析値の比較 (E14、R=440~460 mm H=5~10 mm)

⑧ E15 実験

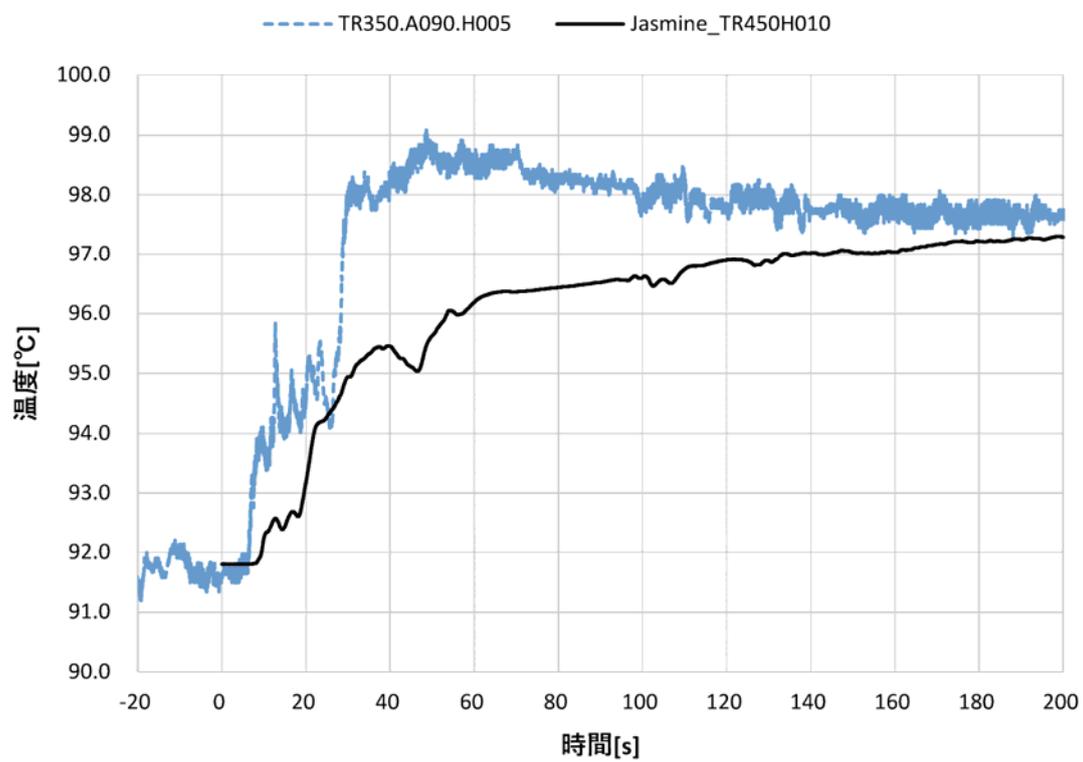


図 B1.30 水中温度の実験値と解析値の比較 (E15、R=440~460 mm H=5~10 mm)

B.2 全体の分布を示す図

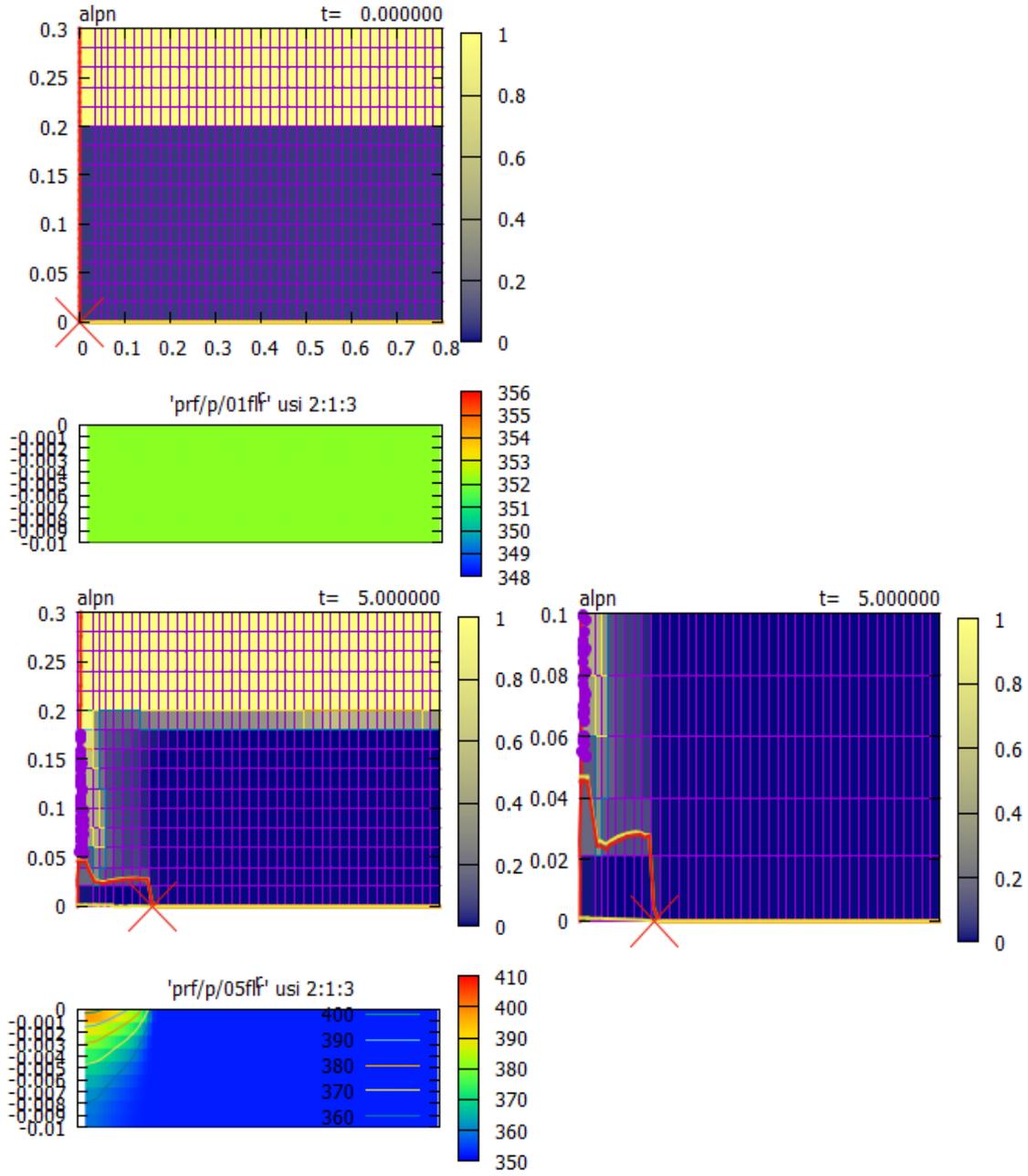


図 B2.1 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E1 : 0.0~5.0 秒)

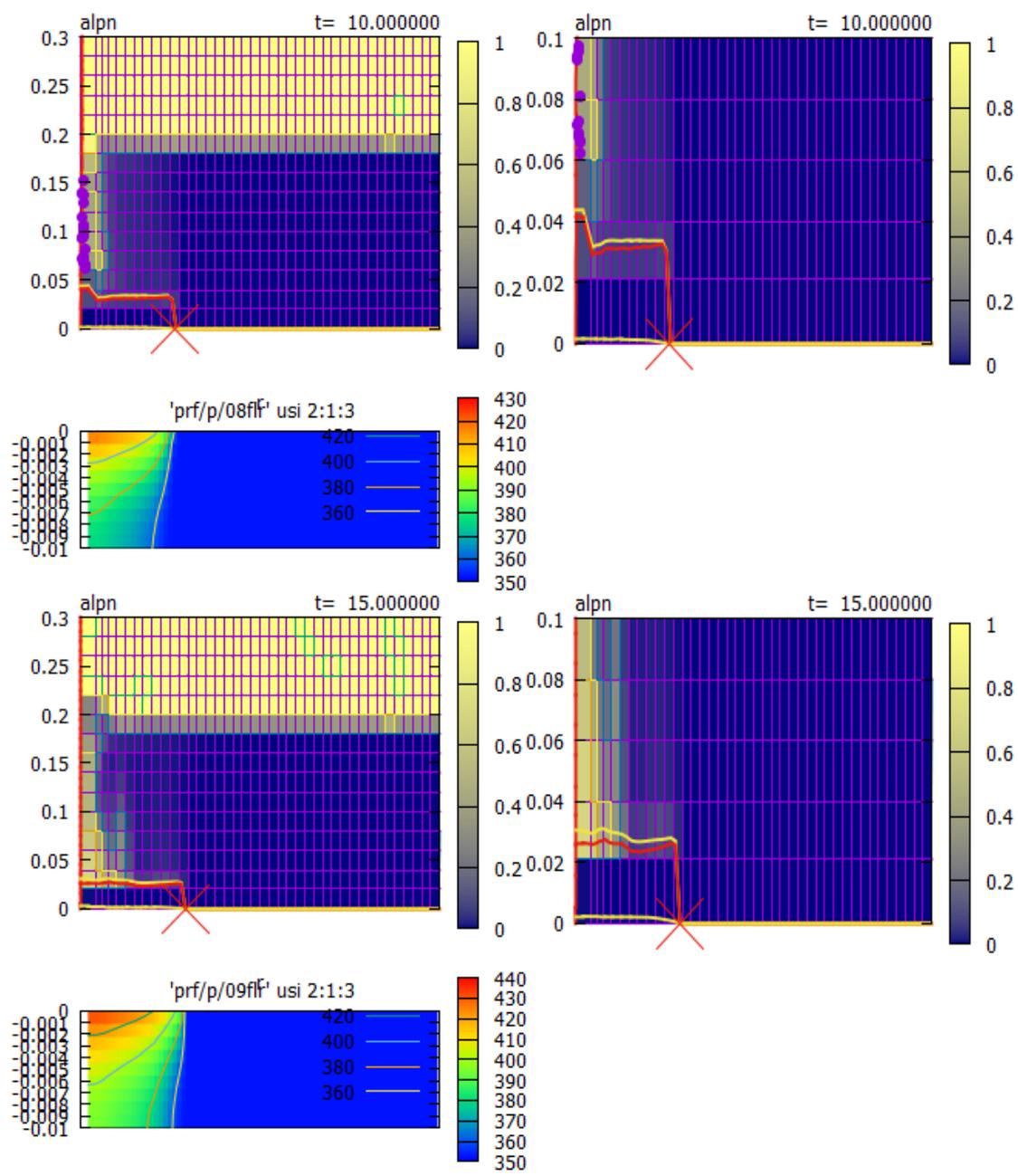


図 B2.2 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E1 : 10.0~15.0 秒)

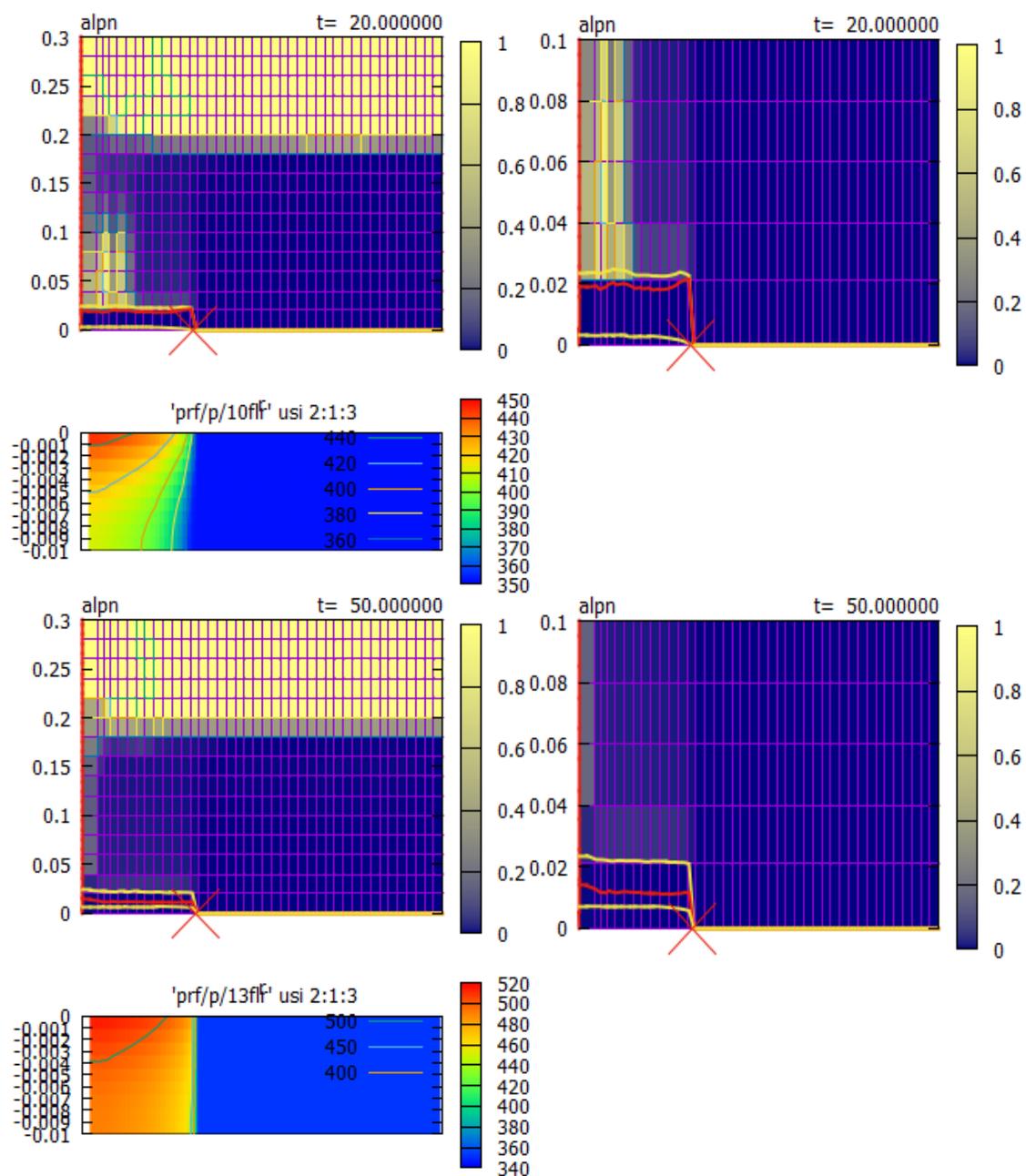


図 B2.3 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E1 : 20.0~50.0 秒)

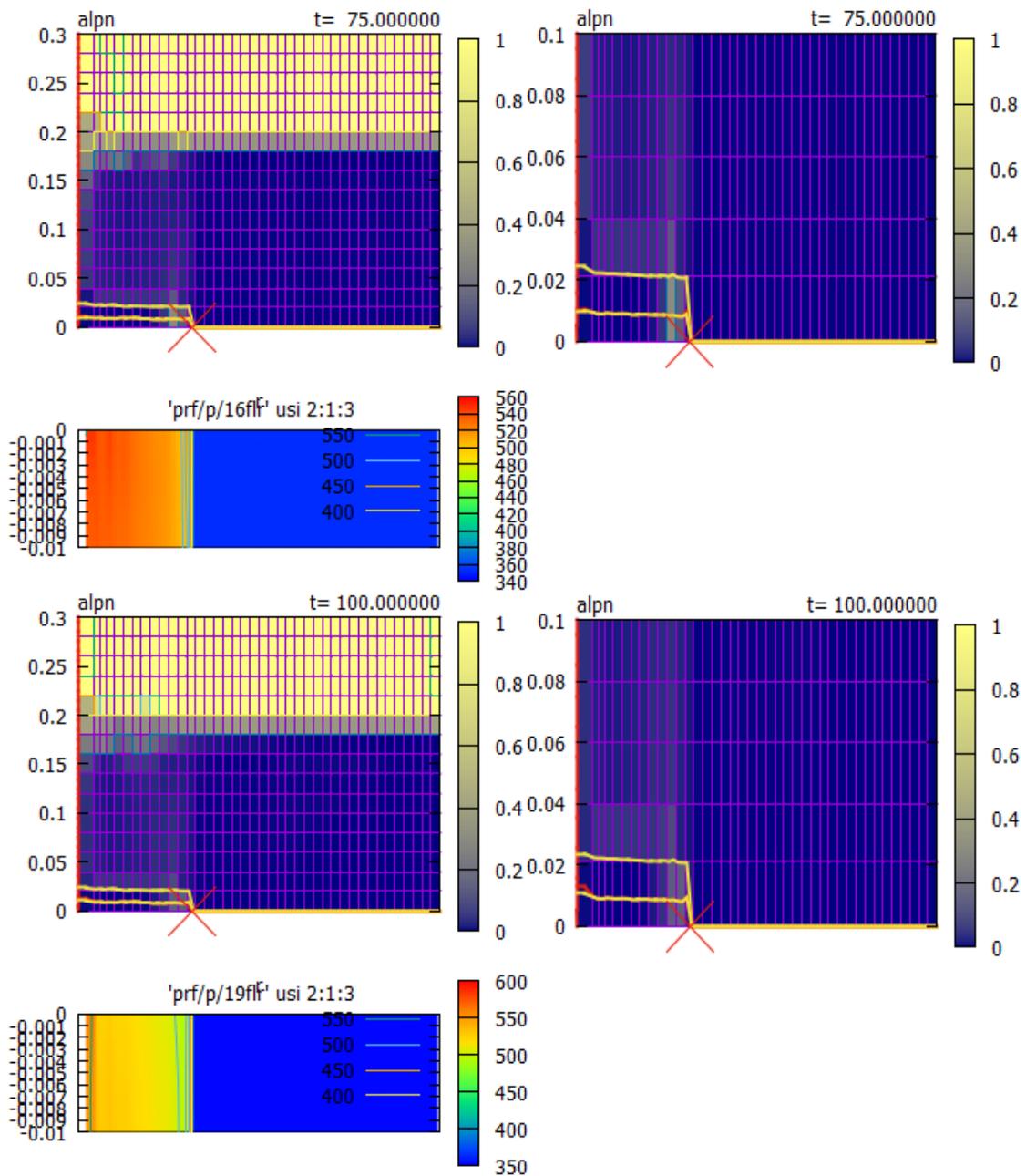


図 B2.4 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E1 : 75.0~100.0 秒)

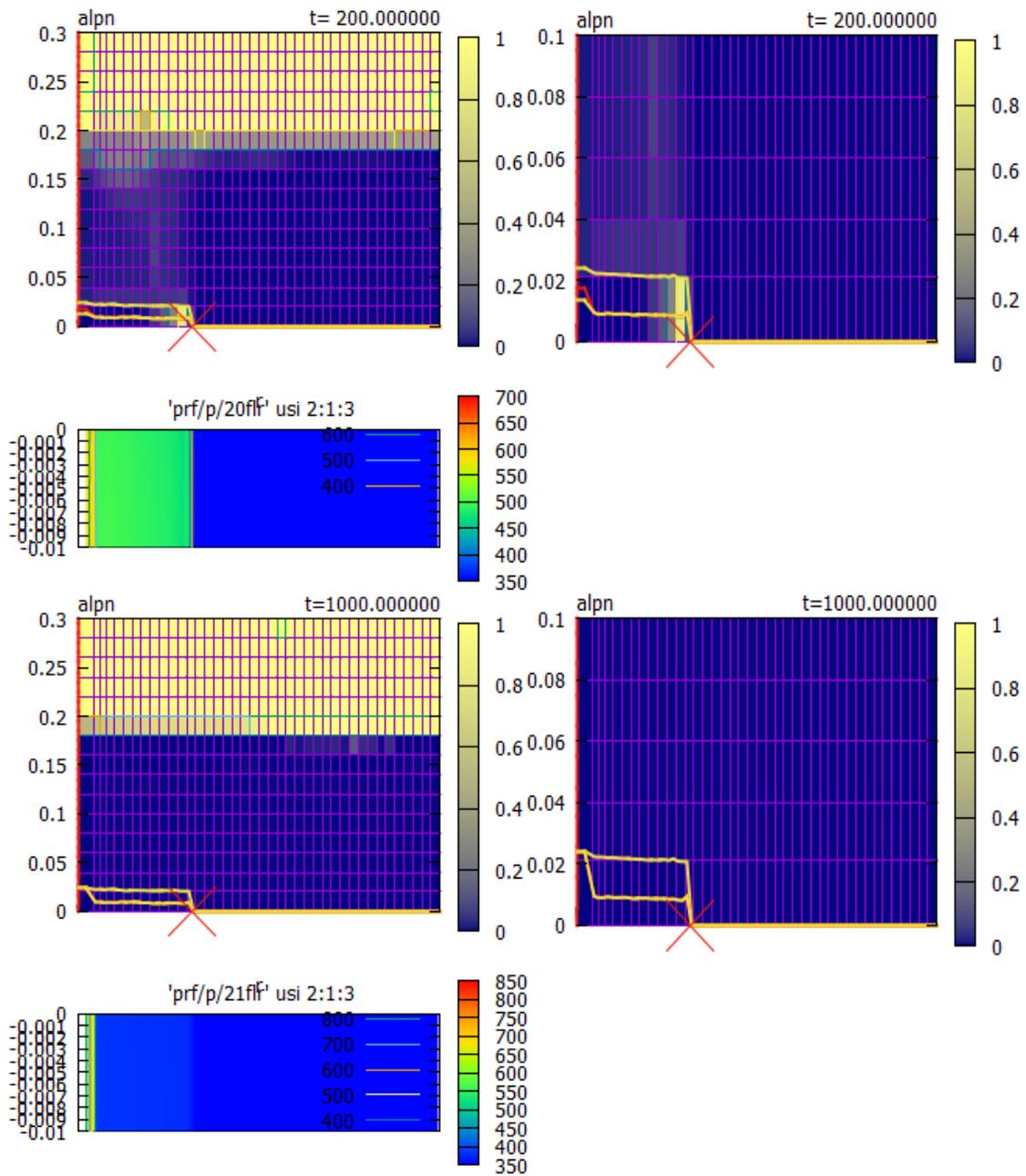


図 B2.5 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E1 : 200.0~1000.0 秒)

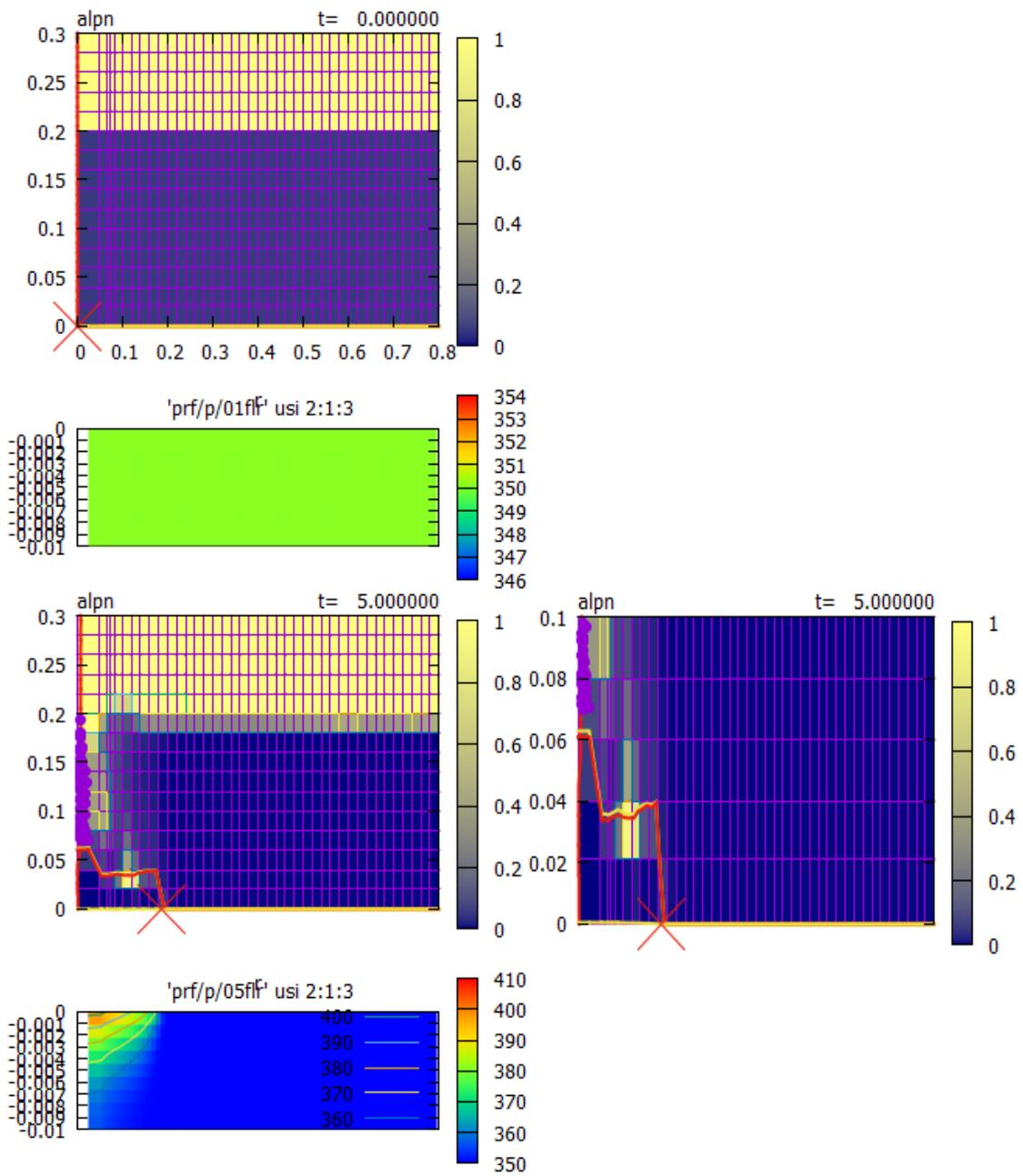


図 B2.6 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E4 : 0.0~5.0 秒)

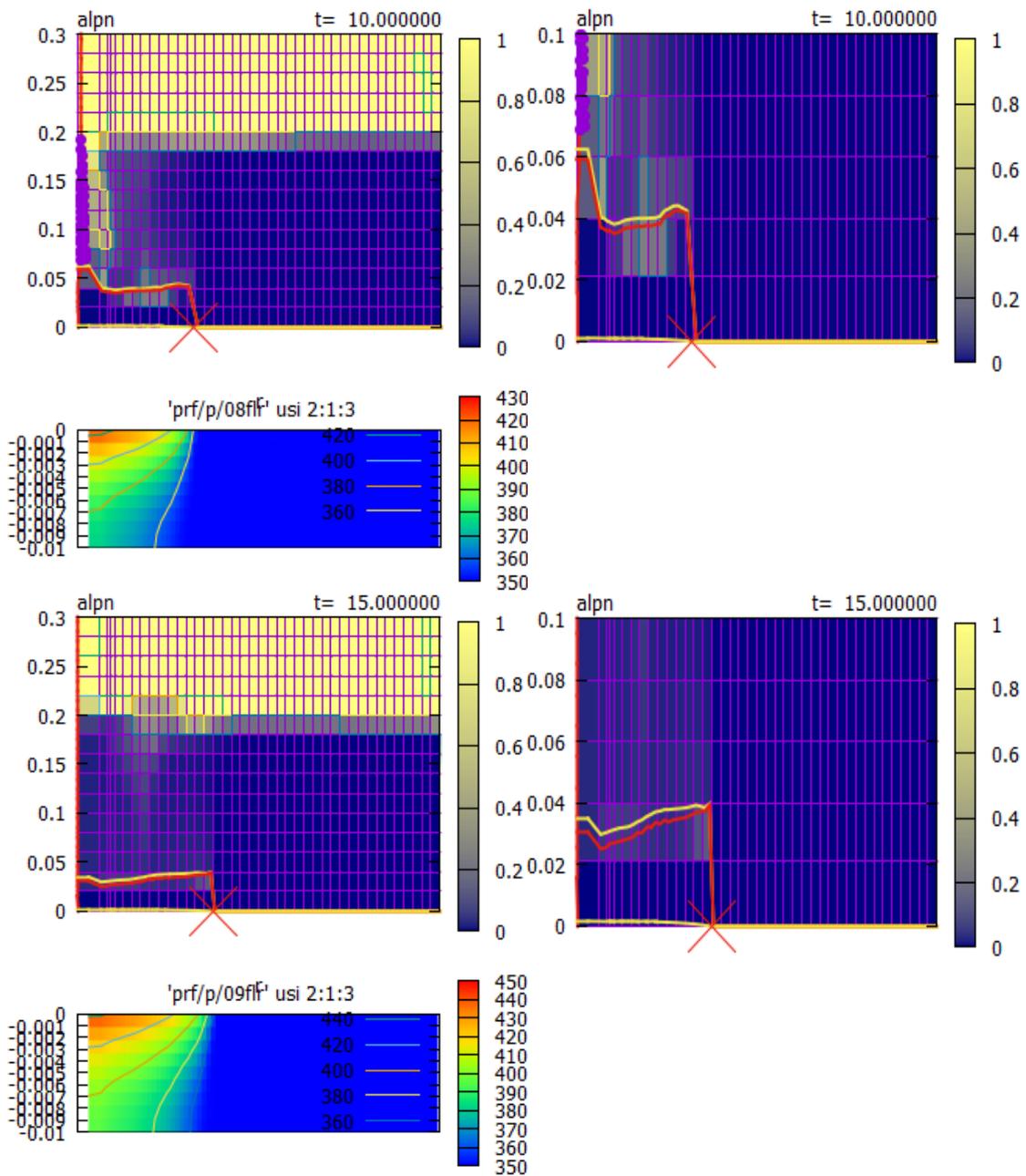


図 B2.7 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E4 : 10.0~15.0 秒)

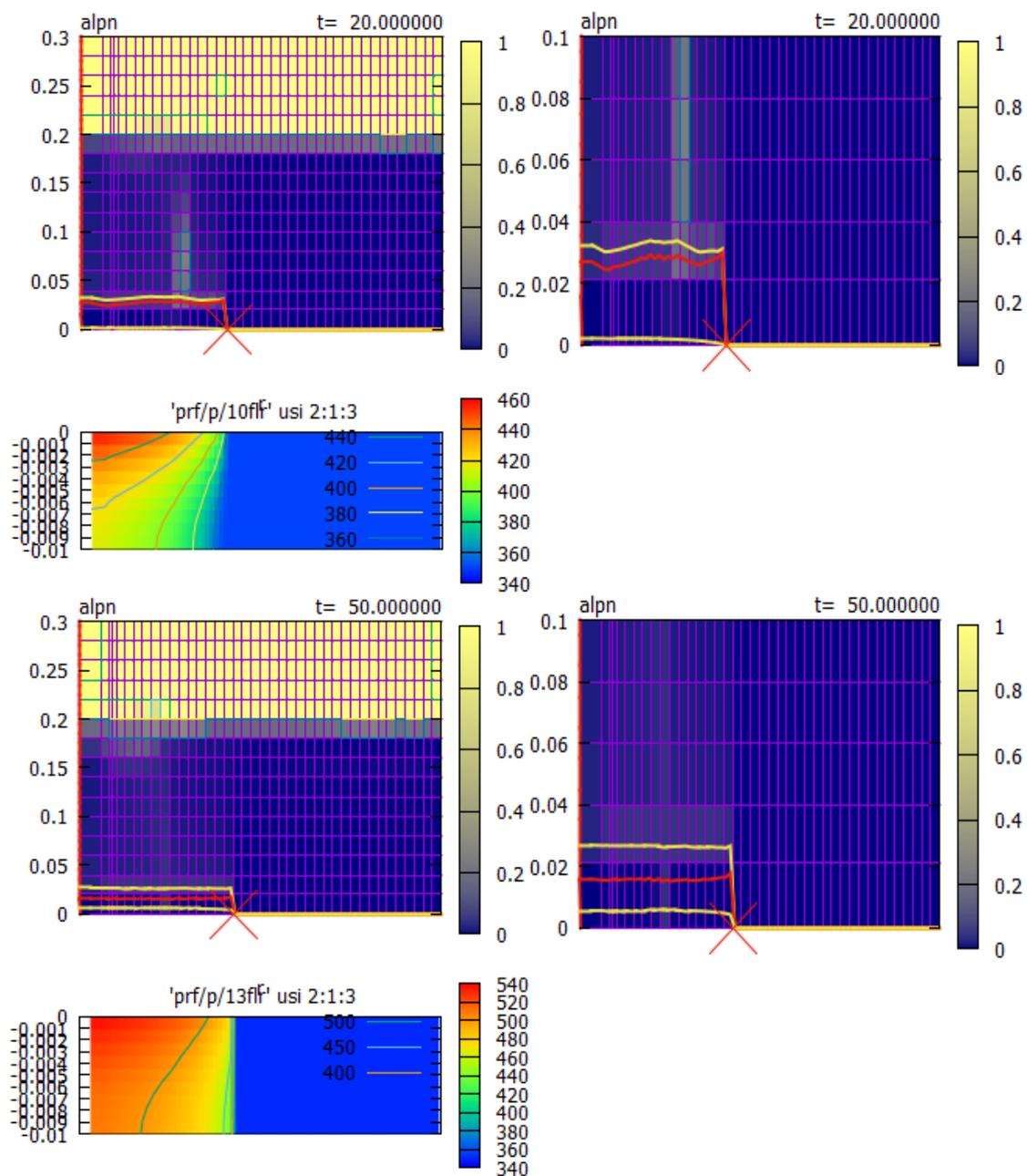


図 B2.8 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E4 : 20.0~50.0 秒)

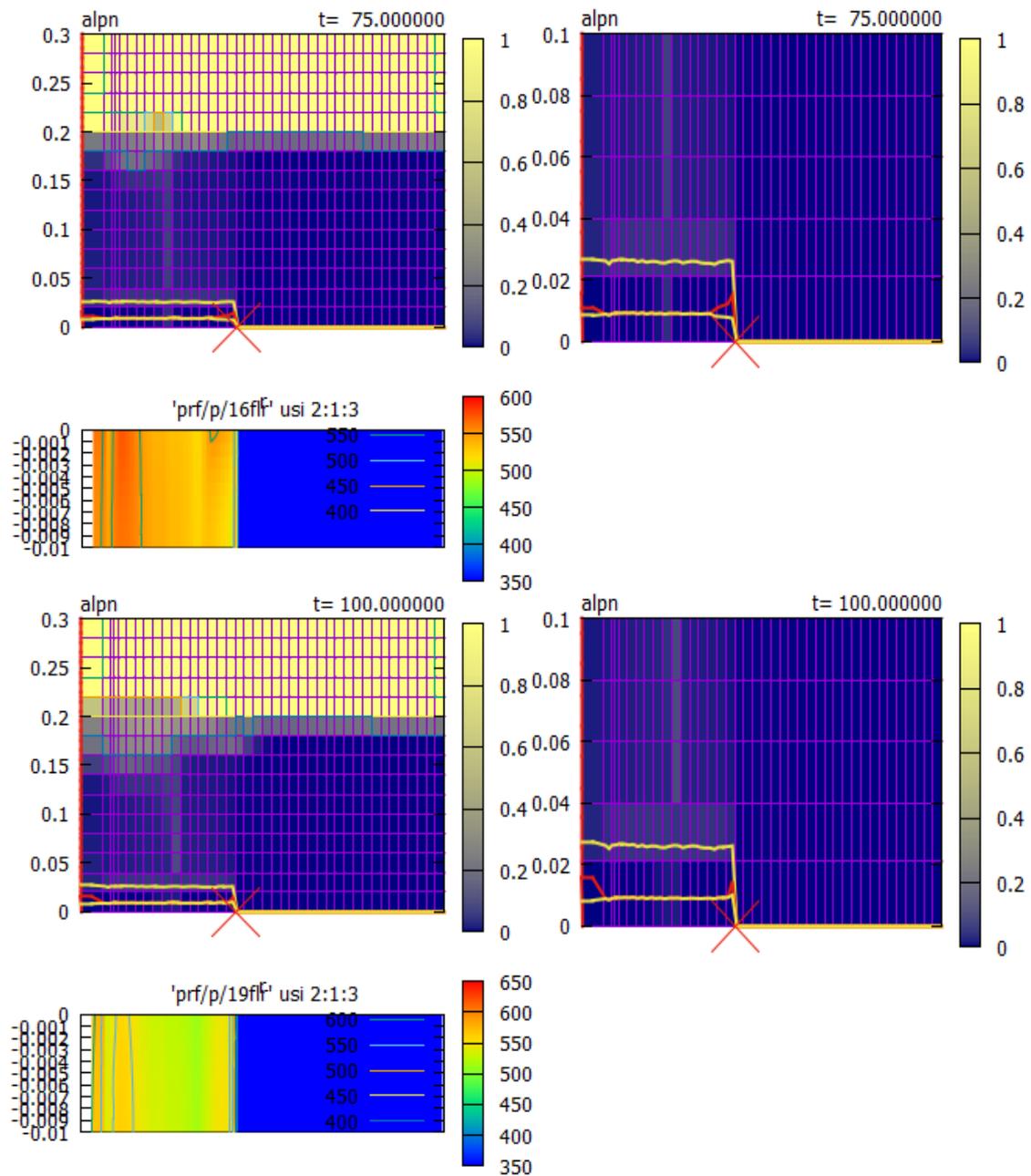


図 B2.9 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E4 : 75.0~100.0 秒)

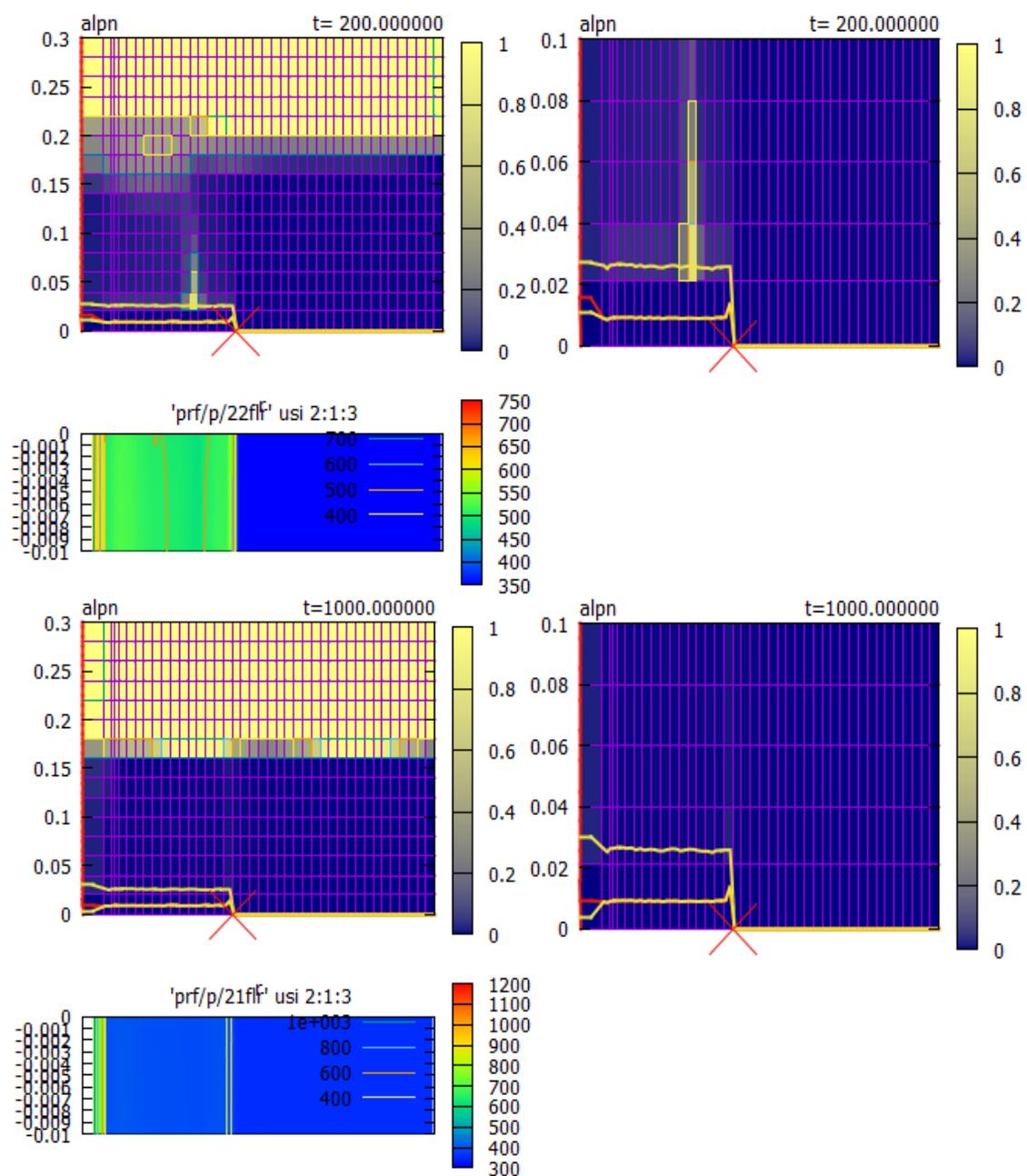


図 B2.10 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E4 : 200.0~1000.0 秒)

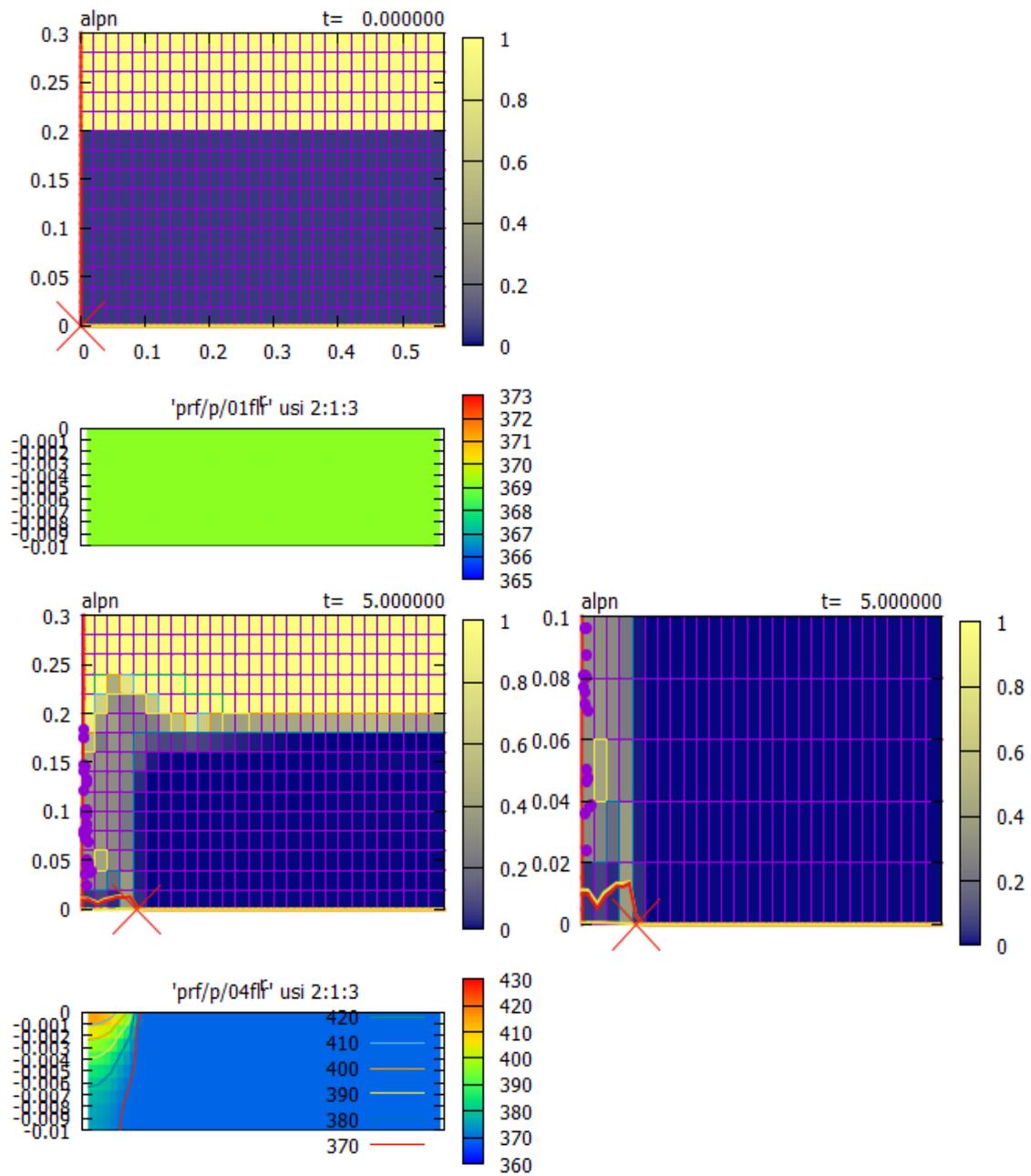


図 B2.11 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E8 : 0.0~5.0 秒)

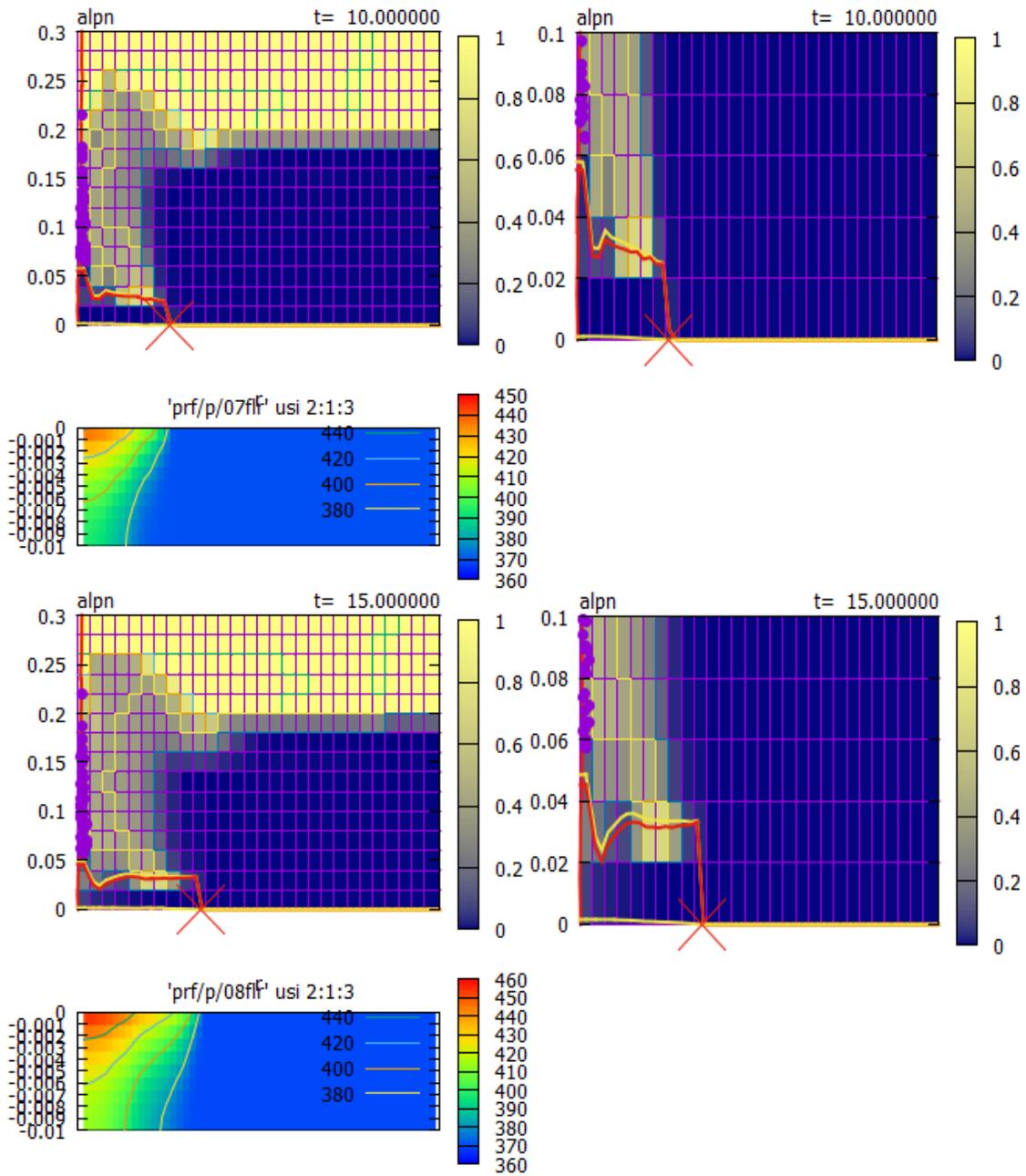


図 B2.12 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E8 : 10.0~15.0 秒)

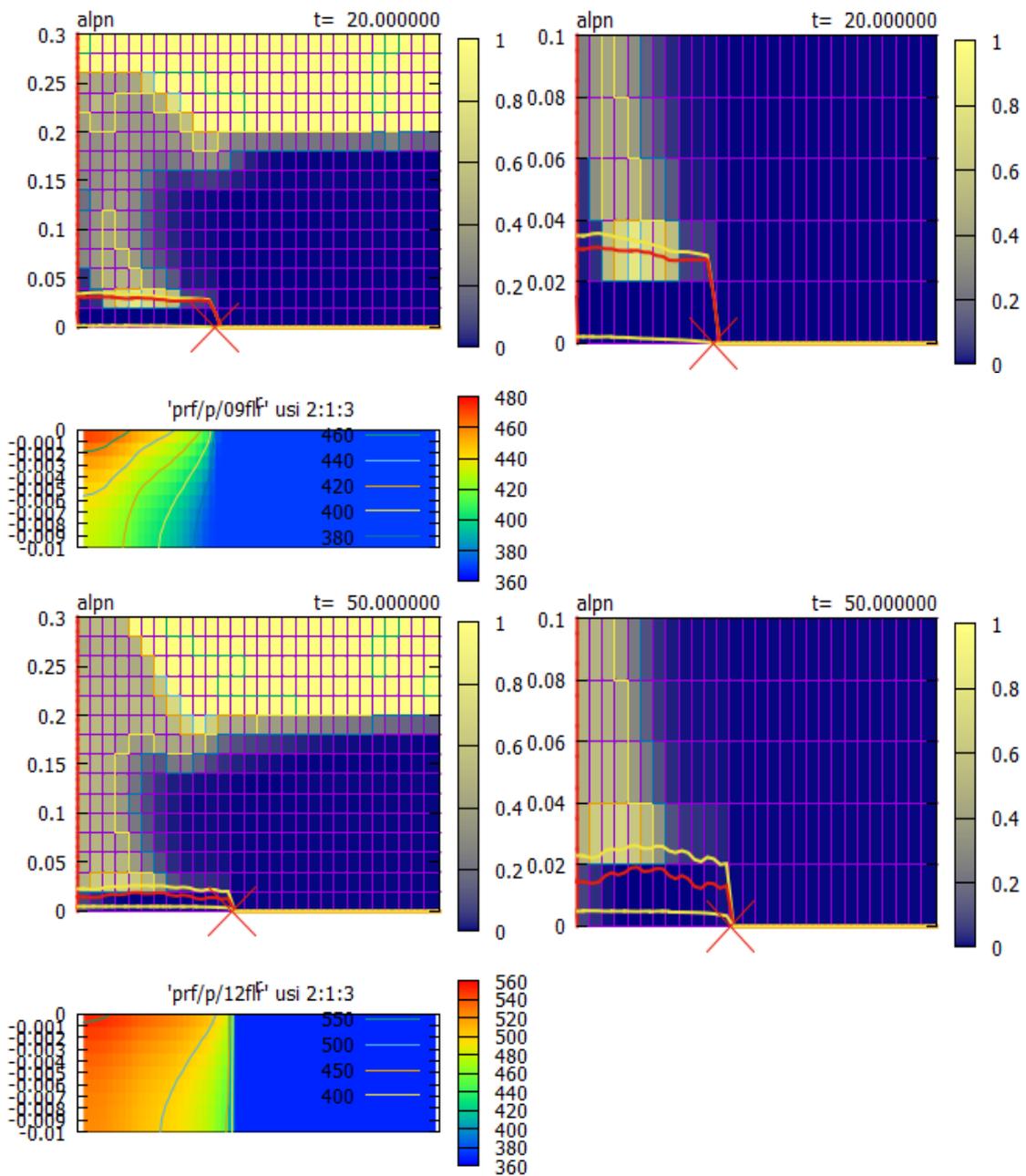


図 B2.13 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E8 : 20.0~50.0 秒)

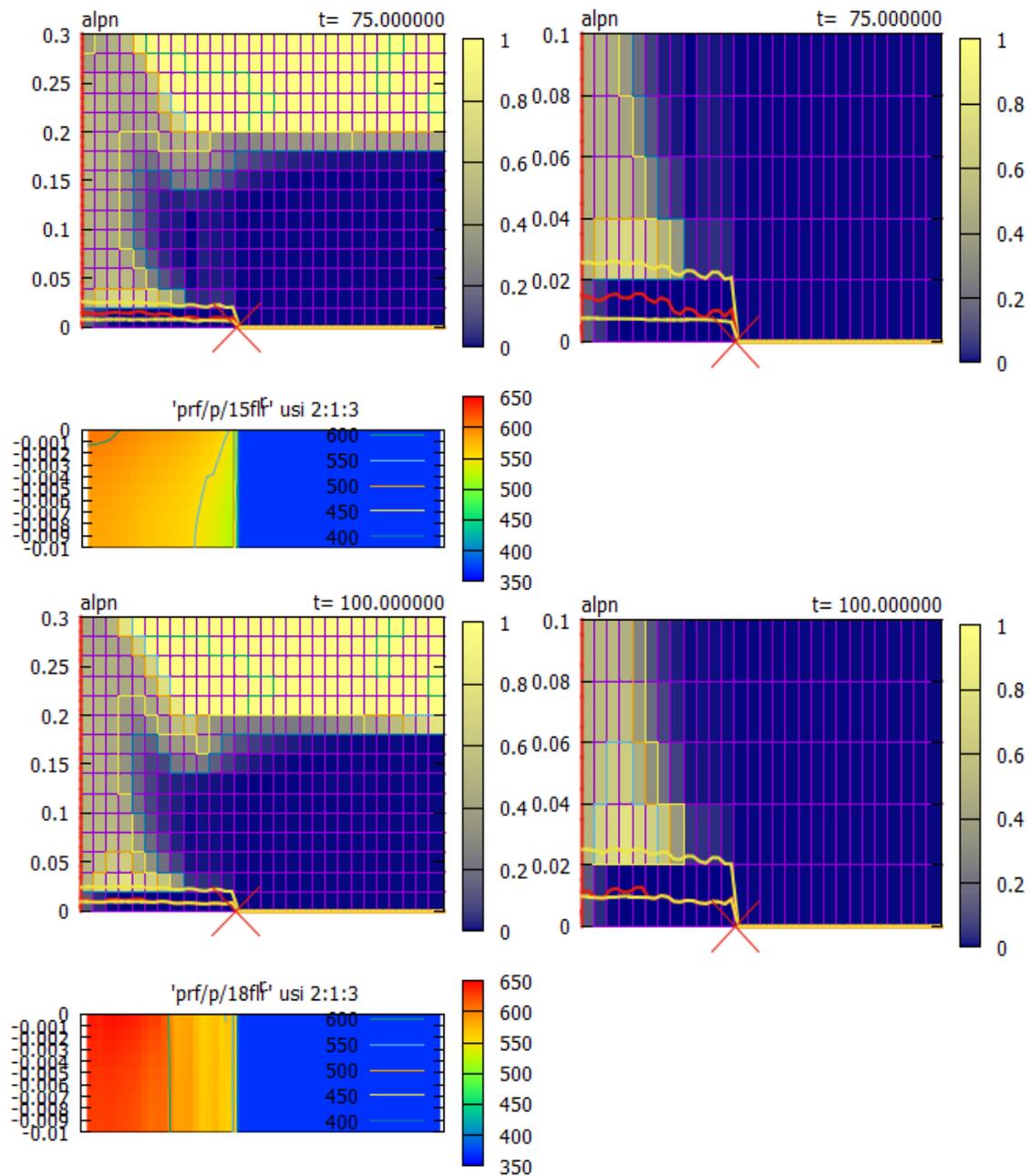


図 B2.14 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E8 : 75.0~100.0 秒)

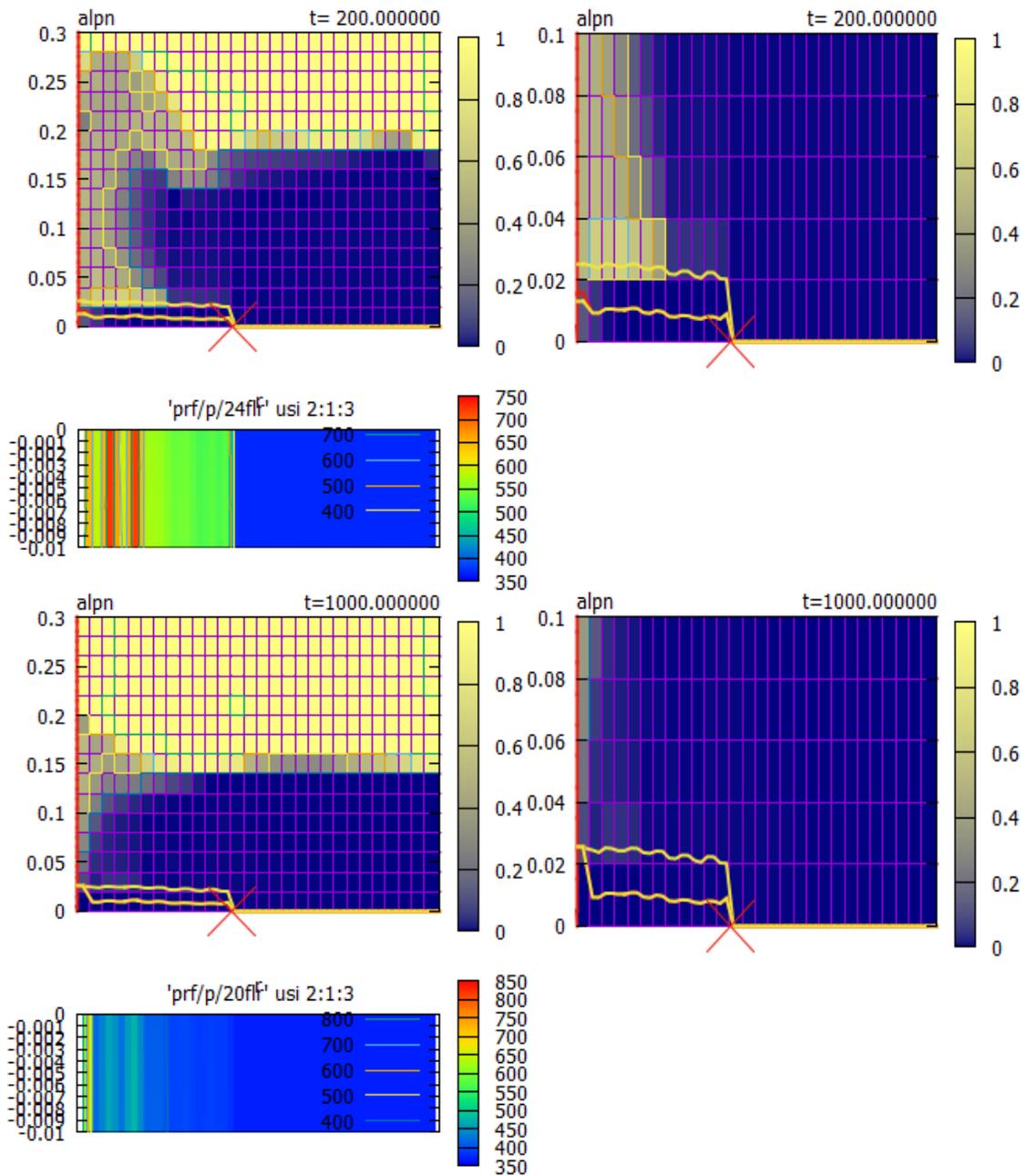


図 B2.15 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E8 : 200.0~1000.0 秒)

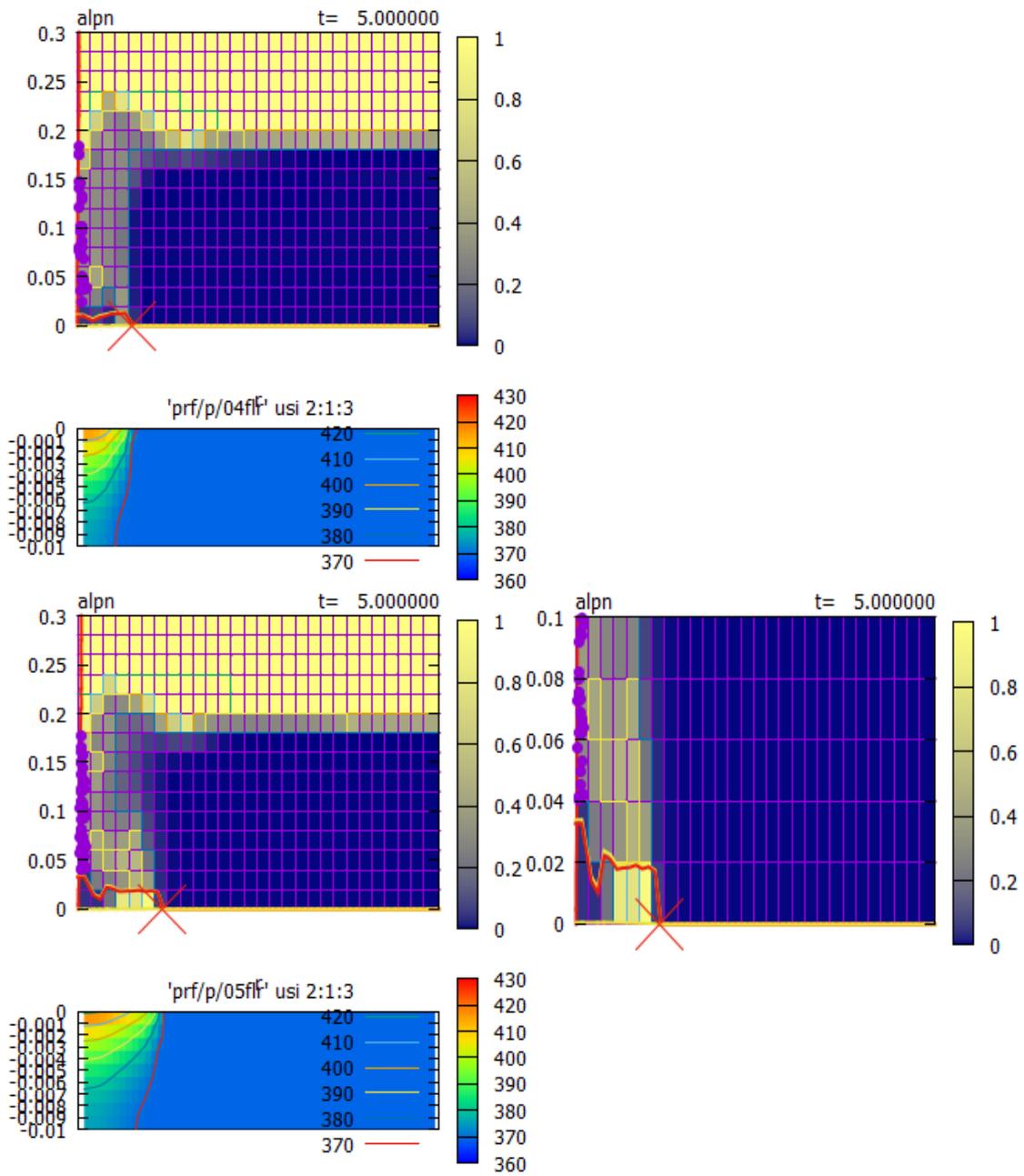


図 B2.16 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E9 : 0.0~5.0 秒)

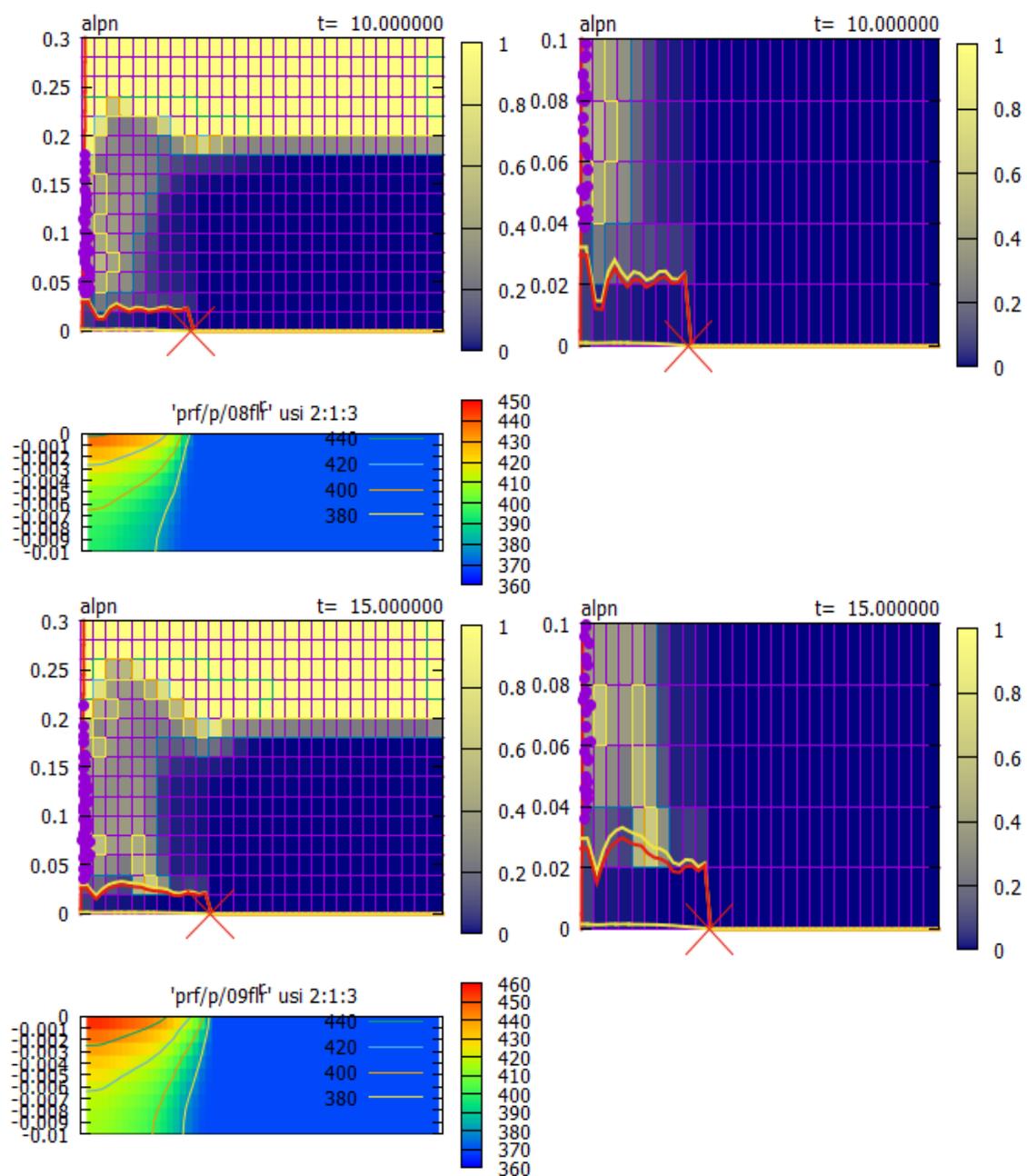


図 B2.17 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E9 : 10.0~15.0 秒)

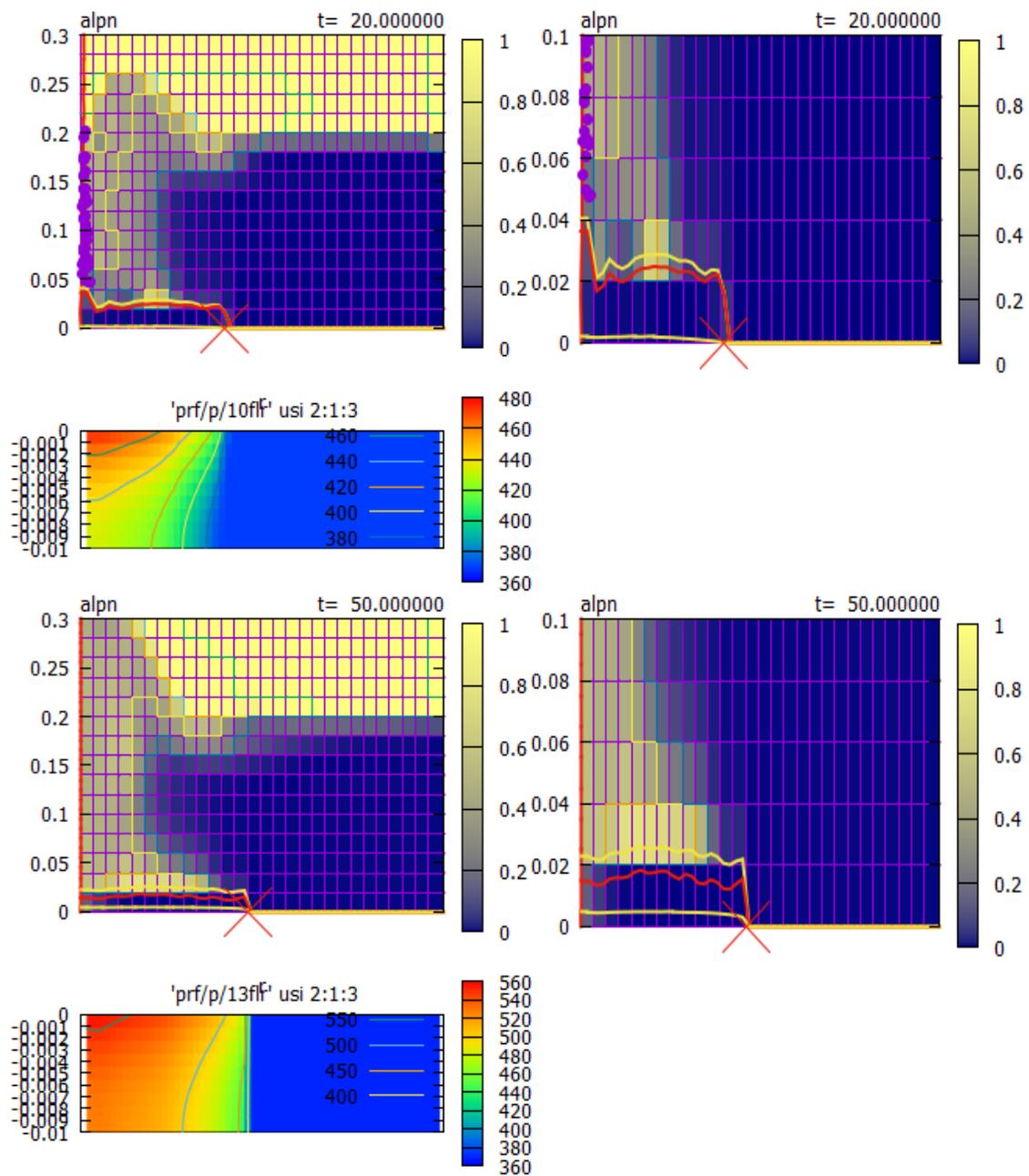


図 B2.18 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E9 : 20.0~50.0 秒)

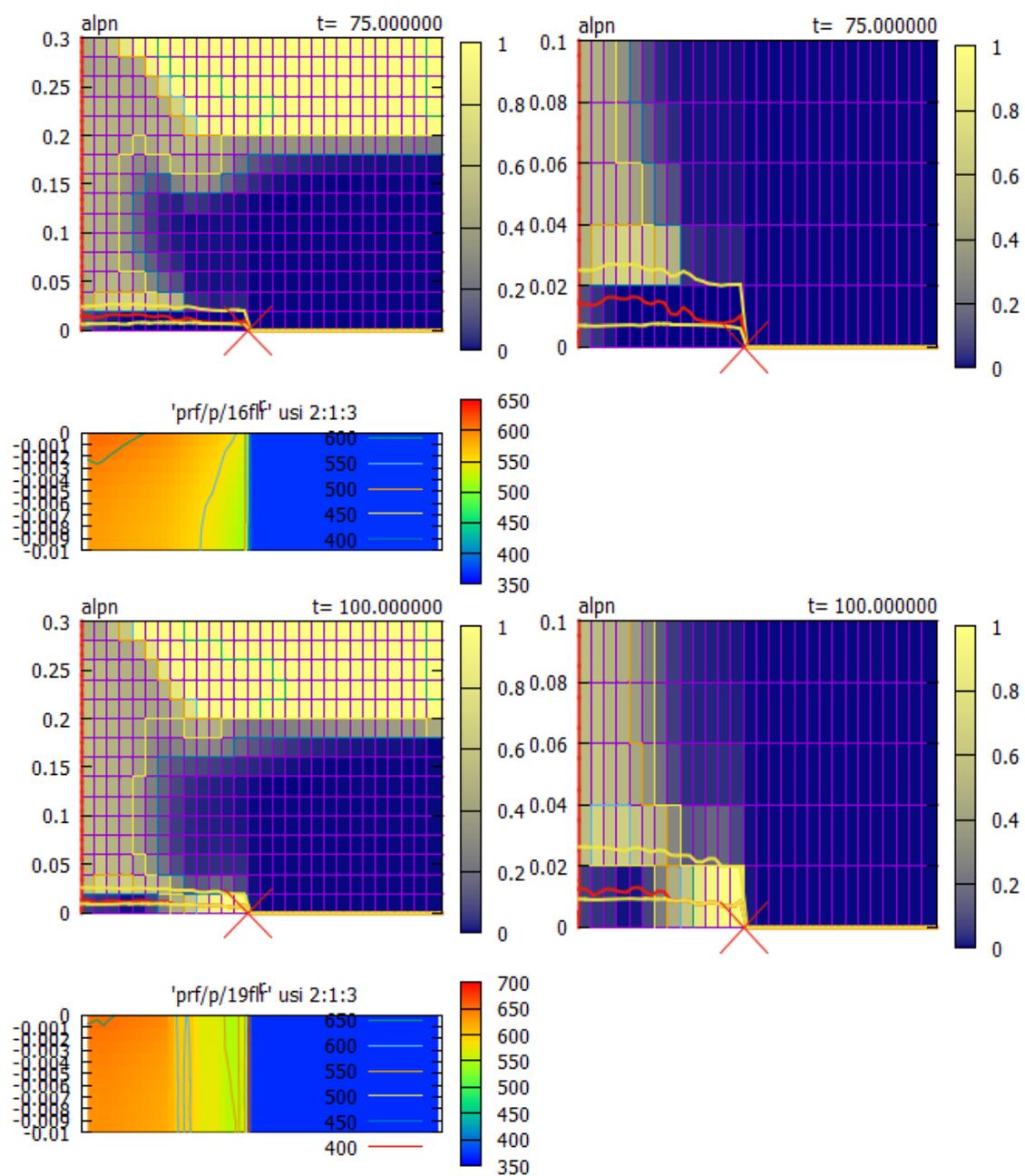


図 B2.19 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E9 : 75.0~100.0 秒)

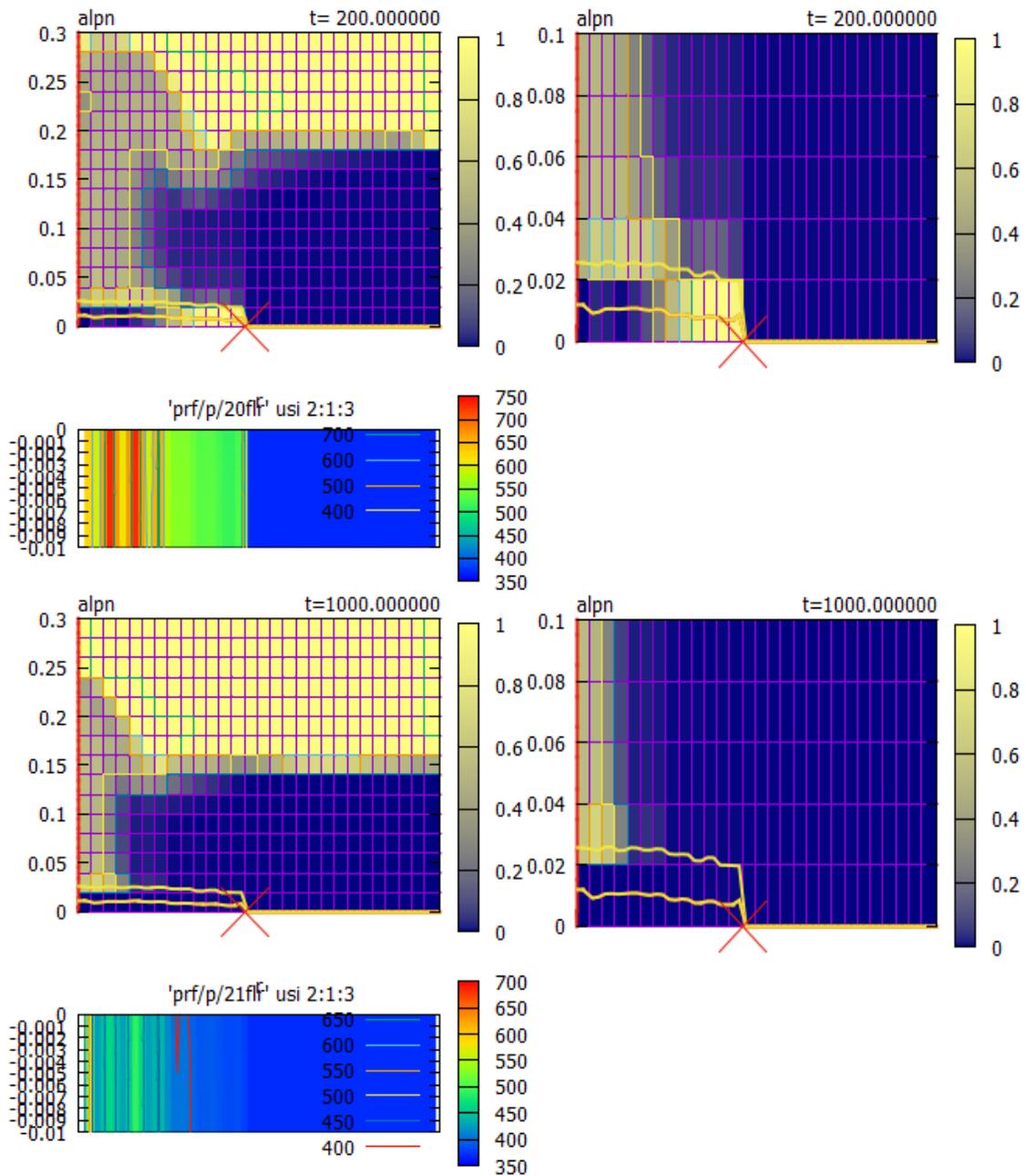


図 B2.20 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E9 : 200.0~1000.0 秒)

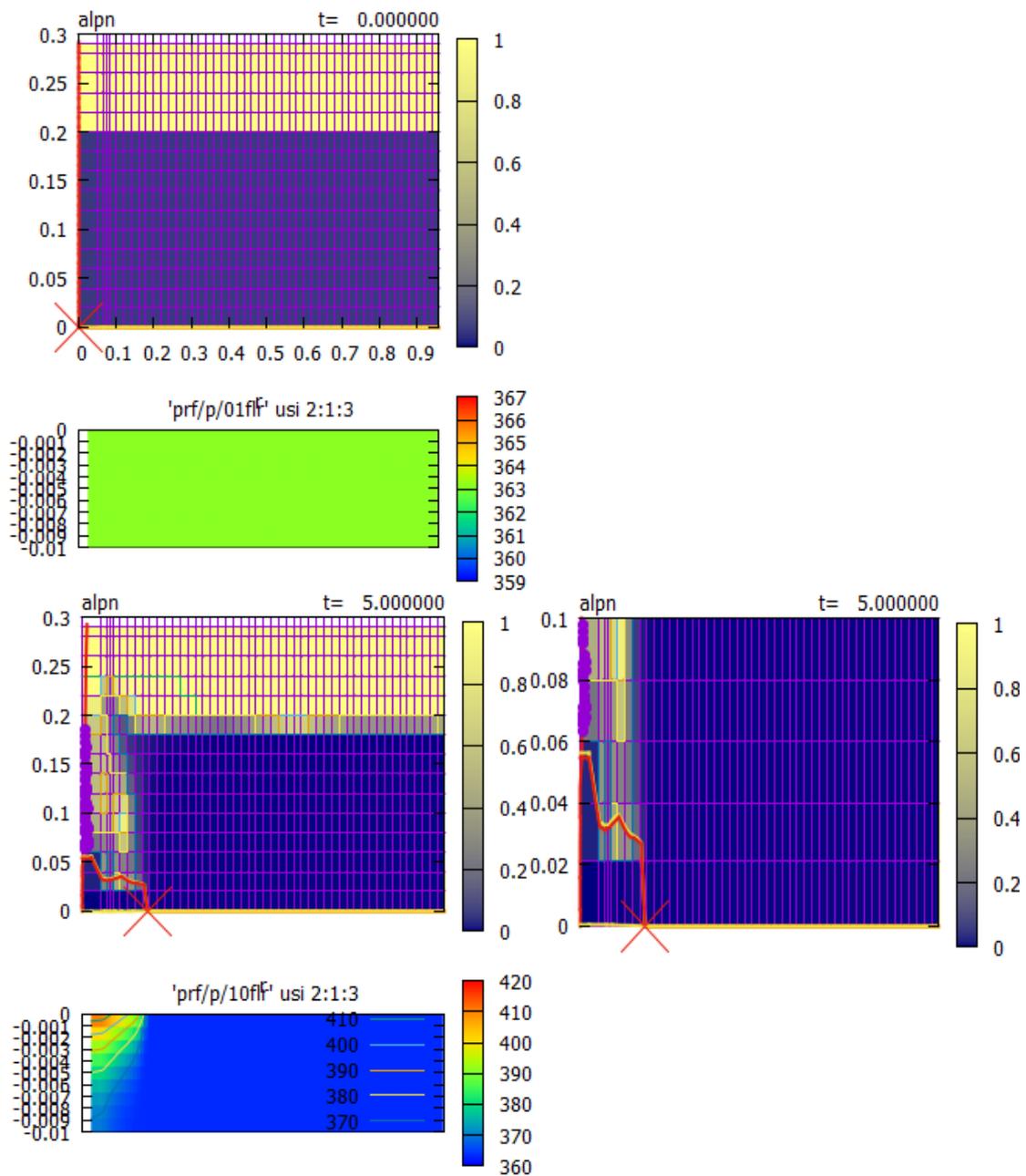


図 B2.21 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E10 : 0.0~5.0 秒)

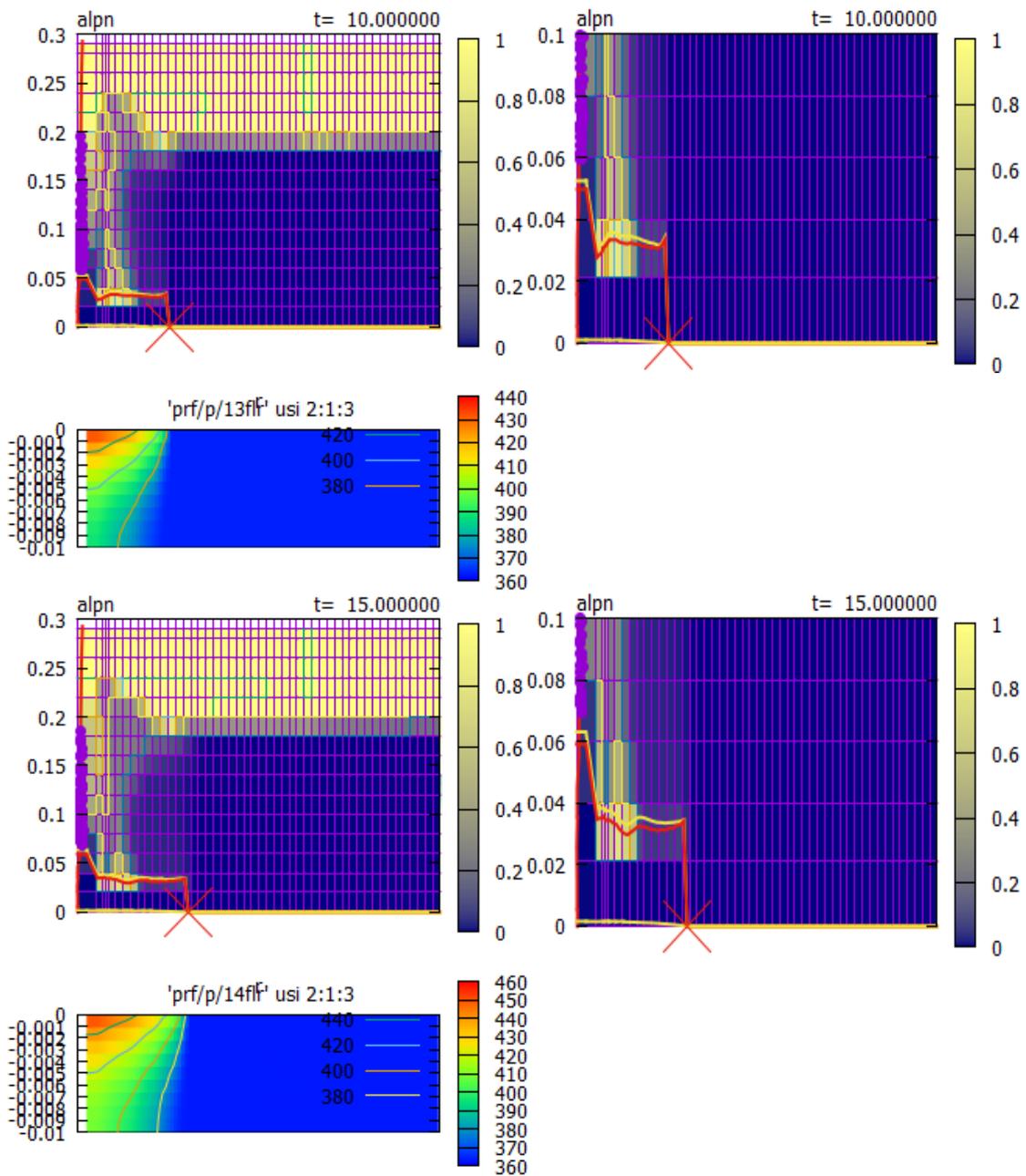


図 B2.22 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E10 : 10.0~15.0 秒)

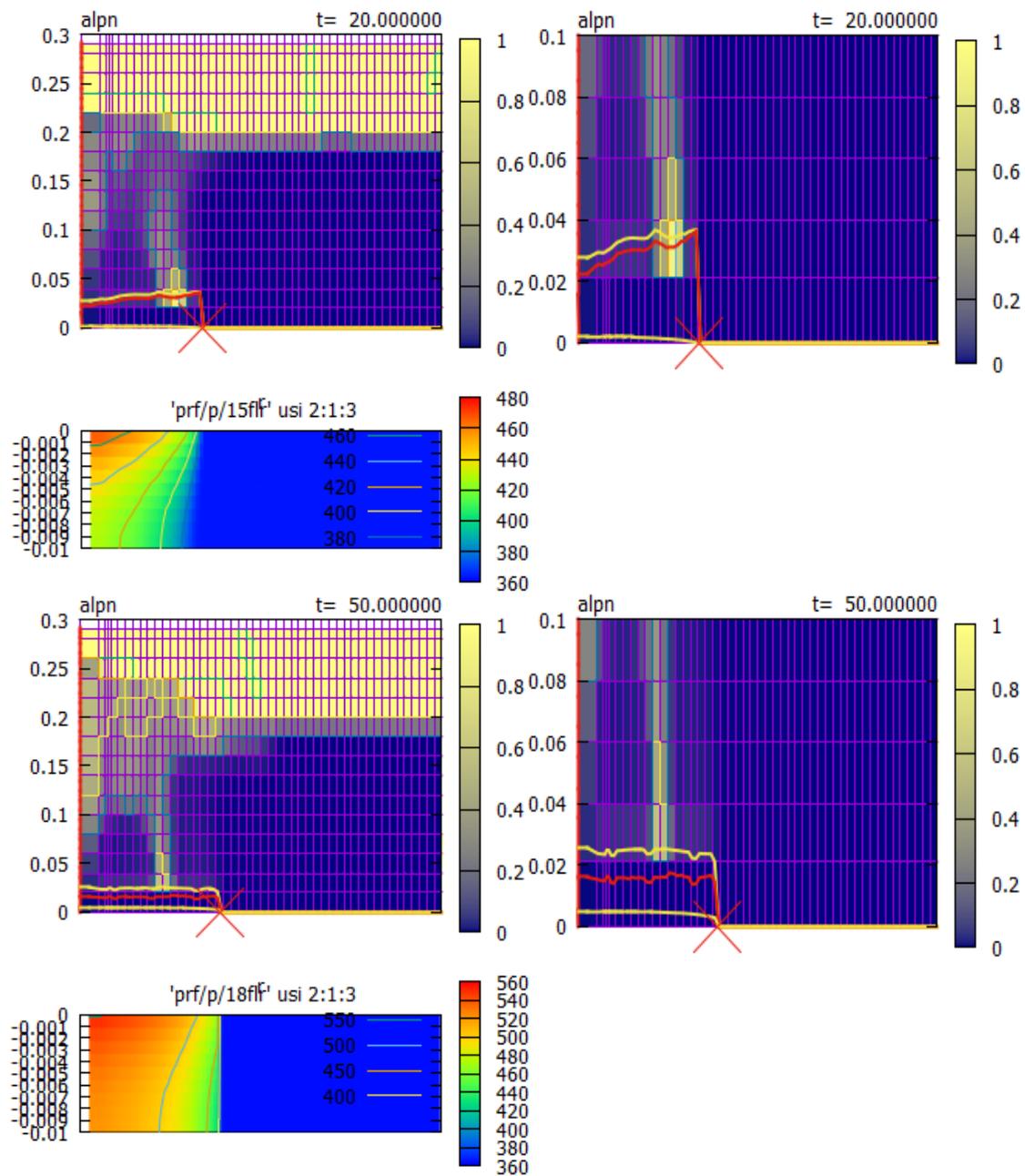


図 B2.23 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E10 : 20.0~50.0 秒)

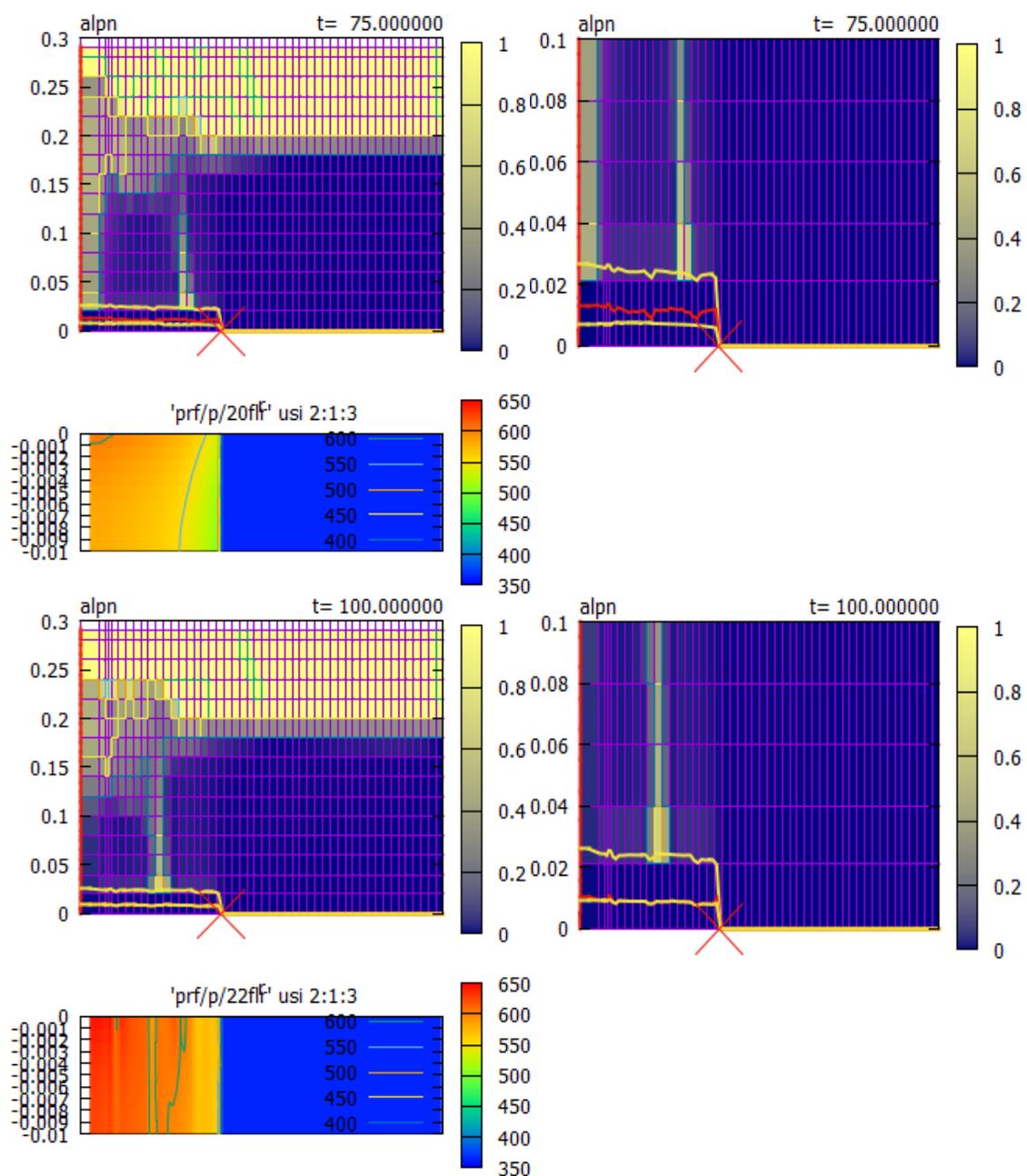


図 B2.24 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E10 : 75.0~100.0 秒)

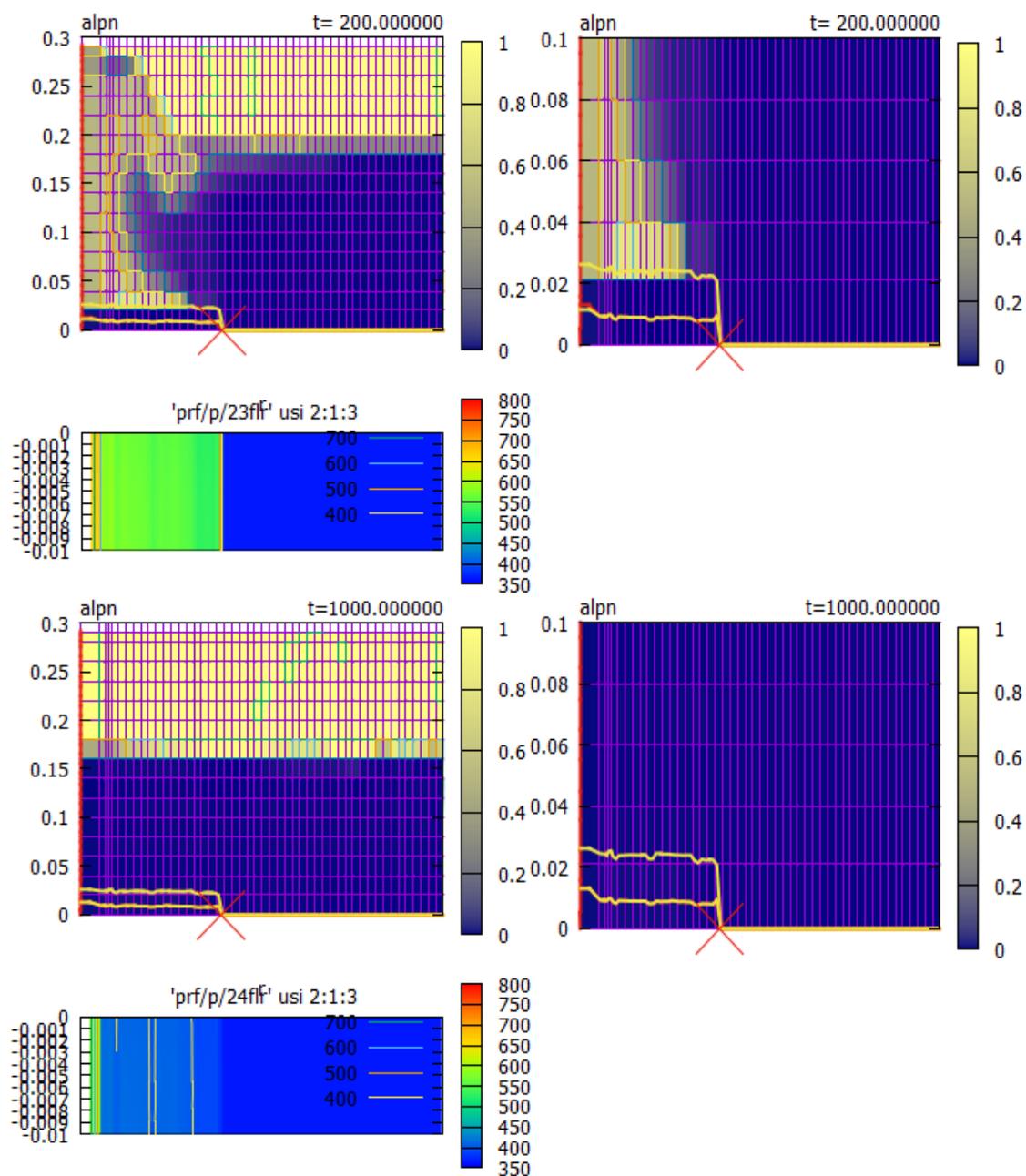


図 B2.25 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E10 : 200.0 秒)

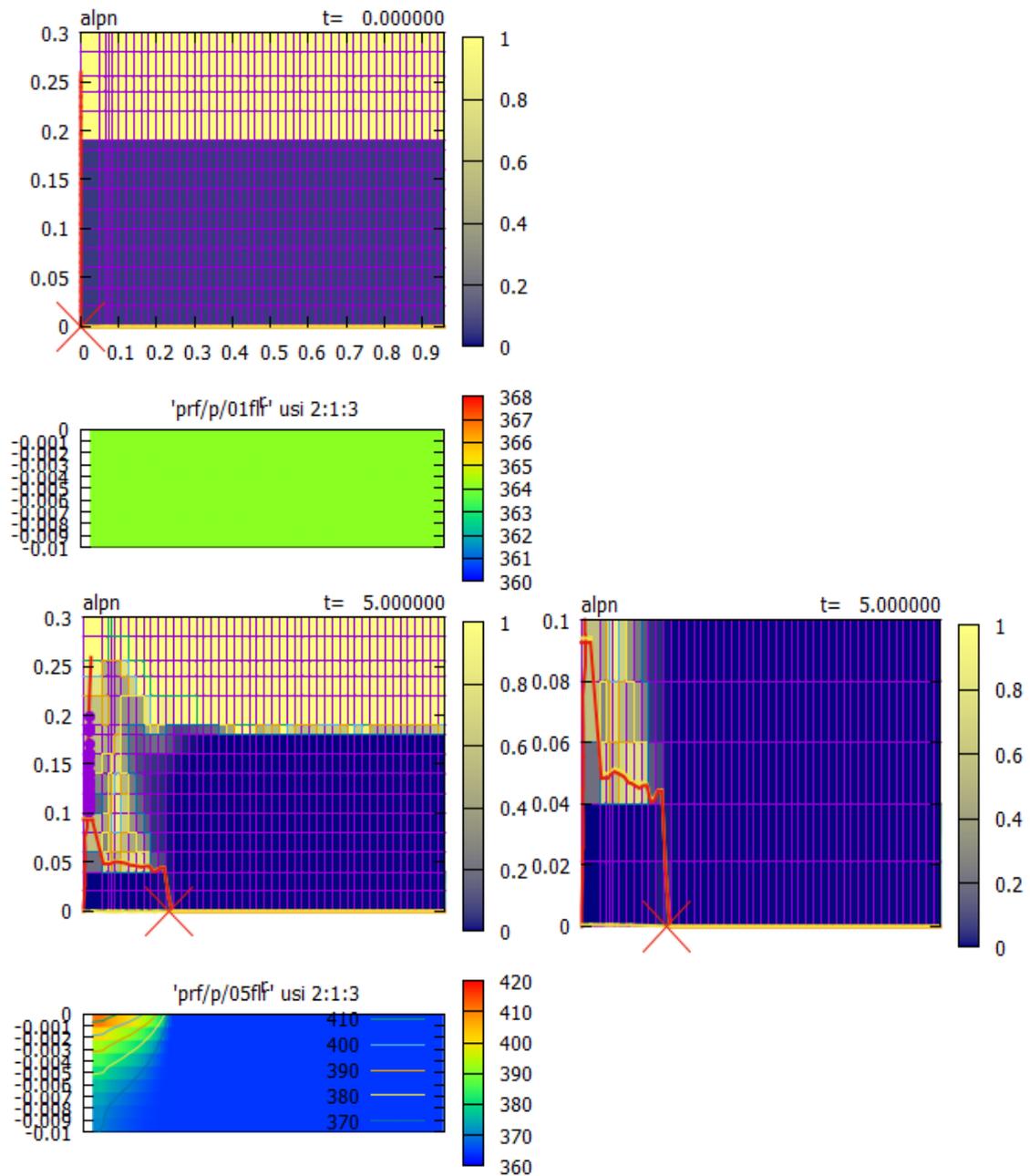


図 B2.26 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E11 : 0.0~5.0 秒)

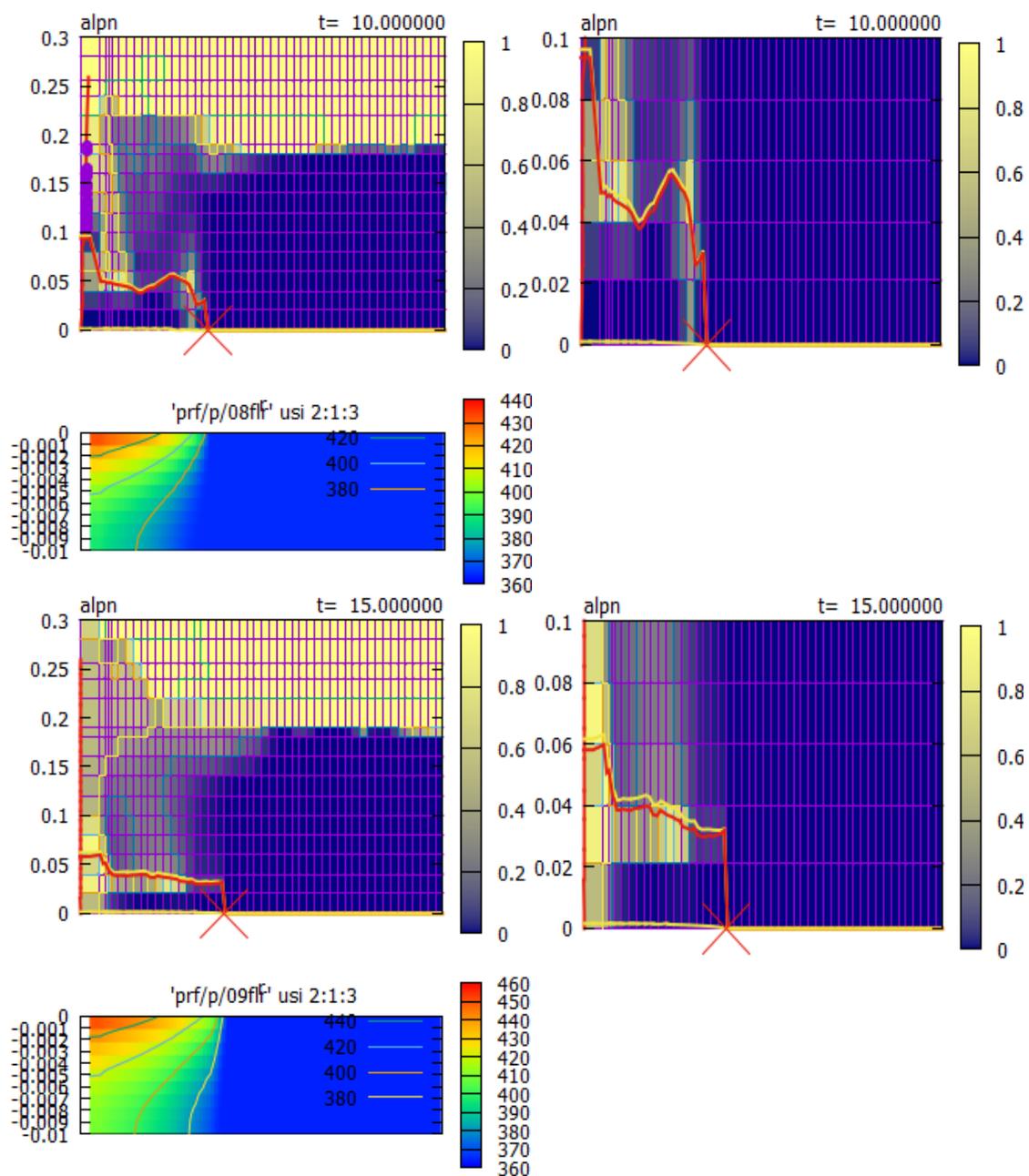


図 B2.27 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E11 : 10.0~15.0 秒)

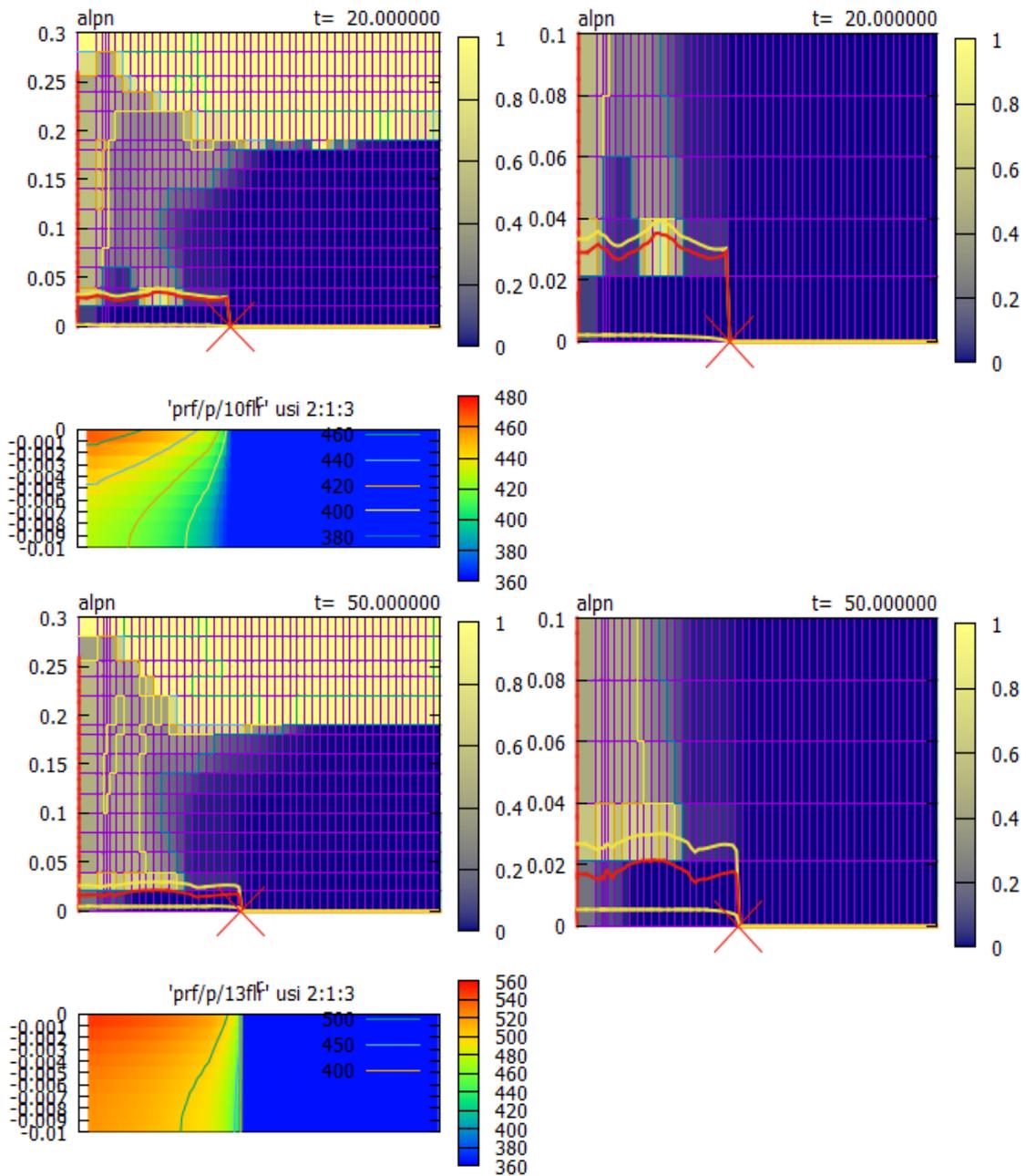


図 B2.28 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E11 : 20.0~50.0 秒)

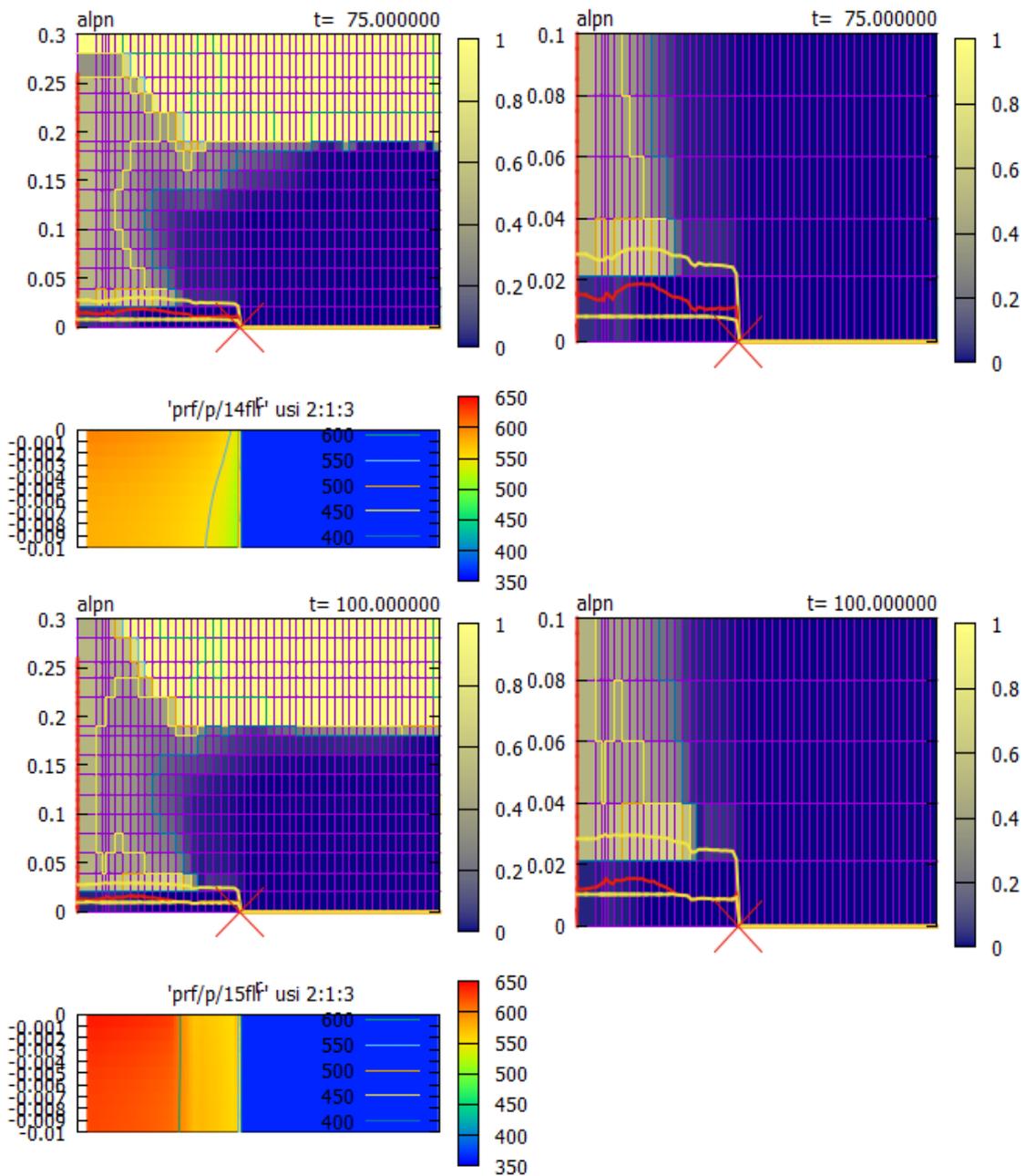


図 B2.29 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E11 : 75.0~100.0 秒)

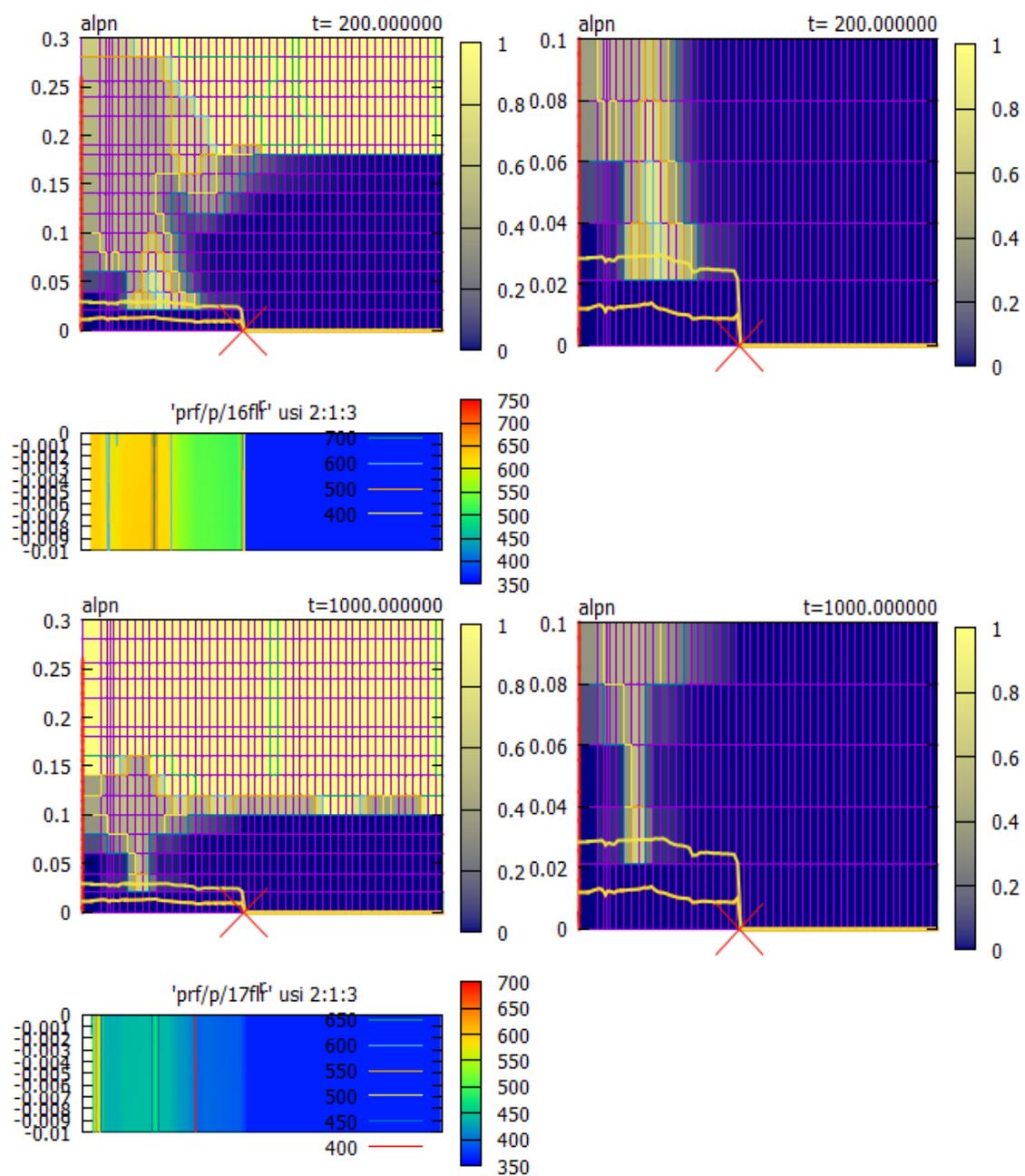


図 B2.30 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E11 : 200.0 秒)

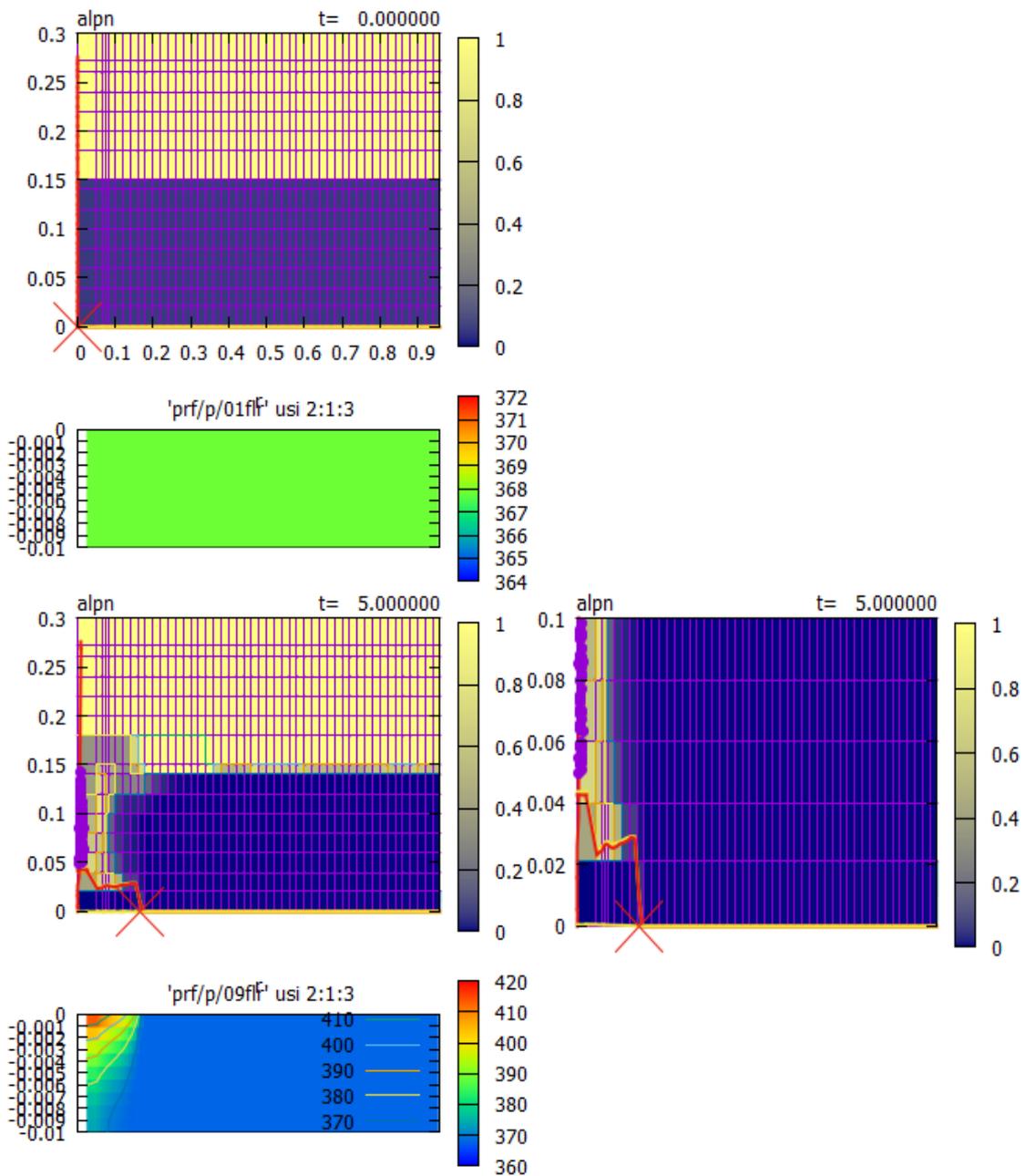


図 B2.31 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E12 : 0.0~5.0 秒)

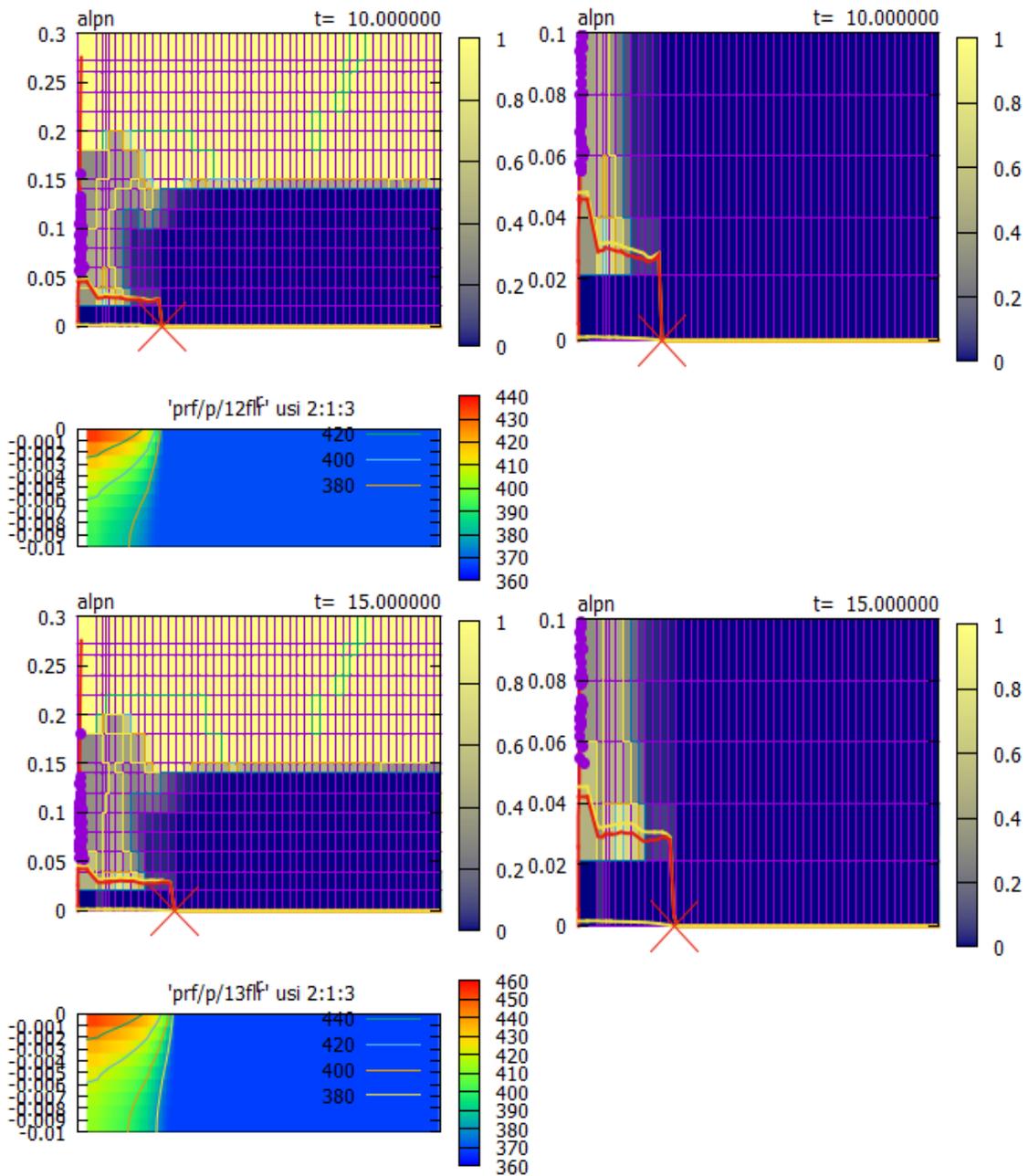


図 B2.32 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E12 : 10.0~15.0 秒)

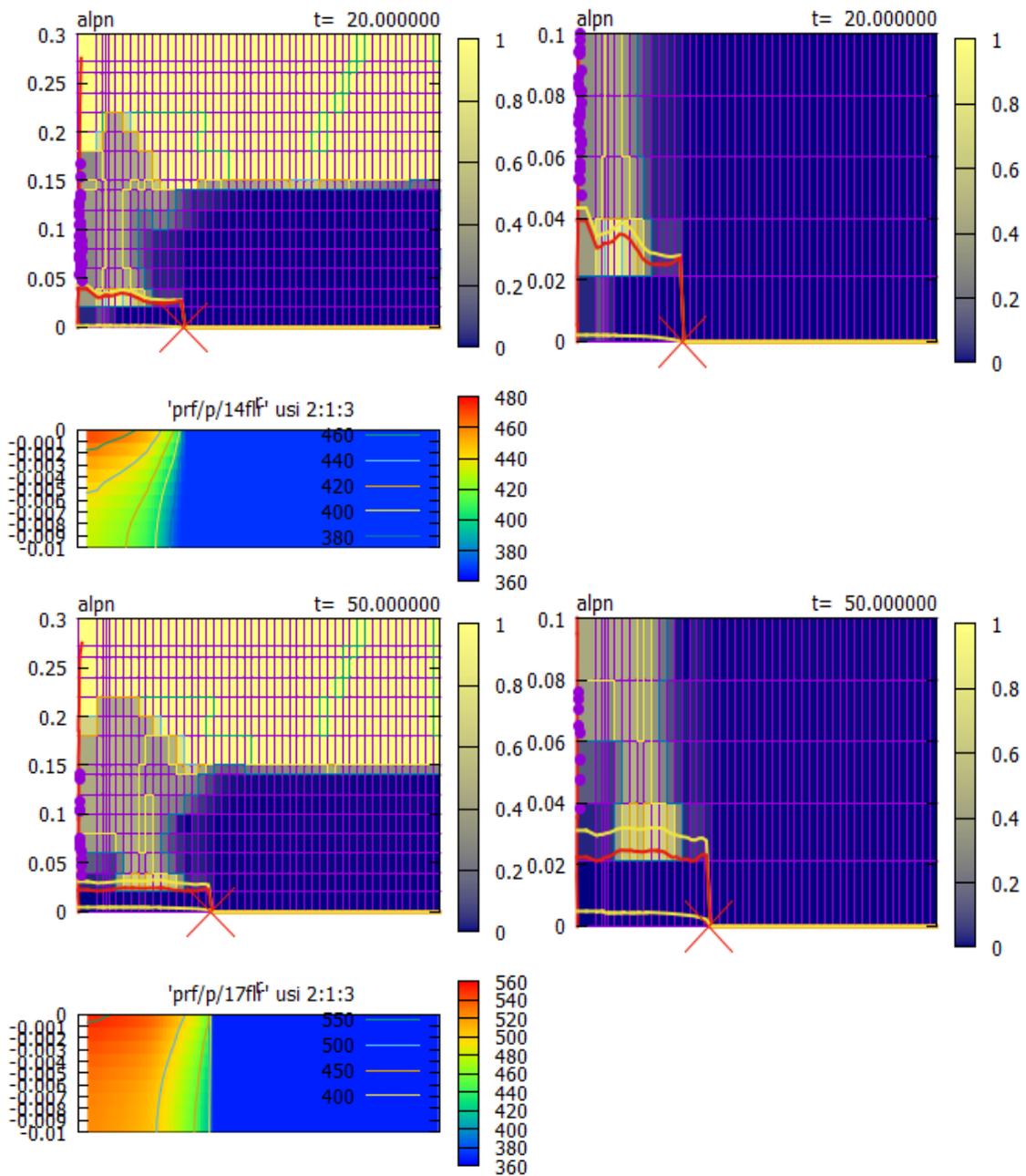


図 B2.33 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E12 : 20.0~50.0 秒)

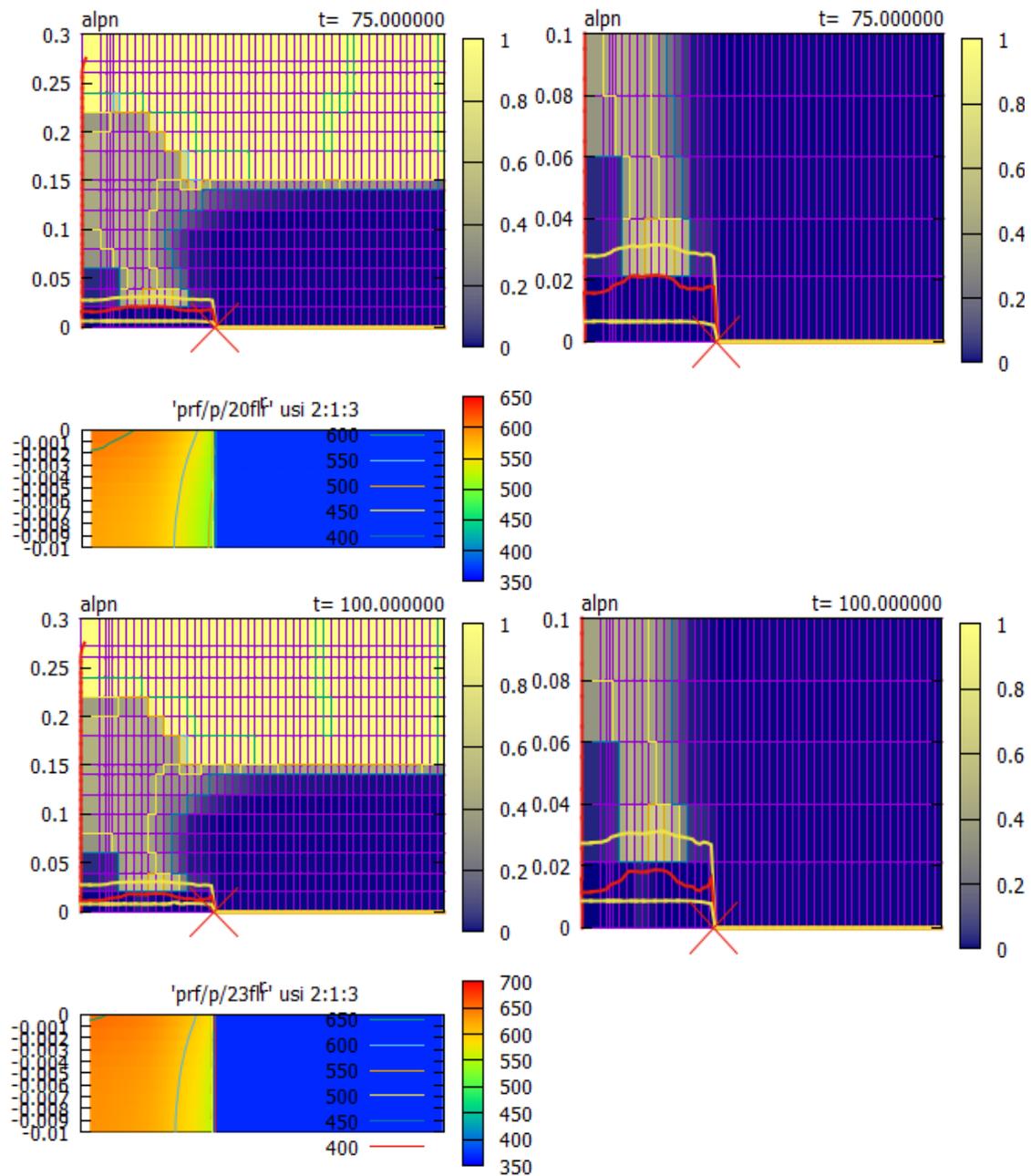


図 B2.34 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E12 : 75.0~100.0 秒)

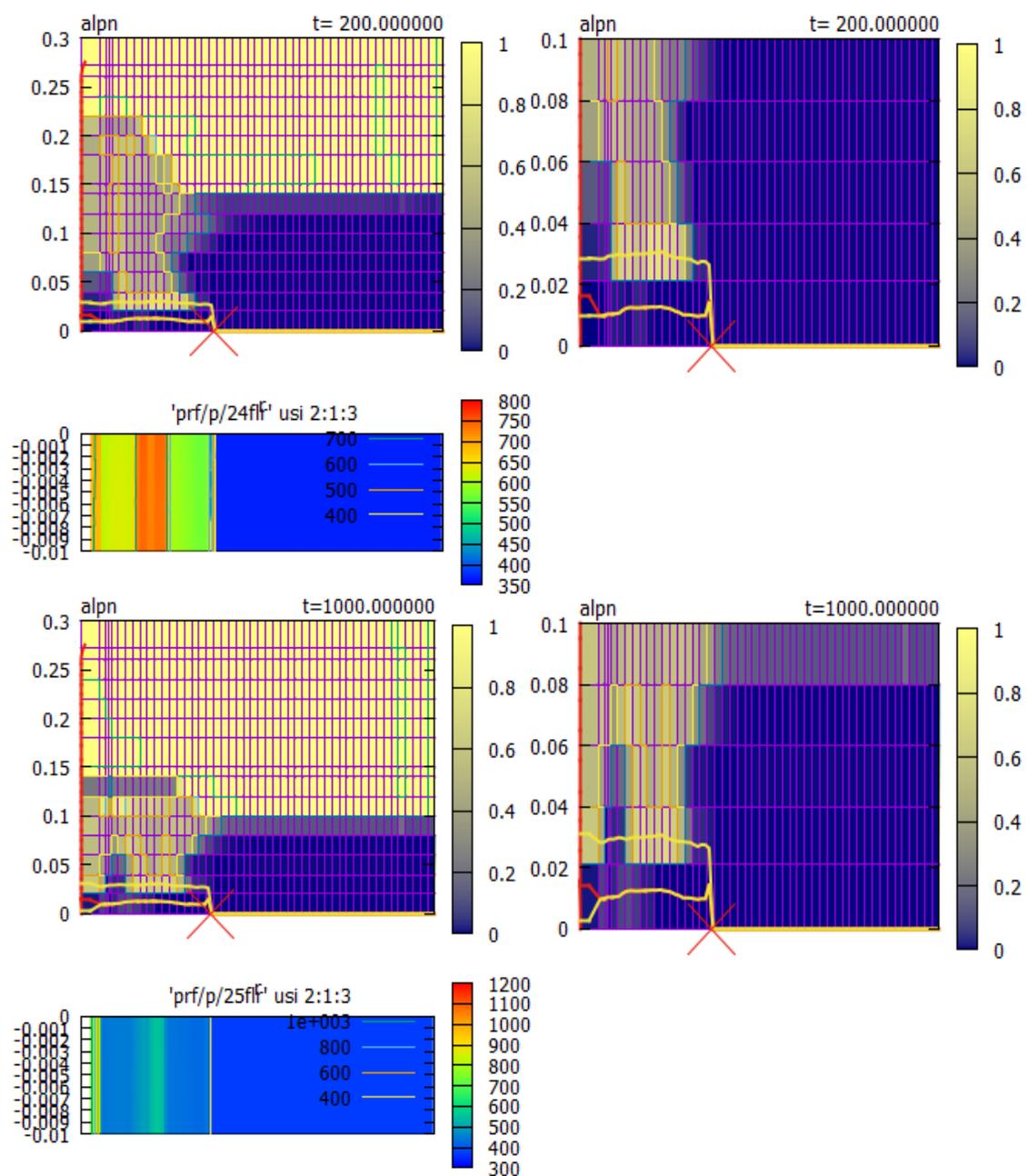


図 B2.35 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E12 : 200.0~1000.0 秒)

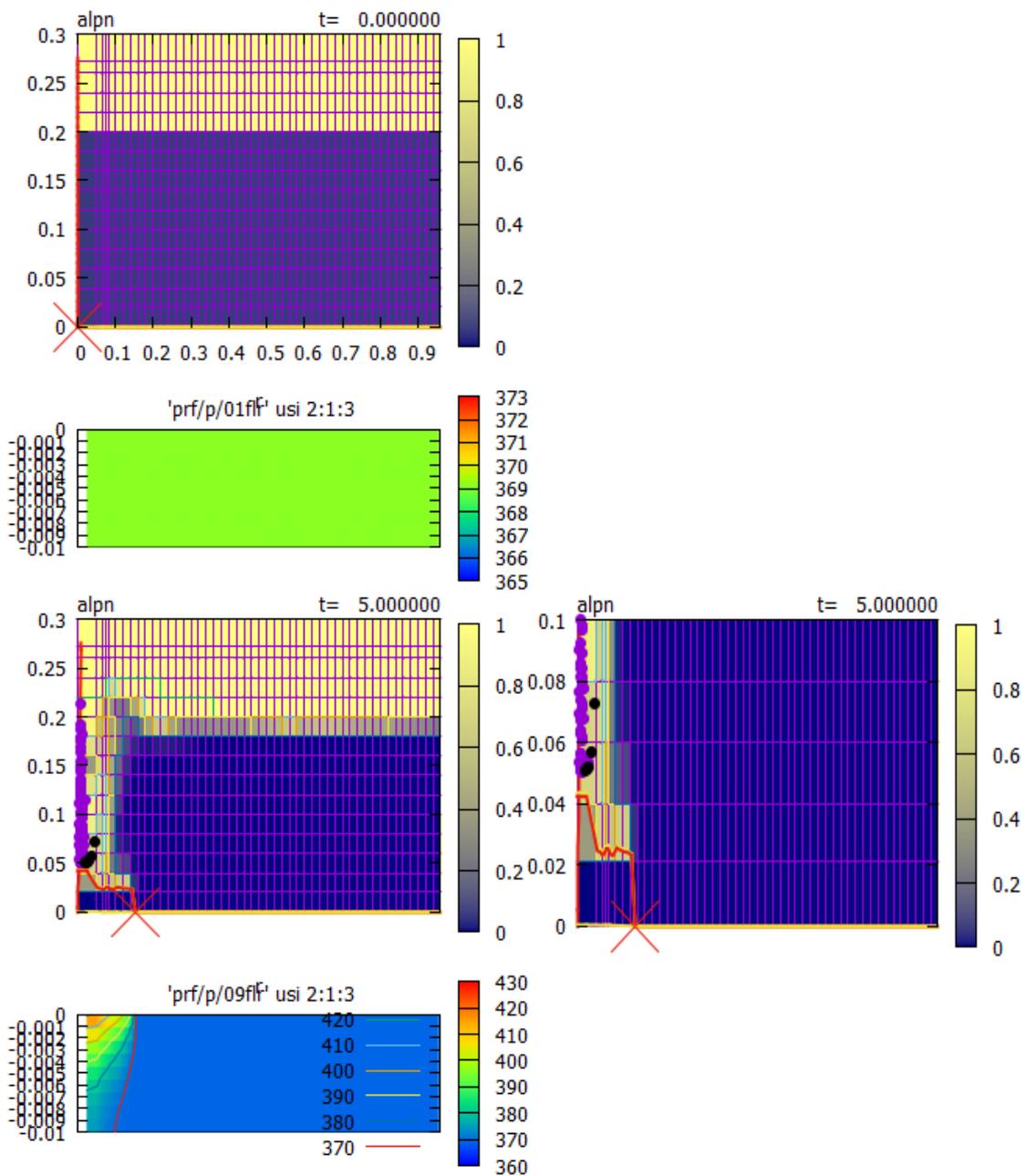


図 B2.36 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E13 : 0.0~5.0 秒)

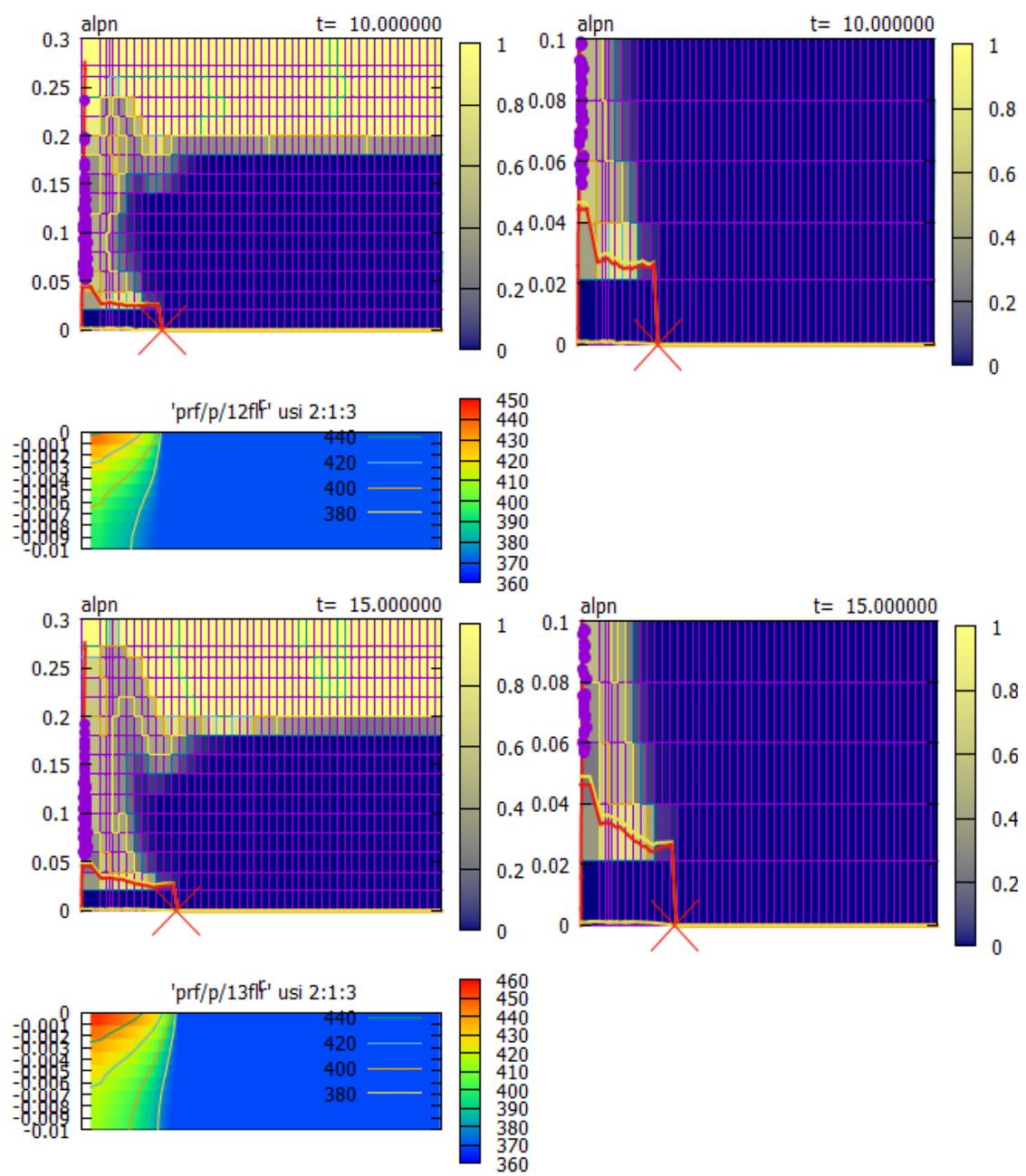


図 B2.37 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E13 : 10.0~15.0 秒)

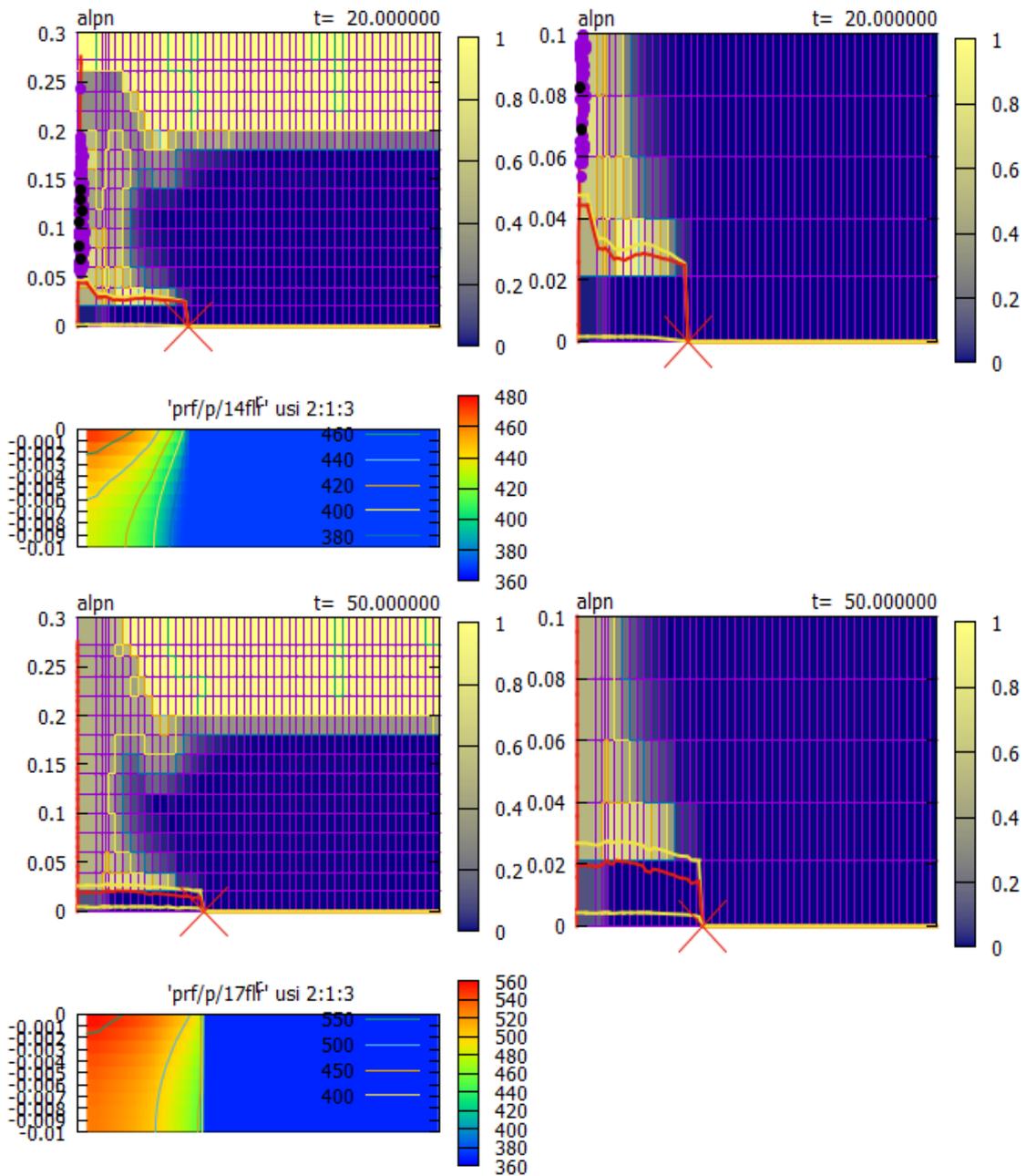


図 B2.38 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E13 : 20.0~50.0 秒)

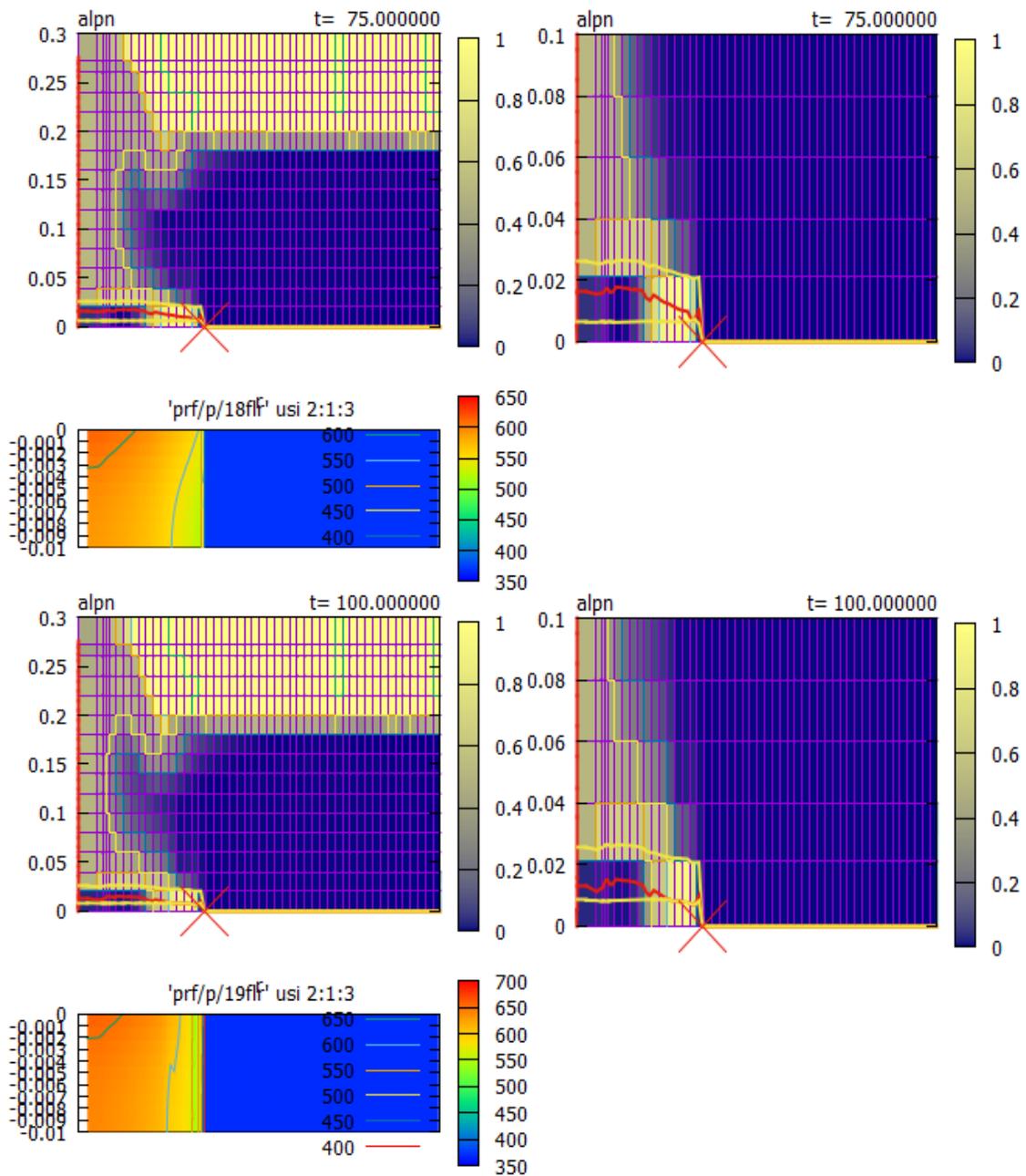


図 B2.39 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E13 : 75.0~100.0 秒)

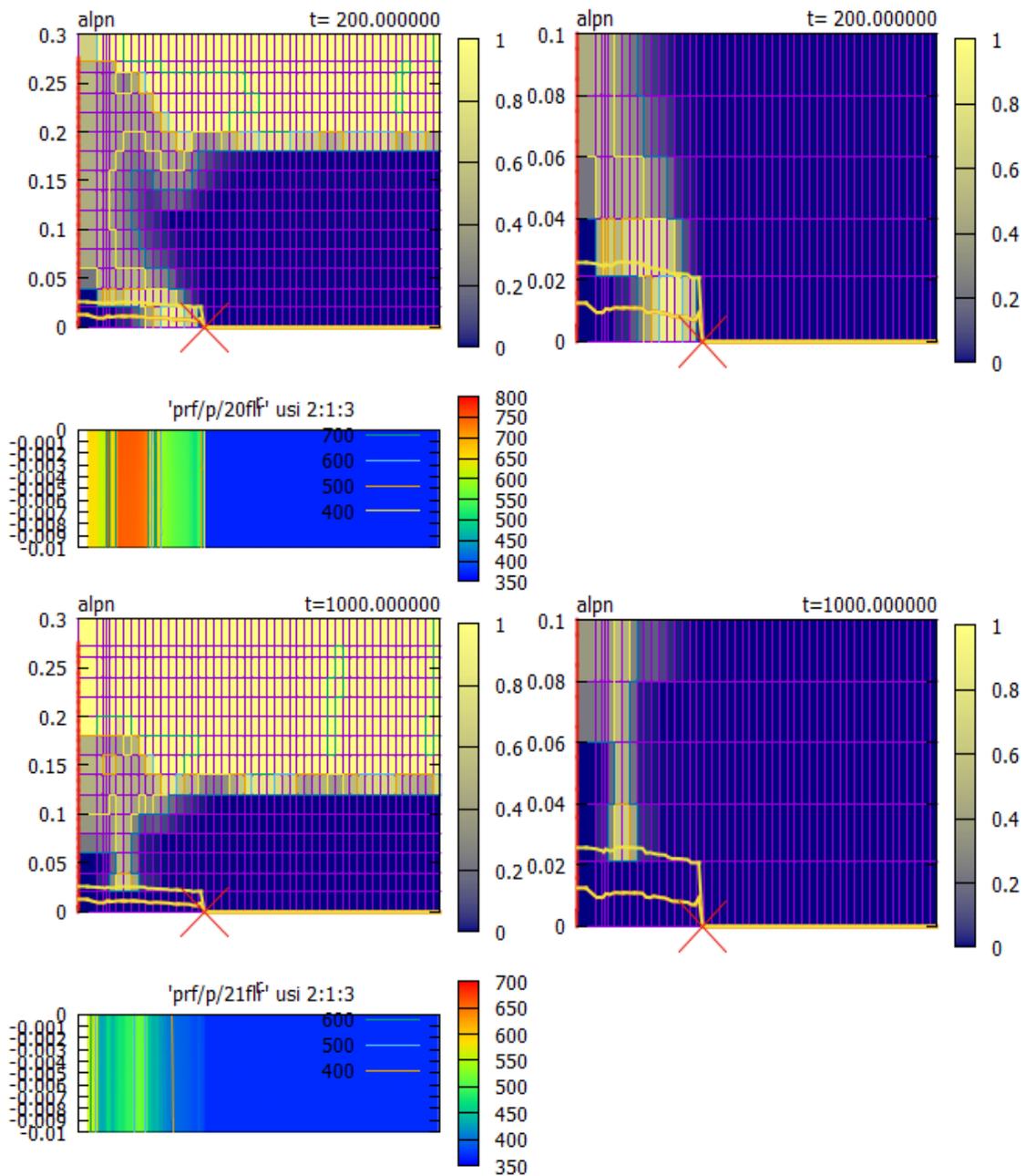


図 B2.40 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E13 : 200.0 秒)

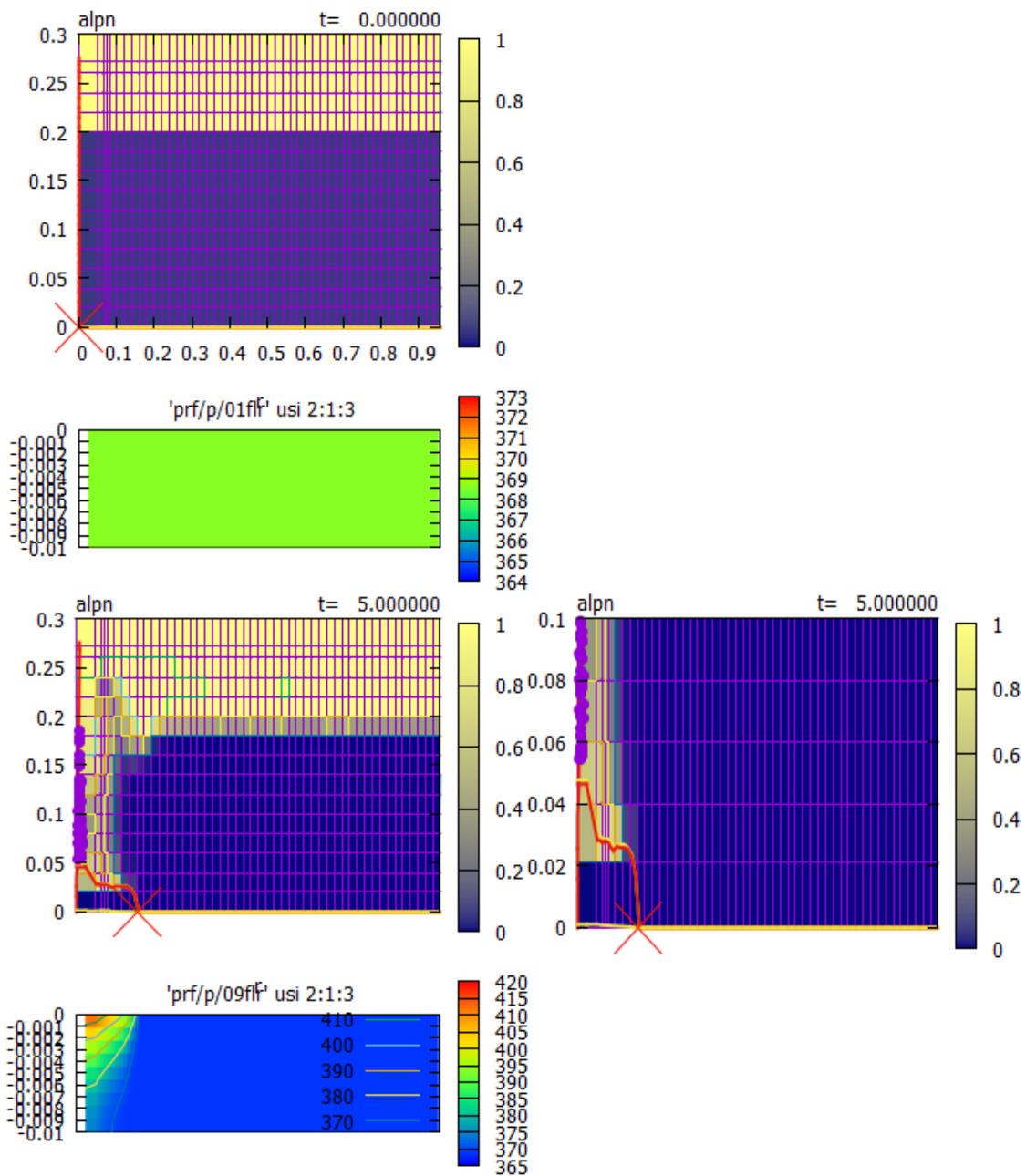


図 B2.41 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E14 : 0.0~5.0 秒)

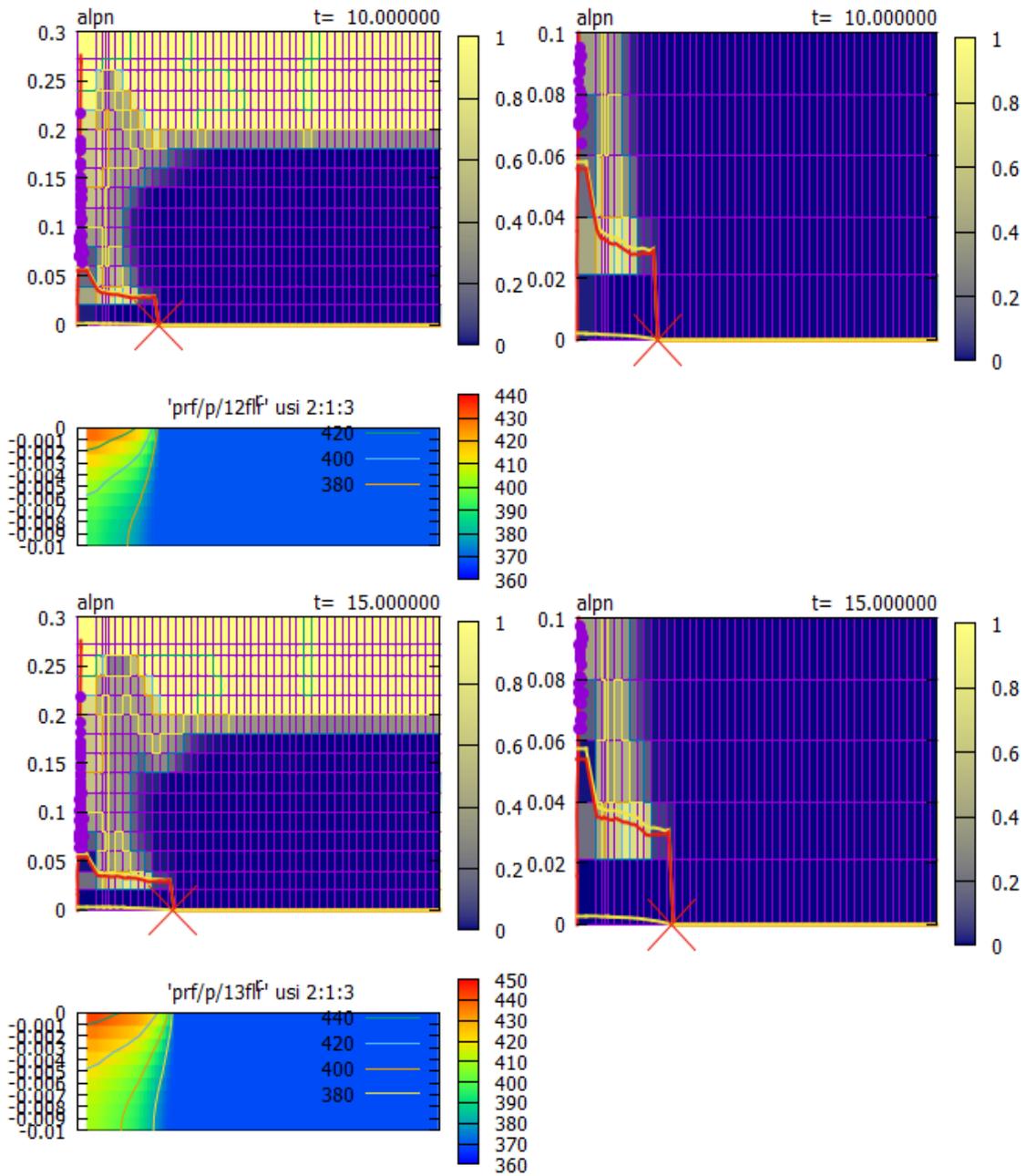


図 B2.42 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E14 : 10.0~15.0 秒)

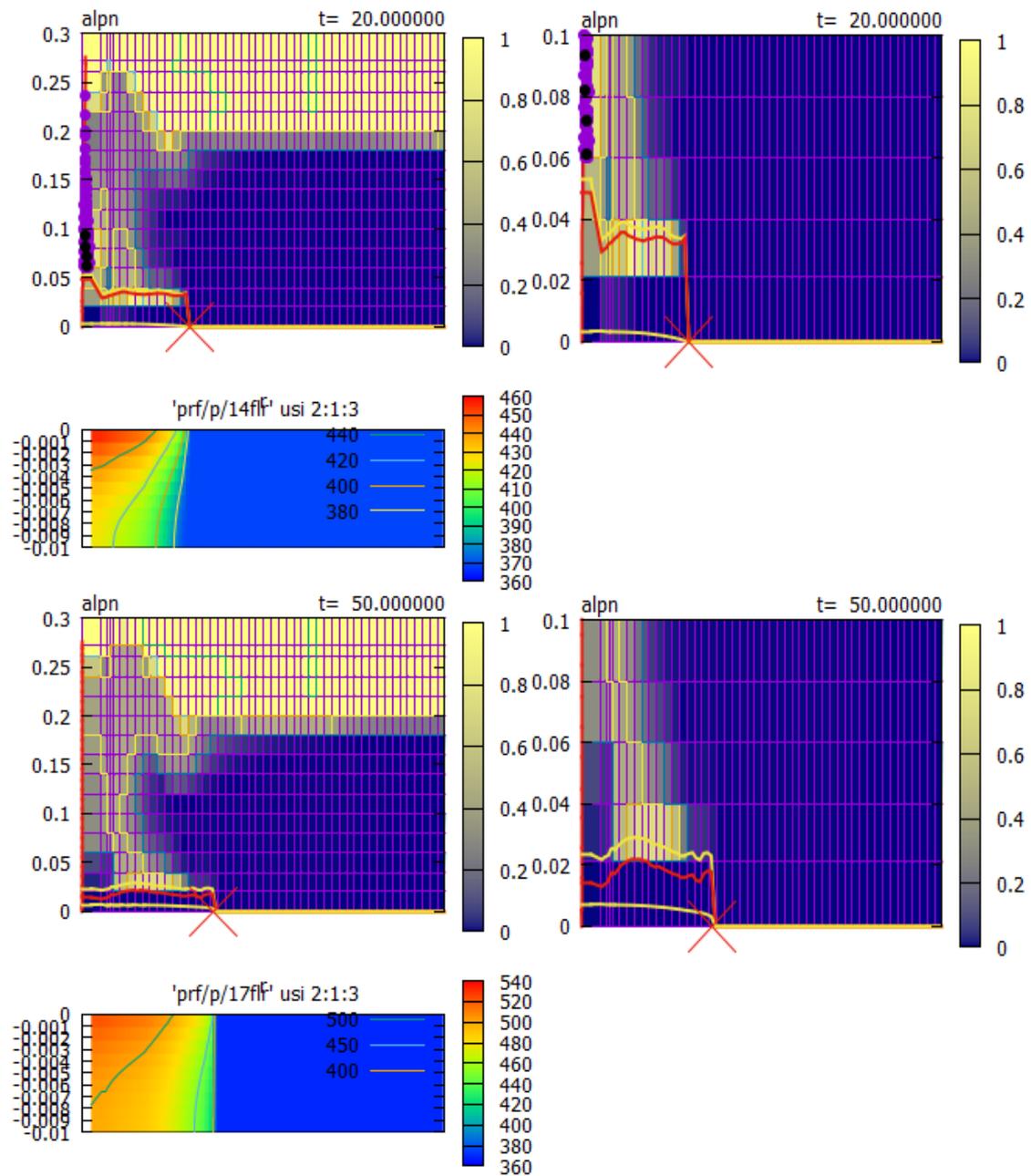


図 B2.43 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E14 : 20.0~50.0 秒)

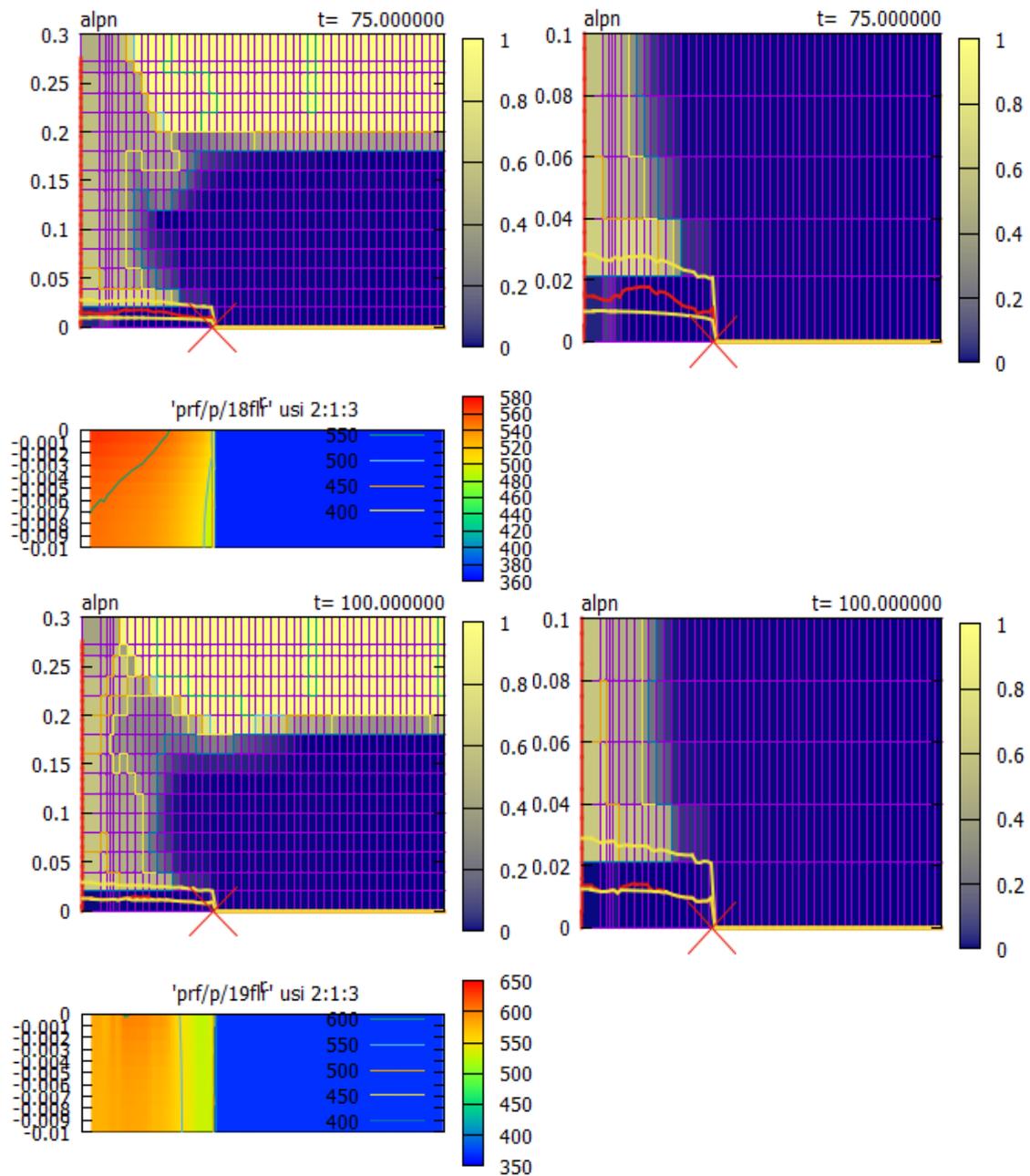


図 B2.44 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E14 : 75.0~100.0 秒)

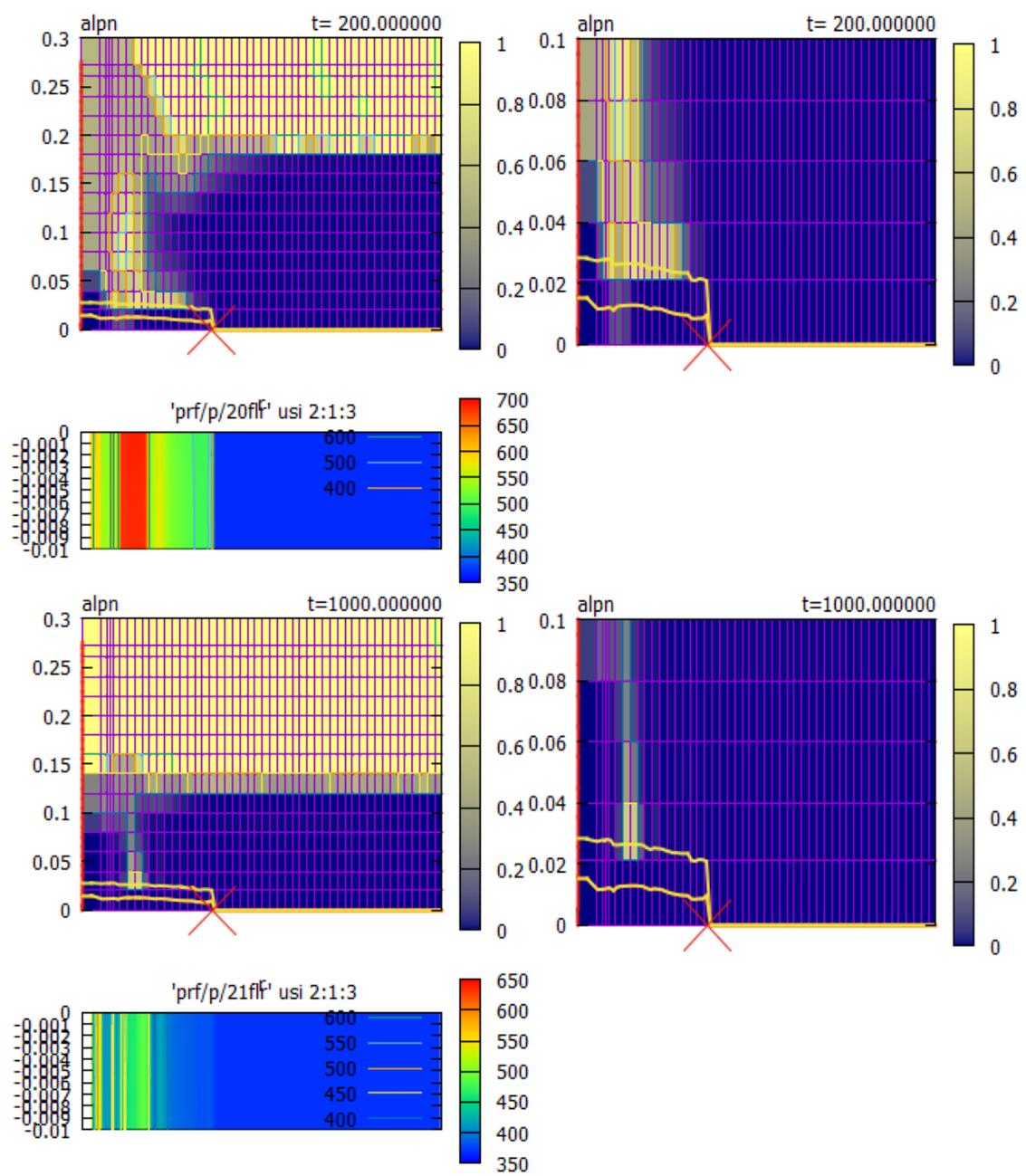


図 B2.45 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E14 : 200.0 秒)

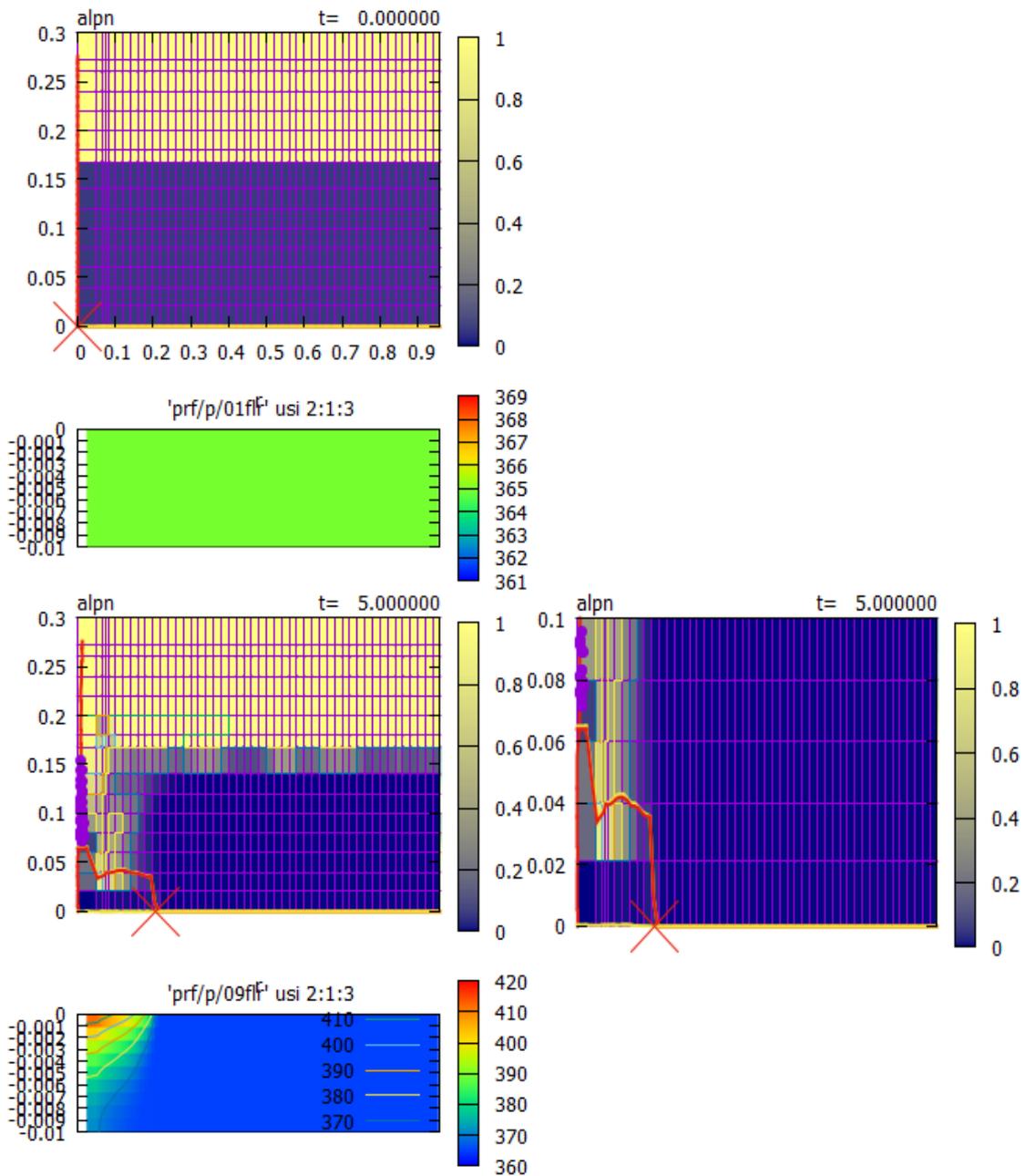


図 B2.46 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E15 : 0.0~5.0 秒)

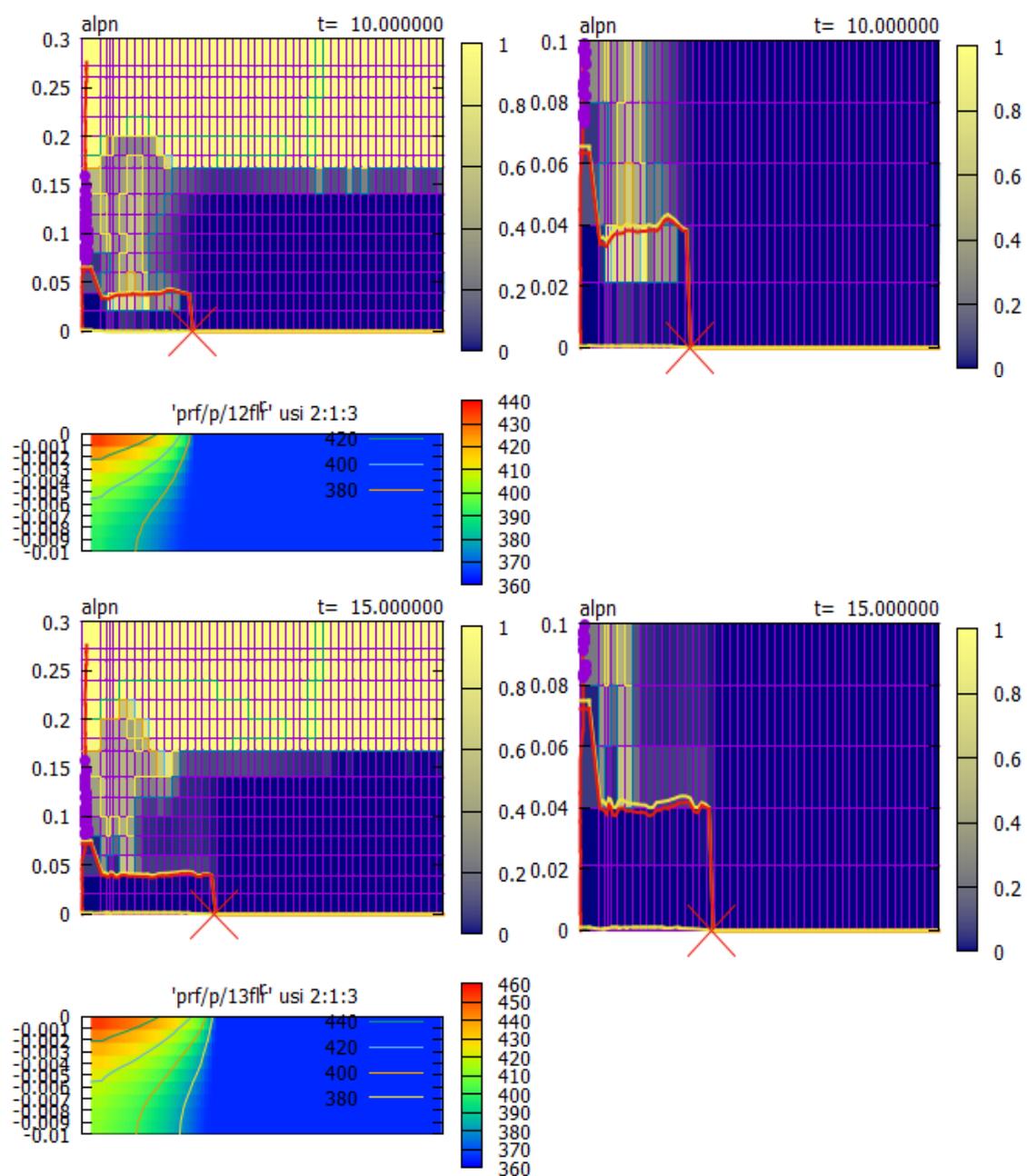


図 B2.47 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E15 : 10.0~15.0 秒)

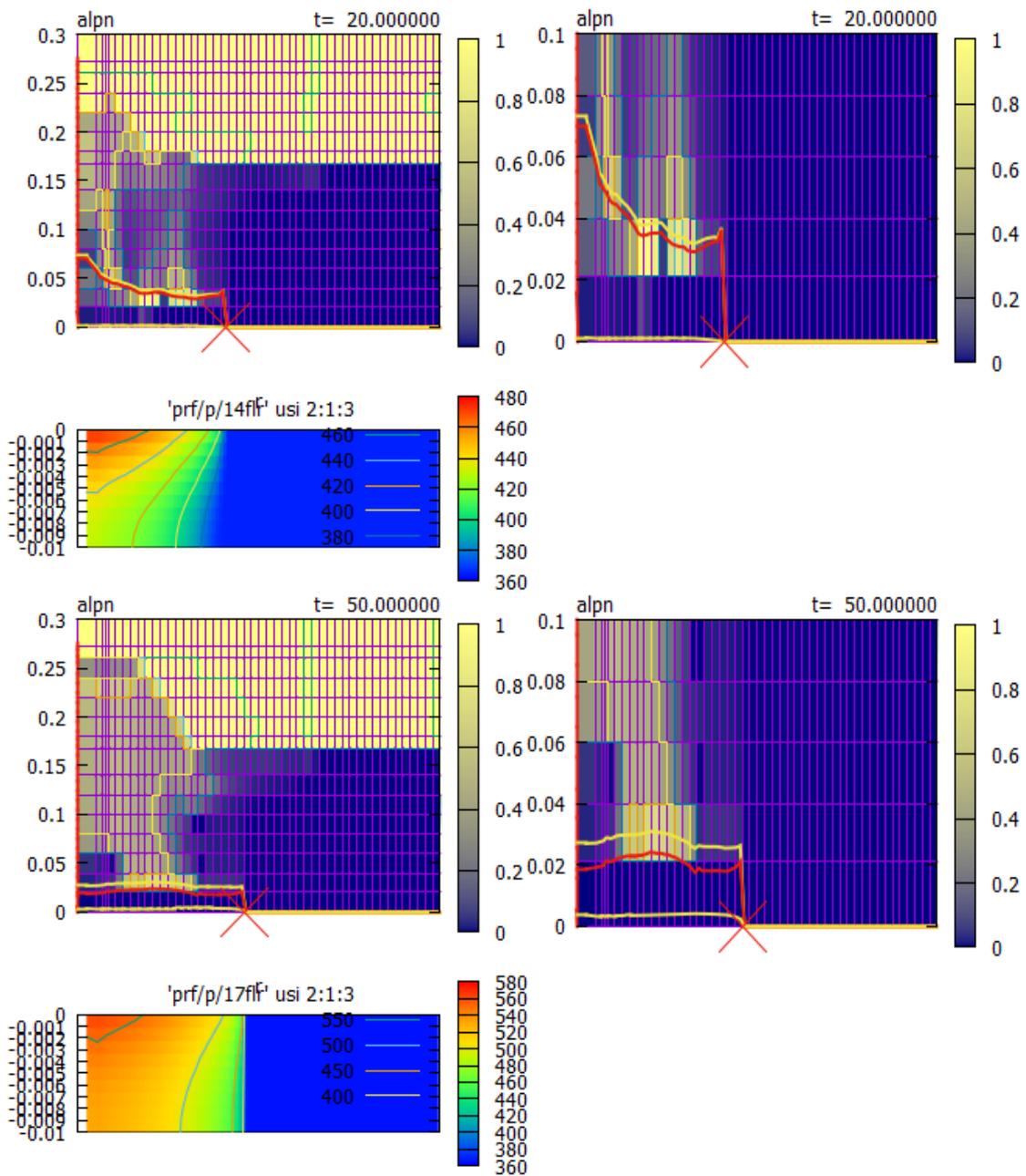


図 B2.48 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E15 : 20.0~50.0 秒)

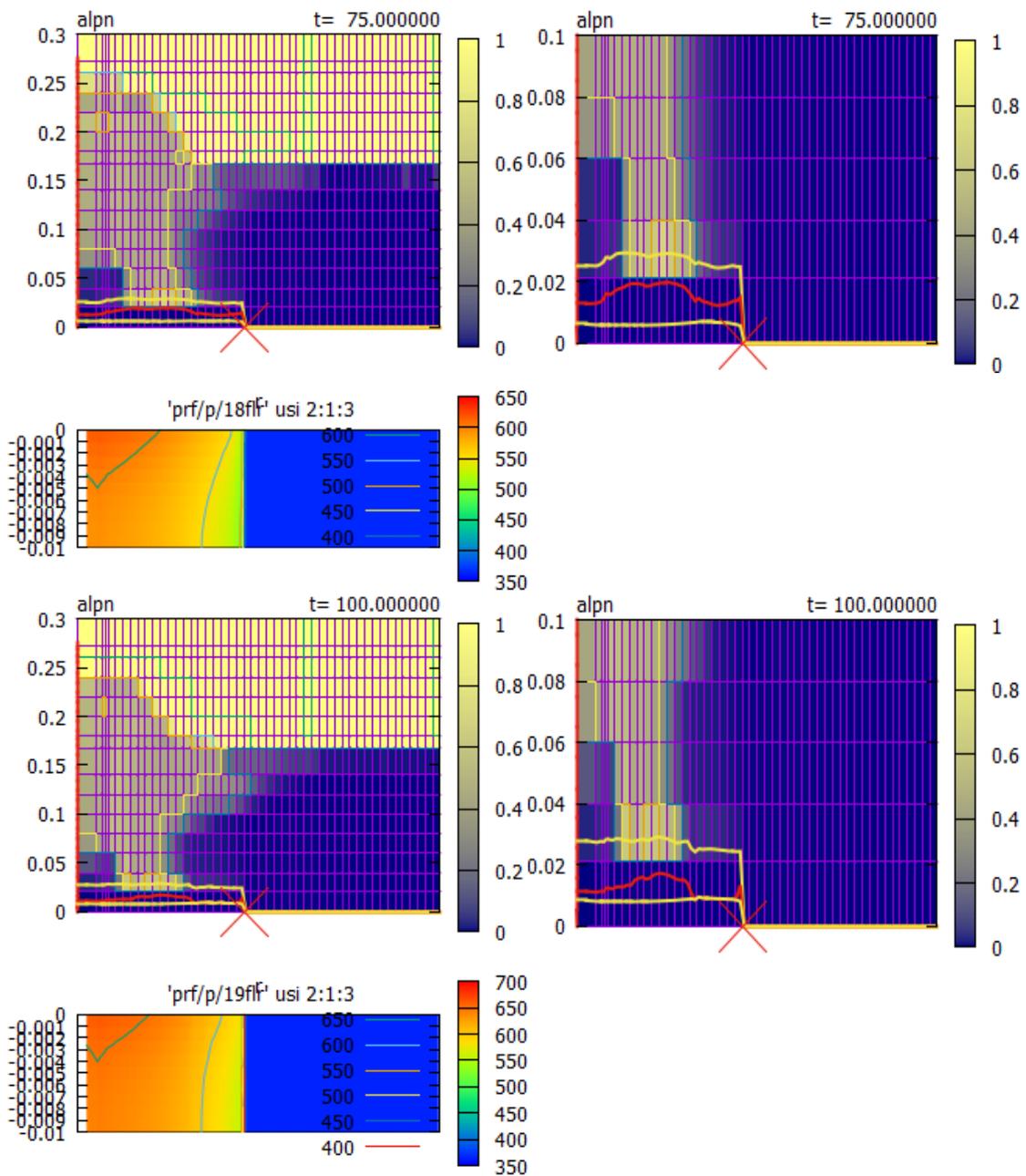


図 B2.49 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E15 : 75.0~100.0 秒)

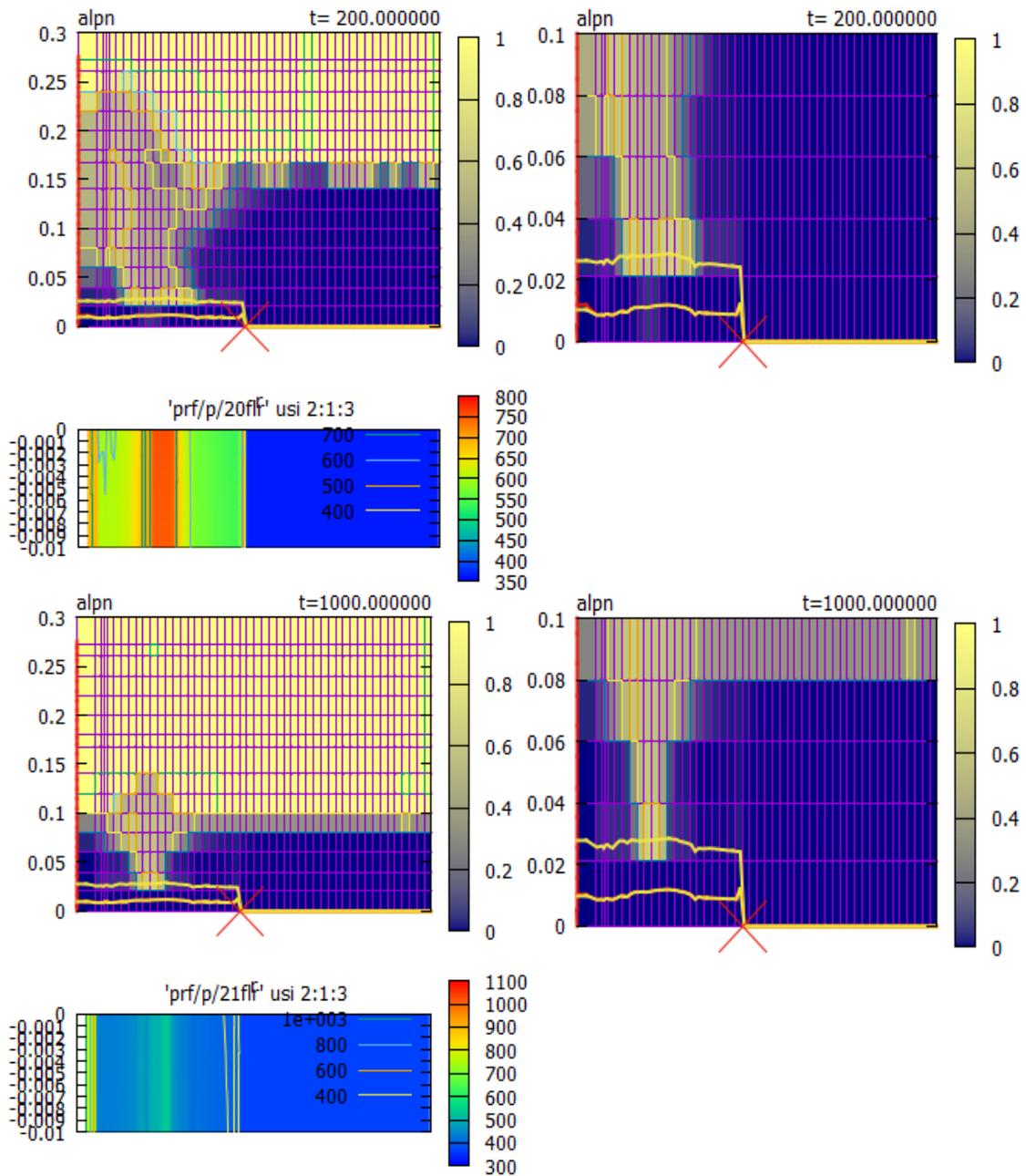


図 B2.50 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E15 : 200.0 秒)

付録 C 実機解析結果

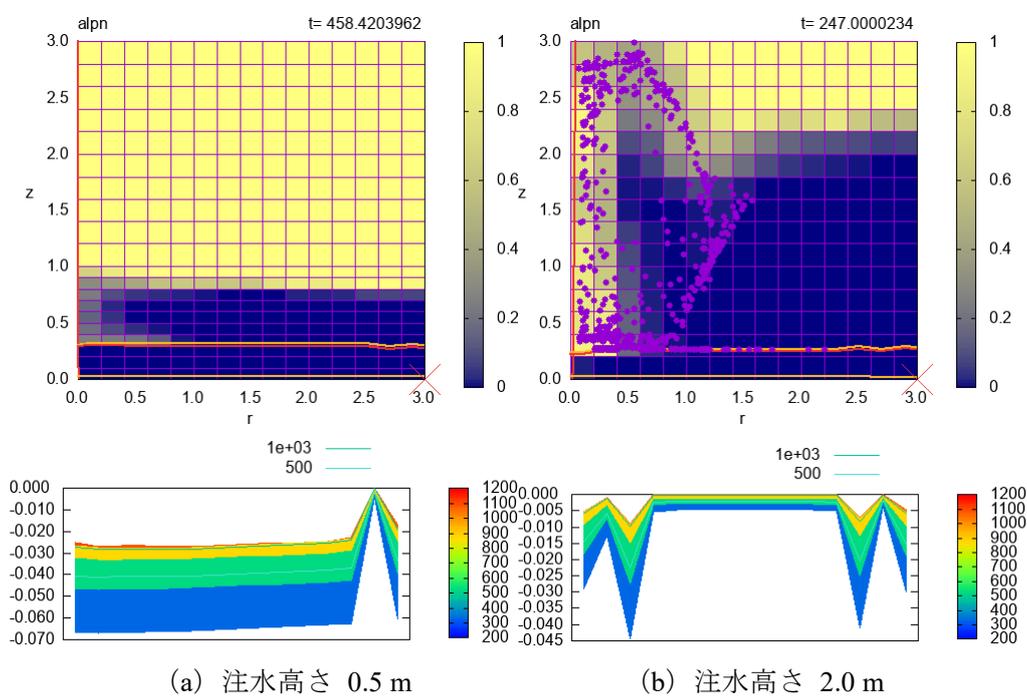


図 C.1 溶融物の液深とクラスト厚さの半径方向分布 (ケース 1)

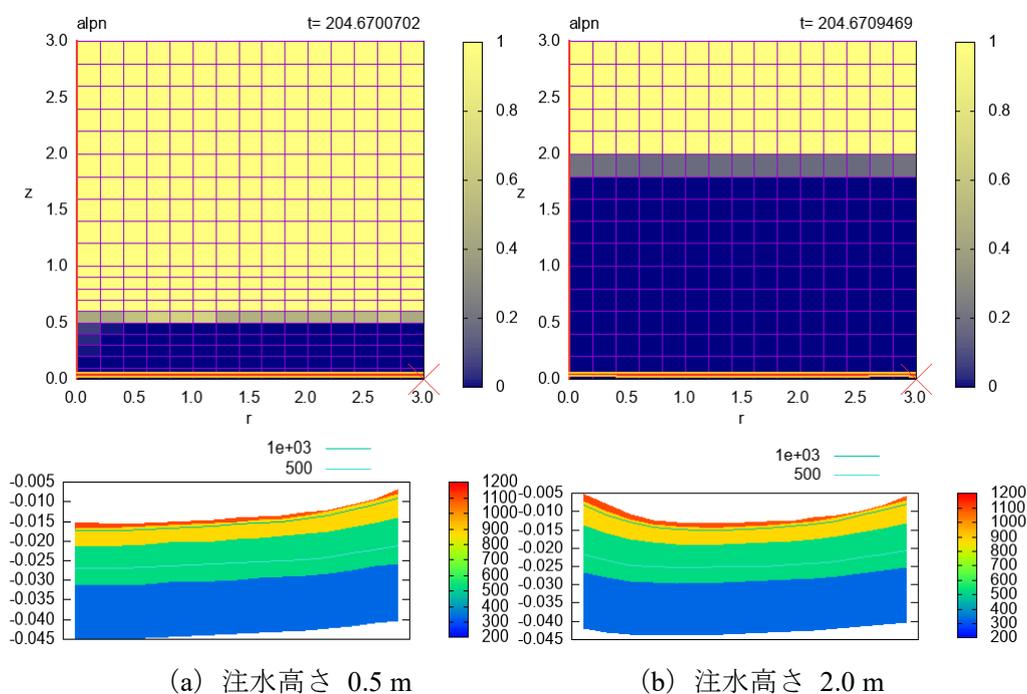


図 C.2 溶融物の液深とクラスト厚さの半径方向分布 (ケース 2)

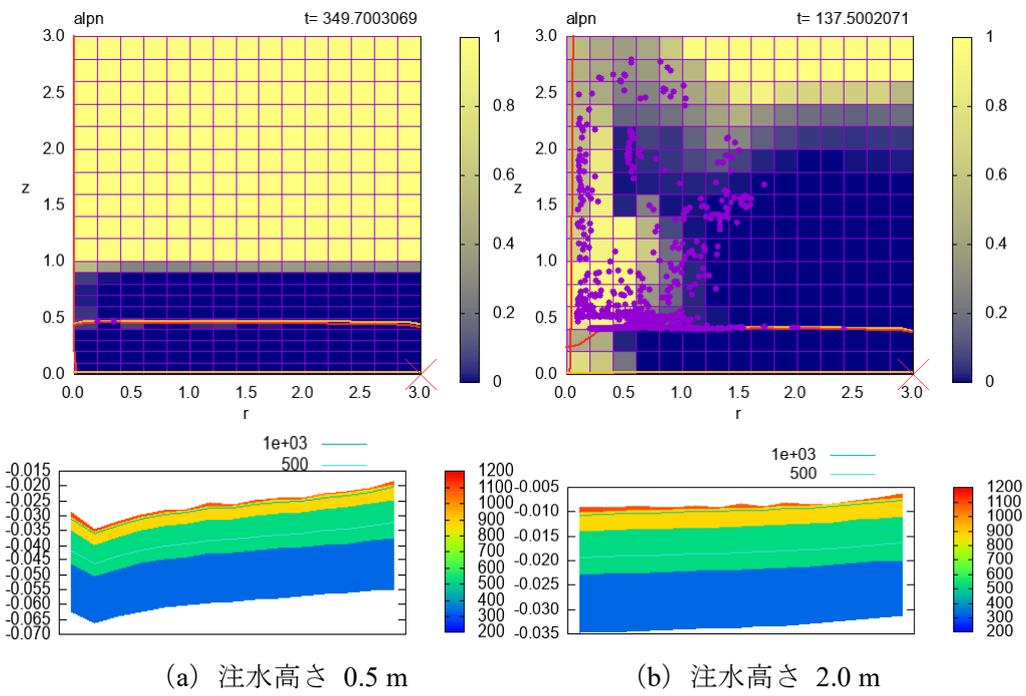


図 C.3 溶融物の液深とクラスト厚さの半径方向分布 (ケース 3)

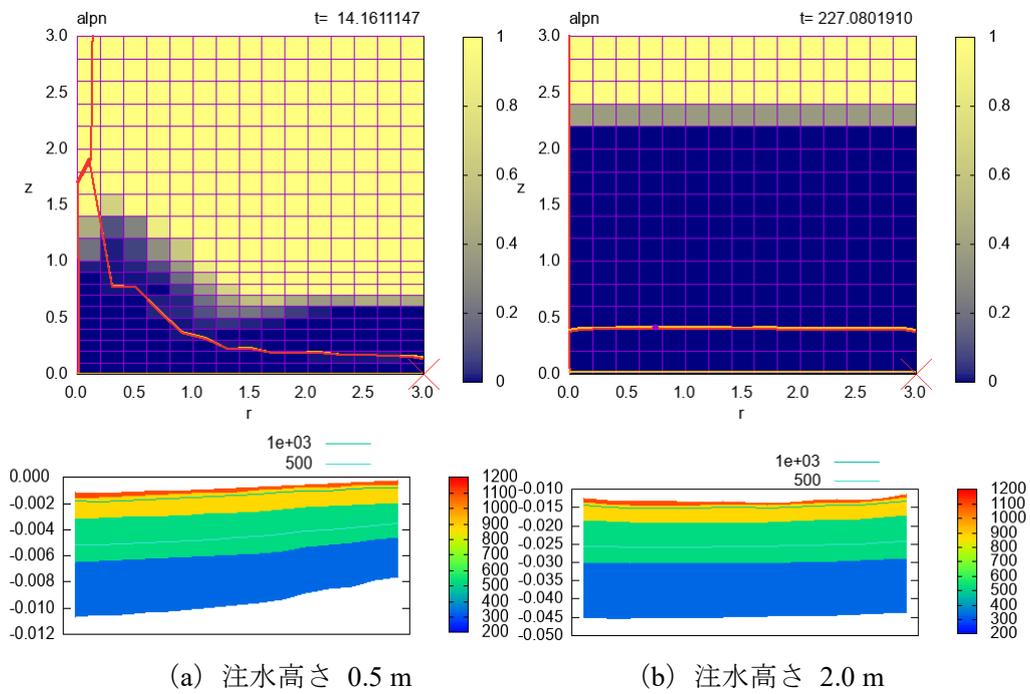


図 C.4 溶融物の液深とクラスト厚さの半径方向分布 (ケース 4)

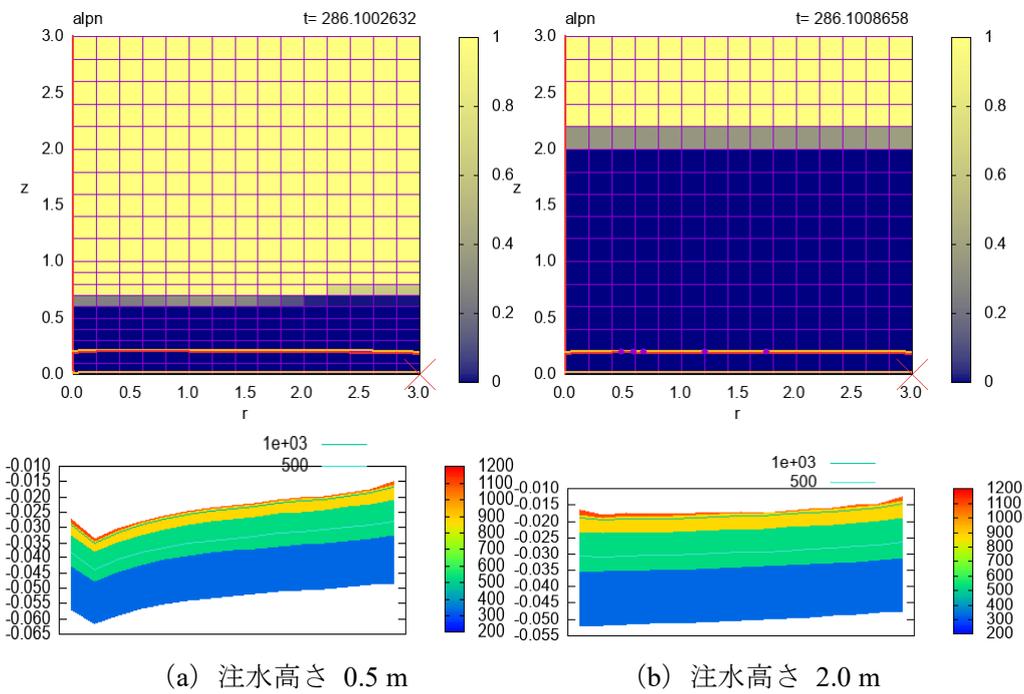


図 C.5 溶融物の液深とクラスト厚さの半径方向分布 (ケース 5)

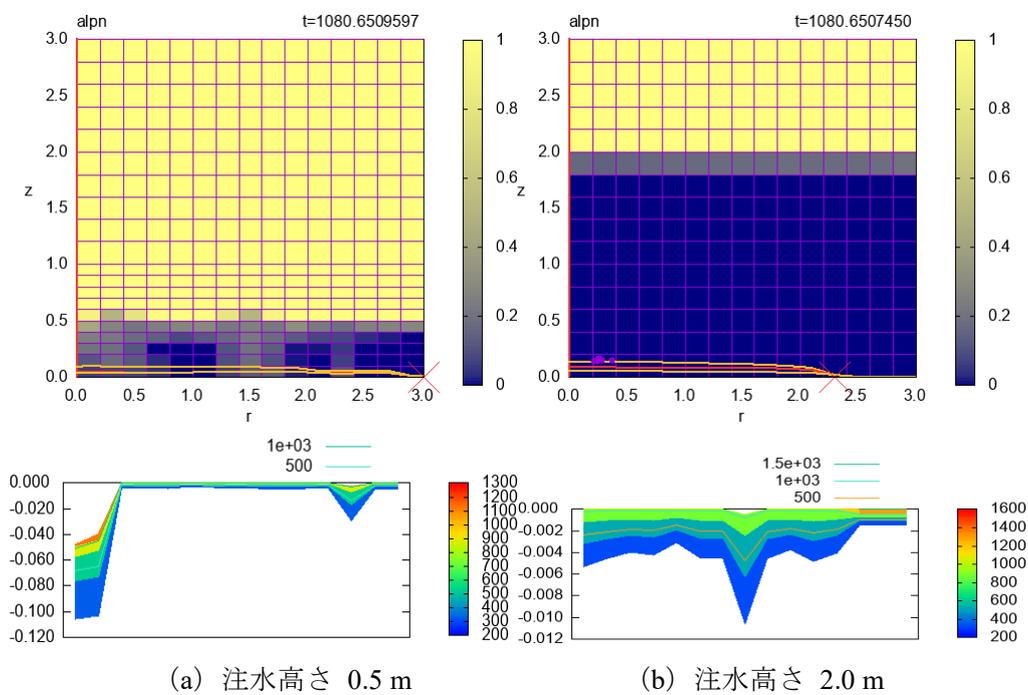


図 C.6 溶融物の液深とクラスト厚さの半径方向分布 (ケース 6)

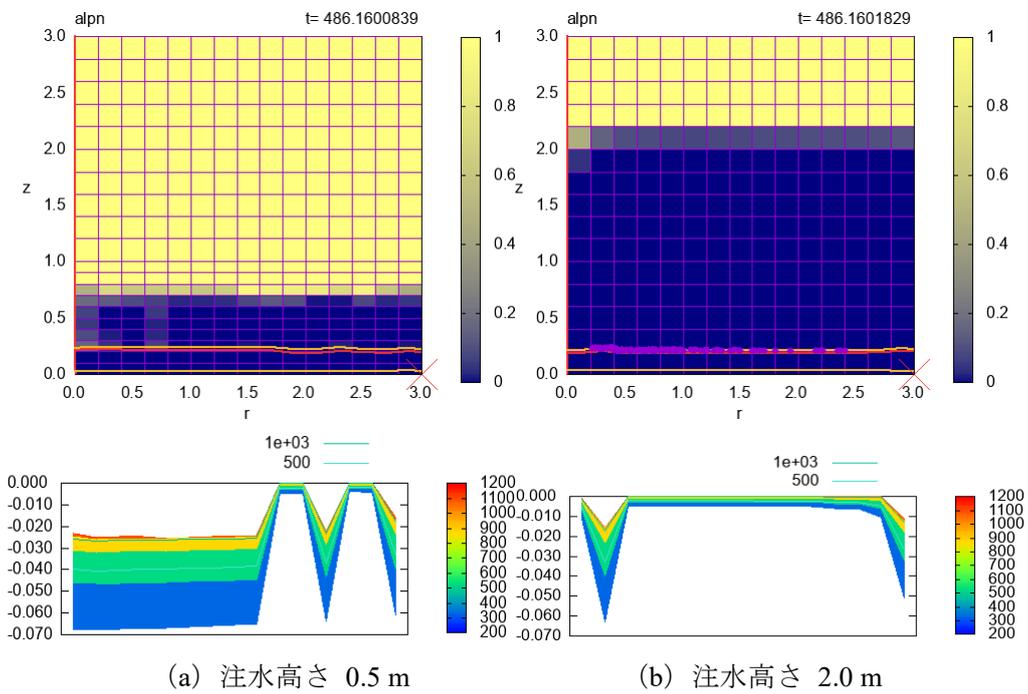


図 C.7 溶融物の液深とクラスト厚さの半径方向分布 (ケース 7)

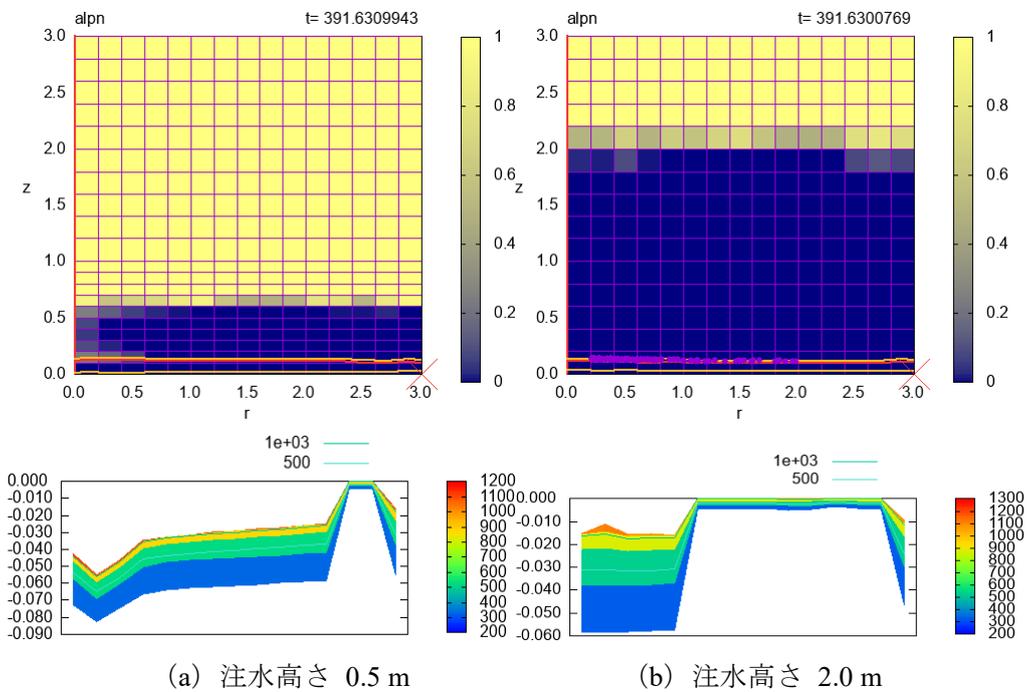


図 C.8 溶融物の液深とクラスト厚さの半径方向分布 (ケース 8)

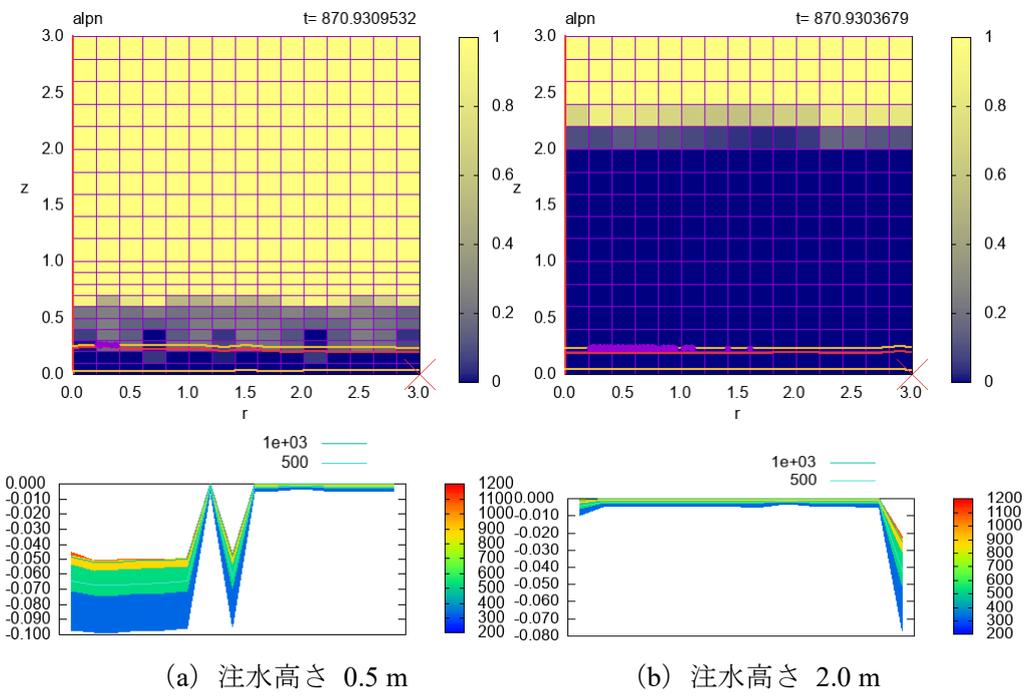


図 C.9 溶融物の液深とクラスト厚さの半径方向分布 (ケース 9)

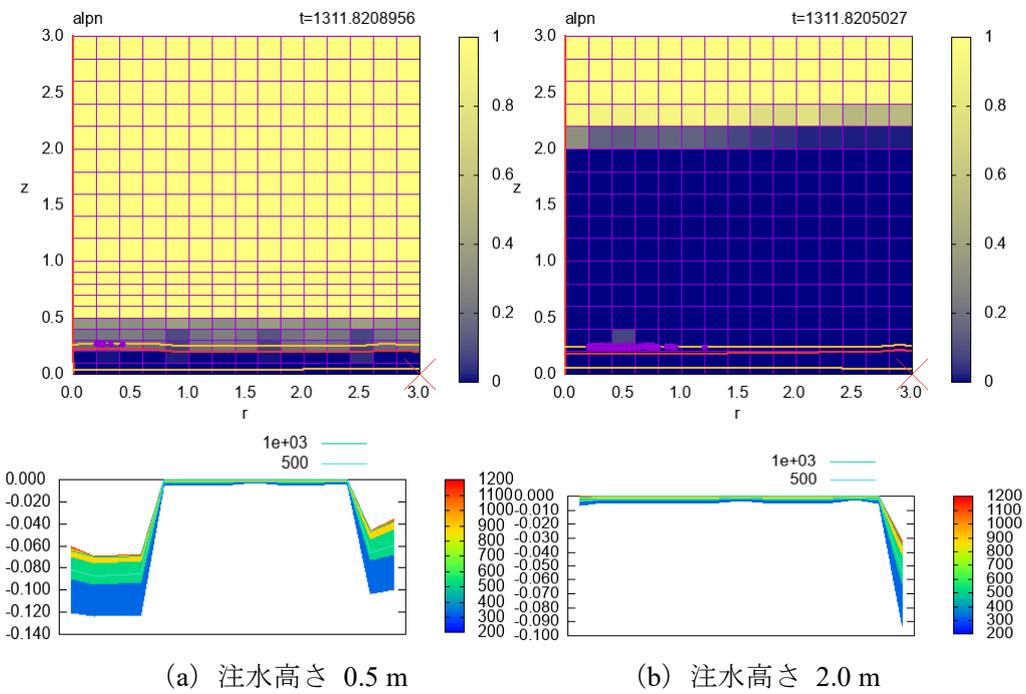


図 C.10 溶融物の液深とクラスト厚さの半径方向分布 (ケース 10)

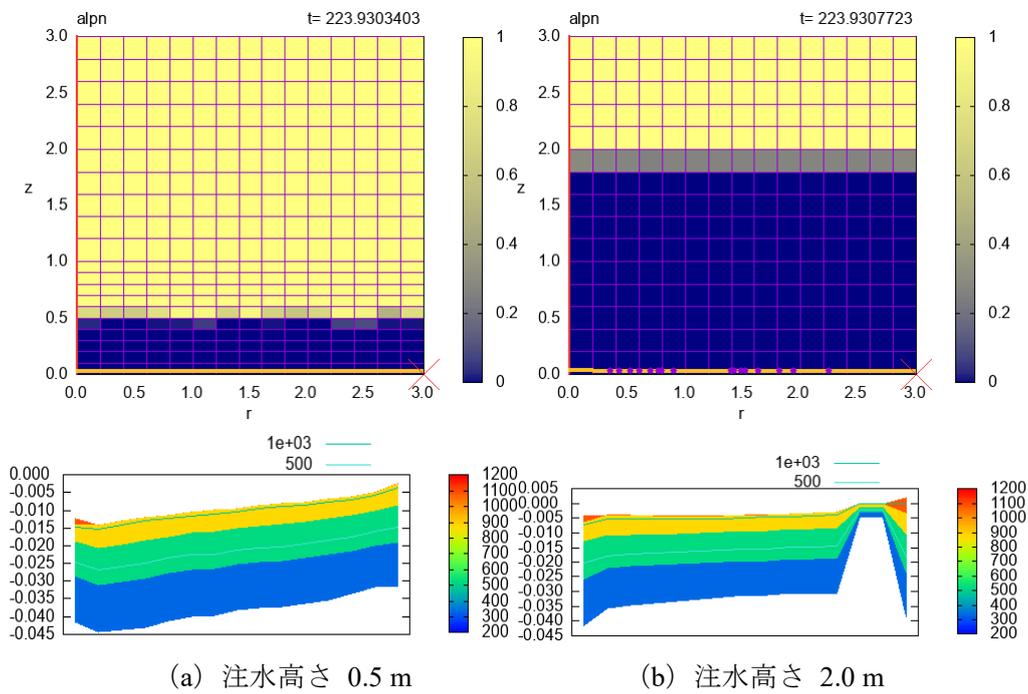


図 C.11 溶融物の液深とクラスト厚さの半径方向分布 (ケース 11)

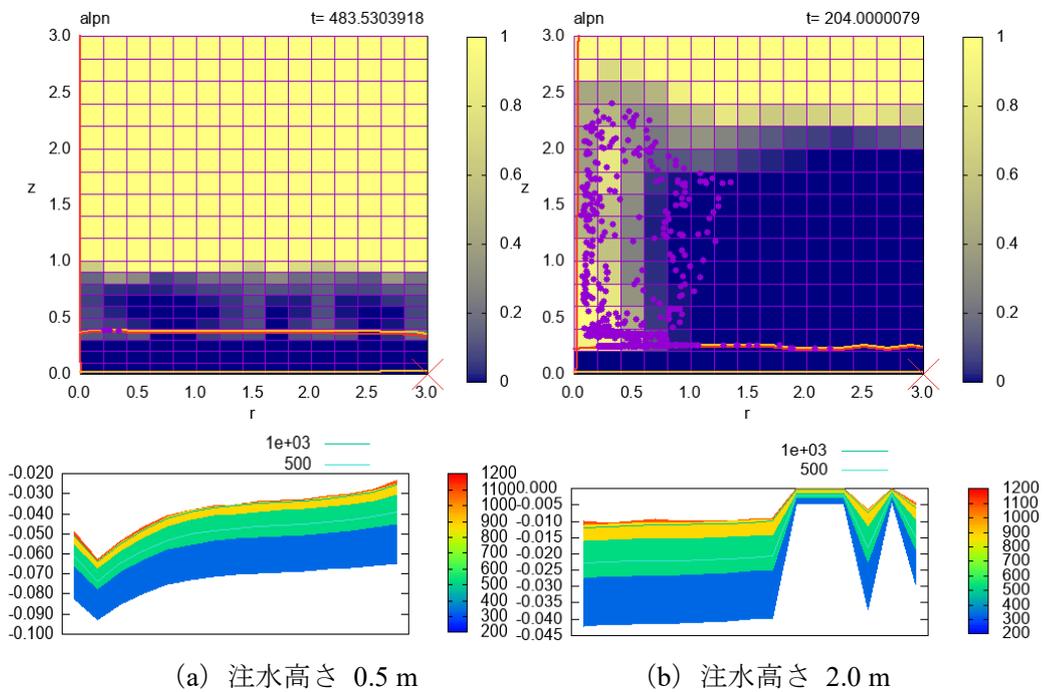


図 C.12 溶融物の液深とクラスト厚さの半径方向分布 (ケース 12)

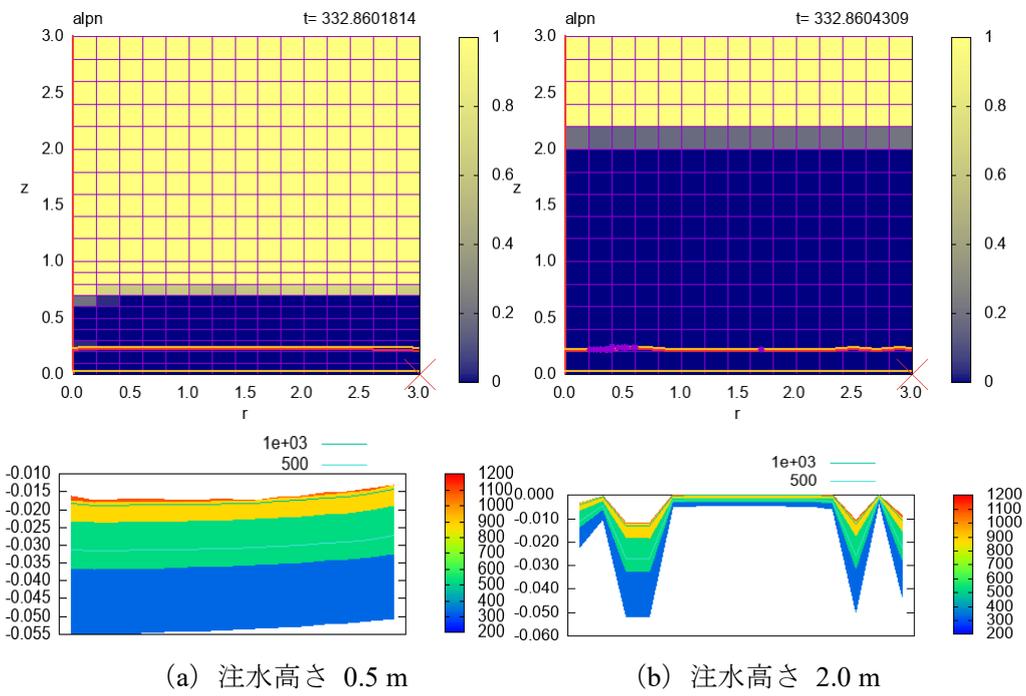


図 C.13 溶融物の液深とクラスト厚さの半径方向分布 (ケース 13)

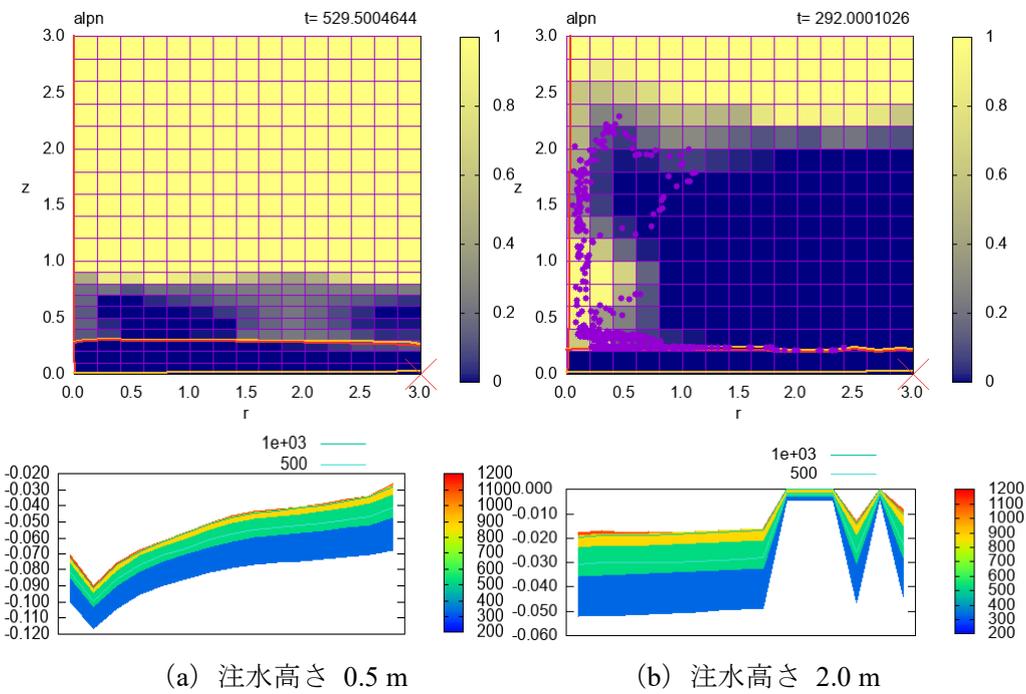


図 C.14 溶融物の液深とクラスト厚さの半径方向分布 (ケース 14)

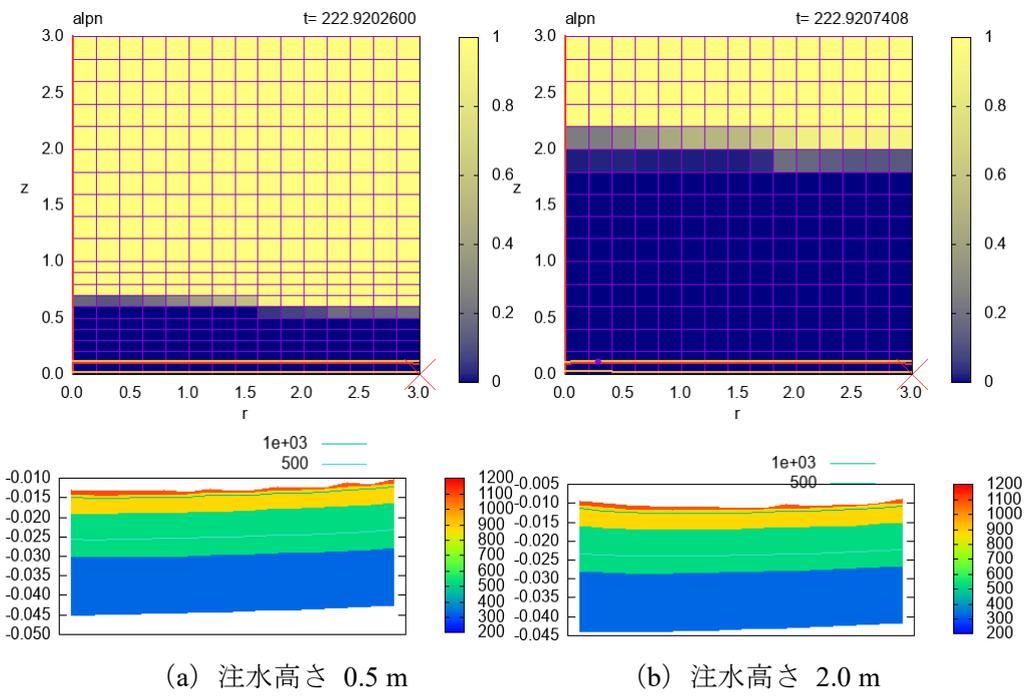


図 C.15 溶融物の液深とクラスト厚さの半径方向分布 (ケース 15)

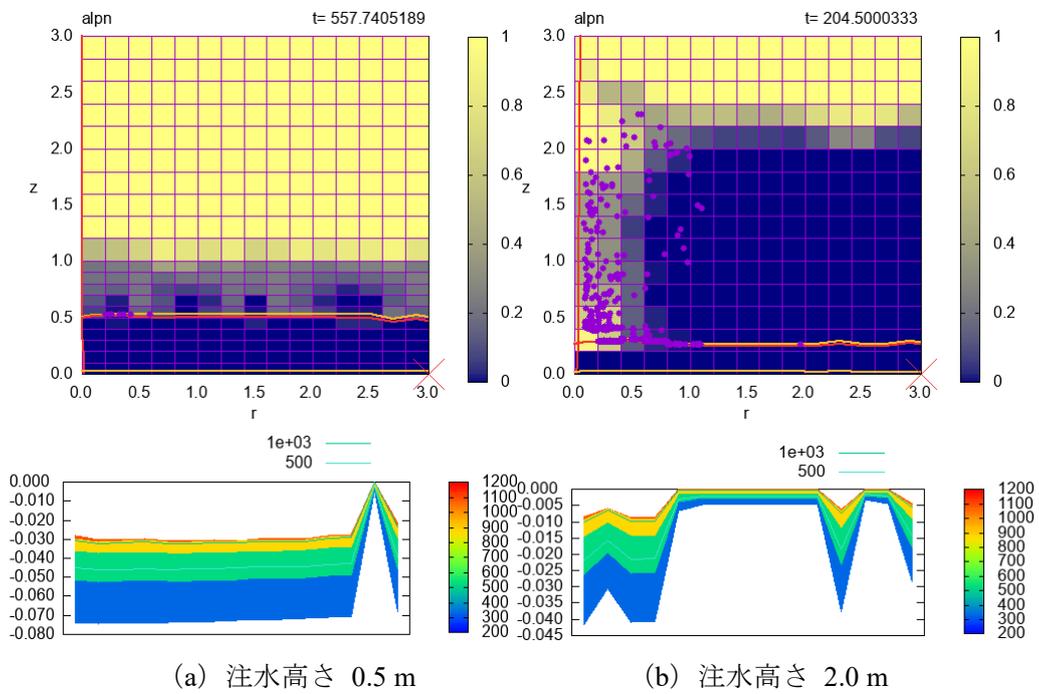


図 C.16 溶融物の液深とクラスト厚さの半径方向分布 (ケース 16)

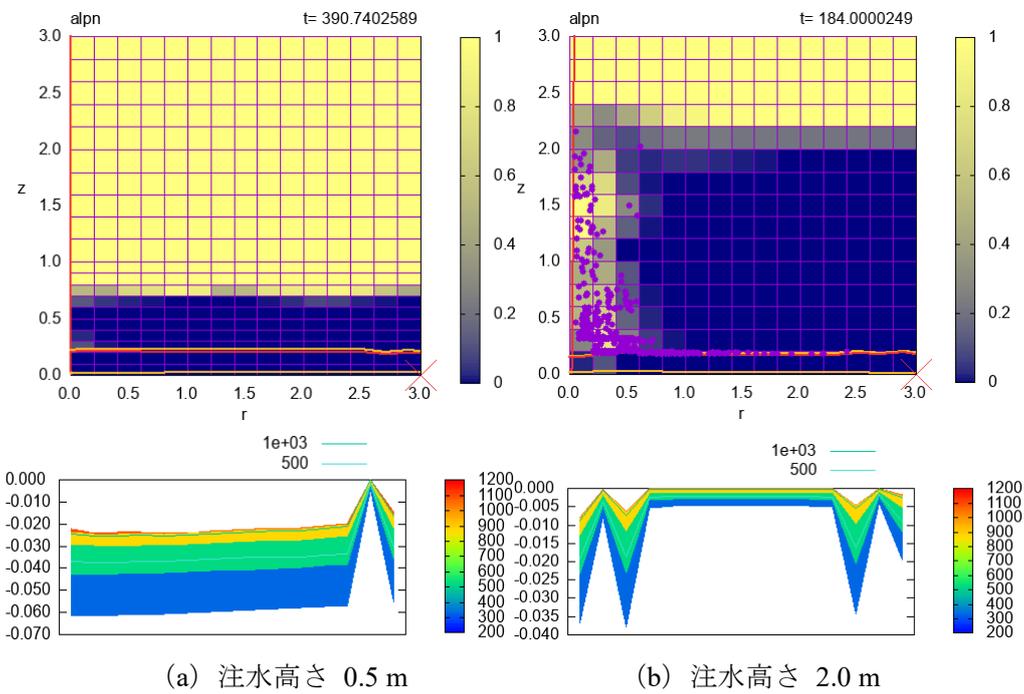


図 C.17 溶融物の液深とクラスト厚さの半径方向分布 (ケース 17)

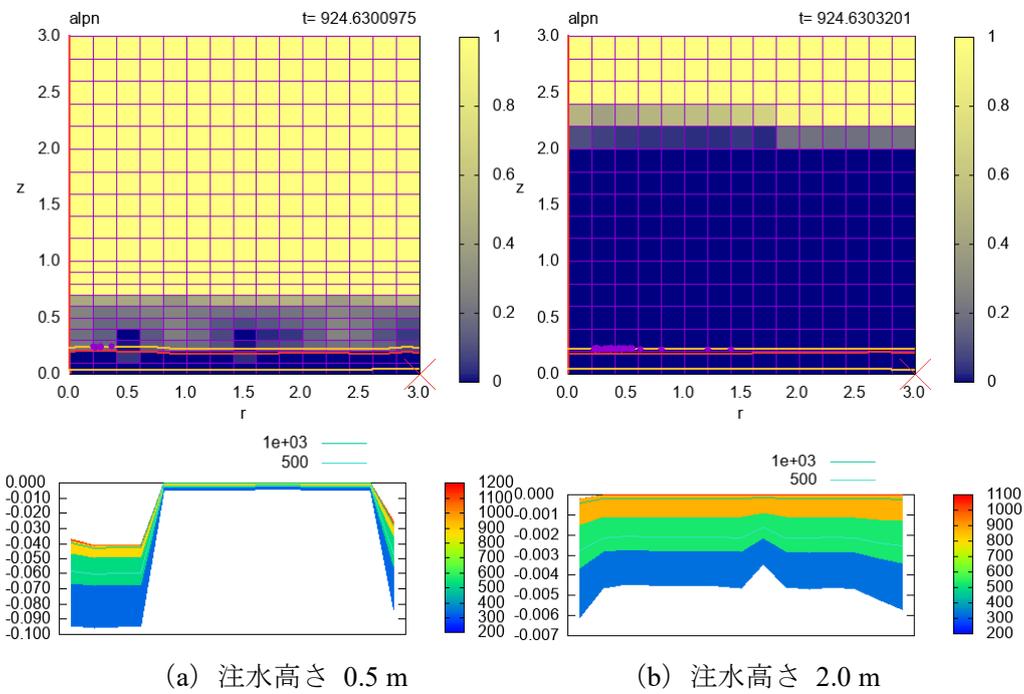


図 C.18 溶融物の液深とクラスト厚さの半径方向分布 (ケース 18)

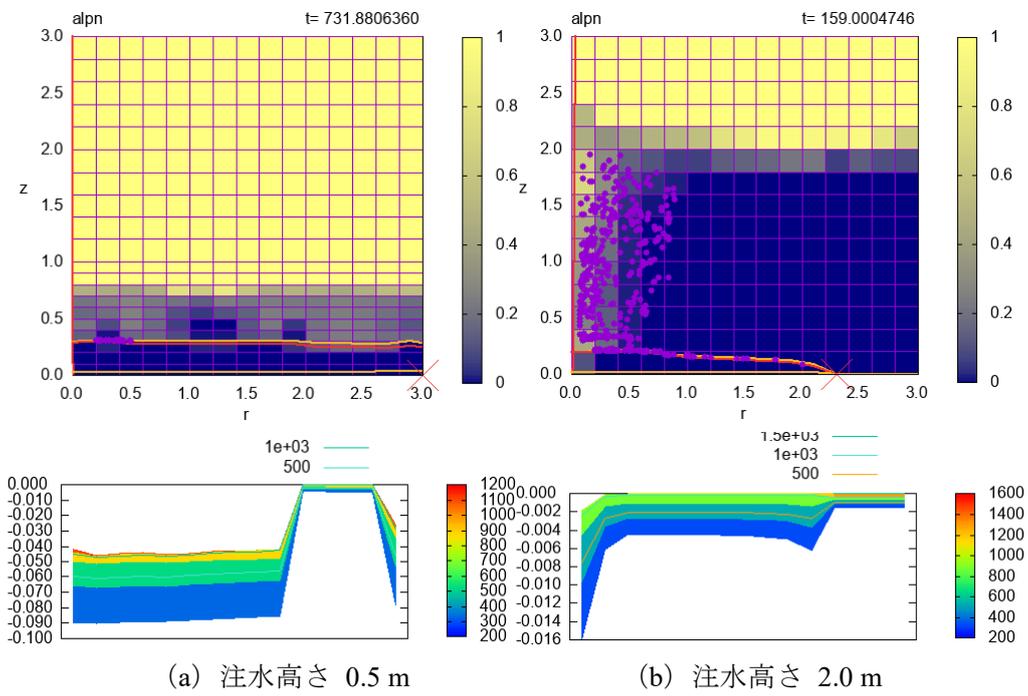


図 C.19 溶融物の液深とクラスト厚さの半径方向分布 (ケース 19)

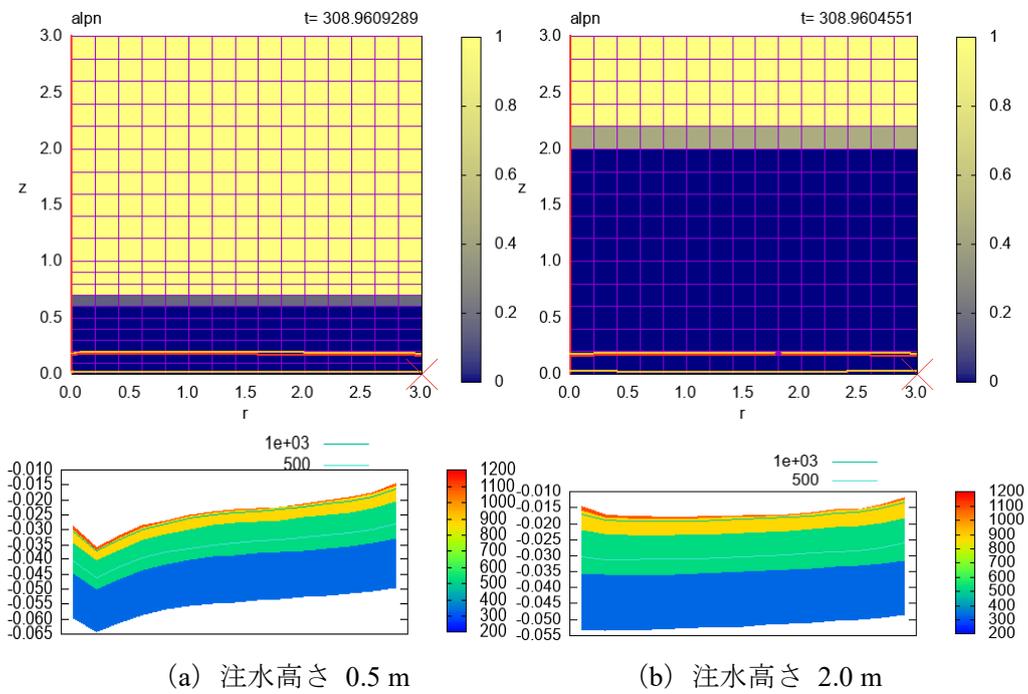


図 C.20 溶融物の液深とクラスト厚さの半径方向分布 (ケース 20)

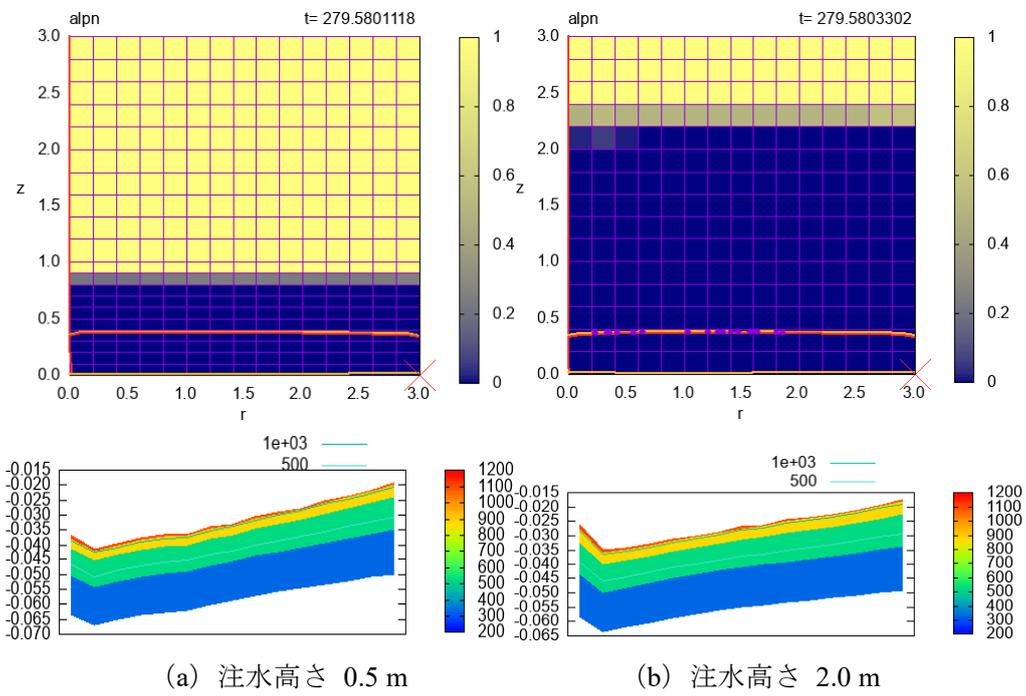


図 C.21 溶融物の液深とクラスト厚さの半径方向分布 (ケース 21)

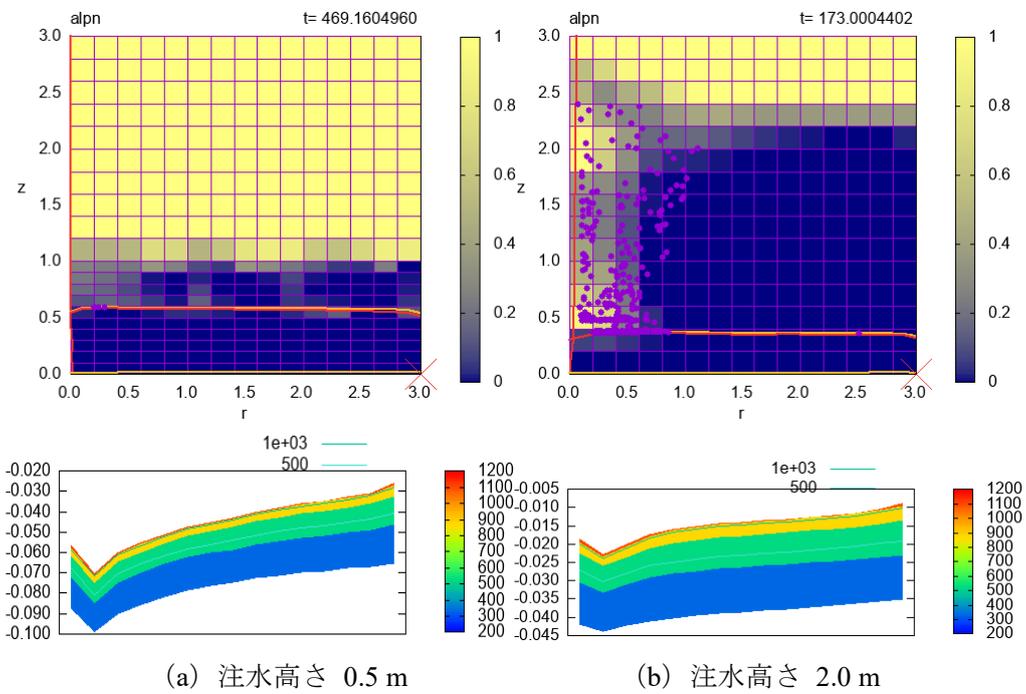


図 C.22 溶融物の液深とクラスト厚さの半径方向分布 (ケース 22)

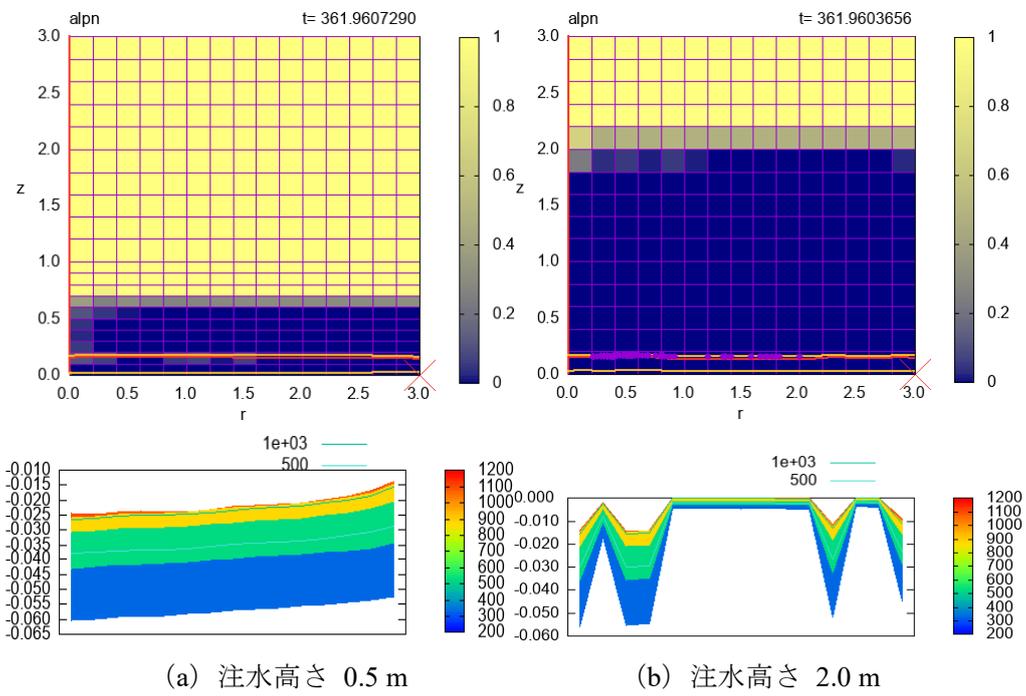


図 C.23 溶融物の液深とクラスト厚さの半径方向分布 (ケース 23)

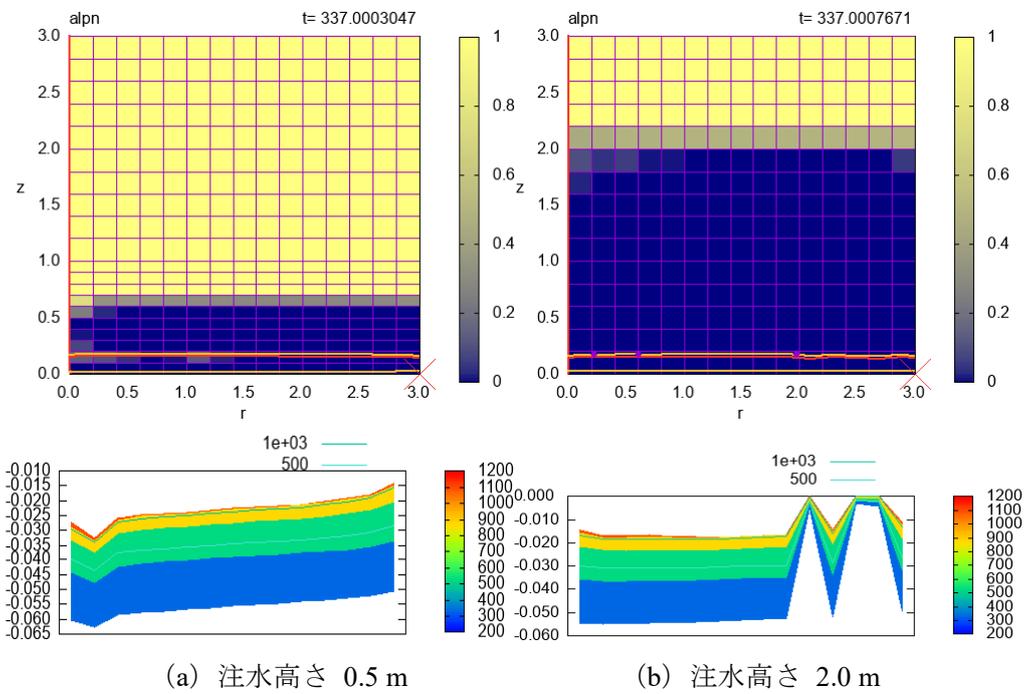


図 C.24 溶融物の液深とクラスト厚さの半径方向分布 (ケース 24)

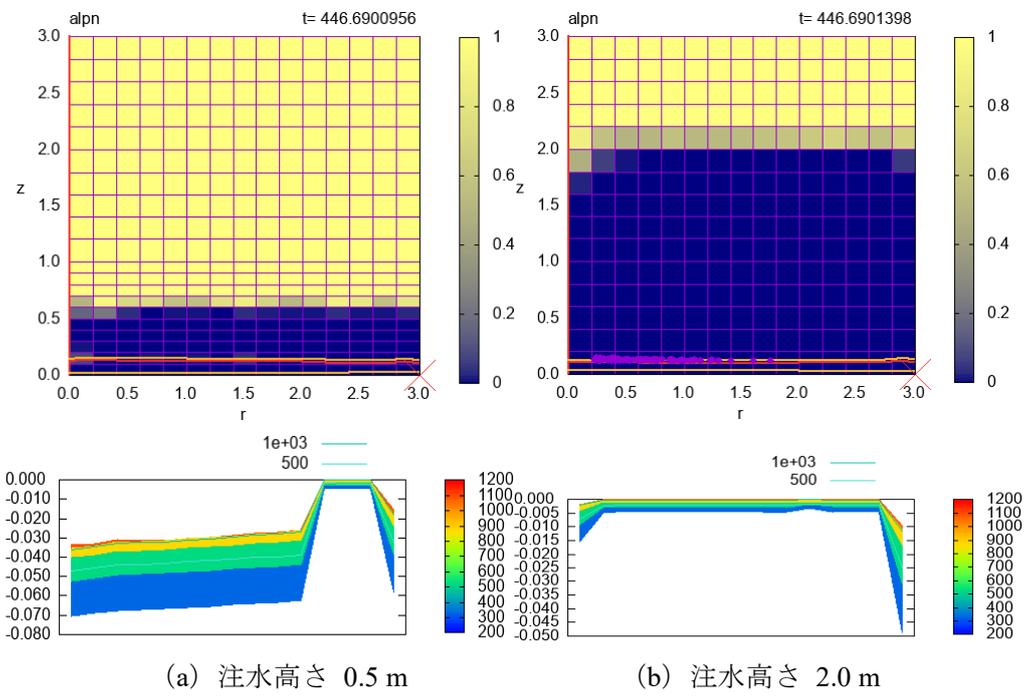


図 C.25 溶融物の液深とクラスト厚さの半径方向分布 (ケース 25)

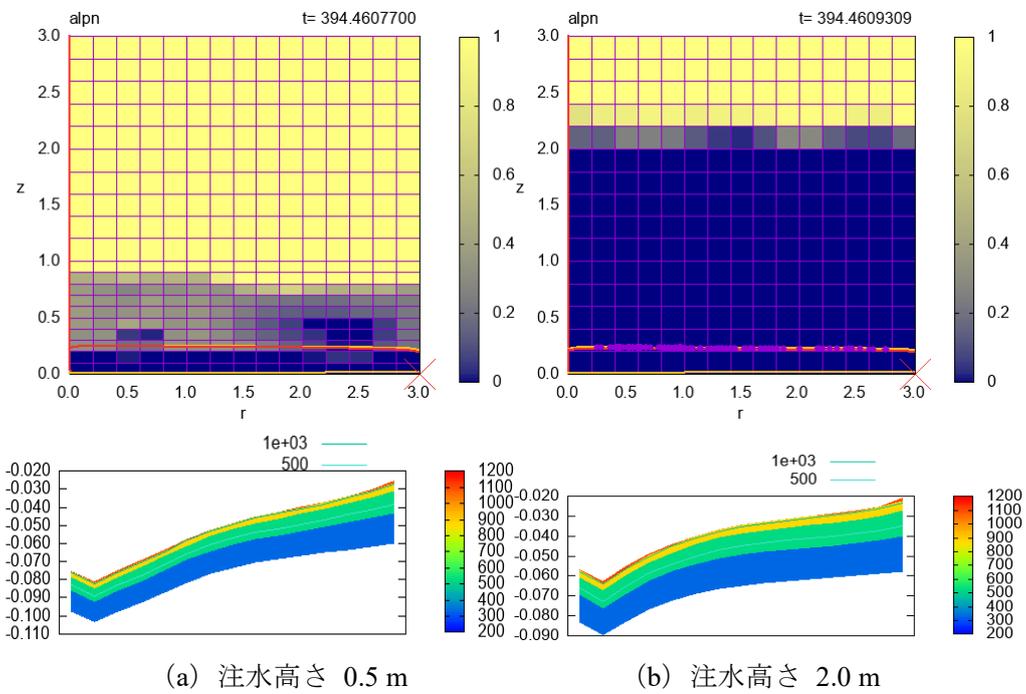


図 C.26 溶融物の液深とクラスト厚さの半径方向分布 (ケース 26)

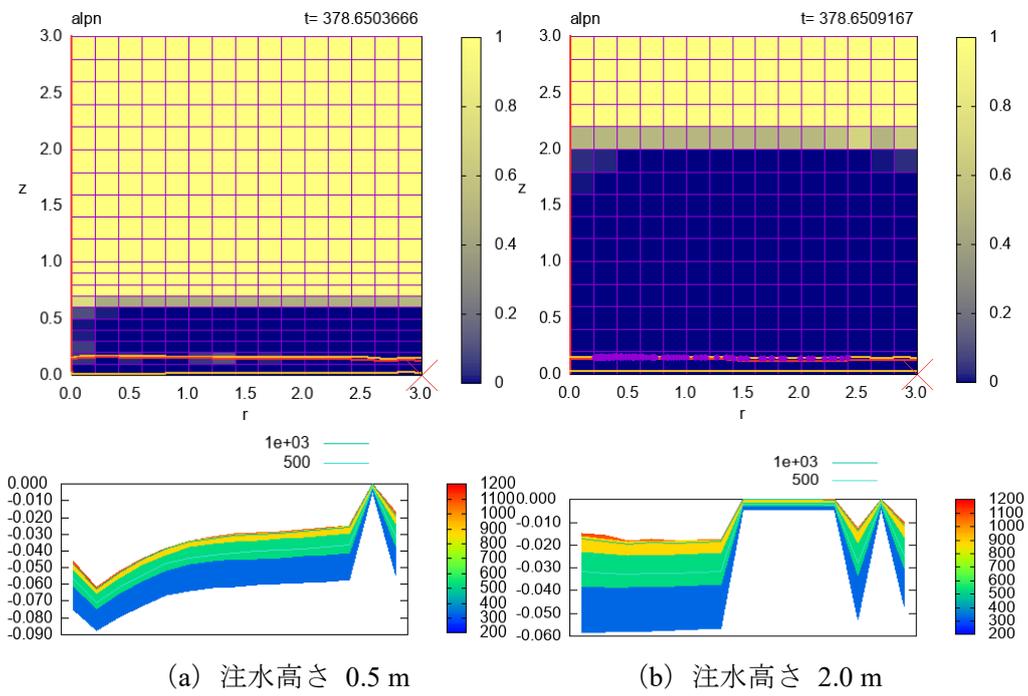


図 C.27 溶融物の液深とクラスト厚さの半径方向分布 (ケース 27)

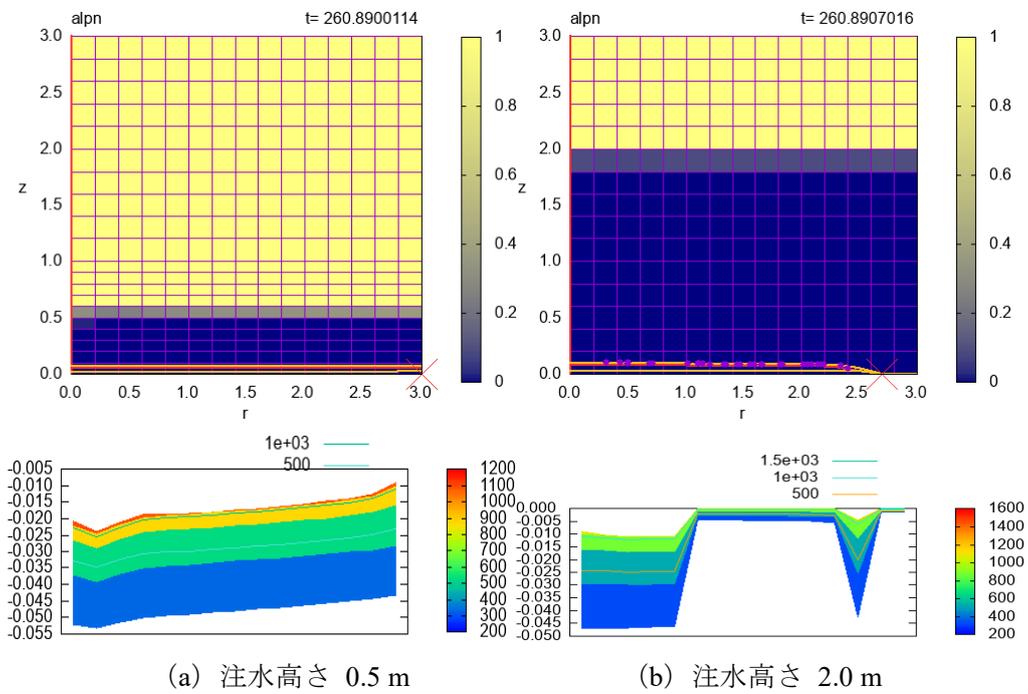


図 C.28 溶融物の液深とクラスト厚さの半径方向分布 (ケース 28)

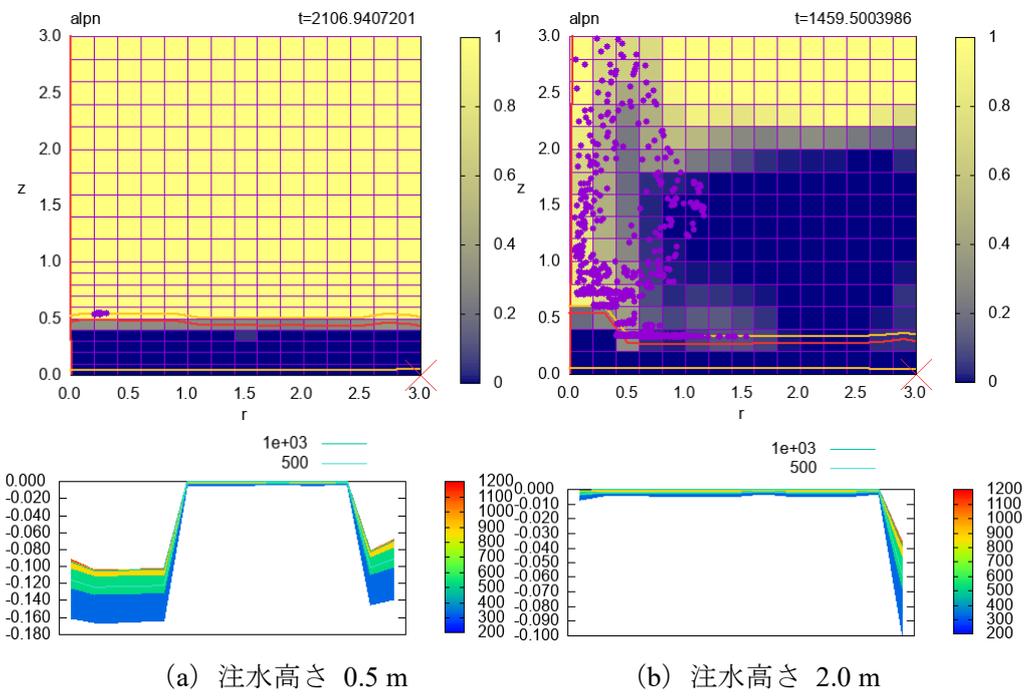


図 C.29 溶融物の液深とクラスト厚さの半径方向分布 (ケース 29)

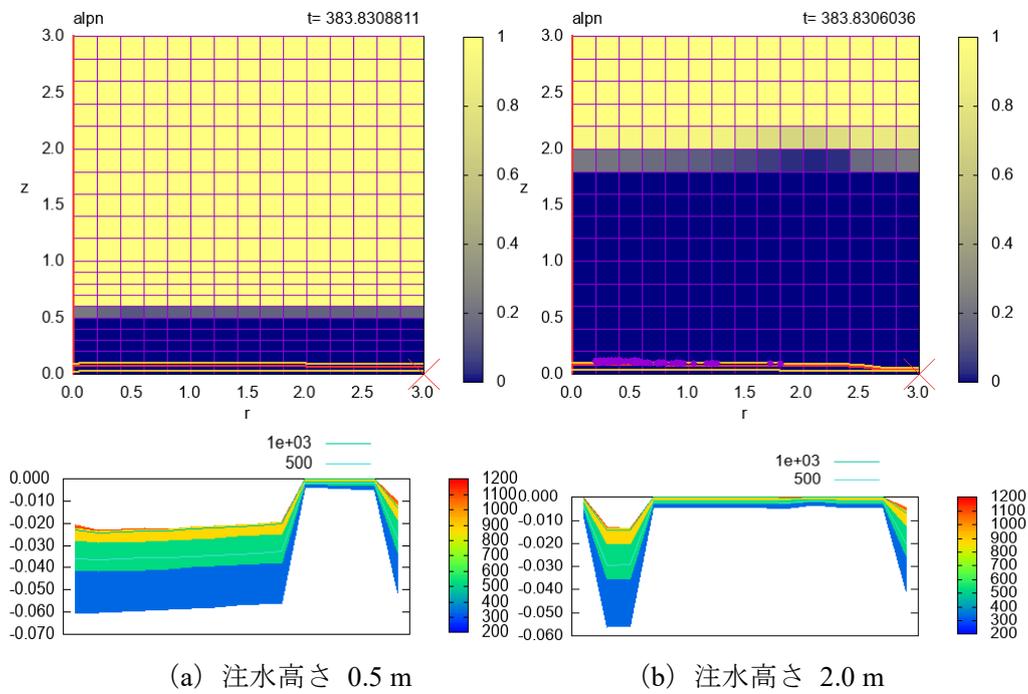


図 C.30 溶融物の液深とクラスト厚さの半径方向分布 (ケース 30)

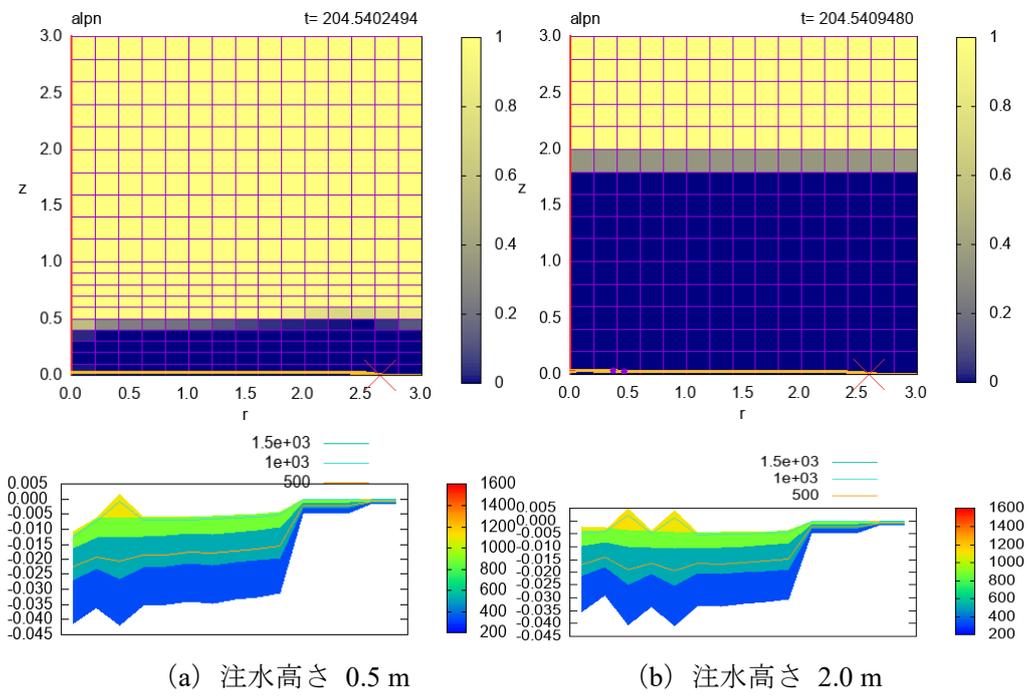


図 C.31 溶融物の液深とクラスト厚さの半径方向分布 (ケース 31)

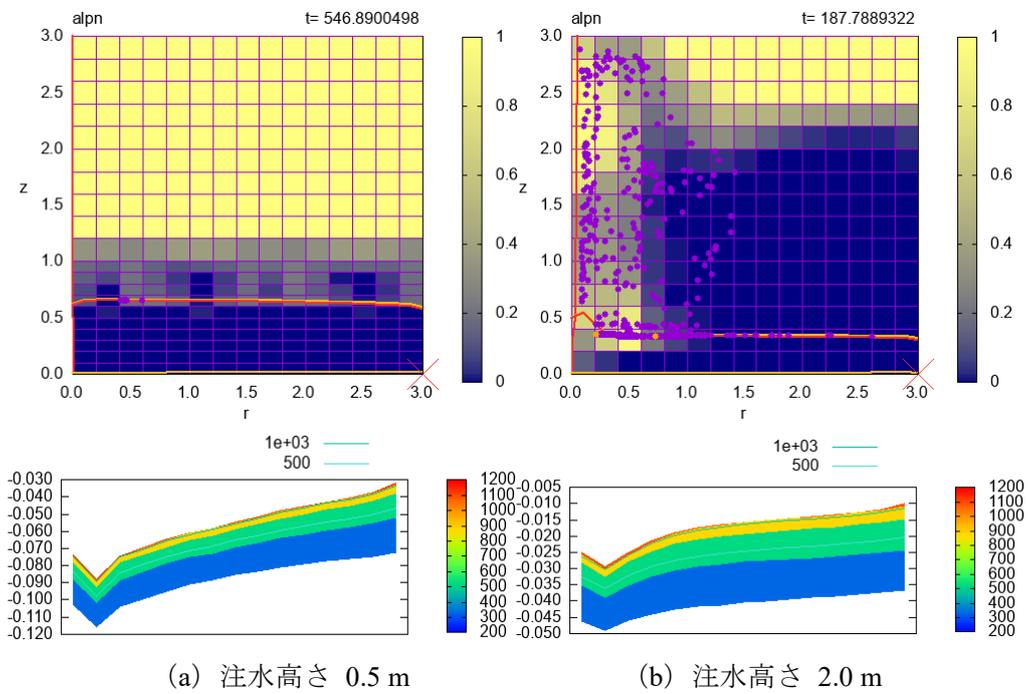


図 C.32 溶融物の液深とクラスト厚さの半径方向分布 (ケース 32)

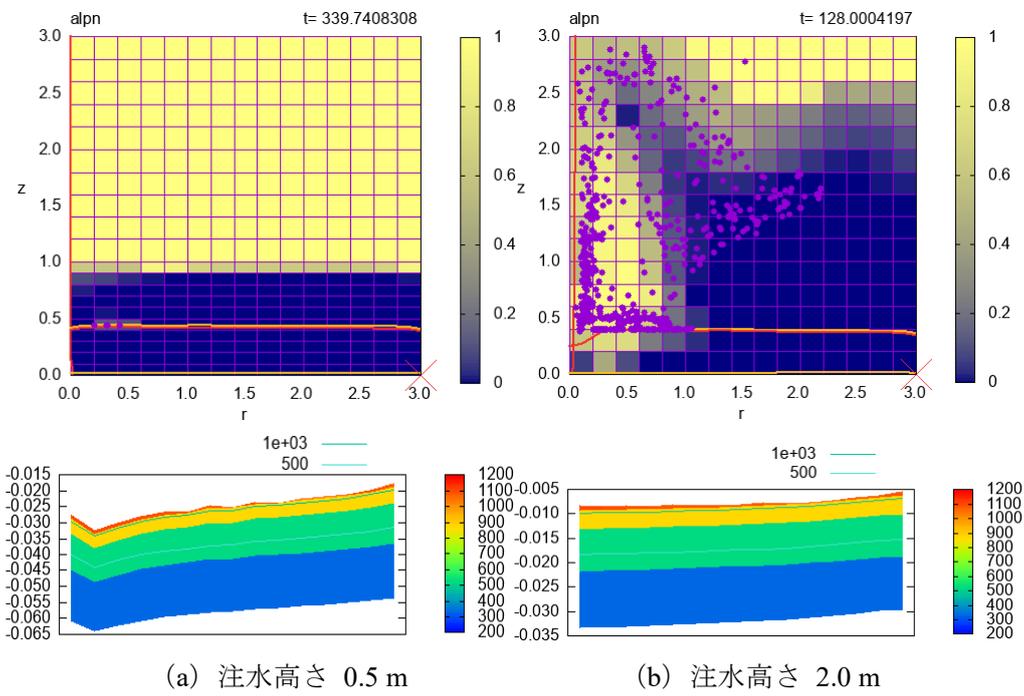


図 C.33 溶融物の液深とクラスト厚さの半径方向分布 (ケース 33)

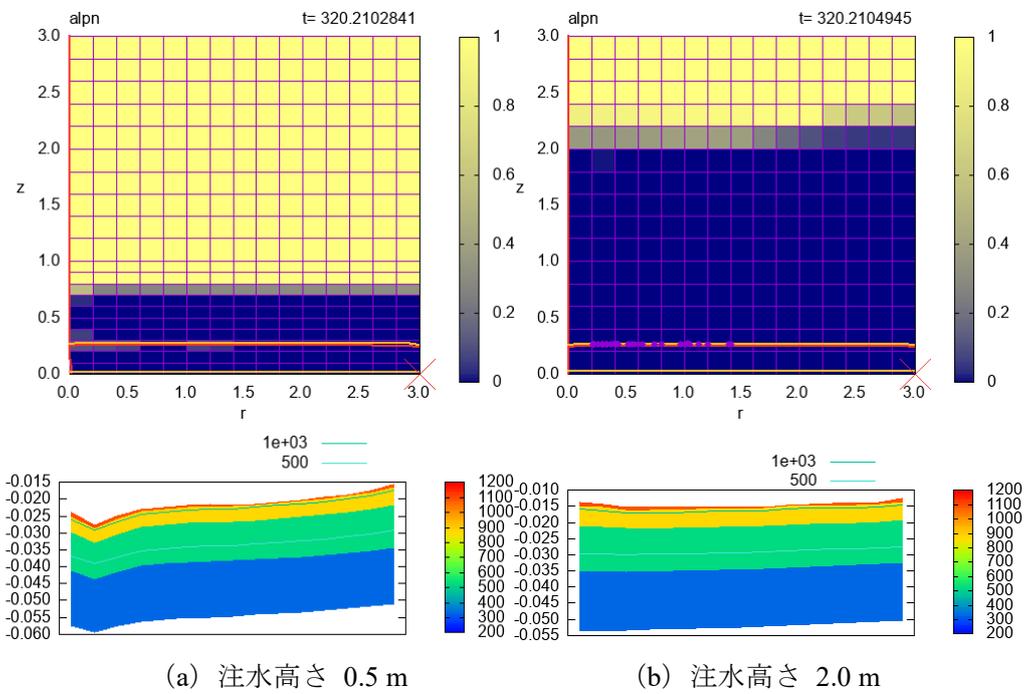


図 C.34 溶融物の液深とクラスト厚さの半径方向分布 (ケース 34)

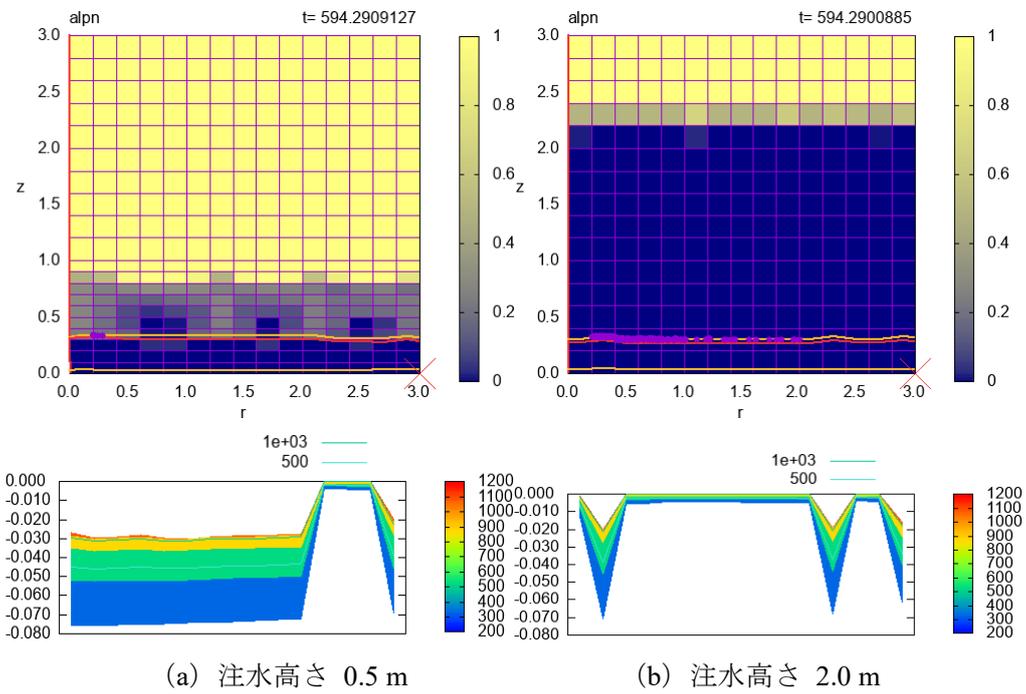


図 C.35 溶融物の液深とクラスト厚さの半径方向分布 (ケース 35)

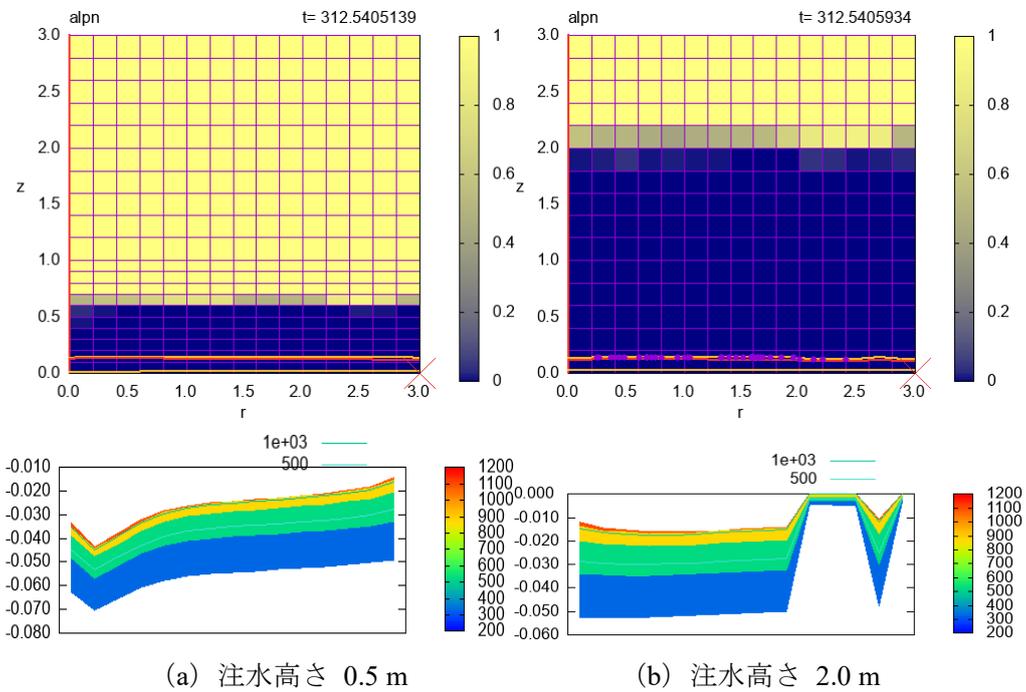


図 C.36 溶融物の液深とクラスト厚さの半径方向分布 (ケース 36)

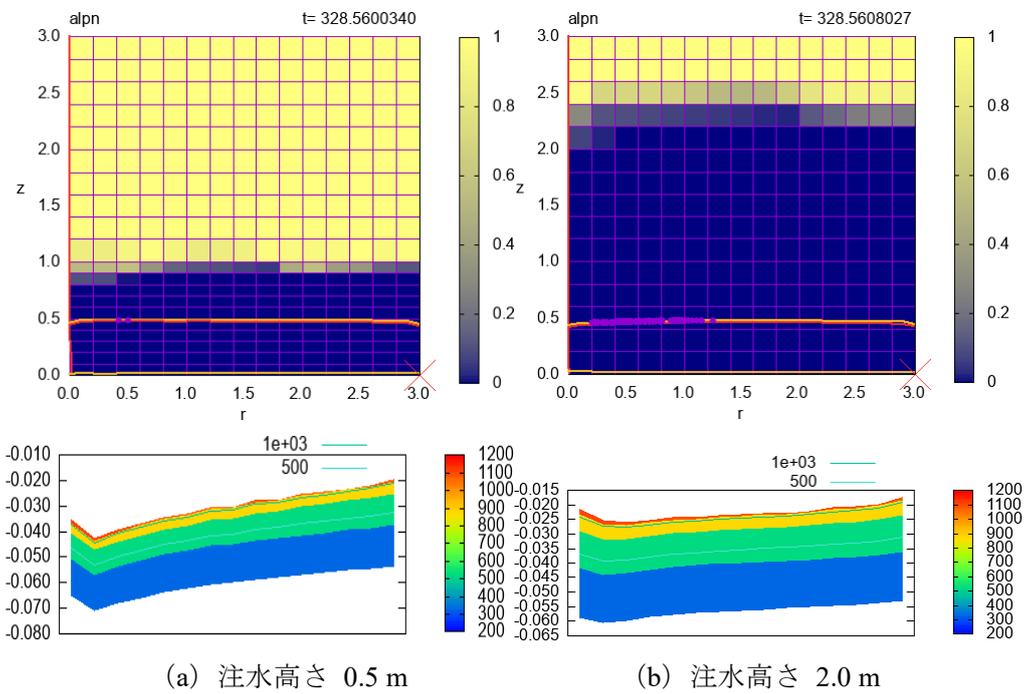


図 C.37 溶融物の液深とクラスト厚さの半径方向分布 (ケース 37)

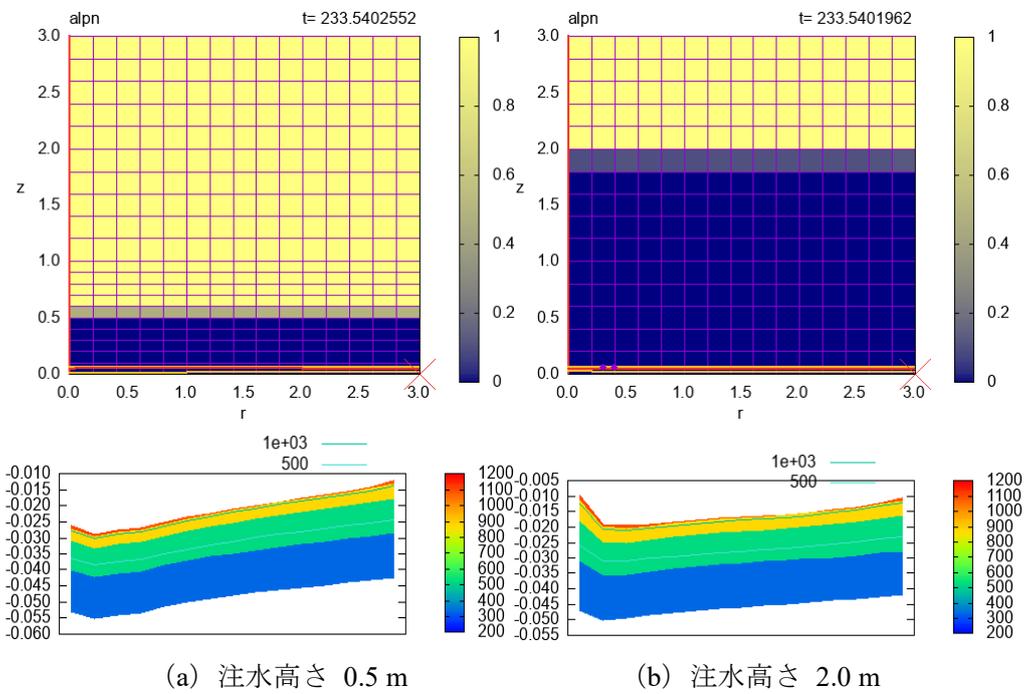


図 C.38 溶融物の液深とクラスト厚さの半径方向分布 (ケース 38)

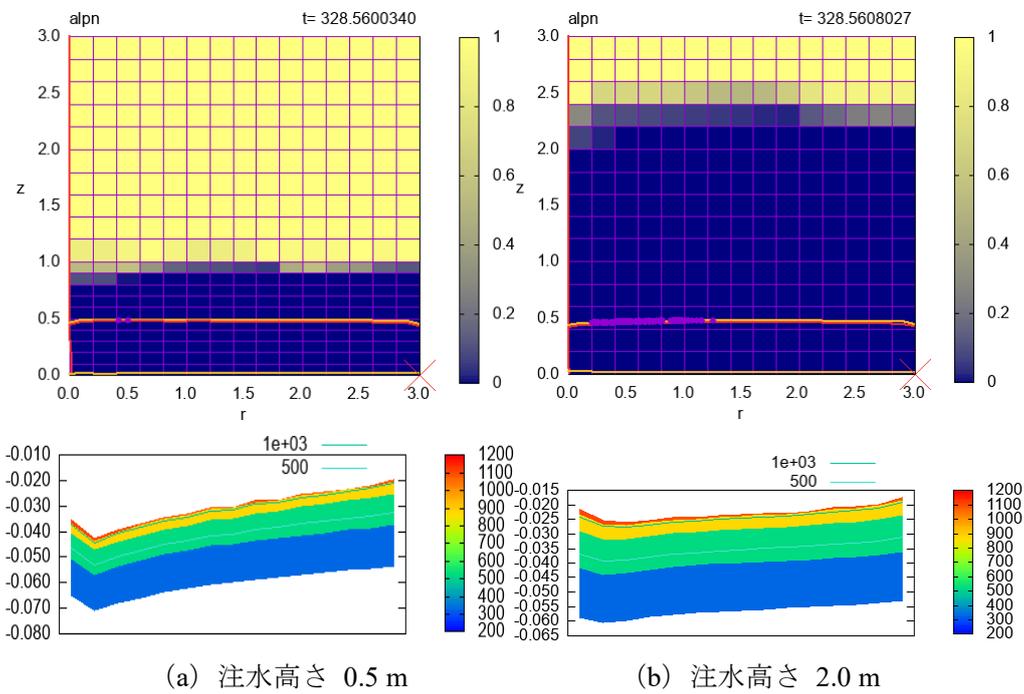


図 C.39 溶融物の液深とクラスト厚さの半径方向分布 (ケース 39)

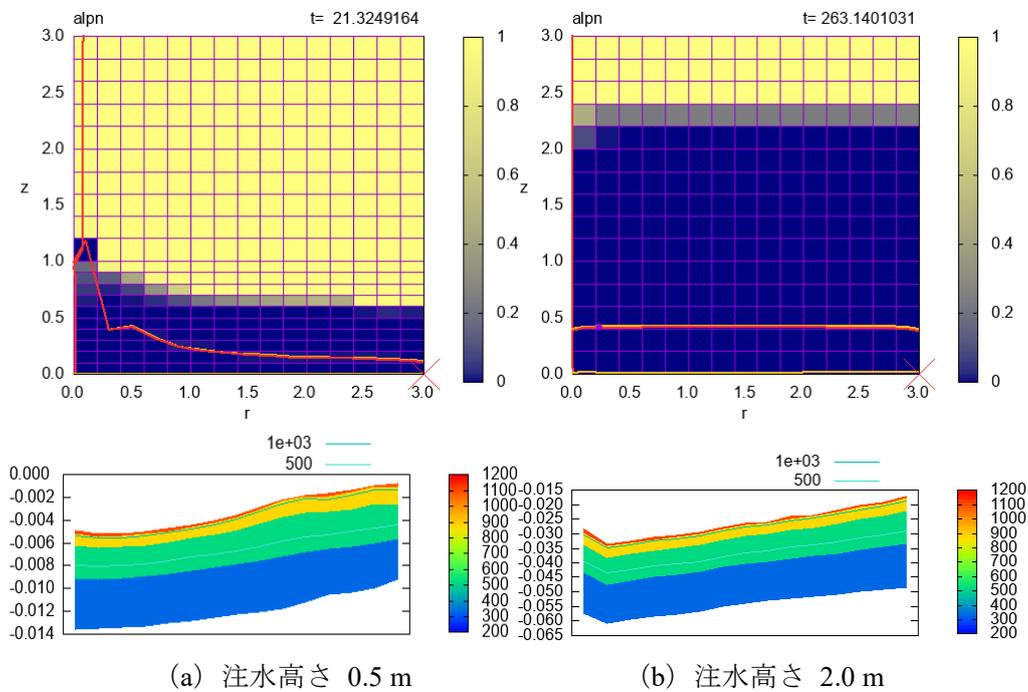


図 C.40 溶融物の液深とクラスト厚さの半径方向分布 (ケース 40)

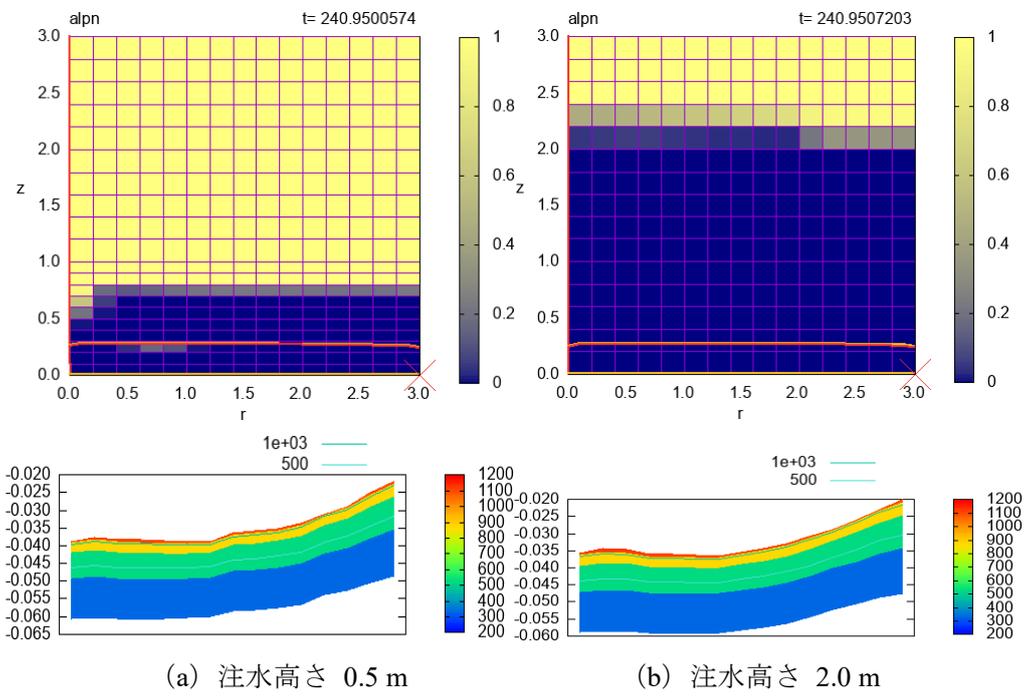


図 C.41 溶融物の液深とクラスト厚さの半径方向分布 (ケース 41)

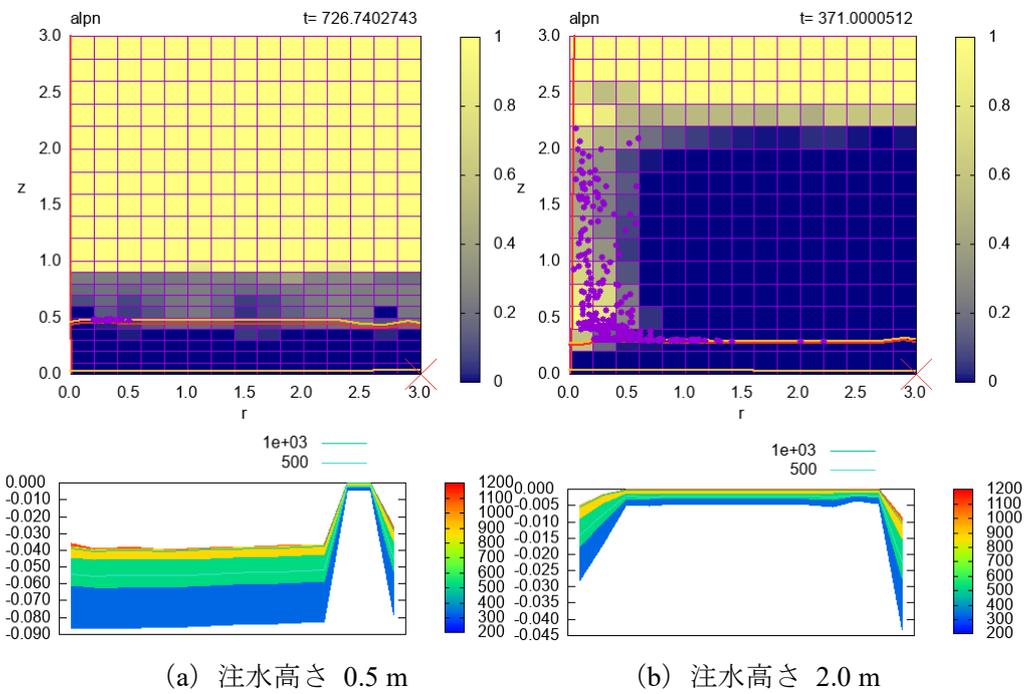


図 C.42 溶融物の液深とクラスト厚さの半径方向分布 (ケース 42)

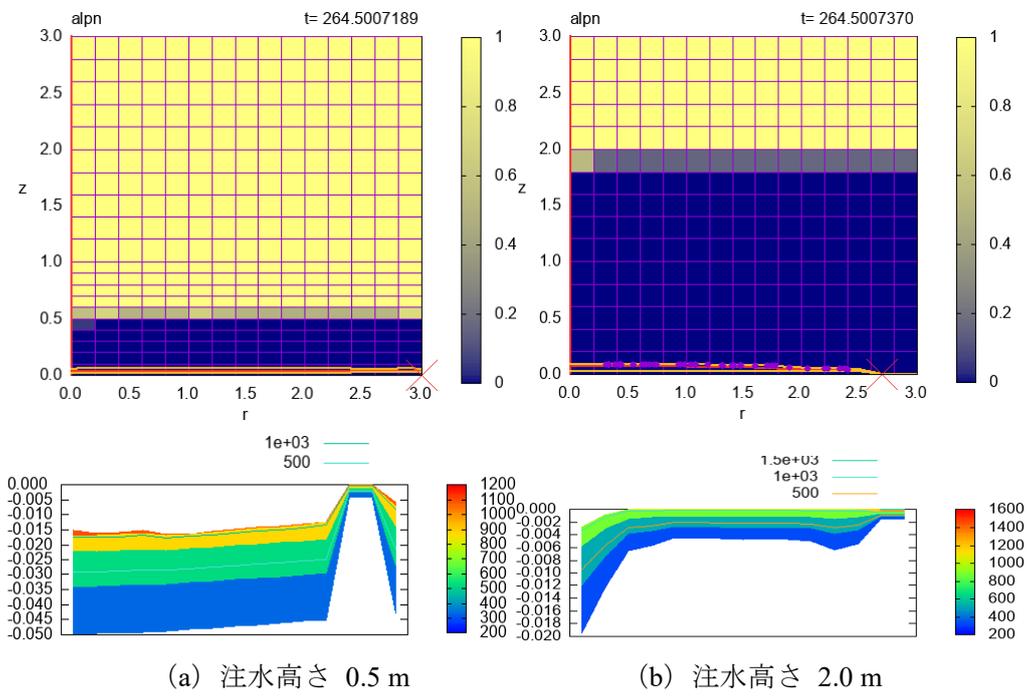


図 C.43 溶融物の液深とクラスト厚さの半径方向分布 (ケース 43)

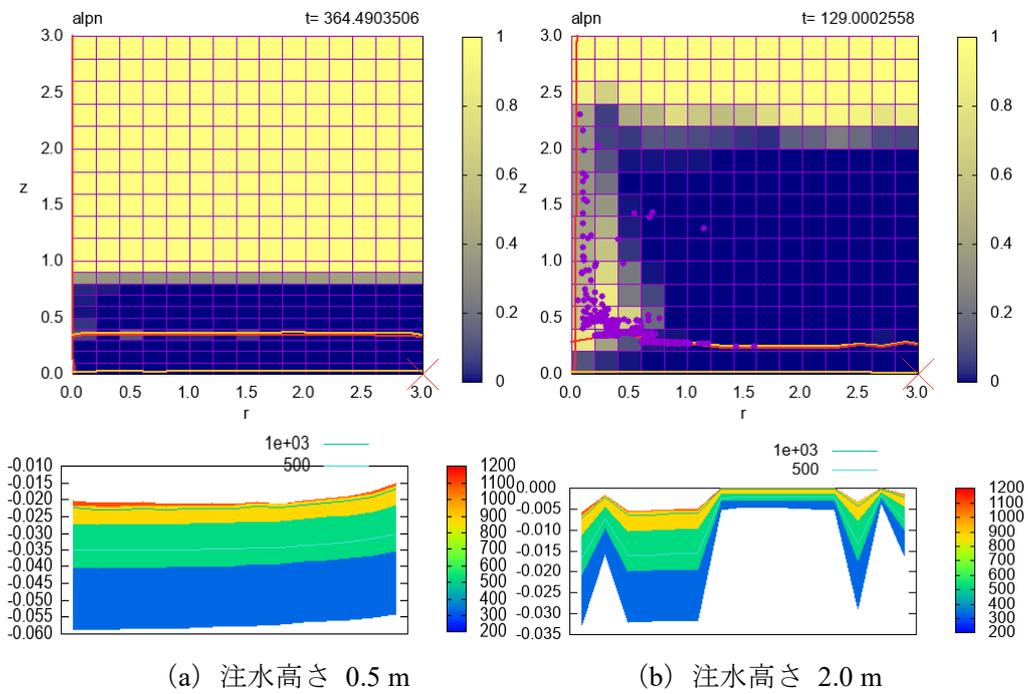


図 C.44 溶融物の液深とクラスト厚さの半径方向分布 (ケース 44)

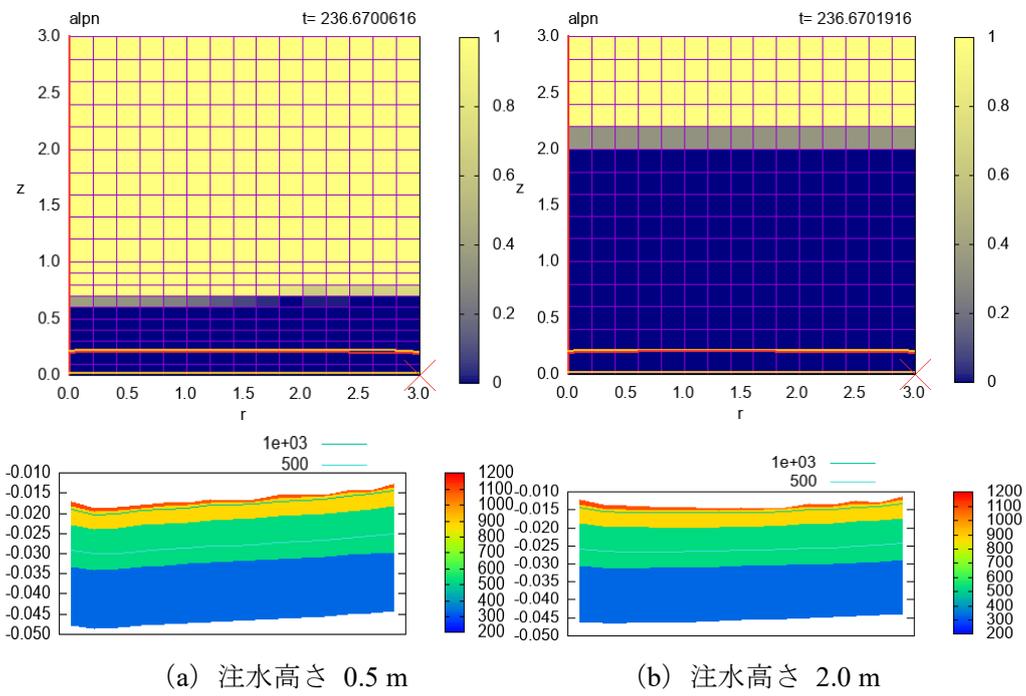


図 C.45 溶融物の液深とクラスト厚さの半径方向分布 (ケース 45)

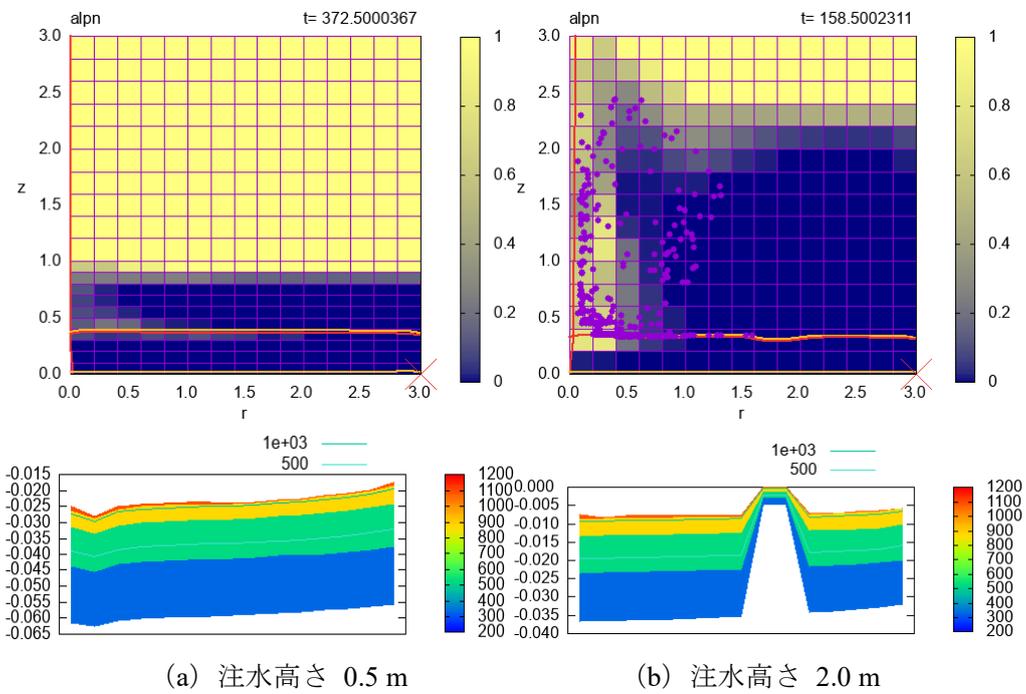


図 C.46 溶融物の液深とクラスト厚さの半径方向分布 (ケース 46)

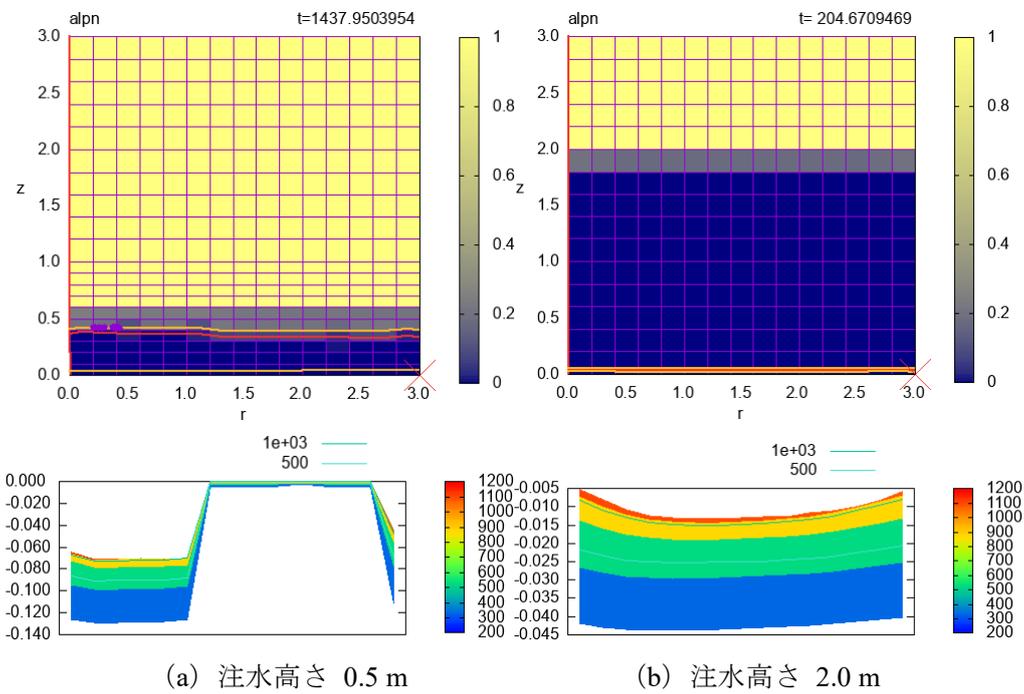


図 C.47 溶融物の液深とクラスト厚さの半径方向分布 (ケース 47)

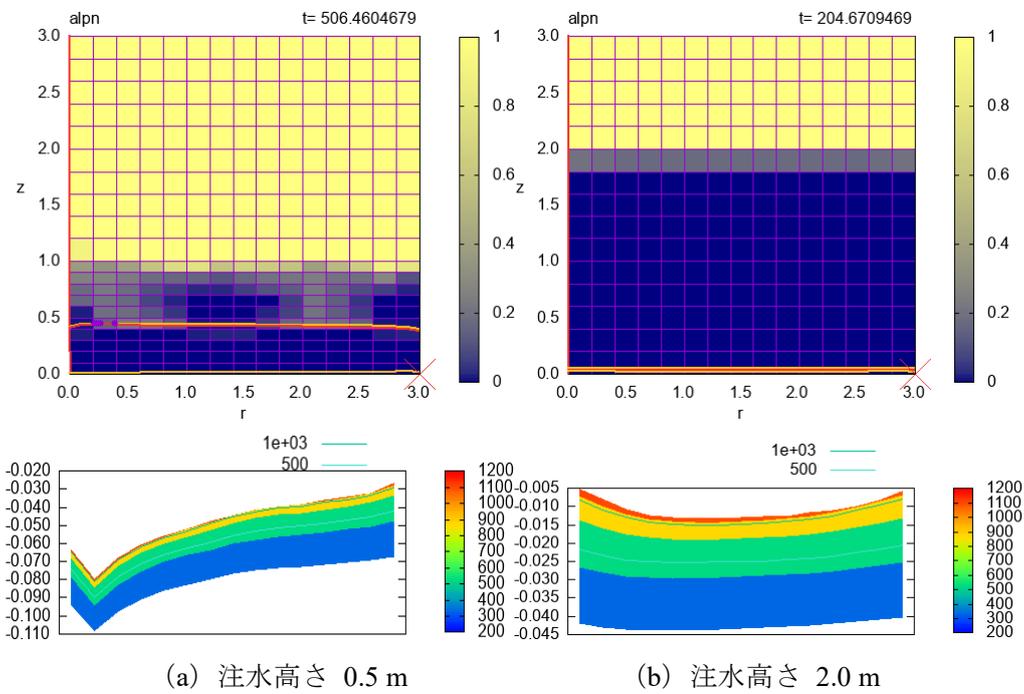


図 C.48 溶融物の液深とクラスト厚さの半径方向分布 (ケース 48)

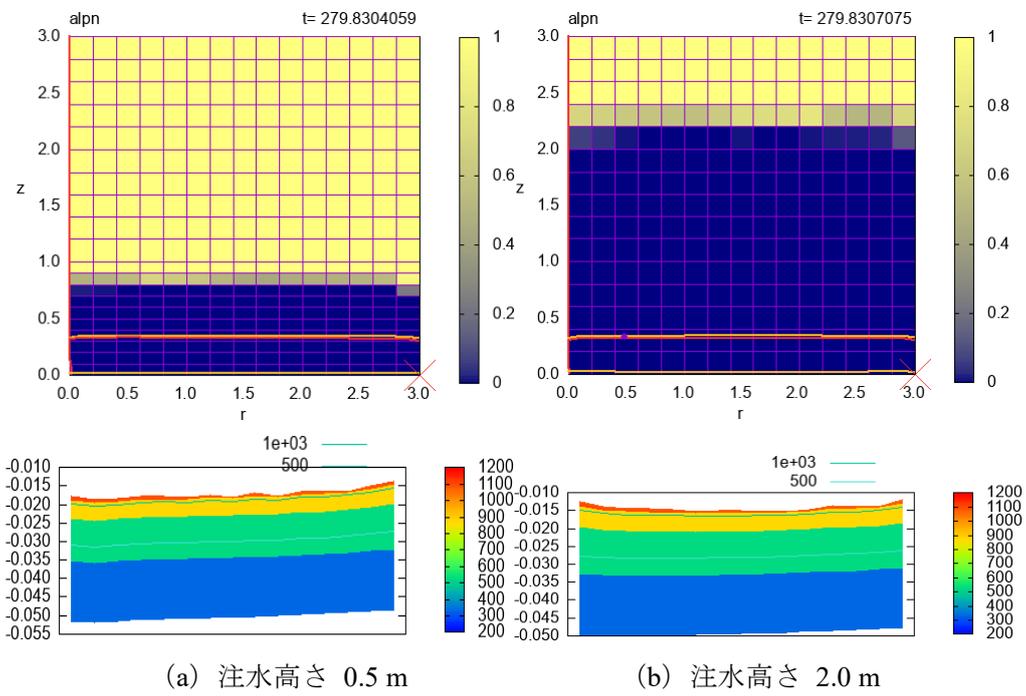


図 C.49 溶融物の液深とクラスト厚さの半径方向分布 (ケース 49)

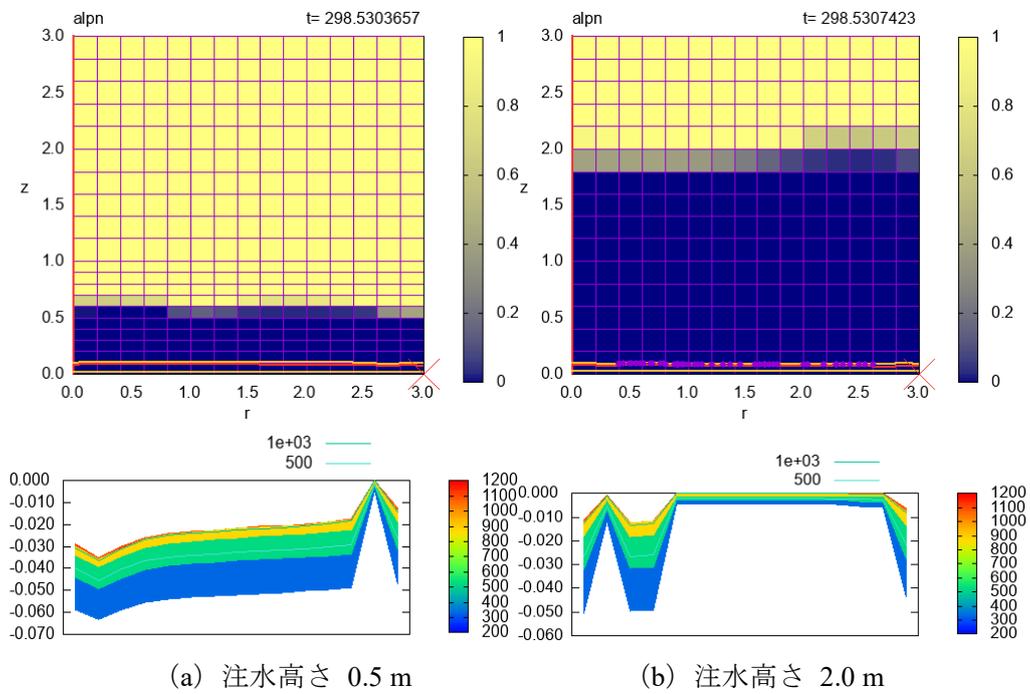


図 C.50 溶融物の液深とクラスト厚さの半径方向分布 (ケース 50)

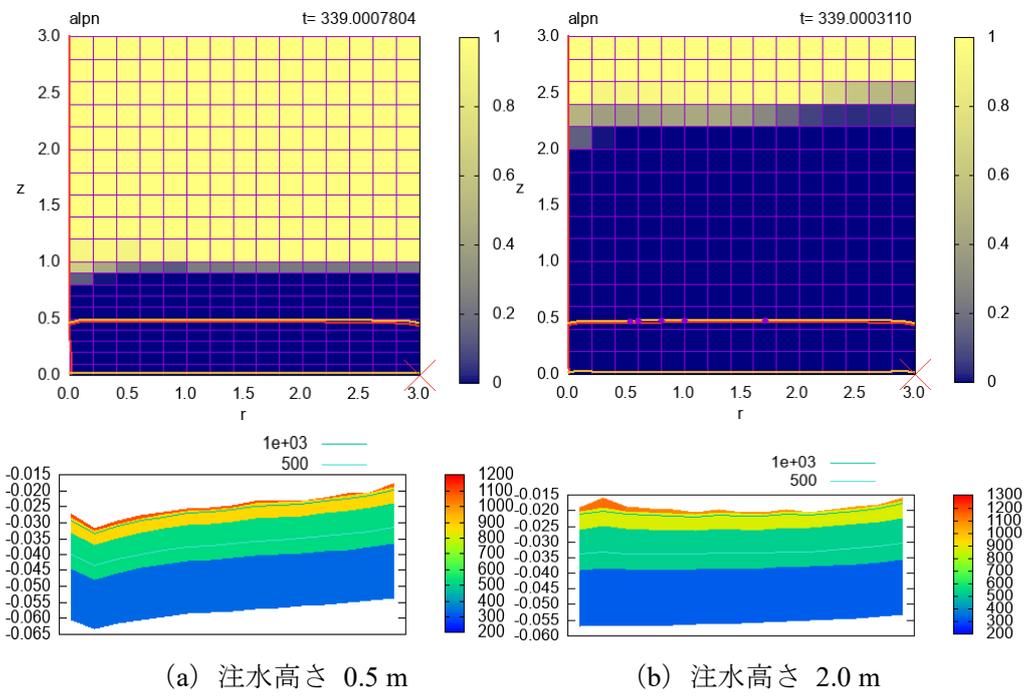


図 C.51 溶融物の液深とクラスト厚さの半径方向分布 (ケース 51)

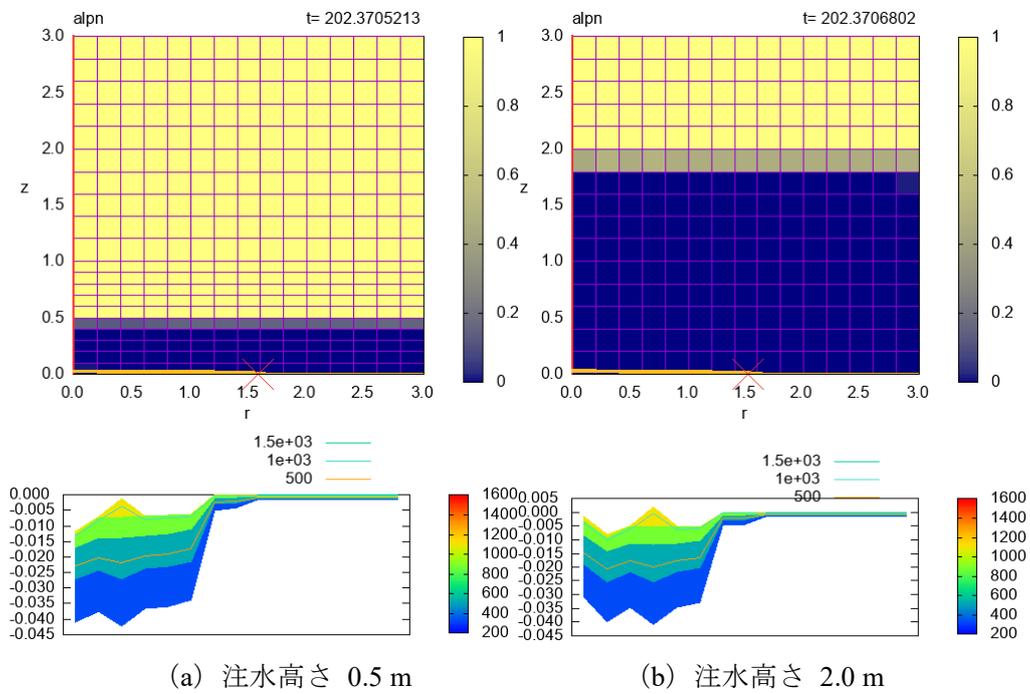


図 C.52 溶融物の液深とクラスト厚さの半径方向分布 (ケース 52)

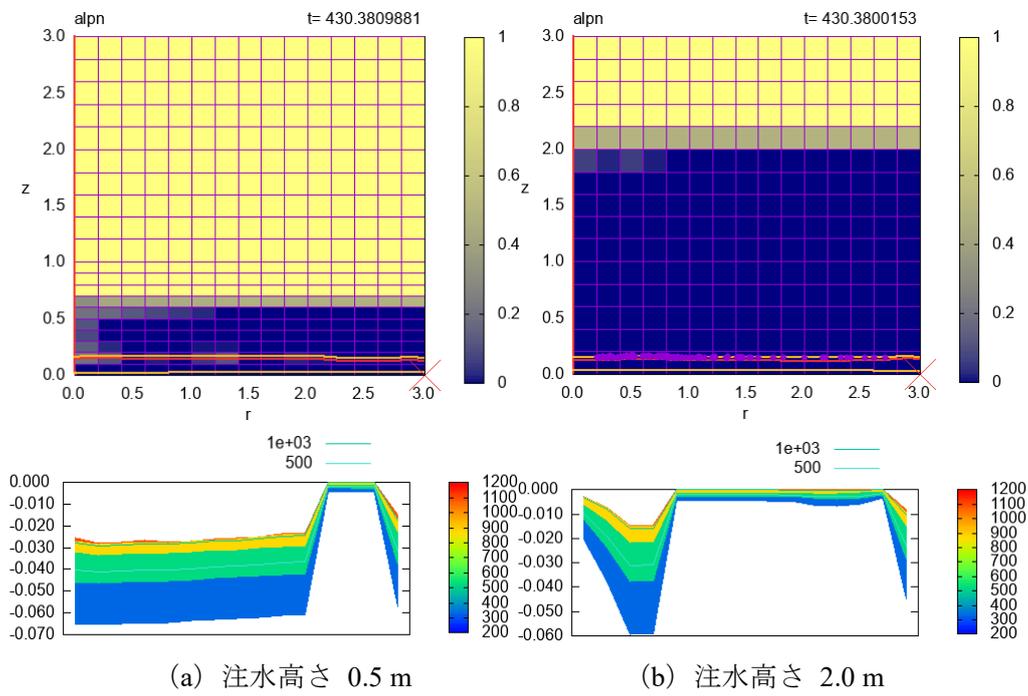


図 C.53 溶融物の液深とクラスト厚さの半径方向分布 (ケース 53)

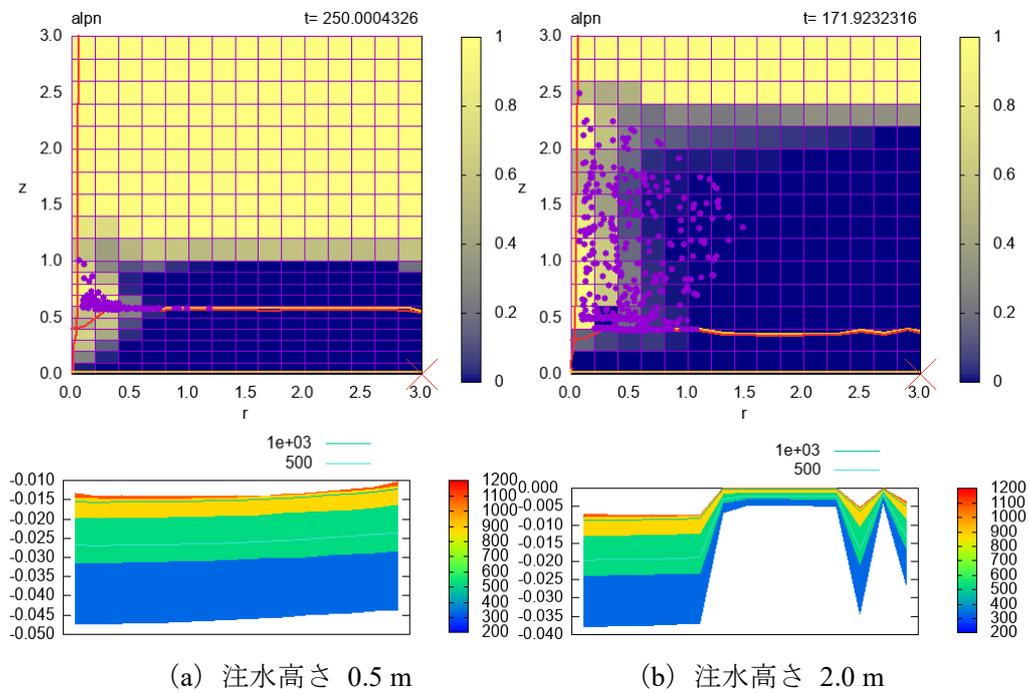


図 C.54 溶融物の液深とクラスト厚さの半径方向分布 (ケース 54)

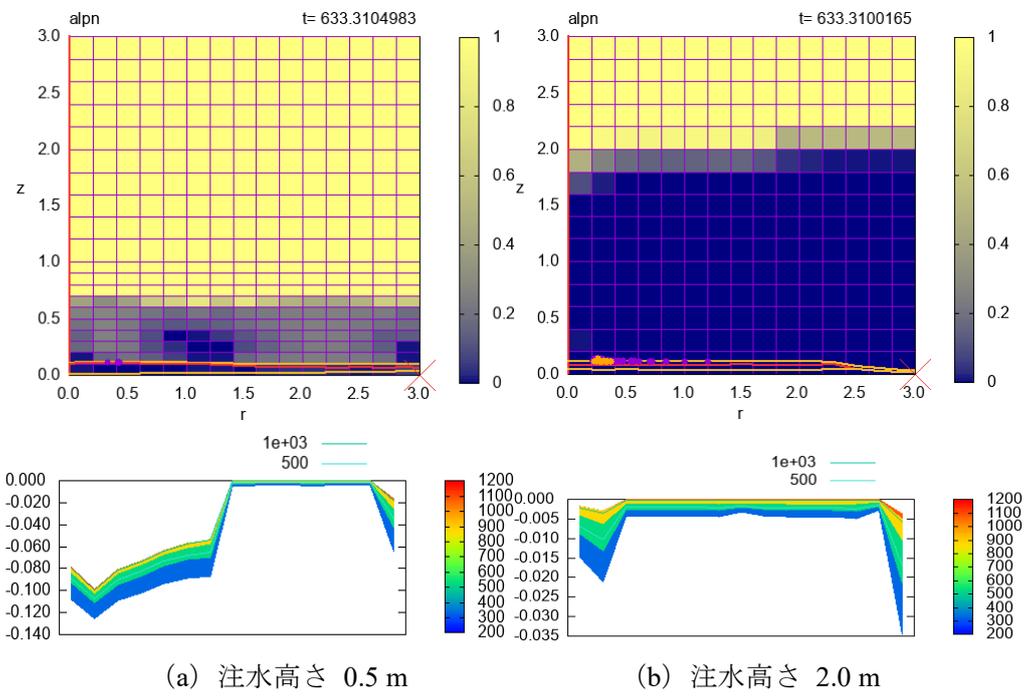


図 C.55 溶融物の液深とクラスト厚さの半径方向分布 (ケース 55)

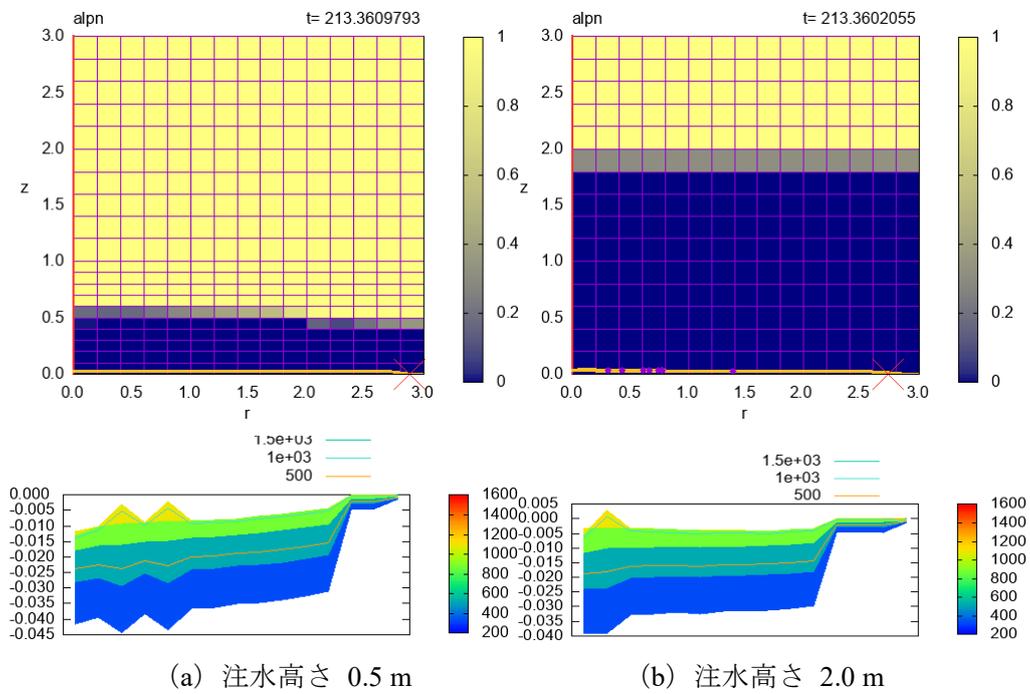


図 C.56 溶融物の液深とクラスト厚さの半径方向分布 (ケース 56)

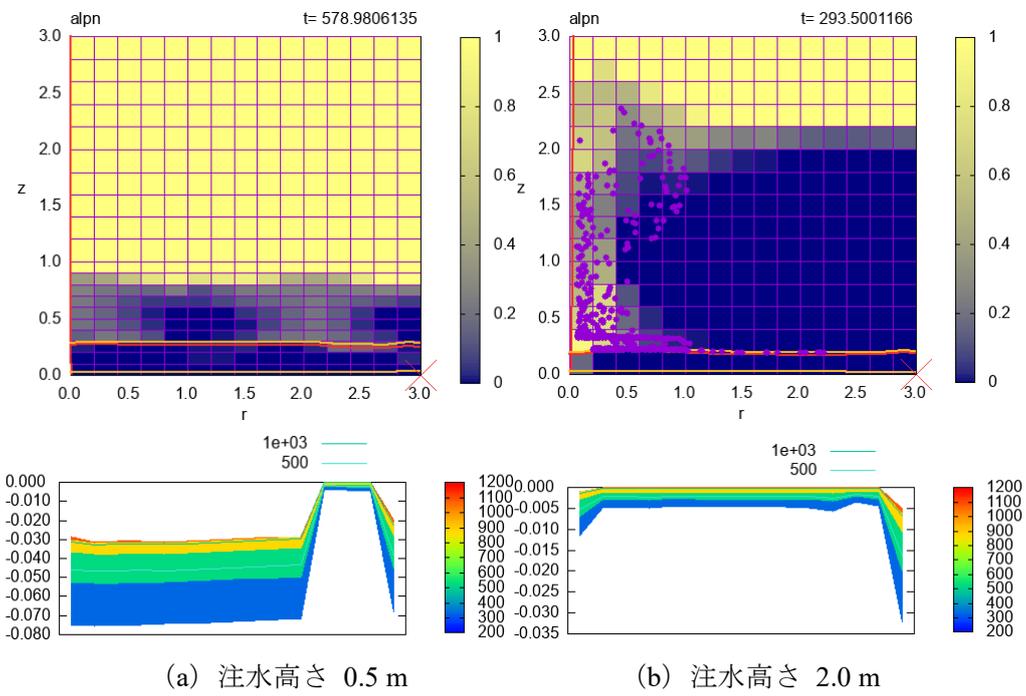


図 C.57 溶融物の液深とクラスト厚さの半径方向分布 (ケース 57)

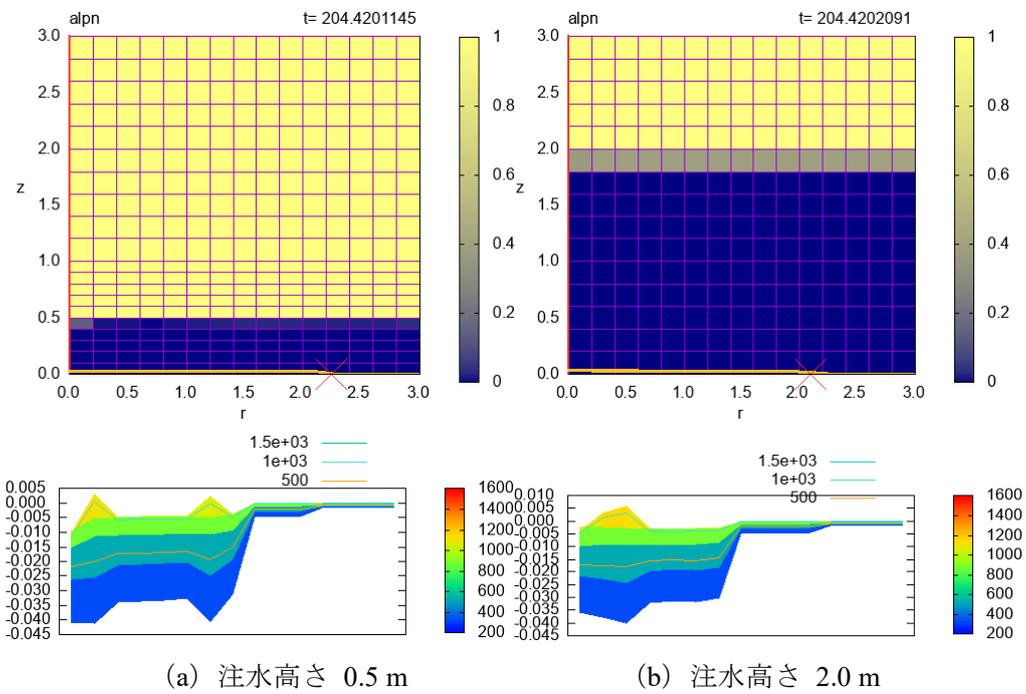


図 C.58 溶融物の液深とクラスト厚さの半径方向分布 (ケース 58)

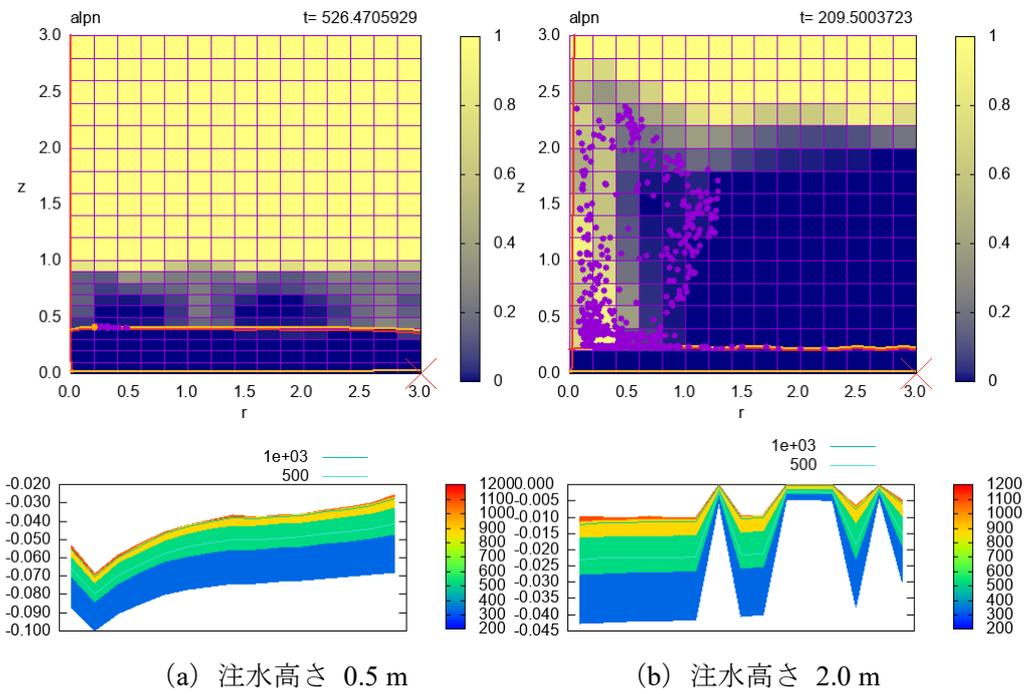


図 C.59 溶融物の液深とクラスト厚さの半径方向分布 (ケース 59)

付録 D 冷却可能な最大デブリ堆積高さの評価

円筒状に堆積した溶融炉心デブリの冷却は、主に上面における水への伝熱により行われる。ここでは、円筒側面における伝熱を無視し、鉛直方向の1次元問題として取り扱う。

デブリは発熱体であるため、高さが大きくなると総発熱量が増大し、やがて下面（コンクリートとの界面）温度がコンクリート溶融浸食温度（すなわち、MCCI 開始温度）に到達する。この時の高さを冷却可能な最大デブリ堆積高さとする。

評価の考え方

堆積したデブリのモデルを図 D-1 に示す。ここで、デブリ（高さ L の連続層状デブリ）の上部には固化時の熱収縮で生じたクラック等に水が浸水した「浸水層」（高さ δ ）が存在すると仮定する。いま、デブリ下面がコンクリート溶融浸食温度に達した状態を考えると、デブリ内部及び浸水層における温度分布は図 D-2 のようになる。このときの1次元熱伝導方程式は以下の通りである。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + Q_d \tag{D-1}$$

定常解を考えるので時間変化の項が 0 となり、デブリ上下面の温度境界条件から以下の解を得る。

$$T = -\frac{Q_d}{2\lambda} x^2 + \left(\frac{Q_d L}{2\lambda} - \frac{T_{abl} - T_{sat}}{L} \right) x + T_{abl} \tag{D-2}$$

また、デブリ内部の最高温度 T_{max} については、

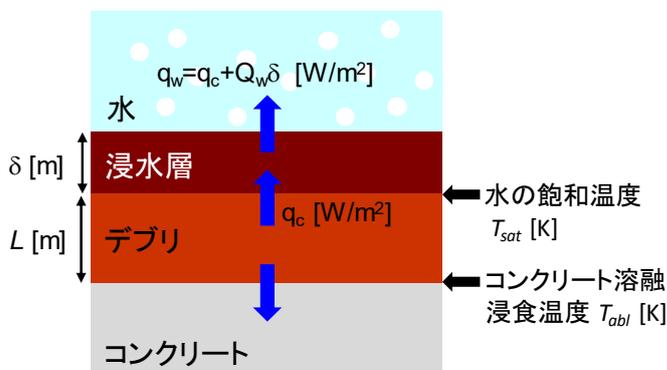


図 D-1 評価モデル

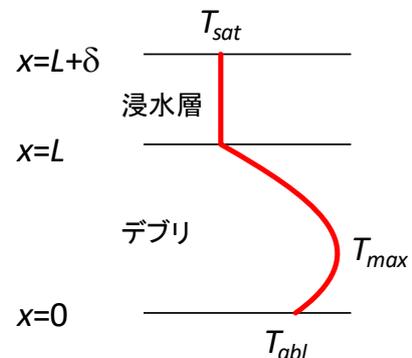


図 D-2 デブリ内温度分布

$$x = \frac{\lambda}{Q_d} \left(\frac{Q_d L}{2\lambda} - \frac{T_{abl} - T_{sat}}{L} \right) \quad (D-3)$$

のとき

$$T_{max} = \frac{\lambda}{2Q_d} \left(\frac{Q_d L}{2\lambda} - \frac{T_{abl} - T_{sat}}{L} \right)^2 + T_{abl} \quad (D-4)$$

となるが、これがデブリの融点 T_{melt} を超える場合は除熱量に対してデブリの崩壊熱（すなわちデブリ高さ）が大きすぎて冷却できないと見なす。よって、次式を考慮することで冷却可能なデブリ高さ L が得られる。

$$T_{max} < T_{melt} \quad (D-5)$$

いま、デブリ高さが L のとき、デブリから浸水層への熱流束は次式となる。

$$q_c = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=L} = \lambda \left(\frac{Q_d L}{2\lambda} + \frac{T_{abl} - T_{sat}}{L} \right) \quad (D-6)$$

浸水層では浸入した水が水蒸気となることで除熱が行われる。この除熱量は、デブリから浸水層に流入した熱と浸水層で生じた崩壊熱の合計に等しい。また、この値の上限はドライアウト熱流束となる。

$$q_{dry} > q_w = q_c + Q_w \delta \quad (D-7)$$

本評価では、与えられた物性値、崩壊熱、デブリ高さ及びドライアウト熱流束に対して、ドライアウト熱流束で除熱できる最大の浸水層高さ δ を次式から評価する。

$$q_{dry} = q_c + Q_w \delta \quad (D-8)$$

最終的に、デブリ及び浸水層の高さの合計 $L + \delta$ をデブリ冷却が可能な最大堆積高さとして得る。

変数一覧

λ	: デブリ熱伝導率 (固相) [W/m·K]	
δ	: 浸水層高さ [m]	
ρ	: デブリ密度 (固相) [kg/m ³]	
c	: デブリ比熱 (固相) [J/kg·K]	
L	: デブリ高さ [m]	
Q_d	: デブリ崩壊熱 [W/m ³]	
Q_w	: 浸水層崩壊熱 [W/m ³]	※ 1
q_c	: デブリから浸水層への熱流束 [W/m ²]	
q_{btm}	: デブリからコンクリート床面への熱流束 [W/m ²]	
q_{dry}	: 浸水層におけるドライアウト熱流束 [W/m ²]	
q_w	: 浸水層から水への熱流束 [W/m ²]	
T	: 温度 [K]	
T_{abl}	: コンクリート溶融浸食温度 [K]	
T_{max}	: デブリ最高温度 [K]	
T_{melt}	: デブリ融点 [K]	※ 2
T_{sat}	: 水の飽和温度 [K]	

※ 1 本評価においてはデブリ崩壊熱と等しいと仮定する。

※ 2 共晶組成でない場合は固相線温度を用いる。

付録 E JASMINE コードの概要

JASMINE コード (**JAeri Simulator for Multiphase INteraction and Explosion**) の開発は 1994 年から進められてきた。ここでは、詳細な解析モデルが User's Guide [E.1] に公開されているバージョン 3 について説明する。

E.1 コードの目的及び対象とする現象

JASMINE コードは、軽水炉シビアアクシデント時における溶融炉心と冷却水の相互作用（水蒸気爆発）を解析するために開発された。

水蒸気爆発は、高温溶融物が水中に落下し、その一部または全部が液滴となって水中に分散する粗混合過程及び引き続き生じる爆発過程から成るとされている。その概略及び JASMINE コードにおける解析モデルを図 E.1 に示す。粗混合過程では、高温溶融物液滴の周囲は膜沸騰状態であり蒸気膜に覆われている。爆発過程では、何らかのきっかけ（トリガー）で発生した圧力波が液滴に到達したときに、蒸気膜を不安定化させて液滴を微粒化させることにより液滴からの熱伝達を急増させ、このときに発生する蒸気が圧力波をさらに増幅または維持伝播させる。

予混合過程において液滴とならなかった溶融物は、床面に達して水平方向に拡がり、溶融物のプールを形成する。また、トリガーが生じなかった場合や、圧力波を維持できるほどの量の液滴が生じなかった場合、または液滴が冷却されて表面に厚い固化層が形成され微粒化しなかった場合には水蒸気爆発は生じず、溶融物液滴は冷却固化されて落下し、やがては溶融物プールに吸収される。冷却により溶融物プールの表面に厚い固化層（クラスト）が形成されている場合には、その上に粒子層（デブリベッド）が形成される。

十分な水深がある場合には、水中に流入する溶融物（溶融物ジェット）は全て液滴となり、それらの液滴は床面に達する前に水中で固化し、床面上に堆積してデブリベッドを形成する。ここで、液滴同士の結合により比表面積の小さな塊状のデブリが生じた場合、デブリベッドの冷却が不十分となり、やがて水の浸透し難い部分で崩壊熱による再溶融が生じる恐れがある。JASMINE バージョン 3 には、塊状デブリの生成やデブリベッドの再溶融のモデルは組み込まれていない。

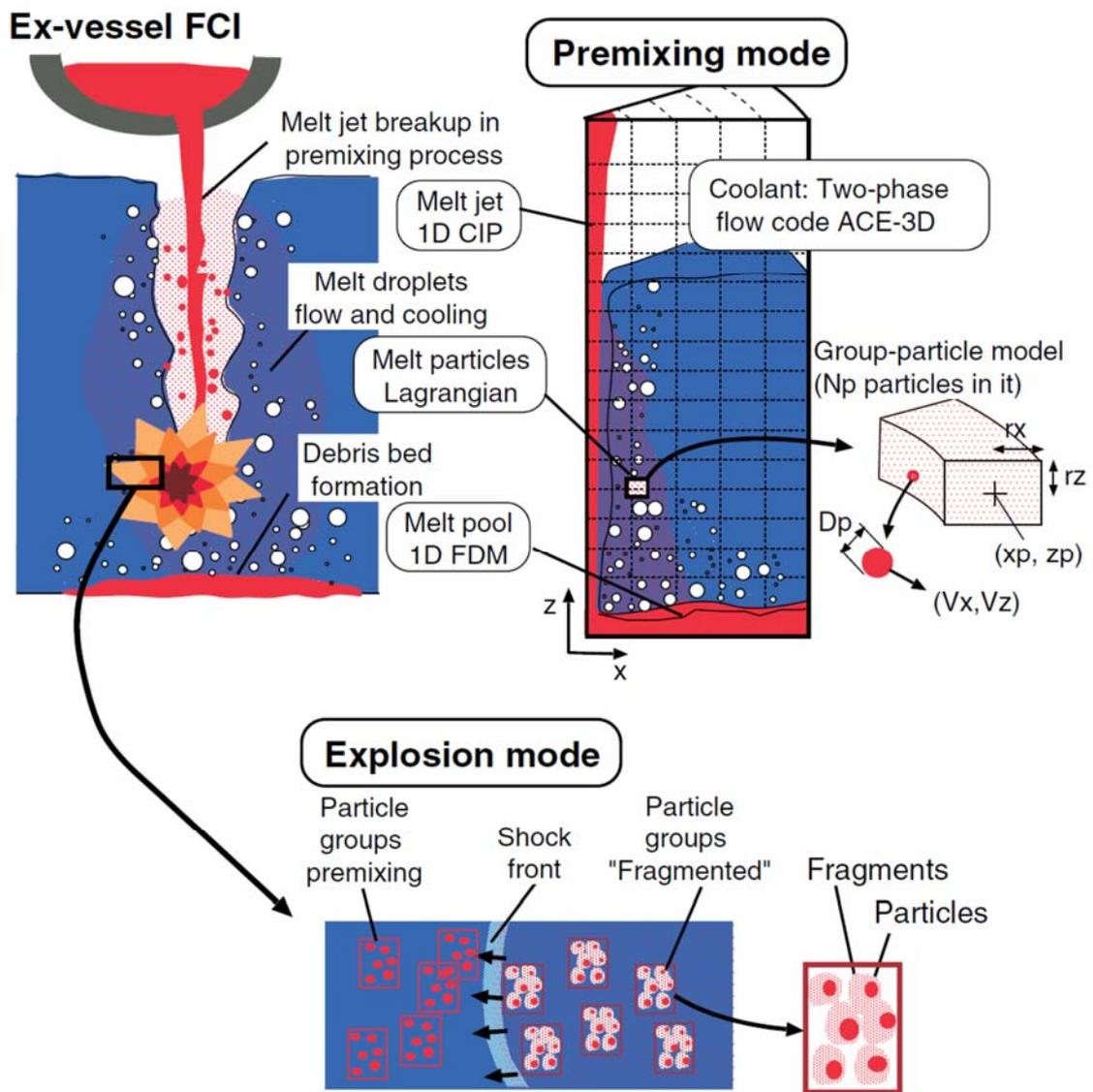


図 E.1 水蒸気爆発現象と JASMINE コードの解析モデル

E.2 基本モデルと計算式

JASMINE コードは軸対称二次元コードであり、溶融物は体系の中心軸上に落下する。溶融物及び水の旋回運動成分は考慮していない。予混合過程及び爆発過程は時間スケールが異なるものの、溶融物ジェット・液滴・水の流動・伝熱と水蒸気二相流の挙動で表されるため同様のモデルを使用している。以下に各部分でのモデル詳細を述べる。

JASMINE コードの構成は、溶融物計算部と水-蒸気挙動計算部(水プール)とに大別される。また、溶融物計算部は、溶融物ジェット挙動、溶融物プール挙動、溶融物液滴挙動に分けられる。本節に記述する式中の記号の説明は(5)に示す。

(1) 溶融物ジェット

以下に示すオイラー座標で記述された高さ方向一次元の質量保存則、エネルギー保存則及び運動量保存則を CIP 法で積分し、流速変化、温度変化及び溶融物ジェット径の変化を計算する。

質量保存則：

$$\frac{\partial A_J \rho_J}{\partial t} + v_J \frac{\partial A_J \rho_J}{\partial z} = -\sqrt{2\theta} A_J m_e - A_J \rho_J \frac{\partial v_J}{\partial z}$$

エネルギー保存則：

$$\frac{\partial e_J}{\partial t} + v_J \frac{\partial e_J}{\partial z} = -\sqrt{\frac{2\theta}{A_J}} \frac{q}{\rho_J}$$

運動量保存則：

$$\frac{\partial v_J}{\partial t} + v_J \frac{\partial v_J}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_J} \frac{\partial p_a}{\partial z} + K_f (v_a - v_J) + g$$

ここで、質量保存式中の m_e は予混合過程における液滴発生量であり、溶融物がすべて液滴に変わり溶融物ジェット径がゼロになる深さ(ブレイクアップ長さ。図 E.2 参照) L_{brk} から計算する。ブレイクアップ長さは基本的には次に示す Saito の式を用いて計算する。

$$\frac{L_{brk}}{D_{ji}} = 2.1 \left(\frac{\rho_J}{\rho_l} \right)^{1/2} \left(\frac{V_{ji}^2}{g D_{ji}} \right)^{1/2}$$

液滴発生量は、溶融物ジェット径が深さに対して一定の割合で減少するという仮定に基づき計算する。すなわち

$$V_e = \frac{v_J}{2} \frac{D_{ji}}{L_{brk}}$$

により、ジェット表面での溶融物剥離速度を求め、さらに、

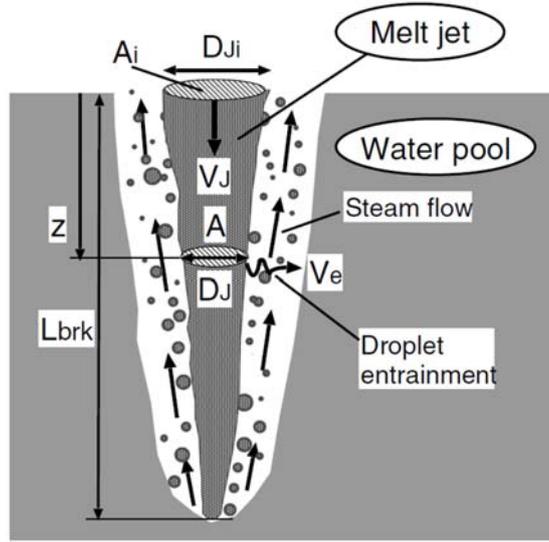


図 E.2 JASMINE コードにおける溶融物ジェットのモデル

$$m_e = C_{ent} \rho_J V_e$$

として質量速度に換算する。ここで C_{ent} は、入力パラメータであり、デフォルト値は 1 とする。

(2) 溶融物プール

半径方向一次元の浅水方程式を有限差分法により解く。オイラー座標で記述し、エネルギー保存則、運動量保存則は非保存形である。すなわち、

質量保存則：

$$\frac{\partial w h_p \rho_p}{\partial t} + \frac{\partial (w h_p \rho_p v_p)}{\partial x} = w m_s$$

エネルギー保存則：

$$\frac{\partial e_p}{\partial t} + v_p \frac{\partial e_p}{\partial x} = \frac{q}{h_p \rho_p} + \frac{(e_{ms} - e_p) \max(m_s, 0)}{h_p \rho_p}$$

運動量保存則：

$$\frac{\partial v_p}{\partial t} + v_p \frac{\partial v_p}{\partial x} = -\frac{1}{\rho_p} \left[\frac{\partial p_a}{\partial x} + \frac{g}{2} \frac{\partial h_p \rho_p}{\partial x} \right] + K_{fa} (v_a - v_p) - K_{fw} v_p + \frac{(v_{ms} - v_p) \max(m_s, 0)}{h_p \rho_p}$$

とする。

溶融物プールの表面温度 T_{sf} は、 e_p から計算した平均温度 T_{av} と水温 T_c を用いて、プール高さ方向の温度分布が二次関数で表されると仮定して次式で計算する。

$$T_{sf} = \frac{T_{av} + T_c \frac{h_p H}{6\lambda_p}}{1 + \frac{h_p H}{6\lambda_p}}$$

ここで、 H は溶融物表面の水側熱伝達率である。

(3) 溶融物液滴

離散要素法を採用し、ラグランジュ座標で記述された運動量及びエネルギーの保存式を解く。個々の液滴をすべて計算するのではなく、同じ条件の多数の液滴から成るグループを想定し、グループ毎の代表値を計算し、代表値にそのグループ内の液滴数を乗じて水との交換熱量、堆積溶融物量等を求める。また、液滴初速の決定に乱数を使用しており、液滴が水プールに及ぼす影響及び溶融物プールへの流入量に関してはモンテカルロ法を使用していることになる。

運動量保存則は、速度について：

$$\frac{\partial \mathbf{v}_p}{\partial t} = \mathbf{g} - \frac{\nabla p_a}{\rho_p} + \frac{\mathbf{F}_{hy}}{m_p}$$

液滴位置について：

$$\frac{\partial \mathbf{x}_p}{\partial t} = \mathbf{v}_p$$

また、エネルギー保存則は：

$$\frac{\partial e_p}{\partial t} = \frac{q}{m_p}$$

となる。

液滴と水の相互作用の計算は、溶融物ジェットから液滴が発生した時に直ちに始めるのではなく、pre-particle というグループを考え、この中にある程度の質量が蓄積される等の条件に至った時に real-group として水との相互作用の計算を始める。この条件は、

- (a) 液滴数が所定の値に達した時
- (b) グループが占める空間領域の x 方向の大きさが x 方向分割メッシュ最小サイズの 1/4 を超えた時
- (c) グループが占める空間領域の外周が x 方向第 1 メッシュに達した時
- (d) 所定の時間が経過した時

としている。

液滴の初期径は、バージョン 3.3 b までは固定値を入力で与えている。

液滴発生時の初速 (x 、 z 方向成分をそれぞれ v_{ex} 、 v_{ez} とする) は、次式で計算する。

$$\begin{aligned} v_{ex} &= C_{vx}(2V_e)\{0.02 + 0.98\phi_r\} \\ v_{ez} &= C_{vzwt}v_j + (1 - C_{vzwt})v_c \end{aligned}$$

ここで、 C_{vx} 、 C_{vzwt} は、入力で与える定数でデフォルト値はそれぞれ 5.0、0.5 である。

また、 ϕ_r は 0~1 の一様乱数である。

液滴の表面温度は、温度境界層の考えを取り入れプロフィール法を用いて次式で計算する。すなわち温度境界層内部の温度分布は二次関数で近似し、内部の温度と滑らかに接続されるという条件から、温度境界層厚さ δ の変化は次式で与えられる。

$$\delta \left\{ 1 - \frac{3\delta}{4R} + \frac{1}{5} \left(\frac{\delta}{R} \right)^2 \right\} d\delta = 3\kappa dt$$

また、表面温度 T_{sf} は液滴平均温度 T_{av} と液滴半径から次式で決定される。

$$T_{av} - T_{sf} = \frac{q\delta}{2\lambda} \left[1 - \frac{\delta}{R} \left\{ 1 - \frac{1\delta}{2R} + \frac{1}{10} \left(\frac{\delta}{R} \right)^2 \right\} \right]$$

(4) 水プール

水プールの温度及び流動の挙動は、多流体モデルの圧縮性二相流に関する質量、運動量及びエネルギーの保存則について有限差分法を用いて計算する。座標系はオイラー座標軸対称二次元（並進対称二次元の機能も有する）であるが、プログラム上は円筒座標三次元としており、 θ 方向 1 セルについて計算するセクターモデルである。セクター角度は入力により指定可能である（通常は 0.1 ラディアン）。旧日本原子力研究所で開発された ACE-3D コードを用いており、気相及び液相のそれぞれに以下の基本式を適用する。

質量保存則：

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_k \rho_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k \mathbf{v}_k) = \gamma_k$$

エネルギー保存則：

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_k \rho_k e_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k e_k \mathbf{v}_k) = -p \left[\frac{\partial \alpha_k}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_k \mathbf{v}_k) \right] + q_{ik} + q_{mk} + q_{wk} + \sum_{j \neq k} q_{jk} + \gamma_k h_k$$

運動量保存則：

$$\frac{\partial \mathbf{v}_k}{\partial t} + \mathbf{v}_k \cdot \nabla \mathbf{v}_k = -\frac{1}{\rho_k} \nabla p - [K_{ik} (\mathbf{v}_k - \mathbf{v}_i)]_{i \neq k} - \frac{\gamma_k^+}{\alpha_k \rho_k} (\mathbf{v}_k - \mathbf{v}_i)_{i \neq k} + \frac{f_{mk}}{\alpha_k \rho_k} + \mathbf{g}$$

水及び蒸気の物性については、蒸気表から求めた近似式を使用する。また、非凝縮性ガスは理想気体とする。

熔融物プール及び液滴の表面と水・蒸気との摩擦力及び熱伝達の評価に使用される相関式を以下にまとめる。

表 E.1 JASMINE コードで使用される水・蒸気と熔融物の相互作用の相関式

項目	熔融物プールの表面	熔融物液滴の表面
摩擦抗力	無	球の抗力係数 $f = \max(24/Re, 18.5/Re^{0.6}, 0.44)$
対流熱伝達	水平平面自然対流熱伝達式	球まわりの対流熱伝達 $Nu = 2 + 0.6Re^{1/2}Pr^{1/3}$
核沸騰熱流	Kutateladze	Kutateladze
限界熱流束	Zuber	Zuber
膜沸騰熱伝達	Berenson	Liu-Theofanous
極小熱流束	Berenson	Kondo et al.

水のボイド率に応じて上記の式に補正項を掛ける。

(5) 記号の説明

JASMINE コードにおける計算式の説明に使用された記号及び添字の定義を以下に示す。

記号

A : 断面積

e : 比内部エネルギー

g : 重力加速度

h : 液深または比エンタルピー

K : 摩擦係数

m : 質量または質量速度

p : 圧力

R : 半径

t : 時間

v : 速度

w : セクターモデルの周方向分割メッシュ幅長さ ($w = x\theta$)

x : 水平方向座標

z : 高さ方向座標

α : ボイド率

γ_k : 単位体積当たり質量変化

κ : 熱拡散率

λ : 熱伝導率

ρ : 密度

θ : セクターモデルの周方向分割メッシュ幅角度

添字

a : 水プールを表す

av : 平均を表す

e : エントレインメント

J : 溶融物ジェット (Ji は、水面高さでの値を示す)

k : 流体の種類

l : 水

P : 溶融物プール

p : 溶融物液滴

sf : 表面

E.3 プログラムの特徴

(1) 計算手順

予混合過程と爆発過程を同一のコードで解析する。爆発過程の計算時には、予混合過程の計算時に作成されたファイルから指定された時刻のデータを読み出し、リスタート機能を使用して細かい計算ステップ幅で計算を行う。この時、爆発過程の計算を指示するフラグとトリガーとなるセルの状態は入力で与える。

(2) JASMINE コードで使用する物性値

(a) 溶融物

実機解析、実験解析に備えて、以下の物質に対する物性値の関数を用意している。

表 E.2 JASMINE コードで用意されている溶融物

名称	物質
corium	UO ₂ 80 : ZrO ₂ 20 wt% (FARO/KROTOS のコリウム)
corium2	=tsol/tmelt/tliq を 2420/2545/2670 とするコリウム
corium3	UO ₂ 70:ZrO ₂ 30 wt% (TROI-13 のコリウム: 共晶点近傍)
alumina	アルミナ
alumina2	SERENA-T3 のアルミナ
zirconia	ジルコニア
ss304	304L ステンレススチール

このうち、実機解析に使用される corium 及び corium3 について、具体的な数値を表 E.3 に示す。固相線温度と液相線温度の間にある温度の場合は以下のように補間する。

密度は、固相線温度、液相線温度の値をコサイン関数で補間した値とする。温度-内部エネルギーの換算に使用する内部エネルギーの温度微係数（比熱）については、温度の一次関数で表し（固相・液相線温度の平均温度で折れ曲がる）、温度による積分値が凝固潜熱と一致するように決定する。伝熱計算関連式に使用される比熱については、固相・液相線温度の平均温度との大小比較で固相のものと液相のものを使い分ける。corium3 の熱伝導率については、密度と同様、コサイン関数で補間する。

表 E.3 JASMINE で使用されるコリウムの物性値

変数	タイプ	説明	corium	corium3
			UO ₂ -ZrO ₂ 80 : 20wt%	UO ₂ -ZrO ₂ 70 : 30wt%
tmelt	実数	溶融物融点 [K]	2840	2811
tsoli	実数	溶融物固相線温度 [K]	2830	2806
tliq	実数	溶融物液相線温度 [K]	2850	2816
rhosol	実数	固相密度 [kg/m ³]	9430	8285.1
rholiq	実数	液相密度 [kg/m ³]	7960	7121.6
cpsol	実数	固相比熱 [J/kg/K]	445	566.2
cpliq	実数	液相比熱 [J/kg/K]	565	680.7
lheat	実数	凝固潜熱 [J/kg]	362.0E3	428.0E3
lamsol	実数	固相熱伝導率 [W/m/K]	2.88	1.911
lamliq	実数	液相熱伝導率 [W/m/K]	2.88	3.601
viscmm	実数	粘性係数 [Pa·s]	4.23E-3	3.489E-3
sftnmm	実数	表面張力 [N/m]	0.45	0.45
emssmm	実数	輻射率 [-]	0.79	0.79
cf_visc	実数	粘性係数の温度依存性の係数 (温度の1次式の係数)	0	0
cf_sftn	実数	表面張力の温度依存性の係数 (温度の1次式の係数)	0	0
cf_emss	実数	輻射率の温度依存性の係数 (温度の1次式の係数)	0	0

(b) 蒸気表

JASMINE コードでは、計算速度の高速化を図るために、蒸気表の近似関数を作成し組み込んでいる。日本機械学会蒸気表[E.2]との比較により、臨界点近傍を除き、いずれの物性値についても良好な精度で一致していることを確認している。

(c) 沸騰熱伝達

JASMINE コードで使用している沸騰曲線の一例をグラフに示す。雰囲気圧力を大気圧とし、水プールのサブクール度をパラメータとして、溶融物の表面過熱度に対する熱流束を計算した。図 E.3 が液滴表面熱流束、図 E.4 が溶融物プール表面熱流束である。液滴表面熱流束の計算では、液滴径は 3 mm、液滴と水との相対速度は 0.3 m/s とした。

溶融物プール表面熱流束に関しては、膜沸騰熱流束及び極小熱流束への水サブクール度の影響がほとんどないことが分かる。よって、JASMINE コードにより溶融物の床面拡がり解析を行った場合に水サブクール度の影響がきわめて小さくなると予想される。

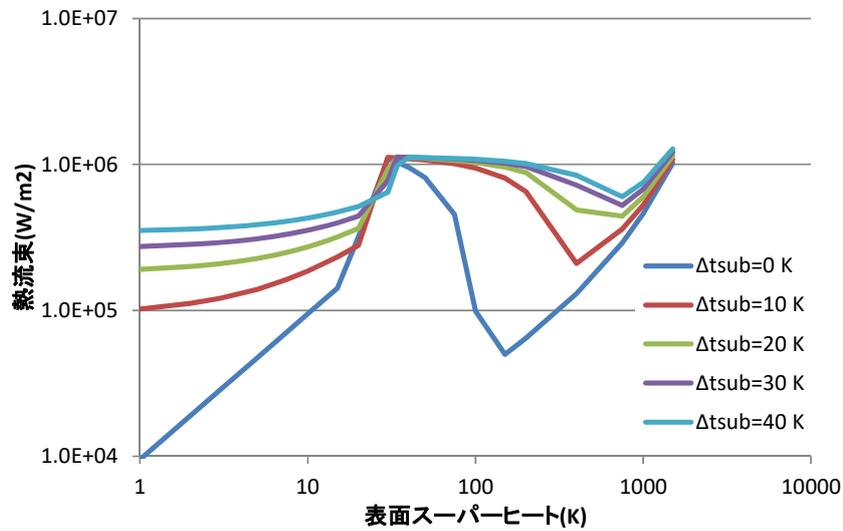


図 E.3 Jasmine 液滴表面熱流束(大気圧,d=3mm,v=0.3m/s)

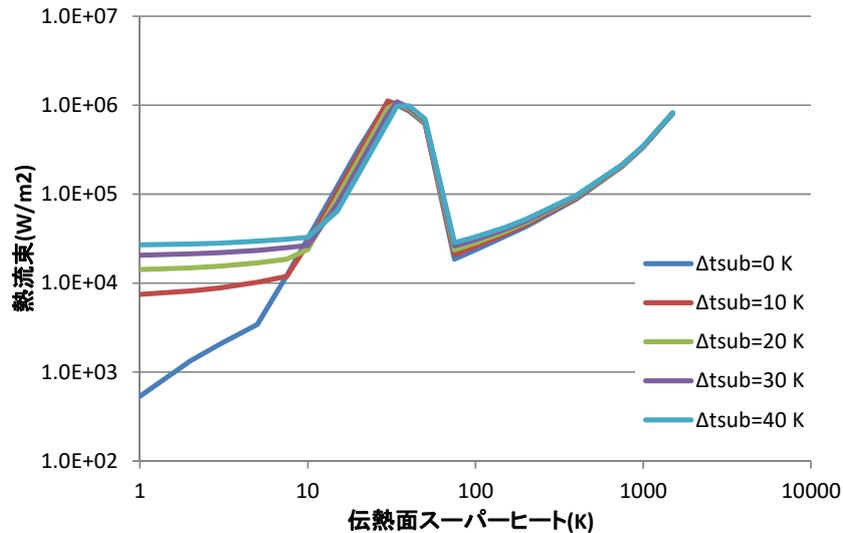


図 E.4 Jasmine プール表面熱流束(大気圧)

E.4 コードの開発履歴と検証

JASMINE コードの開発・改良は長期間にわたり行われている。これまでの開発の経緯とコードバージョン名及び解析・比較の対象とした実験を表 E.4 に示す。JASMINE v.3 で、コードの基本式・計算手法・構成が固まり、その後、予混合過程での溶融物液滴の粒径分布考慮機能などの追加が行われてきた。平成 27 度事業において改良したバージョンを JASMINE 4.0 とし、平成 28 度事業において作成・改良したアグロメレーションモデル(ver. 4.0_agl)とメルトスプレッドモデル(ver. 4.0_msp)を結合したバージョンを JASMINE 4.1、とする。

その後、DEFOR-A 実験、PULiMS 実験との比較により解析モデルの改良を継続し、平成 29 年度の改良により JASMINE 4.2 を、本年度(平成 30 年度)の改良により JASMINE 4.3a を作成した。

本年度(平成 30 年度)の作業では、JASMINE 4.2 を用いて実機冷却性評価の解析を行うとともに(本文 第 4 章)、JASMINE 4.3a を用いて DEFOR-A 実験、PULiMS 実験の解析を進めた(本文 第 2 章、第 3 章)。

表 E.4 JASMINE コードの開発・改良の経緯

バージョン名	発行/ 実施年 月	内容・参考文献	比較対象実験 及び 解析対象
JASMINE	1994	開発着手。 混相流解析コード MISTRAL を元 に予混合過程の解析部を作成。 [E.3]	Gilbertson らの非加 熱体系での実験 MAGICO 実験
JASMINE Pro	2000/12	爆発過程の解析部を作成。 ユーザーマニュアルを発行。 [E.4]	
JASMINE-pre	2004/1	水-蒸気系の計算に ACE-3D を利用 した予混合過程計算部を作成。 論文発行。 [E.5]	FARO-L24, -L31
JASMINE 3	2008/07	予混合過程・爆発過程を同一の計 算プロセスで扱うバージョンを作 成。ユーザーズマニュアルを発行。 [E.1]	FARO-L14, -L28, -L31, -L33 KROTOS-K44, -42, -K37
JASMINE 3.3b	2010/07	プログラムの構成・変数名、説明文 書等を整理。	OECD/NEA SERENA Project Phase-1
JASMINE_NRA	2014/10	予混合過程の液滴粒径分布考慮。 ジェットの流動抵抗計算式変更。 溶融物の物性値入力をも可能とした。	OECD/NEA SERENA Project Phase-2
JASMINE 3.3NW	2015/07	環境を LINUX (UNIX) から WINDOWS に変更。コンパイラを インテル Visual Fortran Composer XE に変更。入力マニュアル改訂。	
JASMINE 4.0		平成 27 年度事業において、ジェットブレイク アップにおける Rosin-Rammler 粒径分布モデ ル及び床面拡がり挙動におけるクラスト形成 モデルを追加。	DEFOR-A PULiMS
JASMINE 4.0_agl	2017/3	アグロメレーションモデルを導入	DEFOR-A
JASMINE 4.0_msp	2017/3	床材内熱伝導解析を組み込み、溶融 物中ボイドの影響を考慮	PULiMS
JASMINE 4.1	2017/9	4.0_agl と 4.0_msp を結合	H29 年度 実機冷却 性評価の予備解析
JASMINE 4.2	2018/3	平成 29 年度事業においてアグロメ レーションモデル及びメルトスプ レッドモデルを改良 (本文参照)	DEFOR-A PULiMS
JASMINE 4.3a	2019/3	平成 30 年度事業においてメルトス プレッドモデルを改良 (本文参照)。 また、可読性向上を目的として粒子 挙動計算部等を分割、書き改めた。	DEFOR-A PULiMS

E.5 参考文献

- [E.1] Kiyofumi MORIYAMA, Yu MARUYAMA, Hideo NAKAMURA, “Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User’s Guide”, JAEA-DATA/Code 2008-014, July 2008, Japan Atomic Energy Agency
- [E.2] 日本機械学会, “1999 日本機械学会蒸気表”, (1999-11 月)
- [E.3] 森山清史ら, ”水蒸気爆発解析コード JASMINE の開発”, JAERI-Data/Code 95-016 (1995-11 月) 日本原子力研究所
- [E.4] Y. Yang, et al., “JASMINE-PRO: a Computer Code for the Analysis of Propagation Process in Steam Explosions—User’s Manual”, JAERI-Data/Code 2000-035 (Sep. 2000) Japan Atomic Energy Agency
- [E.5] K. Moriyama, H. Nakamura, Y. Maruyama, “Analytical tool development for coarse break-up of a molten jet in a deep water pool”, Nucl. Eng. Des. 236(2006) 2010-2025

付録 F 出張報告

国内出張 (1)

件名	日本原子力学会 2018 年秋の大会における口頭発表
出張先	岡山大学津島キャンパス (岡山市)
期間	平成 30 年 9 月 5 日 (水) ~平成 30 年 9 月 7 日 (金)
出張者	研究員 1 名
概要	<p>シビアアクシデント時の格納容器内溶融炉心冷却性評価手法の高度化の一環として、溶融物水中落下時の粒子化及び結合挙動並びに格納容器床面での溶融物拡がり挙動に関する JASMINE コードのモデルを改良し、スウェーデン王立工科大学の実験データにより検証を行った結果について、日本原子力学会 2017 年秋の大会にて口頭発表を行った。</p> <p>[3P05] JASMINE コードによる格納容器内溶融炉心冷却性 岩澤 譲、松本 俊慶、川部 隆平、安島 航平、杉山 智之、丸山 結 (原子力機構)</p>

外国出張 (1)

件名	シビアアクシデント時格納容器内熔融炉心冷却性評価に関する技術打合せ
出張先	スウェーデン／ストックホルム 王立工科大学 (KTH)
期間	平成 30 年 5 月 6 日 (日) ～平成 30 年 5 月 10 日 (木)
出張者	研究主席 1 名、研究員 2 名
概要	<p>原子力規制庁の技術研究調査官 2 名に同行してスウェーデン／ストックホルムの王立工科大学 (KTH) を訪問し、熔融炉心／冷却材相互作用解析コード JASMINE の改良及び同コードによる実験解析結果を紹介するとともに、意見交換や実験施設見学等を通して熔融炉心冷却性評価研究に関する最新情報を取得した。</p> <p>また、同席したドイツ／シュトゥットガルト大学 (IKE) より、同大学の熔融炉心冷却性解析コード COCOMO を用いた解析例として、欧州 SARNET で実施された原子炉下部ヘッド堆積デブリ冷却性評価実験 LIVE-L8A の解析結果が報告され、現状の COCOMO コードが有するモデルの限界等が議論された。</p>

外国出張（2）

件名	共同シビアアクシデント研究プログラム（CSARP）会合への出席及び発表
出張先	米国 原子力規制委員会（NRC）
期間	平成 30 年 6 月 4 日（月）～平成 30 年 6 月 9 日（土）
出張者	研究主席 1 名
概要	<p>米国 NRC が主催する共同シビアアクシデント研究プログラム（CSARP）に出席し、JAEA で進めるシビアアクシデント関連の研究で得られた成果を発表するとともに、軽水炉シビアアクシデント及び熱水力安全研究に係る最新情報を収集する。</p>

外国出張 (3)

件名	OECD/NEA WGAMA 会合及び ROSAU 計画専門家会合への出席
出張先	フランス OECD/NEA 本部
期間	平成 30 年 9 月 16 日 (日) ~平成 30 年 9 月 22 日 (土)
出張者	研究主席 1 名
概要	<p>OECD/NEA の CSNI (原子力施設安全委員会) WGAMA (事故の分析・管理ワーキンググループ) 第 21 回会議に出席し、原子炉の熱水力及びシビアアクシデント (SA) 分野に関するタスクや国際プロジェクトに関する議論に参加するとともに、実験・数値解析等に関する各国の取り組みなどの最新情報を取得した。約 20 カ国から約 60 名 (IAEA、EU など国際機関を含む) が参加し、日本については、原子力規制庁から 1 名、電力中央研究所から 2 名、エネルギー総合工学研究所から 2 名、JAEA から 3 名 (報告書含む) が出席した。</p> <p>また、溶融炉心冷却実験に関する OECD/NEA ROSAU (Reduction of Severe Accident Uncertainties) 計画の専門家会合に出席し、実施機関である米国 ANL が提案した実験計画に関する情報を取得した。主要国を中心に約 40 名が出席し、日本については、原子力規制庁から 1 名、電力中央研究所から 2 名、エネルギー総合工学研究所から 2 名、JAEA から 2 名 (報告書含む) が出席した。</p>

外国出張（4）

件名	シビアアクシデント時格納容器内溶融炉心冷却性評価に関する技術打合せ
出張先	スウェーデン／ストックホルム 王立工科大学（KTH）
期間	平成 30 年 10 月 28 日（日）～平成 30 年 11 月 2 日（金）
出張者	研究員 1 名
概要	<p>原子力規制庁の技術研究調査官 2 名に同行してスウェーデン／ストックホルムの王立工科大学（KTH）を訪問し、溶融物の床面拡がり実験 PULiMS の最新データに関する議論により相互理解を深めるとともに、今後実施する PULiMS 実験及び溶融物粒子化及びアグロメレーション実験 DEFOR-A の実験条件について議論を行った。</p> <p>また、同席したドイツ／シュトゥットガルト大学（IKE）より、同大学の溶融炉心冷却性解析コード COCOMO の開発状況が報告された。</p>

外国出張（5）

件名	シビアアクシデント時格納容器内溶解炉心冷却性評価に関する技術打合せ
出張先	米国／アルバカーキ サンディア国立研究所（SNL）
期間	平成 30 年 12 月 2 日（土）～平成 30 年 12 月 8 日（水）
出張者	研究員 1 名
概要	原子力規制庁の技術研究調査官 1 名に同行して米国サンディア国立研究所（SNL）を訪問し、シビアアクシデント総合解析コード MELCOR を用いた事故進展解析時における格納容器内溶融物挙動に関する解析及び不確かさについて情報収集を行った。（調査結果の概要を本文 4.8 に記載）

外国出張 (6)

件名	ROSAU 計画予備会合への出席
出張先	フランス OECD/NEA 本部
期間	平成 31 年 1 月 29 日 (火) ～平成 31 年 1 月 31 日 (木)
出張者	研究主席 1 名、研究員 1 名
概要	<p>OECD/NEA で実施が予定されている ROSAU (Reduction of Severe Accident Uncertainties) 計画の予備会合に出席し、実施機関である米国 ANL による実験計画に関する情報を取得した。ANL より崩壊熱の影響、溶融物の加熱方法、MCCI 実験マトリクス、模擬 FP 添加のコストなどに関する検討結果が報告され、これに対し、実験条件に関する質問や提言、また、参加機関による解析アクティビティの追加などの提案が出された。参加を表明している 10 ヶ国 (日本を含む) から約 40 名の参加者があり、日本については、原子力規制庁 1 名、IAE 2 名、東京電力 1 名、原子力機構 5 名が参加した。(原子力機構からの出席者のうち報告者以外の 4 名は直前に開催された OECD/NEA PreADES 計画会合の出席者であり、本会合にはオブザーバとして参加)</p>

外国駐在

件名	スウェーデン王立工科大学 (KTH) 駐在
出張先	スウェーデン王立工科大学
期間	平成 30 年 4 月 2 日 (月) ~平成 30 年 9 月 19 日 (水)
出張者	研究員 1 名
概要	<p>DEFOR-A 及び PULiMS 実験に関する実験結果の整理、分析、解釈及び物理モデルの検討等を現地の研究者及び技術者とともに実施し、これを通して、格納容器内溶融炉心冷却性評価に係る共通課題の解決に向けて緊密な連携を図ることを目的として、同実験の実施機関であるスウェーデン王立工科大学 (KTH) に駐在した。</p> <p>駐在期間中に下記の実験が実施され、出張者は実験条件等の検討や実験装置の改良に関する議論に加わった。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ PULiMS-E16(N10) (実施日：2018 年 4 月 5 日) ・ PULiMS-E17(N11) (実施日：2018 年 9 月 13 日) <p>原子力規制庁の委託実験のうち PULiMS-E10 から E15 では、クォーツガラスを設置して広がり方向を制限することで半円体系とすることで、床の単位面積当たり及び単位時間当たりの溶融物供給量を増やして実験条件の範囲を拡大するとともに、溶融物が広がる際の垂直断面の可視化を実現した。</p> <p>PULiMS 実験後にはデブリ表面のレーザースキャンによる形状測定が行われ、空隙率のデータが得られている。領域をさらに制限して四半円の体系で実施された PULiMS-E16、E17 実験については、実験後のデブリベッドの周りに作成した小プールに注水する方法で全空隙率に加えて開気孔率の測定が可能になった。</p> <p>得られたデータより、溶融物の最終的な広がり面積や厚さに対する支配因子が溶融物の過熱度であること、また、ある程度過熱度が小さくなるとデブリ堆積物の斜面の勾配が急に大きくなることが明らかになった。</p> <p>クォーツガラスを通した可視化により落下溶融物が床面に衝突した際の飛び跳ねや、広がりが停止した先端を後続の溶融物が乗り越えるといった現象が観察されたが、これらは JASMINE コード等ではモデル化されていない。今後のモデル化の必要性が議論された。</p> <p>その他、実験の質を高めるためにいくつかの装置改良が行われた。</p>