

平成 31 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  
令和 2 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 アグロメレーションモデルの概要	2-1
2.2 解析対象とする実験	2-5
2.2.1 DEFOR-A 実験の概要	2-5
2.2.2 DEFOR-A27 実験	2-8
2.3 解析条件	2-9
2.4 解析結果	2-12
2.5 まとめ	2-16
3. 溶融物拡がりの解析	3-1
3.1 JASMINE コードの解析モデルの高度化	3-1
3.1.1 射流モデル	3-1
3.1.2 計算機能の追加	3-7
3.2 PULiMS 実験の解析	3-12
3.2.1 実験の概要と入力データ	3-12
3.2.2 解析結果	3-21
3.2.3 最終的な拡がり面積の評価	3-33
3.3 気相中実験の解析	3-35
3.3.1 VULCANO 実験	3-36
3.3.2 KATS 実験	3-43
3.3.3 ECOKATS 実験	3-46
3.3.4 FARO 実験	3-49
3.3.5 COMAS 実験	3-51
3.3.6 気相中実験の解析のまとめ	3-54
3.4 拡がり予測における重要な項目	3-56
3.5 まとめ	3-58
4. 実機冷却性評価	4-1
4.1 MELCOR コードによるシビアアクシデント解析	4-1
4.1.1 MELCOR 解析条件の設定	4-1
4.1.2 不確かさを考慮するパラメータ	4-5
4.1.3 不確かさを考慮した MELCOR 入力条件	4-6
4.1.4 MELCOR 解析結果からの JASMINE 入力パラメータの抽出	4-17
4.2 JASMINE コードによる冷却成功確率解析	4-21
4.2.1 JASMINE 解析条件	4-21
4.2.2 JASMINE 解析入力パラメータの確率分布	4-25

4.2.3	JASMINE 解析の結果-----	4-27
4.2.4	溶融炉心の冷却成功確率-----	4-34
4.2.5	考察-----	4-37
4.3	まとめ-----	4-40
5.	おわりに-----	5-1
付録 A	拡がり実験の解析結果-----	A-1
付録 B	冷却可能な最大デブリ堆積高さの評価-----	B-1
付録 C	JASMINE コードの概要-----	C-1
付録 D	出張報告-----	D-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（ドライ・キャビティ戦略）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（ウェット・キャビティ戦略）に大別され、我が国の事業者は後者を採用している。これは、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ークアップ（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。我が国以外でも、例えばスウェーデンのBWRにおいてウェット・キャビティ戦略が採られているが [1.4]、水蒸気爆発リスクの低減を優先してドライ・キャビティ戦略を採用する国が多数派であり、それ故に実験データは十分でない。

このため、現時点ではウェット・キャビティ戦略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、先行注水された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、以下のように評価技術を開発する。

- (a) 機構論的な溶融炉心／冷却材相互作用解析コード JASMINE [1.5]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ークアップ、ブレー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。

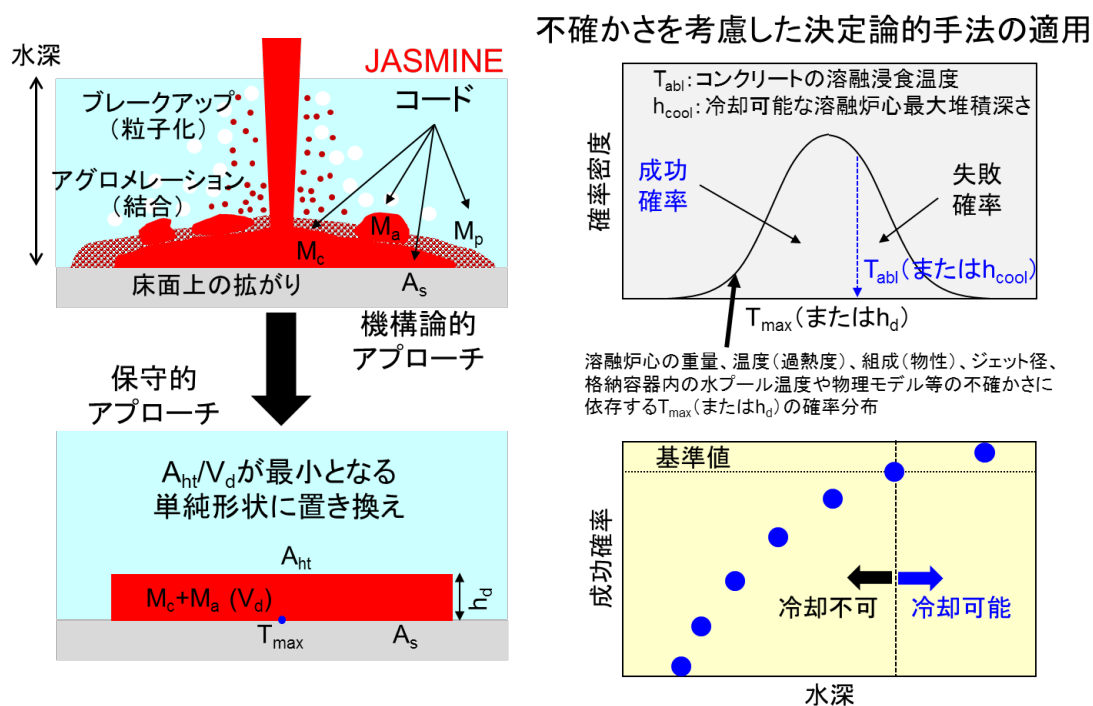


図 1.1 格納容器内溶融炉心冷却性評価のアプローチ及びアウトプット

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 30 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ー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熔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目指した。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 30 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を用いて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）[1.6]の解析を行い、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。同実験では共晶組成の高温熔融酸化物が用いられていたが、最近の調査により非共晶組成となっていた可能性が示されたことから、解析においては非共晶組成からのずれが評価結果に及ぼす影響に着目した。
- 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、床面に衝突した熔融物が速く浅い水平方向の流れ（射流）を形成するモデル等を JASMINE コードに追加し、KTH で実施された高温熔融酸化物の水中床面拡がり実験（PULiMS 実験）[1.7]の解析に適用し、熔融物の床面拡がりモデルの予測性能を検証した。さらに、このモデルの、より大きな体系への適用性及び PULiMS 実験で用いられた熔融物とは異なる物質（特に実機組成熔融物）に対する適用性を確認するため、任意の流路形状や気相中条件に対応できるよう JASMINE コードを改良した上で、フランスやドイツで実施された拡がり実験[1.8, 1.9 など]の解析に適用した。
- ③ シビアアクシデント総合解析コード MELCOR を用い、炉心損傷に関連する入力パラメータに不確かさを仮定した上で約 300 ケースの事故解析を行い、その結果に基づき JASMINE コードに与える入力パラメータ（格納容器内に流出する熔融炉心の量や温度、熔融炉心ジェットの径、格納容器内の水温等）の不確かさの確率分布を検討した。これらに基づいて抽出した 59 ケースに対して行った JASMINE 解析により MCCI 回避確率（冷却成功確率）を評価し、これを複数の格納容器水位条件に対して実施することで、冷却成功確率と格納容器先行注水量の関係性を評価した。

## 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](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](http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/handouts/2018/images1/handouts_180119_08-j.pdf).
- [1.4] S. Galushin and P. Kudinov, “Sensitivity analysis of debris properties in lower plenum of a Nordic BWR”, Nucl. Eng. Des., Vol. 332, pp. 374-382, 2018.
- [1.5] 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.
- [1.6] 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.
- [1.7] 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.
- [1.8] C. Journeau, J.-F. Haquet, B. Spindler, C. Spengler, J. Foit, The VULCANO VE-U7 corium spreading benchmark, Progress in Nuclear Energy, vol.48, 215--234, doi:10.1016/j.pnucene.2005.09.009, 2006.
- [1.9] B. Eppinger, G. Fieg, W. Sch"utz, U. Stegmaier, KATS experiments to simulate corium spreading in the EPR core catcher concept, 9th International Conference on Nuclear Engineering, 2001.

## 2. DEFOR-A 実験の解析

粒子状の溶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）が大きいために容易に冷却される。一方、粒子状の溶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、溶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 年度以降、JASMINE コードにアグロメレーションデブリの質量割合を評価するモデルを導入し、スウェーデン KTH において実施されている水中の溶融物ブレイクアップ実験 DEOFR-A を対象に検証を行ってきた。このモデルは、溶融ジェットより生成した多数の粒子を代表する「粒子群」同士の重なり状態及び粒子群の平均エンタルピを考慮することにより、溶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となっている。また、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  $k_{qhtr}$  ( $< 1$ ) が導入されている。

DEFOR-A 実験では  $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-WO}_3$  の共晶組成の溶融物を使用しているが、平成 30 年度に実施された DEFOR-A27 実験では、実験後に固化したデブリの組成が測定され、共晶組成よりも  $\text{WO}_3$  の割合が多いことが明らかになった。共晶組成から外れた条件では見かけ上の融点が変わるため、アグロメレーション挙動に影響を及ぼした可能性が高い。そのため、本年度は溶融物質が非共晶組成だったという条件を想定して DEFOR-A27 の解析を実施し、その影響について調査した。

### 2.1 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。粒子群が溶融物プールの上面に落下した場合は、溶融物プールに取り込まれるかを判定した後に、溶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溶融物プールが無い床に着地した粒子群、②固化した溶融物プールの上面に着地した粒子群、③溶融しているが上面に厚いクラストが生成した溶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を起こす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

新しく落下してきた粒子群を  $grp1$ 、 $grp1$  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 2.1 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。

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

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

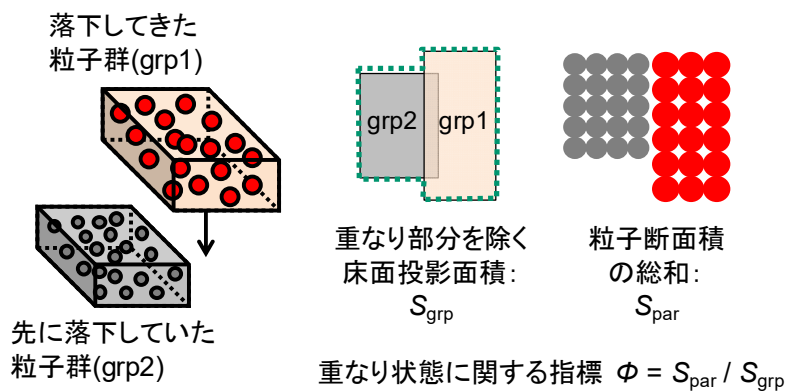


図 2.1 粒子群の重なり状態の定義

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  $\Phi_{lim}$  を以下に示す通りに定義する。

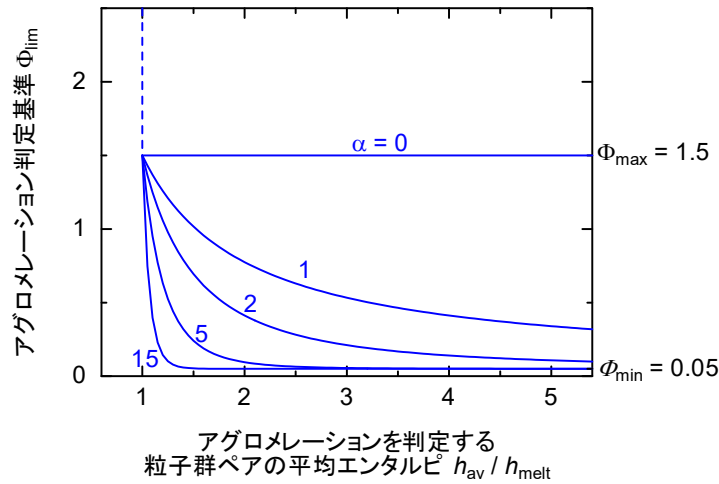
$$\begin{aligned}\Phi_{lim} &= \infty && \text{for } h_{av}/h_{melt} \leq 1 \\ \Phi_{lim} &= \Phi_{min} + (\Phi_{max} - \Phi_{min})/(h_{av}/h_{melt})^\alpha && \text{for } h_{av}/h_{melt} > 1\end{aligned}$$

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（融解エンタルピーではなく、融点におけるエンタルピーを）を示す。 $\Phi_{min}$ 、 $\Phi_{max}$  及び  $\alpha$  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。

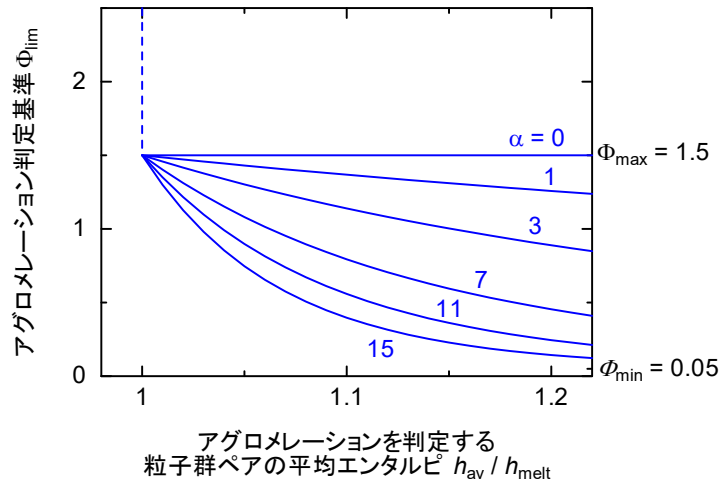
(3) で評価した指標を判定基準と比較した結果、以下に示す関係を満足した場合にアグロメレーションが生じると判定する。

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

図 2.2 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 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  $\Phi_{min}$  及び  $\Phi_{max}$  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  $\alpha$  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、溶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) 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  $k_{qhttr}$  ( $< 1$ ) を導入した。



## 2.2 解析対象とする実験

### 2.2.1 DEFOR-A 実験の概要

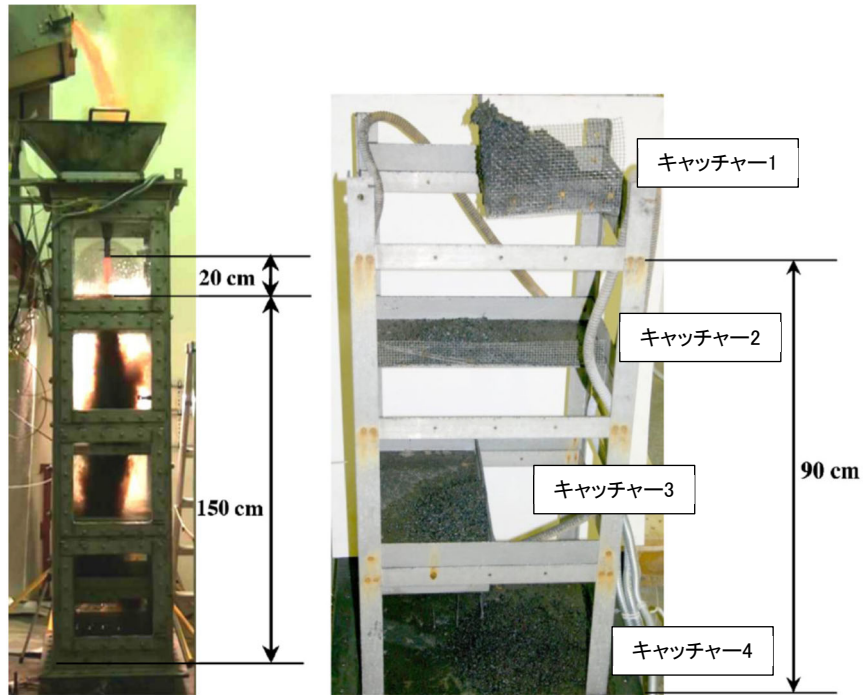
スウェーデン王立工科大学 (KTH) では、高温の溶融物を水プールにジェット状に落下させることにより、溶融ジェットが水中で粒子化することで生成した粒子同士の結合（アグロメレーション）を解明することを目的とした DEFOR (DEbris bed FORmation) 実験を実施している。本事業では、アグロメレーションを対象とした DEFOR-A 実験 [2.1] [2.2] を解析対象とした。

DEFOR-A 実験で用いられている実験装置の概略を図 2.3 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 2.4 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、 $\rho$  : 溶融物密度、 $\rho_w$  : 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 DEFOR-A 実験装置 [2.1]

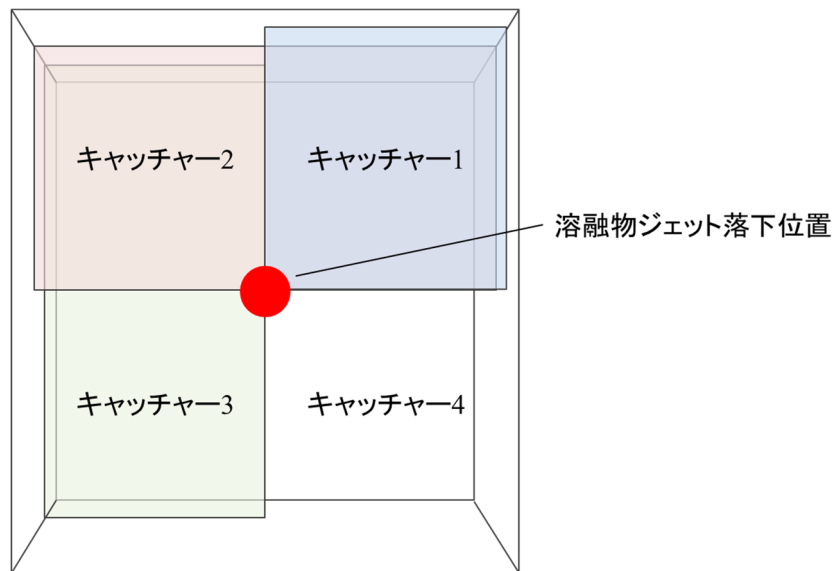


図 2.4 DEFOR-A 実験でのキャッチャーの配置

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 A23~27 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 2.1 に A23~26 実験の条件をそれぞれ示す。

表 2.1 DEFOR-A23~27 実験条件

実験番号	A23	A24	A25	A26	A27
溶融物温度 [K]	1280	1248	1216	1299	1342
溶融物過熱度 [K]	137	105	73	156	199
溶融物ジェット直径 [mm]	25	34	34	34	20
ジェット放出時間 [s]	5.8	5.3	5.7	5.5	6.92
ジェット放出高さ [m]	1.72	1.77	1.77	1.77	1.695
ジェット自由落下距離 [m]	0.205	0.17	0.17	0.17	0.195
水プール深さ [m]	1.515	1.6	1.6	1.6	1.5
水初期温度 [K]	332	346	363	346	360.5
水サブクール度 [K]	41	27	10	27	12.5
回収デブリ重量 [kg]	23.6	24.9	22.7	24.1	21.2
重量平均直径 [mm]	-	-	-	-	-

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 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 2.2 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	A27
キャッチャー1 [%]	48.1	65.4	19.4	96.4	87.0
キャッチャー2 [%]	19.0	12.6	22.6	46.6	81.3
キャッチャー3 [%]	6.4	1.1	5.8	11.5	66.4
キャッチャー4 [%]	0	0	0	0	50.6

## 2.2.2 DEFOR-A27 実験

DEFOR-A27 実験は、約 200K という高い溶融物過熱度条件で実施された A7 及び A9 実験[2.1]の再実験である。これらの実験では、キャッチャー2 及び 3 のアグロメレーション割合がキャッチャー1 よりも高いという特異な結果が得られたため(図 2.5)、これらの妥当性を確認するために A9 とほぼ同じ条件で A27 実験が実施された。その結果、同じく図 2.5 に示すように、全領域において高いアグロメレーション割合が示された。

前述の通り、A27 実験では実験後にデブリの組成が測定され、共晶組成から逸脱していたことが確認されている。図 2.6 に A27 デブリ試料の組成と相図の関係を示す。共晶組成からの逸脱がアグロメレーション割合に及ぼす影響については JASMINE コードによる解析結果に基づき 2.4 節で議論するが、固相線温度の高温側に固液二相状態が加わることでアグロメレーション割合が著しく上昇するとは考え難い。最も深い位置での結果に違いがあるものの、A27 実験の結果は、広範囲で高いアグロメレーション割合が得られたという点で A7 及び A9 実験の結果を概ね再現しているとも解釈できる。なお、A27 実験以外では組成分析が行われておらず、同様に共晶組成から逸脱していた可能性は否定できない。

上記の 3 実験の結果に関しては共通の条件である高い溶融物過熱度が影響したと考えられるが、現時点ではそのメカニズムに関する実験データが得られておらず、JASMINE 解析でも再現できていない。よって、高過熱度条件に対する評価は今後の検討課題とする。なお、過熱度に限らず、JASMINE コードがカバーすべき条件の範囲については、4 章に示すような不確かさを考慮したシビアアクシデント総合解析により検討することが合理的と考えられる。

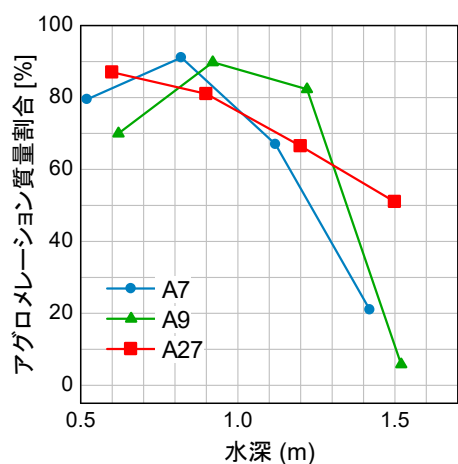


図 2.5 DEFOR-A7, A9 及び A27 実験の結果

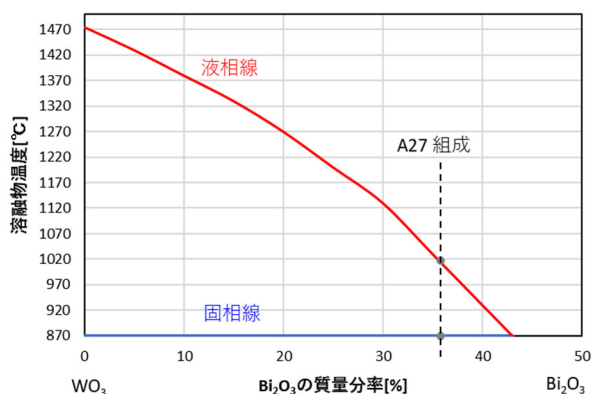


図 2.6 DEFOR-A27 実験における溶融物の組成と相図

## 2.3 解析条件

### (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 2.7 に DEFOR-A の解析体系を例として示す。

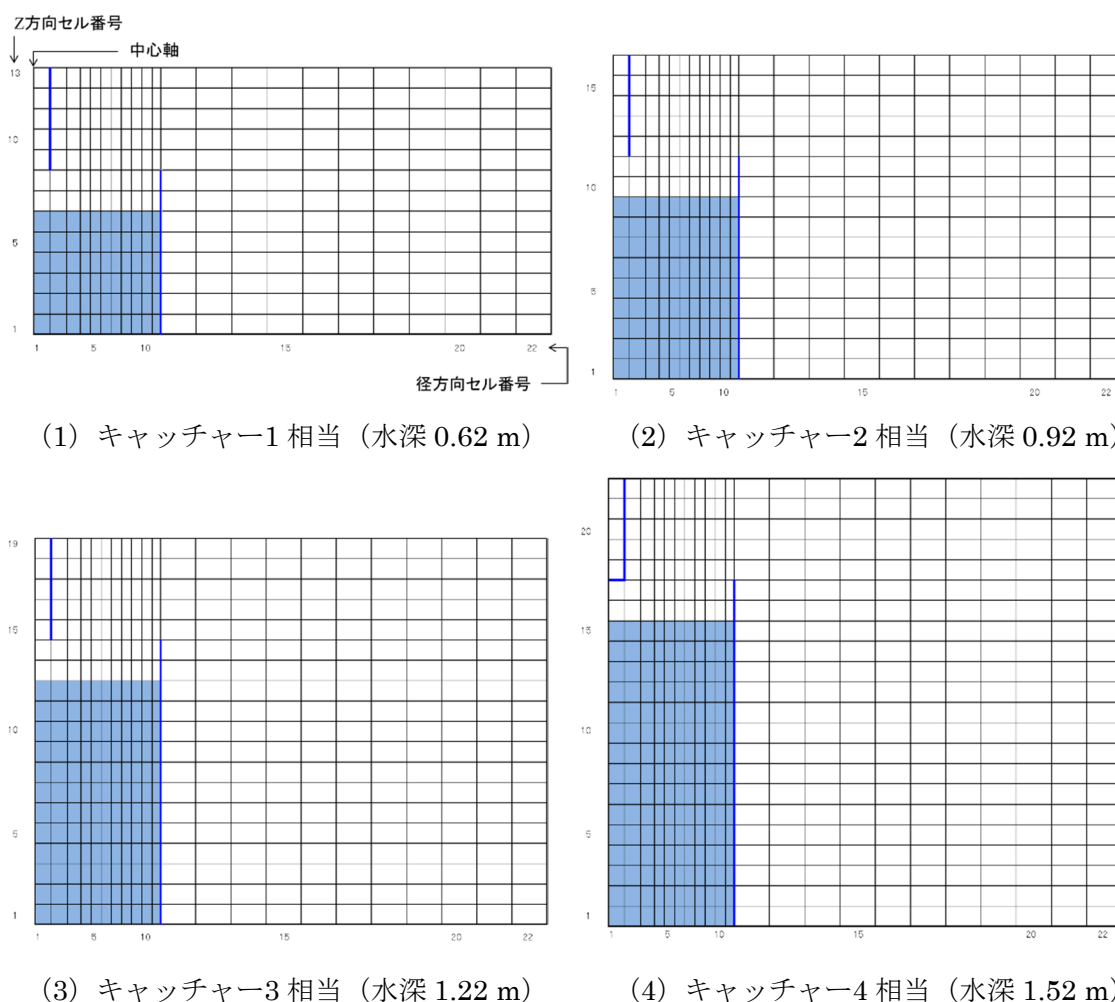


図 2.7 DEFOR-A 実験での解析体系

## (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 2.3 に示す値を用いた。溶融物融点は解析のパラメータとして(5)で説明する。

表 2.3  $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-WO}_3$  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 <sup>3</sup> ]	6876
RHOSOL	固相密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	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 30 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。また、熱伝達を調整するための係数は  $k_{qhtr} = 0.1$  とした。

#### (5) 共晶組成からの逸脱

酸化ビスマス ( $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ) と酸化タングステン ( $\text{WO}_3$ ) の共晶混合比は 42.64 : 57.36 wt% であるが、DEFOR-A27 実験で測定された溶融物の組成は  $\text{WO}_3$  が 35.8%w であった。図 2.6 に示したように、共晶組成の時は固相線温度と液相線温度が 1143 K ( 870 °C ) で一致しているが、A27 の組成では液相線温度が 1290.15 K ( 1017 °C ) となる。

JASMINE コードでは、ジェットブレイクアップ挙動や落下後の拡がり挙動の解析において非共晶組成を有する溶融物を取扱うことが出来る。しかし、アグロメレーションの判定においては単純化した融点の概念を用いている。そこで、非共晶組成に対しては液相線温度と固相線温度の間に便宜上の融点を設定し、この温度に対応するエンタルピをアグロメレーション判定において用いることとした。ここで、融点の設定方法に関する感度を確認するため、固相線温度と気相線温度を 1 : 3 内分する温度及び 1 : 1 に内分する温度の 2 ケースについて解析した。

すなわち、各実験に対して下記の 3 条件で JASMINE 解析を実施した。

共晶組成 : TSOL = 1142 (K), TLIQ = 1144 (K), TMELT = 1143

非共晶組成(1) : TSOL = 1142 (K), TLIQ = 1290.15 (K), TMELT = 1179.575 (K)

非共晶組成(2) : TSOL = 1142 (K), TLIQ = 1290.15 (K), TMELT = 1216.075 (K)

ここで、TLIQ、TSOL 及び TMELT は、それぞれ、液相線温度、固相線温度及び融点である。

## 2.4 解析結果

DEFOR-A 実験の結果と JASMINE 解析結果の比較を図 2.8 から図 2.12 に示す。各図は水深の浅い点からキャッチャー1, 2, 3, 4 のアグロメレーション割合を示している。溶融粒子は水中を落下するにつれて冷却されることで融点以下となり、アグロメレーションしにくくなるため、水深の増大とともにアグロメレーション割合が低下すると予想される。

実験結果は、A23 から A26 のいずれについても水深の増大につれてアグロメレーション割合が急激に低下する傾向を示しているが、A25 のキャッチャー1 では特異な値となっている。また、A27 については 2.2.2 項で述べたように全領域で高い値となり、最も深い位置においてさえも 50%を示している。

共晶組成条件に関する解析は平成 30 年度の解析と同じ結果であり（新たに実施された A27 実験を除く）、いずれも水深とともに短調減少する傾向を再現している。特に、A23、A24 及び A26 の実験結果をよく再現しているが（図 2.8、2.9 及び 2.11）、傾向が異なる A25 及び A27 の再現性は低い（図 2.10 及び 2.12）。

非共晶組成(1)及び(2)の条件では、アグロメレーションの判定に用いる融点が共晶組成条件に比べて、それぞれ、約 37K 及び 73K 高くなるためアグロメレーション発生確率が低下する（2.1 節参照）。その結果、いずれの実験についても、共晶組成→非共晶組成(1)→非共晶組成(2)の順にアグロメレーション割合が低下するが、融点変化の幅がほぼ等しいにもかかわらず、共晶組成→非共晶組成(1)の変化が大きい。

全領域で極めて高いアグロメレーション割合が示された A27 実験については（図 2.12）、当然ながら共晶組成からの逸脱を仮定しても実験結果を再現できず（むしろ差が拡大した）、組成の実測データが得られていることのメリットが活かされない結果となった。KTH は過去の DEFOR-A 実験の試料を保管しているため、各実験の組成分析を改めて実施することで実験データのより精緻な評価が期待できる。平成 30 年度のアグロメレーションモデルは共晶組成を仮定して A1～A9 実験の結果で最適化したため、組成分析の結果次第では最適化をやり直す必要があると考えられる。

一方で、JASMINE コードを安全評価ツールとして用いる場合には、必ずしも上記の再最適化を実施しなくても、アグロメレーションの判定に用いる融点として固相線温度を仮定し、さらに必要に応じてその他のパラメータを調整することで、共晶組成からの逸脱の程度に関わらずアグロメレーション割合を高め（冷却性評価の観点では、より厳しい側に）評価することが可能である。



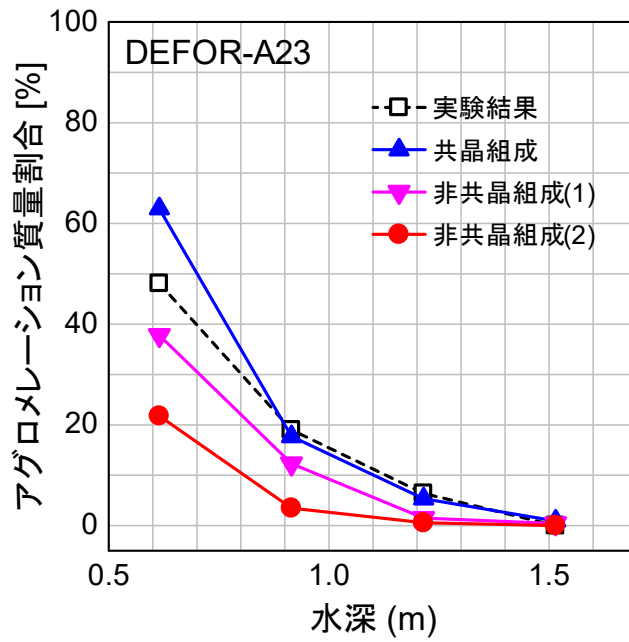


図 2.8 DEFOR-A23 実験のアグロメレーション質量割合

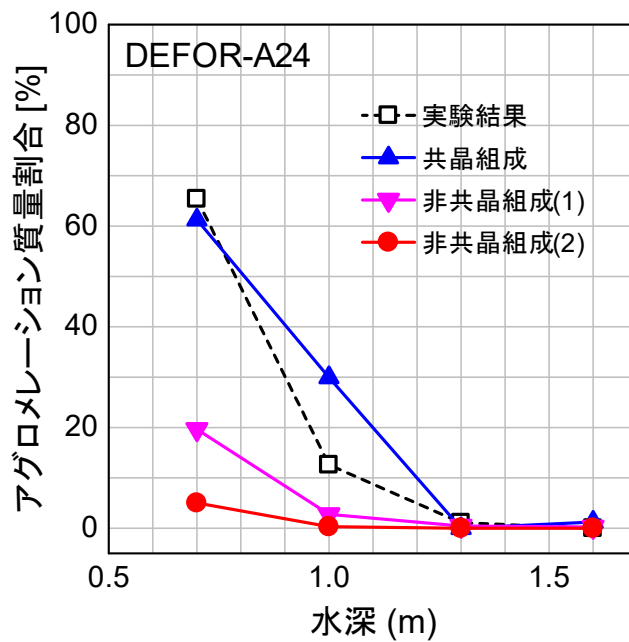


図 2.9 DEFOR-A24 実験のアグロメレーション質量割合

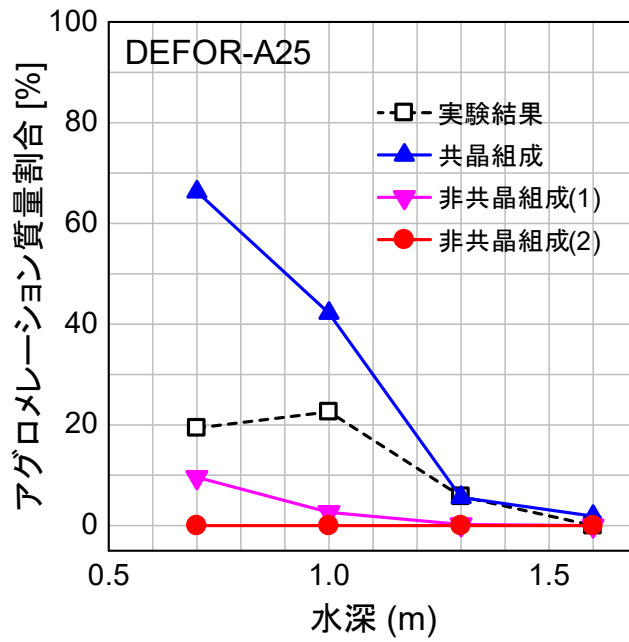


図 2.10 DEFOR-A25 実験のアグロメレーション質量割合

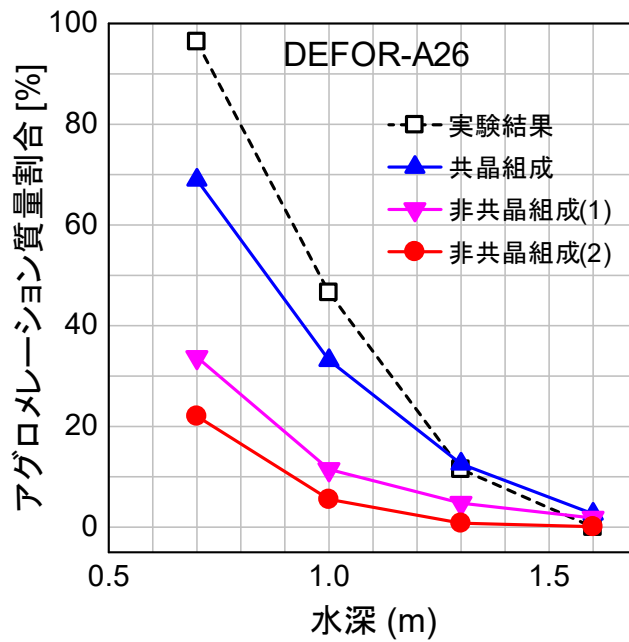


図 2.11 DEFOR-A26 実験のアグロメレーション質量割合

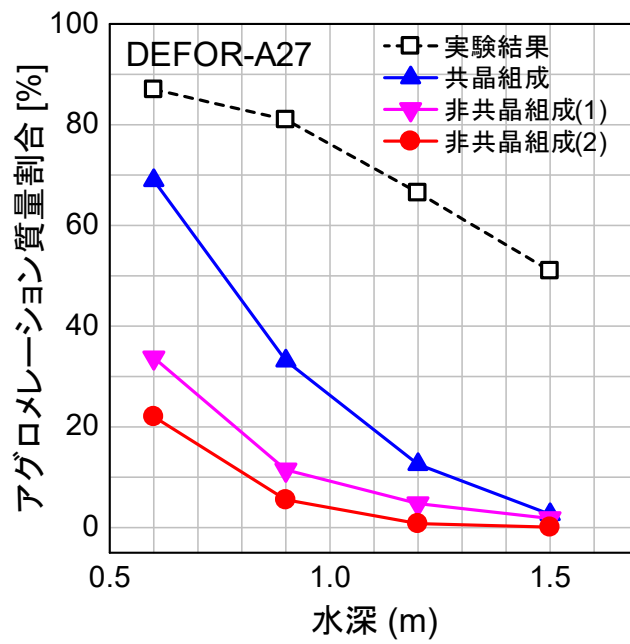


図 2.12 DEFOR-A27 実験のアグロメレーション質量割合

## 2.5 まとめ

DEFOR-A27 実験で生じたデブリの分析により溶融物が共晶組成から逸脱していたことが明らかになった。これを受けて、共晶組成からの逸脱を考慮したアグロメレーション割合の評価を JASMINE コードを用いて実施した。解析対象は近年実施された A23～A27 実験とした。

過去の実験 (A1～A9) における一般的な傾向に従う結果が得られた A23、A24 及び A26 実験に関しては、平成 30 年度版のアグロメレーションモデルで共晶組成を仮定した解析により、実験結果を概ね再現できた。一方、特異な傾向が示された A25 実験に関しては実験データ自体の信頼性が低いと考えられる。また、広い範囲の水深において高いアグロメレーション割合が示された A27 実験の結果については、過去の A7 及び A9 実験とともに、約 200K と高い過熱度条件の影響を受けたと考えられ、現行のアグロメレーションモデルによる再現はできなかった。

共晶組成からの逸脱の影響はアグロメレーションモデルにおける判定基準に用いるパラメータである溶融物の融点を調整することで評価したが、上記の通り JASMINE 解析による A27 実験結果の再現がそもそも困難だったため、非共晶組成に対する評価の妥当性を確認できなかった。よって、評価精度の向上という観点では、モデル最適化に用いた過去の DEFOR-A 実験試料の組成分析が必要となるが、安全評価ツールとしての利用に際しては、アグロメレーションモデルに与えるパラメータの調整等により、目的に応じた保守性を確保することが可能である。

なお、解析対象とした DEFOR-A23～A27 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

- [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. 溶融物拡がりの解析

#### 3.1 JASMINE コードの解析モデルの高度化

平成 30 年度までの PULiMS 実験の解析計算の結果、次の項目が解決すべき課題として残された。

- (1) PULiMS 実験における溶融物供給初期の拡がり速度の不一致
- (2) より大きな体系での実験との比較
- (3) PULiMS とは異なる物性の溶融物を用いた実験との比較

上記 (1) に対応するため、溶融物ジェット落下点から拡がり流れに移るときに射流の発生を考慮するようにした。また (2)、(3) に対応するためこれまでに数多く行われたドライ実験と比較することとし、そのために非軸対称体系に適用できるようにした。以下に、その詳細について説明する。

##### 3.1.1 射流モデル

###### (1) モデルの概要

落下する液相のジェットが水平床面に衝突するときの典型的な現象が、水道水が蛇口から出てシンクの底面に衝突するときに見られる (図 3.1)。ジェット落下点を中心にして薄い半径方向の流れが生じ、その外側では厚い緩やかな流れとなる。その境界は円形で、明確に判別できる。これは大気中で観察されたものであるが、PULiMS においても、溶融物の密度は水密度に比して著しく大きいので、同様な現象が生じると考えられる。

薄い半径方向の流れの部分は、水の流速が表面波の速度よりも大きく周囲の影響が及ばない領域で、このような表面波速度よりも速い流れは射流 (shooting flow) と呼ばれる。外側の緩やかな流れは常流 (normal flow) と呼ばれ、液流速は表面波速度よりも小さく、壁面等の下流側の境界条件の影響を受ける。射流と常流の境界では水流速と液位が急変する跳水 (hydraulic jump) と呼ばれる現象が生じる。

射流域でも流体に作用する力の種類はこれまで考えていた常流域と同じであり、同じ質量、運動量、エネルギー保存式が成立する。従って、今回の改良モデルにおいてもこれまでの差分計算式をそのまま使用する。従来と異なるのは、ジェットから水平流に移行するときの境界条件の与え方である。

###### (2) 射流の発生条件

###### (a) 判定条件式の導出

溶融物の落下ジェットの下端で射流が生じるか、常流となるかはジェットの流速と表面波の速度 (液深に依存) との関係で決定される。落下ジェットの下端での流動は複雑な 2 次元流動であり、1 次元で流動を近似計算している JASMINE で扱うのは適当ではない。そこで、半径方向の第一セルの下流側境界点で流動境界条件を与えることとし、跳水の位置がその点の下流側にあれば射流とする。

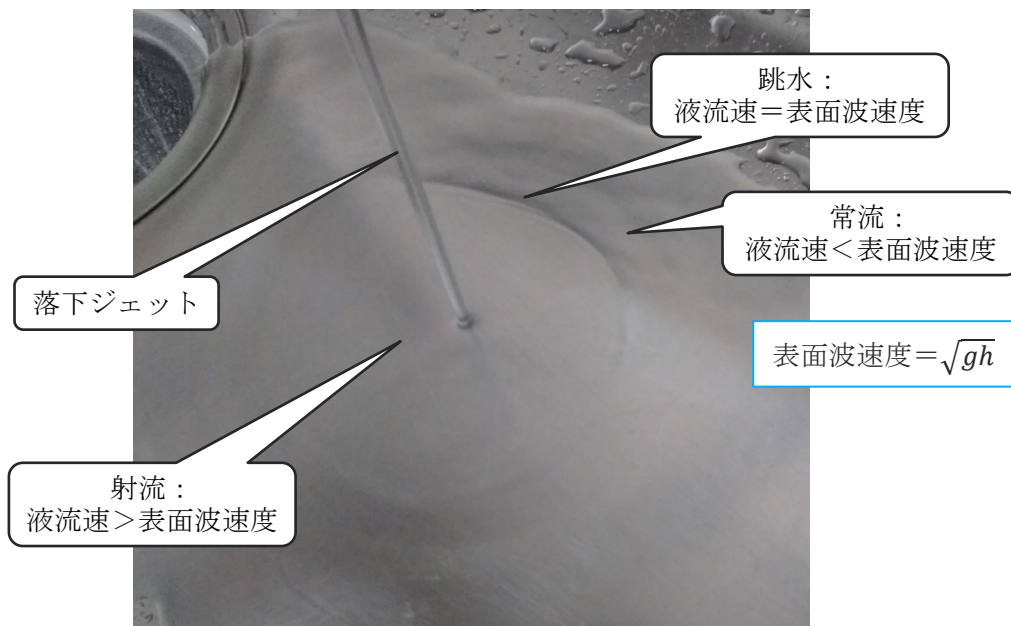


図 3.1 蛇口から出る水道水のシンク底面での拡がり

ジェット下端から第一セル下流側境界点の間では定常状態と仮定し、流量が保存されるとする。又密度も一定とする。跳水での質量保存則及び運動量保存則は、

$$h_u v_u = h_d v_d \quad \text{①}$$

$$v_d^2 h_d - v_u^2 h_u = \frac{1}{2} g h_u^2 - \frac{1}{2} g h_d^2 \quad \text{②}$$

ここで  $h$  : 液位  $v$  : 流速 添え字  $u$  : 上流側  $d$  : 下流側  $g$  : 重力加速度である (図 3.2)。

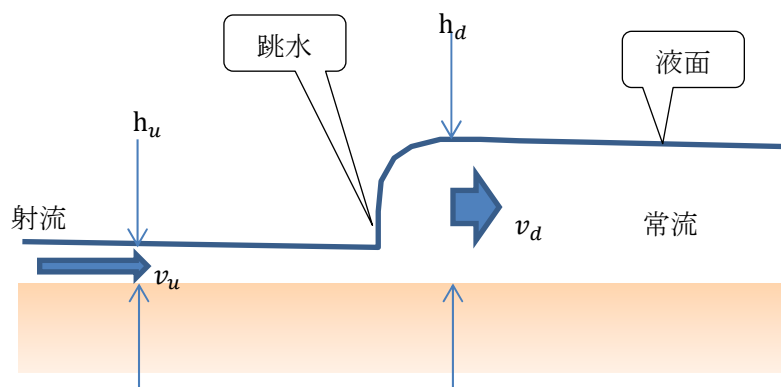


図 3.2 跳水の上流側・下流側の流速と液位の変化

式①の両辺を自乗して②式を引くことにより  $v_d$  を消去する。

$$h_u = h_d \frac{v_u^2 \pm \sqrt{(v_u^2 - g h_d)^2}}{2v_u^2 - g h_d} = \frac{g h_d^2}{2v_u^2 - g h_d} \quad \text{③}$$

ここで複号が正の場合は跳水のない場合を表すので、ここでは負とする。

また、跳水が生じると、 $h_u < h_d$ であるから、

$$v_u > \sqrt{gh_d} \quad (4)$$

すなわち、上流側の速度は下流の表面波速度よりも大きくななければならない。

ジェットの下端において床面に衝突して水平方向の運動量を得るときに、完全に運動エネルギーが保存されない場合を考慮する。ジェットが完全な円形の断面でなく歪んでいたり、分裂している場合などに床面から広がった流れが複数の点から放射状に拡がり衝突・混合することにより運動エネルギーの散逸をもたらすと考えるものである。ジェットの下端流速を  $V_{jpin}$ 、ジェット径を  $D_{jpin}$  とする。ジェット下端流速と水平方向速度の比を一定 ( $v_u/V_{jpin} = F_{jet\_to\_pool}$ ) と仮定する ( $0 < F_{jet\_to\_pool} \leq 1$ )。また、条件判定を行う位置を第1セルの下流側境界 ( $r_{b1}$ : これより内側には計算セルがないので流動モードの変化を考えるのは無意味) とすると、

$$h_u = \frac{D_{jpin}^2}{8r_{b1}F_{jet\_to\_pool}} \quad (5)$$

式③、④にこの関係を入れれば

$$\frac{\{2(V_{jpin}F_{jet\_to\_pool})^2 - gh_d\} \frac{D_{jpin}^2}{F_{jet\_to\_pool}}}{8r_{b1}} > gh_d^2 \quad (6)$$

$$V_{jpin}F_{jet\_to\_pool} > \sqrt{gh_d} \quad (7)$$

流入するジェットの条件 (速度  $V_{jpin}$ 、直径  $D_{jpin}$ )、プール側の条件 (液位  $h_d$ ) が式⑥、⑦を満たすとき射流と判定する。

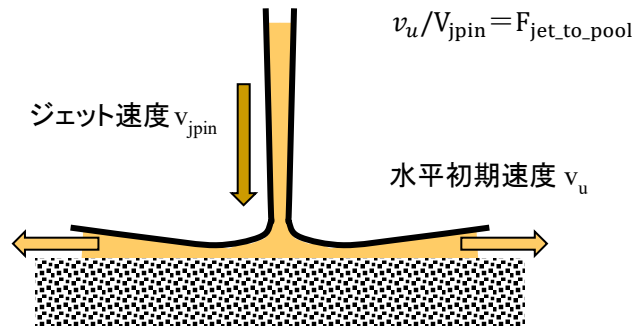


図 3.3 ジェット流からプール初期速度への変換

### (3) 射流発生時の境界条件

JASMINE では溶融物ポールの動的挙動を解析するために浅水方程式を使用しており、浅水方程式は双曲型偏微分方程式に分類される。空間一次元の変曲型偏微分方程式は一般に、空間一時間座標上で特性曲線と呼ばれる曲線上の常微分方程式に変形できる (特性曲線に沿って擾乱が伝播する) ことが知られている。質量、運動量、エネルギーの保存則からなる方程式系では特性曲線は 3 本であり、伝播する擾乱 (Riemann invariants) は表 3.1



に示す 3 種である。空間—時間座標上での特性曲線を表すと図 3.4 のようになり、時間を差分で表現すれば、時刻  $t_0 + \Delta t$  の点 B での状態値は、前の時刻の点 A1~A3 の状態から計算することができる。流れの速度が表面波の速度よりも大きいときは全ての特性曲線の勾配が正となり、下流側の影響を受けないことになる。

表 3.1 空間一次元の線形双曲型偏微分方程式の特性曲線

特性曲線の勾配の逆数	物理現象	不変量
$v_p + c$	流れの方向へ伝播する表面波	$h_p + \frac{c}{g}v_p$
$v_p$	流れ	$e_p$
$v_p - c$	流れと反対の方向へ伝播する表面波	$h_p - \frac{c}{g}v_p$

ここで、 $h_p$ 、 $v_p$ 、 $e_p$  はそれぞれ溶融物プールの液位、流速、比内部エネルギーである。 $g$  は重力加速度、 $c$  は表面波の速度である ( $c = \sqrt{gh_p}$ )。

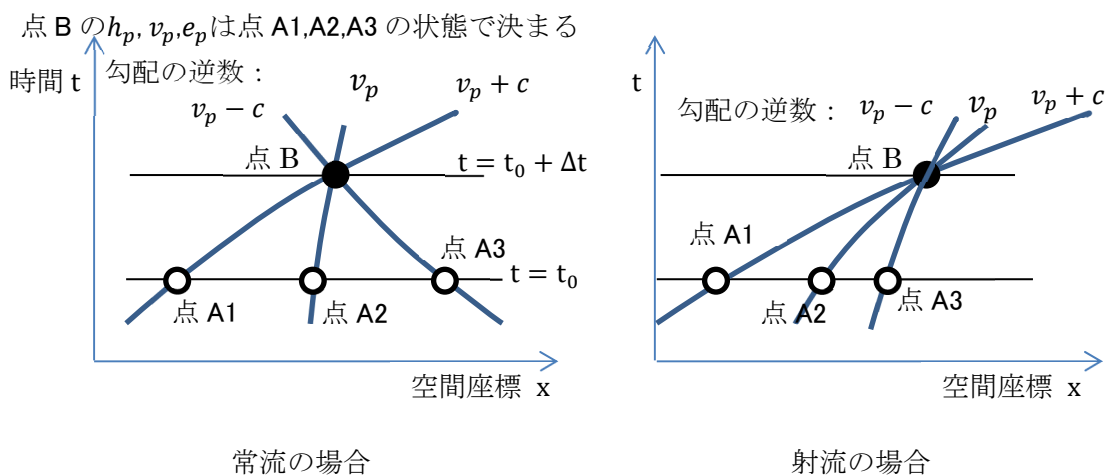
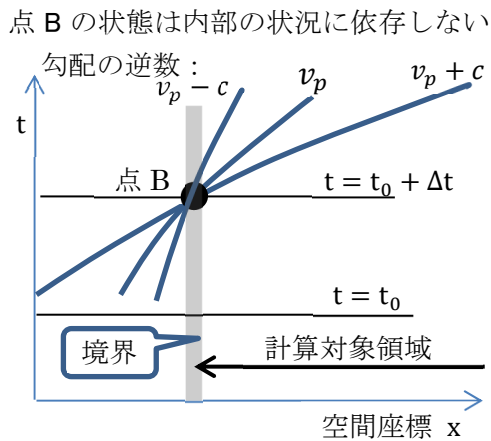


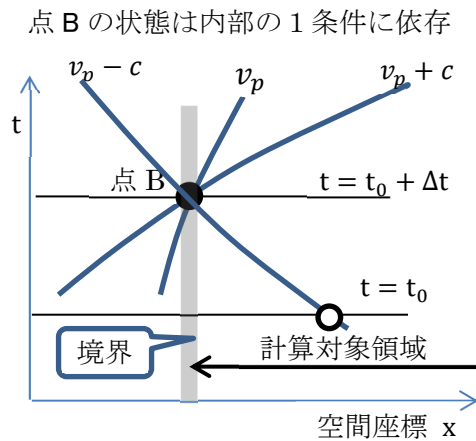
図 3.4 空間—時間座標上の特性曲線

点 B が計算対象領域の境界にあった場合には図 3.5 のようになり、境界における特性曲線の勾配に応じて与えられる境界条件の数が増える。JASMINE ではジェットの下端の条件に応じてプール中心部が射流か常流かを判定し、それに応じて指定する境界条件の数を変更している (表 3.2)。

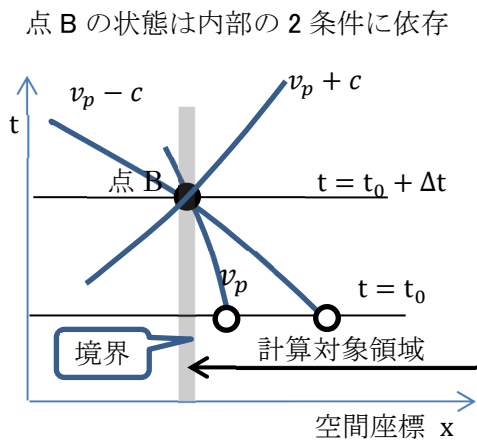
なお、今回の解析では生じないが、もし出口側境界で流速  $\geq$  波動伝播速度の場合には、境界条件は不要 (数は 0 個) となる。次元圧縮性流体においては、このような現象は臨界流として知られており、流量が背圧の影響を受けなくなる。



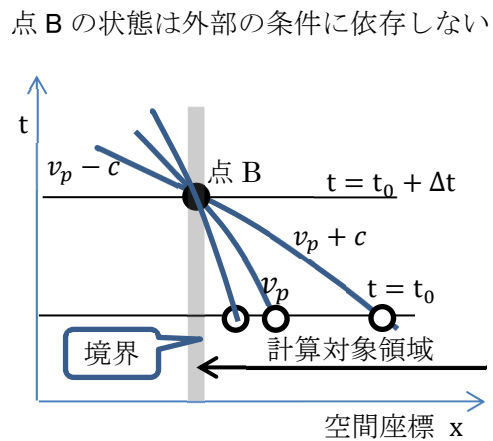
(a) 流入部で射流の場合



(b) 常流で流入



(c) 常流で流出



(d) 流出部で射流

図 3.5 境界における特性曲線と境界条件の数

表 3.2 空間 1 次元双曲型偏微分方程式の境界条件の数 (エネルギー保存則を含む場合)

系外から計算領域に入る特性曲線の数	流動状況	必要な境界条件の数	与える境界条件の物理量の例
3	流入部で射流	3	流速と液位と温度 (エネルギー)
2	常流で流入	2	流速と温度 (エネルギー)
1	常流で流出	1	圧力 (又は流速=0: 壁面等、又は流速の勾配=0: 自由流出等)
0	流出部で射流	0	なし (外部の影響を受けない)

(4) 拡がり流れの先端

溶融物の先端部では、射流のように流速の大きな場合には水と衝突しながら流れるので、

先端の移動速度は流速とは異なった値となる（図 3.6）。先端部を拡大し先端部の移動速度と同じ速度の座標系で見ると、壁面衝突流と同じフローパターンとなる。この座標系で衝突部の運動量保存則を考えると（ $\hat{v}$ は先端部の移動速度と同じ速度の座標系に対する相対速度を表す）、単位体積当たりの熔融物の運動量は $\rho_m \hat{v}_m$ となるので、単位時間に流入する熔融物の体積と運動量は $\hat{v}_m$ 、 $\rho_m \hat{v}_m^2$ であり、水の運動量は $\rho_w \hat{v}_w^2$ となる。両方の運動量が等しいので

$$\rho_m \hat{v}_m^2 = \rho_w \hat{v}_w^2 \quad (1)$$

先端部の移動速度を $v_{edge}$ とし、初期に水は静止していたとすると

$$\hat{v}_w = -v_{edge}$$

熔融物については、熔融物の流速を $v_{flow}$ とすると

$$\hat{v}_m = v_{flow} - v_{edge}$$

運動量バランスの①式に代入すると

$$v_{edge} = \frac{v_{flow} \pm \sqrt{v_{flow}^2 - (1 - \rho_w/\rho_m)v_{flow}^2}}{1 - \rho_w/\rho_m} = v_{flow} \frac{1 \pm \sqrt{\rho_w/\rho_m}}{1 - \rho_w/\rho_m}$$

$v_{edge} < v_{flow}$  なので複号は負となる。すなわち、

$$v_{edge} = \frac{1 - \sqrt{\rho_w/\rho_m}}{1 - \rho_w/\rho_m} v_{flow} \quad (2)$$

例として PULiMS 実験に近い状況を想定して  $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$ （水プール二相流密度の近似値）、 $\rho_m = 7000 \text{ kg/m}^3$ （熔融物の密度の近似値）とすると

$$v_{edge} = 0.7257 v_{flow}$$

となり、空気中の場合（ $v_{edge} \cong v_{flow}$ ）とかなり異なった拡がり速度となる。水中での $v_{edge}$ と $v_{flow}$ の差により行き場を失った熔融物体積は先端部の液位上昇に寄与する。

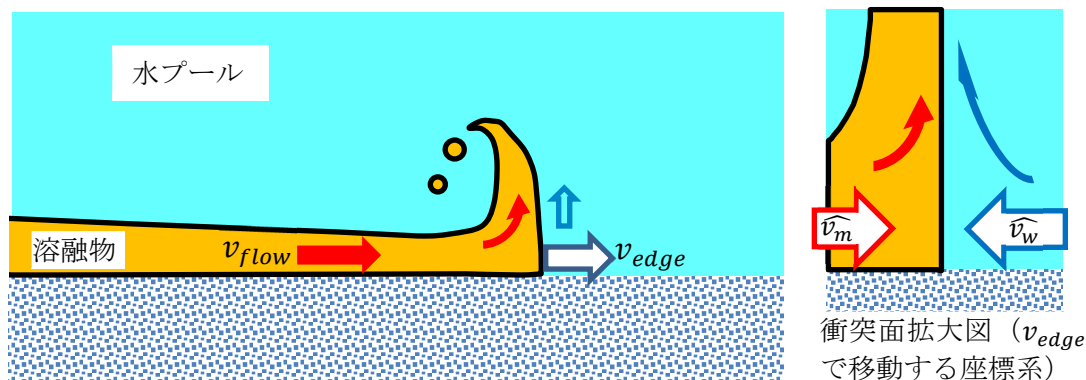


図 3.6 熔融物先端での流れ

#### (5) JASMINE 熔融物プール流動計算の人工粘性項

熔融物のプール表面には波が生じ、特に先端部には急峻な水面高さの変化が存在する可能性がある。このような急激な変化に対応するため、JASMINE では人工粘性項[3.1]が含まれており、これによりなだらかな水面が得られるようになっている。計算式は

$$\mu_a = \rho_w (b_0 \Delta x)^2 \left| \frac{\partial v_w}{\partial x} \right| \quad \text{if } \frac{\partial v_w}{\partial x} < 0$$

$$= 0 \quad \text{otherwise}$$

今回溶融物ジェットの下端で射流が生じるモデルで計算すると、中央部には高流速で薄い膜上の流れが生じ、周辺部に溶融物が溜まる状態となる。溶融物供給が終了するとこの中央の低液位部に周辺から急峻な波が押し寄せることになる。JASMINE では軸対称を仮定しているため、中心部へ収斂する波動に対して数値計算が発散する場合がある。そのため、これを抑えることができるよう人工粘性項を大きくする必要がある。

### 3.1.2 計算機能の追加

#### (1) 非軸対称体系への拡張

JASMINE は、PULiMS 実験及び実機条件の解析に適用することを目的に、水プール中に溶融物が落下する体系を対象として、軸対称を仮定してプログラムを作成してきた。プログラム上は、図 3.7 に示すセクターを対象に計算している。今回、大規模または PULiMS とは異なった模擬溶融物を使用した実験と比較するため、これまで数多く実施されてきたドライ条件の実験を解析のできるよう以下の計算オプションを追加した。

- (a) 樋形状等の流路に対応できるようにする。
- (b) 溶融物ジェットの計算部をバイパスする。
- (c) 二相流計算部をバイパスする。

上記(a)を実現するため、流れ方向座標  $x$  と流路幅  $w(x)$  の関係  $f(x)$  を入力で指定できるようにする (図 3.8)。また、(b)は、軸対称の仮定を設けていないため従来の計算モデルが意味をなさなくなったためである。溶融物プールの第 1 セルに直接供給されるとして、溶融物の温度、流量、速度 (運動量を計算するため) を入力で与える。

平成 30 年度の改良では、ドライ条件の解析では二相流側の状態を気相とすることで対応していたが、(c)の変更を行うことにより計算時間の大幅な短縮と計算の安定性が期待できるようになった。気相への伝熱は、放射伝熱と気相への熱伝達を考慮しており、外部温度と対流熱伝達率を入力で与える。気相の場合には放射伝熱が支配的であり、対流の効果は小さいので定数で近似可能と考えたものである。

これらの追加機能を用いた計算結果は 3.3 節に示す。

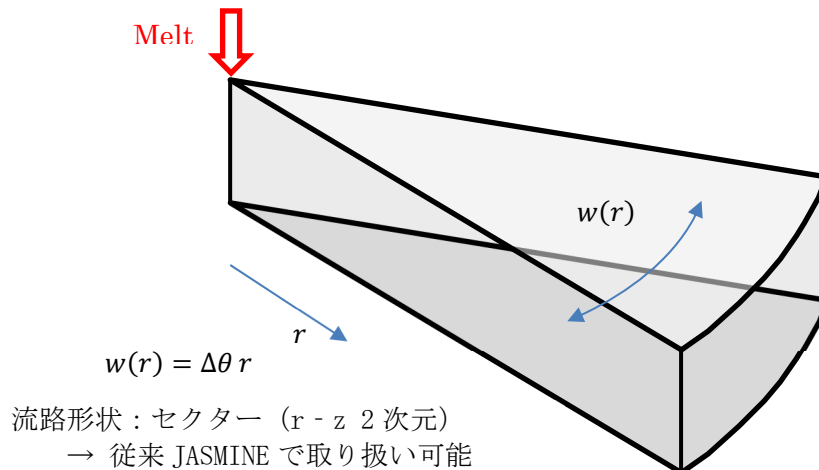


図 3.7 これまでの JASMINE の計算対象とする形状

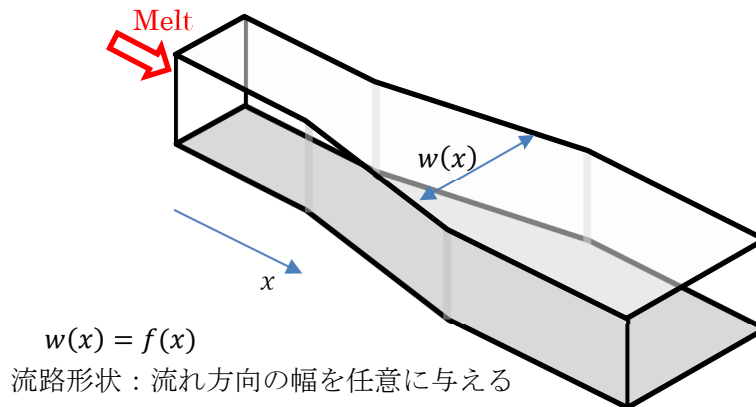


図 3.8 今回組み込んだ対応可能な流路形状

## (2) 初期条件の多様化

溶融物プールが既に形成されている状態から計算を開始できるようにした。これにより局部的に存在した溶融物が、重力により拡がって行く過程を計算できるようになった。これは、初期条件を与える入力オプションを追加したもので、計算モデル等の変更はない。

本機能を Dam Break 問題に適用した計算例を図 3.9 に示す。これは初期水位を 0.2m (位置 0~1m のところに水がある) として 0.5 秒まで計算したものである。Dam Break 問題を浅水方程式で近似した場合には Ritter 解として知られる理論解があり [3.2]、この結果も併せて示してある。

流動抵抗を無視した浅水方程式の質量保存則と運動量保存則は次式で表現される。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} + h \frac{\partial u}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = 0$$

Ritter 解は、これらの偏微分方程式の解析解を与えるものである。

$-t\sqrt{gh_0} < x < 2t\sqrt{gh_0}$ の範囲で

$$u(x, t) = \frac{2}{3} \left( \sqrt{gh_0} + \frac{x}{t} \right)$$

$$h(x, t) = \frac{1}{9g} \left( 2\sqrt{gh_0} - \frac{x}{t} \right)^2$$

ここで、 $t, x, h, u, g$ は、それぞれ、時間、位置座標、液位、流速、重力加速度、 $h_0$ は $x < 0$ における初期水位である。

図 3.9 に示すように、JASMINE の結果は上流側の水位減少を正しく表現するが流れの先端部で Ritter と一致していない。この差の原因は、理論解では薄い先端部の流れに作用する流動抵抗や表面張力を記述できないこと、及び JASMINE 数値計算における人工粘性の悪影響（人工粘性は隣り合う計算点の速度差を減らすように働くので先端部の速度の大きい尖った部分がなくなるように作用する）である。

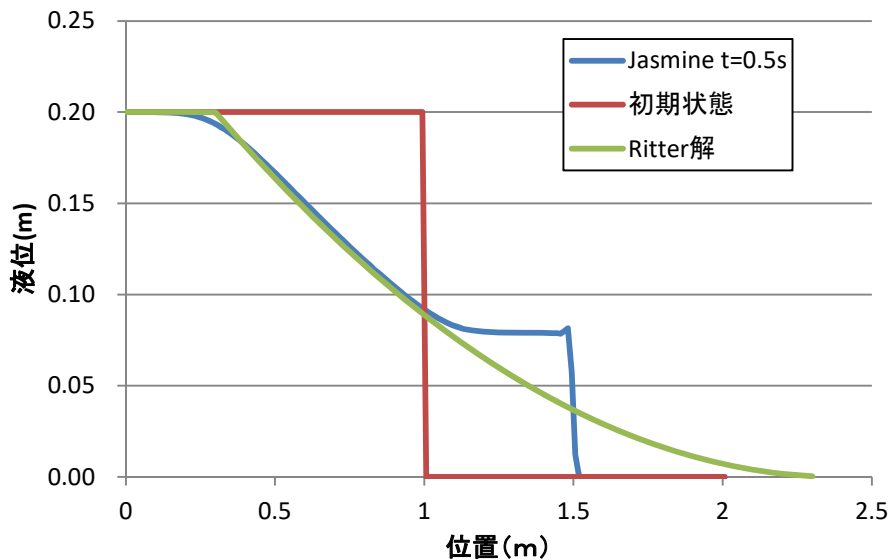


図 3.9 Dam Break 問題への適用例

### (3) 水プールの一点近似モデル

今回の改良で、ドライ条件では軸対称ではない体系も JASMINE が適用できるようになったが、水プールに関する計算はそれに対応できていない。これに対処するため、水プール側を平均値で表す計算オプションを設けた。これにより円筒座標でもデカルト座標でも表されない変形形状の水プールに適用できるようになる。また、計算時間が著しく短縮されることが期待される。但し、限界として、水温度分布、ボイドの局所的な発生、水の流速の影響などは扱えない。

計算の簡単化のため以下の仮定を設けた。

- (a) 水は常に十分に混合されている。(一点近似)
- (b) 体系の圧力は初期値一定 (体系上辺は自由流出)
- (c) 水温が飽和温度以下の時、水面からの蒸発は考えない。水面での伝熱、蒸発・凝縮

は無視する。

(d) 水温が飽和温度に達した後に溶融物から伝わった熱は蒸発に使われる。

(e) 水面上の気流により発生した水蒸気は流されると仮定し、上部の気相空間の水蒸気分率は変化しない。

以上の仮定の下で、質量保存則、エネルギー保存則に関する常微分方程式を導くと、

$$\frac{d(M_w + M_g)}{dt} = 0$$
$$\frac{d(h_w M_w + h_g M_g)}{dt} = Q$$

ここで、

$M_w$ 、 $M_g$  : 水プールを形成する水の質量、蒸発した水の質量

$h_w$ 、 $h_g$ 、 $h_{sat}$ 、 $Q$  : 水プールの単位質量当たりエンタルピ (比エンタルピ)、飽和蒸気の比エンタルピ (定数)、飽和水の比エンタルピ (定数)、溶融物からの伝熱量

水プールが未飽和状態の時は蒸発がないので ( $dM_w/dt = 0$ )、 $T$ 、 $C_p$  をプール水温・比熱として

$$\frac{dh_w}{dt} = C_p \frac{dT}{dt} = \frac{Q}{M_w}$$

が得られ、一方飽和後は、

$$\frac{dM_w}{dt} = -\frac{Q}{h_g - h_{sat}}$$

となる。

JASMINE では、溶融物に関する計算結果から得られた水相への伝熱量を総計して  $Q$  とし、これを用いて上記の常微分方程式を解き、得られた水温及びその結果求められた水密度等を、従来使用していた二相流計算セルに与える。このとき水質量  $M_w$  の計算結果及び溶融物存在量に基づき水位を計算して水面以下の計算セルにすべて同じ値を入れる。従来の二相流計算部はスキップし、流速はすべて 0 とする。

簡易化した一点近似モデル水プールと従来の 2 次元計算水プールモデルとの比較をするために PULiMS E14 実験を対象として計算を行った。6 秒後のプールの状況をプロットしたものが図 3.10 である。水プール二次元計算ではジェットのある中心部でボイドが発生しているのに対して、一点近似モデルでは水プール内にボイドの分布はなく一様である。溶融物の拡がりを比較したものが図 3.11 である。一点近似の方が、拡がりはずかになくなる。この理由はジェットの落下速度の差、すなわち水平方向に広がり始める流れの初速の差に起因する。ジェットの落下速度は図 3.12 に示すように二次元解析の方が大きくなる。これは二次元解析ではジェット近傍のボイドの発生が計算されジェットに対する流動抵抗が小さくなるのに対して一点近似では一様な水プール状態となるためボイド率が高くジェットの速度が抑えられるためである。

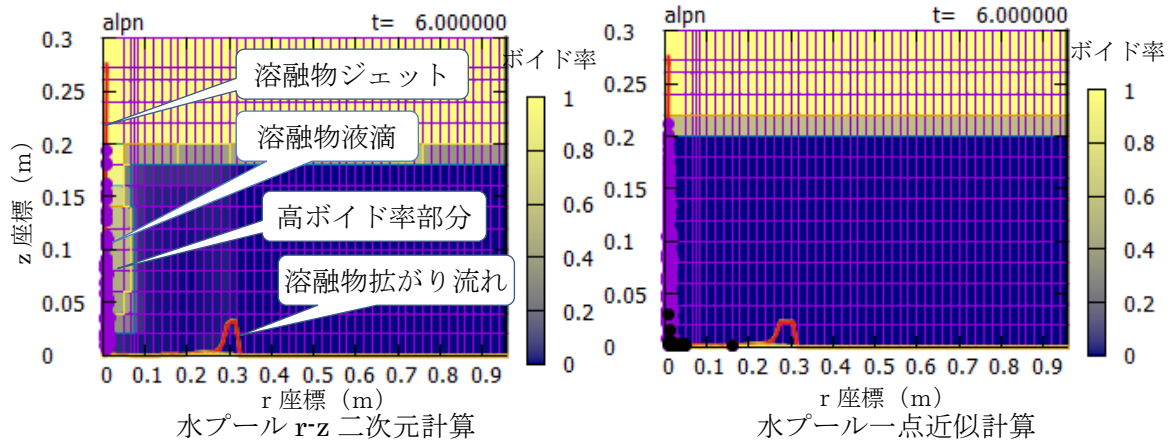


図 3.10 二次元計算と一点近似計算の水プールの状況の比較

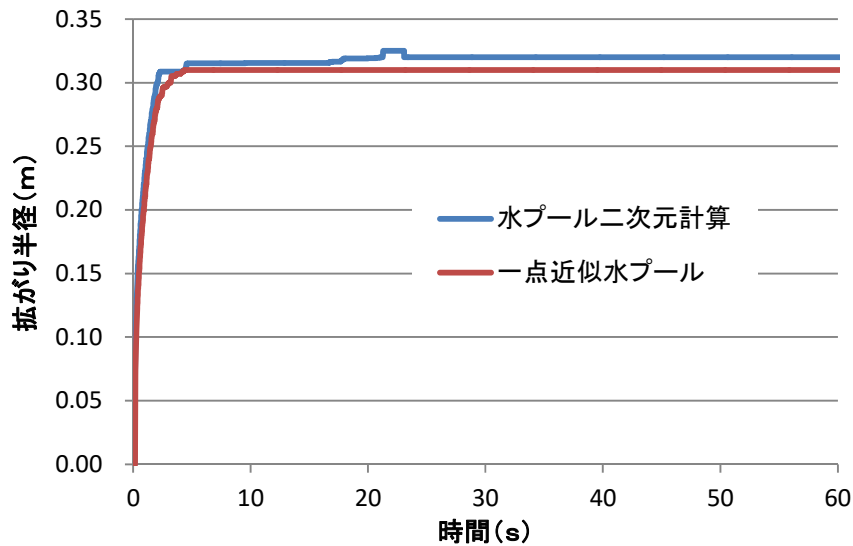


図 3.11 二次元計算と一点近似計算の溶融物の拡がりの比較

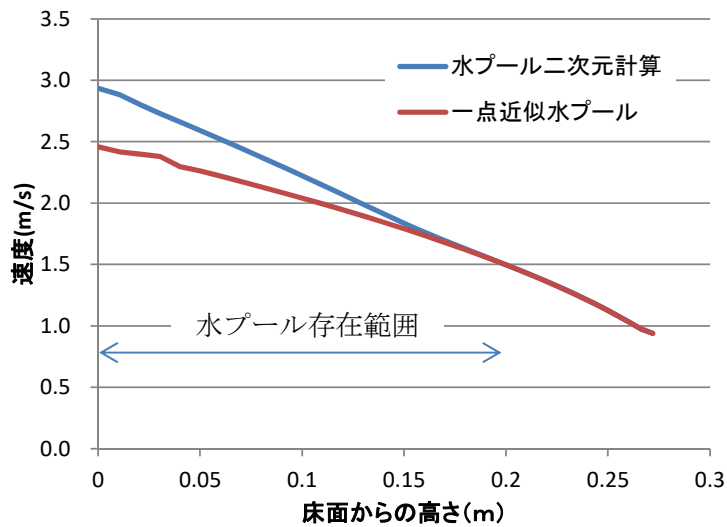


図 3.12 二次元計算と一点近似計算の溶融物ジェット下端の速度の比較



## 3.2 PULiMS 実験の解析

### 3.2.1 実験の概要と入力データ

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[3.3]。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 30 年度までの JASMINE による解析では、E1,E4,E8,E9 実験及び E10~E15 実験を対象とした。今年度は、溶融物供給初期の拡がり速度の実験値と解析値の差を解消するモデルの改良を行ったため、初期の溶融物先端位置が観察されている E10~E15 を解析対象とした。加えて、新たに実施された E16~E18 実験も解析対象とした。

装置の外観写真を図 3.13 に、装置の概略構造を図 3.14 示す。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、溶融物の拡がりが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。E16~E18 ではさらにもう一枚直角に石英ガラス製の板（壁）を設けてあり、溶融物の拡がり範囲は 90° となっているので、実効的な溶融物量は 4 倍、拡がり面積も 4 倍と考える。図 3.15 に E16~E18 実験に使用された床面と石英ガラスの状況の写真を示す。

実験装置の床の Spreading Plate の形状を図 3.16~3.18 に示す。E10 実験では図 3.16 に示すように熱電対配置の中心位置に溶融物の落下点があるようになっているが、E11~E18 実験では図 3.17、図 3.18 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 3.3 に示す。入力の値や決め方は、今回導入した射流モデルに関するものを除き、平成 30 年度までと同じである。射流モデルの採用により溶融物の拡がりが大きく計算されるようになったので、拡がり面積の解析値が実験値と一致するよう決定していたクラスト強度に関する入力値も変更された。

使用された模擬溶融物は、 $\text{Bi}_2\text{O}_3 \cdot \text{WO}_3$  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 3.4 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 3.5 に示す[3.4]。

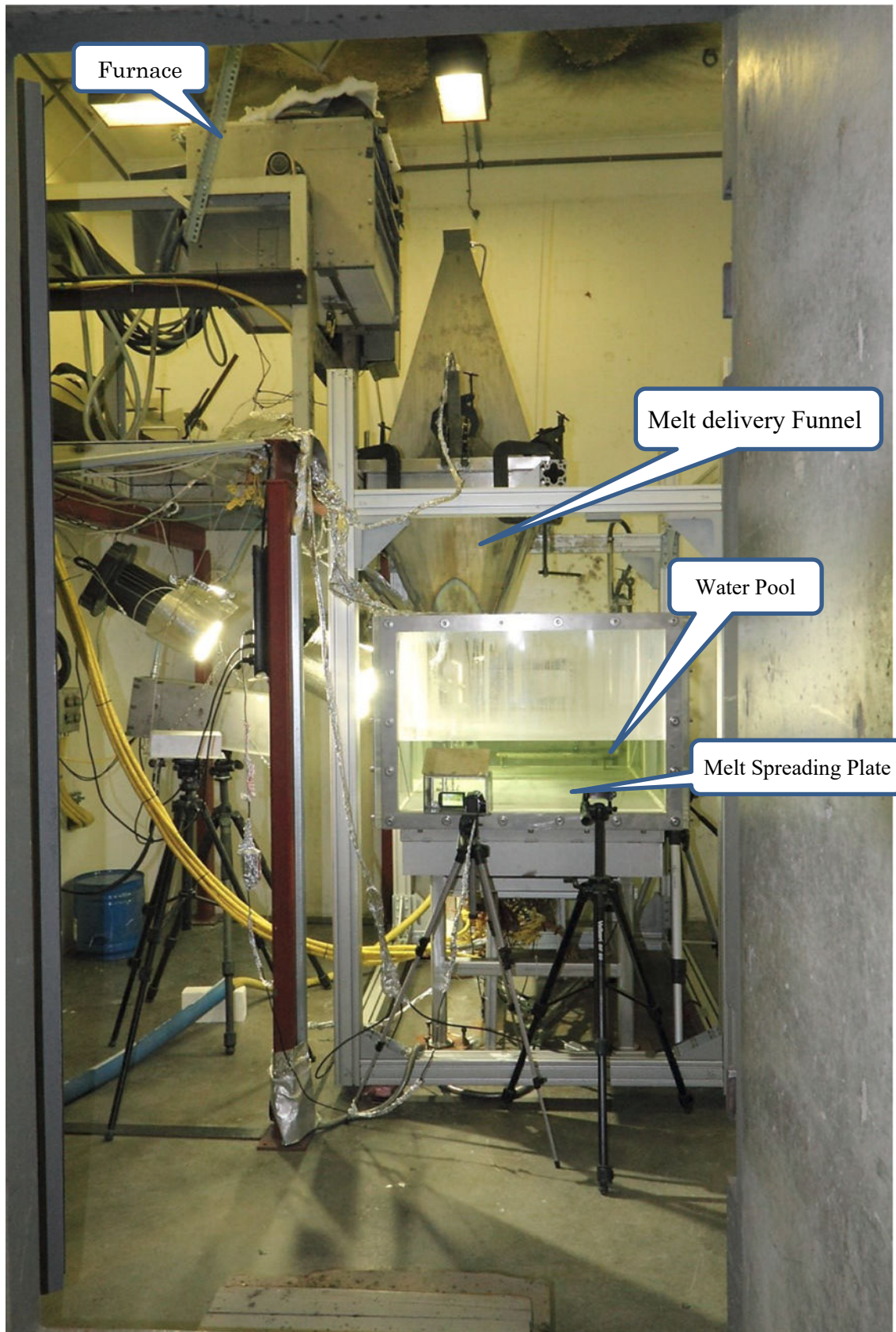


図 3.13 PULiMS 実験装置全体写真 (E10~E15 実験用)



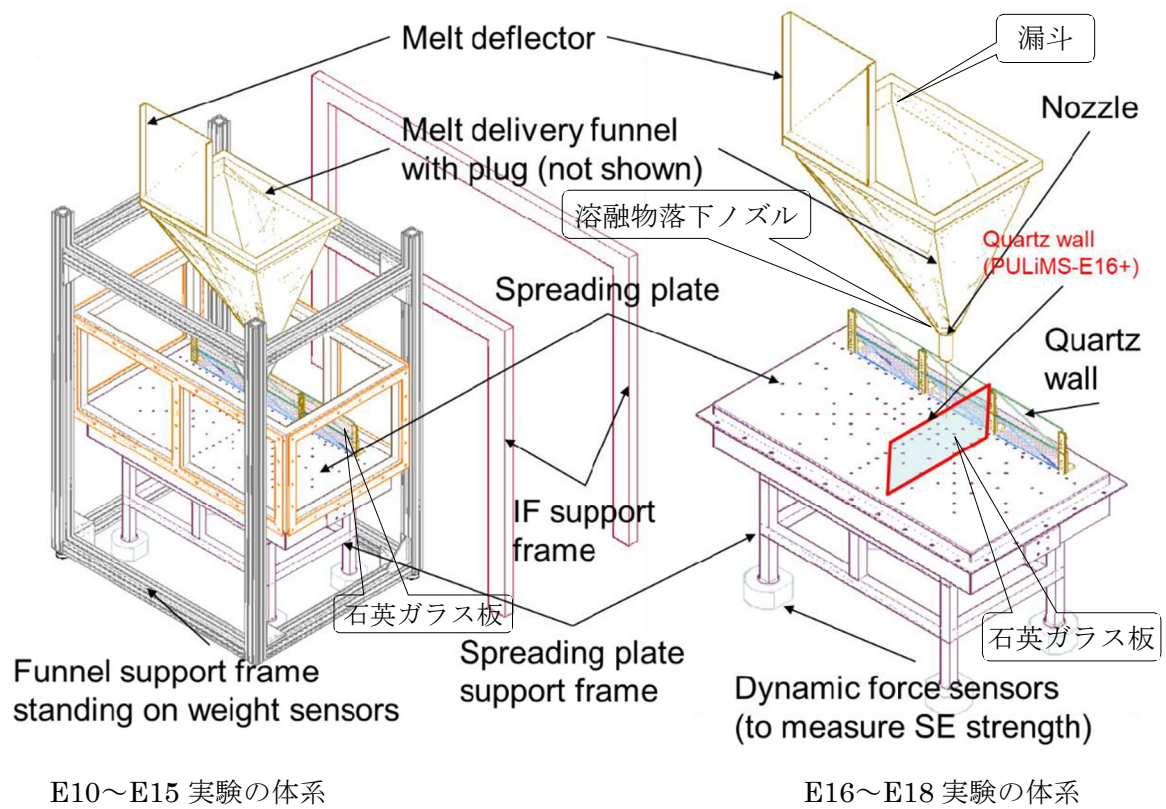


図 3.14 PULiMS 実験装置の概略構造

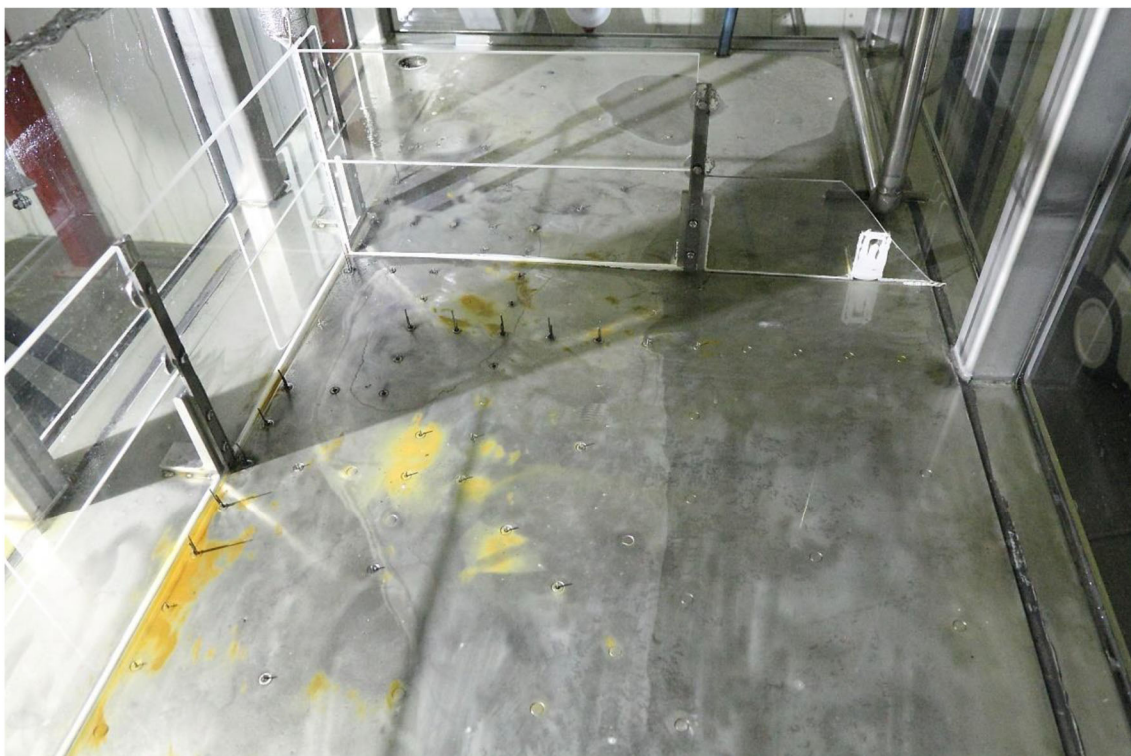


図 3.15 E16~E18 実験体系の床面と石英ガラス板の状況

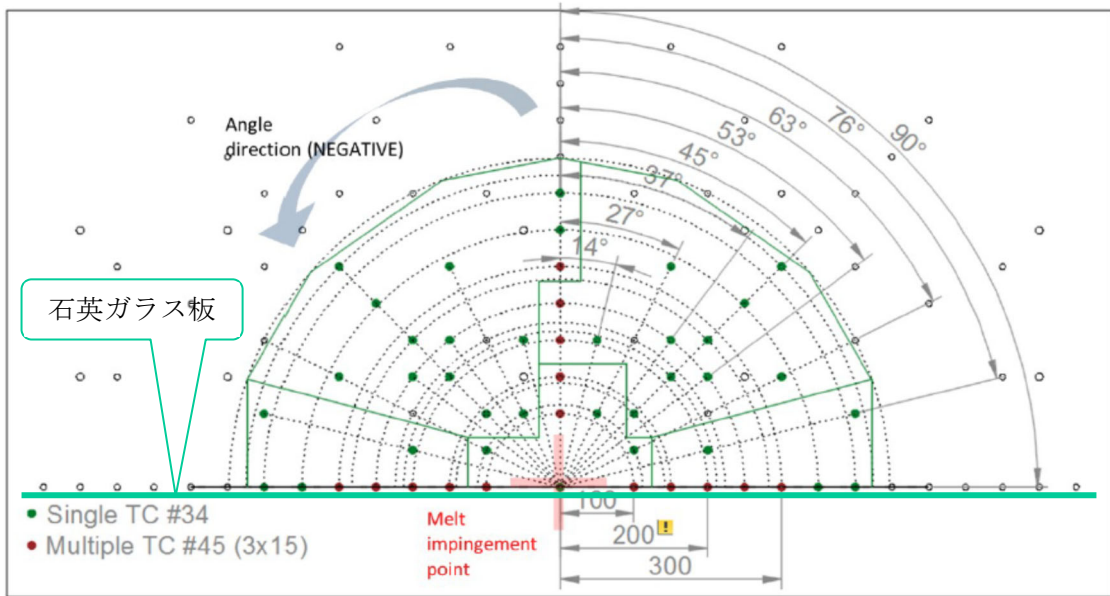


図 3.16 PULiMS 半円状拡がり実験のテストセクション平面図 (E10 実験)

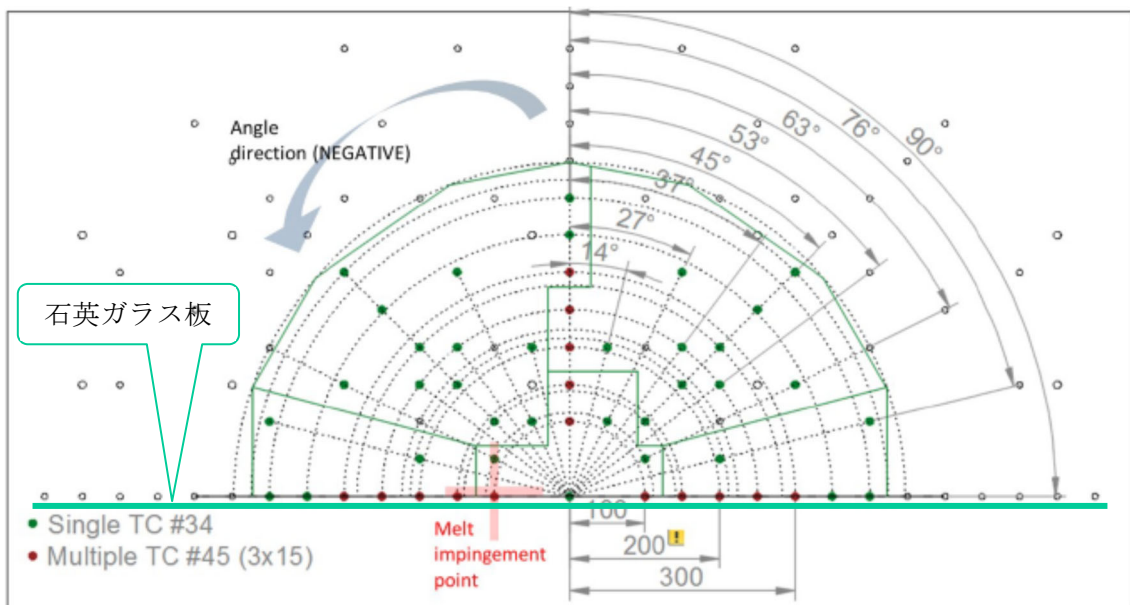


図 3.17 PULiMS 半円状拡がり実験のテストセクション平面図 (E11~E15 実験)

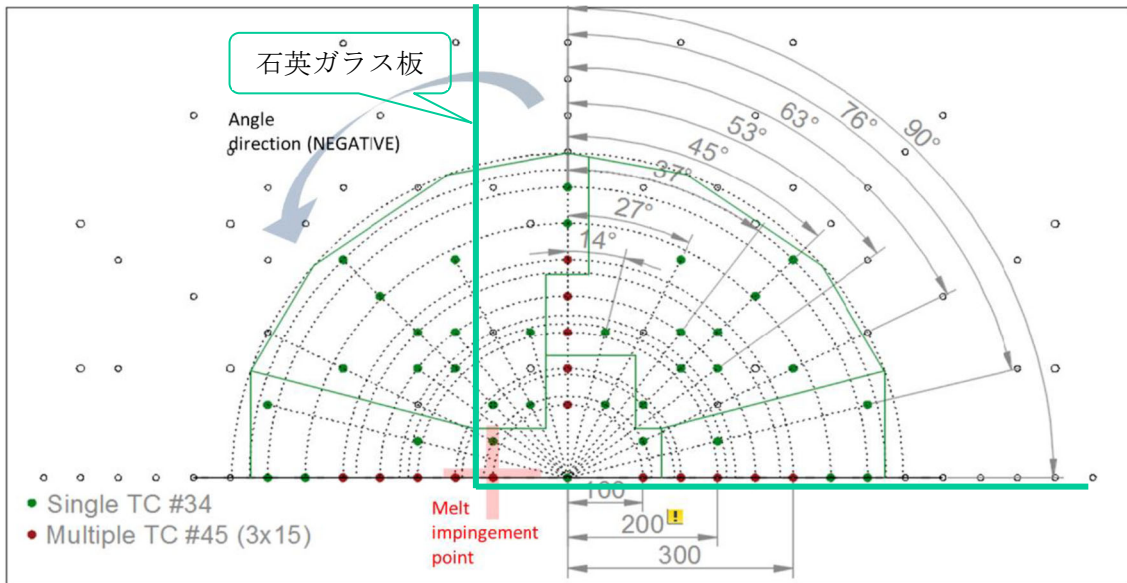


図 3.18 PULiMS 半円状拡がり実験のテストセクション平面図 (E16～E18 実験)

熔融物の温度は、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、熔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。

落下熔融物量は、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。

PULiMS の実験では水プールの形状が長方形であり、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、E16～E18 実験に対しては 4 倍とする。これにより初期水位を実験と同一とさせることにより、水の全量と熔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。

$$\text{E10～E15 実験} : R = \sqrt{2 \times 0.9 \times 1.6 / \pi} \doteq 0.958 \text{ m}$$

$$\text{E16～E18 実験} : R = \sqrt{4 \times 0.9 \times 1.6 / \pi} \doteq 1.354 \text{ m}$$

解析には、Jasmine 開発のスケジュールとの兼ね合いから、E10～E15 実験、E17～E18 実験に対しては、従来の平成 30 年度の解析に使用したバージョンに射流モデルを組み込んだ Jasmine ver. 4.3d を使用し、E16 の解析にはこれに前記の非軸対称体系への拡張を行った Jasmine ver. 4.4 を使用したが、軸対称体系の計算に対しては実質的に同じ解析モデルである。

表 3.3 PULiMS 実験の解析における入力値

実験番号	E10	E11	E12	E13	E14	E15	E16	E17	E18
試験部形状	1/2 対称 (半円状の拡がり)						1/4 対称 (90° セクター)		
熔融物組成	Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -WO <sub>3</sub> 共晶組成								
熔融物温度 (K)	1178.65	1189	1148.55	1218.55	1181.65	1293.15	1244	1303.15	1164.15
落下熔融物量 (kg)	30.761	39.25	32.60	23.79	27.176	44.22	17.7	2.33	15.1
落下継続時間 (s)	17	10.63	55	21.9	22.4	16.3	11.1	11.8	20.7
ノズル位置(床からの高さ mm)	290	255	272	272	272	272	266	266	266
ノズル径 (mm)	20	30	15	15	15	17	17	17	17
水プール寸法	0.9 m × 1.6 m								
水プール半径の入力値	0.958 m						1.354		
床板厚さ	10 mm								
水プール初期深さ(mm)	200	190	150	200	200	168	200	210	210
初期水温 (K)	363.15	364.15	367.75	369.15	368.65	364.95	363	357.15	364.15
熔融物中ボイド率	0.259	0.348	0.249	0.234	0.281	0.293	0.381	0.238	0.186

表 3.4 PULiMS 実験の解析で使した物性値

変数	タイプ	説明	Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -WO <sub>3</sub> 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
tliq	実数	溶融物液相線温度[K]	1144
rhosol	実数	固相密度[kg/m <sup>3</sup> ]	7811
rholiq	実数	液相密度[kg/m <sup>3</sup> ]	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 3.5 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 <sup>2</sup> /W)	0.02				
温度 (K)	300	400	600	800	1000
密度 (kg/m <sup>3</sup> )	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

床面と溶融物間の熱抵抗は平成 30 年度と同様に  $2 \times 10^{-2}$  Km<sup>2</sup>/W を使用した。これは、床面と溶融物間の伝熱が熱伝導だけと想定した場合、溶融物と床の間に約 0.5mm の蒸気膜がある場合に相当する。

溶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溶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溶融物拡がりには有意な影響を与えなかったことが分かっている。

水への伝熱に関する入力値は入力値を表 3.6 に示すように、平成 30 年度のものと同ーである。

表 3.6 PULiMS 解析の計算条件 (沸騰曲線に関連する入力)

項目	数値
限界熱流束	1.0E6 W/m <sup>2</sup>
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

JASMINE の主要なモデルパラメータのうち、PULiMS 実験と比較して決めたものを表 3.7 に示す。これらは次の手順で決定した。

- (i) 高速ビデオで観測された初期の拡がり速度と比較して  $F_{jet\_to\_pool}$  を決定。
- (ii) 最終的な拡がり面積が一致するようクラスト強度  $\tau_{sol}$  を決定。
- (iii) 熱電対で測定された水温と比較して伝熱表面積増加の係数  $multsurf$  を決定。これにより拡がり面積に影響が出た場合には(ii)に戻る。

このようにして決めた値を表 3.7 に示してある。E13、E18 の  $F_{jet\_to\_pool}$  の値が異なるのは次の理由による。



高速ビデオにより観測された溶融物の初期拡がりの状況を図 3.19 に、又このときの実験条件を表 3.8 に示す。E13 と E14 はプール水位、ノズル位置は同一で、流量も 10%程度しか異ならない。しかし、溶融物の拡がりは大きく異なる。この原因を探るためにジェット形状の映像を比較したものを図 3.20 に示す。E13 はジェットが分裂しており、中心部に円柱状の流れのある他の実験とは著しく異なる。ノズル部フローパターンに何らかの差異（空気巻き込み、部分凝固など）があり、E13 のジェットが **coherent** でなくなっているものと推察する。従って、ジェット流速と pool 境界流速の変換係数が小さくなる。E11 のジェット形状も他より太いがこれはノズル径が大きいことによるものである。

また、E18 実験においても図 3.20 右下に示すようにジェットは途中で途切れており、ジェットが滑らかにプールの水平流に移行するという射流モデルとは異なる。このため、この実験ケースに対しての  $F_{jet\_to\_pool}$  を初期の拡がり速度観測結果と比較して決定した。

表 3.7 クラスト拡がりに影響する主要な入力パラメータ

項目	数値
ジェット流速からプール初速への変換係数： $F_{jet\_to\_pool}$	E13 の解析 0.4
	E18 の解析 0.1
	上記以外 0.7
クラスト強度 $\tau_{sol}$	7500 N/m <sup>2</sup>
伝熱表面積増加の係数： $multsurf$	8.0

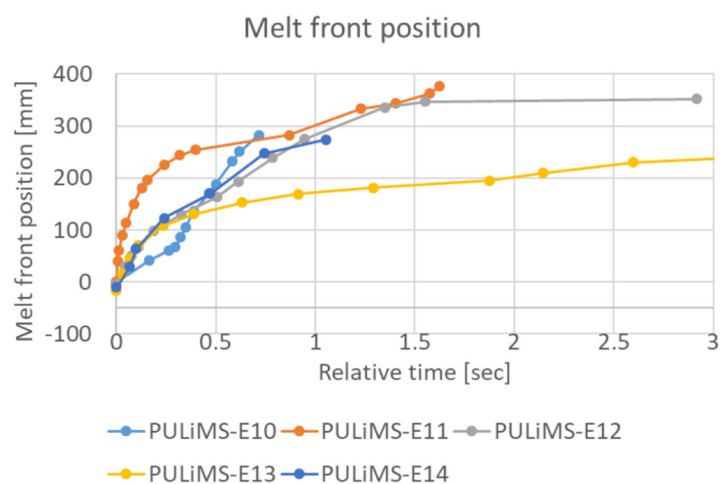


図 3.19 PULiMS 実験初期の溶融物の拡がりの観測結果 (E10~E14)

表 3.8 E10～E14 の溶融物供給条件

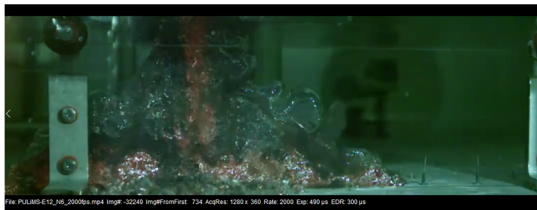
	E10	E11	E12	E13	E14
d : ノズル径 (mm)	20	30	15	15	15
h : 水深(mm)	200	190	150	200	200
H : ノズルの床面からの高さ(mm)	290	255	272	272	272
W : 平均流量(kg/s)	1.713	1.713	0.572	1.086	1.200



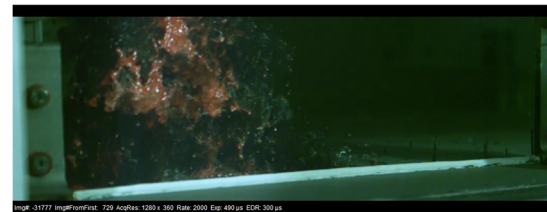
E10



E11



E12

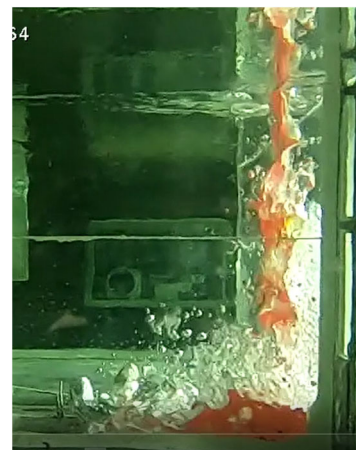


E13



E14

溶融物が最初に接地してから  
0.28 s 後の状況



E18

図 3.20 PULiMS 実験溶融物供給開始直後のジェットの状態の比較

### 3.2.2 解析結果

#### (a) 時間変化の例

E10 実験を例として、JASMINE による流動状況の解析の結果を図 3.21 に示す。これは、計算開始前、溶融物供給開始後 5、10、15、18.5、20、50、100 s における溶融物のジェツ

ト・液滴・プールの状態を表示したものであり、水プールについてはボイド率も示してある。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 90cm まで表示しているのに対して、高さ方向は 30 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。5 s では、溶融物ジェットが床まで達し溶融物が 0.35 m まで広がる。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。

10 s の図に記したように中心部では射流が生じて溶融物液位が低くなり、その外側で上流域となって液位は高くなっていて、その境界に跳水があるが、この跳水の発生位置は計算条件に極めて敏感で、計算セルの大きさや人工粘性の大きさを与える係数にも依存する。溶融物の供給は 17 s で終わるので 20 s の図にはジェットが表示されていない。溶融物の供給がなくなると跳水の位置にあった水位の急変部が中心方向（図の左方向）へ向かって進みだす（18.5 s）。20 s ではこの水位の急増する波がすでに中心にまで達している。50 s では溶融物プールの表面高さもほぼ均一となり、表面クラストと床クラストが成長し厚くなる。100 s では、溶融物がほとんど残っていない。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。

#### (b) 1/2 対称実験 (E10~E15) の実測値との比較 (新モデルによる再計算)

今年度改良モデルを組み込んだ JASMINE による E10~E15 試験に対する解析結果の内、溶融物の拡がり先端の位置の変化と実験における観測値との比較を図 3.22~3.27 示した。

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。そこで平成 30 年度と同様に、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。

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▲印でプロットしてある。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、右端にその熱電対の位置をオレンジ色の横線 (—印) 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) をそれぞれ右端に赤黒の横線 (—、—印) で示した (赤:短辺、黒:長辺の 1/2)。

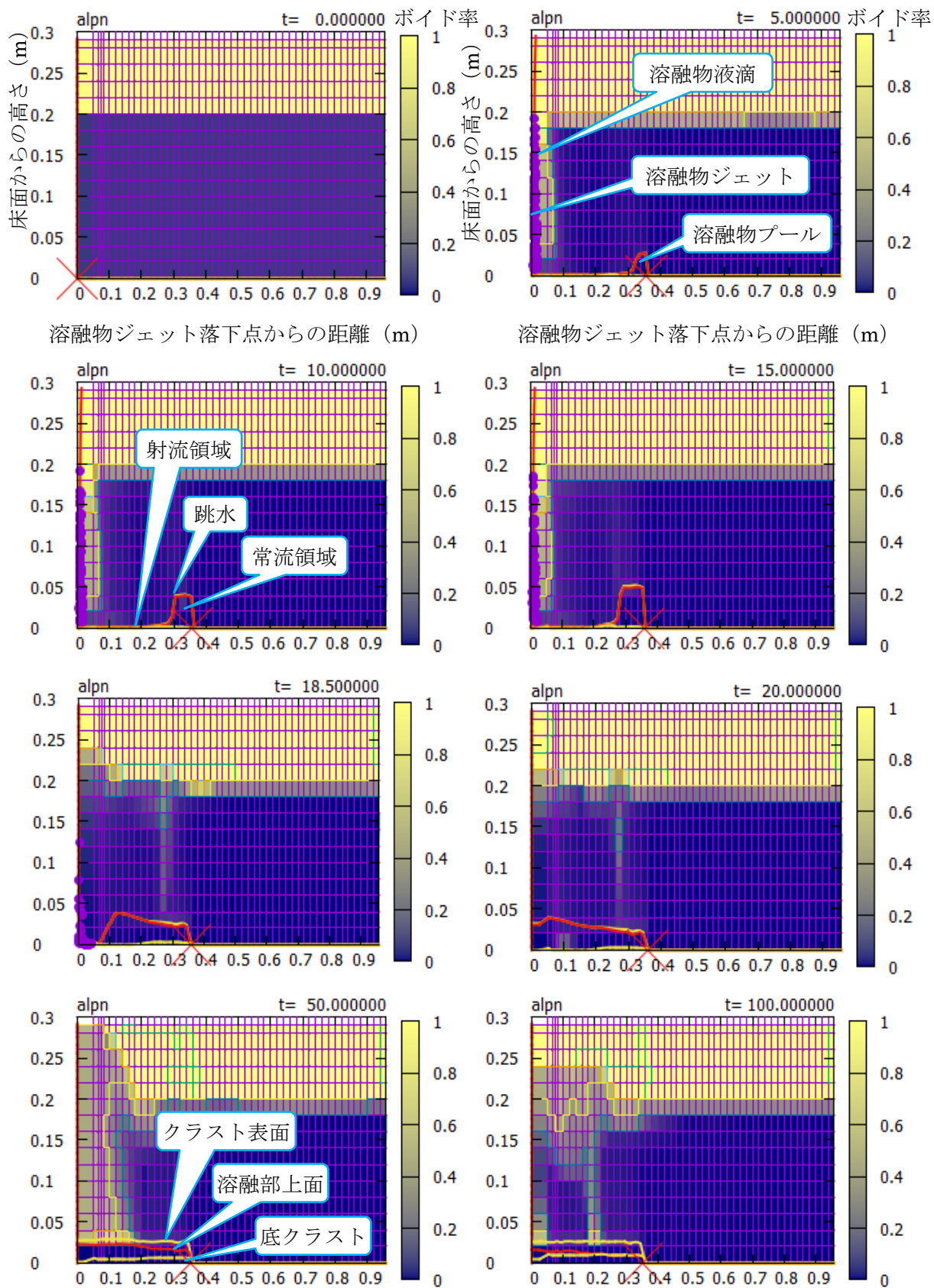


図 3.21 E10 実験の熔融物と水プールの時間変化の解析結果

図 3.22～3.27 から分かるように、JASMINE による溶融物先端位置の計算結果は、測定結果のバラつきを考慮すると良好に一致していると言える。図 3.22 には平成 30 年度の解析結果も併せて示してあるが、射流モデルの組み込みによりビデオ撮影に観察された初期の拡がり挙動が正しく計算されるようになったことが分かる。なお、図 3.27 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温度から得たプロット点が 5 s 程ずれている。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熱電対温度履歴の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。

次に水温について検討する。図 3.28 に E10 実験の、図 3.29 に E13 実験の溶融物が拡がる範囲内の高い位置(25～30mm)における水温の測定値と計算値を示す。黒い実線が射流モデルを組み込んだ今年度の JASMINE による結果であり、薄いオレンジ色の細線が同じ位置の従来解析の結果である。従来解析では 0～10 s の間全く水温が上昇しなかったが、今年度の解析では、初期の溶融物拡がり計算されているために実測された温度に近い値を示している。100 s 以降の緩やかな温度低下は生じておらず、従来と同様の結果を示している。

図 3.30 に E11 実験の、図 3.31 に E14 実験の溶融物到達範囲外の位置での水温を示す。こちらは、今年度の計算結果は平成 30 年度のものと同様の差はなく実験値との差は解消されていない。すなわち、

- (i) 実験開始初期の温度上昇がみられない。
- (ii) 実験では 100 s 以降緩やかな温度低下があるが JASMINE では再現されない。

これらの原因として平成 30 年度はノズル直下での溶融物液滴の発生と実験開始前から存在した低温の水の流入を挙げたが、これらの現象は PULiMS 実験固有のものとして JASMINE でのモデル化を見送ったためである。

そのほかの点の水温の実験 - 解析の比較の図は付録に記載する。

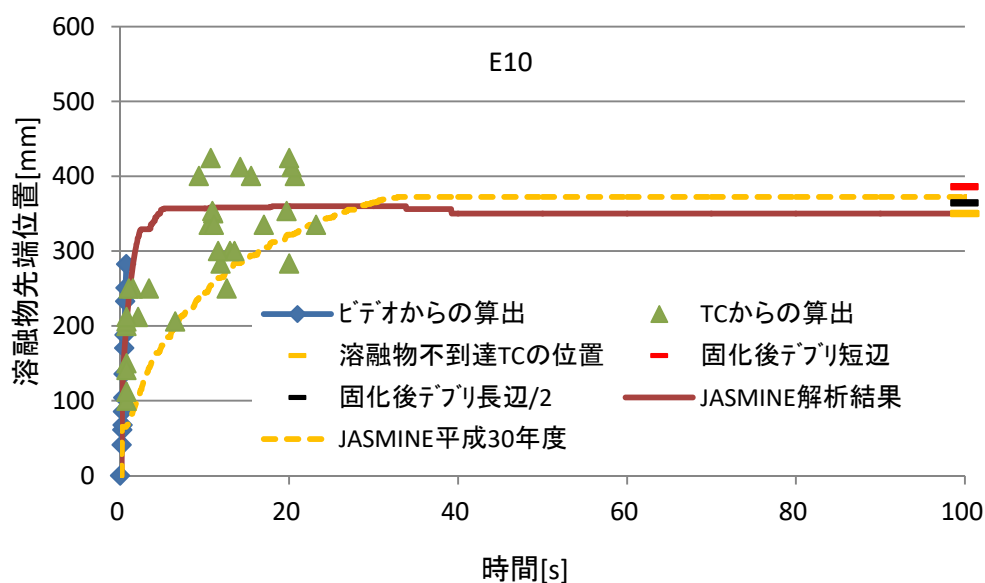


図 3.22 溶融物の先端部の拡がり 実験値と解析値の比較 (E10)



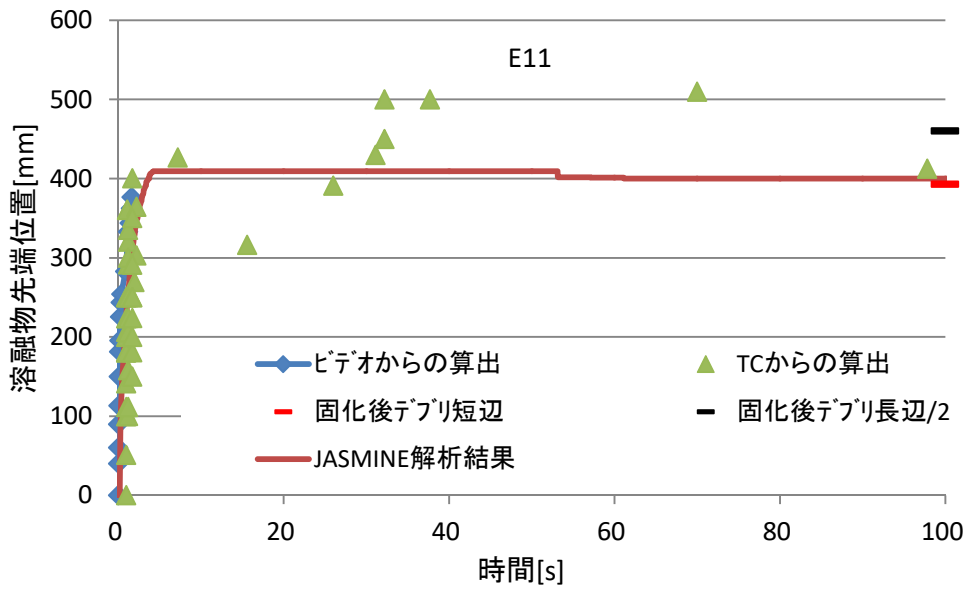


図 3.23 溶融物の先端部の拡がり 実験値と解析値の比較 (E11)

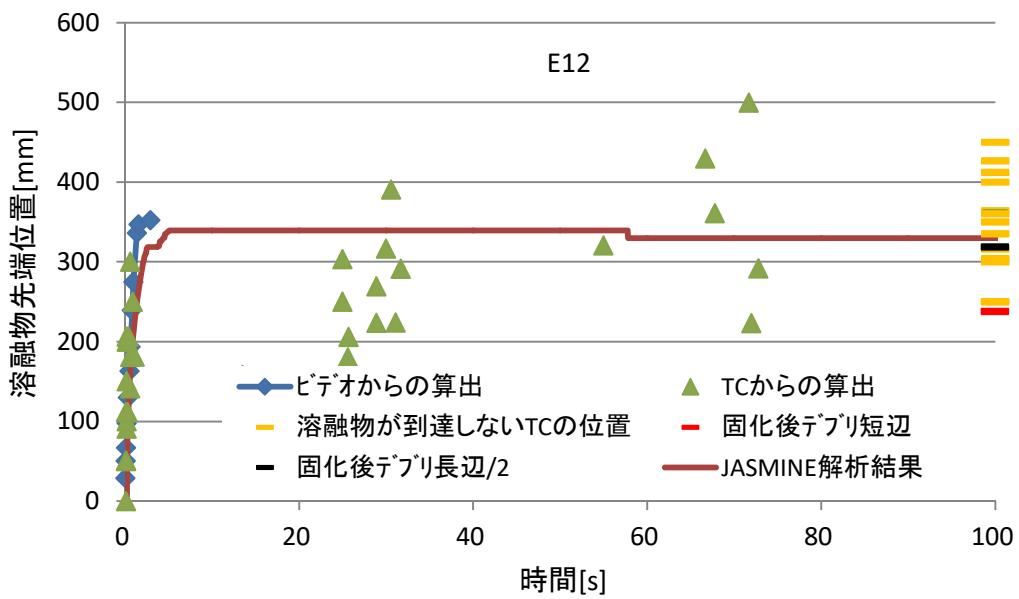


図 3.24 溶融物の先端部の拡がり 実験値と解析値の比較 (E12)

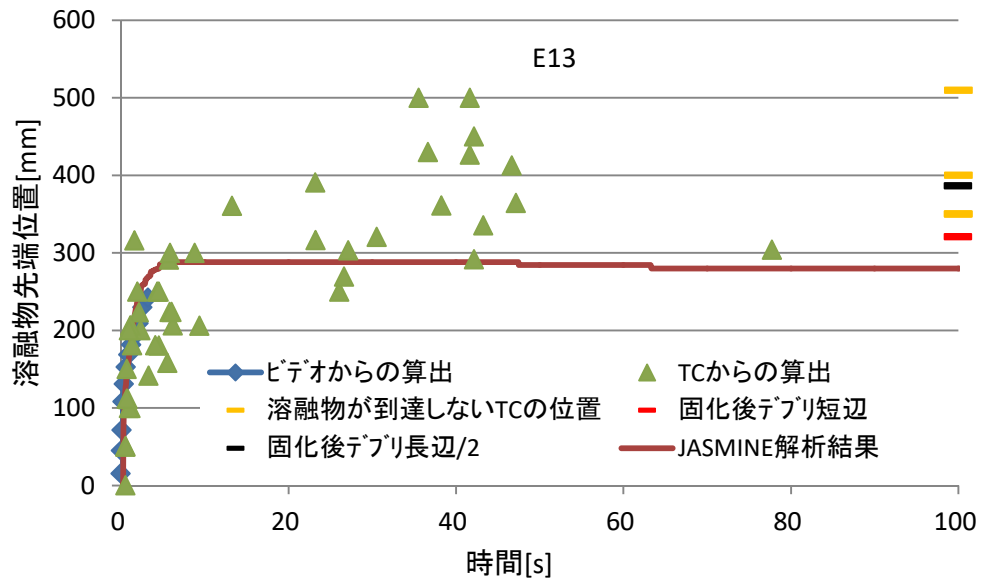


図 3.25 溶融物の先端部の拡がり 実験値と解析値の比較 (E13)

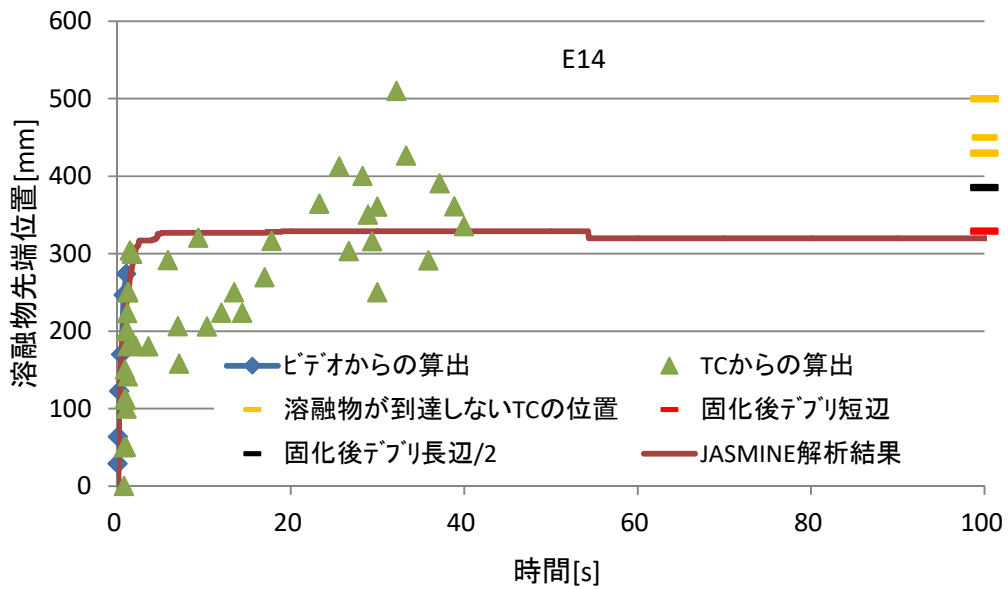


図 3.26 溶融物の先端部の拡がり 実験値と解析値の比較 (E14)

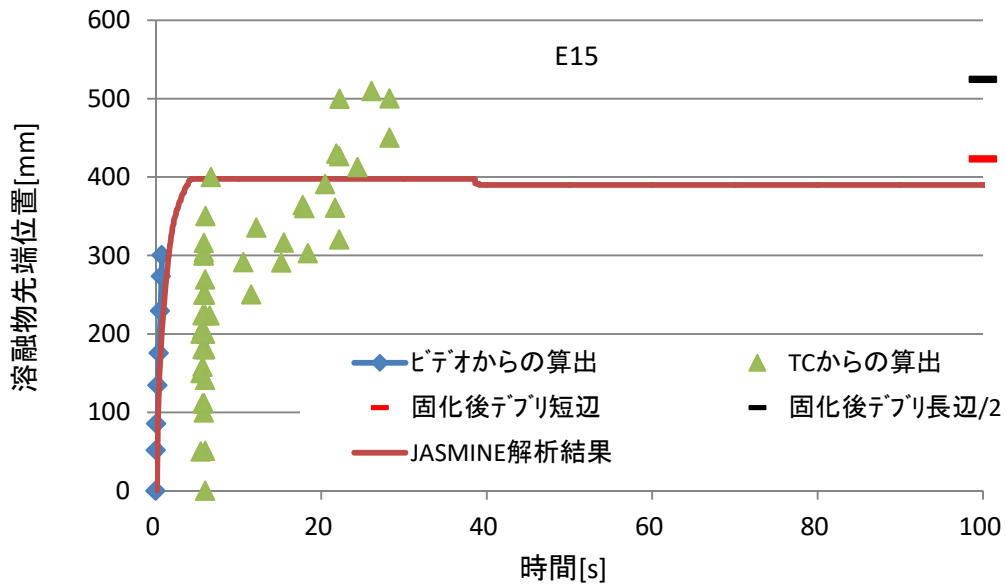


図 3.27 溶融物の先端部の拡がり 実験値と解析値の比較 (E15)

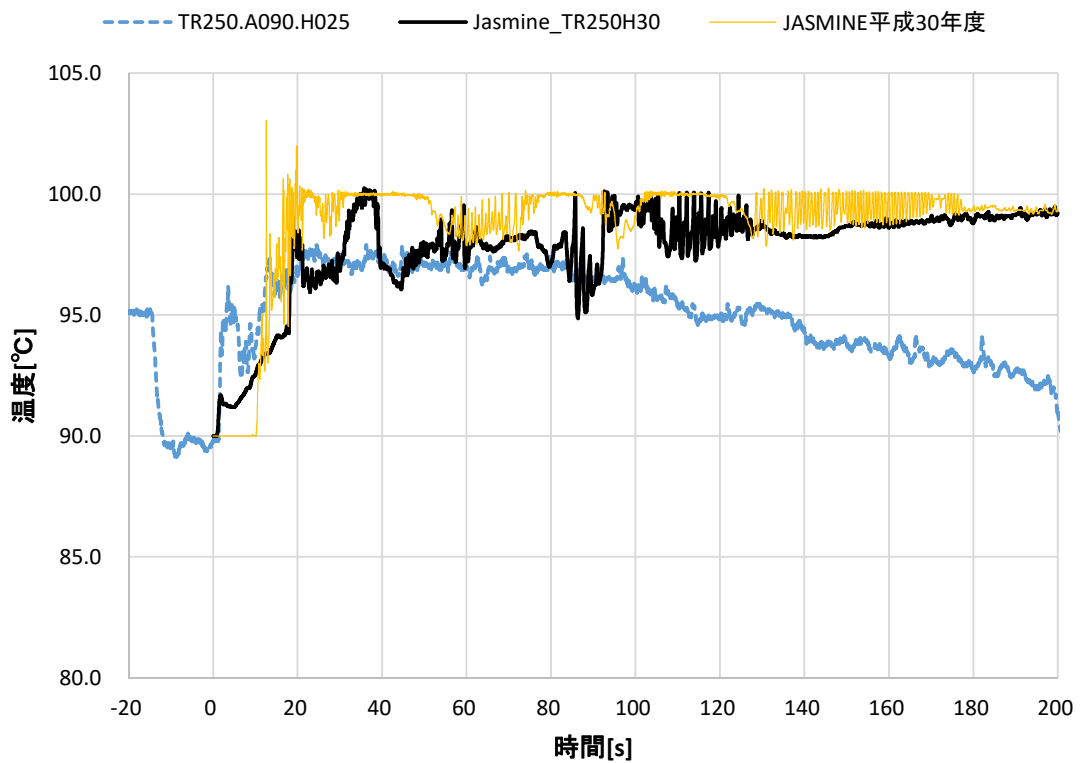


図 3.28 水中温度の実験値と解析値の比較 (E10、R=250 mm H=25~30 mm)



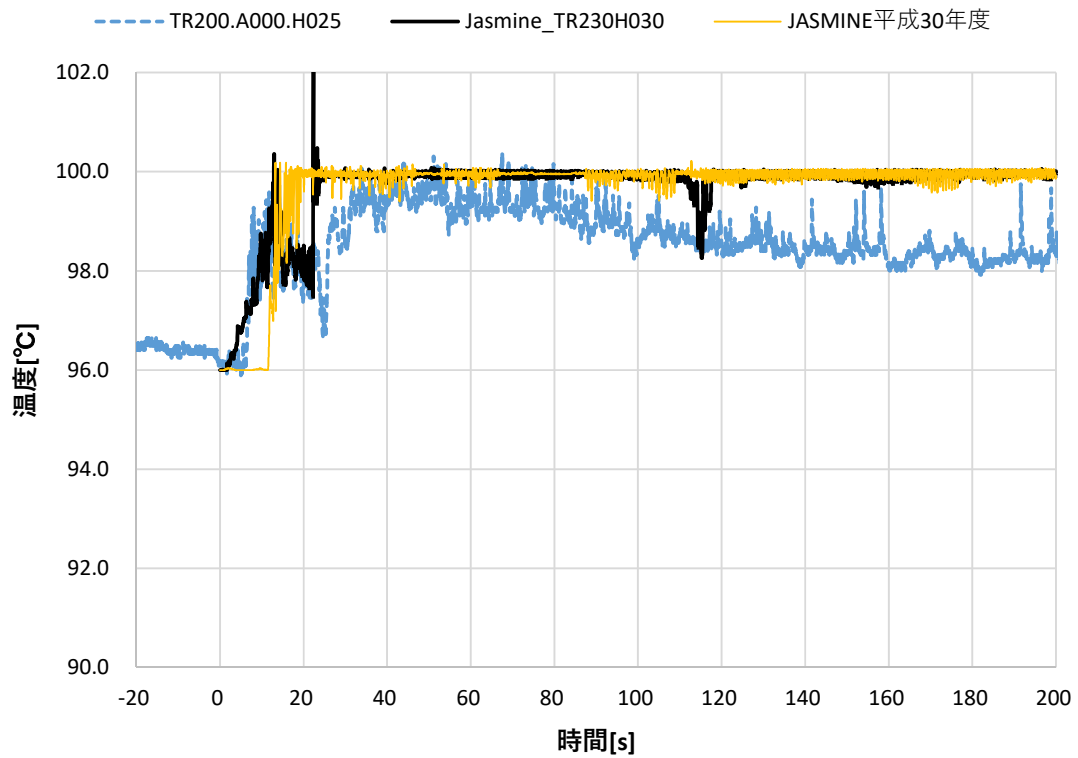


図 3.29 水中温度の実験値と解析値の比較 (E13、R=220~240 mm H=25~30 mm)

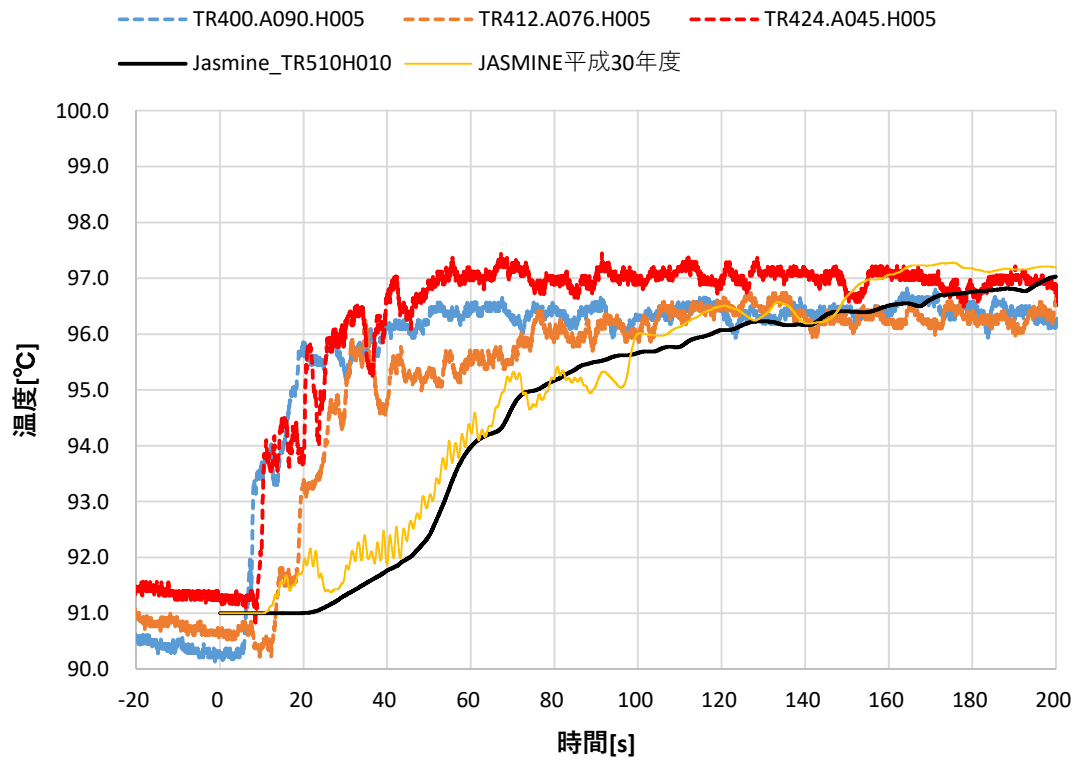


図 3.30 水中温度の実験値と解析値の比較 (E11、R=500~520 mm H=5~10 mm)

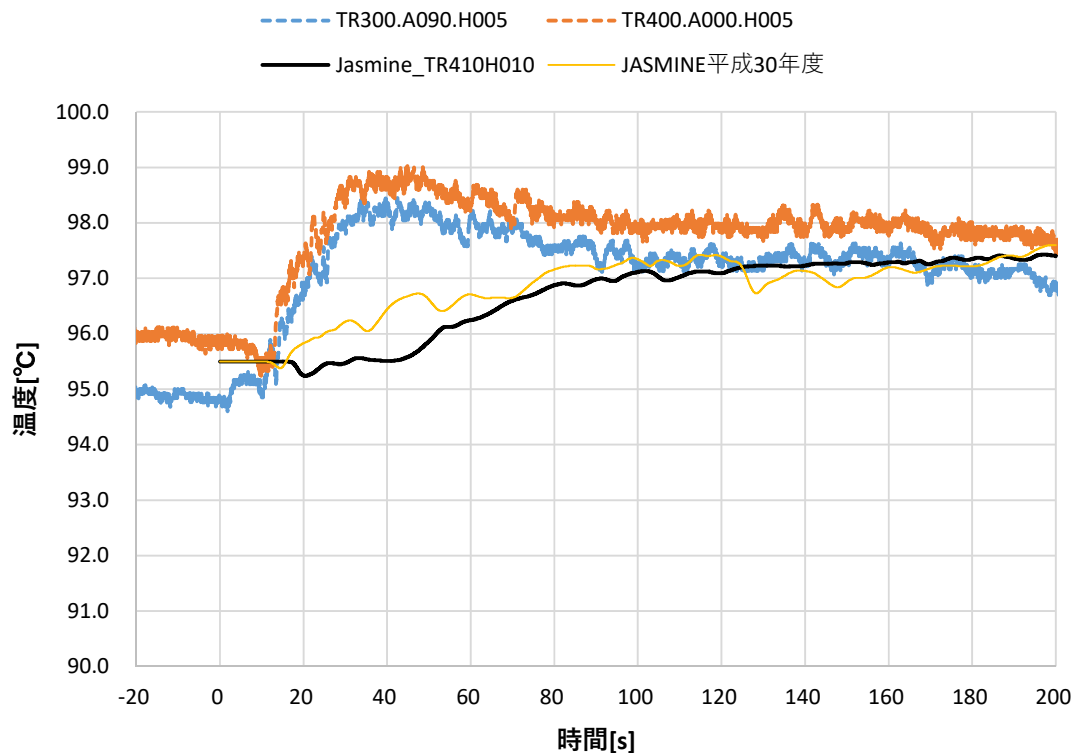


図 3.31 水中温度の実験値と解析値の比較 (E14、R=400~420 mm H=5~10 mm)

(c) 1/4 対称実験 (E16~E18) との比較 (今年度新たに行った解析)

E16 以降の実験は石英ガラス製の堰を一つ増やし 90° の範囲内に溶融物が流れるようにして実験を行った。図 3.32 に E16 実験の溶融物先端の拡がり状況を測定結果と併せて示す。この図の左端に赤い線 (—印) が 2 つあるが、1/4 対称実験では固化後のデブリ寸法を 2 枚の石英ガラス板にそれぞれ平行に測定しており、これらの赤線はその値を示したものである。これまでの解析と同様に、初期の溶融物拡がりや最終的な拡がりは実測値よりやや小さいが、実験値のバラつきを考慮すると近い値を与えている。

図 3.33~3.35 に水温の比較を示す。溶融物落下点近傍の温度上昇のタイミング (図 3.33 の 5 s) は正しく計算されていること、遠方のマクロな温度上昇は良く再現されているが、初期 (0~20 s) の温度上昇がないこと、160 s 以降の長期的な緩やかな温度低下がないことはこれまでと同様である。

E17 実験で観察されたジェットの様子を図 3.36 に示す。これは、図 3.20 と同様、溶融物が最初に接地してから 0.28 s 後の状態である。ここにあるようにこの実験では流量が小さく床に届くようなジェットが形成されなかった。一方 JASMINE による解析では、面積を一致させるために溶融物ノズルの径を実際の 2 倍としており、ジェットの到達距離が実験よりも長くなる。そこでこの解析では、ジェットから液滴の発生量を与える係数 Cent を default 値より 4 倍に大きくしてジェットが水プール途中で消滅するという計算を行った。

E17 実験の溶融物先端の拡がり状況の比較を図 3.37 に示す。この実験ケース及び次の

E18 については温度データが入手できていないので TC からの先端位置推定に関するプロットはない。E17 については、高速ビデオの観察結果よりも立ち上がりが早い但最终的な拡がり距離は固化後の測定値よりもかなり小さい。この実験では、形成された cake は溶融プールが固化したものではなく agglomeration した粒子群を測定している可能性があること、また溶融物供給の途中で小規模な水蒸気爆発が何度も生じており、それが溶融物の拡がりに影響した可能性が考えられる。

E18 については、前述のように実験値と整合するように  $F_{jet\_to\_pool}$  を調節しているので、初期の拡がりには図 3.38 に示すように極めて良好に一致している。

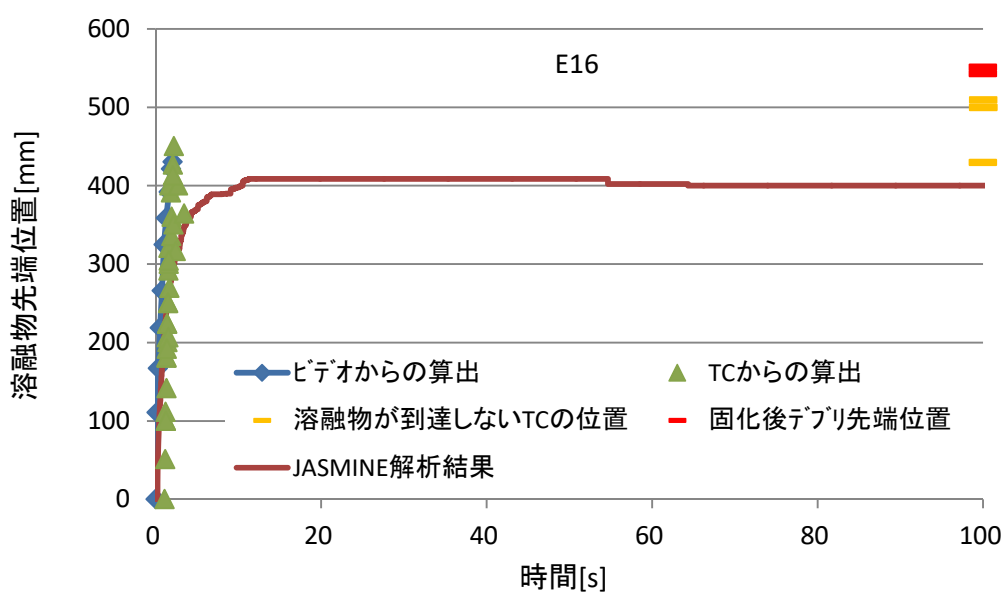


図 3.32 溶融物の先端部の拡がり 実験値と解析値の比較 (E16)

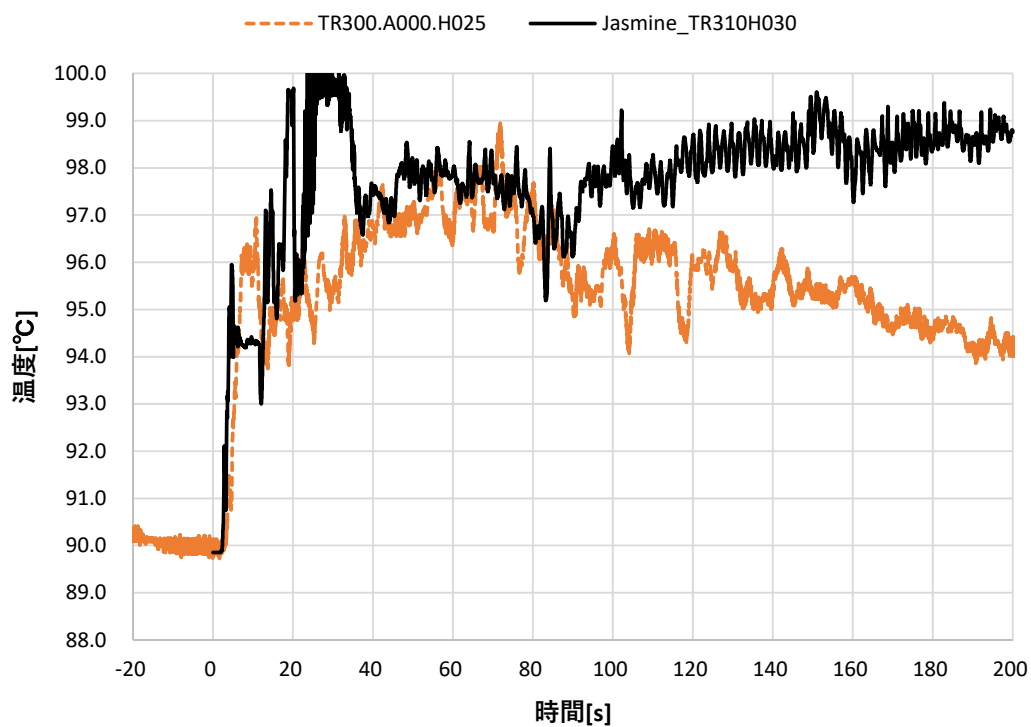


図 3.33 水中温度の実験値と解析値の比較 (E16、R=300~320 mm H=25~30 mm)

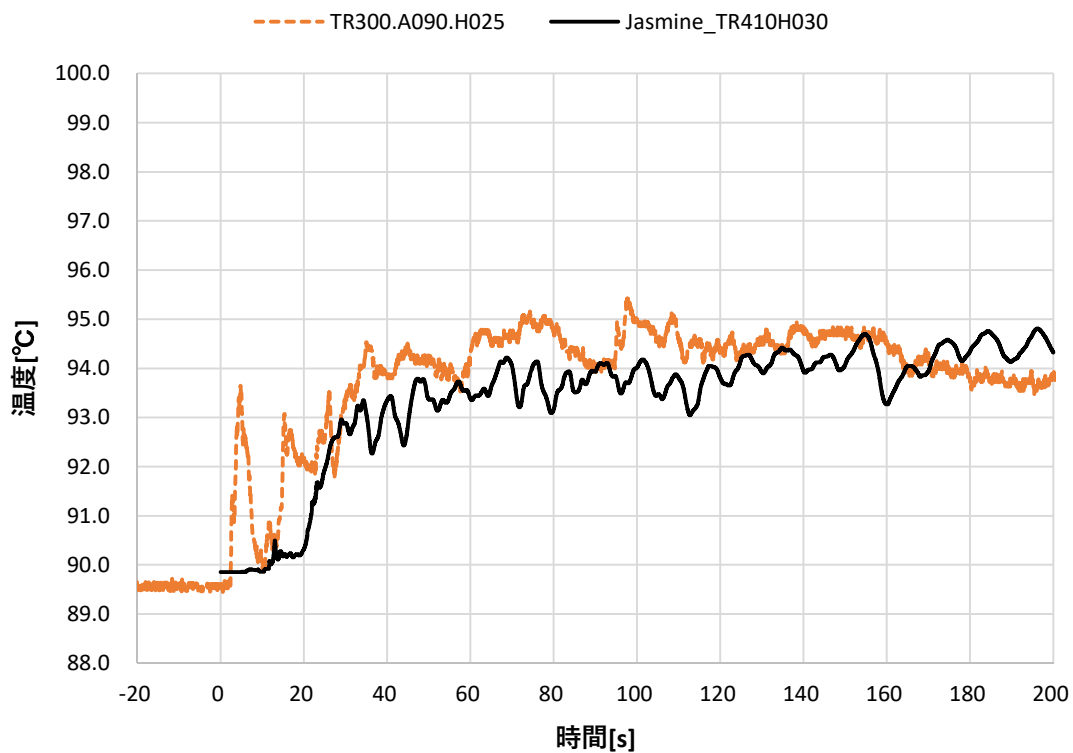


図 3.34 水中温度の実験値と解析値の比較 (E16、R=400~420 mm H=25~30 mm)

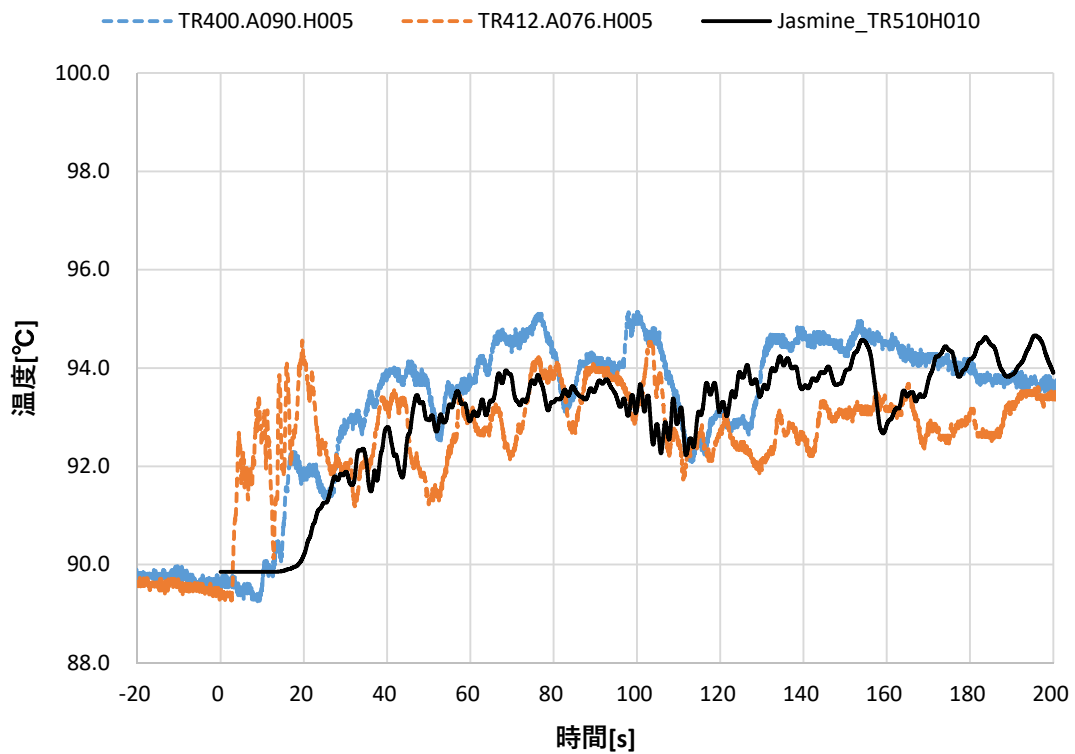


図 3.35 水中温度の実験値と解析値の比較 (E16、R=500~520 mm H=5~10 mm)



図 3.36 E17 実験の溶融物ジェットの撮影結果 (最初の接地後 0.28 s)

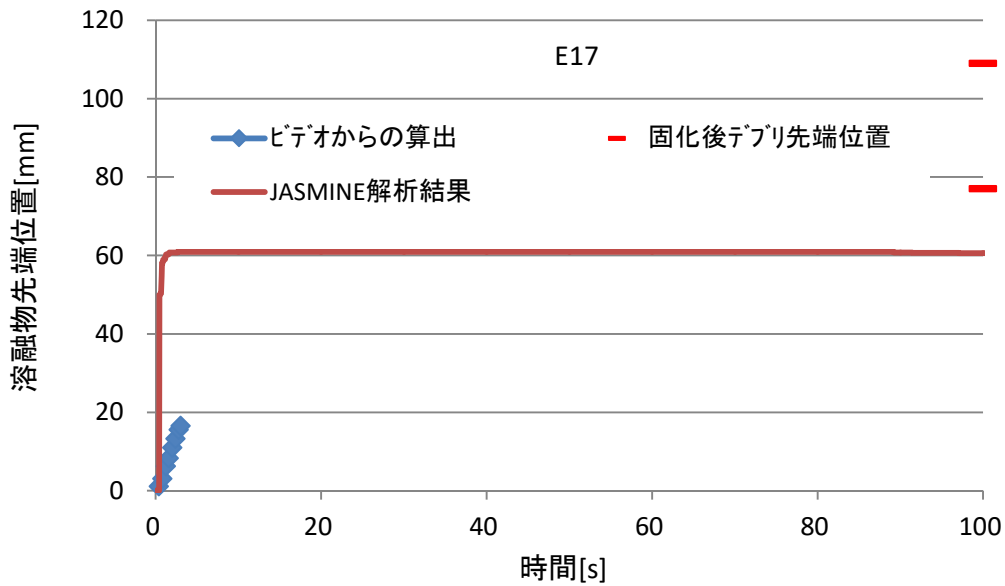


図 3.37 溶融物の先端部の拡がり 実験値と解析値の比較 (E17)

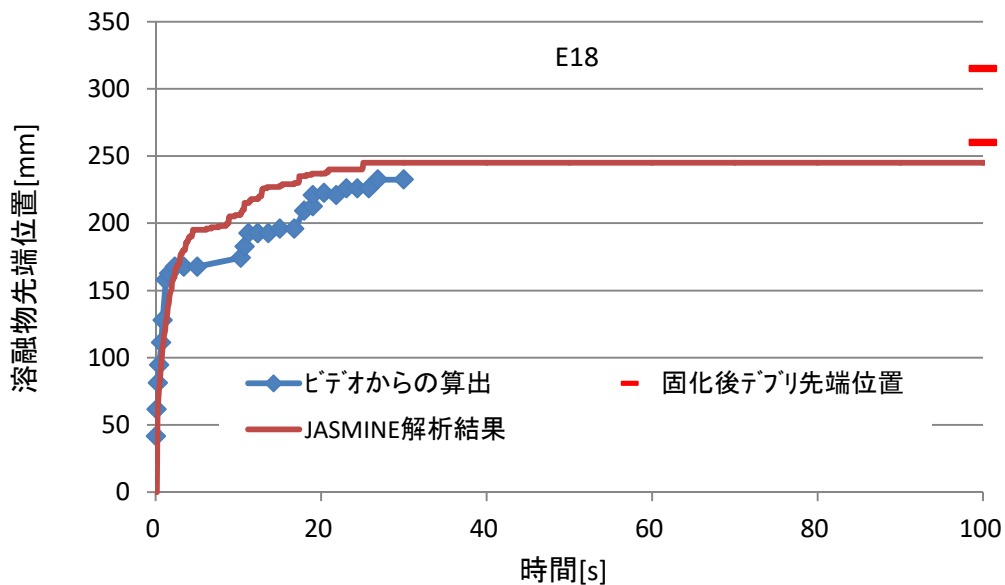


図 3.38 溶融物の先端部の拡がり 実験値と解析値の比較 (E18)

### 3.2.3 最終的な拡がり面積の評価

JASMINE による計算で得られた溶融物の拡がり面積を、実験で求められた固化物(cake)の面積に対してプロットしたものを図 3.39 に示す。ここで、JASMINE 計算値は実験体系に応じて、拡がり半径から算出される円の面積を 1/2 又は 1/4 にしている。

拡がり範囲が 180° の場合や 90° の場合、また落下量の大小にかかわらず良好に一致している。また、1/4 と 1/2 対称性の差も特に見られない。

この計算では、E13とE18実験に対して異なった $F_{jet\_to\_pool}$ の値を用いている。 $F_{jet\_to\_pool}$ は溶融物ジェットの落下流からプール水平流に移行するときの速度変換係数であり、ジェットが理想的な円柱状の流れ (coherent) の時には1となり、ジェットに乱れがあればこの値は小さくなる。coherentなジェットが形成されるには、流路形状が完全に軸対称である、上流側の流れに旋回流成分を持たない、ノズル入り口部をベルマウスとする、気相を巻き込まない等の条件が必要で、途中で凝固が生じる可能性がある溶融物流れでは特に困難である。実機においても、シビアアクシデント条件下で $F_{jet\_to\_pool}$ が1に近い値を採ることは考え難く又安全側の仮定(溶融物拡がり小さいとデブリ冷却を達成し難い)の点からも、実機等の解析においては $F_{jet\_to\_pool}$ は小さい値を採用すべきである。

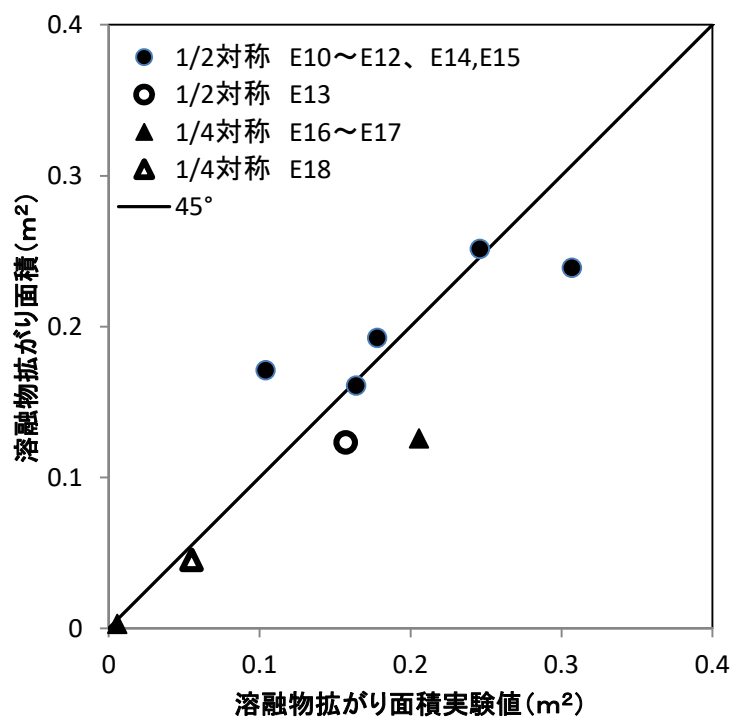


図 3.39 溶融物拡がり面積の実験値・解析値の比較

### 3.3 気相中実験の解析

気相中実験の解析の目的である、(1) なるべく大規模な実験との比較、(2) PULiMSとは異なる溶融物を用いた実験との比較（できればコリウムとする）、との観点から表 3.9 に示す 6 実験の解析を行うこととした。

各実験に対する JASMINE による解析の入力値のうち、次の項目は共通の値とした。

#### (1) 上部熱伝達条件

溶融物表面の対流熱伝達率：10 W/m<sup>2</sup>K

環境温度：300 K

環境の壁の放射率：0.9

空気の自然対流による溶融物表面の熱伝達率の値は、上向き平板加熱面の乱流自然対流熱伝達の相関式[3.5]を用いて定めた。すなわち、下記の式

$$Nu_l = C Ra_l^{\frac{1}{3}} \quad Nu_l = hl/k$$

に、1000K 程度の伝熱面に接する空気の条件、特性長さ 1 m 程度として得られる値を参考としたものである。ここで  $C = 0.13 \sim 0.16$ 、 $Ra_l = 2 \times 10^7 \sim 10^4$  (空気) ( $Nu_l$ : Nusselt 数,  $Ra_l$ : Rayleigh 数,  $h$ : 熱伝達率,  $l$ : 伝熱面特性長さ,  $k$ : 熱伝導率)なお、この式では  $Ra_l$  に含まれる  $l^3$  と  $Nu_l$  に含まれる  $l$  が相殺されるため広い寸法範囲の体系で熱伝達率は大きく変化せず概ね 5~10 となる。

環境温度としては室温を想定し、特に記載がない場合を除いて簡単のため 300 K を使用した。また床材の初期温度も環境温度と同一としてある。

周囲の壁までの距離は実験体系寸法に比べて極めて大きいと考え、実効的な放射率は 1 に近い値とした。

#### (2) クラストの強度 $\tau_{sol}$ : 7500 N/m<sup>2</sup>

PULiMS 実験解析で調整したクラスト強度の値 7500 N/m<sup>2</sup> を適用した。同実験とは溶融物の組成が異なるため強度も異なると予想されるが、現時点では妥当な値を定める根拠がないため暫定的にこの値を使うこととした。

#### (3) 伝熱表面積増加の係数 $multsurf$ : 1

この入力値はクラスト表面の凹凸により伝熱に寄与する表面積が増大する影響を考慮するためのものであるが、気相中実験では水中実験と異なり環境への放射伝熱が支配的となる。表面に凹凸があると、凹部から放射されたエネルギーは凸部に遮られ吸収されてしまう割合が増加するので、局所的な凹凸による表面積の増加は実効的な放射伝熱面積の増加に寄与しない。例えば、10 cm 四方の凹凸のある 800 °C の面からの放射は、少し離れた位置から見れば、10 cm 四方・800 °C の平面の放射エネルギーと同等である。そのため気相中の現象の解析には伝熱表面積増加係数は 1 とする。



このほか、軸対称以外の形状ではジェット計算の意味を持たないので、ジェット流速からプール初速への変換係数 ( $F_{jet\_to\_pool}$ ) は使用せず、プールの初速は入力で指定された値を使用する。

今回の解析に使用した形状・境界条件、熔融物物性値、床材伝熱関連物性値の入力データのうち、主要なものを表 3.10～3.12 に示す。形状もスケールも材料も異なる実験を横並びに比較するのは意味があまりないが、表示を簡潔にするため一覧表とした。

### 3.3.1 VULCANO 実験

#### (1) 実験の概要

VULCANO VE-U7 実験[3.6] [3.7]は模擬熔融物としてコリウムを使用し、図 3.40 に示すような扇形に広がった流路に流し込んでいる。この流路は中央に堰が設けてあり片側の床がコンクリート、他方がセラミック（ジルコニア）となっており、同じ組成・温度条件の熔融物を 2 つの流路に流して床材の影響を見ることができるようになっている。JASMINE による解析はそれぞれの床材に対する流動状況を別個に解析した。

#### (2) 入力値の設定

解析対象領域は、流路が分割されてからの部分である。実験装置の熔融物拡がり流れ部の全長は 1.086 m であるが、解析領域は実験結果を参考に 0.6 m までとした。流路形状に関する入力は図 3.41 に示すようになっており x 軸方向（図 3.40 の水平方向）に垂直な流路幅を指定する。x～0.03 m の流路幅が減少する部分は、堰の先端の尖っているところである。

文献に沿って境界条件（表 3.10）と熔融物の物性値（表 3.11）を決定した。このうち熔融物流入速度は、熔融物の先端位置の初期の変化の実測値に基づき 0.1 m/s とした。融点は熔融物が流動できなくなる温度との解釈から、温度—エンタルピの関係のデータにおいて固液割合が 50%となる温度として決定した。熔融物の空隙率（porosity）は実験結果に基づき決定した。

コンクリートの比熱は、相変化の吸熱分も含めて比熱で表すこととし、記載された温度エンタルピの関係のグラフから読み取りステップ状の値を使用した（細くなるのでここでは記載せず）。

#### (3) 解析結果

コンクリート床に関する熔融物の先端位置の進行過程の実測値と JASMINE 計算結果の比較を図 3.42 に示す。約 10 秒で広がりが停止し、300 秒程度で固化するが、拡がり距離は実験とほぼ一致する。また、固化後の熔融物の厚さ（高さ）の測定結果と JASMINE の結果の比較を図 3.43 に示す。厚みの分布は一樣であり、拡がり距離が一致しているので高さも一致する。

セラミック床に関する同様な比較を図 3.44 及び 3.45 に示す。約 10 秒で広がりが停止、300 秒程度でほぼ固化する。拡がり距離は実験結果に対し過小評価となった。したがって固化後のデブリ 厚さは実験値よりも厚くなっている。

表 3.9 解析の対象として選定したドライ実験

名称	Run No.	流路形状／流路材料	熔融物種類 / 組成	熔融物量
VULCANO	VE-U7	9.5°セクター 珪酸質コンクリート／ セラミック (ZrO <sub>2</sub> )	コリウム 56% UO <sub>2</sub> , 32% ZrO <sub>2</sub> , 5% FeO, 2% CaSiO <sub>3</sub> , 2% SiO <sub>2</sub> , 1% Fe, 1% CaO, 1% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (wt%)	12.6 / 14 kg
KATS	-13	樋 珪酸質コンクリート	酸化物 83% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 8.5% SiO <sub>2</sub> , 6% FeO, 1.5% MgO, 1% MnO (wt%)	185 kg
	-14	樋 セラミック(cordierite)		176 kg
ECOKATS	V1	樋 セラミック(cordierite)	酸化物 41% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 24% FeO, 19% CaO, 16% SiO <sub>2</sub> (wt%)	193 kg
FARO	L-26S	17°セクター ステンレス	コリウム 80wt% UO <sub>2</sub> , 20wt% ZrO <sub>2</sub>	130.2 kg
COMAS	EU-4	樋＋扇形 鋳鉄	コリウム 29% UO <sub>2</sub> , 12% ZrO <sub>2</sub> , 18% FeO, 2% Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 39% Fe (wt%)	1920 kg

表 3.10 解析の体系・境界条件の入力値

解析ケース		VULCANO VE-U7		KATS-13	KATS-14	ECOKATS V1	FARO L-26S	COMAS EU-4
		コンクリート床	セラミック床					
計算領域	形状	任意幅流路		ドライ条件 (非凝縮ガス：空気)		圧力一定 (=0.1 Mpa)		
	長さ	0.6 m		9 m		8 m	1.5 m	8.6 m
	流路幅	(9.5°セクター)		0.25 m		0.293 m	(17°セクター)	0.4~3.1 m
	計算セル数	40		90		80	60	88
	床板厚さ	30 mm		72 mm		20 mm	20 mm	90 mm
	床計算セル数	15		18		20	10	18
溶融物	初期温度	2448 K		2325 K	2240 K	1893 K	2950 K	2323 K
	空隙率	0.28	0.32	0.3	0.3	0.4	0.3	0.3
	流入継続時間	7.7 s		10	37	54.7	9.7	11.6
	平均流量	1.64 kg/s	1.82 kg/s	35.56 → 1.44	5.6 → 3.91	4.24 → 2.61	13.42	300 → 30
	流入速度	0.1 m/s		2.9	0.43	0.25	0.15	2.2 / 20

表 3.11 模擬溶融物の物性値に関する入力値

実験ケース	VULCANO VE-U7	KATS-13、-14	ECOKATS V1	FARO L-26S	COMAS EU-4
溶融物の種類	コリウム	酸化物	酸化物	コリウム	コリウム
液相線温度 (K)	2623	2198	1822	2910	2233
固相線温度 (K)	1273	1848	1373	2860	1598
融点 (K)	2500	2050	1643	2885	1700
液相密度 (kg/m <sup>3</sup> )	7140	2800	3263	8000	7140
熱伝導率(W/mK)	3.0	5.4	5.4	3.0	3.0
粘性係数 (Pa s)	35	0.05	0.2	0.005	35 / 1.5
表面張力 (N/m)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
放射率 (-)	0.8	0.8	0.95	0.8	0.8
固相比熱(J/kgK)	700	1280	1055	500	700
液相比熱(J/kgK)	700	1423	1220	500	700
凝固潜熱 (kJ/kg)	290	802	1162	362	290

表 3.12 床材の物性値

実験ケース及び 床材の種類	VULCANO VE-U7 / KATS-13	VULCANO VE-U7	KATS-14 / ECOKATS V1	FARO L-26S	COMAS EU-4
	珪酸質コンクリート	セラミック (ZrO <sub>2</sub> )	セラミック(cordierite)	ステンレス	鋳鉄
接触熱抵抗 (Km <sup>2</sup> /W)	1.2E-3 / 8.33E-5	5.4E-3	1.68E-4 / 5.4E-3	5.0E-3	5.0E-3
密度 (kg/m <sup>3</sup> )	2475	5300	2600	7920	7180
比熱 (J/kg.K)	554~2484	575	1460	499~644	695
熱伝導率 (W/m.K)	1.3	4.7	3.0	16~25.7	31.4

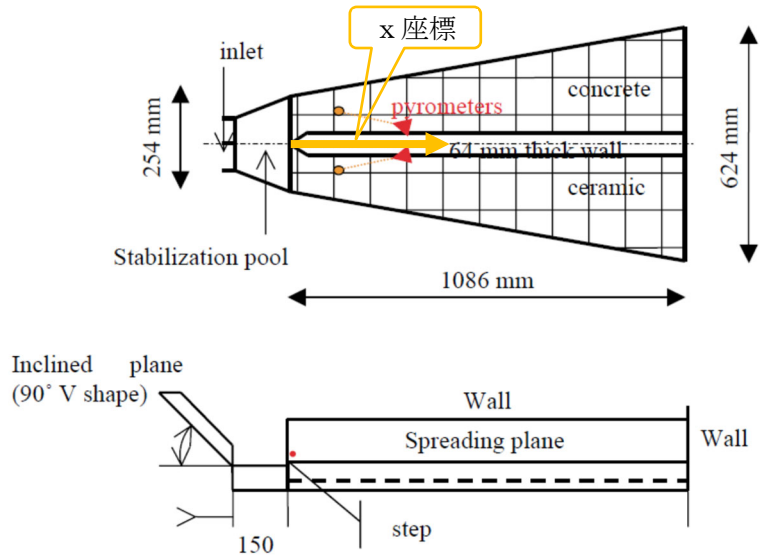


図 3.40 VULCANO VE-U7 実験体系

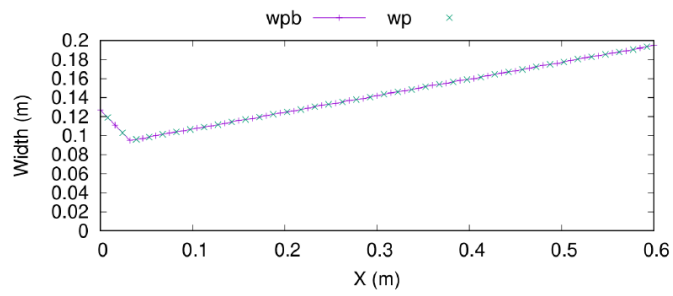


図 3.41 解析に使用した流路幅の関数 $w(x)$

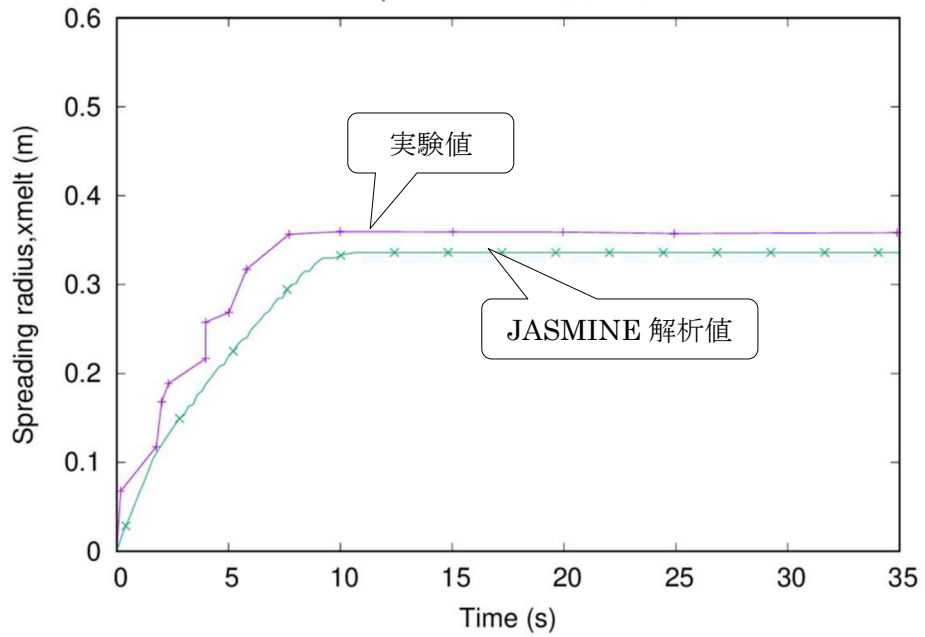


図 3.42 VULCANO VE-U7 コンクリート床実験の溶融物先端位置の比較

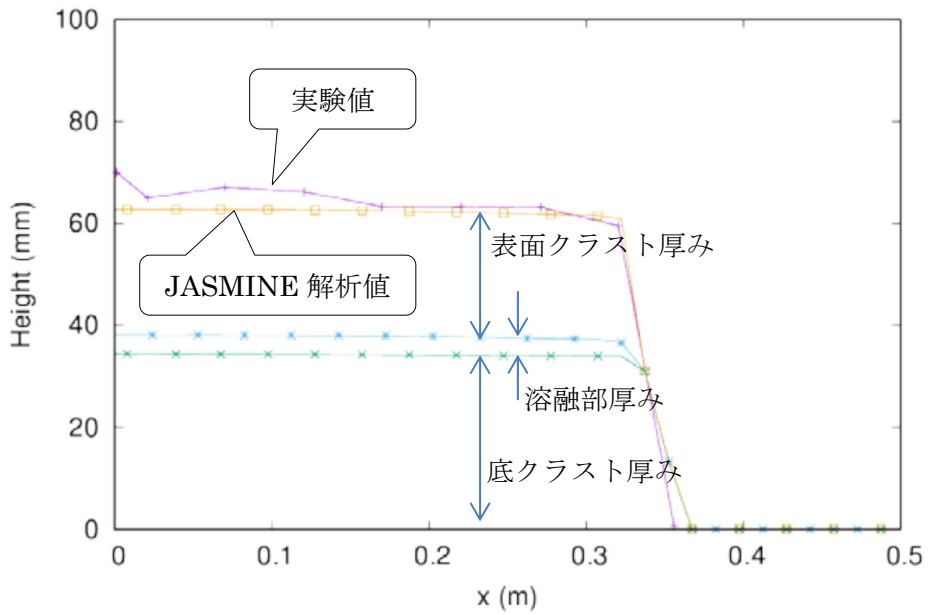


図 3.43 VULCANO VE-U7 コンクリート床実験の実験終了後の溶融物厚さの比較

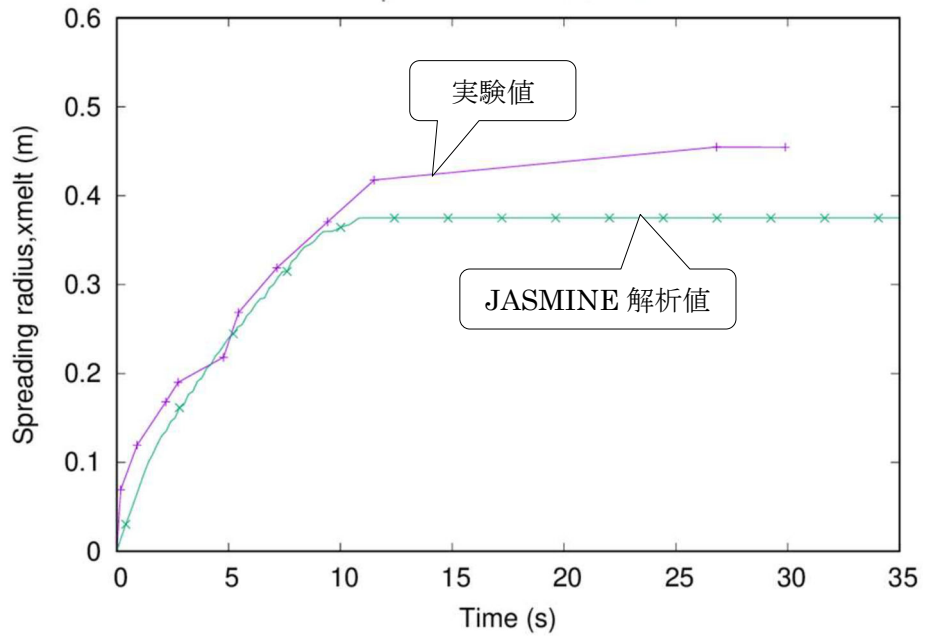


図 3.44 VULCANO VE-U7 セラミック床実験の溶融物先端位置の比較

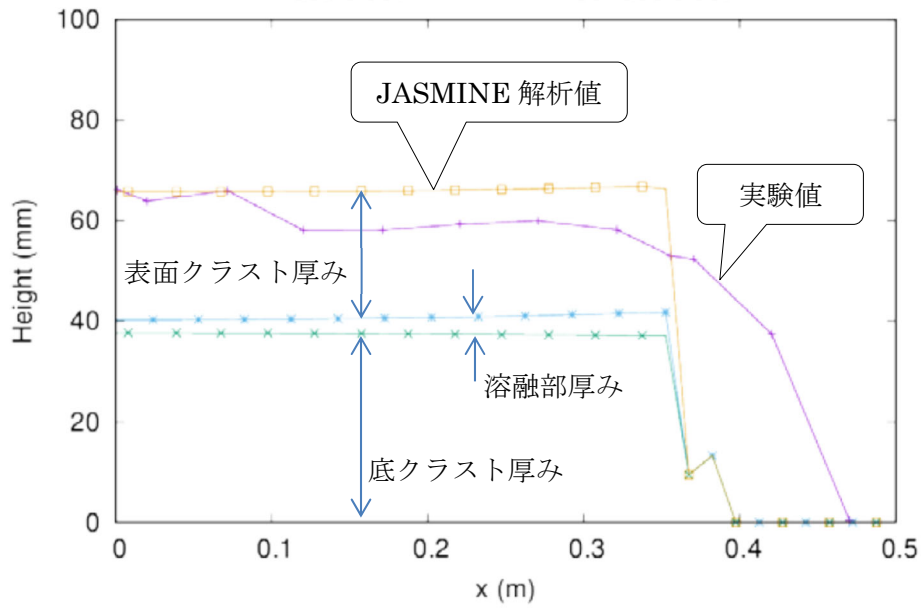


図 3.45 VULCANO VE-U7 セラミック床実験の実験終了後の溶融物厚さの比較

### 3.3.2 KATS 実験

#### (1) 実験の概要

この実験では、図 3.46 に示すように坩堝内でのテルミット反応により生成した熔融物を等幅流路に流す[3.8] [3.9]。生成熔融物は、金属層と酸化物層に分かれるので開口部を分けることにより別々の実験としてある。解析は酸化物層を流出させた場合を対象とした。床材はコンクリート (KATS-13) 又はセラミック (KATS-14) である。

#### (2) 入力値の設定

文献に沿って境界条件、熔融物物性値を決定した。空隙率については記載がないので VULCANO VE-U7 の値を参考にした。熔融物流量に関しては文献の値では合計熔融物量が不足するため、終端の流量を調整して合計を合わせた。熔融物融点は VULCANO の時と同様に固液質量 50%の温度とした。粘性係数は温度依存性が示されているが簡単化のため熔融物供給温度近傍での値 (0.05 Pa·s) を採用し、一定値とした。コンクリートの物性値は VULCANO のものと同一である。床材のセラミック (cordierite) の物性値は、Ferro Ceramic Grinding Inc 社の Web サイトにある "Cordierite" の物性値情報を参考とした。接触熱抵抗 ( $8.33E-5 \text{ Km}^2/\text{W}$ ) は、文献[3.10]の table 2.6 に記載された値である。

熔融物の流入速度は、実験における広がり進展のデータの初期の傾きから決定した。

#### (3) 解析結果

KATS-13 の解析結果を図 3.47、3.48 に示す。約 30 秒で広がりが停止し、計算の終了した 250 s では固化の途上である。拡がりの進展は実験と比較して非常に遅く、拡がり距離を過小評価する。このため熔融物の厚さは、実測値よりも大きくなる。

KATS14 の解析結果を図 3.49、3.50 に示す。約 70 秒で広がりが停止、KATS-13 の場合と同様、計算終了時 (250 s) で固化の途上である。拡がりの進展は実験と比較してやや遅いが、拡がり距離は実験結果に近い。



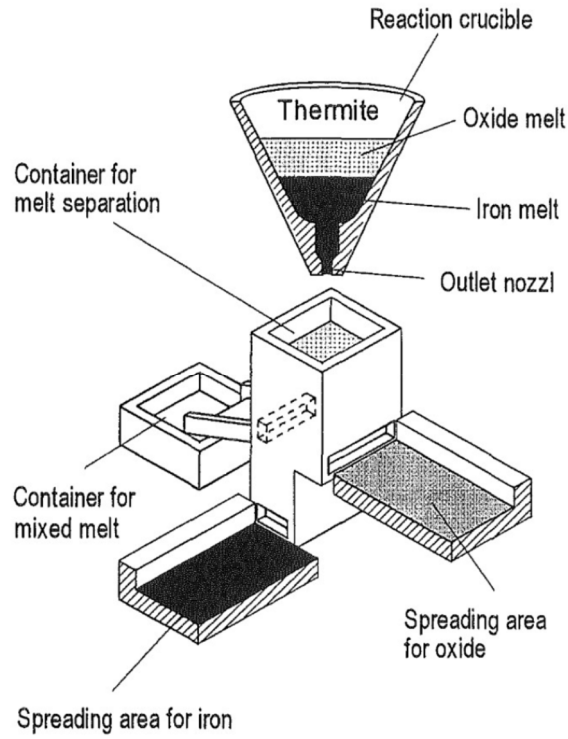


図 3.46 KATS 実験装置 (1次元流路：幅 0.15 m)

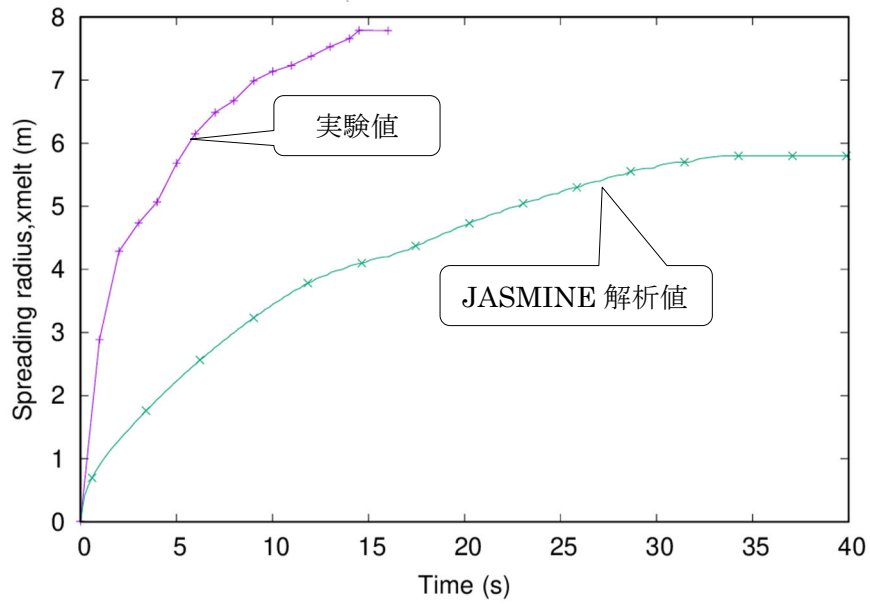


図 3.47 KATS-13 実験の溶融物先端位置の比較

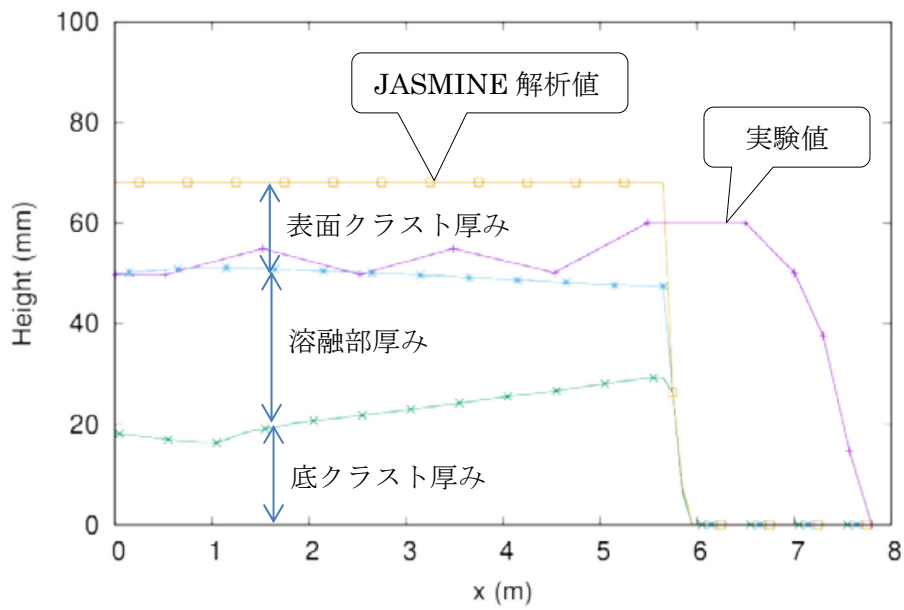


図 3.48 KATS-13 実験の実験終了後の熔融物厚さの比較

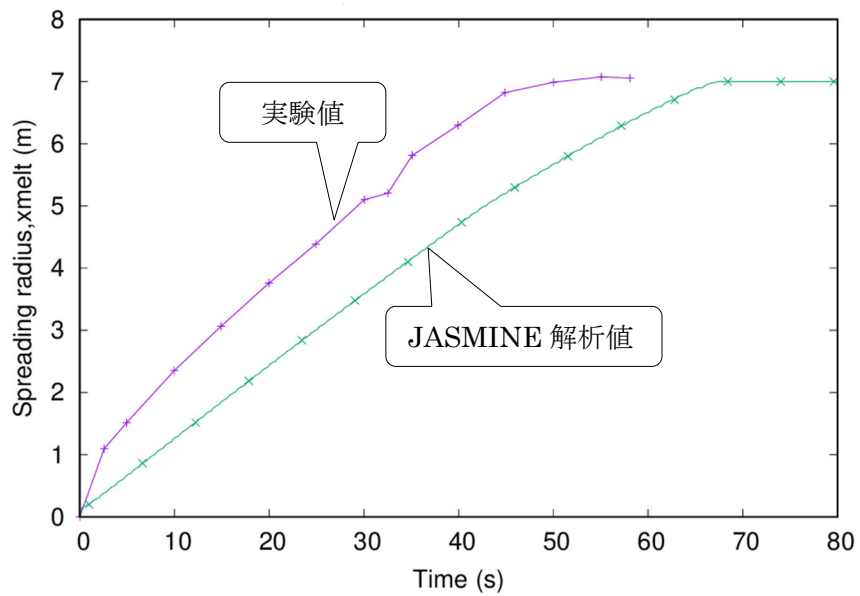


図 3.49 KATS-14 実験の熔融物先端位置の比較

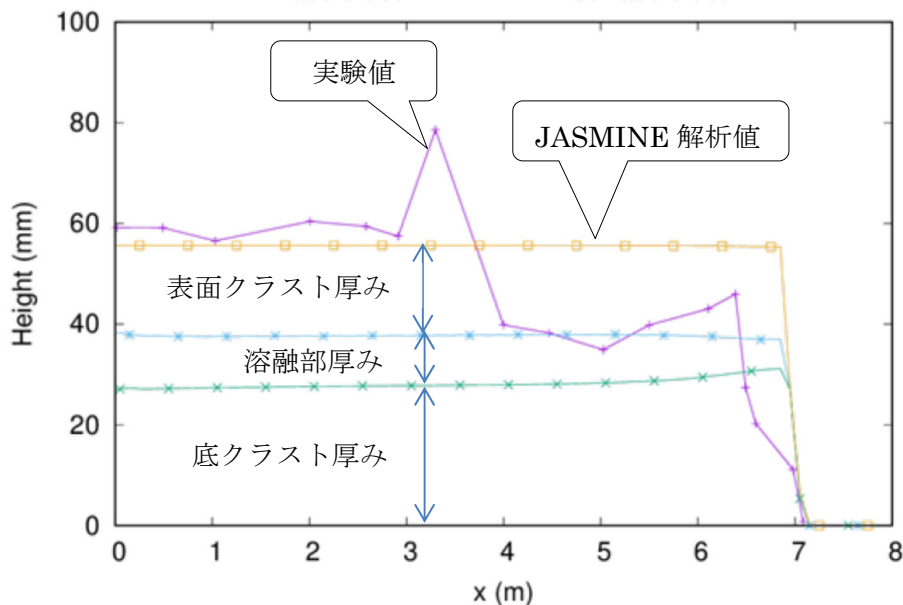


図 3.50 KATS-14 実験の実験終了後の溶融物厚さの比較

### 3.3.3 ECOKATS 実験

#### (1) 実験の概要

ECOKATS-V1 実験は、ECOKATS-1 実験の予備実験として計画されたもので、アルミニウム-酸化鉄のテルミット反応を利用して溶融物 300 kg を作り、幅 300 mm の等幅セラミック製流路に流し込んで、流動状態を調べた[3.11] [3.12]。主実験である ECOKATS-1 は等幅流路の先端に長方形の広がった床面を設けたもので、実験結果を見ると JASMINE の 1 次元解析では表現できない流動状態となっている。そこで予備実験であるが ECOKATS-V1 実験を解析の対象とした。

実験装置の概略を図 3.51 に示す。

#### (2) 入力値の設定

模擬溶融物の物性値は、文献記載に記載された値に基づく。融点はこれまでと同様、液相重量率が 50% となる温度を採用している。粘性係数は、液相単相に対する値 0.2 Pa.s を定数として採用した。空隙率も文献記載値に基づく。

床材のセラミックの物性値は、KATS の解析の時と同様 Ferro Ceramic Grinding Inc 社の Web サイトにある "Cordierite" の物性値情報を参考とし、床の接触熱抵抗は VULCANO VE-U7 解析のセラミック床に対する値を使用した。

溶融物の流入量は、体積流量が測定されておりその値を溶融物密度で質量流量に換算しステップ状データとして入力した。流入速度は、溶融物拡がりの実験結果の初期段階での速度とした。

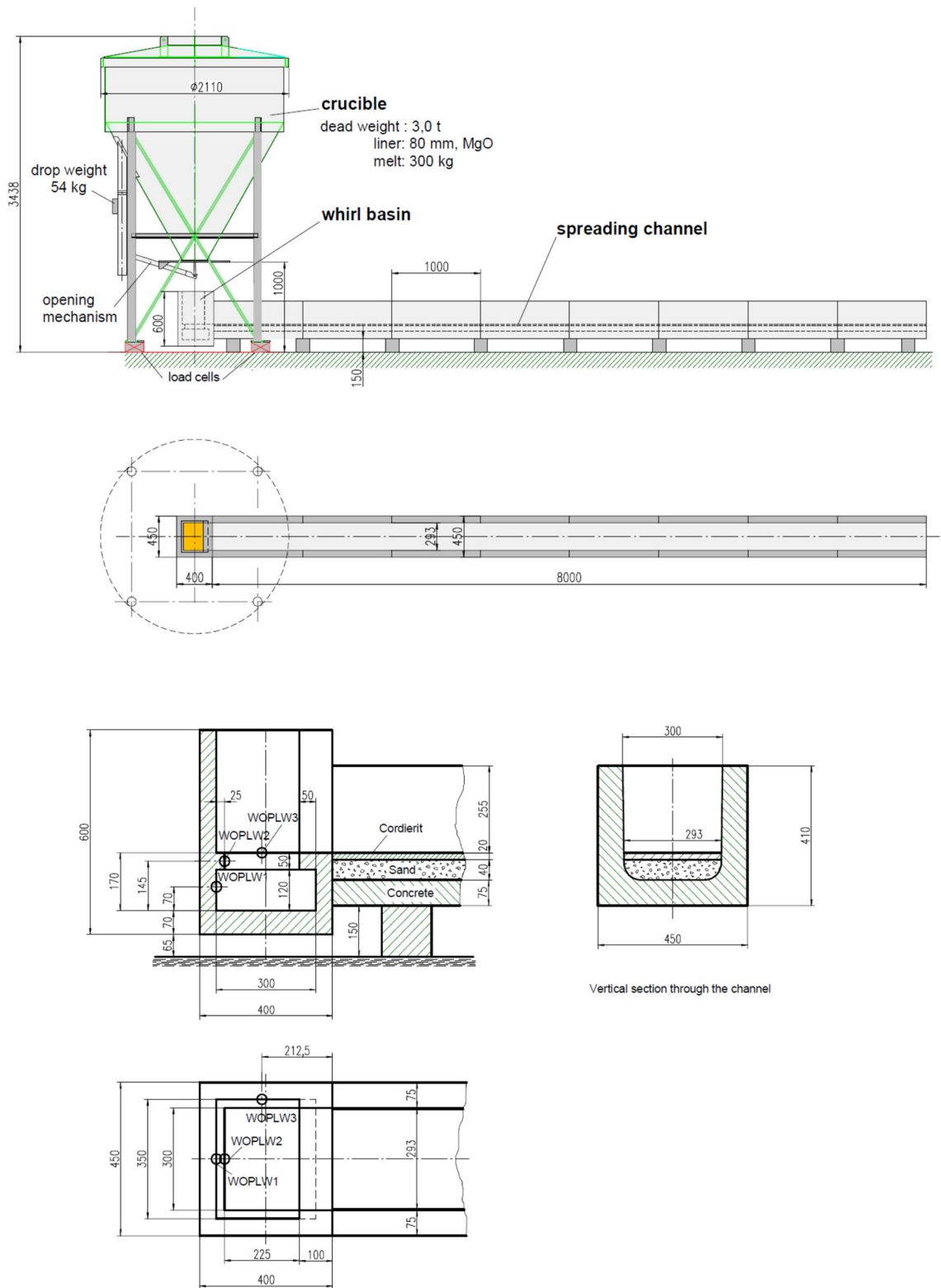


図 3.51 ECOKATS 実験装置 (1次元流路：幅 0.3 m)

(3) 解析結果

図 3.52 に溶融物先端位置の変化、図 3.53 に固化後の溶融物厚みの分布を示す。JASMINE 計算結果では、拡がりの進展は初期に遅く又停止までの時間が長い。最終的な拡がり距離は実験結果よりもやや大きくなった。厚みの分布をみると実験では先端に行くほど薄くなるが、JASMINE ではほぼ一様な厚みを示している。

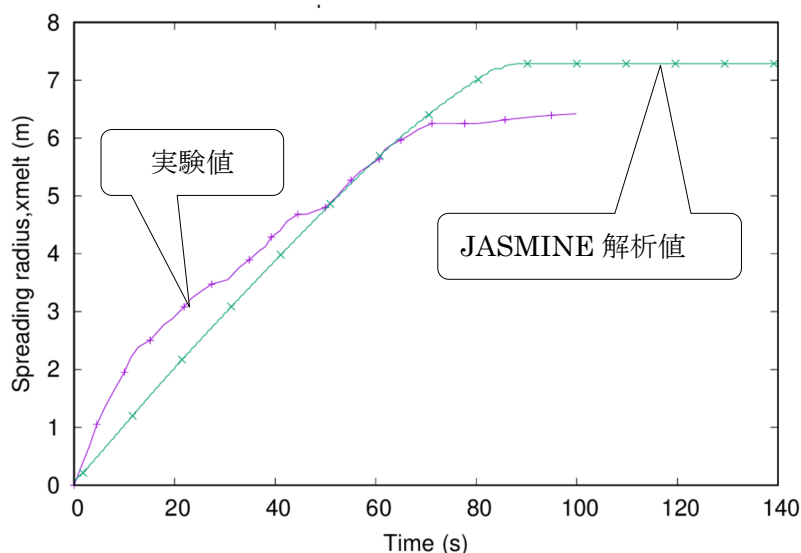


図 3.52 ECOKATS V1 溶融物先端移動の比較

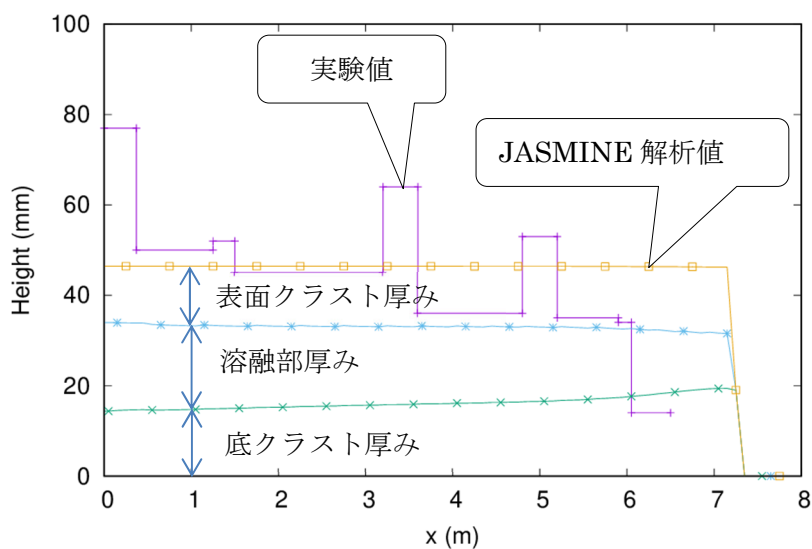


図 3.53 ECOKATS V1 固化物厚さの分布の比較

### 3.3.4 FARO 実験

#### (1) 実験の概要

模擬溶融物として、80-20 wt%の  $\text{UO}_2/\text{ZrO}_2$  を使用した実験であり、図 3.54 に示す  $17^\circ$  の扇形のステンレス製試験部に 130.2 kg を 150 mm 幅の開口部を通して流出させた[3.13]。流路には多数の熱電対が設置されており流路表面の温度が計測できるようになっている。

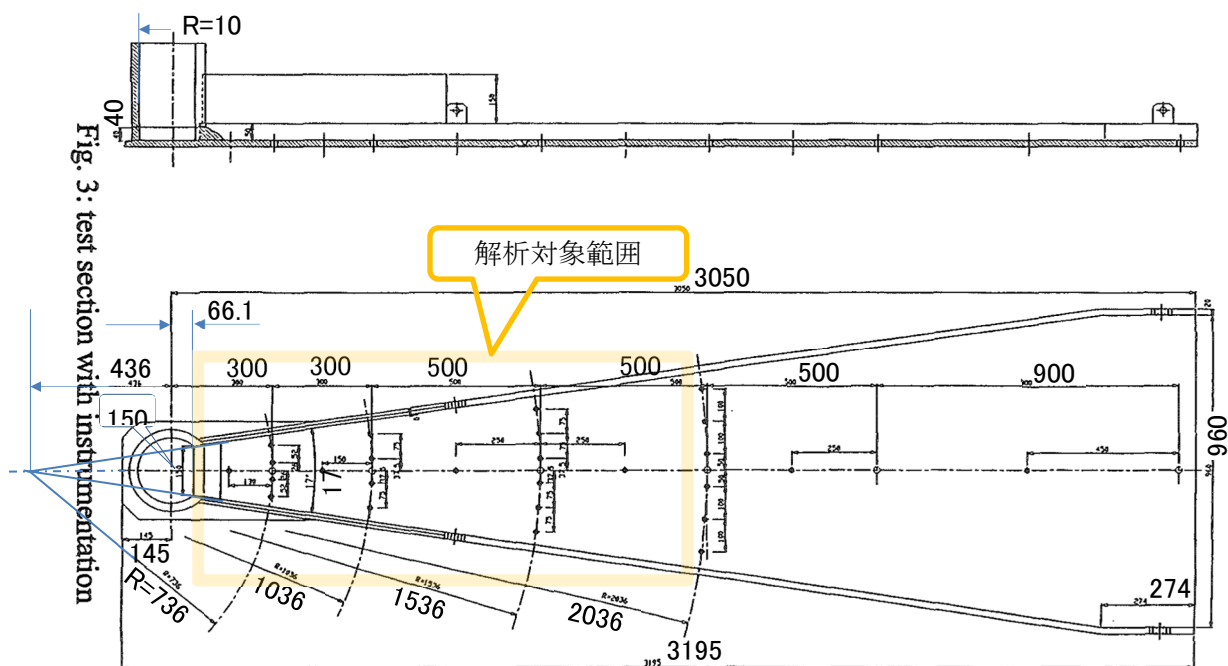


図 3.54 FARO L-26S 実験体系

#### (2) 入力値の設定

計算時間短縮のため、実験結果に基づき解析対象範囲を 1.5 m までとした (図 3.54 参照)。流路幅の分布を図 3.55 に示す。座標原点は開口部で幅 150 mm である。

溶融物の物性値は文献に記載されている値に従った。融点については液相線固相線温度の midpoint とした。この文献では粘性係数の値が他の実験に比べて著しく小さい値  $0.005 \text{ Pa s}$  が与えられている。融解潜熱の値は JASMINE の標準入力値 (corium) を採用している。空隙率は、VULCANO VE-U7 のケースを参考に 0.3 とした。

溶融物の流量は一定とし、流出時間 9.7 s から平均値を求め  $13.42 \text{ kg/s}$  とした。流入速度については広がり進展のデータの初期の傾きから  $0.15 \text{ m/s}$  と与えた。

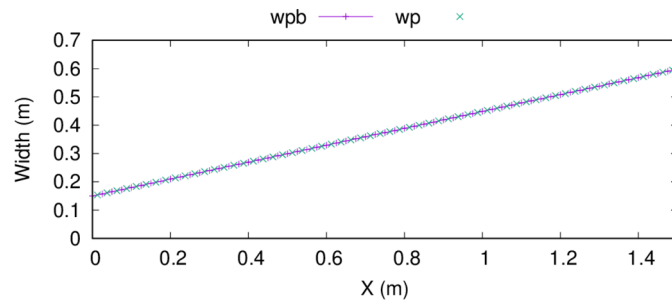


図 3.55 解析に使用した流路幅の関数 $w(x)$

### (3) 解析結果

溶融物拡がりの先端位置の変化を図3.56に示す。拡がりの進展は実験と比べて若干の過大評価となった。図3.57に床面温度の比較を示す。床の温度変化は実験データ、計算値とも位置に関わらずほぼ同じ履歴となっている。初期に溶融物が拡がる時間は比較的短く、ほぼ同時に高温物に接触した床面の非定常熱伝導による温度変化が同じような履歴となったものと考えられる。606 mm位置の実験値だけが他のものと異なる低い温度を示している原因は不明である。

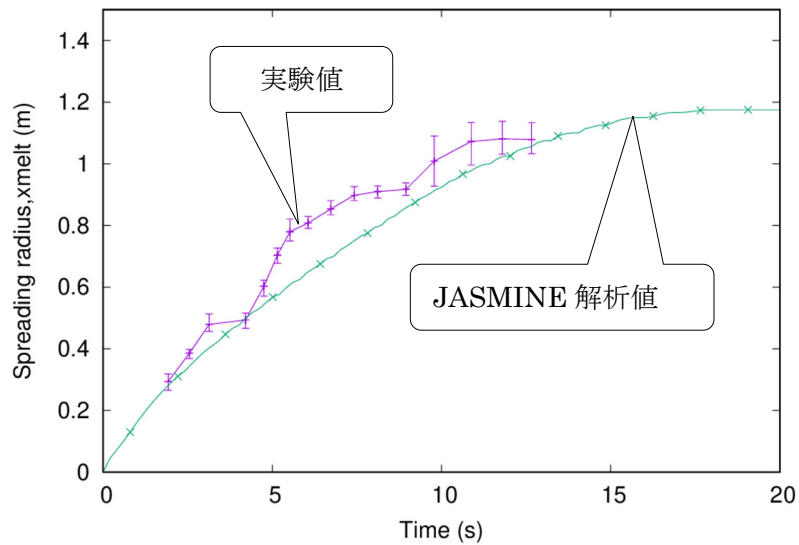


図 3.56 FARO L-26S 溶融物先端移動の比較

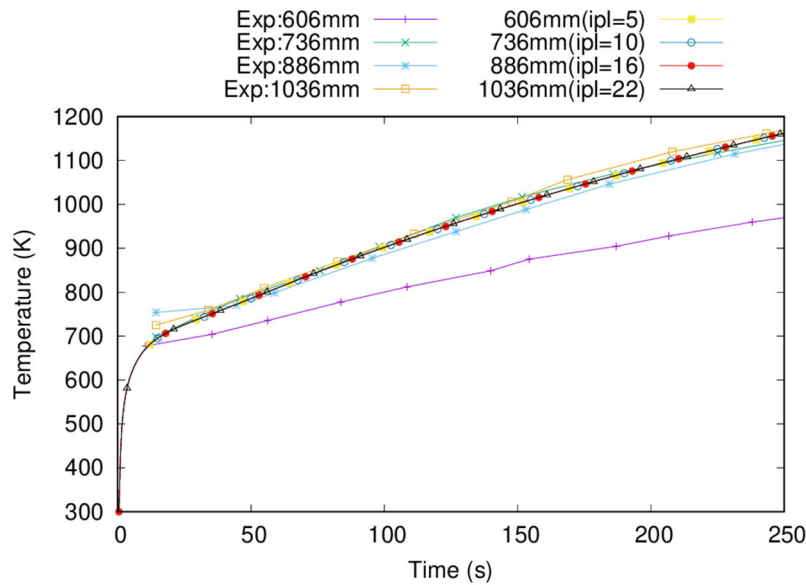


図 3.57 FARO L-26S 床面温度変化の比較

### 3.3.5 COMAS 実験

#### (1) 実験の概要

COMAS EU4 実験は 1920 kg のコリウムを使用した大規模実験である[3.14] [3.15]。流路は図 3.58 に示すように途中に 45° の拡がり部を持つ変形流路である。拡大流路部の前の流路幅は 400 mm、下流側は 3100 mm となっている。左側の貯留部に furnace で融かした模擬溶融物を溜め、それを試験部に流出させる。模擬溶融物は 39 wt% の鉄を含んでおり、酸化物と金属の混合物となっている。

#### (2) 入力値の設定

貯留部と流路部の接続点からを解析対象とし、そこを座標原点とする。JASMINE に入力した流路幅を図 3.59 に示す。横軸は図 3.58 の水平線に沿ったもので、流路幅の中心点に沿ったものではない。

模擬溶融物の融点、液相・固相線温度は Farmer の解析例[3.10]を参考とした。そのほかの溶融物の物性は酸化物に対するものを採用し、組成の似ている VULCANO VE-U7 のものを流用した。

溶融物の流入速度は実験結果の拡がり速度の初期値から 2.2 m/s としたが (ケース 0)、解析結果が実測値と著しく異なるため、この値を大きくし (20 m/s) また粘性係数を小さくした (1.5 Pa s) 計算も行った (ケース 1)。



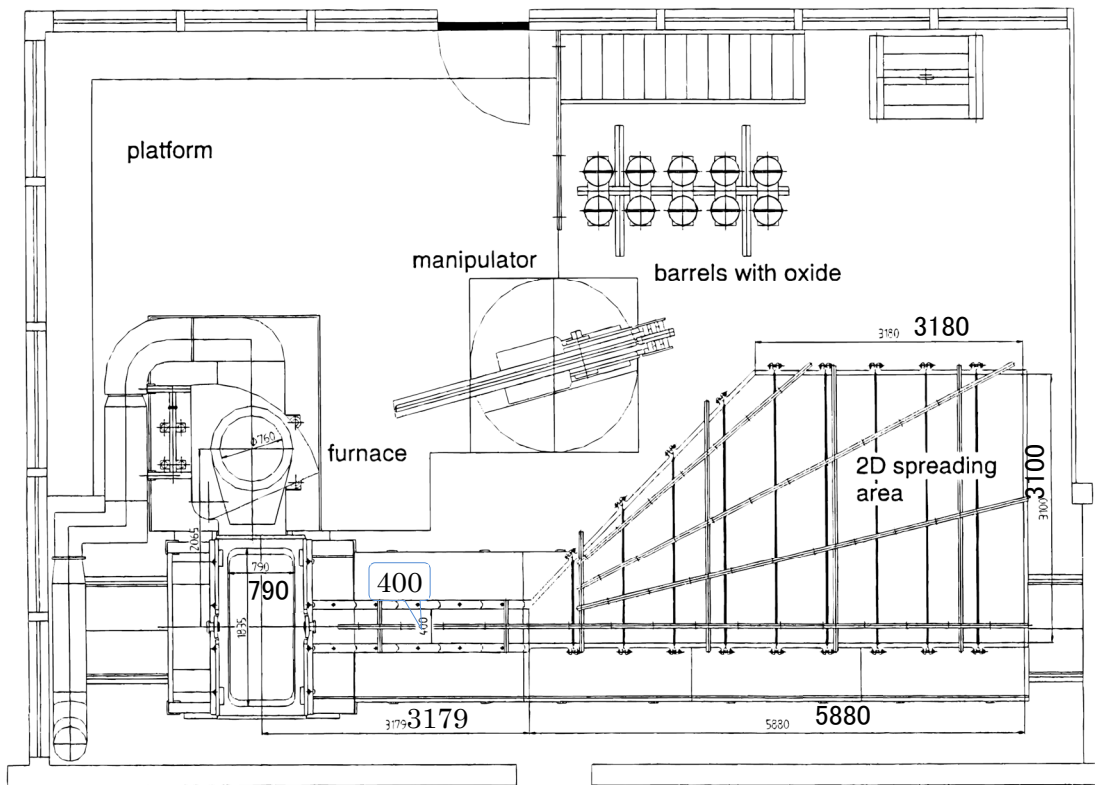


図 3.58 COMAS EU-4 実験の体系

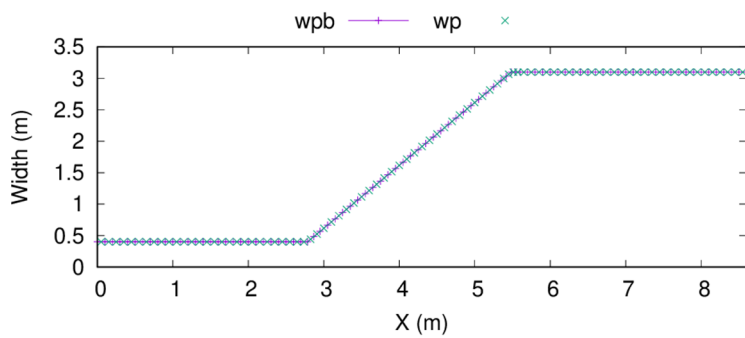


図 3.59 COMAS EU-4 の解析に使用した流路幅の関数 $w(x)$

### (3) 解析結果

ケース0の解析結果を図3.60に示す。拡がりの進展は実験と比べて遅く、到達距離が短い。約60秒で広がりが停止するが、溶融物層の高さが均一になるのは200秒程度（図示せず）となる。

一方、図3.61はケース1の結果である。このケースは溶融物の流入速度と粘性係数を変更して溶融物拡がりの実験結果に近づくように試みたものである。これにより初期段階の拡がり進展速度は実験結果と近くなる。約2.8 m以降は、計算は1次元モデルのため流路幅の拡大により速度が低下するが、実験では中心部はあまり減速せずに進行している。約50 s

で広がり停止し、溶融物層の高さが均一になるのは150 s程度（図示せず）となる。

このようにJASMINEでは流路拡大部（3～5.5 m）で、広がり速度が急減するが、実験では流路拡大の影響が小さい。これを詳しく見るために、広がり速度の2次元分布の観察結果を図3.62に示す。拡大部の上側では到達が遅くなっている。すなわち等幅流路で得た運動量を維持したまま拡大部に入ると、曲がり切れずに直線方向に進む溶融物が多いことを示している。このように流路拡大の大きさが45°にもなるとJASMINEのように $w(x)$ だけを用いて一次元で流動を表現するには無理があることが分かる。

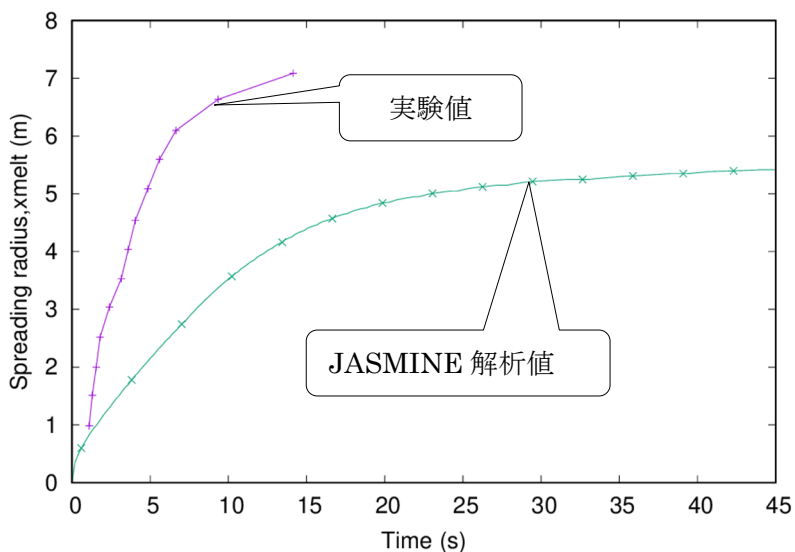


図 3.60 ケース 0 溶融物先端移動の比較

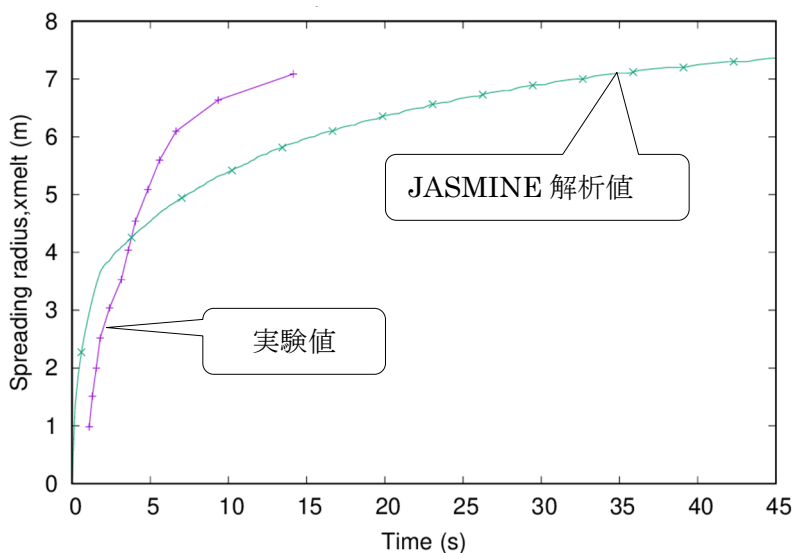


図 3.61 ケース 1 溶融物先端移動の比較

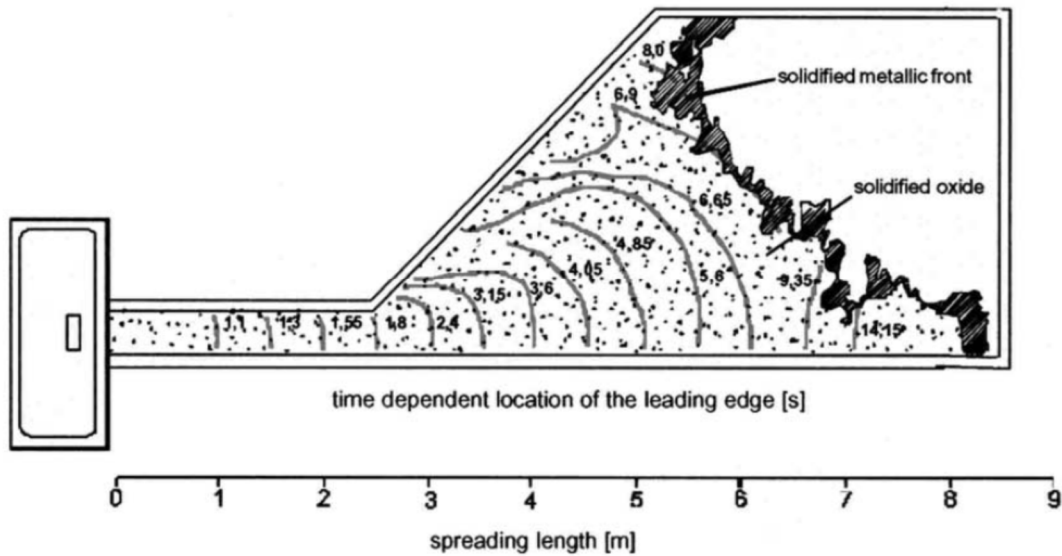


図 3.62 COMAS EU-4 実験結果（溶融物の拡がりの変化）

### 3.3.6 気相中実験の解析まとめ

以上の解析結果を非常に大胆ではあるが、溶融物の種類、流路の形状に関わりなく、溶融物の固化後の拡がり距離を横軸に実験値、縦軸に JASMINE による計算値をとってプロットしたのが図 3.63 である。溶融物が一様に広がっていない COMAS EU-4 実験については最短距離と最長距離を線で結んで示してある。また、このときの解析値は当初の入力値を使用したケース 0 のものである。

この図にあるように、材料の影響は顕著ではない。また、溶融物の量が少なく拡がり距離が小さいときに実験と JASMINE の差が小さい傾向がみられる。

前述のようにクラスト強度の入力値  $\tau_{sol}$  は PULiMS 実験で得られた  $7500 \text{ N/m}^2$  という値を適用した。溶融物組成が異なるにもかかわらず、図 3.63 に示されるように、この値を使用しても実験結果と著しい差がないことが分かった。JASMINE のモデルでは、拡がり先端部の表面に固相が形成されるが、これを突き破るくらいに拡がり駆動力（ジェットから水平流に移ったときの慣性または溶融物に作用する重力）が大きいときには拡がり継続し、駆動力が小さいときには拡がり停止するというものになっている。 $7500 \text{ N/m}^2$  という値が PULiMS と、その他の物質の異なる実験とで同程度という理由としては次の二つの場合が考えられる。

- ① 拡がり距離を支配するのは、拡がり切る前に固相が形成されるか否かであり、この値（ $7500 \text{ N/m}^2$ ）付近では、拡がり距離に対するクラスト強度の感度が小さい。
- ② 局部的に凝固した表面固相がつながり連続した表面の層が形成される瞬間の値であり、物質の種類によらず同程度の値となる。

PULiMS の実験結果を実機に外挿するにあたって重要な値であり、感度分析やより多数の実験の解析、また可能であれば実測値との比較によりクラスト強度の扱いを確定しておくことが望ましい。

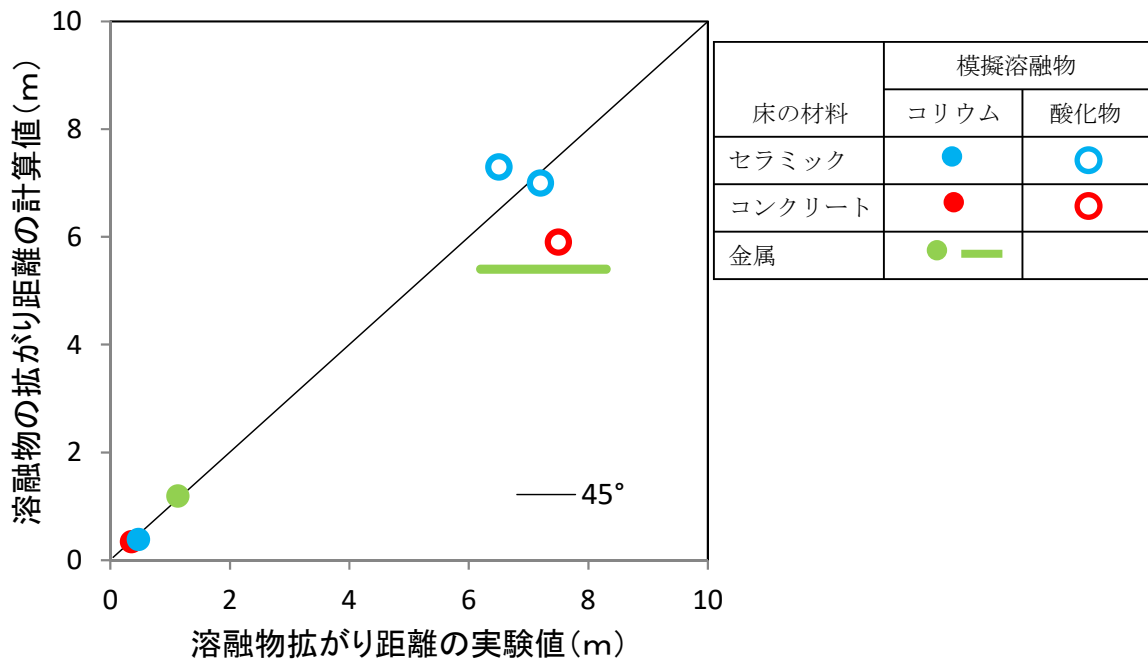


図 3.63 気相中実験の溶融物拡がりに関する JASMINE 解析と実測値の比較

### 3.4 拡がり予測における重要な項目

JASMINE による解析では、実験結果と比較して調整しなければならないモデルパラメータが 3 種ある。これらは PULiMS 実験と比較して決定しがそれらの感度をここに示しておく。

図 3.64 は、他の条件を固定しジェット流速からプール初速への変換係数： $F_{\text{jet\_to\_pool}}$  だけを変化させたときの溶融物の拡がりへの影響を調べた結果を示す。ここでは、実測値と比較しこの値をきめたタイミングである 0.5 s 後の拡がりを示してある。ここにあるように拡がり半径は  $F_{\text{jet\_to\_pool}}$  に対してほとんどリニアに変化している。PULiMS の解析に示したように溶融物の供給停止後にはほとんど拡がりが大きくなるので、この係数は極めて大きな影響を与えることが分かる。

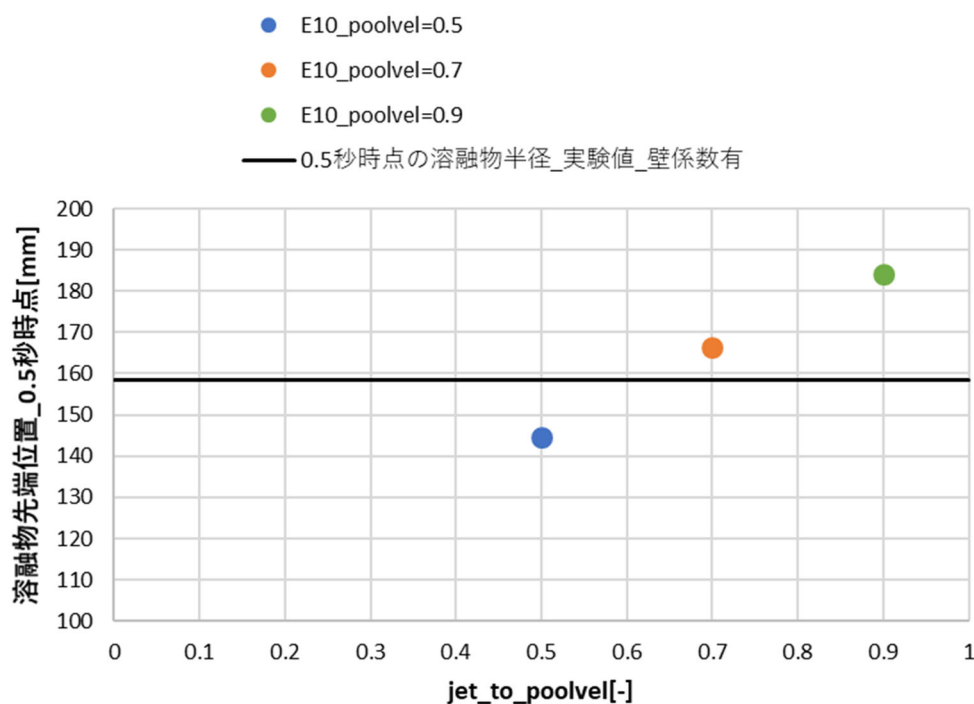


図 3.64  $F_{\text{jet\_to\_pool}}$  を変更した場合の溶融物先端位置\_PULiMS-E10

図 3.65 は、クラスト強度  $\tau_{\text{sol}}$  を変化させたときの溶融物の拡がりへの影響を調べた結果を示す。この値が小さい範囲では大きく影響するが、ある値 10000 N/m<sup>2</sup> を超えるとほとんど解析結果に影響していない。これは、溶融物表面での凝固開始から拡がり停止までの時間における拡がりの進展が小さいことを示しており、拡がり速度と固相成長速度の関係で決まると考えられる。3.3.6 項において物質に依らずクラスト強度 7500 N/m<sup>2</sup> で気相中実験の結果を概ね再現できることを示したが、溶融物の拡がり速度、先端の冷却速度及び相図を考慮して比較を行うことで、より信頼性の高い拡がり停止の判断基準を決定できると期待される。

図 3.66 は、伝熱表面積増加の係数 : **multsurf** を変化させたときの拡がりへの影響を示したものである。ここにあるように、このケースでは拡がりには全く影響しない。従って水温を再現させるためのみ、この値を使用する意味があることになる。

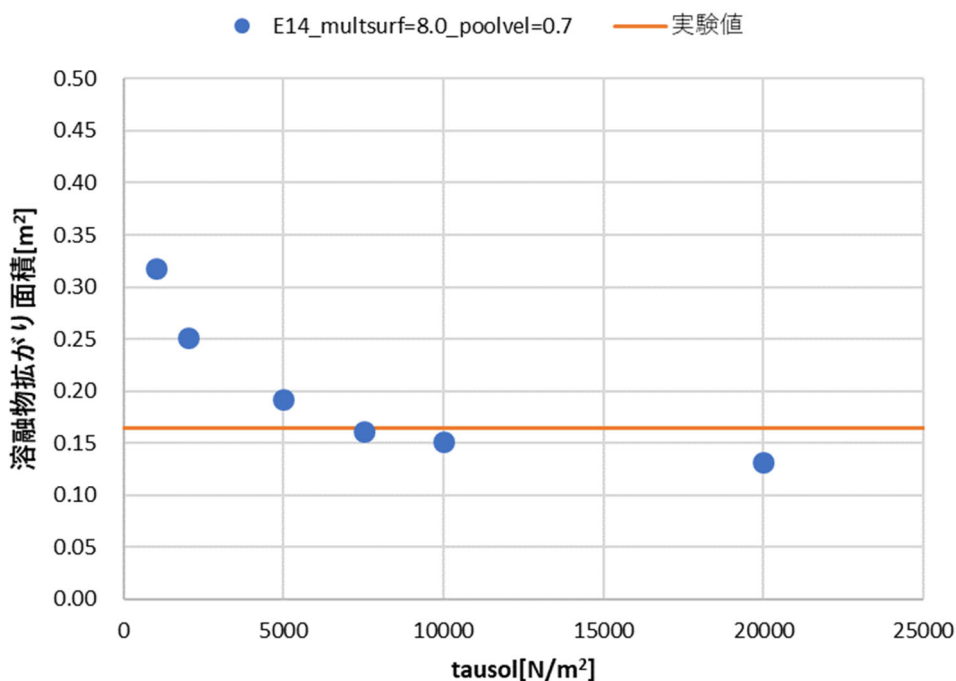


図 3.65 tautosol を変更した場合の溶融物拡がり面積の変化\_PULiMS-E14

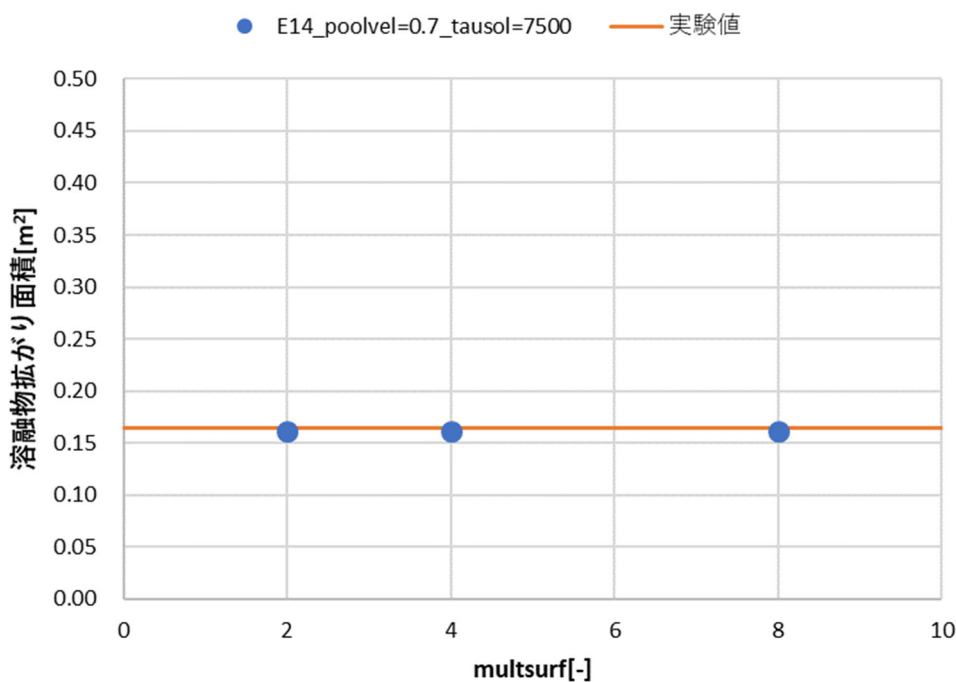


図 3.66 multsurf を変更した場合の溶融物拡がり面積の変化\_PULiMS-E14

### 3.5 まとめ

JASMINE コードに、以下の改良を加えた。

- ① 溶融物ジェット下端・プール流れの境界部での射流モデルの導入
- ② 非軸対称体系への拡張
- ③ 初期条件の多様化 (Dam Break 問題への適用)
- ④ 水プールの一点近似モデル化

改良したモデルを用いて、水中実験の PULiMS E10~E18 実験及び気相中で行われた VULCANO VE-U7、KATS-13,-14、ECOKATS V1、FARO L-26S、COMAS EU-4 実験の解析を行い、溶融物の拡がりについて実測値と比較した。図 3.67 にすべての結果をまとめて対数グラフにプロットしたものを示す。PULiMS の実験結果は実測された面積を真円の半径に換算している。その結果、溶融物の種類がコリウム・酸化物、量が 12.6~1920 kg、軸対称・樋状流路、水中・気相中と異なる実験に対して、溶融物流量が極端に小さかった PULiMS E17 (左下のプロット) を除いて拡がり距離を  $\pm 25\%$  以内で予測できるところを確認した。

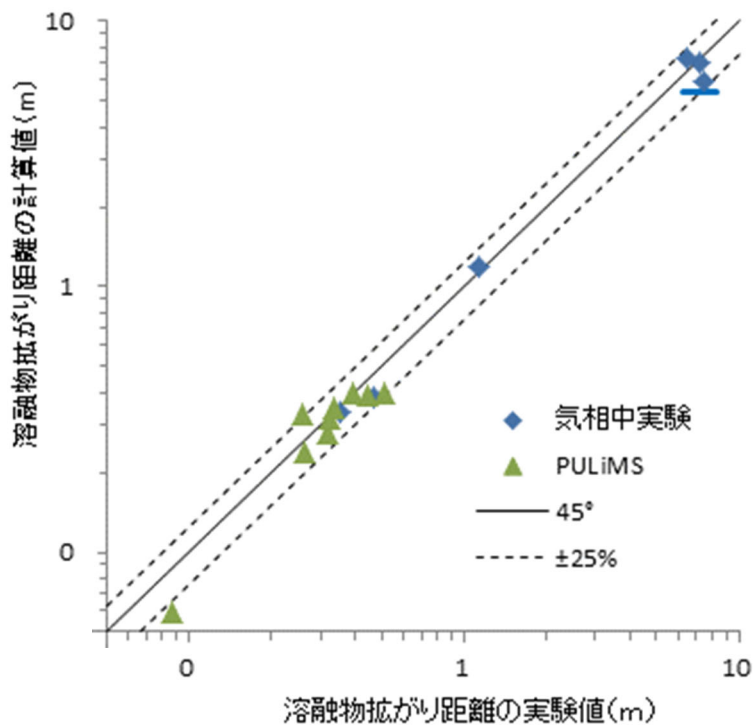


図 3.67 拡がり距離の実験値と JASMINE 解析値の比較

今後の課題として次の点が挙げられる。

- ① 溶融物ジェットの落下流からプール水平流に移行するときの速度変換係数 $F_{\text{jet\_to\_pool}}$ についての検討
- ② より多くの実験との比較
- ③ 各種実験解析に対して不確定な要素のある入力値の感度を調べる。特に、クラスト強度 $\tau_{sol}$ に注目すべきである。
- ④ モデルパラメータ及びクラスト強度 $\tau_{sol}$ 等の主要な物性値を個別要素試験により決定する。

なお、ここで解析対象とした PULiMS 実験の内 E-10～E18 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] D. F. Fletcher, "An improved mathematical model of melt/water detonation-1. Model formulation and example results", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 34(10), p.2435-2448, 1991.
- [3.2] 廣川ら, "ダム崩壊問題の実験結果を対象とした CFD の基礎的検討", 第 32 回数値流体力学シンポジウム, 002-1
- [3.3] 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
- [3.4] 日本機械学会, "伝熱工学資料 改訂第 5 版", P.100、2009
- [3.5] 日本機械学会, "伝熱工学資料 改訂第 5 版", P.53、2009
- [3.6] C. Journeau, E. Boccaccio, C. Brayer, G. Cognet, J.-F. Haquet, C. J'egou, P. Piluso, J. Moneris, Ex-vessel corium spreading: results from the VULCANO spreading tests, *Nuclear Engineering and Design*, vol.223, 75--102, doi:10.1016/S0029-5493(02)00397-7, 2003.
- [3.7] C. Journeau, J.-F. Haquet, B. Spindler, C. Spengler, J. Foit, The VULCANO VE-U7 corium spreading benchmark, *Progress in Nuclear Energy*, vol.48, 215--234, doi:10.1016/j.pnucene.2005.09.009, 2006.
- [3.8] G. Engel, G. Fieg, H. Massier, U. Stegmaier, W. Sch"utz, KATS experiments to simulate corium spreading in the EPR core catcher concept, *OECD Workshop on Ex-Vessel Debris Coolability*, Karlsruhe 1999, 148--155, 1999.
- [3.9] B. Eppinger, G. Fieg, W. Sch"utz, U. Stegmaier, KATS experiments to simulate corium spreading in the EPR core catcher concept, *9th International Conference on Nuclear Engineering*, 2001.
- [3.10] M. Farmer, Melt spreading code assessment, modifications, and applications to the EPR core catcher design, ANL-09/10, Argonne National Laboratory, 2009.
- [3.11] H. Alsmeyer, T. Cron, J.J. Foit, G. Messemer, S. Schmidt-Stiefel, W. H"afner, H. Kriscio, Test report of the melt spreading tests ECOKATS-V1 and ECOKATS-1, FZKA-7064, SAM-ECOSTR-D15, Forschungszentrum Karlsruhe, 2004.
- [3.12] J.J. Foit, Large-scale ECOKATS experiments: spreading of oxide melt on ceramic and concrete surfaces, *Nuclear Engineering and Design*, vol.236, 2567--2573, doi:10.1016/j.nucengdes.2006.03.010, 2006.
- [3.13] W. Tromm, J.J. Foit, Dry and wet spreading experiments with prototypical material at the FARO facility and theoretical analysis, *OECD Workshop on Ex-Vessel Debris Coolability*, Karlsruhe 1999, 178--188, 1999.
- [3.14] M. Sappok, W. Steinwarz, Large-scale experiments on ex-vessel core melt behavior, *Nuclear Technology*, vol.125, 363--370, 1999.
- [3.15] W. Steinwarz, A. Alemberti, W. H"afner, Z. Alkan, M. Fischer, Investigations on the

phenomenology of ex-vessel core melt behavio (COMAS), Nuclear Engineering and Design, vol.209, 139--146, 2001.

## 4 実機冷却性評価

JASMINE コードによる解析には、初期条件、解析条件等に含まれる不確かさが存在する。平成 30 年度の解析では入力パラメータの不確かさを仮定し、確率分布に従って抽出した入力パラメータセットに対する JASMINE 解析で溶融炉心の堆積高さを求め、MCCI 回避確率（冷却成功確率）を確率論的に評価した。

JASMINE コードに与える入力パラメータは、本来、シビアアクシデント（SA）時の事故進展の結果として決まるものである。したがって、その不確かさの確率分布は、SA 総合解析コードに含まれる不確かさや事故シナリオの不確かさを反映して決定されるべきである。本年度はこの手法の実践として、まず、シビアアクシデント総合解析コード MELCOR1.8.5 [4.1]におけるモデルパラメータの不確かさを考慮した解析を行い、その結果から JASMINE 入力パラメータの不確かさの確率分布を決定した。これに基づき JASMINE 解析の入力ケースを抽出し、各ケースにおける溶融炉心堆積高さを求めることで冷却成功確率を求めた。さらに、格納容器への先行注水量（水位）を変えた解析を行うことで、冷却成功確率と注水量の関係を評価した。

### 4.1 MELCOR コードによるシビアアクシデント解析

MELCOR 解析では、福島第一原子力発電所 3 号炉の事故シナリオを想定し、公開情報に基づきプラント条件や事故進展条件を設定した。このため、JASMINE 解析で想定するプラント条件と完全に同一ではない。また、今回は事故シナリオの不確かさは考慮していないため、対策の開始時刻や効果（炉心注水量など）は固定した。

#### 4.1.1 MELCOR 解析条件の設定

##### (1) 解析対象とする原子炉

解析対象は、Mark-I 型格納容器を持つ定格出力 840MWe の BWR4 である。入力ファイルを作成するにあたり、原子炉のデータを種々の文献から値を推定した。表 4.1 MELCOR に主要なプラント条件を示す。図 4.1 MELCOR 解析における炉心セル分割及び図 4.2 MELCOR 解析におけるボリューム分割は MELCOR 解析における炉心ノード分割及びボリューム分割を示す。原子炉圧力容器は、下部プレナム、バイパス、炉心、上部プレナム、蒸気ドーム、ダウンコマ、再循環ライン、主蒸気ライン、SR 弁等の 16 のボリュームに分割された。格納容器は、ドライウェル区画をペDESTAL、ドライウェル、ベント管等の 5 つのボリュームに分割した。

表 4.1 MELCOR 解析の対象プラント条件

項目	値	備考
初期原子炉熱出力	2381 MWt	定格値
初期原子炉圧力	7.03 MPa	通常運転圧力
初期原子炉水位	ベッセル下端から 14.3m	種々の文献より推定した値であるので、実際とは異なる場合がある。
蒸気温度	559K	
UO <sub>2</sub> 質量	107 t (ウラン質量 94t)	
有効炉心ノード分割	半径方向 3 リング 軸方向 6 レベル	
原子炉圧力容器及び格納容器ボリューム分割	図 4.2 MELCOR 解析におけるボリューム分割参照	下部ヘッドの破損もリングごとに生じる
崩壊熱	ANS 標準データ	
炉心損傷温度	被覆管破損温度 1173 K 燃料棒破損温度 2500 K	不確かさ解析のパラメータの一つ
格納容器空間容積	ドライウエル空間 (ベント管空間部を含む) 4240m <sup>3</sup> サブプレッションチェンバ空間 3160m <sup>3</sup> サブプレシヨンプール水量 2980 m <sup>3</sup>	
コンクリート組成	玄武岩系コンクリート (Basalt aggregate concrete)	融点は 1450 K

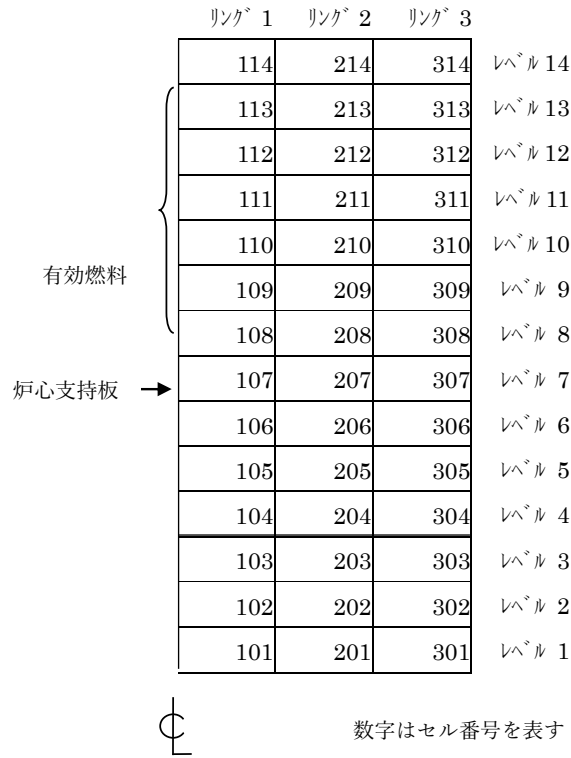


図 4.1 MELCOR 解析における炉心セル分割

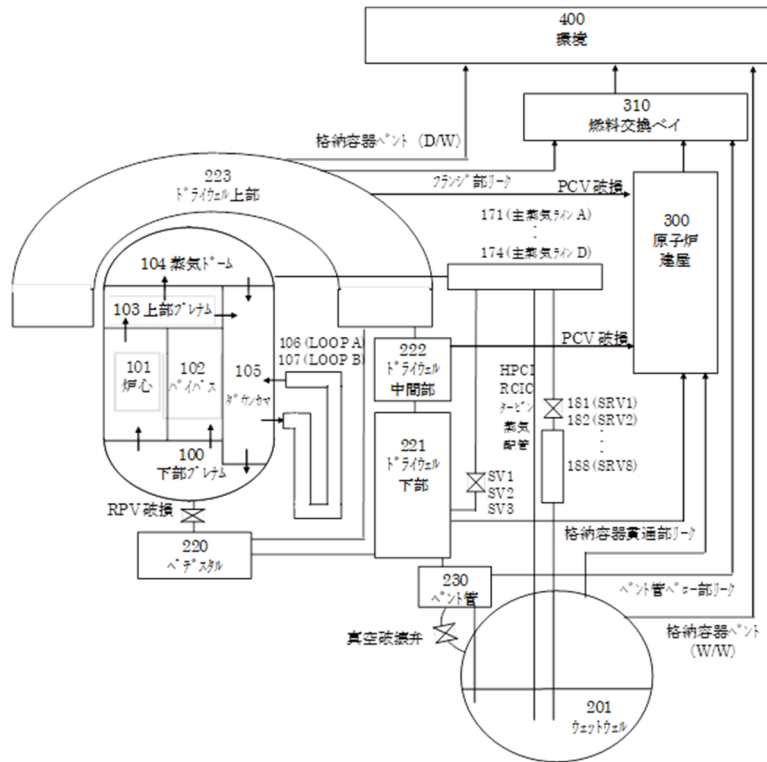


図 4.2 MELCOR 解析におけるボリューム分割

## (2) 解析条件の設定

### ① 原子炉隔離時冷却系 (RCIC)

以下に RCIC の設定条件を示す。

#### (a) 起動タイミング

1200 秒に RCIC を手動起動し、原子炉水位が L8 (有効燃料頂部 (TAF) より 5.655 m 上) まで上昇したときに RCIC を停止する設定にした。また、4560 秒に RCIC を手動起動するようにし、その後 74940 秒まで原子炉水位が L8 まで上昇すると停止、原子炉水位が L2 (TAF より 2.950 m 上) まで下降すると起動するように設定した。74940 秒以降、RCIC は起動しないようにした。

#### (b) 水源

初期水源を外部水源 (復水貯蔵タンク) とし、サブプレッションプールへの水源切替は無いとした。注入する水温は 283K (10℃) と仮定した。

#### (c) 圧力容器内への注入流量

RCIC の圧力容器内への注入流量は、定格流量の 97t/hr (26.9kg/s) とした。

#### (d) RCIC 駆動タービンの消費蒸気の模擬

RCIC タービンで消費される蒸気流を、主蒸気ライン C とウェットウエルのプール間を繋ぐフローパスで模擬した。このフローパスは初期に閉じており、RCIC の注入時のみ開放して、原子炉圧力に依存した流量になるように設定した。

### ② 高圧注水系 (HPCI)

以下に HPCI の設定条件を示す。

#### (a) 起動タイミング

749460 秒以降、原子炉水位が L2 まで低下したときに HPCI が起動するように設定した。また、129300 秒以降は HPCI が作動しないように設定した。

#### (b) 水源

初期水源を外部水源(復水貯蔵タンク)とし、サブプレッションプールへの水源切替は無いとした。注入する水温は 283K (10℃) と仮定した。

#### (c) 圧力容器内への注入流量

1F-3の事故報告では、HPCIが起動・停止を繰り返さないように、その流量の大半をテストラインにより復水貯蔵タンクに戻し、圧力容器内へ注入される流量を制限したとされている。このため、原子炉水位が低下せず、かつ129300秒までに原子炉水位がL8まで上昇しないHPCIの注入流量として、38.6t/hr (10.7kg/s) を設定した。この流量値は、注入流量についての予備解析を実施して決めたものである。

#### (d) HPCI 駆動タービン蒸気の模擬

HPCI駆動タービンで消費される蒸気流は、RCIC同様、主蒸気ラインCとウェットウエルのプール間を繋ぐフローパスで模擬した。このフローパスの流量は、原子炉圧力に依存した流量を設定した。

### ③ 格納容器スプレイの設定

本格納容器スプレイは、プラントに設置されている消火系ポンプを利用した代替格

納容器スプレイである。以下に格納容器スプレイの設定条件を示す。

(a) 流量

格納容器スプレイの流量は15t/hr (4.17kg/s) とした。

(b) 格納容器スプレイのタイミング及び散水箇所

サプレッションチェンバ (S/C) またはドライウエル (D/W) に散水するように設定した。

(c) 水源

消火系によるスプレイは外部水源 (ろ過水タンク) を用いる。注入する水温は 283K (10°C) と仮定した。

(d) 液滴径

サプレッションチェンバへのスプレイ液滴径を1mm、ドライウエルへのスプレイ液滴径を5mmと仮定した。

④ 手動減圧

事故後 152460 秒に SR 弁の 1 弁を開放するように設定した。最も吹出圧力の設定値の低い SRV-C を開放すると仮定した。

⑤ 消火系ポンプによる原子炉注水

消火系ポンプによる原子炉注水の設定条件を以下に示す。

(a) 注水タイミング

153480 秒～163980 秒、167100 秒～210180 秒、217980 秒～245640 秒、265380 秒以降に原子炉注水を実施するように設定した。

(b) 流量

それぞれの時間帯の注入流量は、原子炉圧力に依存した流量である。今回はこの半分の流量になるように設定した。原子炉圧力依存の注入流量の設定には、265310 秒以前は消火系ポンプ 1 台を用い、それ以降は消火系ポンプを 2 台直列に繋いで用いることを考慮した。

(c) 水源

164580 秒までの原子炉注入は淡水とし、それ以降の注入は海水とした。淡水の温度は 283K (10°C)、海水の温度は 281K (8°C) とした。

⑥ SR 弁漏洩

事故後 18000 秒 (5 時間) に SR 弁 (SRV-C) の配管が S/C の気相部において漏洩が発生し、圧力容器からサプレッションプール中に放出されるべき水蒸気の一部が S/C 気相部に放出されると仮定した。漏洩口の面積は 0.015m<sup>2</sup> と仮定した。

#### 4.1.2 不確かさを考慮するパラメータ

MELCOR 解析では事象進展に係るモデルパラメータに確率分布を与えた。北欧 BWR を対象とした過去の感度解析の事例[4.2][4.3]から圧力容器破損時の状態に影響が大きいとされるパラメータを含む以下を選定した。

- ① TPFALL ... 下部ヘッド貫通部破損温度
- ② HFRZSS ... 鋼の凝固熱伝達係数
- ③ HFRZZR ... ジルカロイの凝固熱伝達係数
- ④ VFALL ... デブリ落下速度
- ⑤ TRDFAI ... 被覆管に未酸化 Zr が無い状態で燃料棒が自立できる最高温度

#### 4.1.3 不確かさを考慮した MELCOR 入力条件

##### (1) 不確かさを考慮するパラメータセットの生成

MELCOR解析で不確かさを考慮する5個の入力パラメータに対して表 4.2 MELCORコードによる事故進展解析で確かさを考慮する入力パラメータの通り分布を設定し、モンテカルロ解析を実施するための汎用コード PREP[4.4]に組み込まれている Latin Hypercube Sampling (LHS)法を用いて表 4.3 PREP で出力したパラメータセットに示す 300組の入力パラメータを抽出した。

これらの300ケースについてMELCOR解析を実施したところ、3ケース(No.47, 54, 209)については200時間まで計算しても圧力容器破損に至らず、21ケースについてはエラーにより圧力容器破損まで解析を継続することが出来なかった。よって、これらの24ケースは除外し、圧力容器破損に至った276ケースの結果を用いることとした。図 4.7 TRDFAIの確率分布から図 4.7 TRDFAIの確率分布に276ケースのパラメータの分布を示す。さらに、276ケースにおける各パラメータのデータの正規性を確認するため、パラメータ毎に作成した正規 Q-Qプロット図(パラメータ値を横軸に、期待値を縦軸にとった確率プロット)を図 4.8 正規 Q-Qプロット (TPFAIL) から図 4.12 正規 Q-Qプロット (TRDFAI) に示す。いずれのパラメータにおいてもデータ点が概ね一直線上に並んでおり、正規分布に従っていることが確認された。



表 4.2 MELCOR コードによる事故進展解析で確かさを考慮する入力パラメータ

	<b>Large item</b>	<b>Variable name</b>	<b>Default value</b>	<b>Distribution</b>	<b>Standard deviation</b>	<b>Average</b>
1	Lower Head Failure Modeling Parameters	TPFAIL	1273.2	Normal	127.315	1273.15
2	Candling Heat Transfer Coefficients	HFRZSS	1000	Normal	300	1000
3	Candling Heat Transfer Coefficients	HFRZZR	1000	Normal	300	1000
4	In-Vessel Falling Debris Quench Model Parameters	VFALL	1	Normal	0.1	1.0
5	Core Component Failure Parameters	TRDFAI	2500	Normal	250	2500

表 4.3 PREP で出力したパラメータセット

ケース No.	\$TPFAIL	\$SHFRZSS	\$SHFRZZR	\$VFALL	\$STRDAFI
1	1.32E+03	1.23E+03	1.06E+03	1.17E+00	2.65E+03
2	1.42E+03	8.98E+02	1.13E+03	8.92E-01	2.70E+03
3	1.25E+03	8.02E+02	1.14E+03	9.70E-01	2.47E+03
4	1.27E+03	1.36E+03	1.35E+03	8.76E-01	2.56E+03
5	1.30E+03	7.05E+02	1.01E+03	1.07E+00	2.53E+03
6	1.56E+03	9.02E+02	9.07E+02	1.03E+00	2.23E+03
7	1.06E+03	1.27E+03	1.27E+03	9.58E-01	2.49E+03
8	1.26E+03	4.50E+02	1.34E+03	1.14E+00	2.49E+03
9	1.31E+03	1.60E+03	1.08E+03	9.91E-01	2.40E+03
10	1.22E+03	8.69E+02	6.18E+02	1.04E+00	2.52E+03
11	1.40E+03	8.76E+02	1.11E+03	1.01E+00	2.41E+03
12	1.24E+03	9.75E+02	1.13E+03	1.01E+00	2.47E+03
13	9.78E+02	8.28E+02	1.14E+03	1.02E+00	2.51E+03
14	1.19E+03	1.25E+03	5.11E+02	1.09E+00	2.55E+03
15	1.24E+03	1.63E+03	8.51E+02	1.06E+00	2.57E+03
16	1.10E+03	8.07E+02	9.95E+02	9.24E-01	2.59E+03
17	1.20E+03	1.35E+03	5.69E+02	1.05E+00	2.50E+03
18	9.75E+02	1.38E+03	4.89E+02	9.79E-01	2.47E+03
19	1.25E+03	1.06E+03	1.41E+03	1.20E+00	2.57E+03
20	1.19E+03	9.95E+02	1.19E+03	1.11E+00	2.51E+03
21	1.17E+03	7.98E+02	9.38E+02	1.06E+00	2.49E+03
22	1.19E+03	9.33E+02	1.36E+03	8.85E-01	2.46E+03
23	1.37E+03	8.16E+02	1.51E+03	9.49E-01	2.55E+03
24	1.21E+03	7.18E+02	9.12E+02	8.82E-01	2.58E+03
25	1.40E+03	1.26E+03	1.33E+03	1.03E+00	2.39E+03
26	1.26E+03	1.04E+03	1.20E+03	1.07E+00	2.64E+03
27	1.29E+03	1.41E+03	9.18E+02	1.02E+00	2.68E+03
28	1.22E+03	1.32E+03	1.05E+03	1.02E+00	2.39E+03
29	1.14E+03	6.81E+02	1.34E+03	1.02E+00	2.50E+03
30	1.08E+03	5.64E+02	1.50E+03	9.71E-01	2.66E+03
31	1.32E+03	9.80E+02	8.84E+02	9.82E-01	2.46E+03
32	1.31E+03	7.25E+02	9.53E+02	1.04E+00	2.67E+03
33	1.31E+03	9.57E+02	1.10E+03	8.92E-01	2.39E+03
34	1.23E+03	1.25E+03	1.20E+03	1.04E+00	2.45E+03
35	1.29E+03	4.26E+02	6.33E+02	1.23E+00	2.52E+03
36	1.25E+03	1.55E+03	7.68E+02	1.16E+00	2.46E+03
37	1.21E+03	1.51E+03	1.29E+03	9.72E-01	2.80E+03
38	1.42E+03	8.87E+02	1.29E+03	1.11E+00	2.26E+03
39	1.53E+03	9.21E+02	1.33E+03	1.03E+00	2.50E+03
40	1.32E+03	1.17E+03	6.75E+02	1.08E+00	2.58E+03
41	1.15E+03	8.40E+02	1.48E+03	8.00E-01	2.73E+03
42	1.26E+03	1.18E+03	5.18E+02	1.05E+00	2.48E+03
43	1.10E+03	1.07E+03	1.24E+03	1.14E+00	2.59E+03
44	1.24E+03	9.16E+02	1.21E+03	1.13E+00	2.59E+03
45	1.36E+03	1.19E+03	1.01E+03	1.08E+00	2.51E+03
46	1.45E+03	1.34E+03	1.09E+03	9.85E-01	2.62E+03
47	1.53E+03	1.11E+03	1.38E+03	9.93E-01	2.68E+03
48	1.14E+03	6.72E+02	1.17E+03	8.38E-01	2.32E+03
49	1.27E+03	1.24E+03	3.43E+02	9.42E-01	2.64E+03
50	1.37E+03	7.10E+02	9.69E+02	1.09E+00	2.48E+03

網掛けは計算エラー等により除外したケース

ケース No.	\$TPFAIL	\$SHFRZSS	\$SHFRZZR	\$VFALL	\$TRDFAI
51	1.16E+03	1.46E+03	8.60E+02	7.75E-01	2.50E+03
52	1.15E+03	1.35E+03	6.24E+02	1.11E+00	2.73E+03
53	1.02E+03	9.06E+02	1.30E+03	1.09E+00	2.51E+03
54	1.41E+03	1.21E+03	1.40E+03	7.51E-01	2.57E+03
55	1.15E+03	9.04E+02	1.13E+03	9.93E-01	2.49E+03
56	1.16E+03	9.36E+02	9.98E+02	9.14E-01	2.45E+03
57	1.21E+03	1.18E+03	8.30E+02	9.79E-01	2.43E+03
58	1.22E+03	2.25E+02	7.62E+02	9.96E-01	2.37E+03
59	1.07E+03	1.27E+03	1.26E+03	9.48E-01	2.46E+03
60	1.36E+03	1.01E+03	9.52E+02	9.53E-01	2.46E+03
61	1.38E+03	6.47E+02	8.58E+02	1.25E+00	2.59E+03
62	1.36E+03	9.68E+02	9.60E+02	8.55E-01	2.48E+03
63	1.26E+03	9.28E+02	1.11E+03	9.50E-01	2.58E+03
64	1.00E+03	1.00E+03	1.32E+03	8.79E-01	2.52E+03
65	1.11E+03	8.86E+02	1.06E+03	1.12E+00	2.57E+03
66	1.44E+03	1.28E+03	8.20E+02	1.10E+00	2.56E+03
67	1.40E+03	1.07E+03	1.70E+03	8.65E-01	2.44E+03
68	1.32E+03	1.10E+03	7.86E+02	9.20E-01	2.54E+03
69	1.13E+03	1.19E+03	8.36E+02	1.05E+00	2.44E+03
70	1.26E+03	5.05E+02	1.57E+03	9.54E-01	2.60E+03
71	1.09E+03	1.02E+03	5.86E+02	1.03E+00	2.37E+03
72	1.14E+03	4.86E+02	8.05E+02	9.35E-01	2.53E+03
73	1.35E+03	1.23E+03	7.49E+02	8.03E-01	2.52E+03
74	1.25E+03	6.69E+02	1.03E+03	1.13E+00	2.59E+03
75	1.04E+03	3.42E+02	1.42E+03	8.95E-01	2.63E+03
76	1.18E+03	1.44E+03	1.15E+03	1.12E+00	2.54E+03
77	1.47E+03	8.63E+02	1.09E+03	8.70E-01	2.53E+03
78	1.18E+03	1.42E+03	8.24E+02	1.04E+00	2.46E+03
79	1.09E+03	1.09E+03	9.63E+02	8.75E-01	2.45E+03
80	1.49E+03	6.08E+02	7.95E+02	1.06E+00	2.60E+03
81	1.41E+03	1.28E+03	8.03E+02	9.96E-01	2.62E+03
82	1.32E+03	1.35E+03	1.04E+03	8.14E-01	2.69E+03
83	1.58E+03	6.23E+02	9.36E+02	9.40E-01	2.33E+03
84	1.33E+03	6.59E+02	9.28E+02	1.01E+00	2.53E+03
85	1.28E+03	1.78E+03	9.32E+02	1.09E+00	2.47E+03
86	1.27E+03	7.94E+02	2.33E+02	8.61E-01	2.48E+03
87	1.28E+03	1.26E+03	1.17E+03	9.19E-01	2.34E+03
88	1.26E+03	8.51E+02	3.30E+02	1.32E+00	2.48E+03
89	1.43E+03	9.39E+02	9.84E+02	1.01E+00	2.39E+03
90	1.39E+03	1.13E+03	4.44E+02	9.64E-01	2.51E+03
91	1.36E+03	6.65E+02	1.27E+03	1.04E+00	2.45E+03
92	1.31E+03	1.56E+03	1.26E+03	7.88E-01	2.53E+03
93	1.42E+03	8.76E+02	1.81E+03	1.22E+00	2.48E+03
94	1.20E+03	1.33E+03	6.45E+02	1.00E+00	2.59E+03
95	1.35E+03	1.02E+03	1.18E+03	1.06E+00	2.47E+03
96	1.13E+03	5.95E+02	1.30E+03	8.66E-01	2.44E+03
97	1.25E+03	1.06E+03	7.37E+02	1.14E+00	2.64E+03
98	1.44E+03	1.03E+03	1.22E+03	9.81E-01	2.44E+03
99	1.19E+03	1.04E+03	1.02E+03	1.01E+00	2.62E+03
100	1.35E+03	1.15E+03	1.42E+03	8.83E-01	2.58E+03

網掛けは計算エラー等により除外したケース

ケース No.	\$TPFAIL	\$HFRZSS	\$HFRZZR	\$VFALL	\$TRDFAI
101	1.30E+03	1.05E+03	8.27E+02	1.03E+00	2.41E+03
102	1.29E+03	1.01E+03	1.44E+03	1.00E+00	2.48E+03
103	1.13E+03	1.15E+03	1.22E+03	8.97E-01	2.51E+03
104	1.11E+03	7.31E+02	7.22E+02	9.39E-01	2.48E+03
105	1.12E+03	1.05E+03	9.29E+02	1.17E+00	2.29E+03
106	1.41E+03	8.35E+02	3.78E+02	9.84E-01	2.48E+03
107	1.20E+03	7.57E+02	6.97E+02	8.28E-01	2.51E+03
108	1.50E+03	8.59E+02	1.84E+02	9.56E-01	2.53E+03
109	1.16E+03	8.11E+02	9.04E+02	8.42E-01	2.46E+03
110	1.30E+03	7.97E+02	8.19E+02	1.08E+00	2.56E+03
111	1.20E+03	8.93E+02	6.31E+02	1.18E+00	2.68E+03
112	1.40E+03	8.80E+02	1.03E+03	9.99E-01	2.57E+03
113	1.45E+03	7.02E+02	1.02E+03	9.90E-01	2.58E+03
114	1.33E+03	1.30E+03	1.61E+03	9.37E-01	2.42E+03
115	1.39E+03	5.28E+02	1.07E+03	9.84E-01	2.63E+03
116	1.32E+03	1.10E+03	8.07E+02	9.52E-01	2.57E+03
117	8.94E+02	9.11E+02	1.36E+03	1.13E+00	2.43E+03
118	1.24E+03	1.10E+03	8.94E+02	9.33E-01	2.55E+03
119	1.22E+03	5.50E+02	8.13E+02	1.01E+00	2.52E+03
120	1.29E+03	6.31E+02	1.18E+03	1.26E+00	2.60E+03
121	1.35E+03	8.55E+02	1.39E+03	1.05E+00	2.31E+03
122	1.22E+03	1.09E+03	8.87E+02	1.13E+00	2.51E+03
123	1.31E+03	9.83E+02	6.41E+02	9.47E-01	2.49E+03
124	9.48E+02	8.45E+02	1.04E+03	1.11E+00	2.47E+03
125	1.32E+03	9.94E+02	6.12E+02	1.01E+00	2.42E+03
126	1.37E+03	1.10E+03	1.10E+03	1.08E+00	2.56E+03
127	1.17E+03	1.24E+03	8.51E+02	9.87E-01	2.44E+03
128	1.29E+03	1.06E+03	1.11E+03	1.08E+00	2.72E+03
129	1.21E+03	1.11E+03	6.93E+02	8.56E-01	2.58E+03
130	1.29E+03	1.28E+03	5.99E+02	1.02E+00	2.59E+03
131	1.14E+03	5.47E+02	6.51E+02	1.08E+00	2.62E+03
132	1.61E+03	4.75E+02	1.01E+03	9.23E-01	2.54E+03
133	1.29E+03	9.91E+02	7.21E+02	1.04E+00	2.28E+03
134	1.31E+03	6.01E+02	1.26E+03	1.02E+00	2.62E+03
135	1.44E+03	7.65E+02	5.49E+02	1.00E+00	2.21E+03
136	1.39E+03	1.42E+03	2.80E+02	9.38E-01	2.31E+03
137	1.27E+03	1.13E+03	1.31E+03	1.11E+00	2.42E+03
138	1.31E+03	1.18E+03	1.06E+03	9.97E-01	2.40E+03
139	1.48E+03	6.52E+02	7.02E+02	9.66E-01	2.38E+03
140	1.27E+03	1.07E+03	1.35E+03	8.96E-01	2.55E+03
141	1.09E+03	1.03E+03	1.01E+03	9.32E-01	2.45E+03
142	1.43E+03	1.03E+03	7.43E+02	9.56E-01	2.45E+03
143	1.16E+03	7.59E+02	1.41E+03	1.21E+00	2.52E+03
144	1.28E+03	7.51E+02	1.05E+03	9.16E-01	2.49E+03
145	1.26E+03	5.36E+02	9.71E+02	9.90E-01	2.63E+03
146	1.15E+03	1.22E+03	1.52E+03	7.61E-01	2.50E+03
147	1.23E+03	9.42E+02	1.46E+03	1.11E+00	2.40E+03
148	1.28E+03	9.98E+02	7.76E+02	1.05E+00	2.40E+03
149	1.37E+03	9.62E+02	7.83E+02	1.07E+00	2.61E+03
150	1.34E+03	1.08E+03	1.16E+03	8.34E-01	2.45E+03

網掛けは計算エラー等により除外したケース

ケース No.	\$TPFAIL	\$HFRZSS	\$HFRZZR	\$VFALL	\$TRDFAI
151	1.35E+03	1.22E+03	1.23E+03	1.03E+00	2.46E+03
152	1.03E+03	1.16E+03	1.04E+03	8.42E-01	2.51E+03
153	1.11E+03	1.13E+03	1.20E+03	9.06E-01	2.77E+03
154	1.23E+03	7.17E+02	4.20E+02	9.27E-01	2.41E+03
155	1.27E+03	2.61E+02	1.23E+03	9.77E-01	2.55E+03
156	1.18E+03	1.03E+03	9.46E+02	8.79E-01	2.61E+03
157	1.15E+03	1.11E+03	1.15E+03	9.07E-01	2.36E+03
158	1.22E+03	5.82E+02	1.06E+03	9.25E-01	2.50E+03
159	1.29E+03	1.31E+03	9.67E+02	1.15E+00	2.35E+03
160	1.41E+03	7.91E+02	4.58E+02	1.00E+00	2.50E+03
161	1.40E+03	1.45E+03	5.31E+02	9.73E-01	2.37E+03
162	1.07E+03	1.14E+03	1.12E+03	8.87E-01	2.35E+03
163	1.16E+03	6.56E+02	4.78E+02	9.09E-01	2.32E+03
164	1.43E+03	1.22E+03	8.67E+02	9.54E-01	2.54E+03
165	1.14E+03	1.39E+03	9.48E+02	1.01E+00	2.54E+03
166	1.36E+03	1.41E+03	8.39E+02	9.44E-01	2.61E+03
167	1.30E+03	1.34E+03	9.89E+02	9.16E-01	2.63E+03
168	1.37E+03	1.39E+03	8.15E+02	9.76E-01	2.51E+03
169	1.33E+03	7.71E+02	1.32E+03	9.67E-01	2.50E+03
170	1.30E+03	8.43E+02	1.25E+03	1.02E+00	2.55E+03
171	1.12E+03	8.31E+02	8.97E+02	9.94E-01	2.34E+03
172	1.45E+03	8.24E+02	6.85E+02	1.07E+00	2.53E+03
173	1.30E+03	1.67E+03	1.09E+03	8.19E-01	2.43E+03
174	1.22E+03	7.79E+02	8.98E+02	1.03E+00	2.61E+03
175	1.20E+03	8.83E+02	1.21E+03	9.86E-01	2.56E+03
176	1.40E+03	9.22E+02	1.54E+03	1.15E+00	2.42E+03
177	1.35E+03	5.71E+02	7.47E+02	1.03E+00	2.55E+03
178	1.29E+03	1.27E+03	1.47E+03	9.61E-01	2.43E+03
179	1.26E+03	9.14E+02	9.59E+02	9.65E-01	2.35E+03
180	1.38E+03	1.70E+03	7.89E+02	8.58E-01	2.43E+03
181	1.12E+03	1.37E+03	1.02E+03	1.12E+00	2.47E+03
182	1.21E+03	1.50E+03	8.63E+02	9.92E-01	2.47E+03
183	1.13E+03	1.08E+03	7.98E+02	1.03E+00	2.52E+03
184	1.48E+03	9.52E+02	6.84E+02	9.03E-01	2.62E+03
185	1.20E+03	1.06E+03	8.74E+02	9.26E-01	2.54E+03
186	1.34E+03	1.14E+03	1.59E+03	1.10E+00	2.44E+03
187	1.46E+03	9.72E+02	8.33E+02	1.10E+00	2.52E+03
188	1.19E+03	1.00E+03	4.98E+02	8.24E-01	2.55E+03
189	1.24E+03	9.87E+02	3.94E+02	1.09E+00	2.38E+03
190	1.15E+03	7.46E+02	8.40E+02	9.69E-01	2.45E+03
191	1.49E+03	4.86E+02	1.24E+03	1.13E+00	2.46E+03
192	1.38E+03	9.75E+02	5.37E+02	9.83E-01	2.55E+03
193	1.72E+03	1.16E+03	1.55E+03	1.01E+00	2.50E+03
194	1.38E+03	1.26E+03	9.19E+02	1.17E+00	2.52E+03
195	1.39E+03	1.47E+03	7.58E+02	9.42E-01	2.57E+03
196	1.33E+03	8.33E+02	1.43E+03	9.37E-01	2.44E+03
197	1.39E+03	9.80E+02	1.09E+03	9.59E-01	2.70E+03
198	1.24E+03	1.14E+03	6.78E+02	1.07E+00	2.61E+03
199	1.42E+03	1.08E+03	1.38E+03	1.08E+00	2.41E+03
200	1.17E+03	6.14E+02	1.12E+03	9.10E-01	2.48E+03

網掛けは計算エラー等により除外したケース

ケース No.	\$TPFAIL	\$HFRZSS	\$HFRZZR	\$VFALL	\$TRDFAI
201	1.05E+03	1.47E+02	1.14E+03	9.71E-01	2.45E+03
202	1.42E+03	9.25E+02	1.12E+03	9.21E-01	2.36E+03
203	1.24E+03	1.02E+03	4.73E+02	9.88E-01	2.64E+03
204	1.34E+03	1.20E+03	6.07E+02	1.02E+00	2.60E+03
205	1.34E+03	9.89E+02	9.79E+02	1.19E+00	2.56E+03
206	1.46E+03	8.60E+02	1.14E+03	1.03E+00	2.46E+03
207	1.44E+03	5.73E+02	5.80E+02	9.34E-01	2.53E+03
208	1.27E+03	1.17E+03	9.40E+02	1.00E+00	2.67E+03
209	1.35E+03	9.00E+02	1.18E+03	9.58E-01	2.71E+03
210	1.21E+03	5.24E+02	8.78E+02	1.09E+00	2.36E+03
211	1.51E+03	1.37E+03	1.24E+03	1.12E+00	2.37E+03
212	1.18E+03	1.17E+03	7.06E+02	1.15E+00	2.39E+03
213	1.05E+03	5.87E+02	8.92E+02	1.09E+00	2.41E+03
214	1.10E+03	1.05E+03	6.65E+02	1.09E+00	2.41E+03
215	1.25E+03	9.60E+02	1.00E+03	1.18E+00	2.39E+03
216	1.25E+03	1.12E+03	7.81E+02	9.46E-01	2.56E+03
217	1.28E+03	1.20E+03	1.45E+03	1.08E+00	2.38E+03
218	1.19E+03	1.09E+03	8.43E+02	9.88E-01	2.30E+03
219	1.33E+03	8.90E+02	9.82E+02	9.04E-01	2.47E+03
220	1.47E+03	1.24E+03	9.95E+02	1.10E+00	2.57E+03
221	1.36E+03	7.84E+02	1.19E+03	9.13E-01	2.61E+03
222	1.23E+03	9.44E+02	9.91E+02	1.15E+00	2.67E+03
223	1.30E+03	1.09E+03	1.31E+03	9.80E-01	2.34E+03
224	1.08E+03	3.77E+02	7.06E+02	1.10E+00	2.41E+03
225	1.31E+03	9.51E+02	8.71E+02	1.07E+00	2.42E+03
226	1.09E+03	1.19E+03	1.07E+03	1.07E+00	2.44E+03
227	1.25E+03	7.38E+02	1.69E+03	9.18E-01	2.43E+03
228	1.26E+03	1.12E+03	1.84E+03	9.45E-01	2.53E+03
229	1.30E+03	7.42E+02	8.56E+02	1.06E+00	2.48E+03
230	1.38E+03	4.53E+02	7.55E+02	1.04E+00	2.43E+03
231	1.18E+03	6.88E+02	1.28E+03	8.64E-01	2.50E+03
232	1.22E+03	1.21E+03	1.03E+03	1.07E+00	2.52E+03
233	1.23E+03	1.30E+03	7.69E+02	1.05E+00	2.57E+03
234	1.29E+03	7.87E+02	1.17E+03	1.07E+00	2.56E+03
235	1.47E+03	1.05E+03	1.25E+03	9.28E-01	2.28E+03
236	1.18E+03	1.13E+03	7.35E+02	9.66E-01	2.59E+03
237	1.33E+03	9.10E+02	1.16E+03	1.20E+00	2.55E+03
238	1.11E+03	7.11E+02	6.58E+02	1.04E+00	2.54E+03
239	1.16E+03	4.04E+02	7.30E+02	1.02E+00	2.35E+03
240	1.21E+03	8.08E+02	1.64E+03	1.01E+00	2.36E+03
241	1.10E+03	1.24E+03	5.59E+02	8.51E-01	2.41E+03
242	1.19E+03	1.46E+03	1.37E+03	9.11E-01	2.38E+03
243	1.28E+03	8.53E+02	1.30E+03	8.88E-01	2.50E+03
244	1.23E+03	1.21E+03	1.29E+03	1.14E+00	2.39E+03
245	1.19E+03	1.01E+03	1.03E+03	9.78E-01	2.45E+03
246	1.34E+03	8.21E+02	5.93E+02	9.74E-01	2.33E+03
247	1.23E+03	7.28E+02	9.23E+02	8.30E-01	2.49E+03
248	1.38E+03	1.58E+03	9.14E+02	1.00E+00	2.53E+03
249	1.31E+03	1.16E+03	1.07E+03	1.01E+00	2.43E+03
250	1.13E+03	1.40E+03	1.37E+03	9.98E-01	2.40E+03

網掛けは計算エラー等により除外したケース

ケース No.	\$TPFAIL	\$HFRZSS	\$HFRZZR	\$VFALL	\$TRDFAI
251	1.12E+03	1.03E+03	1.08E+03	8.45E-01	2.66E+03
252	1.21E+03	8.72E+02	1.63E+03	1.05E+00	2.54E+03
253	1.41E+03	5.09E+02	7.12E+02	9.08E-01	2.57E+03
254	1.34E+03	1.29E+03	1.39E+03	1.06E+00	2.54E+03
255	1.38E+03	1.19E+03	7.17E+02	9.63E-01	2.58E+03
256	1.17E+03	3.07E+02	8.47E+02	9.31E-01	2.60E+03
257	1.04E+03	1.30E+03	1.19E+03	1.05E+00	2.53E+03
258	1.36E+03	7.67E+02	1.03E+03	8.90E-01	2.47E+03
259	1.34E+03	9.45E+02	8.89E+02	9.28E-01	2.42E+03
260	1.14E+03	1.57E+03	8.79E+02	1.06E+00	2.49E+03
261	1.33E+03	8.18E+02	1.07E+03	9.43E-01	2.60E+03
262	1.32E+03	1.15E+03	1.20E+03	1.03E+00	2.48E+03
263	1.26E+03	1.32E+03	1.53E+03	1.02E+00	2.42E+03
264	1.33E+03	9.32E+02	1.04E+03	1.05E+00	2.47E+03
265	1.43E+03	1.17E+03	1.12E+03	8.10E-01	2.44E+03
266	1.00E+03	1.12E+03	6.56E+02	1.09E+00	2.60E+03
267	1.34E+03	1.53E+03	1.11E+03	1.10E+00	2.40E+03
268	1.27E+03	1.48E+03	1.15E+03	7.07E-01	2.43E+03
269	1.55E+03	7.34E+02	7.61E+02	9.51E-01	2.52E+03
270	1.23E+03	1.07E+03	1.22E+03	1.06E+00	2.56E+03
271	1.27E+03	1.04E+03	1.23E+03	1.14E+00	2.49E+03
272	1.34E+03	1.20E+03	1.11E+03	9.60E-01	2.54E+03
273	1.21E+03	6.37E+02	7.94E+02	1.12E+00	2.51E+03
274	1.44E+03	6.92E+02	1.01E+03	1.06E+00	2.49E+03
275	1.50E+03	1.33E+03	9.73E+02	9.75E-01	2.38E+03
276	1.06E+03	1.11E+03	1.06E+03	1.03E+00	2.40E+03
277	1.27E+03	1.02E+03	1.16E+03	9.62E-01	2.65E+03
278	1.24E+03	1.49E+03	4.35E+02	7.88E-01	2.37E+03
279	1.37E+03	1.96E+03	1.17E+03	1.06E+00	2.52E+03
280	1.22E+03	1.38E+03	1.21E+03	1.04E+00	2.63E+03
281	1.17E+03	6.76E+02	9.01E+02	1.16E+00	2.42E+03
282	1.23E+03	9.63E+02	9.56E+02	9.00E-01	2.65E+03
283	1.28E+03	1.65E+03	1.08E+03	1.01E+00	2.66E+03
284	1.20E+03	8.66E+02	5.51E+02	1.16E+00	2.47E+03
285	1.19E+03	1.43E+03	1.10E+03	9.68E-01	2.49E+03
286	1.36E+03	1.29E+03	9.11E+02	1.11E+00	2.50E+03
287	1.32E+03	1.04E+03	1.48E+03	9.30E-01	2.37E+03
288	1.28E+03	1.52E+03	9.86E+02	1.12E+00	2.33E+03
289	1.37E+03	3.99E+02	7.75E+02	8.68E-01	2.49E+03
290	1.03E+03	6.18E+02	9.42E+02	1.04E+00	2.46E+03
291	1.51E+03	9.66E+02	1.28E+03	1.02E+00	2.66E+03
292	1.24E+03	6.40E+02	7.26E+02	1.01E+00	2.61E+03
293	1.30E+03	1.32E+03	9.75E+02	1.05E+00	2.56E+03
294	1.54E+03	8.47E+02	1.05E+03	8.98E-01	2.44E+03
295	1.07E+03	1.14E+03	1.27E+03	1.07E+00	2.54E+03
296	1.40E+03	6.97E+02	5.74E+02	1.19E+00	2.53E+03
297	1.17E+03	7.54E+02	9.26E+02	8.49E-01	2.43E+03
298	1.46E+03	7.74E+02	6.69E+02	8.73E-01	2.58E+03
299	1.18E+03	9.49E+02	1.46E+03	9.02E-01	2.34E+03
300	1.49E+03	7.77E+02	8.69E+02	1.04E+00	2.64E+03

網掛けは計算エラー等により除外したケース

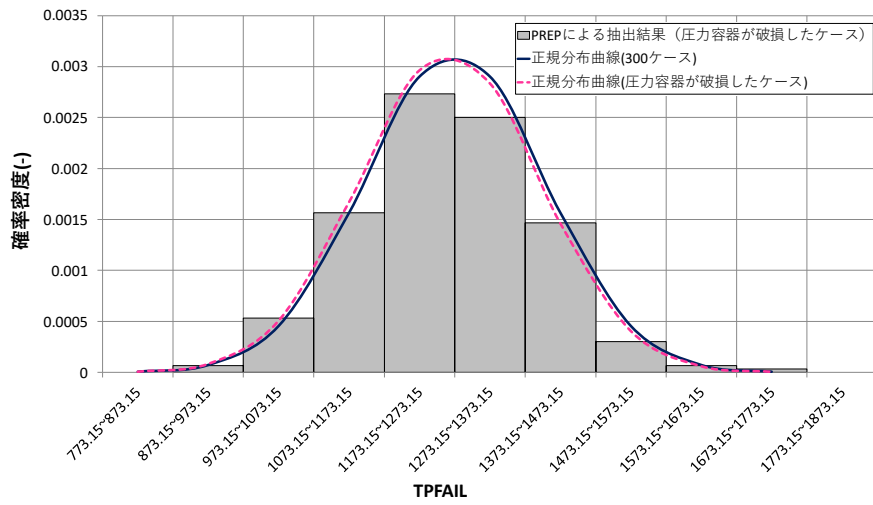


図 4.3 TPFail の確率分布

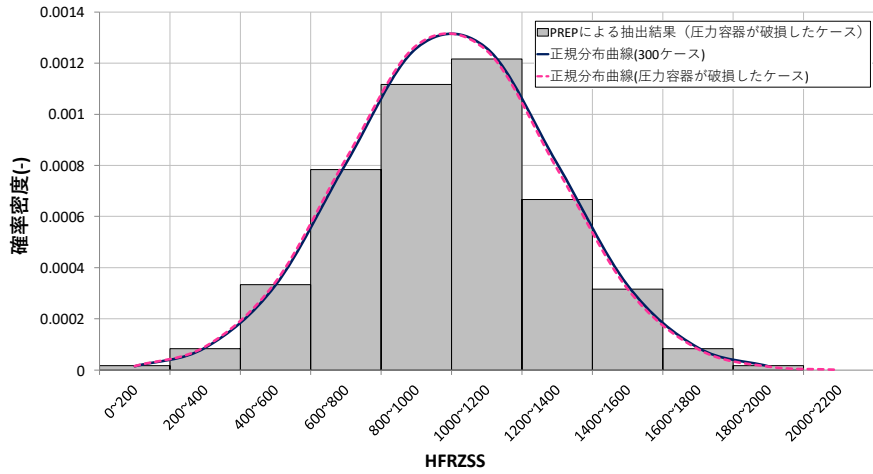


図 4.4 HFRZSS の確率分布

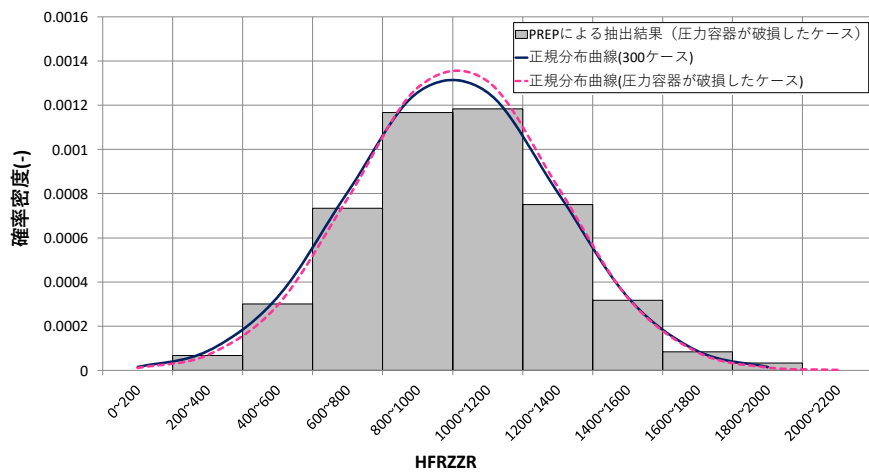


図 4.5 HFRZZR の確率分布



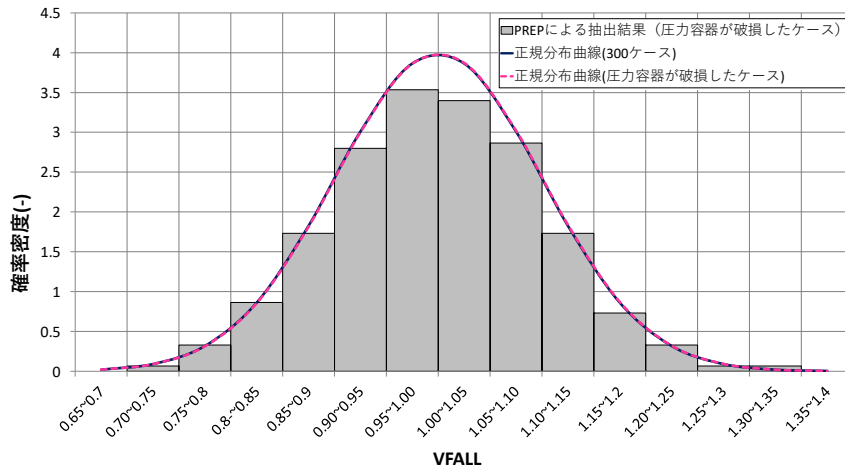


図 4.6 VFALL の確率分布

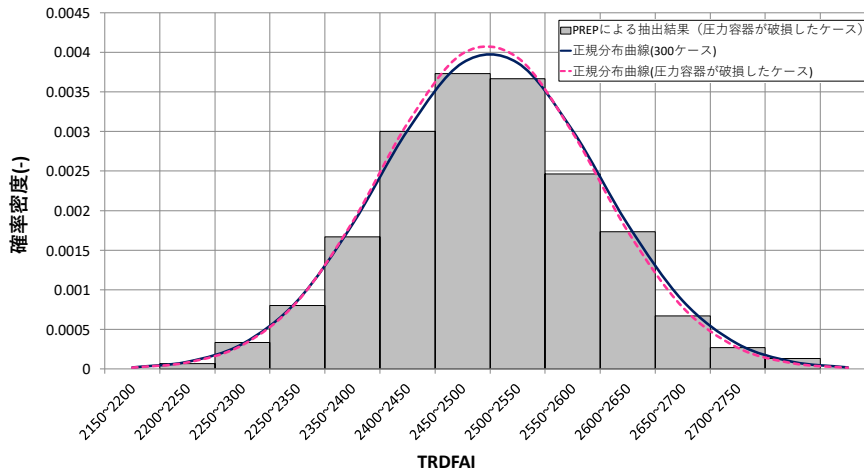


図 4.7 TRDFAI の確率分布

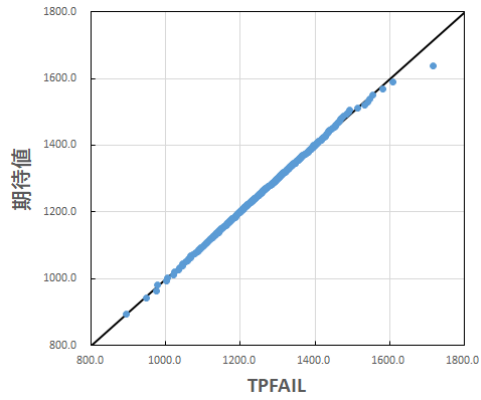


図 4.8 正規 Q-Q プロット (TPFAIL)

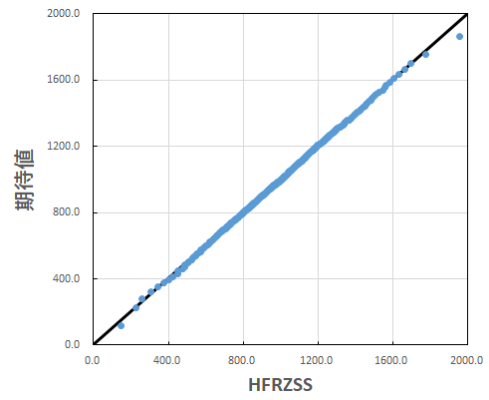


図 4.9 正規 Q-Q プロット (HFRZSS)

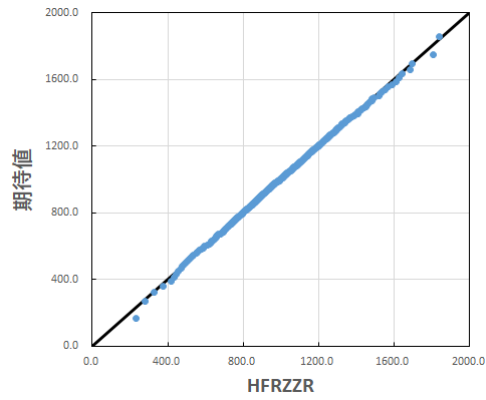


図 4.10 正規 Q-Q プロット (HFRZZR)

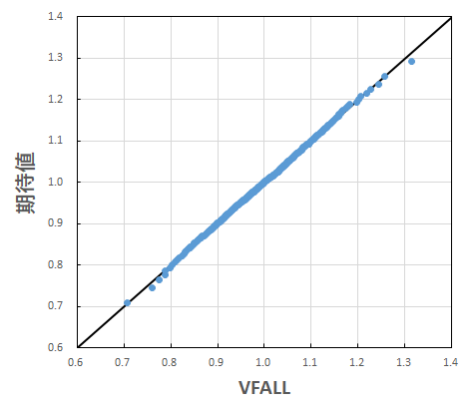


図 4.11 正規 Q-Q プロット (VFALL)

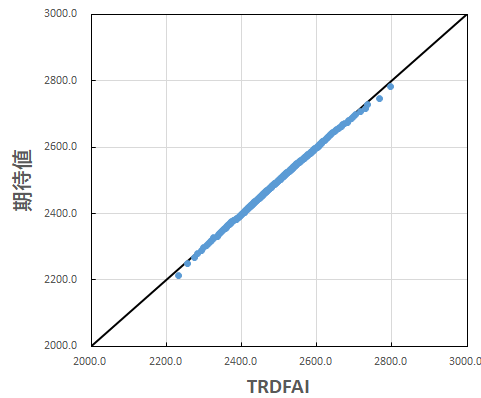


図 4.12 正規 Q-Q プロット (TRDFAI)

#### 4.1.4 MELCOR 解析結果からの JASMINE 入力パラメータの抽出

JASMINE 解析で不確かさを考慮するパラメータとして、以下の 4 つを選定した。

- ① 格納容器への熔融炉心落下質量（熔融炉心落下継続時間内の累積量）
- ② 熔融炉心落下継続時間
- ③ 圧力容器破損口面積
- ④ 熔融炉心温度

ここで、②熔融炉心落下継続時間は、熔融炉心の落下を開始した時間からの落下流量が 1t/min 未満になるまでの時間、③圧力容器破損口面積は②の時間内での平均値、④熔融炉心温度は熔融炉心の落下開始時間での値とした。

圧力容器破損に至った 276 ケースの MELCOR 解析結果から、上記の 4 つのパラメータを抽出した。その確率密度分布を図 4.13 熔融炉心落下質量の確率密度分布から図 4.17 に示す。なお、1 ケースの MELCOR 解析の結果を 1 ケースの JASMINE 入力に変換する方法も考えられるが、今回は JASMINE 解析のケース数を低減するため、MELCOR 解析結果を一旦確率分布に置き換えることとした。

MELCOR 解析で得られた熔融炉心温度は約 1500K から 3100K 付近まで分布しており、コリウムの融点 (2309.1 K) を下回る温度領域において熔融炉心は  $\text{UO}_2$  から成る固相と主として熔融金属から成る液相の固液二相状態にあると考えられる。JASMINE コードは固液二相状態に対応しているが、それに応じた物性値を JASMINE 解析に入力する必要がある。組成に応じた物性値をケース毎に設定することが現状では困難であるため、今回の JASMINE 解析に与える熔融炉心温度については、コリウム融点以上に限定することとした。

エラー! 参照元が見つかりません。に各変数間の相関係数を示す。圧力容器から放出された熔融炉心量(\$MMELT)と熔融炉心落下継続時間(\$DROPDUR)の間に比較的大きな相関が見られた。

JASMINE では熔融炉心落下質量は直接設定されず、熔融ジェット速度の時刻テーブルを設定する方式になっている。また、熔融ジェット速度の時系列データはそのままでは確率的に分布するパラメータとして扱うことは困難である。そこで、熔融ジェット速度  $v$  は落下計測時間内で一定値として次式より計算した値を使用した。

$$v = \frac{M}{t_{drop} A \rho}$$

ここで、

- $M$  : 溶融炉心落下質量  
 $t_{drop}$  : 溶融炉心落下継続時間  
 $A$  : 圧力容器破損口面積  
 $\rho$  : 溶融炉心の密度 (JASMINE コードに組み込まれた値)

また、破損口直径 $d$ は圧力容器破損口面積 $A$ から次式より計算し、JASMINE の入力値として使用した。

$$d = 2\sqrt{A/\pi}$$

表 4.4 各変数間の相関係数

	\$TMELT	\$DROPDUR	\$MMELT	\$DROPARA
\$TMELT		-0.09467	0.074846	0.034175448
\$DROPDUR			0.629096	0.084535194
\$MMELT				0.250809519
\$DROPARA				

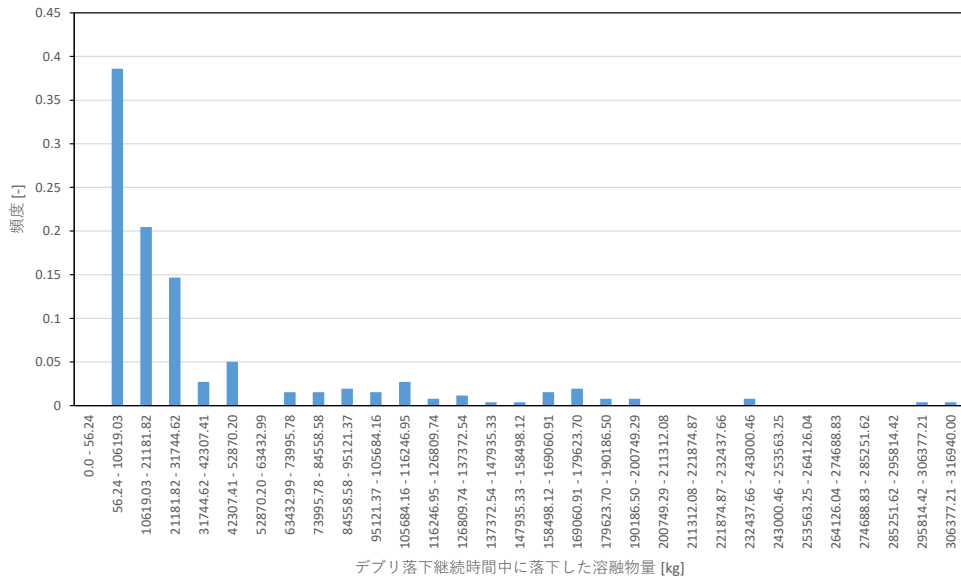


図 4.13 溶融炉心落下質量の確率密度分布

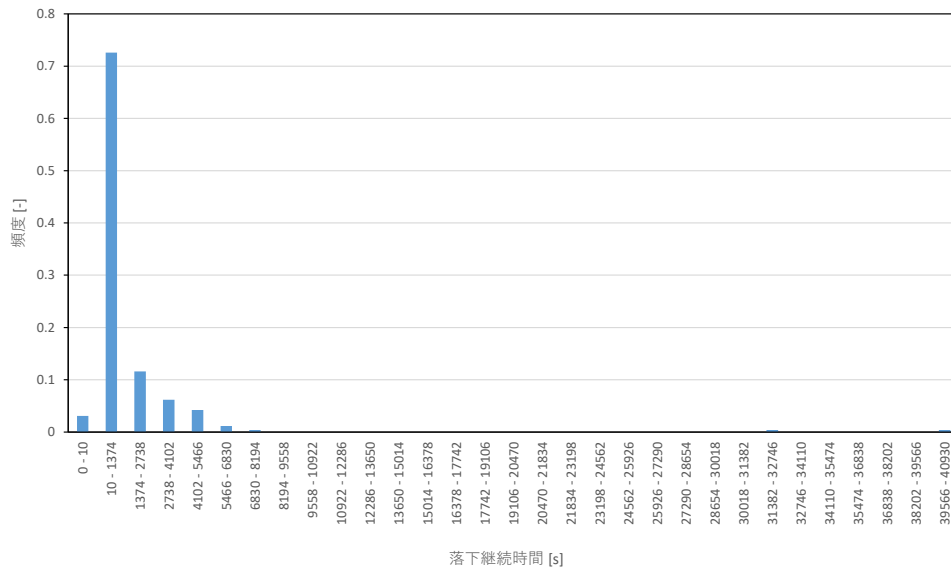


図 4.14 落下継続時間の確率密度分布

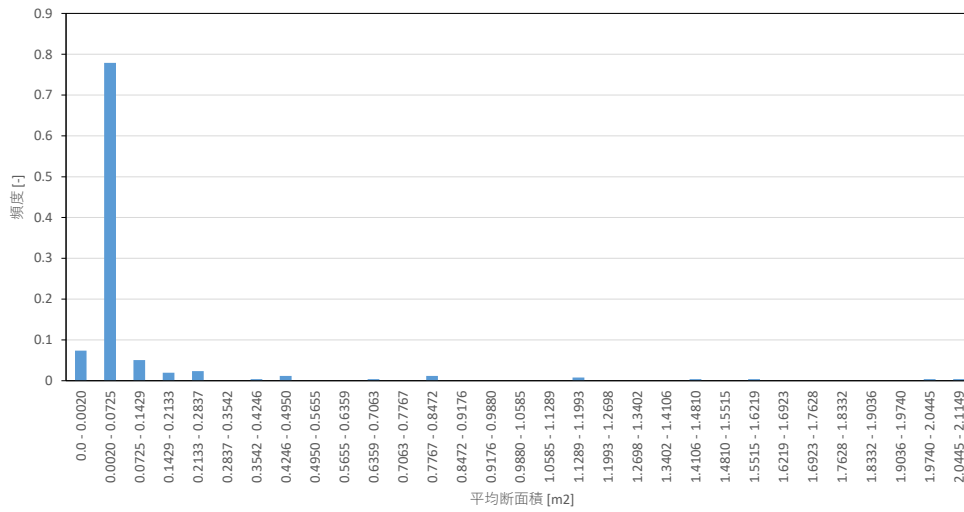


図 4.15 落下断面積の確率密度分布

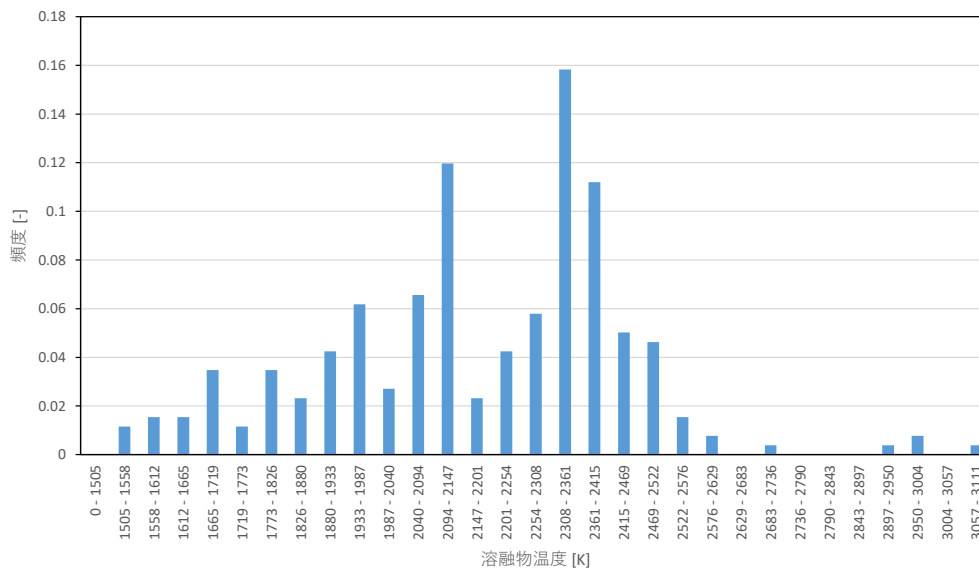


図 4.16 溶融炉心温度の確率密度分布  
(JASMINE 入力パラメータの決定には使用しない)

## 4.2 JASMINE コードによる冷却成功確率解析

### 4.2.1 JASMINE 解析条件

平成 30 年度と同様に出力 820MW の Mark-I 改良型格納容器を有する BWR プラントを仮定し、格納容器床（ペデスタル）の直径、上部自由空間容積及び溶融炉心落下質量の最大値を決定した。主要な実機解析の条件を表 4.6 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。格納容器内の初期圧力は大気圧とした。

その他、格納容器床材コンクリート組成、溶融炉心の組成、溶融炉心の液相線温度、固相線温度及び融点、溶融炉心粒子の入力、溶融炉心プールのボイド率、粒子の粒径と溶融炉心プールへの堆積、格納容器内の初期水位の各条件は平成 30 年度と同じである。

不確かさを考慮する 4 つのパラメータのセットを PREP コードに組み込まれている LHS 法を用いて作成した。ここで、溶融炉心温度については 4.1.4 項で述べたようにコリウム融点 (2309.1 K) 以上のデータを使用することとし、コリウム融点から MELCOR 解析で得られた最高温度までの範囲で一様分布を仮定した。それ以外の 3 パラメータはワイブル分布で近似できるとした。ワイブル分布のパラメータはそれぞれの度数分布にワイブル分布曲線を最小二乗法によりフィッティングさせて求めた。以上の方法で文献[4.5]に基づき 59 組の入力パラメータを作成した。

溶融炉心の発熱量を 100 W/kg とし、JASMINE 入力ファイルを設定した。PREP コードで入力する確率分布とパラメータを表 4.7 のように設定した。ここで、これら溶融炉心落下継続時間 (\$DROPDUR) と圧力容器から放出された溶融炉心量 (\$MMELT) 間については表 4.5 に示した通り相関係数 0.629096 を設定した。

溶融炉心の速度は溶融炉心落下質量、原子炉圧力容器破損の開口直径及び落下継続時間から求めた。その分布を図 4.20 に示す。JASMINE コードでは計算の安定性のため、溶融炉心の初速を 1.0 m/s 以上に設定する必要がある。そこで、この分布をワイブル分布で近似できるとし、最小値を 1.0 m/s に設定し、改めてパラメータセットを抽出して JASMINE 解析への入力とした。

なお、本解析に使用した JASMINE コードは平成 30 年度に開発したバージョンであり、3 章で示した拡がりモデルに関する本年度の改良は反映されていない。

表 4.6 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 <sup>3</sup>
初期圧力	0.1 MPa ( $T_{\text{sat}} = 372.76 \text{ K}$ )
溶融炉心落下継続時間	溶融炉心落下質量・開口面積・初速から計算
溶融炉心放出高さ	床から 4 m
溶融炉心発熱量	100 W/kg
原子炉格納容器内の冷却水温	299.2 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 <sup>2</sup>
クラスト拘束条件	流動、所定の厚みで固定

表 4.7 PREP 用入力ファイル

パラメータ	記号	確率分布
①溶融炉心落下質量	\$MMELT	ワイブル分布 $\alpha: 26185.312, \beta: 0.6142285,$ $\gamma: 56.239$
②溶融炉心落下継続時間	\$DROPDUR	ワイブル分布 $\alpha: 801.25187, \beta: 0.6278162,$ $\gamma: 10.0,$
③圧力容器破損口面積	\$DROPAREA	ワイブル分布 $\alpha: 0.0059794, \beta: 0.2643251,$ $\gamma: 0.00203,$
④溶融炉心温度	\$TMELT	一様分布 下限: 2309.1, 上限: 3113.0

ワイブル分布のパラメータはそれぞれ  $\alpha$  : 形状パラメータ、 $\beta$  : 尺度パラメータ、 $\gamma$  : 最小値



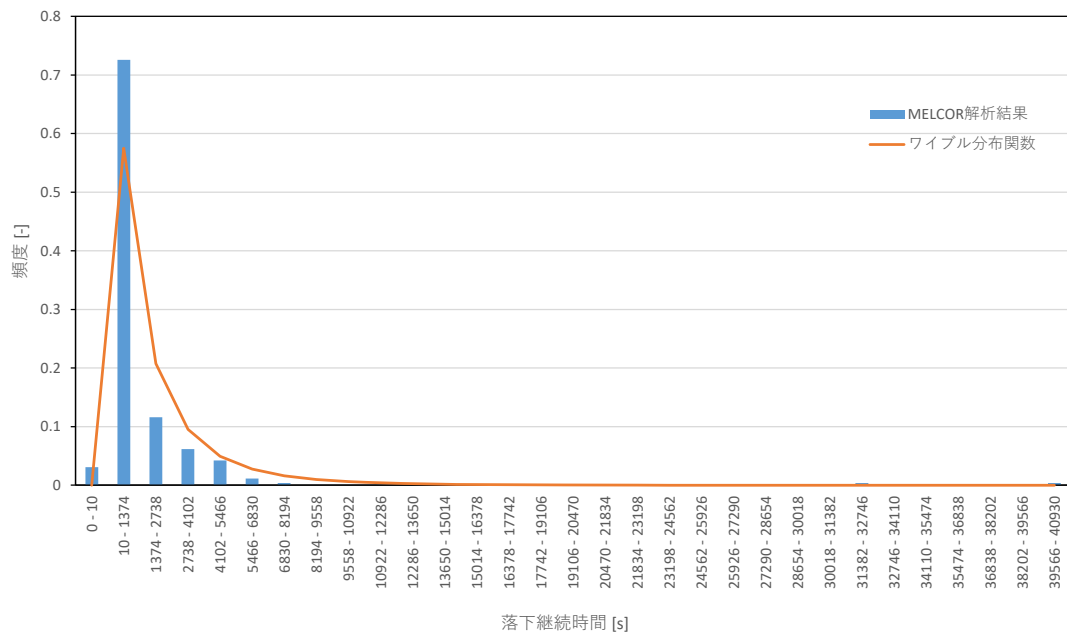


図 4.17 落下継続時間の確率密度分布

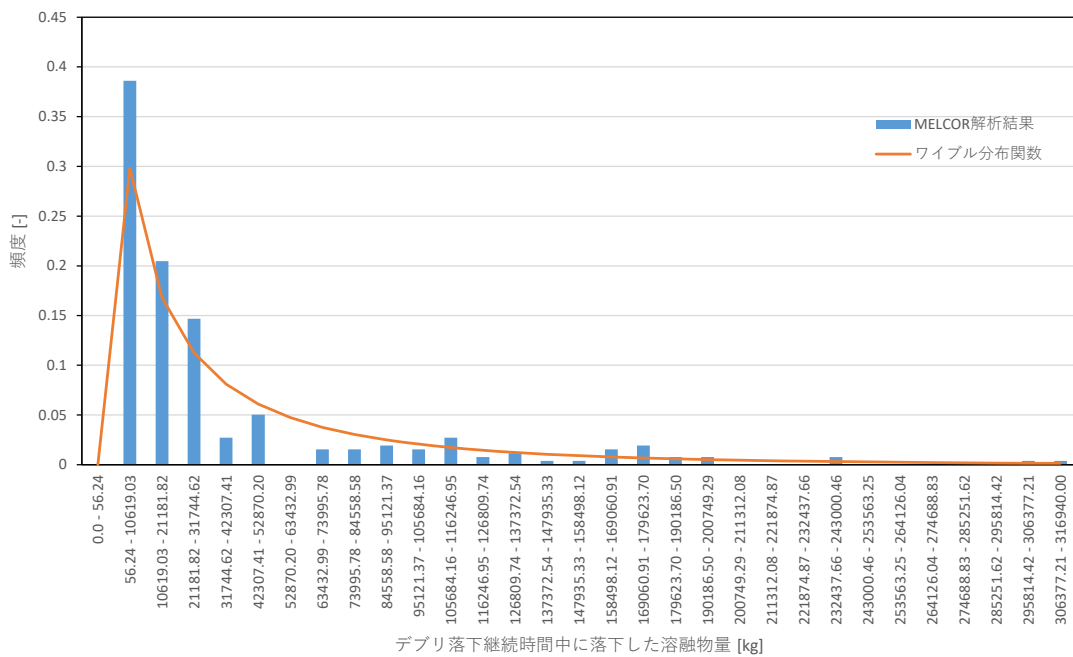


図 4.18 溶融炉心落下質量の確率密度分布

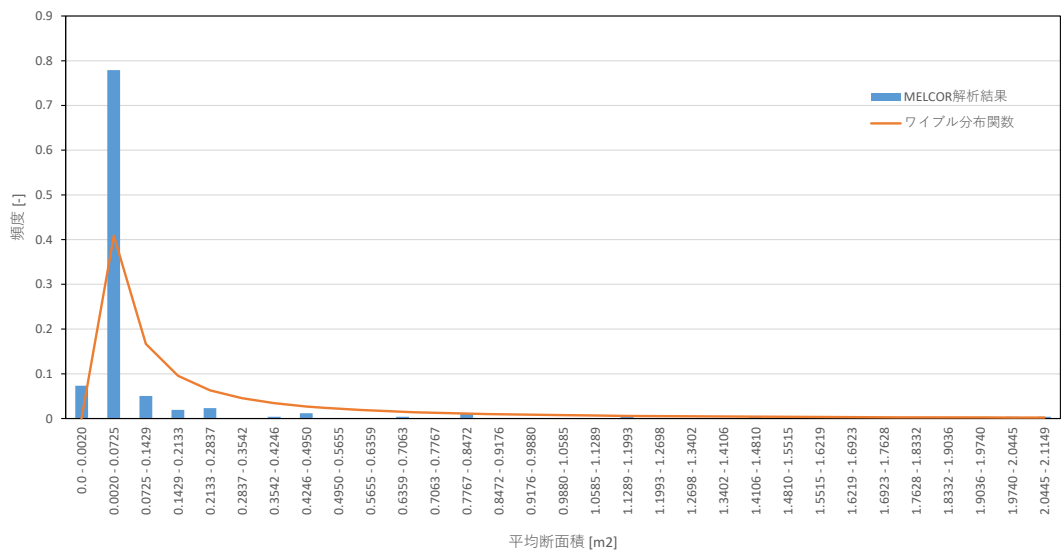


図 4.19 圧力容器破損口面積の確率密度分布

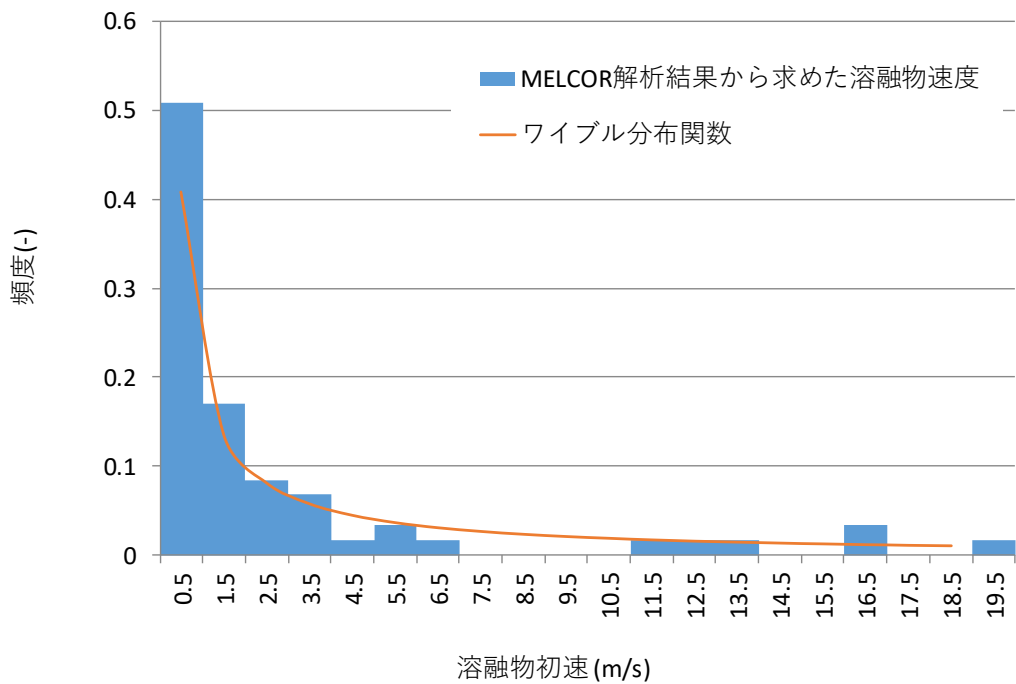


図 4.20 溶融炉心落下時の初速の確率密度分布

#### 4.2.2 JASMINE 解析入力パラメータの確率分布

抽出した条件を JASMINE 解析の入力パラメータに変換したものを表 4.8 に示す。

表 4.8 JASMINE 用入力パラメータセット

No.	\$DROPDUR	\$MMELT	\$TMELT	\$JETDIA	\$DROPVEL
1	3.13E+00	6.08E+01	2818	5.41E-02	1.189
2	2.63E+02	9.84E+03	2417	8.17E-02	1.000
3	1.69E+03	2.51E+04	2629	5.15E-02	1.001
4	7.83E+01	2.68E+03	2399	5.08E-02	2.370
5	1.18E+01	2.23E+02	2711	5.81E-02	1.000
6	1.37E+02	2.01E+03	2598	5.12E-02	1.000
7	1.00E+02	4.40E+03	2783	8.51E-02	1.080
8	2.05E+02	2.99E+03	2464	5.10E-02	1.000
9	1.00E+03	1.46E+04	2923	5.09E-02	1.001
10	5.48E+01	7.38E+03	2879	1.53E-01	1.031
11	7.25E+02	2.11E+04	2320	7.12E-02	1.023
12	1.37E+02	3.14E+04	2412	1.98E-01	1.044
13	9.67E+02	1.54E+04	2578	5.33E-02	1.005
14	8.40E+03	1.21E+05	2340	5.08E-02	1.000
15	5.45E+02	8.80E+03	2858	5.35E-02	1.006
16	1.17E+02	1.93E+04	2470	1.71E-01	1.000
17	1.09E+02	1.66E+04	2998	1.64E-01	1.004
18	1.91E+02	5.73E+03	2605	7.33E-02	1.000
19	1.11E+02	3.84E+03	2515	7.86E-02	1.000
20	1.89E+03	3.50E+04	2735	5.10E-02	1.271
21	4.59E+02	2.33E+04	2682	9.53E-02	1.000
22	2.17E+02	3.38E+03	2523	5.22E-02	1.025
23	4.51E+01	1.25E+04	2670	1.96E-01	1.286
24	4.86E+00	7.02E+01	2558	5.08E-02	1.000
25	5.41E+01	1.32E+03	2743	6.61E-02	1.000
26	1.41E+01	3.96E+02	2905	6.77E-02	1.097
27	1.49E+03	3.93E+04	2871	6.86E-02	1.000
28	3.75E+01	1.16E+03	2573	7.42E-02	1.003
29	9.43E+02	1.37E+04	3053	5.08E-02	1.001
30	9.88E+02	1.43E+04	3062	5.08E-02	1.003
31	6.50E+02	1.09E+04	2383	5.48E-02	1.000

No.	\$DROPDUR	\$MMELT	\$TMELT	\$JETDIA	\$DROPVEL
32	1.11E+01	6.43E+02	2941	1.02E-01	1.002
33	2.02E+02	2.38E+04	3036	1.45E-01	1.008
34	3.52E+01	5.41E+03	2704	1.60E-01	1.067
35	2.04E+03	4.68E+04	3101	6.41E-02	1.000
36	3.28E+03	6.74E+04	2811	6.03E-02	1.009
37	1.46E+03	7.15E+04	2455	5.53E-02	2.876
38	4.94E+02	9.20E+03	2887	5.45E-02	1.120
39	8.32E+02	1.81E+04	2800	6.20E-02	1.012
40	2.68E+03	4.35E+04	2343	5.25E-02	1.054
41	3.77E+02	1.30E+04	2445	7.70E-02	1.042
42	4.95E+03	7.68E+04	2548	5.18E-02	1.035
43	5.58E+02	6.05E+04	2692	1.39E-01	1.001
44	2.11E+01	3.13E+02	2753	5.13E-02	1.004
45	1.16E+03	1.68E+04	2948	5.08E-02	1.000
46	2.47E+03	5.45E+04	2494	5.09E-02	1.522
47	2.75E+02	2.06E+04	2896	1.16E-01	1.000
48	2.33E+01	4.86E+02	2913	6.11E-02	1.000
49	5.22E+01	7.70E+02	2987	5.13E-02	1.000
50	7.56E+01	6.04E+03	2899	1.20E-01	1.000
51	2.18E+03	3.80E+04	2560	5.59E-02	1.000
52	1.20E+02	2.32E+03	2955	5.87E-02	1.002
53	7.71E+01	5.14E+03	2357	1.08E-01	1.012
54	8.72E+00	9.47E+02	2479	5.08E-02	7.515
55	1.29E+01	1.89E+02	2789	5.08E-02	1.016
56	4.59E+02	6.65E+03	3083	5.09E-02	1.000
57	5.38E+01	4.25E+03	2446	5.72E-02	4.305
58	5.80E+03	8.46E+04	2333	5.11E-02	1.000
59	2.82E+03	4.16E+04	2977	5.10E-02	1.014

### 4.2.3 JASMINE 解析の結果

JASMINE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4.9、表4.10及び表4.11に示す。それぞれ、原子炉格納容器内初期水位が 0.5 m、1.0 m 及び 2.0 m の条件に対する結果を示す。なお、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ため、表4.9から表4.11では中心角  $2\pi$  rad の領域に換算したデブリ質量を示した。

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  $M_c(\text{kg})$  及びアグロメレーションデブリ質量  $M_a(\text{kg})$  より円筒の体積  $V(\text{m}^3)$  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  $R_c(\text{m})$  より、円筒の高さ（すなわちデブリ堆積高さ） $h_d(\text{m})$  を次式で得る。

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

表 4.9 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	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)	拡がり 半径 (m)	溶融炉心 堆積高さ (m)
1	0.195	0.00	59.7	0.45	0.012
2	0.204	0.00	10002.8	2.73	0.051
3	0.371	0.00	24718.1	3.00	0.107
4	0.216	0.00	2761.5	1.62	0.039
5	0.156	0.00	220.3	0.75	0.015
6	0.228	0.00	1986.1	1.61	0.030
7	0.209	0.00	4388.8	2.04	0.040
8	0.289	0.00	2956.9	1.65	0.042
9	0.319	0.00	14501.6	3.00	0.062
10	0.131	0.00	7665.5	3.00	0.032
11	0.363	0.00	22770.3	2.85	0.100
12	0.583	0.00	33112.4	3.00	0.134
13	0.391	0.00	15349.8	3.00	0.066
14	0.401	0.00	113160.2	3.00	0.518
15	0.321	0.00	8721.1	2.64	0.048
16	0.351	0.00	19352.2	3.00	0.082
17	0.180	0.00	16782.4	3.00	0.071
18	0.239	0.00	5700.7	2.23	0.044
19	0.270	0.00	3815.2	1.91	0.041
20	0.213	0.00	34394.2	3.00	0.149
21	0.410	0.00	23316.9	3.00	0.100
22	0.234	0.00	3347.1	1.81	0.039
23	0.682	0.00	12842.8	3.00	0.053
24	0.242	0.00	68.9	0.46	0.013
25	0.209	0.00	1310.7	1.19	0.036
26	0.178	0.00	393.1	0.82	0.023
27	0.413	0.00	37516.9	3.00	0.168
28	0.137	0.00	1147.9	1.17	0.033
29	0.391	0.00	13584.2	3.00	0.058
30	0.312	0.00	14262.8	3.00	0.061

表 4.9 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	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)	拡がり 半径 (m)	デブリ 堆積高さ (m)
31	0.348	0.00	11347.4	2.72	0.057
32	0.197	0.00	659.7	1.29	0.015
33	0.585	0.00	24020.6	3.00	0.102
34	0.121	0.00	5667.4	3.00	0.023
35	0.329	0.00	43215.7	3.00	0.200
36	0.389	0.00	59998.1	3.00	0.288
37	0.349	0.00	66287.6	3.00	0.305
38	0.405	0.00	9148.3	2.73	0.048
39	0.409	0.00	18083.0	3.00	0.077
40	0.260	0.00	45326.9	3.00	0.186
41	0.267	0.00	12974.8	3.00	0.056
42	0.322	0.00	66853.1	3.00	0.328
43	0.469	0.00	60356.3	3.00	0.258
44	0.239	0.00	308.4	0.95	0.013
45	0.395	0.00	16719.6	3.00	0.072
46	0.444	0.00	50454.0	3.00	0.233
47	0.391	0.00	20659.1	3.00	0.088
48	0.166	0.00	481.1	0.84	0.026
49	0.250	0.00	762.8	1.55	0.012
50	0.192	0.00	6075.8	3.00	0.026
51	0.284	0.00	37089.6	3.00	0.162
52	0.162	0.00	2303.4	1.70	0.031
53	0.243	0.00	5446.9	2.05	0.047
54	0.181	0.00	1056.2	1.66	0.013
55	0.304	0.00	186.0	0.75	0.013
56	0.409	0.00	6584.8	2.40	0.044
57	0.197	0.00	4266.9	3.00	0.018
58	1.159	0.00	82372.6	3.00	0.361
59	0.233	0.00	39345.3	3.00	0.177

表 4.10 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	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)	拡がり 半径 (m)	溶融炉心 堆積高さ (m)
1	0.309	0.00	60.3	0.45	0.012
2	0.396	0.00	10040.5	2.73	0.052
3	0.626	0.00	25113.9	3.00	0.107
4	0.218	0.00	2779.7	1.90	0.030
5	0.356	0.00	222.0	0.76	0.015
6	0.330	0.00	2004.3	1.42	0.038
7	0.266	0.00	4405.1	2.09	0.039
8	0.473	0.00	2984.5	1.42	0.057
9	0.880	0.00	14614.7	3.00	0.062
10	0.212	0.00	7451.9	3.00	0.032
11	0.487	0.00	22814.2	2.84	0.100
12	0.270	0.00	32986.7	3.00	0.141
13	0.792	0.00	15456.6	3.00	0.066
14	0.736	0.00	114165.5	3.00	0.487
15	2.348	0.00	8783.9	2.24	0.067
16	0.215	0.00	19389.9	3.00	0.083
17	0.263	0.00	16650.4	3.00	0.071
18	0.310	0.00	5726.5	2.40	0.038
19	0.439	0.00	3832.1	2.10	0.033
20	0.293	0.00	34375.3	3.00	0.149
21	0.588	0.00	23386.0	3.00	0.100
22	0.326	0.00	3378.5	1.54	0.055
23	0.267	0.00	12918.2	3.00	0.055
24	0.228	0.00	69.7	0.70	0.005
25	0.290	0.00	1321.4	1.95	0.013
26	0.259	0.00	395.4	1.02	0.015
27	0.861	0.00	39094.0	3.00	0.167
28	0.323	0.00	1154.8	1.70	0.015
29	0.735	0.00	13672.2	3.00	0.058
30	0.755	0.00	14363.4	3.00	0.061



表 4.10 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	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)	拡がり 半径 (m)	デブリ 堆積高さ (m)
31	9.010	0.00	11422.8	2.61	0.064
32	0.369	0.00	640.3	1.04	0.023
33	0.630	0.00	23938.9	3.00	0.102
34	0.183	0.00	5443.8	2.94	0.024
35	0.716	0.00	45144.7	3.00	0.193
36	0.797	0.00	60827.5	3.00	0.260
37	0.826	0.00	71125.7	3.00	0.304
38	2.016	0.00	9211.1	2.73	0.048
39	0.674	0.00	18158.4	3.00	0.078
40	0.500	0.00	46175.1	3.00	0.197
41	0.564	0.00	13037.6	3.00	0.056
42	0.487	0.00	67732.7	3.00	0.289
43	0.918	0.00	60620.2	3.00	0.259
44	0.422	0.00	311.4	0.94	0.013
45	1.649	0.00	16876.6	3.00	0.072
46	0.431	0.00	52119.0	3.00	0.222
47	0.610	0.00	20690.5	3.00	0.088
48	0.457	0.00	465.8	1.09	0.015
49	0.323	0.00	769.7	1.49	0.013
50	0.276	0.00	6073.3	3.00	0.026
51	0.542	0.00	37491.8	3.00	0.160
52	0.385	0.00	2322.3	1.87	0.025
53	0.337	0.00	5459.5	2.12	0.046
54	0.335	0.00	943.1	1.25	0.023
55	0.334	0.00	188.7	0.85	0.010
56	8.394	0.00	6635.0	2.31	0.048
57	0.297	0.00	4237.4	2.62	0.024
58	0.545	0.00	82309.7	3.00	0.351
59	0.593	0.00	39986.2	3.00	0.171

表 4.11 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	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)	拡がり 半径(m)	溶融炉心 堆積高さ(m)
1	3.583	0.00	57.2	0.80	0.003
2	0.633	0.00	10071.9	2.73	0.051
3	1.021	0.00	25258.4	3.00	0.107
4	0.579	0.00	2789.7	1.71	0.035
5	0.643	0.00	223.1	1.30	0.005
6	0.619	0.00	2015.6	1.50	0.034
7	0.591	0.00	4460.4	3.00	0.019
8	0.549	0.00	3005.9	1.63	0.043
9	1.136	0.00	14665.0	3.00	0.062
10	0.581	0.00	7464.4	3.00	0.032
11	0.621	0.00	22839.4	2.84	0.100
12	11.027	0.00	32584.6	3.00	0.134
13	99.086	0.00	15513.2	2.65	0.084
14	1.142	0.00	115799.1	3.00	0.518
15	0.922	0.00	8846.7	2.54	0.052
16	0.351	0.00	19352.2	3.00	0.082
17	0.519	0.00	16669.3	3.00	0.071
18	0.715	0.00	5751.0	2.40	0.038
19	0.785	0.00	3847.2	2.14	0.032
20	1.035	0.00	35255.0	3.00	0.149
21	0.769	0.00	23675.0	3.00	0.100
22	0.608	0.00	3401.7	1.80	0.040
23	0.682	0.00	12842.8	3.00	0.053
24	0.495	0.00	69.6	0.90	0.003
25	0.709	0.00	1327.6	1.62	0.019
26	0.786	0.00	397.0	1.39	0.008
27	1.298	0.00	39477.3	3.00	0.168
28	0.526	0.00	1159.9	1.85	0.013
29	1.040	0.00	13741.3	2.98	0.059
30	1.268	0.00	14426.2	3.00	0.061

表 4.11 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	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)	拡がり 半径 (m)	デブリ 堆積高さ (m)
31	0.6327	0.00	11504.5	2.23	0.084
32	0.6283	0.00	641.5	1.62	0.009
33	0.6055	0.00	23957.8	3.00	0.102
34	0.5517	0.00	5439.4	3.00	0.023
35	1.5570	0.00	46991.9	3.00	0.200
36	1.0512	0.00	65408.0	3.00	0.288
37	1.0537	0.00	71691.1	3.00	0.305
38	1.0738	0.00	9274.0	2.64	0.051
39	0.8583	0.00	18215.0	3.00	0.077
40	0.8941	0.00	46615.0	3.00	0.186
41	0.7056	0.00	13075.3	3.00	0.056
42	1.2139	0.00	68675.2	3.00	0.328
43	31.5416	0.00	60657.9	3.00	0.258
44	0.7081	0.00	312.8	1.15	0.009
45	1.0116	0.00	16945.8	3.00	0.072
46	1.1435	0.00	54883.6	3.00	0.233
47	0.5840	0.00	20759.6	3.00	0.088
48	0.6849	0.00	487.8	2.20	0.004
49	0.6685	0.00	772.8	1.35	0.016
50	0.6013	0.00	6090.9	3.00	0.026
51	0.9594	0.00	38314.9	3.00	0.162
52	0.7188	0.00	2334.2	1.63	0.034
53	0.3859	0.00	5467.6	1.94	0.052
54	0.5596	0.00	945.0	1.48	0.016
55	0.6447	0.00	188.7	1.10	0.006
56	0.6723	0.00	6685.3	2.40	0.044
57	0.5547	0.00	4246.8	2.91	0.019
58	1.1592	0.00	82372.6	3.00	0.361
59	1.2284	0.00	41670.1	3.00	0.177

#### 4.2.4 溶融炉心の冷却成功確率

JASMINE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4.12に示す条件に基づき、付録Bに示す方法で算出し、表4.13に示す通り0.466 mと評価した。

原子炉格納容器内初期水位0.5 m、1.0 m、2.0 mのそれぞれの条件に対して59ケースのJASMINE解析を実施した。得られたデブリ堆積高さの度数分布及び確率分布を図4.21から図4.23に示す。各初期水位条件において1ケースでデブリ堆積高さが $h_{max}$ を上回った。よって、いずれの水位においても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。

$$P = 58/59 = 0.983$$

図4.24 水位と冷却成功確率の関係を示す。本年度の評価では、デブリの冷却成功確率は異なる初期水位に対して等しい値となった。

表4.12 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
$\lambda$	デブリ熱伝導率（固相）[W/m·K]	1.911
$\rho$	デブリ密度（固相）[kg/m <sup>3</sup> ]	8285.1
$Q_d$	デブリ崩壊熱 [W/m <sup>3</sup> ]	828510
$Q_w$	浸水層崩壊熱 [W/m <sup>3</sup> ]	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 <sup>2</sup> ]	350000 *
$T_{melt}$	デブリ融点 [K]	2003

\*文献 [4.6] に基づき保守的に設定

表4.13 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 $\delta$ [m]	0.337
最大堆積高さ $h_{max}$ [m]	0.466

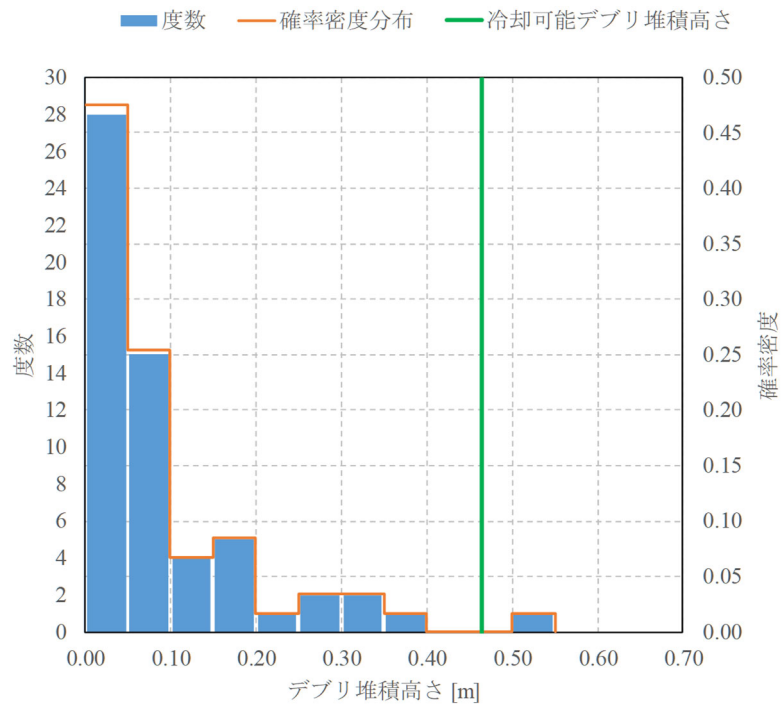


図 4.21 デブリ堆積高さのヒストグラム及び確率分布（初期水位 0.5 m）

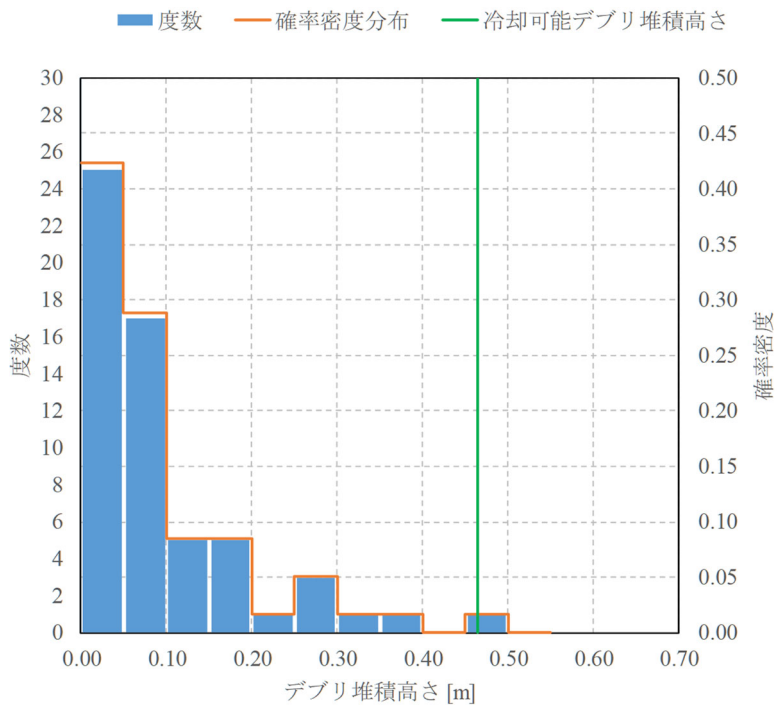


図 4.22 デブリ堆積高さのヒストグラム及び確率分布（初期水位 1.0 m）

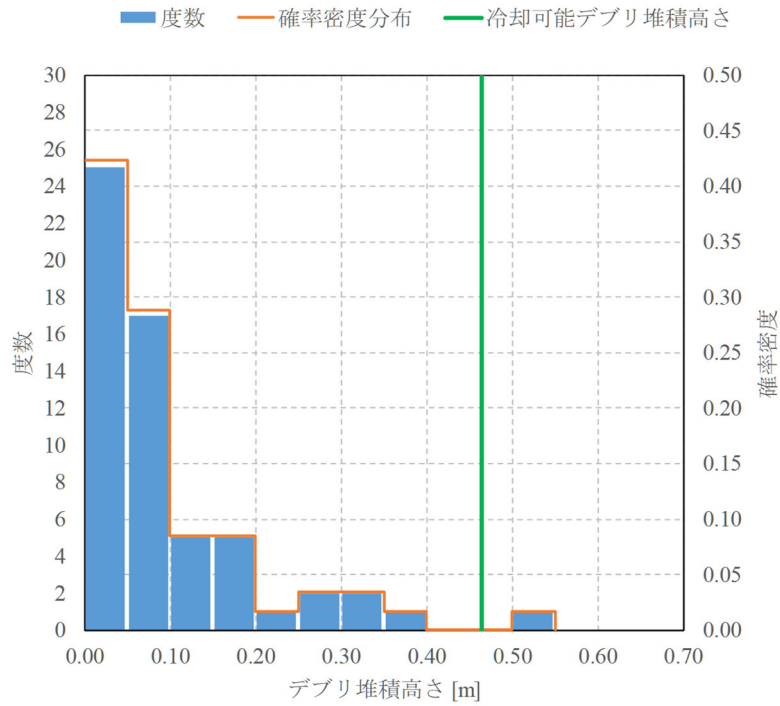


図 4.23 デブリ堆積高さのヒストグラム及び確率分布（初期水位 2.0 m）

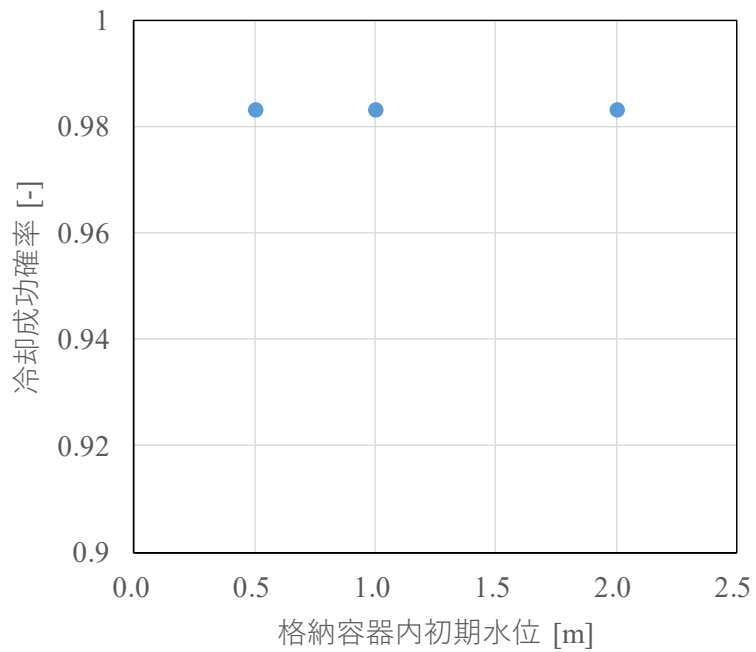


図 4.24 水位の変化による冷却成功確率の推移

#### 4.2.5 考察

前項で示した通り、今回の評価では格納容器先行注水による3通りの水位に対し、冷却成功確率に差は生じなかった。この結果について考察する。

図 4.25 に溶融炉心落下質量に対するデブリ拡がり半径を示す。溶融炉心落下質量がおよそ 20000 kg (図中の青線) を超えると、水位にかかわらず溶融物がペDESTAL 壁面に到達する。それ以下では、溶融炉心落下量と拡がり半径の間に相関があり、特に溶融炉心落下質量が小さい領域において初期水位に対する僅かな依存性が見られる。半径が小さいほど溶融炉心の堆積高さは高くなると考えられるが、図 4.26 に示すように、溶融炉心落下質量と堆積高さの相関関係に対する水位の影響は極めて小さい。また、溶融炉心が壁面に到達する前に拡がり停止し、その後で堆積高さが増大して  $h_{max}$  (緑線) を超えるような挙動は見られなかった。これらの結果から、実機体系の空間スケール、溶融炉心の物性値(密度、融点、粘性等)及び落下質量の組み合わせにおいては、溶融炉心の流動性が高く、落下した溶融炉心は薄く拡がりやすいと推測される。

ただし、今回の評価では、4.1.4 項に示した通り溶融炉心温度をコリウム融点以上に限定しており、この条件が上記の傾向を強めたと考えられる。落下する溶融炉心の組成に関する情報を MELCOR 解析より引き継ぎ、JASMINE 解析に与える溶融炉心の物性値をケース毎に設定した場合、拡がらずに堆積するケースの割合が増加し、水位条件が優位な感度を持つ可能性がある。よって、MELCOR 解析と JASMINE 解析の連携方法を見直し、適用可能な事故条件範囲の拡大を図ることとする。

また、現行の評価では、評価手法を可能な限り簡略化して個別ケースの不確かさをケース数で補う方針に基づき、冷却可能な最大デブリ堆積高さを固定値としている。上に示したように溶融炉心の組成を MELCOR 解析結果と連動させる場合、表 4.12 に示したデブリ物性値も変わるため、一貫性を確保するためにはケース毎に最大デブリ堆積高さを計算する必要がある。

図 4.27 に水位に対する粒子状デブリ割合を示す。水位が高いほど粒子状デブリの割合が増大する傾向が示されている。これは、水位が高いとジェットブレイクアップによる溶融炉心の粒子化が促進されるためと解釈される。ただし、粒子状デブリ割合の絶対値が小さいため、このメカニズムが拡がり面積や堆積高さに及ぼす影響は限定的と考えられる。

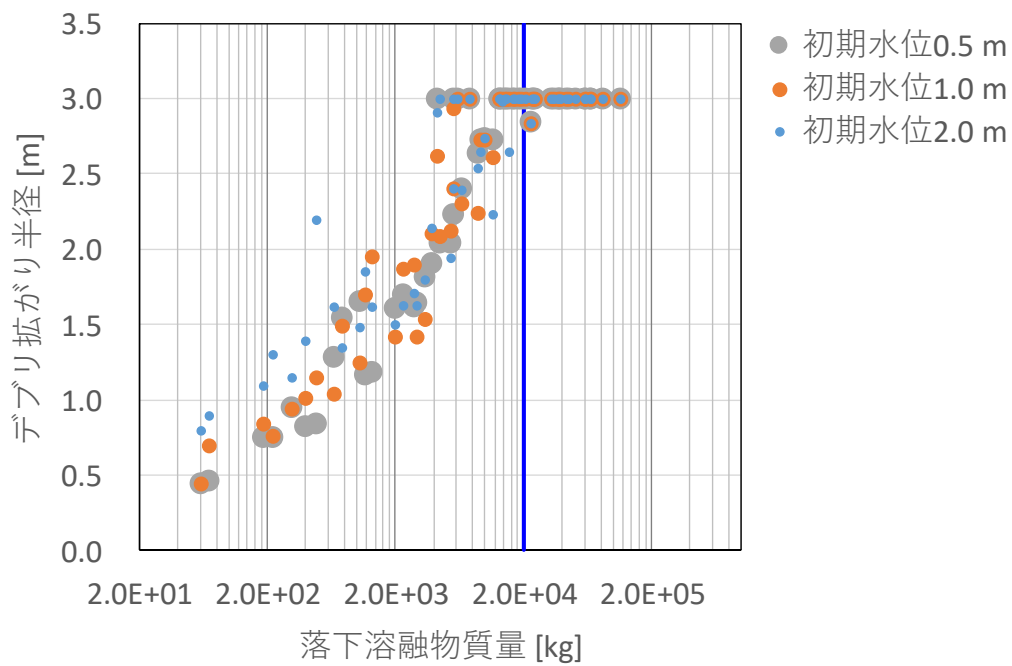


図 4.25 溶融炉心落下質量に対するデブリ拡がり半径

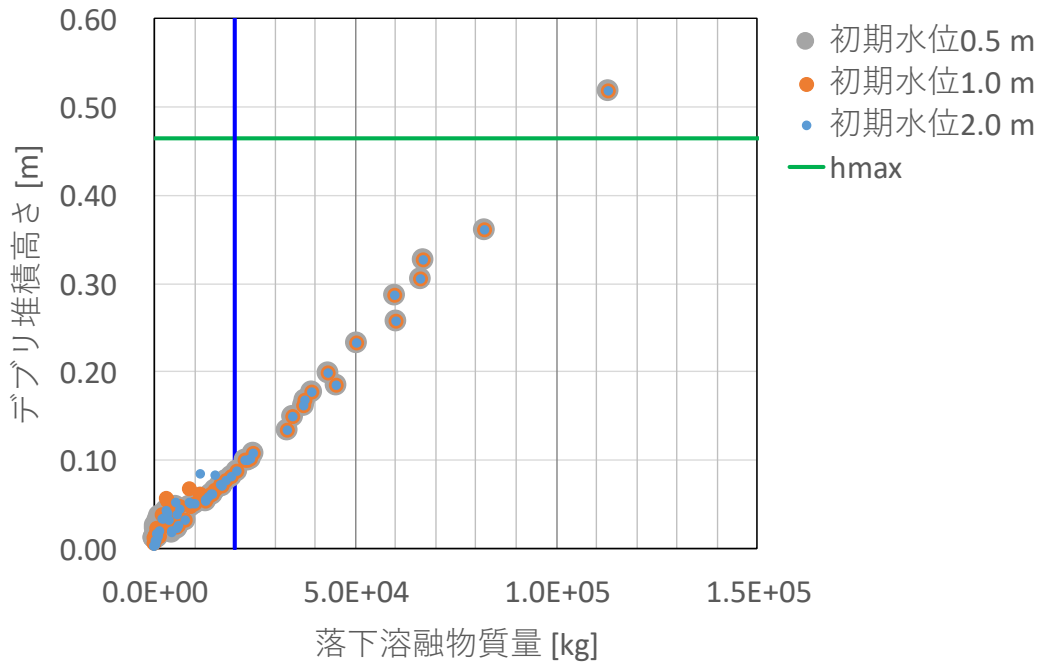


図 4.26 溶融炉心落下質量に対するデブリ堆積高さ



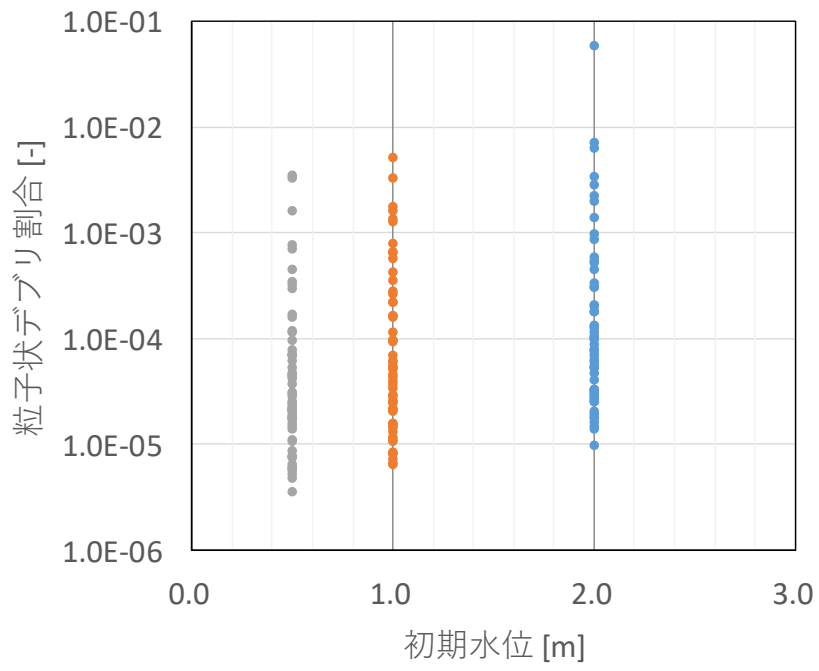


図 4.27 初期水位に対する粒子状デブリ割合

### 4.3 まとめ

格納容器に先行注水したときの溶融炉心冷却性の評価として、MELCOR1.8.5 によるシビアアクシデント解析と JASMINE による格納容器内溶融炉心挙動の解析を組み合わせ、デブリの堆積高さを評価し、冷却成功確率を求めた。

MELCOR 解析においては、圧力容器破損を生じさせるため、福島第一原子力発電所 3 号炉の事故進展をモデルとした事故シナリオを選定した。炉心損傷に関連する 5 つの入力パラメータに不確かさを仮定して 300 ケースの入力パラメータセットを抽出し、このうち圧力容器の破損に至ることが示された 276 ケースの MELCOR 解析結果に基づいて JASMINE 解析への入力パラメータの確率分布を評価した。

これらの確率分布に基づき JASMINE 解析の入力条件（溶融炉心落下質量、破損口断面積、落下継続時間、溶融炉心温度等）を抽出し、同コードにより溶融炉心落下時の拡がり挙動のシミュレーションを行うことで最終的なデブリ堆積高さを評価した。得られたデブリ堆積高さを簡易モデルにより推定した最大冷却可能高さと比較することで、先行注水の効果により MCCI 回避の成否を判断し、これを抽出された 59 ケース全てに対して行うことで冷却成功確率を評価した。さらに、同様の JASMINE 解析を異なる格納容器先行注水量（水位）条件に対して実施した。しかし、冷却成功確率は水位に依らず一定となった。

この結果は、JASMINE 解析に与える溶融炉心温度条件をコリウム融点以上に限定したことに起因して、多くのケースにおいて溶融炉心が薄く拡がりやすい条件になったためと考えられる。MELCOR 解析で得た溶融炉心の温度や組成に関する結果に基づき JASMINE 解析に与える溶融炉心の物性値及び冷却性能判定基準である「冷却可能な最大デブリ堆積高さ」をケース毎に設定することで、より信頼性の高い結果が得られると期待される。

## 参考文献

- [4.1] Sandia National Laboratories, “MELCOR Computer Code Manuals Primer and User’s Guide Version 1.8.5”, NUREG/CR-6119, Vol.1, SAND2000-2417/1
- [4.2] S. Galushin and P. Kudinov, “Sensitivity and uncertainty analysis of the vessel lower head failure mode and melt release conditions in Nordic BWR using MELCOR code” *Annals of Nuclear Energy* 135 (2020) 106976
- [4.3] S. Galushin and P. Kudinov, “Sensitivity Analysis of the Vessel Lower Head Failure in Nordic BWR using MELCOR code” PSAM14 (2018), 16-21 September 2018, UCLA Meyer & Renee Luskin Conference Center, Los Angeles, CA, USA
- [4.4] 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.
- [4.5] 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.
- [4.6] S. Lomperski, M.T. Farmer, “Experimental evaluation of the water ingress mechanism for corium cooling”, *Nucl. Eng. Des.*, 237, 2905-917, 2007.

## 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、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 に関して、溶融物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での溶融物拡がり挙動に係わる実験結果の再現性のさらなる向上を図るとともに、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溶融炉心冷却性評価をシビアアクシデント総合解析コード MELCOR と JASMINE を連動して実施した。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（ $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-WO}_3$ ）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-A23～A27 実験の解析を行った。約 200K という高い溶融物過熱度条件で実施された A27 実験は、実験データの信頼性が低いと判断された A7 及び A9 実験の再実験であったが、広い水深範囲で極めて高いアグロメレーション割合が示された点で A7 及び A9 実験の傾向を再現する結果となり、高過熱度条件における正しい結果が得られている可能性が示唆された。これらの結果を再現できるモデルについては新たな検討が必要である。

A27 実験で生じたデブリの分析により溶融物が共晶組成から逸脱していたことが明らかになり、これを受けて共晶組成からの逸脱を考慮した解析を行った。非共晶組成条件の解析はアグロメレーション判定基準に用いるパラメータを調整することで実施したが、従来傾向と異なる A27 実験の結果はそもそも再現が困難であるため、非共晶組成時のアグロメレーション割合の低下に対する予測性能を定量的には確認できなかった。この確認には、他の実験試料に対する組成分析を改めて行うことが必要になる。

ただし、現状のモデルが個別チューニングなしに DEFOR-A 実験結果の多くを概ね再現できることは既に確認しており、試料組成の不確かさを考慮してモデルのパラメータを保守側に調整することで、JASMINE を安全評価ツールとして使用することは可能である。

### 5.2 PULiMS 実験解析

格納容器に落下した溶融炉心が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、拡がり挙動の評価精度を向上させるため、床面に衝突した溶融物が速く浅い水平方向の流れ（射流）を形成するモデル等を JASMINE コードに追加し、

KTH が実施した高温溶融酸化物 ( $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-WO}_3$ ) の水中拡がり実験 PULiMS のうち E10～E18 実験の解析に適用し、溶融物床面拡がりモデルの予測性能を検証した。その結果、落下初期の拡がり履歴の再現性が格段に向上し、共通の調整パラメータセットにより全ての実験結果をよく再現することができた。

さらに、PULiMS より大きな体系や  $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-WO}_3$  以外の物質に対する適用性を確認するため、任意の流路形状や気相中条件に対応できるよう JASMINE コードを改良した上でフランスやドイツで実施された VULCANO 実験、KATS 実験等の解析に適用し、モデルの予測性能を確認した。これらの解析において、拡がり停止の判断に係るパラメータは PULiMS 実験で調整した値を暫定的に適用したが、溶融物組成が異なるにも関わらず実験結果と著しい差がない結果を得た。PULiMS 実験での感度解析でも当該パラメータに対する感度が小さいことを確認しているが、今後、溶融物の拡がり速度、先端の冷却速度及び相図を考慮した検討を行い、より信頼性の高い拡がり停止の判断基準を決定する。

### 5.3 実機冷却性評価

格納容器先行注水時の溶融炉心冷却性の評価として、MELCOR によるシビアアクシデント解析と JASMINE による格納容器内溶融炉心挙動解析を組み合わせ、デブリの堆積高さを評価し、冷却成功確率を求めた。

MELCOR 解析では、炉心損傷に関連する入力パラメータに不確かさを仮定して 300 ケースの入力パラメータセットを抽出し、このうち圧力容器破損に至ったケースの結果に基づいて JASMINE 解析への入力パラメータの確率分布を評価した。

これに基づき JASMINE 入力条件を抽出し、拡がり後のデブリ堆積高さを評価した。それを簡易モデルで推定した最大冷却可能高さと比較することで MCCI 回避の成否を判断し、59 ケースの結果から冷却成功確率を評価した。この手順を異なる格納容器水位条件で繰り返したところ冷却成功確率は水位に依らず一定という結果を得た。

今回の結果は、JASMINE 解析の溶融炉心温度条件をコリウム融点以上に限定したことで多くのケースにおいて溶融炉心が薄く拡がりやすい条件になったためと考えられる。溶融炉心の温度や組成に関する情報を MELCOR 解析より取得し、JASMINE 解析で用いる溶融炉心の物性値及び結果を比較するための「冷却可能な最大デブリ堆積高さ」をケース毎に設定することで、より信頼性の高い結果が得られると期待される。

引き続き、JASMINE コードの改良を進めて評価の不確かさの低減を図るとともに、MELCOR 解析と連携した実機評価手順を改良し、事業目的の達成を図る。

## 付録 A PULiMS 実験の解析結果

### A.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。

実測値については熱電対が溶融物に埋もれず、水温を示していると考えられるもの、解析地については計算セルに水が存在しており、比熱の対照となるものを選んだ。

熱電対位置と計算セル中心は完全に一致していないので最も近い計算セルの値と比較した。

#### ① E10 実験

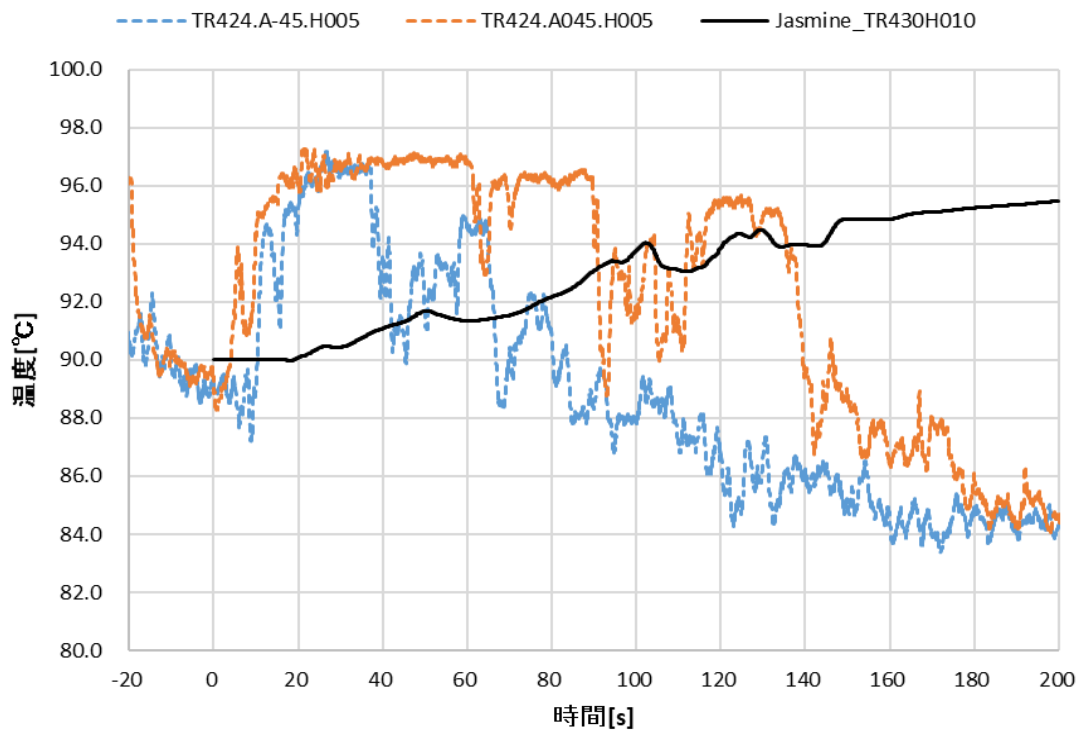


図 A1.1 水中温度の実験値と解析値の比較 (E10、R=424~430 mm H=5~10 mm)

② E11 実験

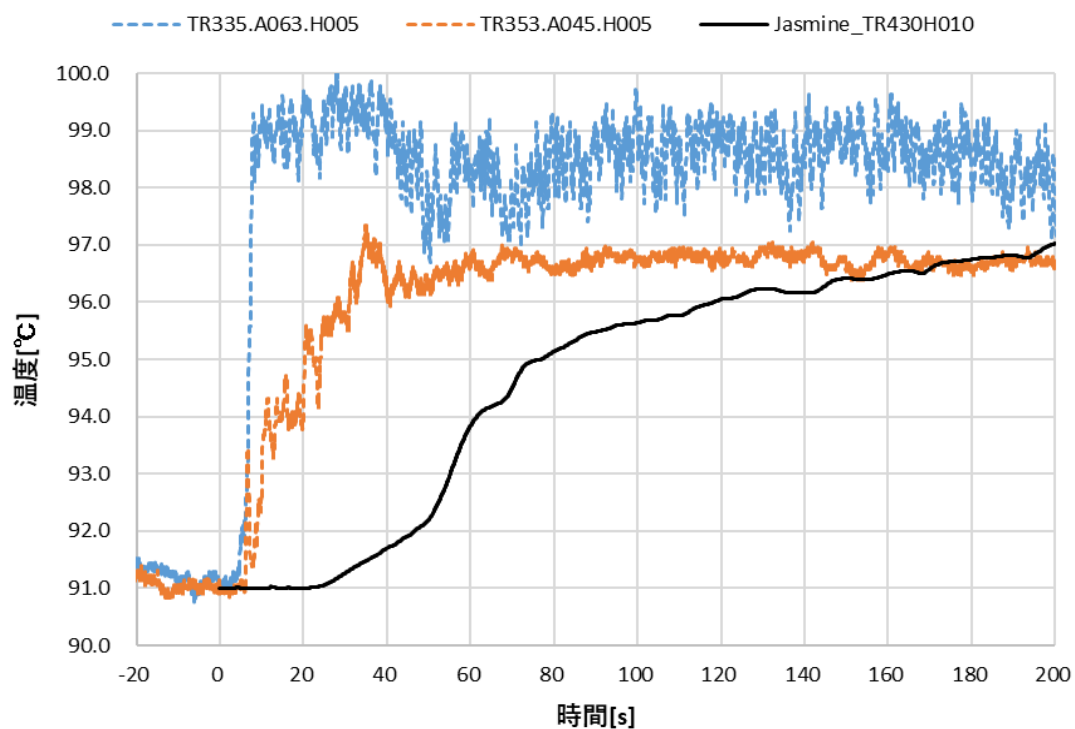


図 A1.2 水中温度の実験値と解析値の比較 (E11、R=420~440 mm H=5~10 mm)

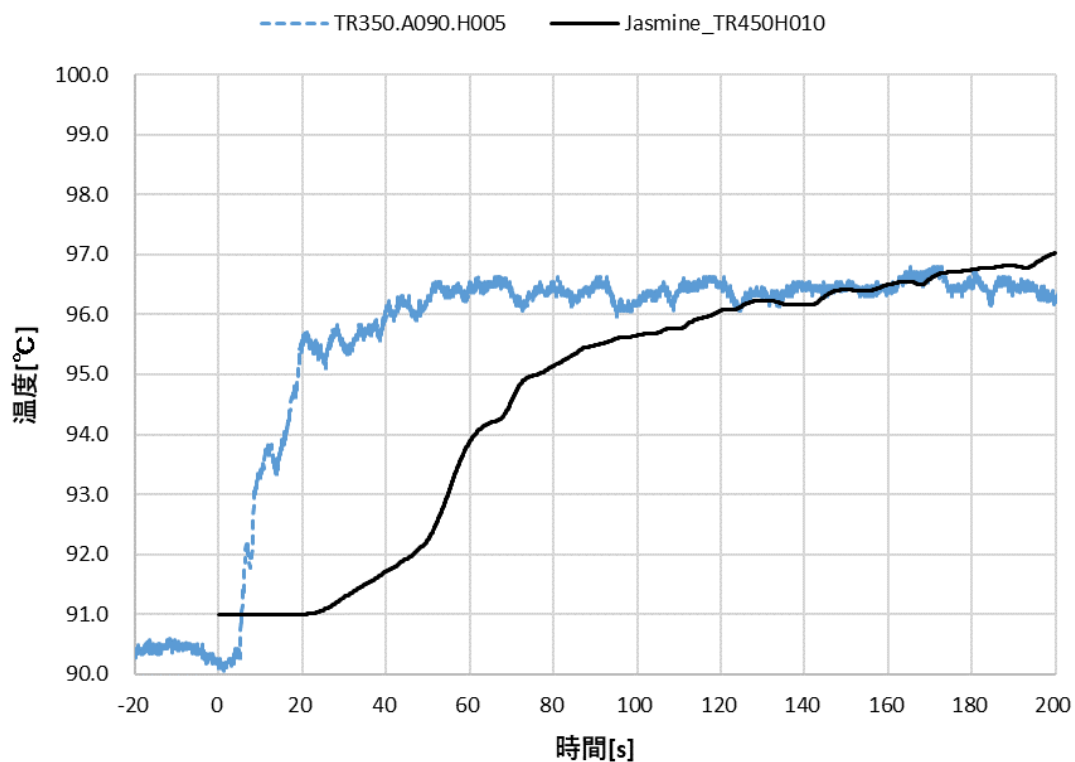


図 A1.3 水中温度の実験値と解析値の比較 (E11、R=440~460 mm H=5~10 mm)

③ E12 実験

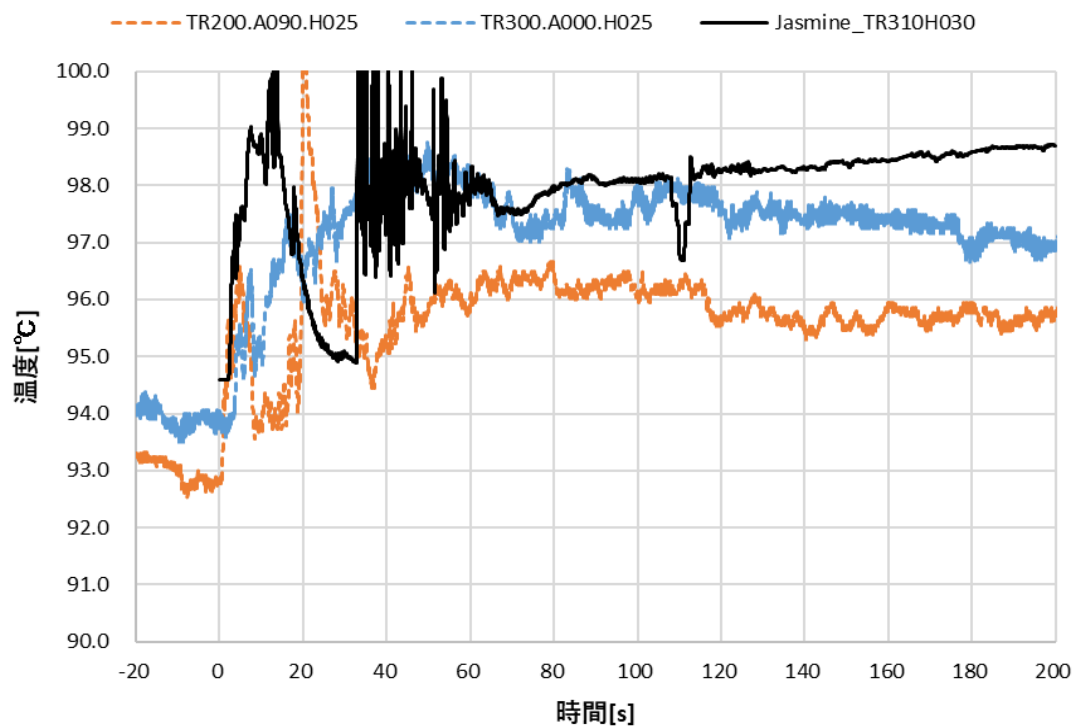


図 A1.4 水中温度の実験値と解析値の比較 (E12、R=300~320 mm H=25~30 mm)

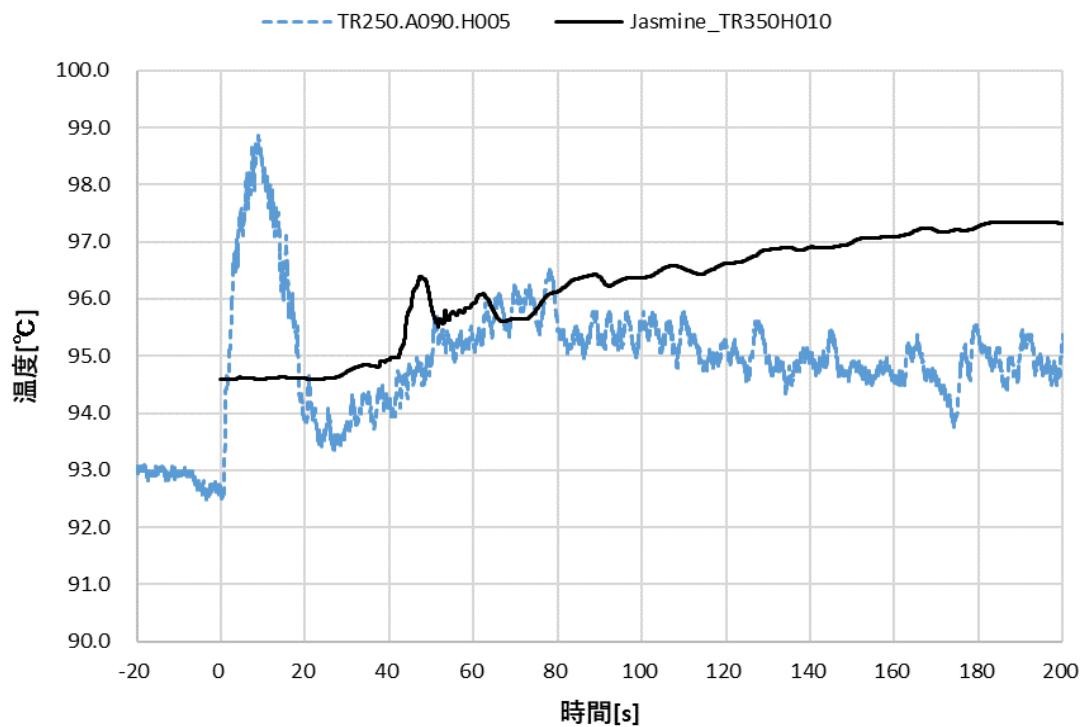


図 A1.5 水中温度の実験値と解析値の比較 (E12、R=340~360 mm H=5~10 mm)



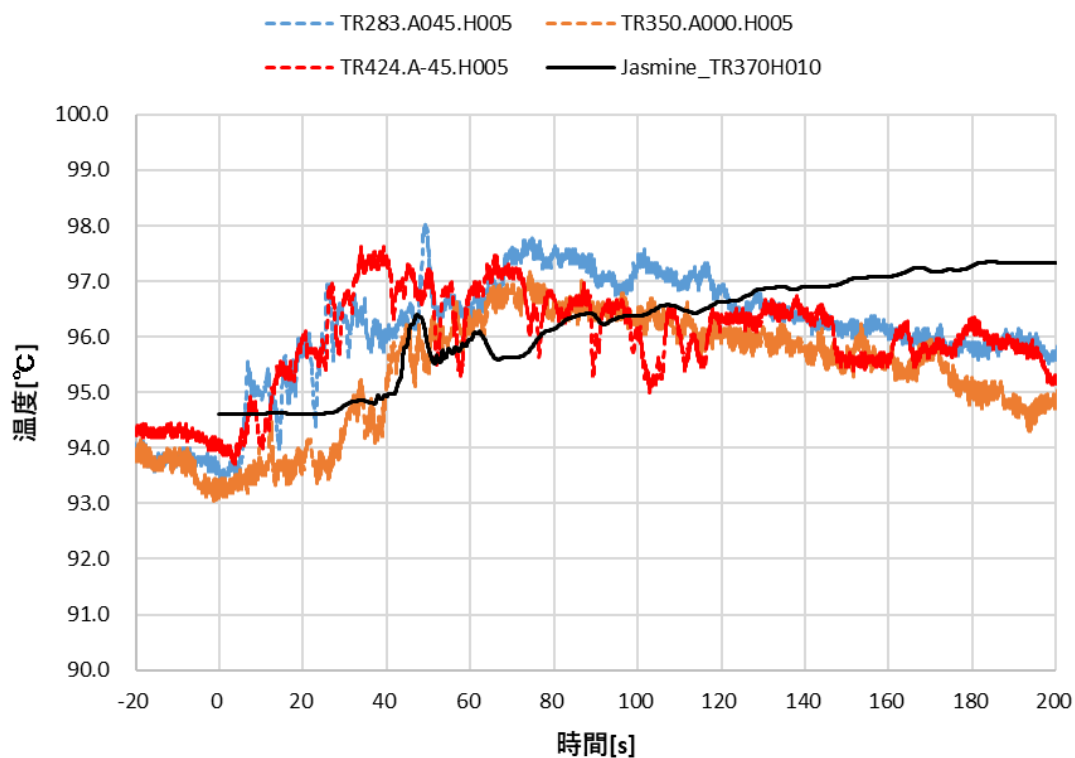


図 A1.6 水中温度の実験値と解析値の比較 (E12、R=360~380 mm H=5~10 mm)

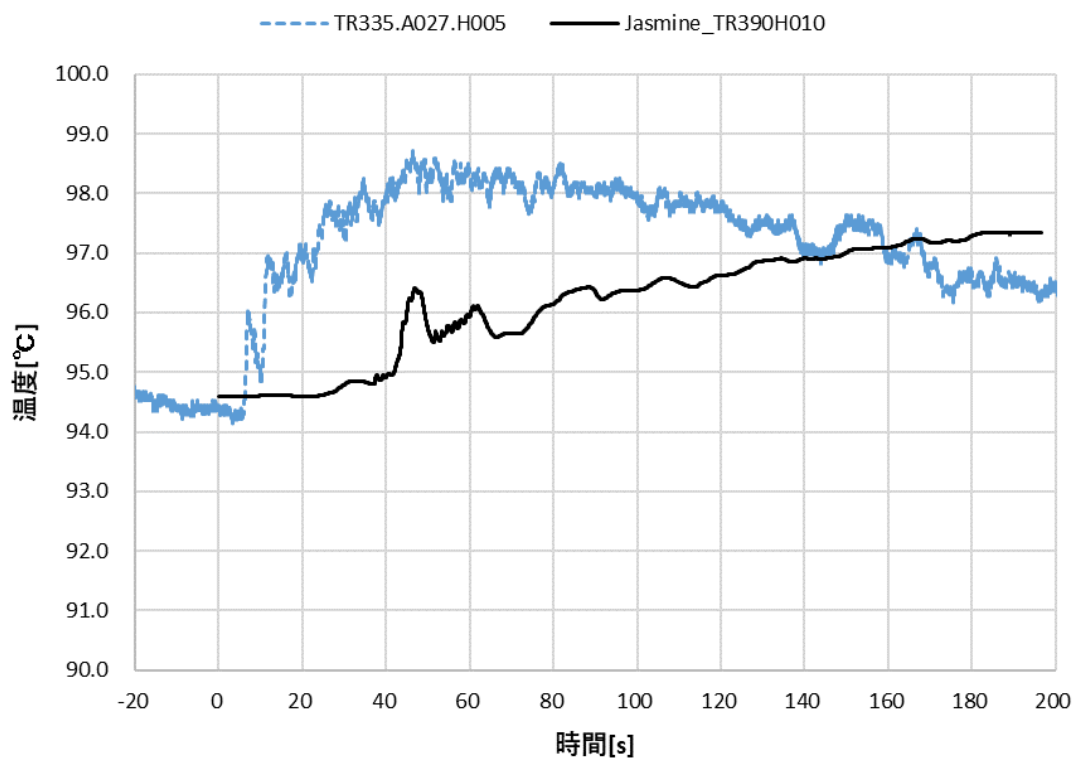


図 A1.7 水中温度の実験値と解析値の比較 (E12、R=380~400 mm H=5~10 mm)

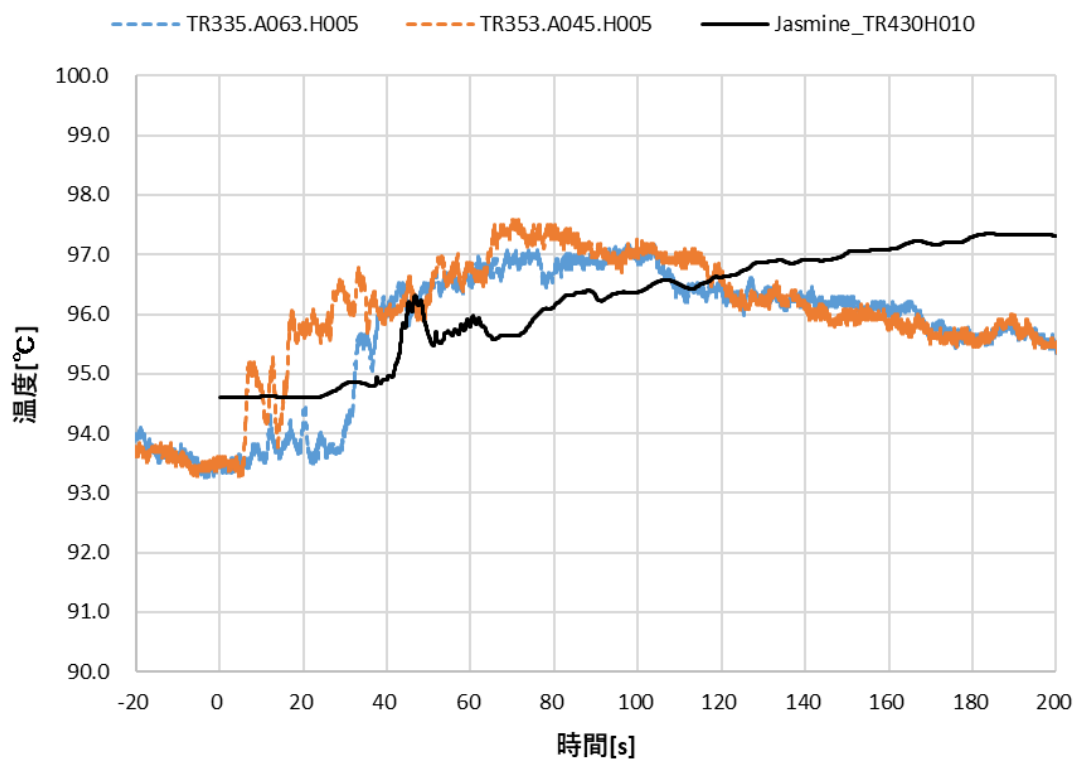


図 A1.8 水中温度の実験値と解析値の比較 (E12、R=420~440 mm H=5~10 mm)

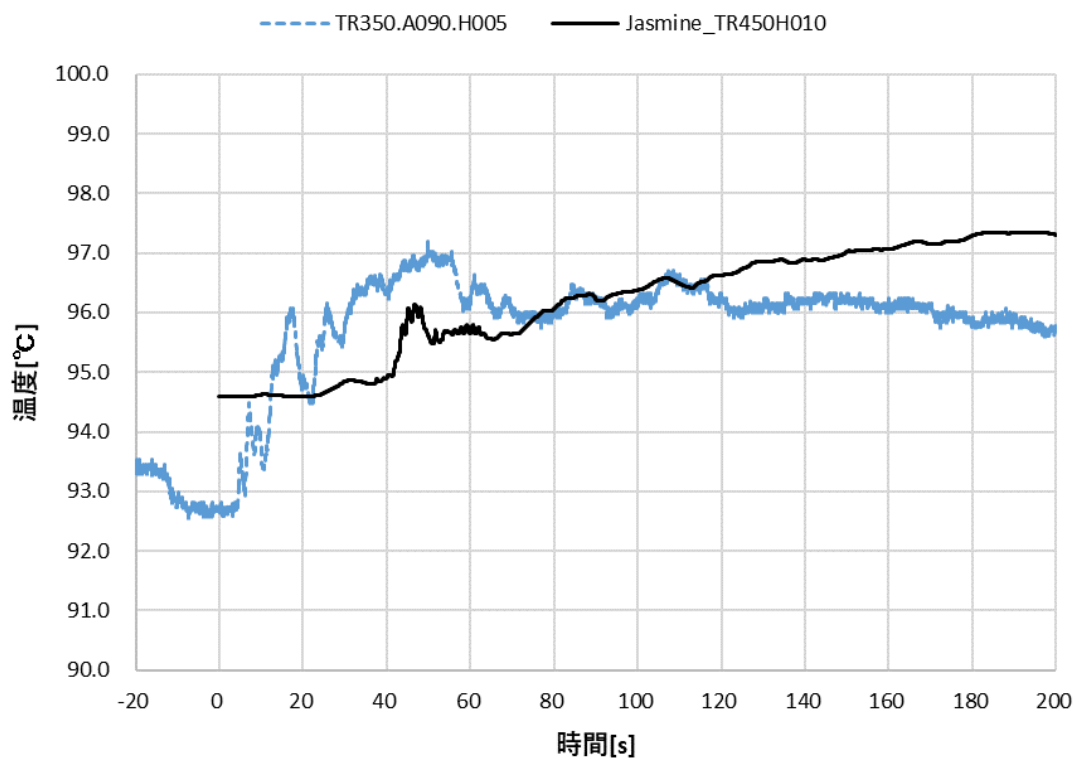


図 A1.9 水中温度の実験値と解析値の比較 (E12、R=440~460 mm H=5~10 mm)

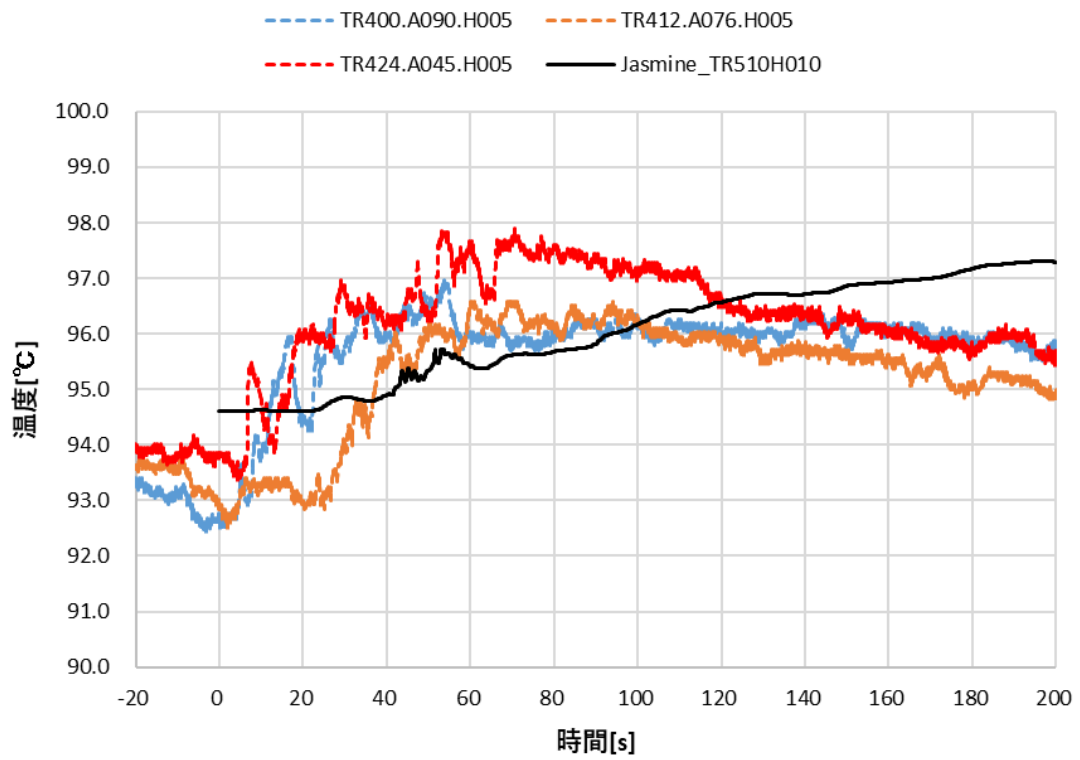


図 A1.10 水中温度の実験値と解析値の比較 (E12、R=500~510 mm H=5~10 mm)

④ E13 実験

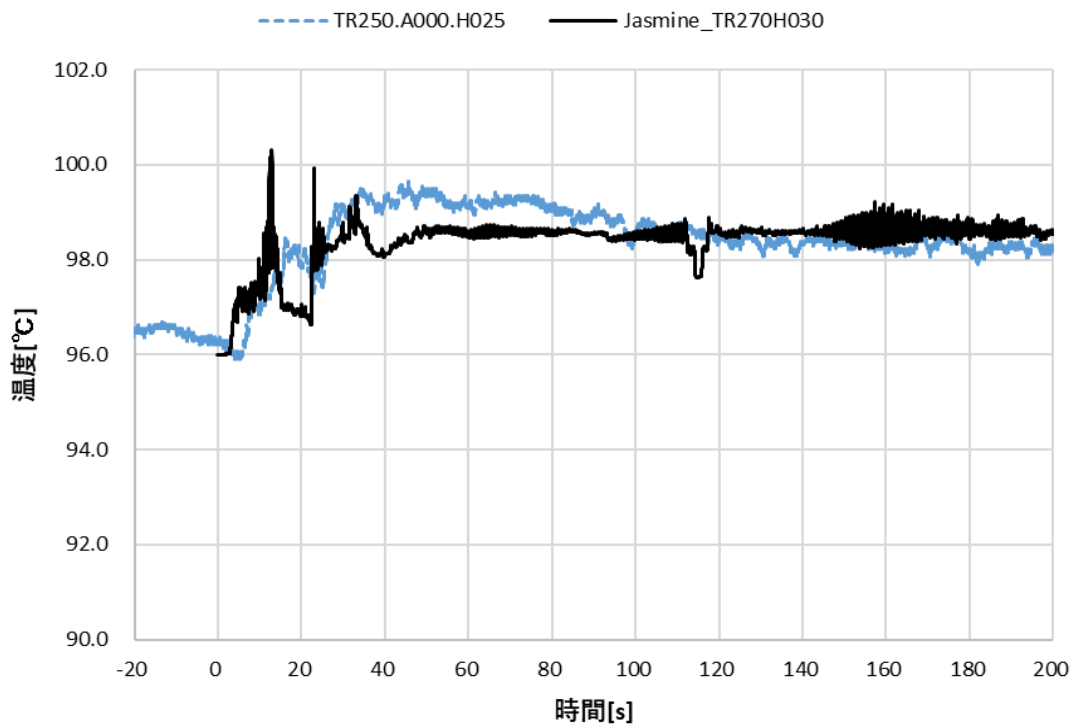


図 A1.11 水中温度の実験値と解析値の比較 (E13、R=260～280 mm H=25～30 mm)

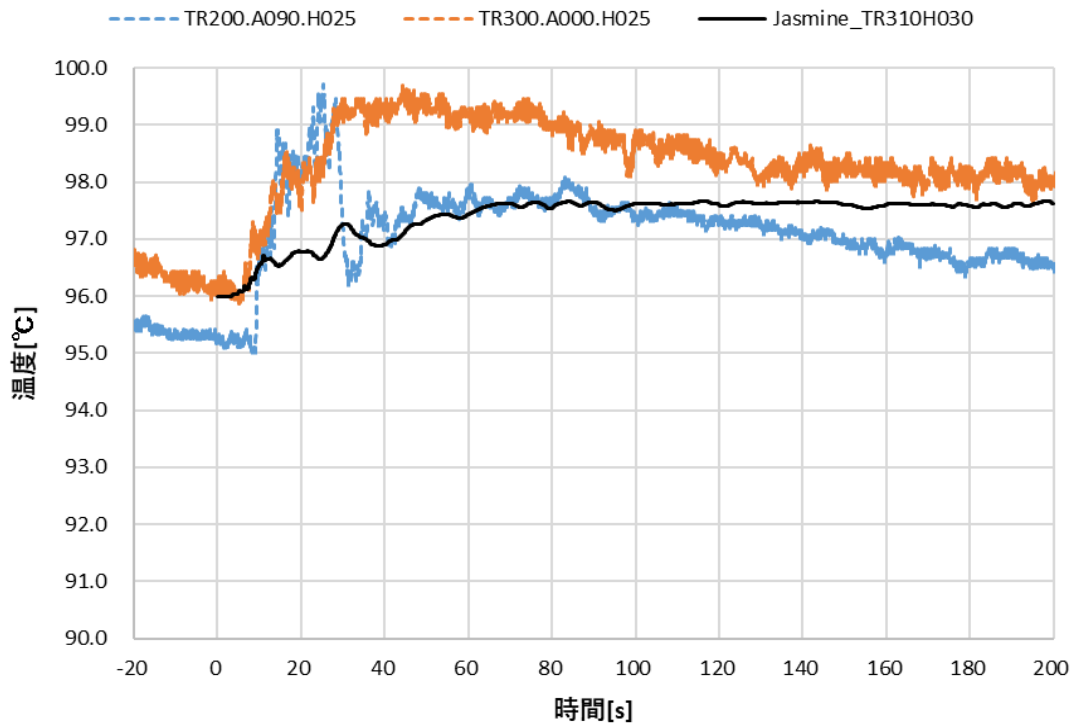


図 A1.12 水中温度の実験値と解析値の比較 (E13、R=300～320 mm H=25～30 mm)

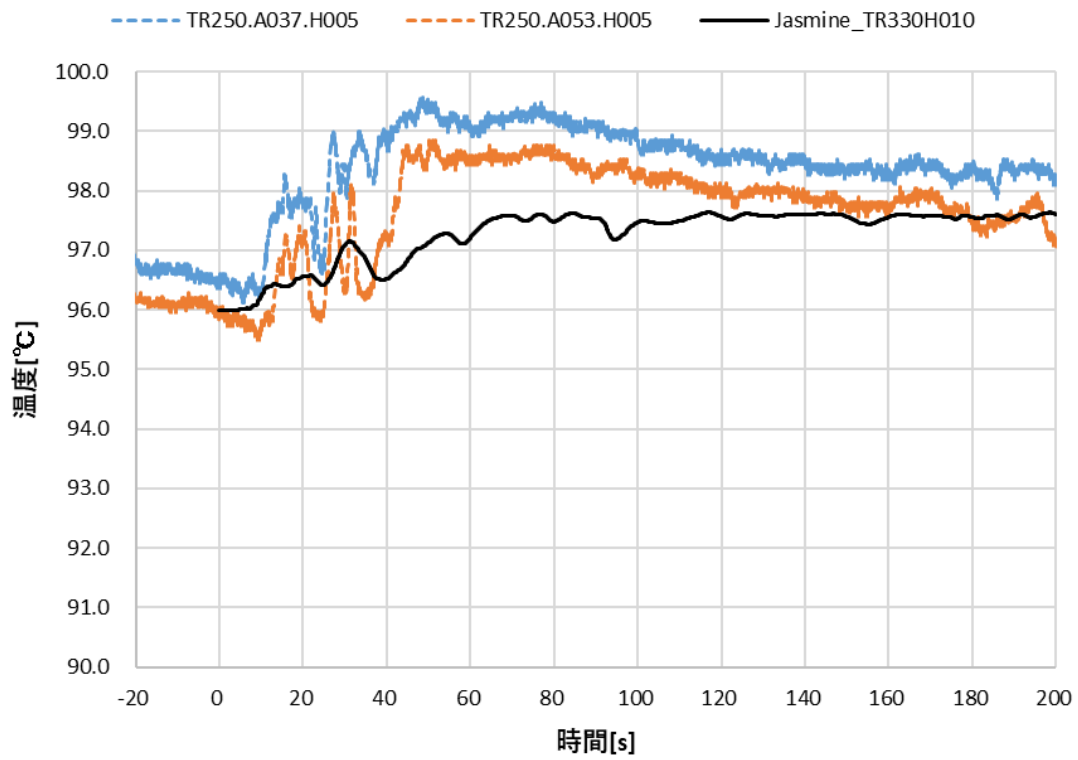


図 A1.13 水中温度の実験値と解析値の比較 (E13、R=310~340 mm H=5~10 mm)

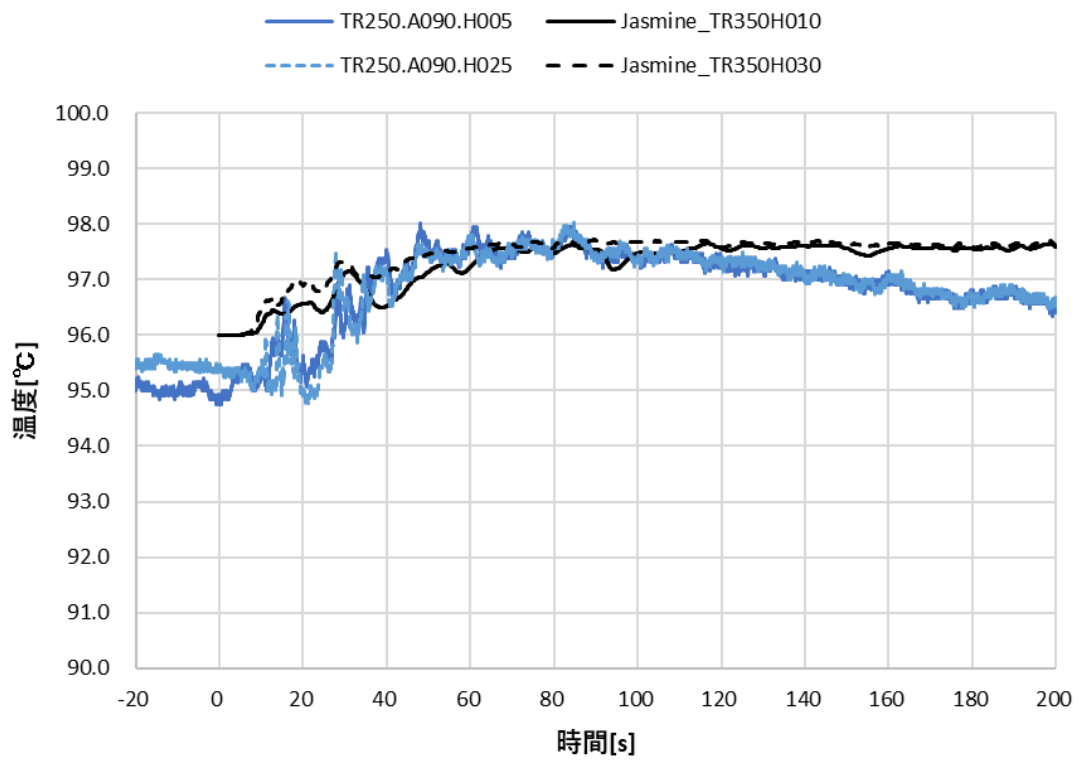


図 A1.14 水中温度の実験値と解析値の比較 (E13、R=340~360 mm H=5~30 mm)

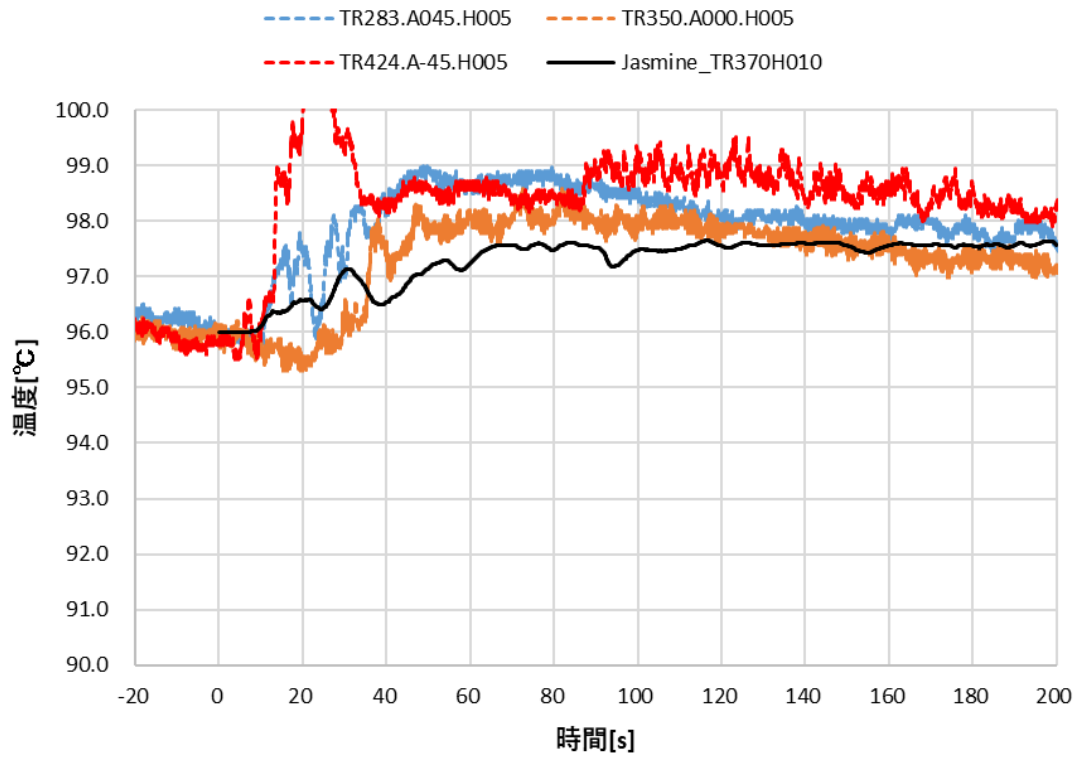


図 A1.15 水中温度の実験値と解析値の比較 (E13、R=360~380 mm H=5~10 mm)

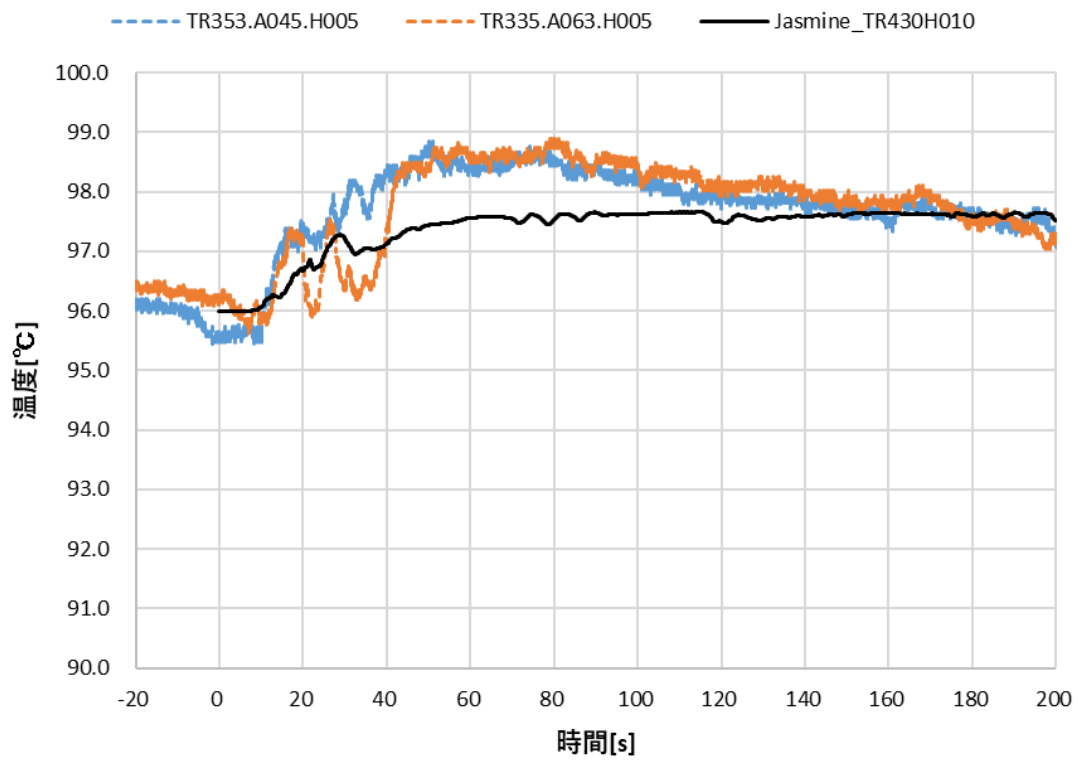


図 A1.16 水中温度の実験値と解析値の比較 (E13、R=420~440 mm H=5~10 mm)

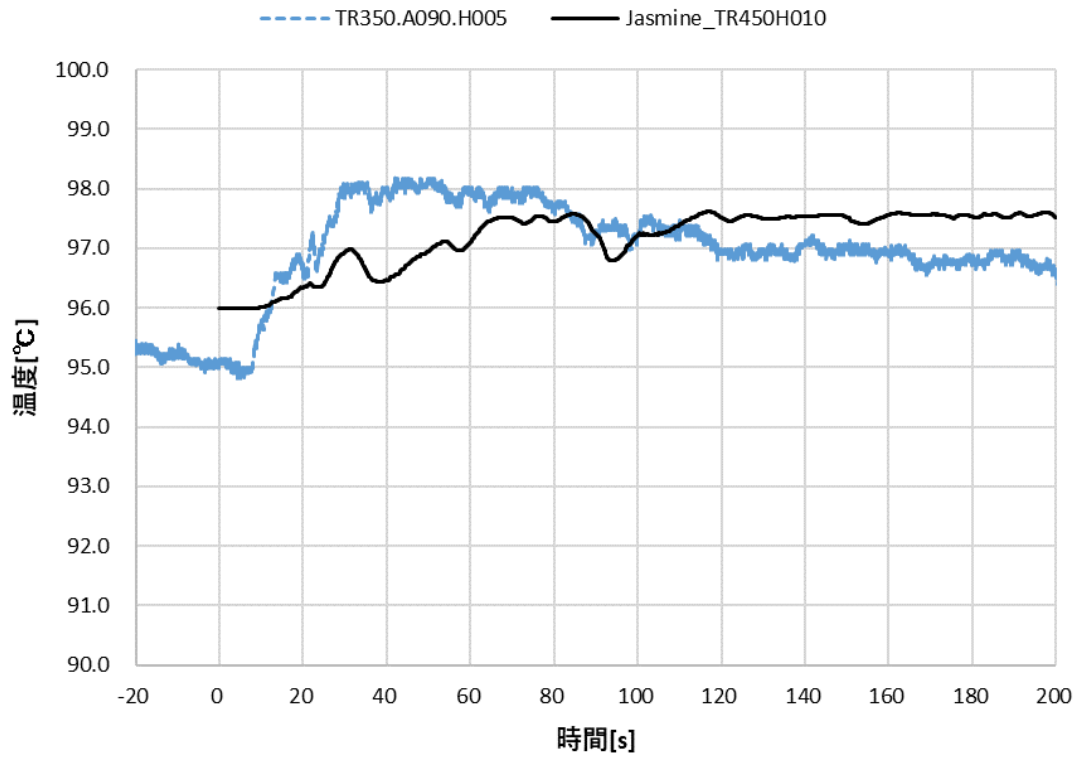


図 A1.17 水中温度の実験値と解析値の比較 (E13、R=440~460 mm H=5~10 mm)

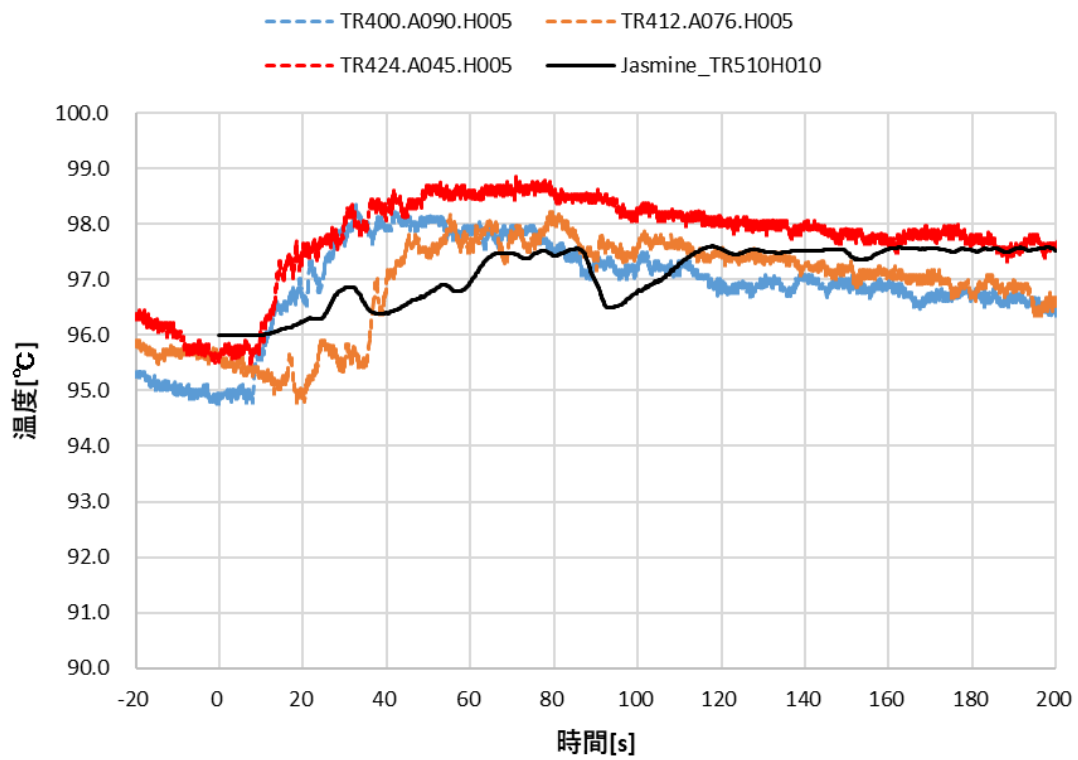


図 A1.18 水中温度の実験値と解析値の比較 (E13、R=500~520 mm H=5~10 mm)

⑤ E14 実験

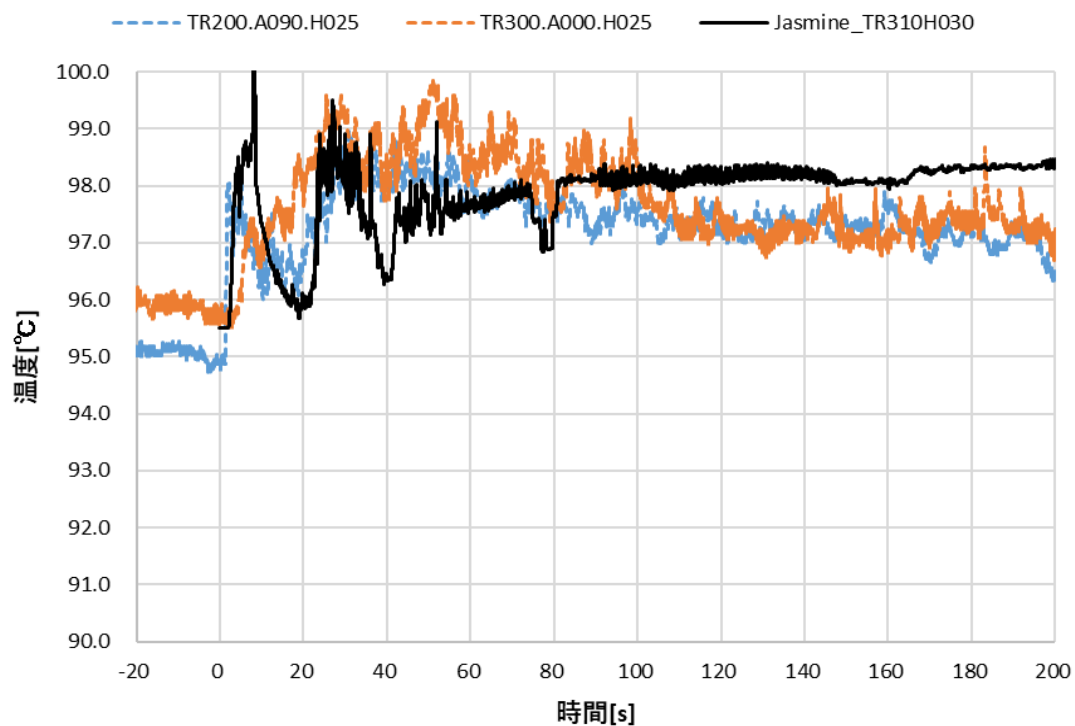


図 A1.19 水中温度の実験値と解析値の比較 (E14、R=300～320 mm H=25～30 mm)

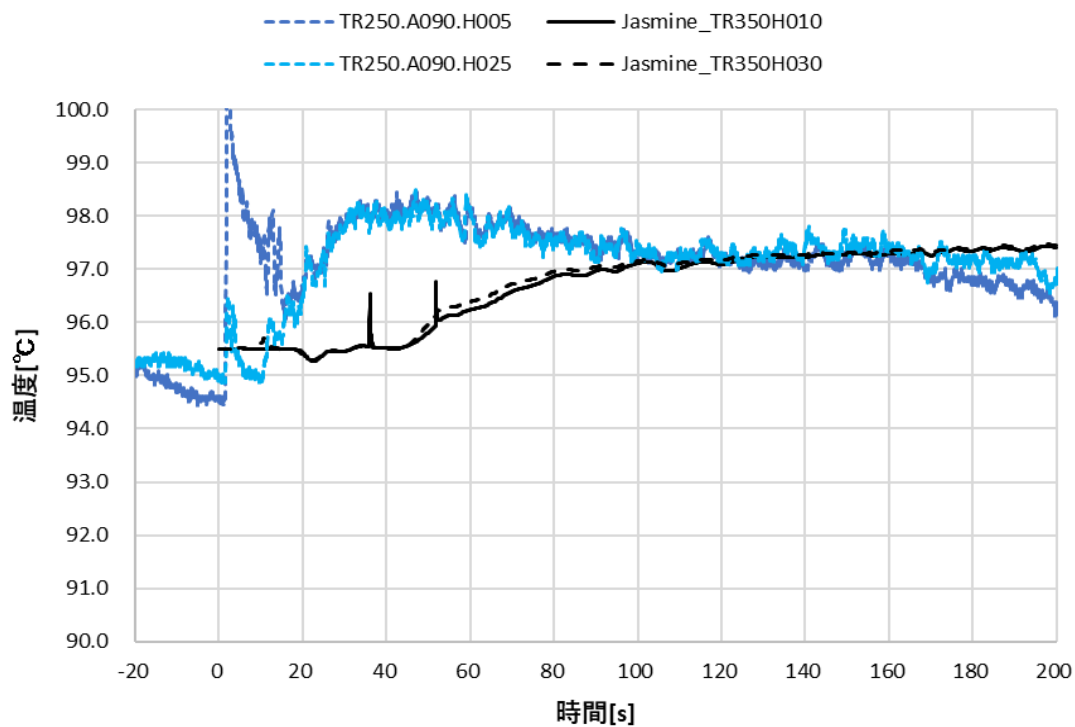


図 A1.20 水中温度の実験値と解析値の比較 (E14、R=340～360 mm H=5～30 mm)



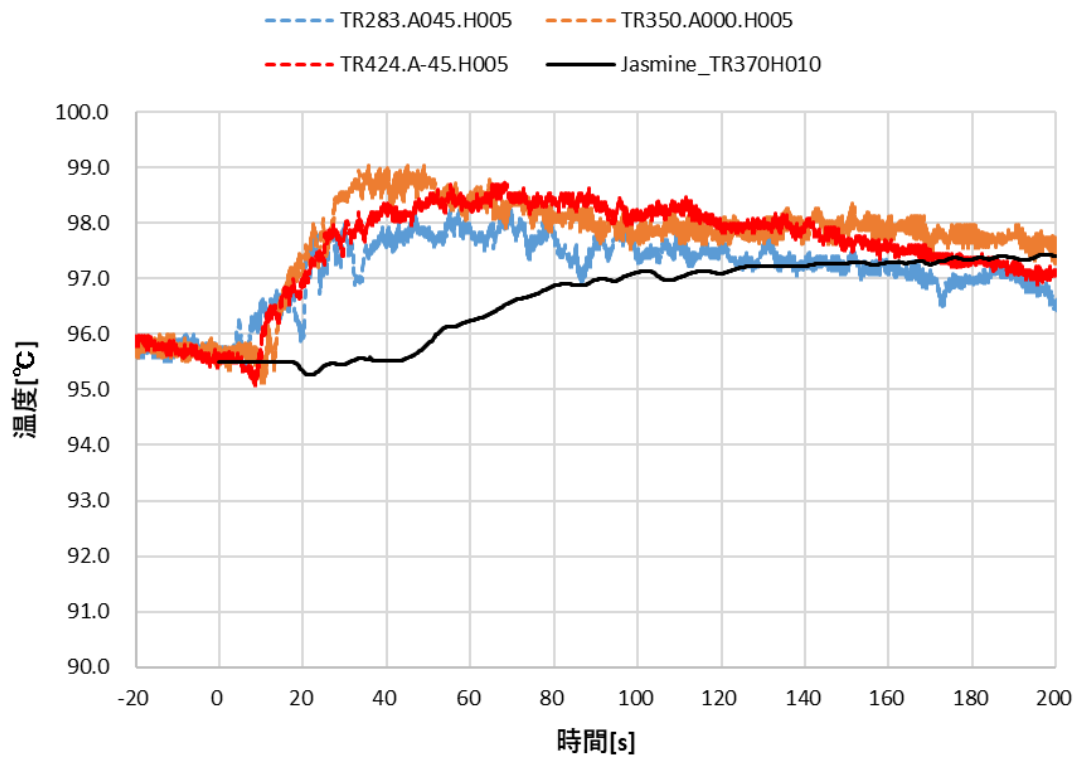


図 A1.21 水中温度の実験値と解析値の比較 (E14、R=360~380 mm H=5~10 mm)

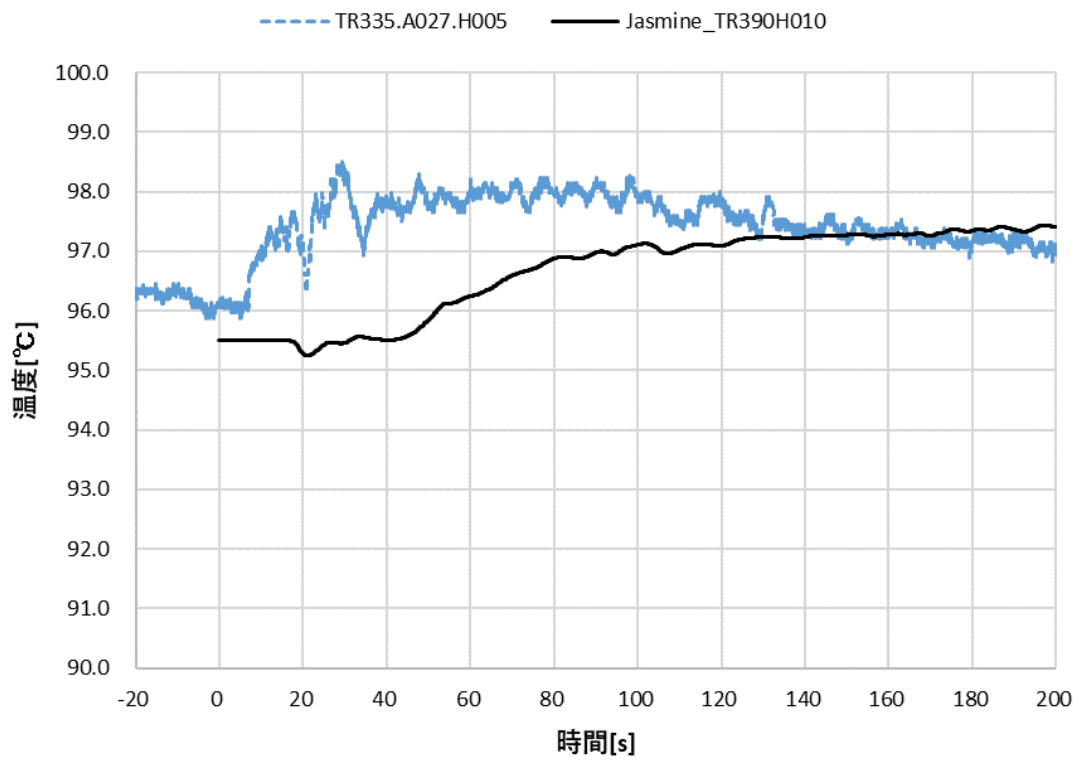


図 A1.22 水中温度の実験値と解析値の比較 (E14、R=380~400 mm H=5~10 mm)

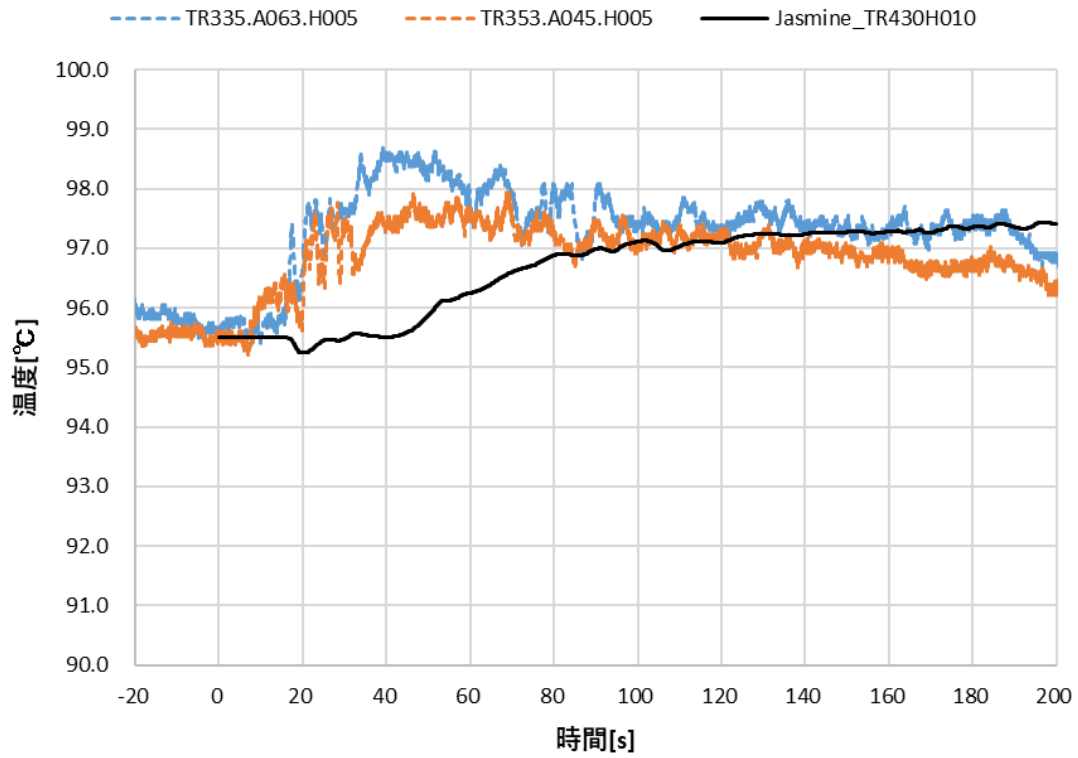


図 A1.23 水中温度の実験値と解析値の比較 (E14、R=420~440 mm H=5~10 mm)

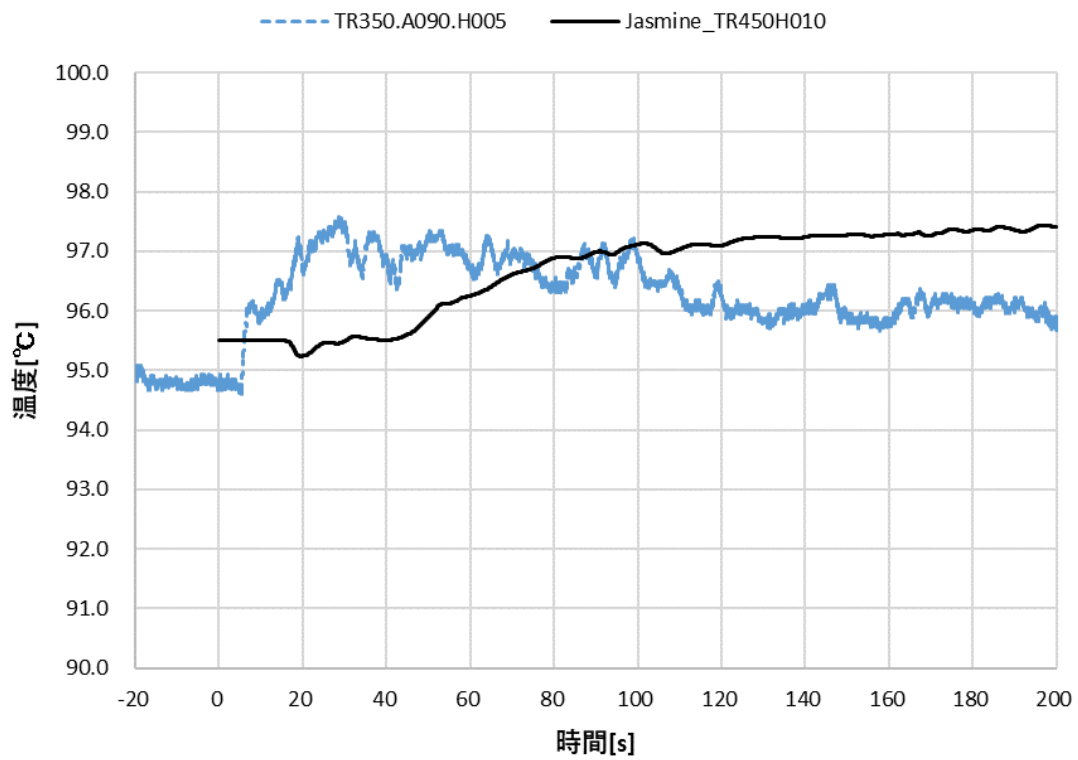


図 A1.24 水中温度の実験値と解析値の比較 (E14、R=440~460 mm H=5~10 mm)

⑥ E15 実験

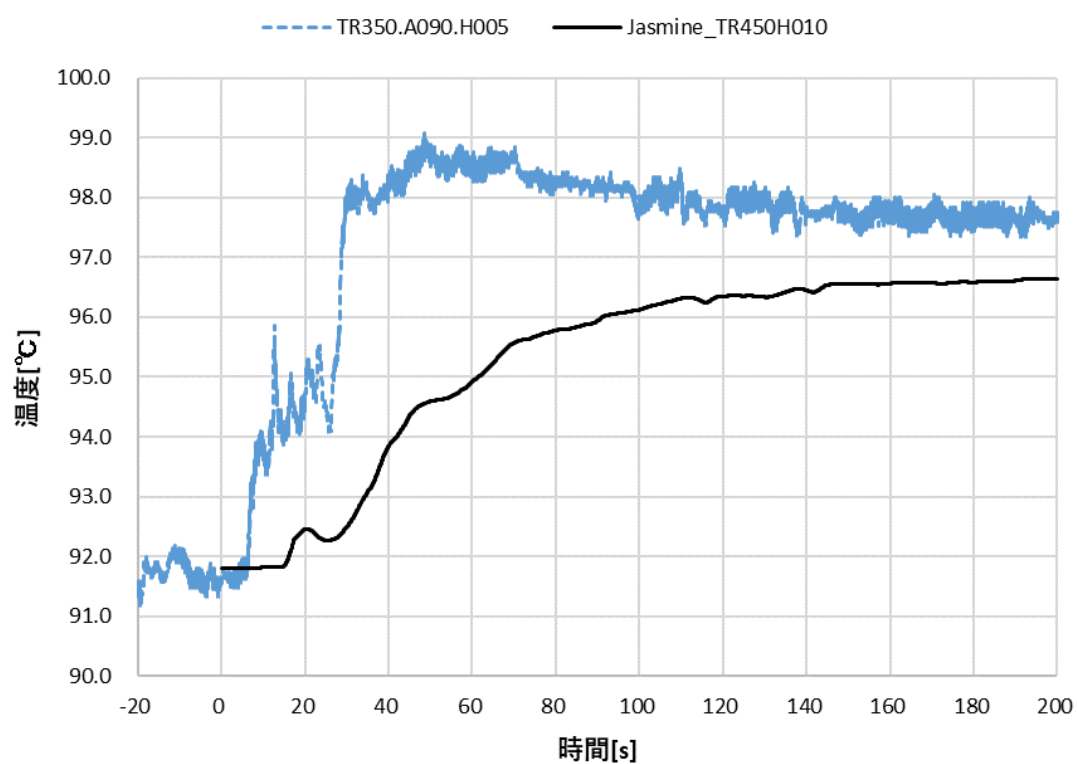


図 A1.25 水中温度の実験値と解析値の比較 (E15、R=440~460 mm H=5~10 mm)

⑦ E16 実験

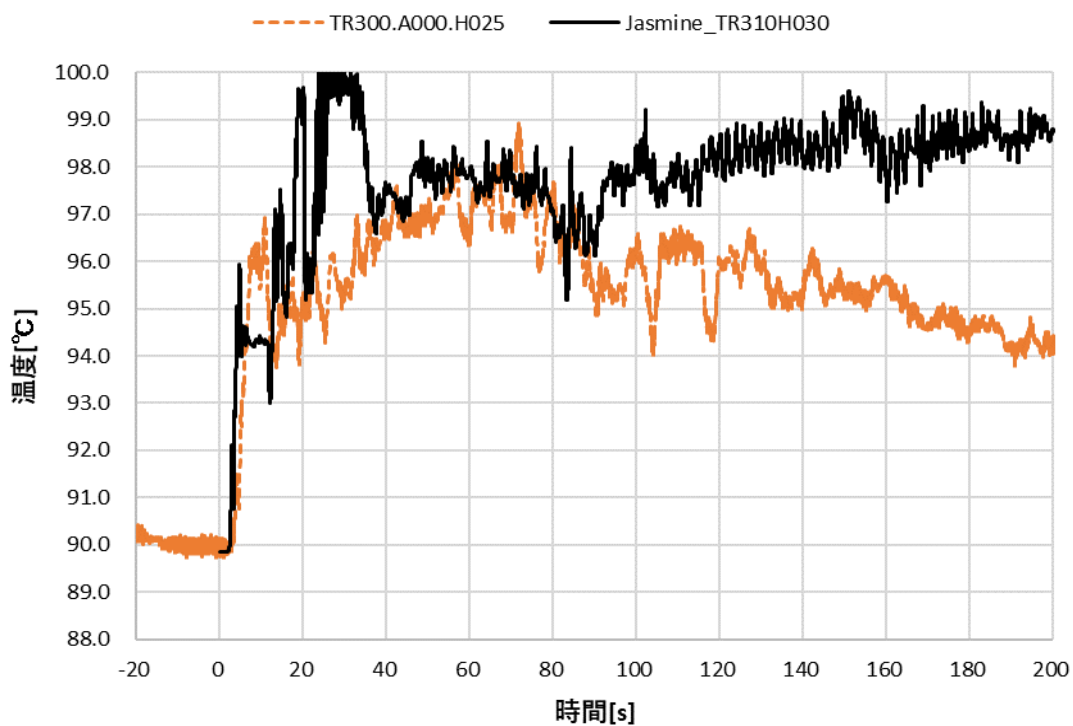


図 A1.26 水中温度の実験値と解析値の比較 (E16、R=300～320 mm H=25～30 mm)

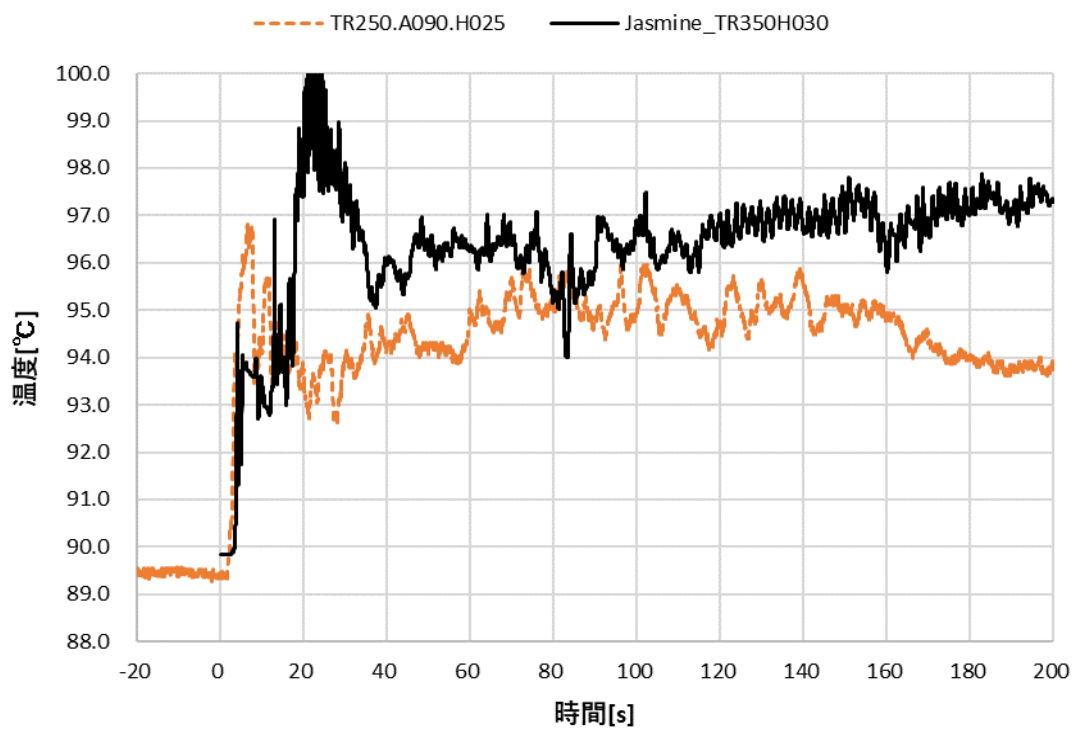


図 A1.27 水中温度の実験値と解析値の比較 (E16、R=340～360 mm H=25～30 mm)

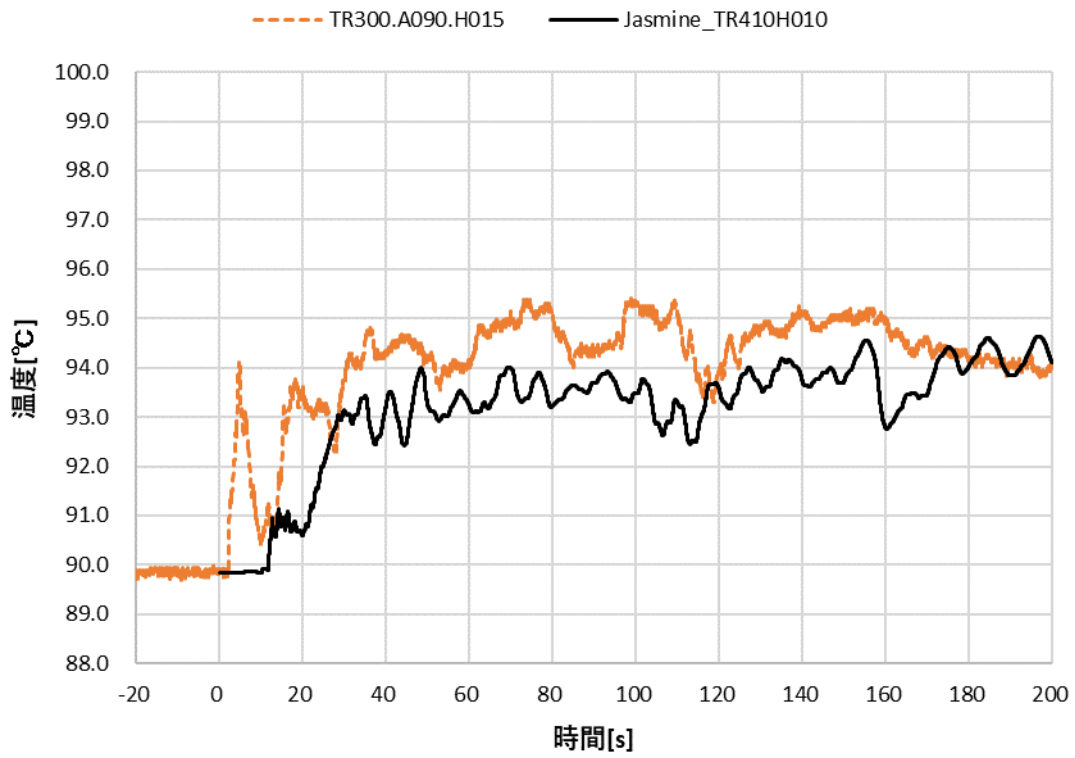


図 A1.28 水中温度の実験値と解析値の比較 (E16、R=400~420 mm H=10~15 mm)

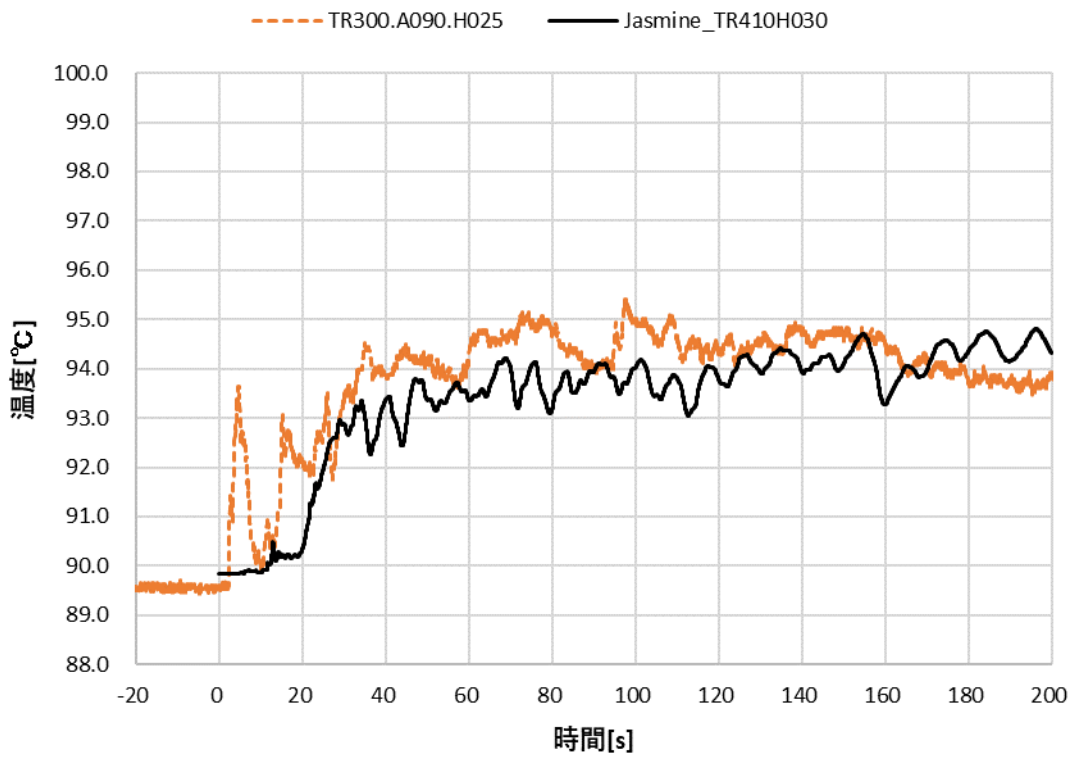


図 A1.29 水中温度の実験値と解析値の比較 (E16、R=400~420 mm H=25~30 mm)

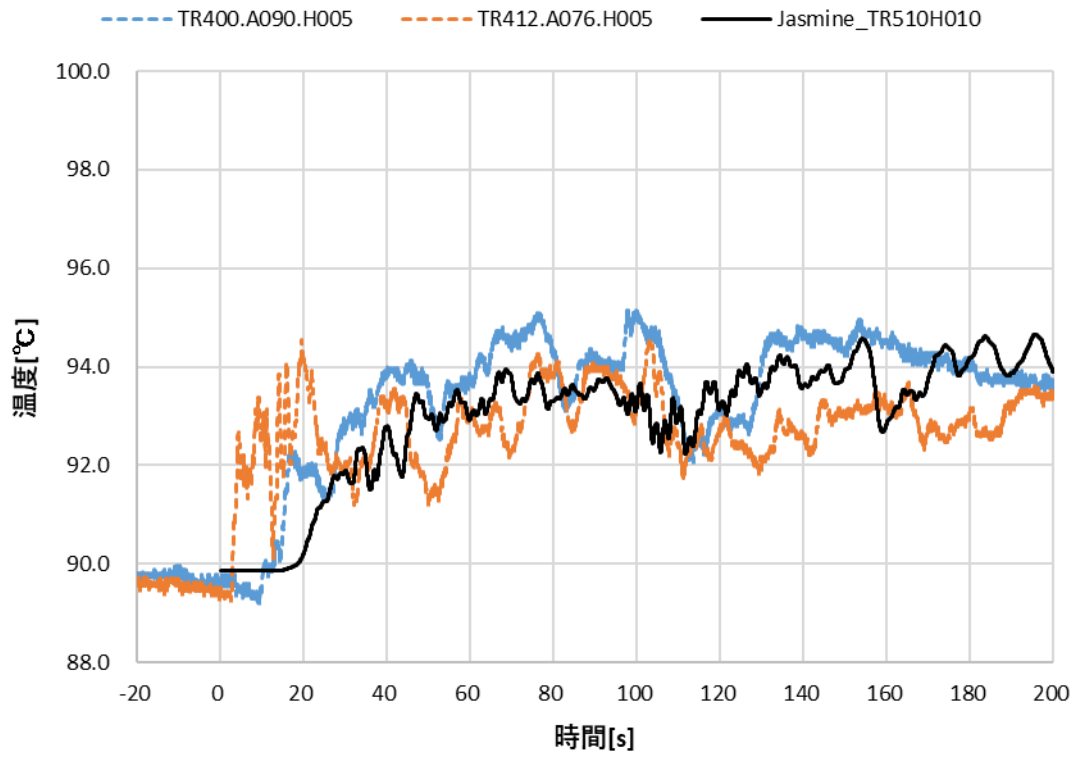


図 A1.30 水中温度の実験値と解析値の比較 (E16、R=500~520 mm H=5~10 mm)

A.2 全体のボイド率・溶融部ジェット・液滴・プールの形状・床板内温度分布を示す図

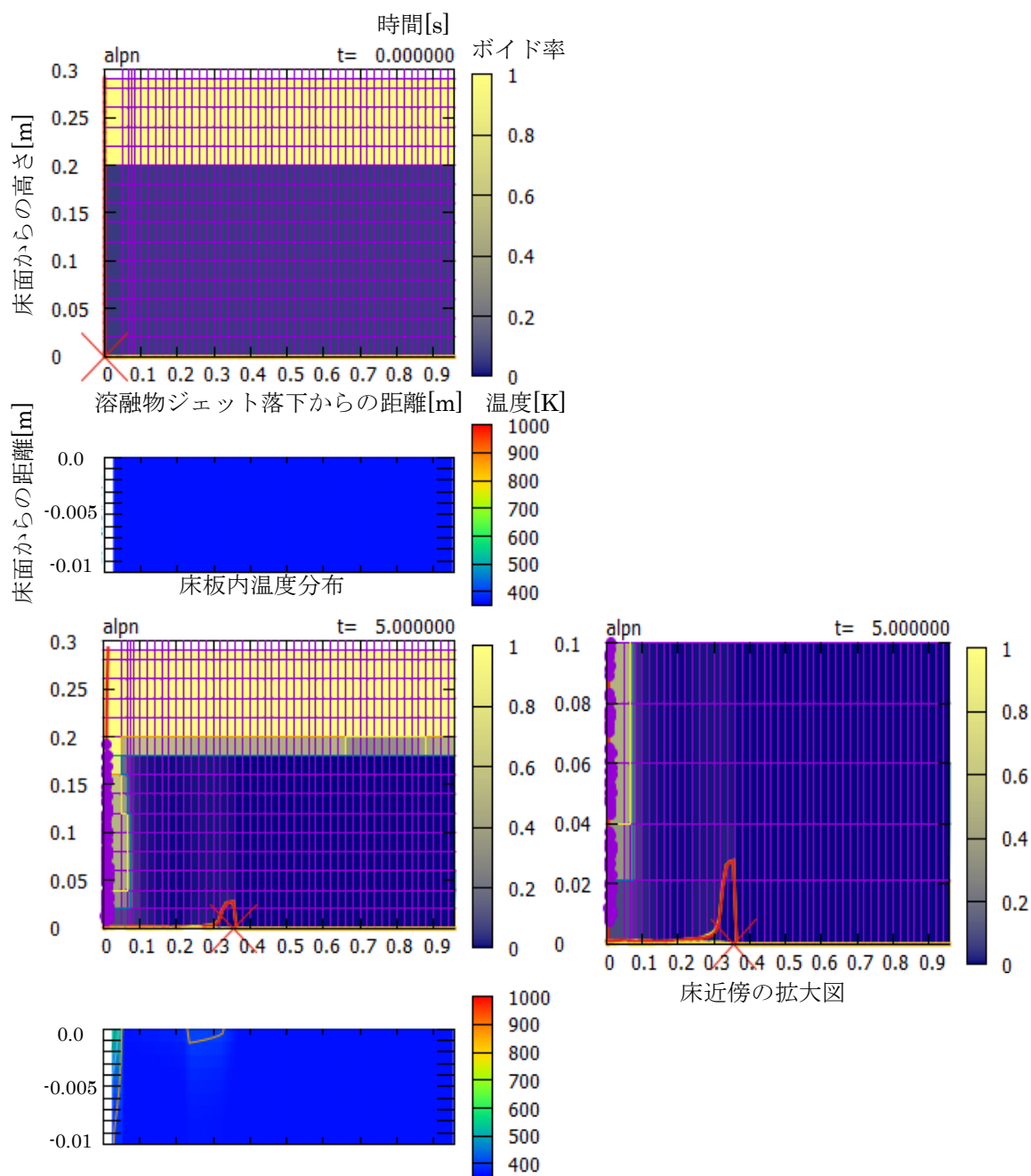


図 A2.1 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E10 : 0.0~5.0 秒)

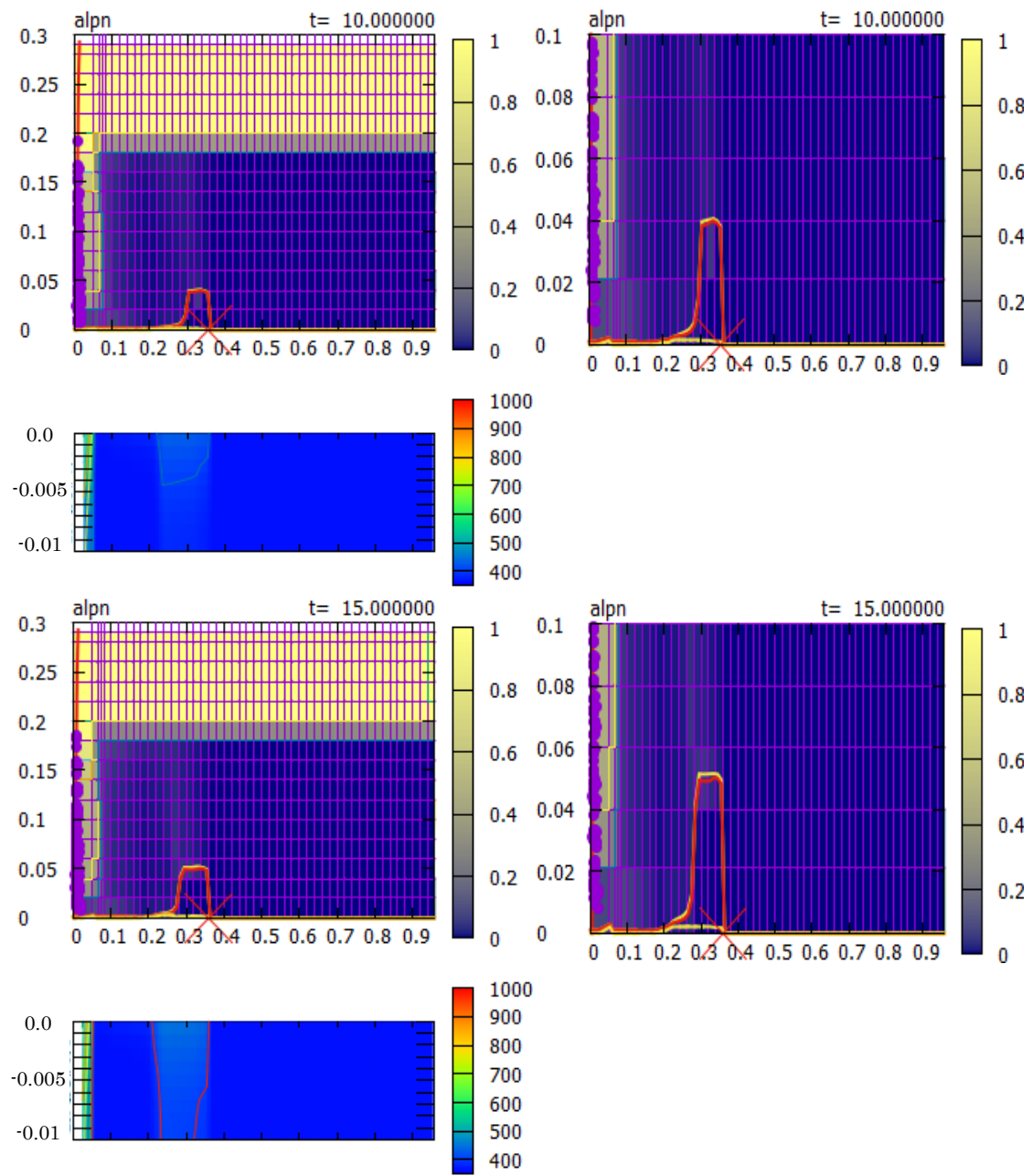


図 A2.2 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E10 : 10.0~15.0 秒)



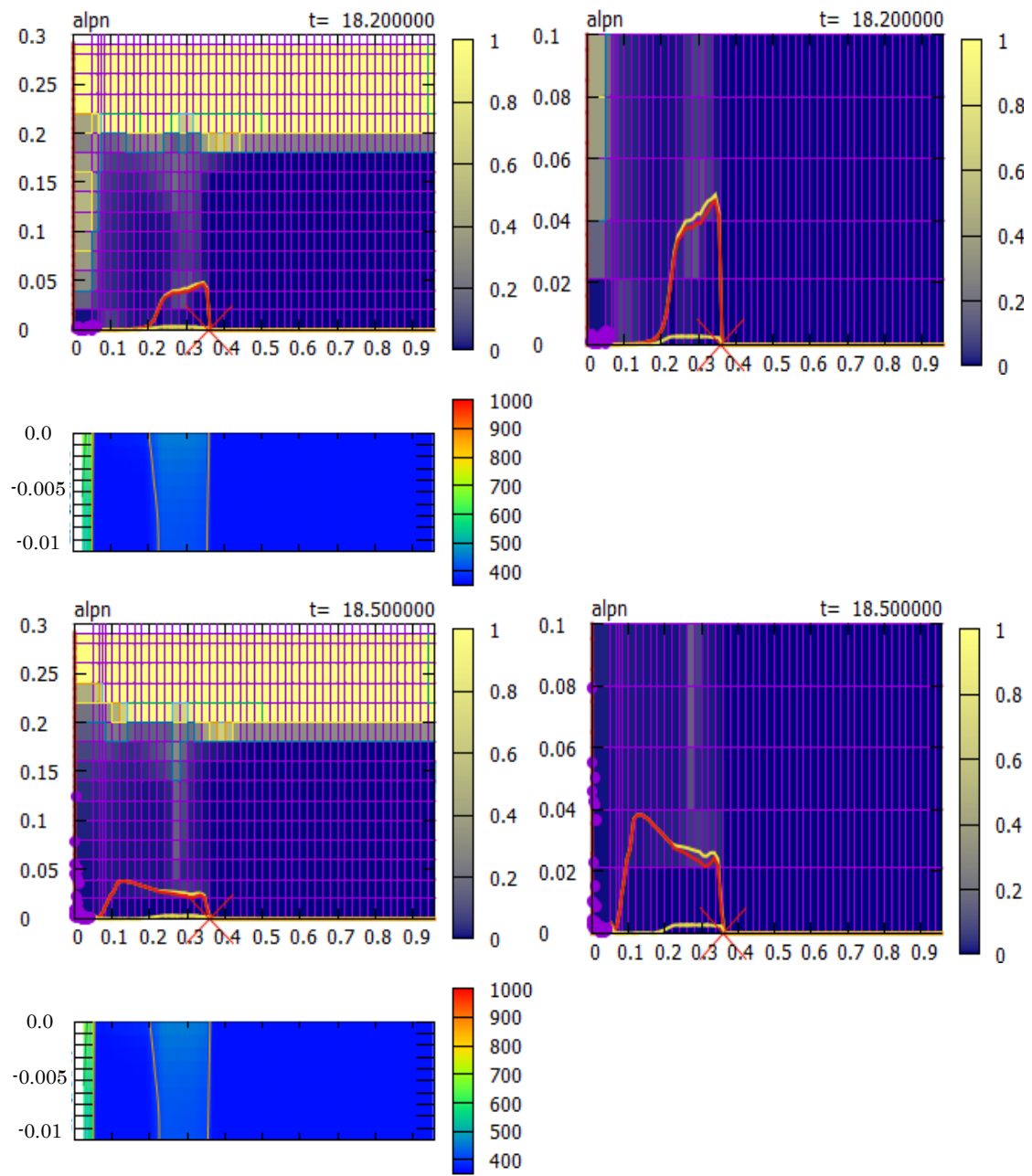


図 A2.3 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E10 : 18.2~18.5 秒)

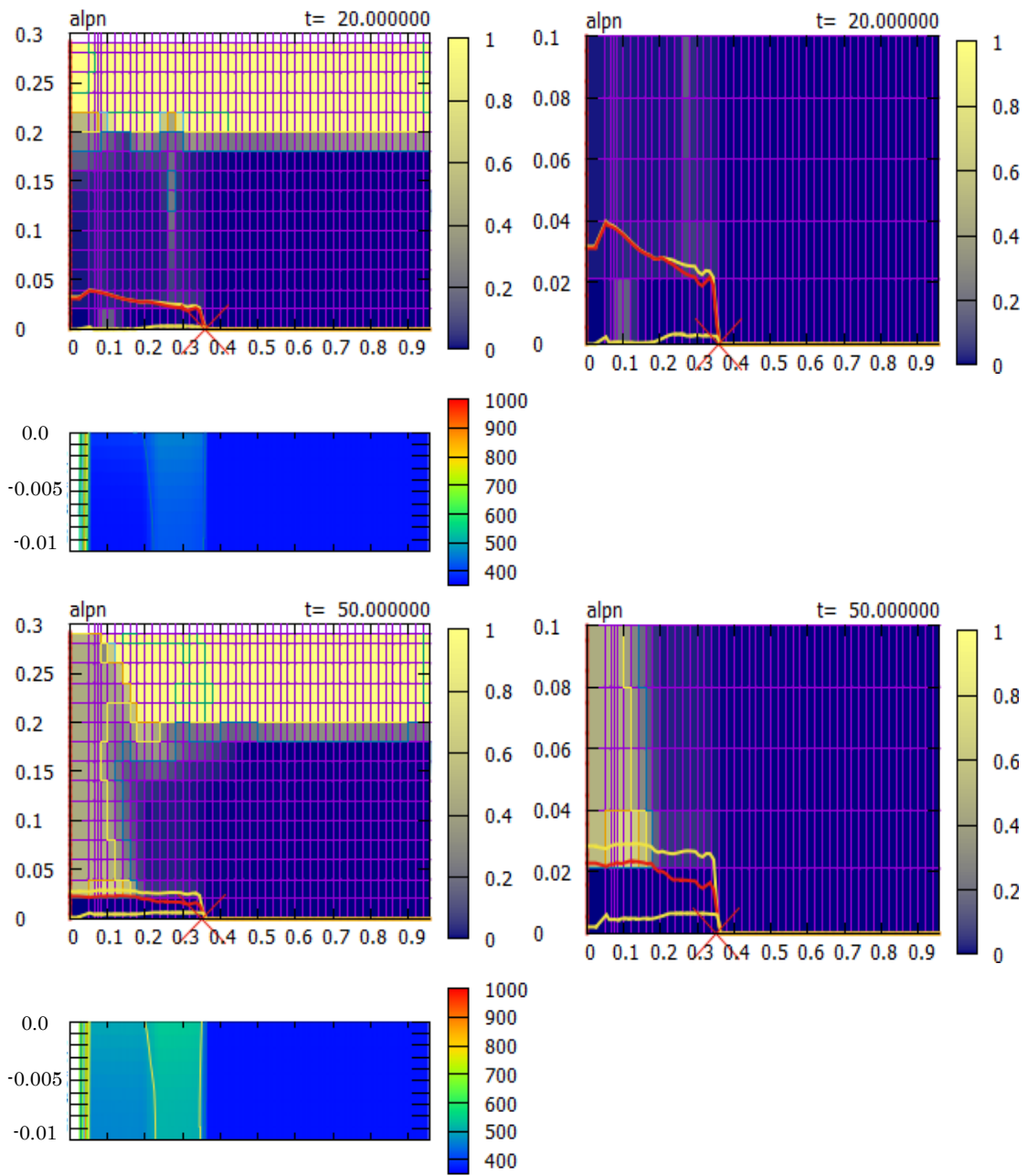


図 A2.4 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E10 : 20.0~50.0 秒)

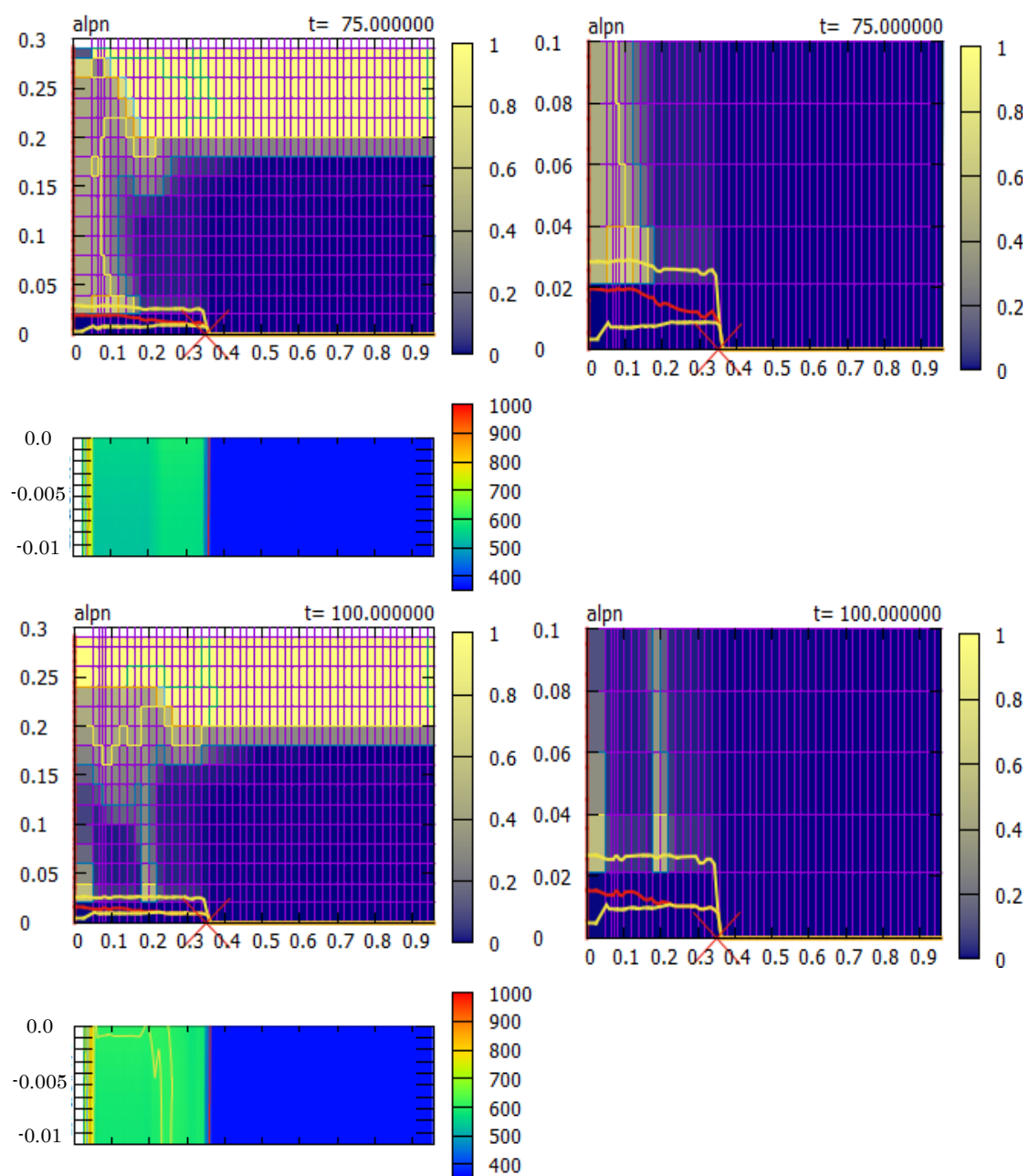


図 A2.5 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E10 : 75.0~100.0 秒)

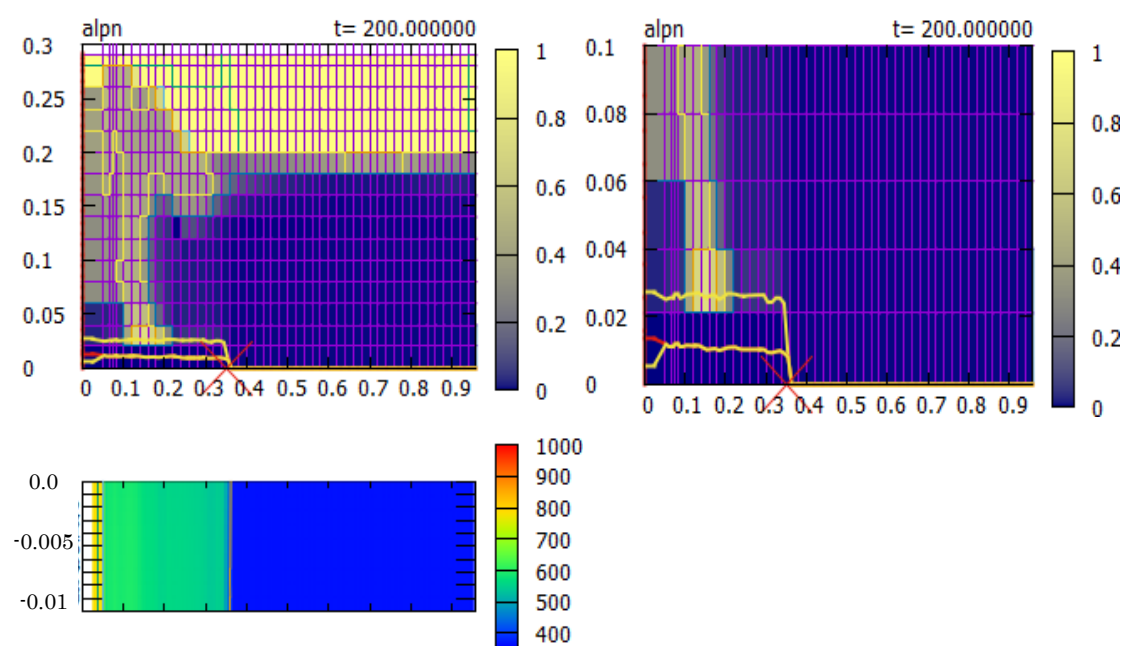


図 A2.6 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E10 : 200.0 秒)

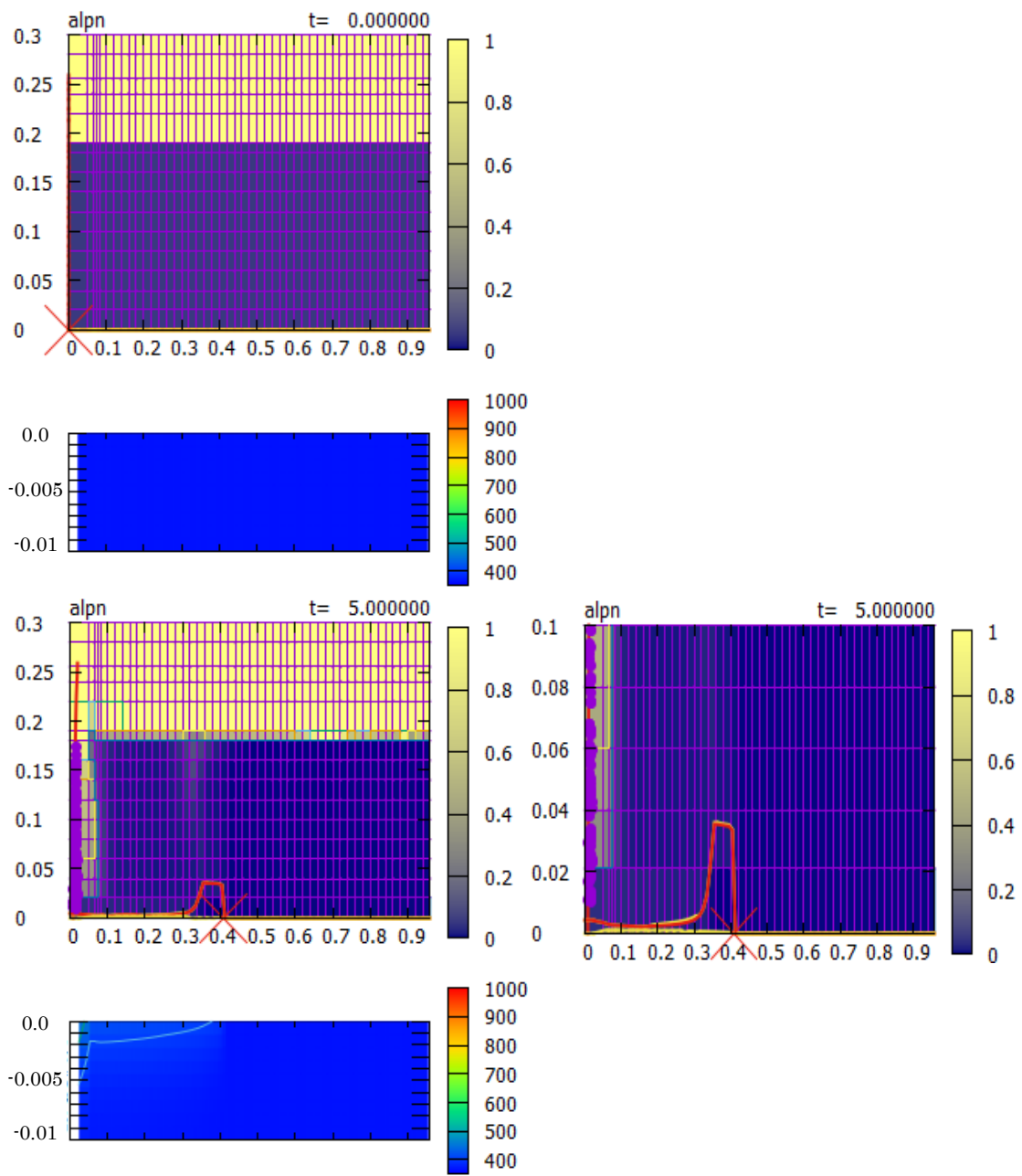


図 A2.7 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E11 : 0.0~5.0 秒)

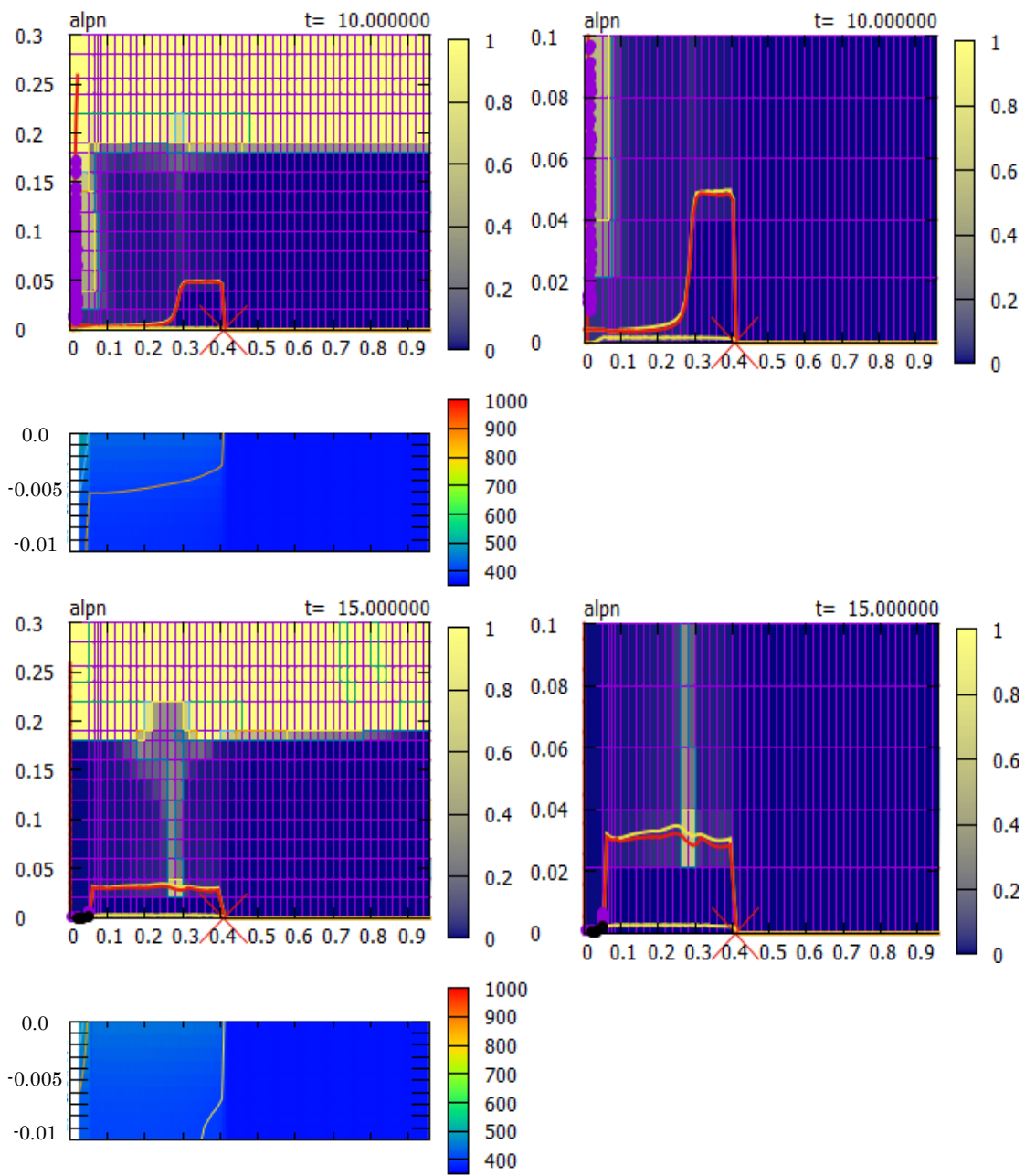


図 A2.8 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E11 : 10.0~15.0 秒)

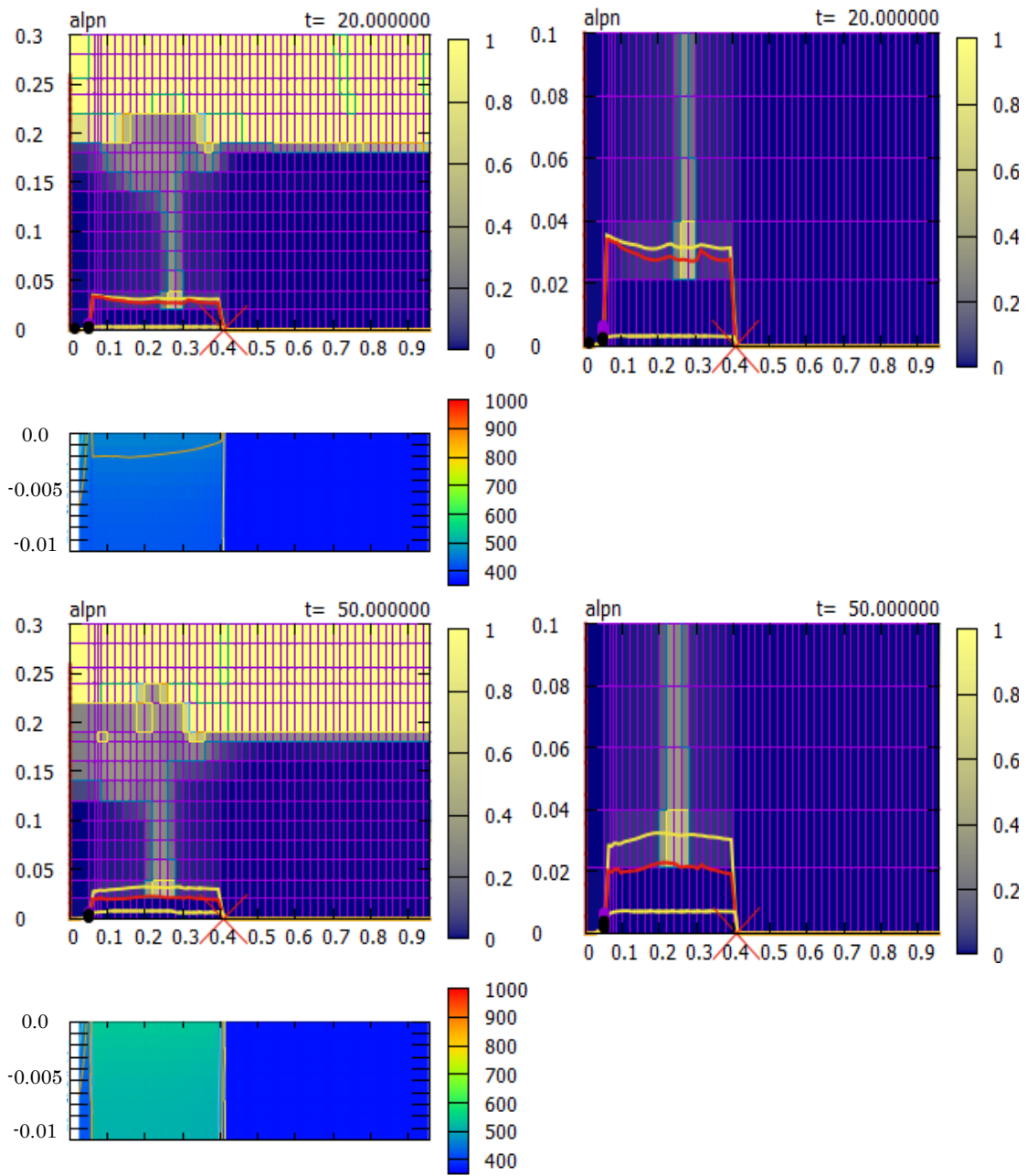


図 A2.9 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E11 : 20.0~50.0 秒)

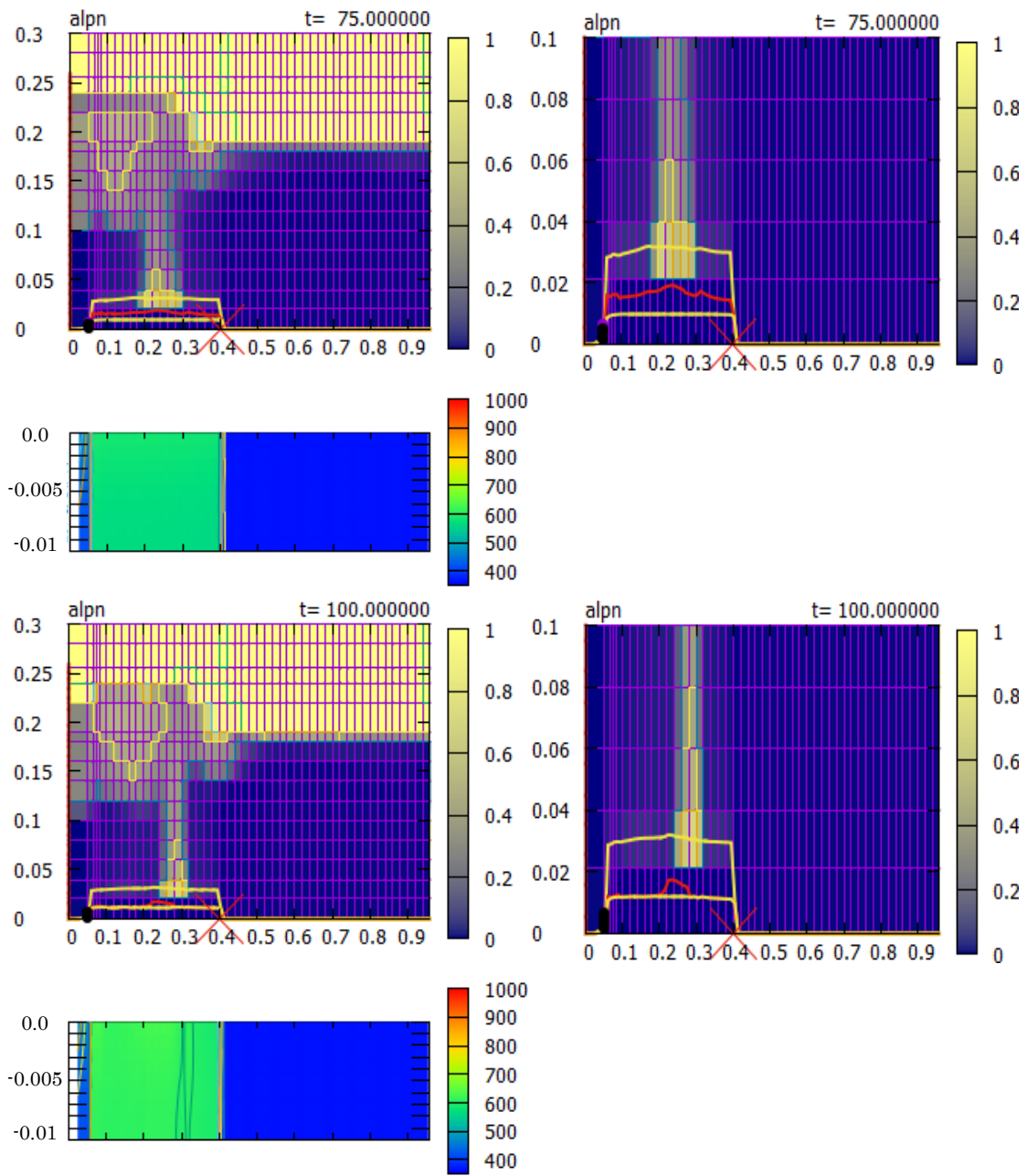


図 A2.10 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E11 : 75.0~100.0 秒)



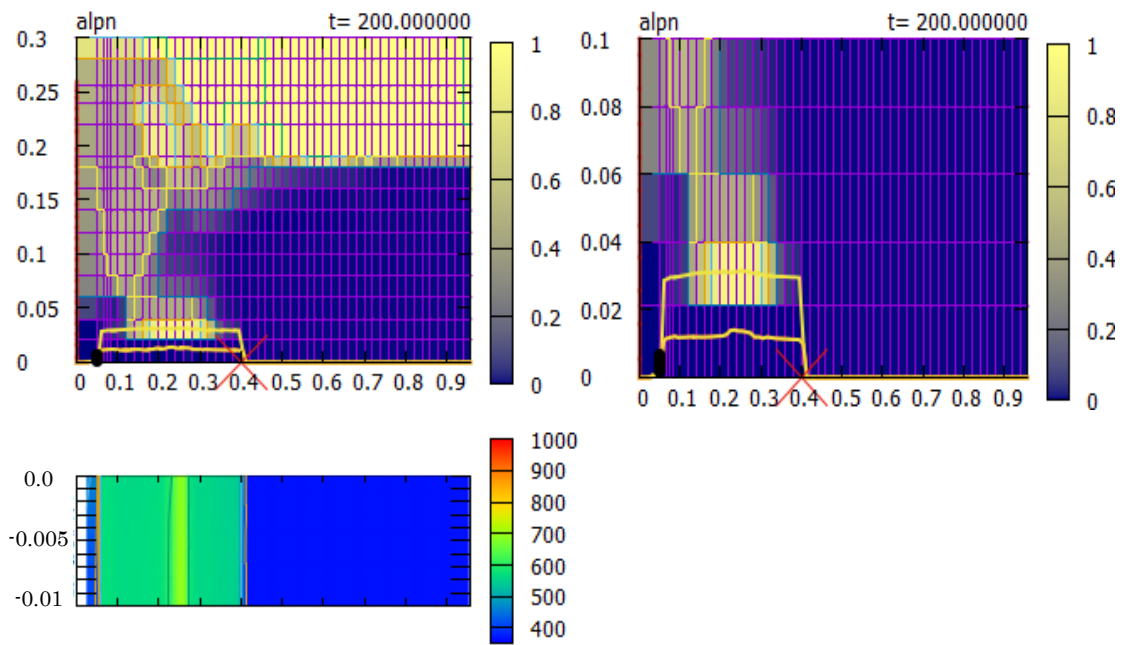


図 A2.11 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E11 : 200.0 秒)

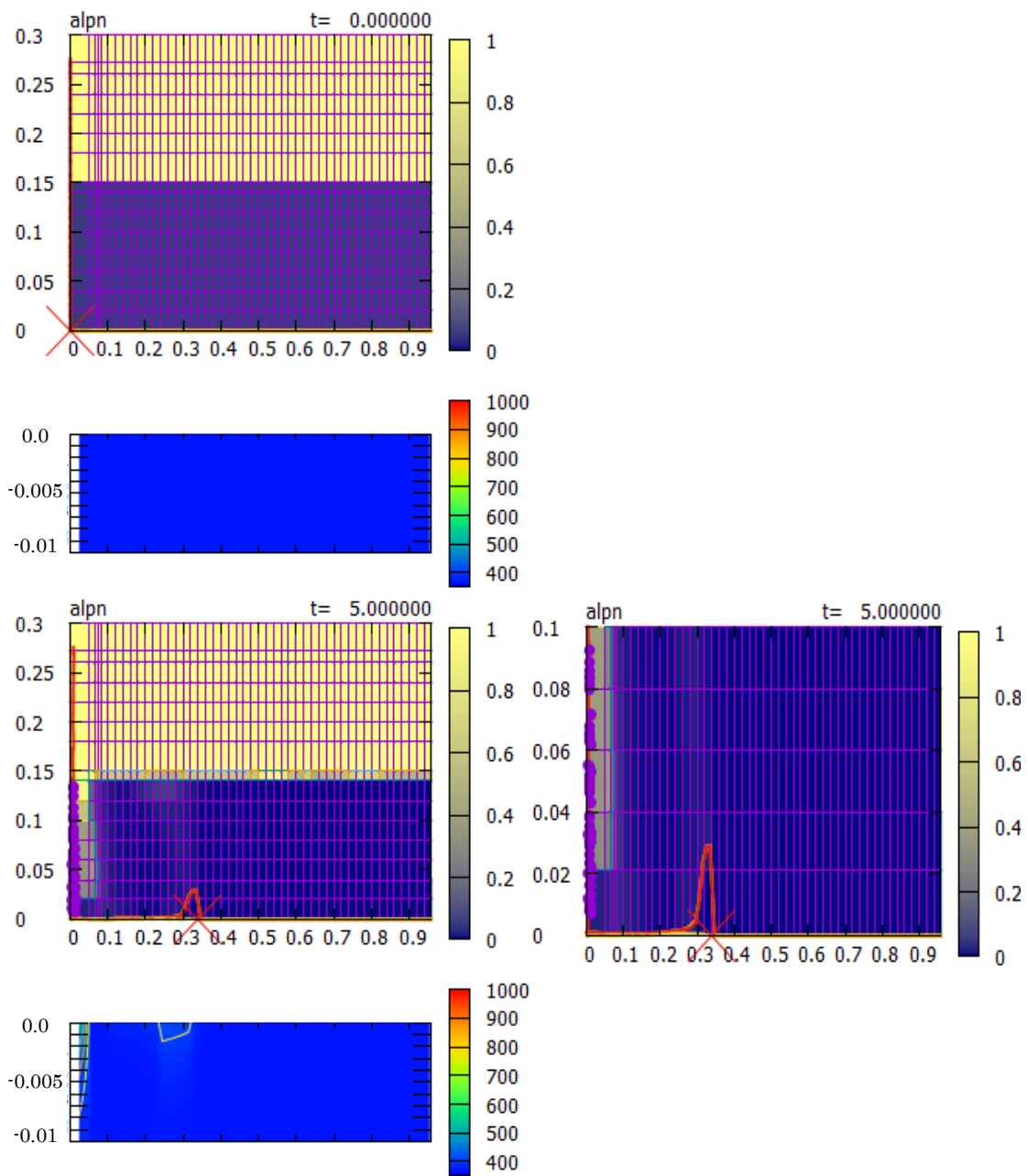


図 A2.12 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E12 : 0.0~5.0 秒)

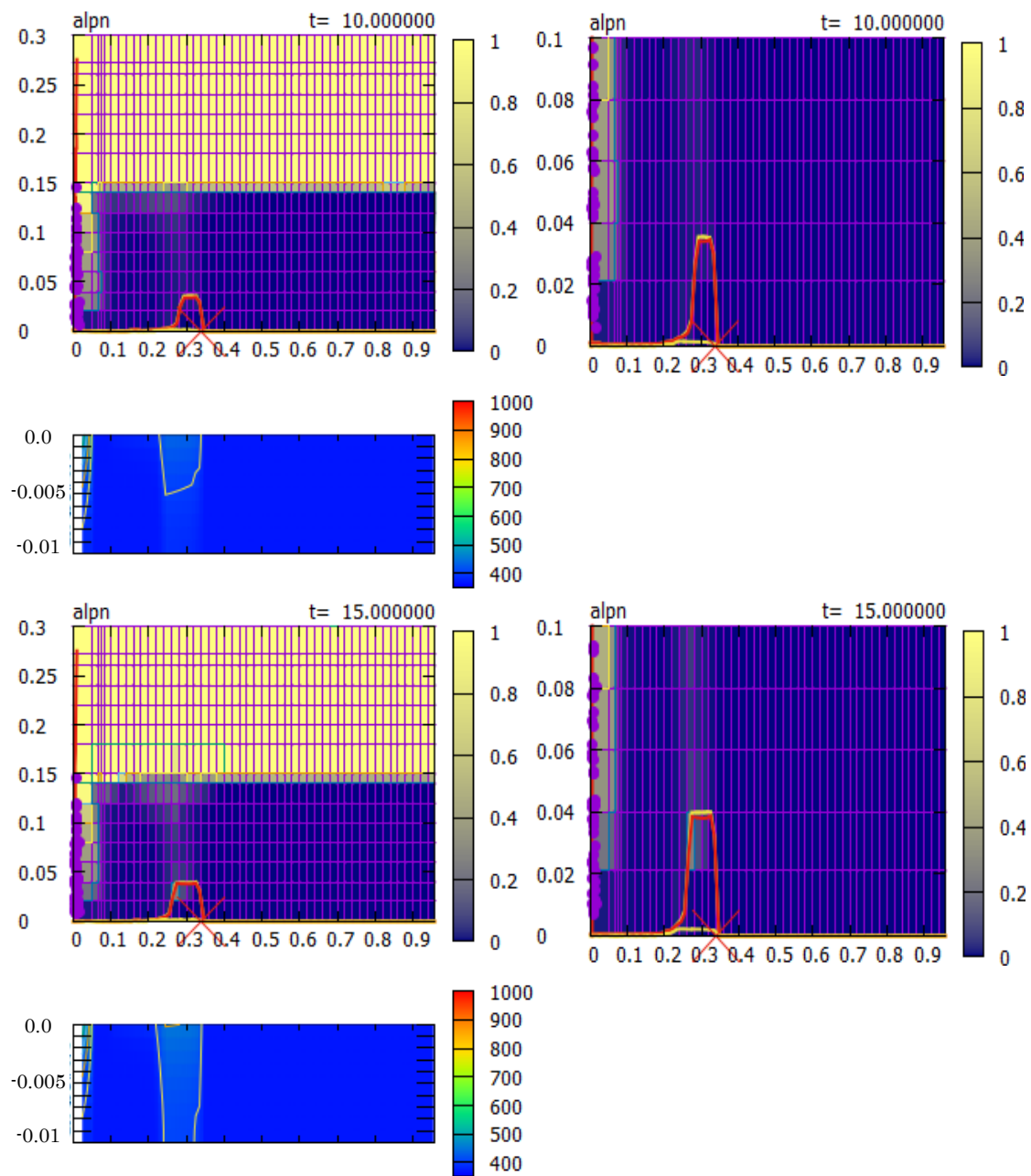


図 A2.13 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E12 : 10.0~15.0 秒)

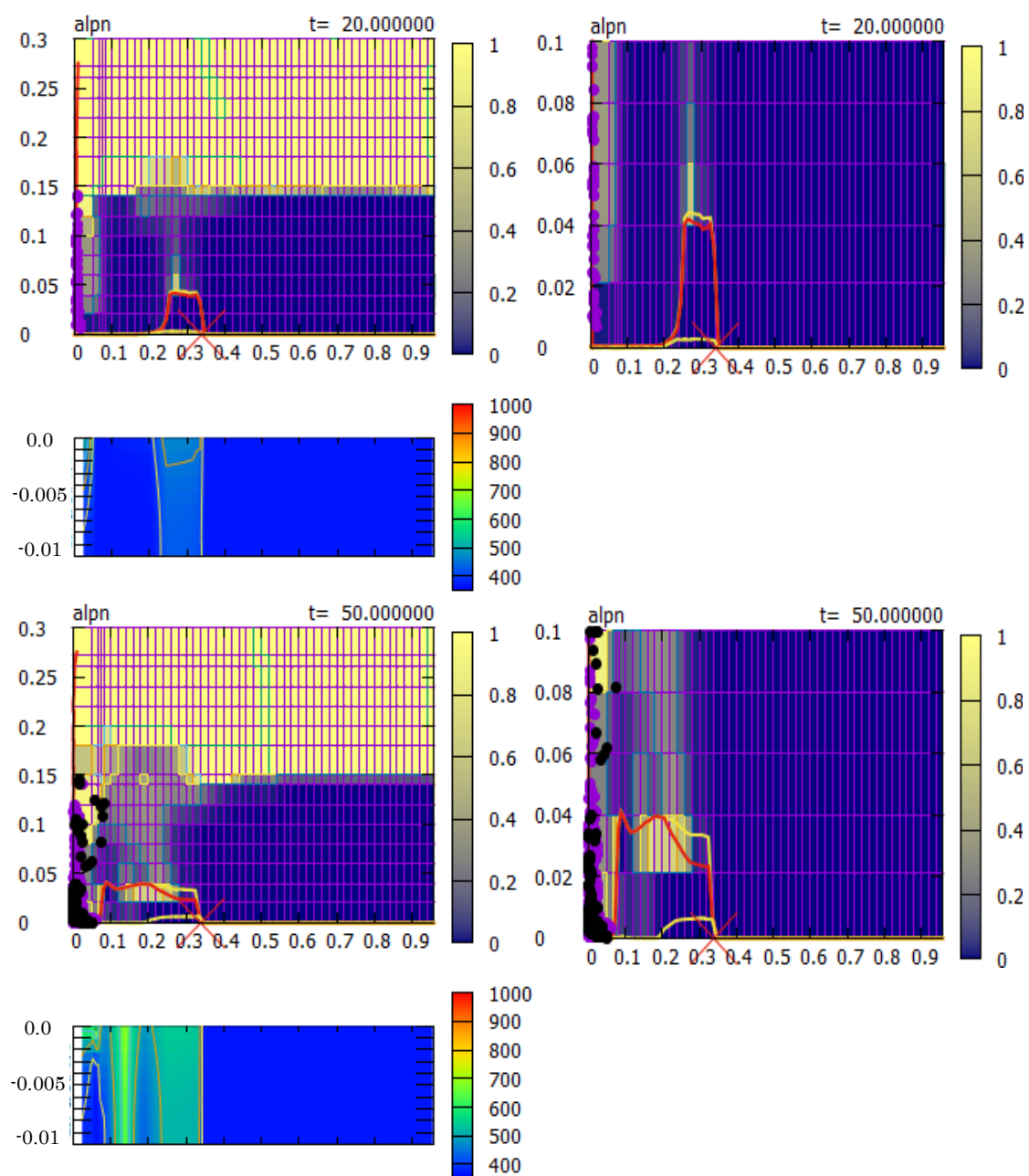


図 A2.14 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E12 : 20.0~50.0 秒)

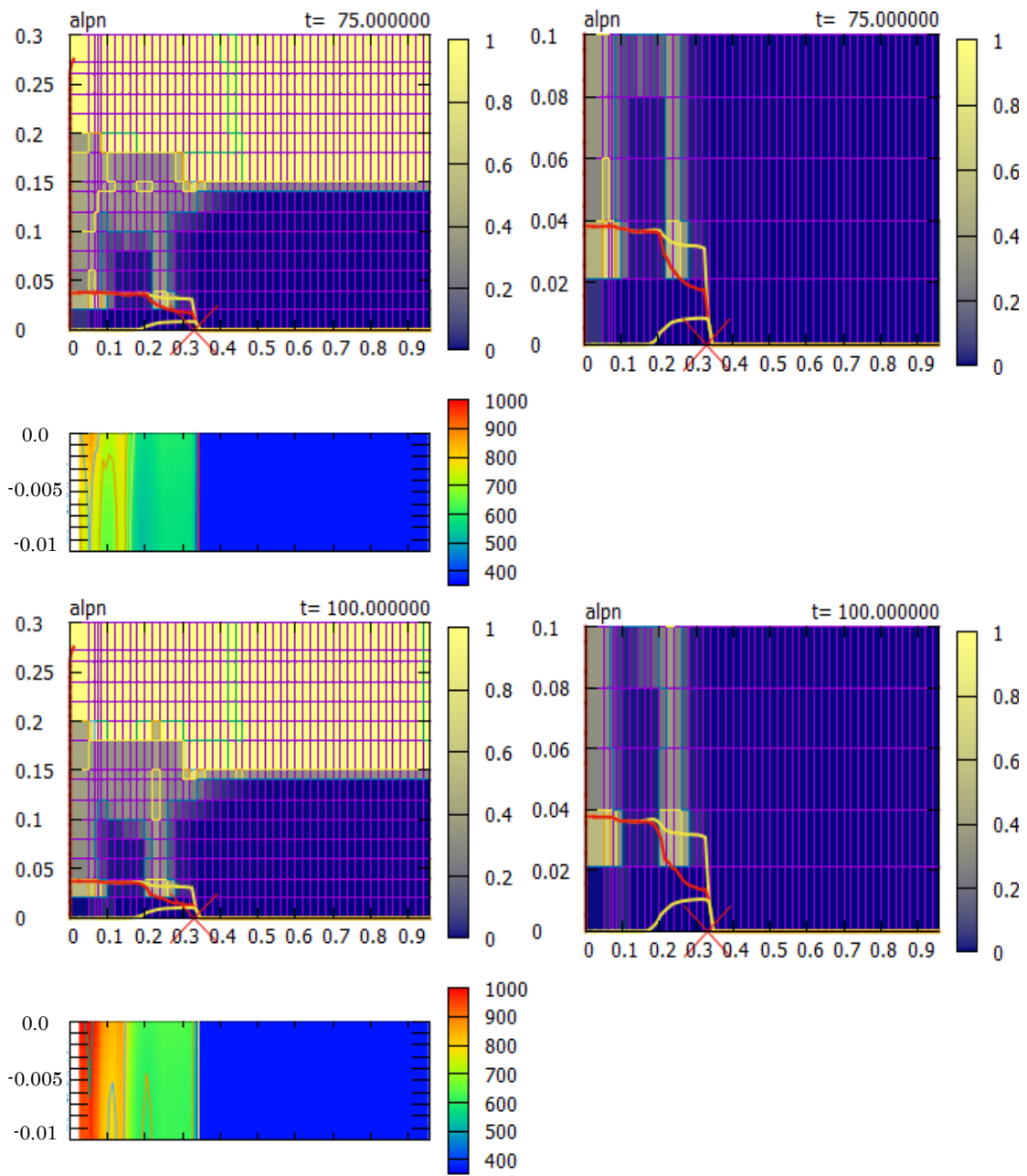


図 A2.15 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E12 : 75.0~100.0 秒)

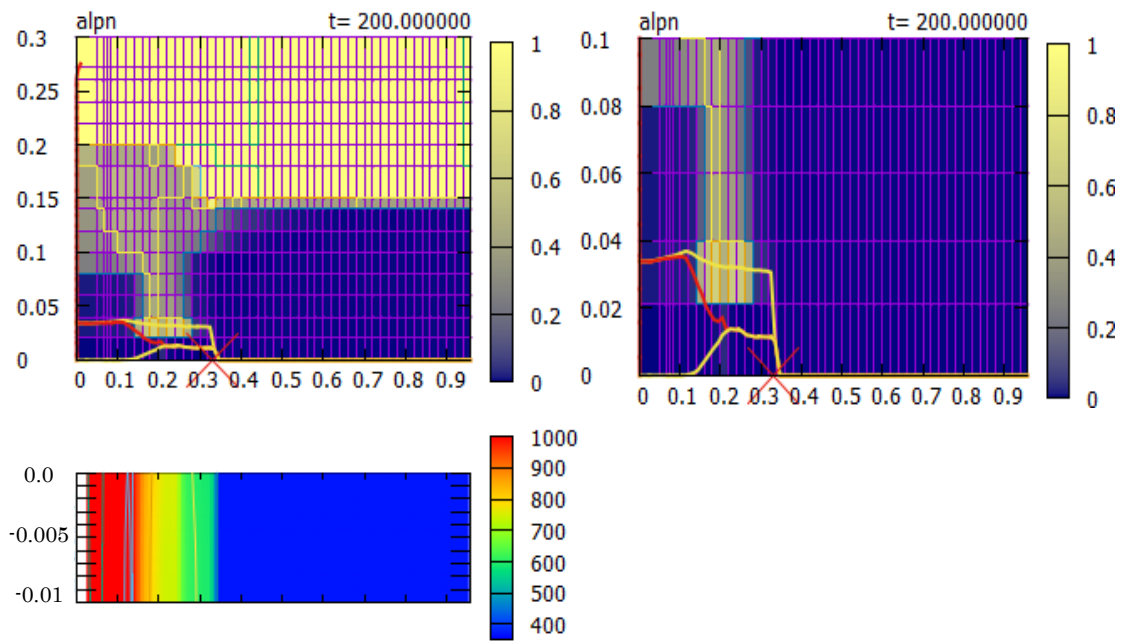


図 A2.16 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E12 : 200.0 秒)

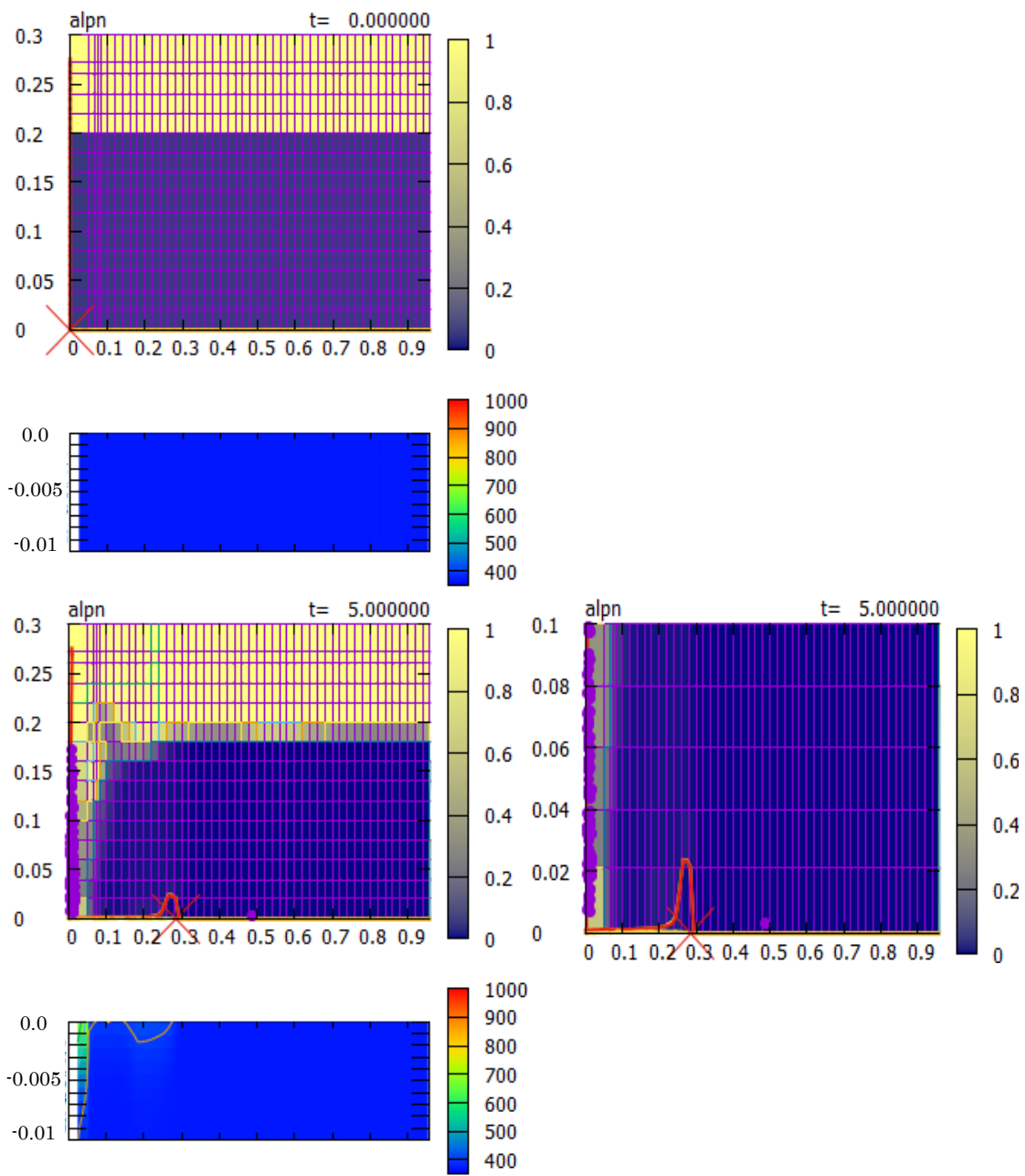


図 A2.17 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E13 : 0.0~5.0 秒)

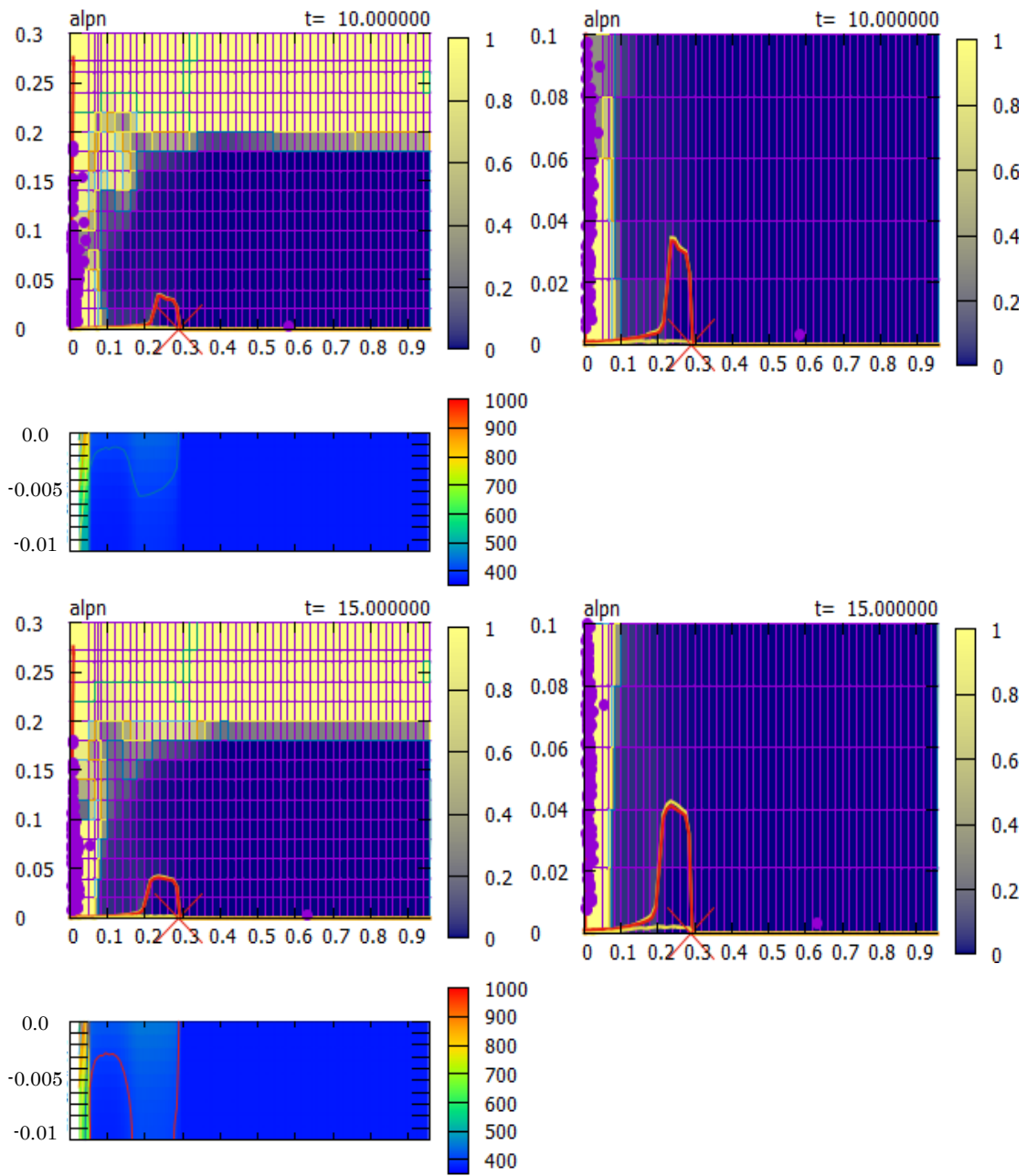


図 A2.18 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E13 : 10.0~15.0 秒)



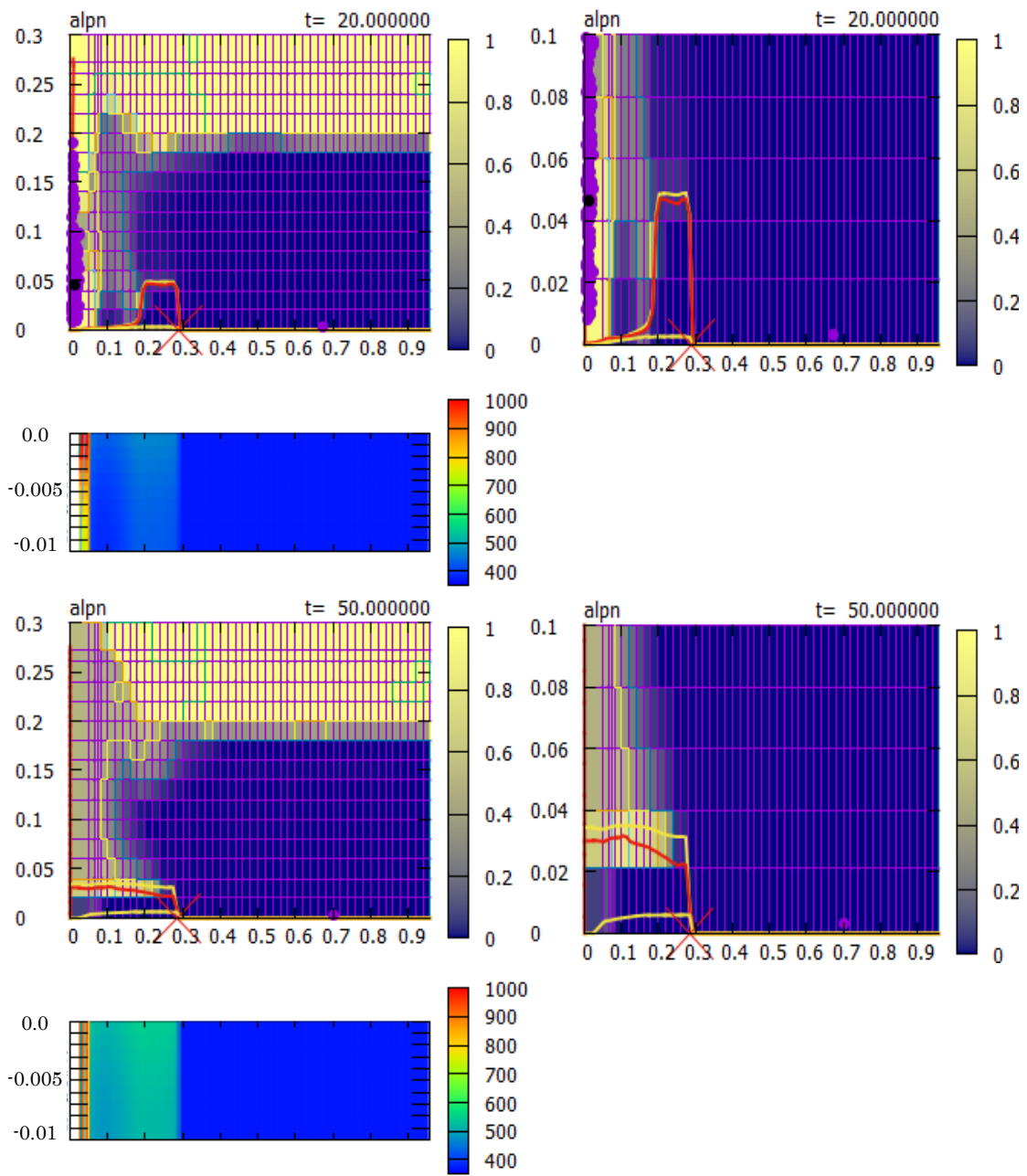


図 A2.19 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E13 : 20.0~50.0 秒)

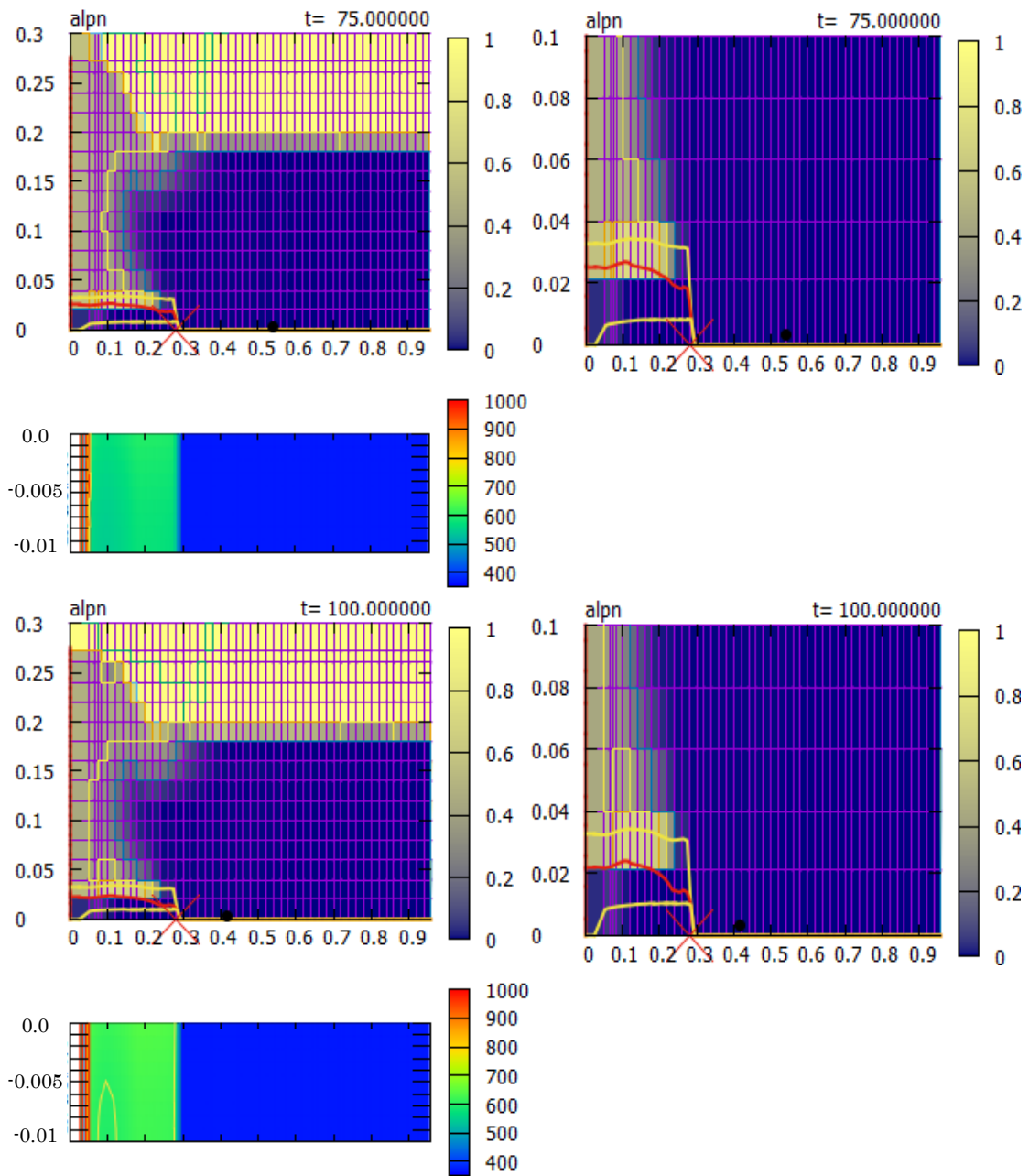


図 A2.20 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E13 : 75.0~100.0 秒)

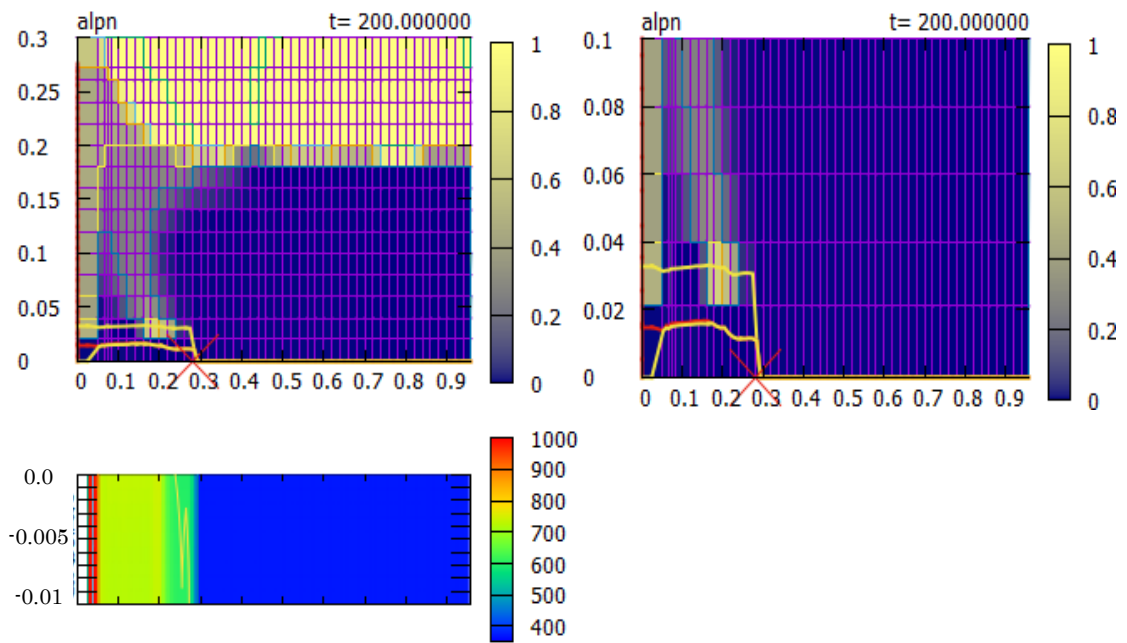


図 A2.21 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E13 : 200.0 秒)

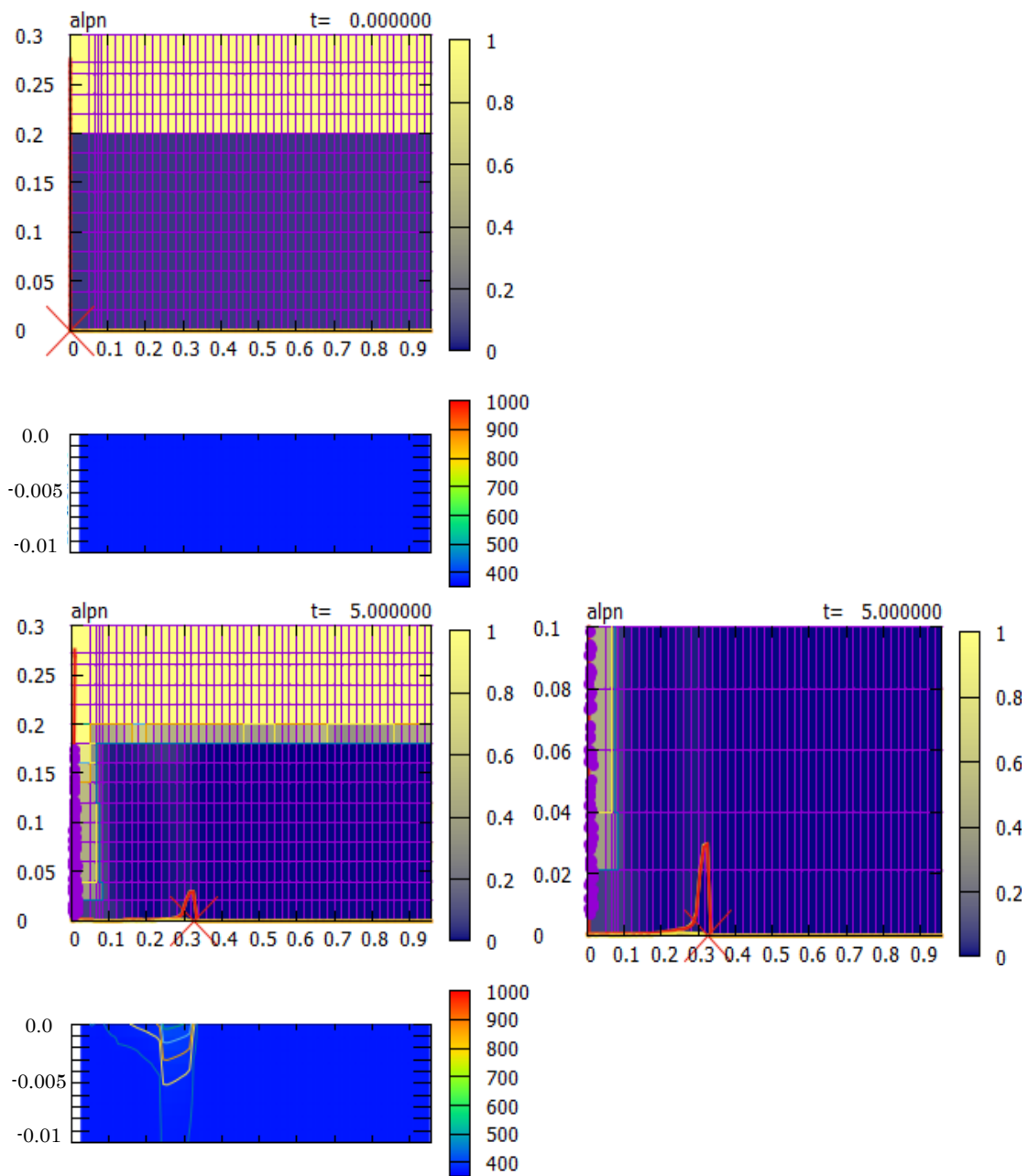


図 A2.22 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E14 : 0.0~5.0 秒)

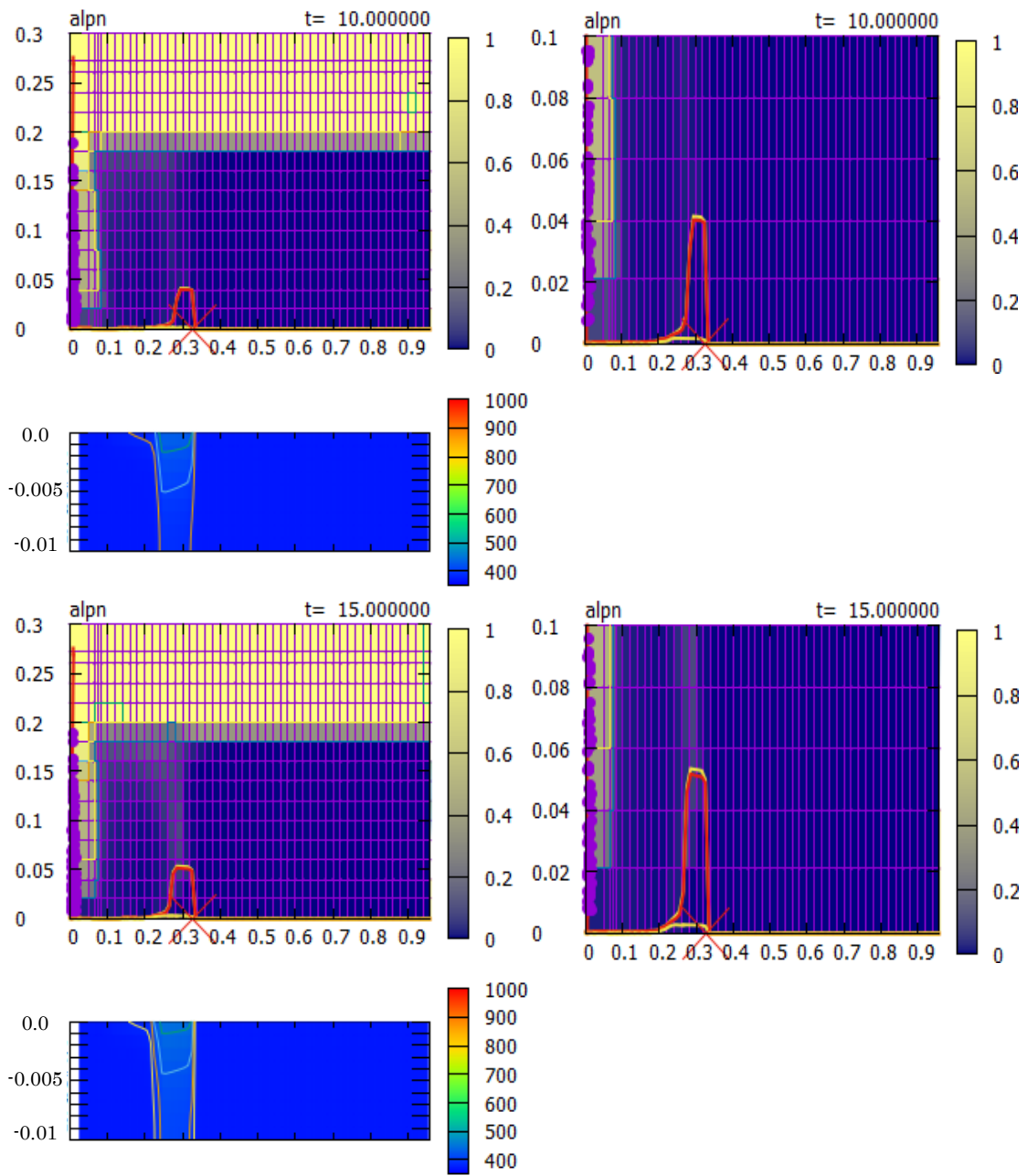


図 A2.23 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E14 : 10.0~15.0 秒)

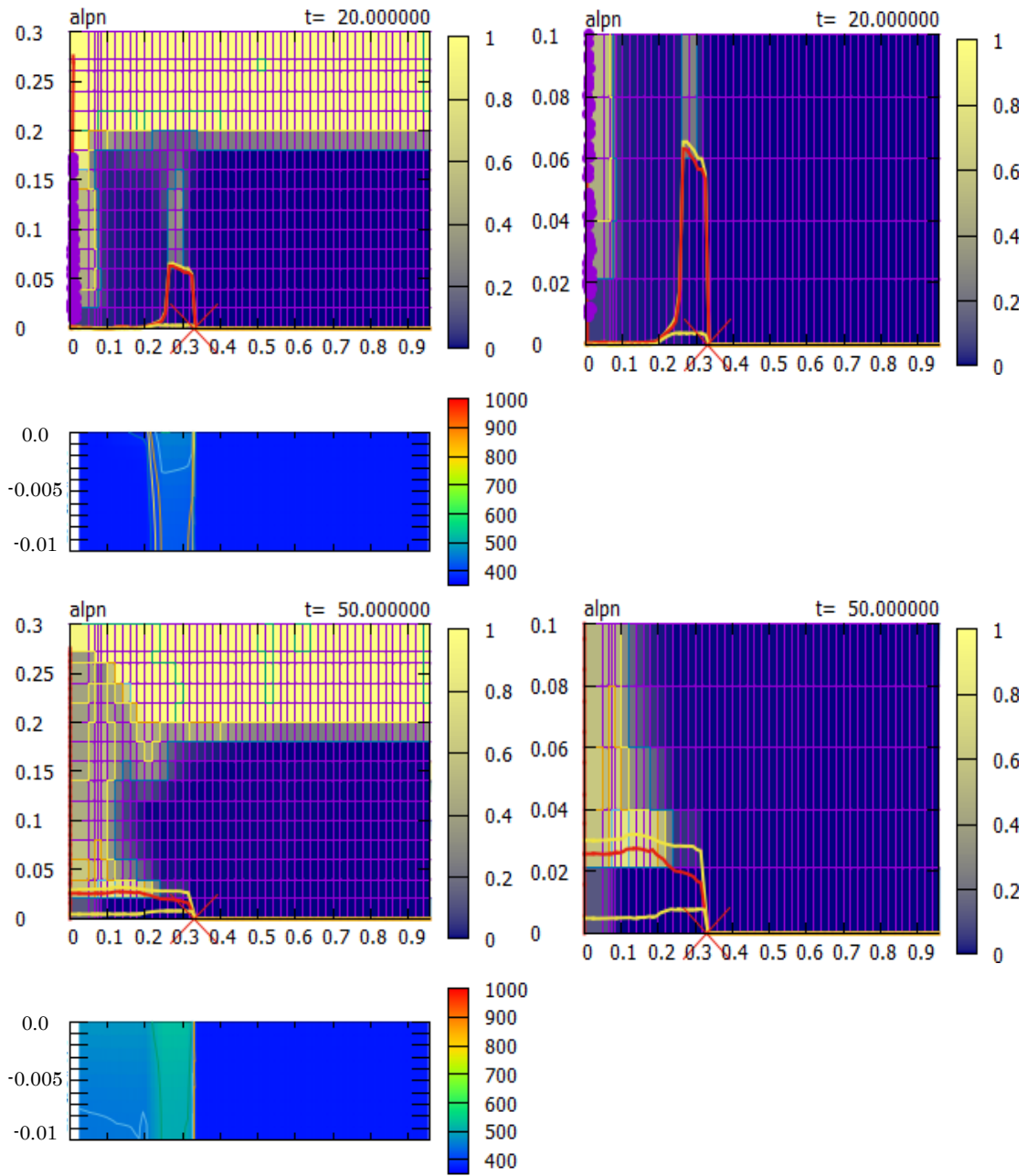


図 A2.24 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E14 : 20.0~50.0 秒)

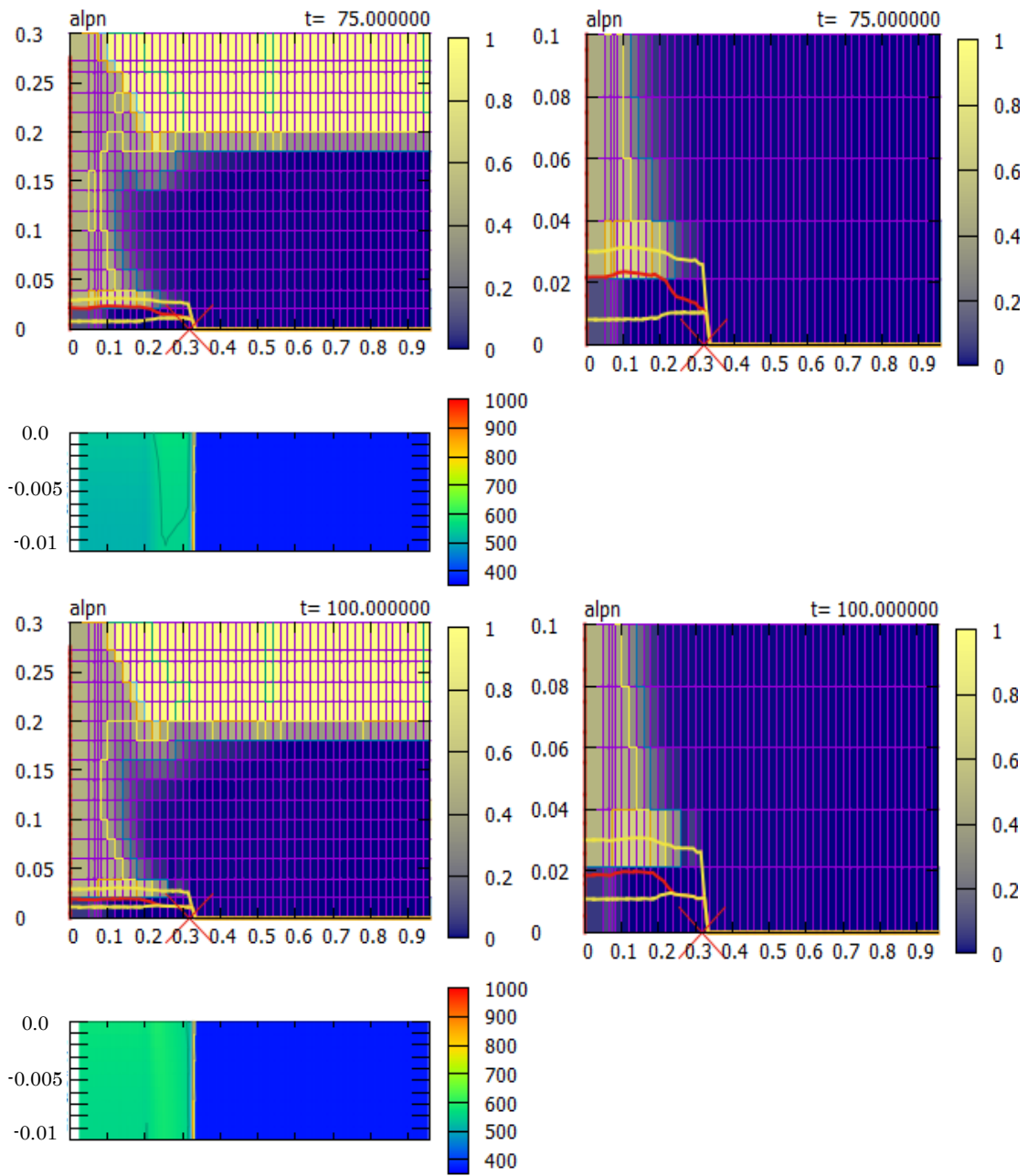


図 A2.25 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E14 : 75.0~100.0 秒)

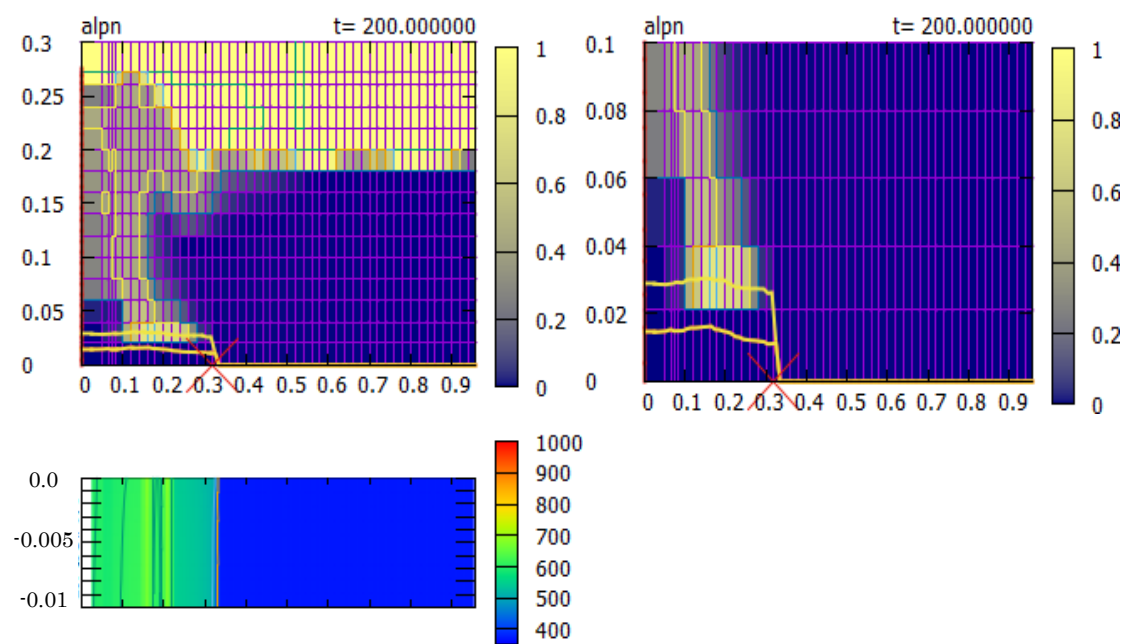


図 A2.26 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E14 : 200.0 秒)



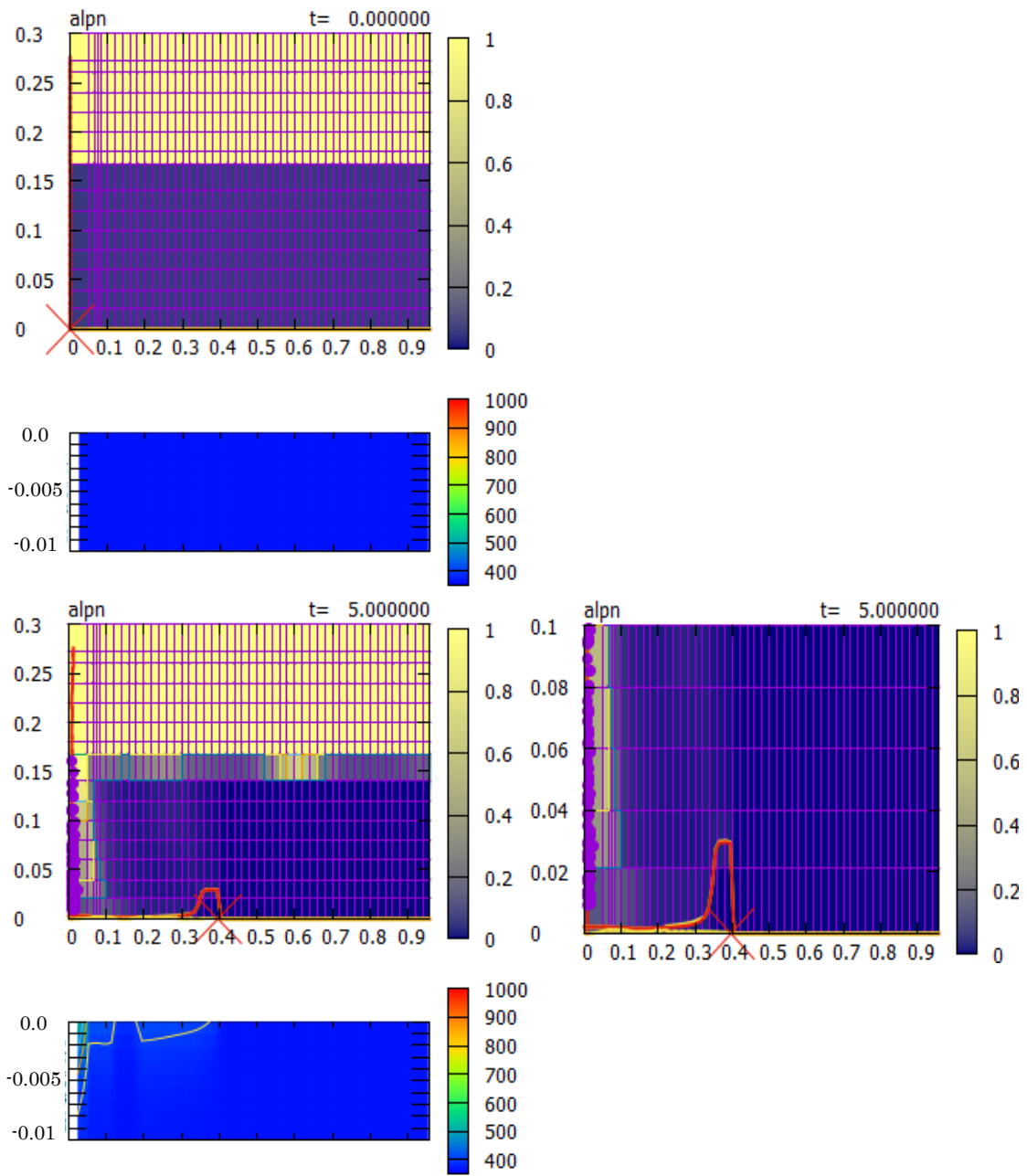


図 A2.27 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E15 : 0.0~5.0 秒)

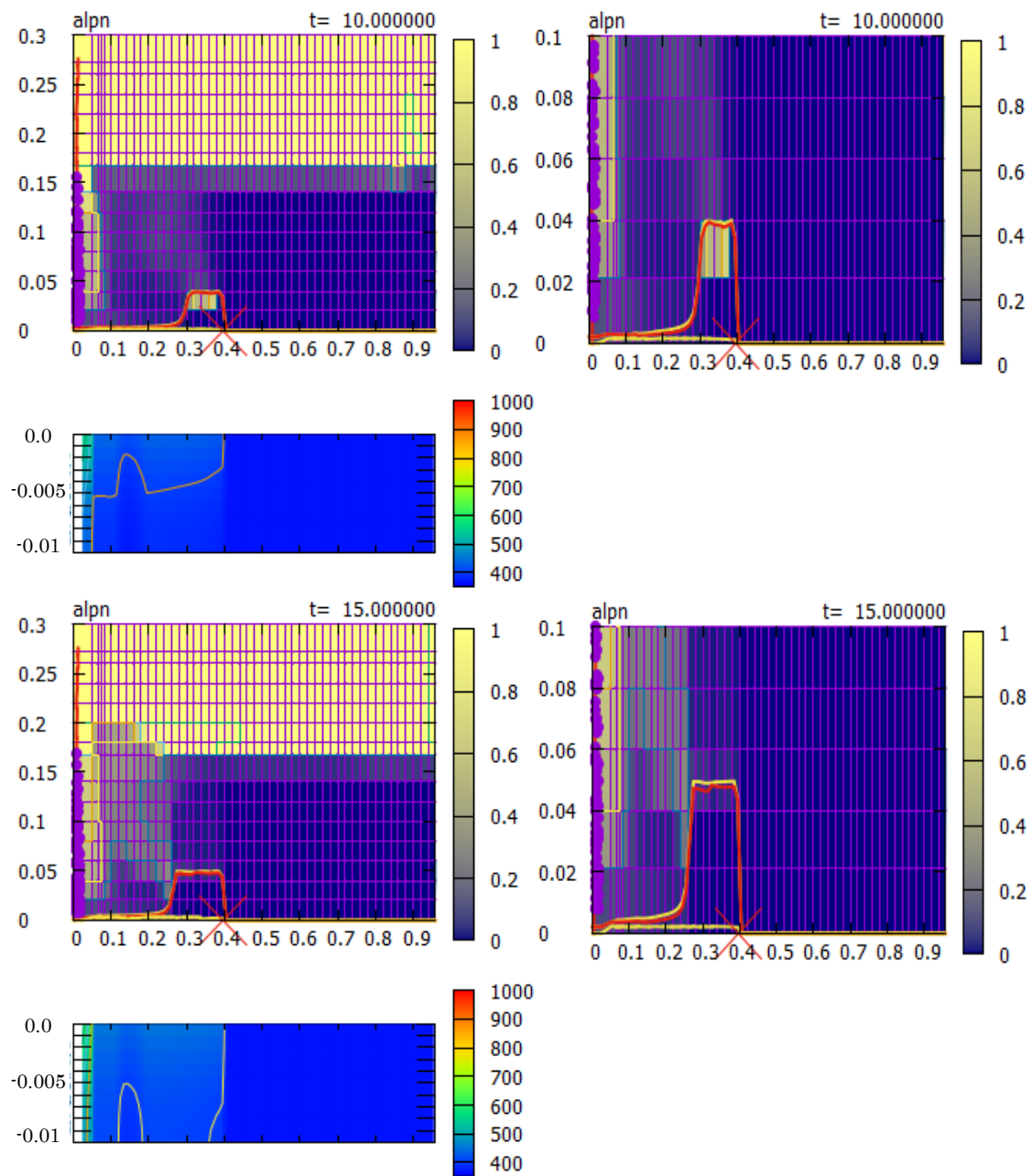


図 A2.28 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E15 : 10.0~15.0 秒)

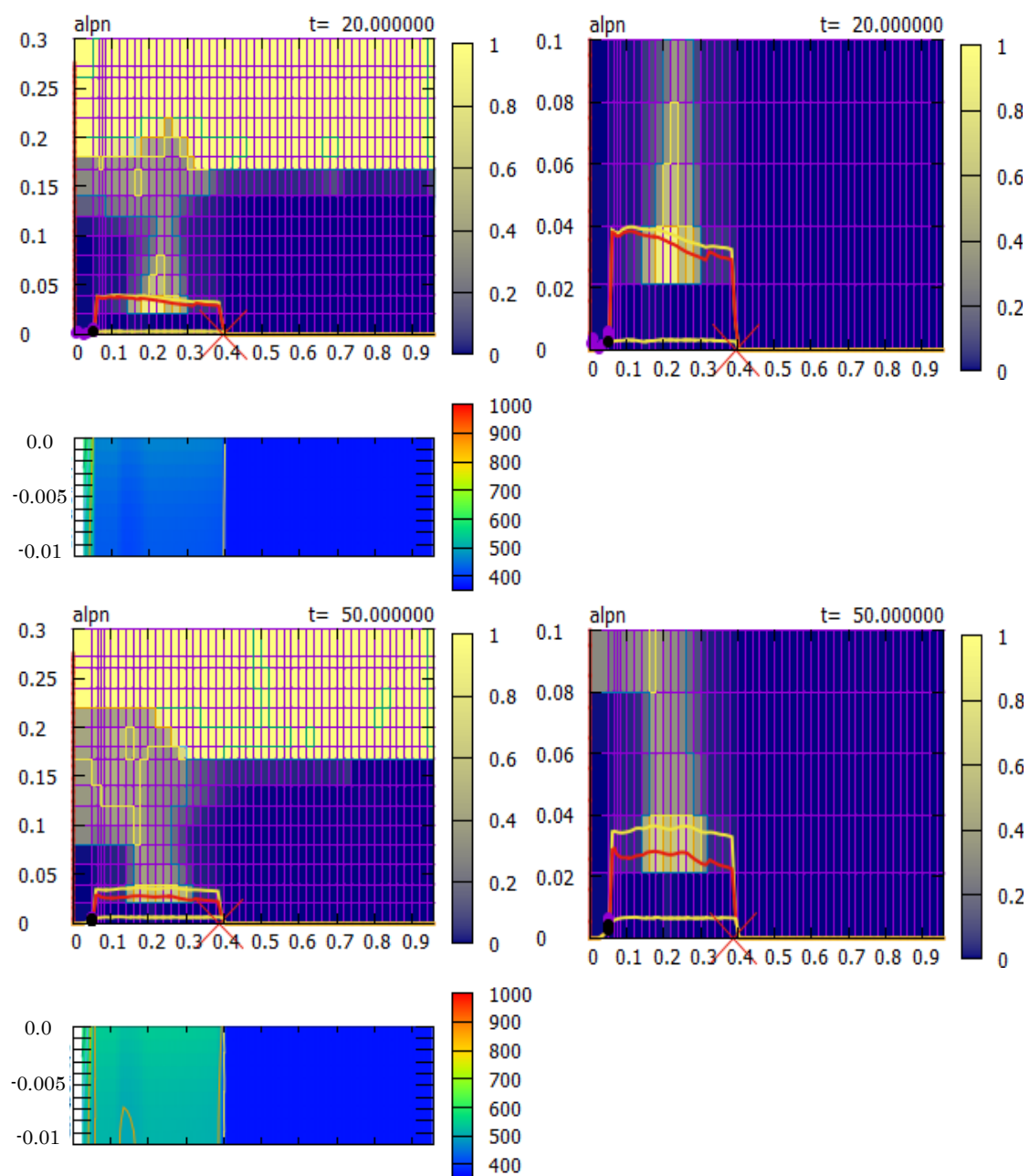


図 A2.29 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E15 : 20.0~50.0 秒)

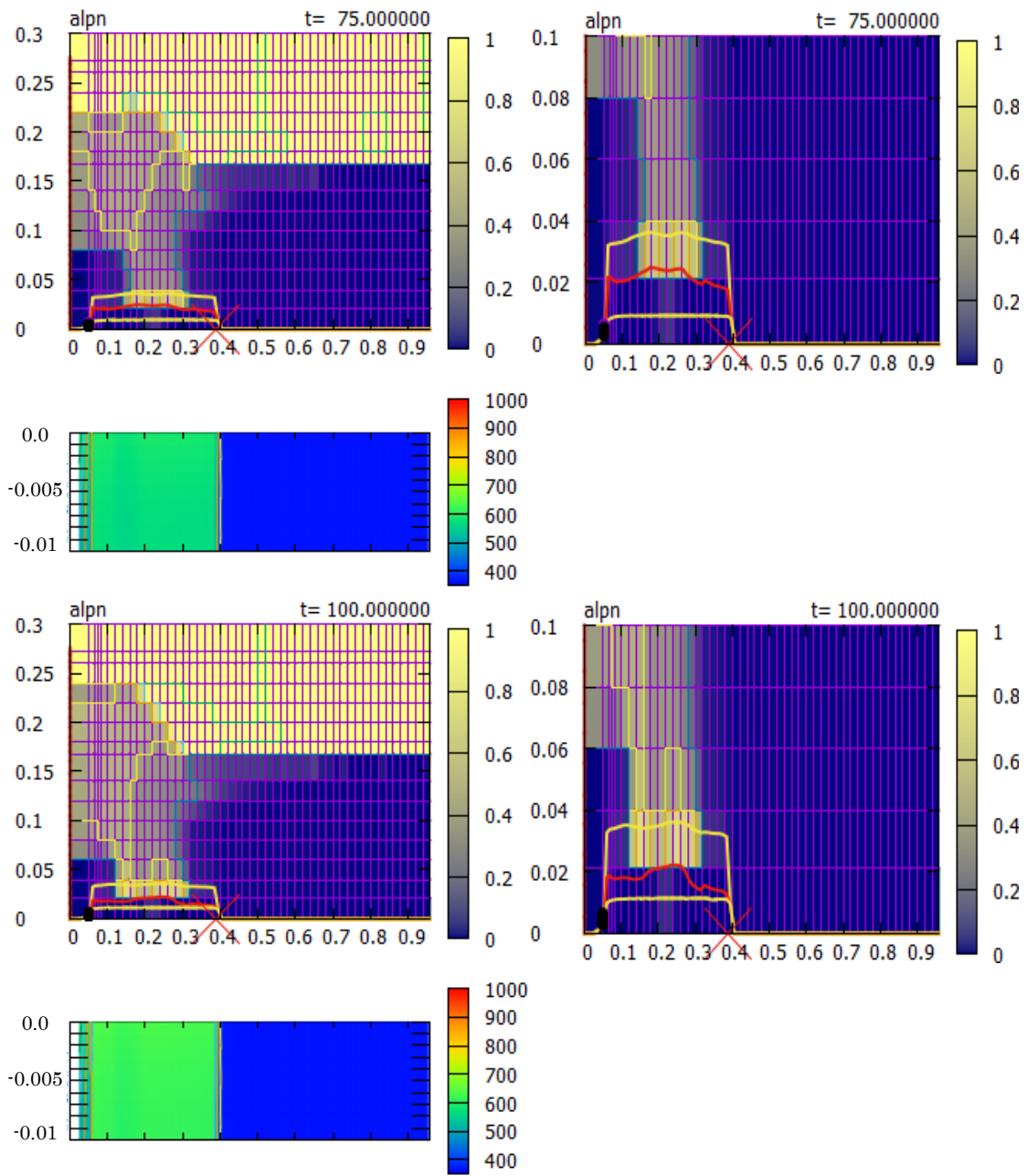


図 A2.30 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E15 : 75.0~100.0 秒)

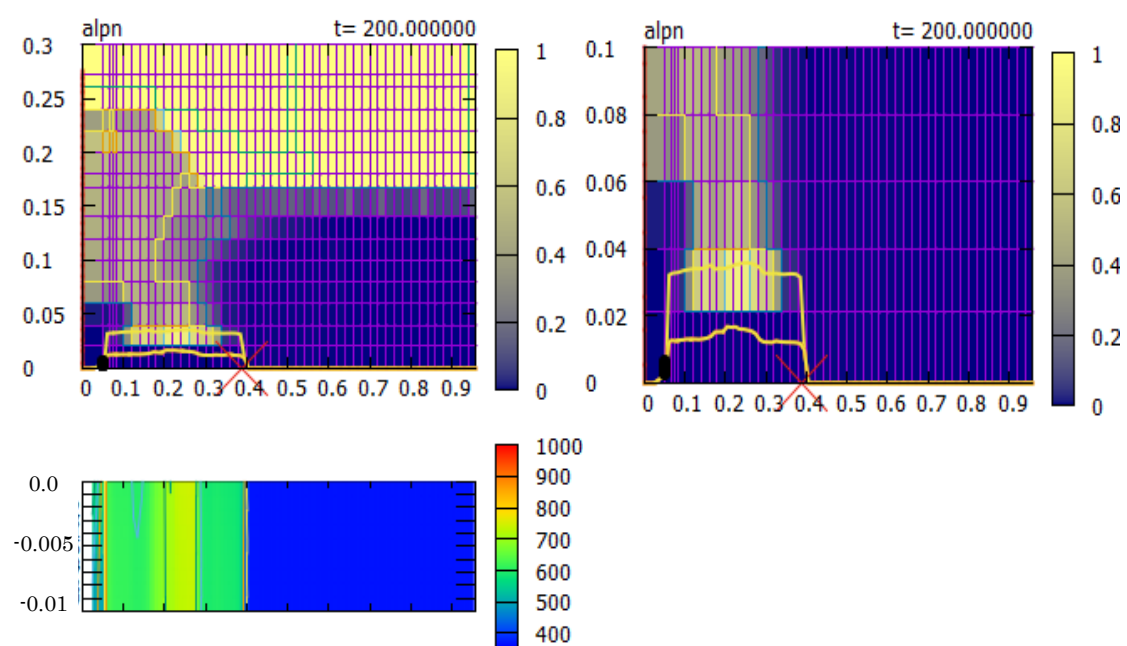


図 A2.31 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E15 : 200.0 秒)

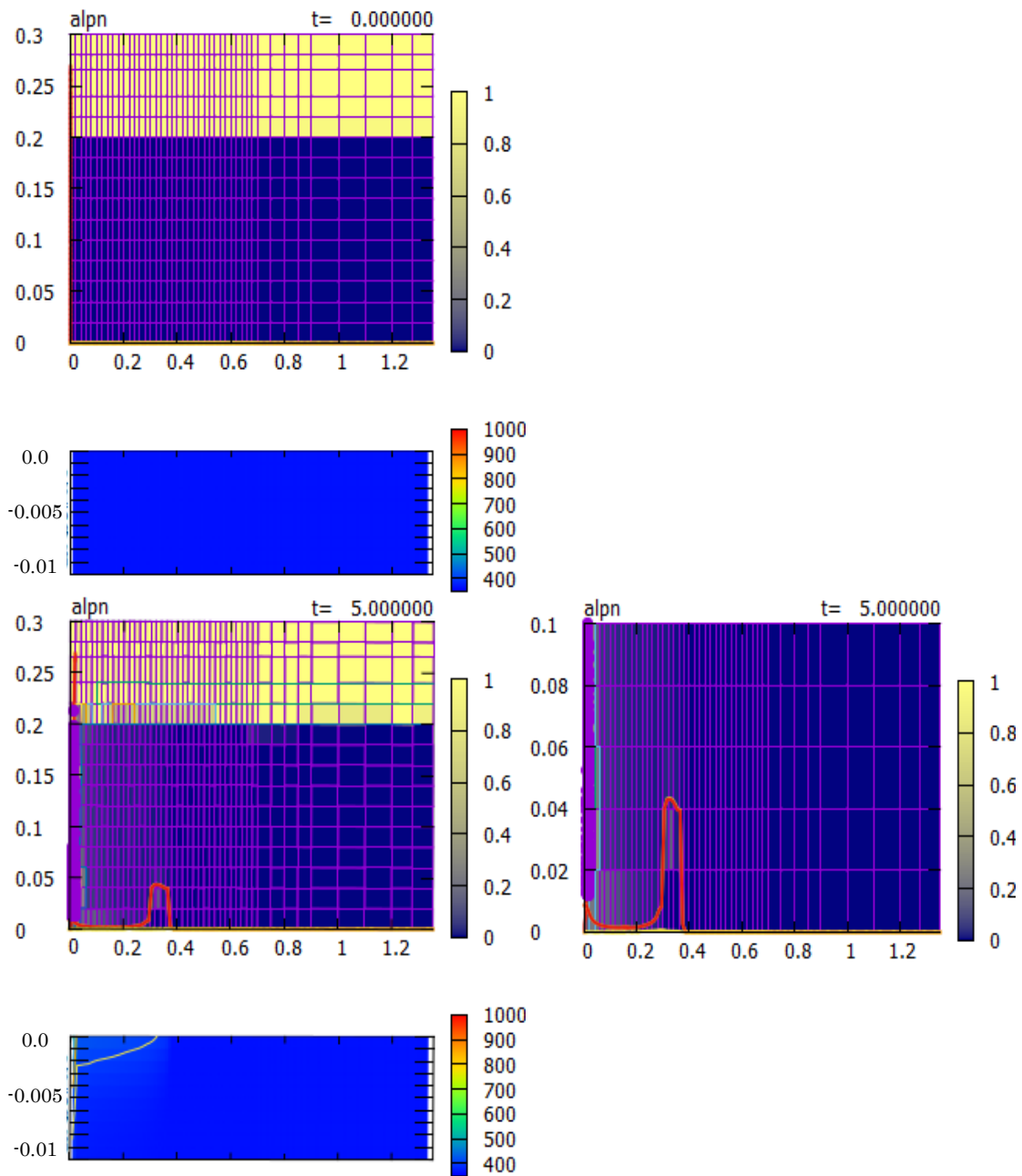


図 A2.32 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E16 : 0.0~5.0 秒)

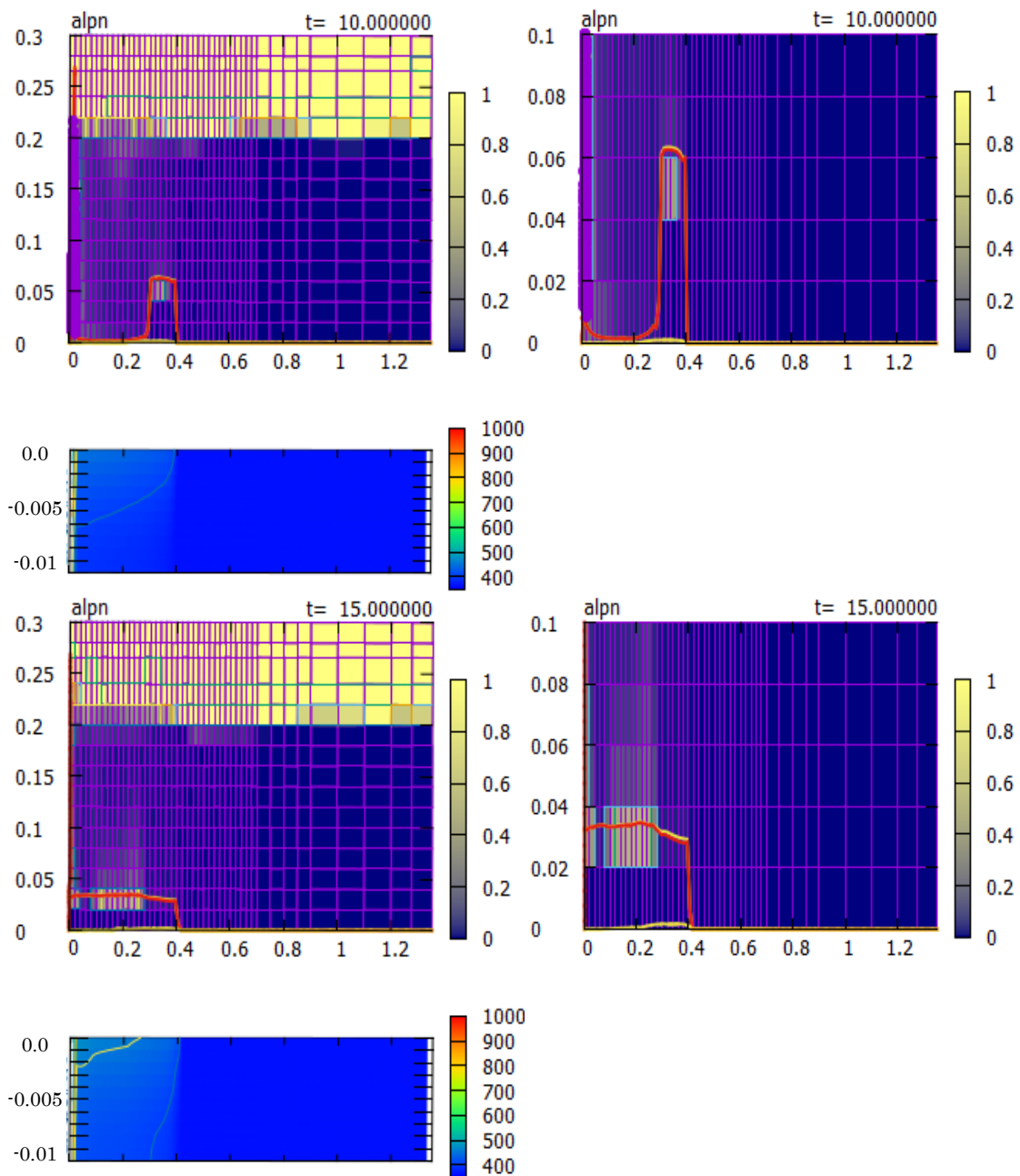


図 A2.33 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E16 : 10.0~15.0 秒)

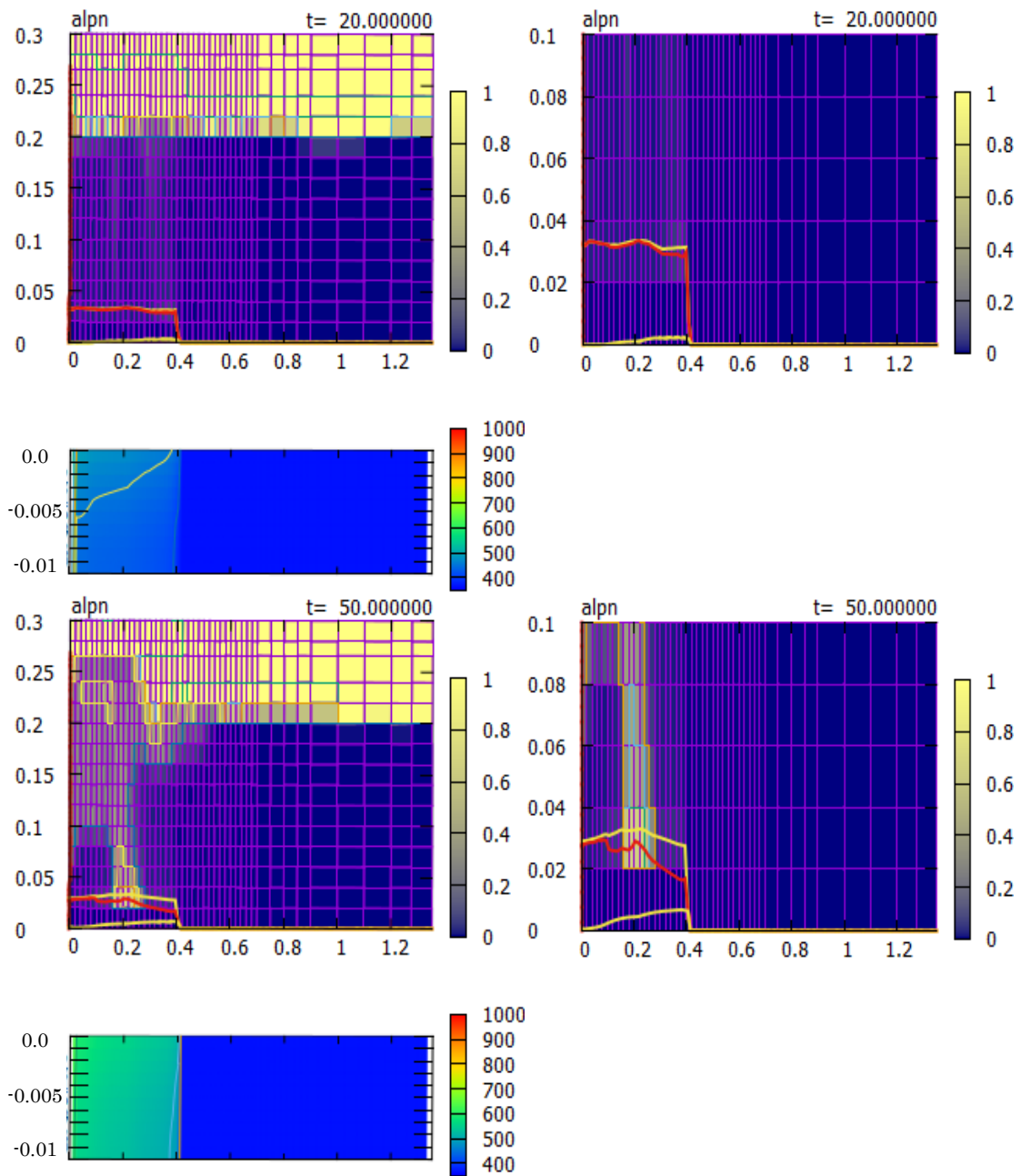


図 A2.34 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E16 : 20.0~50.0 秒)



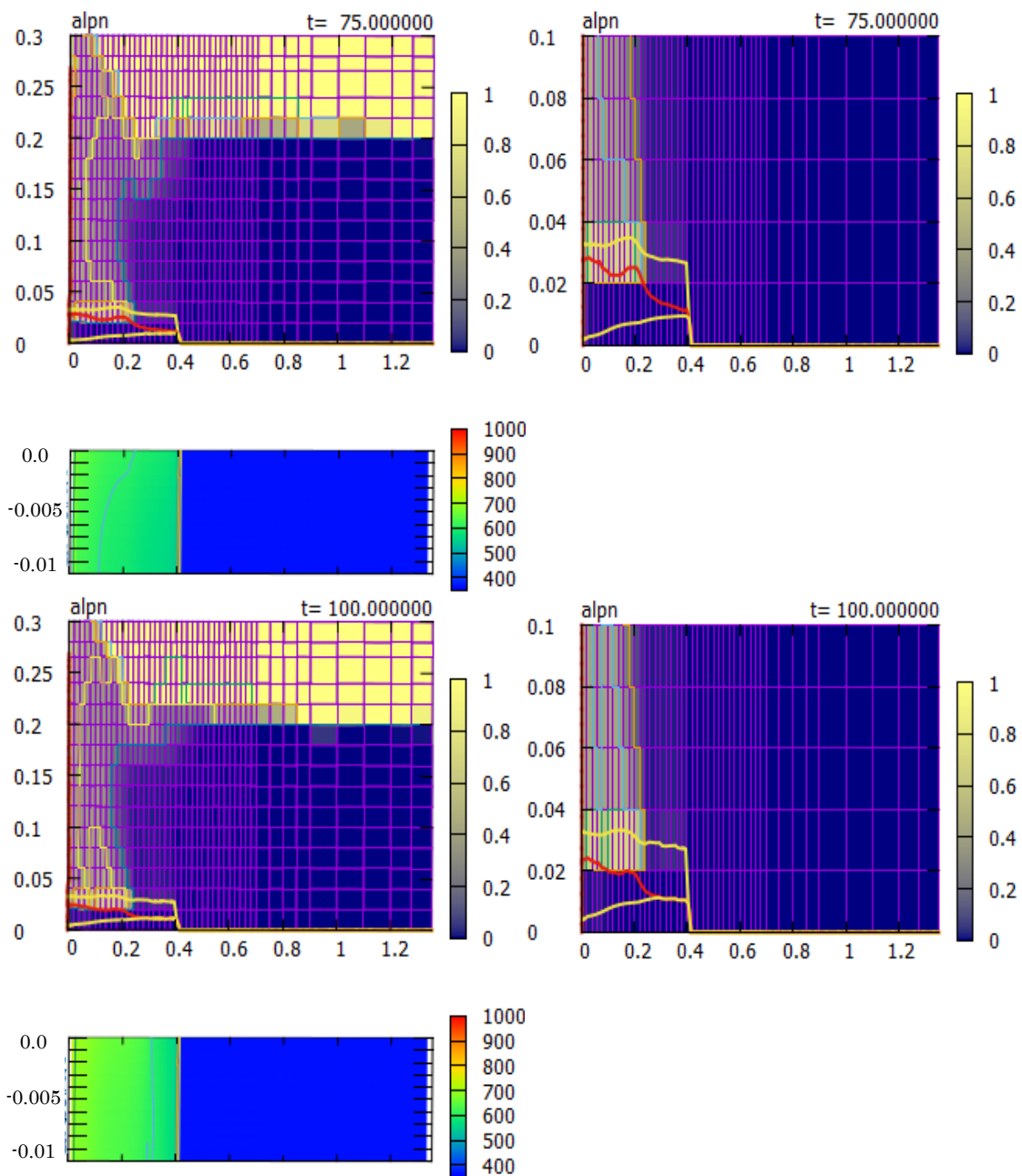


図 A2.35 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E16 : 75.0~100.0 秒)

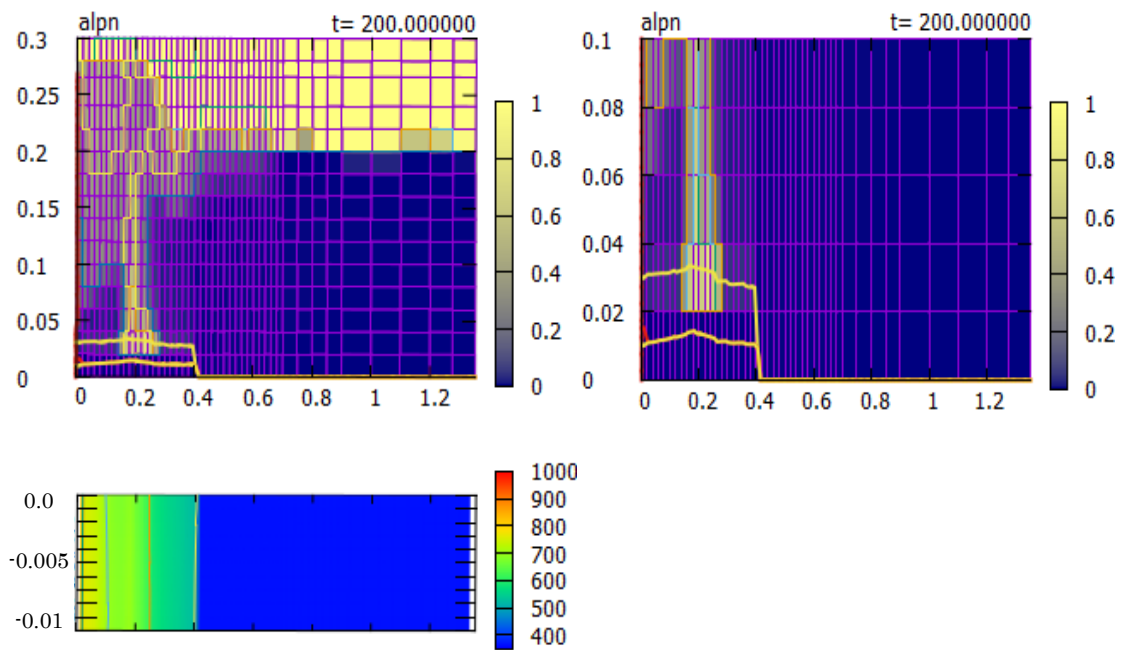


図 A2.36 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E16 : 200.0 秒)

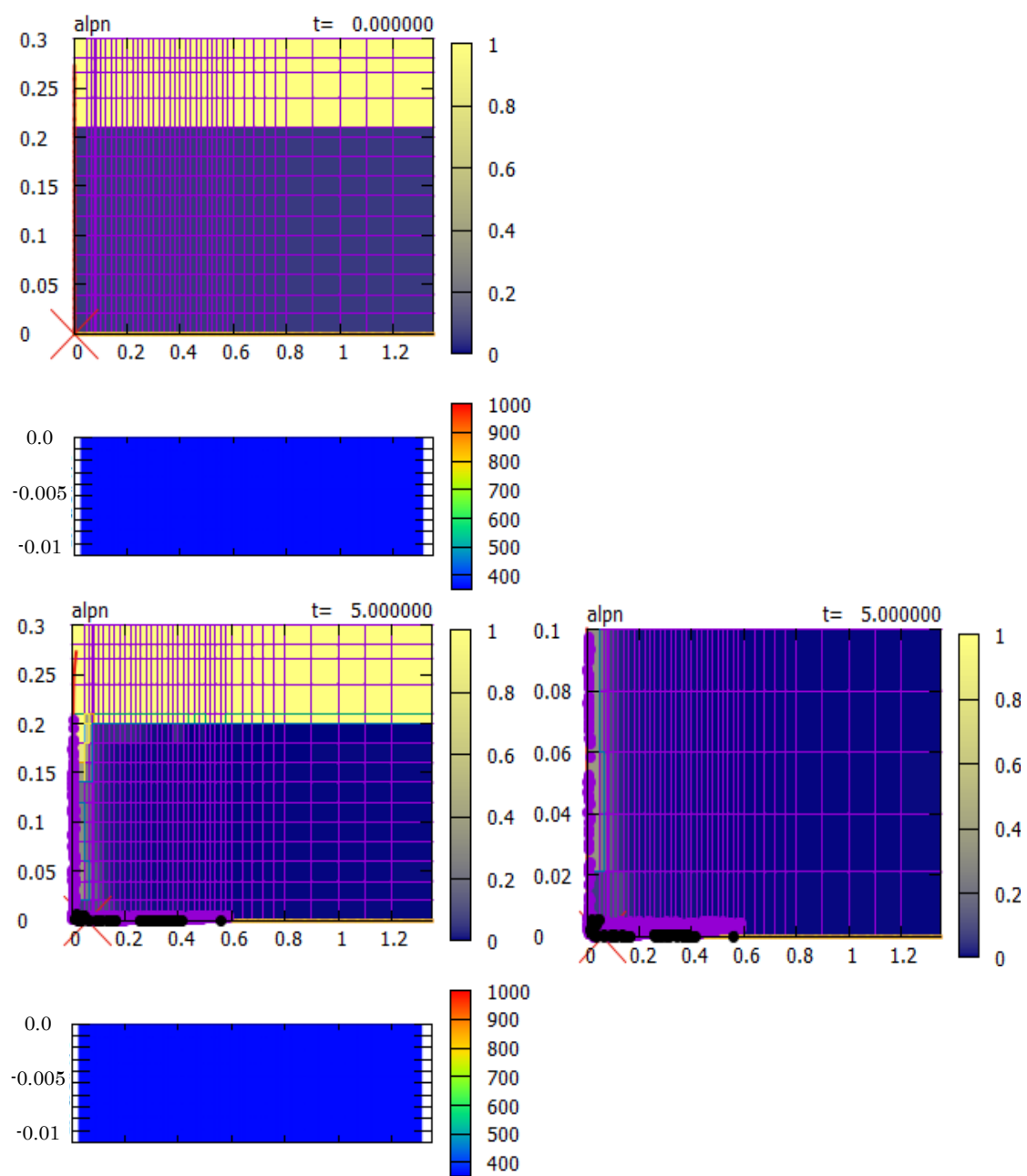


図 A2.37 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E17 : 0.0~5.0 秒)

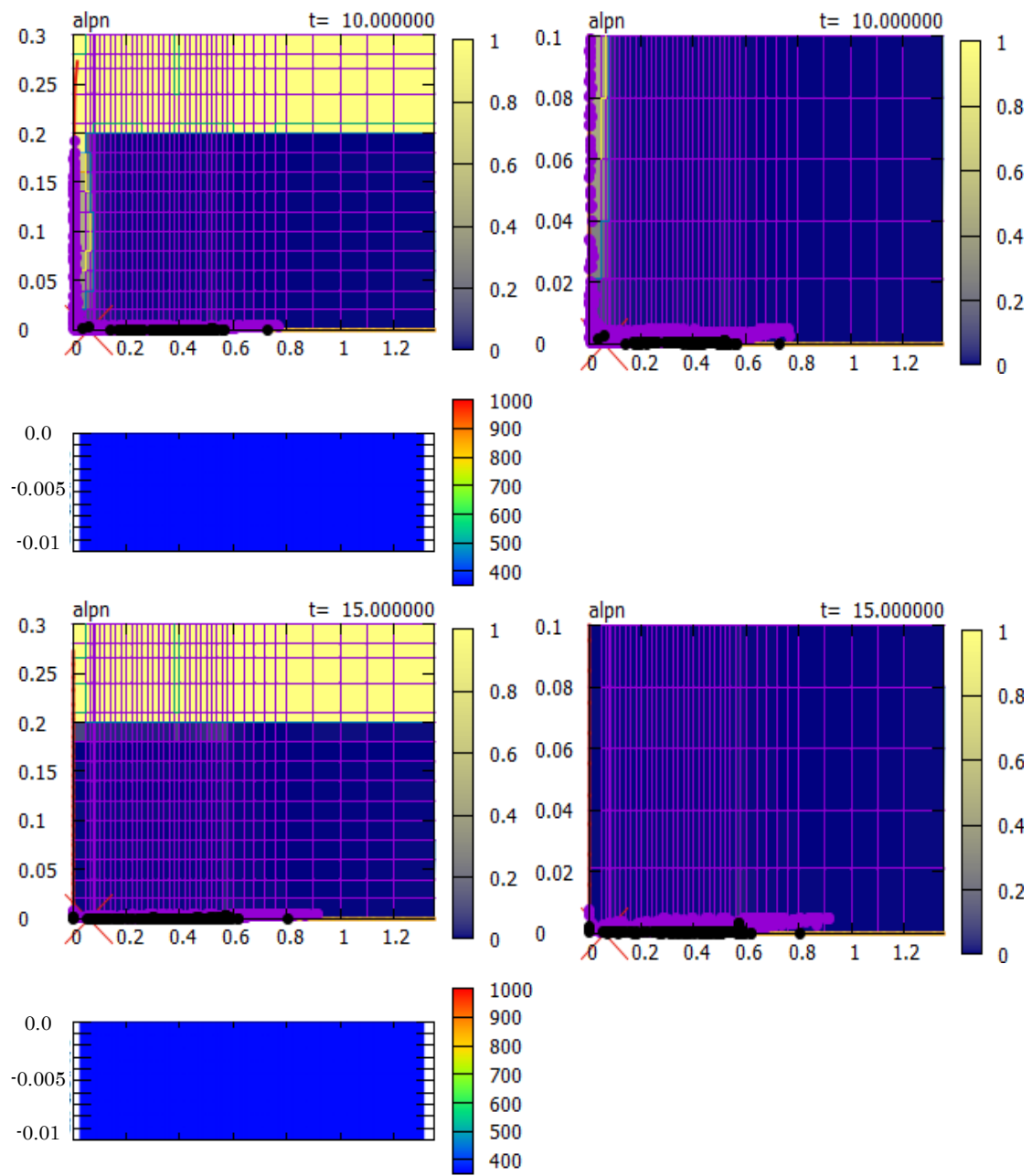


図 A2.38 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E17 : 10.0~15.0 秒)

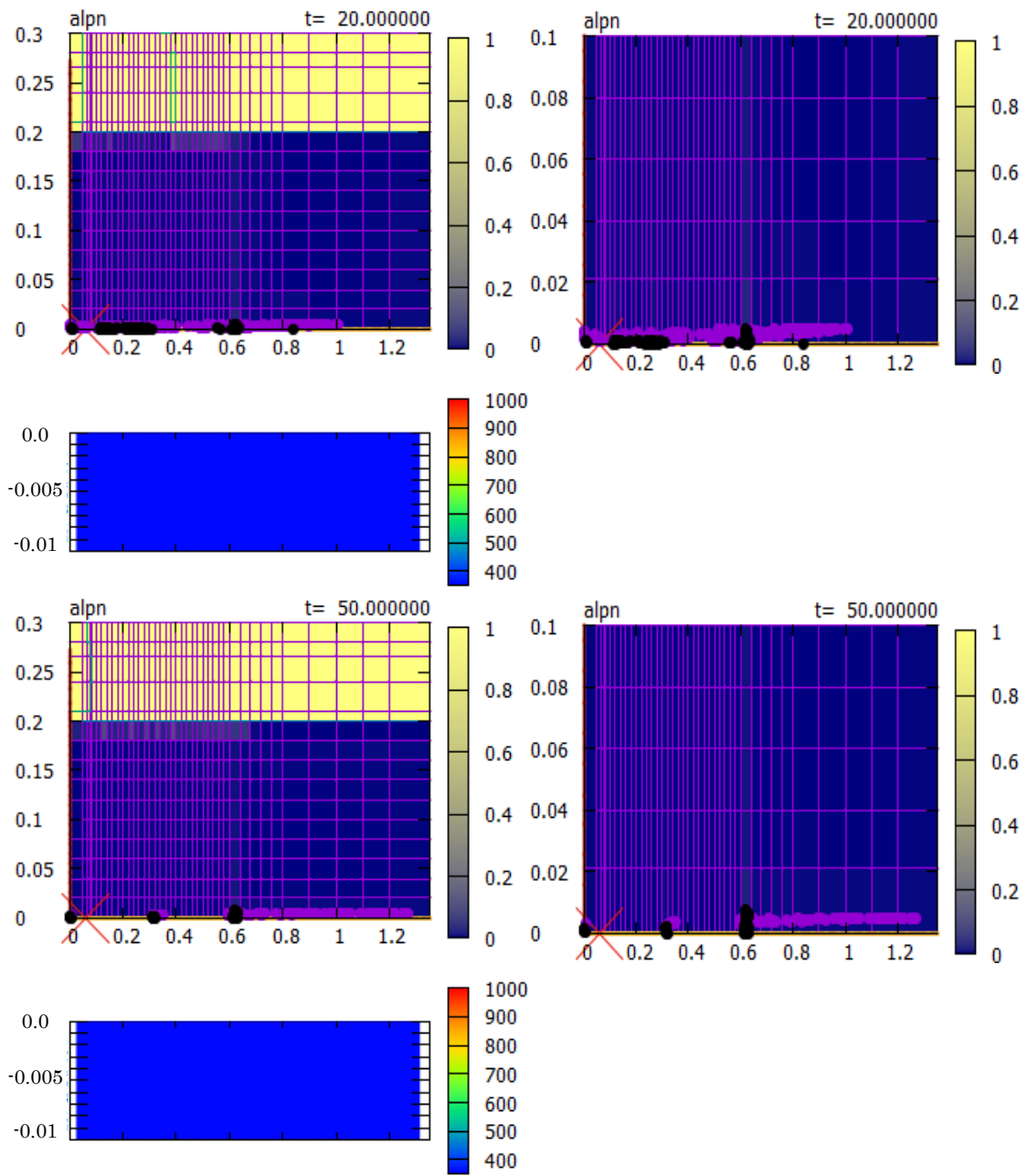


図 A2.39 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E17 : 20.0~50.0 秒)

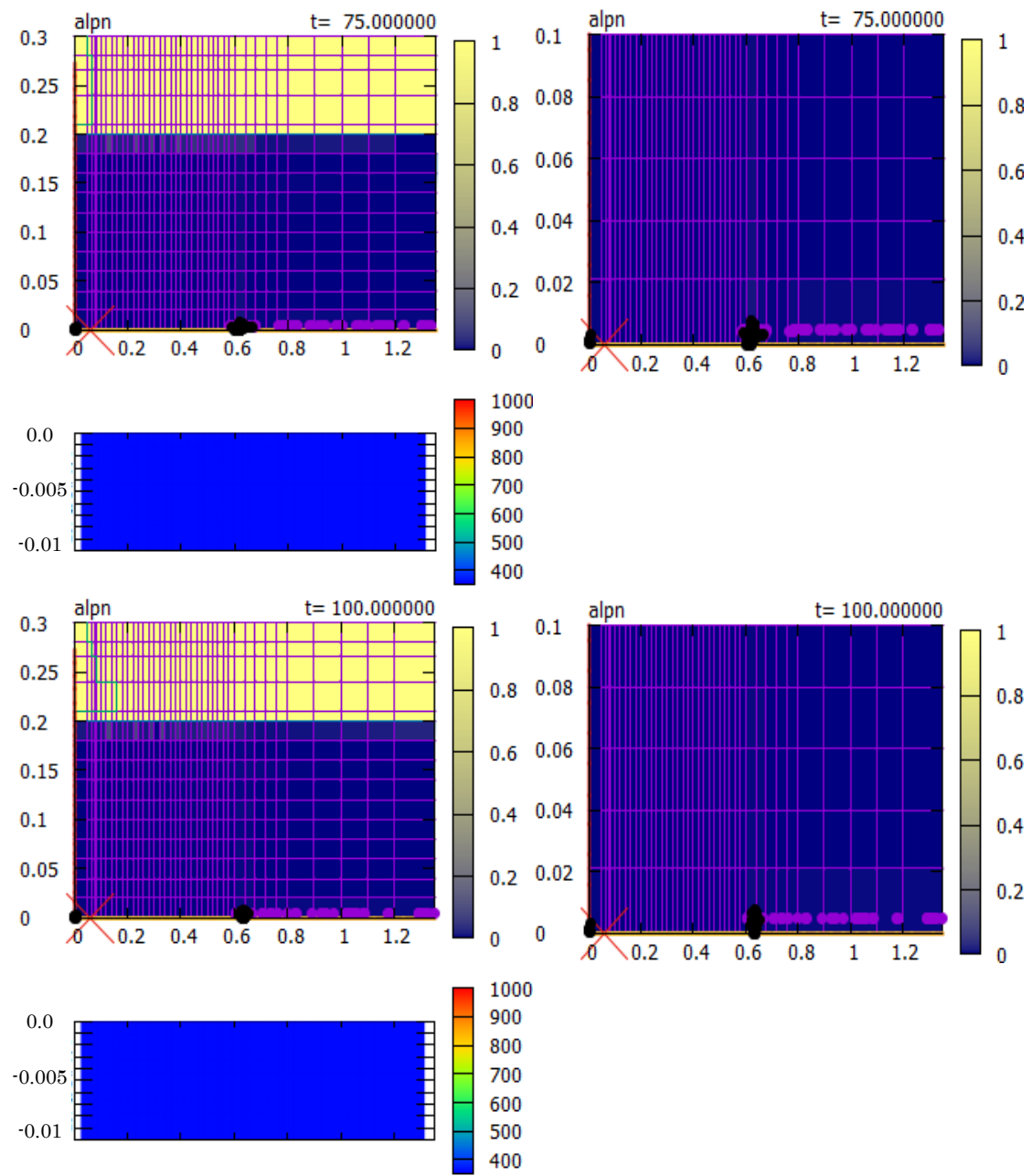


図 A2.40 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E17 : 75.0~100.0 秒)

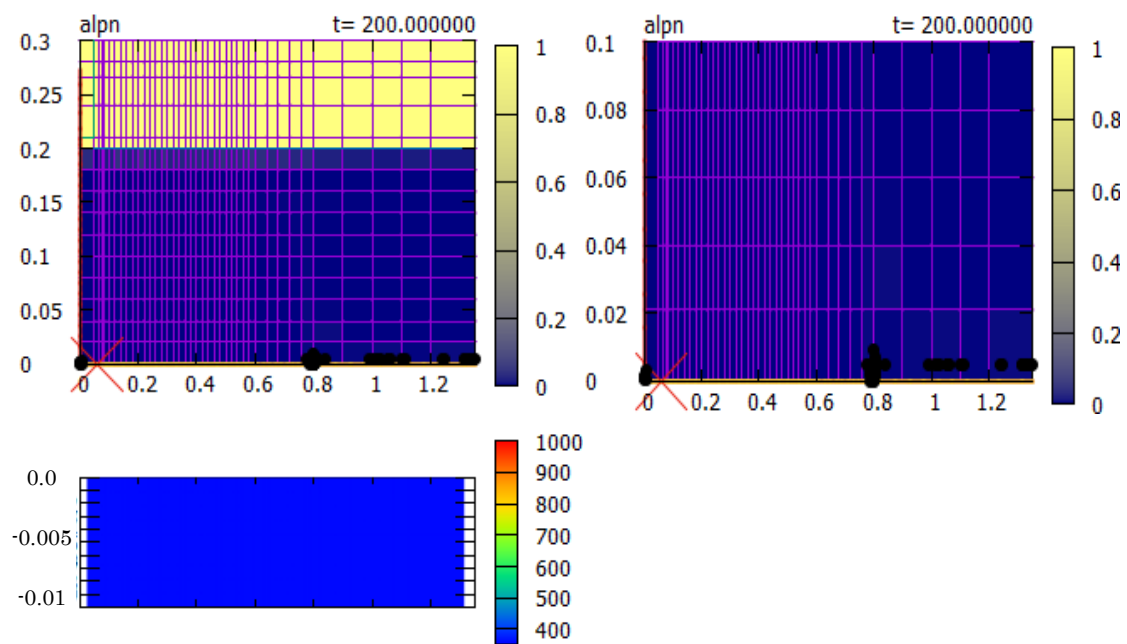


図 A2.41 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E17 : 200.0 秒)

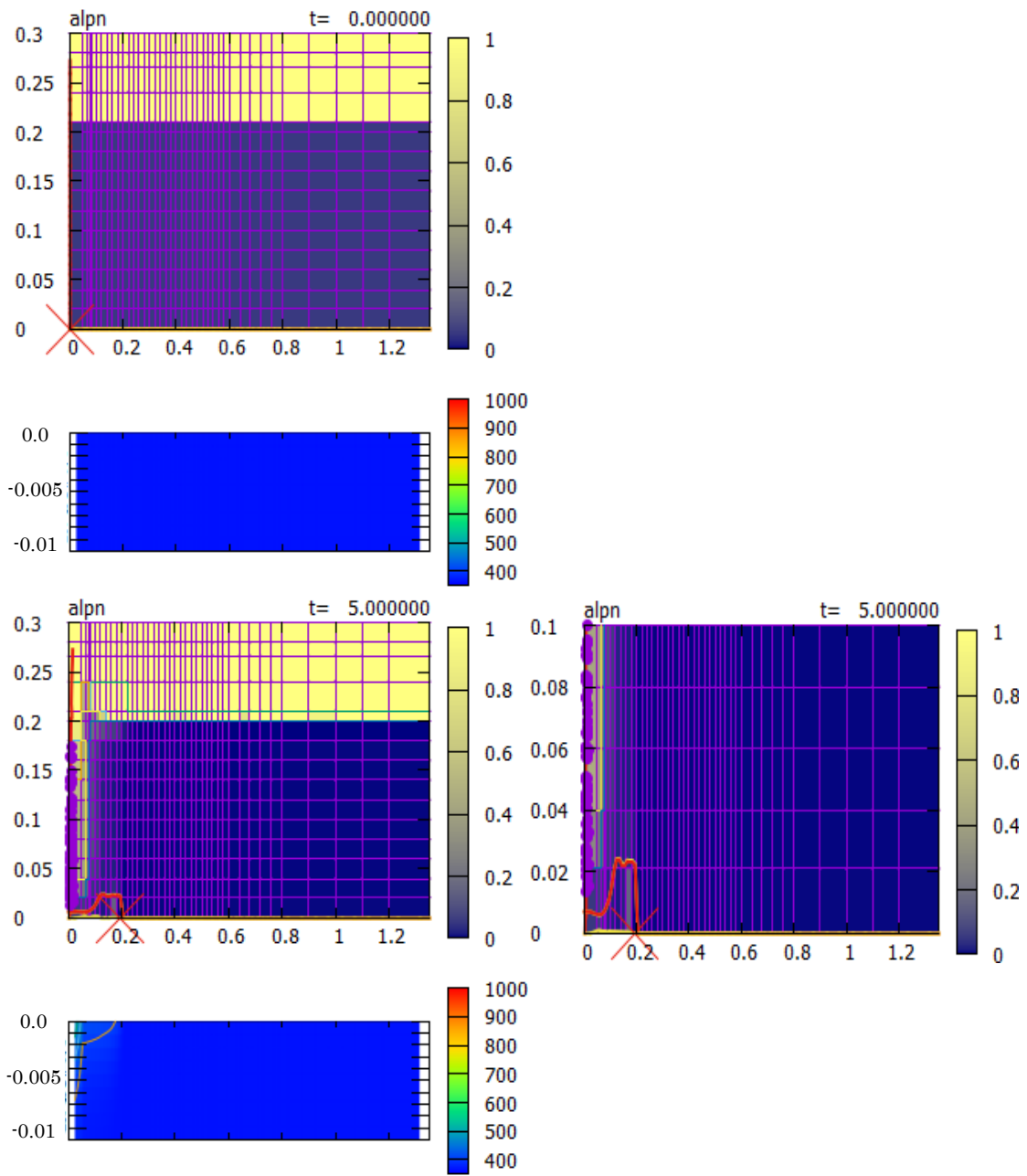


図 A2.42 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E18 : 0.0~5.0 秒)



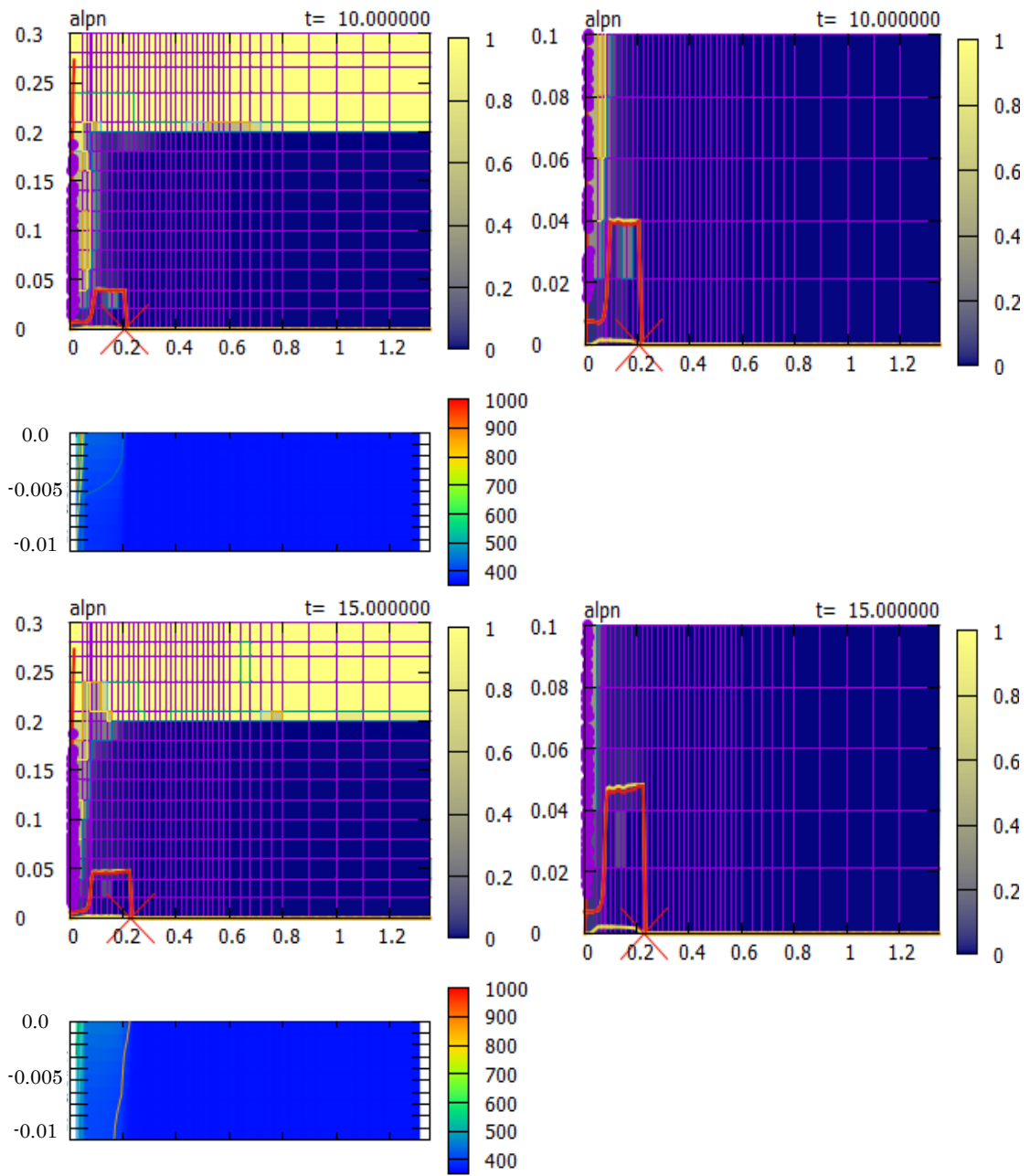


図 A2.43 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E18 : 10.0~15.0 秒)

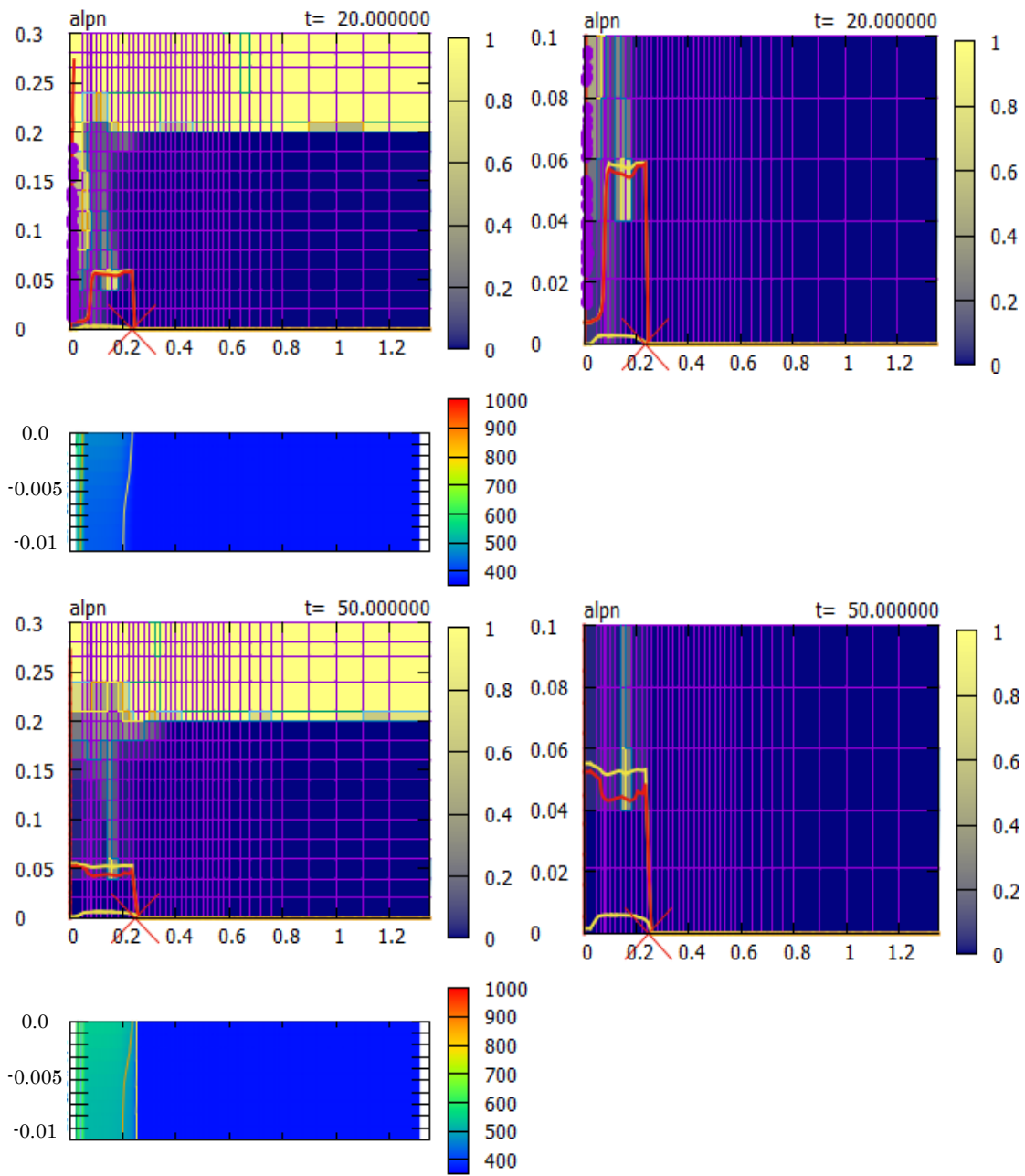


図 A2.44 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E18 : 20.0~50.0 秒)

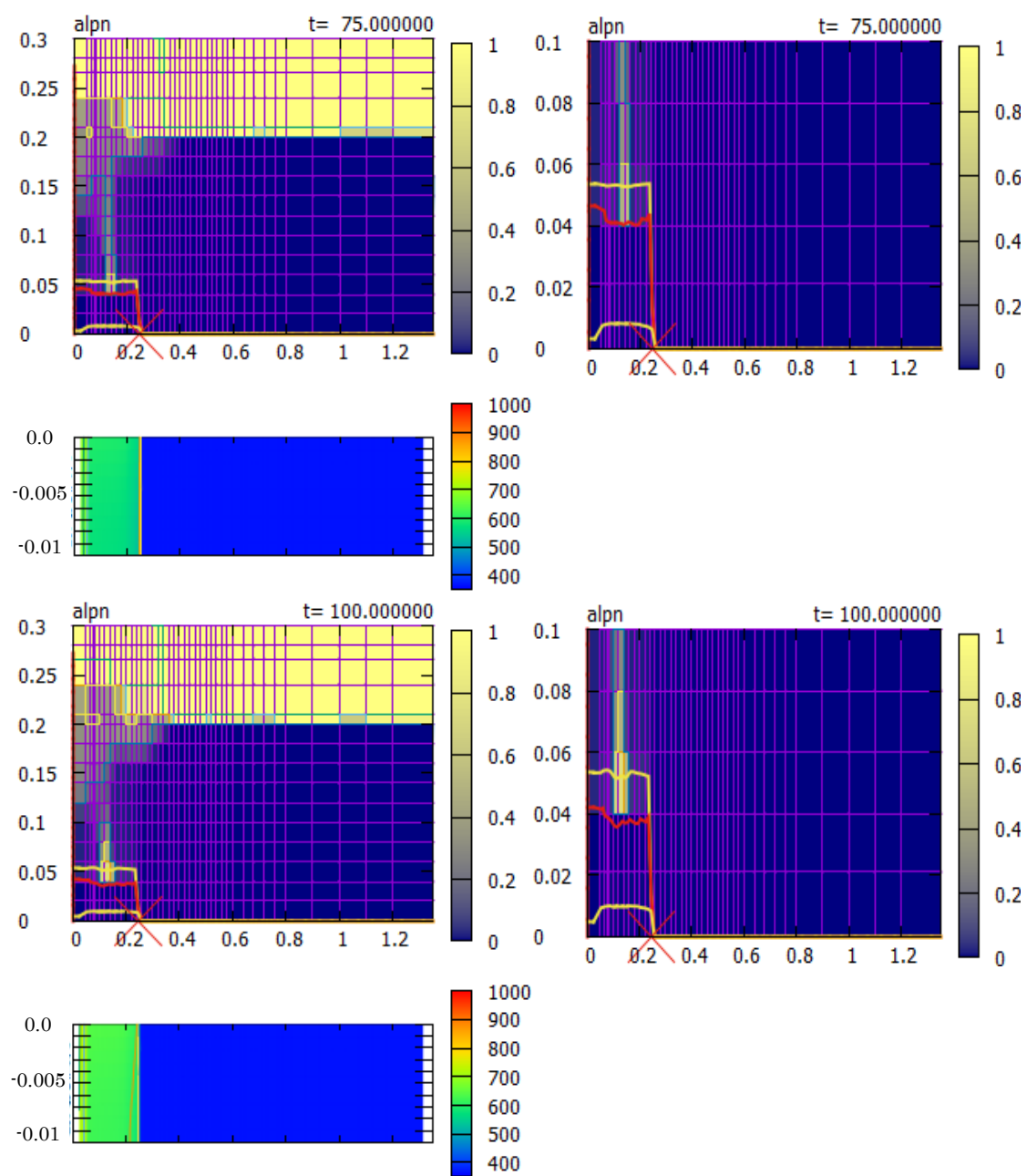


図 A2.45 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E18 : 75.0~100.0 秒)

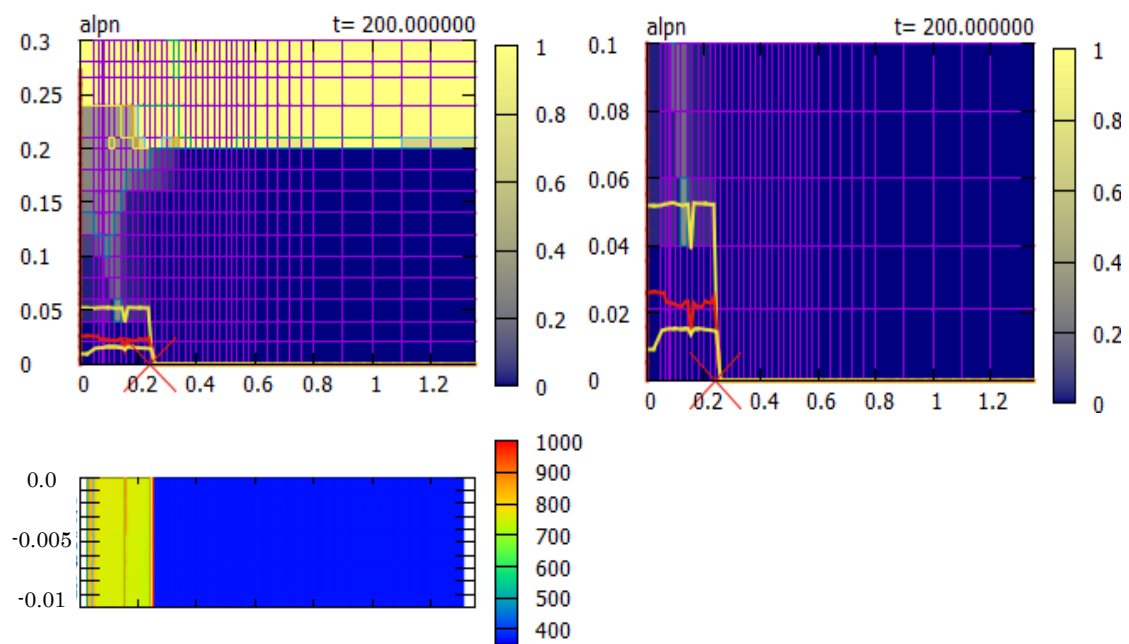


図 A2.46 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E18 : 200.0 秒)

付録 B 冷却可能な最大デブリ堆積高さの評価

円筒状に堆積した熔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熔融浸食温度（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 B-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  $\delta$ ）が存在すると仮定する。いま、デブリ下面がコンクリート熔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 B-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。

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

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。

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

また、デブリ内部の最高温度  $T_{max}$  については、

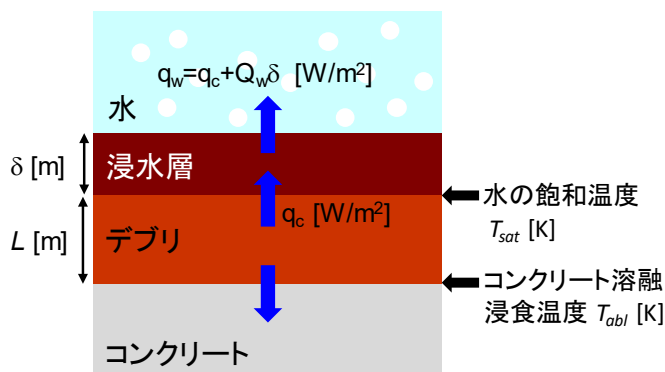


図 B-1 評価モデル

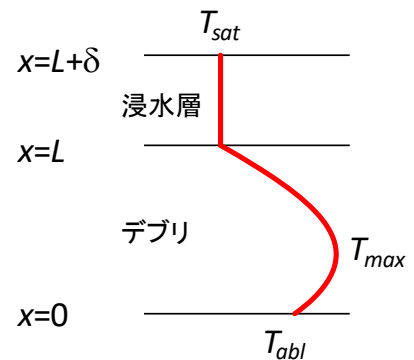


図 B-2 デブリ内温度分布

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

のとき

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

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。

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

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。

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

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。

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

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 $\delta$ を次式から評価する。

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

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

$\lambda$	: デブリ熱伝導率 (固相) [W/m·K]	
$\delta$	: 浸水層高さ [m]	
$\rho$	: デブリ密度 (固相) [kg/m <sup>3</sup> ]	
$c$	: 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 <sup>3</sup> ]	
$Q_w$	: 浸水層崩壊熱 [W/m <sup>3</sup> ]	※ 1
$q_c$	: デブリから浸水層への熱流束 [W/m <sup>2</sup> ]	
$q_{btm}$	: デブリからコンクリート床面への熱流束 [W/m <sup>2</sup> ]	
$q_{dry}$	: 浸水層におけるドライアウト熱流束 [W/m <sup>2</sup> ]	
$q_w$	: 浸水層から水への熱流束 [W/m <sup>2</sup> ]	
$T$	: 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 C 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 [C.1] に公開されているバージョン 3 について説明する。

### C.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 C.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。



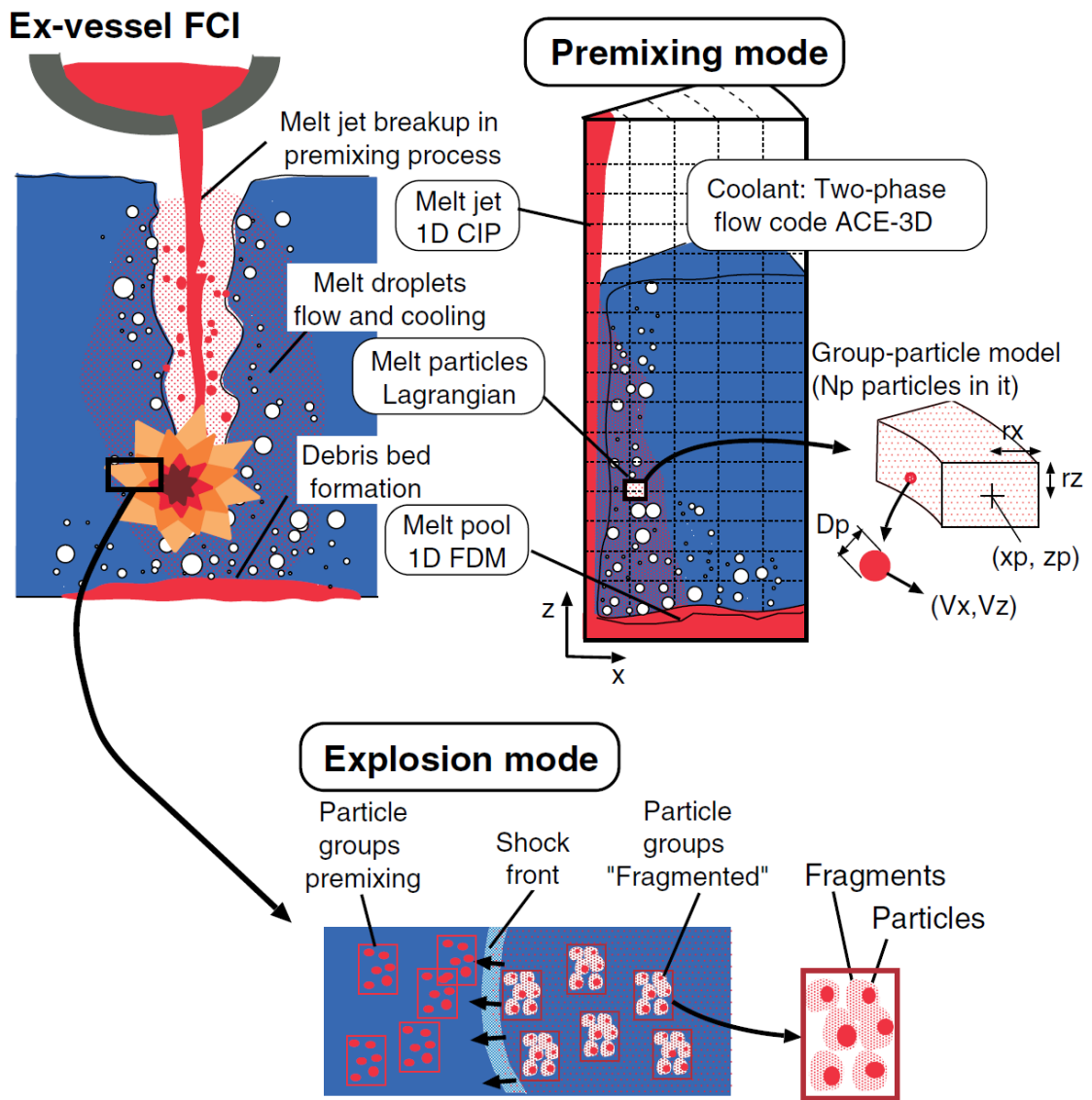


図 C.1 水蒸気爆発現象と JASMINE コードの解析モデル

## C.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：

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

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 C.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

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

により、ジェット表面での溶融物剥離速度を求め、さらに、

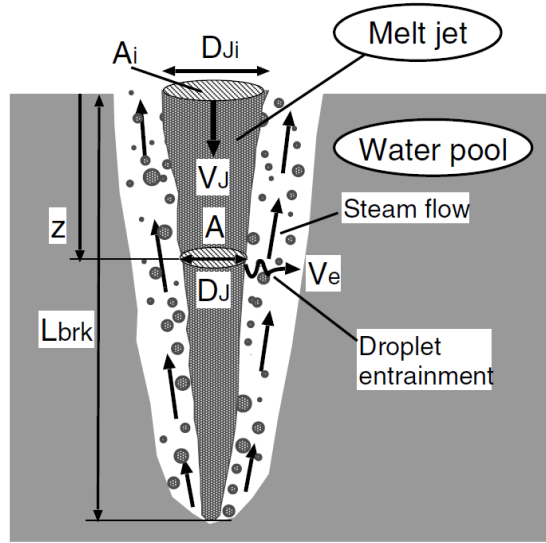


図 C.2 JASMINE コードにおける溶融物ジェットのモデル

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

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、 $\phi_r$  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 $\delta$ 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、 $\theta$  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 ラジアン）。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 C.1 JASMINE コードで使用される水・蒸気と溶融物の相互作用の相関式

項目	溶融物プールの表面	溶融物液滴の表面
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) 溶融物プールの運動方程式

【運動量保存式】

① 表面クラストが存在し、流動する場合( $v_{cr} = v_p$ )

$$\begin{aligned}
 \frac{v_{P,i+\frac{1}{2}}^{n+1} - v_{P,i+\frac{1}{2}}^n}{\Delta t} = & - \left[ \max(v_{P,i+\frac{1}{2}}, 0) \frac{v_{P,i+\frac{1}{2}}^{n+1} - v_{P,i-\frac{1}{2}}^{n+1}}{x_{i+\frac{1}{2}} - x_{i-\frac{1}{2}}} + \min(v_{P,i+\frac{1}{2}}, 0) \frac{v_{P,i+\frac{3}{2}}^{n+1} - v_{P,i+\frac{1}{2}}^{n+1}}{x_{i+\frac{3}{2}} - x_{i+\frac{1}{2}}} \right] \\
 & - \frac{1}{\rho_{P,i+\frac{1}{2}}} \left[ \frac{p_{a,i+1} - p_{a,i}}{x_{i+1} - x_i} \right. \\
 & \left. + g \frac{[h_P \rho_P]_{i+1} - [h_P \rho_P]_{i-1} + [d_{cr} \rho_{cr}]_{i+1} - [d_{cr} \rho_{cr}]_{i-1} + [d_b \rho_{cr}]_{i+1} - [d_b \rho_{cr}]_{i-1}}{x_{i+1} - x_i} \right] \\
 & + \left[ \frac{K_{a-cr}}{h_P} (v_a - v_{cr}) |v_a - v_{cr}| - \frac{f_w}{h_P} \frac{1}{2} v_p |v_p| + \frac{(v_{ms} - v_p) \max(m_s, 0)}{h_P \rho_P} \right]_{i+\frac{1}{2}} \quad (2.67)
 \end{aligned}$$

② 表面クラストが存在し、固定されている場合( $v_{cr} = 0$ )

$$\begin{aligned}
 \frac{v_{P,i+\frac{1}{2}}^{n+1} - v_{P,i+\frac{1}{2}}^n}{\Delta t} = & - \left[ \max(v_{P,i+\frac{1}{2}}, 0) \frac{v_{P,i+\frac{1}{2}}^{n+1} - v_{P,i-\frac{1}{2}}^{n+1}}{x_{i+\frac{1}{2}} - x_{i-\frac{1}{2}}} + \min(v_{P,i+\frac{1}{2}}, 0) \frac{v_{P,i+\frac{3}{2}}^{n+1} - v_{P,i+\frac{1}{2}}^{n+1}}{x_{i+\frac{3}{2}} - x_{i+\frac{1}{2}}} \right] \\
 & - \frac{1}{\rho_{P,i+\frac{1}{2}}} \left[ \frac{p_{a,i+1} - p_{a,i}}{x_{i+1} - x_i} \right. \\
 & \left. + g \frac{[h_P \rho_P]_{i+1} - [h_P \rho_P]_{i-1} + [d_{cr} \rho_{cr}]_{i+1} - [d_{cr} \rho_{cr}]_{i-1} + [d_b \rho_{cr}]_{i+1} - [d_b \rho_{cr}]_{i-1}}{x_{i+1} - x_i} \right] \\
 & + \left[ -\frac{f_{cr}}{h_P} \frac{1}{2} v_p |v_p| - \frac{f_w}{h_P} \frac{1}{2} v_p |v_p| + \frac{(v_{ms} - v_p) \max(m_{sp}, 0)}{h_P \rho_P} \right]_{i+\frac{1}{2}}
 \end{aligned}$$

③ 表面クラストが存在しない場合

$$\begin{aligned}
 \frac{v_{P,i+\frac{1}{2}}^{n+1} - v_{P,i+\frac{1}{2}}^n}{\Delta t} = & - \left[ \max(v_{P,i+\frac{1}{2}}, 0) \frac{v_{P,i+\frac{1}{2}}^{n+1} - v_{P,i-\frac{1}{2}}^{n+1}}{x_{i+\frac{1}{2}} - x_{i-\frac{1}{2}}} + \min(v_{P,i+\frac{1}{2}}, 0) \frac{v_{P,i+\frac{3}{2}}^{n+1} - v_{P,i+\frac{1}{2}}^{n+1}}{x_{i+\frac{3}{2}} - x_{i+\frac{1}{2}}} \right] \\
 & - \frac{1}{\rho_{P,i+\frac{1}{2}}} \left[ \frac{p_{a,i+1} - p_{a,i}}{x_{i+1} - x_i} + g \frac{[h_P \rho_P]_{i+1} - [h_P \rho_P]_{i-1} + [d_b \rho_{cr}]_{i+1} - [d_b \rho_{cr}]_{i-1}}{x_{i+1} - x_i} \right] \\
 & + \left[ \frac{K_{a-p}}{h_P} (v_a - v_p) |v_a - v_p| - \frac{f_w}{h_P} \frac{1}{2} v_p |v_p| + \frac{(v_{ms} - v_p) \max(m_s, 0)}{h_P \rho_P} \right]_{i+\frac{1}{2}} \quad (2.69)
 \end{aligned}$$

連立方程式の係数の導出：

表面クラストが存在し、固定されている場合( $v_{cr} = 0$ )を例とする。元の方程式は

$$\begin{aligned} \frac{v_{P,i+\frac{1}{2}}^{n+1} - v_{P,i+\frac{1}{2}}^n}{\Delta t} = & - \left[ \max\left(v_{P,i+\frac{1}{2}}, 0\right) \frac{v_{P,i+\frac{1}{2}}^{n+1} - v_{P,i-\frac{1}{2}}^{n+1}}{x_{i+\frac{1}{2}} - x_{i-\frac{1}{2}}} + \min\left(v_{P,i+\frac{1}{2}}, 0\right) \frac{v_{P,i+\frac{3}{2}}^{n+1} - v_{P,i+\frac{1}{2}}^{n+1}}{x_{i+\frac{3}{2}} - x_{i+\frac{1}{2}}} \right] \\ & - \frac{1}{\rho_{P,i+\frac{1}{2}}} \left[ \frac{p_{a,i+1} - p_{a,i}}{x_{i+1} - x_i} \right. \\ & + g \frac{[h_P \rho_P]_{i+1} - [h_P \rho_P]_{i-1} + [d_{cr} \rho_{cr}]_{i+1} - [d_{cr} \rho_{cr}]_{i-1} + [d_b \rho_{cr}]_{i+1} - [d_b \rho_{cr}]_{i-1}}{x_{i+1} - x_i} \\ & \left. + \left[ -\frac{f_{cr}}{h_P} \frac{1}{2} v_P |v_P| - \frac{f_w}{h_P} \frac{1}{2} v_P |v_P| + \frac{(v_{ms} - v_P) \max(m_{sp}, 0)}{h_P \rho_P} \right]_{i+\frac{1}{2}} \right] \end{aligned}$$

既知の状態の時刻  $n$  と求める時刻  $n+1$  を明確に分ける。

$$v_P = \frac{v_{P,i+\frac{1}{2}}^n + v_{P,i+\frac{1}{2}}^{n+1}}{2}$$

とする。

$$\begin{aligned} \frac{1}{\Delta t} v_{P,i+\frac{1}{2}}^{n+1} - \frac{1}{\Delta t} v_{P,i+\frac{1}{2}}^n & = - \frac{\max\left(v_{P,i+\frac{1}{2}}, 0\right)}{x_{i+\frac{1}{2}} - x_{i-\frac{1}{2}}} \left( v_{P,i+\frac{1}{2}}^{n+1} - v_{P,i-\frac{1}{2}}^{n+1} \right) - \frac{\min\left(v_{P,i+\frac{1}{2}}, 0\right)}{x_{i+\frac{3}{2}} - x_{i+\frac{1}{2}}} \left( v_{P,i+\frac{3}{2}}^{n+1} - v_{P,i+\frac{1}{2}}^{n+1} \right) + B \\ & - \frac{(f_{cr} + f_w)}{2h_P} \left| v_{P,i+\frac{1}{2}}^n \right| v_{P,i+\frac{1}{2}}^{n+1} + \left[ \frac{\left( v_{ms} - v_{P,i+\frac{1}{2}}^n / 2 - v_{P,i+\frac{1}{2}}^{n+1} / 2 \right) \max(m_{sp}, 0)}{h_P \rho_P} \right]_{i+\frac{1}{2}} \end{aligned}$$

左辺に未知数を含む項、右辺に既知の項を集めて整理する。

$$\begin{aligned} \left\{ \frac{1}{\Delta t} + \frac{\max\left(v_{P,i+\frac{1}{2}}, 0\right)}{x_{i+\frac{1}{2}} - x_{i-\frac{1}{2}}} - \frac{\min\left(v_{P,i+\frac{1}{2}}, 0\right)}{x_{i+\frac{3}{2}} - x_{i+\frac{1}{2}}} + \frac{(f_{cr} + f_w)}{2h_P} \left| v_{P,i+\frac{1}{2}}^n \right| + \frac{\max(m_{sp}, 0)}{2h_P \rho_P} \right\} v_{P,i+\frac{1}{2}}^{n+1} \\ - \frac{\max\left(v_{P,i+\frac{1}{2}}, 0\right)}{x_{i+\frac{1}{2}} - x_{i-\frac{1}{2}}} v_{P,i-\frac{1}{2}}^{n+1} + \frac{\min\left(v_{P,i+\frac{1}{2}}, 0\right)}{x_{i+\frac{3}{2}} - x_{i+\frac{1}{2}}} v_{P,i+\frac{3}{2}}^{n+1} = \frac{1}{\Delta t} v_{P,i+\frac{1}{2}}^n + B \\ + \left[ \frac{\left( v_{ms} - v_{P,i+\frac{1}{2}}^n / 2 \right) \max(m_{sp}, 0)}{h_P \rho_P} \right]_{i+\frac{1}{2}} \end{aligned}$$

ここにあるように右辺に摩擦項 ( $f_{cr}$ 、 $f_w$ を含む項) が無い点が注目される。



ここで

$$B = -\frac{1}{\rho_{P,i+\frac{1}{2}}} \left[ \frac{p_{a,i+1} - p_{a,i}}{x_{i+1} - x_i} + g \frac{[h_P \rho_P]_{i+1} - [h_P \rho_P]_{i-1} + [d_{cr} \rho_{cr}]_{i+1} - [d_{cr} \rho_{cr}]_{i-1} + [d_b \rho_{cr}]_{i+1} - [d_b \rho_{cr}]_{i-1}}{x_{i+1} - x_i} \right] \quad (A)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} v_P^2 &= \frac{1}{2} \left( v_{P,i+\frac{1}{2}}^n + \frac{\Delta v}{2} \right)^2 = \frac{1}{2} \left( v_{P,i+\frac{1}{2}}^n{}^2 + v_{P,i+\frac{1}{2}}^n \Delta v + \frac{\Delta v^2}{4} \right) \\ &\cong \frac{1}{2} \left\{ v_{P,i+\frac{1}{2}}^n{}^2 + v_{P,i+\frac{1}{2}}^n \left( v_{P,i+\frac{1}{2}}^{n+1} - v_{P,i+\frac{1}{2}}^n \right) \right\} = \frac{1}{2} v_{P,i+\frac{1}{2}}^n \cdot v_{P,i+\frac{1}{2}}^{n+1} \end{aligned}$$

ここで

$$\Delta v = v_{P,i+\frac{1}{2}}^{n+1} - v_{P,i+\frac{1}{2}}^n \ll v_{P,i+\frac{1}{2}}^n$$

従って  $\Delta v^2$  の項は  $v_{P,i+\frac{1}{2}}^n \Delta v$  の項などに比べて negligible

## (6) 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

$\alpha$  : ボイド率

$\gamma_k$  : 単位体積当たり質量変化

$\kappa$  : 熱拡散率

$\lambda$  : 熱伝導率

$\rho$  : 密度

$\theta$  : 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

### C.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 C.2 JASMINE コードで用意されている溶融物

名称	物質
corium	UO <sub>2</sub> 80 : ZrO <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> 70:ZrO <sub>2</sub> 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 C.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 <sub>2</sub> -ZrO <sub>2</sub> 80 : 20wt%	UO <sub>2</sub> -ZrO <sub>2</sub> 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 <sup>3</sup> ]	9430	8285.1
rholiq	実数	液相密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	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[C.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部をグラフに示す。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 C.3 が液滴表面熱流束、図 C.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。

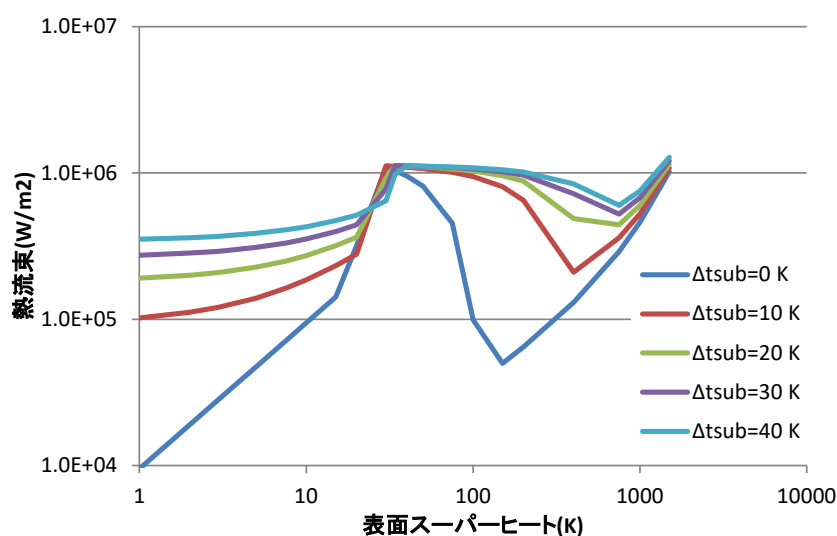


図 C.3 Jasmine 液滴表面熱流束(大気圧,d=3mm,v=0.3m/s)

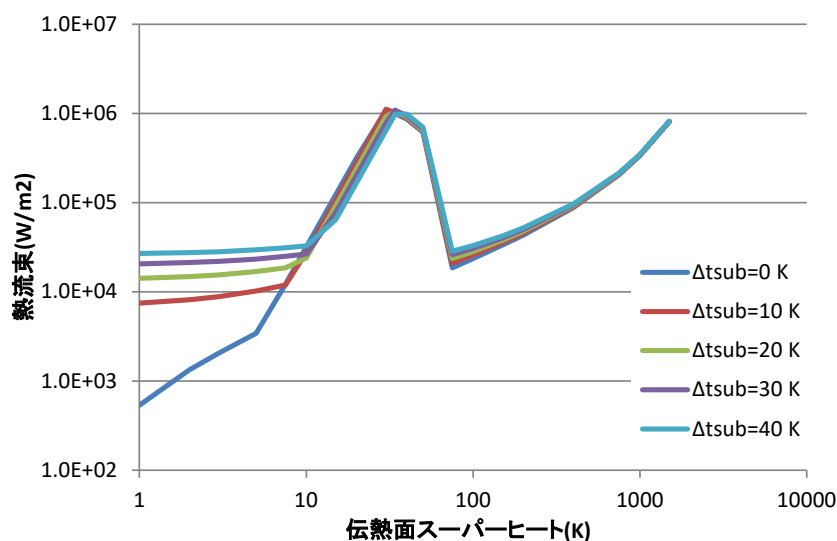


図 C.4 Jasmine プール表面熱流束(大気圧)

#### C.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(令和元年度)の作業では、4.3a を改良した JASMINE 4.3d を用いて PULiMS 解析、及び実機冷却性評価の解析を行うとともに、気相中実験の解析を可能とした JASMINE 4.4 を開発しこれまで手を付けてこなかった気相中実験の解析を行った。

表 C.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。 [C.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。 [C.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。 [C.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。 [C.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	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。 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

JASMINE 4.3d	2019/8	射流モデル組み込み	PULiMS E10～ E15、E17,E18 実機冷却性評価
JASMINE 4.4	2019/12	流路幅が変化する形状に対応	PULiMS E16 ドライ実験
JASMINE 4.4a	2020/2	初期条件の多様化 水プールの一点近似モデル組込	

## C.5 参考文献

- [C.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
- [C.2] 日本機械学会, “1999 日本機械学会蒸気表”, (1999-11 月)
- [C.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
- [C.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
- [C.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 D 出張報告

国内出張 (1)

件名	日本原子力学会 2019 年秋の大会における口頭発表
出張先	富山大学五福キャンパス (富山市)
期間	令和元年 9 月 11 日 (水) ~ 令和元年 9 月 13 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、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 2019 年会秋の大会にて口頭発表を行った。</p> <p>[IG16] 格納容器内溶融炉心冷却性評価のための JASMINE コードの改良 松本 俊慶、岩澤 譲、川部 隆平、安島 航平、杉山 智之、丸山 結 (原子力機構)</p>

国内出張（2）

件名	CEA との情報交換
出張先	原子力規制庁
期間	令和2年1月15日（水）
出張者	研究員2名，ディビジョン長1名，副センター長1名
概要	<p>フランス原子力・代替エネルギー庁のシビアアクシデント実験部長である Christophe SUTEAU 氏を原子力規制庁に迎え、熔融炉心冷却性評価技術の開発に係る情報交換を行った。</p> <p>CEA における様々な実験活動について紹介を受けた後、原子力規制庁と JAEA よりそれぞれの最近の研究成果を紹介した。</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	令和元年 5 月 26 日（日）～令和元年 5 月 30 日（木）
出張者	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>

外国出張（2）

件名	OECD/NEA WGAMA 第 22 回会合出席
出張先	フランス OECD/NEA 本部
期間	令和元年 9 月 15 日（日）～令和元年 9 月 20 日（金）
出張者	ディビジョン長 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 22 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。</p> <p>今回は、米独仏などの主要国及びその他（IAEA、EU など国際機関を含む）から約 60 名が参加した。近年、非 OECD 加盟国との協力が推進されており、今年からインドも参加している。日本からは、原子力規制庁から 1 名、電力中央研究所から 1 名、JAEA から 3 名（出張者含む）が出席した。</p>

外国出張 (3)

件名	IRSN-JAEA-NRA Scientific Seminar 2019 出席
出張先	スウェーデン/カダラッシュ
期間	令和元年 11 月 10 日 (日) ~ 令和元年 11 月 16 日 (土)
出張者	研究員 1 名、副センター長 1 名
概要	<p>フランス放射線防護原子力安全研究所 (IRSN)、原子力規制庁 (NRA) 及び安全研究センターで IRSN-JAEA-S/NRA/R Scientific Seminar 2019 を開催し、安全研究に関する三者間の協力を推進するため、シビアアクシデント、燃料安全、材料劣化、熱水力安全等の分野における各機関の最新知見や研究計画等の情報交換を行うとともに、今後の三者間の研究協力の枠組み等について協議を行った。</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	令和2年2月5日（水）～令和2年2月9日（日）
出張者	研究員2名
概要	原子力規制庁の技術研究調査官3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、実験及び解析技術に関する意見交換を行った。

外国出張 (5)

件名	OECD/NEA QUENCH-ATF 専門家会合
出張先	フランス OECD/NEA 本部
期間	令和2年2月14(金)
出張者	ディビジョン長1名
概要	<p>OECD/NEA の QUENCH-ATF プロジェクトは、独 KIT の QUENCH 装置を用いて事故耐性燃料 (ATF) の LOCA 時挙動データを取得することを目的とする。同装置では比較的長尺 (全長約 2.5m、加熱部長さ約 1m) の 20 本の模擬燃料棒からなるバンドルを扱うことができ、想定される事故条件及びそれを超える条件下で熱水力挙動、化学挙動、力学挙動のデータを取得し、最終的に SA 解析コードの検証に役立てることが見込まれている。今回はプロジェクト開始前の専門家会合であり、独、仏、チェコ、露、スウェーデン、スイス、英、米、日から約 30 名が参加した (うち数名は TV 会議による)。日本からは電力中央研究所から 2 名 (うち 1 名は TV 会議)、JAEA から 2 名 (出張者含む) が参加した。</p> <p>本プロジェクトに対する各国の関心事項及び試験条件に対する要望について情報を入手した。なお、本プロジェクトに対する日本の参加は未定である。</p>