

平成 29 年度原子力規制庁委託成果報告書

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

国立研究開発法人
日本原子力研究開発機構
平成 30 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 JASMINE コードの改良	2-1
2.1.1 溶融物モデルの改良	2-1
2.1.2 アグロメレーションモデルの改良	2-5
2.2 対象実験ケースと入力条件	2-9
2.2.1 DEFOR-A 実験の概要	2-9
2.2.2 解析条件	2-13
2.3 解析結果	2-15
2.4 考察	2-18
3. PULiMS 実験の解析	3-1
3.1 JASMINE コードの改良	3-1
3.1.1 スプレッドモデルの改良	3-1
3.1.2 沸騰曲線相関式の改良	3-5
3.1.3 二相流解析における数値計算の安定化	3-8
3.2 対象実験ケースと入力条件	3-12
3.3 解析結果	3-17
3.4 考察	3-24
3.5 まとめ	3-44
4. 実機冷却性評価の予備解析	4-1
4.1 プラント・デブリ初期状態に関する入力条件	4-1
4.2 入力パラメータの不確かさの仮定	4-8
4.3 解析パラメータセットの抽出	4-10
4.4 解析結果	4-16
4.5 デブリ冷却性評価	4-20
5. おわりに	5-1
付録 A DEFOR-A 実験の解析結果	A-1
付録 B PULiMS 実験の解析結果	B-1
付録 C 実機冷却性評価の予備解析の結果	C-1
付録 D 逆問題解析による PULiMS 床表面の温度・熱抵抗の推定	D-1
付録 E 冷却可能な最大デブリ堆積高さの評価	E-1
付録 F JASMINE コードの概要	F-1
付録 G 出張報告	G-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ている [1.1]。また、最近撮影された 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示唆された [1.2]。

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

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

- (a) 機構論的な溶融炉心／冷却材相互作用解析コード JASMINE [1.3]を改良し、溶融炉心の冷却性を支配すると考えられる水プール中における溶融炉心ジェットのブレイクアップ、ブレイクアップで生じた粒子同士の結合による塊状デブリ（アグロメレーションデブリ）の生成及び溶融炉心の床面上における拡がり挙動に係わる予測性能の向上を図る。
- (b) 冷却性の観点で特に重要と考えられるアグロメレーションデブリの重量 M_a 及び床面に拡がって連続層状に堆積する溶融炉心の重量 M_c の合計（または合計体積 V_d ）を JASMINE コードの解析により求める。複雑な溶融炉心の堆積状態を単純かつ保守的な体系に置き換えて、溶融炉心とコンクリートとの境界における最高温度 T_{max} （または溶融炉心の堆積深さ h_d ）を算出する。

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

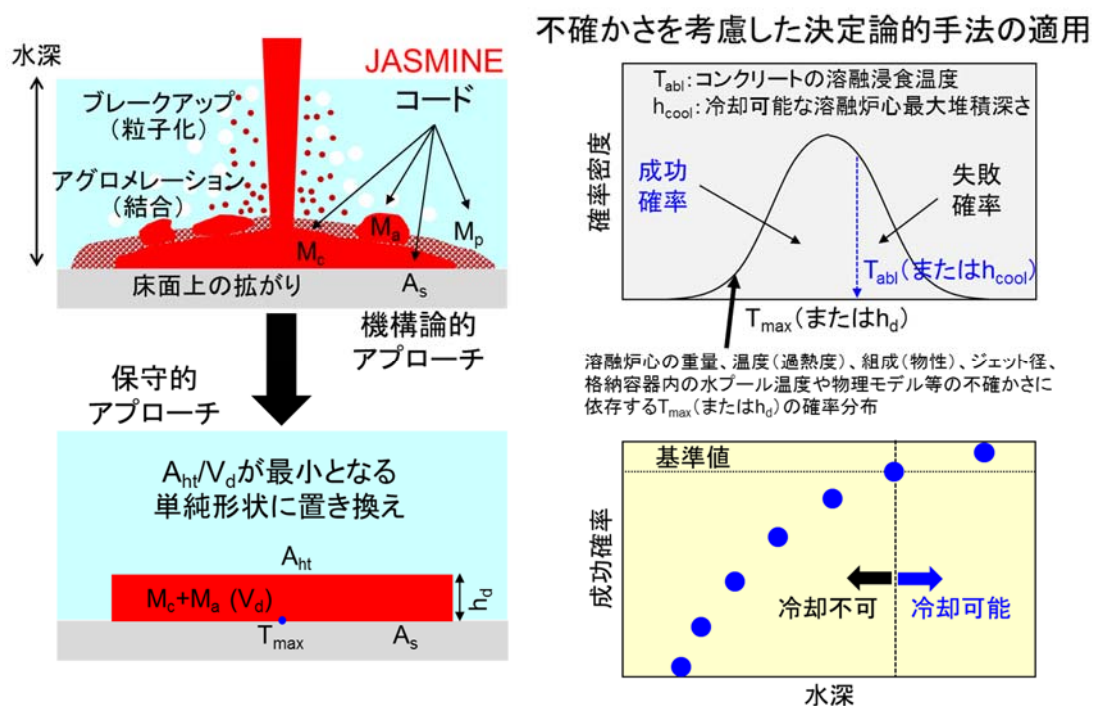


図 1.1 格納容器内溶融炉心冷却性評価のアプローチ及びアウトプット

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 28 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溶融炉心の拡がり挙動に係わるモデルの改良を進めた。また、図 1.1 に示したアプローチによる実機評価の一環として、事故条件の不確かさを考慮した予備的解析を JASMINE コードを用いて実施した。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）を評価するために平成 28 年度に JASMINE コードに組み込んだアグロメレーションモデルを改良し、スウェーデン王立工科大学（KTH）で実施された高温熔融酸化物ジェットブレイクアップ実験（DEFOR-A 実験）[1.4]の解析に適用した。これにより、ブレイクアップやブレイクアップ後の粒子挙動に係わるモデルの予測性能を検証した。
- ② 格納容器床面上での熔融炉心拡がり挙動の評価精度を向上させるため、熔融物の表面固化及び表面に作用する張力の考慮、熔融物から冷却水への伝熱評価相関式の改良、熔融物から床面への熱抵抗の考慮等といった改良を JASMINE コードに対して加え、KTH で実施された高温熔融酸化物ジェットの水中床面拡がり実験（PULiMS 実験）[1.5]の解析に適用した。これにより、熔融物の床面拡がりモデルの予測性能を検証した。
- ③ 原子炉圧力容器破損時に格納容器内に流出する熔融炉心の量、温度、熔融炉心ジェット径といった JASMINE 解析への入力パラメータについて確率分布を仮定し、抽出した 59 ケースの事故条件に対して予備的な実機解析を実施することで入力パラメータの不確かさを考慮したデブリ冷却成功確率の評価を行った。これにより、格納容器内における熔融炉心の冷却可能性評価への JASMINE コードを用いた確率論的評価手法の適用性を検討した。

参考文献

- [1.1] M. Pellegrini, et al., “Benchmark Study of the Accident at the Fukushima Daiichi NPS Best Estimate Case Comparison”, NURETH-16, 13743, Chicago, IL, August 30-September 4, 2015.
- [1.2] 東京電力ホールディングス, 福島第一原子力発電所 2 号機原子炉格納容器内部調査実施結果 (速報), 2017 年 2 月 20 日, http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/handouts/2018/images1/handouts_180119_08-j.pdf.
- [1.3] 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.
- [1.4] 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.

- [1.5] A. Konovalenko, A. Karbojian and P. Kudinov, “ Experimental Results on Pouring and Underwater Liquid Melt Spreading and Energetic Melt-coolant Interaction”, NUTHOS-9, N9P0303, Kaohsing, Taiwan, September, 2012.

2. DEFOR-A 実験の解析

2.1 JASMINE コードの改良

2.1.1 溶融物モデルの改良

原子炉の過酷事故で生じる炉心溶融物は、燃料、燃料被覆管、制御棒、構造材、冷却材が高温で溶融・反応することで生じ、多くの元素・化合物からなる混合物である。このため液相線温度と固相線温度とが異なり、冷却に伴い固相と液相が共存する流体となる可能性がある。固相と液相の混合物は、液相単体の場合よりも粘性係数が飛躍的に増加するので溶融物の拡がりに影響すると考えられる。

平成 28 年度までの解析では、PULiMS、DEFOR-A とも Bi_2O_3 と WO_3 の共晶混合物であり、実機解析においても UO_2 と ZrO_2 の共晶混合物を仮定していたので、液相線温度と固相線温度の差を考慮する必要がなかった。今年度は JASMINE の適用範囲を拡大するために、非共晶点の溶融物にも対応できるように溶融物の物性モデルを改良した。

JASMINE の解析モデルでは、溶融物の凝固点、凝固潜熱、粘性係数、熱伝導率、比熱を用いてクラストの形成・成長・冷却を計算しており、これまでのモデルとの整合性を保つためには固液二相状態でのこれらの値を定義する必要がある。クラストの成長速度は熱的に決まるとモデル化されており、凝固潜熱と出入りする熱流束の差で決定されるので、凝固潜熱は 0 でない値を持たないとならない。今回のモデル化では、固相粒子は液相に懸濁されまた、固相と液相の分離はなく両相のスリップもないと仮定する。

(1) 非共晶体の溶融潜熱・比熱の計算

(a) クラストと溶融部界面近傍の温度・状態の分布

溶融物が共晶体であるとき、液相線温度と固相線温度が一致し、クラストと溶融部の界面もこの温度（融点）となる。界面近傍にできる温度境界層内で溶融物プール温度（主流温度）から融点まで変化する（図 2.1.1 参照）。

溶融物が非共晶体であるときは液相線温度 T_{liquidus} と固相線温度 T_{solidus} とは異なり、溶融物は固液二相状態となる。クラストと溶融部の界面の温度は、固液二相の固相の割合が多くなり、流動が不可能となる温度として与えられる。この温度を融点 T_{melt} と定義する（図 2.1.2 参照）。

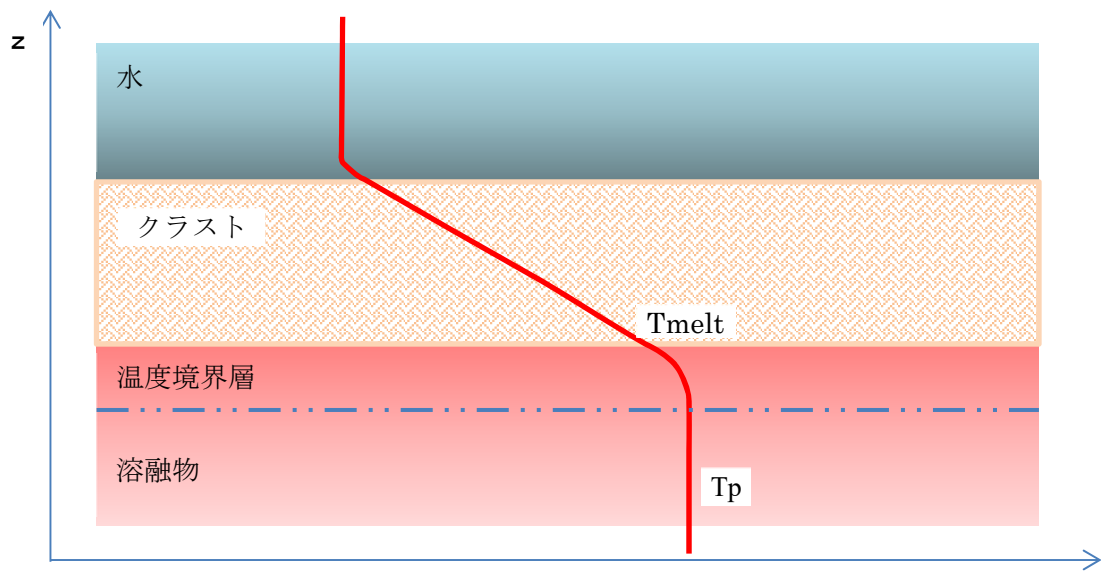


図 2.1.1 共晶体の場合の温度分布

温度

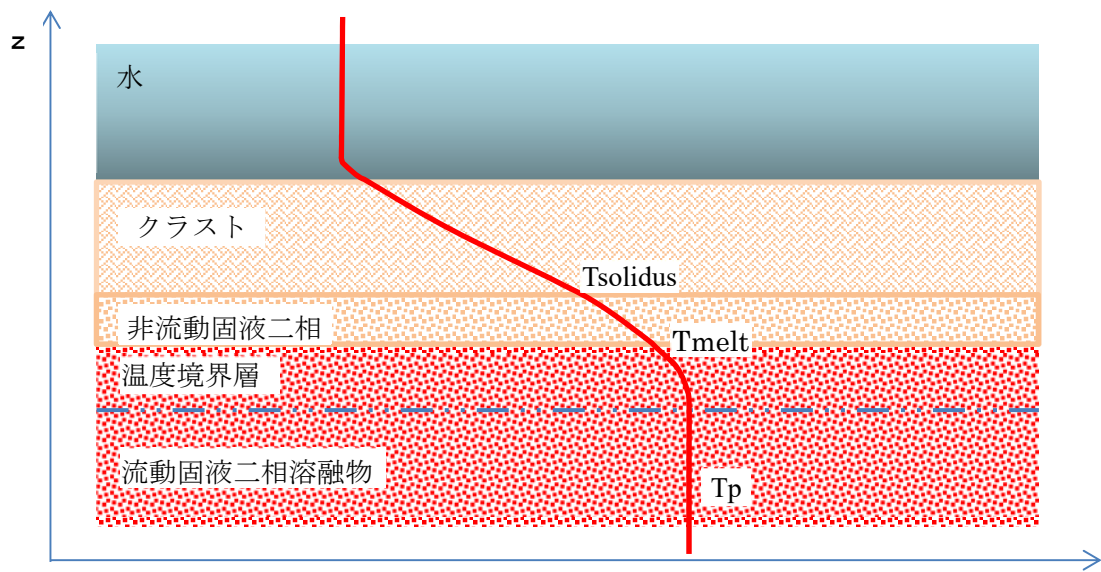


図 2.1.2 非共晶体の場合の温度・状態分

温度

(b) 固相率の温度依存性

温度と固相率・比エンタルピの関係を図 2.1.3 に示す。真のエンタルピと比熱は液相線温度と固相線温度の間で固相率の変化に伴い曲線となるが、JASMINE では、プール、クラストに対してそれぞれ一つの物性値を与えなければならないので、融点のところで段差を持つ直線とする。熱収支の計算にエンタルピを使用し、熱伝達率の評価のために比熱を使用する。本来は比エンタルピを温度で微分したものが比熱であるが、ここでは使い分ける。比熱は、熱伝達率評価にのみ使用される。

(2) JASMINE での実装

液相線温度、融点、固相線温度、流動が不可能になる固相体積率、凝固潜熱、液相の密度・粘性係数・比熱・熱伝導率、固相の密度・比熱・熱伝導率を一定値で与え、温度と固相重量率の関係を示す point-by-point のデータを入力で与えるようにする。

(3) 凝固潜熱

液相、固相の比熱が異なるので、凝固潜熱には詳細な定義が必要となる。液相線温度 T_l における溶融物の比エンタルピを $h_l(T_l)$ とし、固相線温度 T_s における比エンタルピを $h_s(T_s)$ とする。融点 T_m ですべての相変化が生じると想定して次式で全凝固潜熱 Δh を定義する。この値を、JASMINE の凝固潜熱入力値とする。

$$\text{LHEAT} = h_l(T_l) - C_{pl}(T_l - T_m) - \{h_s(T_s) + C_{ps}(T_m - T_s)\}$$

ここで、 C_{pl} 、 C_{ps} は、液相、固相の比熱である。

凝固潜熱は固相率の変化に応じて放出されるので、液相線温度と固相線温度が異なっていれば、厳密には溶融物側の境界層とクラスト内の流動が不可能になる温度と固相線温度の間の部分で連続的に凝固潜熱が放出され、クラストの固液界面局所の凝固潜熱は0となるが、(i)境界層内の温度変化やクラスト内の温度分布を計算していないこと、(ii)従来の計算式が使えなくなることのために、温度境界層から界面近傍までの凝固潜熱（界面凝固潜熱と呼ぶ）は溶融部とクラストの界面で集中して扱うこととする。

界面凝固潜熱は、凝固点での液相側（流動対部分）のエンタルピと、固相側（クラスト）でのエンタルピの差で表される。凝固点での液相側すなわち図 2.1.3 のオレンジ色の線の凝固点の上端での液相重量率は、プール中の液相重量率 $fwlp$ と等しいとする。一方、固相側（クラスト）については凝固点において、本来の融点でのエンタルピから液相部分が完全に凝固するまでに放出する凝固潜熱のうちの一定割合（ $factlheat$: 入力で与える）を放出することとする。

したがって、 T_{melt} での真の液相重量率を $fwlm$ とすれば、JASMINE のクラスト形成の計算に使用する界面凝固潜熱は

$$\{fwlp - fwlm \times (1 - factlheat)\} \times \text{LHEAT}$$

となる。このように、クラスト成長の計算にかかわる界面凝固潜熱の値は、溶融物のバルク温度に依存する形となっている。

(4) 溶融物の比熱

JASMINE 内部では比熱の値は、液相側では熱伝達率の計算に使用され、固相側ではクラスト保有熱量の計算に使用される。溶融部分の熱伝達率計算に使用する比熱は、温度境界層内での凝固潜熱の放出も考慮して、液相だけの比熱ではなく、液相バルクでのエンタルピと、凝固点での真のエンタルピの差を液相バルクのスーパーヒートで除して計算する。

一方、固相側では、クラスト内部に含まれる液相が凝固するときに放出する凝固潜熱（前記の固液界面で考慮した部分を除く）も加えて比熱とする。

(5) 溶融物の粘性係数

溶融物温度が液相線温度以下になると溶融物は固液二相流となるが、その粘性係数は次式で示される Einstein-Roscoe の式[2.1]で計算する。

$$\mu = \mu_0(1 - \varphi/R)^{-2.5}$$

ここで、

μ : 溶融物（固液二相流）の粘性係数

μ_0 : 液単相の粘性係数

φ : 固相体積率

R : 流動が不可能になる固相体積率

固相体積率が R となる温度を融点とするべきであるが、粘性係数の計算において発散の可能性があるがあるので、少し余裕を見た温度が入力できるよう、融点も入力とする。

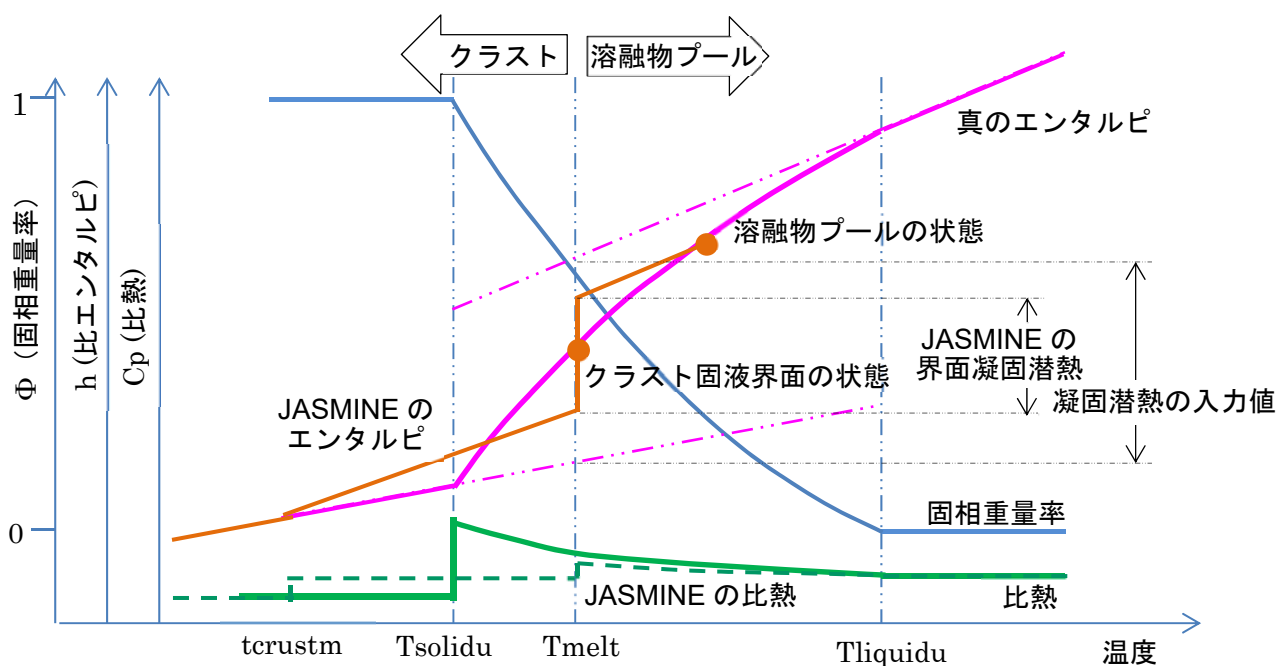


図 2.1.3 固相率と比エンタルピ変化のモデル化

2.1.2 アグロメレーションモデルの改良

原子炉圧力容器の破損により、先行注水された格納容器下部（キャビティまたはペDESTAL）に炉心溶融物がジェット状に流入する場合、溶融物と水との相互作用により溶融物ジェットの表面でブレイクアップ（粒子化）が生じ、粒子状の溶融物が形成される。これがそのまま冷却されて固化することで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）が大きいと冷却されやすい。一方、粒子状の溶融物が固化する前に他の粒子と結合して塊状のデブリ（アグロメレーションデブリ）を形成したときには、比表面積の減少により粒子状デブリよりも冷却性が低下する。このため、溶融炉心冷却性評価において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。

JASMINE コードには平成 28 年度にアグロメレーション評価モデルが導入された。このモデルは、アグロメレーションデブリの生成割合を相関式等で与えるものではなく、JASMINE コードで取り扱う「粒子群」同士の重なり状態を位置及び大きさに基づいて評価し、重なり状態が判定基準を上回る場合にアグロメレーション発生と判断するという機構論的なものであった。本年度は、粒子群同士の重なり状態の評価方法は変更せず、判定基準を粒子群の平均エンタルピの関数とすることで、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できるよう改良した。

(1) アグロメレーションモデルの概要

JASMINE コードでは、同一パラメータ（直径、温度等）を持つ多数の粒子をまとめて粒子群として取扱う。ここで、粒子群は質点ではなく有限の体積を有しており、そこに含まれる粒子は粒子群が占める空間領域に均等に分散していると想定する。粒子群の持つパラメータには、この空間領域の大きさや座標が含まれており、粒子の数密度が変化するような場合も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の 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、落下点近傍に先に落下していた粒子群とアグロメレーションするか否かを判定する。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否かを判断した上で、これを免れた粒子について床面と同様のアグロメレーション判定を行う。

判定対象とするのは、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である。

なお、平成 28 年度モデルでは、上記①～③のうち融点以上の粒子群のみを判定対象としたが、固化した粒子群でも先に落下していた融点以上の粒子群とアグロメレーションする可能性があるため、融点以上という条件をなくした。

2) アグロメレーションの相手となる粒子群の探索

判定対象とする落下粒子群に対して、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）に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、それぞれについて以下を実施する。

3) 粒子群の重なり状態の評価

落下してきた粒子群を **grp1**、既に落下し **grp1** と重なりを持つ粒子群を **grp2** とする。

図 2.1.4 に示すように、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を、

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

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

とし、さらに、これらの和を、

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

とする。また、同図に示す様に、2つの粒子群が含まれる空間領域の床への投影面積を、

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

とする。

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。

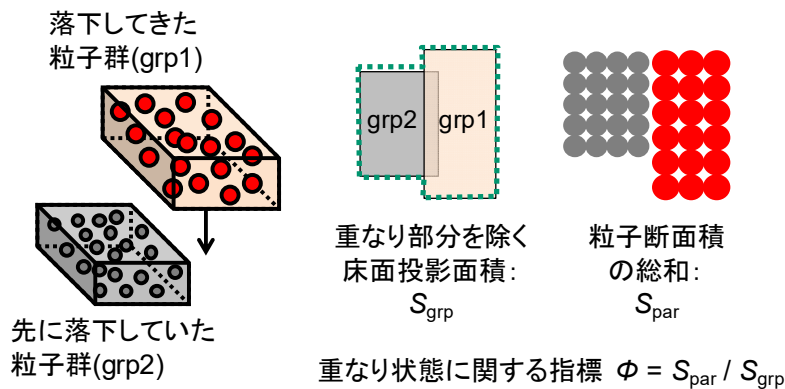


図 2.1.4 粒子群の重なり状態の定量化

4) アグロメレーションの判定

アグロメレーション判定基準を以下の式で定義する。

$$\Phi_{lim} = \infty \quad \text{for } h_{av}/h_{melt} \leq 1$$

$$\Phi_{lim} = \Phi_{min} + (\Phi_{max} - \Phi_{min}) / (h_{av}/h_{melt})^\alpha \quad \text{for } h_{av}/h_{melt} > 1$$

ここで、 h_{av} は粒子群 **grp1** 及び **grp2** の平均エンタルピ、 h_{melt} は溶融物の溶融エンタルピ、 Φ_{min} 、 Φ_{max} 及び α は調整パラメータである。なお、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は平均エンタルピ算出において考慮しないものとする。

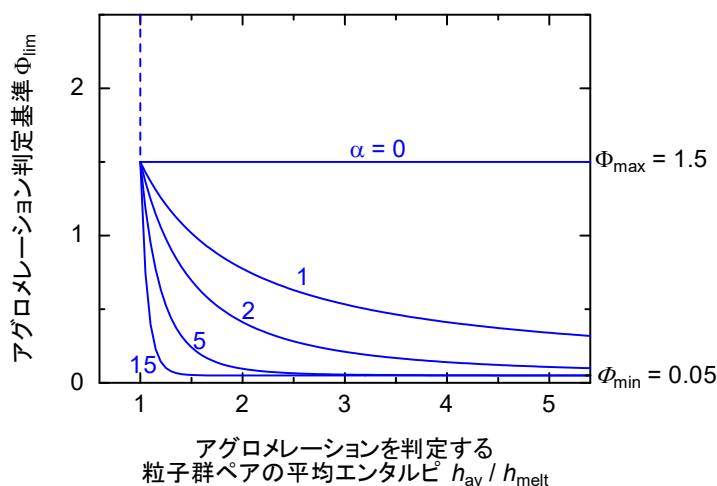
3)で評価した指標を判定基準と比較し、

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

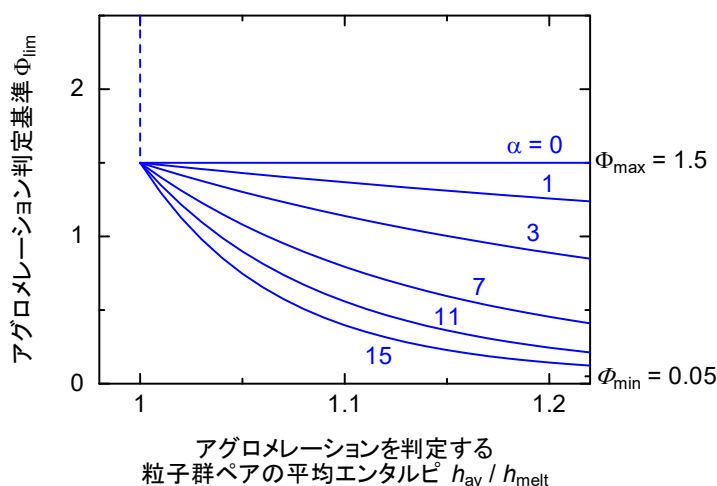
の場合にアグロメレーションが生じると判定する。

図 2.1.5 に $\Phi_{min} = 0.05$ 、 $\Phi_{max} = 1.5$ としたときのアグロメレーション判定基準の例を示す。この図から判るように、溶融エンタルピに対する平均エンタルピの割合

(h_{av}/h_{melt}) が 1 を下回る場合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下がりアグロメレーションし易くなる。なお、判定基準を固定値とした平成 28 年度モデルは、 $\alpha = 0$ のケースに対応する。



(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 2.1.5 アグロメレーション判定基準の例

判定基準が取り得る範囲は調整パラメータ Φ_{min} 及び Φ_{max} で与えられるが、 h_{av}/h_{melt} に対する依存性を与える α がより重要な調整パラメータとなる。2.2.1 節に後述するように、解析対象とした DEFOR-A 実験で溶融物の過熱度が最も高いケースでも h_{av}/h_{melt} が 1.2 程度であるため、アグロメレーション判定において参照される範囲は狭く、図 2.1.5(2) に示す範囲となる。

なお、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が、その効果を定量的に評価することが困難であるため、熱伝達量を調整するための係数 $kqht$ (< 1) を導入した。(平成 28 年度モデルから変更なし)

2.2 対象実験ケースと入力条件

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、高温溶融物質を水プールにジェット状に落下させ、水中でのブレイクアップ挙動やブレイクアップで生成された粒子同士の結合（アグロメレーション）挙動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挙動を主なとした DEFOR-A 実験 [2.2][2.3] を解析対象とした。

DEFOR-A 実験装置の概略を図 2.2.1 に示す。実験装置は、模擬物質を溶融させるための高周波誘導加熱炉、溶融物ジェットを形成するための漏斗、溶融物ジェットを落下させる水プールから構成される。装置上部の高周波誘導加熱炉で模擬物質を加熱し溶融させ、加熱炉を傾けることで溶融物を漏斗に落下させる。漏斗の下部にはノズルが設置されており、これを通して溶融物がジェット状に水中に落下する。水プールは、底面が 0.45 [m]×0.5 [m] の矩形で、高さは 2 [m] である。透明なプール壁を通して溶融物の挙動を観察する。

プール内には落下粒子を受け止めるために 0.3 m 間隔で 4 つの異なる深さにキャッチャーが備えられている。図 2.3.2 はプールを上から見たときのキャッチャーの配置を示している。ブレイクアップで生じ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おり、これにより 1 回の実験で 4 通りの水深に関するブレイクアップ粒子データを取得する。最も高い位置においても溶融物の全てがブレイクアップにより粒子化するよう、キャッチャー1 の水深が、水中での溶融物ジェットのブレイクアップ長さ（溶融物ジェットが完全にブレイクアップする深さ）を上回るよう設計されている。ここで、ブレイクアップ長さは以下の Saito の式[2.4]で推定される。

$$\frac{L_{br}}{D_{jet}} = 2.1 \sqrt{\frac{\rho}{\rho_w} \frac{U_{jet}^2}{g D_{jet}}} \quad (2.1)$$

式中において、 L_{br} ：ブレイクアップ長さ、 D_{jet} ：溶融物ジェットの入水直径、 ρ ：溶融物密度、 ρ_w ：水密度、 U_{jet} ：ジェット入水速度、 g ：重力である。

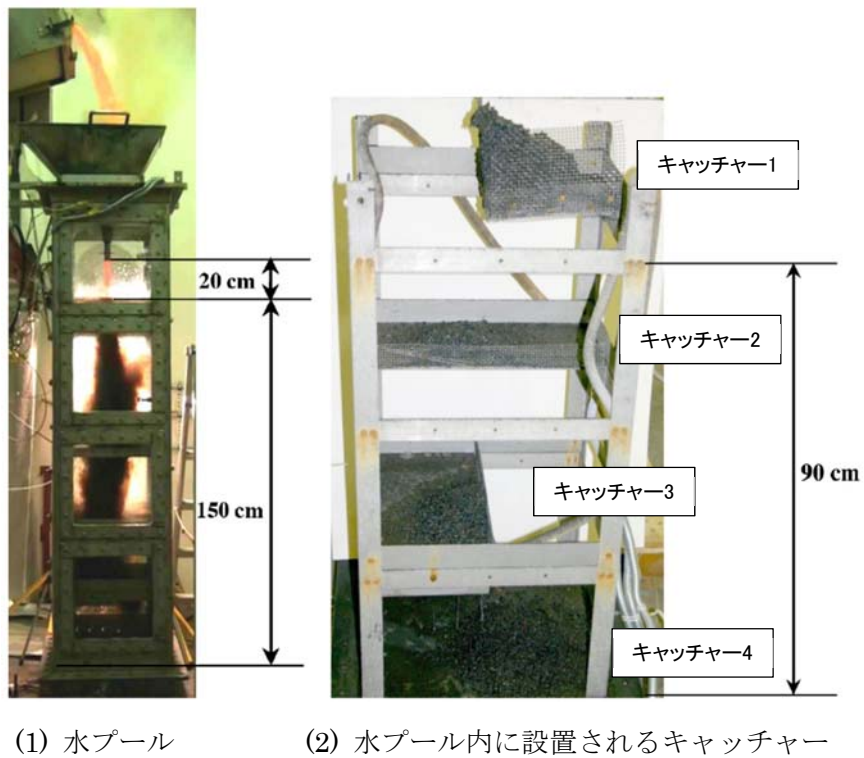


図 2.2.1 DEFOR-A 実験装置[2.2.1]

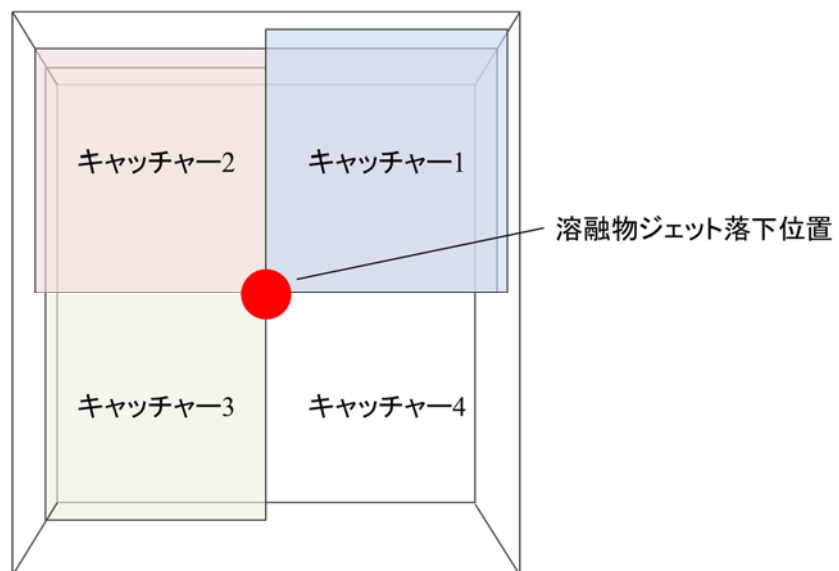


図 2.2.2 DEFOR-A 実験におけるキャッチャーの配置

DEFOR-A 実験のうち、溶融物として酸化ビスマスと酸化タングステンの共晶点混合物 ($\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-WO}_3$) を用いた DEFOR-A1~9 実験及び A23~26 実験を解析対象とした。主要な実験パラメータは溶融物の温度 (過熱度)、溶融ジェット直径、水温 (サブクール度) である。表 2.2.1 及び表 2.2.2 に DEFOR-A1~9 実験及び A23~26 実験の条件をそれぞれまとめる。なお、DEFOR-A3 実験では途中で溶融物の放出が止まったと報告されているため解析対象から除外した。

表 2.2.1 DEFOR-A1~9 実験条件 [2.3]

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

表 2.2.2 DEFOR-A23~26 実験条件

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

各実験においてキャッチャー毎に評価されたアグロメレーション割合を表 2.2.3 及び表 2.2.4 に示す。

表 2.2.3 DEFOR-A1~9 実験アグロメレーション割合 [2.2]

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

表 2.2.4 DEFOR-A23~26 実験アグロメレーション割合

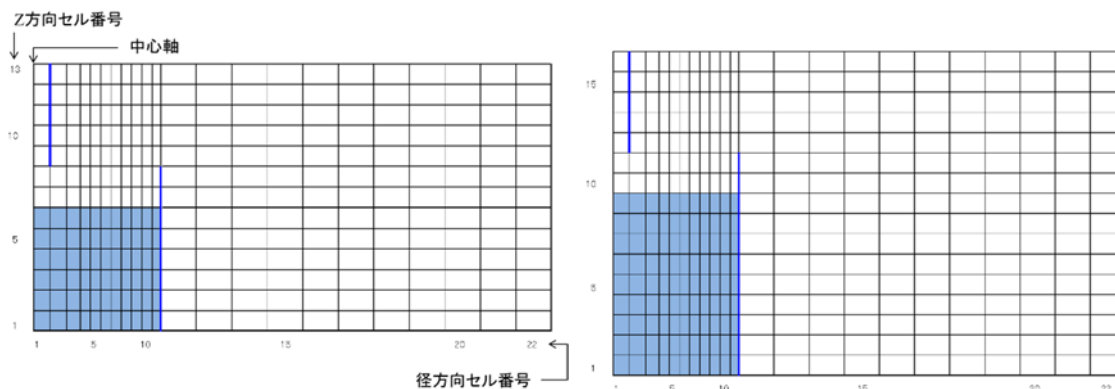
実験番号	A23	A24	A25	A26
キャッチャー1 [%]	48.1	65.4	19.4	96.4
キャッチャー2 [%]	19.0	12.6	22.6	46.6
キャッチャー3 [%]	6.4	1.1	5.8	11.5
キャッチャー4 [%]	0	0	0	0

2.2.2 解析条件

解析条件は、改良したアグロメレーションモデルに関連するパラメータを除き、平成 28 年度の解析と同じとした。

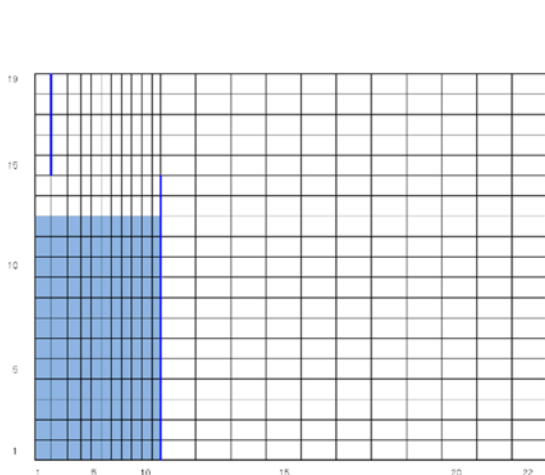
(1) 解析体系

DEFOR-A 実験では異なる高さに設置した 4 つのキャッチャーを用いることで 1 回の実験で 4 通りの水深についてデータを取得するが、解析では 4 通りの水深条件を個別に取り扱う。DEFOR-A 実験装置の水プールの水断面積は 0.5 [m]×0.45 [m]の矩形であるが、JASMINE コードによる解析では水プールを実験装置と水断面積が等しい円筒形状とした。また、実験装置と異なり解析では水プール上方及び外側の気相部分の体積が有限であるが、水蒸気発生等により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大きな体積を設定した。図 2.2.3 に DEFOR-A2 の解析体系を例として示す。



(1) キャッチャー1相当 (水深 0.62 m)

(2) キャッチャー2相当 (水深 0.92 m)



(3) キャッチャー3相当 (水深 1.22 m)

(4) キャッチャー4相当 (水深 1.52 m)

図 2.2.3 DEFOR-A2 実験の解析体系

(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 2.2.5 の値を用いた。

表 2.2.5 $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-WO}_3$ の物性値 [2.2][2.5][2.6]

変数名	物性 [単位]	値
TMELT	溶融物融点 [K]	1143
TSOLI	溶融物固相線温度 [K]	1138
TLIQU	溶融物液相線温度 [K]	1148
CPLIQ	液相比熱 [J/kg/K]	280.0
CPSOL	固相比熱 [J/kg/K]	390.6
LHEAT	凝固潜熱 [J/k]	170000.0
RHOLIQU	液相密度 [kg/m^3]	6876
RHOSOL	固相密度 [kg/m^3]	7811
LAMLIQ	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 分布パラメータ

ジェットブレイクアップにより生じる粒子の粒子径分布として以下の式で表される Rosin-Rammler 分布を仮定した。

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

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。また、 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が、平成 28 年度の解析と同様、DEFOR-A1~9 実験で得られた粒子直径の分布に基づき、

$$D_p = 4.0, n = 1.87$$

とした。

(4) アグロメレーション判定パラメータ及び熱伝達調整係数

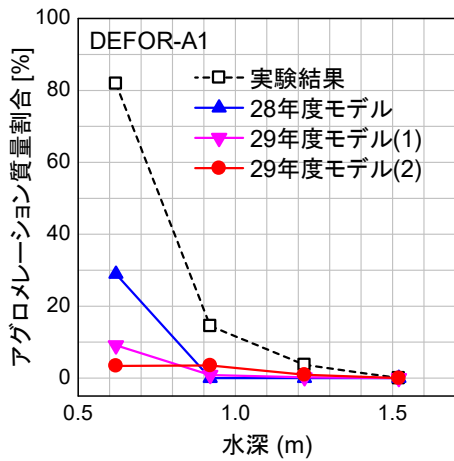
今回の解析では、調整パラメータ Φ_{min} 及び Φ_{max} をそれぞれ $\Phi_{min} = 0.05$ 、 $\Phi_{max} = 1.5$ に固定し、 α について DEFOR-A1~A9 実験の結果をよく再現する値を探索した。さらに、その値を DEFOR-A23~A26 実験の解析に適用した。

熱伝達調整係数は、平成 28 年度の解析と同様 0.8 とした。

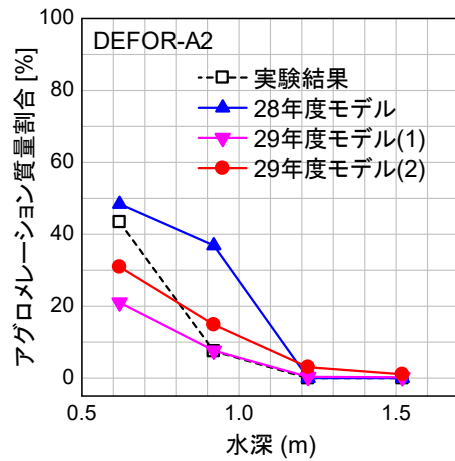
2.3 解析結果

JASMINE 解析結果と実験結果の比較を、DEFOR-A1～A9 実験（A3 を除く）については図 2.3.1、A23～A26 実験については図 2.3.2 に示す。解析結果として示したものは以下の 3 ケースである。このうち、今回改良したアグロメレーションモデルにより DEFOR-A1～A9 実験の結果を最もよく再現したと判断した条件は 29 年度モデル(2)のケースである。29 年度モデル(1)のケースは、調整パラメータ α の感度を示すために併せて示した。

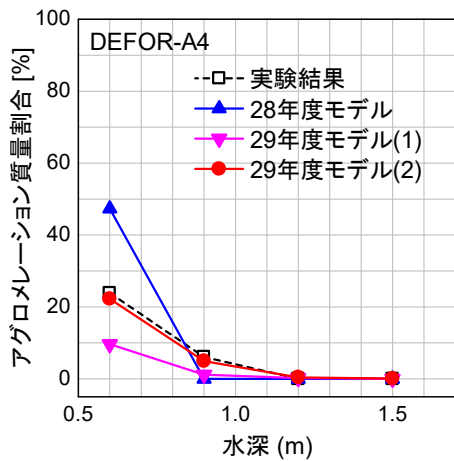
28 年度モデル :	平成 28 年度解析結果, $\Phi_{lim} = 1.5$
29 年度モデル(1) :	$\Phi_{min} = 0.05, \Phi_{max} = 1.5, \alpha = 11.0$
29 年度モデル(2) :	$\Phi_{min} = 0.05, \Phi_{max} = 1.5, \alpha = 15.0$



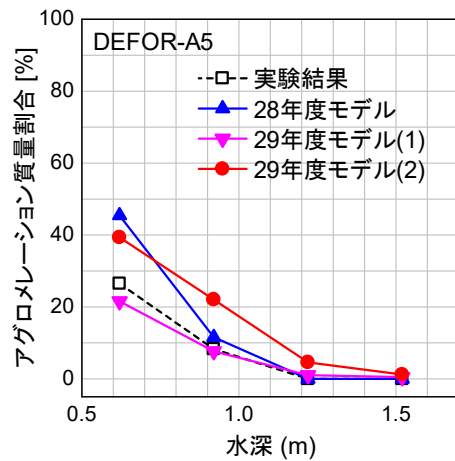
(1) DEFOR-A1 実験



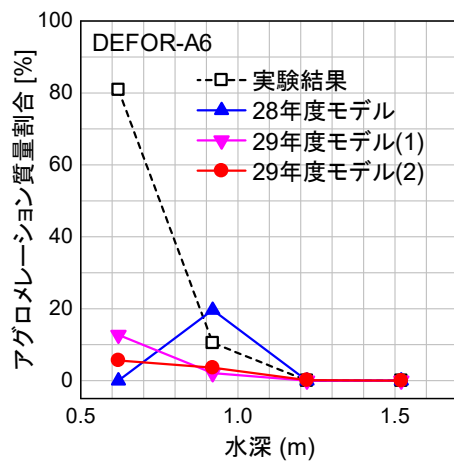
(2) DEFOR-A2 実験



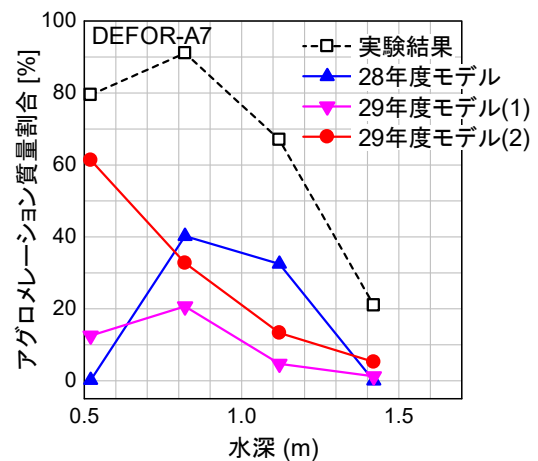
(3) DEFOR-A4 実験



(4) DEFOR-A5 実験

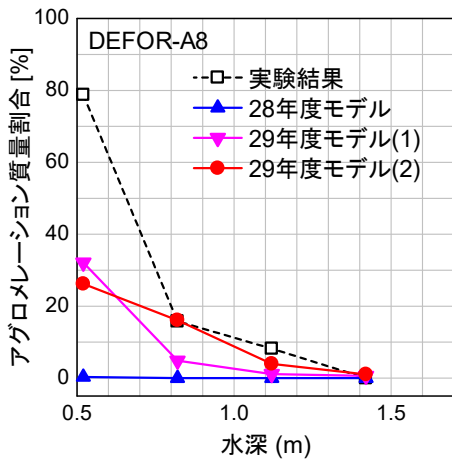


(5) DEFOR-A6 実験

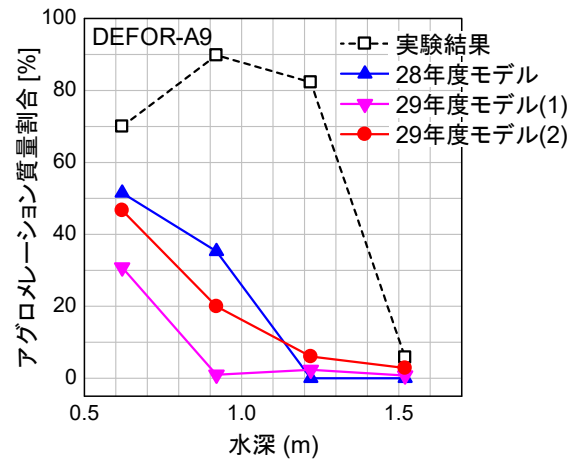


(6) DEFOR-A7 実験

図 2.3.1 DEFOR-A1～A9 実験におけるアグロメレーション割合

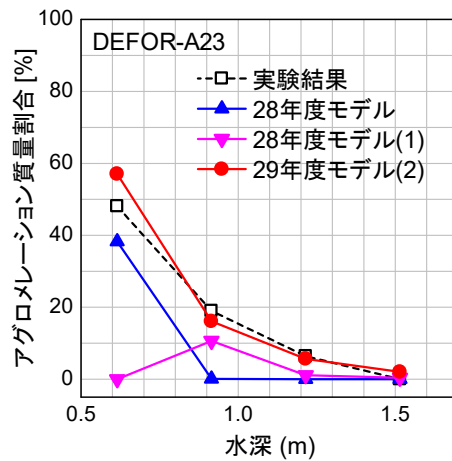


(7) DEFOR-A8 実験

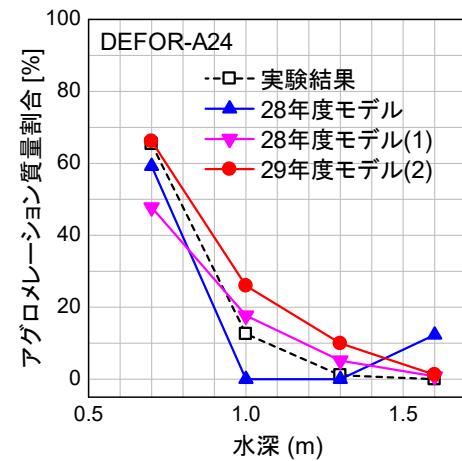


(8) DEFOR-A9 実験

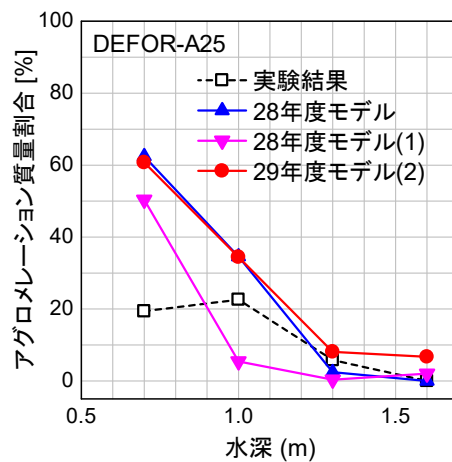
図 2.3.1 DEFOR-A1～A9 実験におけるアグロメレーション割合 (続き)



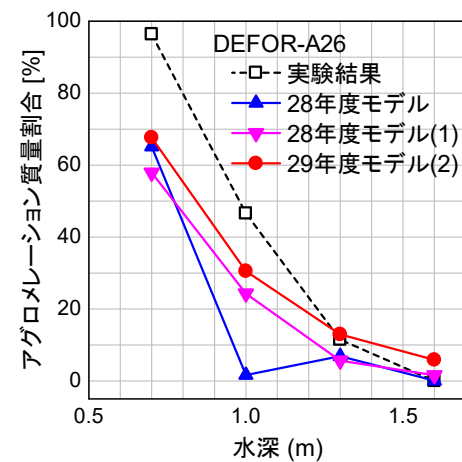
(1) DEFOR-A23 実験



(2) DEFOR-A24 実験



(1) DEFOR-A25 実験



(2) DEFOR-A26 実験

図 2.3.2 DEFOR-A23～A26 実験におけるアグロメレーション割合 (続き)

2.4 考察

(1) DEFOR-A1～A9 実験

アグロメレーション割合が水深の増大に対して単調減少の傾向となることは粒子の冷却を考慮すれば明かであり、この傾向通りの実験結果が得られた DEFOR-A2、A4 及び A5 実験については解析結果と実験結果がよく一致した (図 2.3.1(2)～(4))。

溶融物の過熱度が比較的高い条件で実施された A1、A6 及び A8 実験については、アグロメレーション割合が短調減少の傾向を示した点では A2、A4 及び A5 実験と同様であるが、これらの実験ではキャッチャー1 において約 80%という極めて高い割合となり、キャッチャー2 において 20%以下に急激に低下する実験結果が得られている。このように極端に下向きの凸となる傾向を解析で再現することはできなかった (図 2.3.1(1),(5)及び(7))。今回は昨年度の解析に引き続き熱伝達量調整係数 $kqhtr$ を 0.8 としており、この値をより小さく設定することでアグロメレーションデブリの冷却性の低下がさらなるアグロメレーションを促進し、A1、A6 及び A8 実験結果に対する再現性が向上する可能性がある。

溶融物の過熱度がさらに高い条件で実施された A7 及び A9 実験の解析は実験結果を大幅に過小評価した (図 2.3.1(6)及び(8))。実験ではキャッチャー1 よりもキャッチャー2 の方が高いアグロメレーション割合となり、全体傾向が上向きに凸となる傾向が得られているが、文献[2.2]によれば、これらの実験ではデブリ捕集に問題がありキャッチャー1 で捕集された割合が極端に小さかったためであり、上向きに凸となる分布の再現を目指す必要はない。全体的な過小評価を適正化するにあたり、熱伝達量調整係数 $kqhtr$ の調整が有効と考えられる。

なお、図 2.3.1 に示す「29 年度モデル(1)」及び「29 年度モデル(2)」は、調整パラメータ α をそれぞれ 11.0 及び 15.0 とした場合の解析結果である。図 2.1.5(2)に示すようにアグロメレーション判定基準曲線における違いはさほど大きくないが、アグロメレーション割合には有意な違いが生じており、調整パラメータ α の感度が高いことが判る。

(2) DEFOR-A23～A26 実験

図 2.3.2 に示すように、「29 年度モデル(2)」のケースは DEFOR-A23～A26 実験結果をよく再現した。ただし、A25 実験では、アグロメレーション割合が比較的低いにも関わらずキャッチャー1 よりもキャッチャー2 の方が高いという特異な傾向が得られていることから、キャッチャー1 の水深に対する再現性は低かった。

A26 実験は溶融物の過熱度が高い条件で実施されたが、A1～A9 実験における高過熱度ケースの解析結果と比較して良好な結果を得た。この違いは、A26 実験では溶融物ジェット直径が大きく、溶融物ジェット放出時間が短かったため、長時間経過後に落下してくる粒子が少なく、結果的にアグロメレーションした粒子の冷却性 (すなわち、熱伝達量調整係数 $kqhtr$) の影響を受けにくかったためと推測される。

(3) まとめ

今回改良したアグロメレーションモデルで、調整パラメータを $\Phi_{min} = 0.05$ 、 $\Phi_{max} =$

1.5、 $\alpha = 15.0$ と設定することで、DEFOR-A 実験におけるアグロメレーション割合の再現性が向上した。

参考文献

- [2.1] H. Sato, “Viscosity measurement of subliquidus magmas: 1707 basalt of Fuji volcano”, *Journal of Mineralogical and Petrological Science*, Vol. 100, P133-142, 2005.
- [2.2] 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.
- [2.3] 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.
- [2.4] 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
- [2.5] P. Kudinov, A. Karbojian, W. Ma, “The Defor-S experimental study of debris formation with corium simulant materials”, *Nucl. Technol.*, 170, 219-230, 2010
- [2.6] 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), Clogne, Germany, March 21-23, 2012

3. PULiMS 実験の解析

3.1 JASMINE コードの改良

JASMINE コードによる溶融物の拡がり解析に関して、前章の溶融物モデルの改良及びアグロメレーションモデルの改良に加えて、以下の点について変更・修正を行った。

3.1.1 スプレッドモデルの改良

(1) モデルの概要

溶融物プールの一部が高さ方向全体にわたって固化した時に、その上を乗り越えて流れる溶融物の挙動を計算できるようにした。以下に計算モデルを説明する。

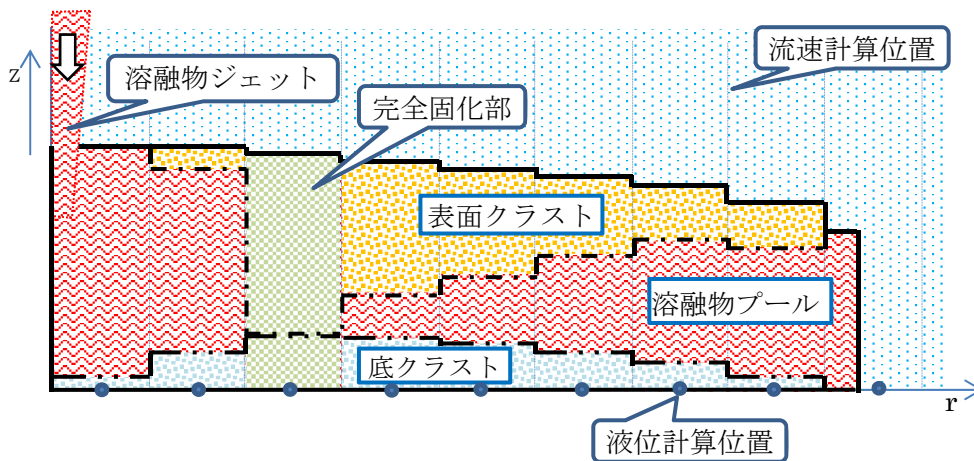
上方から表面クラスト、下側から底クラストが成長して、溶融部の厚みが設定値よりも小さくなると、その点では完全に固化したと判定し(完全固化部と呼称する)、これまでは、その点を通る溶融物はないとしていた(図 3.1(a)参照)。その後、完全固化したクラストについては、流動計算部とは別の計算ルーチンに入り熱伝導を解析していた。溶融物ジェットの供給が続く場合には、この完全固化部の内側(中心軸側)に溶融物が堆積し、図 3.1(b)に示すように液位が高くなるという結果を示す。

今回の改良では、その点の内側の溶融物の液位(図 3.1(b)オーバーフロー高さ)が、表面張力で決まる流動可能液膜厚さを超えたときに、固化部分を乗り越えて流動するとする。流動可能液膜厚 h_{min} さは、液膜先端部の計算と同様に、

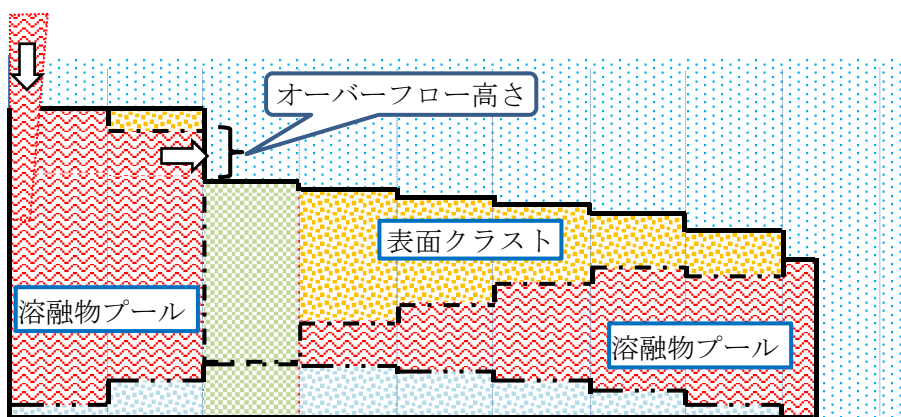
$$h_{min} = \sqrt{\frac{4\sigma}{(\rho_p - \rho_a)g}}$$

ここで、 σ : 溶融物の表面張力、 ρ_p : ボイドを考慮した溶融物の密度、 ρ_a : 水側密度、 g : 重力加速度、である。

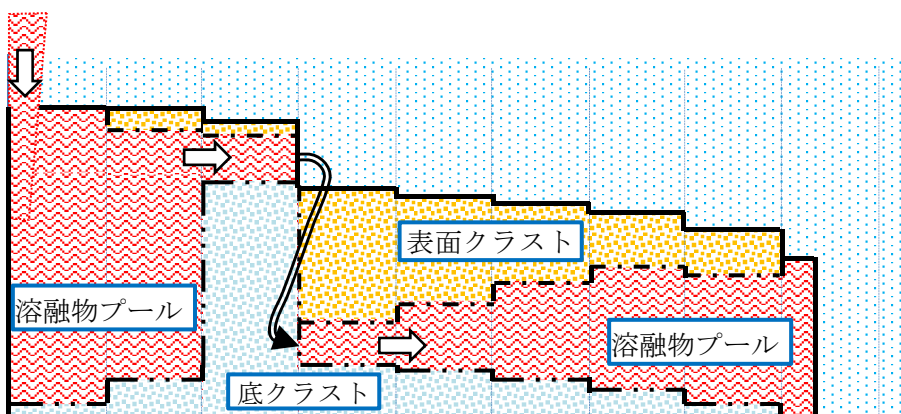
完全固化部の上面高さよりも内側の液位が h_{min} 以上高くなった時に流動が開始すると判定する。このとき、完全固化クラストは底クラストとして扱い、冷却が進めば乗り越えて流動する溶融物の上に表面クラストが形成される。完全固化部を乗り越えて進んだ溶融物が、すでに溶融部が存在する計算メッシュに達すると、そこにある表面クラストの下側に流入するという計算とする(図 3.1(c)参照)。表面クラストは溶融物より密度が小さく溶融部の上に浮くという仮定を設けているので、ここでもクラストは完全な連続体でなく、完全固化部を乗り越えて流れる溶融物はクラック等を通して、表面クラストの下側の溶融部とつながるという想定とした。



(a) 表面クラストと底クラストが接した状況



(b) 固化部内側への溶融物の堆積



(c) 高液位部からの流出

図 3.1 固化部分を乗り越えて流れる溶融物のモデル

(2) 計算例

平成 28 年度に実施した実機解析の case3 に近い条件で、本改良モデルの効果を調べた。この計算条件は、820MWe 級の Mark I 改良型格納容器を有する BWR を想定し、半径 3 m のコンクリート床面に 157.1 t の溶融物を 500 s で落下させる。床面上には深さ 2 m の水プールがあり、水の初期温度は 300 K、雰囲気圧力は 0.5 MPa である。クラストの形成を顕著にするため、ジェットから発生した液滴の初期水平速度を与える係数 C_{vx} を 11 (Default 値は 5)、クラストの拘束条件は「薄い場合は『流動』であるが厚み 5cm となった時点で固定される」としてある。また、ジェットが落下している計算セルを除き、液滴はクラストに付着するとしてある。

図 3.2 に計算結果を示す。これは落下点近傍の水プールの内部を示したものであり、赤い線が溶融物の上側の界面を表し、黄色の線がクラストの上端の界面を表す。図 3.2 の(a)は、溶融物の落下開始から 40 秒後の状態を表しており、溶融物は床面上に広がっている。溶融物の液深が大きくなると半径方向の流速が小さくなるので溶融物表面の冷却が進み表面クラストが形成される。この計算では表面クラストが形成されるとその上に落下してきた液滴が付着するので落下量が多い中央付近 (半径方向座標 0.3~0.7 m) のクラストの厚みが大きくなる (図 3.2(b))。

表面クラストの厚みが増し、この計算で仮定した 5 cm に達するとクラストが移動できなくなり、表面クラストは急成長し沈下するためクラストの下端は下がる。このため溶融物が流れる底クラスト上端と表面クラスト下端の距離が小さくなる (図 3.2(c))。溶融部の厚みが限界値 (この計算では 1 mm) に達すると、図 3.2(d)に示したように溶融物はクラストの上を乗り越えて流れ、表面クラストは底クラストとして扱われる。従って中央部の溶融物液位は周囲の底クラストの厚みよりも高くなる。

さらに時間が経過すると図 3.2(e)に示したように再度溶融物上面に表面クラストが形成される。このクラストが成長し、溶融物流路をふさぐと図 3.2(f)に示したように底クラストが成長したように扱われ、溶融物はクラストの上側を流れるようになる。このように中央近傍のクラストの成長・液面上昇が繰り返され、やがて中心での液面の高さが溶融物落下開始点に達すると計算が停止する。

このように、今回採用したモデルではクラストは溶融物液滴の落下する部分で急速に成長し、溶融物液面も中央部だけで高くなる。現実には底クラストの成長は均一ではなく、背の高い部分を迂回するか、上からランダムに落ちてくる半固化液滴がトンネルのような流路またはポーラスな構造を形成しその部分を通過して溶融物は流れるであろう。しかし、軸対称モデルを採用したコードでは固相部分を通過する液相を記述するのは困難である。

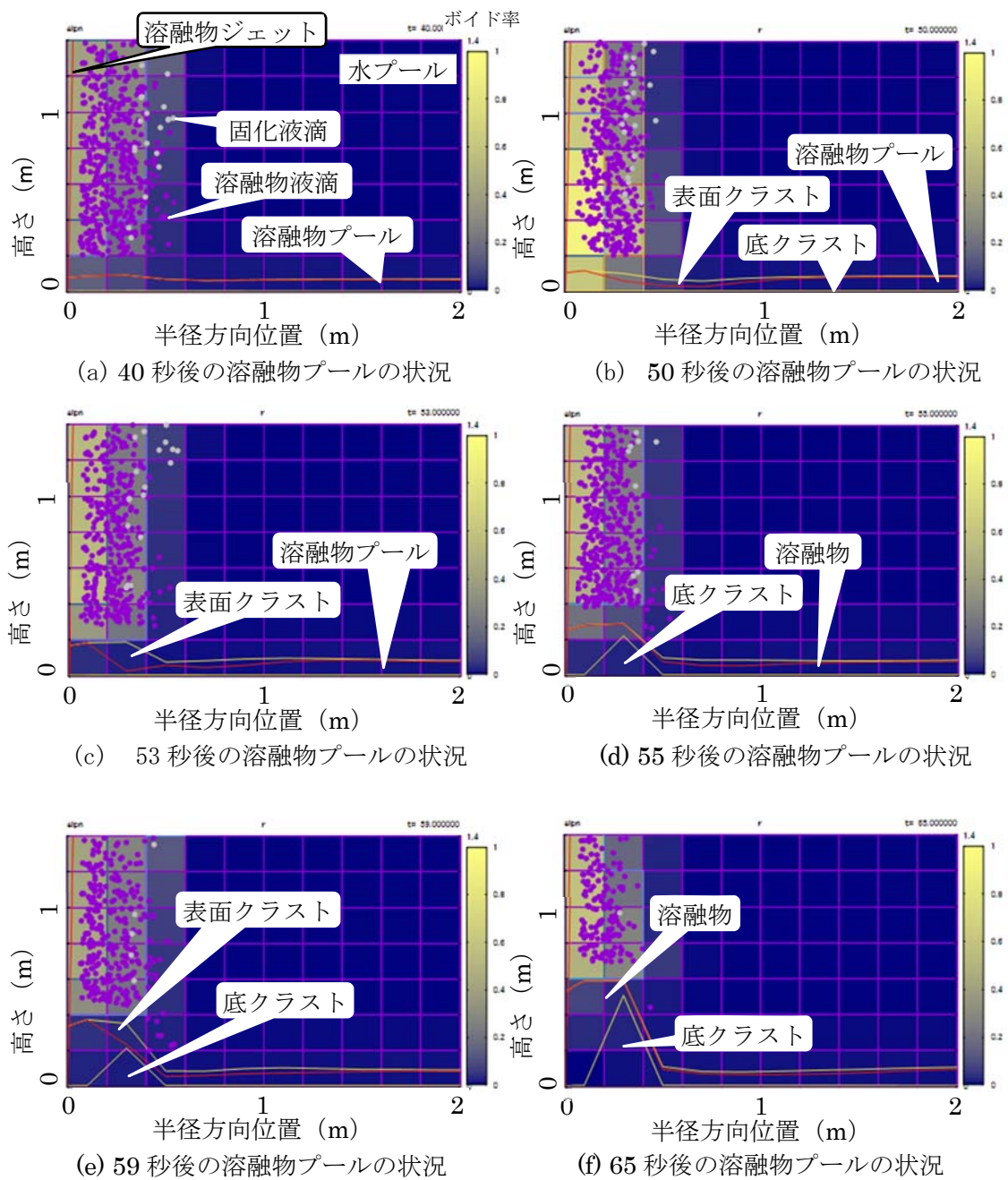


図 3.2 固化部分を乗り越えて流れる溶融物に関する計算例

3.1.2 沸騰曲線相関式の改良

(1) 水による冷却モデルの改良

図 3.3 に、PULiMS 装置 E8 実験の後の溶融物の固化状況を示す。このようにクラストの表面は平坦でない。このために実効的な熱伝達表面積は、溶融物が床上状で占めた面積（投影面積）よりもかなり大きくなる。そこで、実効表面積と投影面積の比 S_m を入力で与えるようにした。JASMINE 内部では、沸騰熱伝達相関式による熱流束の値を S_m 倍する。ただし、クラスト内部の蒸気と水の対向流の圧力損失の大きさが限界となるドライアウト熱流束は、この値の影響を受けないとした。

なお、クラスト表面の凹凸を半球で近似すると、「半球表面積÷円面積」より、この比は 2 となる（図 3.4 参照）。

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

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



図 3.3 PULiMS 実験の溶融物表面形状（E8 試験）

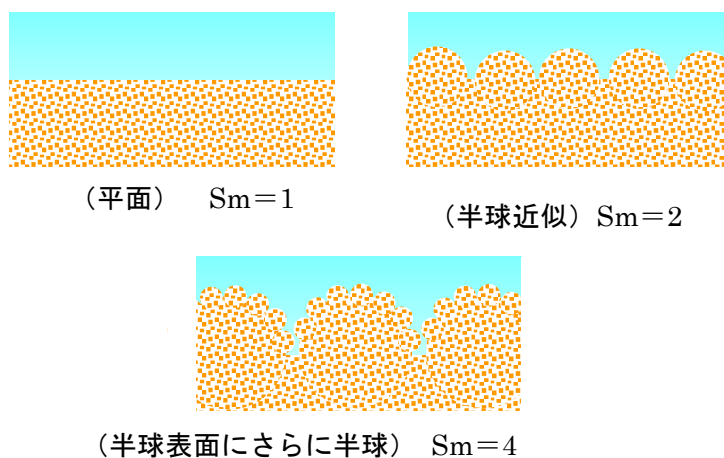


図 3.4 クラストの表面形状の近似

(2) 沸騰曲線の改良

従来の溶融物プール表面の沸騰熱伝達計算式は、膜沸騰時の熱伝達率に水のサブクールの影響が顕著には表れなかったため、以下の計算式を組み込んだ。なお、溶融物液滴に関する熱伝達計算式はプール表面のものとは全く異なったサブプログラムを用いており、今回の変更の影響を受けない。

沸騰曲線を、非沸騰域、核沸騰域、遷移沸騰域、膜沸騰域に分ける。

- ・非沸騰域は、水平平板の自然対流熱伝達相関式を使用する。計算式は従来の JASMINE と同様とする。
- ・核沸騰域は Kutateladze の式を使用する。計算式は従来の JASMINE と同様とする。非沸騰域と核沸騰域の境界は、熱流束の大きい方を採用する。
- ・限界熱流束は、入力で与える。但し、水のサブクール度及び圧力に依存（一次関数）するとし、これへの係数も入力する。
- ・膜沸騰領域は、Bromley の式を使用する[3.1]。このとき水のサブクールも考慮する。また、放射伝熱も考慮する。

飽和膜沸騰熱伝達率 h_{sat} は次式で計算する。

$$Nu = C_1 \left(\frac{Gr^* Pr_g}{Sp} \right)^{1/4}$$

ここで

$$\begin{aligned} Nu &= h_{sat} S / k_g \\ h_{sat} &= q_w / (T_w - T_{sat}) \\ Gr^* &= [g \rho_g (\rho_l - \rho_g) S^3] / \mu_g^2 \\ Pr_g &= (c_{pg} \mu_g) / k_g \\ Sp &= [c_{pl} (T_w - T_{sat})] / L' \\ L' &= \Delta h_v \left[1 + C_2 \frac{c_{pg} (T_w - T_{sat})}{\Delta h_v} \right] \end{aligned}$$

気相の物性値（添え字 g ）は膜温度で与え、液相の物性値（添え字 l ）は飽和温度で与える。水平上向き平板の式を使用することにして

$$C_1 = 0.74$$

$$C_2 = 0.5$$

$$S = 2\pi\sqrt{3}\lambda_0$$

$$\lambda_0 = \sqrt{\sigma / g(\rho_{ls} - \rho_{gs})}$$

とする（添え字 s は飽和を表す）。サブクールの影響は次式で計算する[3.2]。

$$h_{sub} = h_{sat} + 0.067 \frac{k_{lf} Gr_l^{*0.25} Pr_{lf}^{0.46}}{SR^{0.23}} \left(\frac{\Delta T_{sub}}{\Delta T_{sat}} \right)$$

$$Gr_l^* = [g \rho_{lf} (\rho_{lb} - \rho_{ls}) S^3] / \mu_{lf}^2$$

$$R = (\rho_{gs} \mu_{gs}) / (\rho_{ls} \mu_{ls})$$

添え字 b, s, f は物性値をバルク、飽和、膜温度で評価することを意味する。

放射伝熱の影響を含めた総括熱伝達率を h_t 、対流熱伝達を h 、放射熱伝達率を h_{rad} として次式を用いて繰り返し計算する。

$$h_t = h(h/h_t)^{1/3} + h_{rad}$$

$$h_{rad} = \varepsilon_{cr} \sigma_{SB} (T_w + T_{sat}) (T_w^2 + T_{sat}^2)$$

T_w 、 T_{sat} は伝熱面温度、飽和温度、 ΔT_{sat} 、 ΔT_{sat} は伝熱面過熱度、水サブクール度、 k 、 ρ 、 μ 、 c_p 、 σ は熱伝導率、密度、粘性係数、定圧比熱、表面張力であり、 g 、 σ_{SB} は、重力加速度、ステファン・ボルツマン定数、 Δh_v 、 ε_{cr} は、蒸発潜熱、クラスト表面放射率である。

・極小熱流束点温度は、入力で与える。水のサブクール度及び圧力に依存（一次関数）するとし、これへの係数も入力する。

・遷移沸騰領域は、限界熱流束点の温度、熱流束と極小熱流束点の温度圧力を線形補間して計算する。すなわち、入力値及び水プール側の計算結果から得られるその点の圧力とサブクール度から、限界熱流束を求め、これから核沸騰熱伝達計算式から限界熱流束点の温度を決定する。同様に極小熱流束点温度から核沸騰の計算式により極小熱流束を求める。この2点の値から表面クラスト上面の温度を用いて線形補間により熱流束を計算する。

JASMINEにこれまで組み込まれていた相関式と、今回採用した式の一覧を表3.1に示す。

表 3.1 JASMINE の溶融物プール表面の沸騰曲線相関式

	従来	今年度組み込みの式
核沸騰	Kutateladze	Kutateladze
限界熱流束	Zuber	入力（圧力、水サブクール度の一次式）
膜沸騰	Berenson	Berenson
膜沸騰時のサブクール度の影響	伝熱面温度と水温度の差が大きくなることで表現	西尾の式
極小熱流束点温度	Berenson	入力（圧力、水サブクール度の一次式）

従来の計算式と、今回の計算式による沸騰曲線の例を図3.5と図3.6に示す。これらの計算は、圧力は大気圧とし、水のサブクール度としては0, 30, 60 Kとしてある。また、今回の極小熱流束点温度 T_{MHF} は伝熱工学資料[3.1]に沿って次式で与えてある。

$$T_{MHF} = 201 + 8 \sqrt{T_{sub}} \quad (^\circ\text{C})$$

図3.5に示した従来の相関式では、水サブクール度の影響は小さくすべての線がほとんど重なっている。一方、今回の相関式では水温の影響が明確に表れ、特に極小熱流束の値はサブクール度が60 Kの時には飽和水の場合の10倍近くになっている（図3.6）。

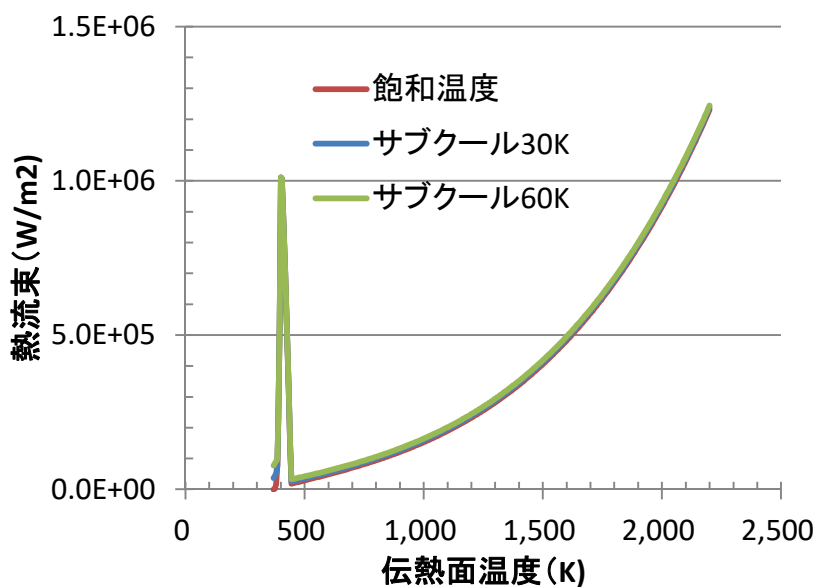


図 3.5 従来の JASMINE コードのプール表面での沸騰曲線相関式の例 (大気圧)

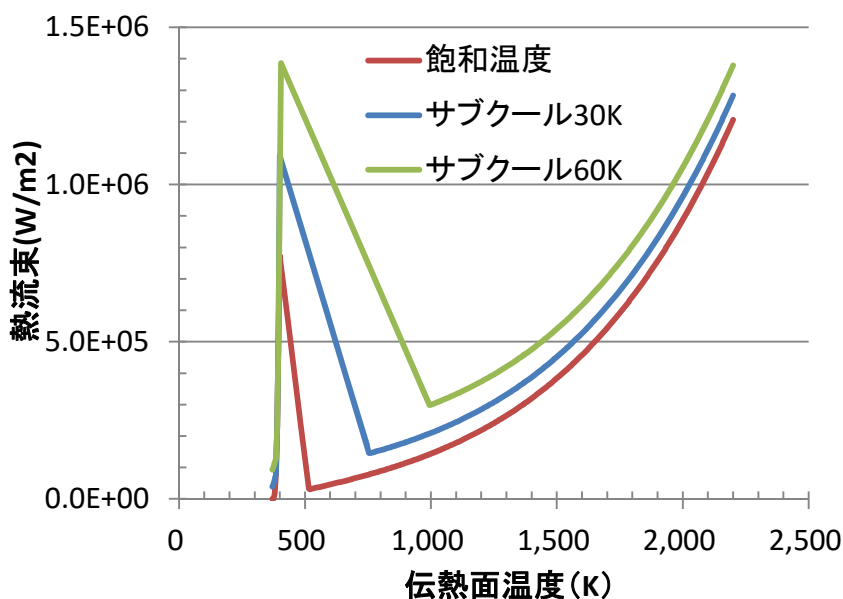


図 3.6 今回組み込んだプール表面での沸騰曲線相関式の例 (大気圧)

3.1.3 二相流解析における数値計算の安定化

(1) 目的

JASMINE の計算において、途中で計算が停止する 경우가度々生じていた。これを防止するために、プログラムを修正し、数値計算の安定化を図った。

(2) 内容

JASMINE の計算において途中で停止するのは多くの場合、水プールでの二相流計算部

が収束しなくなるためである。二相流計算部は、水–蒸気各相に関する質量、運動量、エネルギーの保存則を表す偏微分方程式を解いているが、当然の前提として、解（ボイド率、圧力、速度）が時間・空間軸方向に微分可能であり、また方程式の係数・生成項も連続であることが要求される。しかし JASMINE のように流体の溶融物と水が接している体系では、液面の変動によりメッシュ界面を溶融物・水の境界面が通過する場合や、沸騰曲線に基づく伝熱モードの変化、液滴の発生などにより、セル内の水の専有部の体積・セル間の水側流路面積・伝熱量が急変（導関数が不連続）する場合がある。このような場合に解（主に圧力）の計算結果が前時間ステップのものから急変して、時間ステップ幅を小さくしても変動の許容値範囲に収まらず、計算が停止してしまうことになる。これを回避するために、伝熱量や水側の流路面積の変化を緩和して、解の急変を回避する必要がある。

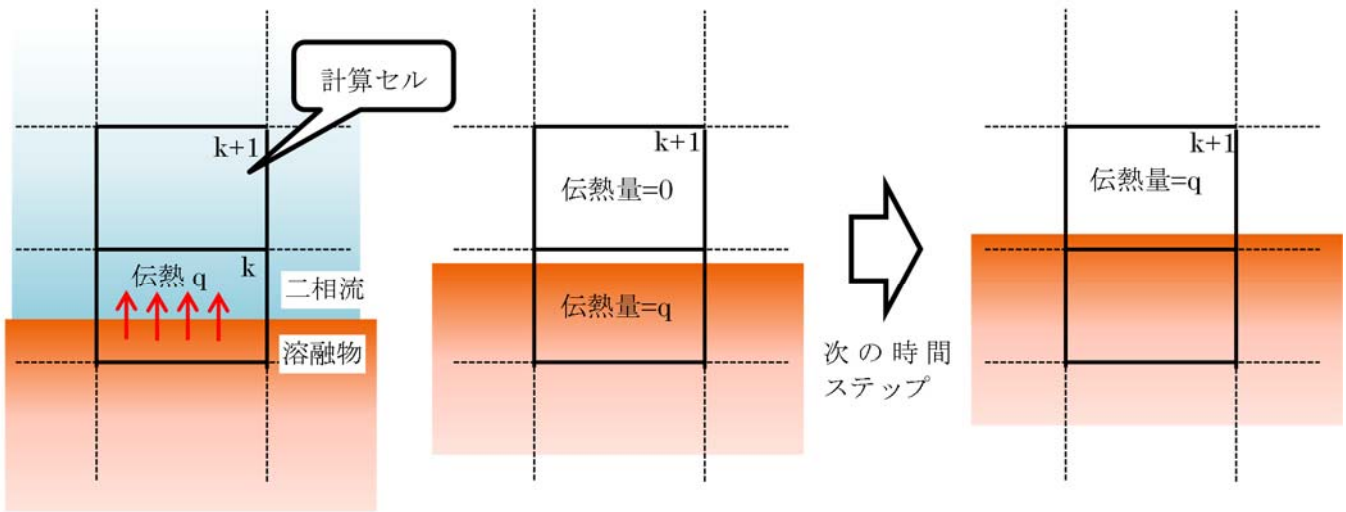
① 溶融物液面動変化時の計算セル間の伝熱量分配のスムージング

溶融物から水側への伝熱量計算部を修正した。従来でも伝熱量の空間分布のスムージングが行われていたが、そこでは液面が上昇していき上側メッシュに新たな液面が生じたときの伝熱量の急増を防止することを目的として、スムージング関数を指数関数としていた。今回の修正では、これを余弦関数として、液面が下がり下側のメッシュに再度新たな液面が生じたときの伝熱量の急変が生じないようにした（サブプログラム melt2tp）。

溶融物から水・蒸気二相流への伝熱は、表面クラストまたは溶融部上端位置が存在する計算メッシュへ伝えられる。このとき、二相流計算部の安定化のため、溶融物と二相流界面における伝熱量をスムージングしている。従来の JASMINE では、溶融物液面が存在する計算セル k に、溶融物表面から伝わる熱が加えられていた（図 3.7(a)）。溶融物液面が上昇し、 k と $k+1$ のセルの境界を通過すると、 $k+1$ のセルにはあるタイムステップに急に q の伝熱が生じることになる（図 3.7(b)）。この急変が、二相流計算で収束が困難になる原因の一つである。これを回避するために、界面での伝熱量を空間高さ方向にスムージングする。すなわち図 3.7(c)に示すように、セル k 内の二相流容積に応じたファクター f で、 k とその上のメッシュ $k+1$ に溶融物からの伝熱量 q を配分($f \times q$ と $(1-f) \times q$ に分ける)する。平成 28 年度の改良では f は計算セル k 内の二相流体積率の γ 乗とした。 γ は固定値であり melt2tp.F 内の定数として与えられる。これにより、二相流計算のエネルギー式のソース項が、溶融物界面の移動に対して連続となり、また、エネルギーも保存される。 $\gamma=0$ とすると従来の計算式と同一となる。

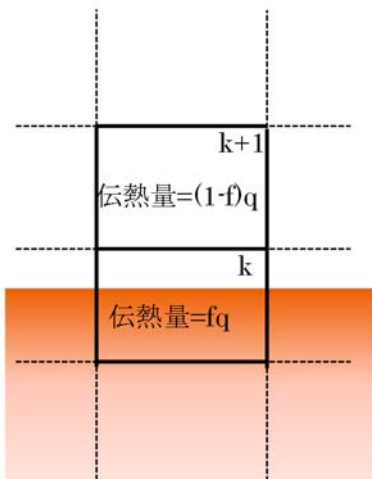
今年度の改良では、液面が低下していく場合でも伝熱量の時間変化の微係数が連続となるように、指数関数ではなくて余弦関数を使用するようにした（図 3.8 参照）。なお、修正が及ぶ範囲を示すパラメータの γ は $\gamma=0.5$ としている。

$$f = \frac{-\cos \left[\frac{\pi}{\gamma} \min \left\{ \gamma, \max \left(0, \frac{volsv - volumem}{volsv} \right) \right\} \right] + 1}{2}$$



(a) 界面の状況のモデル化

(b) 溶融物液面変動時の伝熱量の変化



(c) 界面伝熱量計算の改良案

今回、採用した関数形

$$f = \frac{-\cos \left[\frac{\pi}{\gamma} \min \left\{ \gamma, \max \left(0, \frac{volsv - volumem}{volsv} \right) \right\} \right] + 1}{2}$$

図 3.7 溶融物上表面が、二相流計算セルの境界を通過するときのスムージング

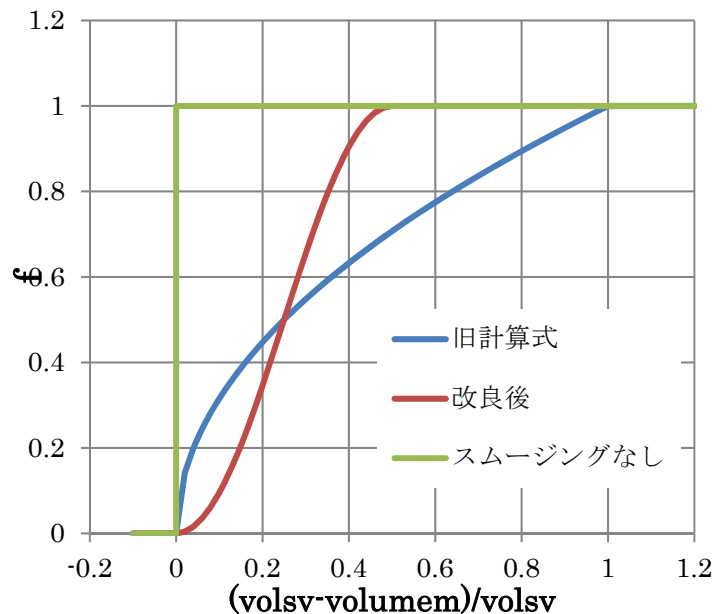


図 3.8 液面から水側への伝熱量の計算に使用するスムージング関数

② 溶融物からの伝熱量の変化のスムージング

サブプログラム `field0.F` 及びサブプログラム `dampexchange` に、溶融物から水への伝熱量の時間変化のスムージングを行う部分を組み込んだ。具体的には、伝熱量に一次遅れを与える。この時の時定数としては定数と仮定して、 10ms とした。

③ 溶融物中の気泡体積率の変化のスムージング

ファイル `pool5.F` 内のサブプログラム `voidfraction` を変更: コンクリートから発生する熱分解ガスが溶融物中を通過する現象を考慮して、溶融物中のボイド率（見かけ密度）を計算しているが、コンクリートからのガス発生量が急変する場合がある（表面温度が低下するとガス発生量が 0 となるなど）。この場合、液面高さが急変するので、水側計算が対応できなくなる。これを回避するために、溶融物中ボイド率の変化に一次遅れが生じるようにした。このときの時定数としては、 0.5s としてある。

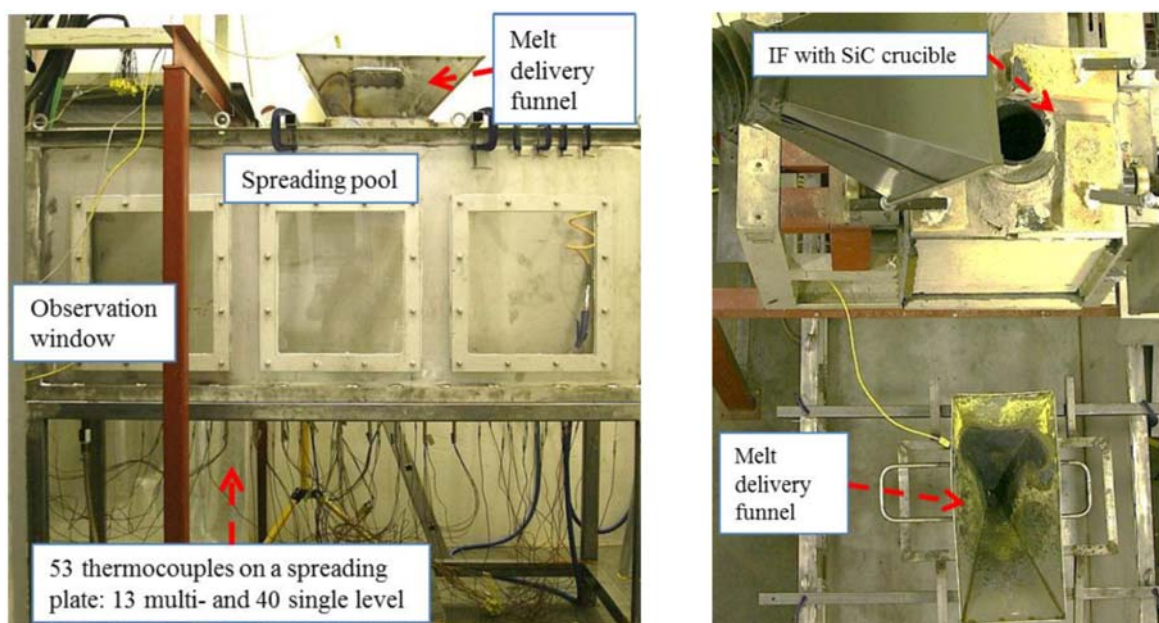
④ 溶融物ジェット近傍の液面面積変動のスムージング

サブプログラム `field0.F` を修正した。`field0.F` には、溶融物ジェットの存在するセル（ r 方向第 1 メッシュ）で、水側のセル境界面の面積をジェットの面積だけ減らす計算を行う部分がある。溶融物プールの液面が低下し、水側の計算セルが新たに生じると、このセルの境界面面積が急変することになり、水側計算部が対応できなくなる。これを回避するために、面積の変動幅を強制的に前タイムステップの値の 5%以内とするようにした。

3.2 対象実験ケースと入力条件

スウェーデン王立工科大学 (KTH) では、水プール内での溶融物拡がり実験を、PULiMS 装置を用いて進めている[3.3]。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た。実験装置の外観写真を図 3.9 に示す。床面近傍には多数の熱電対が設けられており、この中央部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~0.02 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 28 年度までの JASMINE による解析では、E1,E4,E6,E7,E8,E9 試験を対象としていたが今年度の解析では、水蒸気爆発の生じなかった E1,E4,E8,E9 を対象として選定した。これは、水蒸気爆発が生じることにより解析の初期条件が不明確になること又は比較対象の時間範囲が短くなりすぎることを避けるためである。実験装置の床の Spreading Plate の形状を図 3.10 に示す。E1~E6 実験までは長方形、E7 実験以降は正方形の形状をしている。



正面からの撮影

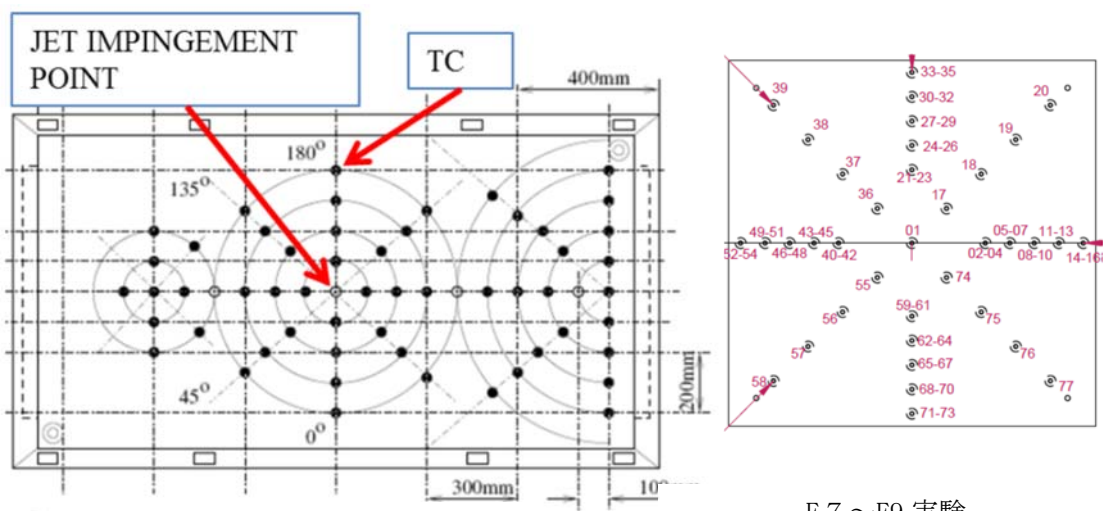
上方からの撮影

図 3.9 PULiMS 実験装置

固化後の模擬溶融物の写真を Run E-4 のものについて、図 3.11 に示す。実験後の床面上には、粒子状となった模擬溶融物と、床面上を液体が流れ拡がった後に固化したと考えられる cake 状の模擬溶融物が残されており、cake 状の固化物の上に溶融物が噴出 (melt eruption) したと思われる塔のように高くなっている部分が観察された。その高さは、デブリ平均高さの 2~3 倍に及ぶ。この塔は固化過程において表面にある固化層 (クラスト) を突き抜けて噴出したものと推定されている。

固化物の垂直断面の写真を図 3.12 に示す。写真からわかるように多数の空孔を含んでおり、そのポイド率 (ポロシティ) は、0.29~0.36 に達する。固化物は高さ方向に三層に分

けられるとしている。最下層は2~3 mmの厚みでポロシティは小さく、上の部分には縦長の細かい空孔がある。中間層は1~2 cmの厚みで、大きな(~1 cm)の空孔があり、上の部分には水平方向に延びた大きな(最大10 cm)空孔・流路がある。最上部は、不規則な構造をしており閉じた空孔を有する。



E1~E6 実験
Spreading Plate : 1×2 m

E 7 ~E9 実験
Spreading Plate : 0.75×0.75 m
(水槽は 1×1m)

図 3.10 PULiMS テストセクション平面図

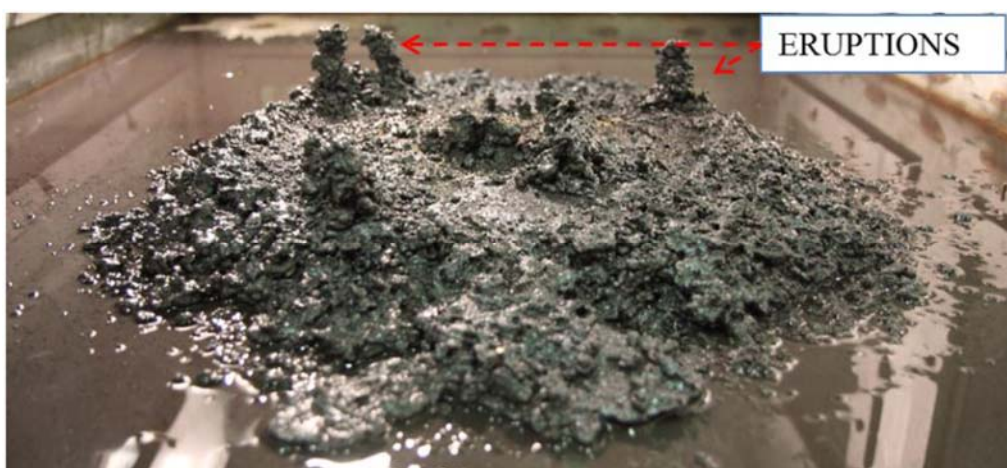


図 3.11 PULiMS E4 実験後の模擬溶融物



図 3.12 PULiMS E4 実験後の溶融物の縦断面写真

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 3.2 に示す。使用された模擬溶融物は、 $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-WO}_3$ の混合物であり、共晶を形成する混合比（42.64 : 57.36 wt%）である。JASMINE による計算に使用した物性値を表 3.3 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値の入力値については表 3.4 に示す[3.4]。

表 3.2 PULiMS 実験の解析における入力値

実験番号	E1	E4	E8	E9
溶融物組成	$\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-WO}_3$ 共晶組成			
溶融物温度 (K)	1279	1213	1168	1182
落下溶融物量 (kg)	23.4	46.9	23.2	26.8
落下継続時間 (s)	10	12	17.6	24.9
ノズル位置 (床からの高さ, mm)	400	400	400	400
ノズル径 (mm)	20	20	20	15
水プール寸法	1 m × 2 m		1 m × 1 m	
水プール半径入力値	0.8 m		0.565 m	
床板厚さ	10 mm		10 mm	
水プール初期液深 (mm)	200	200	200	200
初期水温 (K)	352	350	369	369
溶融物中のボイド率 (-)	0.29	0.36	0.3	0.3

溶融物の温度は、供給に使用した漏斗で測定された値を使用した。落下溶融物量は、実験後に床面上に残された固化物の重量が測定・報告されているものはその値、それ以外は漏斗の重量の変化幅から決定した。

E1,E4,E6 実験は水プールの形状が 1×2 m の長方形であり、E7,E8,E9 実験は 1×1 m の

正方形である。これを軸対称 2 次元コードである JASMINE で解析するため、計算体系は水プールの底の面積が実験と同一となるように選定した。これにより初期水位を実験と同一とさせることにより、水の全量と溶融物の量の比を解析と実験とで一致させることができる。

E1,E4 実験：

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

E8,E9 実験：

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

床面と溶融物間の熱抵抗は平成 28 年度と同様に $2 \times 10^{-2} \text{ Km}^2/\text{W}$ を使用した。これは、床面と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、E1,E4 実験については、実験後の観察結果が報告されておりその値を使用した。その他の実験ケースについては、両者の中間の値を丸めて使用している。

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ほとんど影響を与えなかったことが分かっている。

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

今年度改良した部分に対する入力値を表 3.5 に示す。

表 3.3 PULiMS 実験の解析で使した物性値

変数	タイプ	説明	Bi ₂ O ₃ -WO ₃ 42.64 : 57.36wt%
tmelt	実数	溶融物融点[K]	1143
tsoli	実数	溶融物固相線温度[K]	1142
tliqu	実数	溶融物液相線温度[K]	1144
rhosol	実数	固相密度[kg/m ³]	7811
rholiq	実数	液相密度[kg/m ³]	6876
cpsol	実数	固相比熱[J/kg/K]	390.6
cpliq	実数	液相比熱[J/kg/K]	280
lheat	実数	凝固潜熱[J/kg]	170E3
lamsol	実数	固相熱伝導率[W/m/K]	5.3
lamliq	実数	液相熱伝導率[W/m/K]	5.3
viscmm	実数	粘性係数[Pa s]	1.5E-2
sftnmm	実数	表面張力[N/m]	0.18
emssmm	実数	輻射率[-]	0.7
cf_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 3.4 入力した床ステンレス等の物性値

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

表 3.5 PULiMS 解析の計算条件（沸騰曲線に関連する入力）：ベースケース

項目	数値
伝熱表面積増加の係数	1.0
限界熱流束	1.354E6 W/m ²
限界熱流束のサブクール度依存性係数	0.0
限界熱流束の圧力依存性係数	0.0
極小熱流束点温度と飽和温度の差	101.0 K (T _{mhfx} =201.0 °C)
極小熱流束点温度のサブクール度依存性係数	-8.0
極小熱流束点温度の圧力依存性係数	0

3.3 解析結果

ここでは解析結果をまとめた結果と図出力のうち典型例を示す。

図 3.13~3.15 は E4 実験に対する解析結果のうち、水プールのボイド率、溶融物の液位・クラスト厚さ、床ステンレス床材内部の温度分布の 5s、15s、75s の状況を示したものである。これらの図はわかりやすくするために、高さ方向の位置を極端に拡大して表示している。5s では、溶融物のジェットの落下が継続中で、発生する液滴も表示されており、溶融物の拡がり、0.22m にまで広がっている。溶融物が到達した領域では床材の温度上昇が始まっているが、その影響は裏面までは到達していない。

15 秒では溶融物プールの拡がり、0.42m に達するが、溶融物の供給は終了している。クラストの形成はほとんどなく底クラスト、表面クラストとも極めて薄い。裏面にも温度上昇の影響が表れ始めている。

75 秒ではさらに溶融物プールが拡がって 0.6m に達している。すなわち、溶融物供給が停止した後も拡大が進んだ。溶融部は中央部や 0.42m 付近等にわずかに残っているだけで、ほとんどが固化している。底クラストの厚みは表面クラストに比して小さく、図 3.12 に示した実験観察結果において底クラストが薄い点と合致する。床内の熱伝導が発達し、高さ方向の温度分布はほとんど無くなっている。

図 3.16~3.17 に、溶融物の拡がり速度の実験値と解析値の比較を示す。ここに示したのは温度データの入手できた E8, E9 実験に関するものである。実験値の方は床面近傍に設けた熱電対の指示値が所定の値を超えたタイミングとその位置（中心からの距離）をプロットしたものである。グラフの凡例のところに記した数値は熱電対位置の方向であり、その方向によってプロット位置がばらついていることから分かるように、溶融物の拡がり方は同心円状ではなく時間的に偏りがある。解析結果は、実測値と著しく離れているわけではなく、拡がり速度については妥当な評価をしていると考えることができる。

図 3.18~3.21 に、水中の熱電対の指示値と解析値の比較の例を示す。図 3.18 は、E8 実験における中心から 300mm、高さ 30mm の位置にある熱電対の測定値であり、凡例に示した A*** の数値は熱電対位置の方向を示している。ここにあるように、方向によって温度

の上がり方にバラつきがあるが、解析結果は温度上昇の幅を過小評価している。図 3.19 は、同じく E8 実験の距離 400mm 高さ 10mm での比較であり、解析による水温上昇は極めて小さい。図 3.20 と図 3.21 は、E9 実験に対する水温の比較であり、解析による水温上昇が実測値よりも小さいのは同様である。

E1、E4、E8、E9 実験に対する溶融物拡がりの計算結果をまとめて表 3.6 に示す。この表には JASMINE の平成 27 年度作成のバージョン及び平成 28 年度のバージョンを用いて計算した結果も併せて示してある。このようにコードのモデル改良の継続にもかかわらず、溶融物の拡がりを過大に評価するという点は変わっていない。以降の節で、JASMINE コードの結果と実験結果との差の理由について検討する。

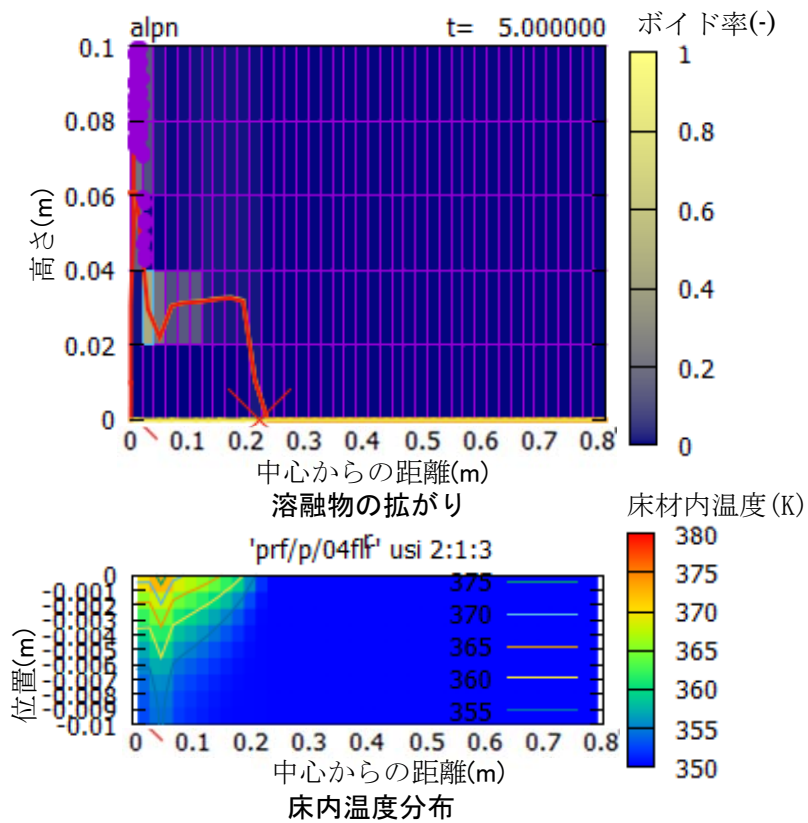


図 3.13 E4 実験解析 5 秒後の状況

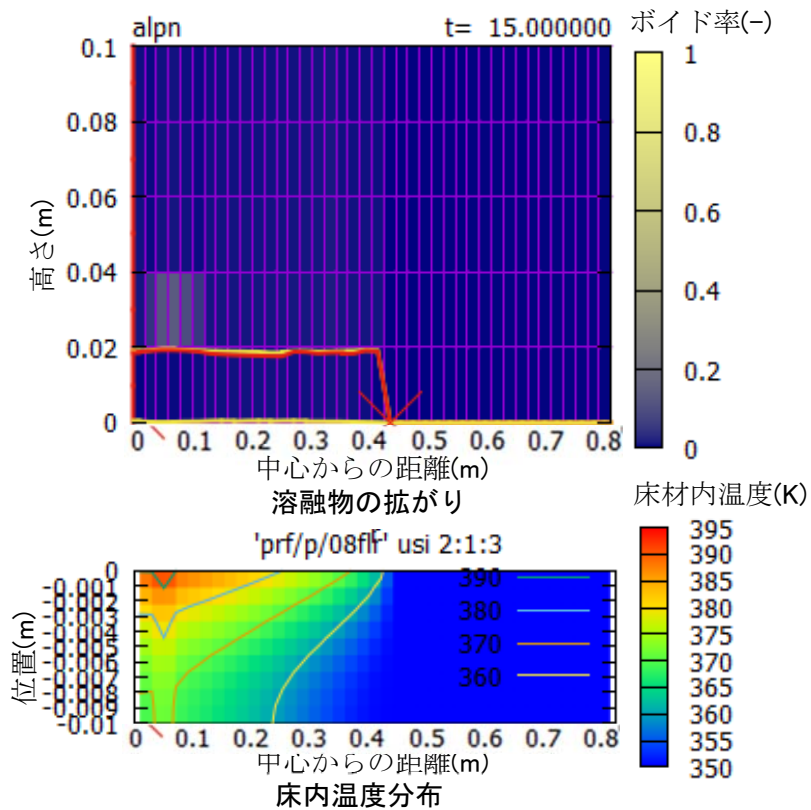


図 3.14 E4 実験解析 15 秒後の状況

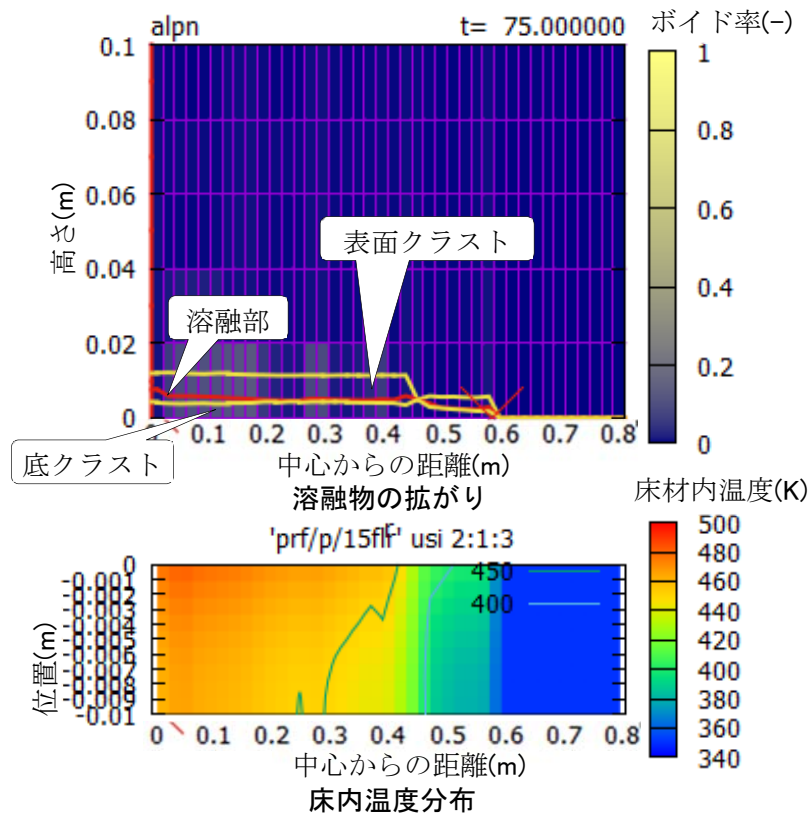


図 3.15 E4 実験解析 75 秒後の状況

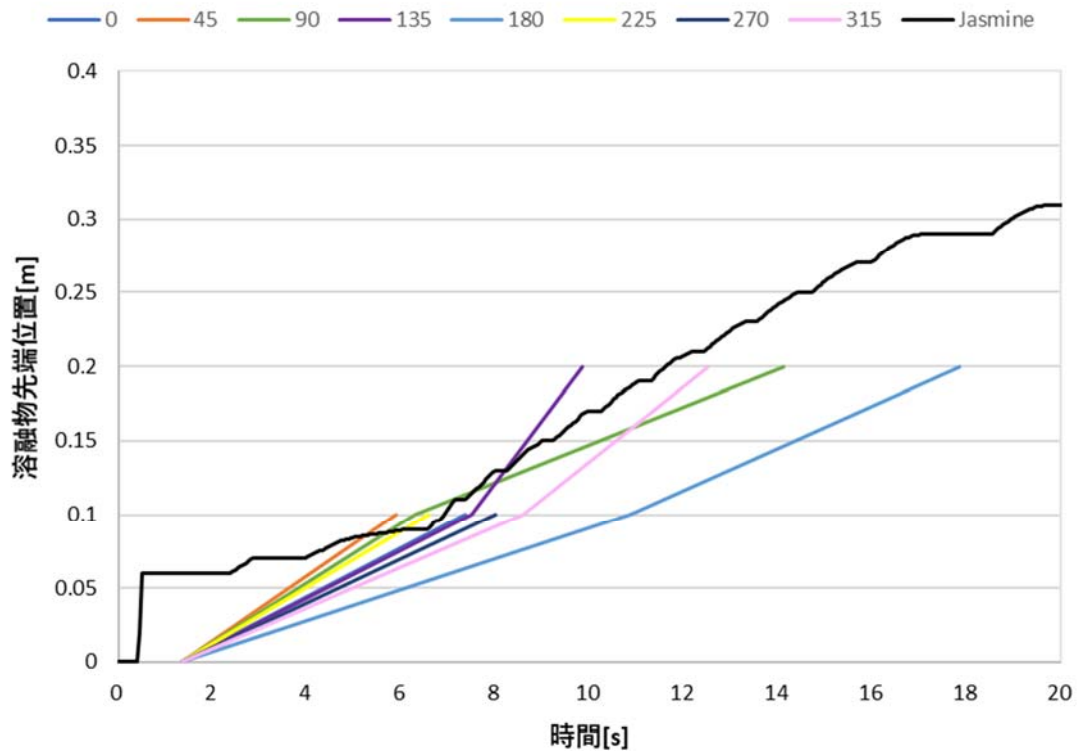


図 3.16 溶融物拡がりの実験結果と解析結果の比較 (PULiMS_E8_表 3.5 入力データ)

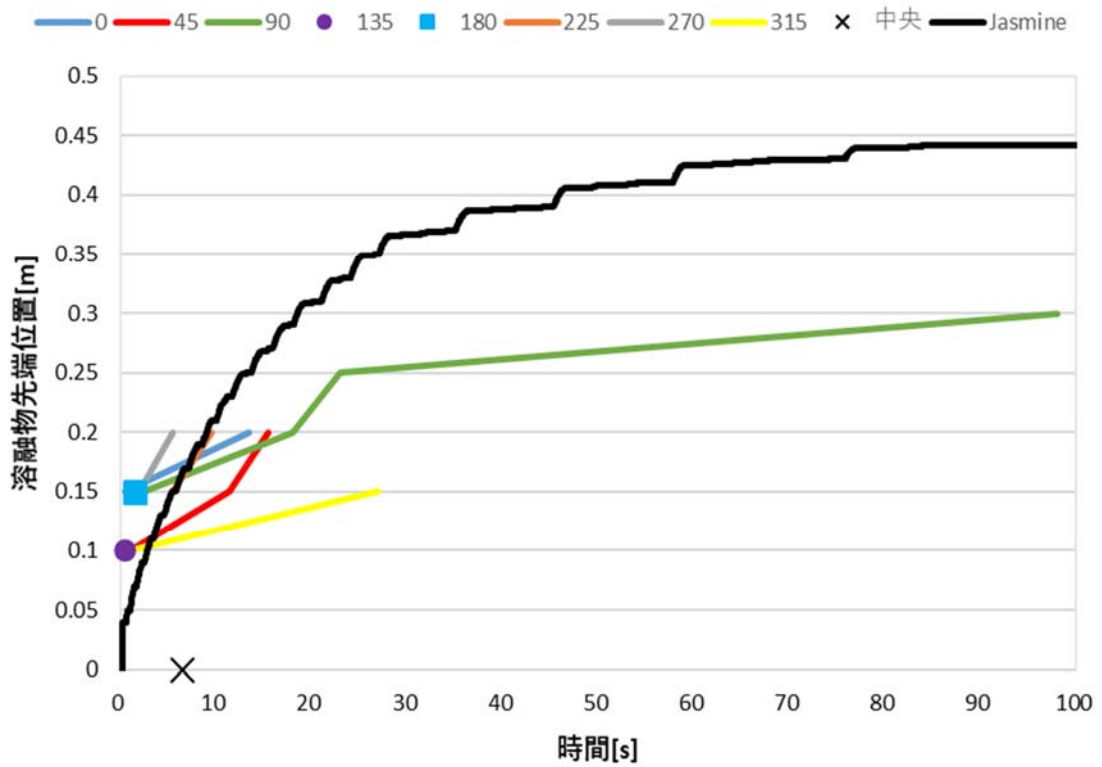


図 3.17 溶融物拡がりの実験結果と解析結果の比較 (PULiMS_E9_表 3.5 入力データ)

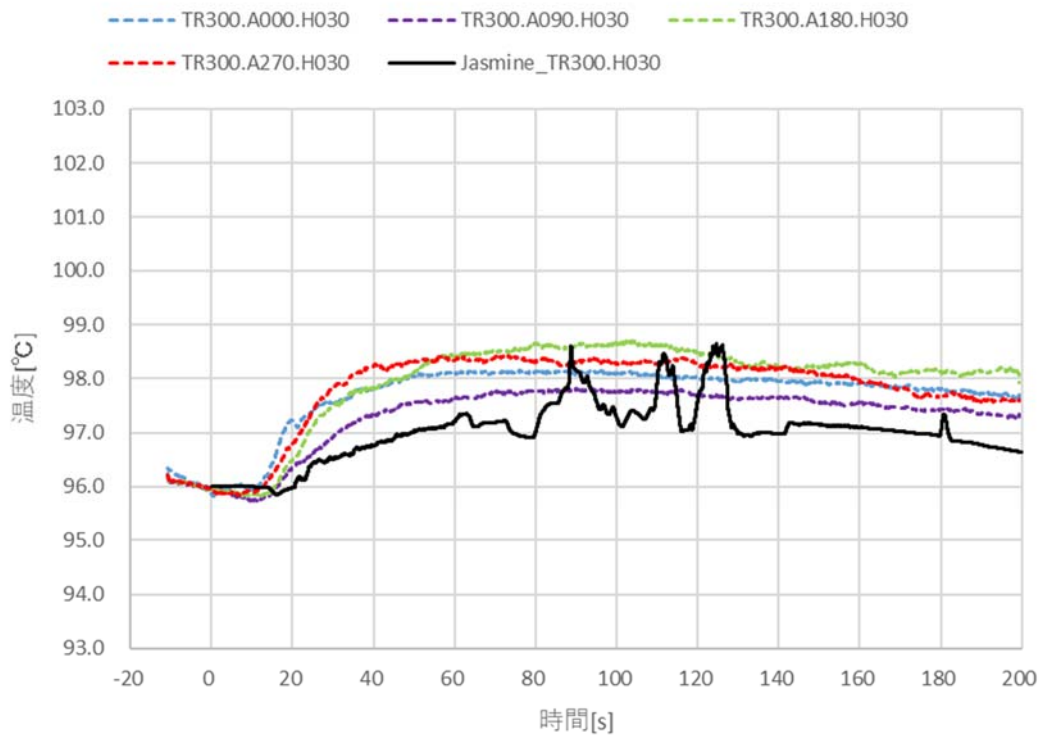


図 3.18 水温の比較 E8 実験_表 3.5 入力データ 中央から 300mm, 床板表面から 30mm

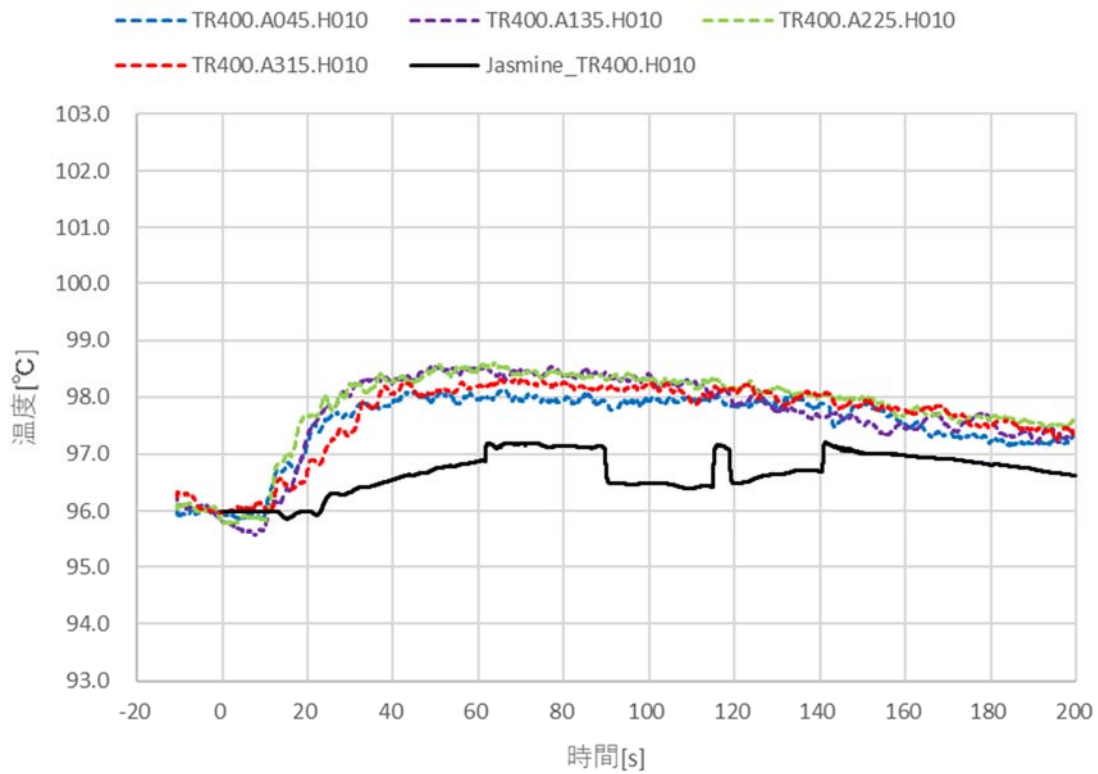


図 3.19 水温の比較 E8 実験_表 3.5 入力データ 中央から 400mm, 床板表面から 10mm

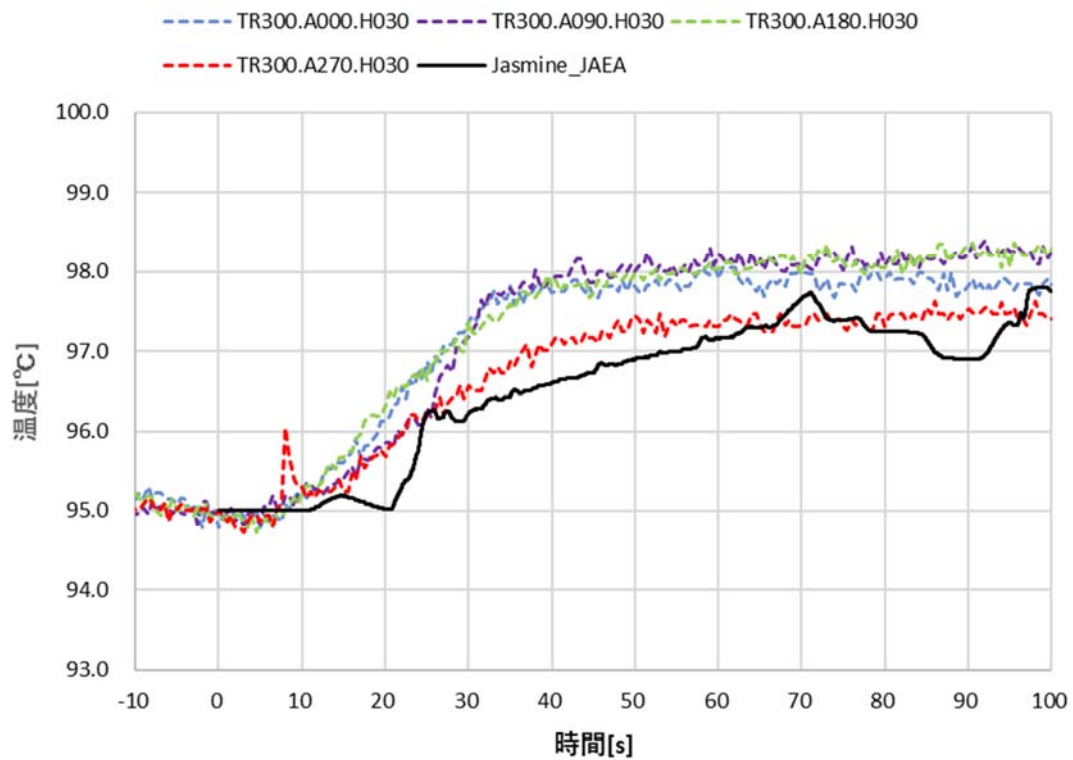


図 3.20 水温の比較 E9 実験_表 3.5 入力データ 中央から 300mm, 床板表面から 30mm

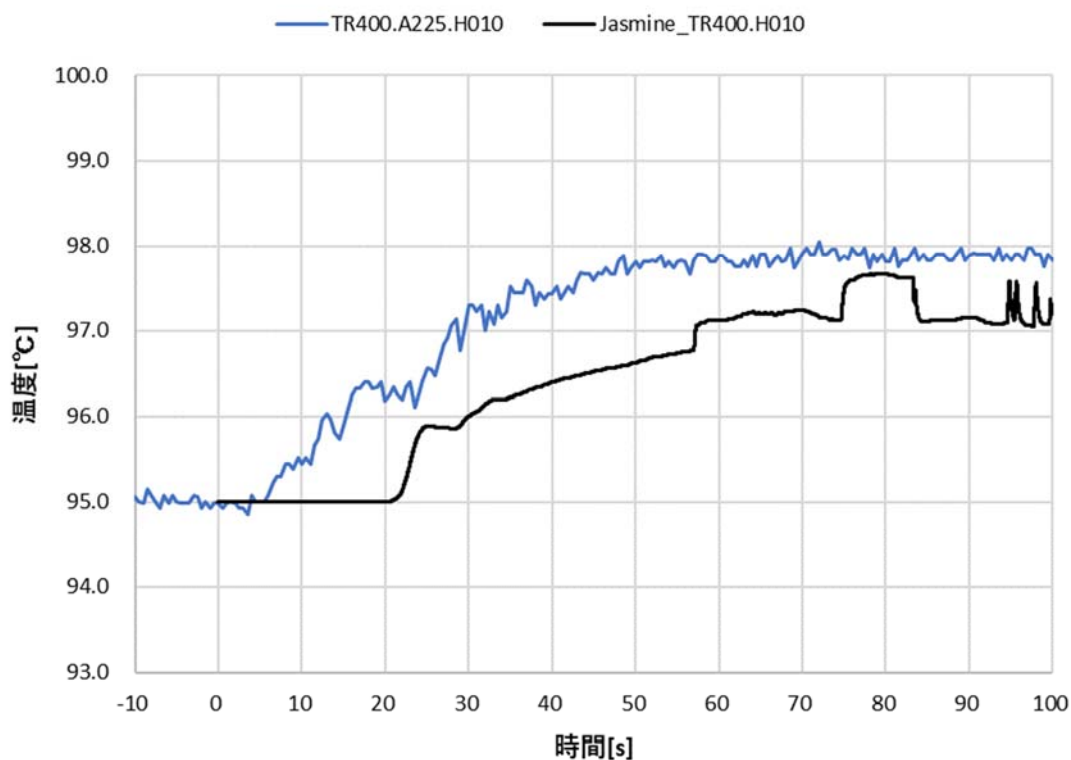


図 3.21 水温の比較 E9 実験_表 3.5 入力データ 中央から 400mm, 床板表面から 10mm

表 3.6 PULiMS 実験解析 E1~E9 結果のまとめ

解析 ケース	JASMINE Version	JASMINE 解析結果			PULiMS 実験値		
		溶融物 拡がり 直径(m)	溶融物 拡がり 面積(m ²)	溶融物 厚さ(m) (平均)	cake 拡がり (m)	cake 面積 (m ²)	デブリ 厚さ(m) (面積平均)
E1	H27	0.61	0.292	0.0089	0.43×0.32	0.14	0.031
	H28	0.794	0.495	0.0072			
	H29	0.888	0.619	0.0076			
E4	H27	0.81	0.518	0.0097	0.711×0.471	0.30	0.030
	H28	1.004	0.792	0.0109			
	H29	1.154	1.046	0.0099			
E8	H28	0.749	0.440	0.0091	0.50×0.45	0.213	0.0212
	H29	0.8470	0.563	0.0073			
E9	H28	0.792	0.493	0.0101	0.5516× 0.5294	0.23	0.0215
	H29	0.8838	0.613	0.0082			

3.3 考察

前記の実験値と解析値の比較の結果をまとめると以下のようになる。

- ① 熔融物の先端の拡がりのグラフの勾配が近いことから、流動に関しては考え方に大きな誤りはないと考えられる
- ② 水温に関しては、JASMINE による解析の結果は、実測値よりも低い。これは、熔融物からの伝熱を過小評価していることを示している。
- ③ JASMINE は最終的な広がりを過大評価している。
- ④ 熔融物上面の冷却量過小評価について考えると、JASMINE で使用している沸騰曲線は、工業目的に実験データを得たもので、金属面・平坦な表面を仮定している。今回は、PULiMS 実験のデブリの写真からもわかるように極めて凹凸が多い。また、酸化物であり、熱伝導率が大きくない。

以上のように、PULiMS 実験の結果を再現するためには、熔融物の拡がりを支配する因子や、クラスト表面の凹凸に起因する伝熱に寄与する表面積の増加や沸騰曲線を見直すことが必要である。

(1) 熔融物拡がりの支配因子

実験結果と解析結果の差の原因を調べるために、流動中の熔融物に作用する力の種類とその大きさのオーダーを考えてみる。液体の流動時に作用する力としては、表面張力、粘性による力、重力（浮力）、慣性に基づく力が挙げられる。流体中に一辺が L （代表長さ）の立方体を考えそれに作用する力を計算すると、表 3.7 の計算式の項に示したものとなる。それぞれの力の比は、無次元数となり、歴史的に提唱者の名等が与えられている。ここで、 Ca ：キャピラリー数、 $E0$ ：エトベス数、 Ga ：ガリレオ数($=gL^3/\nu^2$)、 We ：ウェーバ数、 Re ：レイノルズ数、 Fr ：フルード数である。フルード数の定義は、慣性力と重力の比とする図書もあるが[3.5]、ここでは多くの文献に従い、その平方根をとることにする。

これらの力のうち主要な働きを及ぼすと考えられる重力に対する大きさの比（無次元数）の値を、PULiMS 実験及び実機条件について計算した結果を図 3.22 に示す。このとき現象は時間的に変化していくので、代表長さは以下のように、時間的に中間の状態を想定して決定した。最終的な拡がり（PULiMS：0.3m、実機：3mと設定）の半分の面積となる半径（基準半径と呼ぶ）を考え、この半径まで熔融物の半分がたまった状態の液深の 1/10 を代表長さとした。ここで代表長さをよく使用される液深や流れ方向の寸法としなかったのは、管内流の層流・乱流の遷移条件が $Re=2000$ 程度と 1 よりもはるかに大きくなっていることからわかるように、局所的な粘性力と慣性力が流動パターンを支配しているので、液深よりも小さい数値を採用したものである。流速については、基準半径の位置での円周と代表長さの液深及び熔融物流量とから決定した。最も支配的な重力に対しての比（無次元数）が大きい力が現象を支配していると言える。

図 3.22 にあるように PULiMS 実験では表面張力が最も大きい。すなわち、表面張力と重力のバランスが現象を支配していることになる。一方実機条件では表面張力の影響は 10^{-3} と著しく小さく、流動現象の支配因子とはならないと判断できる。実機条件では、極端に

落下流量の小さい場合を除いて、最も大きいのは慣性力 ($1/\text{Fr}^2$) である。すなわち、重力と慣性力 (溶融物の速度) のバランスで広がり方・速度が決まることになる。但し、この検討では粘性係数として液相単体のものを使用しているが、溶融物の液相線温度と固相線温度が異なり、溶融物中に固相粒子が懸濁されるような現象があると見かけの粘性係数は著しく大きくなり、固相線温度近くまで冷却された溶融物温度条件では溶融物中の固相率が大きくなり、粘性係数の項が支配的になる可能性もある。

図 3.22 には、レイノルズ数を併せて示してある。実機条件ではレイノルズ数は大きくほとんどすべての条件で乱流状態であるが、PULiMS 実験では層流となっている可能性があることが分かる。

表 3.7 無次元数：流体に作用する力の比 (寸法 L の立方体の流体体積に作用する力)

	力の種類	計算式	分母			
			表面張力	粘性力	重力(浮力)	慣性力
分子	表面張力	σL	—	$1/\text{Ca}$	$1/\text{E0}$	$1/\text{We}$
	粘性力	μvL	Ca	—	Re/Ga	$1/\text{Re}$
	重力(浮力)	$(\rho - \rho_w)gL^3$	E0	Ga/Re	—	$1/\text{Fr}^2$
	慣性力	ρv^2L^2	We	Re	Fr^2	—

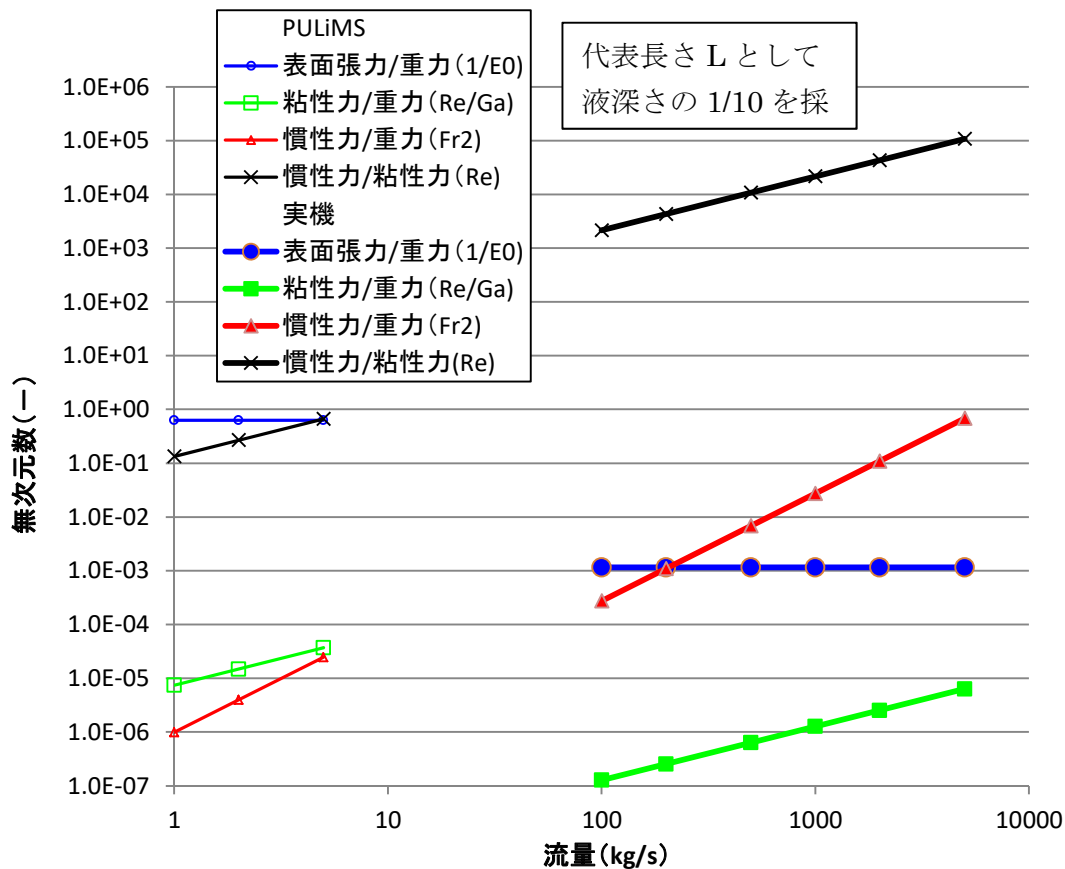


図 3.22 無次元数の溶融物落下流量依存性

(2) PULiMS における溶融物表面温度

上記のように PULiMS 実験では表面張力が拡がり方に影響を与えるので溶融物の表面の状態について検討する。溶融物は水プール中で流動するので、その表面の熱流束は極めて大きなものとなる。表面の温度が凝固点以下に低下すると固化相が生じる。固化相の引っ張り強度の評価は困難であるが、薄い膜状の固化相であっても表面張力よりはるかに大きな力が作用すると考えられる。表面張力は表面に位置する分子と隣接する分子との分子間引力に起因するわけであるが、固相が形成される場合には表面の引っ張り力に寄与する分子の数が飛躍的に増えるからである。但し、今回のように新たな表面を生じさせようとするときの抵抗力としては寄与するが、表面積が減少していくような現象には適用できないであろう。

クラストに覆われて部分から液相が流れ出し、新たに生じた表面の沸騰伝熱モードは膜沸騰熱伝達であると考えられるが、放射による冷却熱流束は大きなものとなり、JASMINE の出力によれば、表面温度 1200K の時、熱流束 q は $2.18E5 \text{ W/m}^2$ となる。

クラストに覆われた部分から液相が流出するときの流動パターンとして図 3.23 のように 2 つのものを考える。1 つは、クラストから流れ出た液相の流れが同方向で、液相表面の冷却がクラストから出た部分から始まるとするものである (流動パターン 1)。もう一つは、

液相は床とクラストに接する部分の流速は小さく、流路の中央を流れ溶融物拡がりの先端で上下に分かれるとするものである（流動パターン 2）。この場合新たな液面は拡がりの先端部で生じる。

前者の場合、溶融物の上面はクラストに接しているときには凝固点である。その後クラスト覆われた位置から水中に出たときに表面の温度が上昇するか否かを判定する。簡単のために軸対称の放射状の流れではなく並進対称と仮定する。前項で述べたように PULiMS の流動条件では層流になっていると想定される。このときに溶融物からクラスト下面への熱流束 q_c は層流に対する局所的熱伝達率の相関式[3.6]から求められる。

$$Nu_x = C(Pr)Re_x^{1/2}$$

ここで $Pr > 0.5$ の時 $C(Pr) = 0.332Pr^{1/3}$ である。また、 Nu_x 、 Re_x は局所ヌセルト数、局所レイノルズ数であり、クラスト端部（流れ方向に沿ってクラストが始まる位置からの距離 x ）で定義される。

溶融物のスーパーヒートを ΔT とすると、

$$q_c = \Delta T \lambda Nu_x / x < q$$

であれば水への冷却が進むのでクラスト下側から水中に出たときに表面に固化相が形成され成長していくことになる。すなわち判定基準は次式となる。ここで λ は溶融物の熱伝導率である。

$$\sqrt{v_0} \Delta T < \frac{\sqrt{xv} q}{0.332Pr^{1/3}\lambda}$$

数値を代入すると、溶融物の水平方向速度 v_0 、クラストの流れ方向の長さ x の値に応じて、表 3.8 のようになる。PULiMS 実験では一様に広がると仮定すると溶融物落下末期の拡がり先端速度 v_0 は 0.005~0.01 m/s である。このように、この条件では、極めて容易に表面には固相が形成される。

表 3.8 表面温度が凝固点となる限界の溶融物スーパーヒート ΔT (K) : (流動パターン 1)

		クラストの長さ: x (m)		
		0.05	0.1	0.2
流速: v_0 (m/s)	0.001	1.38E+03	1.95E+03	2.76E+03
	0.05	1.95E+02	2.76E+02	3.90E+02
	0.1	1.38E+02	1.95E+02	2.76E+02
	0.5	6.17E+01	8.72E+01	1.23E+02

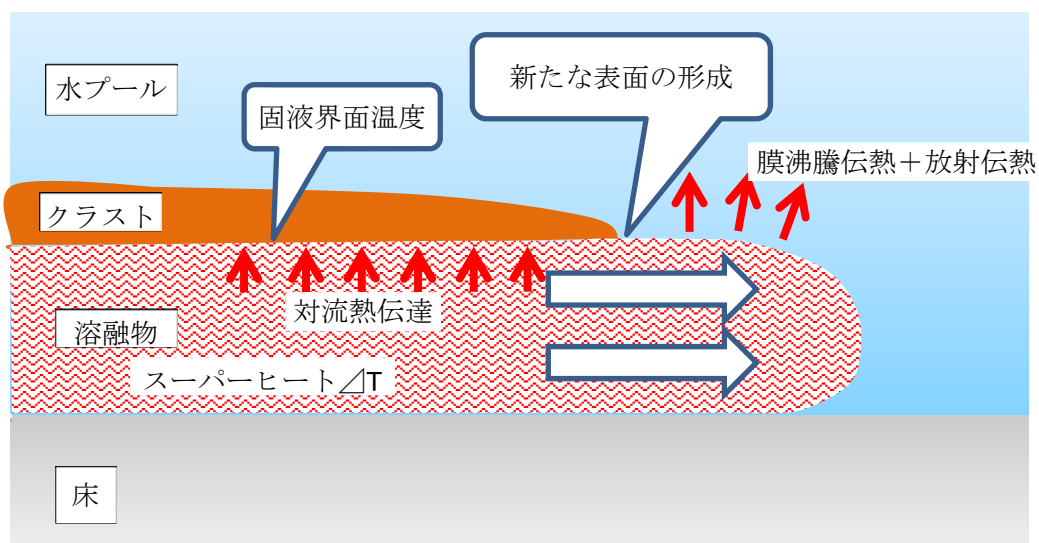
一方、流動パターン 2 では、溶融物の拡がり流れの先端のよどみ点で、新たな表面が形成されるのでこの点が最も高温となる。この点の冷却熱流束 q が与えられると、先端の温度低下は、十分上流の熱輸送(流速 v_0)が表面冷却熱流束に等しいので（併進対称流れを仮定）

$$C_p \rho v_0 \Delta T = q$$

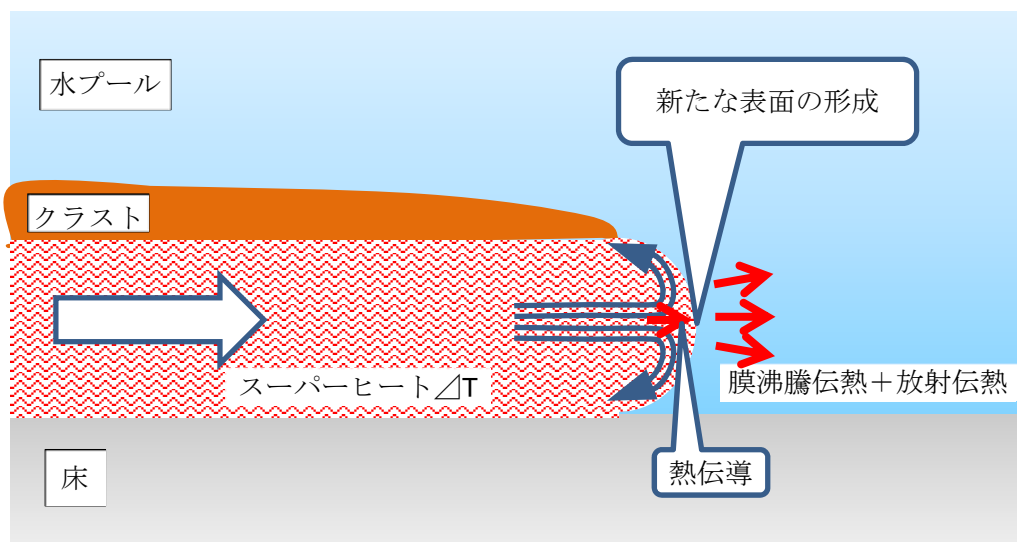
で計算できる。ここで、 C_p : 溶融物の比熱、 ρ : 溶融物密度である。

物性値を代入すると、表 3.9 のように溶融物の先端速度と先端が融点である場合に溶融物に

許されるスーパーヒートの関係が与えられる。このように溶融物の表面は容易に凝固点に達することが分かる。従って PULiMS 実験では溶融物の表面に固相の薄膜が形成され、液相単独の表面張力よりも大きな張力が作用していると推定される。固相の薄膜の厚みや強度は不明確であり、且つ推定することも困難なので JASMINE による解析では、表面張力の入力値を変更して計算し、実験結果を説明できる結果が得られるか調べることにする。一例として、E8 実験について溶融物の表面張力の入力値を変化させて、拡がり面積がどのように変わるか調べた計算の結果を図 3.24 にしめす。



流動パターン 1



流動パターン 2

図 3.23 溶融物表面の新たな形成の模式図

表 3.9 表面温度が凝固点となる限界の溶融物スーパーヒート ΔT ：(流動パターン 2)

v_0 (m/s)	ΔT (K)
0.001	104
0.005	20
0.01	10

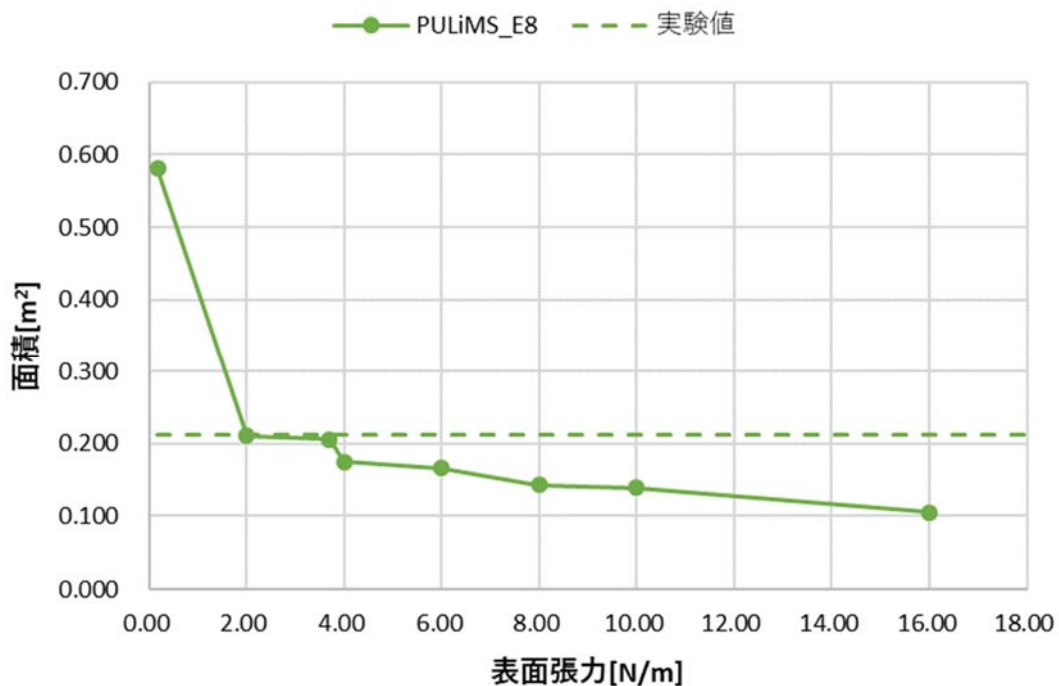


図 3.24 表面張力の入力値を変えたときの溶融物拡がり面積の変化

このように表面張力を 2.0 N/m としたときが、E8 実験における溶融物拡がり面積を最もよく説明できる。他の実験ケースでは、これよりも大きな数値を採用したほうが実験との一致はよいが、2.0 N/m を越えた付近で拡がり面積の減少が少なくなるという性質は同じである。そこで、今年度の解析では $\sigma = 2.0$ N/m を採用することとした。この値は、実験に使われた溶融物の表面張力 (0.18 N/m) の約 10 倍であり、表面に分子間距離の ~ 10 倍程度の厚さの固相が存在すれば生じる値である。

また、表面張力が変わると伝熱にどのような影響が現れるか調べるために、表面張力入力値を変更した計算結果を、水温の実測値と併せて図 3.25 に示す。これは E8 実験の中心から 300mm、床面から高さ 30mm における水温で、異なる方向における測定値 (A***で方角を示す) と、表面張力値を 0.18、2、6 N/m とした JASMINE による計算の結果である。

計算された水温は表面張力入力値によってかなり変化している。これは溶融物の拡がり面積すなわち水への伝熱面積が変わるために、水温も変化するためであり、表面張力を大きくすると溶融物拡がりが抑えられるために水温上昇も少ない。なお、表面張力を 0.18N/m とした場合の計算では溶融物がこの位置まで到達するために水温変動も大きくなっている。

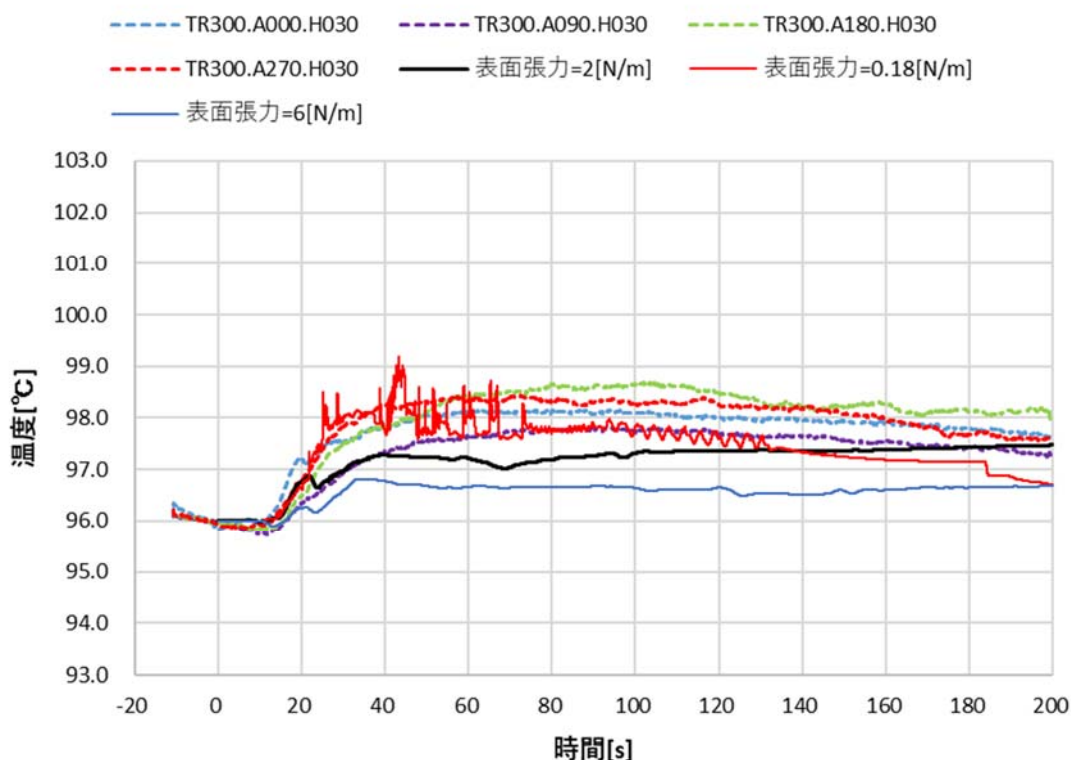


図 3.25 表面張力を変更した場合の水温の時間変化：PULiMS_E8_TR300H030

(3) 極小熱流束点温度の検討

沸騰伝熱は、膜沸騰に比べて核沸騰伝熱の方が著しく熱流束が大きくなる。したがって冷却量を評価するときには膜沸騰から核沸騰への遷移を正しく評価する必要がある。この Rewet 現象については、原子炉 LOCA 時の燃料棒の冷却挙動解明のために知見が蓄えられてきたが、燃料被覆管や BWR チャンネルボックスに適用するために薄い滑らかな金属板を対象にしたもの、すなわち厚み方向の熱伝導を無視したものがほとんどであった。今回対象としている溶融物のクラストは酸化物であるため熱伝導率が金属より小さく、又厚みも大きい。更に表面の形状は滑らかではない。このような条件での Rewet 現象（本来、燃料棒のように水に浸されていたものが再度濡れて核沸騰状態になるので Rewet と記され、今回のように最初から膜沸騰状態の場合とは異なるがここでは Rewet と記す）について検討する。

クラスト表面には凹凸があり、又固化過程により内部にボイドがあると表面熱流束は一

様にならず、局部的に **Rewetting** の生じやすいスポットが存在すると推定される（図 3.26 参照）。このような低温・低熱流束の領域があると、その点で核沸騰への遷移が生じ、その冷却量が増すので隣接する場所の温度も下がり核沸騰領域が広がっていく。このときにどの程度の速度で **Rewet** 領域の先端が進んでいくか調べるために以下のような数値実験を行った。

系を並進対称 2 次元（進行方向座標を x 、高さ方向座標を y とする）と仮定する。長さ 10 cm、厚さ 1 cm のクラスト領域を考え、長さ左端が膜沸騰の定常状態であり（表面温度を T_{ini} 、表面での熱流束を q_{ini} とする）、他端で **Rewet** が生じるとする。**Rewet** 点で熱流束が急変するため数値計算は不安定になりやすく、また細かい計算メッシュが必要であり、次のような方法を採用した。クラストに固定した座標系を使用せず、**Rewet** 点と同じ速度 v で移動する座標系で考える。このときのクラスト内の熱伝導方程式は

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -v \frac{\partial T}{\partial x} + \kappa \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right)$$

ここで、 T は温度、 κ はクラストの熱拡散率である。

であり、境界条件は、水冷却面 $y=0$ においてコーシー境界条件として沸騰曲線 $q_{boil}(T)$ で与えられ

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = q_{boil}(T)$$

一方他端 $y=0.01$ m では、ノイマン境界条件として初期の膜沸騰伝熱熱流束 q_{ini} で与えられる。

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = q_{ini}$$

x 軸方向の境界条件については、ディリクレ境界条件で与えられ、左端（高温側）は、表面温度が T_{ini} 、熱流束が q_{ini} の定常温度分布、右端（低温側）は、表面温度が T_{nucl} 、熱流束が q_{ini} の定常温度分布を求めて固定している。 T_{nucl} は、 q_{ini} の熱流束を与える核沸騰表面温度である。

数値計算法としては、時間を進める繰り返し計算により定常温度分布を求めると同時に、**Rewet** 点が移動しないように座標系の移動速度 v を変化させる計算ループを組み合わせる全体が定常となるまで繰り返し計算を行った。このときに得られた v が **Rewet** 速度となる。また計算メッシュは 0.25mm の正方形であり、沸騰曲線は JASMINE に今年度組み込んだものと同様なものを使用した。圧力条件は大気圧であり、冷却水のサブクールは 0、ボイド率も 0 とした。極小熱流束点温度は 3.1.2 項(2) で述べたものと同様に 201°C としてある。クラストの物性としては、内部に均一に 30% のボイドがあることを想定し、熱伝導率と密度を $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-WO}_3$ のものから 30% 減らした。

計算結果の一例を図 3.27 に示す。これは初期温度 400°C のもので、クラスト内部の 2 次元温度分布等高線（下側の表示）と表面熱流束分布（上側の表示）を示している。温度分布の等温度線が **Rewet** 点付近で密になっていることから分かるように、この点に高温側の熱流が集中し、表面温度が低下し **Rewet** しやすくなっている。これらの結果をまとめたも

のを図 3.28 に示す。これは横軸に初期温度 T_{ini} 、縦軸に Rewet 点が移動しなくなる座標速度 v を示したものである。Rewet 点の移動を考慮しない極小熱流束点温度が 201°C なので、その温度に近づくにしながら v も大きくなる（少しでもきっかけがあればすぐに全体が核沸騰状態になりやすい）。初期温度が高くなると v の値が負となる。これは Rewet とは逆に、核沸騰から膜沸騰への遷移が生じることを示している。すなわちこの温度に対応する熱流束を生じる核沸騰状態で何らかの原因（凹部があるなど）で膜沸騰状態が生じるとその境界が移動して全体が膜沸騰へと遷移することを示す。

この図には、SUS 材に対する同様な計算結果も参考のために示した。熱伝導率の大きい高温側からの熱流のまわり込みが多くなるので 400°C 程度までは、Rewet 点移動速度は小さくなるが、それより高温では、 $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-WO}_3$ とあまり差がない結果となっている。

今回の PULiMS 実験の解析では、Rewet 点移動速度が 0.5 mm/s となる温度 383°C （飽和温度との差 283K ）を採用することとした。移動速度が 0.5 mm/s の時、最初の Rewet 点が 1 cm 間隔で存在すれば、10 秒以内で全体が極小熱流束点温度以下に移行することになる。

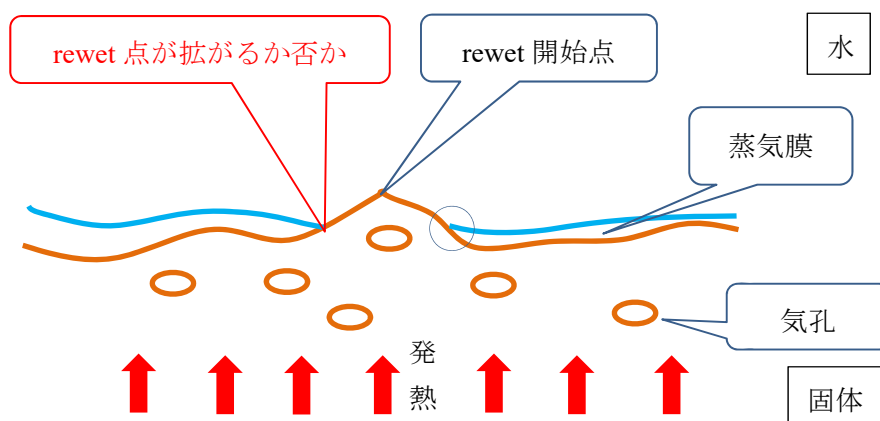


図 3.26 クラストの Rewet 現象の模式図

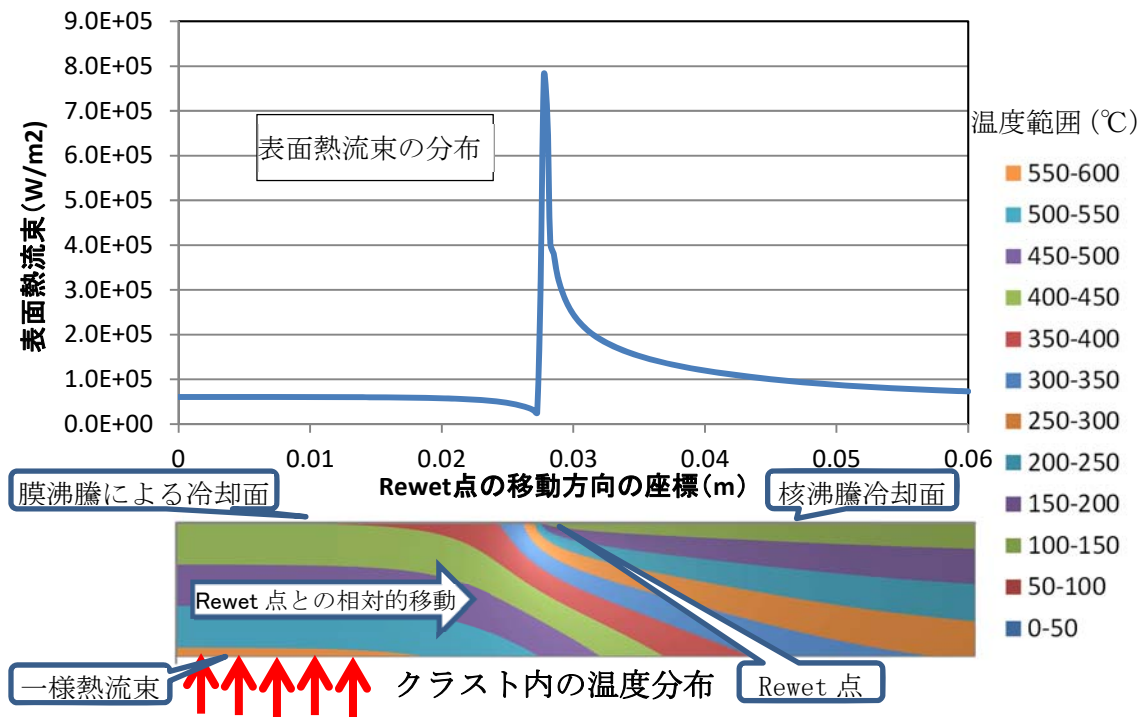


図 3.27 水中の固体の Rewet 点移動時の表面熱流束と内部温度分布 (数値実験の例)

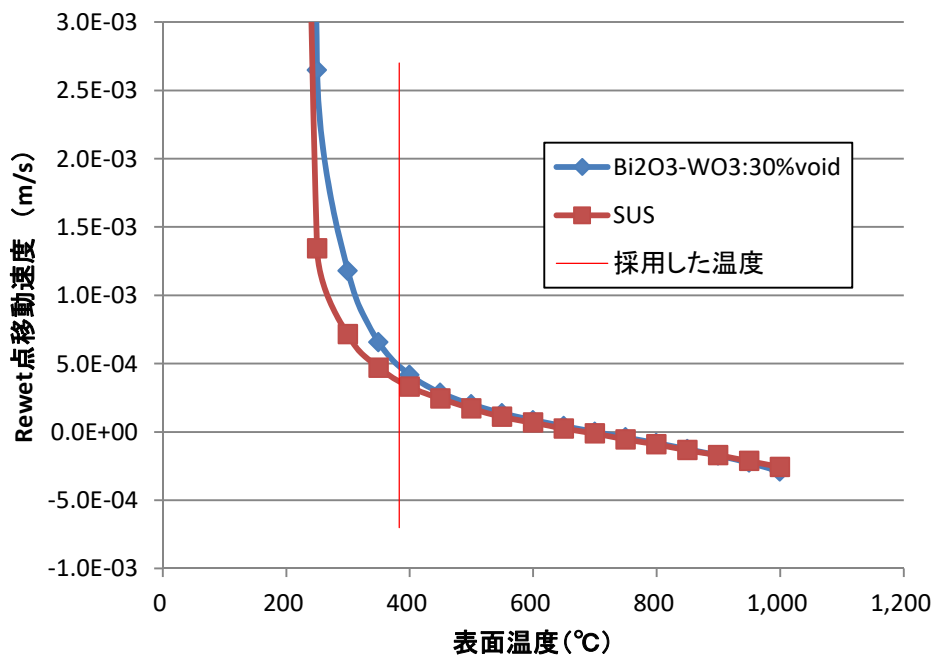


図 3.28 固体表面初期温度と Rewet 点の移動速度の関係 (数値実験の結果)

(4) 溶融物—床間接触熱抵抗の実測値からの推定

JASMINE コードでは溶融物から床面の伝熱量を評価するために床内部の熱伝導方程式を計算しており、そこでは溶融物と床面の間の接触熱抵抗を入力で与えている。この接触熱抵抗の値について、床下面熱電対による測定値から推定することにした。計算法は熱伝導方程式の逆問題を、床下側温度を入力条件として計算するもので、上面温度を仮定して下側を断熱条件とした熱伝導計算を行い、下側温度の計算結果が入力された温度と一致するまで上面温度の仮定を修正するというものである。計算法の詳細については付録 D に示す。

計算結果の一例を図 3.29 に示す。これは PULiMS の E8 実験における溶融物落下点から 150mm の位置における床裏面の熱電対出力値から表面温度と熱流束を計算したものである。赤の破線が修正を繰り返した上面温度である。計算された裏面温度（オレンジ色の破線）と入力された裏面温度（測定値）は良好に一致しており重なって見える。この時に得られた熱流束（床材内温度勾配から計算）を青線（右縦軸）で示す。

溶融物の凝固点温度と上面温度の差と熱流束から熱抵抗（この方法で得られるのは溶融物底部にできるクラストまでを含んだ値）が算出できる。E7、E8、E9 実験のすべての床裏温度測定値から計算した熱抵抗の変化をグラフにすると図 3.30 のようになる。実験開始直後は熱流束が 0 のため意味のあるデータとならないが、10 s 程度で $0.01 \text{ Km}^2/\text{W}$ 以下に低下し、その後緩やかに増加していく。この増加は、溶融物の下側にクラストが形成されるためであると思われる。今回の JASMINE による計算ではこの最小点の平均を丸めて $5.0\text{E-}3 \text{ Km}^2/\text{W}$ を使用することとする。なお、熱抵抗の $5.0\text{E-}3 \text{ Km}^2/\text{W}$ という値は、溶融物と床面との間に形成される蒸気膜の熱伝導だけが寄与しているとすると、 0.125mm の蒸気膜厚さに相当する。

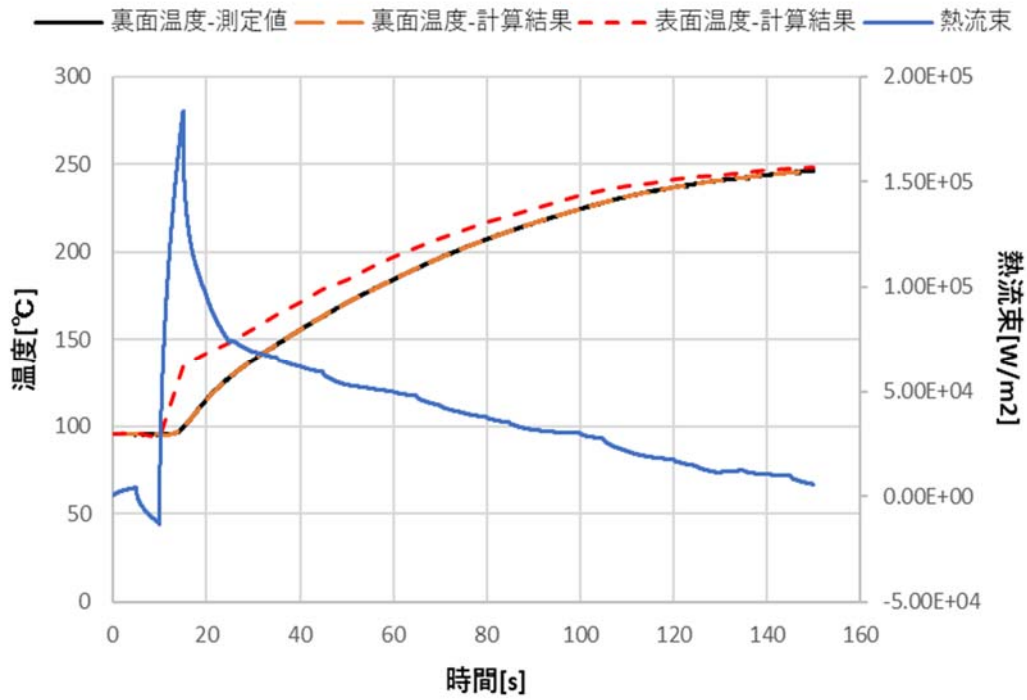


図 3.29 逆問題解析による床面温度と熱流束 (E8 実験、中央から 150mm の位置)

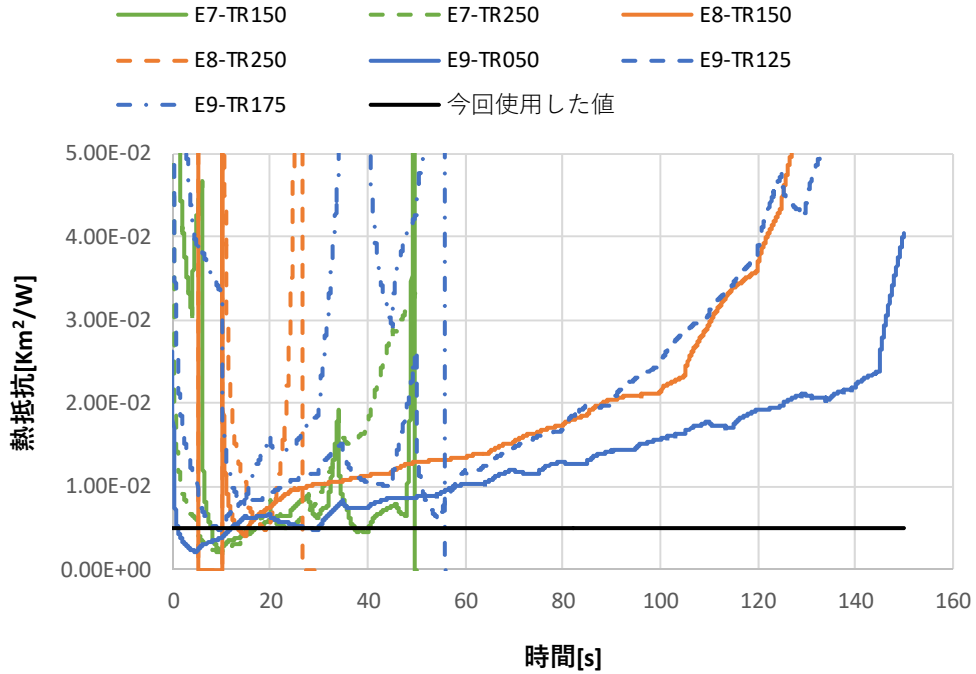


図 3.30 逆問題解析による溶融物と床の間の熱抵抗の計算結果

(5) 入力条件を変更した計算

以上の検討結果に基づき新たな冷却に関する入力値を表 3.10 のように決定した。これらの入力に対する溶融物拡がり大きさの計算結果をまとめて表 3.11 に示す。また、図 3.31 以降に、対応する測定値がある項目について PULiMS と JASMINE の結果の比較の図を示す。表 3.6 に示したこれまでの計算結果に比べて、拡がり面積が著しく小さくなっていることが分かる。特に E8, E9 実験に対しては良好な結果を与えている。E1, E4 に対してはまだ差があるがこの理由としてはこれらの実験では水の初期サブクールが大きく、溶融物表面に形成される固化相の厚みが大きくなるので、今回作用した表面張力の 2.0 N/m という値が小さすぎたことが考えられる。

表 3.10 PULiMS 解析の計算条件：ベースケース

項目		数値
溶融物の表面張力		2.0 N/m
溶融物—床間接触熱抵抗		5.0E-3 Km ² /W
沸騰伝熱に関連する入力	伝熱表面積増加の係数	16.0
	限界熱流束	1.0E6 W/m ²
	限界熱流束のサブクール度依存性係数	-5.7E4
	限界熱流束の圧力依存性係数	2.5
	極小熱流束点温度と飽和温度の差	283.0 K
	極小熱流束点温度のサブクール度依存性係数	-8.0
	極小熱流束点温度の圧力依存性係数	0

図 3.31~3.34 に溶融物の拡がりの先端位置の計算結果を示す。E8, E9 の図には測定結果（熱電対温度の急上昇時刻から溶融物の到達を推定したもの）も併せて示してある。凡例の実験結果に対する数値は方向を示したものである。解析結果は実験結果のバラつきの範囲内に収まっており、初期の拡がり速度は正しく計算していることを示している。

図 3.35~3.39 に、水温の測定結果と JASMINE による計算結果の比較を示す。位置は中心から 300mm と 400mm である。これより内側にも熱電対があるがそこでの測定値は溶融物の温度を示しているものがあるので今回の水温の比較には入れていない。図 3.35 と 3.36 は E8 実験に対するもので、図 3.37~3.39 は E9 実験に対するものである。図 3.35 と 3.38 には、沸騰伝熱に関連する入力の影響を見るために、表 3.10 のベースケース（黒実線）に加えて、極小熱流束点温度を 650 °C（飽和温度との差 550 K）とし、伝熱面積増加の係数を 8（ベースケースの半分）とした計算（赤実線）、及び極小熱流束点温度をベースケースと同一とし、伝熱面積増加の係数を 8 とした計算結果（黄緑実線）を示してある。極小熱流束点温度を 650 °C としたのは、図 3.28 において、Rewet 点移動速度がcaろうじて正になる条件として採用した。

図 3.35 の黒実線（ベースケース）は 300mm の位置・高さ 30mm での水温の立ち上がり

を JASMINE は正しくとらえている。40 s 以降の水温はやや低めに（～1℃）評価しているが 200 s 頃には差は小さくなっている。一方、図 3.36 に示した 400mm・高さ 10mm での水温計算結果は、立ち上がりを遅くまた 40 s 以降の温度も低く計算している。

図 3.37 と 3.38 は E9 実験の 300mm の位置における水温で、10mm 高さの温度(図 3.37) は立ち上がりを遅くまた、40s 以降の温度も低く計算している。一方、高さ 30mm のベースケース計算結果(図 3.38 黒実線)は、わずかに低めであるがほぼ正しい温度変化を与えている。図 3.39 は E9 実験の 400mm・高さ 10mm のものである。E8 実験に対する結果と同様、立ち上がりを遅く、また、40 s 以降の温度の値を低めに計算している。この測定値は 300mm のものと大きな差はなく、水中に大きな攪拌力が生じているか、または実験開始直後に水平方向速度の大きな液滴群が後の定常的な液滴発生よりも多く発生して床面上に達した可能性を示している。

図 3.35 と図 3.38 に示した沸騰伝熱に関する入力値変化の水温計算への影響の結果から、①40 s 以降の水温には大差がない、②水温立ち上がりの部分に差が生じ、E9 の計算ではベースケースの条件が最も実測値に近い結果を与える、ことが分かる。

図 3.40 と 3.41 は床板裏面温度の比較である。メッシュの関係で対応する位置に計算点がない場合には近い位置のメッシュ点の値を記している。E8 に対する JASMINE の結果はやや温度上昇を大きめに評価しているが、E9 では 50mm の位置の温度は正しく計算している。実験では中心から離れるに従い温度上昇が非常に緩やかになるのに対して、JASMINE では溶融物の到達した位置の温度上昇速度は差が少ない。これは溶融物が拡がる過程において、底クラストと床板の間の隙間が大きくなったことを想像させるが、JASMINE ではそのようなモデルは組み込まれていない。

表 3.11 PULiMS 実験解析 E1～E9 結果のまとめ

解析 ケース	JASMINE 解析結果			PULiMS 実験値			面積の比 解析/実験
	溶融物 拡がり 直径(m)	溶融物 拡がり 面積(m ²)	溶融物 厚さ(m) (平均)	cake 拡がり (m)	cake 面積 (m ²)	デブリ 厚さ(m) (面積平均)	
E1	0.564	0.250	0.0166	0.43× 0.32	0.14	0.031	1.786
E4	0.730	0.418	0.230	0.711× 0.471	0.30	0.030	1.393
E8	0.500	0.196	0.0193	0.50× 0.45	0.213	0.0212	0.920
E9	0.540	0.229	0.0201	0.5516× 0.5294	0.23	0.0215	0.996

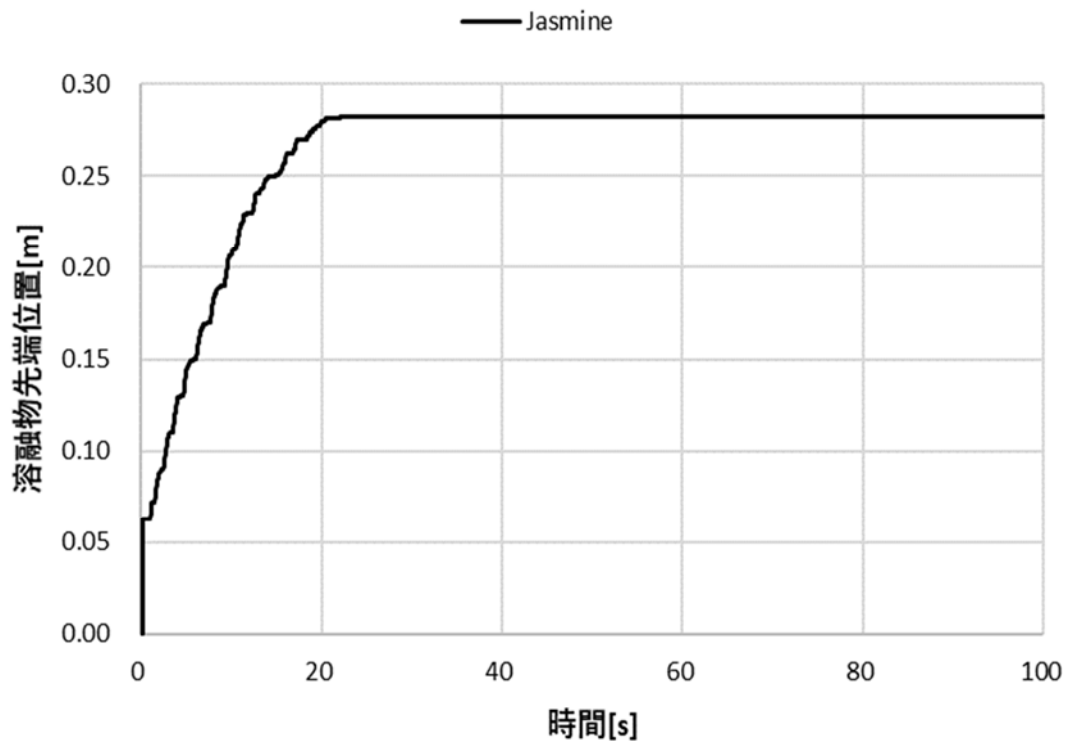


図 3.31 溶融物拡がりの解析結果 (PULiMS_E1 実験。表 3.10 の入力値)

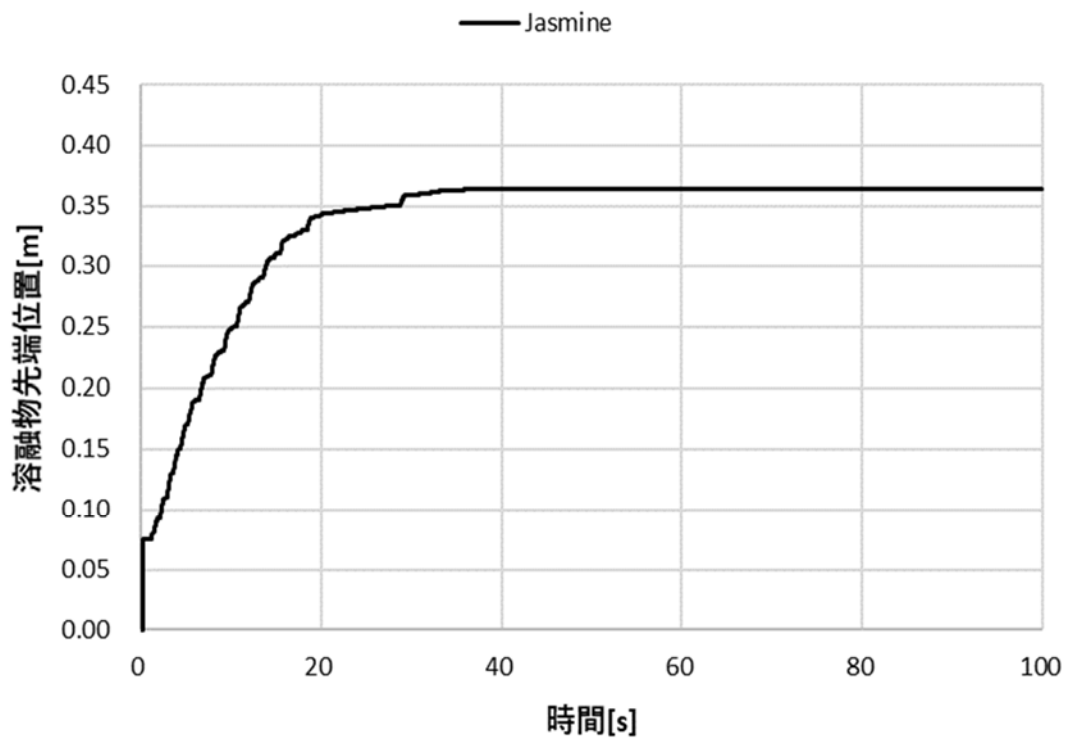


図 3.32 溶融物拡がりの解析結果 (PULiMS_E4 実験。表 3.10 の入力値)

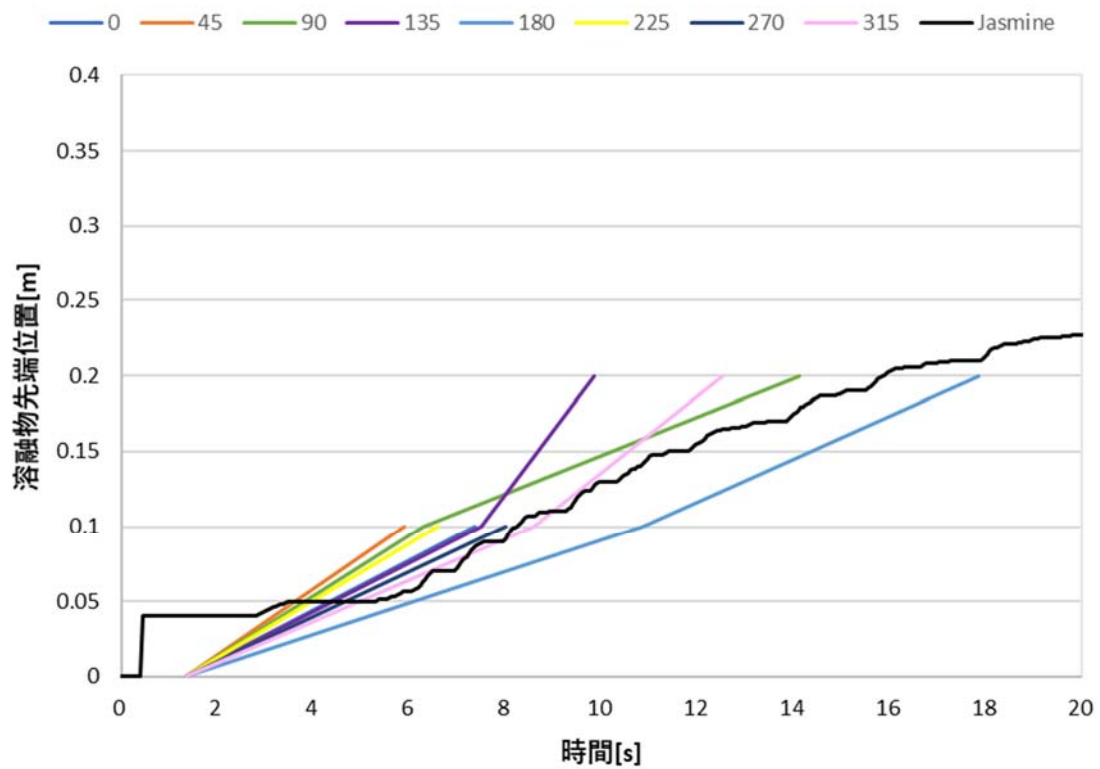


図 3.33 溶融物拡がりの実験結果と解析結果の比較 (PULiMS_E8 : 表 3.10 の入力値)

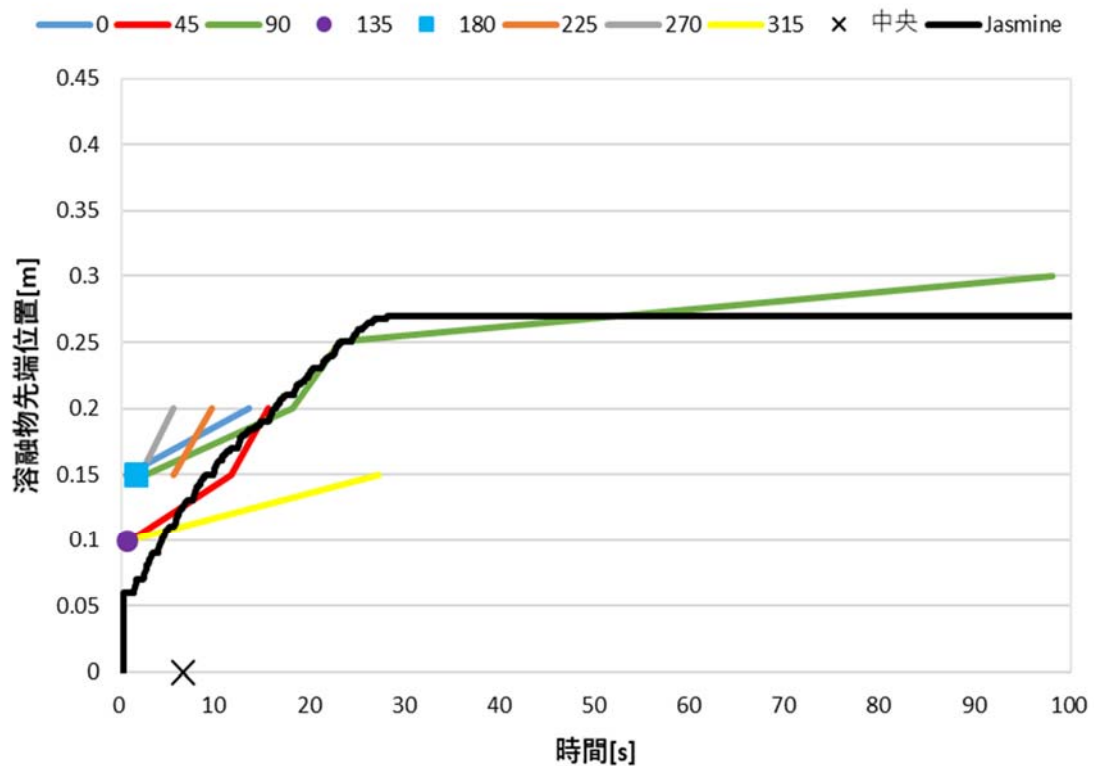


図 3.34 溶融物拡がりの実験結果と解析結果の比較 (PULiMS_E9 : 表 3.10 の入力値)

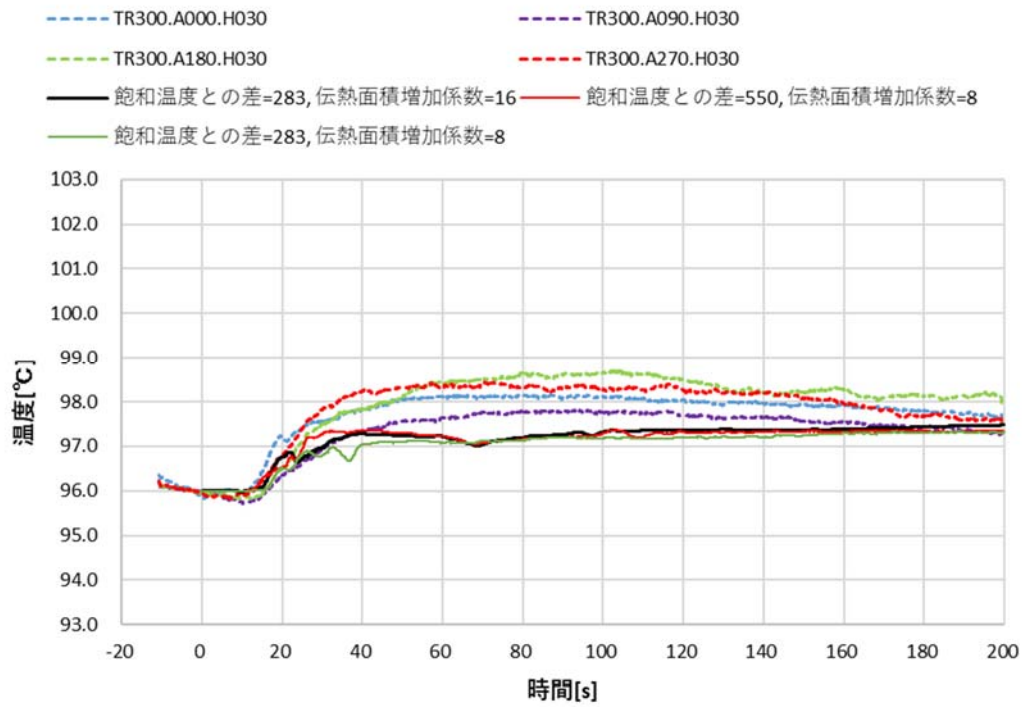


図 3.35 水温の比較 E8 実験：表 3.10 中央から 300mm, 床板表面から 30mm

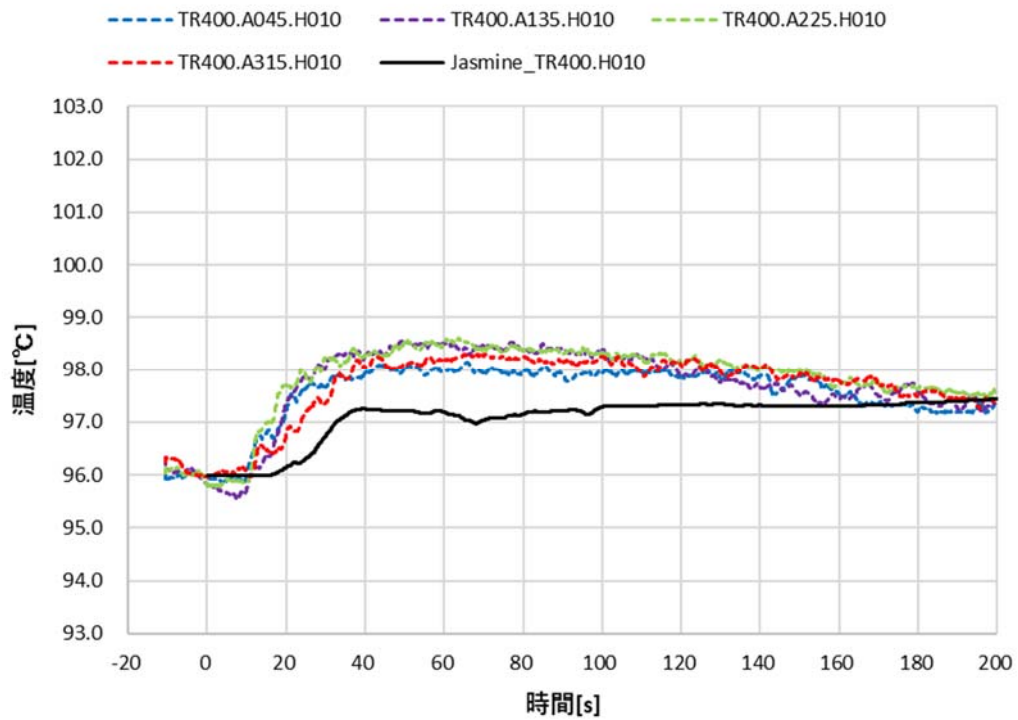


図 3.36 水温の比較 E8 実験：表 3.10 中央から 400mm, 床板表面から 10mm

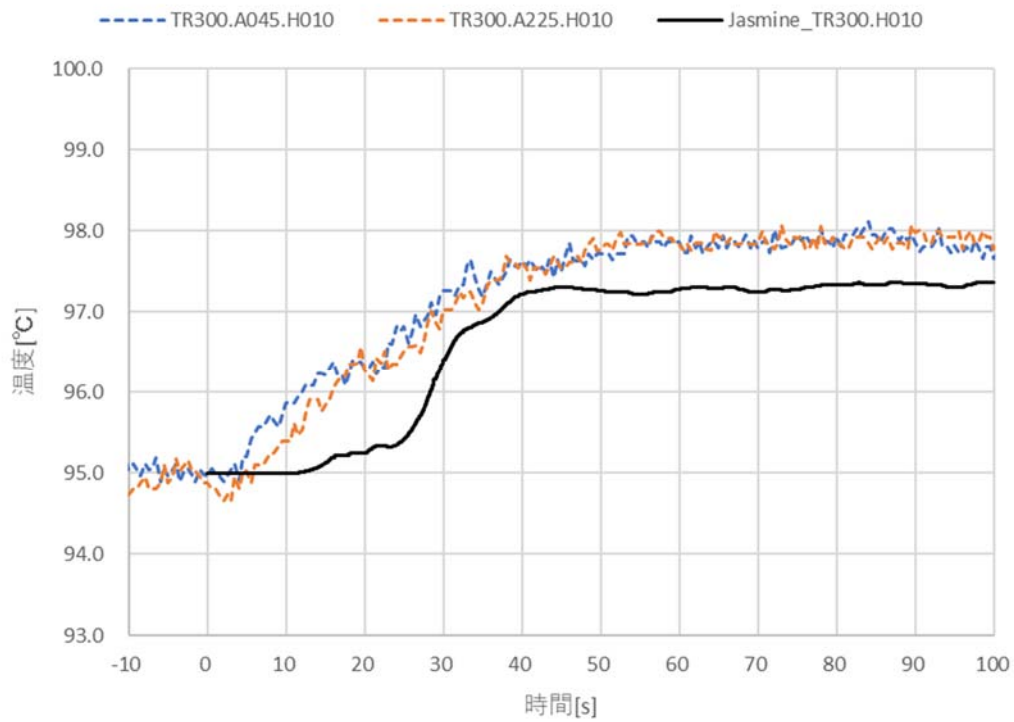


図 3.37 水温の比較 E9 実験：表 3.10 中央から 300mm, 床板表面から 10mm

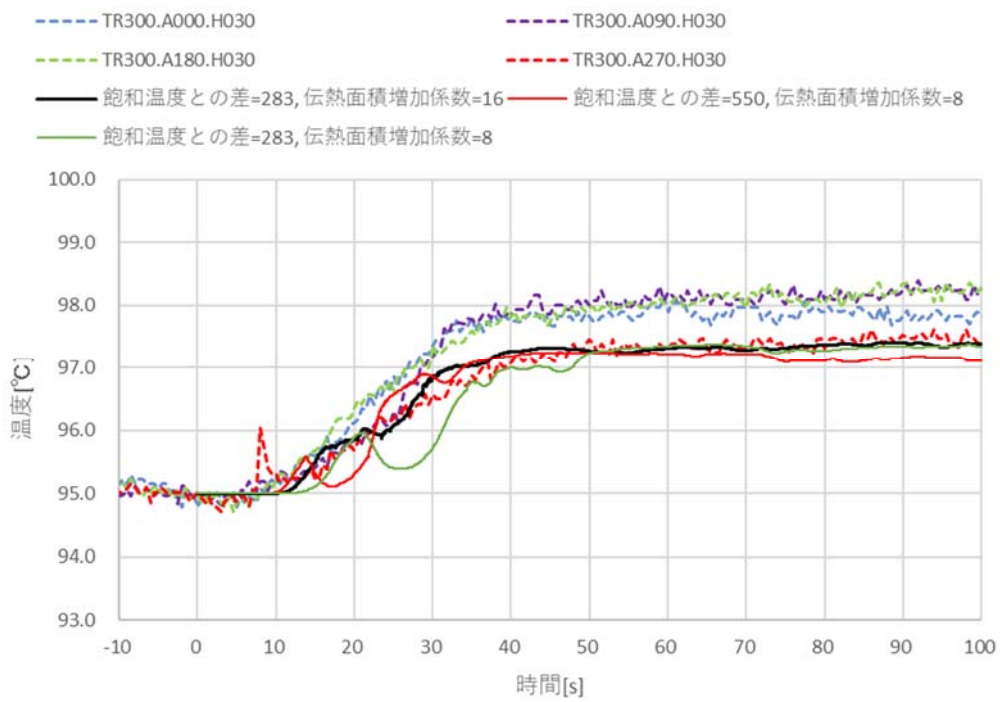


図 3.38 水温の比較 E9 実験：表 3.10 中央から 300mm, 床板表面から 30mm

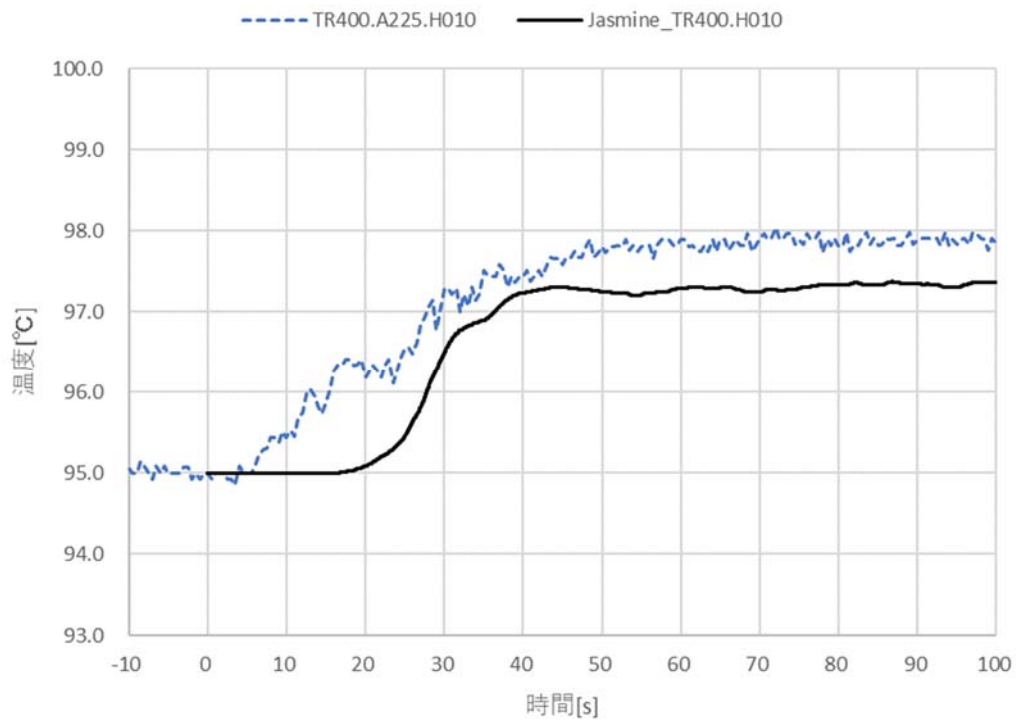


図 3.39 水温の比較 E9 実験：表 3.10 中央から 400mm, 床板表面から 10mm

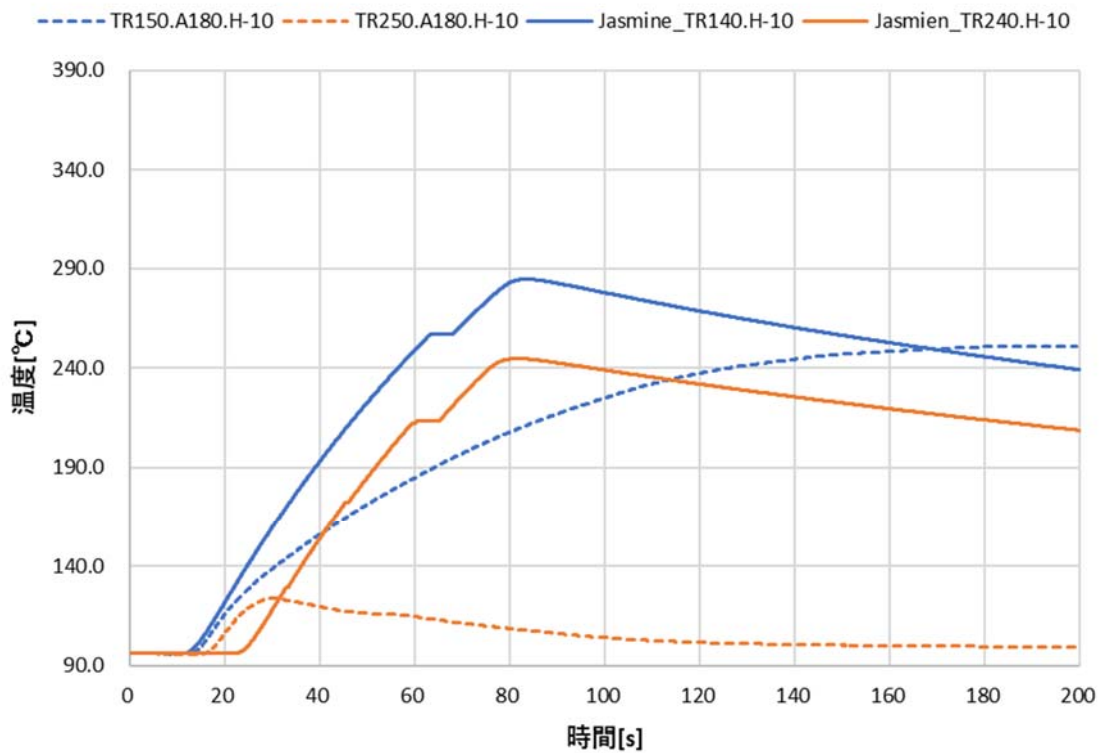


図 3.40 ステンレス床板裏側の温度変化 (PULiMS_E8 : 表 3.10)

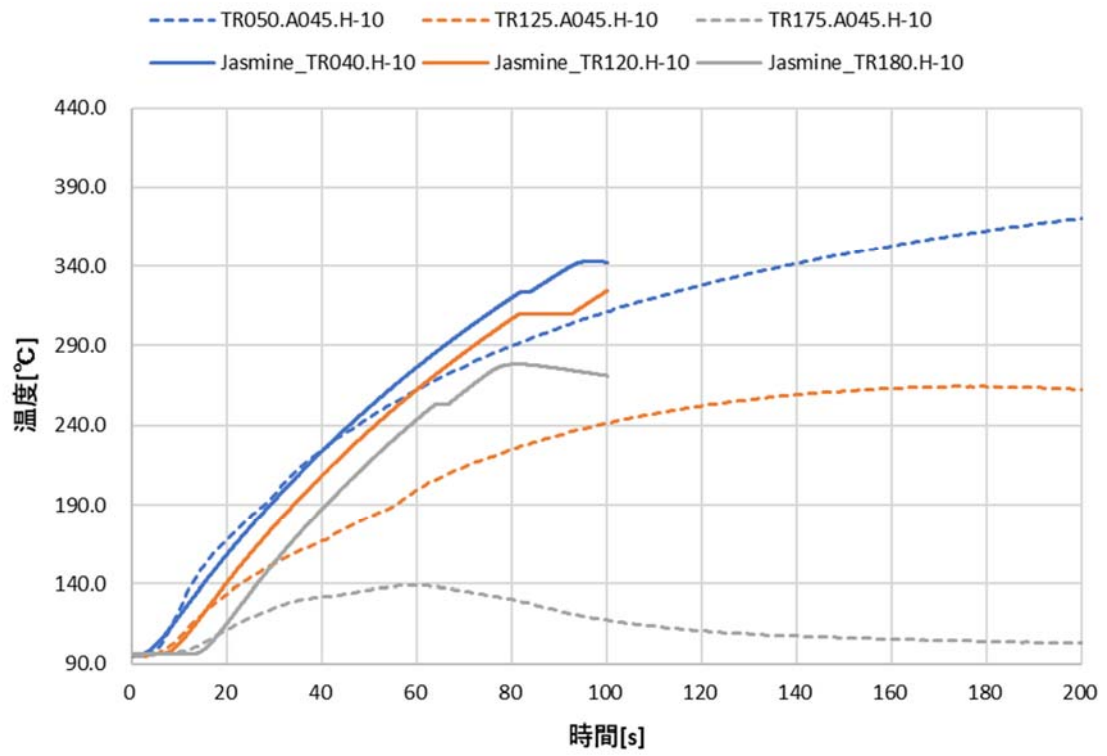


図 3.41 ステンレス床板裏側の温度変化 (PULiMS_E9 : 表 3.10)

3.5 まとめ

PULiMS 実験結果と JASMINE 解析結果との差異を解消するために、以下の項目について評価・検討し、入力値の見直しを行った。

- (1) 溶融物の表面の固化の可能性と表面に作用する張力
- (2) Rewet 現象と極小熱流束点温度
- (3) 溶融物—床間の熱抵抗

これらを、変更することで、実験において観測された拡がりの大きさやプール水中で観察された温度の変化を説明することが可能であることを示した。

今後の課題としては次の点が挙げられる。

- ① より大きな体系での実験との比較による JASMINE の検証
- ② クラスト表面の沸騰伝熱モード及び熱伝達率・熱流束等の実験的確認
- ③ クラスト表面の形状(凹凸)の形成メカニズム(今回 PULiMS で得られた結果が、実機コリウムにも適用できるか否か)
- ④ PULiMS 実験の解析では、問題とならなかったが、実機条件において溶融物温度が液相線温度以下に下がった場合の取り扱いについてさらなる検討が必要である。すなわち、コリウムの信頼しうる相図の完備、固液二相状態のレオロジーや固相液相の分離の扱いなどである。
- ⑤ JASMINE で採用しているモデルの妥当性のさらなる確認。JASMINE のモデルは以下の点で実際の現象と異なる。これらの差異が、本研究の目的である溶融物の拡がりについての程度の影響を及ぼすのか検討・評価する必要がある。影響が大きいと判断されれば、モデルの改良や新モデルの組み込みの可否や方法について検討する。
 - (a) JASMINE の解析は軸対称を仮定しているが、実機の測定結果は方向によってばらつきがある。解析はこれらの平均値を求めていることになるが、軸対称でないことが、現象に支配的な影響を与えているかどうかの検討が必要である。例えば沸騰曲線は著しい非線形性があり、一部が核沸騰状態、他方が高温の膜沸騰状態となっている場合の合計伝熱量と、全体を平均した低温(極小熱流束点近傍)での膜沸騰伝熱量の計算値には著しい差がある。
 - (b) JASMINE では PULiMS 実験の結果などに基づき、表面クラスト、溶融部、底クラストの三層構造を採用しており、表面クラストは密度が液相よりも大きいにもかかわらず、溶融部に沈まないと仮定している。表面クラストの上に溶融物ジェットから生じた溶融物液滴が多量に堆積した場合や、クラストが割れ分離した場合などにもこの仮定が成立するのかさらなる確認が必要である。
 - (c) 溶融物ジェットから生じた溶融物液滴が冷却・固化して溶融物プールに達した時に生じる現象についてさらなる検討が必要である。固化した粒子は瞬時に再溶融するわけではないので、固化粒子が溶融物中の流動を妨げ拡がり面積を減少させる可能性がある。

参考文献

- [3.1] 日本機械学会、”伝熱工学資料 改訂第 5 版”、P.100、丸善、2009
- [3.2] S. Nishio, M. Uemura, K. Sakaguchi, “Film Boiling Heat Transfer and Minimum-Heat-Flux(MHF)-Point Condition in Subcooled Pool Boiling”, JSME International Journal, 1987, Vol. 30, No. 266
- [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.285、丸善、2009
- [3.5] R. B. Bird, W. E. Stewart, E. N. Lightfoot, “Transport Phenomena, Second Edition”, John Wiley & Sons, Inc, Sep. 2006
- [3.6] 日本機械学会、”伝熱工学資料 改訂第 5 版”、P.28、丸善、2009

4. 実機冷却性評価の予備解析

4.1 プラント・デブリ初期状態に関する入力条件

(1) 解析対象

仮想プラントを計算対象としたが、実機的设计値に近い数値を選定した。820 MWe 級の Mark-I 改良型格納容器を有する BWR プラントを想定し、これに基づき、格納容器床直径、上部自由空間容積、熔融物落下量最大値を決定した。解析に使用した主要な条件を表 4.1.1 に示す。床にはサンピット等はなく水平な平面であるとした。ペDESTAL 床上に水プールが形成されている状況を想定し、圧力上昇も模擬するため上部空間の容積も実機と近い値とした。また、圧力条件としては格納容器の設計圧とした。

表 4.1.1 に示す解析条件のうち、熔融物落下量、熔融物温度、熔融物初速、原子炉圧力容器破損開口直径及び原子炉格納容器内初期水温を、不確かさを考慮するパラメータとして選定した。また、熔融物落下継続時間は、熔融物落下量、開口面積及び初速から計算することとした。

床材については、珪岩質 (Siliceous) 骨材を使用したコンクリートを想定し、OECD/MCCI 計画の CCI-3 試験[4.1]で使用されたものと同様の熱分解ガス成分含有量を仮定した。入力に使用した数値を表 4.1.2 に示す。

表 4.1.1 実機解析の条件

項目	数値
床直径	6 m
上部自由空間容積	8000 m ³
初期圧力	0.5 MPa (T _{sat} = 424.986 K)
熔融物落下量 *	最大 (全量落下時) 157.1 t
熔融物落下継続時間	熔融物落下量・開口面積・初速から計算
熔融物ノズル位置	床から 4 m
熔融物初速 *	X ₅₀ = 5 m/s, EF = 2
原子炉圧力容器開口直径 *	X ₅₀ = 0.1 m, EF = 2 (最大 0.3 m)
熔融物温度 *	過熱度 : X ₅₀ = 50 K, EF = 2
熔融物発熱量	100 W/kg
原子炉格納容器内初期水温 *	300 ± 10 K
原子炉格納容器内初期水位	1 m
表面クラストドライアウト熱流束	500 kW /m ²
クラスト拘束条件	流動、所定の厚みで固定

* 不確かさを考慮するパラメータ

表 4.1.2 コンクリートの組成に関する入力値

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

コンクリート密度：2300 kg/m³

コンクリートを熔融するのに必要な熱量：1.72 MJ/kg

(2) 熔融物の性質

落下する熔融物の物性は、融点に関連するもの以外は JASMINE コードに組み込まれている CORIUM3 と同じ値を使用した。これは UO₂(70%)-ZrO₂(30%)の混合物で、熔融物落下量最大値は炉心燃料の UO₂ 保有量及び仮定した組成から 157.1 t と評価した。使用した物性値を表 4.1.3 に示す

これまでの解析経験によると、熔融物が液相単相の場合（高温の共晶組成の場合など）、格納容器床に落下した熔融物は床端部にまで容易に達してしまい、熔融物の拡がり进行评估する意義が薄れてしまう。そこで、本解析では熔融物の過熱度は低いとし、液相線温度と固相線温度が一致しない固液二相状態において熔融物の見かけの粘性が著しく増加する条件を想定する。原子炉容器を構成する鉄の融点 1,811 K に比して炉心熔融物の温度は高いので、熔融物の過熱度が低くても、原子炉圧力容器の熱的破損及び熔融物の格納容器への落下は生じる。

熔融物の流動を支配する固液二相状態の固相率・凝固点は以下のような考えで求めた。

(a) 仮定

- (i) 熔融物の U と Zr の比は CORIUM3 (UO₂:ZrO₂ = 70:30 wt%) と同じとする。これをもとに原子数比を求めると原子モル分率 (U/(U+Zr)) は 0.516 となる。
- (ii) 相図として JAEA が報告した“二酸化ウランとジルカロイの熱力学的に妥当な状態図”を参考とする (図 4.1.1) [4.2]。(ただしこの図は、酸素飽和ジルコニウム (酸素モル分率約 30%) と UO₂ の相図であり、部分酸化の熔融炉心を想定していることになる)。
- (iii) 上記相図は、2000℃以下では、熔融部の左右両側が固相線となり、固相率を求められない。しかし、この部分では固相重量率が十分に大きく流動不可能となっているので、計算結果に影響しないはずである。従って固相率は、固相線温度に至るまで単純に線形に増加させる。
- (iv) 流動が不可能になる固相体積率は、0.4～0.6 程度の範囲とされるがここでは、0.55 を採用した。この値を変えると、計算上の凝固点 (T_{melt}) が変化するが、熔融物のスーパージット値で入力を考えれば、計算結果に著しい影響はないと考えられる。

(v) 相図から固相・液相の割合（原子モル分率）が求められるが、これを重量率に換算するときに、単純化のために、固相は UO_2 、液相は ZrO_2 として重量比を計算する。

(b) 具体的数値

相図（図 4.1.1）から、 $\text{U}/(\text{U}+\text{Zr})=0.516$ の点の液相線温度、固相線温度を読み取る（2170,1730℃）。また、約 2000℃における固相率と液相率が等しくなることから（固相率=0.5）、この点及び液相線温度（固相率 0.0）、固相線温度（固相率 1.0）を基準として、高温側、低温側に直線で固相モル分率-温度の関係を補間する。モル分率 0.1 ピッチのデータを、JASMINE 入力値とする（表 4.1.4 参照）。

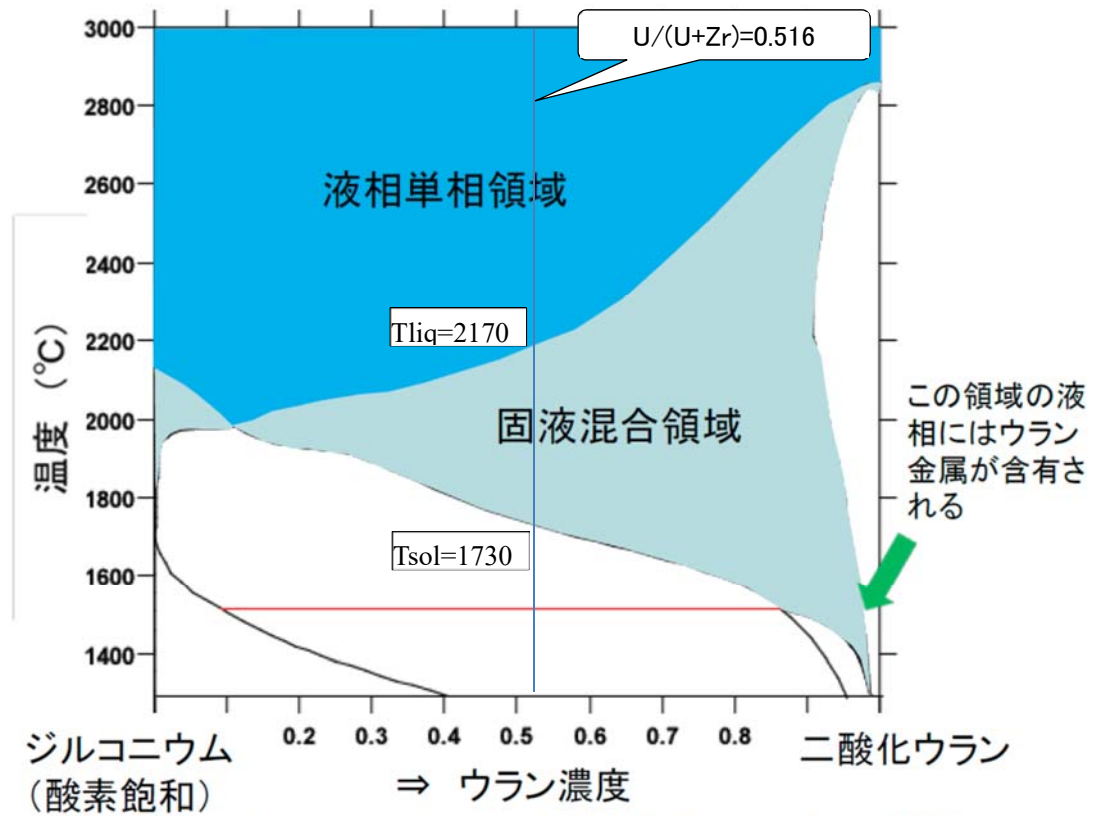
凝固点 T_{melt} は、熔融物の流動が不可能になる温度であるが、粘性が無限大となる固相体積率は 0.55 としてあるので、解の発散を避けるために、それより固相体積率がわずかに小さい 2309.1K を T_{melt} とする。入力した固相重量率と JASMINE 内部で計算される固相体積率及び粘性係数の増倍率（液相単相の場合の何倍の粘性を示すか）を温度の関数として図 4.1.2 に示す。

表 4.1.3 使用する物性値

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

表 4.1.4 JASMINE 計算に入力した温度と固相重量率の関係

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



二酸化ウランとジルカロイの熱力学的に妥当な状態図

図 1. 参照した相図 [4.2]

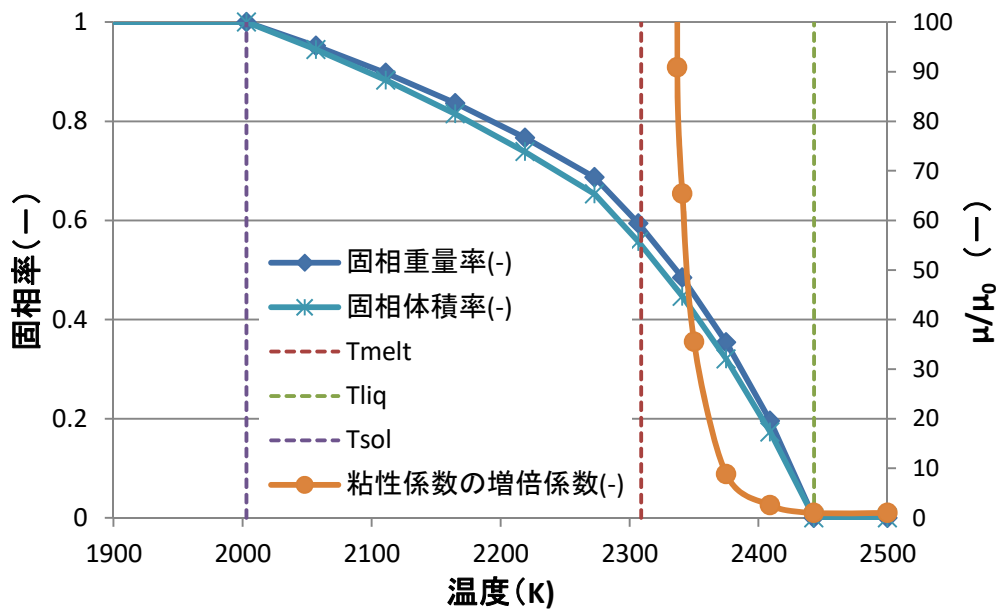


図 4.1.2 落下溶融物の温度と固相率の関係の入力値と粘性係数増倍係数

(3) その他の計算条件

(a) 水プールへの沸騰熱伝達

水プールによる冷却に関する入力値は表 4.1.5 のようになっている。伝熱面積の増加係数は、平面→半球の形状変化を 2 段に考慮して 4 としてある。PULiMS 実験解析で最適と判断された 8.0 と異なっているのは、実験解析終了前に、計算条件を設定する必要があったためである。

そのほかの数値は、径の圧力が 0.5MPa であることを考慮して決めた。極小熱流束点温度のプール水温依存性については、大気圧の場合と同じとしてある。またこの圧力依存性は 0 としてあるので、圧力変化の影響は、飽和温度の変化としてだけ現れる。

表 4.1.5 沸騰曲線に関連する入力

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

(b) 溶融物中のボイド率評価

コンクリートから発生するガスにより溶融物液面が変動する現象を表現するのに必要なパラメータである。溶融物中のボイド挙動 α は次式で表現されるドリフトフラックスモデル [4.3]を用いて、発生ガスの見かけ速度（容積流速） j_g から計算する。

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

使用する定数は昨年度と同様、 $C_0=1.198$ 、 $v_g=0.2231$ m/s とする。

(c) 液滴挙動

溶融物ジェットからの液滴発生の計算法及び液滴がクラストに到達したときの計算オプションを表 4.1.6 に示す。

表 4.1.6 液滴挙動に関する入力

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

*粒子の径/クラスト厚さ $>\beta_{in}$ となる粒子はクラストを貫通して溶融部に流入する。

(d) アグロメレーションモデル

本解析に用いる JASMINE コードのアグロメレーションモデルは平成 28 年度版である。ただし、初期水位が 1 m と比較的浅いため、ジェットブレイクアップによる溶融物の粒子化割合がそもそも小さく、アグロメレーションモデルの違いが結果に及ぼす影響は小さいと考えられる。

4.2 入力パラメータの不確かさの仮定

表 4.1.1 に示した不確かさを考慮するパラメータについては、以下の確率分布を仮定する。なお、ここで仮定する確率分布は工学的判断や文献[4.4]に基づき便宜的に定めたものであり、本来は起因事象の発生頻度や事象発生時のプラント状態の確率分布を考慮したシビアアクシデント解析により評価すべきものである。

(1) 原子炉圧力容器破損時の溶融物温度

融点 2309.1 K に対する過熱度について $X_{50} = 50$ K, $EF = 2$ の対数正規分布を仮定する。図4.2.1(1)に確率分布を示す。

(2) 原子炉圧力容器破損時の溶融物初速

溶融物初速について $X_{50} = 5$ m/s, $EF = 2$ の対数正規分布を仮定する。図4.2.1(2)に確率分布を示す。

(3) 原子炉圧力容器破損部の開口直径

開口部の直径について $X_{50} = 0.1$ m, $EF = 2$ の対数正規分布を仮定する。ただし、最大 0.3 m とする。図4.2.1(3)に確率分布を示す。

(4) 溶融物落下量

全量落下時 157.1 t に対して以下の3段階の確率分布を仮定する。

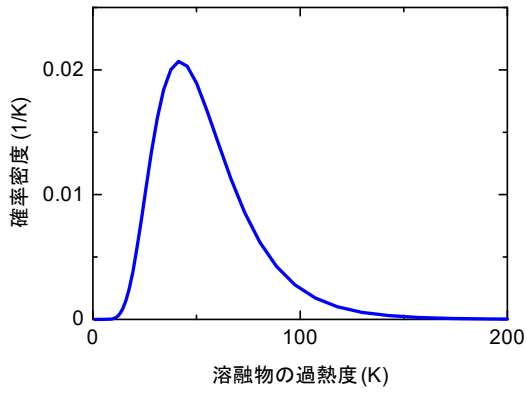
落下割合	0.0 – 0.6	0.6 – 0.8	0.8 – 1.0
区間の累積確率	0.89	0.1	0.01

図4.2.1(4)に確率分布を示す。

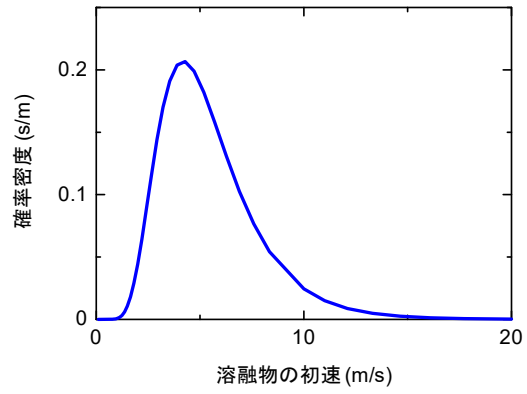
(5) 原子炉格納容器内初期水温

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

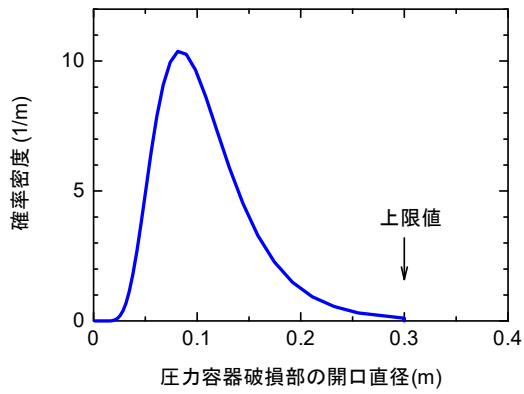
上記の対数正規分布において、 X_{50} は平均値（累積確率 50% 値）、 X_{95} は累積確率 95% 値を意味する。また、 $EF = X_{95}/X_{50} = X_{50}/X_{05} = \sqrt{(X_{95}/X_{05})}$ である。



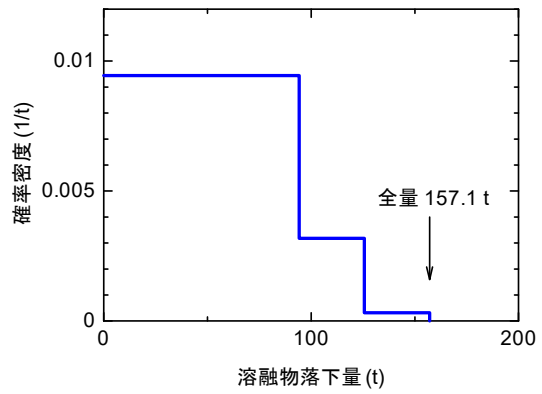
(1) 溶融物過熱度



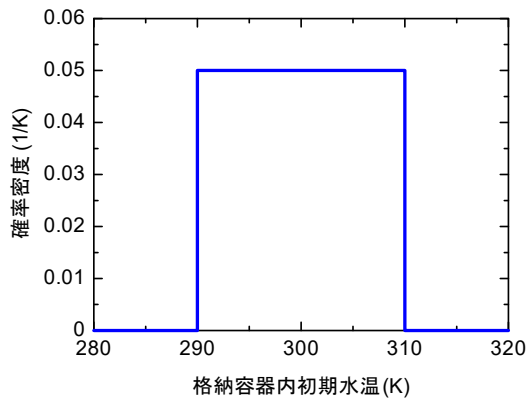
(2) 溶融物初速



(3) 原子炉压力容器の破損開口直径



(4) 溶融物落下量



(5) 原子炉格納容器内初期水温

図 4.2.1 不確かさを考慮する入力パラメータの確率分布

4.3 解析パラメータセットの抽出

前節の各入力パラメータの確率分布に従うパラメータセットの抽出をPREPコード[4.5]を用いて実施した。抽出された59ケースのパラメータセットを表4.3.1に示す。また、一部をJASMINEコードへの入力パラメータに変換したものを表4.3.2に示す。

溶融物温度(K)については、

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

として、また、溶融物落下継続時間(s)は、

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

として、それぞれ変換した。ここで、溶融物密度(kg/m³)はJASMINEコードの densm_datain2 関数により各ケースの溶融炉心温度(K)に対してそれぞれ算出した値を用いた。図4.3.1はPREPコードにより抽出した各パラメータのヒストグラムと確率分布を示しており、抽出したパラメータセットが確率分布に従っていることが確認できる。

なお、59というケース数は、95%の累積確率で95%の信頼水準を達成するために必要なサンプル数という観点で決定した[4.6]。

表 4.3.1 PREP コードにより生成したパラメータセット一覧(1/2)

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

表 4.3.1 PREP コードにより生成したパラメータセット一覧(2/2)

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

表 4.3.2 JASMINE コードへの入力パラメータ一覧(1/2)

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

表 4.3.2 JASMINE コードへの入力パラメータ一覧(2/2)

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

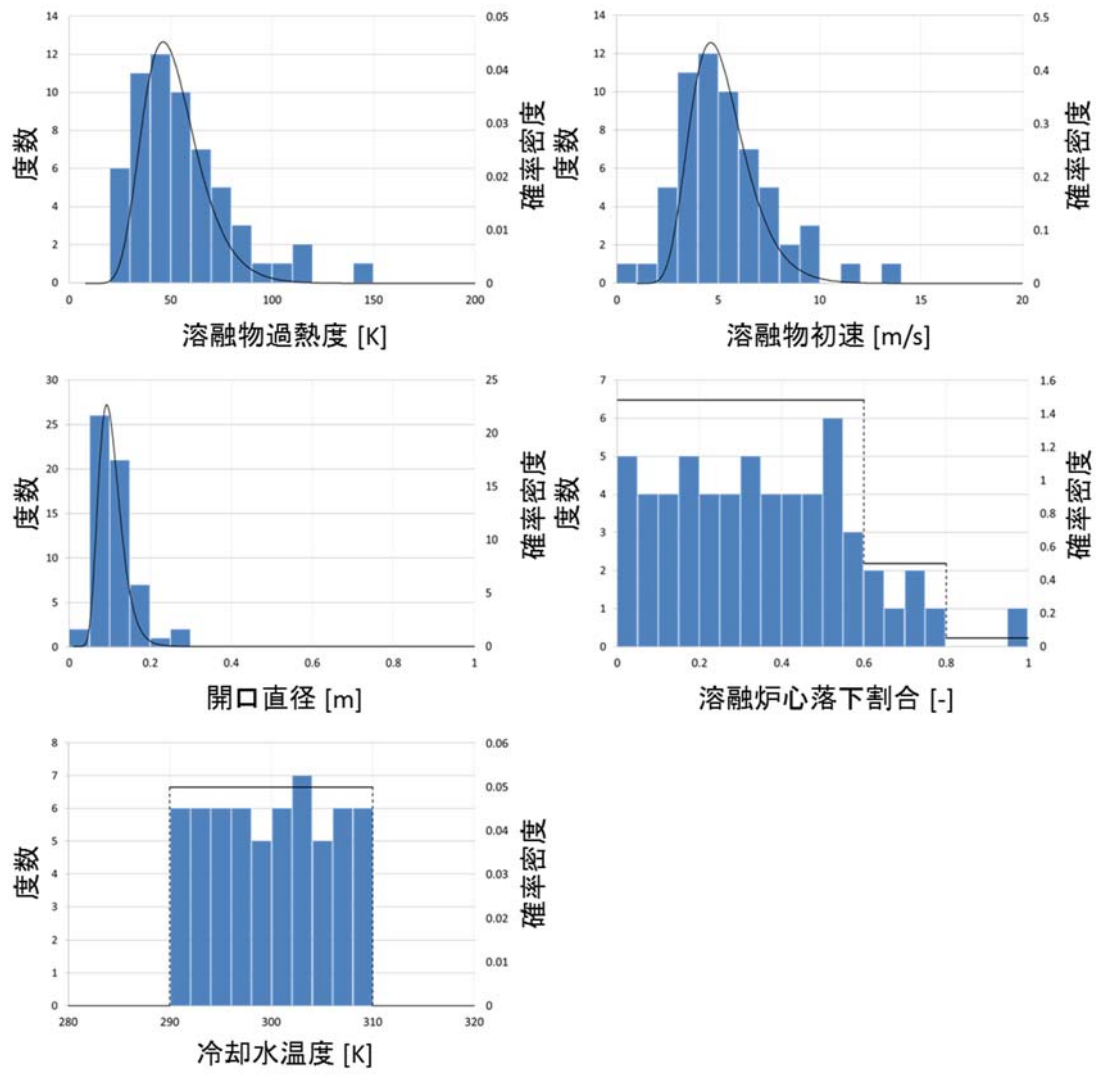


図 4.3.1 抽出したパラメータセットのヒストグラム及び確率分布

4.4 解析結果

JASMINEコードを用いた59ケースの解析結果のうち、粒子状デブリ、アグロメレーションデブリ及び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、デブリ堆積高さを表4.4.1に示す。

一部のケースにおいては設定した時間に達する前に計算が途中停止したが（表中の計算状況が×のケース）、その前に溶融物が格納容器内壁まで到達している場合には計算停止時点でのデブリ質量に未落下分の溶融物質量を加算してデブリ堆積高さを算出した。なお、JASMINEコードでは中心角0.1 radの領域を解析対象としているが、表中の各デブリ質量は円筒全体（ 2π rad）相当に換算した値である。

デブリ堆積高さは、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考えて評価した。まず、連続層状デブリ質量 M_c (kg) 及びアグロメレーションデブリ質量 M_a (kg) より円筒の体積 V (m³)を次式で得た。

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

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

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

図4.4.1に溶融物液深とクラスト厚さ並びに床材内温度の半径方向分布に関する解析結果の例を示す。各ケースにおいて、赤い×印は溶融物の先端位置を示しており、ケース49、50及び51では格納容器の壁面まで溶融物が到達していることが判る。

表 4.4.1 実機体系解析結果(1/2)

ケース 番号	計算状況 ○: 完了 ×: 途中停止	粒子状 デブリ質量 (kg)	アグロメレー ションデブリ 質量 (kg)	連続層状 デブリ質量 (kg)	未落下分の 溶融物質 質量 (kg)	拡がり 半径 (m)	デブリ 堆積高さ (m)
1	○	599.60	12.76	63787	0.00	3.00	0.272
2	○	0.00	0.00	10935	0.00	3.00	0.047
3	○	374.10	16.63	83133	0.00	3.00	0.355
4	○	16.19	0.00	80940	0.00	3.00	0.346
5	○	0.00	0.00	41037	0.00	3.00	0.175
6	×	594.36	210.74	12619	2835.60	3.00	0.067
7	○	198.95	19.41	48524	0.00	3.00	0.207
8	×	70.90	400.24	22871	3302.23	3.00	0.113
9	×	137.91	666.03	16819	35115.70	3.00	0.225
10	×	474.96	204.80	43574	12176.68	3.00	0.239
11	○	0.00	0.00	7248	0.00	3.00	0.031
12	×	626.49	26.10	52208	21181.02	3.00	0.313
13	○	4.91	0.00	49095	0.00	3.00	0.210
14	×	920.56	28.41	56824	7454.45	3.00	0.275
15	○	0.00	0.00	23557	0.00	3.00	0.101
16	×	1596.96	74.28	92847	12655.75	3.00	0.451
17	○	0.00	0.00	46080	0.00	3.00	0.197
18	×	426.42	13.65	10503	39768.83	3.00	0.215
19	×	51.61	141.92	12902	48597.75	3.00	0.263
20	○	0.00	0.00	36910	0.00	3.00	0.158
21	○	0.00	0.00	71107	0.00	3.00	0.304
22	×	415.76	8.48	84848	26488.56	3.00	0.475
23	○	0.00	0.00	35171	0.00	3.00	0.150
24	○	0.00	0.00	34735	0.00	3.00	0.148
25	×	32.48	388.21	15467	12987.60	3.00	0.123
26	○	8.84	0.00	44198	0.00	3.00	0.189
27	○	9.39	0.00	31286	0.00	3.00	0.134
28	○	0.00	0.00	15058	0.00	3.00	0.064
29	×	177.42	1127.53	12857	100725.63	3.00	0.490
30	×	159.03	525.13	16566	1696.48	3.00	0.080

表 4.4.1 実機体系解析結果(2/2)

ケース 番号	計算状況 ○: 完了 ×: 途中停止	粒子状 デブリ質量 (kg)	アグロメレー ションデブリ 質量 (kg)	連続層状 デブリ質量 (kg)	未落下分の 溶融物質 質量 (kg)	拡がり 半径 (m)	デブリ 堆積高さ (m)
31	○	0.00	0.00	4559	0.00	2.64	0.025
32	×	730.00	24.00	118680	3654.34	3.00	0.522
33	○	321.00	17.00	84171	0.00	3.00	0.359
34	○	5.00	0.00	53905	0.00	3.00	0.230
35	×	773.21	33.38	54720	13408.68	3.00	0.291
36	○	0.00	0.00	28051	0.00	3.00	0.120
37	○	27.87	0.00	92916	0.00	3.00	0.397
38	○	0.00	0.00	13077	0.00	3.00	0.056
39	○	0.00	0.00	87676	0.00	3.00	0.374
40	○	0.00	0.00	80538	0.00	3.00	0.344
41	○	0.00	0.00	57857	0.00	3.00	0.247
42	×	485.55	302.62	22584	73606.01	3.00	0.412
43	○	2.45	0.00	12271	0.00	3.00	0.052
44	○	0.00	0.00	72960	0.00	3.00	0.311
45	○	0.00	0.00	42759	0.00	3.00	0.183
46	○	83.48	0.00	75895	0.00	3.00	0.324
47	×	58.86	291.12	10510	75419.46	3.00	0.368
48	○	613.23	24.86	82869	0.00	3.00	0.354
49	○	0.00	0.00	68041	0.00	3.00	0.290
50	○	0.00	0.00	20571	0.00	3.00	0.088
51	○	216.28	9.40	94034	0.00	3.00	0.401
52	○	0.14	0.00	1394	0.00	1.58	0.021
53	×	23.12	90.92	15410	17545.37	3.00	0.141
54	×	443.99	9.87	98665	50660.42	3.00	0.637
55	○	4.99	0.00	24961	0.00	3.00	0.107
56	○	0.00	0.00	5449	0.00	2.88	0.025
57	×	269.73	28.39	47321	12188.66	3.00	0.254
58	○	0.00	0.00	3247	0.00	2.24	0.025
59	×	310.27	0.00	50864	27579.69	3.00	0.335

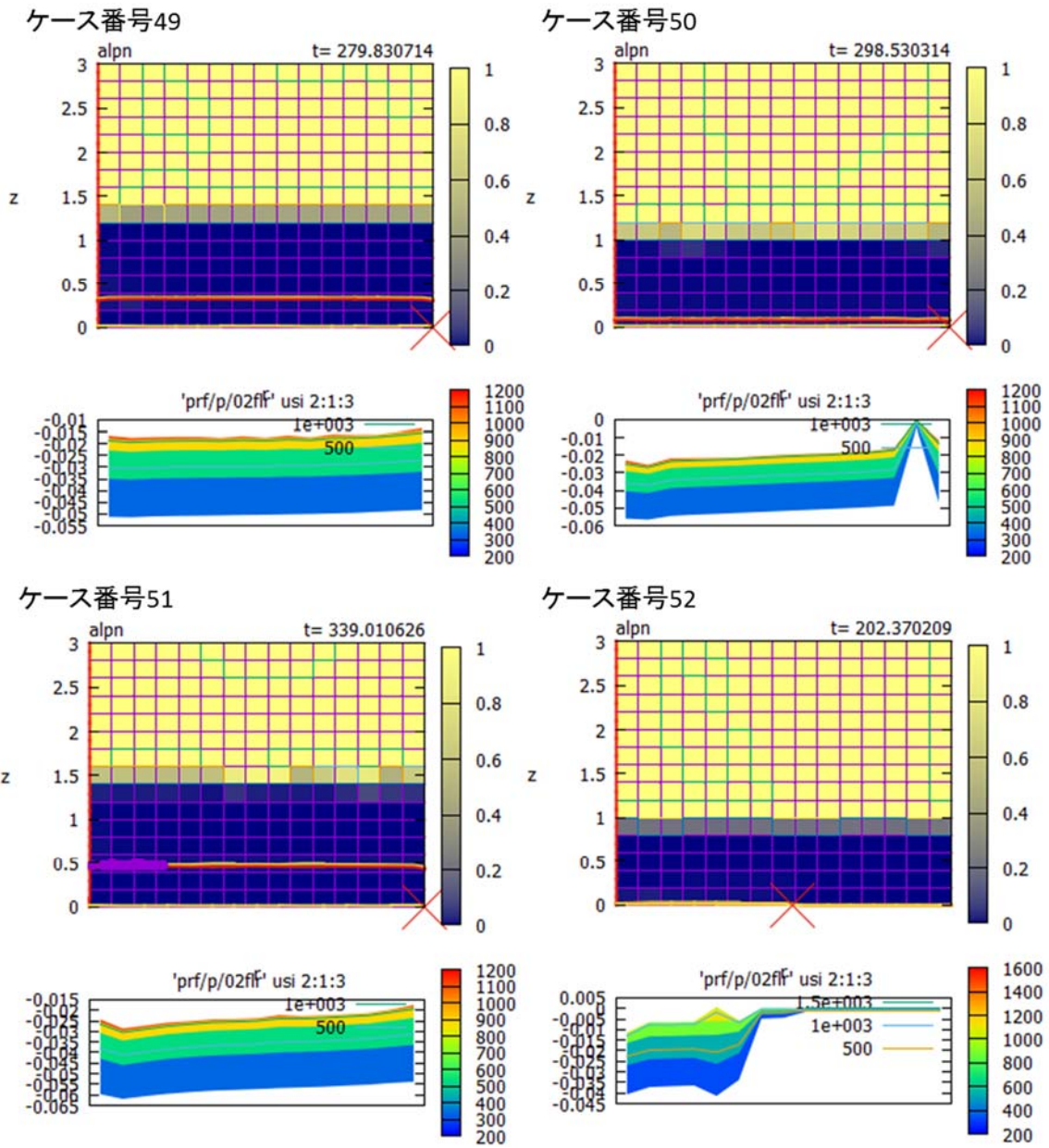


図 4.4.1 実機体系解析による溶融物及びクラストの半径方向分布の例

4.5 デブリ冷却性評価

JASMINE解析で得たデブリ堆積高さを冷却可能な最大デブリ堆積高さ h_{max} と比較することにより、MCCI回避の成功／失敗を判定した。ここで、 h_{max} は表4.5.1のパラメータを用いて付録Eに示す方法で評価した。その結果、表4.5.2に示す様に冷却可能な最大デブリ堆積高さを0.466 mと評価した。

図4.5.1に、59ケースのデブリ堆積高さの度数分布を示す。4ケースにおいてデブリ堆積高さが h_{max} を上回っており、これらのケースではMCCIが発生すると判断される。従って、本解析の条件におけるデブリ冷却成功確率 P は以下の通り評価された。

$$P = 55/59 = 0.932$$

この結果は便宜的に確率分布を与えた入力パラメータに基づくものであり、実機におけるデブリ冷却成功確率を意味するものではない。今後は、JASMINEコードの熔融物床面拡がりモデルのさらなる改良により評価自体の不確かさ低減を図るとともに、今回は固定値とした格納容器内初期水位をパラメータとした解析を実施し、初期水位（すなわち事前注水量）とデブリ冷却成功確率の関係を明らかにしていく計画である。

表4.5.1 冷却可能な最大デブリ堆積高さの評価に用いたパラメーター一覧

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

* 文献[4.7]に基づき保守的に設定

表4.5.2 冷却可能な最大デブリ堆積高さの評価結果

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

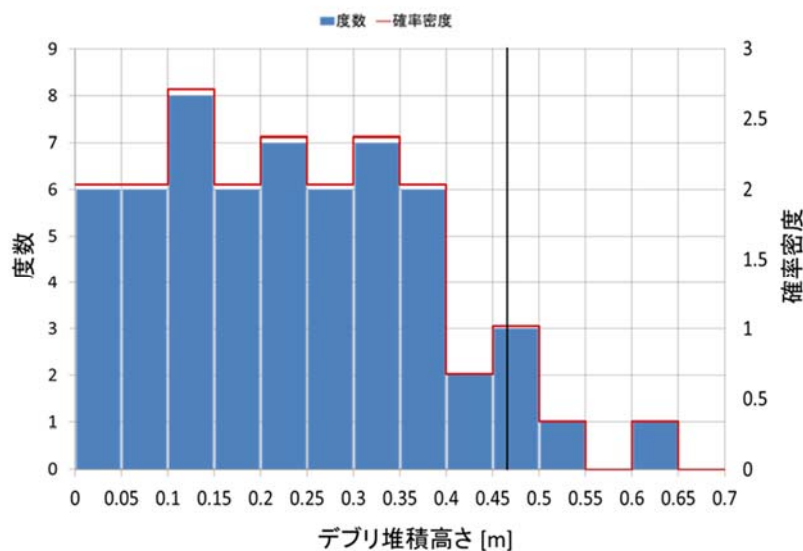


図 4.5.1 デブリ堆積高さのヒストグラム及び確率分布

参考文献

- [4.1] M. T. Farmer, S. Lomperski, D. J. Kilsdonk, and R. W. Aeschlimann ,OECD MCCI Project 2-D Core Concrete Interaction (CCI) Tests: Final Report, OECD/MCCI-2005 -TR05, February 28, 2006
- [4.2] 国立研究法人 日本原子力研究開発機構 ,” 原子力の安全性に資する共通基盤整備のための技術開発委託事業（シビアアクシデント時の燃料破損・熔融過程解析手法の高度化）”, 委託事業報告資料 www.nsr.go.jp/data/000182517.pdf、平成 29 年 2 月
- [4.3] 日本機械学会編、“気液二相流技術ハンドブック”、コロナ社、1989 年 5 月
- [4.4] K. Moriyama, Y. Maruyama and H. Nakamura, Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User’s Guide, JAEA-DATA/Code 2008-014, July 2008, Japan Atomic Energy Agency.
- [4.5] T. Homma and A.Saltelli, LISA package user guide, Part 1: PREP (Statistical PRE Processor) preparation of input sample for Monte Carlo simulations program description and user guide, EUR-13922, Commission of the European Communities, 1992.
- [4.6] 日本原子力学会, 統計的安全評価の実施基準, AESJ-SC-S001:2008, 日本原子力学会 標準委員会 システム安全専門部会 統計的安全評価手法標準分科会, 2009.
- [4.7] S. Lomperski, M.T. Farmer, “Experimental evaluation of the water ingress ion 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、主に、格納容器内溶融炉心冷却性評価手法において中心的な役割を果たす溶融炉心／冷却材相互作用解析コード JASMINE の高度化に向けて、水プール中における溶融炉心の粒子化における粒子同士の結合（アグロメレーション）モデル及び格納容器床面上における溶融炉心の拡がりに係わるモデルの改良を進め、さらに、入力パラメータの不確かさを考慮した予備的な実機解析により JASMINE コードを用いた確率論的評価手法の溶融炉心冷却性評価への適用性評価を試みた。主要な成果は以下のとおりである。

5.1 DEFOR-A 実験解析

JASMINE コードを用いて、高温溶融酸化物ジェットブレイクアップ現象を対象としてスウェーデン王立工科大学（KTH）で行われた DEFOR-A1、A2、A4～A9、A23～A26 実験の解析を行った。冷却性評価においては、ブレイクアップにより生じた粒子同士が結合して塊状になる割合（アグロメレーション割合）が重要となることから、同実験シリーズでは水プール深さとアグロメレーション質量割合の関係に関するデータが取得されている。平成 28 年度に JASMINE コードに導入したアグロメレーションモデルを改良し、調整パラメータの最適化を図った結果、実験で得られたアグロメレーション割合の再現性が向上したことを確認した。溶融物の加熱度が高い実験においては水深が浅い場合に実験結果を過小評価する傾向が締めされたが、アグロメレーションデブリの熱伝達調整パラメータによりさらなる再現性の向上が期待できると考えられる。

5.2 PULiMS 実験解析

JASMINE コードを用いて、高温溶融酸化物の水中床上拡がり現象に着目して KTH で実施された PULiMS-E1、E4、E8 及び E9 実験の解析を行った。格納容器に落下した溶融物がより大きく拡がるほど冷却され易くなり、MCCI 回避の成功確率が高くなることから、冷却性評価においては格納容器床面上での溶融炉心拡がり面積の評価が重要となる。そこで、JASMINE コードの溶融物拡がりモデル、溶融物から冷却水への伝熱モデル等の改良を進めて PULiMS 実験解析に適用した結果、実験で計測された拡がり面積の再現性が向上したことを確認した。また、実機へのスケールリングを検討するため、様々な無次元数を PULiMS 実験条件と実機条件で比較したところ、前者では表面張力、後者では慣性力が溶融物の拡がりに対する支配的因子であることが示された。今後、この知見を踏まえた上で実機条件での拡がり面積の評価精度向上を図る。

5.3 予備的実機解析

格納容器内に流出する溶融炉心の量、温度、溶融炉心ジェット径といった事故解析における入力パラメータについて確率分布を仮定し、抽出した 59 ケースの事故条件に対して予備的な実機解析を実施することで入力パラメータの不確かさを考慮したデブリ冷却成功確率の評価を行った。今回は便宜的に与えた仮想的な確率分布に対して評価を行ったものであり、得られた数値は実機におけるデブリ冷却成功確率を意味するものではないが、本解析により JASMINE コードを用いた確率論的評価手法の適用性について見通しを得た。

引き続き、JASMINE コードのアグロメレーションモデル及び溶融物床面拡がりモデルのさらなる改良により評価自体の不確かさ低減を図るとともに、実機解析のケース数を増やし、格納容器内初期水位（すなわち事前注水量）とデブリ冷却成功確率の関係を評価することで事業目的の達成を図る。

付録 A DEFOR-A 実験の解析結果

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

共通解析条件

- JASMINE 4.2
- アグロメレーション調整パラメータ： $\Phi_{min} = 0.05$, $\Phi_{max} = 1.5$, $\alpha = 15.0$
- 熱伝達調整係数： $kqhtr = 0.8$

掲載データ

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

DEFOR-A1 (キャッチャー1)

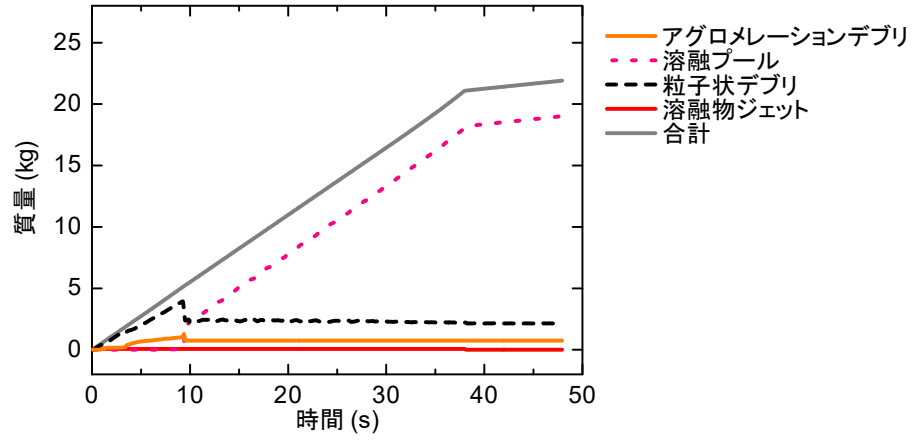


図 A1-C1-1 デブリの状態別質量の履歴

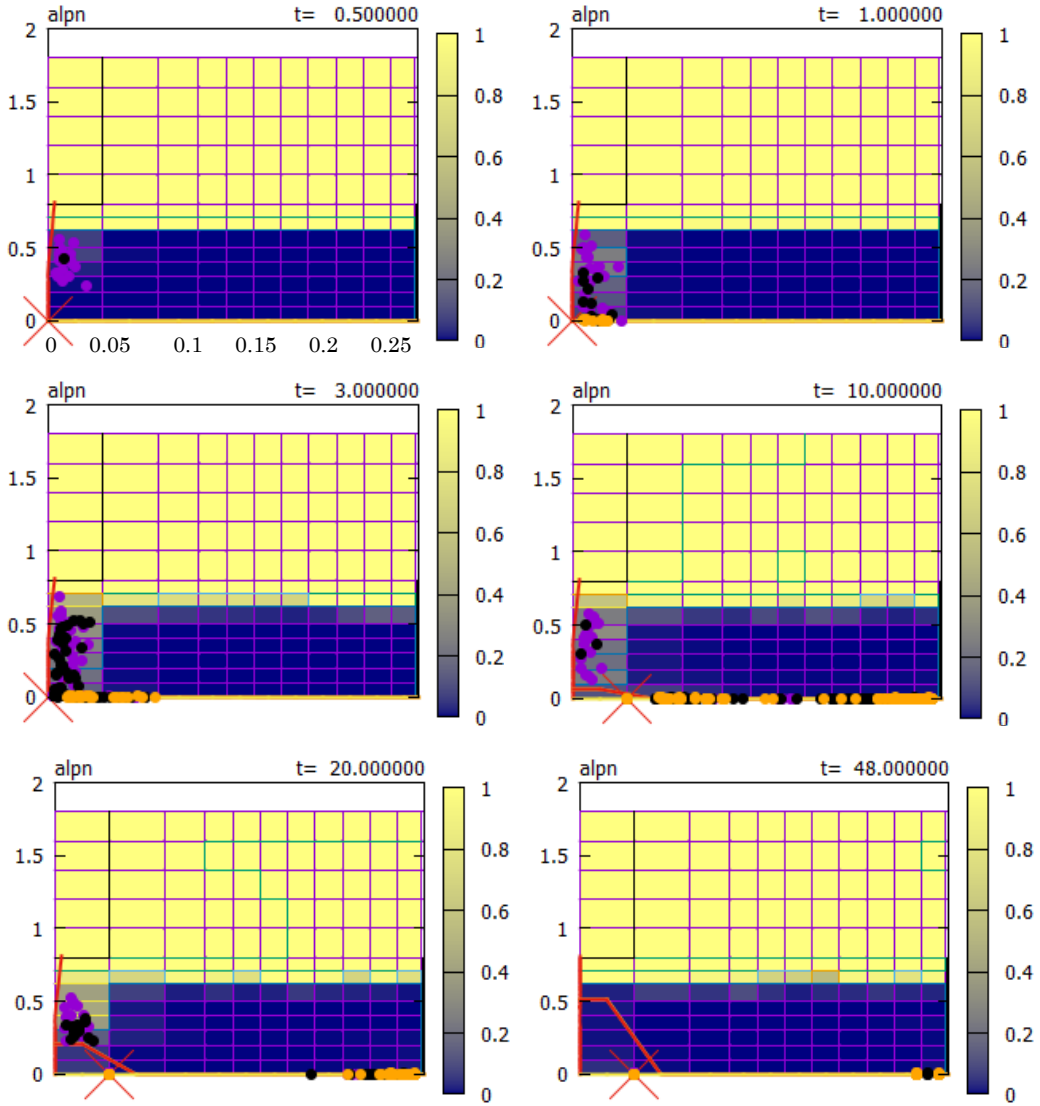


図 A1-C1-2 ボイド率及び熔融物粒子分布図

DEFOR-A1 (キャッチャー2)

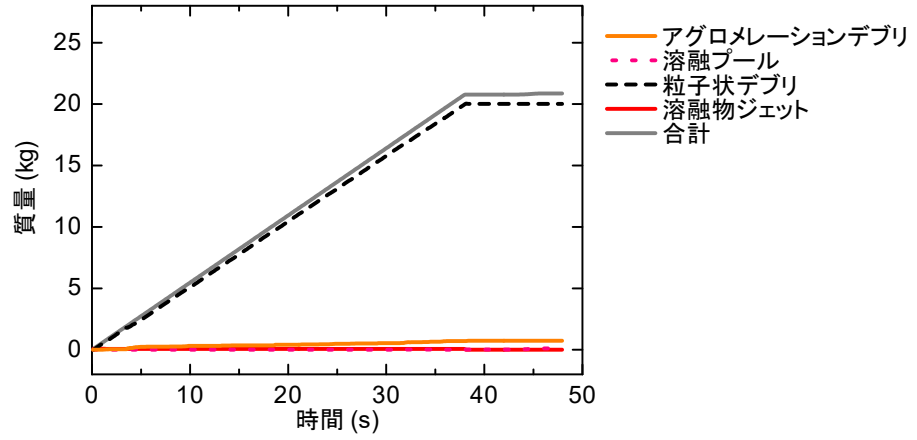


図 A1-C2-1 デブリの状態別質量の履歴

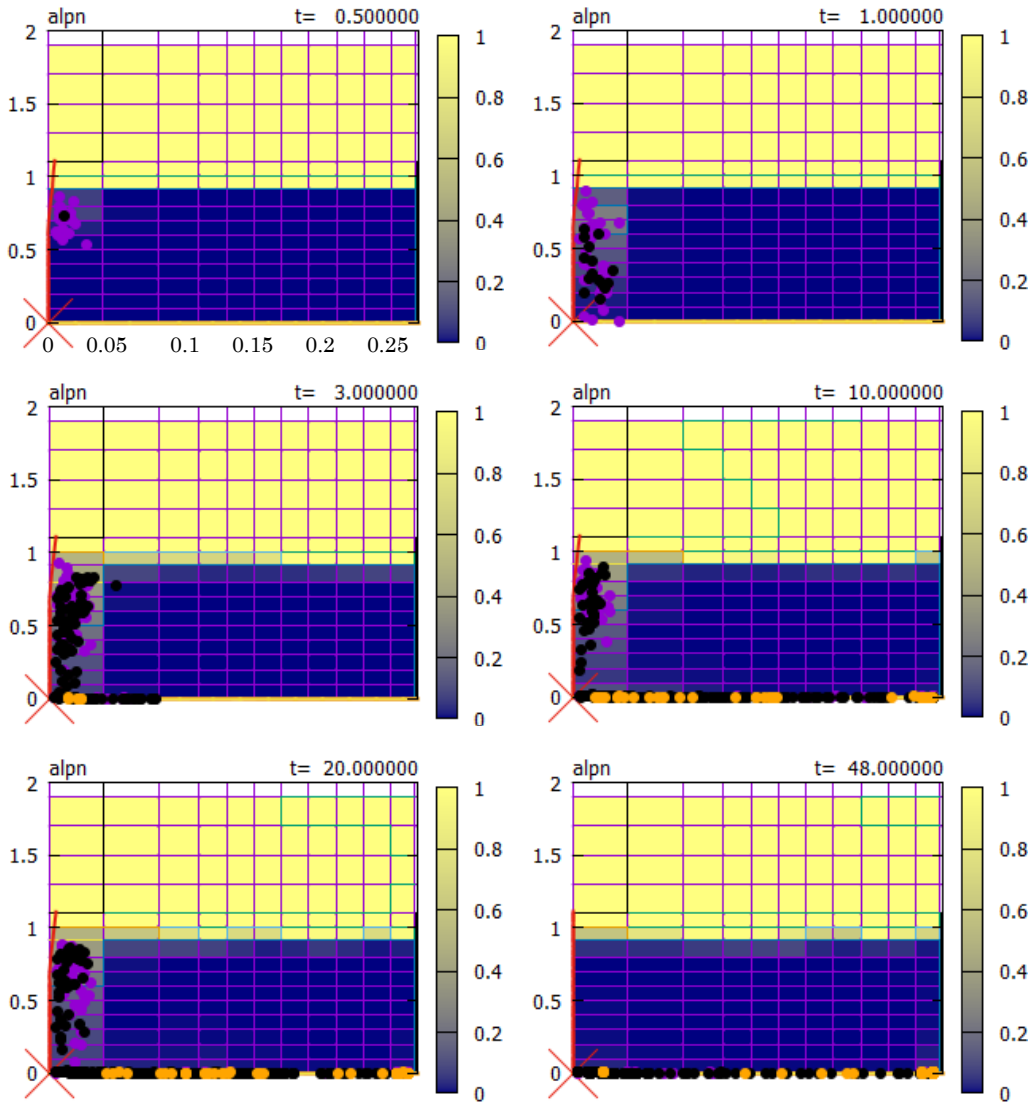


図 A1-C2-2 ボイド率及び溶融物粒子分布図

DEFOR-A1 (キャッチャー3)

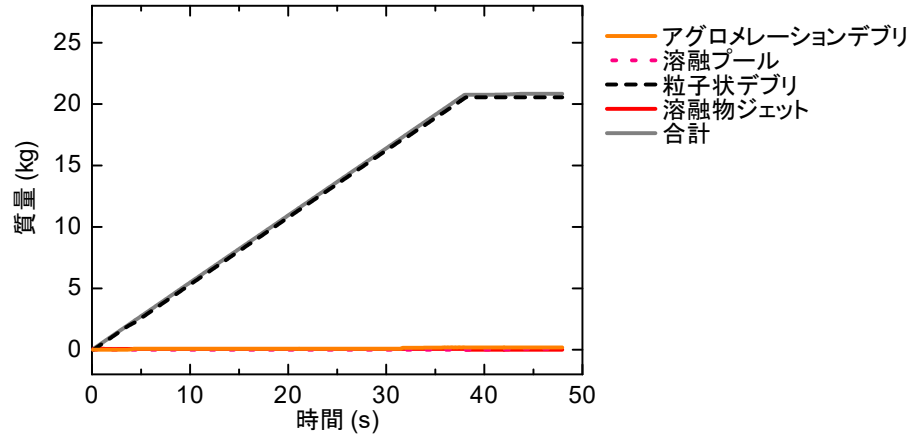


図 A1-C3-1 デブリの状態別質量の履歴

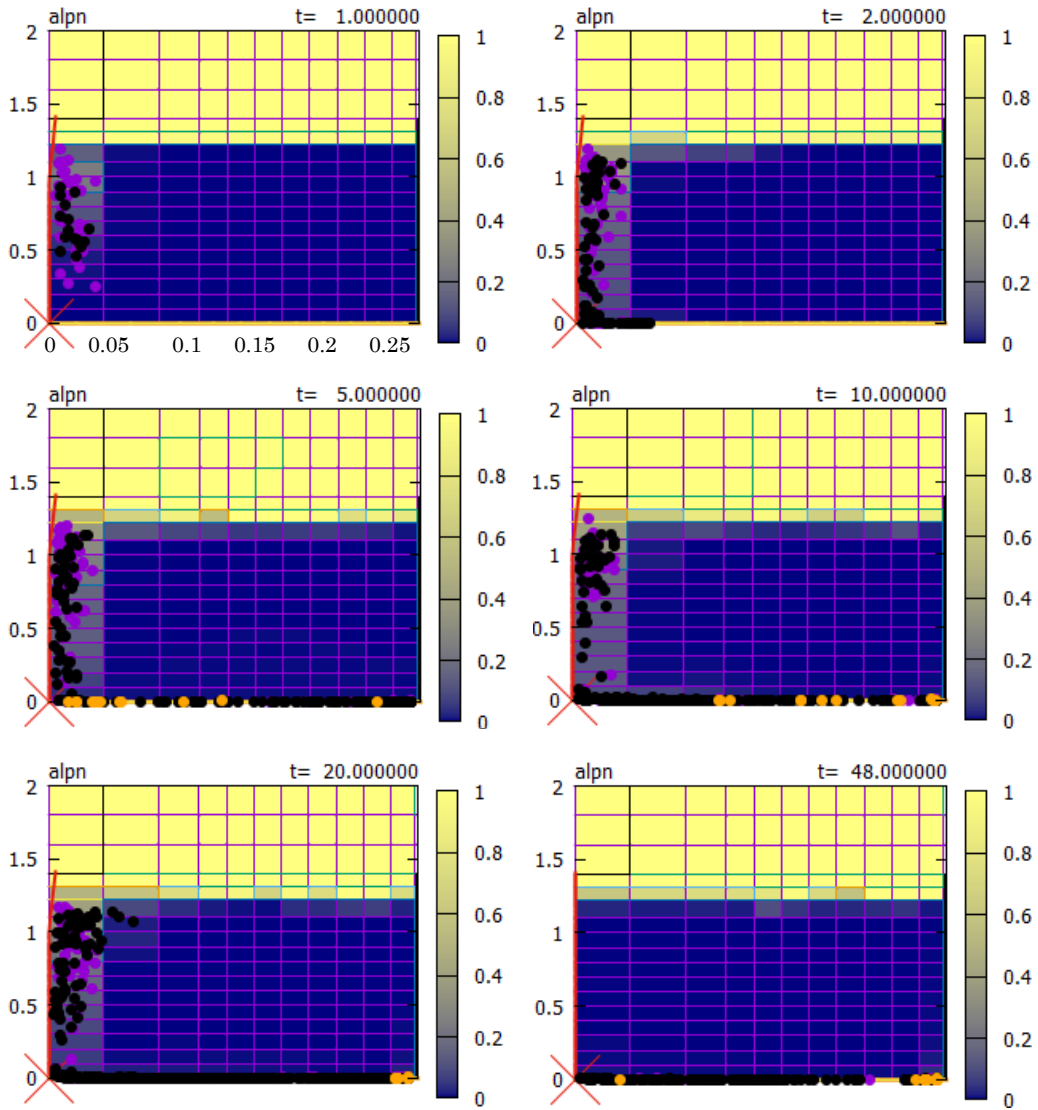


図 A1-C3-2 ボイド率及び溶融物粒子分布図

DEFOR-A1 (キャッチャー4)

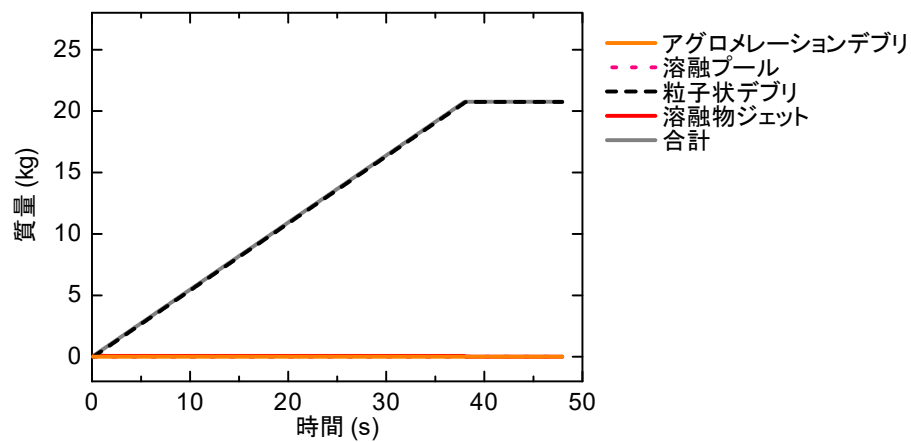


図 A1-C4-1 デブリの状態別質量の履歴

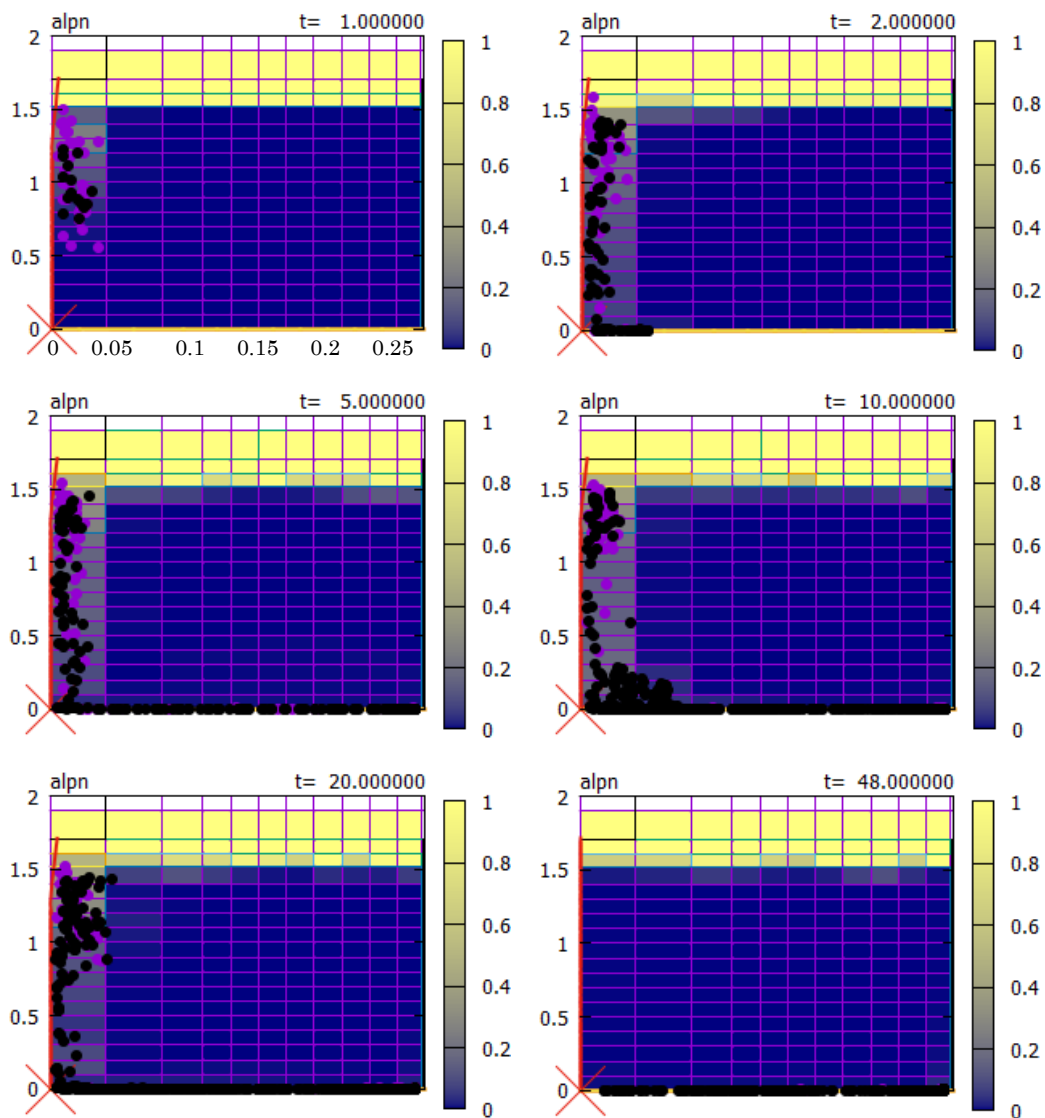


図 A1-C4-2 ボイド率及び熔融物粒子分布図

DEFOR-A2 (キャッチャー1)

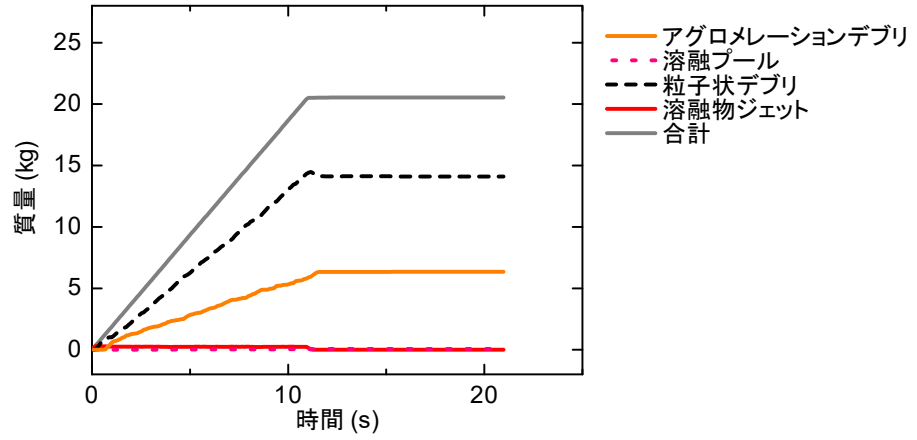


図 A2-C1-1 デブリの状態別質量の履歴

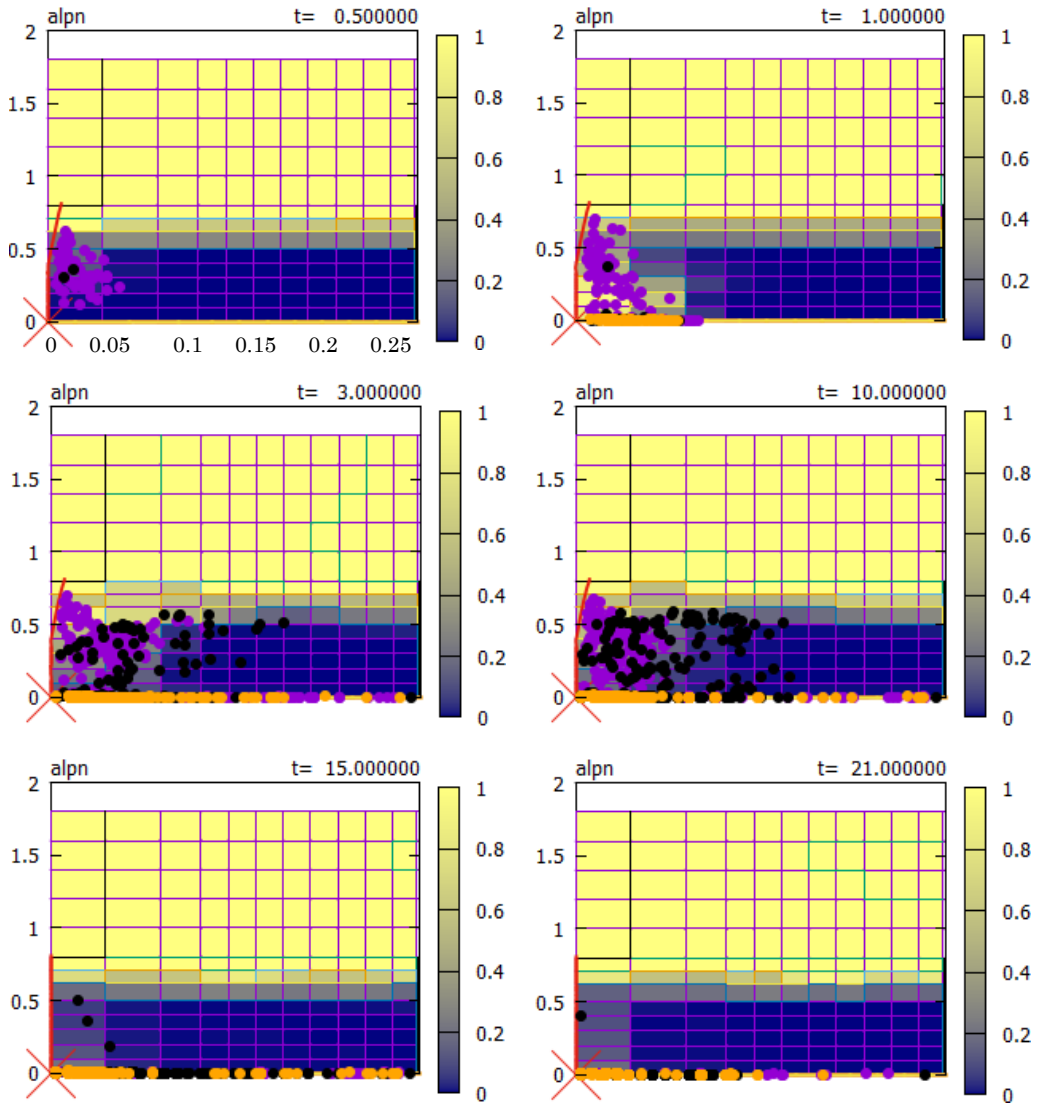


図 A2-C1-2 ボイド率及び熔融物粒子分布図

DEFOR-A2 (キャッチャー2)

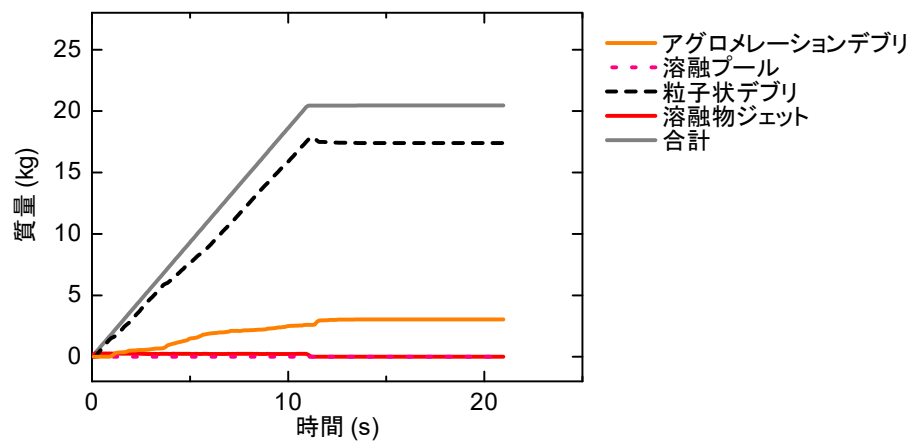


図 A2-C2-1 デブリの状態別質量の履歴

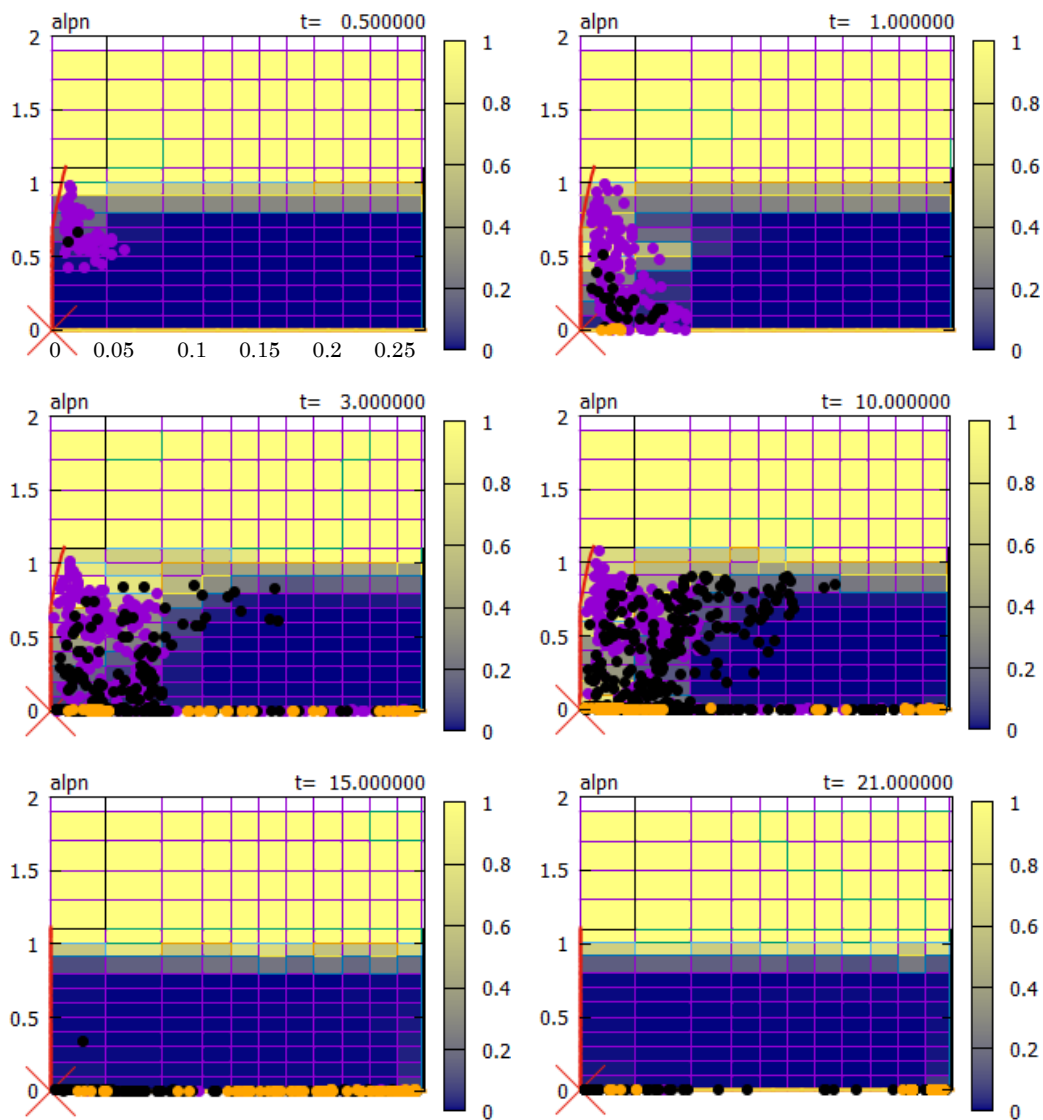


図 A2-C2-2 ボイド率及び溶融物粒子分布図

DEFOR-A2 (キャッチャー3)

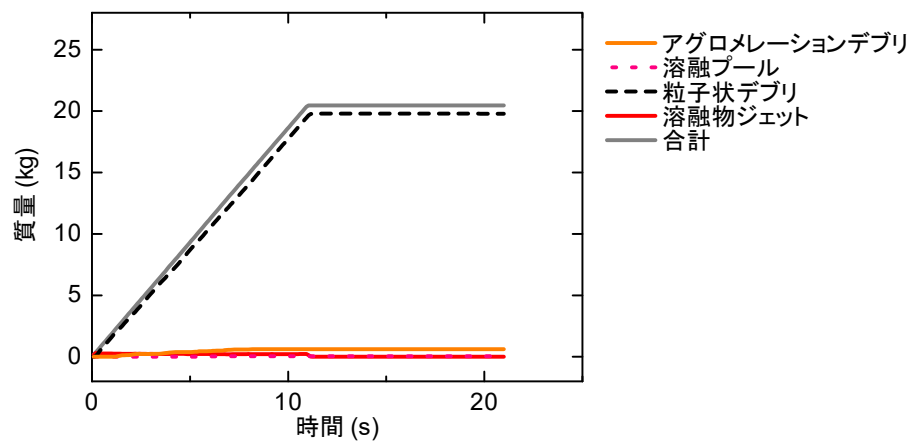


図 A2-C3-1 デブリの状態別質量の履歴

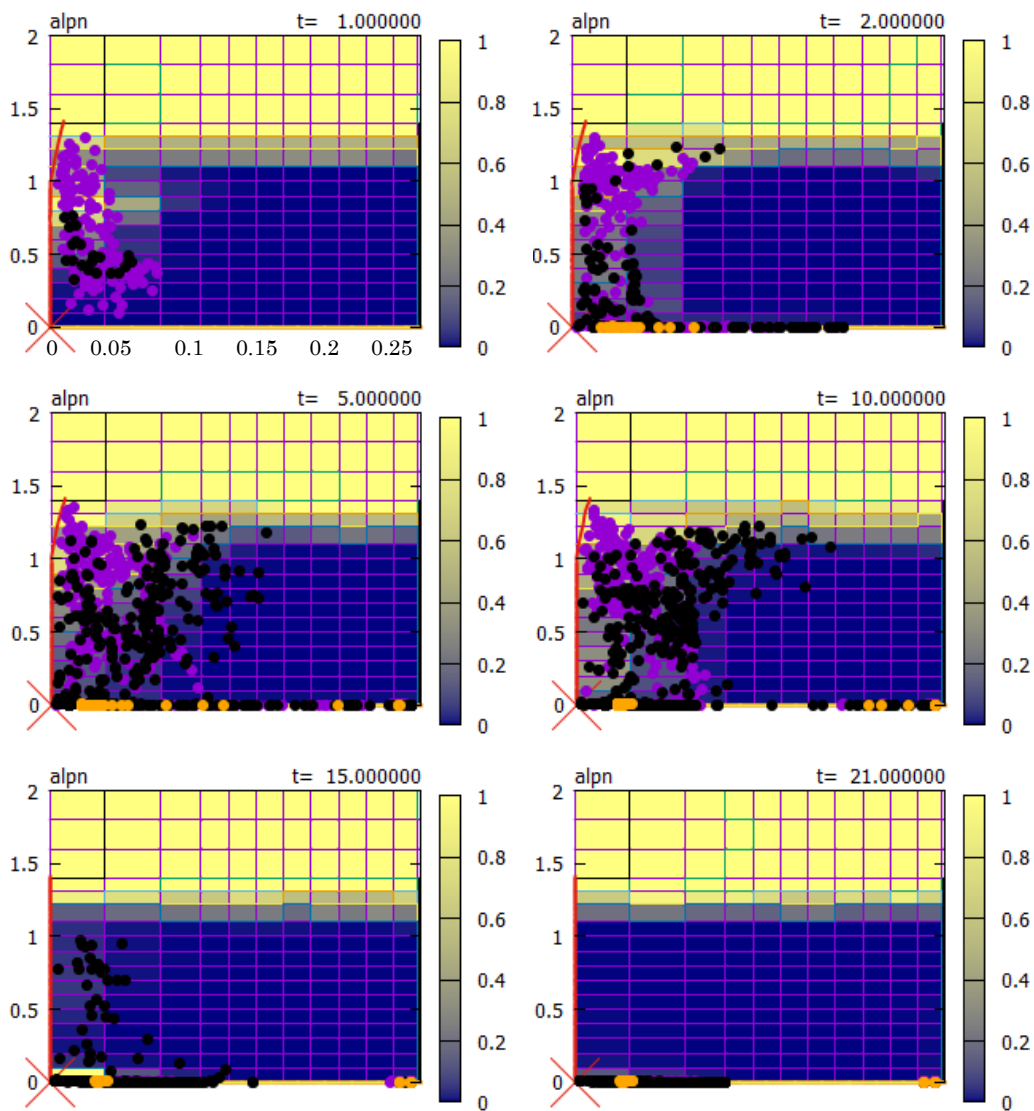


図 A2-C3-2 ボイド率及び熔融物粒子分布図

DEFOR-A2 (キャッチャー4)

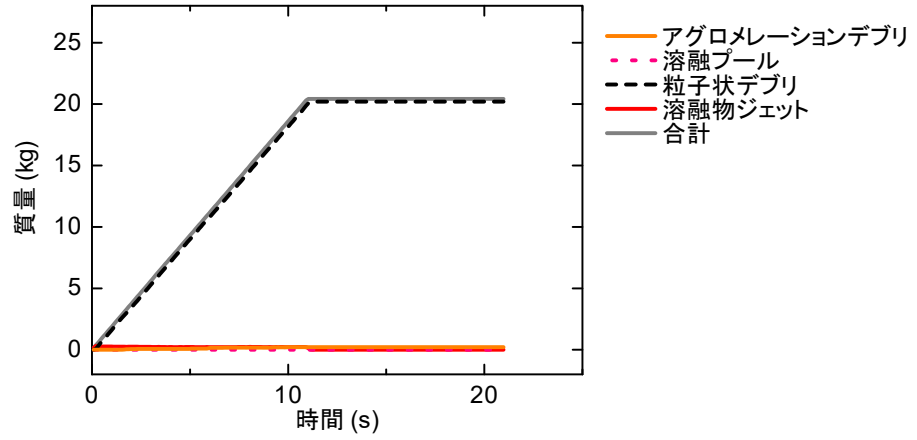


図 A2-C4-1 デブリの状態別質量の履歴

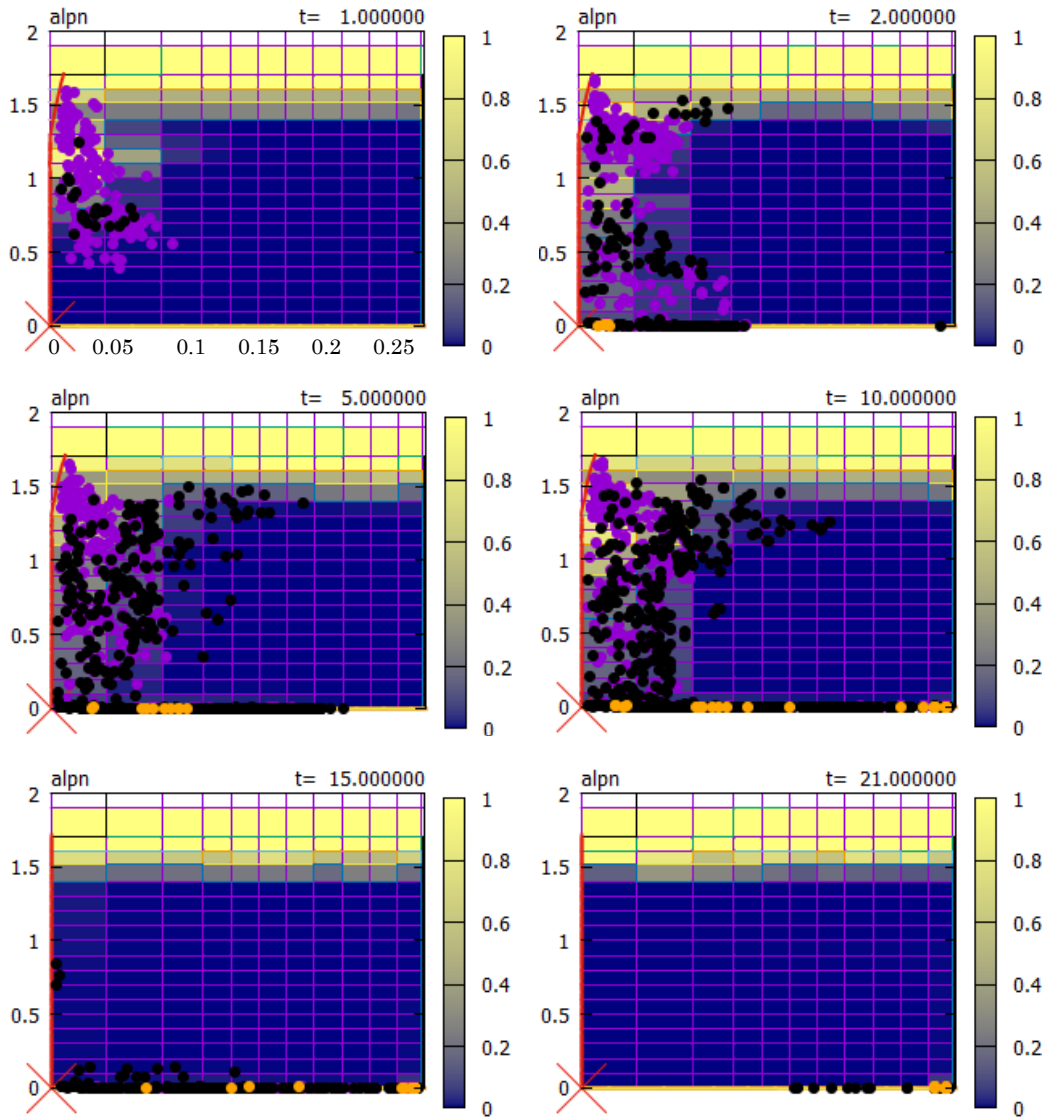


図 A2-C4-2 ボイド率及び溶融物粒子分布図

DEFOR-A4 (キャッチャー1)

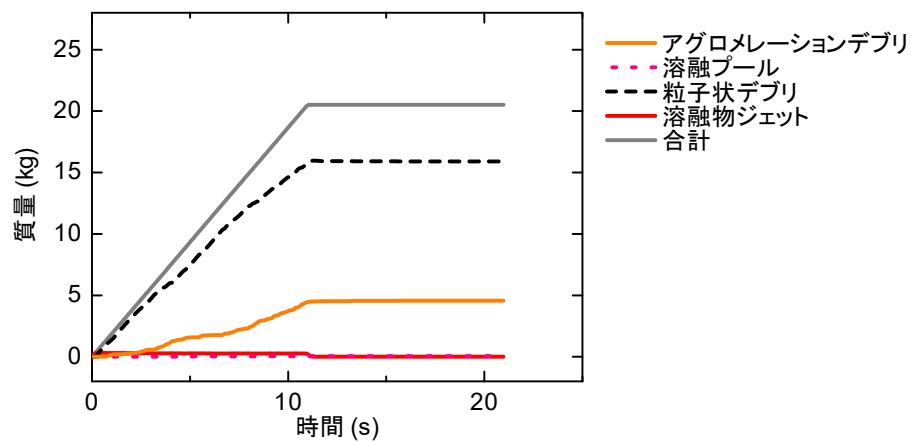


図 A4-C1-1 デブリの状態別質量の履歴

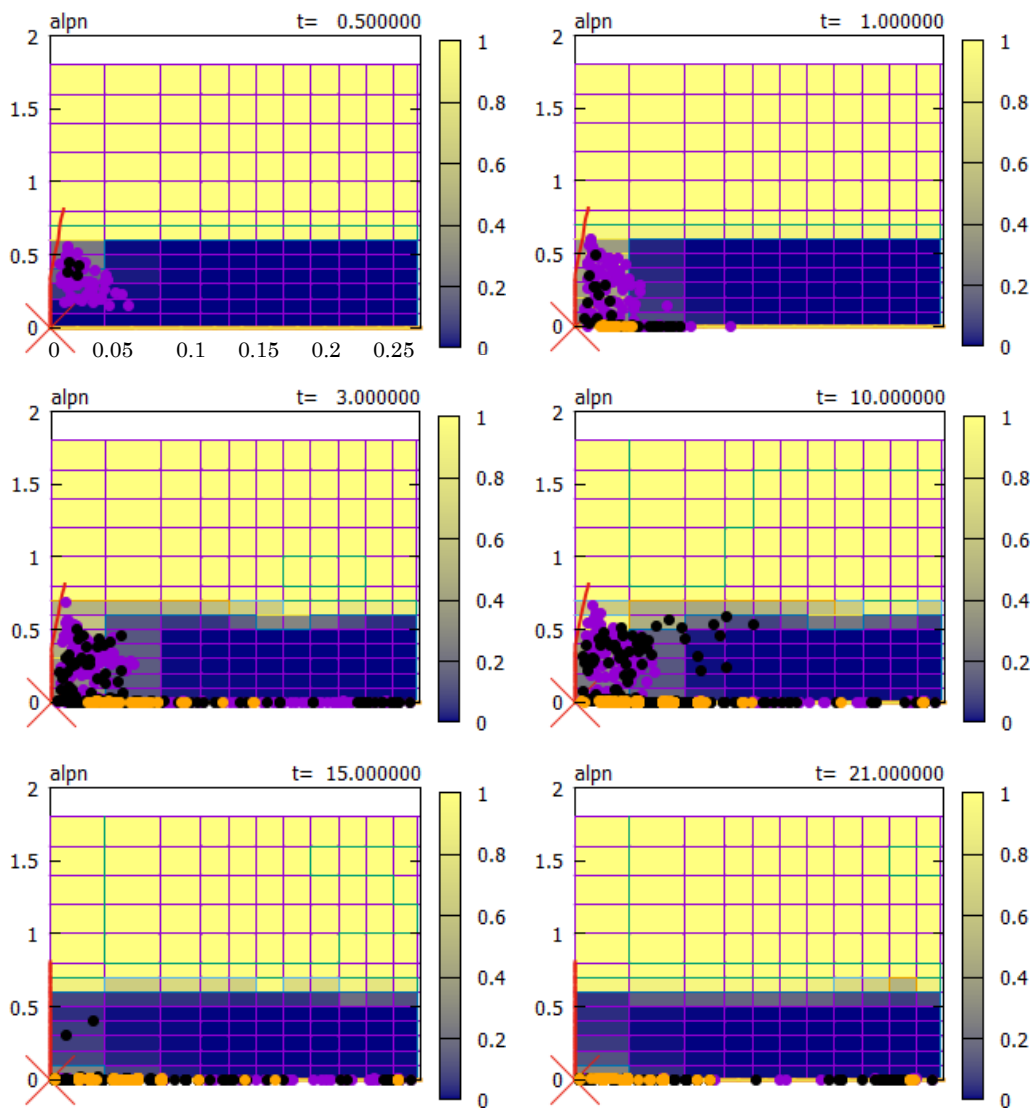


図 A4-C1-2 ボイド率及び溶融物粒子分布図

DEFOR-A4 (キャッチャー2)

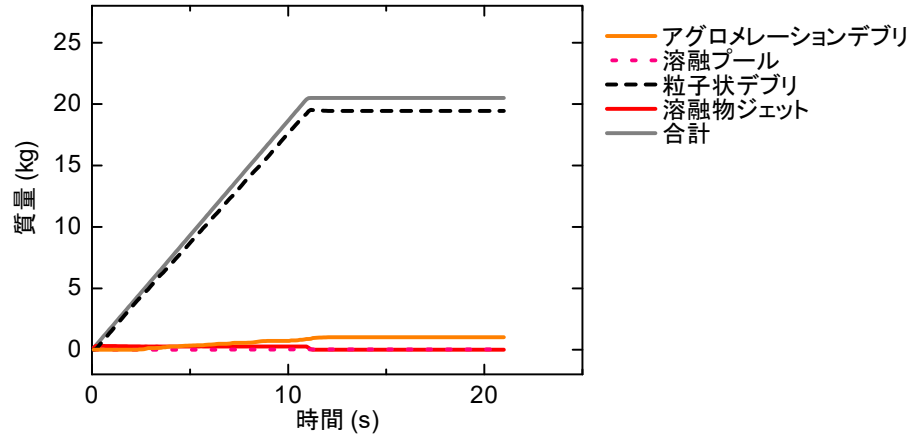


図 A4-C2-1 デブリの状態別質量の履歴

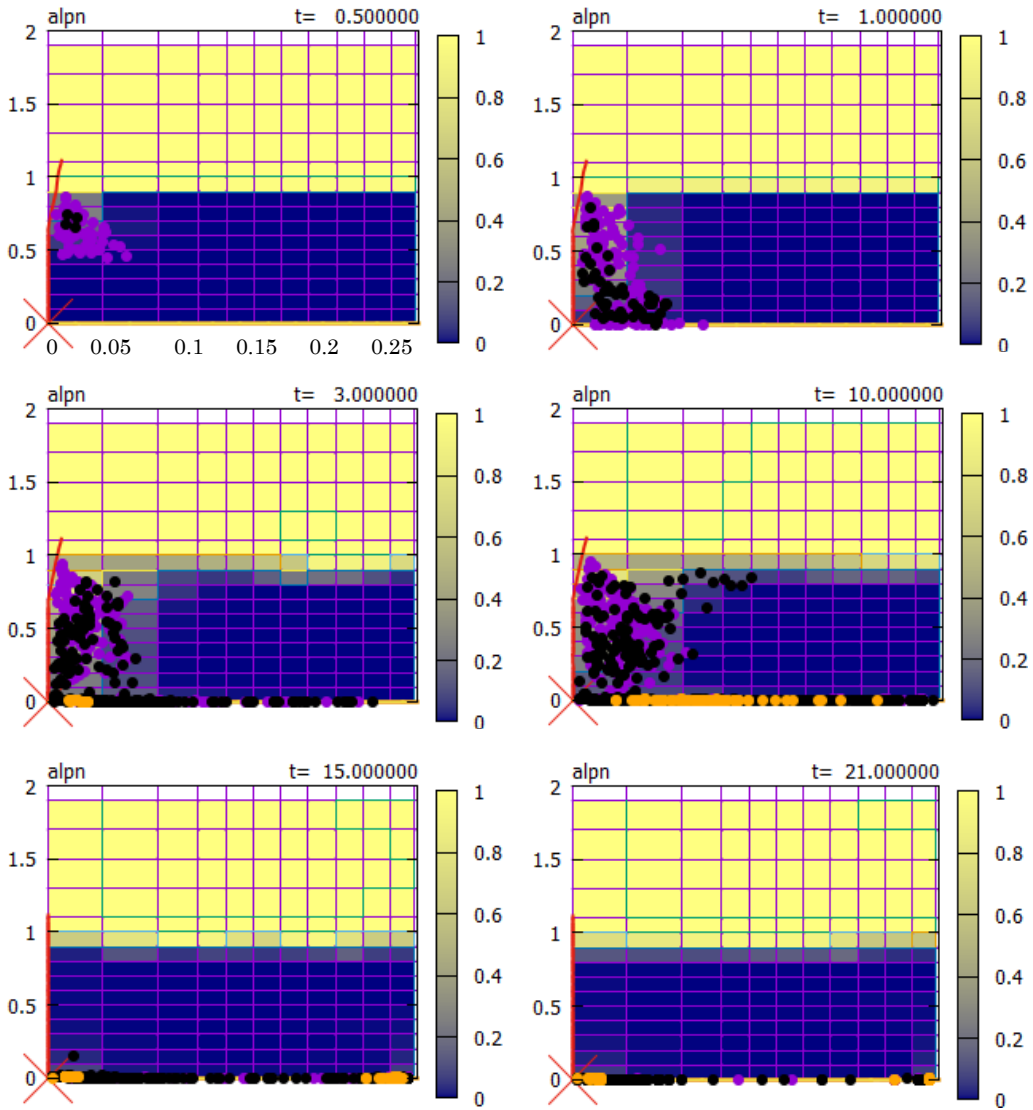


図 A4-C2-2 ボイド率及び溶融物粒子分布図

DEFOR-A4 (キャッチャー3)

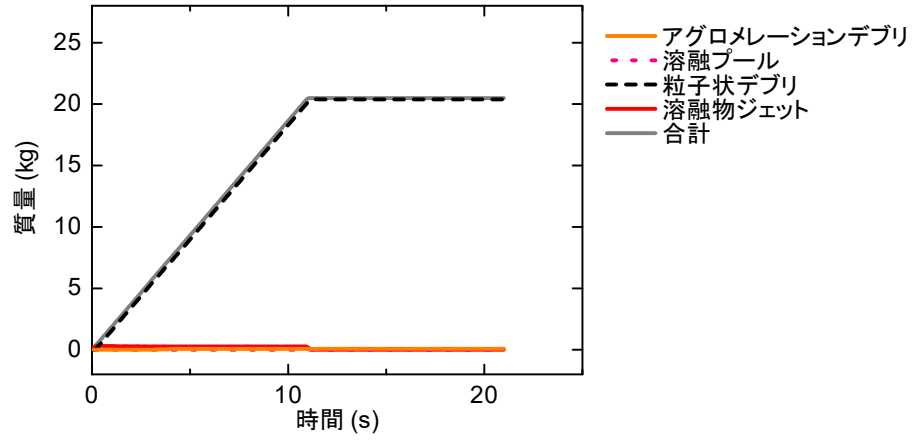


図 A4-C3-1 デブリの状態別質量の履歴

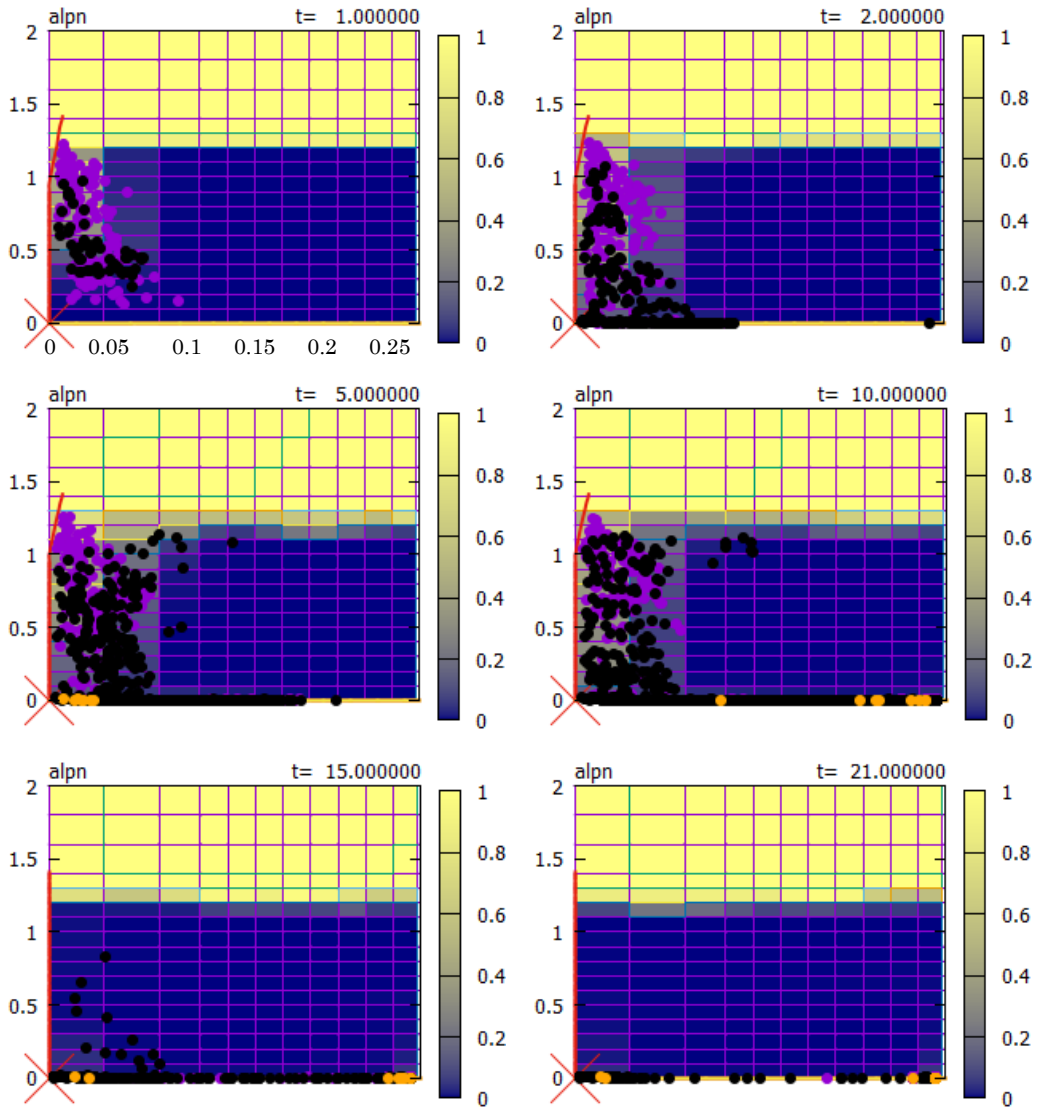


図 A4-C3-2 ボイド率及び溶融物粒子分布図

DEFOR-A4 (キャッチャー4)

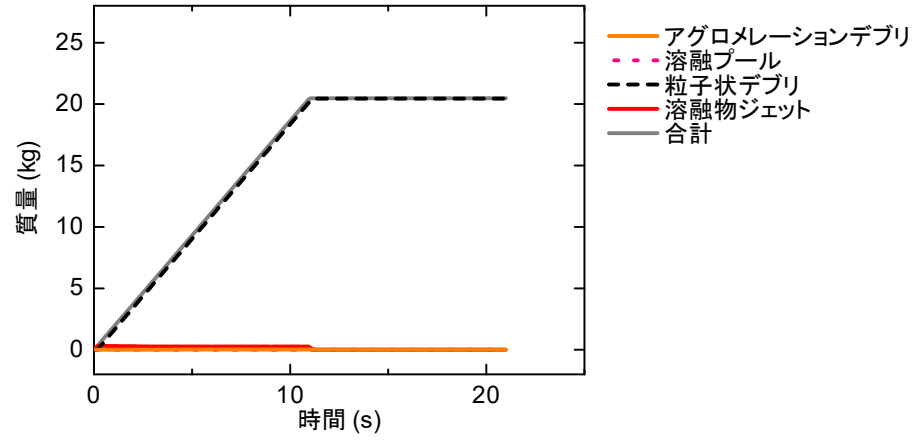


図 A4-C4-1 デブリの状態別質量の履歴

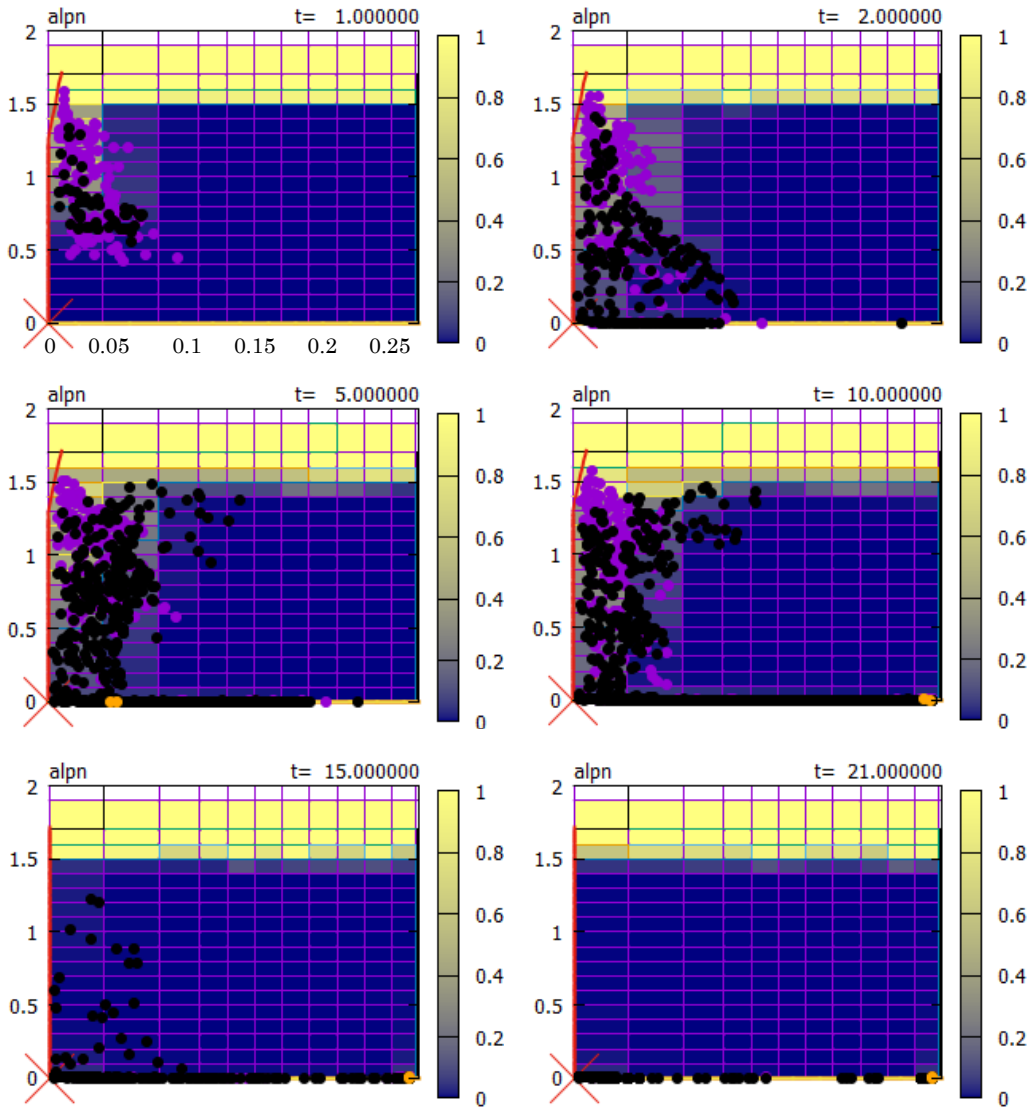


図 A4-C4-2 ボイド率及び溶融物粒子分布図

DEFOR-A5 (キャッチャー1)

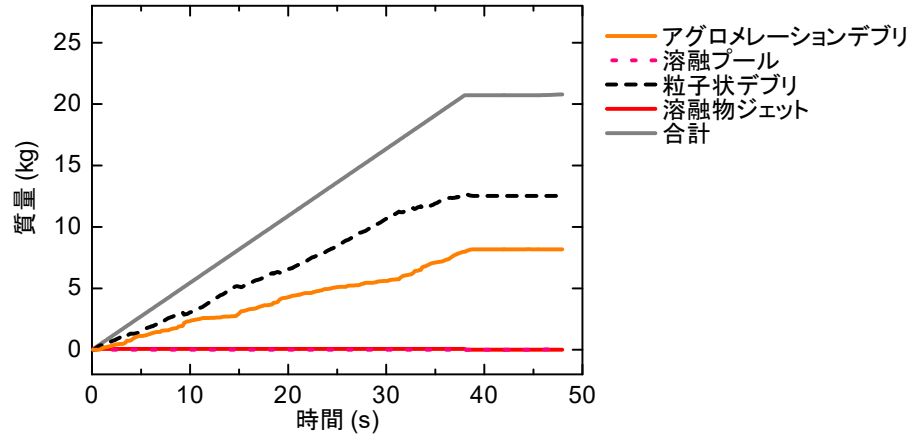


図 A5-C1-1 デブリの状態別質量の履歴

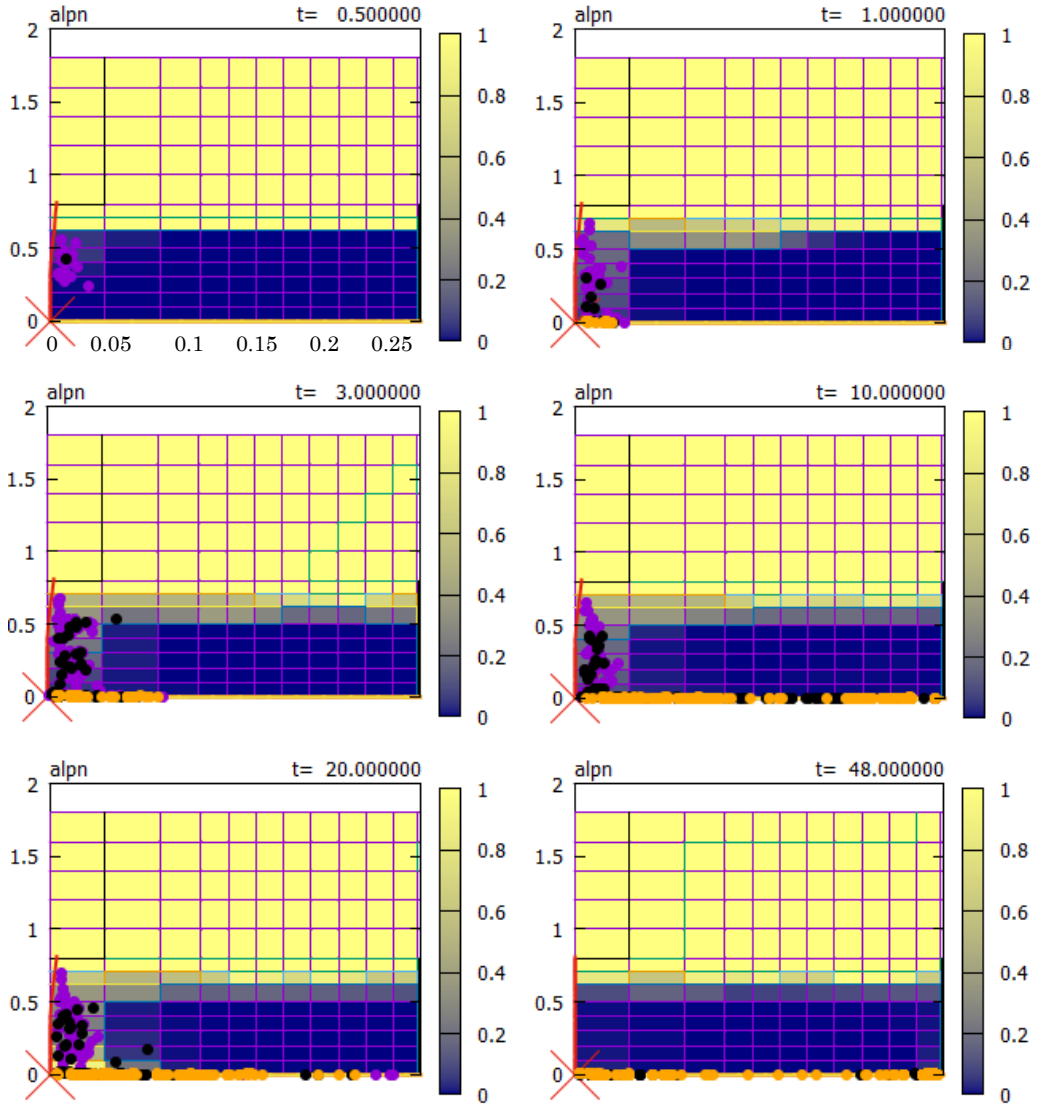


図 A5-C1-2 ボイド率及び熔融物粒子分布図

DEFOR-A5 (キャッチャー2)

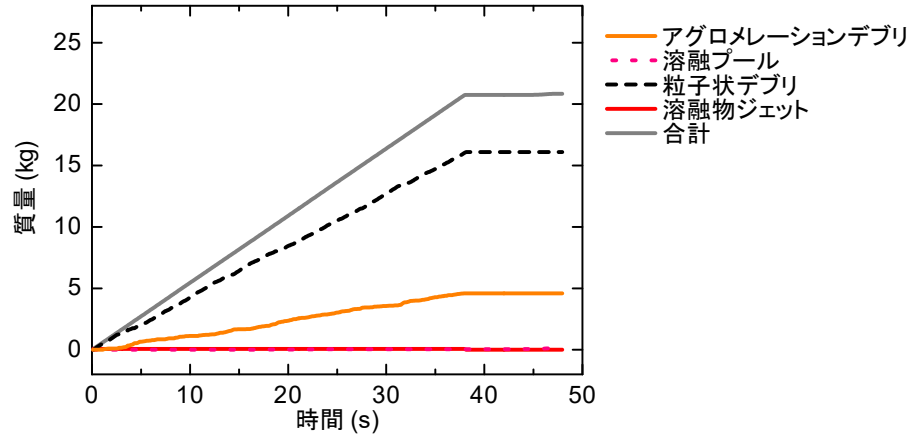


図 A5-C2-1 デブリの状態別質量の履歴

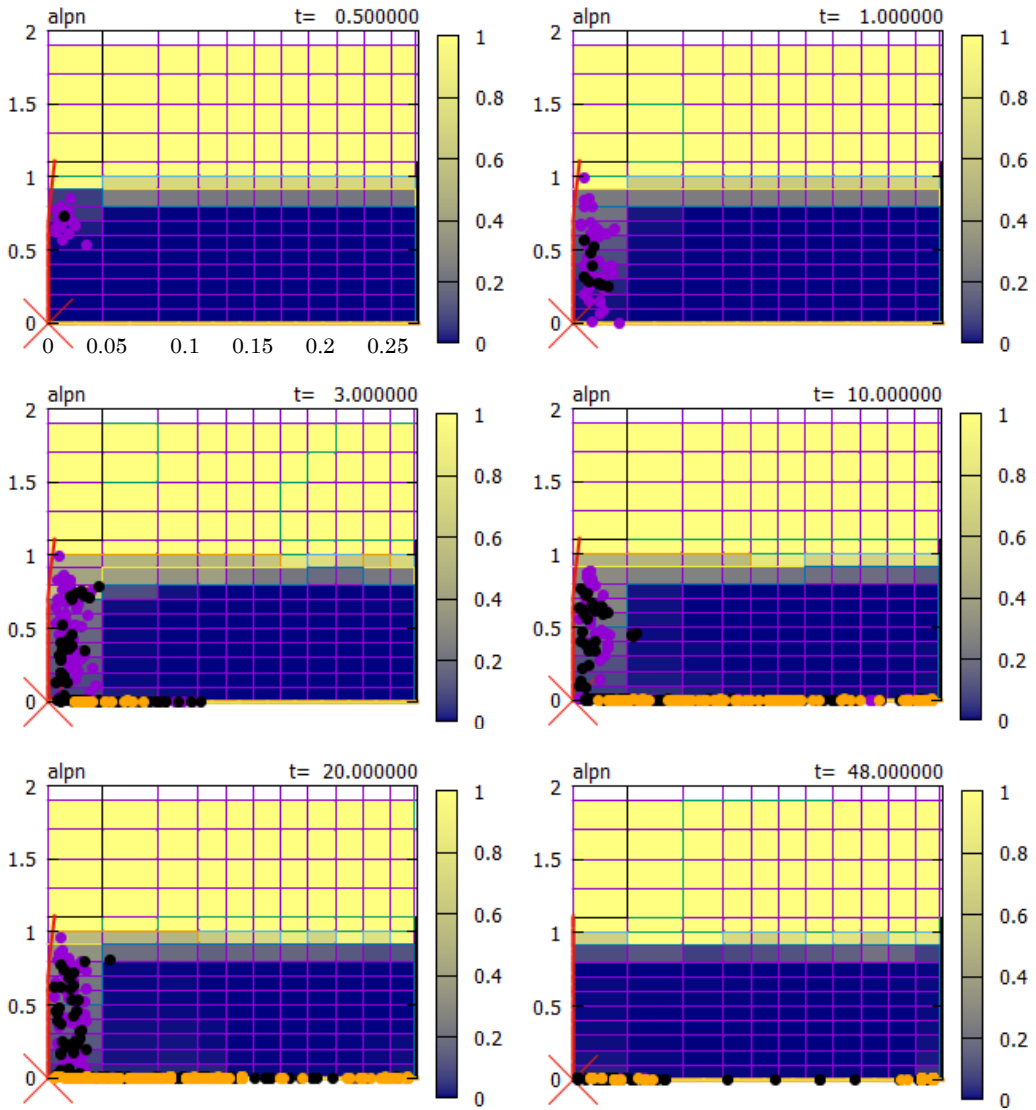


図 A5-C2-2 ボイド率及び溶融物粒子分布図

DEFOR-A5 (キャッチャー3)

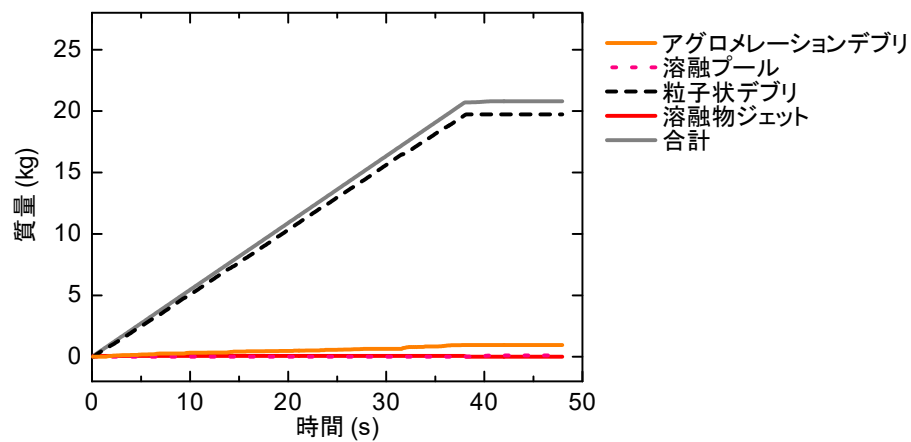


図 A5-C3-1 デブリの状態別質量の履歴

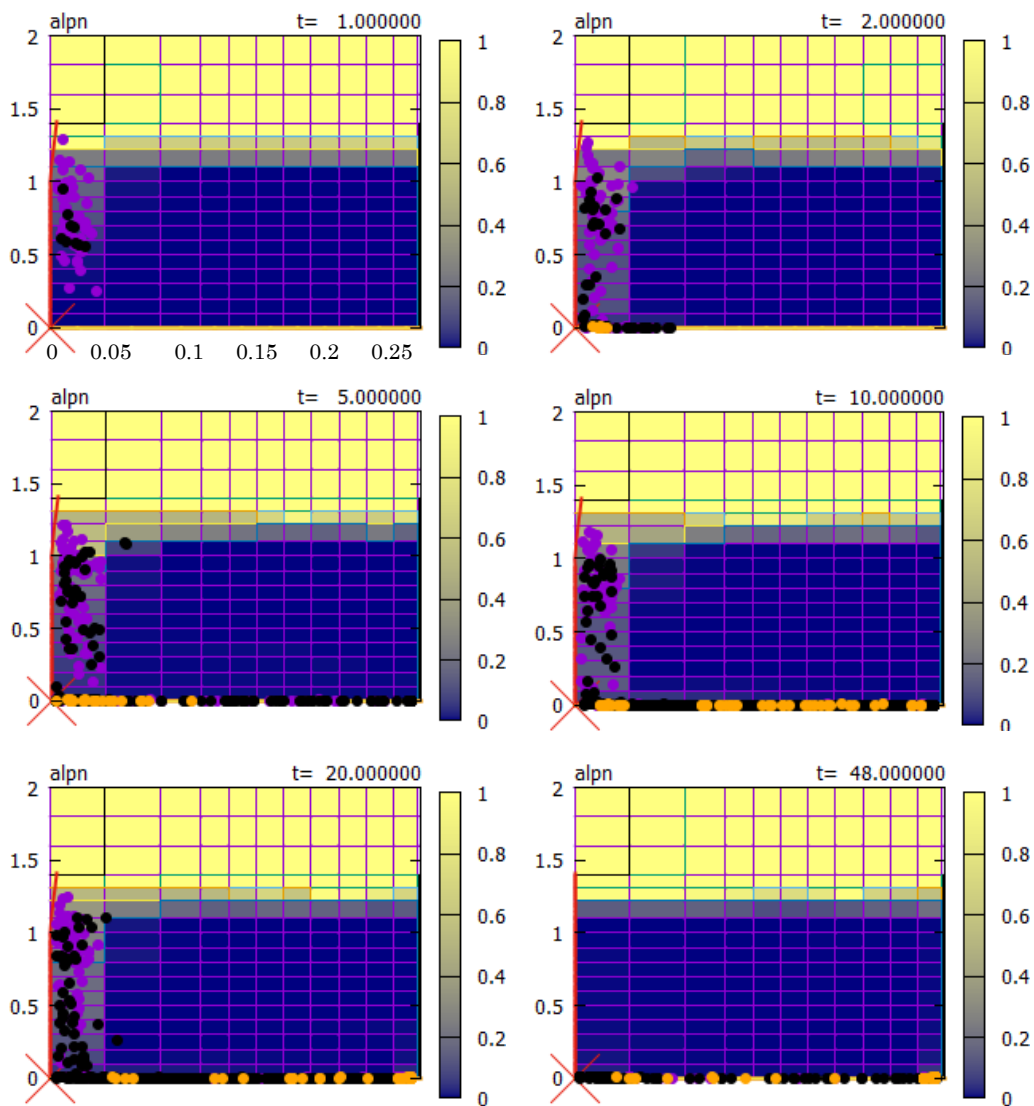


図 A5-C3-2 ボイド率及び溶融物粒子分布図

DEFOR-A5 (キャッチャー4)

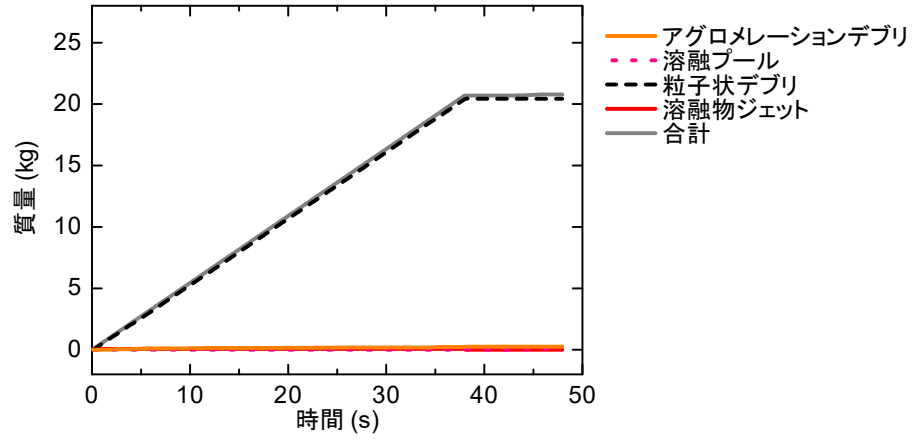


図 A5-C4-1 デブリの状態別質量の履歴

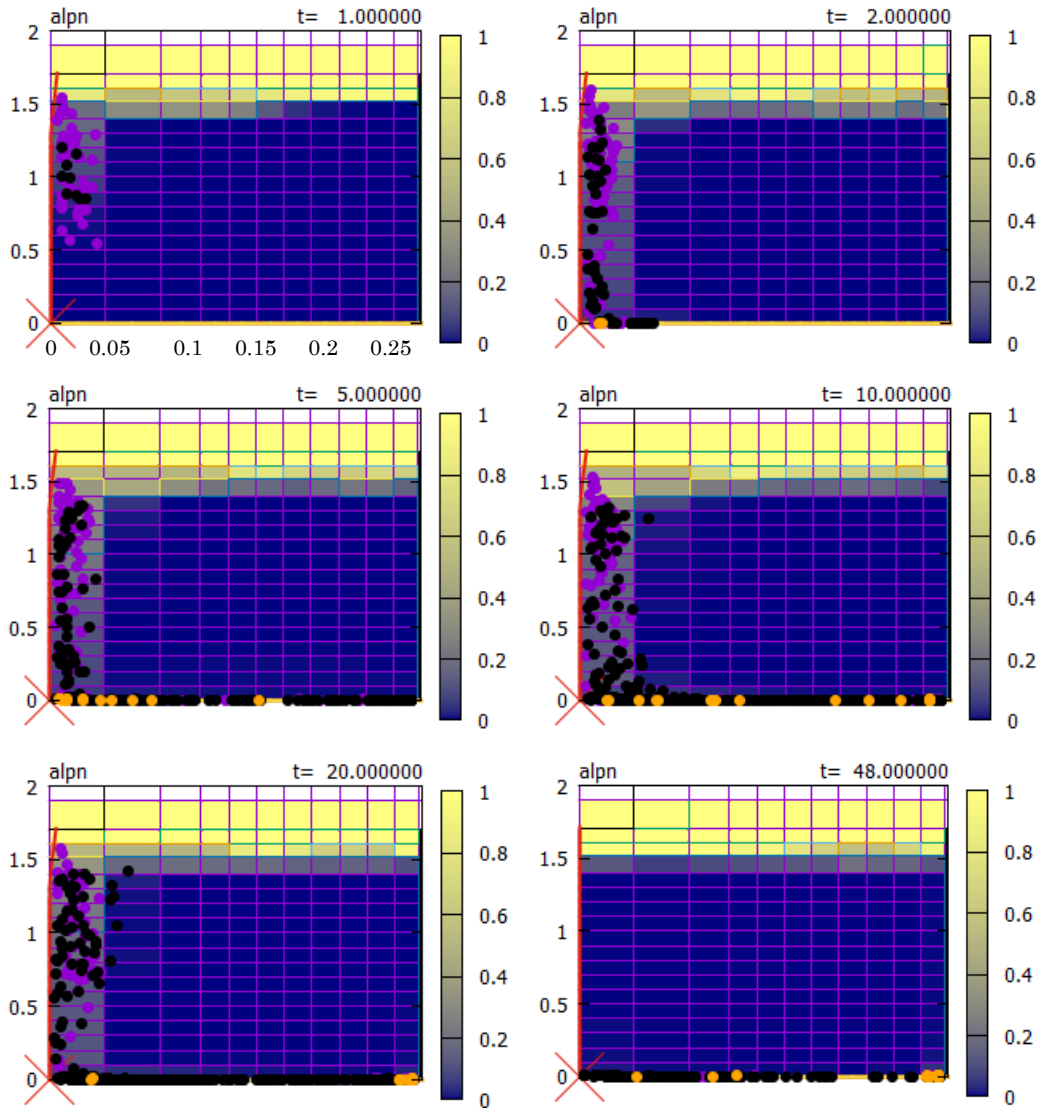


図 A5-C4-2 ボイド率及び溶融物粒子分布図

DEFOR-A6 (キャッチャー1)

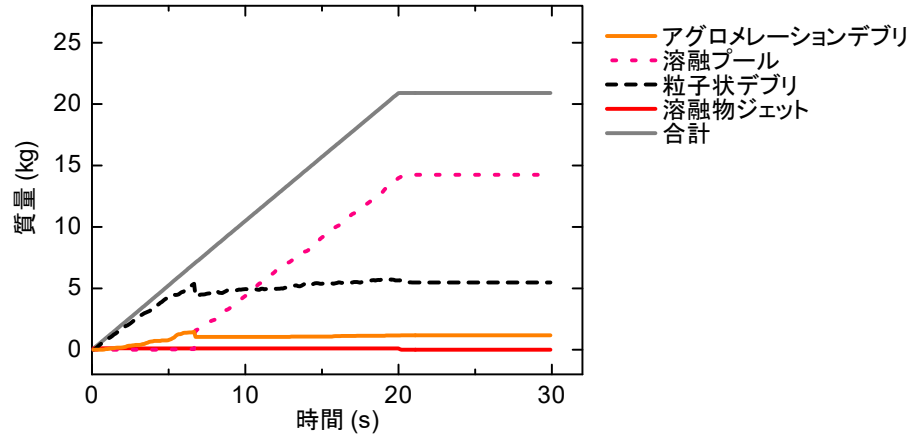


図 A6-C1-1 デブリの状態別質量の履歴

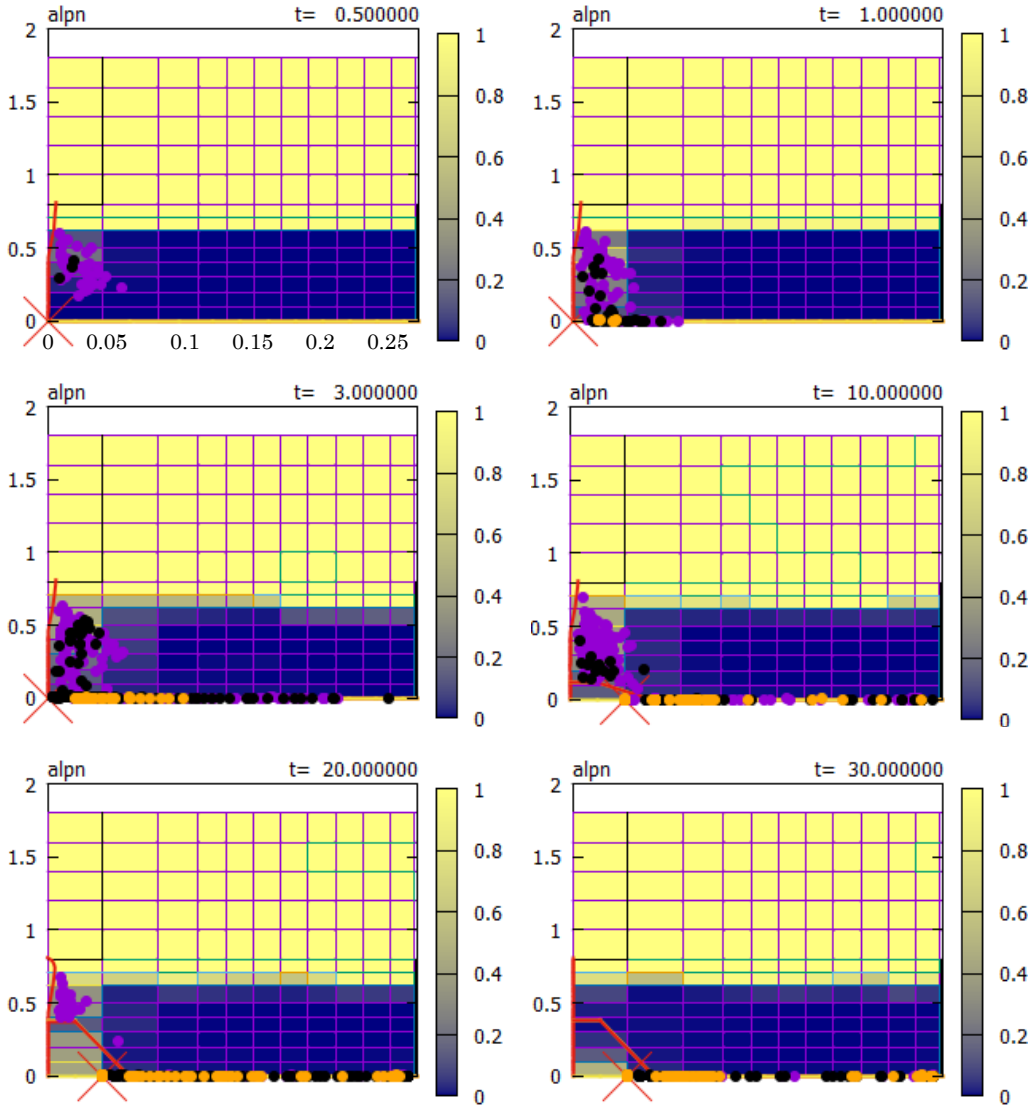


図 A6-C1-2 ボイド率及び熔融物粒子分布図

DEFOR-A6 (キャッチャー2)

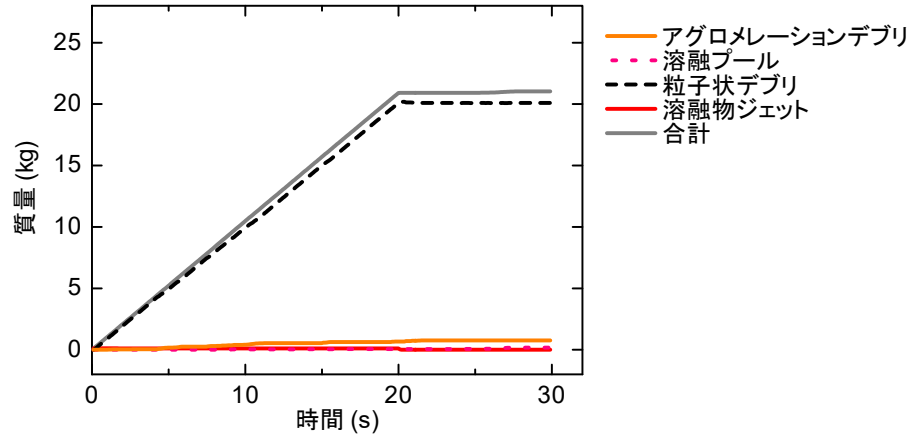


図 A6-C2-1 デブリの状態別質量の履歴

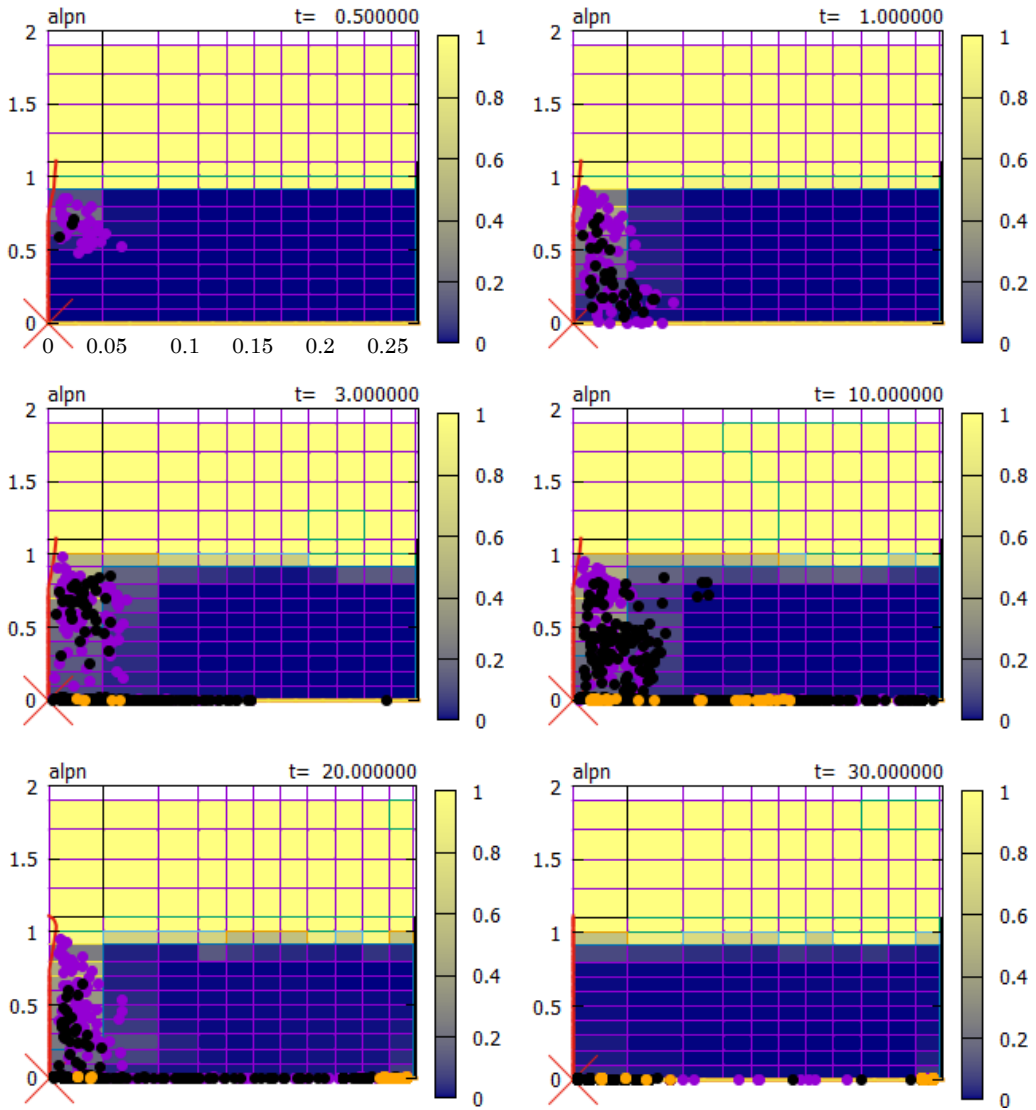


図 A6-C2-2 ボイド率及び溶融物粒子分布図

DEFOR-A6 (キャッチャー3)

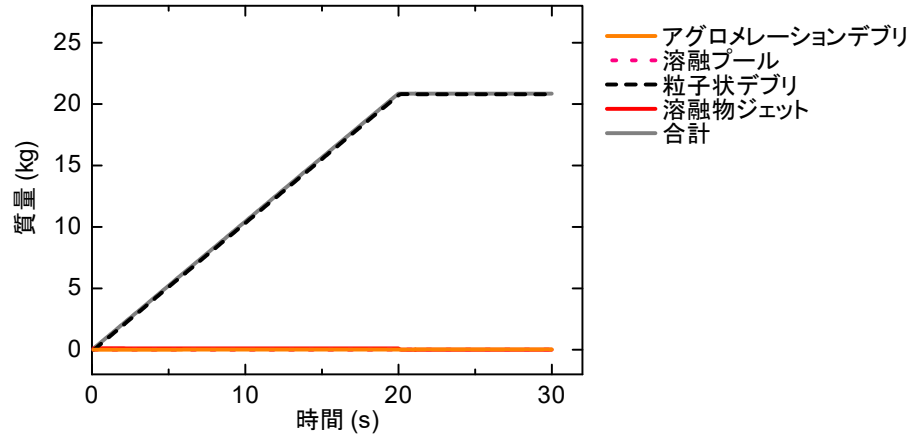


図 A6-C3-1 デブリの状態別質量の履歴

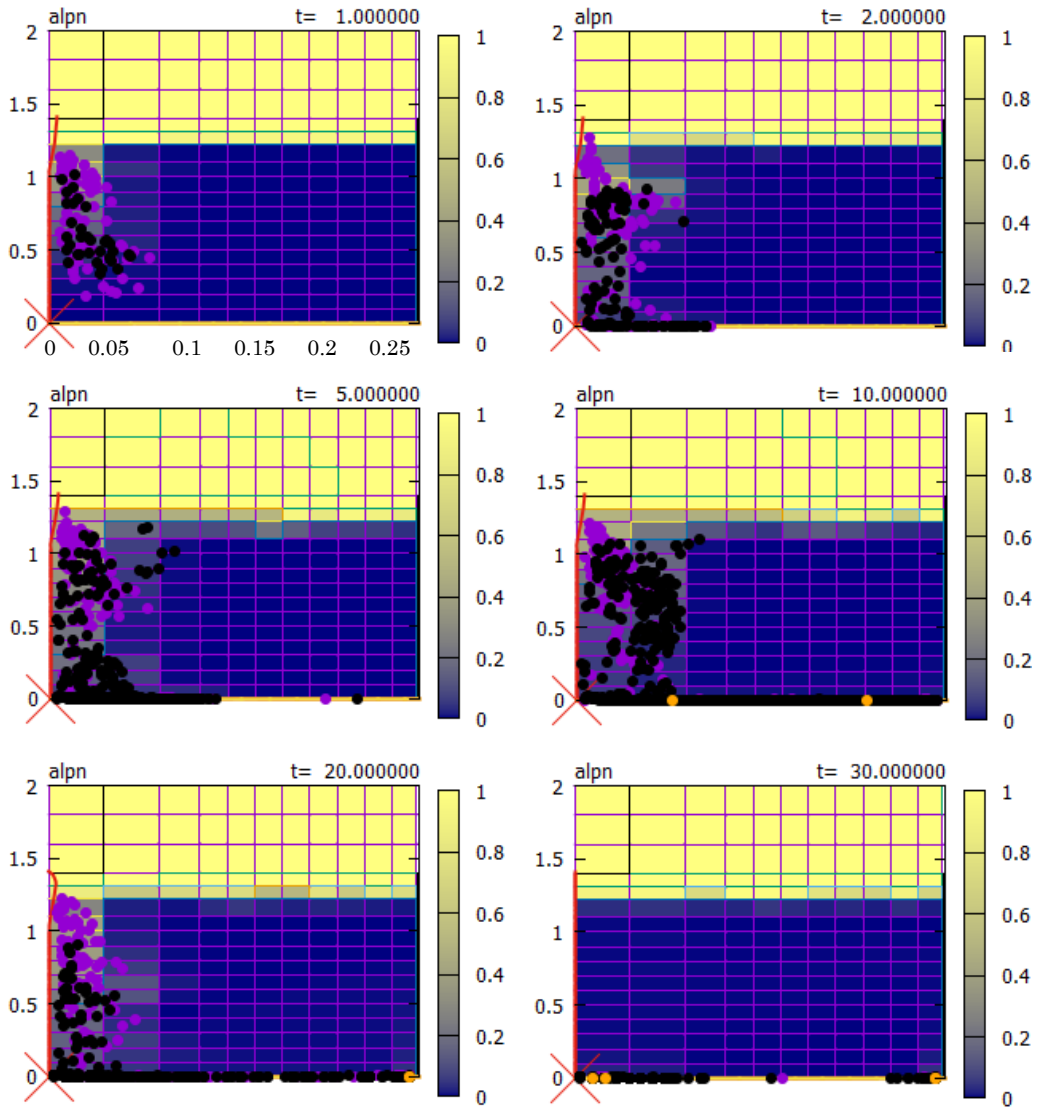


図 A6-C3-2 ボイド率及び熔融物粒子分布図

DEFOR-A6 (キャッチャー4)

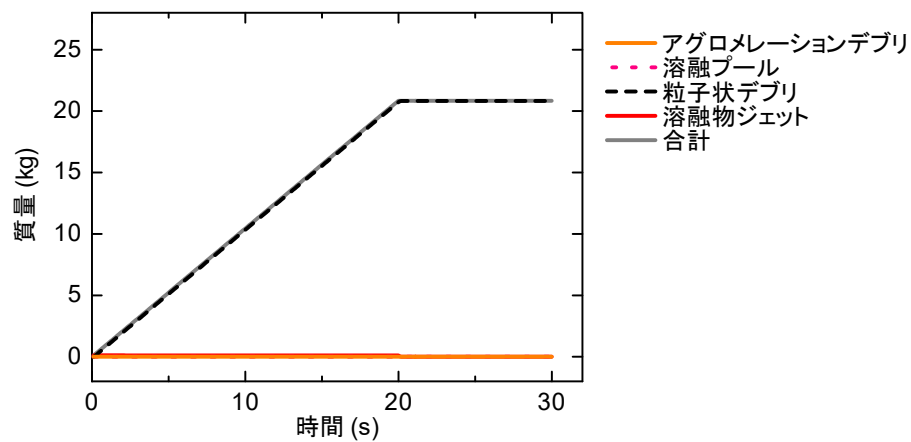


図 A6-C4-1 デブリの状態別質量の履歴

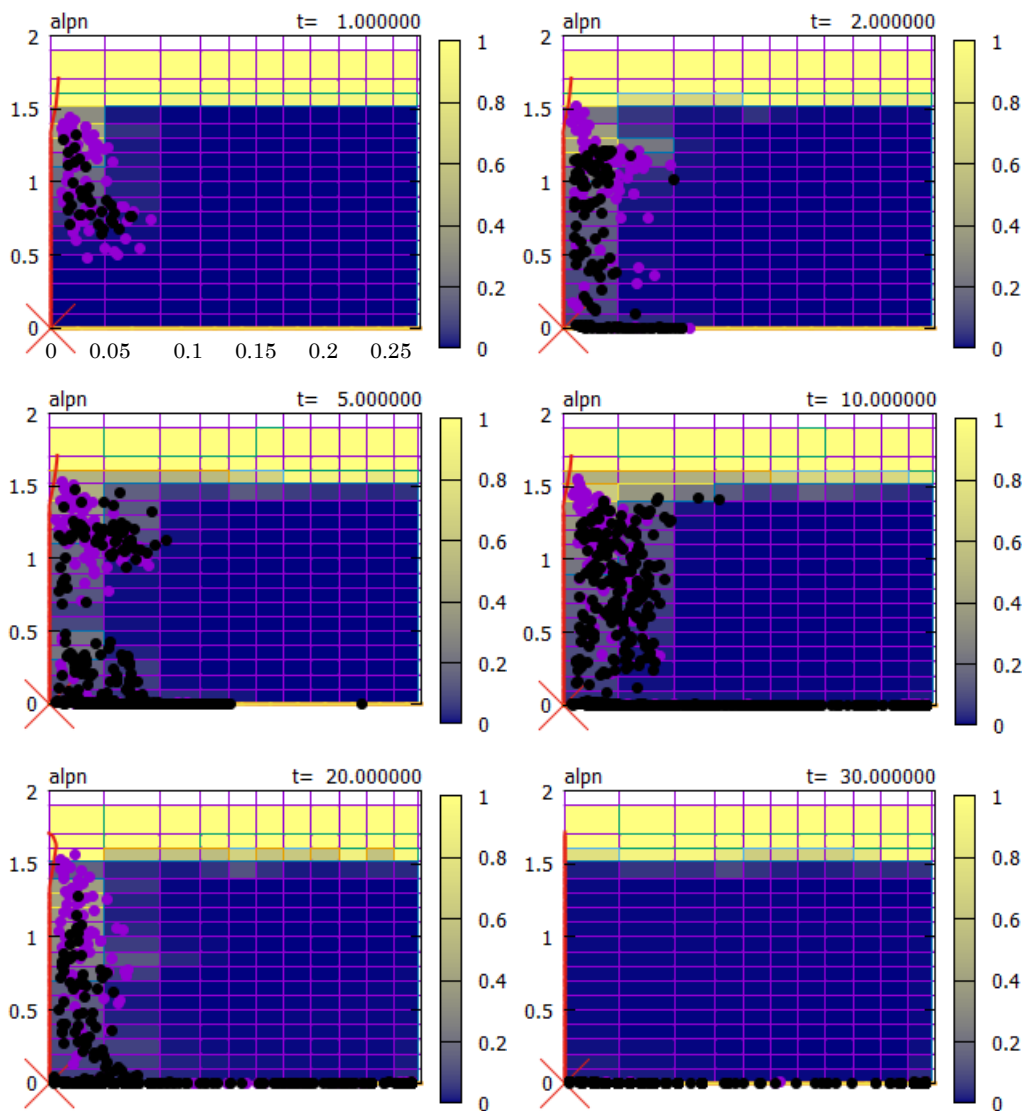


図 A6-C4-2 ボイド率及び溶融物粒子分布図

DEFOR-A7 (キャッチャー1)

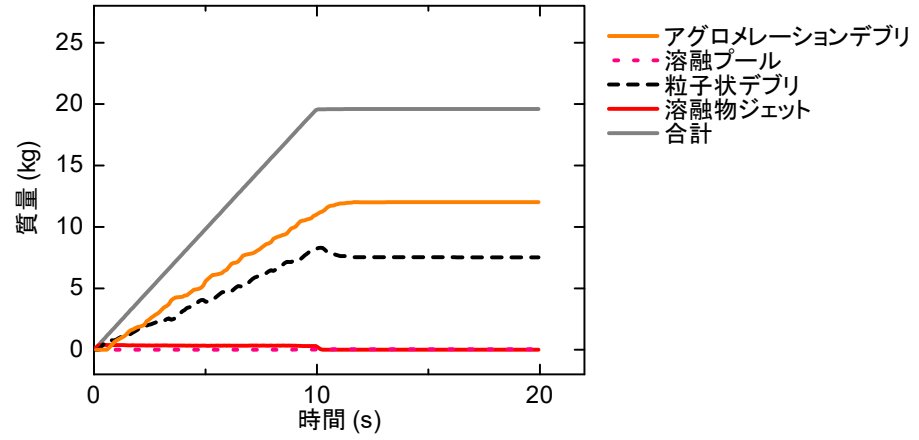


図 A7-C1-1 デブリの状態別質量の履歴

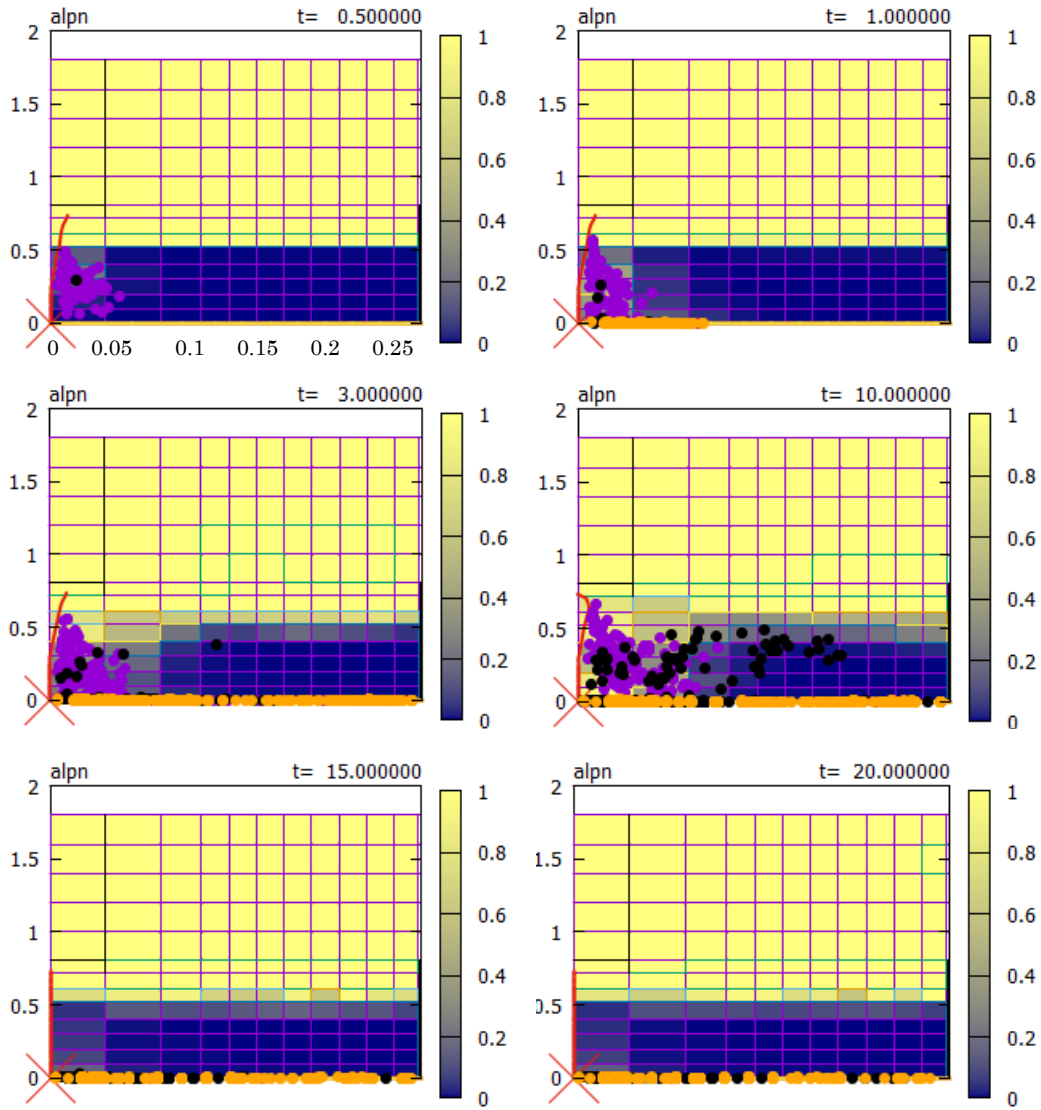


図 A7-C1-2 ボイド率及び溶融物粒子分布図

DEFOR-A7 (キャッチャー2)

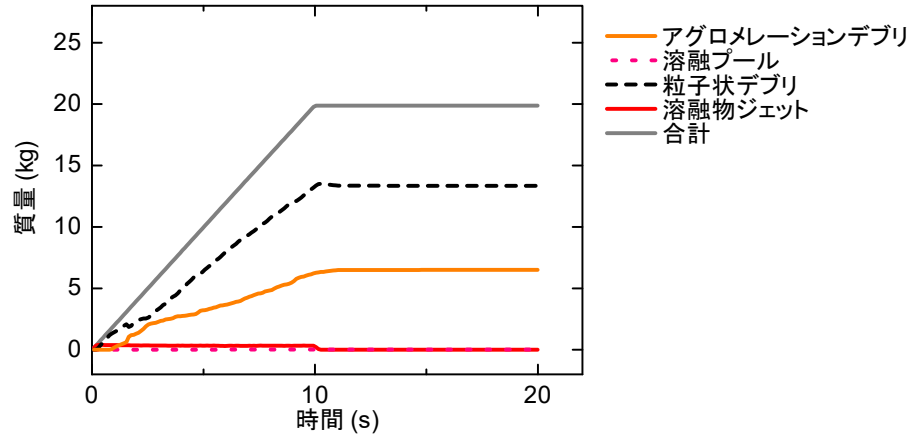


図 A7-C2-1 デブリの状態別質量の履歴

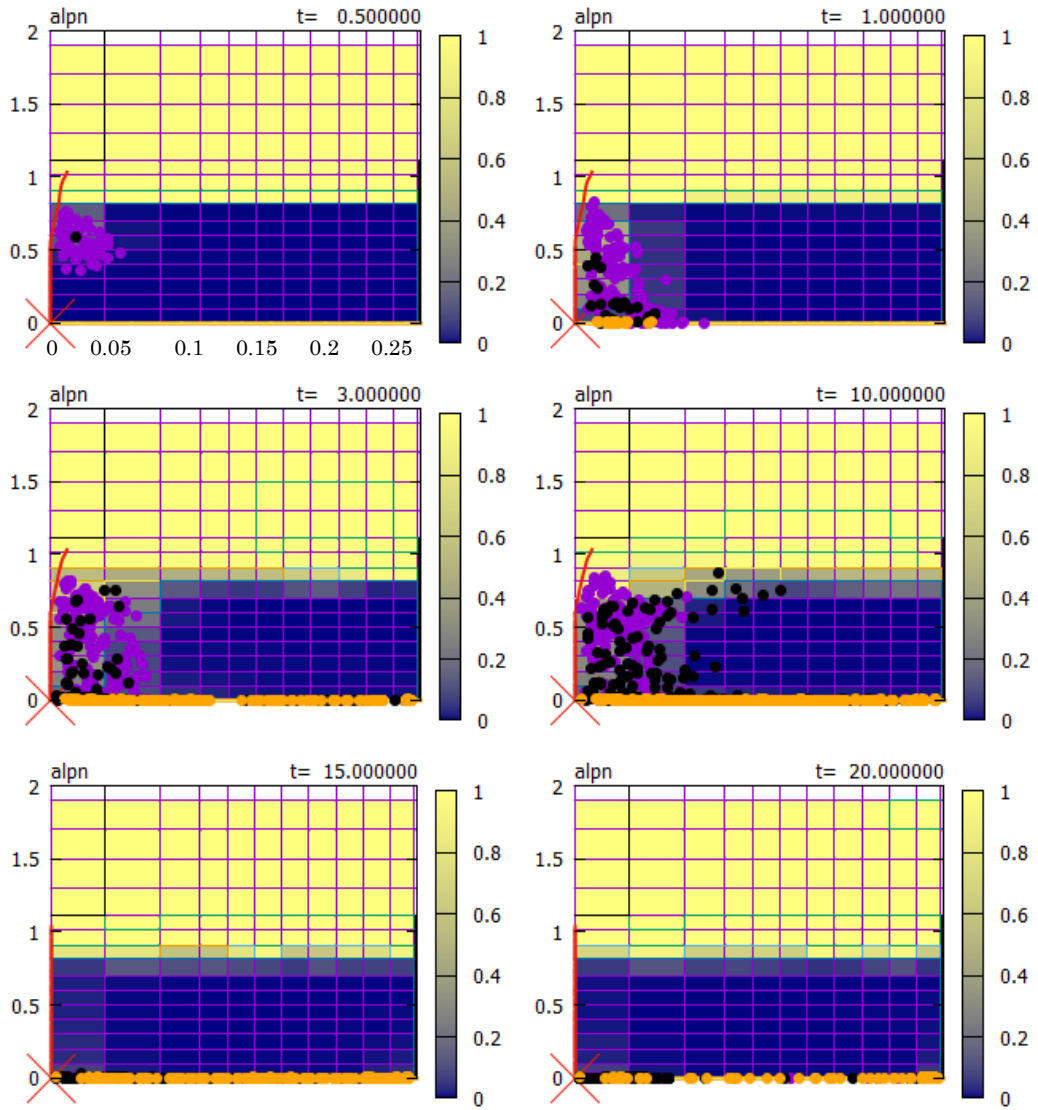


図 A7-C2-2 ボイド率及び溶融物粒子分布図

DEFOR-A7 (キャッチャー3)

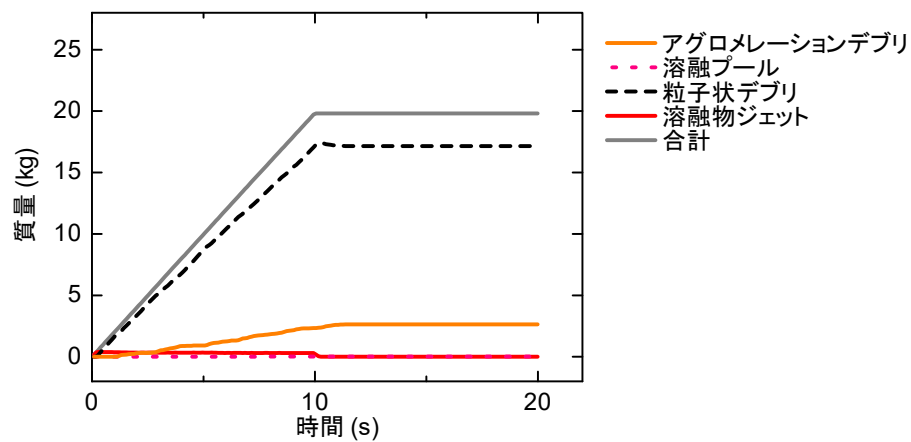


図 A7-C3-1 デブリの状態別質量の履歴

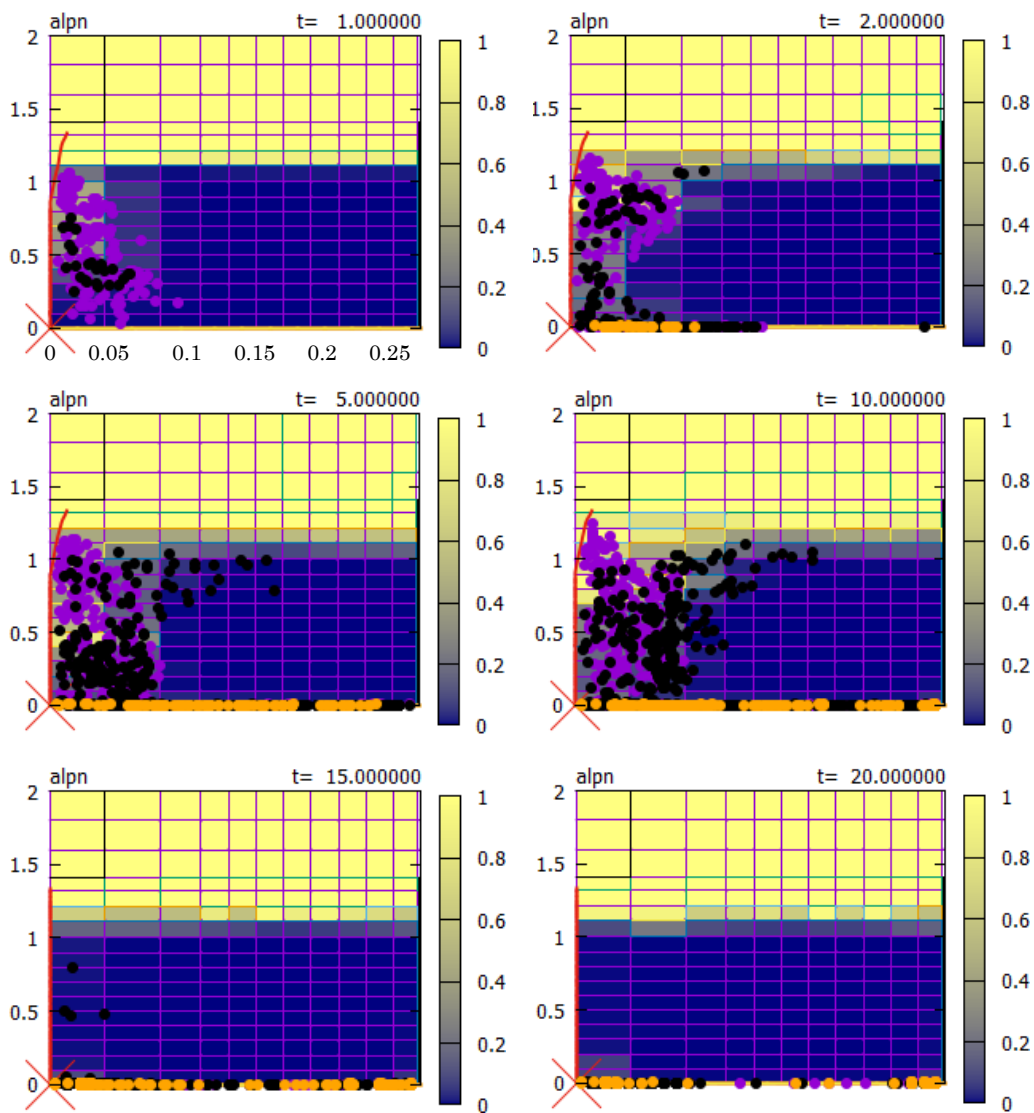


図 A7-C3-2 ボイド率及び溶融物粒子分布図

DEFOR-A7 (キャッチャー4)

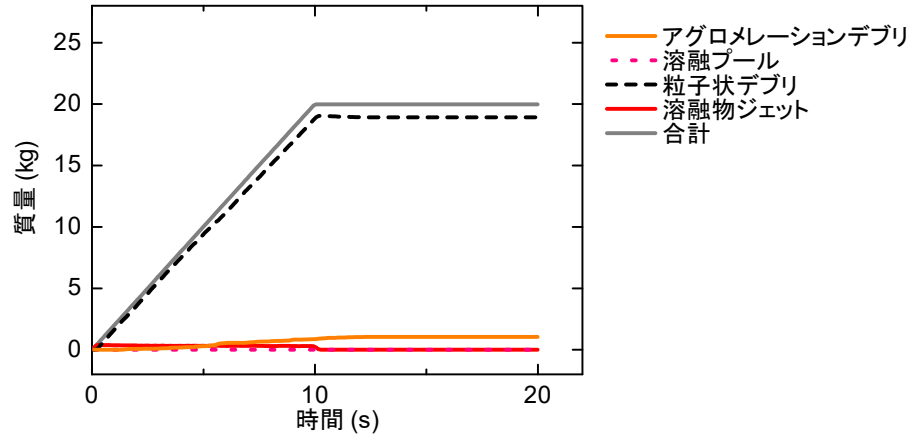


図 A7-C4-1 デブリの状態別質量の履歴

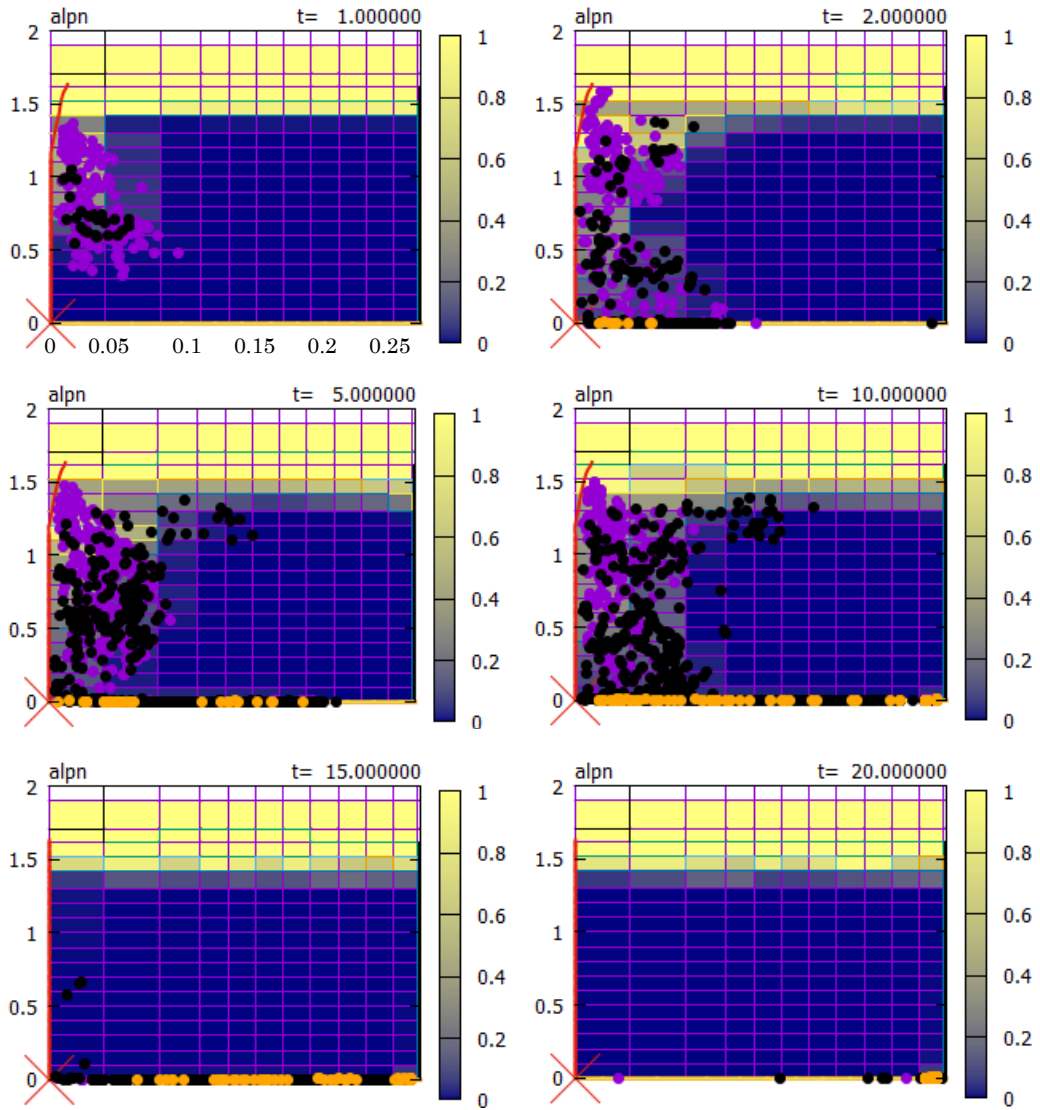


図 A7-C4-2 ボイド率及び熔融物粒子分布図

DEFOR-A8 (キャッチャー1)

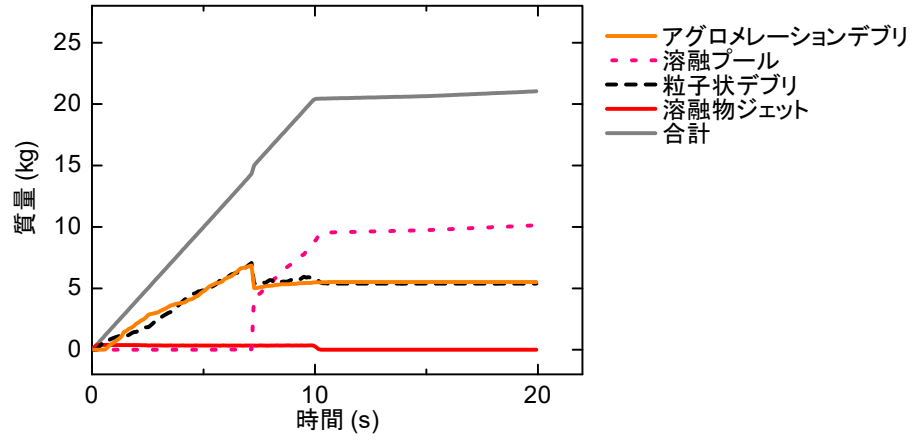


図 A8-C1-1 デブリの状態別質量の履歴

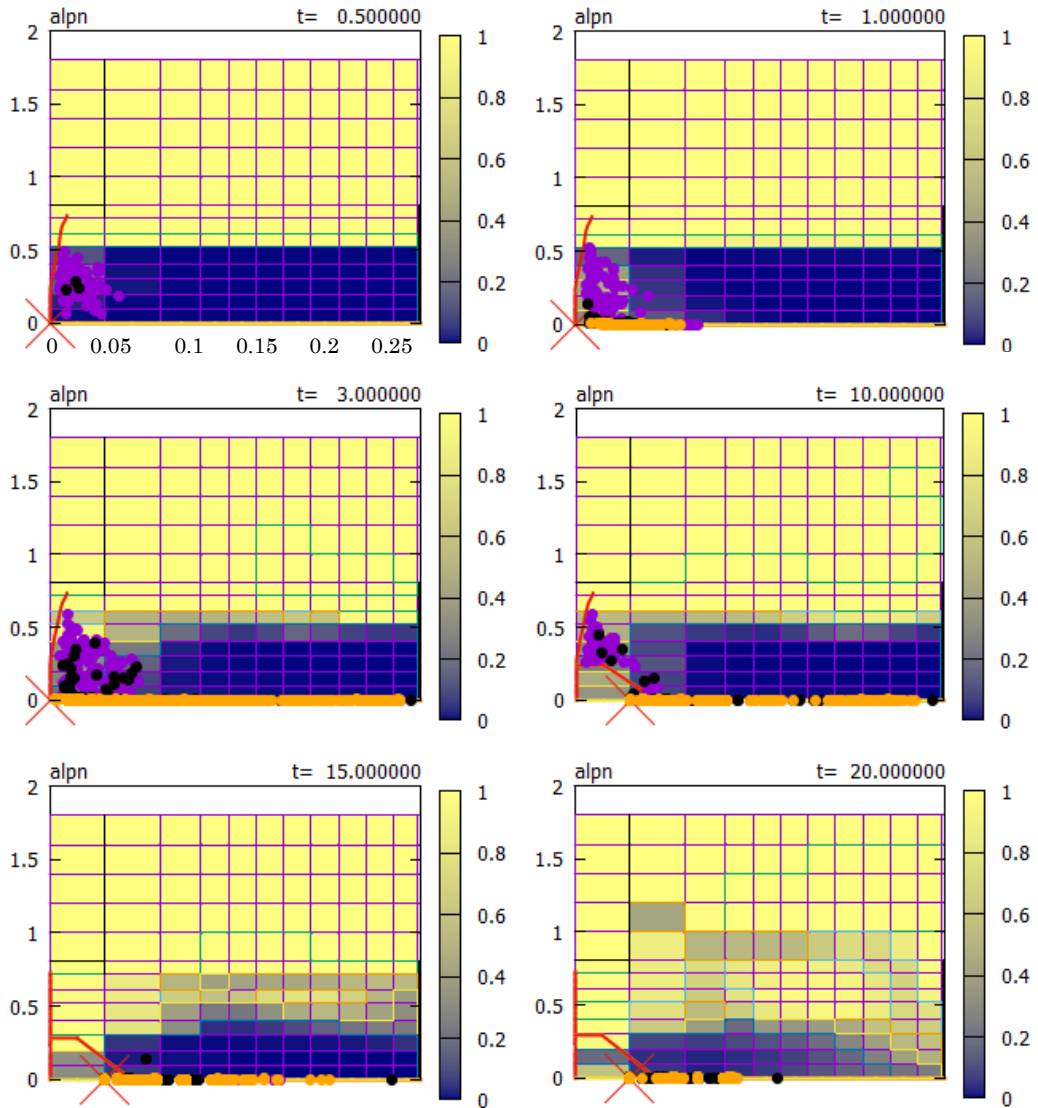


図 A8-C1-2 ボイド率及び熔融物粒子分布図

DEFOR-A8 (キャッチャー2)

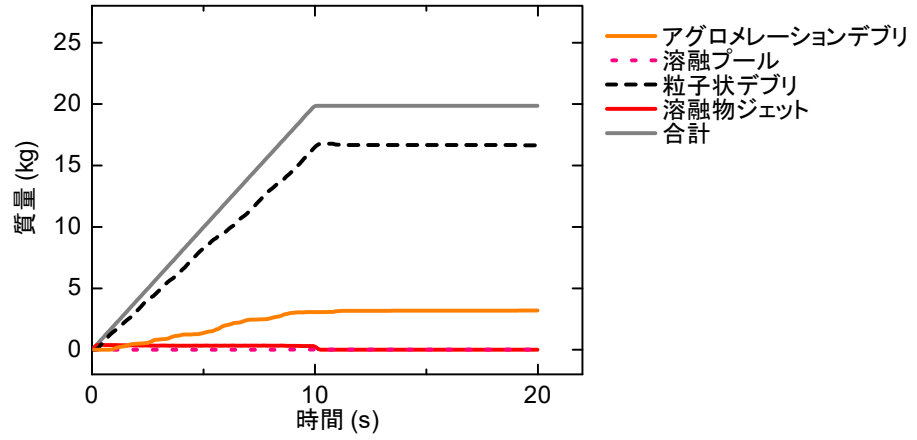


図 A8-C2-1 デブリの状態別質量の履歴

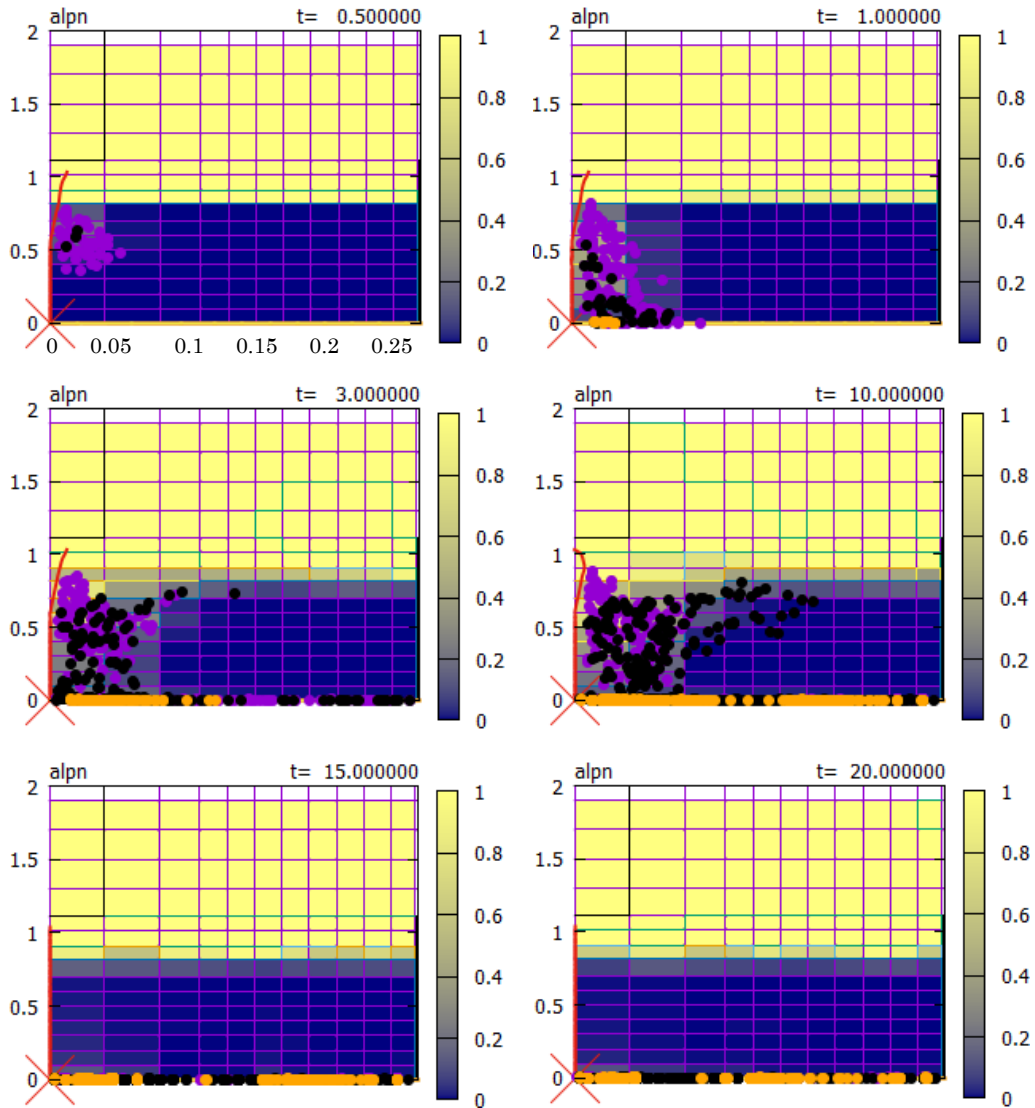


図 A8-C2-2 ボイド率及び溶融物粒子分布図

DEFOR-A8 (キャッチャー3)

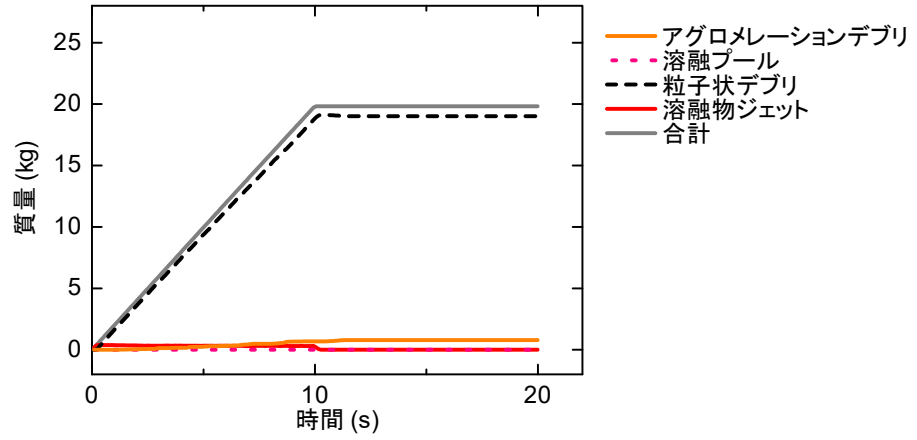


図 A8-C3-1 デブリの状態別質量の履歴

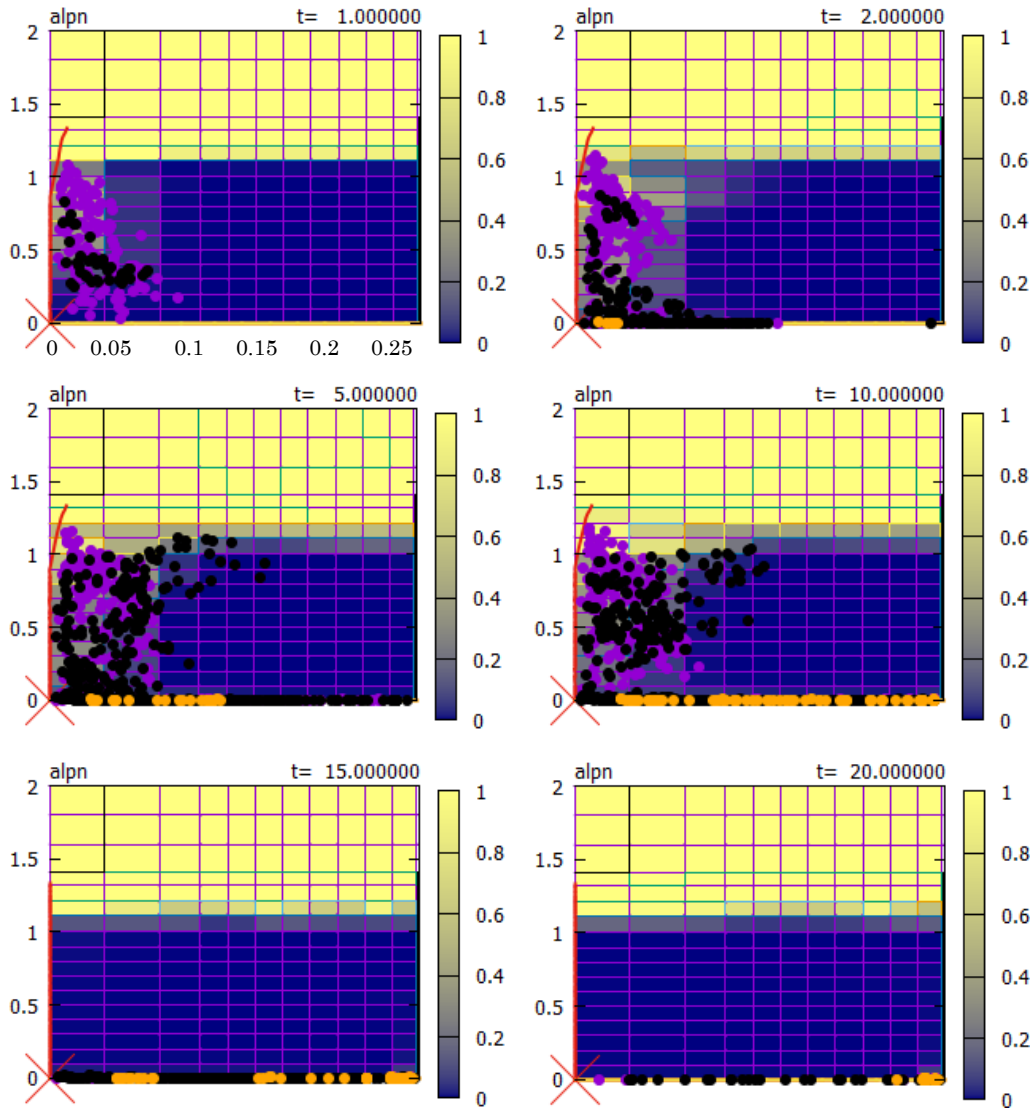


図 A8-C3-2 ボイド率及び熔融物粒子分布図

DEFOR-A8 (キャッチャー4)

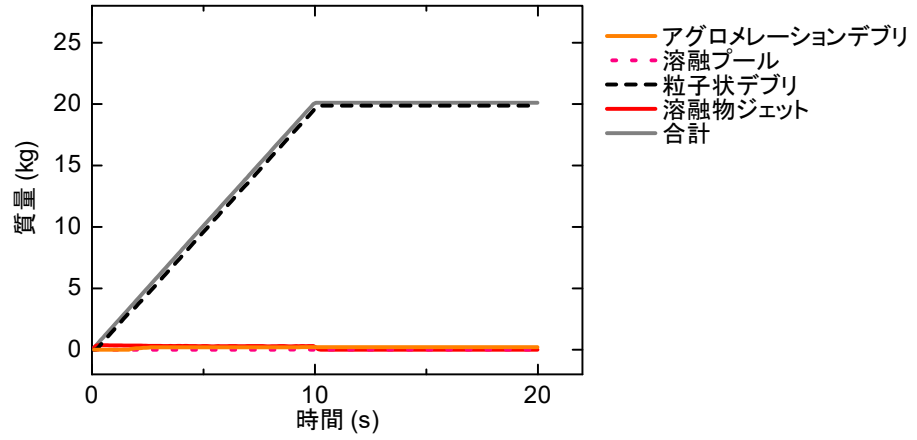


図 A8-C4-1 デブリの状態別質量の履歴

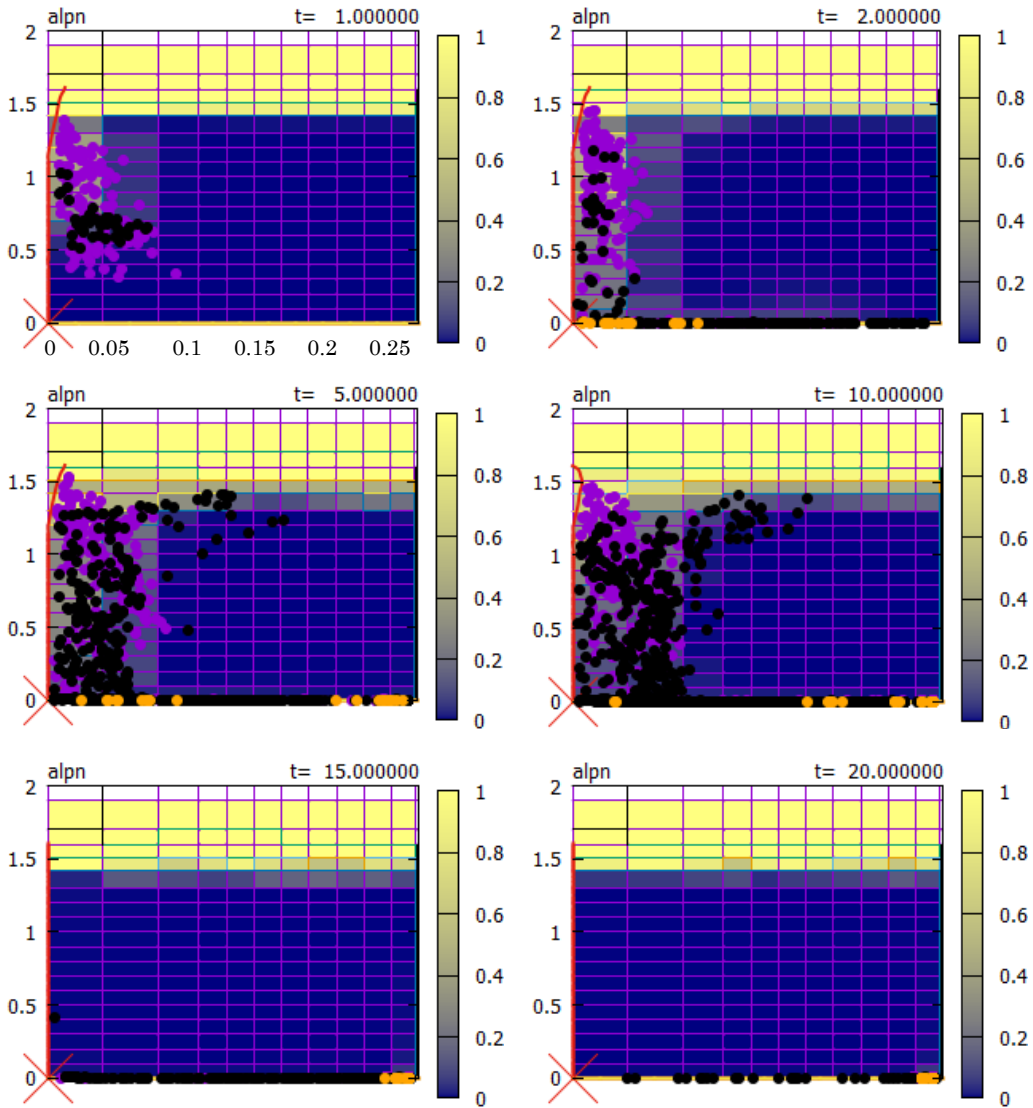


図 A8-C4-2 ボイド率及び溶融物粒子分布図

DEFOR-A9 (キャッチャー1)

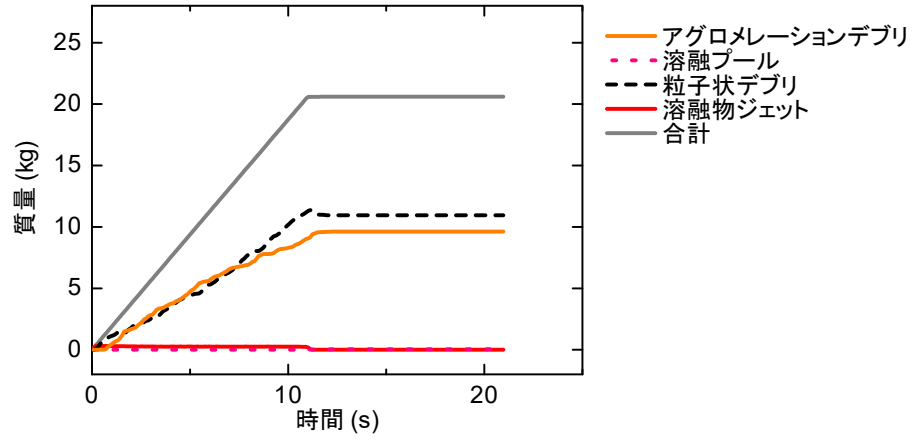


図 A9-C1-1 デブリの状態別質量の履歴

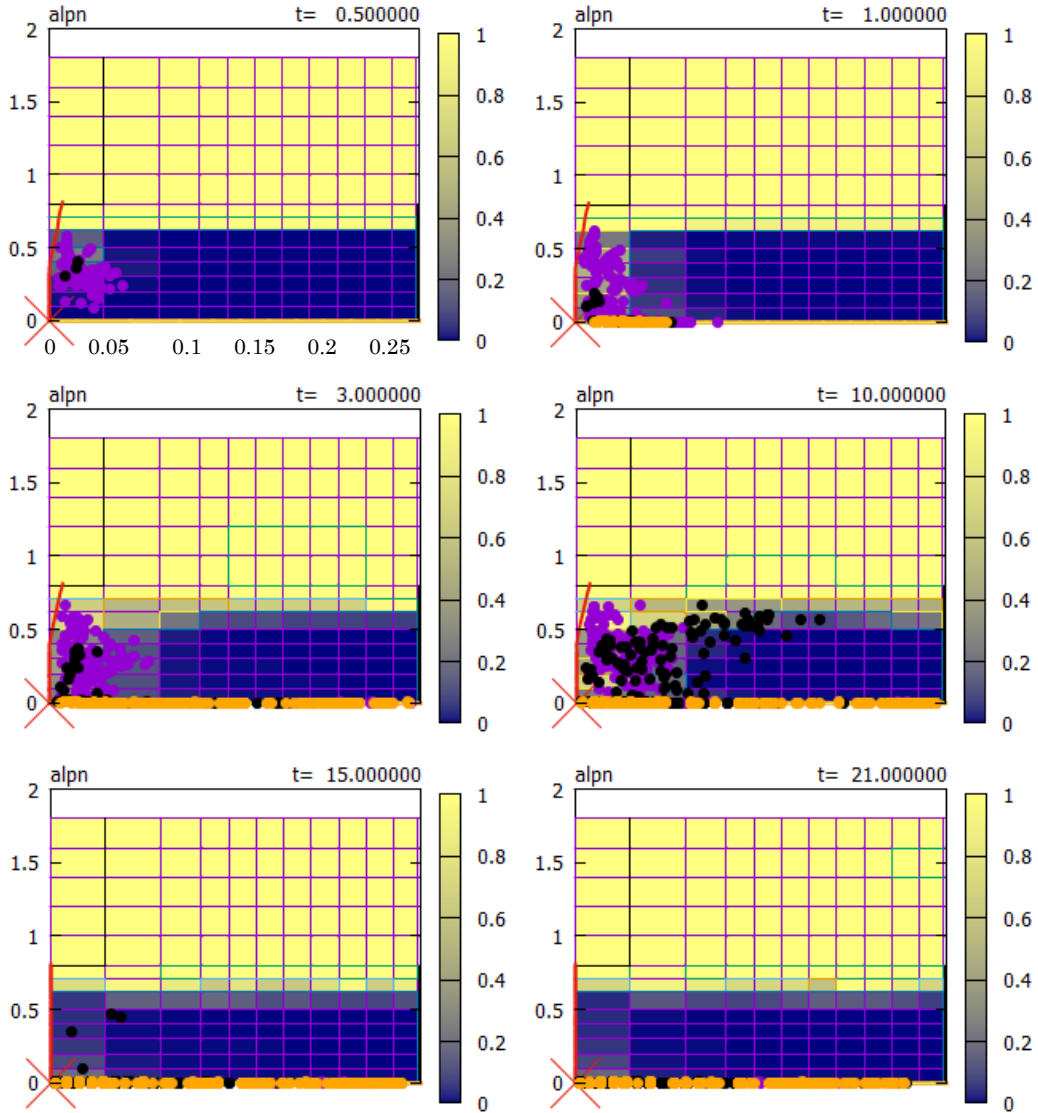


図 A9-C1-2 ボイド率及び熔融物粒子分布図

DEFOR-A9 (キャッチャー2)

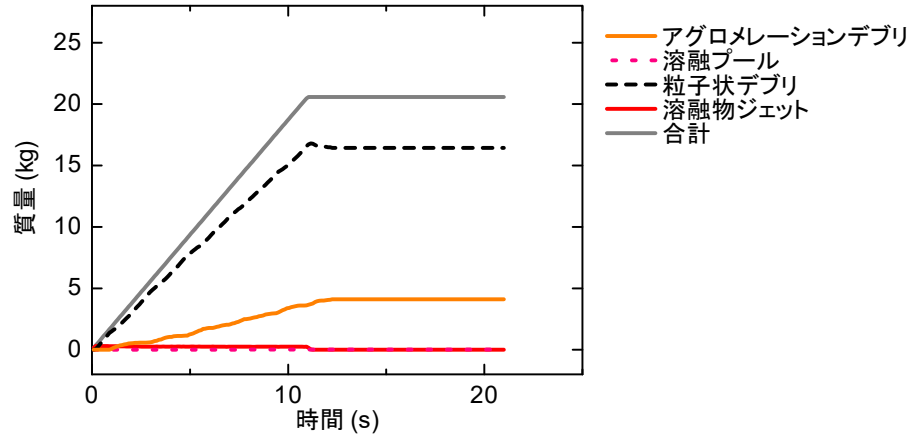


図 A9-C2-1 デブリの状態別質量の履歴

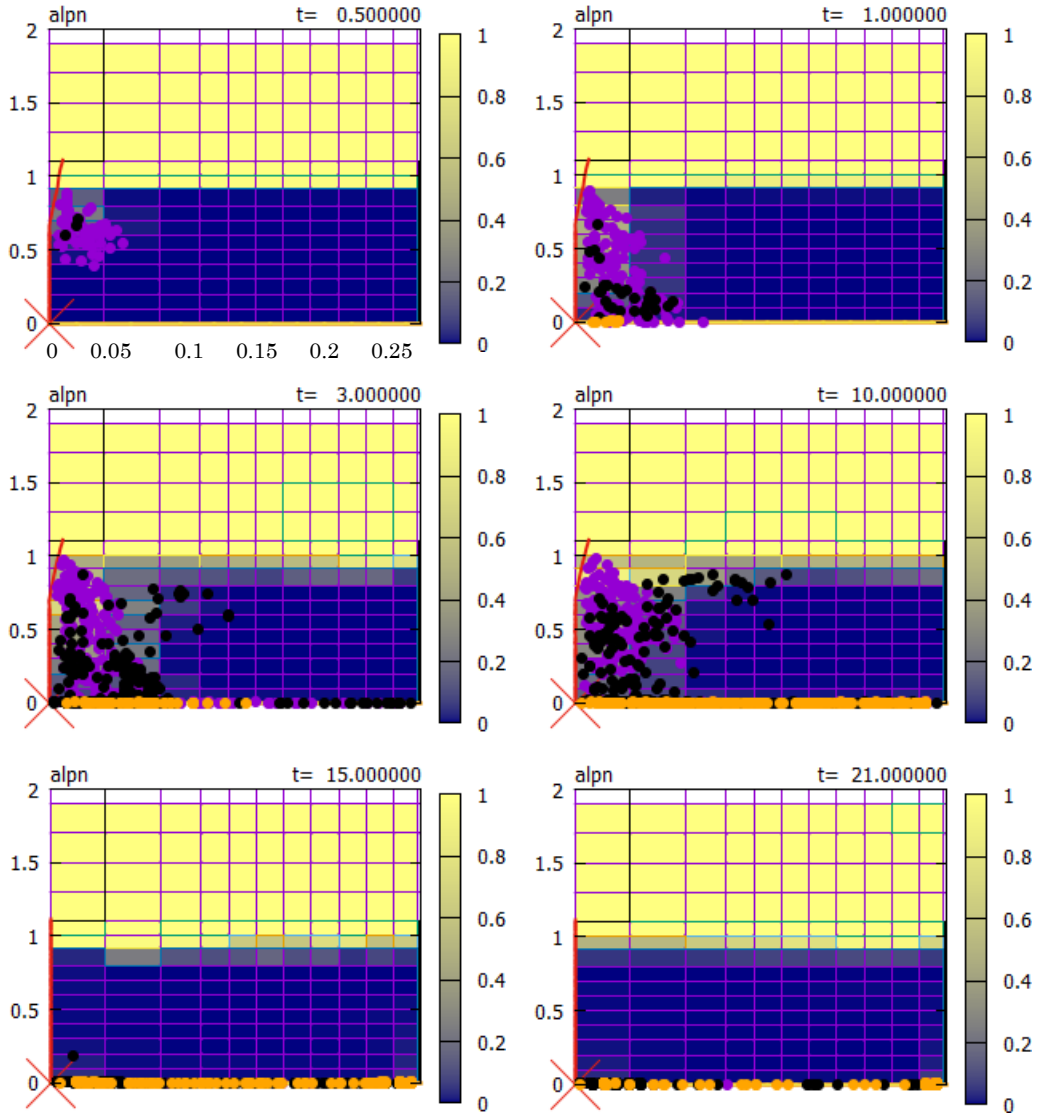


図 A9-C2-2 ボイド率及び溶融物粒子分布図

DEFOR-A9 (キャッチャー3)

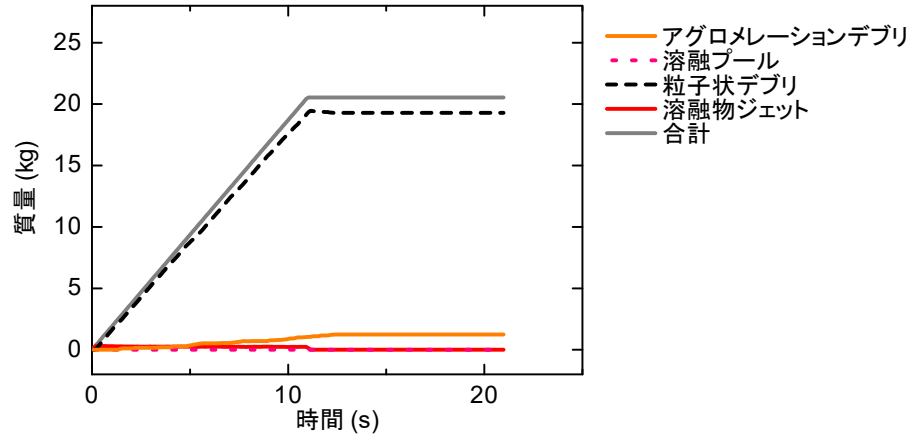


図 A9-C3-1 デブリの状態別質量の履歴

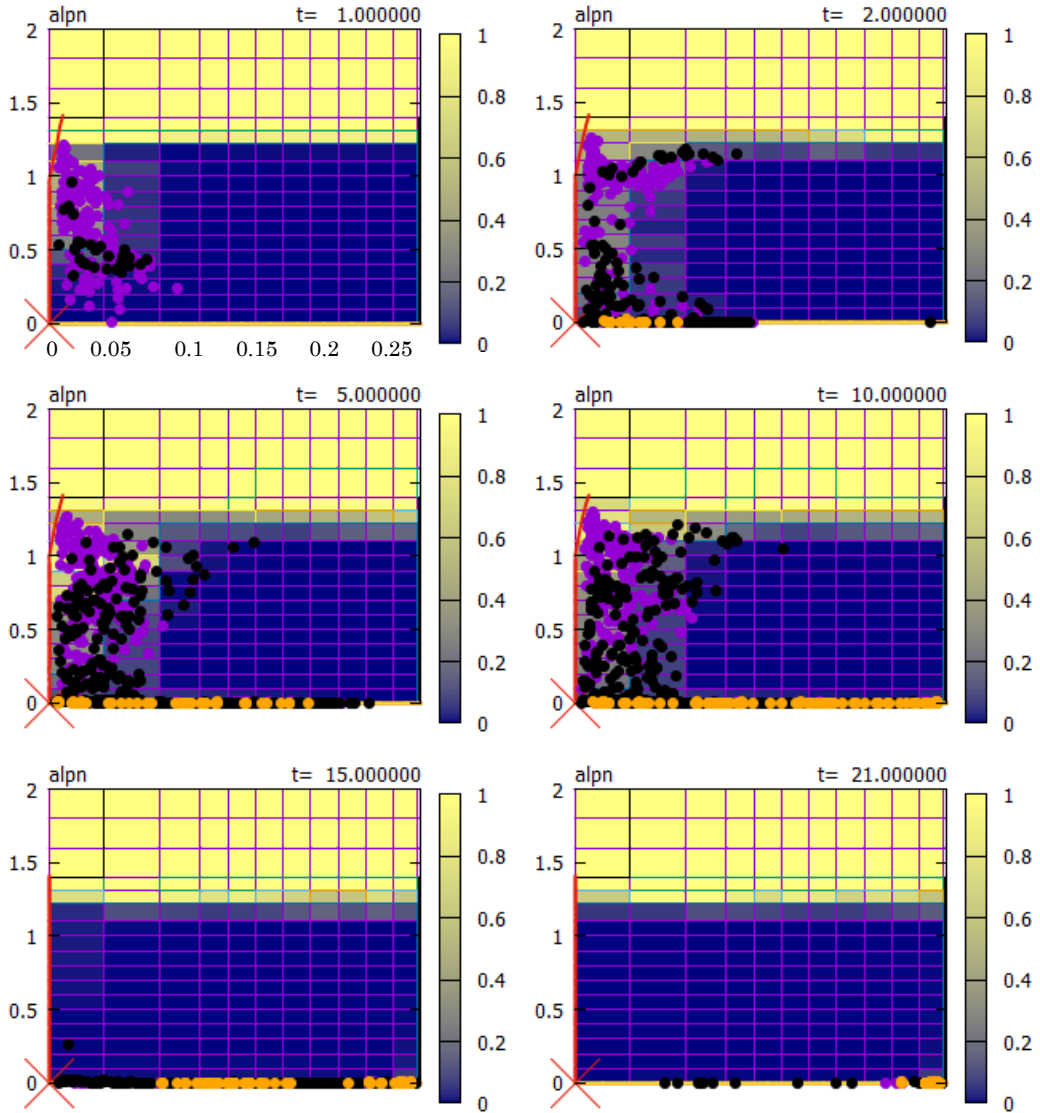


図 A9-C3-2 ボイド率及び溶融物粒子分布図

DEFOR-A9 (キャッチャー4)

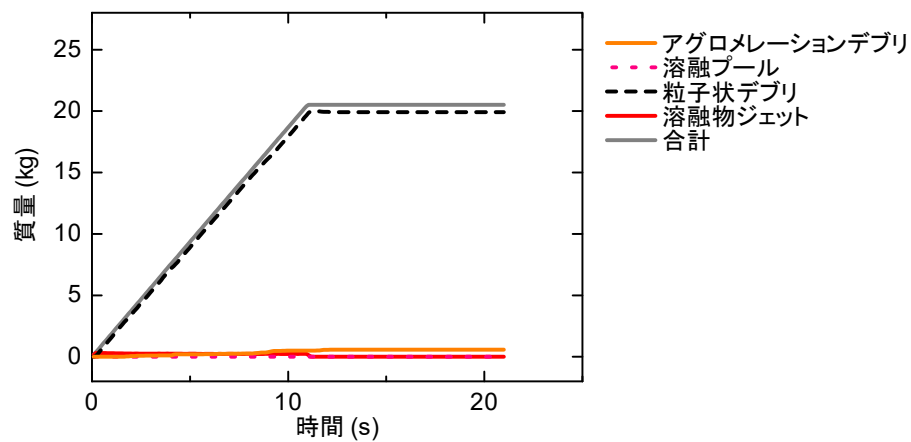


図 A9-C4-1 デブリの状態別質量の履歴

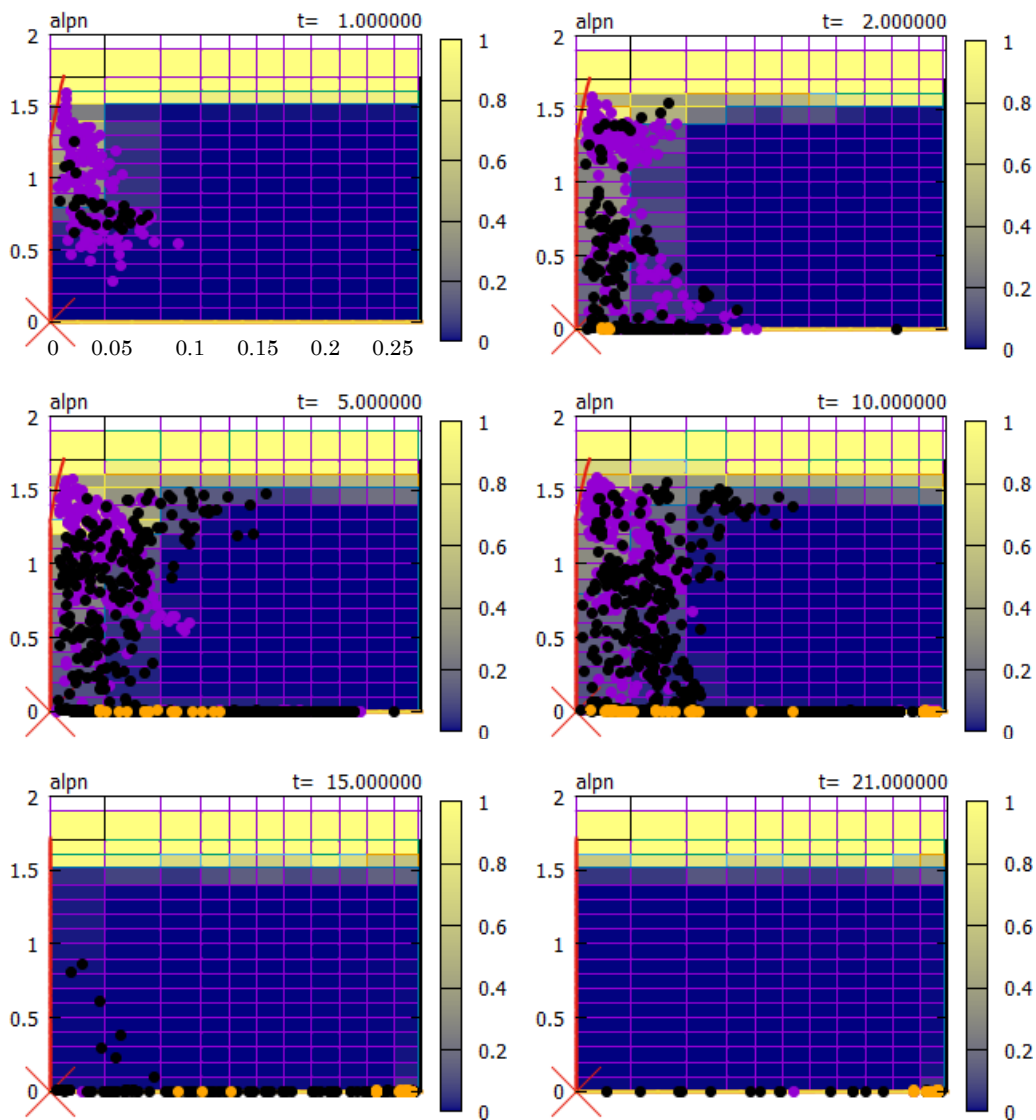


図 A9-C4-2 ボイド率及び溶融物粒子分布図

DEFOR-A23 (キャッチャー1)

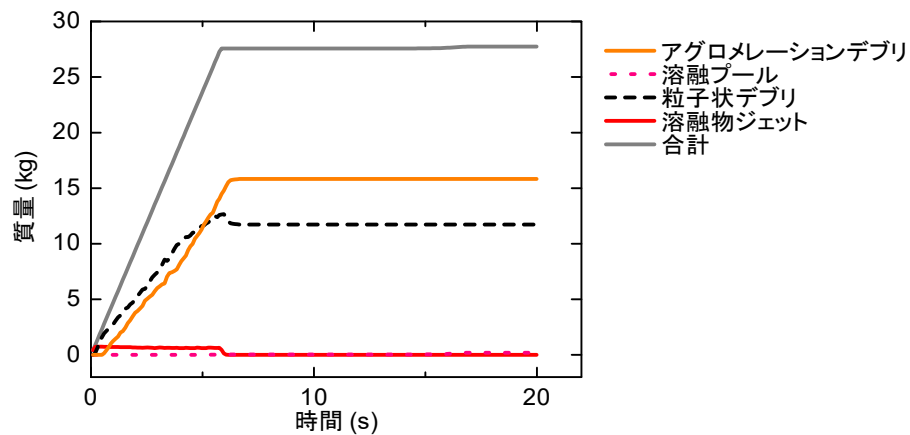


図 A23-C1-1 デブリの状態別質量の履歴

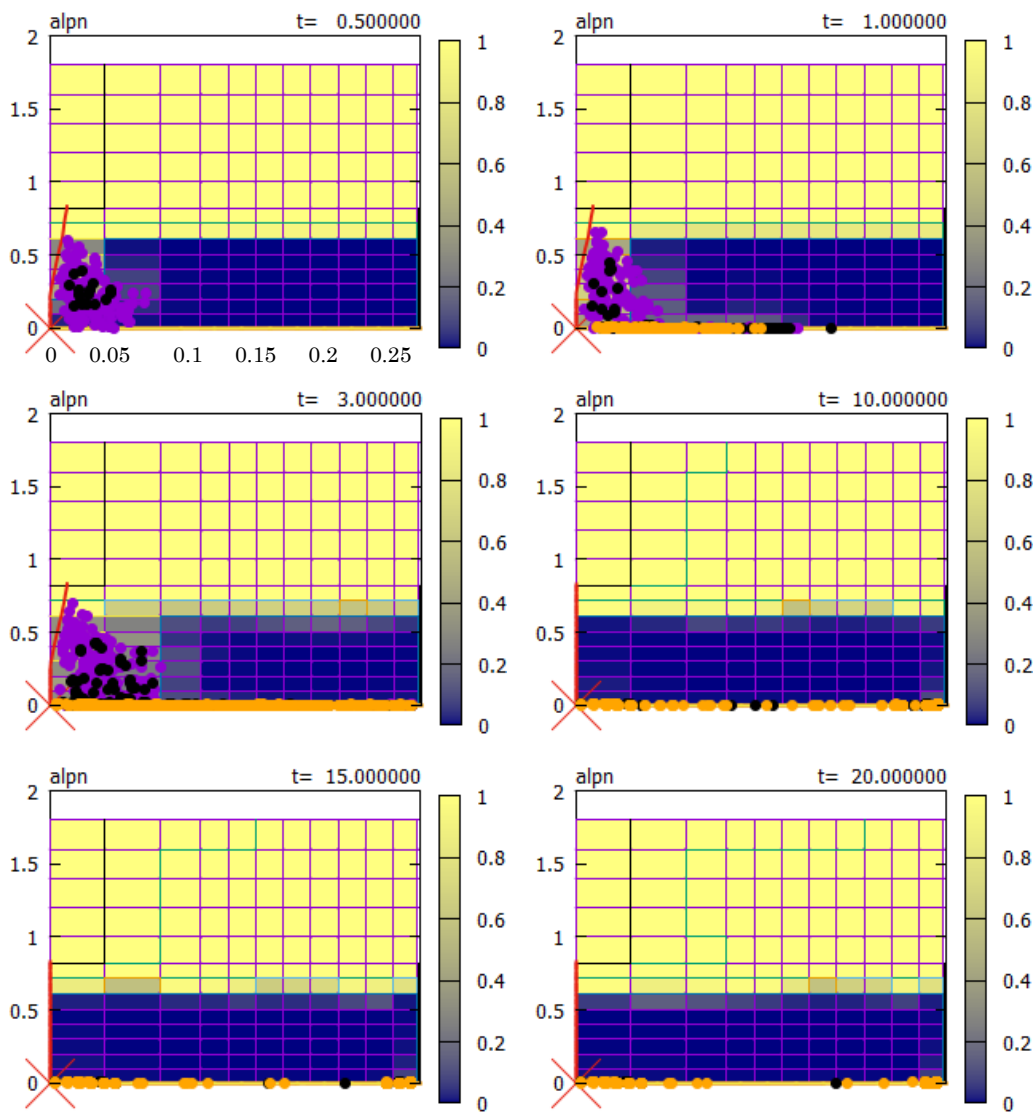


図 A23-C1-2 ボイド率及び溶融物粒子分布図

DEFOR-A23 (キャッチャー2)

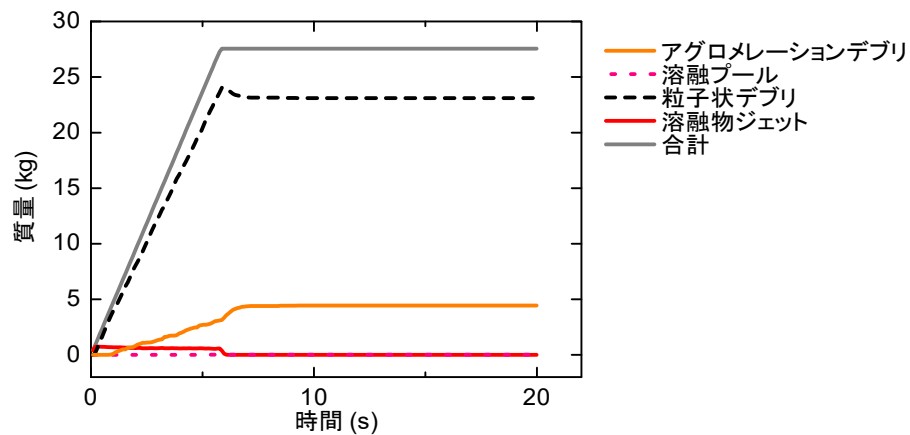


図 A23-C2-1 デブリの状態別質量の履歴

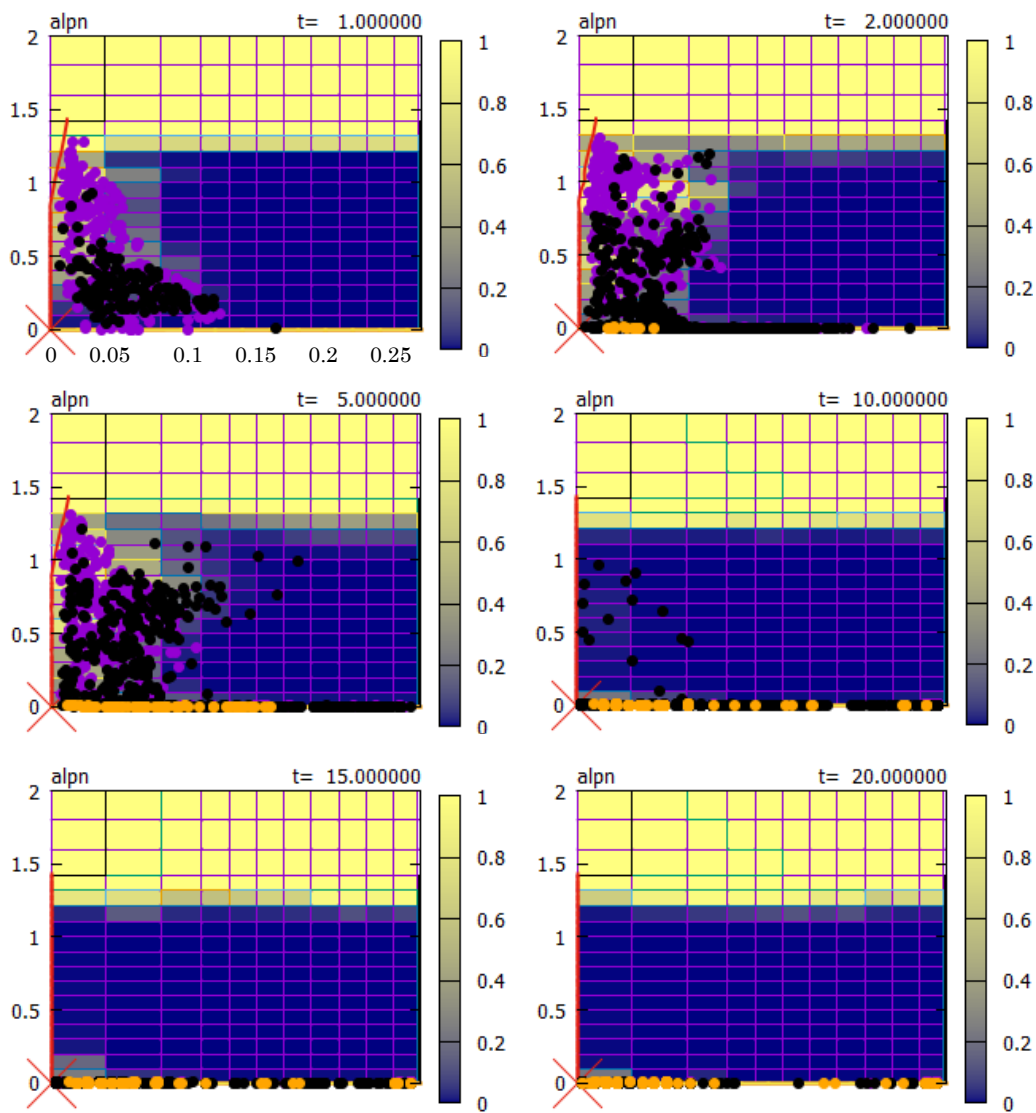


図 A23-C2-2 ボイド率及び溶融物粒子分布図

DEFOR-A23 (キャッチャー3)

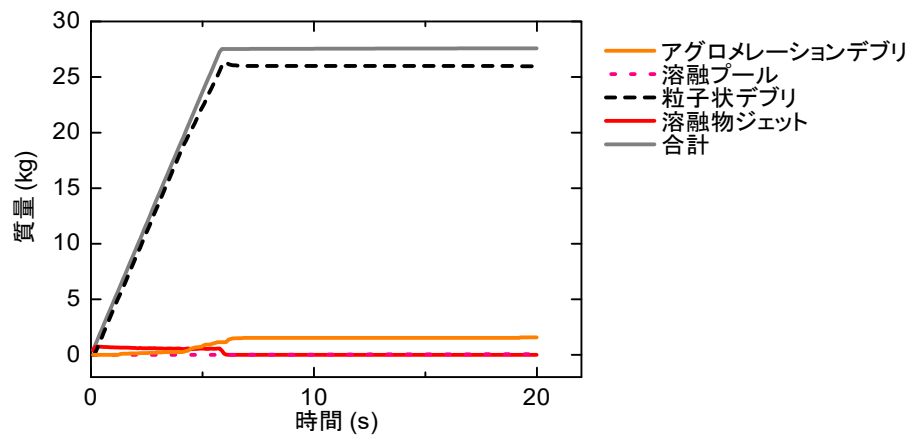


図 A23-C3-1 デブリの状態別質量の履歴

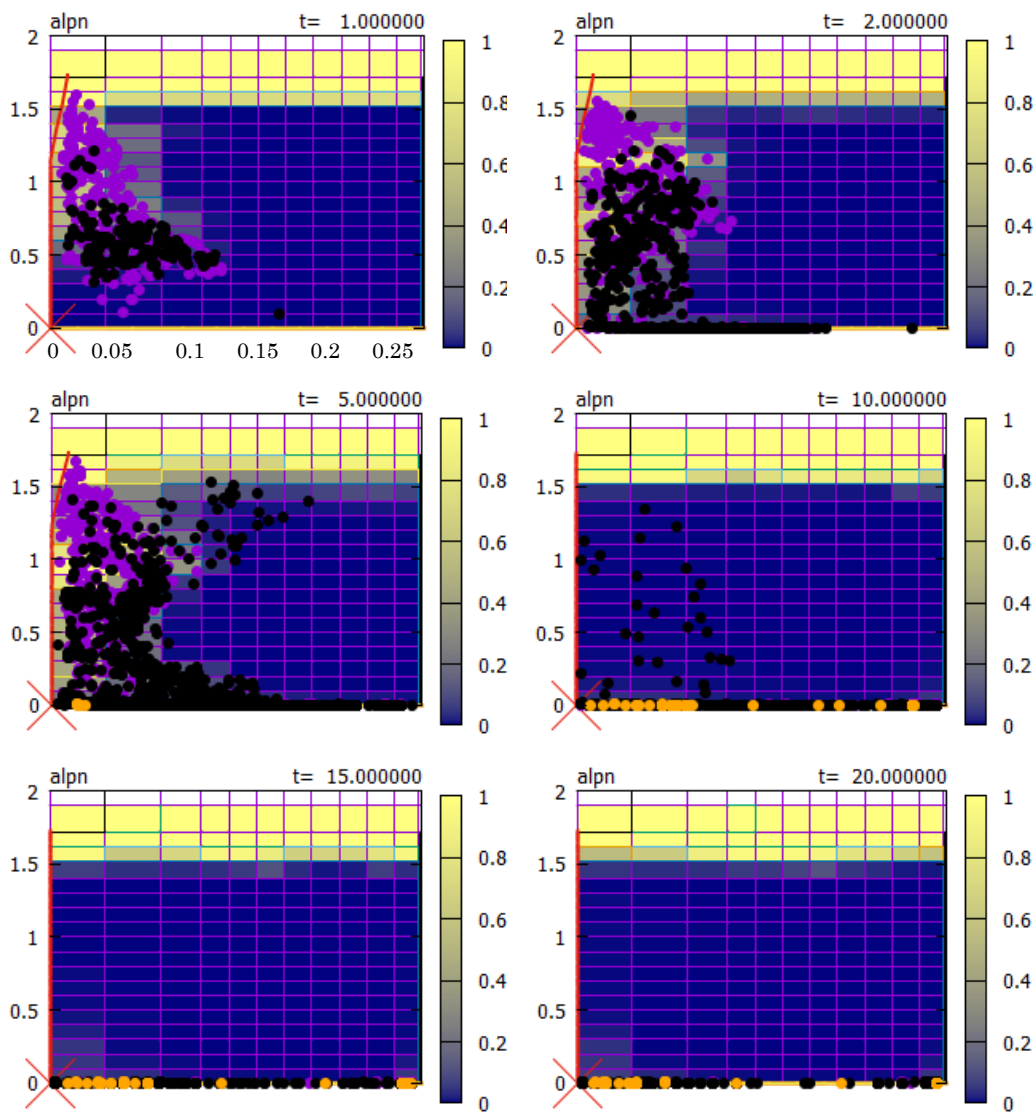


図 A23-C3-2 ボイド率及び熔融物粒子分布図

DEFOR-A23 (キャッチャー4)

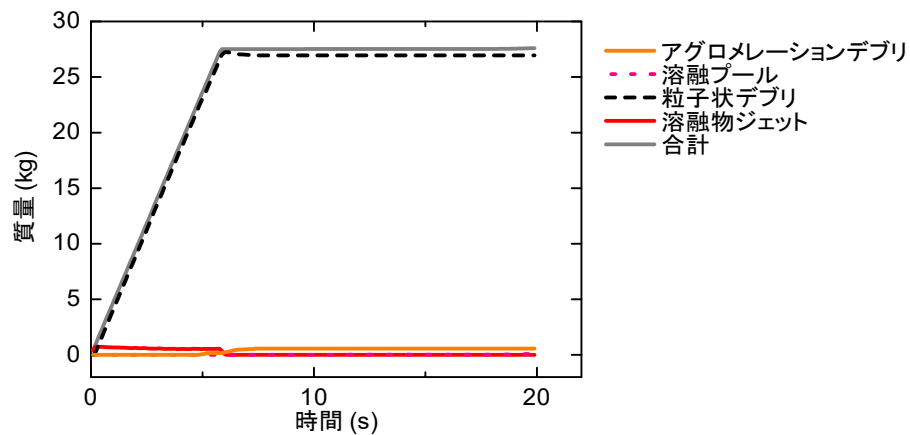


図 A23-C4-1 デブリの状態別質量の履歴

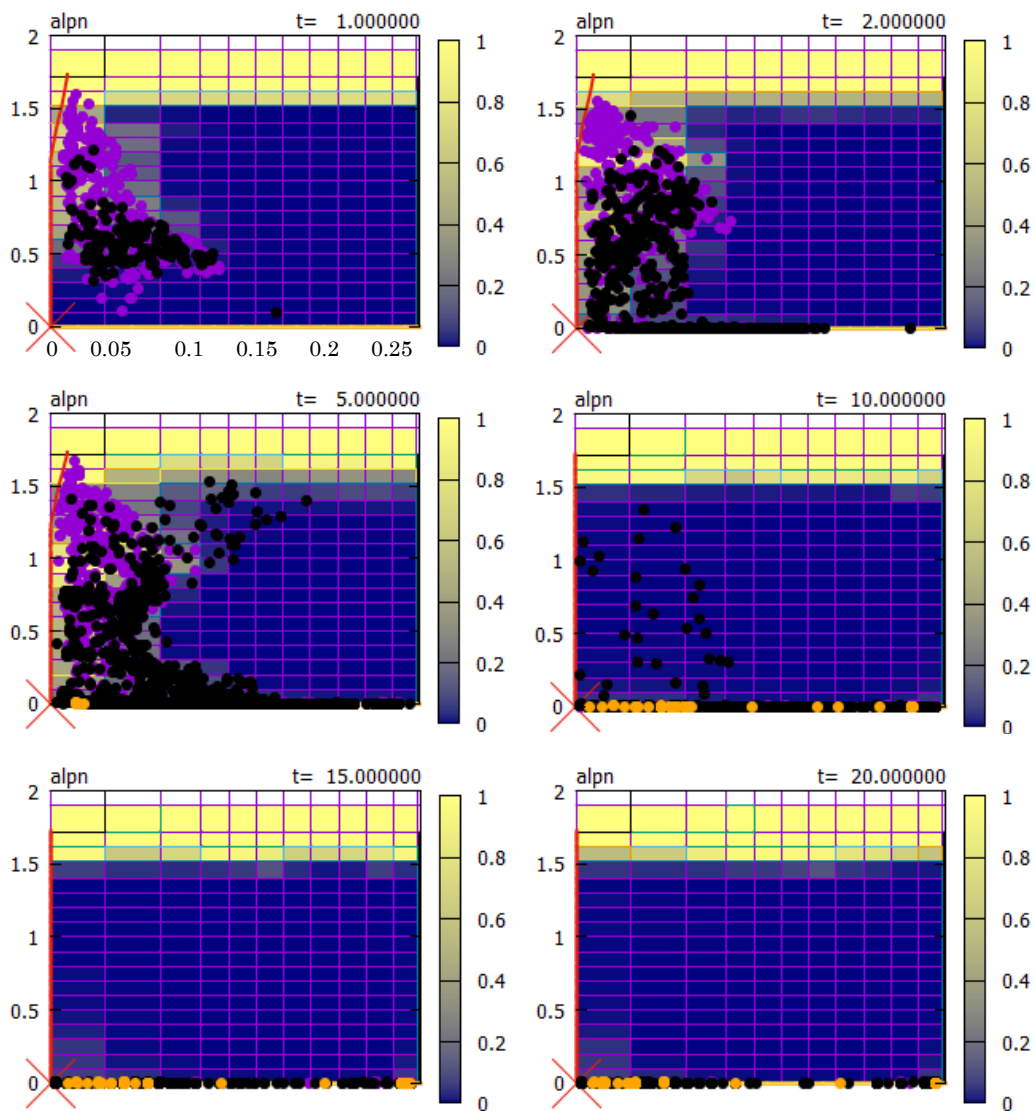


図 A23-C4-2 ボイド率及び溶融物粒子分布図

DEFOR-A24 (キャッチャー1)

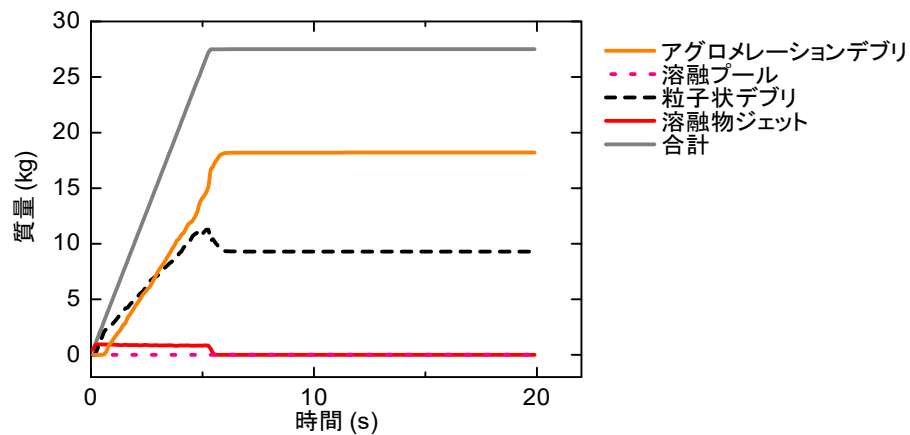


図 A24-C1-1 デブリの状態別質量の履歴

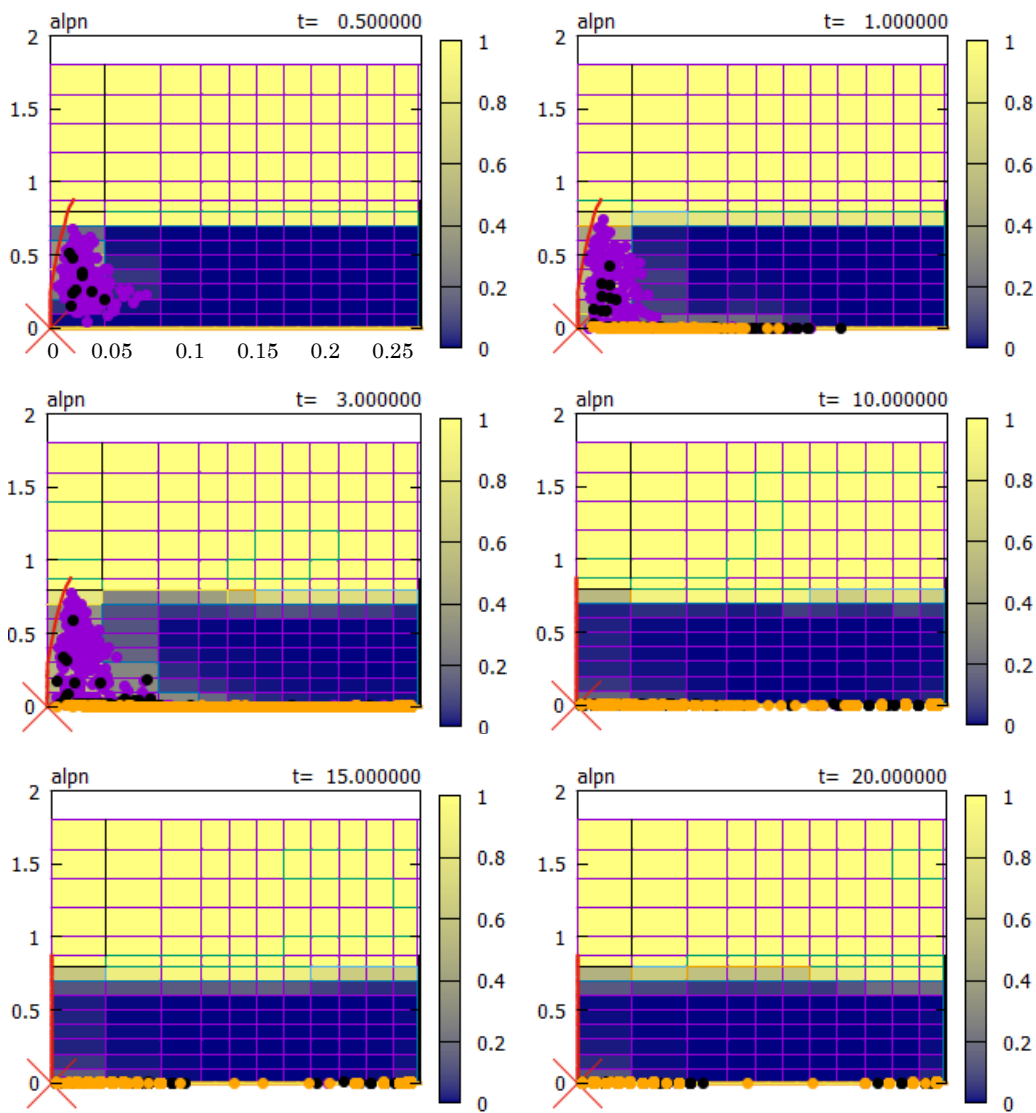


図 A24-C1-2 ボイド率及び溶融物粒子分布図

DEFOR-A24 (キャッチャー2)

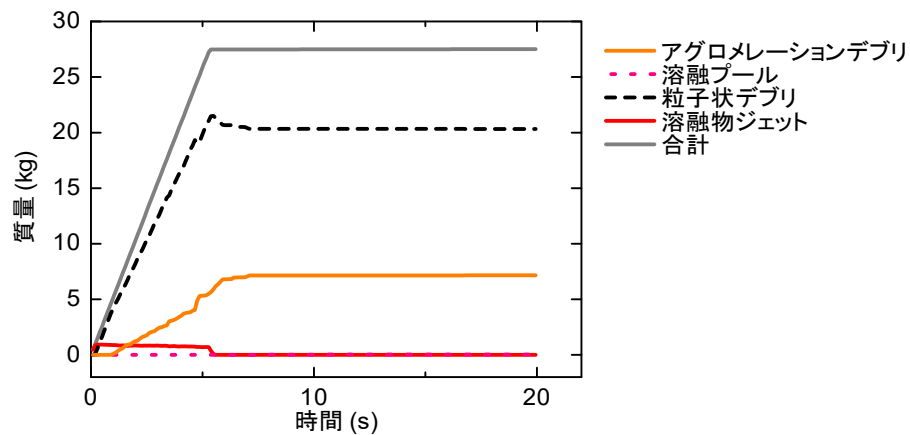


図 A24-C2-1 デブリの状態別質量の履歴

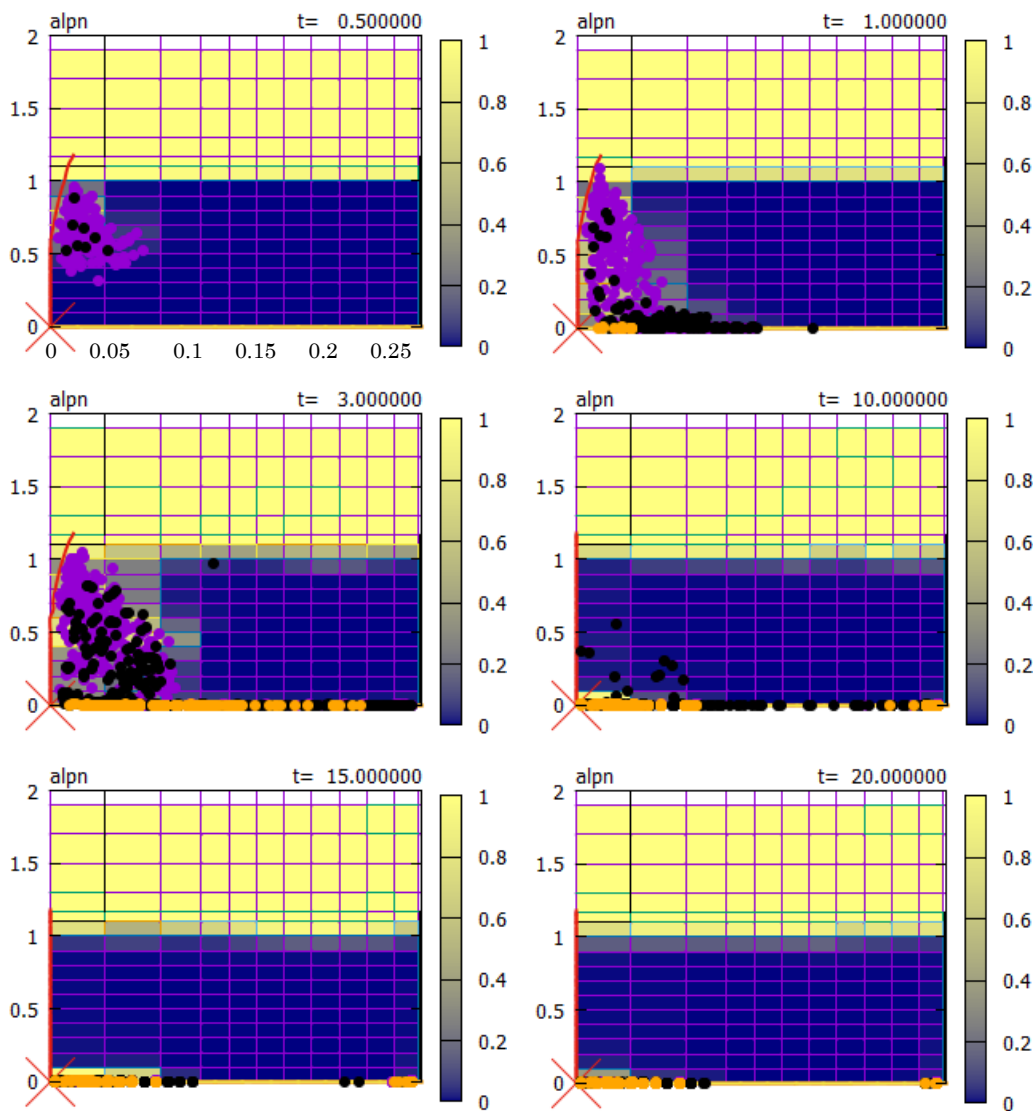


図 A24-C2-2 ボイド率及び溶融物粒子分布図

DEFOR-A24 (キャッチャー3)

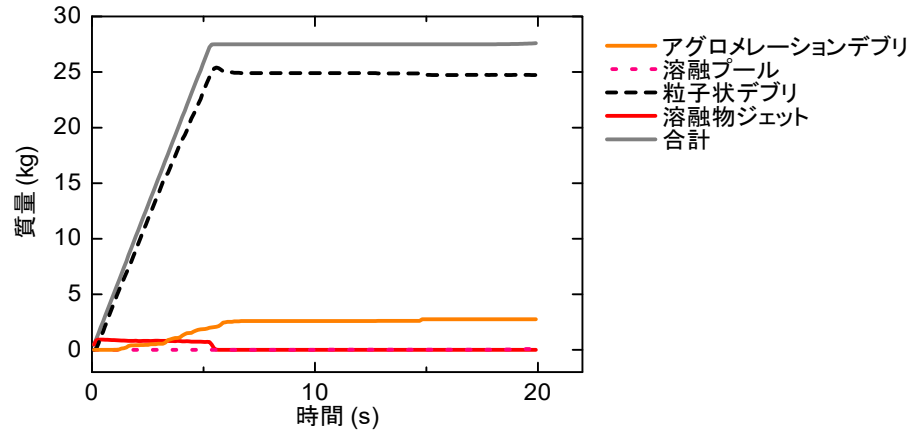


図 A24-C3-1 デブリの状態別質量の履歴

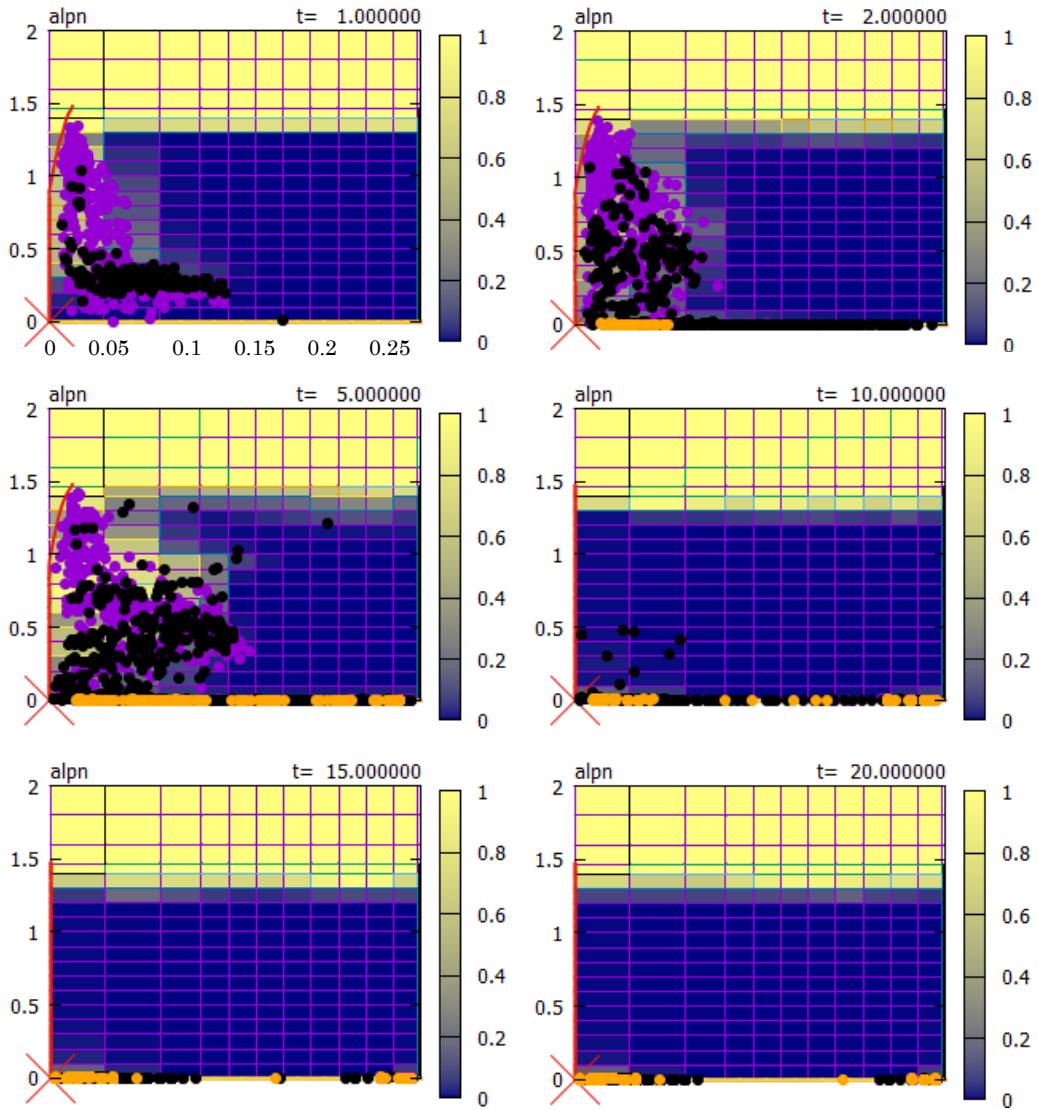


図 A24-C3-2 ボイド率及び溶融物粒子分布図

DEFOR-A24 (キャッチャー4)

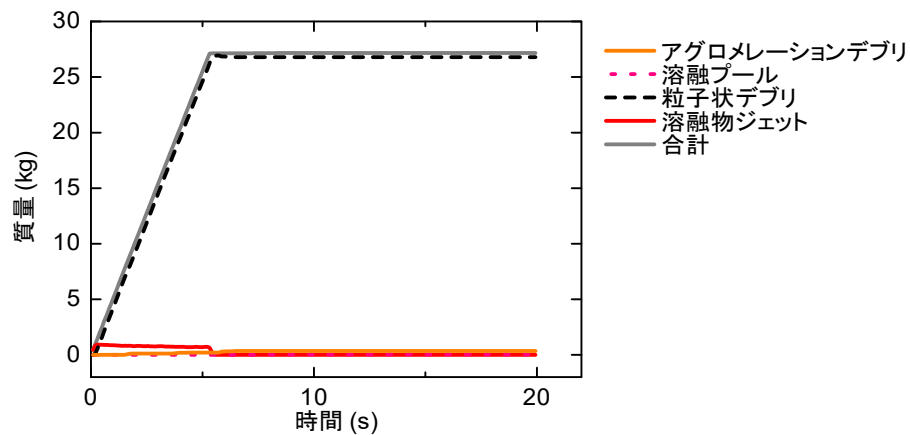


図 A24-C4-1 デブリの状態別質量の履歴

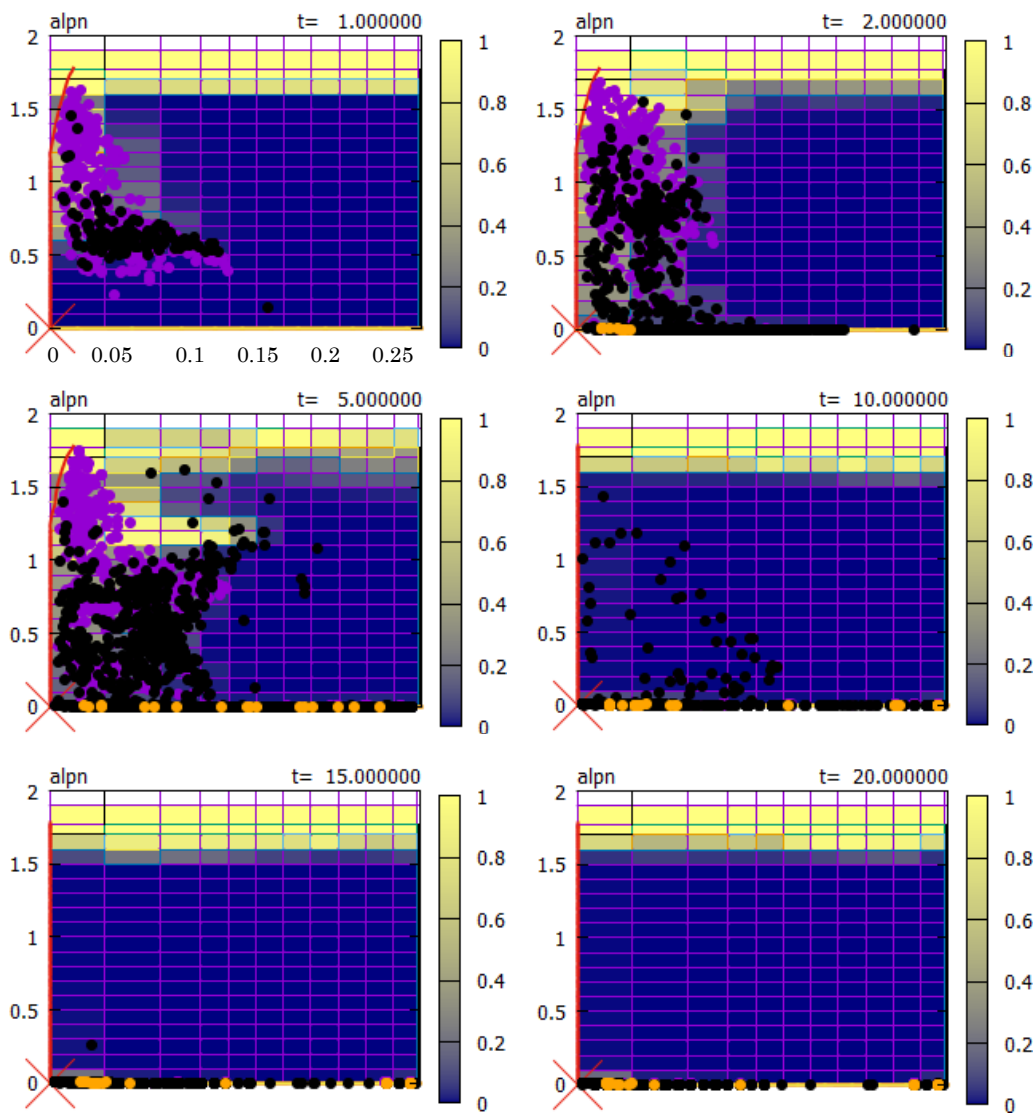


図 A24-C4-2 ボイド率及び溶融物粒子分布図

DEFOR-A25 (キャッチャー1)

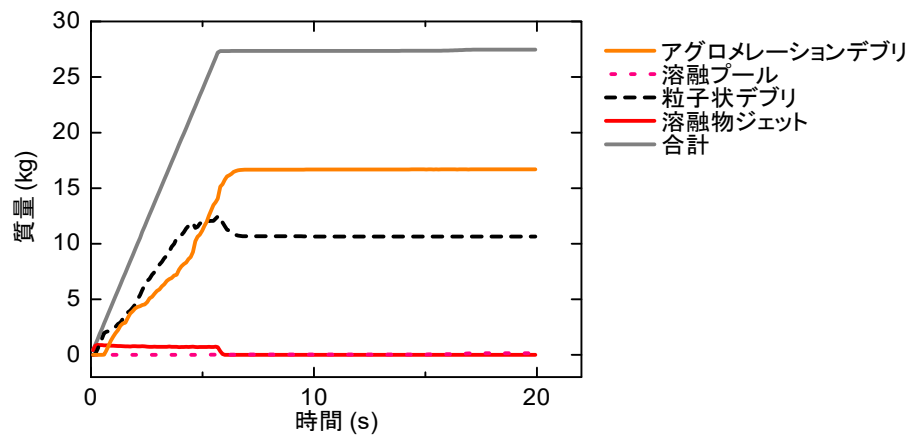


図 A25-C1-1 デブリの状態別質量の履歴

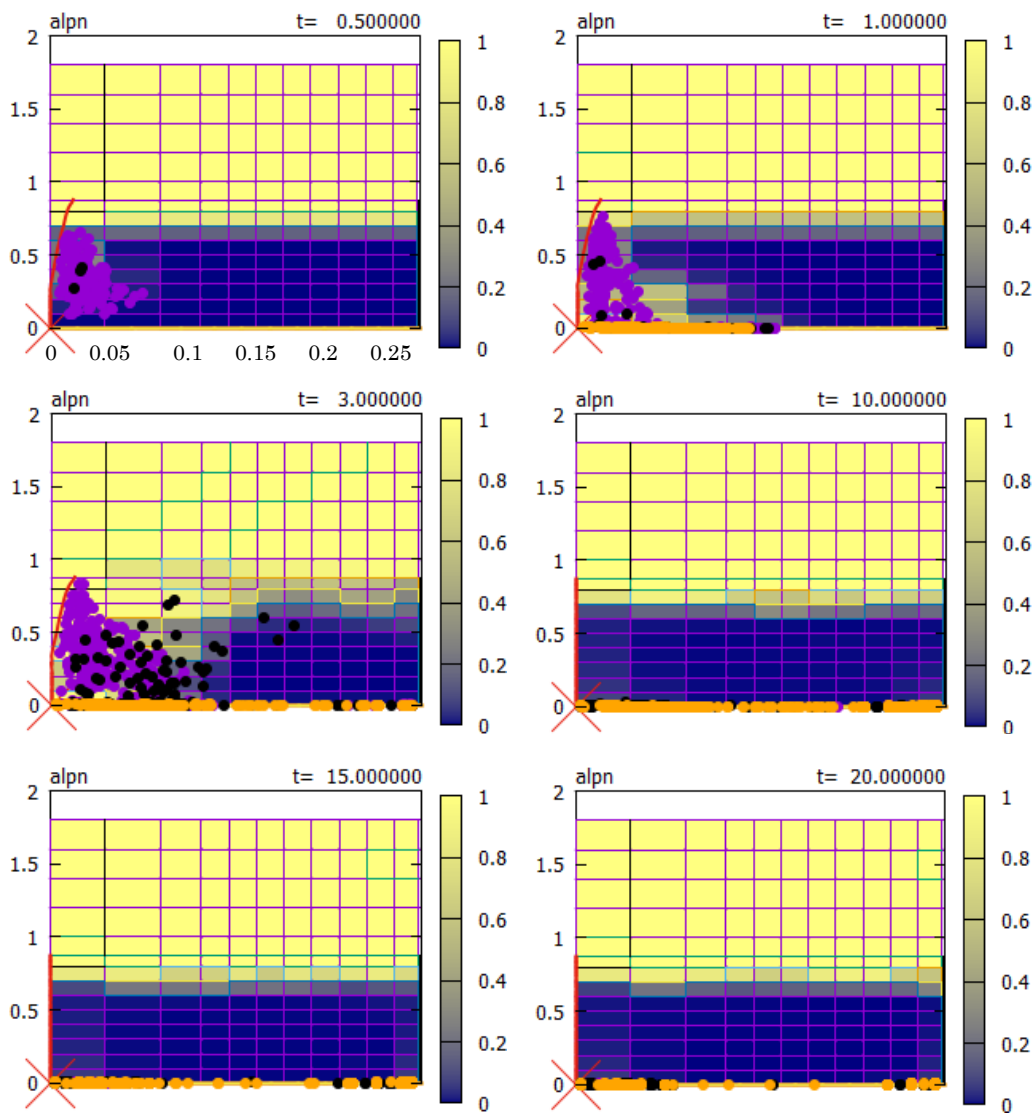


図 A25-C1-2 ボイド率及び溶融物粒子分布図

DEFOR-A25 (キャッチャー2)

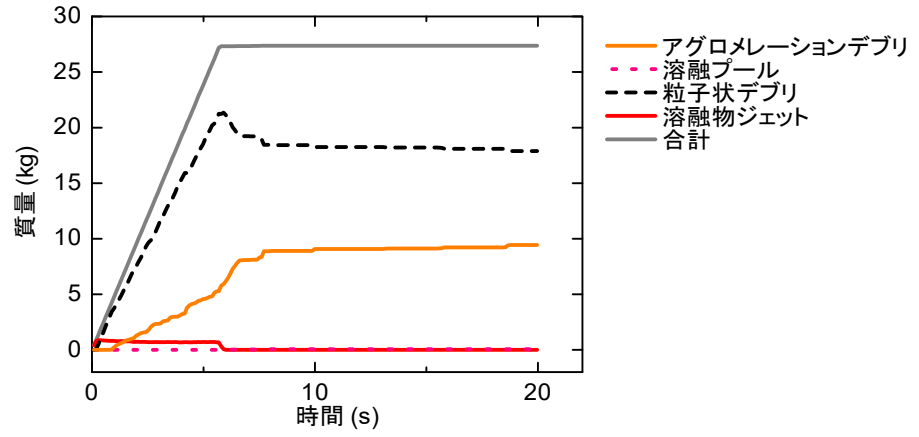


図 A25-C2-1 デブリの状態別質量の履歴

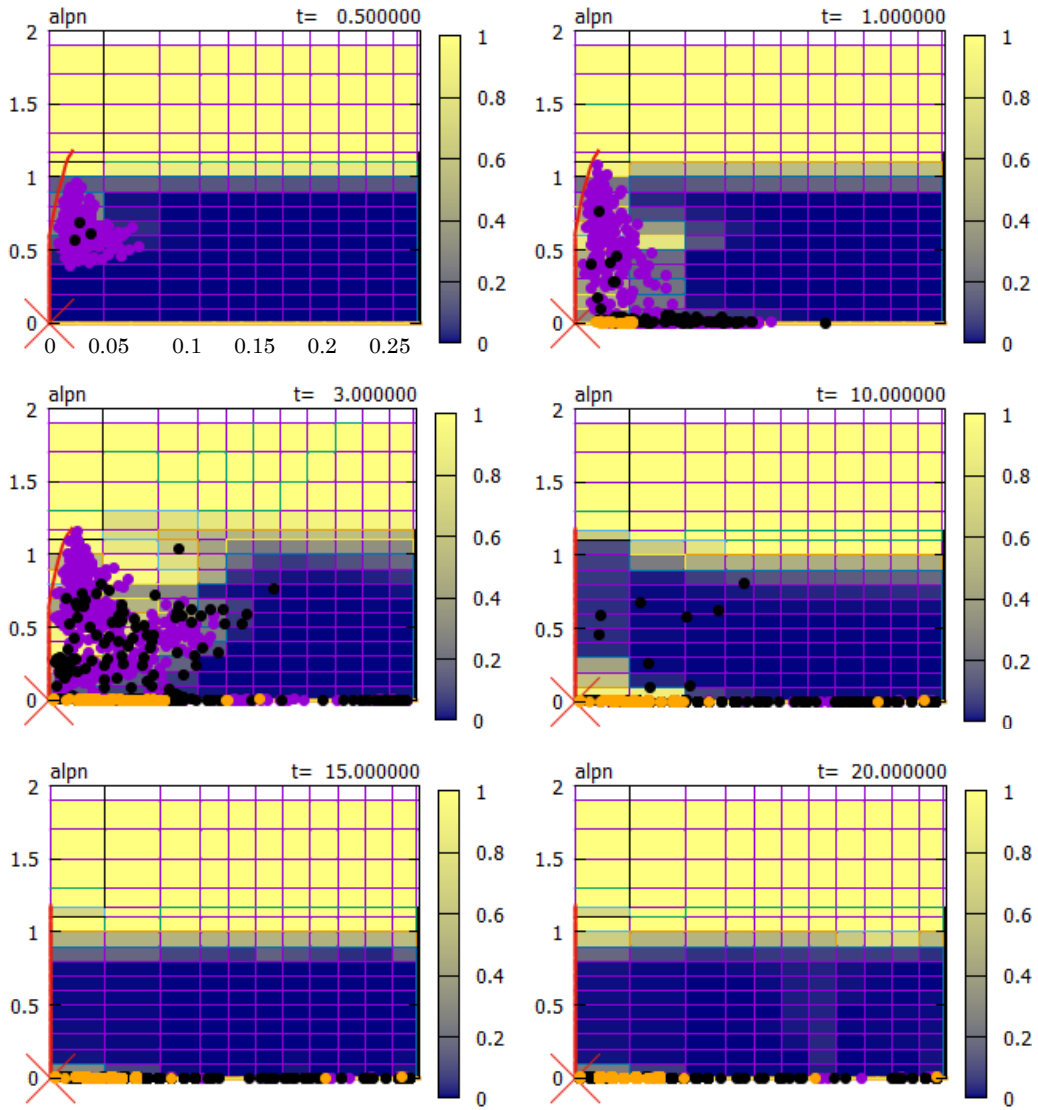


図 A25-C2-2 ボイド率及び熔融物粒子分布図

DEFOR-A25 (キャッチャー3)

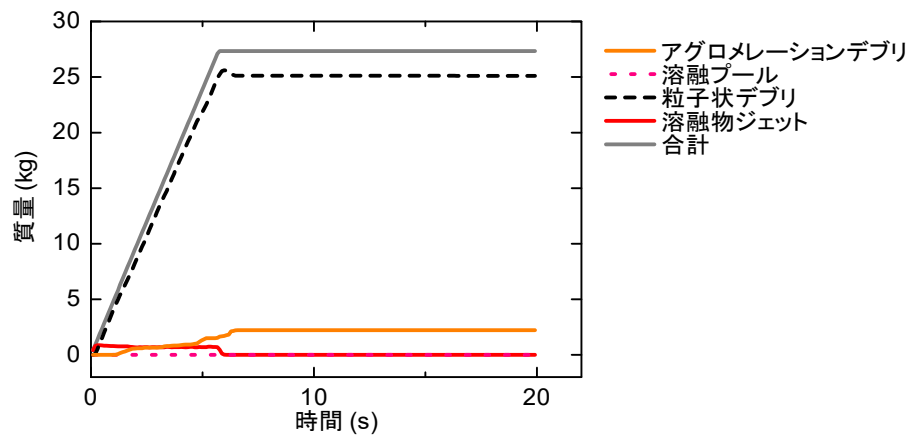


図 A25-C3-1 デブリの状態別質量の履歴

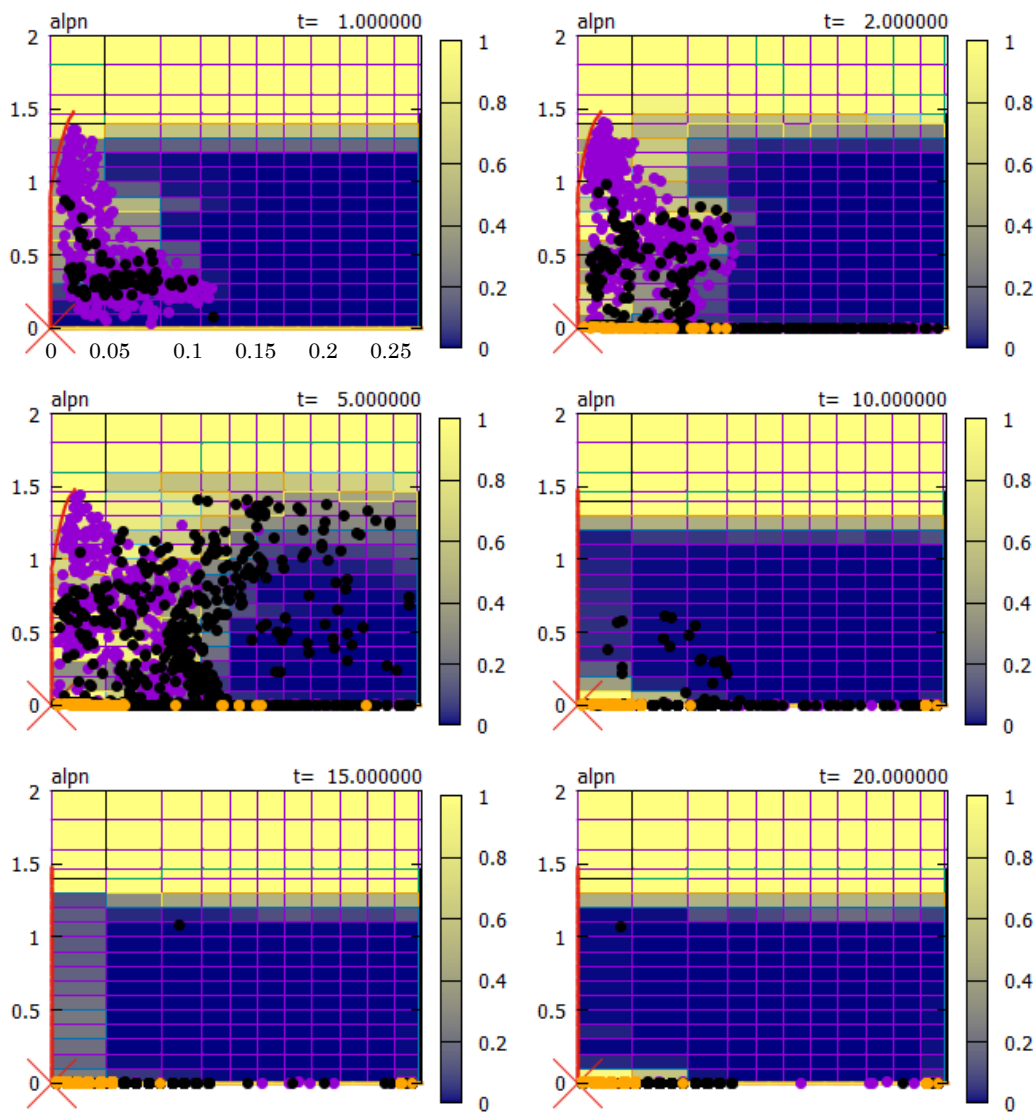


図 A25-C3-2 ボイド率及び溶融物粒子分布図

DEFOR-A25 (キャッチャー4)

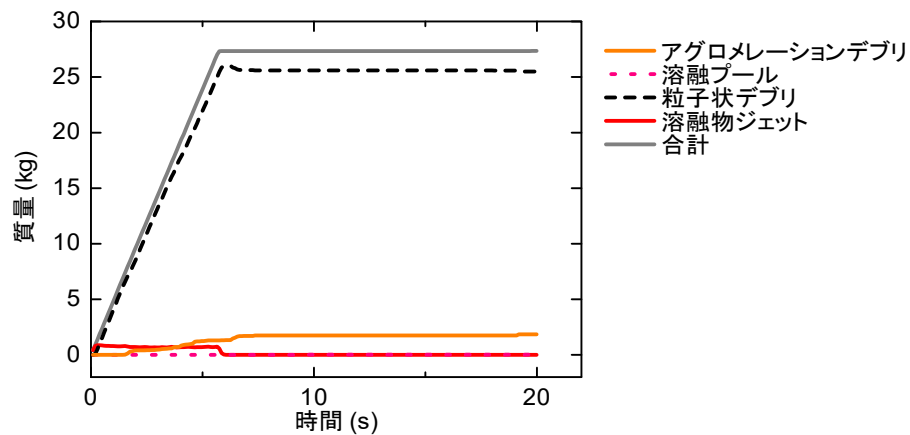


図 A25-C4-1 デブリの状態別質量の履歴

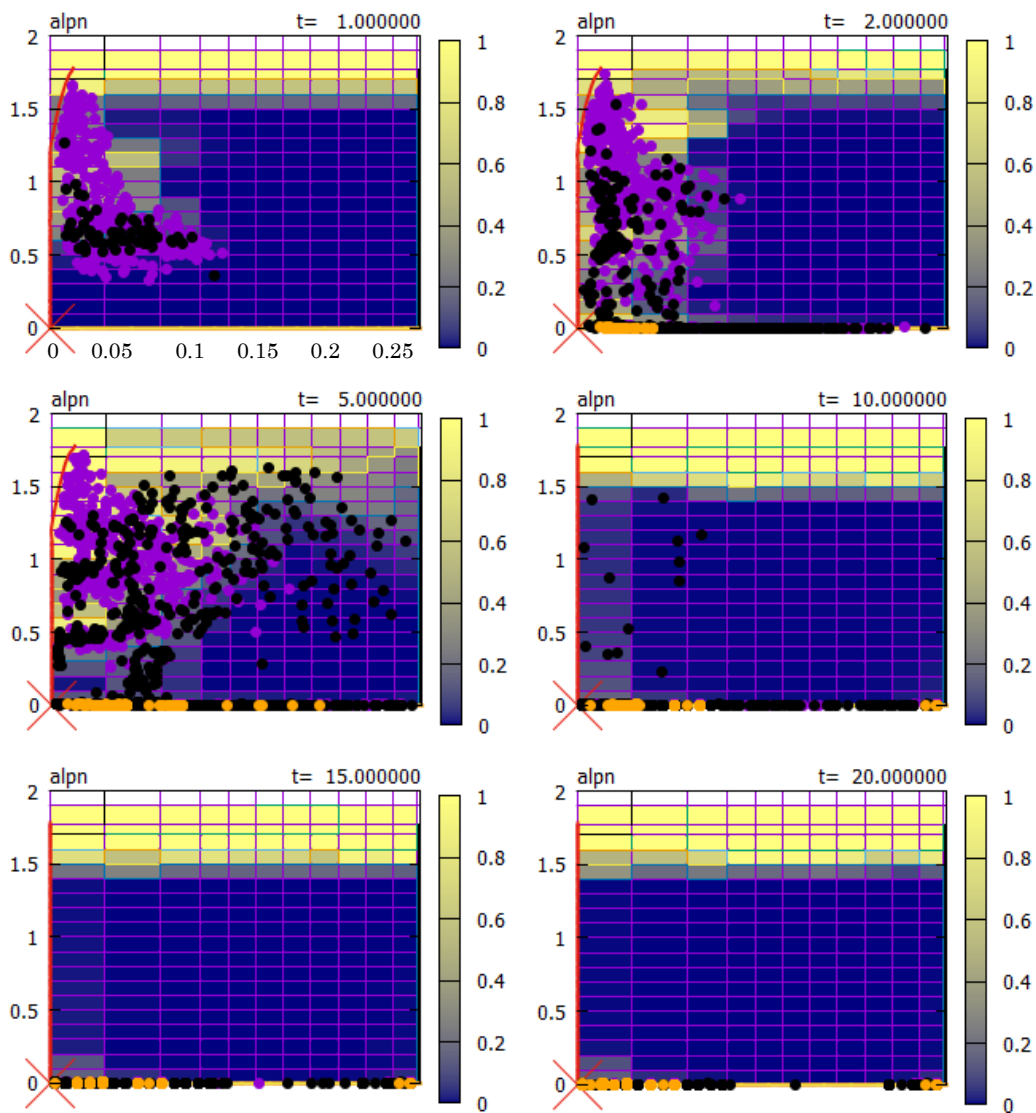


図 A25-C4-2 ボイド率及び溶融物粒子分布図

DEFOR-A26 (キャッチャー1)

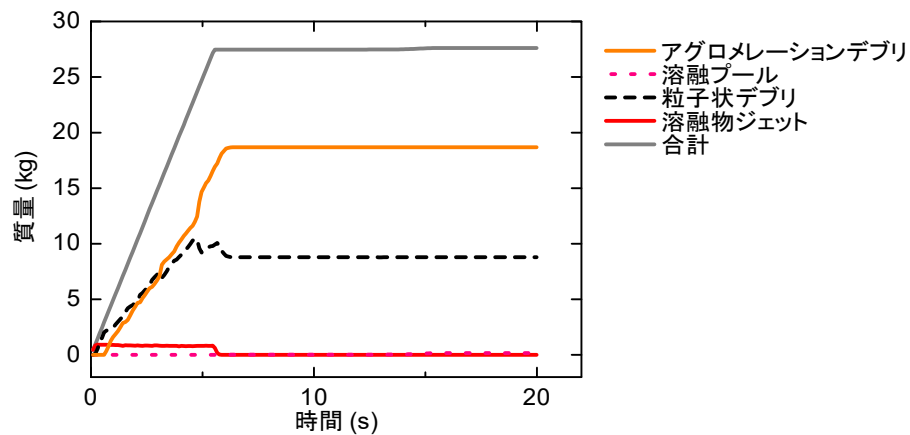


図 A26-C1-1 デブリの状態別質量の履歴

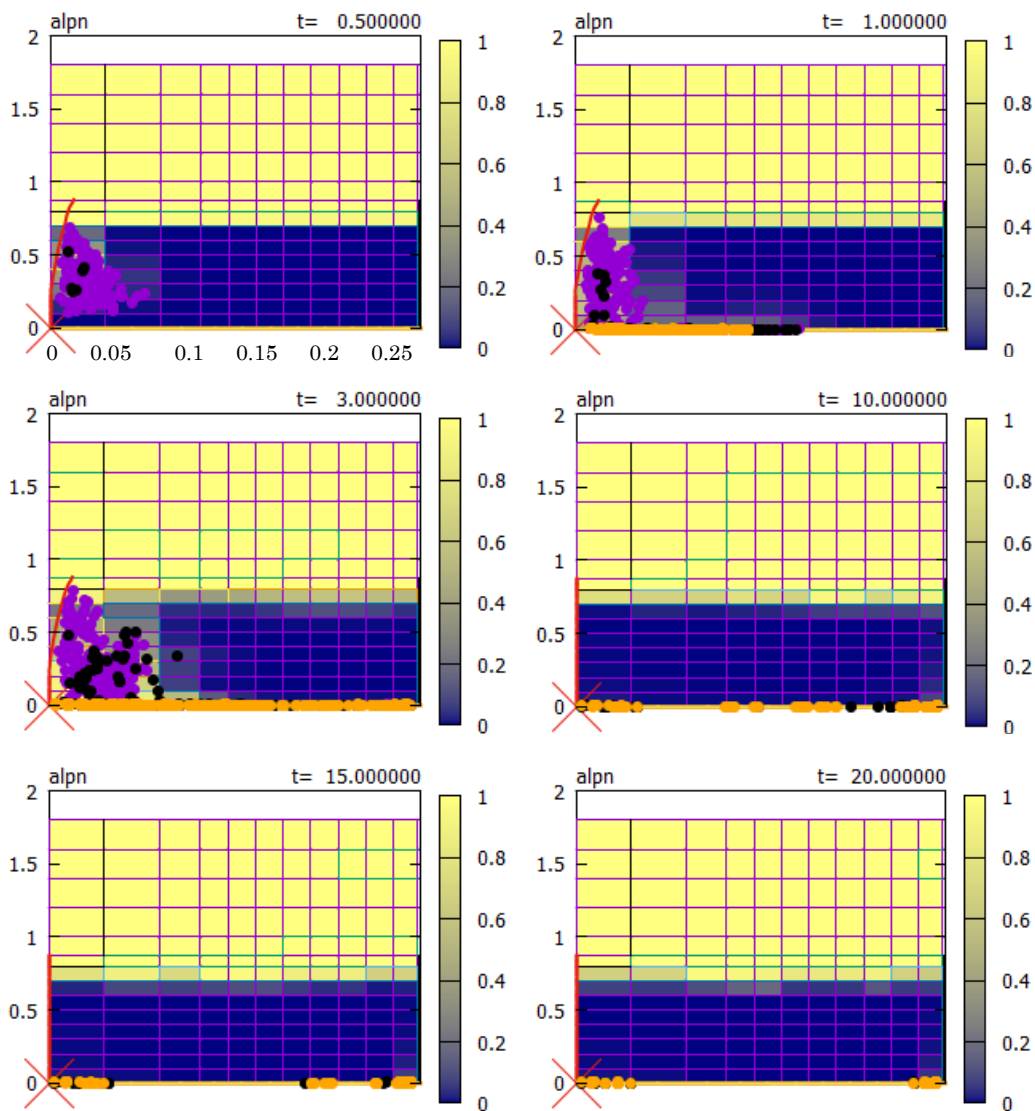


図 A26-C1-2 ボイド率及び熔融物粒子分布図

DEFOR-A26 (キャッチャー2)

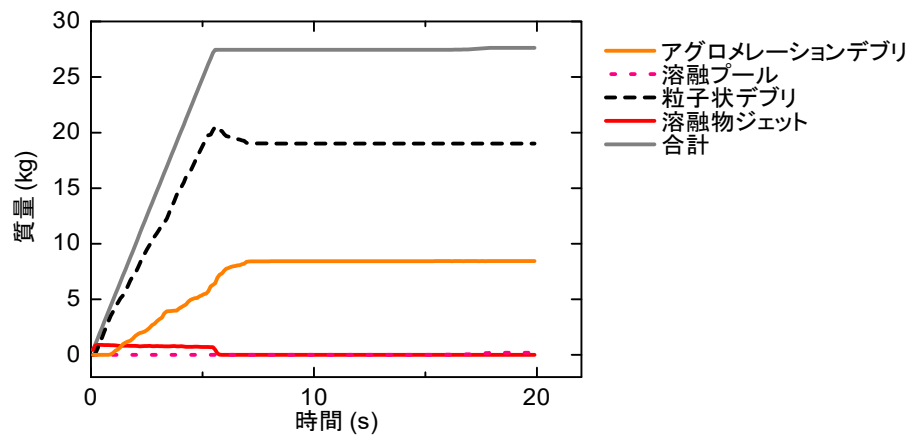


図 A26-C2-1 デブリの状態別質量の履歴

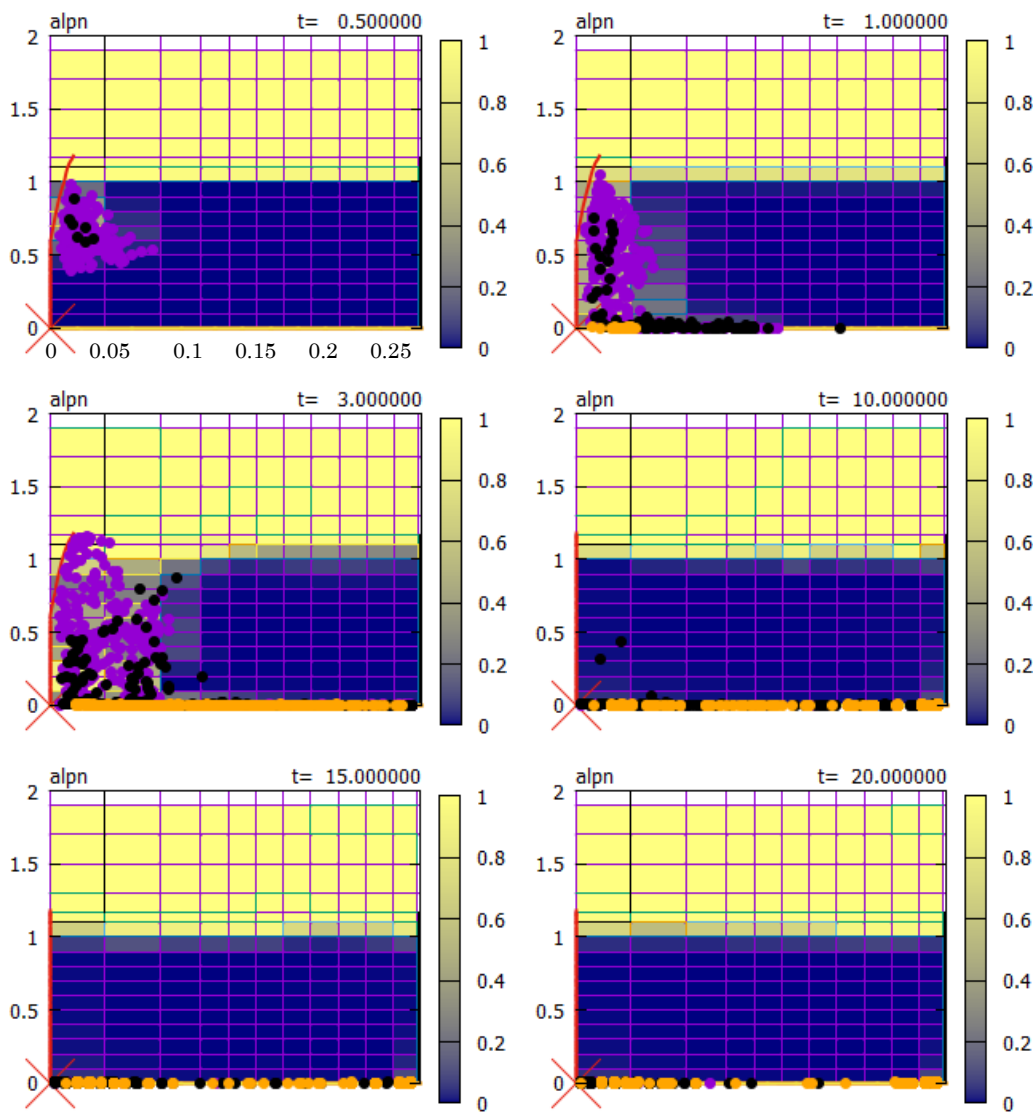


図 A26-C2-2 ボイド率及び溶融物粒子分布図

DEFOR-A26 (キャッチャー3)

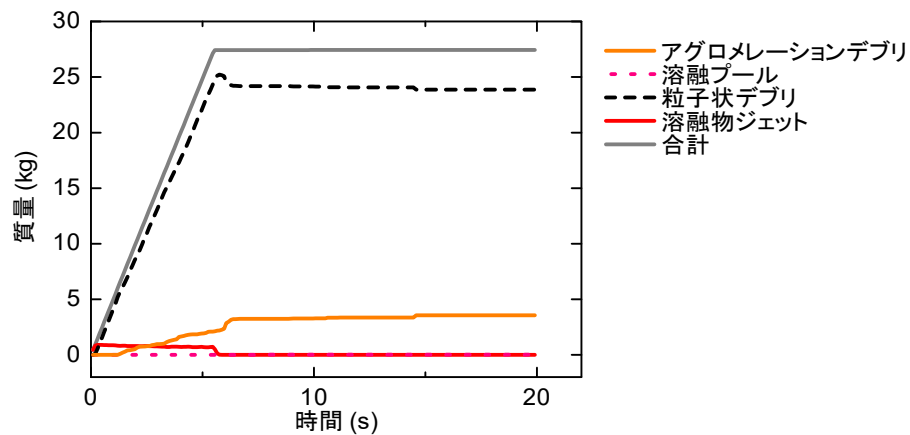


図 A26-C3-1 デブリの状態別質量の履歴

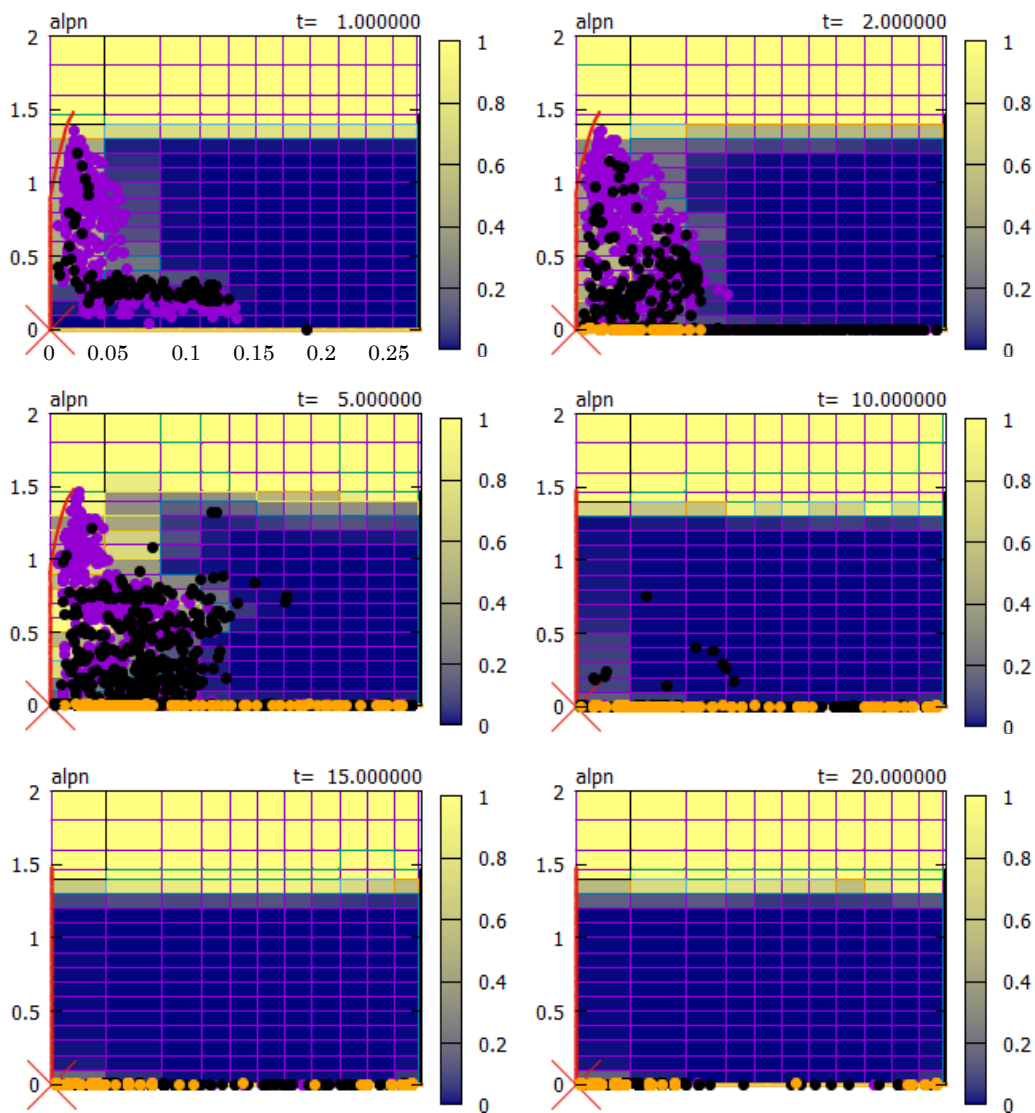


図 A26-C3-2 ボイド率及び溶融物粒子分布図

DEFOR-A26 (キャッチャー4)

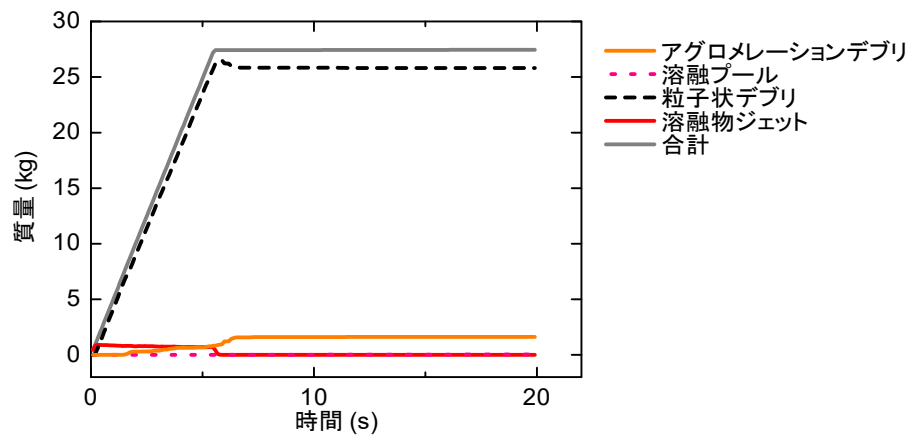


図 A26-C4-1 デブリの状態別質量の履歴

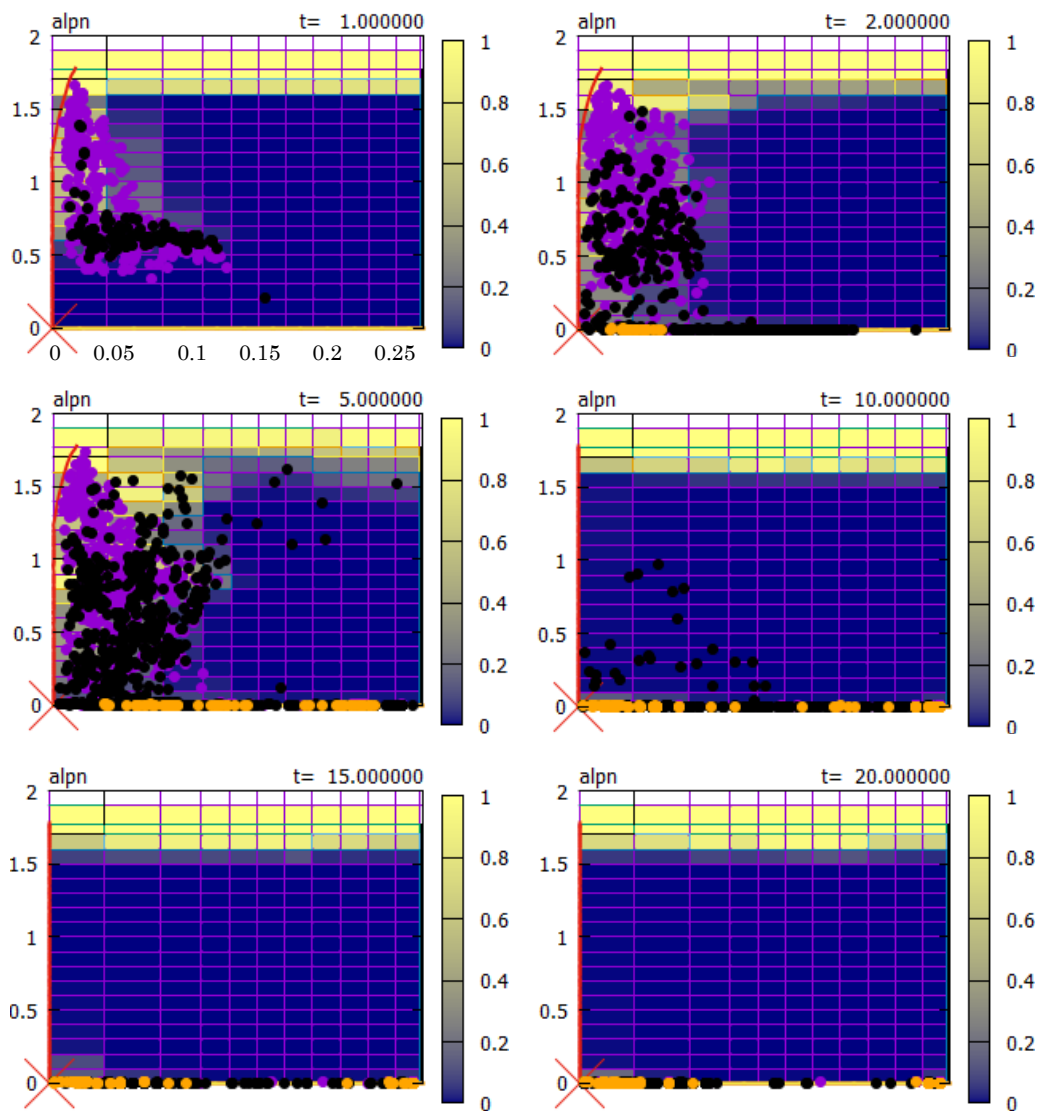


図 A26-C4-2 ボイド率及び溶融物粒子分布図

付録 B PULiMS 実験の解析結果

B.1 全体の分布を示す図

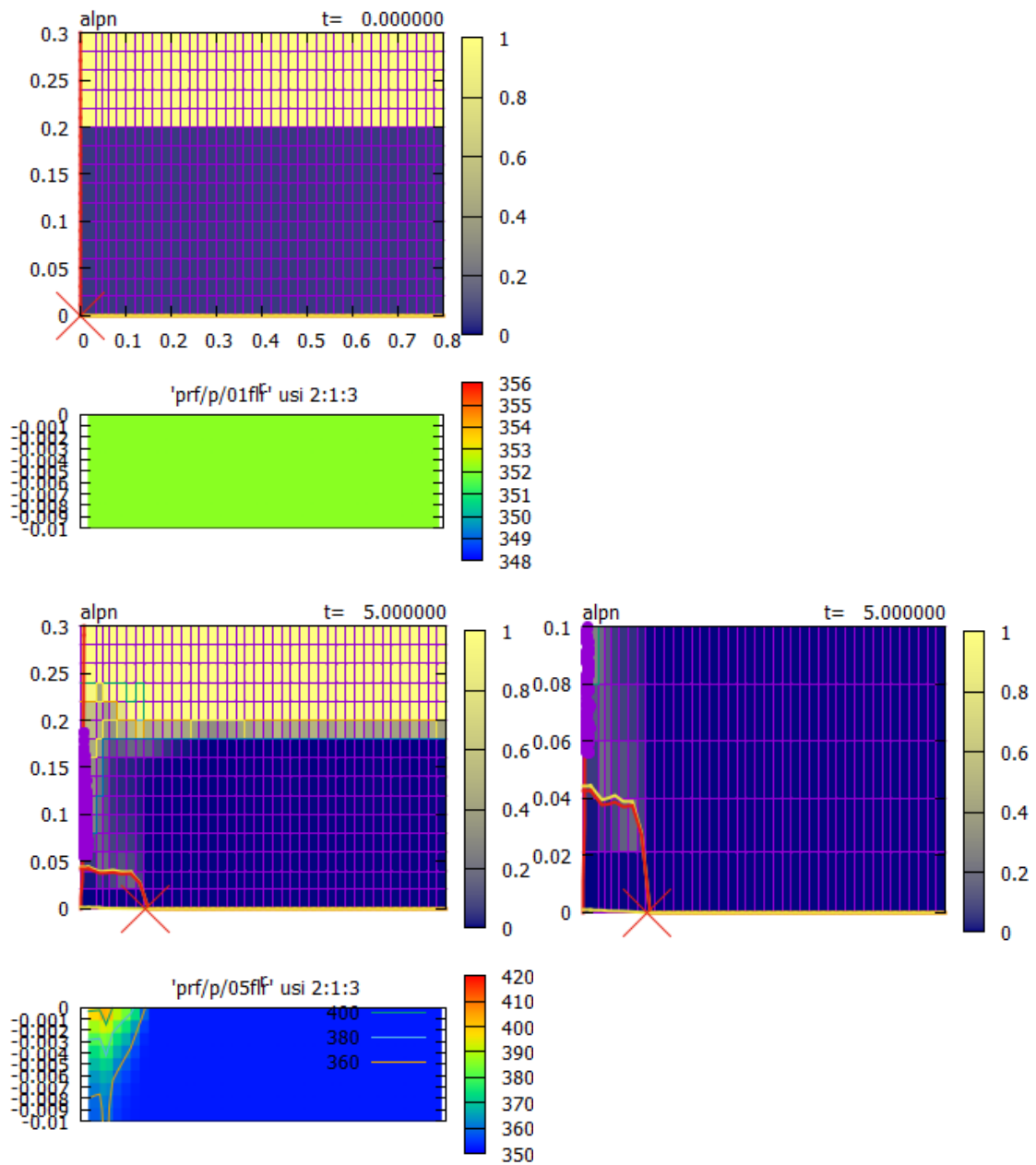


図 B.1 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E1 : 0~5 秒)

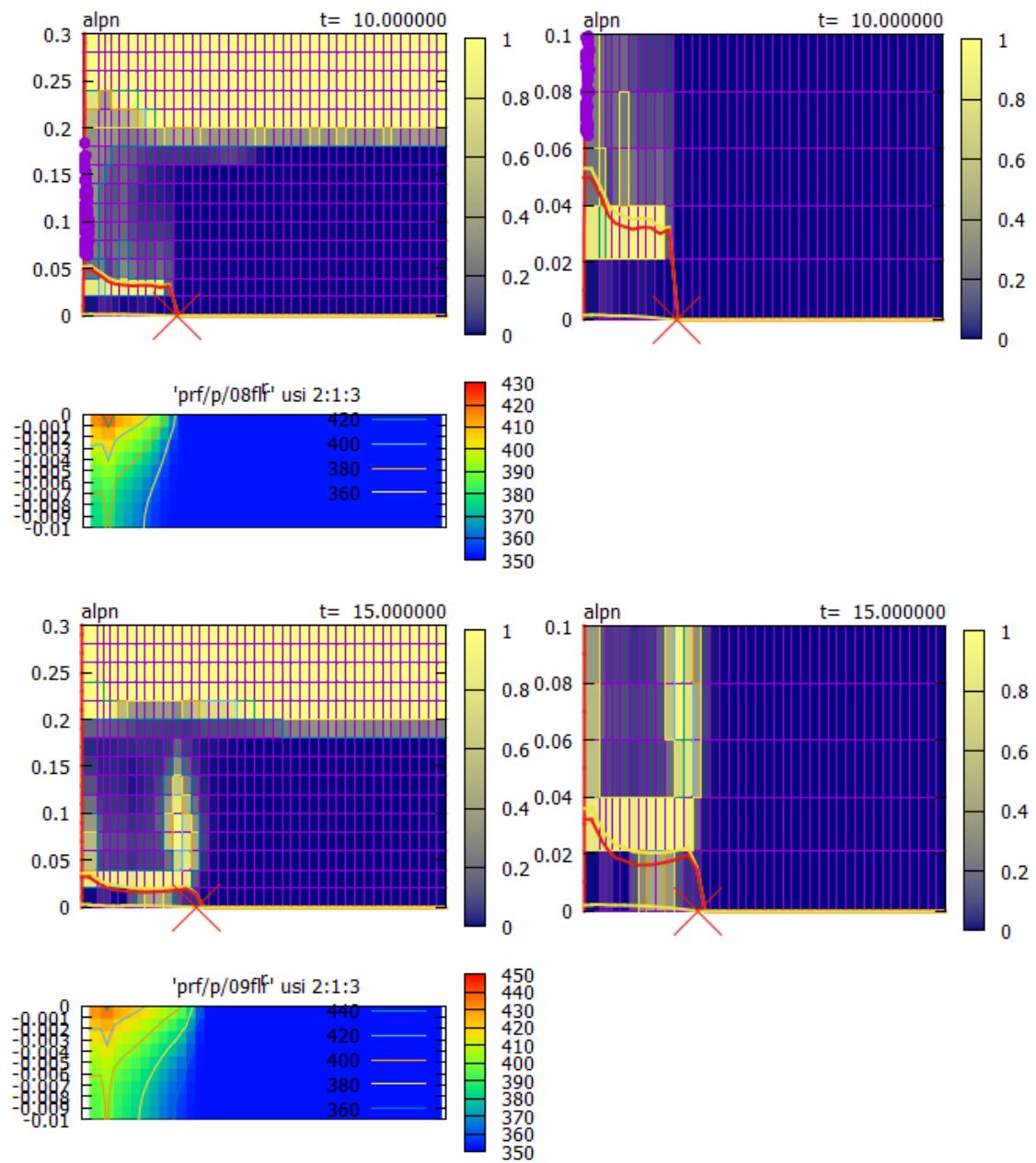


図 B.2 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E1 : 10~15 秒)

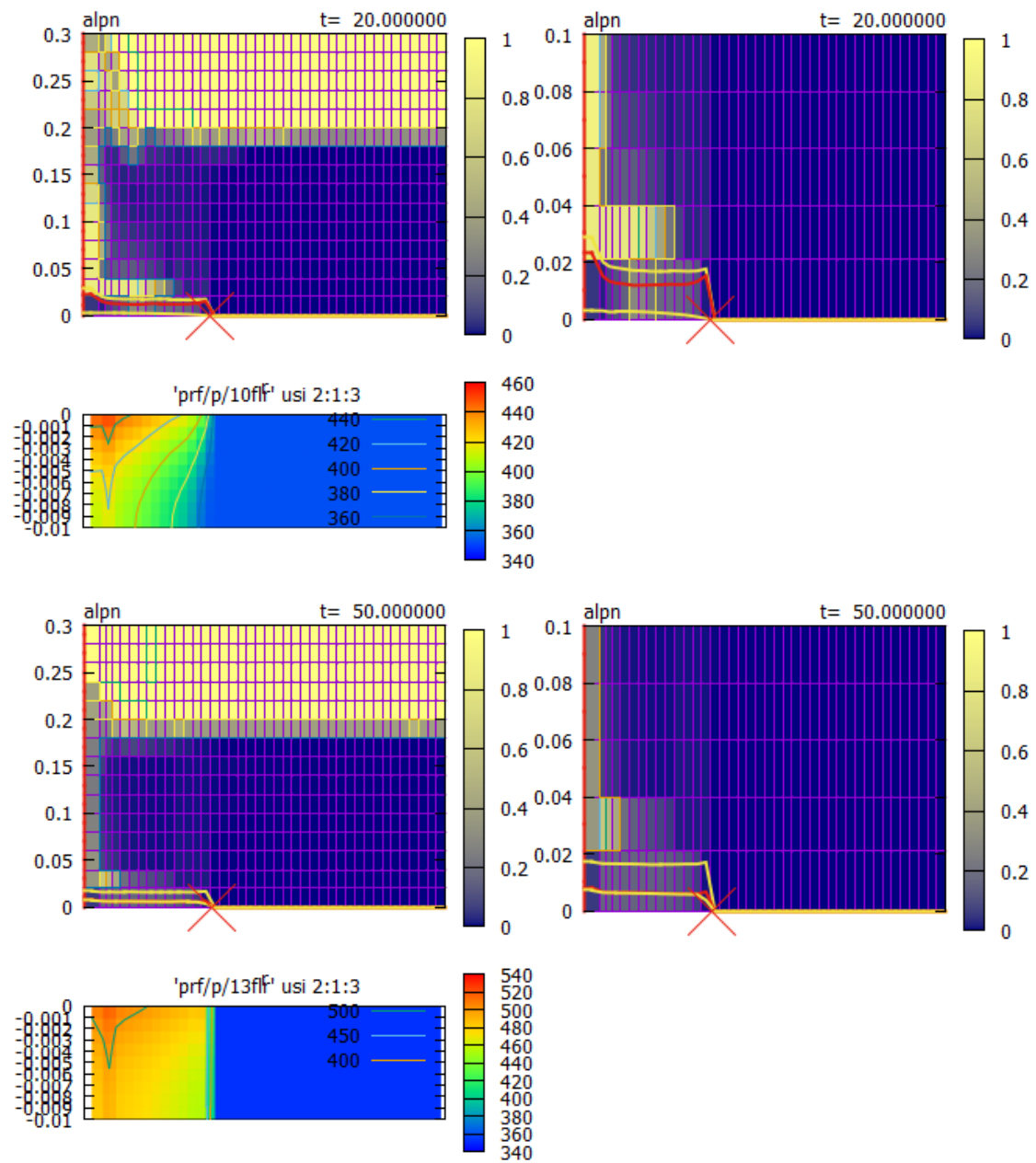


図 B.3 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E1 : 20~50 秒)

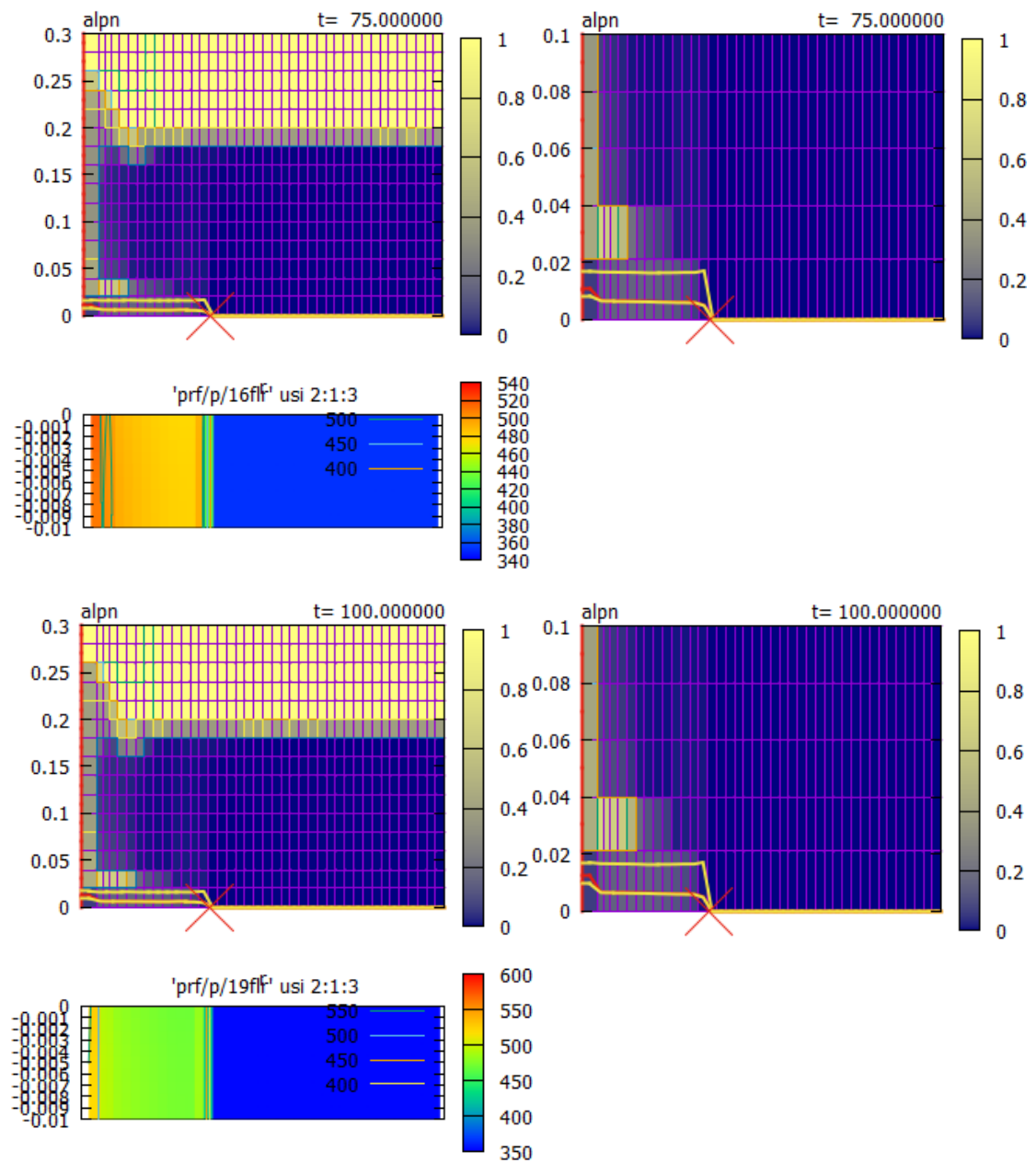


図 B.4 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E1 : 75~100 秒)

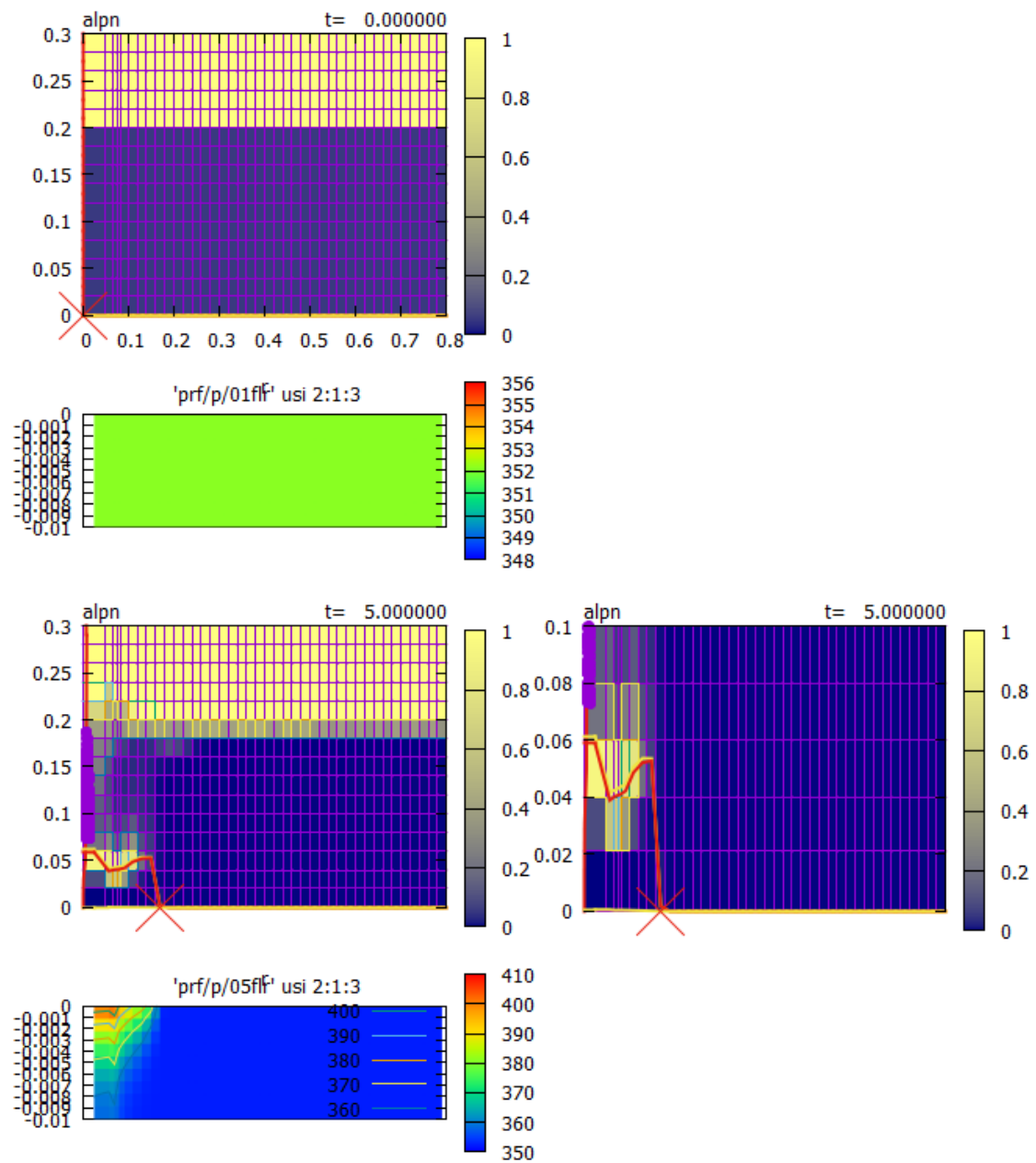


図 B.5 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E4 : 0~5 秒)

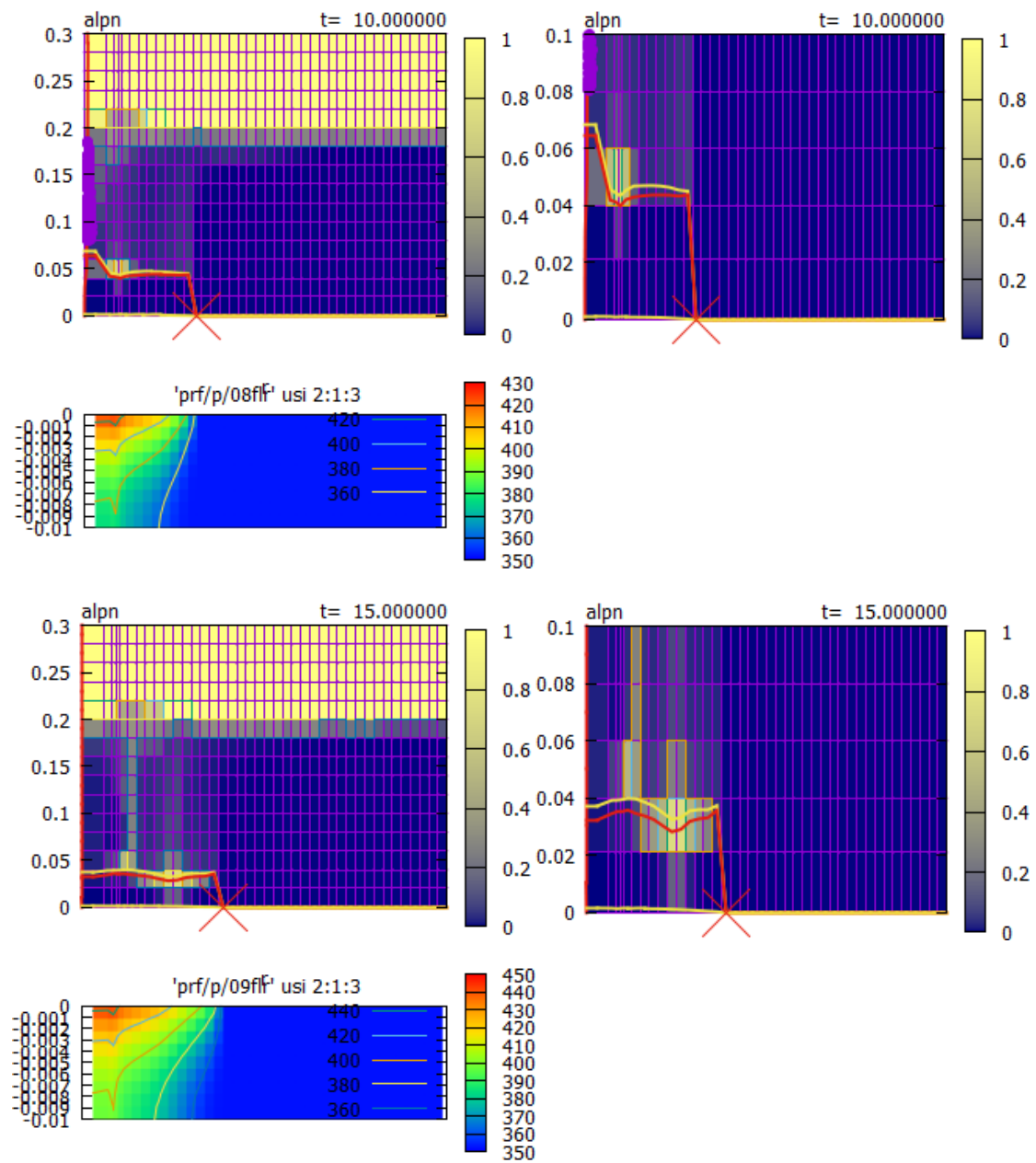


図 B.6 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E4 : 10~15 秒)

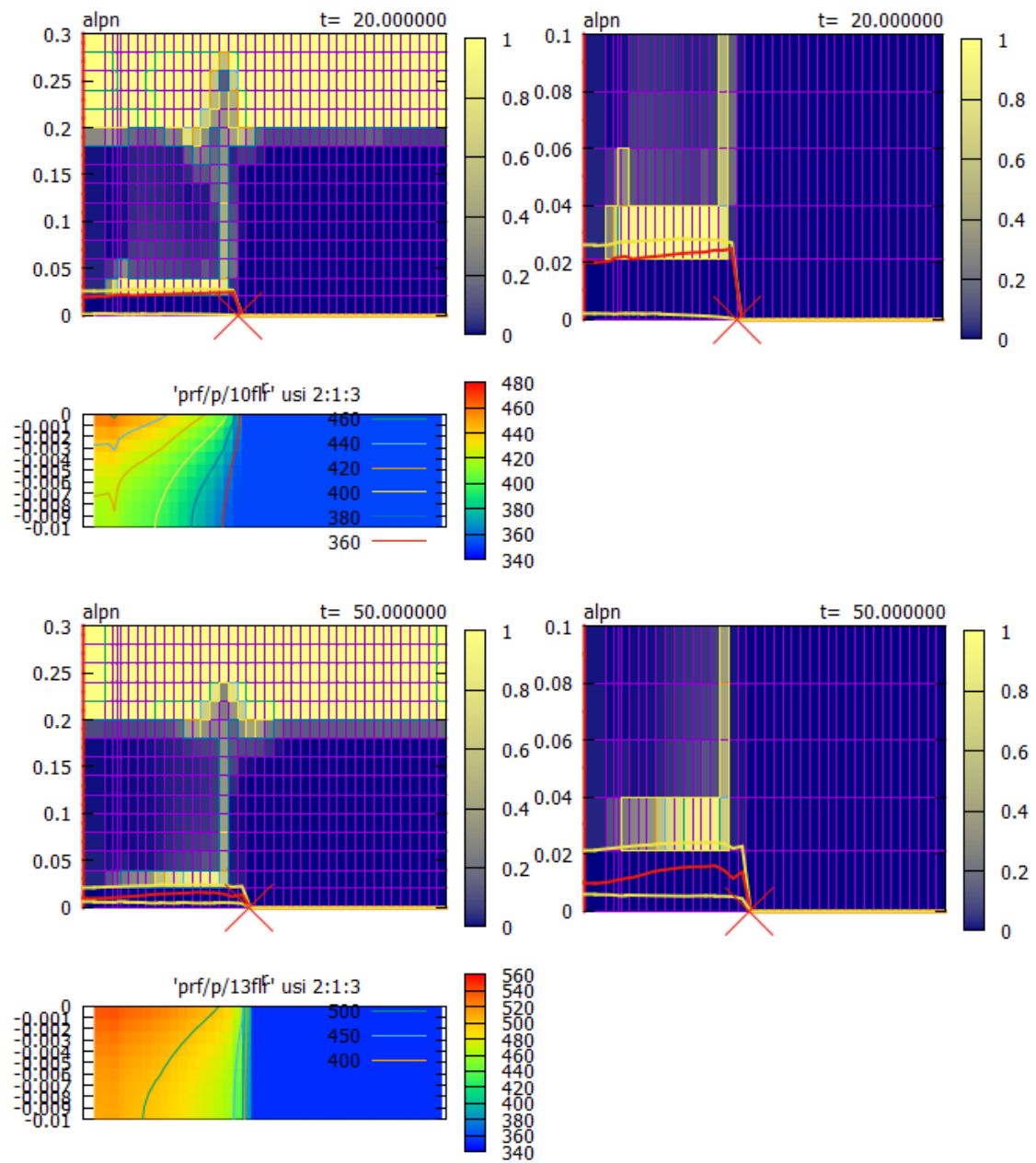


図 B.7 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E4 : 20~50 秒)

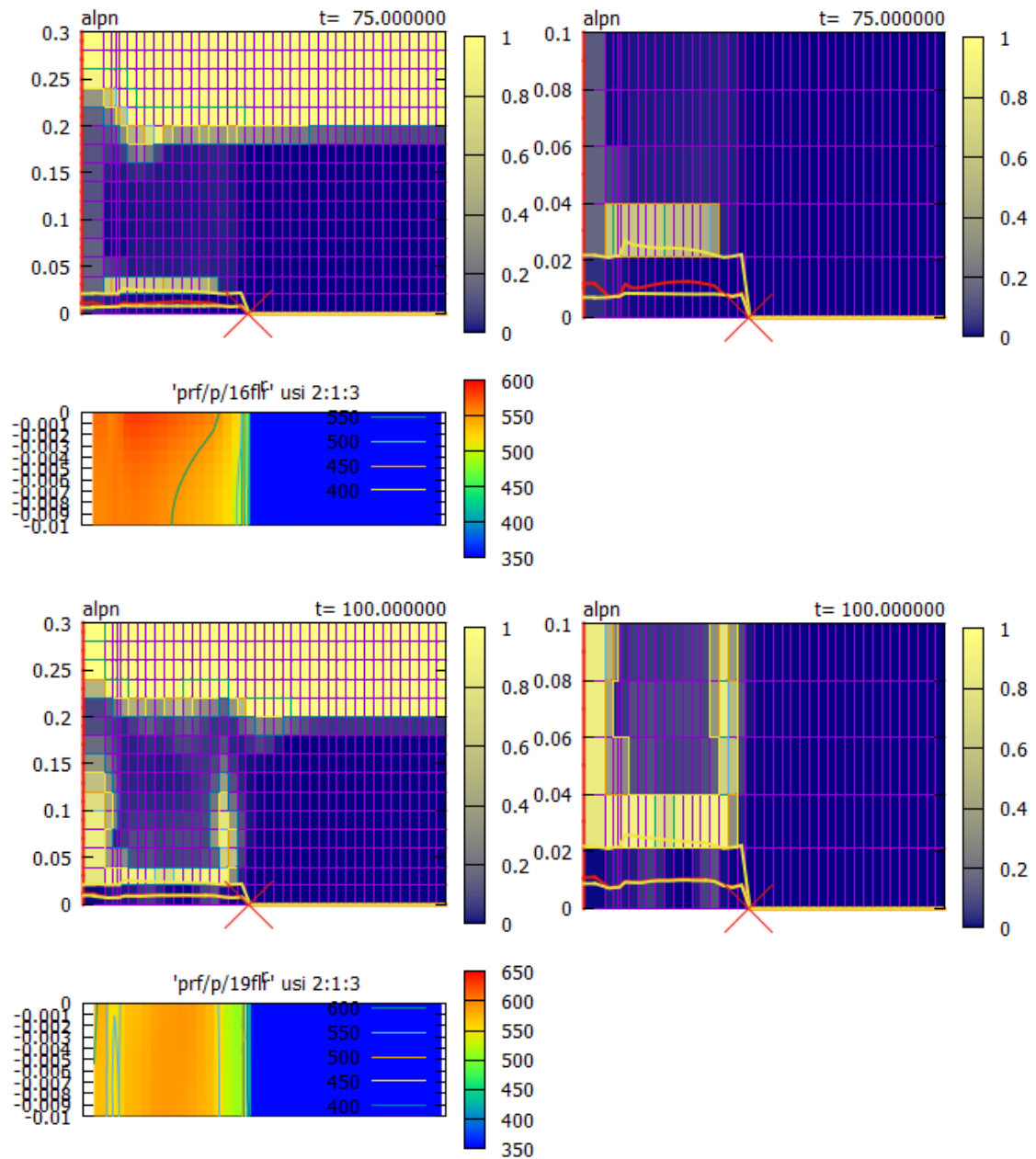


図 B.8 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E4 : 75~100 秒)

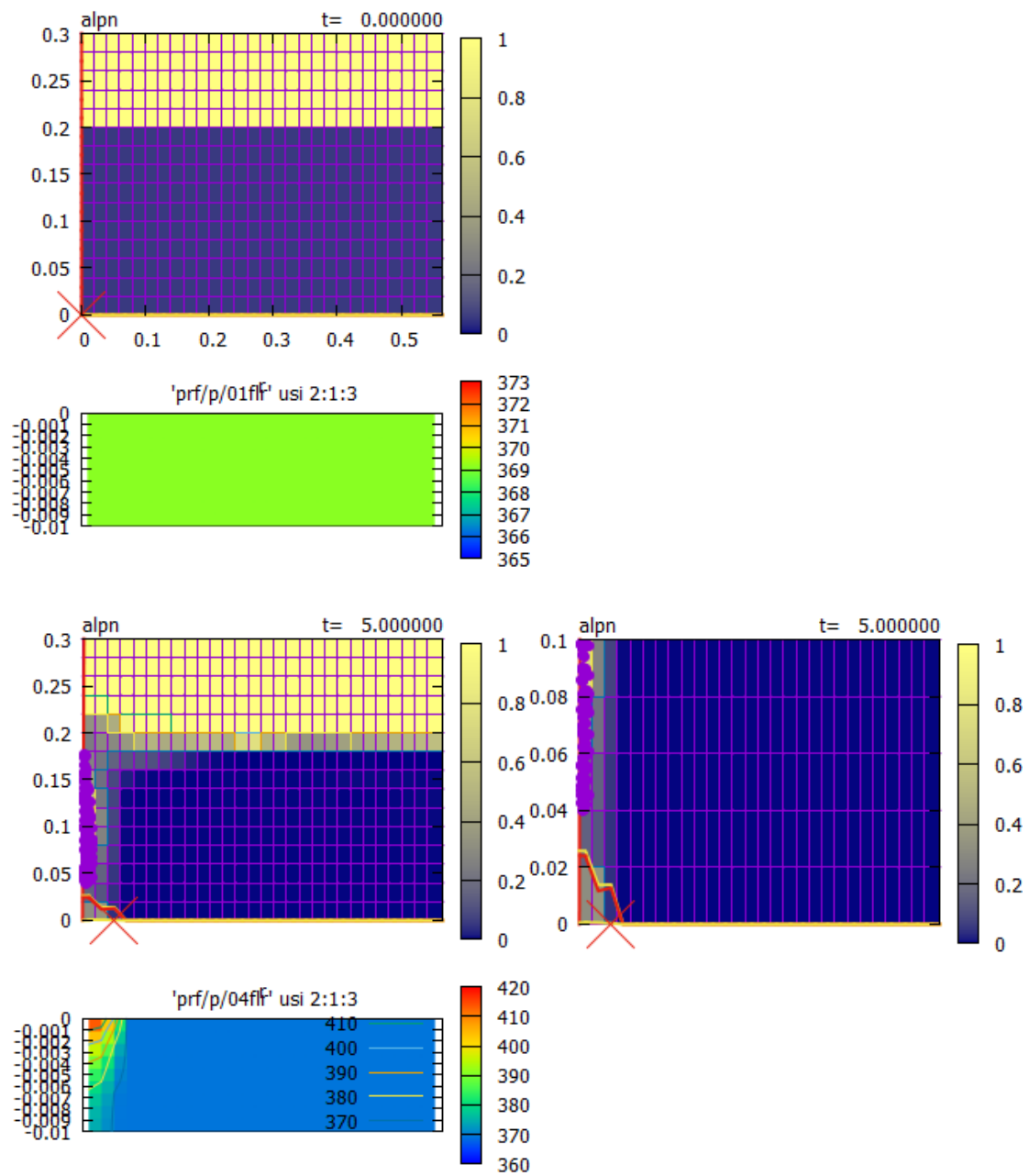


図 B.9 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E8 : 0~5 秒)

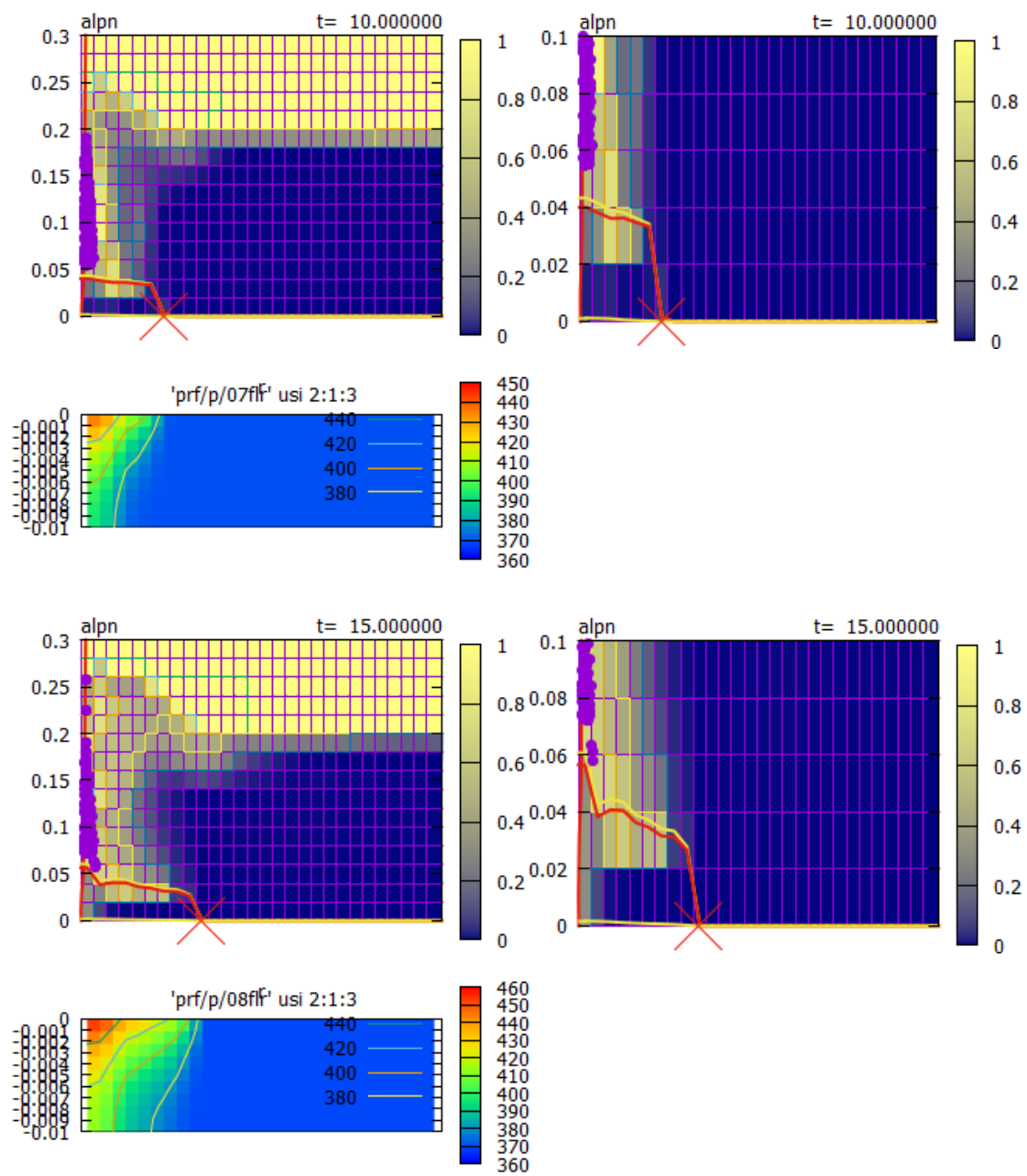


図 B.10 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E8 : 10~15 秒)

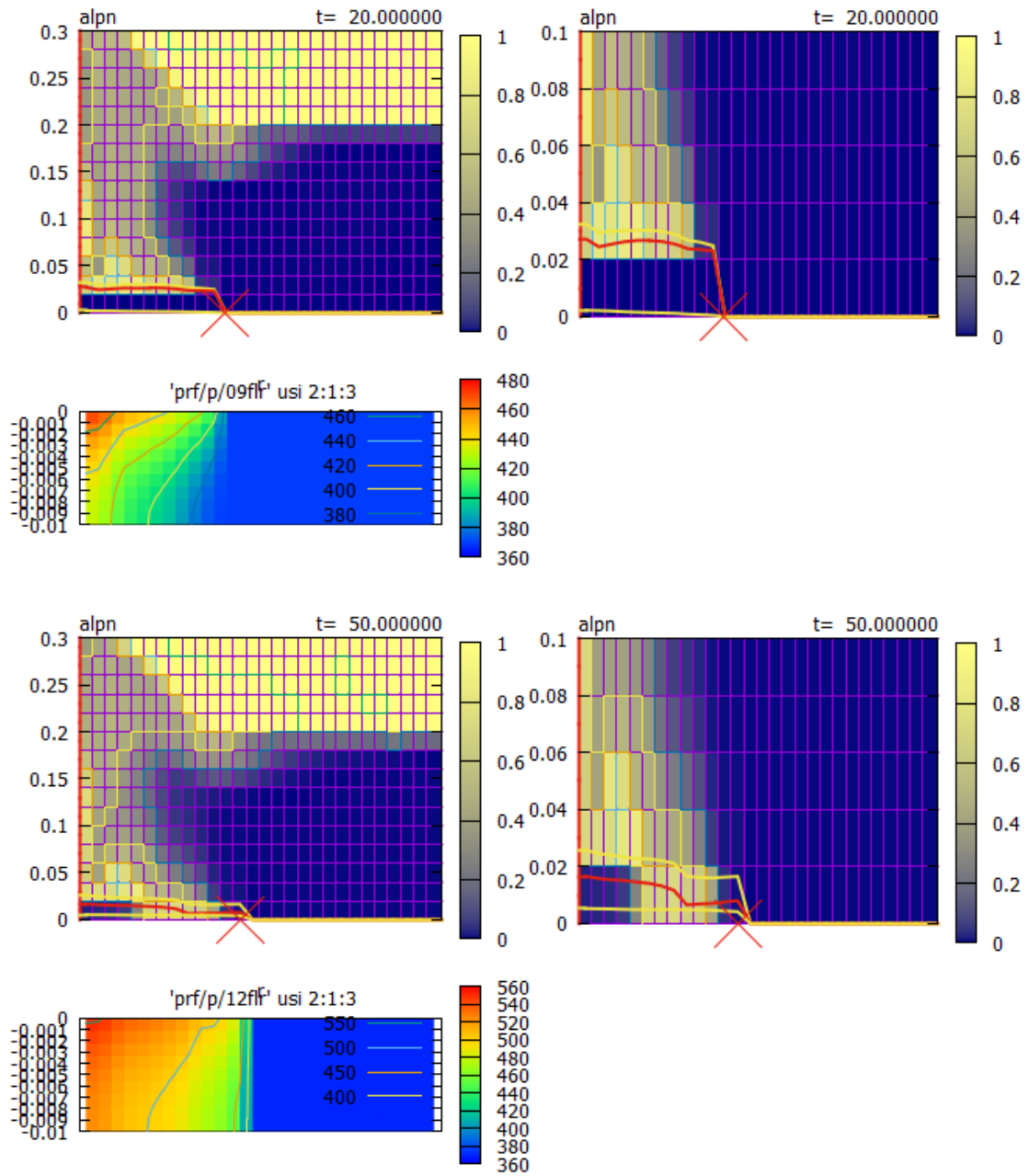


図 B.11 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E8 : 20~50 秒)

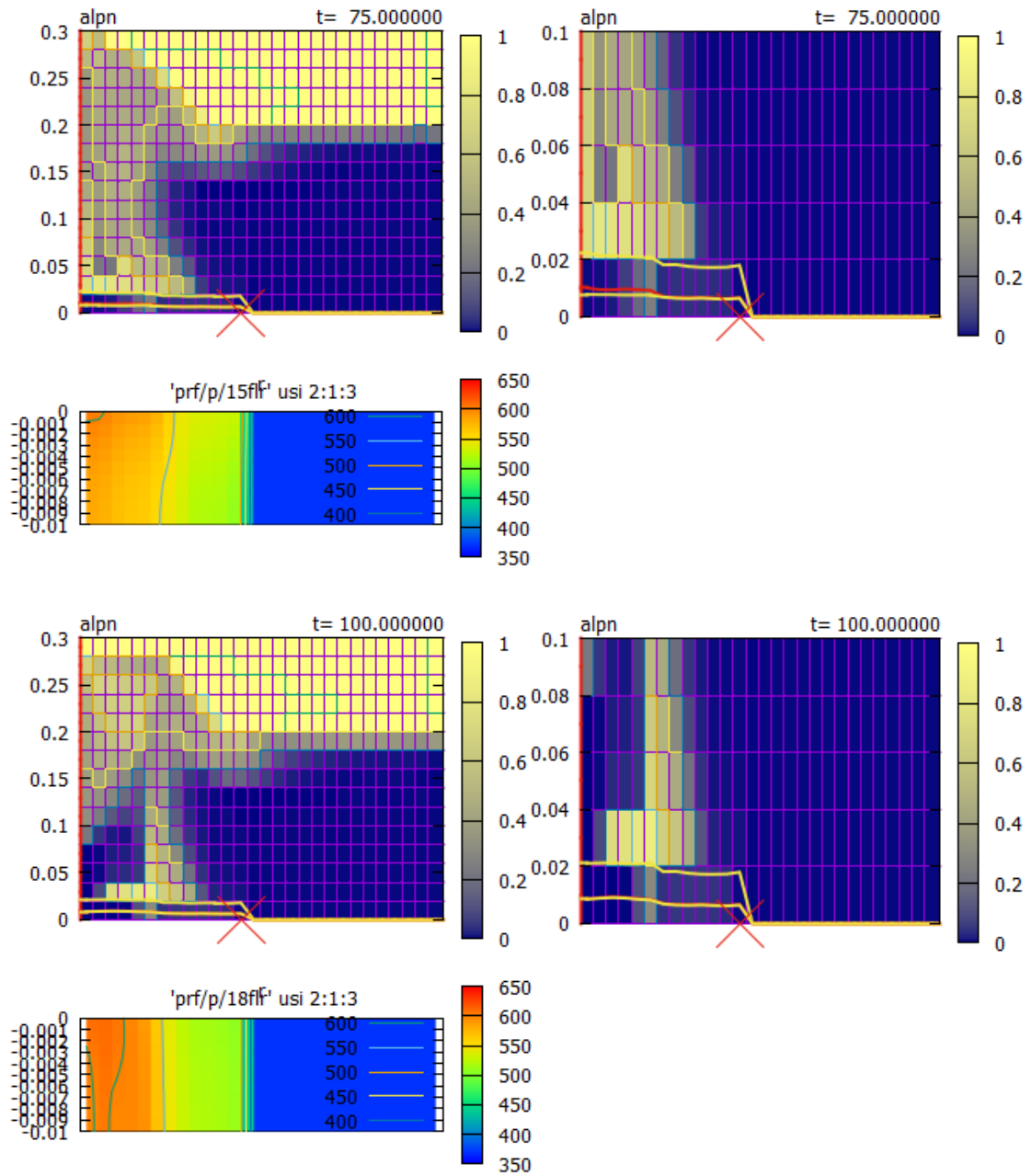


図 B.12 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E8 : 75~100 秒)

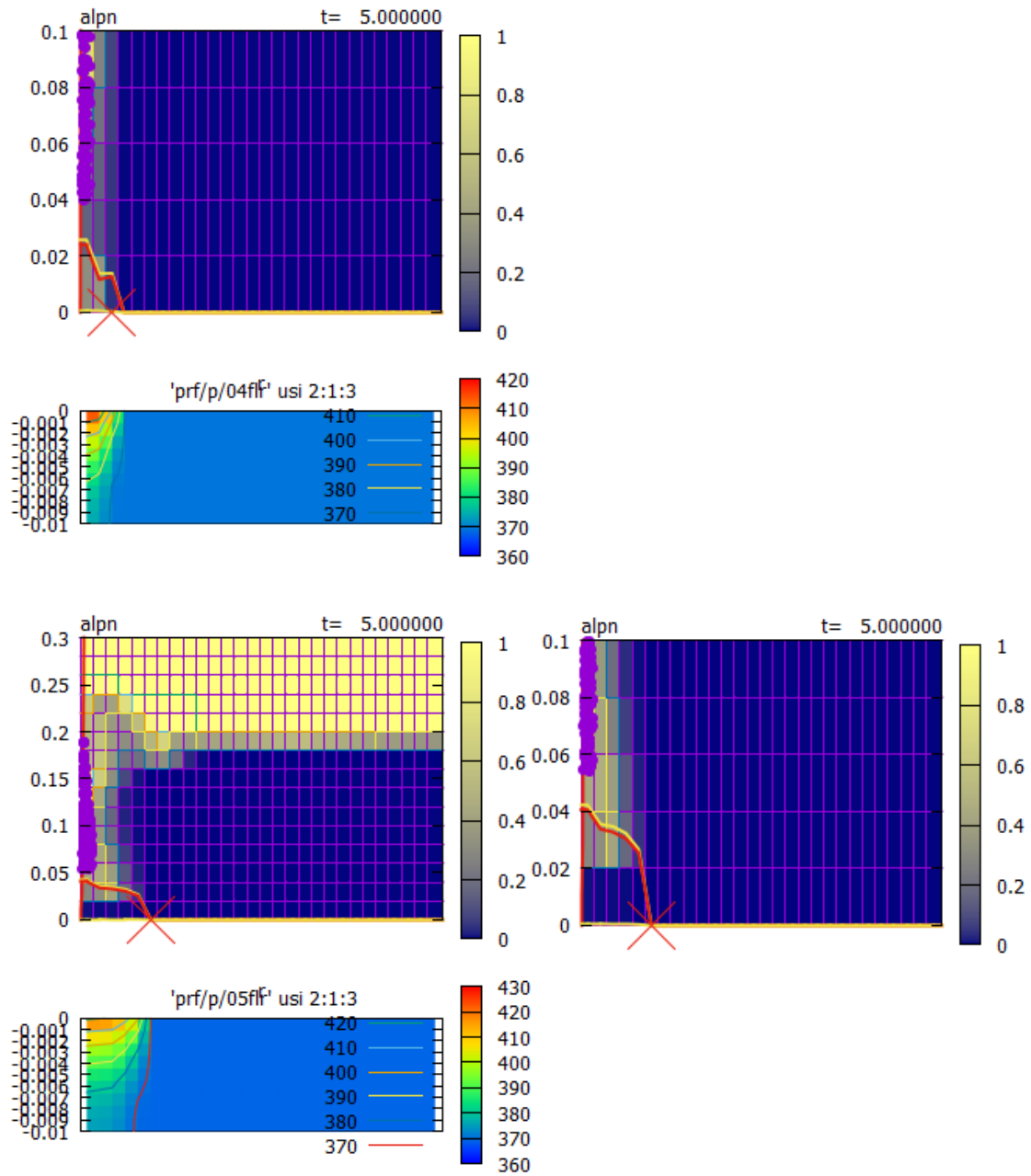


図 B.13 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E9 : 0~5 秒)

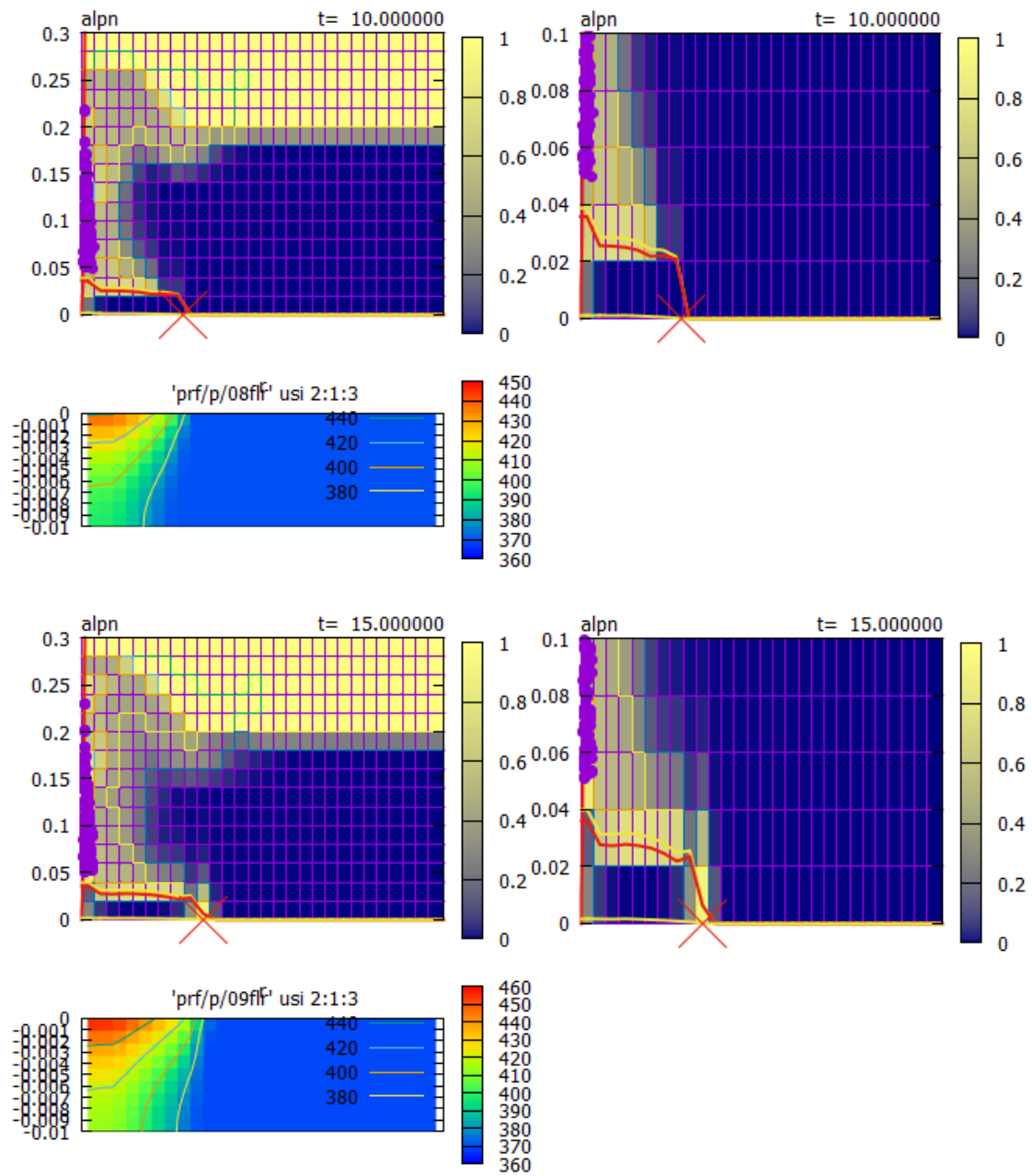


図 B.14 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E9 : 10~15 秒)

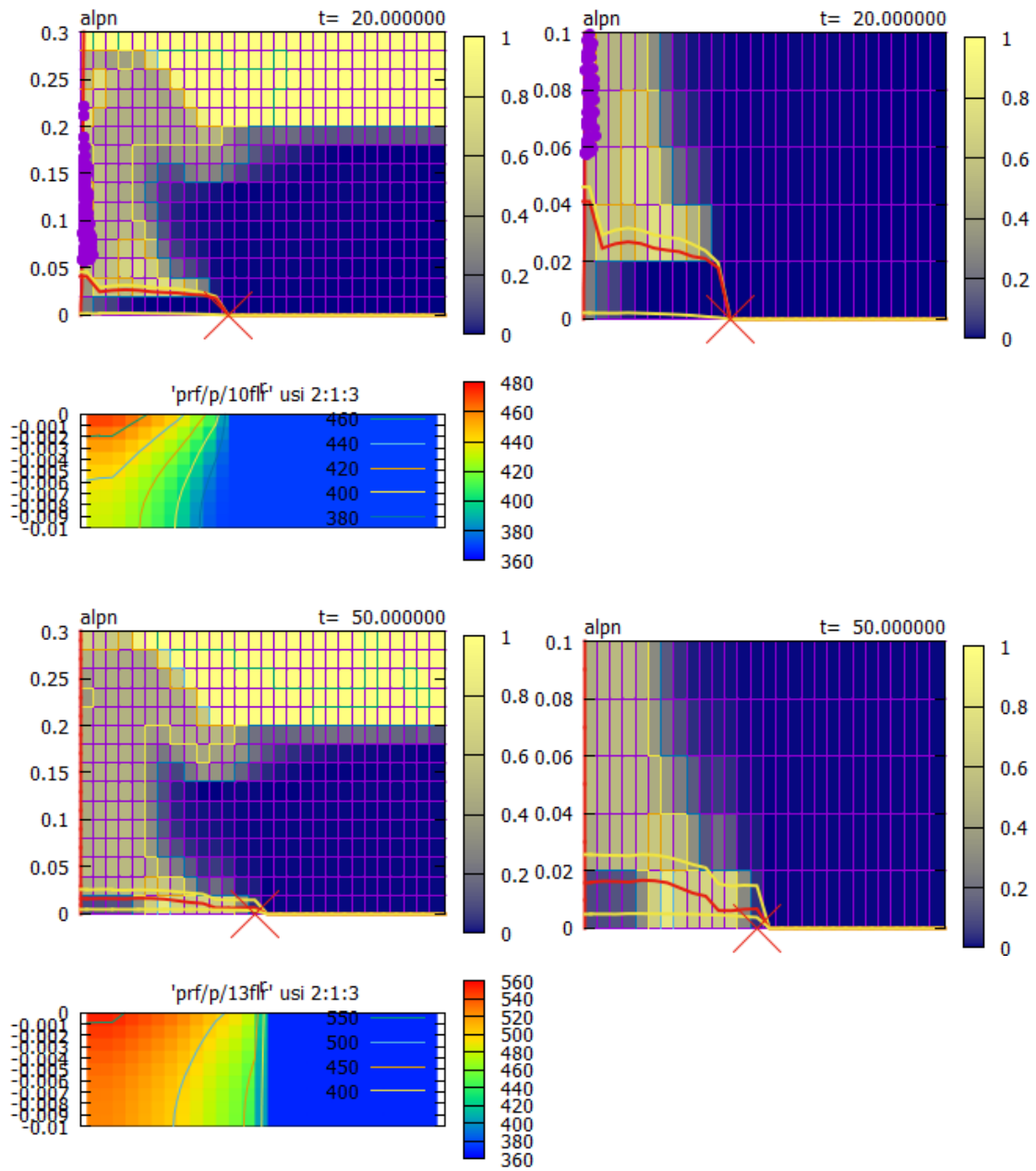


図 B.15 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E9 : 20~50 秒)

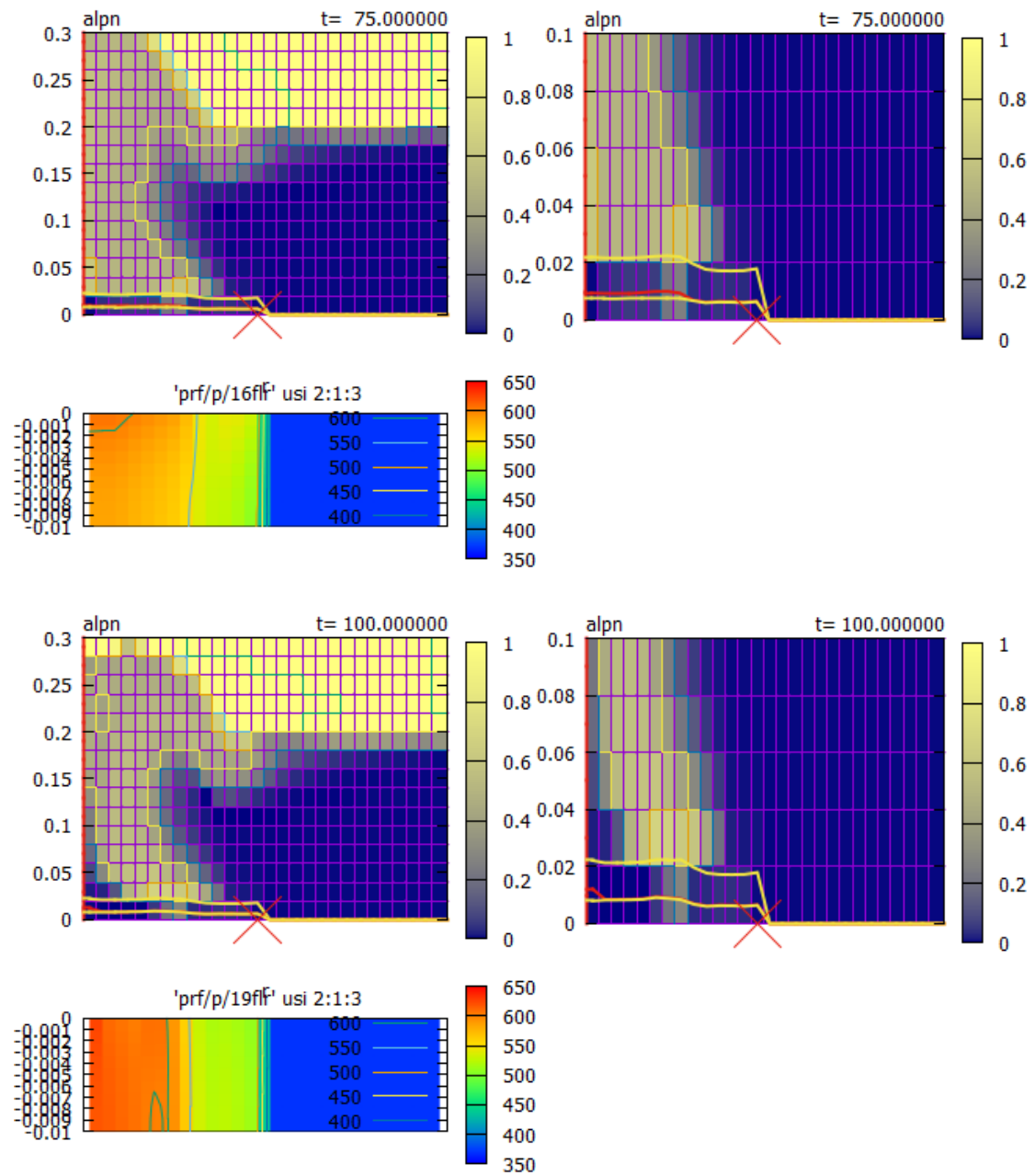


図 B.16 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E9 : 75~100 秒)

B.2 クラスト厚さの変化

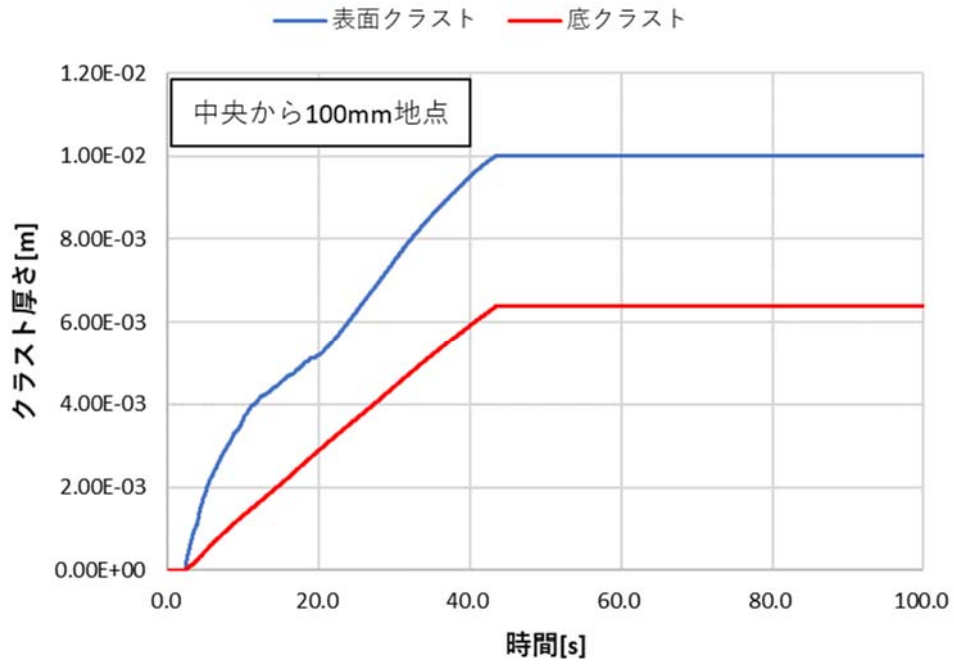


図 B.17 クラスト厚さの変化の計算結果 (PULiMS 実験 E1)

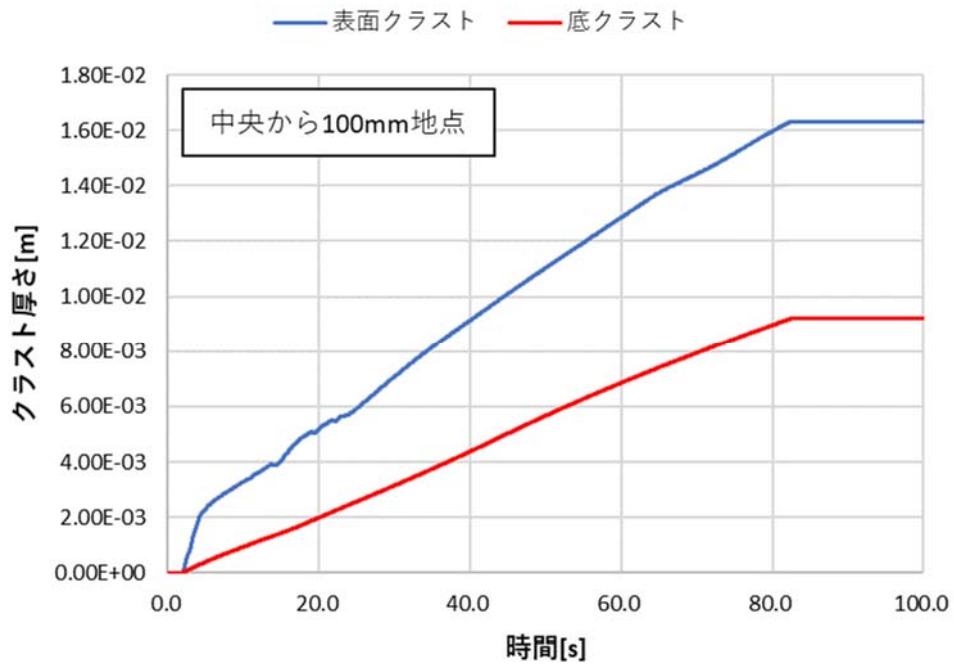


図 B.18 クラスト厚さの変化の計算結果 (PULiMS 実験 E4)

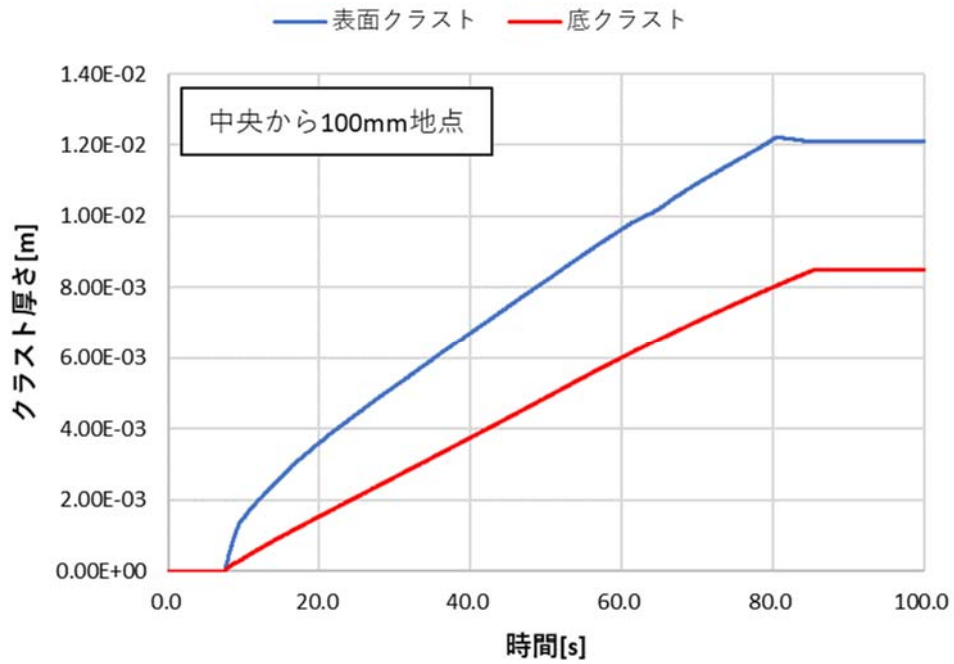


図 B.19 クラスト厚さの変化の計算結果 (PULiMS 実験 E8)

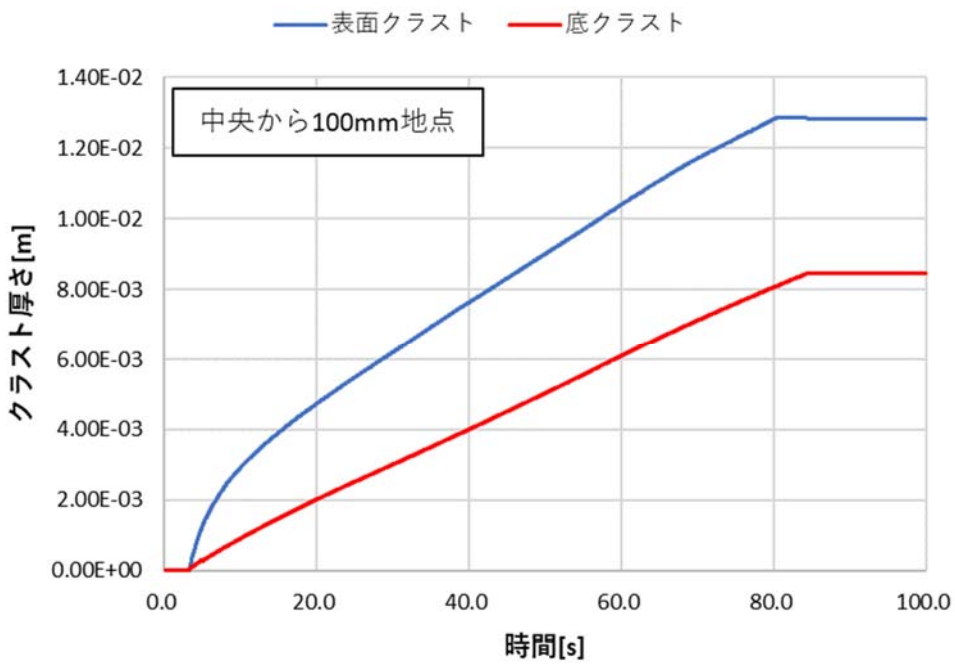


図 B.20 クラスト厚さの変化の計算結果 (PULiMS 実験 E9)

付録 C 実機冷却性評価の予備解析の結果

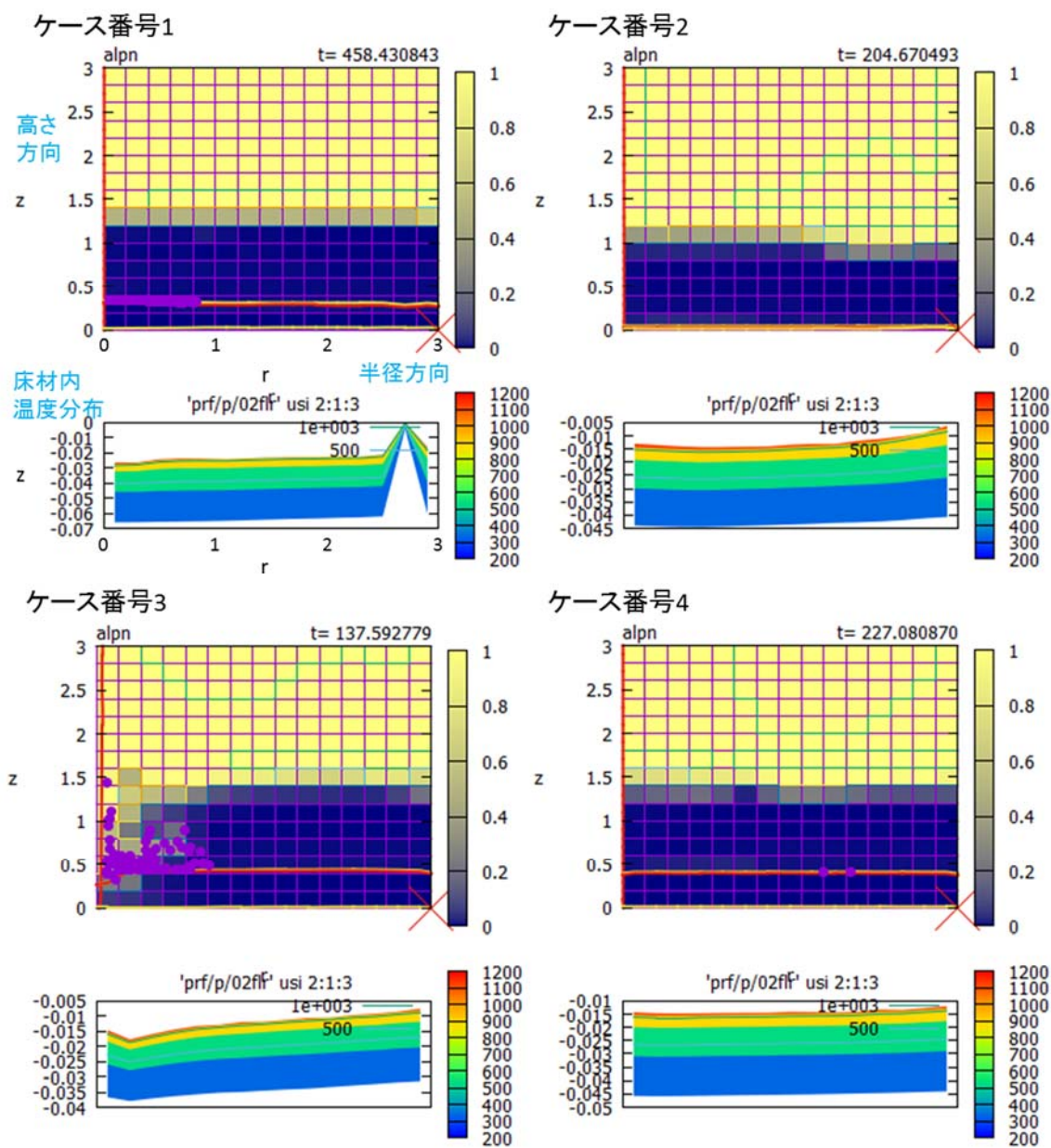


図 B.1 実機体系解析による溶融物及びクラストの半径方向分布 (1/15)

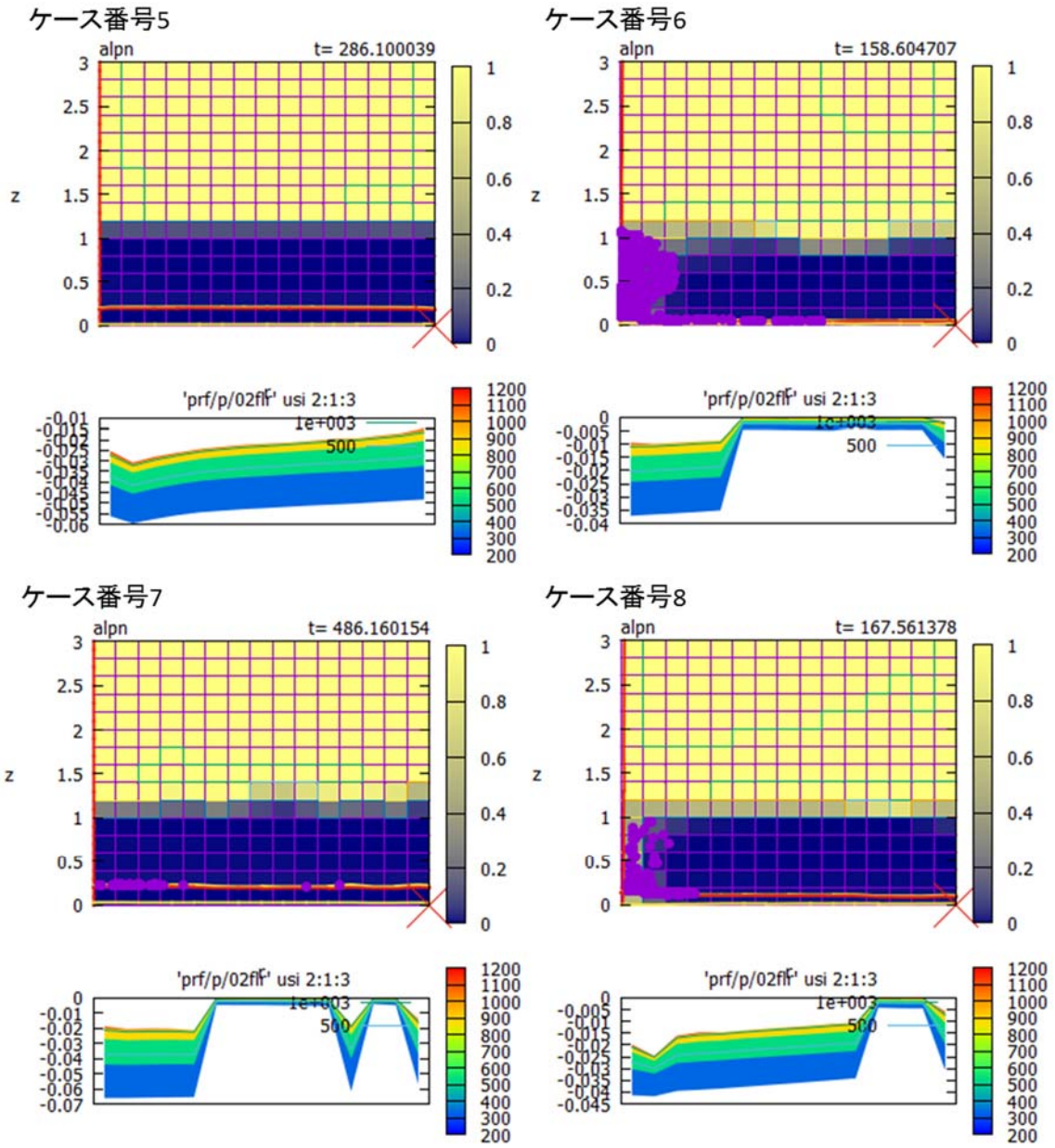


図 B.1 実機体系解析による溶融物及びクラストの半径方向分布 (2/15)

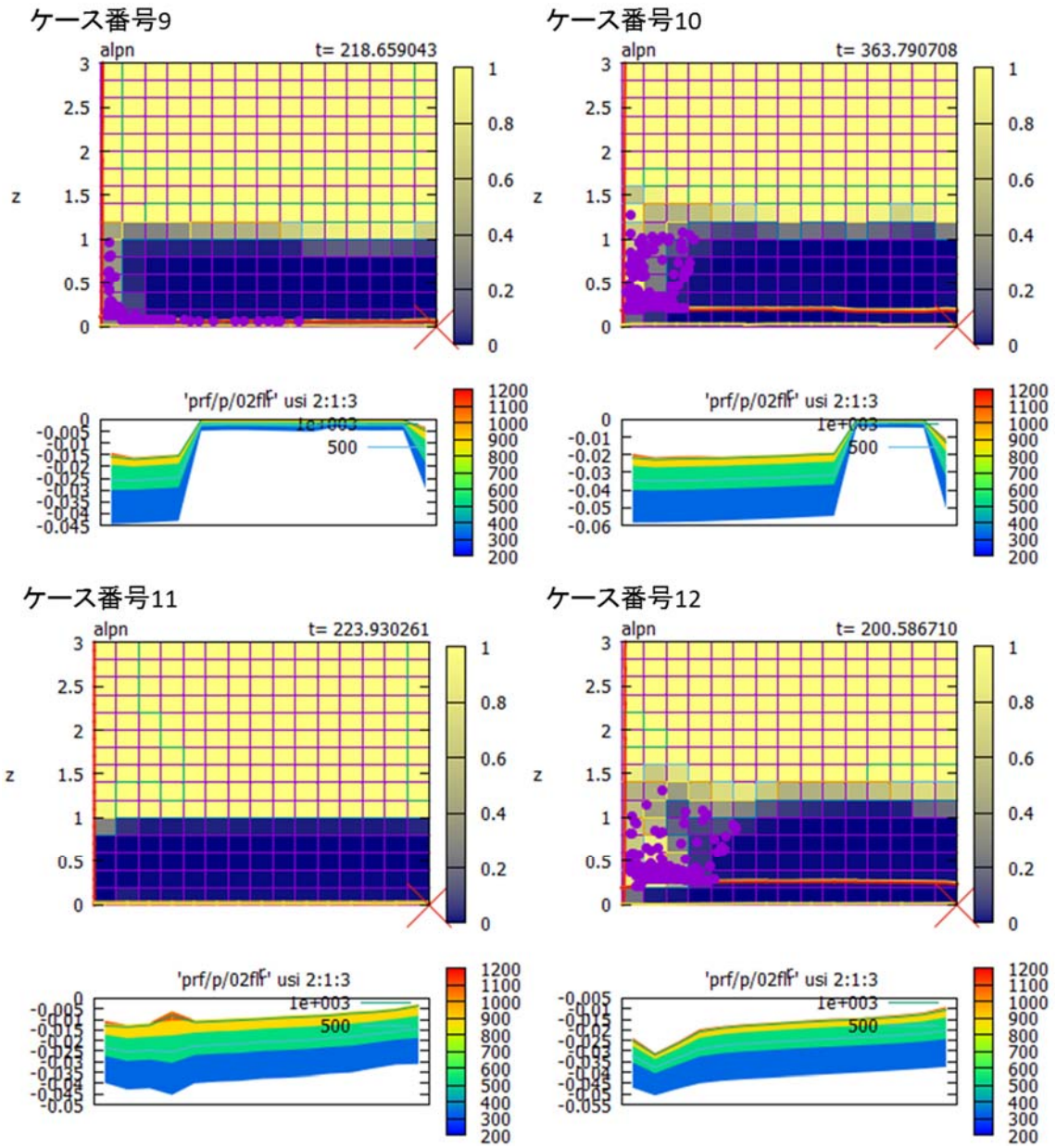


図 B.1 実機体系解析による溶融物及びクラストの半径方向分布 (3/15)

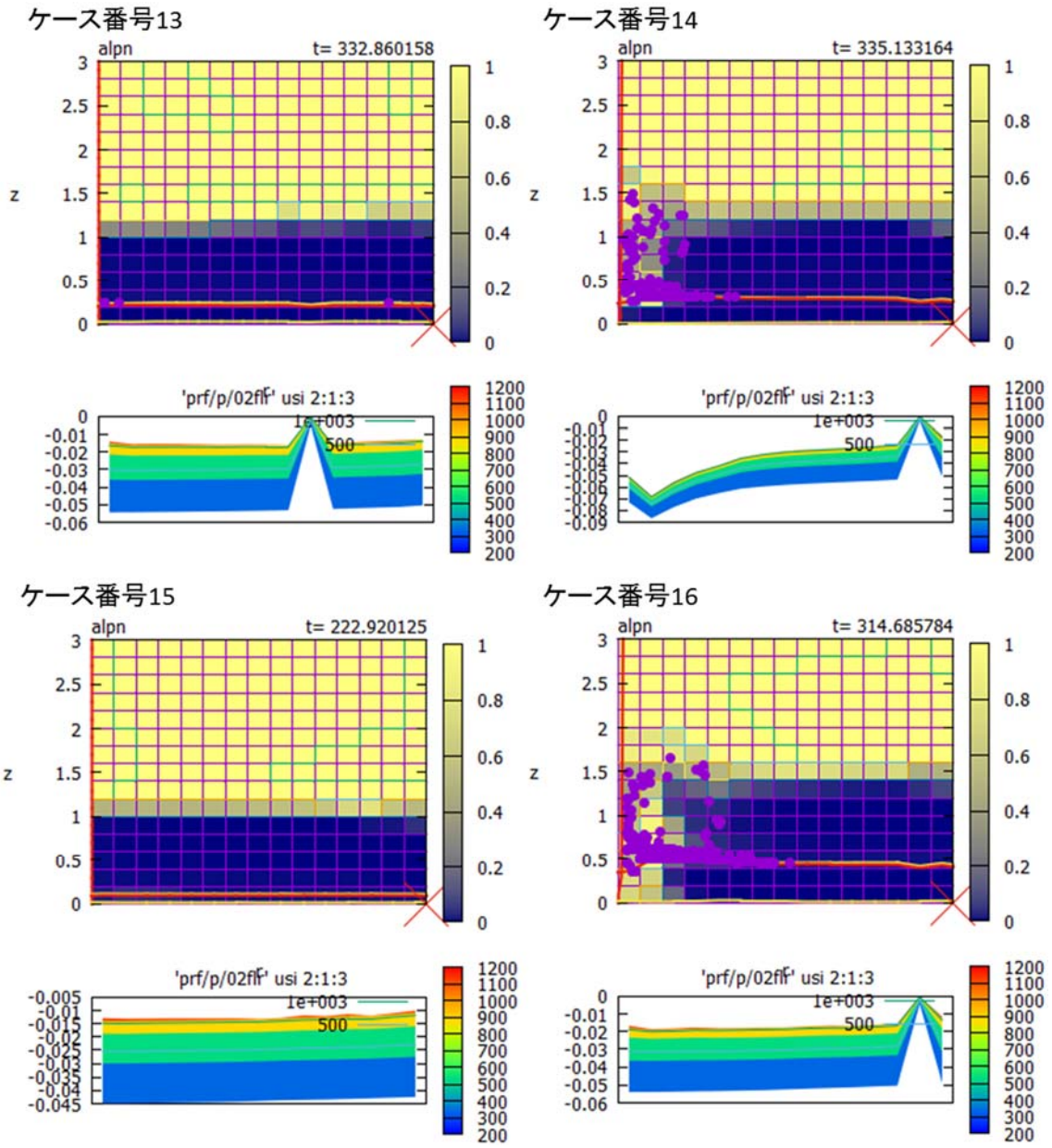


図 B.1 実機体系解析による溶融物及びクラストの半径方向分布 (4/15)

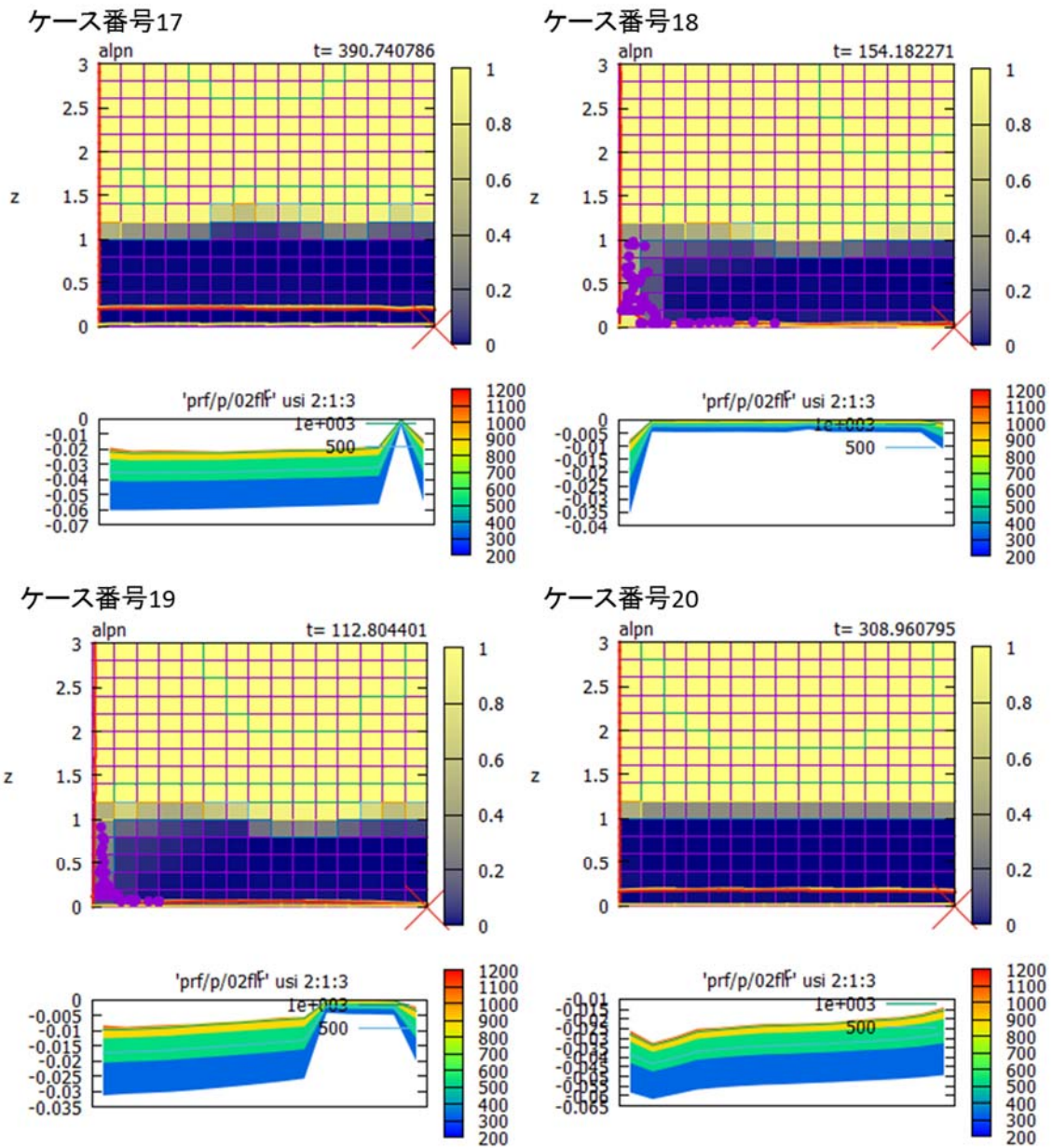


図 B.1 実機体系解析による溶融物及びクラストの半径方向分布 (5/15)

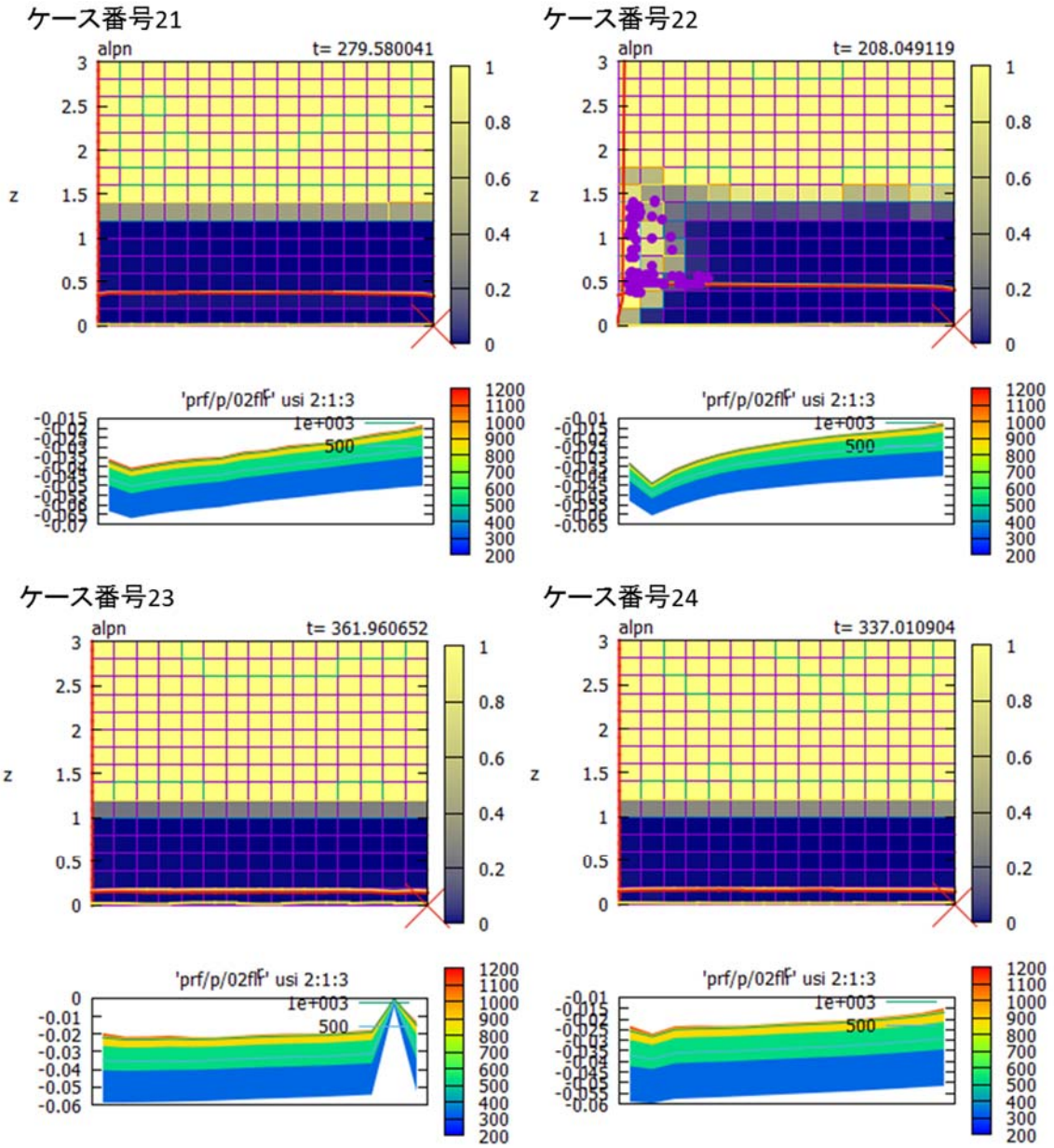


図 B.1 実機体系解析による溶融物及びクラストの半径方向分布 (6/15)

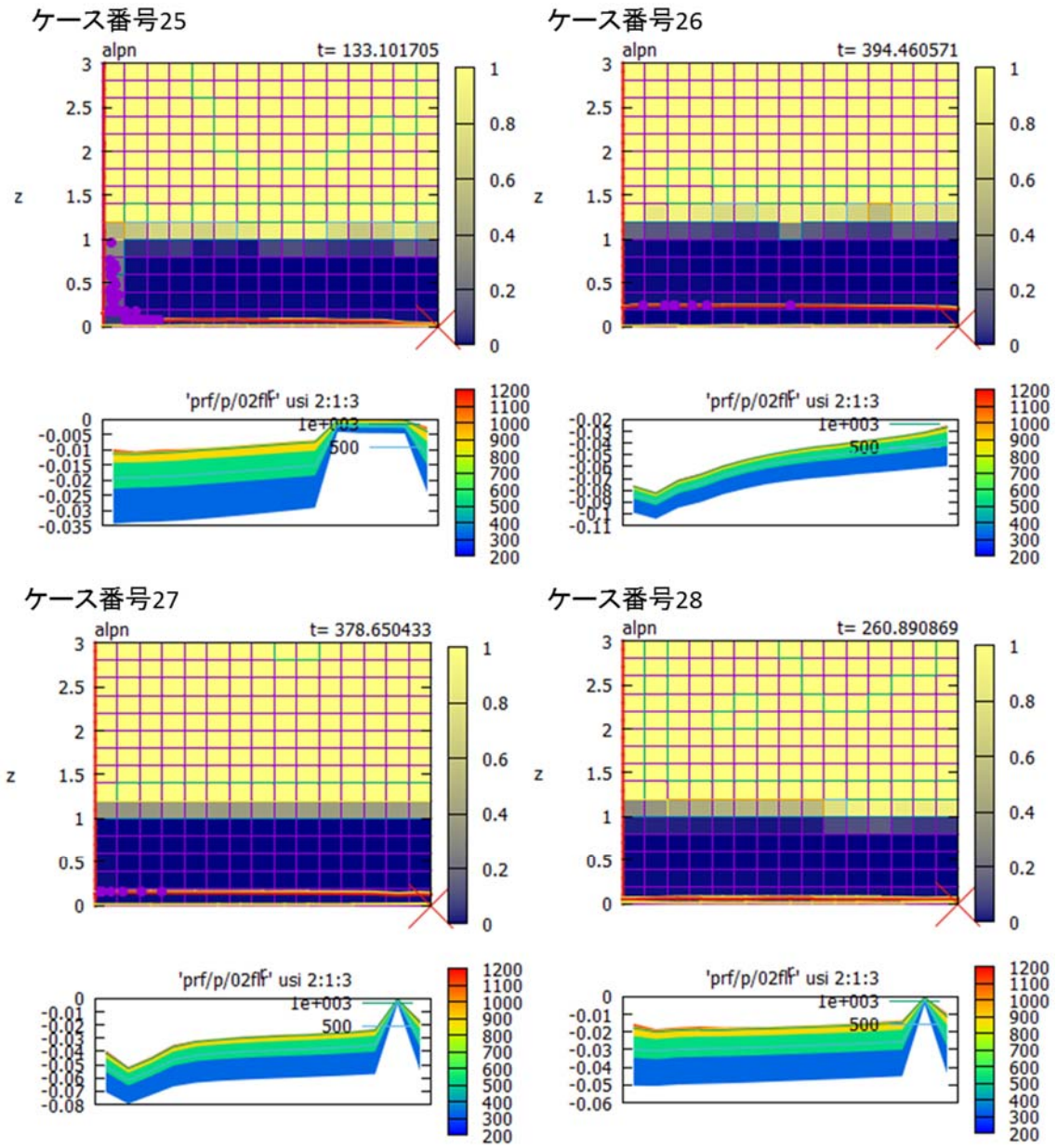


図 B.1 実機体系解析による溶融物及びクラストの半径方向分布 (7/15)

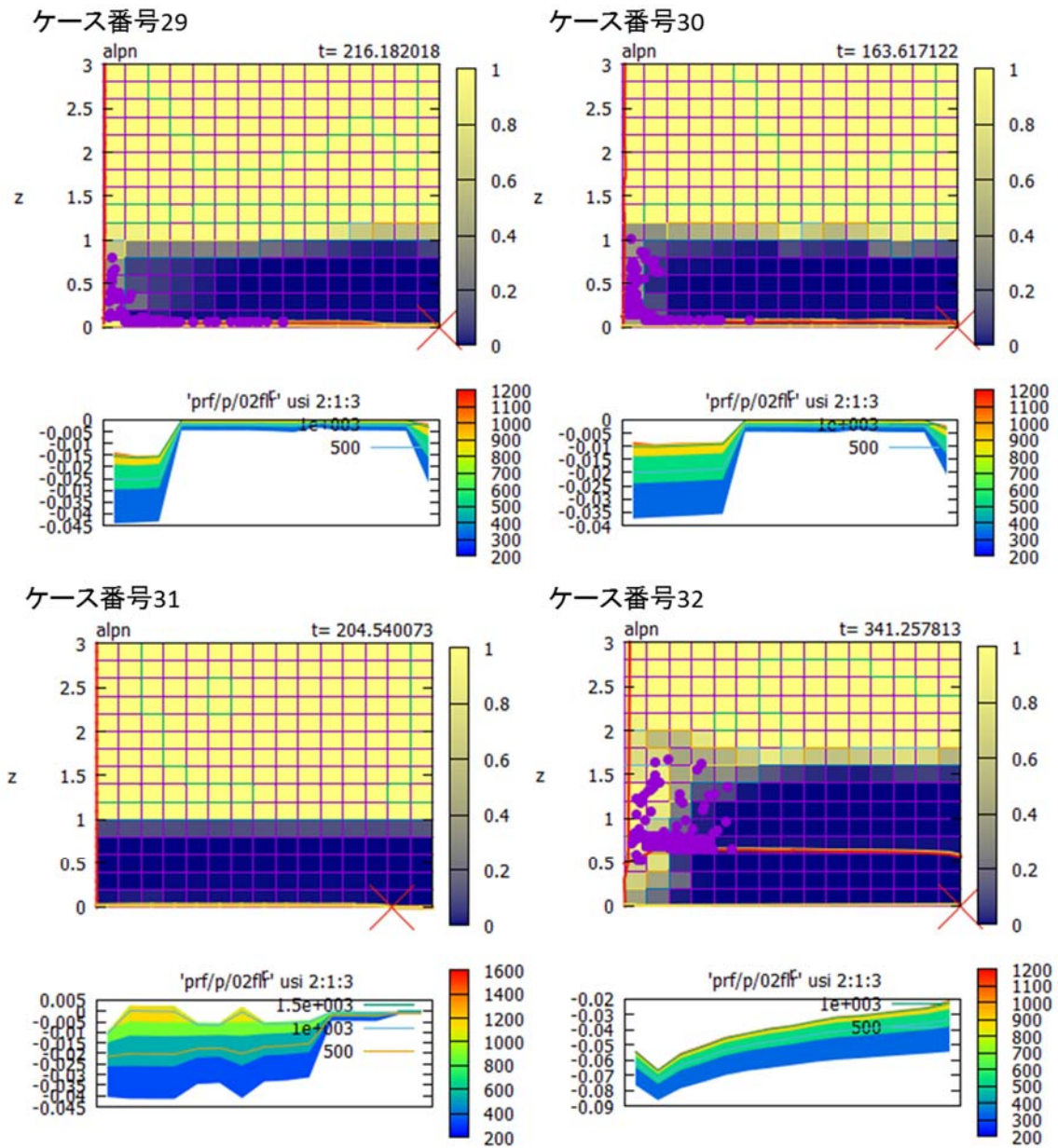


図 B.1 実機体系解析による溶融物及びクラスタの半径方向分布 (8/15)

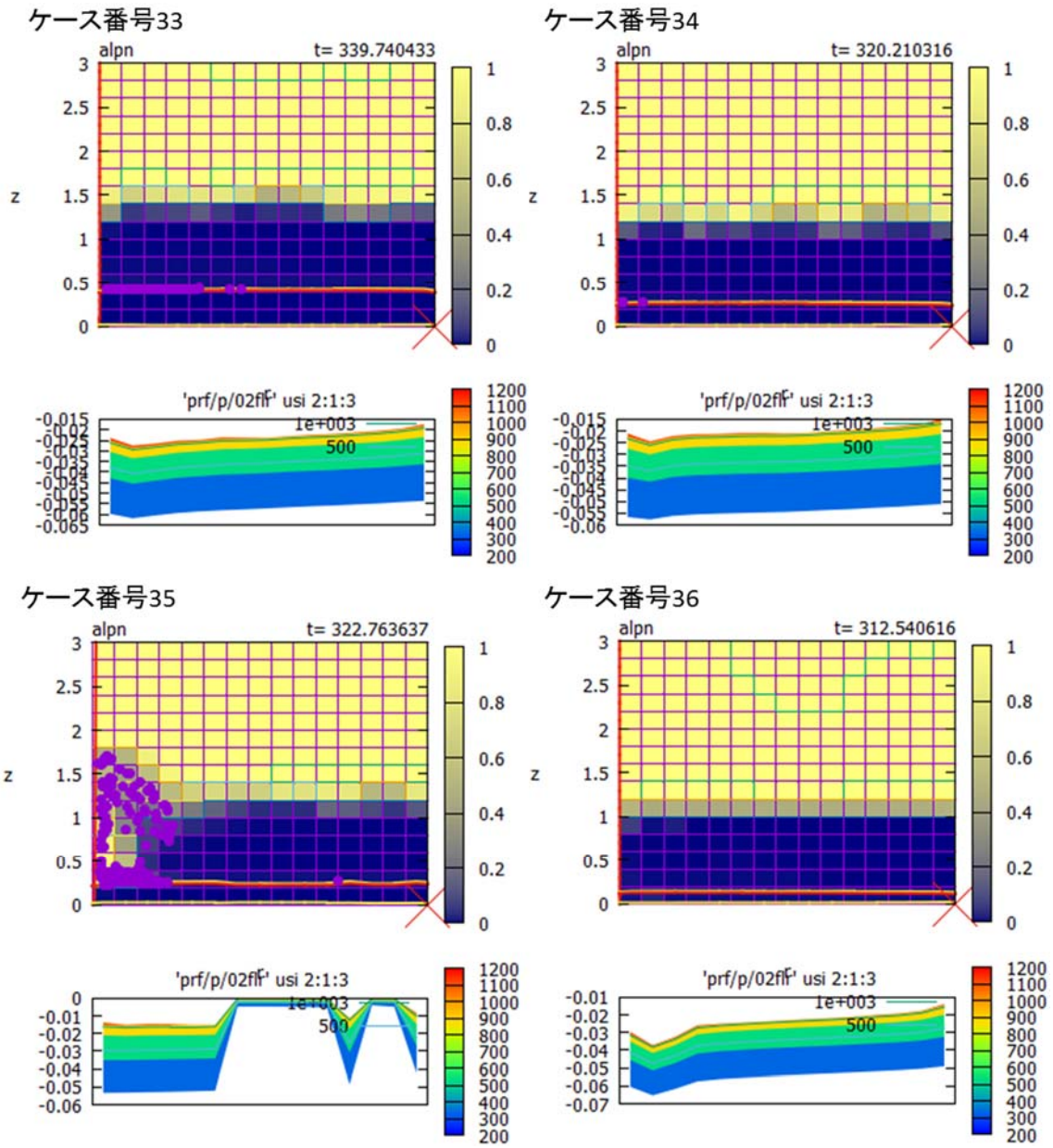


図 B.1 実機体系解析による溶融物及びクラストの半径方向分布 (9/15)

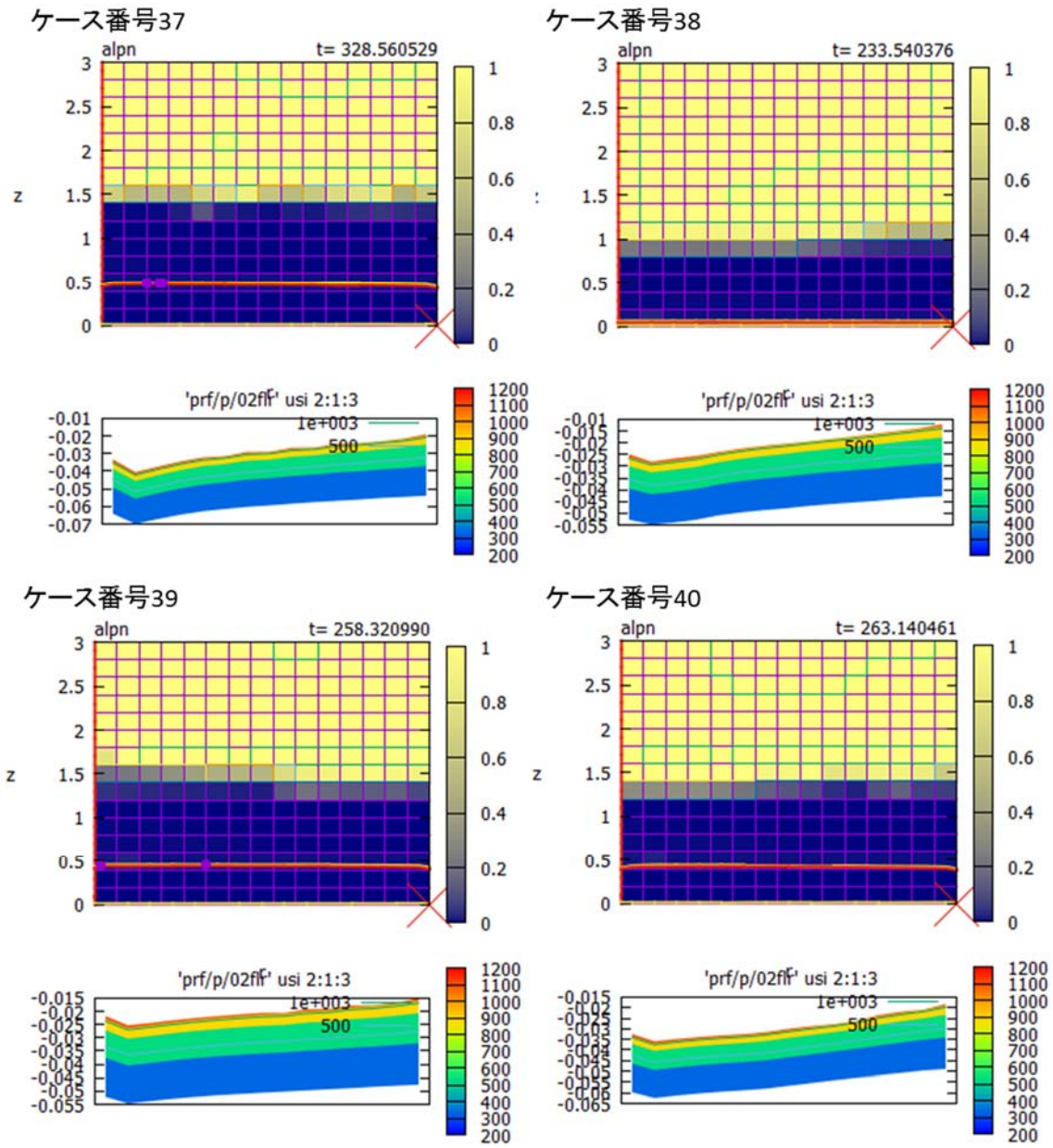


図 B.1 実機体系解析による溶融物及びクラストの半径方向分布 (10/15)

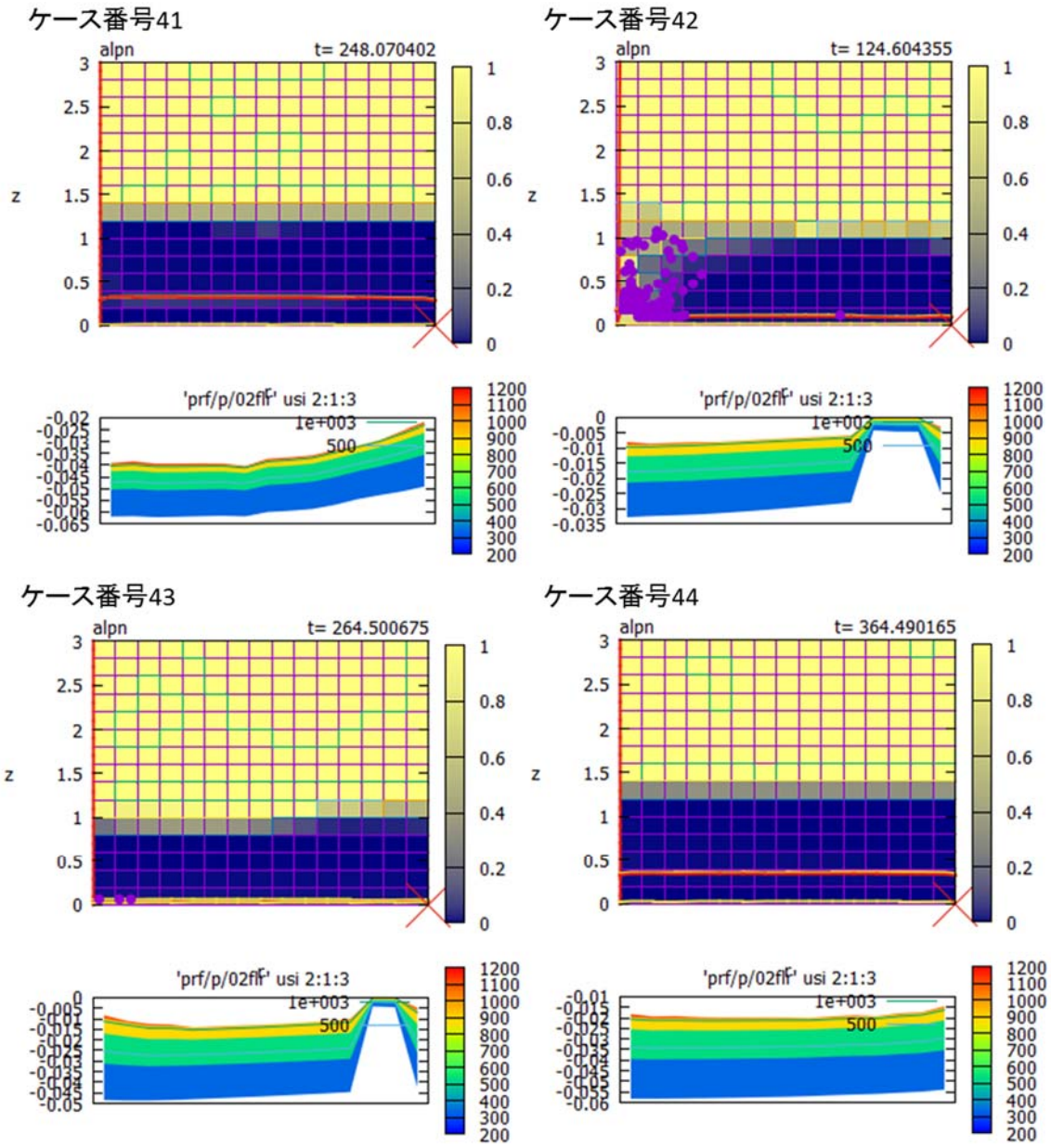


図 B.1 実機体系解析による溶融物及びクラストの半径方向分布 (11/15)

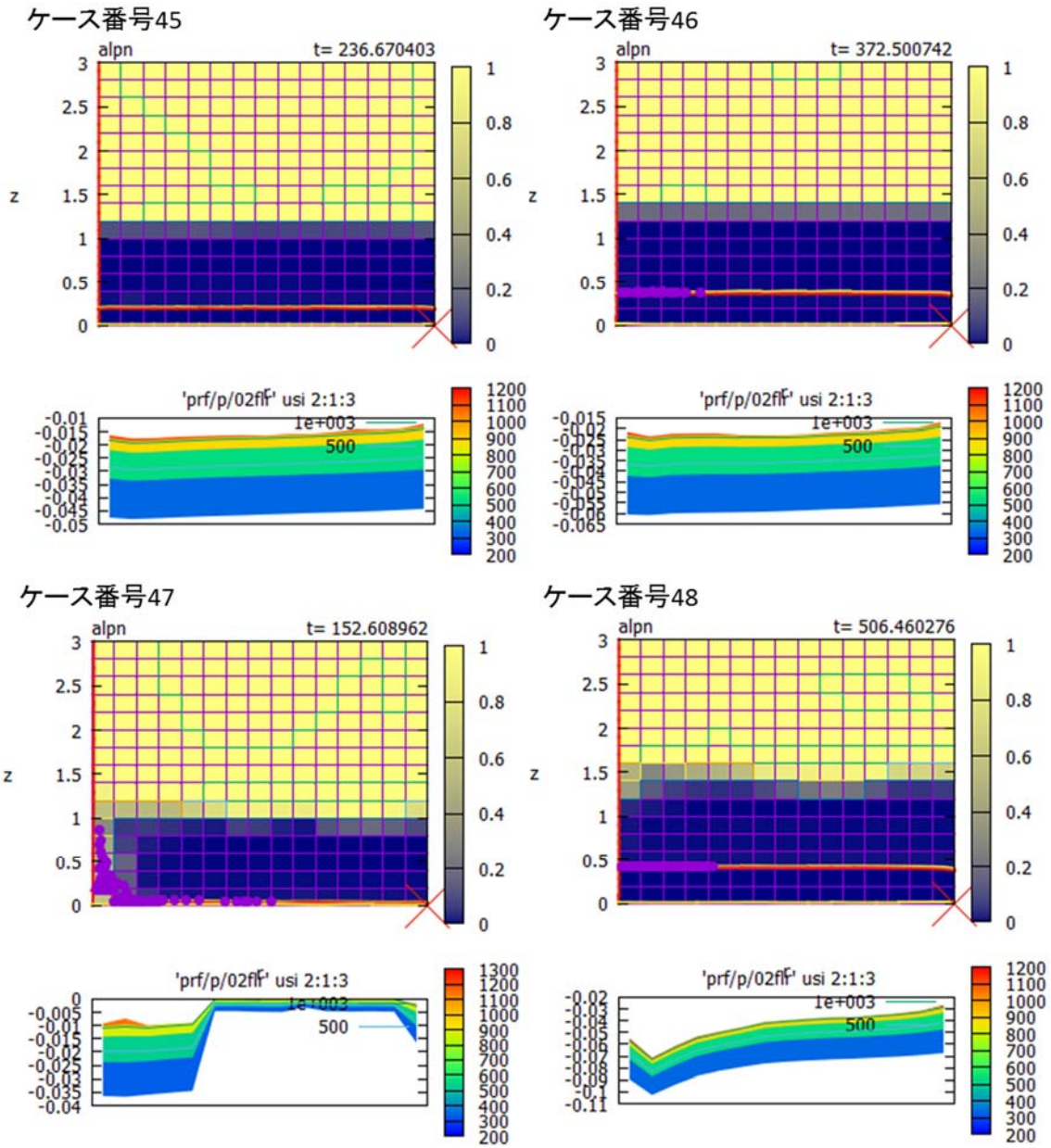


図 B.1 実機体系解析による溶融物及びクラストの半径方向分布 (12/15)

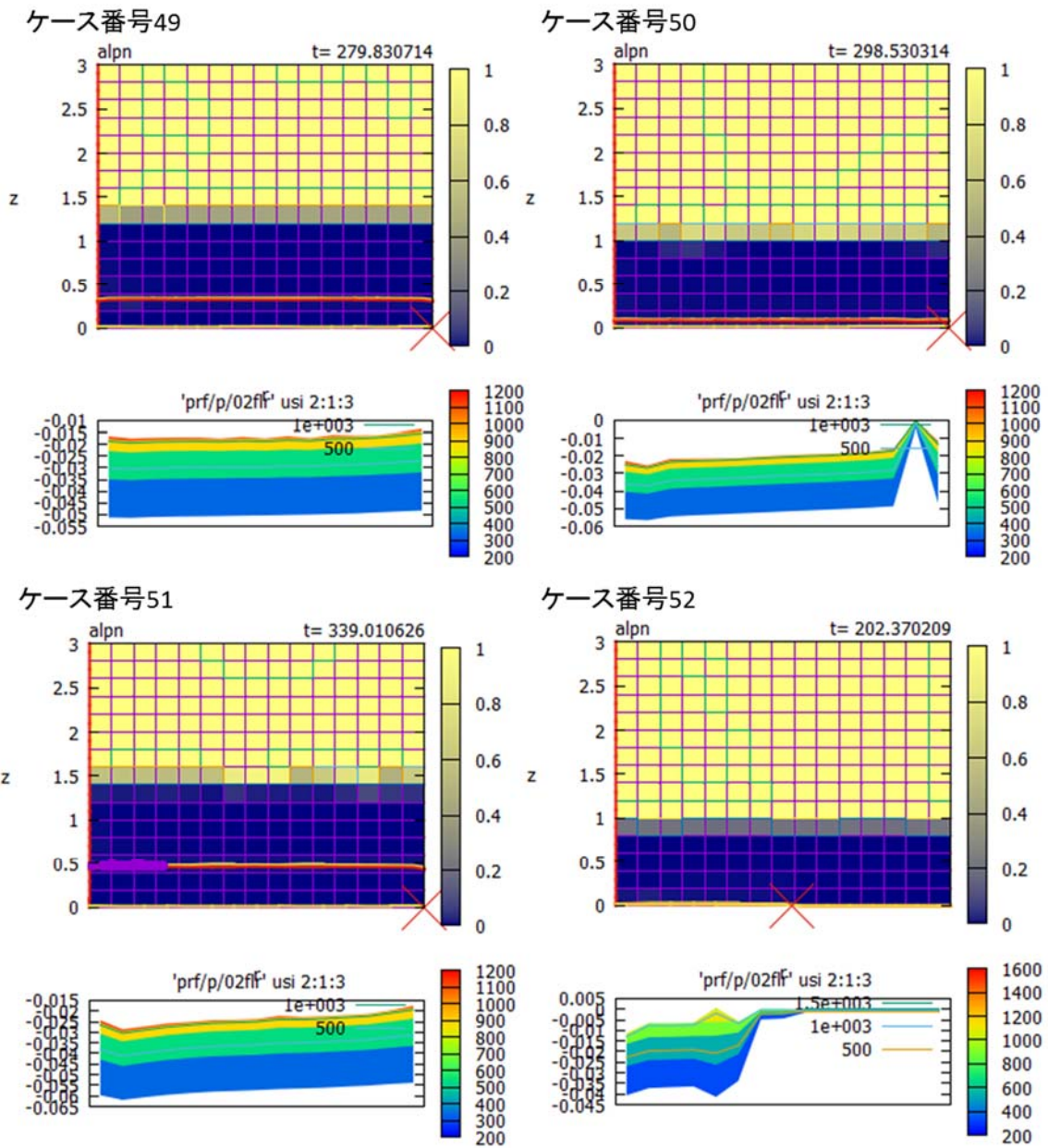


図 B.1 実機体系解析による溶融物及びクラストの半径方向分布 (13/15)

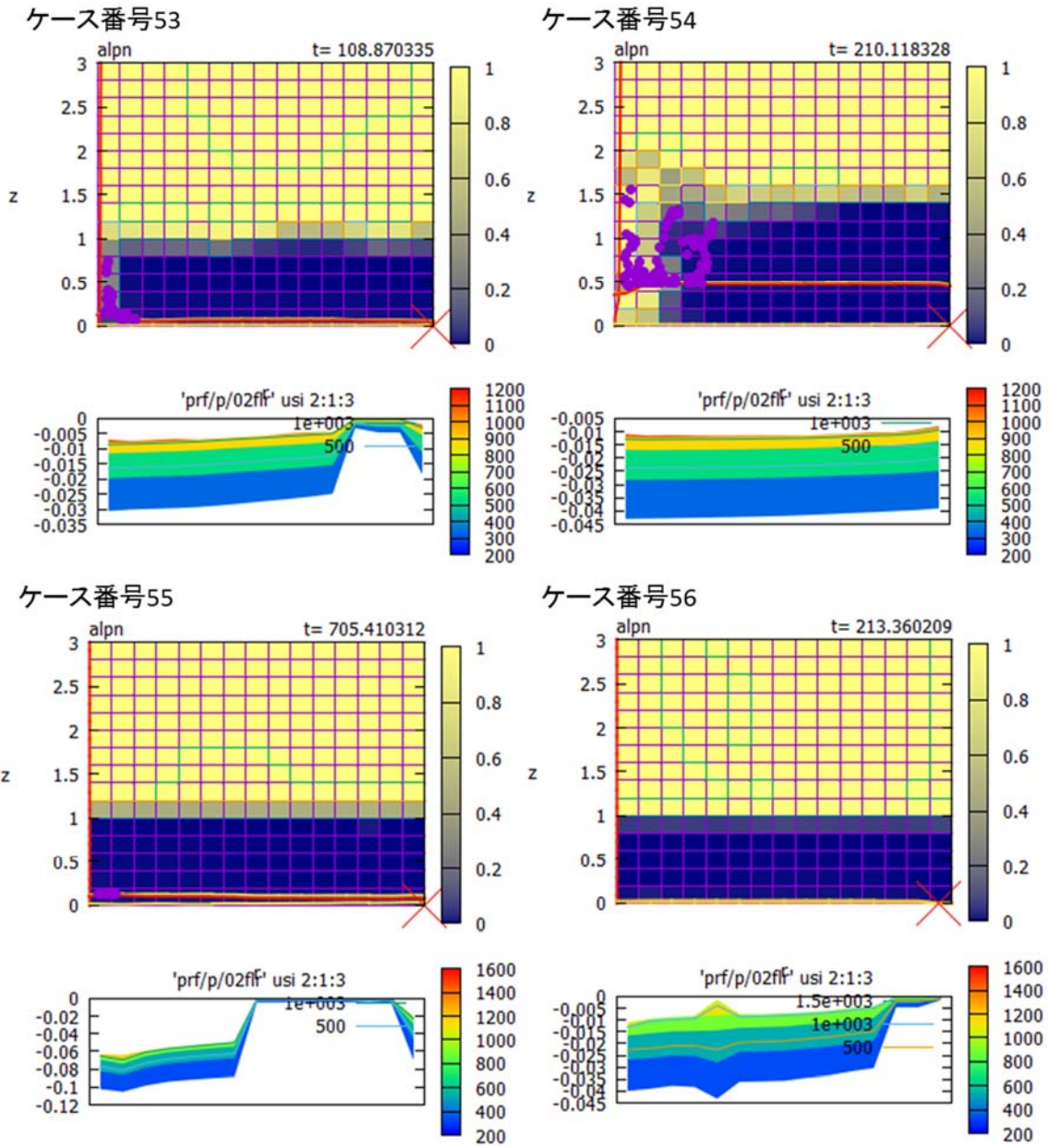


図 B.1 実機体系解析による溶融物及びクラストの半径方向分布 (14/15)

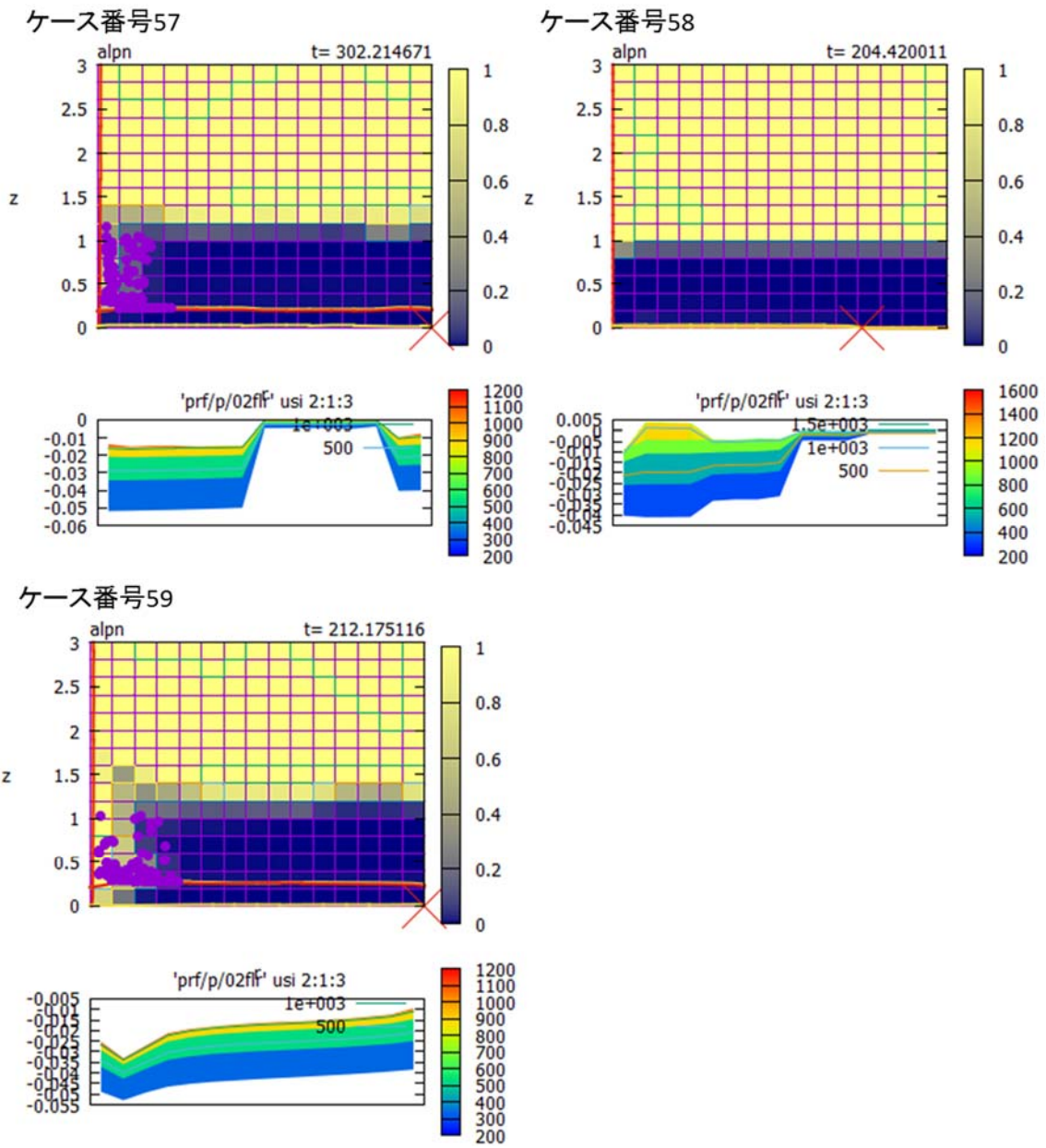


図 B.1 実機体系解析による溶融物及びクラストの半径方向分布 (15/15)

付録 D 逆問題解析による PULiMS 床表面の温度・熱抵抗の推定

D.1 緒言

PULiMS 実験[1.1]では、多数の熱電対を設けて様々な場所の温度変化を測定しているが、熔融物の局所的な熱的挙動には不明な点が多い。そこで、床面温度の測定値のデータから床表面の温度、熱流束を計算し、さらに熔融部と床表面間の熱抵抗を推定する。

このためには、表面温度測定値から構造物内部の温度を推定する、いわゆる熱伝導方程式の逆問題を解く必要がある。そこで、まず、熱伝導方程式の純問題を解く計算プログラムを作成し、これを用いて、逆問題を解くことにした。

D.2 順問題に対するプログラム

D.2.1 計算対象の形状

PULiMS 実験では、水を張ったステンレス製の床板の中央部に模擬炉心熔融物 ($\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-WO}_3$) を落下させ、その拡がり状況を調べた。図 D2-1-1 に熱電対と熔融物・水プールの概念図を示す、床板の上部に水があり、左から熔融物が広がっていき、熔融物上部と水が接触し冷えて固まった箇所が表面クラストとなる。熔融物下部と床板が接触し冷えて固まった箇所は底クラストとなる。

今回の計算に使用する温度データを測定した熱電対は、床板に張り付くような形をしている。

図 D2-1-2 に PULiMS 実験 E9 で使用した熱電対の配置位置を示した図を示す。

表面と裏面温度を測定するのに使用した熱電対の種類は「Single TC $\Phi 0.5 \text{ mm}$ 」を使用している。図 2-1-3 に実験で使用した熱電対の画像を示す。

図 B2-1-2 に書かれている「TR～.A～.H～」は、それぞれ、TR：中心からの距離 [mm]、

A：中心から見た角度[°]、H：床板表面からの距離[mm]を表している。

裏面温度が測定されている箇所は、図 D2-1-2 に四角で囲っている緑色の点の箇所である。

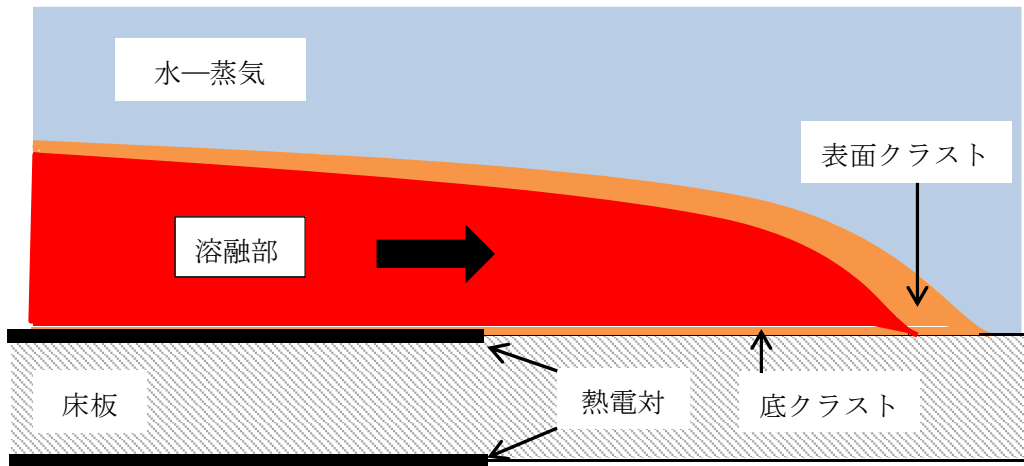


図 D2-1-1 熱電対と熔融物・水プールの概念図

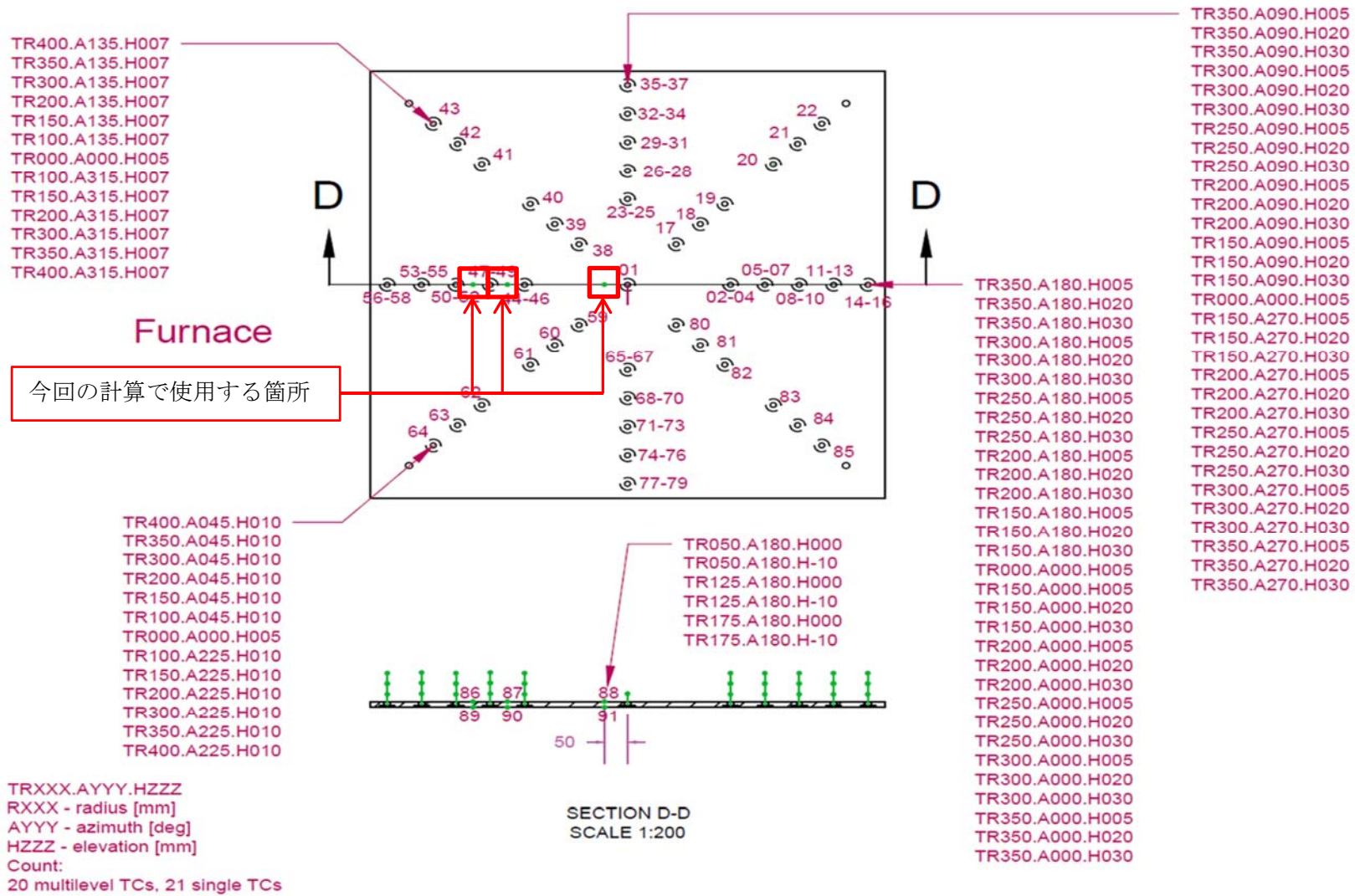


図 D2-1-2 PULiMS 実験 E9 の熱電対配置の平面図



図 D2-1-3 表面と裏面温度を測定する熱電対 (Single TC Φ0.5 mm)

D.2.2 数値計算法

D.2.2.1 基礎式

高さ方向一次元熱伝導方程式を差分化して使用する。上から下の方向に一次元座標をとり、表面が $n=0$ 、裏面が $n=n_{\max}$ とする。時間には前進差分を用い、空間には 2 次微分に対して 2 次中央差分を用いる。

$$T_n^{i+1} = \frac{\lambda}{\rho C_p} \times \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \times (T_{n+1}^i - 2 \times T_n^i + T_{n-1}^i) + T_n^i$$

ここで、

T : 床板温度 [°C]

n : セル番号

i : 時間ステップ番号

λ : 床材熱伝導率 [W/(m*K)]

ρ : 床材密度 [kg/m³]

C_p : 床材比熱 [J/(kg*K)]

Δt : 時間ステップ幅 [s]

Δx : 床板高さ方向分割メッシュ幅 [m]

D.2.2.2 境界条件

表面温度は、入力値で指定し、裏面は断熱とする。

この計算式では、表面を $n=0$ 、裏面を $n=n_{\max}$ にしており、床裏面のメッシュ $n=n_{\max}$ の温度を求めることができないので、床裏面のメッシュの後ろにダミーメッシュ $n=n_{\max}+1$ を追加して、床裏面の 1 つ前のメッシュ $n=n_{\max}-1$ の温度データをダミーメッシュに代入して計算を行った。

D.2.3 計算のフロー図

図 D2-3-1 に順問題プログラムの PAD (Problem Analysis Diagram) 図を示す。

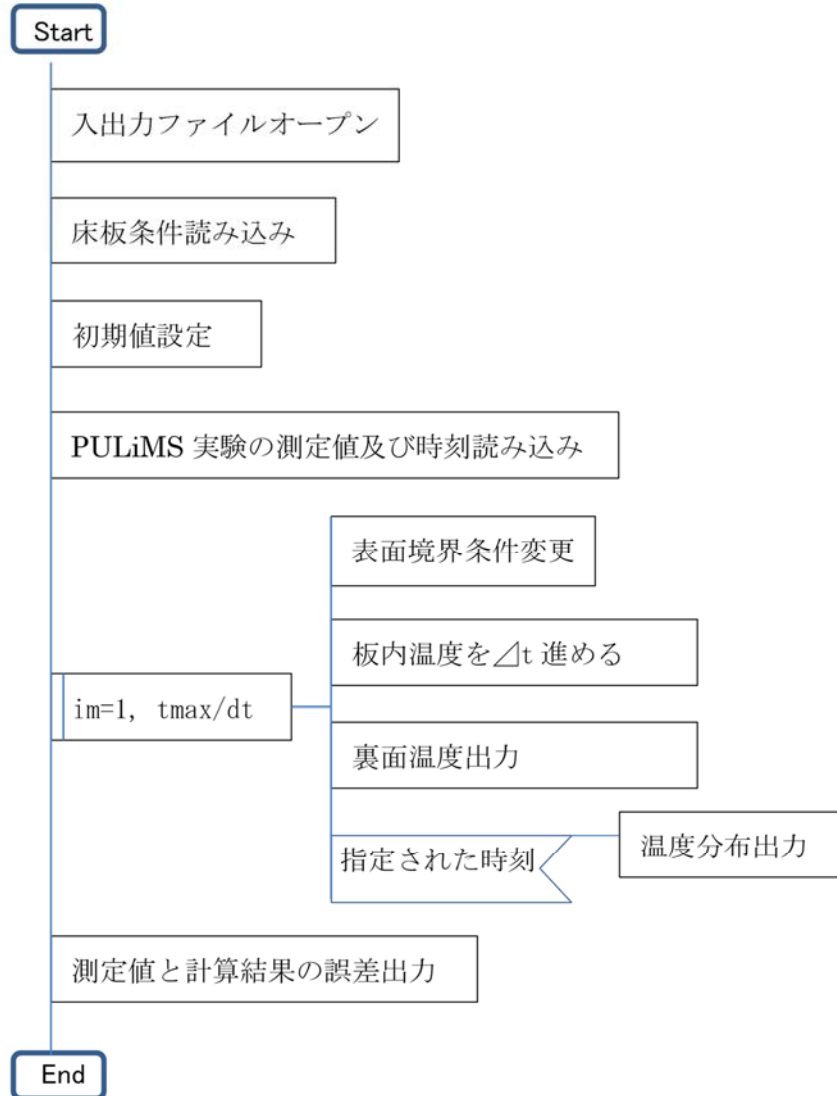


図 D2-3-1 順問題プログラムの PAD 図

D.2.4 ステップ入力に対する計算結果と理論解との比較

順問題プログラムの計算が正しかを調べるために理論解を使用する。
理論解は、次式で求める。

$$\theta = \theta_0 \frac{4}{\pi} \left(e^{-\frac{\pi^2 \kappa t}{l^2}} \sin \frac{\pi x}{l} + \frac{1}{3} e^{-\frac{(3\pi)^2 \kappa t}{l^2}} \sin \frac{3\pi x}{l} + \dots \right) \quad [2.4.1]$$

ここで

κ : 床材熱拡散率 [m²/s]

t : 時間 [s]

x : 床板厚さ [m]

l : 床板厚さの 2 倍の数値 [m]

理論解の計算は、一定温度 θ_0 の物体の表面温度が急に 0 となった場合の計算である。そのため、今回の計算では、 θ_0 で「床板表面に与える温度－床板初期温度と表面に与える温度の差」の計算を行う。

本来の理論解の計算なら、第 2 項、第 3 項と続いていくのだが、今回の計算では第 2 項までしか使用していない。これは、第 3 項まで計算した答えと第 2 項のまで計算した答えにほとんど変化がなかったためである。

図 B2-4-1 に順問題プログラムで得た裏面温度の計算結果と理論解の比較のグラフを示す。

この計算に使用した数値を以下に示す。

- 床板初期温度 : 20 [°C]
- 床表面に与える温度 : 500 [°C] (0.01 s から表面温度を 500 [°C] とする)
- 床材熱拡散率 : 5.06329 [m²/s]
- 床板厚さ : 1.0E-2 [m]

図 B2-4-1 を見るとわかるように、計算結果と理論解はほぼ同じ値となる。

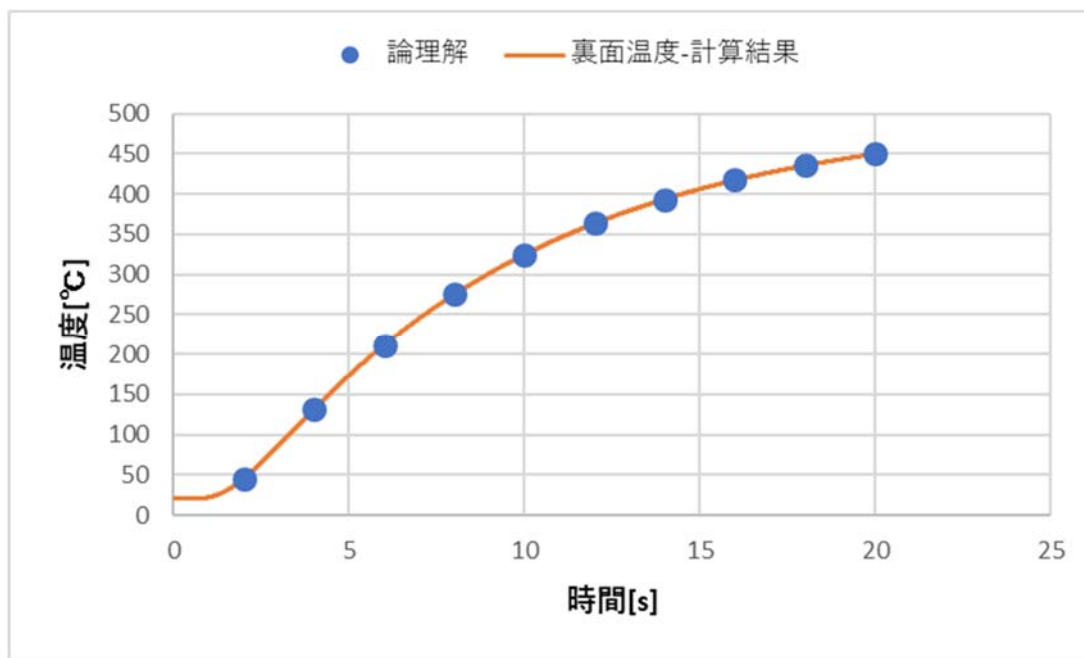


図 B2-4-1 裏面温度の計算結果と理論解の比較

D.2.5 表面温度の測定値から計算した裏面温度の比較

表面温度の測定値から裏面温度の計算結果を求めて裏面温度の測定値と比較を行い、そのグラフを図 D2-5-1 に示す。

表面に設けた熱電対による測定値から計算した裏面温度と裏面温度の測定値が大きく異なることがわかる。このことから、床表面に設けた熱電対の測定値が床材の表面温度を表す数値でないことが分かった。

床表面近傍は温度勾配が大きく、表面に設けた熱電対は、床材の温度だけでなく溶融物の温度の影響を受けたことが原因として考えられる。

この計算に使用した数値を以下に示す。

- 床板厚さ：1.0E-2 [m]
- 床材比熱：500 [J/(kg*K)]
- 床材密度：7900 [kg/m³]
- 床材熱伝導率：20 [W/(m*K)]
- 床板初期温度：93.579 [°C]

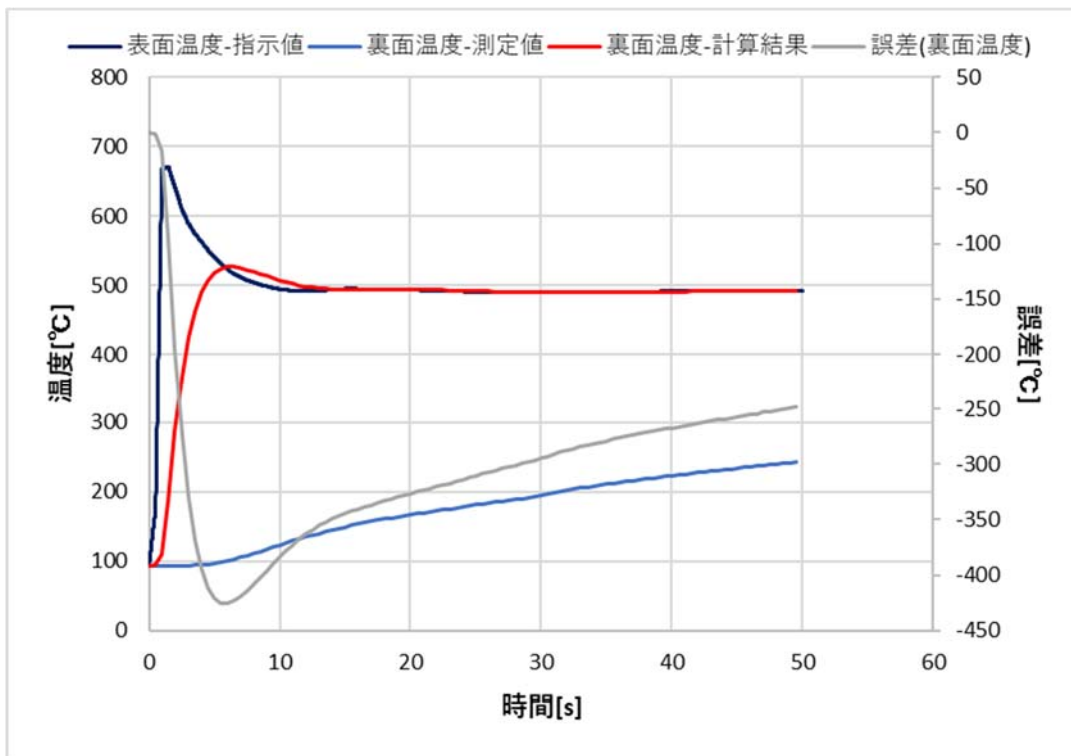


図 D2-5-1 表面熱電対の指示値から求めた裏面温度と裏面温度測定値の比較 (PULiMS_E9 : TR050.A045)

D.3 逆問題解析プログラム

D.3.1 計算の方針と仮定

熱伝導方程式の逆問題を数値計算で解くことは不可能である（差分式を用いて、現在の温度分布とこれまでの境界条件から、 $t^{i+1} = t^i - \Delta t$ としての過去の温度変化を計算すると、数値解は不安定となり一意的に定まらない）。そこで、次のような仮定を設けて床材内の温度分布の変化を推定する。

- ① 表面温度は急変しない。従って、一定時間間隔で表面温度を与え、その間の温度は線形補間で決定することで、表面での境界条件を表現できる。
- ② 初期には床材内には温度分布はなく、裏面温度測定値で与えられる。
- ③ 裏面は断熱とする。

以上の仮定から、一定時間間隔で与える表面温度の値を様々に変化させて順問題を計算し、裏面温度の計算結果と測定結果の誤差の自乗平均が最小となるようにする。どのように変化させても誤差の自乗平均が減少しない表面温度の仮定が求める解である。

測定値の時間ステップ幅[s]と計算での時間ステップ幅[s]が異なるので、計算の際は、裏面温度の計算結果から測定値の時間ステップ幅に合うように補間値を求めて出力する。

計算結果の補間値をもとめて、測定値と比較する時間の範囲は入力データで与える。

誤差の自乗平均は次式で計算する。

$$\text{terr} = \frac{[(Ts(is) - Tc(is))^2 + (Ts(is + 1) - Tc(is + 1))^2 + \dots + (Ts(ie) - Tc(ie))^2]}{ipmax}$$

ここで、

Ts : 裏面温度の測定値 [°C]

Tc : 測定値と同じ時刻の裏面温度計算結果の補間値 [°C]

is : 計算開始時間と同じ、もしくは開始時間が過ぎた時点の測定値のデータ数

ie : 計算終了時間より 1 ステップ小さい測定値のデータ数

計算で使用した時間ステップ幅や測定値と計算結果の補間値との比較時間範囲は D4.1 に記述する。

D.3.2 計算のフロー図

図 D3-2-1 に逆問題プログラムの PAD 図を示す。

赤い四角の中は、前章で説明した順問題プログラムである。

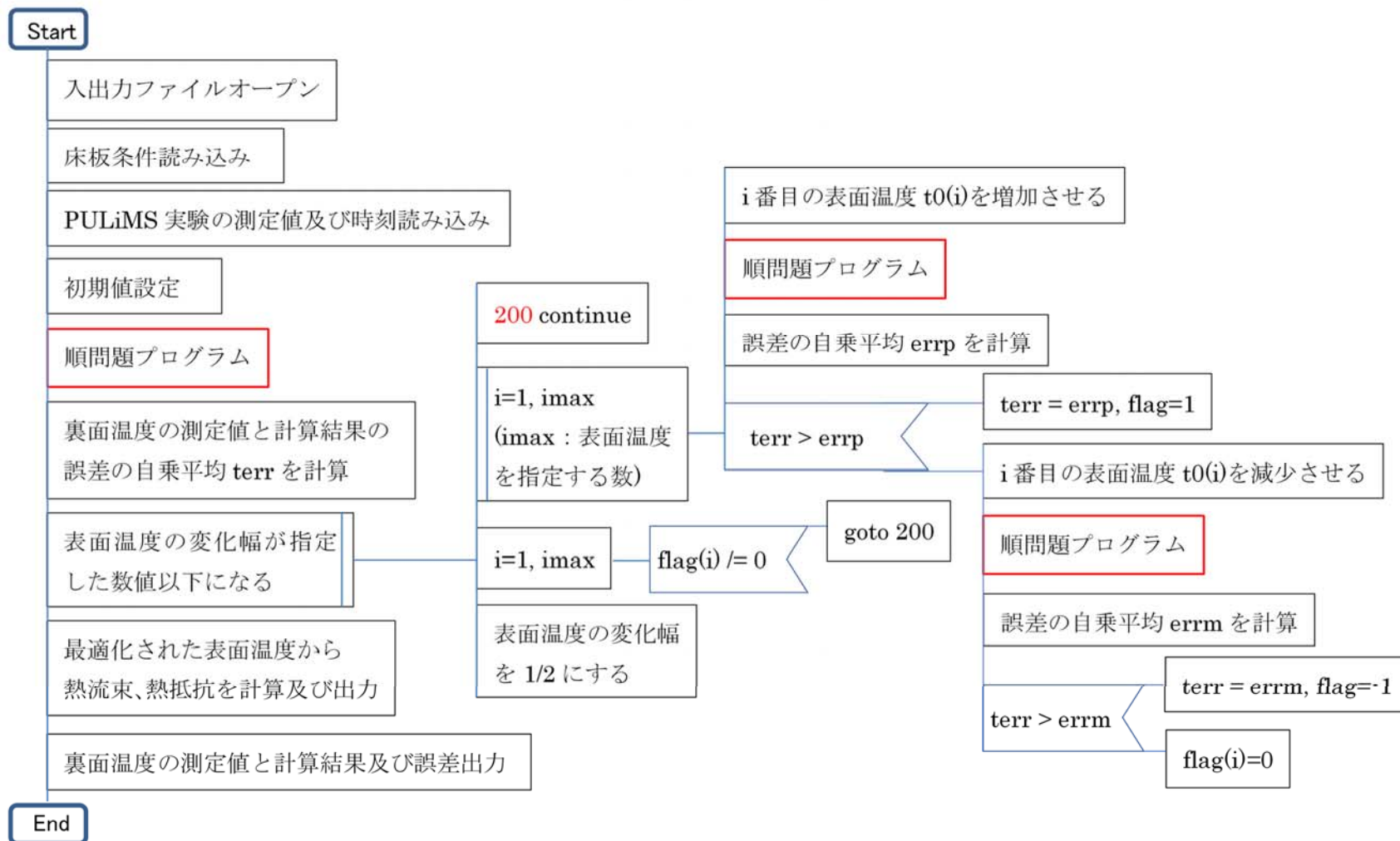


図 D3-2-1 逆問題プログラムの PAD 図

D.3.3 表面熱流束の計算式

差分式を変形させて表面熱流束を求める。差分式では熱流束を使用して温度を計算するが、今回は表面温度が判明していて熱流束が分からない状態なので、次式で計算する。

$$q(0) = \frac{T(0)^{i+1} - T(0)^i}{\Delta t} \times \frac{\Delta x}{2} \rho C_p + \lambda \frac{T(0)^i - T(1)^i}{\Delta x}$$

ここで、

$q(0)$: 表面熱流束 [W/m²]

$T(0)$: 表面温度 [°C]

$T(1)$: セル番号 1 の温度 [°C]

Δt : 時間ステップ幅 [s]

Δx : 床板高さ分割メッシュ幅 [m]

ρ : 床材密度 [kg/m³]

C_p : 床材比熱 [J/(kg*K)]

λ : 床材熱伝導率 [W/(m*K)]

i : 時間ステップ番号

使用している変数の値については、D.4.1 で説明する。

上記の計算で Δx を 2 分の 1 にしているのは、熱流束はセルの端の値、温度はセルの中央の値を調べているので、床表面の温度を計算するには図 D3-3-1 のように 1 セル目はセルの長さ Δx を 1/2 にする必要があるからである。

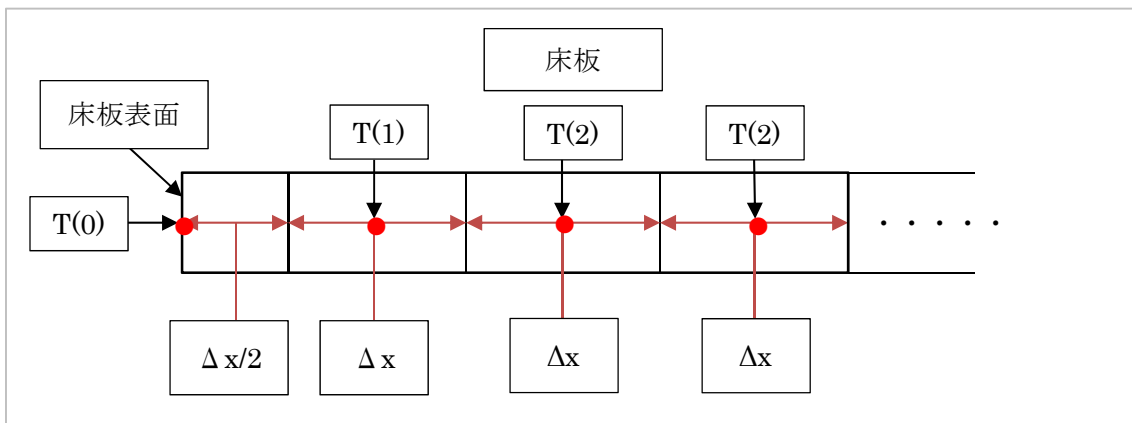


図 3-3-1 床板の分割

D.4 PULiMS 実験における測定値を用いた計算の結果

D.4.1 入力値

計算の対象としたのは、PULiMS 実験 E7, E8, E9 実験である。

測定値及び、測定値の時間ステップ幅は、

「PULiMS-E7_Temperature_dm.xlsx(2016/4/19)」、

「E8_pouring_160518134633.xlsx(2016/8/18)」、

「PULiMS-E9_Temperatures.xlsx(2016/7/28)」を用いた。

PULiMS 実験では、床板はステンレスを使用しており、入力値には以下の数値を使用している。

- 床板厚さ : 1.0E-2 [m]
- 床板高さ分割数 : 10
- 床板高さ分割メッシュ幅 : 1.0E-3 [m]
- ステンレスの密度 : 7900 [kg/m³]
- ステンレスの比熱 : 500 [J/(kg*K)]
- ステンレスの熱伝導率 : 20 [W/(m*K)]
- 計算時間(E7) : 50.0 [s]
- 計算時間(E8, E9) : 150 [s]
- 時間ステップ幅 : 0.01 [s]
- 測定値時間ステップ幅(E7) : 0.1 [s]
- 測定値時間ステップ幅(E8) : 0.05 [s]
- 測定値時間ステップ幅(E9) : 0.5 [s]
- 測定値と計算結果の比較開始時間(E7) : 0.0 [s]
- 測定値と計算結果の比較終了時間(E7) : 50.0 [s]
- 測定値と計算結果の比較開始時間(E8, E9) : 0.0 [s]
- 測定値と計算結果の比較終了時間(E8, E9) : 150.0 [s]
- 床板初期温度(E7_TR150) : 91.714 [°C]
- 床板初期温度(E7_TR250) : 92.020 [°C]
- 床板初期温度(E8_TR150) : 95.271 [°C]
- 床板初期温度(E8_TR250) : 96.167 [°C]
- 床板初期温度(E9_TR050) : 93.590 [°C]
- 床板初期温度(E9_TR125) : 94.249 [°C]
- 床板初期温度(E9_TR175) : 94.472 [°C]
- 溶融物温度(一定) : 870.0 [°C]

D.4.2 時間分解能の検討

表面温度を与える一定時間間隔として $\Delta t = 2.0 \text{ s}$ と $\Delta t = 5.0 \text{ s}$ としたPULiMS実験E8_TR150の計算結果を図D4-2-1に示す。

2.0 sと5.0 sの表面温度の計算結果はほぼ一致した。

2.0 sと5.0 sの熱流束もほぼ一致するが、 $\Delta t = 2.0 \text{ s}$ では振動が発生した。したがって、以降の計算では $\Delta t = 5.0 \text{ s}$ を使用する。

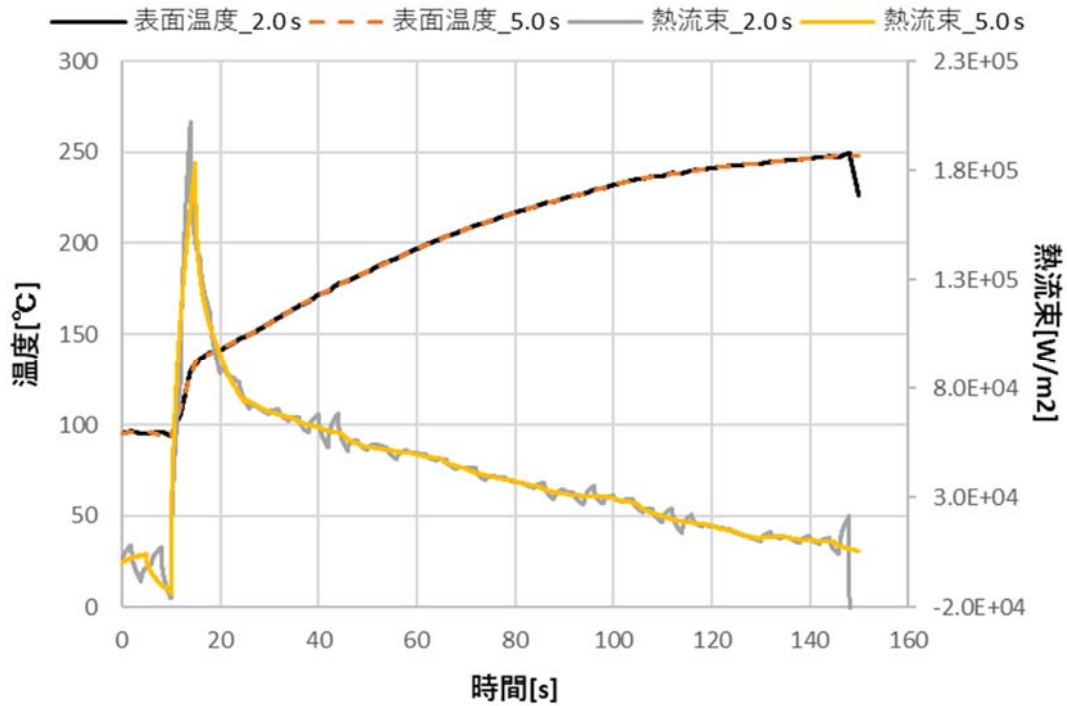


図 D4-2-1 $\Delta t = 2.0 \text{ s}$ と $\Delta t = 5.0 \text{ s}$ の表面温度と熱流束の計算結果

D.4.3 計算結果

図 D4-3-1 に PULiMS_E9 の「TR050.A045」を例として計算結果で得た裏面温度と測定値の誤差を示す。誤差は「測定値 - 計算結果」で求めている。

図 D4-3-2~D4-3-8 に裏面温度の測定値と表面温度、裏面温度の計算結果、表面の熱流束を示す。測定値と計算結果の裏側温度はグラフでは重なり合うほど近い値になっている。表面の熱流束は、表面温度が低いうちは熱流束は上昇して表面温度が大きくなるにつれて、熱流束も小さくなっていく。

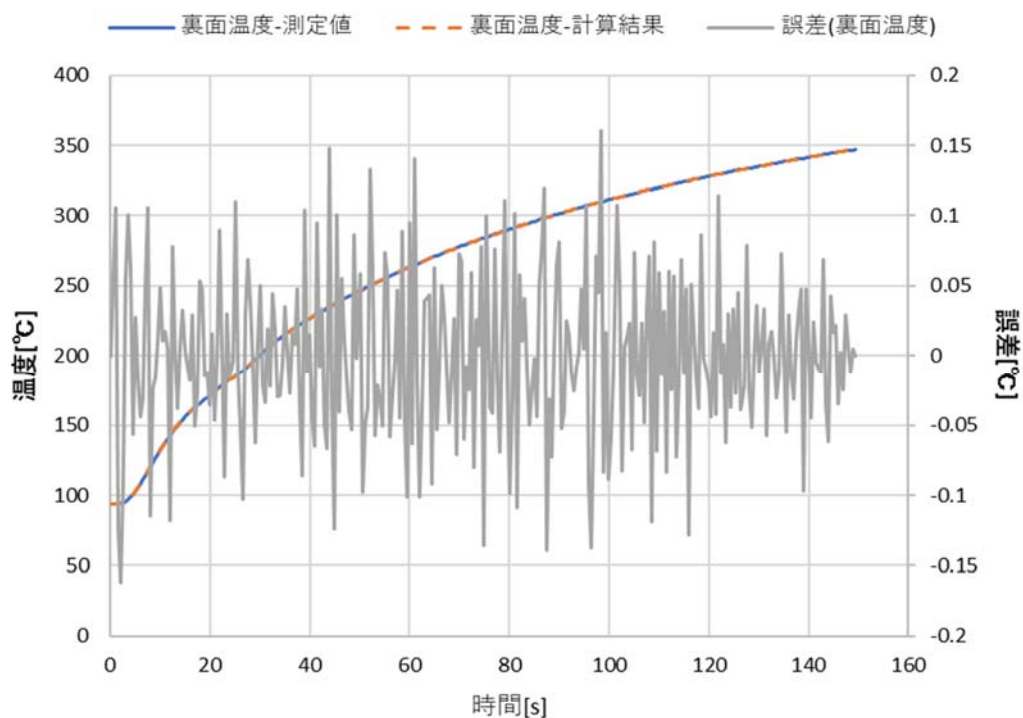


図 D4-3-1 測定値と計算結果の裏面温度の誤差 (PULiMS_E9_TR050.A0415)

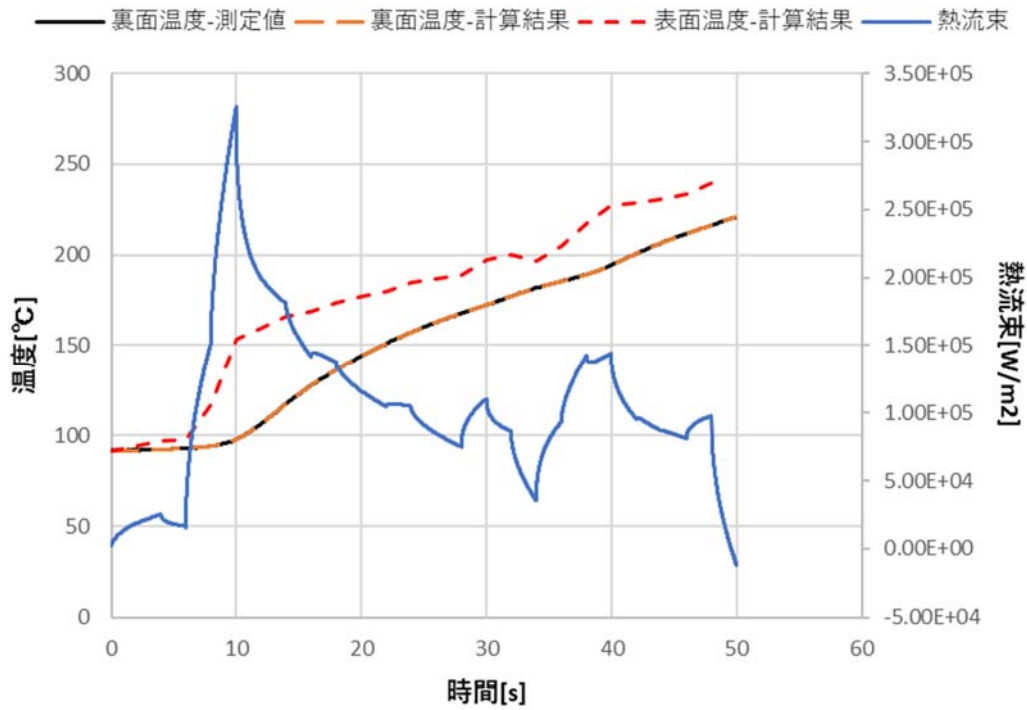


図 D4-3-2 表面温度と表面熱流束の計算結果 (PULiMS_E7_TR150.A180)

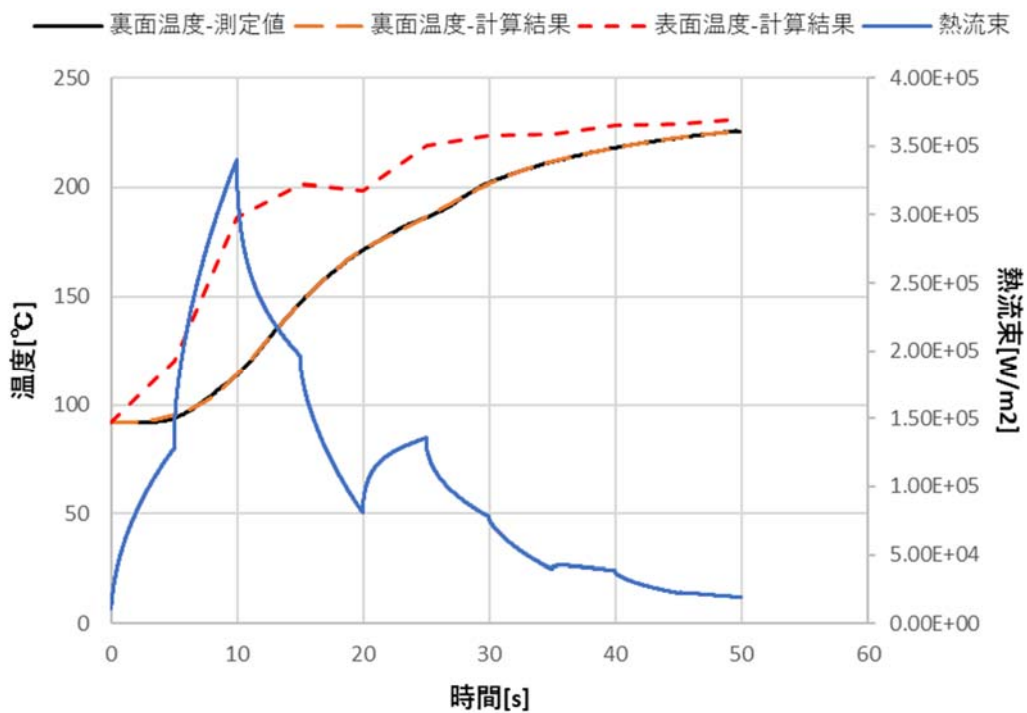


図 D4-3-3 表面温度と表面熱流束の計算結果 (PULiMS_E7_TR250.A180)

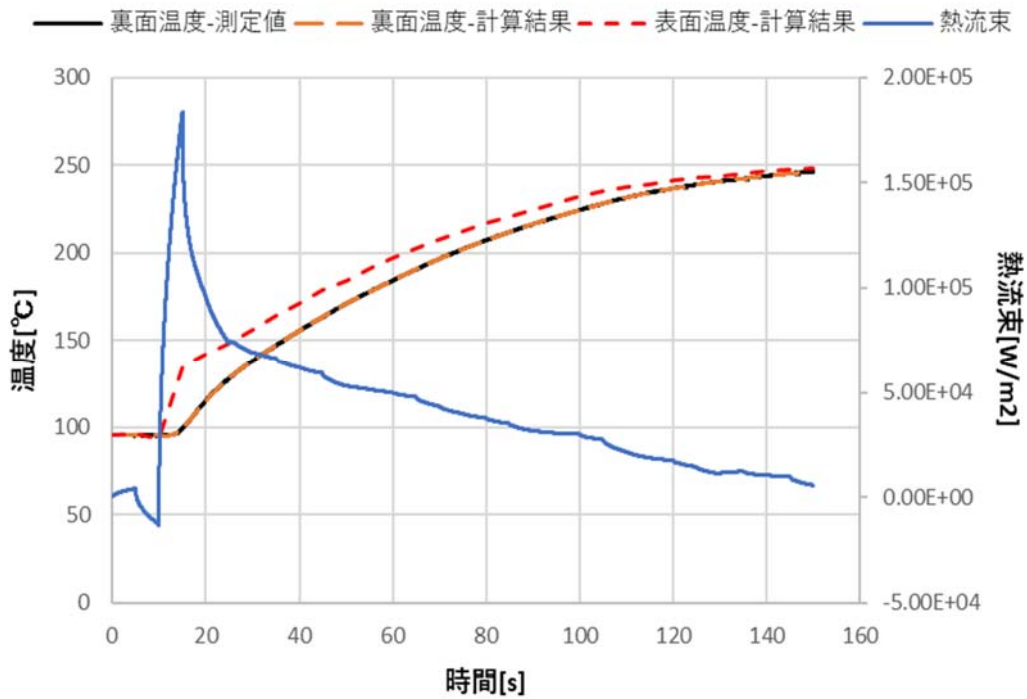


図 D4-3-4 表面温度と表面熱流束の計算結果 (PULiMS_E8_TR150.A180)

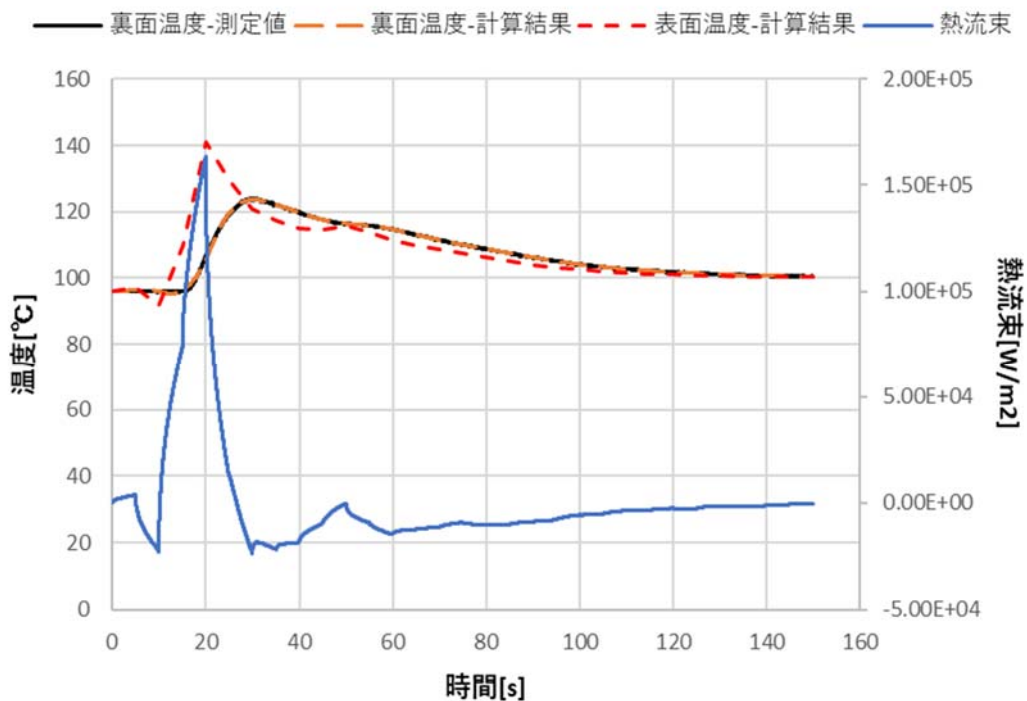


図 D4-3-5 表面温度と表面熱流束の計算結果 (PULiMS_E8_TR250.A180)

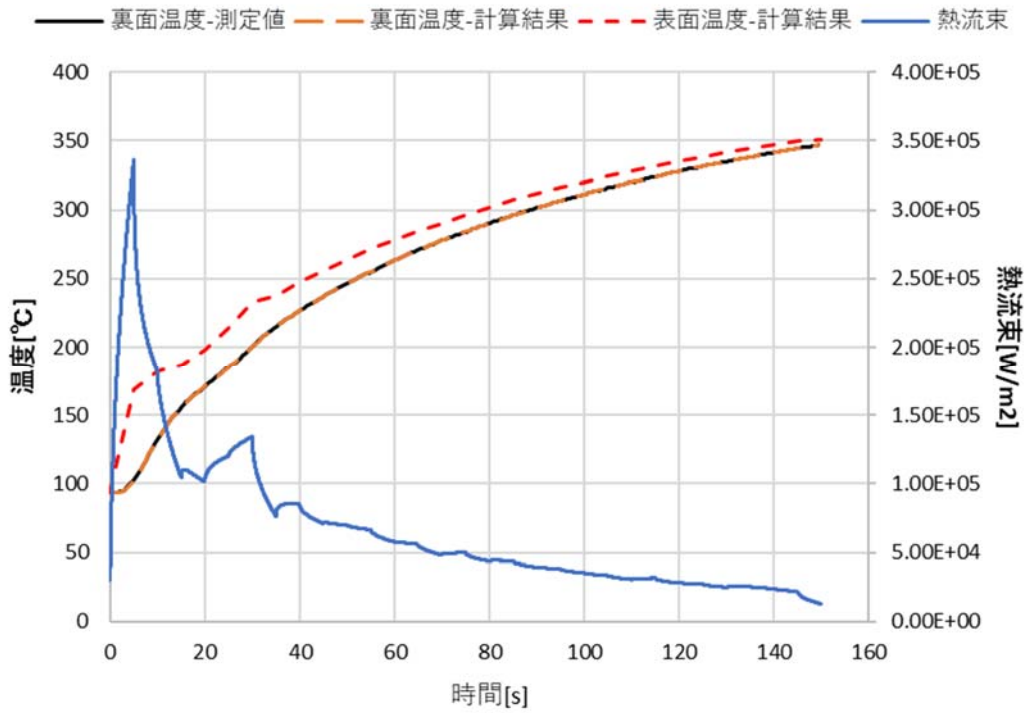


図 D4-3-6 表面温度と表面熱流束の計算結果 (PULiMS_E9_TR050.A045)

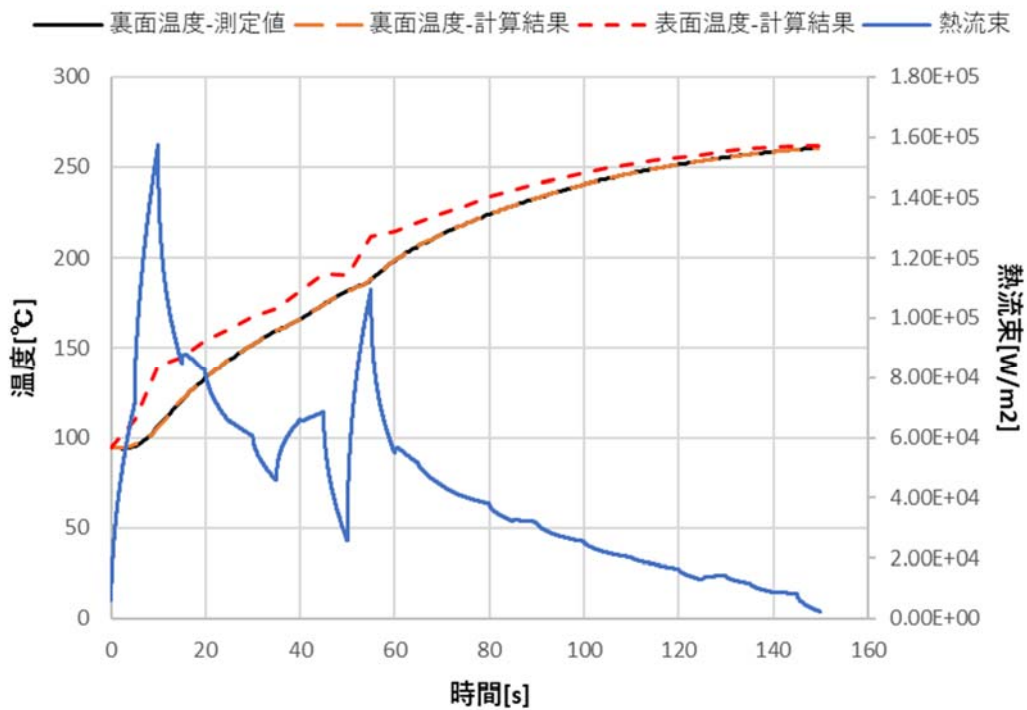


図 D4-3-7 表面温度と表面熱流束の計算結果 (PULiMS_E9_TR125.A045)

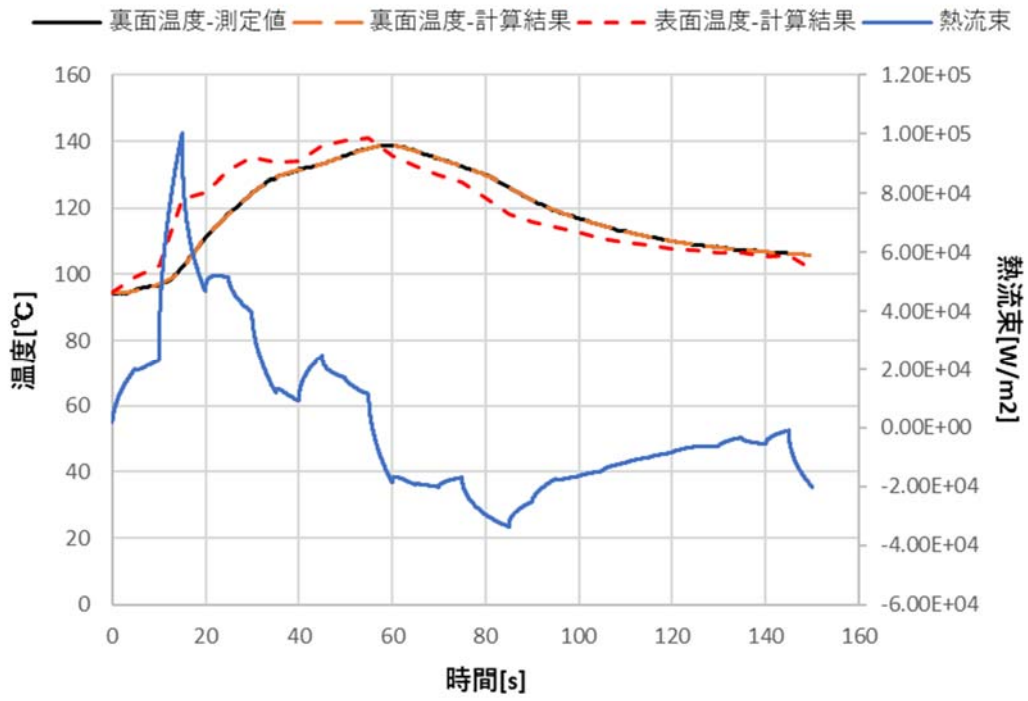


図 D4-3-8 表面温度と表面熱流束の計算結果 (PULiMS_E9_TR175.A045)

D.5 考察

D.5.1 表面温度の測定値について

図 D5-1-1 の床板表面温度の測定値を見ると、温度が急激に上昇してその後、高い温度で一定を保っているのがわかる。さらに、裏面温度の測定値から求めた表面温度の計算結果とも大きく異なっている。これは、床板表面温度の測定値は床板の温度を測定しているのではなく、床板上の熔融物の温度の影響を大きく受けた温度を出力していると考えられる。

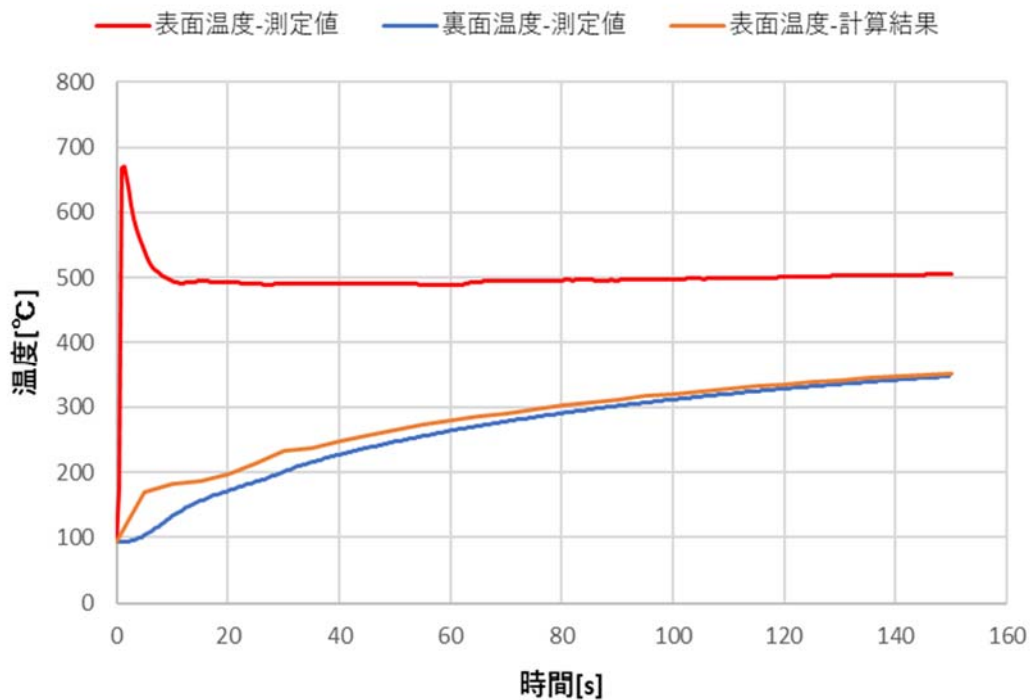


図 D5-1-1 床板温度の測定値 (PULiMS_E9_TR050.A045)

D.5.2 溶融物と床表面間の熱抵抗の計算の仮定と計算式

溶融物が到達すると伝熱が始まる。溶融物の温度を仮定すれば熱抵抗が計算できる。溶融物の温度としてクラストの存在を仮定し、溶融部とクラストの界面の温度、すなわち融点を与える。

床板表面の熱抵抗を求める計算式は以下を使用している。

$$R = \frac{T_m - T(0)}{q(0)} \quad (5-1)$$

ここで、

R : 熱抵抗 [Km²/W]

T_m : 溶融物温度 [°C] (今回の計算では 870 °C)

T(0) : 床表面温度 [°C]

q(0) : 床表面熱流束 [W/m²]

PULiMS 実験で溶融物は「Bi₂O₃-WO₂」を使用している。なお、T_m は一定としており、使用している溶融物の融点である 870 °Cを計算で使用している。

D.5.3 熱抵抗の計算結果

D.4.3 で示した計算結果から各ケースの床板表面の熱抵抗を求め、図 D5-3-1～D5-3-7 に示す。仮定からわかるようにこの方法で求められるのは、溶融物が到達してから溶融物がなくなる（固化する）までである。

熱流束の値が負になった場合、(5-1)式を使用することができないので、熱抵抗を「1.0E-8」と表示する。

表面温度が上昇していない最初の方の時間はまだ溶融物が到達していない。その後は、表面温度が上昇すると熱抵抗は有意な値を示す。

表面温度が下がるタイミングでは、熱流束が下がり、0 より小さい値となった。これは、溶融物が完全に固化したためと考えられる。

PULiMS_E9 (図 D5-3-5～D5-3-7) を例として、クラストまたは、蒸気膜が存在すると仮定する場合、表面の熱抵抗を使用してそれぞれの厚さを計算で求めて表 5-3-1 に示す。なお、熱抵抗は 3 つのケースで値が一番安定している 20 s 時点の数値を使用した。

クラスト、蒸気膜の厚さを求めるのに以下の計算式を使用する。

$$d = R * \lambda$$

使用している変数は以下の通りである。

- ・ d : 厚さ [m]
- ・ R : 熱抵抗 [Km²/W]
- ・ λ : 熱伝導率 [W/(m*K)]
 - クラスト熱伝導率 : 5.3 W/(m*K)[5.3.1]
 - 蒸気熱伝導 : 30.77E-3 W/(m*K) [5.3.2]

表 D5-3-1 の底クラスト厚さを見ると最小で 3.434E-2 m となっており、実験で得られ底クラストのデータより大きな数値となった。蒸気膜厚さはクラスト厚さより小さくなり、このことから、床板上にクラストではなく蒸気膜が存在したと考えられる。

計算で求めた各ケースの蒸気膜厚さを図 5-3-8 に示す。

このことから次のことが言える。

- ① 溶融物は底ステンレス板を濡らさず、薄い蒸気層が残る。(局所的に溶融物とステンレス表面が接する可能性はある)
- ② 初期に蒸気膜は 0.2 mm 程度であり、時間が経過すると 0.5 mm 程度まで増加する。0.2 mm から 0.5 mm への増加をクラストの成長で説明しようとするクラスト厚みは約 52 mm となる。この値は、実験で得られたクラストの厚みより大きいため、クラストが成長したのではなく蒸気膜がさらに厚くなったと考えられる。
- ③ 蒸気膜厚さの最小値は 0.2 mm 程度であり、実験ケース、位置によりあまり変化しない。

表 D5-3-1 PULiMS_E9 の 20 s 時点でのクラスト・蒸気膜厚さ

ケース名	熱抵抗[Km ² /W]	底クラスト厚さ[m]	蒸気膜厚さ[m]
PULiMS_E9_TR050	6.480E-3	3.434E-2	1.994E-4
PULiMS_E9_TR125	8.810E-3	4.669E-2	2.711E-4
PULiMS_E9_TR175	1.550E-2	8.215E-2	4.769E-4

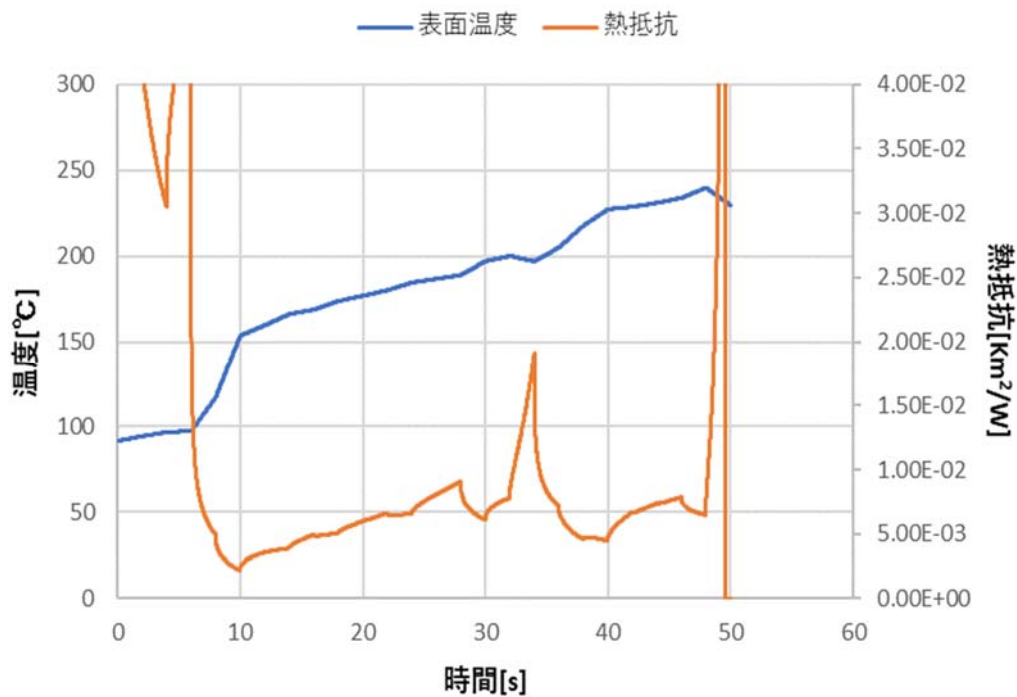


図 D5-3-1 表面温度と表面熱抵抗の時間変化 (PULiMS_E7_TR150.A180)

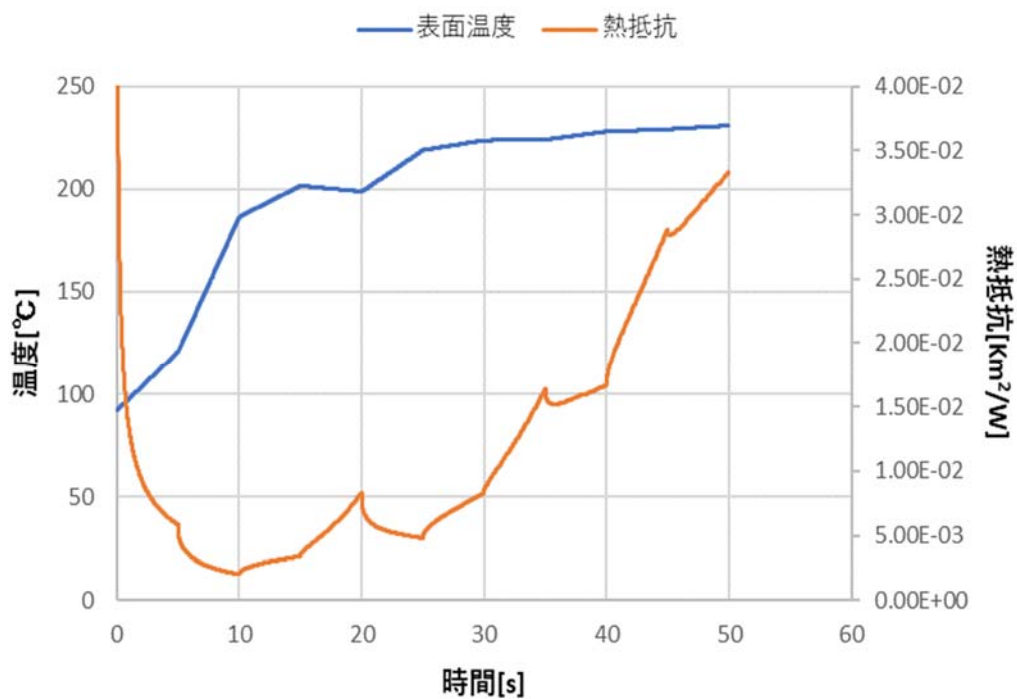


図 D5-3-2 表面温度と表面熱抵抗の時間変化 (PULiMS_E7_TR250.A180)

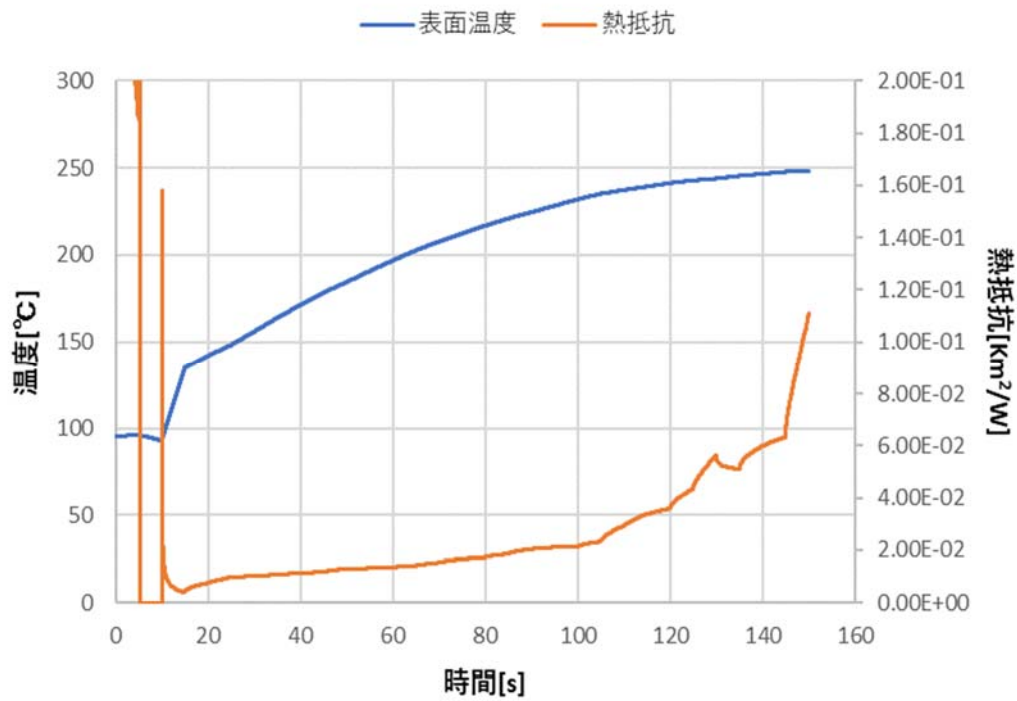


図 D5-3-3 表面温度と表面熱抵抗の時間変化 (PULiMS_E8_TR150.A180)

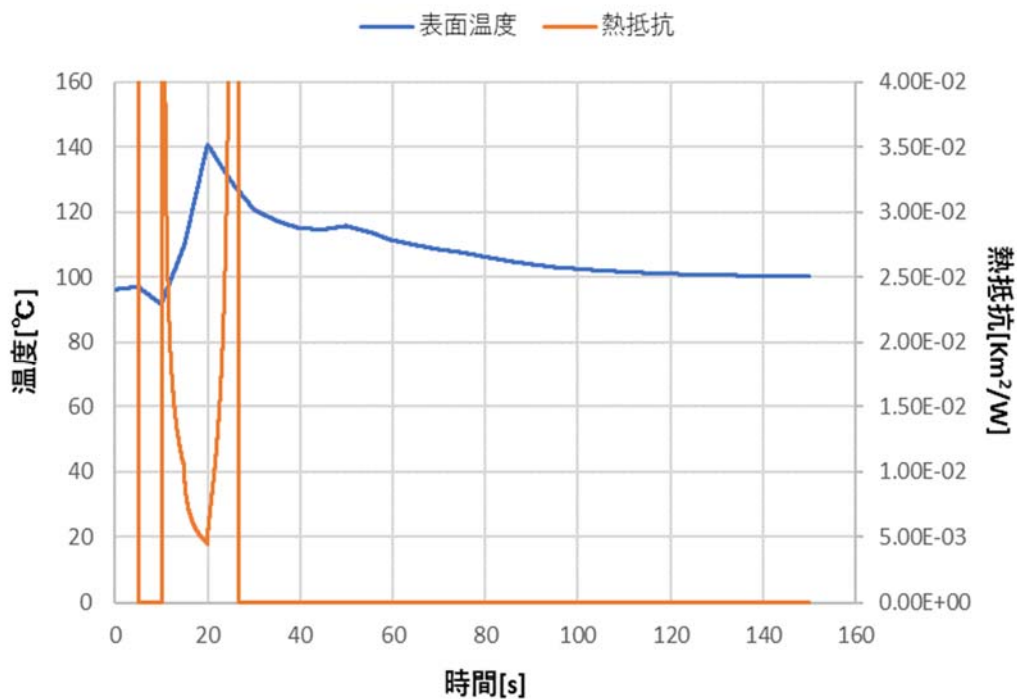


図 D5-3-4 表面温度と表面熱抵抗の時間変化 (PULiMS_E8_TR250.A180)

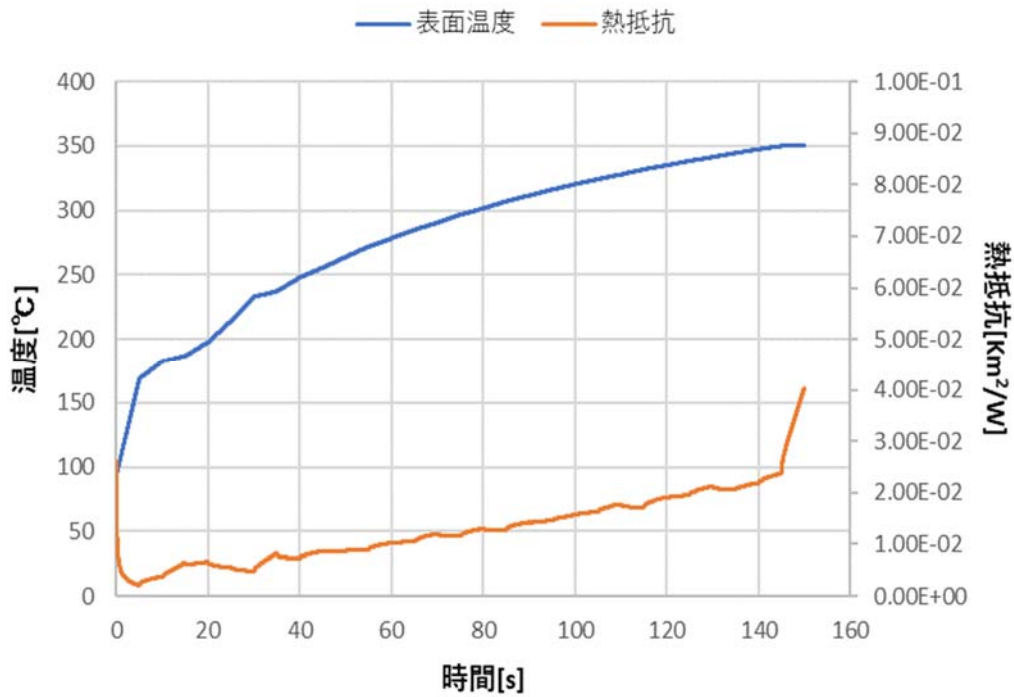


図 D5-3-5 表面温度と表面熱抵抗の時間変化 (PULiMS_E9_TR050.A045)

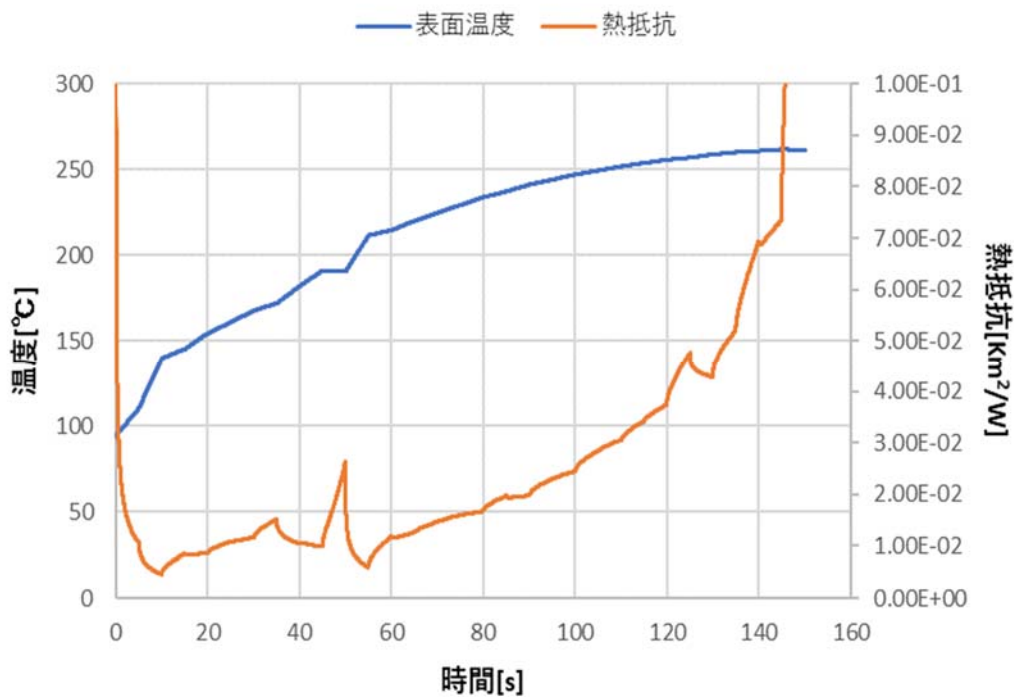


図 D5-3-6 表面温度と表面熱抵抗の時間変化 (PULiMS_E9_TR125.A045)

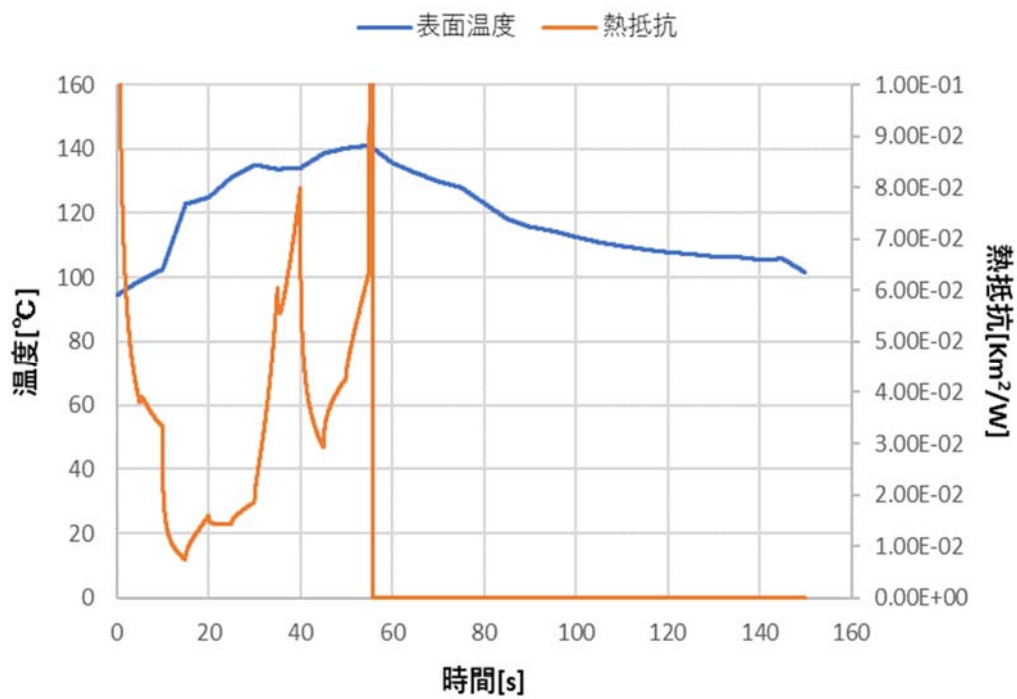


図 D5-3-7 表面温度と表面熱抵抗の時間変化 (PULiMS_E9_TR175.A045)

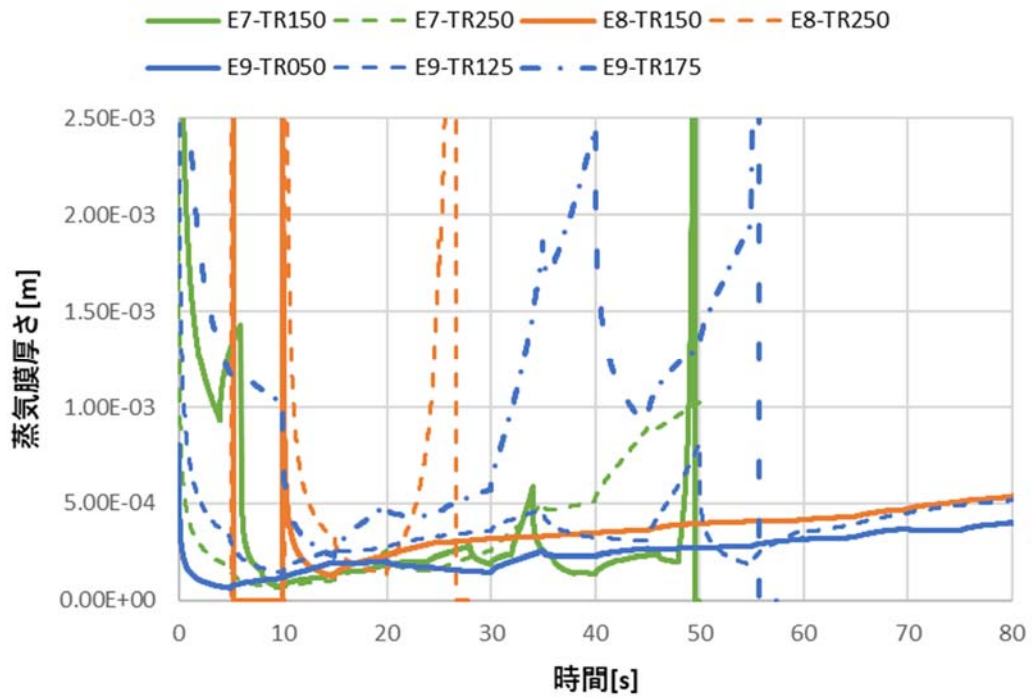


図 D5-3-8 各ケースの蒸気膜厚さの時間変化

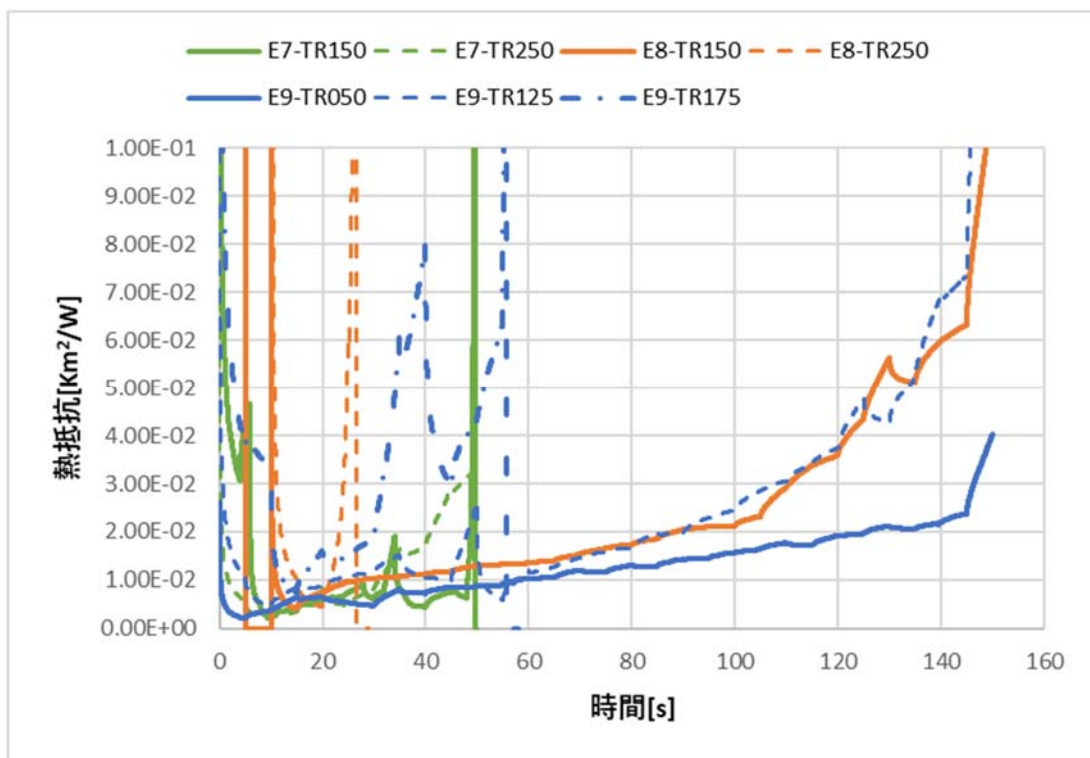


図 D5-3-9 各ケースの熱抵抗の時間変化

D.6 結論

PULiMS 実験の床裏面温度の測定値から床表面の伝熱状態を推定した。

床の厚み方向の熱伝導を解析する順問題プログラムを作成し、これと、裏面温度測定値から表面温度・熱流束を推定する逆問題プログラムを作成した。

順問題プログラム

- ・差分式で裏面温度を計算して論理解ともほぼ一致したことを確認した。
- ・表面温度の測定値から計算した裏面温度と裏面温度の測定値に大きな差ができた。これは、床板裏面より離れた位置の温度を測定しているためであることが確認できた。

逆問題プログラム

- ・裏面温度の計算結果と測定値の誤差がなるべく小さくなるように表面温度を変化させて最適化させることに成功した。
- ・床板温度の計算結果から求めた表面熱流束は、表側温度が上昇した途端に大きく上昇し、その後は段々と減少していく結果となった。

逆問題解析で得た床表面温度と熱流束から床板表面の熱抵抗を求めた。

- ・床板表面の熱抵抗からクラストと蒸気膜の厚さをそれぞれ調べた結果、蒸気膜が存在すると仮定した方が現実的な厚さとなった。

D.7 参考文献

- [1.1] P.Kudinov, D.Grishchenko, A.Konovalenko, A.Karbojian, S.Bechta,
“Investigation of Cooling Phenomena of High Temperature Molten Core
Phase-2: Melt-coolant interaction experiments on melt spreading under water”
(March,2016),
Royal Institute of Technology (KTH)
- [2.4.1] 甲藤,「伝熱概論」(34 ページ), 養賢堂
- [5.3.1] 国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構,
「平成 28 年度 原子力施設等防災委対策等委託費 (シビアアクシデント時格納容器
内容融炉心冷却性評価技術高度化) 事業」(3-18 ページ),
国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構
- [5.3.2] 日本機械学会 「伝熱工学資料 改訂第 5 版」(291 ページ) 日本機械学会

付録 E 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 E-1 に示す。ここで、デブリ（高さ L の連続層状デブリ）の上部には固化時の熱収縮で生じたクラック等に水が浸水した「浸水層」（高さ δ ）が存在すると仮定する。いま、デブリ下面がコンクリート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 E-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。

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

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。

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

また、デブリ内部の最高温度 T_{max} については、

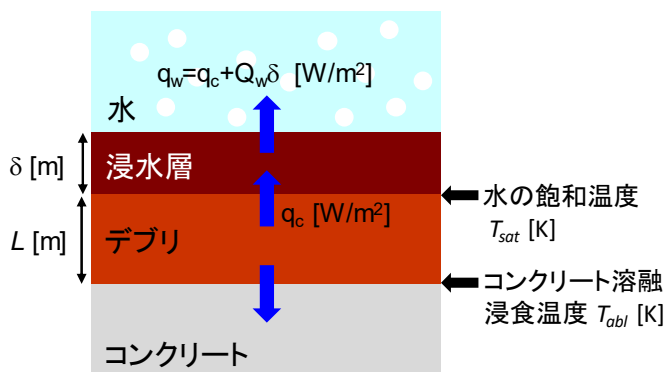


図 E-1 評価モデル

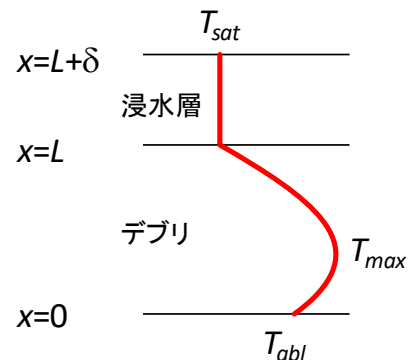


図 E-2 デブリ内温度分布

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

のとき

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

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。

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

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。

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

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。

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

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

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

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

変数一覧

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

※ 1 本評価においてはデブリ崩壊熱と等しいと仮定する。

※ 2 共晶組成でない場合は固相線温度を用いる。

付録 F 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 [F.1] に公開されているバージョン 3 について説明する。

F.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 F.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。

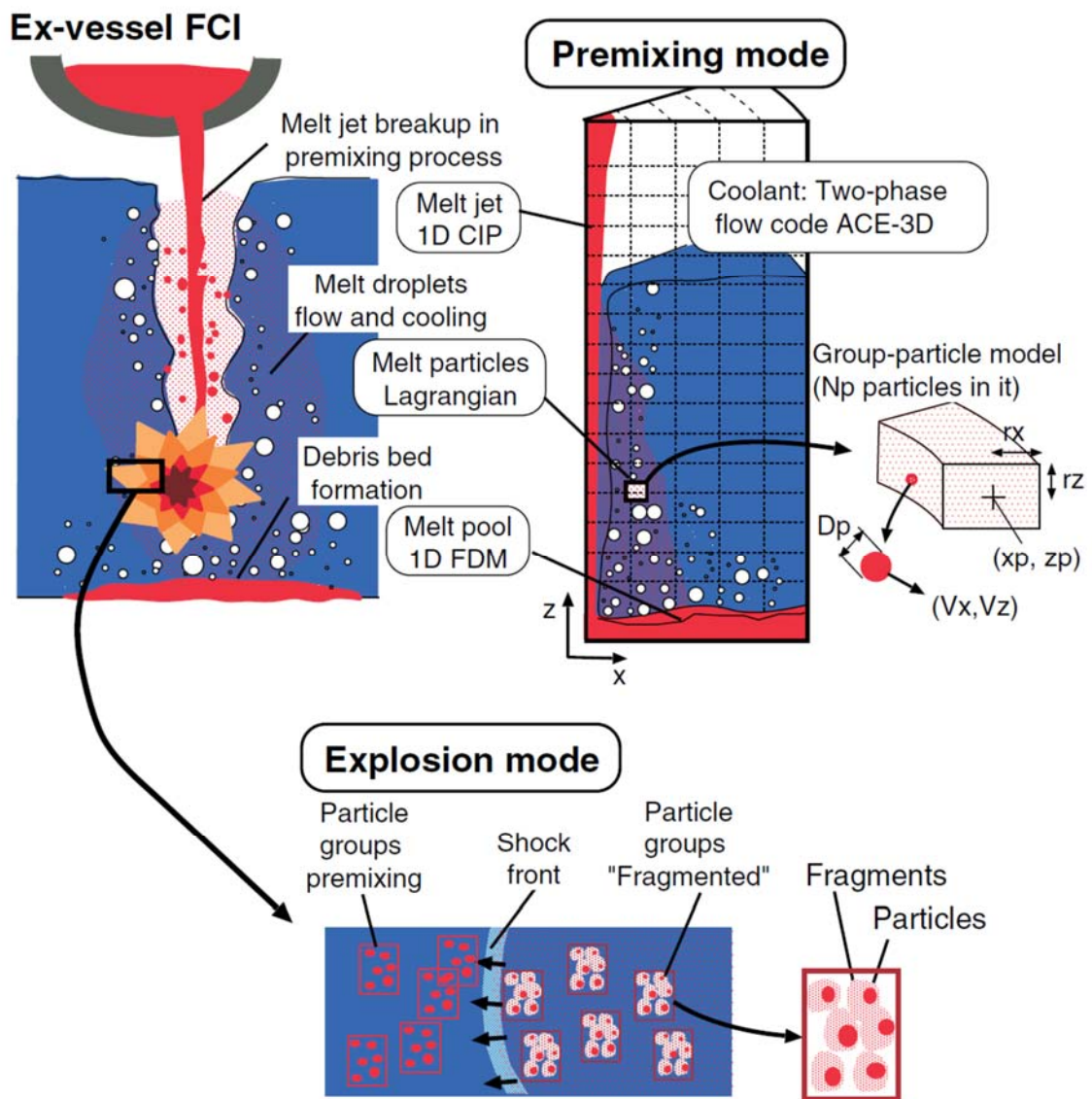


図 F.1 水蒸気爆発現象と JASMINE コードの解析モデル

F.2 基本モデルと計算式

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

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

(1) 溶融物ジェット

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

質量保存則：

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

エネルギー保存則：

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

運動量保存則：

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

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

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

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

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

により、ジェット表面での溶融物剥離速度を求め、さらに、

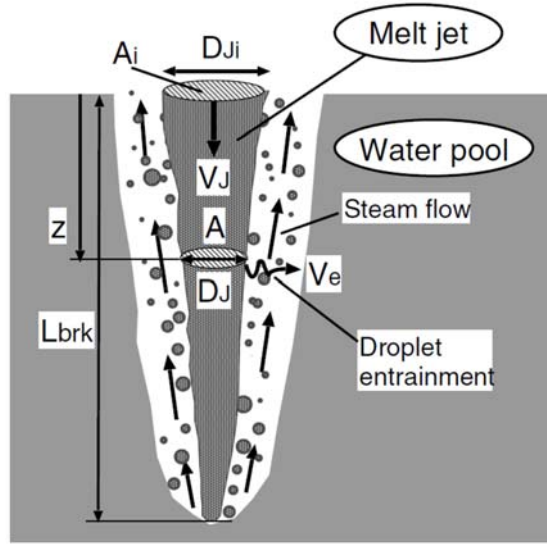


図 F.2 JASMINE コードにおける溶融物ジェットのモデル

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

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

(2) 溶融物プール

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

質量保存則：

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

エネルギー保存則：

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

運動量保存則：

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

とする。

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

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

ここで、 H は溶融物表面の水側熱伝達率である。

(3) 溶融物液滴

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

運動量保存則は、速度について：

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

液滴位置について：

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

また、エネルギー保存則は：

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

となる。

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

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

としている。

液滴の初期径は、バージョン 3.3 b までは固定値を入力で与えている。

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

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

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

また、 ϕ_r は 0~1 の一様乱数である。

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

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

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

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

(4) 水プール

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

質量保存則：

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

エネルギー保存則：

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

運動量保存則：

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

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

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

表 F.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) 記号の説明

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

記号

A : 断面積

e : 比内部エネルギー

g : 重力加速度

h : 液深または比エンタルピー

K : 摩擦係数

m : 質量または質量速度

p : 圧力

R : 半径

t : 時間

v : 速度

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

x : 水平方向座標

z : 高さ方向座標

α : ボイド率

γ_k : 単位体積当たり質量変化

κ : 熱拡散率

λ : 熱伝導率

ρ : 密度

θ : セクターモデルの周方向分割メッシュ幅角度

添字

a : 水プールを表す

av : 平均を表す

e : エントレインメント

J : 溶融物ジェット (Ji は、水面高さでの値を示す)

k : 流体の種類

l : 水

P : 溶融物プール

p : 溶融物液滴

sf : 表面

F.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 F.2 JASMINE コードで用意されている溶融物

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

このうち、実機解析に使用される corium 及び corium3 について、具体的な数値を表 F.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 F.3 JASMINE で使用されるコリウムの物性値

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

(b) 蒸気表

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

(c) 沸騰熱伝達

JASMINE コードで使用している沸騰曲線の一例をグラフに示す。雰囲気圧力を大気圧とし、水プールのサブクール度をパラメータとして、溶融物の表面過熱度に対する熱流束を計算した。図 F.3 が液滴表面熱流束、図 F.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。

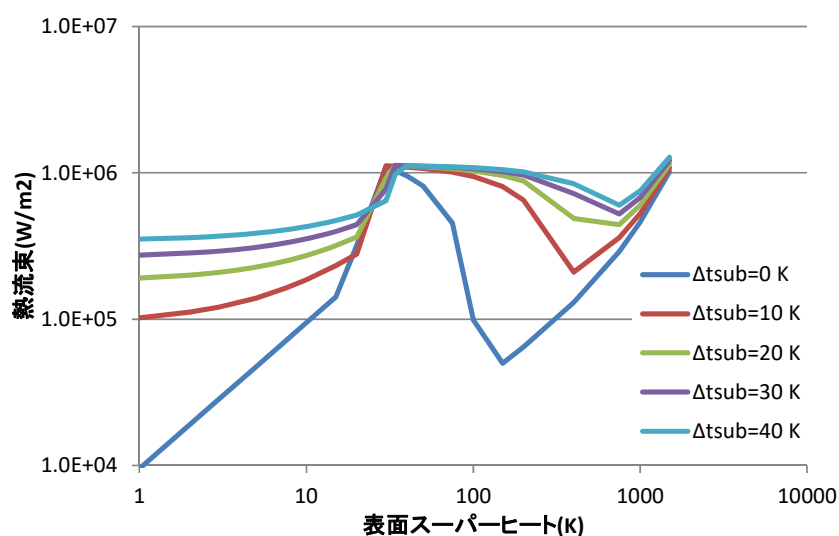


図 F.3 Jasmine 液滴表面熱流束(大気圧,d=3mm,v=0.3m/s)

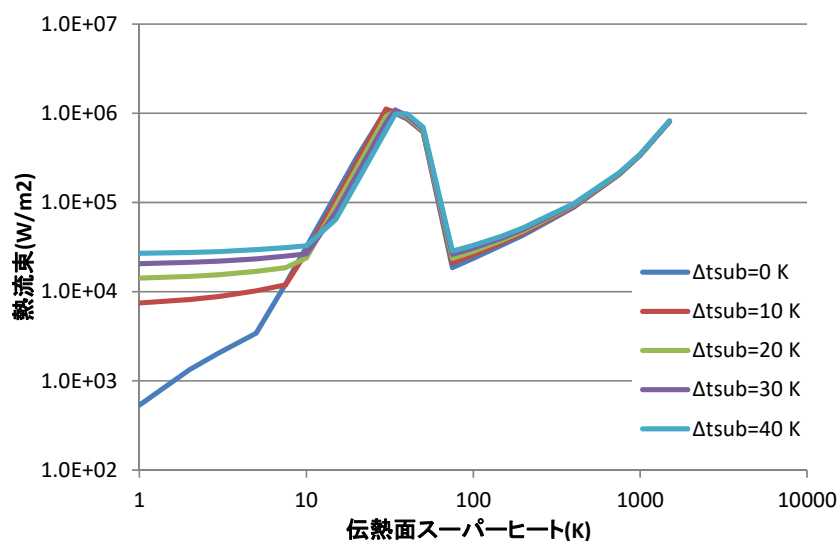


図 F.4 Jasmine プール表面熱流束(大気圧)

F.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 F.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。

本年度（平成 29 年度）の作業では、JASMINE 4.1 を用いて実機冷却性評価の予備解析を行うとともに（本文 第 4 章）、ver. 4.1 の解析モデルを改良して JASMINE 4.2 を作成した（本文 第 2 章、第 3 章）。

表 F.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。 [F.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。 [F.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。 [F.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。 [F.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可能とした。	OECD/NEA SERENA Project Phase-2
JASMINE 3.3NW	2015/07	環境を LINUX (UNIX) から WINDOWS に変更。コンパイラを インテル Visual Fortran Composer XE に変更。入力マニュアル改訂。	
JASMINE 4.0		平成 27 年度事業において、ジェットブレイク アップにおける Rosin-Rammler 粒径分布モデ ル及び床面拡がり挙動におけるクラスト形成 モデルを追加。	DEFOR-A PULiMS
JASMINE 4.0_agl	2017/3	アグロメレーションモデルを導入	DEFOR-A
JASMINE 4.0_msp	2017/3	床材内熱伝導解析を組み込み、溶融 物中ボイドの影響を考慮	PULiMS
JASMINE 4.1	2017/9	4.0_agl と 4.0_msp を結合	H29 年度 実機冷却 性評価の予備解析
JASMINE 4.2	2018/3	平成 29 年度事業においてアグロメ レーションモデル及びメルトスプ レッドモデルを改良 (本文参照)	DEFOR-A PULiMS

F.5 参考文献

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

国内出張 (1)

件名	日本原子力学会 2017 年秋の大会における口頭発表
出張先	北海道大学 (北海道札幌市)
期間	平成 29 年 9 月 13 日(水)～平成 29 年 9 月 15 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実施した JASMINE コードへの粒子結合 (アグロメレーション) モデルの導入及びその解析結果について、日本原子力学会 2017 年秋の大会にて口頭発表を行った。</p> <p>[2B04] 格納容器内先行注水による溶融炉心冷却挙動に関する研究 (1) JASMINE コードにおけるブレイクアップ粒子結合モデルの開発 松本 俊慶、川部 隆平、安島 航平、杉山 智之、丸山 結 (原子力機構)</p>

国内出張 (2)

件名	日本原子力学会 2017 年秋の大会における口頭発表
出張先	北海道大学 (北海道札幌市)
期間	平成 29 年 9 月 13 日(水)～平成 29 年 9 月 15 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実施した JASMINE コードの溶融炉心床上拡がりモデルの改良及びその解析結果について、日本原子力学 2017 年会秋の大会にて口頭発表を行った。</p> <p>[2B05] 格納容器内先行注水による溶融炉心冷却挙動に関する研究 (2) JASMINE コードにおける溶融炉心床上拡がりモデルの改良と解析 川部 隆平、松本 俊慶、安島 航平、杉山 智之、丸山 結 (原子力機構)</p>

国内出張 (3)

件名	IRSN-JAEA-S/NRA/R Scientific Seminar 2017 への参加
出張先	コンベンションルーム AP 東京八重洲通り (東京都中央区京橋 1-10-7)
期間	平成 29 年 11 月 20 日(月)~21(火)
出張者	研究主席 1 名
概要	フランス放射線防護・原子力安全研究所 (IRSN)、原子力規制庁及び原子力機構の 3 機関で開催されたセミナーに参加し、熔融炉心冷却性研究に関する情報交換を行うとともに、今後の研究及び協力について議論した。

外国出張（1）

件名	OECD/NEA WGAMA 会合への出席
出張先	フランス OECD 本部
期間	平成 29 年 9 月 18 日（月）～平成 29 年 9 月 23 日（土）
出張者	研究首席 1 名
概要	<p>OECD/NEA の CSNI（原子力施設安全委員会）WGAMA（事故の分析・管理ワーキンググループ）第 20 回会合に出席し、原子炉の安全研究に関する各国の取り組み、国際協力の進捗等について最新情報を取得した。</p> <p>本会合は毎年 1 回開催され、軽水炉のシビアアクシデント(SA)を含む熱水力安全の確保・向上に資する安全情報の共有を目指した活動の検討を行っている。今回は米露独仏などの主要国をはじめとする約 20 カ国から約 60 名が参加した（うち日本からの参加者は、原子力規制庁から 1 名、電力中央研究所から 2 名、JAEA から 2 名）。</p> <p>また、CEA/Saclay 研究所を訪問し、シビアアクシデント関連研究について実験施設を見学するとともに情報交換を行った。</p>

外国出張 (2)

件名	熔融炉心冷却性評価に関する KTH 及び IKE との技術打合せ
出張先	スウェーデン／ストックホルム 王立工科大学 (KTH) ドイツ／シュトゥットガルト シュトゥットガルト大学 (IKE)
期間	平成 29 年 10 月 22 日 (日) ～平成 29 年 10 月 28 日 (土)
出張者	研究首席 1 名、研究員 1 名
概要	<p>原子力規制庁の研究員 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) 及びドイツ／シュトゥットガルト大学 (IKE) を訪問し、熔融炉心／冷却材相互作用解析コード JASMINE の改良及び同コードによる実験解析結果を紹介するとともに、意見交換や実験施設見学等を通して熔融炉心冷却性評価研究に関する最新情報を取得した。</p> <p>KTH においては、JASMINE コードの熔融炉心粒子化モデルの改良においてデータを活用している DEFOR-A 実験の実施に立会い、データレポートからは得られない実験装置や実験手順に関する詳細情報を取得した。また、今後実施する DEFOR-A 及び PULiMS 実験に関する検討に参加した。</p>

外国駐在

件名	スウェーデン王立工科大学（KTH）駐在
出張先	スウェーデン王立工科大学
期間	平成 29 年 4 月 3 日（月）～平成 30 年 3 月 30 日（金）
出張者	研究員 1 名
概要	<p>DEFOR-A 及び PULiMS 実験に関する実験結果の整理、分析、解釈及び物理モデルの検討等を現地の研究者及び技術者とともに実施し、これを通して、格納容器内溶融炉心冷却性評価に係る共通課題の解決に向けて緊密な連携を図ることを目的として、同実験の実施機関であるスウェーデン王立工科大学（KTH）に駐在した。</p>