

平成 28 年度原子力規制庁委託成果報告書

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

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構  
平成 29 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. 溶融炉心ジェットブレイクアップ及びアグロメレーション       | 2-1  |
| 2.1 ブレイクアップ及びアグロメレーション評価の目的         | 2-1  |
| 2.2 JASMINE コードへのアグロメレーションモデルの組み込み  | 2-1  |
| 2.3 DEFOR-A 実験解析                    | 2-3  |
| 2.4 DEFOR-A1 及び A4～9 の解析            | 2-28 |
| 2.5 DEFOR-A23～25 の解析                | 2-33 |
| 2.6 実機条件での解析                        | 2-35 |
| 2.7 まとめ                             | 2-42 |
| 3. 溶融炉心の床面上の拡がり                     | 3-1  |
| 3.1 JASMINE コードの改造                  | 3-1  |
| 3.2 PULiMS 実験の解析                    | 3-13 |
| 3.3 実機条件での解析                        | 3-30 |
| 3.4 技術的課題                           | 3-35 |
| 4. おわりに                             | 4-1  |
| 付録 A 溶融炉心ジェットブレイクアップ及びアグロメレーション解析結果 | A-1  |
| 付録 B 溶融炉心の床面上の拡がりの解析結果              | B-1  |
| 付録 C JASMINE コードの概要                 | C-1  |
| 付録 D 出張報告                           | D-1  |

## 1. はじめに

軽水炉のシビアアクシデントにおいて、原子炉圧力容器の下部ヘッドが溶融炉心との相互作用により破損すると、溶融炉心が格納容器の原子炉キャビティ（PWR）あるいはペデスタル（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デスタルに移行したと推定されている [1.1]。また、事故から約 6 年を経て最近取得された 2 号機圧力容器直下の映像は、実際に溶融炉心がペデスタルに落下したことを示唆している [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。

- ① 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。
- ② 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。

- ③ 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②の解析を繰り返し実施する。一連の解析により、熔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熔融浸食温度  $T_{abl}$ （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、熔融炉心の冷却に成功する確率を評価する。
- ④ 上記の②及び③を格納容器内に形成される水プールの水深をパラメータとして実施することにより、熔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。

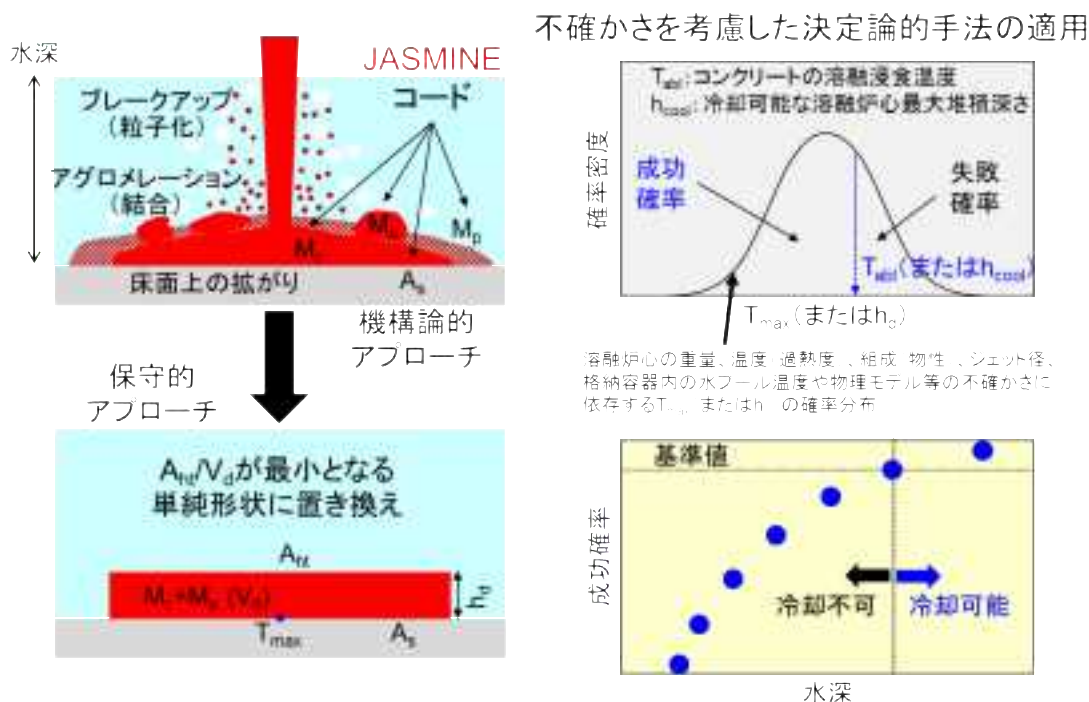


図 1.1 格納容器内熔融炉心冷却性評価のアプローチ及びアウトプット

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 27 年度に引き続き水プール中における熔融炉心のブレイクアップ及び格納容器床面上における熔融炉心の拡がり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り実機を対象とした評価を行うための準備として、実機条件に対する JASMINE コードを用いた試解析を実施した。今年度の具体的な実施項目は以下のとおりである。

- ① 熔融炉心のブレー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）を評価するためのモデルを JASMINE コードに組み込み、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ークアップ実験（DEFOR-A 実験）[1.4]の解析に適用した。また、想定した実機条件に対してアグロメレーション割合を評価するための試解析を実施した。
- ② 格納容器床面上での熔融炉心の拡がり過程における床面内の伝熱や熔融炉心内のガスの影響を考慮できるよう JASMINE コードを改良し、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]の解析を実施した。また、想定した実機条件に対して床面上拡がり挙動を評価するための試解析を実施した。

次年度以降、原子力規制庁と KTH が共同で実施する DEFOR-A 実験及び PULiMS 実験のデータを活用して JASMINE コードの更なる改良と検証を行うとともに、実機格納容器内における熔融炉心の冷却性評価手法の構築に向けた解析を進める計画である。

#### 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, 2 号機原子炉格納容器内部調査について, 2017 年 2 月 20 日, [http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/handouts/2017/images1/handouts\\_170220\\_03-j.pdf](http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/handouts/2017/images1/handouts_170220_03-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, Kaohsiung, Taiwan, September, 2012.

## 2. 溶融炉心ジェットブレイクアップ及びアグロメレーション

### 2.1 ブレイクアップ及びアグロメレーション評価の目的

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デスタル）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。このように形成された「粒子状デブリ」は比表面積（重量当たりの表面積）が大きいため冷却されやすい。一方、溶融物ジェットが格納容器の床面に到達し、水平方向に拡がって床面上で溶融物プールを形成した後に「連続層状デブリ」となった場合には、水による冷却がデブリの上面側でしか期待できないため冷却されにくい。また、溶融物が一旦粒子化した場合でも、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。

格納容器床面での溶融炉心・コンクリート相互作用（MCCI）回避または影響緩和に対するシビアアクシデント対策の有効性を評価するためには、格納容器内における炉心溶融物の冷却性を適切に評価する必要がある。したがって、炉心溶融物がどのような重量割合で粒子状デブリ、アグロメレーションデブリ及び連続層状デブリに分配されるかを評価する技術が求められる。溶融炉心／冷却材相互作用解析コード JASMINE は既に粒子状デブリ生成モデルを有していることから、本年度の事業では、アグロメレーションデブリの生成割合を評価する機能を追加することとした。

### 2.2 JASMINE コードへのアグロメレーションモデルの組み込み

JASMINE コードでは、同一パラメータ（質量、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、有限の体積を有す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場合も空間領域を拡大または縮小することで表現できる。粒子群の持つパラメータは配列を使って管理しており、ブレイクアップにより粒子群が発生するたびに新たなパラメータセットを生成する。

本改良では以下の（１）～（４）で説明するように、アグロメレーション発生 の判定基準と、その粒子群がアグロメレーションしたことを示すパラメータを追加した。アグロメレーションした粒子群の周囲二相流体との相互作用については、表面熱伝達の調整係数やクラスト（溶融物の表面に形成される固化層）上への固着を新たに考慮することとしたが、それ以外は元の粒子群の取り扱いと同じである。

JASMINE コードでは、溶融物の床面上での拡がり は溶融物プールモデルで表されているため、本章中では冷却されて固化した状態についても溶融物プールと表現する。

#### （１）アグロメレーションの判定対象となる粒子群

粒子群が床面に到達（落下）した時点で、落下点近傍の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。

判定対象となるのは、①溶融物プールが無い床に着地した融点以上の粒子群、②固化した溶融物プールの上面に着地した融点以上の粒子群、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融点以上の粒子群である。

## (2) アグロメレーション判定

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。

該当する粒子群が既にアグロメレーションしている場合、その粒子群の温度が融点以上なら落下粒子群とのアグロメレーションが生じると判定する。

該当する粒子群がアグロメレーションしていない場合、以下の考え方に従って重なりを程度を評価し、アグロメレーションを判定する。いま、落下粒子群を **grp1**、既に落下し **grp1** と重なりを持つ粒子群を **grp2** とする。図 2.2.1 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、図 2.2.2 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 2 つの面積の比  $\Phi = S_{par} / S_{grp}$  が判定基準  $\Phi_{lim}$  よりも大きい場合に粒子群 **grp1** 及び **grp2** がアグロメレーションすると判定する。ここで、 $\Phi$  は粒子同士の接触がどの程度起こるかを示す尺度であるが、アグロメレーションは粒子同士の接触があれば必ず生じるとは限らない。判定基準  $\Phi_{lim}$  は実験結果との比較により最適化する。

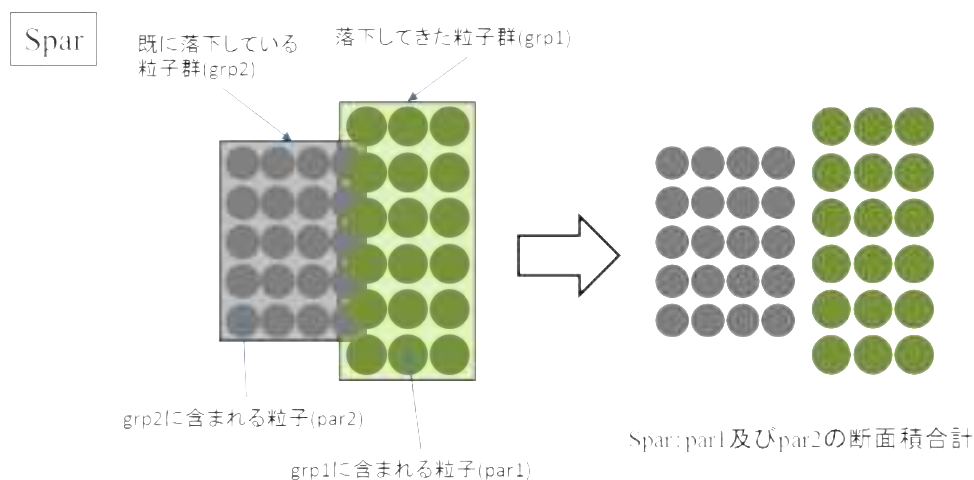


図 2.2.1 粒子断面積の合計  $S_{par}$

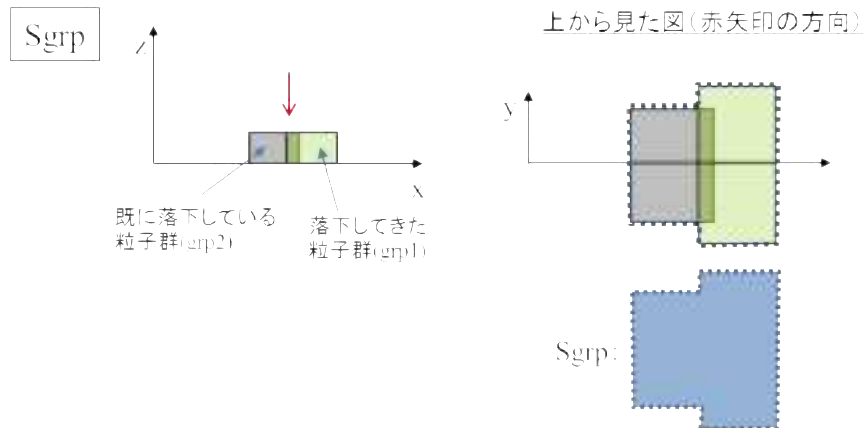


図 2.2.2 粒子群が含まれる空間領域の投影面積  $S_{grp}$

### (3) アグロメレーションした粒子群の熱伝達量の調整

アグロメレーションにより粒子群から二相流体への伝熱面積が減少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  $k_{qhtr}$  を導入した。

### (4) クラスト上に着地した粒子群の取り扱い

本年度の改良前は、熔融物プール上面のクラストに着地した粒子群が周囲の二相流体から受ける力で自由に移動することとしていた。本改良により、クラストに着地した粒子がクラスト表面に固着し、クラストとともに移動するモデルを選択可能とした。

## 2.3 DEFOR-A 実験解析

改良を加えた JASMINE コードを用いて DEFOR-A 実験の解析を実施した。また、アグロメレーション判定基準である  $\phi_{lim}$  を DEFOR-A2 実験の解析により検討し、得られた値をその他の実験の解析に適用した。

### 2.3.1 DEFOR-A 実験の概要

DEFOR (DEbris bed FORmation) 実験は、水中での熔融デブリの冷却性に関する知見を得るために、KTH の Division of Nuclear Power Safety により実施されている。水プールに熔融物質をジェット状に落下させ、水中でのブレイクアップやアグロメレーションに着目した実験が行われてきた。これまでに DEFOR-E、DEFOR-S、DEFOR-A という複数の実験シリーズが実施された。DEFOR-E (E : Exploratory) [2.3.1]では DEFOR 装置によるデブリ生成の特性について、サブクール度とプール深さ、熔融物の組成と過熱度、粒子の着地前の状態とデブリベッドの状態（空隙率、粒子径分布、形態）等の関係が調べられた。DEFOR-S (S : Snapshot) [2.3.2][2.3.3]では、ジェットが完全にブレイクアップし、粒子が冷却固化してアグロメレーションデブリが生成しない水プール深さの条件で、固化

粒子の形態が調べられた。粒子の空隙率がそれまでのデブリベッド解析で用いられる値よりも大きいこと、粒子の形状が水プールのサブクール度や溶融物の組成によって大きく異なることが示された。

DEFOR-A (A : Agglomeration) [2.3.4][2.3.5]はアグロメレーションデブリを対象とした実験シリーズである。アグロメレーションの生成割合に影響があると考えられる溶融物のジェット径、溶融物温度及び水プール温度を主な実験パラメータとして、これまでにおよそ 20 ケースが実施された。模擬物質としては主に酸化タングステンと酸化ビスマスの共晶物質が使用された。実験パラメータの範囲は、ジェット径：10～35 [mm]、溶融物温度（過熱度）：1200～1300（80～160）[K]、水プール温度（サブクール度）：330～370（～40）[K]である。各条件において、水深に対するアグロメレーション割合などのデータが得られた。DEFOR タイプの実験ではアグロメレーションデブリに着目した例が世界的に少なく、一貫したデータが得られているという観点から DEFOR-A 実験は重要である。

### 2.3.2 DEFOR-A 実験装置

DEFOR 実験装置の水プールとキャッチャーの写真を図 2.3.1 に示す。実験装置は、模擬物質を溶融させるための高周波誘導加熱炉、溶融物ジェットを形成するための漏斗、溶融物ジェットを落下させる水プールから構成される。実験装置は鉄筋コンクリート製の耐圧実験室内に設置されており、実験は室外からの遠隔操作で開始される。装置上部の高周波誘導加熱炉はシリコンカーバイド製で、45 [kW](30 [kHz])の出力を持ち、容量は 15 リットルである。この炉内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、これを通してジェットが落下する。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。

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。プール中には落下粒子を受け止めるために、4つの異なる深さにキャッチャーが備えられている。上部のキャッチャーからそれぞれキャッチャー1、キャッチャー2、キャッチャー3、キャッチャー4と呼ぶ。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いる。水面からキャッチャー1 まで十分な深さがあるため、溶融物の全てがキャッチャー1 に到達するまでにブレイクアップし、粒子化すると考えられる。

以下は、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）を推定する Saito の式[2.3.6]である。

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

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、 $\rho$ ：溶融物密度、 $\rho_w$ ：水密度、 $U_{jet}$ ：ジェット入水速度、 $g$ ：重力である。この式に基づき、DEFOR-A 実験のキャッチャー1 の高さが決められた。[2.3.4]によれば、ジェットの初期直径が 25 [mm]のとき、ブレイクアップ長さは 0.60 [m]となり、水面からキャッチャー1 までの距離

と同程度である。溶融物ジェットは、ノズルから水面まで落下する間に加速されることで断面積が減ることから、水面到達時の直径は初期直径より小さくなる。したがって、キャッチャー1までの水深で完全にブレイクアップすると考えられる。

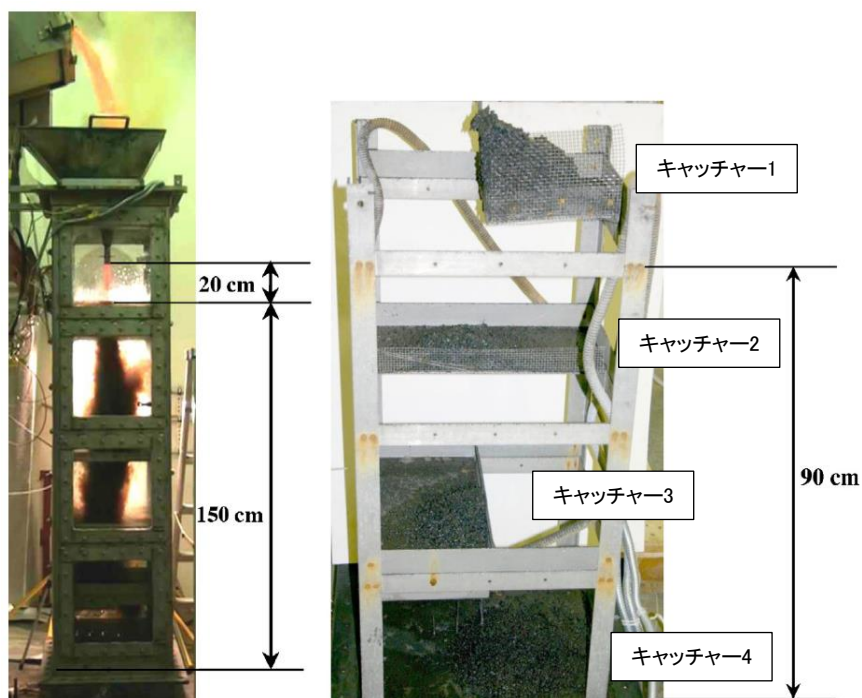


図 2.3.1 DEFOR-A 実験装置[2.3.4]

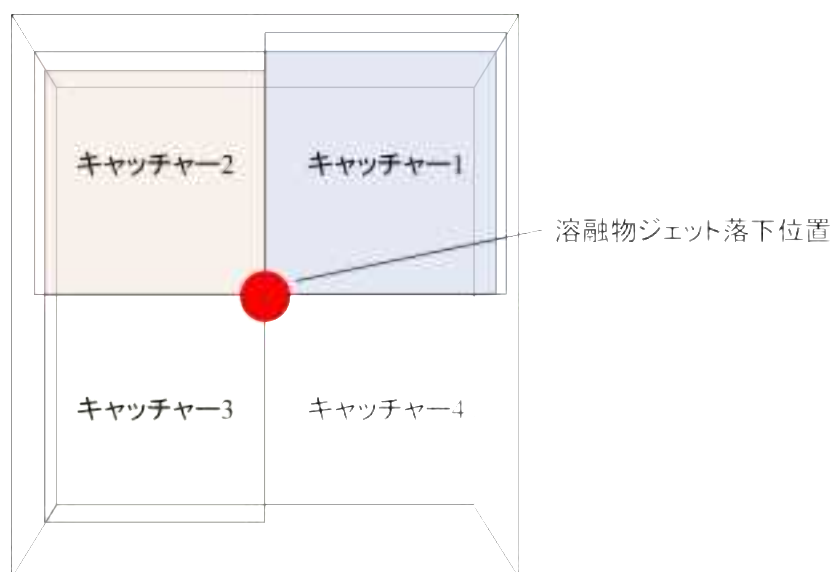


図 2.3.2 DEFOR-A 実験におけるキャッチャーの配置

### 2.3.3 DEFOR-A 実験条件と主な結果

アグロメレーション粒子に関する改良を加えた JASMINE コードを用いて、DEFOR-A1~9 及び A23~25 を対象として解析を実施した。なお、A26 が解析対象に含まれないのは、現時点でアグロメレーションデータが得られていないためである。

DEFOR-A 実験の溶融物は、酸化ビスマスと酸化タングステンの共晶点混合物 ( $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-WO}_3$ ) である。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 2.3.1 に DEFOR-A1~9 実験の条件をまとめる。A3 のケース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としなかった。表 2.3.2 は A23~26 の実験条件を示す。A23~26 は溶融物ジェット直径が比較的大きく、水のサブクール度が小さいため、より複雑な現象が予想される条件となっている。

表 2.3.1 DEFOR-A1~9 実験条件[2.3.5]

| 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   |
| 重量平均直径 [mm]   | 4    | 3.7  | -    | 3    | 4.4  | 3.1  | 4.8  | 3.9  | 4.3  |

表 2.3.2 DEFOR-A23~26 実験条件

| 実験番号           | A23  | A24  | A25  | A26   |
|----------------|------|------|------|-------|
| 溶融物温度 [K]      | 1280 | 1248 | 1216 | 1299  |
| 溶融物過熱度 [K]     | 137  | 105  | 73   | 156   |
| 溶融物ジェット直径 [mm] | 25   | 34   | 34   | 34    |
| ジェット放出時間 [s]   | 5.8  | 5.3  | 5.7  | -(不明) |
| ジェット放出高さ [m]   | 1.7  | 1.77 | 1.77 | 1.77  |
| ジェット自由落下距離 [m] | 0.2  | 0.17 | 0.17 | 0.17  |
| 水プール深さ [m]     | 1.5  | 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    |
| 重量平均直径 [mm]    | -    | -    | -    | -     |

キャッチャー4に堆積したデブリの分析が実験後に行われた。粒子状のデブリは篩にかけられ、粒子直径に対する累積質量割合として整理された（表 2.3.3）。DEFOR-A1~9 実験での各キャッチャーにおけるアグロメレーション割合を表 2.3.4 に示す。また、水プール深さとアグロメレーション割合の相関関係を A1~9 については図 2.3.3 に、A23~25 については図 2.3.4 に示す。

表 2.3.3 粒子直径と累積質量割合一覧[2.3.4]

| 粒子直径<br>[mm] | 粒子直径以下の累積粒子質量割合 [%] |      |      |      |      |      |      |      |
|--------------|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|
|              | A1                  | A2   | A4   | A5   | A6   | A7   | A8   | A9   |
| 7.1          | 97.9                | 98.2 | 98.9 | 93.1 | 99.4 | 92.3 | 96.7 | 95.9 |
| 5.6          | 86.7                | 88.3 | 95.4 | 82.2 | 95.3 | 74.6 | 86.5 | 91.4 |
| 4.75         | 79.3                | 81.5 | 93.1 | 75   | 90.7 | 62   | 79.7 | 64.8 |
| 4            | 62                  | 68   | 88.8 | 60.7 | 82.3 | 48.6 | 64.7 | 49.1 |
| 3.55         | 54.6                | 59.7 | 84.2 | 51.7 | 76   | 41   | 57.9 | 39.1 |
| 2.8          | 36.5                | 44.2 | 51.5 | 32.6 | 54.9 | 28.8 | 38.3 | 30.1 |
| 2.36         | 28.3                | 32.6 | 46.2 | 24.7 | 44.8 | 22   | 30.3 | 22.9 |
| 2            | 18.5                | 24.5 | 30.9 | 17.5 | 29.7 | 18.6 | 21   | 17.4 |
| 1.8          | 15.7                | 19.8 | 27.4 | 15.5 | 26.9 | 14.5 | 18.7 | 12.6 |
| 1.4          | 9.2                 | 11.4 | 16.5 | 8.7  | 14.4 | 7.4  | 10.2 | 9.1  |
| 1            | 4                   | 5.5  | 8.5  | 4.2  | 7.5  | 3.9  | 4.9  | 6.1  |
| 0.5          | 1.2                 | 1.3  | 3    | 1    | 2.6  | 1.2  | 1.3  | 3.3  |
| 0.25         | 0.4                 | 0.3  | 1.1  | 0.3  | 0.9  | 0.5  | 0.5  | 1.5  |
| 0.1          | 0.1                 | 0.1  | 0.3  | 0.1  | 0.2  | 0.1  | 0.1  | 0.3  |

表 2.3.4 アグロメレーション割合(A1~9)[2.3.4]

| 実験番号              | A1   | A2   | A3   | A4   | A5   | A6   | A7   | A8   | A9   |
|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 溶融物過熱度 [K]        | 110  | 103  | -    | 78   | 102  | 136  | 206  | 112  | 200  |
| 溶融物ジェット直径<br>[mm] | 10   | 20   | 20   | 20   | 10   | 12   | 25   | 25   | 20   |
| 水サブクール度 [K]       | 27   | 7    | 28   | 27   | 9    | 27   | 17   | 18   | 18   |
| 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  |

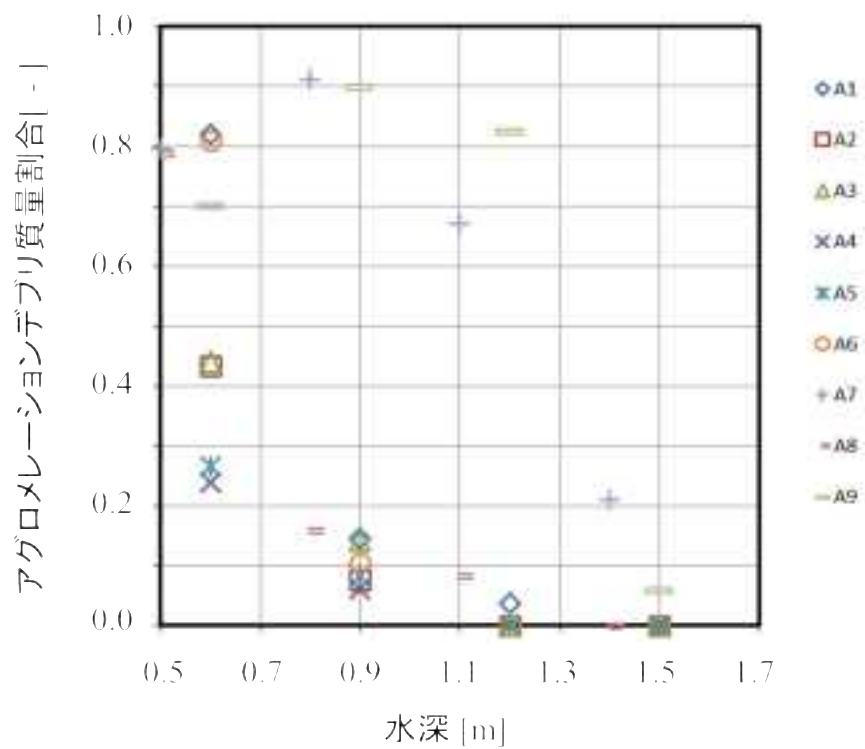


図 2.3.3 アグロメレーションデブリ質量割合 (A1~9)

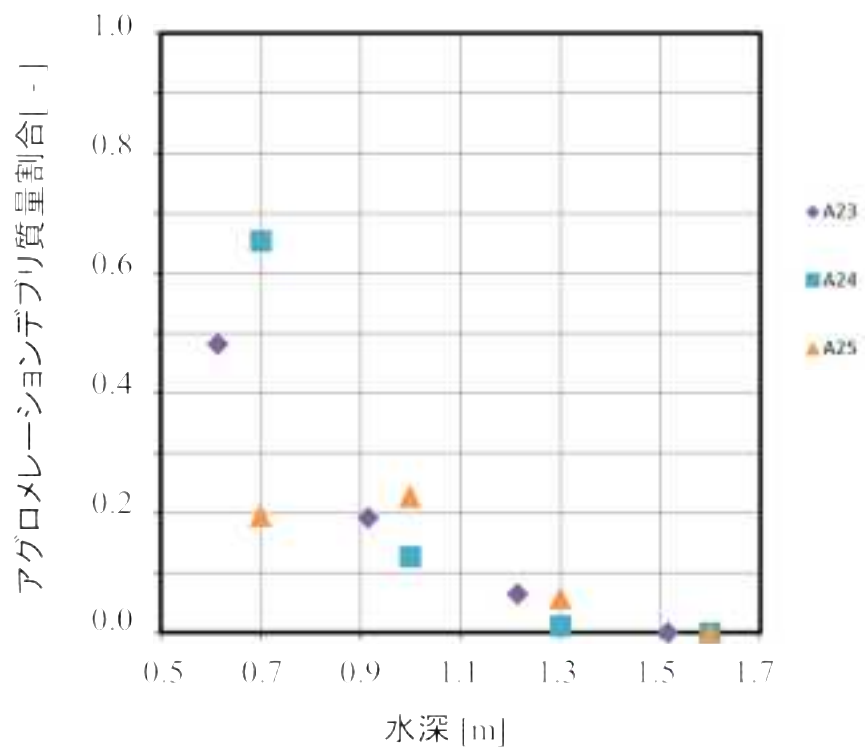


図 2.3.4 アグロメレーションデブリ質量割合 (A23~25)

### 2.3.4 解析条件

DEFOR-A 実験を JASMINE コードで解析するための条件設定について述べる。アグロメレーション判定基準である  $\phi_{im}$  をパラメータとした解析を A2 ケースを対象として実施し、比較的整合性の良い値を用いて残りのケースに適用した。

#### (1) 解析体系

DEFOR-A 実験における 4 層のキャッチャーを模擬するために、JASMINE 解析では、水面から各キャッチャーまでの距離に等しい水深を有する 4 つの解析体系を用意して、それぞれ独立に計算を行うこととした。得られたアグロメレーション割合を各キャッチャー高さに対する結果と見なし、実験結果と比較した。

DEFOR-A 実験装置のテストセクション（水プール）の水平断面は 0.5 [m]×0.45 [m] の矩形であるが、JASMINE コードの計算体系は円筒であるため、水プールの水平断面積が実験と等しくなるよう等価半径を決定した。実験では、プール上部が開放されており、発生した水蒸気を含む気体が放出される。解析において放出された気体がプール中の現象へ顕著な影響を及ぼさないように、十分な体積を有するプール外の領域を設けた。

図 2.3.5~8 に DEFOR-A2 の解析体系を示す。各図において、青色の実線は入力で設定している壁を表し、色を塗った部分は初期状態で水が存在する領域を示す。表 2.3.5 及び表 2.3.6 に軸方向及び半径方向のメッシュ座標を示す。

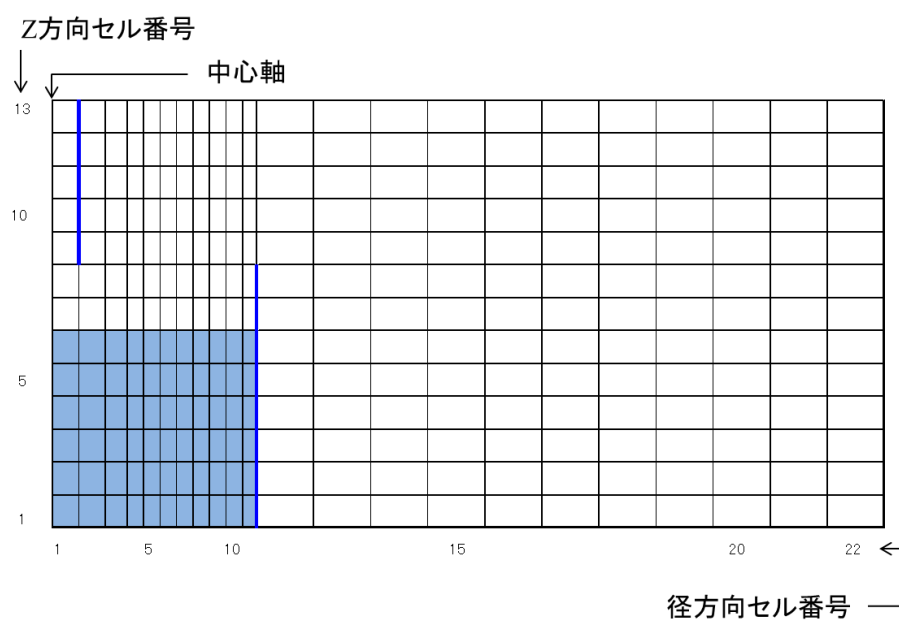


図 2.3.5 DEFOR-A 解析体系（キャッチャー1 相当）

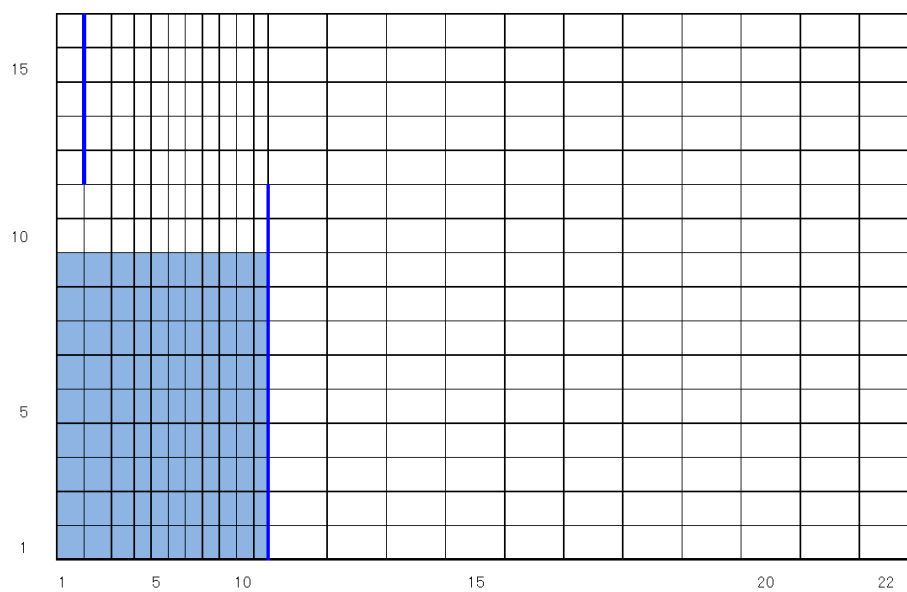


図 2.3.6 DEFOR-A 解析体系（キャッチャー2 相当）

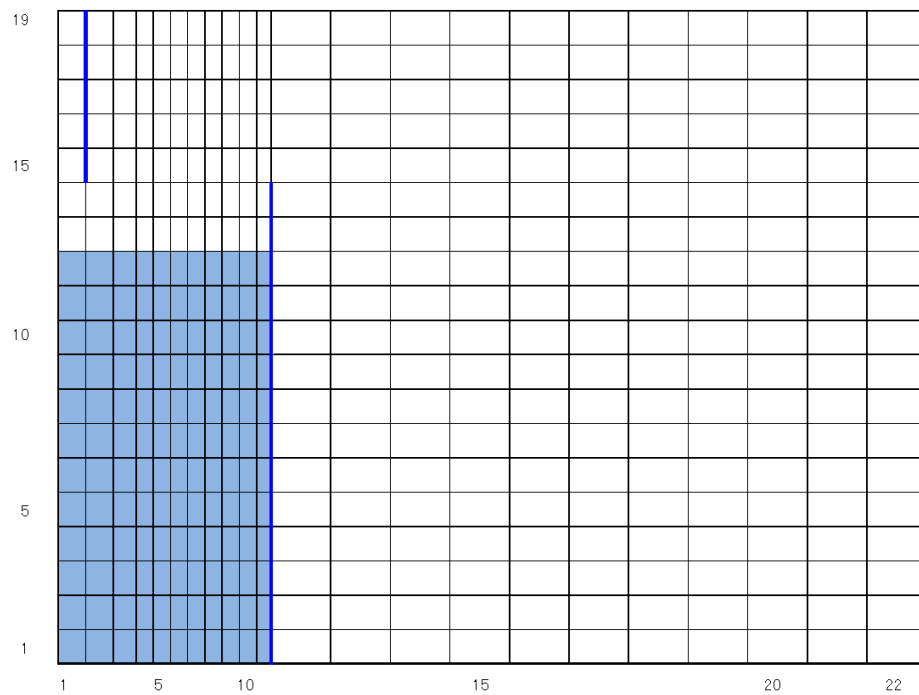


図 2.3.7 DEFOR-A 解析体系 (キャッチャー3 相当)

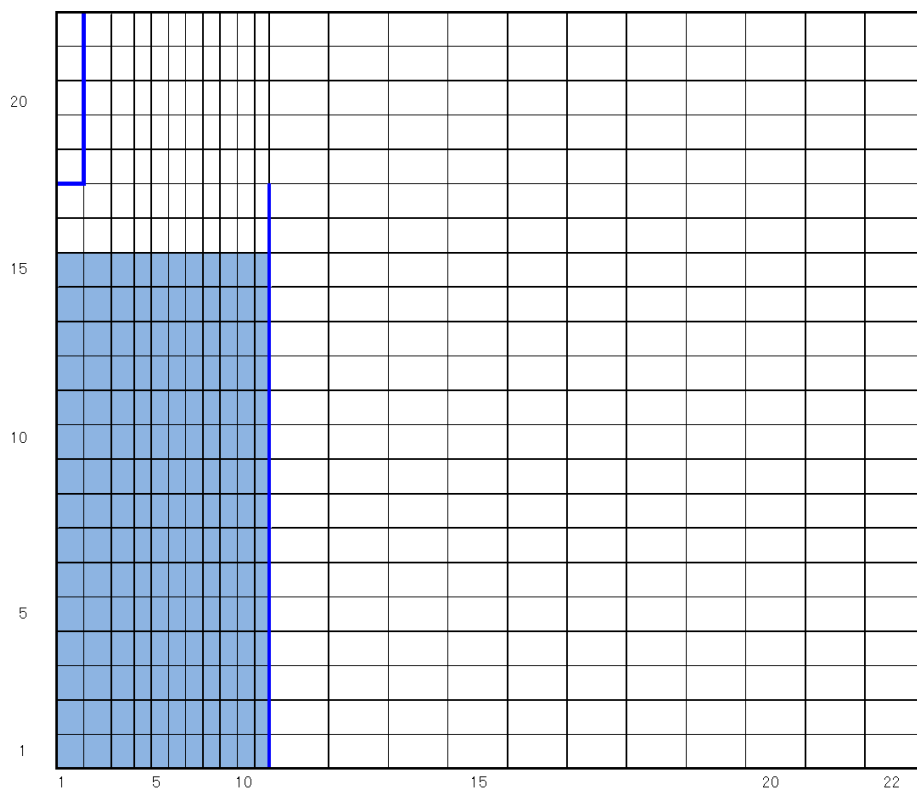


図 2.3.8 DEFOR-A 解析体系 (キャッチャー4 相当)

表 2.3.5 軸方向メッシュ座標

|    | キャッチャー1   |          | キャッチャー2   |          | キャッチャー3   |          | キャッチャー4   |          |
|----|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|
|    | セルサイズ [m] | 境界位置 [m] | セルサイズ [m] | 境界位置 [m] | セルサイズ [m] | 境界位置 [m] | セルサイズ [m] | 境界位置 [m] |
| 0  |           | 0.00     |           | 0.00     |           | 0.00     |           | 0.00     |
| 1  | 0.10      | 0.10     | 0.10      | 0.10     | 0.10      | 0.10     | 0.10      | 0.10     |
| 2  | 0.10      | 0.20     | 0.10      | 0.20     | 0.10      | 0.20     | 0.10      | 0.20     |
| 3  | 0.10      | 0.30     | 0.10      | 0.30     | 0.10      | 0.30     | 0.10      | 0.30     |
| 4  | 0.10      | 0.40     | 0.10      | 0.40     | 0.10      | 0.40     | 0.10      | 0.40     |
| 5  | 0.10      | 0.50     | 0.10      | 0.50     | 0.10      | 0.50     | 0.10      | 0.50     |
| 6  | 0.10      | 0.60     | 0.10      | 0.60     | 0.10      | 0.60     | 0.10      | 0.60     |
| 7  | 0.10      | 0.70     | 0.10      | 0.70     | 0.10      | 0.70     | 0.10      | 0.70     |
| 8  | 0.10      | 0.80     | 0.10      | 0.80     | 0.10      | 0.80     | 0.10      | 0.80     |
| 9  | 0.20      | 1.00     | 0.10      | 0.90     | 0.10      | 0.90     | 0.10      | 0.90     |
| 10 | 0.20      | 1.20     | 0.10      | 1.00     | 0.10      | 1.00     | 0.10      | 1.00     |
| 11 | 0.20      | 1.40     | 0.10      | 1.10     | 0.10      | 1.10     | 0.10      | 1.10     |
| 12 | 0.20      | 1.60     | 0.10      | 1.20     | 0.12      | 1.22     | 0.10      | 1.20     |
| 13 | 0.20      | 1.80     | 0.10      | 1.30     | 0.09      | 1.31     | 0.10      | 1.30     |
| 14 |           |          | 0.20      | 1.50     | 0.09      | 1.40     | 0.10      | 1.40     |
| 15 |           |          | 0.20      | 1.70     | 0.20      | 1.60     | 0.12      | 1.52     |
| 16 |           |          | 0.20      | 1.90     | 0.20      | 1.80     | 0.09      | 1.61     |
| 17 |           |          |           |          | 0.20      | 2.00     | 0.09      | 1.70     |
| 18 |           |          |           |          | 0.20      | 2.20     | 0.20      | 1.90     |
| 19 |           |          |           |          | 0.20      | 2.40     | 0.20      | 2.10     |
| 20 |           |          |           |          |           |          | 0.20      | 2.30     |
| 21 |           |          |           |          |           |          | 0.20      | 2.50     |
| 22 |           |          |           |          |           |          | 0.20      | 2.70     |

表 2.3.6 径方向メッシュ座標（共通）

|    | セルサイズ<br>[m] | 境界位置<br>[m] |
|----|--------------|-------------|
| 0  |              | 0.00        |
| 1  | 0.04         | 0.04        |
| 2  | 0.04         | 0.08        |
| 3  | 0.03         | 0.11        |
| 4  | 0.02         | 0.13        |
| 5  | 0.02         | 0.15        |
| 6  | 0.02         | 0.17        |
| 7  | 0.02         | 0.19        |
| 8  | 0.02         | 0.21        |
| 9  | 0.02         | 0.2300      |
| 10 | 0.02         | 0.2500      |
| 11 | 0.01676      | 0.2676      |
| 12 | 0.10         | 0.3676      |
| 13 | 0.10         | 0.4676      |
| 14 | 0.10         | 0.5676      |
| 15 | 0.10         | 0.6676      |
| 16 | 0.10         | 0.7676      |
| 17 | 0.10         | 0.8676      |
| 18 | 0.10         | 0.9676      |
| 19 | 0.10         | 1.0676      |
| 20 | 0.10         | 1.1676      |
| 21 | 0.10         | 1.2676      |
| 22 | 0.10         | 1.3676      |

## (2) 溶融物の物性値の設定

JASMINE コードは代表的な溶融物の物性値を備えており、溶融物を指定することで物性値を参照することができる。DEFOR-A 実験で使用されるのは  $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-WO}_3$  の共晶物質である（モル比  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  27%、 $\text{WO}_3$  73%）。表 2.3.7 に具体的な物性値を示す。

表 2.3.7  $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-WO}_3$  の物性値

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

[2.3.3, 2.3.4, 2.3.7]

## (3) Rosin-Rammler 分布パラメータの決定

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について、過去に検討が行われている。酸化ジルコニウムと酸化アルミニウムの混合物やステンレス鋼を用いてジェットブレイクアップ実験を行った森山らの研究[3.3.7]では、生成粒子径が Rosin-Rammler 分布に従うことが示された。また、酸化ウランと酸化ジルコニウムの混合物を使用した FARO 及び KROTOS 実験や、その他の様々な実験条件での粒子径分布も比較され、どの実験でも粒子径分布が大きく変化しないことが示されている。JASMINE コードでは、ブレイクアップによる生成粒子径として Rosin-Rammler 分布を選択できるため、本解析においてはこれを用いるものとした。

Rosin-Rammler 分布関数は以下の式で表される。

$$F = 1 - \exp \left\{ - \left( \frac{D_p}{D_e} \right)^n \right\} \quad (3.1)$$

式中の  $D_p$  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  $D_e$  と  $n$  はそれぞれ absolute size constant、distribution constant と呼ばれる分布を特徴づけるパラメータである。

式(3.1)を次式のように変形する。

$$\log \left\{ \log \left( \frac{1}{1-F} \right) \right\} = n \cdot \log D_p - n \cdot \log D_e + \log(\log(e)) \quad (3.2)$$

この式において、粒子直径  $D_p$  と累積分布  $F$  が含まれる以下の項をそれぞれ横軸と縦軸の変数と見なすことで、Rosin-Rammler 分布を直線に変換できる。ここで、式(3.2)の右辺第一項の  $n$  は傾き、 $\log D_p$  は横軸変数、第二項は切片を示す。

$$(\text{横軸}) \log(D_p) \quad (3.3)$$

$$(\text{縦軸}) \log \left\{ \log \left( \frac{1}{1-F} \right) \right\} \quad (3.4)$$

本解析の対象となる DEFOR-A 実験で得られた累積質量割合を図 2.3.9 に示す。青色の直線は 8 つのケースの平均分布である。本解析では平均分布が全ケースを代表できるとして Rosin-Rammler 分布のパラメータを求めた。この直線は線形スケールでは以下の式で表される。

$$y = 1.8711x - 1.4875 \quad (3.9)$$

この式と前掲の(3.2)式を比べると、 $n$  と  $D_e$  の値が以下のように求められる。

$$n = 1.8711 \approx 1.87 \quad (3.11)$$

$$D_e = 10^{\frac{1.4875 + \log(\log(e))}{n}} = 3.993949 \approx 4.0 \quad (3.12)$$

本解析では Rosin-Rammler 分布のパラメータとして(3.11)及び(3.12)の値を用いることとした。なお、A23~25 については、実験条件の情報は得られているが、粒子直径分布のデータは未取得である。このため、A23~25 の解析でもこの値を用いた。

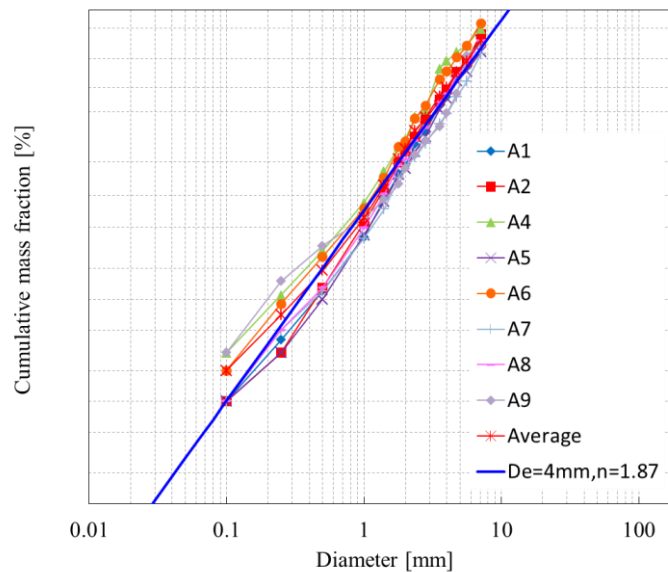


図 2.3.9 粒子直径と累積質量割合の相関関係 (Rosin-Rammler 分布式含む)

#### (4) アグロメレーション判定基準及び熱伝達調整係数

DEFOR-A2 実験を対象として、アグロメレーション判定基準 $\phi_{lim}$ をパラメータとした 5 ケースについて、それぞれ 21 秒間の解析を実施した（表 2.3.8）。ここで、アグロメレーション粒子群の熱伝達調整係数  $k_{qhtr}$  は 0.8 とした。A2 実験を対象とした理由は、図 2.3.3 において、ジェットブレイクアップの不完全等による不自然な傾向が見られず、代表的な結果が得られた実験と判断されたためである。

表 2.3.8 DEFOR-A2 解析ケース

| 実験番号 | ケース No. | $\phi_{lim}$ | $k_{qhtr}$ |
|------|---------|--------------|------------|
| A2   | A2-1    | 0.1          | 0.8        |
| A2   | A2-2    | 0.5          | 0.8        |
| A2   | A2-3    | 0.8          | 0.8        |
| A2   | A2-4    | 1.5          | 0.8        |
| A2   | A2-5    | 2            | 0.8        |

#### 2.3.5 DEFOR-A2 解析結果

DEFOR-A2 実験解析の結果について、(1)に発生粒子径分布、(2)に質量バランス及び熱バランス、(3)に溶融物ジェット、粒子及び発生蒸気の分布図を示す。ここでは A2-4 ケースの結果を代表例として示す。その他のケースの結果は付録に掲載する。(4)では A2-1～A2-5 についてアグロメレーション割合の評価結果を示す。

##### (1) 発生粒子径分布

発生粒子の直径に対する累積質量割合を図 2.3.10 に示す。

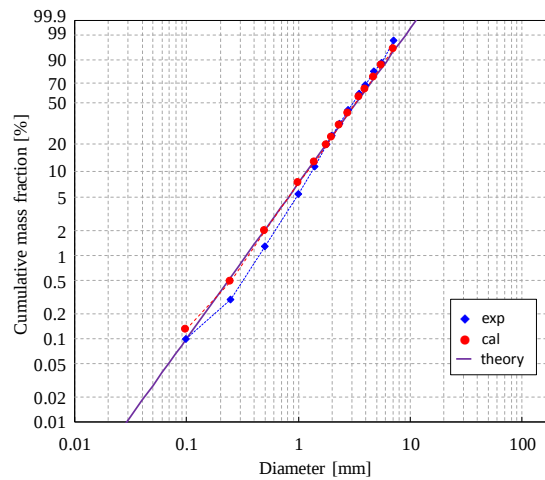


図 2.3.10 発生粒子の累積質量割合

## (2) 質量バランス及び熱バランス

表 2.3.9~12 に、キャッチャー1~4 の解析における 0 s、10 s、21 s での質量バランス及びエネルギーバランスを示す。また、図 2.3.11~14 に各キャッチャーにおけるデブリの状態別質量割合の履歴、図 2.3.15~18 に各キャッチャーにおける状態別質量の履歴をそれぞれ示す。

表 2.3.9 質量バランス及びエネルギーバランス (A2-4 キャッチャー1)

| 時刻                  | 0 s      | 1 s       | 21 s      | 21 s-0 s  |
|---------------------|----------|-----------|-----------|-----------|
| 溶融物の質量バランス [kg]     |          |           |           |           |
| ジェット                | 0.000    | 0.243     | 0.000     |           |
| プール                 | 0.000    | 0.065     | 0.070     |           |
| 粒子                  | 0.000    | 18.389    | 20.470    |           |
| 合計                  | 0.000    | 18.697    | 20.540    |           |
| (粒子のうちアグロメレーションした分) | 0.000    | 7.970     | 9.910     |           |
| 水、蒸気の質量バランス [kg]    |          |           |           |           |
| 水                   | 2.138    | 2.117     | 2.108     |           |
| 蒸気                  | 0.000    | 0.013     | 0.022     |           |
| 合計                  | 2.138    | 2.129     | 2.129     |           |
| エネルギーバランス [J]       |          |           |           |           |
| 水の内部エネルギー           | 831440   | 842800    | 835950    | 4510      |
| 蒸気の内部エネルギー          | 0.295    | 30737.000 | 53139.000 | 53138.705 |
| 非凝縮性ガスの内部エネルギー      | 41537.0  | 45459.0   | 47616.0   | 6079.0    |
| 溶融物の内部エネルギー         | 0.000    | 141080.0  | 142080.0  | 142080.0  |
| 流体の運動エネルギー          | 0.000    | 0.070     | 0.027     | 0.027     |
| 合計                  | 872977.3 | 1060076.1 | 1078785.0 | 205807.7  |
| エネルギーの増加量           | 0.0      | 187098.8  | 205807.7  |           |
| 流入溶融物のエンタルピー        | 0.0      | 192027.0  | 210947.2  |           |
| 誤差                  | 0.0      | -4928.2   | -5139.5   |           |
|                     | 0.00%    | -0.46%    | -0.48%    |           |

表 2.3.10 質量バランス及びエネルギーバランス (A2-4 キャッチャー2)

| 時刻                  | 0 s       | 1 s       | 21 s      | 21 s-0 s  |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 溶融物の質量バランス [kg]     |           |           |           |           |
| ジェット                | 0.000     | 0.237     | 0.000     |           |
| プール                 | 0.000     | 0.050     | 0.055     |           |
| 粒子                  | 0.000     | 18.383    | 20.449    |           |
| 合計                  | 0.000     | 18.670    | 20.505    |           |
| (粒子のうちアグロメレーションした分) | 0.000     | 5.889     | 7.544     |           |
| 水、蒸気の質量バランス [kg]    |           |           |           |           |
| 水                   | 3.173     | 3.150     | 3.138     |           |
| 蒸気                  | 0.000     | 0.013     | 0.022     |           |
| 合計                  | 3.173     | 3.163     | 3.160     |           |
| エネルギーバランス [J]       |           |           |           |           |
| 水の内部エネルギー           | 1233700   | 1254400   | 1248800   | 15100     |
| 蒸気の内部エネルギー          | 0.343     | 32136.000 | 54843.000 | 54842.657 |
| 非凝縮性ガスの内部エネルギー      | 48284.0   | 52451.0   | 54789.0   | 6505.0    |
| 溶融物の内部エネルギー         | 0.000     | 130230.0  | 128500.0  | 128500.0  |
| 流体の運動エネルギー          | 0.000     | 0.051     | 0.031     | 0.031     |
| 合計                  | 1281984.3 | 1469217.1 | 1486932.0 | 204947.7  |
| エネルギーの増加量           | 0.0       | 187232.7  | 204947.7  |           |
| 流入溶融物のエンタルピー        | 0.0       | 191749.6  | 210585.8  |           |
| 誤差                  | 0.0       | -4516.9   | -5638.1   |           |
|                     | 0.00%     | -0.31%    | -0.38%    |           |

表 2.3.11 質量バランス及びエネルギーバランス (A2-4 キャッチャー3)

| 時刻                  | 0 s       | 1 s       | 21 s      | 21 s-0 s  |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 溶融物の質量バランス [kg]     |           |           |           |           |
| ジェット                | 0.000     | 0.225     | 0.000     |           |
| プール                 | 0.000     | 0.011     | 0.010     |           |
| 粒子                  | 0.000     | 18.371    | 20.447    |           |
| 合計                  | 0.000     | 18.608    | 20.457    |           |
| (粒子のうちアグロメレーションした分) | 0.000     | 0.000     | 0.000     |           |
| 水、蒸気の質量バランス [kg]    |           |           |           |           |
| 水                   | 4.208     | 4.181     | 4.169     |           |
| 蒸気                  | 0.000     | 0.013     | 0.023     |           |
| 合計                  | 4.208     | 4.194     | 4.191     |           |
| エネルギーバランス [J]       |           |           |           |           |
| 水の内部エネルギー           | 1636100   | 1661700   | 1661800   | 25700     |
| 蒸気の内部エネルギー          | 0.392     | 31255.000 | 55887.000 | 55886.608 |
| 非凝縮性ガスの内部エネルギー      | 55030.0   | 59173.0   | 61733.0   | 6703.0    |
| 溶融物の内部エネルギー         | 0.000     | 124270.0  | 114500.0  | 114500.0  |
| 流体の運動エネルギー          | 0.000     | 0.183     | 0.029     | 0.029     |
| 合計                  | 1691130.4 | 1876398.2 | 1893920.0 | 202789.6  |
| エネルギーの増加量           | 0.0       | 185267.8  | 202789.6  |           |
| 流入溶融物のエンタルピ         | 0.0       | 191104.4  | 210101.9  |           |
| 誤差                  | 0.0       | -5836.6   | -7312.2   |           |
|                     | 0.00%     | -0.31%    | -0.39%    |           |

表 2.3.12 質量バランス及びエネルギーバランス (A2-4 キャッチャー4)

| 時刻                  | 0 s       | 1 s       | 21 s      | 21 s-0 s  |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 溶融物の質量バランス [kg]     |           |           |           |           |
| ジェット                | 0.000     | 0.223     | 0.000     |           |
| プール                 | 0.000     | 0.026     | 0.029     |           |
| 粒子                  | 0.000     | 18.360    | 20.432    |           |
| 合計                  | 0.000     | 18.610    | 20.461    |           |
| (粒子のうちアグロメレーションした分) | 0.000     | 0.000     | 0.000     |           |
| 水、蒸気の質量バランス [kg]    |           |           |           |           |
| 水                   | 5.243     | 5.217     | 5.203     |           |
| 蒸気                  | 0.000     | 0.014     | 0.024     |           |
| 合計                  | 5.243     | 5.231     | 5.227     |           |
| エネルギーバランス [J]       |           |           |           |           |
| 水の内部エネルギー           | 2038400   | 2070500   | 2068800   | 30400     |
| 蒸気の内部エネルギー          | 0.441     | 33918.000 | 58680.000 | 58679.559 |
| 非凝縮性ガスの内部エネルギー      | 61777.0   | 66312.0   | 68804.0   | 7027.0    |
| 溶融物の内部エネルギー         | 0.000     | 115270.0  | 106870.0  | 106870.0  |
| 流体の運動エネルギー          | 0.000     | 0.063     | 0.034     | 0.034     |
| 合計                  | 2100177.4 | 2286000.1 | 2303154.0 | 202976.6  |
| エネルギーの増加量           | 0.0       | 185822.6  | 202976.6  |           |
| 流入溶融物のエンタルピー        | 0.0       | 191123.7  | 210134.1  |           |
| 誤差                  | 0.0       | -5301.1   | -7157.5   |           |
|                     | 0.00%     | -0.23%    | -0.31%    |           |

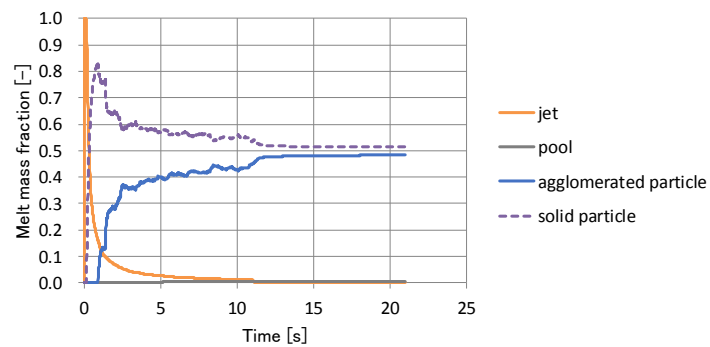


図 2.3.11 デブリの状態別質量割合の履歴 (A2-4 キャッチャー1)

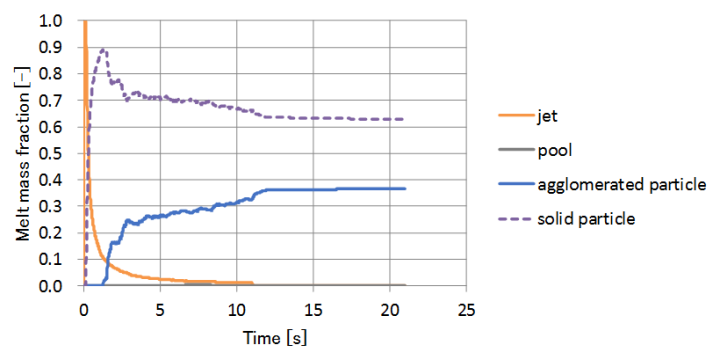


図 2.3.12 デブリの状態別質量割合の履歴 (A2-4 キャッチャー2)

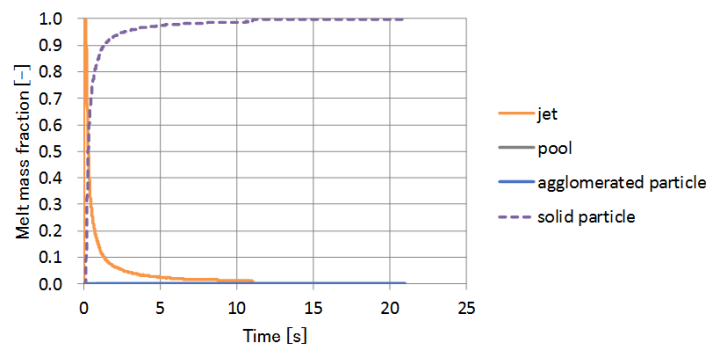


図 2.3.13 デブリの状態別質量割合の履歴 (A2-4 キャッチャー3)

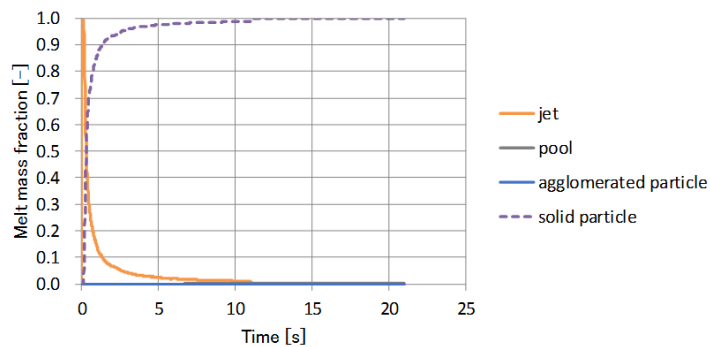


図 2.3.14 デブリの状態別質量割合の履歴 (A2-4 キャッチャー4)

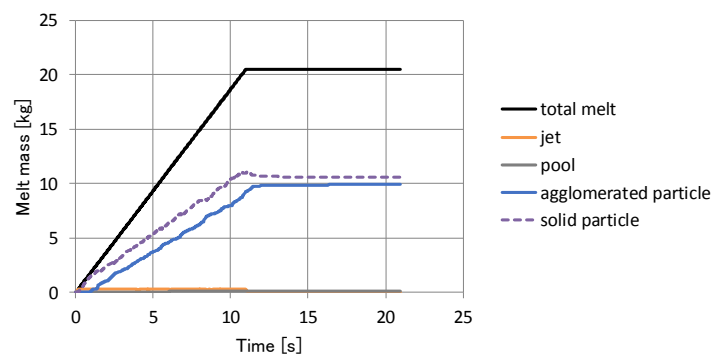


図 2.3.15 デブリの状態別質量の履歴 (A2-4 キャッチャー1)

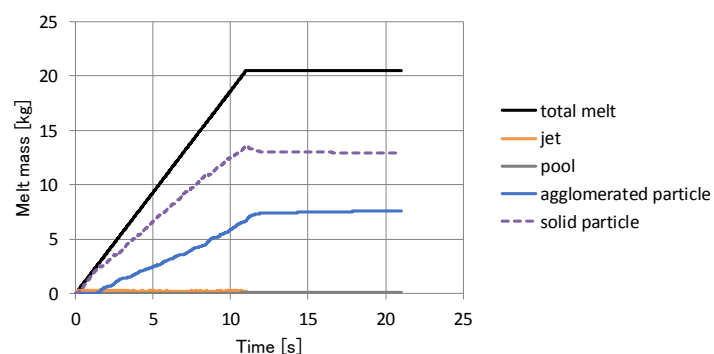


図 2.3.16 デブリの状態別質量の履歴 (A2-4 キャッチャー2)

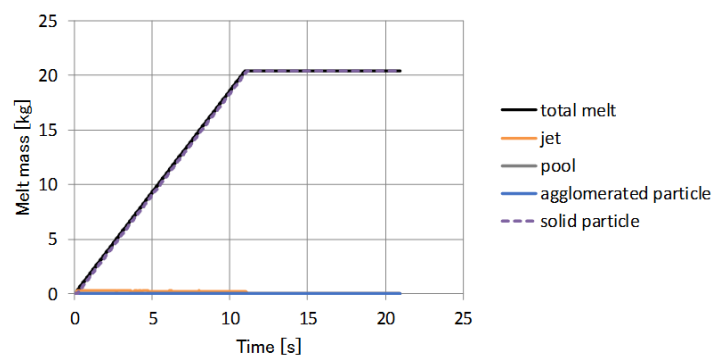


図 2.3.17 デブリの状態別質量の履歴 (A2-4 キャッチャー3)

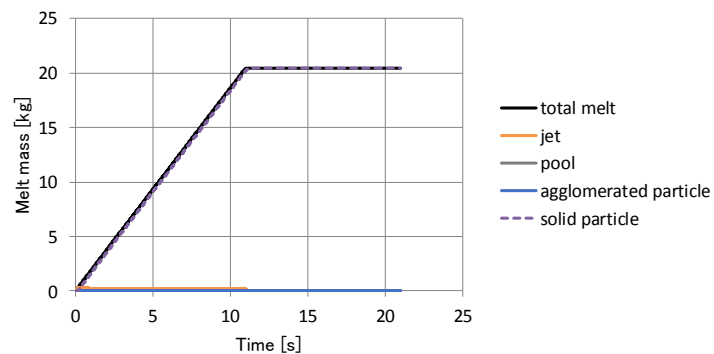


図 2.3.18 デブリの状態別質量の履歴 (A2-4 キャッチャー4)

### (3) 溶融物ジェット、粒子及び発生蒸気

A2-4 ケースのボイド率及び溶融物粒子分布図を図 2.3.19~22 に示す。図中の紫色点は融点以上の粒子群（1143°C 以上）、黒色点は融点未満の粒子群（1143°C 未満）をそれぞれ示す。また、床面上の橙色の点がアグロメレーション属性を持つ粒子群を示す。背景色の青色はボイド率 0、黄色がボイド率 1.0 を示す。

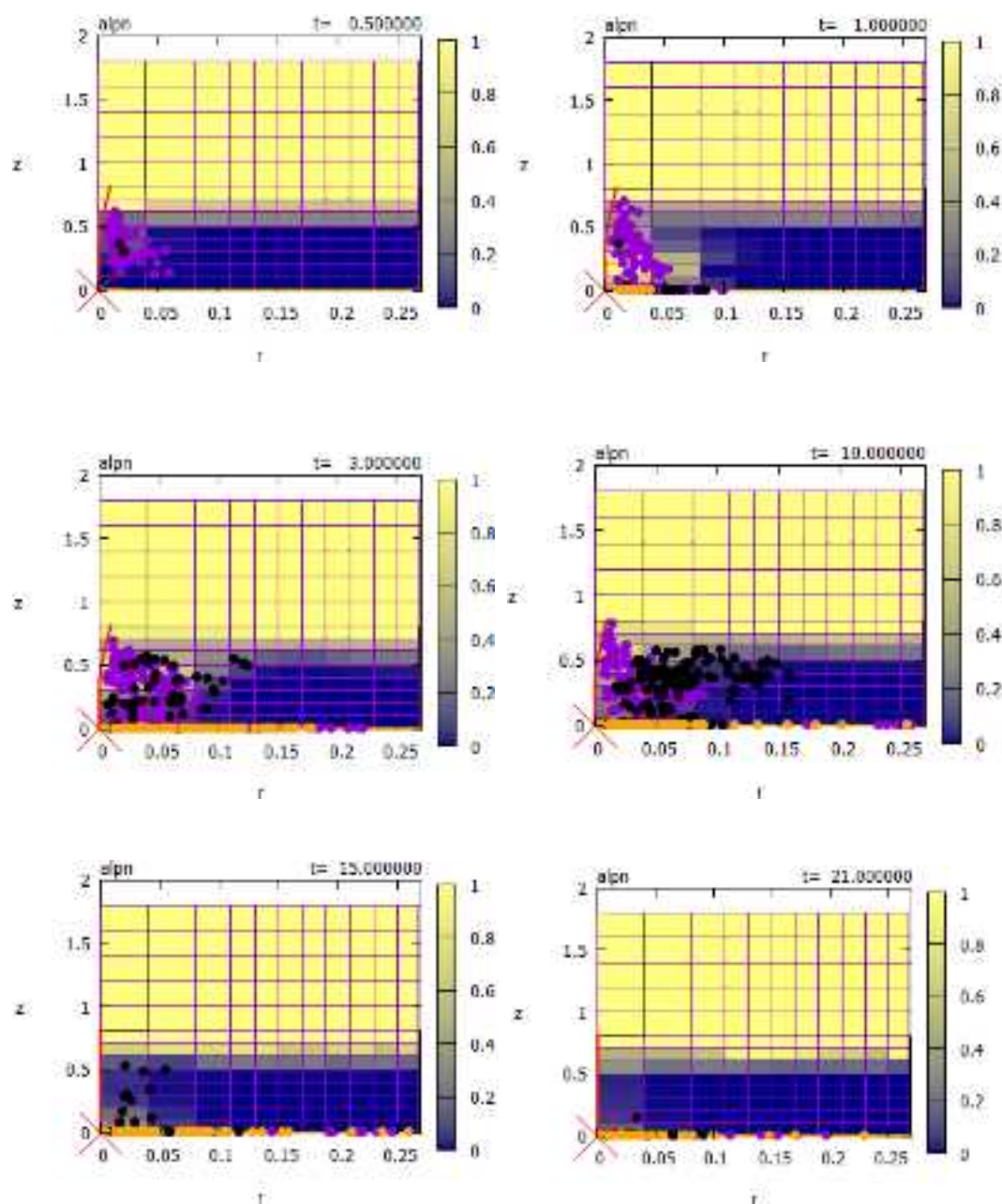


図 2.3.19 ボイド率及び粒子群分布図（A2-4 キャッチャー1）

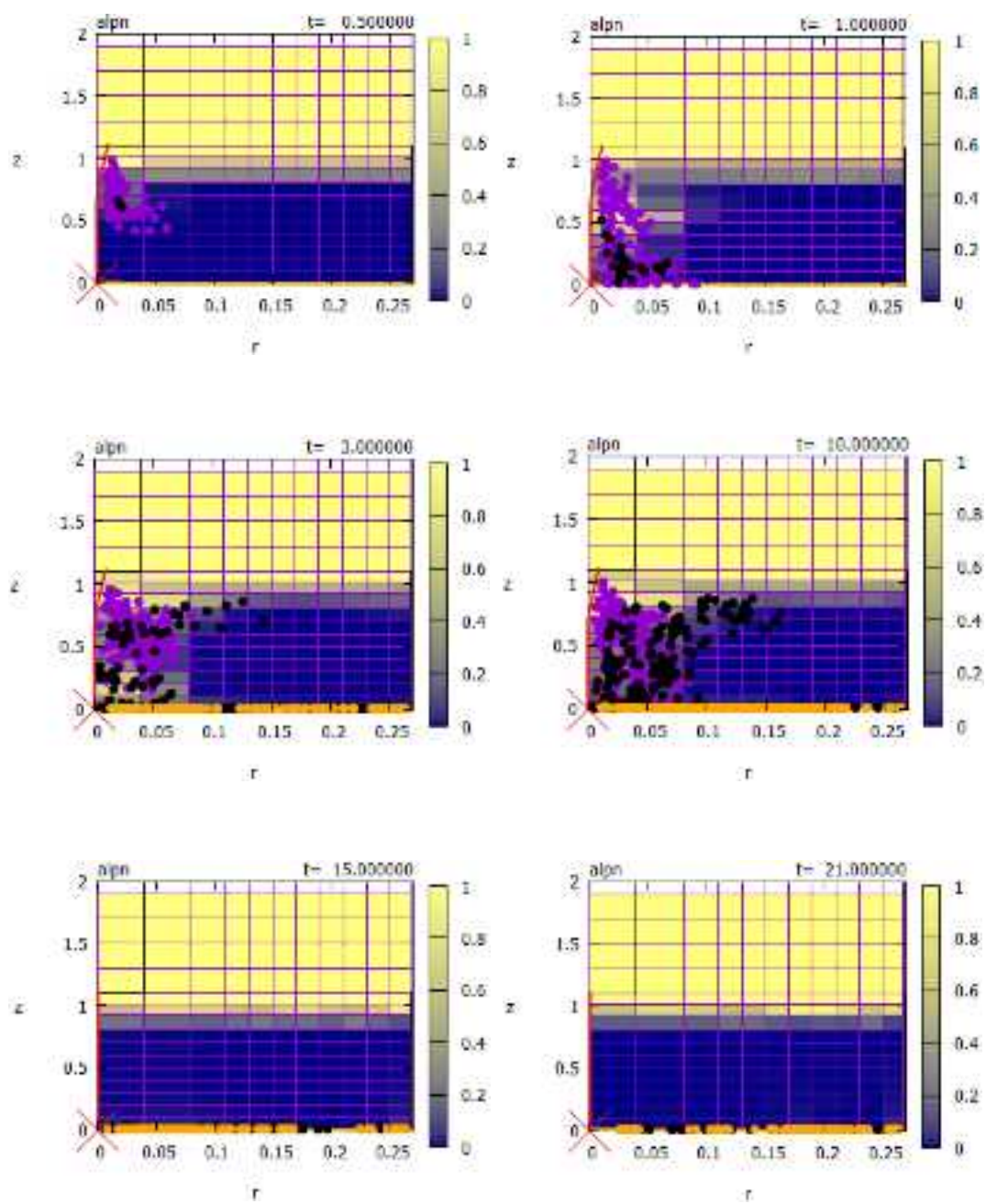


図 2.3.20 ボイド率及び粒子群分布図 (A2-4 キャッチャー2)

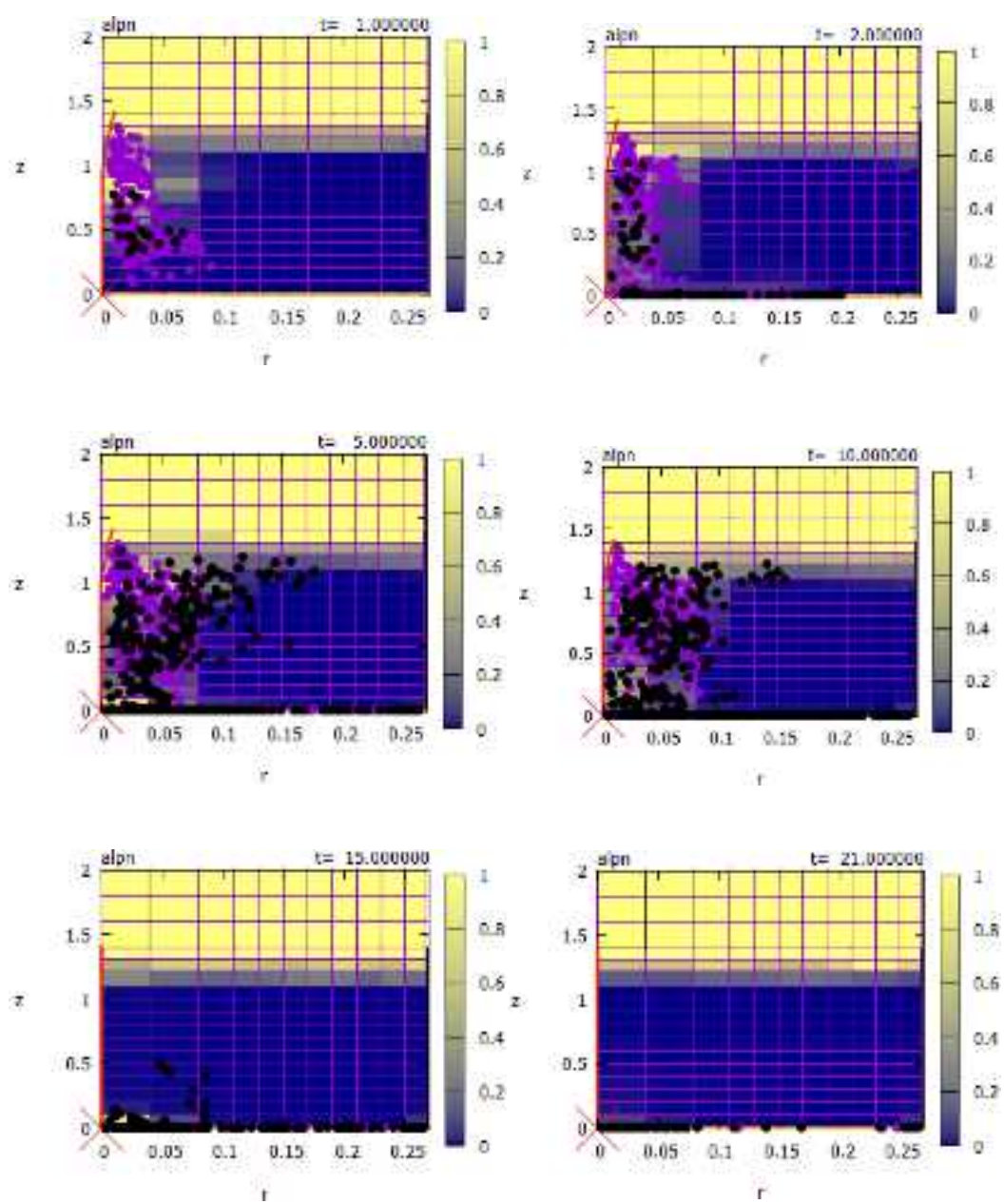


図 2.3.21 ボイド率及び粒子群分布図 (A2-4 キャッチャー3)

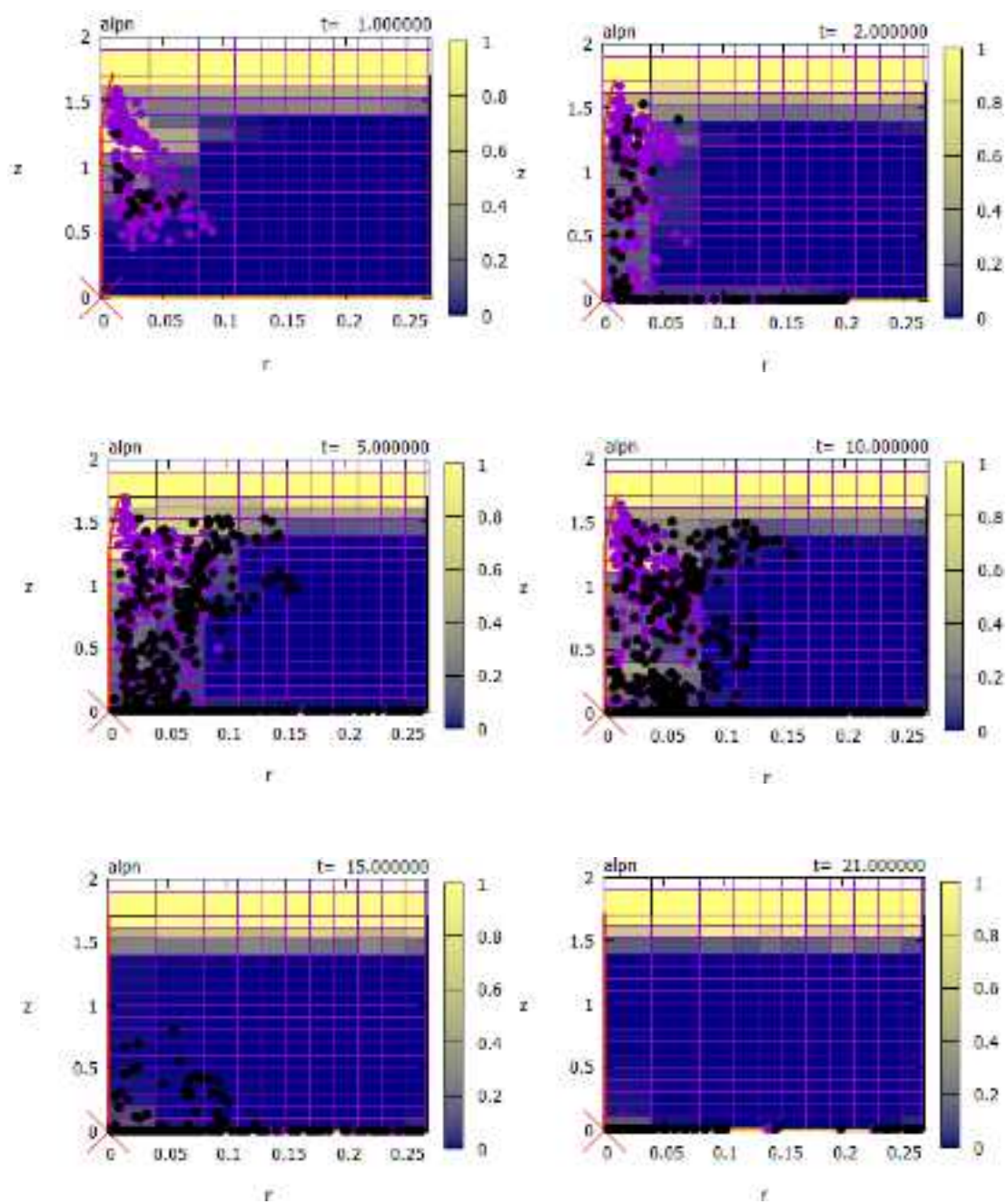


図 2.3.22 ボイド率及び粒子群分布図 (A2-4 キャッチャー4)

#### (4) アグロメレーション割合

DEFOR-A2 実験及び解析ケース A2-1～A2-5 におけるアグロメレーション粒子の質量割合を図 2.3.23 に示す。実験におけるアグロメレーション割合は水深の増大に伴い急激に低下する傾向を示している。JASEMINE による解析では、A2-4 ケース( $\phi_{lim}=1.5$ )において実験結果に比較的近い傾向が現れた。本解析では、2.2(2)に示したように、落下粒子群が融点より高温のアグロメレーション粒子群（既にアグロメレーションしている粒子群）と接触する場合にアグロメレーションすると判定される。単独の粒子群の温度は水深と一定の相関を持つと考えられるが、キャッチャー上でアグロメレーションを起こした粒子群からの除熱は熱伝達調整係数  $k_{qht}$  により低下するため、アグロメレーションが起こりやすい ( $\phi_{lim}$  の値が小さい) 条件の場合はキャッチャー上の粒子群の温度が高い側にシフトし、さらにアグロメレーションを促進する。キャッチャー1（水深約 0.6 m）に着目した場合、このような傾向の変化が生じる  $\phi_{lim}$  の値が A2-4 と A2-5 の間に存在するため、両者におけるアグロメレーション質量割合に極端な違いが生じたと解釈される。一方、キャッチャー2（水深約 0.9 m）については大きな違いが見られず、いずれにおいても比較的高いアグロメレーション質量割合となった。このことは、 $\phi_{lim}$  を固定値として設定することが実験結果を再現する上で不十分であることを示唆している。水深に依存していることから、例えば、粒子温度の関数として設定することが実験結果の再現性向上に対して有効と考えられる。

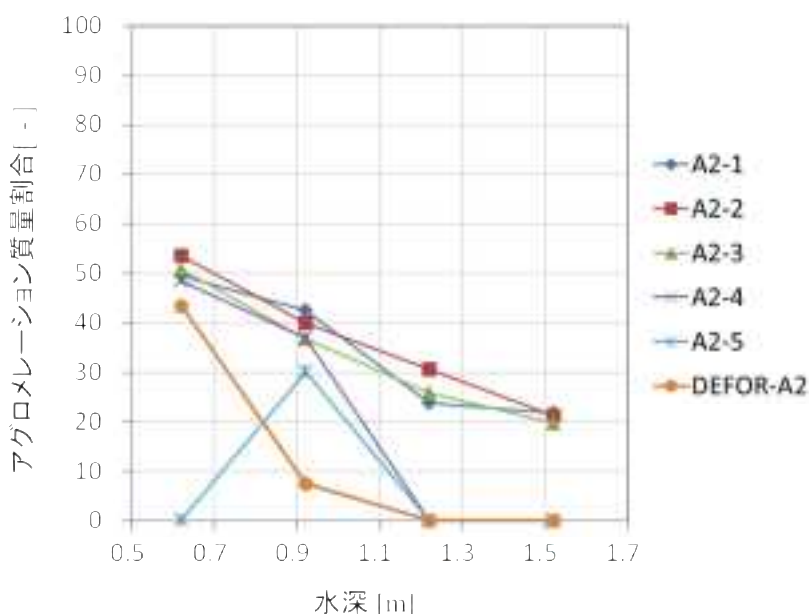


図 2.3.23 アグロメレーション粒子質量割合

## 2.4 DEFOR-A1 及び A4~9 の解析

DEFOR-A2 の解析結果では CaseA2-4 ( $\Phi_{im}=1.5$ ) のアグロメレーション質量割合が実験結果に比較的近かったため、この判定基準値を用いて DEFOR-A1, 4~9 の解析を実施した (A3 は前述のとおり、解析対象から外した)。図 2.4.1~2.4.8 に A1~9 の各ケースで得られた水深に対するアグロメレーション質量割合を実験結果と共に示す。また、これらの図には本年度の改造を行う前の JASMINE コードにより推定した結果も参考のために示した。改造前のバージョンはアグロメレーションモデルを持たないため、各キャッチャー高さを通過する粒子群のうち、温度が融点より高いものの割合をアグロメレーション質量割合と見なした。

アグロメレーション割合が 0 となった水深は、A1 及び A4 ではキャッチャー2、A2、A5 及び A6 ではキャッチャー3、A7 ではキャッチャー4 の深さであった。また、A8 のケースでは、アグロメレーション粒子が計算上ほとんど生成されなかった。このケースでは、キャッチャー1 及び 2 の深さではほとんどが溶融物プールとなっており、これは、ブレイクアップが不十分で、ジェット状のまま床面に到達したことによる。A7 のキャッチャー1 においても、同様な溶融物プールが形成された。

A1、A2 及び A5 のケースでは、水深の増大に伴いアグロメレーション割合が急激に低下する傾向が現れ、実験結果と同様の傾向となった。この結果から、さらなる精度向上が必要であるものの、本年度 JASMINE コードに組み込んだアグロメレーションモデルにより、アグロメレーション質量割合の推定が可能になったと言える。

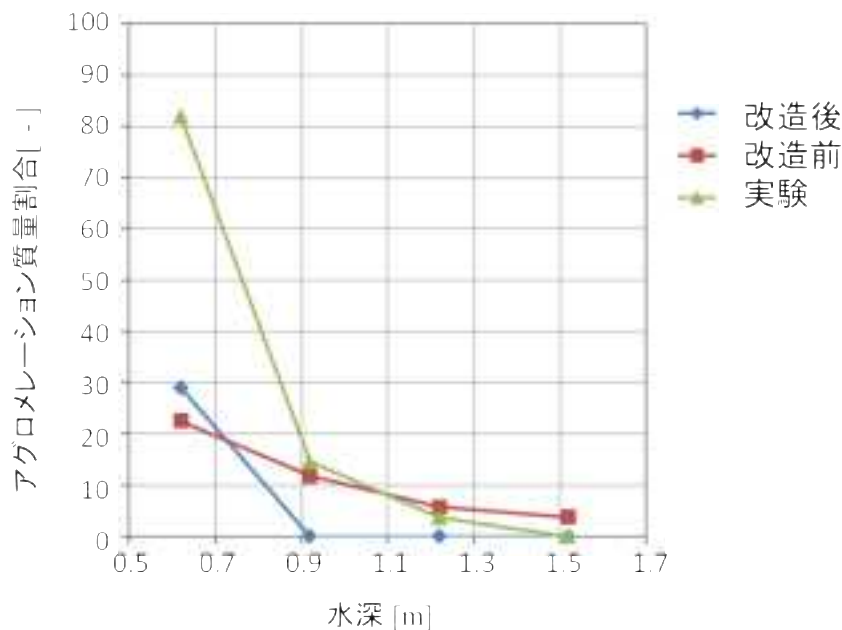


図 2.4.1 アグロメレーション粒子質量割合 (A1)

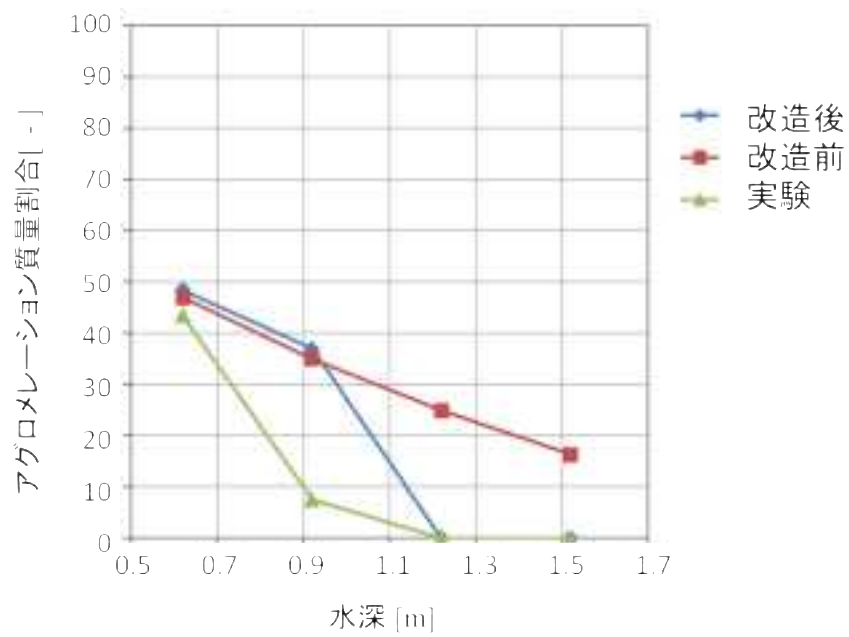


図 2.4.2 アグロメレーション粒子質量割合 (A2)

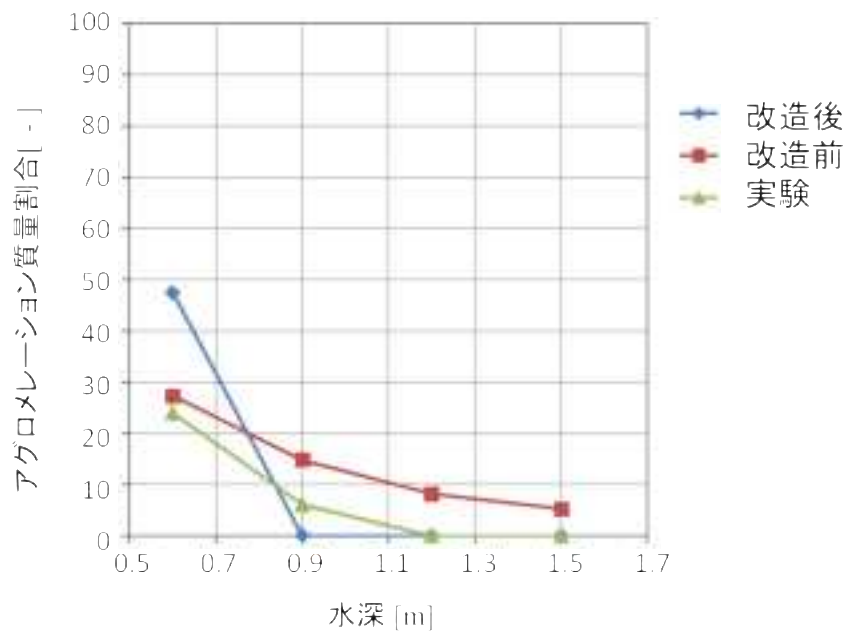


図 2.4.3 アグロメレーション質量割合 (A4)

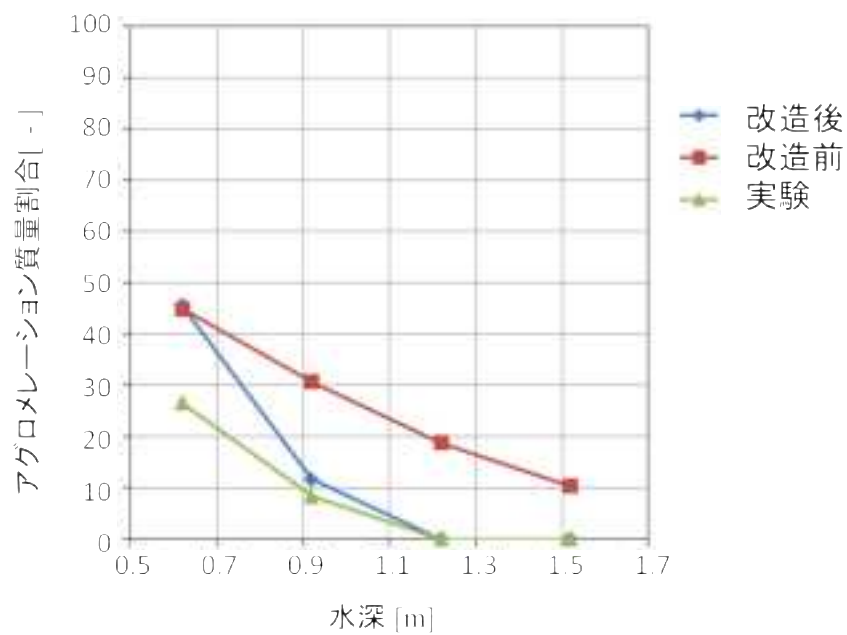


図 2.4.4 アグロメレーション質量割合 (A5)

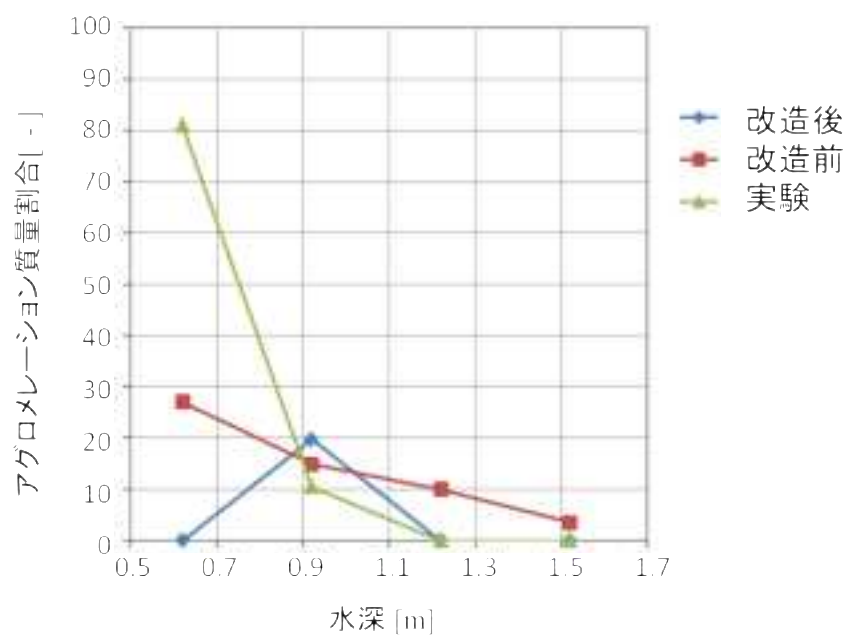


図 2.4.5 アグロメレーション質量割合 (A6)

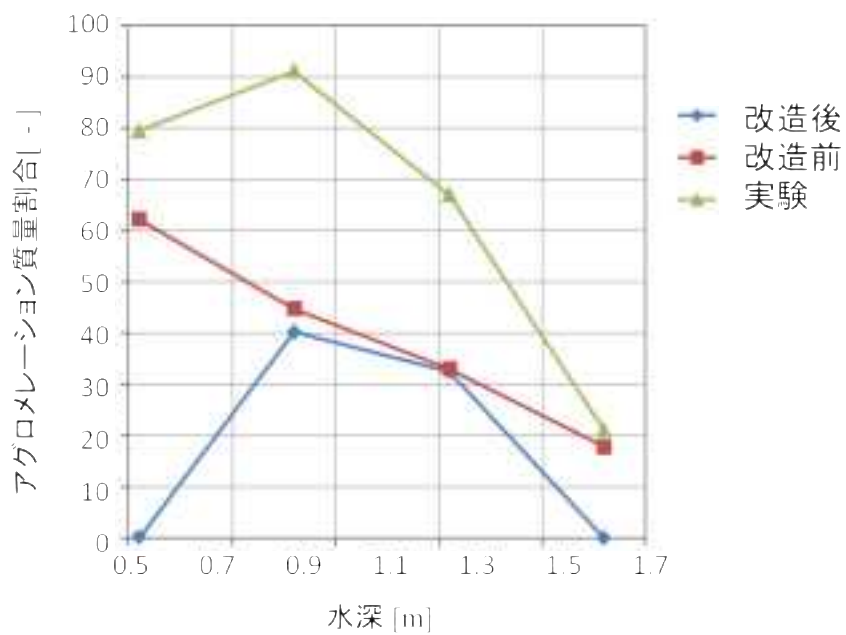


図 2.4.6 アグロメレーション質量割合 (A7)

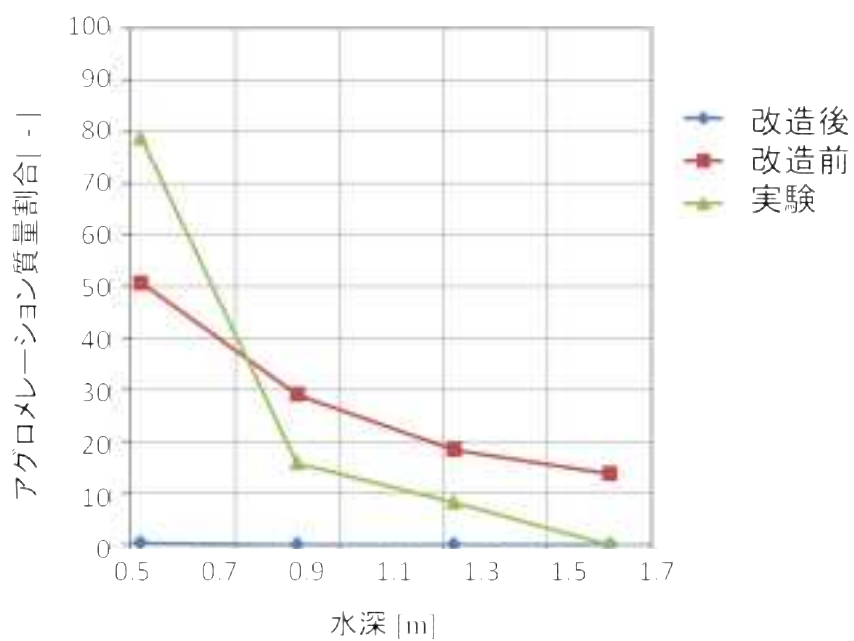


図 2.4.7 アグロメレーション質量割合 (A8)

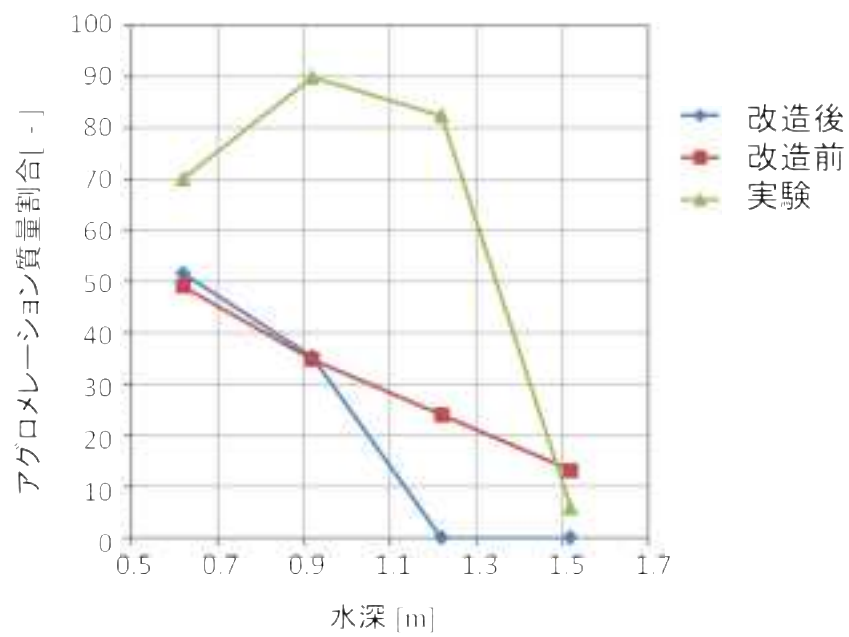


図 2.4.8 アグロメレーション質量割合 (A9)

## 2.5 DEFOR-A23~25 の解析

KTH に新たに実施した DEFOR-A23~25 実験の条件に対して、 $\Phi_{lim}$  を 1.5 とした解析を実施した。アグロメレーション質量割合の結果を図 2.5.1~2.5.3 に示す。いずれにおいても、実験結果の傾向に概ね一致する結果が得られた。

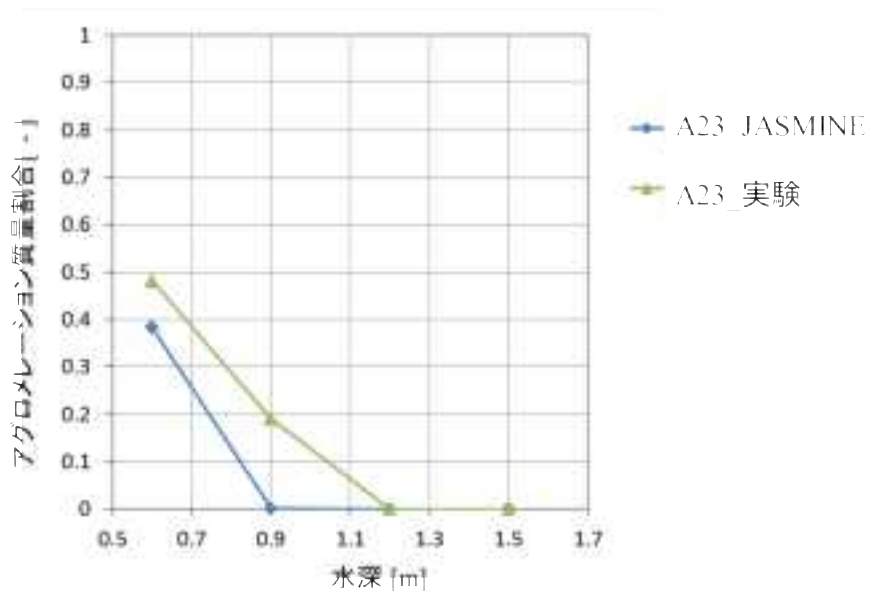


図 2.5.1 アグロメレーション粒子質量割合 (A23)

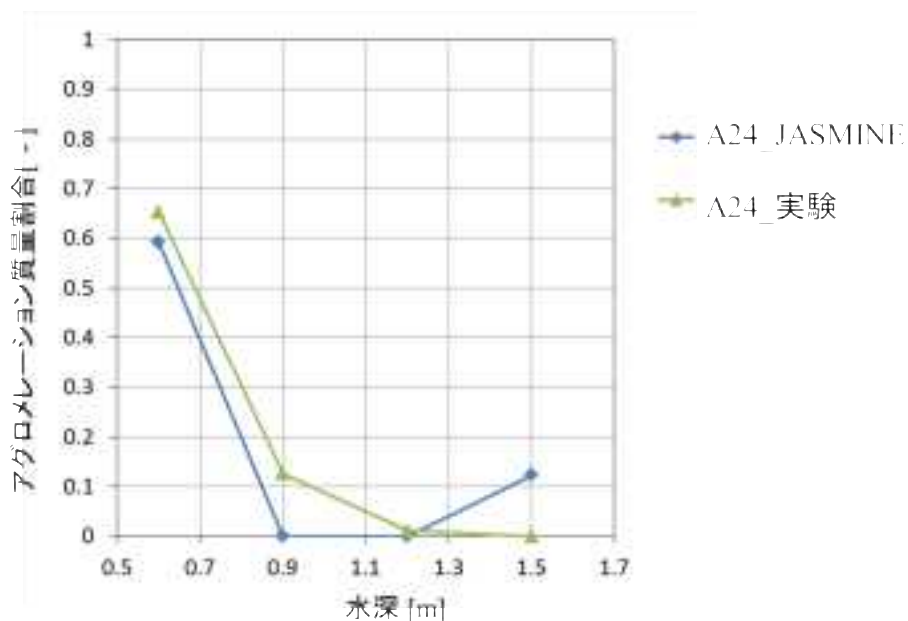


図 2.5.2 アグロメレーション粒子質量割合 (A24)

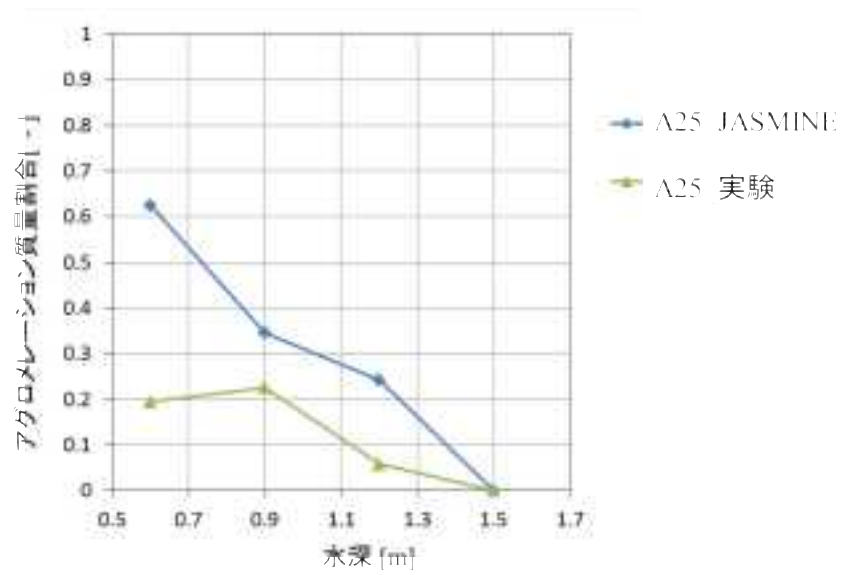


図 2.5.3 アグロメレーション粒子質量割合 (A25)

## 2.6 実機条件での解析

この節では、アグロメレーションモデルを追加した JASMINE コードを用いて実施した実機規模条件での解析について述べる。

### 2.6.1 解析の条件

JASMINE コードによる実機規模の解析への適用性を検討するための計算を実施した。想定したプラントは 820 MWe 級の Mark I 改良型格納容器を有する BWR である。ここで、格納容器床はサンプピット等がない水平な平面とし、先行注水により水プールが形成されているとした。圧力容器の最下端で破損が生じ、そこからペデスタルへ溶融物が落下すると想定する。計算体系と溶融物ジェットの状態を表 2.6.1 に示す。また、水プールの初期水位とノズル直径をパラメータとした解析条件を表 2.6.2 に示す。落下溶融物量を固定として全量または半分落下するとし、落下時間を 1000 秒とした。この条件から破損口の直径は 0.1331 m もしくは 0.094137 m とした。

表 2.6.1 実機解析の条件

|                 |                                                                                                                       |                                                                                                                   |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 体系              | ペデスタル直径 [m]<br>上部自由空間体積 [m <sup>3</sup> ]                                                                             | 6<br>8000                                                                                                         |
| 初期条件            | 圧力 [MPa]<br>気相温度 [K]<br>気相組成：水蒸気体積率<br>水プール初期水位 [m]<br>水プール初期温度 [K]                                                   | 0.5<br>300<br>7.073E-03<br>2, 3, 4<br>300                                                                         |
| 溶融物             | 溶融物組成<br>溶融物温度（過熱度）[K]<br>溶融物発熱量[W/kg]<br>溶融物量[t]<br>ノズル直径 [m]<br>溶融物流入ノズルの水面からの高さ[m]<br>溶融物流入速度[m/s]<br>溶融物落下継続時間[s] | UO <sub>2</sub> : ZrO <sub>2</sub> = 0.7 : 0.3<br>2826 (10)<br>100<br>148.7<br>0.1331, 0.094137<br>4<br>3<br>1000 |
| 発生液滴粒子径分布       | 発生モデル<br>分布パラメータ n<br>分布パラメータ De<br>粒子群最小質量 [kg]                                                                      | Rosin-Rammler 分布<br>1.5<br>8<br>0.1                                                                               |
| アグロメレーションに関する条件 | 判定基準 $\phi_{lim}$ [－]<br>熱伝達調整係数 $k_{qhttr}$ [－]<br>溶融物プールに吸収される場合のクラストへのマージ割合                                        | 1.5<br>0.8<br>0.1                                                                                                 |

表 2.6.2 解析条件

|       | プール水位 [m] | 溶融物ジェット径 [m] |
|-------|-----------|--------------|
| ケース 1 | 2         | 0.13313      |
| ケース 2 | 3         | 0.13313      |
| ケース 3 | 4         | 0.13313      |
| ケース 4 | 2         | 0.094137     |
| ケース 5 | 3         | 0.094137     |
| ケース 6 | 4         | 0.094137     |

## 2.6.2 解析結果

図 2.6.1 にケース 1 に関する水プールにおけるボイド率及び粒子群分布図を示す。ここでは例としてケース 1 の結果を示すが、付録に全ケースの結果を示す。また、図 2.6.2~7 に各ケースのデブリの状態別質量割合の履歴、図 2.6.8~13 に各ケースのデブリの状態別質量の履歴を示す。2.1 で述べたように、アグロメレーションモデル導入の目的は、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（熔融物プール）の分配割合の評価であり、特に、冷却性が悪いアグロメレーションデブリ及び連続層状デブリの合計を評価することが重要である。今回の結果により、水深が大きいほどこれらの合計が低下する、すなわち粒子状デブリの割合が増加し、熔融炉心の冷却性が向上する傾向が確認された。

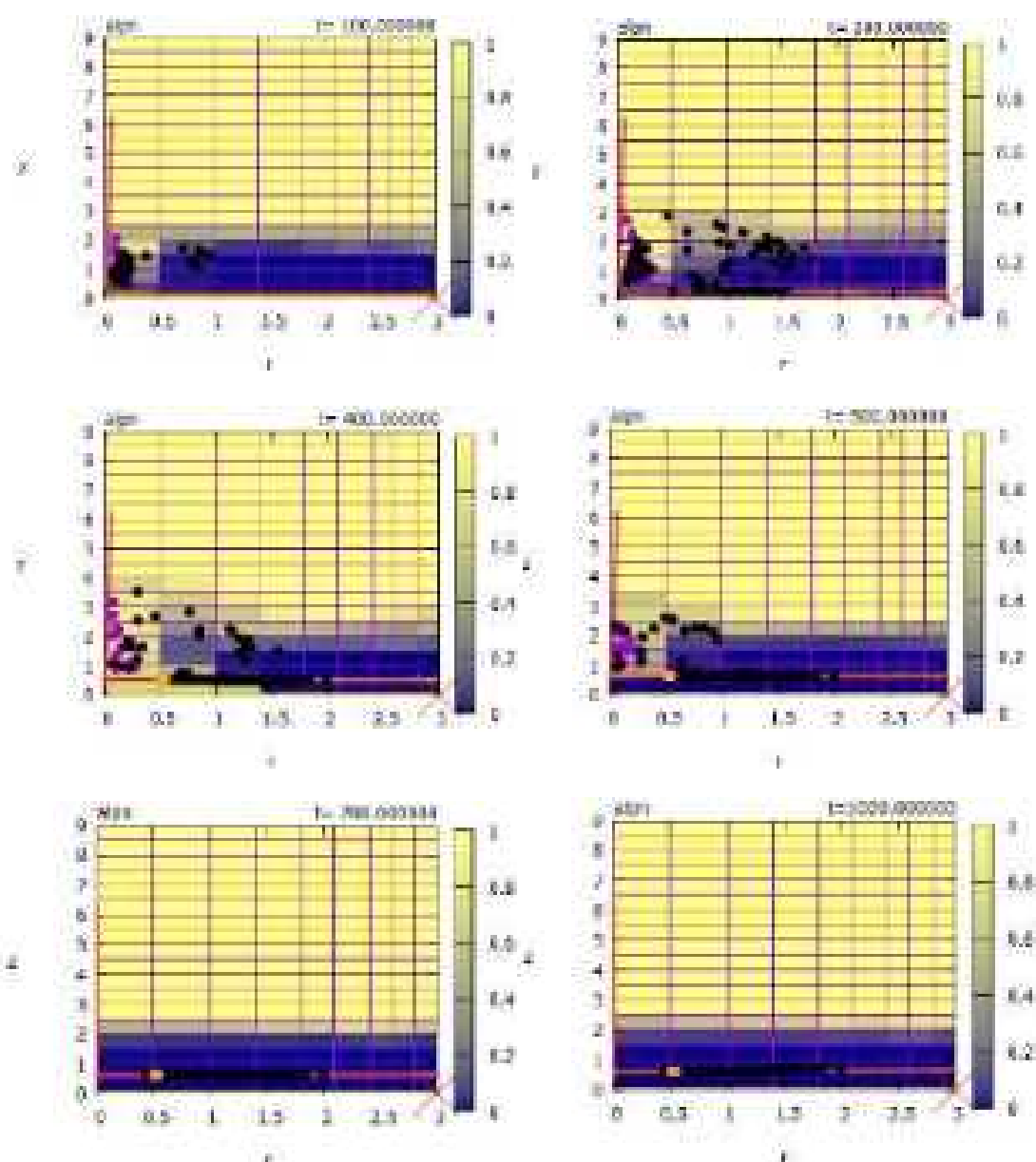


図 2.6.1 ボイド率及び粒子群分布図

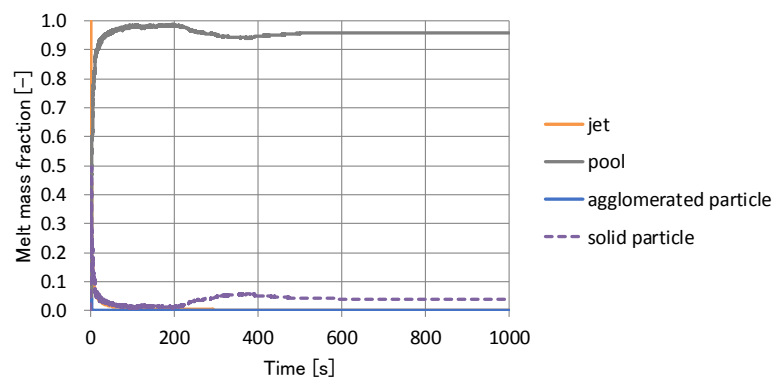


図 2.6.2 デブリの状態別質量割合の履歴（ケース 1）

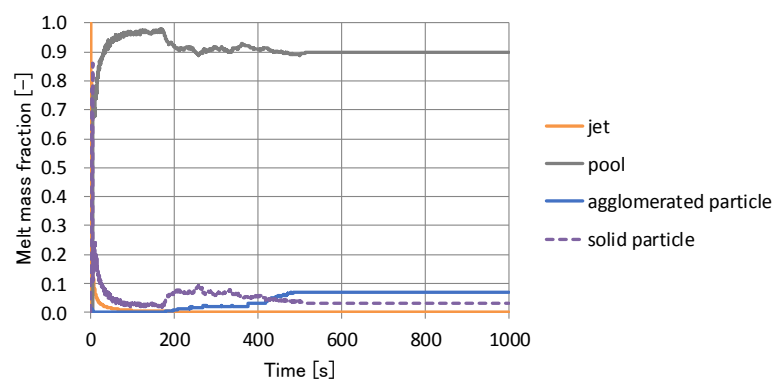


図 2.6.3 デブリの状態別質量割合の履歴（ケース 2）

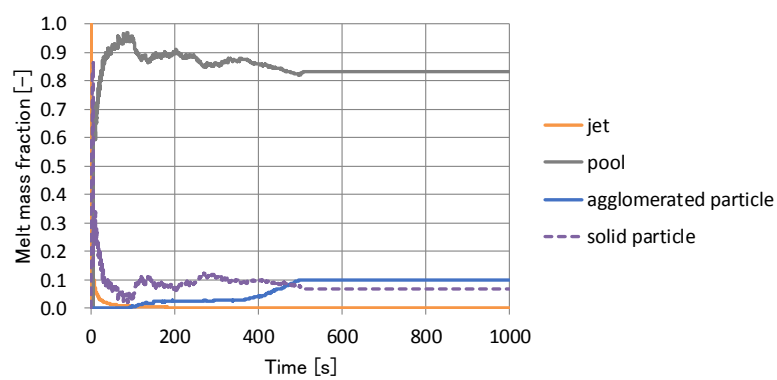


図 2.6.4 デブリの状態別質量割合の履歴（ケース 3）

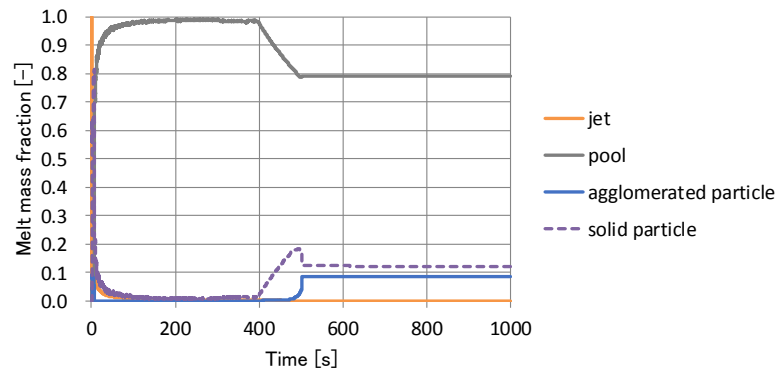


図 2.6.5 デブリの状態別質量割合の履歴（ケース 4）

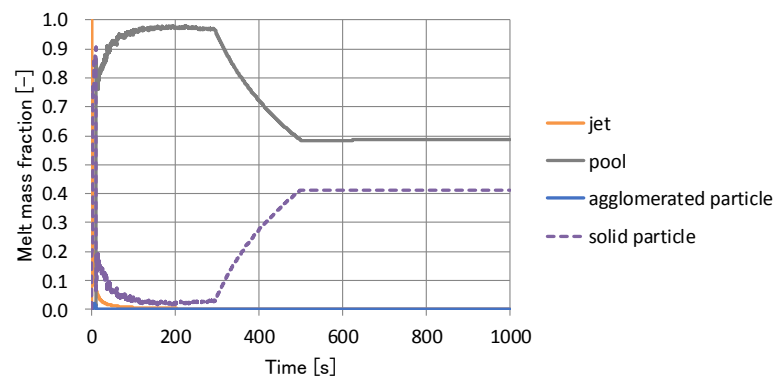


図 2.6.6 デブリの状態別質量割合の履歴（ケース 5）

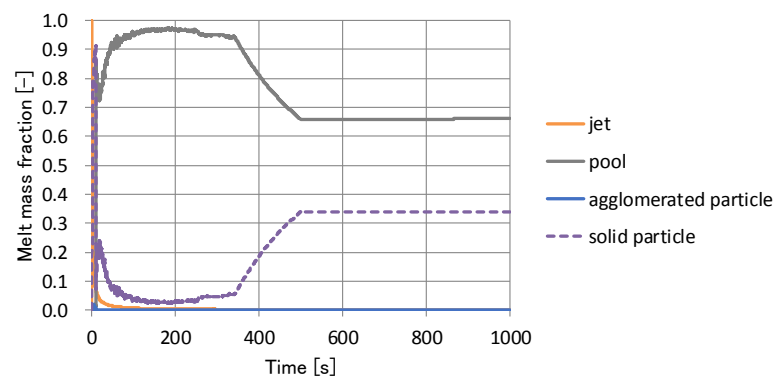


図 2.6.7 デブリの状態別質量割合の履歴（ケース 6）

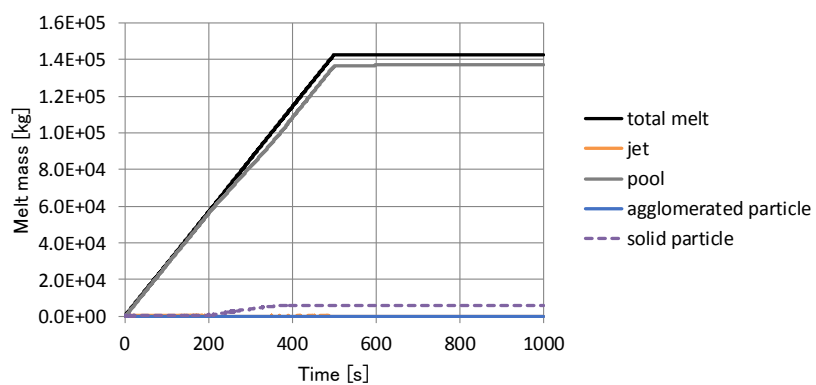


図 2.6.8 デブリの状態別質量の履歴（ケース 1）

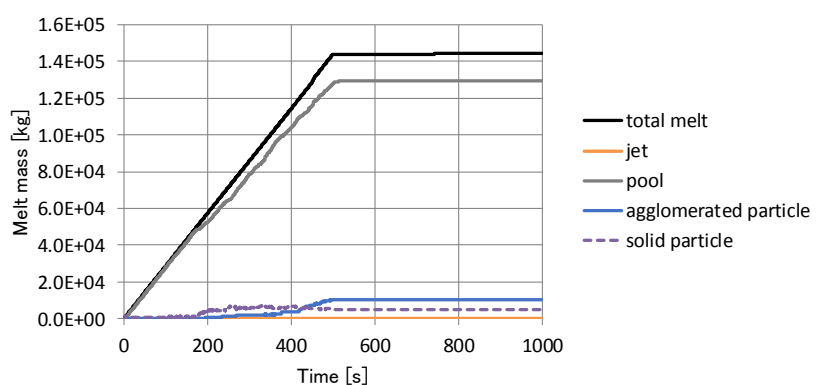


図 2.6.9 デブリの状態別質量の履歴（ケース 2）

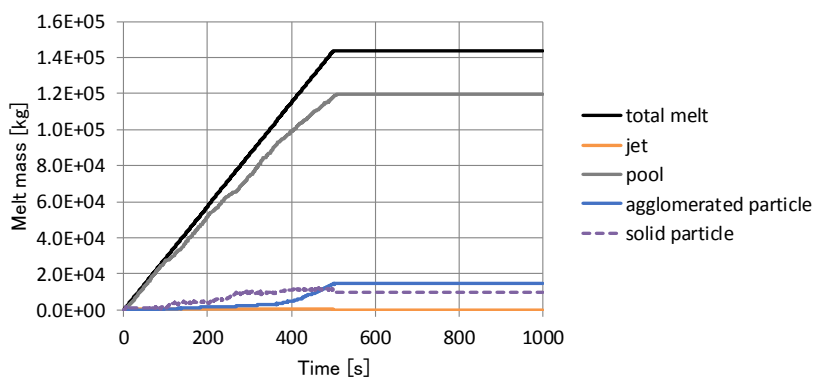


図 2.6.10 デブリの状態別質量の履歴（ケース 3）

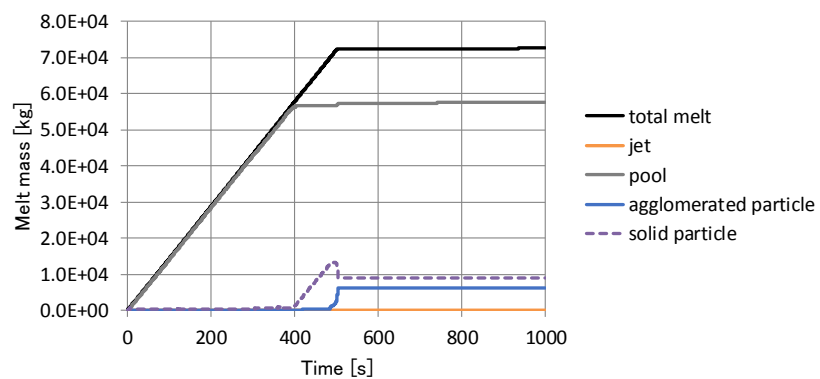


図 2.6.11 デブリの状態別質量の履歴（ケース 4）

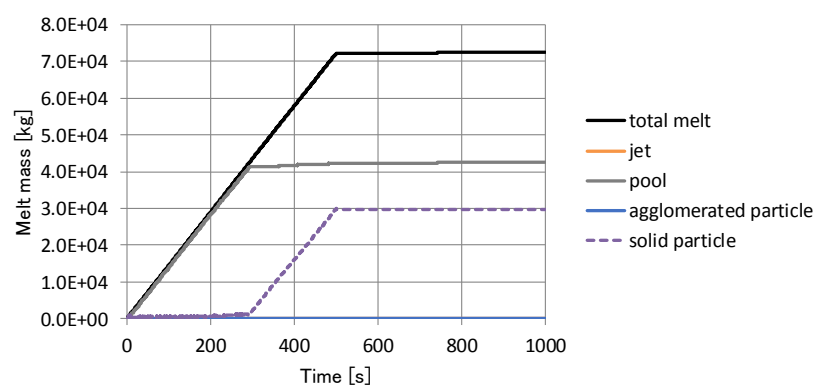


図 2.6.12 デブリの状態別質量の履歴（ケース 5）

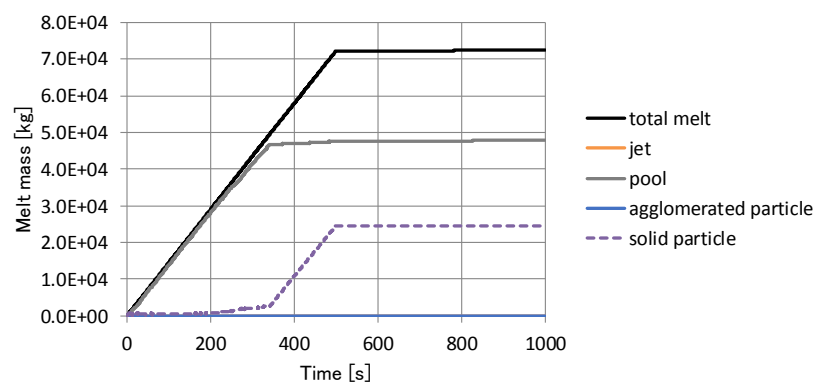


図 2.6.13 デブリの状態別質量の履歴（ケース 6）

## 2.7 まとめ

シビアアクシデント時の格納容器内における熔融炉心冷却性を評価するため、熔融物が水中にジェット状に落下するときの粒子化（ブレイクアップ）に伴う粒子同士の結合（アグロメレーション）の発生に関するモデルを JASMINE コードに追加した。このモデルは、床面または熔融物プールの上面クラストの上に落下した熔融粒子について、落下点近傍の粒子との接触状態や粒子温度からアグロメレーションの発生を判定するものである。スウェーデン王立工科大学（KTH）により実施された DEFOR-A2 実験の結果に基づきアグロメレーション判定基準（接触状態に関するしきい値）を決定し、その他の DEFOR-A 実験の解析に適用した。水プールの水深とアグロメレーション質量割合の関係を整理した結果、水深の増大に伴いアグロメレーション割合が急激に低下するという実験結果を同様の傾向が再現された。

また、BWR 実機条件に対してアグロメレーション割合を評価するための試解析を実施した。アグロメレーション判定基準は DEFOR-A 実験解析と同じ値を適用した。その結果より、水深が大きいほどアグロメレーションデブリ及び連続層状デブリの合計が低下する、すなわち粒子状デブリの割合が増加し、熔融炉心の冷却性が向上するという傾向が確認された。

アグロメレーションモデルによる実験結果の再現性及び実機適用時の信頼性を向上するために、アグロメレーション判定基準や熱伝達のさらなる検討、熔融物プール上面のクラスト上で生成されるアグロメレーションデブリの性状把握等が必要と考えられる。

## 参考文献

- [2.1.1] Bal Raj Sehgal, “NUCLEAR SAFETY IN LIGHT WATER REACTORS”, Academic Press, 2012
- [2.1.2] 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
- [2.1.3] 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
- [2.3.1] A. Karbojian, W.M. Ma, P. Kudinov, T.N. Dinh, “A scoping study of debris bed formation in the DEFOR test facility”, Nucl. Eng. Des., 239, 1653-1659, 2009
- [2.3.2] L. Manickam, P. Kudinov, S. Bechta, “On the influence of water subcooling and melt jet parameters on debris formation”, In: The 15th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermalhydraulics, NURETH-15, 512, Pisa, Italy, May 12-17, 2013
- [2.3.3] P. Kudinov, A. Karbojian, W. Ma, “The Defor-S experimental study of debris formation with corium simulant materials”, Nucl. Technol., 170, 219-230, 2010
- [2.3.4] 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
- [2.3.5] P. Kudinov, M. Davydov, “Development and validation of conservative-mechanistic and best estimate approaches to quantifying mass fractions of agglomerated debris”, Nucl. Eng. Des., 262, 452-461, 2013
- [2.3.6] 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
- [2.3.7] 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. 溶融炉心の床面上の拡がり

#### 3.1 JASMINE コードの改造

昨年度の溶融物拡がり解析機能の開発と PULiMS 実験との比較の結果、以下の点が改良の余地のある項目として挙げられた。

- ・ 溶融物と床の接触面温度の計算
- ・ 溶融物中のガスの影響の評価

今年度の作業では、上記の項目のモデルの付加のほか、長期間の計算に適用できるように溶融物が完全に固化した後もクラスト内の熱伝導の計算を継続できるようにした。以下、改良前の JASMINE の溶融炉心拡がりモデルの概要について 3.1.1 で説明し、その後、上記の付加モデルについて 3.1.2 で詳しく説明する。

##### 3.1.1 改良前の JASMINE の溶融物拡がりモデルの概要

JASMINE コードは、溶融物と水との間の急速な熱伝達いわゆる水蒸気爆発過程の解明を目的に開発された。このため、溶融物が床面に落下してできる溶融物プールに関しては簡略化されたモデルが組み込まれていた。これを、シビアアクシデント時に床面まで到達した炉心溶融物の冷却可能性を評価できるようにすることを目的として、昨年度、落下炉心溶融物ジェットからの液滴発生のモデルの改良、格納容器床上に広がる炉心溶融物の冷却挙動のモデルの改良を行い、JASMINE 4.0b を作成した。この改良コードの炉心溶融物拡がり挙動に関するモデルと計算式は以下のとおりである。

##### (1) 溶融物プールのモデルの基本的な仮定

- ① JASMINE の基本モデルを踏襲しているので、軸対称モデルである。また、床面上の溶融物の挙動は浅水方程式により記述される。
- ② 床上に落下した炉心溶融物のプールは、上表面に形成される表面クラスト、溶融部、床面すなわち溶融部底部に形成される底クラストからなるとする。表面クラスト、溶融部、底クラストの組成は同一で、一様であるとする。又、発熱密度も同一であるとする。(図 3.1.1 参照)
- ③ 表面クラストは、溶融部の表面温度が融点 $T_m$ まで冷却されると生じるとする。
- ④ クラストの真密度は溶融部よりも大きいと想像されるので、上面で形成された表面クラストは溶融物内へ沈む可能性がある。実際には、クラストに生じるクラック（温度降下に伴う体積減少や内部への水蒸気の混入等による）や、溶融物との接触で生じるであろうガス（床ペイントの熱分解ガスや、そのほか構造物に吸着していたガス）を閉じ込めてしまうことにより形成されるクラスト内のボイドの影響で表面クラストは沈まないと仮定する。
- ⑤ 表面クラストの速度は溶融物速度と同一又は表面クラストは移動しないと仮定する。表面クラストは「常に溶融部と同じ速度」又は「常に移動しない」又は「形成初期には溶融部と同じ速度であるが所定の厚みになると移動しなくなる」の何れかとし、これを入力で選択する。また、移動しなくなる所定の厚みも入力で与える。

- ⑥ 底クラストは移動しないとする。
- ⑦ 表面クラスト、底クラストとも水平方向の熱伝導現象は無視できるものとし、厚み方向だけの熱伝達・熱伝導を考慮する。
- ⑧ 床面（底クラストの下面）は、断熱又は一定温度とし、入力で選択する。断熱の場合には、底クラストは形成されないとする。
- ⑨ 軸対称の条件で固体の表面クラストが移動するとその形状は保てないはずである。半径方向に移動することにより、隙間が空くのでその隙間に下から溶融物が上昇してきて固化して一様なクラストになると考える。溶融凝固がないときにクラストが半径方向に移動すると厚みが薄くなるという計算となる。
- ⑩ 表面クラストの伝熱機構は下記の i ～ iii とする。⑨の現象を考慮するとクラスト内は熱伝導だけではないが、4.0b バージョンモデルでは熱伝導だけを仮定している。クラスト上面温度が飽和温度近傍となり熱流束がドライアウト熱流束以下となった時にはクラスト侵水も考慮する。
  - i. クラスト上面：放射及び沸騰熱伝達
  - ii. クラスト内部：熱伝導+クラスト侵水
  - iii. クラスト下面：対流熱伝達（溶融部からの伝熱）
 クラスト侵水時の最大除熱量（ドライアウト熱流束）は一定値とし、入力で与える。
- ⑪ 底クラストの伝熱機構は下記の i ～ iii とする。
  - i. クラスト上面：対流熱伝達（溶融部からの伝熱）
  - ii. クラスト内部：熱伝導
  - iii. クラスト下面：入力で与えられる一定値の温度
- ⑫ クラストと溶融部の界面温度は、溶融物の融点（ $T_m$ ）とする。液相線温度 $T_{liq}$ 、固相線温度 $T_{sol}$ との関係は、 $T_{liq} > T_m > T_{sol}$ とする。
- ⑬ 溶融物が広がり壁面に達すると表面クラストの移動も止まる。この後クラストは上下方向だけに移動するとする。

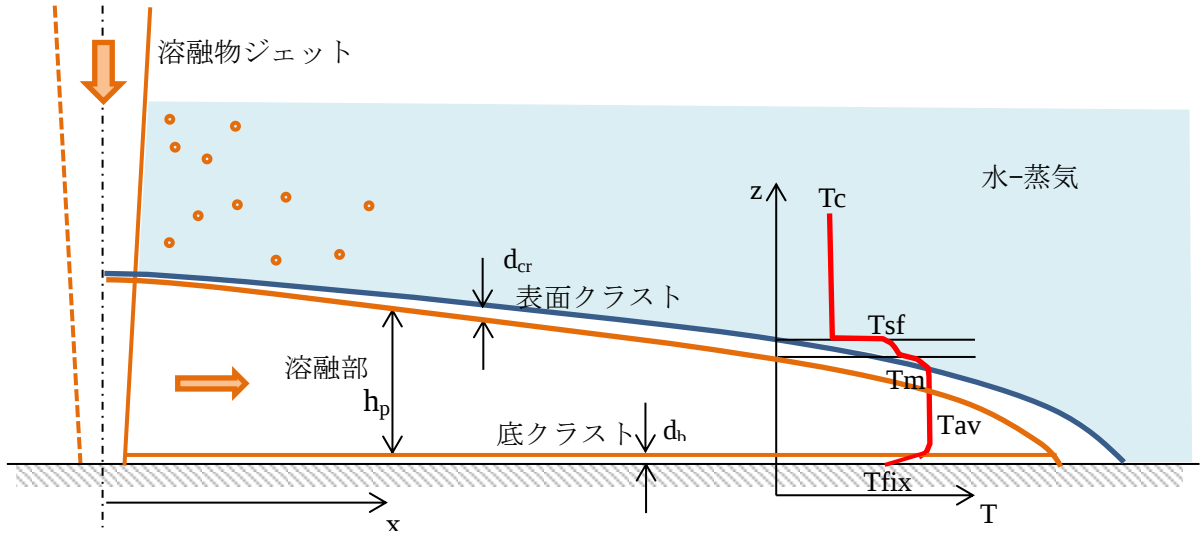


図 3.1.1 溶融物の拡がりとクラストの形成の模式図

## (2) 計算式

計算式に使用される記号の説明は、今年度の改良部も含めて、3.1.3 に記述する。

### (a) 流動に伴う変化を記述する微分方程式

表面クラストの厚み変化に関する微分方程式は、

$$\frac{\partial w d_{cr} \rho_{cr}}{\partial t} + \frac{\partial w d_{cr} \rho_{cr} v_{cr}}{\partial x} = w m_{sc} + w m_{cr} \quad (1)$$

ここで左辺初項は、クラストの厚みの変化、第 2 項はクラストの移動による影響を表す。又、右辺初項は、溶融物液滴のうちクラストへ付着するものを表し、第 2 項は溶融部が凝固する質量フラックスを表す。

底クラストの厚み変化に関する微分方程式は、

$$\frac{\partial d_b \rho_{cr}}{\partial t} = m_b \quad (2)$$

溶融部の高さの変化に関する微分方程式は

$$\frac{\partial w h_p \rho_p}{\partial t} + \frac{\partial w h_p \rho_p v_p}{\partial x} = w m_{sp} - w m_{cr} - w m_b \quad (3)$$

ここで左辺初項は、溶融部分の深さの変化、第 2 項は溶融部の流れの影響を表す。又右辺初項は、溶融物液滴のうちクラストが薄いときにクラストを突き破り溶融部に入ってくるものを表す。 $m_s = m_{sc} + m_{sp}$ が、全落下液滴のフラックスである。右辺第 2 項、第 3 項が表面、底クラストに凝固する量を表す。

内部エネルギーの変化については非保存形で表し、表面クラストに関して

$$\frac{\partial e_{cr}}{\partial t} + v_{cr} \frac{\partial e_{cr}}{\partial x} = \frac{e_{ms}-e_{cr}}{d_{cr}\rho_{cr}} m_{sc} + \frac{e_p-e_{cr}}{d_{cr}\rho_{cr}} m_{cr} - \frac{q_{boil}}{d_{cr}\rho_{cr}} + \frac{h_{conv}(T_{av}-T_m)}{d_{cr}\rho_{cr}} + Q \quad (4)$$

ここで、右辺初項は、溶融物液滴が持ち込むエネルギー、第 2 項が凝固する溶融物が持ち込むエネルギー、第 3 項が上面の水プールへの伝熱、第 4 項が溶融部からの伝熱、第 5 項が崩壊熱等の内部発熱を表す。

溶融部はオリジナルの JASMINE とほぼ同様に

$$\frac{\partial e_p}{\partial t} + v_p \frac{\partial e_p}{\partial x} = -\frac{h_{conv}(T_{av}-T_{sf})}{h_p\rho_p} + \frac{(e_{ms}-e_p)\max(m_{sp},0)}{h_p\rho_p} + Q - \frac{h_{cbottom}(T_{av}-T_m)}{h_p\rho_p} \quad (5)$$

ここで、右辺初項、第 4 項は、上下のクラストへの熱伝達量を表し、第 2 項は落下・流入液滴が持ち込むエネルギーを表す。

表面温度 $T_{sf}$ については、クラストがあるときは $T_{sf} = T_m$ とし、クラストがないときは、

$$h_{conv}(T_{av} - T_{sf}) = q_{boil}(T_{sf}) \quad (6)$$

となる温度を収束計算により求める。

速度についてはクラストに関しては仮定により

$$v_{cr} = v_p \quad \text{又は} \quad v_{cr} = 0 \quad (7)$$

溶融部の運動方程式については、クラストとのスリップがないと仮定した場合には、クラスト - 水間の摩擦力を溶融部側で負担することになる。また、クラストは自立することなく溶融部に浮いていることとし、それに加わる重力は溶融部に伝えられる。したがって

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_p}{\partial t} + v_p \frac{\partial v_p}{\partial x} = & -\frac{1}{\rho_p} \left[ \frac{\partial p_{Pa}}{\partial x} + g \frac{\partial (h_p\rho_p + d_{cr}\rho_{cr} + d_b\rho_{cr})}{\partial x} \right] \\ & + \frac{K_{a-cr}}{h_p} (v_a - v_{cr}) |v_a - v_{cr}| - \frac{f_w}{h_p} \frac{1}{2} v_p |v_p| + \frac{(v_{ms}-v_p)\max(m_s,0)}{h_p\rho_p} \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、右辺初項 ( $x$  による微分項) は、液位の勾配のほか底クラストの勾配による流下、上側のクラストの厚みの差による駆動力、水プールの界面での圧力すなわち浮力による影響を含んでいる。また、クラストが動かないとすると溶融部上端の摩擦力がクラストに対するものとなるから、

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_p}{\partial t} + v_p \frac{\partial v_p}{\partial x} = & -\frac{1}{\rho_p} \left[ \frac{\partial p_{Pa}}{\partial x} + g \frac{\partial (h_p\rho_p + d_{cr}\rho_{cr} + d_b\rho_{cr})}{\partial x} \right] - \frac{f_{cr}}{h_p} \frac{1}{2} v_p |v_p| \\ & - \frac{f_w}{h_p} \frac{1}{2} v_p |v_p| + \frac{(v_{ms}-v_p)\max(m_{sp},0)}{h_p\rho_p} \end{aligned} \quad (9)$$

となる。液滴流入量のうちクラストが吸収する運動量が減るので右辺第 4 項も異なる。

また、表面クラストが存在しない場合には基本的には従来のものと同様であるが、底クラストの勾配の影響の項が加わり、また上面の摩擦力の表現が異なる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_p}{\partial t} + v_p \frac{\partial v_p}{\partial x} = & -\frac{1}{\rho_p} \left[ \frac{\partial p_{Pa}}{\partial x} + g \frac{\partial (h_p\rho_p + d_b\rho_{cr})}{\partial x} \right] - \frac{K_{a-p}}{h_p} (v_a - v_p) |v_a - v_p| \\ & - \frac{f_w}{h_p} \frac{1}{2} v_p |v_p| + \frac{(v_{ms}-v_p)\max(m_s,0)}{h_p\rho_p} \end{aligned} \quad (10)$$

ここで、 $K_{a-cr}$ 、 $K_{a-p}$ は、クラスト又は溶融物表面と水 - 蒸気側との摩擦力に関する係数、 $f_{cr}$ 、 $f_w$ は表面クラスト又は底クラストと溶融物との間の摩擦係数である。

#### (c) クラストの伝熱

表面クラスト内の温度分布を 2 次関数と仮定し、その上面の温度勾配から得られる熱流束が水プールへの沸騰伝熱の熱流束に等しいとすると、次式が得られる。

$$\frac{\lambda}{d_{cr}}(-2T_m - 4T_{sf} + 6T_{cr}) = q_{boil}(T_{sf}) \quad (11)$$

ここで、 $T_m$ はクラスト下面の温度であり、溶融物の融点で与えられ、 $T_{sf}$ は上面の表面温度、 $T_{cr}$ は内部エネルギー $e_{cr}$ から計算されるクラストの平均温度である。 $q_{boil}(T_{sf})$ は沸騰曲線であり、上式を二分法で収束計算させることにより $T_{sf}$ を決定する。

#### (d) クラスト内侵水

高温の溶融物が凝固してクラストを形成すると、その後も続く上面の水による冷却のためクラストは熱収縮し、内部にクラックが生じる。このクラックに水が侵入して蒸発することにより冷却される[3.1]。表面クラストに侵水が生じているときは、表面クラストの上面での伝熱量がドライアウト熱流束で与えられる。侵水している部分の温度は飽和温度とし、それ以外は熱伝導で熱が伝わるとする。

#### (e) 表面クラストの成長

表面クラストがまだ存在しない時刻、計算セルでは、溶融物の融点 $T_m$ に対応する除熱量 $q_{boil}(T_m)$ と、溶融部内部からの伝熱量 $h_{conv}(T_{av} - T_m)$ を計算して比較し、除熱量が多ければこの時刻にクラストが形成されると判定する。ここで、 $h_{conv}$ は、溶融部からクラスト下面への熱伝達率である。

表面クラストの成長速度（単位面積、単位時間当たりの質量増加：質量フラックス $m_{cr}$ ）は、溶融物の凝固潜熱 $\Delta h_{mls}$ と、クラスト内の冷却熱流束と溶融部からの伝熱量の差で決まるから、次式で表される。

$$(e_p - e_{freeze} + \Delta h_{mls})m_{cr} = q_{cr}(0) - h_{conv}(T_{av} - T_m) \quad (12)$$

### 3.1.2 今年度の改良項目と解析モデル

#### (1) 床表面温度の計算

前述のように昨年度の溶融物拡がり解析機能に関する付加作業では、床の表面温度は一定値と仮定しており、半無限物体の接触点温度を使用することになっていた。しかし、PULiMS 実験のように床板が薄い場合や溶融物の底クラストと床表面に接触熱抵抗があると、これは実現されない。そこで、床面内部の熱伝導現象を解析する機能を付与することにした。床材としては、PULiMS 解析用に薄い金属板の場合、実機解析に対応できるようにコンクリートの場合を考慮できるようにした。この両者は、有限板厚／無限板厚、物性値ほぼ一定／熱分解反応がある、というように全く異なる性質を持つため、別々の計算プ

プログラムを作り、入力で選択できるようにした。その結果、JASMINE は次の 4 種の計算法が入力により選択できるようになった。このうち、①と②は昨年度の JASMINE に既に機能が付与されている。

- ① 床面は断熱とする。
- ② 床面温度（正確には底クラスト下面温度）は一定とする。
- ③ 床は有限厚さの板状の物体とする。これは、PULiMS 実験の解析を想定したもので、材質はステンレス等の高熱伝導材料を主に想定する。
- ④ 床は無限厚さの物体とする。これは実機条件を想定したもので、コンクリートのような低熱伝導率で且つ熱分解ガスの発生や溶融などの相変化を有する物質に対応できるようにする。

以下に各オプションのモデルについて詳しく説明する。

(a) 床面を断熱とした場合

底面を断熱と入力した場合には底クラストは形成されない。また、前述の (5) 式において  $h_{cbottom} = 0$  とする。

(b) 床面温度を与えた場合

底面温度を一定値と指定した場合には、底クラストの成長速度  $m_b$  も表面クラストの場合と同様に決定する。すなわち底クラストと溶融部との境界でのクラスト内の熱伝導熱流束を  $q_{bm}$  として、

$$(e_p - e_{freeze} + \Delta h_{mfs})m_b = q_{bm} - h_{cbottom}(T_{av} - T_m) \quad (13)$$

クラスト内の熱伝導率を一樣とみなし、内部発熱を考慮してこの熱流束を次式で与える。

$$q_{bm} = \lambda \frac{(T_m - T_{fix})}{d_b} - \frac{Q\rho_{cr}d_b}{2} \quad (14)$$

ここで  $T_{fix}$  は、入力した一定値温度である。

また、底面温度一定で且つ  $T_{fix} > T_m$  という入力を与えられた場合には、底クラストは形成されず、(4)式の右辺第 4 項にある  $T_m$  の代わりに  $T_{fix}$  を使用する。

(c) 床材が有限厚さの金属板の場合

伝熱現象は深さ方向 1 次元で扱う。床への伝熱を計算する半径方向位置は、溶融物プール挙動計算のメッシュと同一として、溶融物の温度・内部エネルギーを定義している点としている。また、溶融物・クラストと床の表面の間の熱抵抗を考慮する。

- ① 床板の厚さ、物性値、溶融物と床板間の熱抵抗を入力で与える。
- ② 床材の物性値は温度依存とし、point-by-point で値を入力し、線形補間して計算に使用する。
- ③ 底クラストの下面又は溶融物底面と床上面との間の熱抵抗を考慮すると、熱流束は次の式で求められる。

$$q = \frac{(T_{bm} - T_f)}{R_H} + \sigma(T_{bm}^4 - T_f^4) \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_{bm}} + \frac{1}{\epsilon_f} - 1} \quad (15)$$

ここで  $q$  : 溶融物底面又は底クラスト下面と床上面間の熱流束、 $T_{bm}$ ,  $T_f$  : 溶融物底面又は底クラストの下面温度及び床上面温度、 $R_H$  : 接触熱抵抗、 $\sigma$  : Stefan-Boltzmann 定数、 $\epsilon_{bm}$ ,  $\epsilon_f$  : 溶融物、床表面の放射率を表す。このうち  $R_H$ ,  $\epsilon_f$  を入力で与える。

- ④ 熱伝導方程式は有限差分法で表し、クランクニコルソン法により数値計算する。
- ⑤ 熱伝導方程式を解いて得られた床上面温度又は熱流束を境界条件として、JASMINE コードのメルトスプレッド計算に渡す。
- ⑥ 溶融物側に形成される底クラストの扱いは(b)の場合と同様である。

#### (d) コンクリート床の場合

前項の場合と同様、伝熱現象は深さ方向 1 次元で扱う。床への伝熱を計算する半径方向位置は、溶融物プール挙動計算のメッシュと同一とする。

主な仮定は：

- ① 床材をコンクリートとし、自由水の蒸発、結合水（セメントマトリックス中の水分）の分離、 $\text{CO}_2$  ガスの発生、結晶水（骨材中の水分）の分離、溶融を考える。これらの現象の生じる温度、吸収熱量、発生するガスの質量を入力で与える。このほか初期密度・熱伝導率・比熱に加え、各相変化後の熱伝導率・比熱を入力で与える。
- ② 相変化は、入力した温度で生じるとし、変化の生じる温度範囲は 0 と近似できるとする。
- ③ コンクリートの体積は熱分解ガスの発生や温度変化が生じてても不変とする。従って、ガスの発生量から密度の変化が計算できる。

計算式の導出：

コンクリートの侵食熱伝導を一次元で近似するが、金属板の場合と異なるのは、図 3.1.2 に示すようにコンクリートには複数の相転移点があり、また、熱伝導率が極めて小さく計算初期には内部に大きな温度勾配が生じると予想される点である。このため、熱伝導現象を記述する偏微分方程式を解くのではなく、相転移点の位置に関する常微分方程式を導き、これを差分法で解く [3.2]。

コンクリートの相転移点の温度を  $T_n$ 、その座標を  $x_n$  とする。 $n = 1$  がコンクリート溶融点であり、 $n = 2, 3, 4, 5$  を  $\text{CO}_2$  の放出、結合水の蒸発（この例では結晶水とまとめて扱う）、自由水の蒸発、温度変化が始まる点とする。相転移位置間の温度勾配を直線で近似すれば、エネルギー保存則より、

$$\begin{aligned} & \lambda_{n+} \frac{T_{n+1} - T_n}{x_{n+1} - x_n} - \lambda_{n-} \frac{T_n - T_{n-1}}{x_n - x_{n-1}} \\ &= \rho \Delta h_n \frac{dx_n}{dt} - \rho C p_{n-} \frac{dx_n}{dt} \frac{T_n - T_{n-1}}{x_n - x_{n-1}} \frac{x_n - x_{n-1}}{2} - \rho C p_{n+} \frac{dx_n}{dt} \frac{T_{n+1} - T_n}{x_{n+1} - x_n} \frac{x_{n+1} - x_n}{2} \end{aligned} \quad (16)$$

ここで、 $\Delta h_n$ はその相転移点の吸熱量 (J/kg) であり、 $\lambda$ は熱伝導率 (W/mK)、 $\rho$ は密度 (kg/m<sup>3</sup>)、 $Cp$ は比熱 (J/kg.K) である。 $n_-$ は、相転移後の値であることを示し、 $n_+$ は、相転移前の値であることを示す。上式左辺は熱伝導項、右辺第2項、第3項は、温度分布変化に伴う顕熱増加に関する項である。簡単のため  $\rho$  は、加熱前のコンクリート密度を採用するので  $\Delta h_n$ 、 $Cp$  は、加熱前密度に換算した数値を使用する。

熔融部側の境界条件は次式で与えられる。

$$\lambda_{1+} \frac{T_2 - T_1}{x_2 - x_1} + q = \rho \Delta h_1 \frac{dx_1}{dt} - \rho C p_{1+} \frac{dx_1}{dt} \frac{T_2 - T_1}{x_2 - x_1} \frac{x_2 - x_1}{2} \quad (17)$$

熱流束  $q$  は、 $T_1$  を  $T_f$  の代わりにして (15) 式を適用して計算する。

$n$  が最大の時 (温度変化が始まる点) :  $\Delta h_n = 0$  であり、 $n+1$  の点も存在しないので

$$-\lambda_{n-} \frac{T_n - T_{n-1}}{x_n - x_{n-1}} = -\rho C p_{n-} \frac{dx_n}{dt} \frac{T_n - T_{n-1}}{x_n - x_{n-1}} \frac{x_n - x_{n-1}}{2} \quad (18)$$

この式を整理すると

$$\frac{dx_n}{dt} = \frac{2\kappa}{x_n - x_{n-1}} \quad (19)$$

となり、温度に依存しない。計算初期には、 $x_n$  が小さく、発散する恐れがあるので誤差関数のプロフィル法の解を用いた近似解  $\delta = \sqrt{12\kappa t}$  を利用して、上式右辺と  $\sqrt{12\kappa \Delta t}$  の小さい方を選択する。上式の計算では零割を防ぐために分母に微小数を加えておく。

上記の  $n = 1 \sim 5$  に関する連立常微分方程式を解くことにより、1次元熱伝導現象が表される。

差分式に変換するとき、計算の発散を防ぐために左辺の位置  $x_n$  を、新しい時刻の値を用いて

$$x_n = x_n^o + \beta \Delta x_n \quad (20)$$

とする。ここで、 $x_n^o$  が古い時刻の値であり、 $\Delta x_n$  が増分、 $\beta$  は、旧時刻と新時刻の重みで

完全後進差分とするときは  $\beta=1$  である。

求められた  $\Delta x_n$  を用いて発生ガス量を計算する。

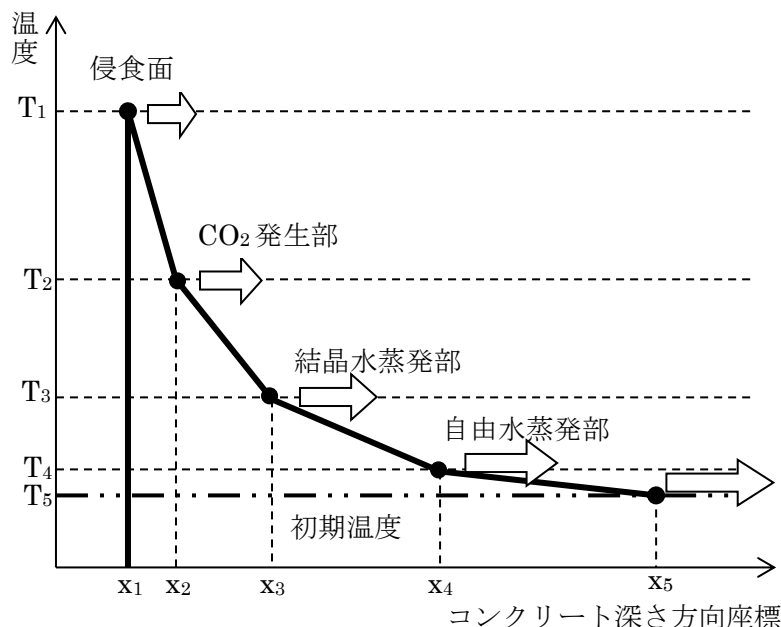


図 3.1.2 コンクリート中の熱伝導計算の概念図

上記の計算で求められた熱流束を境界条件として、JASMINE コードのメルトスプレッド計算を進めるようにする。また、発生した水蒸気及び  $\text{CO}_2$  ガスの量を用いて、溶融物中にガスが存在するときの浮力の効果を計算する。

長時間が経過して冷却が進み、溶融物の底クラスト下端温度が十分に低くなり、 $\Delta x_1 < 0$  となったときは、 $T_1$  を  $\Delta x_1 = 0$  となるよう変更する。さらに冷却が進み、 $T_1 < T_2$  となったときには、この点は断熱として  $q=0$  と溶融物プール計算側に返し、コンクリート温度計算側は、 $X_1 \sim X_n$  の値を保持する。

## (2) 溶融物中にガスが存在するときの浮力の効果の計算

溶融物中にガス気泡があると見かけの溶融物密度が低下し、浮力のために水平方向への溶融物拡がりの駆動力が減少すると考えられる。PULiMS 実験との拡がり距離の差異を減らせるよう溶融物中のボイドの効果を考慮するために、次の計算オプションが選択できるようにする。

- (a) 溶融物中にガスが存在しないとする。(従来の JASMINE)
- (b) 溶融物中ガスのボイド率が一定であるとする。この値は入力で与える。
- (c) コンクリート床からの熱分解ガスが溶融物中に流入するとする。

計算式の導出に当たっては簡単化のために次の仮定を設ける。

- ① 床面から発生したガスは、クラストにさえぎられることなく上昇し上方の水中に流出

する。

- ② クラスト内のボイド率は溶融物中のボイド率と同一であるとする。ただし、プログラム中では個別の変数名を使用し、将来のボイド率評価モデルの変更を容易にするよう配慮する。
- ③ ガスの上昇速度は十分に速いので、溶融物の流動に伴うガスの水平方向の移動は考えなくてよいとする。
- ④ 溶融物中のボイド率  $\alpha$  は次式を用いて求める。

$$\alpha = j_g / (C_0 j_g + v_b) \quad (21)$$

ここで、 $j_g$  は、床面積当たりの発生ガス体積流量、 $v_b$ 、 $C_0$  は、気泡の上昇速度及び分布パラメータで、入力で与える。

- ⑤ ボイド率が与えられ時の溶融物プール挙動に対する影響については、溶融物の見かけの密度が変化するとして評価する。すなわち、挙動計算のプログラム中で使用する表面クラスト、溶融物、底クラストの密度を  $\rho_{cr}$ 、 $\rho_p$ 、 $\rho_b$  としたとき、溶融物の物性値関数で求められる真の密度  $\rho_{cr}^T$ 、 $\rho_p^T$ 、 $\rho_b^T$  から、その位置のボイド率  $\alpha_{cr}$ 、 $\alpha_p$ 、 $\alpha_b$  を用いて次式で決定する。

$$\rho_{cr} = (1 - \alpha_{cr}) \rho_{cr}^T \quad (22)$$

$$\rho_p = (1 - \alpha_p) \rho_p^T \quad (23)$$

$$\rho_b = (1 - \alpha_b) \rho_b^T \quad (24)$$

JASMINE では、溶融物の存在量を液位  $h$  ではなく、液位  $\times$  密度  $\times$  セクター角 (=  $fl$ ) の形で扱うので、 $fl$  が与えられればボイド率の変化が液位の変化として自然に定まり、プログラムの変更が少なくて済むと思われるのでこの方法を採用する。

- ⑥ 溶融物先端部の計算においても最小液深  $h_{min}$  を見かけの密度を用いて次式で与えられるとする (図 3.1.3 参照)。

$$h_{min} = \sqrt{\frac{4\sigma}{(\rho_p - \rho_a)g}} \quad (25)$$

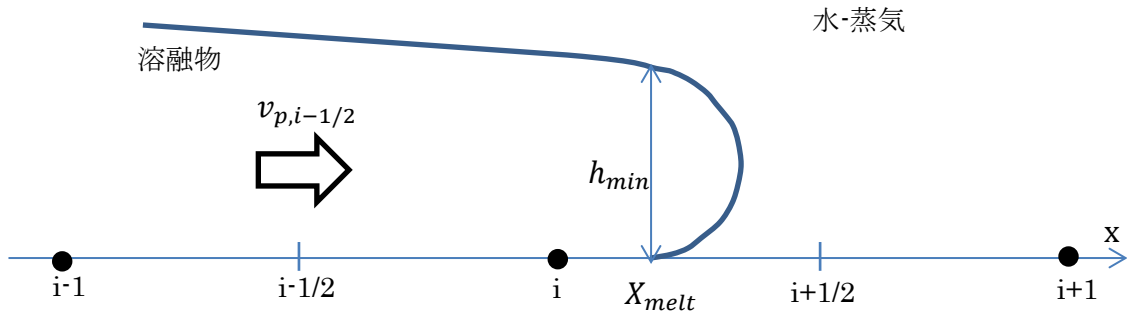


図 3.1.3 溶融物拡がりの先端近傍と計算メッシュ

### (3) 溶融物が完全に固化した後のクラスト内の熱伝導の計算

昨年度作成した JASMINE コードの溶融物拡がりモデルでは、溶融部分の厚さがなくなるか十分小さくなるとその部分の流動が停止するとして、計算対象から除外していた。このため、その部分のクラストが保有する顕熱も考慮されなくなっていた。そのため、水側の保有熱量が少なくなるなどの誤差が生じることが考えられる。今回の改良では、溶融部が小さくなっても、伝熱計算を継続するようにする。

計算方法としては、流動が停止したと判断された水平方向メッシュ点ごとに、表面クラストと底クラストを接続させた長さの高さ方向有限差分メッシュを設け、高さ方向の熱伝導方程式を、有限差分法を用いて解く。

プログラミング上は、サブプログラム `pool` で、ある点の溶融部が極めて小さくなりその半径位置でのデブリが流動しなくなると判定されたときに、固化後温度計算サブプログラムに、表面クラスト、溶融部、底クラストの厚さ、密度、発熱量、温度分布のデータ等を渡す。固化後温度計算サブプログラムでは、高さ方向一次元の有限差分法メッシュを作り必要なメッシュ幅、密度、初期温度等をセットする。メッシュ分割数は入力で定めておく。以降の計算サイクルの伝熱計算ループにおいて、この固化した計算メッシュでは、固化後温度計算サブプログラムを `call` し、熱伝導計算を行う。このとき境界条件として、上端の水プールの温度・圧力・ボイド率が、下端の床表面の温度条件等が `pool` サブルーチンから固化後温度計算サブプログラムに渡される。固化後温度計算サブプログラムでは、克蘭クニコルソン法により一次元熱伝導方程式を解く。この結果得られた温度データ、熱流束データを `pool` サブルーチンへ返す。

#### 3.1.3 変数の定義

英字記号

$C_0$  : 二相流ドリフトフラックスモデルの分布パラメータ

$d$  : クラストの厚さ

$e$  : 比内部エネルギー [ $e_{freeze}$ は、融点（流動しなくなる温度）における溶融物液相の値]

$d$  : クラストの厚さ

$f$  : 溶融物とクラスト又は床面間の摩擦係数

$g$  : 重力加速度

$h$  : 熱伝達率 ( $h_{conv}$ は溶融物と表面クラスト又は水プール間、 $h_{cbottom}$ は溶融物と底クラスト又は床面間の値)

$h_p$  : 溶融物の高さ

$\Delta h$  : 相変化の潜熱 ( $\Delta h_{mfs}$ は、溶融物の凝固潜熱)

$j_g$  : 溶融物中を上昇するガスの見かけ流速

$K$  : 水プールと溶融物の間の摩擦に関する係数 ( $K_{a-cr}$ は水-クラスト間、 $K_{a-p}$ は溶融物が液相の時の値)

$m$  : 質量フラックス ( $m_s$ は、溶融物液滴の単位面積当たり落下量)  
 $P_{Pa}$  : 圧力  
 $Q$  : 単位質量当たり発熱量  
 $q$  : 熱流束 ( $q_{boil}$ は沸騰熱伝達熱流束、 $q_{cr}(0)$ は、表面クラスト下面での熱流束を表す。)  
 $R_H$  : 溶融物と床間の接触熱抵抗  
 $T$  : 温度 [ $T_m$ は、溶融物の融点 (流動しなくなる温度) を表す。]  
 $t$  : 時間  
 $v$  : 水平方向の速度成分  
 $v_b$  : 溶融物中のガス気泡の上昇速度  
 $w$  : 計算領域の幅 ( $x$ の位置に於いて  $= x\theta$ 、 $\theta$ は定数) である。  
 $x$  : 水平方向座標 (溶融物ジェット中心からの距離)

#### ギリシャ文字

$\alpha$  : 溶融物中のボイド率  
 $\epsilon$  : 溶融物の放射率  
 $\lambda$  : 熱伝導率  
 $\rho$  : 密度  
 $\theta$  : 計算対象セクターのセクター角  
 $\sigma$  : 表面張力

#### 添字

$a$  : 水プールを表す  
 $av$  : 平均値を表す  
 $b$  : 底クラストを表す  
 $bm$  : 底クラストの下面を表す  
 $cr$  : 表面クラストを表す  
 $f$  : 床表面を表す  
 $fix$  : 固定値又は入力値であることを示す  
 $m$  : 溶融物を表す  
 $ms$  : 溶融物液滴を表す  
 $P$  : 溶融物液相を表す  
 $sc$  : 表面クラストへの溶融物液滴の到達を示す  
 $sf$  : 表面クラスト上面又は溶融物と水プールとの界面を表す  
 $sP$  : 溶融物液相への溶融物液滴の到達を示す  
 $w$  : 底クラスト上面又は床表面を表す

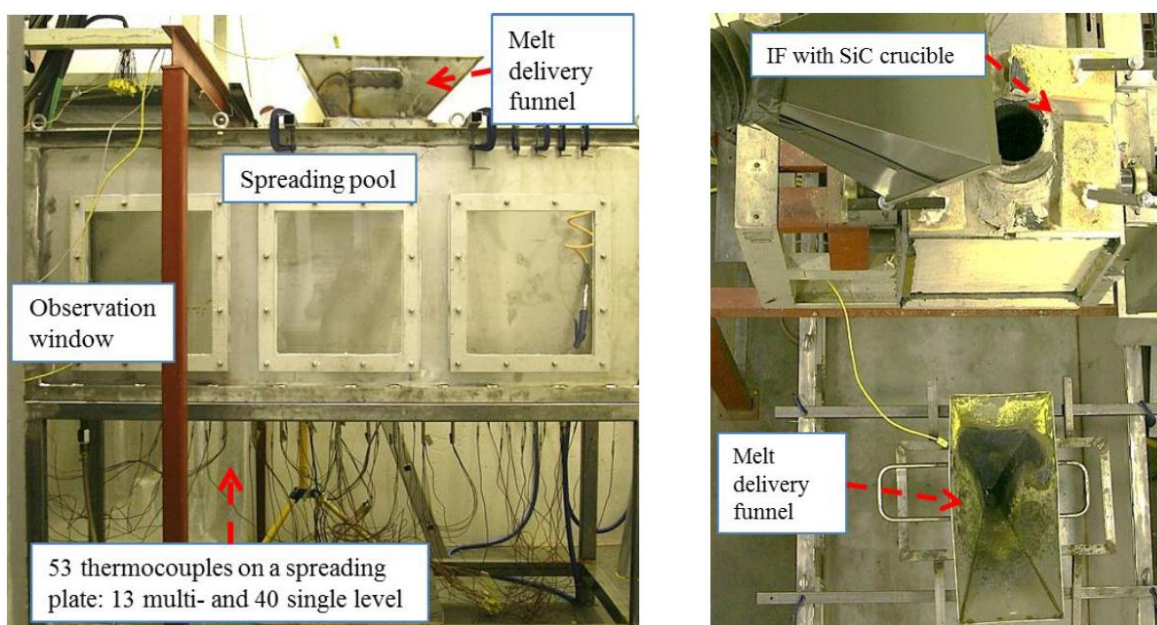
## 3.2 PULiMS 実験の解析

### 3.2.1 解析対象と PULiMS 実験の概要

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おり、これまでに E1～E6 までの 6 回の実験について報告している[3.3][3.4]。これらの実験のうち、昨年度は E1～E6 のうち比較対照可能なデータの得られた E1,E4,E6 ケースの解析を行った。その後、KTH において E7,E8,E9 実験が実施されたことから[3.5]、今年度は、E1,E4,E6 に加えて、E7,E8,E9 実験を改良コードの解析対象とした。

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、最大約 60kg 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 3.2.1 に示す。床面近傍には図 3.2.2 に示すような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た。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。

実験は、模擬溶融物の種類、量、温度を変えてこれまでに 9 回行われた。模擬溶融物の種類としては、 $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-WO}_3$ 、 $\text{B}_2\text{O}_3\text{-CaO}$ 、 $\text{ZrO}_2\text{-WO}_3$  が使用されたが、 $\text{B}_2\text{O}_3\text{-CaO}$  の実験で



正面からの撮影

上方からの撮影

図 3.2.1 PULiMS 実験装置

は、溶融物は水プールに落下後、数 cm の粒子ができその内部が多孔質のため水面上に浮遊し、期待した溶融物拡がり挙動は生じなかった。

9 回の実験のうち、Run E-3, E-5, E-6, E-7 の 3 実験では水蒸気爆発が生じた。E-3, E-5 実験での水蒸気爆発発生は溶融物供給の途中であり、比較できるデータが得られていないので解析対象から外した。E-6 実験は、水蒸気爆発発生が早期であり、その爆発直後の状態

を推定して解析の初期条件とした。また、E-7 実験は、水蒸気爆発までの温度計測値変化が入手できているので、その時刻までを比較対象とした。

固化後の模擬溶融物の写真を Run E-4 のものについて、図 3.2.3 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広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 3.2.4 に示す。写真からわかるように多数の空孔を含んでおり、そのボイド率 (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。

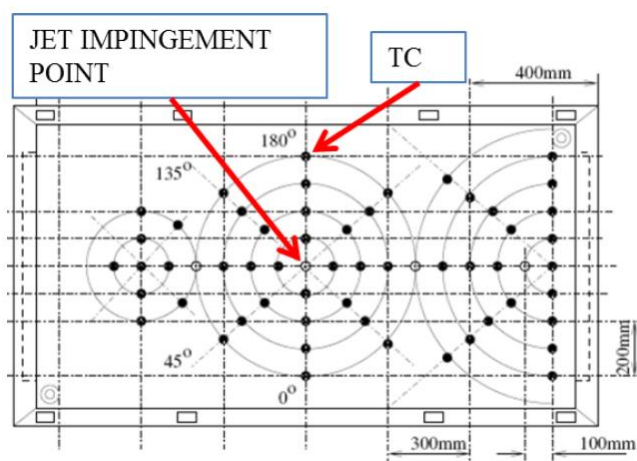


図 3.2.2 PULiMS テストセクション平面図

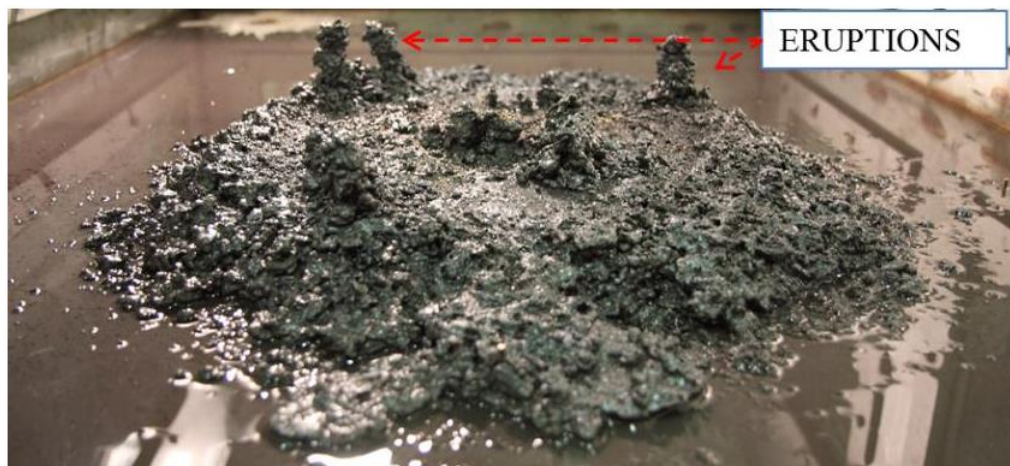


図 3.2.3 PULiMS E4 実験後の模擬溶融物



図 3.2.4 PULiMS E4 実験後の溶融物の縦断面写真

### 3.2.2 入力値の説明

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 3.2.1 に示す。前述のように、このうち E6 実験と E7 実験では溶融物供給の途中で水蒸気爆発が生じている。このため、解析の対象としたのは E6 実験では水蒸気爆発が生じた後の挙動であり、E7 実験では水蒸気爆発が生じるまでを計算した。従って E6 実験の初期水温等、入力値には推定値が多い。

使用された模擬溶融物は、 $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-WO}_3$  の混合物であり、共晶を形成する混合比（42.64 : 57.36 wt%）である。JASMINE による計算に使用した物性値を表 3.2.2 に示す。これらの値は JASMINE 入力の datain オプションを利用して指定した。固相線温度と液相線温度は、溶融物が共晶体であるから一致するはずであるが、JASMINE の計算が不安定となるため、融点に対してそれぞれ 1 K の差を設けた。床材のステンレス鋼に伝熱にかかわる物性の入力値については表 3.2.3 に示す[3.6]。

表 3.2.1 PULiMS 実験の解析における入力値

| 実験番号                  | E1                                       | E4   | E6    | E7        | 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 | 1322  | 1235      | 1173  | 1181  |
| 落下溶融物量 (kg)           | 23.4                                     | 46.9 | 59.4  | 3.046     | 23.27 | 35.15 |
| 落下継続時間 (s)            | 10                                       | 12   | 33.38 | 8.2856    | 13    | 24.5  |
| ノズル位置<br>(床からの高さ, mm) | 400                                      | 400  | 400   | 300       | 400   | 400   |
| ノズル径 (mm)             | 20                                       | 20   | 20    | 20        | 20    | 20    |
| 床板寸法                  | 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                                    |      |       | 5 mm      |       |       |
| 水プール初期液深 (mm)         | 200                                      | 200  | 100   | 100       | 200   | 200   |
| 初期水温 (K)              | 352                                      | 350  | 348   | 369       | 369   | 368   |
| 溶融物中のボイド率 (-)         | 0.29                                     | 0.36 | 0.3   | 0.3       | 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。E6 実験については、落下継続時間と水蒸気爆発の発生タイミングから比例配分して決定した。E8 実験については、初期に落下流量の少ない時間帯があり、その後流量が増加する。これらのタイミングや変化幅はビデオカメラによって撮影された動画を参考に決定した。

E1,E4,E6 実験は床の形状が 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、計算体系は床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,E6 実験：

$$R=\sqrt{1 \times 2/\pi}=0.79788 \div 0.8 \text{ m} \quad (26)$$

E7,E8,E9 実験：

$$R=\sqrt{1 \times 1/\pi} \div 0.565 \text{ m} \quad (27)$$

前述のように E6 実験では水蒸気爆発後の状態を初期条件として計算を行う。そこでプール水深、供給溶融物量は、100 mm、59.4 kg とした。このため、ノズル位置の床からの高さは、E1、E4 実験と同一であるが、水面からの距離は 100mm 長くなる。

床板下面の温度測定データと熱伝導方程式の理論解から推定して、床面と溶融物間の熱抵抗を  $2 \times 10^{-2} \text{ Km}^2/\text{W}$  と推定し、この値を使用した。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、昨年度の解析において、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ため、形成されたクラストは溶融部と同じ速度で流動するというオプションを選択した。

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  $\beta_{in}$  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）。いくつかのケースで  $\beta_{in} = 1$  とした計算（液滴粒子の直径がクラストの厚みより小さければクラストの付着する）と比較したが、結果は変わらなかった。これは、ジェット落下点近傍ではまだクラストが形成されず、また PULiMS 実験では水プール水位が低くジェットから発生した液滴が遠方に飛散しないために、常に溶融部に流入するためである。

表 3.2.2 PULiMS 実験の解析で使した物性値

| 変 数     | タイプ | 説 明                            | Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -WO <sub>3</sub><br>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 <sup>3</sup> ]       | 7811                                                                |
| rhoqli  | 実数  | 液相密度[kg/m <sup>3</sup> ]       | 6876                                                                |
| cpsol   | 実数  | 固相比熱[J/kg/K]                   | 390.6                                                               |
| cpliq   | 実数  | 液相比熱[J/kg/K]                   | 280                                                                 |
| lheat   | 実数  | 凝固潜熱[J/kg]                     | 170E3                                                               |
| lamsol  | 実数  | 固相熱伝導率[W/m/K]                  | 5.3                                                                 |
| lamliq  | 実数  | 液相熱伝導率[W/m/K]                  | 5.3                                                                 |
| viscmm  | 実数  | 粘性係数[Pa・s]                     | 1.5E-2                                                              |
| sftnmm  | 実数  | 表面張力[N/m]                      | 0.18                                                                |
| emssmm  | 実数  | 輻射率[-]                         | 0.7                                                                 |
| cf_visc | 実数  | 粘性係数の温度依存性の係数<br>(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<br>(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<br>(温度の 1 次式の係数)  | 0                                                                   |

表 3.2.3 入力した床ステンレス等の物性値

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

### 3.2.3 解析結果及び実測値の比較

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。各ケースの図出力は付録 B に記載する。

図 3.2.5～3.2.7 は E4 実験に対する解析結果のうち、水プールのボイド率、熔融物の液位・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、熔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、熔融物の拡がりが、0.22m にまで広がっている。熔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 秒では熔融物プールの拡がりは 0.42m に達するが、熔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 秒ではさらに熔融物プールが拡がって 0.5m に達している。すなわち、熔融物供給が停止した後も拡大が進んだ。熔融物が先端部分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 3.2.4 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。昨年度の解析結果では底クラストが表面クラストよりも厚かったが、その点が改良されているのが分かる。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。

E1、E4、E6 実験に対する熔融物拡がりの計算結果をまとめて表 3.2.4 に示す。この表には JASMINE の昨年度作成したバージョンを用いて計算した結果及び今年度作成したモデルのうちボイドの影響を考慮しない計算の結果も併せて示してある。すなわち、昨年度バージョンの結果と今年度ボイドなしの結果の差が床伝熱モデルの差、今年度のボイドの有無の計算の差が、ボイドが熔融物拡がりに与える結果の差ということになる。

熔融物拡がり直径は、ボイドモデルの有無にかかわらず平成 27 年度版の計算結果よりも大きくなっている。床への伝熱モデルを組み込んだことにより、底クラストの成長が遅くなりそのために熔融物の拡がりが大きくなったものである。

E1、E6 のように、ボイドを考慮することにより、拡がりが増える場合もあるが E4 のようにボイドにより、拡がりが抑えられる場合もある。熔融物中のボイドを考慮することにより熔融物の見かけの密度が小さくなり、水による浮力が熔融物拡がりを抑制することを狙ったものであるが、床への伝熱を考慮するとクラストの成長は遅く、供給停止後も熔融物プールの拡大は続き、表面張力と釣り合ったところで拡がりが停止する。ボイドの影響を考えると、見かけ密度に反比例して熔融物体積は増加するのに対して、停止させる表面張力の効果は (25) 式に示すように見かけ密度の平方根に反比例するので、ボイドの効果が少なかったものと考えられる。

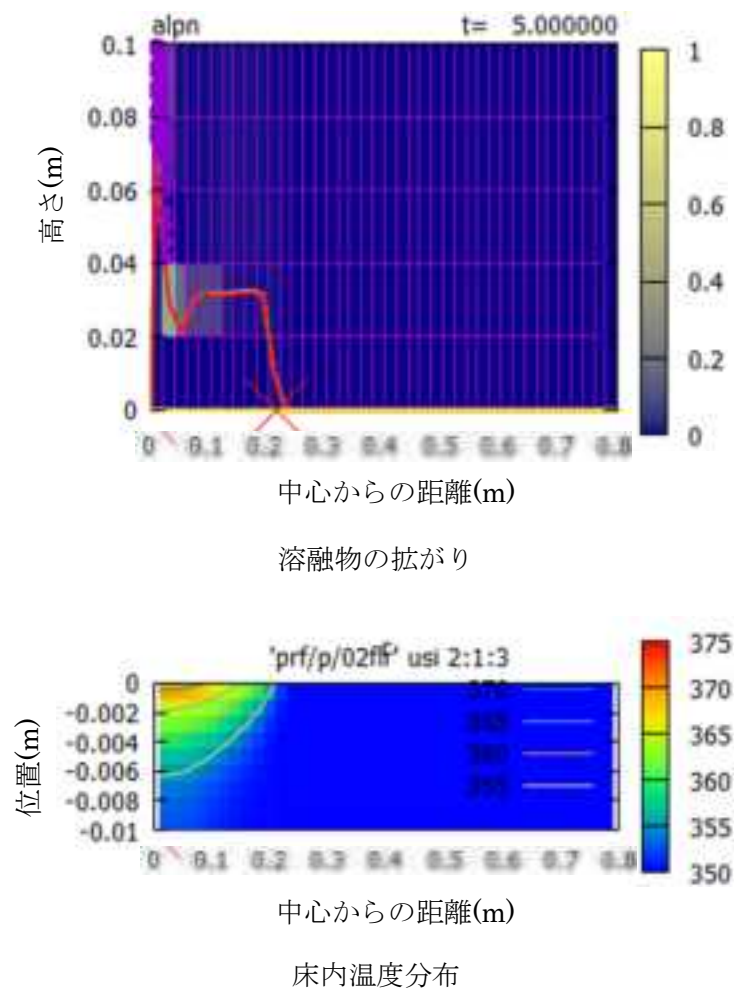
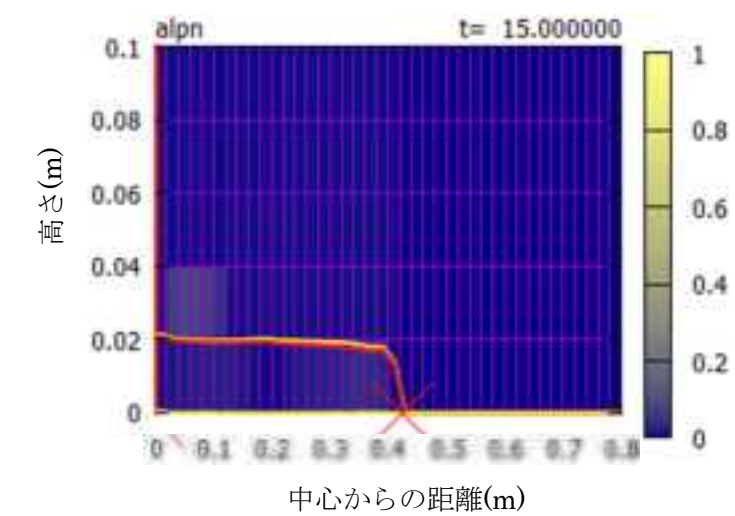
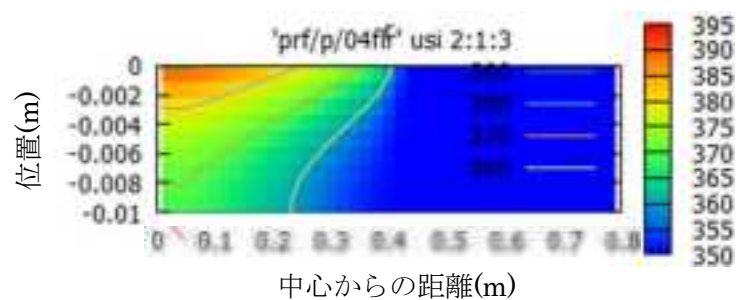


図 3.2.5 E4 実験解析 5 秒後の状況

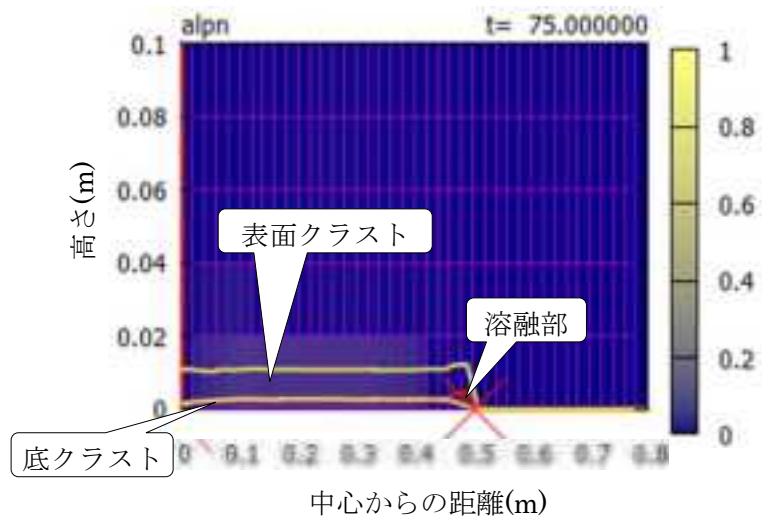


溶融物の拡がり

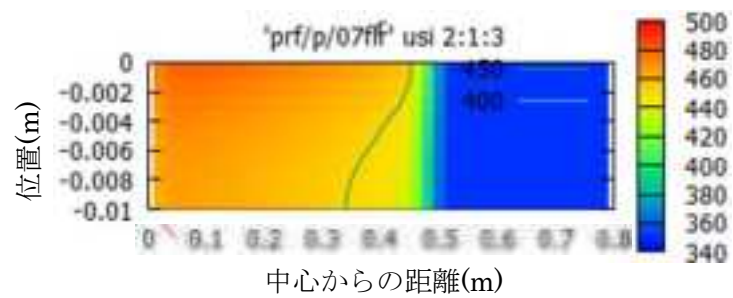


床内温度分布

図 3.2.6 E4 実験解析 15 秒後の状況



熔融物の拡がり



床内温度分布

図 3.2.7 E4 実験解析 75 秒後の状況

表 3.2.4 PULiMS 実験解析 E1~E6 結果のまとめ

| 解析<br>ケース | JASMINE<br>Version |      | JASMINE 解析結果        |                                   |                      | PULiMS 実験値         |                                 |                        |
|-----------|--------------------|------|---------------------|-----------------------------------|----------------------|--------------------|---------------------------------|------------------------|
|           |                    |      | 溶融物<br>拡がり<br>直径(m) | 溶融物<br>拡がり<br>面積(m <sup>2</sup> ) | 溶融物<br>厚さ(m)<br>(平均) | cake<br>拡がり<br>(m) | cake<br>面積<br>(m <sup>2</sup> ) | デブリ<br>厚さ(m)<br>(面積平均) |
| E1        | 平成 27 年度           |      | 0.61                | 0.292                             | 0.0089               | 0.43 × 0.32        | 0.14                            | 0.031                  |
|           | 今年度<br>(床熱伝導)      | ボイド無 | 0.775               | 0.472                             | 0.0055               |                    |                                 |                        |
|           |                    | ボイド有 | 0.794               | 0.495                             | 0.0072               |                    |                                 |                        |
| E4        | 平成 27 年度           |      | 0.81                | 0.518                             | 0.0097               | 0.711×0.471        | 0.30                            | 0.030                  |
|           | 今年度<br>(床熱伝導)      | ボイド無 | 1.019               | 0.816                             | 0.0066               |                    |                                 |                        |
|           |                    | ボイド有 | 1.004               | 0.792                             | 0.0109               |                    |                                 |                        |
| E6        | 平成 27 年度           |      | 0.80                | 0.505                             | 0.0105               | 0.663×0.854        | 0.43                            | 0.030                  |
|           | 今年度<br>(床熱伝導)      | ボイド無 | 1.166               | 1.068                             | 0.0059               |                    |                                 |                        |
|           |                    | ボイド有 | 1.240               | 1.208                             | 0.0076               |                    |                                 |                        |

前述のように E7 実験では、水蒸気爆発が生じたため最終的な溶融物プールの拡がりのデータはなく、E8,E9 実験の最終拡がり測定値は未入手である。そのため、経時的なデータを比較する。図 3.2.8～図 3.2.10 は、実験における熱電対指示値から推定した溶融物到達時刻と溶融物先端位置の変化の計算値をプロットしたものである。図 3.2.8 は、実験 E7 に対するもので水蒸気爆発の生じる 8.28 秒までのデータを示している。溶融物のジェットから生じた液滴が熱電対に到達して温度上昇が生じると実験値ではプロットされるのが、計算上は連続相でないとプールとして扱わないので、初期には計算値の拡がりは小さい。実験値はその方向によってばらつきが大きい、拡がりの拡大速度（グラフの勾配）は、JASMINE と実験とで良く似ているように見える。

図 3.2.9 は実験 E8 に対するもので、この実験では溶融物供給用漏斗の部分閉塞により初期の溶融物落下流量が小さい。そのため初期の拡がり挙動は E7 のものと異なる。この解析でも、溶融物拡がり速度は実験に近い結果を与えている。解析結果は、0.2m 以降も拡がりが継続しているが、実験結果では、表示された熱電対位置の先にある熱電対の指示値が溶融物到達と判定されなかった場合にはプロットされない。すなわち、実験の拡がり速度は解析に近いが、解析よりも早く凝固すると言える。

図 3.2.10 は実験 E9 に対するもので、この実験では中央部にある熱電対の温度上昇開始が遅く、それよりも早く他の位置に溶融物が達していたという結果となっている。実験初期には、対称性のある滑らかなジェットが形成されていなかったと推定される。実験の溶融物拡がり速度（勾配）はバラつきが大きい、解析と著しく異なっているわけではない。

図 3.2.11 と図 3.2.12 は、ステンレス床板裏側の温度の実験値と解析値の比較を示している。比較できる時間が短いため E7 の結果は示していない。溶融物の到達の有無により挙動が全く異なるので溶融物拡がりの範囲が異なる実験と解析とでは直接的な比較は困難であるが、溶融物の到達がはっきりしている E9 の 50mm における温度上昇がほぼ一致していることから、熱抵抗の入力値  $2 \times 10^{-2} \text{ Km}^2/\text{W}$  が妥当であったと言える。

図 3.2.13～図 3.2.16 に水温変化の実験値と解析値の比較を示す。水温は中心からの距離、床からの高さが異なる多数の熱電対で測定されている。中心からの距離が同じものを高さにかかわらず同じグラフに記載している。E8 実験の、距離 300mm ものを図 3.2.13 に、距離 400mm ものを図 3.2.14 に示す。実験値はノイズと思われる細かい振動を示している。解析値はいずれも実験値より低い温度を示している。特に 400mm の結果は差が大きい。

同じく E9 実験に対するものを図 3.2.15 と図 3.2.16 に示す。実験と解析の差の傾向は E8 実験のものと同様である。

### 3.2.4 結果の考察

前記の実験値と解析値の比較の結果をまとめると以下ようになる。

- ① 溶融物の先端の拡がりのグラフの勾配が近いことから、流動に関してはモデルが妥当であると考えられる。
- ② 水温に関しては、JASMINE による解析の結果は、実測値よりもかなり低い。これは、溶融物上面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超小評価している。上記のことから、この理由は溶融物上面の冷却量の過小評価に主因があると言える。
- ④ 溶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。クラストの内部にはボイドがあり熱伝導が一様でないと想像される。このため表面に温度の不均一があると思われる。熱伝達率が一定であれば、温度に不均一があっても合計伝熱量は不変であるが、沸騰現象では、表面の平均温度が極小熱流束点近傍にあるとき、温度の不均一があれば伝熱量は増加する。特に rewetting が生じると、大幅に伝熱量が増加する。

以上のように、PULiMS 実験の結果を再現するためには、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 JASMINE で使用する沸騰曲線を見直すことが必要である。

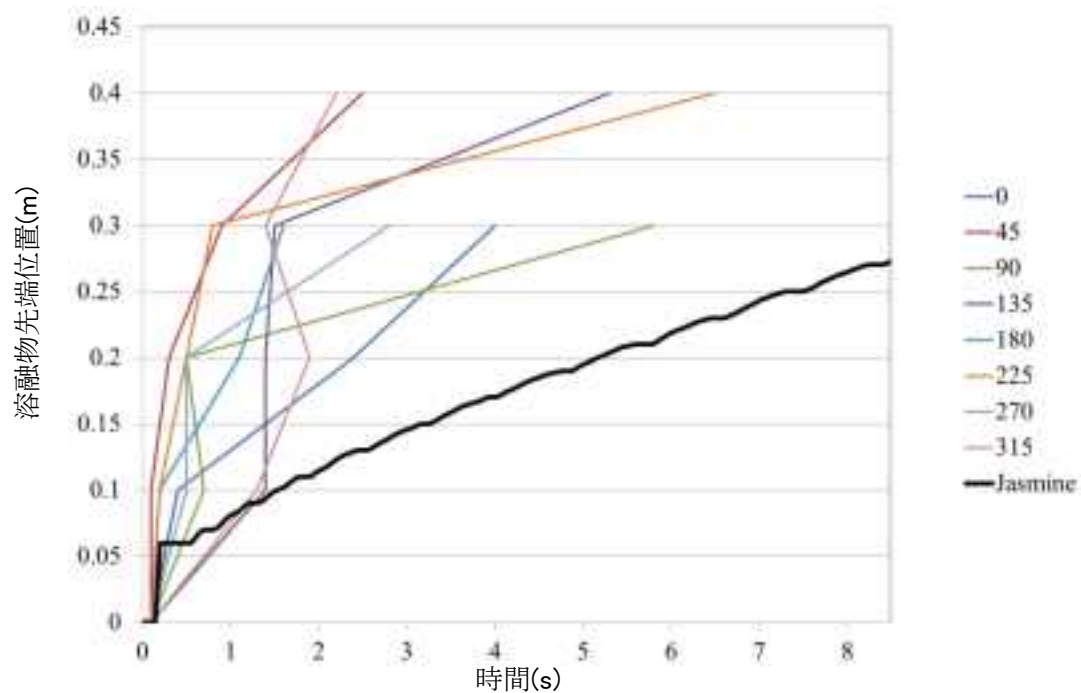


図 3.2.8 溶融物の拡がりの実験結果と解析結果の比較 (E7 実験)

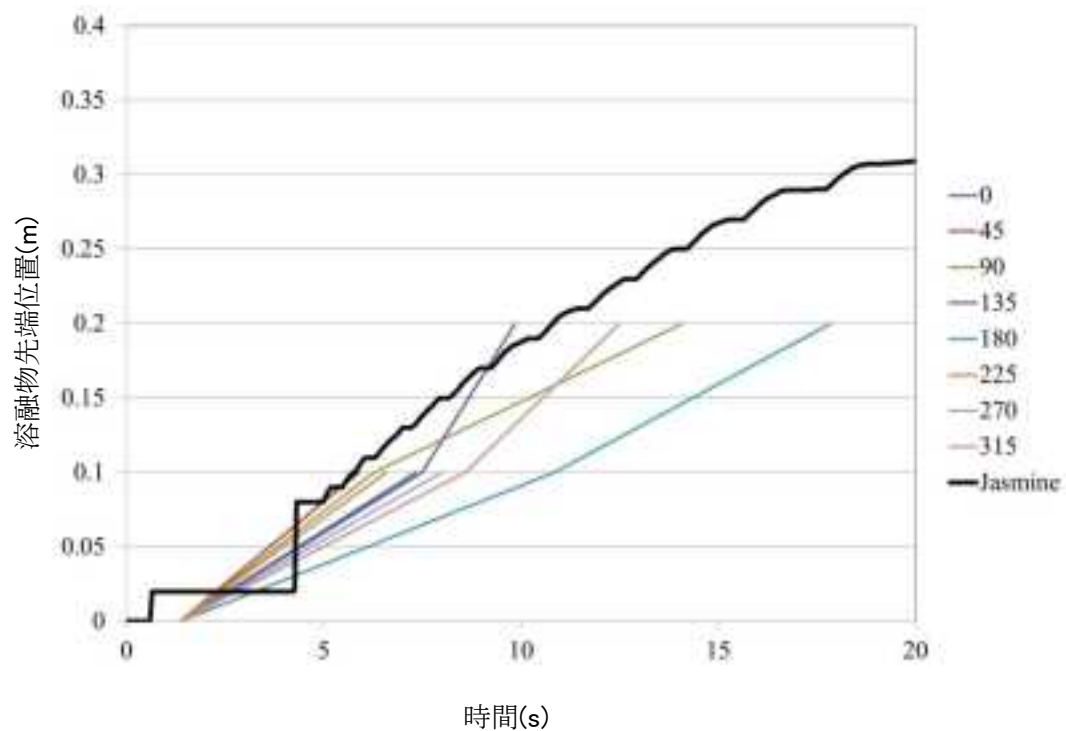


図 3.2.9 溶融物の拡がりの実験結果と解析結果の比較 (E8 実験)

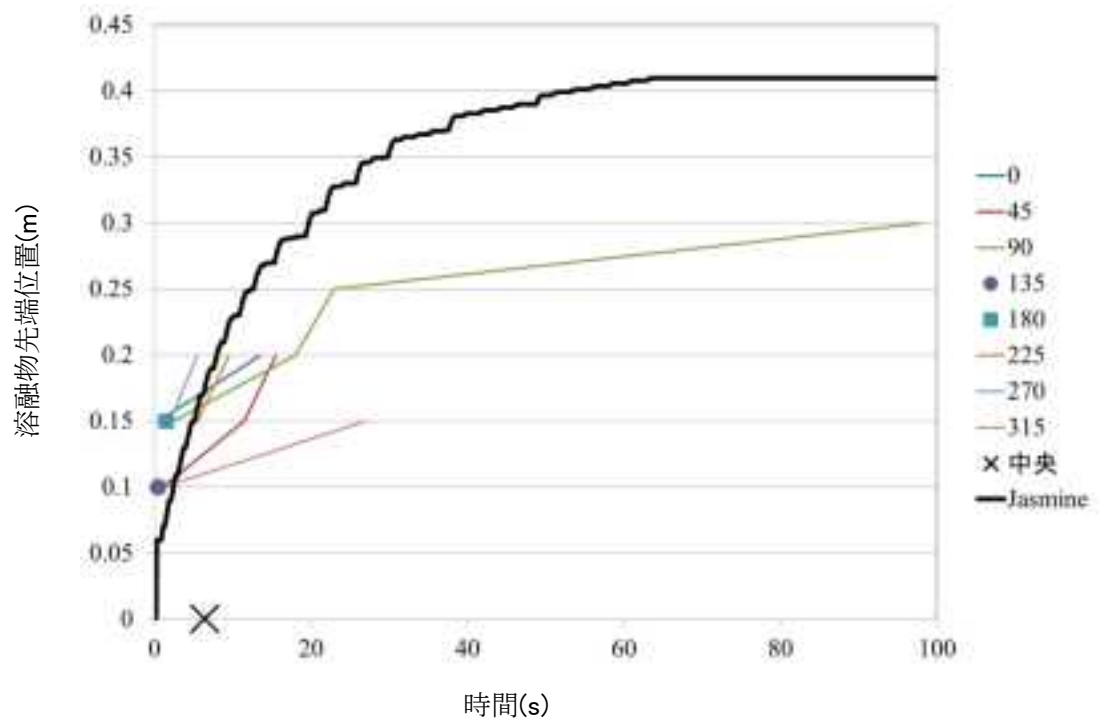


図 3.2.10 溶融物の拡がりの実験結果と解析結果の比較 (E9 実験)

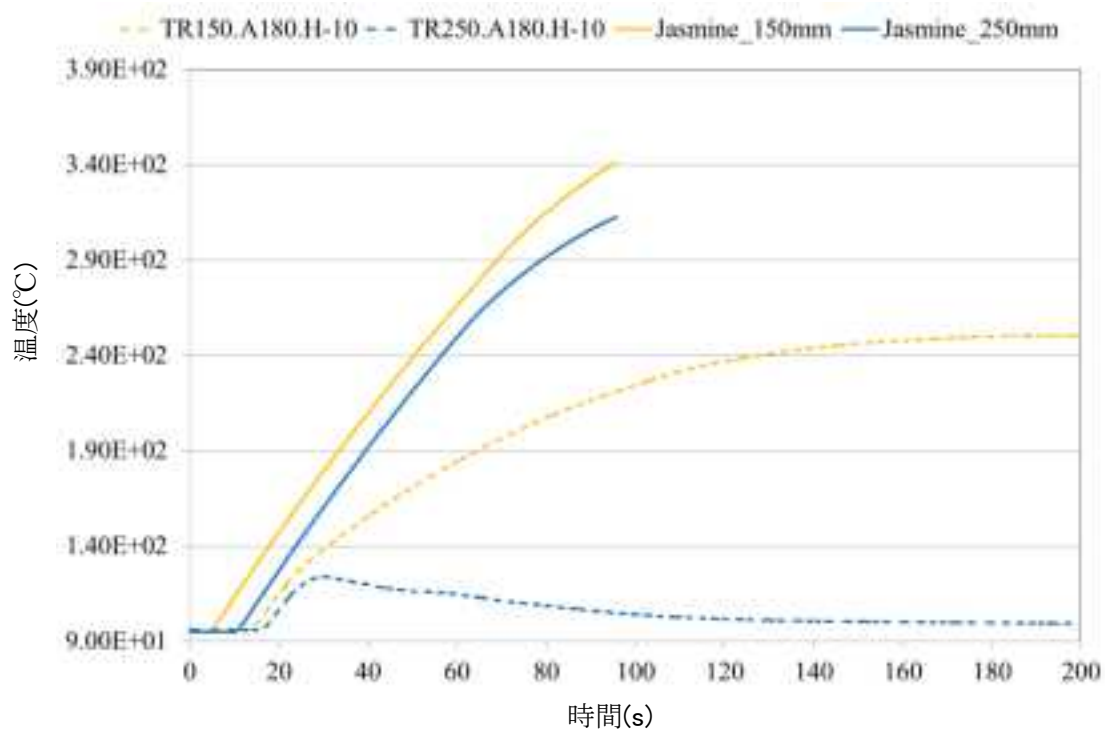


図 3.2.11 ステンレス床板裏側の温度変化 (E8)

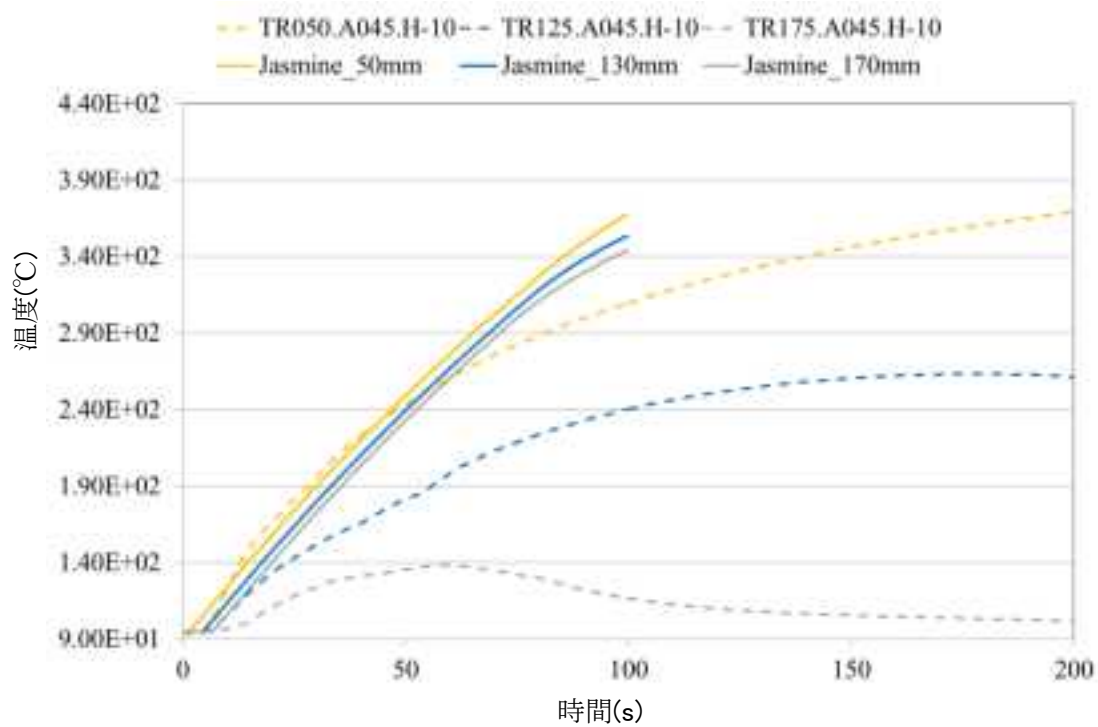


図 3.2.12 ステンレス床板裏側の温度変化 (E9)

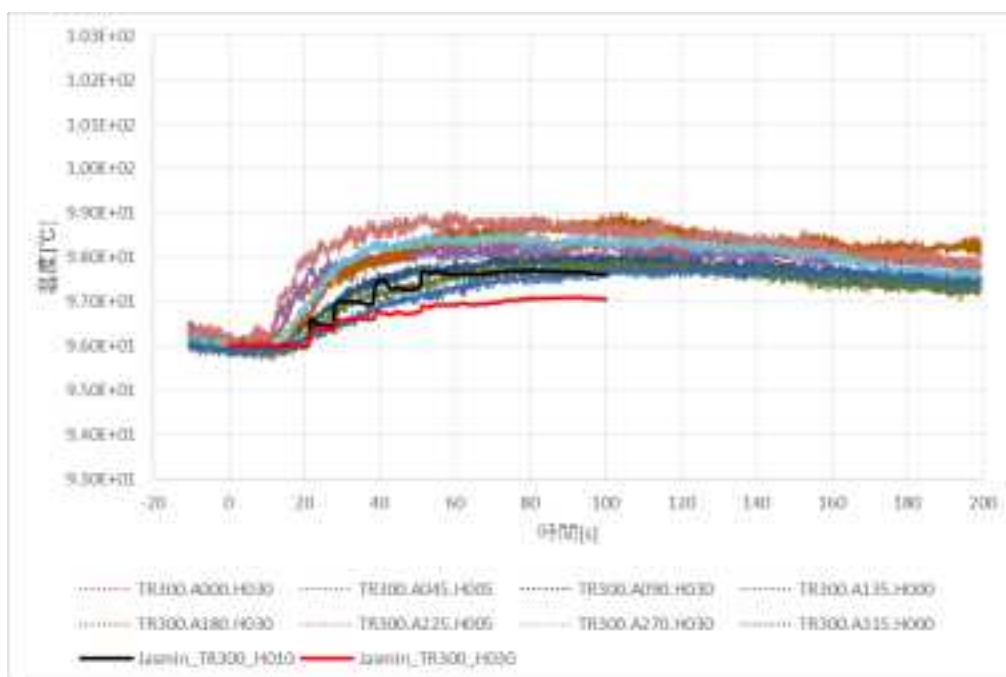


図 3.2.13 水温の比較 E8 実験 中心から 300mm

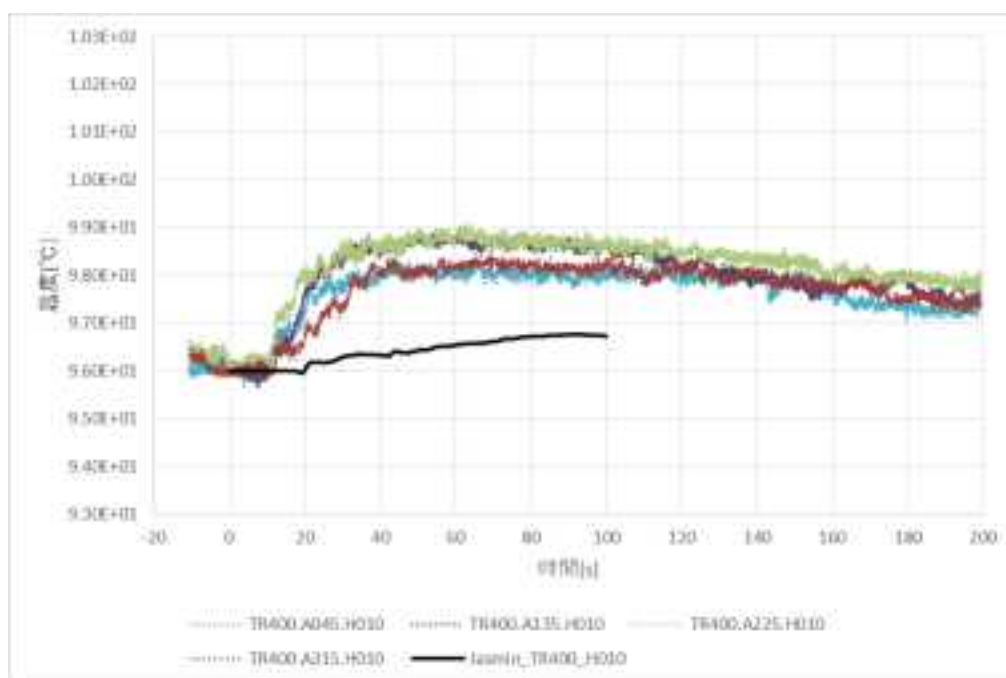


図 3.2.14 水温の比較 E8 実験 中心から 400mm

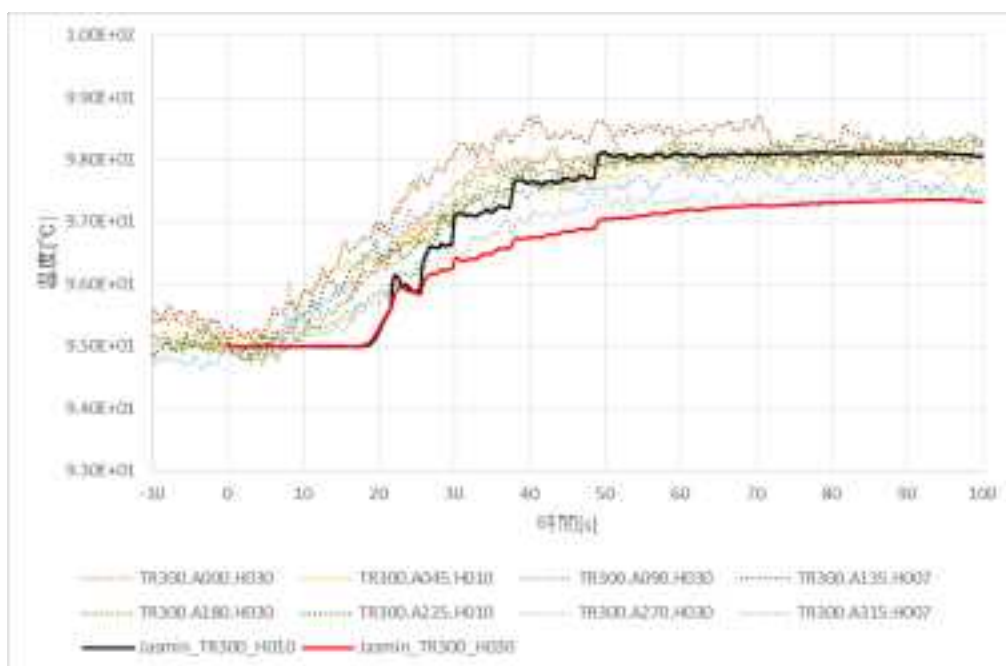


図 3.2.15 水温の比較 E9 実験 中心から 300mm

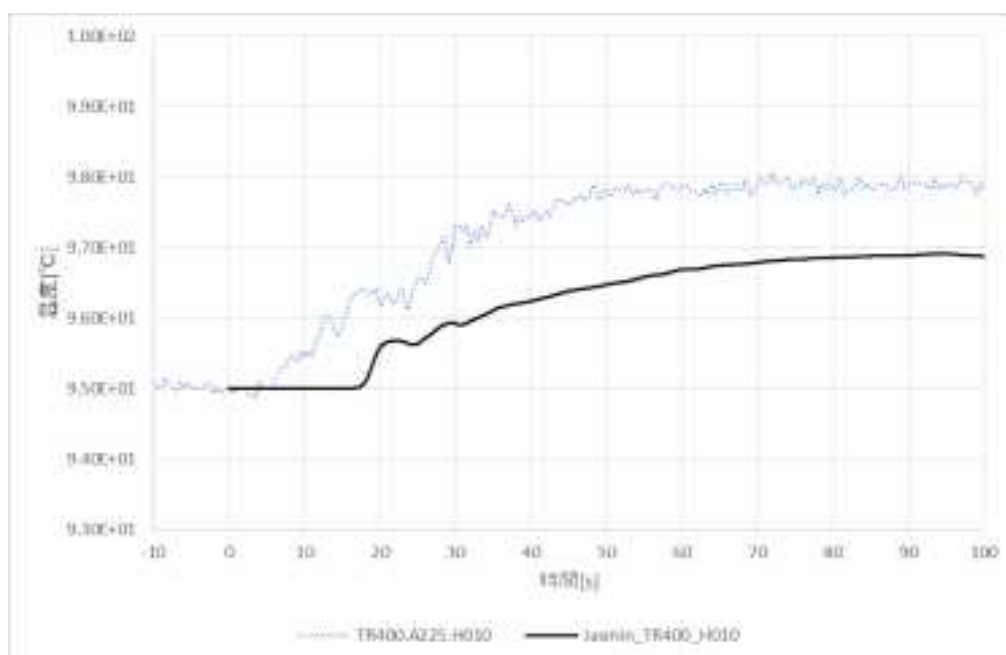


図 3.2.16 水温の比較 E9 実験 中心から 400mm

### 3.3 実機条件での解析

#### 3.3.1 解析対象

特定のプラントを対象とするのではなく、仮想体系を計算対象として入力値を決定するが、実際に近い数値を選定した。想定したプラントは 820 MWe 級の Mark I 改良型格納容器を有する BWR である。床にはサンプピット等はなく水平な平面であるとした。ペデスタル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に近い値とした。また、圧力条件としては格納容器の設計圧を想定した。

JASMINE による溶融物拡がり計算の目的は、床面の熱負荷を求めることであり、溶融物がペデスタル床全面に広がるのではなく局部的に存在する方が床面での最大熱流束が大きくなり溶融炉心・コンクリート相互作用 (MCCI) の観点からはより厳しい条件となる。そこで、溶融物の量は全炉心の溶融落下とし、その他の条件は溶融物になるべく広がらない条件とした。

#### 3.3.2 入力値の説明

##### (1) 体系

解析に使用した主要な条件を表 3.3.1 に示す。溶融物の組成として JASMINE に組み込まれている CORIUM3 を仮定した。これは、 $\text{UO}_2(70\%)\text{-ZrO}_2(30\%)$  の混合物で、液相線温度は 2816 K である。溶融物量は、炉内燃料の  $\text{UO}_2$  保有量と仮定した組成から 157.1 t と計算した。ベースケース (Case1) ではこの溶融物が 500 s で全量落下すると仮定した。溶融物の過熱度は、溶融物の拡がりをなるべく少なく計算するよう 10 K と小さくした。クラストの拘束条件は実験解析の時と同様、溶融物と同じ速度で移動する「流動」を仮定した。

また、ベースケースに加えて次のような考でパラメータを振って合計 5 ケース計算した。

- ・ Case2 : 溶融物落下流量を減らす。総量 157.1 t は維持するので、落下継続時間を 500 s から 1000 s に伸ばす。これにより、流出ノズル径が小さくなる。
- ・ Case3 : ベースケースに対し、「溶融物液滴のうち、クラストへ付着するもの、溶融部へ入っていくものの限界の液滴径を決定する比」を 1.0 とする ( $\beta_{in} = 1.0$ ) (ベースケースでは PULiMS 実験解析の時と同様に  $\beta_{in} = 10^{-12}$  である。)
- ・ Case4 : 溶融物拡がりの極限を見極めるため、水プールの直径を 2 倍 (半径 6m) とする。Case1 では、高さ 9.0m×半径 16.82m の系で計算しているが、全体の寸法は変えずに壁の位置を 6 m の位置にした。そのほかの計算条件 (溶融物落下流量、 $\beta_{in}$  等) はベースケースと同一である。
- ・ Case5 : 膜沸騰熱伝達率 (4倍) と極小熱流束温度 ( $t_{minfb} = 650 \text{ K}$ ) を変えて冷却量向上の影響を調べる。

各ケースのパラメーター一覧を表 3.3.2 に示す。

##### (2) コンクリート物性

床面コンクリートの物性として siliceous concrete を想定して OECD MCCI プロジェクト CCI-3 実験 [3.7] で分析された組成を入力値とした。使用した値を表 3.3.3 に示す。

### (3) 溶融物中のボイド率評価

溶融物中のボイド挙動はドリフトフラックスモデル[3.8]によって記述される。溶融物中を上昇する気相は気泡流となっているとする。一方液相の流れの上下方向成分の平均値は0とする。基本式は、

$$\alpha = \frac{\beta}{C_0 + v_{Gj}/j_T} \quad (28)$$

である。ここで、液相移動がないことから

$$j_T = j_g \quad \beta \equiv j_g/j_T = 1 \quad (29)$$

とする。相関式は Ishii による。すなわち、気泡流で且つ  $\alpha$  は小さいとする。  
これを変形して

$$\alpha = j_g / (C_0 j_g + v_g) \quad (30)$$

$$C_0 = 1.2 - 0.2 \sqrt{\rho_g / \rho_l} \quad (31)$$

$$v_g = \sqrt{2} \{ \sigma g (\rho_l - \rho_g) / \rho_l^2 \}^{1/4} \quad (32)$$

ここで、

$\rho_l$  : 溶融物密度 (CORIUM3) : 7121.6 kg/m<sup>3</sup>

$\rho_g$  : ガス密度 : 0.6735 kg/m<sup>3</sup> (コンクリート中含有率 CO<sub>2</sub> 9.8%、H<sub>2</sub>O 3.7% 及び溶融物状態 2816K、0.5 MPa から計算)

$\sigma$  : 溶融物表面張力 : 0.45 N/m

$g$  : 9.807 m/s<sup>2</sup>

したがって、 $C_0=1.198$ 、 $v_g=0.2231$  m/s とする。

### (4) 熱伝達率の変更

3.2.4節で述べたように表面が平面でない場合には、凹凸の分だけ実効伝熱面積が増し、見かけの熱伝達率が増加する。たとえば、半球状に表面が盛り上がると、平板の場合に比べて表面積は2倍となる(半球の表面積/平板の円の面積)。半球の表面にさらに小さな半球状の凹凸があるとする、最初の平面に比べて4倍の表面積ということになる。

また、高温伝熱面が冷却されていく場合、極小熱流束点よりも低温度になると急速に伝熱量が増し核沸騰に遷移する。今回のように酸化物の溶融物が凝固する場合には表面に凹凸があるだけでなく固相内部に気泡(ボイド)が残るため、表面の熱流束は一定ではない。局所的に核沸騰に遷移した場合には、熱流は低温の核沸騰部分に流れ、近傍の高温の膜沸騰伝熱領域の熱流束が小さくなり沸騰遷移しやすくなる。このため核沸騰領域が拡大・伝播していくと考えられる。

熱伝達率の定量的な値の評価は難しいが、これらの影響を見るためにCase5では、熱伝達率を強制的に4倍とし、極小熱流束点も650 Kと固定した計算を行った。

表 3.3.1 実機解析の条件

| 項目              | 数値                      | パラメータ変更有無                        |
|-----------------|-------------------------|----------------------------------|
| 床直径             | 6 m                     | case4 では 12m                     |
| 上部自由空間容積        | 8000 m <sup>3</sup>     | 固定                               |
| 初期圧力            | 0.5MPa                  | 固定(T <sub>sat</sub> = 424.986 K) |
| 溶融物組成           | CORIUM3                 | 固定                               |
| 溶融物量            | 157.1 t                 | 固定                               |
| 溶融物落下継続時間       | 500 s 1000 s            | 変化                               |
| 溶融物ノズル位置        | 床から 4m                  | 固定                               |
| 溶融物初速           | 5 m/ s                  | 固定                               |
| 溶融物ノズル口径        | ～0.07、～0.1 m            | 変化(落下時間・量から計算)                   |
| 溶融物温度           | 2826 K                  | 固定                               |
| 溶融物発熱量          | 100W/kg                 | 固定                               |
| プール水初期温度        | 300 K                   | 固定                               |
| プール初期水位         | 2 m                     | 固定                               |
| 表面クラストドライアウト熱流束 | 500 k W /m <sup>2</sup> | 固定                               |
| クラスト拘束条件        | 流動 (実験解析と同様)            | 固定                               |

表 3.3.2 実機解析のパラメータ変更値

|              | base case             | case 2                | case 3         | case 4                | case 5                |
|--------------|-----------------------|-----------------------|----------------|-----------------------|-----------------------|
| 流出継続時間       | 500 s                 | 1000 s                | 500 s          | 500 s                 | 1000 s                |
| 粒子のクラスト貫通条件* | $\beta_{in}=10^{-12}$ | $\beta_{in}=10^{-12}$ | $\beta_{in}=1$ | $\beta_{in}=10^{-12}$ | $\beta_{in}=10^{-12}$ |
| 水プール半径       | 3 m                   | 3 m                   | 3 m            | 6 m                   | 3 m                   |
| 熱伝達率         | original              | original              | original       | original              | ×4, tminfb=650        |

\*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。

表 3.3.3 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 <sub>2</sub> O／2.293% |
| 結合水放出              | 688.65 K  | 104.7 kJ/mol                 | H <sub>2</sub> O／1.4%   |
| CO <sub>2</sub> 放出 | 1065.65 K | 167.5 kJ/mol                 | CO <sub>2</sub> ／9.8%   |
| 溶融                 | 1523.15 K | 29.49 kJ/kg(初期コンクリート質量に対する比) |                         |

コンクリート密度：2300 kg/m<sup>3</sup>

コンクリートを溶融するのに必要な熱量：1.72 MJ/kg

### 3.3.3 解析結果

ベースケース (Case1) の計算結果を図 3.3.1～3.3.4 に示す。図 3.3.1 は水プールのボイド率分布、熔融物ジェット・液滴微粒子・プールの状況、床コンクリート内の温度分布の変化を示している。右上の図に示すように熔融物は 100 s 以内に端部にまで達している (約 16 s で到達しており、先端は平均速度 $\sim 0.2\text{m/s}$ で進んだ)。左下は 400 s の状態であり、熔融物プールの液位が深くなっている。また、水プール中での蒸気発生が盛んになるためジェットから発生した液滴微粒子の飛散範囲が広がっているのが分かる。右下は、すでに熔融物落下が終了した 1000 s の状態で、熔融物液位に大きな勾配はなく、わずかに表面クラストが形成されているのが分かる (黄色線が表面クラストの上面であり、赤線が表面クラストと熔融部の境界である)。

図 3.3.2 は水プールの平均温度 (各計算セルの温度の単純平均) の変化を示している。熔融物の落下が継続する間、単調に上昇する。落下が停止した 500 s でわずかに低下するのに見えるのは、計算セルの体積を考慮しない単純平均であるため、中心部にあった高温の水が周辺に移動することによる見かけの変動である。

図 3.3.3 は、水プール中のボイド率分布の変化を示したものである。ボイド率の計算では一様な気泡上昇速度の定常状態を仮定した計算のため高さ方向の分布はない。100 s では、周辺部 ( $>2.5\text{m}$ ) のボイド率が高いが、これは、熔融物の到達が遅くガス発生量が多いためである。時間の経過とともにこの差はなくなり、全体のボイド率もゆるやかに低下してゆく。

図 3.3.4 は、Case2 の結果を示したものである。落下流量が Case1 の半分であるが、短時間で端部にまで達するという点で変わりはなく、落下が終了する 1000 s 後の状態も Case1 とほぼ同様である。

図 3.3.5 と図 3.3.6 に Case3 の結果を示す。これは Case1 と同じ入力値で、熔融物液滴のクラストへの付着条件を変更したものである。右側に、クラストの挙動を見やすくするために縦軸を拡大した図を示す。100 s までは、Case1 とほぼ同様であるが、200 s では落下してきた熔融物が付着することにより 0.3～1.5m位置のクラストが厚くなっている。クラストが薄い場合には大きな粒径の粒子は貫通してしまうため、中心部のクラストは成長が遅く薄い。固相の密度は熔融物液相の密度と大きく異ならないため表面クラストの上面の高さはほぼ水平であり、クラストは下へ成長する。

中心部にも最大液滴径よりも厚いクラストが形成されると 249 s の図に示されるように急速に成長速度が増し、図 3.3.6 の 258 s の図にみられるように表面クラストと底クラストが接触し、クラストは移動しなくなる。熔融部がなくなりクラストの移動が妨げられると、液滴粒子はクラスト上に堆積してクラストは上方に成長する。さらに 400 s にみられるように熔融物の流れもなくなり中央部だけが高くなる計算となり、熔融物ノズル高さまで達すると計算は意味を持たなくなる。

図 3.3.7 は、床半径を 6mに拡大した計算であるが、熔融物プールの拡大は停止されず 77.8 s で端部にまで達している。熔融物液深はベースケースに比べて小さくなるが全体の挙動は Case1 に近い。

図 3.3.8 は、熱伝達を増加させた計算であるがこれも途中で凝固することなく端部にまで達している。同じ入力条件の Case2 と比較するとクラストの厚みがやや大きい著しい差ではない。クラストの厚みが外周部で大きくなるのはクラストが次第に成長しながら外側に流れてゆき端部で停止することにより溜まるからである。

### 3.3.4 結果の検討

今回の計算では、途中での凝固による流動停止はなく、いずれも端部まで溶融物プールが広がった。この中で注目されるのは Case3 である。このケースでは約 250 s で、表面クラストが底クラストと接し、クラストが固着することにより中央部に落下物が堆積するという結果となっている。この過程が JASMINE に期待される溶融物の拡がりの抑制現象の一部を表していると考えられるが、現在のモデルは次の点で現実と異なっている。

- ① 現在の JASMINE のクラストモデルは、内部の温度分布・組成の変化を厳密に扱っておらず、温度分布は 2 次関数で表されるとしている。到達する粒子は、その質量と熱量がクラストに与えられるという計算となっている。実際には、液相が大きな割合を占める粒子の場合には、液相は移動すると考えられるのでどのようなモデルが適切か不明である。また、冷却が進んだ粒子の場合には粒子状デブリベッドを形成すると考えられ、この場合の冷却は、現在の仮定よりも容易となる。ただしいずれの場合も表面クラスト上に粒子が乗るとその荷重はクラストを押し下げるように作用し、クラストが下方に成長するという現在の解析は妥当と思われる。
- ② 表面クラストと底クラストが接触し、溶融部の流動を妨げると中央部に溶融物が堆積する。ある程度の高さに達すればその上の表面クラストを破壊してさらに流れ出すはずであるが、現在の JASMINE では考慮されていない。
- ③ 溶融部に流入した粒子は現在の JASMINE では直ちに溶融部と混合均一になると仮定しているが、粒子表面の固化が進んでいれば融解までにある程度の時間が必要である。プール内に入った半固化液滴（表面の固化した溶融物液滴）が流動に及ぼす影響（スラリーのような Bingham 流体の挙動を示すと想像される）などのモデル化が必要となると推定される。

このほか次の点を確認する必要がある。

- ④ PULiMS が再現できる沸騰熱伝達評価式を得て、本解析に適用する。
- ⑤ アグロメレーションの形成から流動化までの現象など、溶融物液滴が床面上に落下してからプールを形成する過程を再検討する。

### 3.4 技術的課題

JASMINE コードの溶融物プールの計算モデルを改良し、溶融物拡がり現象の解析精度を向上させた。今回の作業では、床内部の熱伝導現象をモデルに入れるとともに、溶融物中のボイド率が流動に及ぼす影響について評価できるようにした。

KTH で行われた PULiMS 実験 E1,E4,E6,E7,E8,E9 の 6 ケースの解析を行い、溶融物の拡がりを実験値と比較した。その結果

- (1) JASMINE による溶融物拡がり、実験値よりもかなり大きくなる。
- (2) 拡がり速度において、実験と解析とで著しい差はみられなかった。
- (3) 水の温度上昇を JASMINE は過小評価する。
- (4) このことから、解析における溶融物の最終的な拡がりの過大評価の原因は、主として水プールへの伝熱評価にあると考えられる。

現在の水プールへの伝熱評価式や蒸気表物性値関数は JASMINE 作成当初のものを踏襲している。これらの点の改良が PULiMS 実験の再現に必要と推定される。

また、実機条件での解析を行い落下流量、液滴粒子のクラスト貫通条件、熱伝達条件等を変えて計算した。いずれも、溶融物の拡がり、端部にまで達したが、粒子径がクラスト厚さより小さければクラスト上に付着する条件では、クラストの成長により溶融物の流動が妨げられるという結果が得られた。これにより溶融物が中央部に堆積するという結果となったが、この過程で考慮されていない現象も多く正確な解析にはモデルの改良が必要である。

以上の研究で得られた今後の検討課題をまとめると以下ようになる。

#### 3.4.1 熱伝達率関連式

- ① 凝固した面に生じる凹凸大きさの評価とそれに対する沸騰熱伝達評価式の見直し。
- ② セラミック、多孔質物質、凹凸のある表面に対する rewetting 条件の見直し。

#### 3.4.2 流動モデル上の問題

- ① クラスト厚さ方向温度分布、ポロシティ分布の考慮
- ② 表面クラストと底クラストが接触した後の流動の考慮。
- ③ 溶融物液滴が床面上に落下してからプールを形成する過程を再検討する。例えば液滴固化物が溶融物中に流入することにより、溶融物がスラリーとなり流動抵抗が著しく増す。この現象を組み込むことが考えられる。
- ④ 軸対称でないことによる伝熱の変化（例えば火山の溶岩はトンネルを形成してその内部を進み、噴火口から軸対称に伝熱現象が生じるわけではない。この場合、不均一性による沸騰熱伝達の向上と同じ現象が生じる。）の影響の評価。

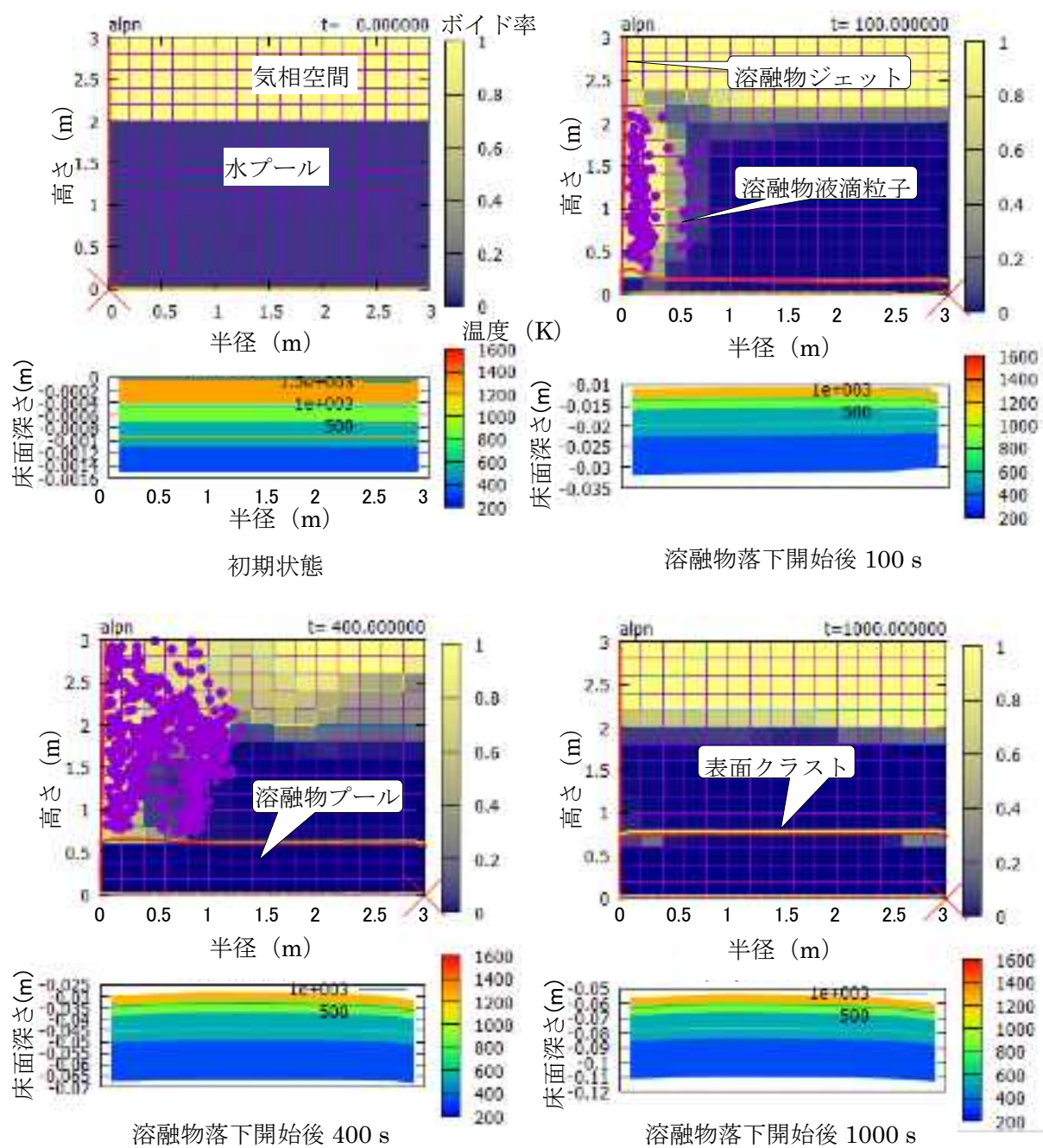


図 3.3.1 Case1 炉心溶融物の拡がり と床温度変化

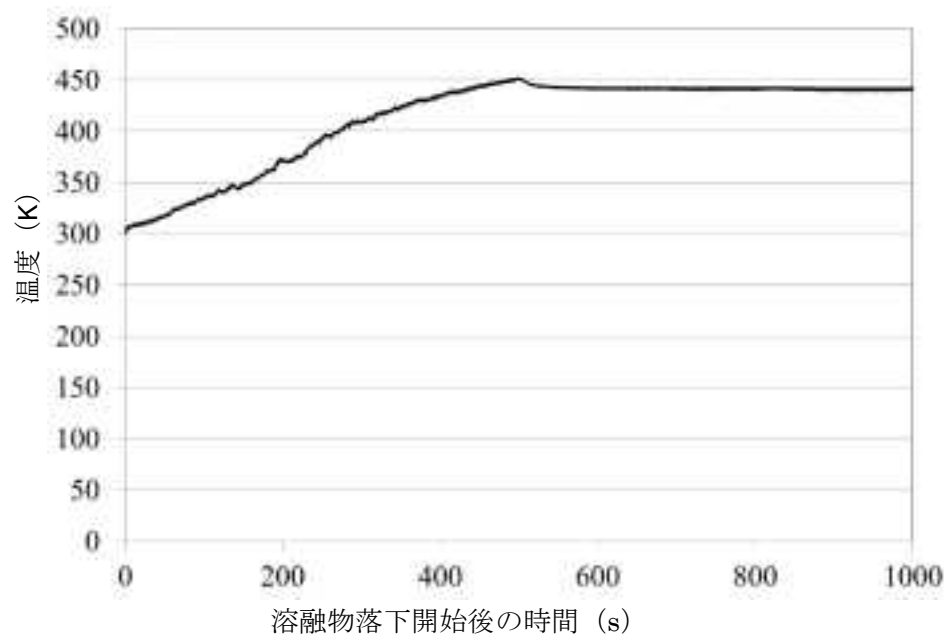


図 3.3.2 Case1 水プールの温度変化

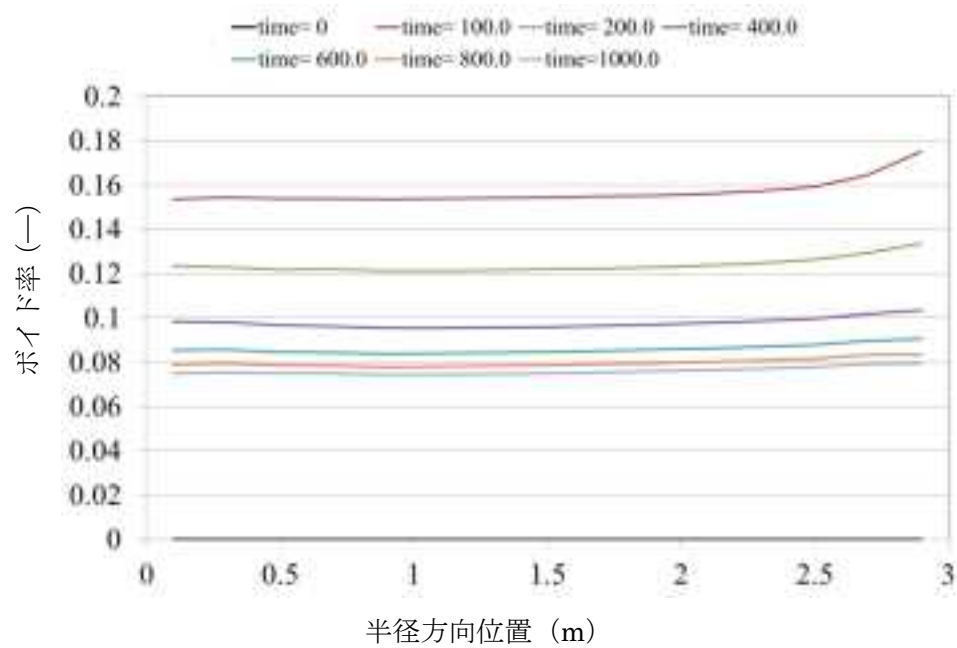


図 3.3.3 Case1 溶融物中のボイド率の分布

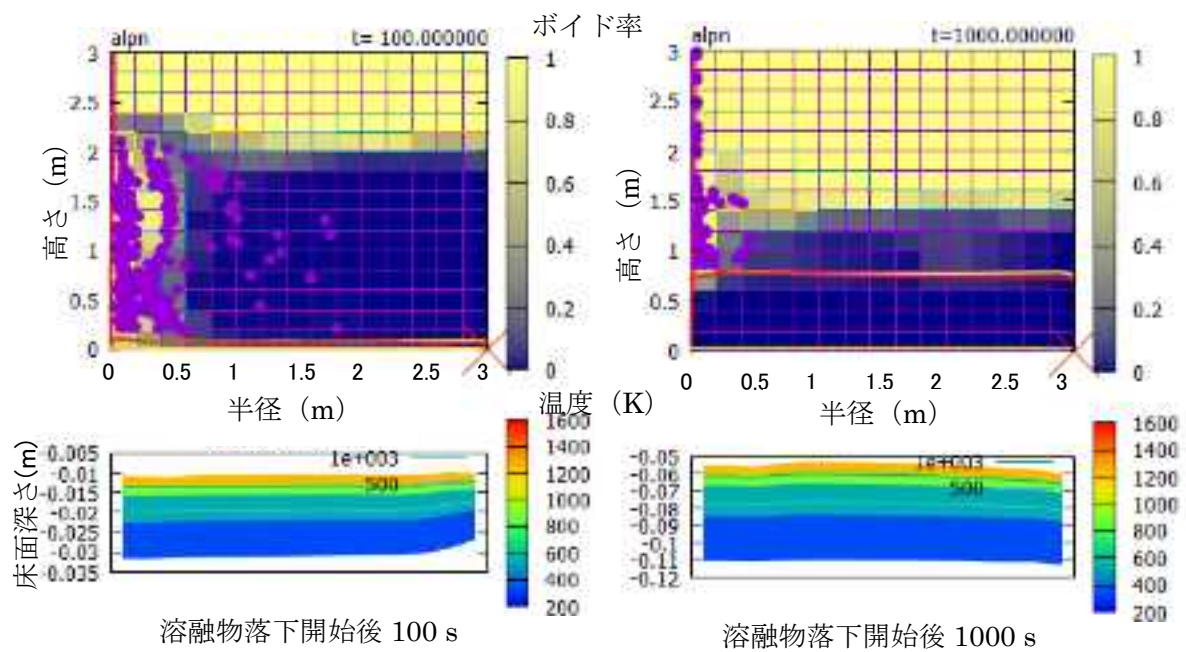


図 3.3.4 Case2 炉心溶融物の拡がりと床温度変化

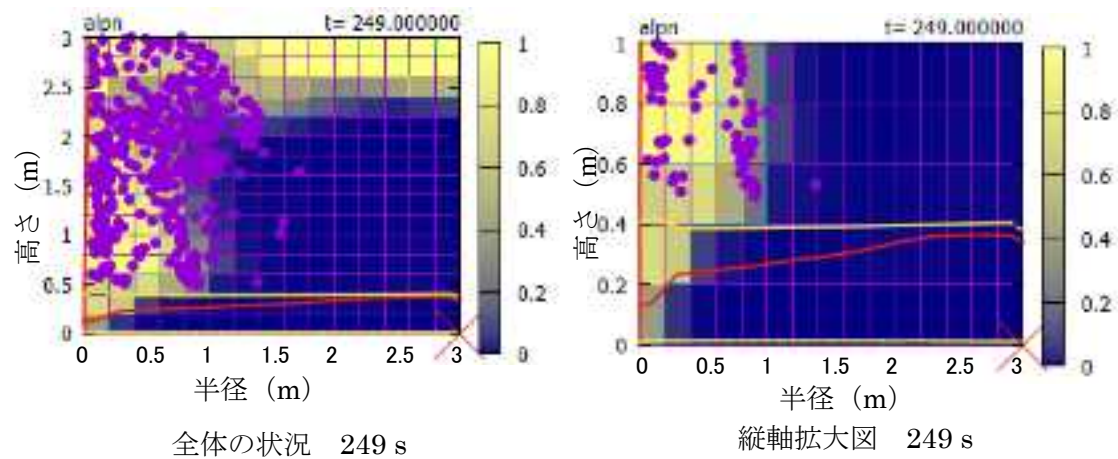
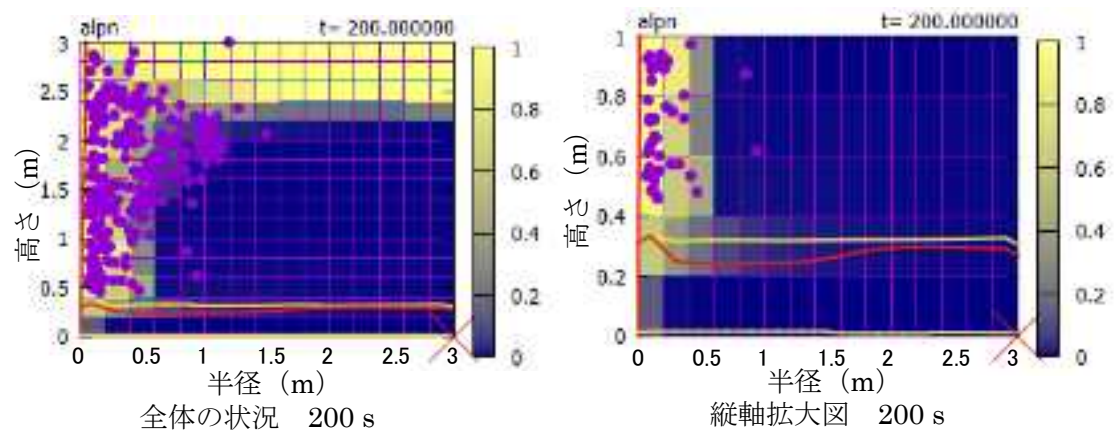
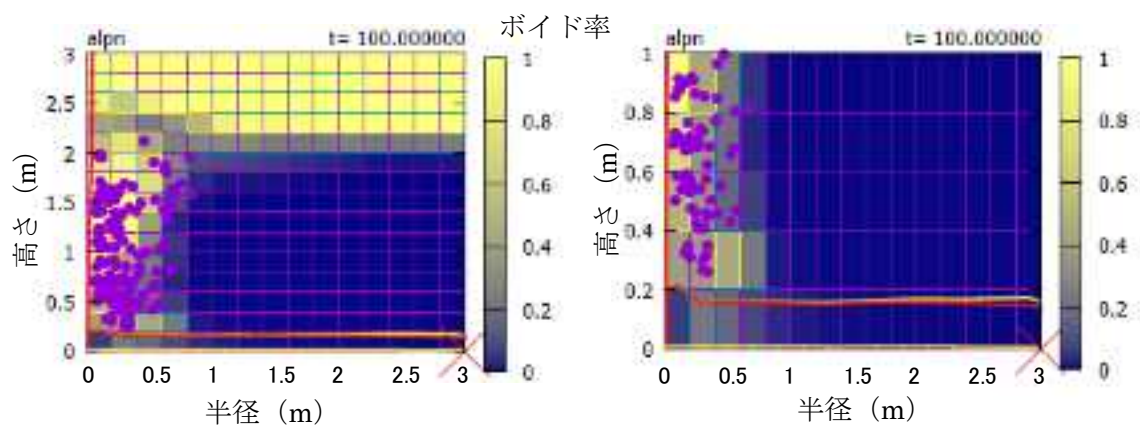


図 3.3.5 Case3 炉心溶融物の拡がり(100 s~249 s)

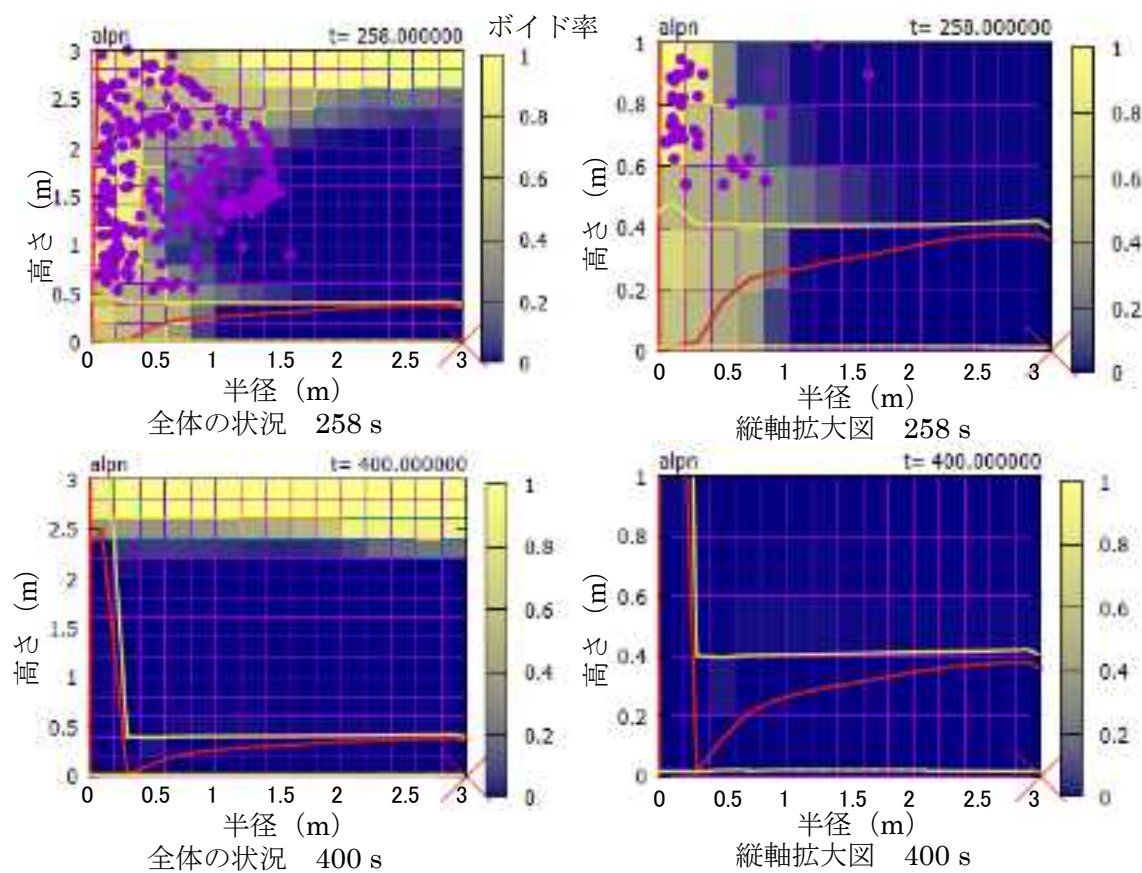


図 3.3.6 Case3 (続き) 炉心溶融物の拡がり(258s~400s)

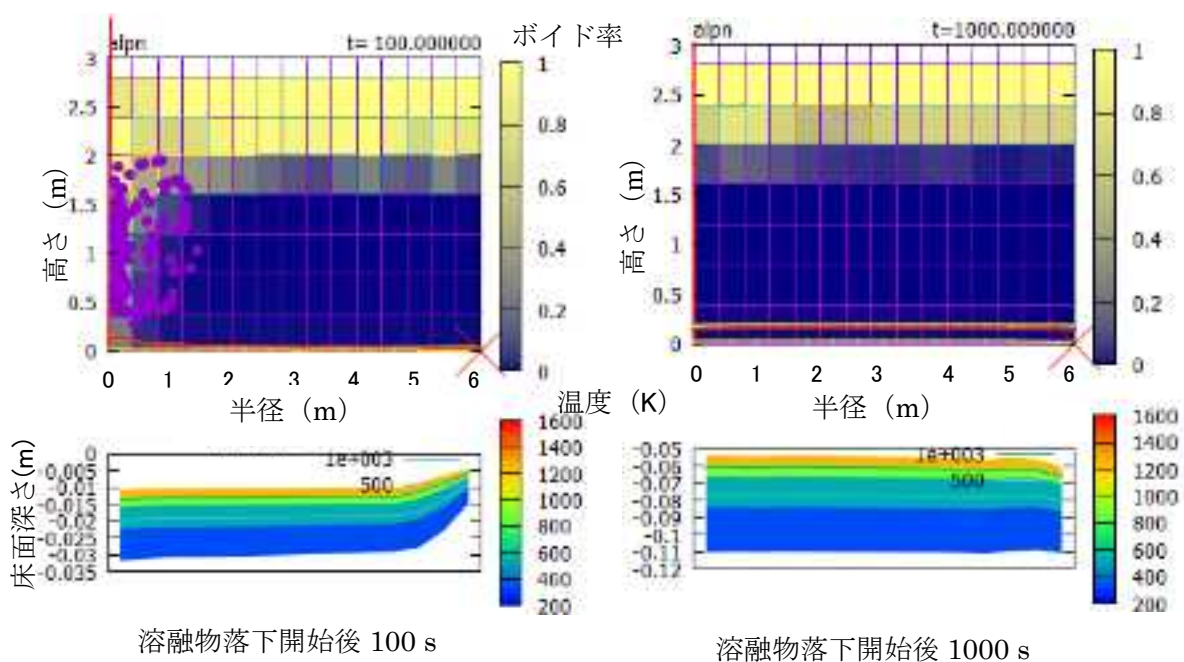


図 3.3.7 Case4 炉心溶融物の拡がりと床温度変化

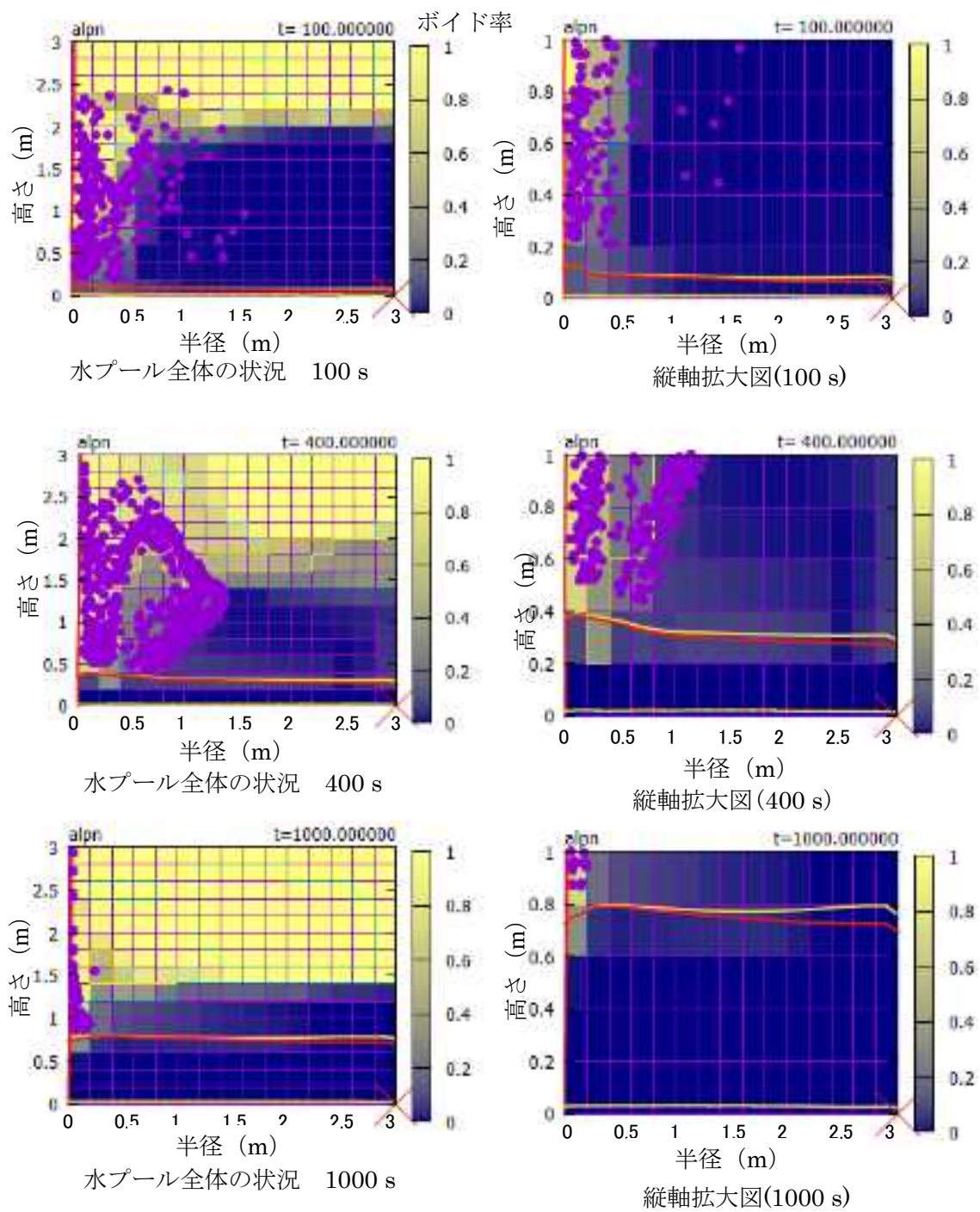


図 3.3.8 Case5 炉心溶融物の拡がり

## 参考文献

- [3.1] S. Lomperski, M. T. Farmer, “Experimental evaluation of the water ingression mechanism for corium cooling”, Nucl. Eng. Des. vol. 237, issue 9, (May 2007) 905-917.
- [3.2] 独立行政法人原子力安全基盤機構, “軽水炉のアクシデントマネジメントに係る知識ベースの整備”, JNES 安全研究年報 (平成 23 年度), 平成 24 年 8 月, p.308
- [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] P. Kudinov et al., “Investigation of Steam Explosion in Stratified Melt-Coolant Configuration”, NUTHOS-10, Okinawa, Japan, (Dec. 2014), NUTHOS10-1316
- [3.5] 秋葉、森田、堀田, “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) 溶融炉心の床上平拡がりに関する実験”, 日本原子力学会 2016 年秋の大会予稿集 (2016 年 9 月), 2 E16
- [3.6] 日本機械学会, “伝熱工学資料 改訂第 5 版”, 丸善、2009
- [3.7] 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
- [3.8] 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. 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）モデルの導入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、実機条件の解析に対する適用を試みた。主要な成果は以下のとおりである。

##### 4.1 溶融炉心ジェットブレイクアップ及びアグロメレーション

JASMINE コードを用いて、スウェーデン王立工科大学（KTH）で行われた高温溶融酸化物ジェットのブレイクアップ現象を対象とした DEFOR-A 実験の解析を行った。この解析では、ブレイクアップにより生じた粒子におけるアグロメレーション割合（粒子同士が結合して塊状になる割合）に着目したため、解析実施に先立ちアグロメレーション発生モデルを JASMINE コードに追加した。このモデルは、床面または溶融物プールの上面クラストの上に落下した溶融粒子について、落下点近傍の粒子との接触状態や粒子温度からアグロメレーションの発生を判定するものである。DEFOR-A2 実験の結果に基づきアグロメレーション判定基準（接触状態に関するしきい値）を決定し、その他の DEFOR-A 実験の解析に適用した。水プールの水深とアグロメレーション質量割合の関係を整理した結果、水深の増大に伴いアグロメレーション割合が急激に低下するという実験結果を同様の傾向が再現された。また、同じアグロメレーション判定基準を用いて BWR 実機条件に対する試解析を実施した。解析結果により、水深が大きいほどアグロメレーションデブリ及び連続層状デブリの合計が低下する、すなわち粒子状デブリの割合が増加し、溶融炉心の冷却性が向上するという傾向が確認された。

アグロメレーションモデルによる実験結果の再現性及び実機適用時の信頼性を向上するために、アグロメレーション判定基準や熱伝達のさらなる検討、溶融物プール上面のクラスト上で生成されるアグロメレーションデブリの性状把握等が必要と考えられる。

##### 4.2 プール床面上における溶融炉心の拡がり

格納容器床上の水プール中に溶融物が落下した時の溶融物の拡がり現象を解明するため、JASMINE コードの溶融物プール計算モデルの改良を進め、KTH で行われた PULiMS 実験の解析及び BWR でのシビアアクシデントを想定した条件での解析を行った。

主な改良点は、以下のとおりである。

- ① 溶融物と床の接触点温度を正確に評価するため床内熱伝導を解析するようにした。
- ② 床または溶融物から発生したガスによる溶融物中ボイドの浮力を考慮するようにした。

PULiMS 実験について 6 ケース (E1, E4, E6, E7, E8, E9) を解析し、観察結果と比較したところ、

- (1) 改良前よりも床面への伝熱量が減り、底クラストの厚みを表面クラストよりも小さく評価するようになった。これは観察結果と合致する。
- (2) 溶融部先端の進展速度は実験結果と概ね一致した。
- (3) 溶融物中ボイドが拡がりの大きさに及ぼす影響はほとんど見られなかった。
- (4) 最終的な溶融物の拡がりを過大評価した。
- (5) プール水の温度上昇を実験結果よりも過小評価した。

以上のことから、JASMINE コードによる溶融物拡がり過大評価の原因は、溶融物の流動モデルにあるのではなく、溶融物からプール水への熱伝達評価モデルにあると推定される。

BWR 実機条件 5 ケースの解析を行った。基本ケースにおいて溶融物が床周辺部に到達したことから、床半径を 2 倍にする、溶融物－水間の熱伝達率を 4 倍にする等、拡がりが止まりやすい条件を試したが、いずれの場合も早期に溶融物が床周辺部に到達した。

また、ある半径において表面クラスト上に多くの粒子が堆積し、重さで表面クラストと底クラストが接触すると、そこで溶融物の流動が妨げられるという結果が得られた。現実には、溶融物が上面クラストを破壊し、接触部を乗り越えて拡がると考えられるが、現在のモデルは対応していない。

以上の解析結果から JASMINE コードの改良課題として次の項目が挙げられる。

- (a) 溶融物と水プールの伝熱モデルの検討：凝固した溶融物の表面には多くの凹凸が生じ、伝熱に寄与する実効的な表面積が大きくなる。また、rewetting 条件も変化すると考えられる。
- (b) 表面クラストと底クラストの接触が生じる場合の取扱いの検討：現在のモデルでは溶融物プールの中央部で不自然に溶融物が堆積することになるため、より現実的な結果を得るための検討が必要である。

## 付録 A 溶融炉心ジェットブレイクアップ及びアグロメレーション解析結果

2 章「溶融炉心ジェットブレイクアップ及びアグロメレーション」において実施した JASMINE コードによる DEFOR-A 実験解析及び実機規模解析の結果を掲載する。掲載対象は DEFOR-A1~9 実験（うち A2 は本文掲載、A3 は解析対象外）、A23~25 実験及び実機規模解析ケース 1~6 の結果である。なお、DEFOR-A 解析については 4 つのキャッチャー深さの結果を示す。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。

### 掲載データ

- ・質量バランス及びエネルギーバランス表
- ・デブリの状態別質量の履歴
- ・水・水蒸気の質量履歴
- ・各エネルギーの履歴
- ・ボイド率及び溶融物粒子分布図
- ・水位履歴
- ・溶融物から水への積算熱移行量

以下は掲載データの目次である。

|      |                                                     |       |
|------|-----------------------------------------------------|-------|
| A2-1 | DEFOR-A2 ( $\phi_{lim} = 0.1$ , $k_{qhtr} = 0.8$ )  | A-2   |
| A2-2 | DEFOR-A2 ( $\phi_{lim} = 0.5$ , $k_{qhtr} = 0.8$ )  | A-18  |
| A2-3 | DEFOR-A2 ( $\phi_{lim} = 0.8$ , $k_{qhtr} = 0.8$ )  | A-34  |
| A2-4 | DEFOR-A2 ( $\phi_{lim} = 1.5$ , $k_{qhtr} = 0.8$ )  | 本文に掲載 |
| A2-5 | DEFOR-A2 ( $\phi_{lim} = 2$ , $k_{qhtr} = 0.8$ )    | A-50  |
| A2-6 | DEFOR-A2 ( $\phi_{lim} = 1.5$ , $k_{qhtr} = 0.9$ )  | A-66  |
| A2-7 | DEFOR-A2 ( $\phi_{lim} = 1.5$ , $k_{qhtr} = 0.95$ ) | A-82  |
| A23  | DEFOR-A23 ( $\phi_{lim} = 1.5$ , $k_{qhtr} = 0.8$ ) | A-98  |
| A24  | DEFOR-A24 ( $\phi_{lim} = 1.5$ , $k_{qhtr} = 0.8$ ) | A-114 |
| A25  | DEFOR-A25 ( $\phi_{lim} = 1.5$ , $k_{qhtr} = 0.8$ ) | A-130 |
| J1   | 実機規模ケース 1 (初期水位 2.0[m], 溶融物落下量 148.7[t])            | A-146 |
| J2   | 実機規模ケース 2 (初期水位 3.0[m], 溶融物落下量 148.7[t])            | A-150 |
| J3   | 実機規模ケース 3 (初期水位 4.0[m], 溶融物落下量 148.7[t])            | A-154 |
| J4   | 実機規模ケース 4 (初期水位 2.0[m], 溶融物落下量 74.35[t])            | A-158 |
| J5   | 実機規模ケース 5 (初期水位 3.0[m], 溶融物落下量 74.35 [t])           | A-162 |
| J6   | 実機規模ケース 6 (初期水位 4.0[m], 溶融物落下量 74.35 [t])           | A-166 |

A2-1 DEFOR-A2 ( $\phi_{\text{im}} = 0.1$ ,  $k_{\text{qht}} = 0.8$ )

キャッチャー1

表 A2-1.1 質量バランス及びエネルギーバランス (A2-1 キャッチャー1)

| 時刻                  | 0 s      | 1 s       | 21 s      | 21 s-0 s  |
|---------------------|----------|-----------|-----------|-----------|
| 溶融物の質量バランス [kg]     |          |           |           |           |
| ジェット                | 0.000    | 0.240     | 0.000     |           |
| プール                 | 0.000    | 0.013     | 0.023     |           |
| 粒子                  | 0.000    | 18.384    | 20.468    |           |
| 合計                  | 0.000    | 18.637    | 20.490    |           |
| (粒子のうちアグロメレーションした分) | 0.000    | 8.224     | 10.112    |           |
| 水、蒸気の質量バランス [kg]    |          |           |           |           |
| 水                   | 2.138    | 2.117     | 2.106     |           |
| 蒸気                  | 0.000    | 0.013     | 0.022     |           |
| 合計                  | 2.138    | 2.129     | 2.127     |           |
| エネルギーバランス [J]       |          |           |           |           |
| 水の内部エネルギー           | 831440   | 842720    | 834500    | 3060      |
| 蒸気の内部エネルギー          | 0.295    | 30705.000 | 53757.000 | 53756.705 |
| 非凝縮性ガスの内部エネルギー      | 41537.0  | 45440.0   | 47645.0   | 6108.0    |
| 溶融物の内部エネルギー         | 0.000    | 140790.0  | 141950.0  | 141950.0  |
| 流体の運動エネルギー          | 0.000    | 0.092     | 0.023     | 0.023     |
| 合計                  | 872977.3 | 1059655.1 | 1077852.0 | 204874.7  |
| エネルギーの増加量           | 0.0      | 186677.8  | 204874.7  |           |
| 流入溶融物のエンタルピー        | 0.0      | 191407.9  | 210437.4  |           |
| 誤差                  | 0.0      | -4730.1   | -5562.7   |           |
|                     | 0.00%    | -0.45%    | -0.52%    |           |

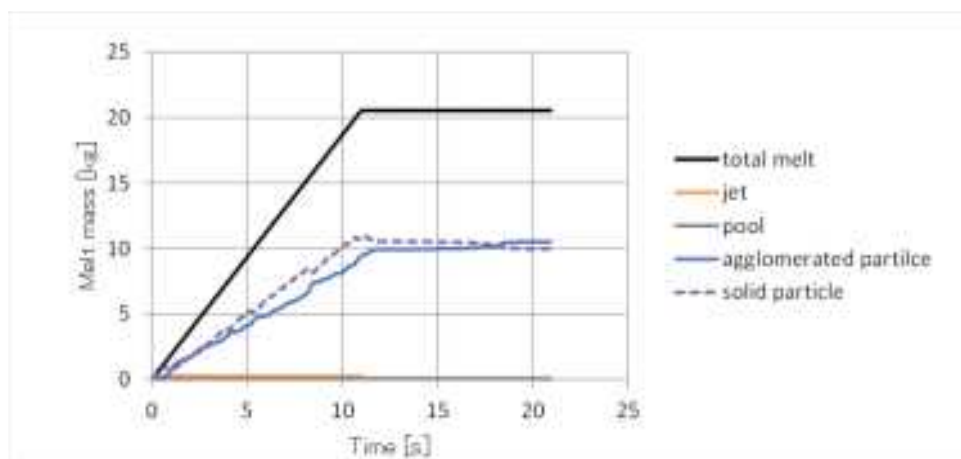


図 A2-1.1 デブリの状態別質量の履歴 (A2-1 キャッチャー1)

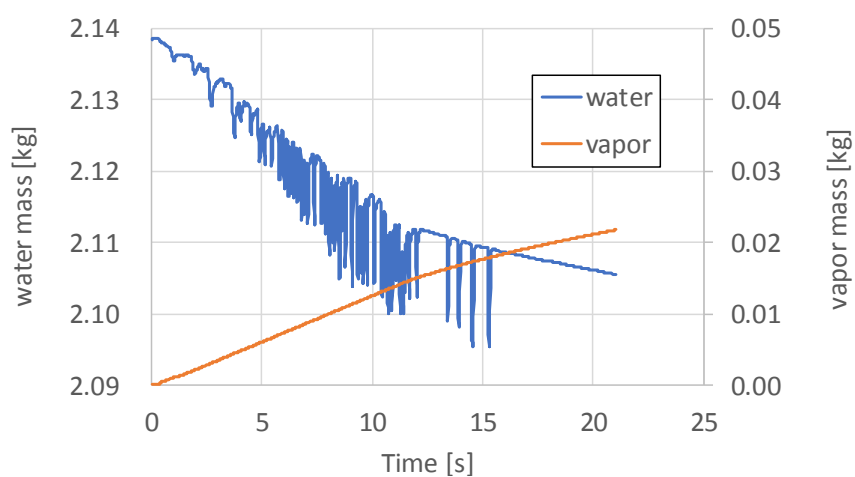


図 A2-1.2 水・水蒸気の質量履歴 (A2-1 キャッチャー1)

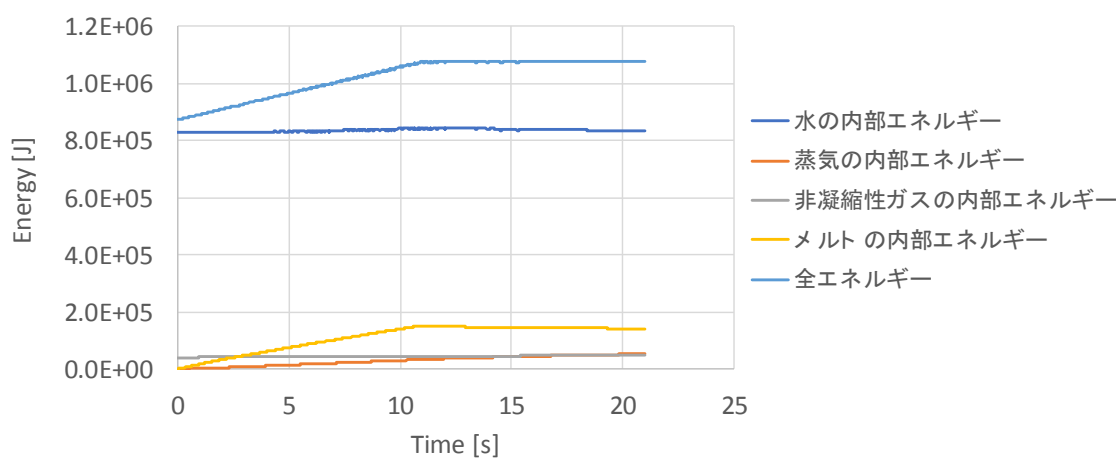


図 A2-1.3 各エネルギーの履歴 (A2-1 キャッチャー1)

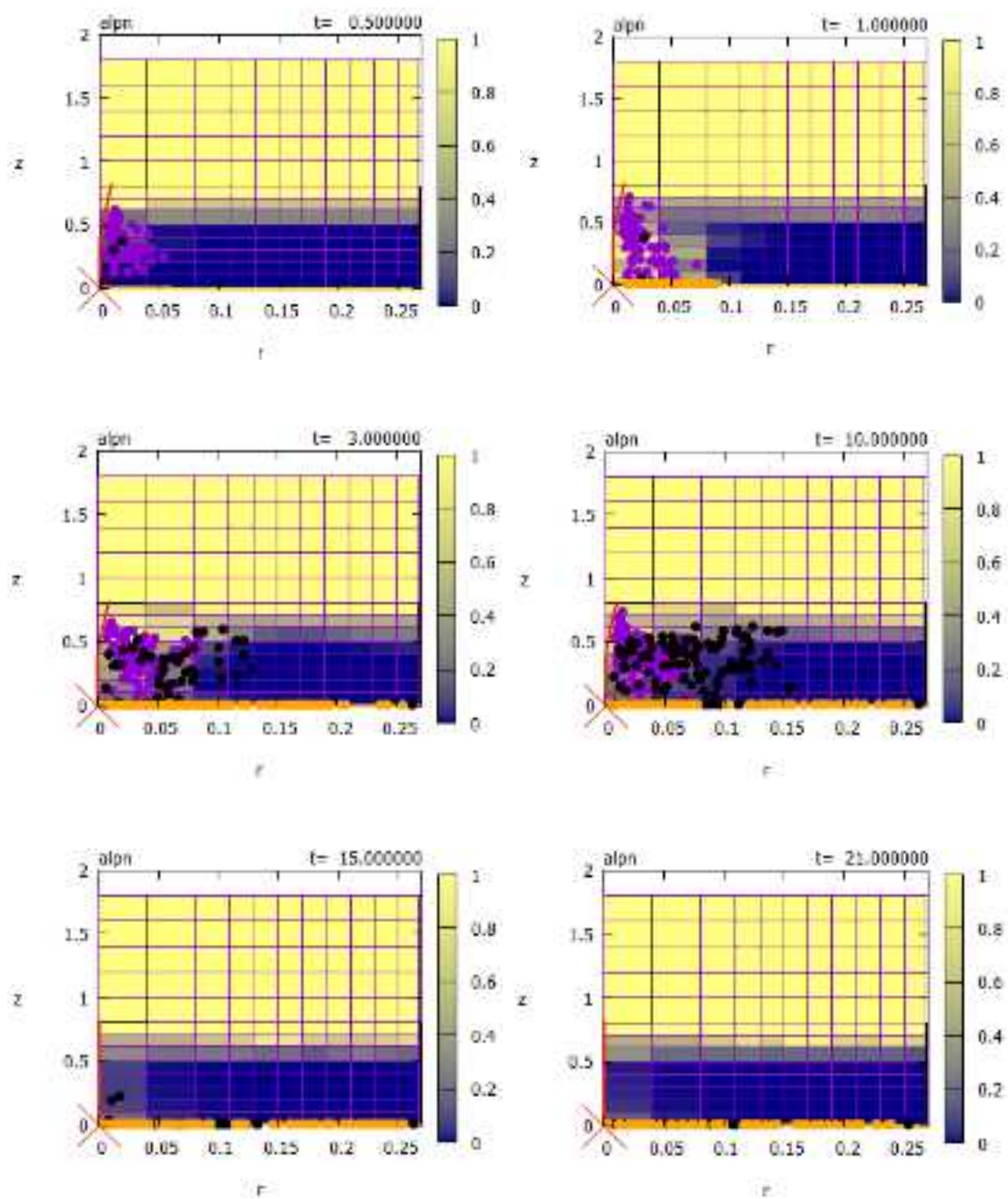


図 A2-1.4 ボイド率及び溶融物粒子分布図 (A2-1 キャッチャー1)  
(橙色：アグロメレーション粒子群、黒色：固化した粒子群)

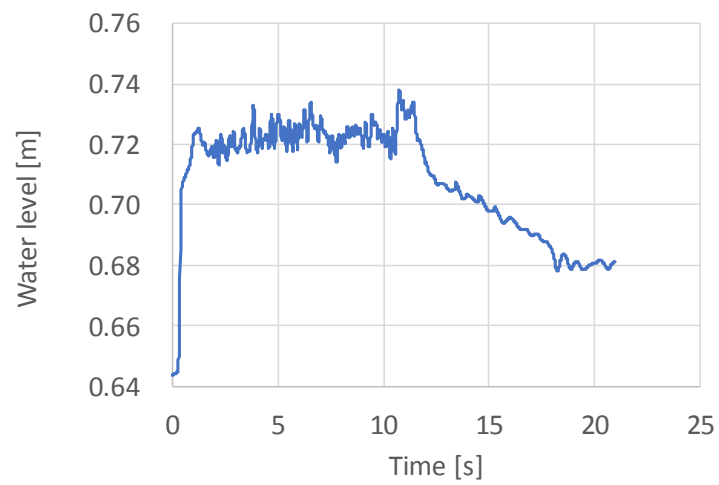


図 A2-1.5 水位履歴 (A2-1 キャッチャー1)

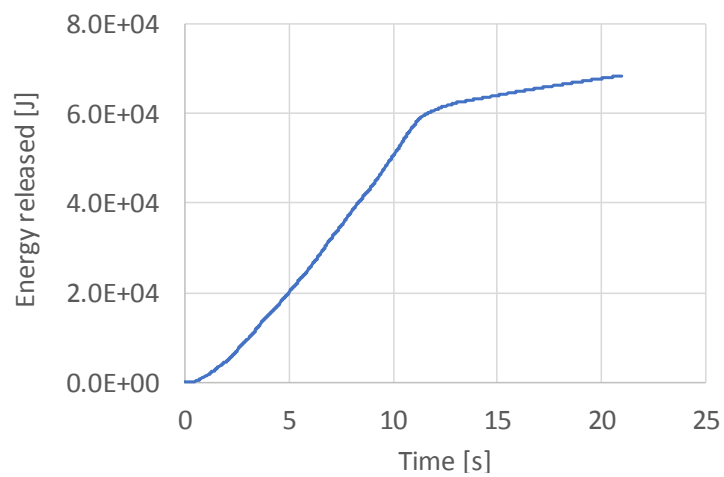


図 A2-1.6 溶融物から水への積算熱移行量 (A2-1 キャッチャー1)

キャッチャー2

表 A2-1.2 質量バランス及びエネルギーバランス (A2-1 キャッチャー2)

| 時刻                  | 0 s       | 1 s       | 21 s      | 21 s-0 s  |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 溶融物の質量バランス [kg]     |           |           |           |           |
| ジェット                | 0.000     | 0.234     | 0.000     |           |
| プール                 | 0.000     | 0.007     | 0.008     |           |
| 粒子                  | 0.000     | 18.363    | 20.446    |           |
| 合計                  | 0.000     | 18.605    | 20.454    |           |
| (粒子のうちアグロメレーションした分) | 0.000     | 6.513     | 8.703     |           |
| 水、蒸気の質量バランス [kg]    |           |           |           |           |
| 水                   | 3.173     | 3.144     | 3.137     |           |
| 蒸気                  | 0.000     | 0.013     | 0.022     |           |
| 合計                  | 3.173     | 3.157     | 3.159     |           |
| エネルギーバランス [J]       |           |           |           |           |
| 水の内部エネルギー           | 1233700   | 1252500   | 1247300   | 13600     |
| 蒸気の内部エネルギー          | 0.343     | 31997.000 | 54948.000 | 54947.657 |
| 非凝縮性ガスの内部エネルギー      | 48284.0   | 52415.0   | 54798.0   | 6514.0    |
| 溶融物の内部エネルギー         | 0.000     | 129180.0  | 128260.0  | 128260.0  |
| 流体の運動エネルギー          | 0.000     | 0.112     | 0.026     | 0.026     |
| 合計                  | 1281984.3 | 1466092.1 | 1485306.0 | 203321.7  |
| エネルギーの増加量           | 0.0       | 184107.8  | 203321.7  |           |
| 流入溶融物のエンタルピ         | 0.0       | 191072.1  | 210069.6  |           |
| 誤差                  | 0.0       | -6964.3   | -6747.9   |           |
|                     | 0.00%     | -0.48%    | -0.45%    |           |

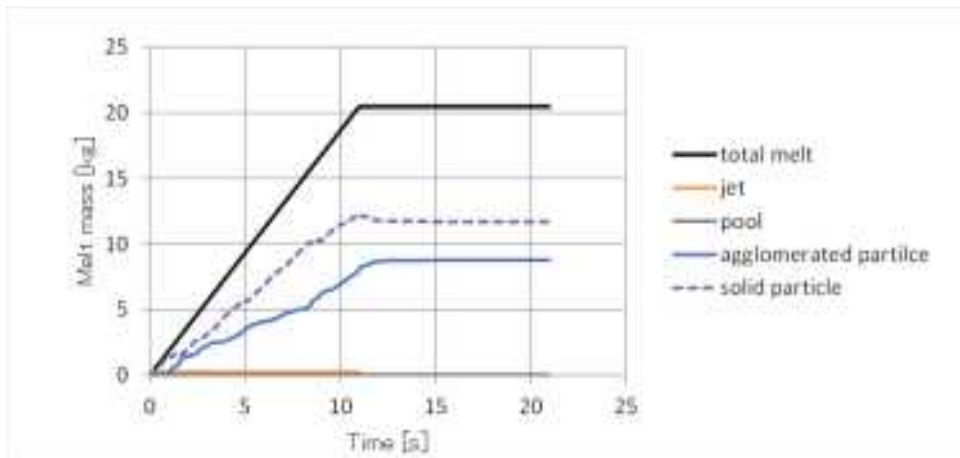


図 A2-1.7 デブリの状態別質量の履歴 (A2-1 キャッチャー2)

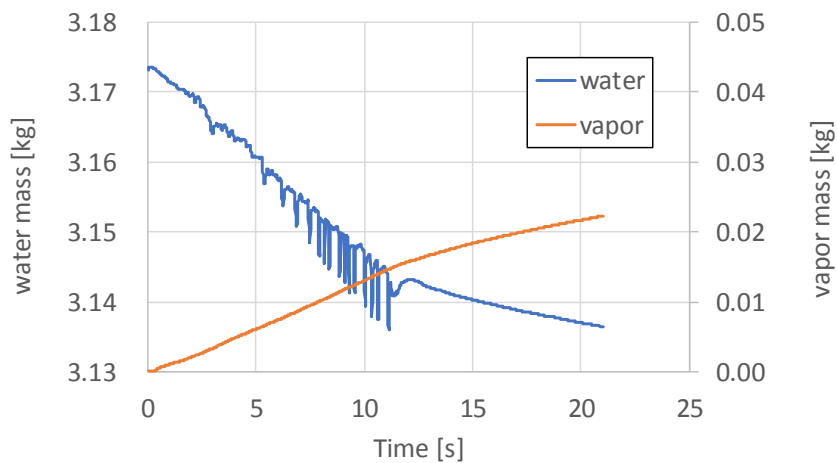


図 A2-1.8 水・水蒸気の質量履歴 (A2-1 キャッチャー2)

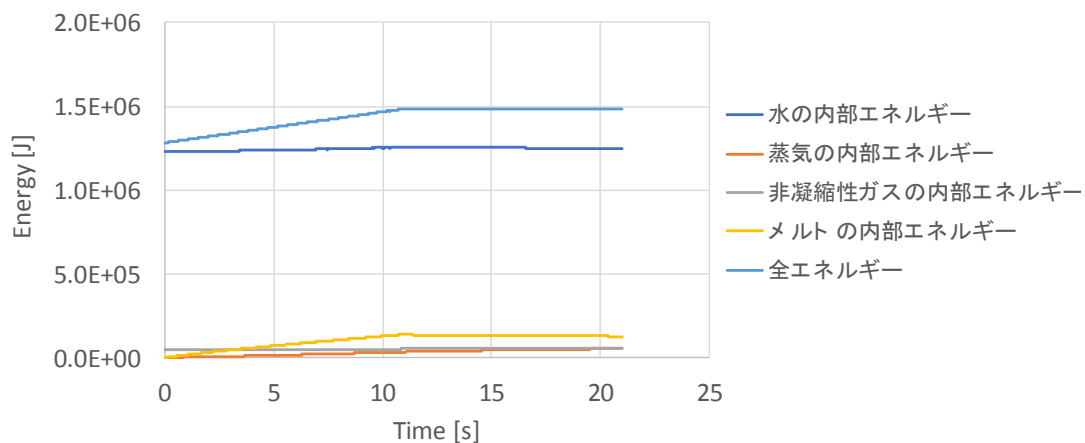


図 A2-1.9 各エネルギーの履歴 (A2-1 キャッチャー2)

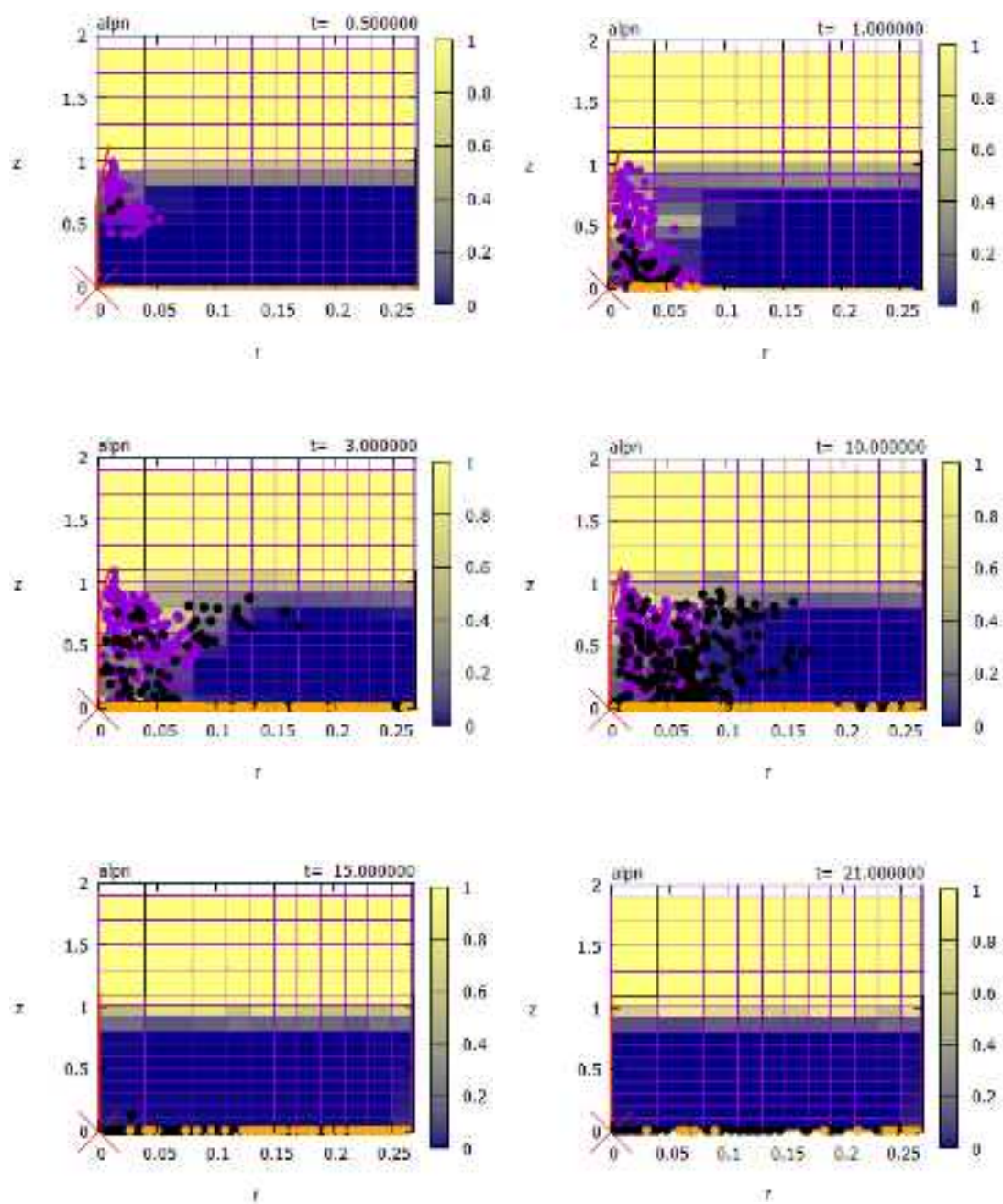


図 A2-1.10 ボイド率及び溶融物粒子分布図 (A2-1 キャッチャー2)  
(橙色：アグロメレーション粒子群、黒色：固化した粒子群)

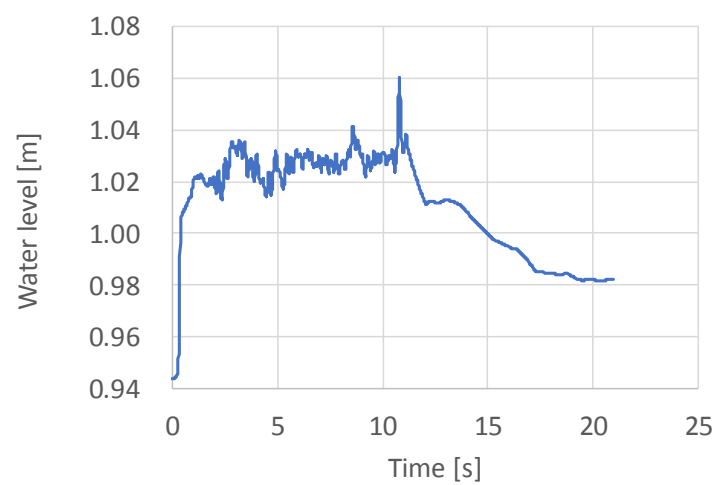


図 A2-1.11 水位履歴 (A2-1 キャッチャー2)

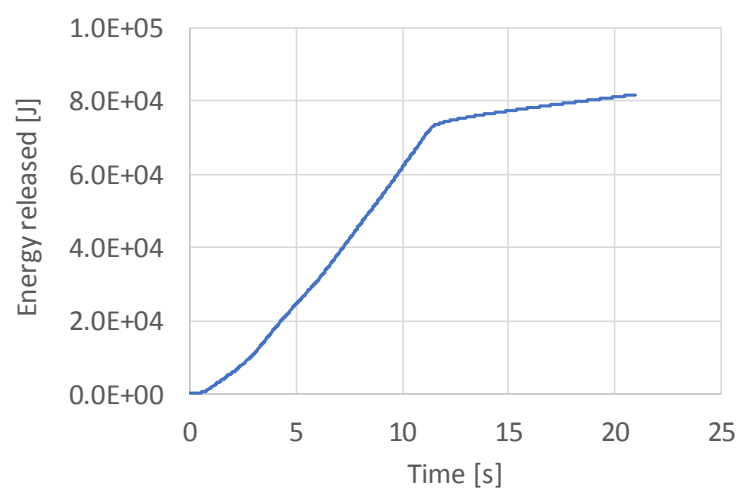


図 A2-1.12 溶融物から水への積算熱移行量 (A2-1 キャッチャー2)

キャッチャー3

表 A2-1.3 質量バランス及びエネルギーバランス (A2-1 キャッチャー3)

| 時刻                  | 0 s       | 1 s       | 21 s      | 21 s-0 s  |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 溶融物の質量バランス [kg]     |           |           |           |           |
| ジェット                | 0.000     | 0.222     | 0.000     |           |
| プール                 | 0.000     | 0.037     | 0.039     |           |
| 粒子                  | 0.000     | 18.371    | 20.417    |           |
| 合計                  | 0.000     | 18.630    | 20.456    |           |
| (粒子のうちアグロメレーションした分) | 0.000     | 3.804     | 4.868     |           |
| 水、蒸気の質量バランス [kg]    |           |           |           |           |
| 水                   | 4.208     | 4.180     | 4.168     |           |
| 蒸気                  | 0.000     | 0.014     | 0.024     |           |
| 合計                  | 4.208     | 4.194     | 4.192     |           |
| エネルギーバランス [J]       |           |           |           |           |
| 水の内部エネルギー           | 1636100   | 1662800   | 1656900   | 20800     |
| 蒸気の内部エネルギー          | 0.392     | 34564.000 | 59930.000 | 59929.608 |
| 非凝縮性ガスの内部エネルギー      | 55030.0   | 59530.0   | 62109.0   | 7079.0    |
| 溶融物の内部エネルギー         | 0.000     | 119710.0  | 114840.0  | 114840.0  |
| 流体の運動エネルギー          | 0.000     | 0.129     | 0.029     | 0.029     |
| 合計                  | 1691130.4 | 1876604.1 | 1893779.0 | 202648.6  |
| エネルギーの増加量           | 0.0       | 185473.7  | 202648.6  |           |
| 流入溶融物のエンタルピ         | 0.0       | 191330.0  | 210082.5  |           |
| 誤差                  | 0.0       | -5856.2   | -7433.9   |           |
|                     | 0.00%     | -0.31%    | -0.39%    |           |

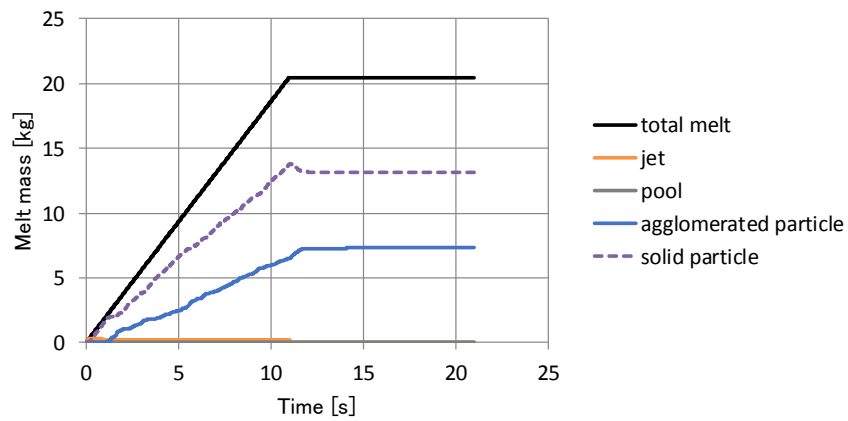


図 A2-1.13 デブリの状態別質量の履歴 (A2-1 キャッチャー3)

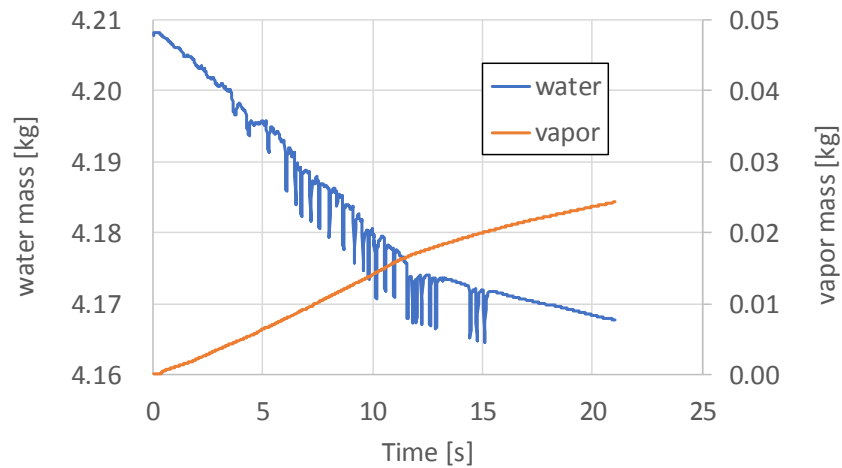


図 A2-1.14 水・水蒸気の質量履歴 (A2-1 キャッチャー3)

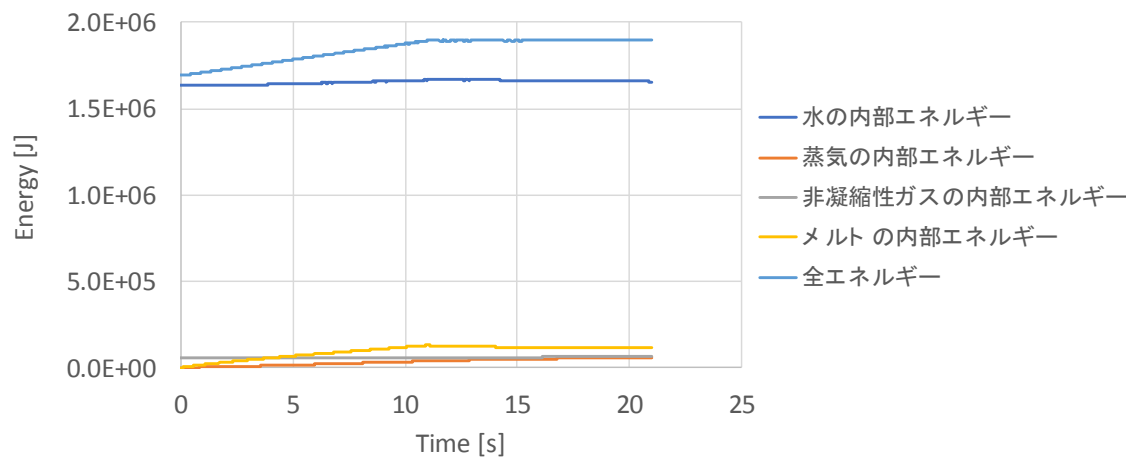


図 A2-1.15 各エネルギーの履歴 (A2-1 キャッチャー3)

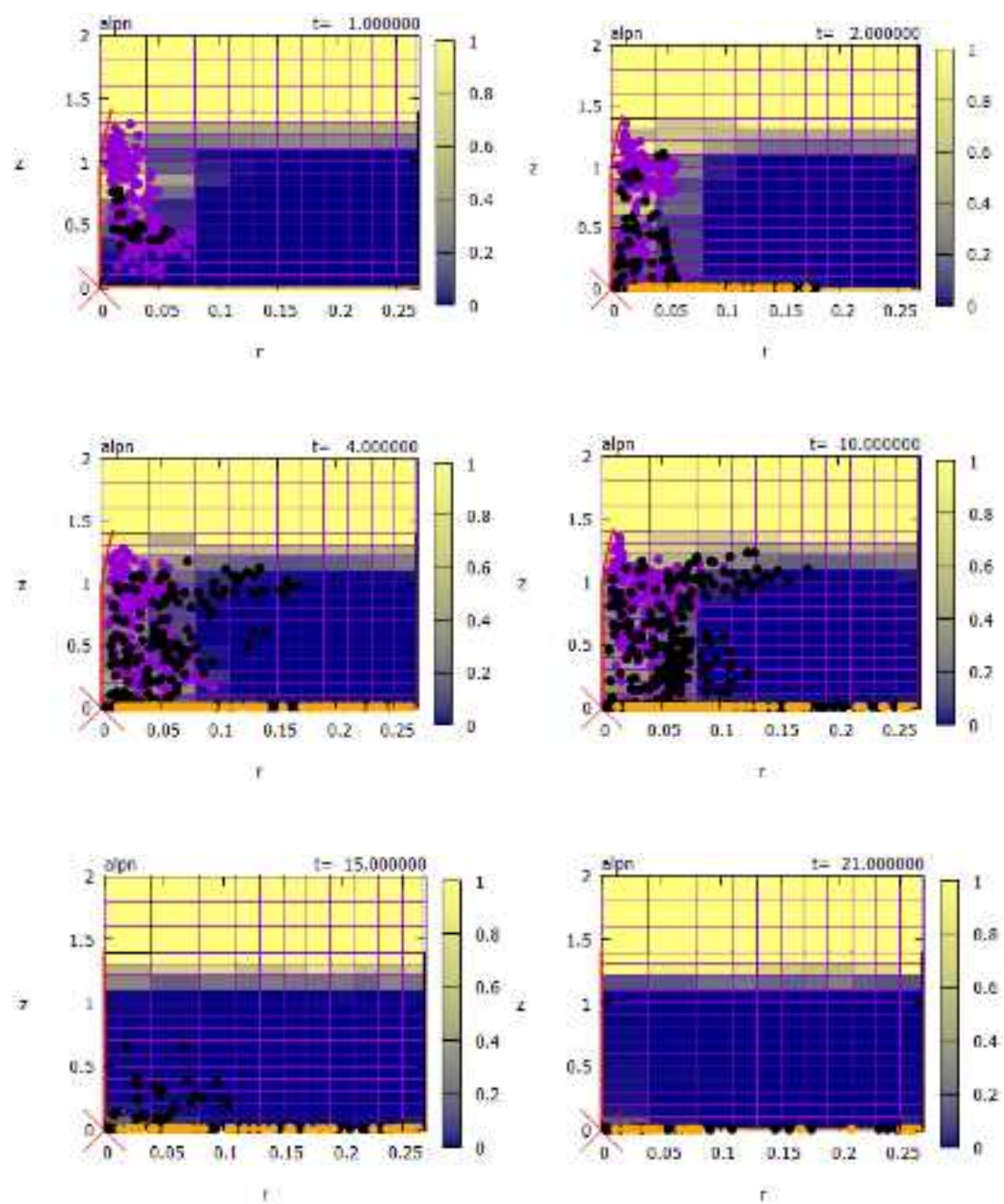


図 A2-1.16 ボイド率及び溶融物粒子分布図 (A2-1 キャッチャー3)  
(橙色：アグロメレーション粒子群、黒色：固化した粒子群)

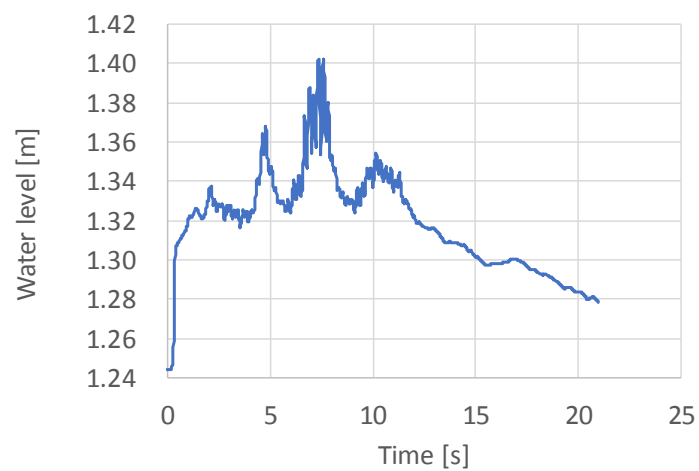


図 A2-1.17 水位履歴 (A2-1 キャッチャー3)

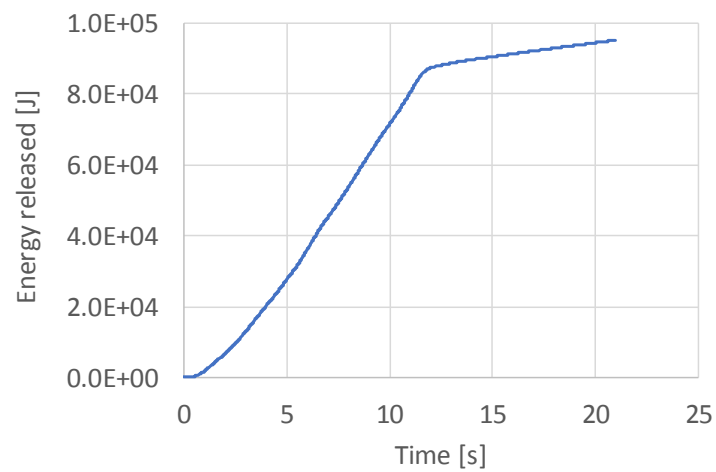


図 A2-1.18 溶融物から水への積算熱移行量 (A2-1 キャッチャー3)

キャッチャー4

表 A2-1.4 質量バランス及びエネルギーバランス (A2-1 キャッチャー4)

| 時刻                  | 0 s       | 1 s       | 21 s      | 21 s-0 s  |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 溶融物の質量バランス [kg]     |           |           |           |           |
| ジェット                | 0.000     | 0.219     | 0.000     |           |
| プール                 | 0.000     | 0.006     | 0.006     |           |
| 粒子                  | 0.000     | 18.361    | 20.419    |           |
| 合計                  | 0.000     | 18.586    | 20.425    |           |
| (粒子のうちアグロメレーションした分) | 0.000     | 3.275     | 4.444     |           |
| 水、蒸気の質量バランス [kg]    |           |           |           |           |
| 水                   | 5.243     | 5.215     | 5.203     |           |
| 蒸気                  | 0.000     | 0.014     | 0.024     |           |
| 合計                  | 5.243     | 5.229     | 5.227     |           |
| エネルギーバランス [J]       |           |           |           |           |
| 水の内部エネルギー           | 2038400   | 2070000   | 2066200   | 27800     |
| 蒸気の内部エネルギー          | 0.441     | 34501.000 | 59658.000 | 59657.559 |
| 非凝縮性ガスの内部エネルギー      | 61777.0   | 66354.0   | 68886.0   | 7109.0    |
| 溶融物の内部エネルギー         | 0.000     | 114390.0  | 107920.0  | 107920.0  |
| 流体の運動エネルギー          | 0.000     | 0.118     | 0.037     | 0.037     |
| 合計                  | 2100177.4 | 2285245.1 | 2302664.0 | 202486.6  |
| エネルギーの増加量           | 0.0       | 185067.7  | 202486.6  |           |
| 流入溶融物のエンタルピ         | 0.0       | 190885.0  | 209766.3  |           |
| 誤差                  | 0.0       | -5817.3   | -7279.7   |           |
|                     | 0.00%     | -0.25%    | -0.32%    |           |

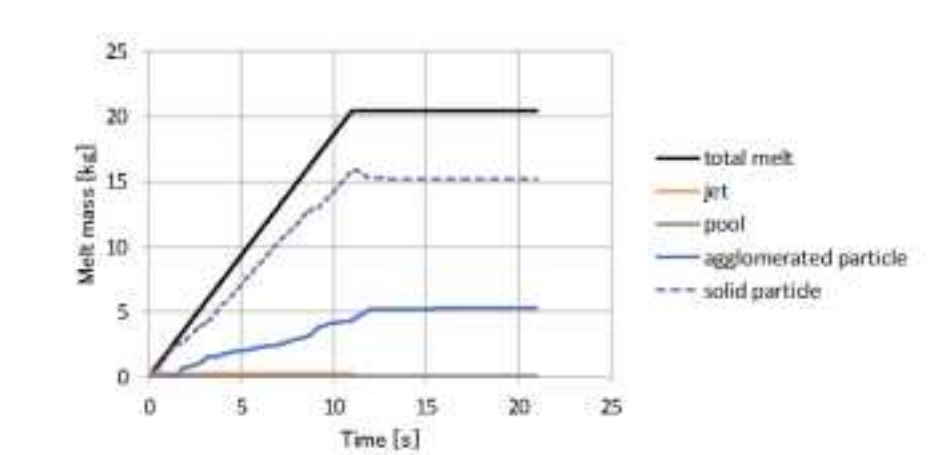


図 A2-1.19 デブリの状態別質量の履歴 (A2-1 キャッチャー4)

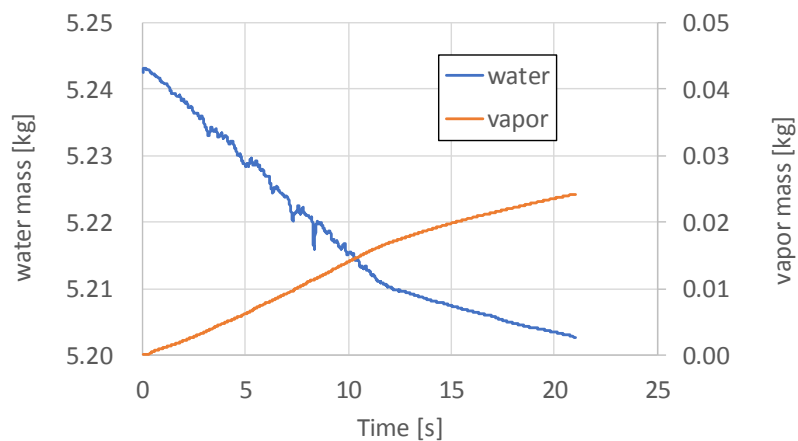


図 A2-1.20 水・水蒸気の質量履歴 (A2-1 キャッチャー4)

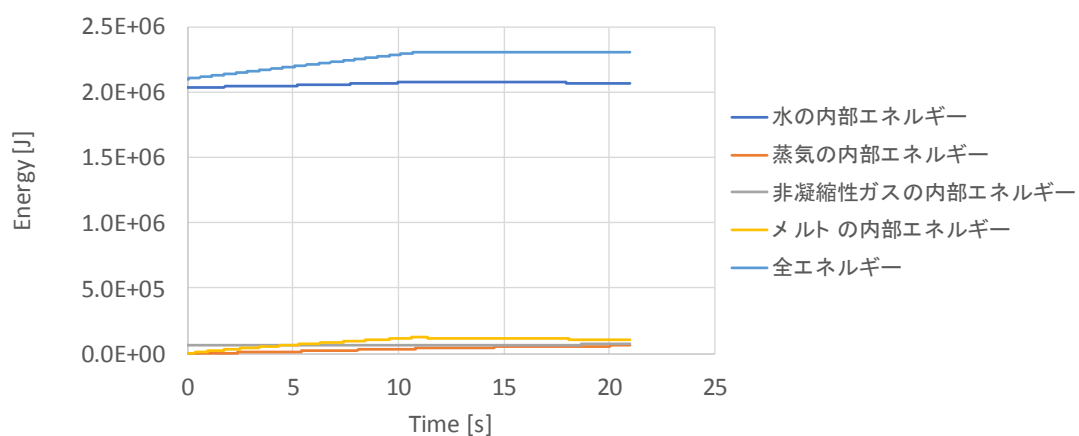


図 A2-1.21 各エネルギーの履歴 (A2-1 キャッチャー4)

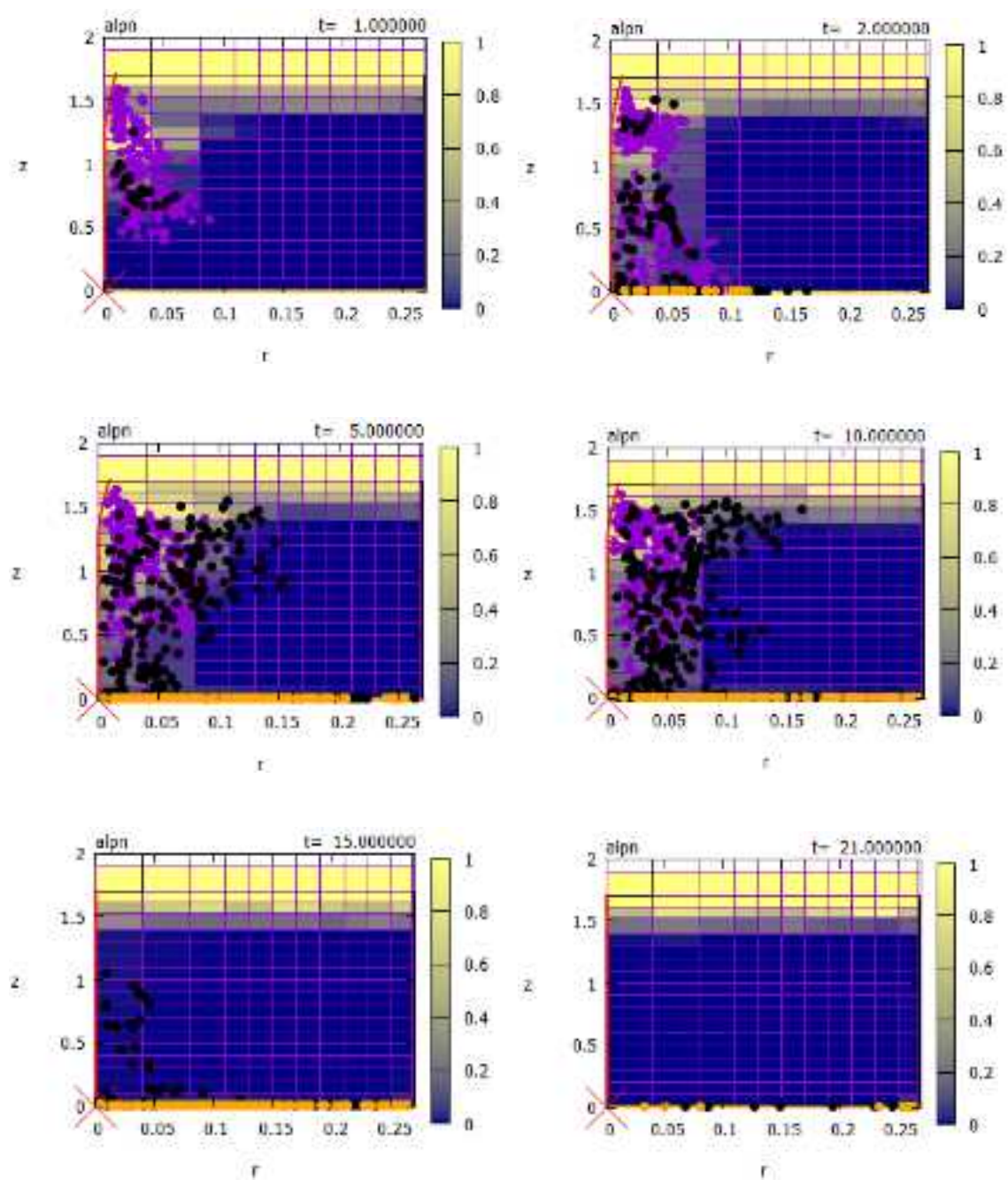


図 A2-1.22 ボイド率及び溶融物粒子分布図 (A2-1 キャッチャー4)  
(橙色：アグロメレーション粒子群、黒色：固化した粒子群)

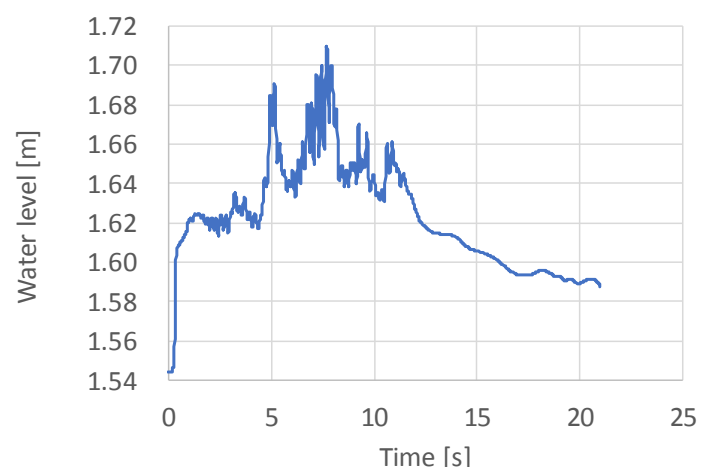


図 A2-1.23 水位履歴 (A2-1 キャッチャー4)

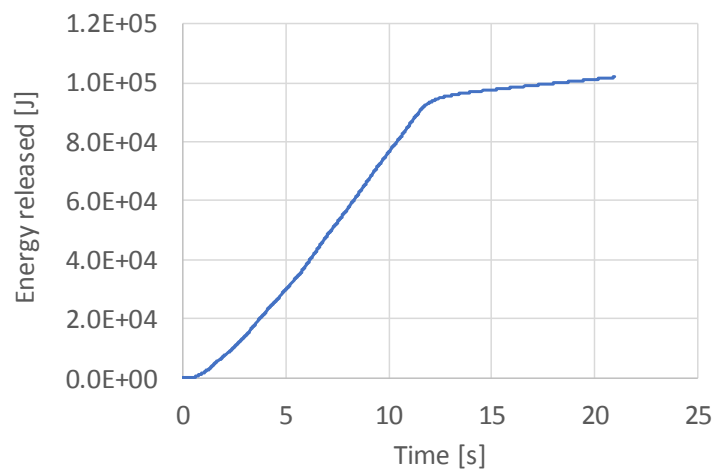


図 A2-1.24 溶融物から水への積算熱移行量 (A2-1 キャッチャー4)

A2-2 DEFOR-A2 ( $\phi_{\text{im}} = 0.5$ ,  $k_{\text{qht}} = 0.8$ )

キャッチャー1

表 A2-2.1 質量バランス及びエネルギーバランス (A2-2 キャッチャー1)

| 時刻                  | 0 s      | 1 s       | 21 s      | 21 s-0 s  |
|---------------------|----------|-----------|-----------|-----------|
| 溶融物の質量バランス [kg]     |          |           |           |           |
| ジェット                | 0.000    | 0.238     | 0.000     |           |
| プール                 | 0.000    | 0.071     | 0.099     |           |
| 粒子                  | 0.000    | 18.395    | 20.469    |           |
| 合計                  | 0.000    | 18.704    | 20.568    |           |
| (粒子のうちアグロメレーションした分) | 0.000    | 8.615     | 10.950    |           |
| 水、蒸気の質量バランス [kg]    |          |           |           |           |
| 水                   | 2.138    | 2.116     | 2.109     |           |
| 蒸気                  | 0.000    | 0.012     | 0.022     |           |
| 合計                  | 2.138    | 2.128     | 2.131     |           |
| エネルギーバランス [J]       |          |           |           |           |
| 水の内部エネルギー           | 831440   | 842120    | 835590    | 4150      |
| 蒸気の内部エネルギー          | 0.295    | 30596.000 | 53150.000 | 53149.705 |
| 非凝縮性ガスの内部エネルギー      | 41537.0  | 45445.0   | 47614.0   | 6077.0    |
| 溶融物の内部エネルギー         | 0.000    | 141440.0  | 143340.0  | 143340.0  |
| 流体の運動エネルギー          | 0.000    | 0.072     | 0.024     | 0.024     |
| 合計                  | 872977.3 | 1059601.1 | 1079694.0 | 206716.7  |
| エネルギーの増加量           | 0.0      | 186623.8  | 206716.7  |           |
| 流入溶融物のエンタルピー        | 0.0      | 192091.7  | 211237.6  |           |
| 誤差                  | 0.0      | -5467.9   | -4520.9   |           |
|                     | 0.00%    | -0.52%    | -0.42%    |           |

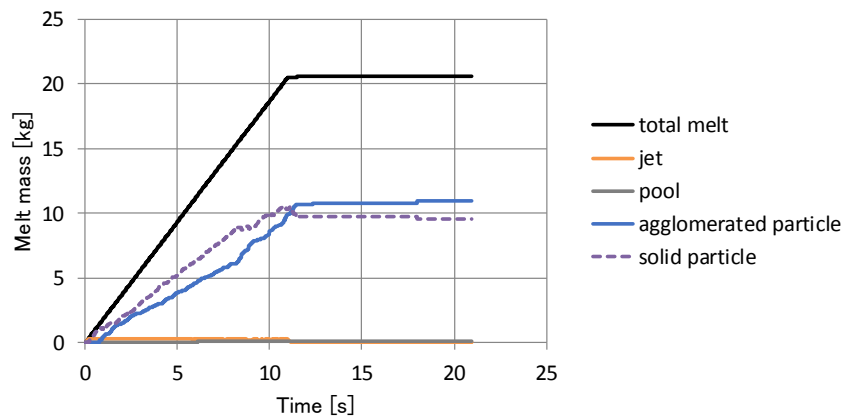


図 A2-2.1 デブリの状態別質量の履歴 (A2-2 キャッチャー1)

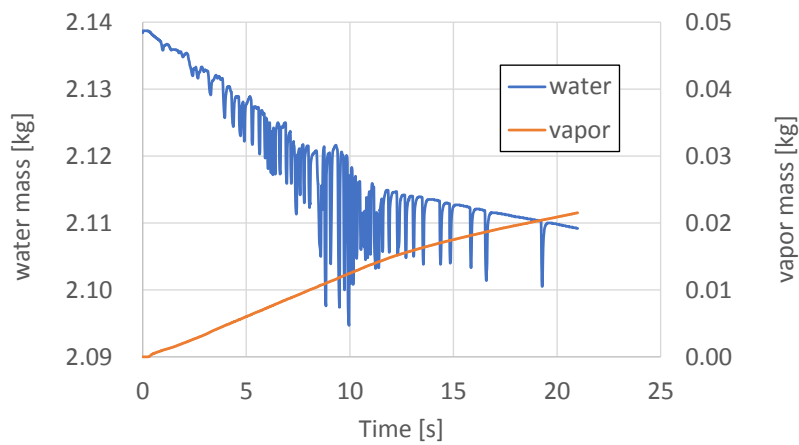


図 A2-2.2 水・水蒸気の質量履歴 (A2-2 キャッチャー1)

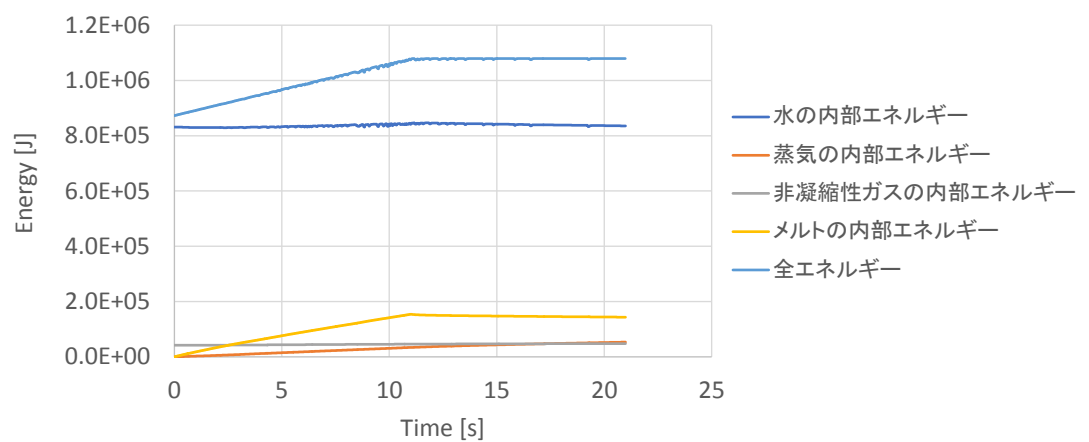


図 A2-2.3 各エネルギーの履歴 (A2-2 キャッチャー1)

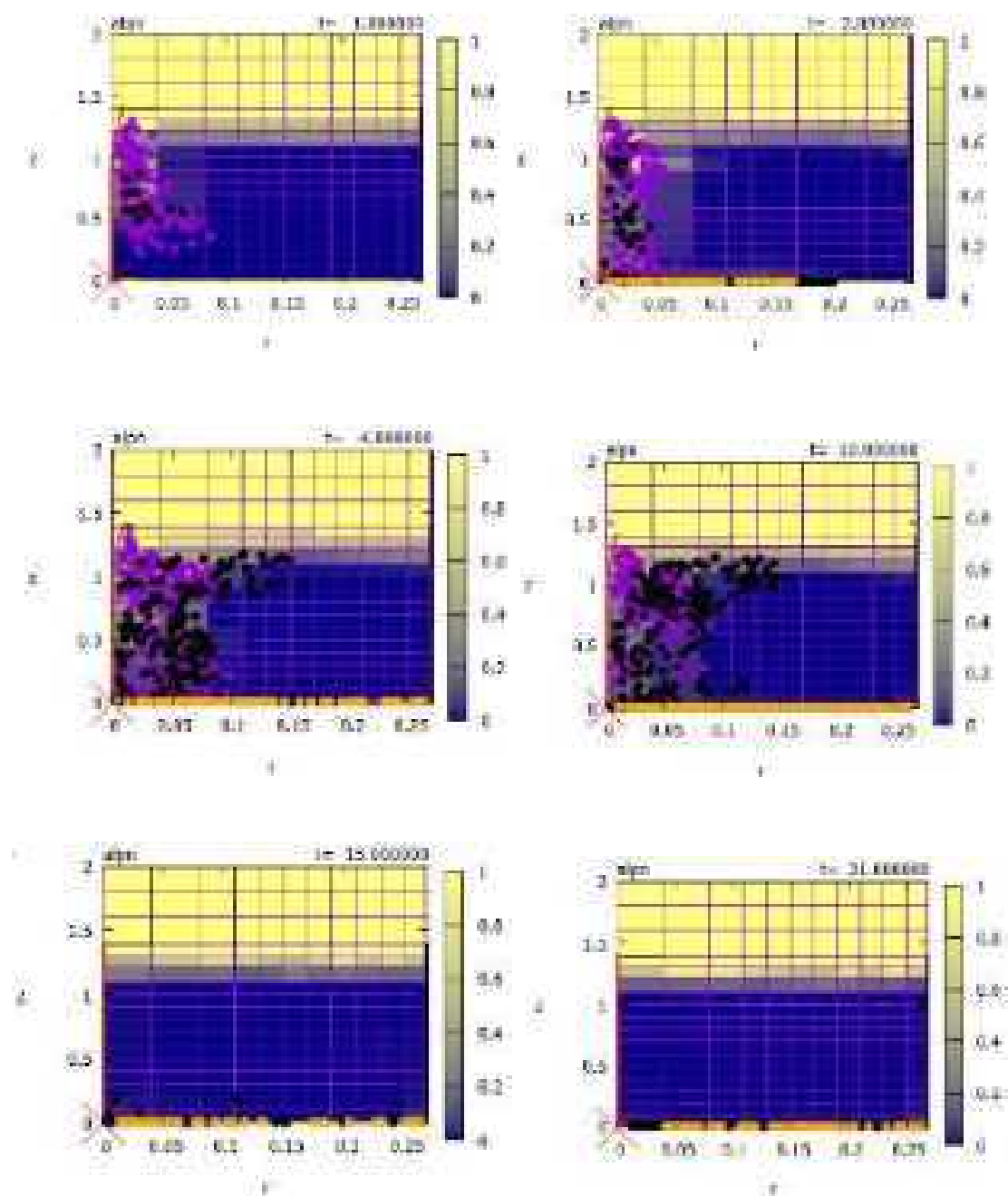


図 A2-2.4 ボイド率及び溶融物粒子分布図 (A2-2 キャッチャー1)  
(橙色：アグロメレーション粒子群、黒色：固化した粒子群)

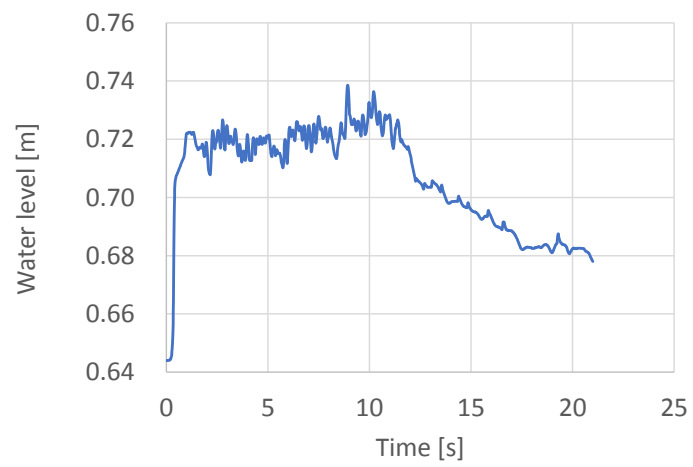


図 A2-2.5 水位履歴 (A2-2 キャッチャー1)

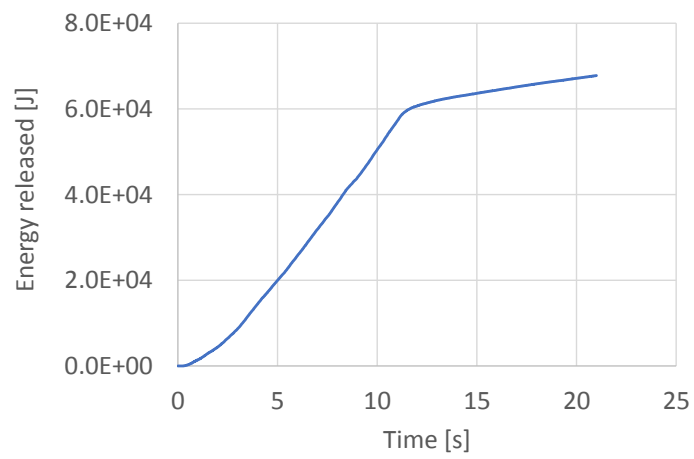


図 A2-2.6 溶融物から水への積算熱移行量 (A2-2 キャッチャー1)

キャッチャー2

表 A2-2.2 質量バランス及びエネルギーバランス (A2-2 キャッチャー2)

| 時刻                  | 0 s       | 1 s       | 21 s      | 21 s-0 s  |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 溶融物の質量バランス [kg]     |           |           |           |           |
| ジェット                | 0.000     | 0.233     | 0.000     |           |
| プール                 | 0.000     | 0.007     | 0.010     |           |
| 粒子                  | 0.000     | 18.386    | 20.478    |           |
| 合計                  | 0.000     | 18.626    | 20.488    |           |
| (粒子のうちアグロメレーションした分) | 0.000     | 6.547     | 8.183     |           |
| 水、蒸気の質量バランス [kg]    |           |           |           |           |
| 水                   | 3.173     | 3.147     | 3.136     |           |
| 蒸気                  | 0.000     | 0.012     | 0.021     |           |
| 合計                  | 3.173     | 3.159     | 3.157     |           |
| エネルギーバランス [J]       |           |           |           |           |
| 水の内部エネルギー           | 1233700   | 1251900   | 1246900   | 13200     |
| 蒸気の内部エネルギー          | 0.343     | 30038.000 | 52388.000 | 52387.657 |
| 非凝縮性ガスの内部エネルギー      | 48284.0   | 52231.0   | 54575.0   | 6291.0    |
| 溶融物の内部エネルギー         | 0.000     | 133350.0  | 131210.0  | 131210.0  |
| 流体の運動エネルギー          | 0.000     | 0.081     | 0.037     | 0.037     |
| 合計                  | 1281984.3 | 1467519.1 | 1485073.0 | 203088.7  |
| エネルギーの増加量           | 0.0       | 185534.7  | 203088.7  |           |
| 流入溶融物のエンタルピ         | 0.0       | 191291.5  | 210418.1  |           |
| 誤差                  | 0.0       | -5756.7   | -7329.4   |           |
|                     | 0.00%     | -0.39%    | -0.49%    |           |

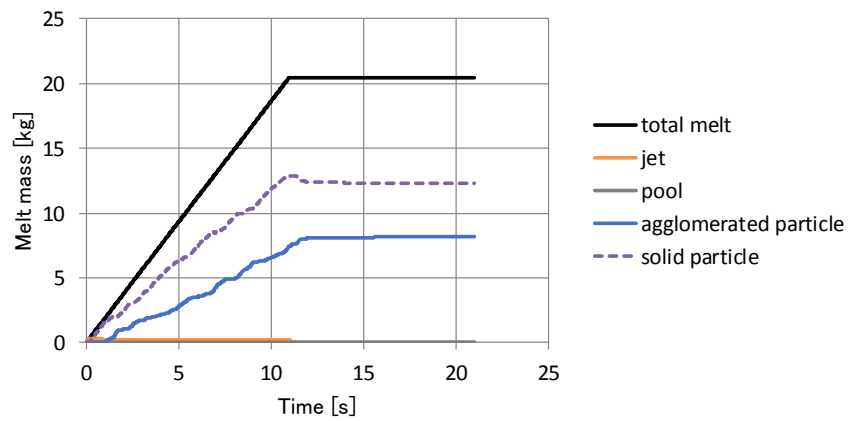


図 A2-2.7 デブリの状態別質量の履歴 (A2-2 キャッチャー2)

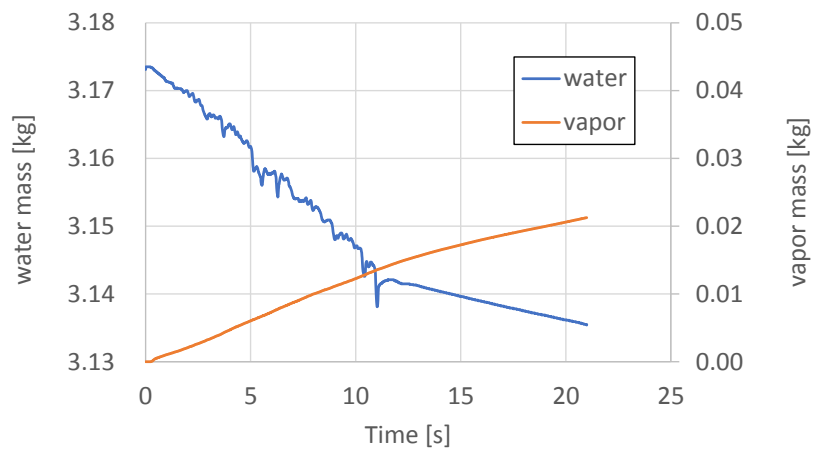


図 A2-2.8 水・水蒸気の質量履歴 (A2-2 キャッチャー2)

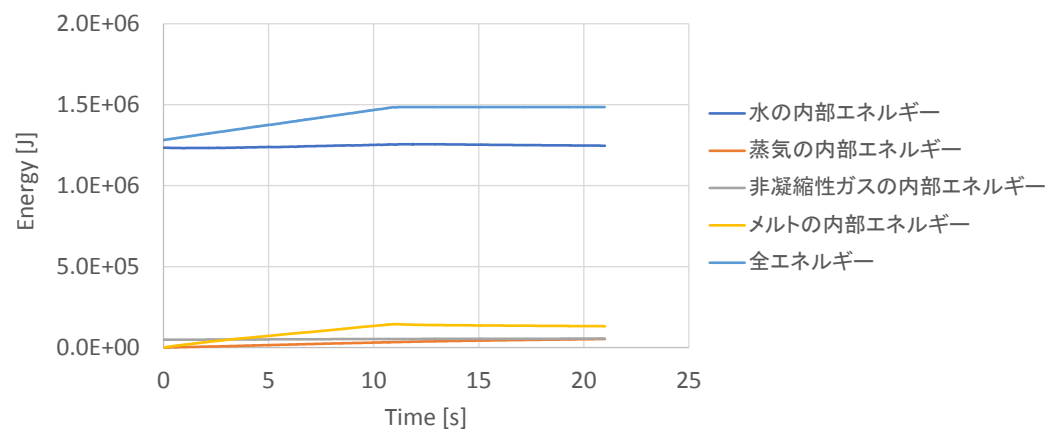


図 A2-2.9 各エネルギーの履歴 (A2-2 キャッチャー2)

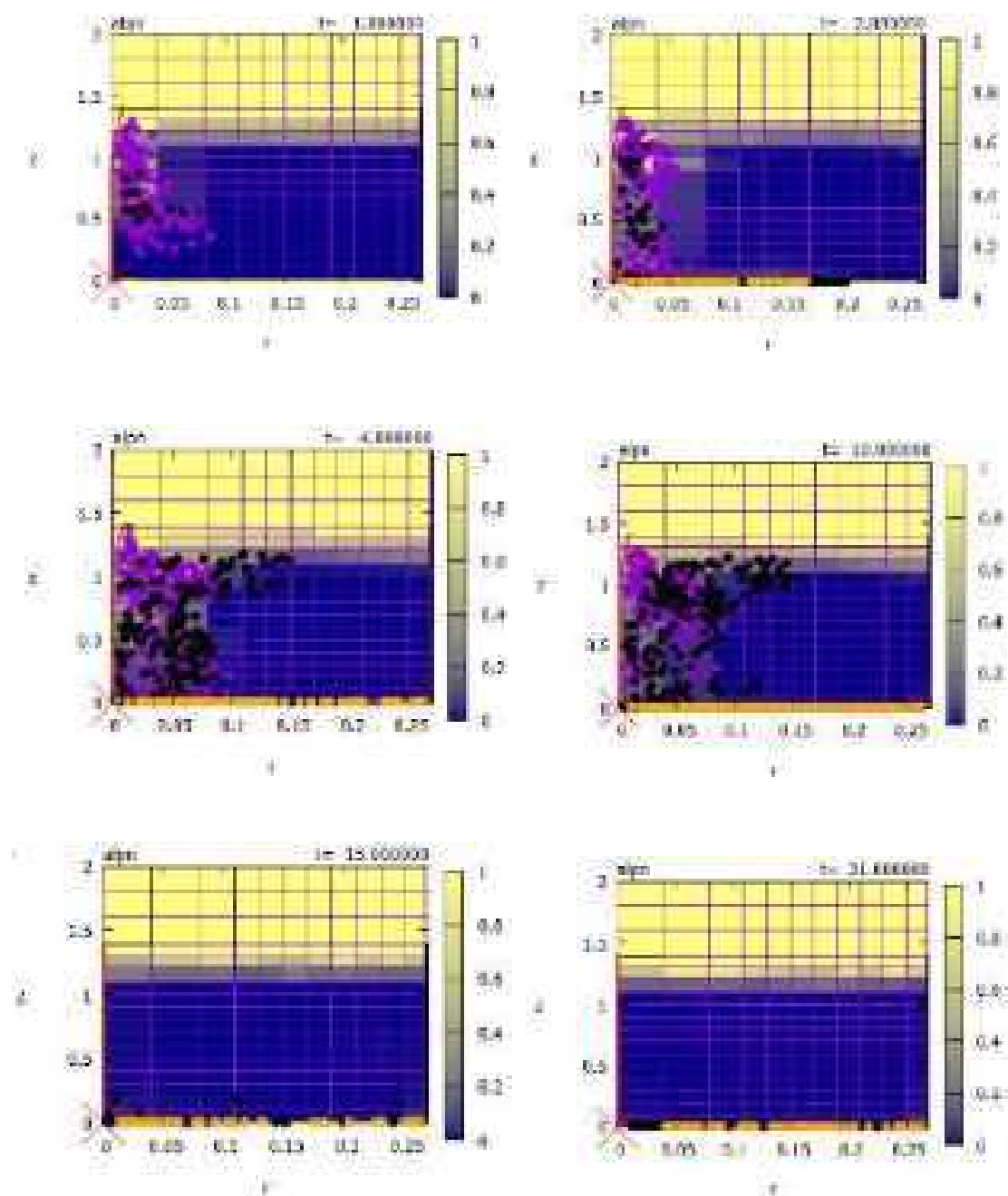


図 A2-2.10 ボイド率及び溶融物粒子分布図 (A2-2 キャッチャー2)  
(橙色：アグロメレーション粒子群、黒色：固化した粒子群)

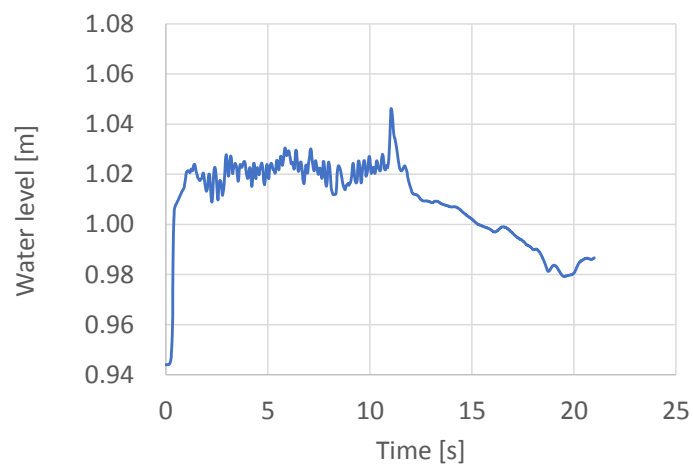


図 A2-2.11 水位履歴 (A2-2 キャッチャー2)

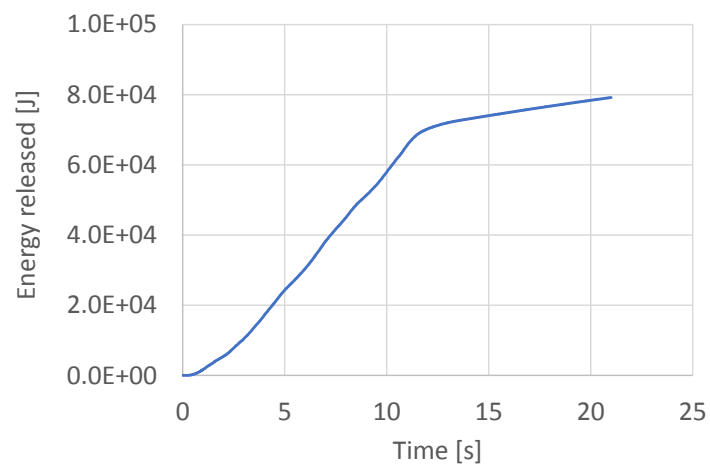


図 A2-2.12 溶融物から水への積算熱移行量 (A2-2 キャッチャー2)

キャッチャー3

表 A2-2.3 質量バランス及びエネルギーバランス (A2-2 キャッチャー3)

| 時刻                  | 0 s       | 1 s       | 21 s      | 21 s-0 s  |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 溶融物の質量バランス [kg]     |           |           |           |           |
| ジェット                | 0.000     | 0.234     | 0.000     |           |
| プール                 | 0.000     | 0.006     | 0.004     |           |
| 粒子                  | 0.000     | 18.364    | 20.450    |           |
| 合計                  | 0.000     | 18.604    | 20.454    |           |
| (粒子のうちアグロメレーションした分) | 0.000     | 4.617     | 6.253     |           |
| 水、蒸気の質量バランス [kg]    |           |           |           |           |
| 水                   | 4.208     | 4.182     | 4.169     |           |
| 蒸気                  | 0.000     | 0.013     | 0.022     |           |
| 合計                  | 4.208     | 4.194     | 4.191     |           |
| エネルギーバランス [J]       |           |           |           |           |
| 水の内部エネルギー           | 1636100   | 1661500   | 1657600   | 21500     |
| 蒸気の内部エネルギー          | 0.392     | 31170.000 | 53244.000 | 53243.608 |
| 非凝縮性ガスの内部エネルギー      | 55030.0   | 59174.0   | 61525.0   | 6495.0    |
| 溶融物の内部エネルギー         | 0.000     | 124640.0  | 121530.0  | 121530.0  |
| 流体の運動エネルギー          | 0.000     | 0.081     | 0.036     | 0.036     |
| 合計                  | 1691130.4 | 1876484.1 | 1893899.0 | 202768.6  |
| エネルギーの増加量           | 0.0       | 185353.7  | 202768.6  |           |
| 流入溶融物のエンタルピ         | 0.0       | 191065.6  | 210063.1  |           |
| 誤差                  | 0.0       | -5711.9   | -7294.5   |           |
|                     | 0.00%     | -0.30%    | -0.39%    |           |

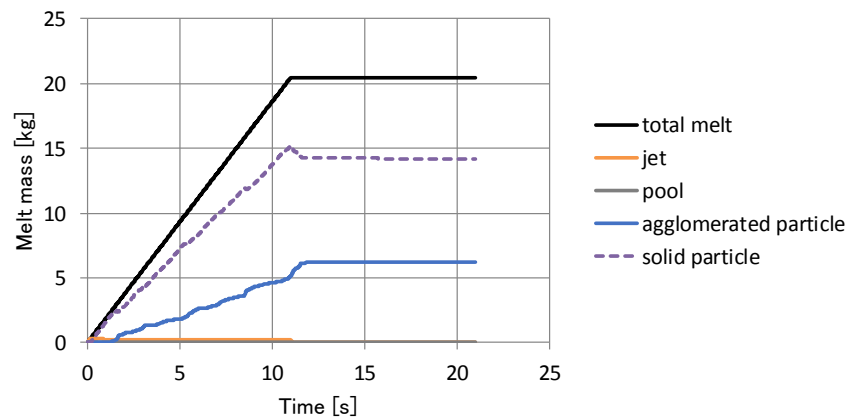


図 A2-2.13 デブリの状態別質量の履歴 (A2-2 キャッチャー3)

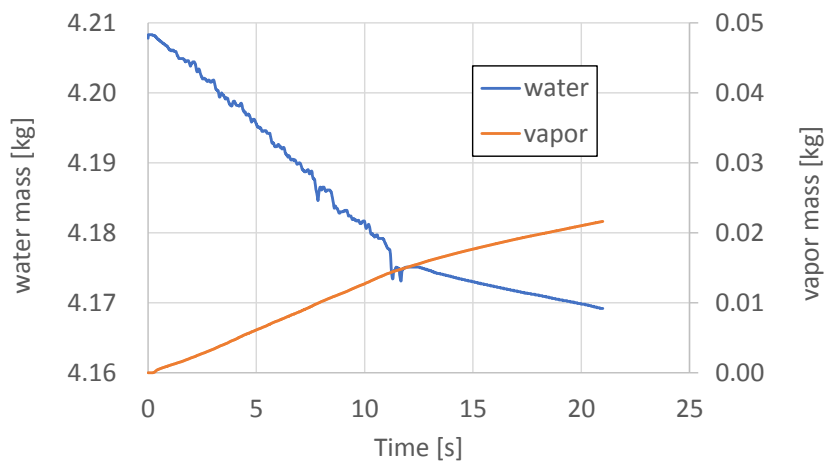


図 A2-2.14 水・水蒸気の質量履歴 (A2-2 キャッチャー3)

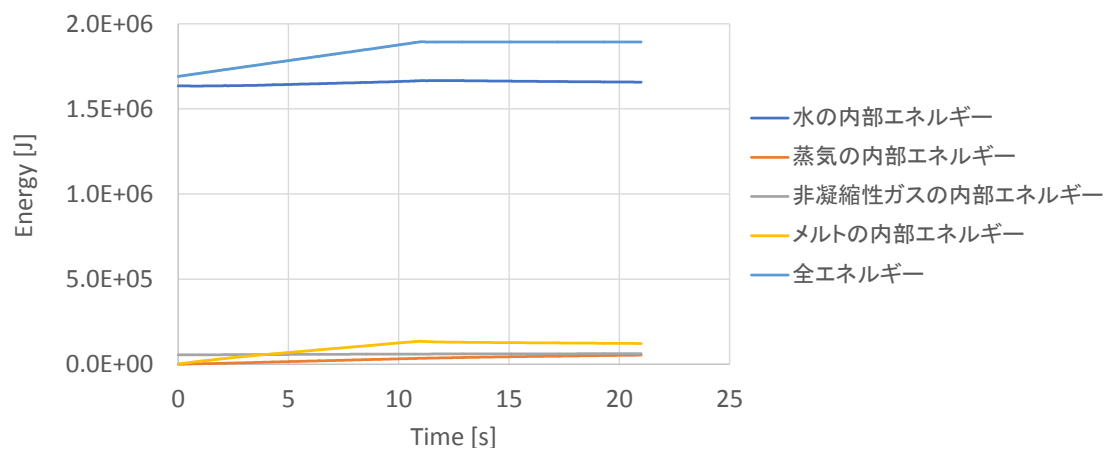


図 A2-2.15 各エネルギーの履歴 (A2-2 キャッチャー3)

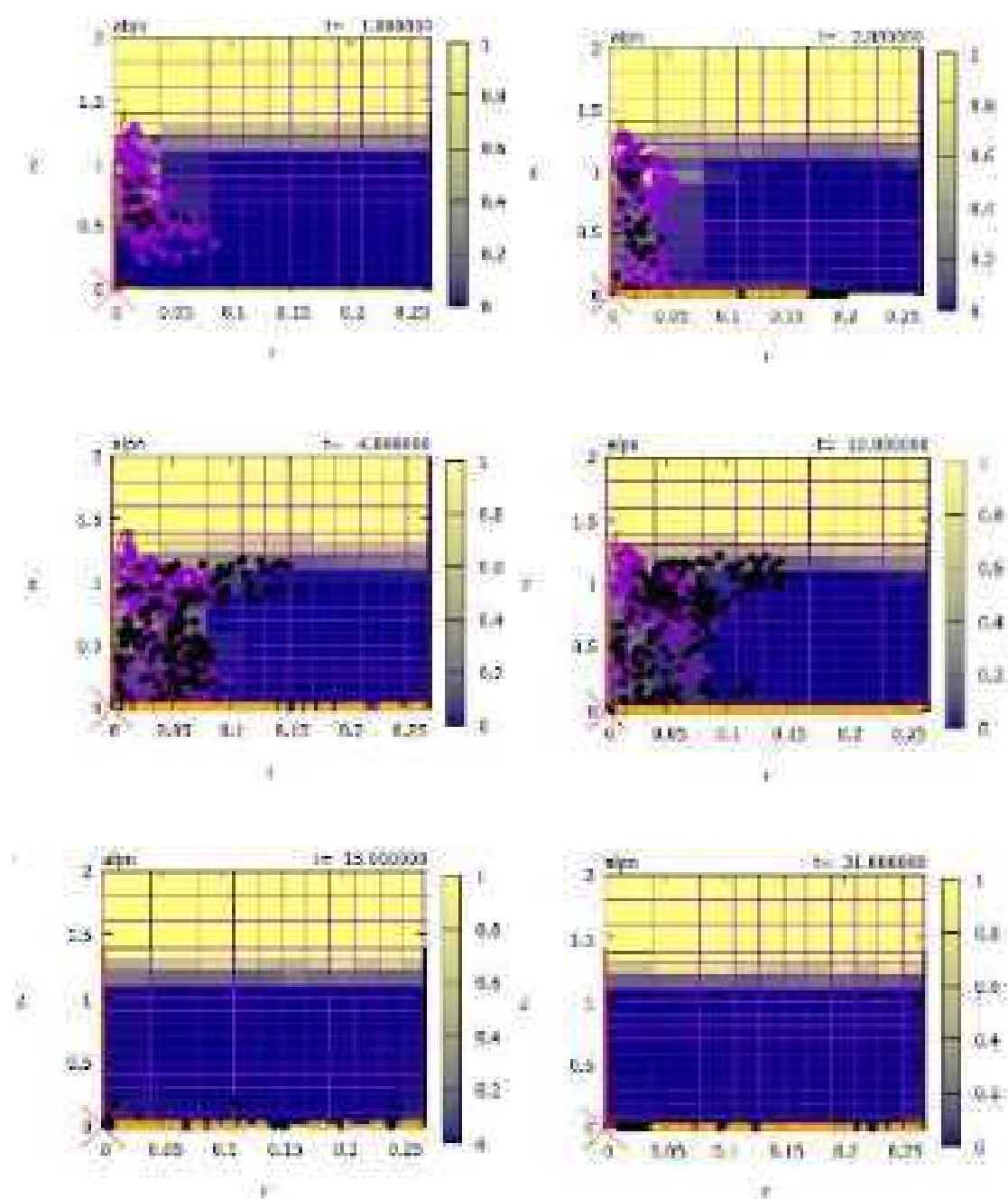


図 A2-2.16 ボイド率及び溶融物粒子分布図 (A2-2 キャッチャー3)  
(橙色：アグロメレーション粒子群、黒色：固化した粒子群)

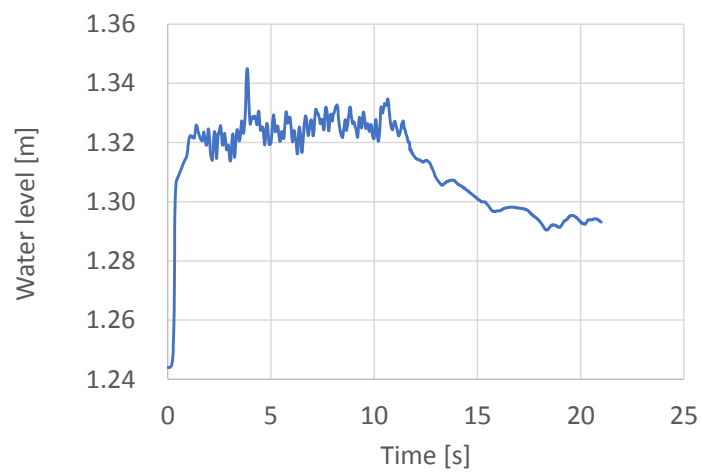


図 A2-2.17 水位履歴 (A2-2 キャッチャー3)

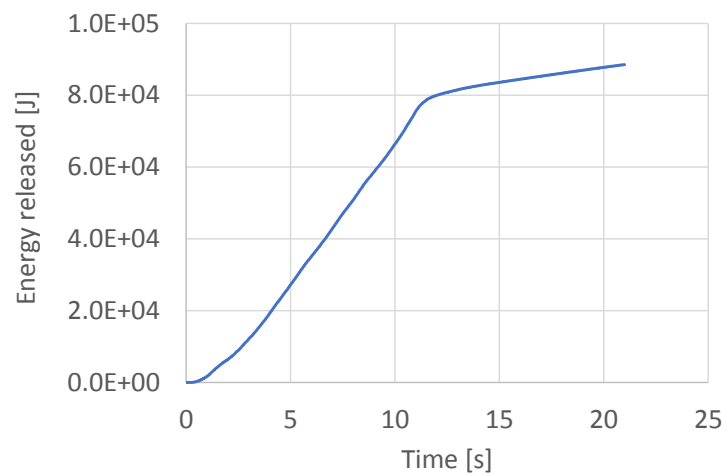


図 A2-2.18 溶融物から水への積算熱移行量 (A2-2 キャッチャー3)

キャッチャー4

表 A2-2.4 質量バランス及びエネルギーバランス (A2-2 キャッチャー4)

| 時刻                  | 0 s       | 1 s       | 21 s      | 21 s-0 s  |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 溶融物の質量バランス [kg]     |           |           |           |           |
| ジェット                | 0.000     | 0.227     | 0.000     |           |
| プール                 | 0.000     | 0.004     | 0.004     |           |
| 粒子                  | 0.000     | 18.378    | 20.443    |           |
| 合計                  | 0.000     | 18.609    | 20.447    |           |
| (粒子のうちアグロメレーションした分) | 0.000     | 3.418     | 4.361     |           |
| 水、蒸気の質量バランス [kg]    |           |           |           |           |
| 水                   | 5.243     | 5.215     | 5.202     |           |
| 蒸気                  | 0.000     | 0.013     | 0.022     |           |
| 合計                  | 5.243     | 5.228     | 5.224     |           |
| エネルギーバランス [J]       |           |           |           |           |
| 水の内部エネルギー           | 2038400   | 2067500   | 2065200   | 26800     |
| 蒸気の内部エネルギー          | 0.441     | 32029.000 | 55110.000 | 55109.559 |
| 非凝縮性ガスの内部エネルギー      | 61777.0   | 66101.0   | 68488.0   | 6711.0    |
| 溶融物の内部エネルギー         | 0.000     | 119640.0  | 113290.0  | 113290.0  |
| 流体の運動エネルギー          | 0.000     | 0.092     | 0.039     | 0.039     |
| 合計                  | 2100177.4 | 2285270.1 | 2302088.0 | 201910.6  |
| エネルギーの増加量           | 0.0       | 185092.7  | 201910.6  |           |
| 流入溶融物のエンタルピ         | 0.0       | 191117.3  | 209992.2  |           |
| 誤差                  | 0.0       | -6024.6   | -8081.6   |           |
|                     | 0.00%     | -0.26%    | -0.35%    |           |

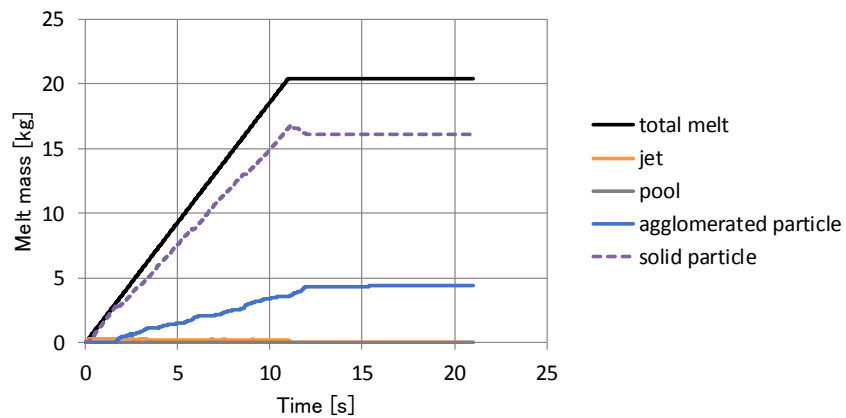


図 A2-2.19 デブリの状態別質量の履歴 (A2-2 キャッチャー4)

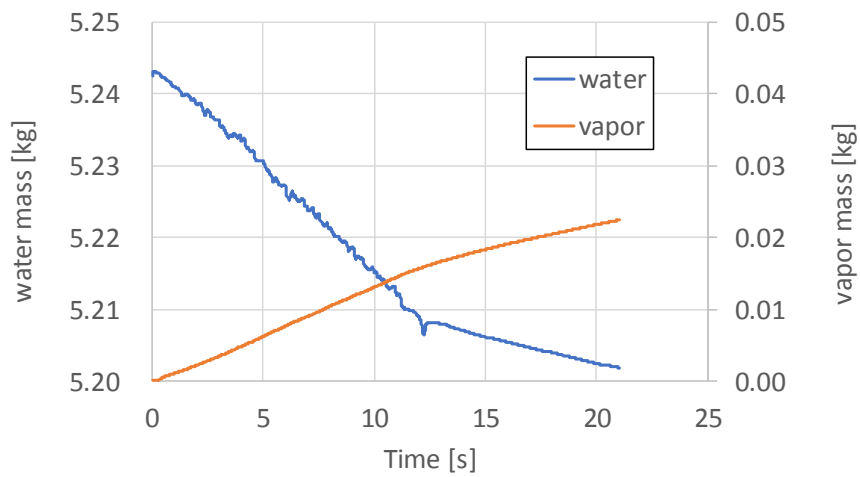


図 A2-2.20 水・水蒸気の質量履歴 (A2-2 キャッチャー4)

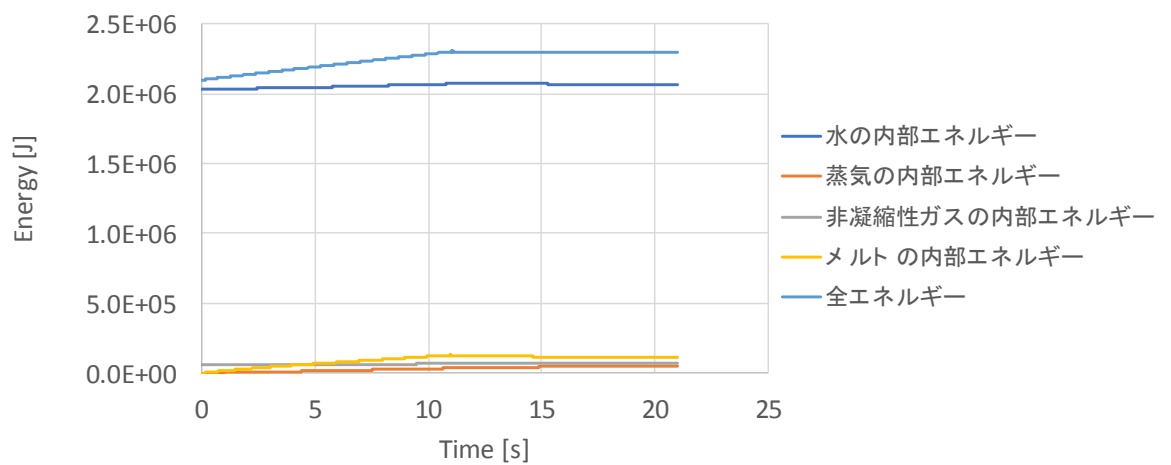


図 A2-2.21 各エネルギーの履歴 (A2-2 キャッチャー4)

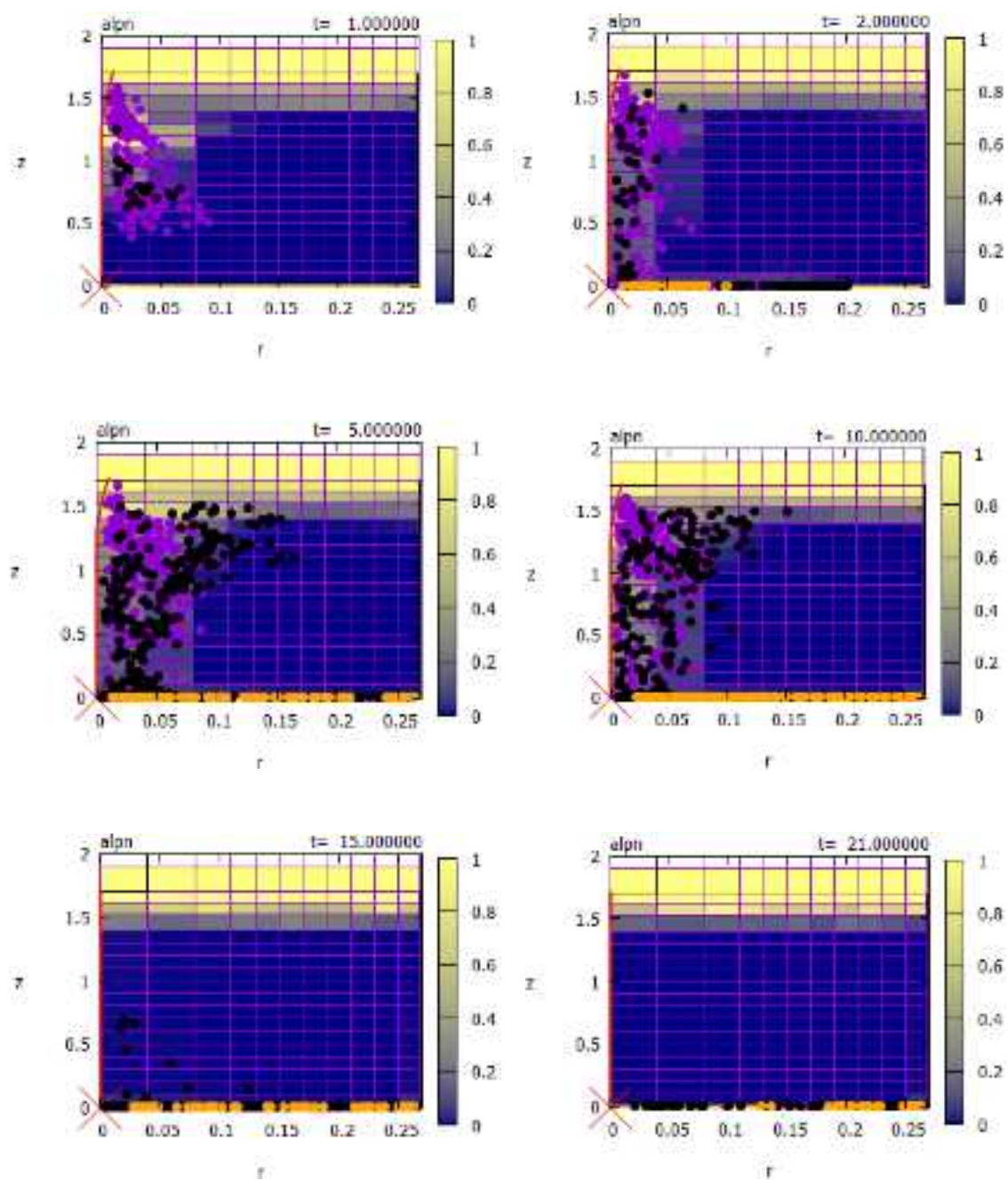


図 A2-2.22 ボイド率及び溶融物粒子分布図 (A2-2 キャッチャー4)  
(橙色：アグロメレーション粒子群、黒色：固化した粒子群)

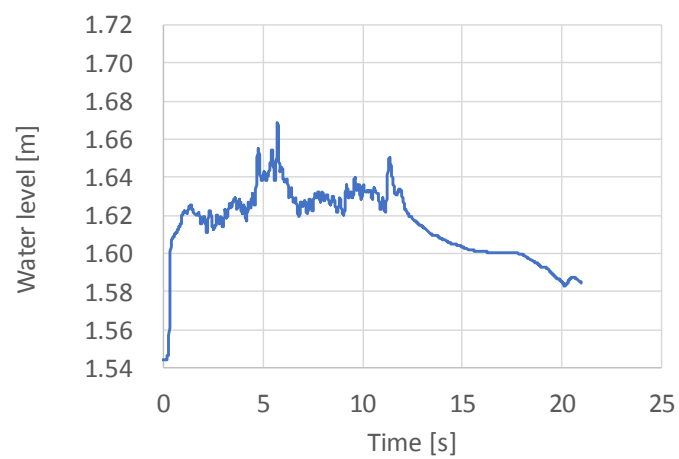


図 A2-2.23 水位履歴 (A2-2 キャッチャー4)

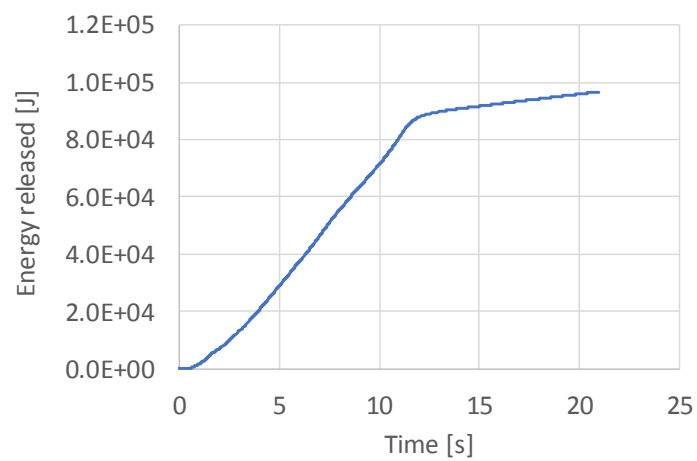


図 A2-2.24 溶融物から水への積算熱移行量 (A2-2 キャッチャー4)

A2-3 DEFOR-A2 ( $\phi_{\text{im}} = 0.8$ ,  $k_{\text{qht}} = 0.8$ )

キャッチャー1

表 A2-3.1 質量バランス及びエネルギーバランス (A2-3 キャッチャー1)

| 時刻                  | 0 s      | 1 s       | 21 s      | 21 s-0 s  |
|---------------------|----------|-----------|-----------|-----------|
| 溶融物の質量バランス [kg]     |          |           |           |           |
| ジェット                | 0.000    | 0.246     | 0.000     |           |
| プール                 | 0.000    | 0.054     | 0.082     |           |
| 粒子                  | 0.000    | 18.367    | 20.472    |           |
| 合計                  | 0.000    | 18.667    | 20.554    |           |
| (粒子のうちアグロメレーションした分) | 0.000    | 8.074     | 10.396    |           |
| 水、蒸気の質量バランス [kg]    |          |           |           |           |
| 水                   | 2.138    | 2.117     | 2.108     |           |
| 蒸気                  | 0.000    | 0.013     | 0.022     |           |
| 合計                  | 2.138    | 2.129     | 2.130     |           |
| エネルギーバランス [J]       |          |           |           |           |
| 水の内部エネルギー           | 831440   | 842250    | 835710    | 4270      |
| 蒸気の内部エネルギー          | 0.295    | 30818.000 | 53664.000 | 53663.705 |
| 非凝縮性ガスの内部エネルギー      | 41537.0  | 45462.0   | 47646.0   | 6109.0    |
| 溶融物の内部エネルギー         | 0.000    | 141240.0  | 141980.0  | 141980.0  |
| 流体の運動エネルギー          | 0.000    | 0.060     | 0.023     | 0.023     |
| 合計                  | 872977.3 | 1059770.1 | 1079000.0 | 206022.7  |
| エネルギーの増加量           | 0.0      | 186792.8  | 206022.7  |           |
| 流入溶融物のエンタルピー        | 0.0      | 191717.4  | 211095.6  |           |
| 誤差                  | 0.0      | -4924.6   | -5072.9   |           |
|                     | 0.00%    | -0.46%    | -0.47%    |           |

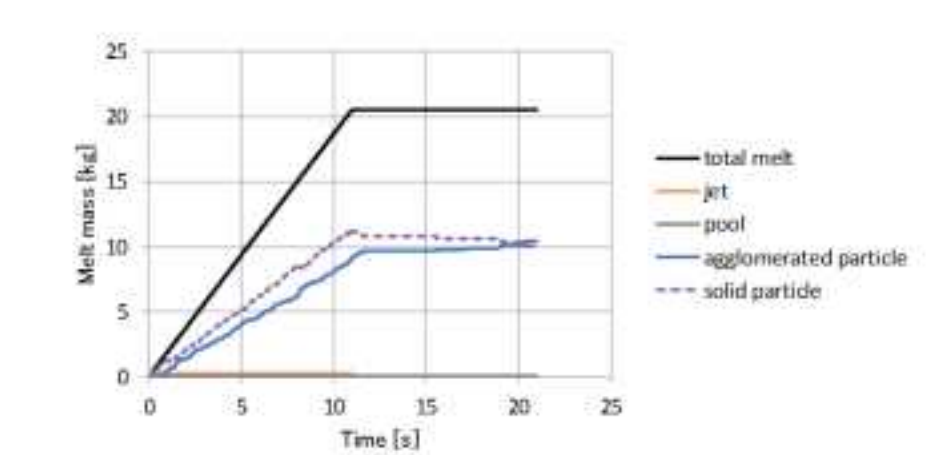


図 A2-3.1 デブリの状態別質量の履歴 (A2-3 キャッチャー1)

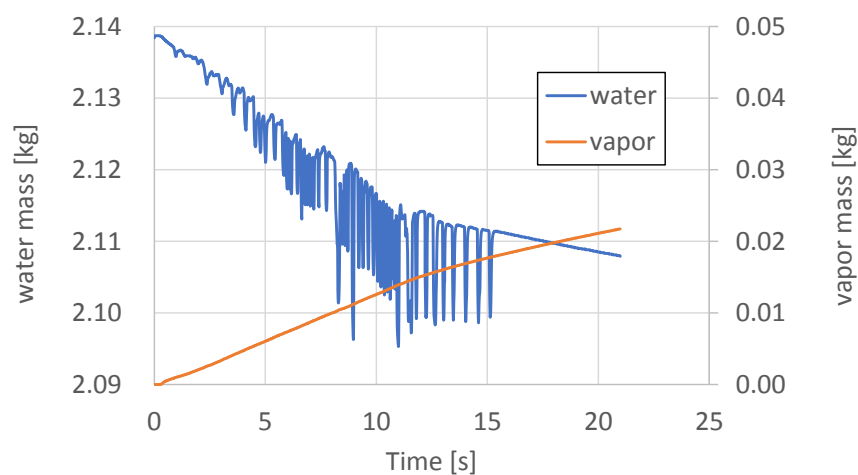


図 A2-3.2 水・水蒸気の質量履歴 (A2-3 キャッチャー1)

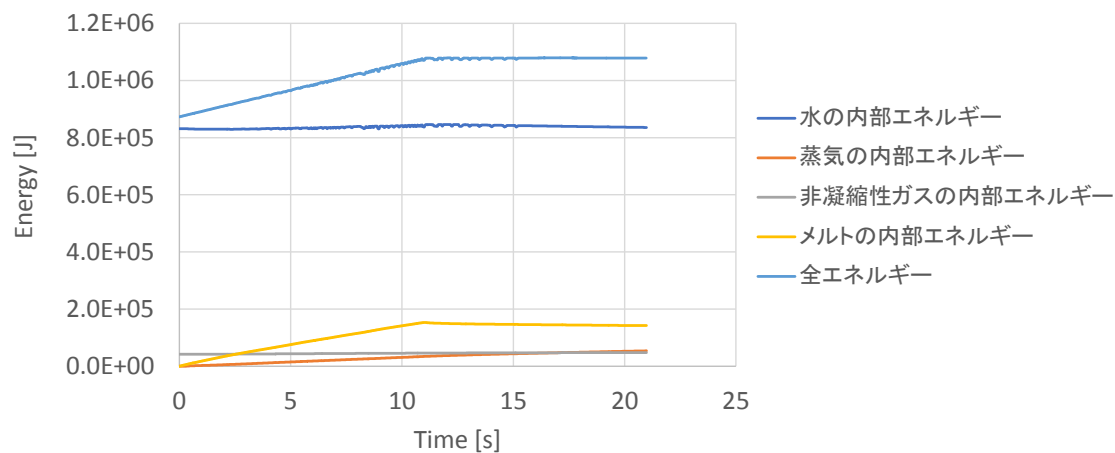


図 A2-3.3 各エネルギーの履歴 (A2-3 キャッチャー1)

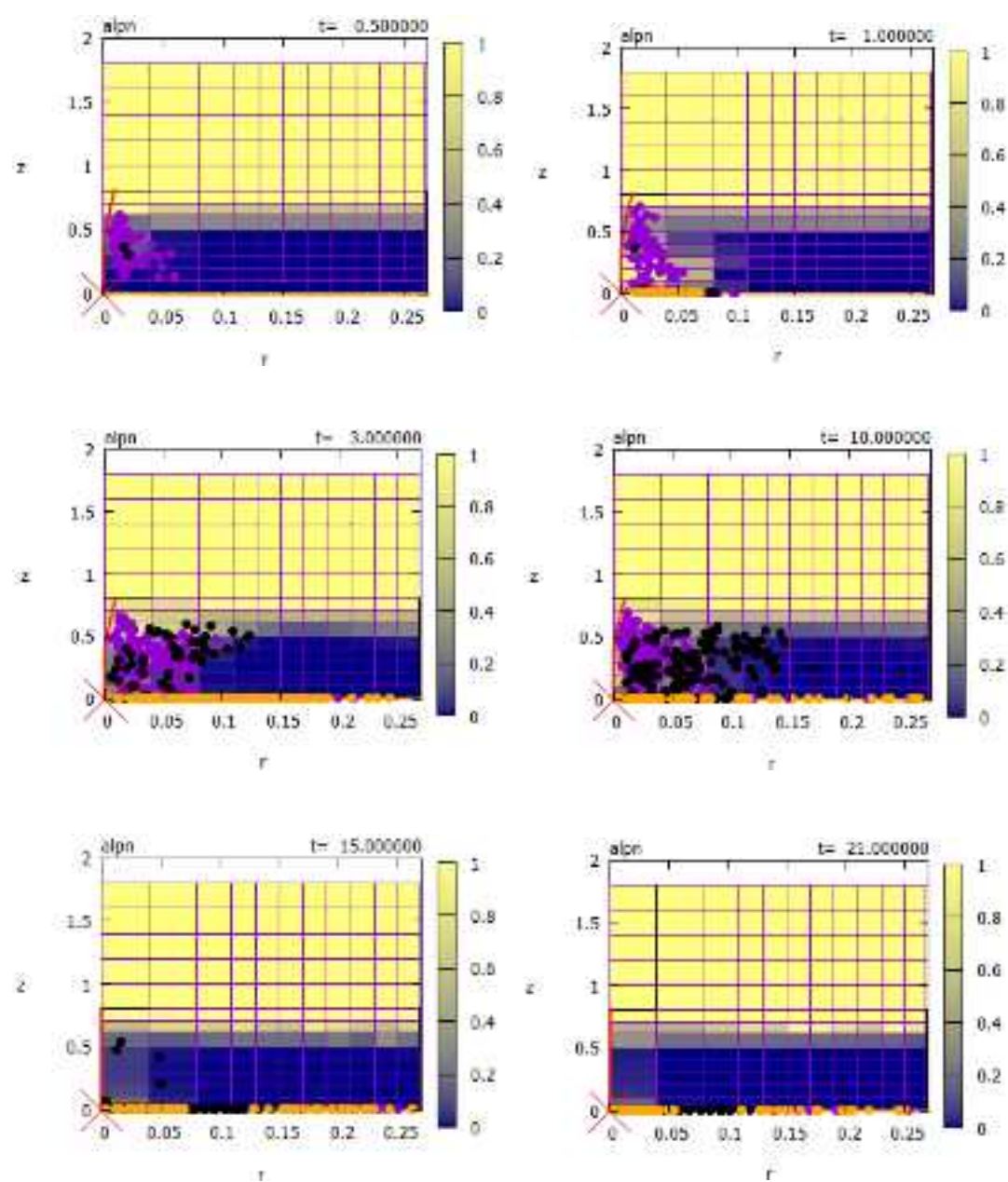


図 A2-3.4 ボイド率及び溶融物粒子分布図 (A2-3 キャッチャー1)  
(橙色：アグロメレーション粒子群、黒色：固化した粒子群)

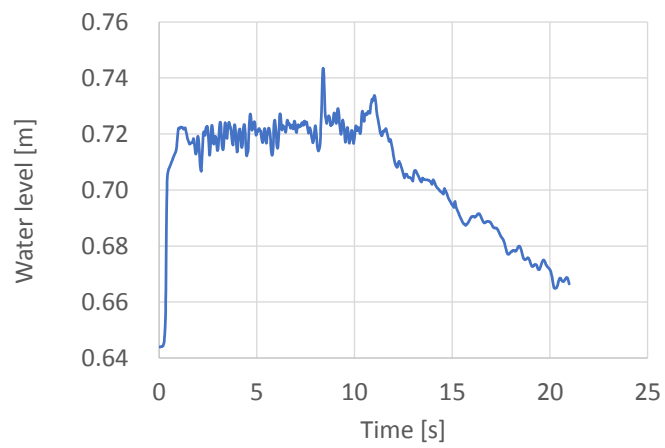


図 A2-3.5 水位履歴 (A2-3 キャッチャー1)

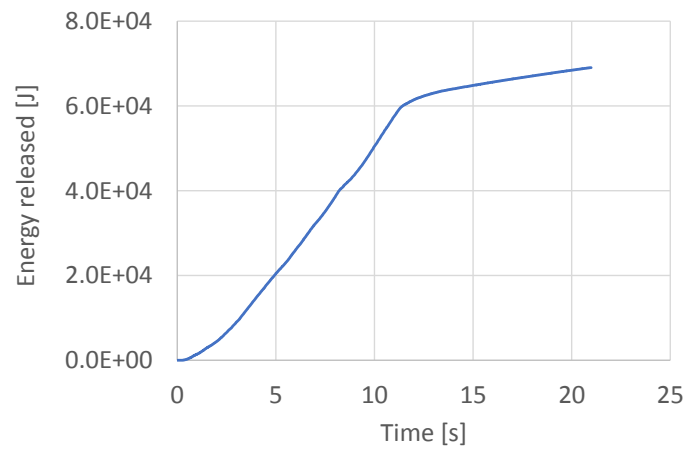


図 A2-3.6 溶融物から水への積算熱移行量 (A2-3 キャッチャー1)

キャッチャー2

表 A2-3.2 質量バランス及びエネルギーバランス (A2-3 キャッチャー2)

| 時刻                  | 0 s       | 1 s       | 21 s      | 21 s-0 s  |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 溶融物の質量バランス [kg]     |           |           |           |           |
| ジェット                | 0.000     | 0.229     | 0.000     |           |
| プール                 | 0.000     | 0.043     | 0.043     |           |
| 粒子                  | 0.000     | 18.371    | 20.455    |           |
| 合計                  | 0.000     | 18.643    | 20.498    |           |
| (粒子のうちアグロメレーションした分) | 0.000     | 6.140     | 7.512     |           |
| 水、蒸気の質量バランス [kg]    |           |           |           |           |
| 水                   | 3.173     | 3.149     | 3.137     |           |
| 蒸気                  | 0.000     | 0.013     | 0.023     |           |
| 合計                  | 3.173     | 3.162     | 3.160     |           |
| エネルギーバランス [J]       |           |           |           |           |
| 水の内部エネルギー           | 1233700   | 1253700   | 1248000   | 14300     |
| 蒸気の内部エネルギー          | 0.343     | 32590.000 | 56945.000 | 56944.657 |
| 非凝縮性ガスの内部エネルギー      | 48284.0   | 52487.0   | 54954.0   | 6670.0    |
| 溶融物の内部エネルギー         | 0.000     | 129740.0  | 126530.0  | 126530.0  |
| 流体の運動エネルギー          | 0.000     | 0.074     | 0.022     | 0.022     |
| 合計                  | 1281984.3 | 1468517.1 | 1486429.0 | 204444.7  |
| エネルギーの増加量           | 0.0       | 186532.7  | 204444.7  |           |
| 流入溶融物のエンタルピ         | 0.0       | 191465.5  | 210514.8  |           |
| 誤差                  | 0.0       | -4932.8   | -6070.2   |           |
|                     | 0.00%     | -0.34%    | -0.41%    |           |

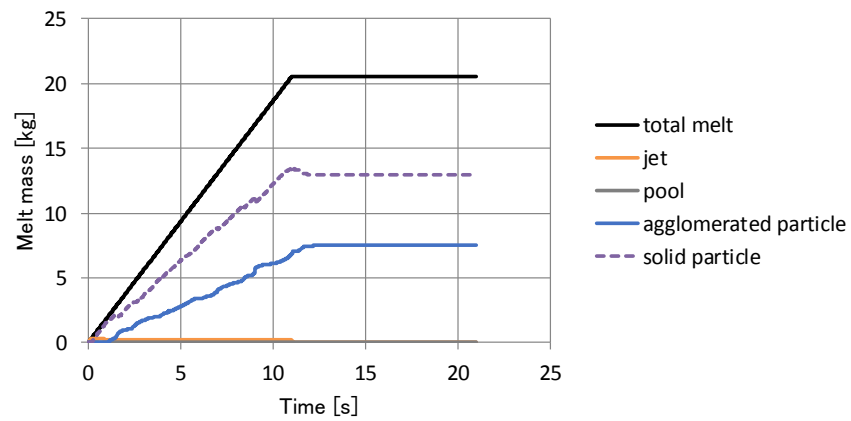


図 A2-3.7 デブリの状態別質量の履歴 (A2-3 キャッチャー2)

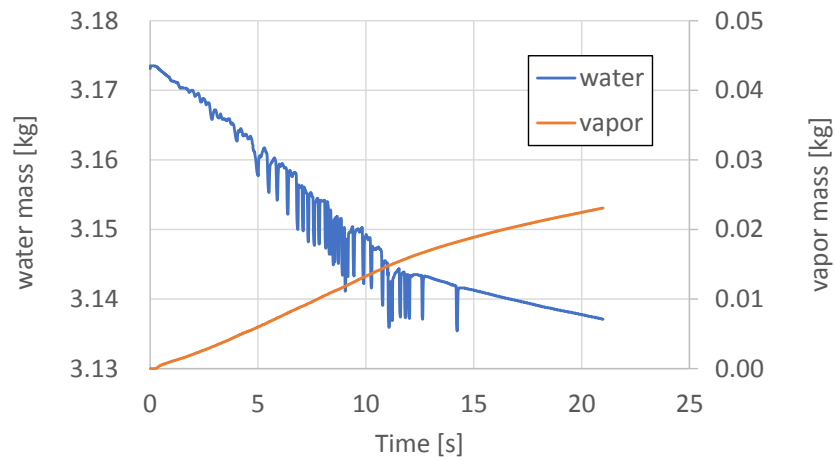


図 A2-3.8 水・水蒸気の質量履歴 (A2-3 キャッチャー2)

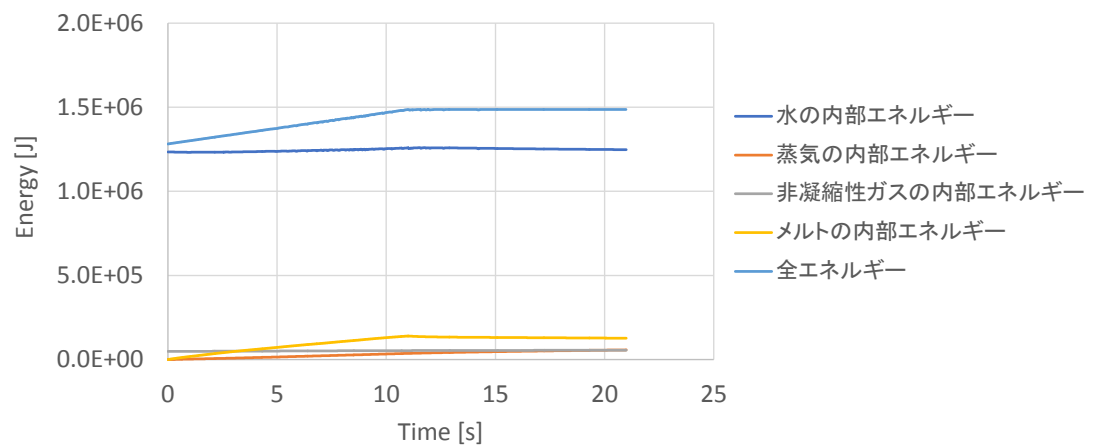


図 A2-3.9 各エネルギーの履歴 (A2-3 キャッチャー2)

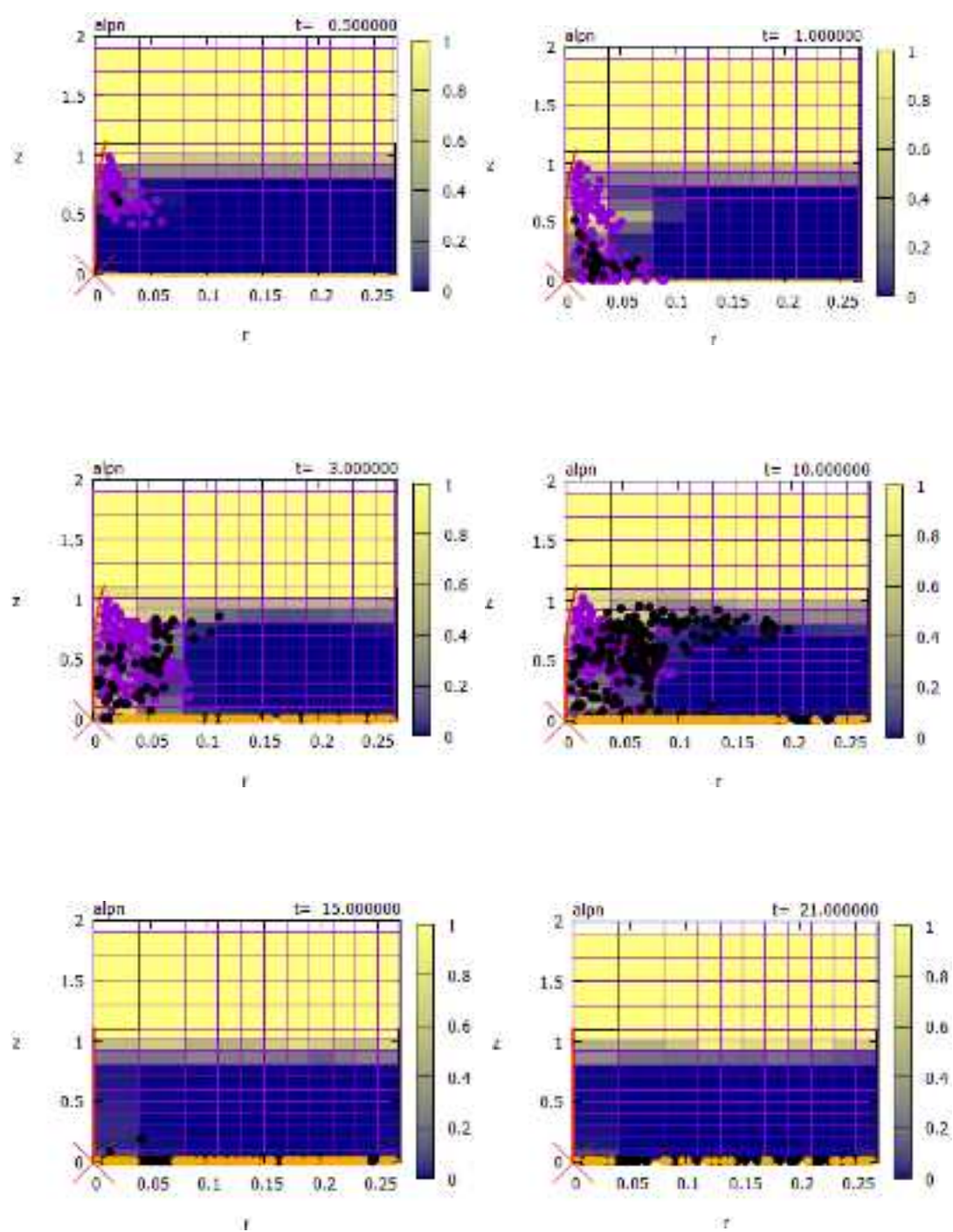


図 A2-3.10 ボイド率及び溶融物粒子分布図 (A2-3 キャッチャー2)  
(橙色：アグロメレーション粒子群、黒色：固化した粒子群)

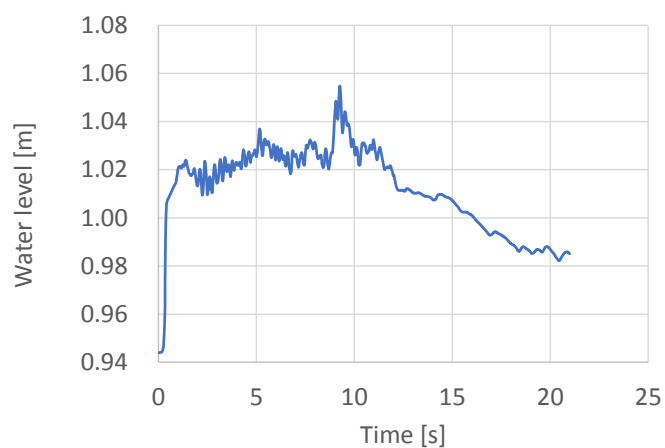


図 A2-3.11 水位履歴 (A2-3 キャッチャー2)

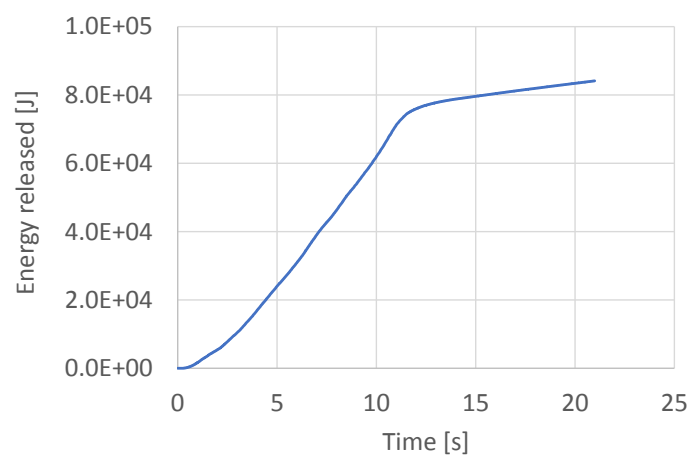


図 A2-3.12 溶融物から水への積算熱移行量 (A2-3 キャッチャー2)

キャッチャー3

表 A2-3.3 質量バランス及びエネルギーバランス (A2-3 キャッチャー3)

| 時刻                  | 0 s       | 1 s       | 21 s      | 21 s-0 s  |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 溶融物の質量バランス [kg]     |           |           |           |           |
| ジェット                | 0.000     | 0.233     | 0.000     |           |
| プール                 | 0.000     | 0.017     | 0.018     |           |
| 粒子                  | 0.000     | 18.368    | 20.447    |           |
| 合計                  | 0.000     | 18.618    | 20.466    |           |
| (粒子のうちアグロメレーションした分) | 0.000     | 4.152     | 5.284     |           |
| 水、蒸気の質量バランス [kg]    |           |           |           |           |
| 水                   | 4.208     | 4.183     | 4.170     |           |
| 蒸気                  | 0.000     | 0.013     | 0.023     |           |
| 合計                  | 4.208     | 4.196     | 4.193     |           |
| エネルギーバランス [J]       |           |           |           |           |
| 水の内部エネルギー           | 1636100   | 1662200   | 1659100   | 23000     |
| 蒸気の内部エネルギー          | 0.392     | 31882.000 | 55885.000 | 55884.608 |
| 非凝縮性ガスの内部エネルギー      | 55030.0   | 59238.0   | 61745.0   | 6715.0    |
| 溶融物の内部エネルギー         | 0.000     | 123810.0  | 117750.0  | 117750.0  |
| 流体の運動エネルギー          | 0.000     | 0.060     | 0.028     | 0.028     |
| 合計                  | 1691130.4 | 1877130.1 | 1894480.0 | 203349.6  |
| エネルギーの増加量           | 0.0       | 185999.7  | 203349.6  |           |
| 流入溶融物のエンタルピ         | 0.0       | 191207.6  | 210185.7  |           |
| 誤差                  | 0.0       | -5207.9   | -6836.1   |           |
|                     | 0.00%     | -0.28%    | -0.36%    |           |

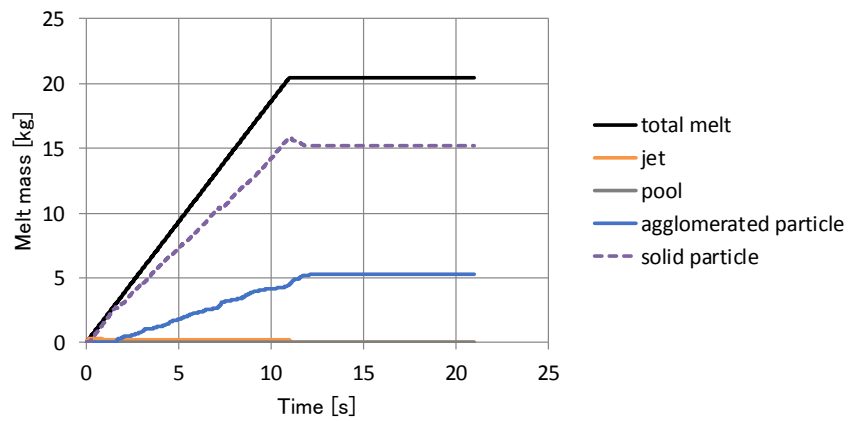


図 A2-3.13 デブリの状態別質量の履歴 (A2-3 キャッチャー3)

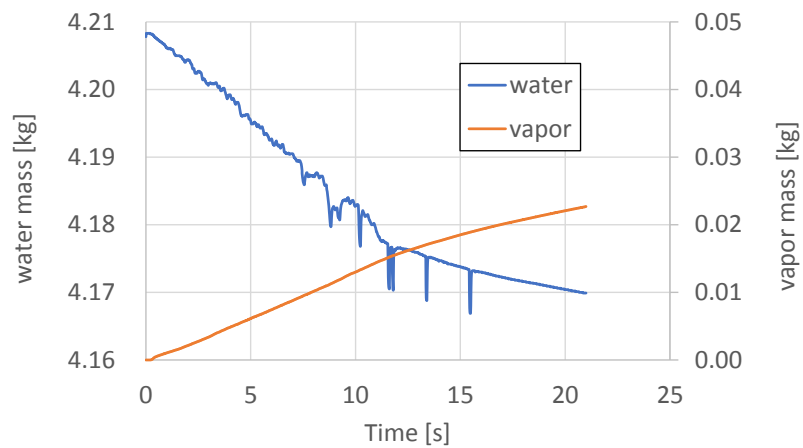


図 A2-3.14 水・水蒸気の質量履歴 (A2-3 キャッチャー3)

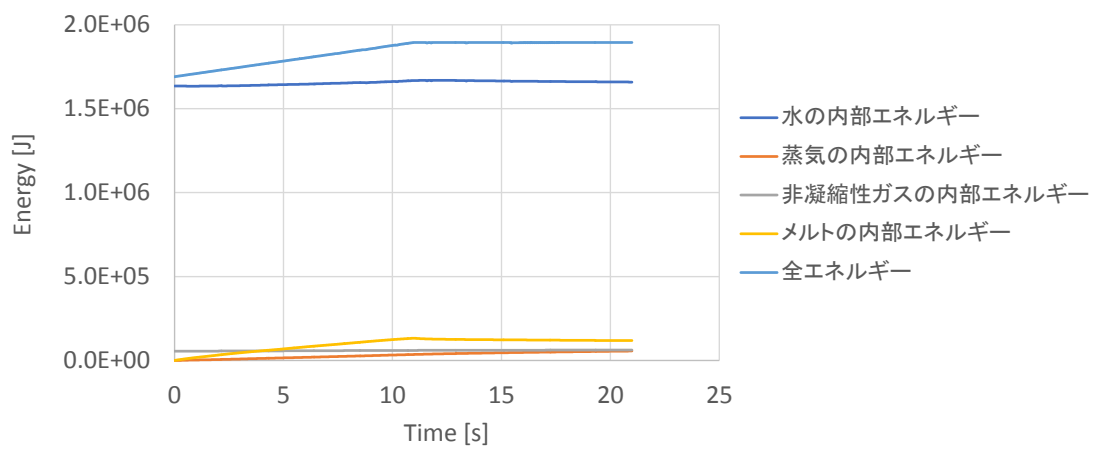


図 A2-3.15 各エネルギーの履歴 (A2-3 キャッチャー3)

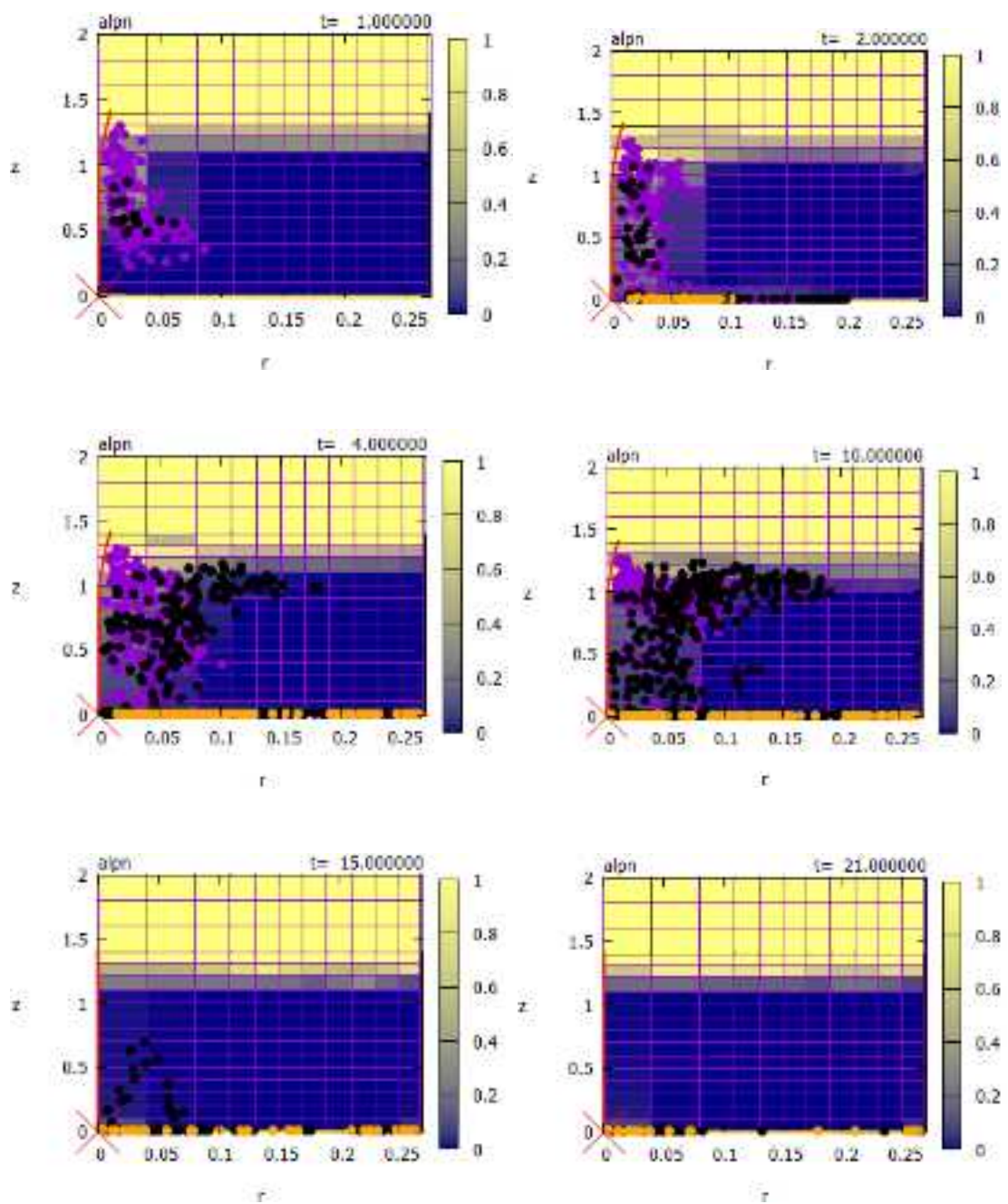


図 A2-3.16 ボイド率及び溶融物粒子分布図 (A2-3 キャッチャー3)  
(橙色：アグロメレーション粒子群、黒色：固化した粒子群)

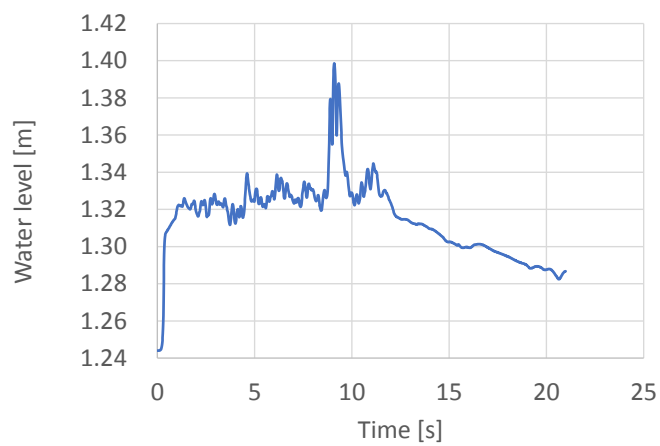


図 A2-3.17 水位履歴 (A2-3 キャッチャー3)

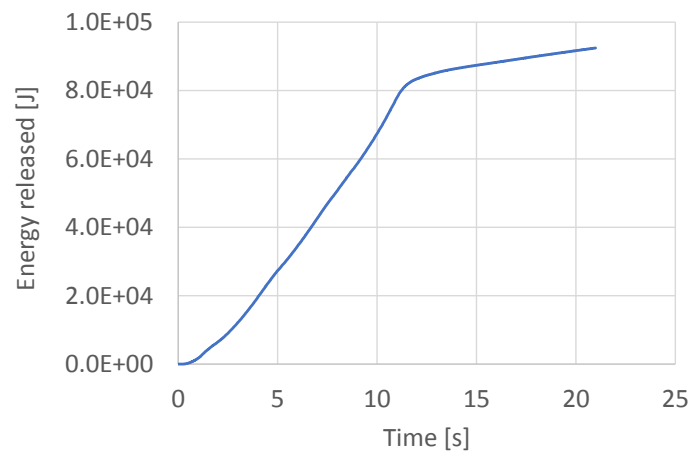


図 A2-3.18 溶融物から水への積算熱移行量 (A2-3 キャッチャー3)

キャッチャー4

表 A2-3.4 質量バランス及びエネルギーバランス (A2-3 キャッチャー4)

| 時刻                  | 0 s       | 1 s       | 21 s      | 21 s-0 s  |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 溶融物の質量バランス [kg]     |           |           |           |           |
| ジェット                | 0.000     | 0.210     | 0.000     |           |
| プール                 | 0.000     | 0.006     | 0.006     |           |
| 粒子                  | 0.000     | 18.389    | 20.429    |           |
| 合計                  | 0.000     | 18.605    | 20.435    |           |
| (粒子のうちアグロメレーションした分) | 0.000     | 3.148     | 4.026     |           |
| 水、蒸気の質量バランス [kg]    |           |           |           |           |
| 水                   | 5.243     | 5.216     | 5.204     |           |
| 蒸気                  | 0.000     | 0.013     | 0.023     |           |
| 合計                  | 5.243     | 5.230     | 5.227     |           |
| エネルギーバランス [J]       |           |           |           |           |
| 水の内部エネルギー           | 2038400   | 2068500   | 2066200   | 27800     |
| 蒸気の内部エネルギー          | 0.441     | 32845.000 | 57494.000 | 57493.559 |
| 非凝縮性ガスの内部エネルギー      | 61777.0   | 66184.0   | 68689.0   | 6912.0    |
| 溶融物の内部エネルギー         | 0.000     | 118080.0  | 110700.0  | 110700.0  |
| 流体の運動エネルギー          | 0.000     | 0.149     | 0.040     | 0.040     |
| 合計                  | 2100177.4 | 2285609.1 | 2303083.0 | 202905.6  |
| エネルギーの増加量           | 0.0       | 185431.7  | 202905.6  |           |
| 流入溶融物のエンタルピ         | 0.0       | 191072.1  | 209869.6  |           |
| 誤差                  | 0.0       | -5640.4   | -6964.0   |           |
|                     | 0.00%     | -0.25%    | -0.30%    |           |

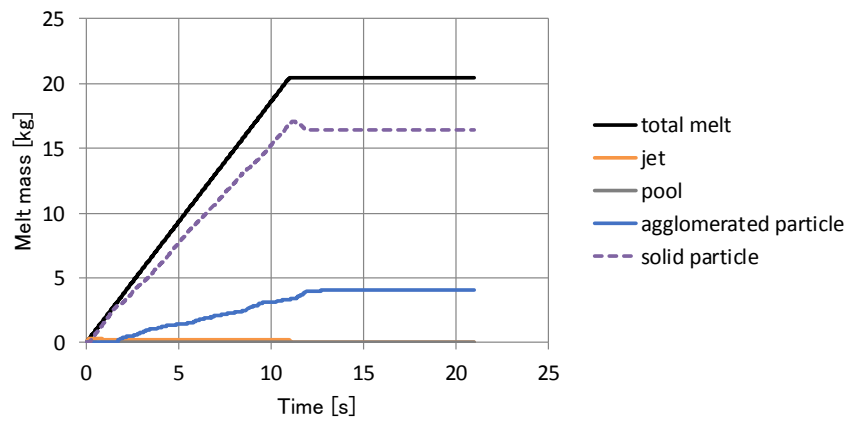


図 A2-3.19 デブリの状態別質量の履歴 (A2-3 キャッチャー4)

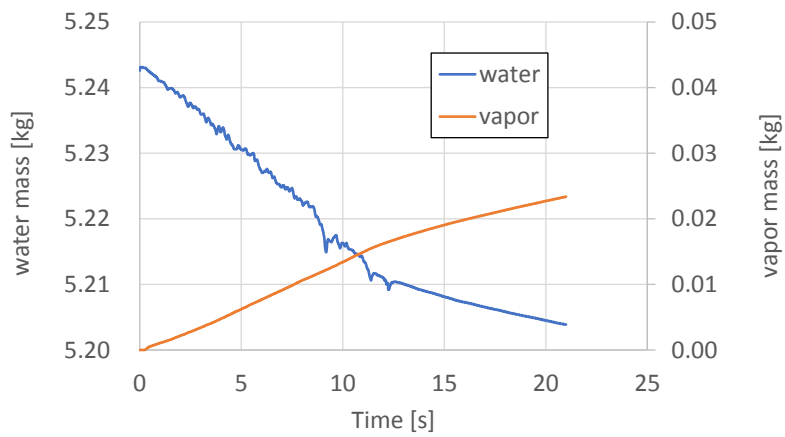


図 A2-3.20 水・水蒸気の質量履歴 (A2-3 キャッチャー4)

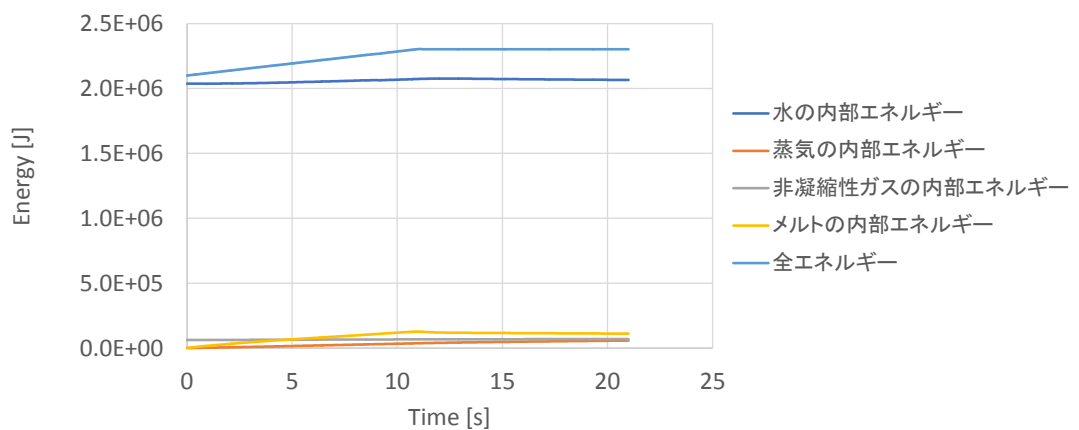


図 A2-3.21 各エネルギーの履歴 (A2-3 キャッチャー4)

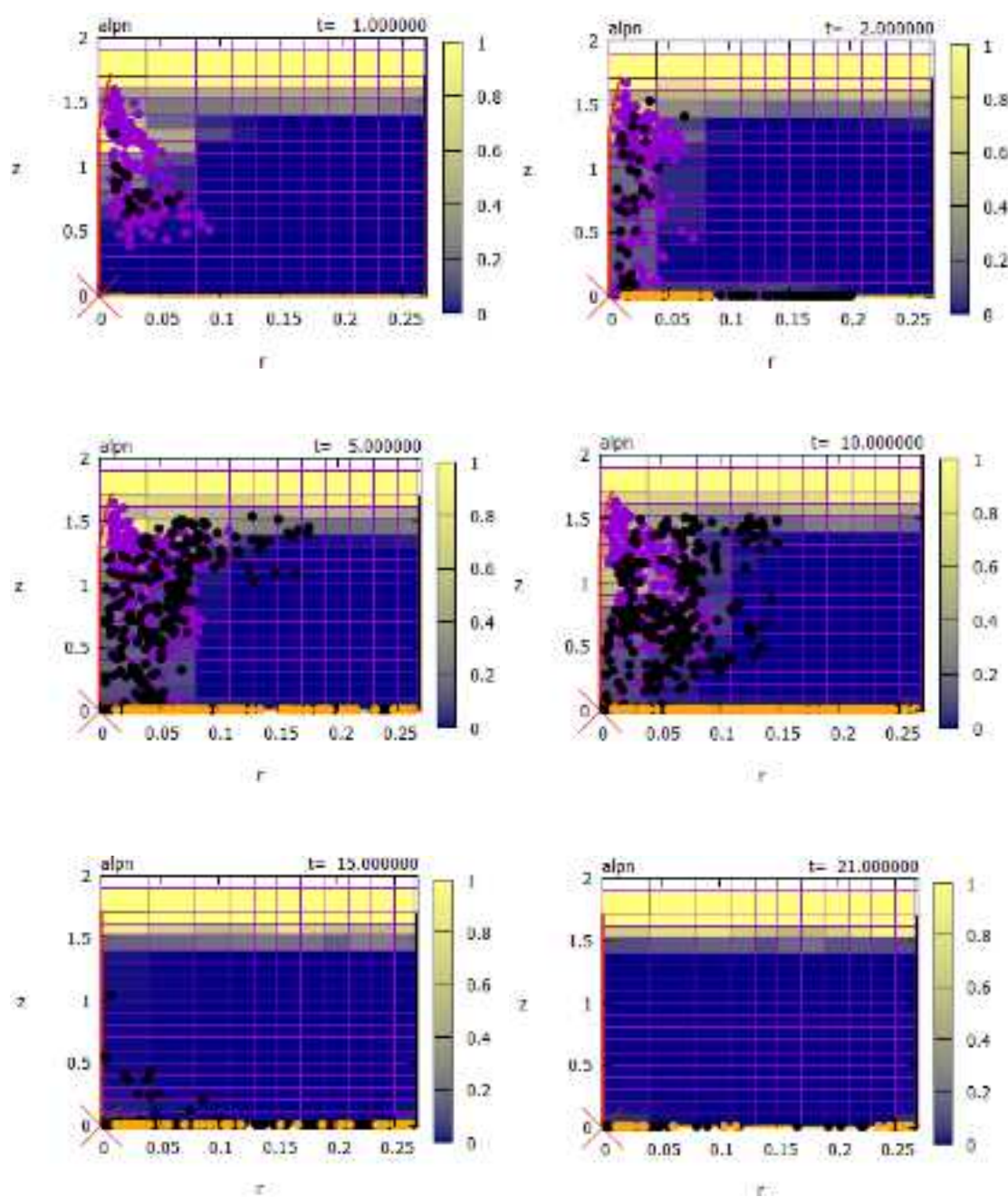


図 A2-3.22 ボイド率及び溶融物粒子分布図 (A2-3 キャッチャー4)  
 (橙色：アグロメレーション粒子群、黒色：固化した粒子群)

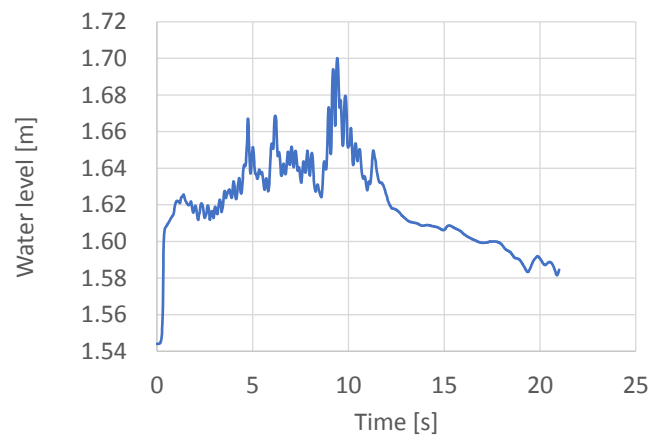


図 A2-3.23 水位履歴 (A2-3 キャッチャー4)

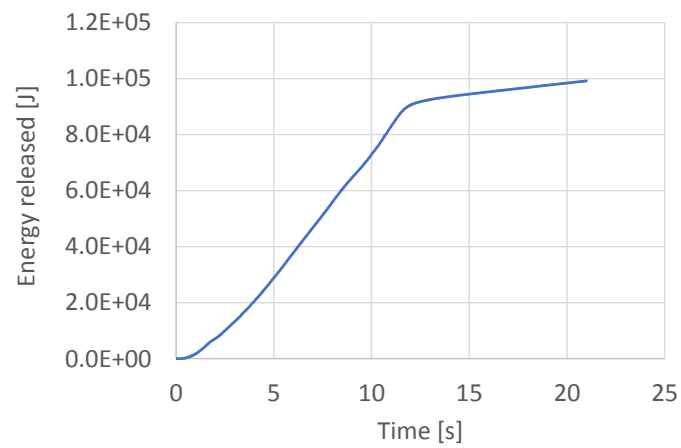


図 A2-3.24 溶融物から水への積算熱移行量 (A2-3 キャッチャー4)

A2-5 DEFOR-A2 ( $\phi_{\text{im}} = 2$ ,  $k_{\text{qht}} = 0.8$ )

キャッチャー1

表 A2-5.1 質量バランス及びエネルギーバランス (A2-5 キャッチャー1)

| 時刻                  | 0 s      | 1 s       | 21 s      | 21 s-0 s  |
|---------------------|----------|-----------|-----------|-----------|
| 溶融物の質量バランス [kg]     |          |           |           |           |
| ジェット                | 0.000    | 0.247     | 0.000     |           |
| プール                 | 0.000    | 0.073     | 0.088     |           |
| 粒子                  | 0.000    | 18.372    | 20.461    |           |
| 合計                  | 0.000    | 18.692    | 20.549    |           |
| (粒子のうちアグロメレーションした分) | 0.000    | 0.017     | 0.016     |           |
| 水、蒸気の質量バランス [kg]    |          |           |           |           |
| 水                   | 2.138    | 2.117     | 2.096     |           |
| 蒸気                  | 0.000    | 0.013     | 0.023     |           |
| 合計                  | 2.138    | 2.129     | 2.119     |           |
| エネルギーバランス [J]       |          |           |           |           |
| 水の内部エネルギー           | 831440   | 845970    | 835320    | 3880      |
| 蒸気の内部エネルギー          | 0.295    | 31732.000 | 56526.000 | 56525.705 |
| 非凝縮性ガスの内部エネルギー      | 41537.0  | 45547.0   | 47856.0   | 6319.0    |
| 溶融物の内部エネルギー         | 0.000    | 136770.0  | 132970.0  | 132970.0  |
| 流体の運動エネルギー          | 0.000    | 0.069     | 0.040     | 0.040     |
| 合計                  | 872977.3 | 1060019.1 | 1072672.0 | 199694.7  |
| エネルギーの増加量           | 0.0      | 187041.8  | 199694.7  |           |
| 流入溶融物のエンタルピー        | 0.0      | 191969.0  | 211044.0  |           |
| 誤差                  | 0.0      | -4927.3   | -11349.2  |           |
|                     | 0.00%    | -0.46%    | -1.06%    |           |

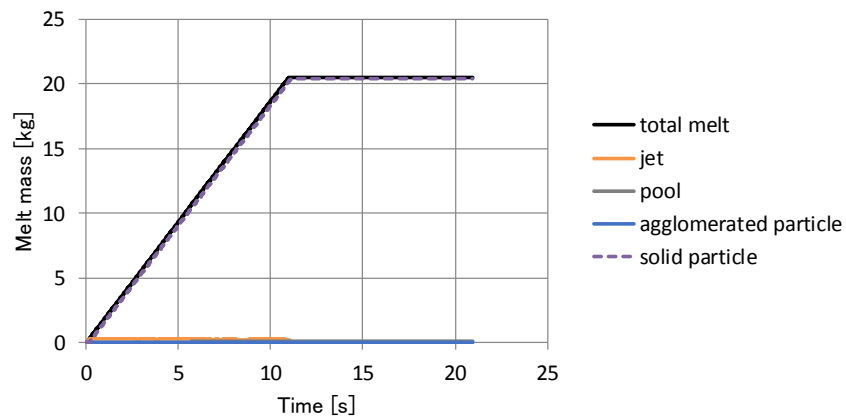


図 A2-5.1 デブリの状態別質量の履歴 (A2-5 キャッチャー1)

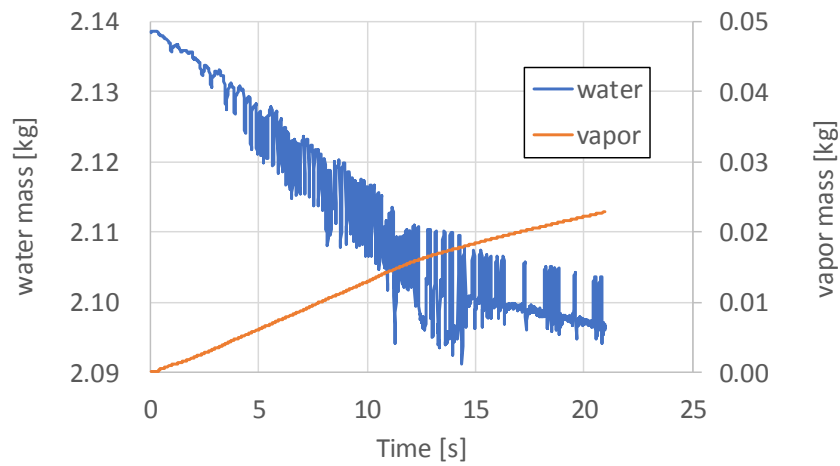


図 A2-5.2 水・水蒸気の質量履歴 (A2-5 キャッチャー1)

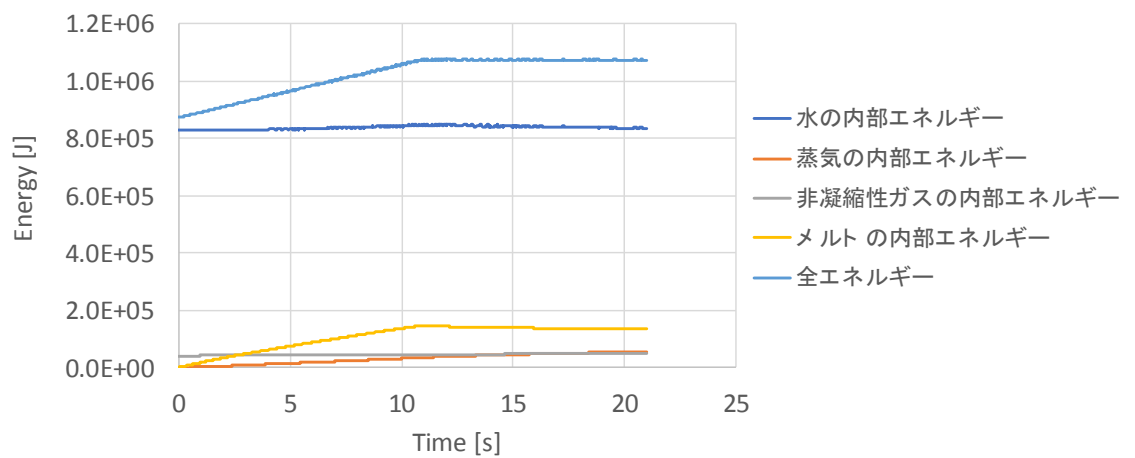


図 A2-5.3 各エネルギーの履歴 (A2-5 キャッチャー1)

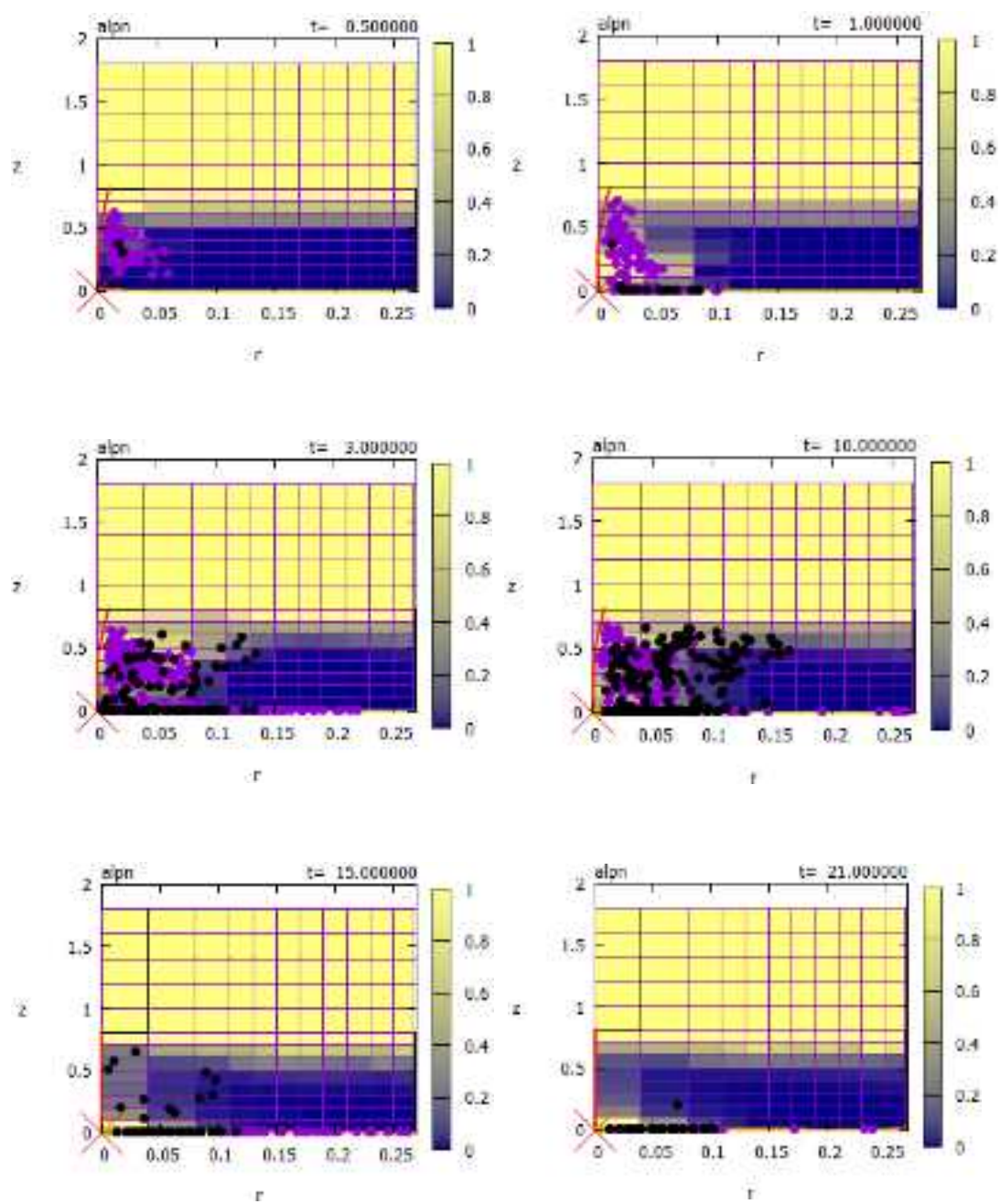


図 A2-5.4 ボイド率及び溶融物粒子分布図 (A2-5 キャッチャー1)  
(橙色：アグロメレーション粒子群、黒色：固化した粒子群)

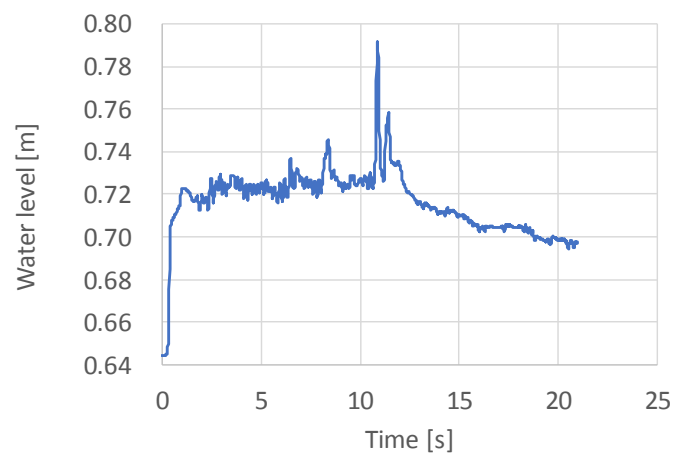


図 A2-5.5 水位履歴 (A2-5 キャッチャー1)

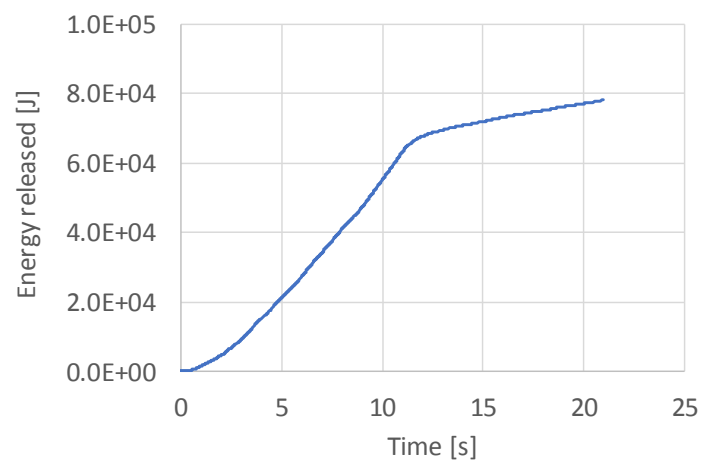


図 A2-5.6 溶融物から水への積算熱移行量 (A2-5 キャッチャー1)

キャッチャー2

表 A2-5.2 質量バランス及びエネルギーバランス (A2-5 キャッチャー2)

| 時刻                  | 0 s       | 1 s       | 21 s      | 21 s-0 s  |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 溶融物の質量バランス [kg]     |           |           |           |           |
| ジェット                | 0.000     | 0.222     | 0.000     |           |
| プール                 | 0.000     | 0.041     | 0.041     |           |
| 粒子                  | 0.000     | 18.368    | 20.455    |           |
| 合計                  | 0.000     | 18.630    | 20.496    |           |
| (粒子のうちアグロメレーションした分) | 0.000     | 4.633     | 6.145     |           |
| 水、蒸気の質量バランス [kg]    |           |           |           |           |
| 水                   | 3.173     | 3.143     | 3.138     |           |
| 蒸気                  | 0.000     | 0.013     | 0.023     |           |
| 合計                  | 3.173     | 3.156     | 3.161     |           |
| エネルギーバランス [J]       |           |           |           |           |
| 水の内部エネルギー           | 1233700   | 1251100   | 1248800   | 15100     |
| 蒸気の内部エネルギー          | 0.343     | 32338.000 | 56787.000 | 56786.657 |
| 非凝縮性ガスの内部エネルギー      | 48284.0   | 52458.0   | 54928.0   | 6644.0    |
| 溶融物の内部エネルギー         | 0.000     | 129700.0  | 125730.0  | 125730.0  |
| 流体の運動エネルギー          | 0.000     | 0.131     | 0.026     | 0.026     |
| 合計                  | 1281984.3 | 1465596.1 | 1486245.0 | 204260.7  |
| エネルギーの増加量           | 0.0       | 183611.8  | 204260.7  |           |
| 流入溶融物のエンタルピ         | 0.0       | 191336.7  | 210501.9  |           |
| 誤差                  | 0.0       | -7724.9   | -6241.3   |           |
|                     | 0.00%     | -0.53%    | -0.42%    |           |

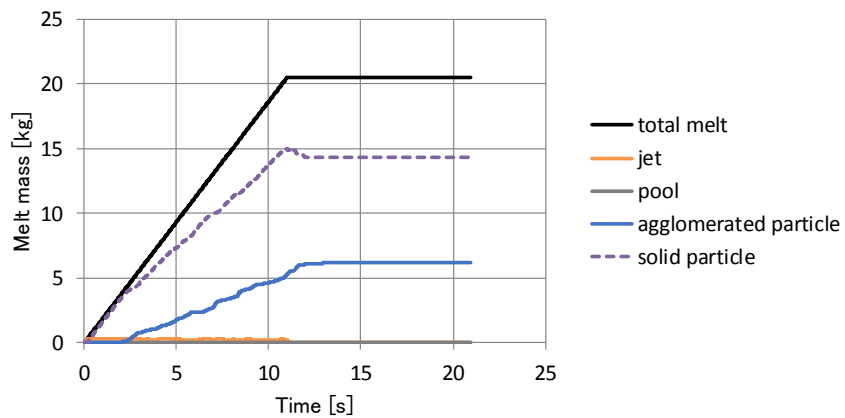


図 A2-5.7 デブリの状態別質量の履歴 (A2-5 キャッチャー2)

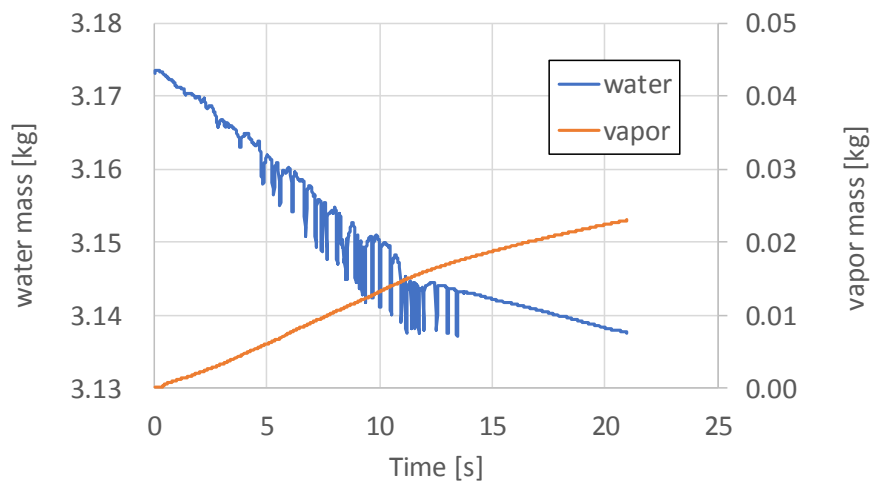


図 A2-5.8 水・水蒸気の質量履歴 (A2-5 キャッチャー2)

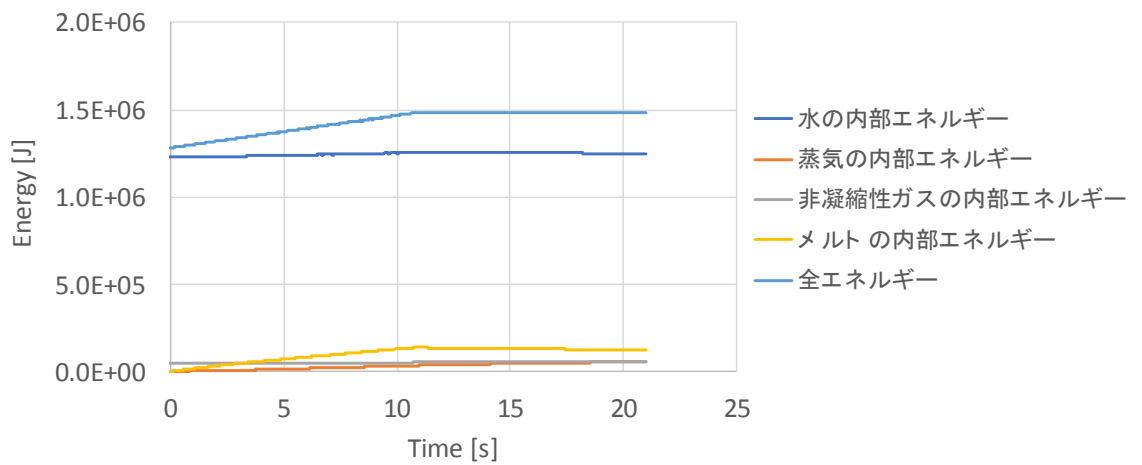


図 A2-5.9 各エネルギーの履歴 (A2-5 キャッチャー2)

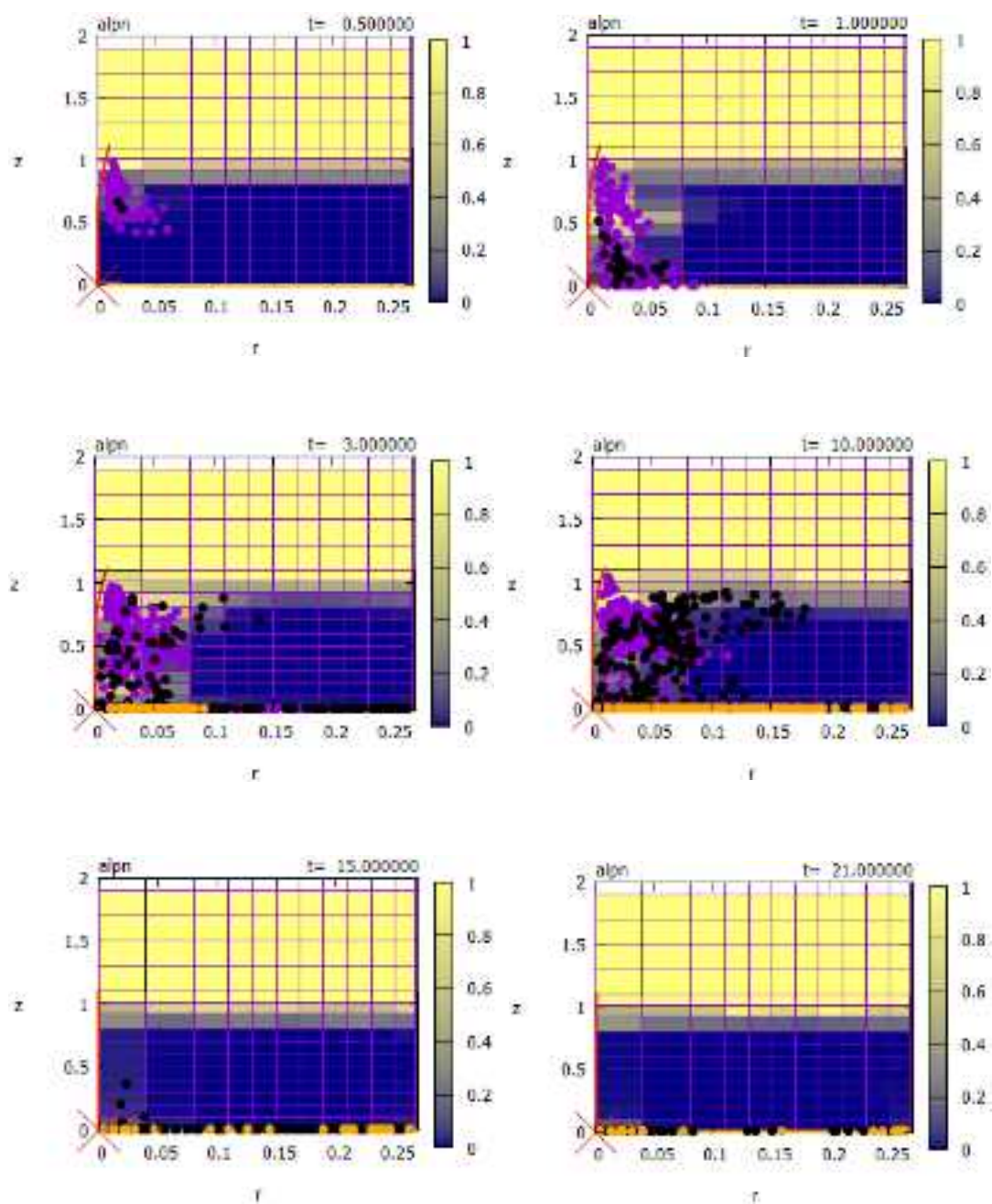


図 A2-5.10 ボイド率及び溶融物粒子分布図 (A2-5 キャッチャー2)  
(橙色：アグロメレーション粒子群、黒色：固化した粒子群)

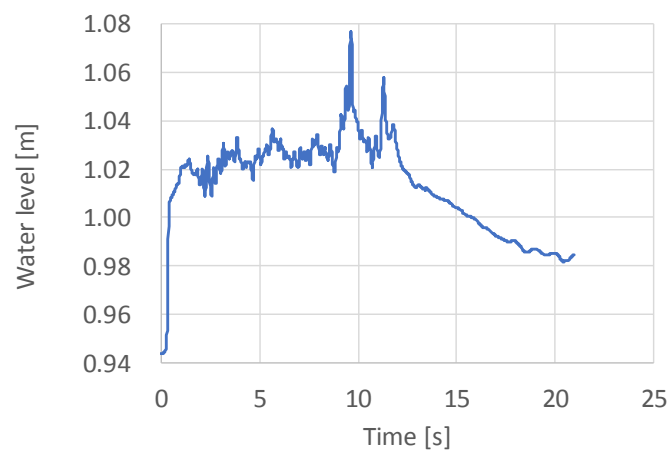


図 A2-5.11 水位履歴 (A2-5 キャッチャー2)

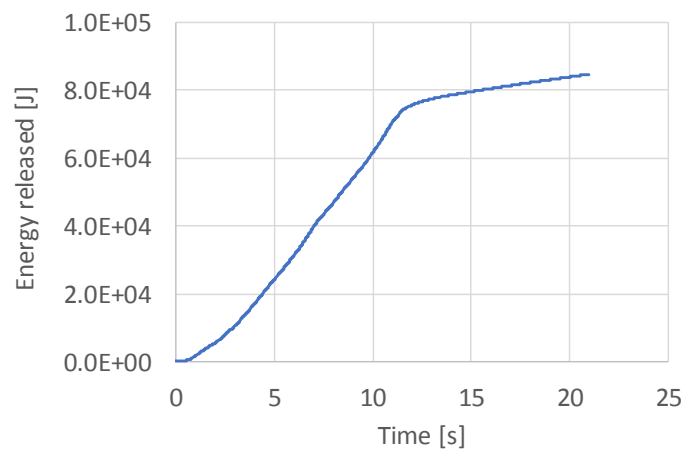


図 A2-5.12 溶融物から水への積算熱移行量 (A2-5 キャッチャー2)

キャッチャー3

表 A2-5.3 質量バランス及びエネルギーバランス (A2-5 キャッチャー3)

| 時刻                  | 0 s       | 1 s       | 21 s      | 21 s-0 s  |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 溶融物の質量バランス [kg]     |           |           |           |           |
| ジェット                | 0.000     | 0.225     | 0.000     |           |
| プール                 | 0.000     | 0.011     | 0.010     |           |
| 粒子                  | 0.000     | 18.371    | 20.447    |           |
| 合計                  | 0.000     | 18.608    | 20.457    |           |
| (粒子のうちアグロメレーションした分) | 0.000     | 0.000     | 0.000     |           |
| 水、蒸気の質量バランス [kg]    |           |           |           |           |
| 水                   | 4.208     | 4.181     | 4.169     |           |
| 蒸気                  | 0.000     | 0.013     | 0.023     |           |
| 合計                  | 4.208     | 4.194     | 4.191     |           |
| エネルギーバランス [J]       |           |           |           |           |
| 水の内部エネルギー           | 1636100   | 1661700   | 1661800   | 25700     |
| 蒸気の内部エネルギー          | 0.392     | 31255.000 | 55887.000 | 55886.608 |
| 非凝縮性ガスの内部エネルギー      | 55030.0   | 59173.0   | 61733.0   | 6703.0    |
| 溶融物の内部エネルギー         | 0.000     | 124270.0  | 114500.0  | 114500.0  |
| 流体の運動エネルギー          | 0.000     | 0.183     | 0.029     | 0.029     |
| 合計                  | 1691130.4 | 1876398.2 | 1893920.0 | 202789.6  |
| エネルギーの増加量           | 0.0       | 185267.8  | 202789.6  |           |
| 流入溶融物のエンタルピ         | 0.0       | 191104.4  | 210101.9  |           |
| 誤差                  | 0.0       | -5836.6   | -7312.2   |           |
|                     | 0.00%     | -0.31%    | -0.39%    |           |

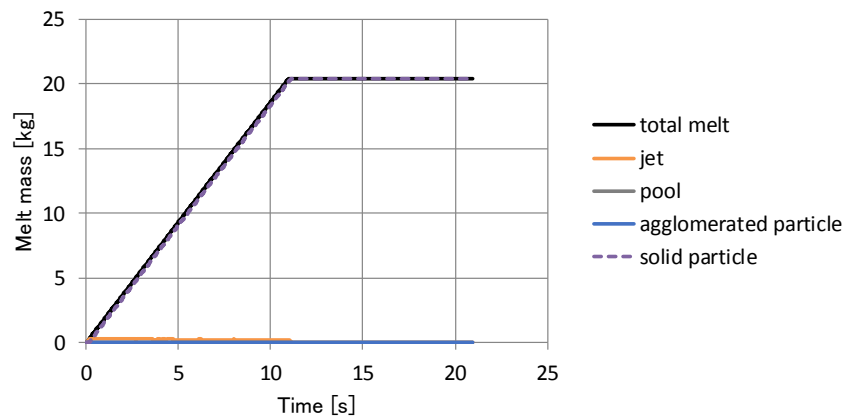


図 A2-5.13 デブリの状態別質量の履歴 (A2-5 キャッチャー3)

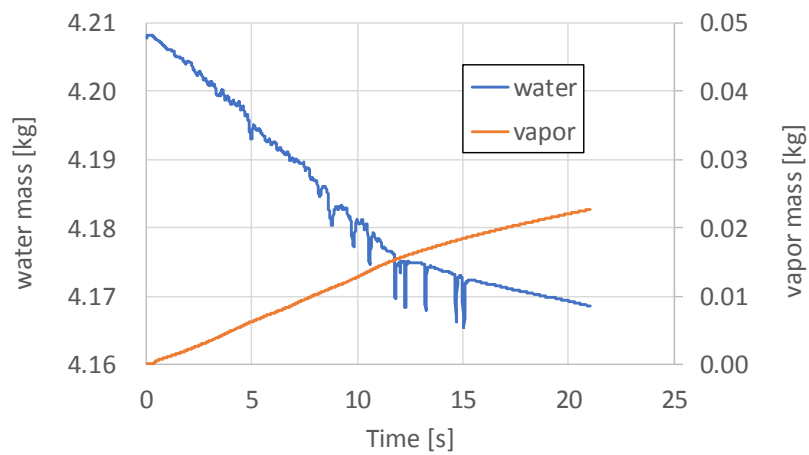


図 A2-5.14 水・水蒸気の質量履歴 (A2-5 キャッチャー3)

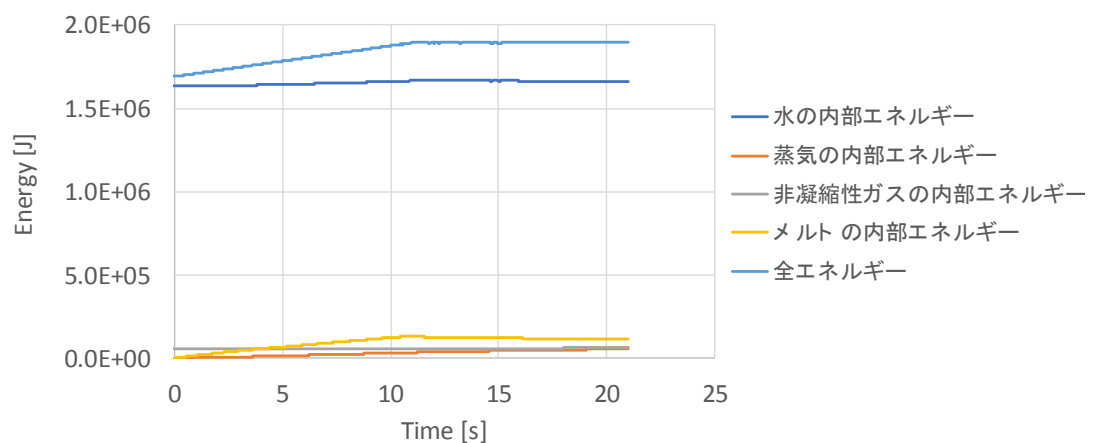


図 A2-5.15 各エネルギーの履歴 (A2-5 キャッチャー3)

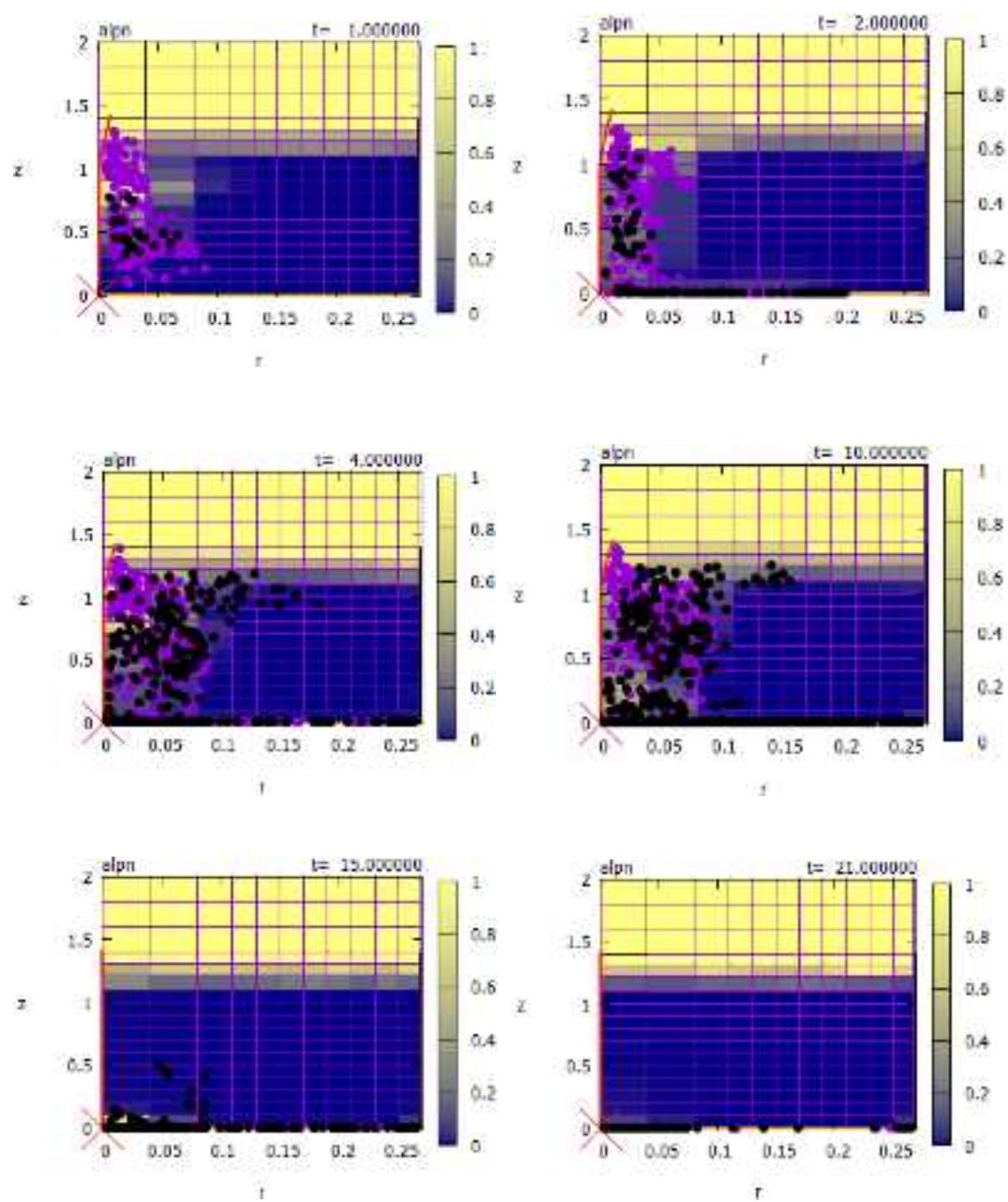


図 A2-5.16 ボイド率及び溶融物粒子分布図 (A2-5 キャッチャー3)  
(橙色：アグロメレーション粒子群、黒色：固化した粒子群)

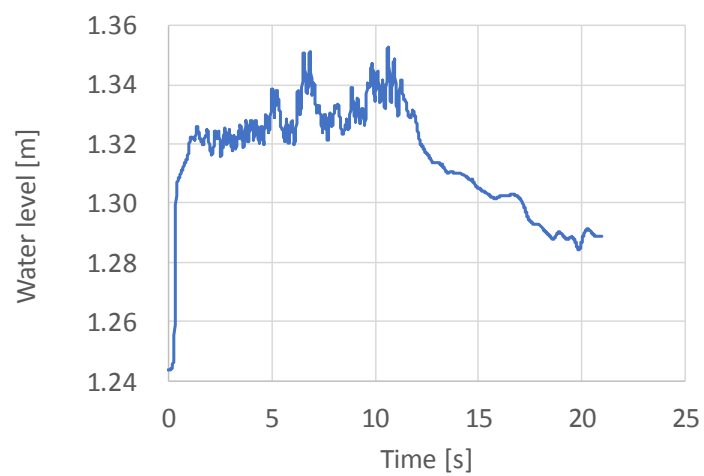


図 A2-5.17 水位履歴 (A2-5 キャッチャー3)

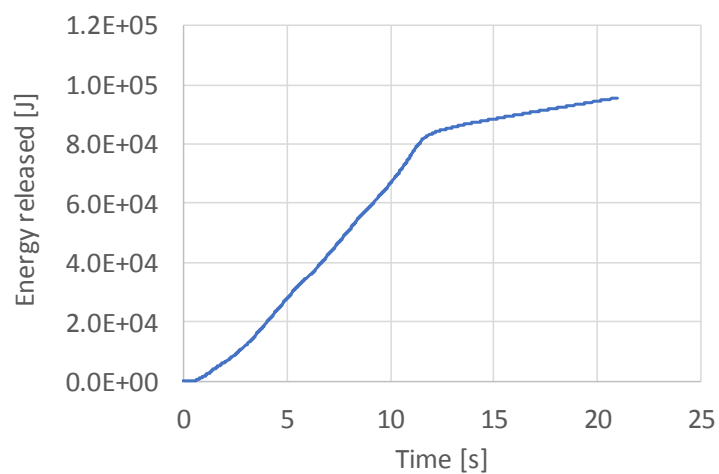


図 A2-5.18 溶融物から水への積算熱移行量 (A2-5 キャッチャー3)

キャッチャー4

表 A2-5.4 質量バランス及びエネルギーバランス (A2-5 キャッチャー4)

| 時刻                  | 0 s       | 1 s       | 21 s      | 21 s-0 s  |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 溶融物の質量バランス [kg]     |           |           |           |           |
| ジェット                | 0.000     | 0.223     | 0.000     |           |
| プール                 | 0.000     | 0.026     | 0.029     |           |
| 粒子                  | 0.000     | 18.360    | 20.432    |           |
| 合計                  | 0.000     | 18.610    | 20.461    |           |
| (粒子のうちアグロメレーションした分) | 0.000     | 0.000     | 0.000     |           |
| 水、蒸気の質量バランス [kg]    |           |           |           |           |
| 水                   | 5.243     | 5.217     | 5.203     |           |
| 蒸気                  | 0.000     | 0.014     | 0.024     |           |
| 合計                  | 5.243     | 5.231     | 5.227     |           |
| エネルギーバランス [J]       |           |           |           |           |
| 水の内部エネルギー           | 2038400   | 2070500   | 2068800   | 30400     |
| 蒸気の内部エネルギー          | 0.441     | 33918.000 | 58680.000 | 58679.559 |
| 非凝縮性ガスの内部エネルギー      | 61777.0   | 66312.0   | 68804.0   | 7027.0    |
| 溶融物の内部エネルギー         | 0.000     | 115270.0  | 106870.0  | 106870.0  |
| 流体の運動エネルギー          | 0.000     | 0.063     | 0.034     | 0.034     |
| 合計                  | 2100177.4 | 2286000.1 | 2303154.0 | 202976.6  |
| エネルギーの増加量           | 0.0       | 185822.6  | 202976.6  |           |
| 流入溶融物のエンタルピ         | 0.0       | 191123.7  | 210134.1  |           |
| 誤差                  | 0.0       | -5301.1   | -7157.5   |           |
|                     | 0.00%     | -0.23%    | -0.31%    |           |

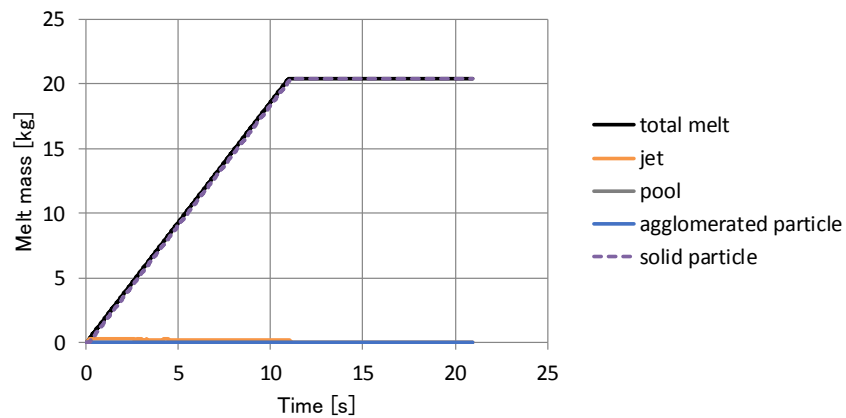


図 A2-5.19 デブリの状態別質量の履歴 (A2-5 キャッチャー4)

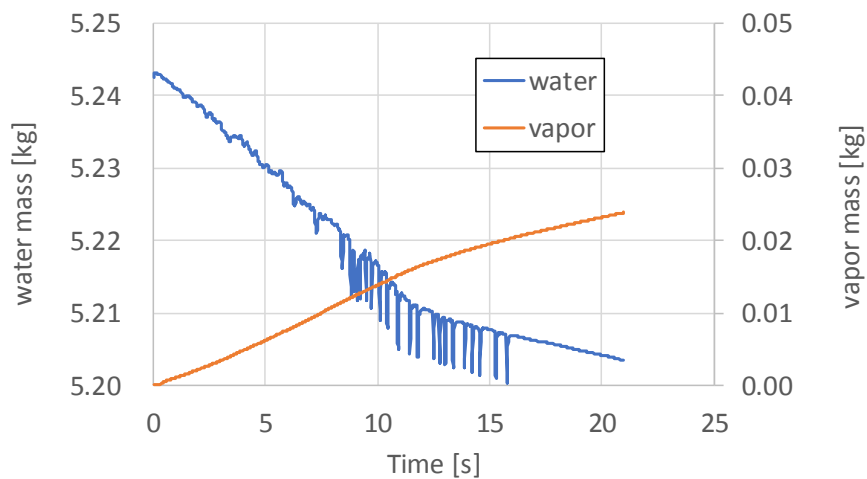


図 A2-5.20 水・水蒸気の質量履歴 (A2-5 キャッチャー4)

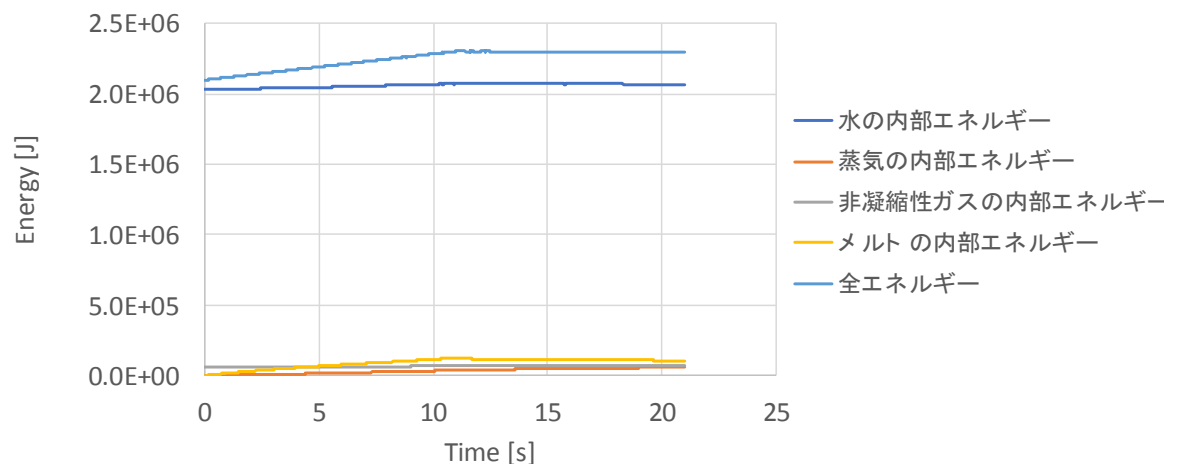


図 A2-5.21 各エネルギーの履歴 (A2-5 キャッチャー4)

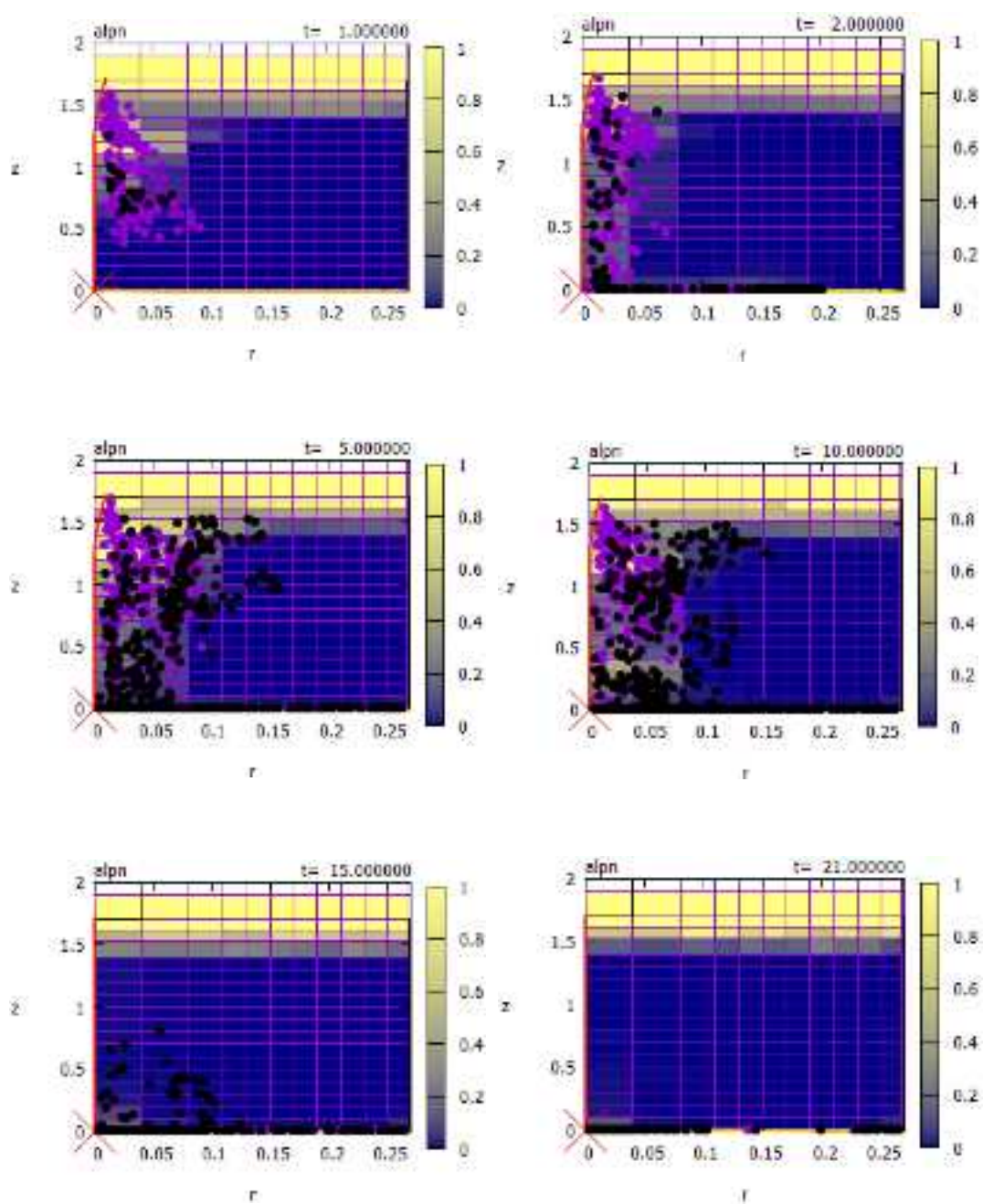


図 A2-5.22 ボイド率及び溶融物粒子分布図 (A2-5 キャッチャー4)  
(橙色：アグロメレーション粒子群、黒色：固化した粒子群)

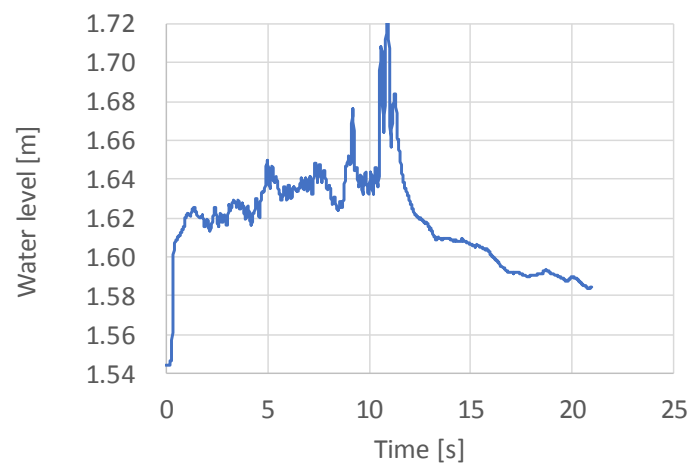


図 A2-5.23 水位履歴 (A2-5 キャッチャー4)

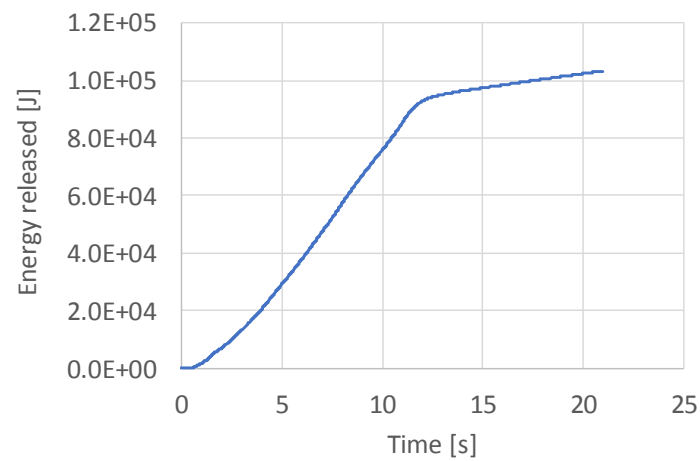


図 A2-5.24 溶融物から水への積算熱移行量 (A2-5 キャッチャー4)

A2-6 DEFOR-A2 ( $\phi_{\text{im}} = 1.5$ ,  $k_{\text{qht}} = 0.9$ )

キャッチャー1

表 A2-6.1 質量バランス及びエネルギーバランス (A2-6 キャッチャー1)

| 時刻                     | 0 s        | 1 s        | 21 s       | 21 s-0 s   |
|------------------------|------------|------------|------------|------------|
| 溶融物の質量バランス [kg]        |            |            |            |            |
| ジェット                   | 0.000      | 0.232      | 0.000      |            |
| プール                    | 0.000      | 0.065      | 0.074      |            |
| 粒子                     | 0.000      | 18.406     | 20.477     |            |
| 合計                     | 0.000      | 18.703     | 20.551     |            |
| (粒子のうちアグロメレーションした分)    | 0.000      | 8.005      | 10.068     |            |
| (粒子のうちアグロメレーションした分の割合) | 0.00%      | 43.49%     | 49.17%     |            |
| 水、蒸気の質量バランス [kg]       |            |            |            |            |
| 水                      | 134.360    | 132.632    | 132.035    |            |
| 蒸気                     | 0.000      | 0.780      | 1.364      |            |
| 合計                     | 134.360    | 133.412    | 133.399    |            |
| エネルギーバランス [J]          |            |            |            |            |
| 水の内部エネルギー              | 52,240,916 | 52,838,447 | 52,387,942 | 147,027    |
| 蒸気の内部エネルギー             | 19         | 1,914,549  | 3,369,735  | 3,369,717  |
| 非凝縮性ガスの内部エネルギー         | 2,609,847  | 2,854,200  | 2,993,686  | 383,840    |
| 溶融物の内部エネルギー            | 0.0        | 8,871,229  | 8,907,043  | 8,907,043  |
| 流体の運動エネルギー             | 0.0        | 4.09       | 1.52       | 1.52       |
| 合計                     | 54,850,781 | 66,478,429 | 67,658,409 | 12,807,628 |
| エネルギーの増加量              | 0.0        | 11,627,648 | 12,807,628 |            |
| 流入溶融物のエンタルピ            | 0.0        | 12,069,069 | 13,261,501 |            |
| 誤差                     | 0.0        | -441,421   | -453,873   |            |
|                        | 0.00%      | -0.66%     | -0.67%     |            |

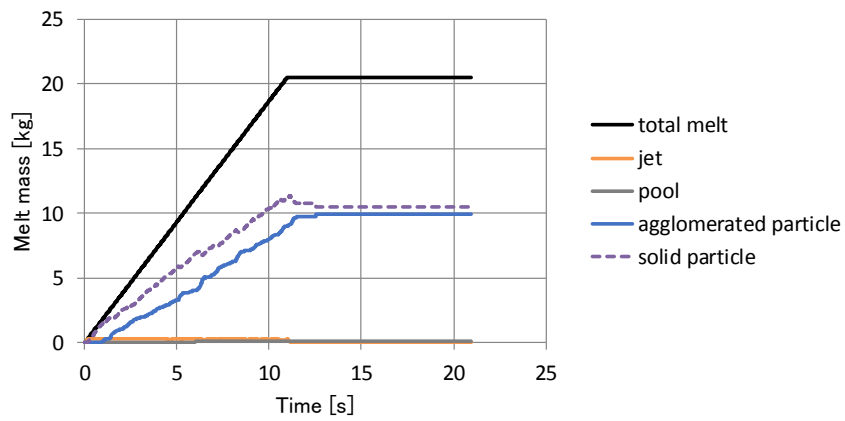


図 A2-6.1 デブリの状態別質量の履歴 (A2-6 キャッチャー1)

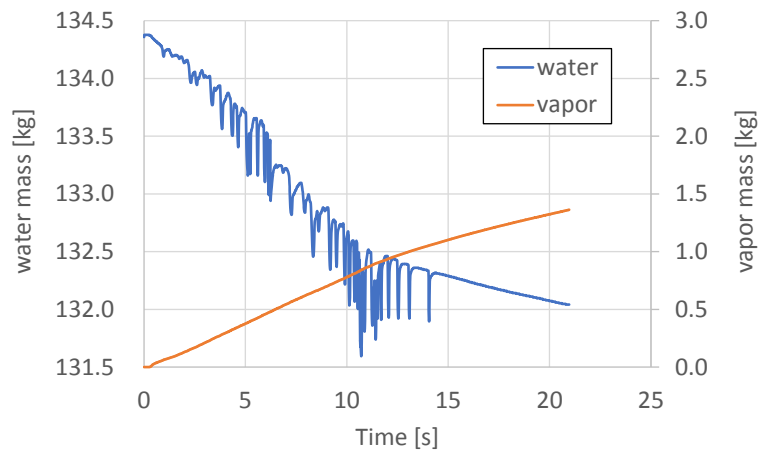


図 A2-6.2 水・水蒸気の質量履歴 (A2-6 キャッチャー1)

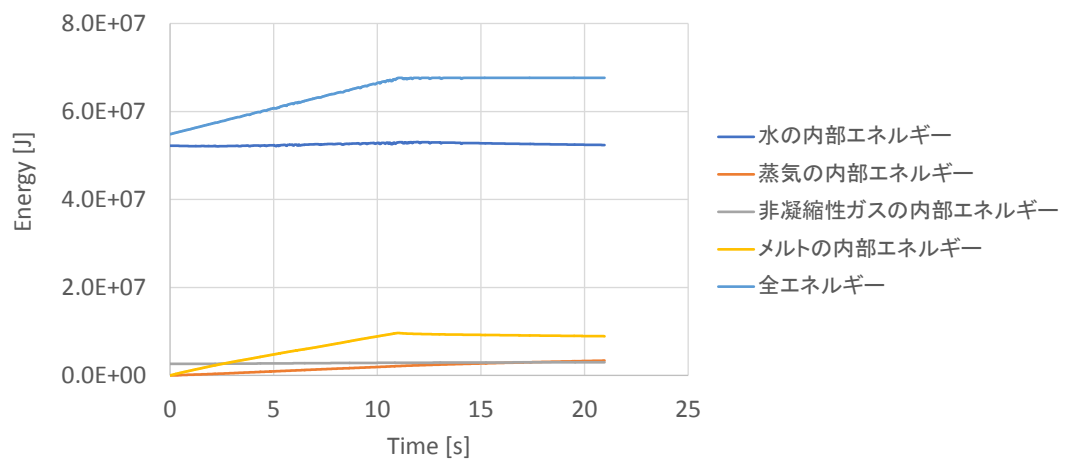


図 A2-6.3 各エネルギーの履歴 (A2-6 キャッチャー1)

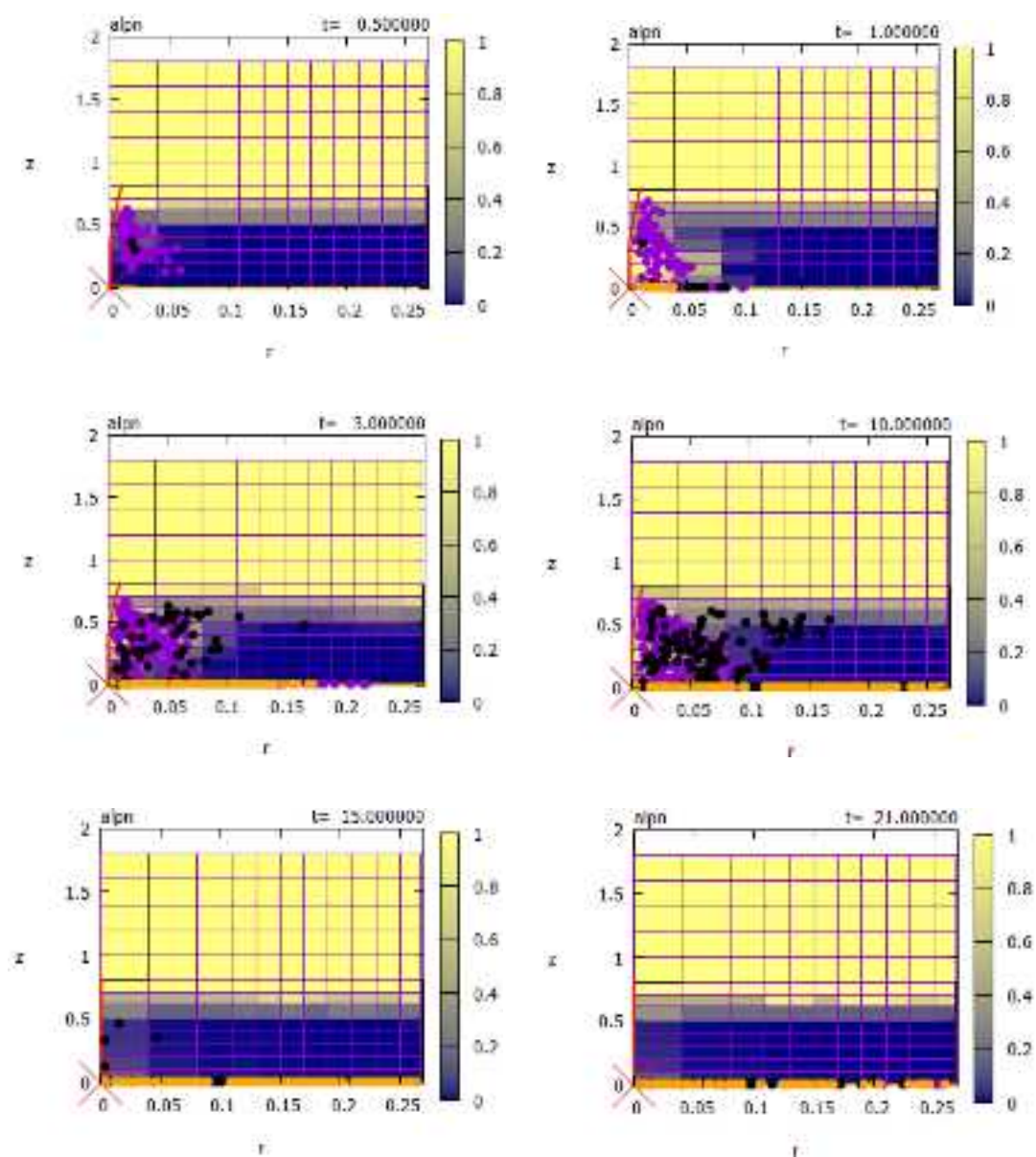


図 A2-6.4 ボイド率及び溶融物粒子分布図 (A2-6 キャッチャー1)  
(橙色：アグロメレーション粒子群、黒色：固化した粒子群)

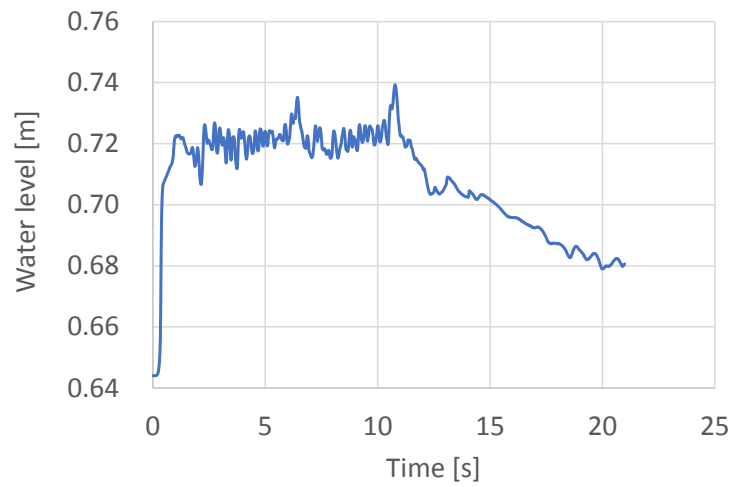


図 A2-6.5 水位履歴 (A2-6 キャッチャー1)

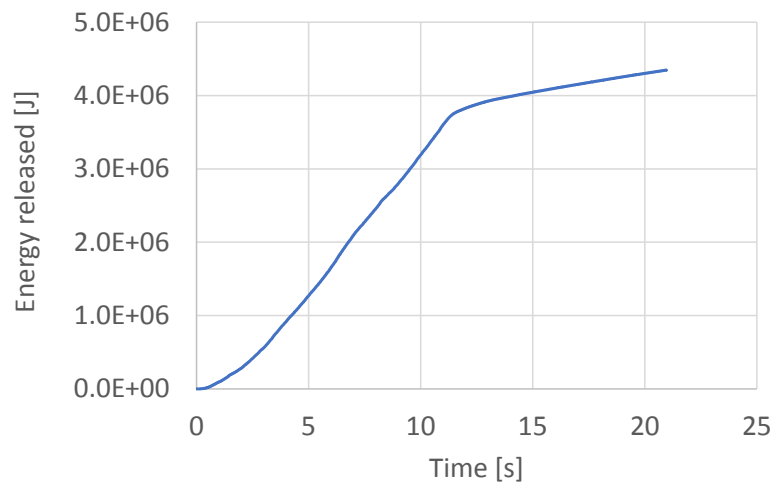


図 A2-6.6 溶融物から水への積算熱移行量 (A2-6 キャッチャー1)

キャッチャー2

表 A2-6.2 質量バランス及びエネルギーバランス (A2-6 キャッチャー2)

| 時刻                     | 0 s        | 1 s        | 21 s       | 21 s-0 s   |
|------------------------|------------|------------|------------|------------|
| 溶融物の質量バランス [kg]        |            |            |            |            |
| ジェット                   | 0.000      | 0.238      | 0.000      |            |
| プール                    | 0.000      | 0.007      | 0.010      |            |
| 粒子                     | 0.000      | 18.375     | 20.462     |            |
| 合計                     | 0.000      | 18.621     | 20.473     |            |
| (粒子のうちアグロメレーションした分)    | 0.000      | 6.046      | 7.816      |            |
| (粒子のうちアグロメレーションした分の割合) | 0.00%      | 32.90%     | 38.20%     |            |
| 水、蒸気の質量バランス [kg]       |            |            |            |            |
| 水                      | 199.372    | 197.870    | 197.185    |            |
| 蒸気                     | 0.000      | 0.805      | 1.348      |            |
| 合計                     | 199.372    | 198.675    | 198.533    |            |
| エネルギーバランス [J]          |            |            |            |            |
| 水の内部エネルギー              | 77,515,657 | 78,778,577 | 78,451,852 | 936,195    |
| 蒸気の内部エネルギー             | 22         | 1,973,800  | 3,323,679  | 3,323,658  |
| 非凝縮性ガスの内部エネルギー         | 3,033,773  | 3,290,630  | 3,432,881  | 399,108    |
| 溶融物の内部エネルギー            | 0.0        | 8,215,893  | 8,170,026  | 8,170,026  |
| 流体の運動エネルギー             | 0.0        | 3.79       | 1.74       | 1.74       |
| 合計                     | 80,549,452 | 92,258,904 | 93,378,440 | 12,828,988 |
| エネルギーの増加量              | 0.0        | 11,709,452 | 12,828,988 |            |
| 流入溶融物のエンタルピー           | 0.0        | 12,015,955 | 13,210,820 |            |
| 誤差                     | 0.0        | -306,503   | -381,832   |            |
|                        | 0.00%      | -0.33%     | -0.41%     |            |

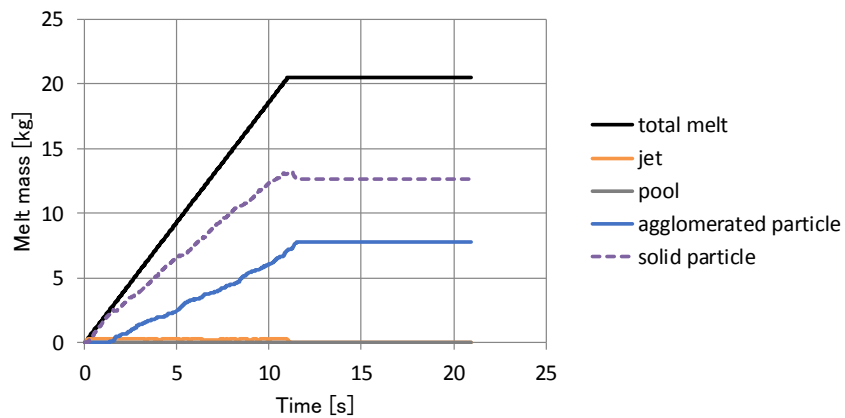


図 A2-6.7 デブリの状態別質量の履歴 (A2-6 キャッチャー2)

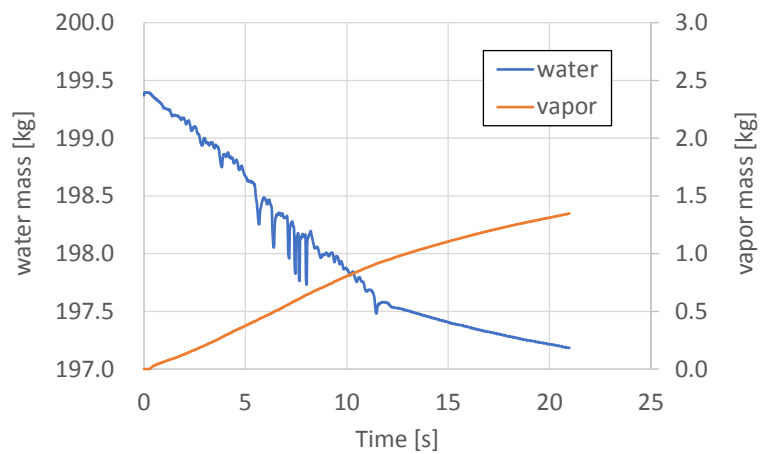


図 A2-6.8 水・水蒸気の質量履歴 (A2-6 キャッチャー2)

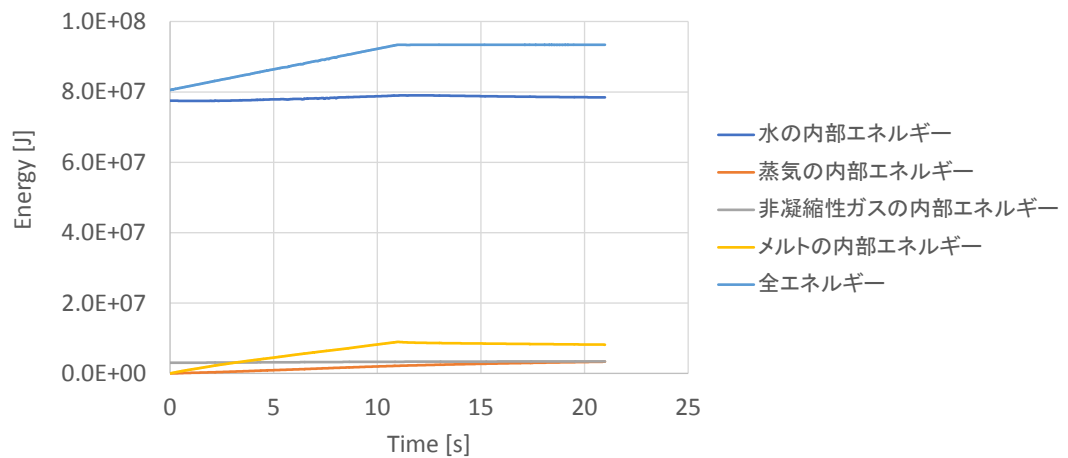


図 A2-6.9 各エネルギーの履歴 (A2-6 キャッチャー2)

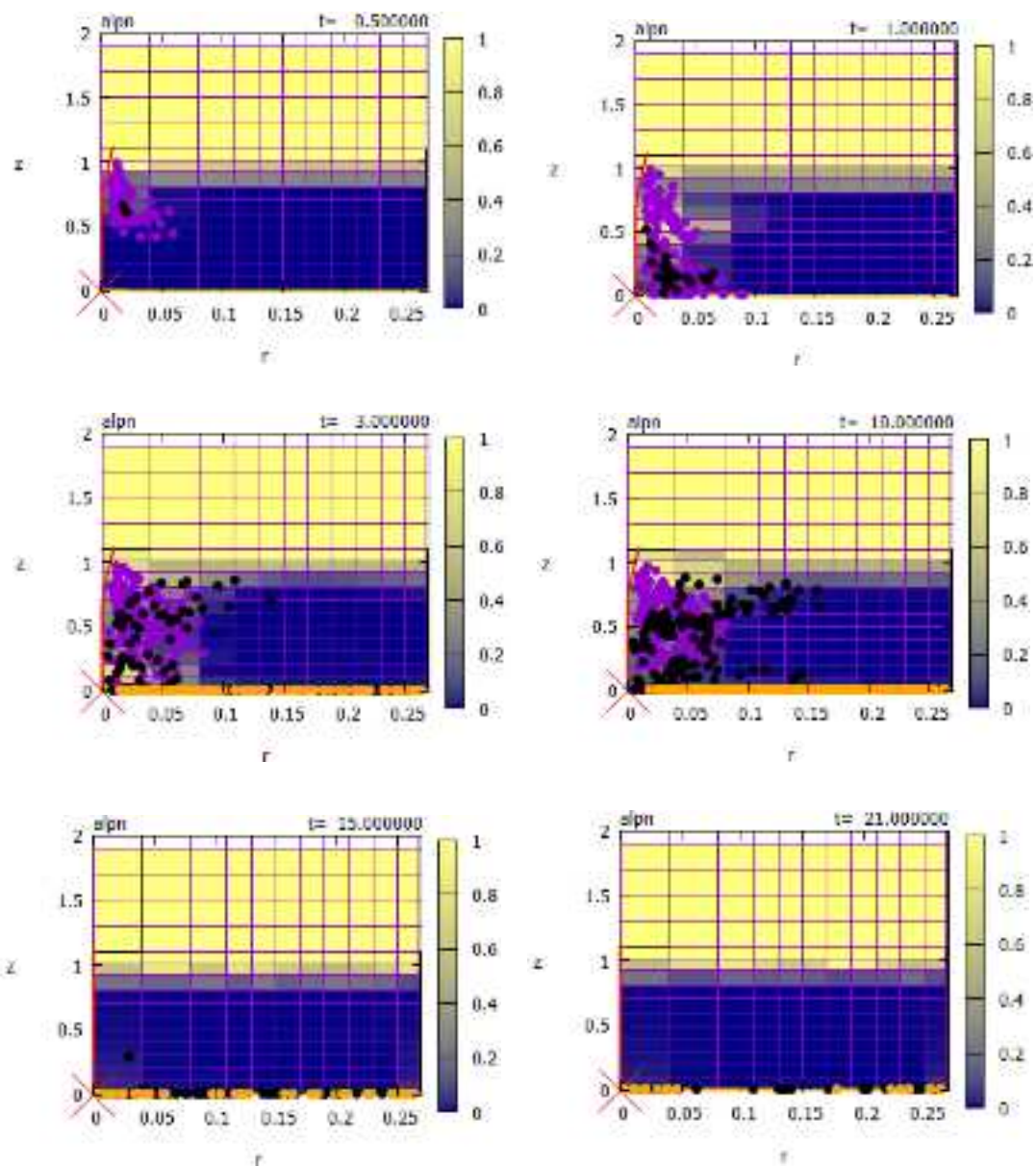


図 A2-6.10 ボイド率及び溶融物粒子分布図 (A2-6 キャッチャー2)  
(橙色：アグロメレーション粒子群、黒色：固化した粒子群)

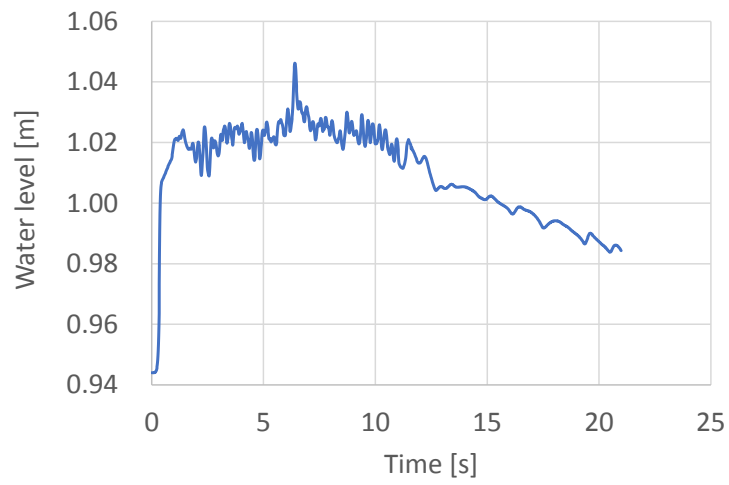


図 A2-6.11 水位履歴 (A2-6 キャッチャー2)

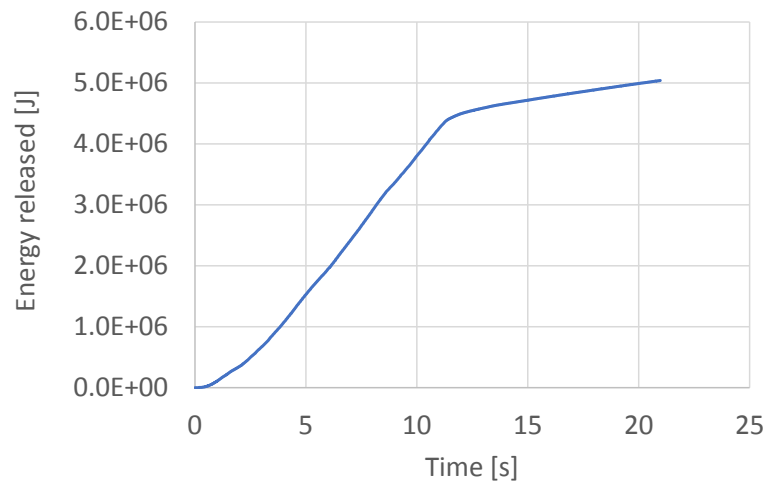


図 A2-6.12 溶融物から水への積算熱移行量 (A2-6 キャッチャー2)

キャッチャー3

表 A2-6.3 質量バランス及びエネルギーバランス (A2-6 キャッチャー3)

| 時刻                     | 0 s         | 1 s         | 21 s        | 21 s-0 s   |
|------------------------|-------------|-------------|-------------|------------|
| 溶融物の質量バランス [kg]        |             |             |             |            |
| ジェット                   | 0.000       | 0.225       | 0.000       |            |
| プール                    | 0.000       | 0.011       | 0.010       |            |
| 粒子                     | 0.000       | 18.393      | 20.447      |            |
| 合計                     | 0.000       | 18.630      | 20.457      |            |
| (粒子のうちアグロメレーションした分)    | 0.000       | 0.000       | 0.000       |            |
| (粒子のうちアグロメレーションした分の割合) | 0.00%       | 0.00%       | 0.00%       |            |
| 水、蒸気の質量バランス [kg]       |             |             |             |            |
| 水                      | 264.384     | 262.706     | 261.915     |            |
| 蒸気                     | 0.000       | 0.802       | 1.426       |            |
| 合計                     | 264.384     | 263.508     | 263.340     |            |
| エネルギーバランス [J]          |             |             |             |            |
| 水の内部エネルギー              | 102,799,195 | 104,407,690 | 104,413,973 | 1,614,779  |
| 蒸気の内部エネルギー             | 25          | 1,966,574   | 3,512,489   | 3,512,464  |
| 非凝縮性ガスの内部エネルギー         | 3,457,637   | 3,718,201   | 3,878,862   | 421,225    |
| 溶融物の内部エネルギー            | 0.0         | 7,815,026   | 7,193,619   | 7,193,619  |
| 流体の運動エネルギー             | 0.0         | 11.43       | 1.83        | 1.83       |
| 合計                     | 106,256,856 | 117,907,502 | 118,998,945 | 12,742,088 |
| エネルギーの増加量              | 0.0         | 11,650,646  | 12,742,088  |            |
| 流入溶融物のエンタルピー           | 0.0         | 12,021,617  | 13,201,089  |            |
| 誤差                     | 0.0         | -370,971    | -459,001    |            |
|                        | 0.00%       | -0.31%      | -0.39%      |            |

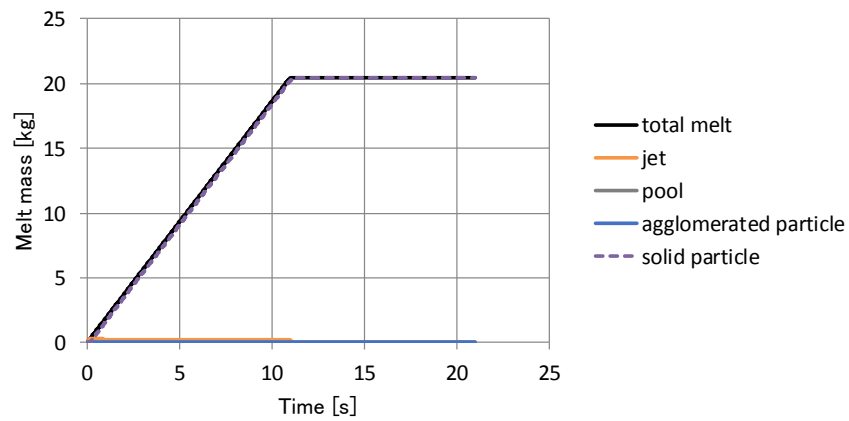


図 A2-6.13 デブリの状態別質量の履歴 (A2-6 キャッチャー3)

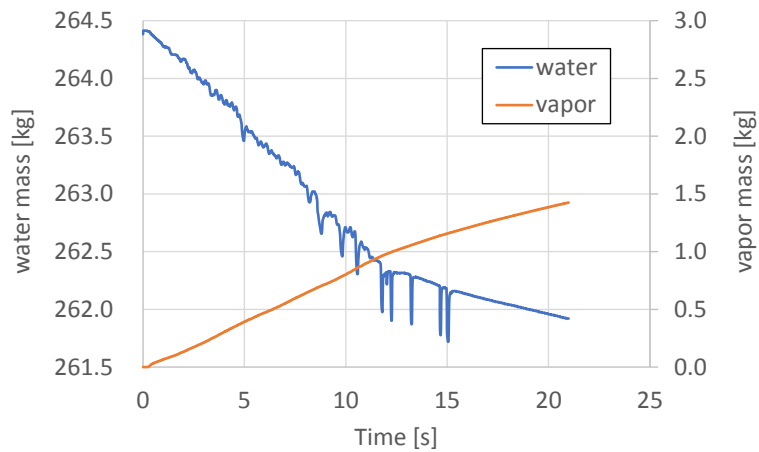


図 A2-6.14 水・水蒸気の質量履歴 (A2-6 キャッチャー3)

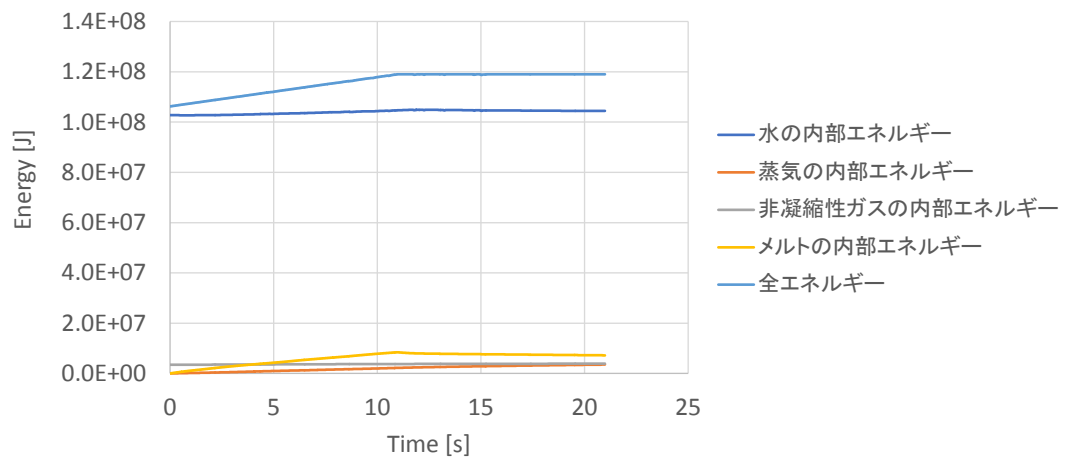


図 A2-6.15 各エネルギーの履歴 (A2-6 キャッチャー3)

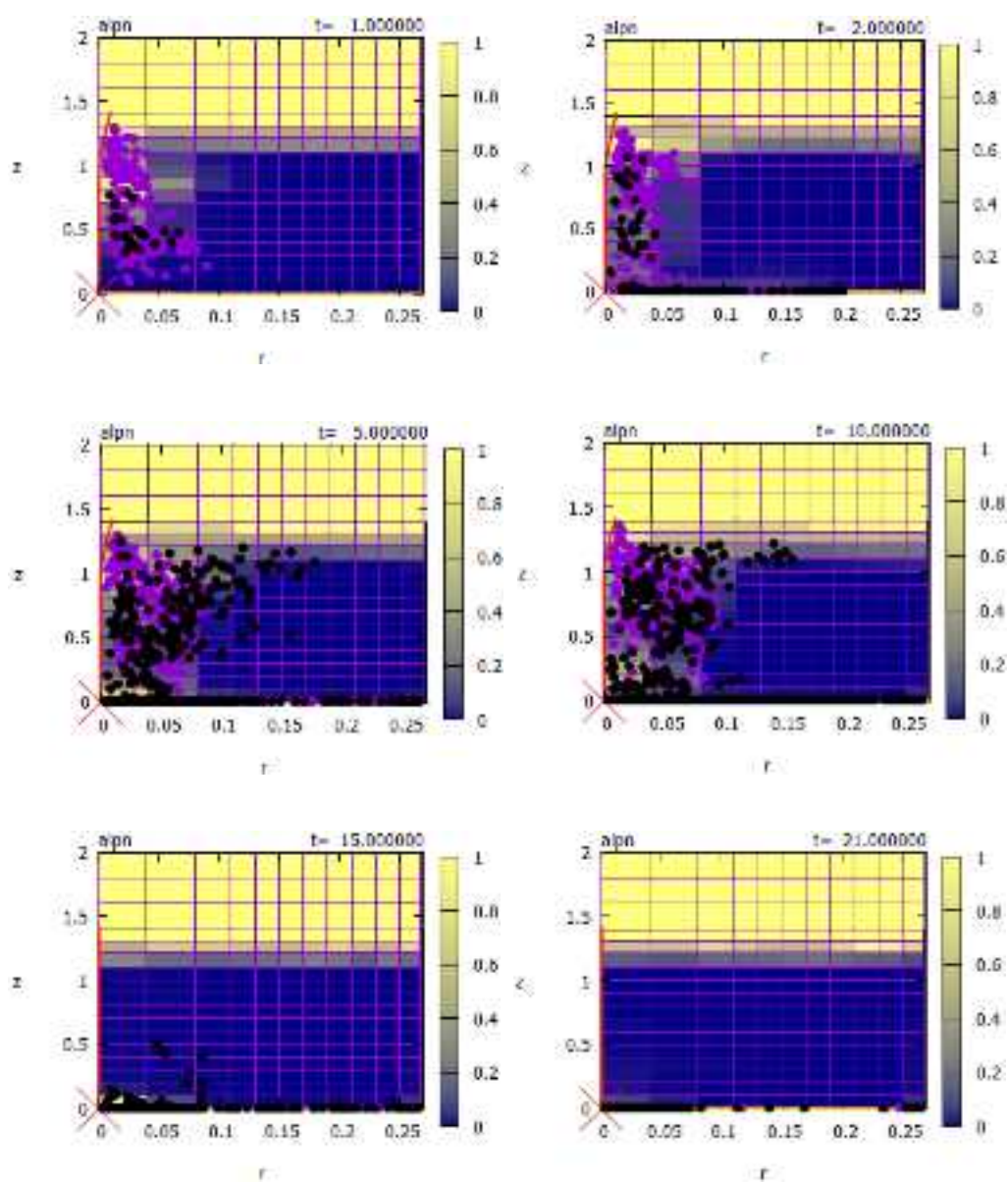


図 A2-6.16 ボイド率及び溶融物粒子分布図 (A2-6 キャッチャー3)  
(橙色：アグロメレーション粒子群、黒色：固化した粒子群)

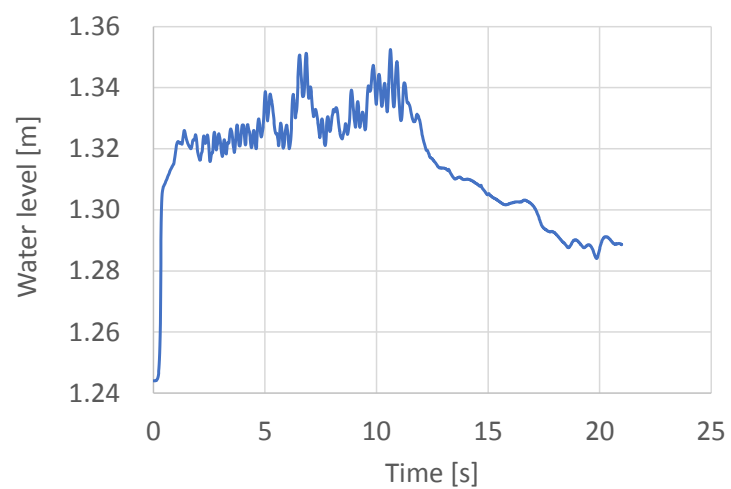


図 A2-6.17 水位履歴 (A2-6 キャッチャー3)

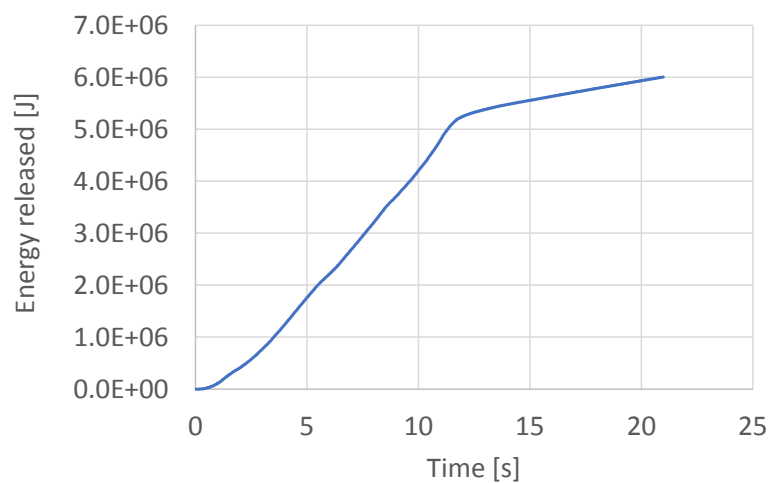


図 A2-6.18 溶融物から水への積算熱移行量 (A2-6 キャッチャー3)

キャッチャー4

表 A2-6.4 質量バランス及びエネルギーバランス (A2-6 キャッチャー4)

| 時刻                     | 0 s         | 1 s         | 21 s        | 21 s-0 s   |
|------------------------|-------------|-------------|-------------|------------|
| 溶融物の質量バランス [kg]        |             |             |             |            |
| ジェット                   | 0.000       | 0.224       | 0.000       |            |
| プール                    | 0.000       | 0.026       | 0.029       |            |
| 粒子                     | 0.000       | 18.380      | 20.432      |            |
| 合計                     | 0.000       | 18.630      | 20.461      |            |
| (粒子のうちアグロメレーションした分)    | 0.000       | 0.000       | 0.000       |            |
| (粒子のうちアグロメレーションした分の割合) | 0.00%       | 0.00%       | 0.00%       |            |
| 水、蒸気の質量バランス [kg]       |             |             |             |            |
| 水                      | 329.402     | 327.769     | 326.939     |            |
| 蒸気                     | 0.000       | 0.870       | 1.498       |            |
| 合計                     | 329.402     | 328.638     | 328.438     |            |
| エネルギーバランス [J]          |             |             |             |            |
| 水の内部エネルギー              | 128,076,449 | 130,093,352 | 129,986,538 | 1,910,088  |
| 蒸気の内部エネルギー             | 28          | 2,133,393   | 3,689,047   | 3,689,019  |
| 非凝縮性ガスの内部エネルギー         | 3,881,563   | 4,166,757   | 4,323,334   | 441,771    |
| 溶融物の内部エネルギー            | 0.0         | 7,250,168   | 6,713,584   | 6,713,584  |
| 流体の運動エネルギー             | 0.0         | 3.99        | 2.12        | 2.12       |
| 合計                     | 131,958,040 | 143,643,673 | 144,712,504 | 12,754,464 |
| エネルギーの増加量              | 0.0         | 11,685,633  | 12,754,464  |            |
| 流入溶融物のエンタルピー           | 0.0         | 12,021,631  | 13,203,116  |            |
| 誤差                     | 0.0         | -335,999    | -448,653    |            |
|                        | 0.00%       | -0.23%      | -0.31%      |            |

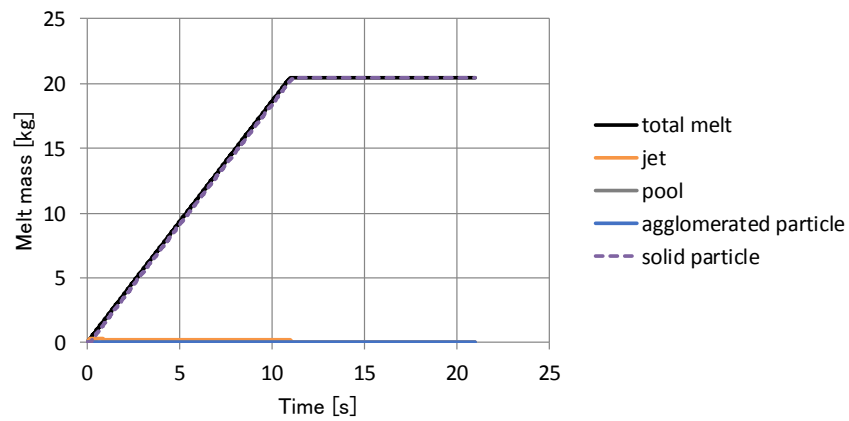


図 A2-6.19 デブリの状態別質量の履歴 (A2-6 キャッチャー4)

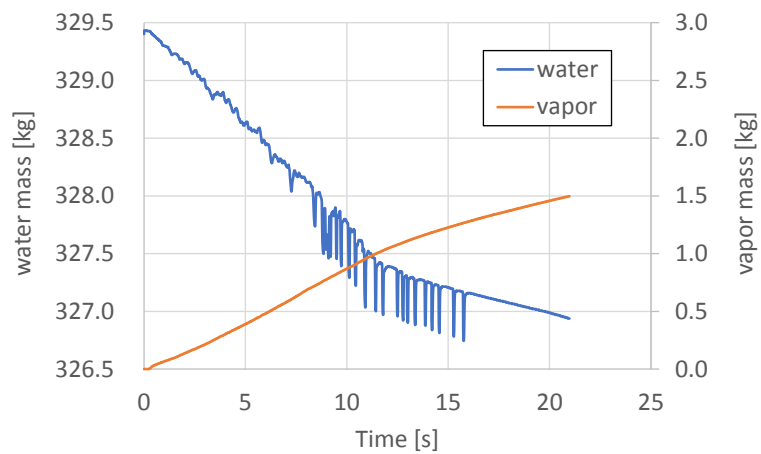


図 A2-6.20 水・水蒸気の質量履歴 (A2-6 キャッチャー4)

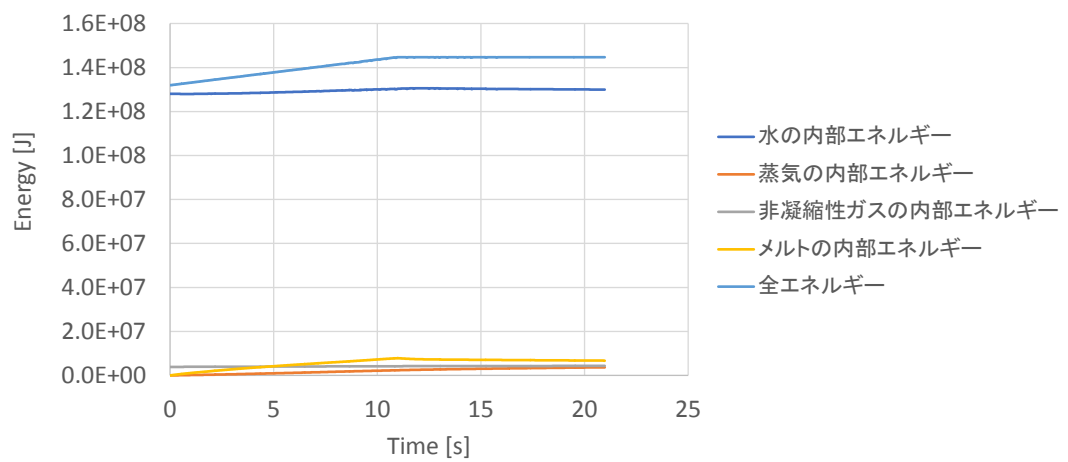


図 A2-6.21 各エネルギーの履歴 (A2-6 キャッチャー4)

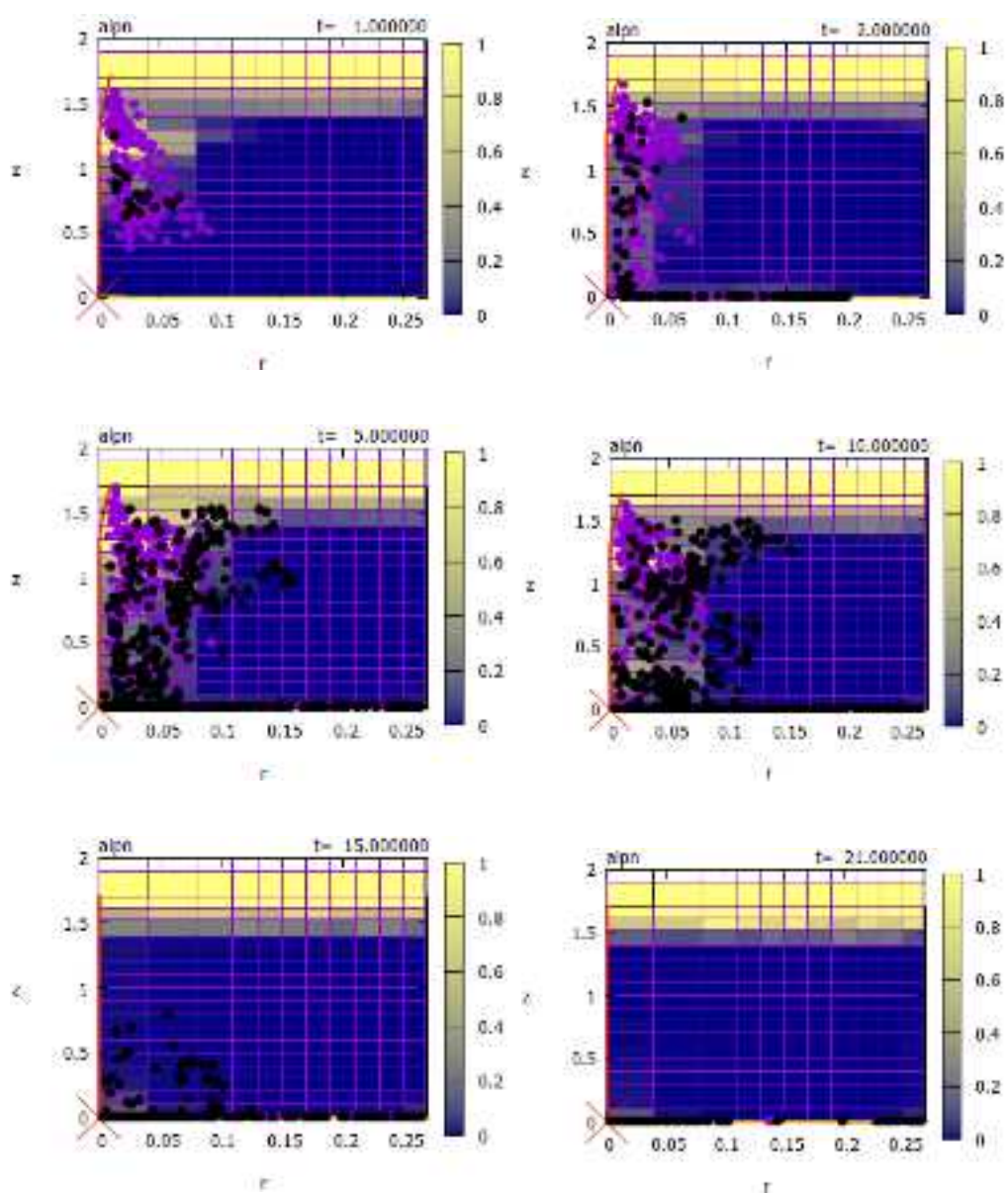


図 A2-6.22 ボイド率及び溶融物粒子分布図 (A2-6 キャッチャー4)  
(橙色：アグロメレーション粒子群、黒色：固化した粒子群)

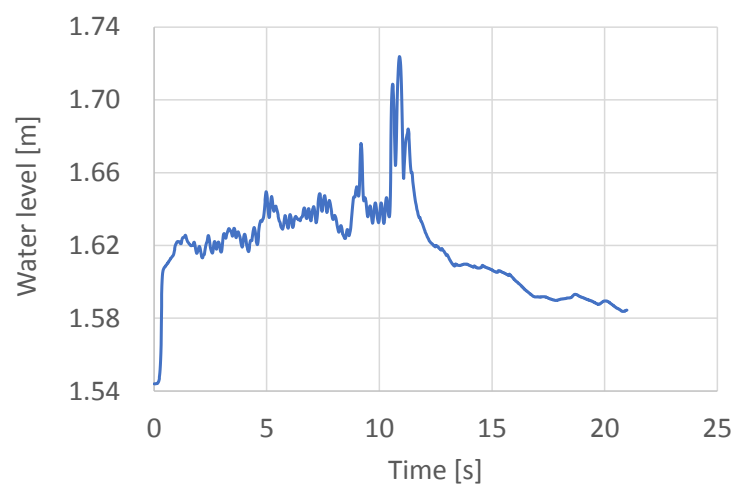


図 A2-6.23 水位履歴 (A2-6 キャッチャー4)

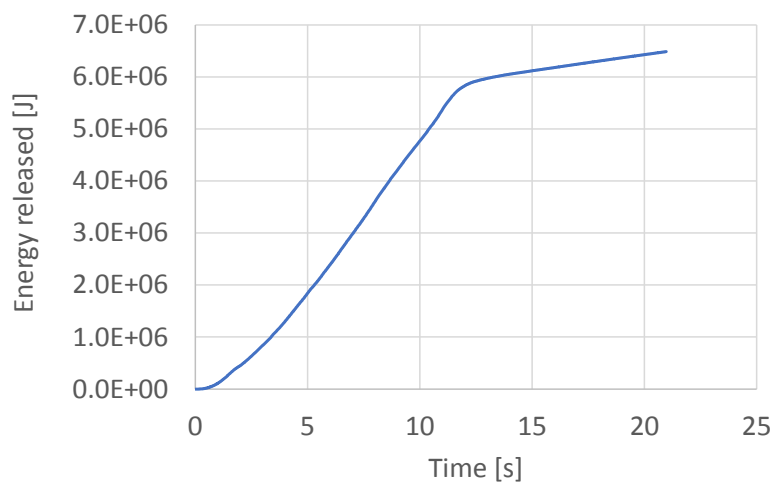


図 A2-6.24 溶融物から水への積算熱移行量 (A2-6 キャッチャー4)

A2-7 DEFOR-A2 ( $\phi_{im} = 1.5$ ,  $k_{qht} = 0.95$ )

キャッチャー1

表 A2-7.1 質量バランス及びエネルギーバランス (A2-7 キャッチャー1)

| 時刻                     | 0 s        | 1 s        | 21 s       | 21 s-0 s   |
|------------------------|------------|------------|------------|------------|
| 溶融物の質量バランス [kg]        |            |            |            |            |
| ジェット                   | 0.000      | 0.230      | 0.000      |            |
| プール                    | 0.000      | 0.064      | 0.072      |            |
| 粒子                     | 0.000      | 18.393     | 20.459     |            |
| 合計                     | 0.000      | 18.687     | 20.531     |            |
| (粒子のうちアグロメレーションした分)    | 0.000      | 8.568      | 10.358     |            |
| (粒子のうちアグロメレーションした分の割合) | 0.00%      | 46.58%     | 50.63%     |            |
| 水、蒸気の質量バランス [kg]       |            |            |            |            |
| 水                      | 134.360    | 132.393    | 132.525    |            |
| 蒸気                     | 0.000      | 0.794      | 1.367      |            |
| 合計                     | 134.360    | 133.187    | 133.892    |            |
| エネルギーバランス [J]          |            |            |            |            |
| 水の内部エネルギー              | 52,240,916 | 52,711,526 | 52,595,916 | 355,000    |
| 蒸気の内部エネルギー             | 19         | 1,947,976  | 3,377,840  | 3,377,822  |
| 非凝縮性ガスの内部エネルギー         | 2,609,847  | 2,857,341  | 2,993,812  | 383,965    |
| 溶融物の内部エネルギー            | 0.0        | 8,827,875  | 8,844,212  | 8,844,212  |
| 流体の運動エネルギー             | 0.0        | 7.41       | 1.47       | 1.47       |
| 合計                     | 54,850,781 | 66,344,727 | 67,811,782 | 12,961,000 |
| エネルギーの増加量              | 0.0        | 11,493,945 | 12,961,000 |            |
| 流入溶融物のエンタルピー           | 0.0        | 12,058,527 | 13,248,527 |            |
| 誤差                     | 0.0        | -564,582   | -287,527   |            |
|                        | 0.00%      | -0.85%     | -0.42%     |            |

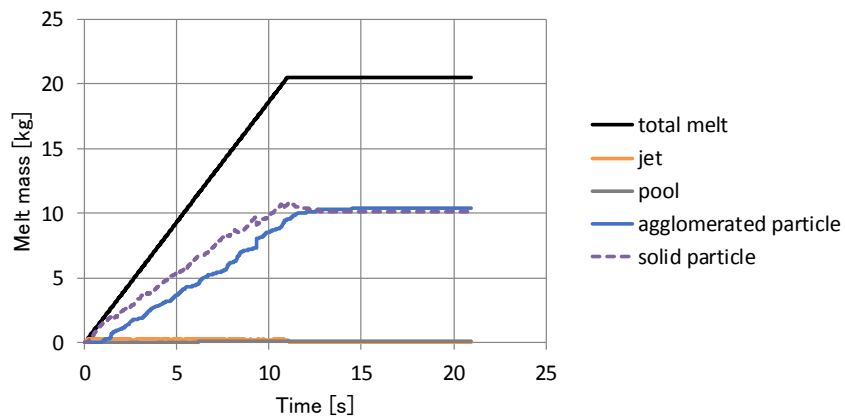


図 A2-7.1 デブリの状態別質量の履歴 (A2-7 キャッチャー1)

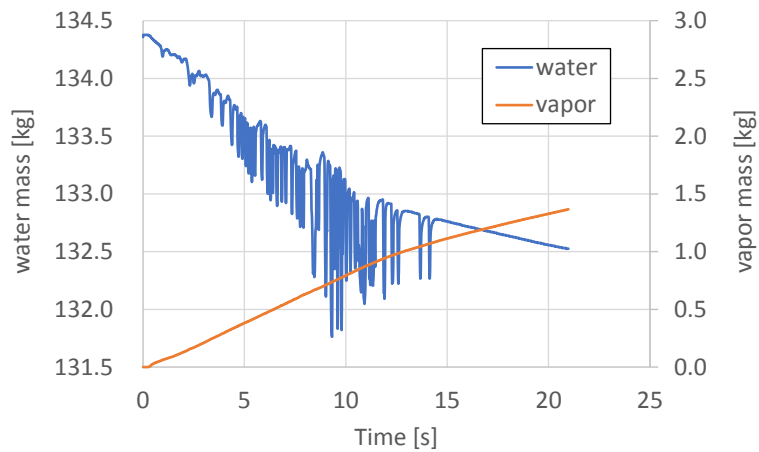


図 A2-7.2 水・水蒸気の質量履歴 (A2-7 キャッチャー1)

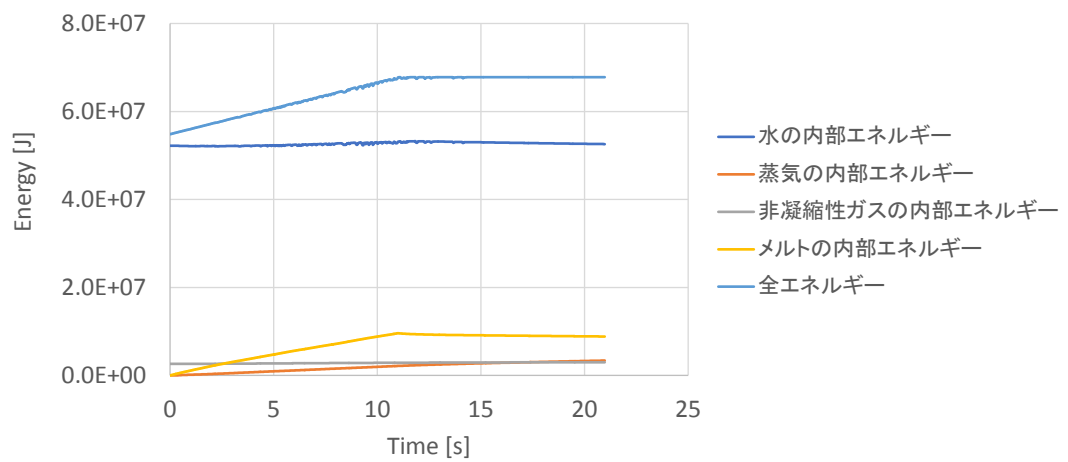


図 A2-7.3 各エネルギーの履歴 (A2-7 キャッチャー1)

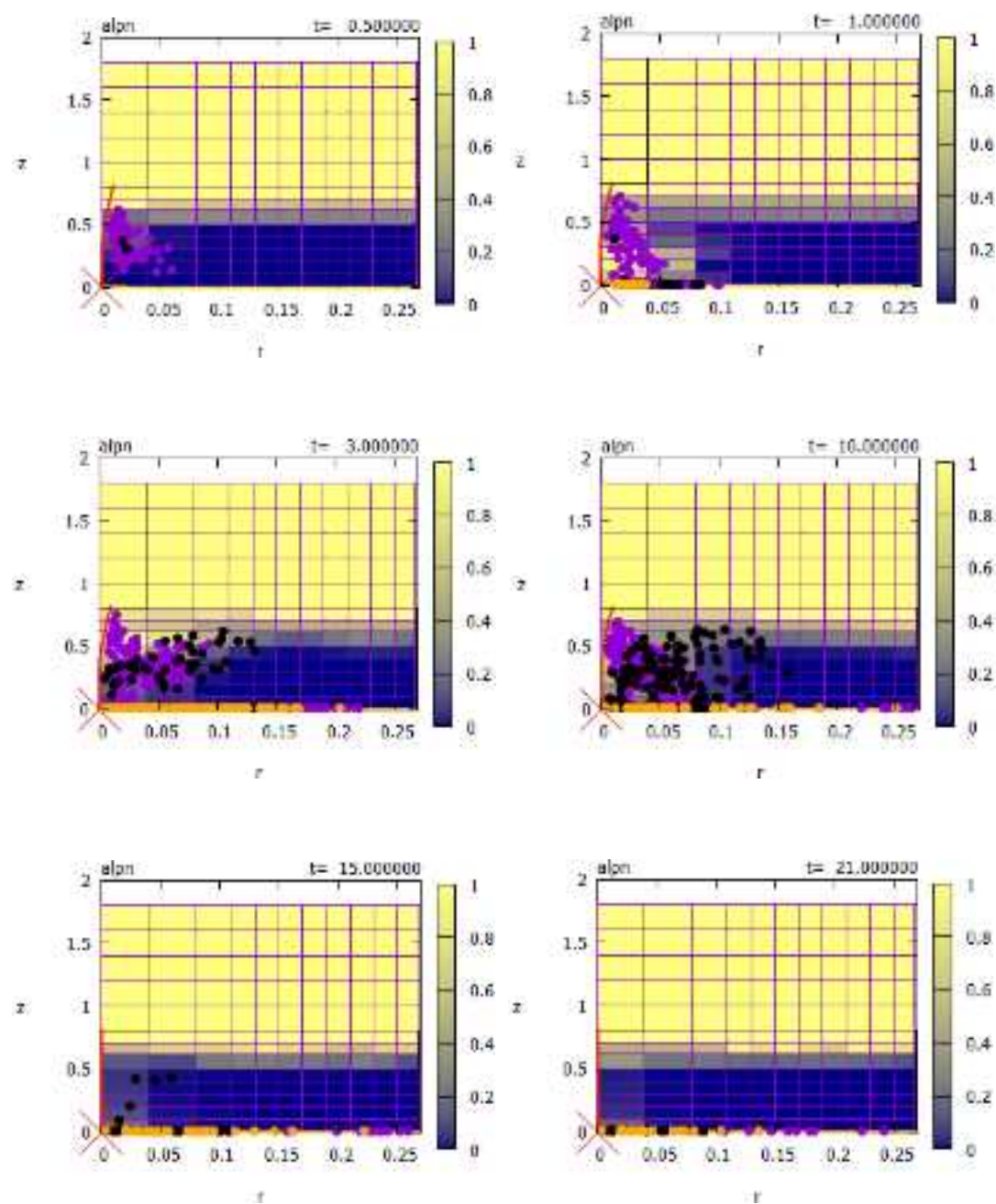


図 A2-7.4 ボイド率及び溶融物粒子分布図 (A2-7 キャッチャー1)  
(橙色：アグロメレーション粒子群、黒色：固化した粒子群)

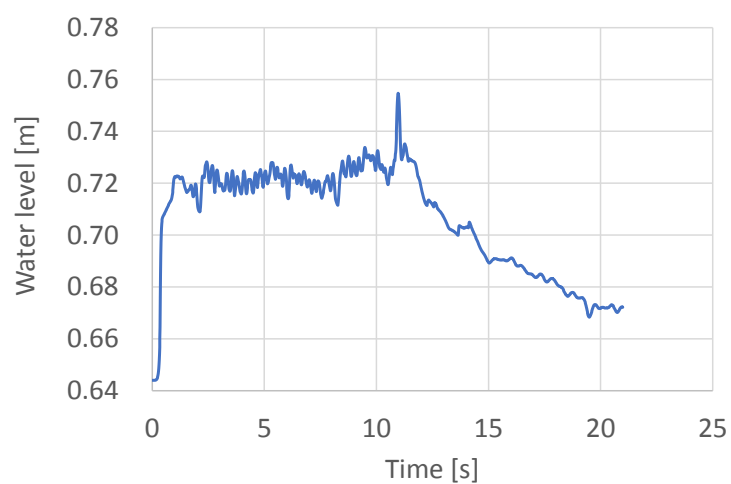


図 A2-7.5 水位履歴 (A2-7 キャッチャー1)

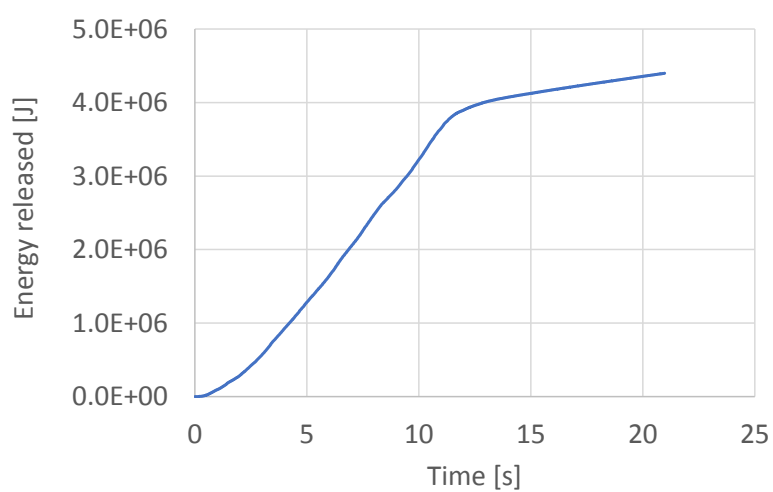


図 A2-7.6 溶融物から水への積算熱移行量 (A2-7 キャッチャー1)

キャッチャー2

表 A2-7.2 質量バランス及びエネルギーバランス (A2-7 キャッチャー2)

| 時刻                     | 0 s        | 1 s        | 21 s       | 21 s-0 s   |
|------------------------|------------|------------|------------|------------|
| 溶融物の質量バランス [kg]        |            |            |            |            |
| ジェット                   | 0.000      | 0.231      | 0.000      |            |
| プール                    | 0.000      | 0.043      | 0.045      |            |
| 粒子                     | 0.000      | 18.381     | 20.457     |            |
| 合計                     | 0.000      | 18.655     | 20.502     |            |
| (粒子のうちアグロメレーションした分)    | 0.000      | 5.721      | 7.498      |            |
| (粒子のうちアグロメレーションした分の割合) | 0.00%      | 31.13%     | 36.65%     |            |
| 水、蒸気の質量バランス [kg]       |            |            |            |            |
| 水                      | 199.372    | 197.883    | 197.053    |            |
| 蒸気                     | 0.000      | 0.836      | 1.395      |            |
| 合計                     | 199.372    | 198.719    | 198.448    |            |
| エネルギーバランス [J]          |            |            |            |            |
| 水の内部エネルギー              | 77,515,657 | 78,853,976 | 78,483,268 | 967,611    |
| 蒸気の内部エネルギー             | 22         | 2,051,963  | 3,440,924  | 3,440,902  |
| 非凝縮性ガスの内部エネルギー         | 3,033,773  | 3,299,049  | 3,442,746  | 408,973    |
| 溶融物の内部エネルギー            | 0.0        | 8,099,026  | 8,026,769  | 8,026,769  |
| 流体の運動エネルギー             | 0.0        | 4.00       | 1.90       | 1.90       |
| 合計                     | 80,549,452 | 92,304,017 | 93,393,708 | 12,844,256 |
| エネルギーの増加量              | 0.0        | 11,754,565 | 12,844,256 |            |
| 流入溶融物のエンタルピー           | 0.0        | 12,037,849 | 13,229,876 |            |
| 誤差                     | 0.0        | -283,284   | -385,620   |            |
|                        | 0.00%      | -0.31%     | -0.41%     |            |

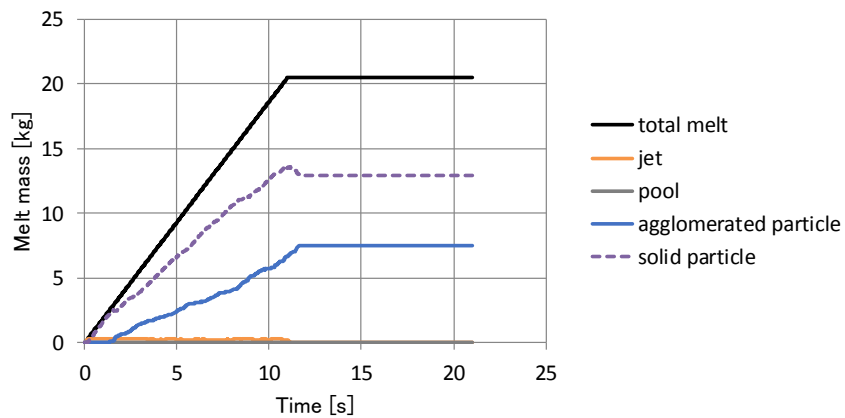


図 A2-7.7 デブリの状態別質量の履歴 (A2-7 キャッチャー2)

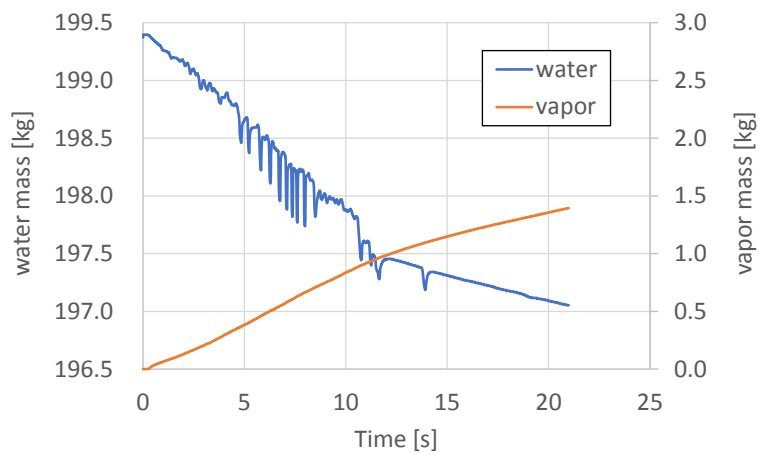


図 A2-7.8 水・水蒸気の質量履歴 (A2-7 キャッチャー2)

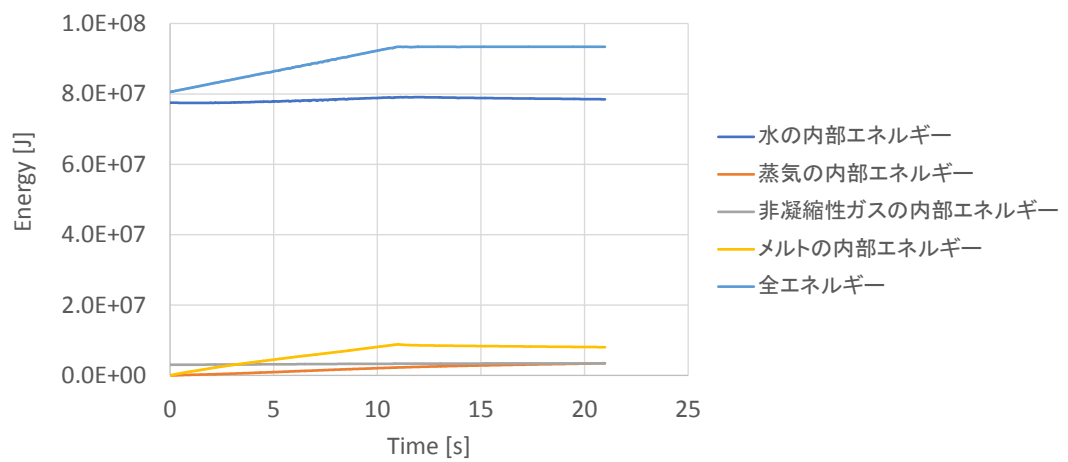


図 A2-7.9 各エネルギーの履歴 (A2-7 キャッチャー2)

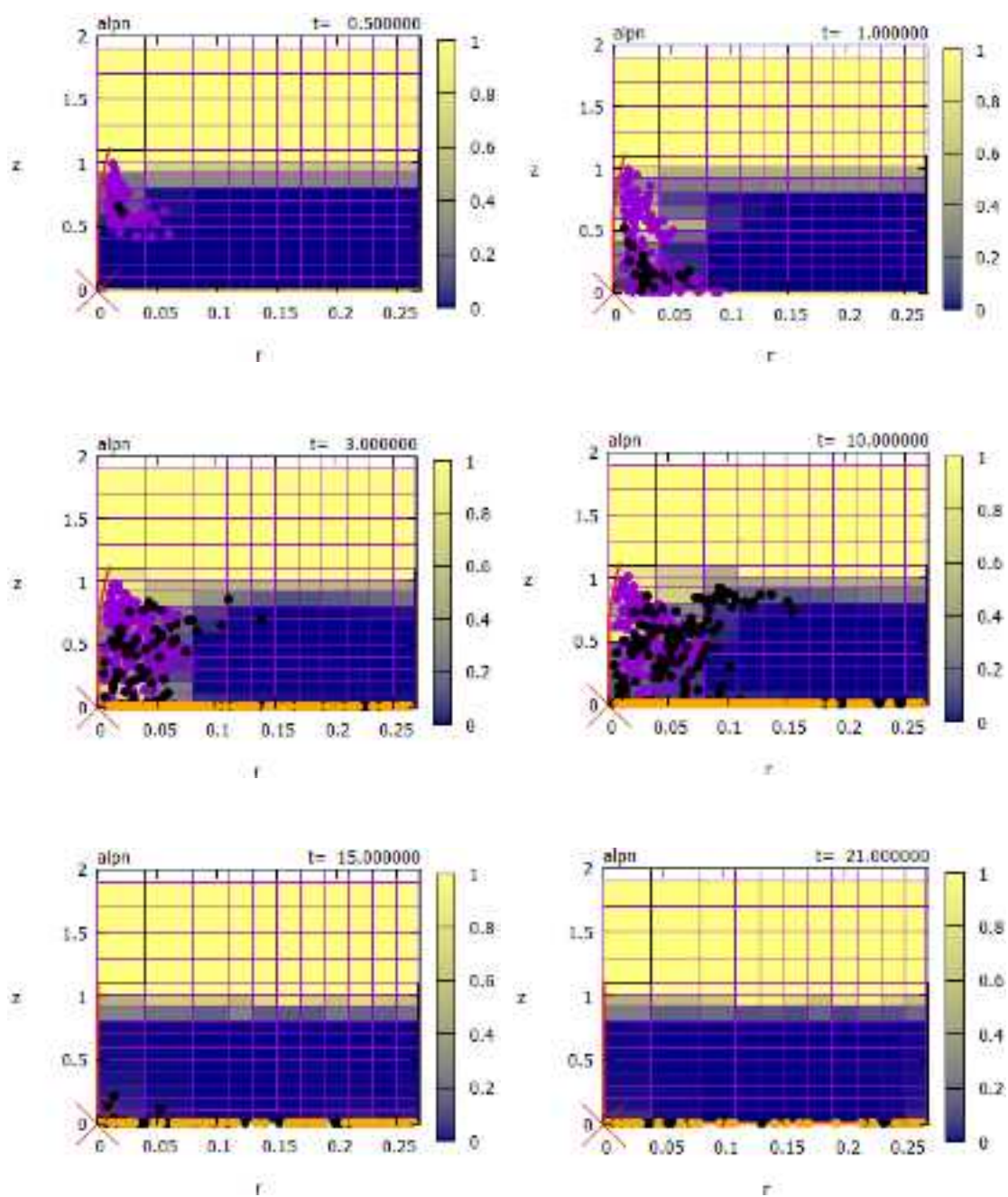


図 A2-7.10 ボイド率及び溶融物粒子分布図 (A2-7 キャッチャー2)  
(橙色：アグロメレーション粒子群、黒色：固化した粒子群)

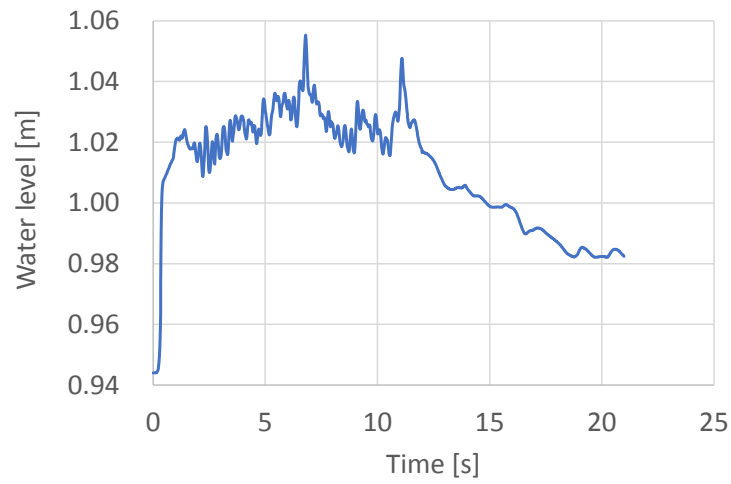


図 A2-7.11 水位履歴 (A2-7 キャッチャー2)

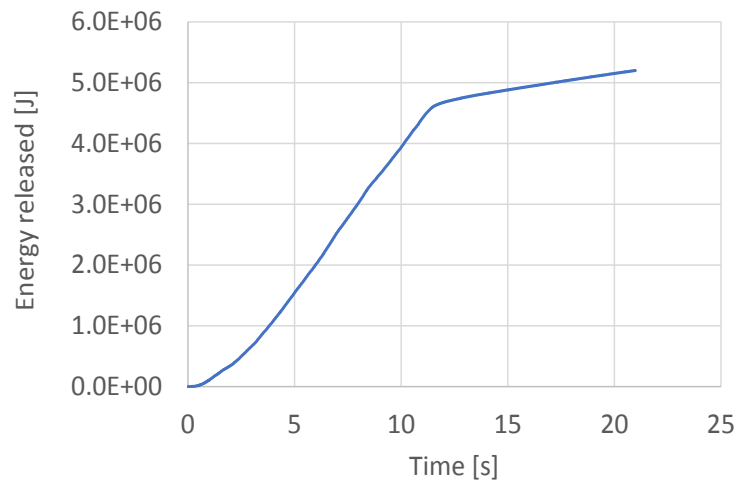


図 A2-7.12 溶融物から水への積算熱移行量 (A2-7 キャッチャー2)

キャッチャー3

表 A2-7.3 質量バランス及びエネルギーバランス (A2-7 キャッチャー3)

| 時刻                     | 0 s         | 1 s         | 21 s        | 21 s-0 s   |
|------------------------|-------------|-------------|-------------|------------|
| 溶融物の質量バランス [kg]        |             |             |             |            |
| ジェット                   | 0.000       | 0.225       | 0.000       |            |
| プール                    | 0.000       | 0.011       | 0.010       |            |
| 粒子                     | 0.000       | 18.393      | 20.447      |            |
| 合計                     | 0.000       | 18.630      | 20.457      |            |
| (粒子のうちアグロメレーションした分)    | 0.000       | 0.000       | 0.000       |            |
| (粒子のうちアグロメレーションした分の割合) | 0.00%       | 0.00%       | 0.00%       |            |
| 水、蒸気の質量バランス [kg]       |             |             |             |            |
| 水                      | 0.000       | 0.225       | 0.000       |            |
| 蒸気                     | 0.000       | 0.011       | 0.010       |            |
| 合計                     | 0.000       | 18.393      | 20.447      |            |
| エネルギーバランス [J]          |             |             |             |            |
| 水の内部エネルギー              | 102,799,195 | 104,407,690 | 104,413,973 | 1,614,779  |
| 蒸気の内部エネルギー             | 25          | 1,966,574   | 3,512,489   | 3,512,464  |
| 非凝縮性ガスの内部エネルギー         | 3,457,637   | 3,718,201   | 3,878,862   | 421,225    |
| 溶融物の内部エネルギー            | 0.0         | 7,815,026   | 7,193,619   | 7,193,619  |
| 流体の運動エネルギー             | 0.0         | 11.43       | 1.83        | 1.83       |
| 合計                     | 106,256,856 | 117,907,502 | 118,998,945 | 12,742,088 |
| エネルギーの増加量              | 0.0         | 11,650,646  | 12,742,088  |            |
| 流入溶融物のエンタルピー           | 0.0         | 12,021,617  | 13,201,089  |            |
| 誤差                     | 0.0         | -370,971    | -459,001    |            |
|                        | 0.00%       | -0.31%      | -0.39%      |            |

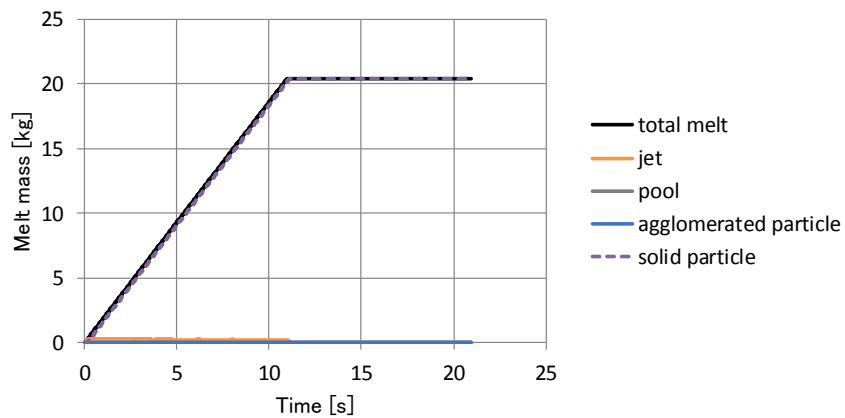


図 A2-7.13 デブリの状態別質量の履歴 (A2-7 キャッチャー3)

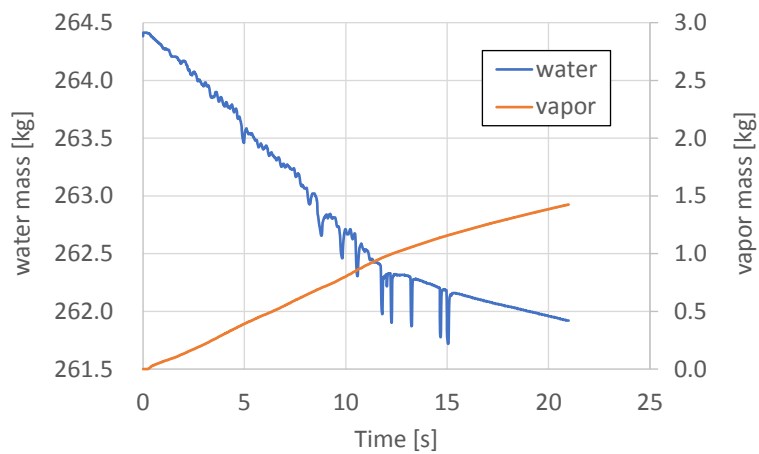


図 A2-7.14 水・水蒸気の質量履歴 (A2-7 キャッチャー3)

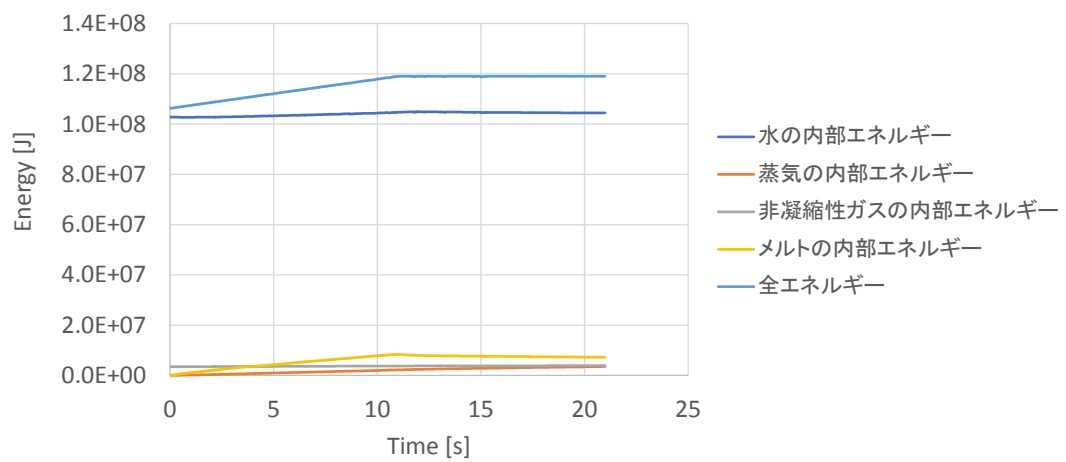


図 A2-7.15 各エネルギーの履歴 (A2-7 キャッチャー3)

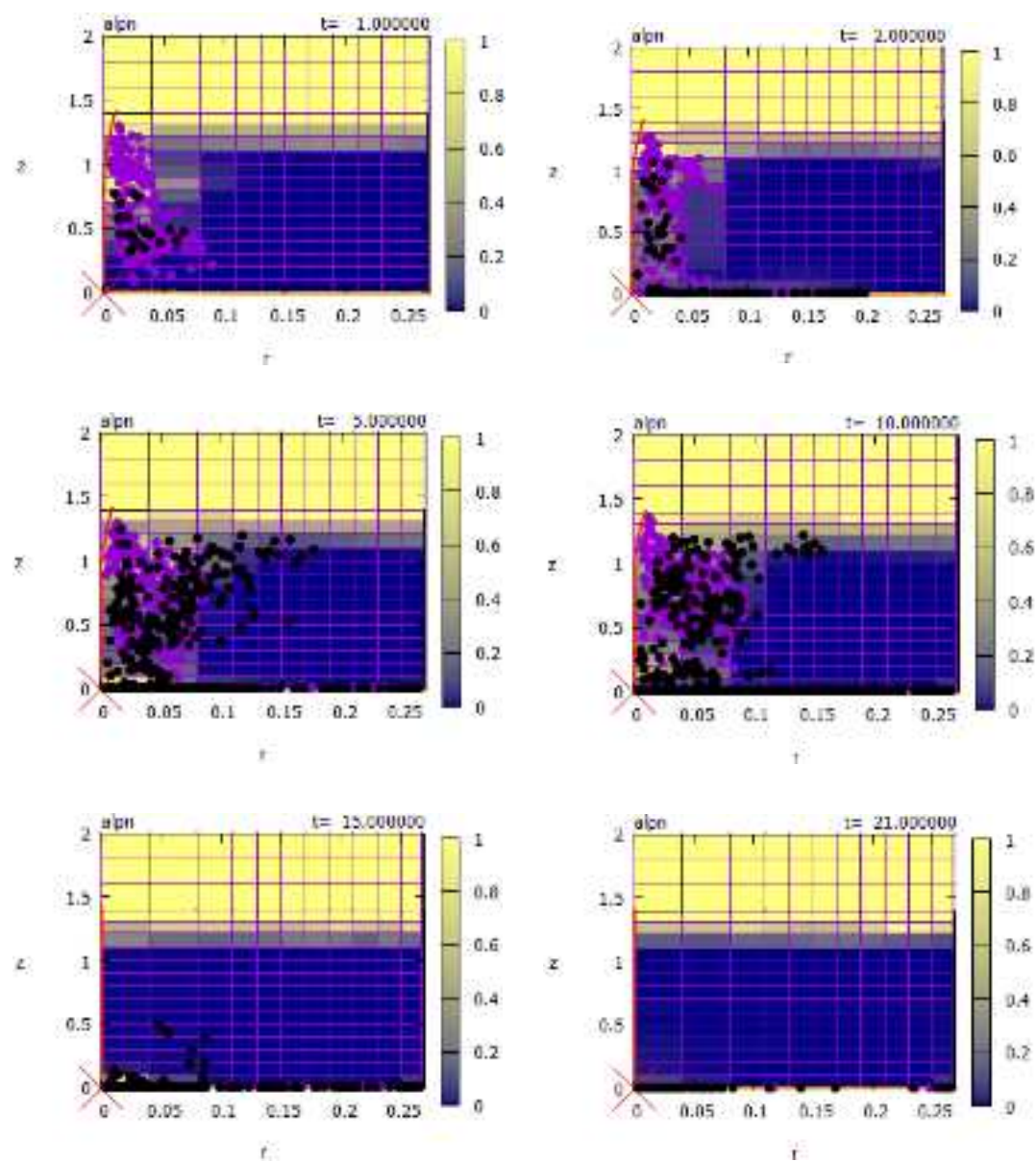


図 A2-7.16 ボイド率及び溶融物粒子分布図 (A2-7 キャッチャー3)  
(橙色：アグロメレーション粒子群、黒色：固化した粒子群)

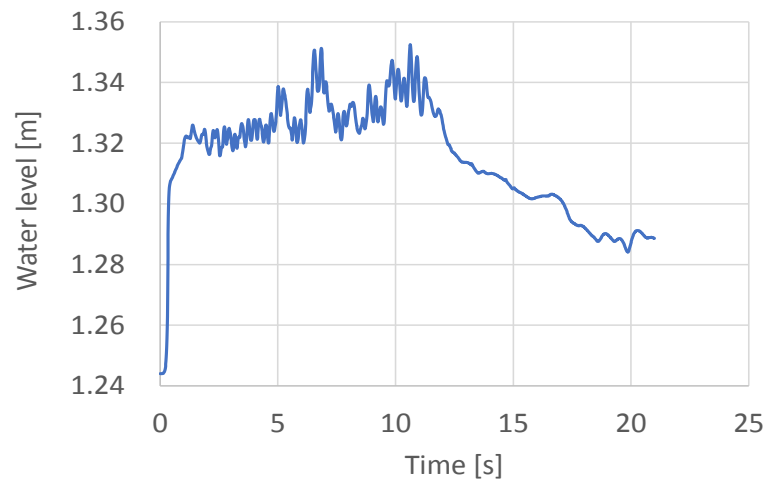


図 A2-7.17 水位履歴 (A2-7 キャッチャー3)

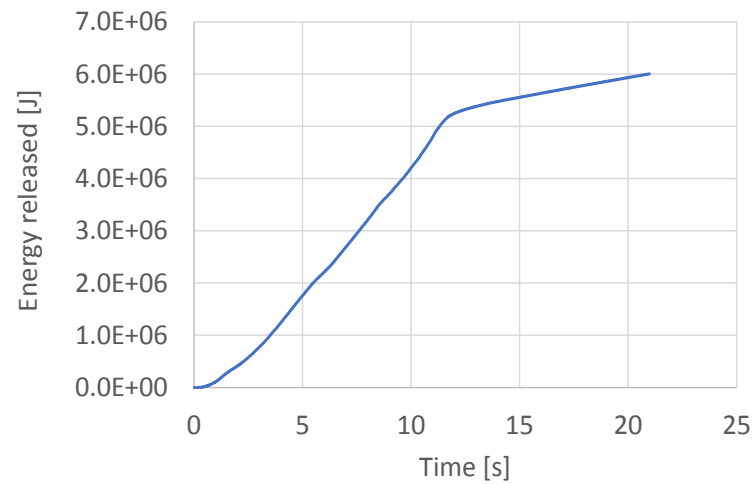


図 A2-7.18 溶融物から水への積算熱移行量 (A2-7 キャッチャー3)

キャッチャー4

表 A2-7.4 質量バランス及びエネルギーバランス (A2-7 キャッチャー4)

| 時刻                     | 0 s         | 1 s         | 21 s        | 21 s-0 s   |
|------------------------|-------------|-------------|-------------|------------|
| 溶融物の質量バランス [kg]        |             |             |             |            |
| ジェット                   | 0.000       | 0.224       | 0.000       |            |
| プール                    | 0.000       | 0.026       | 0.029       |            |
| 粒子                     | 0.000       | 18.380      | 20.432      |            |
| 合計                     | 0.000       | 18.630      | 20.461      |            |
| (粒子のうちアグロメレーションした分)    | 0.000       | 0.000       | 0.000       |            |
| (粒子のうちアグロメレーションした分の割合) | 0.00%       | 0.00%       | 0.00%       |            |
| 水、蒸気の質量バランス [kg]       |             |             |             |            |
| 水                      | 329.402     | 327.769     | 326.939     |            |
| 蒸気                     | 0.000       | 0.870       | 1.498       |            |
| 合計                     | 329.402     | 328.638     | 328.438     |            |
| エネルギーバランス [J]          |             |             |             |            |
| 水の内部エネルギー              | 128,076,449 | 130,093,352 | 129,986,538 | 1,910,088  |
| 蒸気の内部エネルギー             | 28          | 2,133,393   | 3,689,047   | 3,689,019  |
| 非凝縮性ガスの内部エネルギー         | 3,881,563   | 4,166,757   | 4,323,334   | 441,771    |
| 溶融物の内部エネルギー            | 0.0         | 7,250,168   | 6,713,584   | 6,713,584  |
| 流体の運動エネルギー             | 0.0         | 3.99        | 2.12        | 2.12       |
| 合計                     | 131,958,040 | 143,643,673 | 144,712,504 | 12,754,464 |
| エネルギーの増加量              | 0.0         | 11,685,633  | 12,754,464  |            |
| 流入溶融物のエンタルピー           | 0.0         | 12,021,631  | 13,203,116  |            |
| 誤差                     | 0.0         | -335,999    | -448,653    |            |
|                        | 0.00%       | -0.23%      | -0.31%      |            |

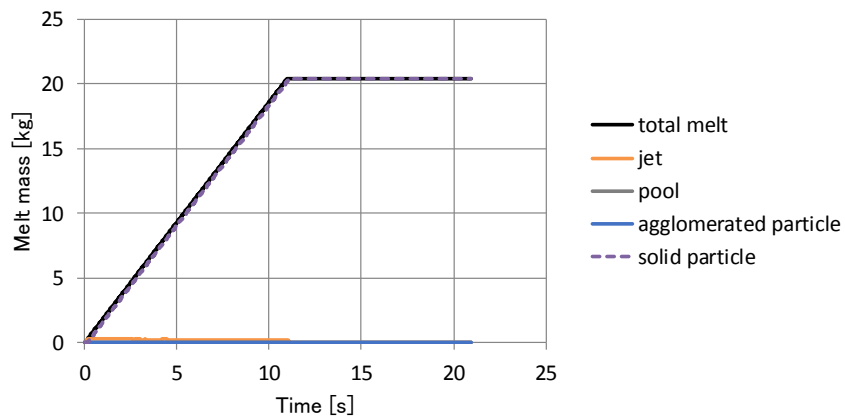


図 A2-7.19 デブリの状態別質量の履歴 (A2-7 キャッチャー4)

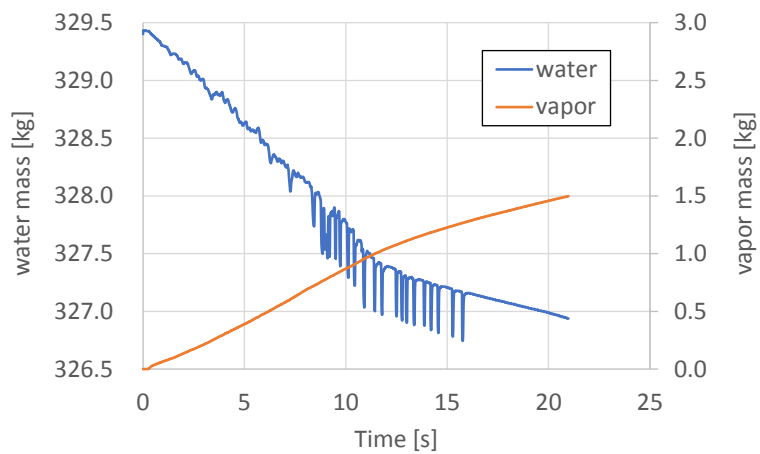


図 A2-7.20 水・水蒸気の質量履歴 (A2-7 キャッチャー4)

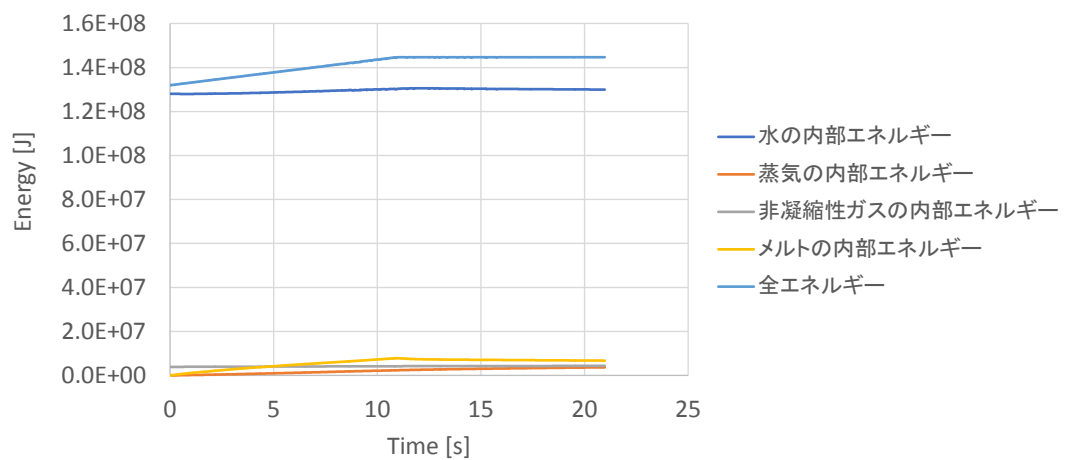


図 A2-7.21 各エネルギーの履歴 (A2-7 キャッチャー4)

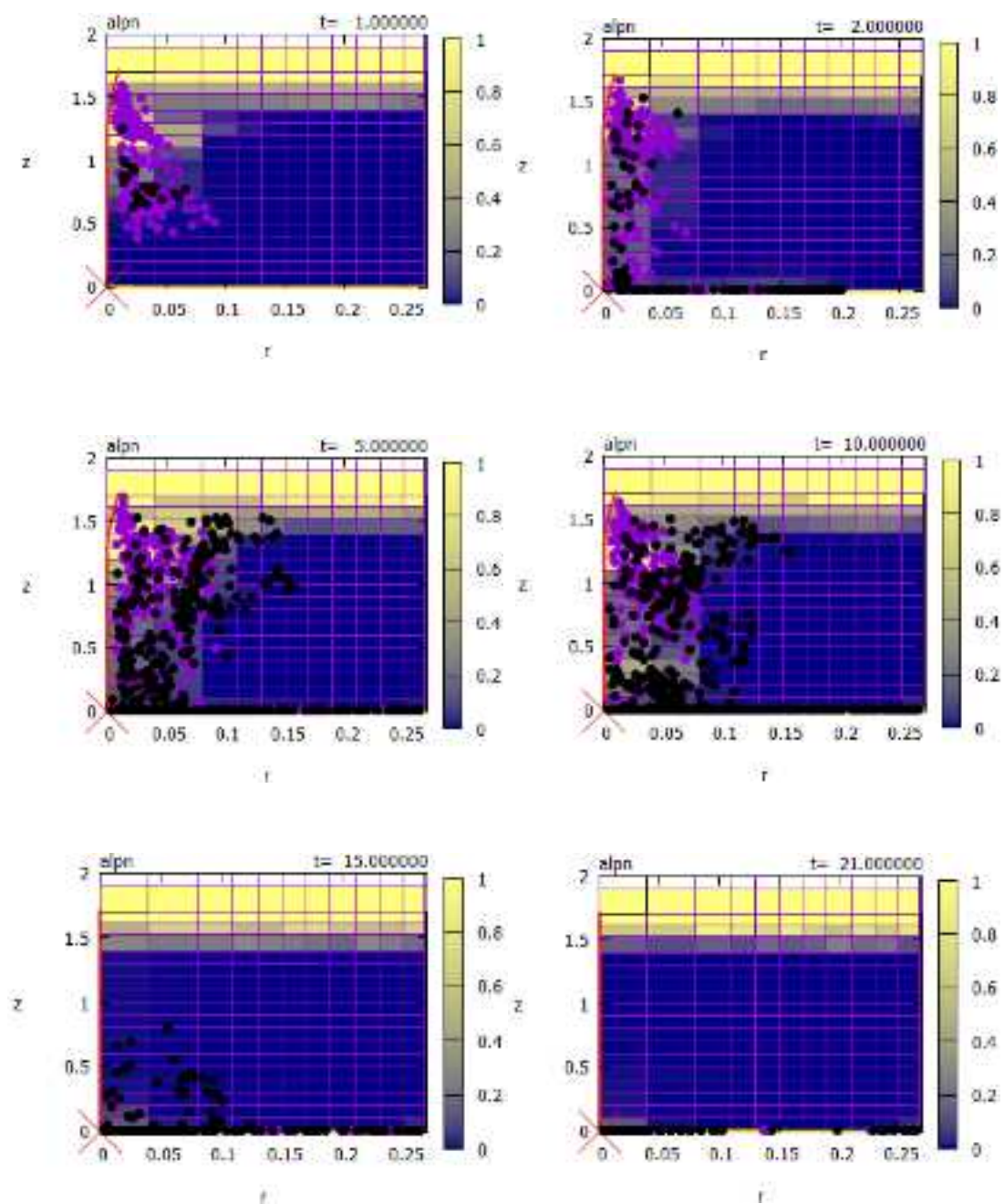


図 A2-7.22 ボイド率及び溶融物粒子分布図 (A2-7 キャッチャー4)  
(橙色：アグロメレーション粒子群、黒色：固化した粒子群)

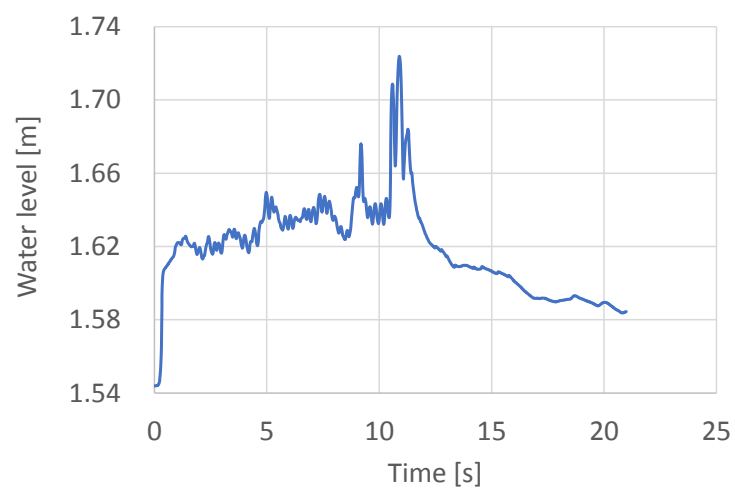


図 A2-7.23 水位履歴 (A2-7 キャッチャー4)

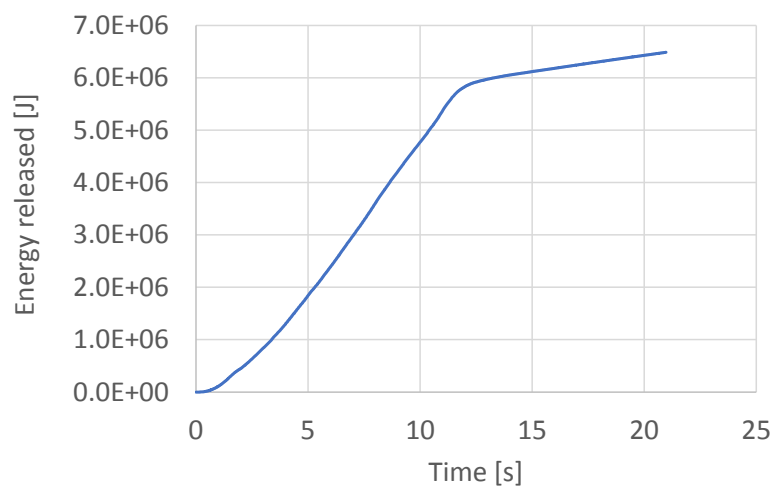


図 A2-7.24 溶融物から水への積算熱移行量 (A2-7 キャッチャー4)

A23 DEFOR-A23 ( $\Phi_{\text{lim}} = 1.5$ ,  $k_{\text{qht}} = 0.8$ )

キャッチャー1

表 A23.1 質量バランス及びエネルギーバランス (A23 キャッチャー1)

| 時刻                     | 0 s        | 1 s        | 21 s       | 21 s-0 s   |
|------------------------|------------|------------|------------|------------|
| 溶融物の質量バランス [kg]        |            |            |            |            |
| ジェット                   | 0.000      | 0.000      | 0.000      |            |
| プール                    | 0.000      | 0.043      | 0.043      |            |
| 粒子                     | 0.000      | 21.410     | 21.410     |            |
| 合計                     | 0.000      | 21.453     | 21.453     |            |
| (粒子のうちアグロメレーションした分)    | 0.000      | 8.024      | 8.195      |            |
| (粒子のうちアグロメレーションした分の割合) | 0.00%      | 37.47%     | 38.28%     |            |
| 水、蒸気の質量バランス [kg]       |            |            |            |            |
| 水                      | 132.789    | 132.594    | 132.556    |            |
| 蒸気                     | 0.000      | 0.120      | 0.240      |            |
| 合計                     | 132.789    | 132.714    | 132.797    |            |
| エネルギーバランス [J]          |            |            |            |            |
| 水の内部エネルギー              | 32,777,493 | 36,229,475 | 36,894,864 | 4,117,371  |
| 蒸気の内部エネルギー             | 19         | 290,026    | 582,646    | 582,628    |
| 非凝縮性ガスの内部エネルギー         | 2,610,978  | 2,638,498  | 2,667,275  | 56,297     |
| 溶融物の内部エネルギー            | 0.0        | 10,137,291 | 9,206,751  | 9,206,751  |
| 流体の運動エネルギー             | 0.0        | 1.05       | 1.09       | 1.09       |
| 合計                     | 35,388,489 | 49,295,291 | 49,351,538 | 13,963,049 |
| エネルギーの増加量              | 0.0        | 13,906,802 | 13,963,049 |            |
| 流入溶融物のエンタルピー           | 0.0        | 14,048,866 | 14,048,866 |            |
| 誤差                     | 0.0        | -142,064   | -85,817    |            |
|                        | 0.00%      | -0.29%     | -0.17%     |            |

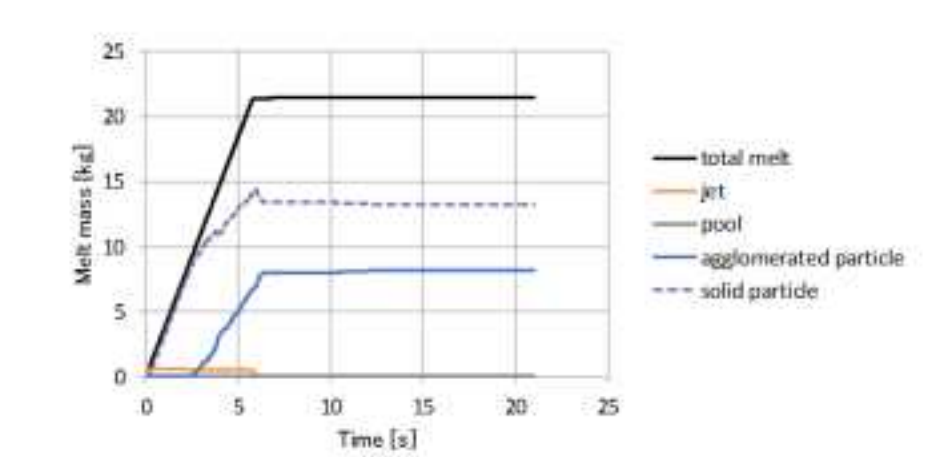


図 A23.1 デブリの状態別質量の履歴 (A23 キャッチャー1)

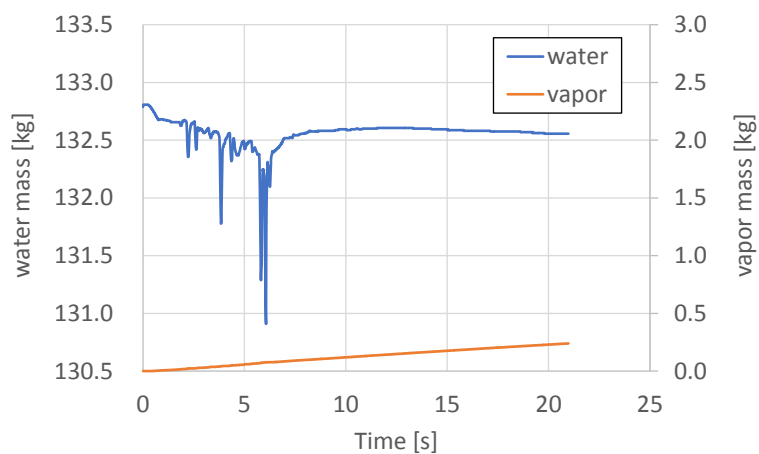


図 A23.2 水・水蒸気の質量履歴 (A23 キャッチャー1)

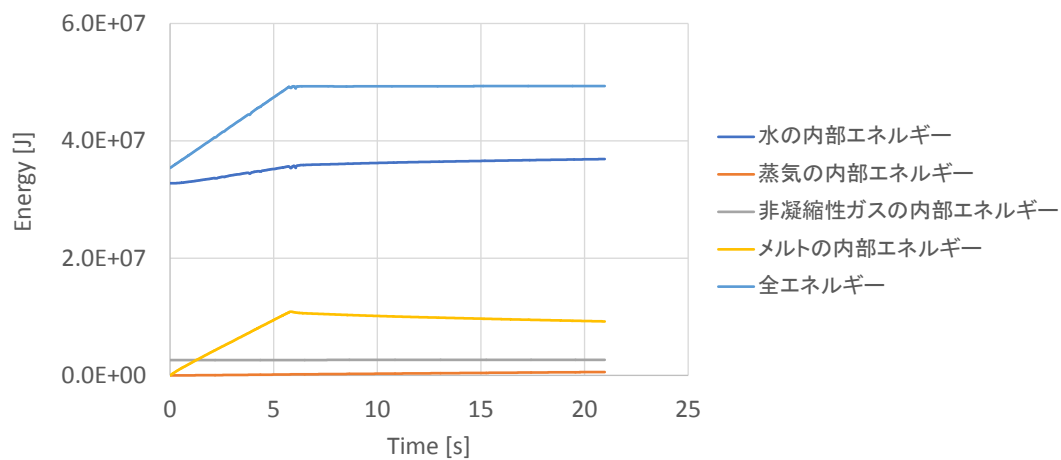


図 A23.3 各エネルギーの履歴 (A23 キャッチャー1)

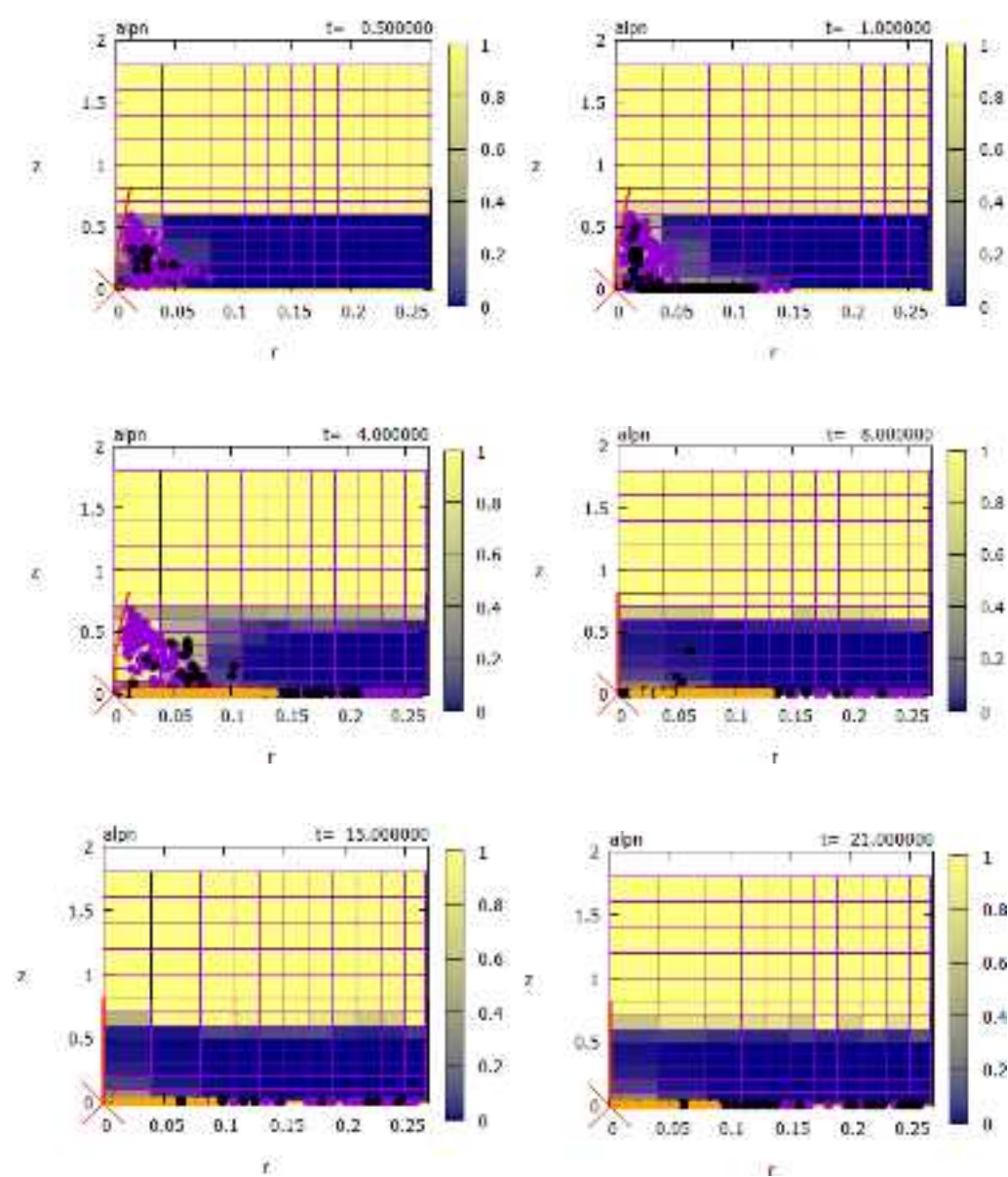


図 A23.4 ボイド率及び溶融物粒子分布図 (A23 キャッチャー1)  
(橙色：アグロメレーション粒子群、黒色：固化した粒子群)

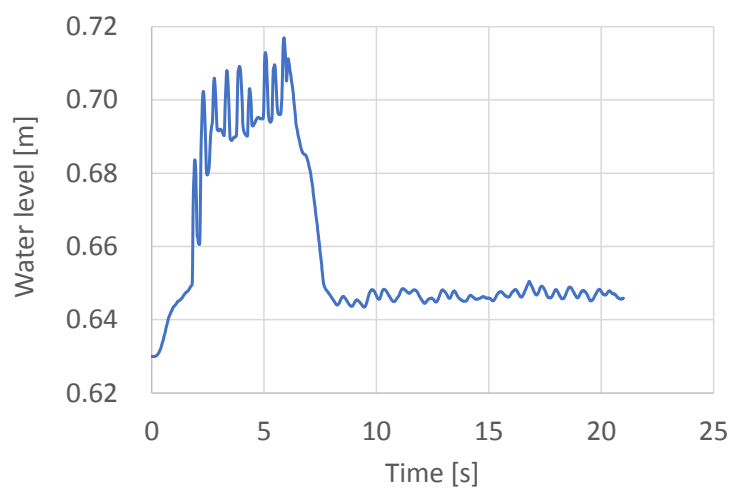


図 A23.5 水位履歴 (A23 キャッチャー1)

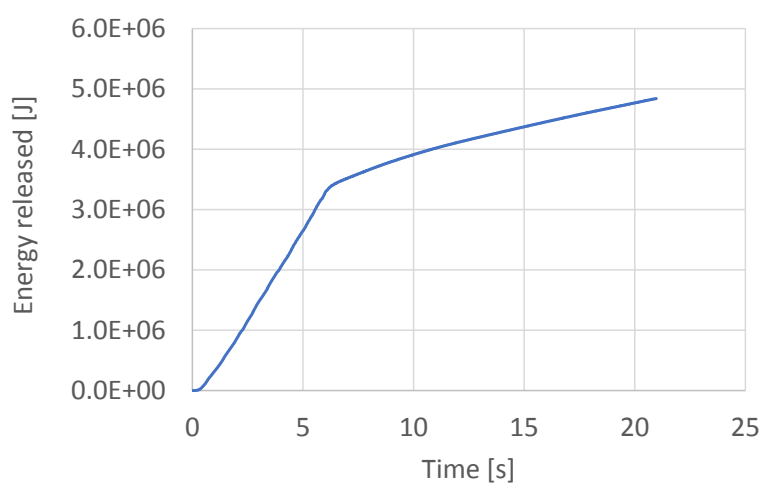


図 A23.6 溶融物から水への積算熱移行量 (A23 キャッチャー1)

キャッチャー2

表 A23.2 質量バランス及びエネルギーバランス (A23 キャッチャー2)

| 時刻                     | 0 s        | 1 s        | 21 s       | 21 s-0 s   |
|------------------------|------------|------------|------------|------------|
| 溶融物の質量バランス [kg]        |            |            |            |            |
| ジェット                   | 0.000      | 0.000      | 0.000      |            |
| プール                    | 0.000      | 0.028      | 0.034      |            |
| 粒子                     | 0.000      | 21.407     | 21.406     |            |
| 合計                     | 0.000      | 21.434     | 21.440     |            |
| (粒子のうちアグロメレーションした分)    | 0.000      | 0.000      | 0.017      |            |
| (粒子のうちアグロメレーションした分の割合) | 0.00%      | 0.00%      | 0.08%      |            |
| 水、蒸気の質量バランス [kg]       |            |            |            |            |
| 水                      | 199.190    | 198.197    | 198.090    |            |
| 蒸気                     | 0.000      | 0.128      | 0.256      |            |
| 合計                     | 199.190    | 198.325    | 198.346    |            |
| エネルギーバランス [J]          |            |            |            |            |
| 水の内部エネルギー              | 49,166,553 | 54,360,863 | 55,071,491 | 5,904,938  |
| 蒸気の内部エネルギー             | 22         | 310,534    | 619,880    | 619,859    |
| 非凝縮性ガスの内部エネルギー         | 3,034,841  | 3,064,372  | 3,094,343  | 59,502     |
| 溶融物の内部エネルギー            | 0.0        | 8,219,663  | 7,149,008  | 7,149,008  |
| 流体の運動エネルギー             | 0.0        | 1.02       | 1.34       | 1.34       |
| 合計                     | 52,201,416 | 65,955,433 | 65,934,724 | 13,733,308 |
| エネルギーの増加量              | 0.0        | 13,754,017 | 13,733,308 |            |
| 流入溶融物のエンタルピー           | 0.0        | 14,036,522 | 14,040,225 |            |
| 誤差                     | 0.0        | -282,506   | -306,918   |            |
|                        | 0.00%      | -0.43%     | -0.47%     |            |

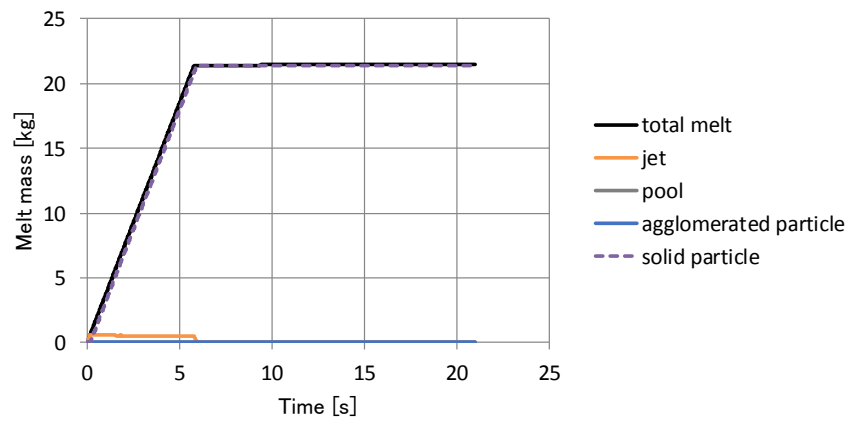


図 A23.7 デブリの状態別質量の履歴 (A23 キャッチャー2)

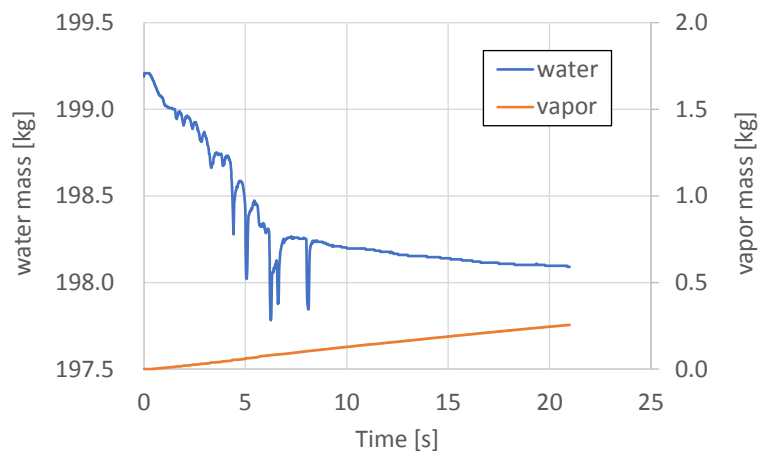


図 A23.8 水・水蒸気の質量履歴 (A23 キャッチャー2)

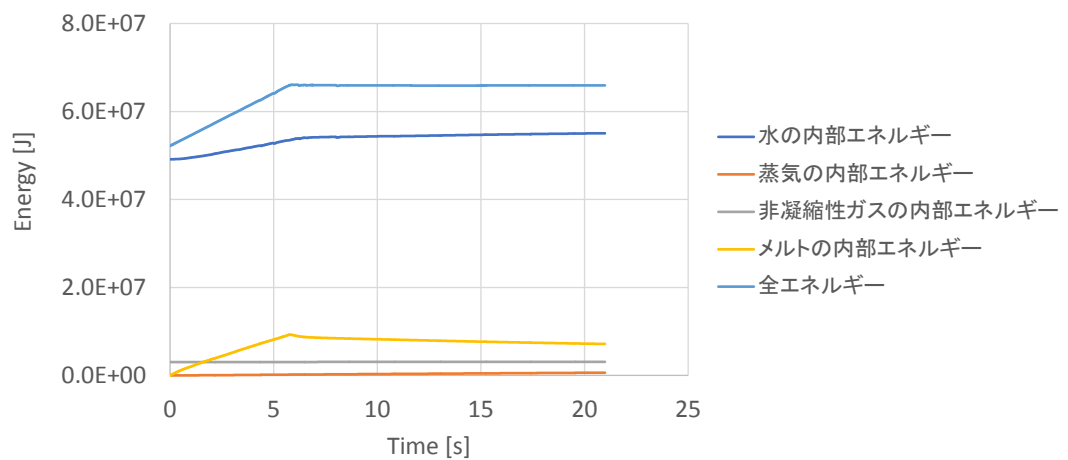


図 A23.9 各エネルギーの履歴 (A23 キャッチャー2)

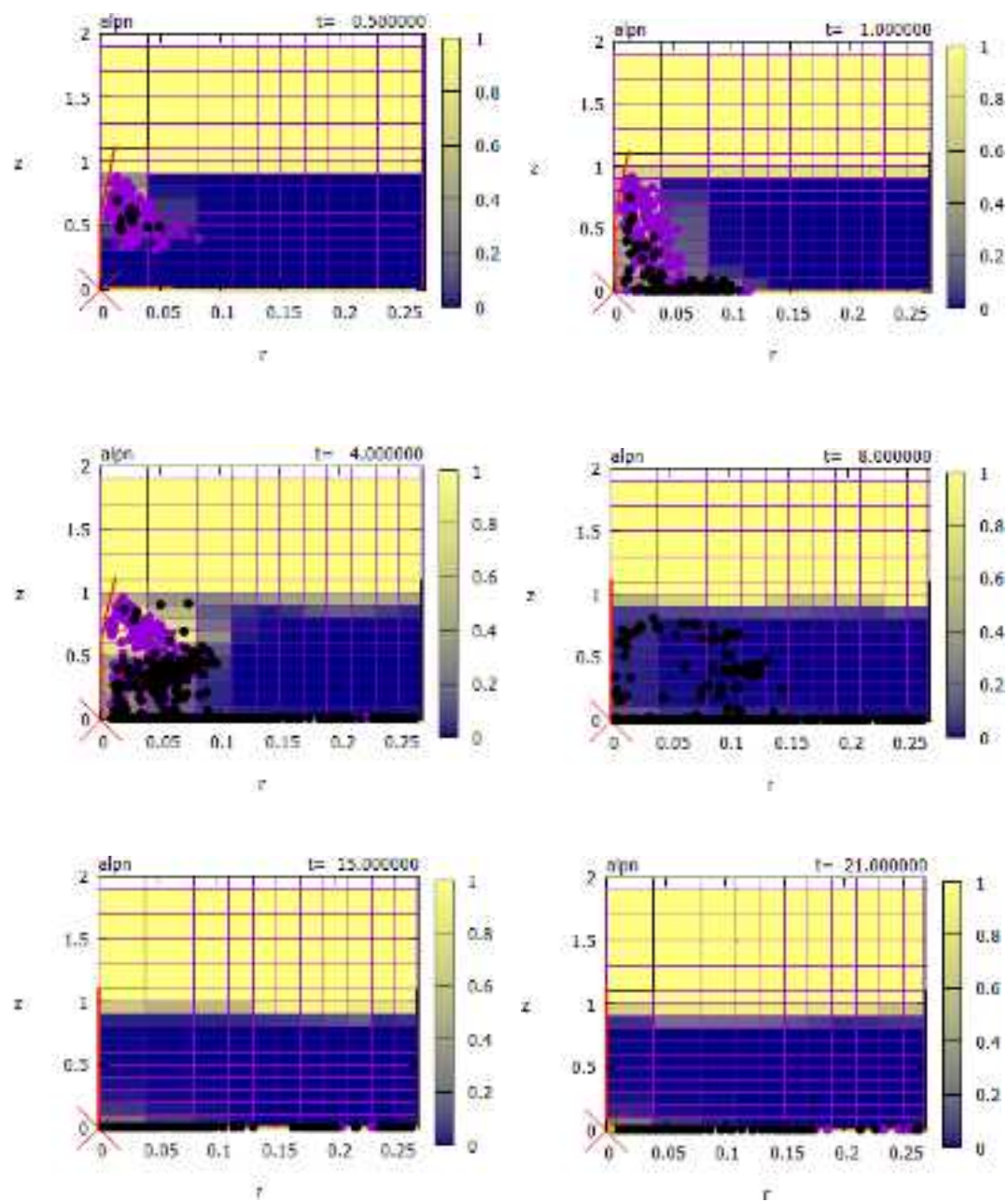


図 A23.10 ボイド率及び溶融物粒子分布図 (A23 キャッチャー2)  
(橙色：アグロメレーション粒子群、黒色：固化した粒子群)

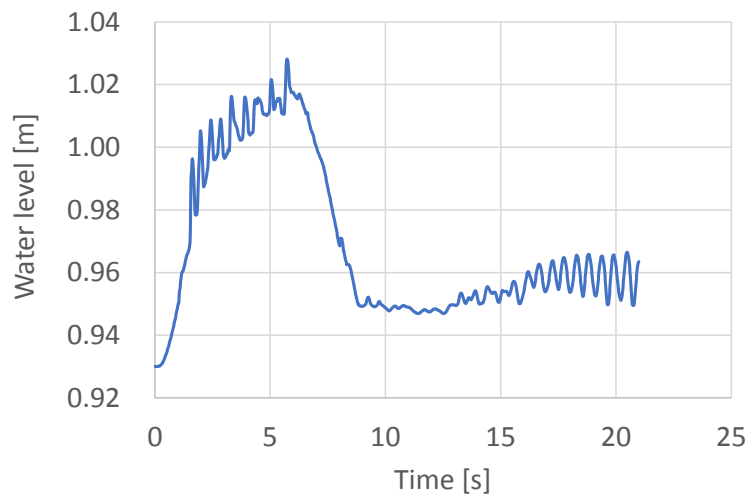


図 A23.11 水位履歴 (A23 キャッチャー2)

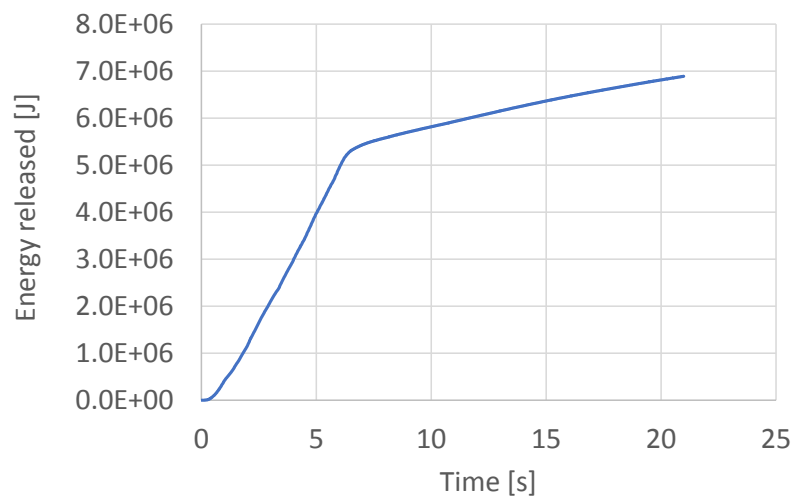


図 A23.12 溶融物から水への積算熱移行量 (A23 キャッチャー2)

キャッチャー3

表 A23.3 質量バランス及びエネルギーバランス (A23 キャッチャー3)

| 時刻                     | 0 s        | 1 s        | 21 s       | 21 s-0 s   |
|------------------------|------------|------------|------------|------------|
| 溶融物の質量バランス [kg]        |            |            |            |            |
| ジェット                   | 0.000      | 0.225      | 0.000      |            |
| プール                    | 0.000      | 0.011      | 0.010      |            |
| 粒子                     | 0.000      | 18.393     | 20.447     |            |
| 合計                     | 0.000      | 18.630     | 20.457     |            |
| (粒子のうちアグロメレーションした分)    | 0.000      | 0.000      | 0.000      |            |
| (粒子のうちアグロメレーションした分の割合) | 0.00%      | 0.00%      | 0.00%      |            |
| 水、蒸気の質量バランス [kg]       |            |            |            |            |
| 水                      | 265.584    | 264.440    | 0.000      |            |
| 蒸気                     | 0.000      | 0.132      | 0.000      |            |
| 合計                     | 265.584    | 264.572    | 0.000      |            |
| エネルギーバランス [J]          |            |            |            |            |
| 水の内部エネルギー              | 65,552,472 | 72,017,870 | 72,432,560 | 6,880,088  |
| 蒸気の内部エネルギー             | 25         | 318,796    | 618,008    | 617,983    |
| 非凝縮性ガスの内部エネルギー         | 3,458,768  | 3,489,555  | 3,518,332  | 59,565     |
| 溶融物の内部エネルギー            | 0.0        | 6,954,858  | 6,192,016  | 6,192,016  |
| 流体の運動エネルギー             | 0.0        | 1.56       | 1.72       | 1.72       |
| 合計                     | 69,011,265 | 82,781,081 | 82,760,918 | 13,749,654 |
| エネルギーの増加量              | 0.0        | 13,769,816 | 13,749,654 |            |
| 流入溶融物のエンタルピー           | 0.0        | 12,199,753 | 13,396,703 |            |
| 誤差                     | 0.0        | 1,570,063  | 352,951    |            |
|                        | 0.00%      | 1.90%      | 0.43%      |            |

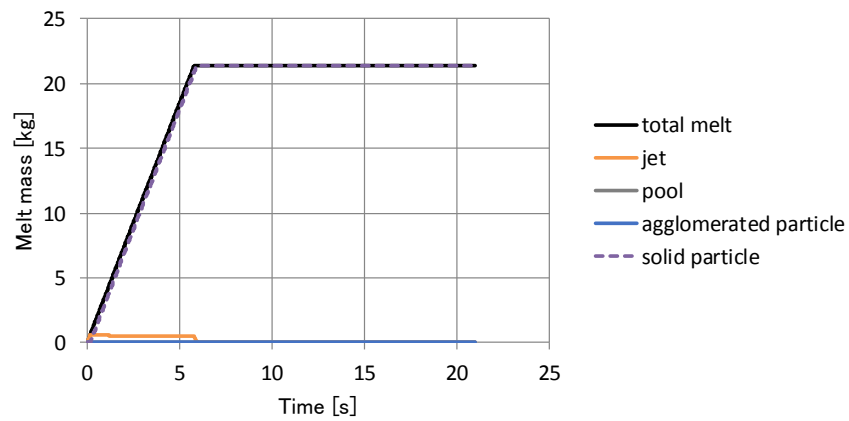


図 A23.13 デブリの状態別質量の履歴 (A23 キャッチャー3)

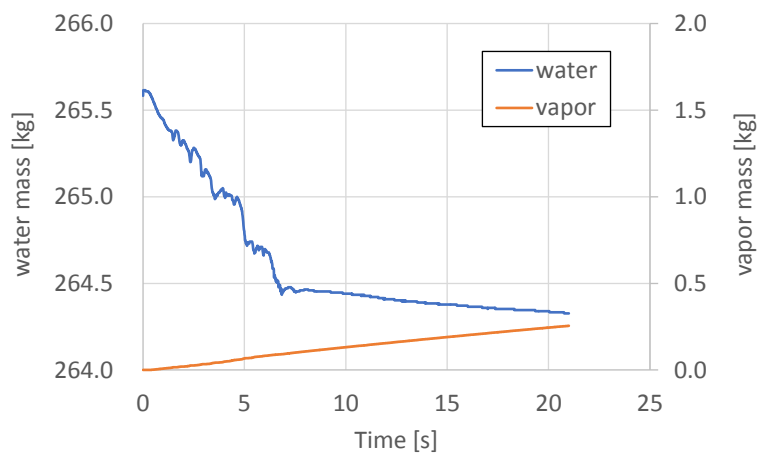


図 A23.14 水・水蒸気の質量履歴 (A23 キャッチャー3)

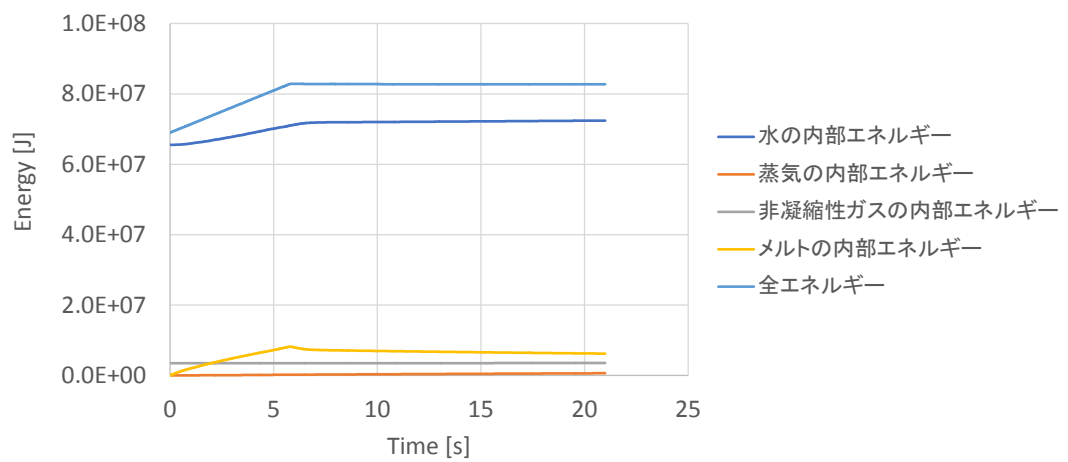


図 A23.15 各エネルギーの履歴 (A23 キャッチャー3)

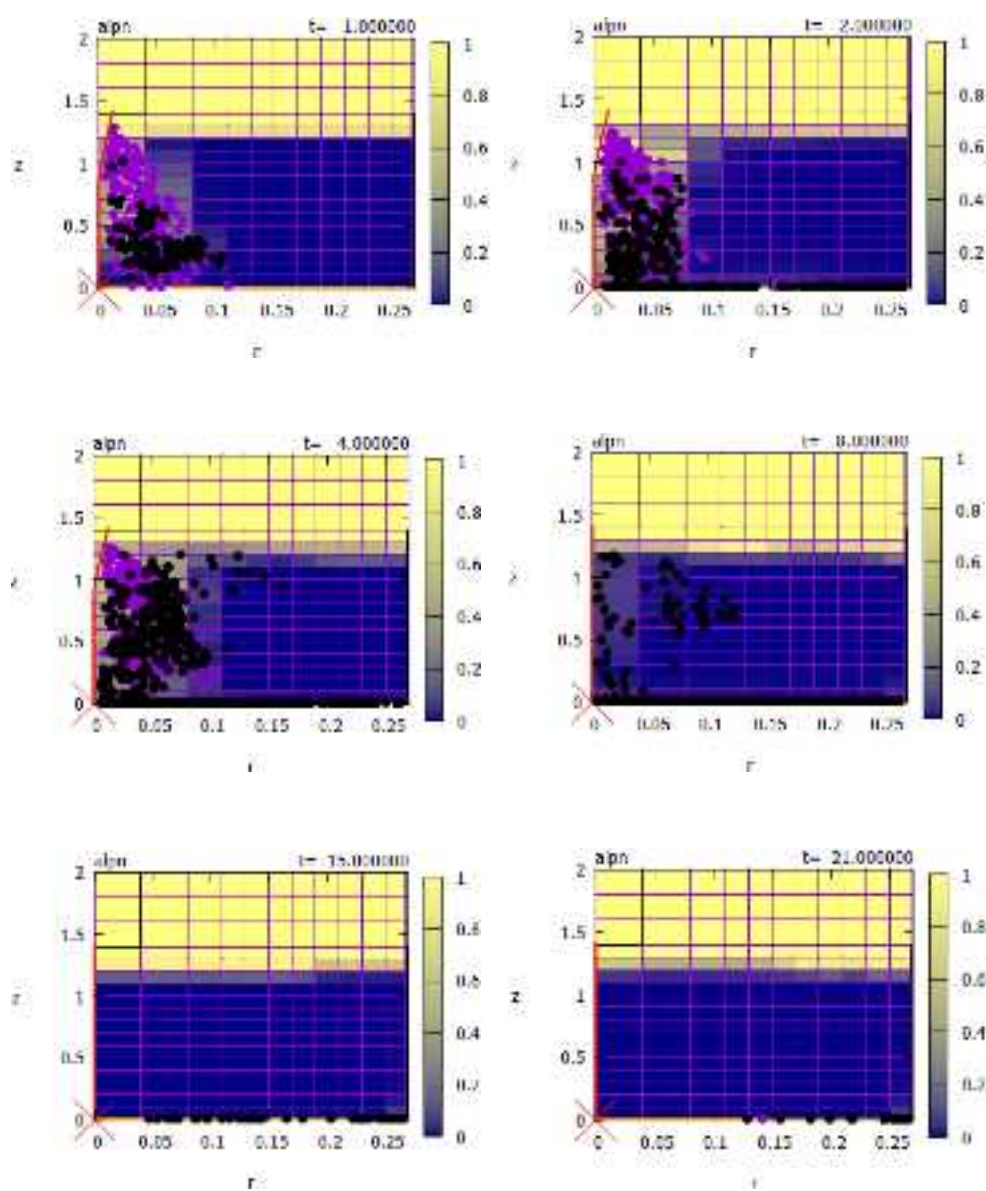


図 A23.16 ボイド率及び溶融物粒子分布図 (A23 キャッチャー3)  
(橙色：アグロメレーション粒子群、黒色：固化した粒子群)

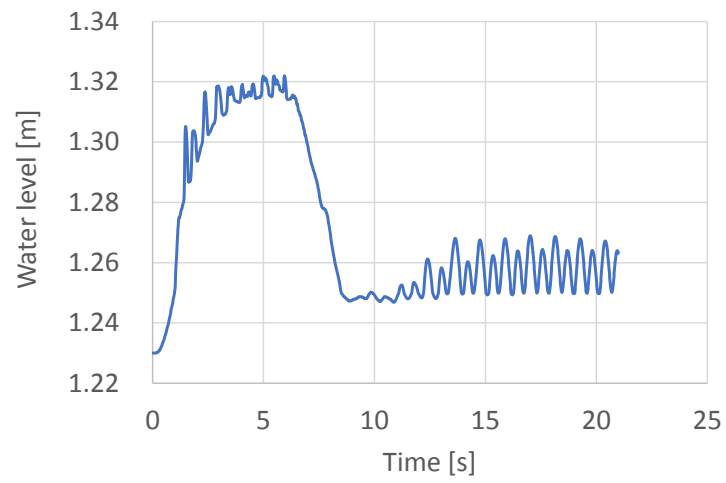


図 A23.17 水位履歴 (A23 キャッチャー3)

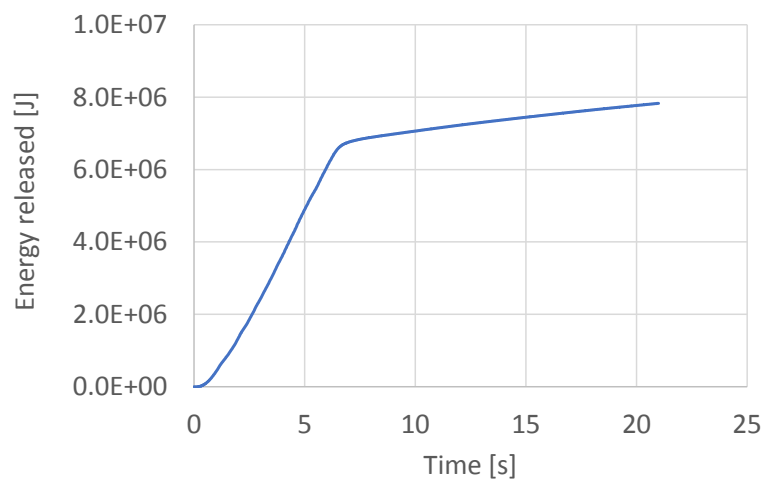


図 A23.18 溶融物から水への積算熱移行量 (A23 キャッチャー3)

キャッチャー4

表 A23.4 質量バランス及びエネルギーバランス (A23 キャッチャー4)

| 時刻                     | 0 s        | 1 s        | 21 s       | 21 s-0 s   |
|------------------------|------------|------------|------------|------------|
| 溶融物の質量バランス [kg]        |            |            |            |            |
| ジェット                   | 0.000      | 0.000      | 0.000      |            |
| プール                    | 0.000      | 0.002      | 0.002      |            |
| 粒子                     | 0.000      | 21.380     | 21.380     |            |
| 合計                     | 0.000      | 21.382     | 21.382     |            |
| (粒子のうちアグロメレーションした分)    | 0.000      | 0.000      | 0.000      |            |
| (粒子のうちアグロメレーションした分の割合) | 0.00%      | 0.00%      | 0.00%      |            |
| 水、蒸気の質量バランス [kg]       |            |            |            |            |
| 水                      | 331.985    | 330.640    | 0.000      |            |
| 蒸気                     | 0.000      | 0.130      | 0.000      |            |
| 合計                     | 331.985    | 330.770    | 0.000      |            |
| エネルギーバランス [J]          |            |            |            |            |
| 水の内部エネルギー              | 81,945,303 | 89,208,665 | 89,447,426 | 7,502,123  |
| 蒸気の内部エネルギー             | 28         | 314,756    | 615,055    | 615,027    |
| 非凝縮性ガスの内部エネルギー         | 3,882,694  | 3,913,042  | 3,942,196  | 59,502     |
| 溶融物の内部エネルギー            | 0.0        | 6,123,907  | 5,519,150  | 5,519,150  |
| 流体の運動エネルギー             | 0.0        | 2.34       | 1.89       | 1.89       |
| 合計                     | 85,828,025 | 99,560,372 | 99,523,829 | 13,695,804 |
| エネルギーの増加量              | 0.0        | 13,732,347 | 13,695,804 |            |
| 流入溶融物のエンタルピー           | 0.0        | 14,001,960 | 14,001,960 |            |
| 誤差                     | 0.0        | -269,612   | -306,156   |            |
|                        | 0.00%      | -0.27%     | -0.31%     |            |

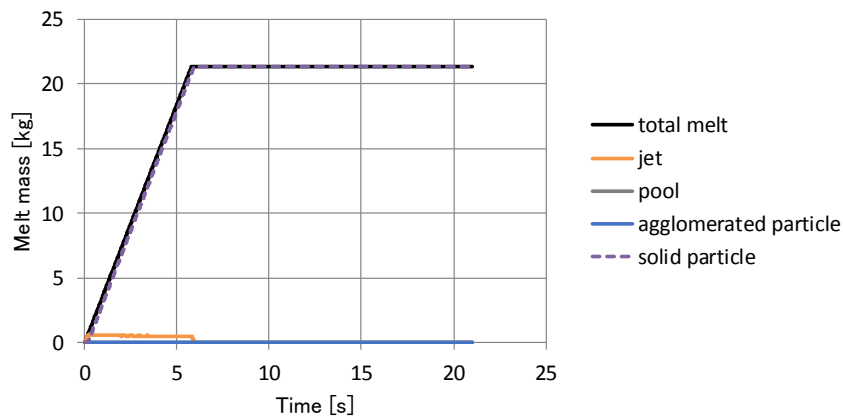


図 A23.19 デブリの状態別質量の履歴 (A23 キャッチャー4)

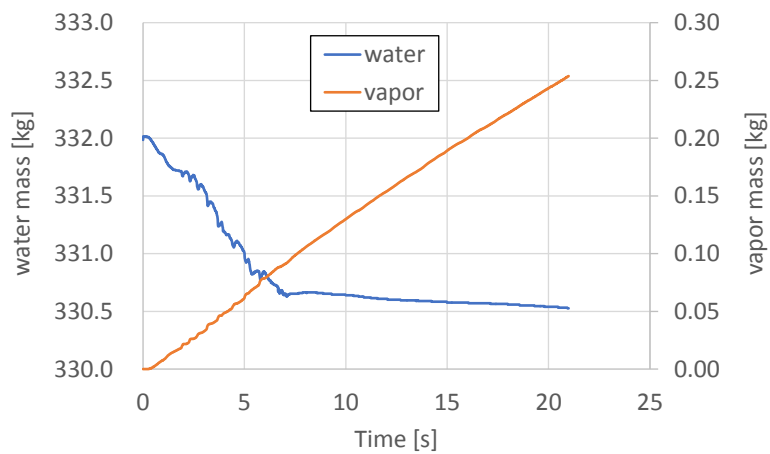


図 A23.20 水・水蒸気の質量履歴 (A23 キャッチャー4)

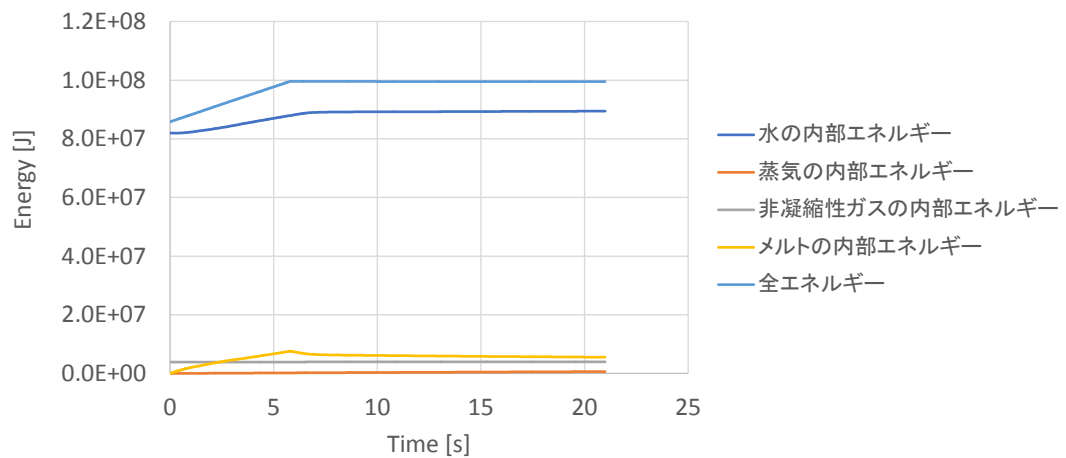


図 A23.21 各エネルギーの履歴 (A23 キャッチャー4)

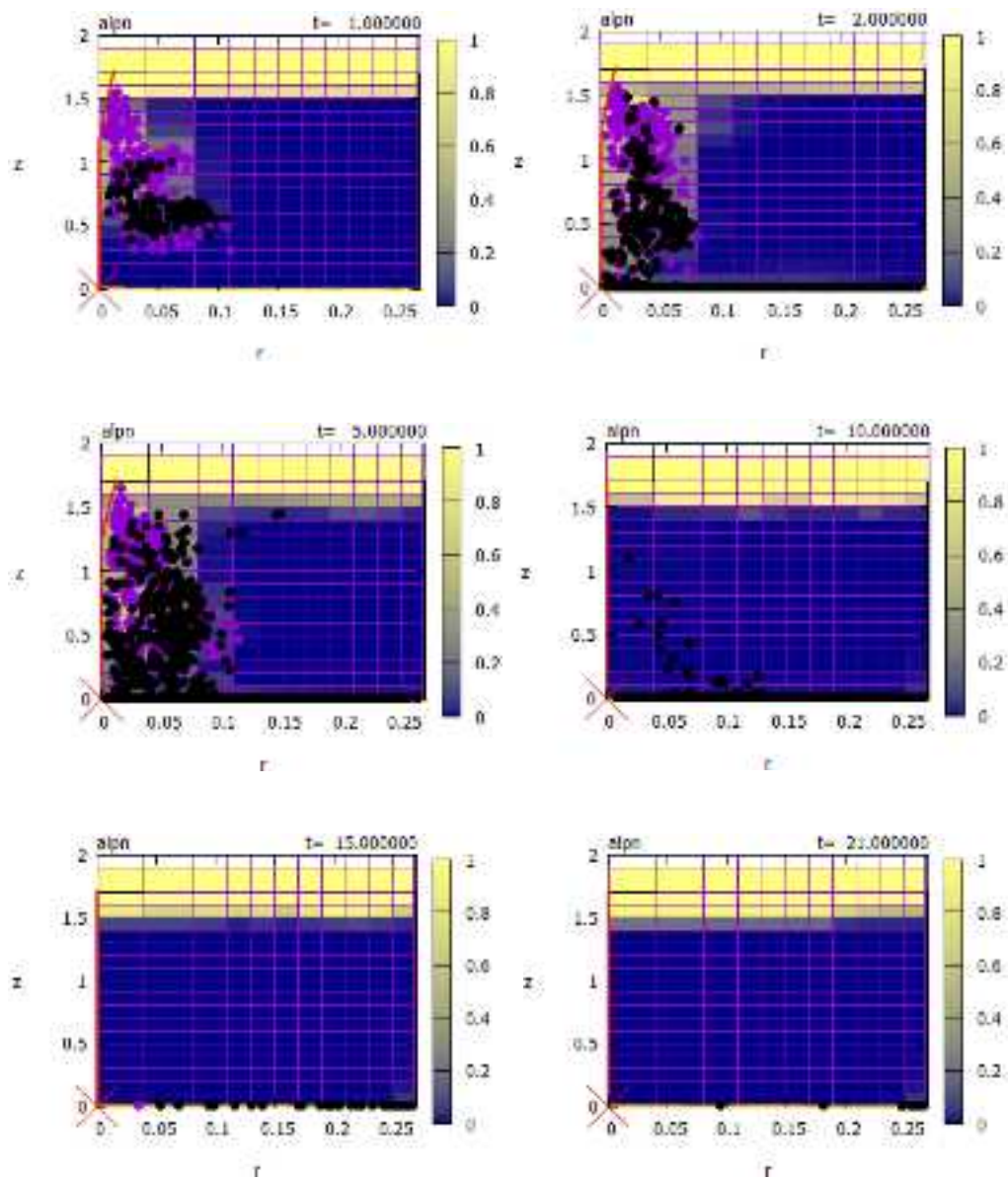


図 A23.22 ボイド率及び溶融物粒子分布図 (A23 キャッチャー4)  
(橙色：アグロメレーション粒子群、黒色：固化した粒子群)

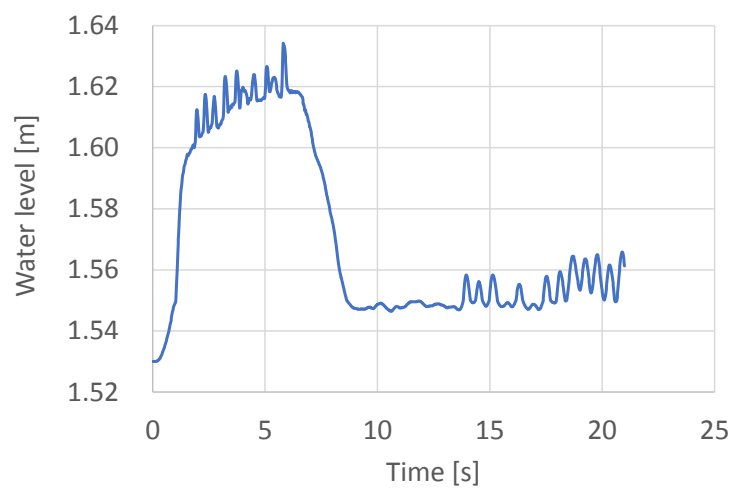


図 A23.23 水位履歴 (A23 キャッチャー4)

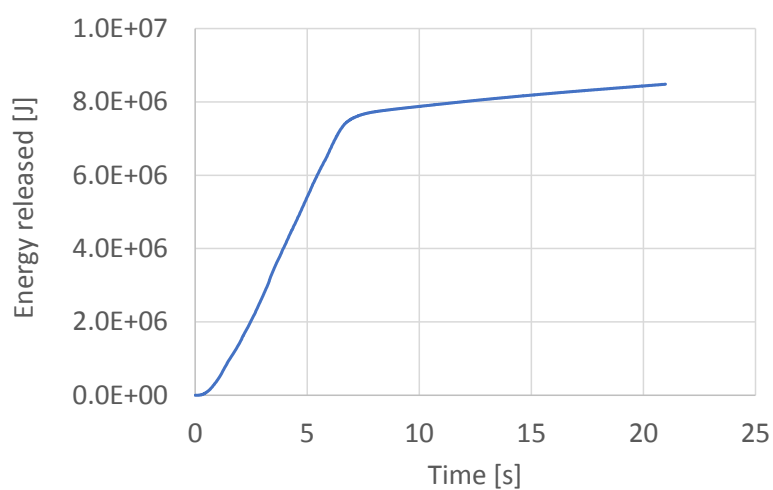


図 A23.24 溶融物から水への積算熱移行量 (A23 キャッチャー4)

A24 DEFOR-A24 ( $\Phi_{\text{lim}} = 1.5$ ,  $k_{\text{qht}} = 0.8$ )

キャッチャー1

表 A24.1 質量バランス及びエネルギーバランス (A24 キャッチャー1)

| 時刻                     | 0 s        | 1 s        | 21 s       | 21 s-0 s   |
|------------------------|------------|------------|------------|------------|
| 溶融物の質量バランス [kg]        |            |            |            |            |
| ジェット                   | 0.000      | 0.000      | 0.000      |            |
| プール                    | 0.000      | 0.011      | 0.011      |            |
| 粒子                     | 0.000      | 22.416     | 22.416     |            |
| 合計                     | 0.000      | 22.427     | 22.427     |            |
| (粒子のうちアグロメレーションした分)    | 0.000      | 13.196     | 13.281     |            |
| (粒子のうちアグロメレーションした分の割合) | 0.00%      | 58.87%     | 59.25%     |            |
| 水、蒸気の質量バランス [kg]       |            |            |            |            |
| 水                      | 153.699    | 153.473    | 0.000      |            |
| 蒸気                     | 0.000      | 0.255      | 0.000      |            |
| 合計                     | 153.699    | 153.728    | 0.000      |            |
| エネルギーバランス [J]          |            |            |            |            |
| 水の内部エネルギー              | 46,948,589 | 49,793,615 | 49,808,067 | 2,859,478  |
| 蒸気の内部エネルギー             | 19         | 618,278    | 1,122,868  | 1,122,850  |
| 非凝縮性ガスの内部エネルギー         | 2,605,323  | 2,676,260  | 2,742,548  | 137,225    |
| 溶融物の内部エネルギー            | 0.0        | 10,895,043 | 10,299,397 | 10,299,397 |
| 流体の運動エネルギー             | 0.0        | 1.11       | 1.00       | 1.00       |
| 合計                     | 49,553,930 | 63,983,198 | 63,972,881 | 14,418,950 |
| エネルギーの増加量              | 0.0        | 14,429,267 | 14,418,950 |            |
| 流入溶融物のエンタルピー           | 0.0        | 14,485,680 | 14,485,680 |            |
| 誤差                     | 0.0        | -56,413    | -66,730    |            |
|                        | 0.00%      | -0.09%     | -0.10%     |            |

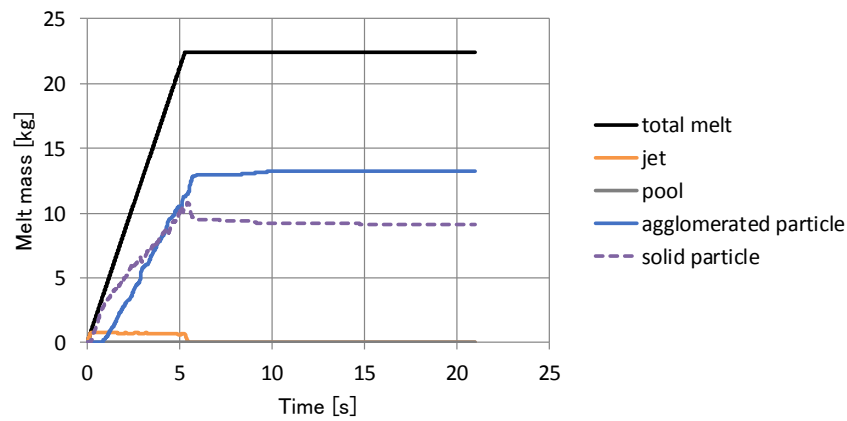


図 A24.1 デブリの状態別質量の履歴 (A24 キャッチャー1)

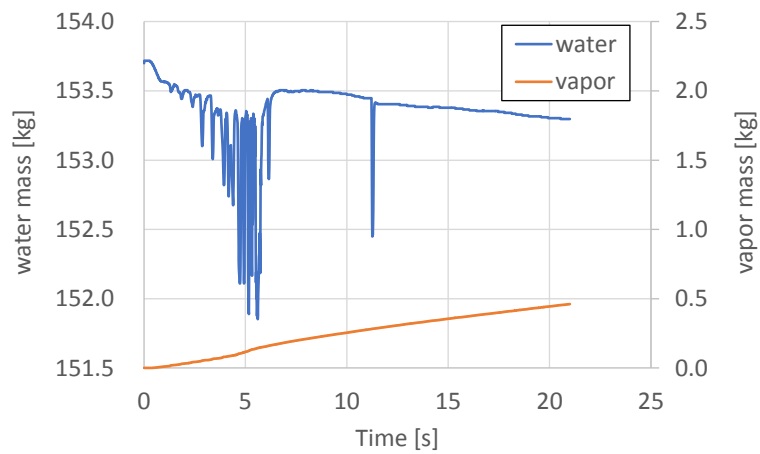


図 A24.2 水・水蒸気の質量履歴 (A24 キャッチャー1)

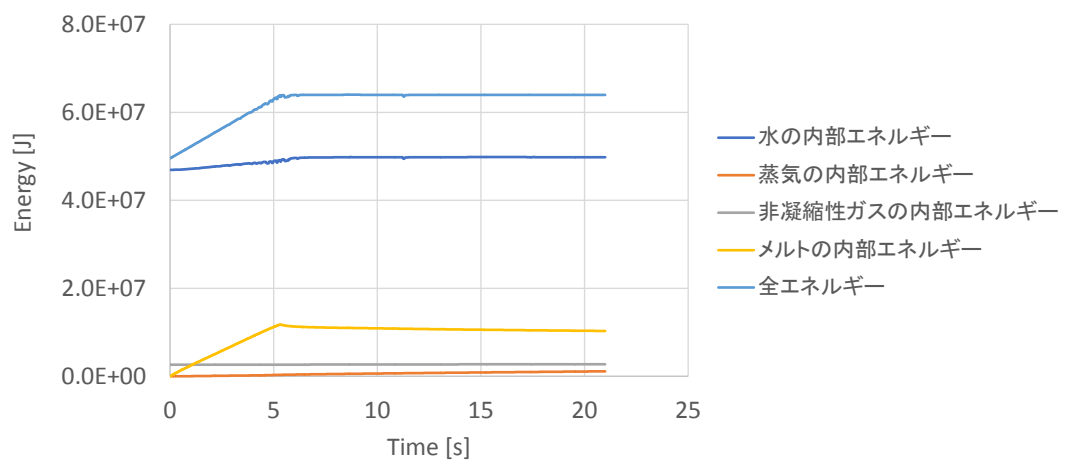


図 A24.3 各エネルギーの履歴 (A24 キャッチャー1)

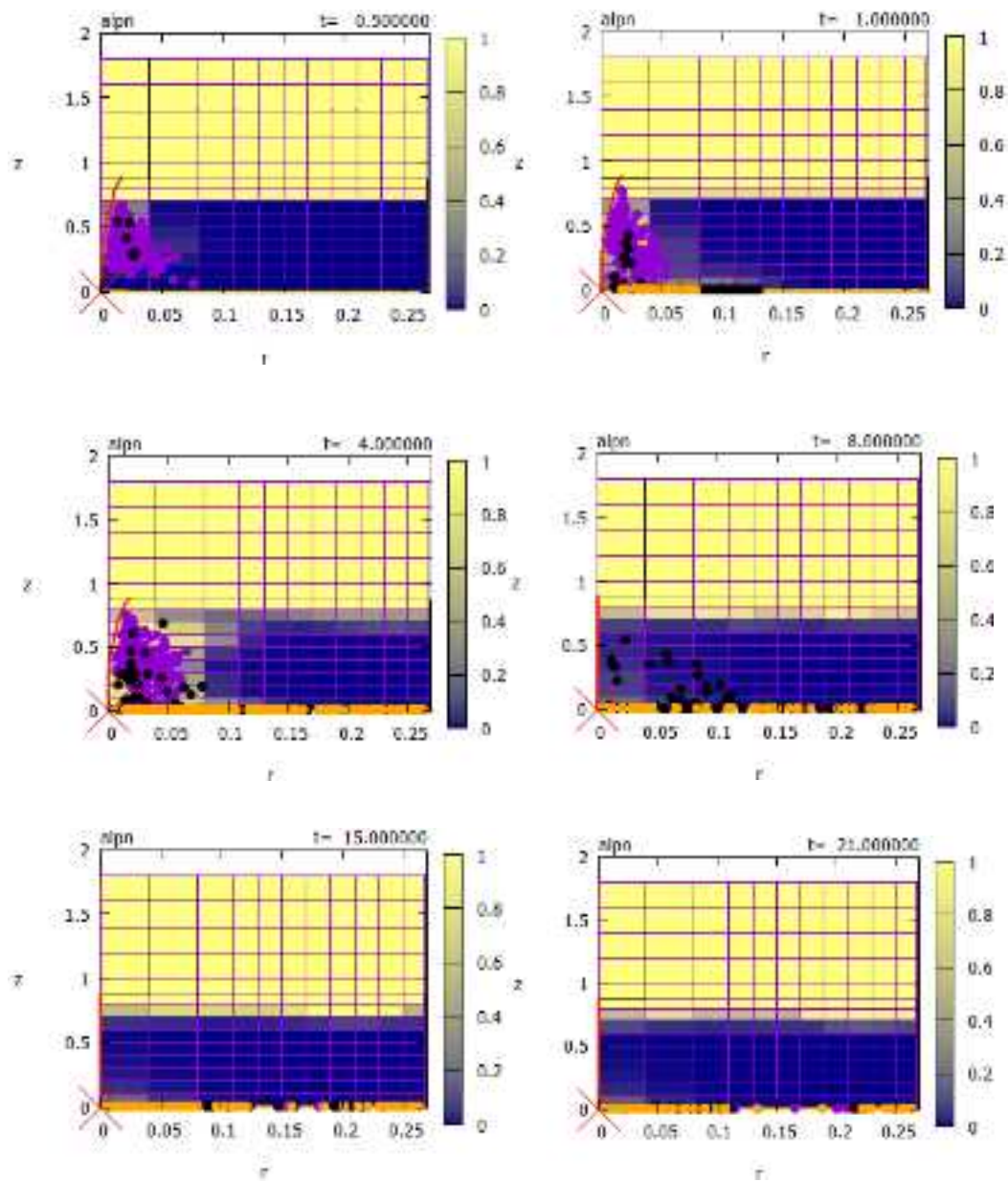


図 A24.4 ボイド率及び溶融物粒子分布図 (A24 キャッチャー1)  
(橙色：アグロメレーション粒子群、黒色：固化した粒子群)

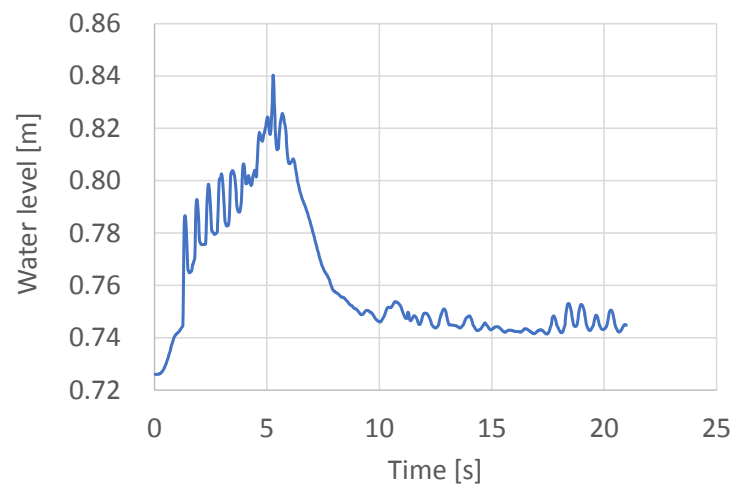


図 A24.5 水位履歴 (A24 キャッチャー1)

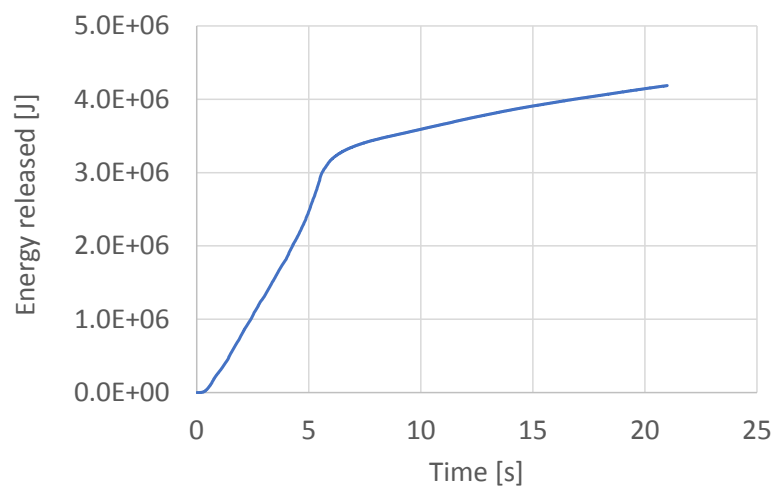


図 A24.6 溶融物から水への積算熱移行量 (A24 キャッチャー1)

キャッチャー2

表 A24.2 質量バランス及びエネルギーバランス (A24 キャッチャー2)

| 時刻                     | 0 s        | 1 s        | 21 s       | 21 s-0 s   |
|------------------------|------------|------------|------------|------------|
| 溶融物の質量バランス [kg]        |            |            |            |            |
| ジェット                   | 0.000      | 0.000      | 0.000      |            |
| プール                    | 0.000      | 0.011      | 0.013      |            |
| 粒子                     | 0.000      | 22.387     | 22.385     |            |
| 合計                     | 0.000      | 22.398     | 22.399     |            |
| (粒子のうちアグロメレーションした分)    | 0.000      | 0.000      | 0.000      |            |
| (粒子のうちアグロメレーションした分の割合) | 0.00%      | 0.00%      | 0.00%      |            |
| 水、蒸気の質量バランス [kg]       |            |            |            |            |
| 水                      | 219.572    | 218.209    | 217.970    |            |
| 蒸気                     | 0.000      | 0.261      | 0.476      |            |
| 合計                     | 219.572    | 218.470    | 218.446    |            |
| エネルギーバランス [J]          |            |            |            |            |
| 水の内部エネルギー              | 67,073,003 | 71,245,038 | 71,873,357 | 4,800,354  |
| 蒸気の内部エネルギー             | 22         | 634,350    | 1,156,860  | 1,156,839  |
| 非凝縮性ガスの内部エネルギー         | 3,029,249  | 3,102,448  | 3,167,040  | 137,790    |
| 溶融物の内部エネルギー            | 0.0        | 9,257,017  | 8,008,548  | 8,008,548  |
| 流体の運動エネルギー             | 0.0        | 0.93       | 1.39       | 1.39       |
| 合計                     | 70,102,274 | 84,238,855 | 84,205,806 | 14,103,532 |
| エネルギーの増加量              | 0.0        | 14,136,581 | 14,103,532 |            |
| 流入溶融物のエンタルピー           | 0.0        | 14,467,012 | 14,467,418 |            |
| 誤差                     | 0.0        | -330,431   | -363,886   |            |
|                        | 0.00%      | -0.39%     | -0.43%     |            |

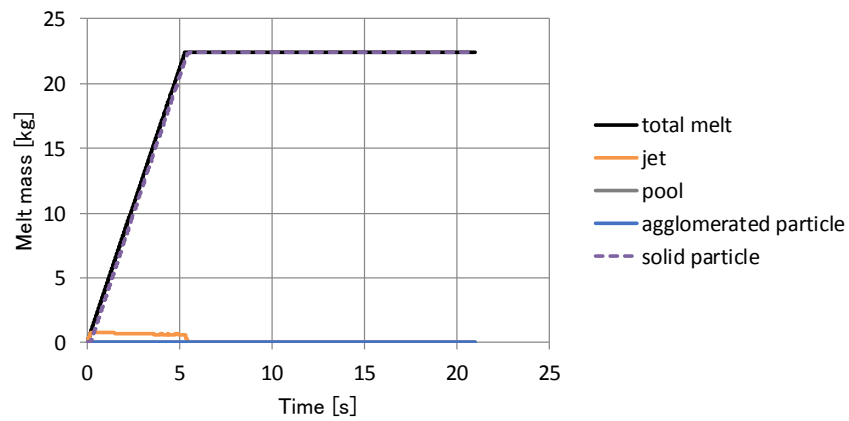


図 A24.7 デブリの状態別質量の履歴 (A24 キャッチャー2)

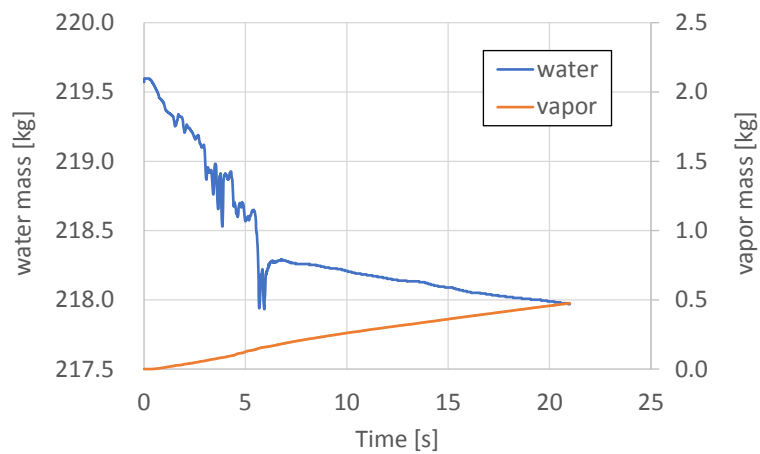


図 A24.8 水・水蒸気の質量履歴 (A24 キャッチャー2)

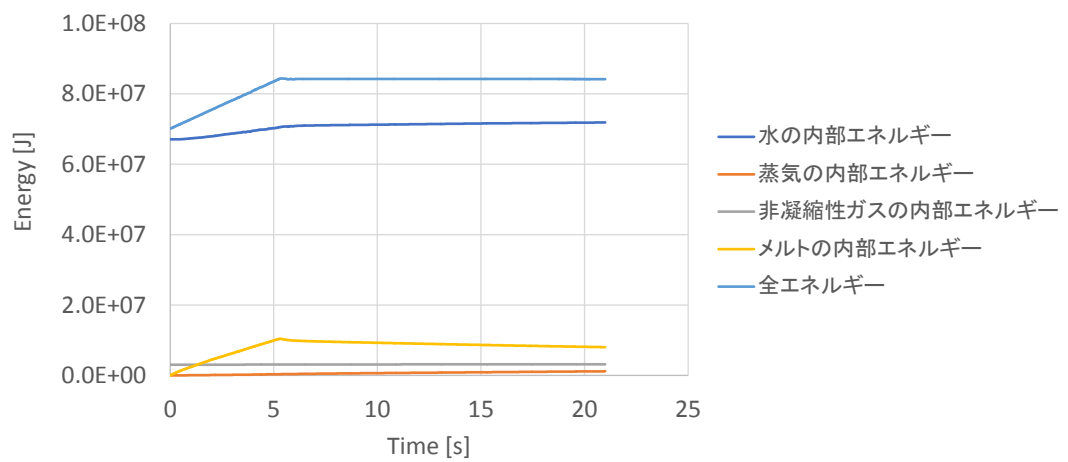


図 A24.9 各エネルギーの履歴 (A24 キャッチャー2)

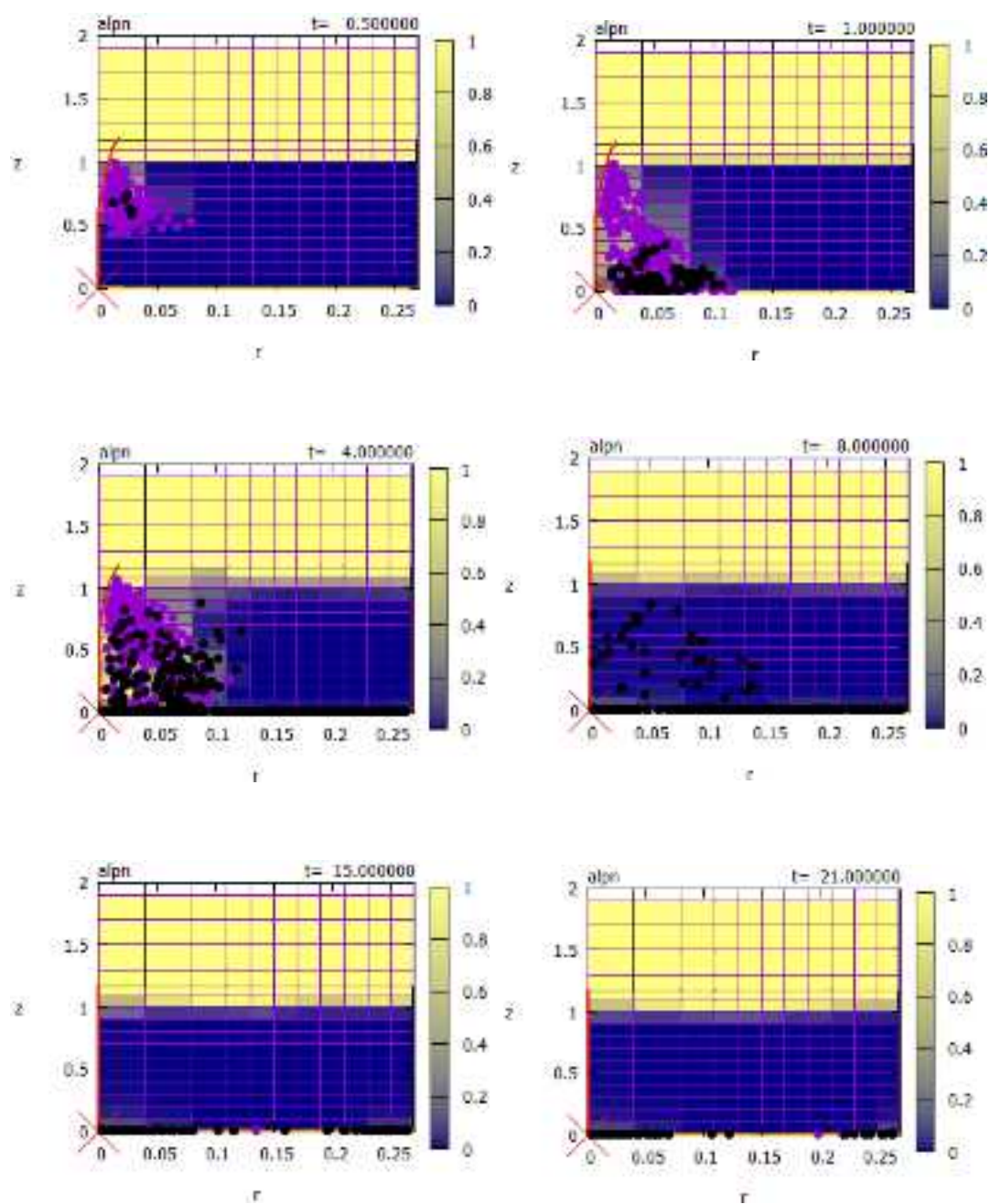


図 A24.10 ボイド率及び溶融物粒子分布図 (A24 キャッチャー2)  
(橙色：アグロメレーション粒子群、黒色：固化した粒子群)

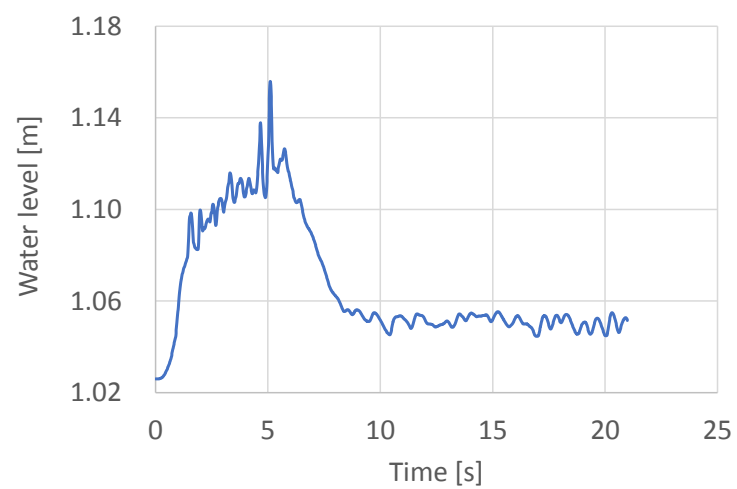


図 A24.11 水位履歴 (A24 キャッチャー2)

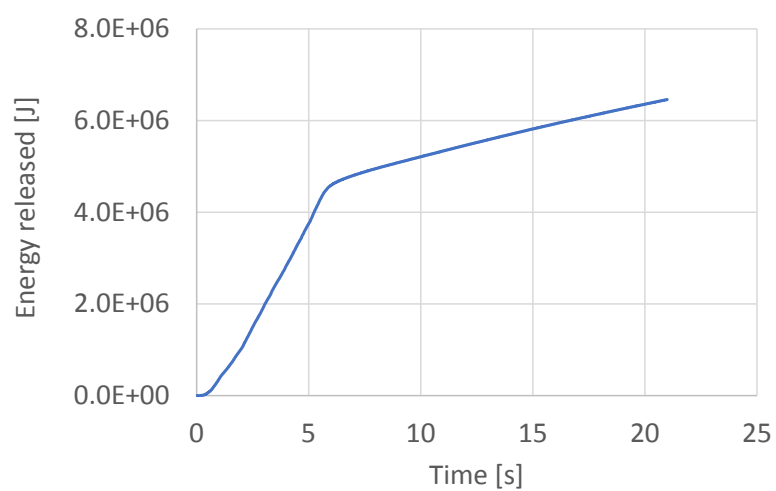


図 A24.12 溶融物から水への積算熱移行量 (A24 キャッチャー2)

キャッチャー3

表 A24.3 質量バランス及びエネルギーバランス (A24 キャッチャー3)

| 時刻                     | 0 s        | 1 s         | 21 s        | 21 s-0 s   |
|------------------------|------------|-------------|-------------|------------|
| 溶融物の質量バランス [kg]        |            |             |             |            |
| ジェット                   | 0.000      | 0.000       | 0.000       |            |
| プール                    | 0.000      | 0.004       | 0.007       |            |
| 粒子                     | 0.000      | 22.380      | 22.380      |            |
| 合計                     | 0.000      | 22.384      | 22.387      |            |
| (粒子のうちアグロメレーションした分)    | 0.000      | 0.000       | 0.000       |            |
| (粒子のうちアグロメレーションした分の割合) | 0.00%      | 0.00%       | 0.00%       |            |
| 水、蒸気の質量バランス [kg]       |            |             |             |            |
| 水                      | 285.451    | 283.717     | 283.472     |            |
| 蒸気                     | 0.000      | 0.266       | 0.472       |            |
| 合計                     | 285.451    | 283.984     | 283.945     |            |
| エネルギーバランス [J]          |            |             |             |            |
| 水の内部エネルギー              | 87,191,763 | 92,356,541  | 92,714,682  | 5,522,920  |
| 蒸気の内部エネルギー             | 25         | 646,665     | 1,148,378   | 1,148,353  |
| 非凝縮性ガスの内部エネルギー         | 3,453,176  | 3,529,579   | 3,590,652   | 137,476    |
| 溶融物の内部エネルギー            | 0.0        | 8,119,132   | 7,162,831   | 7,162,831  |
| 流体の運動エネルギー             | 0.0        | 1.59        | 1.79        | 1.79       |
| 合計                     | 90,644,963 | 104,651,919 | 104,616,545 | 13,971,582 |
| エネルギーの増加量              | 0.0        | 14,006,956  | 13,971,582  |            |
| 流入溶融物のエンタルピー           | 0.0        | 14,458,084  | 14,459,707  |            |
| 誤差                     | 0.0        | -451,128    | -488,125    |            |
|                        | 0.00%      | -0.43%      | -0.47%      |            |

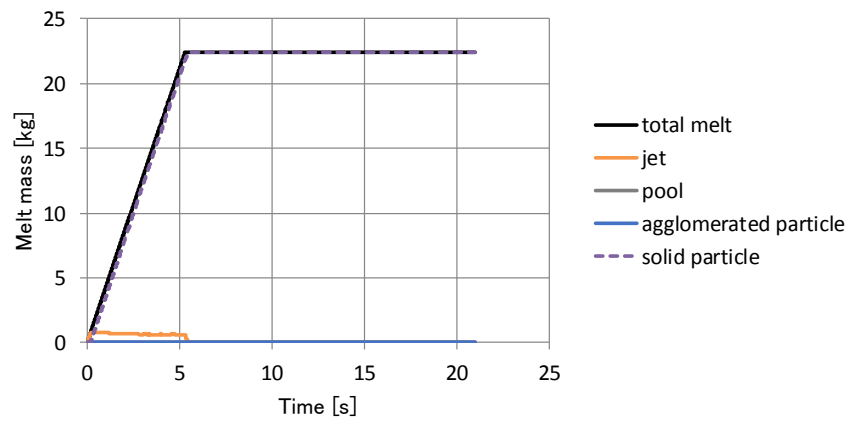


図 A24.13 デブリの状態別質量の履歴 (A24 キャッチャー3)

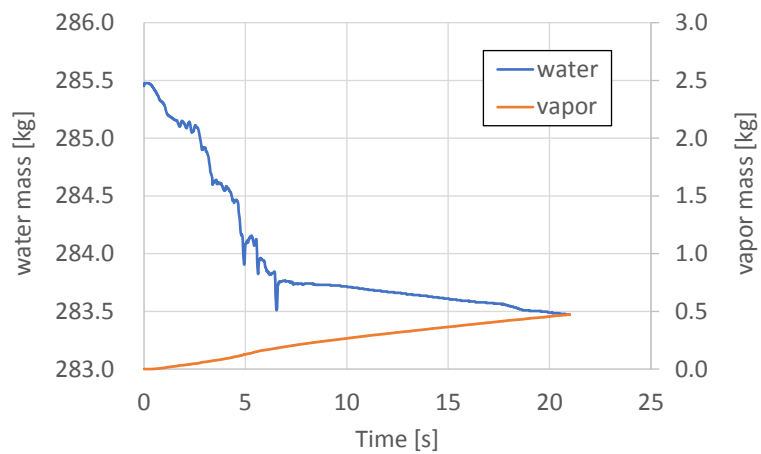


図 A24.14 水・水蒸気の質量履歴 (A24 キャッチャー3)

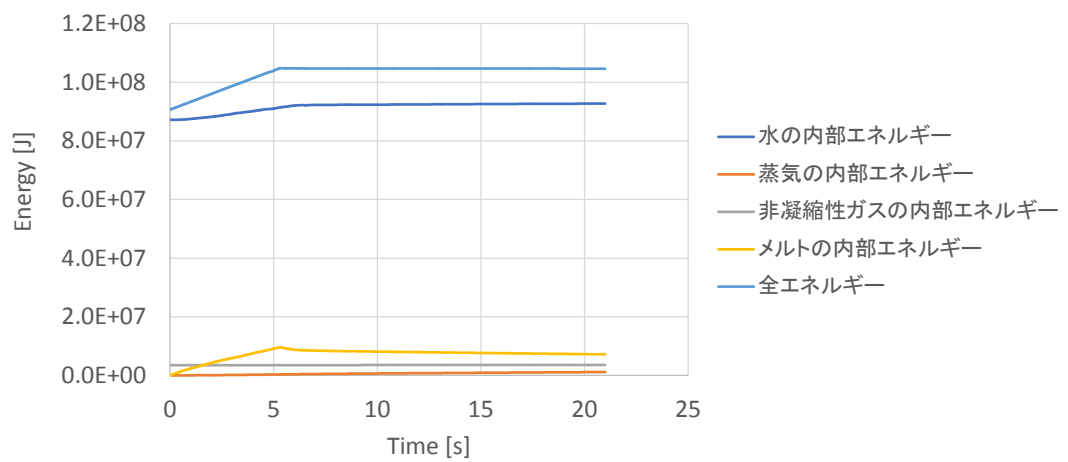


図 A24.15 各エネルギーの履歴 (A24 キャッチャー3)

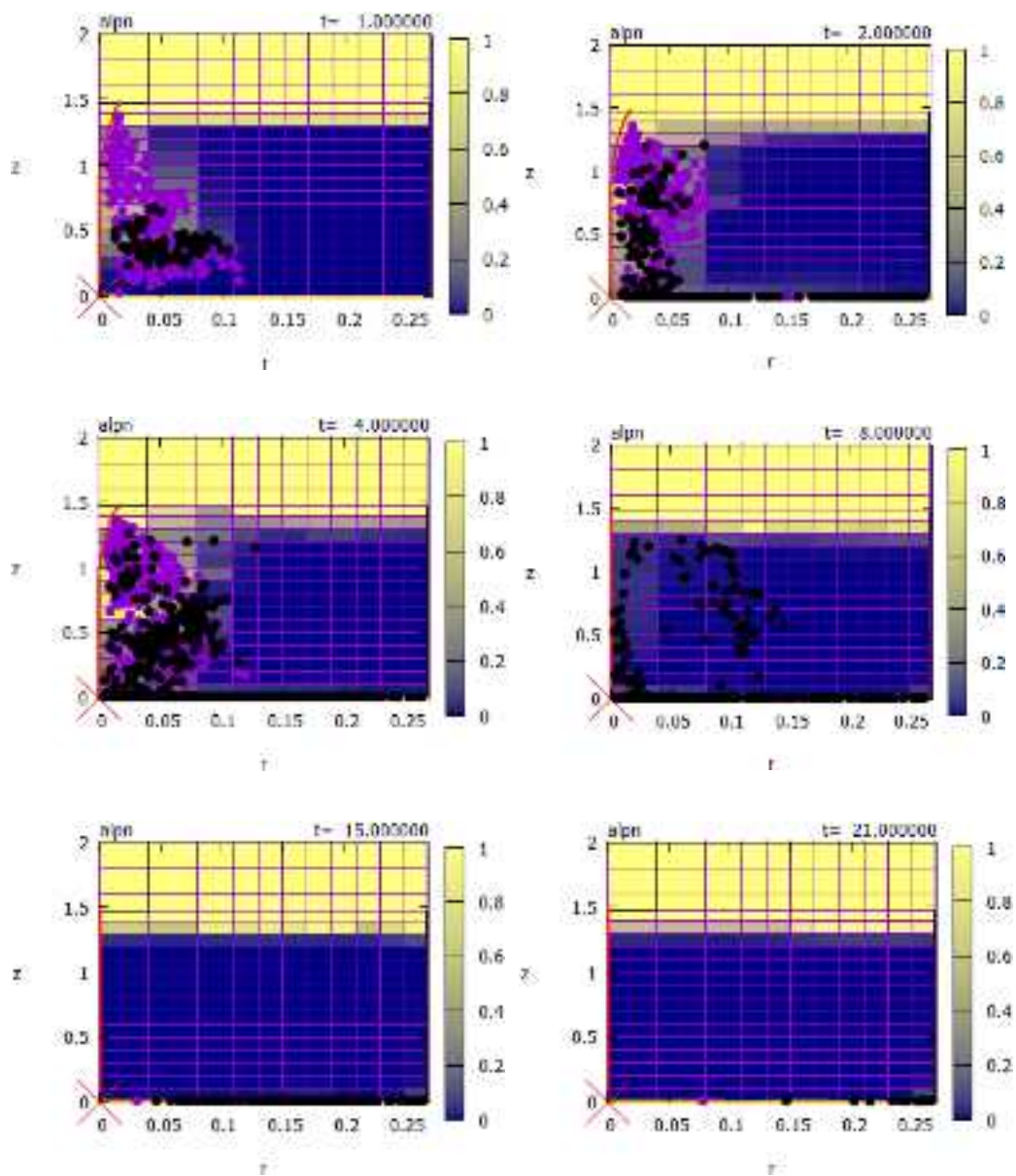


図 A24.16 ボイド率及び溶融物粒子分布図 (A24 キャッチャー3)  
(橙色：アグロメレーション粒子群、黒色：固化した粒子群)

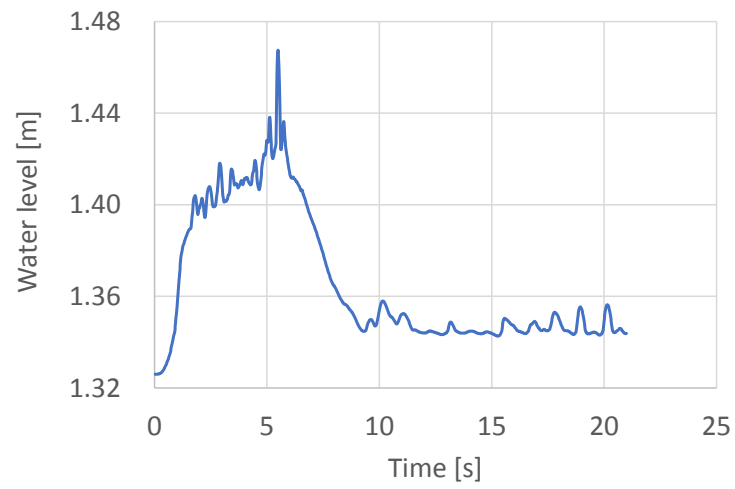


図 A24.17 水位履歴 (A24 キャッチャー3)

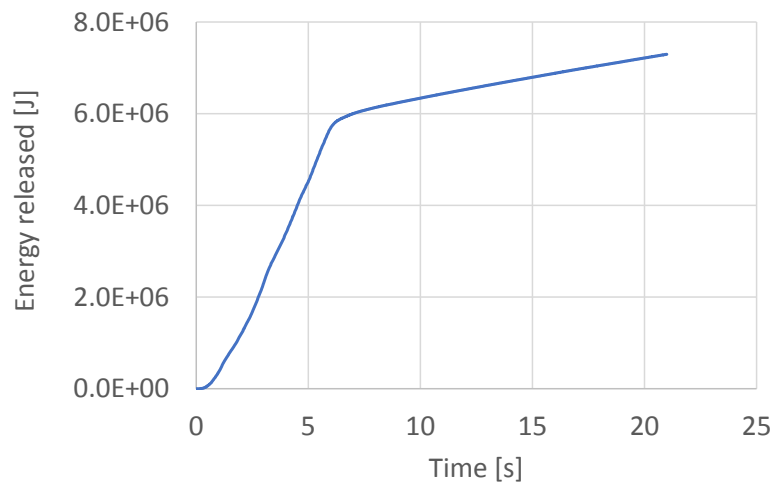


図 A24.18 溶融物から水への積算熱移行量 (A24 キャッチャー3)

キャッチャー4

表 A24.4 質量バランス及びエネルギーバランス (A24 キャッチャー4)

| 時刻                     | 0 s         | 1 s         | 21 s        | 21 s-0 s   |
|------------------------|-------------|-------------|-------------|------------|
| 溶融物の質量バランス [kg]        |             |             |             |            |
| ジェット                   | 0.000       | 0.000       | 0.000       |            |
| プール                    | 0.000       | 0.002       | 0.002       |            |
| 粒子                     | 0.000       | 22.346      | 22.346      |            |
| 合計                     | 0.000       | 22.349      | 22.349      |            |
| (粒子のうちアグロメレーションした分)    | 0.000       | 2.753       | 2.753       |            |
| (粒子のうちアグロメレーションした分の割合) | 0.00%       | 12.32%      | 12.32%      |            |
| 水、蒸気の質量バランス [kg]       |             |             |             |            |
| 水                      | 351.324     | 349.358     | 349.144     |            |
| 蒸気                     | 0.000       | 0.270       | 0.476       |            |
| 合計                     | 351.324     | 349.628     | 349.620     |            |
| エネルギーバランス [J]          |             |             |             |            |
| 水の内部エネルギー              | 107,310,522 | 112,996,805 | 113,072,203 | 5,761,681  |
| 蒸気の内部エネルギー             | 28          | 656,279     | 1,155,603   | 1,155,576  |
| 非凝縮性ガスの内部エネルギー         | 3,877,039   | 3,956,082   | 4,015,709   | 138,670    |
| 溶融物の内部エネルギー            | 0.0         | 7,525,999   | 6,837,991   | 6,837,991  |
| 流体の運動エネルギー             | 0.0         | 2.10        | 2.06        | 2.06       |
| 合計                     | 111,187,589 | 125,135,167 | 125,081,508 | 13,893,919 |
| エネルギーの増加量              | 0.0         | 13,947,578  | 13,893,919  |            |
| 流入溶融物のエンタルピー           | 0.0         | 14,434,952  | 14,434,952  |            |
| 誤差                     | 0.0         | -487,374    | -541,032    |            |
|                        | 0.00%       | -0.39%      | -0.43%      |            |

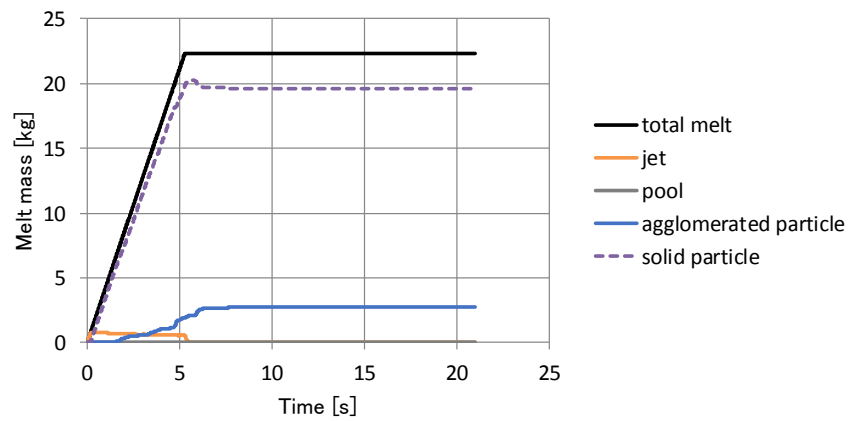


図 A24.19 デブリの状態別質量の履歴 (A24 キャッチャー4)

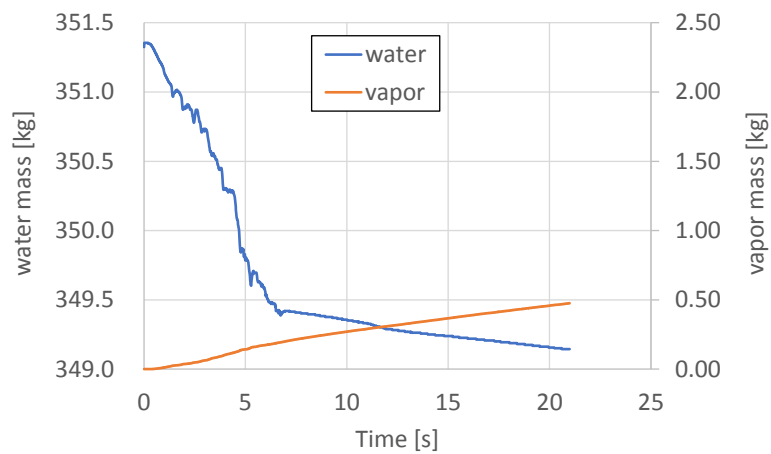


図 A24.20 水・水蒸気の質量履歴 (A24 キャッチャー4)

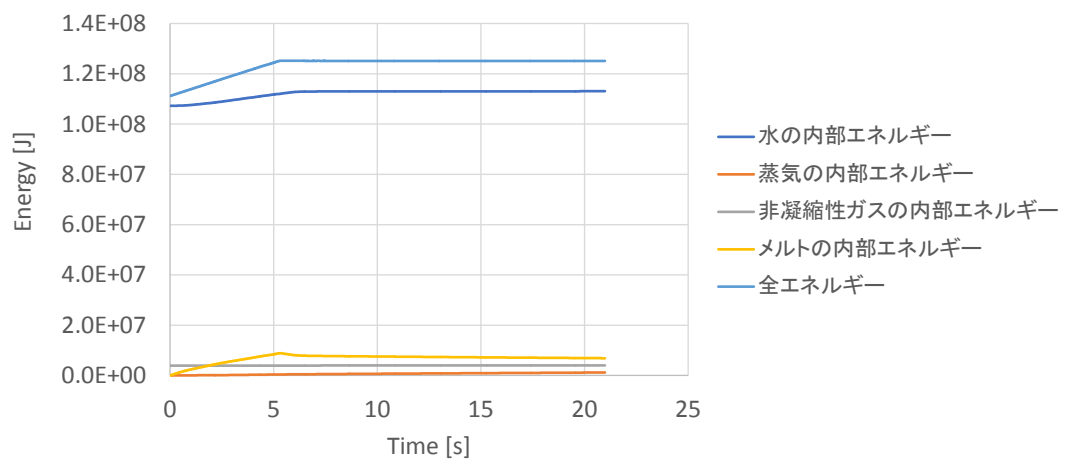


図 A24.21 各エネルギーの履歴 (A24 キャッチャー4)

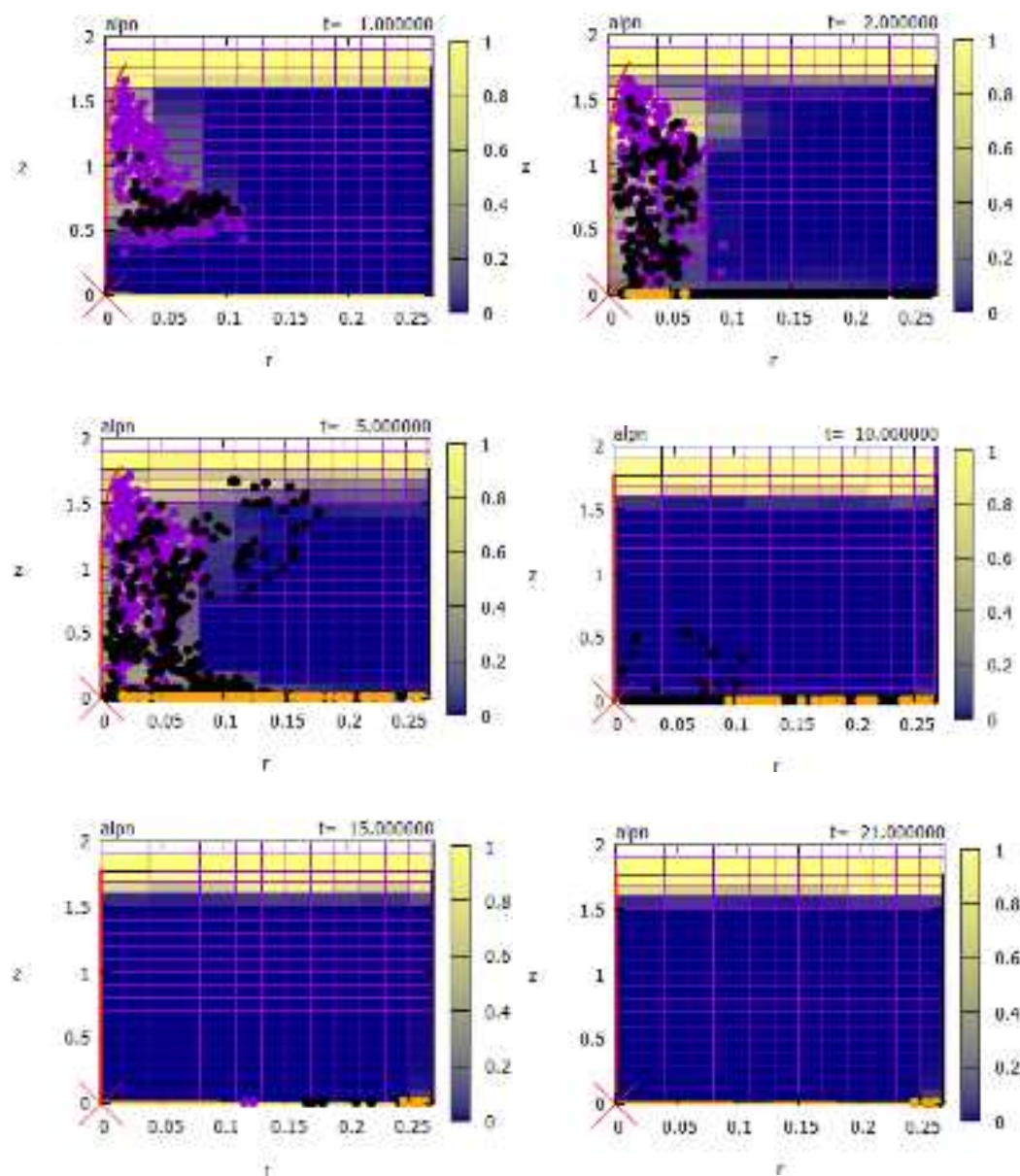


図 A24.22 ボイド率及び溶融物粒子分布図 (A24 キャッチャー4)  
(橙色：アグロメレーション粒子群、黒色：固化した粒子群)

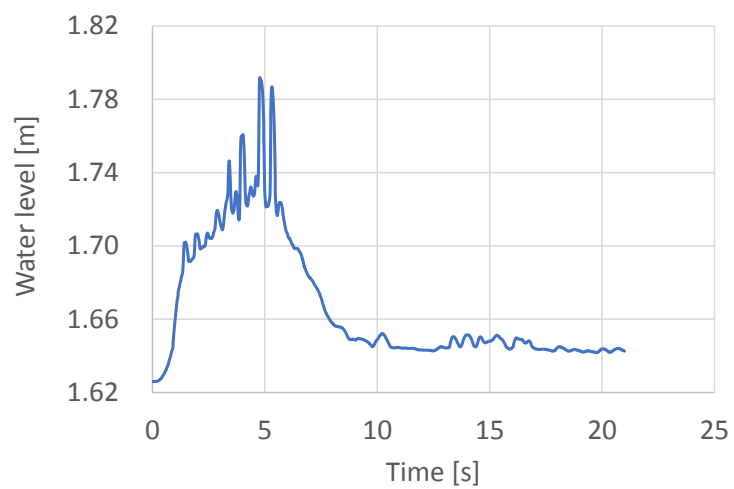


図 A24.23 水位履歴 (A24 キャッチャー4)

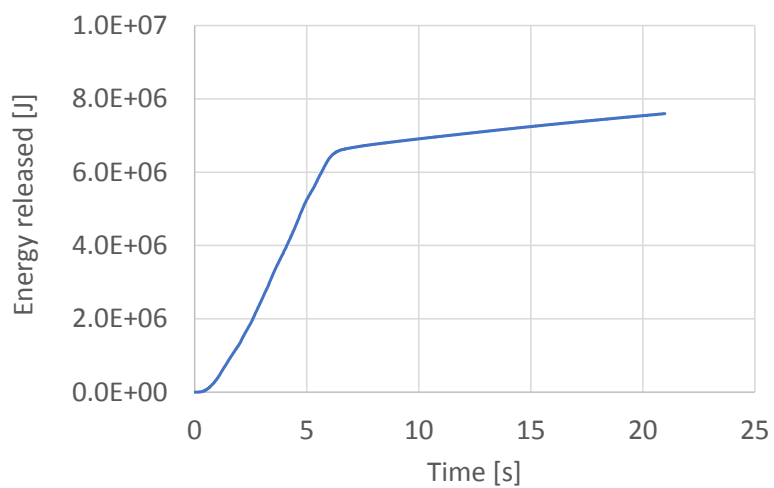


図 A24.24 溶融物から水への積算熱移行量 (A24 キャッチャー4)

A25 DEFOR-A25 ( $\Phi_{\text{lim}} = 1.5$ ,  $k_{\text{qht}} = 0.8$ )

キャッチャー1

表 A25.1 質量バランス及びエネルギーバランス (A25 キャッチャー1)

| 時刻                     | 0 s        | 1 s        | 21 s       | 21 s-0 s   |
|------------------------|------------|------------|------------|------------|
| 溶融物の質量バランス [kg]        |            |            |            |            |
| ジェット                   | 0.000      | 0.000      | 0.000      |            |
| プール                    | 0.000      | 0.020      | 0.023      |            |
| 粒子                     | 0.000      | 22.513     | 22.511     |            |
| 合計                     | 0.000      | 22.533     | 22.534     |            |
| (粒子のうちアグロメレーションした分)    | 0.000      | 14.065     | 14.066     |            |
| (粒子のうちアグロメレーションした分の割合) | 0.00%      | 62.48%     | 62.48%     |            |
| 水、蒸気の質量バランス [kg]       |            |            |            |            |
| 水                      | 152.003    | 151.048    | 150.646    |            |
| 蒸気                     | 0.000      | 0.731      | 1.160      |            |
| 合計                     | 152.003    | 151.779    | 151.805    |            |
| エネルギーバランス [J]          |            |            |            |            |
| 水の内部エネルギー              | 57,278,146 | 58,285,340 | 57,685,924 | 407,779    |
| 蒸気の内部エネルギー             | 19         | 1,790,268  | 2,856,839  | 2,856,820  |
| 非凝縮性ガスの内部エネルギー         | 2,605,323  | 2,831,392  | 2,941,725  | 336,402    |
| 溶融物の内部エネルギー            | 0.0        | 11,189,725 | 10,636,804 | 10,636,804 |
| 流体の運動エネルギー             | 0.0        | 1.87       | 1.27       | 1.27       |
| 合計                     | 59,883,487 | 74,096,727 | 74,121,293 | 14,237,806 |
| エネルギーの増加量              | 0.0        | 14,213,240 | 14,237,806 |            |
| 流入溶融物のエンタルピー           | 0.0        | 14,352,366 | 14,352,766 |            |
| 誤差                     | 0.0        | -139,127   | -114,960   |            |
|                        | 0.00%      | -0.19%     | -0.16%     |            |

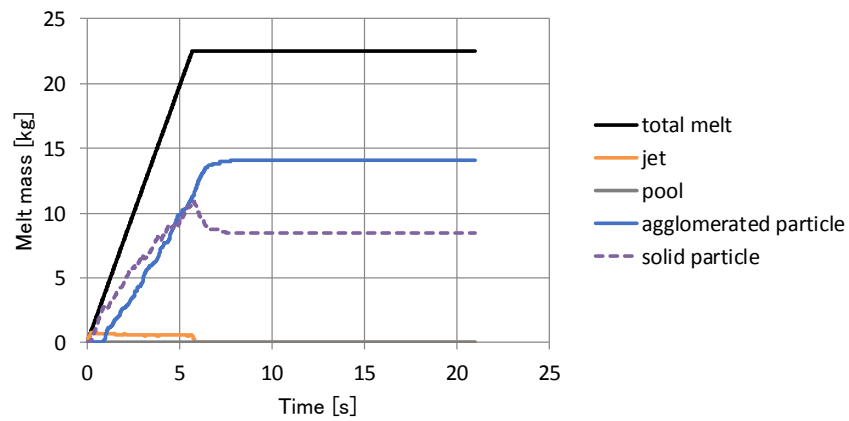


図 A25.1 デブリの状態別質量の履歴 (A25 キャッチャー1)

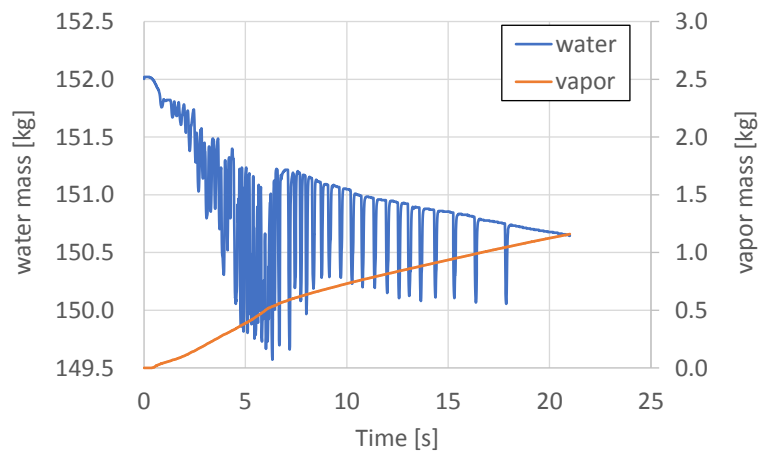


図 A25.2 水・水蒸気の質量履歴 (A25 キャッチャー1)

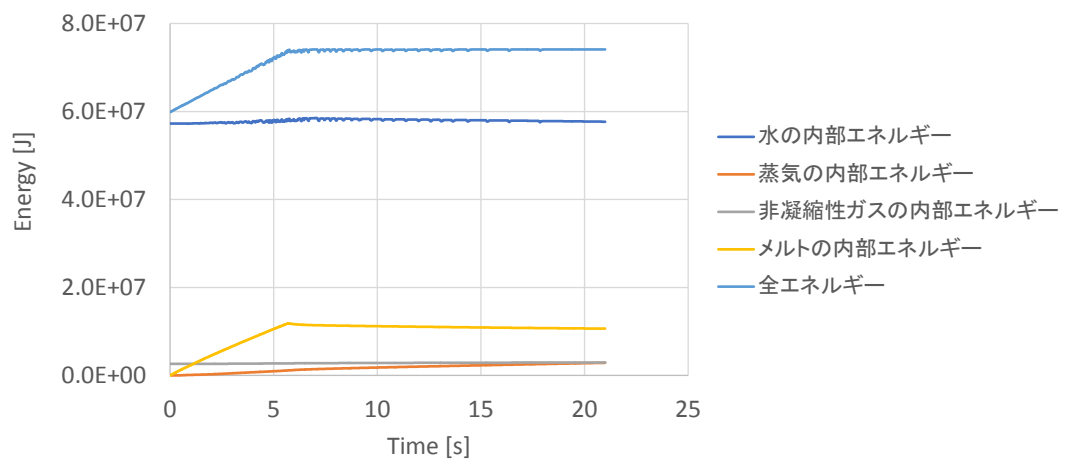


図 A25.3 各エネルギーの履歴 (A25 キャッチャー1)

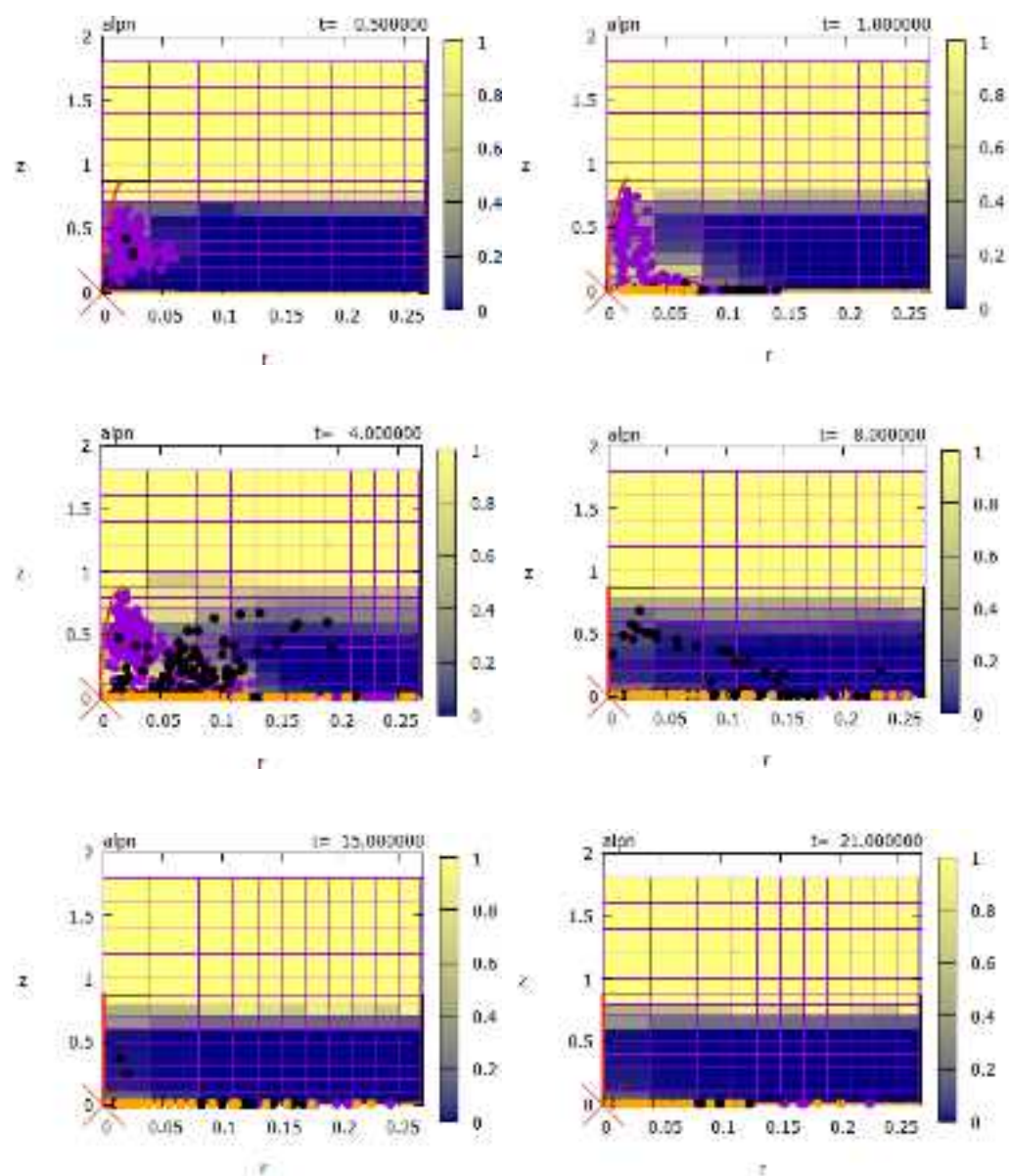


図 A25.4 ボイド率及び溶融物粒子分布図 (A25 キャッチャー1)  
(橙色：アグロメレーション粒子群、黒色：固化した粒子群)

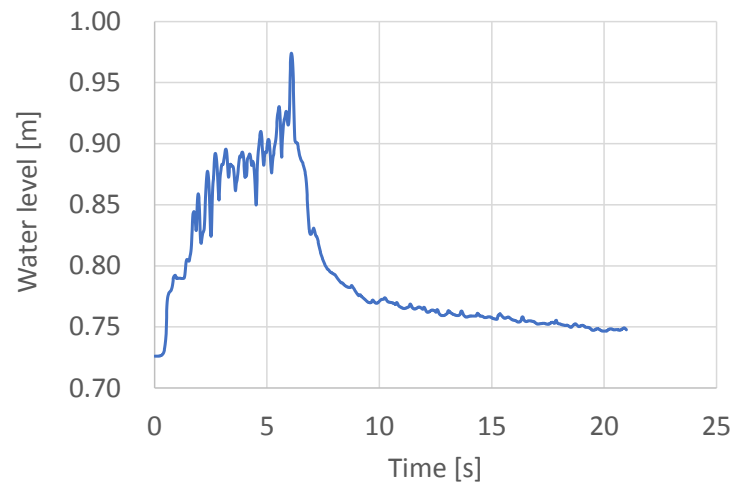


図 A25.5 水位履歴 (A25 キャッチャー1)

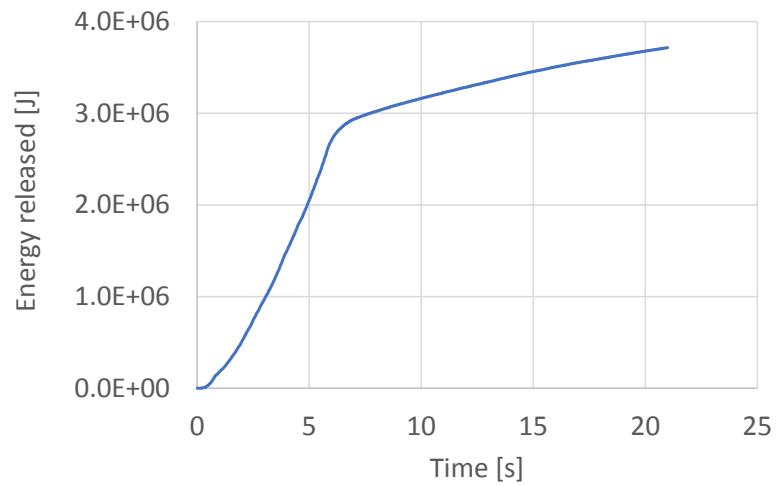


図 A25.6 溶融物から水への積算熱移行量 (A25 キャッチャー1)

キャッチャー2

表 A25.2 質量バランス及びエネルギーバランス (A25 キャッチャー2)

| 時刻                     | 0 s        | 1 s        | 21 s       | 21 s-0 s   |
|------------------------|------------|------------|------------|------------|
| 溶融物の質量バランス [kg]        |            |            |            |            |
| ジェット                   | 0.000      | 0.000      | 0.000      |            |
| プール                    | 0.000      | 0.052      | 0.054      |            |
| 粒子                     | 0.000      | 22.502     | 22.502     |            |
| 合計                     | 0.000      | 22.554     | 22.557     |            |
| (粒子のうちアグロメレーションした分)    | 0.000      | 7.801      | 7.802      |            |
| (粒子のうちアグロメレーションした分の割合) | 0.00%      | 34.67%     | 34.67%     |            |
| 水、蒸気の質量バランス [kg]       |            |            |            |            |
| 水                      | 217.147    | 215.193    | 214.753    |            |
| 蒸気                     | 0.000      | 0.861      | 1.331      |            |
| 合計                     | 217.147    | 216.054    | 216.084    |            |
| エネルギーバランス [J]          |            |            |            |            |
| 水の内部エネルギー              | 81,825,922 | 84,025,037 | 83,396,719 | 1,570,796  |
| 蒸気の内部エネルギー             | 22         | 2,111,653  | 3,279,760  | 3,279,738  |
| 非凝縮性ガスの内部エネルギー         | 3,029,249  | 3,295,594  | 3,418,681  | 389,432    |
| 溶融物の内部エネルギー            | 0.0        | 9,323,619  | 8,677,079  | 8,677,079  |
| 流体の運動エネルギー             | 0.0        | 1.89       | 2.05       | 2.05       |
| 合計                     | 84,855,193 | 98,755,904 | 98,772,241 | 13,917,047 |
| エネルギーの増加量              | 0.0        | 13,900,711 | 13,917,047 |            |
| 流入溶融物のエンタルピー           | 0.0        | 14,365,573 | 14,367,174 |            |
| 誤差                     | 0.0        | -464,862   | -450,126   |            |
|                        | 0.00%      | -0.47%     | -0.46%     |            |

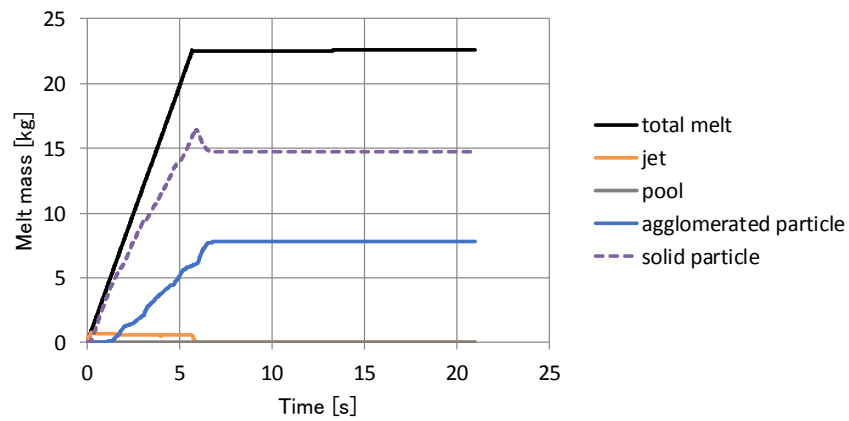


図 A25.7 デブリの状態別質量の履歴 (A25 キャッチャー2)

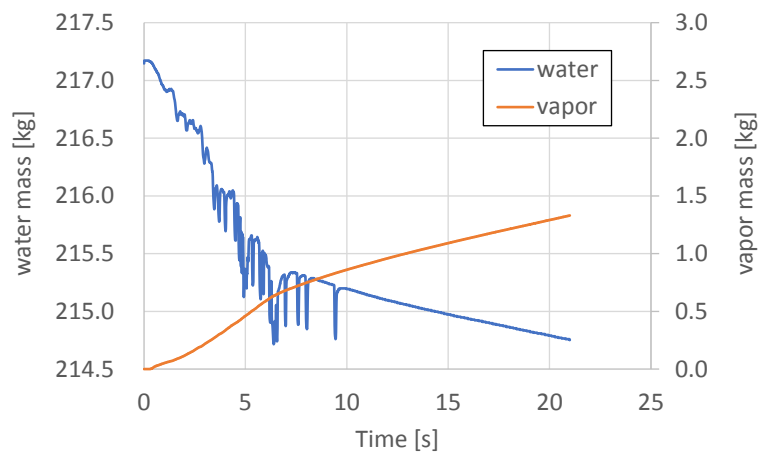


図 A25.8 水・水蒸気の質量履歴 (A25 キャッチャー2)

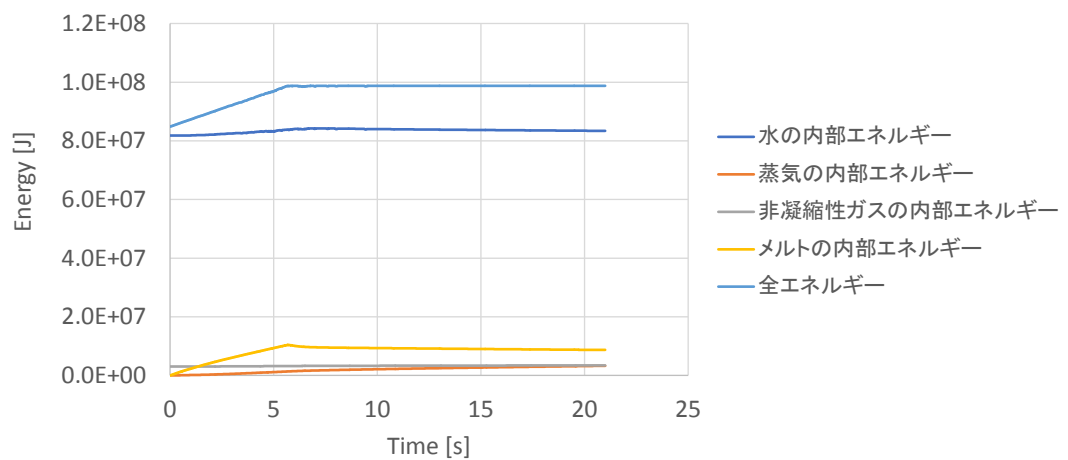


図 A25.9 各エネルギーの履歴 (A25 キャッチャー2)

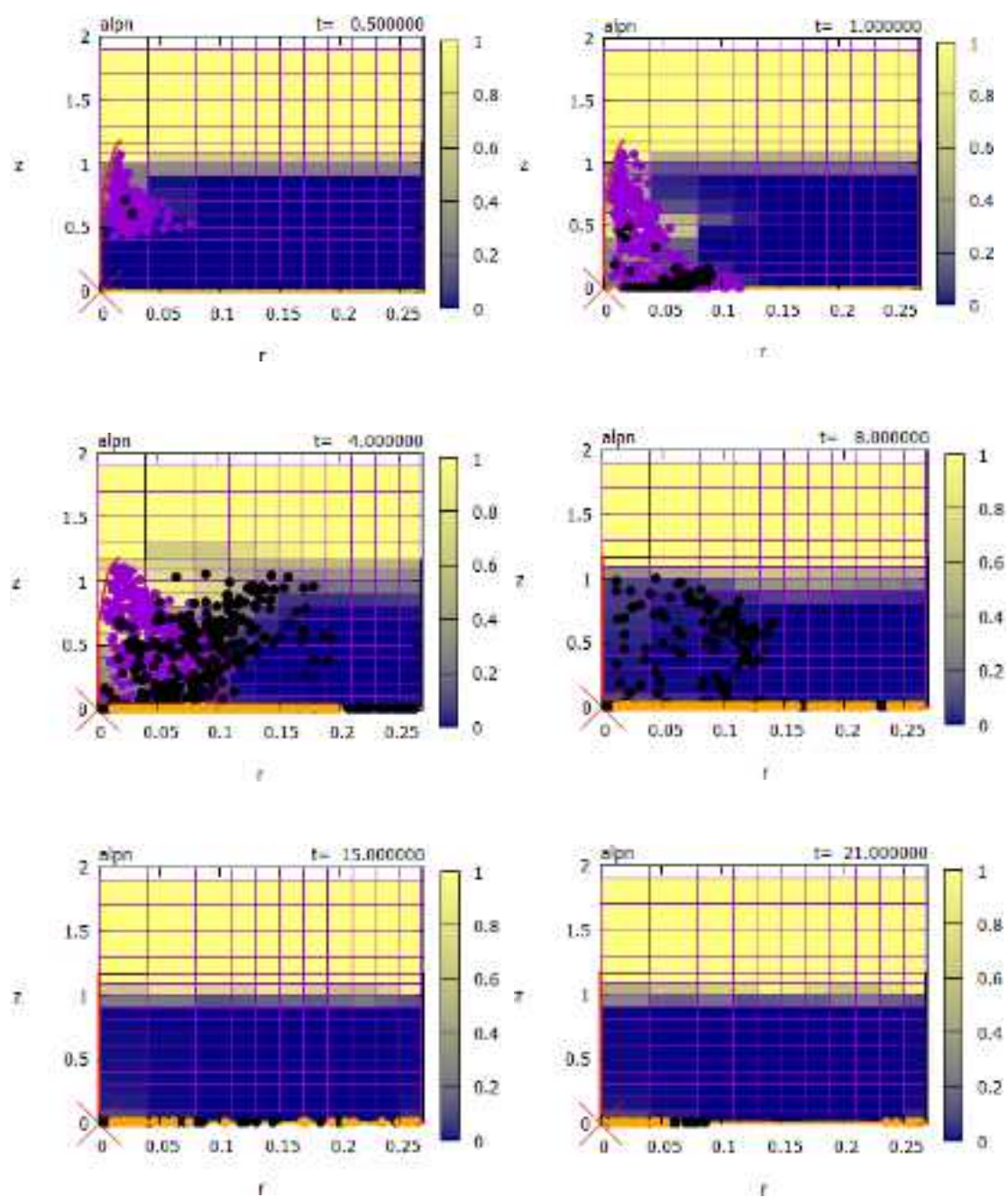


図 A25.10 ボイド率及び溶融物粒子分布図 (A25 キャッチャー2)  
(橙色：アグロメレーション粒子群、黒色：固化した粒子群)

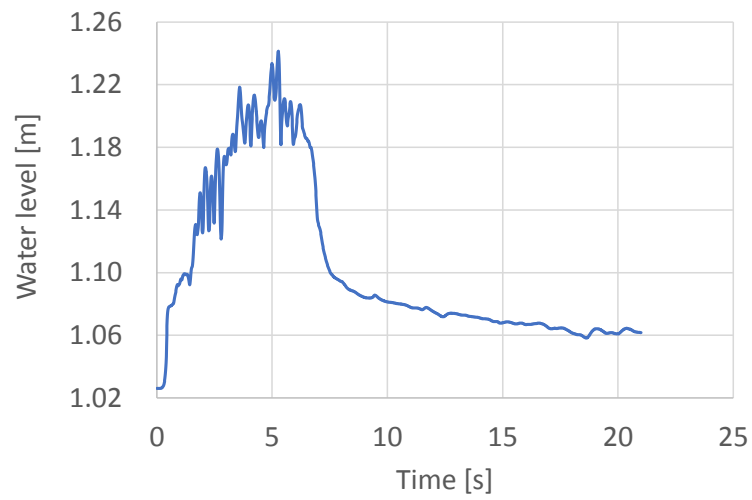


図 A25.11 水位履歴 (A25 キャッチャー2)

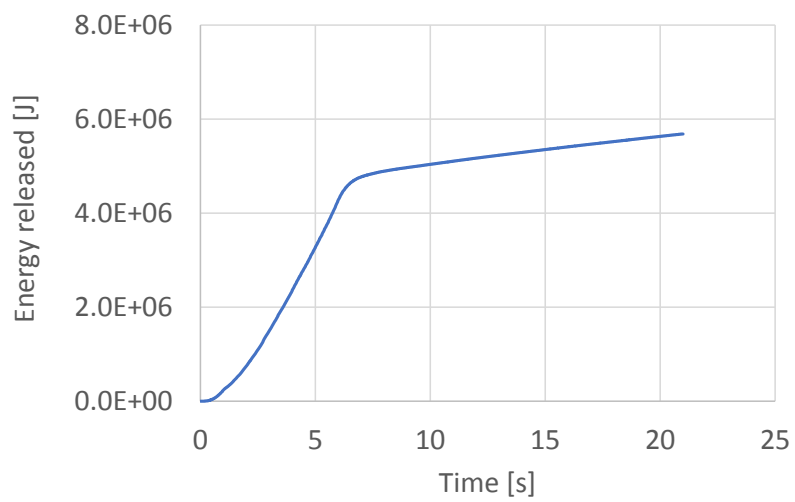


図 A25.12 溶融物から水への積算熱移行量 (A25 キャッチャー2)

キャッチャー3

表 A25.3 質量バランス及びエネルギーバランス (A25 キャッチャー3)

| 時刻                     | 0 s         | 1 s         | 21 s        | 21 s-0 s   |
|------------------------|-------------|-------------|-------------|------------|
| 溶融物の質量バランス [kg]        |             |             |             |            |
| ジェット                   | 0.000       | 0.000       | 0.000       |            |
| プール                    | 0.000       | 0.032       | 0.032       |            |
| 粒子                     | 0.000       | 22.501      | 22.501      |            |
| 合計                     | 0.000       | 22.532      | 22.532      |            |
| (粒子のうちアグロメレーションした分)    | 0.000       | 5.453       | 5.453       |            |
| (粒子のうちアグロメレーションした分の割合) | 0.00%       | 24.23%      | 24.23%      |            |
| 水、蒸気の質量バランス [kg]       |             |             |             |            |
| 水                      | 282.291     | 280.060     | 279.432     |            |
| 蒸気                     | 0.000       | 0.920       | 1.368       |            |
| 合計                     | 282.291     | 280.980     | 280.800     |            |
| エネルギーバランス [J]          |             |             |             |            |
| 水の内部エネルギー              | 106,374,327 | 108,950,433 | 108,353,531 | 1,979,203  |
| 蒸気の内部エネルギー             | 25          | 2,254,721   | 3,367,222   | 3,367,197  |
| 非凝縮性ガスの内部エネルギー         | 3,453,176   | 3,740,569   | 3,861,269   | 408,093    |
| 溶融物の内部エネルギー            | 0.0         | 8,687,760   | 8,002,893   | 8,002,893  |
| 流体の運動エネルギー             | 0.0         | 2.81        | 1.54        | 1.54       |
| 合計                     | 109,827,528 | 123,633,486 | 123,584,916 | 13,757,388 |
| エネルギーの増加量              | 0.0         | 13,805,958  | 13,757,388  |            |
| 流入溶融物のエンタルピー           | 0.0         | 14,351,566  | 14,351,566  |            |
| 誤差                     | 0.0         | -545,607    | -594,178    |            |
|                        | 0.00%       | -0.44%      | -0.48%      |            |

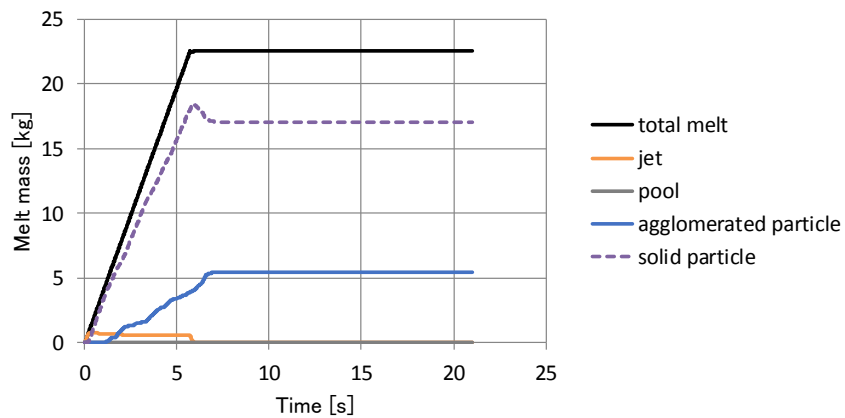


図 A25.13 デブリの状態別質量の履歴 (A25 キャッチャー3)

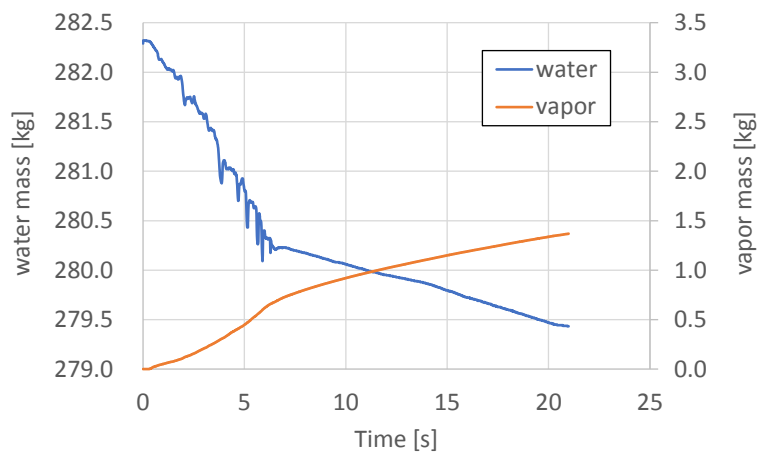


図 A25.14 水・水蒸気の質量履歴 (A25 キャッチャー3)

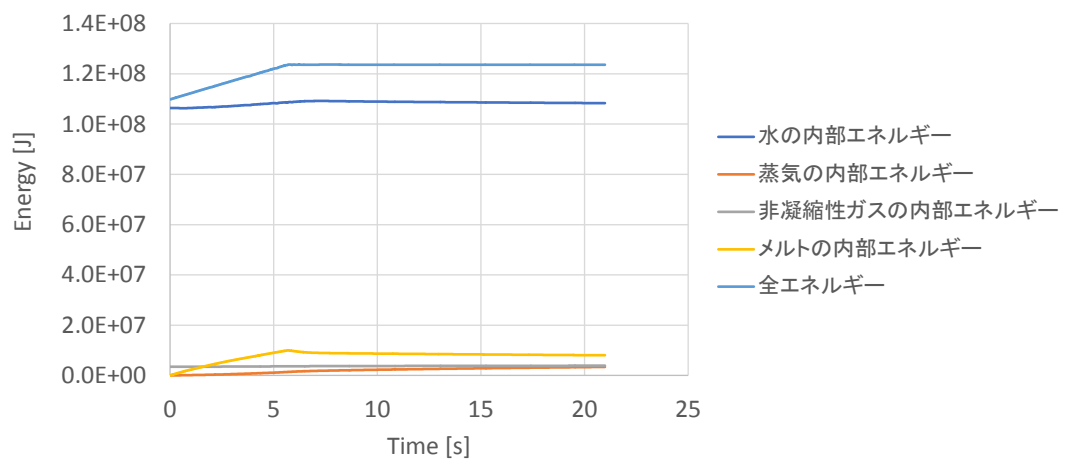


図 A25.15 各エネルギーの履歴 (A25 キャッチャー3)

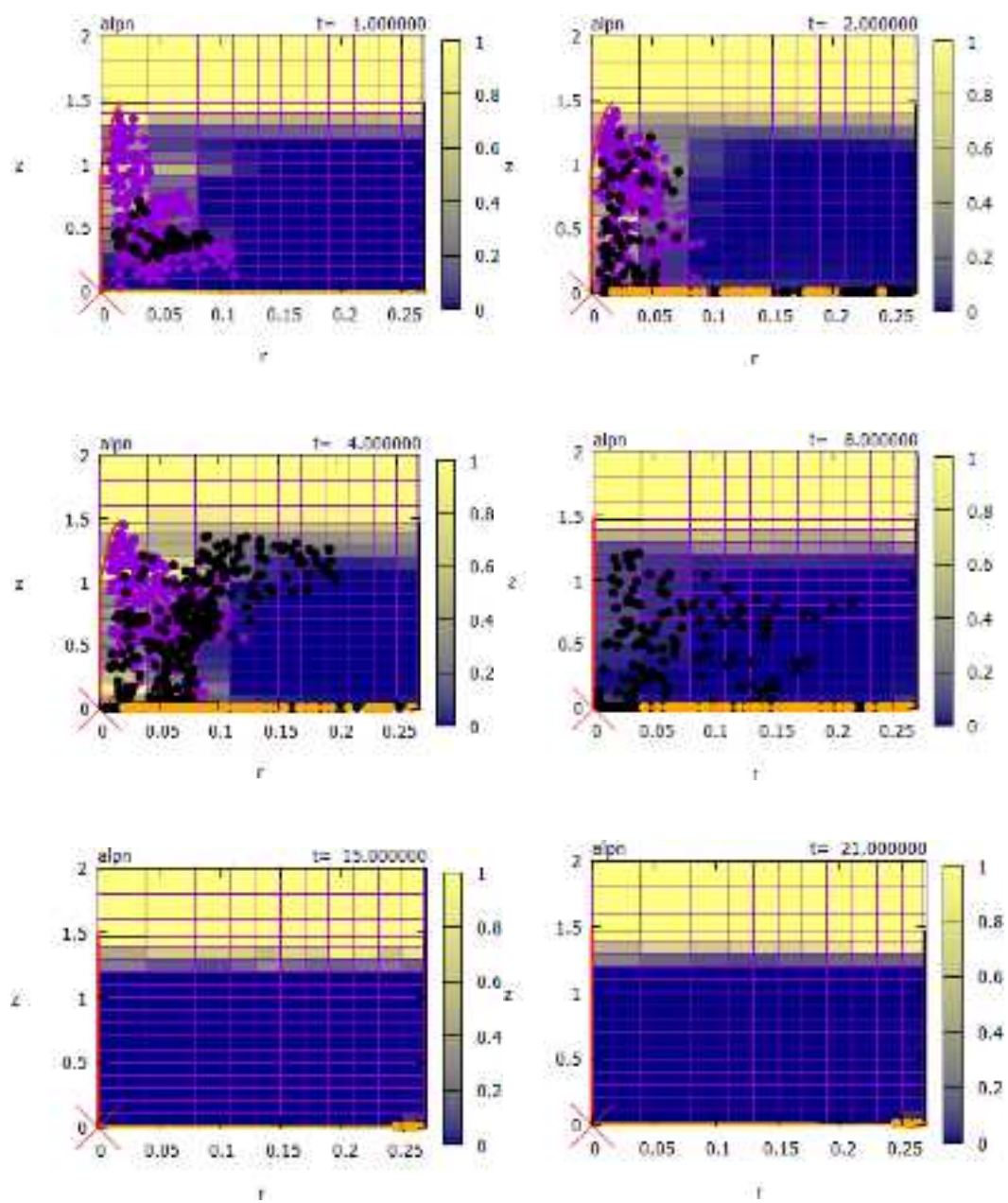


図 A25.16 ボイド率及び溶融物粒子分布図 (A25 キャッチャー3)  
(橙色：アグロメレーション粒子群、黒色：固化した粒子群)

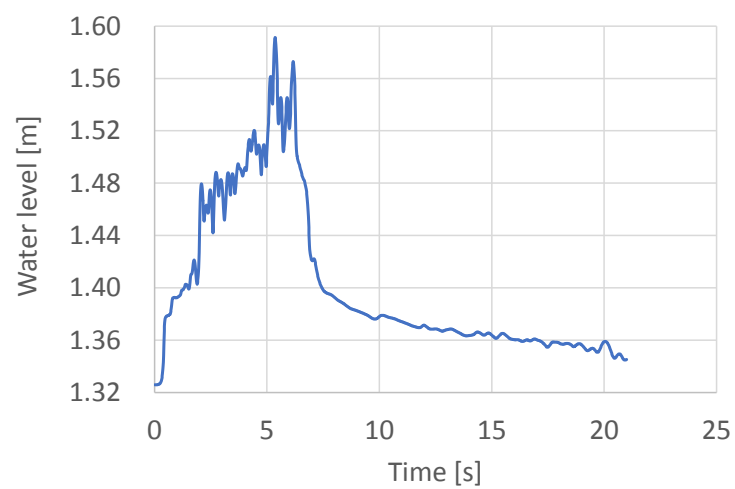


図 A25.17 水位履歴 (A25 キャッチャー3)

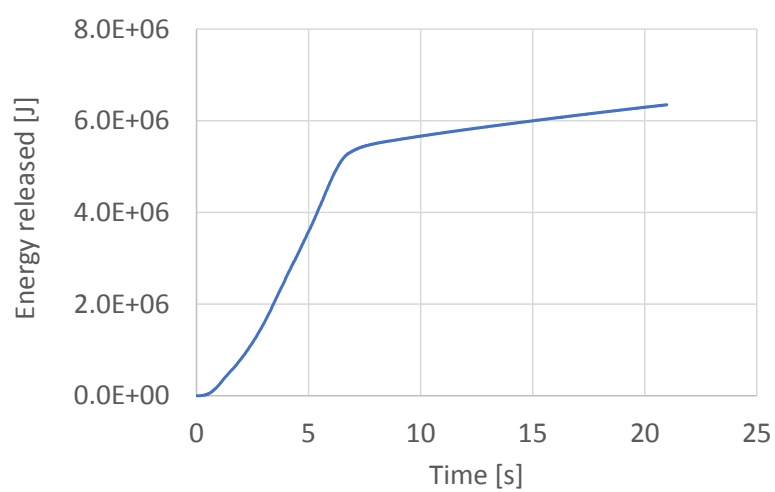


図 A25.18 溶融物から水への積算熱移行量 (A25 キャッチャー3)

キャッチャー4

表 A25.4 質量バランス及びエネルギーバランス (A25 キャッチャー4)

| 時刻                     | 0 s         | 1 s         | 21 s        | 21 s-0 s   |
|------------------------|-------------|-------------|-------------|------------|
| 溶融物の質量バランス [kg]        |             |             |             |            |
| ジェット                   | 0.000       | 0.000       | 0.000       |            |
| プール                    | 0.000       | 0.005       | 0.005       |            |
| 粒子                     | 0.000       | 22.509      | 22.509      |            |
| 合計                     | 0.000       | 22.514      | 22.514      |            |
| (粒子のうちアグロメレーションした分)    | 0.000       | 0.000       | 0.000       |            |
| (粒子のうちアグロメレーションした分の割合) | 0.00%       | 0.00%       | 0.00%       |            |
| 水、蒸気の質量バランス [kg]       |             |             |             |            |
| 水                      | 347.435     | 345.016     | 344.463     |            |
| 蒸気                     | 0.000       | 0.952       | 1.417       |            |
| 合計                     | 347.435     | 345.968     | 345.880     |            |
| エネルギーバランス [J]          |             |             |             |            |
| 水の内部エネルギー              | 130,922,732 | 133,970,077 | 133,473,705 | 2,550,973  |
| 蒸気の内部エネルギー             | 28          | 2,334,141   | 3,483,209   | 3,483,182  |
| 非凝縮性ガスの内部エネルギー         | 3,877,039   | 4,177,187   | 4,299,081   | 422,042    |
| 溶融物の内部エネルギー            | 0.0         | 8,048,132   | 7,241,999   | 7,241,999  |
| 流体の運動エネルギー             | 0.0         | 3.54        | 3.17        | 3.17       |
| 合計                     | 134,799,799 | 148,529,540 | 148,497,999 | 13,698,199 |
| エネルギーの増加量              | 0.0         | 13,729,741  | 13,698,199  |            |
| 流入溶融物のエンタルピー           | 0.0         | 14,339,960  | 14,339,960  |            |
| 誤差                     | 0.0         | -610,219    | -641,761    |            |
|                        | 0.00%       | -0.41%      | -0.43%      |            |

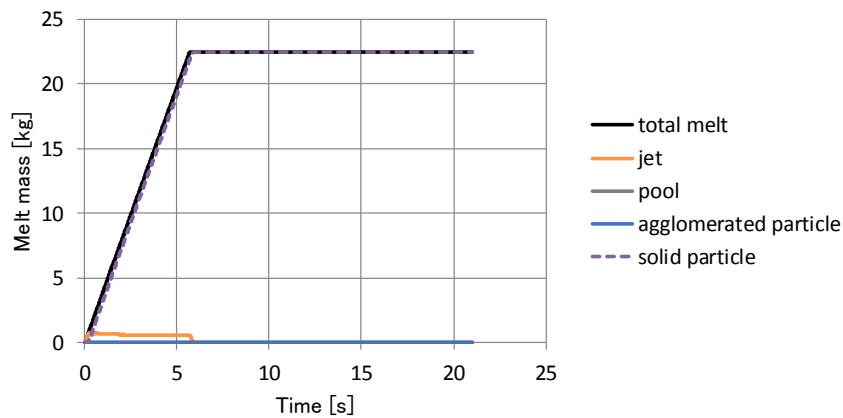


図 A25.19 デブリの状態別質量の履歴 (A25 キャッチャー4)

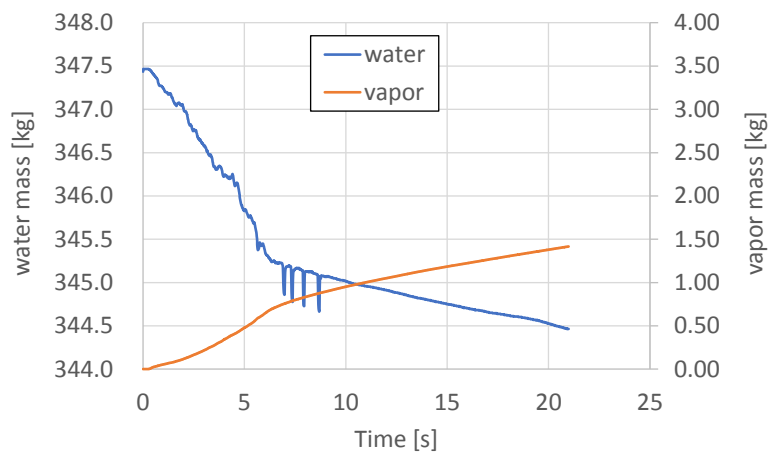


図 A25.20 水・水蒸気の質量履歴 (A25 キャッチャー4)

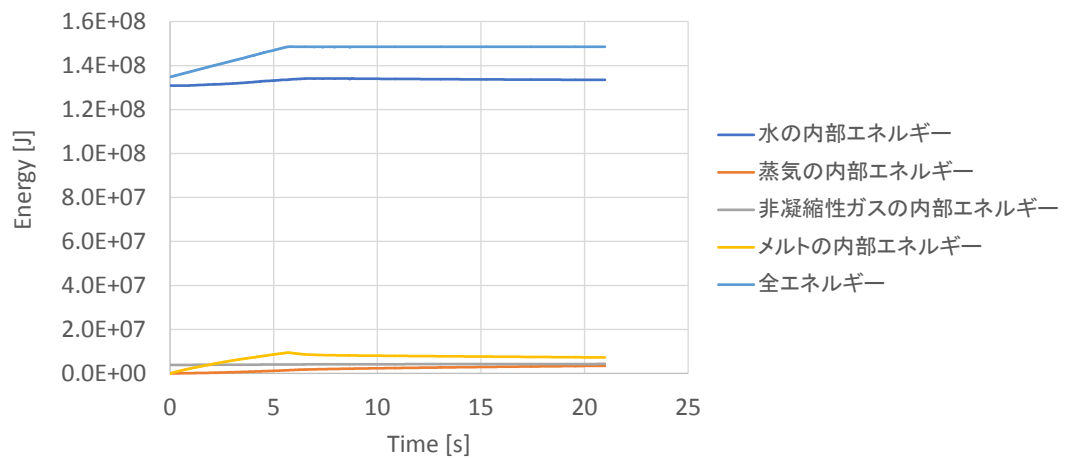


図 A25.21 各エネルギーの履歴 (A25 キャッチャー4)

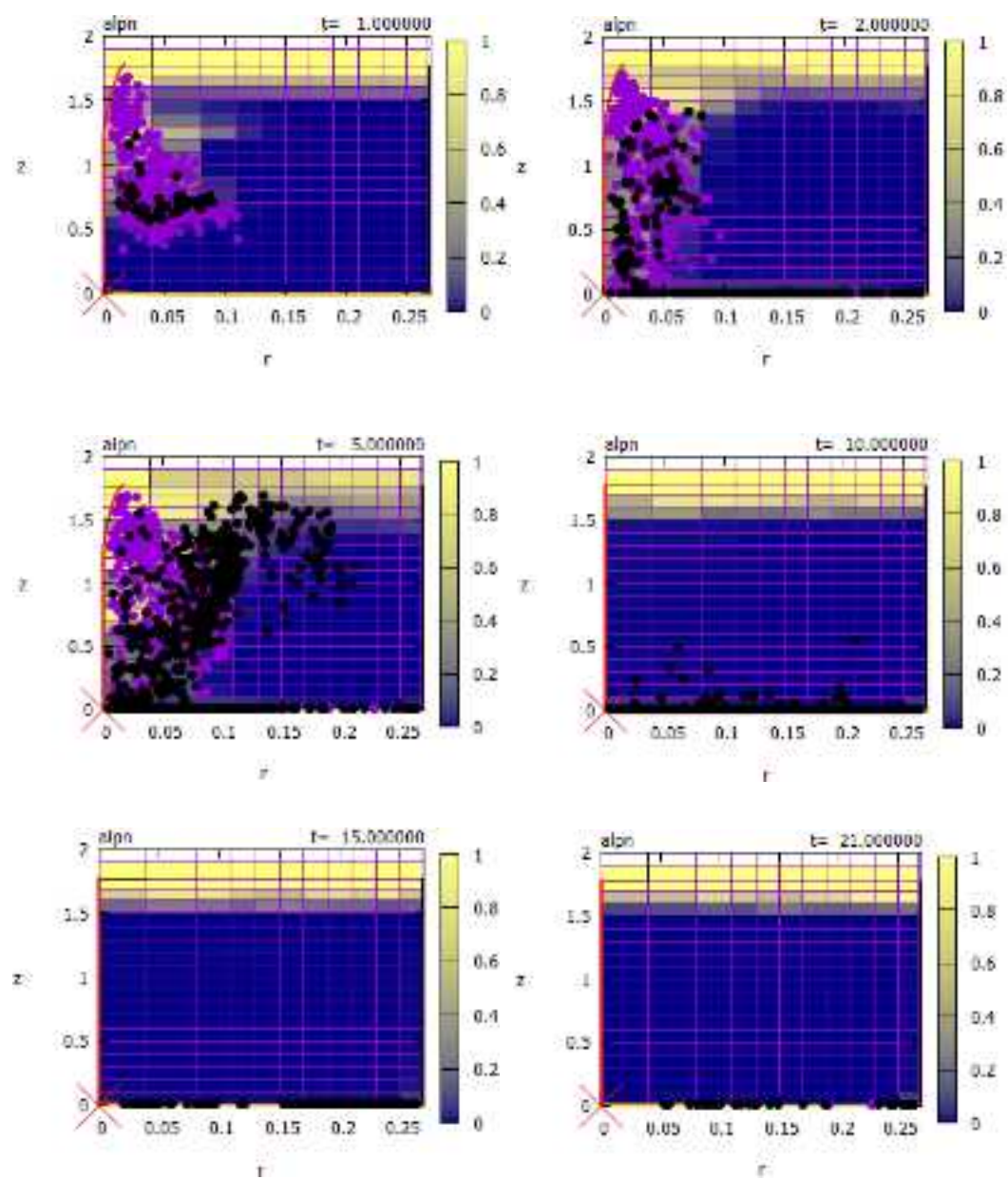


図 A25.22 ボイド率及び溶融物粒子分布図 (A25 キャッチャー4)  
(橙色：アグロメレーション粒子群、黒色：固化した粒子群)

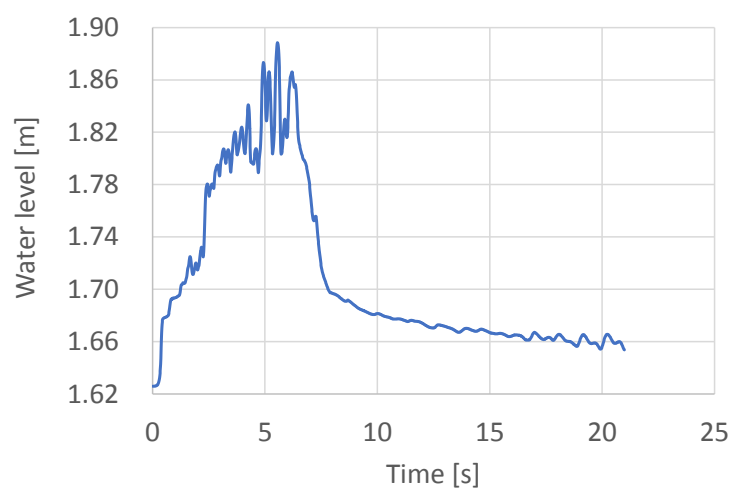


図 A25.23 水位履歴 (A25 キャッチャー4)

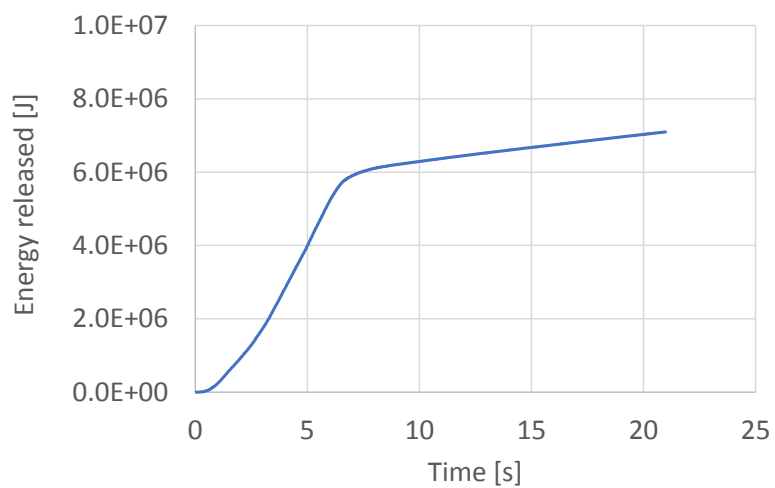


図 A25.24 溶融物から水への積算熱移行量 (A25 キャッチャー4)

J1 実機規模ケース 1 (初期水位 2.0[m], 溶融物落下量 148.7[t])

表 J1.1 質量バランス及びエネルギーバランス (実機規模ケース 1)

| 時刻                     | 0 s        | 500 s      | 1000 s     | 1000 s－0 s |
|------------------------|------------|------------|------------|------------|
| 溶融物の質量バランス [kg]        |            |            |            |            |
| ジェット                   | 0.0        | 185        | 0.0        |            |
| プール                    | 0.0        | 136,354    | 137,037    |            |
| 粒子                     | 0.0        | 5,882      | 5,755      |            |
| 合計                     | 0.0        | 142,421    | 142,792    |            |
| (粒子のうちアグロメレーションした分)    | 0.0        | 14         | 14         |            |
| (粒子のうちアグロメレーションした分の割合) | 0.00%      | 0.24%      | 0.25%      |            |
| 水、蒸気の質量バランス [kg]       |            |            |            |            |
| 水                      | 56,371     | 39,151     | 36,172     |            |
| 蒸気                     | 214        | 15,838     | 19,114     |            |
| 合計                     | 56,585     | 54,989     | 55,286     |            |
| エネルギーバランス [J]          |            |            |            |            |
| 水の内部エネルギー              | 6.3378E+09 | 3.2855E+10 | 2.6190E+10 | 1.9852E+10 |
| 蒸気の内部エネルギー             | 5.1854E+08 | 4.0839E+10 | 4.9370E+10 | 4.8851E+10 |
| 非凝縮性ガスの内部エネルギー         | 9.9358E+09 | 1.4173E+10 | 1.4368E+10 | 4.4320E+09 |
| 溶融物の内部エネルギー            | 0.0        | 2.4777E+11 | 2.5285E+11 | 2.5285E+11 |
| 流体の運動エネルギー             | 0.0        | 7,823      | 2,755      | 2,755      |
| 合計                     | 1.6792E+10 | 3.3564E+11 | 3.4278E+11 | 3.2598E+11 |
| エネルギーの増加量              | 0.0        | 3.1885E+11 | 3.2598E+11 |            |
| 流入溶融物のエンタルピー           | 0.0        | 2.8909E+11 | 2.8984E+11 |            |
| 誤差                     | 0.0        | 2.9760E+10 | 3.6145E+10 |            |
|                        | 0.00%      | 8.87%      | 10.54%     |            |

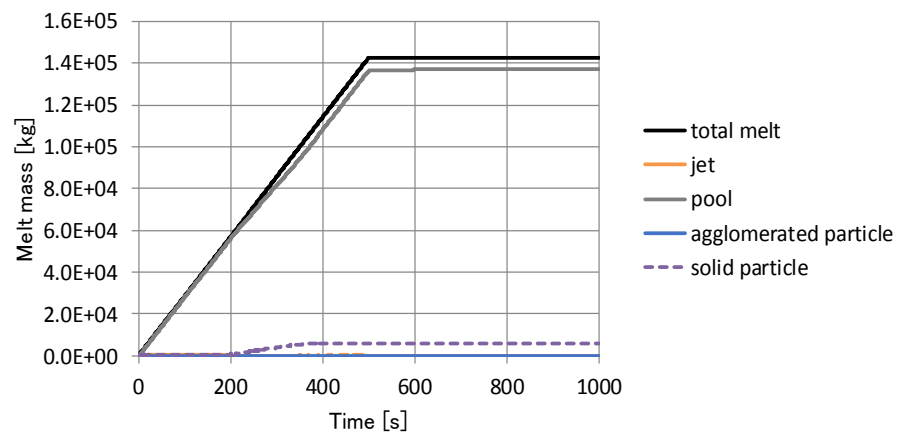


図 J1.1 デブリの状態別質量の履歴（実機規模ケース 1）

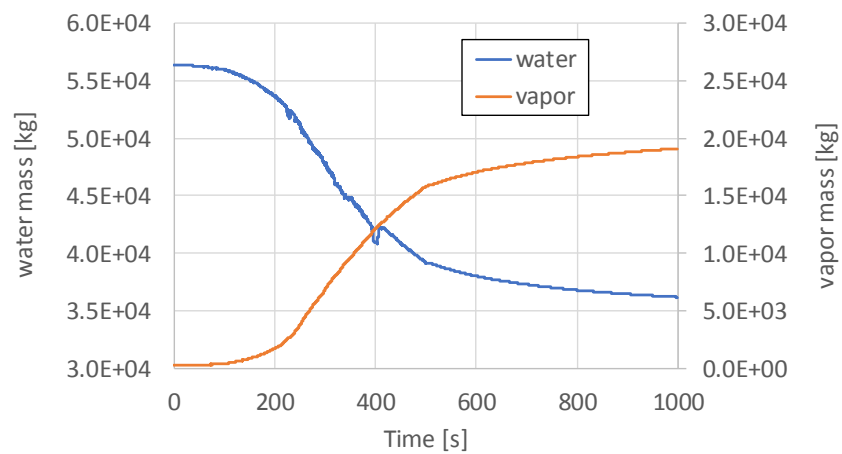


図 J1.2 水・水蒸気の質量履歴（実機規模ケース 1）

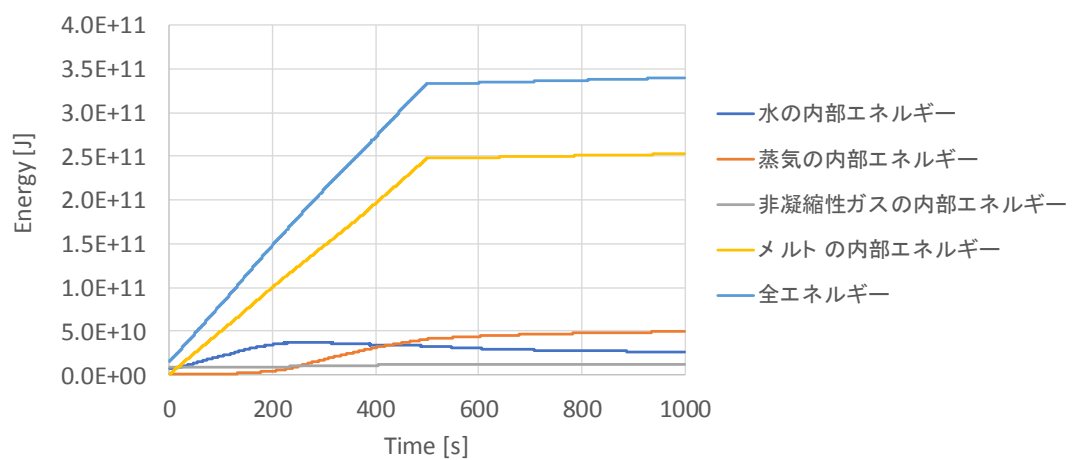


図 J1.3 各エネルギーの履歴（実機規模ケース 1）

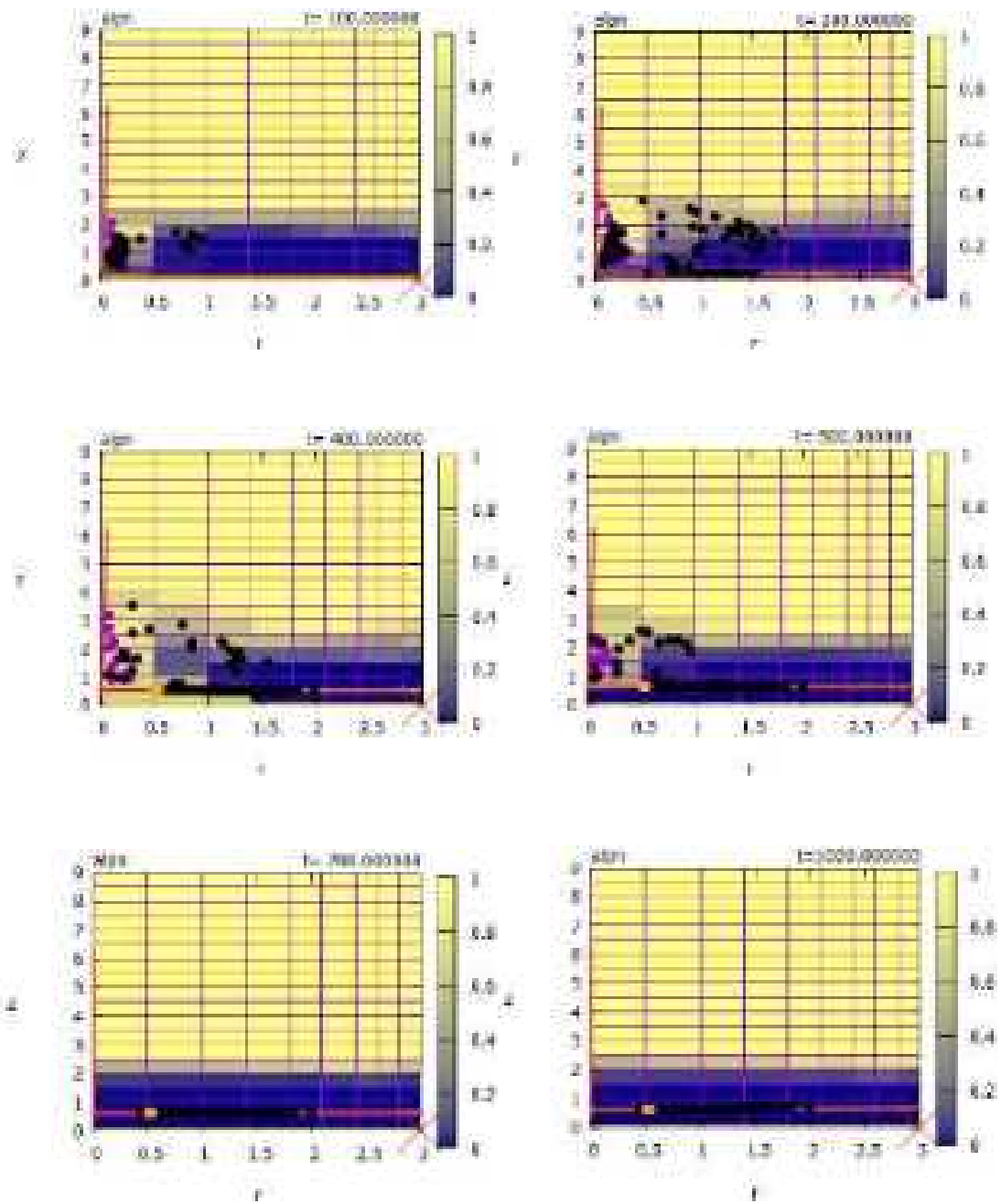


図 J1.4 ボイド率及び溶融物粒子分布図（実機規模ケース 1）  
 （橙色：アグロメレーション粒子群、黒色：固化した粒子群）

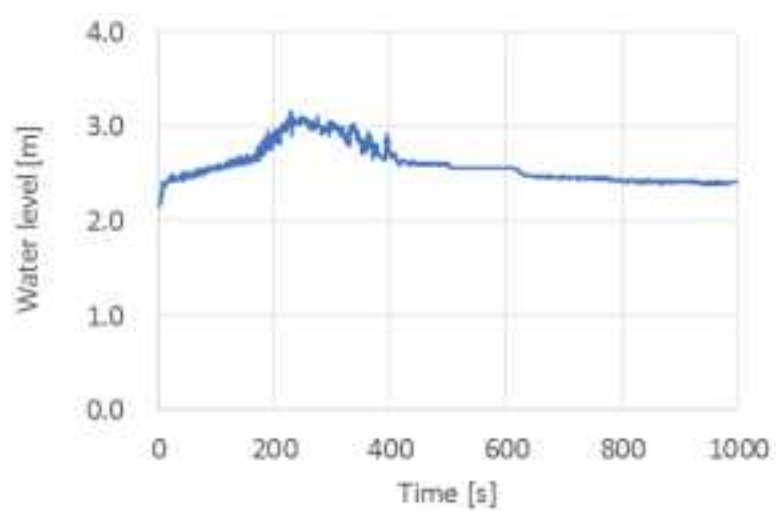


図 J1.5 水位履歴

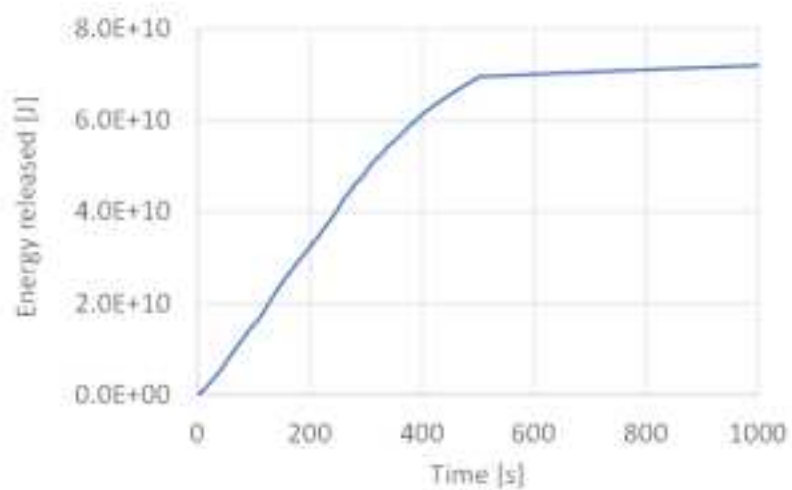


図 J1.6 溶融物から水への積算熱移行量

J2 実機規模ケース 2 (初期水位 3.0[m], 溶融物落下量 148.7[t])

表 J2.1 質量バランス及びエネルギーバランス (実機規模ケース 2)

| 時刻                     | 0 s        | 500 s      | 1000 s     | 1000 s－0 s |
|------------------------|------------|------------|------------|------------|
| 溶融物の質量バランス [kg]        |            |            |            |            |
| ジェット                   | 0.0        | 187        | 0.0        |            |
| プール                    | 0.0        | 128,253    | 129,691    |            |
| 粒子                     | 0.0        | 15,583     | 14,747     |            |
| 合計                     | 0.0        | 144,023    | 144,438    |            |
| (粒子のうちアグロメレーションした分)    | 0.0        | 10,154     | 10,140     |            |
| (粒子のうちアグロメレーションした分の割合) | 0.00%      | 65.16%     | 68.76%     |            |
| 水、蒸気の質量バランス [kg]       |            |            |            |            |
| 水                      | 84,553     | 41,554     | 38,534     |            |
| 蒸気                     | 214        | 38,684     | 42,582     |            |
| 合計                     | 84,766     | 80,239     | 81,116     |            |
| エネルギーバランス [J]          |            |            |            |            |
| 水の内部エネルギー              | 9.5071E+09 | 4.0171E+10 | 3.5355E+10 | 2.5848E+10 |
| 蒸気の内部エネルギー             | 5.1669E+08 | 1.0194E+11 | 1.1202E+11 | 1.1151E+11 |
| 非凝縮性ガスの内部エネルギー         | 9.9004E+09 | 1.5742E+10 | 1.5707E+10 | 5.8067E+09 |
| 溶融物の内部エネルギー            | 0.0        | 2.3899E+11 | 2.4121E+11 | 2.4121E+11 |
| 流体の運動エネルギー             | 0.0        | 30,482     | 1,505      | 1,505      |
| 合計                     | 1.9924E+10 | 3.9684E+11 | 4.0429E+11 | 3.8437E+11 |
| エネルギーの増加量              | 0.0        | 3.7692E+11 | 3.8437E+11 |            |
| 流入溶融物のエンタルピー           | 0.0        | 2.9234E+11 | 2.9318E+11 |            |
| 誤差                     | 0.0        | 8.4582E+10 | 9.1186E+10 |            |
|                        | 0.00%      | 21.31%     | 22.55%     |            |

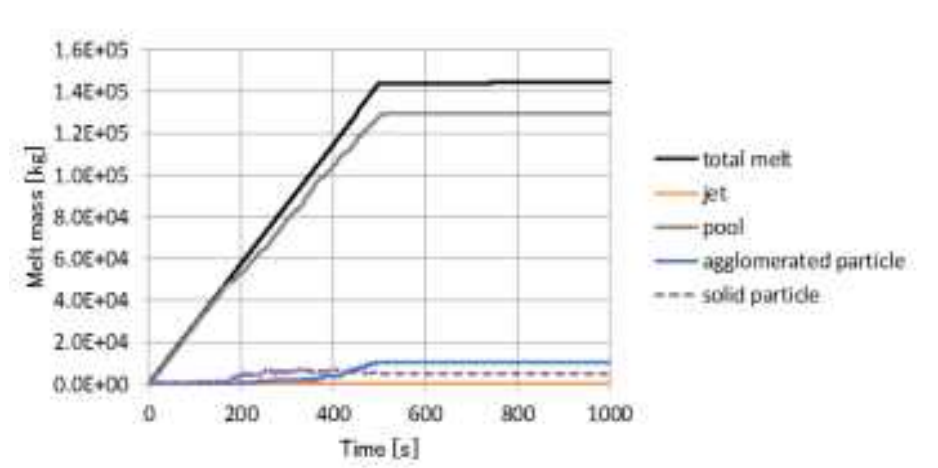


図 J2.1 デブリの状態別質量の履歴（実機規模ケース 2）

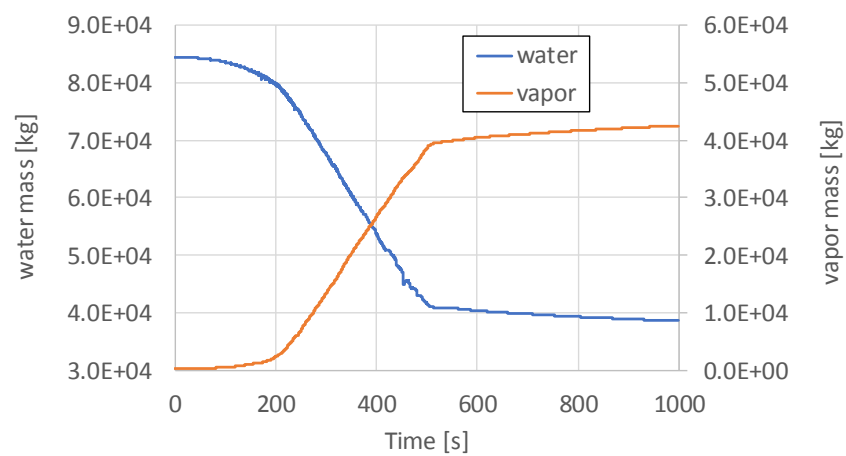


図 J2.2 水・水蒸気の質量履歴（実機規模ケース 2）

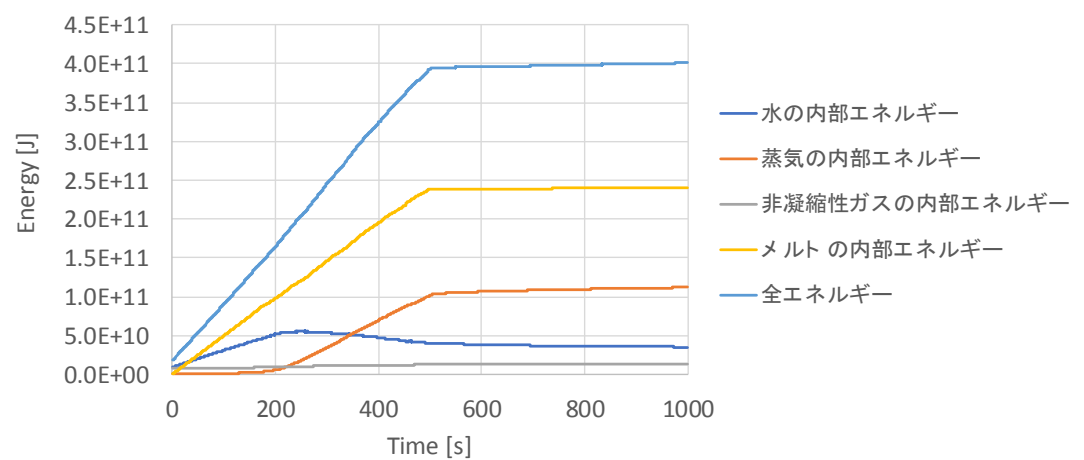


図 J2.3 各エネルギーの履歴（実機規模ケース 2）

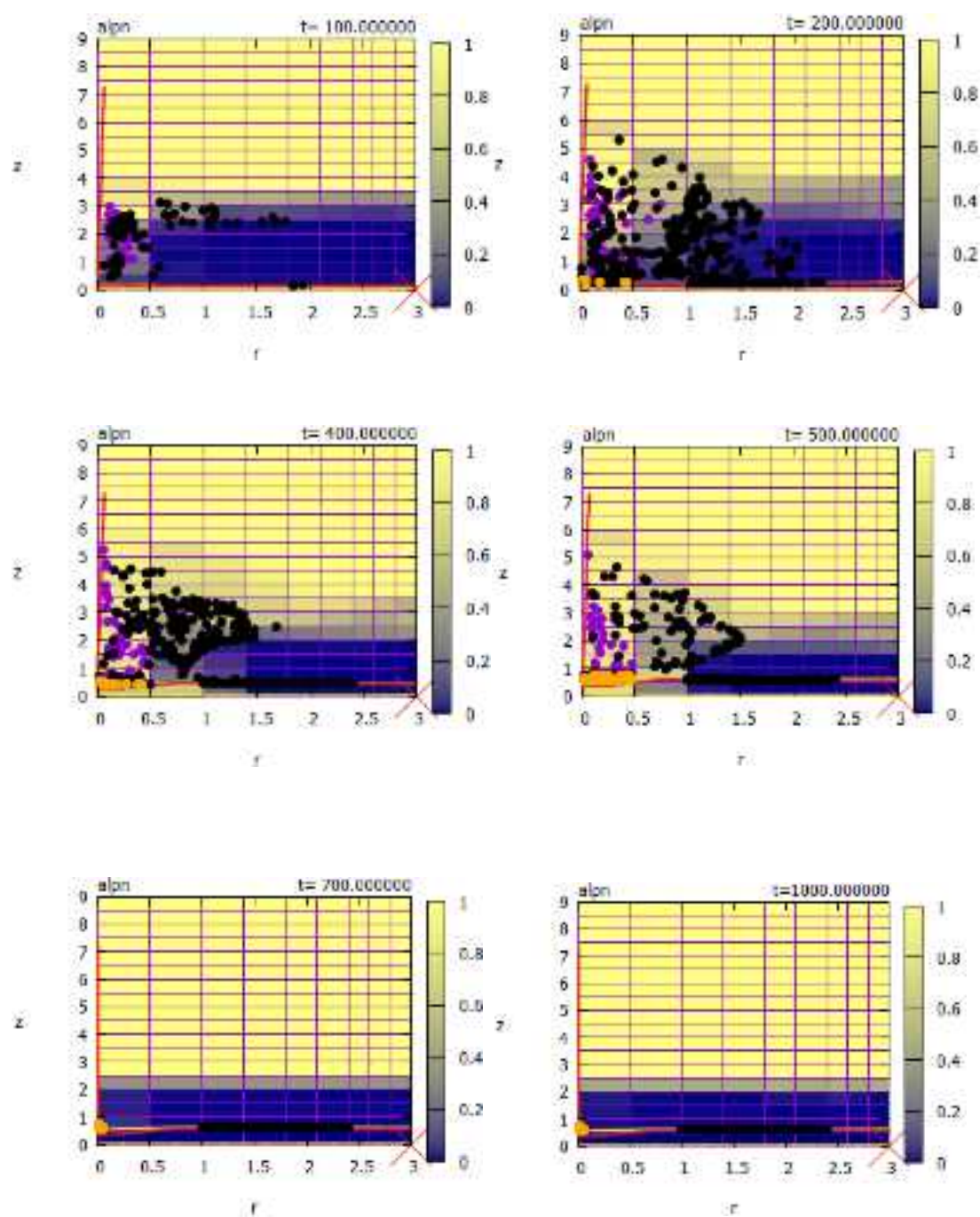


図 J2.4 ボイド率及び溶融物粒子分布図（実機規模ケース 2）  
（橙色：アグロメレーション粒子群、黒色：固化した粒子群）

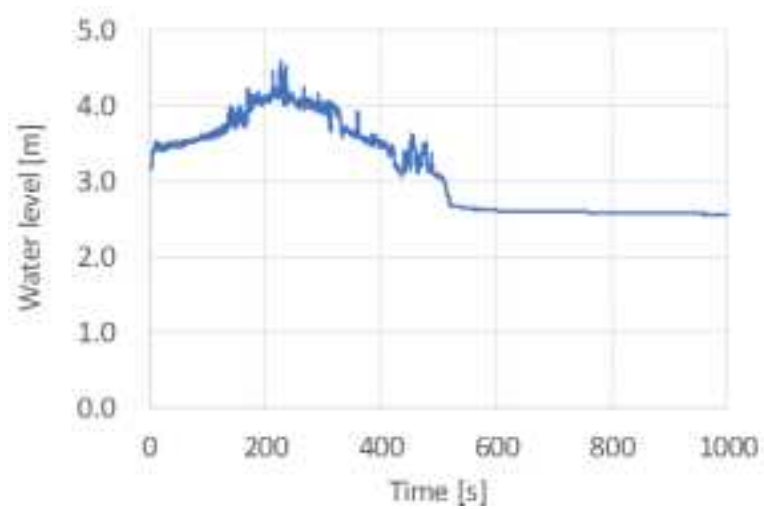


図 J2.5 水位履歴

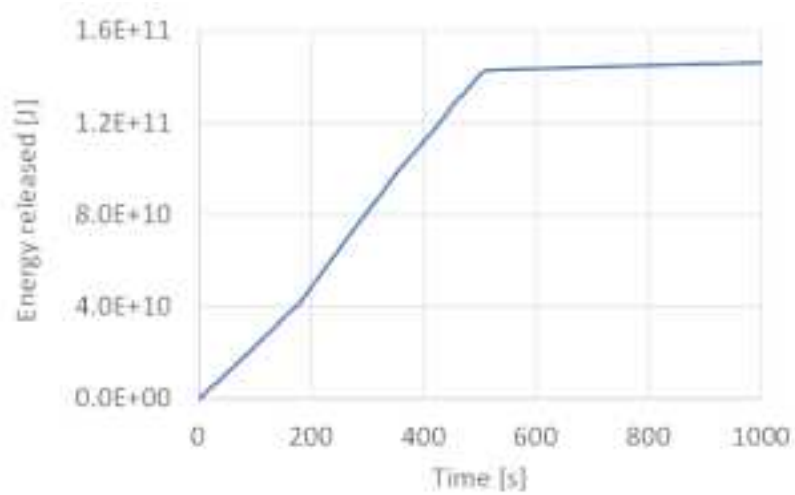


図 J2.6 溶融物から水への積算熱移行量

J3 実機規模ケース 3 (初期水位 4.0[m], 溶融物落下量 148.7[t])

表 J3.1 質量バランス及びエネルギーバランス (実機規模ケース 3)

| 時刻                     | 0 s        | 500 s      | 1000 s     | 1000 s－0 s |
|------------------------|------------|------------|------------|------------|
| 溶融物の質量バランス [kg]        |            |            |            |            |
| ジェット                   | 0.0        | 187        | 0.0        |            |
| プール                    | 0.0        | 118,121    | 119,640    |            |
| 粒子                     | 0.0        | 25,270     | 24,106     |            |
| 合計                     | 0.0        | 143,577    | 143,747    |            |
| (粒子のうちアグロメレーションした分)    | 0.0        | 14,315     | 14,418     |            |
| (粒子のうちアグロメレーションした分の割合) | 0.00%      | 56.65%     | 59.81%     |            |
| 水、蒸気の質量バランス [kg]       |            |            |            |            |
| 水                      | 112,739    | 62,737     | 57,420     |            |
| 蒸気                     | 213        | 44,553     | 50,287     |            |
| 合計                     | 112,952    | 107,290    | 107,706    |            |
| エネルギーバランス [J]          |            |            |            |            |
| 水の内部エネルギー              | 1.2676E+10 | 5.9374E+10 | 5.3477E+10 | 4.0800E+10 |
| 蒸気の内部エネルギー             | 5.1485E+08 | 1.1765E+11 | 1.3270E+11 | 1.3219E+11 |
| 非凝縮性ガスの内部エネルギー         | 9.8651E+09 | 1.5961E+10 | 1.5985E+10 | 6.1201E+09 |
| 溶融物の内部エネルギー            | 0.0        | 2.2785E+11 | 2.2553E+11 | 2.2553E+11 |
| 流体の運動エネルギー             | 0.0        | 30,799     | 2,211      | 2,211      |
| 合計                     | 2.3056E+10 | 4.2083E+11 | 4.2769E+11 | 4.0464E+11 |
| エネルギーの増加量              | 0.0        | 3.9778E+11 | 4.0464E+11 |            |
| 流入溶融物のエンタルピー           | 0.0        | 2.9143E+11 | 2.9178E+11 |            |
| 誤差                     | 0.0        | 1.0635E+11 | 1.1286E+11 |            |
|                        | 0.00%      | 25.27%     | 26.39%     |            |

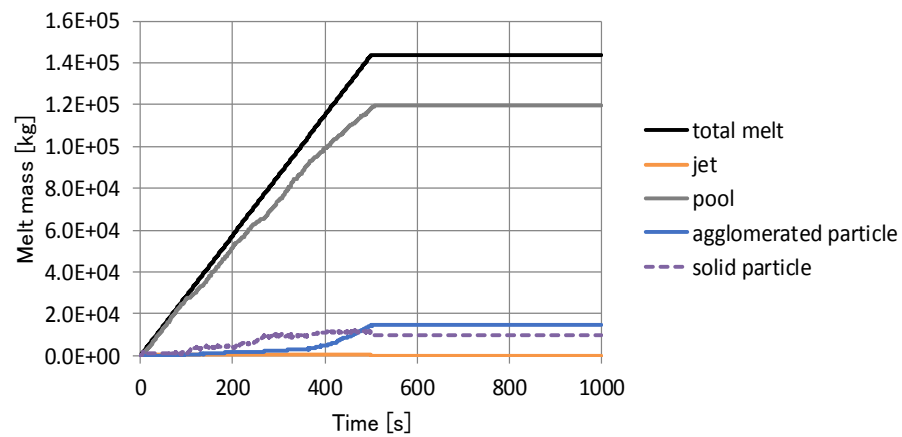


図 J3.1 デブリの状態別質量の履歴（実機規模ケース 3）

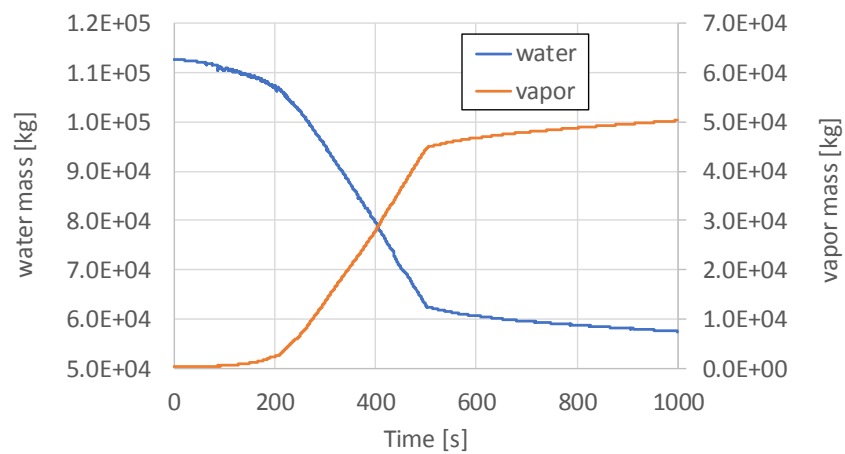


図 J3.2 水・水蒸気の質量履歴（実機規模ケース 3）

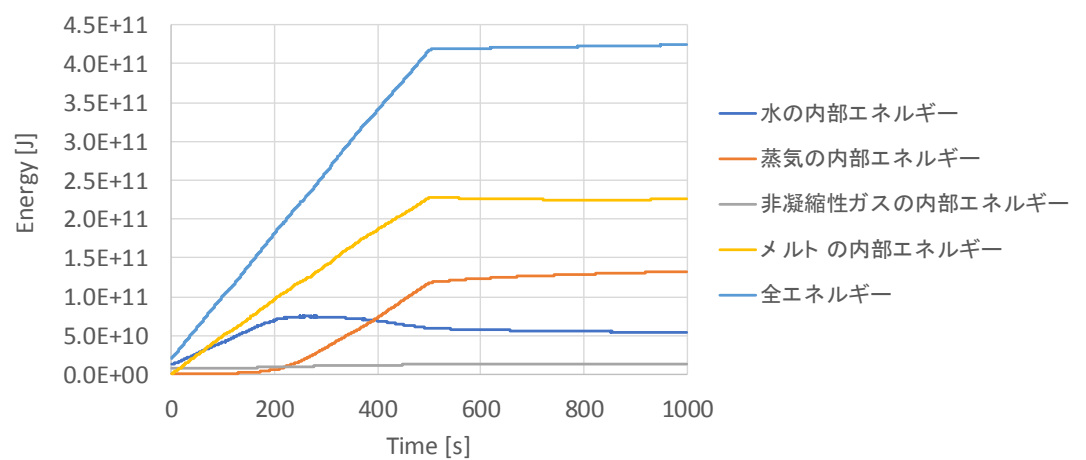


図 J3.3 各エネルギーの履歴（実機規模ケース 3）

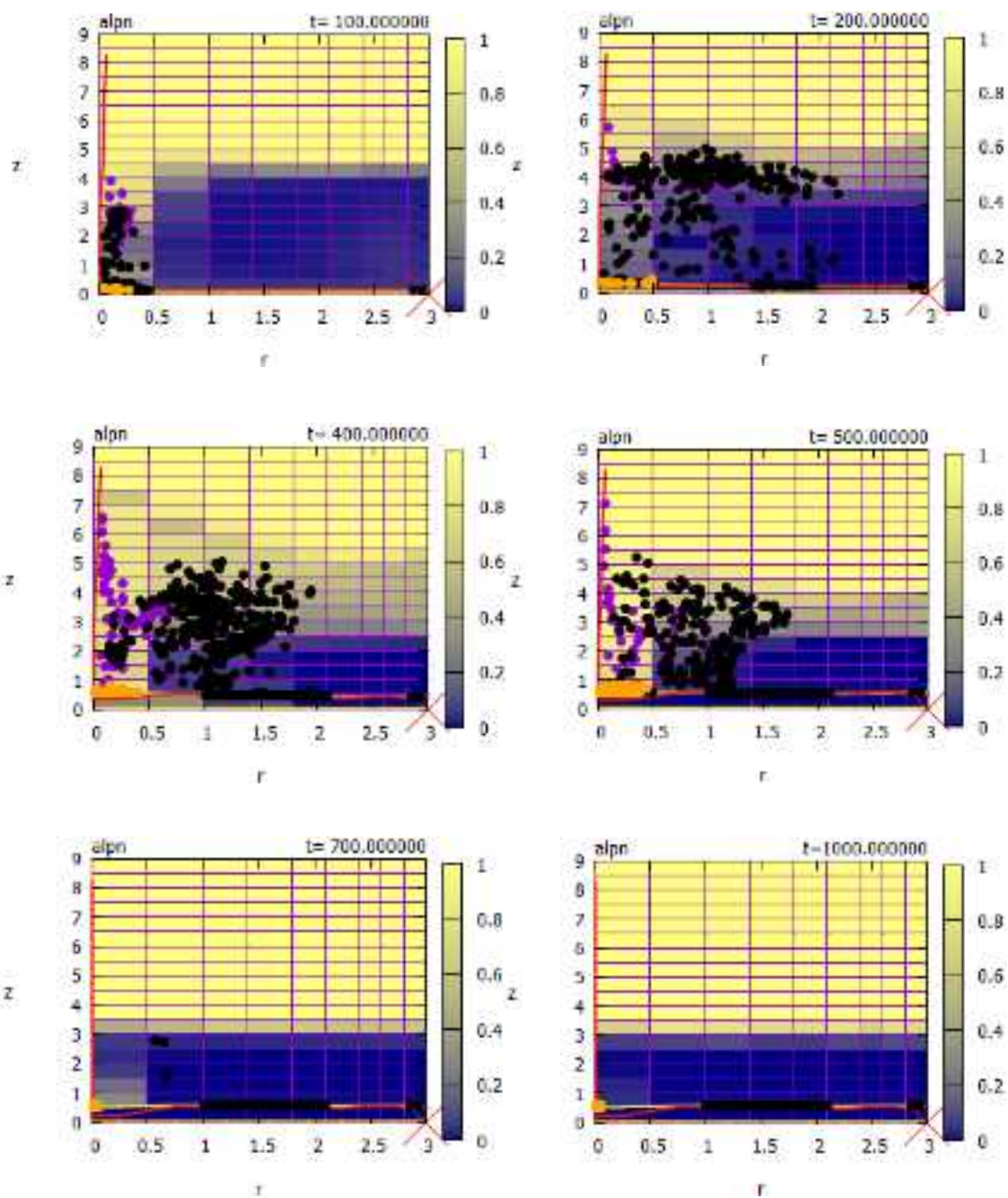


図 J3.4 ボイド率及び溶融物粒子分布図（実機規模ケース 3）  
（橙色：アグロメレーション粒子群、黒色：固化した粒子群）

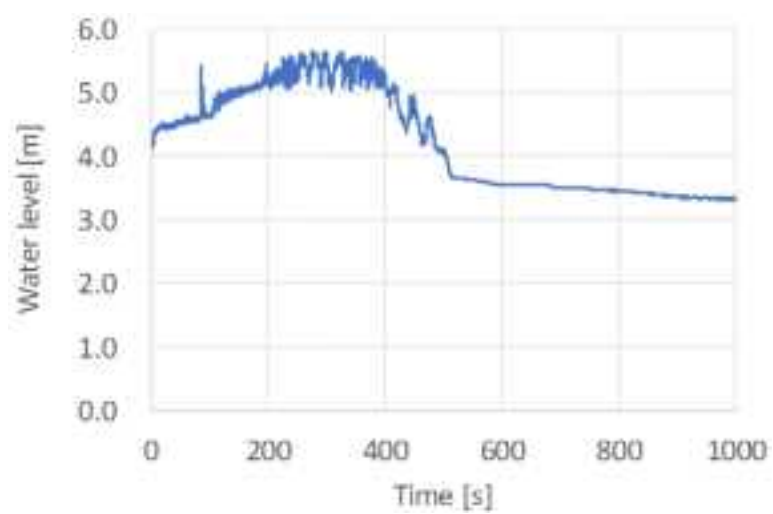


図 J3.5 水位履歴

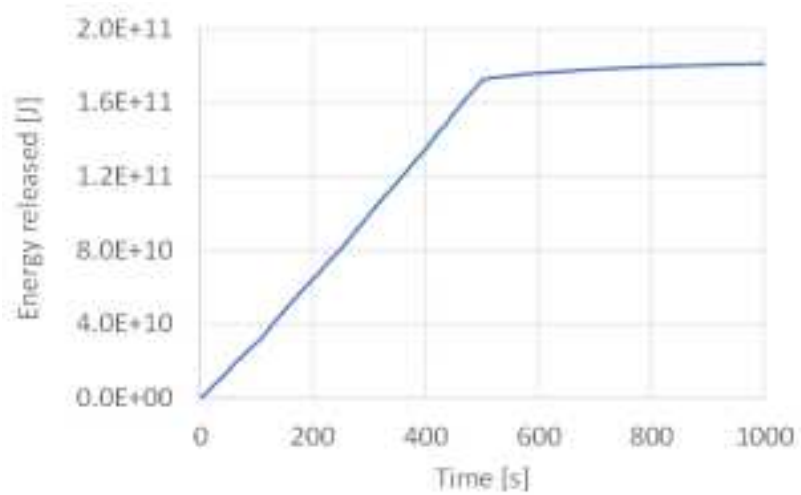


図 J3.6 溶融物から水への積算熱移行量

J4 実機規模ケース 4 (初期水位 2.0[m], 溶融物落下量 74.35[t])

表 J4.1 質量バランス及びエネルギーバランス (実機規模ケース 4)

| 時刻                     | 0 s        | 500 s      | 1000 s     | 1000 s－0 s |
|------------------------|------------|------------|------------|------------|
| 溶融物の質量バランス [kg]        |            |            |            |            |
| ジェット                   | 0.0        | 79         | 0.0        |            |
| プール                    | 0.0        | 56,813     | 57,513     |            |
| 粒子                     | 0.0        | 15,370     | 15,077     |            |
| 合計                     | 0.0        | 72,263     | 72,590     |            |
| (粒子のうちアグロメレーションした分)    | 0.0        | 2,508      | 6,221      |            |
| (粒子のうちアグロメレーションした分の割合) | 0.00%      | 16.31%     | 41.26%     |            |
| 水、蒸気の質量バランス [kg]       |            |            |            |            |
| 水                      | 56,371     | 45,472     | 40,262     |            |
| 蒸気                     | 214        | 9,287      | 15,235     |            |
| 合計                     | 56,585     | 54,759     | 55,497     |            |
| エネルギーバランス [J]          |            |            |            |            |
| 水の内部エネルギー              | 6.3378E+09 | 3.5249E+10 | 2.7731E+10 | 2.1393E+10 |
| 蒸気の内部エネルギー             | 5.1854E+08 | 2.3664E+10 | 3.9057E+10 | 3.8538E+10 |
| 非凝縮性ガスの内部エネルギー         | 9.9358E+09 | 1.3345E+10 | 1.3848E+10 | 3.9126E+09 |
| 溶融物の内部エネルギー            | 0.0        | 1.1400E+11 | 1.0880E+11 | 1.0880E+11 |
| 流体の運動エネルギー             | 0.0        | 32,754     | 1,540      | 1,540      |
| 合計                     | 1.6792E+10 | 1.8625E+11 | 1.8944E+11 | 1.7264E+11 |
| エネルギーの増加量              | 0.0        | 1.6946E+11 | 1.7264E+11 |            |
| 流入溶融物のエンタルピー           | 0.0        | 1.4668E+11 | 1.4734E+11 |            |
| 誤差                     | 0.0        | 2.2782E+10 | 2.5301E+10 |            |
|                        | 0.00%      | 12.23%     | 13.36%     |            |

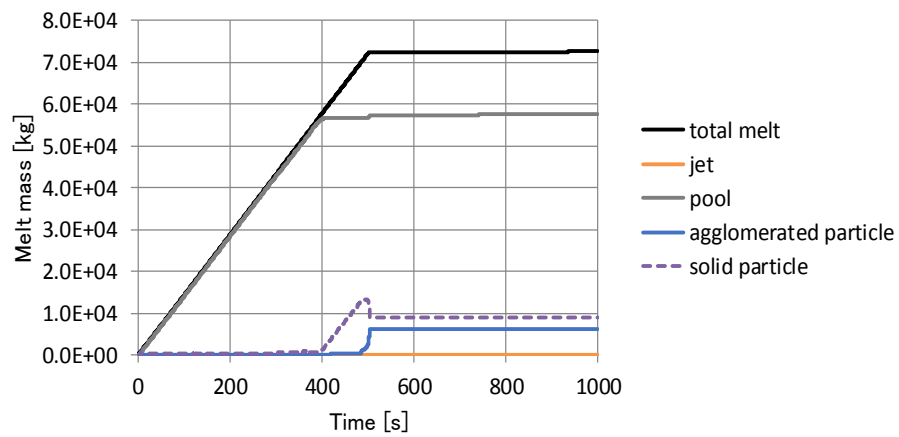


図 J4.1 デブリの状態別質量の履歴（実機規模ケース 4）

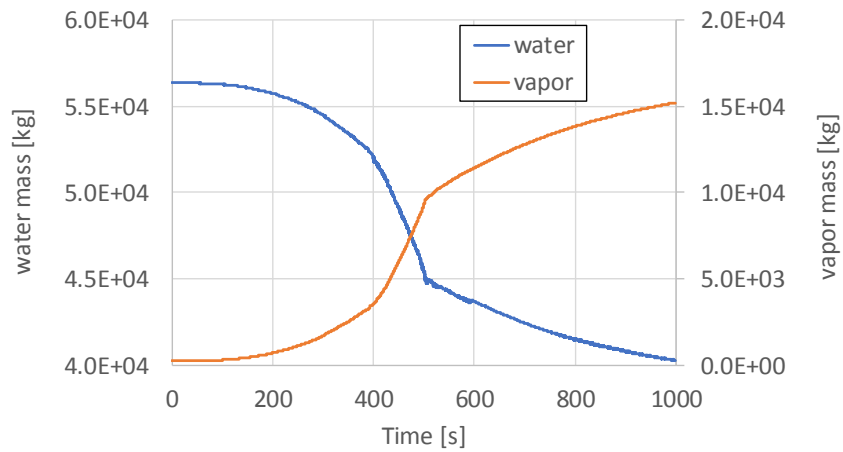


図 J4.2 水・水蒸気の質量履歴（実機規模ケース 4）

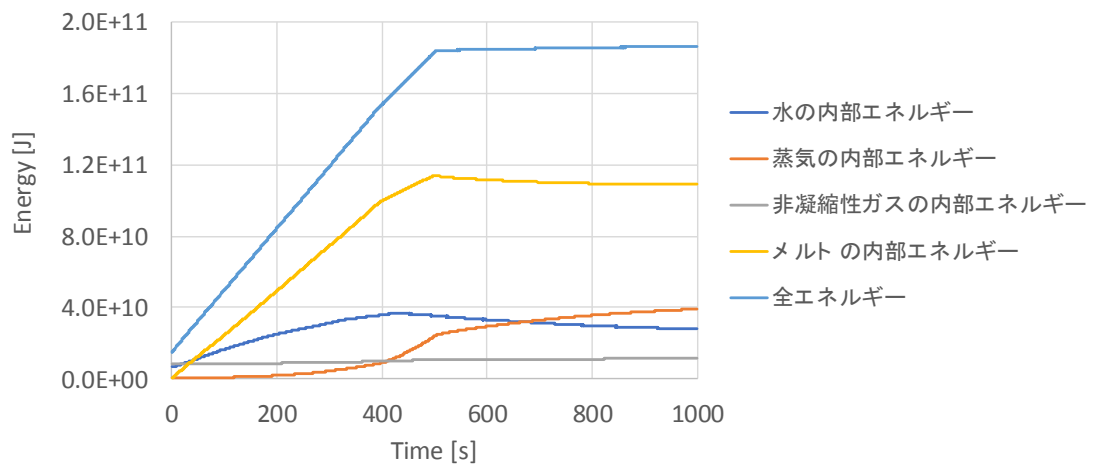


図 J4.3 各エネルギーの履歴（実機規模ケース 4）

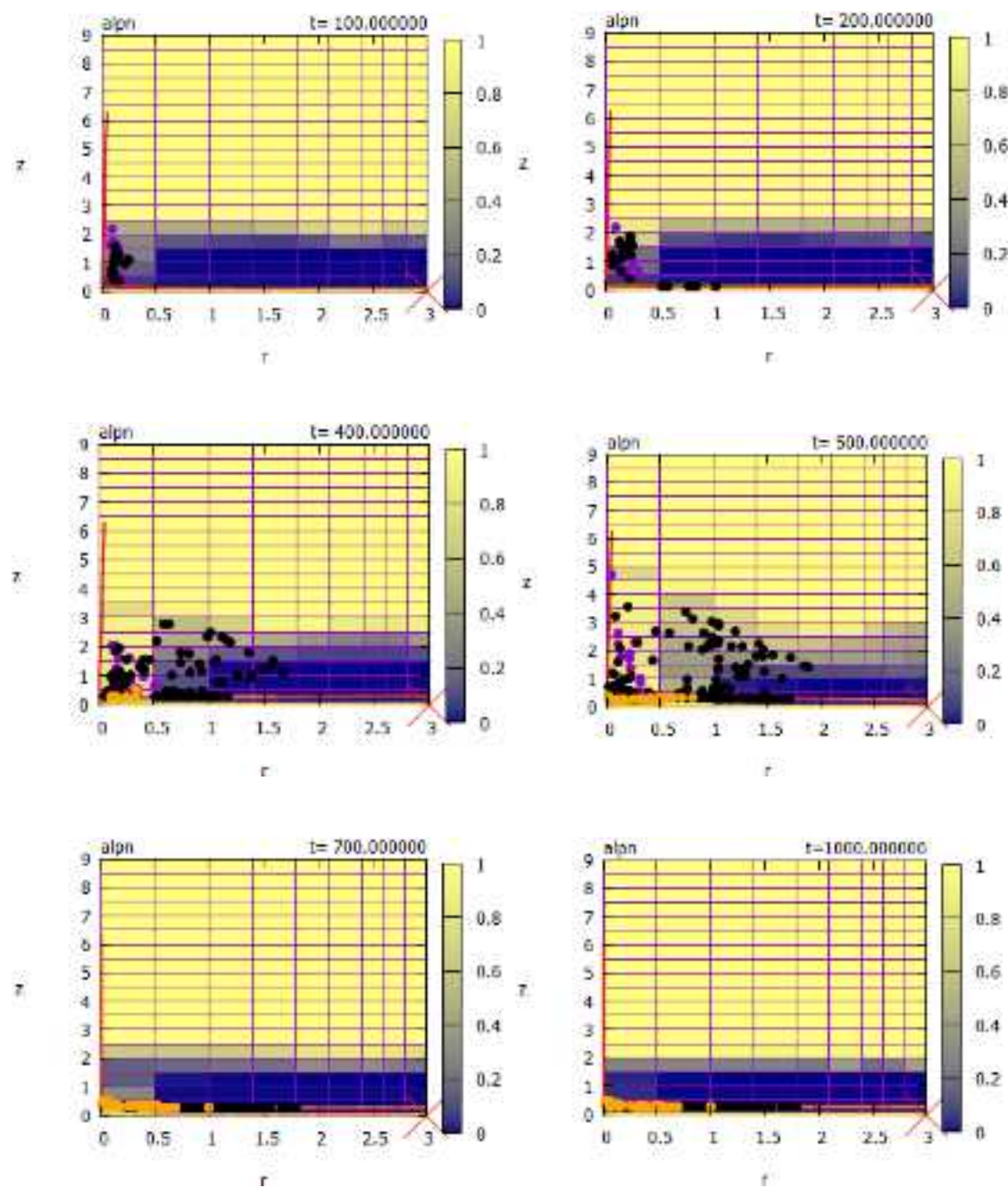


図 J4.4 ボイド率及び溶融物粒子分布図（実機規模ケース 4）  
（橙色：アグロメレーション粒子群、黒色：固化した粒子群）

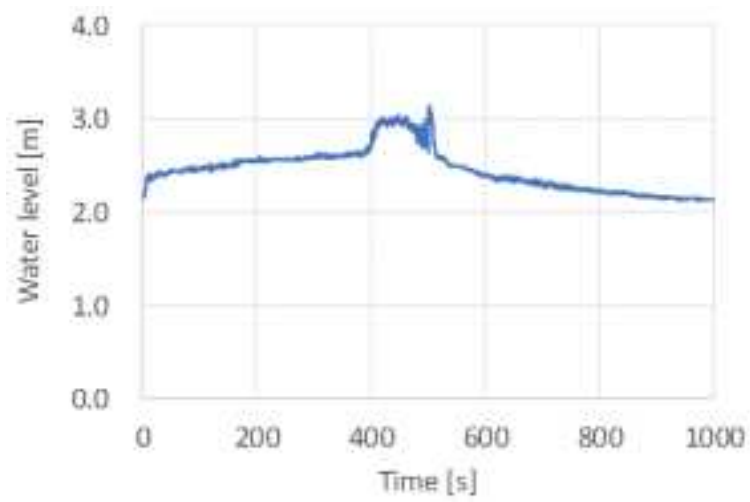


図 J4.5 水位履歴

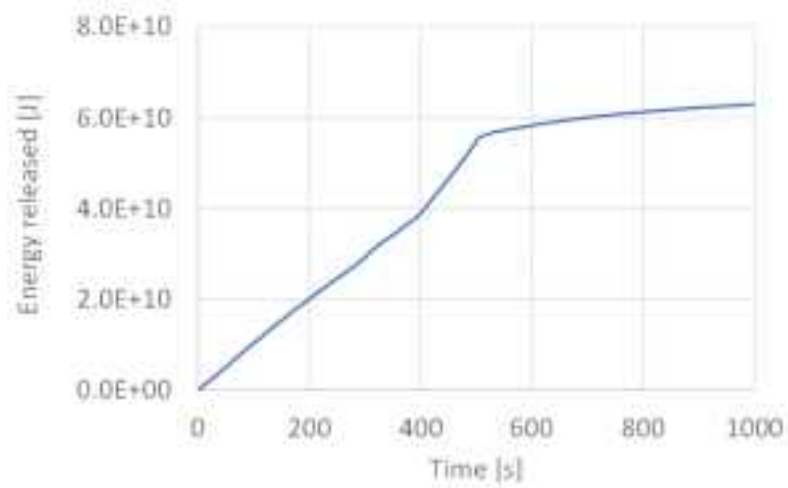


図 J4.6 溶融物から水への積算熱移行量

J5 実機規模ケース 5 (初期水位 3.0[m], 溶融物落下量 74.35 [t])

表 J5.1 質量バランス及びエネルギーバランス (実機規模ケース 5)

| 時刻                     | 0 s        | 500 s      | 1000 s     | 1000 s－0 s |
|------------------------|------------|------------|------------|------------|
| 溶融物の質量バランス [kg]        |            |            |            |            |
| ジェット                   | 0.0        | 65         | 0.0        |            |
| プール                    | 0.0        | 42,197     | 42,647     |            |
| 粒子                     | 0.0        | 29,919     | 29,956     |            |
| 合計                     | 0.0        | 72,181     | 72,602     |            |
| (粒子のうちアグロメレーションした分)    | 0.0        | 130        | 131        |            |
| (粒子のうちアグロメレーションした分の割合) | 0.00%      | 0.43%      | 0.44%      |            |
| 水、蒸気の質量バランス [kg]       |            |            |            |            |
| 水                      | 84,553     | 66,401     | 59,901     |            |
| 蒸気                     | 214        | 15,444     | 22,699     |            |
| 合計                     | 84,766     | 81,845     | 82,600     |            |
| エネルギーバランス [J]          |            |            |            |            |
| 水の内部エネルギー              | 9.5071E+09 | 5.3060E+10 | 4.6165E+10 | 3.6658E+10 |
| 蒸気の内部エネルギー             | 5.1669E+08 | 3.9786E+10 | 5.8767E+10 | 5.8250E+10 |
| 非凝縮性ガスの内部エネルギー         | 9.9004E+09 | 1.4045E+10 | 1.4522E+10 | 4.6220E+09 |
| 溶融物の内部エネルギー            | 0.0        | 9.2206E+10 | 8.1399E+10 | 8.1399E+10 |
| 流体の運動エネルギー             | 0.0        | 49,451     | 3,765      | 3,765      |
| 合計                     | 1.9924E+10 | 1.9910E+11 | 2.0085E+11 | 1.8093E+11 |
| エネルギーの増加量              | 0.0        | 1.7917E+11 | 1.8093E+11 |            |
| 流入溶融物のエンタルピー           | 0.0        | 1.4651E+11 | 1.4737E+11 |            |
| 誤差                     | 0.0        | 3.2659E+10 | 3.3561E+10 |            |
|                        | 0.00%      | 16.40%     | 16.71%     |            |

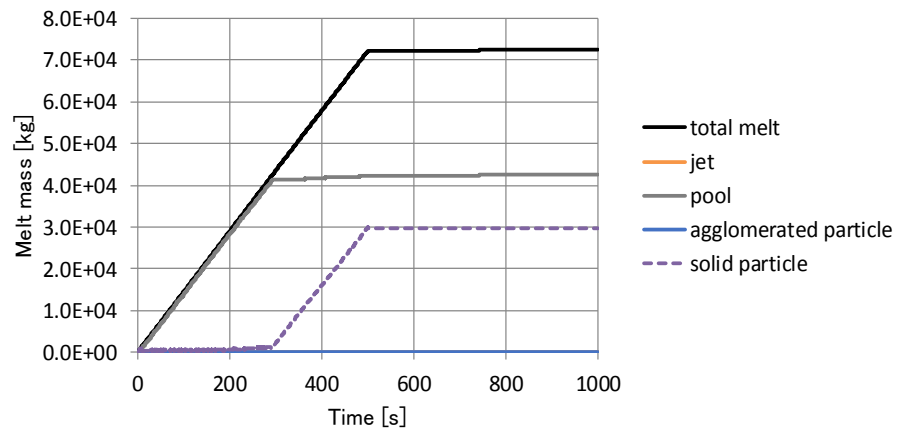


図 J5.1 デブリの状態別質量の履歴（実機規模ケース 5）

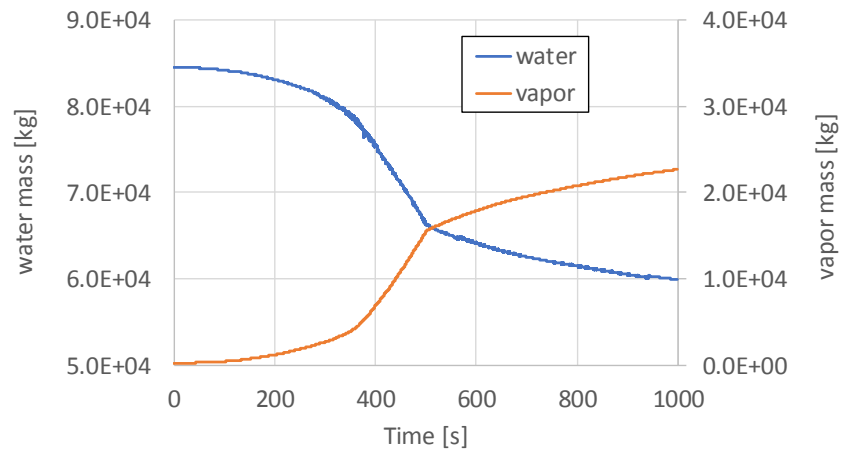


図 J5.2 水・水蒸気の質量履歴（実機規模ケース 5）

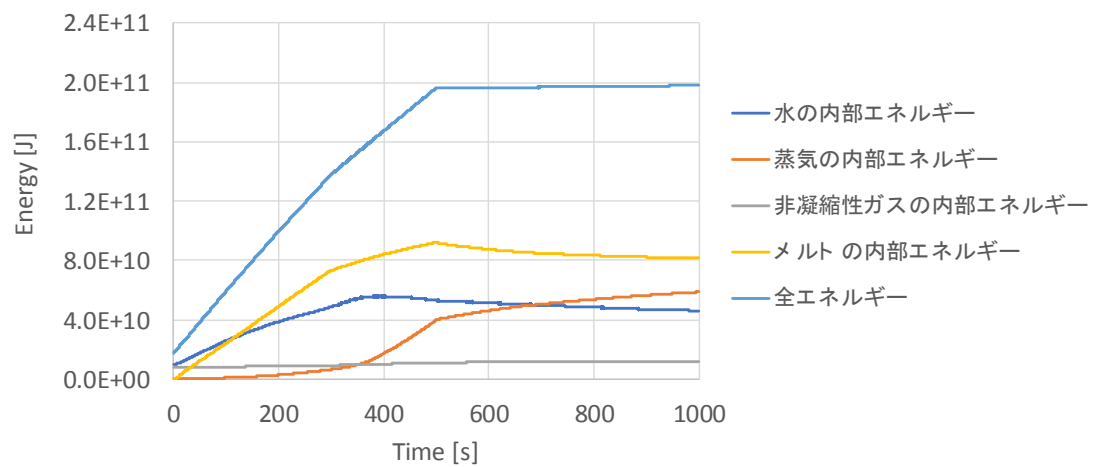


図 J5.3 各エネルギーの履歴（実機規模ケース 5）

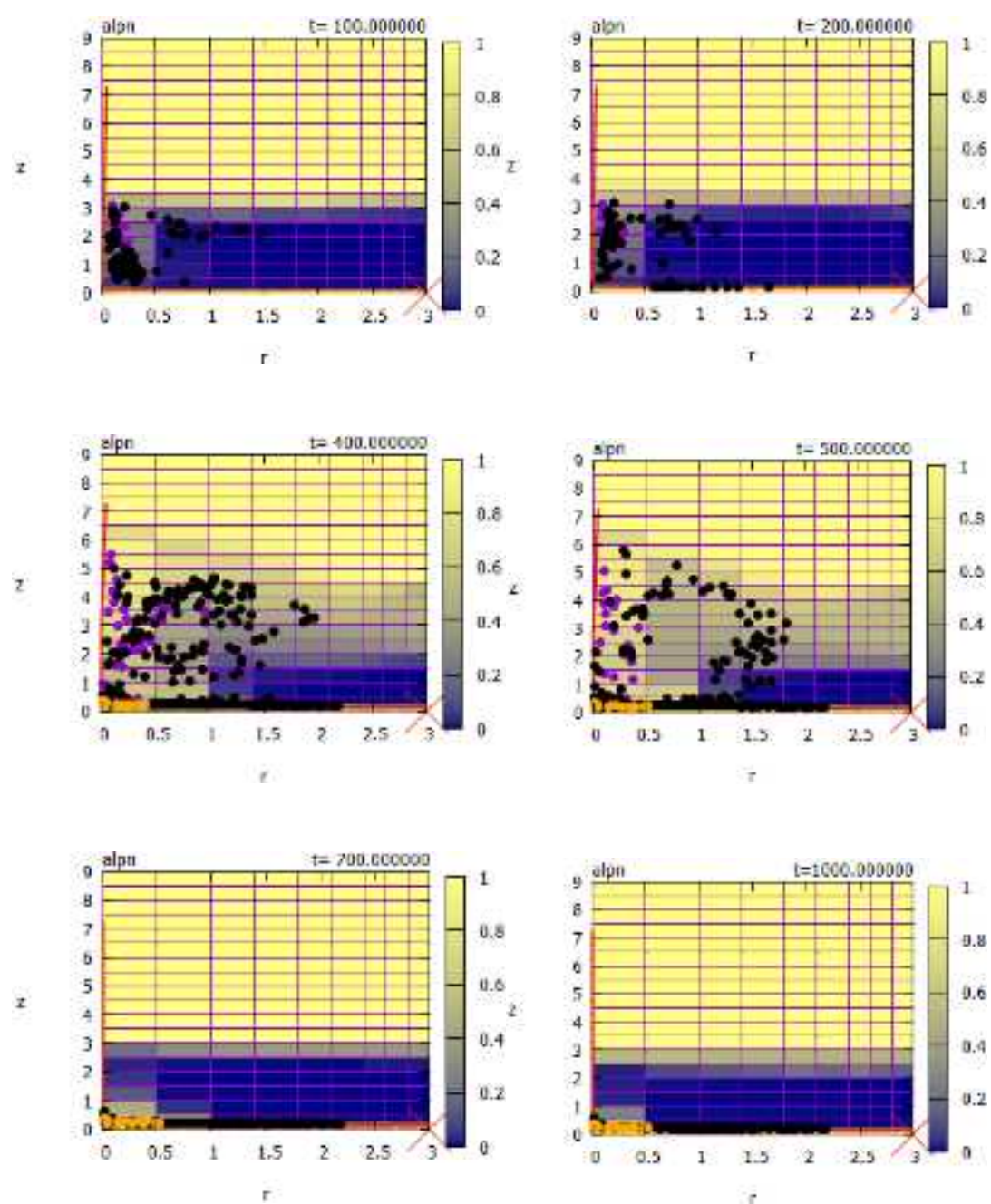


図 J5.4 ボイド率及び溶融物粒子分布図（実機規模ケース 5）  
（橙色：アグロメレーション粒子群、黒色：固化した粒子群）

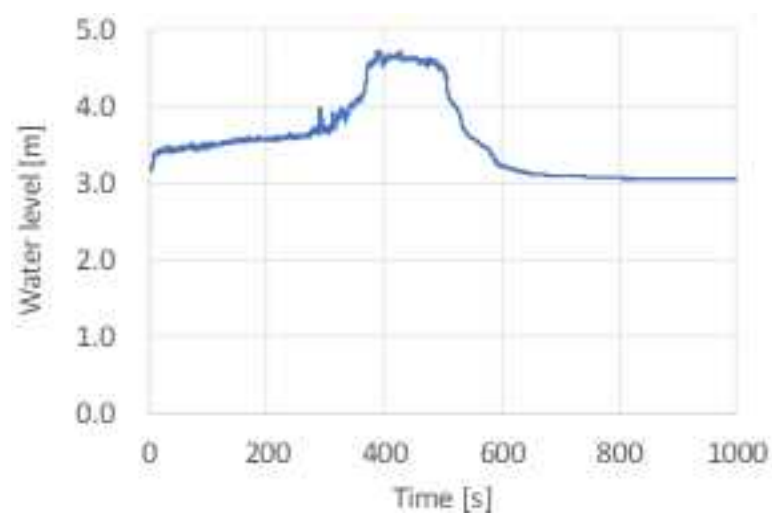


図 J5.5 水位履歴

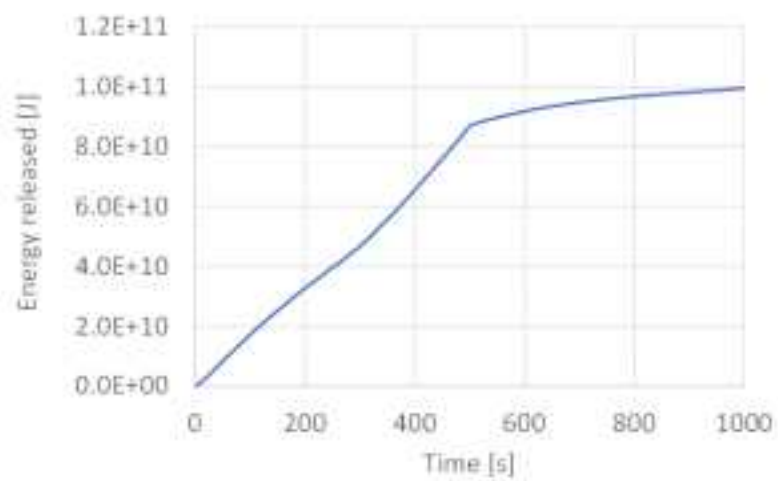


図 J5.6 溶融物から水への積算熱移行量

J6 実機規模ケース 6 (初期水位 4.0[m], 溶融物落下量 74.35 [t])

表 J6.1 質量バランス及びエネルギーバランス (実機規模ケース 6)

| 時刻                     | 0 s        | 500 s      | 1000 s     | 1000 s－0 s |
|------------------------|------------|------------|------------|------------|
| 溶融物の質量バランス [kg]        |            |            |            |            |
| ジェット                   | 0.0        | 43         | 0.0        |            |
| プール                    | 0.0        | 47,520     | 47,937     |            |
| 粒子                     | 0.0        | 24,656     | 24,596     |            |
| 合計                     | 0.0        | 72,219     | 72,533     |            |
| (粒子のうちアグロメレーションした分)    | 0.0        | 87         | 87         |            |
| (粒子のうちアグロメレーションした分の割合) | 0.00%      | 0.35%      | 0.35%      |            |
| 水、蒸気の質量バランス [kg]       |            |            |            |            |
| 水                      | 112,739    | 101,279    | 96,057     |            |
| 蒸気                     | 213        | 8,641      | 15,168     |            |
| 合計                     | 112,952    | 109,919    | 111,225    |            |
| エネルギーバランス [J]          |            |            |            |            |
| 水の内部エネルギー              | 1.2676E+10 | 7.6517E+10 | 7.0227E+10 | 5.7551E+10 |
| 蒸気の内部エネルギー             | 5.1485E+08 | 2.1921E+10 | 3.8823E+10 | 3.8308E+10 |
| 非凝縮性ガスの内部エネルギー         | 9.8651E+09 | 1.2967E+10 | 1.3667E+10 | 3.8023E+09 |
| 溶融物の内部エネルギー            | 0.0        | 9.7622E+10 | 8.8825E+10 | 8.8825E+10 |
| 流体の運動エネルギー             | 0.0        | 67,042     | 4,380      | 4,380      |
| 合計                     | 2.3056E+10 | 2.0903E+11 | 2.1154E+11 | 1.8849E+11 |
| エネルギーの増加量              | 0.0        | 1.8597E+11 | 1.8849E+11 |            |
| 流入溶融物のエンタルピー           | 0.0        | 1.4659E+11 | 1.4723E+11 |            |
| 誤差                     | 0.0        | 3.9380E+10 | 4.1259E+10 |            |
|                        | 0.00%      | 18.84%     | 19.50%     |            |

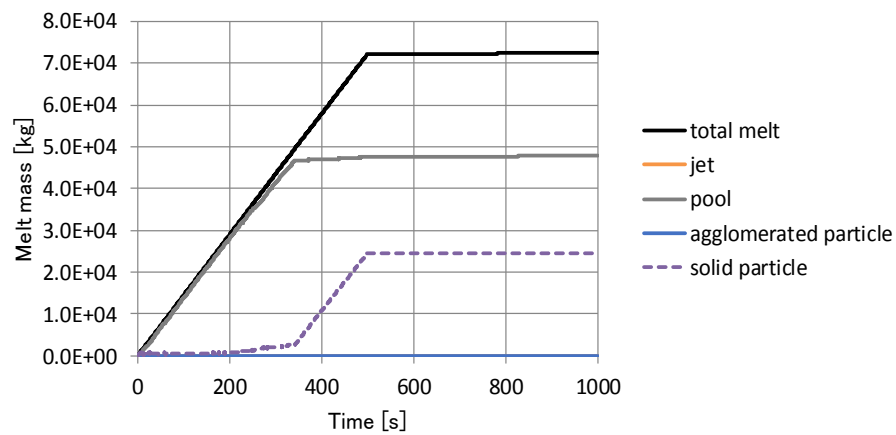


図 J6.1 デブリの状態別質量の履歴（実機規模ケース 6）

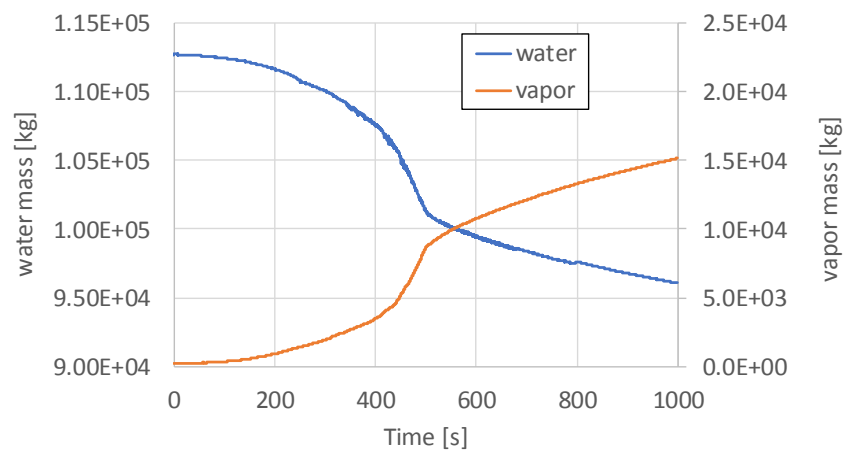


図 J6.2 水・水蒸気の質量履歴（実機規模ケース 6）

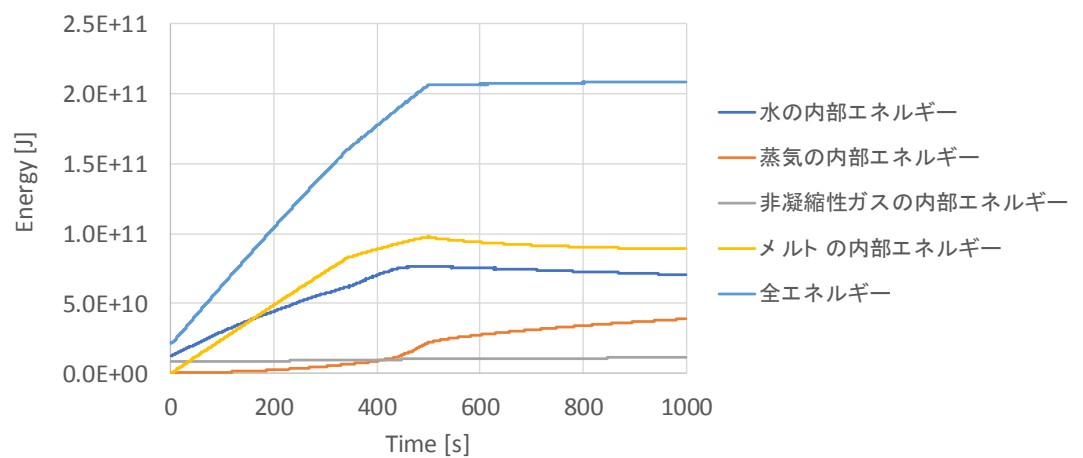


図 J6.3 各エネルギーの履歴（実機規模ケース 6）

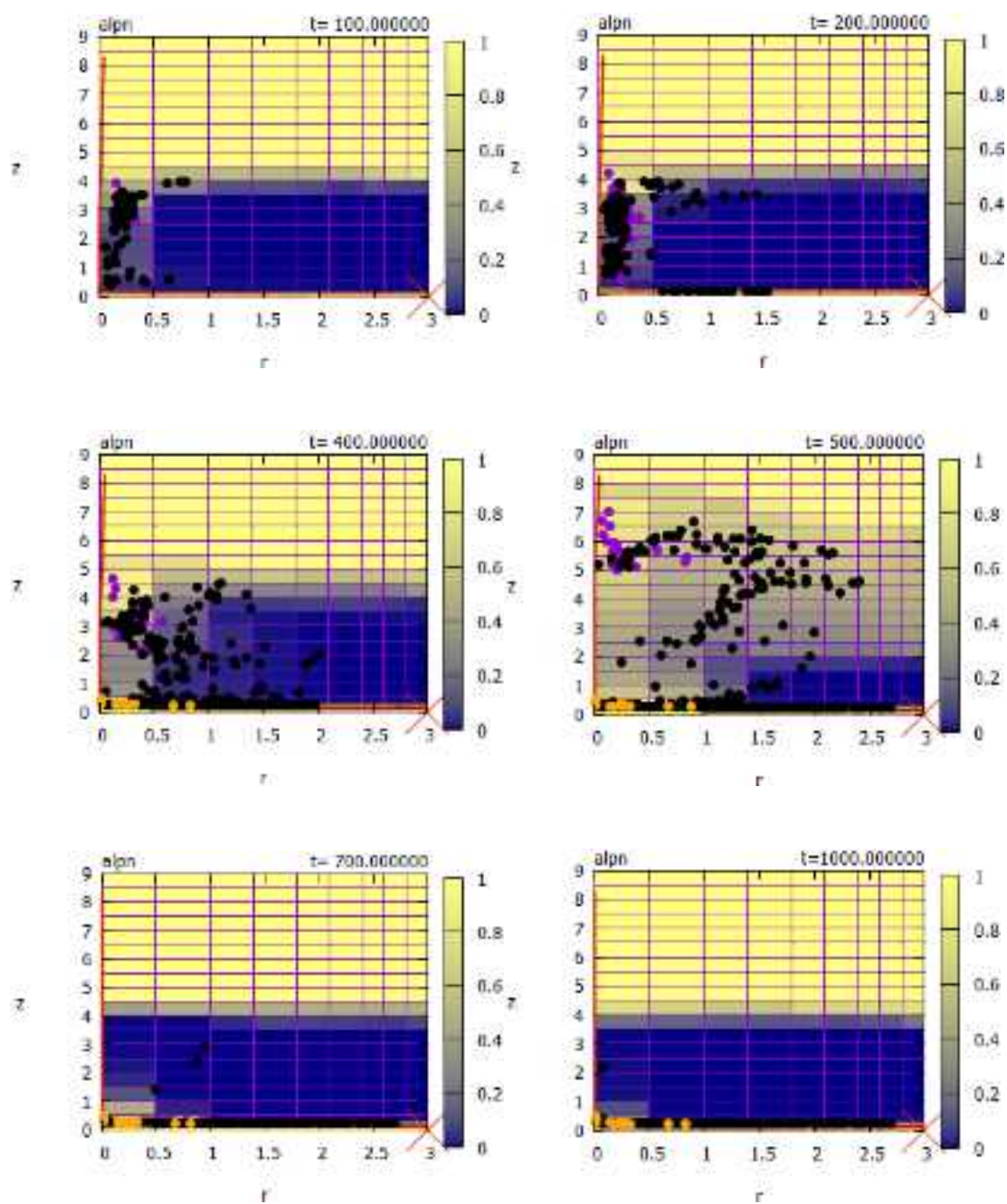


図 J6.4 ボイド率及び溶融物粒子分布図（実機規模ケース 6）  
（橙色：アグロメレーション粒子群、黒色：固化した粒子群）

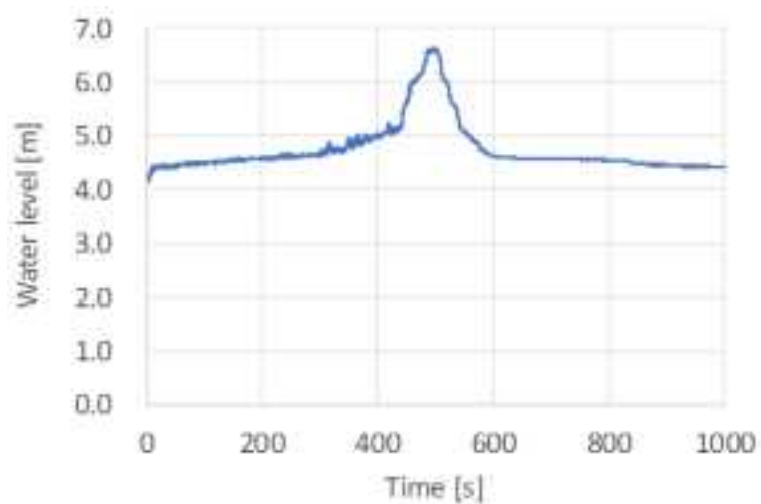


図 J6.5 水位履歴

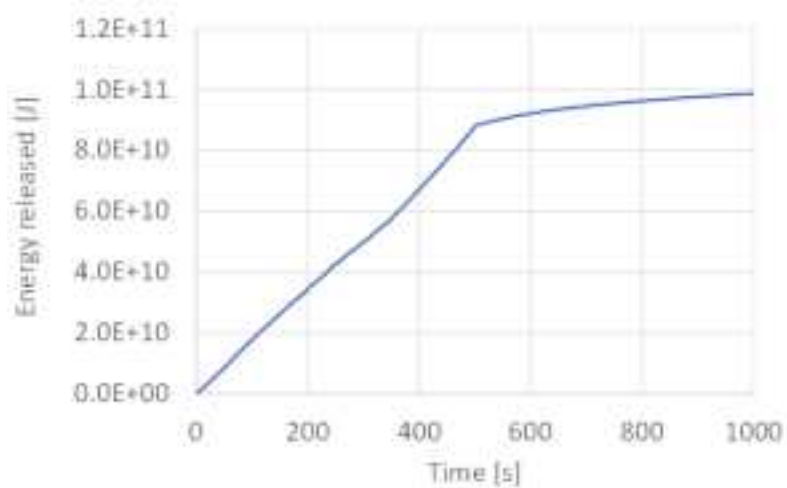


図 J6.6 溶融物から水への積算熱移行量

## 付録 B 溶融炉心の床面上の拡がりの解析結果

### B.1 PULiMS 実験解析

#### B.1.1 全体の分布を示す図

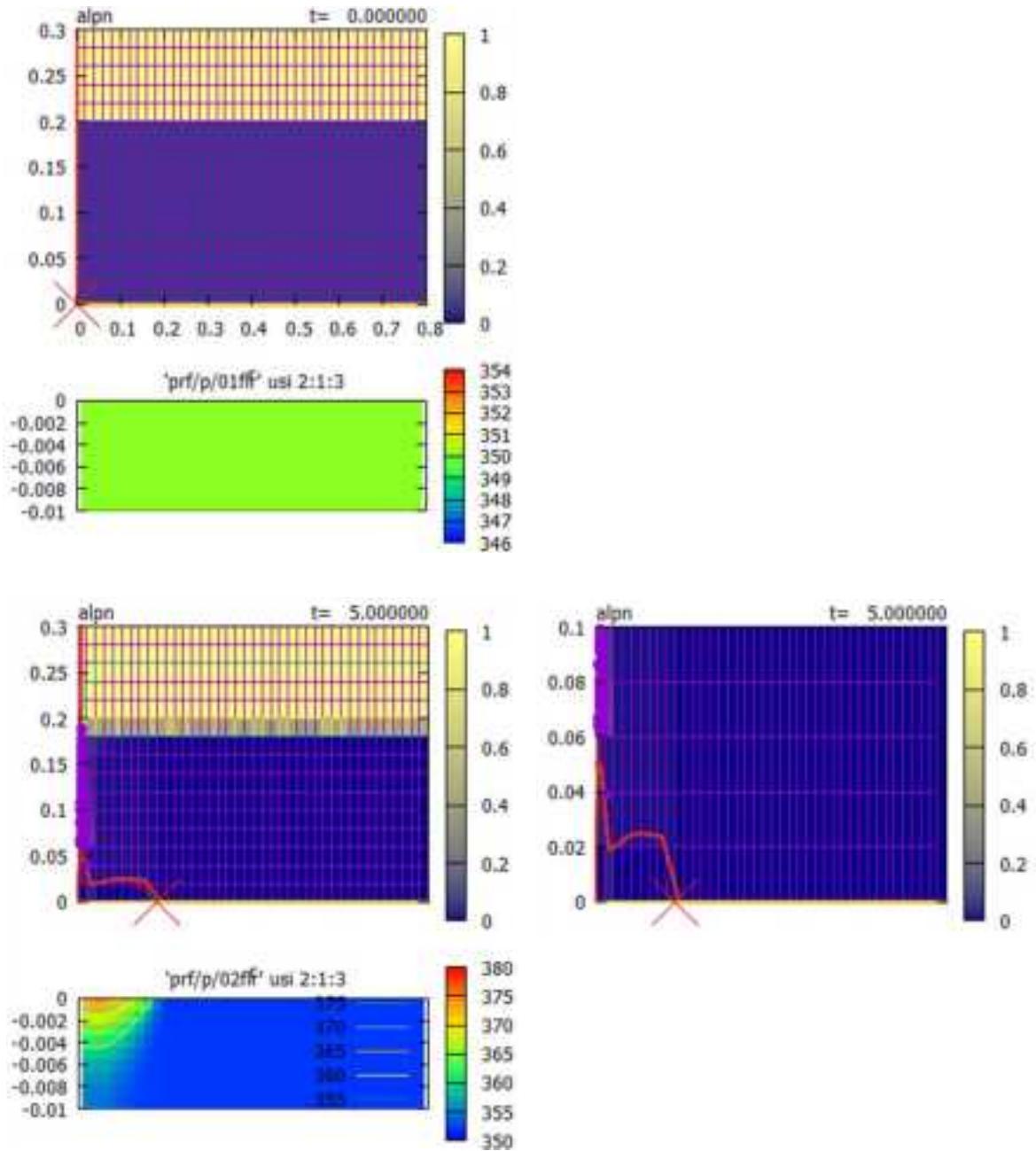


図 B.1.1 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E1 : 0~5 秒)

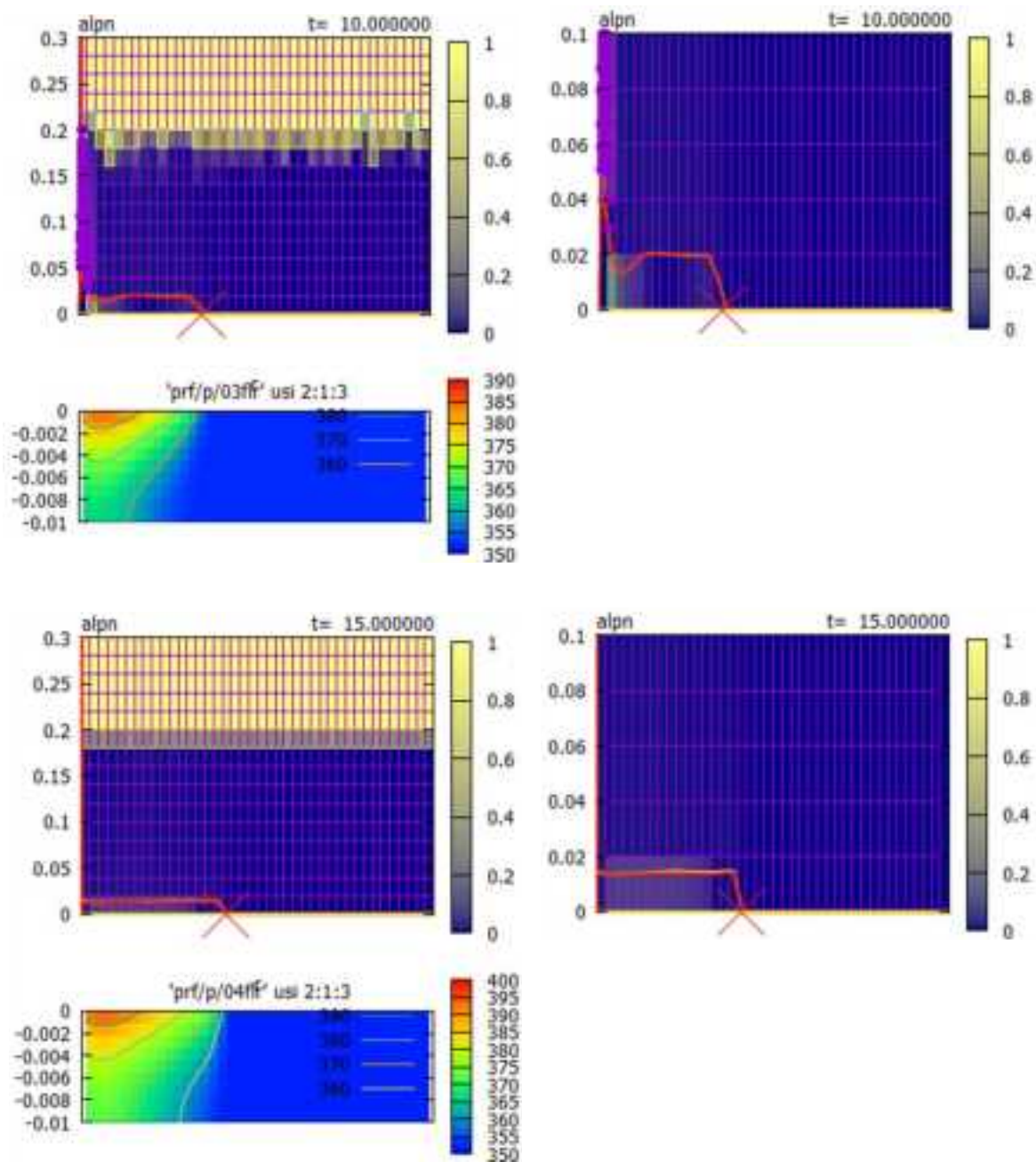


図 B.1.2 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E1 続き : 10~15 秒)

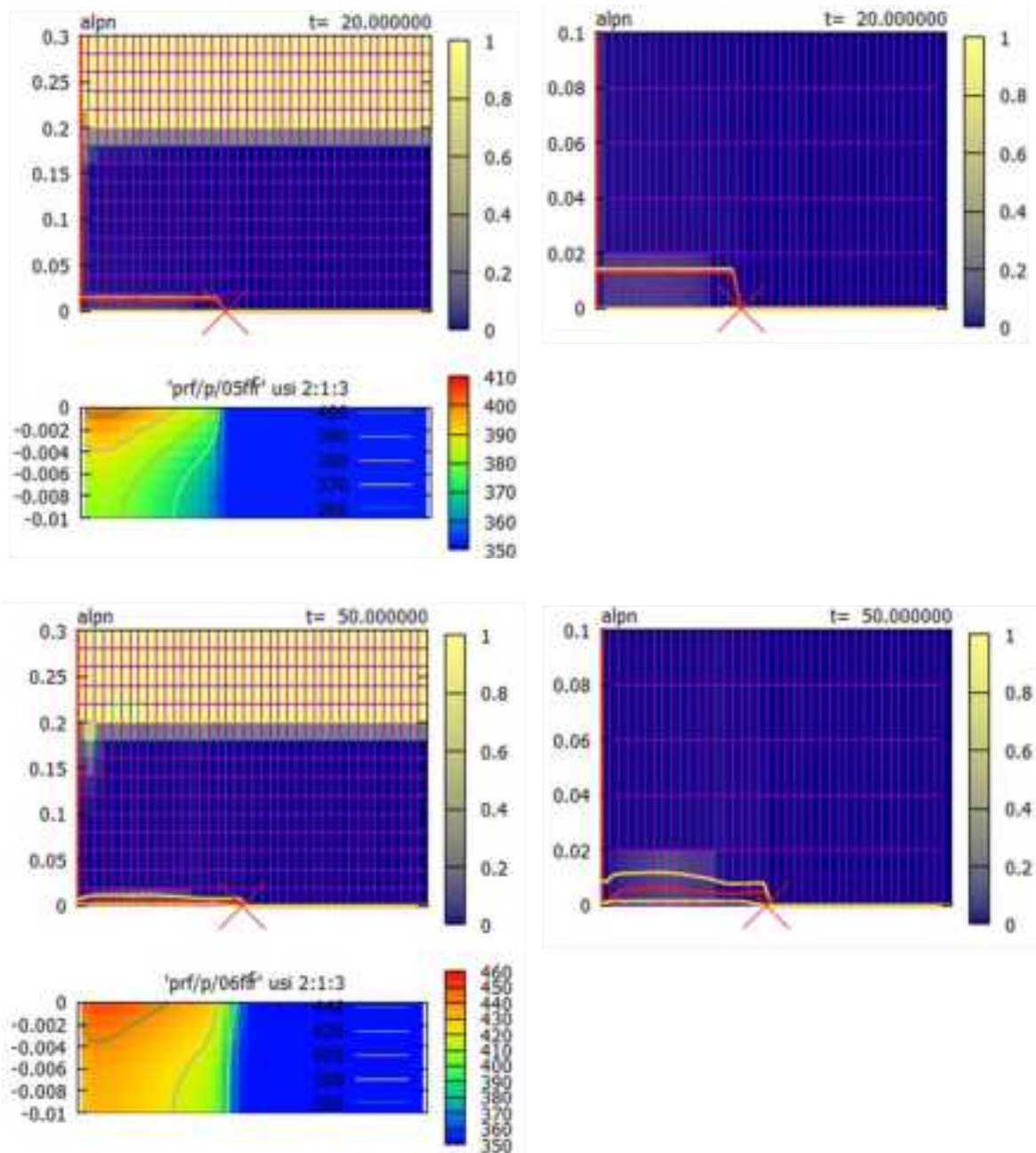


図 B.1.3 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E1 続き : 20~50 秒)

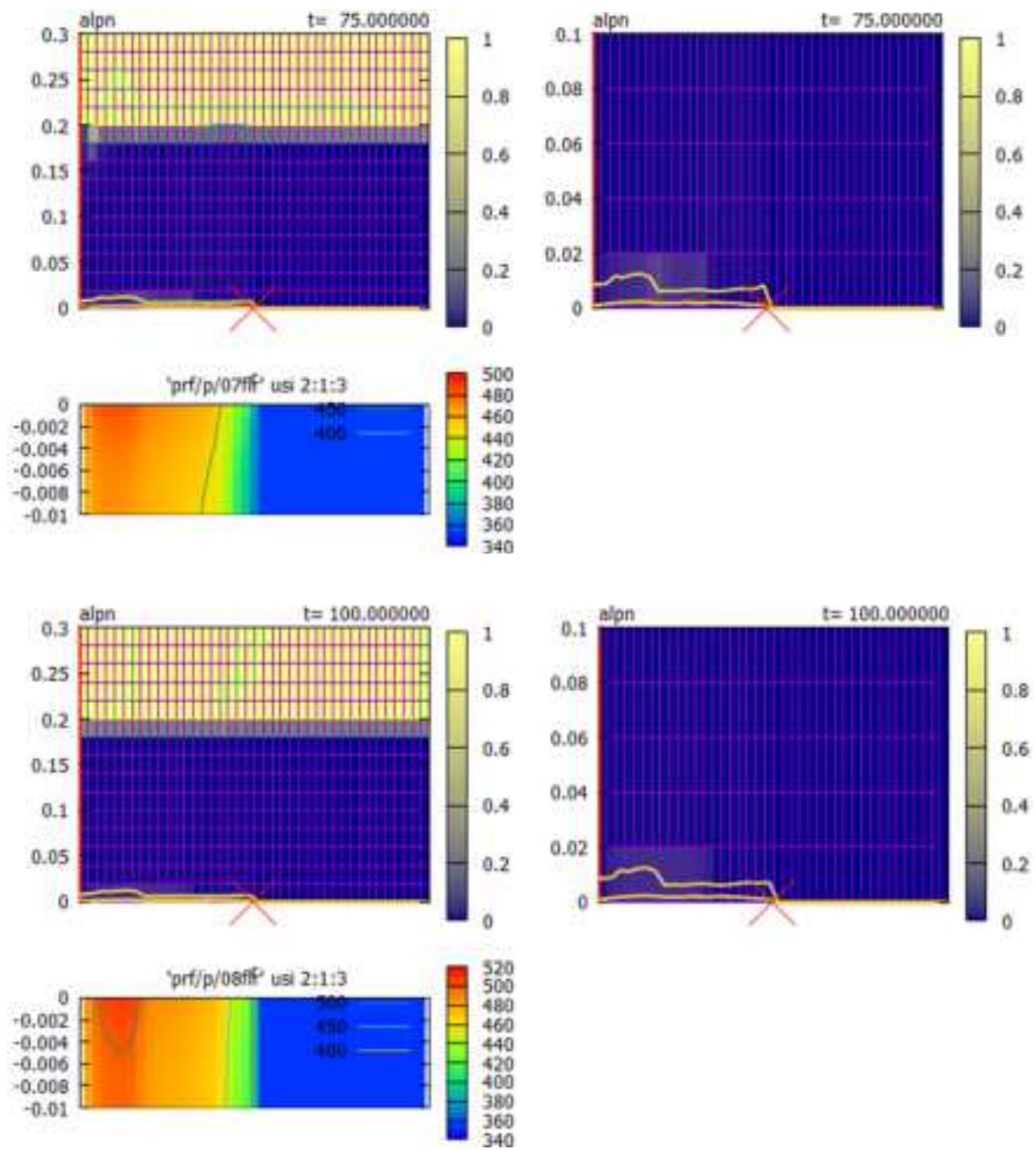


図 B.1.4 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E1 続き : 75~100 秒)

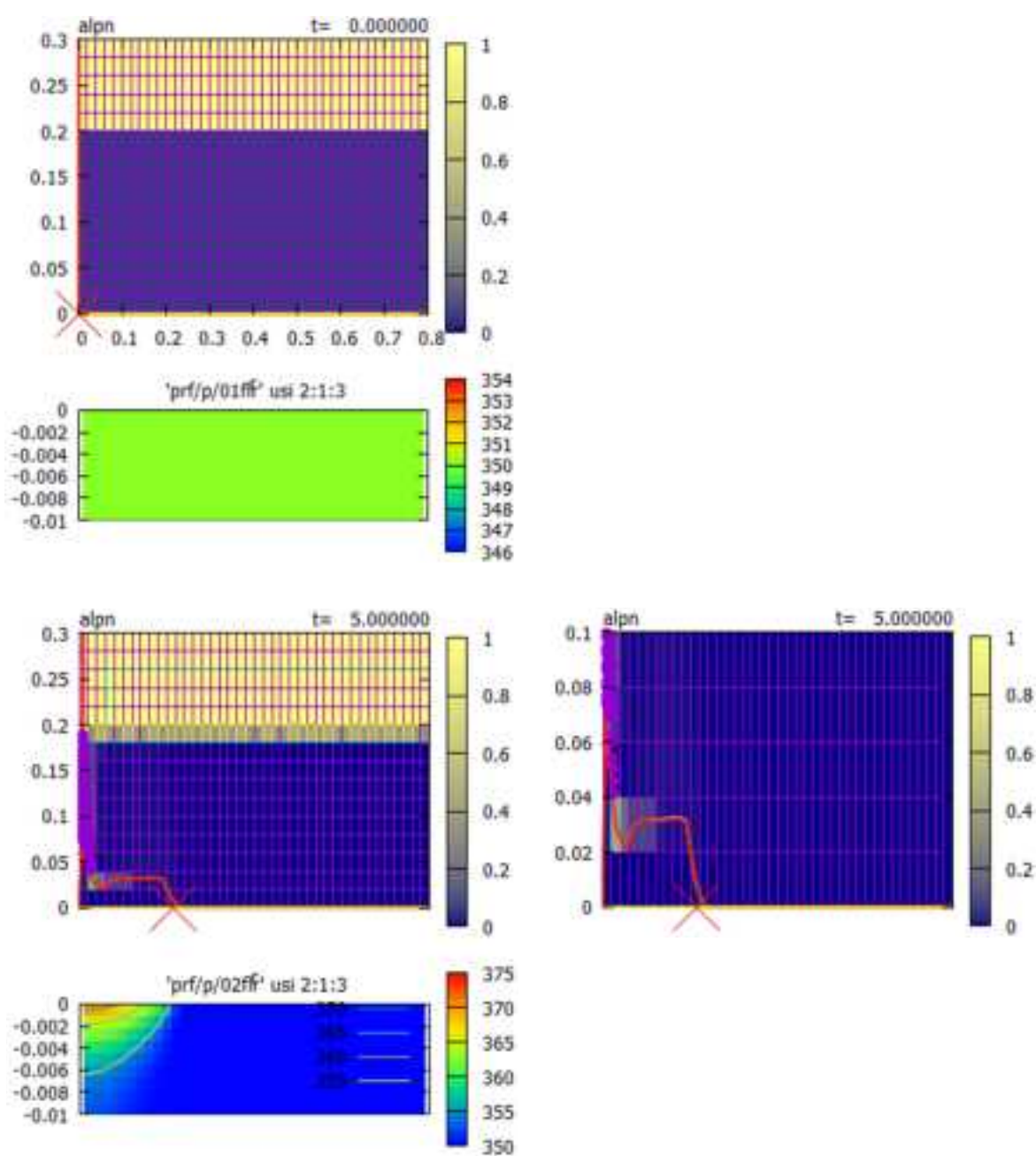


図 B.1.5 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E4 : 0~5 秒)

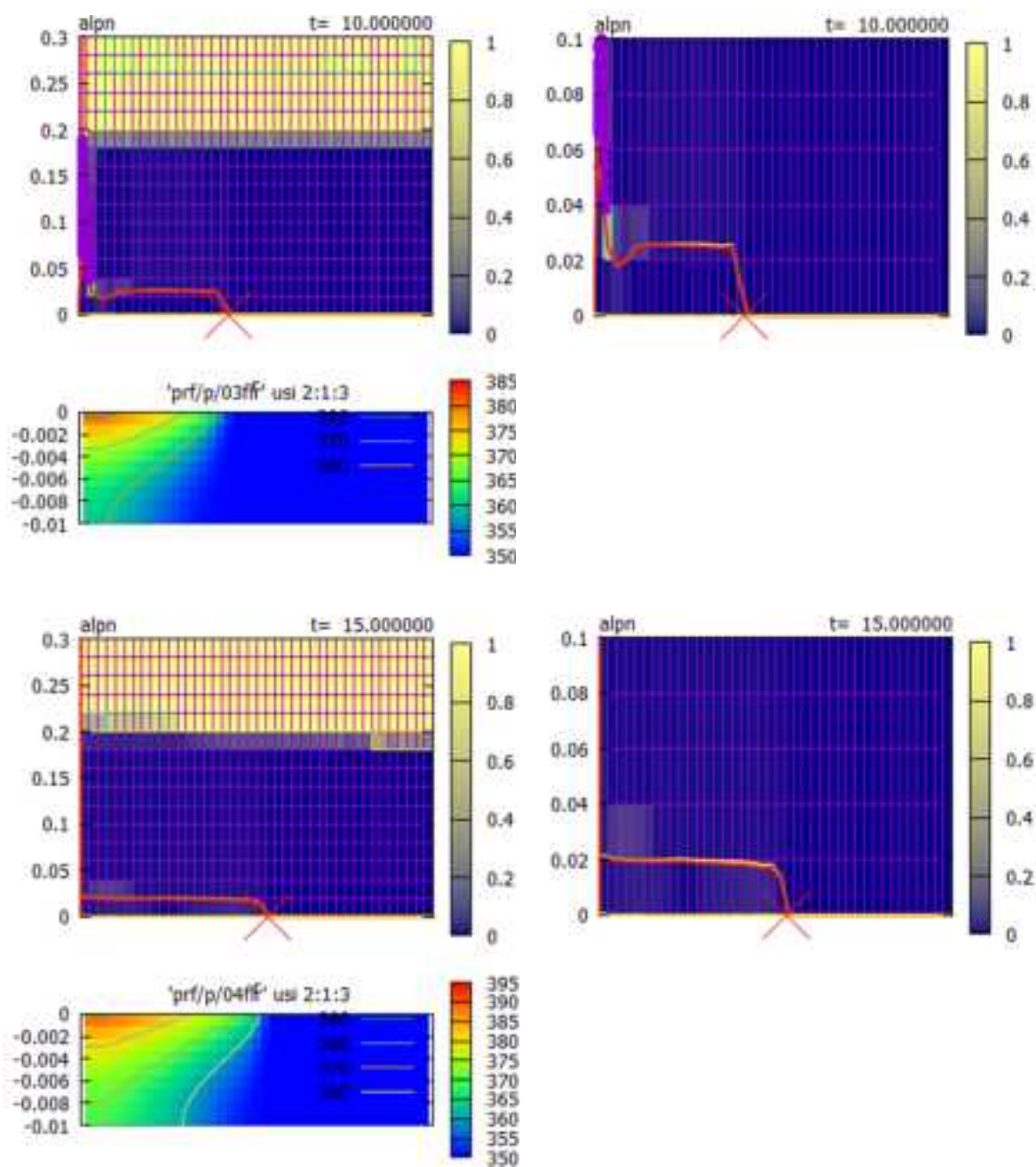


図 B.1.6 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E4 続き : 10~15 秒)

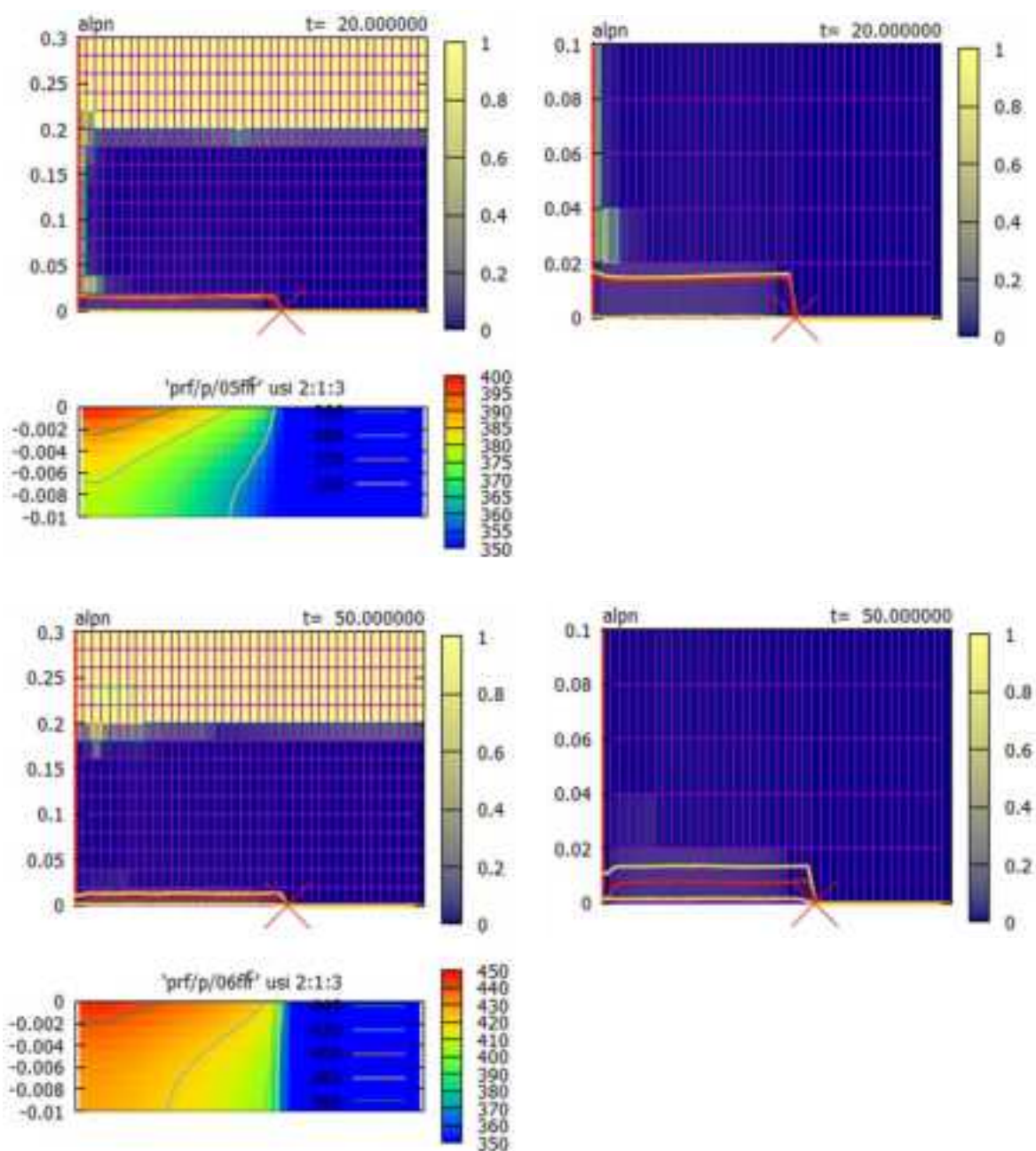


図 B.1.7 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E4 続き : 20~50 秒)

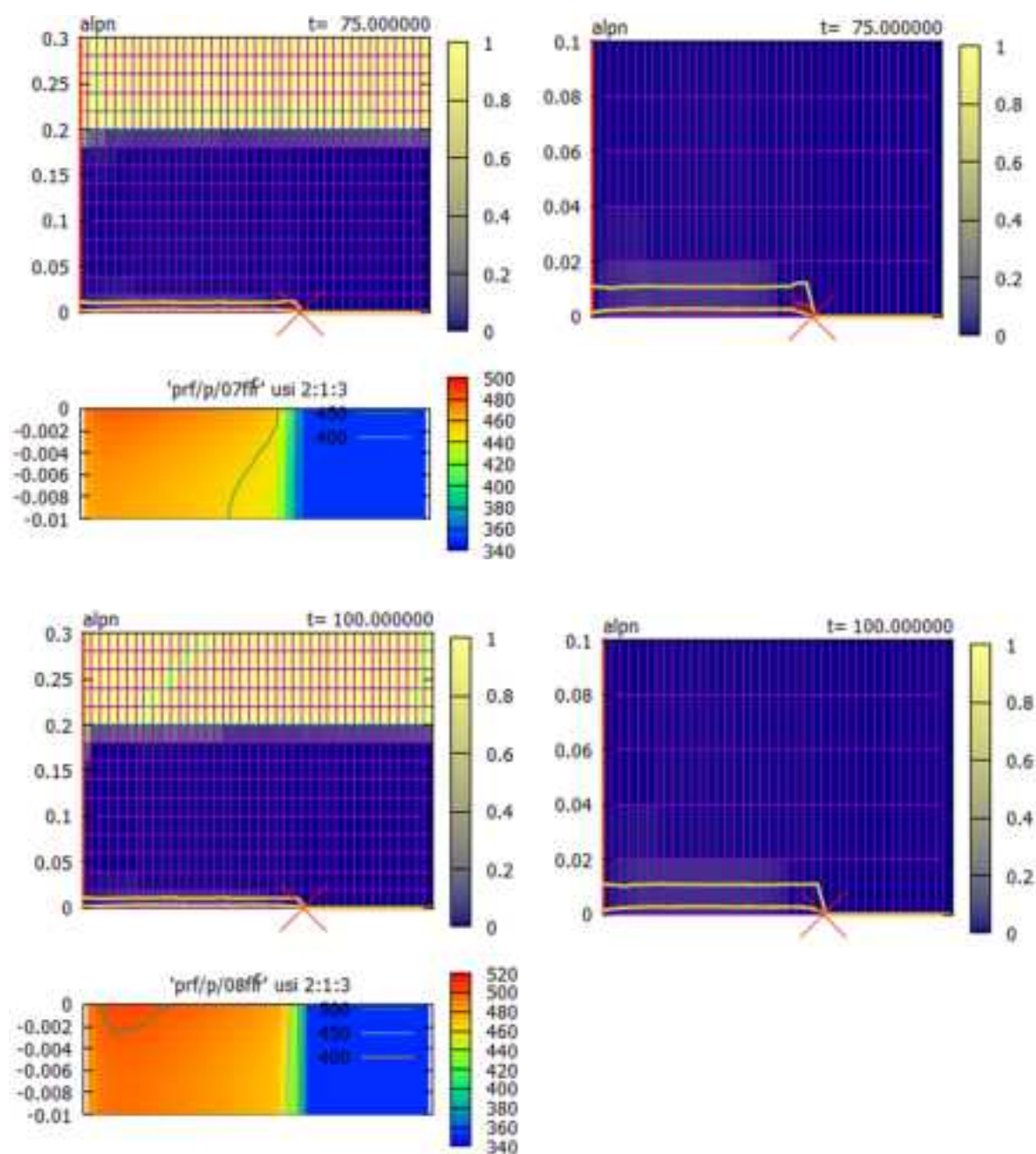


図 B.1.8 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E4 続き : 75~100 秒)

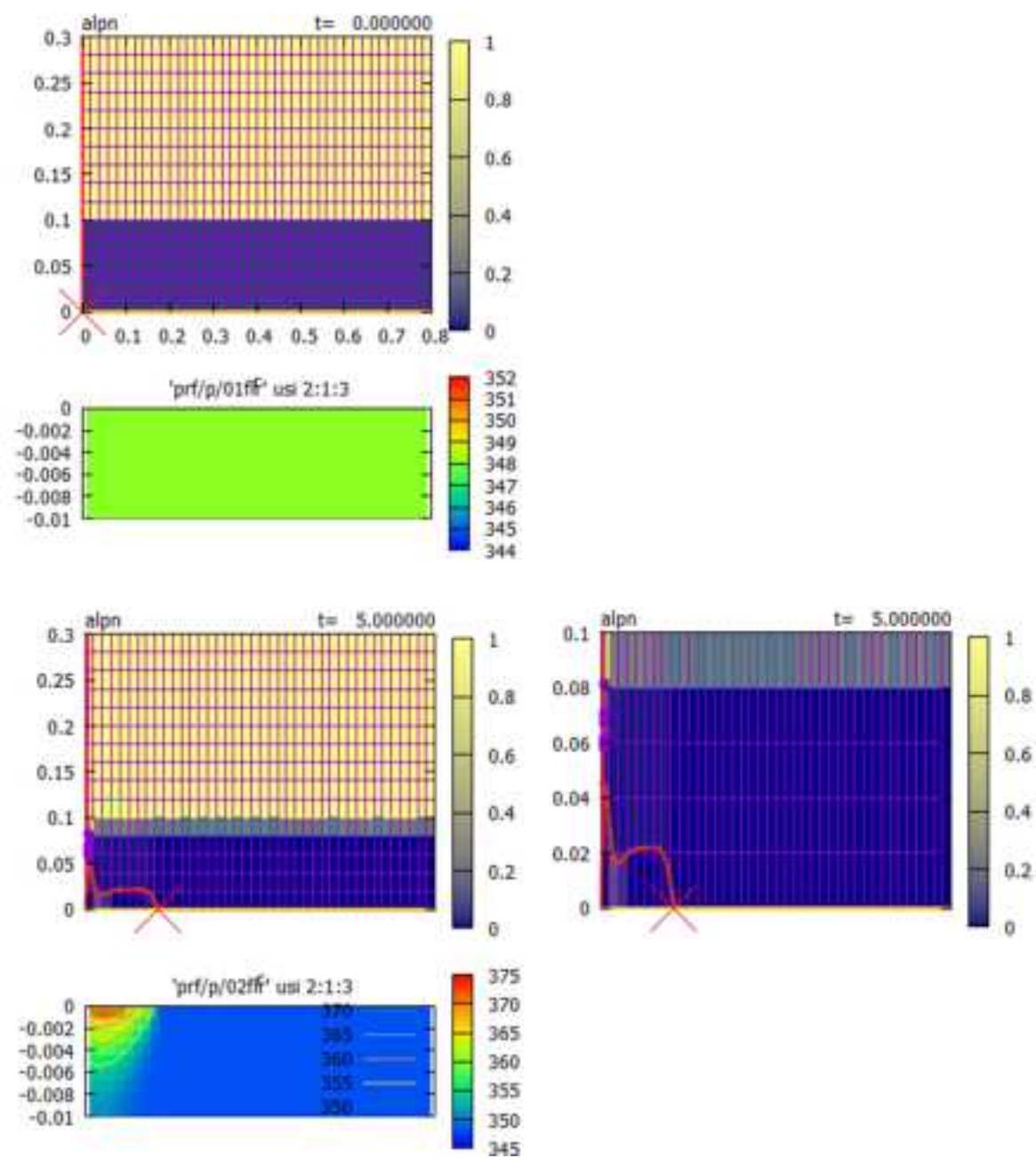


図 B.1.9 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E6 : 0~5 秒)

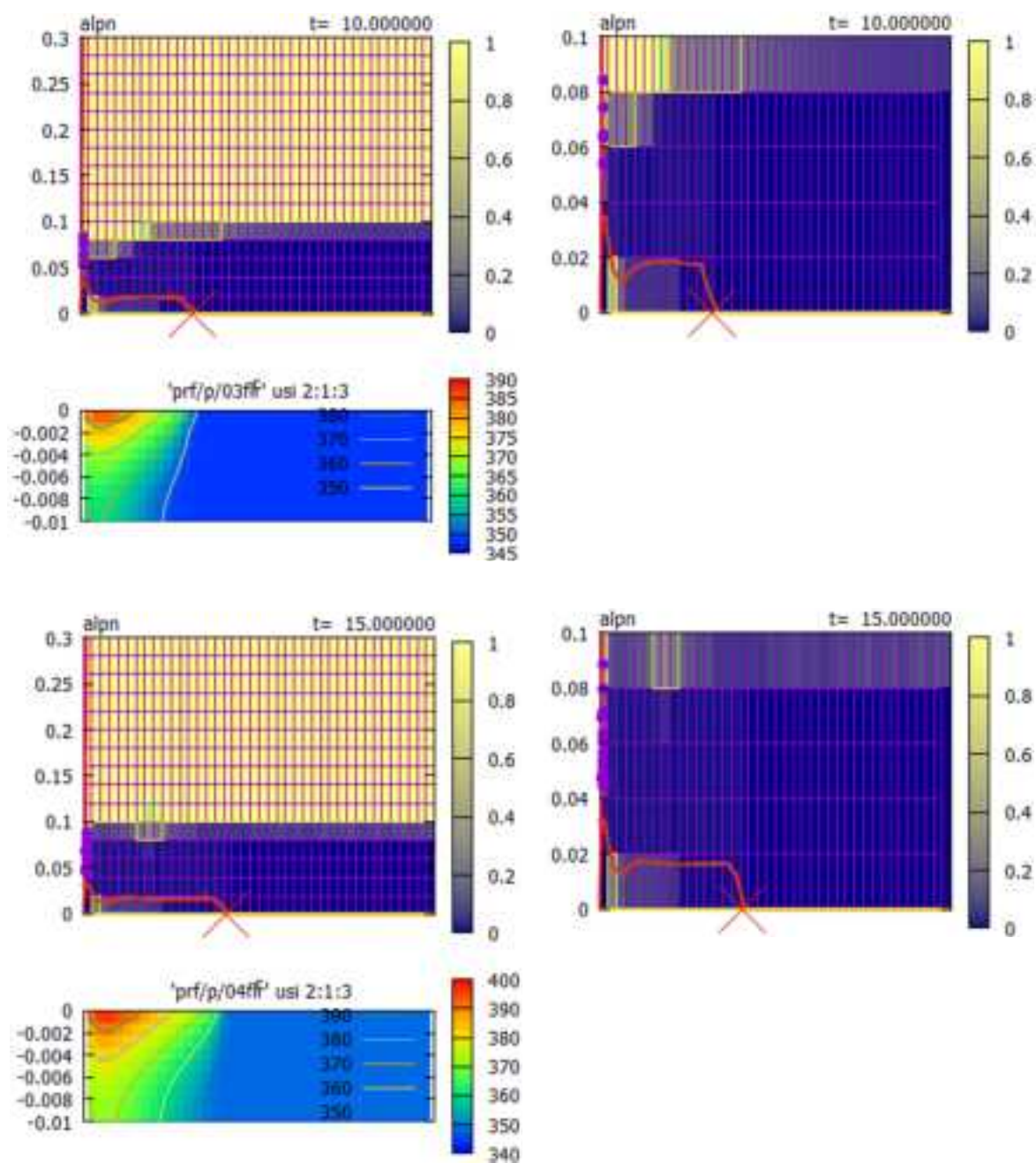


図 B.1.10 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E6 続き : 10~15 秒)

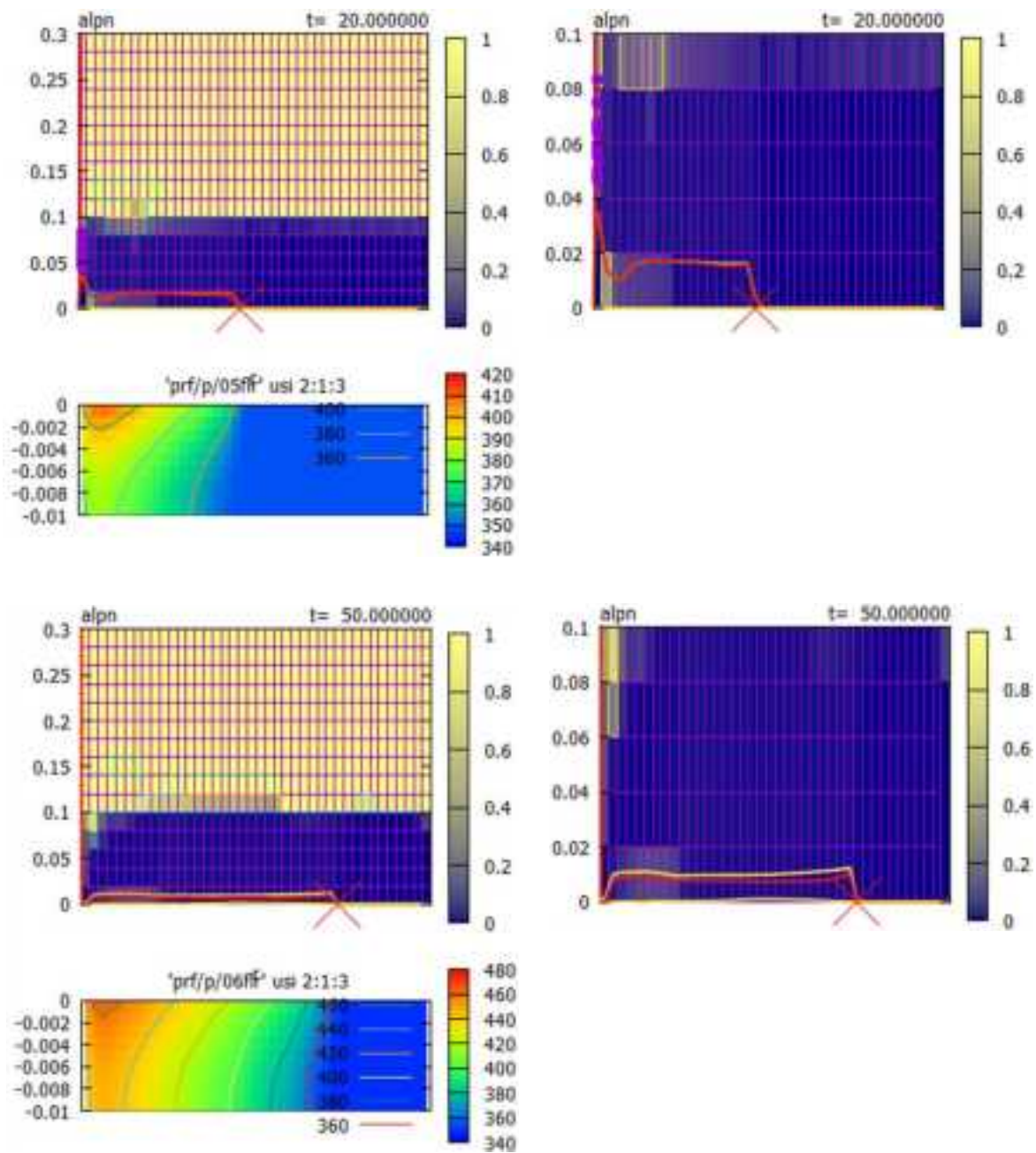


図 B.1.11 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E6 続き : 20~50 秒)

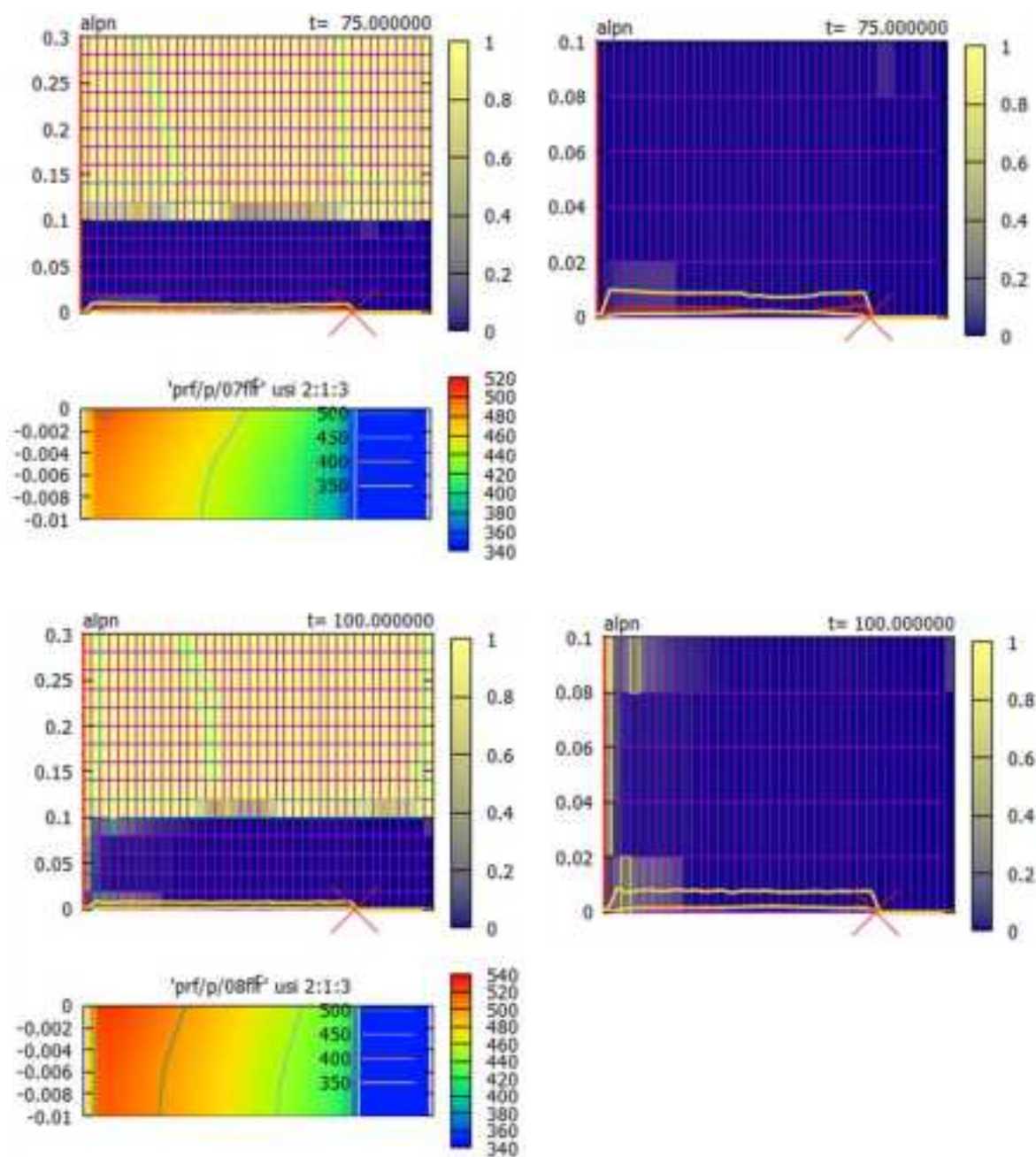


図 B.1.12 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E6 続き : 75~100 秒)

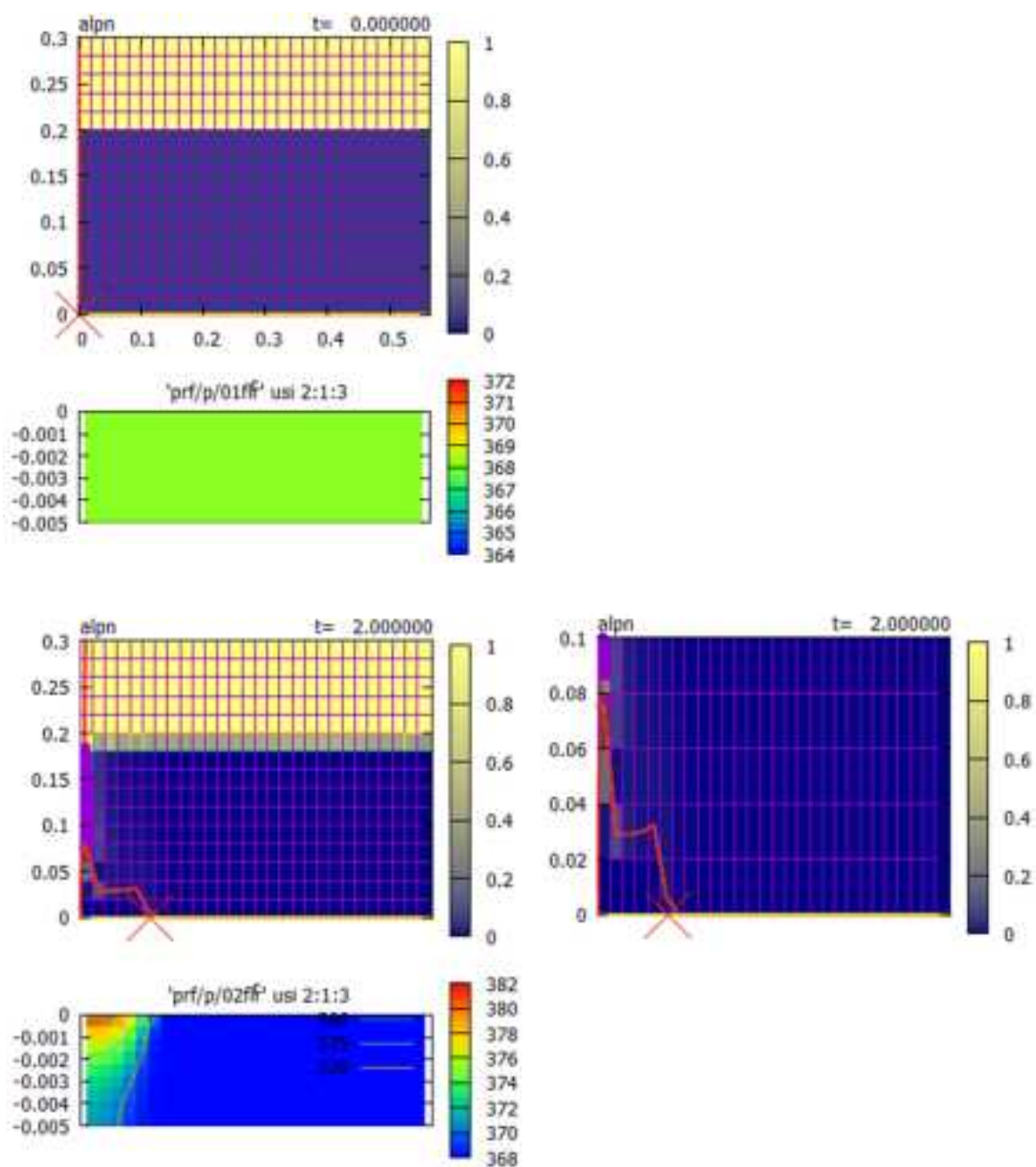


図 B.1.13 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E7 : 0~2 秒)

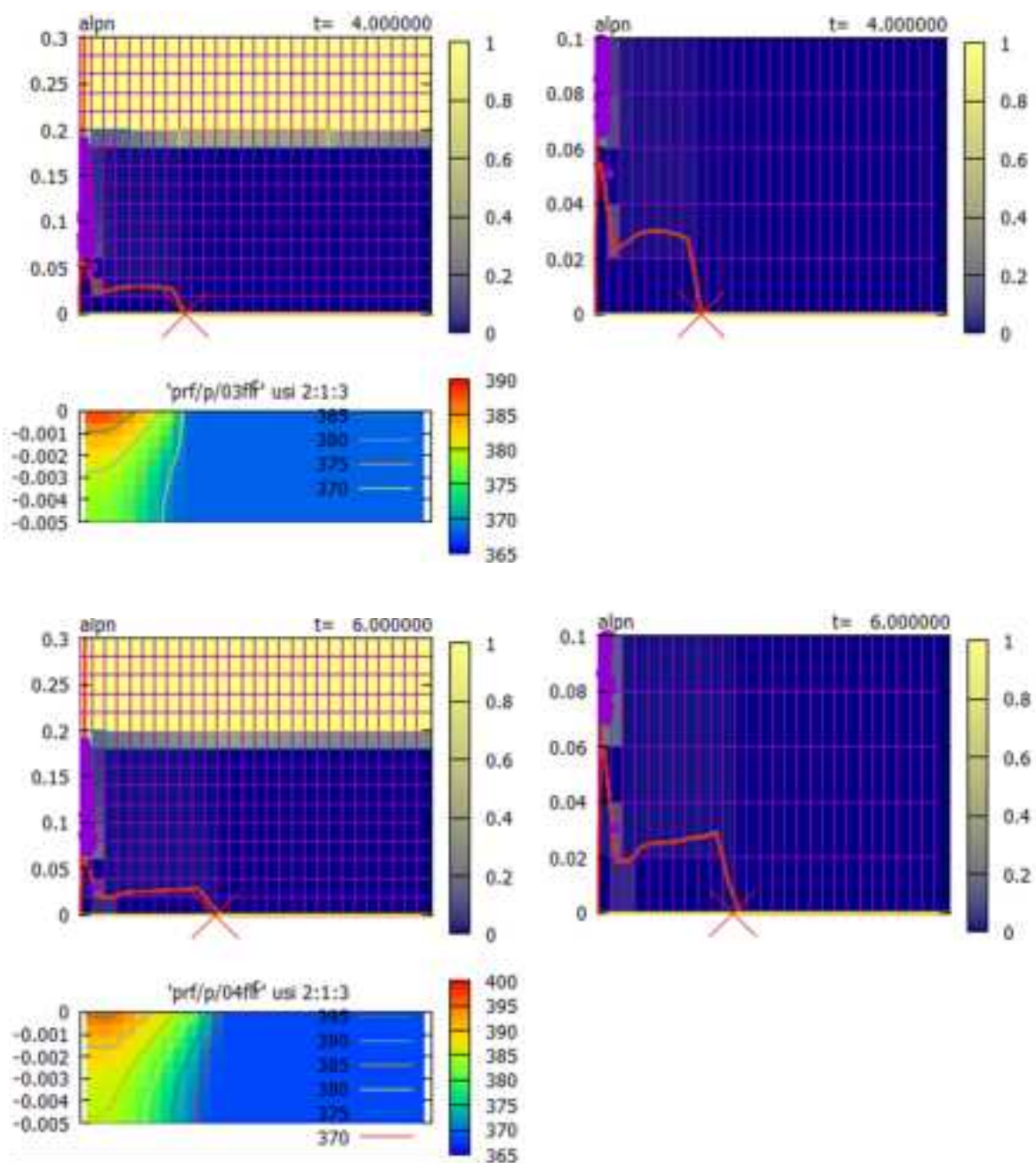


図 B.1.14 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E7 続き : 4~6 秒)

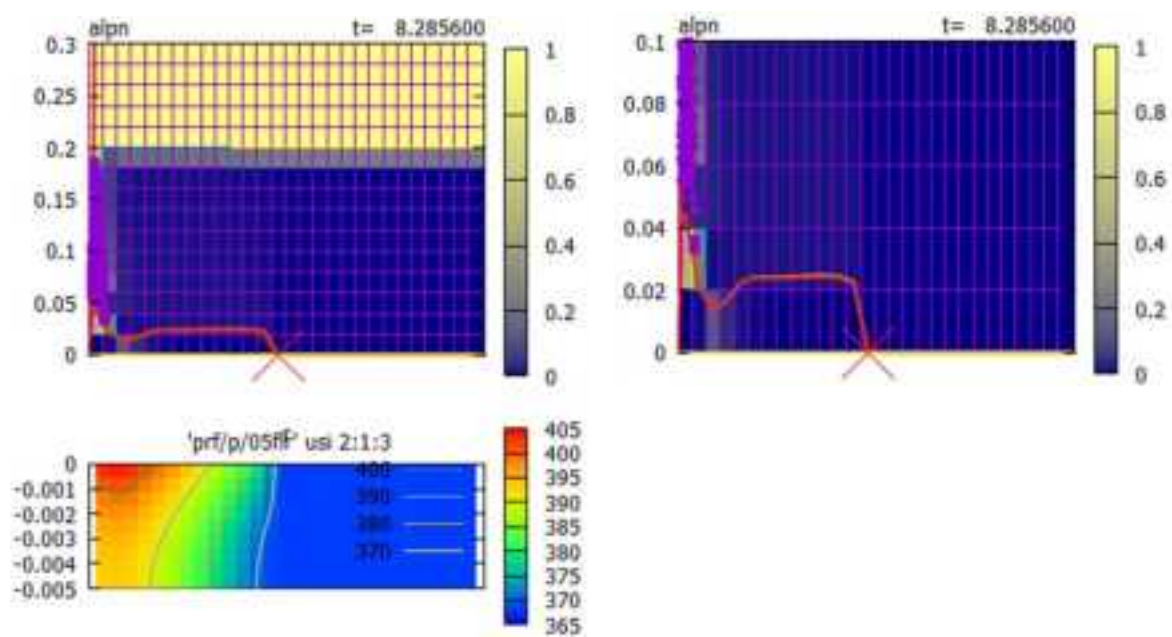


図 B.1.15 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E7 続き : 8.2856 秒)

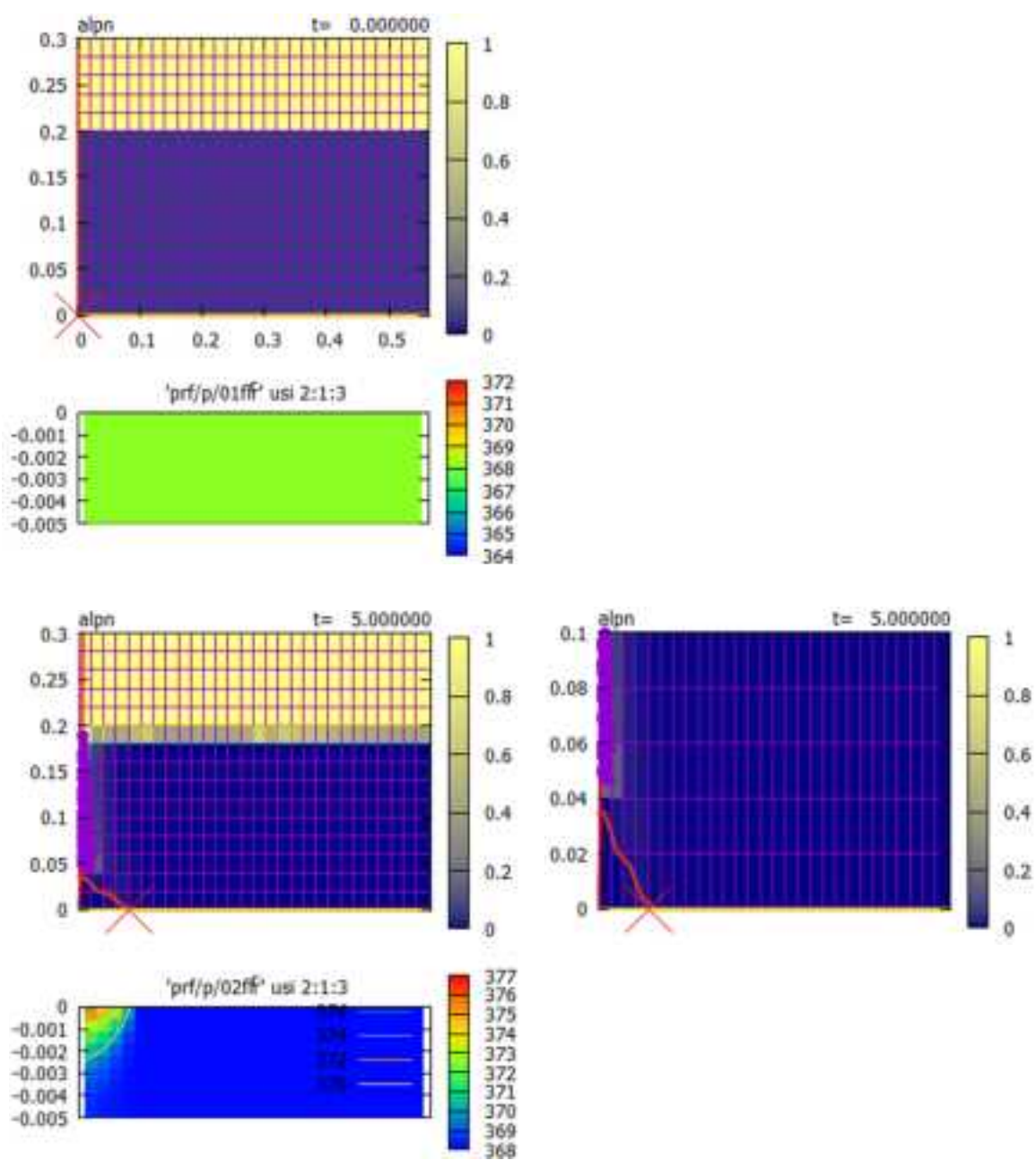


図 B.1.16 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E8 : 0~5 秒)

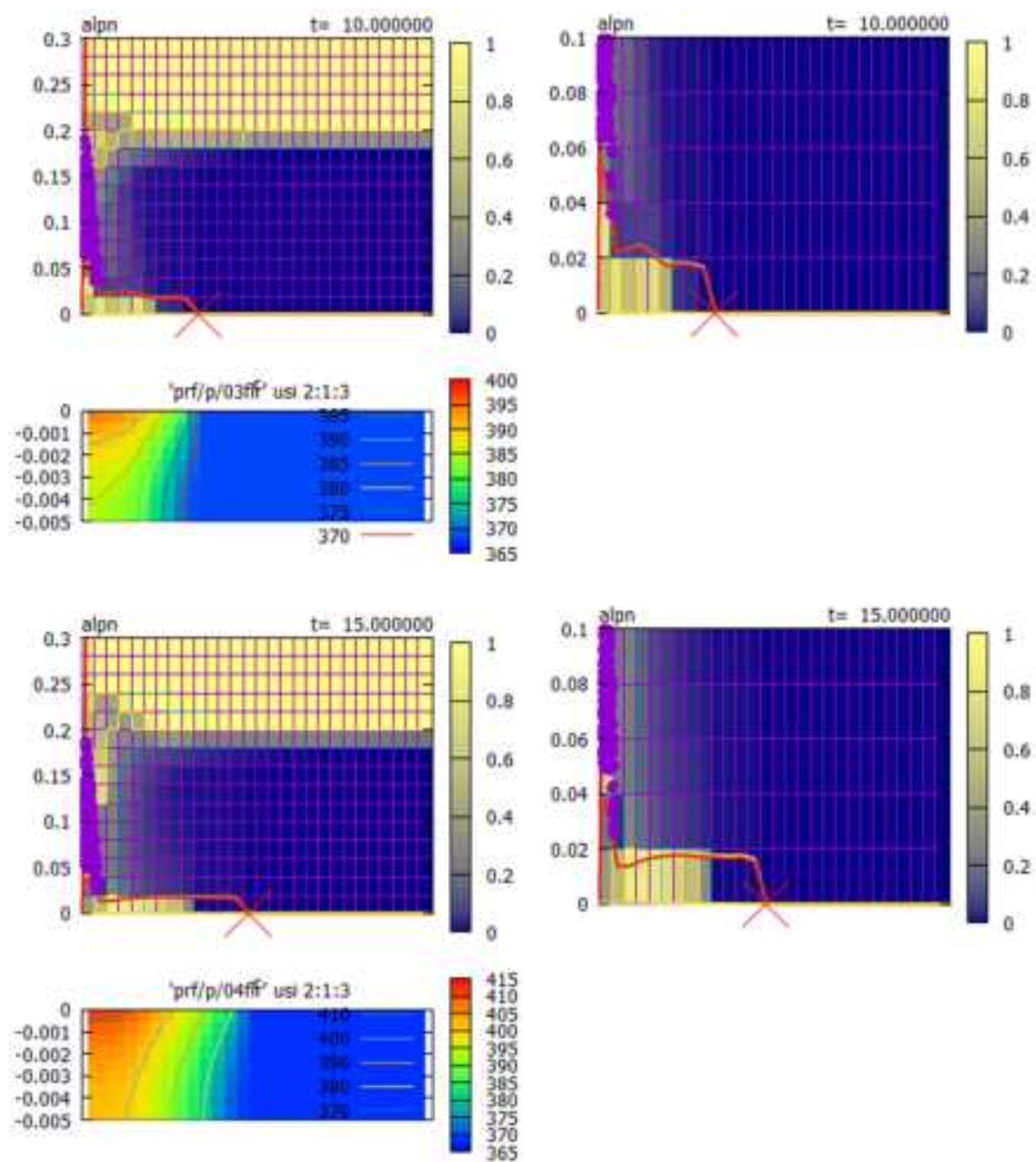


図 B.1.17 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E8 続き : 10~15 秒)

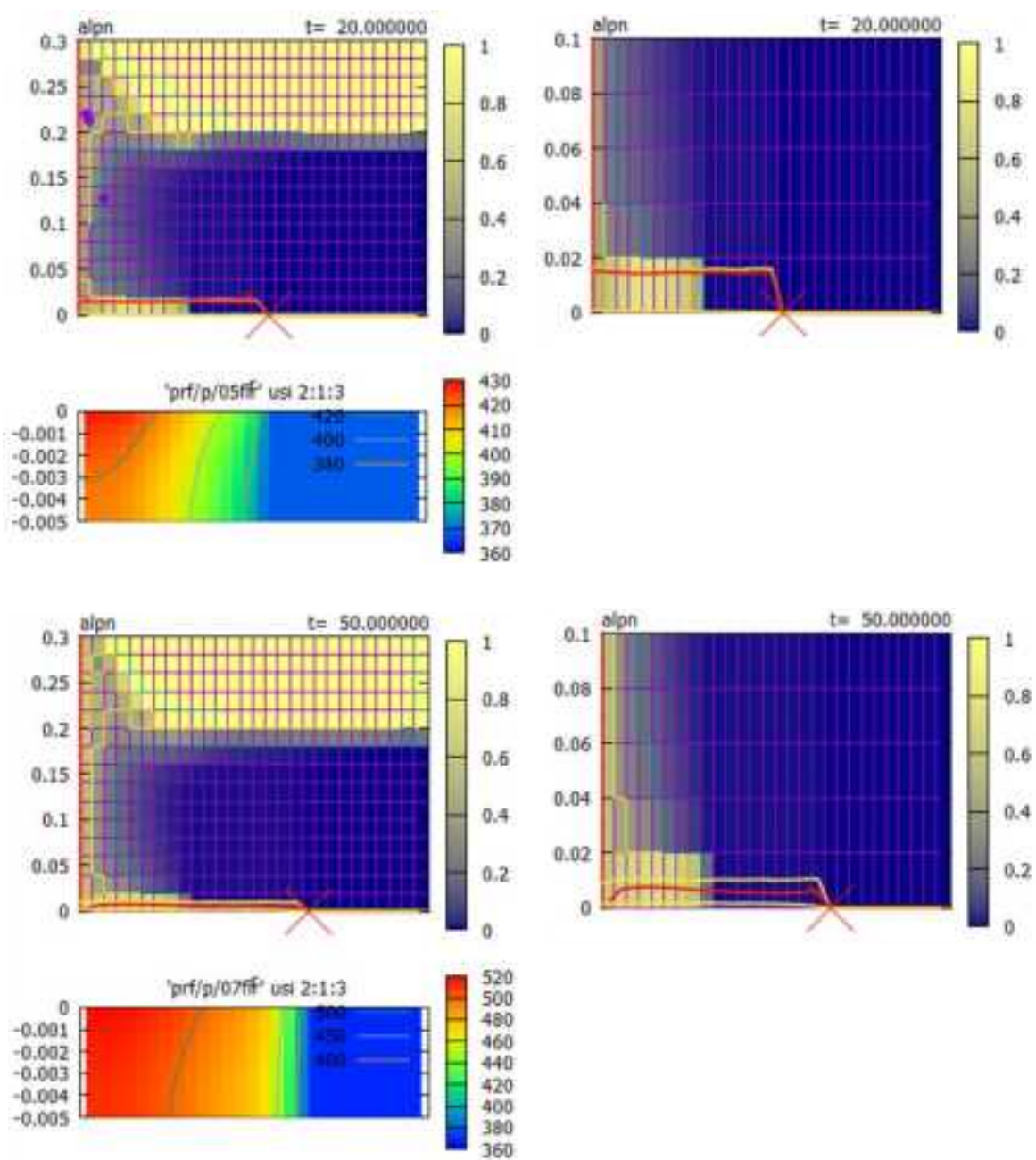


図 B.1.18 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E8 続き : 20~50 秒)

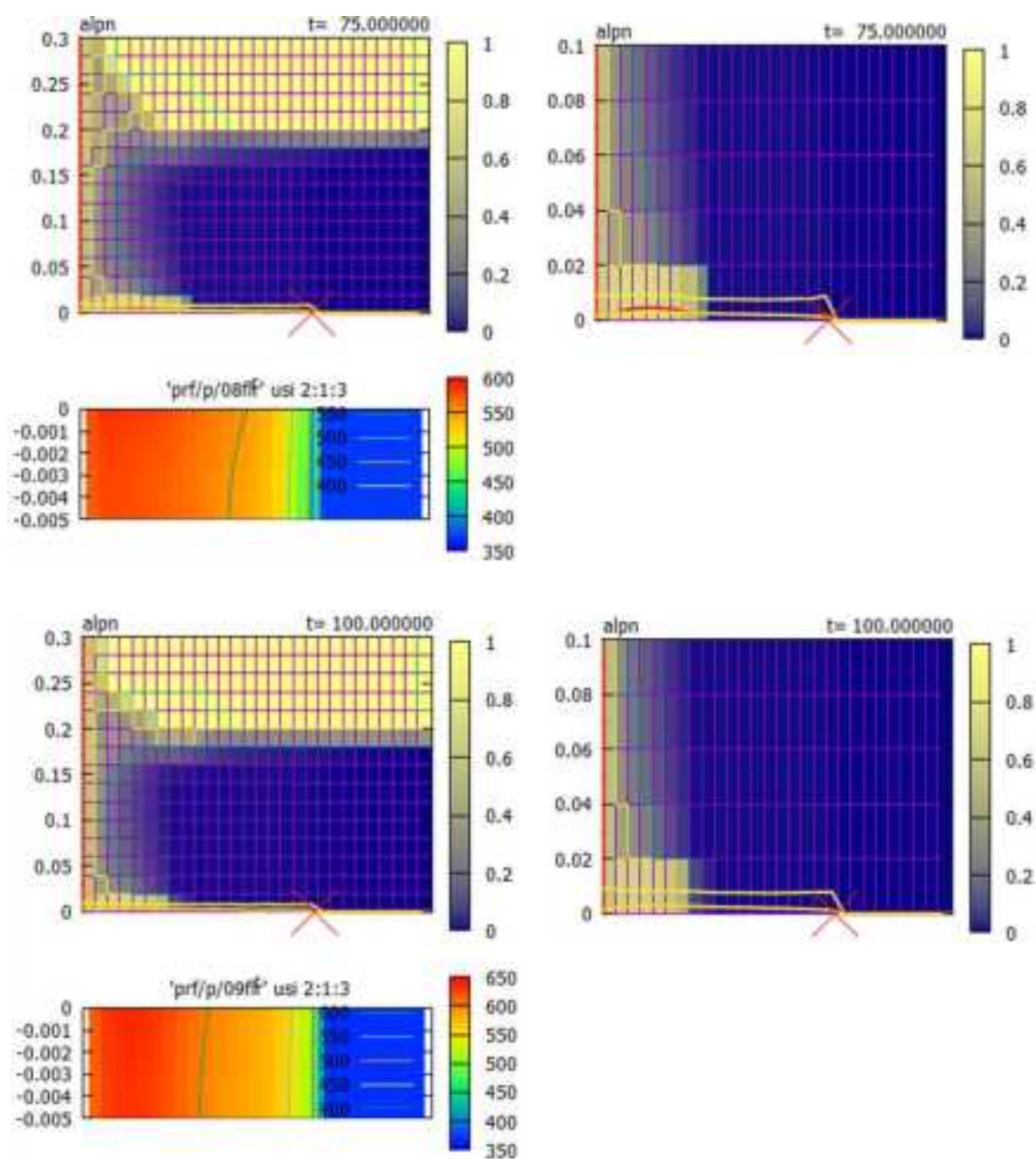


図 B.1.19 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E8 続き : 75~100 秒)

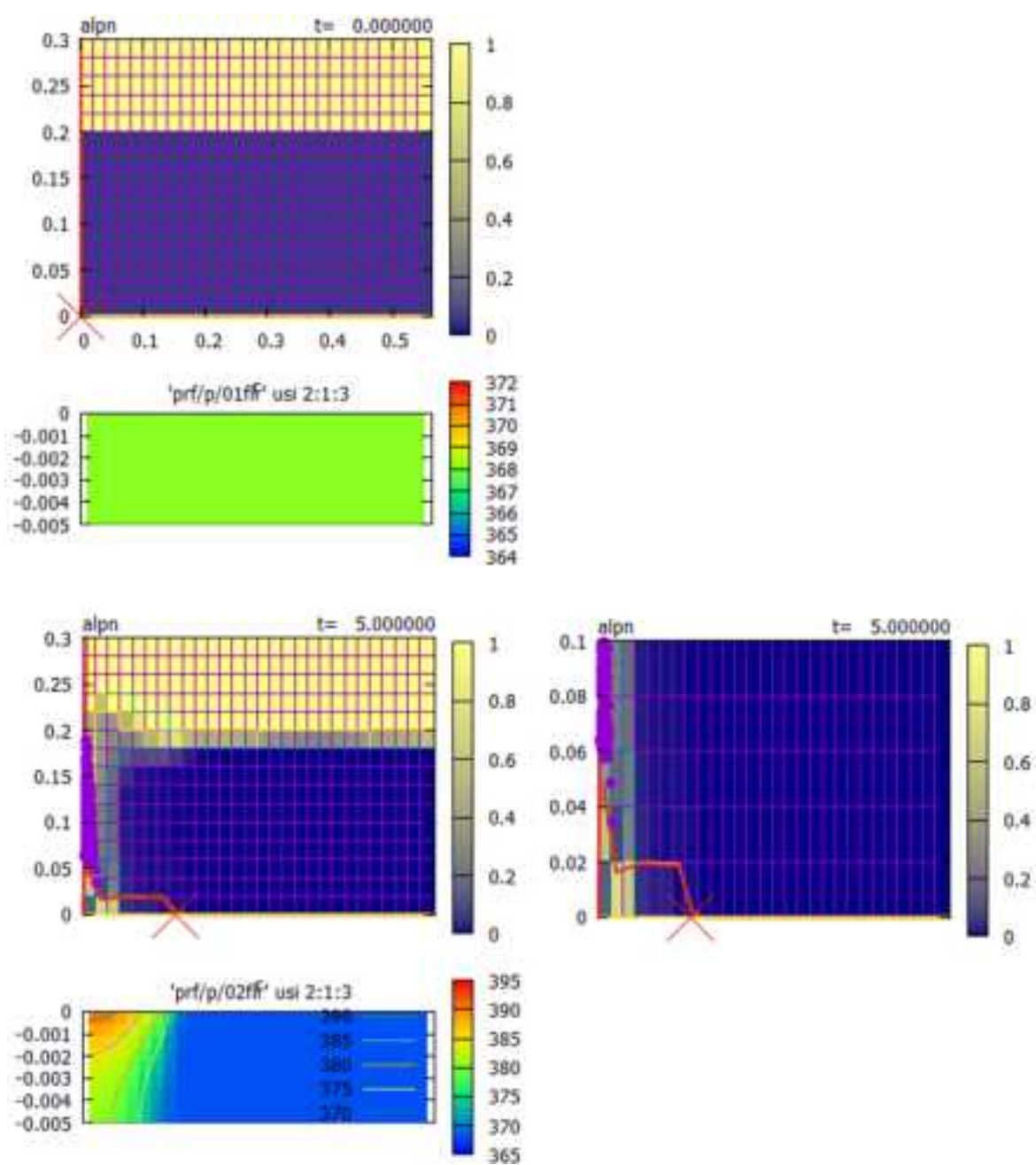


図 B.1.20 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E9 : 0~5 秒)

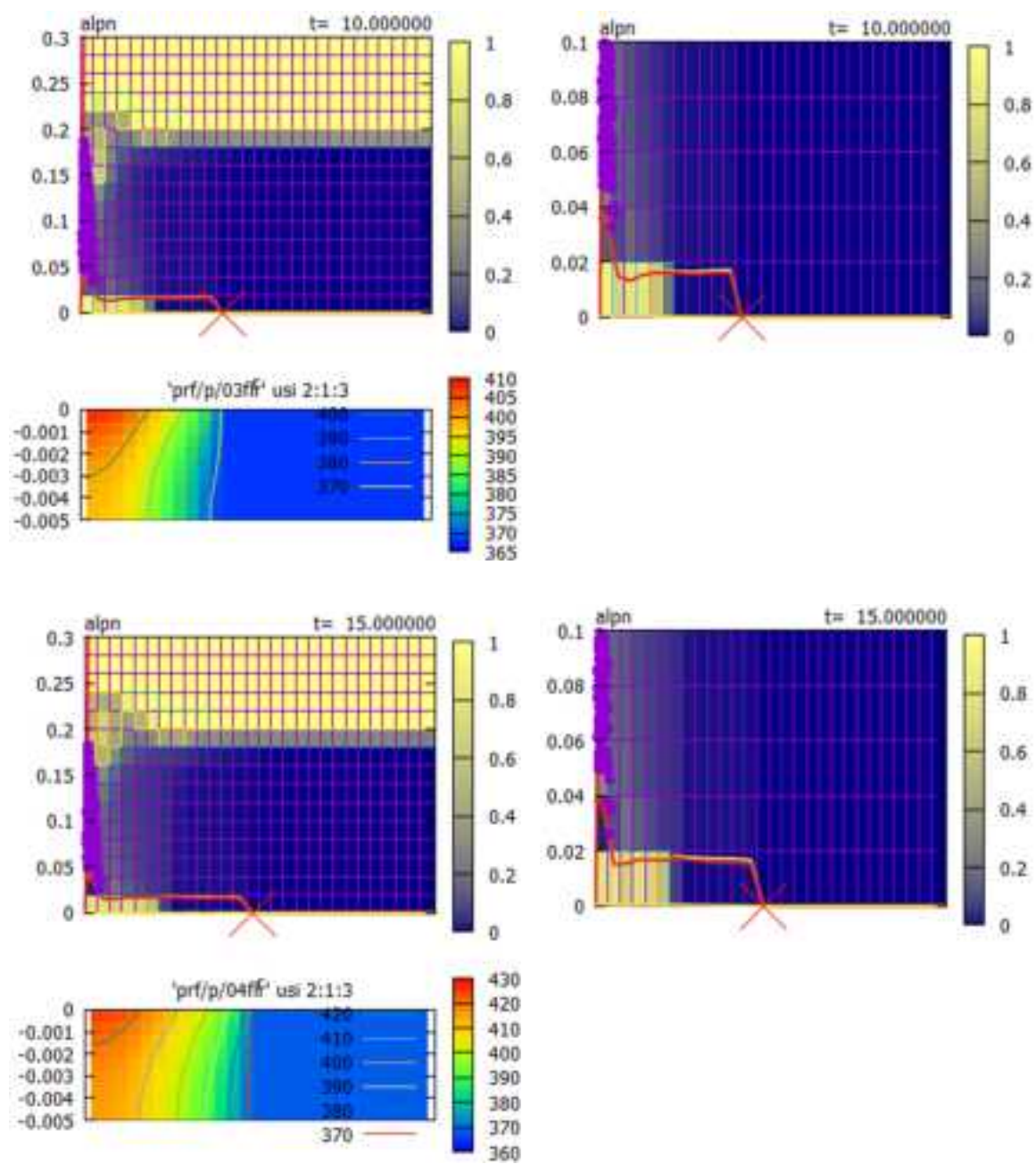


図 B.1.21 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E9 続き : 10~15 秒)

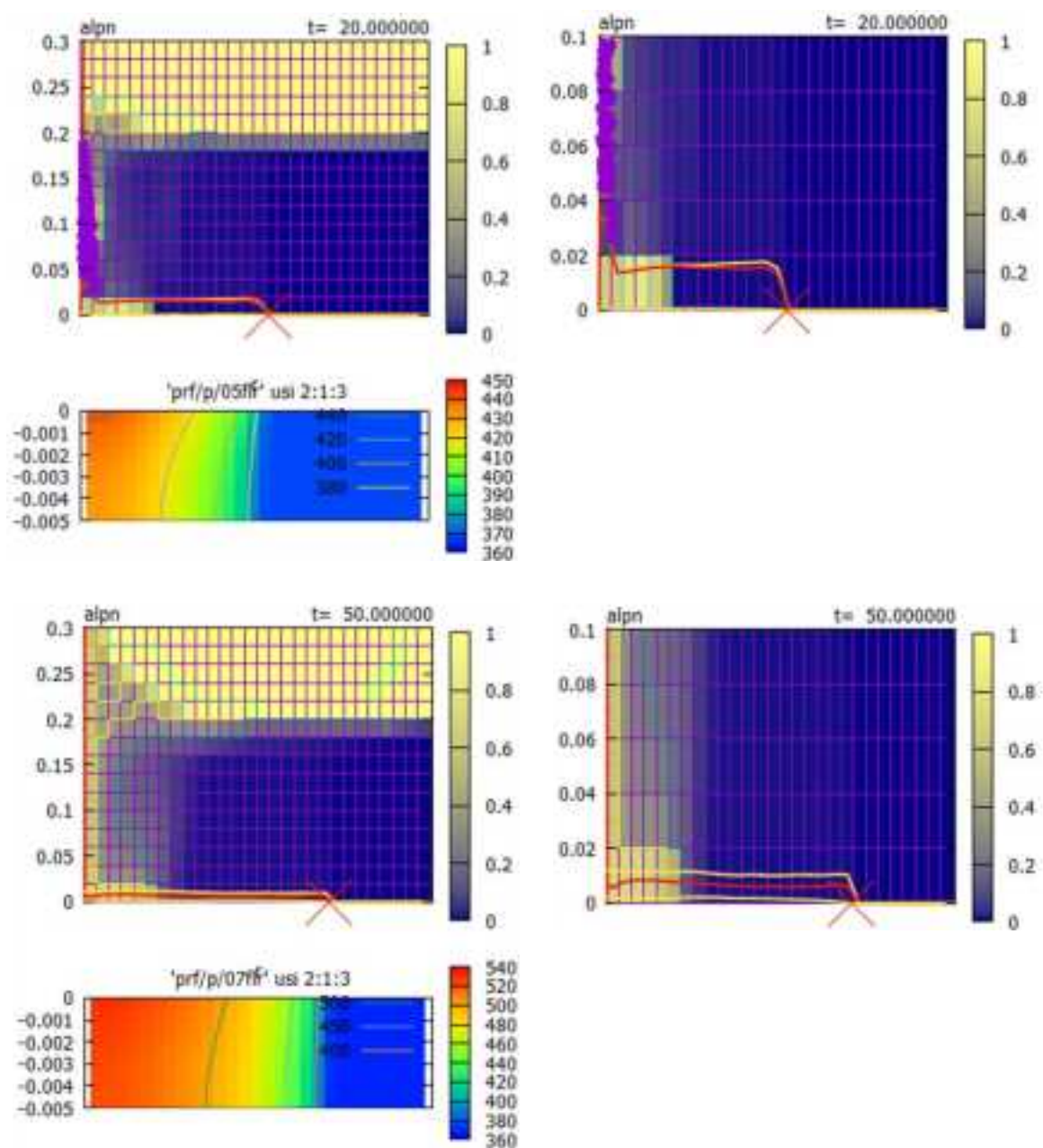


図 B.1.22 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E9 続き : 20~50 秒)

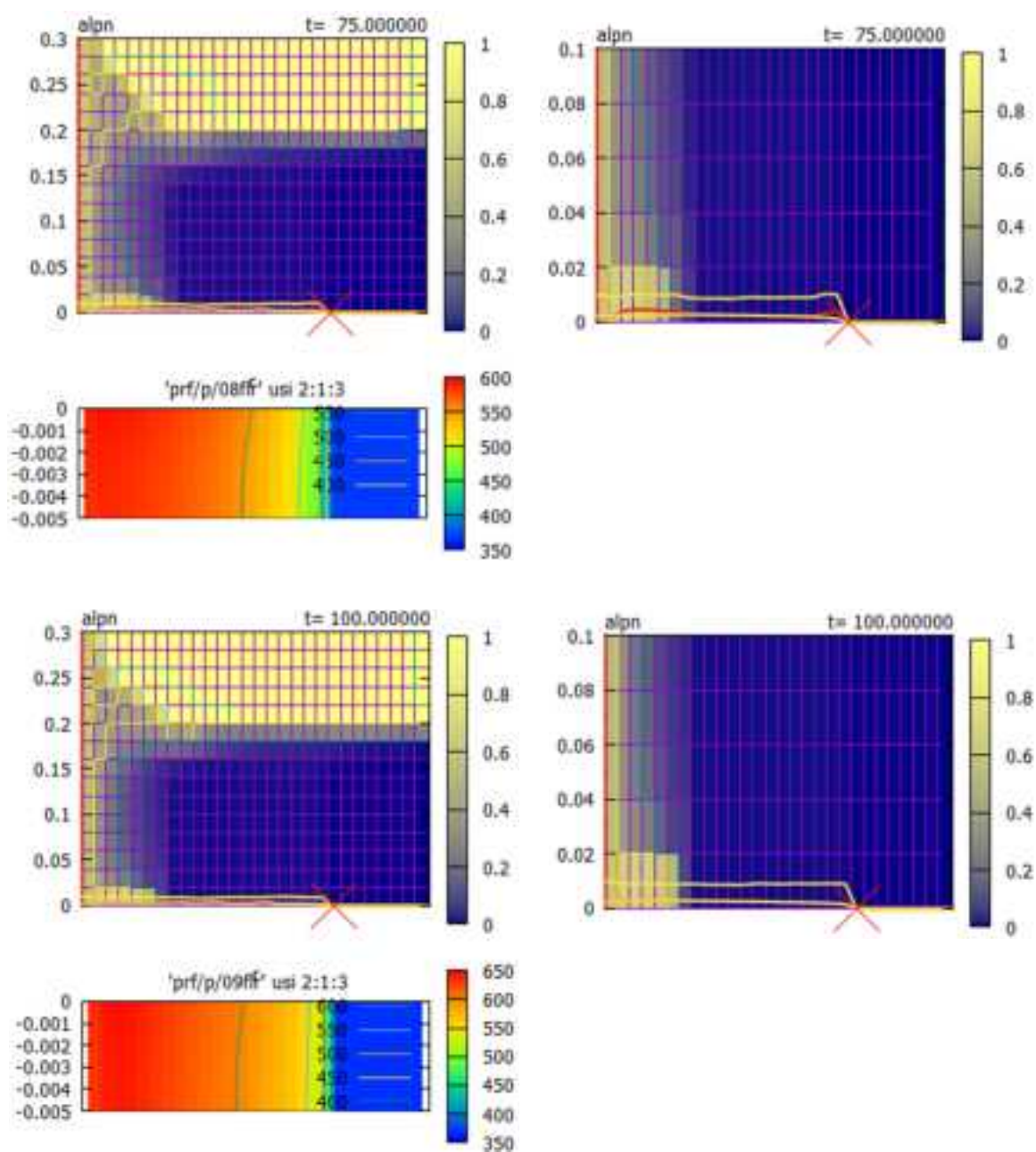


図 B.1.23 溶融物と水プールの状況 (PULiMS 実験 E9 続き : 75~100 秒)

### B.1.2 クラスト厚さの変化

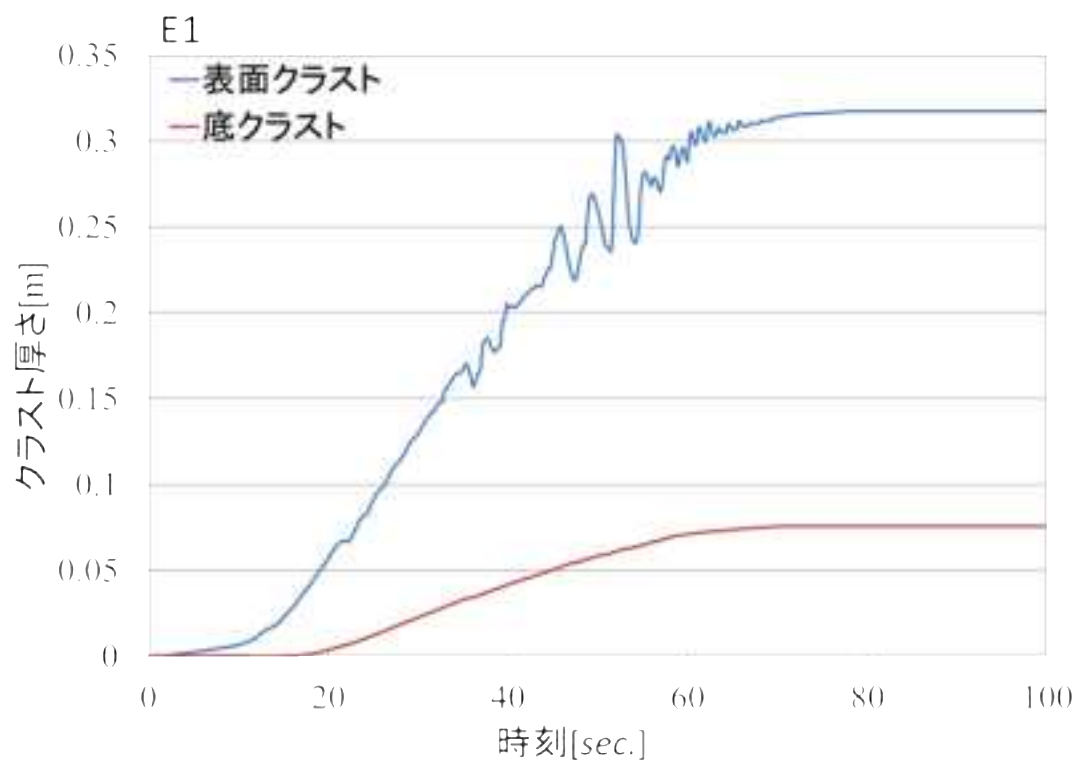


図 B.1.24 クラスト厚さの変化の計算結果 (PULiMS 実験 E1)

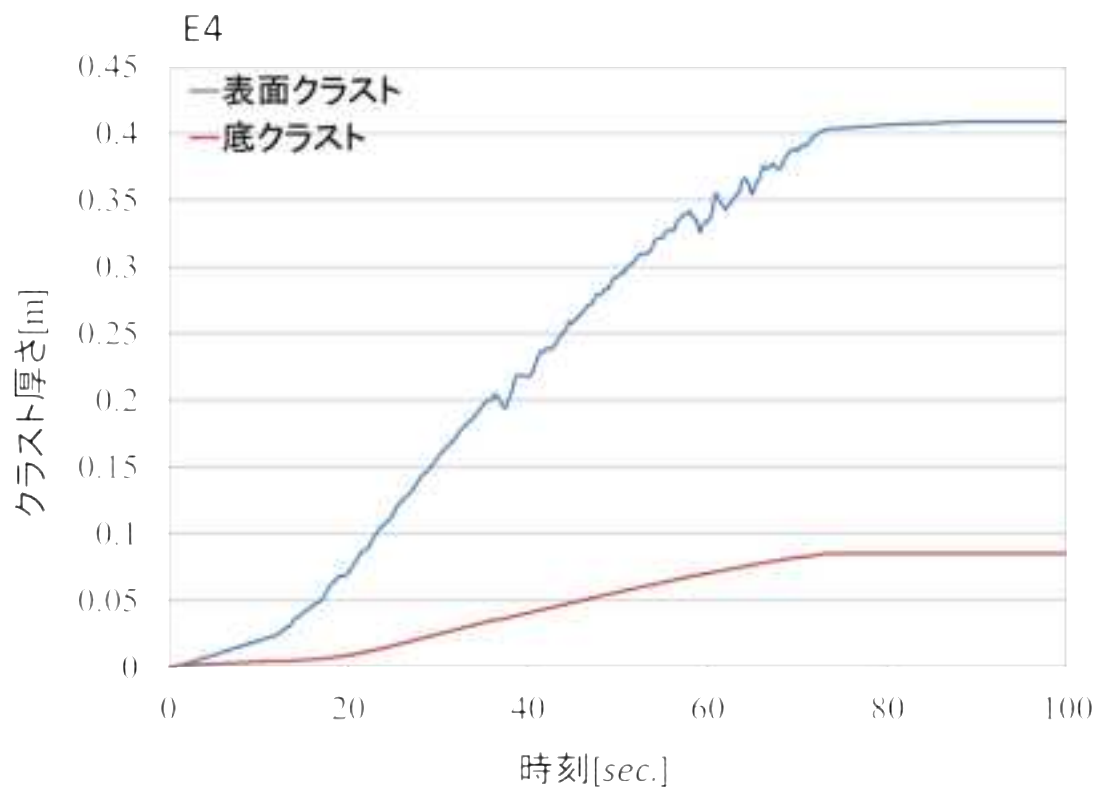


図 B.1.25 クラスト厚さの変化の計算結果 (PULiMS 実験 E4)

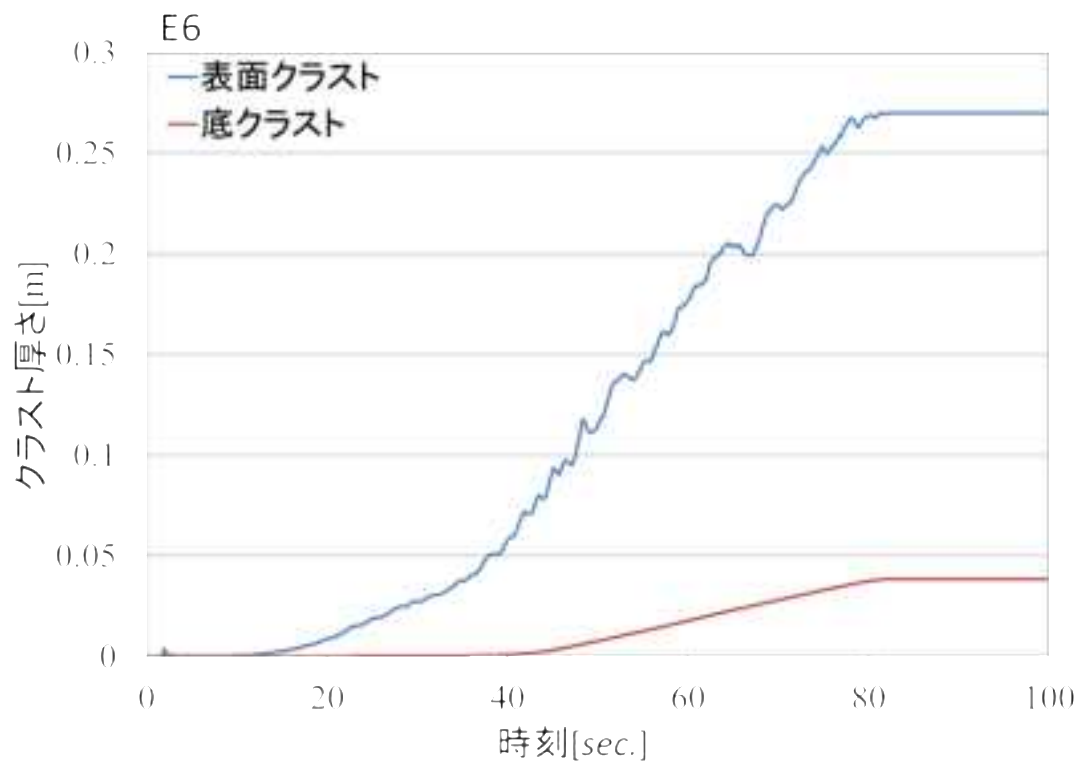


図 B.1.26 クラスト厚さの変化の計算結果 (PULiMS 実験 E6)



図 B.1.27 クラスト厚さの変化の計算結果 (PULiMS 実験 E7)

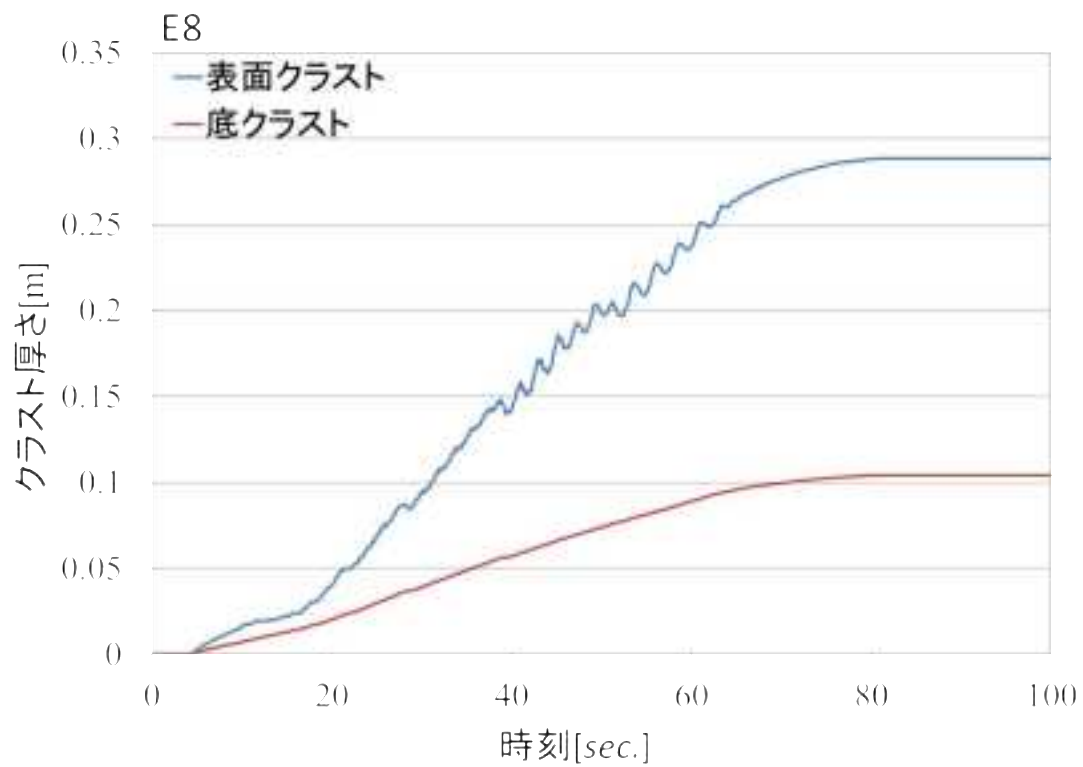


図 B.1.28 クラスト厚さの変化の計算結果（PULiMS 実験 E8）

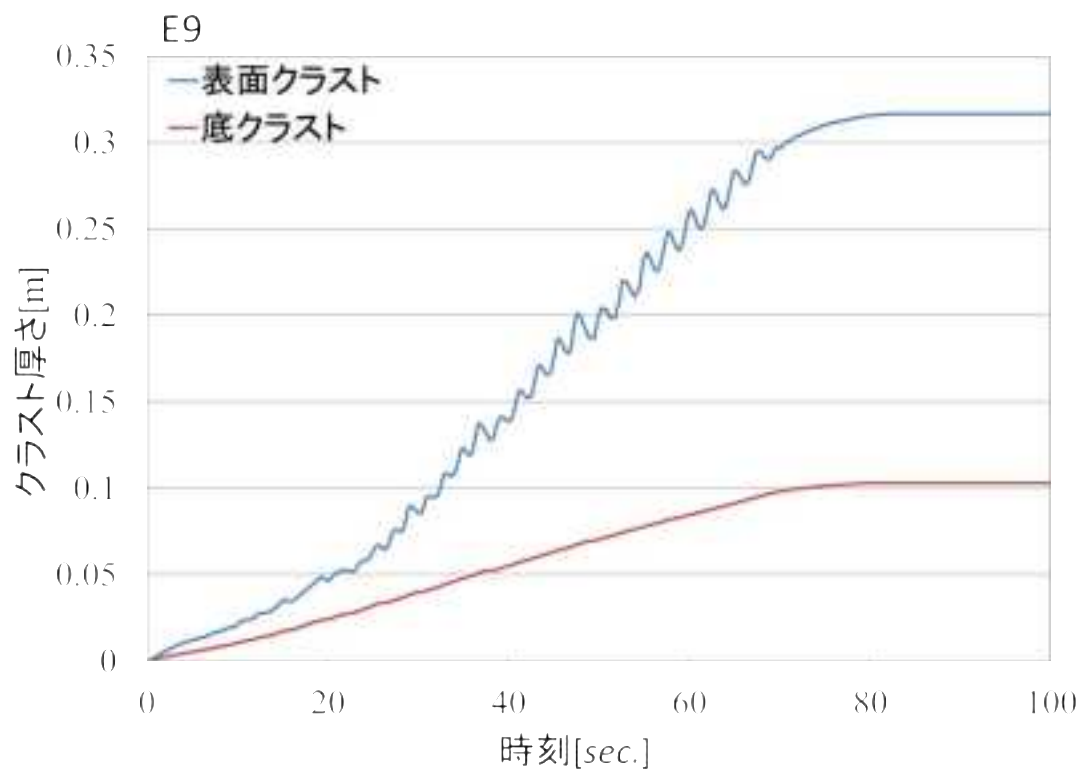


図 B.1.29 クラスト厚さの変化の計算結果（PULiMS 実験 E9）

### B.1.3 溶融物の拡がりの変化

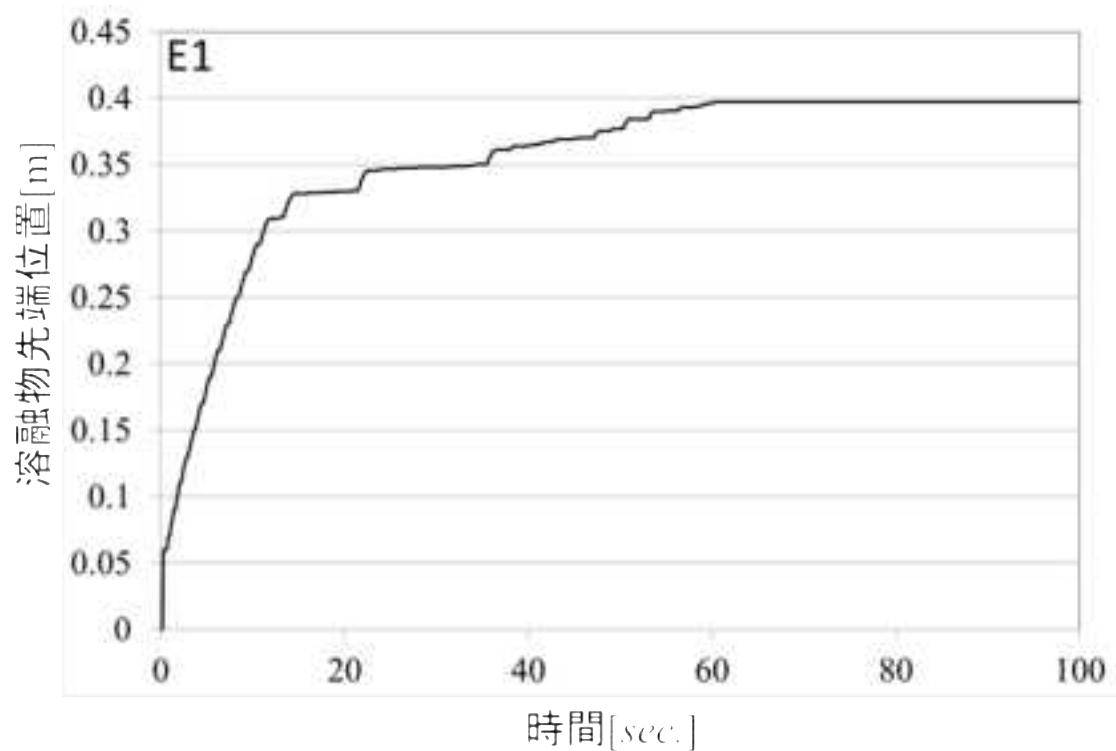


図 B.1.30 溶融物拡がり変化の計算結果 (PULiMS 実験 E1)

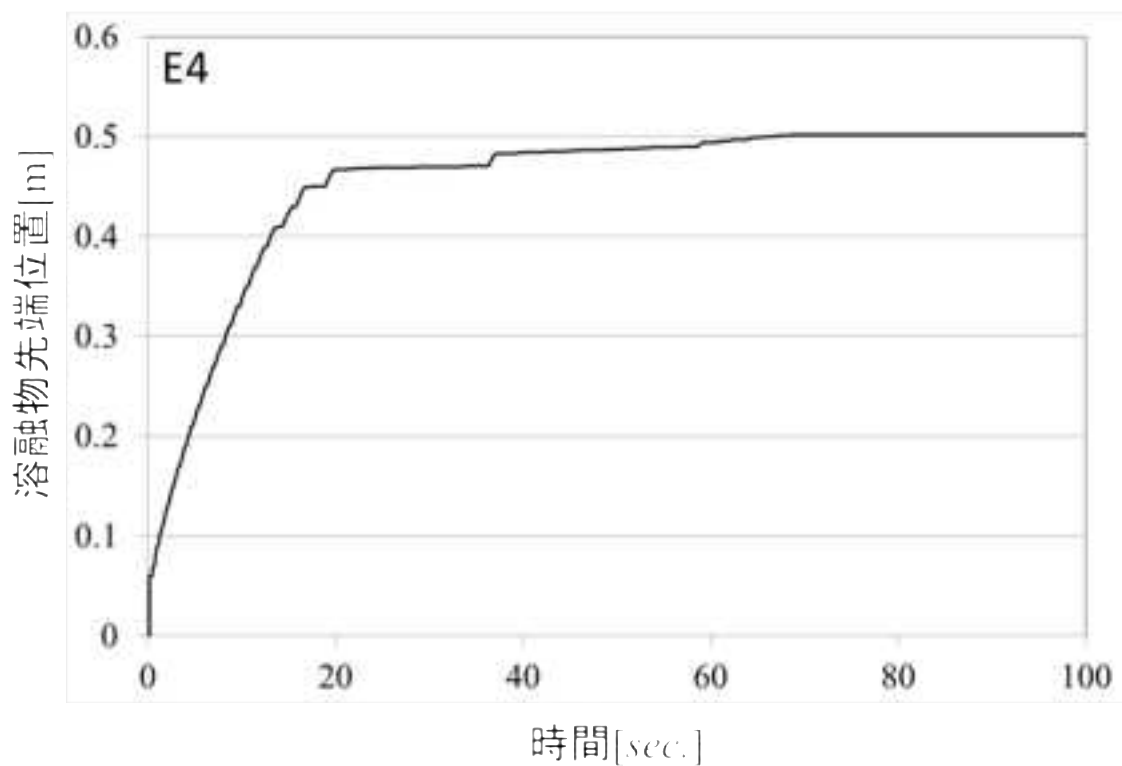


図 B.1.31 溶融物拡がり変化の計算結果 (PULiMS 実験 E4)

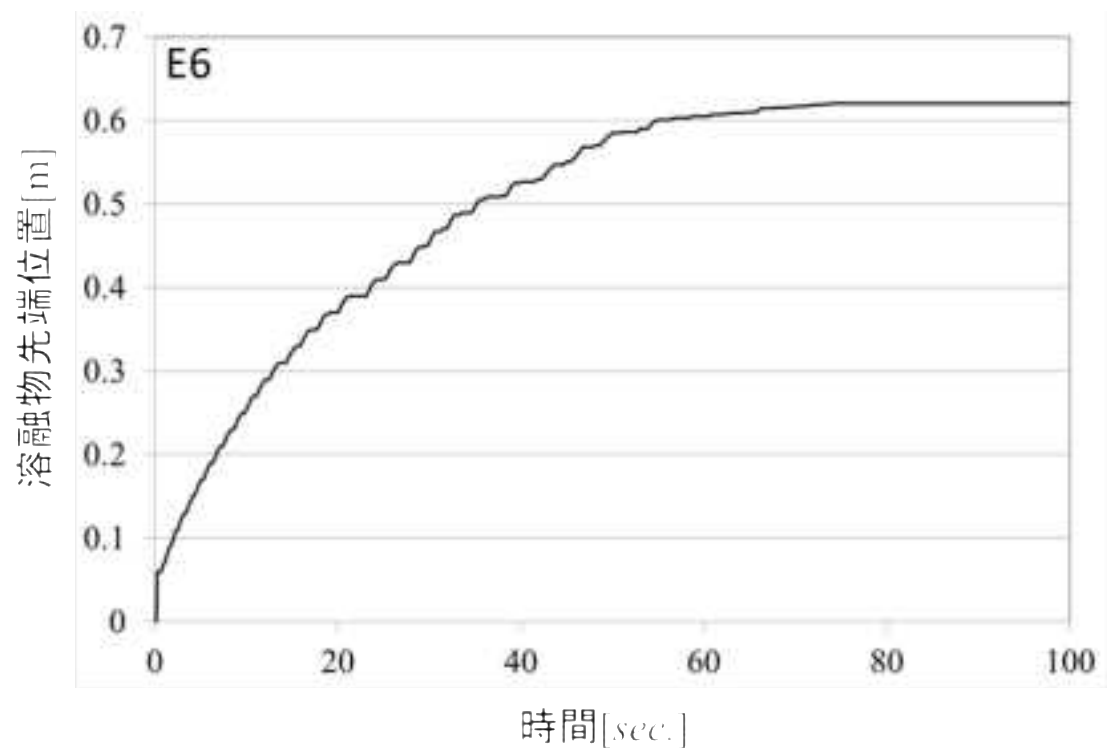


図 B.1.32 溶融物拡がり変化の計算結果 (PULiMS 実験 E6)

#### B.1.4 水温の計算結果

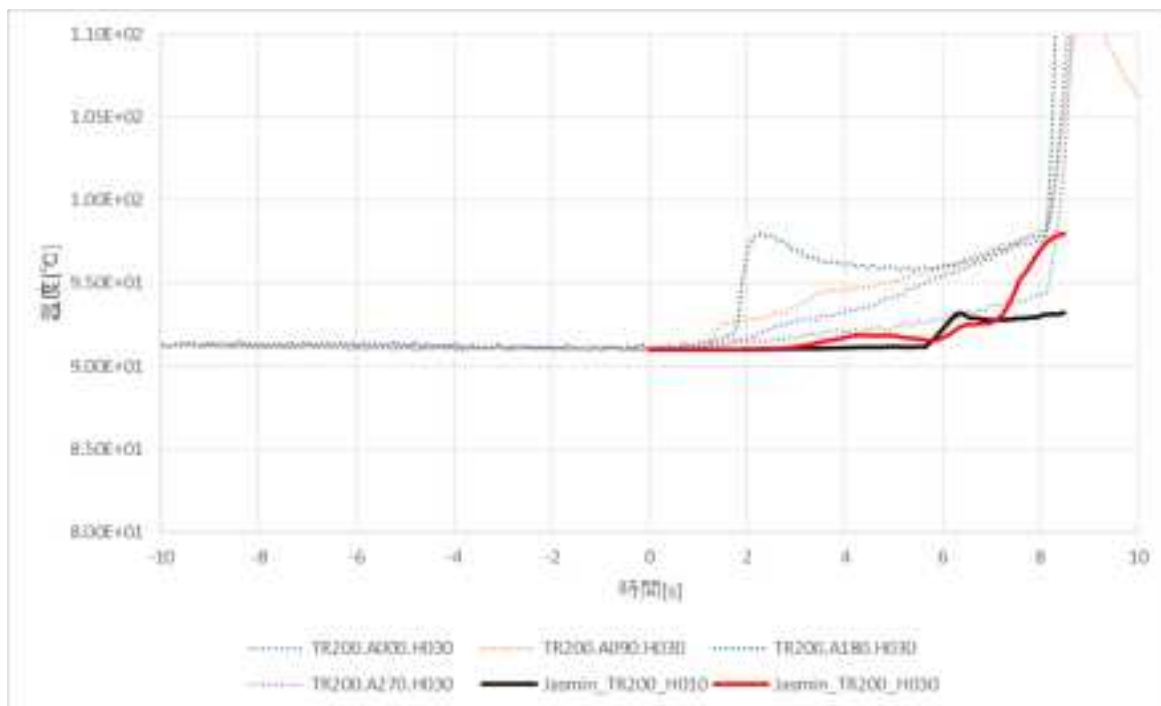


図 B.1.33 水温の比較 PULiMS 実験 E7 中心から 200mm

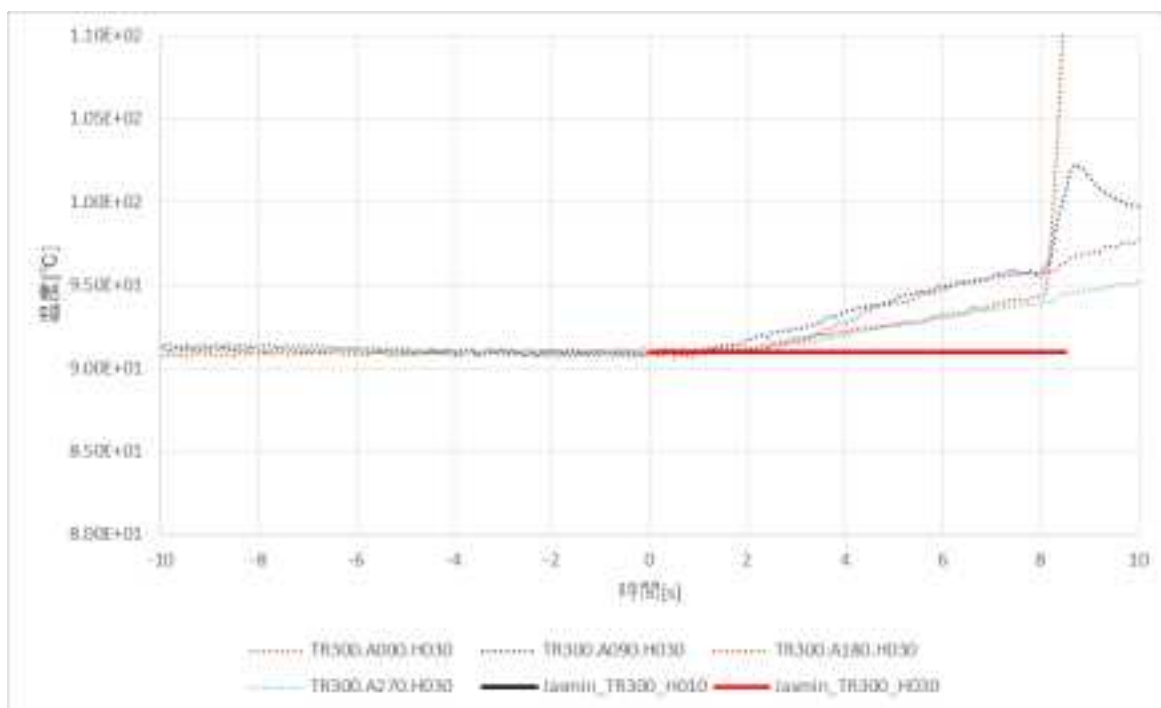


図 B.1.34 水温の比較 PULiMS 実験 E7 中心から 300mm

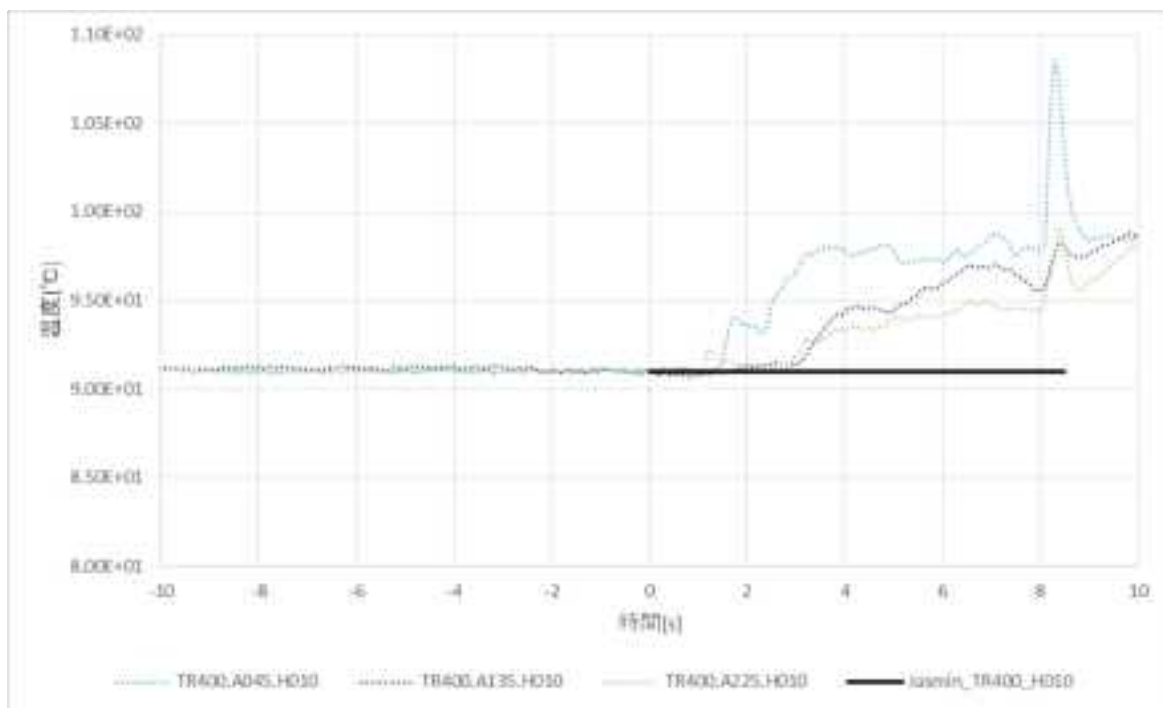


図 B.1.35 水温の比較 PULiMS 実験 E7 中心から 400mm

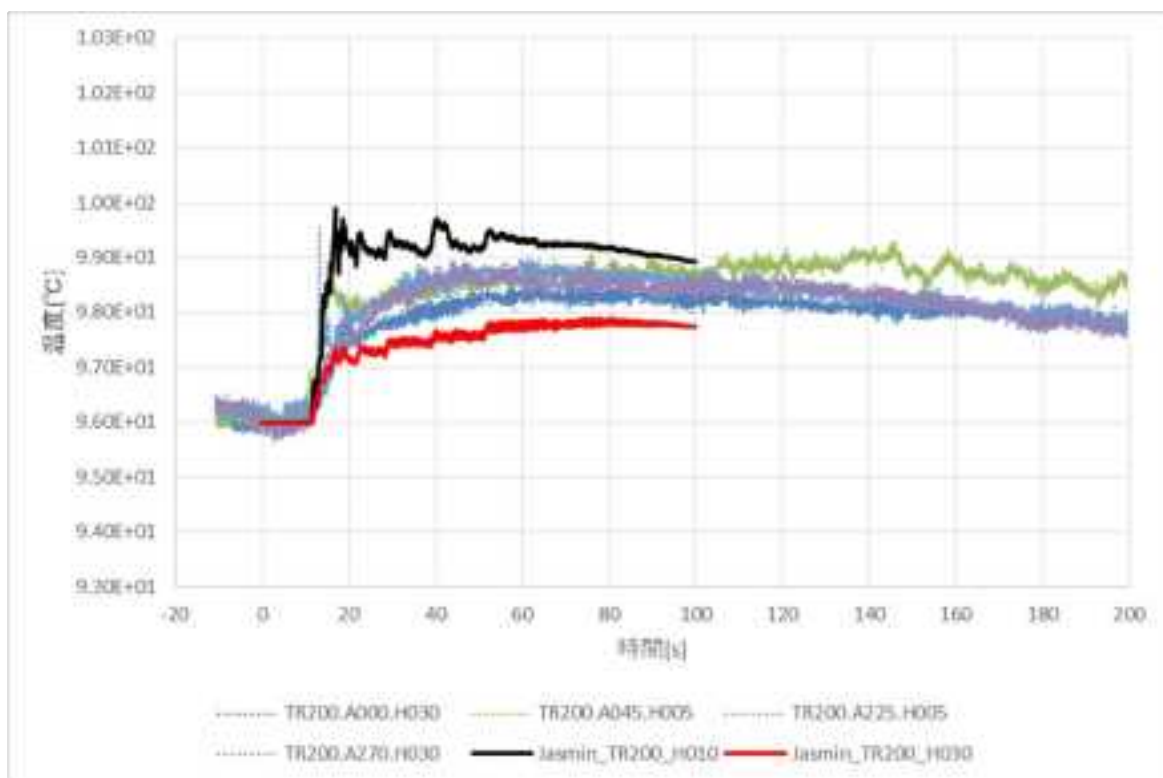


図 B.1.36 水温の比較 PULiMS 実験 E8 中心から 200mm

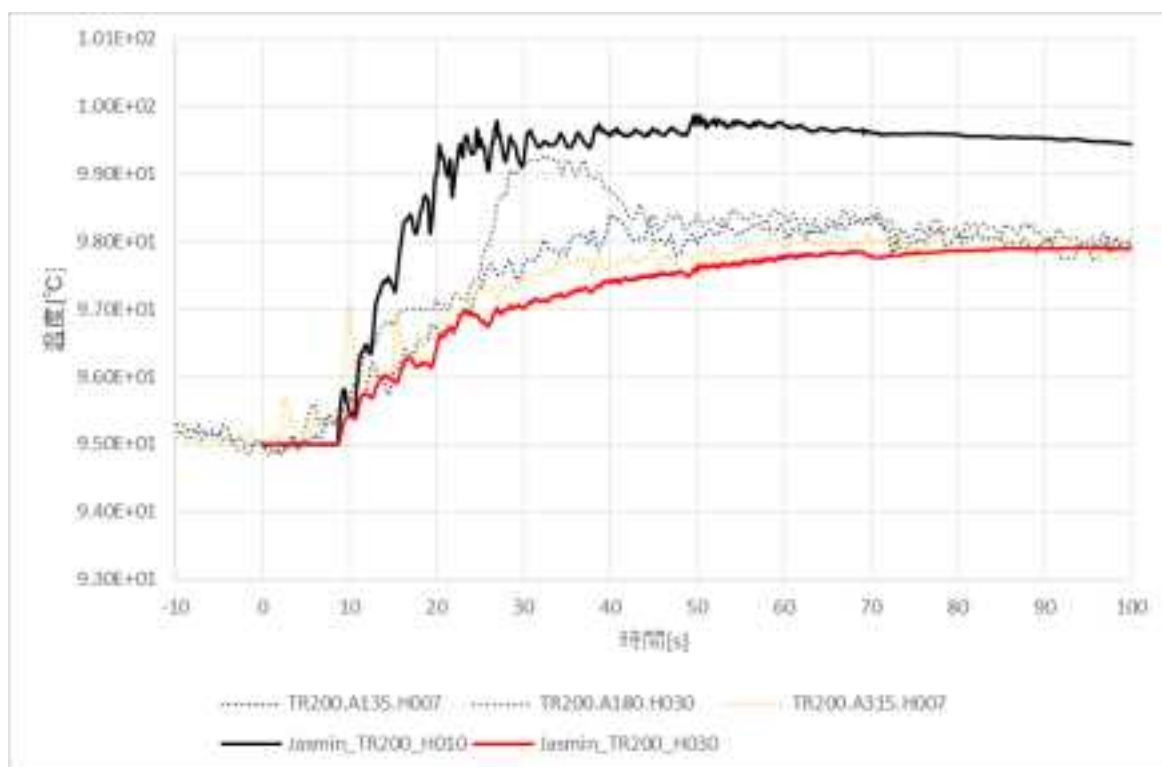


図 B.1.37 水温の比較 PULiMS 実験 E9 中心から 200mm

### B.1.5 プレート裏側温度

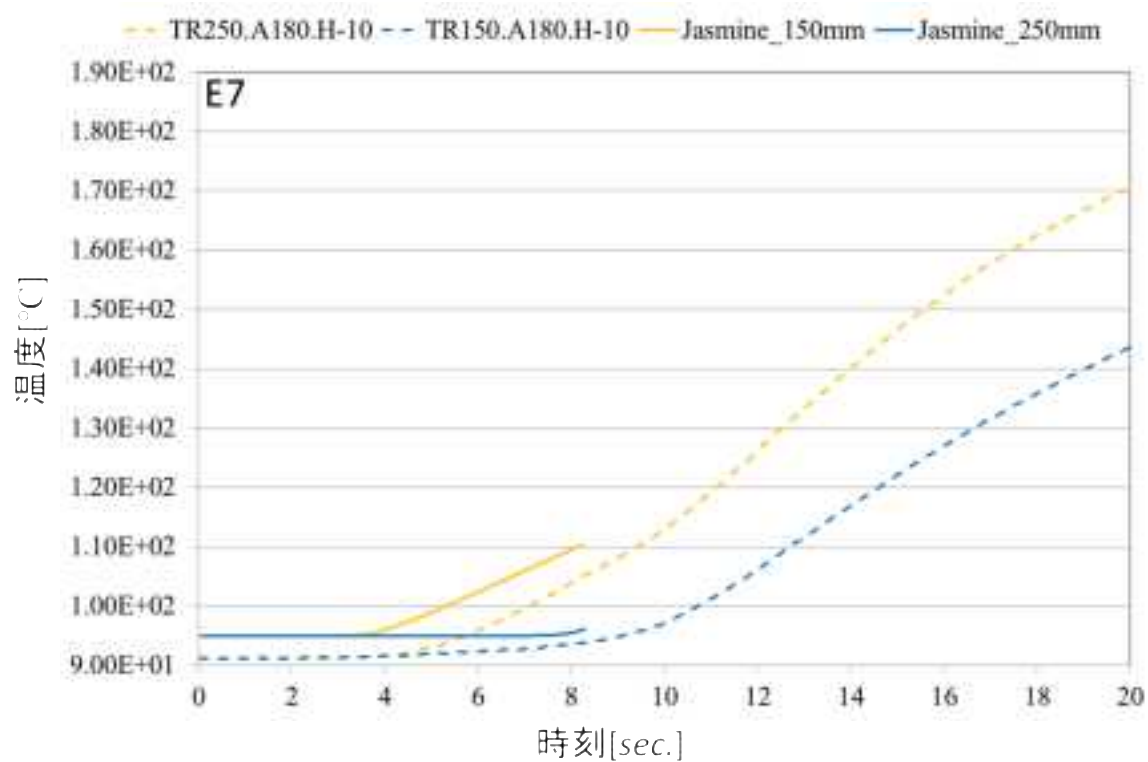


図 B.1.38 ステンレス床板裏側の温度変化 (PULiMS 実験 E7)

## B.2 実機解析

### B.2.1 全体の分布を示す図

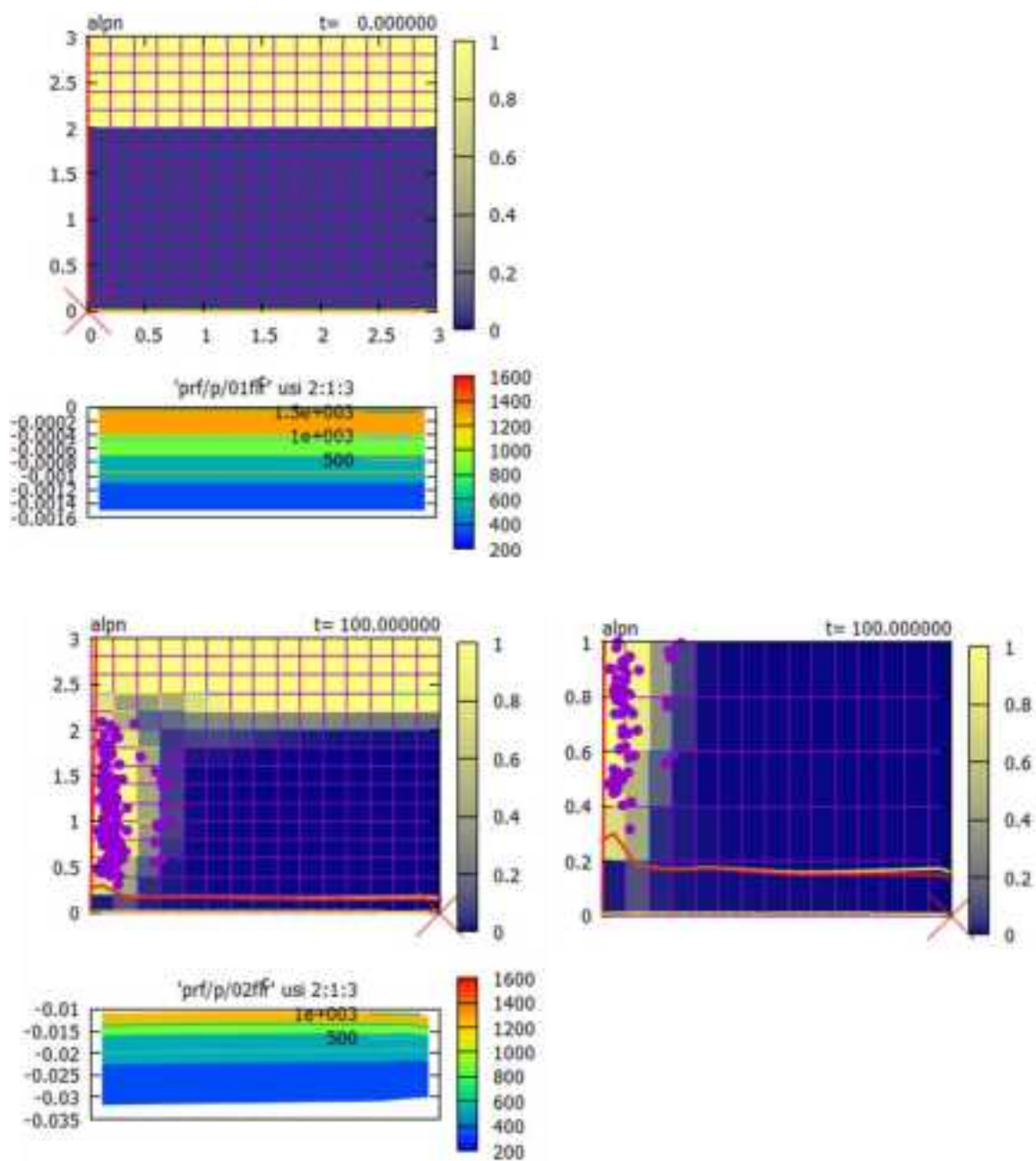


図 B.2.1 溶融物と水プールの状況 (case1 : 0~100 秒)

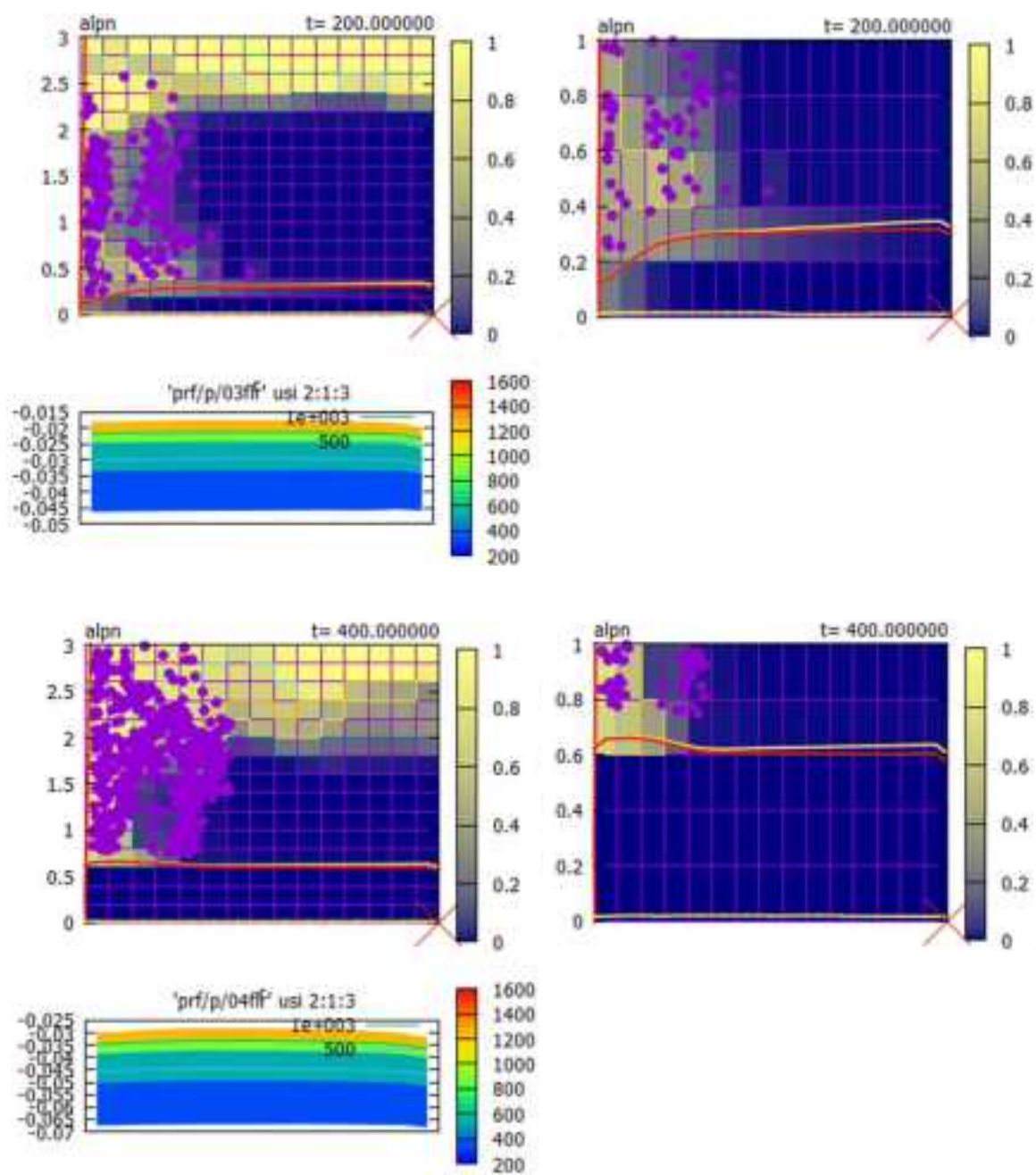


図 B.2.2 溶融物と水プールの状況 (case1 続き : 200~400 秒)

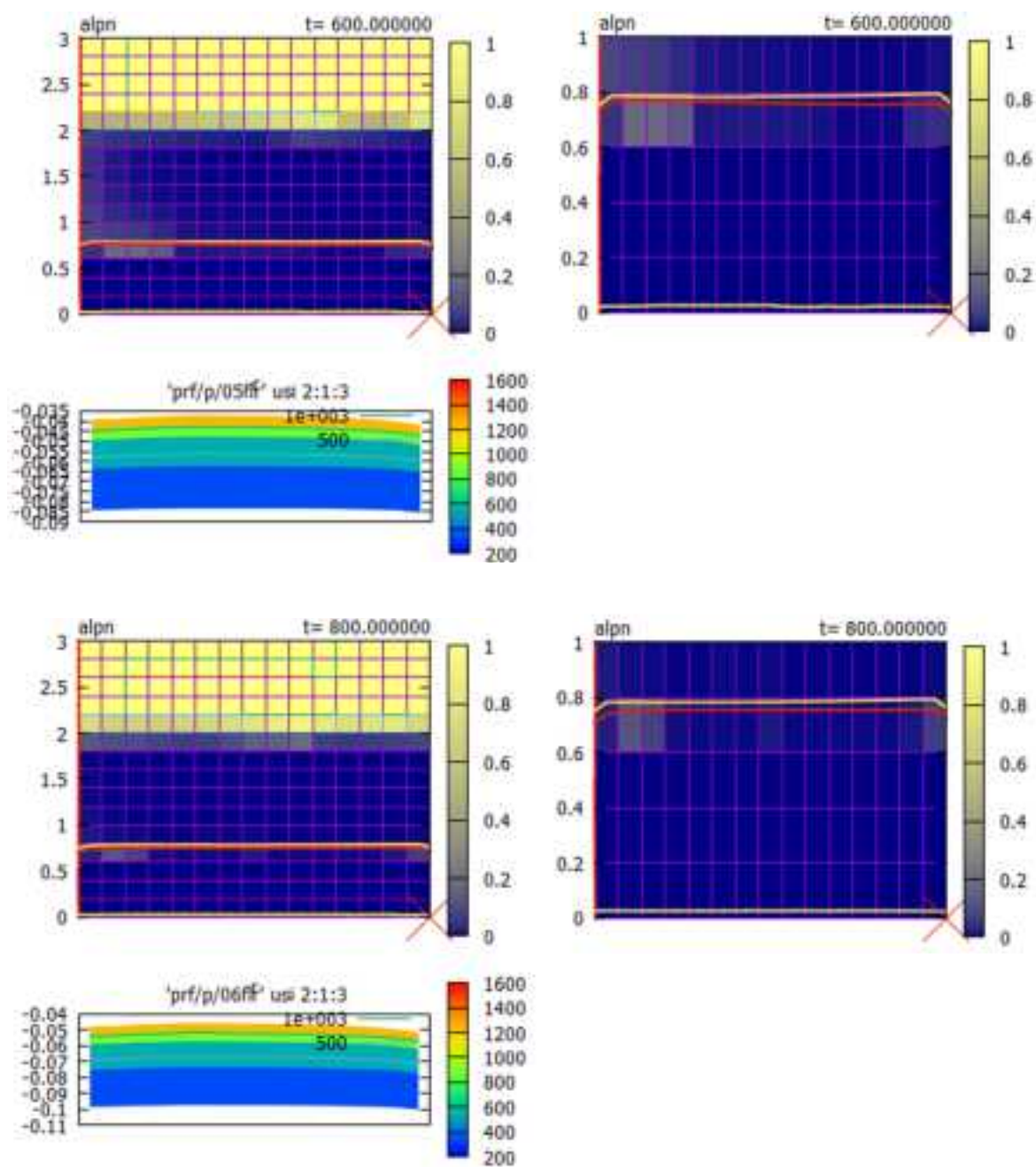


図 B.2.3 溶融物と水プールの状況 (case1 続き : 600~800 秒)

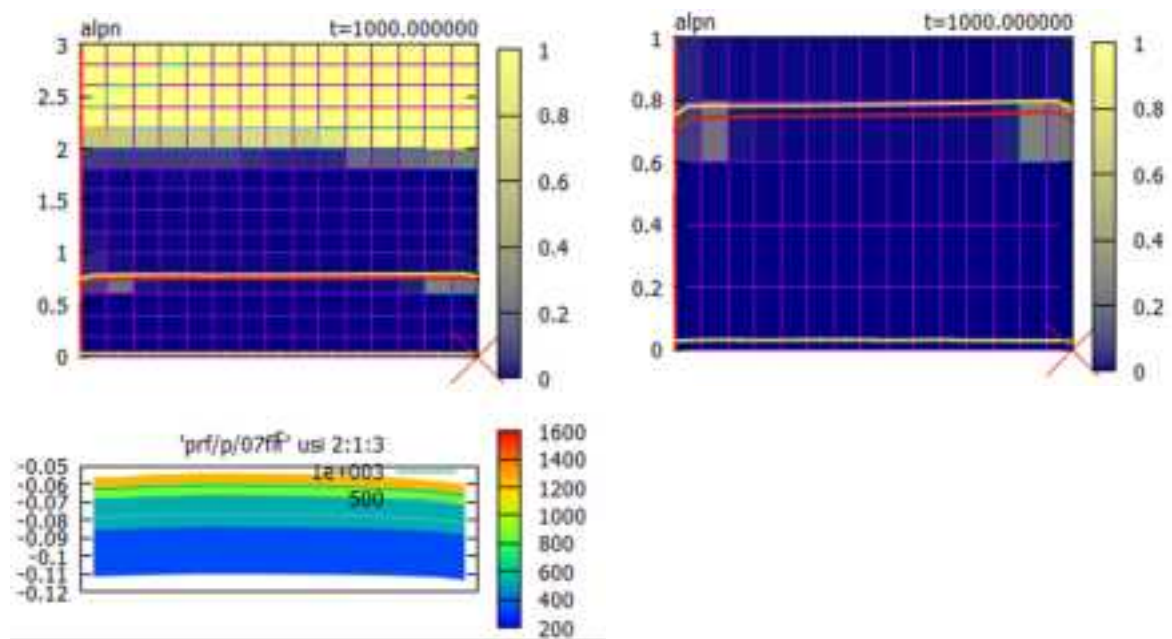


図 B.2.4 溶融物と水プールの状況 (case1 続き : 1000 秒)

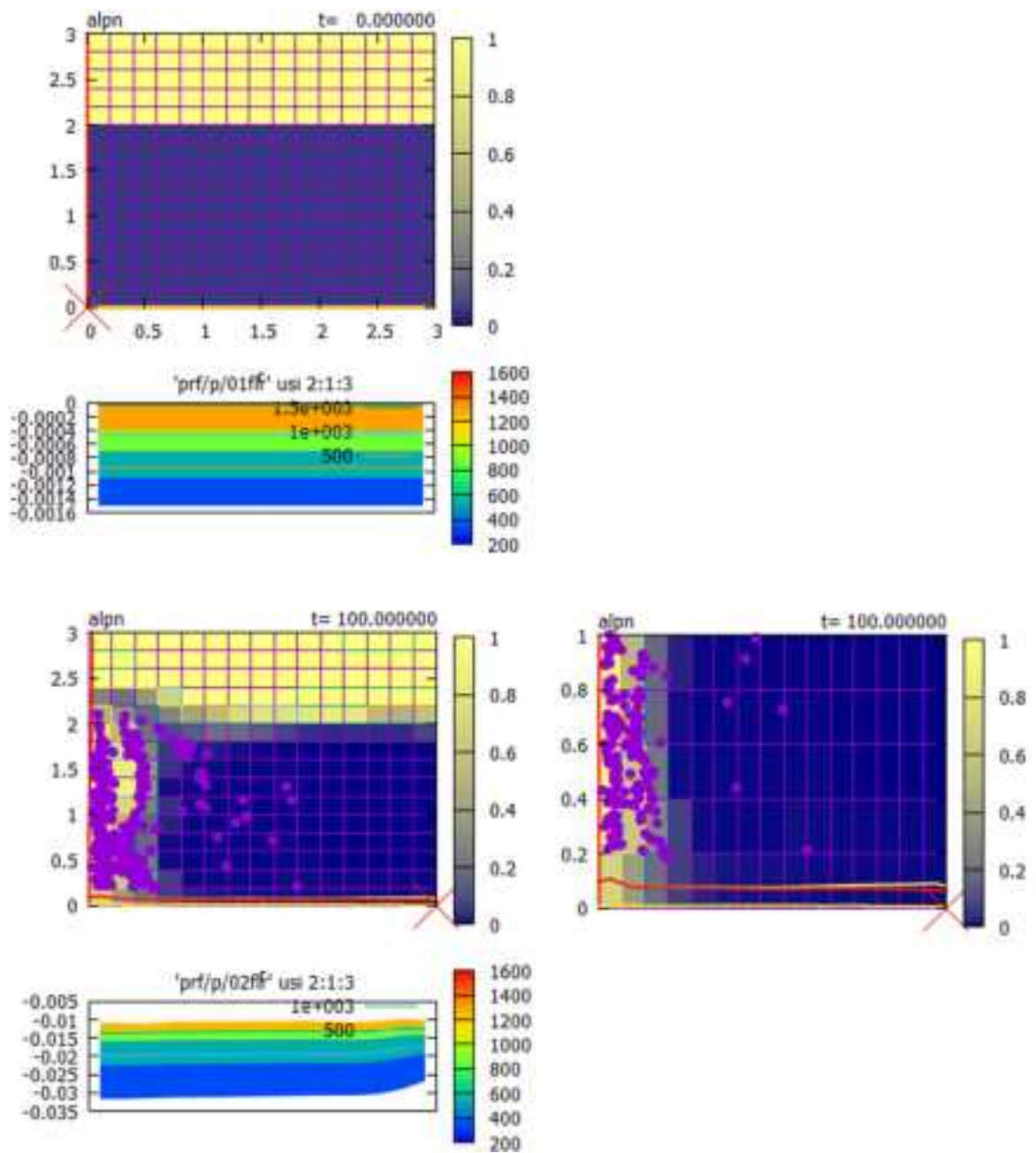


図 B.2.5 溶融物と水プールの状況 (case2 : 0~100 秒)

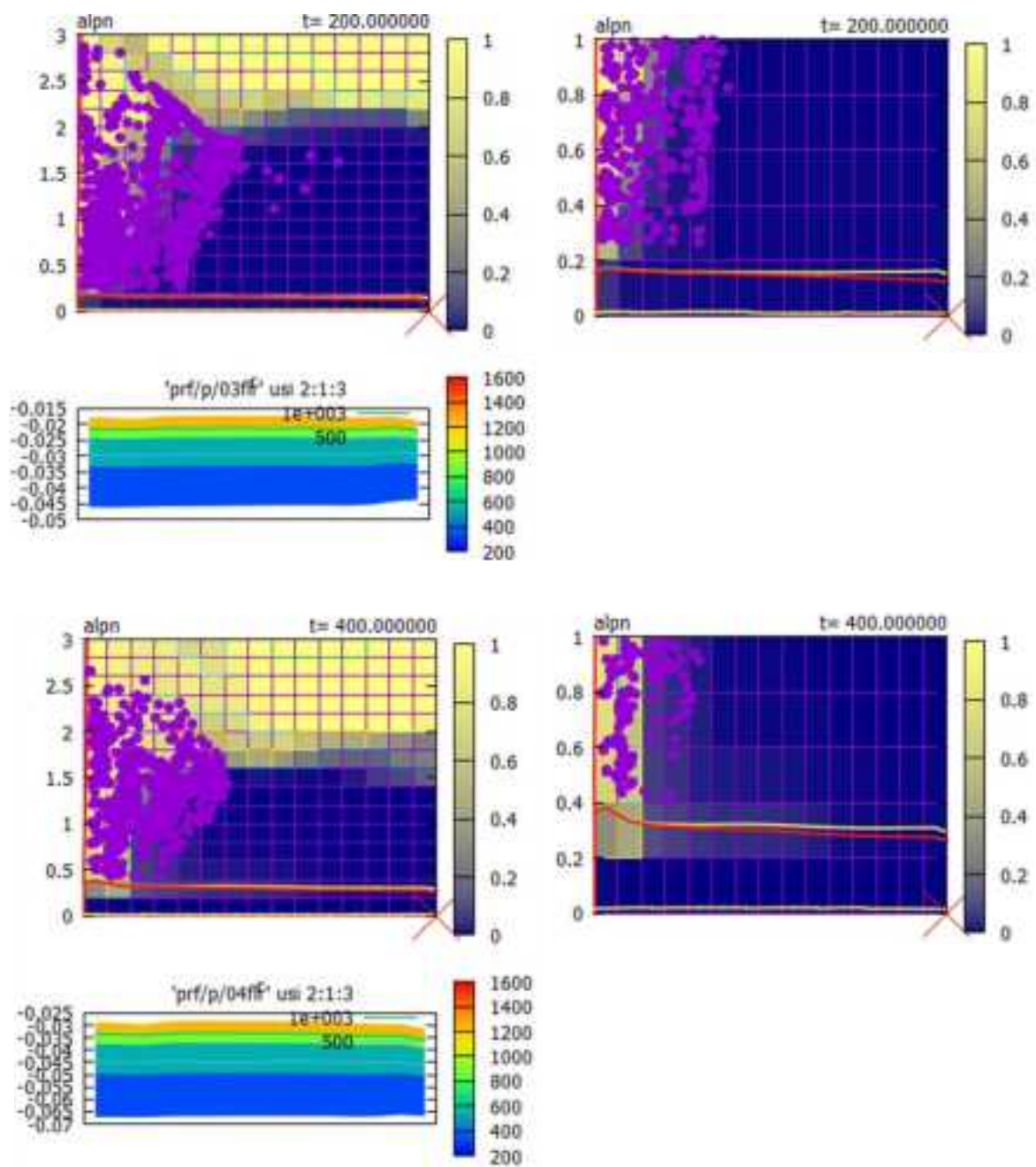


図 B.2.6 溶融物と水プールの状況 (case2 続き : 200~400 秒)

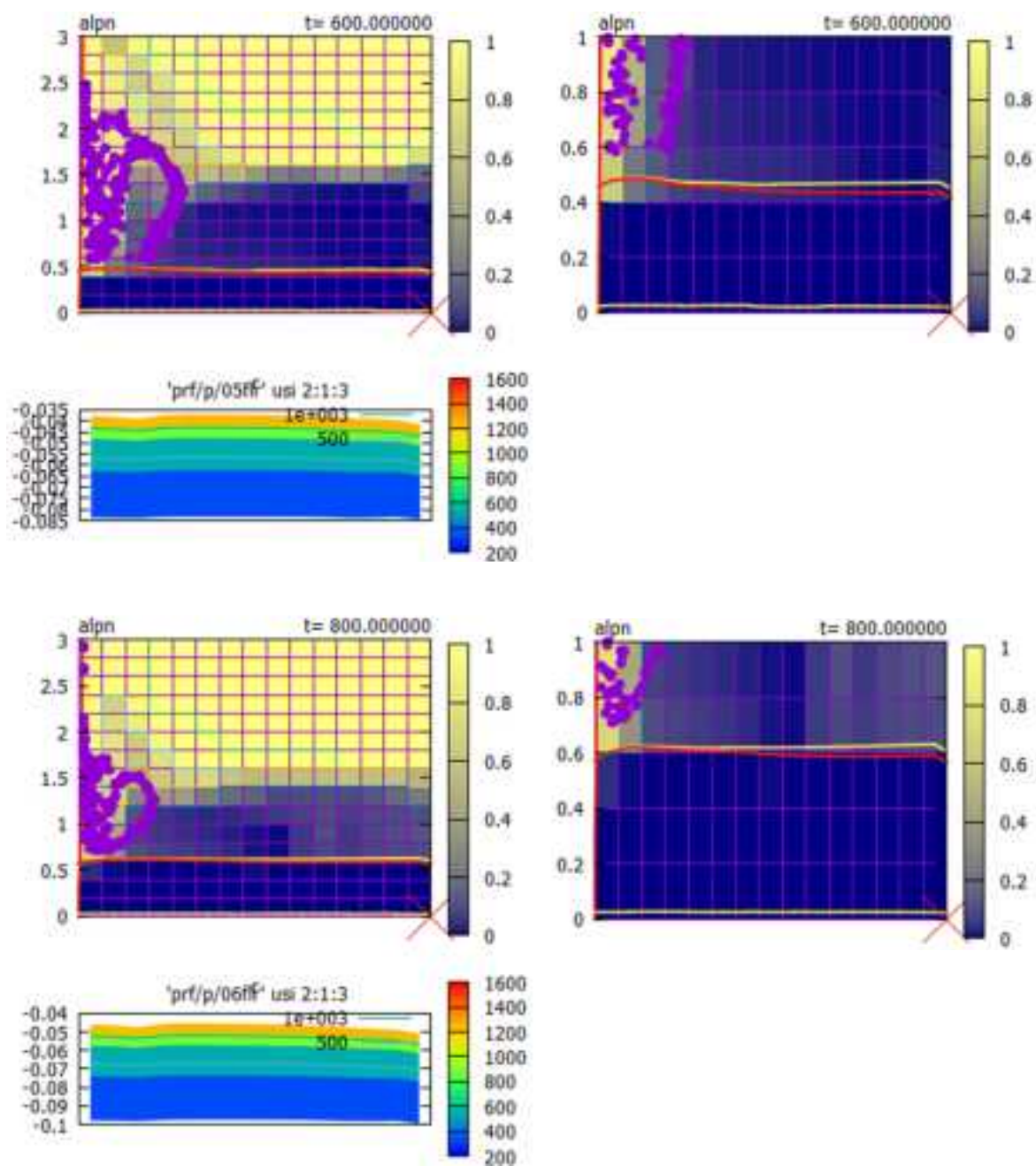


図 B.2.7 溶融物と水プールの状況 (case2 続き : 600~800 秒)

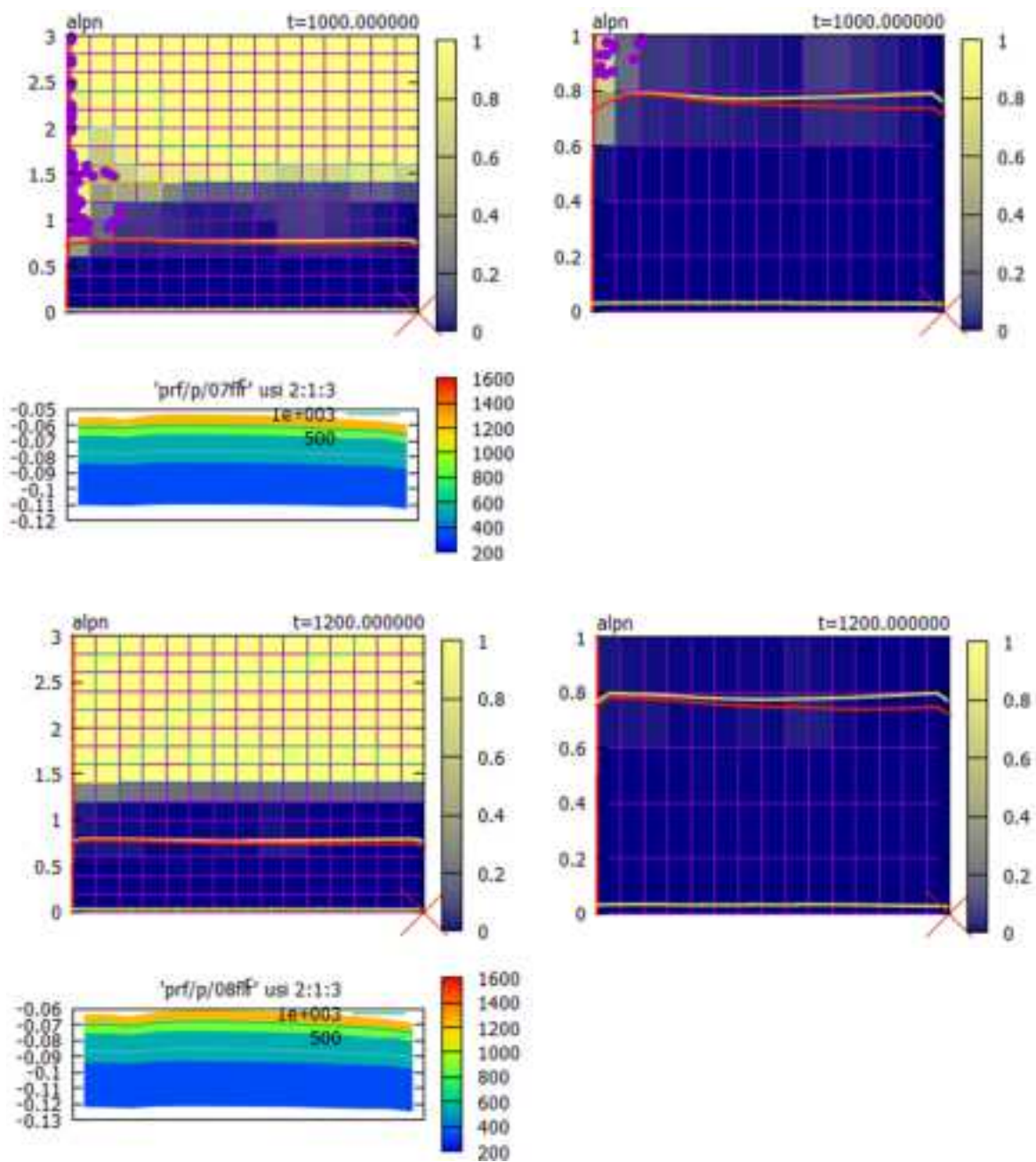


図 B.2.8 溶融物と水プールの状況 (case2 続き : 1000~1200 秒)

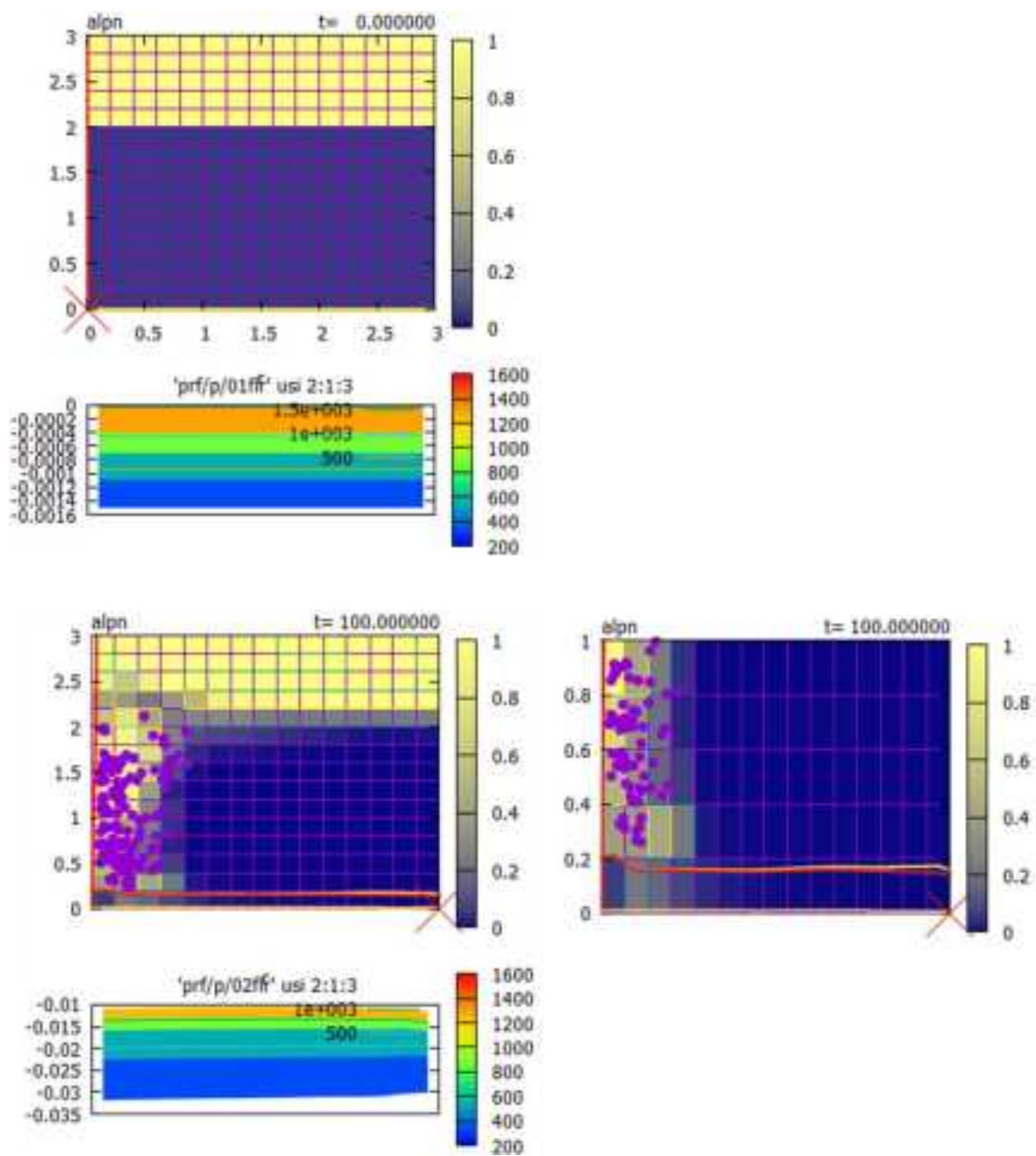


図 B.2.9 溶融物と水プールの状況 (case3 : 0~100 秒)

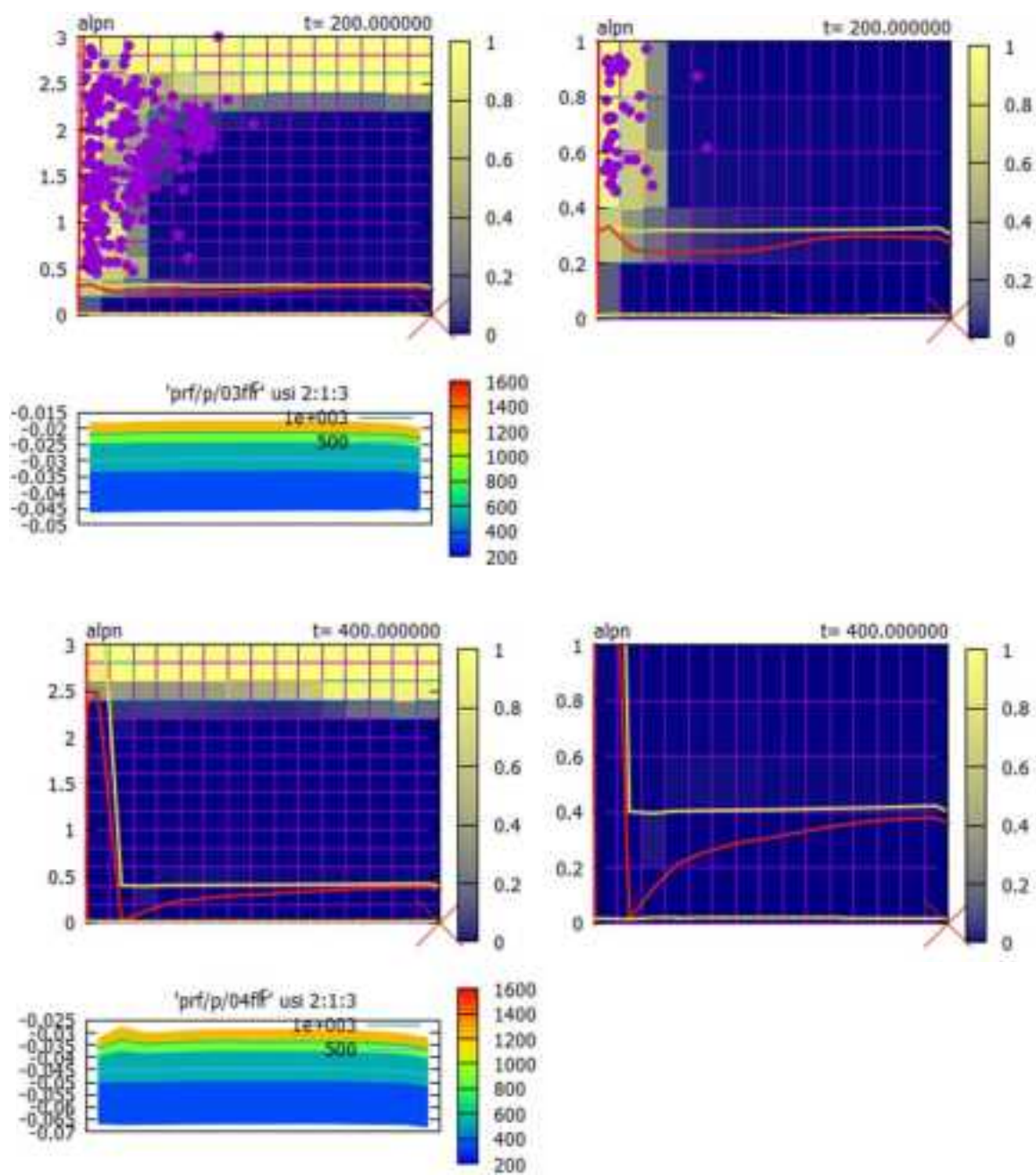


図 B.2.10 溶融物と水プールの状況 (case3 続き : 200~400 秒)

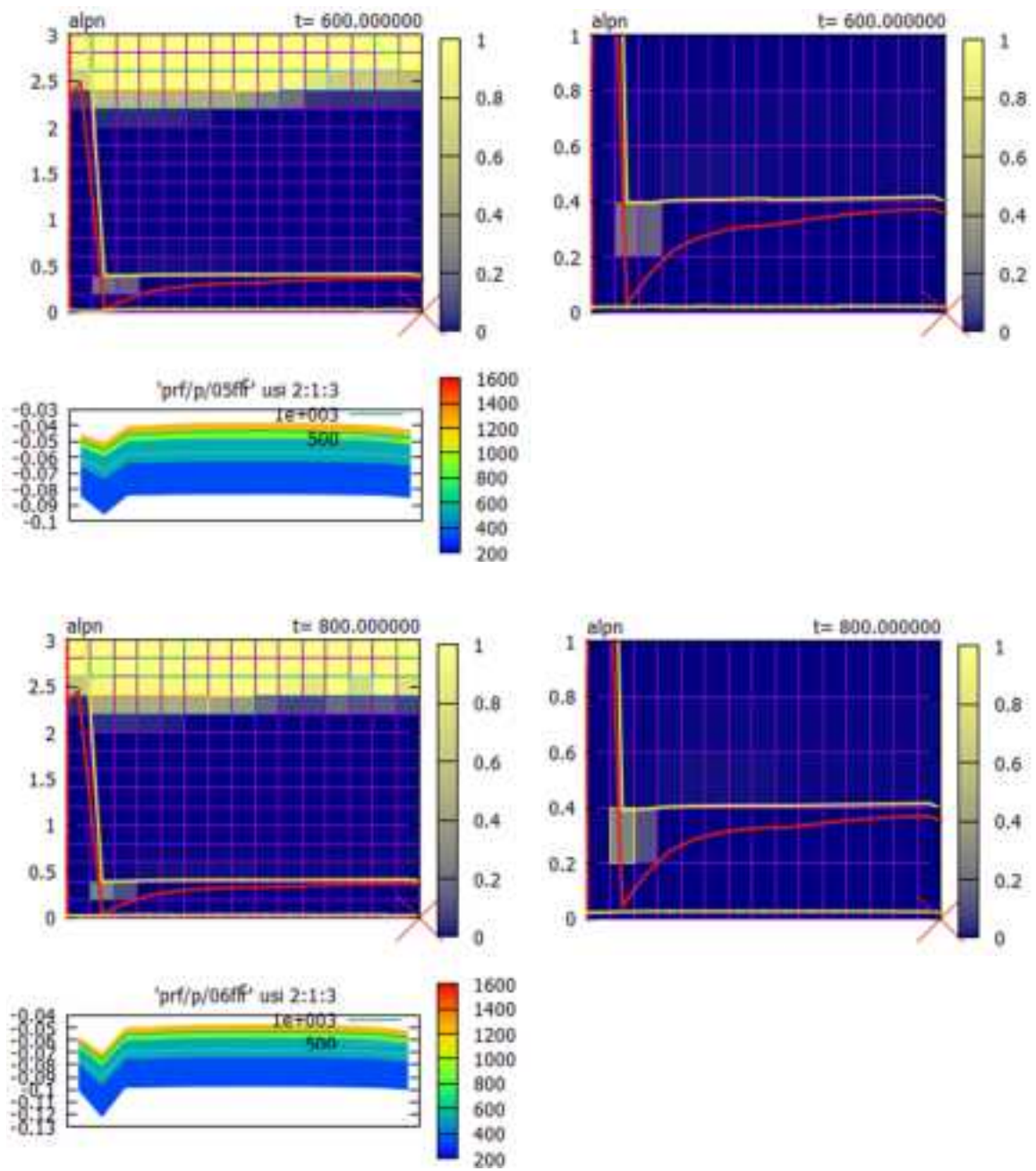


図 B.2.11 溶融物と水プールの状況 (case3 続き : 600~800 秒)

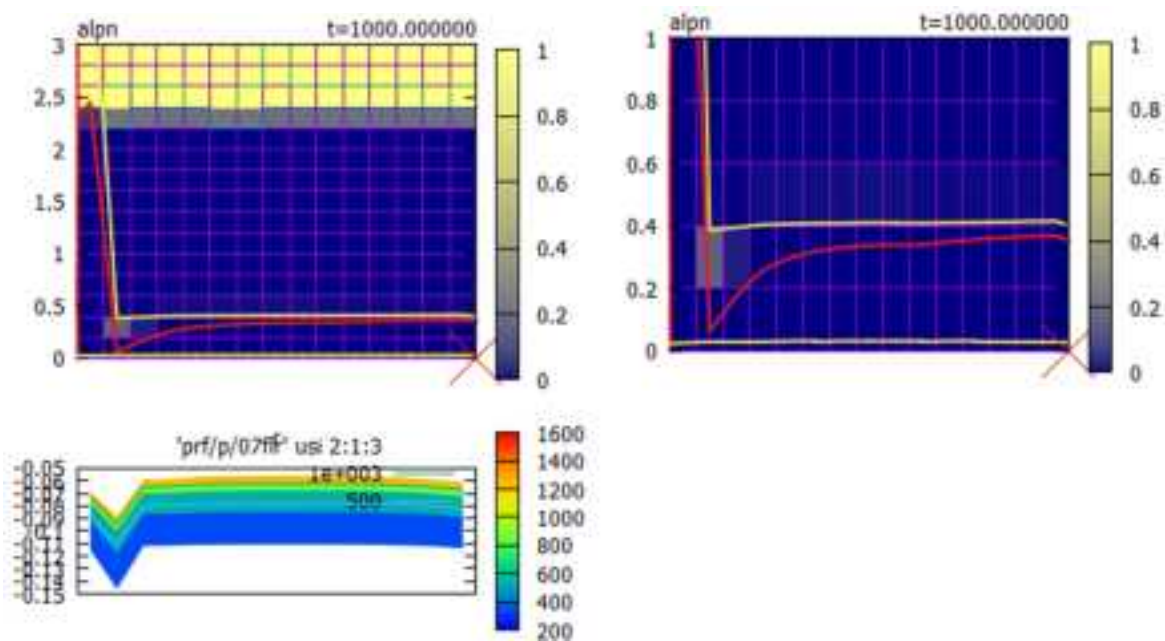


図 B.2.12 溶融物と水プールの状況 (case3 続き : 1000 秒)

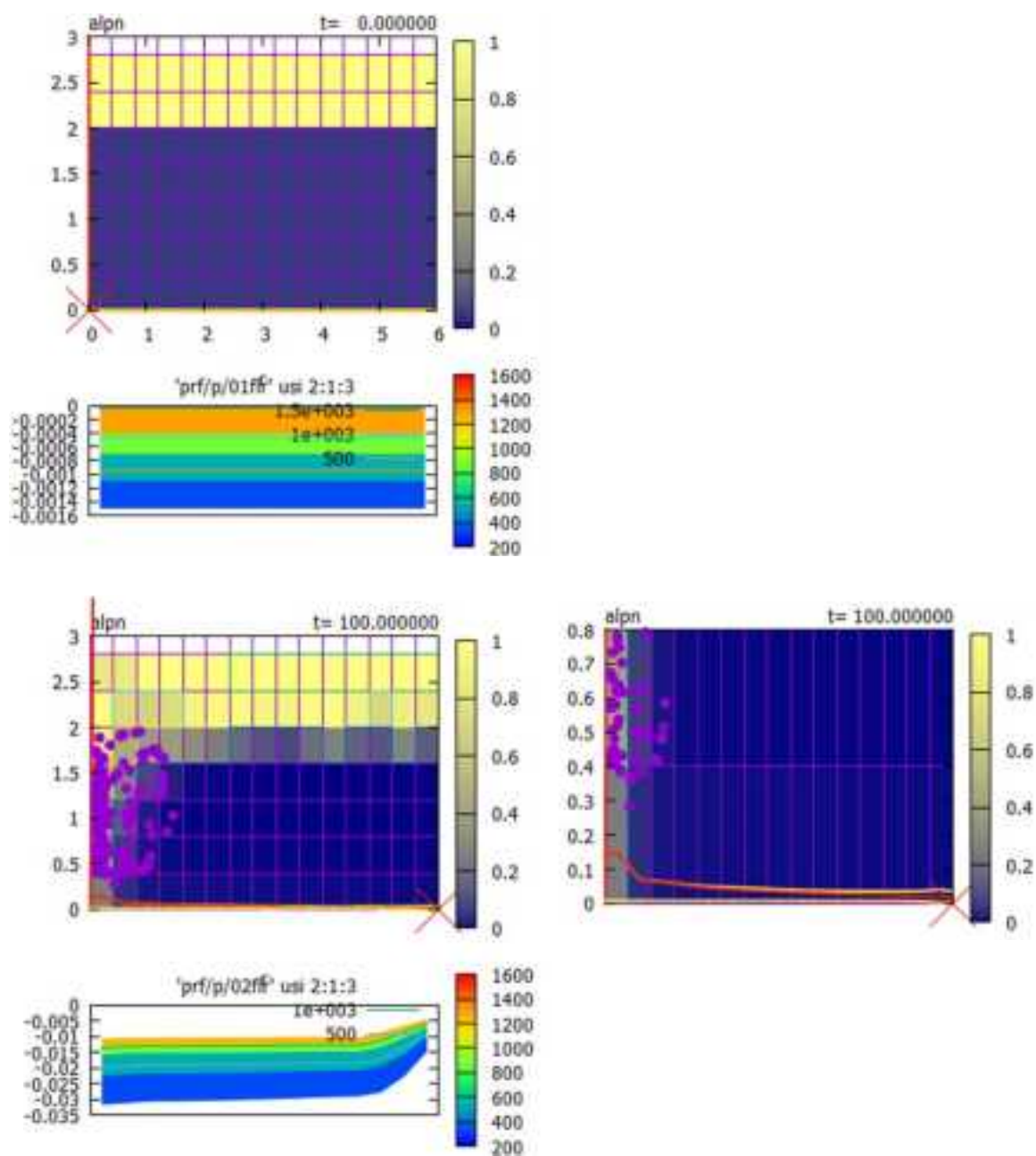


図 B.2.13 溶融物と水プールの状況 (case4 : 0~100 秒)

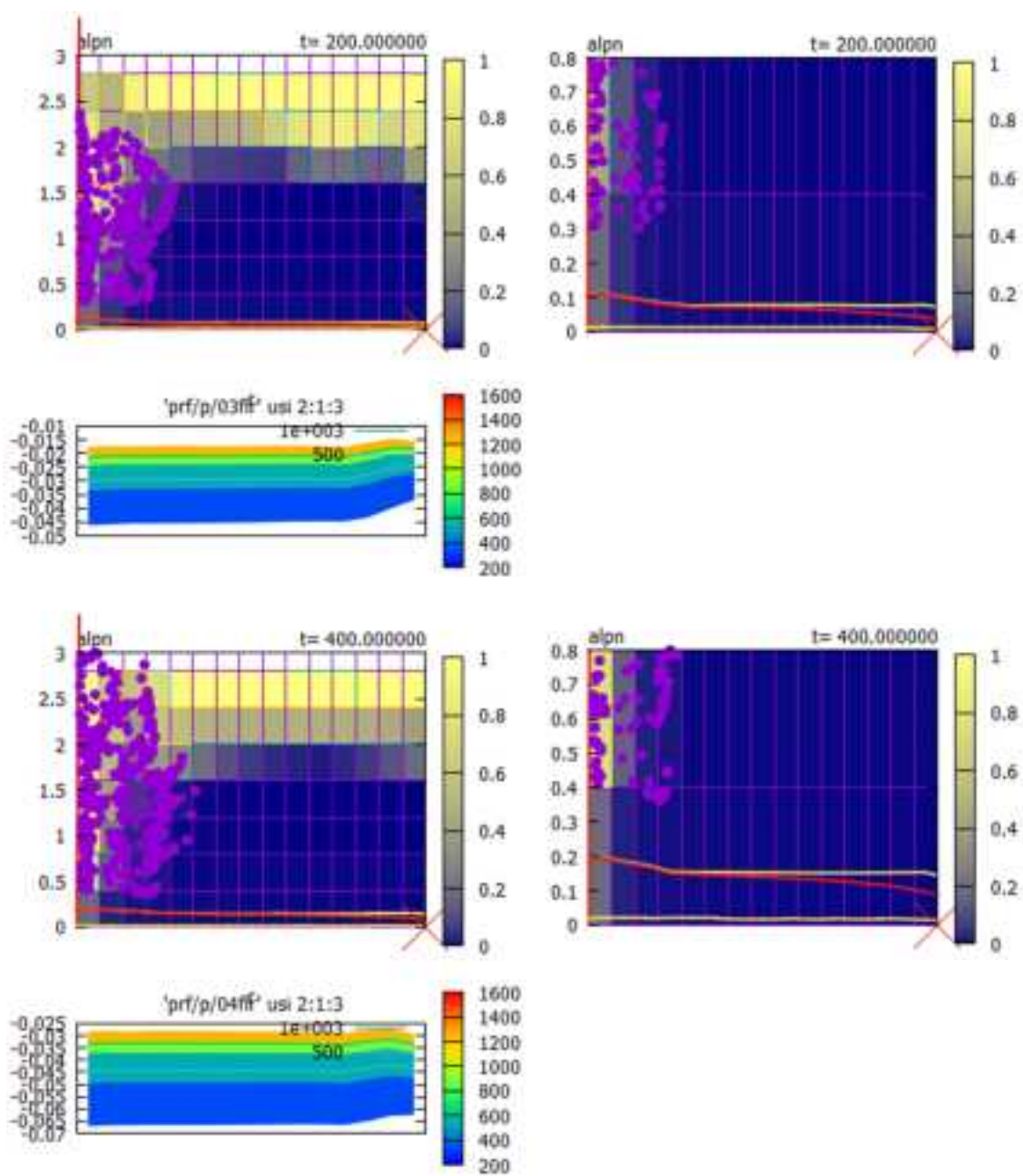


図 B.2.14 溶融物と水プールの状況 (case4 続き : 200~400 秒)

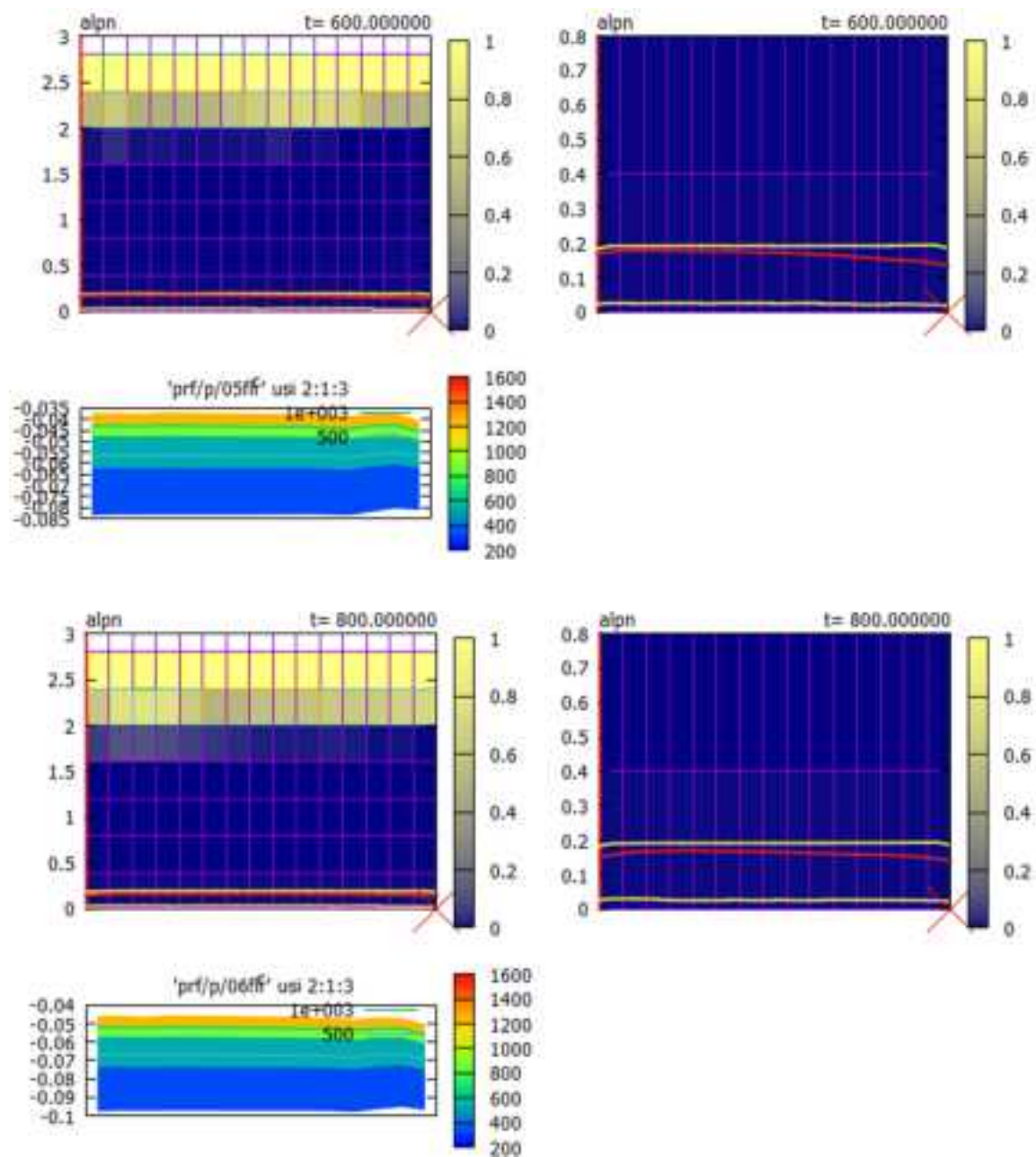


図 B.2.15 溶融物と水プールの状況 (case4 続き : 600~800 秒)

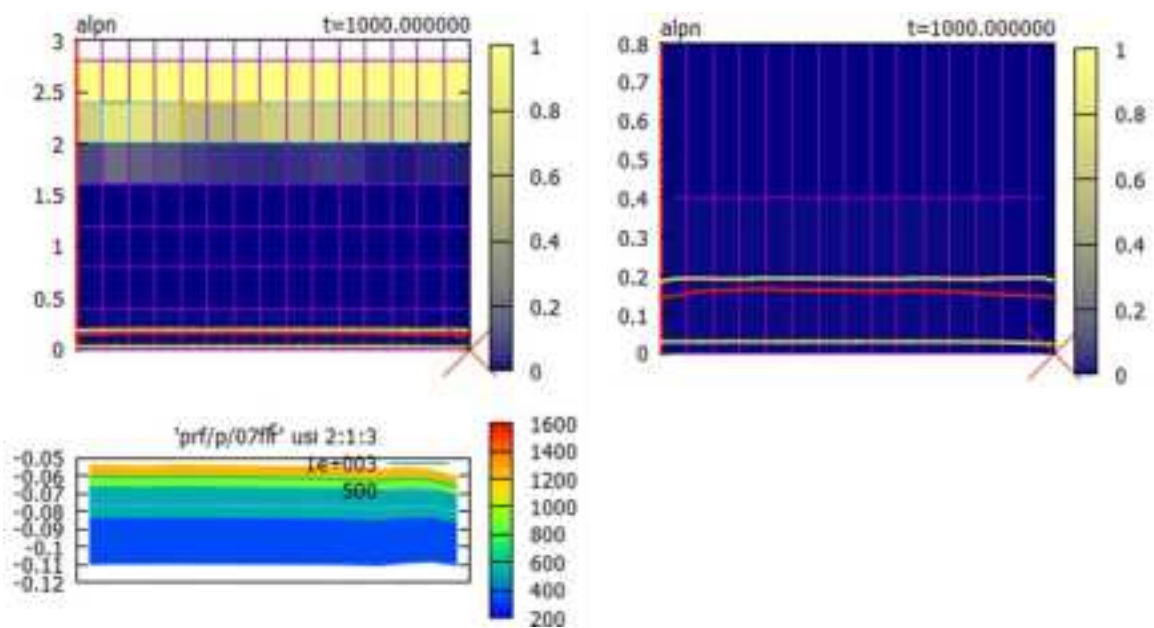


図 B.2.16 溶融物と水プールの状況 (case4 続き : 1000 秒)

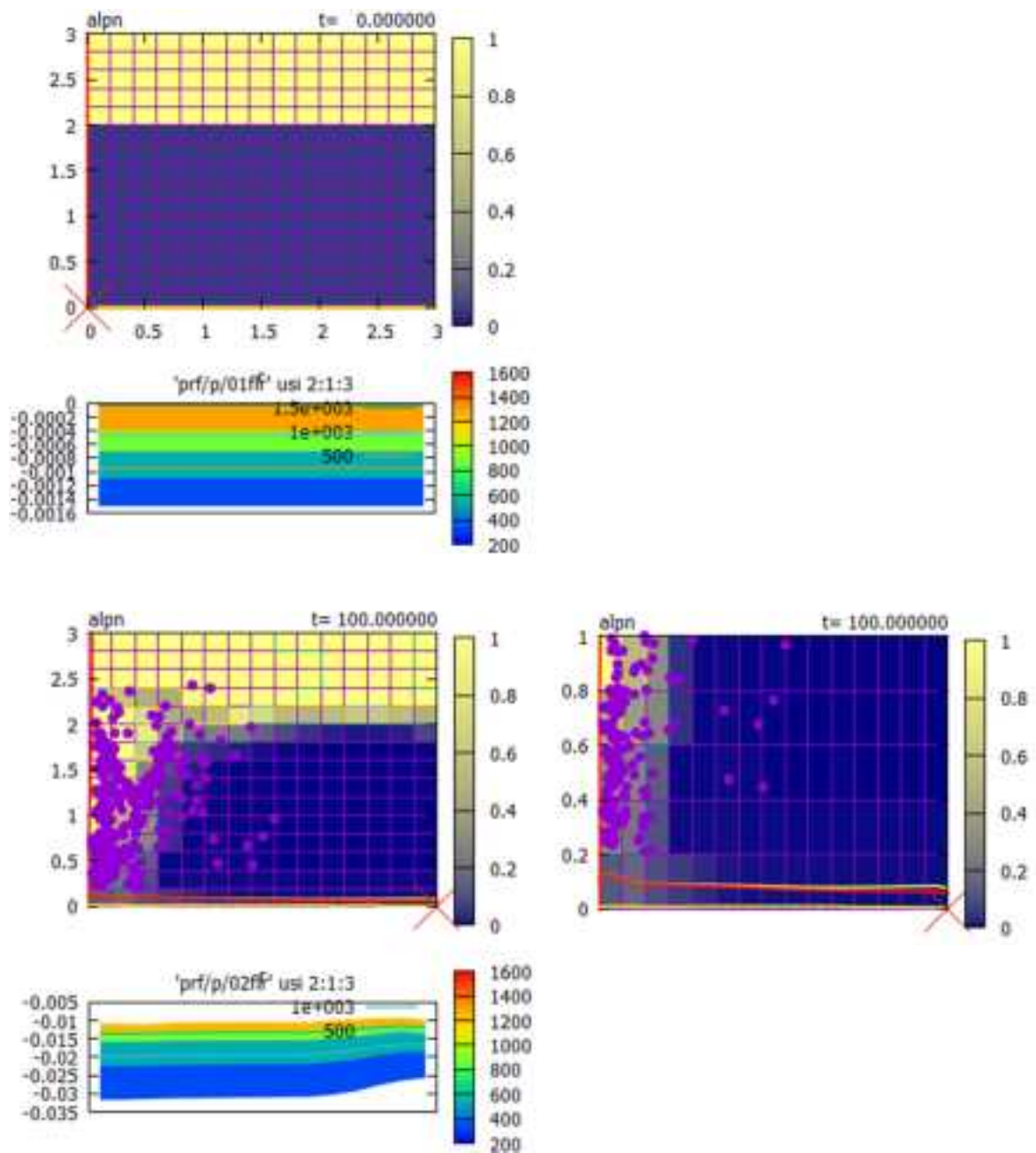


図 B.2.17 溶融物と水プールの状況 (case5 : 0~100 秒)

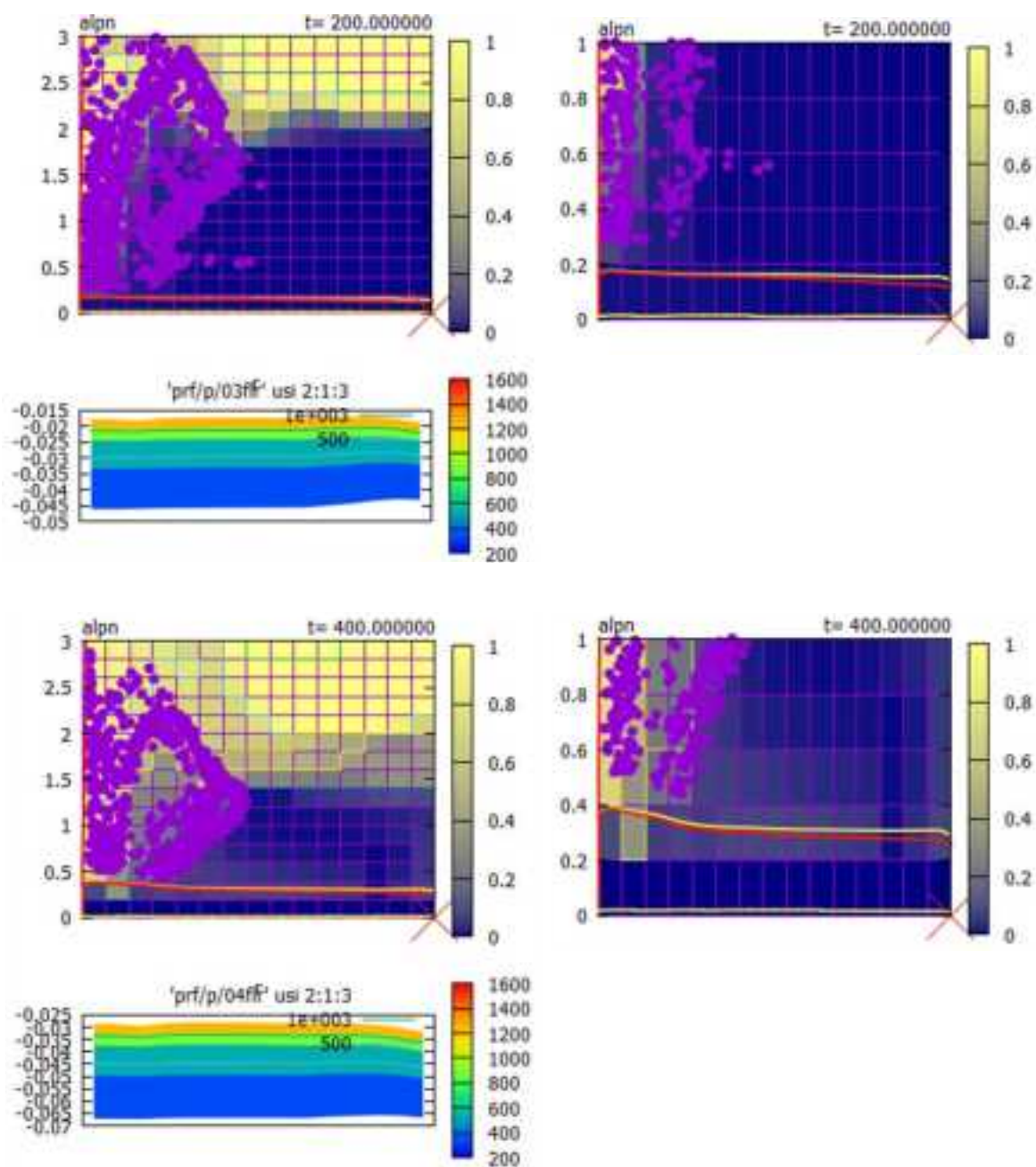


図 B.2.18 溶融物と水プールの状況 (case5 続き : 200~400 秒)

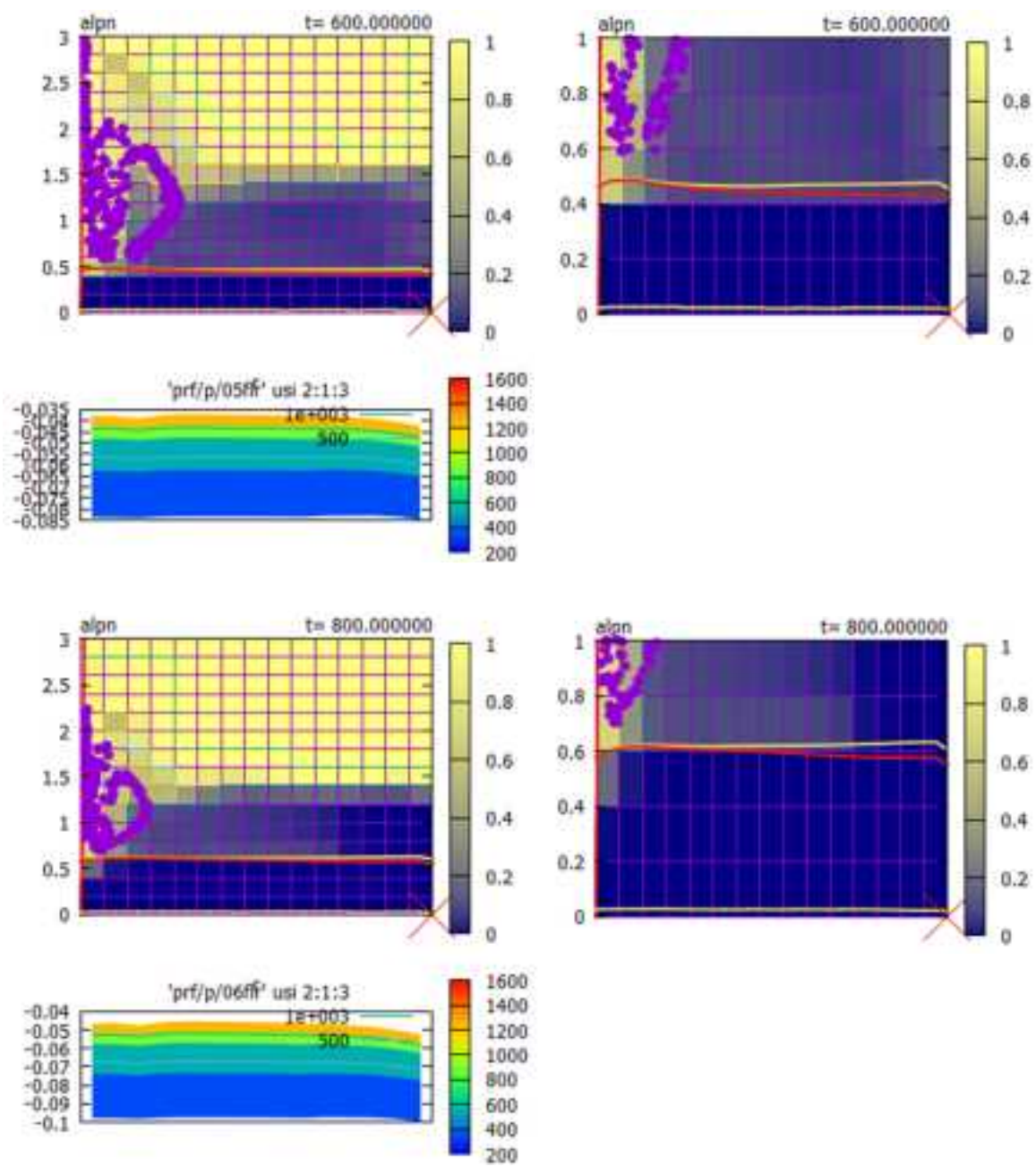


図 B.2.19 溶融物と水プールの状況 (case5 続き : 600~800 秒)

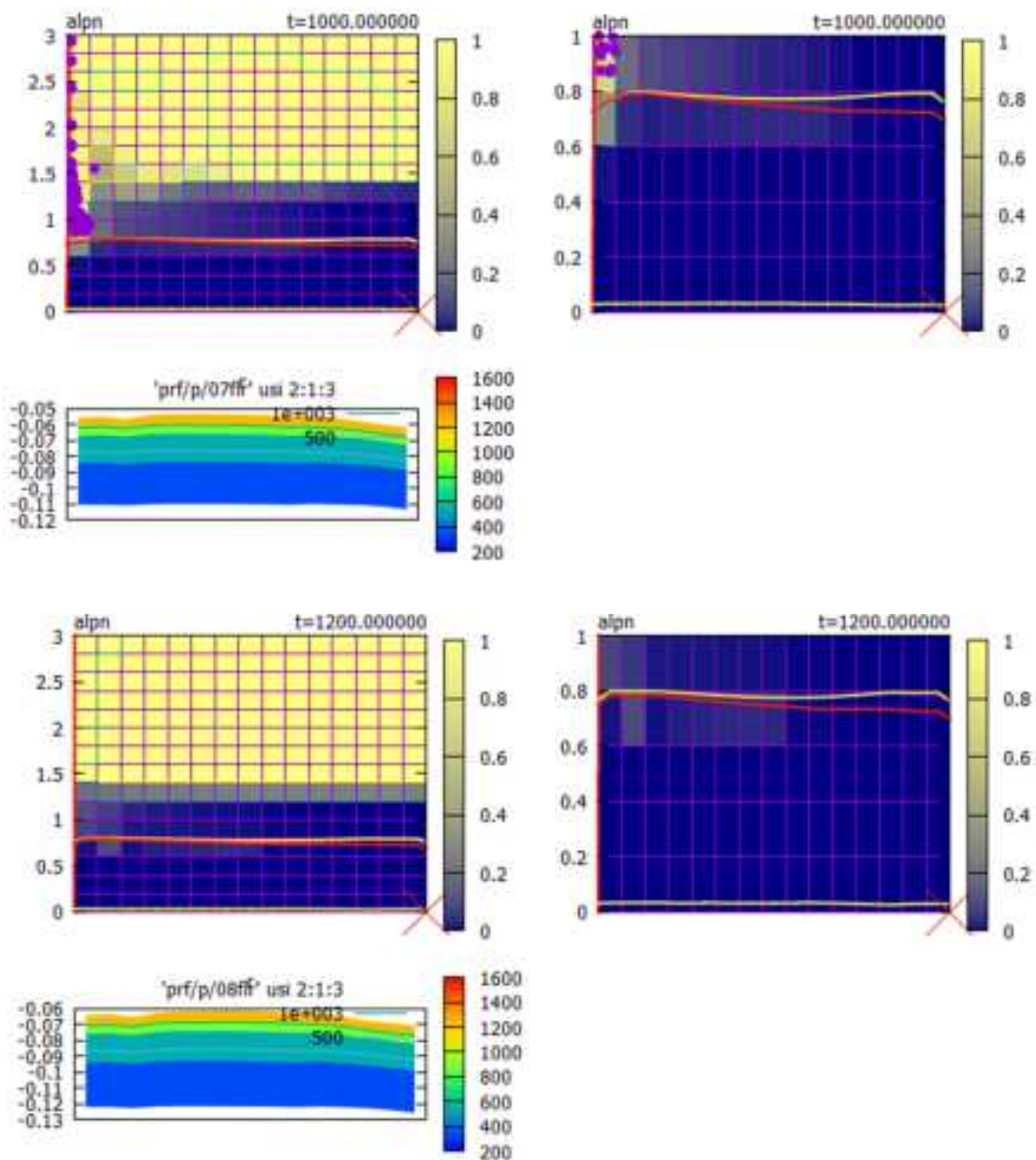


図 B.2.20 溶融物と水プールの状況 (case5 続き : 1000~1200 秒)

## B.2.2 クラスト厚さの変化

case1

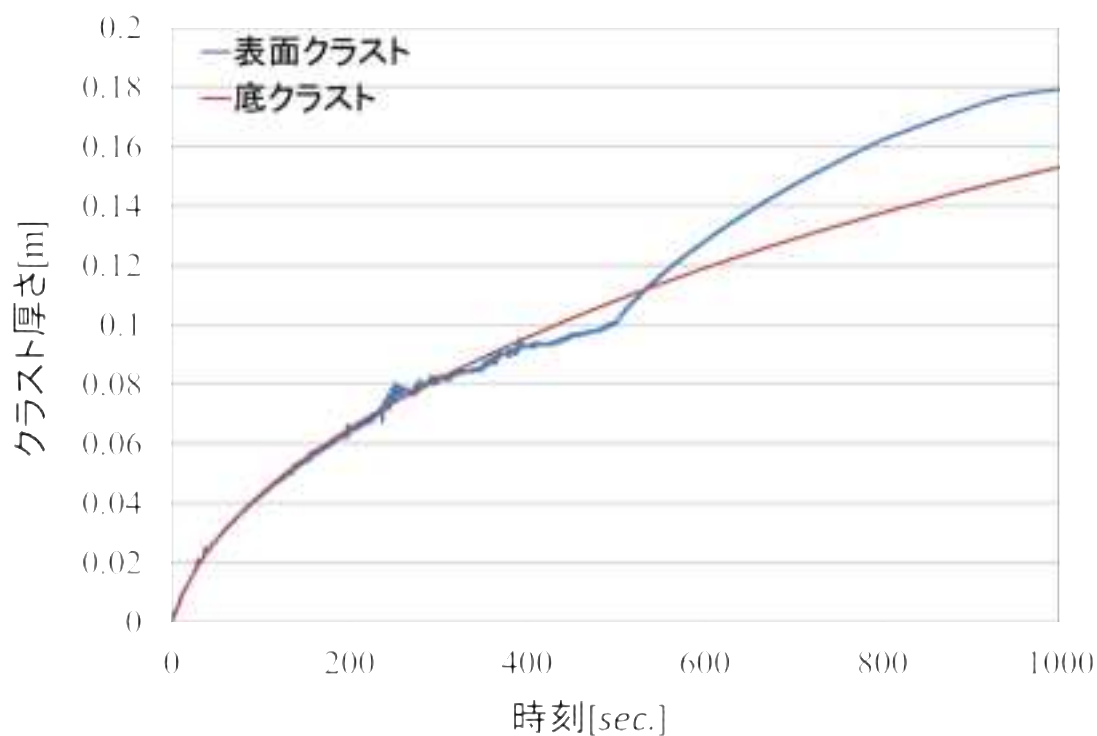


図 B.2.21 クラスト厚さの変化の計算結果 (case1)

case2

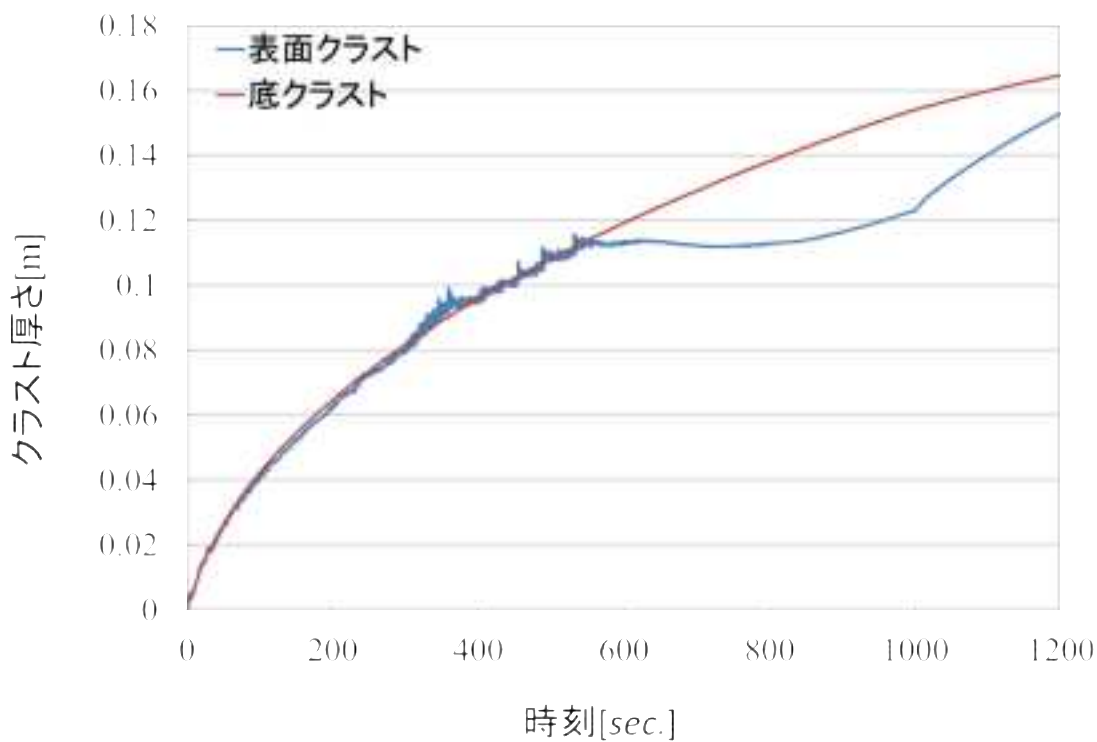


図 B.2.22 クラスト厚さの変化の計算結果 (case2)

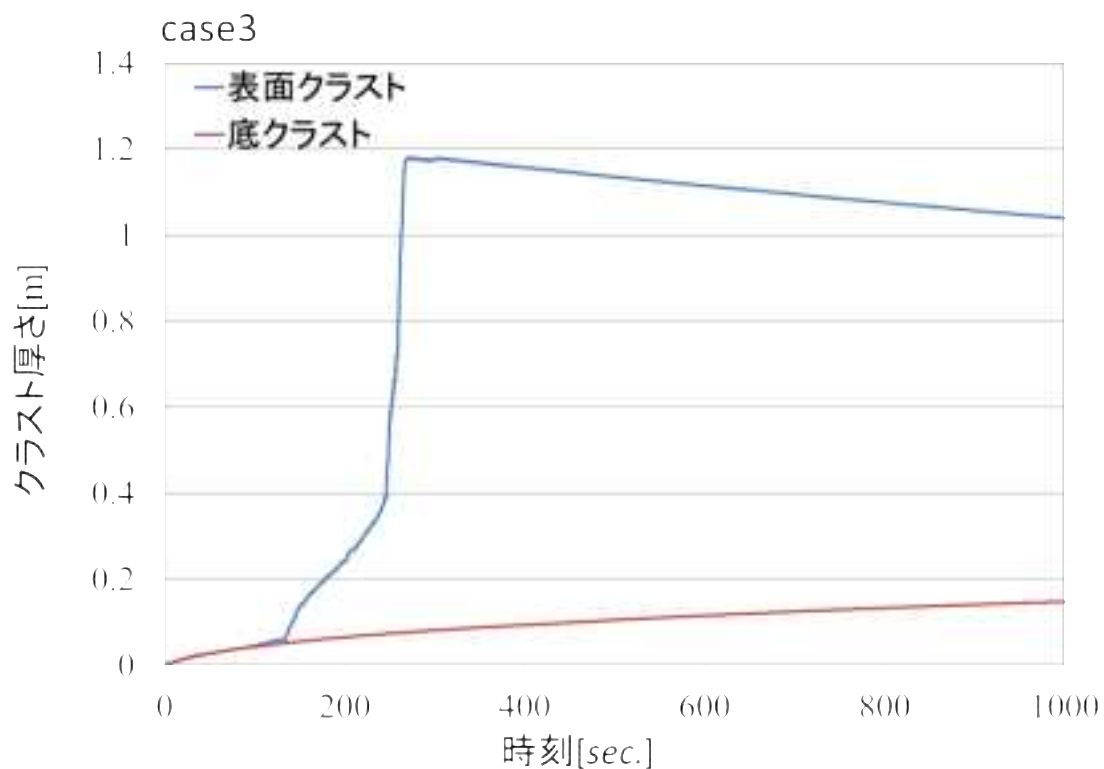


図 B.2.23 クラスト厚さの変化の計算結果 (case3)

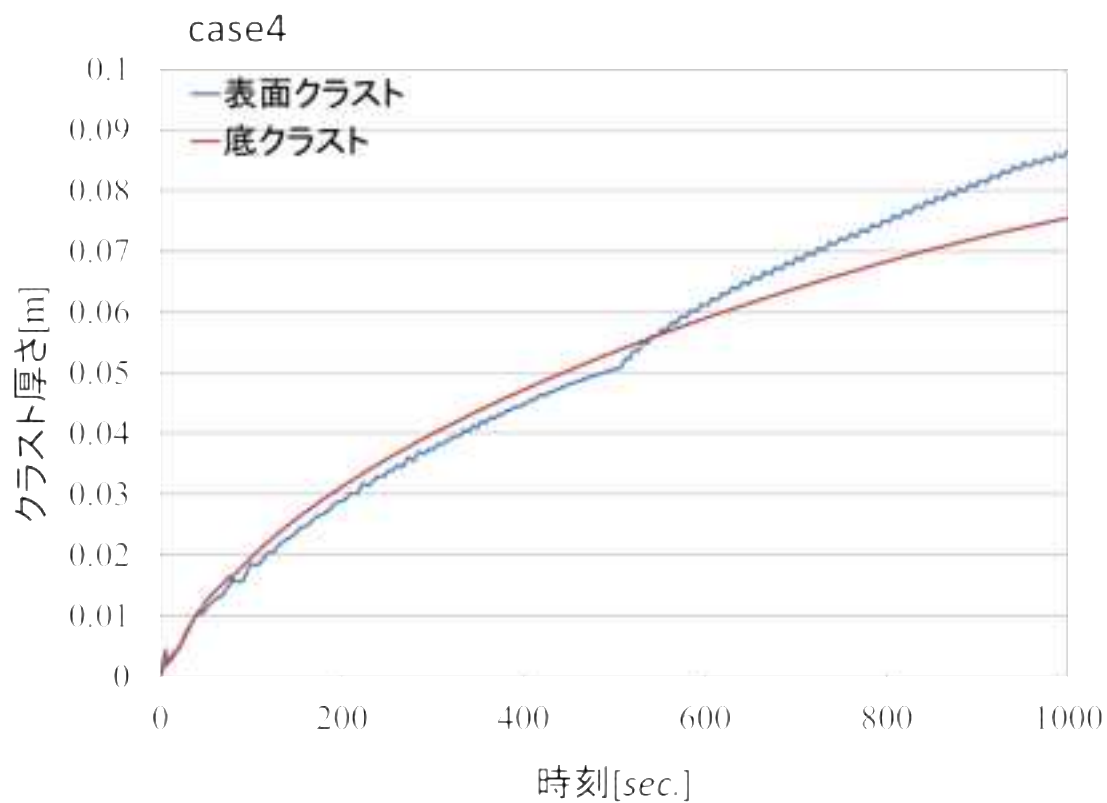


図 B.2.24 クラスト厚さの変化の計算結果 (case4)

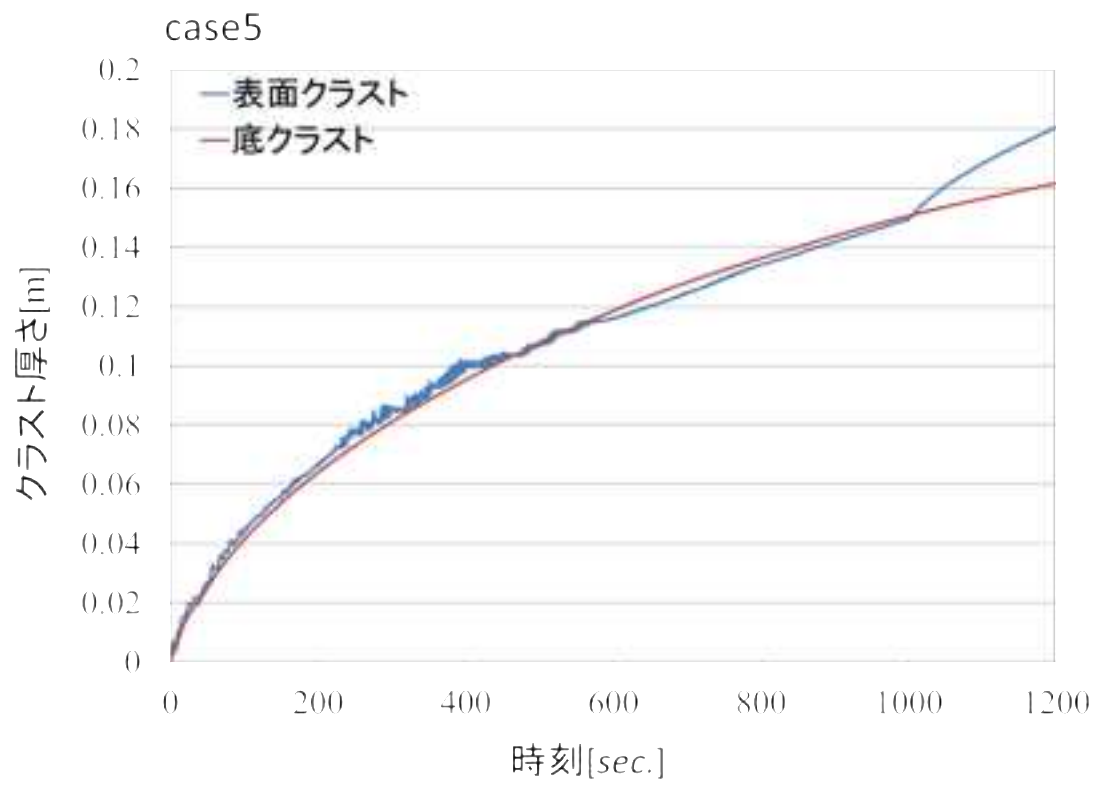


図 B.2.25 クラスト厚さの変化の計算結果 (case5)

### B.2.3 溶融物の拡がりの変化

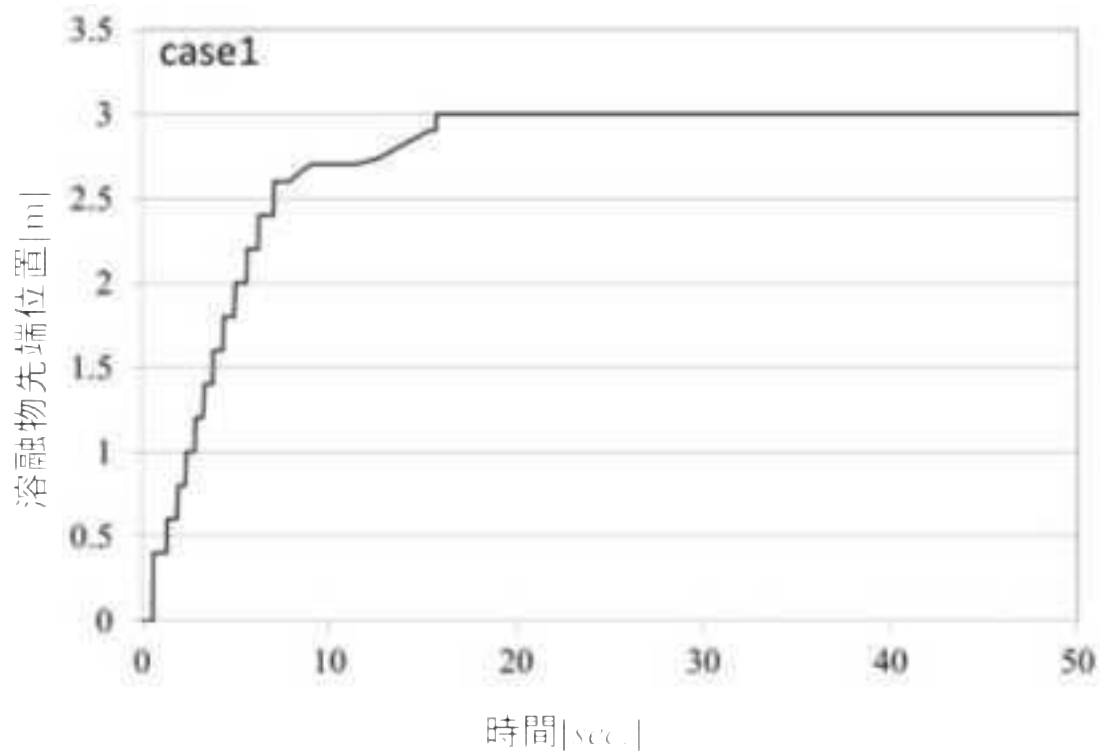


図 B.2.26 溶融物拡がり変化の計算結果 (case1)

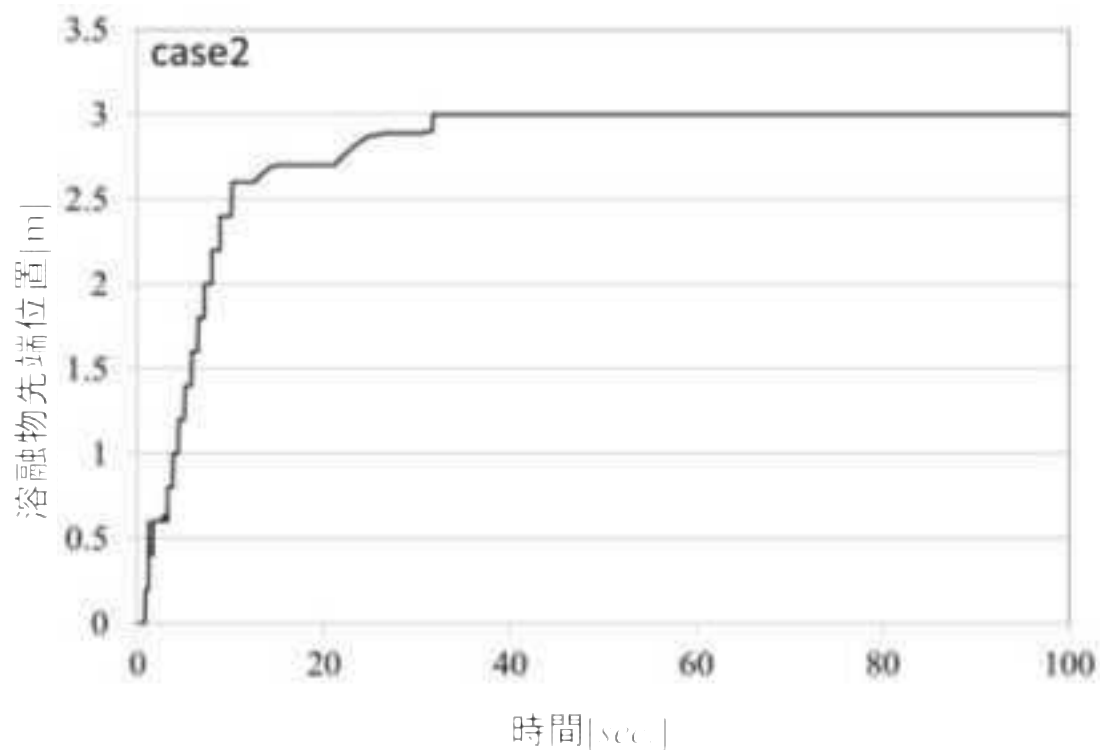


図 B.2.27 溶融物拡がり変化の計算結果 (case2)

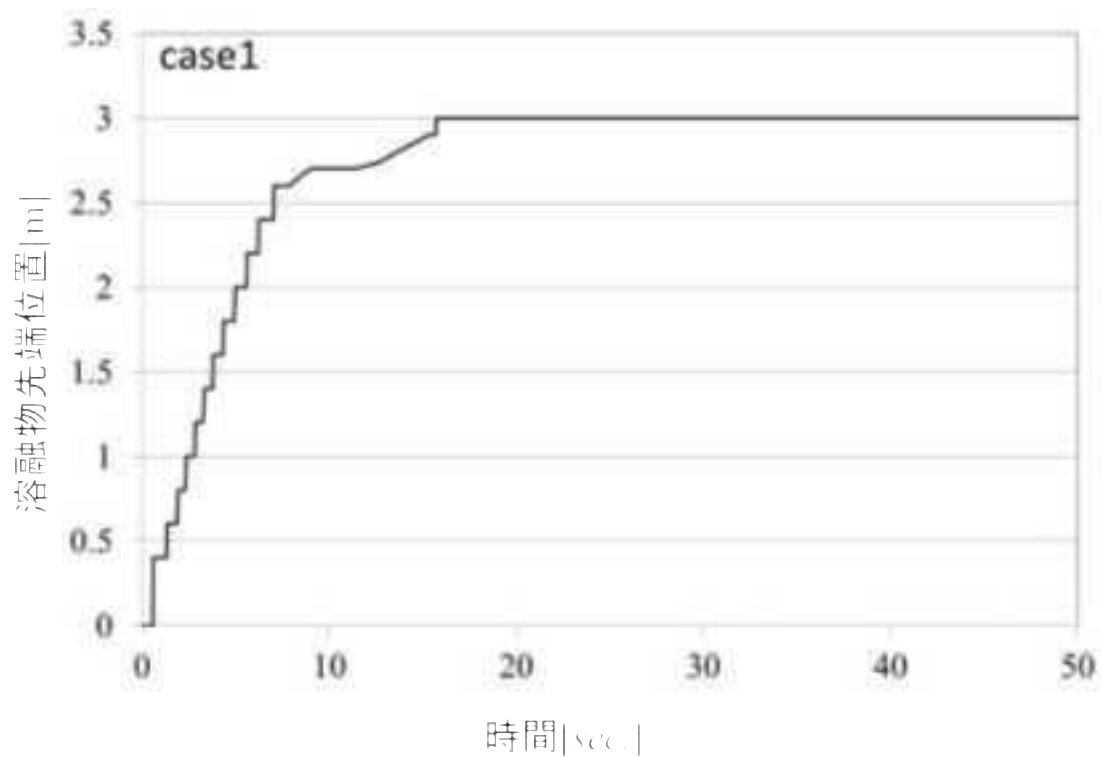


図 B.2.28 溶融物拡がり変化の計算結果 (case3)

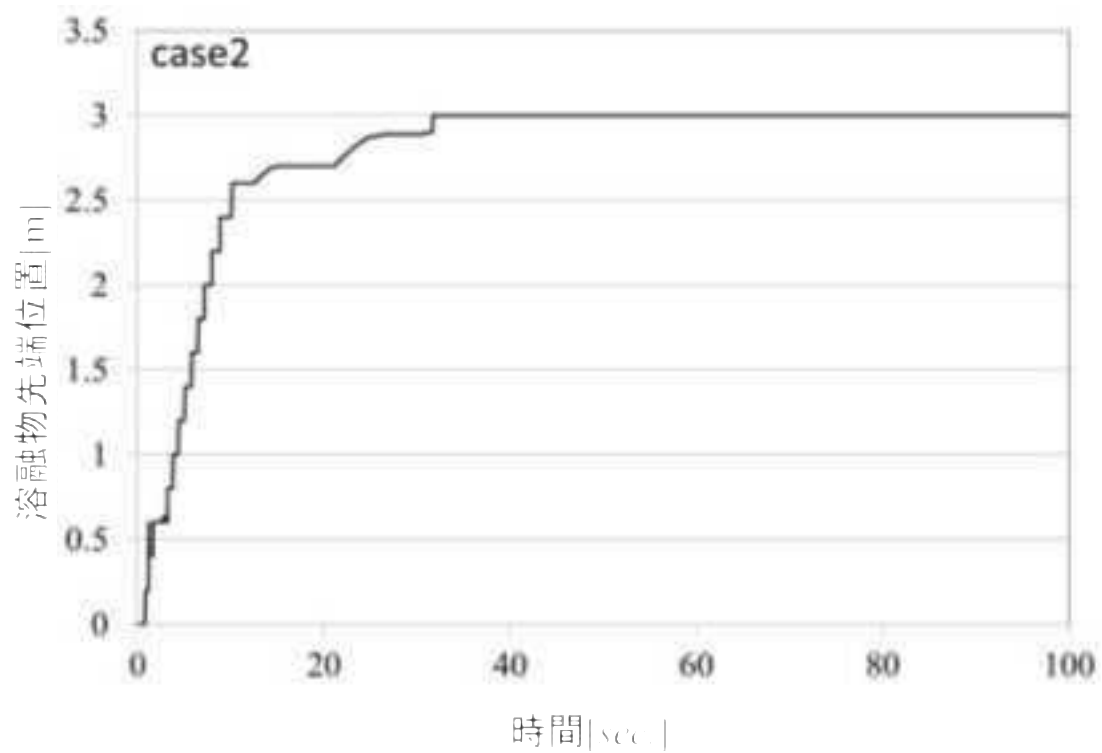


図 B.2.29 溶融物拡がり変化の計算結果 (case4)

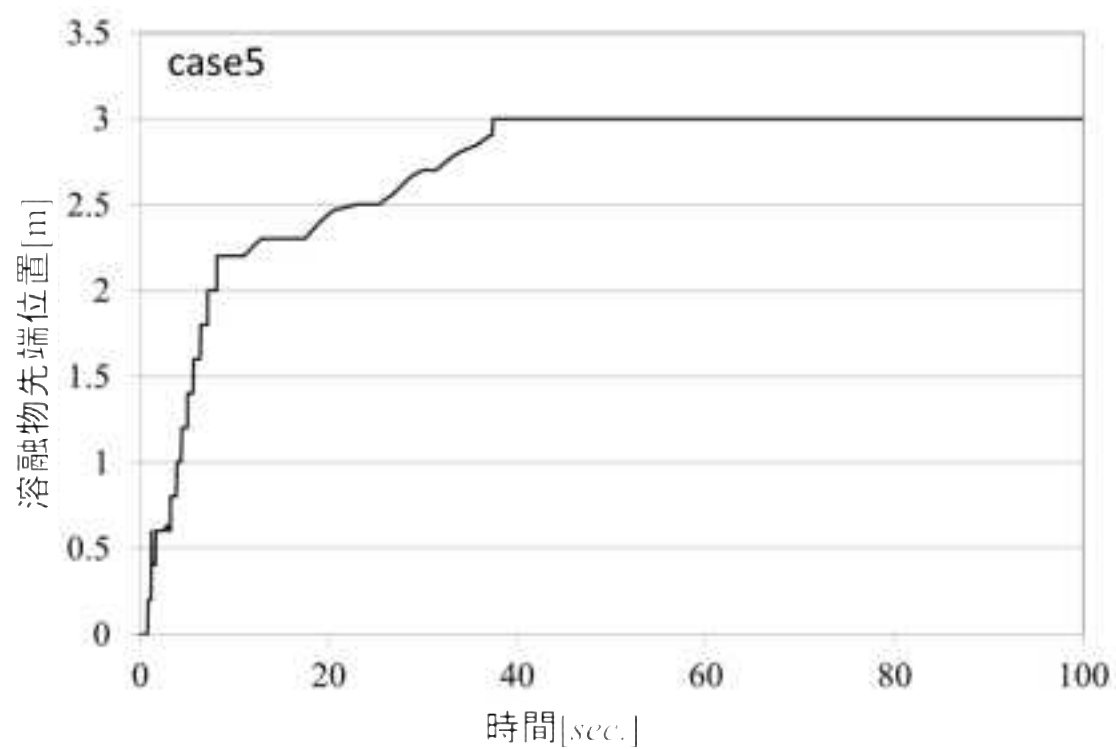


図 B.2.30 溶融物拡がり変化の計算結果 (case5)

## B.2.4 ボイド率分布

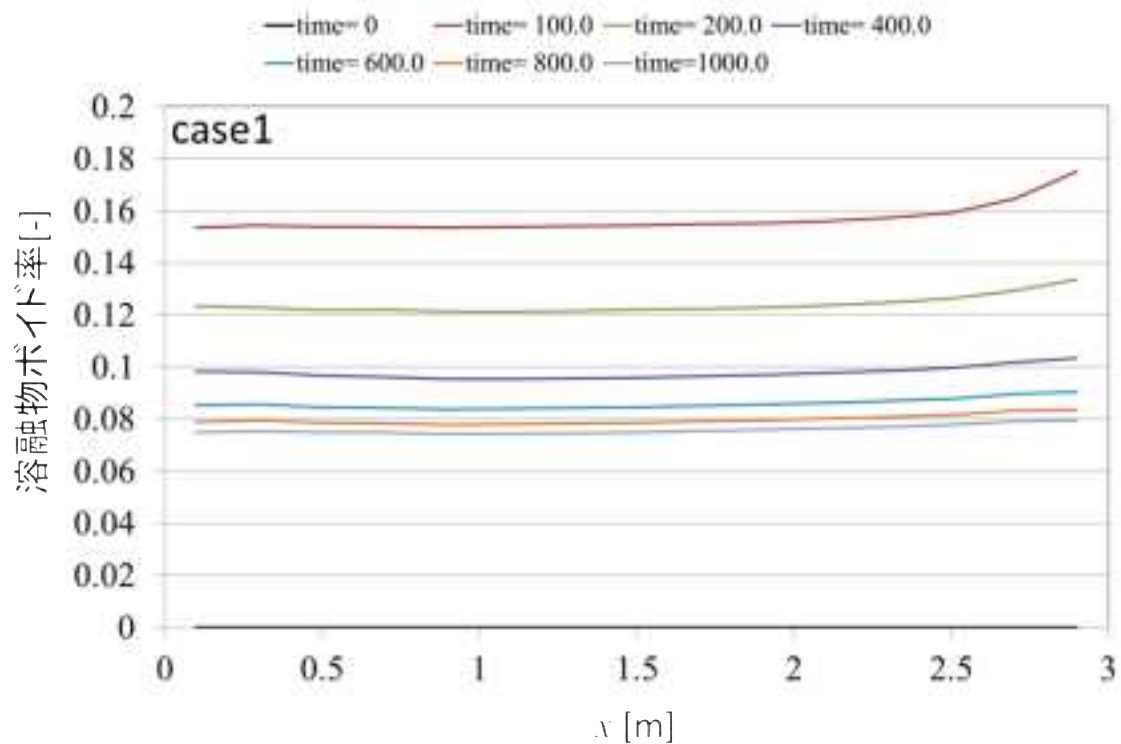


図 B.2.31 溶融物ボイド率 (case1)

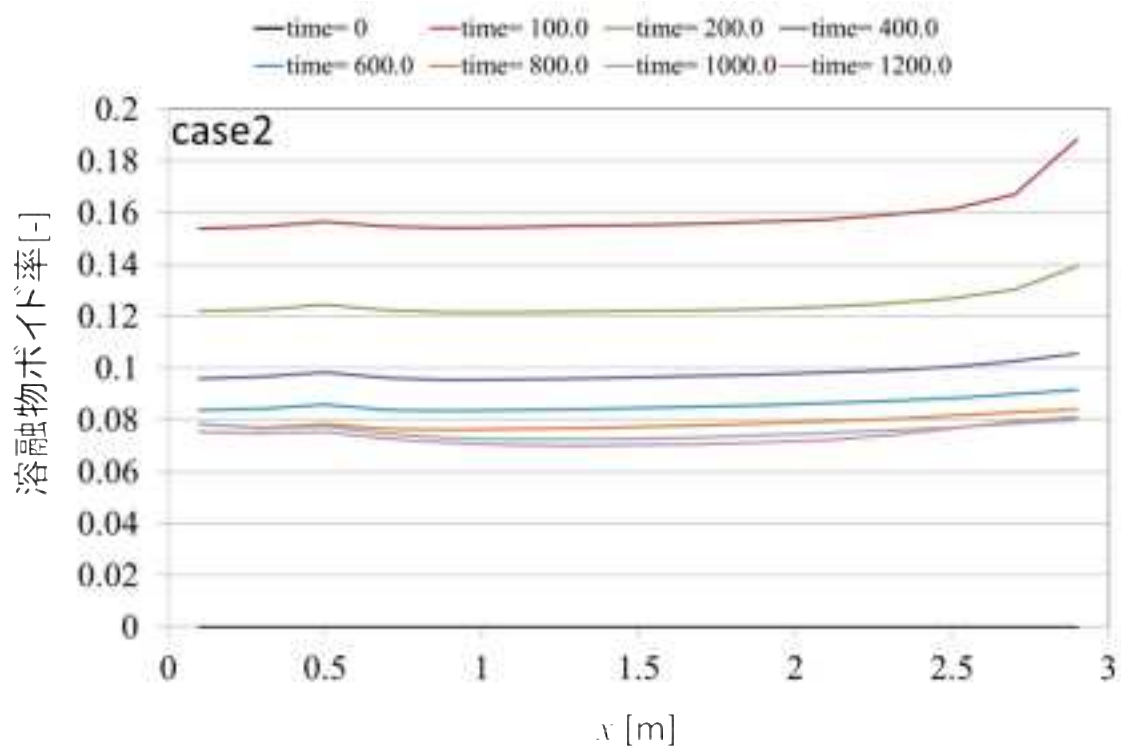


図 B.2.32 溶融物ボイド率 (case2)

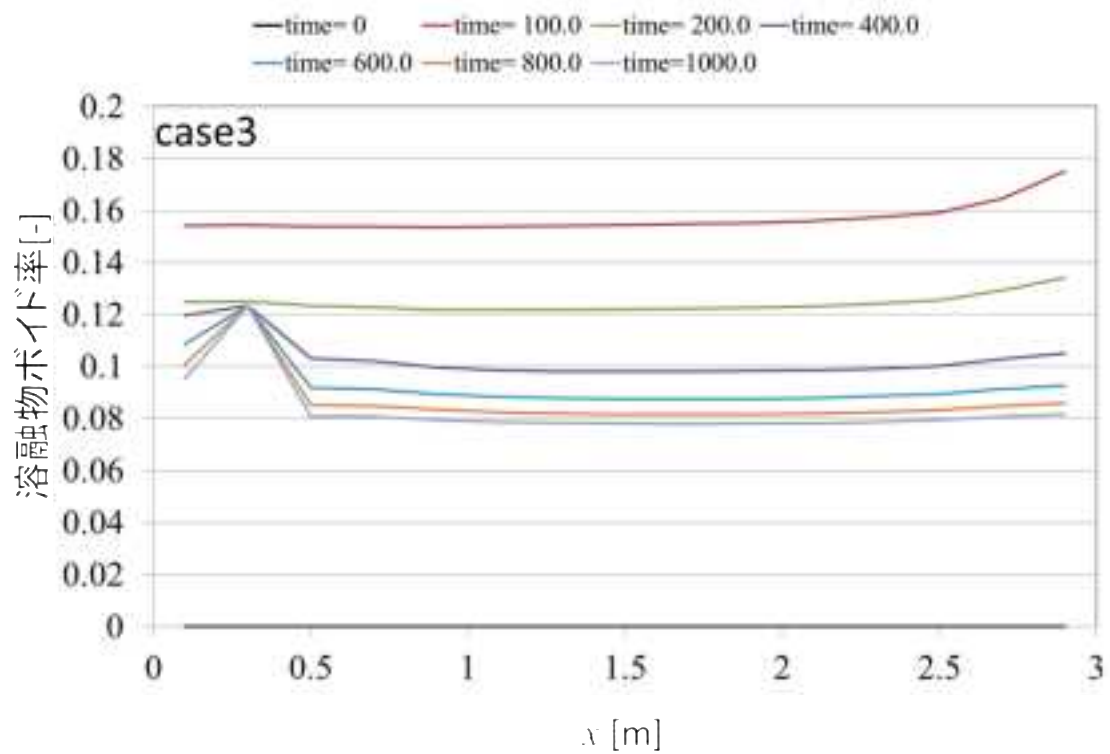


図 B.2.33 溶融物ボイド率 (case3)

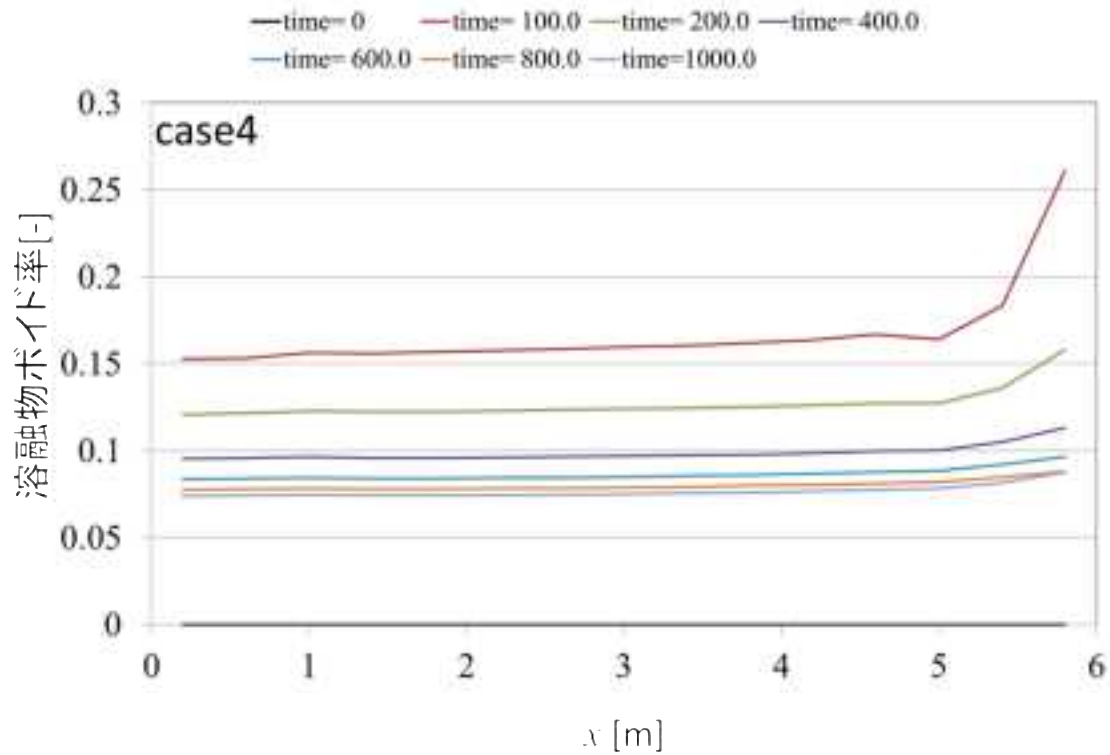


図 B.2.34 溶融物ボイド率 (case4)

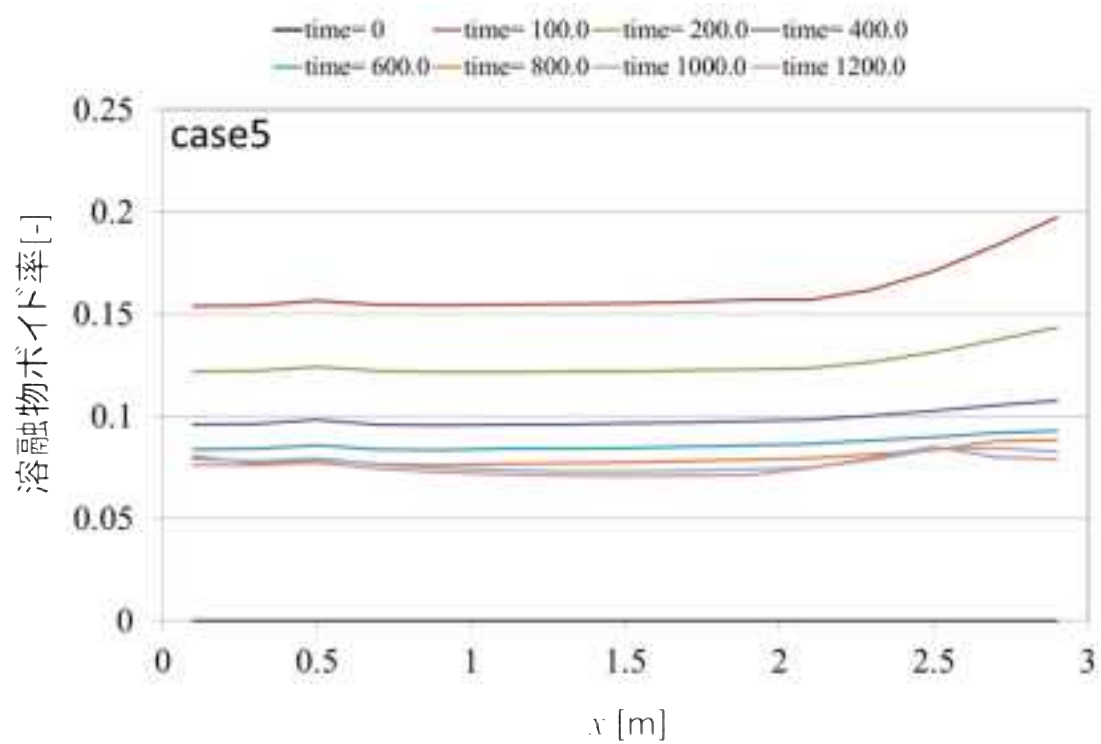


図 B.2.35 溶融物ボイド率 (case5)

## 付録 C JASMINE コードの概要

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

### C.1 コードの目的及び対象とする現象

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

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

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

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

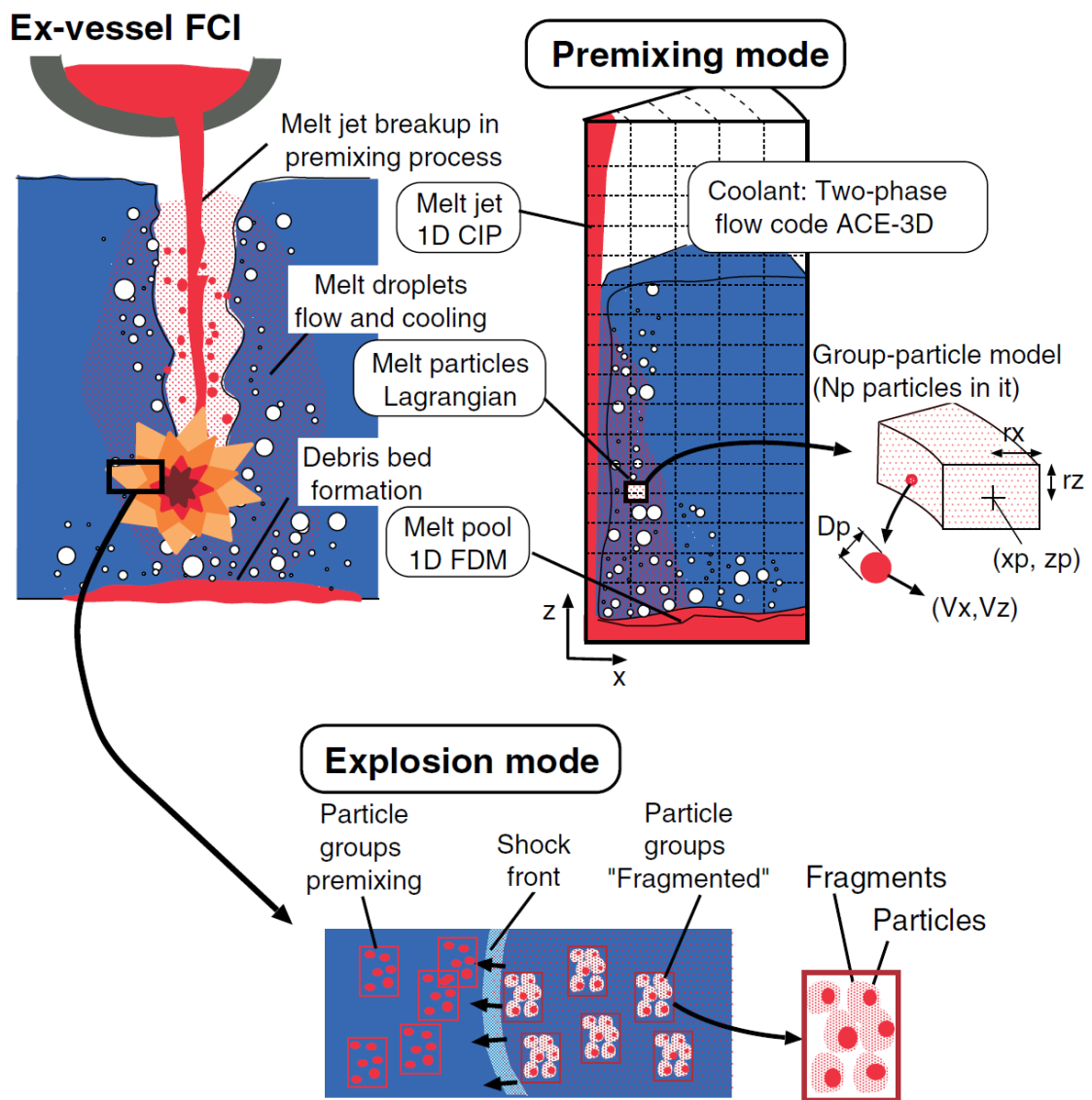


図 C.1 水蒸気爆発現象と JASMINE コードの解析モデル

## C.2 基本モデルと計算式

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

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

### (1) 溶融物ジェット

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

質量保存則：

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

エネルギー保存則：

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

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 C.2 参照） $L_{brk}$ から計算する。ブレイクアップ長さは基本的には次に示す Saito の式を用いて計算する。

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

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

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

により、ジェット表面での溶融物剥離速度を求め、さらに、

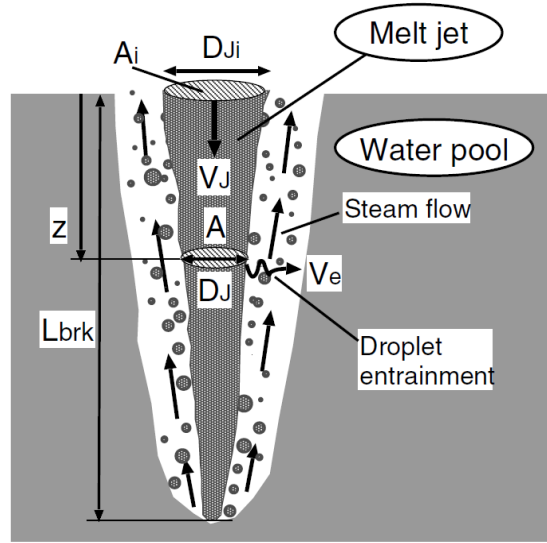


図 C.2 JASMINE コードにおける溶融物ジェットのモデル

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

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

## (2) 溶融物プール

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

質量保存則：

$$\frac{\partial w h_P \rho_P}{\partial t} + \frac{\partial (w h_P \rho_P v_P)}{\partial x} = w m_s$$

エネルギー保存則：

$$\frac{\partial e_P}{\partial t} + v_P \frac{\partial e_P}{\partial x} = \frac{q}{h_P \rho_P} + \frac{(e_{ms} - e_P) \max(m_s, 0)}{h_P \rho_P}$$

運動量保存則：

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

とする。

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

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

ここで、 $H$ は溶融物表面の水側熱伝達率である。

### (3) 溶融物液滴

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

運動量保存則は、速度について：

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

液滴位置について：

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

また、エネルギー保存則は：

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

となる。

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

- (a) 液滴数が所定の値に達した時
- (b) グループが占める空間領域の  $\mathbf{x}$  方向の大きさが  $\mathbf{x}$  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  $\mathbf{x}$  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（ $\mathbf{x}$ 、 $\mathbf{z}$  方向成分をそれぞれ  $v_{ex}$ 、 $v_{ez}$  とする）は、次式で計算する。

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

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

また、 $\phi_r$ は0～1の一様乱数である。

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

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

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。

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

#### (4) 水プール

水プールの温度及び流動の挙動は、多流体モデルの圧縮性二相流に関する質量、運動量及びエネルギーの保存則について有限差分法を用いて計算する。座標系はオイラー座標軸対称二次元（並進対称二次元の機能も有する）であるが、プログラム上は円筒座標三次元としており、 $\theta$ 方向1セルについて計算するセクターモデルである。セクター角度は入力により指定可能である（通常は0.1ラディアン）。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 C.1 JASMINE コードで使用する水・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<br>$Nu = 2 + 0.6Re^{1/2}Pr^{1/3}$  |
| 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  
 $\alpha$  : ボイド率  
 $\gamma_k$  : 単位体積当たり質量変化  
 $\kappa$  : 熱拡散率  
 $\lambda$  : 熱伝導率  
 $\rho$  : 密度  
 $\theta$  : セクターモデルの周方向分割メッシュ幅角度

### 添字

$a$  : 水プールを表す  
 $av$  : 平均を表す  
 $e$  : エントレインメント  
 $J$  : 溶融物ジェット ( $Ji$ は、水面高さでの値を示す)  
 $k$  : 流体の種類  
 $l$  : 水  
 $P$  : 溶融物プール  
 $p$  : 溶融物液滴  
 $sf$  : 表面

### C.3 プログラムの特徴

#### (1) 計算手順

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

#### (2) JASMINE コードで使用する物性値

##### (a) 熔融物

実機解析、実験解析に備えて、以下の物質に対する物性値の関数を用意している。

表 C.2 JASMINE コードで用意されている熔融物

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

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

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

表 C.3 JASMINE で使用されるコリウムの物性値

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

## (b) 蒸気表

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

(c) 沸騰熱伝達

JASMINE コードで使用している沸騰曲線の一例をグラフに示す。雰囲気気圧を大気圧とし、水プールのサブクール度をパラメータとして、熔融物の表面過熱度に対する熱流束を計算した。図 C.3 が液滴表面熱流束、図 C.4 が熔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。

熔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 コードにより熔融物の床面拡がり解析を行った場合に水サブクール度の影響がきわめて小さくなると予想される。

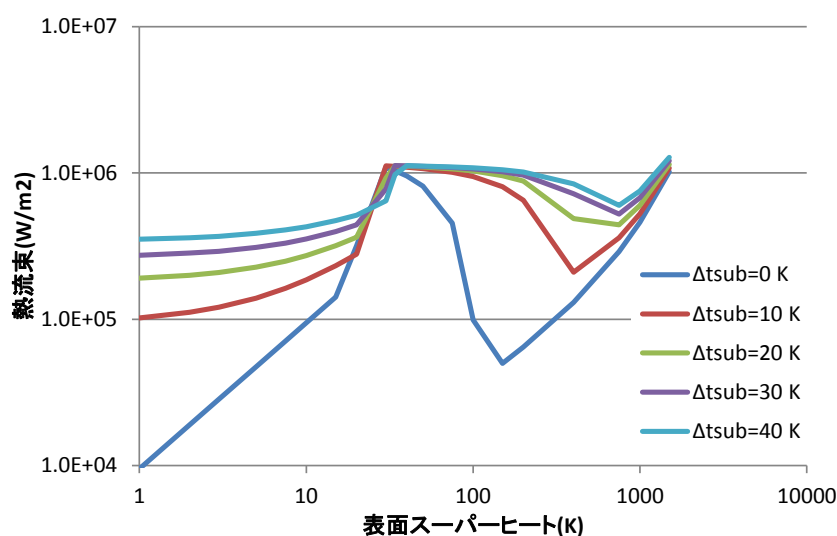


図 C.3 Jasmine 液滴表面熱流束(大気圧,d=3mm,v=0.3m/s)

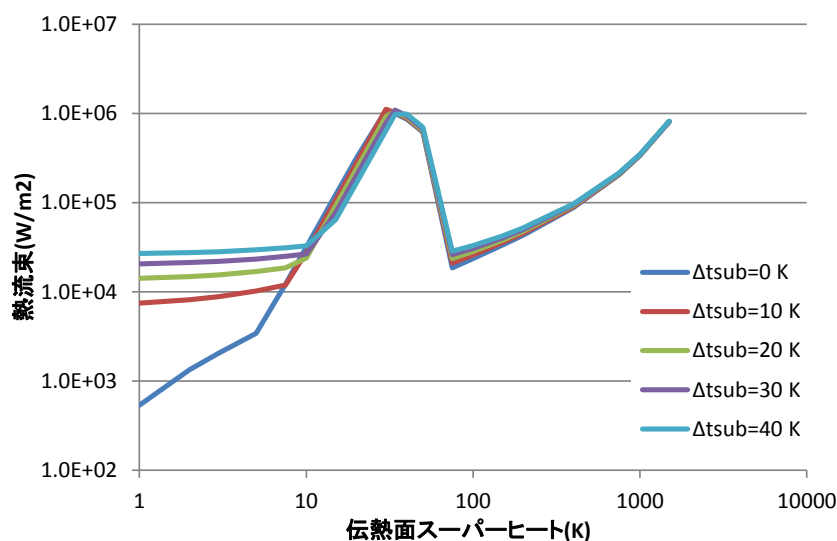


図 C.4 Jasmine プール表面熱流束(大気圧)

#### C.4 コードの開発履歴と検証

JASMINE コードの開発・改良は長期間にわたり行われている。これまでの開発の経緯とコードバージョン名及び解析・比較の対象とした実験を表 C.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。昨年度事業において改良したバージョンを JASMINE 4.0 とする。

表 C.4 JASMINE コードの開発・改良の経緯

| バージョン名        | 発行/<br>実施年月                                                                                | 内容・参考文献                                                                                        | 比較対象実験                                                        |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| JASMINE       | 1994                                                                                       | 開発着手。<br>混相流解析コード MISTRAL を元に<br>予混合過程の解析部を作成。<br>[C.3]                                        | Gilbertson らの非<br>加熱体系での実験<br>MAGICO 実験                       |
| JASMINE Pro   | 2000/12                                                                                    | 爆発過程の解析部を作成。<br>ユーザーマニュアルを発行。<br>[C.4]                                                         |                                                               |
| JASMINE-pre   | 2004/1                                                                                     | 水-蒸気系の計算に ACE-3D を利用<br>した予混合過程計算部を作成。<br>論文発行。<br>[C.5]                                       | FARO-L24, -L31                                                |
| JASMINE 3     | 2008/07                                                                                    | 予混合過程・爆発過程を同一の計算<br>プロセスで扱うバージョンを作成。<br>ユーザーズマニュアルを発行。<br>[C.1]                                | FARO-L14, -L28,<br>-L31, -L33<br><br>KROTOS-K44, -42,<br>-K37 |
| JASMINE 3.3b  | 2010/07                                                                                    | プログラムの構成・変数名、説明文書<br>等を整理。                                                                     | OECD/NEA<br>SERENA Project<br>Phase-1                         |
| JASMINE_NRA   | 2014/10                                                                                    | 予混合過程の液滴粒径分布考慮。<br>ジェットの流動抵抗計算式変更。<br>溶融物の物性値入力を可能とした。                                         | OECD/NEA<br>SERENA Project<br>Phase-2                         |
| JASMINE 3.3NW | 2015/07                                                                                    | 環境を LINUX (UNIX) から<br>WINDOWS に変更。コンパイラをイン<br>テル Visual Fortran Composer XE<br>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<br>ップにおける Rosin-Rammler 粒径分布モデル及<br>び床面拡がり挙動におけるクラスト形成モデル<br>を追加。 |                                                                                                | DEFOR-A<br>PULiMS                                             |

## C.5 参考文献

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

## 付録 D 出張報告

### 国内出張 (1)

|     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 件名  | 日本原子力学会 2016 年秋の大会における口頭発表                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| 出張先 | 久留米シティプラザ (福岡県久留米市)                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| 期間  | 平成 28 年 9 月 7 日(水)～平成 28 年 9 月 9 日(金)                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| 出張者 | 研究首席 1 名、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について、日本原子力学 2016 年会秋の大会にて下記の 2 件の口頭発表を行った。</p> <p>[2E17]<br/>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<br/>(3) JASMINE コードにおける溶融炉心床上拡がり挙動モデルの改良<br/>川部 隆平、松本 俊慶、杉山 智之、丸山 結 (原子力機構)</p> <p>[2E18]<br/>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<br/>(4) JASMINE コードにおけるジェットブレイクアップモデルの改良<br/>松本 俊慶、川部 隆平、杉山 智之、丸山 結 (原子力機構)</p> |

外国出張（1）

|     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 件名  | 原子炉容器内溶融炉心保持に関する国際会合等への出席                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 出張先 | フランス エクサンプロバンス                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| 期間  | 平成 28 年 6 月 5 日（日）～6 月 10 日（金）                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| 出張者 | 研究首席 1 名                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| 概要  | <p>シビアアクシデント対策の一つである原子炉容器内溶融炉心保持に関する国際ワークショップに参加し、格納容器内溶融炉心冷却挙動の境界条件となる圧力容器内における溶融炉心の特性等に関する技術的な情報を収集するとともに、格納容器内水蒸気爆発に係わる技術報告書の取りまとめ会合に出席し、最終ドラフトの作成に向けた検討を行い、これらを通して溶融炉心冷却性に関する最新知見を収集した。</p> <p>・原子炉容器内溶融炉心保持（IVR：In-Vessel Retention）に関する国際ワークショップ</p> <p>本ワークショップは、6 月 6 日～7 日にエクサンプロバンス会議センターにて開催され、欧州各国を中心に約 120 名が参加者した。IVR とは、原子炉容器の下部ヘッドを水没させ、その外面における沸騰熱伝達により下部プレナム内に堆積した溶融炉心の崩壊熱を除去するシビアアクシデント対策である。冒頭セッションにおいて、原子力規制庁の担当者より、原子力規制庁、スウェーデン王立工科大学、ドイツのシュツットガルト大学、フランスの放射線防護原子力安全研究所及び原子力機構が共同で作成した資料を用いて、格納容器内におけるシビアアクシデント影響緩和対策の観点から求められる研究ニーズについて発表が行なわれた。出張者は、冒頭のセッションに引き続いて行われたパネルディスカッションにパネルとして参加した。</p> <p>・格納容器内水蒸気爆発に係わる技術報告書の取りまとめ会合</p> <p>本技術報告書（TOP：Technical Opinion Paper）は、OECD/NEA/CSNI の下に設けられた事故解析・管理ワーキンググループ（WGAMA）における活動の一環として作成されている。本会合（最終会合）は 6 月 8 日に開催され、欧州及び日本から 10 名の専門家が参集した。ドラフト報告書の構成に係わる検討に加えて、特に、近年の研究成果から導き出される研究ニーズの展望について議論を進めた。</p> |

外国出張（2）

|     |                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 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 28 年 9 月 19 日（月）～平成 28 年 9 月 24 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 19 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 50 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、JAEA から 1 名）。</p> |

外国出張（3）

|     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 件名  | IAEA 溶融炉心評価に関する技術会合への出席                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 出張先 | 中国／上海、中国核工程研究設計院（SNERDI）                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| 期間  | 平成 28 年 10 月 18 日（火）～平成 28 年 10 月 21 日（金）                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| 出張者 | 研究員 1 名                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 概要  | <p>本技術会合は、軽水炉シビアアクシデント時における圧力容器内溶融炉心保持（IVMR）及び圧力容器外炉心溶融物冷却（EVCC）に関する科学的・技術的な情報交換及び議論を目的として国際原子力機関（IAEA）が開催したものである。</p> <p>18 か国の 38 機関（産業界、規制機関、研究機関）から、約 60 名が参加した（IAEA 事務局の山田氏を除き、日本からの参加は出張者 1 名のみ）。IVMR については圧力容器の外部冷却・健全性、メルトプール挙動等に関して、また、EVCC については冷却手法、格納容器の健全性等に関して、合計 34 件の発表が行われた。</p> <p>出張者は、上記発表の聴講を通して最新知見を取得するとともに、平成 27 年度事業の成果の一部を「Improvement of Fuel-Coolant Interaction Models for Ex-Vessel Debris Coolability Evaluation」として発表し、参加者からコメントを得た。</p> |

外国出張（4）

|     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 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）<br>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 28 年 10 月 24 日（火）～平成 28 年 10 月 30 日（金）                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 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 3 月 20 日（月）～平成 29 年 3 月 31 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> <p>なお、駐在は平成 29 年度事業まで継続され、全駐在期間は平成 29 年 3 月 20 日(月)～平成 30 年 3 月 19 日(月)である。</p> |