

令和 3 年度原子力規制庁委託成果報告書

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

国立研究開発法人
日本原子力研究開発機構
令和 3 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. アグロメレーションの解析	2-1
2.1 実施背景	2-1
2.2 今年度の実施内容	2-1
2.3 解析対象の実験	2-1
2.3.1 DEFOR-A 実験	2-1
2.3.2 実験条件	2-4
2.4 解析条件	2-6
2.4.1 解析体系	2-6
2.4.2 感度解析	2-6
2.5 感度解析結果	2-8
2.6 考察	2-12
2.7 まとめ	2-16
3. 溶融物の拡がりの解析	3-1
3.1 実施背景	3-1
3.2 今年度の実施内容	3-1
3.3 ウェット条件での解析	3-1
3.3.1 PULiMS 実験	3-1
3.3.2 実験条件	3-3
3.3.3 解析条件	3-4
3.3.4 解析結果	3-7
3.3.5 考察	3-15
3.4 ドライ条件での解析	3-16
3.4.1 VULCANO 実験	3-16
3.4.2 KATS 実験	3-16
3.4.3 ECOKATS 実験	3-16
3.4.4 FARO 実験	3-16
3.4.5 COMAS 実験	3-16
3.4.6 実験条件	3-16
3.4.7 解析条件	3-19
3.4.8 解析結果	3-21
3.4.9 考察	3-29
3.5 RIT 試験の解析	3-31
3.5.1 実験目的	3-31
3.5.2 RIT 試験での実験解析の対象	3-31
3.5.3 実験条件	3-31

3.5.4	解析条件	-----	3-32
3.5.5	解析結果	-----	3-34
3.5.6	考察	-----	3-36
3.6	まとめ	-----	3-37
4.	実機冷却性評価	-----	4-1
4.1	概要	-----	4-1
4.2	MELCOR コードによるシビアアクシデント解析	-----	4-2
4.2.1	解析する原子炉及びベースシナリオ	-----	4-2
4.2.2	解析条件及び不確かさを考慮するパラメータ	-----	4-6
4.2.3	MELCOR 解析	-----	4-7
4.2.4	溶融物放出条件抽出と整理	-----	4-10
4.2.5	溶融物の物性値の算出	-----	4-14
4.3	JASMINE コードによる格納容器内溶融物挙動解析	-----	4-15
4.3.1	JASMINE 解析条件	-----	4-15
4.3.2	JASMINE 解析結果と溶融物堆積状態	-----	4-41
4.3.3	冷却の成功・失敗判定	-----	4-60
4.3.4	冷却の成功確率評価	-----	4-73
4.3.5	JASMINE 入出力パラメータの相関関係	-----	4-76
4.3.6	MELCOR 入力条件の落下溶融物条件及び溶融物拡がりへの影響	-----	4-78
4.3	まとめ	-----	4-80
5.	おわりに	-----	5-1
5.1	アグロメレーションの解析	-----	5-1
5.2	溶融物の拡がりの解析	-----	5-1
5.3	実機冷却性解析	-----	5-2
付録 A	JASMINE コードの概要	-----	A-1
付録 B	冷却可能な最大デブリ堆積高さの評価	-----	B-1
付録 C	ウェブ会議報告	-----	C-1

1. はじめに

軽水炉のシビアアクシデントにおいて、原子炉圧力容器の下部ヘッドが溶融炉心との相互作用により破損すると、溶融炉心が格納容器の原子炉キャビティ（PWR）あるいはペDESTAL（BWR）に移行し、これらの構造材であるコンクリートとの相互作用が発生し得る。この溶融炉心／コンクリート相互作用（MCCI：Molten Core/Concrete Interaction）が継続すると、コンクリートの溶融浸食あるいはそれに伴う非凝縮性気体や可燃性気体（二酸化炭素、一酸化炭素及び水素）の発生による過圧等に起因して格納容器の健全性が脅かされる。

東京電力福島第一原子力発電所（1F）の事故においては、長時間にわたり炉心の冷却が確保できなかったため、相当量の溶融炉心がペDESTALに移行したと推定され [1.1][1.2]、宇宙線ミュオンを用いた測定によっても溶融炉心の移行が裏付けられた [1.3]。また、1 から 3 号機では格納容器壁面に存在する貫通部からカメラ、線量計を挿入しての内部調査が実施された。格納容器内の映像により燃料集合体の一部をなす部材がペDESTALに落下したことが確認されており、圧力容器に比較的大きな開口が生じたことが示唆された [1.4]。

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（ドライ・キャビティ戦略）と溶融炉心が格納容器に落下する前に格納容器内に先行的に注水する対策（ウェット・キャビティ戦略）に大別され、我が国の事業者は後者を採ることとしている。これは、溶融炉心が格納容器内の水プール中を落下する間に、その全てあるいは一部がブレークアップ（粒子化）し、冷却可能なデブリベッドが格納容器の床面上に形成されることを期待するものである。我が国以外でも、例えばスウェーデンの BWR においてウェット・キャビティ戦略が採られているが [1.5]、水蒸気爆発リスクの低減を優先してドライ・キャビティ戦略を採る国が多数派であり、それ故に実験データは十分でない。

このため、現時点ではウェット・キャビティ戦略による溶融炉心の冷却性を評価する科学的・合理的な手法は確立されていない。このような状況を鑑み、本事業においては、図 1.1 に示すようなアプローチに基づいて、先行注水された格納容器内における溶融炉心の冷却性を評価する手法の構築を目指す。具体的には、以下のように評価技術を開発する。

- (a) 機構論的な溶融炉心／冷却材相互作用解析コード JASMINE [1.6]を改良し、溶融炉心の冷却性を支配すると考えられる水プール中における溶融炉心ジェットのブレークアップ、ブレークアップで生じた粒子同士の結合による塊状デブリ（アグロメレーションデブリ）の生成及び溶融炉心の床面上における拡がり挙動に係わる予測性能の向上を図る。

- (b) 冷却性の観点で特に重要と考えられるアグロメレーションデブリの重量 M_a 及び床面に拡がって連続層状に堆積する溶融炉心の重量 M_c の合計（または合計体積 V_d ）を JASMINE コードの解析により求める。複雑な溶融炉心の堆積状態を単純かつ保守的な体系に置き換えて、溶融炉心とコンクリートとの境界における最高温度 T_{max} （または溶融炉心の堆積深さ h_d ）を算出する。
- (c) JASMINE コードによる解析には、初期及び境界条件や解析モデルに含まれる不確かさが存在するため、これらの不確かさを考慮して(b)の解析を繰り返し実施する。一連の解析により、溶融炉心とコンクリートとの境界における最高温度 T_{max} （または堆積深さ h_d ）の不確かさ分布を得る。この分布とコンクリートの溶融浸食温度 T_{abl} （または冷却可能な最大堆積深さ h_{cool} ）を比較することにより、溶融炉心の冷却に成功する確率を評価する。
- (d) 上記の(b)及び(c)を格納容器内に形成される水プールの水深をパラメータとして実施することにより、溶融炉心の冷却性を高い確度で達成するために必要な水プールの水深を評価する。

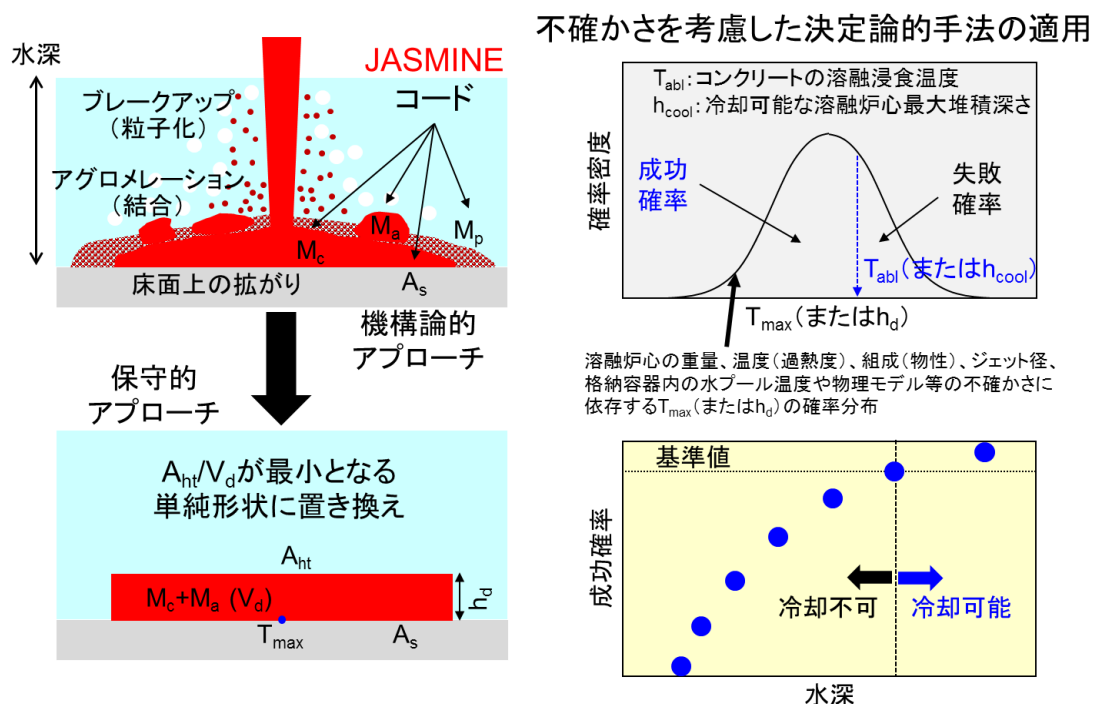


図 1.1 格納容器内溶融炉心冷却性評価のアプローチ及びアウトプット

今年度の事業においては、これまで改良を続けてきた JASMINE コードの改良・高度化に向けての課題及び、今後の実験において着目すべき項目を抽出することを目的として 溶融物の落下条件を対象とした感度解析を実施した。また、図 1.1 に示したアプローチによる実機評価の一環として、事故条件の不確かさを考慮した解析を JASMINE コードにより実施した。今年度の具体的な実施項目は以下のとおりである。

- ① 溶融炉心のブレイクアップで生じた粒子のうち、冷却されて固化する前に他の粒子と結合してアグロメレーションデブリを形成するものの割合（アグロメレーション割合）を評価するモデルが JASMINE コードに組み込まれている。アグロメレーションに対して支配的となる物理現象の要因を検討し、実験における計測に要する精度や不確かさ要因及び解析モデルの不確かさの項目を同定することを目的として、DEFOR-A 実験 [1.7]を対象とした感度解析を実施した。溶融物の投入直径及び投入速度をパラメータとした。
- ② JASMINE コードには格納容器床面上での溶融炉心拡がり挙動の評価モデルとして、平成 31 年度までに溶融物の上面及び下面におけるクラスト層形成、拡がり先端におけるクラスト層の疑似的な強度を用いた拡がり停止判定のモデル及び床面に衝突した溶融物が速く浅い水平方向の流れ（射流）を形成するモデル等が組み込まれた。溶融物の拡がりモデルを用い、ウェット条件として PULiMS [1.8]、ドライ条件として VULUCANO 実験 [1.9]等を対象とした感度解析を実施した。実験で用いられた溶融物の投入直径及び投入速度が溶融物の拡がりへ与える影響を調査した。また解析の結果に基づき、溶融物の拡がりに対して支配的となる物理現象等の要因を検討した。
- ③ シビアアクシデント総合解析コード MELCOR を用い、炉心損傷及び事故対策に関連する入力パラメータに不確かさを仮定した上で TB 事故シーケンスを対象とした解析を行った。その結果に基づき溶融物条件（格納容器内に流出する溶融炉心の組成、質量、温度及び溶融炉心ジェットの径等）及び組成から算出した溶融物の物性値を設定し、JASMINE コードによる格納容器内溶融物挙動解析を実施した。デブリの最終的な堆積高さから MCCI 回避確率（冷却成功確率）を評価し、これを複数の格納容器水位条件に対して実施することで、冷却成功確率と格納容器先行注水量の関係を評価した。

参考文献

- [1.1] Pellegrini, M., Dolganov, K., Herranz, L. E., Bonneville, H., Luxat, D., Sonnenkalb, M., Ishikawa, J., Song, J. J., Gauntt, R. O., Moguel, L. F., Payot, F., Nishi, Y., 2017, Benchmark Study of the Accident at the Fukushima Daiichi NPS: Best-Estimate Case Comparison, Nucl. Technol., 196, 198-210
- [1.2] Madokoro, H. and Sato, I., 2021, Estimation of the core degradation and relocation at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Unit 2 based on RELAP/SCDAPSIM analysis, Nucl. Eng. Des., 376, 111123
- [1.3] 東京電力ホールディングス, 福島第一1～3号機ミュオン測定による燃料デブリ分布の把握について, 2017年8月30日, http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/handouts/2017/images2/handouts_170830_09-j.pdf
- [1.4] 東京電力ホールディングス, 福島第一原子力発電所2号機原子炉格納容器内部調査実施結果(速報), 2017年2月20日, http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/handouts/2018/images1/handouts_180119_08-j.pdf
- [1.5] S. Galushin and P. Kudinov, “Sensitivity analysis of debris properties in lower plenum of a Nordic BWR”, Nucl. Eng. Des., Vol. 332, pp. 374-382, 2018.
- [1.6] 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.
- [1.7] 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.
- [1.8] A. Konovalenko, A. Karbojian and P. Kudinov, “Experimental Results on Pouring and Underwater Liquid Melt Spreading and Energetic Melt-coolant Interaction”, NUTHOS-9, N9P0303, Kaohsiung, Taiwan, September, 2012.
- [1.9] C. Journeau, J.-F. Haquet, B. Spindler, C. Spengler, J. Foit, The VULCANO VE-U7 corium spreading benchmark, Progress in Nuclear Energy, vol.48, 215--234, doi:10.1016/j.pnucene.2005.09.009, 2006.

2. アグロメレーションの解析

2.1. 実施背景

原子炉圧力容器の破損により、格納容器下部（キャビティまたはペデスタル）に溶融物が落下する可能性がある。格納容器下部に事前注水された場合には、溶融物は冷却水中で粒子化する。粒子状の溶融物が個別に固化して堆積した粒子状デブリは、比表面積（重量当たりの表面積）が大きいため容易に冷却される。一方、粒子状の溶融物が固化する前に他の粒子同士と結合することにより形成された塊状のデブリ（アグロメレーションデブリ）は、粒子状デブリと比較して比表面積が小さいために冷却され難く、連続層状デブリとともにMCCIを引き起す可能性がある。したがって、溶融炉心冷却性評価では、アグロメレーションデブリの質量割合を評価することが重要となる。

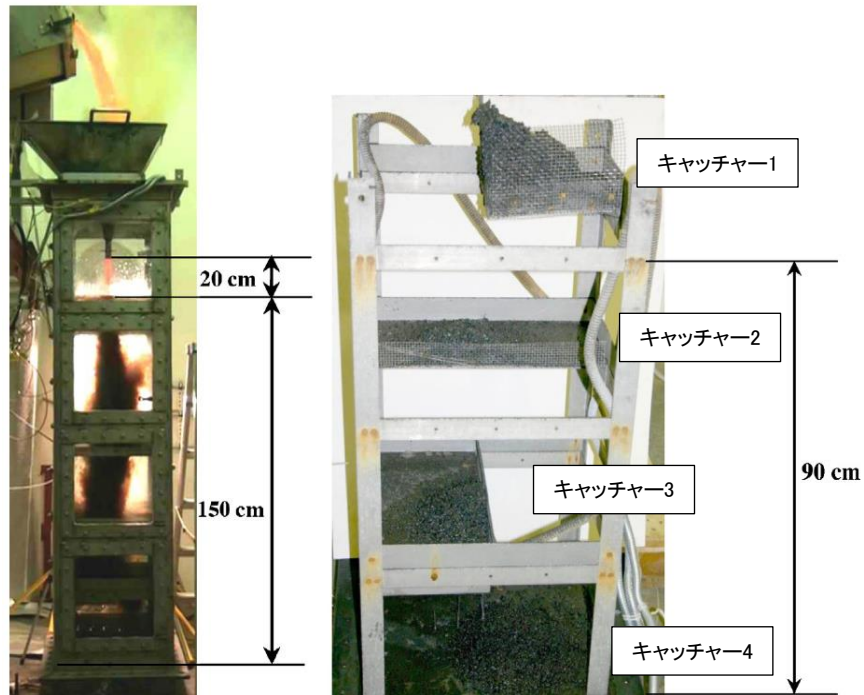
2.2. 今年度の実施内容

平成 27 年度から令和元年度までに、アグロメレーションモデルを構築することにより、アグロメレーションデブリの質量割合を良好に再現することが可能となった。令和 2 年度は、構築したアグロメレーションモデルを用いて、DEFOR-A 実験を対象とした感度解析を実施した。感度解析では、溶融物の物性値及び溶融ジェットより発生する粒子群の粒子直径を決定する疑似乱数のシード値がアグロメレーションデブリの質量割合へ与える影響を調査した。令和 3 年度では、構築したアグロメレーションモデルを用いて、DEFOR-A 実験を対象とした感度解析を実施する。感度解析では、溶融物の投入直径と投入速度がアグロメレーションデブリの質量割合へ与える影響を調査する。感度解析に基づき、アグロメレーションに対して支配的となる物理現象等の要因を検討する。このことにより、実験において投入条件（溶融物の投入直径と投入速度）の計測及び決定に精度を要する項目や不確かさの要因となる解析モデルの項目を同定することを目的とする。

2.3. 解析対象の実験

2.3.1. DEFOR-A 実験

スウェーデン王立工科大学（KTH）は、高温の溶融物を冷却水へジェット状に落下させることにより、溶融ジェットが冷却水中で粒子化することで生成した粒子同士の結合（アグロメレーション）を解明することを目的とした DEFOR-A 実験 [2.1] [2.2] を実施している。図 2.3.1 に実験装置の概略図を示す。実験装置は、模擬物質を溶融させるための高周波誘導加熱炉、溶融物ジェットを形成するための漏斗及び溶融物のジェットを落下させる試験容器から構成される。試験容器の上部に設置された高周波誘導加熱炉で模擬物質を加熱し溶融させた後に、高周波誘導加熱炉を傾けることで溶融物が漏斗を通して冷却水中に落下する。漏斗の下部に設置されたノズルを通してジェット状の溶融物が冷却水中に落下する。試験容器の断面は 0.45 m × 0.5 m の矩形、高さは 2 m となっている。DEFOR-A 実験では、透明な試験容器の壁面を通して、冷却水中を落下する溶融ジェットを観察できる。



(1) 試験容器 (2) 試験容器の内部に設置されるキャッチャー

図 2.3.1 DEFOR-A 実験装置 [2.1]

試験容器の内部には、冷却水中で生成した粒子を捕獲するために 0.3 m 間隔で 4 つの異なる水深にキャッチャーが備えられている。図 2.3.2 に試験容器を上面から見たときのキャッチャーの配置を示す。冷却水中で発生した溶融物の粒子を 4 段キャッチャーが 4 分の 1 ずつ受け止めるように設計されている。このために、1 回の実験で 4 通りの水深での実験データを取得できる。冷却水中に落下した溶融ジェットをキャッチャーに到達するまでにすべて粒子化させるために、最も浅い水深に備えられたキャッチャー1 の水深がジェットブレイクアップ長さ（溶融物ジェットが完全に粒子化する深さ）を上回るようキャッチャー1 の設置位置を設定している。ジェットブレイクアップ長さは式 (2.3.1) に示す Saito の式 [2.3] に基づき推定している。

$$\frac{L_{brk}}{D_{jet}} = 2.1 \sqrt{\frac{\rho_m v_{jet}^2}{\rho_w g D_{jet}}} \quad (2.3.1)$$

ここで、 L_{brk} はジェットブレイクアップ長さ、 D_m は溶融ジェットの侵入直径、 ρ_m は溶融物密度、 ρ_w は冷却水密度、 v_{jet} : 溶融ジェットの侵入速度及び g は重力加速度をそれぞれ示す。

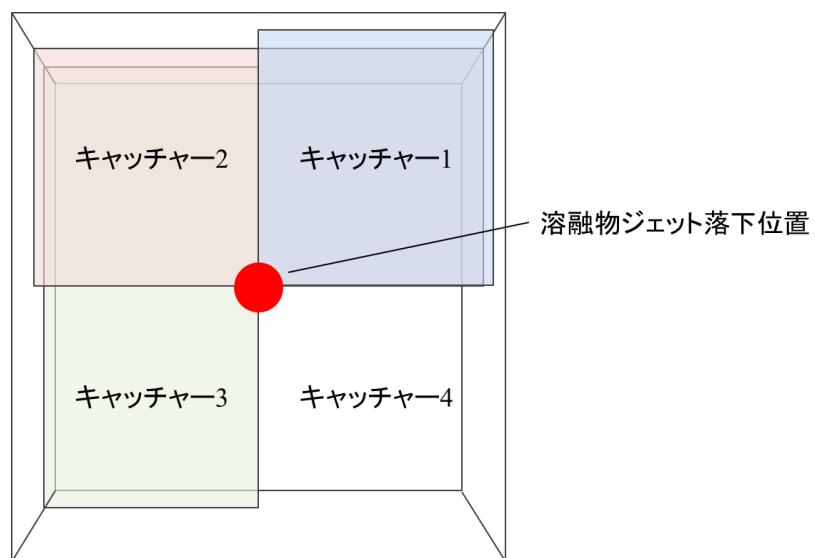


図 2.3.2 DEFOR-A 実験でのキャッチャーの配置

2.3.2. 実験条件

DEFOR-A 実験では、酸化ビスマスと酸化タングステンの共晶点混合物 ($\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-WO}_3$) を溶融物として冷却水中に投入している。溶融物である $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-WO}_3$ 共晶物質 (モル比 27 : 73) の物性値を、表 2.3.1 に示す。

表 2.3.1 $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-WO}_3$ の物性値 [2.1] [2.4] [2.5]

物性 [単位]	値
溶融物融点 [K]	1143
溶融物固相線温度 [K]	1138
溶融物液相線温度 [K]	1148
液相比熱 [J/kg/K]	280.0
固相比熱 [J/kg/K]	390.6
凝固潜熱 [J/k]	170000.0
液相密度 [kg/m ³]	6876
固相密度 [kg/m ³]	7811
液相熱伝導率 [W/m/K]	5.3
固相熱伝導率 [W/m/K]	5.3

主要な実験条件は、溶融物の温度 (過熱度)、溶融ジェット直径、冷却水温 (サブクール度) である。表 2.3.2 及び表 2.3.3 に DEFOR-A1~9 実験及び A23~27 実験の実験条件をそれぞれ示す。DEFOR-A3 実験では、途中で溶融物の放出が止まったと報告されている [2.1]。DEFOR-A27 実験では、堆積したデブリの組成を計測した結果、共晶組成よりも WO_3 の割合が多くなっていたことが報告されている。

表 2.3.2 DEFOR-A1~9 実験条件 [2.2]

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

表 2.3.3 DEFOR-A23~27 実験条件

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

2.4. 解析条件

2.4.1. 解析体系

DEFOR-A 実験では、異なる水深に設置した 4 つのキャッチャーを試験容器に設置することにより、1 回の実験で 4 通りの水深についてデータを取得する。JASMINE コードによる解析では 4 通りの水深を個別の解析で実施する。図 2.4.1 に DEFOR-A1 実験の解析体系を例として示す。DEFOR-A 実験の試験容器の水平断面は 0.5 m × 0.45 m の矩形であるが、JASMINE コードによる解析では解析体系の形状を、試験容器と水平断面積が等しい円筒形とした。解析では、実験と異なり解析体系の上方及び外側の気相部分の体積が有限となる。このことにより、水蒸気の発生等に起因して解析体系の圧力が有意に上昇することを避けるため、気相部分に十分に余裕を持った解析体系を設定した。

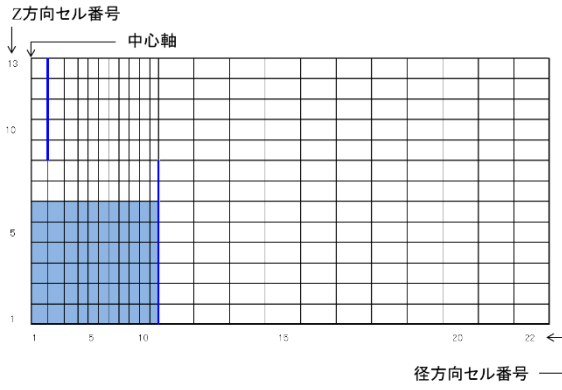
2.4.2. 感度解析

(1) 解析対象

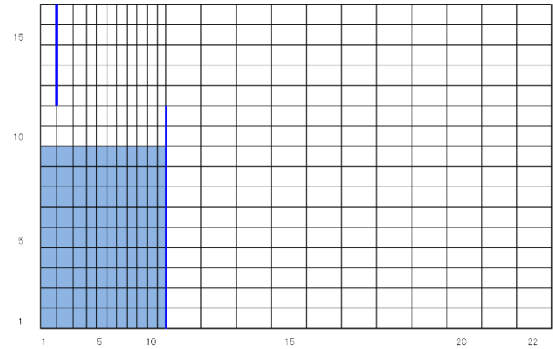
感度解析の対象とする実験条件は、令和 2 年度の感度解析の対象と同一とした。令和 2 年度の実験解析の結果を受けて、解析結果と実験結果の差異となり得る要因を考察するために、解析結果が実験結果を過小評価もしくは過大評価した DEFOR-A1、A5、A8、A23、A24 及び A26 実験を感度解析の対象とした。溶融物の放出が途中で止まったと報告されている DEFOR-A3 実験は感度解析の対象より除外した。解析結果が実験結果を良好に再現した DEFOR-A2 及び A4 実験は感度解析の対象より除外した。同特異的な実験結果となった DEFOR-A6、DEFOR-A7、DEFOR-A9、DEFOR-A25 及び A27 実験は感度解析の対象より除外した。感度解析のベースケースとなる実験解析の解析条件、溶融ジェットより発生する粒子群の粒子直径の分布、アグロメレーションモデルに係る調整係数及びアグロメレーションした粒子群の表面からの熱伝達量を調整する係数を含めたアグロメレーションモデルは令和 2 年度と同一とした。

(2) 投入条件

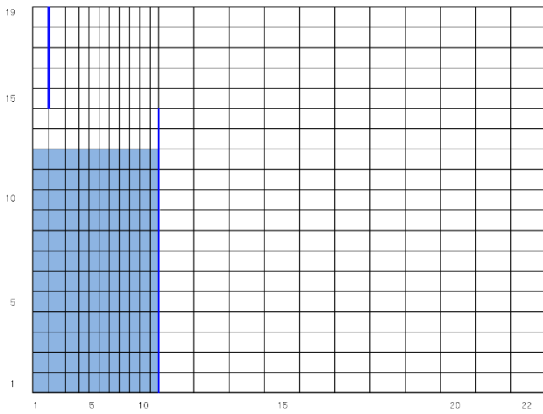
DEFOR-A 実験を対象とした感度解析では、溶融物の投入条件がアグロメレーションデブリの堆質量に与える影響に着目する。溶融物の投入条件を変更する場合には、溶融ジェット直径と投入速度を個別に 1.5 倍及び 0.5 倍する。溶融物の投入条件を変更する場合でも、投入される溶融物の体積が基準(1.0 倍)と同様となるように調整する。投入条件の係数(1.5 倍及び 0.5 倍)の数値に意味はなく、代表値として投入条件の係数を決定した。溶融物の投入条件が解析結果に与える影響が不明であるために、投入条件の係数はすべての投入条件に関する感度解析で統一した。溶融物の投入条件を変更した解析条件は、DEFOR-A 実験の実験条件とは異なる仮想的な解析条件であるために、実験結果と解析結果との定量的な比較は意味を持たないことに留意する必要がある。



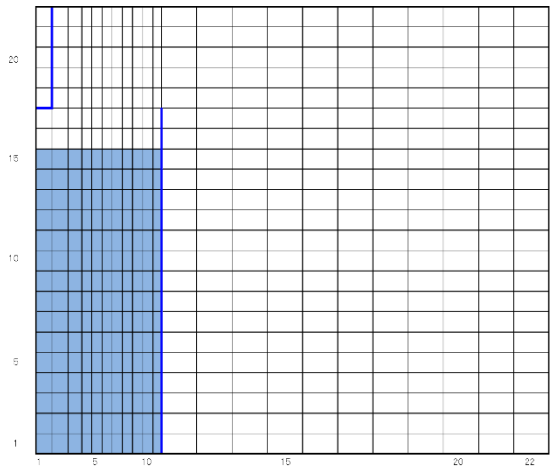
(1) キャッチャー1 相当 (水深 0.62 m)



(2) キャッチャー2 相当 (水深 0.92 m)



(3) キャッチャー3 相当 (水深 1.22 m)



(4) キャッチャー4 相当 (水深 1.52 m)

図 2.4.1 DEFOR-A1 実験での解析体系

2.5. 感度解析結果

DEFOR-A 実験の感度解析の結果を図 2.5.1 から図 2.5.6 に示す。図 2.5.1 から図 2.5.6 は、それぞれ DEFOR-A1、A5、A8、A23、A24 及び A26 実験の感度解析の結果を示す。

DEFOR-A1 実験

図 2.5.1 (1) に示す通り、溶融ジェット直径の増加によるアグロメレーションデブリの質量割合への影響はほぼ見られなかったものの、溶融ジェット直径の減少によるアグロメレーションデブリの質量割合が減少した。図 2.5.1 (2) に示す通り、溶融物投入速度の増加に伴いアグロメレーションデブリの質量割合が増加する傾向を示したものの、DEFOR-A1 実験で得られたキャッチャー1 で高いアグロメレーションデブリの質量割合となる傾向を再現できなかった。

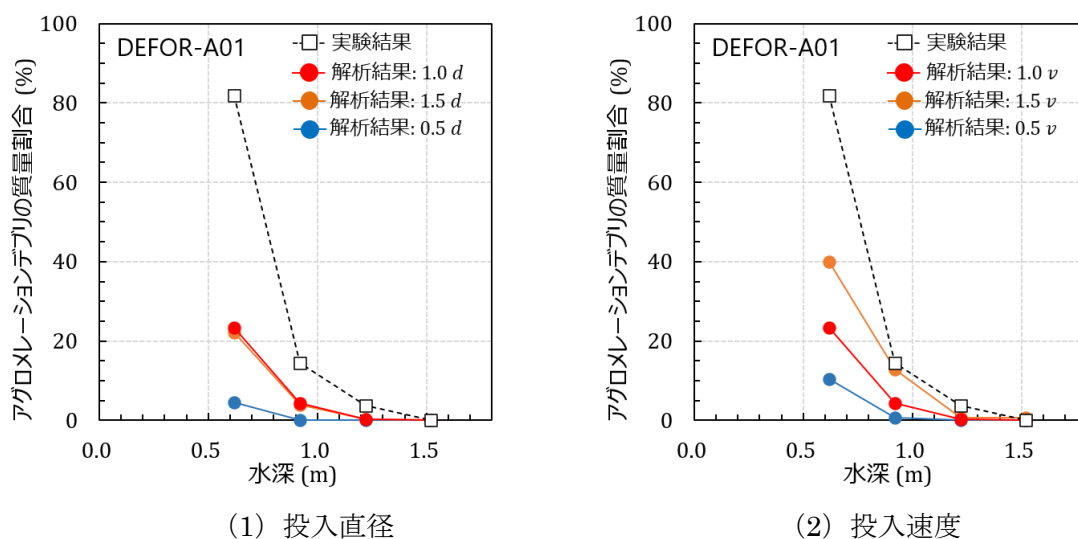
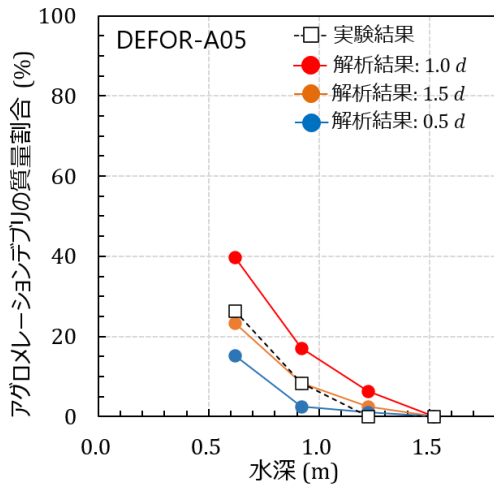


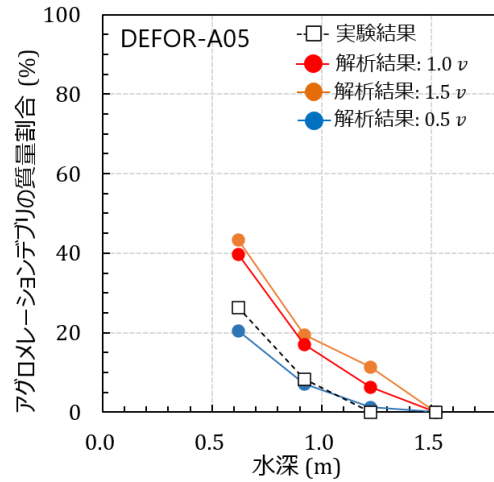
図 2.5.1 アグロメレーション質量割合 : DEFOR-A1

DEFOR-A5 実験

図 2.5.2 (1) に示す通り、溶融ジェット直径が増加した場合、キャッチャー1 から 3 でアグロメレーションデブリの質量割合を過大評価する傾向が改善した。溶融ジェット直径が減少した場合、キャッチャー1 から 3 でアグロメレーションデブリの質量割合が減少した。図 2.5.2 (2) に示す通り、投入速度の減少に伴いすべてのキャッチャーでアグロメレーションデブリの質量割合が減少した。



(1) 投入直径

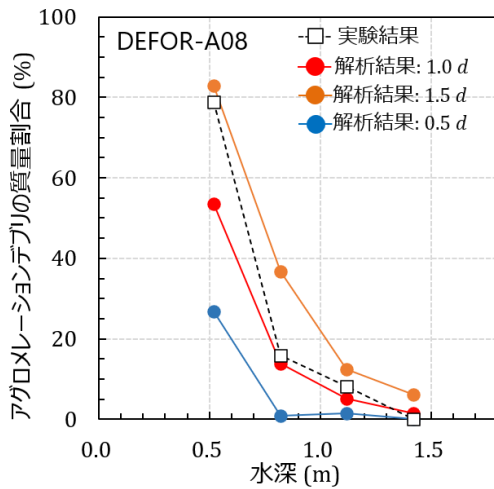


(2) 投入速度

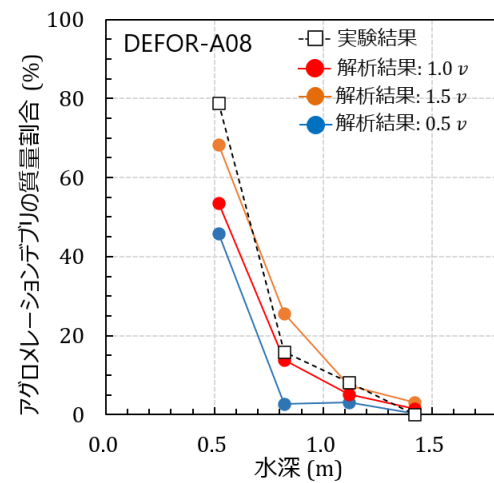
図 2.5.2 アグロメレーション質量割合：DEFOR-A5

DEFOR-A8 実験

図 2.5.3 (1) に示す通り、溶融ジェット直径の増加に伴いすべてのキャッチャーでアグロメレーションデブリの質量割合が増加した。図 2.5.3 (2) に示す通り、溶融物の投入速度の増加に伴いすべてのキャッチャーでアグロメレーションデブリの質量割合が増加した。



(1) 投入直径

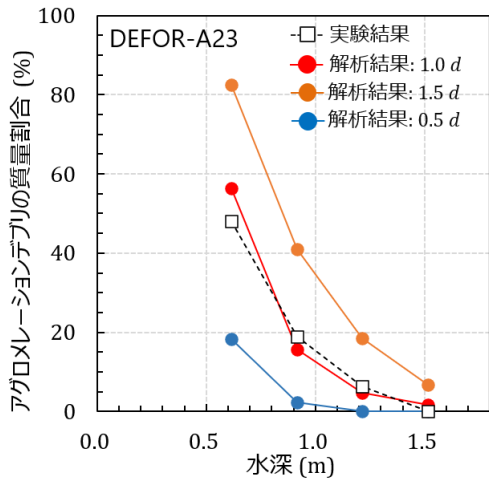


(2) 投入速度

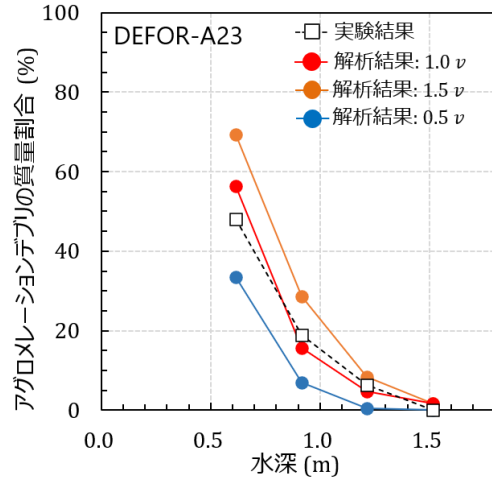
図 2.5.3 アグロメレーション質量割合：DEFOR-A8

DEFOR-A23 実験

図 2.5.4 (1) に示す通り、溶融ジェット直径の増加に伴いすべてのキャッチャーでアグロメレーションデブリの質量割合が増加した。図 2.5.4 (2) に示す通り、溶融物の投入速度の増加に伴いすべてのキャッチャーでアグロメレーションデブリの質量割合が増加した。



(1) 投入直径

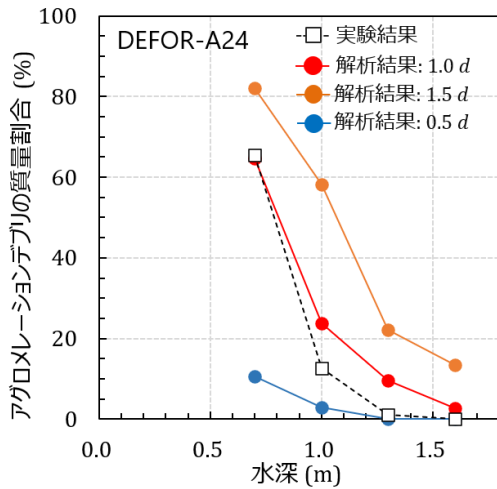


(2) 投入速度

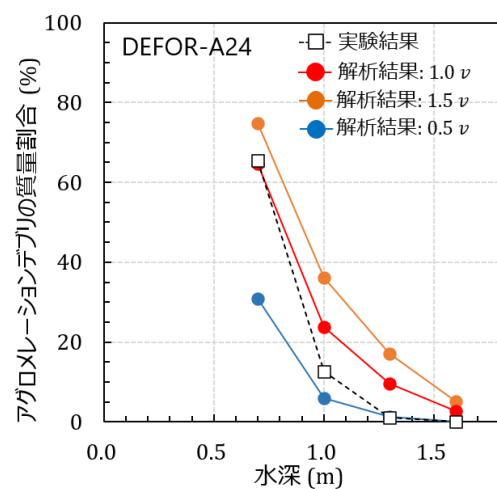
図 2.5.4 アグロメレーション質量割合 : DEFOR-A23

DEFOR-A24 実験

図 2.5.5 (1) に示す通り、溶融ジェット直径の増加に伴いすべてのキャッチャーでアグロメレーションデブリの質量割合が増加した。図 2.5.5 (2) に示す通り、溶融物の投入速度の増加に伴いすべてのキャッチャーでアグロメレーションデブリの質量割合が増加した。



(1) 投入直径

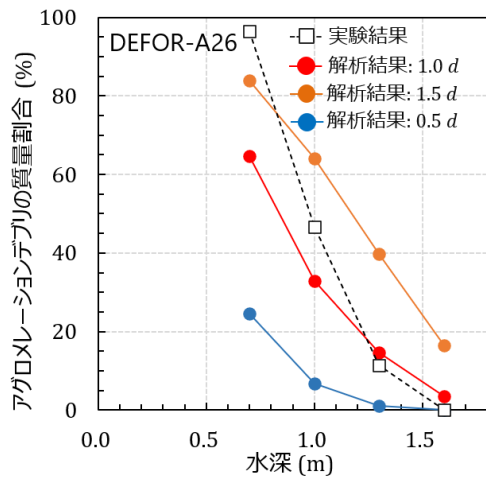


(2) 投入速度

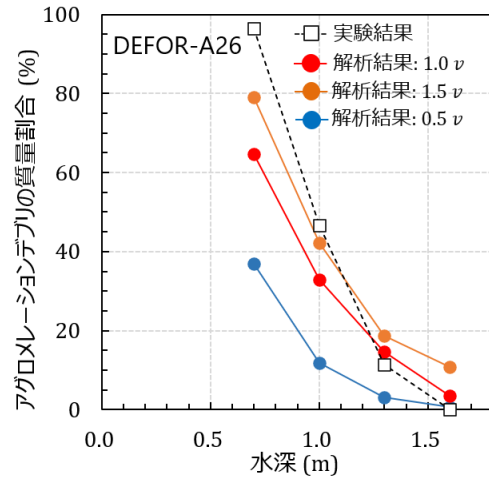
図 2.5.5 アグロメレーション質量割合 : DEFOR-A24

DEFOR-A26 実験

図 2.5.6 (1) に示す通り、溶融ジェット直径の増加に伴いすべてのキャッチャーでアグロメレーションデブリの質量割合が増加した。図 2.5.6 (2) に示す通り、溶融物投入速度の増加に伴いすべてのキャッチャーでアグロメレーションデブリの質量割合が増加した。図 2.5.6 (1) から (2) に示す通り、溶融物の投入直径及び投入速度を変更した場合でも、キャッチャー1のアグロメレーションデブリの質量割合を過小評価する及びキャッチャー4でのアグロメレーションデブリの質量割合を過大評価する傾向に変化はなかった。



(1) 投入直径



(2) 投入速度

図 2.5.6 アグロメレーション質量割合 : DEFOR-A26

2.6. 考察

アグロメレーションデブリの質量割合へ溶融ジェット直径が影響する原因を明らかにするために、DEFOR-A24 実験での感度解析結果を例として、キャッチャー1でのボイド率及び溶融物の粒子分布を図 2.6.1 及び図 2.6.2 に示す。図 2.6.1 は、投入直径を変更したボイド率及び溶融物粒子分布の結果を示す（左：基準、中：投入直径 1.5 倍、右：投入直径 0.5 倍）。図 2.6.2 は、投入速度を変更したボイド率及び溶融物粒子分布の結果を示す（左：基準、中：投入速度 1.5 倍、右：投入速度 0.5 倍）。図中の赤色の粒子は液体粒子（1143°C 以上）、黒色が固化粒子（1143°C 以下）を表している。背景色の青色はボイド率 0、黄色がボイド率 1.0 を示す。

(1) 溶融ジェット直径

図 2.6.1 より、溶融ジェット直径が増加すると溶融ジェットより発生した粒子の落下時間が減少する。一方で、溶融物ジェット直径が減少すると溶融ジェットより発生した粒子の落下時間が増加する。このとき、溶融物の投入速度は、投入される溶融物の体積が基準（1.0 倍）と同様となるように調整している。

溶融ジェット直径が増加すると（同じ時間）投入した溶融物の質量が増加し、慣性が増大する。そのために、溶融ジェットの流入により誘起される溶融物と水の液液二相流動の影響を受け難くなる。したがって、ジェットブレイクアップ長さが増加する。つまり、水深が浅い場所には、溶融ジェット部分の質量割合が増加し、発生した粒子状溶融物の質量割合が減少する。そのために、落下距離が長い粒子状溶融物が減少する。図 2.6.1 に示す通り、粒子状溶融物はキャッチャーの表面へ到達する前に固化される割合が減少するため、アグロメレーションデブリの質量割合が増加したものと考えられる。一方で、溶融ジェット直径が減少すると（同じ時間）投入した溶融物の質量が減少し、慣性が減少する。そのために、溶融ジェットの流入により誘起される溶融物と水の液液二相流動の影響を受け易くなる。したがって、ジェットブレイクアップ長さが減少する。つまり、水深が浅い場所には、溶融ジェット部分の質量割合が減少し、発生した粒子状溶融物の質量割合が増加する。そのために、落下距離が長い粒子状溶融物が増加する。図 2.6.1 に示す通り、粒子状溶融物はキャッチャーの表面へ到達する前に固化される割合が増加するため、アグロメレーションデブリの質量割合が減少したものと考えられる。

(2) 溶融物投入速度

図 2.6.2 より、溶融物の投入速度が増加すると溶融ジェットより発生した粒子の落下時間が減少する。一方で、溶融物の投入速度が減少すると溶融ジェットより発生した粒子の落下時間が増加する。このとき、溶融ジェット直径は、投入される溶融物の体積が基準（1.0 倍）と同様となるように調整している。

溶融物投入速度が増加すると、慣性が増大するために、溶融ジェットの流入により誘起される溶融物と水の液液二相流動の影響を受け難くなる。したがって、ジェットブレイクアップ長さが増加する。つまり、水深が浅い場所には、溶融ジェット部分の質量割合が増加し、

発生した粒子状溶融物の質量割合が減少する。そのために、落下距離が長い粒子状溶融物が減少する。落下速度が増加するとともに、落下時間が長い粒子状溶融物が減少する。図 2.6.2 に示す通り、粒子状溶融物はキャッチャーの表面へ到達する前に固化される割合が減少するため、アグロメレーションデブリの質量割合が増加したものと考えられる。一方で、溶融物の投入速度が減少した場合には、慣性が減少するために、溶融ジェットの流れにより誘起される溶融物と水の液液二相流動の影響を受け易くなる。したがって、ジェットブレイクアップ長さが減少する。つまり、水深が浅い場所には、溶融ジェット部分の質量割合が減少し、発生した粒子状溶融物の質量割合が増加する。そのために、落下距離が長い粒子状溶融物が増加する。落下速度が減少するとともに、落下時間が長い粒子状溶融物が増加する。図 2.6.2 に示す通り、粒子状溶融物はキャッチャーの表面へ到達する前に固化される割合が増加するため、アグロメレーションデブリの質量割合が減少したものと考えられる。

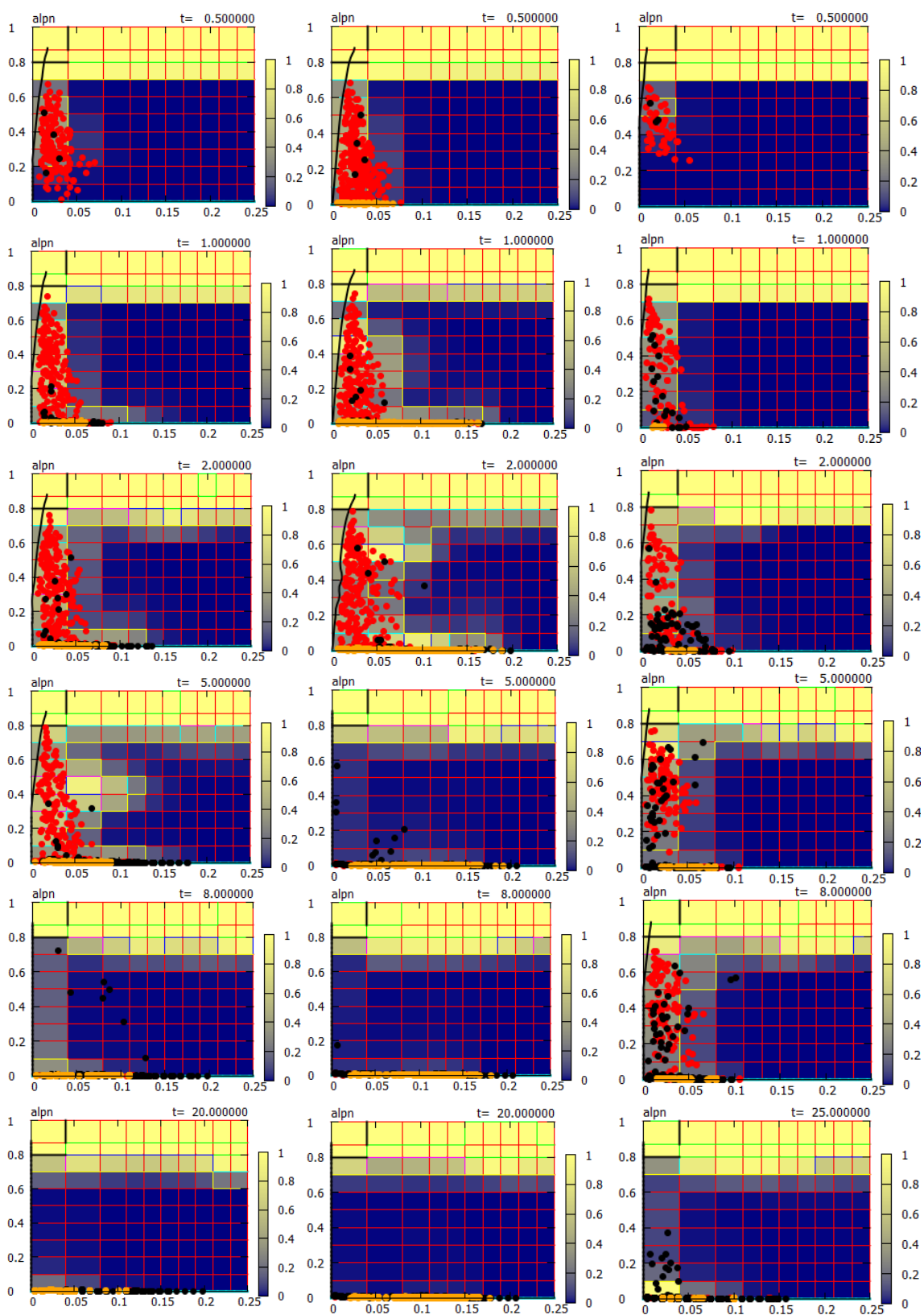


図 2.6.1 投入直径を変更したボイド率及び溶融物粒子分布図_DEFOR-A24_キャッチャー1
 (左：基準、中：投入直径 1.5 倍、右：投入直径 0.5 倍)

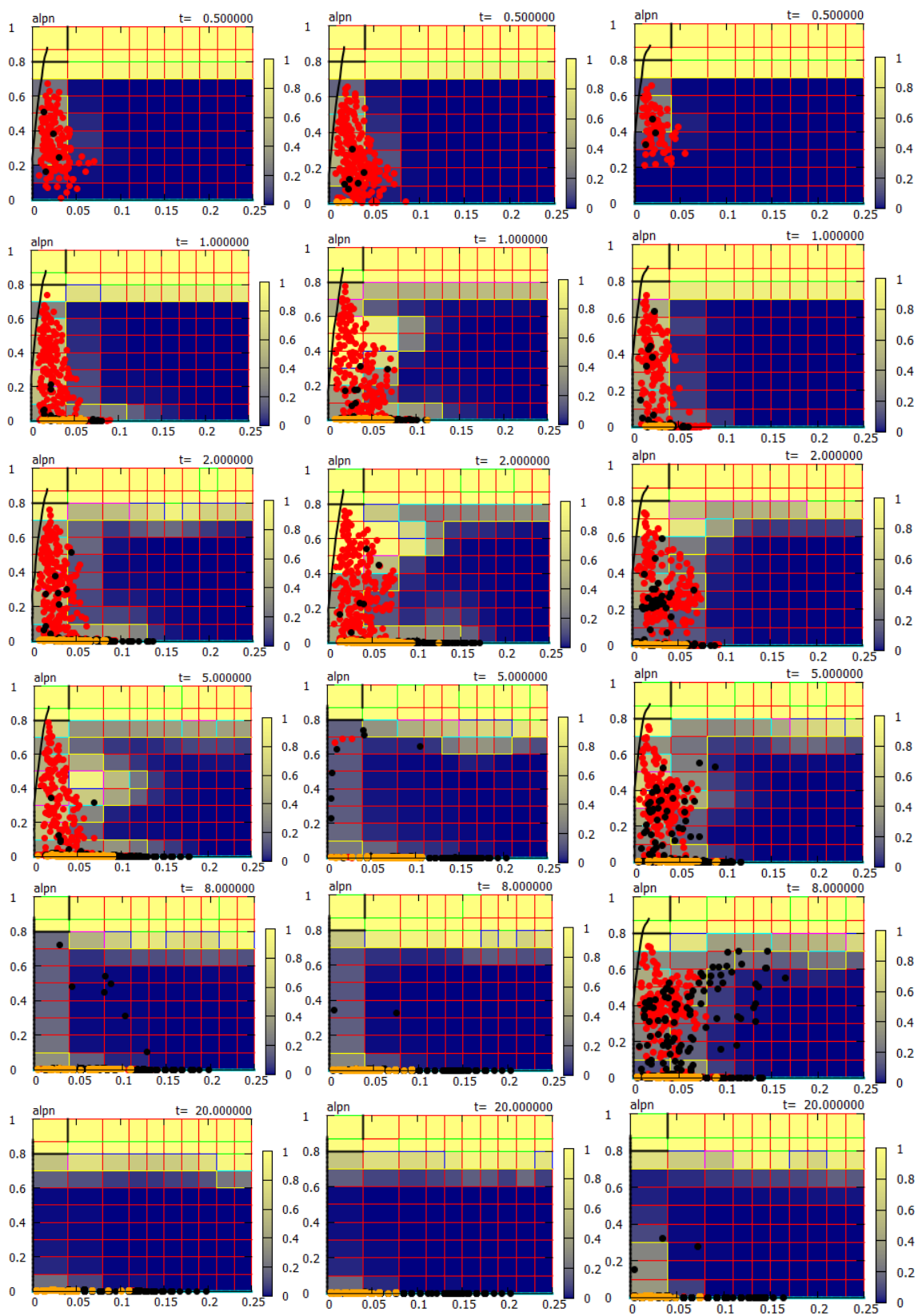


図 2.6.2 投入速度を変更したボイド率及び溶融物粒子分布図_DEFOR-A24_キャッチャー1
 (左：基準、中：投入速度 1.5 倍、右：投入速度 0.5 倍)

2.7. まとめ

JASMINE コードを用いて、DEFOR-A 実験を対象とした感度解析を実施した。感度解析では、熔融ジェット直径及び熔融物の投入速度がアグロメレーションデブリの質量割合へ与える影響を調査した。感度解析の結果、DEFOR-A01 と DEFOR-A05 実験を除き、熔融ジェット直径の増加は、アグロメレーションデブリの質量割合を増加させることが分かった。また、熔融物の投入速度の増加は、アグロメレーションデブリの質量割合を増加させることが分かった。熔融ジェット直径また熔融物の投入速度の増加は、投入した熔融物の慣性の増大をもたらし、熔融ジェットの流入より誘起される熔融物と水の液液二相流動の影響の受け易さを通してジェットブレイクアップ長さが増加する。水深が浅い場所で発生した粒子状熔融物の質量割合が減少するため、落下距離が長い粒子状熔融物が減少する。粒子状熔融物はキャッチャーの表面へ到達する前に固化される割合が減少することから、アグロメレーションデブリの質量割合に影響すると解釈される。

実験で投入された熔融ジェット直径及び熔融物の投入速度を正確に把握することが DEFOR-A 実験を対象とした実験解析の更なる精度向上につながるものと考えられる。加えて、熔融物が受ける液液二相流動による影響の変化がアグロメレーションデブリの質量割合へ影響する要因となることが明らかとなった。したがって、実験で熔融物の流入の発生に起因する液液二相流動を正確に把握することが、DEFOR-A 実験を対象とした実験解析の更なる精度向上につながるものと考えられる。

参考文献

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

3. 溶融物の拡がりの解析

3.1. 実施背景

原子炉圧力容器の破損により、格納容器下部（キャビティまたはペデスタル）に溶融物が落下する可能性がある。格納容器下部に事前注水された場合には、溶融物は冷却水中で粒子化する。粒子状の溶融物が個別に固化して堆積した粒子状デブリは、比表面積（重量当たりの表面積）が大きいため容易に冷却される。一方、溶融物が粒子化せずに格納容器床面に到達した場合に床面での溶融物の拡がりにより堆積する連続層状デブリは、粒子状デブリと比較して比表面積が小さいために冷却され難く、粒子状の溶融物が固化する前に他の粒子同士と結合することにより形成された塊状のデブリ（アグロメレーションデブリ）とともに MCCI を引き起す可能性がある。したがって、溶融炉心冷却性評価では、溶融物の拡がりにより堆積する連続層状デブリの堆積範囲を評価することが重要となる。

3.2. 今年度の実施内容

平成 27 年度から令和元年度までに、溶融物の拡がりモデルを構築することにより、溶融物の拡がり及び連続層状デブリの堆積範囲を良好に再現することが可能となった。令和 2 年度では、溶融物の拡がりモデル用いて、ウェット条件として PULiMS、ドライ条件として VULUCANO 実験等を対象として、溶融物の物性値を変更した感度解析を実施した。令和 3 年度は、昨年度と同じウェット条件の PULiMS 実験とドライ条件実験を解析対象として、投入条件を変更した感度解析を実施する。感度解析では、実験で設定された投入条件の溶融ジェット直径と投入速度が溶融物の拡がりへ与える影響を調査する。感度解析の結果に基づき、溶融物の拡がりに対して支配的となる物理現象等の要因を検討する。

3.3. ウェット条件での解析

3.3.1. PULiMS 実験

スウェーデン王立工科大学（KTH）は、高温の溶融物を冷却水へジェット状に落下させることにより、冷却水中での溶融物の拡がりを解明することを目的とした PULiMS 実験 [3.1] を実施している。図 3.3.1 に実験装置の外観図を示す。実験装置は、模擬物質を溶融させるための高周波誘導加熱炉、溶融物ジェットを形成するための漏斗及び冷却水を張る試験容器から構成される。冷却水を張った試験容器上部に設置された高周波誘導加熱炉で模擬物質を加熱し溶融させた後に、高周波誘導加熱炉を傾けることで溶融物を漏斗に落下させた後、プラグを引き抜いて溶融物を冷却水に落下させる。冷却水中に落下した溶融物は、多数の熱電対が設けられステンレス製の床面を拡がる。

図 3.3.2 に実験装置の概略図をそれぞれ示す。このとき、PULiMS-E1 及び E4 実験では、長方形の床面で溶融物の拡がりが同心円（ 360° ）となる。PULiMS-E8 及び E9 実験では、長方形の床面で溶融物の拡がりが同心円（ 360° ）となる。PULiMS-E10~E15 実験では、投入ノズル出口に石英ガラス製の板を設置することにより、溶融物の拡がりが半円形（ 180° ）となる（図 3.3.2(1)）。E16~E18 実験では、直角に石英ガラス製の板を設けることにより、溶融物の拡がりが扇型（ 90° ）となる（図 3.3.2(2)）。

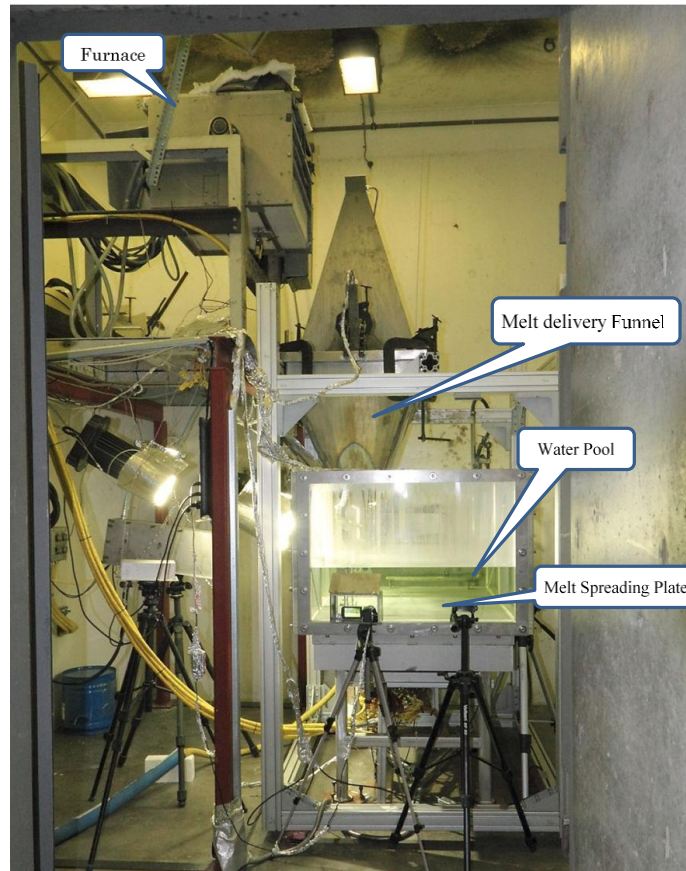
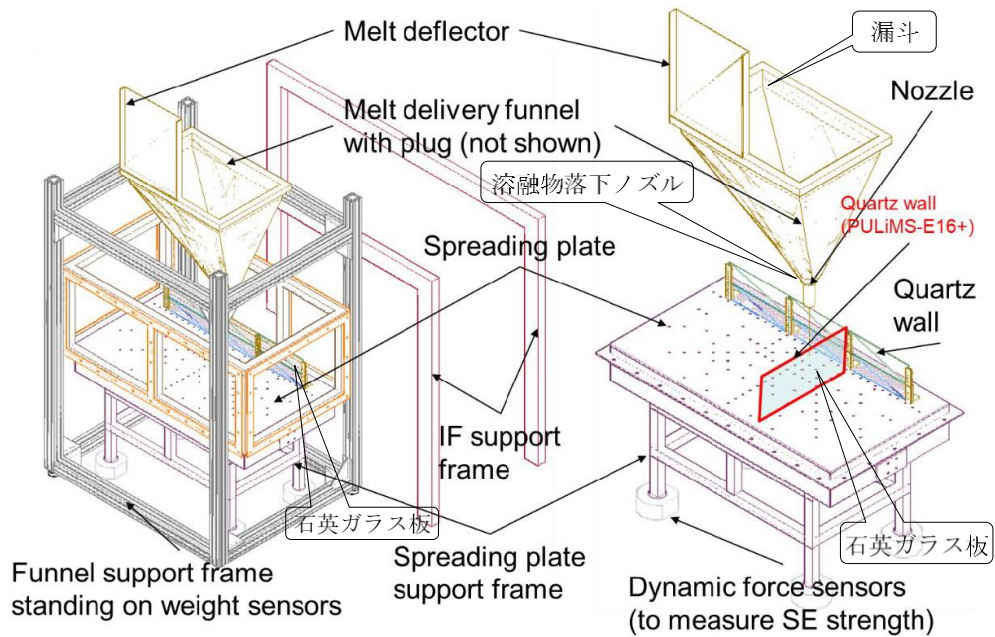


図 3.3.1 PULiMS 実験装置の外観図 (E10 から E15 実験)



(1) E10 から E15 実験

(2) E16 から E18 実験

図 3.3.2 PULiMS 実験装置の概略図

PULiMS-E8 及び E9 実験では、熱電対を用いた、PULiMS-E10~E16 実験では、高速度可視化及び熱電対を用いた、PULiMS-E17 及び E18 実験では、高速度可視化を用いた溶融物の拡がりの先端位置の進展の計測が実施されている。

3.3.2. 実験条件

PULiMS 実験では、酸化ビスマスと酸化タングステンの共晶点混合物 ($\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-WO}_3$) を溶融物として冷却水中に投入している。溶融物である $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-WO}_3$ 共晶物質 (モル比 27 : 73) の物性値を、表 3.3.1 に示す。

表 3.3.1 $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-WO}_3$ の物性値 [3.1]

物性 [単位]	値
溶融物融点 [K]	1143
溶融物固相線温度 [K]	1138
溶融物液相線温度 [K]	1148
液相比熱 [J/kg/K]	280.0
固相比熱 [J/kg/K]	390.6
凝固潜熱 [J/k]	170000.0
液相密度 [kg/m ³]	6876
固相密度 [kg/m ³]	7811
液相熱伝導率 [W/m/K]	5.3
固相熱伝導率 [W/m/K]	5.3

主要な実験条件は、溶融物の温度 (過熱度)、溶融ジェット直径、冷却水温 (サブクール度) である。表 3.3.2 及び表 3.3.3 に PULiMS-E1~9 実験及び PULiMS-E10~18 実験の実験条件をそれぞれ示す。このとき、PULiMS-E8 実験では、初期に溶融物の落下量が少なくなることが報告されている。加えて、PULiMS-E15 及び E17 実験では、溶融物の落下後に小規模な水蒸気爆発の発生が報告されている。

3.3.3. 解析条件

(1) 実験解析

感度解析の対象とする実験条件を選定するために、表 3.3.2 及び表 3.3.3 に示すウェット条件で実施された PULiMS 実験を対象とした実験解析を実施した。このとき、初期に熔融物の落下量が少なくなった PULiMS-E8 実験に加えて、熔融物の落下後に小規模な水蒸気爆発の発生が報告された PULiMS-E15 及び E17 実験を除外した。平成 27 年度から令和元年度までの研究成果により、構築した熔融物の拡がりモデルを用いて、ウェット条件で実施された PULiMS 実験での熔融物の拡がり及び連続層状デブリの堆積範囲を良好に再現することが可能となっている。感度解析のベースケースとなる実験解析の解析条件、熔融物の表面からの熱伝達率及び熱伝達面積増加の係数を含めたウェット条件で実施された PULiMS 実験での熔融物の拡がりモデルは令和元年度と同一とした。

(2) 感度解析

ウェット条件で実施された PULiMS 実験での実験を対象とした感度解析では、熔融物の投入条件が熔融物の拡がり及び連続層状デブリの堆積範囲に与える影響に着目する。感度解析での解析条件の設定方法は、次の項目に示す通りとした。

熔融物の投入条件

熔融物の投入条件を変更する場合には、表 3.3.2 及び表 3.3.3 に示す熔融ジェット直径、投入速度を個別に 1.5 倍及び 0.5 倍にする。この時、熔融物の熔融ジェット直径を変更する場合、投入速度は表 3.3.2 及び表 3.3.3 に示す数値に固定する。落下熔融物質量は同一とするために、落下熔融物質量と質量流量から落下継続時間を求めて解析で使用する。投入条件の係数 (1.5 倍及び 0.5 倍) の数値に意味はなく、代表値として投入条件の係数を決定した。熔融物の投入条件を変更した解析条件は、ウェット条件で実施された PULiMS 実験での実験条件とは異なる仮想的な解析条件であるために、実験結果と解析結果との定量的な比較は意味を持たないことに留意する必要がある。

(3) 解析体系

ウェット条件で実施された PULiMS 実験での実験解析の解析体系を表 3.3.2 及び表 3.3.3 に示す。ウェット条件で実施された PULiMS 実験での実験解析では、流入する熔融物の投入速度は表 3.3.2 及び表 3.3.3 に示す熔融物の落下熔融物質量、熔融ジェット直径、落下継続時間より逆算した値を入力で与える。解析体系は令和元年度と同様である。

表 3.3.2 PULiMS 実験での実験条件及び解析条件 (1/2)

実験番号	E1	E4	E8	E9
試験部の形状	長方形		正方形	
溶融物の種別	Bi ₂ O ₃ -WO ₃ (共晶組成)			
溶融物の温度 (K)	1279	1213	1168	1182.15
落下溶融物量 (kg)	23.4	46.9	23.2	26.8
落下継続時間 (s)	10	12	17.6	24.9
ノズル位置 (床からの高さ mm)	400	400	400	400
溶融ジェット直径 (mm)	20	20	20	15
溶融物の投入速度 (m/s)	1.11	1.83	0.16	0.89
試験容器寸法	1 m × 2 m		1 m × 1 m	
試験容器半径の入力値	0.8 m		0.565 m	
試験容器の床板厚さ	10 mm		10 mm	
冷却水の深さ (mm)	200	200	200	200
冷却水の水温 (K)	352	350.15	368.15	369
溶融物中ボイド率	0.29	0.36	0.3	0.281

表 3.3.3 PULiMS 実験での実験条件及び解析条件 (2/2)

実験番号	E10	E11	E12	E13	E14	E15	E16	E17	E18
試験部の形状	1/2 対称 (半円形)						1/4 対称 (90°扇型)		
溶融物の種別	Bi ₂ O ₃ -WO ₃ (共晶組成)								
溶融物の温度 (K)	1178.65	1189	1148.55	1218.55	1181.65	1293.15	1244	1303.15	1164.15
落下溶融物量 (kg)	30.761	39.25	32.60	23.79	27.176	44.22	17.7	2.33	15.1
落下継続時間 (s)	17	10.63	55	21.9	22.4	16.3	11.1	11.8	20.7
ノズル位置 (床からの高さ mm)	290	255	272	272	272	272	266	266	266
溶融ジェット直径 (mm)	20	30	15	15	15	17	17	17	17
溶融物投入速度 (m/s)	0.76	0.76	1.18	0.89	0.94	1.74	1.05	0.13	0.47
試験容器寸法	0.9 m × 1.6 m								
試験容器半径の入力値	0.958 m						1.354		
試験容器の床板厚さ	10 mm								
冷却水の深さ (mm)	200	190	150	200	200	168	200	210	210
冷却水の水温 (K)	363.15	364.15	367.75	369.15	368.65	364.95	363	357.15	364.15
溶融物中ボイド率	0.259	0.348	0.249	0.234	0.281	0.293	0.381	0.238	0.186

3.3.4. 解析結果

(1) 実験解析

ウェット条件で実施された PULiMS 実験での実験結果と解析結果との比較を図 3.3.3 から図 3.3.5 に示す。図 3.3.3 は PULiMS-E1~E9 実験、図 3.3.4 は PULiMS-E10~E14 実験及び図 3.3.5 は PULiMS-E16~E18 実験の実験結果と解析結果との比較をそれぞれ示す。

PULiMS-E1~E9 実験

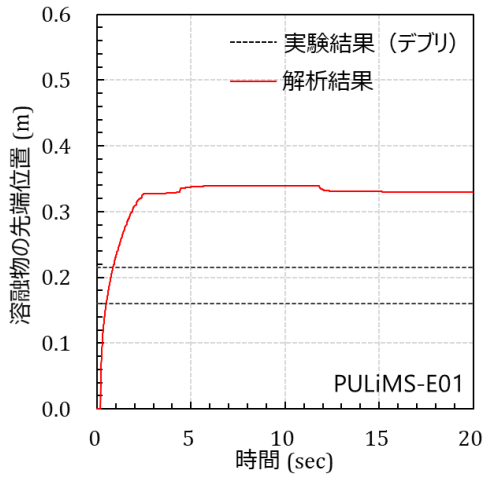
PULiMS-E1 及び E4 実験では、溶融物の拡がりの先端位置は計測されていないために、実験で得られたデブリの長辺及び短辺の値の計測結果を示す。PULiMS-E9 実験では、熱電対を用いた溶融物の拡がりの先端位置の計測結果に加えて、実験で得られたデブリの長辺及び短辺の値を示す。PULiMS-E1~E9 実験で得られたデブリの計測結果より、溶融物の拡がりの先端位置は投入ノズルより、0.2 m から 0.4 m 程度まで到達することが分かる。PULiMS-E9 実験で得られた熱電対を用いた溶融物先端位置の計測結果より、溶融物の投入開始直後から溶融物は投入ノズルの中心より外側へ拡がること分かる。

PULiMS-E1 及び E4 実験では、解析結果は実験結果を過大評価した。実験では、溶融物の拡がりの先端位置は計測されていないために、溶融物の拡がりの詳細が不明であることから実験結果と解析結果との差異の要因を考察することは難しい。PULiMS-E9 実験では、解析結果と実験で得られたデブリの計測結果は良好に一致した。一方で、解析結果は実験結果として得られた熱電対を用いた計測結果を過大評価した。実験での溶融物の拡がりの非等方性が要因と考えられる。

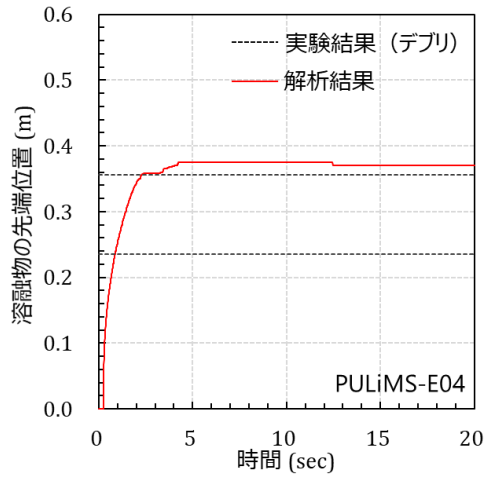
PULiMS-E10~E14 実験

PULiMS-E10~E14 実験では、高速度可視化及び熱電対を用いた溶融物の拡がりの先端位置の計測結果に加えて、実験で得られたデブリの長辺及び短辺の値を示す。PULiMS-E10~E14 実験で得られたデブリの計測結果より、溶融物の拡がりの先端位置は投入ノズルより、0.3 m から 0.4 m 程度まで到達することが分かる。PULiMS-E10~E12 実験では、実験で得られたデブリの長辺及び短辺の値と高速度可視化及び熱電対を用いた溶融物の拡がりの先端位置の計測結果が良好に一致する。PULiMS-E13 及び E14 実験では、実験で得られたデブリの長辺及び短辺の値と比較して、高速度可視化及び熱電対を用いた溶融物の拡がりの先端位置の計測結果が下回る。PULiMS-E13 及び E14 実験では、投入された溶融物の質量が多い実験条件であるために、初期の溶融物の拡がりに後続する溶融物の拡がりが最終的な溶融物の到達位置を広げた可能性が考えられる。

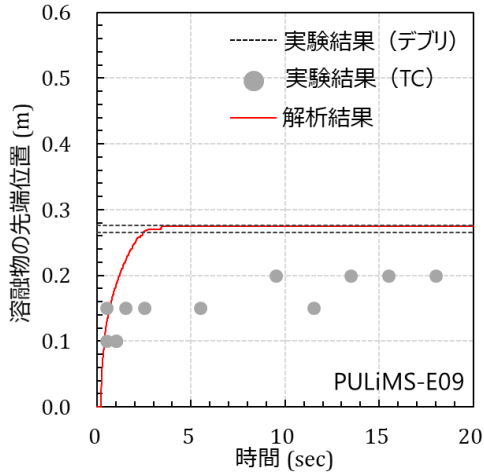
PULiMS-E10、E11 及び E14 実験では、解析結果と実験結果として得られたデブリの計測結果は良好に一致した。加えて、解析結果は実験結果として得られた高速度可視化及び熱電対を用いた計測結果と良好に一致した。PULiMS-E12 及び E13 実験では、解析結果は実験結果として得られたデブリの計測結果をわずかに過小評価もしくは過大評価した。このとき、解析結果は実験結果として得られた高速度可視化及び熱電対を用いた計測結果と良好に一致した。



(1) PULiMS-E1 実験



(2) PULiMS-E4 実験



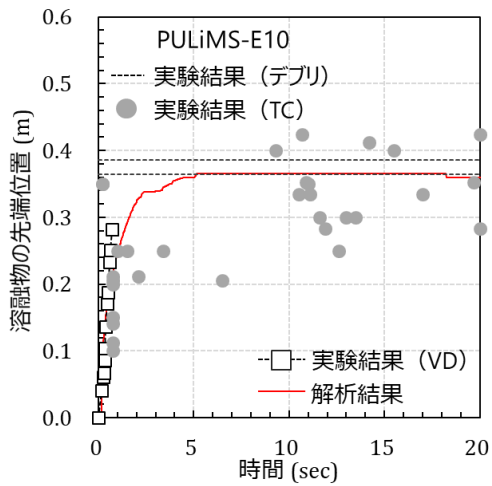
(3) PULiMS-E9 実験

図 3.3.3 溶融物の拡がりの先端位置 (ウェット条件) : PULiMS-E1~E9 実験

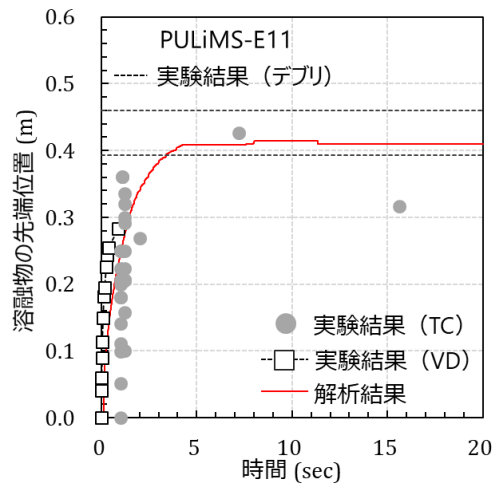
PULiMS-E16~E18 実験

PULiMS-E16 実験では、高速度可視化及び熱電対を用いた溶融物の拡がりの先端位置の計測結果に加えて、実験で得られたデブリの長辺及び短辺の値を示す。PULiMS-E18 実験では、高速度可視化を用いた溶融物の拡がりの先端位置の計測結果に加えて、実験で得られたデブリの長辺及び短辺の値を示す。PULiMS-E16 及び E18 実験で得られたデブリの計測結果より、溶融物の拡がりの先端位置は投入ノズルより、0.3 m から 0.5 m 程度まで到達することが分かる。

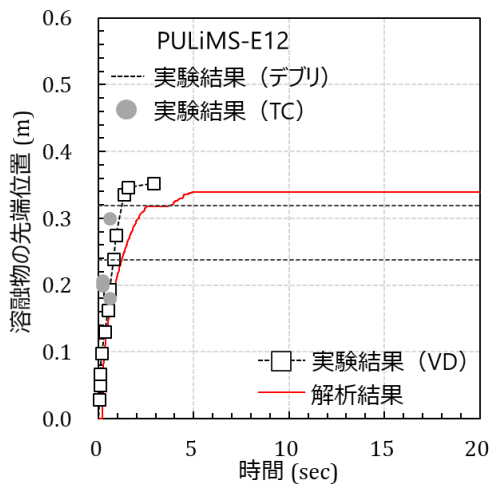
PULiMS-E16 実験では、解析結果は実験結果として得られたデブリの計測結果よりも過小評価した。このとき、解析結果は実験で得られた高速度可視化及び熱電対を用いた計測結果と良好に一致した。PULiMS-E18 実験では、解析結果は実験結果として得られたデブリの計測結果をわずかに過小評価した。このとき、解析結果は実験結果として得られた高速度可視化を用いた計測結果と良好に一致した。



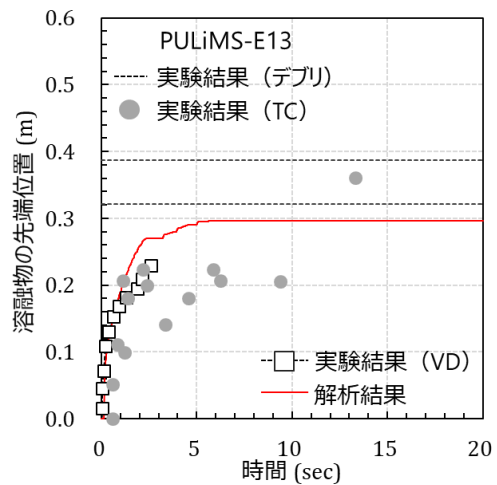
(1) PULiMS-E10 実験



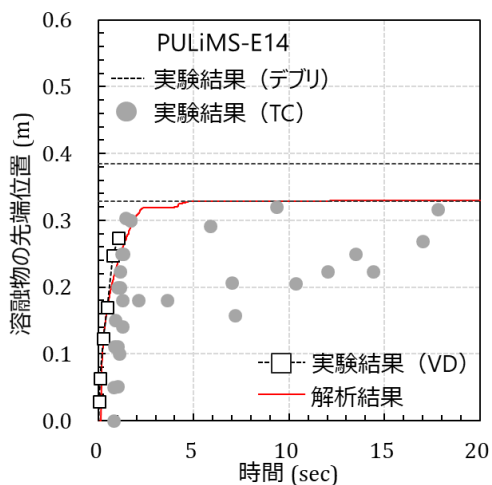
(2) PULiMS-E11 実験



(3) PULiMS-E12 実験

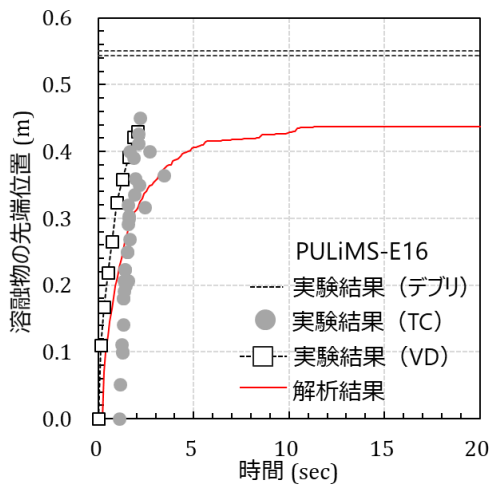


(4) PULiMS-E13 実験

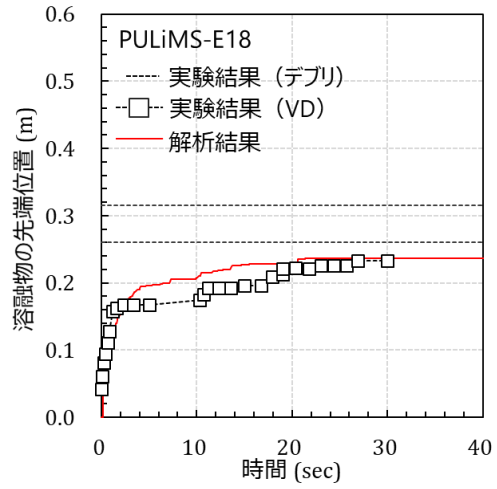


(5) PULiMS-E14 実験

図 3.3.4 溶融物の拡がりの先端位置 (ウェット条件) : PULiMS-E10~E14 実験



(1) PULiMS-E16 実験



(2) PULiMS-E18 実験

図 3.3.5 溶融物の拡がりの先端位置 (ウェット条件) : PULiMS-E16~E18 実験

溶融物の拡がりの面積に関する実験結果と解析結果との比較を図 3.3.6 に示す。投入ノズル出口に石英ガラス製の板を設置することにより、溶融物の拡がりが半円形 (180°) となる PULiMS-E10~E15 実験及び直角に石英ガラス製の板を設けることにより、溶融物の拡がりが扇型 (90°) となる PULiMS-E16~E18 実験で得られた溶融物の拡がり面積の実験結果と、JASMINE コードを用いた解析結果は良好に一致した。一方で、床面で溶融物の拡がりが同心円 (360°) となる PULiMS-E1~E9 実験では解析結果は実験結果を過小評価した。

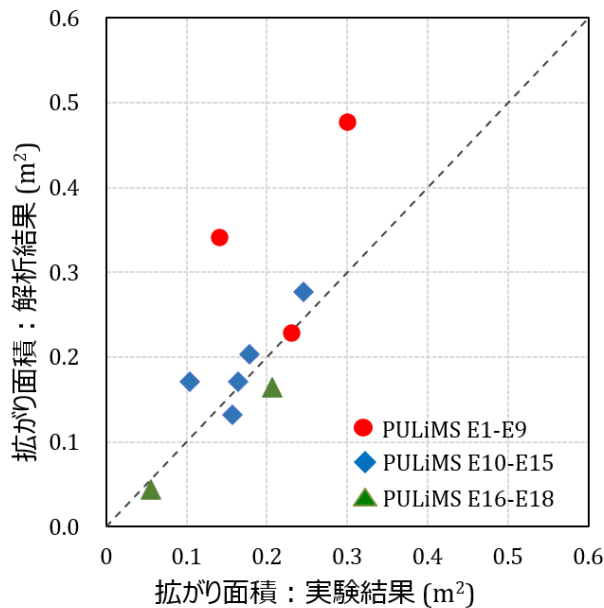


図 3.3.6 溶融物の拡がり面積 (ウェット条件) : PULiMS-E16~E18 実験

PULiMS-E10~E15 及び PULiMS-E16~E18 と比較して PULiMS-E1~E9 の異なる部分は溶融物の拡がる角度である。溶融物の拡がり半円形(180°)となる PULiMS-E10~E15 や溶融物の拡がり扇型(90°)となる PULiMS-E16~E18 実験と異なり、PULiMS-E1~E9 床面で溶融物の拡がり同心円(360°)となる。したがって、溶融物の拡がり方に対する二次元性が顕著となったために、JASMENE コードを用いた解析結果との差異が生じた可能性が考えられるものの、床面で溶融物の拡がり同心円(360°)となる条件で実施された実験データが少なく詳細を考察することは困難である。

実験解析の結果を受けて、感度解析を実施することにより、解析結果と実験結果の差異となり得る要因を考察するために、高速度可視化及び熱電対を用いて溶融物の拡がり計測されている PULiMS-E10~E14 実験を感度解析の対象とした。

(2) 感度解析

ウェット条件で実施された PULiMS 実験での感度解析の結果を図 3.3.7 から図 3.3.12 にそれぞれ示す。図 3.3.7 から図 3.3.12 は、それぞれ PULiMS-E10、E11、E12、E13、E14 及び E16 実験の感度解析の結果を示す。

PULiMS-E10

溶融物の溶融ジェット直径及び投入速度の増加に伴い溶融物の拡がりの最終的な到達距離(連続層状デブリの堆積範囲)が増加した。投入速度の影響は溶融ジェット直径の影響に比べて小さかった。

PULiMS-E11

溶融物の溶融ジェット直径及び投入速度の増加に伴い溶融物の拡がりの最終的な到達距離(連続層状デブリの堆積範囲)が増加した。投入速度の影響は溶融ジェット直径の影響に比べて小さかった。他の PULiMS 感度解析と比較して溶融物拡がりの増加量が大きいのは、もともとの落下溶融物質量が多く、溶融ジェット直径が大きいためである。

PULiMS-E12

溶融物の溶融ジェット直径及び投入速度の増加に伴い溶融物の拡がりの最終的な到達距離(連続層状デブリの堆積範囲)が増加した。投入速度の影響は溶融ジェット直径の影響に比べて小さかった。

PULiMS-E13

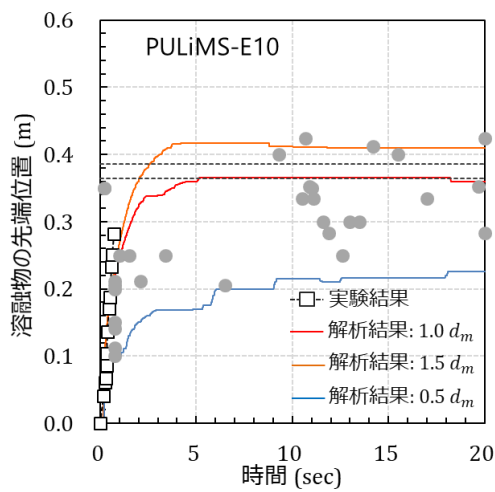
溶融物の溶融ジェット直径及び投入速度の増加に伴い溶融物の拡がりの最終的な到達距離(連続層状デブリの堆積範囲)が増加した。投入速度の影響は溶融ジェット直径の影響に比べて小さかった。

PULiMS-E14

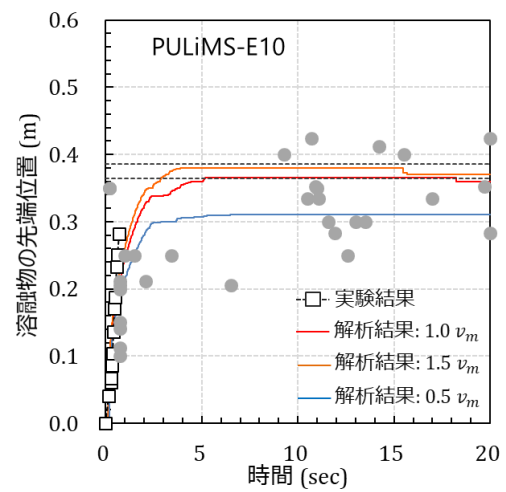
溶融物の溶融ジェット直径及び投入速度の増加に伴い溶融物の拡がりの最終的な到達距離（連続層状デブリの堆積範囲）が増加した。溶融ジェット直径及び投入速度を 1.5 倍に設定した解析結果では、最終的な溶融物先端位置は両者でほぼ同程度だった。

PULiMS-E16

溶融物の溶融ジェット直径及び投入速度の増加に伴い溶融物の拡がりの最終的な到達距離（連続層状デブリの堆積範囲）が増加した。溶融ジェット直径及び投入速度を 1.5 倍に設定した解析結果では、最終的な溶融物先端位置は両者でほぼ同程度だった。

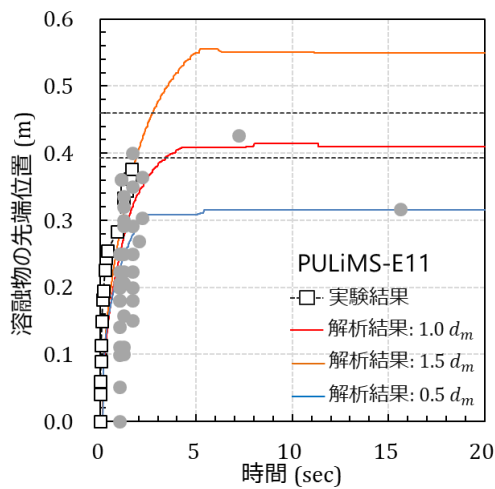


(1) 溶融物の溶融ジェット直径

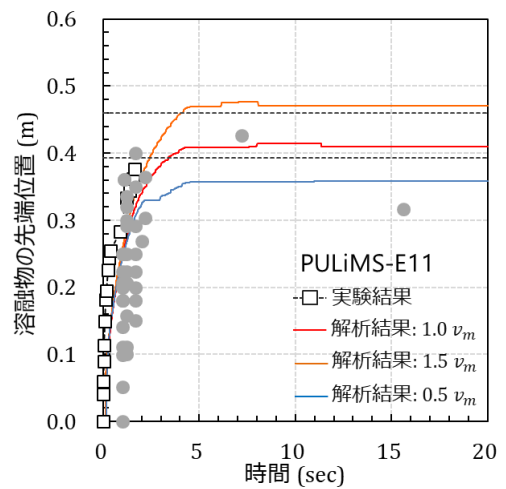


(2) 溶融物の投入速度

図 3.3.7 溶融物の拡がりの先端位置：PULiMS-E10

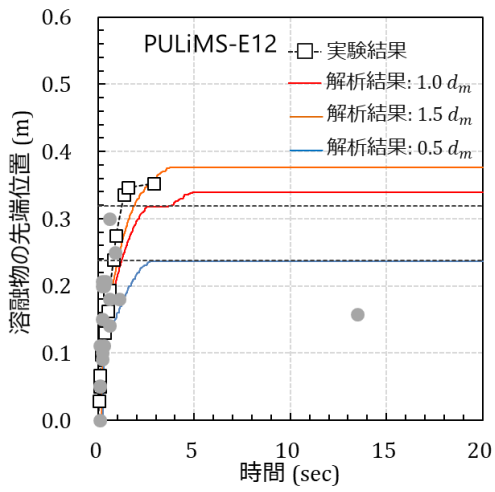


(1) 溶融物の溶融ジェット直径

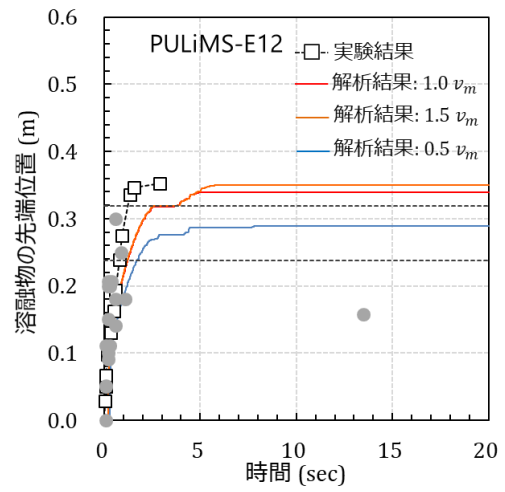


(2) 溶融物の投入速度

図 3.3.8 溶融物の拡がりの先端位置：PULiMS-E11

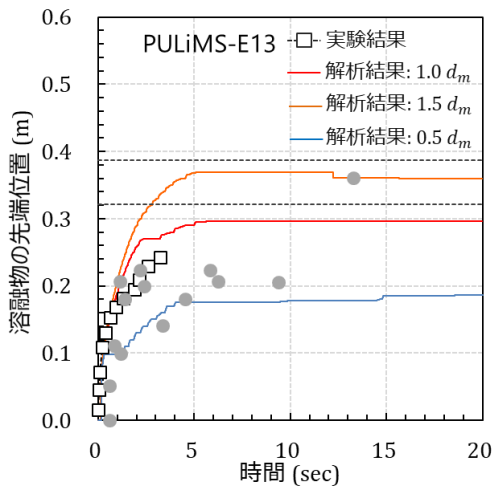


(1) 溶融物の溶融ジェット直径

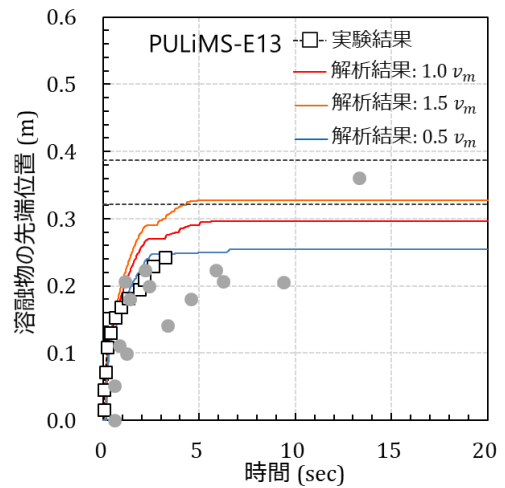


(2) 溶融物の投入速度

図 3.3.9 溶融物の拡がりの先端位置 : PULiMS-E12

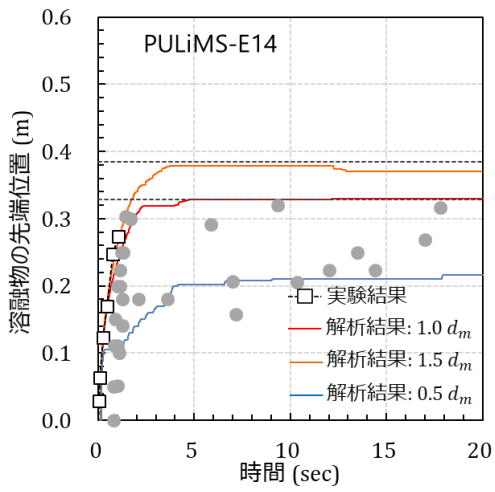


(1) 溶融物の溶融ジェット直径

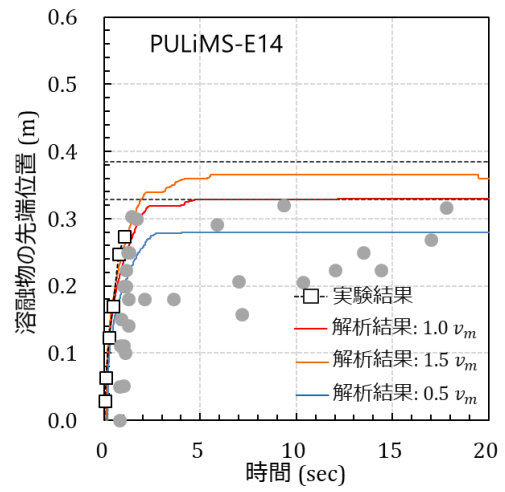


(2) 溶融物の投入速度

図 3.3.10 溶融物の拡がりの先端位置 : PULiMS-E13

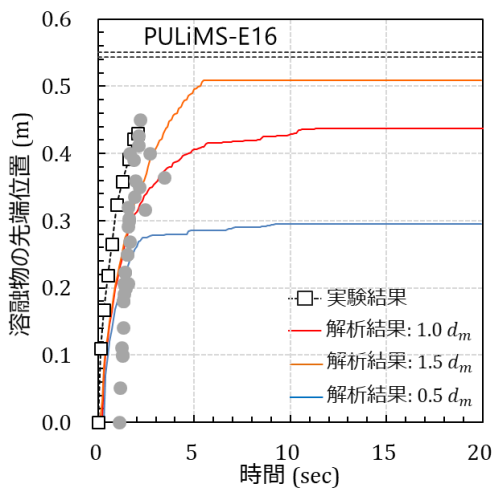


(1) 溶融物の溶融ジェット直径

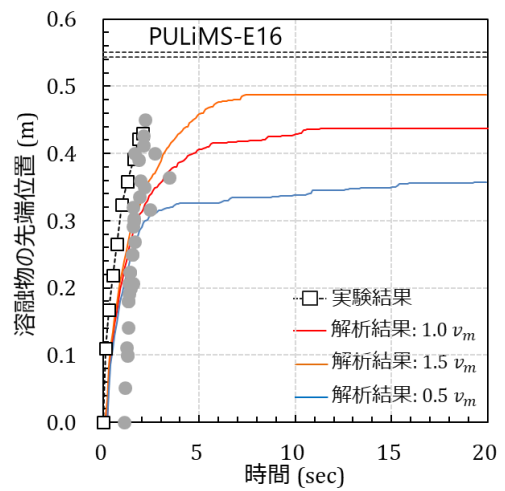


(2) 溶融物の投入速度

図 3.3.11 溶融物の拡がりの先端位置 : PULiMS-E14



(1) 溶融物の溶融ジェット直径



(2) 溶融物の投入速度

図 3.3.12 溶融物の拡がりの先端位置 : PULiMS-E16

3.3.5. 考察

(1) 溶融物の投入条件の影響

溶融物の溶融ジェット直径による影響

溶融物の溶融ジェット直径の増加に伴い、投入される溶融物の質量流量が多くなる。したがって、溶融物の初期拡がり速度が増加する。射流モデルを使用していない解析だと溶融物のジェットが床面に到達した際に水平方向の運動量が得られずに、溶融物の拡がり速度が 0.0m/s から上昇していく。一方、射流モデルを使用する解析では投入された溶融物のジェットが床面に衝突して水平方向の運動量を得ることで溶融物が拡がり易くなる。JASMINE コードでは、溶融物先端位置が下流のセルに移動した場合には、溶融物の先端表面が更新されたと仮定して、固相の厚さ $d_{edge} = 0$ とする。溶融物の拡がり速度が増加することにより、溶融物の先端表面での固相の更新頻度が増加するために、溶融物先端の固相が成長しづらくなる。このため、溶融物の拡がりの先端位置の進展が促進される。逆に、溶融ジェット直径が減少すると、溶融物の拡がり速度が減少してしまい、溶融物の先端表面での固相の更新頻度が減少するために、溶融物先端の固相が成長し易くなる。このため、溶融物の拡がりが抑制される。

溶融物の投入速度による影響

溶融物の投入速度の増加に伴い、投入される溶融物の質量流量が多くなる。したがって、溶融物の初期拡がり速度が増加する。射流モデルを使用していない解析だと溶融物のジェットが床面に到達した際に水平方向の運動量が得られずに、溶融物の拡がり速度が 0.0m/s から上昇していく。一方、射流モデルを使用する解析では投入された溶融物のジェットが床面に衝突して水平方向の運動量を得ることで溶融物が拡がり易くなる。溶融物の拡がり速度が増加することにより、溶融物の先端表面での固相の更新頻度が増加するために、溶融物先端の固相が成長しづらくなる。このため、溶融物の拡がりの先端位置の進展が促進される。逆に投入速度が減少すると、溶融物の拡がり速度が減少してしまい、溶融物の先端表面での固相の更新頻度が減少するために、溶融物先端の固相が成長し易くなり溶融物の拡がり可能な最小厚さを下回ってしまう。このため、溶融物の拡がりが抑制される。投入速度が溶融物拡がりに与える影響は溶融ジェット直径の影響に比べて小さくなる解析結果が得られた。この理由は、質量流量の定義から考察できる。質量流量は式(3.1)で表される。ここで、 D_e が溶融ジェット直径、 ρ が密度、 v が投入速度である。質量流量の定義では溶融ジェット直径が 2 乗されているため、質量流量及び溶融物拡がりに与える影響は、投入速度よりも溶融ジェット直径の方が大きくなると考えられる。

$$q = \rho\pi \frac{D_e^2}{4} v \quad (3.1)$$

3.4. ドライ条件での解析

3.4.1. VULCANO 実験

VULCANO VE-U7 実験 [3.2] [3.3] を実験解析の対象とする。実験では溶融物としてコリウムを扇形の流路に流入させている。流路は中央に堰が設けてあり、片側の床面がコンクリート、他方の床面がセラミック（ジルコニア）となっているために、同じ組成・温度条件の溶融物を 2 つの流路の流入させることにより異なる床材が溶融物の拡がりに与える影響を調査できる。JASMINE コードによる解析では、それぞれの床材に対する溶融物の拡がりを個別に解析する。

3.4.2. KATS 実験

KATS-13 及び KATS-14 実験 [3.4] [3.5] を実験解析の対象とする。実験では坩堝内でのテルミット反応により生成した溶融物を等幅流路に流入させている。溶融物は、坩堝内で酸化物（主としてアルミナ）と金属層（主として鉄）に層状に分離するために、開口部を分けることにより酸化物と金属を個別に等幅流路に流入させる。KATS-13（コンクリート床面）及び KATS-14（セラミック床面）では酸化物を等幅流路に流入させている。

3.4.3. ECOKATS 実験

ECOKATS-V1 実験 [3.6] [3.7] を実験解析の対象とする。テルミット反応により生成した溶融物（主としてアルミナ）をセラミック床面の等幅流路に流入させている。ECOKATS-V1 実験は ECOKATS-1 実験の予備実験である。ECOKATS-1 実験では、等幅流路の先に長方形の広い流路を設けることにより、溶融物の二次元的な拡がりに着目しているために、JASMINE の解析対象より除外した。

3.4.4. FARO 実験

FARO-L26S 実験 [3.8] を実験解析の対象とする。80-20wt% のコリウム (UO_2/ZrO_2) を溶融物として使用した実験である。17° の扇形のステンレス製床面の流路に溶融物を流入させている。流路には多数の熱電対が設置されているために、流路表面の温度が計測できるようになっている。

3.4.5. COMAS 実験

COMAS EU4 実験 [3.9] [3.10] を実験解析の対象とする。39wt% の鉄を含むコリウムを溶融物として使用した実験である。坩堝内で生成した溶融物を貯留部へ移した後に、溶融物を流入させる。片側 45° への拡大部を持つ変形流路に溶融物を流入させている。

3.4.6. 実験条件

実験解析の対象としたドライ条件の実験条件の一覧を表 3.4.1 に示す。溶融物の物性値及び床材の物性値の一覧を表 3.4.2 及び表 3.4.3 にそれぞれ示す。

表 3.4.1 実験解析の対象としたドライ条件での実験

名称	番号	流路形状 / 床面材質	溶融物種別 / 組成	流入質量
VULCANO	VE-U7	9.5° 扇形流路/ 珪酸質コンクリート& セラミック (ZrO ₂)	コリウム 56% UO ₂ 、32% ZrO ₂ 、5% FeO、2% CaSiO ₃ 、2% SiO ₂ 、1% Fe、 1% CaO、1% Al ₂ O ₃ (wt%)	12.6 kg & 14 kg
KATS	-13	等幅流路/ 珪酸質コンクリート	酸化物 83% Al ₂ O ₃ 、8.5% SiO ₂ 、6% FeO、1.5% MgO、1% MnO (wt%)	185 kg
	-14	等幅流路/ セラミック (cordierite)		176 kg
ECOKATS	V1	等幅流路/ セラミック (cordierite)	酸化物 41% Al ₂ O ₃ 、24% FeO、19% CaO、16% SiO ₂ (wt%)	193 kg
FARO	L-26S	17° 扇形流路/ ステンレス	コリウム 80% UO ₂ 、20% ZrO ₂ (wt%)	130 kg
COMAS	EU-4	等幅流路+9.5° 扇形流路/ 鋳鉄	コリウム 29% UO ₂ 、12% ZrO ₂ 、18% FeO、2% Cr ₂ O ₃ 、39% Fe (wt%)	1920 kg

表 3.4.2 ドライ条件で投入された溶融物の物性値

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

表 3.4.3 ドライ条件で用いられた床材の物性値

実験条件及び 床材の種類	VULCANO VE-U7/ KATS-13	VULCANOVE-U7	KATS-14/ ECOKATS V1	FARO L-26S	COMAS EU-4
	珪酸質コンクリート	セラミック (ZrO ₂)	セラミック(cordierite)	ステンレス	鋳鉄
接触熱抵抗 (Km ² /W)	1.20×10 ⁻³ / 8.33×10 ⁻⁵	5.40×10 ⁻³	1.68×10 ⁻⁴ / 5.40×10 ⁻³	5.00×10 ⁻³	5.00×10 ⁻³
密度 (kg/m ³)	2475	5300	2600	7920	7180
比熱 (J/kg·K)	554~2484	575	1460	499~644	695
熱伝導率 (W/m·K)	1.3	4.7	3.0	16~25.7	31.4

3.4.7. 解析条件

(1) 実験解析

感度解析の対象とする実験条件を選定するために、表 3.4.1 に示すドライ条件での実験を対象とした実験解析を実施した。平成 27 年度から令和元年度までの研究成果により、構築した溶融物の拡がりモデルを用いて、ドライ条件での溶融物の拡がり及び連続層状デブリの堆積範囲を良好に再現することが可能となっている。感度解析のベースケースとなる実験解析の解析条件、溶融物の表面からの熱伝達率及び熱伝達面積増加の係数を含めたドライ条件での溶融物の拡がりモデルは令和元年度と同一とした。

(2) 感度解析

ドライ条件での実験を対象とした感度解析では、溶融物の投入条件が溶融物の拡がり及び連続層状デブリの堆積範囲に与える影響に着目する。感度解析での解析条件の設定方法は、次の項目に示す通りとした。

溶融物の投入条件

溶融物の投入条件を変更する場合には、表 3.4.4 に示す溶融ジェット直径及び投入速度を個別に 1.5 倍及び 0.5 倍する。このとき、溶融ジェット直径は質量流量と投入速度から逆算して求める。溶融物の溶融ジェット直径を変更する場合、投入速度は表 3.4.4 に示す数値に固定する。溶融物流入質量は同一とするため、溶融物流入質量と質量流量から投入時間を求めて解析で使用する。投入条件の係数（1.5 倍及び 0.5 倍）の数値に意味はなく、代表値として投入条件の係数を決定した。溶融物の投入条件を変更した解析条件は、ドライ条件での実験の実験条件とは異なる仮想的な解析条件であるために、実験結果と解析結果との定量的な比較は意味を持たないことに留意する必要がある。

(3) 解析体系

表 3.4.1 に示すドライ条件での実験解析の解析体系を表 3.4.4 に示す。ドライ条件での実験解析では、流入する溶融物の投入速度は表 3.4.4 に示す値を入力で与える。解析体系は令和元年度と同様である。

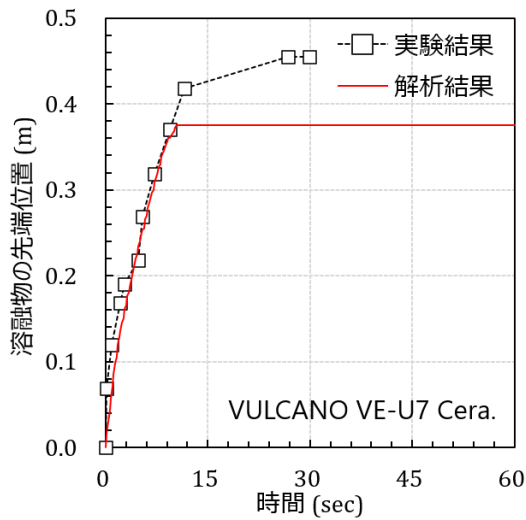
表 3.4.4. ドライ条件で設定する解析体系

解析条件		VULCANO VE-U7		KATS-13	KATS-14	ECOKATS V1	FARO L-26S	COMAS EU-4
		コンクリート	セラミック					
計算領域	気相	空気：圧力一定 (0.1 MPa)						
	流入距離	0.6 m		15 / 12 m		8 m	1.5 m	8.6 m
	流入幅	(9.5°セクター)		0.25 m		0.293 m	(17°セクター)	0.4~3.1
	流路セル	40		90		80	60	88
	床板厚さ	30 mm		72 mm		20 mm	20 mm	90 mm
	床板セル	15		18		20	10	18
溶融物	初期温度	2448 K		2325 K	2240 K	1893 K	2950 K	2323 K
	空隙率	0.28	0.32	0.3	0.3	0.4	0.3	0.3
	流入時間	7.7 s		10	37	54.7	9.7	11.6
	質量流量	1.64 kg/s	1.82 kg/s	35.56→1.44	5.6→3.91	4.24→2.61	13.42	300→30
	投入速度	0.1 m/s		2.9	0.43	0.25	0.15	2.2 / 20

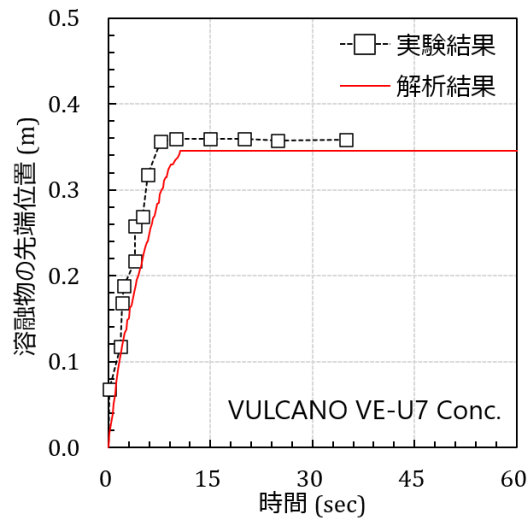
3.4.8. 解析結果

(1) 実験解析

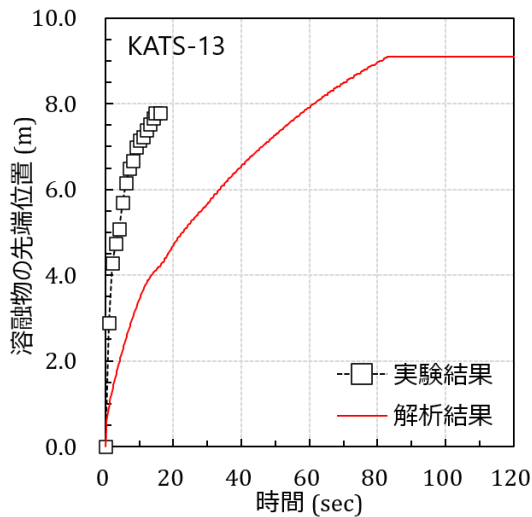
ドライ条件での実験の実験結果と解析結果との比較を図 3.4.1 に示す。図 3.4.1 (1) は VULCANO VE-U7 (セラミック床面)、図 3.4.1 (2) は VULCANO VE-U7 (コンクリート床面)、図 3.4.1 (3) は KATS-13 実験、図 3.4.1 (4) は KATS-14 実験、図 3.4.1 (5) は ECOKATS-V1 実験、図 3.4.1 (6) は FARO-L26S 実験及び図 3.4.1 (7) は COMAS-EU4 実験に関する実験結果と解析結果との比較をそれぞれ示す。



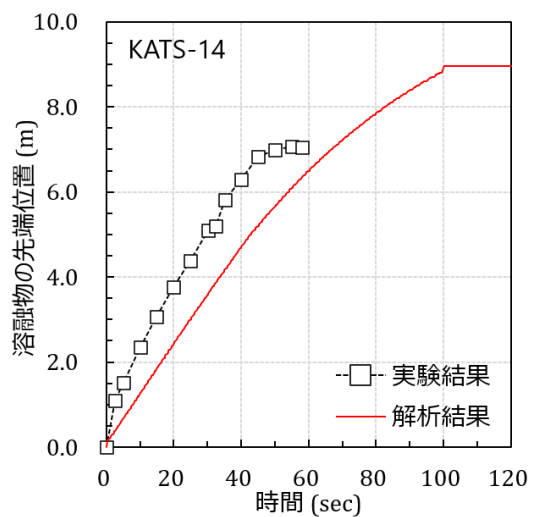
(1) VULCANO 実験 (セラミック床面)



(2) VULCANO 実験 (コンクリート床面)

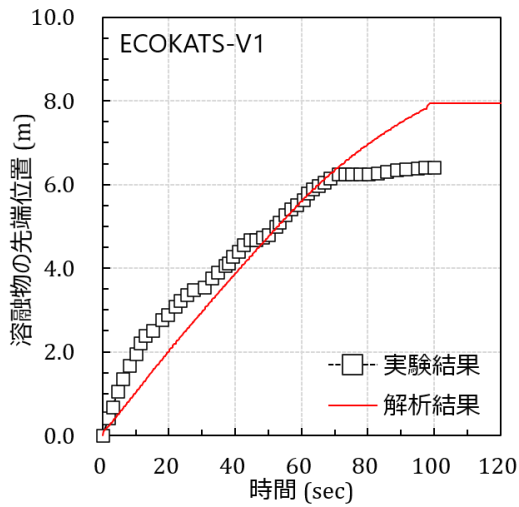


(3) KATS-13 実験

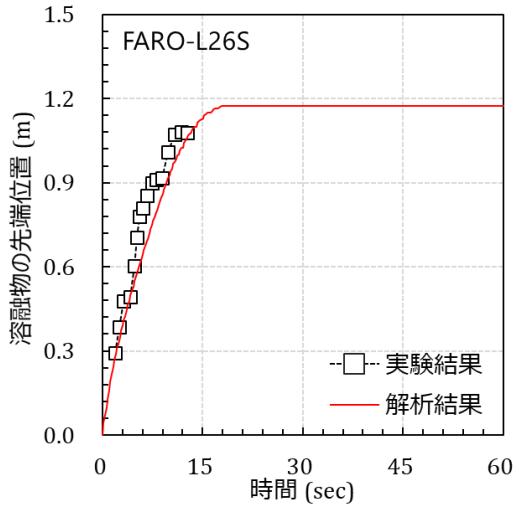


(4) KATS-14 実験

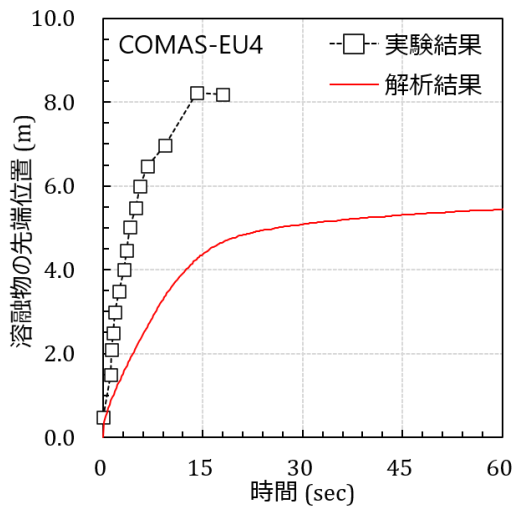
図 3.4.1 溶融物の拡がりの先端位置 (ドライ条件) (1/2)



(5) ECOKATS-V1 実験



(6) FARO-L26S 実験



(7) COMAS-EU4 実験

図 3.4.1 溶融物の拡がりの先端位置 (ドライ条件) (2/2)

VULUCANO VE-U7 実験 (セラミック床面)

実験結果では、溶融物の投入から 7-8 秒までに溶融物の拡がりの先端位置が 0.35 m 程度まで到達する。溶融物は最終的に 0.45 m 程度まで到達する。解析結果では、溶融物の投入から 7-8 秒までの溶融物の拡がりの先端位置と良好に一致した。しかしながら、解析結果は、14-15 秒からの溶融物の拡がりを再現できず、最終的に溶融物が到達した距離 (連続層状デブリの堆積範囲) を過小評価した。

VULUCANO VE-U7 実験（コンクリート床面）

実験結果では、溶融物の投入から 7-8 秒までに溶融物の拡がりの先端位置が 0.35 m 程度まで到達する。溶融物は最終的に 0.35 m 程度まで到達する。解析結果では、溶融物の投入から 7-8 秒までの溶融物の拡がりの先端位置と良好に一致した。加えて、最終的に溶融物が到達した距離（連続層状デブリの堆積範囲）に関して実験結果を良好に再現した。

KATS-13 実験

実験結果では、溶融物の投入から 20 秒までに溶融物の拡がりの先端位置が 8 m 程度まで到達する。溶融物は最終的に 8 m 程度まで到達する。解析結果では、溶融物の投入から 20 秒までに溶融物の拡がりの先端位置を過小評価した。加えて、最終的に溶融物が到達した距離（連続層状デブリの堆積範囲）を過大評価した。

KATS-14 実験

実験結果では、溶融物の投入から 40 秒までに溶融物の拡がりの先端位置が 7 m 程度まで到達する。溶融物は最終的に 7 m 程度まで到達する。解析結果では、溶融物の投入から 60 秒までに溶融物の拡がりの先端位置を過小評価した。加えて、最終的に溶融物が到達した距離（連続層状デブリの堆積範囲）を過大評価した。

ECOKATS-V1 実験

実験結果では、溶融物の投入から 70 秒までに溶融物の拡がりの先端位置が 6 m 程度まで到達する。溶融物は最終的に 6.5 m 程度まで到達する。このとき、溶融物の投入後から 20 秒程度にかけて加速する溶融物の拡がりは、40 秒程度にかけて減速する。解析結果では、溶融物の投入から 70 秒までの溶融物の拡がりの先端位置と良好に一致した。ただし、解析結果は、溶融物の投入後から 20 秒程度にかけて加速し、40 秒程度にかけて減速する溶融物の拡がりを再現できなかった。加えて、最終的に溶融物が到達した距離（連続層状デブリの堆積範囲）を過大評価した。

FARO-L26S 実験

実験結果では、溶融物の投入から 15 秒までに溶融物の拡がりの先端位置が 1.1 m 程度まで到達する。溶融物は最終的に 1.1 m 程度まで到達する。解析結果では、溶融物の投入から 15 秒までの溶融物の拡がりの先端位置と良好に一致した。ただし、最終的に溶融物が到達した距離（連続層状デブリの堆積範囲）をわずかに過大評価した。

COMAS-EU4 実験

実験結果では、溶融物の投入から 15 秒までに溶融物の拡がりの先端位置が 8 m 程度まで到達する。溶融物は最終的に 8 m 程度まで到達する。解析結果では、溶融物の投入から 15 秒までの溶融物の拡がりの先端位置を大幅に過小評価する。加えて、最終的に溶融物が到達した距離（連続層状デブリの堆積範囲）を大幅に過小評価した。

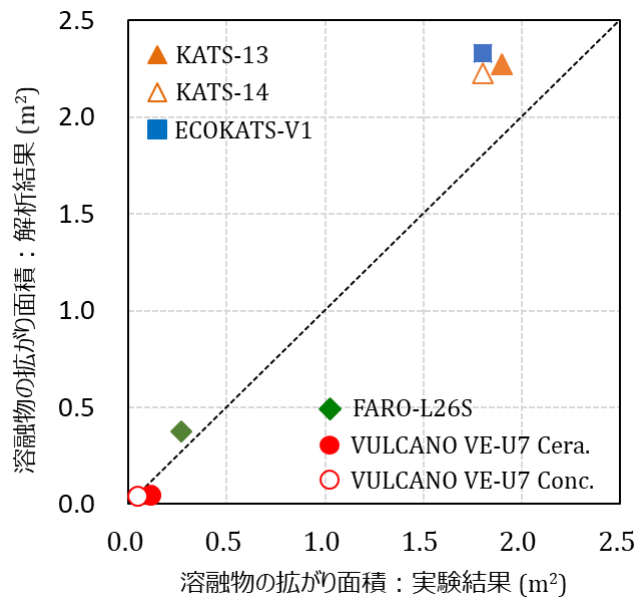


図 3.4.2 溶融物の拡がりの面積：実験結果と解析結果との比較

文献[3.11]に基づき、溶融物の拡がりの面積に関する実験結果と解析結果との比較を図 3.4.2 に示す。溶融物としてコリウムを用いた VULUCANO VE-U7 実験及び FARO-L26S 実験で得られた溶融物の拡がりの面積の実験結果と、JASMINE コードを用いた解析結果は良好に一致した。一方で、溶融物として主としてアルミナの酸化物を用いた KATS-13、KATS-14 実験及び ECOKATS-V1 実験で得られた溶融物の拡がりの面積の実験結果を、JASMINE コードを用いた解析結果は過大評価した。このとき、KATS-13、KATS-14 実験及び ECOKATS-V1 実験では、VULUCANO VE-U7 実験及び FARO-L26S 実験と比較して、投入速度が大きいもしくは投入時間が長いために、溶融物が長い距離を拡がる実験条件となっている（表 3.4.4）。したがって、図 3.4.2 に示す実験結果と解析結果との差異を、単純に投入する溶融物の違いに起因するものであると断定することは困難である。

文献[3.11]等に COMAS-EU4 実験で得られた溶融物の拡がりの面積の数値が不明であったために、図 3.4.2 では比較を行わなかった。しかしながら、図 3.4.1 (7) に示す通り、実験結果を、解析結果は過小評価した。COMAS-EU4 実験では、溶融物を等幅流路に流入させる。溶融物が拡がると、片側 45° への拡大部を持つ変形流路に溶融物が流入する。実験では、等幅流路から片側 45° への拡大部へ溶融物が流入する際に、拡大部へ均一に広がらずに、溶融物の拡がりの先端が先行して直進した後に拡大部へ拡がる。JASMINE コードでは、実験で得られた二次元的な溶融物の拡がりは解析することはできず、拡大部へ均一に溶融物が拡がる。したがって、解析結果は実験結果を過小評価したものと考えられる。

実験解析の結果を受けて、溶融物の拡がりが二次元的となる COMAS-EU4 実験を除く、VULCANO VE-U7 実験、KATS-13 実験、KATS-14 実験、ECOKATS-V1 実験及び FARO-L26S 実験を感度解析の対象とした。

(2) 感度解析

ドライ条件での感度解析の結果を図 3.4.3 から図 3.4.8 にそれぞれ示す。図 3.4.3 は VULCANO VE-U7 実験（セラミック床面）、図 3.4.4 は VULCANO VE-U7 実験（コンクリート床面）、図 3.4.5 は KATS-13 実験、図 3.4.6 は KATS-14 実験、図 3.4.7 は ECOKATS-V1 実験及び図 3.4.8 は FARO-L26S 実験の感度解析の結果をそれぞれ示す。

VULCANO VE-U7 実験（セラミック床面）

溶融物の溶融ジェット直径及び投入速度を 1.5 倍に設定した解析結果では、ベースケースと比較して初期の溶融物拡がりが増加し、最終的な溶融物の到達距離（連続層状デブリの堆積範囲）が増加した。溶融物の溶融ジェット直径及び投入速度を 0.5 倍に設定した解析結果では、ベースケースと比較して初期の溶融物拡がりが増加し、最終的な溶融物の到達距離（連続層状デブリの堆積範囲）が増加した。

VULCANO VE-U7 実験（コンクリート床面）

溶融物の溶融ジェット直径及び投入速度を 1.5 倍に設定した解析結果では、ベースケースと比較して初期の溶融物拡がりが増加し、最終的な溶融物の到達距離（連続層状デブリの堆積範囲）が増加した。溶融物の溶融ジェット直径及び投入速度を 0.5 倍に設定した解析結果では、ベースケースと比較して初期の溶融物拡がりが増加し、最終的な溶融物の到達距離（連続層状デブリの堆積範囲）が増加した。

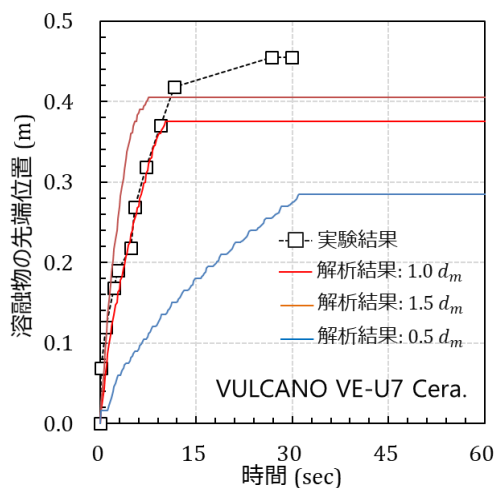
KATS-13 実験

溶融物の溶融ジェット直径を 1.5 倍に設定した解析結果では、ベースケースと比較して初期の溶融物の拡がりが増加したが、最終的な溶融物の到達距離（連続層状デブリの堆積範囲）はほぼ同一となった。しかし、溶融ジェット直径を 0.5 倍に設定した解析結果では、ベースケース及び溶融ジェット直径を 1.5 倍に設定した解析結果より最終的な溶融物の到達距離（連続層状デブリの堆積範囲）がわずかに増加する解析結果となった。溶融物の投入速度を 1.5 倍に設定した解析結果では、ベースケースと比較して初期の溶融物の拡がりが増加したが、最終的な溶融物の到達距離（連続層状デブリの堆積範囲）がわずかに増加する解析結果となった。投入速度を 0.5 倍に設定した解析結果では、ベースケースと比較して初期の溶融物の拡がりが増加したが、最終的な溶融物の到達距離（連続層状デブリの堆積範囲）はベースケース及び投入速度を 1.5 倍に設定した解析結果よりわずかに増加した。

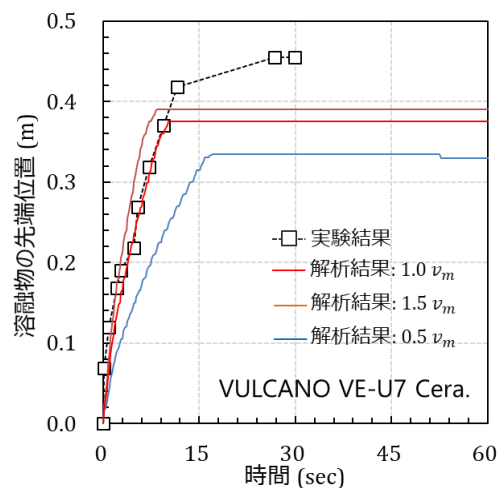
KATS-14 実験

溶融物の溶融ジェット直径を 1.5 倍に設定した解析結果では、初期の溶融物の拡がりが増加し、最終的な溶融物の到達距離（連続層状デブリの堆積範囲）はベースケースよりも早く壁（9.0 m）に到達した。溶融ジェット直径を 0.5 倍に設定した解析結果では、最終的な溶融物の到達距離（連続層状デブリの堆積範囲）は減少した。溶融物の投入速度を 1.5 倍に設定した解析結果では、初期の溶融物の拡がりが増加して、最終的な溶融物の到達距離（連続

層状デブリの堆積範囲) がベースケースよりも早く壁 (9.0 m) に到達した。投入速度を 0.5 倍に設定した解析結果では、初期の溶融物の拡がりはベースケースよりも減少したが、最終的な溶融物の到達距離 (連続層状デブリの堆積範囲) は壁 (9.0 m) まで到達した。

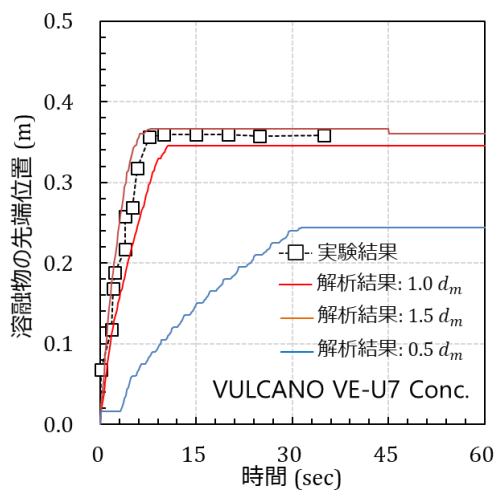


(1) 溶融物の溶融ジェット直径

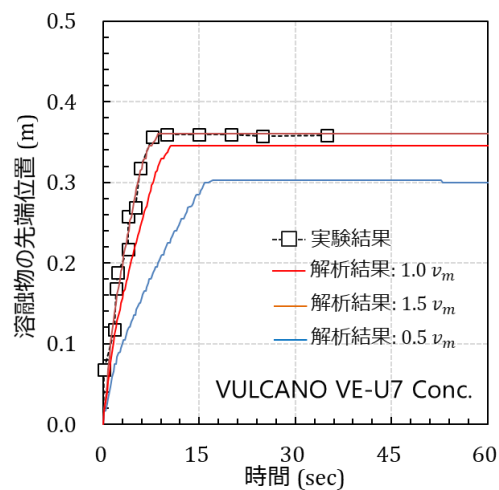


(2) 溶融物の投入速度

図 3.4.3 溶融物の拡がりの先端位置 : VULUVANO VE-U7 (セラミック床面)

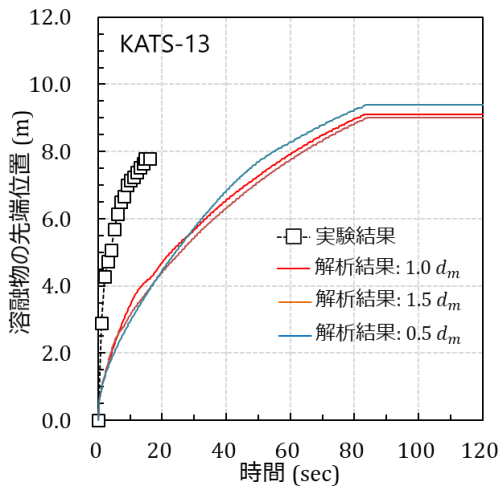


(1) 溶融物の溶融ジェット直径

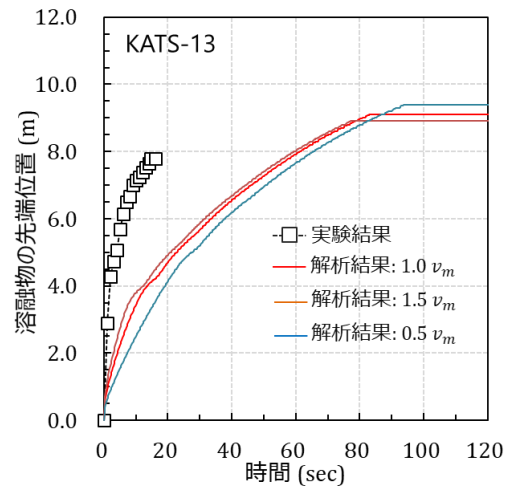


(2) 溶融物の投入速度

図 3.4.4 溶融物の拡がりの先端位置 : VULUVANO VE-U7 (コンクリート床面)

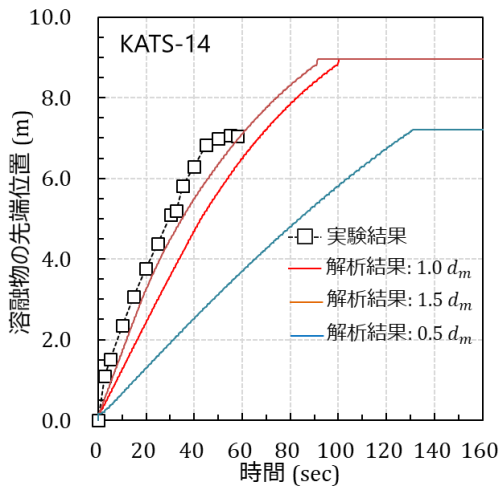


(1) 溶融物の溶融ジェット直径

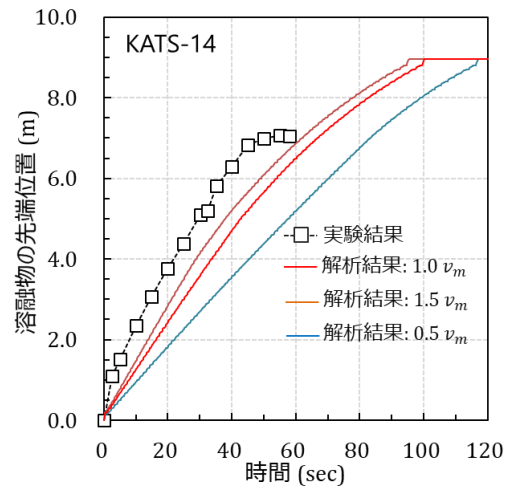


(2) 溶融物の投入速度

図 3.4.5 溶融物の拡がりの先端位置 : KATS-13 での感度解析結果



(1) 溶融物の溶融ジェット直径



(2) 溶融物の投入速度

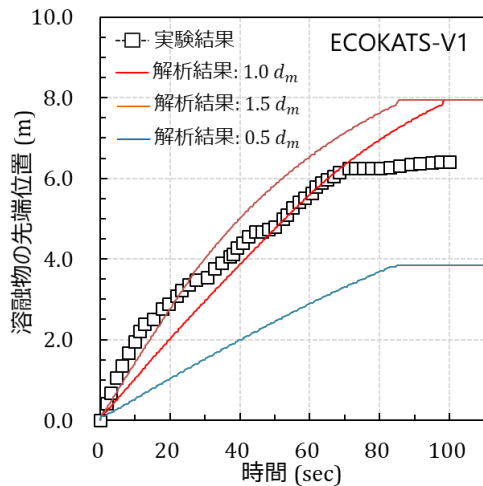
図 3.4.6 溶融物の拡がりの先端位置 : KATS-14 での感度解析結果

ECOKATS-V1 実験

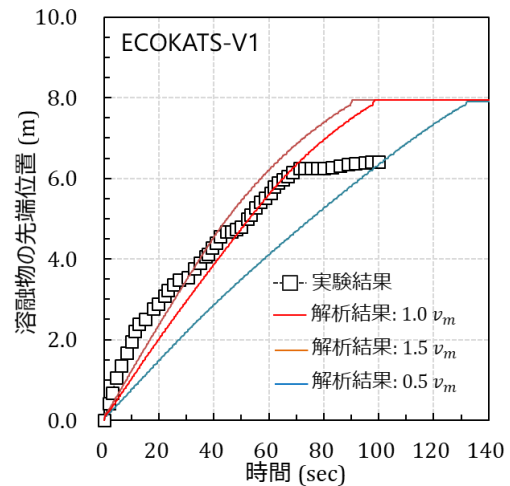
溶融物の溶融ジェット直径を 1.5 倍に設定した解析結果では、初期の溶融物の拡がりが増加し、最終的な溶融物の到達距離（連続層状デブリの堆積範囲）がベースケースよりも早く壁（8.0 m）まで到達した。溶融ジェット直径を 0.5 倍に設定した解析結果では、最終的な溶融物の到達距離（連続層状デブリの堆積範囲）は減少して壁（8.0 m）まで到達しなかった。溶融物の投入速度を 1.5 倍に設定した解析結果では、初期の溶融物の拡がりが増加して、最終的な溶融物の到達距離（連続層状デブリの堆積範囲）がベースケースよりも早く壁（8.0 m）まで到達した。投入速度を 0.5 倍に設定した解析結果では、初期の溶融物の拡がりは減少したが、最終的な溶融物の到達距離（連続層状デブリの堆積範囲）は壁（8.0 m）まで到達した。

FARO-L26S 実験

溶融物の溶融ジェット直径及び投入速度を 1.5 倍に設定した解析結果では、初期の溶融物の拡がりが増加し、最終的な溶融物の到達距離（連続層状デブリの堆積範囲）がベースケースより増加した。溶融ジェット直径及び投入速度を 0.5 倍に設定した解析結果では、初期の溶融物の拡がりが減少し、最終的な溶融物の到達距離（連続層状デブリの堆積範囲）がベースケースより減少した。



(1) 溶融物の溶融ジェット直径



(2) 溶融物の投入速度

図 3.4.7 溶融物の拡がりの先端位置：ECOKATS-V1

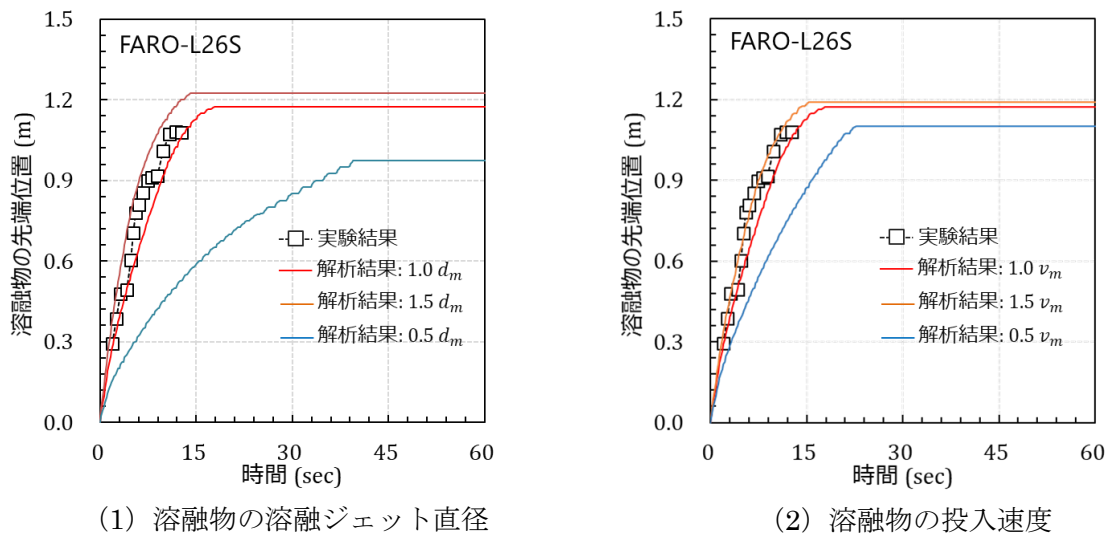


図 3.4.8 溶融物の拡がりの先端位置：FARO-L26S

3.4.9. 考察

(1) 溶融物の投入条件の影響

溶融物の溶融ジェット直径による影響

溶融物の溶融ジェット直径を増加させることにより、溶融ジェットの質量流量が増加して溶融物の拡がり速度が増加するため、溶融物の拡がり先端の進展が促進される。したがって、溶融物の拡がりの先端位置の進展速度が増加する。一方で、溶融ジェット直径が減少することにより、溶融ジェットの質量流量が減少して溶融物拡がり速度が減少するため、溶融物の拡がり先端の進展が抑制される。したがって、溶融物の拡がりの先端位置の進展速度が減少する。KATS-14 及び ECOKATS-V1 実験解析では、ベースケース及び溶融ジェット直径 1.5 倍の解析結果が壁に到達しているため、最終的な溶融物の到達距離が増加しているか確認できない。また、KATS-13 では溶融ジェット直径を 0.5 倍に設定した解析結果で、最終的な溶融物の拡がりがベースケース及び溶融ジェット直径を 1.5 倍に設定した解析結果をわずかに上回る解析結果となった。

JASMINE コードでは、溶融物の先端位置が下流のセルに移動した場合には、溶融物の先端表面が更新されると仮定して、固相の厚さ $d_{edge} = 0$ とする。溶融ジェット直径を増加させると質量流量が増加して溶融物の拡がり速度が増加する。溶融物の拡がり速度が増加することにより、溶融物の先端表面での固相の更新頻度が増加するために、溶融物先端の固相が成長しづらくなる。このため、溶融物の拡がりの先端位置の進展が促進される。逆に、溶融ジェット直径が減少すると、溶融物の拡がり速度が減少してしまい、溶融物の先端表面での固相の更新頻度が減少するために、溶融物先端の固相が成長し易くなる。このため、溶融物の拡がりが抑制される。これが、VULUCANO VE-U7 実験や FARO-L26S 実験で得られた解析結果の原因と考えられる。KATS-13 の溶融ジェット直径を 0.5 倍に設定した解析結果では、最終的な溶融物の到達距離がベースケースや溶融ジェット直径 1.5 倍の解析結果よ

りも増加した。KATS-13 はもともとの溶融物の質量流量が多いため、溶融ジェット直径を 0.5 倍に減少させて質量流量が減少したとしても溶融物の先端が広がるのに必要なだけの慣性力が確保できたため、溶融物先端での固相の成長より溶融物の拡がりの先端位置が抑制されずに拡がり続けることができたことが理由であると考えられる。

溶融物の投入速度による影響

溶融物の投入速度の増加に伴い、溶融ジェットの質量流量が増加して溶融物の拡がり速度が増加するため、溶融物の拡がり先端の進展が促進される。したがって、溶融物の拡がりの先端位置の進展速度が増加する。一方で、投入速度が減少することにより、溶融ジェットの質量流量が減少して溶融物拡がり速度が減少するため、溶融物の拡がり先端の進展が抑制される。したがって、溶融物の拡がりの先端位置の進展速度が減少する。溶融物の投入速度を変更した影響は、溶融ジェット直径を変更した解析結果程の影響は見られなかった。これは、質量流量の計算において溶融ジェット直径が 2 乗されるので、投入速度よりも溶融ジェット直径の方が質量流量に与える影響が大きくなるためである (式 3.1)。KATS-14 及び ECOKATS-V1 実験解析では、ベースケース及び投入速度 1.5 倍、0.5 倍の解析結果がすべて壁まで到達したため、最終的な溶融物の到達距離への影響は確認できなかった。また、KATS-13 では投入速度を 0.5 倍に設定した解析結果で、最終的な溶融物の拡がりがベースケース及び投入速度を 1.5 倍に設定した解析結果をわずかに上回る解析結果となった。

JASMINE コードでは、溶融物先端位置が下流のセルに移動した場合には、溶融物の先端表面が更新されたと仮定して、固相の厚さ $d_{edge} = 0$ とする。投入速度を増加させると質量流量が増加して溶融物の拡がり速度が増加する。溶融物の拡がり速度が増加することにより、溶融物の先端表面での固相の更新頻度が増加するために、溶融物先端の固相が成長しづらくなる。このため、溶融物の拡がりの先端位置の進展が促進される。逆に、投入速度が減少すると、溶融物の拡がり速度が減少してしまい、溶融物の先端表面での固相の更新頻度が減少するために、溶融物先端の固相が成長し易くなる。このため、溶融物の拡がりが抑制される。これが、VULUCANO VE-U7 実験や FARO-L26S 実験で得られた解析結果の原因と考えられる。KATS-13 の解析では、溶融物の投入速度を 0.5 倍に設定した場合の最終的な溶融物の到達距離がベースケース及び投入速度を 1.5 倍に設定した解析結果を上回る結果となった。これは、KATS-13 のもともとの質量流量が多いため投入速度を 0.5 倍に減少させて質量流量が減少したとしても溶融物の先端が広がるのに必要なだけの慣性力が確保できたため、溶融物先端での固相の成長より溶融物の拡がりの先端位置が抑制されずに拡がり続けることができたことが理由であると考えられる。

3.5. RIT 試験の解析

3.5.1. 実施目的

シビアアクシデントの不確かさ低減プロジェクト（ROSAU）で実施予定である実験の解析を可能とするため、JASMINE コードを用いて変形流路での二相流の解析を行うための拡張が必要となる。このため、今年度は JASMINE コードの拡張の過程として、直交座標での二相流及び溶融物拡がりモデルの検証として RIT 試験の解析を行う。

3.5.2. RIT 試験での実験解析の対象

2MWS-Ox-3

2MWS-Ox-3 を RIT 試験の実験解析の対象とする（文献[3.12]）。2MWS-Ox-3 では、30-70wt%の混合酸化物（CaO/B₂O₃）を溶融物として使用した実験である。抵抗加熱炉で生成した溶融物をスチール製床面の等幅流路（流路幅 0.2 m）に流入させている。このとき等幅流路には、あらかじめ水深 12 cm の冷却水を貯めている。

3.5.3. 実験条件

実験解析の対象とした 2MWS-Ox-3 の実験条件の一覧を表 3.5.1 に、実験で使用した酸化物（CaO/B₂O₃）の物性値の一覧を表 3.5.2 に示す。ここで、表 3.5.1 の名称は、2M が流入距離（2.0 m）、W がウェット条件、S が床材（Steel）、Ox が酸化物（Oxide）を示し、番号は 2MWS-Ox の 3 番目の実験を示す。

表 3.5.1 実験解析の対象とした RIT 試験の実験

名称	番号	流路形状 / 床面材質	溶融物種別 / 組成	流入質量 (kg)
2MWS-Ox	3	等幅流路 / スチール	混合酸化物 CaO/B ₂ O ₃ / 30/70 wt%	25.0

表 3.5.2 RIT 試験で投入された溶融物の物性値[3.12]

実験条件	2MWS-Ox-3
溶融物の種別	混合酸化物(CaO/B ₂ O ₃)
液相線温度 (K)	1323.0
固相線温度 (K)	1225.0
融点 (K)	1274.0
液相密度 (kg/m ³)	2500
液相比熱 (J/kg·K)	2200
熱伝導率 (W/m·K)	3.0
粘性係数 (Pa·s)	0.2
表面張力 (N/m)	0.75
放射率 (-)	0.3
凝固潜熱 (kJ/kg)	460.0

3.5.4. 解析条件

(1) 解析体系

RIT 試験の実験解析を行う場合の、 x 方向及び z 方向の二相流のセルのサイズは図 3.5.1 に示す。解析における解析体系は、表 3.5.2 をもとに決定した。解析における物性値は、表 3.5.3 をもとに決定した。

(2) 境界条件

溶融物を第一セル ($x = 1, z = 1$) から幅 0.2 m、長さ 2.0 m の直交流路へ水平方向に投入される (図 3.5.1 を参照)。この際、第一セルの z 方向長さを質量流量と投入速度から逆算した投入直径より大きくなるように設定する。

(3) 二相流の伝熱モデル

直交座標系で二相流計算を行うために、冷却水の一点近似モデルを設定して解析を行った。冷却水の一点近似モデルでは、冷却水温がすべての二相流のセルで同一となり、局所的なボイドの発生が無くなり、冷却水の流速が 0 となる。

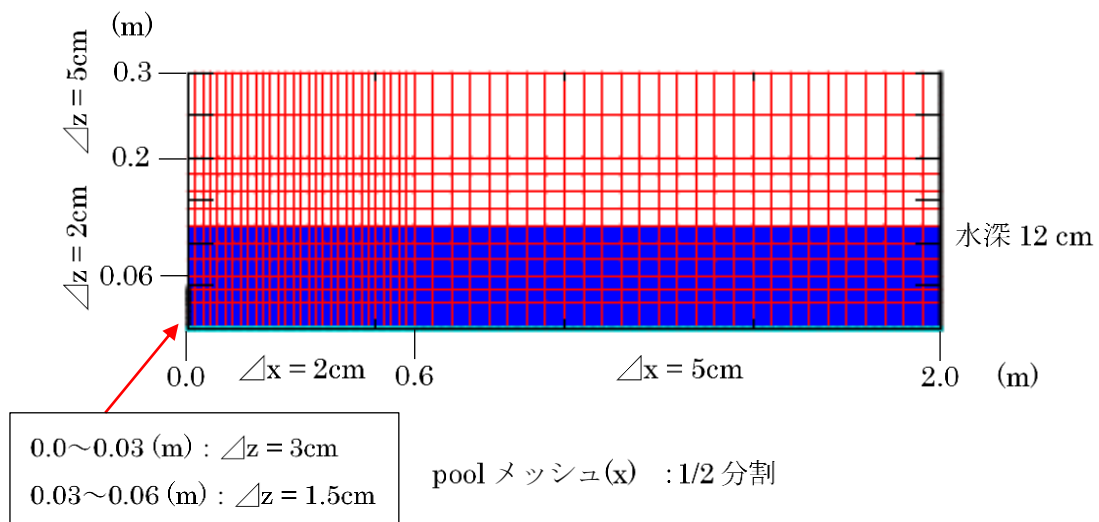


図 3.5.1 RIT 試験解析での解析体系 (2MWS-Ox-3)

表 3.5.3 RIT 試験で設定する解析条件

解析条件	2MWS-Ox-3
圧力 (MPa)	0.1 (大気圧)
流入距離 (m)	2.0
流入幅 (m)	0.2
床板厚さ (m)	0.02
床材温度 (K)	298.0
熔融物温度 (K)	1373.0
落下継続時間 (s)	33.33
流入直径 (m)	0.028
質量流量 (kg/s)	0.75
冷却水深 (m)	0.12
冷却水温 (K)	363.0

3.5.5. 解析結果

RIT 試験 (2MWS-Ox-3) の溶融物と冷却水の解析結果の可視化図を図 3.5.2 に、溶融物拡がりの先端位置の実験結果と解析結果との比較を図 3.5.3 に示す。

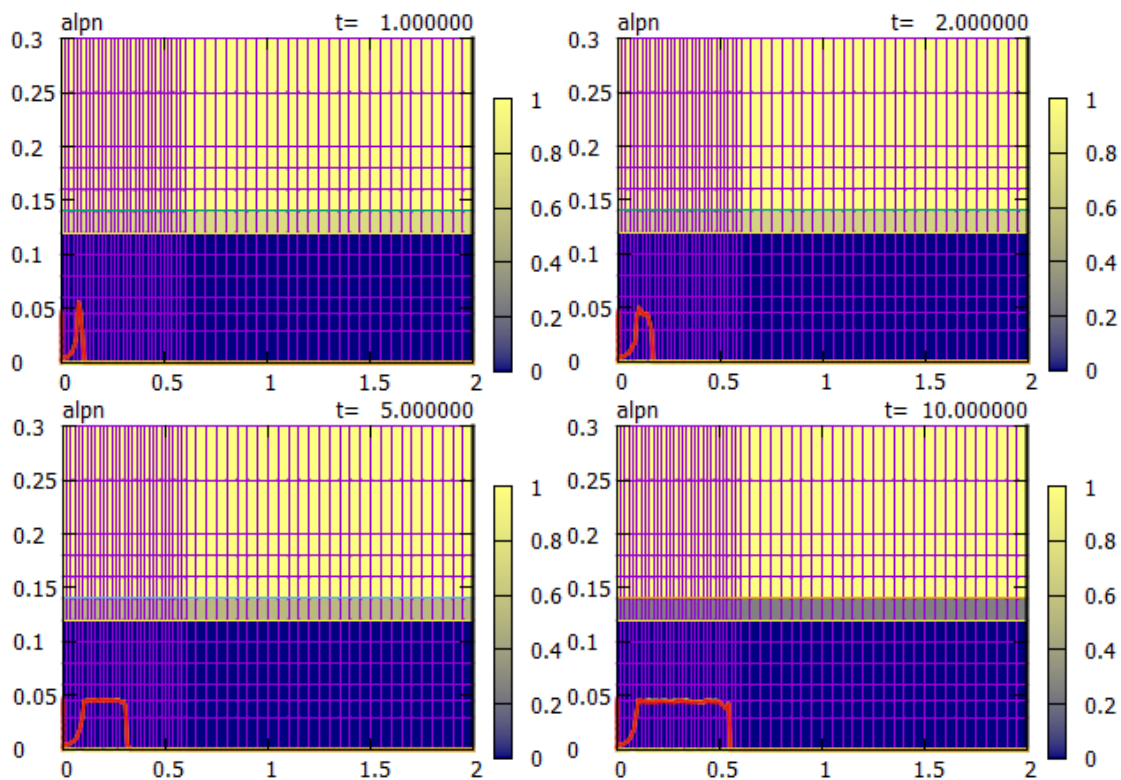


図 3.5.2 溶融物と冷却水の解析結果の可視化図 : 2MWS-Ox-3 (1/2)

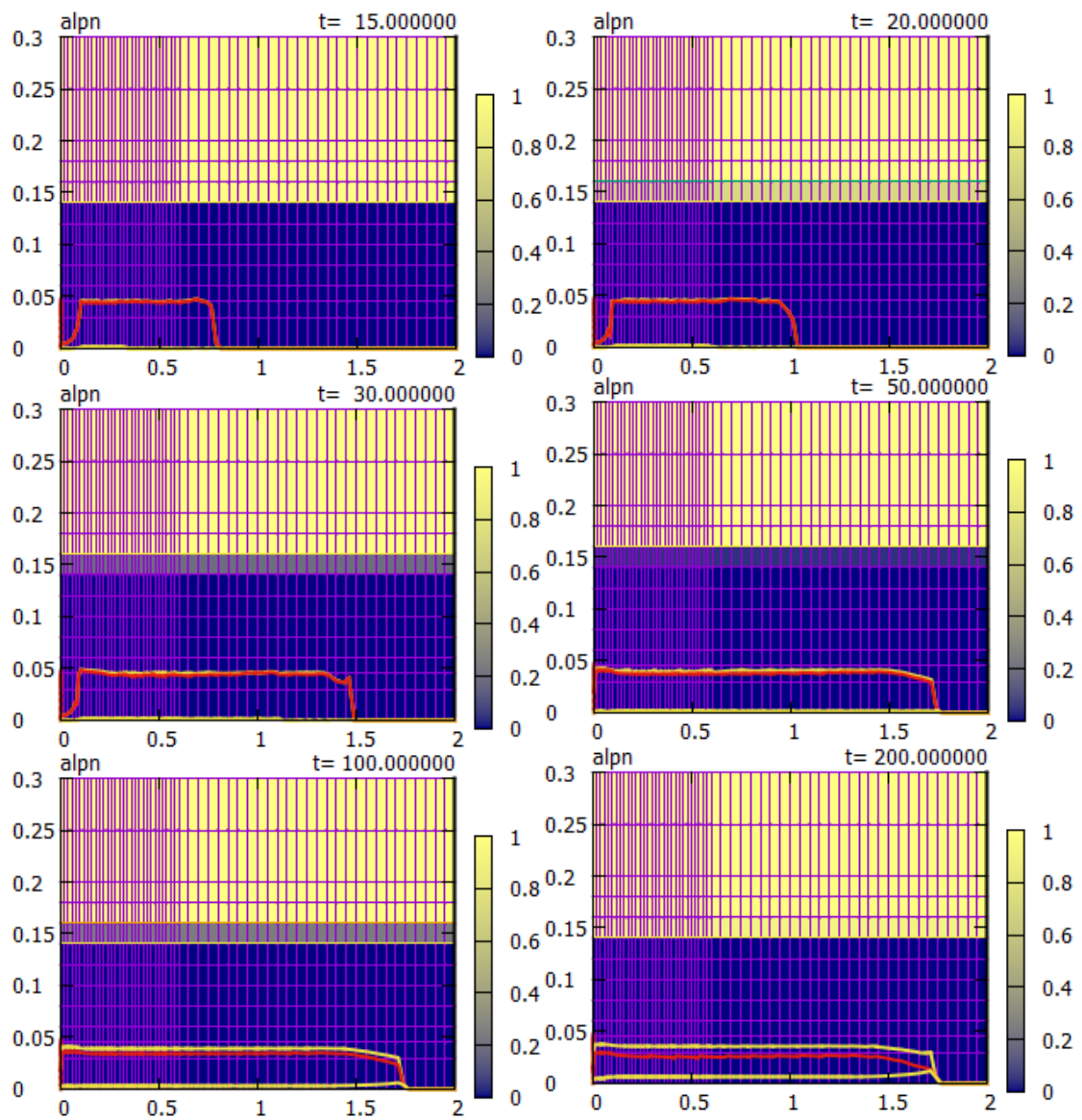


図 3.5.2 溶融物と冷却水の解析結果の可視化図：2MWS-Ox-3 (2/2)

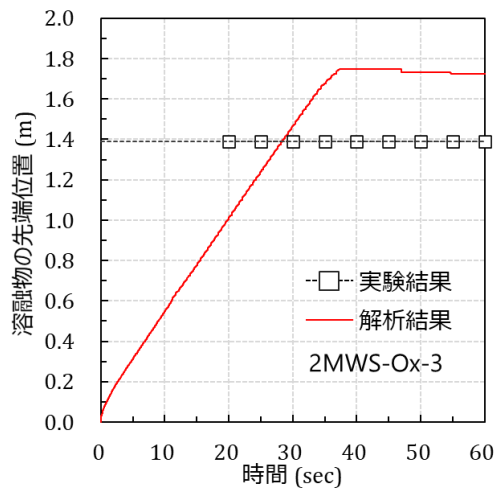


図 3.5.3 溶融物の拡がりの先端位置：2MWS-Ox-3

2MWS-Ox-3

実験結果では、溶融物の投入から約 20 秒時点で溶融物拡がりの先端位置が 1.4m 程度まで到達している。溶融物は最終的に 1.4m 程度まで到達する。解析結果では、溶融物の拡がりの先端位置が 1.4m まで到達するのに約 28 秒かかり、最終的な溶融物の到達距離は、約 1.7m となった。最終的な溶融物の到達距離（連続層状デブリの堆積範囲）を過大評価した。

3.5.6. 考察

RIT 試験の実験解析：2MWS-Ox-3

解析結果と実験結果を比較して、溶融物先端位置が 1.4m まで到達するのに解析結果の方が実験結果より 8 秒ほど遅れた。この原因は、一点近似を使用した解析では冷却水が一様な状態となるためボイド率が低くなり溶融物の速度が抑えられるためである。しかしながら、解析結果の最終的な溶融物の到達距離（連続層状デブリの堆積範囲）が実験結果を上回ってしまった。

3.6. まとめ

JASMINE コードを用いて、ウェット条件及びドライ条件で実施された実験を対象とした感度解析を実施した。感度解析では、溶融物の溶融ジェット直径及び投入速度が溶融物への拡がりへ与える影響を調査した。感度解析の結果、ウェット条件では、溶融物の溶融ジェット直径及び投入速度が増加した場合には、溶融物の拡がりが促進されること分かった。溶融物の溶融ジェット直径及び投入速度が減少した場合には、溶融物の拡がりが抑制されること分かった。溶融物の投入速度による影響は、溶融ジェット直径の与える影響よりも小さかった。ドライ条件では、溶融物の溶融ジェット直径及び投入速度を増加させた場合は、溶融物の拡がりが促進される。溶融ジェット直径及び投入速度を減少させた場合には、溶融物の拡がりが抑制されることが分かった。ただし、質量流量が大きい実験条件では、溶融物の溶融ジェット直径及び投入速度を減少させると、ベースケース及び溶融ジェット直径と投入速度を増加させた解析結果よりも最終的な溶融物の拡がりが大きくなることが確認できた。ROSAU で実施予定の実験を対象とした実験解析を行うために、RIT 試験の実験解析を行った。冷却水の一点近似モデルを使用した場合には、最終的な溶融物の拡がりの解析結果が実験結果を上回った。

参考文献

- [3.1] A. Konovalenko, A. Karbojian, P. Kudinov, Experimental Results on Pouring and Underwater Liquid Melt Spreading and Energetic Melt-coolant Interaction, NUTHOS-9, Kaohsing, Taiwan, N9P0303, 2012.
- [3.2] C. Journeau, E. Boccaccio, C. Brayer, G. Cognet, J.-F. Haquet, C. J'egou, P. Piluso, J. Monerriis, Ex-vessel corium spreading: results from the VULCANO spreading tests, Nuclear Engineering and Design, vol.223, pp.75-102, 2003.
- [3.3] C. Journeau, J.-F. Haquet, B. Spindler, C. Spengler, J. Foit, The VULCANO VE-U7 corium spreading benchmark, Progress in Nuclear Energy, vol.48, pp.215-234, 2006.
- [3.4] G. Engel, G. Fieg, H. Massier, U. Stegmaier, W. Sch"utz, KATS experiments to simulate corium spreading in the EPR core catcher concept, OECD Workshop on Ex-Vessel Debris Coolability, Karlsruhe, pp.148-155, 1999.
- [3.5] B. Eppinger, G. Fieg, W. Sch"utz, U. Stegmaier, KATS experiments to simulate corium spreading in the EPR core catcher concept, 9th International Conference on Nuclear Engineering, 2001.
- [3.6] H. Alsmeyer, T. Cron, J.J. Foit, G. Messemer, S. Schmidt-Stiefel, W. H"afner, H. Kriscio, Test report of the melt spreading tests ECOKATS-V1 and ECOKATS-1, FZKA-7064, SAM-ECOSTR-D15, Forschungszentrum Karlsruhe, 2004.
- [3.7] J.J. Foit, Large-scale ECOKATS experiments: spreading of oxide melt on ceramic and concrete surfaces, Nuclear Engineering and Design, vol.236, pp.2567-2573, 2006.
- [3.8] W. Tromm, J.J. Foit, Dry and wet spreading experiments with prototypical material at the FARO facility and theoretical analysis, OECD Workshop on Ex-Vessel Debris Coolability, Karlsruhe, pp.178-188, 1999.
- [3.9] M. Sappok, W. Steinwarz, Large-scale experiments on ex-vessel core melt behavior, Nuclear Technology, vol.125, pp.363-370, 1999.
- [3.10] W. Steinwarz, A. Alemberti, W. H"afner, Z. Alkan, M. Fischer, Investigations on the phenomenology of ex-vessel core melt behavior (COMAS), Nuclear Engineering and Design, vol.209, pp.139-146, 2001.
- [3.11] B. Spindler, J.M. Veteau, The simulation of melt spreading with THEMA code Part 2: Assessment against spreading experiments, Nuclear Engineering and Design, vol.236, pp.425-441, 2006.
- [3.12] M.T. Farmer, The MELTSPREAD Code for Modeling of Ex-Vessel Core Debris Spreading Behavior, Code Manual – Version 3.0, pp.214-230, 2018.

4. 実機冷却性評価

4.1 概要

この章では実機を対象とした格納容器内の溶融物冷却性評価を行う。格納容器内に落下する溶融物の条件はシビアアクシデント (SA) コードによる解析の結果として求めることができる。溶融物条件には事故シナリオや SA 解析コードに含まれるモデル及びモデルパラメータ等による不確かさが含まれる。事故シナリオによる不確かさに対応するため、本研究では確率論的な評価を行う。

平成 31 年度[4.1]の解析では①JASMINE コードの入力パラメータの不確かさの確率分布をシビアアクシデント (SA) 総合解析コード MELCOR1.8.5[4.2] (以下 MELCOR) による不確かさを考慮した解析の結果から決定した。そして、②抽出した確率分布に基づいた入力パラメータセットに対する JASMINE 解析の結果から溶融炉心の堆積高さの分布を求め、冷却可能な堆積高さと比較して MCCI 回避の成功・失敗を判定し、デブリの冷却成功確率を評価した。

また、令和 2 年度[4.2]の解析では、溶融物の各パラメータどうしの非現実的な組み合わせを除外し、現実的な相関関係を維持した評価を行うため、1 ケースの MELCOR 解析から抽出した溶融物条件に対して 1 ケースの JASMINE 解析を実施するという手順で同様に MCCI 回避の成功・失敗判定からデブリの冷却成功確率を評価した。この際、溶融物条件として、MELCOR 解析の結果得られた組成情報と、熱力学平衡計算の結果得られた相図の情報を組み合わせて融点 (固/液相線温度) の情報を反映させた。このことにより 1 ケース対 1 ケースの方法のメリットを活かすことができた。

本年度は、令和 2 年度では反映できていなかった融点以外の物性値についても JASMINE 解析に反映させた解析を実施した。解析対象は代表的な事故シナリオである TB シーケンスをベースとして検討した。

炉心損傷及び事故シナリオに関する合計 2 つのパラメータに不確かさを与えた MELCOR コード解析を行った。MELCOR による解析結果から溶融物の落下条件に加えて、組成情報から融点を含む物性値条件を取得し、JASMINE 解析入力を作成し、格納容器内の溶融物挙動解析を実施した。最終的なデブリの状態から堆積高さを求め、冷却可能なデブリ高さと比較することで冷却成功判定を行い、冷却成功確率を求めた。

4.2 MELCOR コードによるシビアアクシデント解析

MELCOR 解析で対象とするプラントは、福島第一原子力発電所 3 号炉の公開情報を基に入力を作成した[4.3, 4.4]。事故シナリオは BWR における SA の代表的な事故シナリオである TB[4.5, 4.6]をベースとしてパラメータを与えた。過去の解析からは、溶融物拡がり面積には落下溶融物量の影響が大きいことが分かっている。その落下溶融物量に対してはモデルパラメータのうち圧力容器 (RPV) 下部ヘッド破損温度の影響が比較的大きい。本年度は下部ヘッド破損温度と、事故対策である RPV 内への注水の継続時間をパラメータとした解析とした。

4.2.1 解析する原子炉及びベースシナリオ

(1) 解析対象とする原子炉

解析対象は、Mark-I型格納容器を持つ定格出力 840MWe の BWR4 である。入力ファイルを作成するにあたり、原子炉のデータを種々の公開文献から値を推定した。表 4.2.1 に主要なプラント条件を示す。図 4.2.1 及び図 4.2.2 は MELCOR 解析における炉心ノード分割及びボリューム分割を示す。原子炉圧力容器は、下部プレナム、バイパス、炉心、上部プレナム、蒸気ドーム、ダウンカマ、再循環ライン、主蒸気ライン、SR 弁等の 16 のボリュームに分割された。格納容器は、ドライウェル区画をペDESTAL、ドライウェル、ベント管等の 5 つのボリュームに分割した。

(2) TB シナリオの解析条件設定

表 4.2.2 にはベースとした TB シナリオ、表 4.2.3 には圧力容器内への注水設定を示す。このシナリオは全ての交流電源が喪失する事故シナリオであり、交流電源が必要な HPCS 及び低圧注水系は使用できない。所内バッテリーの直流電源により RCIC による注水が行われる。バッテリーが枯渇した後、注水ができなくなるため炉心溶融に至る。炉心溶融物により圧力容器下部ヘッドが破損し、溶融燃料が放出される。

表 4.2.1 MELCOR 解析の対象プラント条件

項目	値	備考
初期原子炉熱出力	2381 MWt	定格値
初期原子炉圧力	7.03 MPa	通常運転圧力
初期原子炉水位	ベッセル下端から 14.3m	文献からの推定値
蒸気温度	559K	
UO ₂ 質量	107 t (ウラン質量 94t)	
有効炉心ノード分割	半径方向 3 リング 軸方向 6 レベル	
原子炉圧力容器及び格納容器ボリューム分割	図 4.2.2 MELCOR 解析におけるボリューム分割参照	下部ヘッドの破損もリングごとに生じる
崩壊熱	ANS 標準データ	
炉心損傷温度	被覆管破損温度 1173 K 燃料棒破損温度 2500 K	
格納容器空間容積	ドライウェル空間 (ベント管空間部を含む) 4240m ³ サブプレッションチェンバ空間 3160m ³ サブプレッションプール水量 2980 m ³	
コンクリート組成	玄武岩系コンクリート (Basalt aggregate concrete)	融点は 1450 K

	リング 1	リング 2	リング 3		
有効燃料	114	214	314	レベル 14	
	113	213	313	レベル 13	
	112	212	312	レベル 12	
	111	211	311	レベル 11	
	110	210	310	レベル 10	
	109	209	309	レベル 9	
	108	208	308	レベル 8	
	炉心支持板 →	107	207	307	レベル 7
		106	206	306	レベル 6
		105	205	305	レベル 5
		104	204	304	レベル 4
		103	203	303	レベル 3
		102	202	302	レベル 2
		101	201	301	レベル 1

☉ 数字はセル番号を表す

図 4.2.1 MELCOR 解析における炉心部セル分割

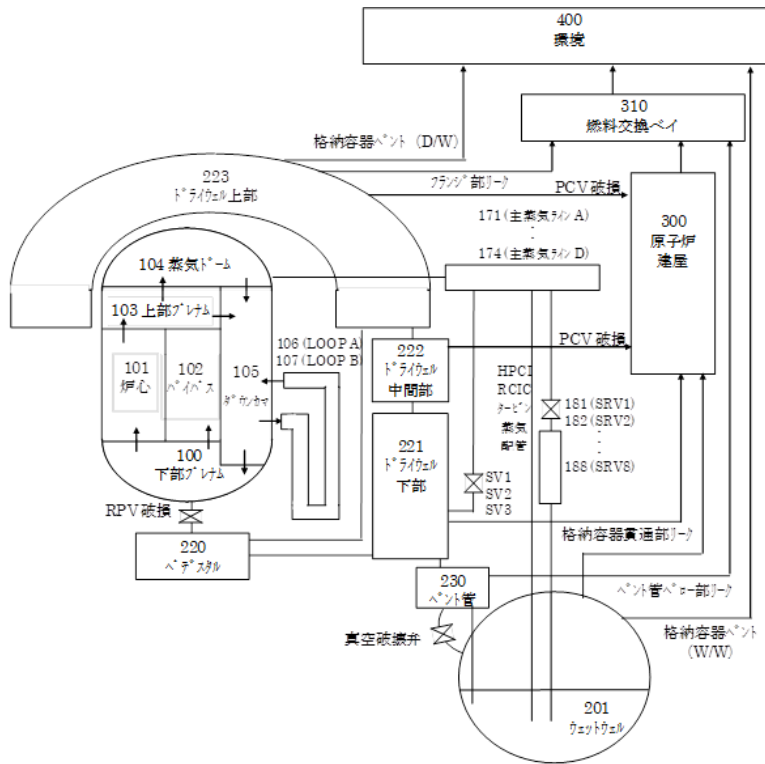


図 4.2.2 MELCOR 解析におけるボリューム分割

表 4.2.2 TB シナリオ (ベース) の設定

イベント	時刻 [s] or 作動条件
原子炉スクラム	0.0
RCIC 起動	0.0
MSIV(主蒸気隔離弁)閉	60.0
SRV 開閉繰り返し	原子炉圧力が設定圧に到達後
RCIC 制御	原子炉水位低(レベル 2 : 11.965 m) で注入開始 原子炉水位高(レベル 8 : 14.615 m) で注入停止 (基準 : 圧力容器ゼロレベル)
RCIC 停止	28800.0 [s] (RCIC 起動から 8 時間後)
低圧代替注水失敗	-
炉心溶融	被覆管温度が 2098 [K]を超えたとき
圧力容器損傷	下部ヘッドの貫通部破損発生時

表 4.2.3 注水設定

大項目	小項目	TB シナリオ
RCIC	作動時間	0 秒に起動しサンプル時間まで
	作動圧力	RPV(蒸気ドーム)の圧力が以下のとき 1.14E6 ~ 7.85E6 [Pa]
	注水の制御条件	レベル 2 水位 = 11.965 [m] で注水開始 レベル 8 水位 = 14.615 [m] で注水停止
	注水量	97 [t/hr] (26.9 [kg/s])
	注水温度	283 [K]
HPCI	作動時間	起動させない
格納容器スプレイ	S/C 散水	動作させない
	D/W 散水	動作させない
消火系ポンプ による原子炉注水	作動時間	動作させない

4.2.2 解析条件及び不確かさを考慮するパラメータ

解析条件検討

予備計算を行い、計算の安定性などを考慮して以下の設定を行った。注水可能な時間（RCIC のバッテリー枯渇時間）については表 4.2.3 の注水の制御条件に従うものとした。バッテリー駆動が連続して行われているわけではないが、バッテリーによる駆動が可能な最長時間を変更した。これはバッテリーにより RCIC の作動が 8 時間以上求められているが、バッテリー駆動を断続的に行ったときに何時間まで持つかには不確かさがあると考えられるためである。予備計算の結果から 6 時間以下では圧力容器破損が生じなかったが、安定的な計算のため最短では 8 時間とした。最長については 24 時間としたが、RCIC の水源 CST タンク（断面積 500m²、水位 2.156m、1078m³ の保有水量とする）の水は空にならなかったため、CST 水源が枯渇するという条件は撤廃した。また、原子炉内のスチールの降伏応力発生値を 2000K に変更した。時間刻みについては安定的に計算できた 0.01 sec とした。

IDEJ オプションの設定

MELCOR の COR パッケージのオプション IDEJ については放出溶融物が「固相及び液相（IDEJ=0）」を選択した。JASMINE 計算では落下する溶融物は液相を前提としているが、本計算においては溶融物中の固相及び液相が均一に混ざっている状態を仮定しており、固相率に従って粘性率を上昇させることで固相の影響を考慮した（4.2.5 に記載）。

抽出するデータ

MELCOR の出力のうち、物質ごとの質量は COR-Mxx-DB のデータを抽出した。溶融物放出量は COR-MEJEC-TOT、下部ヘッ드의損傷面積は COR-ABRCH を抽出した。

下部ヘッド破損時に COR-MEJEC-TOT と COR-ABRCH がノンゼロになるタイミングは 24 時間の計算では約 1000 秒のラグがある。両タイミングでの溶融物組成は異なっているが、本解析では COR-MEJEC-TOT を基準に抽出した。

不確かさパラメータ

解析のパラメータは RCIC については上で述べた作動の最長時間及び下部ヘッ드의破損温度 TPFAIL の 2 つとした。TPFAIL は MELCOR コードの圧力容器下部ヘッ드의破損判定温度である。MELCOR では圧力容器の破損モードのひとつとして計装配管と下部ヘッド構造のギャップの溶接部の破損が想定されており、その破損温度に不確かさが考えられる。以下に示す 17 水準×TPFAIL16 水準として、パラメータに分布をつけずに均等サンプリングとした。

- RCIC 稼働時間を 8~24 時間の間で、1 時間刻み 17 水準。
- TPFAIL を 900~1200degC の間で、20degC 刻みの 16 水準（デフォルト 1000degC）。
- RCIC 稼働停止後から 30 時間経過した場合に正常終了とする。

4.2.3 MELCOR 解析

272 ケースの MELCOR 解析を実施し、各ケースの結果をグラフ化した。出力された MES ファイルから計算終了時の状態を抽出すると表 4.2.4 になる。

圧力容器破損は径方向に 3 領域のリングに分かれており、リングごとに破損判定が行われる。最終時刻（RCIC 停止後 30 時間経過）まで正常に計算できたのは 70 ケースあり、このうち 65 ケースが 3 つのリング全てが損傷していた。全リングが損傷していないケースは内側のリング 1 とリング 2 からの放出が多く、長時間経過してもリング 3 が損傷しなかった。異常終了としてエラーを出力して計算が終了したケースが 202 ケースあった。その中で 43 ケースが全てのリングが破損するものの、長時間の計算によって原子炉内部状態が悪化し計算が停止した。損傷が発生する以前に計算が不安定化して、61 ケースが異常終了した。

表 4.2.4 MELCOR 解析の結果

終了ステータス	ケース数	内訳
最終時刻まで計算終了	70/272	すべてのリングが損傷：65 ケース 少なくとも 1 つのリングが損傷：70 ケース
異常終了	202/272	すべてのリングが損傷：43 ケース 少なくとも 1 つのリングが損傷：141 ケース 損傷なし：61 ケース
溶融物放出なし	119/272	(溶融物放出は 153 ケース)

以下に損傷の発生しなかったケースと 3 リングの損傷が発生したケースそれぞれの TPFAIL 及び RCIC 稼働時間への依存性を示すヒストグラム（図 4.2.3 から 4.2.6）を掲載する。TPFAIL への依存性は小さく、RCIC 稼働時間への依存性が大きい。RCIC 稼働時間が短い条件で破損なしのケースがあり、RCIC 稼働時間が長い条件に 3 リングとも破損のケースが多くなる傾向となった。

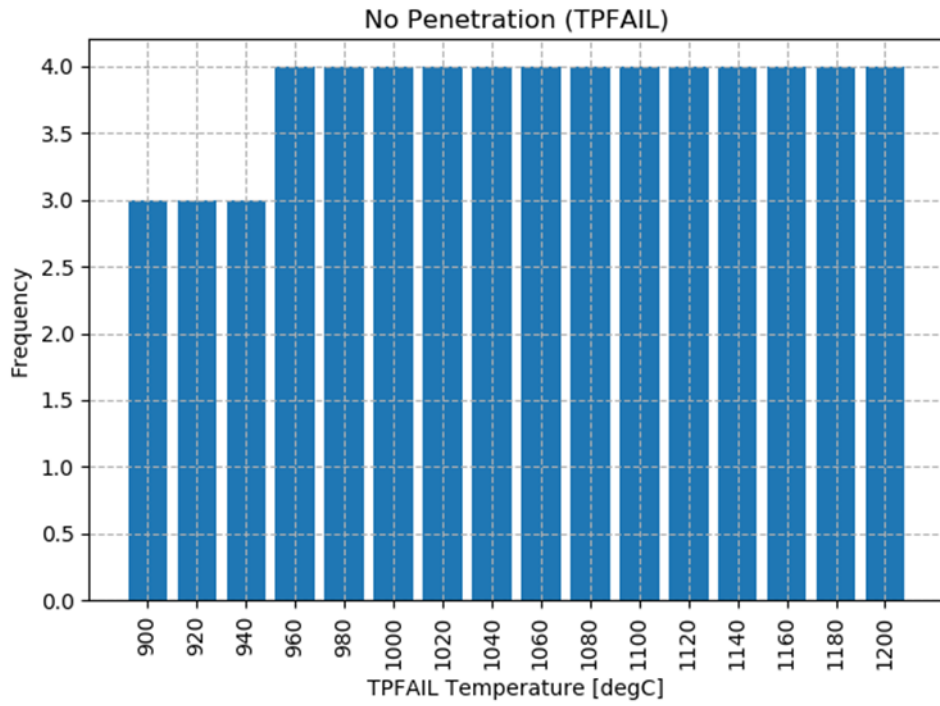


図 4.2.3 損傷が発生しなかったケース (TPFAIL 依存性)

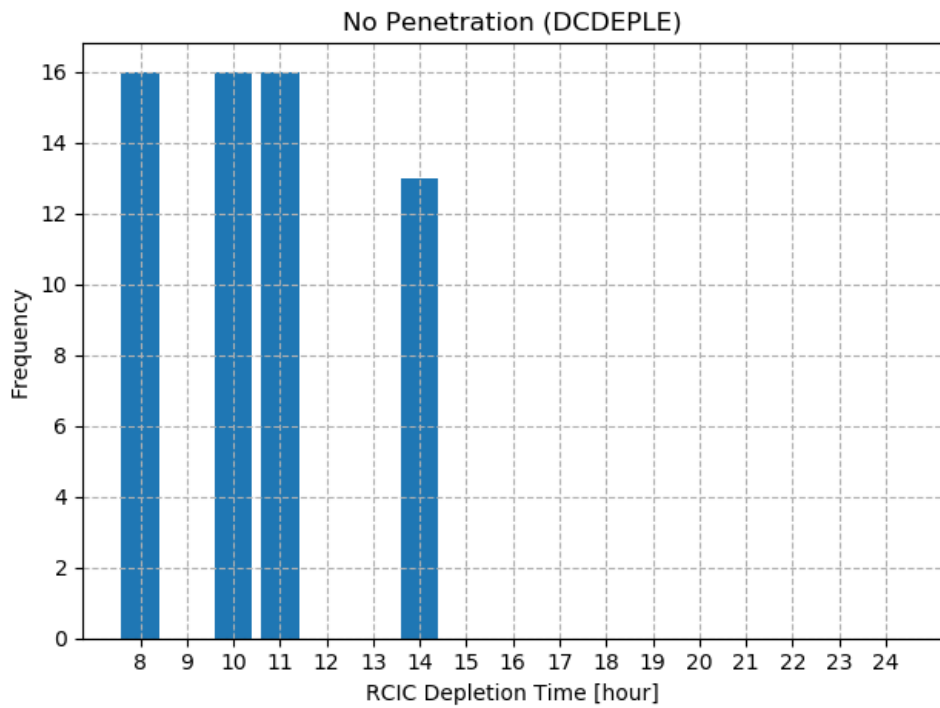
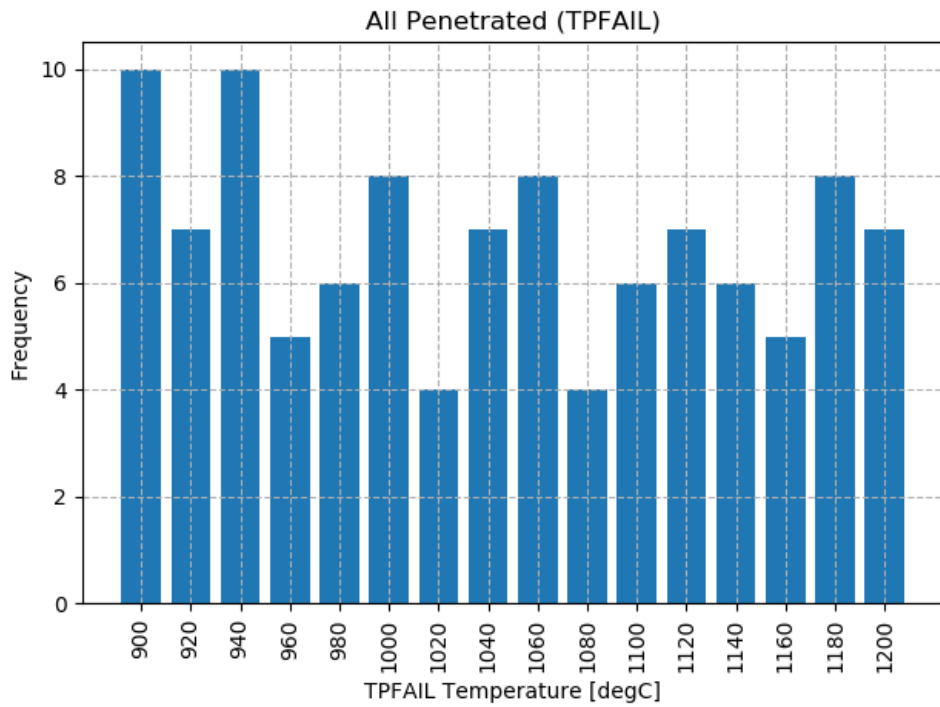


図 4.2.4 損傷が発生しなかったケース (RCIC 稼働時間依存性)



z

図 4.2.6 3つのリングが全て損傷したケース (TPFAIL 依存性)

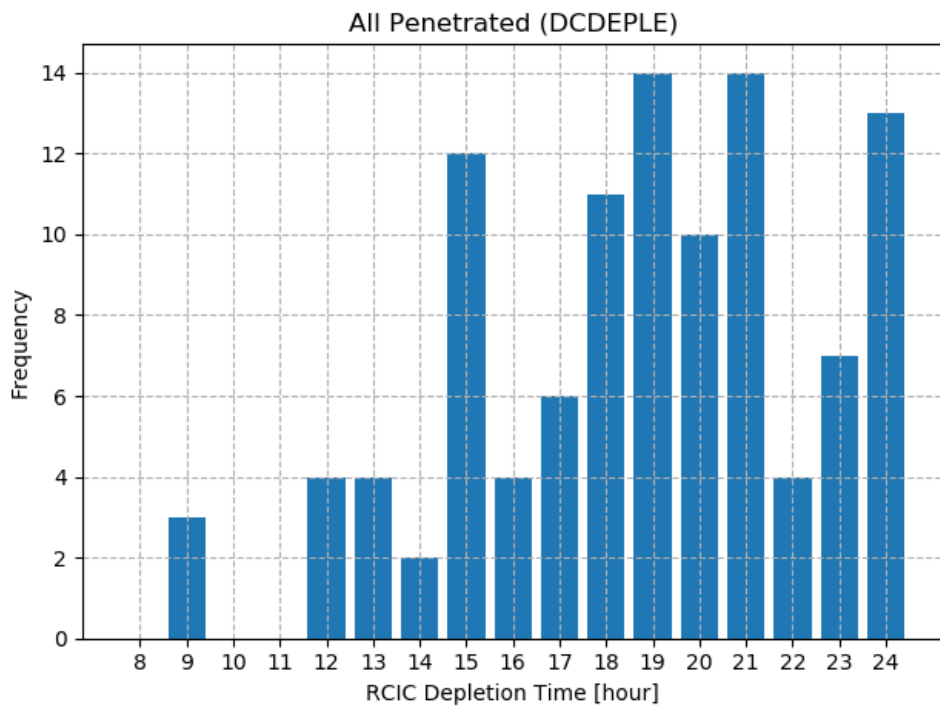


図 4.2.6 3つのリングが全て損傷したケース (RCIC 稼働時間依存性)

4.2.4 溶融物放出条件抽出と整理

MELCOR 解析結果のうち溶融物放出量を表す COR-MEJEC-TOT から、溶融物組成比を計算する時刻を抽出するルールを以下に示す。PTF ファイルに出力されている時刻データ $t(i)$ に対応して、溶融物放出量を COR-MEJEC-TOT(i) と記述する。

- ① COR-MEJEC-TOT(i)にて、前時刻との微分量 DIV-MEJEC(i)を計算する。
- ② 開始時刻は DIV-MEJEC($i+1$) > 1.0 かつ DIV-MEJEC(i) < 1.0 とする。
- ③ 停止時刻は DIV-MEJEC($i+1$) < 1.0 かつ DIV-MEJEC(i) > 1.0 とする。
- ④ プロット出力最終時刻で DIV-MEJEC > 1.0 の場合には、開始時刻としてカウントされた最後の時刻を除外する。

最後の④は溶融物が放出されている最中に計算が異常終了したケースの開始時刻を排除するためであり、必ず同数の開始時刻データと停止時刻データが得られる。このルール内の閾値 1.0 は同数の開始・停止データが得られるようチューニングした結果である。このルールに沿って各ケースの溶融物放出開始時刻と停止時刻を抽出し、COR-MEJEC-TOT と合わせてプロットしたグラフを作成した (図 4.2.7 から 4.2.9)。放出開始と停止のタイミングを捉えられていると確認できる。図 4.2.10 から 12 にはセル 101 (真ん中のリングの一番下層) の溶融物組成比の変化 (1~3 回目の放出時) を示す。1 回目の放出では UO_2 の液相成分が多かったが、2 回目・3 回目では各固相成分のみ放出されている。

PTF ファイルから表 4.2.5 に示す変数を抽出した。抽出したデータ (下部ヘッドセルのデブリ温度、下部ヘッド損傷面積、各セル各成分の質量、放出開始時の時刻・放出量、放出停止時の時刻・放出量、開始・停止の差分量) を、JASMINE の解析に必要な「溶融物温度、融点、固・液相線温度などの算出に用いた。

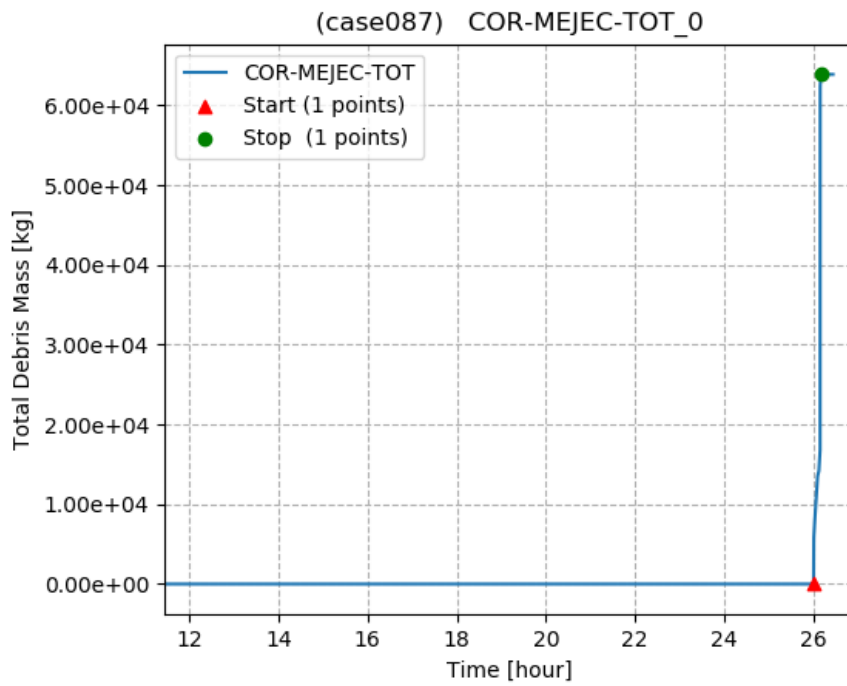


図 4.2.7 ケース 87 におけるデータ抽出時刻

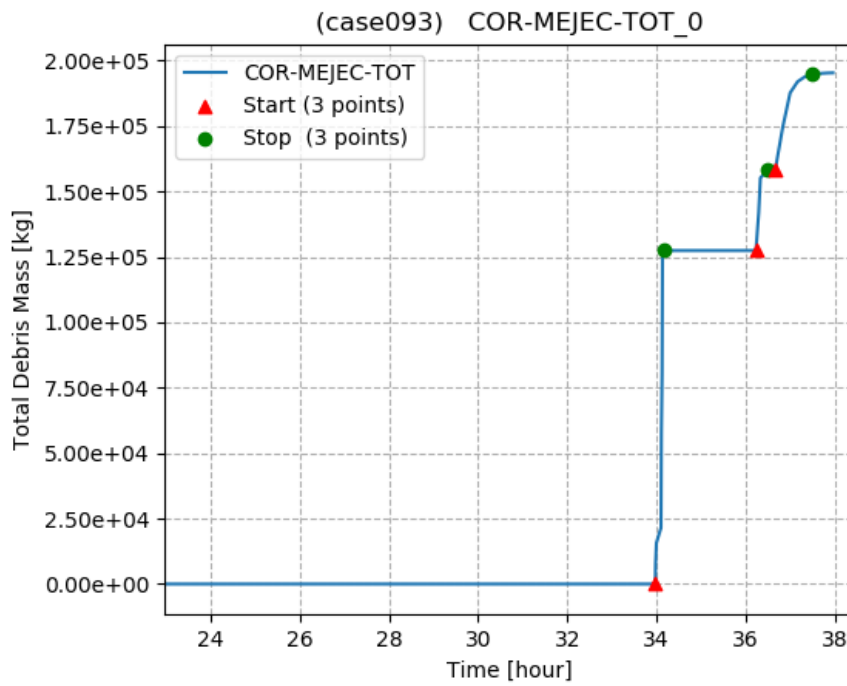


図 4.2.8 ケース 93 におけるデータ抽出時刻

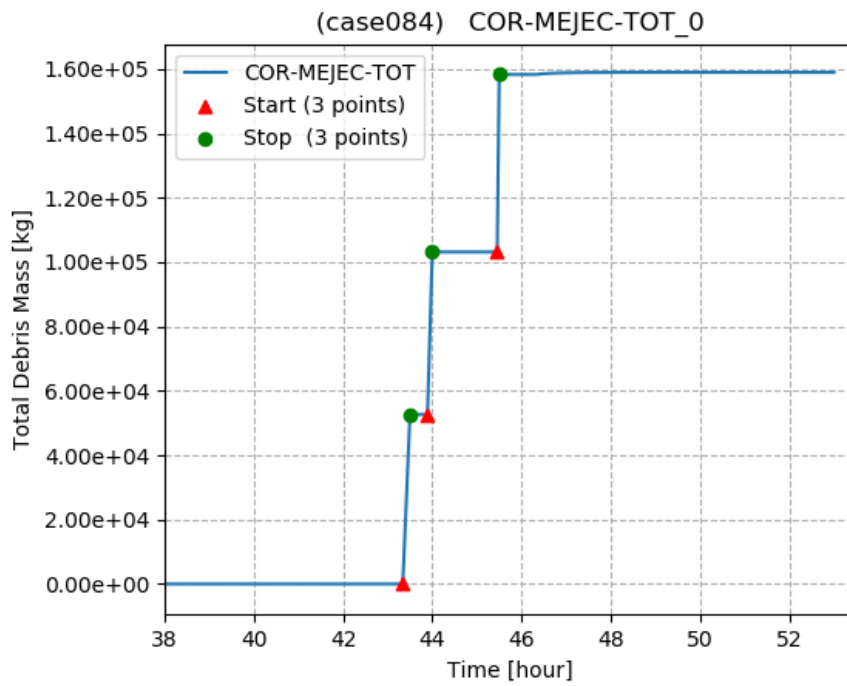


図 4.2.9 ケース 84 におけるデータ抽出時刻

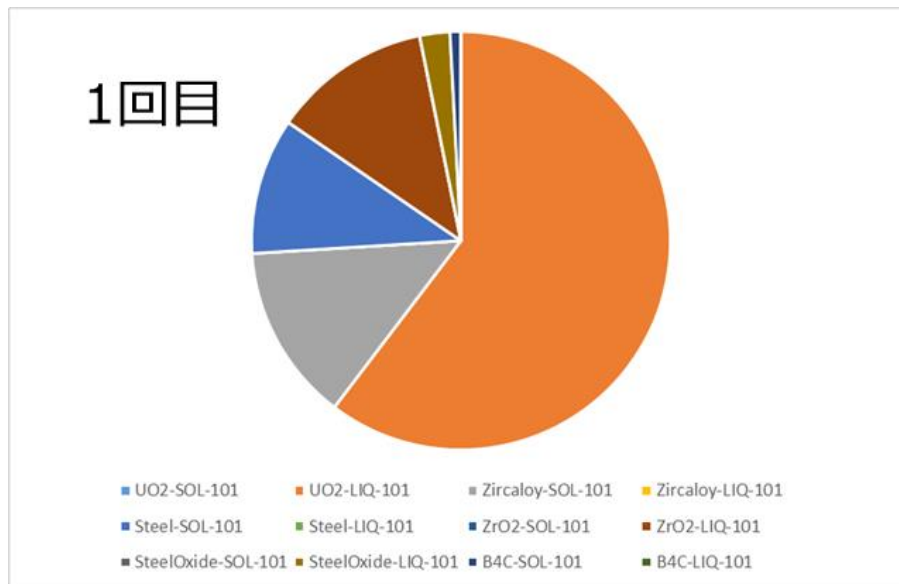


図 4.2.10 ケース 84 における 1 回目放出時の溶融物組成比

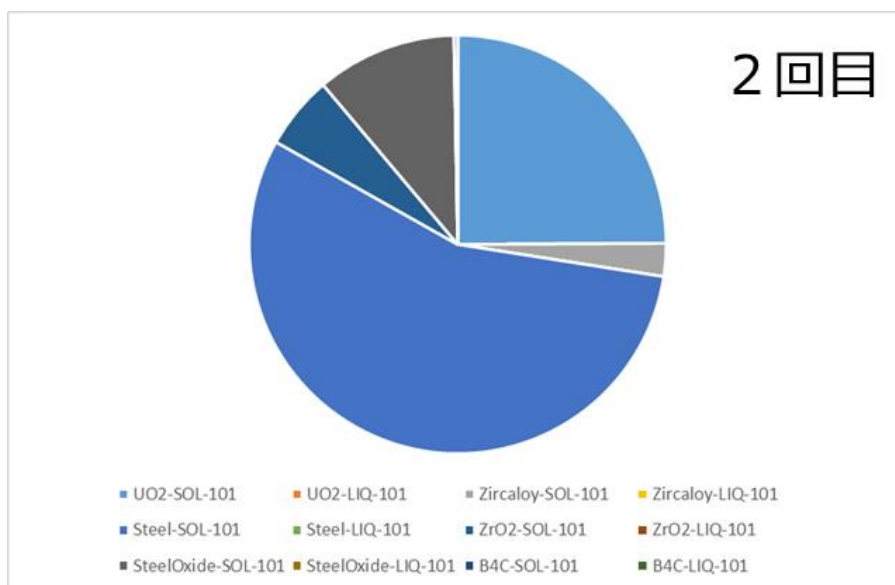


図 4.2.11 ケース 84 における 2 回目放出時の溶融物組成比

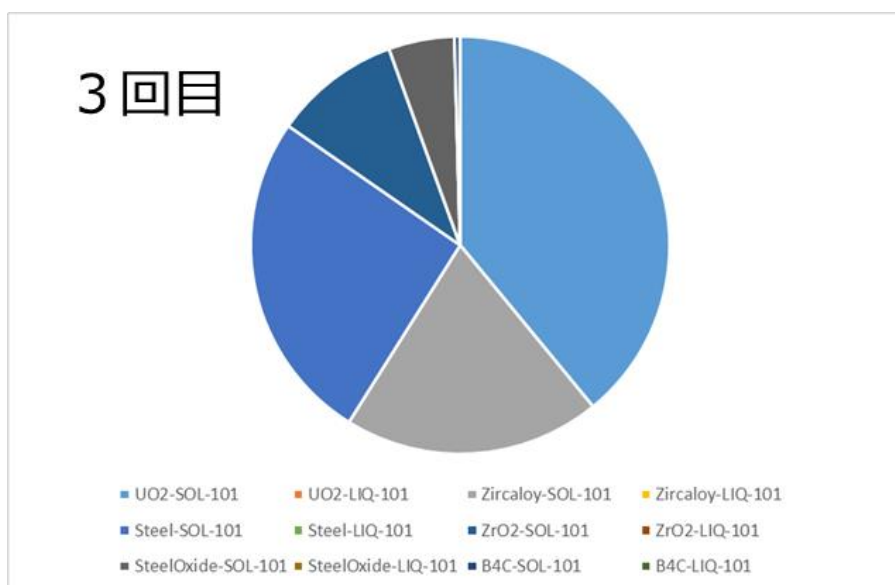


図 4.2.12 ケース 84 における 3 回目放出時の溶融物組成比

表 4.2.5 PTF ファイルから溶融物放出条件として抽出した変数

変数名	概要
COR-MEJEC-TOT	溶融物放出量 [kg]
COR-M _{xx} -DB	セル (101 から 307) ごとの成分ごとの質量 [kg] UO ₂ , Zircaloy, Steel, ZrO ₂ , Steel Oxide, B ₄ C
COR-MLTFR	セル (101 から 307) ごとの溶融率 [-]
COR-ABRCH	下部ヘッド損傷面積 [m ²]
COR-TPD	セル内のデブリ温度

4.2.5 溶融物の物性値の算出

炉心の溶融進展の結果として、压力容器破損時の炉心溶融物の組成は各ケースで異なる。MELCOR 計算の各ケースにおいて炉心セルのレベル 1~7 に存在する酸化物 (UO₂、ZrO₂、Steel Oxide) の各質量割合、また、金属成分 (Steel、Zr、Poison 物質 (BWR では B₄C)) の質量割合を取得した。

混合物の融点及び固／液相線温度は Thermo-Calc を用いて熱力学平衡／状態図計算を行うことで求めた。[4.10]に示す研究で取得されたデータベースが用いられた。ここで、酸化物としては UO₂、ZrO₂ 及び FeO、金属成分としては Fe、Zr 及び B₄C を仮定した。図 4.2.13 及び図 4.2.14 に得られた酸化物成分及び金属成分の固相面／液相面温度を示す。この相図を用いて、MELCOR 解析の結果得られた酸化物及び金属成分の質量割合に対する固相線温度、液相線温度を決定し、融点は両温度の平均値とした。

その他の物性値としては固相線及び液相線それぞれにおける密度、比熱、凝固潜熱及び熱伝導率等がある。各成分について固相／液相での物性値は、温度から固相、遷移、液相のどこに位置するか判定した後にエンタルピから各材料の物性値を計算した。そして、混合物の物性値については、下部ヘッドではすべての成分は均一に混合していると仮定したうえで、物質の各成分の質量比による重み付けをして求めた。

凝固点 T_m は、溶融物の流動が不可能になる温度である。このことから、溶融物の粘性が無限大となる固相体積率は 0.55 となる。解析では発散を避けるために、固相体積率が 0.55 よりわずかに小さくなる値を T_m とする。粘性係数増倍係数が固相体積率が 0.55 のときに極大になるように決めた。

以上で求めた物性値は JASMINE 解析及び堆積デブリの高さ計算や、冷却可能高さの計算に用いられた。

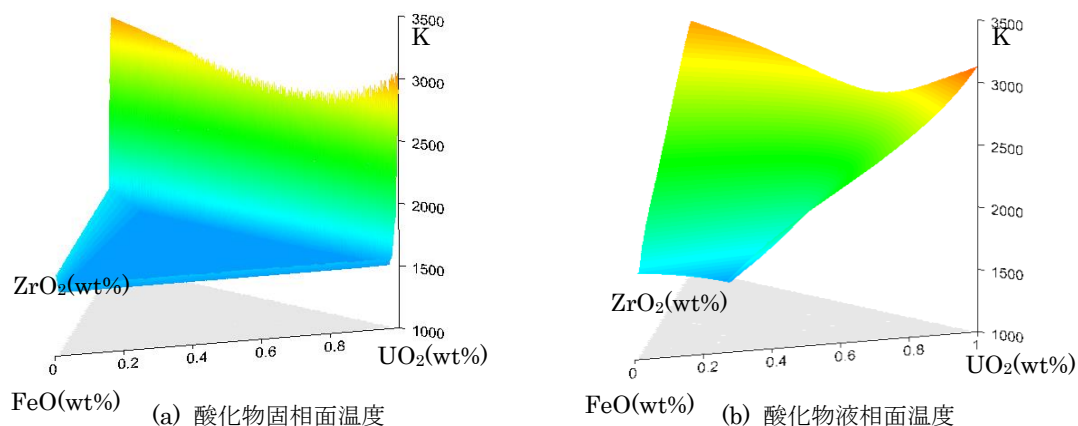


図 4.2.13 炉心溶融物酸化物の固相面温度及び液相面温度

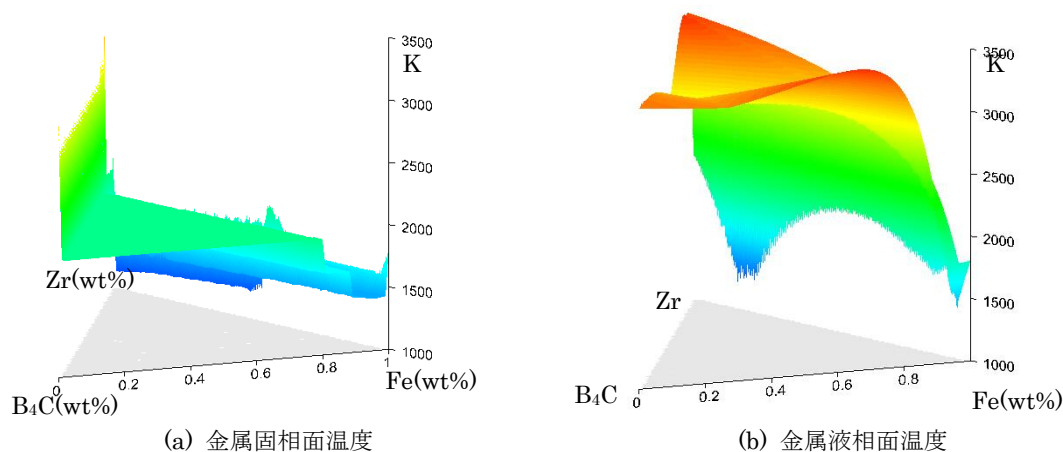


図 4.2.14 炉心溶融物金属の固相面温度及び液相面温度

4.3 JASMINE コードによる格納容器内溶融物挙動解析

4.3.1 JASMINE 解析条件

JASMINE のバージョン

本解析では平成 31 年度に開発された JASMINE コードを使用した。

解析体系

平成 31 年度と同様に出力 820MW の Mark-I 改良型格納容器を有する BWR プラントを仮定し、格納容器床（ペDESTAL）の直径、上部自由空間容積を決定した。主要な実機解析の条件を表 4.3.1 に示す。格納容器内の床面はサンプルピット等がない水平な平面とした。格納容器内の初期圧力は大気圧とした。その他、格納容器床材コンクリート組成、溶融炉心プールのボイド率、溶融炉心粒子の入力、粒子の粒径と溶融炉心プールへの堆積の各条件は平成 31 年度と同じである。また、溶融炉心の発熱量は 100 W/kg とした。

ジェット流入及び溶融物条件の設定

溶融物の放出は複数回に分かれているケースがあるが、以下の考え方に従って 1 回の放出にまとめた。

溶融物物性値：1 回目放出開始時の溶融物組成から算出した。

ジェット流入温度：1 回目放出開始時の値を使用した。

ジェット流入速度：ジェット流入直径と溶融物落下量から算出した。

計算の安定性のため 1.0m/s 以下となった場合は 1.0m/s とする。

ジェット流入直径：各放出の平均値を使用した。ジェット流入速度を 1.0m/s へ修正したケースに対しては単位時間に系に入ってくる溶融物の質量と合計の落下量が修正前と等しくなるように調整した。

溶融物落下量と溶融物落下時間：各放出の合計値を使用した。

表 4.3.2~4.3.4 にそれぞれ JASMINE コード・ジェット、溶融物物性値、相図に関する入力パラメータの一覧を示す。

水位の設定

水位は 3 水準、1.0、1.5 及び 2.0m に設定した。

表 4.3.1 実機冷却性評価の主要な入力条件

項目	数値
床直径	6 m
上部自由空間容積	8000 m ³
初期圧力	0.1 MPa ($T_{\text{sat}} = 372.76 \text{ K}$)
溶融炉心放出高さ	床から 4 m
溶融炉心発熱量	100 W/kg
原子炉格納容器内の冷却水温	299.2 K
原子炉格納容器内の初期水位	0.5, 1.0
表面クラストドライアウト熱流束	500 kW /m ²
クラスト拘束条件	流動、所定の厚みで固定

表 4.3.2 JASMINE コード・ジェットに関する入力パラメーター一覧(1/7)

case	Tjin	djin1	djin2	Vjin1	Vjin2	Mtot	dt
2	1700.01	0.656340441	0.0781665	0.014183486	1	188.6296	4584
6	1700	0.738398372	0.104740363	0.020120867	1	184.381	3525
8	1700.01	0.73038215	0.127891308	0.030660678	1	128.096	1598
9	1700.01	0.731515256	0.131825874	0.032475402	1	128.418	1534
10	1700.01	0.073192156	0.028057243	0.146947056	1	1.74288	455
11	1700.01	0.703591638	0.112328009	0.025487943	1	161.302	2772
12	2098	0.734170578	0.132716612	0.032678087	1	159.556	1232
14	1700.01	0.634473182	0.128692355	0.041141389	1	159.425	2079
15	1700	0.662754377	0.129237521	0.038025246	1	167.287	2048
16	2229.66	0.729185881	0.15436823	0.044816645	1	156.835	979
17	2098.01	0.723884625	0.144291108	0.039732001	1	157.731	1143
19	1700.01	0.615432832	0.122689058	0.039742057	1	117.8877	1513
23	1870	0.071038795	0.071038795	1.176340474	1.176	0.916138	32
24	1700	0.804431076	0.154097908	0.036695753	1	170.472	1505
25	1700.01	0.732308952	0.128683871	0.030878738	1	128.431	1583
26	1700.01	0.730682799	0.132412865	0.032839958	1	128.3	1519
27	1700.01	0.764037691	0.096680089	0.016011961	1	182.355	4008
28	1700.01	0.654934765	0.123773378	0.035715637	1	161.364	2284
29	1239.26	0.633093118	0.156324891	0.060970686	1	104.101	901
31	1700.01	0.636019518	0.147215426	0.053575441	1	159.789	1593
32	1700	0.071842228	0.027014979	0.14140009	1	1.00214	281
33	2228.71	0.729640019	0.147603694	0.040923914	1	156.996	1071
34	2098.01	0.6211776	0.132990486	0.045836302	1	102.248	848
36	1700.01	0.628221491	0.12529955	0.039780794	1	118.067	1448
40	1870.01	0.636689399	0.142304982	0.049955691	1	174.62364	1784
41	1700.01	0.68768184	0.096098398	0.019527974	1	186.8617	4230
42	1700.01	0.729918298	0.165243073	0.05125049	1	128.076	948
43	1700.01	0.727161365	0.169786618	0.054518679	1	128.595	926

Tjin: ジェット流入温度(K)、djin1: ジェット流入直径(m)補正前、djin2: ジェット流入直径(m)補正後、vjin1: ジェット流入速度(m/s)補正前、vjin2: ジェット流入速度(m/s)補正後、Mtot: 溶融物落下量(t)、dt: 溶融物落下時間(s)

表 4.3.2 JASMINE コード・ジェットに関する入力パラメーター一覧(2/7)

case	Tjin	djin1	djin2	Vjin1	Vjin2	Mtot	dt
44	1700.01	0.743635687	0.082626712	0.012345836	1	196.554	5917
45	1700.01	0.654933015	0.145610751	0.049430285	1	161.927	1656
46	1381.06	0.783279864	0.137781001	0.030941741	1	160.509	1821
47	2108.14	0.781145149	0.113488574	0.021107694	1	162.658	1916
48	1700.01	0.698252053	0.146116071	0.043789655	1	161.065	1630
50	2098.01	0.727960536	0.147452468	0.041028762	1	157.36	1095
51	2098.01	0.717164339	0.160471087	0.050067536	1	159.413	896
53	1700.01	0.510001171	0.144655108	0.080449843	1	63.9753	588
57	1728.28	0.054439705	0.029091368	0.285559593	1	0.772277	188
59	1700.01	0.719635259	0.171679358	0.056912975	1	127.234	907
60	1700.01	0.051297835	0.034060265	0.440857251	1	1.73807	311
61	1700.01	0.752401968	0.104207998	0.01918237	1	170.786	3244
62	1700	0.713343306	0.184037498	0.066560329	1	167.568	906
63	1371.84	0.635196796	0.144970162	0.052088356	1	104.69003	1058
65	1700.01	0.698339757	0.144067504	0.042559697	1	160.95	1675
68	1700	0.701063166	0.177776383	0.064303385	1	171.3184	1110
76	1700.01	0.720212257	0.12924005	0.032201286	1	128.274	1599
77	1700	0.525347305	0.144128277	0.075267132	1	128.60227	1285
78	1700.01	0.514017837	0.205664342	0.160089047	1	127.43149	621
79	1700	0.720139034	0.148139288	0.042316311	1	167.626	1399
80	1700.01	0.697863974	0.132901535	0.036267568	1	126.539	1480
81	1700	0.713679307	0.161728768	0.051353299	1	169.526	1368
82	1700.01	0.692360191	0.152132871	0.048281633	1	161.107	1503
84	2225.55	0.724896749	0.14305861	0.038947151	1	158.342	1149
87	1700.01	0.520236642	0.145440262	0.078156917	1	63.8907	579.4
93	1700	0.72599808	0.093412329	0.016555315	1	194.724	4640
95	1700.01	0.727746829	0.106914729	0.02158313	1	128.22	2312
97	1700.01	0.699405781	0.171848827	0.060371881	1	126.161	883

Tjin: ジェット流入温度(K)、djin1: ジェット流入直径(m)補正前、djin2: ジェット流入直径(m)補正後、vjin1: ジェット流入速度(m/s)補正前、vjin2: ジェット流入速度(m/s)補正後、Mtot: 溶融物落下量(t)、dt: 溶融物落下時間(s)

表 4.3.2 JASMINE コード・ジェットに関する入力パラメーター一覧(3/7)

case	Tjin	djin1	djin2	Vjin1	Vjin2	Mtot	dt
98	1700.01	0.602509043	0.177496467	0.086786522	1	116.785	776
99	1700.01	0.690151726	0.153908664	0.049732121	1	161.528	1472
100	1700	0.679328618	0.088521853	0.016980136	1	180.985	4723
101	2197.12	0.731062282	0.14246273	0.037974649	1	158.565	1161
102	1700.01	0.657089787	0.088692453	0.018218973	1	183.785	4786
104	1700.01	0.574256315	0.145932134	0.06457885	1	63.9014	574.8
110	1700.01	0.628860376	0.086041956	0.018720269	1	194.522846	5457
112	1700.01	0.740343149	0.124622074	0.02833504	1	128.013	1699
113	1700.01	0.721815254	0.142736985	0.039103977	1	130.592	1354
114	1700.01	0.692582183	0.136252893	0.038703375	1	129.512	1354
116	1700.01	0.07184205	0.018632198	0.06726215	1	0.910681	566
117	1700	0.509782676	0.119778457	0.055206127	1	64.273	916
118	2116.71	0.637288035	0.150536555	0.055797202	1	103.665	681
119	1700	0.715748259	0.118556508	0.027436594	1	129.709	1870
121	1700.01	0.567980613	0.152110961	0.071722265	1	63.8069	527.6
127	1700	0.636993277	0.090645378	0.020249842	1	192.25858	4863
128	1700	0.643184374	0.105940193	0.027130047	1	125.881	2039
129	1700	0.729245537	0.155990129	0.045755855	1	127.959	1084
130	1700.01	0.7164799	0.116222976	0.026313339	1	130.8	1904
131	1700.01	0.502973941	0.149871618	0.088786681	1	128.690009	1196
132	1700.01	0.68848885	0.145530554	0.044680142	1	129.55	1281
133	1700	0.07184205	0.020719987	0.083180499	1	0.81091	407
134	1700	0.51541984	0.131023614	0.064621478	1	64.6657	770
135	2098	0.742353156	0.182228766	0.060257727	1	158.8916	695
136	1700.01	0.701596005	0.114387793	0.026581847	1	128.931	2084
138	1700.01	0.570983273	0.152206347	0.071058944	1	63.7571	525.9
142	1700.01	0.621078693	0.142701234	0.05279128	1	118.093	1164
144	1700	0.619893145	0.094960119	0.023466528	1	195.55622	4507

Tjin: ジェット流入温度(K)、djin1: ジェット流入直径(m)補正前、djin2: ジェット流入直径(m)補正後、vjin1: ジェット流入速度(m/s)補正前、vjin2: ジェット流入速度(m/s)補正後、Mtot: 溶融物落下量(t)、dt: 溶融物落下時間(s)

表 4.3.2 JASMINE コード・ジェットに関する入力パラメーター一覧(4/7)

case	Tjin	djin1	djin2	Vjin1	Vjin2	Mtot	dt
145	1700	0.620369998	0.164703272	0.070486003	1	124.7435	928
146	1700	0.695239083	0.123682851	0.031648317	1	123.701	1667
148	1700.01	0.717225883	0.153736274	0.045945269	1	129.587	1146
149	1700.01	0.644440515	0.09847102	0.023348081	1	128.992	2791
150	1700.01	0.726652091	0.11088905	0.023287575	1	130.634	2296
151	1700	0.709918881	0.093909261	0.017498443	1	181.978	4218
152	1700.01	0.729279583	0.194358596	0.071026334	1	128.294	646
153	1700	0.704439441	0.129192676	0.03363477	1	128.105	1564
155	1700.01	0.570712275	0.149852913	0.068943916	1	63.7162	541.5
161	1700	0.05080138	0.05080138	3.687791061	3.688	1.83186	40
165	1700.01	0.719841351	0.170402845	0.056037674	1	129.658	935
166	1700.01	0.717907247	0.128652235	0.032114266	1	123.569	1583
167	1700.01	0.728259271	0.157404084	0.046715387	1	128.955	1107
168	1700	0.544615686	0.102169359	0.035193386	1	65.4237	1281
169	1700.01	0.722719589	0.1349006	0.034840799	1	128.293	1465
170	1700	0.725696953	0.119802828	0.027253579	1	129.814	1840
172	1700	0.573829346	0.148261529	0.066756174	1	63.659	551.6
176	1700.01	0.675707263	0.118064567	0.030529661	1	154.855	2232
178	1700	0.633641153	0.098632371	0.024229932	1	194.50631	4155
179	1700	0.756237159	0.196528822	0.067536178	1	127.776	599
182	1700	0.754818755	0.100491895	0.017724611	1	196.727	4089
183	1700.01	0.677797182	0.143975497	0.04512089	1	120.999	1240
184	1700.01	0.728117643	0.121365871	0.027783698	1	126.794	1825
187	1700	0.74145073	0.11321369	0.023314886	1	129.434	2055
189	1700	0.574649733	0.148960963	0.067195242	1	63.591	544.7
192	1700	0.765704833	0.076224663	0.009909877	1	194.814	6427
197	1700	0.742168184	0.146251445	0.038832528	1	128.754	1095
198	1700.01	0.757532741	0.089125407	0.013842044	1	189.388	4555

Tjin: ジェット流入温度(K)、djin1: ジェット流入直径(m)補正前、djin2: ジェット流入直径(m)補正後、vjin1: ジェット流入速度(m/s)補正前、vjin2: ジェット流入速度(m/s)補正後、Mtot: 溶融物落下量(t)、dt: 溶融物落下時間(s)

表 4.3.2 JASMINE コード・ジェットに関する入力パラメーター一覧(5/7)

case	Tjin	djin1	djin2	Vjin1	Vjin2	Mtot	dt
145	1700	0.620369998	0.164703272	0.070486003	1	124.7435	928
146	1700	0.695239083	0.123682851	0.031648317	1	123.701	1667
148	1700.01	0.717225883	0.153736274	0.045945269	1	129.587	1146
149	1700.01	0.644440515	0.09847102	0.023348081	1	128.992	2791
150	1700.01	0.726652091	0.11088905	0.023287575	1	130.634	2296
151	1700	0.709918881	0.093909261	0.017498443	1	181.978	4218
152	1700.01	0.729279583	0.194358596	0.071026334	1	128.294	646
153	1700	0.704439441	0.129192676	0.03363477	1	128.105	1564
155	1700.01	0.570712275	0.149852913	0.068943916	1	63.7162	541.5
161	1700	0.05080138	0.05080138	3.687791061	3.688	1.83186	40
165	1700.01	0.719841351	0.170402845	0.056037674	1	129.658	935
166	1700.01	0.717907247	0.128652235	0.032114266	1	123.569	1583
167	1700.01	0.728259271	0.157404084	0.046715387	1	128.955	1107
168	1700	0.544615686	0.102169359	0.035193386	1	65.4237	1281
169	1700.01	0.722719589	0.1349006	0.034840799	1	128.293	1465
170	1700	0.725696953	0.119802828	0.027253579	1	129.814	1840
172	1700	0.573829346	0.148261529	0.066756174	1	63.659	551.6
176	1700.01	0.675707263	0.118064567	0.030529661	1	154.855	2232
178	1700	0.633641153	0.098632371	0.024229932	1	194.50631	4155
179	1700	0.756237159	0.196528822	0.067536178	1	127.776	599
182	1700	0.754818755	0.100491895	0.017724611	1	196.727	4089
183	1700.01	0.677797182	0.143975497	0.04512089	1	120.999	1240
184	1700.01	0.728117643	0.121365871	0.027783698	1	126.794	1825
187	1700	0.74145073	0.11321369	0.023314886	1	129.434	2055
189	1700	0.574649733	0.148960963	0.067195242	1	63.591	544.7
192	1700	0.765704833	0.076224663	0.009909877	1	194.814	6427
197	1700	0.742168184	0.146251445	0.038832528	1	128.754	1095
198	1700.01	0.757532741	0.089125407	0.013842044	1	189.388	4555

Tjin: ジェット流入温度(K)、djin1: ジェット流入直径(m)補正前、djin2: ジェット流入直径(m)補正後、vjin1: ジェット流入速度(m/s)補正前、vjin2: ジェット流入速度(m/s)補正後、Mtot: 溶融物落下量(t)、dt: 溶融物落下時間(s)

表 4.3.2 JASMINE コード・ジェットに関する入力パラメータ一覧(6/7)

case	Tjin	djin1	djin2	Vjin1	Vjin2	Mtot	dt
199	1700	0.7655	0.096803266	0.015991516	1	198.099	4431
200	1700.01	0.703765844	0.126326697	0.032220621	1	121.015	1621
201	1700.01	0.671074043	0.086960905	0.016792185	1	190.648	5342
203	1700.01	0.751228264	0.090163363	0.014405103	1	195.547	4603
204	1700	0.744533613	0.151425556	0.041364686	1	128.347	1143
206	1700	0.575146938	0.149748356	0.067790136	1	63.5258	537.2
209	1700	0.75412403	0.07647443	0.010283642	1	192.046	6275
214	1700	0.741472195	0.147979789	0.039830437	1	127.429	1061
215	1700.01	0.760704998	0.086168738	0.01283119	1	189.432	4839
216	1700	0.768937486	0.096523695	0.015757445	1	198.418	4481
217	1700.01	0.703830067	0.122229622	0.030159026	1	121.081	1734
218	1700.01	0.679296442	0.08874744	0.017068407	1	186.657	5031
221	1700	0.74850758	0.113291741	0.022908893	1	130.895	2091
226	1700	0.752814407	0.076662939	0.01037039	1	190.716	6182
229	1700	0.702742008	0.153774629	0.047882581	1	122.353	976
233	1700	0.793071834	0.09341086	0.013872978	1	199.537	4794
234	1700.01	0.486729202	0.113392651	0.054274397	1	64.9975	1066
235	1700.01	0.685051854	0.085226444	0.015477537	1	187.095	5470
238	1700	0.748415718	0.097138997	0.01684618	1	131.519	2870
240	1700	0.576956058	0.151626749	0.069066297	1	63.3601	519.9
243	1700	0.74794092	0.074240604	0.009852544	1	190.932	6579
244	1700	0.523524158	0.131526312	0.063117796	1	65.6598	761
246	1700	0.714869391	0.133609459	0.034931803	1	154.795	1635
247	1700	0.791554568	0.09189233	0.013477111	1	194.689	4759
248	1700	0.756908637	0.142867713	0.035627165	1	124.732	1209
249	1700	0.786663195	0.091020253	0.013387467	1	199.288	5090
250	1700	0.738272198	0.145770836	0.038985962	1	184.8931	1842
251	1700.01	0.673930303	0.098091766	0.021185325	1	186.794	4095

Tjin: ジェット流入温度(K)、djin1: ジェット流入直径(m)補正前、djin2: ジェット流入直径(m)補正後、vjin1: ジェット流入速度(m/s)補正前、vjin2: ジェット流入速度(m/s)補正後、Mtot: 溶融物落下量(t)、dt: 溶融物落下時間(s)

表 4.3.2 JASMINE コード・ジェットに関する入力パラメーター一覧(7/7)

case	Tjin	djin1	djin2	Vjin1	Vjin2	Mtot	dt
252	1700.01	0.688726216	0.086874961	0.015910946	1	187.626	5284
253	1700	0.554758756	0.133397647	0.057821321	1	66.1431	717
255	1700.01	0.820580471	0.115602867	0.019846999	1	186.502	2888
257	1700	0.578659417	0.152783392	0.069711792	1	63.2718	510
261	1700	0.664831774	0.145065961	0.047611022	1	147.9719	1403
263	1700	0.719671971	0.123435144	0.029417684	1	154.628	1912
265	1700	0.75515801	0.159581897	0.044657209	1	126.335	981
266	1700	0.788191493	0.100053735	0.016113991	1	199.32	4227
267	1700	0.731548906	0.155390778	0.045119445	1	184.643	1623
268	1700	0.475020826	0.116507969	0.060156971	1	64.7807	1007
269	1700.01	0.672199788	0.085572394	0.016205806	1	191.5778	5531
270	1700	0.765285186	0.089318029	0.013621711	1	200.3517	5064
272	1700.01	0.805414043	0.087823783	0.01189011	1	201.637	5425

Tjin: ジェット流入温度(K)、djin1: ジェット流入直径(m)補正前、djin2: ジェット流入直径(m)補正後、vjin1: ジェット流入速度(m/s)補正前、vjin2: ジェット流入速度(m/s)補正後、Mtot: 溶融物落下量(t)、dt: 溶融物落下時間(s)

表 4.3.3 JASMINE コード・溶融物物性値パラメーター一覧(1/8)

case	Tm(K)	Tsol(K)	Tliq(K)	rhosol(kg/m ³)	rholiq(kg/m ³)	Cpsol(J/kg/K)	Cpliq(J/kg/K)	lheat	lamsol(W/m/K)	lamliq(W/m/K)
2	2099.99	1233.55	2860.81	8768.913773	8574.997974	712.2043969	874.4008372	333953.8342	20.22270096	16.41568987
6	2075.645	1199.04	2952.25	6180.162483	6070.703381	694.1000001	1070.813547	361950.5015	16.82802004	15.28016707
8	2120.62	1202.07	3039.17	6414.475788	6240.032523	698.5190624	1096.180197	343510.6691	14.79993972	14.03279879
9	2136.015	1225.77	2954.23	6292.702819	6133.513756	681.7366127	1062.414482	337488.0953	15.47215976	14.7868111
10	2141.495	1233.55	2983.32	6369.519973	6195.498219	672.6187954	1039.382287	343955.7835	15.5342245	14.80051847
11	2136.445	1199.04	3009.05	5928.004659	5871.925338	703.699051	1088.461497	367586.6419	17.99779885	16.042366
12	2344.65	1425.45	2817.78	9642.216965	9361.856455	939.173654	1395.716478	309913.5711	10.86932256	10.78735608
14	2136.445	1199.04	3039.65	5951.623993	5895.308836	700.5339916	1077.296263	372699.6345	18.18274262	16.14766492
15	2136.015	1225.77	2929.28	6375.105269	6226.802922	680.382685	1037.741519	362056.15	16.40420447	15.07937479
16	2533.585	1769.68	2756.7	8784.408094	8559.621615	901.1510179	1348.087654	317317.029	11.85263312	11.52764695
17	2492.645	1692.5	2772.79	8668.640301	8439.210271	891.4789239	1336.060006	314372.8222	11.85202867	11.65449542
19	2100.205	1233.55	2864.93	6826.065485	6590.646585	699.6827486	1079.549803	331131.8958	13.9142599	13.67980942
23	2078.705	1199.04	2843.05	6293.812752	6140.40229	683.4785956	1061.959881	339943.0577	15.678685	14.84468601
24	2151.765	1199.04	2949.19	6178.281879	6073.41821	688.3911544	1053.324679	364896.5635	17.20541682	15.59303322
25	2120.62	1202.07	3039.17	6412.576939	6238.078475	698.3318135	1096.063938	343354.9239	14.79677402	14.0337178
26	2136.015	1225.77	2954.23	6293.265001	6133.644974	681.6177002	1062.371515	337151.9124	15.45888517	14.78340602
27	2141.495	1233.55	2972.57	6372.970876	6197.635074	672.1231309	1038.629306	343444.0217	15.50962178	14.79453355
28	2136.445	1199.04	3019.24	5927.817571	5871.731401	703.7094888	1088.521437	367567.5317	17.99631556	16.04194984
29	2075.645	1199.04	2952.25	6123.126546	6019.826294	695.624909	1078.312601	355716.4743	16.79477969	15.36354762
31	2136.445	1199.04	3039.65	5949.179464	5892.974801	700.7253955	1078.040043	372253.2115	18.17126606	16.14487411

Tm:融点(K)、Tsol/ Tliq: 固／液相線温度(K)、rhosol/rholiq: 固／液相線密度(kg/m³)、Cpsol/Cpliq: 固／液相線比熱(J/kg/K)、
lheat: 凝固潜熱(J/kg)、lamsol/lamliq: 固／液相線熱伝導率(W/m/K)

表 4.3.3 JASMINE コード・熔融物物性値パラメータ一覧(2/8)

case	Tm(K)	Tsol(K)	Tliq(K)	rhosol(kg/m ³)	rholiq(kg/m ³)	Cpsol(J/kg/K)	Cpliq(J/kg/K)	lheat	lamsol(W/m/K)	lamliq(W/m/K)
32	2136.015	1225.77	2929.28	6369.962394	6221.898582	680.7013413	1039.125639	361119.6273	16.37855372	15.07284367
33	2533.585	1769.68	2756.7	8791.330154	8566.724189	901.3612126	1347.953581	317590.3128	11.8624994	11.53119315
34	2405.9	1535.31	2787.68	8920.2463	8680.164246	906.7367673	1356.648387	312264.3426	11.54010726	11.39201853
36	2100.355	1233.55	2855.67	6859.032599	6612.581888	698.1963441	1078.50194	328594.0114	13.69879096	13.5667574
40	2136.015	1225.77	2843.05	6312.071026	6154.291929	682.4975098	1060.08699	339504.5	15.60335693	14.80245029
41	2151.765	1199.04	2938.68	6197.811406	6090.567387	687.317373	1049.636072	366721.6484	17.22168247	15.57962396
42	2100.745	1233.55	2967.94	6496.817511	6299.745624	678.2315729	1050.459397	342351.1201	14.93414436	14.32299348
43	2136.015	1225.77	2946.54	6294.933773	6133.611986	681.2859032	1062.630488	335810.4212	15.40029987	14.76333779
44	2141.495	1233.55	2972.57	6370.003737	6195.116689	672.0772717	1038.642604	343274.328	15.51612305	14.80296005
45	2136.445	1199.04	3019.24	5928.015233	5871.947586	703.7069842	1088.469391	367638.7043	17.99818107	16.04230472
46	2149.25	1199.04	3099.46	6009.080096	5911.815763	711.6503903	1130.672058	344878.649	16.07390226	14.86485199
47	2510.5	1712.1	2761.07	8612.116379	8392.39208	893.581952	1342.075209	316821.8564	11.91365434	11.59866714
48	2136.445	1199.04	3039.65	5949.027347	5892.881666	700.7398506	1078.047788	372267.0629	18.17289648	16.14590638
50	2533.585	1769.68	2749.05	8633.629823	8415.622703	890.9405483	1333.009397	319339.7009	12.09376462	11.72293294
51	2399.49	1535.31	2795.45	9044.965688	8796.952695	912.7500105	1364.391286	311098.5337	11.38526648	11.27312857
53	2100.355	1233.55	2842.02	6867.043351	6620.298606	699.5341921	1080.76857	328022.038	13.66615558	13.54558525
57	2140.76	1233.55	2845.53	6346.419179	6180.122555	680.6630163	1056.776632	338374.7917	15.45090424	14.7200851
59	2115.885	1199.04	3032.73	6157.639013	6059.96134	692.509761	1060.831206	372002.9073	17.33739347	15.55641405
60	2136.015	1225.77	2954.23	6293.467653	6133.677529	681.5867996	1062.397359	337030.5535	15.45319249	14.78125472
61	2142.105	1233.55	2946.54	6358.087552	6172.7606	669.2909488	1041.814718	330975.1676	15.07860197	14.69388997

Tm:融点(K)、Tsol/ Tliq: 固／液相線温度(K)、rhosol/rholiq: 固／液相線密度(kg/m³)、Cpsol/Cpliq: 固／液相線比熱(J/kg/K)、
lheat: 凝固潜熱(J/kg)、lamsol/lamliq: 固／液相線熱伝導率(W/m/K)

表 4.3.3 JASMINE コード・熔融物物性値パラメーター一覧(3/8)

case	Tm(K)	Tsol(K)	Tliq(K)	rhosol(kg/m ³)	rholiq(kg/m ³)	Cpsol(J/kg/K)	Cpliq(J/kg/K)	lheat	lamsol(W/m/K)	lamliq(W/m/K)
62	2220.615	1199.04	2663.31	7033.266673	6952.810095	830.8016905	1272.662372	337320.9149	14.80107332	13.58265716
63	2075.645	1199.04	2952.25	6065.243719	5994.769986	719.2408628	1118.156319	372583.0362	17.30764053	15.22763849
65	2136.445	1199.04	3039.65	5950.730097	5894.598402	700.5994225	1077.433941	372644.6965	18.18528846	16.15045594
68	2206.285	1233.55	2986.79	6416.201312	6217.889752	661.7371108	1023.853697	334153.3745	15.07682685	14.71943709
76	2119.32	1199.04	3039.6	6265.120577	6115.135104	672.1159861	1036.074478	355257.4921	16.20251927	15.10984719
77	2136.015	1225.77	2954.23	6291.834186	6134.19019	681.9872706	1061.951097	338843.6334	15.53031685	14.80708319
78	2177.66	1233.55	2935.51	6366.724282	6176.995438	668.2627932	1041.305799	328656.1053	14.96094931	14.65011289
79	2220.615	1199.04	2676.96	7032.309308	6951.736156	830.2414918	1271.470774	337690.7561	14.81812135	13.59278696
80	2098.325	1199.04	2997.61	6311.689759	6163.292873	687.2829306	1064.571468	350955.3571	15.86489767	14.81926855
81	2245.375	1233.55	2994.93	6173.927313	6032.339548	664.8863112	1026.091872	340399.4783	16.33079758	15.55893965
82	2136.445	1199.04	3039.65	5953.040894	5896.841092	700.4545558	1076.788934	373114.5006	18.19684701	16.15243785
84	2533.585	1769.68	2756.7	8795.034302	8573.501241	901.9234571	1347.769738	318254.9374	11.91268048	11.56037268
87	2100.355	1233.55	2832.54	6884.437012	6637.4304	702.1646839	1084.775118	327453.7326	13.62233348	13.51048025
93	2227.555	1233.55	3029.24	6273.701302	6123.549351	663.1966092	1012.820054	353212.1021	16.48633685	15.48478247
95	2177.66	1233.55	2935.51	6366.78699	6177.361016	668.290597	1041.128122	328951.621	14.97389633	14.65507758
97	2098.325	1199.04	2997.61	6307.47916	6160.009638	687.5107944	1065.063707	350980.4892	15.87880587	14.82768402
98	2096.545	1199.04	2994.05	6198.088581	6082.134752	701.0258518	1090.252382	355967.3501	16.33548737	14.97342638
99	2136.445	1199.04	3049.88	5954.267236	5898.261041	700.3616363	1076.209754	373532.529	18.21402755	16.15998721
100	2136.015	1225.77	2929.28	6374.656942	6226.353326	680.4235219	1037.911607	361976.6175	16.40081635	15.07758028
101	2533.585	1769.68	2756.7	8787.562663	8568.064057	901.2098622	1345.811276	319093.4755	11.96988581	11.59637608

Tm:融点(K)、Tsol/ Tliq: 固／液相線温度(K)、rhosol/rholiq: 固／液相線密度(kg/m³)、Cpsol/Cpliq: 固／液相線比熱(J/kg/K)、
lheat: 凝固潜熱(J/kg)、lamsol/lamliq: 固／液相線熱伝導率(W/m/K)

表 4.3.3 JASMINE コード・熔融物物性値パラメータ一覧(4/8)

case	Tm(K)	Tsol(K)	Tliq(K)	rhosol(kg/m ³)	rholiq(kg/m ³)	Cpsol(J/kg/K)	Cpliq(J/kg/K)	lheat	lamsol(W/m/K)	lamliq(W/m/K)
102	2141.495	1233.55	2986.79	6388.356488	6215.472617	675.7100385	1043.098884	347276.5559	15.56380403	14.74389995
104	2100.355	1233.55	2837	6893.618382	6646.63555	703.4703699	1086.584624	327400.4823	13.60918538	13.4958912
110	2245.53	1233.55	3029.24	6282.759882	6130.645925	662.1552796	1010.376562	353423.2805	16.47807986	15.48360701
112	2177.66	1233.55	2935.51	6365.643504	6177.046424	668.4815102	1041.139215	329487.194	14.99863814	14.6637137
113	2093.11	1199.04	2987.18	6143.240718	6027.469081	694.3358382	1082.205574	348180.9831	16.33466386	15.16866107
114	2136.015	1225.77	2855.67	6723.157246	6560.09302	731.3574681	1122.122568	344031.1551	14.98841218	14.11268912
116	2136.445	1199.04	3049.88	5957.117017	5901.083739	700.1393285	1075.258181	374131.2548	18.23205855	16.16577425
117	2136.015	1225.77	2929.28	6375.345134	6227.099264	680.3647762	1037.617624	362158.8978	16.40843676	15.0811318
118	2533.585	1769.68	2756.7	8769.723584	8552.857001	900.9204575	1345.501831	319188.4333	12.00130762	11.62033704
119	2106.495	1233.55	2979.44	6476.68856	6283.300442	670.3407584	1031.532318	346576.9324	15.29462052	14.59278692
121	2100.355	1233.55	2837	6902.301093	6655.05974	704.5975438	1088.225078	327214.9627	13.5902164	13.47988553
127	2245.53	1233.55	3029.24	6277.157595	6126.328113	662.8239138	1011.892582	353363.6118	16.48562619	15.48477402
128	2226.79	1233.55	2747.93	7273.634607	7003.764858	729.4591852	1110.744119	324113.8402	13.21864178	13.22109963
129	2177.66	1233.55	2946.54	6364.293308	6176.713239	668.7148344	1041.141728	330160.0013	15.02936973	14.67432194
130	2157.44	1202.33	2851.45	6614.534269	6475.404999	735.7166881	1131.155753	344158.6378	15.34101766	14.3473891
131	2103.68	1199.04	3008.32	6219.361405	6099.37001	689.7895445	1062.634326	361391.0434	16.65855469	15.23327418
132	2096.545	1199.04	2994.05	6195.309781	6079.810449	701.2253601	1090.805447	355824.6354	16.33696545	14.97536101
133	2169.315	1199.04	3049.88	5965.890012	5908.937623	699.6702306	1073.564376	374692.8095	18.23509017	16.1645668
134	2136.015	1225.77	2926.27	6376.845268	6228.654305	680.2376118	1037.033734	362503.7842	16.42203401	15.0872851
135	2401.23	1535.31	2776.31	8996.424778	8765.816718	911.8671822	1359.406222	317201.0897	11.71875328	11.40266616

Tm:融点(K)、Tsol/ Tliq: 固/液相線温度(K)、rhosol/rholiq: 固/液相線密度(kg/m³)、Cpsol/Cpliq: 固/液相線比熱(J/kg/K)、
lheat: 凝固潜熱(J/kg)、lamsol/lamliq: 固/液相線熱伝導率(W/m/K)

表 4.3.3 JASMINE コード・溶融物物性値パラメータ一覧(5/8)

case	Tm(K)	Tsol(K)	Tliq(K)	rhosol(kg/m ³)	rholiq(kg/m ³)	Cpsol(J/kg/K)	Cpliq(J/kg/K)	lheat	lamsol(W/m/K)	lamliq(W/m/K)
136	2154.605	1199.04	2991.05	6144.513086	6020.192688	684.6169039	1065.170085	345497.5664	16.30658765	15.26854446
138	2100.355	1233.55	2827.65	6910.921141	6663.002551	705.3104419	1089.145526	327120.3327	13.57259499	13.4655213
142	2070.86	1233.55	2908.17	6543.759886	6343.454637	673.500202	1033.890518	348750.589	15.21090873	14.4330384
144	2245.53	1233.55	3029.24	6277.315523	6126.489509	662.8127394	1011.837305	353400.489	16.48694057	15.485285
145	2111.95	1233.55	2990.35	6512.15707	6309.21914	664.3838625	1018.458097	347671.8548	15.2839437	14.61686724
146	2177.66	1233.55	2946.54	6362.599617	6176.305282	669.0123139	1041.148508	331017.3405	15.06827716	14.68761501
148	2107.19	1199.04	3015.34	6208.333237	6091.640044	690.2925765	1062.932854	362530.8453	16.74498126	15.27648003
149	2094.81	1199.04	2990.58	6179.650393	6068.707235	702.1533191	1091.831007	357256.3339	16.44783861	15.0290723
150	2169.315	1199.04	3039.65	5948.277089	5891.381293	700.1140332	1077.259251	371150.5606	18.15136624	16.15511313
151	2136.015	1225.77	2926.27	6376.993741	6228.817153	680.2303025	1036.982143	362548.7466	16.42362958	15.08783708
152	2178.665	1233.55	2827.65	6932.910236	6693.857151	707.4982063	1085.294895	330735.2285	13.87308677	13.65596993
153	2142.105	1233.55	2986.79	6428.831679	6248.32575	672.6603889	1035.051462	349115.0837	15.53973784	14.71856905
155	2100.355	1233.55	2827.65	6920.310383	6671.617632	706.0534835	1090.092273	327018.2377	13.55340337	13.45004225
161	2245.53	1233.55	3029.24	6277.500332	6126.678453	662.800134	1011.773724	353443.9424	16.48846951	15.48586399
165	2107.19	1199.04	3015.34	6191.730553	6080.567894	690.9746348	1062.726449	364911.8093	16.90603741	15.35479303
166	2101.95	1199.04	3004.86	6094.862194	6004.876299	707.2399501	1100.249555	361262.455	16.89134399	15.26131619
167	2173.86	1199.04	2960.98	6055.958916	5986.44079	694.8537638	1058.802086	377553.352	18.15568386	16.05115127
168	2136.015	1225.77	2926.27	6377.612164	6229.522374	680.1714096	1036.676105	362731.0563	16.43206378	15.09210737
169	2168.445	1222.2	3004.86	6265.821482	6126.997329	676.9678996	1038.885757	355631.2264	16.45612308	15.29743703
170	2178.055	1233.55	2986.79	6450.309092	6258.635933	666.1131317	1024.045089	345079.4048	15.38968536	14.73275368

Tm:融点(K)、Tsol/ Tliq: 固／液相線温度(K)、rhosol/rholiq: 固／液相線密度(kg/m³)、Cpsol/Cpliq: 固／液相線比熱(J/kg/K)、
lheat: 凝固潜熱(J/kg)、lamsol/lamliq: 固／液相線熱伝導率(W/m/K)

表 4.3.3 JASMINE コード・熔融物物性値パラメータ一覧(6/8)

case	Tm(K)	Tsol(K)	Tliq(K)	rhosol(kg/m ³)	rholiq(kg/m ³)	Cpsol(J/kg/K)	Cpliq(J/kg/K)	lheat	lamsol(W/m/K)	lamliq(W/m/K)
172	2100.355	1233.55	2827.65	6935.550961	6684.804717	706.6955353	1090.782384	326721.4375	13.51521961	13.42484394
176	2099.32	1233.55	2905.14	6532.604997	6337.266937	674.8292632	1035.213455	350092.8336	15.31398561	14.48125207
178	2245.53	1233.55	3029.24	6277.600419	6126.801924	662.7972482	1011.732231	353486.0908	16.49011536	15.48647535
179	2227.25	1233.55	2747.93	7292.897115	7032.019745	735.4868832	1117.467205	326360.1324	13.34769673	13.25757029
182	2259.11	1233.55	3043.01	6195.053096	6065.895276	664.7778477	1012.37869	358712.3503	17.03091442	15.80207659
183	2101.95	1199.04	3004.86	6080.451187	5993.672945	708.1048805	1101.920675	361130.3065	16.94866112	15.30223544
184	2173.86	1199.04	2971.25	6075.37125	6005.550195	693.4328472	1052.680844	381482.5914	18.27139801	16.08648084
187	2206.285	1233.55	2994.05	6453.188028	6256.749591	660.3191799	1012.976924	343797.7655	15.40706379	14.8207355
189	2100.355	1233.55	2818.31	6951.838929	6698.899402	707.383604	1091.523579	326406.5783	13.47468154	13.39806149
192	2046.28	1233.55	2726.55	6925.432678	6642.490793	702.8319567	1104.389687	302388.7983	12.38588529	12.96888872
197	2306.29	1393.59	2748.18	7279.802744	6999.32887	721.7462964	1097.488966	325534.0017	13.20882962	13.22912852
198	2177.17	1233.55	2760.72	6855.242359	6664.554812	732.7508707	1125.883966	334411.3868	14.35007889	13.77984462
199	2245.16	1233.55	3046.45	6206.153384	6074.501275	664.7507696	1012.568801	358255.5076	16.96636156	15.76017445
200	2119.505	1199.04	3039.97	6040.417801	5956.292625	714.3143409	1121.129153	356820.4726	16.70145089	15.13466545
201	2173.86	1199.04	2971.25	6078.266316	6008.836543	693.275525	1051.543492	382454.6935	18.30685733	16.09962406
203	2178.055	1233.55	2846.35	6854.913092	6653.652233	717.4625215	1095.587708	339590.2859	14.55924424	13.98033717
204	2206.07	1233.55	3001.22	6420.385763	6235.212494	660.6628287	1010.495966	348417.0958	15.72848854	14.98830984
206	2100.355	1233.55	2818.31	6969.618253	6714.290544	708.1399705	1092.341625	326066.1629	13.430782	13.3689994
209	2046.28	1233.55	2718.62	6945.548854	6662.990017	705.5363094	1107.650681	302699.4527	12.38202118	12.95046595
214	2328.845	1393.59	2719.93	7290.695084	6983.259878	698.9050279	1056.391763	321862.7089	13.20298258	13.44817813

Tm:融点(K)、Tsol/ Tliq: 固/液相線温度(K)、rhosol/rholiq: 固/液相線密度(kg/m³)、Cpsol/Cpliq: 固/液相線比熱(J/kg/K)、
lheat: 凝固潜熱(J/kg)、lamsol/lamliq: 固/液相線熱伝導率(W/m/K)

表 4.3.3 JASMINE コード・溶融物物性値パラメーター一覧(7/8)

case	Tm(K)	Tsol(K)	Tliq(K)	rhosol(kg/m ³)	rholiq(kg/m ³)	Cpsol(J/kg/K)	Cpliq(J/kg/K)	lheat	lamsol(W/m/K)	lamliq(W/m/K)
215	2177.17	1233.55	2741.27	6903.491417	6712.872176	738.745975	1133.837214	334299.5894	14.28511319	13.70753519
216	2244.37	1233.55	3049.88	6169.534564	6051.295613	667.1321949	1013.381605	366436.8674	17.36743756	15.89662621
217	2119.505	1199.04	3039.97	6033.758396	5950.919658	714.388094	1121.250871	356296.3628	16.72847793	15.16408831
218	2144.135	1199.04	2974.31	6072.509142	5997.750711	695.6340237	1062.57701	375163.311	17.94232675	15.92331692
221	2177.17	1233.55	3001.22	6379.766215	6209.871849	668.7164099	1024.994621	351867.3026	15.91283633	15.00073352
226	2046.28	1233.55	2725.85	6965.674657	6683.397852	708.2152766	1110.939428	302921.1333	12.37438029	12.93074322
229	2245.1	1233.55	2799.8	6951.950611	6750.027548	727.9508415	1108.059341	334030.7084	14.40610995	13.95369632
233	2243.82	1233.55	2978.46	6180.48869	6073.524451	669.5205203	1008.438571	376051.4539	17.85302227	16.05466349
234	2116.455	1199.04	2994.37	6153.493896	6037.814315	689.8916507	1069.614386	352184.5511	16.5479142	15.30756471
235	2144.135	1199.04	2974.31	6069.971977	5995.649463	695.9860079	1063.461069	375034.9592	17.9401551	15.92123444
238	2176.56	1233.55	3008.32	6344.032649	6183.430528	670.5885353	1028.043295	353413.9608	16.08810974	15.09475525
240	2143.905	1233.55	2814.22	7009.973562	6749.234353	709.8680607	1094.220129	325302.706	13.33231719	13.30367819
243	2046.28	1233.55	2718.69	6986.413172	6704.184561	710.920518	1114.377278	302965.0455	12.35849783	12.90762407
244	2206.345	1233.55	2929.28	6567.713718	6350.380308	649.1927163	983.0007577	348324.9147	15.49118375	14.88144143
246	2245.1	1233.55	2805.22	6954.89978	6752.659918	728.0572104	1108.122383	334040.4424	14.40128448	13.94970677
247	2221.955	1199.04	2960.92	6241.458392	6168.467773	712.1813951	1076.799225	375106.4567	17.81130119	15.84046825
248	2330.065	1393.59	2905.14	6707.798537	6435.666335	629.9427248	952.9448504	331609.241	14.61097825	14.6757784
249	2112.915	1199.04	2949.19	6113.358582	6017.241037	694.2636665	1070.556571	359587.768	17.12353414	15.57245515
250	2144.135	1199.04	2978.46	6087.93818	6014.505262	688.151633	1040.884193	385889.6022	18.37907045	16.12230097
251	2116.455	1199.04	2994.37	6151.386246	6036.06671	690.0778953	1070.10786	352058.9801	16.54842456	15.30855722

Tm:融点(K)、Tsol/ Tliq: 固／液相線温度(K)、rhosol/rholiq: 固／液相線密度(kg/m³)、Cpsol/Cpliq: 固／液相線比熱(J/kg/K)、
lheat: 凝固潜熱(J/kg)、lamsol/lamliq: 固／液相線熱伝導率(W/m/K)

表 4.3.3 JASMINE コード・熔融物物性値パラメーター一覧(8/8)

case	Tm(K)	Tsol(K)	Tliq(K)	rhosol(kg/m ³)	rholiq(kg/m ³)	Cpsol(J/kg/K)	Cpliq(J/kg/K)	lheat	lamsol(W/m/K)	lamliq(W/m/K)
252	2144.135	1199.04	2974.31	6063.738795	5990.334703	696.6436481	1065.250083	374629.4645	17.93527984	15.91917573
253	2142.655	1233.55	2813.17	6794.928928	6600.535455	709.377529	1079.762288	347712.7978	14.96855176	14.13979357
255	2204.3	1233.55	3015.34	6302.446514	6152.607513	672.7571222	1031.513945	355305.6082	16.29788533	15.20713265
257	2100.42	1233.55	2799.8	7030.394217	6767.025848	710.9444637	1095.593571	324797.1315	13.27857572	13.26849442
261	2206.19	1233.55	2921.38	6611.228935	6381.175084	647.7828243	981.9389516	345462.1956	15.2280636	14.73853195
263	2245.1	1233.55	2790.7	6961.072924	6758.226057	728.3277089	1108.334903	334052.3959	14.39123361	13.94128929
265	2330.065	1393.59	2916.38	6710.974954	6438.690516	629.2866598	950.9226284	332201.8142	14.64477159	14.69861439
266	2110.875	1199.04	2949.19	6087.552517	5997.387832	696.0044096	1073.889748	360302.87	17.23467179	15.63235876
267	2088.75	1199.04	2978.46	6061.830535	5998.932385	695.3230044	1053.707567	390458.0546	18.53506432	16.09164536
268	2116.455	1199.04	2994.37	6149.045879	6034.134981	690.2815436	1070.640641	351924.9123	16.54950102	15.30999389
269	2263.64	1222.47	2932.87	6100.334977	6022.603533	683.3456975	1030.565011	373595.214	18.28157638	16.34696539
270	2098.86	1233.55	2916.38	6496.627813	6314.386906	676.080315	1034.118146	353726.4339	15.64011208	14.67458874
272	2175.065	1233.55	3015.34	6279.367528	6135.589845	674.0938637	1033.653348	356422.3129	16.41675297	15.26940212

Tm:融点(K)、Tsol/ Tliq: 固／液相線温度(K)、rhosol/rholiq: 固／液相線密度(kg/m³)、Cpsol/Cpliq: 固／液相線比熱(J/kg/K)、
lheat: 凝固潜熱(J/kg)、lamsol/lamliq: 固／液相線熱伝導率(W/m/K)

表 4.3.4 JASMINE コード・固相重量率に対する溶融物温度一覧(1/9)

case	mwtf1	mwtf2	mwtf3	mwtf4	mwtf5	mwtf6	mwtf7	mwtf8	mwtf9
全ケース 共通	0.02	0.032531531	0.052915026	0.086070341	0.14	0.227720719	0.370405184	0.60249239	0.02

表 4.3.4 JASMINE コード・固相重量率に対する溶融物温度一覧(2/9)

case	tmat1	tmat2	tmat3	tmat4	tmat5	tmat6	tmat7	tmat8	tmat9
2	1283.55	1379.355	1475.16	1570.965	1666.77	1762.575	1858.38	1954.185	2049.99
6	1249.04	1346.115625	1443.19125	1540.266875	1637.3425	1734.418125	1831.49375	1928.569375	2025.645
8	1252.07	1354.38875	1456.7075	1559.02625	1661.345	1763.66375	1865.9825	1968.30125	2070.62
9	1275.77	1377.050625	1478.33125	1579.611875	1680.8925	1782.173125	1883.45375	1984.734375	2086.015
10	1283.55	1384.543125	1485.53625	1586.529375	1687.5225	1788.515625	1889.50875	1990.501875	2091.495
11	1249.04	1353.715625	1458.39125	1563.066875	1667.7425	1772.418125	1877.09375	1981.769375	2086.445
12	1475.45	1577.85	1680.25	1782.65	1885.05	1987.45	2089.85	2192.25	2294.65
14	1249.04	1353.715625	1458.39125	1563.066875	1667.7425	1772.418125	1877.09375	1981.769375	2086.445
15	1275.77	1377.050625	1478.33125	1579.611875	1680.8925	1782.173125	1883.45375	1984.734375	2086.015
16	1819.68	1902.668125	1985.65625	2068.644375	2151.6325	2234.620625	2317.60875	2400.596875	2483.585
17	1742.5	1830.018125	1917.53625	2005.054375	2092.5725	2180.090625	2267.60875	2355.126875	2442.645
19	1283.55	1379.381875	1475.21375	1571.045625	1666.8775	1762.709375	1858.54125	1954.373125	2050.205
23	1249.04	1346.498125	1443.95625	1541.414375	1638.8725	1736.330625	1833.78875	1931.246875	2028.705
24	1249.04	1355.630625	1462.22125	1568.811875	1675.4025	1781.993125	1888.58375	1995.174375	2101.765
25	1252.07	1354.38875	1456.7075	1559.02625	1661.345	1763.66375	1865.9825	1968.30125	2070.62
26	1275.77	1377.050625	1478.33125	1579.611875	1680.8925	1782.173125	1883.45375	1984.734375	2086.015
27	1283.55	1384.543125	1485.53625	1586.529375	1687.5225	1788.515625	1889.50875	1990.501875	2091.495
28	1249.04	1353.715625	1458.39125	1563.066875	1667.7425	1772.418125	1877.09375	1981.769375	2086.445
29	1249.04	1346.115625	1443.19125	1540.266875	1637.3425	1734.418125	1831.49375	1928.569375	2025.645
31	1249.04	1353.715625	1458.39125	1563.066875	1667.7425	1772.418125	1877.09375	1981.769375	2086.445

表 4.3.4 JASMINE コード・固相重量率に対する溶融物温度一覧(3/9)

ケース	tmat1	tmat2	tmat3	tmat4	tmat5	tmat6	tmat7	tmat8	tmat9
32	1275.77	1377.050625	1478.33125	1579.611875	1680.8925	1782.173125	1883.45375	1984.734375	2086.015
33	1819.68	1902.668125	1985.65625	2068.644375	2151.6325	2234.620625	2317.60875	2400.596875	2483.585
34	1585.31	1681.63375	1777.9575	1874.28125	1970.605	2066.92875	2163.2525	2259.57625	2355.9
36	1283.55	1379.400625	1475.25125	1571.101875	1666.9525	1762.803125	1858.65375	1954.504375	2050.355
40	1275.77	1377.050625	1478.33125	1579.611875	1680.8925	1782.173125	1883.45375	1984.734375	2086.015
41	1249.04	1355.630625	1462.22125	1568.811875	1675.4025	1781.993125	1888.58375	1995.174375	2101.765
42	1283.55	1379.449375	1475.34875	1571.248125	1667.1475	1763.046875	1858.94625	1954.845625	2050.745
43	1275.77	1377.050625	1478.33125	1579.611875	1680.8925	1782.173125	1883.45375	1984.734375	2086.015
44	1283.55	1384.543125	1485.53625	1586.529375	1687.5225	1788.515625	1889.50875	1990.501875	2091.495
45	1249.04	1353.715625	1458.39125	1563.066875	1667.7425	1772.418125	1877.09375	1981.769375	2086.445
46	1249.04	1355.31625	1461.5925	1567.86875	1674.145	1780.42125	1886.6975	1992.97375	2099.25
47	1762.1	1849.4	1936.7	2024	2111.3	2198.6	2285.9	2373.2	2460.5
48	1249.04	1353.715625	1458.39125	1563.066875	1667.7425	1772.418125	1877.09375	1981.769375	2086.445
50	1819.68	1902.668125	1985.65625	2068.644375	2151.6325	2234.620625	2317.60875	2400.596875	2483.585
51	1585.31	1680.8325	1776.355	1871.8775	1967.4	2062.9225	2158.445	2253.9675	2349.49
53	1283.55	1379.400625	1475.25125	1571.101875	1666.9525	1762.803125	1858.65375	1954.504375	2050.355
57	1283.55	1384.45125	1485.3525	1586.25375	1687.155	1788.05625	1888.9575	1989.85875	2090.76
59	1249.04	1351.145625	1453.25125	1555.356875	1657.4625	1759.568125	1861.67375	1963.779375	2065.885
60	1275.77	1377.050625	1478.33125	1579.611875	1680.8925	1782.173125	1883.45375	1984.734375	2086.015
61	1283.55	1384.619375	1485.68875	1586.758125	1687.8275	1788.896875	1889.96625	1991.035625	2092.105

表 4.3.4 JASMINE コード・固相重量率に対する溶融物温度一覧(4/9)

ケース	tmat1	tmat2	tmat3	tmat4	tmat5	tmat6	tmat7	tmat8	tmat9
62	1249.04	1364.236875	1479.43375	1594.630625	1709.8275	1825.024375	1940.22125	2055.418125	2170.615
63	1249.04	1346.115625	1443.19125	1540.266875	1637.3425	1734.418125	1831.49375	1928.569375	2025.645
65	1249.04	1353.715625	1458.39125	1563.066875	1667.7425	1772.418125	1877.09375	1981.769375	2086.445
68	1283.55	1392.641875	1501.73375	1610.825625	1719.9175	1829.009375	1938.10125	2047.193125	2156.285
76	1249.04	1351.575	1454.11	1556.645	1659.18	1761.715	1864.25	1966.785	2069.32
77	1275.77	1377.050625	1478.33125	1579.611875	1680.8925	1782.173125	1883.45375	1984.734375	2086.015
78	1283.55	1389.06375	1494.5775	1600.09125	1705.605	1811.11875	1916.6325	2022.14625	2127.66
79	1249.04	1364.236875	1479.43375	1594.630625	1709.8275	1825.024375	1940.22125	2055.418125	2170.615
80	1249.04	1348.950625	1448.86125	1548.771875	1648.6825	1748.593125	1848.50375	1948.414375	2048.325
81	1283.55	1397.528125	1511.50625	1625.484375	1739.4625	1853.440625	1967.41875	2081.396875	2195.375
82	1249.04	1353.715625	1458.39125	1563.066875	1667.7425	1772.418125	1877.09375	1981.769375	2086.445
84	1819.68	1902.668125	1985.65625	2068.644375	2151.6325	2234.620625	2317.60875	2400.596875	2483.585
87	1283.55	1379.400625	1475.25125	1571.101875	1666.9525	1762.803125	1858.65375	1954.504375	2050.355
93	1283.55	1395.300625	1507.05125	1618.801875	1730.5525	1842.303125	1954.05375	2065.804375	2177.555
95	1283.55	1389.06375	1494.5775	1600.09125	1705.605	1811.11875	1916.6325	2022.14625	2127.66
97	1249.04	1348.950625	1448.86125	1548.771875	1648.6825	1748.593125	1848.50375	1948.414375	2048.325
98	1249.04	1348.728125	1448.41625	1548.104375	1647.7925	1747.480625	1847.16875	1946.856875	2046.545
99	1249.04	1353.715625	1458.39125	1563.066875	1667.7425	1772.418125	1877.09375	1981.769375	2086.445
100	1275.77	1377.050625	1478.33125	1579.611875	1680.8925	1782.173125	1883.45375	1984.734375	2086.015
101	1819.68	1902.668125	1985.65625	2068.644375	2151.6325	2234.620625	2317.60875	2400.596875	2483.585

表 4.3.4 JASMINE コード・固相重量率に対する溶融物温度一覧(5/9)

ケース	tmat1	tmat2	tmat3	tmat4	tmat5	tmat6	tmat7	tmat8	tmat9
102	1283.55	1384.543125	1485.53625	1586.529375	1687.5225	1788.515625	1889.50875	1990.501875	2091.495
104	1283.55	1379.400625	1475.25125	1571.101875	1666.9525	1762.803125	1858.65375	1954.504375	2050.355
110	1283.55	1397.5475	1511.545	1625.5425	1739.54	1853.5375	1967.535	2081.5325	2195.53
112	1283.55	1389.06375	1494.5775	1600.09125	1705.605	1811.11875	1916.6325	2022.14625	2127.66
113	1249.04	1348.29875	1447.5575	1546.81625	1646.075	1745.33375	1844.5925	1943.85125	2043.11
114	1275.77	1377.050625	1478.33125	1579.611875	1680.8925	1782.173125	1883.45375	1984.734375	2086.015
116	1249.04	1353.715625	1458.39125	1563.066875	1667.7425	1772.418125	1877.09375	1981.769375	2086.445
117	1275.77	1377.050625	1478.33125	1579.611875	1680.8925	1782.173125	1883.45375	1984.734375	2086.015
118	1819.68	1902.668125	1985.65625	2068.644375	2151.6325	2234.620625	2317.60875	2400.596875	2483.585
119	1283.55	1380.168125	1476.78625	1573.404375	1670.0225	1766.640625	1863.25875	1959.876875	2056.495
121	1283.55	1379.400625	1475.25125	1571.101875	1666.9525	1762.803125	1858.65375	1954.504375	2050.355
127	1283.55	1397.5475	1511.545	1625.5425	1739.54	1853.5375	1967.535	2081.5325	2195.53
128	1283.55	1395.205	1506.86	1618.515	1730.17	1841.825	1953.48	2065.135	2176.79
129	1283.55	1389.06375	1494.5775	1600.09125	1705.605	1811.11875	1916.6325	2022.14625	2127.66
130	1252.33	1359.21875	1466.1075	1572.99625	1679.885	1786.77375	1893.6625	2000.55125	2107.44
131	1249.04	1349.62	1450.2	1550.78	1651.36	1751.94	1852.52	1953.1	2053.68
132	1249.04	1348.728125	1448.41625	1548.104375	1647.7925	1747.480625	1847.16875	1946.856875	2046.545
133	1249.04	1357.824375	1466.60875	1575.393125	1684.1775	1792.961875	1901.74625	2010.530625	2119.315
134	1275.77	1377.050625	1478.33125	1579.611875	1680.8925	1782.173125	1883.45375	1984.734375	2086.015
135	1585.31	1681.05	1776.79	1872.53	1968.27	2064.01	2159.75	2255.49	2351.23

表 4.3.4 JASMINE コード・固相重量率に対する溶融物温度一覧(6/9)

ケース	tmat1	tmat2	tmat3	tmat4	tmat5	tmat6	tmat7	tmat8	tmat9
136	1249.04	1355.985625	1462.93125	1569.876875	1676.8225	1783.768125	1890.71375	1997.659375	2104.605
138	1283.55	1379.400625	1475.25125	1571.101875	1666.9525	1762.803125	1858.65375	1954.504375	2050.355
142	1283.55	1375.71375	1467.8775	1560.04125	1652.205	1744.36875	1836.5325	1928.69625	2020.86
144	1283.55	1397.5475	1511.545	1625.5425	1739.54	1853.5375	1967.535	2081.5325	2195.53
145	1283.55	1380.85	1478.15	1575.45	1672.75	1770.05	1867.35	1964.65	2061.95
146	1283.55	1389.06375	1494.5775	1600.09125	1705.605	1811.11875	1916.6325	2022.14625	2127.66
148	1249.04	1350.05875	1451.0775	1552.09625	1653.115	1754.13375	1855.1525	1956.17125	2057.19
149	1249.04	1348.51125	1447.9825	1547.45375	1646.925	1746.39625	1845.8675	1945.33875	2044.81
150	1249.04	1357.824375	1466.60875	1575.393125	1684.1775	1792.961875	1901.74625	2010.530625	2119.315
151	1275.77	1377.050625	1478.33125	1579.611875	1680.8925	1782.173125	1883.45375	1984.734375	2086.015
152	1283.55	1389.189375	1494.82875	1600.468125	1706.1075	1811.746875	1917.38625	2023.025625	2128.665
153	1283.55	1384.619375	1485.68875	1586.758125	1687.8275	1788.896875	1889.96625	1991.035625	2092.105
155	1283.55	1379.400625	1475.25125	1571.101875	1666.9525	1762.803125	1858.65375	1954.504375	2050.355
161	1283.55	1397.5475	1511.545	1625.5425	1739.54	1853.5375	1967.535	2081.5325	2195.53
165	1249.04	1350.05875	1451.0775	1552.09625	1653.115	1754.13375	1855.1525	1956.17125	2057.19
166	1249.04	1349.40375	1449.7675	1550.13125	1650.495	1750.85875	1851.2225	1951.58625	2051.95
167	1249.04	1358.3925	1467.745	1577.0975	1686.45	1795.8025	1905.155	2014.5075	2123.86
168	1275.77	1377.050625	1478.33125	1579.611875	1680.8925	1782.173125	1883.45375	1984.734375	2086.015
169	1272.2	1377.980625	1483.76125	1589.541875	1695.3225	1801.103125	1906.88375	2012.664375	2118.445
170	1283.55	1389.113125	1494.67625	1600.239375	1705.8025	1811.365625	1916.92875	2022.491875	2128.055

表 4.3.4 JASMINE コード・固相重量率に対する溶融物温度一覧(7/9)

ケース	tmat1	tmat2	tmat3	tmat4	tmat5	tmat6	tmat7	tmat8	tmat9
172	1283.55	1379.400625	1475.25125	1571.101875	1666.9525	1762.803125	1858.65375	1954.504375	2050.355
176	1283.55	1379.27125	1474.9925	1570.71375	1666.435	1762.15625	1857.8775	1953.59875	2049.32
178	1283.55	1397.5475	1511.545	1625.5425	1739.54	1853.5375	1967.535	2081.5325	2195.53
179	1283.55	1395.2625	1506.975	1618.6875	1730.4	1842.1125	1953.825	2065.5375	2177.25
182	1283.55	1399.245	1514.94	1630.635	1746.33	1862.025	1977.72	2093.415	2209.11
183	1249.04	1349.40375	1449.7675	1550.13125	1650.495	1750.85875	1851.2225	1951.58625	2051.95
184	1249.04	1358.3925	1467.745	1577.0975	1686.45	1795.8025	1905.155	2014.5075	2123.86
187	1283.55	1392.641875	1501.73375	1610.825625	1719.9175	1829.009375	1938.10125	2047.193125	2156.285
189	1283.55	1379.400625	1475.25125	1571.101875	1666.9525	1762.803125	1858.65375	1954.504375	2050.355
192	1283.55	1372.64125	1461.7325	1550.82375	1639.915	1729.00625	1818.0975	1907.18875	1996.28
197	1443.59	1545.1775	1646.765	1748.3525	1849.94	1951.5275	2053.115	2154.7025	2256.29
198	1283.55	1389.0025	1494.455	1599.9075	1705.36	1810.8125	1916.265	2021.7175	2127.17
199	1283.55	1397.50125	1511.4525	1625.40375	1739.355	1853.30625	1967.2575	2081.20875	2195.16
200	1249.04	1351.598125	1454.15625	1556.714375	1659.2725	1761.830625	1864.38875	1966.946875	2069.505
201	1249.04	1358.3925	1467.745	1577.0975	1686.45	1795.8025	1905.155	2014.5075	2123.86
203	1283.55	1389.113125	1494.67625	1600.239375	1705.8025	1811.365625	1916.92875	2022.491875	2128.055
204	1283.55	1392.615	1501.68	1610.745	1719.81	1828.875	1937.94	2047.005	2156.07
206	1283.55	1379.400625	1475.25125	1571.101875	1666.9525	1762.803125	1858.65375	1954.504375	2050.355
209	1283.55	1372.64125	1461.7325	1550.82375	1639.915	1729.00625	1818.0975	1907.18875	1996.28
214	1443.59	1547.996875	1652.40375	1756.810625	1861.2175	1965.624375	2070.03125	2174.438125	2278.845

表 4.3.4 JASMINE コード・固相重量率に対する溶融物温度一覧(8/9)

ケース	tmat1	tmat2	tmat3	tmat4	tmat5	tmat6	tmat7	tmat8	tmat9
215	1283.55	1389.0025	1494.455	1599.9075	1705.36	1810.8125	1916.265	2021.7175	2127.17
216	1283.55	1397.4025	1511.255	1625.1075	1738.96	1852.8125	1966.665	2080.5175	2194.37
217	1249.04	1351.598125	1454.15625	1556.714375	1659.2725	1761.830625	1864.38875	1966.946875	2069.505
218	1249.04	1354.676875	1460.31375	1565.950625	1671.5875	1777.224375	1882.86125	1988.498125	2094.135
221	1283.55	1389.0025	1494.455	1599.9075	1705.36	1810.8125	1916.265	2021.7175	2127.17
226	1283.55	1372.64125	1461.7325	1550.82375	1639.915	1729.00625	1818.0975	1907.18875	1996.28
229	1283.55	1397.49375	1511.4375	1625.38125	1739.325	1853.26875	1967.2125	2081.15625	2195.1
233	1283.55	1397.33375	1511.1175	1624.90125	1738.685	1852.46875	1966.2525	2080.03625	2193.82
234	1249.04	1351.216875	1453.39375	1555.570625	1657.7475	1759.924375	1862.10125	1964.278125	2066.455
235	1249.04	1354.676875	1460.31375	1565.950625	1671.5875	1777.224375	1882.86125	1988.498125	2094.135
238	1283.55	1388.92625	1494.3025	1599.67875	1705.055	1810.43125	1915.8075	2021.18375	2126.56
240	1283.55	1384.844375	1486.13875	1587.433125	1688.7275	1790.021875	1891.31625	1992.610625	2093.905
243	1283.55	1372.64125	1461.7325	1550.82375	1639.915	1729.00625	1818.0975	1907.18875	1996.28
244	1283.55	1392.649375	1501.74875	1610.848125	1719.9475	1829.046875	1938.14625	2047.245625	2156.345
246	1283.55	1397.49375	1511.4375	1625.38125	1739.325	1853.26875	1967.2125	2081.15625	2195.1
247	1249.04	1364.404375	1479.76875	1595.133125	1710.4975	1825.861875	1941.22625	2056.590625	2171.955
248	1443.59	1548.149375	1652.70875	1757.268125	1861.8275	1966.386875	2070.94625	2175.505625	2280.065
249	1249.04	1350.774375	1452.50875	1554.243125	1655.9775	1757.711875	1859.44625	1961.180625	2062.915
250	1249.04	1354.676875	1460.31375	1565.950625	1671.5875	1777.224375	1882.86125	1988.498125	2094.135
251	1249.04	1351.216875	1453.39375	1555.570625	1657.7475	1759.924375	1862.10125	1964.278125	2066.455

表 4.3.4 JASMINE コード・固相重量率に対する溶融物温度一覧(9/9)

ケース	tmat1	tmat2	tmat3	tmat4	tmat5	tmat6	tmat7	tmat8	tmat9
252	1249.04	1354.676875	1460.31375	1565.950625	1671.5875	1777.224375	1882.86125	1988.498125	2094.135
253	1283.55	1384.688125	1485.82625	1586.964375	1688.1025	1789.240625	1890.37875	1991.516875	2092.655
255	1283.55	1392.39375	1501.2375	1610.08125	1718.925	1827.76875	1936.6125	2045.45625	2154.3
257	1283.55	1379.40875	1475.2675	1571.12625	1666.985	1762.84375	1858.7025	1954.56125	2050.42
261	1283.55	1392.63	1501.71	1610.79	1719.87	1828.95	1938.03	2047.11	2156.19
263	1283.55	1397.49375	1511.4375	1625.38125	1739.325	1853.26875	1967.2125	2081.15625	2195.1
265	1443.59	1548.149375	1652.70875	1757.268125	1861.8275	1966.386875	2070.94625	2175.505625	2280.065
266	1249.04	1350.519375	1451.99875	1553.478125	1654.9575	1756.436875	1857.91625	1959.395625	2060.875
267	1249.04	1347.75375	1446.4675	1545.18125	1643.895	1742.60875	1841.3225	1940.03625	2038.75
268	1249.04	1351.216875	1453.39375	1555.570625	1657.7475	1759.924375	1862.10125	1964.278125	2066.455
269	1272.47	1390.11625	1507.7625	1625.40875	1743.055	1860.70125	1978.3475	2095.99375	2213.64
270	1283.55	1379.21375	1474.8775	1570.54125	1666.205	1761.86875	1857.5325	1953.19625	2048.86
272	1283.55	1388.739375	1493.92875	1599.118125	1704.3075	1809.496875	1914.68625	2019.875625	2125.065

4.3.2 JASMINE 解析結果と溶融物堆積状態

JASMINE コードでは溶融物は最終的に固化し、3種類のデブリ（連続層状、アグロメレーション状、粒子状）になると考えている。

解析結果のうち、次の出力パラメータを用いてデブリ堆積高さを評価した。

- (1) 連続層状デブリの質量： $M_c(\text{kg})$
- (2) アグロメレーションデブリの質量： $M_a(\text{kg})$
- (3) 水プール床面におけるデブリ拡がり半径： $R_c(\text{m})$

いま、連続層状デブリ及びアグロメレーションデブリが一体化して円筒を形成すると考える。このとき、円筒の体積 $V (\text{m}^3)$ は次式となる。

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

この円筒形状デブリの半径が水プール床面におけるデブリ拡がり半径 $R_c(\text{m})$ に等しいと仮定し、円筒の高さ(すなわちデブリ堆積高さ) $h_d(\text{m})$ を次式で求める。

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

以上の評価を、全ての解析ケースに対して実施した。

プール水位 3 水準(1.0m、1.5m、2.0m)に対してそれぞれ解析を実施し得られた結果(粒子状デブリ質量、アグロメレーションデブリ質量、連続層状デブリ質量、拡がり半径、デブリ堆積高さ)を表 4.3.4 から 4.3.6 に示す。計算の途中で溶融物が系の端まで到達したケースについては、その時点で計算を停止し、停止時点でのデブリ質量に未落下分の溶融物質量を加算してデブリ堆積高さを算出した。それ以外で計算停止したケースについては計算失敗とし、デブリ堆積高さ評価の対象から除外した。

表 4.3.4 JASMINE コード解析結果(プール水位 1.0m) (1/6)

ケース	計算状況 ○:計算成功 ×:計算失敗	粒子状デブリ 質量 (kg)	アグロメレー ションデブリ 質量 (kg)	連続層状デブ リ質量 (kg)	未落下分の溶 融物質量 (kg)	拡がり半径 (m)	デブリ堆積高 さ (m)
2	○	15.83	0	14360	174253	3	0.761
6	○	21.82	0	12795	171564	3	1.055
8	×						
9	○	2.73	0	13638	114777	3	0.722
10	×						
11	○	13.46	0	13420	147869	3	0.962
12	○	2.70	0	13445	146108	3	0.585
14	○	1.44	0	14381	145043	3	0.947
15	○	2.85	0	14199	153085	3	0.928
16	○	10.96	0	9888	146936	3	0.631
17	○	2.75	0	13672	144057	3	0.644
19	○	1.43	0	14316	103570	3	0.611
23	×						
24	○	2.36	0	11729	158741	3	0.976
25	○	1.33	0	13314	115116	3	0.708
26	○	1.42	0	14124	114174	3	0.721
27	○	19.15	0	12729	169607	3	1.012
28	○	1.40	0	13941	147422	3	0.963
29	○	2.23	0	11111	92988	3	0.601
31	○	1.36	0	13539	146249	3	0.950
32	○	0.16	0	1577	0	1.5122	0.034
33	○	2.49	0	12400	144593	3	0.632
34	○	2.36	0	11728	90518	3	0.405
36	○	2.81	0	14029	104035	3	0.609
40	○	2.76	0	13758	160863	3	0.900
41	○	20.37	0	12696	174145	3	1.066
42	○	2.31	0	11503	116571	3	0.697
43	○	2.01	0	9978	118615	3	0.722
44	○	14.74	0	12257	184282	3	1.091
45	○	2.71	0	13532	148392	3	0.966

表 4.3.4 JASMINE コード解析結果(プール水位 1.0m) (2/6)

ケース 番号	計算状況 ○:計算成功 ×:計算失敗	粒子状デブリ 質量 (kg)	アグロメレー ションデブリ 質量 (kg)	連続層状デブ リ質量 (kg)	未落下分の溶 融物質量 (kg)	拡がり半径 (m)	デブリ堆積高 さ (m)
46	○	1.38	0	13727	146781	3	0.945
47	○	18.17	0	13928	148712	3	0.668
48	○	2.71	0	13506	147556	3	0.958
50	○	2.72	0	13562	143796	3	0.645
51	○	2.02	0	10033	149378	3	0.623
53	○	2.74	0	13673	50300	3	0.329
57	×						
59	○	2.40	0	7975	119256	3	0.731
60	×						
61	○	23.54	0	13040	157722	3	0.950
62	○	2.81	0	9295	158270	3	0.843
63	○	2.60	0	12947	91740	3	0.610
65	○	2.69	0	13421	147526	3	0.957
68	○	1.84	0	9112	162204	3	0.944
76	○	2.70	0	13476	114795	3	0.724
77	○	2.80	0	13934	114665	3	0.723
78	○	2.90	0	9581	117848	3	0.708
79	○	2.13	0	10596	157028	3	0.843
80	○	1.39	0	13821	112717	3	0.709
81	○	2.02	0	10032	159492	3	0.971
82	○	1.33	0	13279	147826	3	0.957
84	○	2.60	0	12933	145406	3	0.637
87	○	2.75	0	13719	50169	3	0.328
93	○	12.74	0	12715	181997	3	1.098
95	○	30.17	0	13661	114528	3	0.712
97	○	3.26	0	10804	115354	3	0.707
98	○	1.96	0	9719	107064	3	0.666
99	○	2.66	0	13242	148283	3	0.959
100	○	10.00	0	12475	168500	3	1.004
101	○	2.45	0	12194	146369	3	0.638

表 4.3.4 JASMINE コード解析結果(プール水位 1.0m) (3/6)

ケース 番号	計算状況 ○:計算成功 ×:計算失敗	粒子状デブリ 質量 (kg)	アグロメレー ションデブリ 質量 (kg)	連続層状デブ リ質量 (kg)	未落下分の溶 融物質量 (kg)	拡がり半径 (m)	デブリ堆積高 さ (m)
102	○	18.68	0	12418	171348	3	1.017
104	○	1.38	0	13752	50148	3	0.328
110	○	7.60	0	12648	181867	3	1.095
112	○	2.83	0	14120	113890	3	0.711
113	○	2.36	0	11767	118823	3	0.726
114	○	1.38	0	13724	115787	3	0.681
116	○	0.14	0	457	454	0.57012	0.150
117	○	1.38	0	13817	50455	3	0.357
118	○	2.51	0	12493	91169	3	0.418
119	○	1.42	0	14165	115542	3	0.708
121	○	2.47	0	12282	51522	3	0.327
127	○	12.93	0	11728	180517	3	1.083
128	○	13.98	0	13945	111922	3	0.612
129	○	1.16	0	11599	116359	3	0.711
130	○	4.23	0	14058	116737	3	0.699
131	○	2.31	0	11509	117179	3	0.732
132	○	1.37	0	13625	115924	3	0.740
133	○	0.16	0	406	404	0.55008	0.143
134	○	2.79	0	13899	50764	3	0.359
135	○	2.43	0	8030	150859	3	0.625
136	○	16.73	0	13903	115012	3	0.742
138	○	2.51	0	12507	51247	3	0.326
142	○	2.36	0	11775	106315	3	0.638
144	○	12.55	0	12523	183021	3	1.102
145	○	2.29	0	11385	113356	3	0.677
146	○	1.38	0	13768	109931	3	0.688
148	○	2.15	0	10680	118905	3	0.738
149	○	23.62	0	13080	115889	3	0.738
150	○	22.58	0	13238	117373	3	0.777
151	○	18.22	0	12977	168983	3	1.009

表 4.3.4 JASMINE コード解析結果(プール水位 1.0m) (4/6)

ケース 番号	計算状況 ○:計算成功 ×:計算失敗	粒子状デブリ 質量 (kg)	アグロメレー ションデブリ 質量 (kg)	連続層状デブ リ質量 (kg)	未落下分の溶 融物質量 (kg)	拡がり半径 (m)	デブリ堆積高 さ (m)
152	○	3.34	0	8268	120023	3	0.654
153	○	1.41	0	14070	114033	3	0.705
155	○	2.41	0	11981	51733	3	0.326
161	○	0.19	0	928	903	1.2317	0.061
165	○	1.93	0	9595	120061	3	0.741
166	○	1.39	0	13900	109668	3	0.717
167	○	2.29	0	11381	117572	3	0.753
168	○	24.66	0	12934	52465	3	0.363
169	○	1.38	0	13753	114539	3	0.724
170	○	2.82	0	14059	115752	3	0.712
172	○	2.77	0	13805	49851	3	0.325
176	○	1.41	0	14102	140752	3	0.838
178	○	18.82	0	12508	181980	3	1.096
179	○	1.77	0	8778	118996	3	0.620
182	○	19.91	0	12406	184302	3	1.123
183	○	1.34	0	13341	107657	3	0.704
184	○	1.40	0	13928	112865	3	0.738
187	○	30.86	0	13972	115431	3	0.709
189	○	1.38	0	13743	49847	3	0.324
192	○	10.88	0	12071	182732	3	0.995
197	○	2.51	0	12484	116268	3	0.626
198	○	18.92	0	12576	176793	3	0.977
199	○	13.37	0	12123	185963	3	1.129
200	○	1.38	0	13755	107259	3	0.709
201	○	12.09	0	12067	178569	3	1.109
203	○	12.94	0	12911	182623	3	1.009
204	○	2.47	0	12297	116047	3	0.707
206	○	2.68	0	13372	50151	3	0.322
209	○	12.46	0	12432	179601	3	0.978
214	○	2.15	0	10695	116732	3	0.618

表 4.3.4 JASMINE コード解析結果(プール水位 1.0m) (5/6)

ケース 番号	計算状況 ○:計算成功 ×:計算失敗	粒子状デブリ 質量 (kg)	アグロメレー ションデブリ 質量 (kg)	連続層状デブ リ質量 (kg)	未落下分の溶 融物質量 (kg)	拡がり半径 (m)	デブリ堆積高 さ (m)
215	○	14.04	0	12736	176682	3	0.970
216	○	18.58	0	12352	186047	3	1.137
217	○	1.39	0	13891	107188	3	0.710
218	○	15.95	0	12242	174399	3	1.087
221	○	23.67	0	13877	116995	3	0.726
226	○	12.47	0	12442	178262	3	0.968
229	○	2.37	0	11815	110535	3	0.622
233	○	17.22	0	12265	187255	3	1.142
234	○	2.76	0	13751	51244	3	0.374
235	○	17.13	0	12203	174875	3	1.090
238	○	16.38	0	12563	118939	3	0.733
240	○	2.14	0	10656	52702	3	0.320
243	○	10.94	0	12129	178792	3	0.967
244	○	2.94	0	14644	51013	3	0.354
246	○	1.46	0	14567	140226	3	0.787
247	○	11.14	0	12354	182323	3	1.103
248	○	2.91	0	14522	110207	3	0.658
249	○	14.92	0	12406	186867	3	1.153
250	○	1.34	0	13309	171583	3	1.074
251	○	15.29	0	12709	174070	3	1.074
252	○	16.09	0	12345	175265	3	1.094
253	○	1.45	0	14428	51714	3	0.344
255	○	23.67	0	13874	172605	3	1.046
257	○	2.58	0	12851	50418	3	0.318
261	○	2.78	0	13865	134104	3	0.792
263	○	2.78	0	13890	140736	3	0.786
265	○	2.08	0	10366	115967	3	0.666
266	○	24.64	0	12928	186367	3	1.158
267	○	2.15	0	10699	173942	3	1.077
268	○	2.78	0	13897	50881	3	0.373

表 4.3.4 JASMINE コード解析結果(プール水位 1.0m) (6/6)

ケース 番号	計算状況 ○:計算成功 ×:計算失敗	粒子状デブリ 質量 (kg)	アグロメレー ションデブリ 質量 (kg)	連続層状デブ リ質量 (kg)	未落下分の溶 融物質量 (kg)	拡がり半径 (m)	デブリ堆積高 さ (m)
269	○	18.54	0	12328	179231	3	1.111
270	○	18.17	0	12947	187386	3	1.091
272	○	14.78	0	12288	189334	3	1.136

表 4.3.5 JASMINE コード解析結果(プール水位 1.5m) (1/6)

ケース	計算状況 ○:計算成功 ×:計算失敗	粒子状デブリ 質量 (kg)	アグロメレー ションデブリ 質量 (kg)	連続層状デブ リ質量 (kg)	未落下分の溶 融物質量 (kg)	拡がり半径 (m)	デブリ堆積高 さ (m)
2	○	43.33	0	14882	173705	3	0.761
6	○	2.58	0	12897	171481	3	1.055
8	×						
9	○	2.81	0	14040	114375	3	0.722
10	×						
11	○	3.86	0	12850	148448	3	0.962
12	○	5.84	0	14539	145011	3	0.585
14	○	2.79	0	13894	145529	3	0.947
15	○	4.17	0	13855	153428	3	0.928
16	○	4.59	0	11410	145421	3	0.631
17	○	4.12	0	13677	144050	3	0.644
19	○	3.13	0	15623	102262	3	0.611
23	×						
24	○	4.00	0	13272	157196	3	0.976
25	○	2.88	0	14354	114074	3	0.708
26	○	2.85	0	14225	114072	3	0.721
27	○	18.18	0	12952	169385	3	1.012
28	○	4.12	0	13714	147646	3	0.963
29	○	4.53	0	11284	92813	3	0.601
31	○	3.97	0	13204	146582	3	0.950
32	×						
33	○	3.66	0	12150	144843	3	0.632
34	○	4.18	0	13885	88359	3	0.405
36	○	3.11	0	15516	102548	3	0.609
40	○	4.14	0	13744	160876	3	0.900
41	○	4.98	0	12436	174421	3	1.066
42	○	5.18	0	8577	119494	3	0.697
43	○	6.28	0	10401	118188	3	0.722
44	○	31.26	0	11979	184543	3	1.091
45	○	4.04	0	13438	148485	3	0.966

表 4.3.5 JASMINE コード解析結果(プール水位 1.5m) (2/6)

ケース 番号	計算状況 ○:計算成功 ×:計算失敗	粒子状デブリ 質量 (kg)	アグロメレー ションデブリ 質量 (kg)	連続層状デブ リ質量 (kg)	未落下分の溶 融物質量 (kg)	拡がり半径 (m)	デブリ堆積高 さ (m)
46	○	4.18	0	13882	146623	3	0.945
47	○	19.94	0	15289	147349	3	0.668
48	×						
50	○	4.26	0	14153	143202	3	0.645
51	○	4.54	0	11270	148139	3	0.623
53	○	3.94	0	9791	54180	3	0.329
57	×						
59	○	5.97	0	8500	118728	3	0.731
60	×						
61	×						
62	○	5.03	0	8312	159251	3	0.843
63	○	3.65	0	12112	92574	3	0.610
65	○	4.01	0	13330	147616	3	0.957
68	○	2.73	0	9039	162277	3	0.944
76	○	2.95	0	14720	113551	3	0.724
77	○	4.10	0	13634	114964	3	0.723
78	○	5.18	0	7313	120114	3	0.708
79	○	3.99	0	13256	154366	3	0.843
80	×						
81	○	6.08	0	12097	157423	3	0.971
82	○	3.94	0	13103	148000	3	0.957
84	○	4.26	0	14142	144196	3	0.637
87	○	3.64	0	12081	51806	3	0.328
93	○	32.31	0	12379	182313	3	1.098
95	○	4.02	0	13366	114850	3	0.712
97	○	5.32	0	8811	117345	3	0.707
98	○	4.96	0	8196	108584	3	0.666
99	○	3.94	0	13092	148432	3	0.959
100	○	25.02	0	12472	168488	3	1.004
101	○	4.26	0	14133	144427	3	0.638

表 4.3.5 JASMINE コード解析結果(プール水位 1.5m) (3/6)

ケース 番号	計算状況 ○:計算成功 ×:計算失敗	粒子状デブリ 質量 (kg)	アグロメレー ションデブリ 質量 (kg)	連続層状デブ リ質量 (kg)	未落下分の溶 融物質量 (kg)	拡がり半径 (m)	デブリ堆積高 さ (m)
102	○	37.54	0	12461	171286	3	1.017
104	○	3.89	0	12925	50973	3	0.328
110	○	42.79	0	11510	182970	3	1.095
112	○	2.92	0	14591	113419	3	0.711
113	○	4.04	0	13435	117153	3	0.726
114	○	4.12	0	13676	115832	3	0.681
116	×						
117	○	4.21	0	13995	50274	3	0.357
118	○	6.97	0	13905	89753	3	0.418
119	○	2.99	0	14904	114802	3	0.708
121	○	3.15	0	10447	53357	3	0.327
127	○	37.98	0	11818	180403	3	1.083
128	○	2.87	0	14326	111552	3	0.612
129	○	5.05	0	12569	115385	3	0.711
130	○	2.89	0	14442	116355	3	0.699
131	○	3.24	0	10770	117916	3	0.732
132	○	6.99	0	11610	117933	3	0.740
133	×						
134	○	4.21	0	13999	50663	3	0.359
135	○	4.81	0	9572	149315	3	0.625
136	○	2.70	0	13489	115440	3	0.742
138	○	5.97	0	11885	51866	3	0.326
142	○	3.71	0	12331	105758	3	0.638
144	○	35.66	0	12245	183275	3	1.102
145	○	4.29	0	8519	116220	3	0.677
146	○	2.87	0	14311	109387	3	0.688
148	○	5.59	0	11123	118459	3	0.738
149	○	2.61	0	13025	115965	3	0.738
150	○	3.86	0	12841	117789	3	0.777
151	○	8.95	0	12757	169212	3	1.009

表 4.3.5 JASMINE コード解析結果(プール水位 1.5m) (4/6)

ケース 番号	計算状況 ○:計算成功 ×:計算失敗	粒子状デブリ 質量 (kg)	アグロメレー ションデブリ 質量 (kg)	連続層状デブ リ質量 (kg)	未落下分の溶 融物質量 (kg)	拡がり半径 (m)	デブリ堆積高 さ (m)
152	○	4.92	0	8111	120178	3	0.654
153	○	4.23	0	14056	114045	3	0.705
155	○	4.72	0	11747	51964	3	0.326
161	○	0.19	0	961	0	1.3109	0.054
165	○	3.47	0	8604	121051	3	0.741
166	○	2.61	0	13056	110511	3	0.717
167	○	3.86	0	12823	116129	3	0.753
168	○	3.85	0	12811	52609	3	0.363
169	○	4.21	0	13985	114304	3	0.724
170	○	4.31	0	14335	115475	3	0.712
172	○	3.47	0	11506	52150	3	0.325
176	○	2.95	0	14713	140139	3	0.838
178	○	21.73	0	12744	181741	3	1.096
179	○	3.62	0	7151	120622	3	0.620
182	○	19.10	0	12698	184010	3	1.123
183	○	3.99	0	13257	107738	3	0.704
184	○	4.13	0	13729	113061	3	0.738
187	○	4.10	0	13632	115798	3	0.709
189	○	3.68	0	12215	51372	3	0.324
192	○	28.96	0	12025	182760	3	0.995
197	○	3.94	0	13070	115680	3	0.626
198	○	44.19	0	12938	176406	3	0.977
199	○	19.90	0	12404	185675	3	1.129
200	○	2.86	0	14248	106764	3	0.709
201	○	39.98	0	11705	178903	3	1.109
203	○	34.36	0	12675	182838	3	1.009
204	○	3.86	0	12828	115516	3	0.707
206	○	4.14	0	10304	53217	3	0.322
209	○	14.48	0	12039	179993	3	0.978
214	○	4.28	0	14224	113200	3	0.618

表 4.3.5 JASMINE コード解析結果(プール水位 1.5m) (5/6)

ケース 番号	計算状況 ○:計算成功 ×:計算失敗	粒子状デブリ 質量 (kg)	アグロメレー ションデブリ 質量 (kg)	連続層状デブ リ質量 (kg)	未落下分の溶 融物質量 (kg)	拡がり半径 (m)	デブリ堆積高 さ (m)
215	○	37.41	0	12418	176977	3	0.970
216	○	45.36	0	12199	186173	3	1.137
217	○	2.81	0	14045	107033	3	0.710
218	○	43.13	0	11924	174690	3	1.087
221	○	4.08	0	13587	117304	3	0.726
226	○	33.38	0	12319	178364	3	0.968
229	○	3.01	0	9991	112359	3	0.622
233	○	43.60	0	12053	187440	3	1.142
234	○	2.78	0	13868	51127	3	0.374
235	○	33.58	0	11946	175116	3	1.090
238	○	22.75	0	12599	118898	3	0.733
240	○	3.68	0	12227	51129	3	0.320
243	○	32.02	0	11817	179083	3	0.966
244	○	5.80	0	14468	51186	3	0.354
246	○	4.24	0	14089	140702	3	0.787
247	○	34.21	0	12170	182485	3	1.103
248	○	4.20	0	13963	110765	3	0.658
249	○	34.83	0	12850	186403	3	1.153
250	○	4.02	0	13371	171518	3	1.074
251	○	3.98	0	13263	173527	3	1.074
252	○	37.23	0	11961	175627	3	1.094
253	○	4.10	0	13619	52520	3	0.344
255	○	4.15	0	13821	172677	3	1.047
257	○	5.44	0	10825	52441	3	0.318
261	○	4.13	0	13736	134232	3	0.792
263	○	4.42	0	14692	139931	3	0.786
265	○	3.80	0	12625	113706	3	0.666
266	○	3.97	0	13213	186103	3	1.158
267	○	3.74	0	9305	175334	3	1.077
268	○	2.82	0	14082	50696	3	0.373

表 4.3.5 JASMINE コード解析結果(プール水位 1.5m) (6/6)

ケース 番号	計算状況 ○:計算成功 ×:計算失敗	粒子状デブリ 質量 (kg)	アグロメレー ションデブリ 質量 (kg)	連続層状デブ リ質量 (kg)	未落下分の溶 融物質量 (kg)	拡がり半径 (m)	デブリ堆積高 さ (m)
269	○	37.92	0	11441	180099	3	1.110
270	○	39.31	0	13051	187262	3	1.091
272	○	35.87	0	11907	189694	3	1.135

表 4.3.6 JASMINE コード解析結果(プール水位 2.0m) (1/6)

ケース	計算状況 ○:計算成功 ×:計算失敗	粒子状デブリ 質量 (kg)	アグロメレー ションデブリ 質量 (kg)	連続層状デブ リ質量 (kg)	未落下分の溶 融物質量 (kg)	拡がり半径 (m)	デブリ堆積高 さ (m)
2	○	4.62	0	15384	173241	3	0.761
6	○	4.84	0	12081	172295	3	1.055
8	○	5.50	0	13714	114376	3	0.706
9	○	6.51	0	12976	115436	3	0.722
10	×						
11	○	5.18	0	12914	148383	3	0.962
12	○	8.88	0	14743	144804	3	0.585
14	○	3.86	0	12836	146585	3	0.947
15	○	5.21	0	12981	154301	3	0.928
16	○	11.55	0	14366	142457	3	0.631
17	○	7.24	0	14429	143295	3	0.644
19	○	5.52	0	13759	104123	3	0.611
23	×						
24	○	5.04	0	12550	157917	3	0.976
25	○	5.29	0	13189	115237	3	0.708
26	○	5.23	0	13042	115253	3	0.721
27	○	5.26	0	13133	169216	3	1.012
28	○	5.13	0	12803	148556	3	0.963
29	○	9.28	0	11542	92550	3	0.601
31	○	6.29	0	12537	147245	3	0.950
32	×						
33	○	8.85	0	14694	142293	3	0.632
34	○	7.29	0	14524	87717	3	0.405
36	○	4.21	0	13988	104075	3	0.609
40	○	7.72	0	12825	161790	3	0.900
41	○	5.17	0	12896	173960	3	1.066
42	○	8.30	0	10313	117755	3	0.697
43	○	6.07	0	12074	116515	3	0.722
44	○	10.15	0	12671	183873	3	1.091
45	○	5.06	0	12611	149311	3	0.966

表 4.3.6 JASMINE コード解析結果(プール水位 2.0m) (2/6)

ケース 番号	計算状況 ○:計算成功 ×:計算失敗	粒子状デブリ 質量 (kg)	アグロメレー ションデブリ 質量 (kg)	連続層状デブ リ質量 (kg)	未落下分の溶 融物質量 (kg)	拡がり半径 (m)	デブリ堆積高 さ (m)
46	○	7.73	0	12847	147654	3	0.945
47	○	7.39	0	14746	147904	3	0.668
48	○	7.56	0	12563	148494	3	0.958
50	○	7.27	0	14488	142865	3	0.645
51	○	9.71	0	12057	147346	3	0.623
53	○	9.19	0	13081	50885	3	0.329
57	×						
59	○	9.07	0	9044	118180	3	0.731
60	×						
61	○	5.31	0	13247	157534	3	0.950
62	○	9.40	0	9316	158243	3	0.843
63	○	9.41	0	11714	92967	3	0.610
65	○	7.62	0	12650	148293	3	0.957
68	○	7.33	0	12149	159162	3	0.944
76	○	5.31	0	13230	115039	3	0.724
77	○	6.50	0	12950	115646	3	0.723
78	○	8.18	0	9001	118423	3	0.708
79	○	6.65	0	13256	154363	3	0.843
80	○	7.76	0	12896	113635	3	0.709
81	○	5.14	0	12788	156733	3	0.971
82	○	8.76	0	12462	148636	3	0.957
84	○	10.44	0	14850	143481	3	0.637
87	○	7.97	0	13231	50652	3	0.328
93	○	5.11	0	12760	181959	3	1.098
95	○	5.21	0	13006	115209	3	0.712
97	○	6.19	0	10262	115892	3	0.707
98	○	6.34	0	10497	106282	3	0.666
99	○	7.50	0	12451	149069	3	0.959
100	×						
101	○	7.44	0	14823	143734	3	0.638

表 4.3.6 JASMINE コード解析結果(プール水位 2.0m) (3/6)

ケース 番号	計算状況 ○:計算成功 ×:計算失敗	粒子状デブリ 質量 (kg)	アグロメレー ションデブリ 質量 (kg)	連続層状デブ リ質量 (kg)	未落下分の溶 融物質量 (kg)	拡がり半径 (m)	デブリ堆積高 さ (m)
102	○	5.27	0	13157	170622	3	1.017
104	○	9.23	0	13131	50761	3	0.328
110	○	20.06	0	12509	181994	3	1.095
112	○	6.50	0	12965	115042	3	0.711
113	○	6.40	0	12757	117829	3	0.726
114	○	6.55	0	13055	116451	3	0.681
116	×						
117	○	6.43	0	12834	51433	3	0.357
118	○	11.19	0	13938	89716	3	0.418
119	○	6.62	0	13215	116487	3	0.708
121	○	7.48	0	12420	51379	3	0.327
127	○	7.62	0	12675	179576	3	1.083
128	○	4.12	0	13700	112177	3	0.612
129	○	7.66	0	12709	115242	3	0.711
130	○	5.20	0	12977	117818	3	0.699
131	○	6.43	0	12819	115864	3	0.732
132	○	4.36	0	781	128765	3	0.740
133	×						
134	○	6.36	0	12682	51978	3	0.359
135	○	8.40	0	10443	148440	3	0.625
136	○	5.15	0	12860	116065	3	0.742
138	○	7.42	0	12317	51433	3	0.326
142	○	8.46	0	12037	106048	3	0.638
144	○	6.23	0	12443	183107	3	1.102
145	○	9.62	0	10625	114109	3	0.677
146	○	5.18	0	12931	110765	3	0.688
148	○	7.62	0	12650	116929	3	0.738
149	○	5.17	0	12902	116085	3	0.738
150	○	5.07	0	12645	117984	3	0.777
151	○	3.92	0	13032	168942	3	1.009

表 4.3.6 JASMINE コード解析結果(プール水位 2.0m) (4/6)

ケース 番号	計算状況 ○:計算成功 ×:計算失敗	粒子状デブリ 質量 (kg)	アグロメレー ションデブリ 質量 (kg)	連続層状デブ リ質量 (kg)	未落下分の溶 融物質量 (kg)	拡がり半径 (m)	デブリ堆積高 さ (m)
152	○	9.93	0	9850	118434	3	0.654
153	○	7.73	0	12843	115254	3	0.705
155	○	9.89	0	12307	51399	3	0.326
161	○	0.29	0	977	0	1.5076	0.022
165	○	6.42	0	10644	119008	3	0.741
166	○	5.16	0	12869	110695	3	0.717
167	○	7.63	0	12670	116277	3	0.753
168	○	4.99	0	12457	52962	3	0.363
169	○	7.72	0	12832	115453	3	0.724
170	○	5.18	0	12919	116890	3	0.712
172	○	5.12	0	12755	50899	3	0.325
176	○	5.32	0	13277	141572	3	0.838
178	○	5.02	0	12538	181963	3	1.096
179	○	7.90	0	8691	119077	3	0.620
182	○	5.07	0	12664	184058	3	1.123
183	○	7.62	0	12663	108328	3	0.704
184	○	3.85	0	12810	113980	3	0.738
187	○	5.17	0	12905	116524	3	0.709
189	○	7.62	0	12655	50928	3	0.323
192	○	3.71	0	12366	182444	3	0.995
197	○	6.84	0	13622	115125	3	0.625
198	○	6.51	0	13001	176380	3	0.977
199	○	5.03	0	12548	185546	3	1.129
200	○	6.53	0	13036	107973	3	0.709
201	○	4.94	0	12340	178303	3	1.109
203	○	5.23	0	13064	182478	3	1.009
204	○	7.75	0	12865	115474	3	0.707
206	○	4.99	0	12422	51099	3	0.322
209	○	4.99	0	12453	179588	3	0.978
214	○	6.88	0	13708	113714	3	0.618

表 4.3.6 JASMINE コード解析結果(プール水位 2.0m) (5/6)

ケース 番号	計算状況 ○:計算成功 ×:計算失敗	粒子状デブリ 質量 (kg)	アグロメレー ションデブリ 質量 (kg)	連続層状デブ リ質量 (kg)	未落下分の溶 融物質量 (kg)	拡がり半径 (m)	デブリ堆積高 さ (m)
215	○	5.24	0	13089	176338	3	0.970
216	○	4.99	0	12468	185945	3	1.137
217	○	5.15	0	12840	108236	3	0.710
218	○	3.77	0	12550	174104	3	1.087
221	○	5.16	0	12874	118016	3	0.726
226	○	5.00	0	12489	178222	3	0.968
229	○	6.56	0	13058	109288	3	0.622
233	○	4.89	0	12212	187320	3	1.142
234	○	3.92	0	13048	51946	3	0.374
235	○	26.31	0	12492	174577	3	1.090
238	○	5.12	0	12783	118730	3	0.733
240	○	8.99	0	12785	50567	3	0.320
243	×						
244	○	5.25	0	13080	52574	3	0.354
246	○	6.67	0	13306	141482	3	0.787
247	○	588.28	6.609879527	8835	185260	3	1.100
248	○	8.09	0	13435	111289	3	0.658
249	○	5.14	0	12832	186450	3	1.153
250	○	8.70	0	12380	172505	3	1.074
251	○	5.22	0	13032	173757	3	1.074
252	○	7.52	0	12511	175107	3	1.094
253	○	6.48	0	12918	53219	3	0.344
255	○	5.14	0	12814	173683	3	1.047
257	○	7.49	0	12426	50838	3	0.318
261	○	5.27	0	13126	134840	3	0.792
263	○	5.39	0	13434	141189	3	0.786
265	○	6.71	0	13357	112972	3	0.666
266	○	5.27	0	13144	186171	3	1.158
267	○	9.42	0	11722	172912	3	1.077
268	○	5.24	0	13062	51714	3	0.373

表 4.3.6 JASMINE コード解析結果(プール水位 2.0m) (6/6)

ケース 番号	計算状況 ○:計算成功 ×:計算失敗	粒子状デブリ 質量 (kg)	アグロメレー ションデブリ 質量 (kg)	連続層状デブ リ質量 (kg)	未落下分の溶 融物質量 (kg)	拡がり半径 (m)	デブリ堆積高 さ (m)
269	○	37.39	0	12015	179526	3	1.110
270	○	3.94	0	13115	187233	3	1.091
272	○	6.32	0	12622	189009	3	1.136

4.3.3 冷却の成功・失敗判定

4.3.2ではJASMINE計算の結果から、デブリは円筒形を仮定して堆積高さが求められた。デブリは発熱体であるため、高くなるほど総発熱量が増大し、やがて下面(コンクリートとの界面)温度がコンクリート溶融浸食温度(MCCI 開始温度)に到達する。この時の高さをデブリ冷却が可能な最大堆積高さとする。円筒形に堆積した溶融炉心デブリの冷却は、主に上面における水との熱交換により行われる。ここでは、円筒側面における伝熱を無視し、鉛直方向の1次元問題として冷却可能な最大堆積高さを求めた。求める方法は付録Bにまとめた。

表4.3.7に評価に用いた変数の値を示す。また、デブリ崩壊熱及び浸水層崩壊熱に関しては100(W/kg)に UO_2 の重量比(wt%)を乗算した値を用いた。

各ケースの崩壊熱の一覧を表4.3.8に示した。表4.3.9から4.3.11にプール水位ごとの各ケースのデブリ堆積高さとデブリ冷却可能な最大堆積高さをまとめ、冷却成功判定結果を示した。

表 4.3.7 デブリ冷却が可能な最大堆積高さ評価に用いたパラメーター一覧

変数	説明	値
λ	デブリ熱伝導率(固相) [W/m·K]	表 4.3.3 に記載
ρ	デブリ密度(固相) [kg/m ³]	表 4.3.3 に記載
Q_d	デブリ崩壊熱 [W/kg]	表 4.3.8 に記載
Q_w	浸水層崩壊熱 [W/kg]	表 4.3.8 表 に記載
T_{sat}	水飽和温度 [K] ※0.5MPa を仮定	424.986
T_{abl}	コンクリート溶融浸食温度 [K]	1600
q_{dry}	ドライアウト熱流束 [W/m ²]	350000
T_{melt}	デブリ融点 [K]	表 4.3.3 に記載

表 4.3.8 デブリ崩壊熱一覧 (1/5)

case	UO ₂ (wt%)	Decay heat (W/kg)
2	0.0727	7.2689
6	0.0137	1.3664
8	0.0346	3.4555
9	0.021	2.0965
10	0.02	2.0024
11	0	0
12	0.3836	38.361
14	0	0
15	0.0213	2.1331
16	0.3225	32.252
17	0.3128	31.284
19	0.0728	7.2812
23	0.021	2.095
24	0.0119	1.1869
25	0.0343	3.4312
26	0.021	2.1027
27	0.0201	2.0138
28	0	0
29	0.4077	40.7733
31	0	0
32	0.0213	2.1335
33	0.323	32.2959
34	0.3342	33.4156
36	0.0743	7.428
40	0.0218	2.1787
41	0.0122	1.2232
42	0.0314	3.1428
43	0.0212	2.124
44	0.02	1.9973
45	0	0

表 4.3.8 デブリ崩壊熱一覧 (2/5)

case	UO ₂ (wt%)	Decay heat (W/kg)
46	0.4125	41.2475
47	0.3093	30.9343
48	0	0
51	0.3436	34.3557
53	0.0759	7.5865
57	0.0234	2.3426
59	0.0102	1.0223
60	0.0210	2.1047
61	0.0203	2.0255
62	0.1769	17.6898
63	0.4106	41.0639
65	0.0000	0.0000
68	0.0201	2.0075
76	0.0087	0.8709
77	0.0208	2.0772
78	0.0208	2.0762
79	0.1764	17.6404
80	0.0221	2.2113
81	0.0049	0.4882
82	0.0000	0.0000
84	0.3236	32.3628
87	0.0790	7.8976
93	0.0084	0.8420
95	0.0207	2.0732
97	0.0219	2.1937
98	0.0198	1.9825
99	0.0000	0.0000
100	0.0213	2.1325
101	0.3228	32.2844
102	0.0222	2.2154

表 4.3.8 デブリ崩壊熱一覧 (3/5)

case	UO ₂ (wt%)	Decay heat (W/kg)
104	0.0805	8.0509
110	0.0085	0.8506
112	0.0206	2.0649
113	0.0147	1.4689
114	0.0858	8.5806
116	0	0
118	0.322	32.1969
119	0.0254	2.5424
121	0.0819	8.1907
127	0.0084	0.8448
128	0.1267	12.6749
129	0.0205	2.0547
130	0.0817	8.167
131	0.0151	1.514
132	0.0198	1.9756
133	0.0004	0.0434
134	0.0213	2.1319
135	0.3393	33.9272
136	0.0102	1.0223
138	0.083	8.2994
142	0.0305	3.0495
144	0.0084	0.8448
145	0.0245	2.4515
146	0.0204	2.0416
148	0.0144	1.4407
149	0.0188	1.884
150	0	0
151	0.0213	2.1317
152	0.0871	8.7112
153	0.0229	2.2927

表 4.3.8 デブリ崩壊熱一覧 (4/5)

case	UO ₂ (wt%)	Decay heat (W/kg)
155	0.0842	8.4154
161	0.0084	0.8448
165	0.0131	1.3137
166	0.0145	1.4543
167	0.0036	0.3622
168	0.0213	2.1316
169	0.014	1.3991
170	0.0222	2.2203
172	0.0857	8.5687
178	0.0084	0.8447
179	0.1319	13.1927
182	0.003	0.2966
183	0.0141	1.4101
184	0.0036	0.362
187	0.02	1.9986
189	0.0873	8.732
192	0.0863	8.6252
197	0.1214	12.1386
198	0.0976	9.7633
199	0.0038	0.3798
200	0.0142	1.4242
201	0.0036	0.3606
203	0.0878	8.7788
204	0.0172	1.7202
206	0.0891	8.9101
209	0.0895	8.9462
214	0.11	11.001
215	0.1051	10.5062
216	0	0
217	0.014	1.4048

表 4.3.8 デブリ崩壊熱一覧 (5/5)

case	UO ₂ (wt%)	Decay heat (W/kg)
218	0.0055	0.5548
221	0.0176	1.7642
226	0.0927	9.2664
229	0.105	10.5024
233	0	0
234	0.0127	1.2738
235	0.0056	0.5556
238	0.0159	1.592
240	0.0931	9.3127
243	0.096	9.5955
244	0.0212	2.1224
246	0.1053	10.529
248	0.0248	2.4832
249	0.011	1.1041
250	0	0
251	0.0127	1.2706
252	0.0055	0.5489
253	0.075	7.4964
255	0.0139	1.3856
257	0.0953	9.5312
261	0.0237	2.3717
263	0.1059	10.5883
265	0.0247	2.4683
266	0.0099	0.9918
267	0	0
268	0.0127	1.2669
269	0.005	0.4992
270	0.0288	2.8772
272	0.0128	1.2756

表 4.3.9 デブリ冷却が可能な最大堆積高さ評価結果 (プール水位 1.0m) (1/5)

case	Debris height (m)	Coolable debris height	Coolable
2	0.761	6.054	○
6	1.055	42.823	○
8	-	-	-
9	0.722	27.651	○
10	-	-	-
11	0.962	> 1e+10	○
12	0.585	1.155	○
14	0.947	> 1e+10	○
15	0.928	26.875	○
16	0.631	1.515	○
17	0.644	1.570	○
19	0.611	7.571	○
23	-	-	-
24	0.976	49.339	○
25	0.708	16.744	○
26	0.721	27.568	○
27	1.012	28.415	○
28	0.963	> 1e+10	○
29	0.601	1.655	○
31	0.950	> 1e+10	○
32	0.034	26.890	○
33	0.632	1.512	○
34	0.405	1.424	○
36	0.609	7.388	○
40	0.900	26.516	○
41	1.066	47.748	○
42	0.697	17.998	○
43	0.722	27.288	○
44	1.091	28.658	○
45	0.966	> 1e+10	○
46	0.945	1.679	○
47	0.668	1.599	○

表 4.3.9 デブリ冷却が可能な最大堆積高さ評価結果 (プール水位 1.0m) (2/5)

case	Debris height (m)	Coolable debris height	Coolable
48	0.958	> 1e+10	○
50	0.645	1.603	○
51	0.623	1.368	○
53	0.329	7.231	○
57	-	-	-
59	0.731	57.286	○
60	-	-	-
61	0.950	28.304	○
62	0.843	3.197	○
63	0.610	1.662	○
65	0.957	> 1e+10	○
68	0.944	28.364	○
76	0.724	65.899	○
77	0.723	27.909	○
78	0.708	27.621	○
79	0.843	3.206	○
80	0.709	26.142	○
81	0.971	118.760	○
82	0.957	> 1e+10	○
84	0.637	1.509	○
87	0.328	6.938	○
93	1.098	68.238	○
95	0.712	27.661	○
97	0.707	26.364	○
98	0.666	29.632	○
99	0.959	> 1e+10	○
100	1.004	26.884	○
101	0.638	1.514	○
102	1.017	25.821	○
104	0.328	6.802	○
110	1.095	67.486	○
112	0.711	27.775	○

表 4.3.9 デブリ冷却が可能な最大堆積高さ評価結果 (プール水位 1.0m) (3/5)

case	Debris height (m)	Coolable debris height	Coolable
113	0.726	40.232	○
114	0.681	6.595	○
116	0.150	> 1e+10	○
117	0.357	26.884	○
118	0.418	1.521	○
119	0.708	22.226	○
121	0.327	6.681	○
127	1.083	68.003	○
128	0.612	4.220	○
129	0.711	27.918	○
130	0.699	7.042	○
131	0.732	38.504	○
132	0.740	29.748	○
133	0.143	1361.329	○
134	0.359	26.883	○
135	0.625	1.395	○
136	0.742	57.417	○
138	0.326	6.589	○
142	0.638	18.386	○
144	1.102	68.003	○
145	0.677	22.914	○
146	0.688	28.102	○
148	0.738	40.508	○
149	0.738	31.244	○
150	0.777	> 1e+10	○
151	1.009	26.885	○
152	0.654	6.311	○
153	0.705	24.815	○
155	0.326	6.492	○
161	0.061	68.002	○
165	0.741	44.480	○
166	0.717	40.869	○

表 4.3.9 デブリ冷却が可能な最大堆積高さ評価結果 (プール水位 1.0m) (4/5)

case	Debris height (m)	Coolable debris height	Coolable
167	0.753	162.645	○
168	0.363	26.884	○
169	0.724	41.385	○
170	0.712	25.553	○
172	0.325	6.366	○
176	0.838	18.503	○
178	1.096	68.010	○
179	0.620	4.055	○
182	1.123	194.002	○
183	0.704	42.229	○
184	0.738	162.224	○
187	0.709	28.341	○
189	0.324	6.237	○
192	0.995	6.290	○
197	0.626	4.420	○
198	0.977	5.727	○
199	1.129	151.551	○
200	0.709	42.104	○
201	1.109	162.788	○
203	1.009	6.345	○
204	0.707	33.005	○
206	0.322	6.101	○
209	0.978	6.055	○
214	0.618	4.854	○
215	0.970	5.302	○
216	1.137	> 1e+10	○
217	0.710	42.725	○
218	1.087	106.304	○
221	0.726	32.374	○
226	0.968	5.836	○
229	0.622	5.298	○
233	1.142	> 1e+10	○

表 4.3.9 デブリ冷却が可能な最大堆積高さ評価結果 (プール水位 1.0m) (5/5)

case	Debris height (m)	Coolable debris height	Coolable
234	0.374	46.130	○
235	1.090	106.180	○
238	0.733	36.011	○
240	0.320	5.833	○
243	0.967	5.627	○
244	0.354	26.270	○
246	0.787	5.283	○
247	1.103	1.380	○
248	0.658	22.144	○
249	1.153	53.469	○
250	1.074	> 1e+10	○
251	1.074	46.260	○
252	1.094	107.575	○
253	0.344	7.436	○
255	1.046	41.581	○
257	0.318	5.669	○
261	0.792	23.407	○
263	0.786	5.251	○
265	0.666	22.266	○
266	1.158	59.678	○
267	1.077	> 1e+10	○
268	0.373	46.408	○
269	1.111	117.761	○
270	1.091	19.638	○
272	1.136	45.230	○

表 4.3.10 デブリ冷却が可能な最大堆積高さ評価結果 (プール水位 1.5m) (1/5)

case	Debris height (m)	Coolable debris height	Coolable
2	0.761	6.054	○
6	1.055	42.823	○
8	-	-	-
9	0.722	27.651	○
10	-	-	-
11	0.962	> 1e+10	○
12	0.585	1.155	○
14	0.947	> 1e+10	○
15	0.928	26.875	○
16	0.631	1.515	○
17	0.644	1.570	○
19	0.611	7.571	○
23	-	-	-
24	0.976	49.339	○
25	0.708	16.744	○
26	0.721	27.568	○
27	1.012	28.415	○
28	0.963	> 1e+10	○
29	0.601	1.655	○
31	0.950	> 1e+10	○
32	-	-	-
33	0.632	1.512	○
34	0.405	1.424	○
36	0.609	7.388	○
40	0.900	26.516	○
41	1.066	47.748	○
42	0.697	17.998	○
43	0.722	27.288	○
44	1.091	28.658	○
45	0.966	> 1e+10	○
46	0.945	1.679	○
47	0.668	1.599	○

表 4.3.10 デブリ冷却が可能な最大堆積高さ評価結果 (プール水位 1.5m) (2/5)

case	Debris height (m)	Coolable debris height	Coolable
48	-	-	-
50	0.645	1.603	○
51	0.623	1.368	○
53	0.329	7.231	○
57	-	-	-
59	0.731	57.286	○
60	-	-	-
61	-	-	-
62	0.843	3.197	○
63	0.610	1.662	○
65	0.957	> 1e+10	○
68	0.944	28.364	○
76	0.724	65.899	○
77	0.723	27.909	○
78	0.708	27.621	○
79	0.843	3.206	○
80	-	-	-
81	0.971	118.760	○
82	0.957	> 1e+10	○
84	0.637	1.509	○
87	0.328	6.938	○
93	1.098	68.238	○
95	0.712	27.661	○
97	0.707	26.364	○
98	0.666	29.632	○
99	0.959	> 1e+10	○
100	1.004	26.884	○
101	0.638	1.514	○
102	1.017	25.821	○
104	0.328	6.802	○
110	1.095	67.486	○
112	0.711	27.775	○

表 4.3.10 デブリ冷却が可能な最大堆積高さ評価結果 (プール水位 1.5m) (3/5)

case	Debris height (m)	Coolable debris height	Coolable
113	0.726	40.232	○
114	0.681	6.595	○
116	-	-	-
117	0.357	26.884	○
118	0.418	1.521	○
119	0.708	22.226	○
121	0.327	6.681	○
127	1.083	68.003	○
128	0.612	4.220	○
129	0.711	27.918	○
130	0.699	7.042	○
131	0.732	38.504	○
132	0.740	29.748	○
133	-	-	-
134	0.359	26.883	○
135	0.625	1.395	○
136	0.742	57.417	○
138	0.326	6.589	○
142	0.638	18.386	○
144	1.102	68.003	○
145	0.677	22.914	○
146	0.688	28.102	○
148	0.738	40.508	○
149	0.738	31.244	○
150	0.777	> 1e+10	○
151	1.009	26.885	○
152	0.654	6.311	○
153	0.705	24.815	○
155	0.326	6.492	○
161	0.054	68.002	○
165	0.741	44.480	○
166	0.717	40.869	○

表 4.3.10 デブリ冷却が可能な最大堆積高さ評価結果 (プール水位 1.5m) (4/5)

case	Debris height (m)	Coolable debris height	Coolable
167	0.753	162.645	○
168	0.363	26.884	○
169	0.724	41.385	○
170	0.712	25.553	○
172	0.325	6.366	○
176	0.838	18.503	○
178	1.096	68.010	○
179	0.620	4.055	○
182	1.123	194.002	○
183	0.704	42.229	○
184	0.738	162.224	○
187	0.709	28.341	○
189	0.324	6.237	○
192	0.995	6.290	○
197	0.626	4.420	○
198	0.977	5.727	○
199	1.129	151.551	○
200	0.709	42.104	○
201	1.109	162.788	○
203	1.009	6.345	○
204	0.707	33.005	○
206	0.322	6.101	○
209	0.978	6.055	○
214	0.618	4.854	○
215	0.970	5.302	○
216	1.137	> 1e+10	○
217	0.710	42.725	○
218	1.087	106.304	○
221	0.726	32.374	○
226	0.968	5.836	○
229	0.622	5.298	○
233	1.142	> 1e+10	○

表 4.3.10 デブリ冷却が可能な最大堆積高さ評価結果 (プール水位 1.5m) (5/5)

case	Debris height (m)	Coolable debris height	Coolable
234	0.374	46.130	○
235	1.090	106.180	○
238	0.733	36.011	○
240	0.320	5.833	○
243	0.966	5.627	○
244	0.354	26.270	○
246	0.787	5.283	○
247	1.103	1.380	○
248	0.658	22.144	○
249	1.153	53.469	○
250	1.074	> 1e+10	○
251	1.074	46.260	○
252	1.094	107.575	○
253	0.344	7.436	○
255	1.047	41.581	○
257	0.318	5.669	○
261	0.792	23.407	○
263	0.786	5.251	○
265	0.666	22.266	○
266	1.158	59.678	○
267	1.077	> 1e+10	○
268	0.373	46.408	○
269	1.110	117.761	○
270	1.091	19.638	○
272	1.135	45.230	○

表 4.3.11 デブリ冷却が可能な最大堆積高さ評価結果 (プール水位 2.0m) (1/5)

case	Debris height (m)	Coolable debris height	Coolable
2	0.761	6.054	○
6	1.055	42.823	○
8	0.706	16.624	○
9	0.722	27.651	○
10	-	-	-
11	0.962	> 1e+10	○
12	0.585	1.155	○
14	0.947	> 1e+10	○
15	0.928	26.875	○
16	0.631	1.515	○
17	0.644	1.570	○
19	0.611	7.571	○
23	-	-	-
24	0.976	49.339	○
25	0.708	16.744	○
26	0.721	27.568	○
27	1.012	28.415	○
28	0.963	> 1e+10	○
29	0.601	1.655	○
31	0.950	> 1e+10	○
32	-	-	-
33	0.632	1.512	○
34	0.405	1.424	○
36	0.609	7.388	○
40	0.900	26.516	○
41	1.066	47.748	○
42	0.697	17.998	○
43	0.722	27.288	○
44	1.091	28.658	○
45	0.966	> 1e+10	○
46	0.945	1.679	○
47	0.668	1.599	○

表 4.3.11 デブリ冷却が可能な最大堆積高さ評価結果 (プール水位 2.0m) (2/5)

case	Debris height (m)	Coolable debris height	Coolable
48	0.958	> 1e+10	○
50	0.645	1.603	○
51	0.623	1.368	○
53	0.329	7.231	○
57	-	-	-
59	0.731	57.286	○
60	-	-	-
61	0.950	28.304	○
62	0.843	3.197	○
63	0.610	1.662	○
65	0.957	> 1e+10	○
68	0.944	28.364	○
76	0.724	65.899	○
77	0.723	27.909	○
78	0.708	27.621	○
79	0.843	3.206	○
80	0.709	26.142	○
81	0.971	118.760	○
82	0.957	> 1e+10	○
84	0.637	1.509	○
87	0.328	6.938	○
93	1.098	68.238	○
95	0.712	27.661	○
97	0.707	26.364	○
98	0.666	29.632	○
99	0.959	> 1e+10	○
100	-	-	-
101	0.638	1.514	○
102	1.017	25.821	○
104	0.328	6.802	○
110	1.095	67.486	○
112	0.711	27.775	○

表 4.3.11 デブリ冷却が可能な最大堆積高さ評価結果 (プール水位 2.0m) (3/5)

case	Debris height (m)	Coolable debris height	Coolable
113	0.726	40.232	○
114	0.681	6.595	○
116	-	-	-
117	0.357	26.884	○
118	0.418	1.521	○
119	0.708	22.226	○
121	0.327	6.681	○
127	1.083	68.003	○
128	0.612	4.220	○
129	0.711	27.918	○
130	0.699	7.042	○
131	0.732	38.504	○
132	0.740	29.748	○
133	-	-	-
134	0.359	26.883	○
135	0.625	1.395	○
136	0.742	57.417	○
138	0.326	6.589	○
142	0.638	18.386	○
144	1.102	68.003	○
145	0.677	22.914	○
146	0.688	28.102	○
148	0.738	40.508	○
149	0.738	31.244	○
150	0.777	> 1e+10	○
151	1.009	26.885	○
152	0.654	6.311	○
153	0.705	24.815	○
155	0.326	6.492	○
161	0.022	68.002	○
165	0.741	44.480	○
166	0.717	40.869	○

表 4.3.11 デブリ冷却が可能な最大堆積高さ評価結果 (プール水位 2.0m) (4/5)

case	Debris height (m)	Coolable debris height	Coolable
167	0.753	162.645	○
168	0.363	26.884	○
169	0.724	41.385	○
170	0.712	25.553	○
172	0.325	6.366	○
176	0.838	18.503	○
178	1.096	68.010	○
179	0.620	4.055	○
182	1.123	194.002	○
183	0.704	42.229	○
184	0.738	162.224	○
187	0.709	28.341	○
189	0.323	6.237	○
192	0.995	6.290	○
197	0.625	4.420	○
198	0.977	5.727	○
199	1.129	151.551	○
200	0.709	42.104	○
201	1.109	162.788	○
203	1.009	6.345	○
204	0.707	33.005	○
206	0.322	6.101	○
209	0.978	6.055	○
214	0.618	4.854	○
215	0.970	5.302	○
216	1.137	> 1e+10	○
217	0.710	42.725	○
218	1.087	106.304	○
221	0.726	32.374	○
226	0.968	5.836	○
229	0.622	5.298	○
233	1.142	> 1e+10	○

表 4.3.11 デブリ冷却が可能な最大堆積高さ評価結果 (プール水位 2.0m) (3/5)

case	Debris height (m)	Coolable debris height	Coolable
234	0.374	46.130	○
235	1.090	106.180	○
238	0.733	36.011	○
240	0.320	5.833	○
243	-	-	-
244	0.354	26.270	○
246	0.787	5.283	○
247	1.100	1.380	○
248	0.658	22.144	○
249	1.153	53.469	○
250	1.074	> 1e+10	○
251	1.074	46.260	○
252	1.094	107.575	○
253	0.344	7.436	○
255	1.047	41.581	○
257	0.318	5.669	○
261	0.792	23.407	○
263	0.786	5.251	○
265	0.666	22.266	○
266	1.158	59.678	○
267	1.077	> 1e+10	○
268	0.373	46.408	○
269	1.110	117.761	○
270	1.091	19.638	○
272	1.136	45.230	○

4.3.4 冷却成功確率評価

4.3.3 での結果として、デブリ堆積高さ（Coolable debris height）から溶融炉心冷却成功・失敗の判定を行った。結果を集計して冷却成功確率の評価を行った。

図 4.3.1 に、プール水位 1.0m の場合のデブリ堆積高さのヒストグラムおよび確率密度分布を示した。また、図 4.3.1 を作成する際に使用した度数および確率密度を表 4.3.1 に載せた。同様に、プール水位 1.5m、2.0m の場合のデブリ堆積高さのヒストグラムおよび確率密度分布と度数を図 4.3.2 及び 4.3.3、確率密度を表 4.3.2 及び 4.3.3 にそれぞれ示す。どのプール水位の場合でもほぼすべてのケースで溶融物は系の端まで到達しているためデブリ堆積高さは溶融物落下量で決まり、確率密度分布にはほとんど差は見られない。

JASMINE コードの計算結果が得られたケースのうちデブリ堆積高さが冷却可能な最大堆積高さを下回ったケース数の割合を求めることにより溶融炉心冷却成功確率 P を求めた結果は 3 ケースとも

$$P = 1.0$$

となり全ケースで冷却成功となった。

以上から、今回解析を行ったパラメータの範囲では、溶融炉心冷却確率への影響はほとんどなかった。

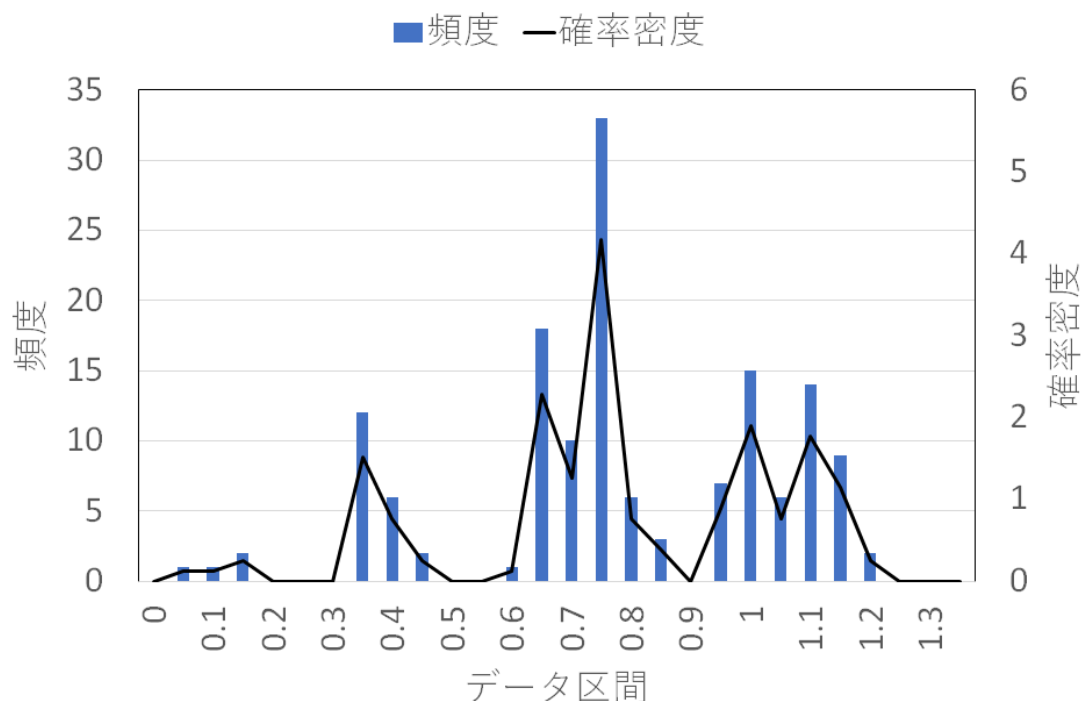


図 4.3.1 デブリ堆積高さのヒストグラム・確率密度分布（プール水位 1.0m）

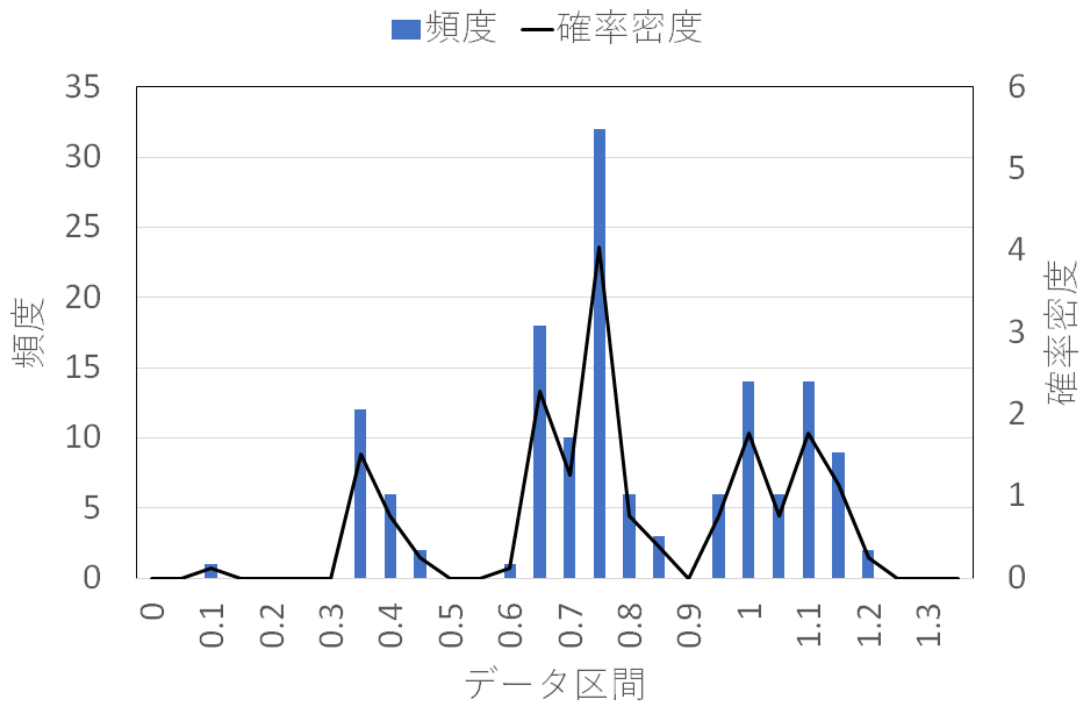


図 4.3.2 デブリ堆積高さのヒストグラム・確率密度分布 (プール水位 1.5m)

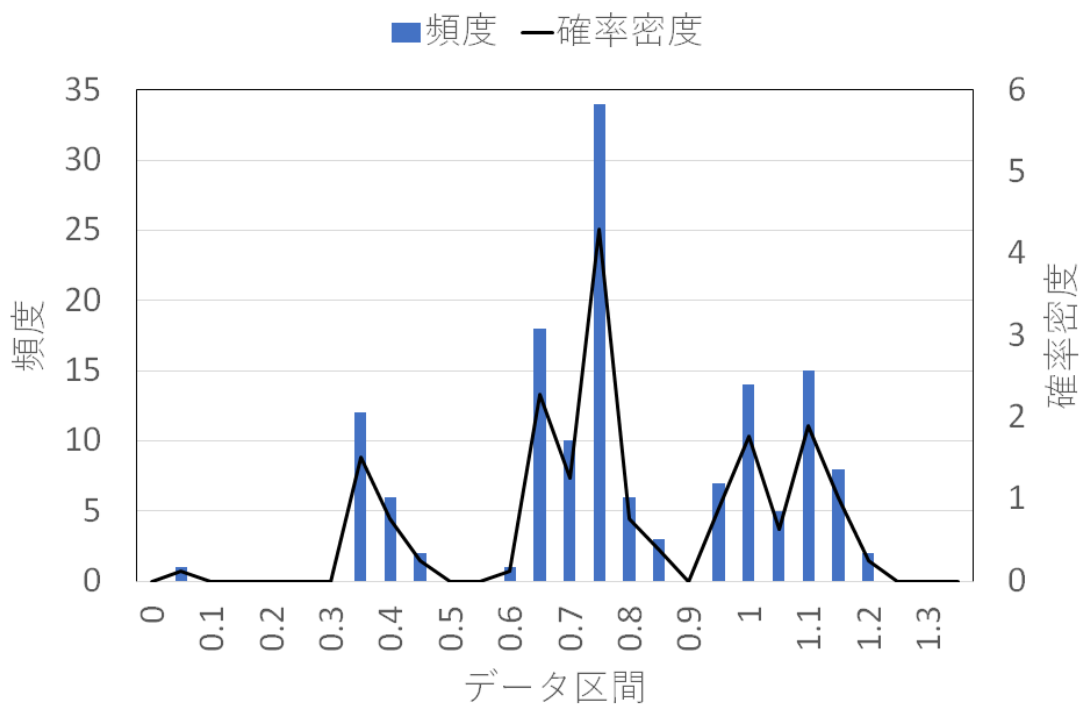


図 4.3.3 デブリ堆積高さのヒストグラム・確率密度分布 (プール水位 2.0m)

表 4.3.1 デブリ堆積高さ
の度数分布・確率密度分布
表（プール水位 1.0m）

区間 [m]	度数	確率密度
0 - 0.05	0	0.00
0.05 - 0.1	1	0.13
0.1 - 0.15	1	0.13
0.15 - 0.2	2	0.25
0.2 - 0.25	0	0.00
0.25 - 0.3	0	0.00
0.3 - 0.35	0	0.00
0.35 - 0.4	12	1.52
0.4 - 0.45	6	0.76
0.45 - 0.5	2	0.25
0.5 - 0.55	0	0.00
0.55 - 0.6	0	0.00
0.6 - 0.65	1	0.13
0.65 - 0.7	18	2.28
0.7 - 0.75	10	1.27
0.75 - 0.8	33	4.18
0.8 - 0.85	6	0.76
0.85 - 0.9	3	0.38
0.9 - 0.95	0	0.00
0.95 - 1.0	7	0.89
1.0 - 1.05	15	1.90
1.05 - 1.1	6	0.76
1.1 - 1.15	14	1.77
1.15 - 1.2	9	1.14
1.2 - 1.25	2	0.25
1.25 - 1.3	0	0.00

表 4.3.2 デブリ堆積高さ
の度数分布・確率密度分布
表（プール水位 1.5m）

区間 [m]	度数	確率密度
0 - 0.05	0	0.00
0.05 - 0.1	0	0.00
0.1 - 0.15	1	0.13
0.15 - 0.2	0	0.00
0.2 - 0.25	0	0.00
0.25 - 0.3	0	0.00
0.3 - 0.35	0	0.00
0.35 - 0.4	12	1.52
0.4 - 0.45	6	0.76
0.45 - 0.5	2	0.25
0.5 - 0.55	0	0.00
0.55 - 0.6	0	0.00
0.6 - 0.65	1	0.13
0.65 - 0.7	18	2.28
0.7 - 0.75	10	1.27
0.75 - 0.8	32	4.05
0.8 - 0.85	6	0.76
0.85 - 0.9	3	0.38
0.9 - 0.95	0	0.00
0.95 - 1.0	6	0.76
1.0 - 1.05	14	1.77
1.05 - 1.1	6	0.76
1.1 - 1.15	14	1.77
1.15 - 1.2	9	1.14
1.2 - 1.25	2	0.25
1.25 - 1.3	0	0.00

表 4.3.3 デブリ堆積高さ
の度数分布・確率密度分布
表（プール水位 2.0m）

区間 [m]	度数	確率密度
0 - 0.05	0	0.00
0.05 - 0.1	1	0.13
0.1 - 0.15	0	0.00
0.15 - 0.2	0	0.00
0.2 - 0.25	0	0.00
0.25 - 0.3	0	0.00
0.3 - 0.35	0	0.00
0.35 - 0.4	12	1.52
0.4 - 0.45	6	0.76
0.45 - 0.5	2	0.25
0.5 - 0.55	0	0.00
0.55 - 0.6	0	0.00
0.6 - 0.65	1	0.13
0.65 - 0.7	18	2.28
0.7 - 0.75	10	1.27
0.75 - 0.8	34	4.30
0.8 - 0.85	6	0.76
0.85 - 0.9	3	0.38
0.9 - 0.95	0	0.00
0.95 - 1.0	7	0.89
1.0 - 1.05	14	1.77
1.05 - 1.1	5	0.63
1.1 - 1.15	15	1.90
1.15 - 1.2	8	1.01
1.2 - 1.25	2	0.25
1.25 - 1.3	0	0.00

4.3.5 JASMINE 入出力パラメータの相関関係

プール水位 3 水準(1.0m、1.5m、2.0m)における JASMINE 入力パラメータと JASMINE 出力パラメータとの各変数間の相関関係の強さを示す相関係数を求めた (図 4.3.4 から 4.3.6)。いずれの場合も、溶融物落下量が多くなるほどデブリ堆積高さが大きくなるという相関が強く見られる。また、プール水位 2.0m の場合にはアグロメレーションデブリの存在が確認される。

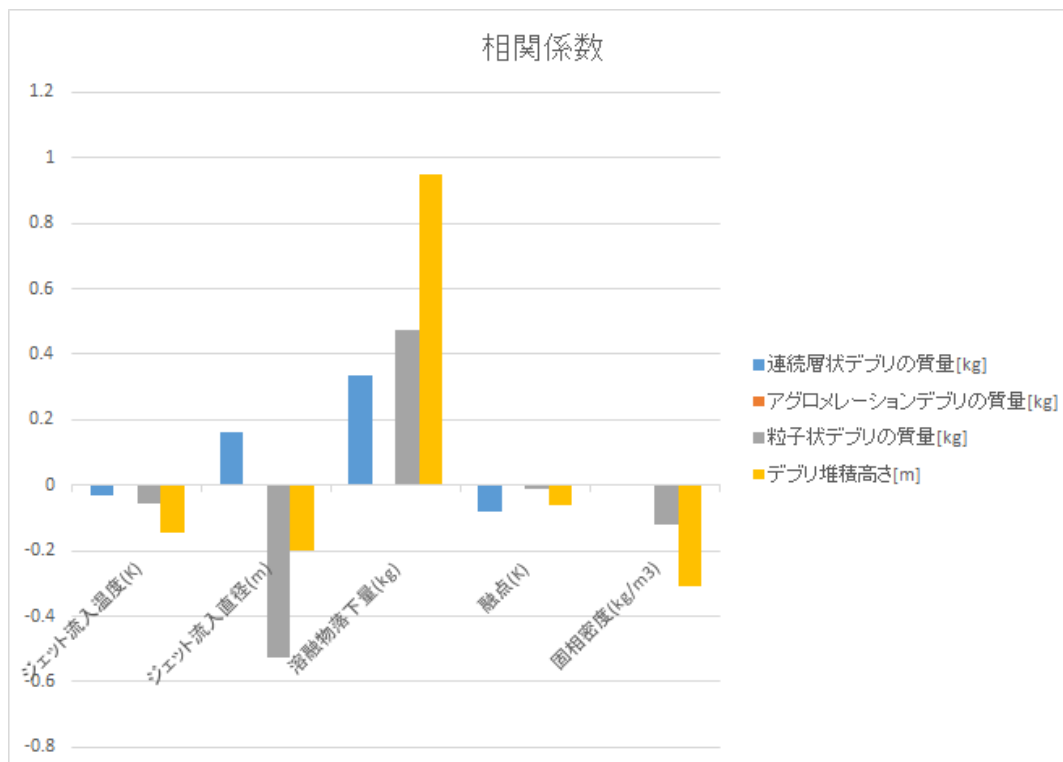


図 4.3.4 JASMINE 入力パラメータと JASMINE 出力パラメータとの相関(水位 1.0m)

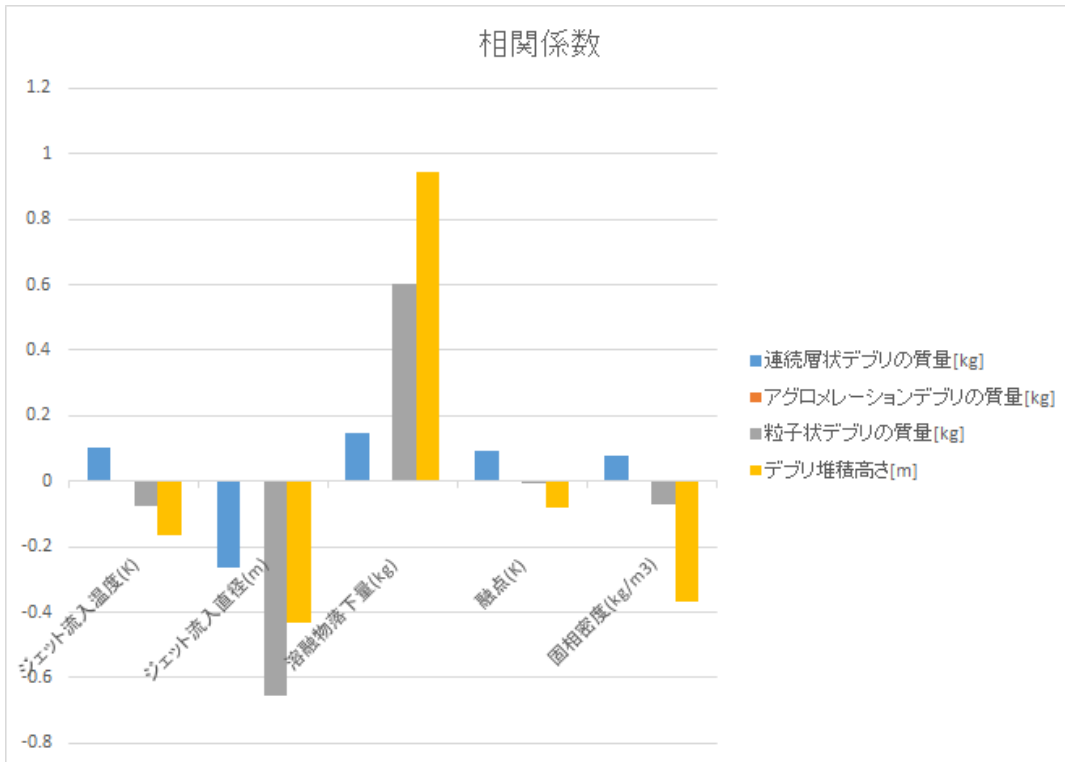


図 4.3.5 JASMINE 入力パラメータと JASMINE 出力パラメータとの相関(水位 1.5m)

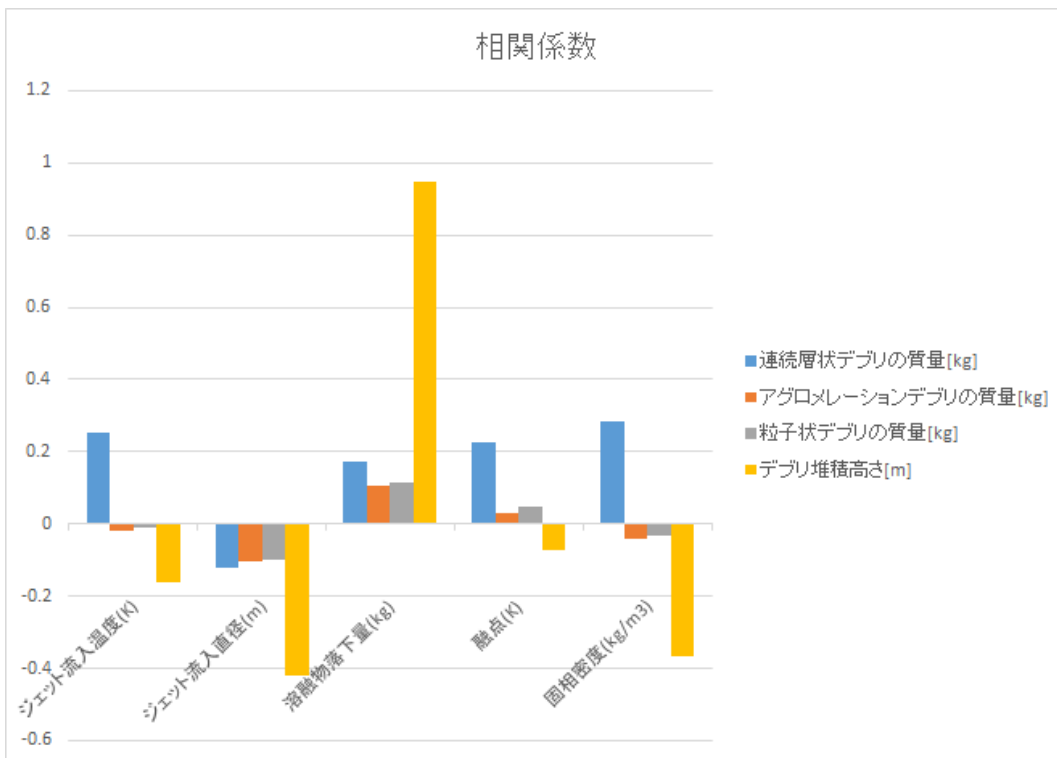


図 4.3.6 JASMINE 入力パラメータと JASMINE 出力パラメータとの相関(水位 2.0m)

4.3.6 MELCOR 入力条件の落下溶融物条件及び溶融物拡がりへの影響

MELCOR 入力条件 (RCIC の停止条件及び下部ヘッド破損温度) の MELCOR 解析結果 落下溶融物条件に対するマッピングを図 4.3.7 に示す。RCIC 継続時間が長く、TPFAIL が低い領域で溶融物ジェットの温度が高くなる傾向がみられる。

図 4.3.8 から 4.3.10 に MELCOR 入力条件に対する JASMINE 解析結果をマッピングした図を示す。図 4.3.7 (d) の RCIC 継続時間が短く TPFAIL が高い範囲では溶融物落下量が比較的少ない領域がある。図 4.3.8 から 10 の(a)の同じ範囲では溶融物の堆積高さが比較的小さく評価されており、溶融物の堆積高さに溶融物落下量の影響が大きいことが特に現れている。

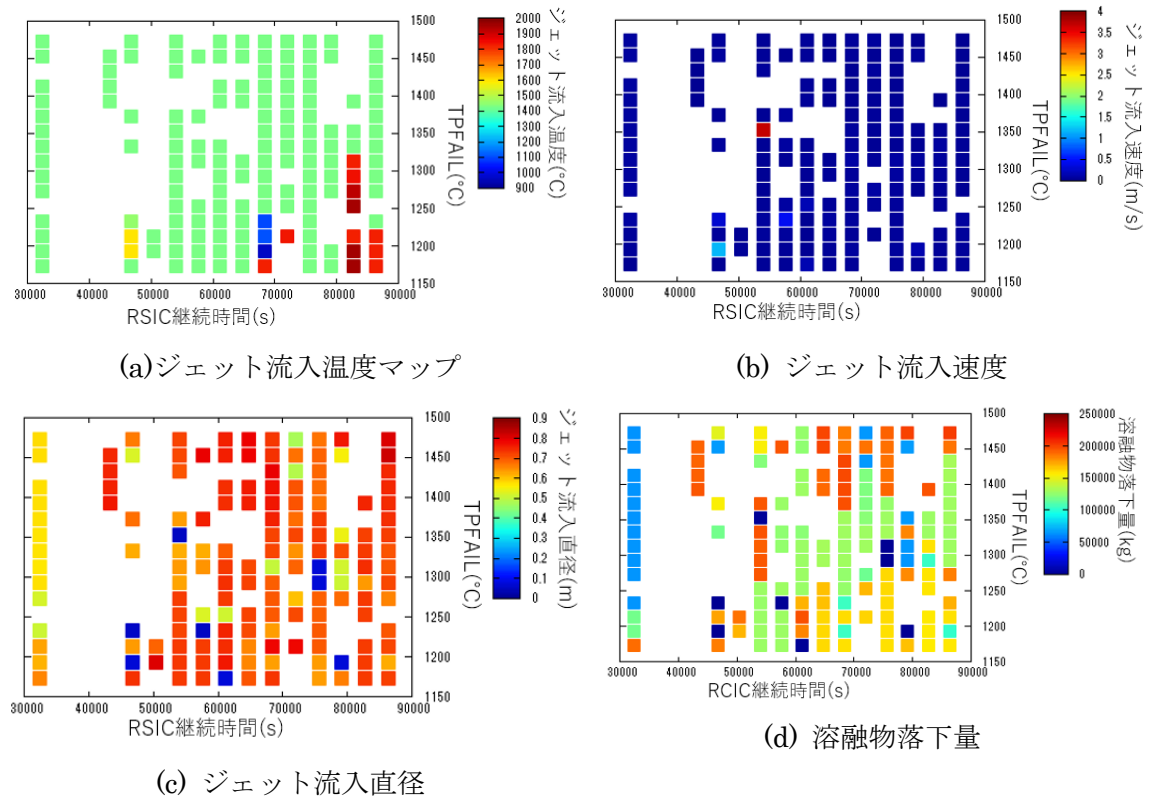


図 4.3.7 MELCOR 入力条件に対する溶融物条件 MELCOR 解析結果

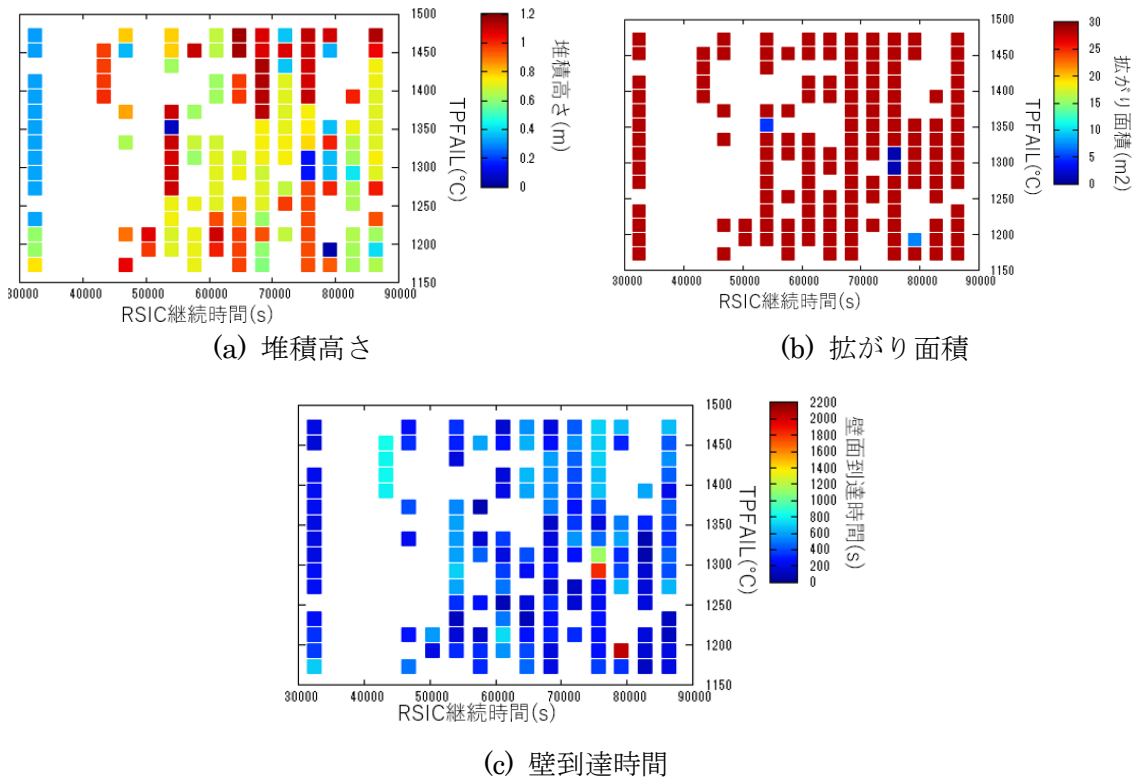


図 4.3.8 MELCOR 入力条件に対する溶融物挙動 JASMINE 解析（水位 1.0m）結果

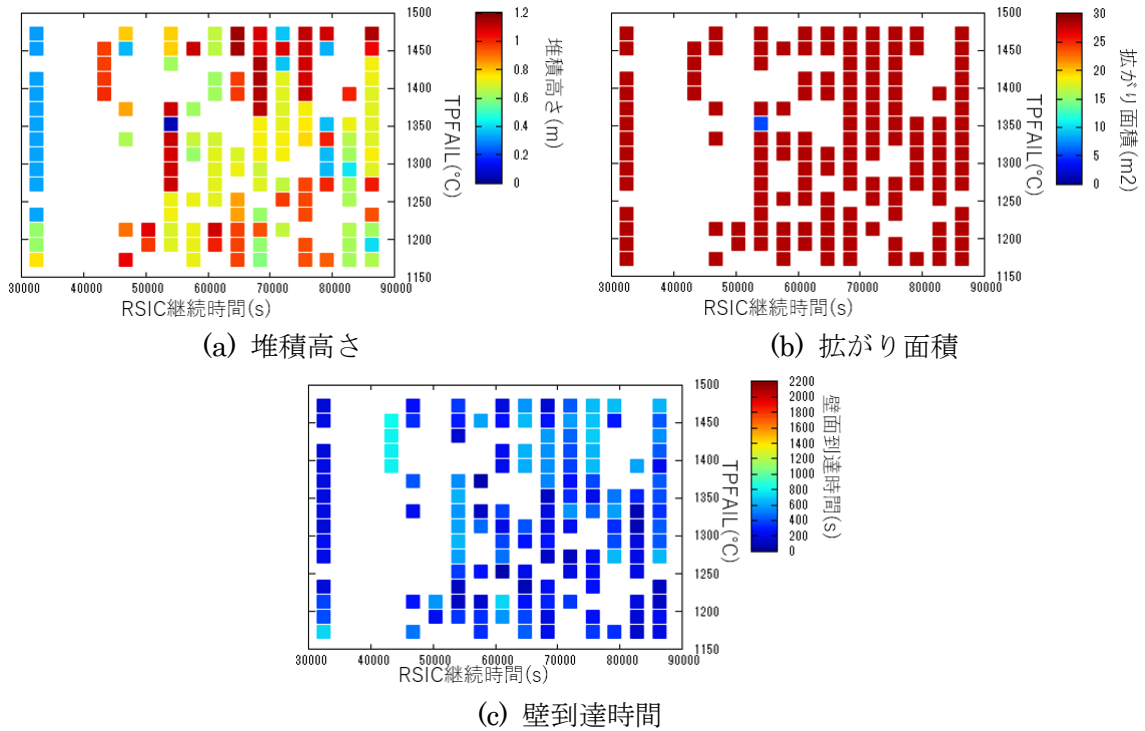


図 4.3.9 MELCOR 入力条件に対する溶融物挙動 JASMINE（水位 1.5m）解析結果

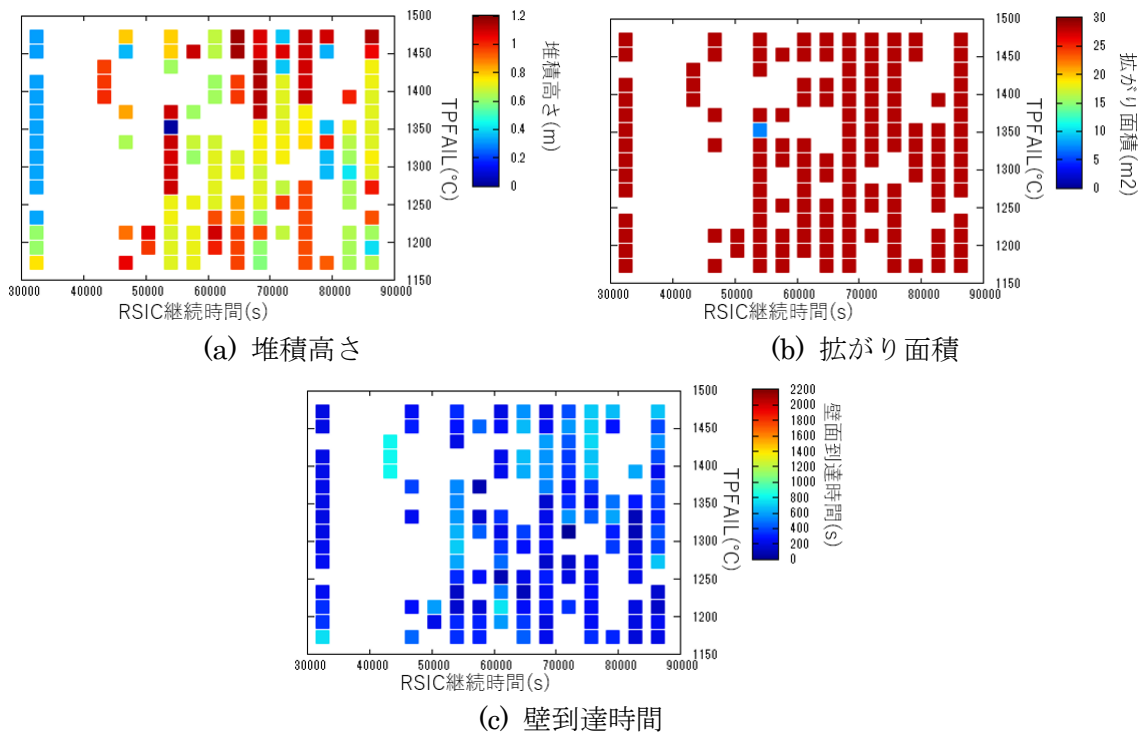


図 4.3.10 MELCOR 入力条件に対する溶融物挙動 JASMINE（水位 2.0m）解析結果

4.4 まとめ

実機における格納容器内の炉心溶融物冷却性を評価した。まず、MELCOR1.8.5(MELCOR)による TB シナリオ解析入力カデータを作成した。このシナリオをベースに、压力容器下部ヘッドの破損温度 TPFAIL 及び事故進展に係わる RCIC の駆動時間の 2 つのパラメータに不確かさを与え、合計 272 ケースの MELCOR 解析を行った。

MELCOR 解析の結果から、压力容器から放出される溶融物の条件を取得した。溶融物の条件は MELCOR の出力ファイルから、溶融物の放出時間、温度、質量、組成等を抽出した。压力容器破損はリングごとに判定が行われ溶融物落下はほとんどのケースで最大 3 段階の落下となった。段階ごとに溶融物組成は大きく変化していることが確認できた。溶融物質量はデブリの堆積高さに影響が大きい、溶融物の組成は冷却判定条件の算出等に影響があるため、溶融物量や溶融物温度からは冷却の成否が単純に予測できない。

溶融物条件を整理し、JASMINE 解析の入力条件を作成した。熱力学平衡計算の結果から求めた融点（固／液相面温度）を利用して溶融物の組成（酸化物割合と金属割合）に応じた融点を算出した。JASMINE の制約上、溶融物組成は 1 段階目の組成を選択して設定した。

初期水位として 1.0, 1.5 及び 2.0 m の条件の下で JASMINE 解析を実施し、最終的なデブリ堆積状態を求めた。MELCOR 解析のどのケースに対しても格納容器内へ移行する溶融物量は多量で、水中で分裂せずに床面上へ到達したケースがほとんどであり、溶融物の拡がり途中では止まらずに全てキャビティ壁面へ到達した。また、水中で分裂した粒子状デ

ブリ及び粒子が結合して生成するアグロメレーションデブリの質量割合は非常に小さいという結果になった。

JASMINE 解析結果から連続層状及びアグロメレーションデブリの質量とデブリの拡がり面積からデブリ堆積高さを評価した。ケースごとの溶融物組成を反映した物性値を用いて算出した冷却可能な最大デブリ高さと比較し、冷却の成否判定を行った。結果を集計し、冷却成功確率を求めたところ、初期水位による差は現れなかった。

本年度は溶融物組成を考慮した物性値を JASMINE 解析に反映し、広範囲の溶融物条件へ対応できる、より現実的な評価が可能となった。今後は本評価手法を多様な事故シナリオに適用し、妥当性の検証を行う。

参考文献

- [4.1] 平成 31 年度原子力規制庁委託成果報告書「原子力施設等防災対策等委託費（シビアアクシデント時格納容器内溶融炉心冷却性評価技術高度化）事業」
- [4.2] Sandia National Laboratories, “MELCOR Computer Code Manuals Primer and User’s Guide Version 1.8.5”, NUREG/CR-6119, Vol.1, SAND2000-2417/1
- [4.3] TEPCO et.al., Information Portal for the Fukushima Daiich Accident Analysis and Decommissioning Activities, <https://fdada.info/en/home2/>
- [4.4] Jun, I. Kenji, K. and Yu, M. “Analysis for iodine release from unit 3 of Fukushima Dai-ichi nuclear power plant with consideration of water phase iodine chemistry”, Journal of Nuclear Science and Technology, p. 308-314, Vol. 52 (3), (2015)
- [4.5] 原子力規制庁 長官官房技術基盤グループ , “NRA 技術報告 格納容器破損防止対策の有効性評価に係る重要事象の分析(BWR)” , NRA 技術報告, 平成 28 年 3 月.
- [4.6] 石川淳, 村松健, 坂本亨, “THALES-2 コードによる BWRMark-II を対象としたレベル 3PSA のための系統的なソースターム解析” , JAERI-Research2005-021, 2005 年 9 月.
- [4.7] Xiaoyu, Z. Hiroto, I. Hitoshi, T. and Yu, M. Source term uncertainty analysis: probabilistic approaches and applications to a BWR severe accident. Mechanical Engineering Journal (Internet), 2(5), p.15-0032_1 – 15-0032_14, 2015.
- [4.8] S. Galushin and P. Kudinov, “Sensitivity and uncertainty analysis of the vessel lower head failure mode and melt release conditions in Nordic BWR using MELCOR code” Annals of Nuclear Energy 135 (2020) 106976
- [4.9] S. Galushin and P. Kudinov, “Sensitivity Analysis of the Vessel Lower Head Failure in Nordic BWR using MELCOR code” PSAM14 (2018), 16-21 September 2018, UCLA Meyer & Renee Luskin Conference Center, Los Angeles, CA, USA
- [4.10] 経済産業省資源エネルギー庁「原子力の安全性向上に資する共通基盤整備のための技術開発事業(シビアアクシデント時の燃料破損・溶融過程解析手法の高度化)」(平成 24 年～令和 2 年)
- [4.11] S. Lomperski, M.T. Farmer, “Experimental evaluation of the water ingress mechanism for corium cooling”, Nucl. Eng. Des., 237, 2905-917, 2007.

5. おわりに

本事業においては、シビアアクシデント時における溶融炉心／コンクリート相互作用（MCCI : Molten Core/Concrete Interaction）を回避あるいはその影響を緩和する対策の有効性を評価する手法を高度化し、基準適合性審査等における規制判断の根拠となる技術的知見を提供することを目的に、溶融炉心が格納容器に落下する前に格納容器内に先行的に注水する場合における溶融炉心の冷却性を科学的・合理的に評価する手法を構築する。今年度の事業では、格納容器内溶融炉心冷却性評価手法において中心的な役割を果たす溶融炉心／冷却材相互作用解析コード JASMINE に関して、溶融物粒子の格納容器床面上でのアグロメレーション挙動及び格納容器床面上での溶融物拡がり挙動に係わる溶融物の落下条件をパラメータとした感度解析を実施するとともに、図 1.1 に示したアプローチによる実機評価の一環として、事故条件の不確かさを考慮した溶融炉心冷却性評価をシビアアクシデント総合解析コード MELCOR と JASMINE を連動して実施した。主要な成果は以下のとおりである。

5.1 アグロメレーションの解析

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 DEFOR-A 実験を対象に感度解析を行った。溶融ジェット径及び投入速度をパラメータとして、アグロメレーションデブリの質量割合へ与える影響を調査した。

溶融ジェットの径及び投入速度の増加はアグロメレーションデブリの質量割合を増加させた。ジェット径及び速度の増加は溶融物の慣性を増大させ、結果的にジェットブレークアップ長が増加した。水深が浅い場所で発生する粒子が減少し、深い場所で発生する粒子が増加する。そのため、キャッチャー表面へ到達する前に固化する粒子の割合が減少することによるものと解釈される。アグロメレーションデブリの質量割合へ影響する粒子発生に係わる液液二相流動を正確に把握することが実験解析の精度向上につながると考えられる。

5.2 溶融物の拡がりの解析

JASMINE コードを用いて、ウェット条件及びドライ条件で実施された実験を対象に感度解析を行った。溶融ジェットの径及び投入速度をパラメータとして、拡がり及び最終的な拡がり距離（面積）へ与える影響を調査した。結果として、各パラメータは以下の効果があることが確認された。

ウェット条件においては溶融ジェット径及び投入速度の増加／減少は溶融物の拡がりを促進／阻害する。溶融ジェット投入速度による影響は投入径の与える影響よりも小さかった。ドライ条件においては溶融ジェット径及び投入速度の増加／減少は溶融物の拡がりを促進／阻害する傾向がある。

5.3 実機冷却性評価

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

MELCOR 解析では、TB シナリオをベースに。炉心損傷及び事故対策に関連する入力パラメータに不確かさを仮定して 272 ケースの入力パラメータセットを抽出し、圧力容器破損時の溶融物条件を抽出した。

溶融物組成から物性値と熱力学平衡計算を利用して固／液相面温度を取得し、これと溶融物条件に基づいた JASMINE 解析の入力条件の下で格納容器内の溶融物挙動解析を実施した。最終的な堆積デブリ高さを評価し、それを簡易モデルで推定した各ケースの溶融物条件に応じた最大冷却可能高さと比較することで MCCI 回避の成否を判断した。この手順を異なる格納容器水位条件で繰り返したところ、冷却成功確率はシナリオ内では水位に依らず一定となるという結果を得た。

今回の解析では、溶融物組成から物性値及び融点を反映できるようになったことから、解析可能な事故の溶融物条件が大幅に広がった。今後はより多様な事故シナリオを対象とすることで評価手法の妥当性検証を行う。

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

付録 A JASMINE コードの概要

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

A.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 A.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。

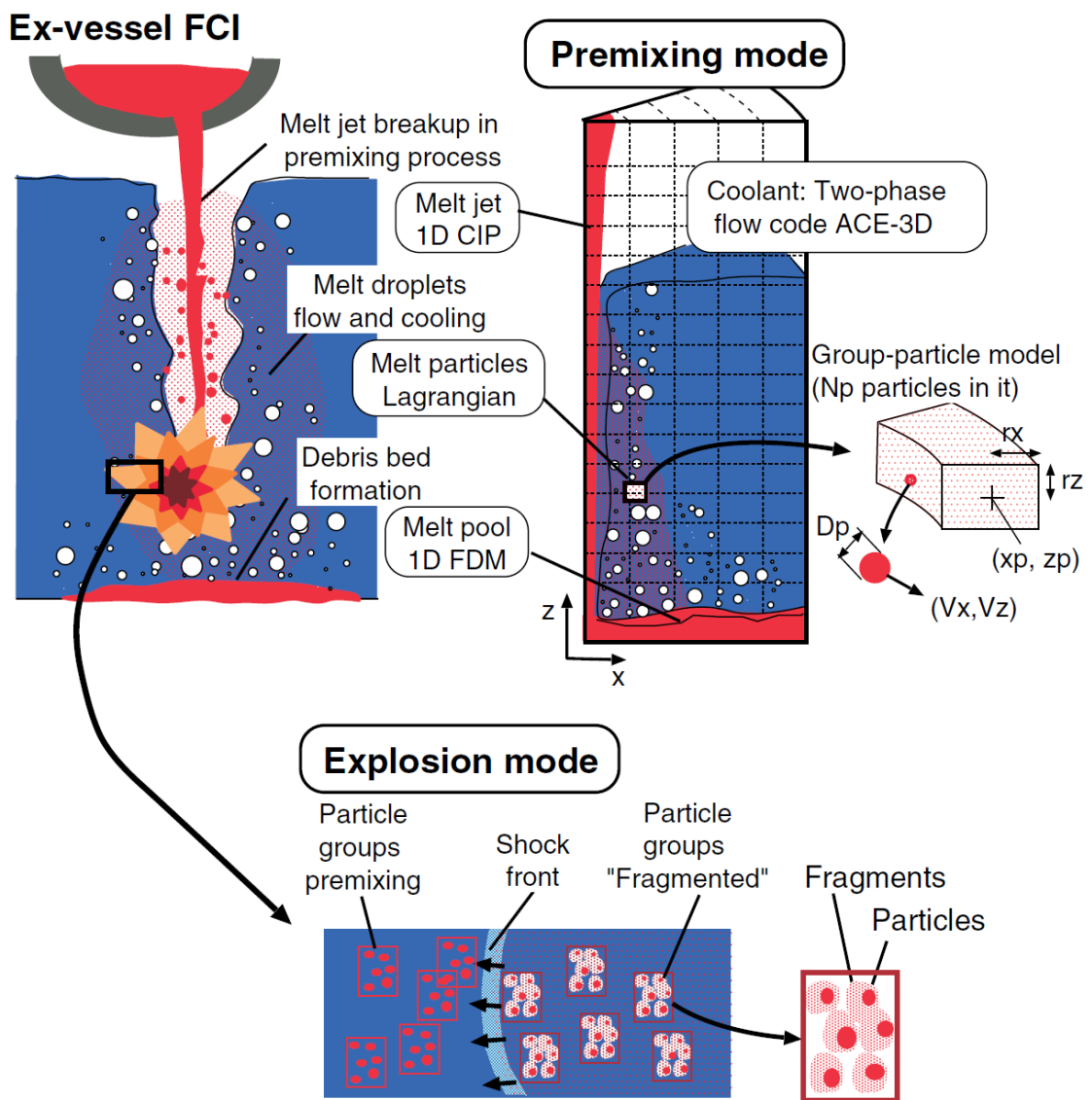


図 A.1 水蒸気爆発現象と JASMINE コードの解析モデル

A.2 基本モデルと計算式

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

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

(1) 溶融物ジェット

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

質量保存則：

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

エネルギー保存則：

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

運動量保存則：

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

ここで、質量保存式中の m_e は予混合過程における液滴発生量であり、溶融物がすべて液滴に変わり溶融物ジェット径がゼロになる深さ (ブレイクアップ長さ。図 A.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、

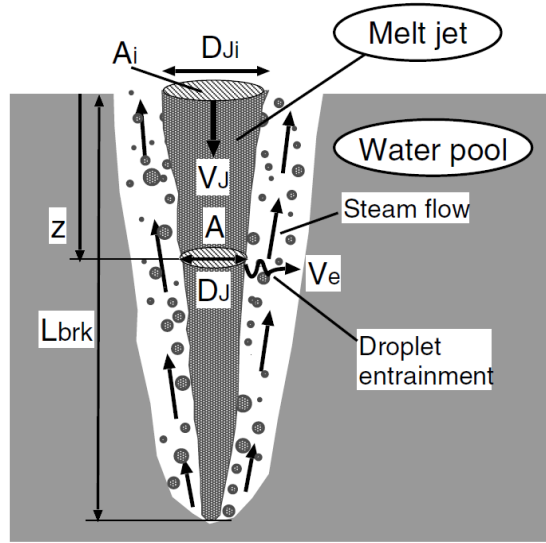


図 A.2 JASMINE コードにおける溶融物ジェットのモデル

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

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

(2) 溶融物プール

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

質量保存則：

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

エネルギー保存則：

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

運動量保存則：

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

とする。

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

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

ここで、 H は溶融物表面の水側熱伝達率である。

(3) 溶融物液滴

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

運動量保存則は、速度について：

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

液滴位置について：

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

また、エネルギー保存則は：

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

となる。

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

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

としている。

液滴の初期径は、バージョン 3.3 b までは固定値を入力で与えている。

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

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

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

また、 ϕ_r は 0~1 の一様乱数である。

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

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

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

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

(4) 水プール

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

質量保存則：

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

エネルギー保存則：

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

運動量保存則：

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

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

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

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

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

水のボイド率に応じて上記の式に補正項を掛ける。

(5) 溶融物プールの運動方程式

【運動量保存式】

① 表面クラストが存在し、流動する場合($v_{cr} = v_p$)

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

② 表面クラストが存在し、固定されている場合($v_{cr} = 0$)

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

③ 表面クラストが存在しない場合

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

連立方程式の係数の導出：

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

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

既知の状態の時刻 n と求める時刻 $n+1$ を明確に分ける。

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

とする。

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

左辺に未知数を含む項、右辺に既知の項を集めて整理する。

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

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

ここで

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

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

ここで

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

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

(6) 記号の説明

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

記号

A : 断面積

e : 比内部エネルギー

g : 重力加速度

h : 液深または比エンタルピー

K : 摩擦係数

m : 質量または質量速度

p : 圧力

R : 半径

t : 時間

v : 速度

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

x : 水平方向座標

z : 高さ方向座標

α : ボイド率

γ_k : 単位体積当たり質量変化

κ : 熱拡散率

λ : 熱伝導率

ρ : 密度

θ : セクターモデルの周方向分割メッシュ幅角度

添字

a : 水プールを表す

av : 平均を表す

e : エントレインメント

J : 溶融物ジェット (Ji は、水面高さでの値を示す)

k : 流体の種類

l : 水

P : 溶融物プール

p : 溶融物液滴

sf : 表面

A.3 プログラムの特徴

(1) 計算手順

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

(2) JASMINE コードで使用する物性値

(a) 溶融物

実機解析、実験解析に備えて、以下の物質に対する物性値の関数を用意している。

表 A.2 JASMINE コードで用意されている溶融物

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

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

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

表 A.3 JASMINE で使用されるコリウムの物性値

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

(b) 蒸気表

JASMINE コードでは、計算速度の高速化を図るために、蒸気表の近似関数を作成し組み込んでいる。日本機械学会蒸気表[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。雰囲気圧力を大気圧とし、水プールのサブクール度をパラメータとして、熔融物の表面過熱度に対する熱流束を計算した。図 A.3 が液滴表面熱流束、図 A.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。

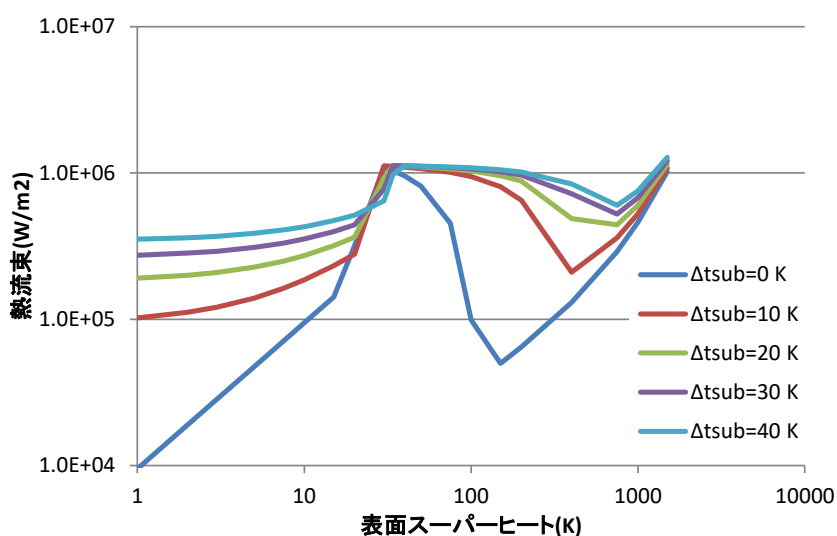


図 A.3 Jasmine 液滴表面熱流束 (大気圧, $d=3\text{mm}$, $v=0.3\text{m/s}$)

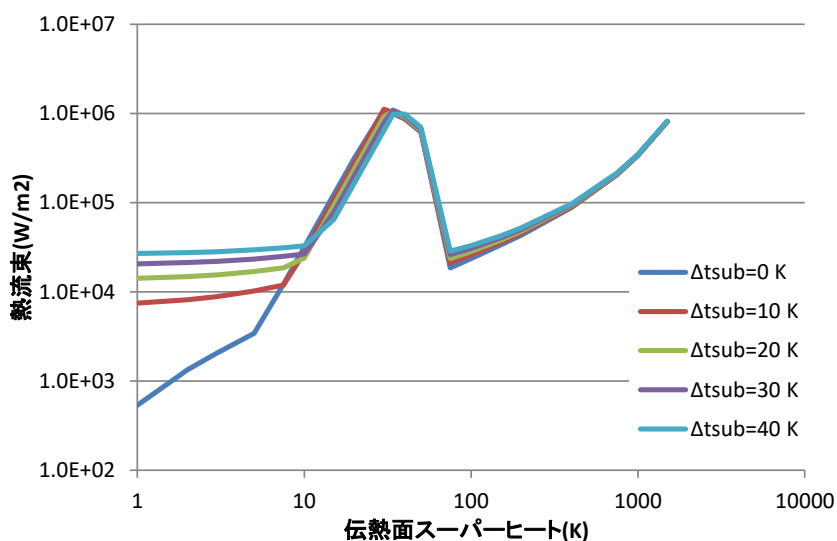


図 A.4 Jasmine プール表面熱流束 (大気圧)

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 A.4 に示す。JASMINE v.3 で、コードの基本式・計算手法・構成が固まり、その後、予混合過程での溶融物液滴の粒径分布考慮機能などの追加が行われてきた。平成 27 年度事業において改良したバージョンを JASMINE 4.0 とし、平成 28 年度事業において作成・改良したアグロメレーションモデル(ver. 4.0_agl)とメルトスプレッドモデル(ver. 4.0_msp)を結合したバージョンを JASMINE 4.1、とする。

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

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

令和 2 年度の作業では、JASMINE 4.4 を改良した JASMINE 4.4b を用いて DEFOR-A 実験及び PULiMS 実験の溶融物の物性値を変更した感度解析を行った。

今年度(令和 3 年度)の作業では、JASMINE 4.4b を改良した JASMINE 4.4d を使用して DEFOR-A 実験及び PULiMS 実験の投入条件を変更した感度解析を行うとともに、JASMINE 4.4a で追加された水プールの一点近似モデルを使用して Wet 条件で直交座標系変形流路の実験解析を行った。

表 A.4 JASMINE コードの開発・改良の経緯

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

JASMINE 4.3d	2019/8	射流モデル組み込み	PULiMS E10～E15、E17、E18 実機冷却性評価
JASMINE 4.4	2019/12	流路幅が変化する形状に対応	PULiMS E16 ドライ実験
JASMINE 4.4a	2020/2	初期条件の多様化 水プールの一点近似モデル組込	DEFOR-A 実験 PULiMS 実験 ドライ実験
JASMINE 4.4b	2021/1	モデルの修正、整理	DEFOR-A1、5、8、 23、24、26 PULiMS-E10～14、 16
JASMINE 4.4c	2021/6	水蒸気爆発の機能確認及び問題抽出	DEFOR-A 実験 PULiMS 実験 ドライ実験
JASMINE 4.4d	2022/1	モデルの修正、整理	DEFOR-A1、5、8、 23、24、26 PULiMS-E10～14、 16 ドライ条件実験 RIT 試験 (2MWS-Ox-3)

A.5 参考文献

- [A.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
- [A.2] 日本機械学会, “1999 日本機械学会蒸気表”, (1999-11 月)
- [A.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
- [A.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
- [A.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 B 冷却可能な最大デブリ堆積高さの評価

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

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

評価の考え方

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

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

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

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

また、デブリ内部の最高温度 T_{max} については、

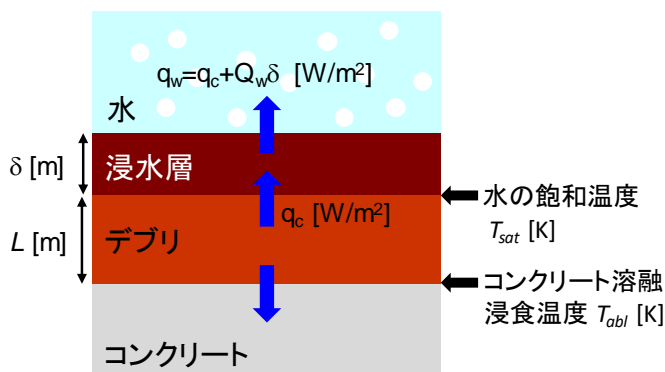


図 B-1 評価モデル

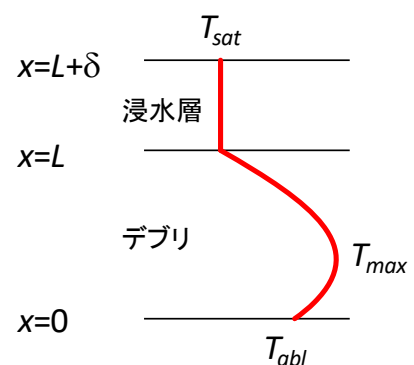


図 B-2 デブリ内温度分布

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

のとき

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

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

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

いま、デブリ高さが L のとき、デブリから浸水層への熱流束は次式となる。

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

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

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

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

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

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

変数一覧

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

※ 1 本評価においてはデブリ崩壊熱と等しいと仮定する。

※ 2 共晶組成でない場合は固相線温度を用いる。

付録C ウェブ会議報告

ウェブ会議 (1)

件名	OECD/ ROSAU 会議
主催	OECD/NEA
期間	令和 3 年 4 月 28 日 (水) ～令和 3 年 4 月 28 日 (木)
参加者	研究員 3 名
概要	<p>OECD/NEA における実験プロジェクト ROSAU (Reduction Of Severe Accident Uncertainties) 中間技術会合 (Web 会合) に出席し、シビアアクシデント時の溶融炉心コンクリート相互作用 (MCCI : Molten Core/Concrete Interaction) の発生防止・影響緩和対策関連する DCAM (Debris Coolability And MCCI) 及び MST (Melt Spreading Test) 実験に関する最新情報を取得した。</p> <p>ROSAU 実験は米国 ANL (Argonne National Laboratory) において実施される。2019 年 6 月から 2024 年 5 月まで継続される。本プロジェクトでは、模擬コリウム (ウラン酸化物やジルコニウム酸化物を含む模擬溶融物) を用い、注水による溶融炉心の冷却性に係わる DCAM 実験 5 ケース及び水中床面における溶融炉心の拡がりに係わる MST 実験 6 ケースが予定されている。</p>

ウェブ会議 (2)

件名	OECD/ ROSAU 会議
主催	OECD/NEA
期間	令和 3 年 6 月 28 日 (月) ～令和 3 年 6 月 29 日 (火)
参加者	研究員 2 名
概要	<p>OECD/NEA における実験プロジェクト ROSAU (Reduction Of Severe Accident Uncertainties) 中間技術会合 (Web 会合) に出席し、シビアアクシデント時の溶融炉心コンクリート相互作用 (MCCI : Molten Core/Concrete Interaction) の発生防止・影響緩和対策関連する DCAM (Debris Coolability And MCCI) 及び MST (Melt Spreading Test) 実験に関する最新情報を取得した。</p>

ウェブ会議 (3)

件名	OECD/NEA WGAMA 第 23 回会合出席
主催	OECD/NEA
期間	令和 3 年 9 月 13 日 (月) ~ 令和 3 年 9 月 15 日 (水)
参加者	ディビジョン長 1 名
概要	<p>OECD/NEA の CSNI (原子力施設安全委員会) WGAMA (事故の分析・管理ワーキンググループ) 第 24 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。</p>

ウェブ会議 (4)

件名	OECD/NEA Specialist Workshop on Reactor core and containment cooling systems Long term management and reliability (RCCS-2021) における口頭発表
主催	OECD/NEA
期間	令和3年10月18日(月)～令和3年10月20日(水)
参加者	研究員1名
概要	<p>シビアアクシデント時の格納容器内溶融炉心冷却性評価手法の高度化の一環として、シビアアクシデント解析(総合解析コード MELCOR)と格納容器内の溶融物挙動解析(JASMINE コード)を組み合わせた、実機における溶融物冷却確率評価手法と結果について、OECD/NEA 主催のワークショップ RCCS-2021 にて口頭発表を行った。</p> <p>[RCCS-2021-1260]</p> <p>Development of Evaluation Framework for Ex-Vessel Core Coolability Toshinori Matsumoto, Yuzuru Iwasawa and Tomoyuki Sugiyama (Japan Atomic Energy Agency, Japan)</p>

ウェブ会議 (5)

件名	OECD/ ROSAU 会議
主催	OECD/NEA
期間	令和 3 年 12 月 13 日 (月) ～令和 3 年 12 月 14 日 (火)
参加者	研究員 3 名
概要	OECD/NEA における実験プロジェクト ROSAU (Reduction Of Severe Accident Uncertainties) 中間技術会合 (Web 会合) に出席し、シビアアクシデント時の溶融炉心コンクリート相互作用 (MCCI : Molten Core/Concrete Interaction) の発生防止・影響緩和対策関連する DCAM (Debris Coolability And MCCI) 及び MST (Melt Spreading Test) 実験に関する最新情報を取得した。