

令和 2 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 実験解析	2-6
2.4.3 感度解析	2-6
2.5 解析結果	2-8
2.5.1 実験解析	2-8
2.5.2 感度解析	2-12
2.6 考察	2-20
2.7 まとめ	2-23
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	3-3
3.3.4 解析結果	3-7
3.3.5 考察	3-19
3.4 ドライ条件での解析	3-21
3.4.1 VULCANO 実験	3-21
3.4.2 KATS 実験	3-21
3.4.3 ECOKATS 実験	3-21
3.4.4 FARO 実験	3-21
3.4.5 COMAS 実験	3-21
3.4.6 実験条件	3-21
3.4.7 解析条件	3-24
3.4.8 解析結果	3-26
3.4.9 考察	3-38
3.5 まとめ	3-40

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	MELCOR 解析条件の設定	4-2
4.2.2	不確かさを考慮するパラメータ	4-6
4.2.3	不確かさを考慮した MELCOR 入力条件	4-6
4.2.4	MELCOR 解析結果からの JASMINE 入力パラメータの抽出	4-9
4.3	JASMINE 解析溶融物条件の抽出	4-13
4.4	JASMINE コードによる冷却成功確率解析	4-18
4.4.1	JASMINE 解析条件	4-18
4.4.2	JASMINE 解析の結果	4-19
4.4.3	溶融炉心の冷却成功確率	4-22
4.4.5	考察	4-35
4.3	まとめ	4-36
5.	Bi ₂ O ₃ -WO ₃ 強度試験	5-1
5.1	概要	5-2
5.2	測定及び分析の概要	5-2
5.2.1	測定及び分析項目	5-2
5.2.2	試験片の作成	5-2
5.3	測定及び分析の結果	5-3
5.3.1	X 線回折 (XRD)	5-3
5.3.2	引張試験	5-5
5.3.3	曲げ試験	5-7
5.4	まとめ	5-9
6.	おわりに	6-1
6.1	アグロメレーションの解析	6-1
6.2	溶融物の拡がりの解析	6-1
6.3	実機冷却性解析	6-2
6.1	Bi ₂ O ₃ -WO ₃ 強度測定	6-2
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	出張報告	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]、宇宙線ミュオンを用いた測定によっても溶融炉心の移行が裏付けられた [1.2]。また、2018年1月に撮影された2号機格納容器内の映像により燃料集合体の一部をなす部材がペDESTALに落下したことが確認されており、圧力容器に比較的大きな開口が生じたことが示唆された [1.3]。

1F事故を踏まえて原子力規制委員会により新たに策定された規制基準では、申請者に対して、シビアアクシデント（重大事故）に適切に対応することを求めている。MCCIに係わる対策は、溶融炉心が格納容器に移行した後に溶融炉心上に注水する対策（ドライ・キャビティ戦略）と溶融炉心が格納容器に落下する前に格納容器内に先行的に注水する対策（ウェット・キャビティ戦略）に大別され、我が国の事業者は後者を採用している。これは、溶融炉心が格納容器内の水プール中を落下する間に、その全てあるいは一部がブレークアップ（粒子化）し、冷却可能なデブリベッドが格納容器の床面上に形成されることを期待するものである。我が国以外でも、例えばスウェーデンのBWRにおいてウェット・キャビティ戦略が採られているが [1.4]、水蒸気爆発リスクの低減を優先してドライ・キャビティ戦略を採用する国が多数派であり、それ故に実験データは十分でない。

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

- (a) 機構論的な溶融炉心／冷却材相互作用解析コード JASMINE [1.5]を改良し、溶融炉心の冷却性を支配すると考えられる水プール中における溶融炉心ジェットのブレークアップ、ブレークアップで生じた粒子同士の結合による塊状デブリ（アグロメレーションデブリ）の生成及び溶融炉心の床面上における拡がり挙動に係わる予測性能の向上を図る。
- (b) 冷却性の観点で特に重要と考えられるアグロメレーションデブリの重量 M_a 及び床面

に拡がって連続層状に堆積する溶融炉心の重量 M_c の合計（または合計体積 V_d ）を JASMINE コードの解析により求める。複雑な溶融炉心の堆積状態を単純かつ保守的な体系に置き換えて、溶融炉心とコンクリートとの境界における最高温度 T_{max} （または溶融炉心の堆積深さ h_d ）を算出する。

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

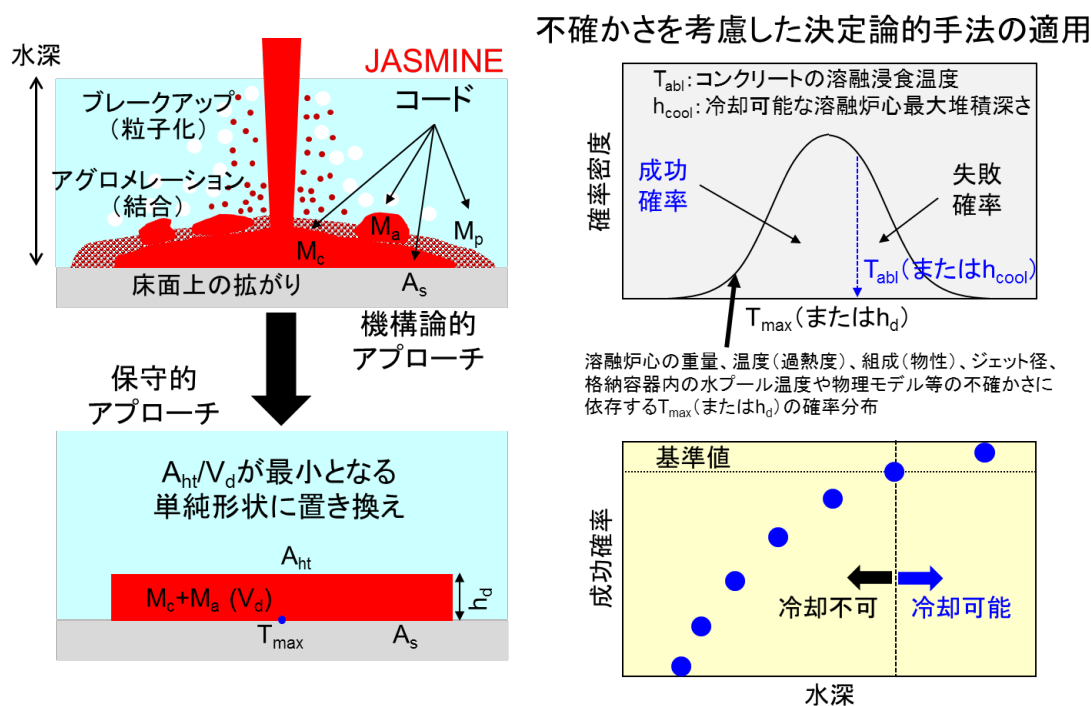


図 1.1 格納容器内溶融炉心冷却性評価のアプローチ及びアウトプット

今年度の事業においては、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

溶融物の物性値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 実験を対象とした感度解析を実施した。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、ドライ条件として VULUCANO 実験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物性値に加えて、溶融物が含む空隙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 および TQUV 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）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。また、事故シーケンスの違いが結果に与える影響を検討した。
- ④ JASMINE コードの拡がり停止モデルでは床面上の拡がり先端部に形成されるクラスト層の疑似的な引張強度をパラメータとしている。解析にあたっては PULiMS 実験に整合する値を設定している。実際の強度に対してどの程度の値を設定しているのかを把握するため、 $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-WO}_3$ の共晶組成混合物の試験片の作成

及びこれを対象とした常温と高温における引張試験を実施し、引張強度のデータを取得した。

参考文献

- [1.1] M. Pellegrini, et al., “Benchmark Study of the Accident at the Fukushima Daiichi NPS Best Estimate Case Comparison”, NURETH-16, 13743, Chicago, IL, August 30-September 4, 2015.
- [1.2] 東京電力ホールディングス, 福島第一 1～3号機ミュオン測定による燃料デブリ分布の把握について, 2017年8月30日, http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/handouts/2017/images2/handouts_170830_09-j.pdf
- [1.3] 東京電力ホールディングス, 福島第一原子力発電所 2号機原子炉格納容器内部調査実施結果(速報), 2017年2月20日, http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/handouts/2018/images1/handouts_180119_08-j.pdf.
- [1.4] S. Galushin and P. Kudinov, “Sensitivity analysis of debris properties in lower plenum of a Nordic BWR”, Nucl. Eng. Des., Vol. 332, pp. 374-382, 2018.
- [1.5] K. Moriyama, Y. Maruyama and H. Nakamura, Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User’s Guide, JAEA-Data/Code 2008-014, Japan Atomic Energy Agency, July, 2008.
- [1.6] P. Kudinov and M. Davydov, “Development and Validation of Conservative-Mechanistic and Best Estimate Approaches to Quantifying Mass Fractions of Agglomerated Debris”, Nucl. Eng. Des., Vol. 262, pp. 452-461, 2013.
- [1.7] A. Konovalenko, A. Karbojian and P. Kudinov, “Experimental Results on Pouring and Underwater Liquid Melt Spreading and Energetic Melt-coolant Interaction”, NUTHOS-9, N9P0303, Kaohsing, Taiwan, September, 2012.
- [1.8] C. Journeau, J.-F. Haquet, B. Spindler, C. Spengler, J. Foit, The VULCANO VE-U7 corium spreading benchmark, Progress in Nuclear Energy, vol.48, 215--234, doi:10.1016/j.pnucene.2005.09.009, 2006.
- [1.9] B. Eppinger, G. Fieg, W. Sch"utz, U. Stegmaier, KATS experiments to simulate corium spreading in the EPR core catcher concept, 9th International Conference on Nuclear Engineering, 2001.

2. 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

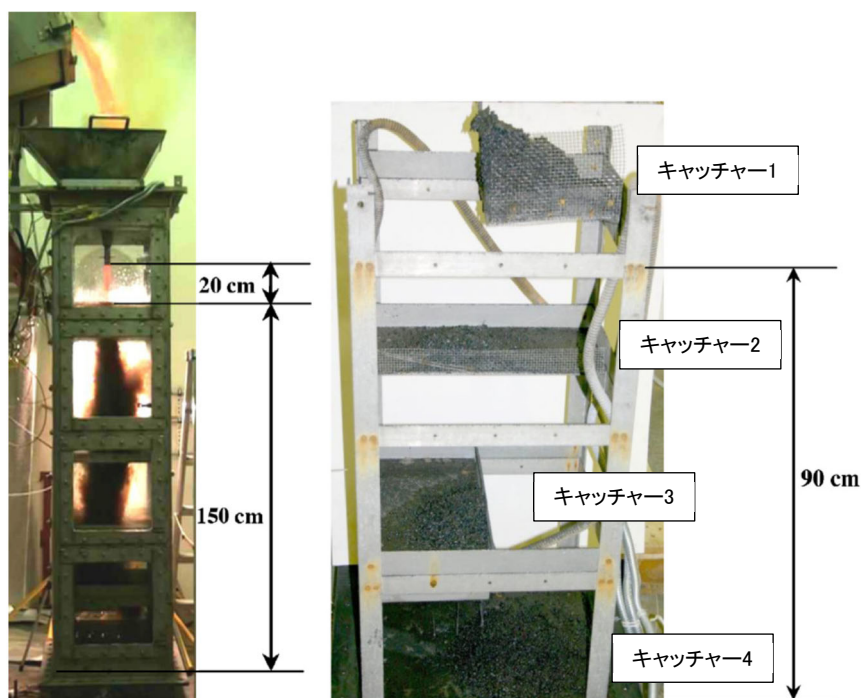
平成 27 年度から令和元年度までに、アグロメレーションモデルを構築することにより、アグロメレーションデブリの質量割合を目標とした水準で再現することが可能となった。令和 2 年度では、構築したアグロメレーションモデルを用いて、DEFOR-A 実験を対象とした感度解析を実施する。感度解析では、DEFOR-A 実験で用いられた溶融物の物性値及び、溶融ジェットより発生する粒子群の粒子直径を決定する疑似乱数のシード値がアグロメレーションデブリの質量割合へ与える影響を調査する。疑似乱数のシード値に着目する目的は、本解析で各条件に対する結果を統計的に評価する上で必要な粒子群のサンプル数を確保できていることを確認するためである。JASMINE コードでは、溶融ジェットより発生する複数の粒子を代表した粒子群を用いて粒子の挙動を解析する。疑似乱数のシード値により、粒子群の粒子直径の分布が影響を受ける場合には、アグロメレーションデブリの質量割合へ影響を与える可能性が考えられる。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、実験において物性値の計測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水プールから構成される。装置上部に設置された高周波誘導加熱炉で模擬物質を加熱し溶融させた後に、加熱炉を傾けることで溶融物を漏斗に落下させる。漏斗の下部に設置されたノズルを通して溶融物がジェット状に冷却水中に落下する。水プールの断面は 0.45 m × 0.5 m の矩形、高さは 2 m となっている。DEFOR-A 実験では、透明なプール壁を通して、冷却

水中を落下する溶融物を観察できる。



(1) 水プール (2) 水プール内に設置されるキャッチャー

図 2.3.1 DEFOR-A 実験装置 [2.1]

水プールの内部には、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 に水プールを上面から見たときのキャッチャーの配置を示す。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。冷却水中に侵入した溶融ジェットをキャッチャーに到達するまでにすべて粒子化させるために、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_m : 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。

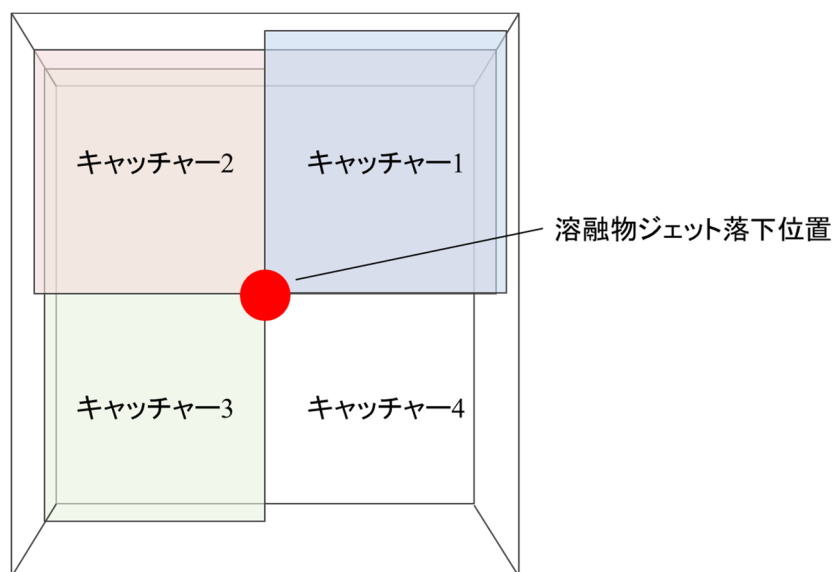


図 2.3.2 DEFOR-A 実験でのキャッチャーの配置

2.3.2. 実験条件

DEFOR-A 実験では、熔融物として酸化ビスマスと酸化タングステンの共晶点混合物 ($\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-WO}_3$) を熔融物として冷却水中に投入している。熔融物である $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-WO}_3$ 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
熔融物融点 [K]	1143
熔融物固相線温度 [K]	1138
熔融物液相線温度 [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、熔融物の温度 (過熱度)、熔融ジェット直径、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、途中で熔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、異なる高さに設置した 4 つのキャッチャーを実験装置に設置することで、1 回の実験で 4 通りの水深についてデータを取得する。JASMINE コードによる解析では 4 通りの水深を個別の解析で実施する。図 2.4.1 に DEFOR-A2 実験の解析体系を例として示す。DEFOR-A 実験の水プールの水平断面は 0.5 m × 0.45 m の矩形であるが、JASMINE コードによる解析では水プールの形状を、実験装置と水平断面積が等しい円筒形とした。解析では、実験と異なり水プール上方及び外側の気相部分の体積が有限となる。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. 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、溶融物の放出が途中で止まったと報告されている DEFOR-A3 実験を除外した DEFOR-A1~9 実験及び A23~27 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、構築したアグロメレーションモデルを用いて、アグロメレーションデブリの堆積割合を目標とした水準で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元年度と同一とした。

2.4.3. 感度解析

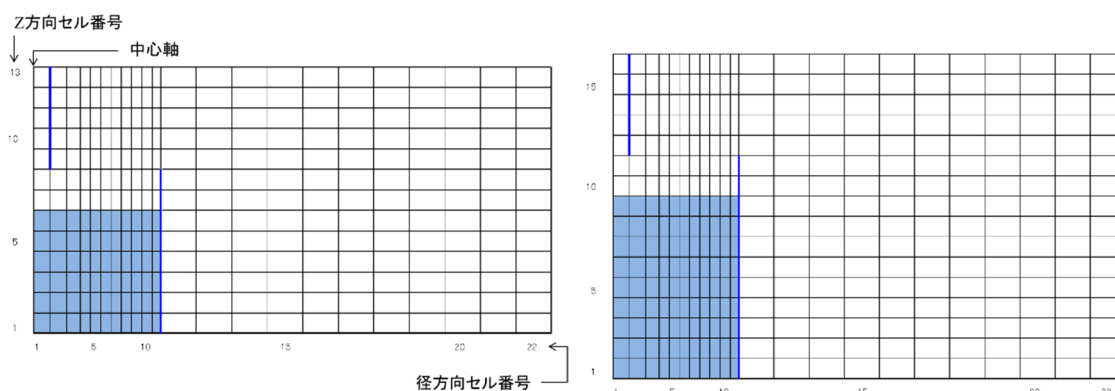
DEFOR-A 実験を対象とした感度解析では、溶融物の物性値に加えて、溶融ジェットより発生する粒子群の粒子直径を決定する疑似乱数のシード値がアグロメレーションデブリの堆質量に与える影響に着目する。感度解析での解析条件の設定方法は、項目 (1) 及び (2) に示す通りとした。

(1) 溶融物の物性値

溶融物の物性値を変更する場合には、表 2.3.3 に示す物性値（融点を除く）を個別に 1.5 倍及び 0.5 倍する。このとき、溶融物の密度を変更する場合、溶融物の密度を除く物性値は、表 2.3.3 に示す物性値に固定する。溶融物の投入速度及び投入時間は変更しないために、溶融物の密度を変更する場合でも、投入される溶融物の体積は一定である。物性値の係数（1.5 倍及び 0.5 倍）の数値に意味はなく、代表値として物性値の係数を決定した。溶融物の物性が解析結果に与える影響が不明であるために、物性値の係数はすべての物性値に関する感度解析で統一した。溶融物の物性値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。

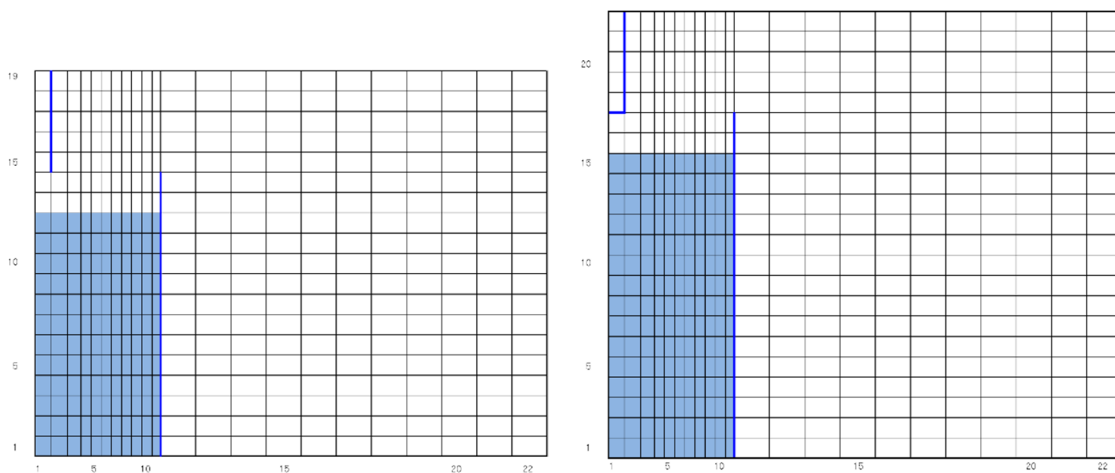
(2) 粒子直径の分布

発生する粒子群の粒子直径の分布を決定する疑似乱数のシード値を変更する。JASMINEコードでは、溶融ジェットより発生する複数の粒子を代表した粒子群を用いて粒子の挙動を解析する。疑似乱数のシード値により、粒子群の粒子直径の分布が影響を受ける場合には、アグロメレーションデブリの堆積割合へ影響を与える可能性が考えられる。疑似乱数のシード値を変更することにより、溶融ジェットより発生する粒子群の粒子直径の分布が変化及びアグロメレーションデブリの堆積質量へ与える影響を調査できる。



(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-A2 実験での解析体系

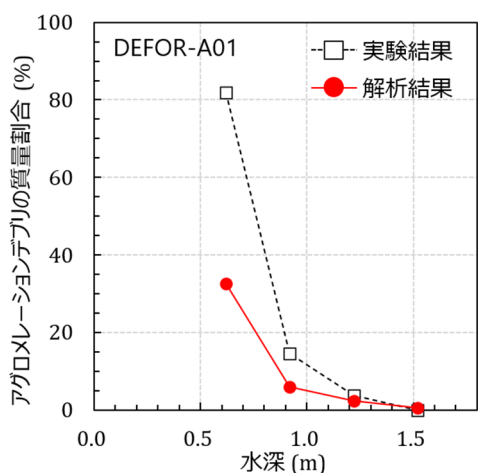
2.5. 解析結果

2.5.1. 実験解析

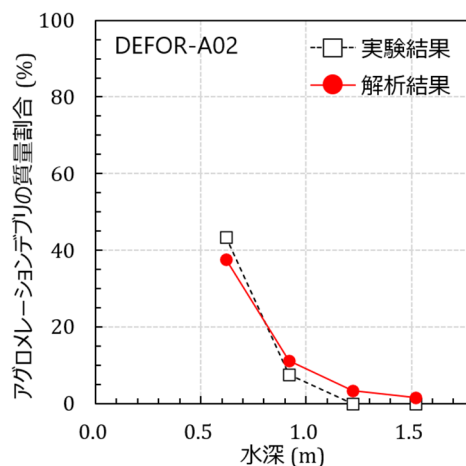
DEFOR-A 実験の実験結果と解析結果との比較を図 2.5.1 及び図 2.5.2 に示す。図 2.5.1 は A1～A9 実験 (A3 を除く) の実験結果と解析結果との比較を、図 2.5.2 は A23～A27 実験の実験結果と解析結果との比較をそれぞれ示す。

(1) DEFOR-A1～A9 実験

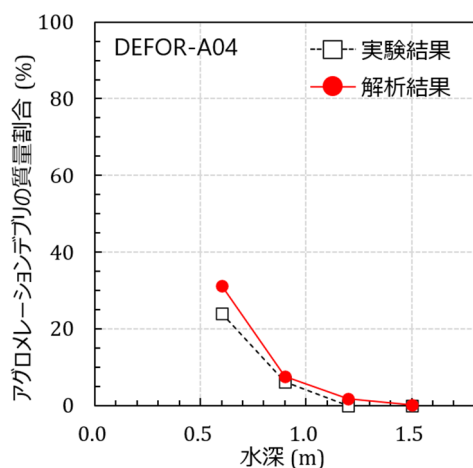
DEFOR-A1、A2、A4、A5、A6 及び A8 実験では、アグロメレーションデブリの質量割合が水深の増大に対して単調に減少する実験結果となった。DEFOR-A7 及び A9 実験では、キャッチャー1 よりもキャッチャー2 の方が高いアグロメレーションデブリの質量割合を示すために、アグロメレーションデブリの質量割合の分布は上向きに凸となっている。



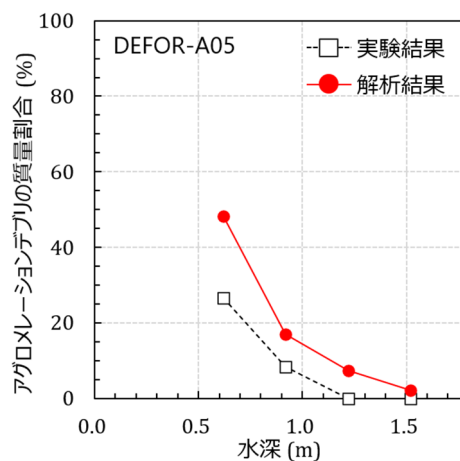
(1) DEFOR-A1 実験



(2) DEFOR-A2 実験

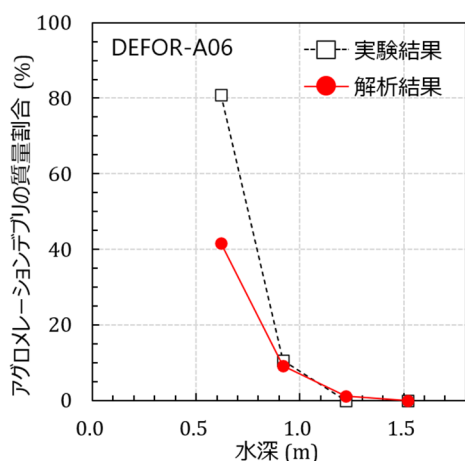


(3) DEFOR-A4 実験

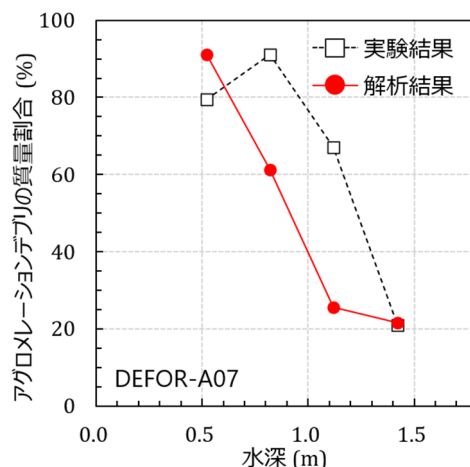


(4) DEFOR-A5 実験

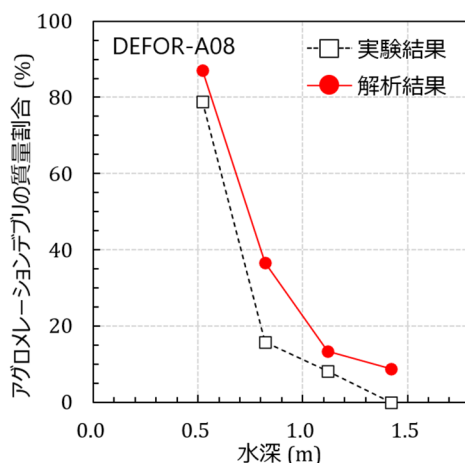
図 2.5.1 DEFOR-A1～A9 実験のアグロメレーション質量割合 (1/2)



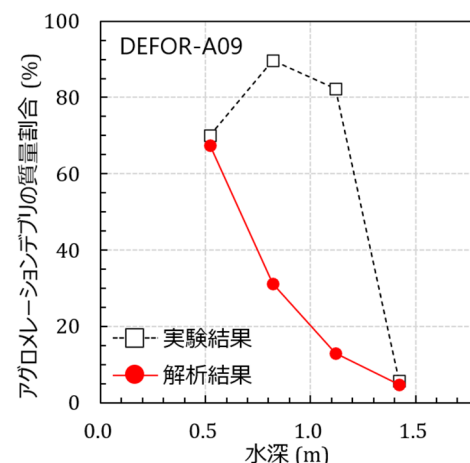
(5) DEFOR-A6 実験



(6) DEFOR-A7 実験



(7) DEFOR-A8 実験



(8) DEFOR-A9 実験

図 2.5.1 DEFOR-A1～A9 実験のアグロメレーション質量割合 (2/2)

DEFOR-A2 及び A4 実験では、解析結果は実験結果を良好に再現した。DEFOR-A5 及び A8 実験では、アグロメレーションデブリの質量割合をわずかに過大評価するものの、解析結果は実験結果を良好に再現した。DEFOR-A1 及び DEFOR-A6 実験では、解析結果はキャッチャー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ものの、実験結果を良好に再現した。DEFOR-A7 及び A9 実験では、解析結果はアグロメレーションデブリの質量割合の分布が上向きに凸となる傾向を再現できなかった。

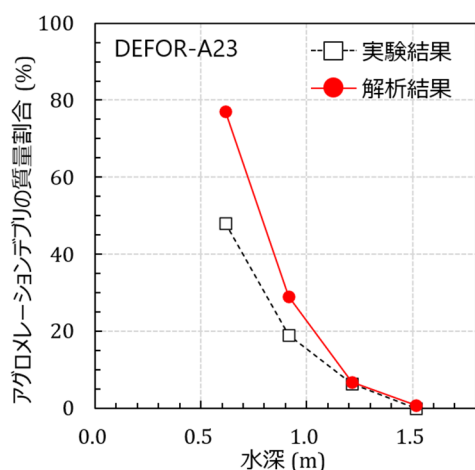
DEFOR-A7 及び A9 実験では、溶融物の射出後、水槽内に設置されたキャッチャー1の縁が水槽の壁面側に折れ曲がっていたことが確認されている [2.1]。このことから、DEFOR-A7 及び A9 実験では、キャッチャー1の縁が冷却水中に侵入した溶融ジェットを弾くことにより、デブリが適切に捕集されなかった可能性が指摘されている [2.1]。よって、適切に実験が完了しなかった DEFOR-A7 及び A9 実験でのアグロメレーションデブリの質量割合を再現する必要はないものと考えられる。

DEFOR-A6 実験では、溶融物の射出後、水槽内に設置されたキャッチャー1の縁が水槽の中央側に折れ曲がっていたことが確認されている [2.1]。このことから、DEFOR-A6 実験では、キャッチャー1が冷却水中に侵入した溶融ジェットを過剰に捕集した可能性が指摘されている [2.1]。よって、DEFOR-A7 及び A9 実験と同様に DEFOR-A6 実験でのアグロメレーションデブリの質量割合を再現する必要はないものと考えられる。

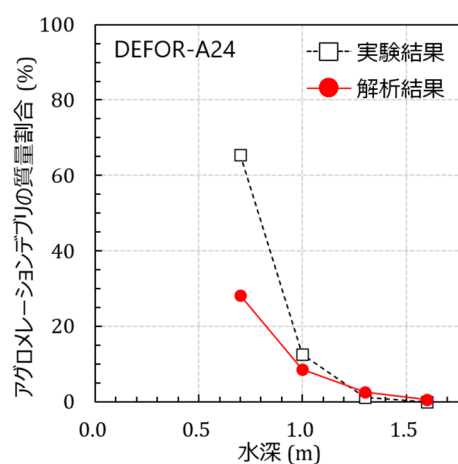
(2) DEFOR-A23～A27 実験

DEFOR-A23、A24 及び A26 実験では、アグロメレーションデブリの質量割合が水深の増大に対して単調に減少する実験結果となった。DEFOR-A25 実験では、DEFOR-A7 及び A9 実験と同様に、キャッチャー1よりもキャッチャー2の方が高いアグロメレーションデブリの質量割合を示すために、アグロメレーションデブリの質量割合の分布は上向きに凸となる傾向を示している。ただし、DEFOR-A7 及び A9 実験と比較して、アグロメレーションデブリの質量割合の値が極めて少ない特異的な傾向を示した。DEFOR-A27 実験では、アグロメレーションデブリの質量割合は単調に減少するものの、DEFOR-A23、A24 及び A26 実験と異なり、水深が深くなることによりアグロメレーションデブリの質量割合が急激に減少せず、アグロメレーションデブリの質量割合が緩やかに減少することにより、分布が上向きに凸となる傾向を示している。

DEFOR-A23、A24 及び A26 実験では、水深の浅い位置に設置されたキャッチャーのアグロメレーションデブリの質量割合を過大評価もしくは過小評価するものの、解析結果は実験結果を良好に再現した。DEFOR-A25 実験では、DEFOR-A7 及び A9 実験と同様に、アグロメレーションデブリの質量割合の分布が上向きに凸となる傾向を再現できなかった。DEFOR-A27 実験では、解析結果はすべての水深で高いアグロメレーションデブリの質量割合となる実験結果を再現できなかった。

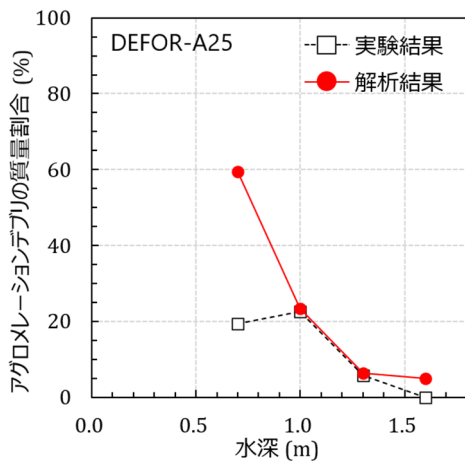


(1) DEFOR-A23 実験

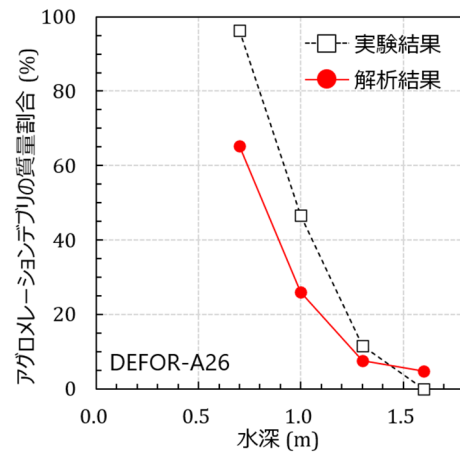


(2) DEFOR-A24 実験

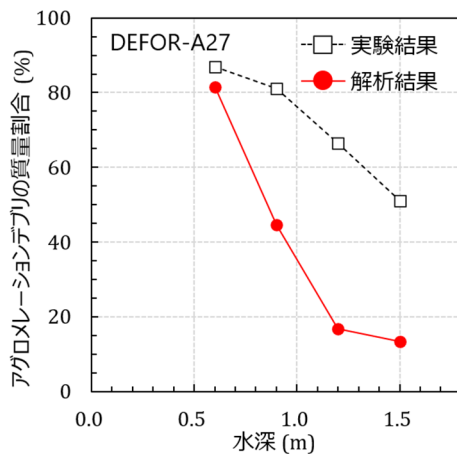
図 2.5.2 DEFOR-A23～A27 実験のアグロメレーション質量割合 (1/2)



(3) DEFOR-A25 実験



(4) DEFOR-A26 実験



(5) DEFOR-A27 実験

図 2.5.2 DEFOR-A23～A27 実験のアグロメレーション質量割合 (2/2)

これまでに実施された実験結果とは異なり、アグロメレーションデブリの質量割合の値が極めて少ない特異的な傾向を示した DEFOR-A25 実験は実験結果の信頼性が低いものと考えられる。DEFOR-A27 実験では、約 200K となる溶融物の高い過熱度の影響を受けたと考えられるものの、詳細な要因は不明である。

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、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。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。

2.5.2. 感度解析

DEFOR-A 実験の感度解析の結果を図 2.5.3 から図 2.5.8 に示す。図 2.5.3 から図 2.5.8 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

溶融物の密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顕著に増加した。溶融物の比熱、熱伝導率、粘性係数及び表面張力の変化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限定的となった。疑似乱数のシード値の変更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限定的となった。

図 2.5.3 (1) に示す通り、溶融物の密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 2.5.3 (6) に示す通り、疑似乱数のシード値を変更した場合でも、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。

DEFOR-A5 実験

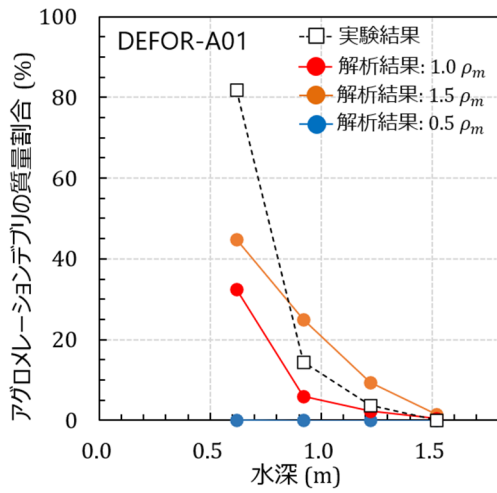
溶融物の密度の増加に伴いすべてのキャッチャーでアグロメレーションデブリの質量割合が顕著に増加した。溶融物の比熱、熱伝導率、粘性係数及び表面張力の変化によるアグロメレーションデブリの質量割合への影響は限定的となった。疑似乱数のシード値の変更によるアグロメレーションデブリの質量割合への影響は限定的となった。

図 2.5.4 (1) から (6) に示す通り、溶融物の物性値及び疑似乱数のシード値を変更した場合でも、溶融物の密度を除き、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に変化はなかった。

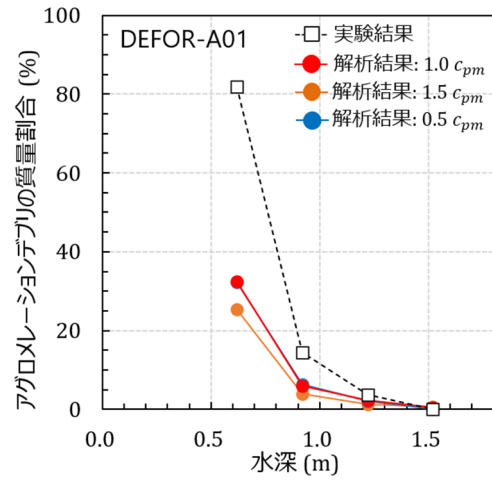
DEFOR-A8 実験

溶融物の密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顕著に増加した。溶融物の比熱、熱伝導率、粘性係数及び表面張力の変化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限定的となった。疑似乱数のシード値の変更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限定的となった。

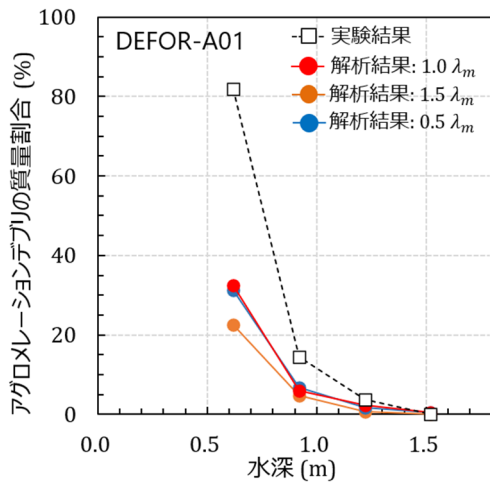
図 2.5.5 (1) から (6) に示す通り、溶融物の物性値及び疑似乱数のシード値を変更した場合でも、溶融物の密度を除き、キャッチャー1 から 4 でアグロメレーションデブリの質量割合を過大評価する傾向に変化はなかった。



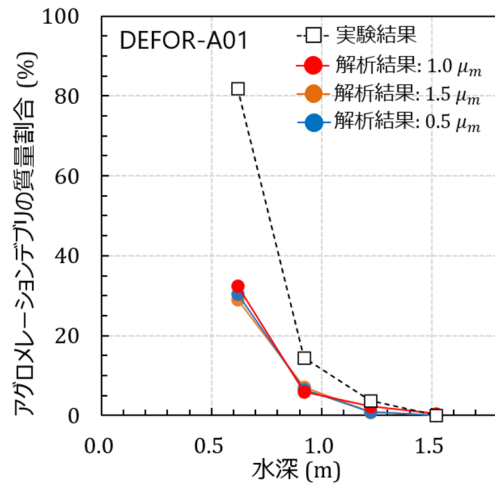
(1) 溶融物の密度



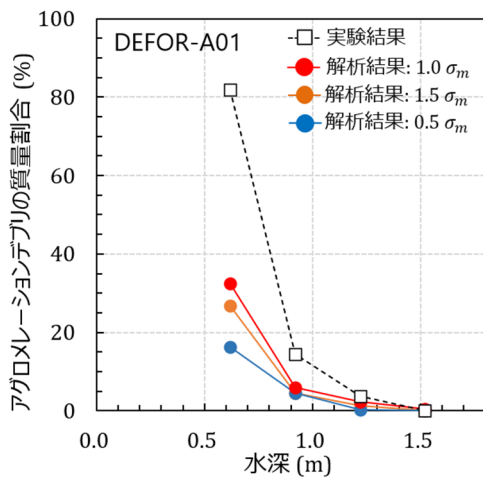
(2) 溶融物の比熱



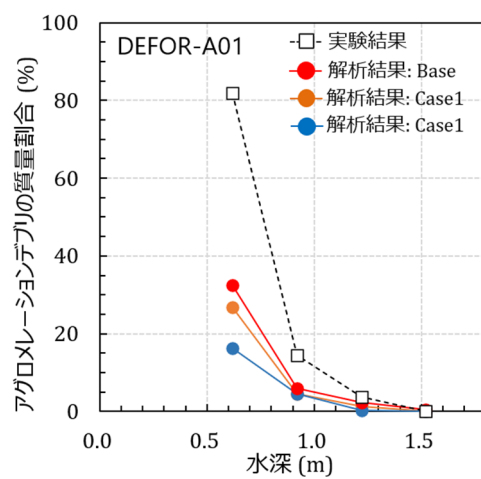
(3) 溶融物の熱伝導率



(4) 溶融物の粘性係数

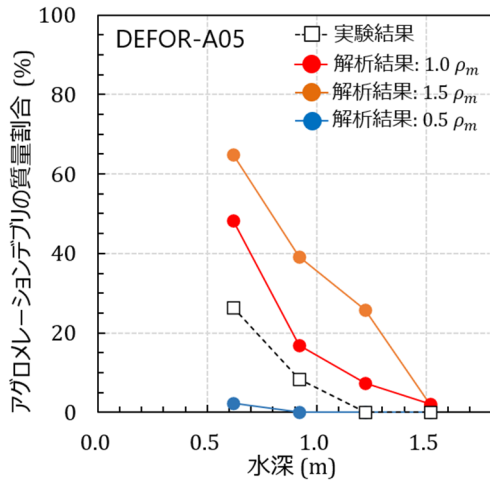


(5) 溶融物の表面張力

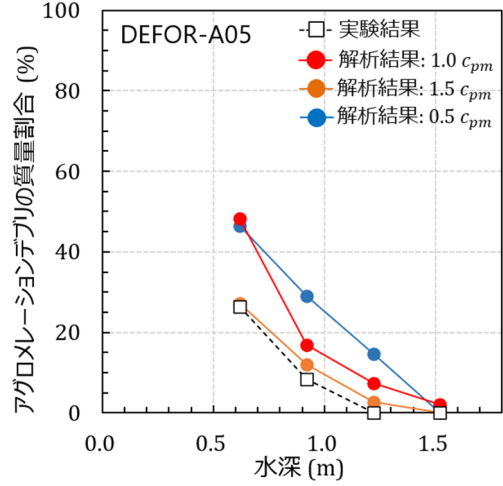


(6) 疑似乱数のシード値

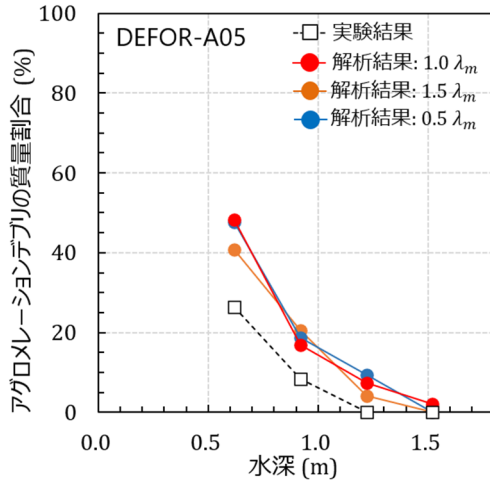
図 2.5.3 アグロメレーション質量割合：DEFOR-A1



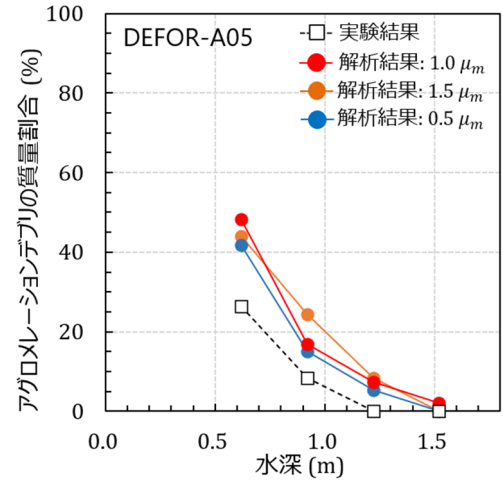
(1) 溶融物の密度



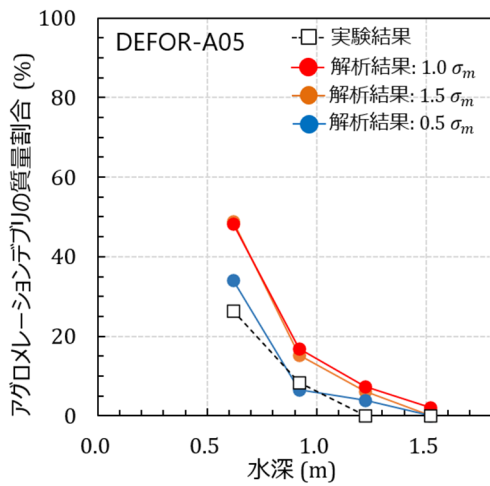
(2) 溶融物の比熱



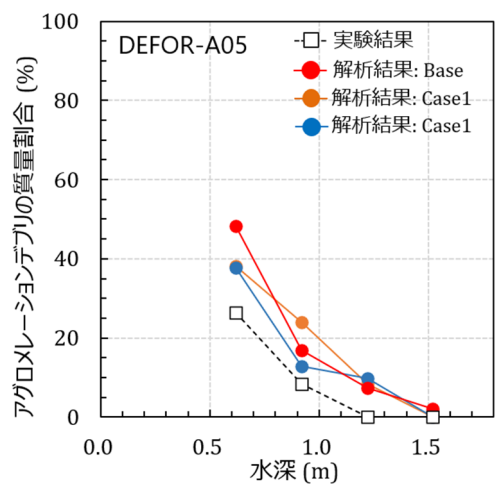
(3) 溶融物の熱伝導率



(4) 溶融物の粘性係数

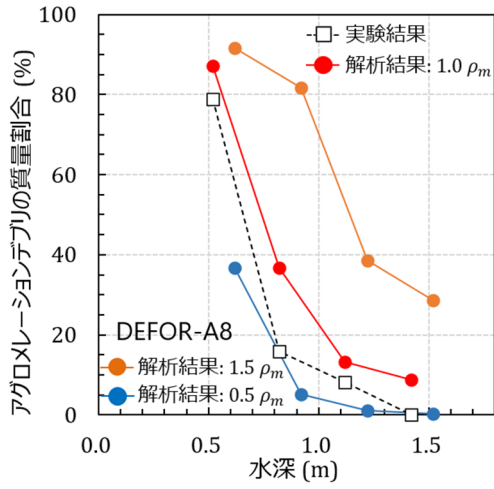


(5) 溶融物の表面張力

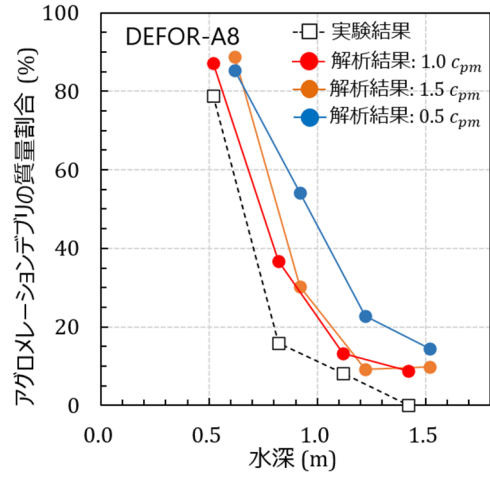


(6) 疑似乱数のシード値

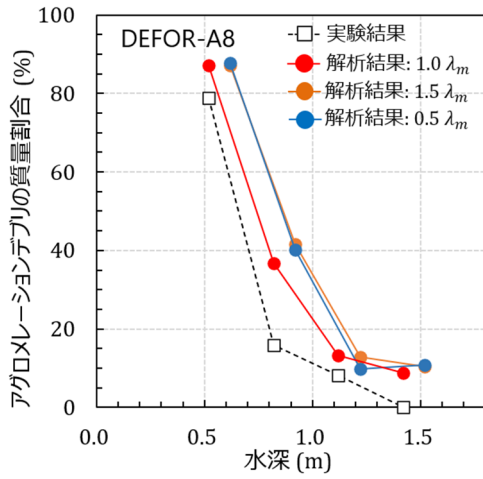
図 2.5.4 アグロメレーション質量割合：DEFOR-A5



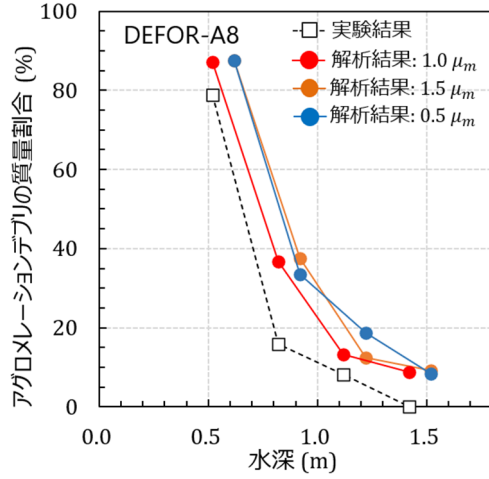
(1) 溶融物の密度



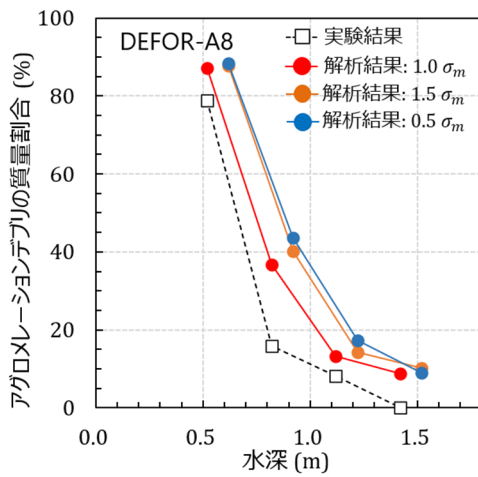
(2) 溶融物の比熱



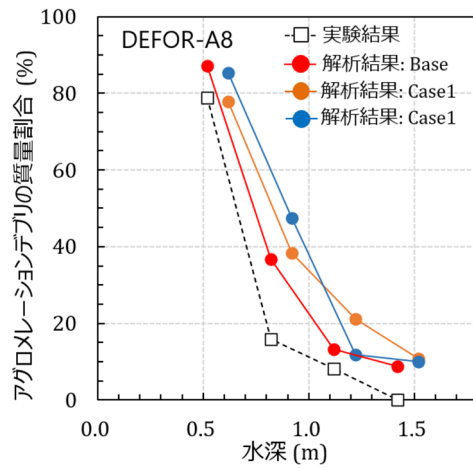
(3) 溶融物の熱伝導率



(4) 溶融物の粘性係数



(5) 溶融物の表面張力



(6) 疑似乱数のシード値

図 2.5.5 アグロメレーション質量割合：DEFOR-A8

DEFOR-A23 実験

溶融物の密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顕著に増加した。溶融物の比熱、熱伝導率、粘性係数及び表面張力の変化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限定的となった。疑似乱数のシード値の変更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限定的となった。

図 2.5.6 (1) から (6) に示す通り、溶融物の物性値疑似乱数のシード値を変更した場合でも、溶融物の密度を除き、キャッチャー1 及び 2 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。

DEFOR-A24 実験

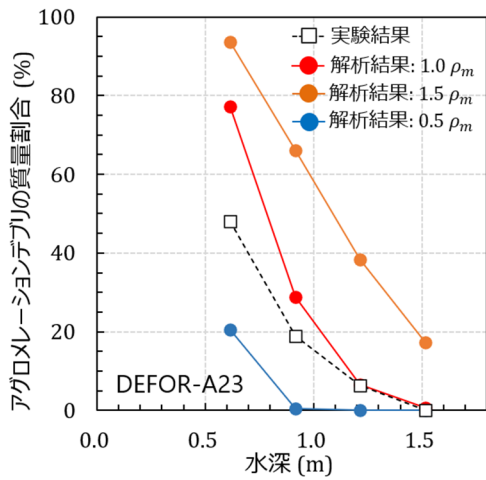
溶融物の密度の増加に伴いすべてのキャッチャーでアグロメレーションデブリの質量割合が顕著に増加した。溶融物の比熱、熱伝導率、粘性係数及び表面張力の変化によるアグロメレーションデブリの質量割合への影響は限定的となった。疑似乱数のシード値の変更によるアグロメレーションデブリの質量割合への影響は限定的となった。

図 2.5.7 (1) から (6) に示す通り、溶融物の物性値及び疑似乱数のシード値を変更した場合でも、溶融物の密度を除き、キャッチャー1 で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2 から 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。

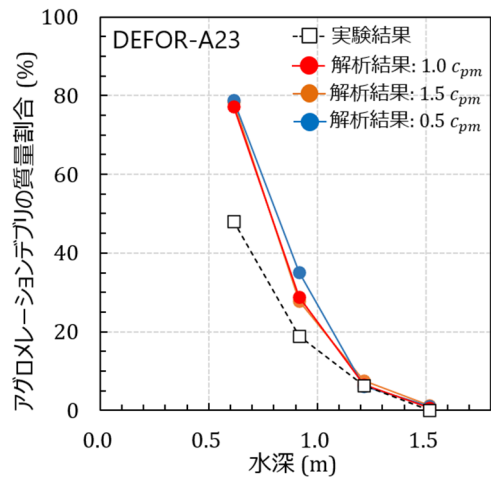
DEFOR-A26 実験

溶融物の密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顕著に増加した。溶融物の比熱、熱伝導率、粘性係数及び表面張力の変化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限定的となった。疑似乱数のシード値の変更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限定的となった。

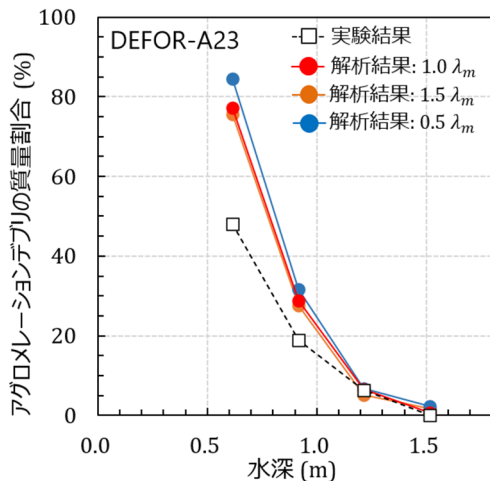
図 2.5.8 (1) から (6) に示す通り、溶融物の物性値及び疑似乱数のシード値を変更した場合でも、溶融物の密度を除き、キャッチャー1 から 3 でのアグロメレーションデブリの質量割合を過小評価する及びキャッチャー4 でのアグロメレーションデブリの質量割合を過大評価する傾向に変化はなかった。



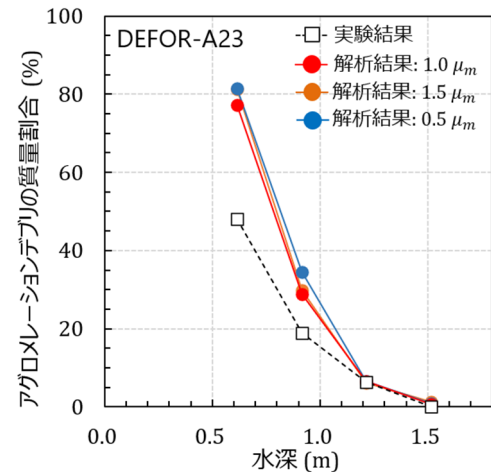
(1) 溶融物の密度



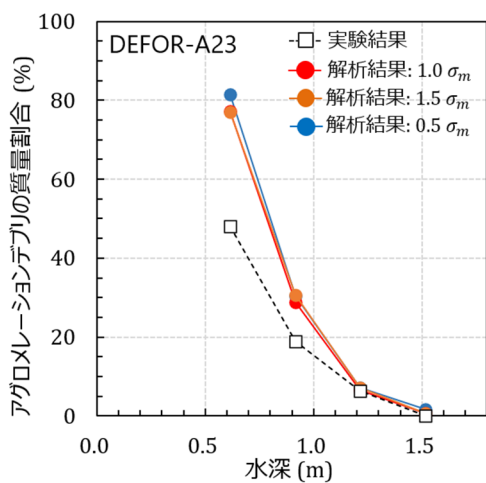
(2) 溶融物の比熱



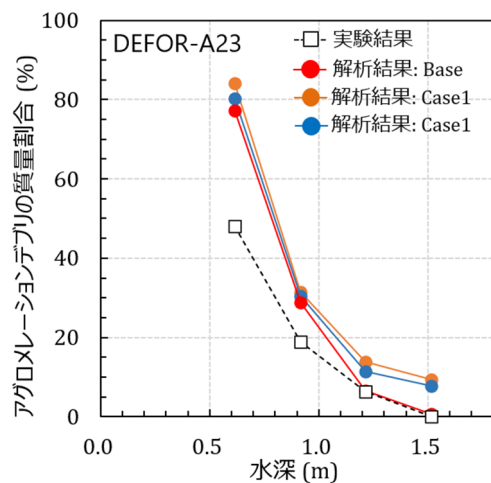
(3) 溶融物の熱伝導率



(4) 溶融物の粘性係数

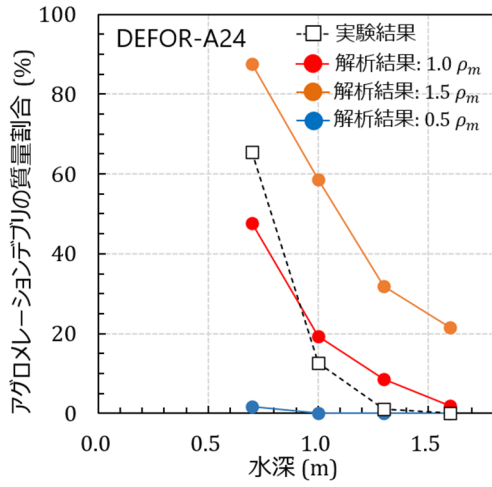


(5) 溶融物の表面張力

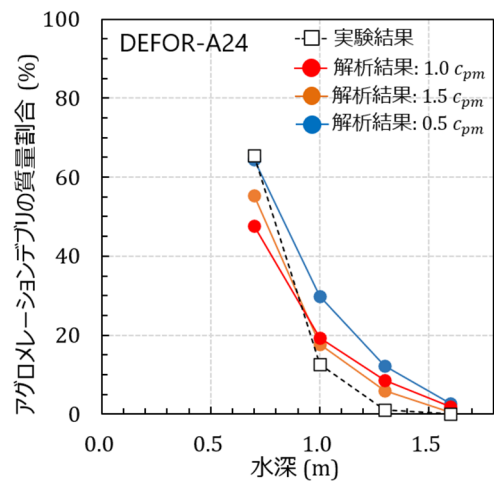


(6) 疑似乱数のシード値

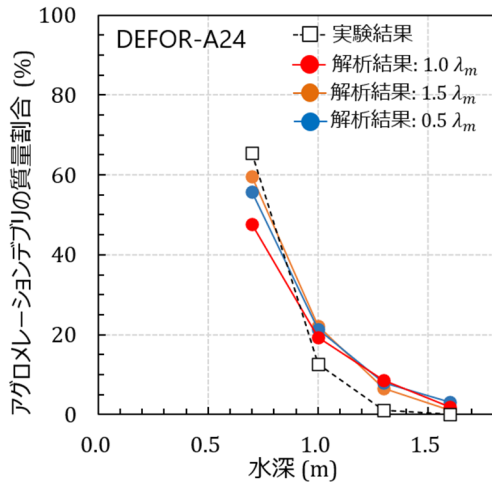
図 2.5.6 アグロメレーション質量割合 : DEFOR-A23



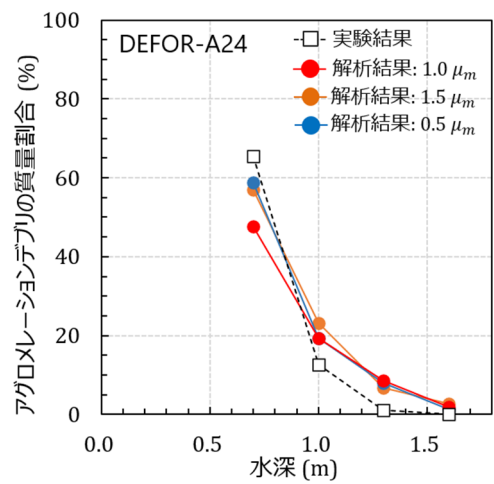
(1) 溶融物の密度



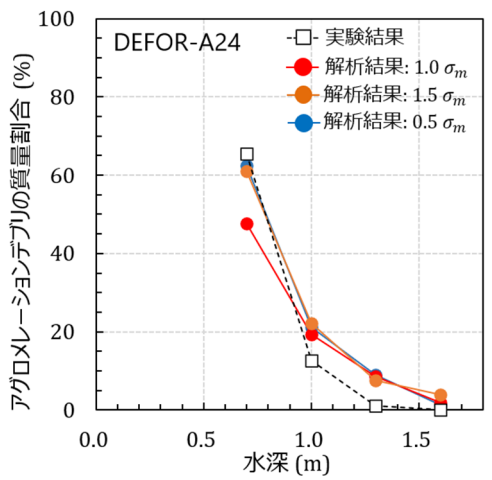
(2) 溶融物の比熱



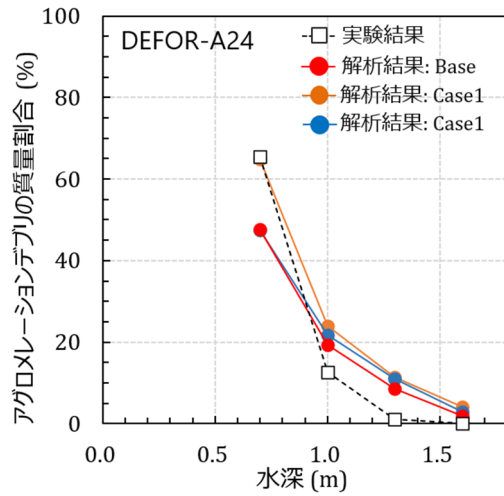
(3) 溶融物の熱伝導率



(4) 溶融物の粘性係数

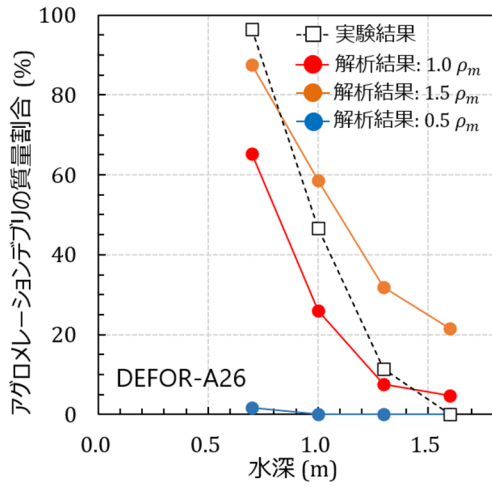


(5) 溶融物の表面張力

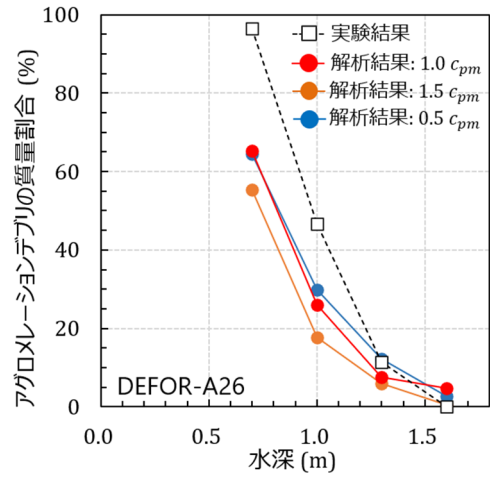


(6) 疑似乱数のシード値

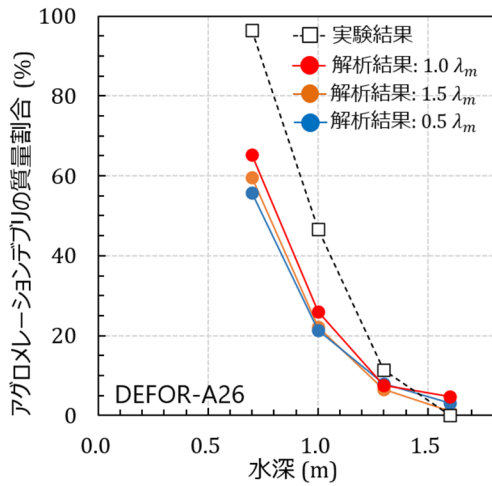
図 2.5.7 アグロメレーション質量割合 : DEFOR-A24



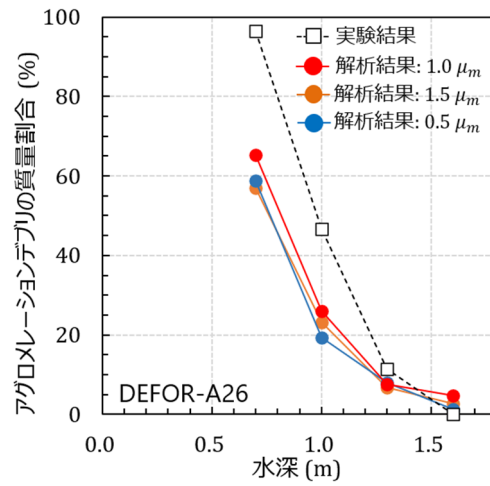
(1) 溶融物の密度



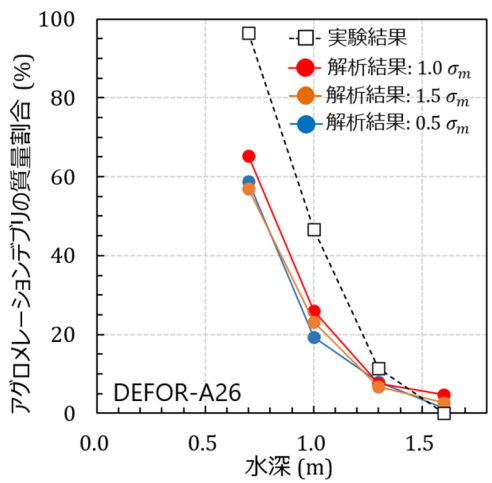
(2) 溶融物の比熱



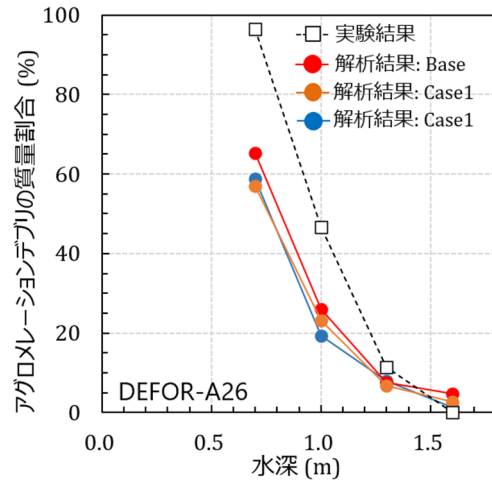
(3) 溶融物の熱伝導率



(4) 溶融物の粘性係数



(5) 溶融物の表面張力



(6) 疑似乱数のシード値

図 2.5.8 アグロメレーション質量割合 : DEFOR-A26 (2/2)

2.6. 考察

(1) 溶融物の物性の影響

アグロメレーションデブリの質量割合へ溶融物の密度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での粒子群の落下時間及び水平方向落下位置を調査した結果を図 2.6.1 に示す。図 2.6.1 (1) の横軸は、溶融ジェットより粒子群が発生した瞬間からキャッチャーの表面に到達するまでに必要となる落下時間の分布を、図 2.6.1 (2) の横軸は、キャッチャーの表面に到達した際の粒子群の水平方向落下位置 (キャッチャー中心から粒子群が落下した位置までの距離) の分布をそれぞれ示す。図 2.6.1 (1) 及び (2) の縦軸は、発生した全粒子群数で規格化した粒子群の数を示す。

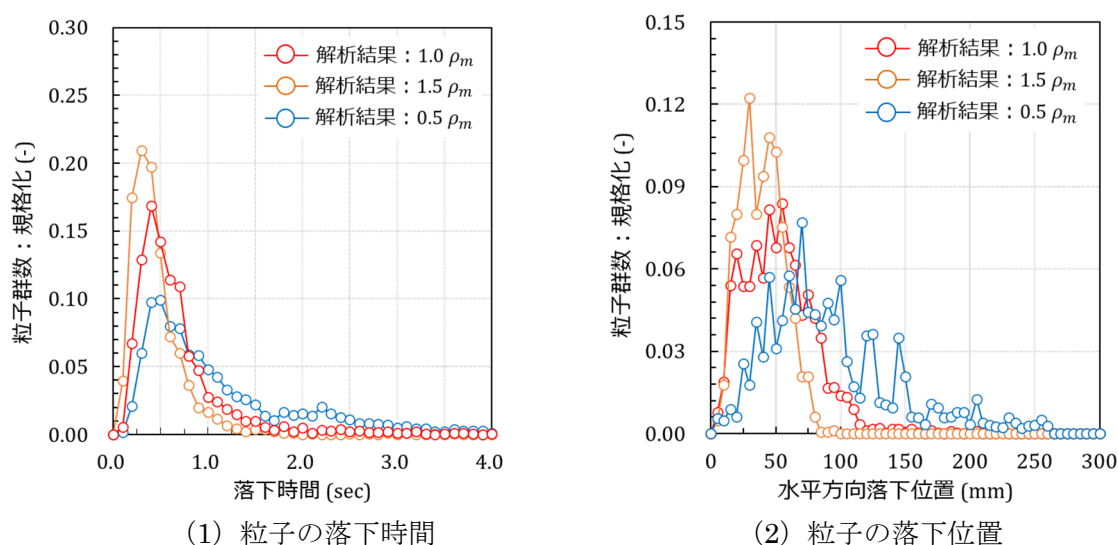


図 2.6.1 溶融物の密度による粒子群の落下への影響 (DEFOR-A24 実験)

図 2.6.1 (1) より、溶融物の密度が増加すると落下時間が短い粒子群が増加する。一方で、溶融物の密度が減少すると落下時間の長い粒子群が増加する。このことは、溶融物の密度の増加により、発生した粒子群が直ちにキャッチャーの表面に到達する傾向となることを示す。図 2.6.1 (2) より、溶融物の密度が増加するとキャッチャーの表面に到達するまでに粒子群が移動する水平方向の距離が減少する。一方で、溶融物の密度が減少すると、キャッチャーの表面に到達するまでに粒子群が移動する水平方向の距離が増加する。このことは、溶融物の密度の増加により、溶融ジェットより発生した粒子群が水平方向へ移動せず、キャッチャーの中心付近に堆積する傾向となることを示す。

溶融物の密度が増加した場合には、粒子群の慣性が増大するために、溶融ジェットの流入や水蒸気の発生により誘起される二相流動の影響を受け難くなる。したがって、粒子群が直ちにキャッチャーの表面に到達するとともに、キャッチャーの中心付近から水平方向へ移動し難くなる。粒子群が固化する前にキャッチャーの表面へ到達する割合が増加するとともに、粒子群がキャッチャーの中央付近に集中して堆積することから、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、溶融物の密度が減少した場合には、

粒子群の慣性が減少するために、溶融ジェットの流れや水蒸気の発生により誘起される二相流動の影響を受け易くなる。したがって、粒子群がキャッチャーの表面に到達するまでの落下時間が増加するとともに、キャッチャーの中心付近から水平方向へ移動し易くなる。粒子群が固化する前にキャッチャーの表面へ到達する割合が減少するとともに、粒子群がキャッチャーの中央付近から分散して堆積することから、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) 粒子直径分布の影響

アグロメレーションデブリの質量割合へ粒子直径の分布を決定する疑似乱数のシード値が与える影響が限定的とな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での粒子群の粒子直径の分布及び疑似乱数の分布を調査した結果を図 2.6.2 に示す。図 2.6.2 (1) に疑似乱数のシード値を変更した場合の粒子直径の分布（キャッチャー1）の変化を示す。疑似乱数のシード値を変更した場合でも、粒子直径の分布はほぼ同一となった。図 2.6.2 (2) に粒子群番号と疑似乱数の値の対応関係（200 個までの抜粋）を示す。JASMINE コードでは、時間ステップの開始前に予め指定した個数（現状 10,000 個）の疑似乱数を発生させる。発生させた疑似乱数番号と粒子群番号は 1 対 1 に対応している。したがって、時間ステップの開始前に予め粒子直径を指定することとなる。図 2.6.2 (2) より、疑似乱数のシード値に依らず、疑似乱数の値は一様に分布する。したがって、疑似乱数のシード値の変更した場合でも、疑似乱数の値に偏りは発生しないために、対応する粒子直径にも偏りは発生しないことになる。

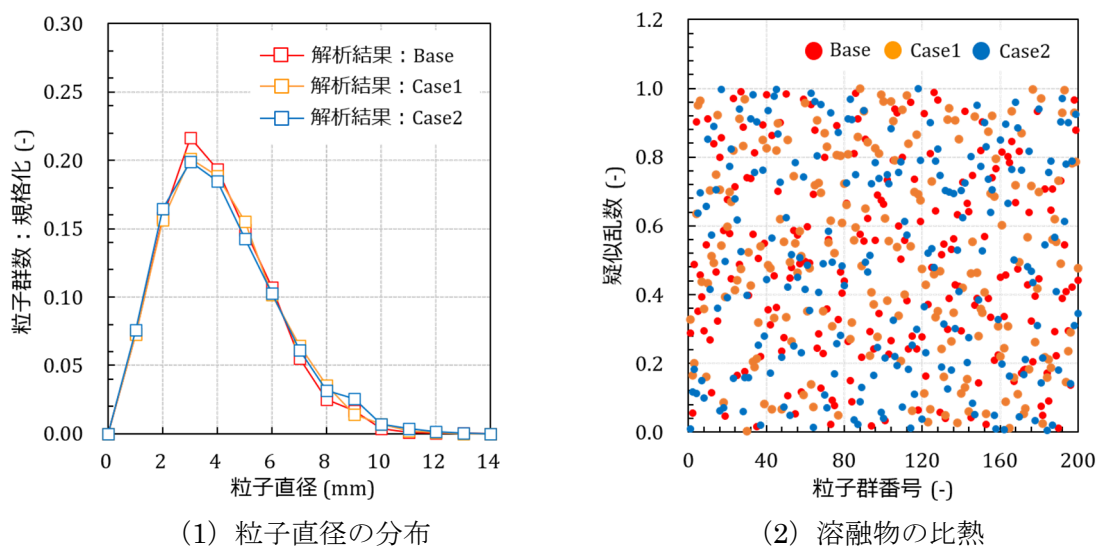


図 2.6.2 疑似乱数のシード値による粒子直径の分布への影響（DEFOR-A24 実験）

JASMINE コードでは、時間ステップの開始後に溶融ジェットより離脱した質量に応じて粒子群番号 1 の粒子群から冷却水に放出（発生）される。単一の粒子群に含まれる粒子数は一定の値に固定されているために、該当する粒子群番号と対応する粒子直径に応じて、1

回の質量の離脱で複数の粒子群が生成する場合もある。DEFOR-A24 のキャッチャー1 では、およそ 2,600 個の粒子群が発生する。したがって、疑似乱数のシード値を変更した場合でも、粒子直径の分布に偏りが発生しないことに加えて、時間ステップの終了までに発生する粒子群の個数が Rosin-Rammler 分布を再現するほどに十分になることが、図 2.6.2 (1) に示す粒子直径の分布がほぼ同一としている。これらが粒子直径の分布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に与える影響を限定的としている要因となる。

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、熔融物の物性値及び熔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。感度解析の結果、熔融物の密度の増加及び減少は、それぞれ、アグロメレーションデブリの質量割合を増加及び減少させることが分かった。熔融物の密度の増加／減少は、粒子群の慣性の増大／低減をもたらし、熔融ジェットの流入や水蒸気の発生により誘起される二相流動の影響の受け難くさ／受け易さを通して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。また、疑似乱数のシード値がアグロメレーションに対して与える影響が限定的であったことから、本解析では各条件に対する結果を統計的に評価する上で必要な粒子群のサンプル数を確保できていることを確認した。

DEFOR-A27 実験では、熔融物が非晶組成となった状態で冷却水に投入された可能性が報告されている。非晶組成となったことにより、熔融物の密度に影響を及ぼした可能性が考えられる。したがって、実験で投入された熔融物の密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、粒子群が受ける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や水蒸気の発生に起因する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質範囲を目標とした水準で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 実験等を対象とした感度解析を実施する。感度解析では、実験で用いられた溶融物の物性値に加えて、溶融物を含む空隙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。このことにより、実験において物性値の計測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。

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溶融物のジェットを落下させる水プールから構成される。装置上部に設置された高周波誘導加熱炉で模擬物質を加熱し溶融させた後に、加熱炉を傾けることで溶融物を漏斗に落下させる。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。E16~E18 実験では、直角に石英ガラス製の板壁を設けることにより、溶融物の拡がりが扇型（ 90° ）となる。

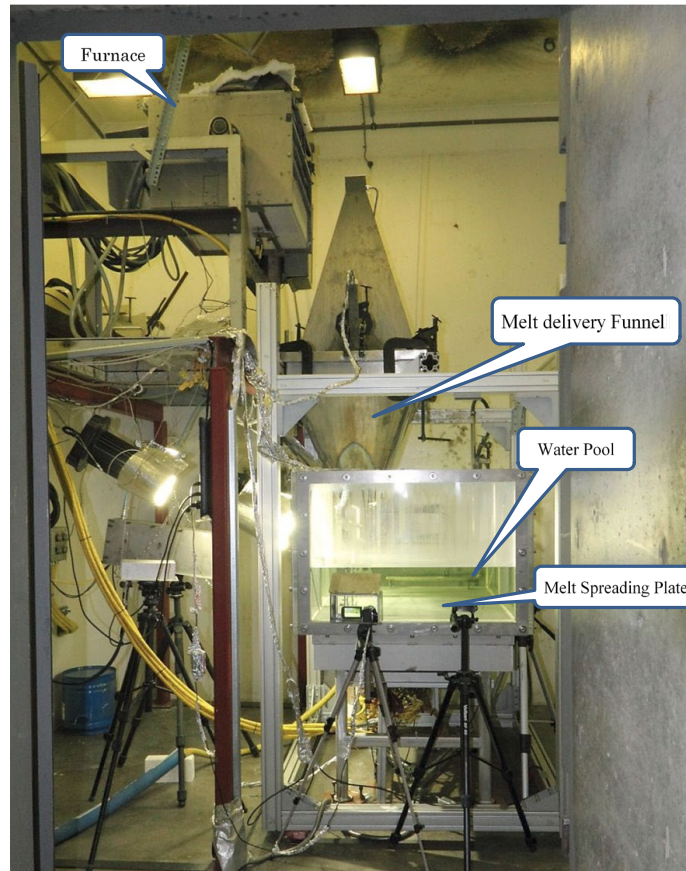
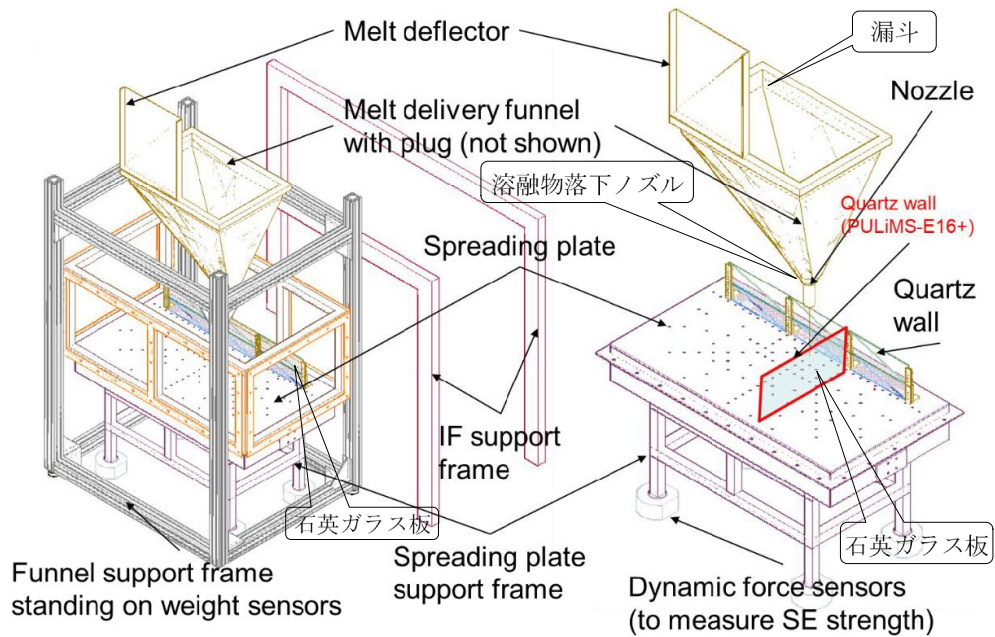


図 3.3.1 PULiMS 実験装置の外観図 (E10 から E15 実験)



(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、溶融物として酸化ビスマスと酸化タングステンの共晶点混合物 ($\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-WO}_3$) を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、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った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、初期に溶融物の落下量が少なくなった PULiMS-E8 実験に加えて、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、構築した溶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 実験での溶融物の拡がり及び連続層状デブリの堆積範囲を目標とした水

準で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ウェット条件で実施された PULiMS 実験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

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、溶融物の物性値に加えて、溶融物の含む空隙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。

溶融物の物性値

溶融物の物性値を変更する場合には、表 3.3.1 に示す物性値（融点を除く）を個別に 1.5 倍及び 0.5 倍する。このとき、溶融物の密度を変更する場合、溶融物の密度を除く物性値は、表 3.3.1 に示す物性値に固定する。溶融物の投入速度及び投入時間は変更しないために、溶融物の密度を変更する場合でも、投入される溶融物の体積は一定である。物性値の係数（1.5 倍及び 0.5 倍）の数値に意味はなく、代表値として物性値の係数を決定した。溶融物の物性が解析結果に与える影響が不明であるために、物性値の係数はすべての物性値に関する感度解析で統一した。溶融物の物性値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。

溶融物の含む空隙

JASMINE コードでは、溶融物が含む空隙率を入力により与える。空隙率は床面の床面を拡がる溶融物の密度の変化に寄与する。溶融物が含む空隙率を変更する場合には、表 3.3.2 及び表 3.3.3 に示す溶融物の含む空隙率を個別に 1.5 倍及び 0.5 倍する。空隙率の係数（1.5 倍及び 0.5 倍）の数値に意味はなく、代表値として物性値の係数を決定した。溶融物の含む空隙率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、流入する溶融物の初速は表 3.3.2 及び表 3.3.3 に示す溶融物の落下体積、落下直径、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	
熔融物の種別	Bi ₂ O ₃ -WO ₃ (共晶組成)			
熔融物温度 (K)	1279	1213	1168	1182.15
落下熔融物量 (kg)	23.4	46.9	23.2	26.8
落下継続時間 (s)	10	12	17.6	24.9
ノズル位置 (床からの高さ mm)	400	400	400	400
ノズル径 (mm)	20	20	20	15
水プール寸法	1 m × 2 m		1 m × 1 m	
水プール半径の入力値	0.8 m		0.565 m	
床板厚さ	10 mm		10 mm	
冷却水初期深さ (mm)	200	200	200	200
冷却水初期水温 (K)	352	350.15	368.15	369
熔融物中ボイド率	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
ノズル径 (mm)	20	30	15	15	15	17	17	17	17
水プール寸法	0.9 m × 1.6 m								
水プール半径の入力値	0.958 m						1.354		
床板厚さ	10 mm								
冷却水初期深さ (mm)	200	190	150	200	200	168	200	210	210
冷却水初期水温 (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 3.4.3 は PULiMS-E1~E9 実験、図 3.4.4 は PULiMS-E10~E14 実験及び図 3.4.5 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

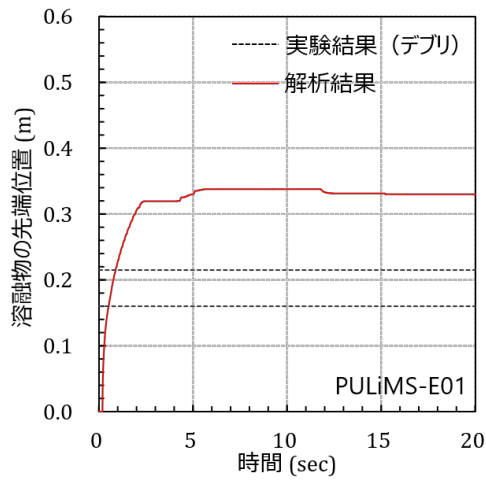
PULiMS-E1 及び E4 実験では、溶融物の拡がりの先端位置は計測されていないために、実験で得られたデブリの長辺及び短辺の値の計測結果を示す。PULiMS-E9 実験では、熱電対を用いた溶融物の拡がりの先端位置の計測結果に加えて、実験で得られたデブリの長辺及び短辺の値を示す。PULiMS-E1~E9 実験で得られたデブリの計測結果より、溶融物の拡がりの先端位置は投入ノズルより、0.2 m から 0.4 m 程度まで到達することが分かる。PULiMS-E9 実験で得られた熱電対を用いた計測結果より、溶融物の投入開始より溶融物の拡がりの先端位置は投入ノズルより拡がるのが分かる。

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、解析結果は実験で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。

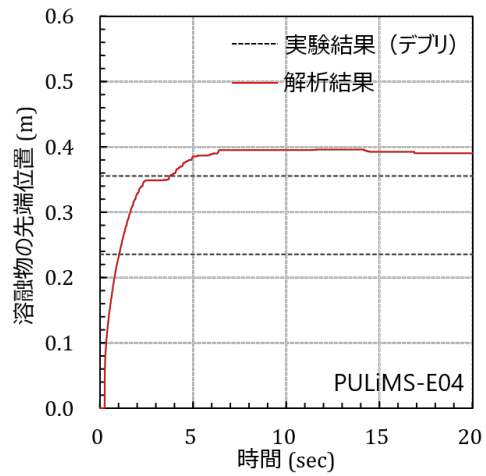
PULiMS-E10~E14 実験

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を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。

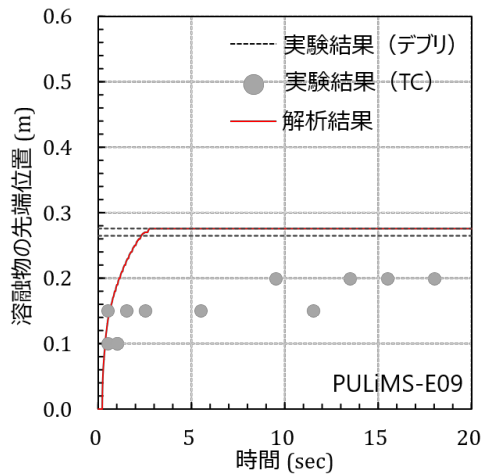
PULiMS-E10、E11 及び E14 実験では、解析結果と実験で得られたデブリの計測結果は良好に一致した。加えて、解析結果は実験で得られた高速度可視化及び熱電対を用いた計測結果と良好に一致した。PULiMS-E12 及び E13 実験では、解析結果は実験で得られたデブリの計測結果をわずかに過小評価もしくは過大評価した。このとき、解析結果は実験で得られた高速度可視化及び熱電対を用いた計測結果と良好に一致した。



(1) PULiMS-E1 実験



(2) PULiMS-E4 実験



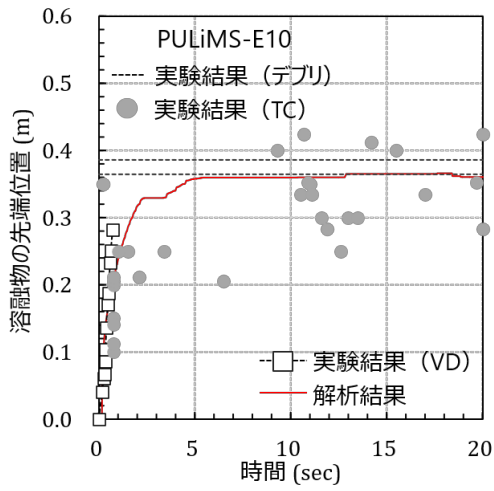
(3) PULiMS-E9 実験

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

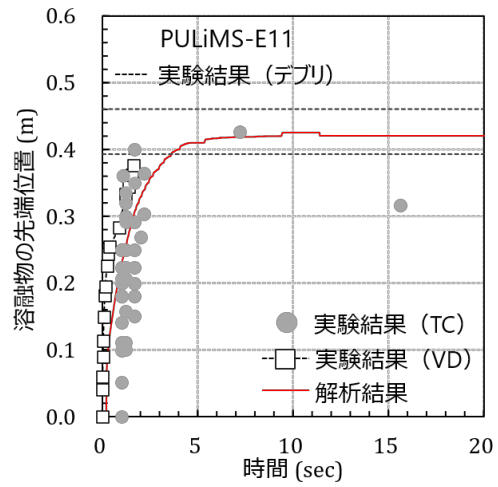
PULiMS-E16~E18 実験

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。

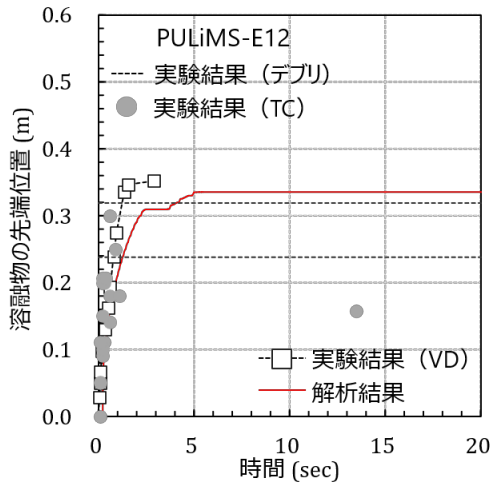
PULiMS-E16 実験では、解析結果は実験で得られたデブリの計測結果をわずかに過大評価した。このとき、解析結果は実験で得られた高速度可視化及び熱電対を用いた計測結果と良好に一致した。PULiMS-E18 実験では、解析結果は実験で得られたデブリの計測結果をわずかに過小評価した。このとき、解析結果は実験で得られた高速度可視化を用いた計測結果と良好に一致した。



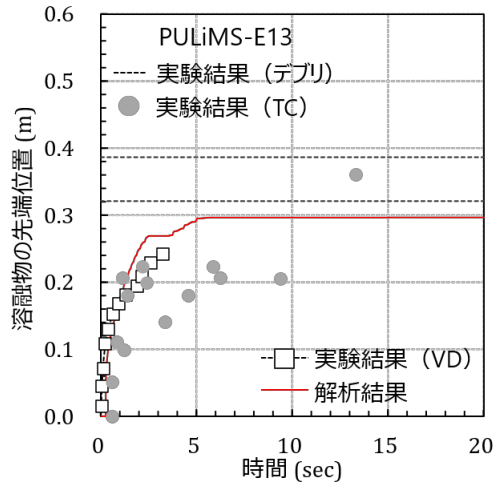
(1) PULiMS-E10 実験



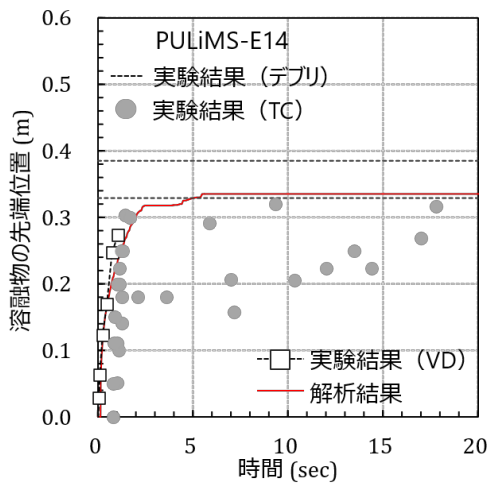
(2) PULiMS-E11 実験



(3) PULiMS-E12 実験

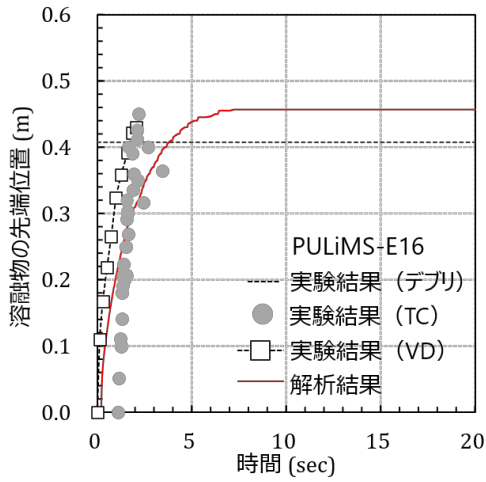


(4) PULiMS-E13 実験

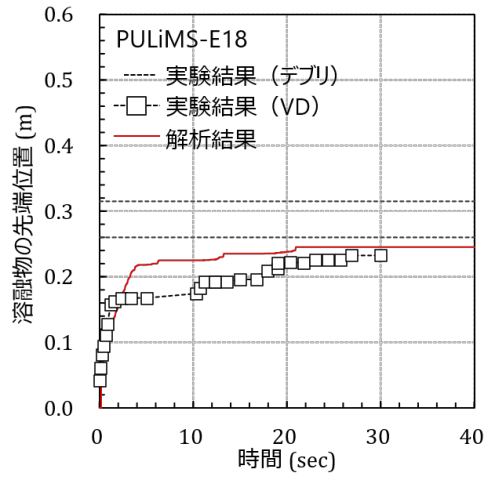


(5) PULiMS-E14 実験

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 3.4.3 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壁を設けることにより、溶融物の拡がり扇型 (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。

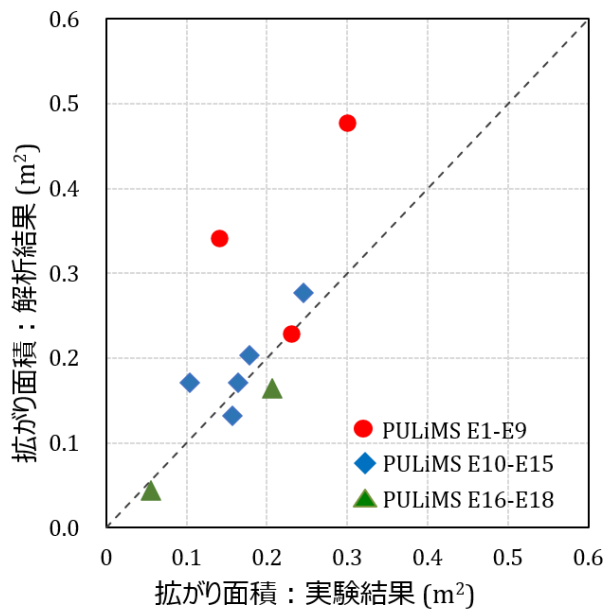


図 3.3.6 溶融物の拡がりの先端位置 (ウェット条件) : PULiMS-E16~E18 実験

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 3.4.7 から図 3.4.12 にそれぞれ示す。図 3.4.7 から図 3.4.12 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

溶融物の密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。これら以外の物性値に対しては最終的な到達距離に対する感度はほとんど見られなかった。また、いずれの物性値に対しても拡がりの先端位置の進展に与える影響は見られなかった。

PULiMS-E11

溶融物の密度、比熱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。溶融物の粘性係数及びボイド率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) が減少した。溶融物の密度の変化が溶融物の拡がりの先端位置の進展及び最終的な到達距離に与える影響が顕著となった。

PULiMS-E12

溶融物の密度の増加に伴い溶融物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。溶融物の粘性係数及びボイド率の増加に伴い溶融物の最終的な到達距離は減少した。溶融物の比熱、熱伝導率及び表面張力による影響は見られなかった。また、いずれの物性値に対しても溶融物の拡がりの先端位置の進展に与える影響は見られなかった。溶融物の密度の変化が溶融物の拡がりの先端位置の進展及び最終的な到達距離に与える影響が顕著となった。また、いずれの物性値に対しても拡がりの先端位置の進展に与える影響は見られなかった。

PULiMS-E13

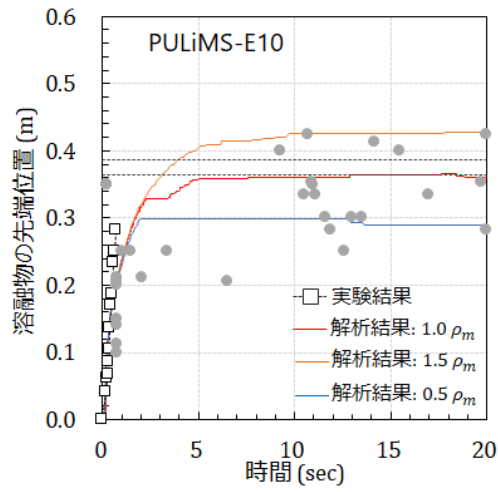
熔融物の密度の増加に伴い熔融物の最終的な到達距離（連続層状デブリの堆積範囲）が増加した。熔融物の他の物性値に対して熔融物の拡がりの先端位置の進展及び熔融物の最終的な到達距離（連続層状デブリの堆積範囲）に与える影響は見られなかった。

PULiMS-E14

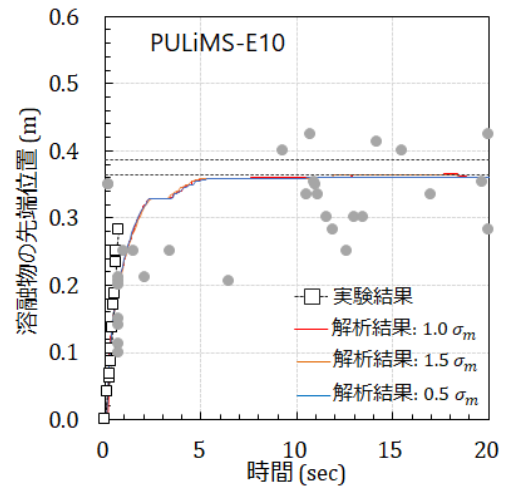
熔融物の密度の増加に伴い熔融物の最終的な到達距離（連続層状デブリの堆積範囲）が増加した。熔融物の他の物性値に対して熔融物の拡がりの先端位置の進展及び熔融物の最終的な到達距離（連続層状デブリの堆積範囲）に与える影響は見られなかった。

PULiMS-E16

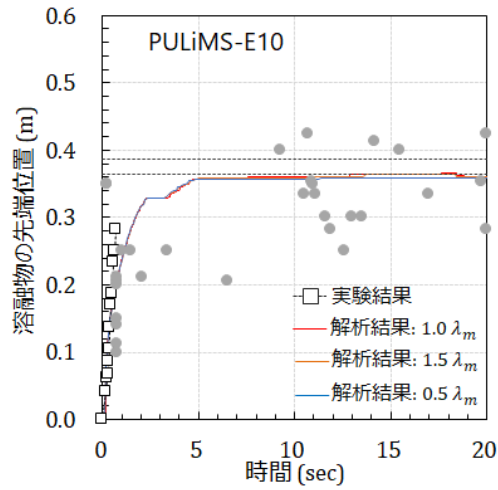
熔融物の密度の増加に伴い熔融物の最終的な到達距離（連続層状デブリの堆積範囲）が増加した。熔融物の他の物性値に対して熔融物の拡がりの先端位置の進展及び熔融物の最終的な到達距離（連続層状デブリの堆積範囲）に与える影響は見られなかった。



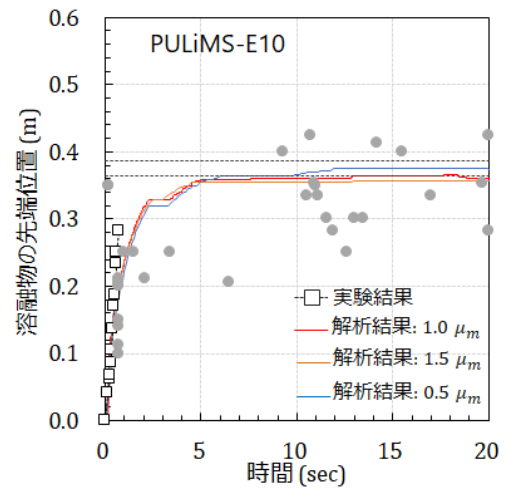
(1) 溶融物の密度



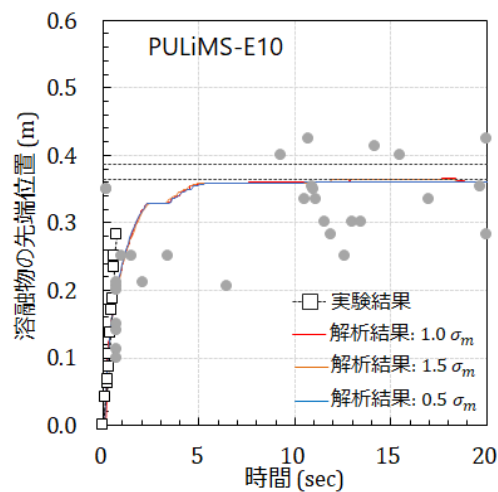
(2) 溶融物の比熱



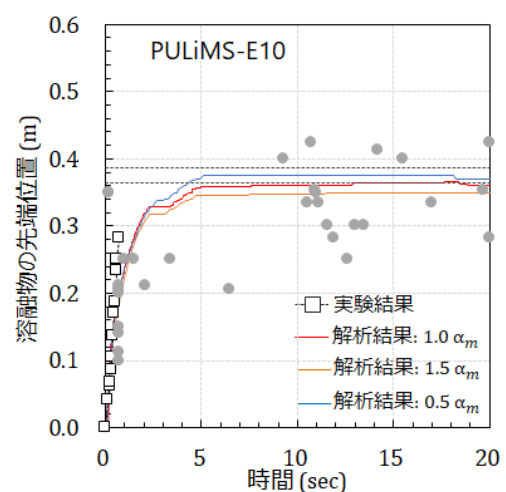
(3) 溶融物の熱伝導率



(4) 溶融物の粘性係数

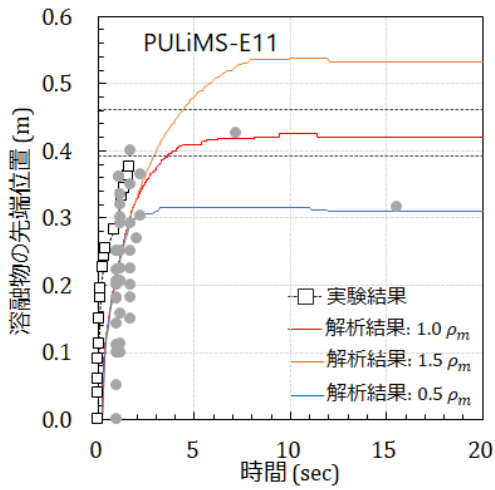


(5) 溶融物の表面張力

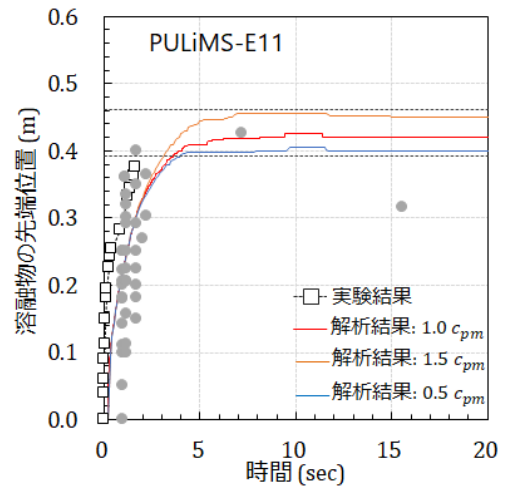


(6) 溶融物のポイド率

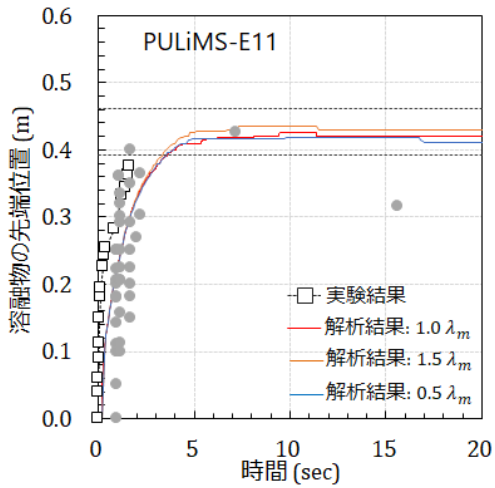
図 3.4.7 溶融物の拡がりの先端位置 : PULiMS-E10



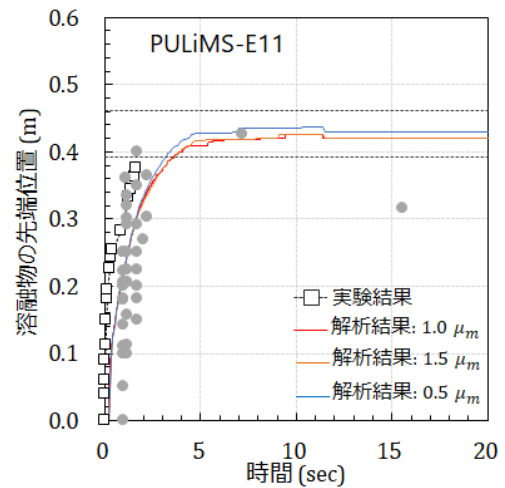
(1) 溶融物の密度



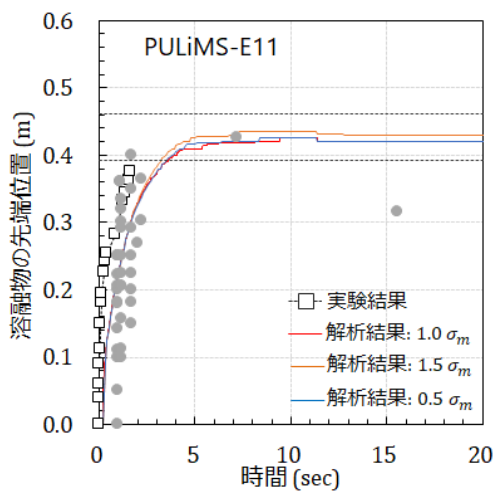
(2) 溶融物の比熱



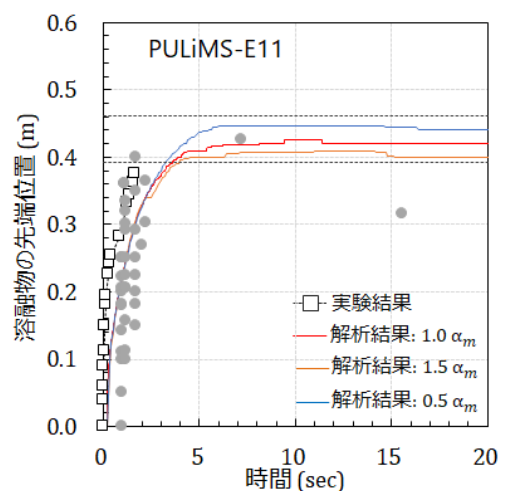
(3) 溶融物の熱伝導率



(4) 溶融物の粘性係数

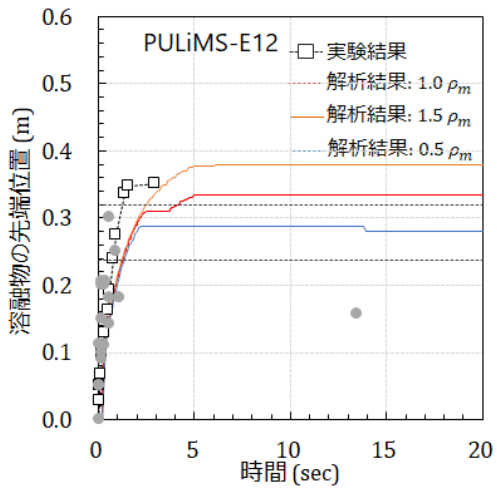


(5) 溶融物の表面張力

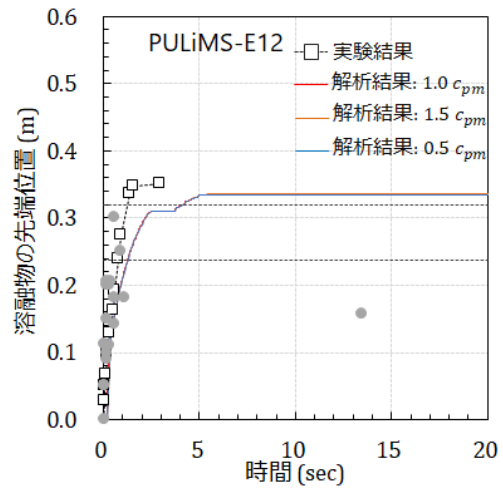


(6) 溶融物のポイド率

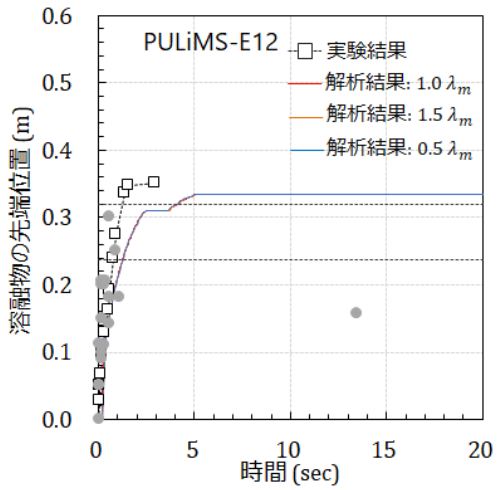
図 3.4.8 溶融物の拡がりの先端位置 : PULiMS-E11



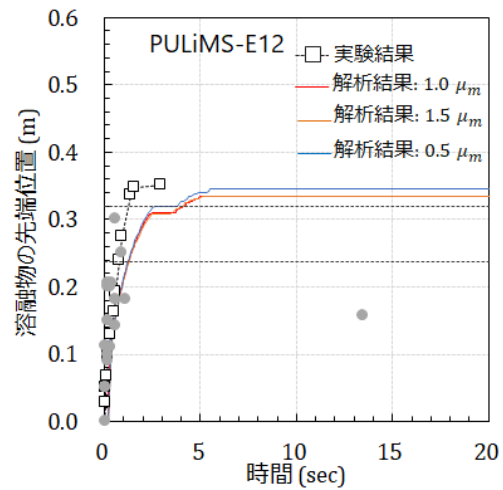
(1) 溶融物の密度



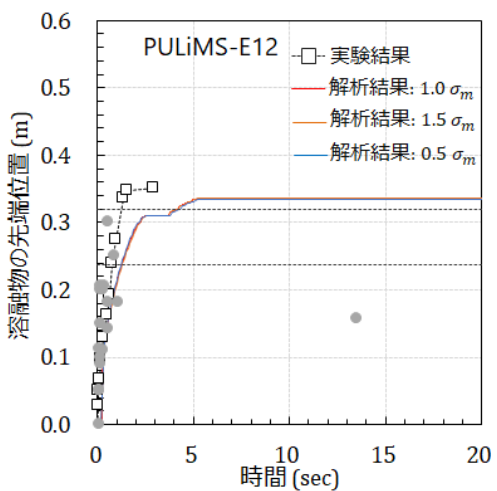
(2) 溶融物の比熱



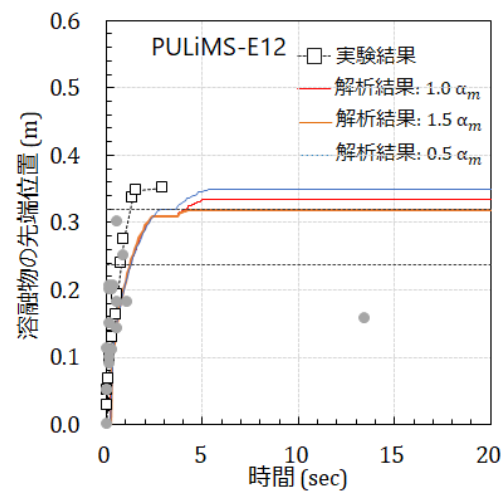
(3) 溶融物の熱伝導率



(4) 溶融物の粘性係数

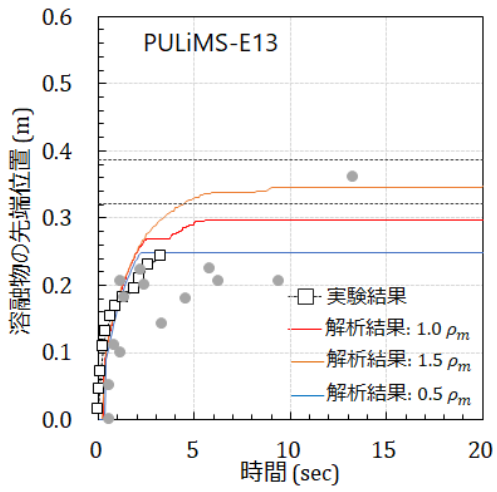


(5) 溶融物の表面張力

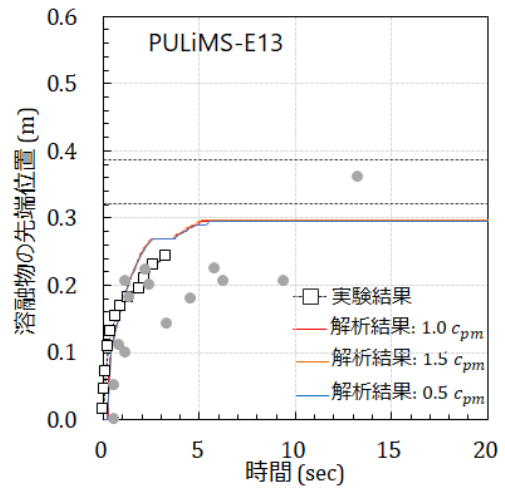


(6) 溶融物のポイド率

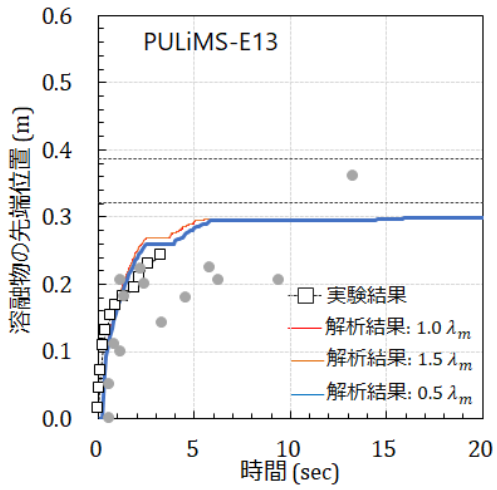
図 3.4.9 溶融物の拡がりの先端位置 : PULiMS-E12



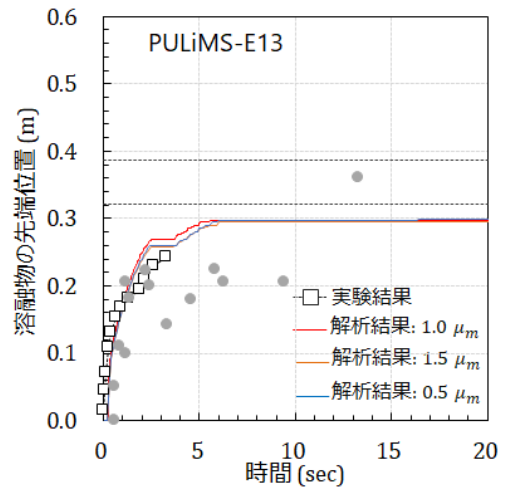
(1) 溶融物の密度



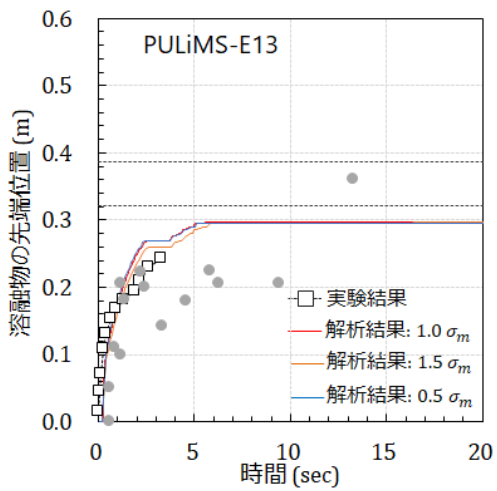
(2) 溶融物の比熱



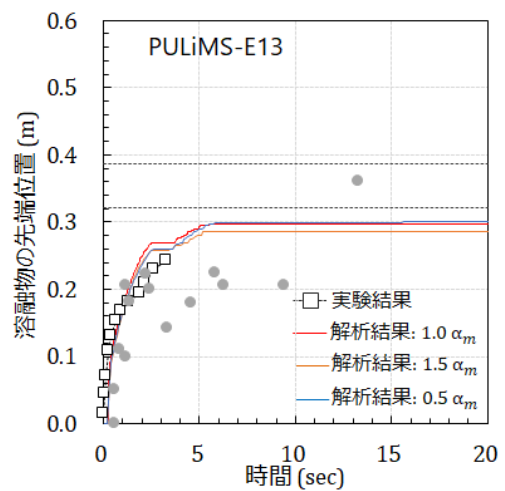
(3) 溶融物の熱伝導率



(4) 溶融物の粘性係数

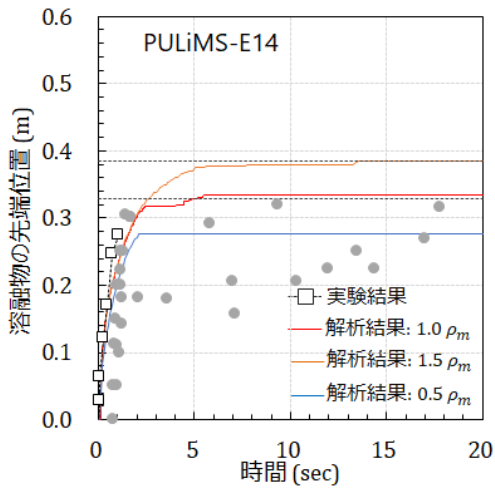


(5) 溶融物の表面張力

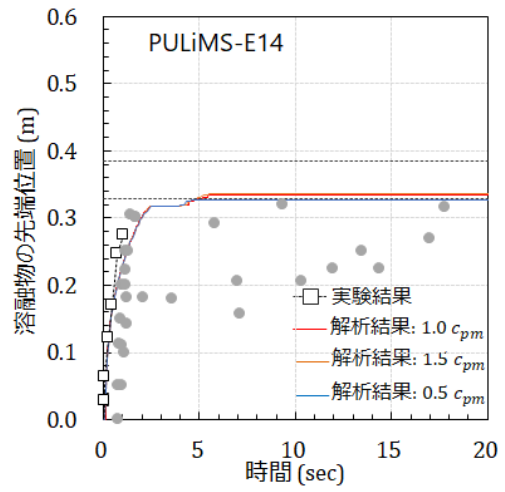


(6) 溶融物のポイド率

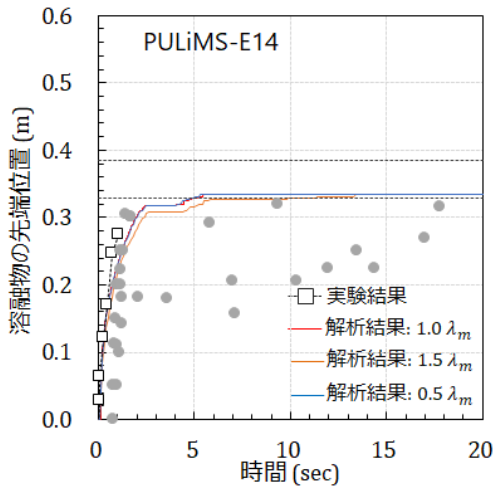
図 3.4.10 溶融物の拡がりの先端位置 : PULiMS-E13



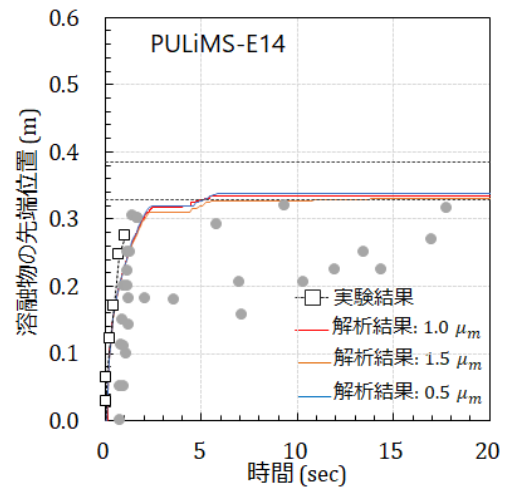
(1) 溶融物の密度



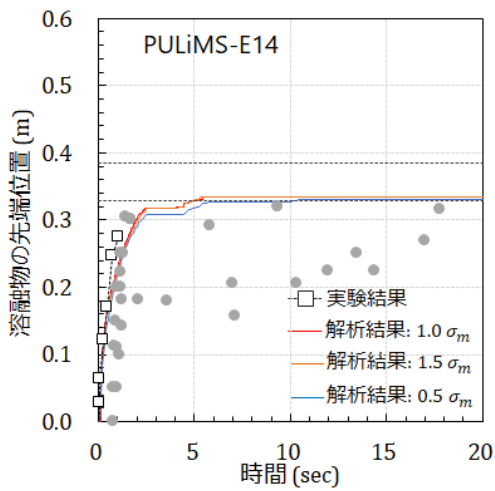
(2) 溶融物の比熱



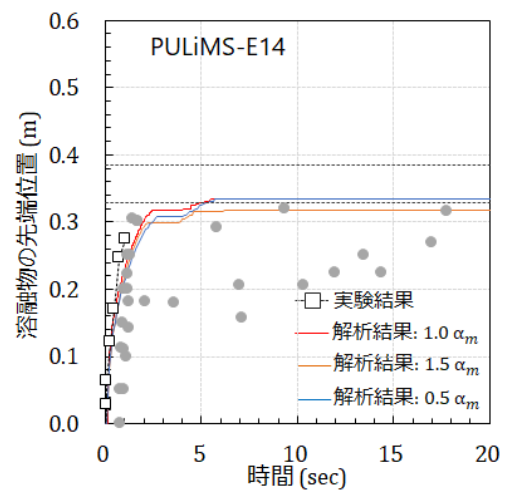
(3) 溶融物の熱伝導率



(4) 溶融物の粘性係数

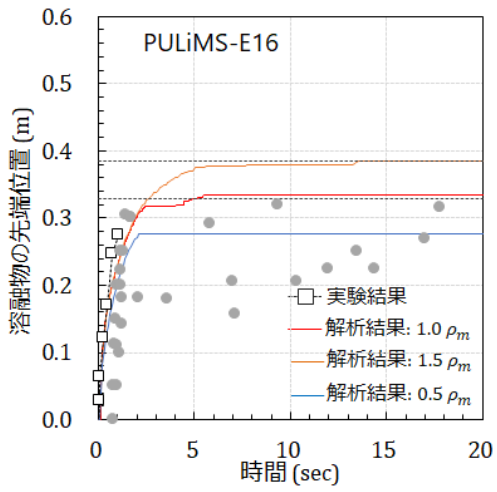


(5) 溶融物の表面張力

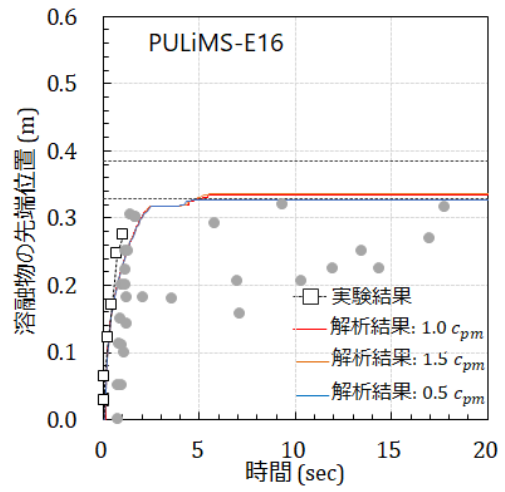


(6) 溶融物のポイド率

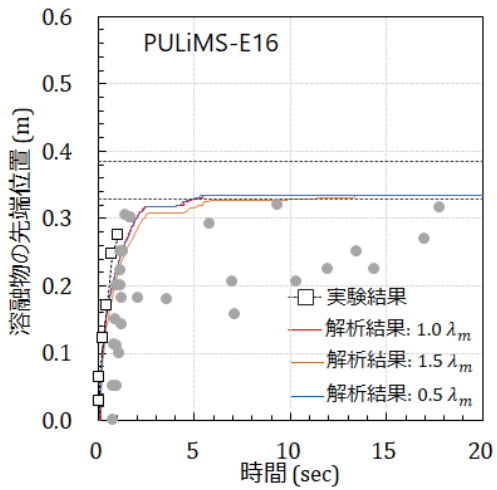
図 3.4.11 溶融物の拡がりの先端位置 : PULiMS-E14



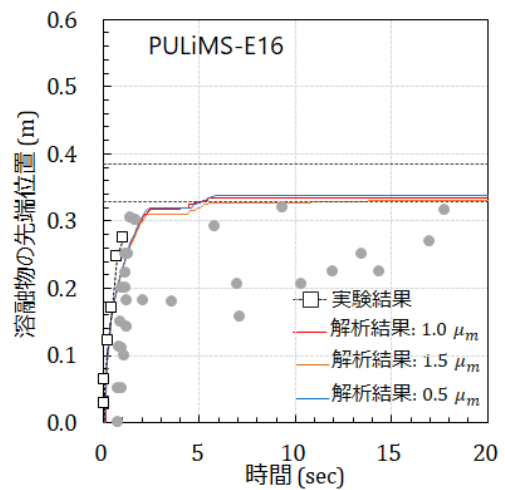
(1) 溶融物の密度



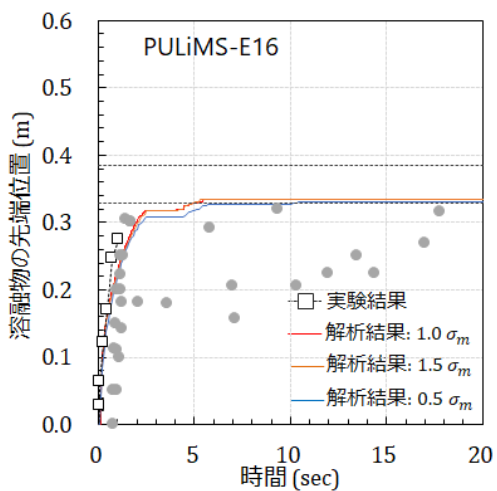
(2) 溶融物の比熱



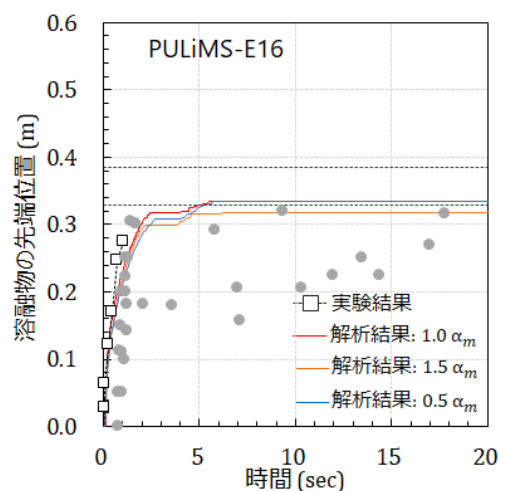
(3) 溶融物の熱伝導率



(4) 溶融物の粘性係数



(5) 溶融物の表面張力



(6) 溶融物のポイド率

図 3.4.12 溶融物の拡がりの先端位置 : PULiMS-E16

3.3.5. 考察

(1) 溶融物の物性の影響

溶融物の密度による影響

溶融物の密度の増加に伴い、溶融物に作用する重力が増加するために、溶融物の拡がりの先端位置の進展が阻害される。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。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たと仮定して、固相の厚さ $d_{edge} = 0$ とする。溶融物の拡がりの速度が減少することにより、溶融物の先端表面での更新頻度が減少するために、溶融物の先端での固相が成長し易くなる。したがって、溶融物の先端での固相の成長に伴い溶融物が拡がり可能な最小厚さ h_{min} が増加することにより溶融物の拡がり難くなるために、溶融物の最終的な拡がり距離も減少する。

溶融物の比熱による影響

溶融物の比熱の増加に伴い、溶融物の先端表面が冷え難くなるために、溶融物の拡がりの先端での固相の成長が阻害される。一方で、溶融物の比熱の減少に伴い、溶融物の先端表面が冷え易くなるために、溶融物の拡がりの先端での固相の成長が促進される。したがって、溶融物先端での固相の成長に伴い溶融物が拡がり可能な最小厚さ h_{min} が増加することにより、溶融物の最終的な拡がり距離も減少する。溶融物の比熱による影響は、KATS 及び ECOKATS 実験で顕著に見られた。表 3.4.2 に示す通り、溶融物の比熱が VULUCANO 実験等と比較して大きいことがわかる。溶融物の比熱が小さい実験条件では、比熱の変化により、溶融物の最終的な拡がり距離が影響を受け難い。

溶融物の熱伝導率による影響

溶融物の熱伝導率の増加に伴い、溶融物の先端表面が冷え難くなるために、溶融物の拡がりの先端での固相の成長が阻害される。一方で、溶融物の熱伝導率の減少に伴い、溶融物の先端表面が冷え易くなるために、溶融物の拡がりの先端での固相の成長が促進される。したがって、溶融物先端での固相の成長に伴い溶融物が拡がり可能な最小厚さ h_{min} が増加することにより、溶融物の最終的な拡がり距離も減少する。溶融物の熱伝導率による影響は、VULUCANO 実験及び FARO 実験で顕著に見られた。表 3.4.2 に示す通り、溶融物の熱伝導率が KATS 実験等と比較して小さいことがわかる。溶融物の熱伝導率が大きい実験条件では、熱伝導率の変化により、溶融物の最終的な拡がり距離が影響を受け難い。

溶融物の粘性係数による影響

溶融物の粘性係数の増加に伴い、溶融物に作用する摩擦力が増加するために、溶融物の拡がりの先端位置の進展が阻害される。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。溶融物の拡がりの速度が減少することにより、溶融物の先端表面での更新頻度が

減少するために、溶融物の先端での固相が成長し易くなる。したがって、溶融物の先端での固相の成長に伴い溶融物が拡がり可能な最小厚さ h_{min} が増加することにより溶融物の拡がり難くなるために、溶融物の最終的な拡がり距離も減少する。溶融物の粘性係数による影響は、FARO 実験では見られなかった。表 3.4.2 に示す通り、溶融物の粘性係数が VULUCANO 実験等と比較して小さいことがわかる。溶融物の粘性係数が小さい実験条件では、粘性係数の変化により、溶融物の拡がりの先端位置の進展及び最終的な拡がり距離が影響を受け難い。

溶融物の表面張力による影響

溶融物の表面張力の増加に伴い、溶融物の先端表面が液相の場合には、溶融物が拡がり可能な最小厚さ h_{min} が増加するために、溶融物の拡がりの先端位置の進展が阻害される。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、溶融物の液位が h_{min} を超えるまで流動しない。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。溶融物が拡がり可能な最小厚さ h_{min} が増加することにより溶融物の最終的な拡がり距離も減少する。溶融物の表面張力による影響は、KATS 実験で顕著に見られた。表 3.4.2 に示す通り、溶融物の投入速度が VULUCANO 実験等と比較して大きいことがわかる。このことは、溶融物の先端で固相が発生する前に溶融物の先端が下流へ移動するために、固相の強度ではなく、表面張力の影響により溶融物の拡がりが影響を受けたためである。

(2) 溶融物の空隙率の影響

溶融物の含む空隙率の増加に伴い、溶融物の密度が低下することから、溶融物に作用する重力が増加するために、溶融物の拡がりの先端位置の進展が阻害される。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。溶融物の拡がりの速度が減少することにより、溶融物の先端表面での更新頻度が減少するために、溶融物の先端での固相が成長し易くなる。したがって、溶融物の先端での固相の成長に伴い溶融物が拡がり可能な最小厚さ h_{min} が増加することにより溶融物の拡がり難くなるために、溶融物の最終的な拡がり距離も減少する。

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別個に解析する。

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）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製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° の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)	1.2E-3 / 8.33E-5	5.4E-3	1.68E-4 / 5.4E-3	5.0E-3	5.0E-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目標とした水準で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、溶融物の物性値に加えて、溶融物の含む空隙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。

溶融物の物性値

溶融物の物性値を変更する場合には、表 3.4.2 に示す物性値（融点を除く）を個別に 1.5 倍及び 0.5 倍する。このとき、溶融物の密度を変更する場合、溶融物の密度を除く物性値は、表 3.4.2 に示す物性値に固定する。溶融物の投入速度及び投入時間は変更しないために、溶融物の密度を変更する場合でも、投入される溶融物の体積は一定である。物性値の係数（1.5 倍及び 0.5 倍）の数値に意味はなく、代表値として物性値の係数を決定した。溶融物の物性が解析結果に与える影響が不明であるために、物性値の係数はすべての物性値に関する感度解析で統一した。溶融物の物性値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。

溶融物の含む空隙

JASMINE コードでは、溶融物が含む空隙率を入力により与える。空隙率は床面の床面を拡がる溶融物の密度の変化に寄与する。溶融物が含む空隙率を変更する場合には、表 3.4.4 に示す溶融物の含む空隙率を個別に 1.5 倍及び 0.5 倍する。空隙率の係数（1.5 倍及び 0.5 倍）の数値に意味はなく、代表値として物性値の係数を決定した。溶融物の含む空隙率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、流入する溶融物の初速は表 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。

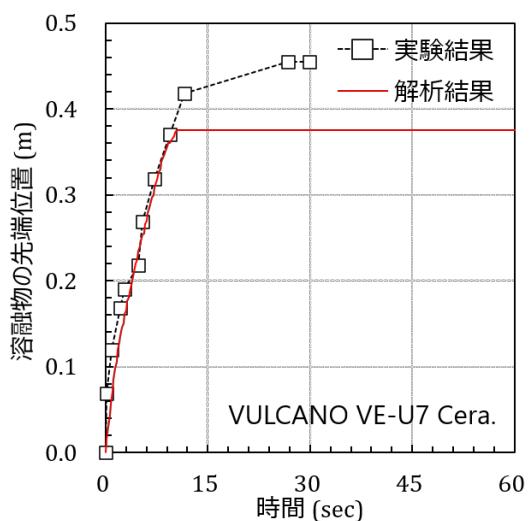
表 3.4.4. ドライ条件で設定する解析体系

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
	平均流量	1.64 kg/s	1.82 kg/s	35.56→1.44	5.6→3.91	4.24→2.61	13.42	300→30
	流入速度	0.1 m/s		2.9	0.43	0.25	0.15	2.2 / 20

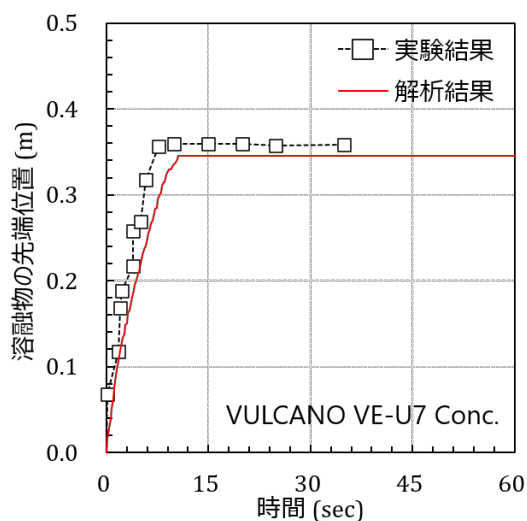
3.4.8. 解析結果

(1) 実験解析

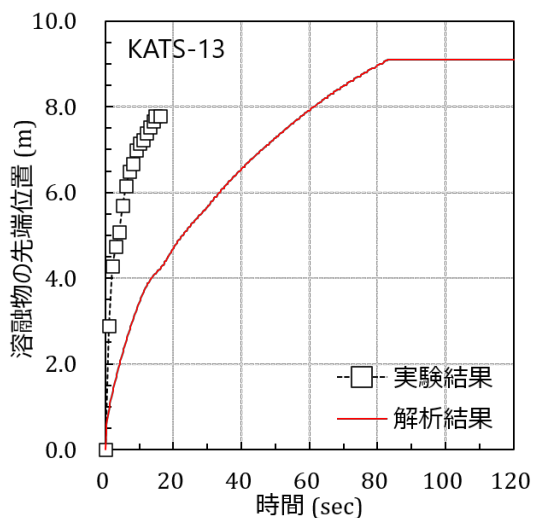
ドライ条件での実験の実験結果と解析結果との比較を図 3.4.1 に示す。図 3.4.1 (1) は VULCANO VE-U7 (セラミック床)、図 3.4.1 (2) は VULCANO VE-U7 (コンクリート床)、図 3.4.1 (3) は KATS-13 実験、図 3.4.1 (4) は KATS-14 実験、図 3.4.1 (5) は ECOKATS-V1 実験、図 3.4.1 (5) は FARO-L26 実験及び図 3.4.1 (6) は COMAS-EU4 実験に関する実験結果と解析結果との比較をそれぞれ示す。



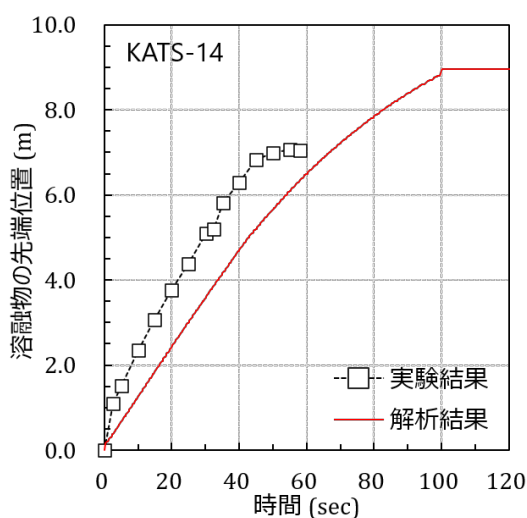
(1) VULCANO 実験 (セラミック床)



(2) VULCANO 実験 (コンクリート床)

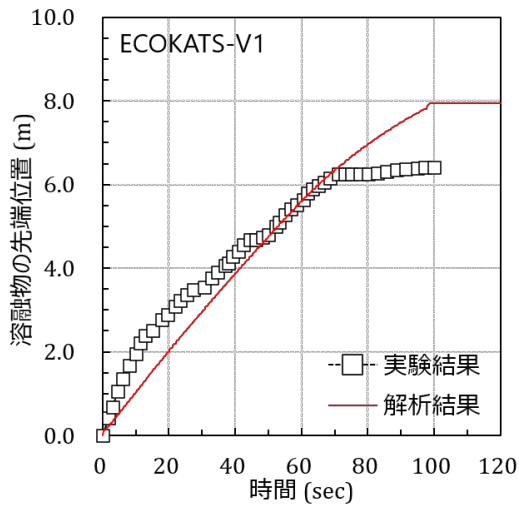


(3) KATS-13 実験

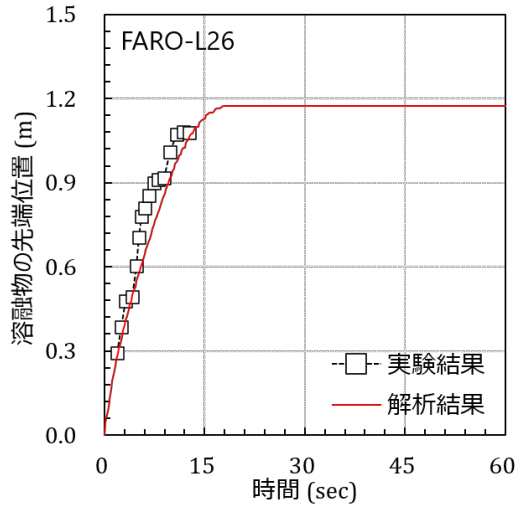


(4) KATS-14 実験

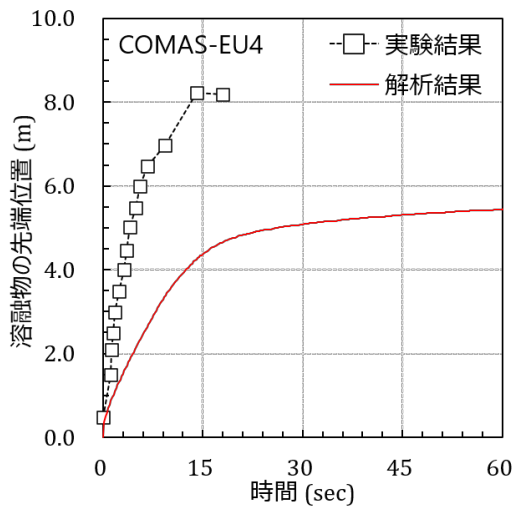
図 3.4.1 溶融物の拡がりの先端位置 (ドライ条件) (1/2)



(5) ECOKATS-V1 実験



(6) FARO-L26 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) (1/2)

VULUCANO VE-U7 (セラミック床)

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 (コンクリート床)

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 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 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 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。

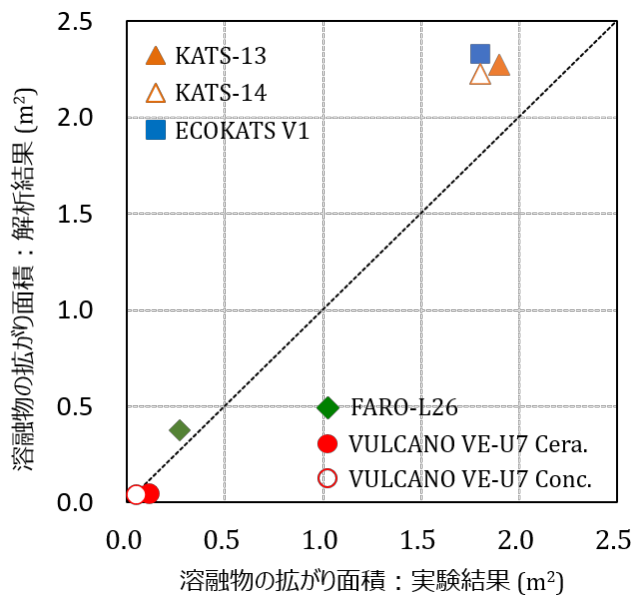


図 3.4.2 溶融物の拡がりの面積：実験結果と解析結果との比較

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 実験及び FARO 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 実験及び ECOKATS 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 実験及び ECOKATS 実験では、VULUCANO 実験及び FARO 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.x] 等に COMAS 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 (6) に示す通り、実験結果を、解析結果は過大評価した。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° のへの拡大部を持つ変形流路に溶融物を流入する。実験では、等幅流路から片側 45° の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-L26 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 (セラミック床)、図 3.4.4 は VULCANO VE-U7 (コンクリート床)、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-L26 実験の感度解析の結果をそれぞれ示す。

VULUCANO VE-U7 (セラミック床)

溶融物の密度、熱伝導率及び粘性係数の増加に伴い溶融物の拡がりの先端位置の進展及び最終的な到達距離(連続層状デブリの堆積範囲)が減少した。溶融物の比熱及び表面張力による影響は見られなかった。溶融物の空隙率の増加に伴い溶融物の拡がりの先端位置の進展及び最終的な到達距離(連続層状デブリの堆積範囲)が増加した。溶融物の密度の変化が溶融物の拡がりの先端位置の進展及び最終的な到達距離に与える影響が顕著となった。

VULUCANO VE-U7 (コンクリート床面)

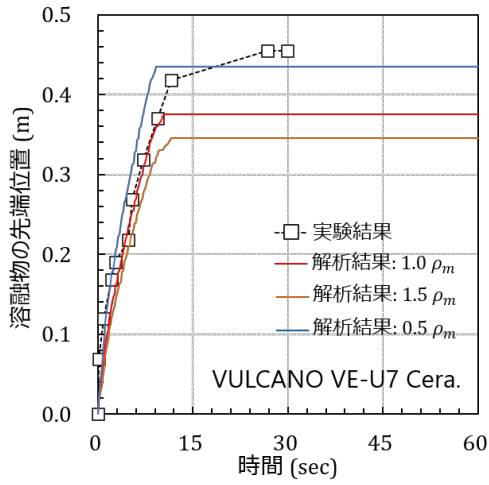
溶融物の密度、熱伝導率及び粘性係数の増加に伴い溶融物の拡がりの先端位置の進展及び最終的な到達距離(連続層状デブリの堆積範囲)が減少した。溶融物の比熱及び表面張力による影響は見られなかった。溶融物の空隙率の増加に伴い溶融物の拡がりの先端位置の進展及び最終的な到達距離(連続層状デブリの堆積範囲)が増加した。溶融物の密度の変化が溶融物の拡がりの先端位置の進展及び最終的な到達距離に与える影響が顕著となった。

KATS-13

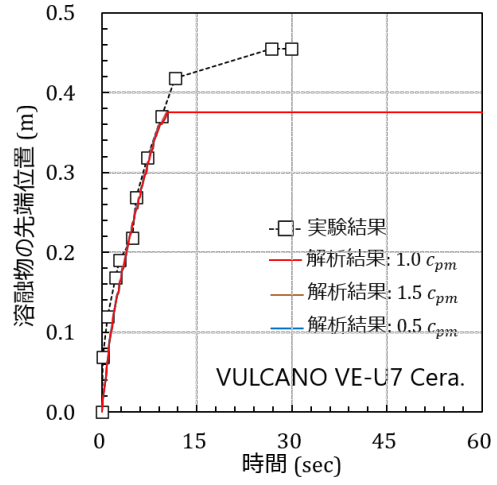
溶融物の密度、熱伝導率、粘性係数及び表面張力の増加に伴い溶融物の拡がりの先端位置の進展及び最終的な到達距離(連続層状デブリの堆積範囲)が減少した。溶融物の比熱の増加により、溶融物の拡がりの先端位置の進展は影響を受けず、最終的な到達距離(連続層状デブリの堆積範囲)が増加した。溶融物の空隙率の増加に伴い溶融物の拡がりの先端位置の進展及び最終的な到達距離(連続層状デブリの堆積範囲)が増加した。溶融物の密度の変化が溶融物の拡がりの先端位置の進展及び最終的な到達距離に与える影響が顕著となった。

KATS-14

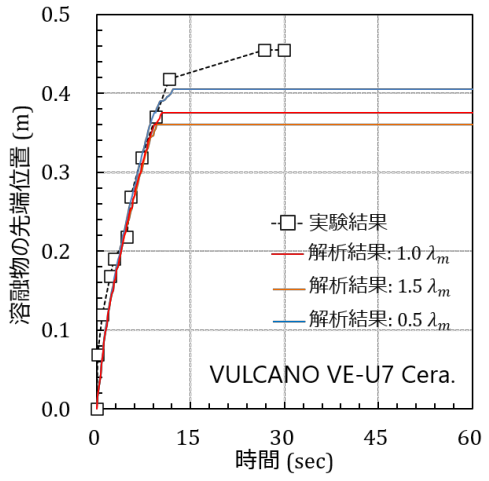
溶融物の密度、熱伝導率、粘性係数及び表面張力の増加に伴い溶融物の拡がりの先端位置の進展及び最終的な到達距離(連続層状デブリの堆積範囲)が減少した。溶融物の比熱の増加により、溶融物の拡がりの先端位置の進展及び最終的な到達距離(連続層状デブリの堆積範囲)は影響を受けなかった。一方で、溶融物の比熱の減少により、溶融物の拡がりの先端位置の進展は影響を受けず、最終的な到達距離(連続層状デブリの堆積範囲)が減少した。溶融物の空隙率の増加に伴い溶融物の拡がりの先端位置の進展及び最終的な到達距離が増加した。溶融物の密度の変化が溶融物の拡がりの先端位置の進展及び最終的な到達距離(連続層状デブリの堆積範囲)に与える影響が顕著となった。



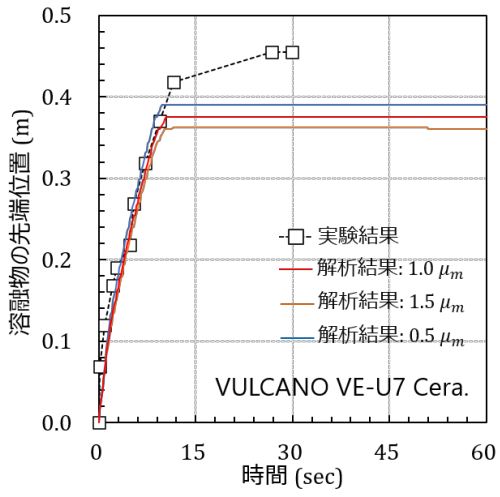
(1) 溶融物の密度



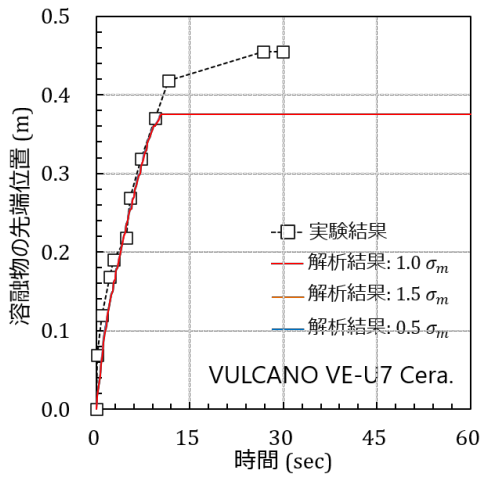
(2) 溶融物の比熱



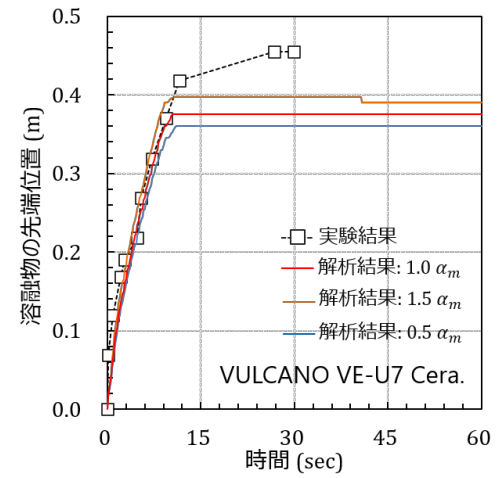
(3) 溶融物の熱伝導率



(4) 溶融物の粘性係数

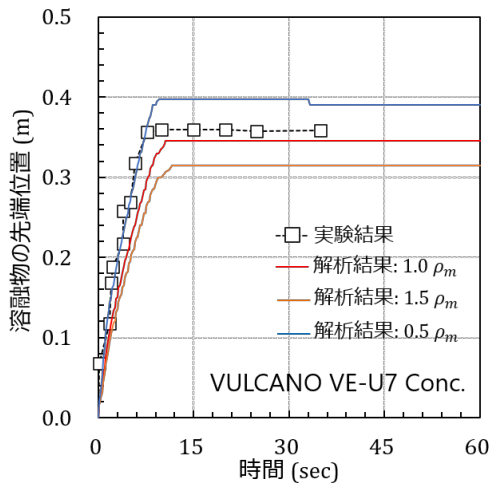


(5) 溶融物の表面張力

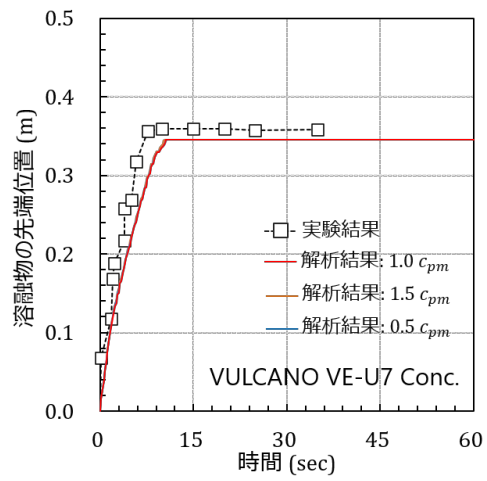


(6) 溶融物の空隙率

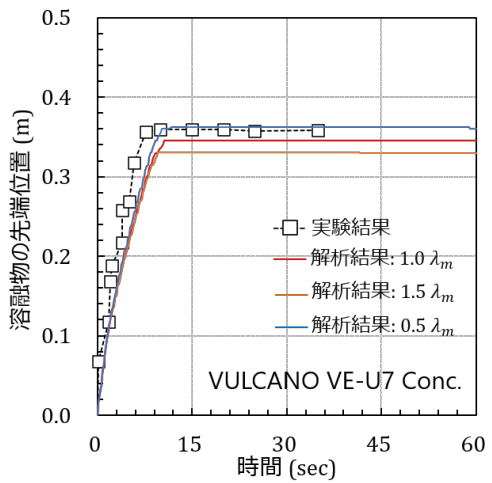
図 3.4.3 溶融物の拡がりの先端位置 : VULUVANO VE-U7 (セラミック床)



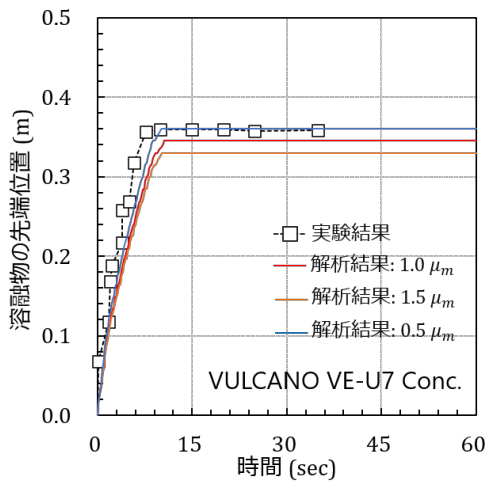
(1) 溶融物の密度



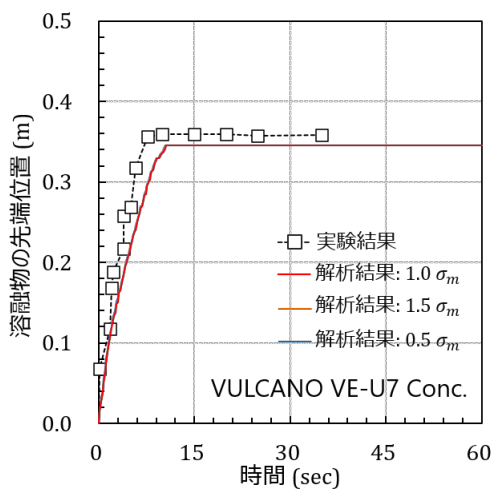
(2) 溶融物の比熱



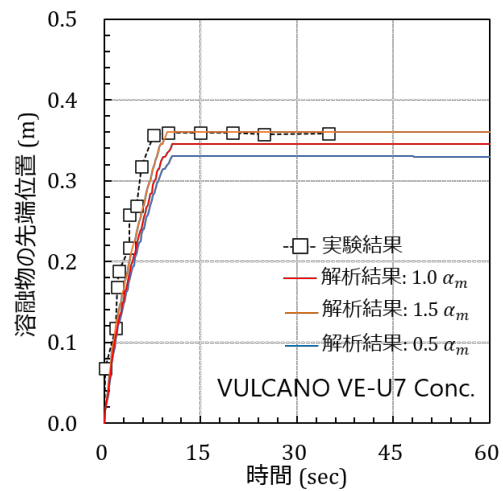
(3) 溶融物の熱伝導率



(4) 溶融物の粘性係数

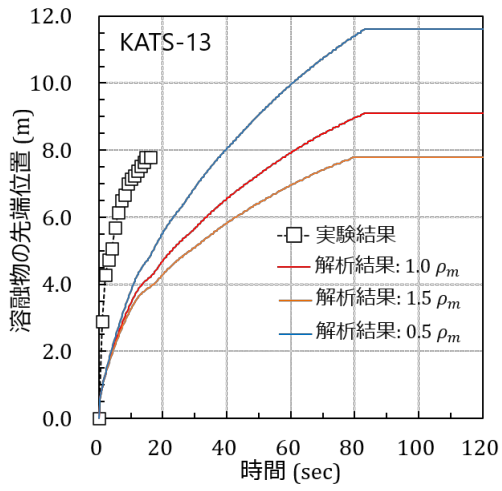


(5) 溶融物の表面張力

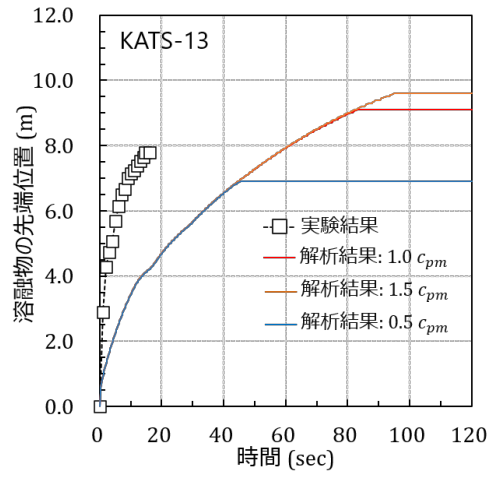


(6) 溶融物の空隙率

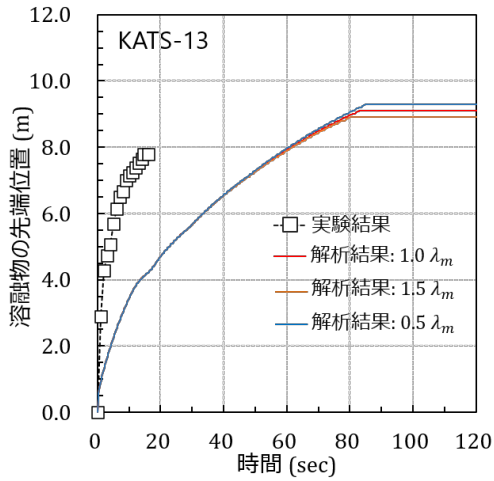
図 3.4.4 溶融物の拡がりの先端位置 : VULUVANO VE-U7 (コンクリート床)



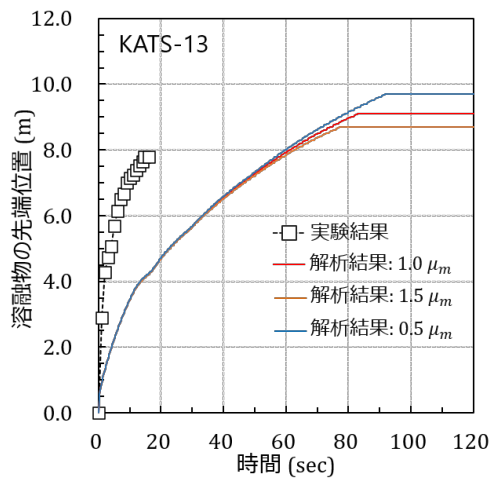
(1) 溶融物の密度



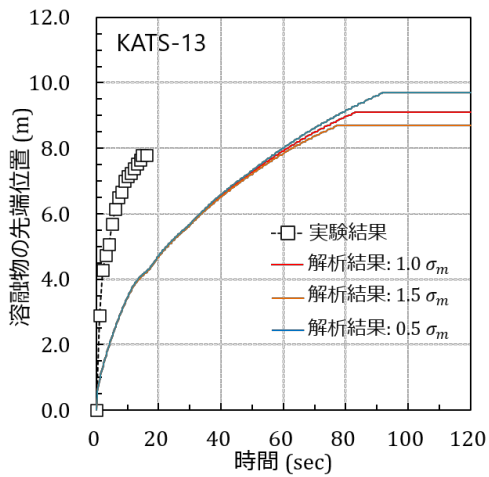
(2) 溶融物の比熱



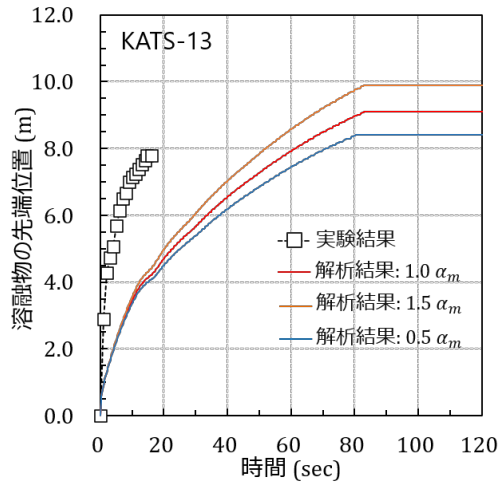
(3) 溶融物の熱伝導率



(4) 溶融物の粘性係数

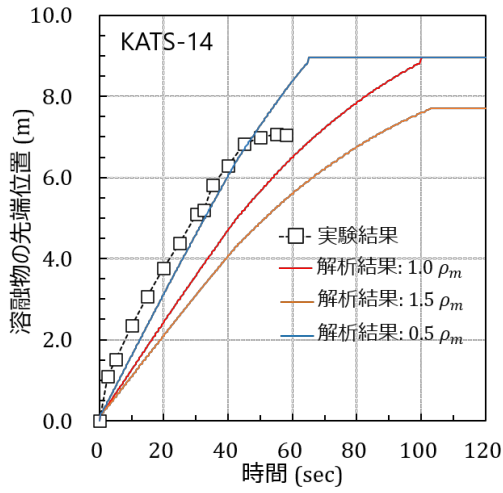


(5) 溶融物の表面張力

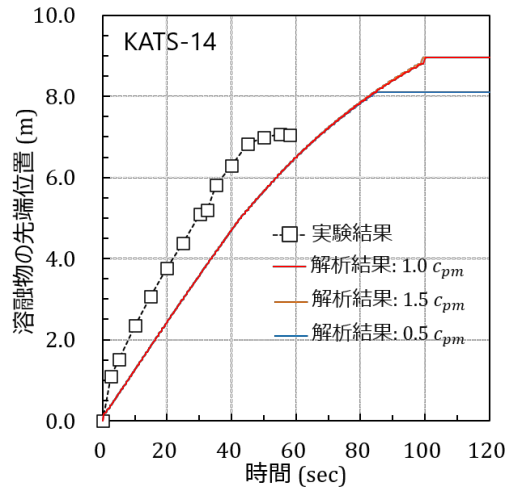


(6) 溶融物の空隙率

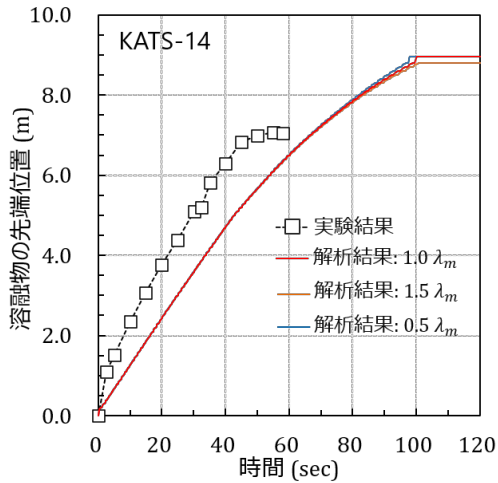
図 3.4.5 溶融物の拡がりの先端位置 : KATS-13 での感度解析結果 (2/2)



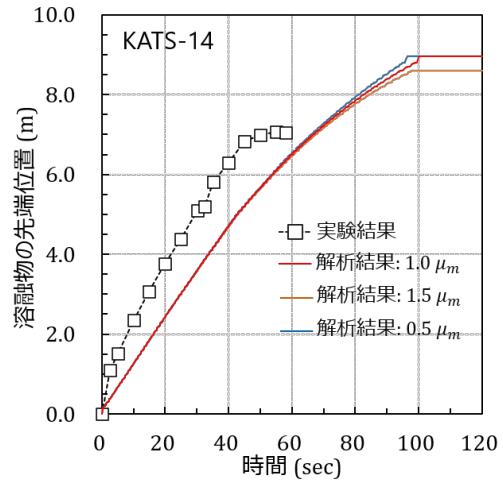
(1) 溶融物の密度



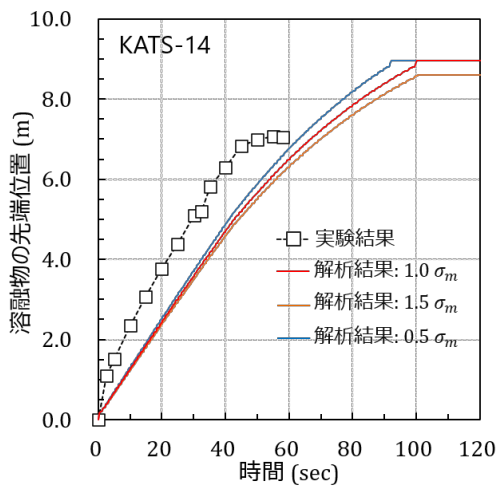
(2) 溶融物の比熱



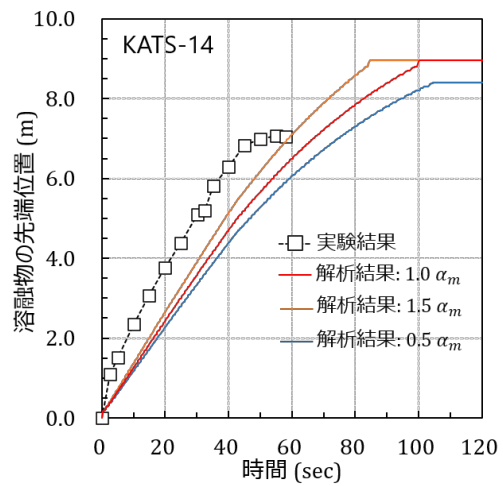
(3) 溶融物の熱伝導率



(4) 溶融物の粘性係数



(5) 溶融物の表面張力



(6) 溶融物の空隙率

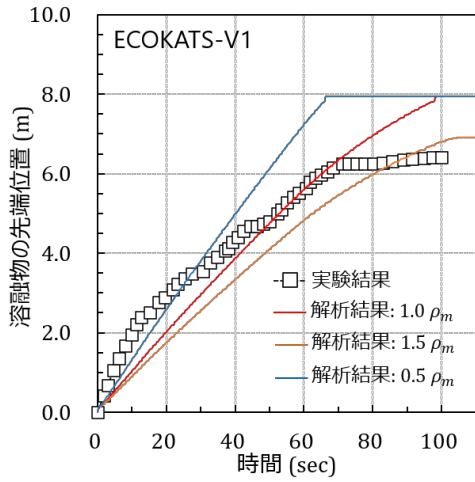
図 3.4.6 溶融物の拡がりの先端位置 : KATS-14 での感度解析結果

ECOKATS-V1

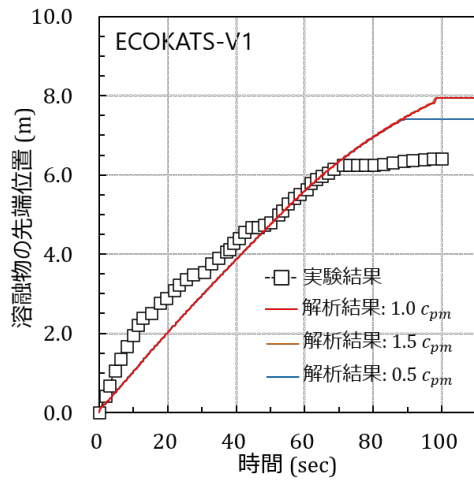
溶融物の密度、粘性係数及び表面張力の増加に伴い溶融物の拡がりの先端位置の進展及び最終的な到達距離（連続層状デブリの堆積範囲）が減少した。溶融物の比熱の増加により、溶融物の拡がりの先端位置の進展及び最終的な到達距離（連続層状デブリの堆積範囲）は影響を受けなかった。一方で、溶融物の比熱の減少により、溶融物の拡がりの先端位置の進展は影響を受けず、最終的な到達距離（連続層状デブリの堆積範囲）が減少した。溶融物の熱伝導率による影響は見られなかった。溶融物の空隙率の増加に伴い溶融物の拡がりの先端位置の進展及び最終的な到達距離（連続層状デブリの堆積範囲）が増加した。溶融物の密度の変化が溶融物の拡がりの先端位置の進展及び最終的な到達距離（連続層状デブリの堆積範囲）に与える影響が顕著となった。

FARO-L26

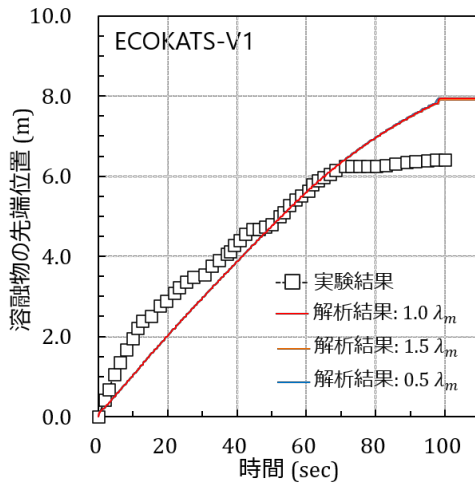
溶融物の密度及び熱伝導率の増加に伴い溶融物の拡がりの先端位置の進展及び最終的な到達距離（連続層状デブリの堆積範囲）が減少した。溶融物の比熱、粘性係数及び表面張力による影響は見られなかった。溶融物の空隙率の増加に伴い溶融物の拡がりの先端位置の進展及び最終的な到達距離（連続層状デブリの堆積範囲）が増加した。溶融物の密度の変化が溶融物の拡がりの先端位置の進展及び最終的な到達距離（連続層状デブリの堆積範囲）に与える影響が顕著となった。



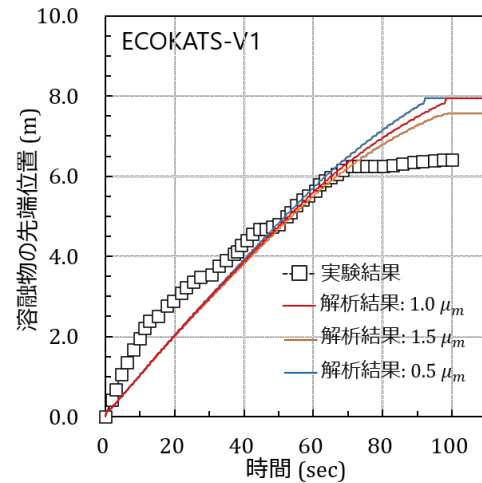
(1) 溶融物の密度



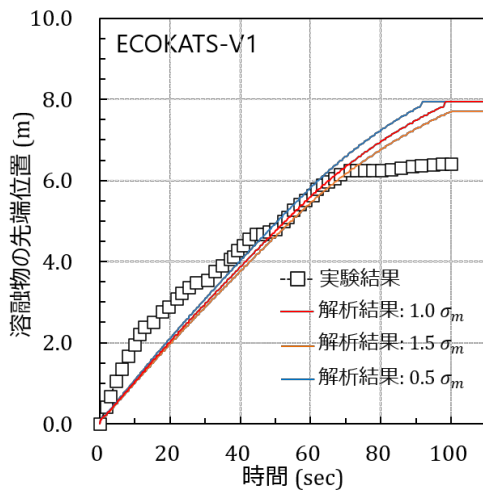
(2) 溶融物の比熱



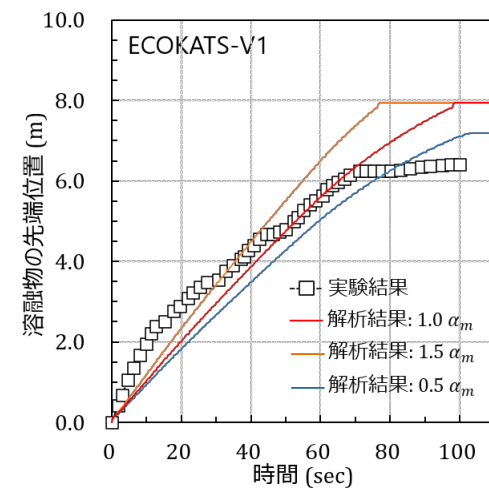
(3) 溶融物の熱伝導率



(4) 溶融物の粘性係数

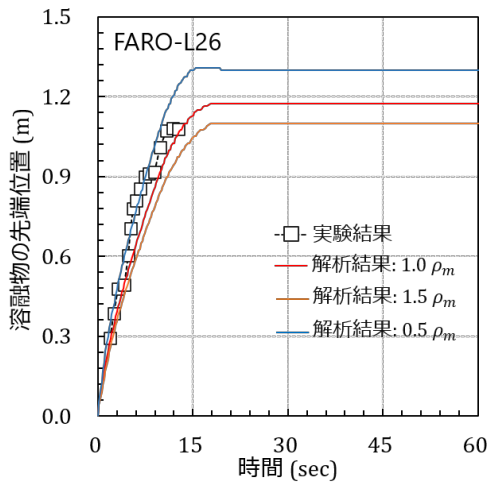


(5) 溶融物の表面張力

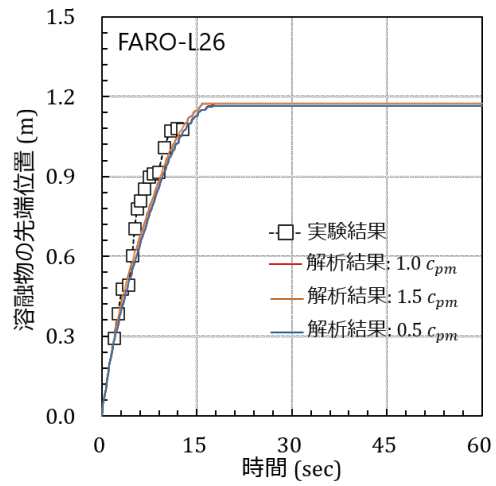


(6) 溶融物の空隙率

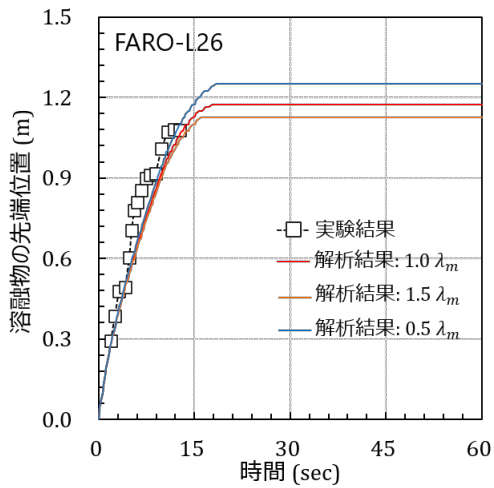
図 3.4.7 溶融物の拡がりの先端位置：ECOKATS-V1



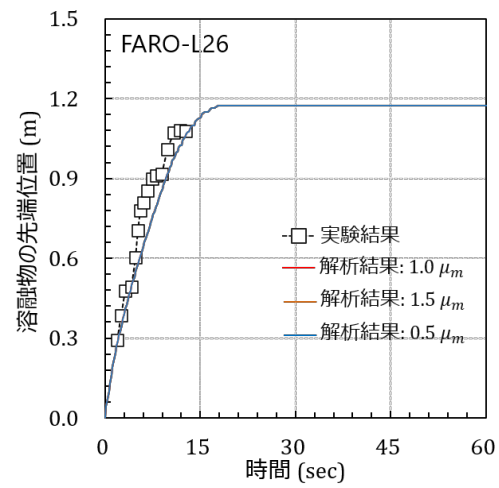
(1) 溶融物の密度



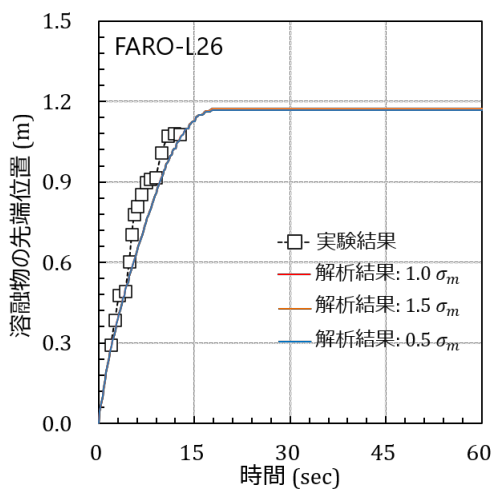
(2) 溶融物の比熱



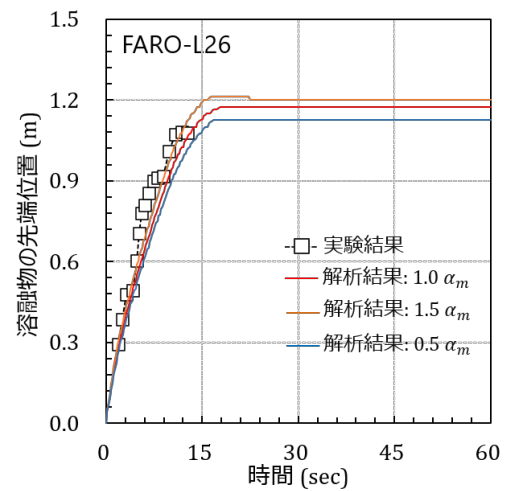
(3) 溶融物の熱伝導率



(4) 溶融物の粘性係数



(5) 溶融物の表面張力



(6) 溶融物の空隙率

図 3.4.8 溶融物の拡がりの先端位置 : FARO-L26

3.4.9. 考察

(1) 熔融物の物性の影響

熔融物の密度による影響

熔融物の密度の増加に伴い、熔融物に作用する重力が増加するために、熔融物の拡がりの先端位置の進展が阻害される。したがって、熔融物の拡がりの先端位置の進展速度が減少する。JASMINE コードでは、熔融物の先端位置が下流のセルに移動した場合には、熔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。熔融物の拡がりの速度が減少することにより、熔融物の先端表面での更新頻度が減少するために、熔融物の先端での固相が成長し易くなる。したがって、熔融物の先端での固相の成長に伴い熔融物が拡がり可能な最小厚さ h_{min} が増加することにより熔融物の拡がり難くなるために、熔融物の最終的な拡がり距離も減少する。

熔融物の比熱による影響

熔融物の比熱の増加に伴い、熔融物の先端表面が冷え難くなるために、熔融物の拡がりの先端での固相の成長が阻害される。一方で、熔融物の比熱の減少に伴い、熔融物の先端表面が冷え易くなるために、熔融物の拡がりの先端での固相の成長が促進される。したがって、熔融物先端での固相の成長に伴い熔融物が拡がり可能な最小厚さ h_{min} が増加することにより、熔融物の最終的な拡がり距離も減少する。熔融物の比熱による影響は、KATS 及び ECOKATS 実験で顕著に見られた。表 3.4.2 に示す通り、熔融物の比熱が VULUCANO 実験等と比較して大きいことがわかる。熔融物の比熱が小さい実験条件では、比熱の変化により、熔融物の最終的な拡がり距離が影響を受け難い。

熔融物の熱伝導率による影響

熔融物の熱伝導率の増加に伴い、熔融物の先端表面が冷え難くなるために、熔融物の拡がりの先端での固相の成長が阻害される。一方で、熔融物の熱伝導率の減少に伴い、熔融物の先端表面が冷え易くなるために、熔融物の拡がりの先端での固相の成長が促進される。したがって、熔融物先端での固相の成長に伴い熔融物が拡がり可能な最小厚さ h_{min} が増加することにより、熔融物の最終的な拡がり距離も減少する。熔融物の熱伝導率による影響は、VULUCANO 実験及び FARO 実験で顕著に見られた。表 3.4.2 に示す通り、熔融物の熱伝導率が KATS 実験等と比較して小さいことがわかる。熔融物の熱伝導率が大きい実験条件では、熱伝導率の変化により、熔融物の最終的な拡がり距離が影響を受け難い。

熔融物の粘性係数による影響

熔融物の粘性係数の増加に伴い、熔融物に作用する摩擦力が増加するために、熔融物の拡がりの先端位置の進展が阻害される。したがって、熔融物の拡がりの先端位置の進展速度が減少する。熔融物の拡がりの速度が減少することにより、熔融物の先端表面での更新頻度が減少するために、熔融物の先端での固相が成長し易くなる。したがって、熔融物の先端での

固相の成長に伴い溶融物が拡がり可能な最小厚さ h_{min} が増加することにより溶融物の拡がり難くなるために、溶融物の最終的な拡がり距離も減少する。溶融物の粘性係数による影響は、FARO 実験では見られなかった。表 3.4.2 に示す通り、溶融物の粘性係数が VULUCANO 実験等と比較して小さいことがわかる。溶融物の粘性係数が小さい実験条件では、粘性係数の変化により、溶融物の拡がりの先端位置の進展及び最終的な拡がり距離が影響を受け難い。

溶融物の表面張力による影響

溶融物の表面張力の増加に伴い、溶融物の先端表面が液相の場合には、溶融物が拡がり可能な最小厚さ h_{min} が増加するために、溶融物の拡がりの先端位置の進展が阻害される。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、溶融物の液位が h_{min} を超えるまで流動しない。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。溶融物が拡がり可能な最小厚さ h_{min} が増加することにより溶融物の最終的な拡がり距離も減少する。溶融物の表面張力による影響は、KATS 実験で顕著に見られた。表 3.4.2 に示す通り、溶融物の投入速度が VULUCANO 実験等と比較して大きいことがわかる。このことは、溶融物の先端で固相が発生する前に溶融物の先端が下流へ移動するために、固相の強度ではなく、表面張力の影響により溶融物の拡がりが影響を受けたためである。

(2) 溶融物の空隙率の影響

溶融物の含む空隙率の増加に伴い、溶融物の密度が低下することから、溶融物に作用する重力が増加するために、溶融物の拡がりの先端位置の進展が阻害される。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。溶融物の拡がりの速度が減少することにより、溶融物の先端表面での更新頻度が減少するために、溶融物の先端での固相が成長し易くなる。したがって、溶融物の先端での固相の成長に伴い溶融物が拡がり可能な最小厚さ h_{min} が増加することにより溶融物の拡がり難くなるために、溶融物の最終的な拡がり距離も減少する。

3.5. 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、熔融物の物性値及び熔融物の含む空隙が熔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、ウェット条件及びドライ条件では、熔融物の密度が増加した場合には、熔融物の拡がりが増害されること分かった。一方で、熔融物の密度が減少した場合には、熔融物の拡がりが増進されること分かった。熔融物の比熱、熱伝導率、粘性係数及び表面張力による影響は、熔融物の投入条件により熔融物の拡がりへの影響が顕著となる場合と限定的となる場合があることが分かった。熔融物の含む空隙が増加した場合には、熔融物の拡がりが増進されること分かった。一方で、熔融物の空隙が減少した場合には、熔融物の拡がりが増害されること分かった。熔融物の密度、粘性係数及び表面張力が変化した場合、重力及び摩擦力等の流体力学的な要因により熔融物の拡がりが増進を受ける。熔融物の比熱及び熱伝導率が変化した場合、熔融物の先端での固相の成長等の熱力学的な要因により熔融物の拡がりが増進を受ける。熔融物の含む空隙が増加した場合には、熔融物の幾何的形狀が増進した結果として熔融物の密度が増進するために、重力による流体力学的な要因により熔融物の拡がりが増進を受ける。

ウェット条件で実施された PULiMS 実験では、熔融物が非晶組成となった状態で冷却水に投入された可能性が報告されている。非晶組成となったことにより、熔融物の密度等の物性値に増進を及ぼした可能性が考えられる。したがって、実験で投入された熔融物の密度等の物性値を正確に把握することが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の更なる増進向上につながるものと考えられる。同様に、ドライ条件で実施された実験で投入された熔融物の密度等の物性値を正確に把握することがドライ条件で実施された実験を対象とした実験解析の更なる増進向上につながるものと考えられる。加えて、ウェット条件及びドライ条件では、熔融物の含む空隙を正確に把握することが実験解析の更なる増進向上につながるものと考えられる。

参考文献

- [3.1] A. Konovalenko, A. Karbojian, P. Kudinov, "Experimental Results on Pouring and Underwater Liquid Melt Spreading and Energetic Melt-coolant Interaction", NUTHOS-9, Kaohsiung, Taiwan, (Sep. 2012),N9P0303
- [3.2] C. Journeau, E. Boccaccio, C. Brayer, G. Cognet, J.-F. Haquet, C. J'egou, P. Piluso, J. Monerris, Ex-vessel corium spreading: results from the VULCANO spreading tests, Nuclear Engineering and Design, vol.223, 75--102, doi:10.1016/S0029-5493(02)00397-7, 2003.
- [3.3] C. Journeau, J.-F. Haquet, B. Spindler, C. Spengler, J. Foit, The VULCANO VE-U7 corium spreading benchmark, Progress in Nuclear Energy, vol.48, 215--234, doi:10.1016/j.pnucene.2005.09.009, 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 1999, 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, 2567-2573.
- [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 1999, 178--188, 1999.
- [3.9] M. Sappok, W. Steinwarz, Large-scale experiments on ex-vessel core melt behavior, Nuclear Technology, vol.125, 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, 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, 425-441, 2006.

4. 実機冷却性評価

4.1 概要

JASMINE コードによる解析には、初期条件、解析条件等に含まれる不確かさが存在する。平成 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 解析の結果から熔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。以上のことから、シビアアクシデント解析と格納容器内の熔融物挙動解析を組み合わせた、デブリの冷却成功確率評価手法の実現性が確認できた。

この評価手順では、SA 解析の結果を一旦、確率分布に置き換えているため、①で程度の良い解析ができていれば、②の解析数を柔軟に変更することができるという特徴がある。ここで、本来同一の事故進展に対する組み合わせである、熔融物の各パラメータ同士は相関関係を持つ。しかしながら、JASMINE 解析の入力パラメータセットを生成する際に、その相関関係の情報を捨ててしまう恐れがある。そのため、パラメータセット生成のときにパラメータ同士の相関を考慮する必要がある。また、生成したパラメータセット中に非現実的な熔融物パラメータの組み合わせが含まれている可能性も考えなければならない。例えば、熔融物の落下速度は圧力容器の破損部面積、落下継続時間、熔融物の総量の組み合わせによっては、極端に遅い速度が評価される可能性があるため、これを除外する工夫が必要である。

本年度は、実機における熔融物冷却確率評価として、MELCOR による SA 解析により得られる熔融物パラメータの情報をできる限りそのまま JASMINE 解析の入力として用いる手順で実施した。すなわち、MELCOR 解析 1 ケースに対して JASMINE 解析を 1 ケース実行する。また、対象とする事故は代表的な事故シナリオである TB および TQUV を対象として、事故シーケンスの影響について検討することとした。

まず、MELCOR を用いて炉心損傷に関連する 5 つの入力パラメータに不確かさを与えた解析を行った。次に MELCOR 解析の 1 ケースに対して、その熔融物条件から JASMINE 解析 1 ケースを設定し、格納容器内の熔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

福島第一原子力発電所 3 号炉の公開情報に基づきプラント条件を設定し[4.3, 4.4]、BWR における SA の代表的な事故シナリオとして TB 及び TQUV[4.5, 4.6]を対象として解析した。このため、JASMINE 解析で想定するプラント条件と完全に同一ではない。また、今回は事故シナリオの不確かさは考慮していないため、対策の開始時刻や効果（炉心注水量など）は固定した。

4.2.1 MELCOR 解析条件の設定

(1) 解析対象とする原子炉

解析対象は、Mark-I 型格納容器を持つ定格出力 840MWe の BWR4 である。入力ファイルを作成するにあたり、原子炉のデータを種々の文献から値を推定した。表 4.2.1 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) TQUV シナリオの解析条件設定

表 4.2.2 に TQUV シナリオを示す。これは高圧注入系(HPCS、RCIC)と低圧注水系(LPCI、LPCS)が機能喪失する事故シナリオであり、高圧注入系の作動に失敗した後、手動による原子炉冷却系の減圧に成功するが、低圧注水系の作動に失敗して炉心溶融に至る。溶融燃料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。TB シナリオとは違い、注水が無い場合早期の炉心溶融及び下部ヘッド破損となる。

(3) TB シナリオの解析条件設定

表 4.2.3 には TB シナリオ及び注水設定を示す。これ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。溶融燃料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 炉心支持板 →	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
	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

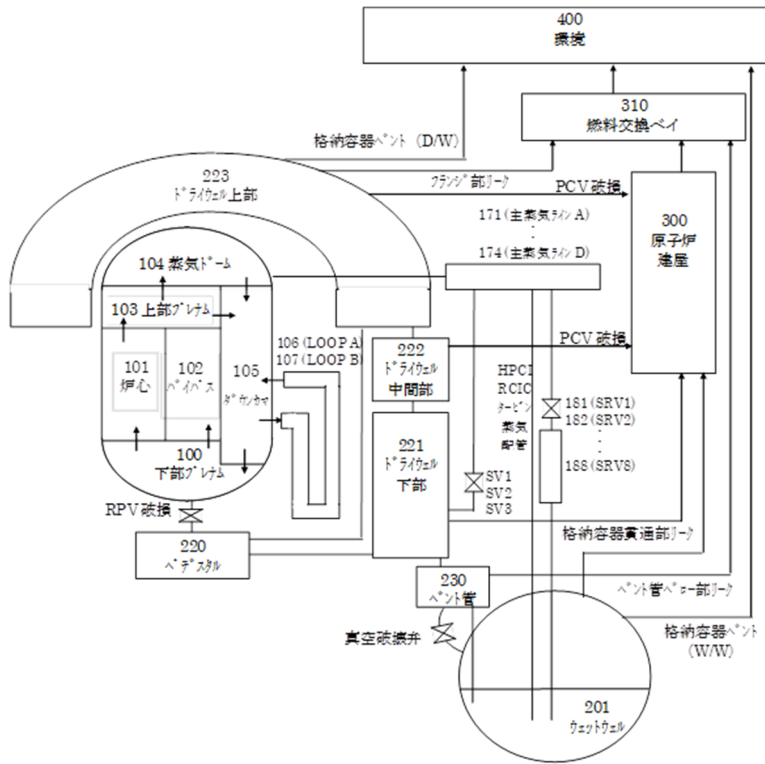


図 4.2.2 MELCOR 解析におけるボリューム分割

表 4.2.2 TQUV シナリオ

イベント	時刻 [s] or 作動条件
原子炉スクラム	0.0
MSIV(主蒸気隔離弁)閉	60.0
以後、SRV 開閉繰り返し	原子炉圧力が設定圧に到達後 (SRV-C は 7.54MPa 到達時)
高圧注水失敗	-
ADS(自動減圧系)手動作動	原子炉水位低 (レベル 1 水位=9.60m)となった時刻から 120 秒後
低圧注水失敗	-
炉心溶融	被覆管温度が 2098K を超えた時
圧力容器損傷	下部ヘッドの貫通部破損発生時

表 4.2.3 TB シナリオ

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

4.2.2 不確かさを考慮するパラメータ

MELCOR 解析では事象進展に係るモデルパラメータに確率分布を与えた。福島事故をベースにしたソースタームの不確かさ評価 (MELCOR1.8.5) [4.7]や北欧 BWR を対象とした過去の感度解析 (MELCOR2.2) [4.8][4.9]の事例を基にして、圧力容器破損時の溶融物状態に影響が大きいとされるパラメータを含む以下を選定した。①下部ヘッドの貫通破損温度以外は炉内燃料の溶融進展に係るパラメータである。

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

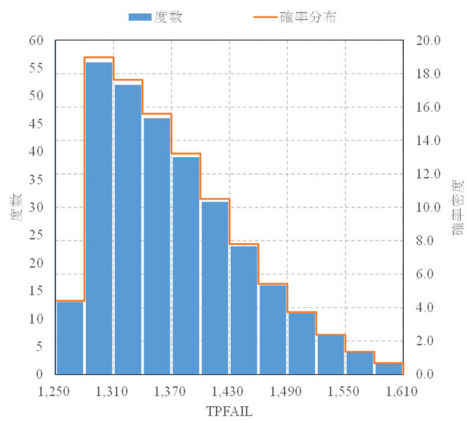
4.2.3 不確かさを考慮した MELCOR 入力条件

(1) 不確かさを考慮するパラメータセットの生成

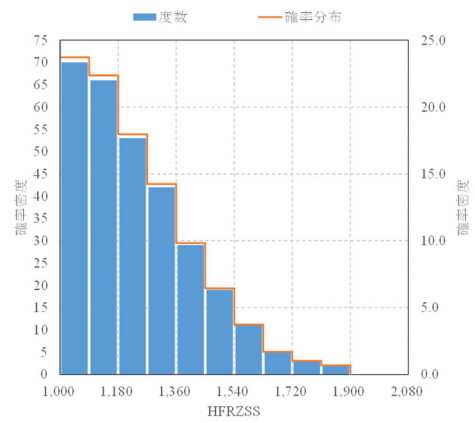
MELCOR 解析で不確かさを考慮する 5 個の入力パラメータに対して LHS 法を用いて表 4.2.4 に示した確率分布に従う 300 組の入力パラメータセットを発生させた。図 4.2.3 に発生させた各パラメータのヒストグラムを示す。

表 4.2.4 不確かさを考慮する MELCOR 入力パラメータ情報

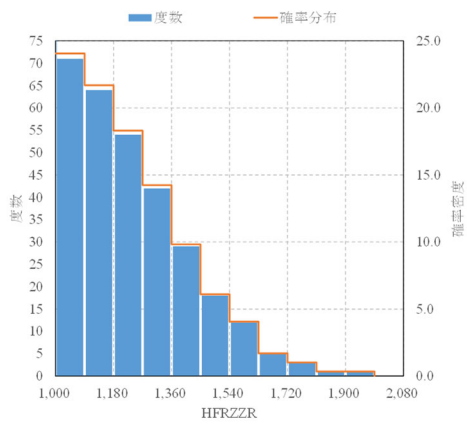
	Large item	Small item	Variable number	Variable name	Default value	Distribution	Standard deviation	Minimum value	Maximum value	Average
1	Lower Head Failure Modeling Parameters	Failure temperature of the penetration or the lower head	COR00009	TPFAIL	1273.2	Truncated Normal	127.315	1100	1600	1273.15
2	Candling Heat Transfer Coefficients	Refreezing heat transfer coefficient for steel	COR00005	HFRZSS	1000	Truncated Normal	300	100	2500	1000
3	Candling Heat Transfer Coefficients	Refreezing heat transfer coefficient for Zircaloy	COR00005	HFRZZR	1000	Truncated Normal	300	100	7500	1000
4	In-Vessel Falling Debris Quench Model Parameters	Velocity of falling debris	COR00012	VFALL	1	Truncated Normal	0.1	0.01	1.2	1.0
5	Core Component Failure Parameters	Temperature to which oxidized fuel rods can stand in the absence of unoxidized Zr in the cladding	SC1132	TRDFAI	2500	Truncated Normal	100	2350	2650	2500



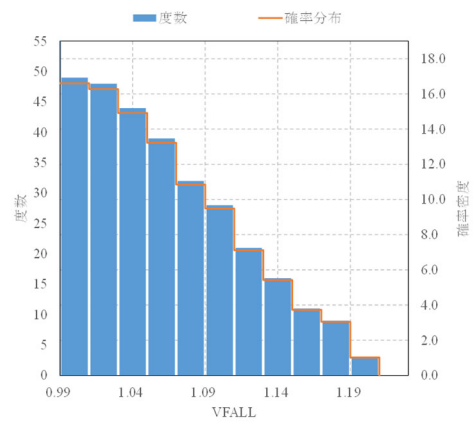
(a) TPFALL 不確かさ分布



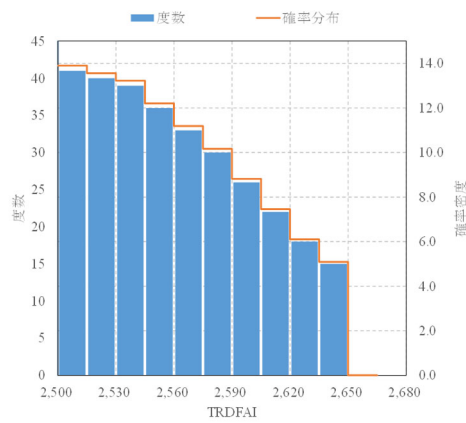
(b) HFRZSS 不確かさ分布



(c) HFRZZR 不確かさ分布



(d) VFALL 不確かさ分布



(e) TRDFAI 不確かさ分布

図 4.2.3 MELCOR インプット不確かさ分布

4.2.4 MELCOR 解析結果

生成した入力 300 ケースに対して MELCOR 解析を実施した。TB 及び TQUV シーケンスそれぞれについて、圧力容器が破損し 150,000 [s] 及び 20,000 [s] まで計算できたケースを JASMINE 解析の入力作成に使用した。ここで、エラーにより計算の継続ができないケースも除外した。TB では 208 ケース及び TQUV では 163 ケースが JASMINE 解析の入力作成に使用された。図 4.2.4 は JASMINE 解析に使用された不確かさパラメータ分布を示す。なお、JASMINE 解析は TQUV では 163 ケース、TB では 204 ケースが計算成功しており、最終的に使用されたパラメータ分布は図 4.2.4 とほとんど変わらない。

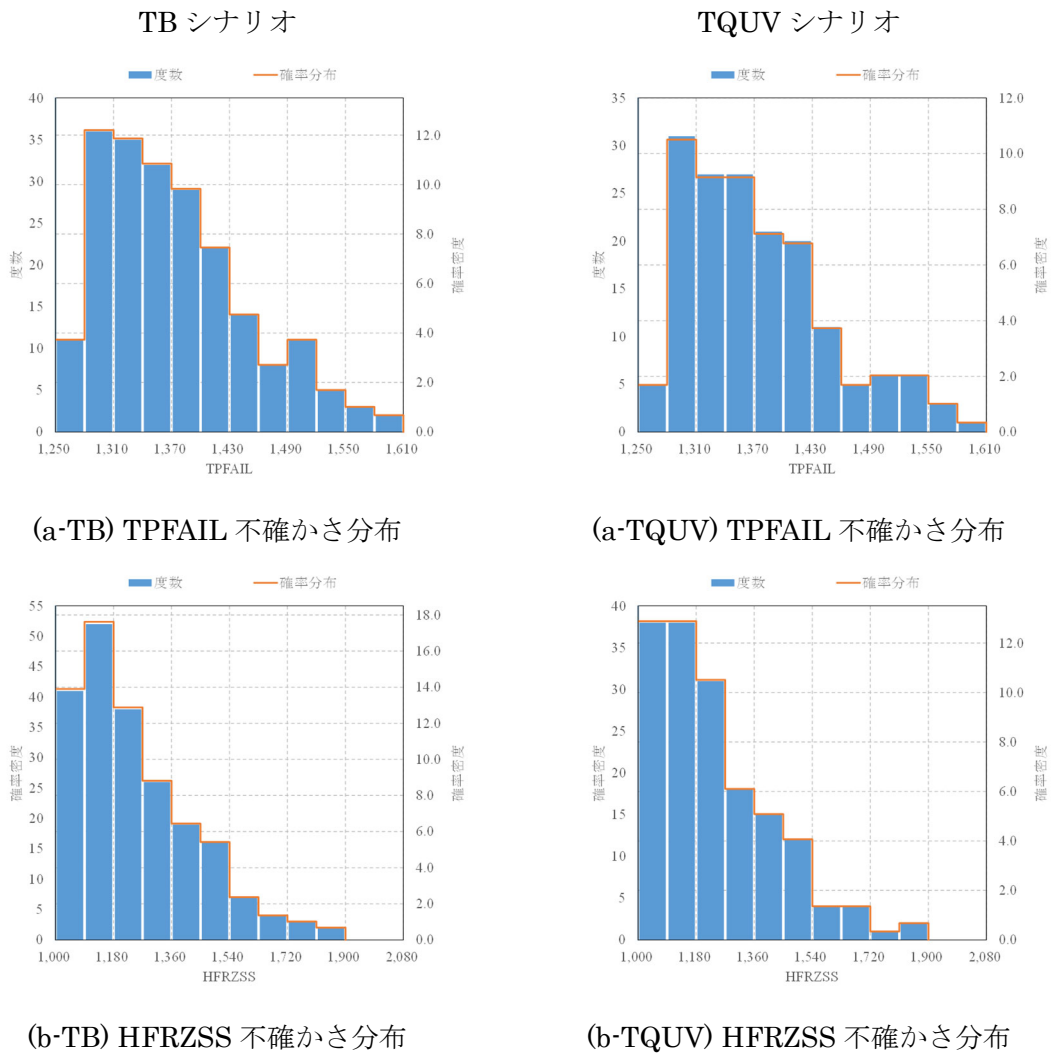
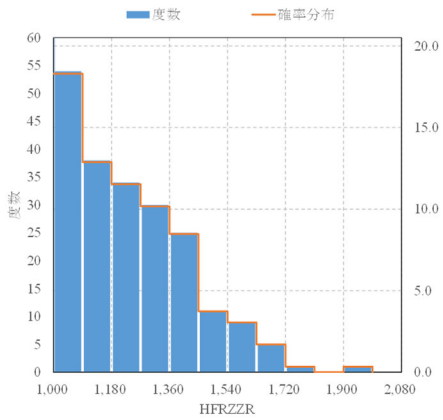
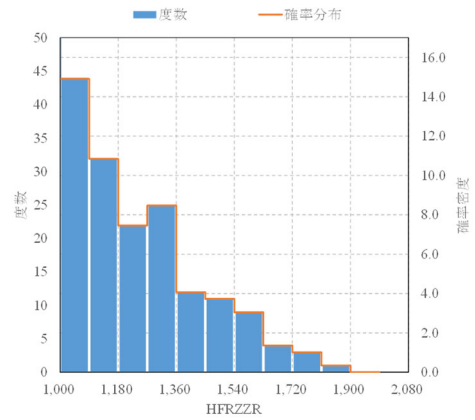


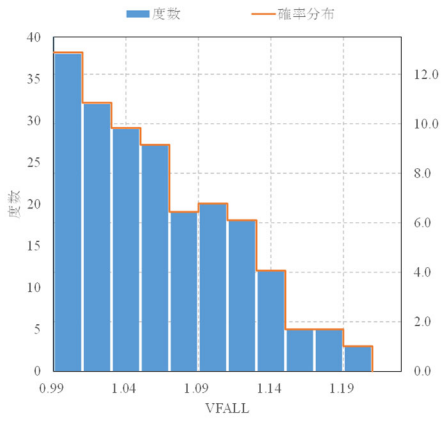
図 4.2.4 圧力容器破損まで解析が成功したケースの不確かさパラメータ分布 (1/2)



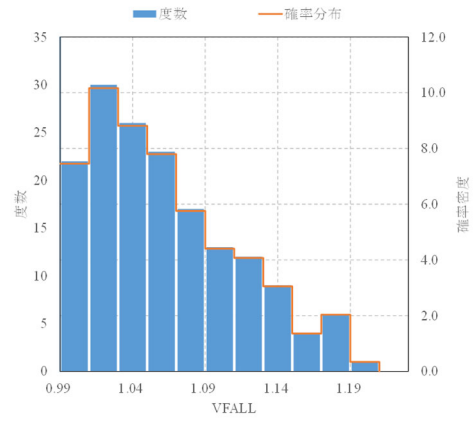
(c-TB) HFRZZR 不確かさ分布



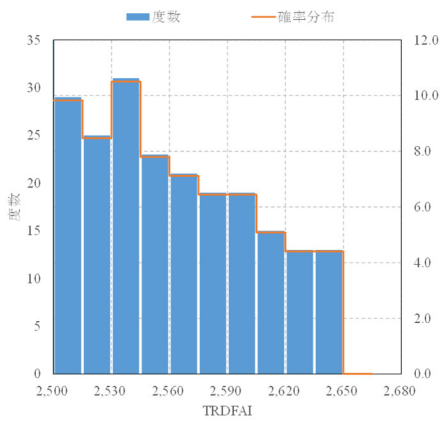
(c-TQUV) HFRZZR 不確かさ分布



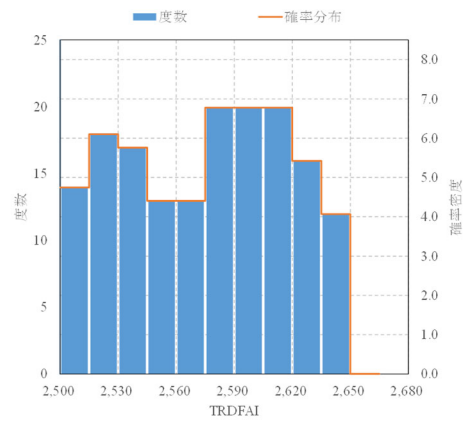
(d-TB) VFALL 不確かさ分布



(d-TQUV) VFALL 不確かさ分布



(e-TB) TRDFAI 不確かさ分布



(e-TQUV) TRDFAI 不確かさ分布

図 4.2.4 圧力容器破損まで解析が成功したケースの不確かさパラメータ分布 (2/2)

MELCOR の出力ファイルから読み取れるシビアアクシデントの代表的な以下の事象について発生した時刻と各パラメータの相関(ピアソンの積率相関係数)を図 4.2.5 及び図 4.2.6 に示す。カッコ内のメッセージを図に示している。

- (1) 燃料被覆管露出 (CORE-UNCOVER)
- (2) 燃料被覆管溶融 (CLAD-MELT)
- (3) 炉心支持板破損 (PLATEB-FAILED)
- (4) 上部格子板破損 (PLATE-G FAILED)
- (5) 圧力容器破損 (LH-PENETRATE)

図 4.2.5 より TB シナリオに対して、相関係数としては ± 1.0 が最も強いと考えられるが、ほとんどが ± 0.1 以下であり、その多くも ± 0.05 以下である。TB LH-PENETRATE-R3 に対する TPFAIL が目立つ以外は、いずれのパラメータもシビアアクシデント事象への影響が限定的である。

図 4.2.6 より、TQUV シナリオに対して、相関係数としては TRDFAI(燃料被覆管に酸化されていない Zr がいない場合に酸化された燃料棒が耐えられる温度)及び HFRZZR(Zr の再凝固熱伝達係数)と幾つかの事象との相関に大きな値が見られる。一方その他のパラメータでは、ほとんどが ± 0.1 以下であり、それらのパラメータはシビアアクシデント事象への影響が限定的である。

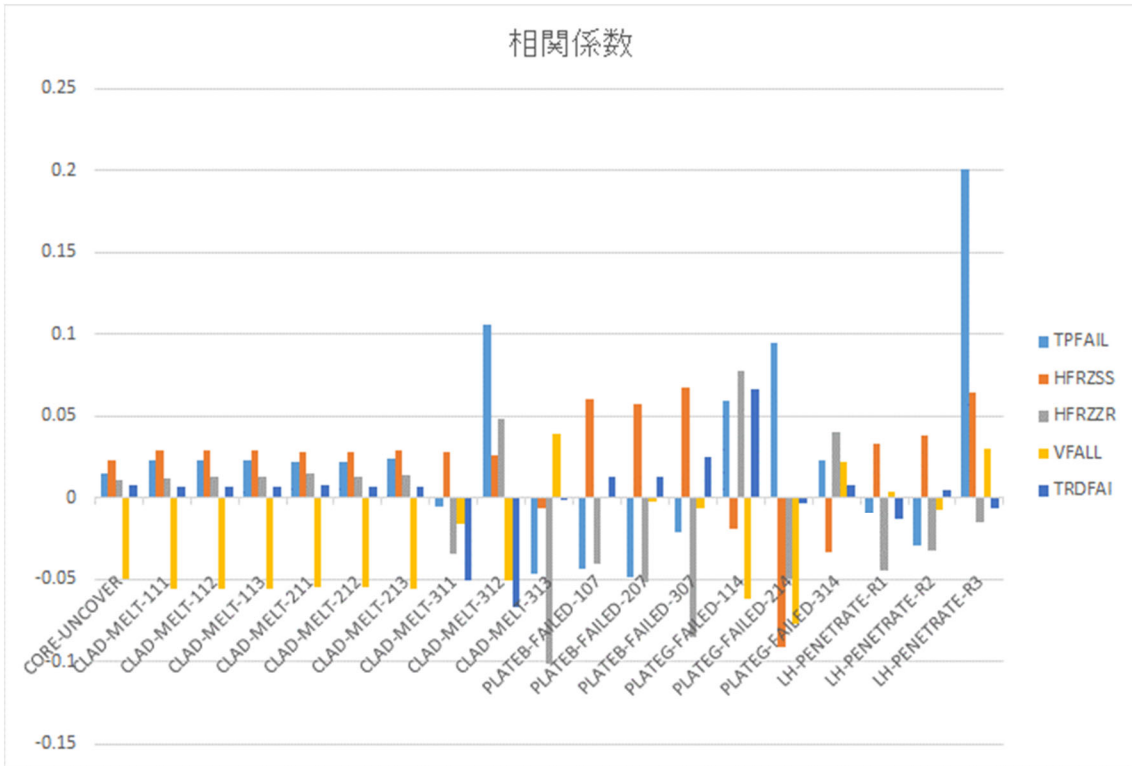


図 4.2.5 TB 代表的な事象の生じた時刻と各パラメータとの相関

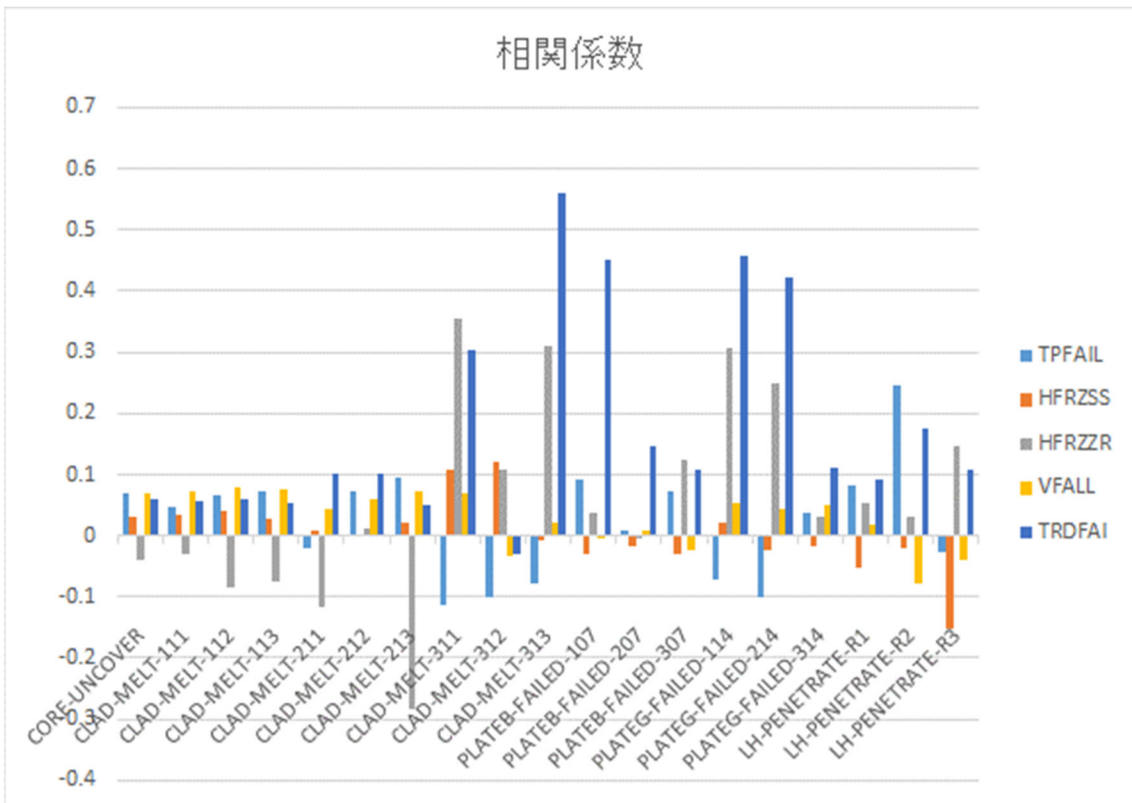


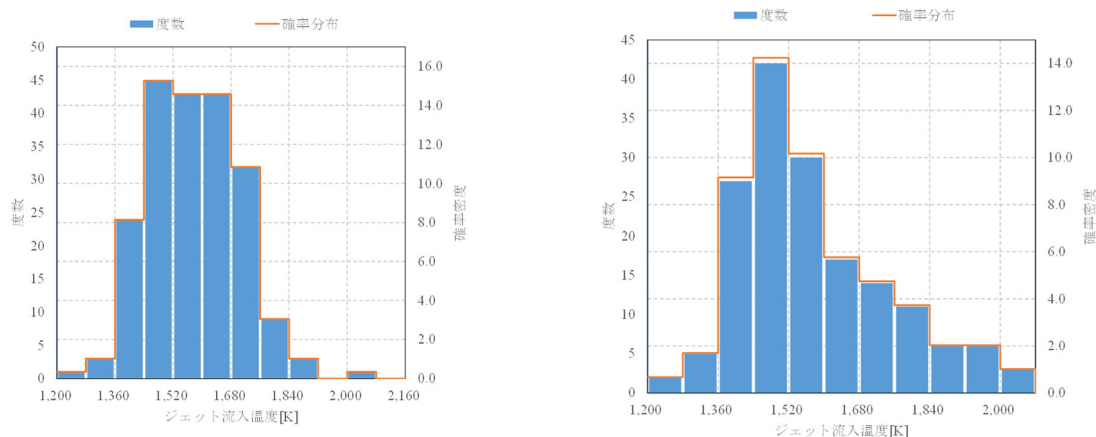
図 4.2.6 TQUV 代表的な事象の生じた時刻と各パラメータとの相関

4.3 JASMINE 解析溶融物条件の抽出

MELCOR の出力データから JASMINE 解析の入力条件として格納容器内へ移行する溶融物条件を抽出した。

(1) ジェットの流入温度

圧力容器破損直後の一番下のセル（図 4.2.1 の 101, 201, 301）のデブリ温度の平均値をとした。TB 及び TQUV シナリオの溶融物ジェット流入温度のヒストグラムを図 4.3.1 に示す。TB 及び TQUV シナリオの流入温度の最頻値はどちらも 1480 [K]程度であるが、TB は TQUV ほど明確ではなく 250 [K]程度の幅がある。



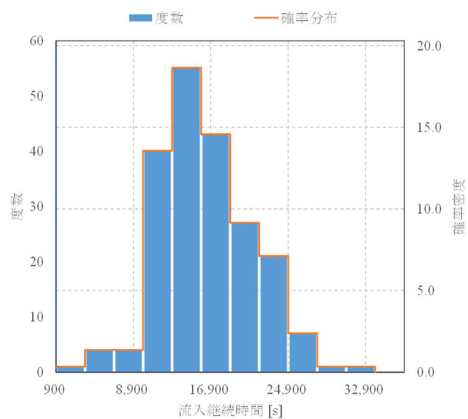
(a) TB シナリオのジェット温度

(b) TQUV シナリオのジェット温度

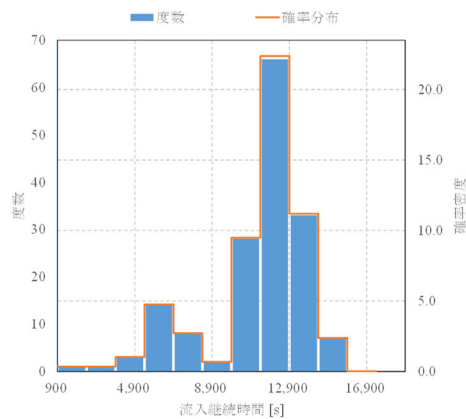
図 4.3.1 格納容器内へ移行した溶融物ジェット流入温度

(2) 流入継続時間

圧力容器破損時刻から溶融物放出停止時刻までとした。リングごとの破損時刻に間隔があり、溶融物の落下が複数回に分かれているようなケースであっても、最初のリングが破損した時刻から溶融物の放出が最終的に停止した時刻の間隔を採用した。図 4.3.2 に TB 及び TQUV シナリオにおける溶融物の格納容器内への流入継続時間を示す。両シナリオの最頻値はそれぞれ 20400 [s]及び 12150 [s]で 8000 [s]程度の差がある。また、TQUV では 2 つの山になっている。これは TQUV のケースでは最終的なリングの破損数に幅があり、複数破損の場合はそのタイミングが離れていたと考えられる。



(a) TB シナリオの流入継続時間

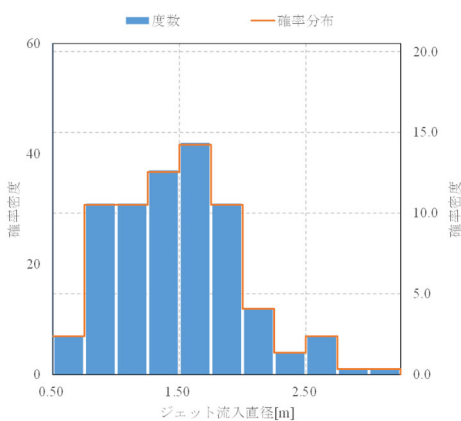


(b) TQUV シナリオの溶融物流入継続時間

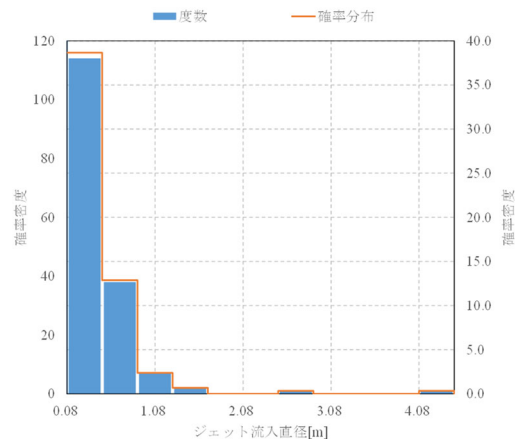
図 4.3.2 溶融物流入継続時間

(3) 流入直径

MELCOR のバージョン 1.8.5 における圧力容器下部ヘッ드의破損は貫通部破損が有効であるため本解析でも利用している。また、その破損もリング要素ごとに生じるものとなっている。下部ヘッ드의貫通部破損とは制御棒案内管や計装管等の溶接部分が破損して開いた隙間から溶融物が格納容器内へ落下する。このため、複数個所から溶融物が落下すると考えられる。このことは、JASMINE 解析で想定している格納容器内へジェット状に溶融物が落下するという条件と直接整合していない。本解析では破損部面積を合計したジェットを想定した。流入継続時間中の下部ヘッド破損部面積の時間平均値とし、破損口は円形として求めた。図 4.3.3 に TB 及び TQUV シナリオの溶融物ジェットの流入直径を示す。TB シナリオでは 1.6[m]程度に最頻値があり分布に幅がある。TQUV では 0.28[m]以下に最頻値がある。



(a) TB シナリオのジェット直径



(b) TQUV シナリオのジェット直径

図 4.3.3 溶融物ジェットの流入直径

(4) ジェットの流入速度

$$\text{ジェット流入速度(m/s)} = \frac{\text{溶融物落下量(kg)}}{\text{溶融物密度(kg/m}^3\text{)} \cdot \text{ジェット流入面積(m}^2\text{)} \cdot \text{溶融物落下時間(s)}}$$

として求めた。ここで溶融物密度は(5)で求めた各ケースに対する溶融物の液相密度、流入継続時間及びジェット流入面積は(2)及び(3)で使用した値とした。図 4.3.4 に TB 及び TQUV シナリオの溶融物ジェットの落下溶融物量を示す。TB 及び TQUV シナリオの溶融物量の最頻値はそれぞれ 194 t 及び 134 t であった。TQUV ケースでは分布が 2 つにわかれている。これは最終的に破損した下部ヘッドのリング数によって落下溶融物量に差が出るためと考えられる。

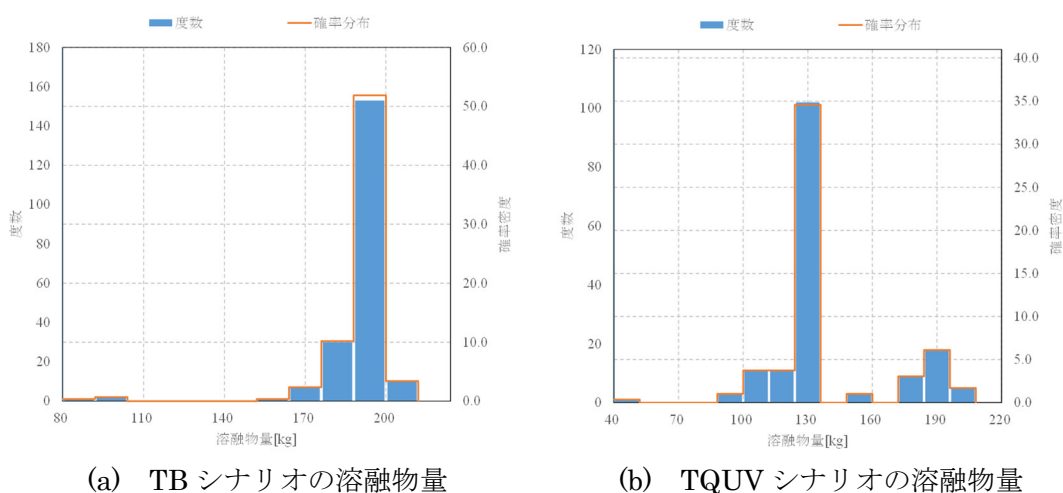


図 4.3.4 落下溶融物量

(5) 溶融物の物性値

炉心の溶融進展の結果として、圧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、SOX (酸化鉄))の各質量割合、また、金属成分(SS (ステンレススチール)、ZR、Poison 物質 (BWR では B₄C))の質量割合を取得した。

図 4.3.1 及び図 4.3.2 に TB 及び TQUV シナリオ解析の結果得られた酸化物及び金属成分の質量割合のヒストグラムを示す。TB シナリオでは酸化物割合が 20%程度の場合が多く、金属割合が 80%の場合が多い。また、TQUV ケースでは、酸化物割合が 60%程度の場合が多く、金属割合が 40%程度の場合が多いという結果になった。

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、酸化物は UO₂、ZrO₂ 及び FeO、金属成分は Fe、Zr 及び B₄C を仮定した。図 4.3.3 及び図 4.3.4 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。これらの物性値は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。しかしながら、計算の安定性のため、JASMINE 計算では融点の情報のみ用いることとした。

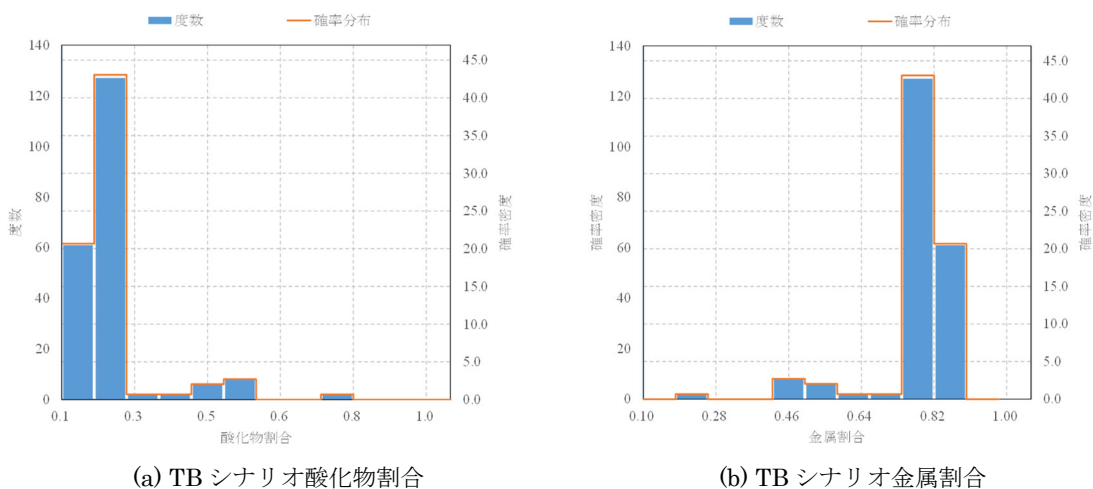


図 4.3.1 TB シナリオの溶融炉心酸化物質量割合及び金属成分質量割合

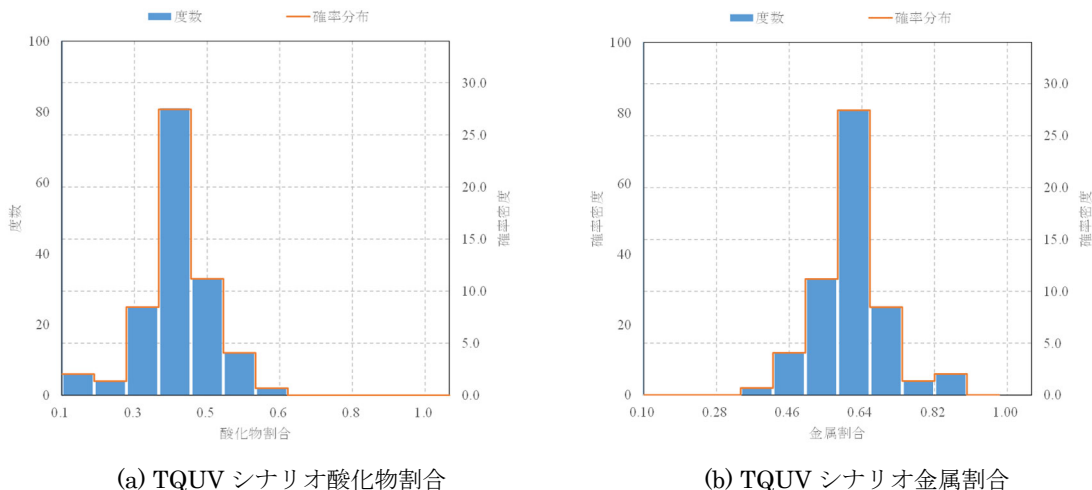


図 4.3.2 TQUV シナリオの溶融炉心酸化物質量割合及び金属成分質量割合

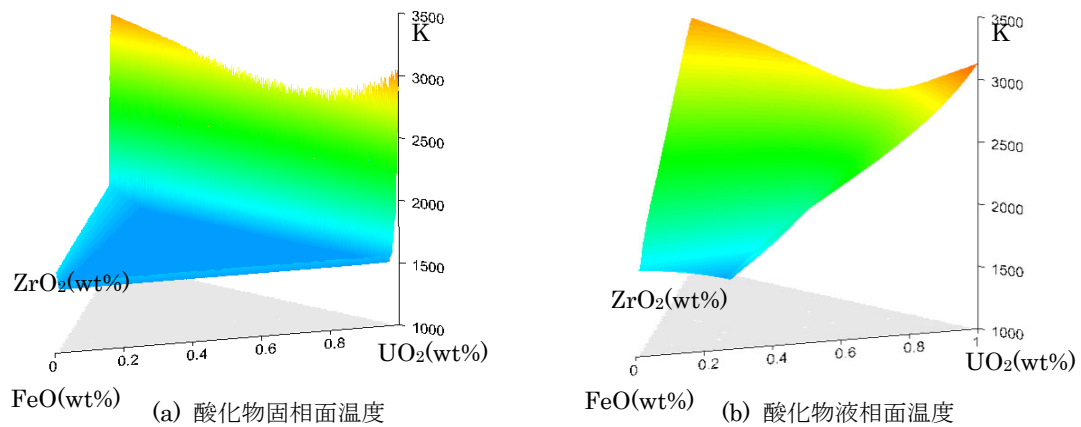


図 4.3.3 炉心溶融物酸化物の固相面温度及び液相面温度

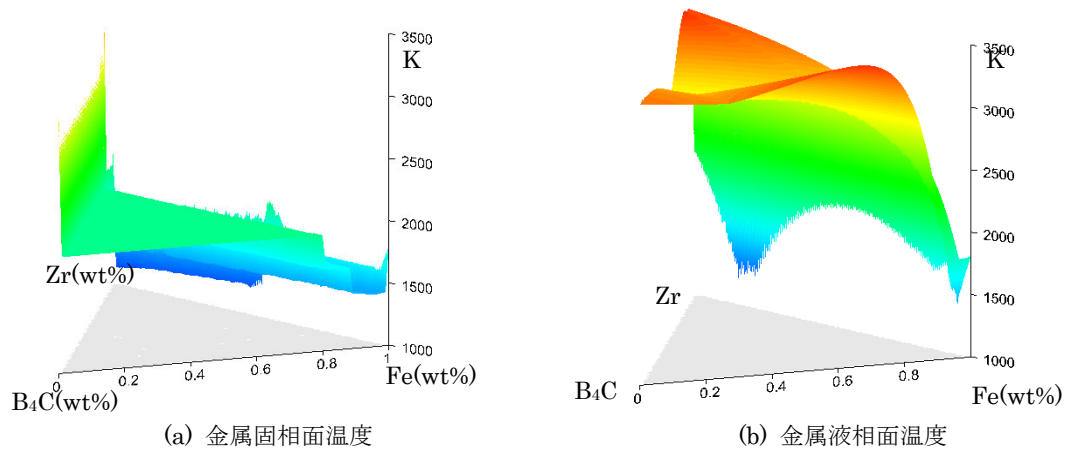


図 4.3.4 炉心溶融物金属の固相面温度及び液相面温度

(6) 溶融物条件間の相関

表 4.3.1 に溶融物条件（酸化物割合、溶融物量及び溶融物温度）間の相関を示す。TB では酸化物割合と溶融物温度に他のパラメータに比べて強い相関がみられる。一方 TQUV では酸化物割合と溶融物温度の相関は非常に弱い。酸化物割合と溶融物量では TB では負の相関であるのに対して TQUV では正の相関であった。溶融物量と溶融物温度の相関は TB では TQUV の場合に比べて非常に弱い。

表 4.3.1 溶融物条件間の相関

相関係数	酸化物割合 [-]	溶融物量 [kg]	溶融物温度 [K]
酸化物割合 [-]		-0.127	0.465
溶融物量 [kg]	-0.127		-0.026
溶融物温度 [K]	0.465	-0.026	

(a) TB シナリオ

相関係数	酸化物割合 [-]	溶融物量 [kg]	溶融物温度 [K]
酸化物割合 [-]		0.188	-0.087
溶融物量 [kg]	0.188		-0.146
溶融物温度 [K]	-0.087	-0.146	

(b) TQUV シナリオ

4.4 JASMINE コードによる冷却成功確率解析

4.4.1 JASMINE 解析条件

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、上部自由空間容積及び溶融炉心落下質量の最大値を決定した。主要な実機解析の条件を表 4.4.1 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。

溶融物の落下条件は 4.3 で示したものを使うが、(4)のジェット流入速度については非常に小さい値となったため、計算の安定性から全て 1.0 m/s とした。同時に単位時間に系に流入する溶融物の質量を変化させないように、流入直径を計算して用いた。

水位 1.0m 以上ではジェットが完全分裂するケースが多くなったため、格納容器内の初期水位は 0.5 及び 1.0m とした。また、溶融炉心の溶融炉心の液相線温度、固相線温度及び融点は 4.3 で求めた値とした。JASMINE 解析における溶融炉心の発熱量は 100 W/kg とした。なお、本解析に使用した JASMINE コードは平成 30 年度に開発したバージョンである。

表 4.4.1 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

4.4.2 JASMINE 解析の結果

解析の結果、溶融物ジェットが完全分裂した少数のケース以外の全てのケースで溶融物が床面上を拡がり、途中で停止することなく壁面に到達した。

図 4.4.1 から図 4.4.3 に TB、TQUV シナリオのか各初期水位ケースの最終的な連続層状デブリ質量、粒子状デブリ質量及びアグロメレーションデブリ質量を示す。連続層状及びアグロメレーションデブリ質量が最終的なデブリ高さ計算で考慮されるが、溶融物はほとんどが連続層状として堆積した。連続層状デブリ質量はシナリオによる違いが大きく、水位による影響はほとんど見られなかった。粒子状デブリはどのシナリオ、初期水位であれ生成質量に大きな差は見られない。アグロメレーションデブリは水位 1.0m の条件では少数ケースにおいて生成された。

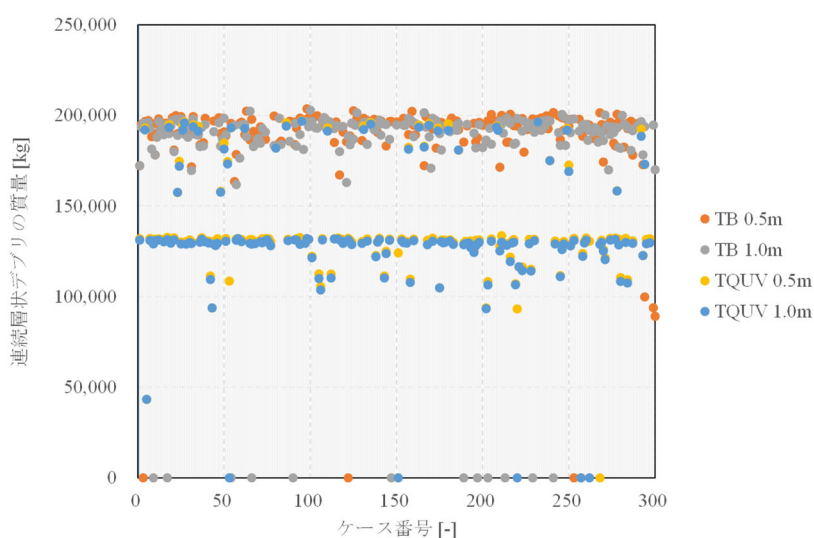


図 4.4.1 連続層状デブリの質量

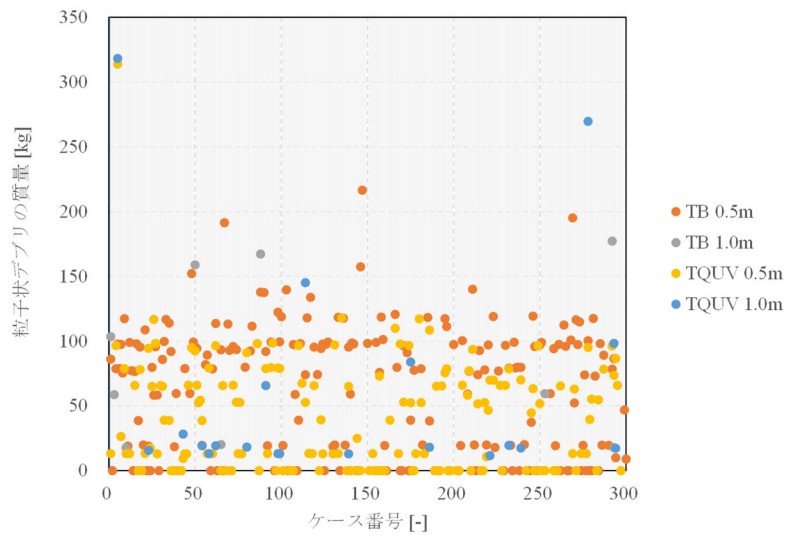


図 4.4.2 粒子状デブリの質量

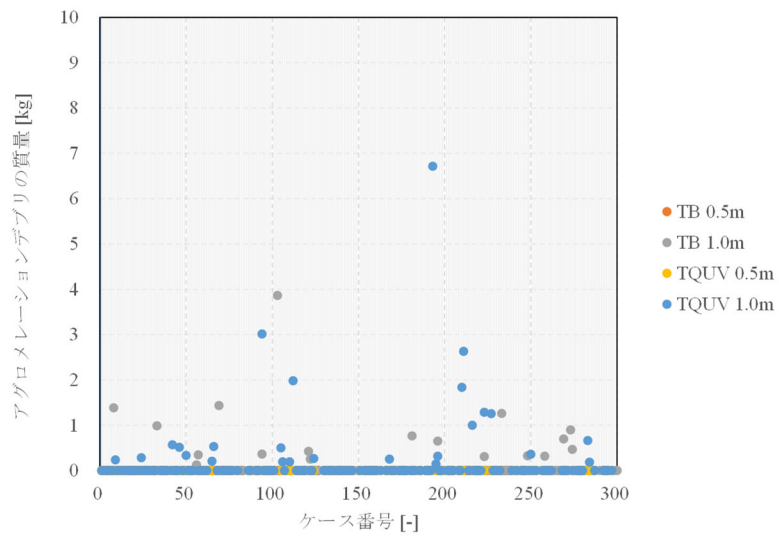


図 4.4.3 アグロメレーションデブリの質量

JASMINE 計算の結果として得られたデブリの拡がり距離及びプール状、粒子状、アグロメレーション状デブリの質量(割合)とデブリの密度からデブリの堆積高さを計算する。ここで、昨年度までと同様に保守的な評価のためデブリは円柱形状を仮定した。

デブリ堆積高さの算出では、連続層状デブリ及びアグロメレーションデブリが一体化して円筒を形成すると仮定する。連続層状デブリ質量 $M_c(\text{kg})$ 及びアグロメレーションデブリ質量 $M_a(\text{kg})$ より円筒の体積 $V(\text{m}^3)$ を次式で得る。また、密度 $\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$ については各ケースの溶融物の組成の質量割合に応じた固相線密度を使用した。

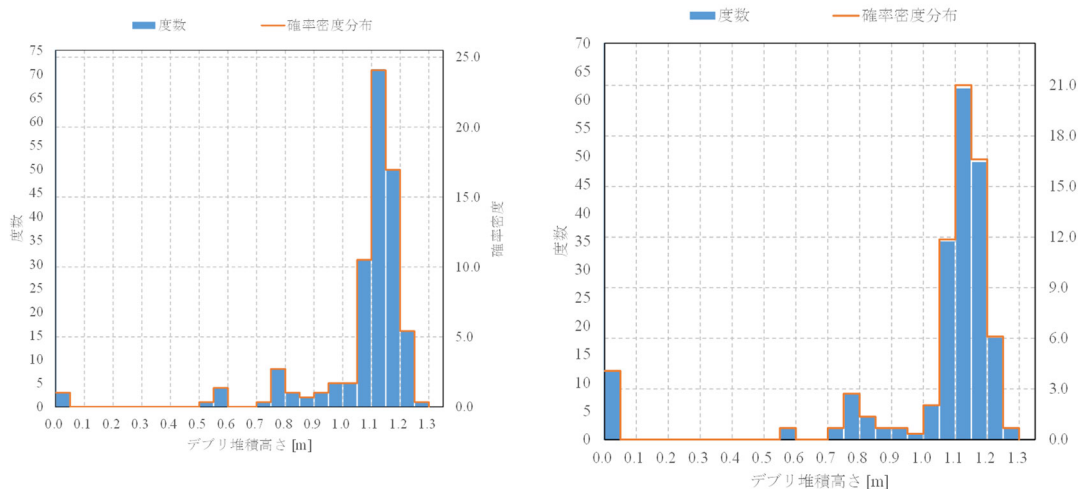
$$V = (M_c + M_a) / \rho$$

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

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

図 4.4.4 及び図 4.4.5 に TB 及び TQUV シナリオでのデブリ堆積高さのヒストグラムを示す。それぞれのシナリオ内で、水位の影響はほとんど見られなかった。水位が 1.0m のケースではデブリの堆積高さが 0.0m のケースが水位 0.5m のケースより多く見られる。水位が高い条件では溶融物ジェット粒子化割合が多くなるが、水位 0.5m と 1.0m の間でジェットが完全分裂し、全て粒子化したケースである。全て粒子化したケースは後の冷却の成否判定では冷却成功判定とした。また、これらのケースではジェットの流入速度が比較的小さなケースだったと考えられるが、床面にジェットとして到達したあと床面上の拡がり停止することなくキャビティ壁に到達した。

堆積高さの最頻値は TB 及び TQUV シナリオではそれぞれ 1.125 m 及び 0.525 m となり、TB ケースの方が 2 倍程度高くなった。



(a) デブリ堆積高さ(TB 水位 0.5m)

(b) デブリ堆積高さ(TB 水位 1.0m)

図 4.4.4 TB シナリオの格納容器内デブリ堆積高さ

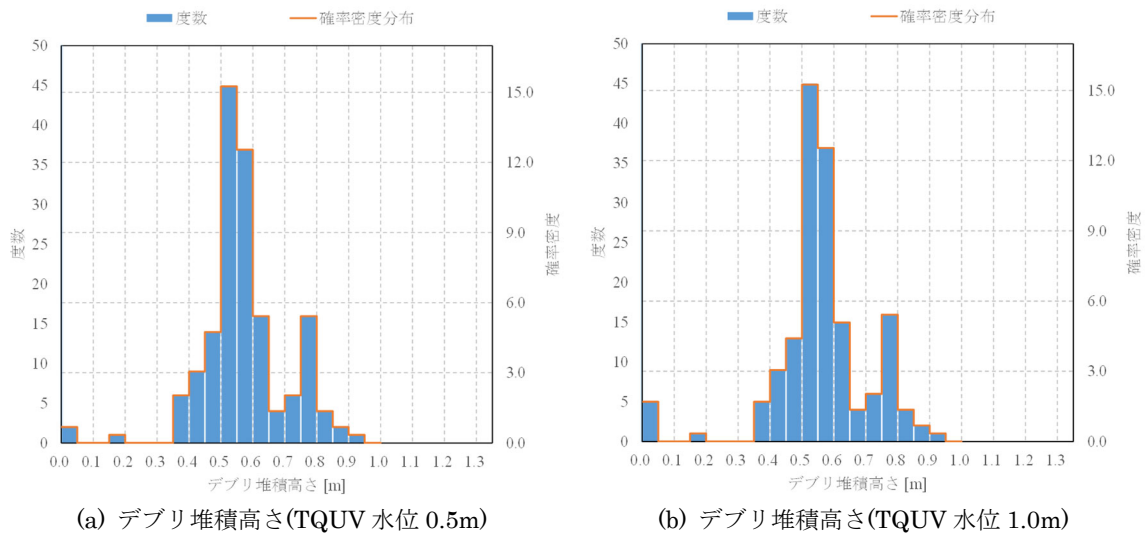


図 4.4.5 TQUV シナリオの格納容器内デブリ堆積高さ

4.4.3 溶融炉心の冷却成功確率

JASMINE解析で得たデブリ堆積高さと冷却可能な最大デブリ堆積高さ h_{max} とを比較することにより、デブリの冷却成功 (MCCI 回避の成功/失敗) を判定する。ここで、溶融物の酸化物及び金属相の質量割合に応じた物性値を用いて付録Bに示す方法で h_{max} を算出した。用いた条件を表4.4.2に示す。TB及びTQUVの各ケースの冷却可能なデブリ堆積高さを図4.4.6に示す。TBシナリオでは冷却可能なデブリ堆積高さが高く、ばらつきも大きい傾向がある。TBシナリオでは金属成分が優越するケースが多く、発熱量が小さいとされるためと考えられる。

表4.4.2 冷却可能な最大デブリ堆積高さの評価に用いる入力条件一覧

変数	説明	値
λ	デブリ熱伝導率 (固相) [W/m·K]	4.3 (5)で求めた値
ρ	デブリ密度 (固相) [kg/m ³]	4.3 (5)で求めた値
Q_d	デブリ崩壊熱 [W/m ³]	828510 に (ZrO ₂ +UO ₂)の質 量割合をかけた値
Q_w	浸水層崩壊熱 [W/m ³]	828510 に (ZrO ₂ +UO ₂)の質 量割合をかけた値
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]	4.3 (5)で求めた値

*文献 [4.11] に基づき保守的に設定

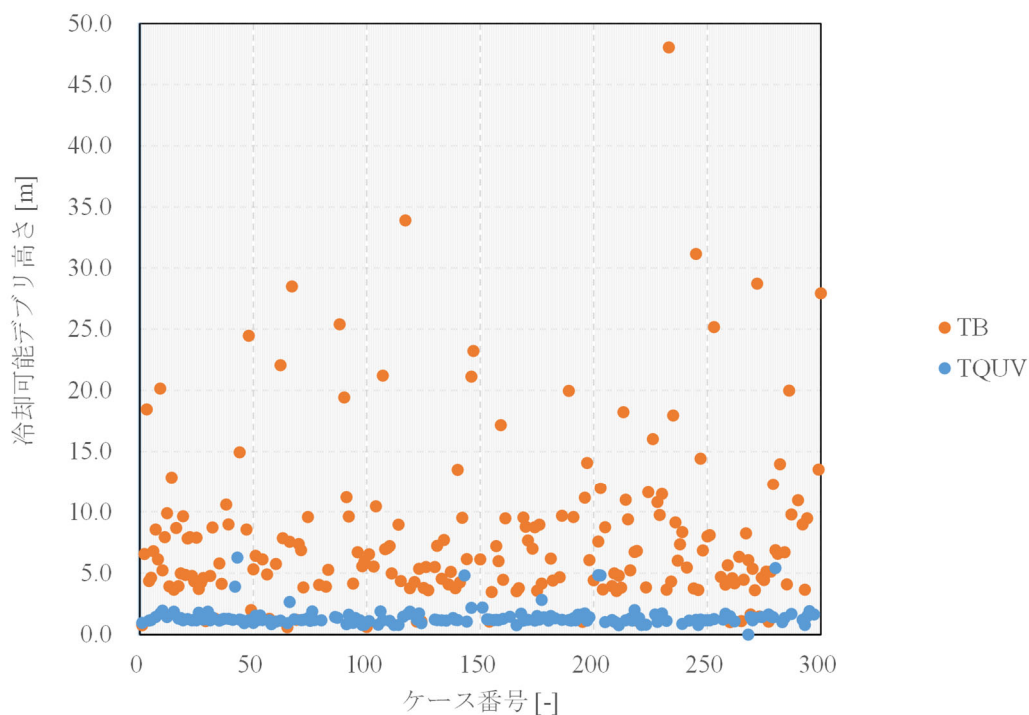


図4.4.6 冷却可能なデブリの堆積高さ

また、それぞれのケースの冷却判定の結果を表4.4.3及び表4.4.4にそれぞれ示す。TBケースでは水位0.5m及び1.0mの初期水位条件に対して1ケースのみ冷却失敗と判定された。TQUVケースでは水位0.5m及び1.0mの初期水位に対して冷却失敗と判定されたケースはなかった。それぞれのケースの冷却成功確率 P は以下の通りに求めた。

TBシナリオ（初期水位0.5 m）

$$P = 203/204 = 0.995$$

TBシナリオ（初期水位1.0m）

$$P = 203/204 = 0.995$$

TQUVシナリオ（初期水位0.5 m）

$$P = 163/163 = 1.0$$

TQUVシナリオ（初期水位1.0m）

$$P = 163/163 = 1.0$$

表 4.4.3 TB シナリオでの冷却成功判定

ケース 番号	冷却可能高 さ [m]	TB 0.5m		TB 1.0m	
		デブリ堆積 高さ[m]	冷却成功判 定	デブリ堆積 高さ[m]	冷却成功判 定
1	0.7712	0.8073	×	0.8073	×
2	6.5655	1.1571	○	1.1571	○
3	18.4306	0.0000	○	1.2025	○
4	4.3572	1.0955	○	1.0955	○
5	4.6381	1.1120	○	1.1120	○
6	6.7976	1.1432	○	1.1432	○
7	8.5563	1.1606	○	1.1606	○
8	6.1250	1.0968	○	1.0968	○
9	20.1462	1.2030	○	0.0000	○
10	5.2306	1.0309	○	1.0309	○
11	7.9243	1.1533	○	1.1533	○
12	9.8797	1.1995	○	1.1995	○
13	3.9161	1.1037	○	1.1037	○
14	12.8536	1.1781	○	1.1781	○
15	3.6426	1.0681	○	1.0681	○
16	8.6880	1.1341	○	1.1341	○
17	3.9417	1.1046	○	0.0000	○
18	4.9720	1.0811	○	1.0811	○
19	9.6399	1.1955	○	1.1955	○

20	4.8583	1.1216	○	1.1216	○
21	7.8336	1.0432	○	1.0432	○
22	7.9306	1.1795	○	1.1795	○
23	4.7835	1.0543	○	1.0543	○
24	4.3453	1.1304	○	1.1304	○
25	7.8826	1.2027	○	1.2027	○
26	3.7055	1.1046	○	1.1046	○
27	4.2311	1.0966	○	1.0966	○
28	4.6142	1.1004	○	1.1004	○
29	1.1028	0.7714	○	0.7714	○
31	4.7836	0.9855	○	0.9855	○
32	8.7221	1.2003	○	1.2003	○
33	1.3021	0.8582	○	0.8582	○
35	5.7851	1.0965	○	1.0965	○
36	4.1327	1.0040	○	1.0040	○
38	10.5920	1.1288	○	1.1288	○
39	8.9709	1.1971	○	1.1971	○
44	14.9293	1.1934	○	1.1657	○
47	8.5488	1.1927	○	1.1819	○
48	24.4664	1.1874	○	1.2419	○
49	1.9823	0.9806	○	0.9387	○
50	5.3168	1.1075	○	1.1509	○
51	6.4205	1.0996	○	1.1128	○
54	6.1194	1.1287	○	0.0000	○
56	4.9092	0.9484	○	1.1343	○
57	1.2885	0.7839	○	0.7182	○
59	1.0550	0.8002	○	0.7305	○
60	5.7541	1.1691	○	1.1645	○
62	22.0493	1.1704	○	1.2130	○
63	7.8551	1.2008	○	1.1242	○
65	0.6017	0.5192	○	0.5630	○
66	7.5643	1.1747	○	0.0000	○
67	28.4990	1.2043	○	1.2450	○
69	1.2047	0.7980	○	0.8093	○
70	7.3697	1.1211	○	1.1379	○
71	6.8616	1.1436	○	1.0977	○

72	3.8492	1.0801	○	1.0919	○
74	9.5783	1.1203	○	1.1485	○
79	4.0533	1.1448	○	1.0708	○
82	3.8923	1.0480	○	1.1323	○
83	5.2797	1.0780	○	1.0722	○
88	25.3992	1.2403	○	1.1705	○
90	19.4100	1.1970	○	0.0000	○
91	11.1914	1.1321	○	1.2088	○
92	9.6205	1.1407	○	1.0873	○
94	4.1542	1.1131	○	1.0822	○
96	6.6997	1.1475	○	1.0638	○
98	5.5558	1.1860	○	1.1561	○
99	5.9890	1.1614	○	1.1536	○
100	0.6213	0.5717	○	0.5882	○
101	6.5427	1.1315	○	1.1560	○
103	5.5476	1.1329	○	1.1244	○
104	10.4392	1.1769	○	1.1467	○
107	21.2031	1.2141	○	1.2432	○
108	6.9489	1.1735	○	1.1941	○
109	7.0467	1.1677	○	1.1511	○
110	7.2058	1.1386	○	1.1487	○
111	4.9842	1.1544	○	1.1621	○
114	8.9530	1.0943	○	1.1501	○
115	4.3562	1.1241	○	1.1234	○
117	33.8846	1.0695	○	1.1840	○
119	3.7780	1.0899	○	1.1214	○
121	4.2737	1.0504	○	0.9465	○
122	1.0507	0.0000	○	0.7625	○
123	5.3541	1.0953	○	1.0767	○
124	1.0766	0.7918	○	0.8069	○
125	3.7893	1.1315	○	1.0545	○
126	5.5108	1.1465	○	1.1499	○
127	3.6180	1.1163	○	1.1378	○
130	5.5104	1.0979	○	1.1511	○
131	7.2281	1.1839	○	1.1855	○
133	4.5528	1.1286	○	1.0644	○

134	7.7085	1.1682	○	1.1836	○
136	4.0809	1.1353	○	1.1432	○
137	5.1015	1.1258	○	1.1146	○
139	3.7867	1.0836	○	1.1135	○
140	13.5054	1.1938	○	1.1969	○
141	4.2592	1.1334	○	1.0970	○
142	9.5146	1.1716	○	1.1819	○
144	6.1371	1.0792	○	1.1611	○
146	21.1282	1.2054	○	1.1984	○
147	23.2221	1.2256	○	0.0000	○
150	6.1274	1.1191	○	1.1211	○
154	1.0583	0.8020	○	0.7957	○
155	3.4703	1.0875	○	1.0783	○
157	7.2080	1.0935	○	1.1502	○
158	5.9721	1.1490	○	1.1535	○
159	17.1531	1.2581	○	1.2320	○
160	4.4696	1.0625	○	1.0350	○
161	9.4614	1.1132	○	1.1623	○
166	3.5350	0.9716	○	1.1403	○
167	3.7767	1.1393	○	1.1113	○
169	9.5307	1.1672	○	1.1167	○
170	8.7833	1.1529	○	1.0187	○
171	7.6522	1.1350	○	1.1758	○
173	6.9888	1.0884	○	1.1828	○
174	8.7421	1.1728	○	1.1728	○
175	3.5705	1.0969	○	1.0838	○
176	8.9519	1.1946	○	1.1088	○
177	4.1427	1.1108	○	1.1186	○
181	6.1953	1.1433	○	1.1328	○
182	4.4033	1.1516	○	1.1376	○
185	4.6679	1.1258	○	1.1071	○
186	9.6711	1.1346	○	1.1614	○
189	19.9620	1.1311	○	0.0000	○
191	9.5735	1.1501	○	1.1661	○
195	1.0447	0.7700	○	0.7558	○
196	11.1580	1.1221	○	1.1211	○

197	14.0614	1.1428	○	0.0000	○
198	6.0561	1.1694	○	1.1672	○
200	4.4250	1.1302	○	1.0767	○
202	7.5688	1.1078	○	1.1210	○
203	11.9377	1.1937	○	0.0000	○
204	3.6834	1.0984	○	1.0984	○
205	8.7469	1.1898	○	1.0998	○
208	3.9488	1.1116	○	1.1117	○
209	4.9719	1.0828	○	1.0979	○
210	3.5387	0.9416	○	1.1021	○
211	4.7954	1.1479	○	1.1297	○
212	3.8105	1.1313	○	1.0964	○
213	18.2139	1.2463	○	0.0000	○
214	10.9809	1.1263	○	1.2167	○
215	9.3812	1.0944	○	1.1697	○
216	5.2387	1.1690	○	1.1589	○
218	6.7361	1.1355	○	1.0821	○
219	6.8108	1.1473	○	1.0730	○
220	1.0321	0.7702	○	0.7957	○
223	3.8373	1.1326	○	1.1097	○
224	11.5989	1.0926	○	1.2048	○
226	16.0008	1.2135	○	1.2259	○
228	10.7891	1.1493	○	1.1735	○
229	9.7388	1.1651	○	0.0000	○
230	11.4594	1.1939	○	1.1871	○
232	3.6597	1.1163	○	1.0961	○
233	48.0286	1.2210	○	1.2373	○
234	4.3259	1.1147	○	1.0855	○
235	17.9396	1.2430	○	1.2400	○
236	9.1326	1.1773	○	1.1615	○
237	6.0232	1.1920	○	1.1844	○
238	7.3411	1.1329	○	1.1666	○
239	8.3387	1.1883	○	1.1803	○
241	5.4686	1.1916	○	0.0000	○
244	3.7484	1.1321	○	1.0919	○
245	31.1436	1.1851	○	1.2658	○

246	3.6353	1.1150	○	1.1308	○
247	14.4035	1.2156	○	1.2657	○
248	6.8447	1.1635	○	1.0964	○
250	7.9940	1.1578	○	1.1861	○
251	8.1027	1.1816	○	1.1451	○
253	25.1638	0.0000	○	1.2397	○
256	4.6834	1.1505	○	1.1283	○
258	4.0707	1.0714	○	1.1250	○
259	5.6510	1.1311	○	1.1436	○
260	1.0239	0.7564	○	0.7765	○
261	4.5793	1.1332	○	1.0953	○
262	4.1651	1.1137	○	1.1057	○
264	6.3319	1.0979	○	1.1292	○
265	1.0924	0.7855	○	0.7980	○
266	4.4562	1.1153	○	1.1345	○
267	8.2516	1.1067	○	1.1044	○
268	6.0689	1.1707	○	1.1148	○
269	1.6340	0.9163	○	0.8979	○
270	5.3516	0.9995	○	1.0767	○
271	3.6154	1.0708	○	1.1126	○
272	28.7172	1.2382	○	1.2407	○
273	1.4672	0.8841	○	0.8049	○
274	4.6268	1.1385	○	1.1260	○
275	4.4405	1.1156	○	1.1114	○
276	5.1291	1.0852	○	1.1249	○
277	1.0474	0.7453	○	0.7986	○
278	5.1371	1.1420	○	1.1126	○
279	12.2645	1.1937	○	1.1239	○
280	6.8757	1.1467	○	1.0783	○
281	6.5774	1.1750	○	1.2039	○
282	13.9547	1.1265	○	1.2107	○
284	6.7115	1.1292	○	1.1409	○
285	4.0921	1.1322	○	1.1301	○
286	19.9716	1.2091	○	1.1218	○
287	9.7863	1.0459	○	1.1310	○
290	10.9505	1.1910	○	1.1947	○

292	8.9594	1.1487	○	1.1546	○
293	3.6565	0.9792	○	1.0099	○
294	9.4631	0.5845	○	1.1449	○
299	13.5151	0.5730	○	1.1944	○
300	27.9268	0.5604	○	1.0862	○

表 4.4.4 TB シナリオでの冷却成功判定

ケース 番号	冷却可能高さ [m]	TQUV 0.5m		TQUV 1.0m	
		デブリ堆積 高さ[m]	冷却成功判 定	デブリ堆積 高さ[m]	冷却成功判 定
1	0.9428	0.5364	○	0.5364	○
4	1.1317	0.7860	○	0.7860	○
5	1.1874	0.1752	○	0.1752	○
7	1.4233	0.5795	○	0.5795	○
9	1.7313	0.6218	○	0.6218	○
10	1.9596	0.6165	○	0.6165	○
12	1.4373	0.5718	○	0.5718	○
15	1.8638	0.6106	○	0.6106	○
17	1.3059	0.5597	○	0.5597	○
18	1.3454	0.8447	○	0.8447	○
19	1.1547	0.5177	○	0.5177	○
21	1.2599	0.5517	○	0.5517	○
23	1.1700	0.6438	○	0.6438	○
24	1.2048	0.7084	○	0.7084	○
25	1.1631	0.5209	○	0.5209	○
26	1.7934	0.9029	○	0.9029	○
27	1.4584	0.8712	○	0.8712	○
28	1.2229	0.5245	○	0.5245	○
30	1.8567	0.6050	○	0.6050	○
31	1.1546	0.5246	○	0.5246	○
32	1.3789	0.8409	○	0.8409	○
35	1.1419	0.7799	○	0.7799	○
36	1.2247	0.5334	○	0.5334	○
37	1.2892	0.5589	○	0.5589	○
39	1.2887	0.5579	○	0.5579	○

41	1.2079	0.5259	○	0.5259	○
42	3.9053	0.5998	○	0.5998	○
43	6.2769	0.5453	○	0.5453	○
44	1.2227	0.5260	○	0.5260	○
45	1.1573	0.5168	○	0.5168	○
46	0.9376	0.4759	○	0.4759	○
48	1.1607	0.6433	○	0.6433	○
50	0.9555	0.6744	○	0.6744	○
51	1.5272	0.5893	○	0.5893	○
52	1.1753	0.7003	○	0.7003	○
53	1.5570	0.4775	○	0.0000	○
54	1.1773	0.7651	○	0.7651	○
57	1.1505	0.5339	○	0.5339	○
58	0.8565	0.4507	○	0.4507	○
60	1.0561	0.5154	○	0.5154	○
62	1.1327	0.7734	○	0.7734	○
65	0.9372	0.4743	○	0.4743	○
66	2.6524	0.6591	○	0.6591	○
68	1.2444	0.5302	○	0.5302	○
71	1.1726	0.5346	○	0.5346	○
72	1.1934	0.5383	○	0.5383	○
74	1.3286	0.5613	○	0.5613	○
75	1.1220	0.5338	○	0.5338	○
76	1.8897	0.6087	○	0.6087	○
77	1.1770	0.5277	○	0.5277	○
80	1.1542	0.7295	○	0.7295	○
86	1.4402	0.8457	○	0.8457	○
87	1.3625	0.5667	○	0.5667	○
91	0.8456	0.4403	○	0.4403	○
92	1.6220	0.5932	○	0.5932	○
94	0.9600	0.4810	○	0.4810	○
95	1.3518	0.8573	○	0.8573	○
97	1.1672	0.5280	○	0.5280	○
98	0.7905	0.4287	○	0.4287	○
99	0.8087	0.4295	○	0.4295	○
101	1.1072	0.4911	○	0.4911	○

105	0.8011	0.3663	○	0.3663	○
106	1.8972	0.4885	○	0.4885	○
107	1.1549	0.5267	○	0.5267	○
110	1.1193	0.7804	○	0.7804	○
112	0.7885	0.3602	○	0.3602	○
114	0.7941	0.4260	○	0.4260	○
116	1.4612	0.5742	○	0.5742	○
118	1.6606	0.5900	○	0.5900	○
119	1.8588	0.6059	○	0.6059	○
122	1.2247	0.5387	○	0.5387	○
123	1.7170	0.6025	○	0.6025	○
124	0.9386	0.4700	○	0.4700	○
130	1.2244	0.5271	○	0.5271	○
131	1.1775	0.7751	○	0.7751	○
133	1.1705	0.5278	○	0.5278	○
135	1.1371	0.7885	○	0.7885	○
138	1.3470	0.5252	○	0.5252	○
139	1.1956	0.5214	○	0.5214	○
140	1.1900	0.5454	○	0.5454	○
143	4.8131	0.6016	○	0.6016	○
144	1.0481	0.4885	○	0.4885	○
146	2.1687	0.6262	○	0.6262	○
151	2.1948	0.6036	○	0.0000	○
153	1.2401	0.5430	○	0.5430	○
154	1.2235	0.5526	○	0.5526	○
156	1.1717	0.5327	○	0.5327	○
157	1.1941	0.7375	○	0.7375	○
158	1.1878	0.4382	○	0.4382	○
160	1.2904	0.5573	○	0.5573	○
163	1.4508	0.8412	○	0.8412	○
166	0.7731	0.5832	○	0.5832	○
168	1.6964	0.5916	○	0.5916	○
169	1.1441	0.7813	○	0.7813	○
171	1.2039	0.5412	○	0.5412	○
174	1.1363	0.7853	○	0.7853	○
175	1.5137	0.4590	○	0.4590	○

176	1.2130	0.5277	○	0.5277	○
177	2.8282	0.6591	○	0.6591	○
178	1.4114	0.5764	○	0.5764	○
180	1.1401	0.7857	○	0.7857	○
181	1.5213	0.5935	○	0.5935	○
183	1.3359	0.5550	○	0.5550	○
186	1.2082	0.7514	○	0.7514	○
189	1.1775	0.5188	○	0.5188	○
190	1.1351	0.5312	○	0.5312	○
191	1.3169	0.5502	○	0.5502	○
192	1.1612	0.5222	○	0.5222	○
193	1.6095	0.5889	○	0.5889	○
195	1.6505	0.5643	○	0.5643	○
196	1.7167	0.5906	○	0.5906	○
197	1.1485	0.5284	○	0.5284	○
198	1.4075	0.5726	○	0.5726	○
202	4.8369	0.5078	○	0.5078	○
203	4.8127	0.5852	○	0.5852	○
205	1.0221	0.5055	○	0.5055	○
208	1.1913	0.7819	○	0.7819	○
209	1.0535	0.7471	○	0.7471	○
210	0.9452	0.4618	○	0.4618	○
211	0.7680	0.4269	○	0.4269	○
214	1.1549	0.5146	○	0.5146	○
216	1.3085	0.5198	○	0.5198	○
217	1.1460	0.5230	○	0.5230	○
218	1.9882	0.6221	○	0.6221	○
219	1.2309	0.4342	○	0.4342	○
220	1.3382	0.3908	○	0.0000	○
221	0.7935	0.3764	○	0.3764	○
223	0.8165	0.3825	○	0.3825	○
227	1.6318	0.5857	○	0.5857	○
228	1.0283	0.4353	○	0.4353	○
230	1.7149	0.5989	○	0.5989	○
232	1.1260	0.7843	○	0.7843	○
239	0.8693	0.5981	○	0.5981	○

242	1.1493	0.5283	○	0.5283	○
245	1.1928	0.4514	○	0.4514	○
246	0.7828	0.4080	○	0.4080	○
247	1.2238	0.5264	○	0.5264	○
249	1.1677	0.7729	○	0.7729	○
250	1.1566	0.6876	○	0.6876	○
251	1.1578	0.5141	○	0.5141	○
253	1.2621	0.5488	○	0.5488	○
257	1.2215	0.0000	○	0.0000	○
258	1.6975	0.5720	○	0.5720	○
259	1.3715	0.5764	○	0.5764	○
260	1.4963	0.5865	○	0.5865	○
262	1.0705	0.5096	○	0.0000	○
268	1.0622	0.0000	○	0.5134	○
269	1.4360	0.5624	○	0.5624	○
270	1.1696	0.5119	○	0.5119	○
271	1.3559	0.5330	○	0.5330	○
274	1.4346	0.5757	○	0.5757	○
277	1.6433	0.5907	○	0.5907	○
278	1.4878	0.7027	○	0.7027	○
279	1.4118	0.5769	○	0.5769	○
280	5.4164	0.6039	○	0.6039	○
283	1.0159	0.4947	○	0.4947	○
284	1.3482	0.4581	○	0.4581	○
287	1.6739	0.5907	○	0.5907	○
292	1.1947	0.7751	○	0.7751	○
293	0.7930	0.3953	○	0.3953	○
294	1.4940	0.7665	○	0.7665	○
295	1.9141	0.6172	○	0.6172	○
297	1.6404	0.6014	○	0.6014	○

4.5 考察

事故シナリオの影響

MELCOR 解析では TB 及び TQUV の 2 つのシナリオを考慮した。2 つのシナリオは炉心への注水に限られている。TB シナリオでは 8 時間注水が行われるがその後は 0 になり、TQUV では全く行われない。このことは、圧力容器破損後溶融物が流出する段階で、溶融物の流出量が多くなる傾向となって現れる。落下溶融物量の最小値は TQUV ケースの 40t 程度である。平成 31 年度の結果では落下溶融物量が 20 t 程度あれば溶融物の拡がり半径はキャビティ壁面へ到達する傾向が示された。本解析においてもジェットが完全分裂しないケースでは全て壁面へ到達し、拡がり半径として 3.0 m を用いて後のデブリ堆積高さの計算が行われた。平成 31 年度の福島第一原発 3 号機の事故シナリオを基にした解析では、溶融物の流出量が数 t からおよそ 120 t 程度までと幅が大きかった。このことから炉心への注水条件は格納容器内の溶融物冷却性にも影響が大きいと考えられる。

また、他の溶融物条件についても両シナリオ間には違いが見られた。溶融物の組成から、物性値及び熱力学平衡計算を利用して融点（固／液相面温度）を算出した。これらの値を利用して幅広い溶融物温度条件での JASMINE 解析を実施が可能となり、ケースごとの冷却の成否判定条件（冷却可能なデブリ堆積高さ）を設定した。ここで、両シナリオの MELCOR 及び JASMINE 計算の結果を比較する。TB は TQUV に比べて、溶融物温度が低く、分布も小さいという傾向がある。また、酸化物割合が少なく、冷却可能なデブリ高さも高いという一見冷却に有利な特徴がある。しかしながら、溶融物量は TB シナリオの方が多いため、デブリの堆積高さが高いケースが多くなった。結果として TB では冷却失敗のケースが生じることとなった。

昨年度は MELCOR の計算結果から得られた溶融物条件から確率分布を取得し、JASMINE 計算のパラメータの不確かさとして使用したのに対して、本年度は MELCOR の計算 1 ケースから得られた溶融物条件に対して JASMINE 計算 1 ケースを実行した。

本年度は多様な温度条件への対応として、溶融物条件として組成（酸化物割合／金属割合）を考慮するようになった。表 4.3.1 に示されたそれぞれの組成（酸化物割合）と溶融物条件（溶融物量及び溶融物温度）の相関をからは、シナリオによって条件間の相関の強さや傾向は一定ではないことがわかる。そのため、概要で述べられたように溶融物条件を一旦確率分布に置き換える方法では、これらのパラメータ間の相関を考慮する必要がある。

初期水位の影響

上記のように TB 及び TQUV のシナリオ間でデブリの堆積状態や冷却判定に大きな影響が見られた。一方、本解析においては初期水位を変更することによる影響は大きくなかったといえる。水位条件により粒子状デブリ及びアグロメレーションデブリの生成量は増える傾向であった。しかしながら、落下溶融物量がすべてのケースで多量であり、床面上を

広がった結果生成される連続層状デブリがほとんどを占める結果となった。これにより粒子化やアグロメレーションによる影響が小さくなった。落下溶融物量がより少なくなるシナリオに対しては、粒子化の割合の影響が現れる可能性がある。

4.6 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、ELCOR1.8.5(MELCOR)によるTB及びTQUVシナリオの解析入力データを作成した。これを用いて炉心溶融進展のモデルパラメータ及び圧力容器破損条件に不確かさを与えて300ケースの解析を実施した。圧力容器が破損後に溶融物が流出したケースから圧力容器破損時及び炉心溶融物流出の条件を取得した。溶融物の条件はシナリオによって大きく異なる特徴を持っており、後のJASMINE解析及び冷却成否判定への影響が強かった。溶融物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り、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）に応じた融点を設定した。

初期水位として0.5 m及び1.0 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。両シナリオとも格納容器内へ移行する溶融物量が多く、水中で分裂せずに床面上へ到達すれば、溶融物の拡がりは途中で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。

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に応じた物性値を算出した冷却可能な最大デブリ高さと比較することで、冷却の成否判定を行った。すべてのケースの結果を集計し、TB及びTQUVシナリオそれぞれで初期水位0.5 m及び1.0 mの条件での冷却成功確率を求めた。冷却成功確率はシナリオによる差があるが、水位による差は現れなかった。炉心への注水条件を変更する等、格納容器内へ移行する溶融物量がより少ないシナリオでの解析を実施することで水位の影響を確かめることができる可能性がある。

本年度は溶融物組成を考慮することで、広範囲の溶融物条件へ対応できるようになり、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. Bi₂O₃-WO₃強度測定

5.1 概要

本事業では JASMINE コード改良を実施するにあたり、原子力規制庁（NRA）がスウェーデン王立工科大学（KTH）に委託して実施された DEFOR-A 及び PULiMS 実験[5.1, 5.2]を参照している。両実験ではビスマス酸化物（Bi₂O₃）とタングステン酸化物（WO₃）を共晶組成で混合した模擬物質が使用されている。

JASMINE コードでは拡がり先端に形成されるクラスト層の強度（引張強度等と同じ次元を持つ）を床面上の熔融拡がり停止モデルの調整パラメータとしており、PULiMS 実験における拡がり停止距離をよく再現するように値を選定している。平成 31 年度の PULiMS 実験を対象とした解析においては、ほとんどの実験ケースに対して $\tau_{sol} = 7500 \text{ N/m}^2$ を使用し、実験結果を良好に再現した。また、感度解析の結果、現状の JASMINE コードでは 10000 N/m^2 以上の領域において、拡がりの停止距離にほとんど差が生じないことがわかった。

このクラスト強度を利用した拡がり停止判定モデルは、物質を変更した場合にもそれに応じた物性値を使用することで広く適用できると考えられる。そのため、現実的な原子炉シビアアクシデントを対象とした解析においても、格納容器内へ放出されるコリウムの物性値を用いることで拡がり停止の適切な評価が期待できる。しかしながら、現実的なクラスト強度を評価することは困難である。この解析におけるクラスト強度の設定値は熔融物が冷却されて凝固した際の強度とすべきであるが、そのときのクラスト温度はほぼ融点であり、形成された固相結晶が完全な連続層となっていないことにより文献等で報告される固相の強度に比べて強度が低い可能性が高い。また、急冷により形成されたクラストには空隙等の欠陥が含まれるため、見かけの強度は理論値よりも低くなると考えられる。例えば、酸化物である Al₂O₃ や ZrO₂ の引張強度はそれぞれ $2.6 \sim 5 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ と $1.5 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ であるが、現状の解析ではこれらの値よりも数桁小さい値を設定している[5.3]。

したがって、JASMINE コードで設定している物質の強度と安定した固相が有する強度はそもそも一致しないと考えられるが、それらがどの程度乖離しているかを把握しておくことは、実機を対象とした解析を実施する際の条件を適切に設定するために役立つと考えられる。そこで、文献値が存在しない共晶組成 Bi₂O₃-WO₃（PULiMS 実験で使用された模擬物質）の強度測定を実施した。

5.2 測定及び分析の概要

本測定では、 Bi_2O_3 及び WO_3 の共晶組成混合物を合成し、試験片を作成した。その試験片を対象として以下の項目の測定及び分析を実施した。引張、曲げ及びヤング率・ポアソン比測定は室温及び 800°C で実施した。 800°C は後ろでも述べる対象物質の共晶組成での融点 860°C に比べて 60°C 小さい程度である。

5.2.1 測定及び分析項目

本測定では以下の項目を測定・分析した。JASMINE コード中の拡がり先端部の固化クラストによる拡がり停止モデルで想定しているのは引張強さである。ここでは、引張強さと相関があると考えられる曲げ強さ試験も実施した。

① 化合物同定

XRD による化合物同定

② 引張試験

室温及び 800°C 条件における引張強さ試験

③ 曲げ試験

3点曲げによる室温及び 800°C 条件における曲げ強さ試験

5.2.2 試験片の作成

ともに純度 99.9%以上の Bi_2O_3 及び WO_3 原料粉末をよく混合して、 $150 \times 150 \times 50$ h mm のアルミナ製 (SSA-T) るつぼに装荷した。配合量は Bi_2O_3 854.0 g、 WO_3 1149.0 g の合計 2003.0 g である。るつぼを空気雰囲気において加熱炉 (株式会社広築 HPF) 内で熱処理を行った。文献[5.4]の相図より、 Bi_2O_3 及び WO_3 の共晶組成は $\text{Bi}_2\text{O}_3 : \text{WO}_3 = 27 : 73$ mol% (43 : 57 w%) であり、融点は 870°C (1143 K) とされる。また、 1100°C であればすべての相が液相となるのに十分である。本処理においては図 5.1 に示す昇温パターンで 1100°C まで昇温し、維持して熔融混合させた後に自然放冷により冷却固化させた。凝固した物質の塊を加工 (切削・研磨) し、引張、曲げ及び他の測定のための試験片を作成した。

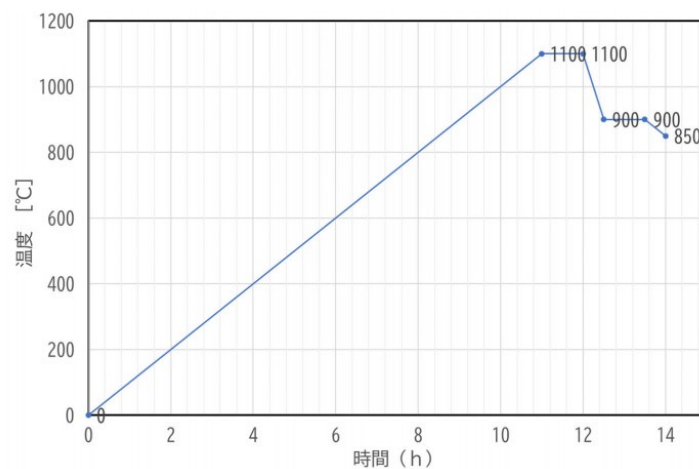


図 5.1 昇温パターン

5.3 測定及び分析の結果

5.3.1 X線回折 (XRD)

観察条件と測定結果

表 1 に XRD 装置と測定条件を示す。試供材の X 線回折による測定結果と同定結果を図 5.2 に示し、表 5.2 に結果をまとめる。図 5.2 中の「↓」で示すピークはデータベースに存在しない未知物質である。また、同定された結晶相は $W_2Bi_2O_9$ の 1 相のみであったため、半定量解析は実施できなかった。

表 5.1 X 線回折測定条件

分析装置	(株)リガク製 水平型 X 線回折装置 SmartLab	
分析条件	ターゲット	Cu
	単色化	モノクロメータ (K α)
	ターゲット出力	45kV-200mA
	測定方法	集中法(θ -2 θ 走査)
	スリット	発散 2/3°, 散乱 2/3°, 受光 0.6mm
	モノクロメータ受光スリット	0.8mm
	走査速度	2° /min
	サンプリング幅	0.02°
	測定角度(2 θ)	5° ~90°

表 5.2 X 線回折による同定結果

試料名	同定された物質	ICDD カード No.
Bi2O3-WO3 混合物	W ₂ Bi ₂ O ₉	04-019-5345

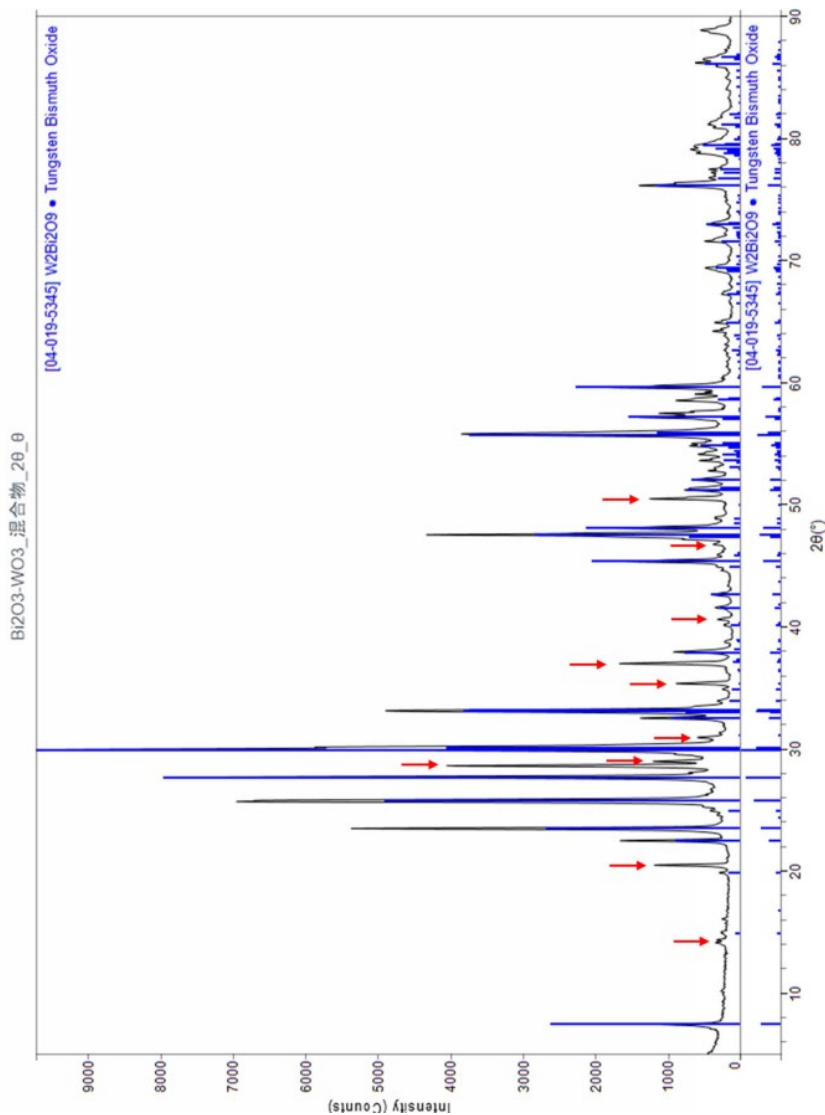


図 5.2 X 線回折の同定結果

5.3.2 引張試験

試験片

引張試験の試験片は平行部 5mm×厚さ 2.5mm×長さ 6mm の平板ダンベル形状を目標として作成した。

試験結果

表 5.3 及び図 5.3 に試験結果を示す。また、試験後の試験片の外観を写真 1 に示す。室温条件での引張強さの平均値は 3.3MPa、標準偏差は 1.86 であった。800℃条件での引張強さの平均値は 6.0MPa、標準偏差は 2.31 であった。高温条件の方が引張強さの平均値が大きい結果となった。但し、標準偏差は高温条件の方が大きい。試験片の破損はいずれのケースもカーブのついた R 部で生じた。室温条件では粉碎形式の破損のケースもみられる。

表 5.3 引張強さ試験結果

試験温度	試験 No. (試料 No)	試料形状 (mm)		断面積 (mm ²)	最大荷重 (N)	引張強さ (MPa)
		厚さ	幅			
室温	1 (1)	2.473	4.954	12.25	87	7
	2 (2)	2.475	4.947	12.24	22	2
	3 (3)	2.473	4.947	12.23	15	1
	平均	-	-	-	-	3.3
	標準偏差					1.86
800℃	1 (4)	2.474	4.945	12.23	20	2
	2 (7)	2.474	4.952	12.25	75	6
	3 (8)	2.473	4.951	12.24	117	10
	平均	-	-		-	6.0
	標準偏差					2.31

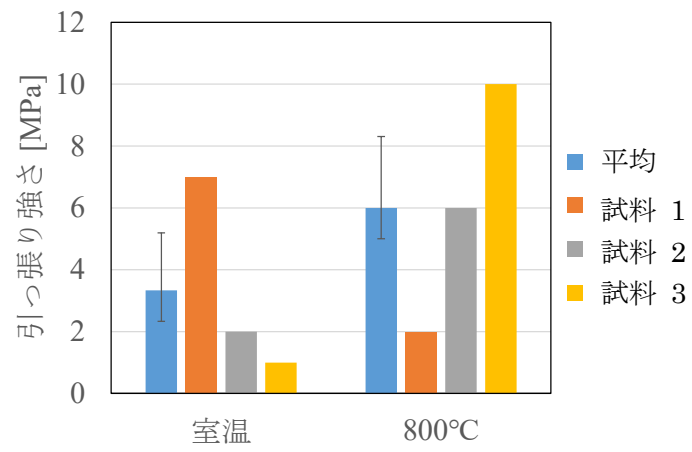


図 5.3 引張試験結果

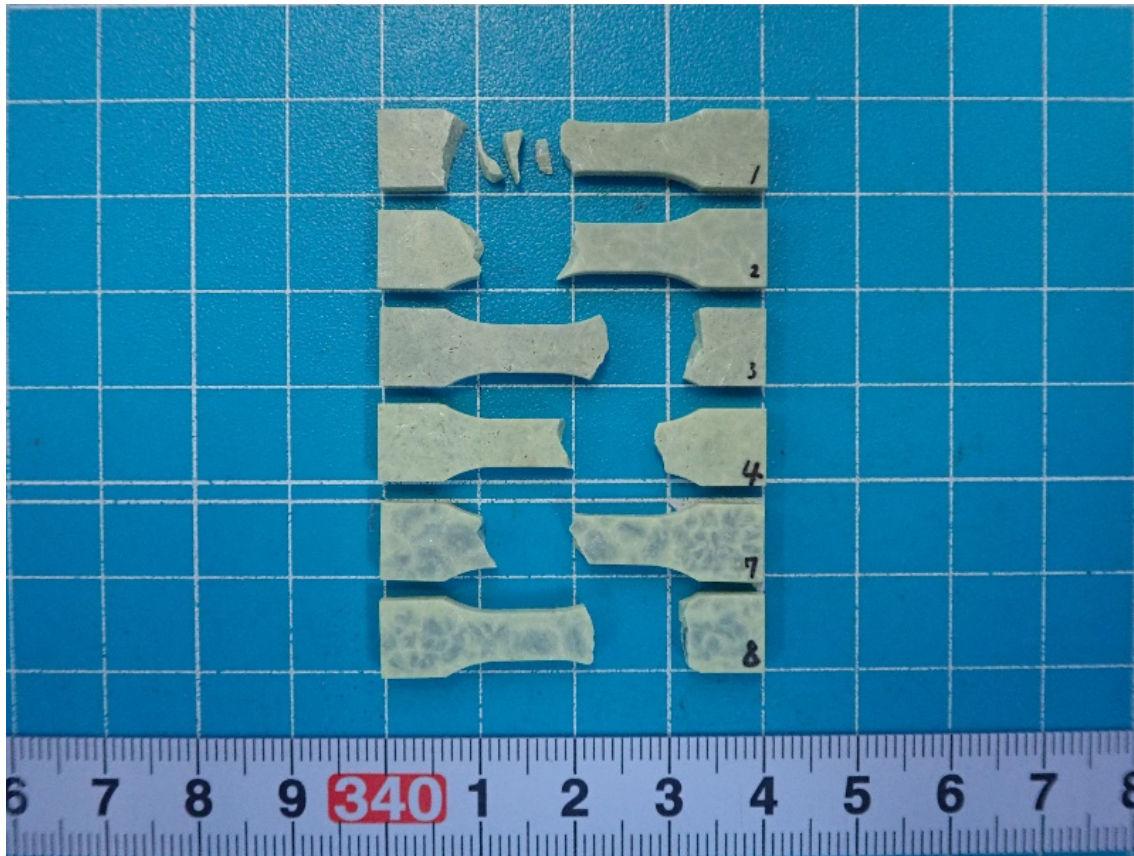


写真 5.1 引張試験片 (試験後)

5.3.3 曲げ試験

試験片

3点曲げ試験の試験片は3×3×40 mmの直方体を目標として作成した。

試験結果

表 5.4 及び図 5.4 に試験結果を示す。また、試験後の試験片の外観を写真 2 に示す。室温条件での曲げ強さの平均値は 11.6MPa、標準偏差は 4.96 であった。800℃の高温条件では曲げ強さの平均値は 25.5MPa、標準偏差は 0.721 であった。高温条件の方が曲げ強さの平均値が大きい結果となった。また、高温条件の方が標準偏差は非常に小さい。

室温条件試験後の試験片の破損個所はいずれも中央からずれており、破損の方向も長手方向に垂直でないケースや破損個所が 2 か所になったケースがある。一方、高温条件試験後の試験片は破損個所がいずれも中央付近であり、破損の方向もおおよそ試験片の長手方向に垂直であった。

表 5.4 曲げ試験結果

試験温度	試験 No. (試料 No)	試料形状 (mm)		破壊荷重 (N)	曲げ強さ (MPa)
		厚さ	幅		
室温	1 (1)	3.015	3.997	8.76	10.8
	2 (2)	3.012	3.998	16.60	20.6
	3 (3)	3.013	3.995	2.80	3.5
	平均	-	-	-	11.6
	標準偏差				4.96
800℃	1 (4)	3.013	3.995	21.32	26.5
	2 (5)	3.013	3.996	19.39	24.1
	3 (6)	3.012	3.999	20.91	25.9
	平均	-	-	-	25.5
	標準偏差				0.721

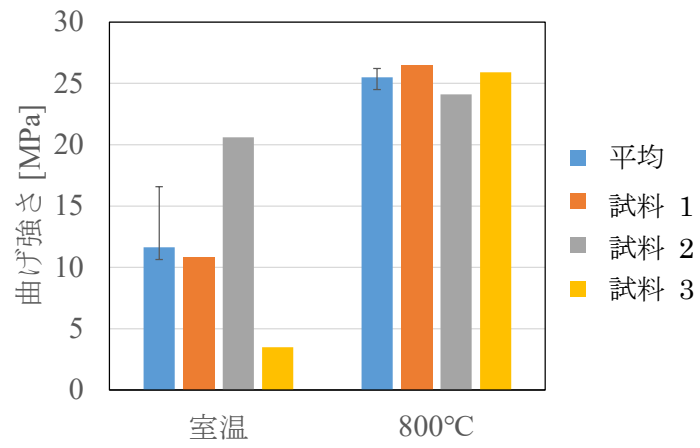


図 5.3 曲げ試験結果

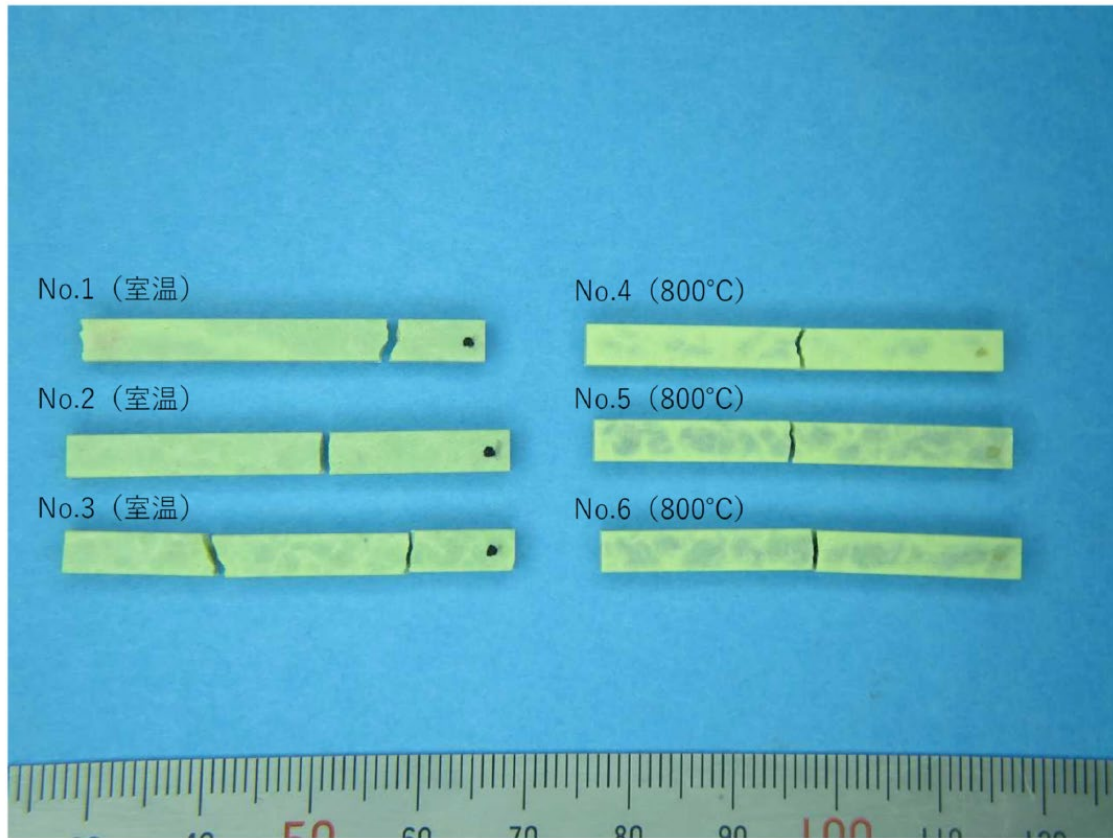


写真 5.1 曲げ試験片 (試験後)

5.4 まとめ

KTH における DEFOR-A 及び PULiMS 実験で熔融炉心を模擬するために使用されている物質 $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-WO}_3$ の共晶組成物質を熔融混合し、冷却した塊から引張試験及び曲げ試験の試験片を作成した。

塊から切り出した試供材を用いた XRD の結果から $2\text{WO}_3 \cdot \text{Bi}_2\text{O}_3$ ($\text{W}_2\text{Bi}_2\text{O}_9$) 化合物が検出された。1100°Cまで昇温した結果、すべての相が液相となり両物質は混合して大部分が $2\text{WO}_3 \cdot \text{Bi}_2\text{O}_3$ ($\text{W}_2\text{Bi}_2\text{O}_9$) 化合物として析出したと考えられる。 $2\text{WO}_3 \cdot \text{Bi}_2\text{O}_3$ は Bi_2O_3 と WO_3 がそれぞれ 33.3 : 66.6 mol%である。今回は両物質を共晶組成の比率 (Bi_2O_3 と WO_3 が 27 : 73 mol%) で使用したため、 Bi_2O_3 が全て $2\text{WO}_3 \cdot \text{Bi}_2\text{O}_3$ に使われたとすれば WO_3 が余るが、検出はされなかった。

試験片を用いて、室温及び高温 (800°C) 条件下で引張試験及び曲げ試験を実施した。引張試験では室温条件で平均 3.3MPa、高温条件で平均 6.0MPa であった。曲げ試験では室温条件で平均 11.6MPa、高温条件で平均 25.5MPa であった。室温条件と高温条件ともに曲げ強さは引張強さの 4 倍程度となった。一般的な曲げ強さ > 引張強さとなる傾向と一致している。どちらの強さ試験においても高温条件でより強い値が取得された。低温条件ではより固化が進み安定化することで強い値となると予想できるが逆の結果となった。試料の写真によると引張強さ試験の試料 7 及び 8、曲げ強さ試験の試料 5 及び 6 は黒色の領域が見られる。これは、塊から切り出した場所により試料の品質に偏りがある可能性を示している。るつぼ内の下部では冷却固化の段階で鬆が生じるため、試料の表面を研磨したとしても切り欠き効果の要因となる空隙が存在し、測定値の差を生んだ可能性がある。

今回の測定値は、PULiMS 実験の結果をよく再現する JASMINE 解析におけるクラスト強度設定値である 7500 Pa と比べて、概ね 3 桁大きな値であった。今回の結果を参考情報として、実機解析におけるコリウム固化クラスト強度の設定方法について引き続き検討する。

参考文献

- [5.1] 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).
- [5.2] P. Kudinov, D. Grishchenko, A. Konovalenko, A. Karbojian, "Premixing and steam explosion phenomena in the tests with stratified melt-coolant configuration and binary oxidic melt simulant materials", Nucl. Eng. Des., 314, pp. 182-197.
- [5.3] 日本機械学会、"機械工学便覧 改訂第 6 版"、P.5-148~149、昭和 52-7
- [5.4] SYED N. HODA and LUKE L. Y. CHANG, "Phase Relations in the System $\text{Bi}_2\text{O}_3 - \text{WO}_3$ ", Journal of the American Ceramic Society, 57 (7) (1974), pp. 323-326.

6. 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物性値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。

6.1 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。

溶融物の密度の増加及び減少はアグロメレーションデブリの質量割合を増加及び減少させた。密度の増加／減少による粒子群の完成の増大／低減、溶融ジェットや水蒸気の発生により誘起される二相流動の影響の受け難さ／受け易さを通じた効果と考えられる。また、疑似乱数のシード値はアグロメレーションの質量割合へ与える影響は限定的であったことから、各条件に対する結果を統計的に評価するうえで必要なサンプル数、すなわち粒子の発生回数が確保できていることを確認した。

6.2 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。溶融物の物性値及び溶融物の含む空隙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。

溶融物の密度の増加／減少は溶融物の拡がりを阻害／促進する。溶融物の空隙の増加／減少は溶融物の見かけの密度の減少／増加を通して、密度と同様の効果がある。溶融物の比熱、熱伝導率、粘性係数及び表面張力による影響は、溶融物の投入条件により拡がりへの影響が顕著となる場合と限定的となる場合がある。溶融物の密度、粘性係数及び表面張力が変化した場合は、流体力学的要因により拡がりが増加／減少を受ける。比熱及び熱伝導率が

変化した場合は先端での固相の成長を通して拡がり影響を受ける。

6.3 実機冷却性評価

格納容器先行注水時の熔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 による格納容器内熔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 及び TQUV シナリオを対象とした。炉心損傷に関連する入力パラメータに不確かさを仮定して 300 ケースの入力パラメータセットを抽出し、压力容器破損時の熔融物条件を抽出した。両シナリオ間では、格納容器内の熔融物拡がり及び冷却性に影響が大きい熔融物量、熔融物温度及び組成に大きな違いがあった。

熔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、これと熔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熔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熔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り、シナリオ間では差が出るという結果を得た。

今回の解析では、熔融物組成から物性値及び融点を考慮できるようになったことから、解析可能な事故の熔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。

6.4 Bi₂O₃-WO₃ 強度測定

JASMINE コードによる熔融物拡がり解析では、拡がり先端に形成されるクラスト層の強度を熔融物拡がり停止モデルの調整パラメータとしている。JASMINE コードで設定している物質の強度と安定した固相が有する強度はそもそも一致しないと考えられるが、それらがどの程度乖離しているかを把握しておくことは実機を対象とした解析を実施する際の条件を適切に設定するために役立つことから、共晶組成 Bi₂O₃-WO₃ (PULiMS 実験で使用された模擬物質) の強度測定を実施した。

今回得られた測定値は、PULiMS 実験の結果をよく再現する JASMINE 解析におけるクラスト強度設定値である 7500 Pa と比べて、概ね 3 桁大きな値であった。今回の結果を参考情報として、実機解析におけるコリウム固化クラスト強度の設定方法について引き続き検討する。

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

付録 A 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。

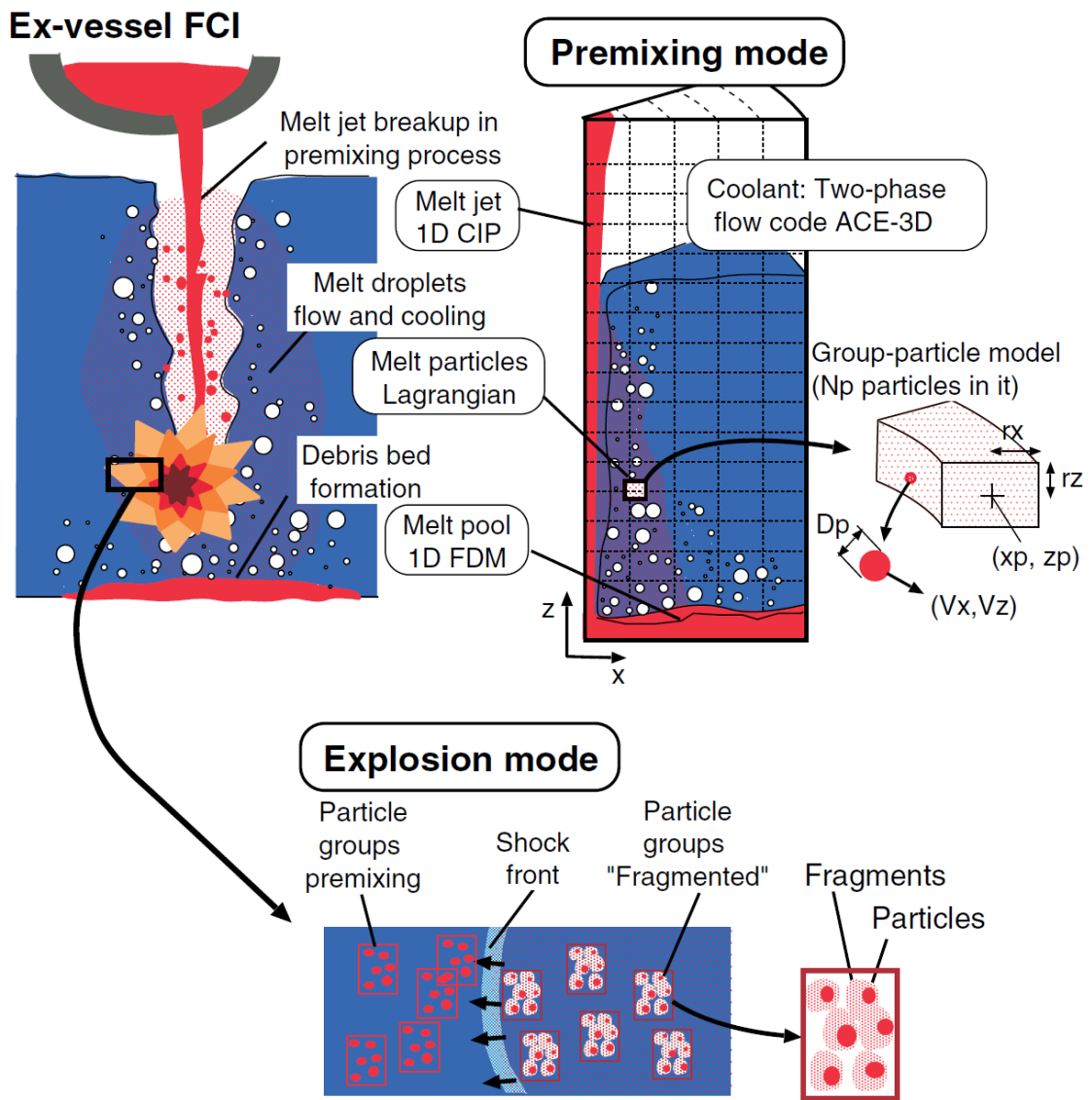


図 A.1 水蒸気爆発現象と JASMINE コードの解析モデル

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、

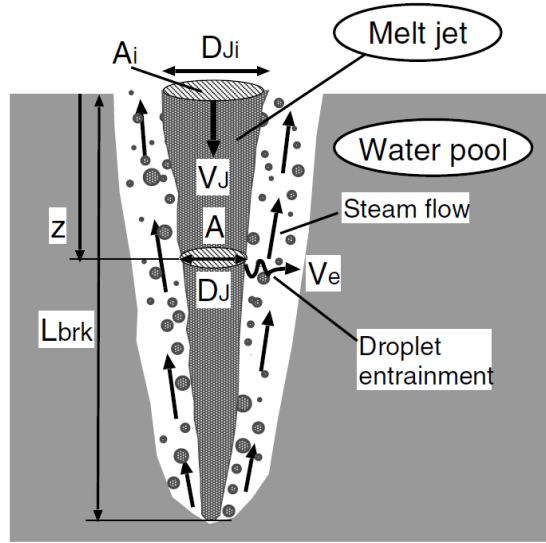


図 A.2 JASMINE コードにおける溶融物ジェットのモデル

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

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・蒸気と溶融物の相互作用の相関式

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

水のボイド率に応じて上記の式に補正項を掛ける。

(5) 溶融物プールの運動方程式

【運動量保存式】

① 表面クラストが存在し、流動する場合($v_{cr} = v_p$)

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

② 表面クラストが存在し、固定されている場合($v_{cr} = 0$)

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

③ 表面クラストが存在しない場合

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

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

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

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

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、溶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 が溶融物プール表面熱流束である。液滴表面熱流束の計算では、液滴径は 3 mm、液滴と水との相対速度は 0.3 m/s とした。

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

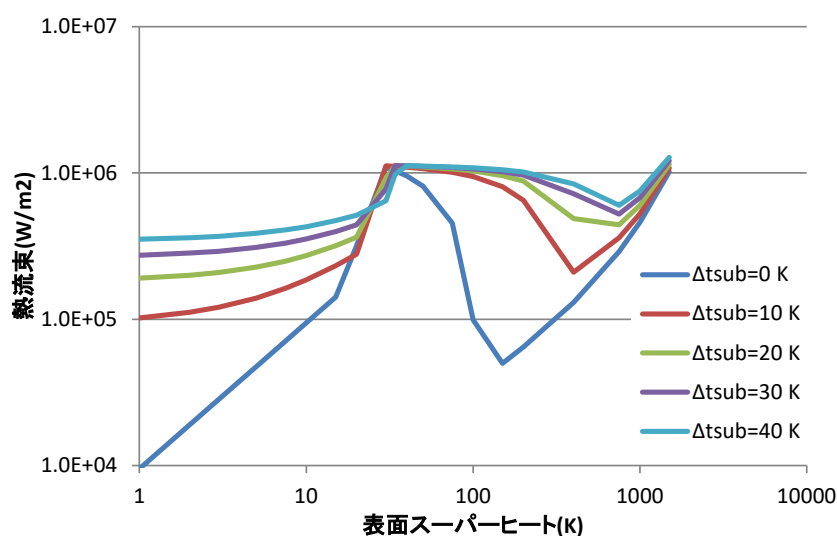


図 A.3 Jasmine 液滴表面熱流束(大気圧,d=3mm,v=0.3m/s)

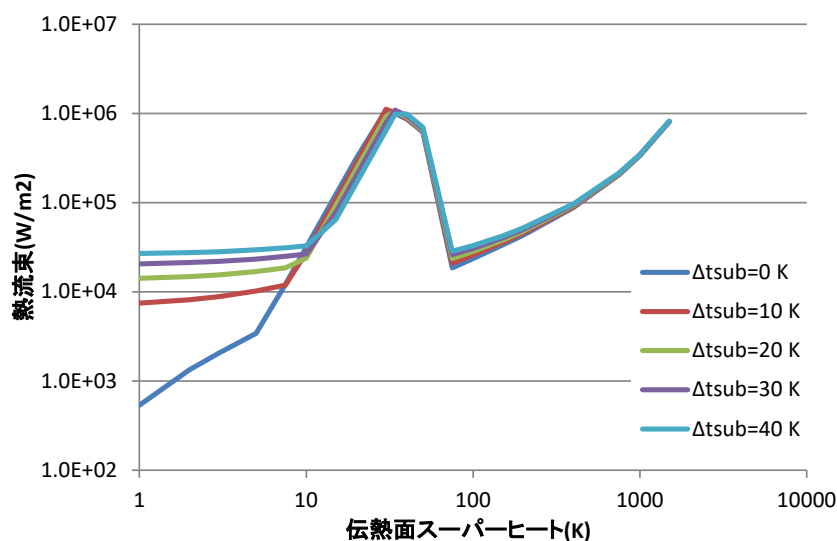


図 A.4 Jasmine プール表面熱流束(大気圧)

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 度事業において改良したバージョンを JASMINE 4.0 とし、平成 28 度事業において作成・改良したアグロメレーションモデル(ver. 4.0_agl)とメルトスプレッドモデル(ver. 4.0_msp)を結合したバージョンを JASMINE 4.1、とする。

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

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

表 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も可能とした。	OECD/NEA SERENA Project Phase-2
JASMINE 3.3NW	2015/07	環境を LINUX (UNIX) から WINDOWS に変更。コンパイラを インテル Visual Fortran Composer XE に変更。入力マニュアル改訂。	
JASMINE 4.0		平成 27 年度事業において、ジェットブレイク アップにおける Rosin-Rammler 粒径分布モデ ル及び床面拡がり挙動におけるクラスト形成 モデルを追加。	DEFOR-A PULiMS
JASMINE 4.0_agl	2017/3	アグロメレーションモデルを導入	DEFOR-A
JASMINE 4.0_msp	2017/3	床材内熱伝導解析を組み込み、溶融 物中ボイドの影響を考慮	PULiMS
JASMINE 4.1	2017/9	4.0_agl と 4.0_msp を結合	H29 年度 実機冷却 性評価の予備解析
JASMINE 4.2	2018/3	平成 29 年度事業においてアグロメ レーションモデル及びメルトスプ レッドモデルを改良	DEFOR-A PULiMS
JASMINE 4.3a	2019/3	平成 30 年度事業においてメルトス プレッドモデルを改良。 また、可読性向上を目的として粒子 挙動計算部等を分割、書き改めた。	DEFOR-A PULiMS

JASMINE 4.3d	2019/8	射流モデル組み込み	PULiMS E10～ E15、E17,E18 実機冷却性評価
JASMINE 4.4	2019/12	流路幅が変化する形状に対応	PULiMS E16 ドライ実験
JASMINE 4.4a	2020/2	初期条件の多様化 水プールの一点近似モデル組込	
JASMINE 4.4b	2021/1	モデルの修正、整理	

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。

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

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。

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

また、デブリ内部の最高温度 T_{max} については、

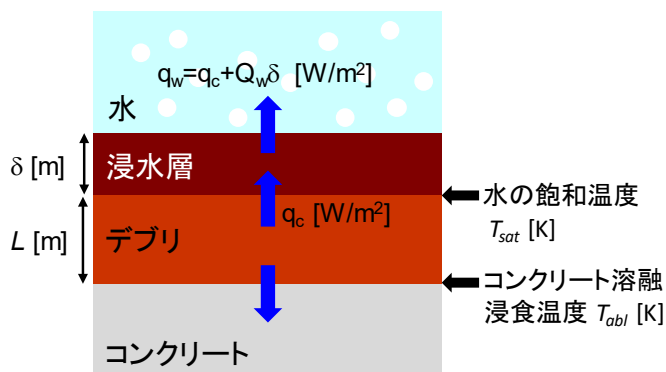


図 B-1 評価モデル

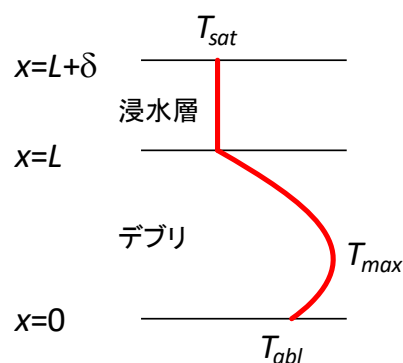


図 B-2 デブリ内温度分布

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

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 2 年 6 月 23 日 (火) ～令和 2 年 6 月 24 日 (水)
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> <p>ROSAU 実験は米国 ANL (Argonne National Laboratory) において実施される。ベルギー、チェコ、カナダ、フランス、日本、韓国、スウェーデン、米国が費用 (860 万ユーロ) を分担して参加している。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	シビアアクシデント時格納容器内溶融炉心冷却性評価に関する技術打合せ
主催	スウェーデン/ストックホルム 王立工科大学 (KTH)
期間	令和2年8月25日(火)～令和2年8月26日(水)
参加者	研究員2名
概要	溶融炉心/冷却材相互作用解析コード JASMINE の改良及び同コードによる実験解析結果を紹介するとともに、意見交換等を通して溶融炉心冷却性評価研究に関する最新情報を取得した。

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 2 年 9 月 22 日 (火) ~ 令和 2 年 9 月 24 日 (木)
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 23 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/ROSAU 会議
主催	OECD/NEA
期間	令和2年11月18日(水)～令和2年11月19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>また、KINS (韓国) により、FLUENT コード及び MELTSPREAD コード (ANL が開発) を用いた解析の進行状況が紹介された。チェコ (UJV) により、溶融物の拡がりをもっと簡単に予測するためのサロゲートモデルを用いた解析の進行状況が紹介された。サロゲートモデルは不確かさ解析に用いることを想定している。</p>

ウェブ会議 (5)

件名	シビアアクシデント時格納容器内溶融炉心冷却性評価に関する技術打合せ
主催	スウェーデン/ストックホルム 王立工科大学 (KTH)
期間	令和2年11月24日(火)～令和2年11月25日(水)
参加者	研究員3名
概要	<p>溶融物の床面拡がり実験 PULiMS 及び溶融物粒子化/アグロメレーション実験 DEFOR-A の実験条件の不確実性に関する議論により相互理解を深めるとともに、実験及び解析技術に関する意見交換を行った。</p>

ウェブ会議 (6)

件名	リスク評価とマネジメントに関するアジアシンポジウム (ASRAM) 2020 における口頭発表
主催	日本原子力学会
期間	令和2年11月30日(月)～令和2年12月2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、ASRAM2020にて口頭発表を行った。</p> <p>[ASRAM2020-1025]</p> <p>The analysis for ex-vessel debris coolability of BWR</p> <p>Toshinori Matsumoto, Yuzuru Iwasawa, Kohei Ajima, Tomoyuki Sugiyama (Japan Atomic Energy Agency, Japan)</p>

ウェブ会議 (7)

件名	シビアアクシデント時格納容器内溶融炉心冷却性評価に関する技術打合せ
主催	スウェーデン/ストックホルム 王立工科大学 (KTH)
期間	令和3年1月14日(木)～令和3年1月15日(金)
参加者	研究員3名
概要	多成分固体粒子再溶融実験 (REMCOD) 実験条件の不確実性に関する議論により相互理解を深めるとともに、実験及び解析技術に関する意見交換を行った。また、今後実施する REMCOD 実験に関する検討に参加した。