

令和 6 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 7 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. 従来の研究	2-1
2.1 実験解析に関する研究	2-1
2.2 連成解析に関する研究	2-3
2.3 従来の研究のまとめ	2-4
3. シビアアクシデント解析コードによる MCCI 解析	3-1
3.1 シビアアクシデント解析コードによる MCCI 解析の概要	3-1
3.2 MELCOR コードによる MCCI 実験解析	3-1
3.2.1 MACE-M0 実験解析	3-1
3.2.1-1 MACE-M0 実験体系	3-1
3.2.1-2 MACE-M0 実験条件	3-1
3.2.1-3 MACE-M0 モデル	3-4
3.2.1-4 MACE-M0 実験ベースケース解析	3-5
3.2.1-5 MACE-M0 実験解析	3-7
3.2.2 VULCANO VF-U1 実験解析	3-16
3.2.2-1 VULCANO VF-U1 実験体系	3-16
3.2.2-2 VULCANO VF-U1 実験条件	3-17
3.2.1-3 VULCANO VF-U1 実験モデル	3-18
3.2.1-4 VULCANO VF-U1 実験ベースケース解析	3-19
3.2.2-5 VULCANO VF-U1 解析	3-21
3.2.3 MELCOR による実験解析のまとめ	3-27
3.3 シビアアクシデント解析コード MCCI モジュール整備	3-28
3.3.1 MCCI モジュールの物理モデル	3-20
3.3.2 MCCI モジュールによる実験解析	3-47
3.3.2-1 MCCI モジュールによる MACE-M0 解析	3-47
3.3.2-2 MCCI モジュールによる MACE-M0 解析結果	3-50
3.3.2-3 MCCI モジュールによる解析のまとめと今後の課題	3-50
3.4 まとめ	3-51
4. JASMINE コード改良とインターフェイス開発	4-1
4.1 実施目的	4-1
4.2 実施内容	4-1
4.3 JASMINE コード改良	4-1
4.4 インターフェイスの概要	4-1
4.5 まとめ	4-3

5. 実機における MCCI 解析	5-1
5.1 概要	5-1
5.2 MELCOR 解析による溶融物条件解析	5-7
5.2 JASMINE による溶融物の堆積条件解析	5-7
5.3 まとめ	5-9
6. おわりに	6-1
付録 A JASMINE コードの概要	A-1
付録 B MELCOR コードによる MCCI 実験解析データ	B-1
付録 C 会合等出席報告	C-1

1. はじめに

原子炉の事故のうち、設計の想定を大幅に超え、反応度の制御ができず緊急時の冷却系を喪失するものはシビアアクシデント（重大事故）と呼ばれる。代替の注水手段などを用いた対処に失敗し事故が継続すると炉心が損傷し炉心が溶融する。このような炉心溶融を含む事故シーケンスは軽水炉のリスクで支配的である[1.1][1.2]。

溶融した炉心は原子炉压力容器（RPV）の下部プレナムに堆積する。溶融炉心は粒子状デブリ、金属層、クラスト及び溶融プールに層分離するが、高温化すると大規模な溶融プールが形成される。RPV 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、炉心溶融物は压力容器下方の原子炉キャビティ（PWR）あるいはペDESTAL（BWR）に移行する。炉心溶融物はこれらの構造材であるコンクリートと、溶融炉心／コンクリート相互作用（MCCI：Molten Core/Concrete Interaction）と呼ばれる反応を生じる。

MCCI は不揮発性の核分裂生成物（FP）からの崩壊熱により高温を維持することで継続する。コンクリート分解によって、大量の水蒸気と二酸化炭素が放出される。これらは炉心溶融物の未酸化の金属との反応により可燃性の水素と一酸化炭素に還元される。このとき、少量の炭化水素や他の化学種も生成される。ガスの発生と可燃性ガスの燃焼により、格納容器が過圧状態になるリスクがある。また、コンクリート分解によるアブレーションは構造的な破損につながる。さらに、格納容器ベースマットの貫通や他の経路にり FP の閉じ込めに失敗し、大気中へ放出される可能性がある。

2011 年の福島第一原子力発電所（1F）の事故においては、炉心冷却が長時間にわたり喪失したことから、炉心が溶融し、続いて压力容器が破損し、溶融炉心が格納容器内に放出されたとみられる。溶融炉心は压力容器下部のペDESTAL と呼ばれる領域に堆積していると推定されている[1.3][1.4]。1F はさまざまな分析が続けられており、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[1.5]。その後、1 から 3 号機では格納容器壁面の貫通部からカメラ、線量計を挿入しての内部調査が実施された。格納容器内の映像により燃料集合体の一部をなす部材がペDESTAL に落下したことが確認されており、压力容器に比較的大きな開口が生じたことが示唆された[1.6]。また、ペDESTAL 領域の入り口付近に置いて、壁のコンクリートが喪失し、鉄筋のみが残るだけになっていることが確認された[1.7]。この原因はいまだ判明していないが、ペDESTAL に落下した溶融物との接触によるものである可能性が検討されている。

1F の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（新規制基準）では、申請者に対してシビアアクシデントに適切に対応することを求めている。我が国の事業者は、既存の BWR においては MCCI に係わる対策として、ペDESTAL に予め注水して水のプールを形成し、落下してきた溶融物の冷却を図るという事前注水方策（ウェットキャビティ戦略）を採用することとしている。ウェットキャビティに落下した溶融物は格納容器内の水プール中を落下する間に、その全てあるいは一部がブレイクアップ（粒子化）し、冷

却可能なデブリベッドが格納容器の床面上に形成されることを期待するものである。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[1.8]、水蒸気爆発リスクの低減を優先して事前注水をしないドライキャビティ戦略を採る国が多数派であり、それ故に実験データは十分でない。実機プラントにおける事前注水の対策の有効性は、格納容器内溶融物による格納容器破損を防止できるかどうかについて、溶融物は床面上で速やかに最大限まで広がったうえで MCCI が生じるか否かと生じた場合にどこまで進展するかが評価されている。

過去の事業においては、シビアアクシデントコード (MELCOR) による不確かさ解析と機構論的な溶融炉心/冷却材相互作用解析コード JASMINE による不確かさ解析を組み合わせ求めて格納容器内の溶融物堆積状態から MCCI の発生の有無を確率論的に評価する手法が開発された[1.9]。この評価手法では、格納容器床面で溶融物の拡がり途中で停止して固化デブリとなった場合に堆積高さが高くなることにより MCCI が生じやすくなるケースを考慮できる。初期水位に対する冷却の成功確率を評価し、別に水蒸気爆発のリスク評価と比較することで、シビアアクシデント対策として必要な水位を求めることができる。

現状の事故対策でも、十分に格納容器破損防止ができるとされている。しかしながら、MCCI が発生した場合の評価方法を構築しておくことは、格納容器破損や FP 放出のリスクを把握する上で重要と考えられる。

そのために、本事業では、MCCI によるコンクリートのベースマットの侵食、可燃性・非凝縮性ガスの発生を、様々な事故条件のもと、不確かさを考慮した解析の手法・手順を整備することを目的として、以下の実施を目指す。

- (a) 機構論的な溶融炉心/冷却材相互作用解析コード JASMINE[1.10]を整備し、溶融炉心の冷却性及び MCCI の継続に重要と思われる堆積状態を評価し、MCCI 解析に必要なデータ抽出の方法を整備する。
- (b) シビアアクシデント解析コードの MCCI 解析を担うモジュールの整備を行い、MCCI によるコンクリート侵食、ガスの発生等を評価できるようにする。
- (c) 不確かさを考慮した MELCOR コードによるシビアアクシデント解析、JASMINE コードによる格納容器内溶融物挙動解析及び MCCI モジュールによる解析を組み合わせ、MCCI によるコンクリート侵食及び発生ガスの評価を実施する。

本年度は MCCI 実験を対象とした MELCOR コード (CAV パッケージ) による解析を実施し、MCCI 解析に重要なパラメータや解析上の課題の検討を行った。また、THALES2 コードの MCCI 解析を担うモジュールのモデルを基に溶融侵食計算のモデルを組み込んだ MCCI 解析モジュールを整備し、MCCI 実験を対象とした解析を行い課題の検討を行った。

連成解析に向けて JASMINE コードから MCCI 解析に必要な溶融物状態のパラメータを抽出するためのインターフェイスの整備を行った。

また、実機条件における連成解析として、MELCOR コードによるシビアアクシデント解析の結果を利用し、JASMINE コードによる溶融物堆積状態の解析、上記のインターフェイスによるデータの抽出、MCCI 解析モジュールによる MCCI 解析の連成解析を実施した。また、実機における不確かさ解析を念頭に課題の抽出を行った。

参考文献

- [1.1] B. R. Sehgal, Nuclear Safety in Light Water Reactor: Severe Accident Phenomenology, Academic Press, 2012.
- [1.2] U.S.Nuclear Regulatory Commission, Reactor Safety Study, NUREG-75-014, WASH-1400, 1975.
- [1.3] Pellegrini, M., Dolganov, K, Herranz, L. E., Bonneville, H., Luxat, D., Sonnenkalb, M., Ishikawa, J., Song, J. J., Gauntt, R. O., Moguel, L. F., Payot, F., Nishi, Y., 2017, Benchmark Study of the Accident at the Fukushima Daiichi NPS: Best-Estimate Case Comparison, Nucl. Technol., 196, 198-210
- [1.4] Madokoro, H. and Sato, I., 2021, Estimation of the core degradation and relocation at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Unit 2 based on RELAP/SCDAPSIM analysis, Nucl. Eng. Des., 376, 111123
- [1.5] 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
- [1.6] 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.
- [1.7] 技術研究組合国際廃炉研究開発機構 東京電力ホールディングス株式会社, 資料 1-1 : 1 号機 PCV 内部調査の状況について, 2022 年 6 月 30 日, <https://www.nra.go.jp/data/000395861.pdf>
- [1.8] 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.
- [1.9] 令和 4 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容融炉心冷却性評価技術高度化) 事業」
- [1.10] 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.

- [1.11] 石川 淳, 村松 健, 坂本 亨 “THALES2 コードによる BWR Mark-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-Research 2005-021 (2005)

2. 従来の研究

溶融炉心とコンクリートとの相互作用 (MCCI) では、シビアアクシデント時において、溶融炉心が原子炉圧力容器下部を溶融貫通し、格納容器床面に落下し、床面のコンクリートと接触することによって引き起こされる。この時、高温の溶融炉心によりコンクリートが加熱され、熱分解し、溶融侵食される。侵食が進行すると、ベースマツト溶融貫通に至る可能性がある。また、コンクリートの熱分解により水蒸気及び二酸化炭素が生成し、溶融炉心内未酸化金属成分と反応して可燃性ガス（水素や一酸化炭素など）が発生することがあり、格納容器内の過圧や燃焼のリスクも考えられる。この現象に関しては、多くの実験や解析モデルの研究が行われてきている。本章では、MCCI に関する実験及び解析コードに関する研究についてまとめた。

2.1 実験解析に関する研究

(1) CCI 実験を対象とした MELCOR による解析

MELCOR コードは、米国サンディア国立研究所で開発されているシビアアクシデント解析コードである。MELCOR 2.1 では、MCCI 現象も含まれるキャビティ (CAV) パッケージに関連する重要な変更が含まれている。MELCOR 2.2 には、CCI 実験から得られた知見に基づいて浸水 (water ingress, WI) 及びメルト噴出 (melt eruption, ME) や熱伝達等のモデルが組み込まれた。[2.1] [2.2]

[2.3]ではトップフラッディング (溶融物に上部から注水) によるコンクリートのアブレーションについて、CCI 実験を対象にして MELCOR2.2 による解析が行われた。また、CORQUENCH による解析も実施され比較された。CCI-1 及び CCI-3 実験では SIL (珪質) コンクリート、CCI-2 では LCS (石灰岩) のコンクリートが使用された。これらの実験では半径方向と軸方向の侵食・アブレーション深さの比率が異なることがわかっている。

CCI-2 の解析では、WI や ME の効果によりコンクリートの溶融侵食の進行が停止した。侵食深さの予測には課題があるが、侵食したコンクリート体積の再現性は良好とされた。CCI-1 及び CCI-3 では軸方向と半径方向の侵食の最大深さや平均的な侵食深さは同程度であり、解析はこれを再現した。

実験の再現性のために、コンクリート侵食の異方性に関する特定の表面の断熱効果などの考慮の必要性、円筒形状以外のシミュレーションへの対応、コリウムの酸化の影響の調査等の必要性が指摘された。

(2) SiC 被覆管による MCCI の影響緩和効果

[2.4]では事故耐性燃料 (ATF) の使用が MCCI に与える影響が調査された。ここではシリコンカーバイド (SiC) 被覆管について取り上げられた。SiC 被覆管を使用することにより、溶融物中の未酸化金属の含有量が少なくなることにより、水との反応熱が減少することで MCCI の進行を妨げる効果が予想される。

CCI-2 実験をベースに、ジルカロイ被覆管 (CCI-4 の未酸化 Zr が含まれる組成) と SiC (シリコンカーバイド) 被覆管の組成を仮定して、CORQUENCH コードで解析が実施さ

れた。解析結果として、コンクリートの侵食深さ、溶融コリウムの温度、表面熱流束、コリウムの粘度、水素 (H_2)・一酸化炭素 (CO)・二酸化炭素 (CO_2) が比較された。CCI-2 実験はコンクリートは石灰岩系の LCS コンクリートが使用され、コリウムを加熱したあと、冷却の効果を調べるため、上部からの注水が行われた。

解析結果から以下の知見が指摘された。侵食深さについて、Zr 被覆管ではコンクリート侵食が継続したのに対し、SiC 被覆管では注水タイミングで侵食が停止した。Zr 被覆管のケースでコリウムの温度は全時間にわたって高くなった。これは、SiC 被覆管のケースでは、ジルコニウムのような注水されたときの発熱反応がなかったことを示す。表面熱流束は Zr 被覆管のケースでほとんどの時間帯で高くなっている。特に注水後は発熱反応があることによる。SiC 被覆材のコリウムの粘度は時間とともに低下した。SiC 被覆管のケースでは発熱反応がなく、温度上昇しないため、高粘度のままだったと考えられる。また、これはコンクリートへの熱伝達が低いことを意味する。さらに、注水後は温度低下することでさらに高粘度になる。Zr 被覆管のケースでは反応によって温度上昇し、粘度が低下して侵食が強化される結果となった。Zr 被覆管のケースでは未酸化の Zr が CO_2 と反応することで可燃性ガス H_2 、 CO がかなり多量に生成した一方で、SiC 被覆管のケースでは上記の反応がないため、 CO_2 が維持されるためである。

この研究では、MCCI の結果に大きく影響するケースがあることから、被覆管の組成を解析で考慮に入れることの重要性が示された。また、コンクリート侵食した場合に生成されるガスとの反応は、コンクリートの成分の影響も受けるため、珪質コンクリートや玄武岩系のコンクリートでの影響を確かめる必要がある。

(3) 1次元のモデルと CORQUENCH コードの比較

[2.5]では、上面冷却されたコリウムによる MCCI の侵食深さを計算するための軸方向 1次元の解析モデル (1次元モデル) を構築し、仮想的な事故の解析が行われた。解析結果は同様の想定をした CORQUENCH コードの解析結果と比較された。

水がないドライ状態では、溶融物と上部コンクリートの間に輻射による伝熱が仮定される。注水後のウェット状態では、水による冷却で生成するクラストが考慮されている。コンクリート侵食深さは、下層のコンクリートへの対流熱伝達があるとしながら、コンクリートは理想的な断熱体として、コンクリート溶融表面の下方には熱伝導が存在しないと仮定されている。崩壊熱、化学反応、クラストの形成と成長などの現象も考慮されている。

解析対象は APR1400 における LOCA シナリオが選択された。工学的安全機能は全て機能せず、冷却材は最終的に枯渇する。压力容器破損後、格納容器内に溶融物が排出され、床面に均一堆積したと仮定された。压力容器破損の 1 時間後に冷却材が注水され、溶融物は上面冷却される。

CORQUENCH コードによる解析結果と比較された。溶融物のバルク温度について、1次元モデルでは、時間をかけて低下し、注水時の過渡的な変化は明確でない。CORQUENCH コードではドライ状態と注水のタイミングで急激に温度低下し、注水後は一定温度を保持する結果となった。コリウム上面の熱流束について、冷却水注入の瞬間に冷却水への熱流束

が沸騰臨界熱流束に近づいた。クラストが厚くなるにつれて、ドライアウト熱流束はある値に収束する。この解析では過去の CCI 実験を基に保守的な値が設定された。CORQUENCH コードでは、ドライ状態では非常に高い熱流束となっていた。浸水すると、高温の溶融物と水との間の膜沸騰熱流束が溶融物上面の高温に対して高くなり、水への熱流束のピークが現れる。注水後は、クラストが形成されないバルク冷却の時間帯があるが、その後クラスト形成されて、熱流束のピークが現れる。その後はドライアウト熱流束に収束した。

最終的なアブレーション深さについては、注水のタイミングを圧力容器破損後 1 時間から 15 時間までの幅を持たせた解析の結果が比較された。1 次元モデルは CORQUENCH に比べて 6.9~12%保守的な値となった。

2.2 連成解析に関する研究

本事業では SA 解析と格納容器内の溶融物挙動解析と連成させて MCCI の影響やリスクを評価する手法を開発しようとしている。ここではそのような複数の解析手法を組み合わせた解析の研究例を紹介する。

[2.6]及び[2.7]では、実機におけるシビアアクシデントを想定して、原子炉キャビティ内の溶融物の拡がりについて、CFD 計算により堆積状態を確認し、その結果をもとに CORQUENCH コードによる解析で MCCI による侵食深さが評価された。ドライ状態のキャビティに溶融物が落下し、その後事故対策として上部から注水されるというものである。

[2.6]では事前検討として、シビアアクシデント時に圧力容器の破損を防止する戦略として、外部原子炉容器冷却(ERVC)戦略と事前浸水戦略 (Pre-flooding strategy) について紹介されている。[2.6]は ERVC は圧力容器の破損を防止するために外部から冷却する方法である。しかしながら、キャビティへの注水により 6.5m 以上の水位が必要なうえ、構造強度の不安があり、また、シビアアクシデント時の注水機能の信頼性は低いとしている。また、注水できるとしても、圧力容器内に注水することを考えた方がよいとしている。韓国の APR1400 型のプラント (新古里 3 号、4 号, SK 3/ SK 4) でのシビアアクシデント対策では、容器の圧力が閾値より高い場合に、溶融コリウムの冷却に事前浸水戦略を選択することになっている。利点として、とにかくバルブを開いてやればキャビティに注水できることがあげられている。一方でこの戦略では FCI による水蒸気爆発や拡がりの停止により溶融物が集中する可能性があるため、慎重な評価が必要としている。

[2.7]では APR1400 型のプラントにおける LBLOCA シナリオを対象に MAAP5 コードによる事故解析の結果を基に、格納容器内に放出される溶融物条件が取得された。溶融物組成は韓国電力公社による報告書を基にして設定された。溶融コリウムの物性については組成比とは異なる、 $\text{UO}_2 : \text{ZrO}_2$ が 8:2 の比率の溶融混合物に関するものとしている。

この研究では、格納容器内はドライ条件とされ、溶融物挙動の CFD には ANSYS 社の Fluent が用いられた。解析結果では溶融物がキャビティ床面を拡がり、壁まで拡がること確認された。ここで、CFD による解析では、溶融物の拡がり途中で止まらないことが確認されたのみで、その後の CORQUENCH による解析の入力のためにデータを抽出したということは明には触れられていない。溶融物からコンクリートへの熱伝達係数や水への

熱流束は、CORCON Mod3 コードや CCI-2 実験等から推定した値が用いられた。上部からの注水のタイミングをパラメータとして評価が実施された。結果として、キャビティへの注水は圧力容器破損後 9 時間で開始しても格納容器の健全性を保つことができることが確認された。

2.3 従来の研究のまとめ

この章では従来の実験解析に関する研究および連成解析に関する研究を調査した。実験の解析では、CCI 実験の解析例から軸方向及び半径方向の侵食深さの評価には異方性についての課題があること。今後、評価が必要となってくるであろう ATF についての評価が行われつつあること。1次元の評価モデルと CORQUENCH モデルの比較により、その保守性が確かめられていることなどの知見が得られた。また、SA コードや CFD 等を組み合わせた解析例では拡がり距離の確認のための解析が実施されており、他の条件については連成されていない模様であり、そのような検討は今後の研究として可能性があるものと考えられる。

参考文献

- [2.1] Sevon, T., "Modeling of water ingression mechanism for corium," Nucl. Technol. 197 (2), 171–179., 2017
- [2.2] Humphries, L., Phillips, J., Schmidt, R., Brad, B., Wagner, K.C., Louie, D., "MELCOR Code Change History Revision 11932 to 14746.," Albuquerque,USA., 2019
- [2.3] Hengra, N., et. al. "Parametric study of molten core concrete interaction and assessment of corium coolability in the light of MCCI experiments," Progress in Nuclear Energy, 166 104976, 2023
- [2.4] Khurshid, I., et. al. "Study on corium-concrete interaction, heat transfer, and concrete ablation: Impact of replacing Zircaloy cladding with accident tolerant silicon carbide cladding on corium characteristics," Applied Thermal Engineering, 243, 122569, 2024.
- [2.5] Na, H., "Concrete ablation depth analysis method during top water flooding ex-vessel cooling by considering phenomena in dry and flooded conditions," Progress in Nuclear Energy, 152, 104322, 2022.
- [2.6] Na, H., et. al. "Preliminary feasibility study of post-flooding ex-vessel corium cooling strategy by CFD spreading simulations and concrete ablation analysis," Progress in Nuclear Energy, 97, 139-152, 2017
- [2.7] Na, H., et. al. "Analysis of concrete ablation depth by MCCI assuming top flooding condition of APR1400 NPP," Annals of Nuclear Energy, 160, 108363, 2021.

3. シビアアクシデント解析コードによる MCCI 解析

3.1 シビアアクシデント解析コードによる MCCI 解析の概要

ここでは、シビアアクシデント (SA) 解析コードの溶融物-コンクリート相互作用 (MCCI) 解析の機能確認と、結果に重要なパラメータを確認するために、MELCOR 2.2 [3.1][3.2] (MELCOR 2.2.11932、以下 MELCOR) による解析を実施した。解析の対象としたのは米国電力研究所 (EPRI) の主導により米国アルゴンヌ国立研究所 (ANL) で実施された MACE-M0 実験 [3.3]~[3.5] (及び、日本原子力研究開発機構の廃炉環境国際共同研究センター (CLADS) とフランス原子力・代替エネルギー庁 (CEA) の協力枠組の下、CEA の施設で実施された VULCANO VF-U1 実験 [3.6]) を対象とした。

解析では MELCOR の持つ感度パラメータを選択し、それらのパラメータや関連する現象の影響を調査した。また、SA 解析コードの MCCI 計算モジュールを用いて実験解析を行い、課題の抽出等を行った。

また、シビアアクシデント解析コードの MCCI モジュールの整備として、コリウム-水及びコア・コンクリート相互作用に起因する熱と質量の移行を計算するモデルを整備し、昨年度検討したコンクリートへの伝熱モデルを組み合わせて実装した。これを用いて MACE-M0 実験を対象に解析を実施した。

3.2 MELCOR コードによる MCCI 実験解析

3.2.1 MACE-M0 実験解析

MACE-M0 は昨年度解析した CCI 実験[3.7]よりも先行して、実施された実験であり、基本的な体系は同様である。

3.2.1-1 MACE-M0 実験体系

MACE の実験装置では、テストセクションの底面のコンクリート上にコリウムの材料物質が充填される。直接電気加熱 (Direct Electrical Heating: DEH) により加熱され、実験が開始される。加熱されたコリウムにより底面と側面が溶融侵食される。コンクリート分解反応により発生したガスは排気システムを通じて外部へ排出される。また、テストセクションはガスの燃焼を防止するために、ヘリウムが常に供給される。

3.2.1-2 MACE-M0 実験条件

MACE-M0 実験の主要な仕様を表 3-1 に示す。コリウム組成は、表 3-2 に記載の値 (Corium Composition at Onset Ablation, kg (wt %))を設定した。また、MACE-M0 実験で使用されたコンクリートは CCI-2 実験で使用されたものと同種類である石灰岩コンクリート (LCS) である。そこで、組成と物性は、CCI-2 実験におけるコンクリート組成(表 3-2)とコンクリート物性(表 3-3)を設定した。なお、MELCOR CAV パッケージで利用可能な物性値に SO₃ が含まれていないため、コンクリート組成から SO₃ を除いた上で Total が 100 wt.%となるように換算したコンクリート組成とした。

実験では、実験開始と同時に DEH による加熱が開始される。加熱条件は[3.5]で、電気出力のプロファイルが提示されている。3.2.1-3 で説明するスケーリングの考えに従って $\pi/4$ 倍した値を設定した。

実験では注水は MCCI が始まったタイミングで開始されるが、本計算では、表 3-1 を基に計算開始と同時に注水することとした。

表 3-1 MACE-M0 実験条件 [3.4]

Parameter Test	MO	
Test Section Internal Dimensions	30 cm × 30 cm	
Test Section Sidewall Material	Concrete	
System Pressure, MPa absolute	0.1	
Corium Mass, kg	130	
Collapsed Pool Depth, cm	15	
Corium Type	70 % oxidized PWR	
Corium Composition at Onset of Ablation, kg (wt %)	UO ₂	73 (56)
	ZrO ₂	14 (11)
	Zr	5 (4)
	Cr	0 (0)
	SiO ₂	4 (3)
	CaO	4 (3)
	MgO	0 (0)
	Al ₂ O ₃	0 (0)
	Concrete	30 (23)
Initial Melt Temperature, K	2000 (estimate)	
Specific Power, W/kg UO ₂ (actual)	350 (2× - 4×actual)	
Basemat Type	L/CS	
Basemat Height, cm	35	
Ablation Depth at Water Addition, cm	1.3	
Water Addition Rate, liters/second	10	
Water Collapsed Pool Depth, cm	50	
Water Makeup Rate, liters/second	10	
Inlet Water Temperature, K	296	
DEH Power Operating Mode	Constant Voltage	

表 3-2 MACE-MO コンクリート組成 [3.3]

Oxide	wt.%
Al ₂ O ₃	2.54
CaO	26.42
Fe ₂ O ₃	1.42
MgO	11.71
MnO	0.03
K ₂ O	0.56
SiO ₂	22.06
Na ₂ O	0.32
SrO	0.00
TiO ₂	0.14
SO ₃	0.00
CO ₂	30.33
H ₂ O, Free	3.32
H ₂ O, Bound	1.13
Total	100

表 3-3 コンクリート物性 [3.3]

Concrete Property	Value
Liquidus Temperature, K	1568.15
Gas Content, wt%	34.1
Decomposition Enthalpy, MJ/kg	2.27
Density, kg/m ³	2330.0

グレーの欄は計算の入力条件

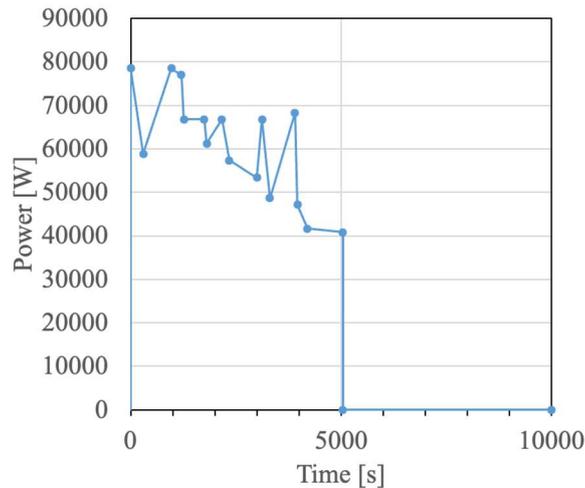


図 3-1 溶融物の加熱プロファイル

3.2.1-3 MACE-M0 モデル

[3.3]～[3.5]の MACE-M0 実験体系を基に、MACE-M0 実験モデルを作成した(図 3-2)。なお、簡略化のため排気システムについては直接環境に接続されているものとしてモデル化を行った。各コンポーネントの説明を表 3-4 に示す。このうち注水及びヘリウムのソースとして用意した CVH10、CVH20 及び排気のための空間 CVH30、注水やヘリウムの注入管としての FL10、FL20 の値は事前解析の上で設定したが、計算の都合上の設定であり実際の寸法を反映したものではない。参考文献[3.3]において、MACE-M0 のテストセクションの高さは約 3m であるとの記載がある。これは CCI 実験における値 328.61 cm と大きく異なることから、テストセクションの高さ方向は CCI 実験モデルと同様とした。テストセクションの底面は 30 cm×30 cm の正方形であるのに対し、MELCOR の CAV モデルは円筒座標系である。先行文献[3.7]と同様に以下の条件を満たすようにスケールリングを行った。

- 1) 溶融物からコンクリートへの熱流束の値が変わらない。
- 2) 侵食領域の底面と側面の比が変わらない。
- 3) 溶融物中のコンクリート濃度の時間変化がスケールリングによって変わらない。

ここでは、底面の直径を 15 cm、高さを 15cm とし、発熱量を $\pi/4$ 倍とすることでスケールリングを行った。

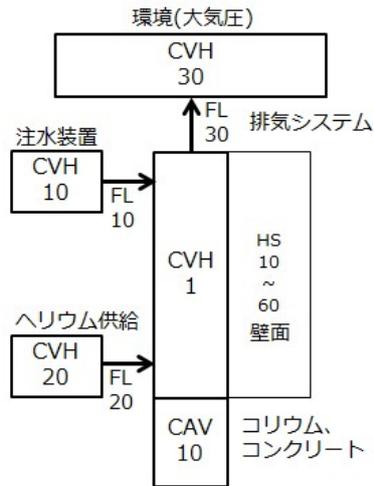


図 3-2 MELCOR MACE-M0 実験モデル

表 3-4 MELCOR MACE-M0 モデル

コンポーネント	説明	寸法、体積
CAV10 MainCavity	TEST SECTION のうち コリウム、コンクリート が存在する領域	内径 0.15 m、高さ 1.2 m、 コンクリート底面厚み 0.35 m、 コンクリート側面厚み 0.25 m
CVH1 PEDESTAL	TEST SECTION のうち 水、ガスが存在する領域	高さ 2.248 m、体積 1.766 m ³
CVH10 WATER-CAV	注水装置	高さ 10.0 m、体積 1.0e3 m ³
CVH20 HELIUM-CAV	ヘリウム供給装置	高さ 10.0 m、体積 1.0e3 m ³
CVH30 ENVIRONMENT	環境(大気圧)	高さ 100.0 m、体積 1.0e6 m ³
FL30 P-FL	圧力逃し弁	流路面積 0.01824 m ² 、流路長さ 2.0 m
FL10 W-FL	注水管	流路面積 1.0 m ² 、流路長さ 0.01 m
FL20 H-FL	ヘリウム供給管	流路面積 1.0 m ² 、流路長さ 0.01 m

HS10 LOWER_WALL1	下部壁面(コンクリート)	面積 0.6185 m ² 、厚み 0.62 m
HS20 LOWER_WALL2	下部壁面(MgO)	面積 0.6185 m ² 、厚み 0.325 m
HS30 TRANSITION_PLATE	TRANSITION_PLATE (Al)	面積 0.0797 m ² 、厚み 0.62 m
HS40 TOP_WALL1	上部壁面(MgO)	面積 2.8726 m ² 、厚み 0.516 m
HS50 TOP_WALL2	上部壁面(コンクリート)	面積 2.8726 m ² 、厚み 0.516 m
HS60 CEILING	天井(コンクリート)	面積 0.7853 m ² 、厚み 0.254 m

3.2.1-4 MACE-M0 実験ベースケース解析

ここでは、実験の条件に基づいて設定した解析を実施した。後で CAV パッケージの感度パラメータの影響を調べるが、ここでは、溶融物の混合モデル (MIXING) 及び MELCOR2.2 で追加された浸水モデル (WATINGR) 及び噴出モデル (ERUPT) について、(a) デフォルト設定 (MIXING=Enforce, WATINGR=OFF, ERUPT=OFF) と (b) (MIXING=Calc, WATINGR=ON, ERUPT=ON) を比較した。

図 3-3 はコンクリートの侵食形状、図 3-4 は底面 (垂直) 方向のコンクリート侵食深さである。コンクリートの侵食形状は(a)が実験に近く、(b)初期の溶融物の高さでの横方向の侵食が見られなかった。底面方向の侵食深さは(a)では過小評価した。底面方向のコンクリート侵食深さは、(a)のケースでは実験と比較して過小評価となり、(b)のケースでは実験と近い変化挙動となった。一方で、コンクリート侵食形状は(a)のケースの方が実験と近い結果が得られた。図 3-5 に MELCOR 計算による除熱量を示した。実験では最終的に 100 分で 300MJ の除熱量と推定されており、(b)の除熱量が実験値に近い結果である。

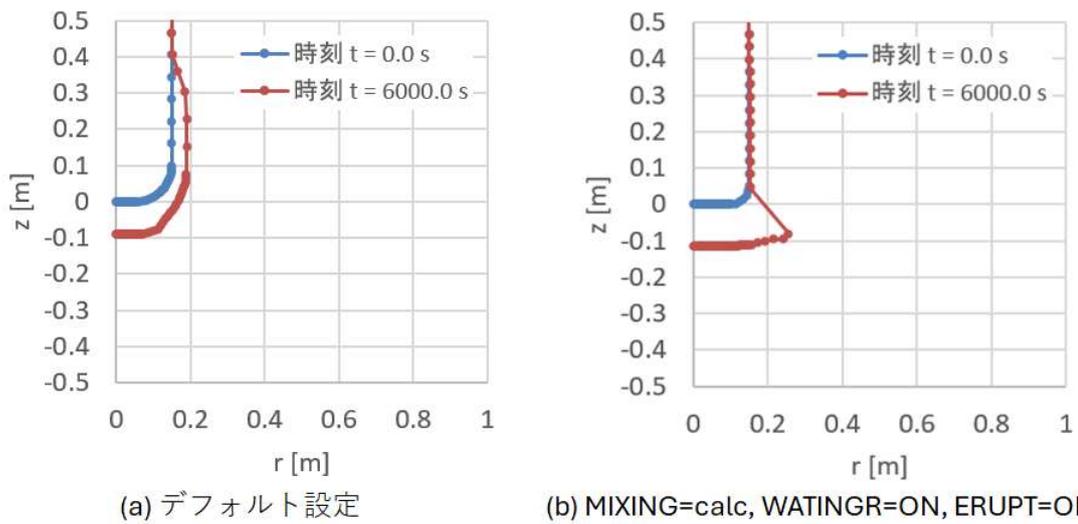


図 3-3 コンクリート侵食形状 (MELCOR 計算)

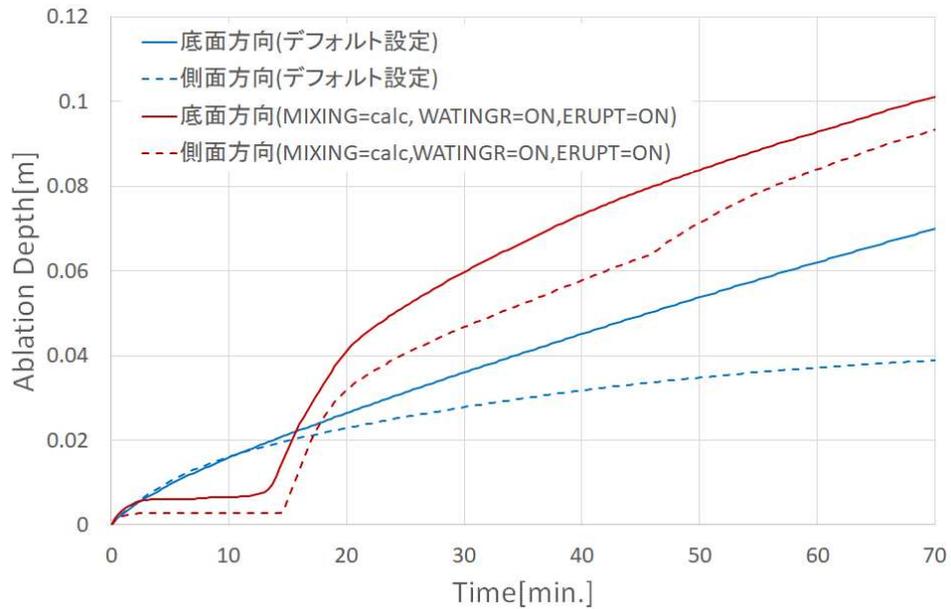
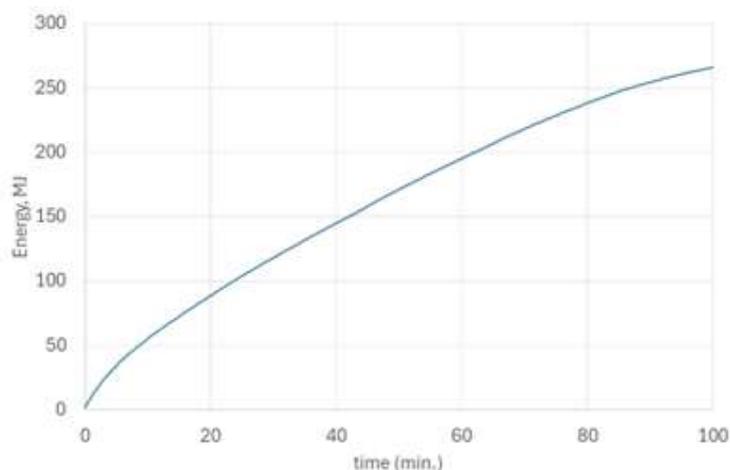
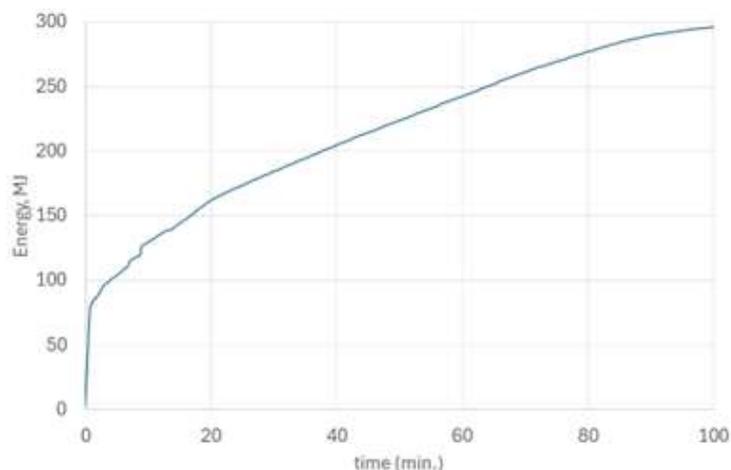


図 3-4 コンクリート侵食深さ (MELCOR 計算)



(a) デフォルト設定



(b) MIXING = Calc., WATINGR = ON, ERUPT = ON

図 3-5 デブリ除熱量 (MELCOR 計算)

3.2.1-5 MACE-M0 実験解析

ここでは、MACE-M0 実験を対象に MCCI 解析に影響の大きいモデル・パラメータを抽出するための感度解析を行う。MELCOR のマニュアル[3.1][3.2]の CAV パッケージの感度解析パラメータから MCCI に関する表 3-5 を選定した。する表 3-6 のように各パラメータに変化をつけて計算を実施した。

解析終了時刻における水温、水蒸発量、熔融コリウム温度、水プールへの熱移行量、コンクリートへの熱移行量、径方向コンクリート侵食量、底方向コンクリート侵食量、コンクリート分解ガス放出量、熔融コリウム各成分の重量、H₂ 放出量、H₂O 放出量、CO 放出量、CO₂ 放出量、上面クラスト厚み、底面クラスト厚み、側面クラスト厚みを出力し、表 3-7 にまとめた。

図 3.6 に MACE-M0 実験解析における MELCOR 入力パラメータ vs.出力データの相関係数のヒートマップを示す。縦軸が出力データ、横軸が入力パラメータであり、値が全て 0.0 で相関係数が求められない出力データについては空白として表示した。

[HTRBOT]

溶融コリウムから底面のコンクリートへ移動する熱量が多くなるため、コリウム温度は下がり、底方向のコンクリート侵食量が多くなる。一方で、底面へ多く熱が移動した分だけ側面へ伝わる熱は少なくなるため、径方向のコンクリート侵食量は少なくなる。コリウム組成への影響はほとんど見られない。

[HTRSIDE]

溶融コリウムから側面のコンクリートへ移動する熱量が多くなるため、径方向のコンクリート侵食量が多くなり、底方向のコンクリート侵食量は少なくなる。その他の影響については HTRBOT と同様である。

[MIXING]

MIXING = Calc とした場合、径方向のコンクリート侵食量が多くなり、底方向のコンクリート侵食量は少なくなる。これは、積層構造のデブリ層が形成されることにより径方向と底方向の熱伝達に違いが現れるためと考えられる。

[GFILMBOT]

溶融コリウムと底面コンクリート間の熱伝達モデルを Gas Film モデルから Slag モデルとすると、熱伝達率が大きくなり底方向のコンクリート侵食量が多くなる。

[GFILMSIDE]

溶融コリウムと側面コンクリート間の熱伝達モデルを Gas Film モデルから Slag モデルとすることで径方向のコンクリート侵食量は多くなる。

[MeltComposition]

コリウム組成の違いにより、クラスト厚みに差異が見られた。

[COND.CRUST]

今回解析を行った値の範囲では出力データへの影響はほとんど無かった。

[WATINGR]

Water Ingress モデルを ON にすると、溶融コリウム温度が急上昇する現象が見られた。これは、溶融コリウムから水プールへの除熱量が増えることにより溶融コリウム温度が融点以下まで低下し、溶融コリウム全体が固化するため上面クラスト、底面クラスト、側面クラストの厚みが増加し、除熱できなくなるためと考えられる。

[ERUPT]

今回解析を行った値の範囲では出力データへの影響はほとんど無かった。

表 3-5 MELCOR 入力パラメータ

パラメータ	説明	予測される効果
HTRBOT	熔融コリウム底面の熱伝達モデルに乗じる係数	底方向コンクリート侵食量増加
HTRSIDE	熔融コリウム側面の熱伝達モデルに乗じる係数	側面方向コンクリート侵食量増加
MIXING	デブリ層の混合モデル (Enforce:強制混合、Calc:層分離を計算)	各デブリ層厚みに応じたコンクリート侵食形状
GFILMBOTT	熔融コリウム底面の熱伝達モデル (GAS:ガスフィルム、SLAG;スラグ層)	底方向コンクリート侵食量増加
GFILMSIDE	熔融コリウム側面の熱伝達モデル (GAS:ガスフィルム、SLAG;スラグ層)	側面方向コンクリート侵食量増加
MeltComposition	デブリ層の混合モデル (Enforce:強制混合、Calc:層分離を計算)	各デブリ層厚みに応じたコンクリート侵食形状
COND.CRUST	クラスト層内の熱伝達係数	クラストから水プールへ移動する熱量増加
WATINGR	Water Ingression モデル (0:OFF、1:ON)	熔融コリウムから水プールへ移動する熱量増加
ERUPT	Melt Eruption モデル (0:OFF、1:ON)	熔融コリウムから水プールへ移動する熱量増加

表 3-6 MACE-M0 実験解析入力パラメータ一覧

case	HTRBOT	HTRSIDE	MIXING	GFILMBOTT	GFILMSIDE	MeltComposition	COND.CRUST	WATINGR	ERUPT
1	0.1	1	Enforce	GAS	GAS	ZrO2 実験値	1	ON	ON
2	10	1	Enforce	GAS	GAS	ZrO2 実験値	1	ON	ON
3	1	0.1	Enforce	GAS	GAS	ZrO2 実験値	1	ON	ON
4	1	10	Enforce	GAS	GAS	ZrO2 実験値	1	ON	ON
5	1	1	Calc	GAS	GAS	ZrO2 実験値	1	ON	ON
6	1	1	Enforce	SLAG	GAS	ZrO2 実験値	1	ON	ON
7	1	1	Enforce	GAS	SLAG	ZrO2 実験値	1	ON	ON
8	1	1	Enforce	GAS	GAS	ZrO2 実験値	0.1	ON	ON
9	1	1	Enforce	GAS	GAS	ZrO2 実験値	10	ON	ON
10	1	1	Enforce	GAS	GAS	ZrO2 50%, Zr 50%	1	ON	ON
11	1	1	Enforce	GAS	GAS	ZrO2 50%, Zr 50%	1	ON	OFF
12	1	1	Enforce	GAS	GAS	ZrO2 50%, Zr 50%	1	OFF	ON
13	1	1	Enforce	GAS	GAS	ZrO2 実験値	1	ON	OFF
14	1	1	Enforce	GAS	GAS	ZrO2 実験値	1	OFF	ON
15	1	1	Enforce	GAS	GAS	ZrO2 実験値	1	ON	ON

表 3-7 MACE-M0 実験 解析終了時刻における出力データ一覧(1/4)

case	Water Temperature[K]	Evaporation Mass[kg]	Melt Temperature[K]	Total Heat to water[kJ]	Total Heat to concrete[kJ]	Radial ablation[m]	Axial ablation[m]	Total mass of released gas [kg]
1	373.17	24.46	1384.28	284628.7	161007.9	0.0400	0.0913	15.12
2	368.54	0.08	1572.28	179787.3	226411.3	0.0590	0.1448	22.90
3	367.12	-0.16	1570.47	200407.1	230734.4	0.0387	0.2279	23.37
4	367.83	-0.15	1572.55	227602.3	227164.4	0.0437	0.1929	23.05
5	367.94	-0.54	1568.54	240861.9	233442.5	0.0495	0.1670	23.60
6	373.17	36.14	1266.89	282340.4	208076.3	0.0842	0.0813	19.96
7	367.26	-0.59	1572.87	251016.6	232684.2	0.0317	0.2269	23.63
8	367.86	-0.48	1569.50	272549.3	234632.5	0.0621	0.1388	23.77
9	367.85	-0.65	1572.73	202380.2	229141.5	0.0439	0.1931	23.21
10	367.84	-0.76	1572.69	198617.6	229517.1	0.0439	0.1932	23.23
11	373.00	58.79	600.55	324541.5	219707.6	0.0334	0.1997	21.95
12	373.00	58.79	600.55	324541.5	219707.6	0.0334	0.1997	21.95
13	373.17	34.05	1378.91	309758.0	178845.5	0.0445	0.0943	14.55
14	367.83	-0.15	1572.55	227602.3	227164.4	0.0437	0.1929	23.05
15	373.17	24.46	1384.28	284628.7	161007.9	0.0400	0.0913	15.12

表 3-7 MACE-M0 実験 解析終了時刻における出力データ一覧(2/4)

case	UO2 Mass[kg]	ZRO2 Mass[kg]	SIO2 Mass[kg]	MGO Mass[kg]	AL2O3 Mass[kg]	CAO Mass[kg]	CR Mass[kg]	CR2O3 Mass[kg]	TIO2 Mass[kg]	FEO Mass[kg]
1	73.00	20.76	24.85	11.07	2.40	28.97	0.00	0.00	0.13	0.00
2	73.00	20.75	27.22	13.34	2.90	34.11	0.00	0.00	0.16	0.00
3	73.00	20.75	27.54	13.50	2.93	34.47	0.00	0.00	0.16	0.00
4	73.00	20.75	27.34	13.40	2.91	34.23	0.00	0.00	0.16	0.00
5	73.00	20.75	27.99	13.62	2.96	34.73	0.00	0.00	0.16	0.00
6	73.00	20.75	27.92	12.70	2.76	32.65	0.00	0.00	0.15	0.00
7	73.00	20.75	27.52	13.57	2.94	34.61	0.00	0.00	0.16	0.00
8	73.00	20.75	28.04	13.67	2.97	34.85	0.00	0.00	0.16	0.00
9	73.00	20.75	27.46	13.45	2.92	34.35	0.00	0.00	0.16	0.00
10	73.00	20.75	27.44	13.45	2.92	34.36	0.00	0.00	0.16	0.00
11	73.00	23.21	22.75	13.12	2.85	33.61	0.00	0.00	0.15	0.00
12	73.00	23.21	22.75	13.12	2.85	33.61	0.00	0.00	0.15	0.00
13	73.00	23.21	26.05	11.70	2.54	30.41	0.00	0.00	0.14	0.00
14	73.00	20.75	27.34	13.40	2.91	34.23	0.00	0.00	0.16	0.00
15	73.00	20.76	24.85	11.07	2.40	28.97	0.00	0.00	0.13	0.00

表 3-7 MACE-MO 実験 解析終了時刻における出力データ一覧(3/4)

case	MNO Mass[kg]	SRO Mass[kg]	NA2O Mass[kg]	K2O Mass[kg]	FE2O3 Mass[kg]	UO3 Mass[kg]	U3O8 Mass[kg]	ZR Mass[kg]	FE Mass[kg]	NI Mass[kg]
1	0.03	0.00	0.30	0.53	1.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.02	0.00	0.36	0.64	1.62	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.02	0.00	0.36	0.65	1.64	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.02	0.00	0.36	0.64	1.62	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.03	0.00	0.37	0.65	1.65	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	0.03	0.00	0.34	0.61	1.54	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	0.02	0.00	0.37	0.65	1.64	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	0.03	0.00	0.37	0.66	1.66	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	0.02	0.00	0.36	0.65	1.63	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.02	0.00	0.36	0.65	1.63	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	0.02	0.00	0.35	0.63	1.59	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	0.02	0.00	0.35	0.63	1.59	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
13	0.03	0.00	0.32	0.56	1.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
14	0.02	0.00	0.36	0.64	1.62	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.03	0.00	0.30	0.53	1.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

表 3-7 MACE-M0 実験 解析終了時刻における出力データ一覧(4/4)

case	Total mass of released H2 [kg]	Total mass of released H2O [kg]	Total mass of released CO [kg]	Total mass of released CO2 [kg]	Top Crust Thickness [m]	Bottom Crust Thickness [m]	Front Crust Thickness [m]
1	0.06	1.64	2.26	11.16	0.19	0.00	0.18
2	0.02	2.81	0.94	19.12	0.00	0.00	0.00
3	0.02	2.87	0.95	19.52	0.00	0.00	0.00
4	0.02	2.83	0.95	19.25	0.00	0.00	0.00
5	0.03	2.88	1.11	19.58	0.00	0.00	0.00
6	0.06	2.26	2.26	15.39	0.19	0.19	0.34
7	0.02	2.91	0.86	19.83	0.00	0.00	0.00
8	0.03	2.90	1.08	19.76	0.00	0.00	0.00
9	0.02	2.85	0.97	19.37	0.00	0.00	0.00
10	0.02	2.85	0.95	19.40	0.00	0.00	0.00
11	0.03	2.64	1.32	17.96	0.02	0.02	0.13
12	0.03	2.64	1.32	17.96	0.02	0.02	0.13
13	0.14	1.15	5.42	7.84	0.21	0.00	0.18
14	0.02	2.83	0.95	19.25	0.00	0.00	0.00
15	0.06	1.64	2.26	11.16	0.19	0.00	0.18

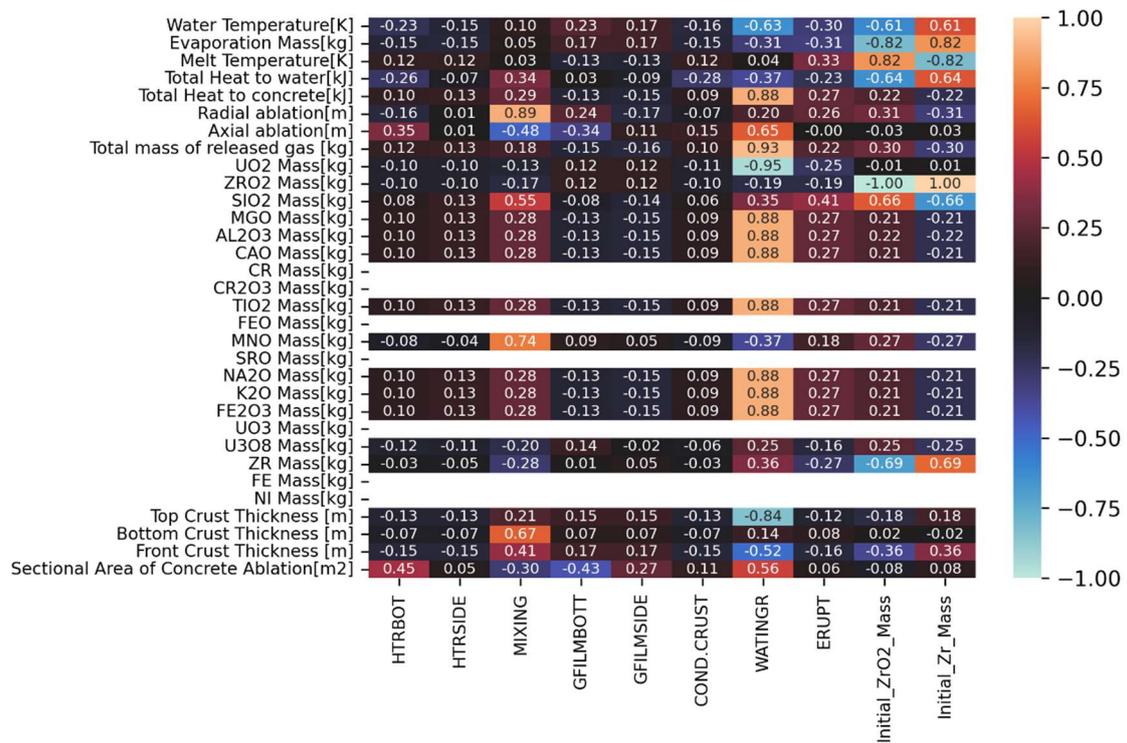


図 3-6 MELCOR 入力データ vs.出力データ相関係数ヒートマップ

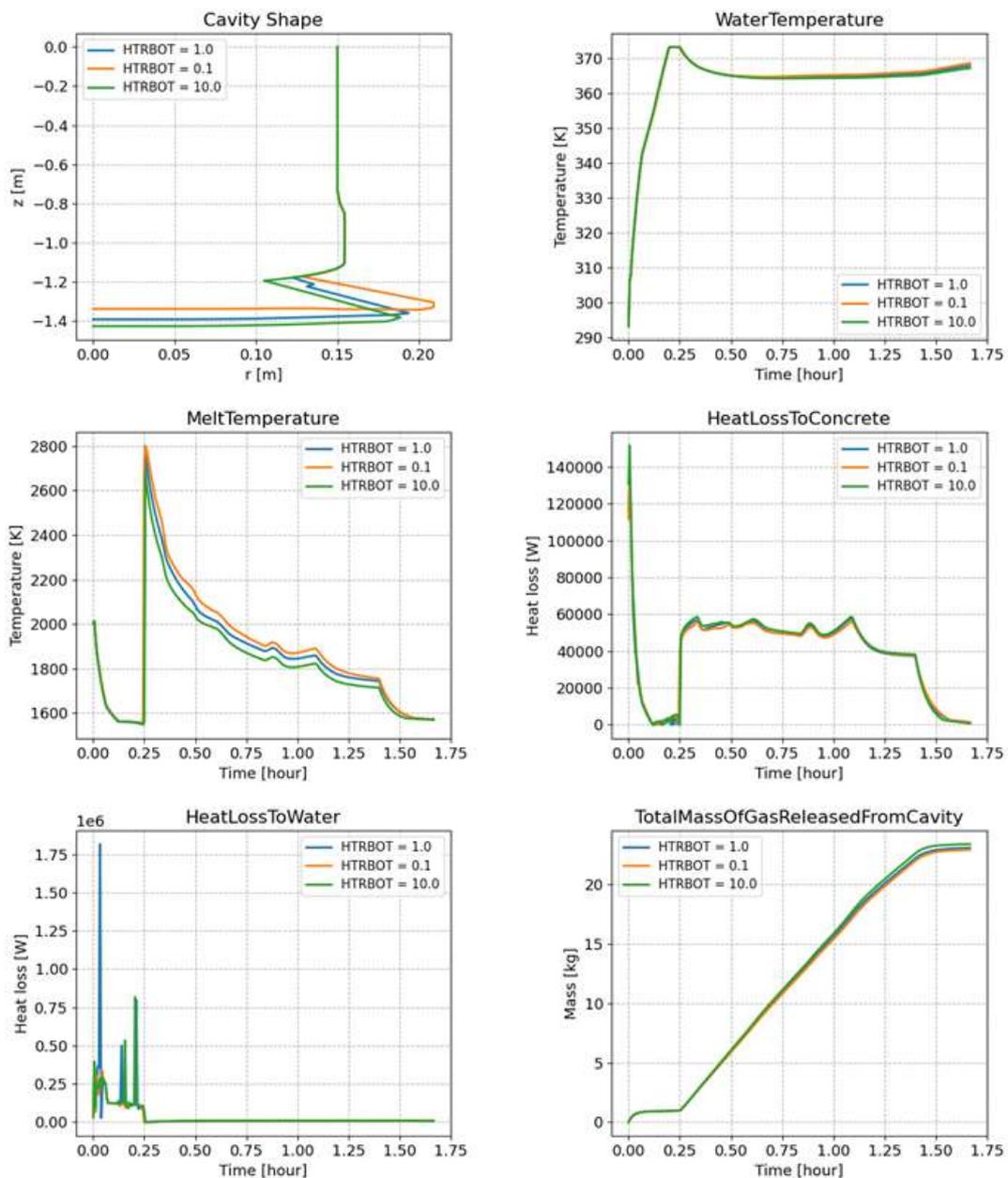


図 3-7 MACE-M0 実験解析 出力データに対する”HTRBOT”の影響

3.2.2 VULCANO VF-U1 実験解析

VULCANO-VF-U1 実験は 1F の燃料デブリ取り出し手法の検討を目的として実施された。ここでは、解析対象となる VULCANO-VF-U1 実験の概要について説明する。

3.2.2-1 VULCANO VF-U1 実験体系

VULCANO-VF-U1 実験体系の概要図を図 3-7 に示す。コンクリート容器内に粉末状コリウム模擬材料が設置され、誘導加熱により模擬材料が溶融し、コンクリート底面と側面が侵食される。

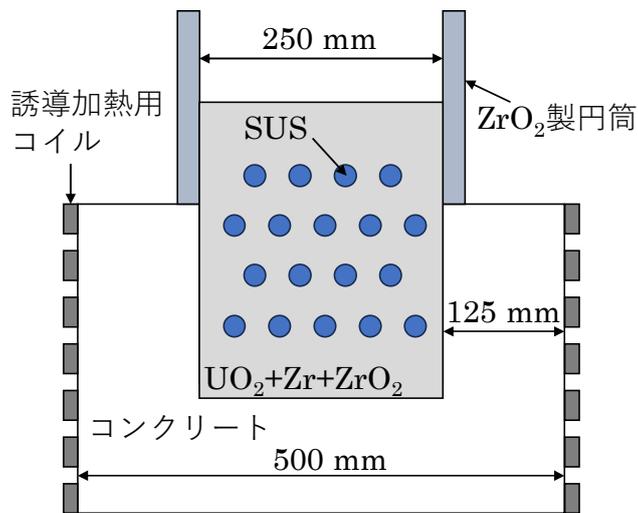


図 3-7 VULCANO VF-U1 実験装置

3.2.2-2 VULCANO VF-U1 実験条件

コリウム組成には、表 3-8 に記載の値を設定した。また、コンクリート組成とコンクリート物性はそれぞれ表 3-9、表 3-10 の値を設定した。

表 3-8 VULCANO VF-U1 実験コリウム組成 [3.8]

Component	UO ₂	CaO stabilized ZrO ₂	Zr	Stainless Steel balls
Weight %	58.8	16.2	11.8	13.2
Weight, kg	27.3	7.5	5.5	6.1

表 3-9 VULCANO VF-U1 実験コンクリート組成 [3.8]

Component	Al ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	H ₂ O	Fe ₂ O ₃
Weight %	12.2	11.8	66.9	3.3	5.8

表 3-10 VULCANO VF-U1 実験コンクリート物性

Concrete Property	設定値
液相線温度(K)	1650.0
密度(kg/m ³)	2400

VF-U1 実験の加熱履歴[3.8]を基に、MCCI が始まった時刻を MELCOR 解析の開始時刻とし、1878 秒を計算時間とし、図 3-8 のように加熱プロファイルを設定した。計算開始時のコリウム温度は、コンクリートアブレーション温度と同じ 1650K とした。

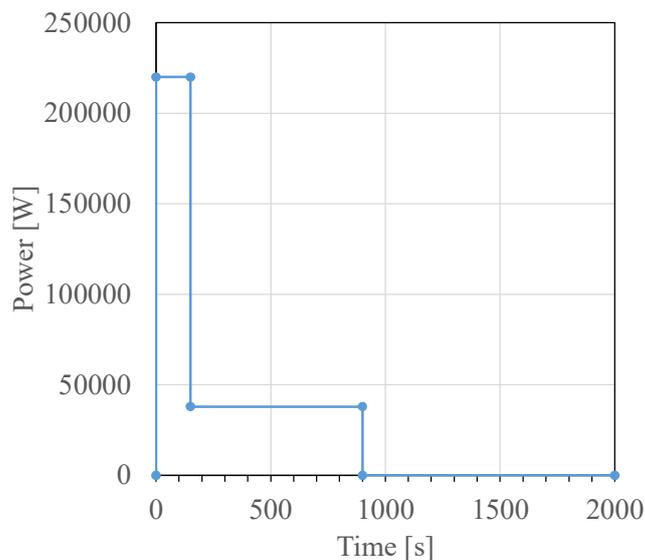


図 3-8 VULCANO VF-U1 加熱プロファイル

3.2.2-3 VULCANO VF-U1 実験モデル

VF-U1 実験体系(図 3-7)を基に、MACE-M0 実験モデルを作成した(図 3-8)。各コンポーネントは表 3-11 のように設定した。

表 3-11 VULCANO VF-U1 実験モデル コンポーネント寸法

コンポーネント	説明	寸法、体積
CAV10 MainCavity	コンクリートキャビティ	内径 0.25 m、高さ 0.2 m、 コンクリート底面厚み 0.25 m、 コンクリート側面厚み 0.22 m
CVH20 ENVIRONMENT	環境	高さ 100.0 m、体積 1.0E6 m ³



図 3-8 VULCANO VF-U1 加熱プロファイル

3.2.2-4 VULCANO VF-U1 実験ベースケース解析

図 3-10 はコンクリート侵食形状の実験結果と MELCOR 計算結果である。高さ方向の侵食深さは、実験結果は 80mm、MELCOR 計算結果では 82.8mm となっておりほぼ同程度となっている。一方、径方向の侵食深さは、実験結果は 35mm、MELCOR 計算結果では 62.2mm となっており、計算は過大評価となった。

VULCANO-VF-U1 実験解析ベースケースのその他の出力データ(コリウム全体の重量、コリウム各成分の重量、分解ガス発生量、コリウム-コンクリート間熱流束、コリウム温度、上面クラスト厚み、底面クラスト厚み、側面クラスト厚み)を図 3-11 に示した。

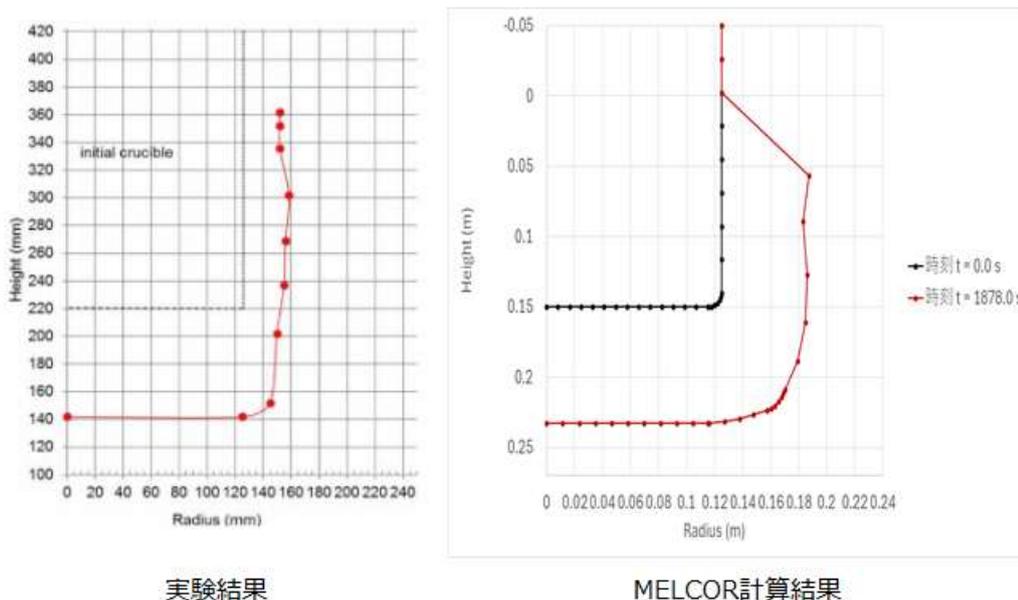


図 3-10 VULCANO VF-U1 実験解析コンクリート侵食形状

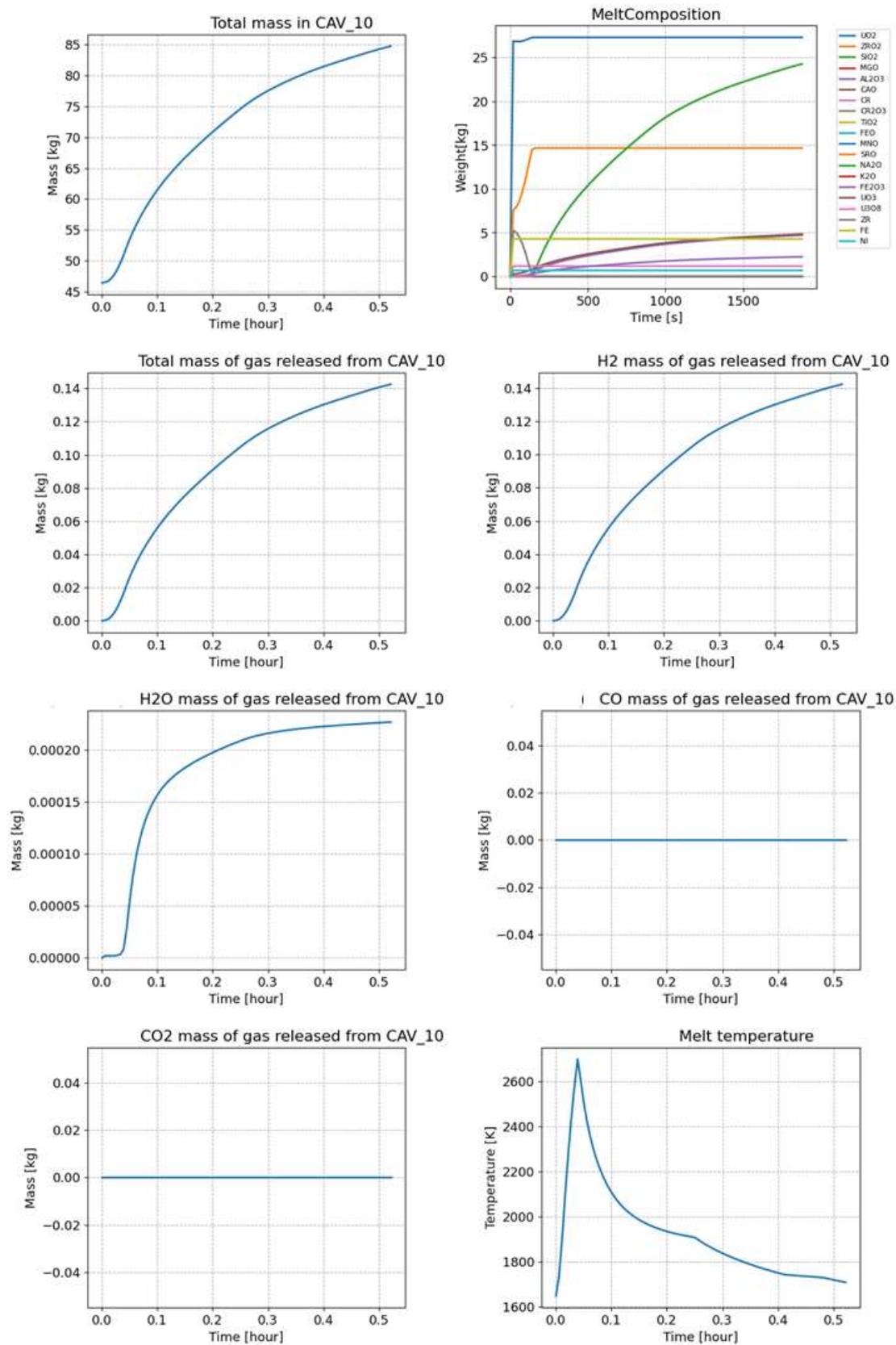


図 3-11 VULCANO VF-U1 実験解析主要な出力(1/2)

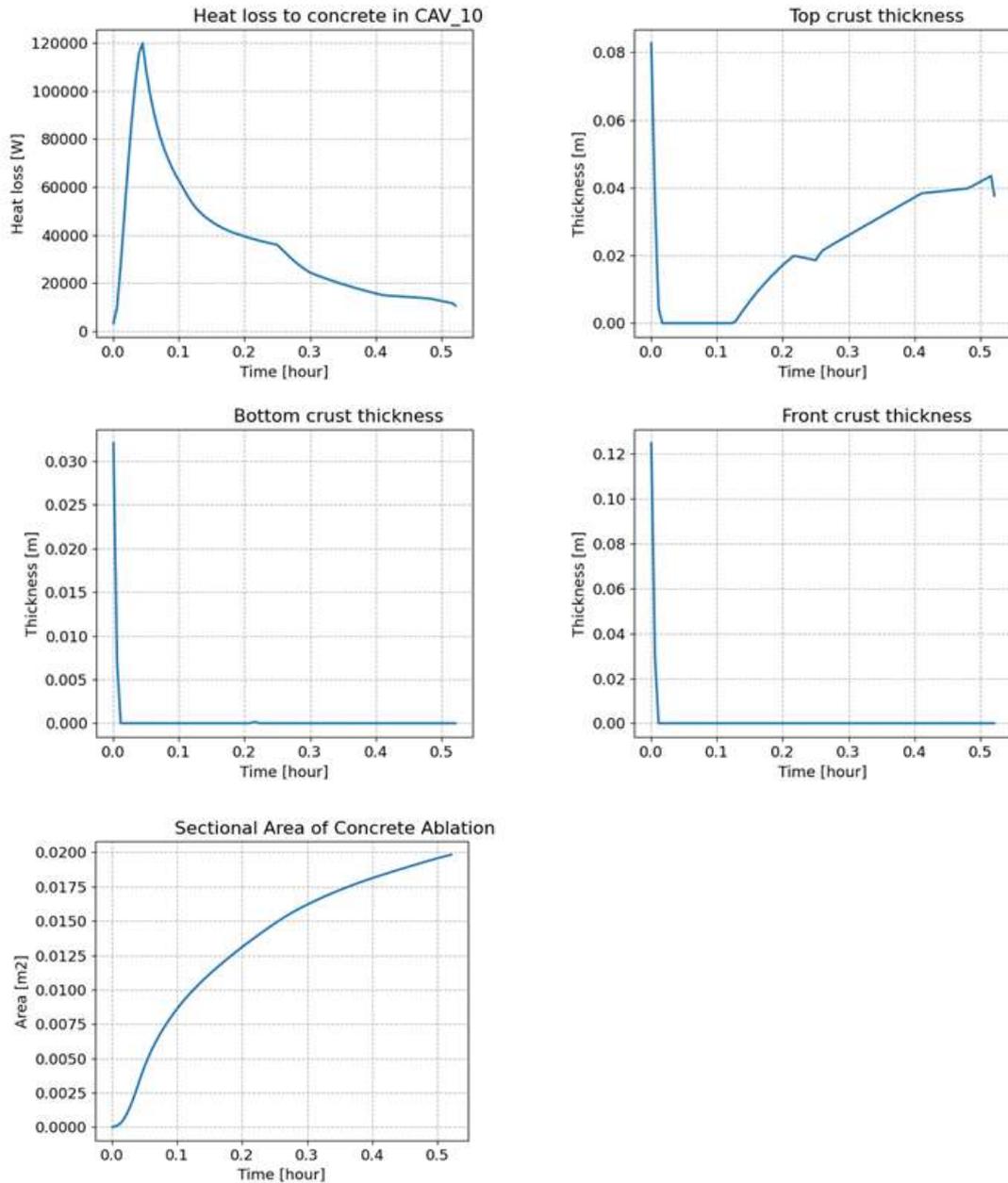


図 3-11 VULCANO VF-U1 実験解析主要な出力(2/2)

3.2.2-5 VULCANO VF-U1 解析

VULCANO VF-U1 の実験解析のパラメータは表 3-12 のように設定した。解析結果について、解析終了時刻における熔融コリウム温度、コンクリートへの熱移行量、径方向コンクリート侵食量、底方向コンクリート侵食量、コンクリート分解ガス放出量、熔融コリウム各成分の重量、H₂ 放出量、H₂O 放出量、CO 放出量、CO₂ 放出量、上面クラスト厚

み、底面クラスト厚み、側面クラスト厚み、コンクリート侵食量断面積を出力した結果を表 3-13 にまとめた。

図 3-12 に VULCANO-VF-U1 実験解析における MELCOR 入力パラメータ vs. 出力データの相関係数ヒートマップを示す。縦軸が出力データ、横軸が入力パラメータであり、値が全て 0.0 で相関係数が求められない出力データについては空白として表示している。

[HTRBOT]

溶融コリウムから底面のコンクリートへ移動する熱量が多くなるため、コリウム温度は下がり、底方向のコンクリート侵食量が多くなる。一方で、底面へ多く熱が移動した分だけ側面へ伝わる熱は少なくなるため、径方向のコンクリート侵食量は少なくなる。

[HTRSIDE]

溶融コリウムから側面のコンクリートへ移動する熱量が多くなるため、径方向のコンクリート侵食量が多くなり、底方向のコンクリート侵食量は少なくなる。その他の影響については HTRBOT と同様である。

[MIXING]

MIXING = Calc とした場合、径方向のコンクリート侵食量が少なくなり、底方向のコンクリート侵食量は多くなる。これは、積層構造のデブリ層が形成されることにより径方向と底方向の熱伝達に違いが現れるためと考えられる。

[GFILMBOT]

今回解析を行った値の範囲では出力データへの影響はほとんど無かった。

[GFILMSIDE]

溶融コリウムと側面コンクリート間の熱伝達モデルを Gas Film モデルから Slag モデルとすることで径方向のコンクリート侵食量はわずかに多くなる。

[MeltComposition]

組成を変更することによりコンクリート侵食量が多くなった。非酸化物相が増えて溶融コリウムの熱伝導率が高くなることによりコンクリートへの熱流量が多くなるためと考えられる。

[COND.CRUST]

溶融コリウムの初期組成に依らず、COND.CRUST の影響出力データへの影響はほとんど無かった。

[EMISS]

EMISS が小さいケースほど溶融コリウム温度が上昇し、コンクリート侵食量が増加する。これは、EMISS の値が小さいと環境への徐熱量が少なくなるためである。

表 3-12 VF-U1 実験解析入力パラメーター一覧

case	HTRBOT	HTRSIDE	MIXING	GFILMBOTT	GFILMSIDE	MeltComposition	COND.CRUST	EMISS
1	0.1	1	Enforce	GAS	GAS	ZrO2 実験値	1	0.6
2	10	1	Enforce	GAS	GAS	ZrO2 実験値	1	0.6
3	1	0.1	Enforce	GAS	GAS	ZrO2 実験値	1	0.6
4	1	10	Enforce	GAS	GAS	ZrO2 実験値	1	0.6
5	1	1	Calc	GAS	GAS	ZrO2 実験値	1	0.6
6	1	1	Enforce	SLAG	GAS	ZrO2 実験値	1	0.6
7	1	1	Enforce	GAS	SLAG	ZrO2 実験値	1	0.6
8	1	1	Enforce	GAS	GAS	ZrO2 実験値	0.1	0.6
9	1	1	Enforce	GAS	GAS	ZrO2 実験値	10	0.6
10	1	1	Enforce	GAS	GAS	ZrO2 50%, Zr 50%	0.1	0.6
11	1	1	Enforce	GAS	GAS	ZrO2 50%, Zr 50%	10	0.6
12	1	1	Enforce	GAS	GAS	ZrO2 50%, SUS 50%	0.1	0.6
13	1	1	Enforce	GAS	GAS	ZrO2 50%, SUS 50%	10	0.6
14	1	1	Enforce	GAS	GAS	ZrO2 実験値	1	0.6
15	1	1	Enforce	GAS	GAS	ZrO2 実験値	1	0.3

表 3-13 VF-U1 実験解析結果(1/3)

case	Melt Temperature[K]	Total Heat to concrete[kJ]	Radial ablation[m]	Axial ablation[m]	Total mass of released gas [kg]
1	1709.54	69225.7	0.0676	0.0672	0.1424
2	1709.54	69225.7	0.0676	0.0672	0.1424
3	1712.56	71036.3	0.0585	0.0914	0.1461
4	1709.54	69225.7	0.0676	0.0672	0.1424
5	1690.30	69503.2	0.0679	0.0775	0.1430
6	1711.30	68955.1	0.0680	0.0653	0.1419
7	1709.89	70158.8	0.0721	0.0654	0.1443
8	1709.54	69225.7	0.0676	0.0672	0.1424
9	1709.54	69225.7	0.0676	0.0672	0.1424
10	1719.62	76257.6	0.0735	0.0698	0.1567
11	1719.62	76257.6	0.0735	0.0698	0.1567
12	1704.36	67962.5	0.0673	0.0669	0.1397
13	1704.36	67962.5	0.0673	0.0669	0.1397
14	1733.77	71104.3	0.0701	0.0619	0.1463
15	1692.30	68135.9	0.0661	0.0705	0.1402

case	MNO Mass[kg]	SRO Mass[kg]	NA2O Mass[kg]	K2O Mass[kg]	FE2O3 Mass[kg]	UO3 Mass[kg]	U3O8 Mass[kg]	ZR Mass[kg]	FE Mass[kg]	NI Mass[kg]
1	0.00	0.00	0.00	0.00	2.23	0.00	0.00	0.00	4.27	0.67
2	0.00	0.00	0.00	0.00	2.23	0.00	0.00	0.00	4.27	0.67
3	0.00	0.00	0.00	0.00	2.29	0.00	0.00	0.00	4.27	0.67
4	0.00	0.00	0.00	0.00	2.23	0.00	0.00	0.00	4.27	0.67
5	0.00	0.00	0.00	0.00	2.24	0.00	0.00	0.00	4.27	0.67
6	0.00	0.00	0.00	0.00	2.23	0.00	0.00	0.00	4.27	0.67
7	0.00	0.00	0.00	0.00	2.26	0.00	0.00	0.00	4.27	0.67
8	0.00	0.00	0.00	0.00	2.23	0.00	0.00	0.00	4.27	0.67
9	0.00	0.00	0.00	0.00	2.23	0.00	0.00	0.00	4.27	0.67
10	0.00	0.00	0.00	0.00	2.46	0.00	0.00	0.00	4.27	0.67
11	0.00	0.00	0.00	0.00	2.46	0.00	0.00	0.00	4.27	0.67
12	0.00	0.00	0.00	0.00	2.19	0.00	0.00	0.00	6.80	1.07
13	0.00	0.00	0.00	0.00	2.19	0.00	0.00	0.00	6.80	1.07
14	0.00	0.00	0.00	0.00	2.29	0.00	0.00	0.00	4.27	0.67
15	0.00	0.00	0.00	0.00	2.20	0.00	0.00	0.00	4.27	0.67

表 3-13 VF-U1 実験解析結果(2/3)

case	Total mass of released H2 [kg]	Total mass of released H2O [kg]	Total mass of released CO [kg]	Total mass of released CO2 [kg]	Top Crust Thickness [m]	Bottom Crust Thickness [m]	Front Crust Thickness [m]	Sectional Area of Concrete Ablation[m2]
1	0.1422	0.0002	0.0000	0.0000	0.0376	0.0000	0.0000	0.0198
2	0.1422	0.0002	0.0000	0.0000	0.0376	0.0000	0.0000	0.0198
3	0.1458	0.0003	0.0000	0.0000	0.0463	0.0000	0.0000	0.0228
4	0.1422	0.0002	0.0000	0.0000	0.0376	0.0000	0.0000	0.0198
5	0.1428	0.0002	0.0000	0.0000	0.0069	0.0069	0.2458	0.0209
6	0.1417	0.0002	0.0000	0.0000	0.0445	0.0000	0.0000	0.0196
7	0.1441	0.0002	0.0000	0.0000	0.0438	0.0000	0.0000	0.0197
8	0.1422	0.0002	0.0000	0.0000	0.0376	0.0000	0.0000	0.0198
9	0.1422	0.0002	0.0000	0.0000	0.0376	0.0000	0.0000	0.0198
10	0.1565	0.0002	0.0000	0.0000	0.0420	0.0000	0.0000	0.0213
11	0.1565	0.0002	0.0000	0.0000	0.0420	0.0000	0.0000	0.0213
12	0.1395	0.0003	0.0000	0.0000	0.0248	0.0000	0.0000	0.0199
13	0.1395	0.0003	0.0000	0.0000	0.0248	0.0000	0.0000	0.0199
14	0.1460	0.0003	0.0000	0.0000	0.0253	0.0000	0.0000	0.0196
15	0.1400	0.0002	0.0000	0.0000	0.0368	0.0000	0.0000	0.0200

表 3-13 VF-U1 実験解析結果(3/3)

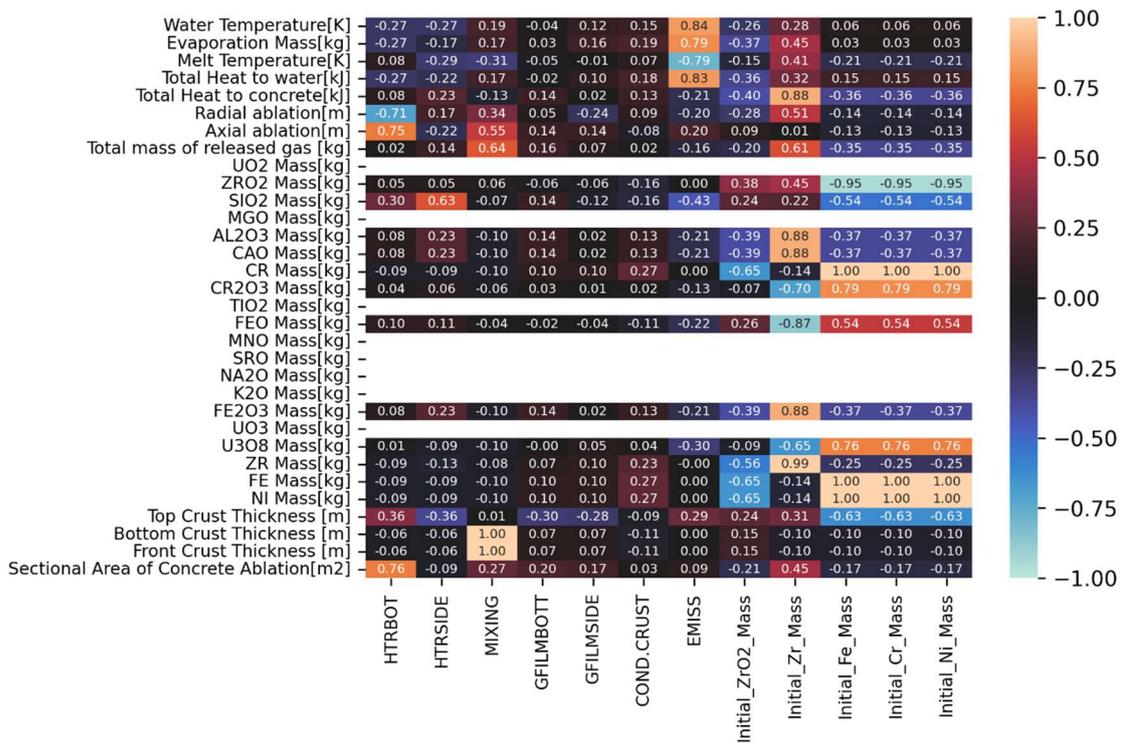


図 3-12 VULCANO VF-U1 実験解析入力データ vs.出力データの相関係数ヒートマップ

3.2.3 MELCOR による実験解析のまとめ

MACE-M0 実験および VULCANO-VF-U1 実験を対象とした MCCI 実験解析では、コンクリート侵食に影響を及ぼすと予想されるパラメータを選定し、各パラメータを変更した解析を実施した。入力パラメータと出力データの相関を分析した結果、HTRBOT、HTRSIDE、GFILMBOT、GFILMSIDE といった溶融コリウムとコンクリート間の熱伝達に関するパラメータはコンクリートの侵食深さに影響した。一方で、COND.CRUST と ERUPT については、本解析のパラメータの範囲ではコンクリート侵食量にほとんど影響は無い。溶融物プールの層状態のモデルの有無 (MIXING) は、コンクリート侵食量やクラスト厚みに対して底面方向と側面方向で大きな差異が生じる。クラストへの浸水モデル (WATINGR) を使用 (ON) すると水プールへの除熱量が増えて溶融コリウム温度が下がるが、融点以下まで温度が低下した後に急激な温度上昇が見られており、浸水モデルを適用した場合の挙動については、MELCOR のさらに新しいバージョンの利用も含めて、更なる調査が必要である。

3.3 シビアアクシデント解析コード MCCI モジュール整備

3.3.1 MCCI モジュールの物理モデル

原子炉圧力容器底部が損傷すると炉内構造物を含む溶融炉心(以下ではコリウムと呼ぶこととする)が原子炉キャビティの床に落下する。本モデルでは、コリウムが原子炉キャビティ(BWR ではペDESTAL)に落下した後のコリウムの状態量(質量、熱容量、温度)の更新と、コリウム-水及びコア・コンクリート相互作用に起因する熱と質量の移行を計算する。

キャビティのモデル体系を図 3-13 に示す。コリウムからの伝熱やコア・コンクリート相互作用による生成ガスの付加熱は、図 3-13 (a)に示すコリウム上部に水がある場合は全て液相に付加され、図 3-13 (b)が示すコリウム上部に水がない場合は気相に付加される。

キャビティモデルで考慮している項目は以下のとおりである。

- a) コリウム内部での発熱
 - FP の崩壊熱
 - コンクリート分解ガスとコリウム中の金属との化学反応熱
- b) 各部への伝熱
 - コリウムからコンクリートへの伝熱
 - コリウムから液相への伝熱 (水がある場合)
 - コリウムから気相への伝熱 (水がない場合またはコリウムが飛散した場合)
 - コリウムから構造物への伝熱 (水がない場合)
 - コリウム中を通過する気体への伝熱
- c) 各部への質量の移行
 - コンクリート分解生成物 (気体以外) のコリウムへの質量移行
 - コンクリート分解ガスの液相又は気相への移行

各項目に対する計算モデルは、以下の仮定に基づき計算している。

- ① コリウム
 - コリウムは一点集中近似(温度一様)で均質を仮定
 - コリウム表面(上部、下部及び側面)でのクラスト層の形成は考慮していない
- ② コンクリートの侵食
 - 一次元熱伝導方程式によりコンクリート内部温度は、コリウムと接する表面温度から直線で近似している。
 - コンクリート分解温度以上で分解が開始すると仮定し、伝熱工学資料[3.9]に記載されている「融解を伴う熱伝導問題」に基づき侵食量を計算する。
 - コンクリートの侵食は径方向と軸方向の両方を考慮している。
 - コンクリート分解による結晶水・CO₂の発生を考慮するとともに、コリウムを通過する際の金属との反応による水素やCOの発生を考慮。反応熱はコリウムに付加す

ると仮定。

➤ コンクリート分解後のキャビティの形状変化は考慮していない。

③ 伝熱モデル

コリウムからコンクリートへの伝達を考慮

キャビティの計算は、以下のような計算ステップからなる。その流れを図 3.3.6-2 に示す。

- (1) 初期状態の設定
- (2) コリウムからコンクリートへの伝熱量の計算
- (3) コンクリート分解量の計算
- (4) 生成ガスとコリウム中の金属との化学反応量と反応熱の計算
- (5) コリウムから気相及び構造物への輻射伝熱量の計算（水がない時またはコリウムが飛散した時）
- (6) コリウムから液相への伝熱量の計算(水があるとき)
- (7) コリウムの状態量の更新
- (8) 気相または液相に付加される質量・熱量の計算

以下に各項目についての計算法を記載する。

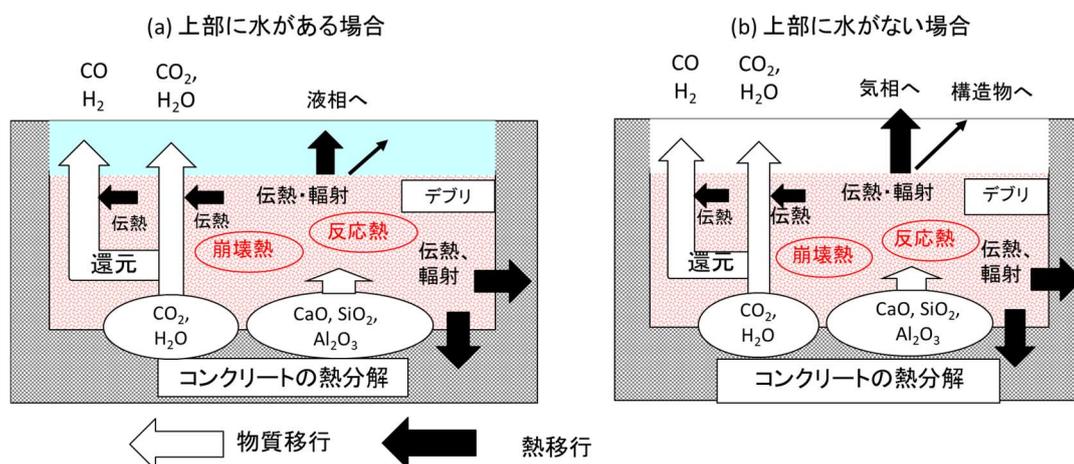


図 3-13 キャビティのモデル体系

(1) 初期状態の設定

キャビティの計算を開始した時に、以下のデータを設定する。

➤ コリウム中の各成分の質量 $M_{MLT,i}$

$$M_{MLT,i} = M_{MLT} \times f_{MLT,i} \quad \text{式(3-1)}$$

ここで

- $M_{MLT,i}$: コリウムの成分 i の質量 (kg)
 M_{MLT} : 格納容器に移行するコリウム質量 (kg)
 $f_{MLT,i}$: コリウム中に占める成分 i の質量比 (-)
 コリウムの成分は、以下の 12 種類とする。
 Fe, Zr, Cr, Ni, UO₂, ZrO₂, FeO, CaO, SiO₂, Al₂O₃, Cr₂O₃ 及び
 NiO

➤ コリウムの熱容量 $(MC)_{MLT}$

$$(MC)_{MLT} = \sum_i M_{MLT,i} c_{p_i} \quad \text{式(3-2)}$$

ここで

- c_{p_i} : 成分 i の比熱 (J/kg-K) (入力)
 $(MC)_{MLT}$: コリウムの熱容量 (J/K)

各成分の比熱は、温度によらず一定値を入力で指定する。

コンクリートの構成物質は以下の 5 種類とし、組成(質量比)は入力で与える。

- コンクリート成分 : CaO, SiO₂, Al₂O₃, H₂O (l) 及び CO₂
 ここで、CaCO₃ 及び Ca(OH)₂ は以下のように CaO, CO₂ 及び
 H₂O 分解するものとして、コンクリート成分比を入力で指定す
 る。 式(3-3)
 $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$
 $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$

➤ コリウム形状

圧力容器破損の際に、格納容器に移行するコリウム質量 M_{MLT} 、組成などが与えられ、それらに基づき計算された平均密度 ρ_{MLT} からコリウム体積 V_{MLT} を計算する。

$$V_{MLT} = M_{MLT} / \rho_{MLT} \quad \text{式(3-4)}$$

ここで

- V_{MLT} : コリウム体積 (m³)
 ρ_{MLT} : 組成情報に基づき計算したコリウム平均密度 (kg/m³)

➤ コリウム・床コンクリート間の接触面積 $A_{MLT,FL}$ 、コリウム・液相間の接触面積 $A_{MLT,LIQ}$

コンクリートの床面との接触面積は、コリウムは移行先ボリュームの底部に均一に広がると仮定し、初期値は流路断面積 A_{CAV} を設定する。そして、側面コンクリートの侵食に伴い床面との接触面積が増加する。

$$A_{MLT,FL} = A_{MLT,LIQ} = A_{CAV} \quad \text{式(3-5)}$$

ここで

$$\begin{aligned} A_{CAV} &: \text{キャビティ床面積 (m}^2\text{) (入力)} \\ A_{MLT,FL} &: \text{コリウム/コンクリート床間の接触面積 (m}^2\text{)} \\ A_{MLT,LIQ} &: \text{コリウム・液相間の接触面積 (m}^2\text{)} \end{aligned}$$

コリウム高さ H_{MLT} は、コリウム体積 V_{MLT} と床コンクリートとの接触面積 $A_{MLT,FL}$ を用いて次式で計算する。また、コリウムの側面との接触面積 $A_{MLT,CV}$ (m^2)は、コリウムと床面コンクリートとの接触面の等価半径を $R_{MLT,FL}$ (m)とすると次式で計算する。

$$H_{MLT} = V_{MLT} / A_{MLT,FL} \quad \text{式(3-6)}$$

$$A_{MLT,CV} = 2\pi R_{MLT,FL} \times H_{MLT} \quad \text{式(3-7)}$$

ここで

$$\begin{aligned} H_{MLT} &: \text{コリウム高さ (m)} \\ A_{MLT,CV} &: \text{コリウムと側面コンクリート間の接触面積 (m}^2\text{)} \\ R_{MLT,FL} &: \text{コリウムと床面コンクリート間の接触面の等価半径 (m)} \\ &(\pi R_{MLT,FL}^2 = A_{MLT,FL}) \end{aligned}$$

➤ コンクリート表面温度 T_0 、 Δt 間のコンクリートへの伝熱量 Q_{CONC}

コンクリート表面温度の初期値は初期温度、 Δt 間のコンクリートへの伝熱量の初期値ゼロを与える。

$$\begin{aligned} T_{CONC,SUR} &= T_{CONC,INI} \\ Q_{CONC} &= 0 \end{aligned} \quad \text{式(3-8)}$$

ここで

$$\begin{aligned} T_{CONC,SUR} &: \text{コンクリート表面温度 (K)} \\ T_{CONC,INI} &: \text{コンクリート初期温度 (K)} \\ Q_{CONC} &: \Delta t \text{間のコンクリートへの伝熱量 (J)} \end{aligned}$$

(2) コリウムからコンクリートへの伝熱

コリウムからコンクリートへの伝熱機構として、(a)輻射伝熱と(b)対流熱伝達の2つを考慮している。

(a) 輻射伝熱

輻射熱流束は、コリウム及びコンクリート表面を灰色体と仮定し、次式で計算する。なお、輻射熱交換係数 F は、無限平行平板に対する値を仮定する。

$$q_{RAD} = F \times \sigma_B (T_{MLT}^4 - T_{CONC,SUR}^4) \quad \text{式(3-9)}$$

$$F = 1 / \left(\frac{1}{\varepsilon_{MLT}} + \frac{1}{\varepsilon_{CONC}} - 1 \right) \quad \text{式(3-10)}$$

ここで

- q_{RAD} : 輻射熱流束(W/m²)
- T_{MLT} : コリウム温度 (K) (1点で近似)
- $T_{CONC,SUR}$: コンクリート表面温度(K)(初期温度 $T_{CONC,INI}$ で代表する)
- σ_B : Stefan-Boltzmann 定数 (W/m²-K⁴)
- F : 輻射熱交換係数 (-)
- ε_{MLT} : コリウム表面の輻射率 (-) (入力)
- ε_{CONC} : コンクリート表面の輻射率 (-) (入力)

(b) 対流熱伝達

床面及び側面の対流熱流束 q_{CONV} 及び q_{CONVV} は、次式で与えられる。

$$q_{CONV} = H_{IMC}(T_{MLT} - T_{CONC,SUR}) \quad \text{(床面)} \quad \text{式(3-11)}$$

$$q_{CONVV} = H_{IMCV}(T_{MLT} - T_{CONC,SUR}) \quad \text{(側面)} \quad \text{式(3-12)}$$

ここで

- q_{CONV} : 床面コンクリートへの対流伝熱による熱流束 (W/m²)
- q_{CONVV} : 横面コンクリートへの対流伝熱による熱流束 (W/m²)
- H_{IMC} : メルト/床コンクリート間の熱伝達係数 (W/m²-K, 入力)
- H_{IMCV} : メルト/側面コンクリート間の熱伝達係数 (W/m²-K, 入力)
- $T_{CONC,SUR}$: コンクリート表面温度(K)(初期温度 $T_{CONC,INI}$ で代表する)

(c) コリウムからコンクリートへの熱流束

コリウムからコンクリートへの伝熱機構として、輻射と対流熱伝達による伝熱の2つを考慮し、次式で計算する。

$$\begin{aligned} \Delta Q_{MLT,CONC1} &= A_{MLT,FL}(q_{RAD} + q_{CONV})\Delta t \quad \text{(床方向)} \\ \Delta Q_{MLT,CONC2} &= A_{MLT,CV}(q_{RAD} + q_{CONVV})\Delta t \quad \text{(横壁方向)} \\ \Delta Q_{MLT,CONC} &= \Delta Q_{MLT,CONC1} + \Delta Q_{MLT,CONC2} \end{aligned} \quad \text{式(3-13)}$$

ここで

- $\Delta Q_{MLT,CONC}$: タイムステップ Δt 間のコンクリートへの伝熱総量 (J)
- $\Delta Q_{MLT,CONC1}$: Δt 間のコンクリート床への伝熱量(J)
- $\Delta Q_{MLT,CONC2}$: Δt 間のコンクリート横壁への伝熱量(J)
- $A_{MLT,FL}$: コリウム/コンクリート床面間の伝熱面積 (m²)
- $A_{MLT,CV}$: コリウム/コンクリート横壁間の伝熱面積 (m²)
- q_{RAD} : コリウムからコンクリートへの輻射熱流束 (W/m²)
- q_{CONV} : コンクリートと床面間の対流熱流束 (W/m²)

q_{CONV} : コンクリートと横壁間の対流熱流束 (W/m²)
 Δt : タイムステップ (sec)

コリウムからコンクリートへの熱流束 q_{INC} (W/m²)は、輻射と対流熱流束の和として計算される。

$$q_{INC} = q_{CONV} + q_{RAD} \quad \text{式(3-14)}$$

(d) 伝熱深さ

コンクリート伝熱深さ L_s を表面から内部温度が初期温度 $T_{CONC,INI}$ と等しくなる位置までの深さと定義する。伝熱深さ L_s は「メルトと分解コンクリートの混合相」の表面からの位置 x_{intf}^{now} より必ず大きくなる($x_{intf}^{now} < L_s$)。

コンクリートへの伝熱量(熱流束)を q_{INC} とすると、熱伝導の関係から式(3-15)が成立する。

$$q_{INC} = \frac{k_{CONC}}{L_s} (T_{MLT} - T_{CONC,INI}) \quad \text{式(3-15)}$$

ここで、

q_{INC} : コリウムからコンクリートへの熱流束(W/m²)
 L_s : コンクリート伝熱深さ(m)
 k_{CONC} : コンクリートの熱伝導度(W/m·K)(入力)
 T_{MLT} : メルト温度(K)
 $T_{CONC,INI}$: コンクリート初期温度 (K)(入力)

式(3-15)から、コンクリートの伝熱深さ L_s は次式で表される。

$$L_s = \frac{k_{CONC}}{q_{INC}} (T_{MLT} - T_{CONC,INI}) \quad \text{式(3-16)}$$

(3) コンクリート分解

コンクリートの表面温度が分解温度を超えると分解が開始する。分解開始後の単純化した温度分布を図 3-3 の青線で示す。時刻 t_0 のときに「メルトと分解コンクリートの混合相」と「非分解コンクリート相」の界面位置が x_{intf}^{now} の場合、 Δt 後の界面位置 x_{intf}^{next} は次式で表される。

$$x_{intf}^{next}(t_0 + \Delta t) = x_{intf}^{now}(t_0) + \Delta x_{intf} \quad \text{式(3-17)}$$

$$\Delta x_{intf} \equiv x_{intf}(t_0 + \Delta t, T_{MLT}(t_0 + \Delta t)) - x_{intf}(t_0, T_{MLT}(t_0)) \quad \text{式(3-18)}$$

ただし、伝熱工学資料[9]に記載されている「融解を伴う熱伝導問題」から、時刻 t 、メルト温度 T_{MLT} の場合の「メルトと分解コンクリートの混合相」と「非分解コンクリート相」の界面位置 x_{intf} は

$$x_{intf}(t, T_{MLT}) = 2\xi\sqrt{a_L t} \quad \text{式(3-19)}$$

であり、係数 $\xi(T_{MLT})$ は次式の解である。

$$\frac{\exp(-\xi^2)}{\operatorname{erf}(\xi)} - \frac{\lambda_S\sqrt{a_L}(T_{CONC,INI} - T_{CONC,DEC})\exp(-a_L\xi^2/a_S)}{\lambda_L\sqrt{a_S}(T_{CONC,DEC} - T_{MLT})\operatorname{erfc}(\xi\sqrt{a_L/a_S})} = \frac{\xi\Delta h_L\sqrt{\pi}}{C_L(T_{CONC,DEC} - T_{MLT})} \quad \text{式(3-20)}$$

なお、

- $T_{CONC,DEC}$: 分解温度(K) (入力)
- λ_L : メルトと分解コンクリートの混合相の熱伝導率(W/m·K) (入力)
- λ_S : 非分解コンクリート相の熱伝導率(W/m·K) (入力)
- a_L : メルトと分解コンクリートの混合相の熱拡散率(m²/s) ($a_L = \lambda_L/(\rho_L C_L)$)
- a_S : 非分解コンクリート相の熱拡散率(m²/s) ($a_S = \lambda_S/(\rho_S C_S)$)
- Δh_L : 分解潜熱(J/Kg) (入力)
- C_L : メルトと分解コンクリートの混合相の比熱(J/Kg·K) (入力)

式(3-20)は解析的に解くことはできないため、数值的に係数 ξ を求める。

$F(\xi)$ を次式で定義する。

$$F(\xi) \equiv \frac{\exp(-\xi^2)}{\operatorname{erf}(\xi)} - \frac{\lambda_S\sqrt{a_L}(T_{CONC,INI} - T_{CONC,DEC})\exp\left(-\frac{a_L\xi^2}{a_S}\right)}{\lambda_L\sqrt{a_S}(T_{CONC,DEC} - T_{MLT})\operatorname{erfc}\left(\xi\sqrt{\frac{a_L}{a_S}}\right)} - \frac{\xi\Delta h_L\sqrt{\pi}}{C_L(T_{CONC,DEC} - T_{MLT})} \quad \text{式(3-21)}$$

$F(\xi^*) = 0$ となる ξ^* が係数 ξ の解となる。本コードでは ξ^* を二分法で求めている。

タイムステップ Δt 間のコンクリート分解量は次式で表される。

$$\Delta M_{DEC,FL} = \Delta x_{intf} A_{MLT,FL} \rho_L \quad \text{式(3-22)}$$

$$\Delta M_{DEC,CV} = \Delta x_{intf} A_{MLT,CV} \rho_L \quad \text{式(3-23)}$$

$$\Delta M_{DEC} = \Delta M_{DEC,FL} + \Delta M_{DEC,CV} \quad \text{式(3-24)}$$

ここで

$$\Delta M_{DEC,FL} : \Delta t \text{ 間の床面方向のコンクリートの分解量 (kg)}$$

$$\begin{aligned} \Delta M_{DEC,CV} &: \Delta t \text{ 間の側面方向のコンクリートの分解量 (kg)} \\ \Delta M_{DEC} &: \Delta t \text{ 間のトータルのコンクリート分解量(kg)} \\ \rho_L &: \text{メルトと分解コンクリートの混合相の密度(kg/m}^3\text{)} \end{aligned}$$

Δt 間のコンクリート分解量 ΔM_{DEC} が求まるとき、各成分の分解量は次式で求める。

$$\Delta M_{CaO} = \Delta M_{DEC} \times f_{CaO} \quad \text{式(3-25)}$$

$$\Delta M_{SiO_2} = \Delta M_{DEC} \times f_{SiO_2} \quad \text{式(3-26)}$$

$$\Delta M_{Al_2O_3} = \Delta M_{DEC} \times f_{Al_2O_3} \quad \text{式(3-27)}$$

$$\Delta M_{H_2O} = \Delta M_{DEC} \times f_{H_2O} \quad \text{式(3-28)}$$

$$\Delta M_{CO_2} = \Delta M_{DEC} \times f_{CO_2} \quad \text{式(3-29)}$$

ここで

$$\Delta M_{DEC} : \text{コンクリート分解量 (kg)}$$

$$f_i : \text{コンクリート中に占める成分 i の割合(質量比)(入力)}$$

発生したガス(H_2O 及び CO_2)は大気へ放出されるため、発生量 ΔM_{H_2O} 及び ΔM_{CO_2} を混合相の質量から差し引く。

(4) 生成ガスと金属との化学反応及び化学反応熱の計算

コンクリート分解により生成したガス(CO_2 、 H_2O)のうち、入力で与える割合 f_{CHEM} が、コリウム中の金属成分と反応し、残りのガスはコリウムを通過し、化学反応には寄与しないものとする。この化学反応はコリウム内に未酸化金属が存在する限り続く。なお、金属ガス反応に関するガス(CO_2 、 H_2O)は、コンクリート分解から生成されるものに限定している。これはキャビティ注水によりコリウム上部に賢固なクラスト層が形成されることで、冷却材の内部への流入と金属との反応は発生し難いとの判断による。

生成ガス金属反応に用いられるガスの量は次式で計算される。

$$\Delta t \text{ 間の反応に使用される } CO_2 \text{ の量(Kg): } M_{CO_2,ACT} = \Delta M_{CO_2} \times f_{CHEM}$$

$$\Delta t \text{ 間の反応に使用される } H_2O \text{ の量(Kg): } M_{H_2O,ACT} = \Delta M_{H_2O} \times f_{CHEM}$$

$$\Delta t \text{ 間の } CO_2 \text{ 生成量(Kg): } \Delta M_{CO_2} = \Delta V \rho_{total} R_{CO_2} \quad \text{式(3-30)}$$

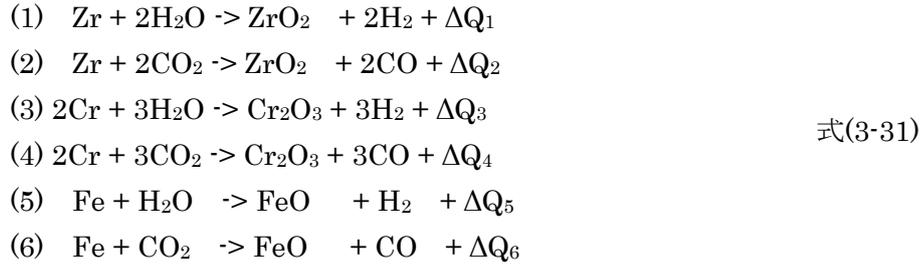
$$\Delta t \text{ 間の } H_2O \text{ 生成量(Kg): } \Delta M_{H_2O} = \Delta V \rho_{total} R_{H_2O}$$

$$\Delta V: \Delta t \text{ 間のコンクリート分解体積(m}^3\text{)}$$

$$\rho_{total}: \text{コンクリートのトータルの密度(Kg/m}^3\text{)}$$

$$R_{CO_2}, R_{H_2O}: CO_2, H_2O \text{ の成分比(-)(入力)}$$

金属とコンクリート分解ガスとの反応として、以下の6つの反応を考慮している。これら6つの反応は反応の起こりやすさから優先度が決まっており、(1)から(6)の順に反応する。



化学反応による反応熱は次式で求める。これらの反応熱はコリウムに付加される。

$$\Delta Q_{CHEM} = \sum_{i=1}^6 \Delta M_{i,react} \Delta Q_i \tag{3-32}$$

ここで

- ΔQ_{CHEM} : Δt 間の化学反応による反応熱のコリウムへの付加熱量(J)
 $\Delta M_{i,react}$: 反応 i の未酸化金属の Δt 間の酸化量(kg)
 ΔQ_i : 酸化熱(J/Kg)(入力)

コンクリート分解により発生した H_2O 及び CO_2 のうち、コリウムを通過する際に反応することが可能な最大値を $M_{\text{H}_2\text{O},ACT}$ 及び $M_{\text{CO}_2,ACT}$ とする。コンクリート分解から発生した H_2O 及び CO_2 がコリウムを通過する際に、反応性の高い順に金属ガス反応が進行する。

反応 1 から反応 6 の各反応における質量は以下の(1)から(6)に従って計算する。

(1) 反応 1($\text{Zr} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{ZrO}_2 + 2\text{H}_2 + \Delta Q_1$)

コリウム中に本反応に必要な未酸化 Zr 量 M_{Zr} と H_2O 量 $M_{\text{H}_2\text{O},ACT}$ が残存(より高反応性の上位の反応により消費されなければ)していれば、金属ガス反応 1 が進展する。

$$\begin{aligned}
\Delta M_{\text{H}_2\text{O},react1} &= M_{\text{H}_2\text{O},ACT} \\
\Delta M_{\text{Zr},react1} &= \frac{\Delta M_{\text{H}_2\text{O},react1}}{2mw_{\text{H}_2\text{O}}} mw_{\text{Zr}}
\end{aligned}
\tag{3-33}$$

$$M_{\text{Zr}} = M_{\text{Zr}} - \Delta M_{\text{Zr},react1}$$

ただし、Zr 変化量 $\Delta M_{\text{Zr},react}$ が存在量 M_{Zr} より大の場合、上記の $\Delta M_{\text{Zr},react}$ 及び $\Delta M_{\text{H}_2\text{O},react1}$ は次式で補正される。

$$\begin{aligned}
\Delta M_{\text{Zr},react1} &= M_{\text{Zr}} \\
\Delta M_{\text{H}_2\text{O},react1} &= \Delta M_{\text{H}_2\text{O},react1} \frac{M_{\text{Zr}}}{\Delta M_{\text{Zr},react1}}
\end{aligned}
\tag{3-34}$$

上記より、反応 1 に使用される Zr 量 $\Delta M_{\text{Zr},react}$ 及び H_2O 量 $\Delta M_{\text{H}_2\text{O},react}$ が決定できれば、 ZrO_2 生成量 $\Delta M_{\text{ZrO}_2,react}$ 、水素発生量 $\Delta M_{\text{H}_2,react1}$ 、反応熱量 ΔQ_{react} 、水蒸気残存量 $M_{\text{H}_2\text{O},ACT}$ がモルバランスの関係から計算できる。

$$\Delta M_{\text{ZrO}_2,react1} = \frac{\Delta M_{\text{H}_2\text{O},react1}}{2mw_{\text{H}_2\text{O}}} mw_{\text{ZrO}_2} \tag{3-35}$$

$$\Delta M_{H_2,react1} = \frac{\Delta M_{H_2O,react1}}{mw_{H_2O}} mw_{H_2}$$

$$M_{H_2O,ACT} = M_{H_2O,ACT} - \Delta M_{H_2O,react}$$

$$\Delta Q_{react1} = \Delta Q_1 \times \Delta M_{Zr,react1}$$

本反応で残存した $M_{H_2O,ACT}$ は、以下の反応で使用することができる。

ここで

M_{XX}	: 材料 XX の質量 (kg)
ΔM_{XX}	: Δt 間の材料 XX の質量変化量 (kg)
$M_{H_2O,ACT}$,	: Δt 間にコリウム中の金属と反応可能な H_2O 又は CO_2 の質量
$M_{CO_2,ACT}$	(kg)
$M_{H_2O,react Y}$,	: Δt 間に反応 Y により消費された H_2O 質量 (kg)
$M_{CO_2,react Y}$	Δt 間に反応 Y により消費された CO_2 質量 (kg)
$\Delta M_{XX,react Y}$: Δt 間に金属ガス反応 Y に関わる材料 XX の質量変化量 (kg)
mw_{XX}	: 物質 XX の分子量 (kg/kmol)
$\Delta Q_{react Y}$: Δt 間に反応 Y により発生する熱量 (kcal)

(2) 反応 $2(Zr + 2CO_2 \rightarrow ZrO_2 + 2CO + \Delta Q_2)$

コリウム中に本反応に必要な未酸化 Zr 量 M_{Zr} と CO_2 量 $M_{CO_2,ACT}$ が残存(より高反応性の上位の反応により消費されなければ)していれば、金属ガス反応 2 が進展する。

$$\Delta M_{H_2O,react2} = M_{CO_2,ACT}$$

$$\Delta M_{Zr,react2} = \frac{\Delta M_{CO_2,react2}}{2mw_{CO_2}} mw_{Zr} \quad \text{式(3-36)}$$

$$M_{Zr} = M_{Zr} - \Delta M_{Zr,react2}$$

ただし、Zr 変化量 $\Delta M_{Zr,react2}$ が存在量 M_{Zr} より大の場合、上記の $\Delta M_{Zr,react2}$ 及び $\Delta M_{CO_2,react}$ は次式で補正される。

$$\Delta M_{Zr,react2} = M_{Zr}$$

$$\Delta M_{CO_2,react2} = \Delta M_{CO_2,react2} \frac{M_{Zr}}{\Delta M_{Zr,react2}} \quad \text{式(3-37)}$$

上記より、反応 2 に使用される Zr 量 $\Delta M_{Zr,react}$ 及び CO_2 量 $\Delta M_{CO_2,react2}$ が決定できれば、 ZrO_2 生成量 $\Delta M_{ZrO_2,react}$ 、水素発生量 $\Delta M_{H_2,react2}$ 、反応熱量 ΔQ_{react2} 、 CO_2 残存量 $M_{CO_2,ACT}$ がモルバランスの関係から計算できる。

$$\Delta M_{ZrO_2,react2} = \frac{\Delta M_{CO_2,react2}}{2mw_{CO_2}} mw_{ZrO_2}$$

$$\Delta M_{CO_2,react2} = \frac{\Delta M_{CO_2,react}}{mw_{CO_2}} mw_{CO_2} \quad \text{式(3-38)}$$

$$M_{CO_2,ACT} = M_{CO_2,ACT} - \Delta M_{CO_2,react}$$

$$\Delta Q_{react2} = \Delta Q_2 \times \Delta M_{Zr,react2}$$

本反応で残存した $M_{CO_2,ACT}$ は、本反応より反応性の低い 3~6 の反応で消費可能である。

(3) 反応 3 ($2\text{Cr} + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Cr}_2\text{O}_3 + 3\text{H}_2 + \Delta Q_3$)

コリウム中に本反応に必要な未酸化 Zr 量 M_{Zr} と H_2O 量 $M_{\text{H}_2\text{O},\text{ACT}}$ が残存(より高反応性の上位の反応により消費されなければ)していれば、金属ガス反応 3 が進展する。

$$\begin{aligned}\Delta M_{\text{H}_2\text{O},\text{react}3} &= M_{\text{H}_2\text{O},\text{ACT}} \\ \Delta M_{\text{Cr},\text{react}3} &= \frac{2}{3} \frac{\Delta M_{\text{H}_2\text{O},\text{react}3}}{mw_{\text{H}_2\text{O}}} mw_{\text{Cr}}\end{aligned}\quad \text{式(3-39)}$$

$$M_{\text{Cr}} = M_{\text{Cr}} - \Delta M_{\text{Cr},\text{react}3}$$

ただし、Cr 変化量 $\Delta M_{\text{Cr},\text{react}3}$ が存在量 M_{Cr} より大の場合、上記の $\Delta M_{\text{Cr},\text{react}3}$ 及び $\Delta M_{\text{H}_2\text{O},\text{react}3}$ は次式で補正される。

$$\begin{aligned}\Delta M_{\text{Cr},\text{react}3} &= M_{\text{Cr}} \\ \Delta M_{\text{H}_2\text{O},\text{react}3} &= \Delta M_{\text{H}_2\text{O},\text{react}3} \frac{M_{\text{Cr}}}{\Delta M_{\text{Cr},\text{react}3}}\end{aligned}\quad \text{式(3-40)}$$

上記より、反応 3 に使用される Cr 量 $\Delta M_{\text{Cr},\text{react}3}$ 及び H_2O 量 $\Delta M_{\text{H}_2\text{O},\text{react}3}$ が決定できれば、 Cr_2O_3 生成量 $\Delta M_{\text{Cr}_2\text{O}_3,\text{react}3}$ 、水素発生量 $\Delta M_{\text{H}_2,\text{react}3}$ 、反応熱量 $\Delta Q_{\text{react}3}$ 、水蒸気残存量 $M_{\text{H}_2\text{O},\text{ACT}}$ がモルバランスの関係から計算できる。

$$\begin{aligned}\Delta M_{\text{Cr}_2\text{O}_3,\text{react}3} &= \frac{\Delta M_{\text{H}_2\text{O},\text{react}3}}{mw_{\text{H}_2\text{O}}} mw_{\text{Cr}_2\text{O}_3} \\ \Delta M_{\text{H}_2,\text{react}3} &= \frac{\Delta M_{\text{H}_2\text{O},\text{react}3}}{mw_{\text{H}_2\text{O}}} mw_{\text{H}_2}\end{aligned}\quad \text{式(3-41)}$$

$$M_{\text{H}_2\text{O},\text{ACT}} = M_{\text{H}_2\text{O},\text{ACT}} - \Delta M_{\text{H}_2\text{O},\text{react}3}$$

$$\Delta Q_{\text{react}3} = \Delta Q_3 \times \Delta M_{\text{Cr},\text{react}3}$$

本反応で残存した $M_{\text{H}_2\text{O},\text{ACT}}$ は、本反応より反応性の低い 4~6 の反応で消費可能である。

(4) 反応 4 ($2\text{Cr} + 3\text{CO}_2 \rightarrow \text{Cr}_2\text{O}_3 + 3\text{CO} + \Delta Q_4$)

コリウム中に本反応に必要な未酸化 Cr 量 M_{Cr} と CO_2 量 $M_{\text{CO}_2,\text{ACT}}$ が残存(より高反応性の上位の反応により消費されなければ)していれば、金属ガス反応 4 が進展する。

$$\begin{aligned}\Delta M_{\text{CO}_2,\text{react}4} &= M_{\text{CO}_2,\text{ACT}} \\ \Delta M_{\text{Cr},\text{react}4} &= \frac{2}{3} \frac{\Delta M_{\text{CO}_2,\text{react}4}}{mw_{\text{CO}_2}} mw_{\text{Cr}}\end{aligned}\quad \text{式(3-42)}$$

$$M_{\text{Cr}} = M_{\text{Cr}} - \Delta M_{\text{Cr},\text{react}4}$$

ただし、Cr 変化量 $\Delta M_{\text{Cr},\text{react}4}$ が存在量 M_{Cr} より大の場合、上記の $\Delta M_{\text{Cr},\text{react}4}$ 及び $\Delta M_{\text{CO}_2,\text{react}4}$ は次式で補正される。

$$\begin{aligned}\Delta M_{\text{Cr},\text{react}4} &= M_{\text{Cr}} \\ \Delta M_{\text{CO}_2,\text{react}4} &= \Delta M_{\text{CO}_2,\text{react}4} \frac{M_{\text{Cr}}}{\Delta M_{\text{Cr},\text{react}4}}\end{aligned}\quad \text{式(3-43)}$$

上記より、反応 4 に使用される Cr 量 $\Delta M_{Cr,react4}$ 及び CO₂ 量 $\Delta M_{CO_2,react4}$ が決定できれば、Cr₂O₃ 生成量 $\Delta M_{Cr_2O_3,react4}$ 、CO 発生量 $\Delta M_{CO,react4}$ 、反応熱量 ΔQ_{react4} 、CO₂ 残存量 $M_{CO_2,ACT}$ がモルバランスの関係から計算できる。

$$\Delta M_{Cr_2O_3,react4} = \frac{1}{3} \frac{\Delta M_{CO_2,react4}}{mw_{CO_2}} mw_{Cr_2O_3}$$

$$\Delta M_{CO,react4} = \frac{\Delta M_{CO_2,react4}}{mw_{CO_2}} mw_{CO} \quad \text{式(3-44)}$$

$$M_{CO_2,ACT} = M_{CO_2,ACT} - \Delta M_{CO_2,react4}$$

$$\Delta Q_{react4} = \Delta Q_4 \times \Delta M_{Cr,react4}$$

本反応で残存した $M_{CO_2,ACT}$ は、本反応より反応性の低い 5~6 の反応で消費可能である。

(5) 反応 5 (Fe + H₂O -> FeO + 3H₂ + ΔQ₅)

コリウム中に本反応に必要な未酸化 Fe 量 M_{Fe} と H₂O 量 $M_{H_2O,ACT}$ が残存(より高反応性の上位の反応により消費されなければ)していれば、金属ガス反応 5 が進展する。

$$\Delta M_{H_2O,react5} = M_{H_2O,ACT}$$

$$\Delta M_{Fe,react5} = \frac{\Delta M_{H_2O,react5}}{mw_{H_2O}} mw_{Fe} \quad \text{式(3-45)}$$

$$M_{Fe} = M_{Fe} - \Delta M_{Fe,react5}$$

ただし、Fe 変化量 $\Delta M_{Fe,react5}$ が存在量 M_{Fe} より大の場合、上記の $\Delta M_{Fe,react5}$ 及び $\Delta M_{H_2O,react5}$ は次式で補正される。

$$\Delta M_{Fe,react5} = M_{Fe}$$

$$\Delta M_{H_2O,react5} = \Delta M_{H_2O,react5} \frac{M_{Fe}}{\Delta M_{Fe,react5}} \quad \text{式(3-46)}$$

上記より、反応 5 に使用される Fe 量 $\Delta M_{Fe,react5}$ 及び H₂O 量 $\Delta M_{H_2O,react5}$ が決定できれば、FeO 生成量 $\Delta M_{FeO,react5}$ 、水素発生量 $\Delta M_{H_2,react5}$ 、反応熱量 ΔQ_{react5} 、水蒸気残存量 $M_{H_2O,ACT}$ がモルバランスの関係から計算できる。

$$\Delta M_{FeO,react5} = \frac{\Delta M_{H_2O,react5}}{mw_{H_2O}} mw_{FeO}$$

$$\Delta M_{H_2,react5} = \frac{\Delta M_{H_2O,react5}}{mw_{H_2O}} mw_{H_2} \quad \text{式(3-47)}$$

$$M_{H_2O,ACT} = M_{H_2O,ACT} - \Delta M_{H_2O,react5}$$

$$\Delta Q_{react5} = \Delta Q_5 \times \Delta M_{Fe,react5}$$

本反応に関わらなかった水蒸気 $M_{H_2O,ACT}$ は、コリウム外に放出される。

(6) 反応 6 (Fe + CO₂ -> FeO + CO + ΔQ₆)

コリウム中に本反応に必要な未酸化 Fe 量 M_{Fe} と CO₂ 量 $M_{CO_2,ACT}$ が残存(より高反応性の上位の反応により消費されなければ)していれば、金属ガス反応 6 が進展する。

$$\Delta M_{CO_2,react6} = M_{CO_2,ACT} \quad \text{式(3-48)}$$

$$\Delta M_{Fe,react6} = \frac{\Delta M_{CO2,react6}}{mw_{CO2}} mw_{Fe}$$

$$M_{Fe} = M_{Fe} - \Delta M_{Fe,react6}$$

ただし、Fe 変化量 $\Delta M_{Fe,react6}$ が存在量 M_{Fe} より大の場合、上記の $\Delta M_{Fe,react6}$ 及び $\Delta M_{CO2,react6}$ は次式で補正される。

$$\Delta M_{Fe,react6} = M_{Fe}$$

$$\Delta M_{CO2,react6} = \Delta M_{CO2,react6} \frac{M_{Fe}}{\Delta M_{Fe,react6}} \quad \text{式(3-49)}$$

上記より、反応 6 に使用される Fe 量 $\Delta M_{Fe,react6}$ 及び CO₂ 量 $\Delta M_{CO2,react6}$ が決定できれば、FeO 生成量 $\Delta M_{FeO,react6}$ 、CO 発生量 $\Delta M_{CO,react6}$ 、反応熱量 ΔQ_{react6} 、CO₂ 残存量 $M_{CO2,ACT}$ がモルバランスの関係から計算できる。

$$\Delta M_{FeO,react6} = \frac{\Delta M_{CO2,react6}}{mw_{CO2}} mw_{FeO}$$

$$\Delta M_{CO,react6} = \frac{\Delta M_{CO2,react6}}{mw_{CO2}} mw_{CO} \quad \text{式(3-50)}$$

$$M_{CO2,ACT} = M_{CO2,ACT} - \Delta M_{CO2,react6}$$

$$\Delta Q_{react6} = \Delta Q_6 \times \Delta M_{Fe,react6}$$

本反応に関わらなかった CO₂ 量 $M_{CO2,ACT}$ は、コリウム外に移行する。

金属ガス反応によるコリウム中の金属の質量変化は次式で表せる。

$$\Delta M_{Zr} = -(\Delta M_{Zr,react1} + \Delta M_{Zr,react2})$$

$$\Delta M_{Cr} = -(\Delta M_{Cr,react3} + \Delta M_{Cr,react4})$$

$$\Delta M_{Fe} = -(\Delta M_{Fe,react5} + \Delta M_{Fe,react6})$$

$$\Delta M_{Zr} = (\Delta M_{ZrO2,react1} + \Delta M_{ZrO2,react2})$$

$$\Delta M_{Cr2O3} = (\Delta M_{Cr2O3,react3} + \Delta M_{Cr2O3,react4})$$

$$\Delta M_{FeO} = (\Delta M_{FeO,react5} + \Delta M_{FeO,react6})$$

式(3-51)

金属ガス反応後にコリウムから放出されるガスは次式で表せる。

$$\Delta M_{H2O,g} = (\Delta M_{H2O,DEC} - \Delta M_{H2O,react1} - \Delta M_{H2O,react3} - \Delta M_{H2O,react5})$$

$$\Delta M_{CO2,g} = (\Delta M_{CO2,DEC} - \Delta M_{CO2,react2} - \Delta M_{CO,react5} - \Delta M_{CO2,react6})$$

式(3-52)

$$\Delta M_{H2,g} = (\Delta M_{H2,react1} + \Delta M_{H2,react3} + \Delta M_{H2,react5})$$

$$\Delta M_{CO,g} = (\Delta M_{CO,react2} + \Delta M_{CO,react4} + \Delta M_{CO,react6})$$

ここで

$M_{IGAS,g}$: 気相中のガス IGAS の質量 (kg)

$\Delta M_{H2O,DEC}$: Δt 間にコンクリート分解から発生した H₂O 質量 (kg)

$\Delta M_{CO2,DEC}$: Δt 間にコンクリート分解から発生した CO₂ 質量 (kg)

$\Delta M_{XX,YY}$: Δt 間に反応 YY での物質 XX の質量変化量 (kg)

(5) コリウムから気相及び上部構造物への輻射伝熱量の計算(水がない時)

コリウムからの Δt 間の輻射伝熱量 ΔQ_{RAD} を次式で求める。

$$\Delta Q_{MLT,RAD} = \sigma_B \varepsilon_{MLT} A_{CAV} T_{MLT}^4 \Delta t \quad \text{式(3-53)}$$

ここで

$\Delta Q_{MLT,RAD}$: Δt 間のコリウムからの輻射伝熱量 (J)
σ_B	: Stefan-Boltzmann 定数 ($W/m^2 \cdot K^4$)
ε_{MLT}	: コリウム表面の輻射率 (-)
A_{CAV}	: キャビティ上部面積 (m^2) (=キャビティ床面積)
T_{MLT}	: コリウム温度 (K)
Δt	: タイムステップ (sec)

輻射による伝熱量の上限は、コリウムと気相の温度が等しくなる熱量である。

$$\Delta Q_{max,RAD} = \frac{(MC)_{MLT}(MC)_{gas}}{(MC)_{MLT} + (MC)_{gas}} (T_{MLT} - T_{gas}) \quad \text{式(3-54)}$$

ここで

$\Delta Q_{max,RAD}$: コリウムからの Δt 間の輻射熱流束の上限値 (W/m^2)
$(MC)_{MLT}$: コリウムの熱容量 (J/K)
$(MC)_{gas}$: 気相の熱容量 (J/K)
T_{gas}	: 気相の温度 (K)

輻射伝熱量のうち、入力で与える f_{mat} なる割合分が入力で指定する構造物に付加され、残りは気相に付加されるものとする。

$$\Delta Q_{RAD,slab} = \Delta Q_{MLT,RAD} f_{mat} \quad \text{式(3-55)}$$

$$\Delta Q_{RAD,gas} = \Delta Q_{MLT,RAD} (1 - f_{mat}) \quad \text{式(3-56)}$$

ここで

$\Delta Q_{RAD,slab}$: Δt 間のコリウムからスラブへの輻射による付加熱量 (J)
$\Delta Q_{RAD,gas}$: Δt 間のコリウムから気相への輻射による付加熱量 (J)
f_{mat}	: コリウム近傍の構造物への輻射熱の付加割合(-)(入力)

(6) コリウムから液相への伝熱量の計算(水があるとき)

液相への伝熱量を次式で求める。

$$\Delta Q_{MLT,LIQ} = A_{MLT,LIQ} h_{MLT,LIQ} (T_{MLT} - T_{LIQ}) \Delta t \quad \text{式(3-57)}$$

ここで

$\Delta Q_{MLT,LIQ}$: Δt 間のコリウムから液相への伝熱量 (J)
$A_{MLT,LIQ}$: コリウム/液相間の伝熱面積 (m^2)
$h_{MLT,LIQ}$: コリウム/液相間の熱伝達係数 ($W/m^2 \cdot K$)
T_{LIQ}	: 液相温度 (K)

(7) コリウムの状態量(質量、熱容量、温度)の更新

コリウムの熱量の増分を次式で求める。

$$\Delta Q_{MLT} = \Delta Q_{MCCI} + \Delta Q_{FP} + \Delta Q_{CHEM} - \Delta Q_{MLT,CONC} - \Delta Q_{MLT,LIQ} - \Delta Q_{MLT,RAD} \quad \text{式(3-58)}$$

ここで

- ΔQ_{MLT} : Δt 間のコリウムの熱量変化 (J)
- ΔQ_{MCCI} : Δt 間のコンクリート分解生成物の流入に伴う熱量変化 (J)
=式(3-59)
- ΔQ_{FP} : Δt 間の FP 崩壊熱に伴う熱量変化(J)
= 崩壊熱モデルあるいは直接通電加熱等の時系列データにより設定
- ΔQ_{CHEM} : Δt 間の化学反応による反応熱のコリウムへの付加熱量 (J)
=式(3-32)
- $\Delta Q_{MLT,CONC}$: Δt 間のコリウムからコンクリートへの伝熱量 (J)
=式(3-14)に伝熱面積と Δt を乗じた値
- $\Delta Q_{MLT,LIQ}$: Δt 間のコリウムから液相への伝熱量 (J) (液相がある場合)
=式(3-57)
- $\Delta Q_{MLT,RAD}$: Δt 間の輻射によるコリウムから構造物又は気相への放熱量(J)
= $\Delta Q_{RAD,slab} + \Delta Q_{RAD,gas}$ 式(3-55)及び式(3-56)

コンクリート分解生成物がコリウムへ取り込まれる際の変化熱量 ΔQ_{MCCI} は、次式で計算される。

$$\Delta Q_{MCCI} = \{\Delta(MC)_{gas} + \Delta(MC)_{sol}\}(T_{CONC,DEC} - T_{MLT}) \quad \text{式(3-59)}$$

ここで

- $\Delta(MC)_{gas}$: Δt 間のコリウムに付加されるガスによる熱容量変化 (J/K)
 $\Delta(MC)_{gas} = \Delta M'_{H2O} C_{pH2O} + \Delta M'_{CO2} C_{pCO2} + \Delta M'_{CO} C_{pCO} + \Delta M'_{H2} C_{pH2}$
- $\Delta(MC)_{sol}$: Δt 間のコリウムに付加されるガス以外の分解成分 (固体) による熱容量変化量 (J/K)
 $\Delta(MC)_{sol} = \Delta M_{CaO} C_{pCaO} + \Delta M_{SiO2} C_{pSiO2} + \Delta M_{Al2O3} C_{pAl2O3}$
- $\Delta M'_i$: 金属との反応を考慮した後のガス成分 i の Δt 間の流入質量 (kg)
- C_{pi} : 成分 i の比熱 (J/kg-K)
- ΔM_i : ガス以外のコンクリート分解成分 i の Δt 間の流入質量 (kg)

流入ガス分を想定し、コリウムの熱容量を更新する。

$$(MC)'_{MLT} = (MC)_{MLT} + \Delta(MC)_{gas} + \Delta(MC)_{sol} \quad \text{式(3-60)}$$

コリウムの変化熱量 ΔQ_{MLT} を用いて、コリウム温度を更新する。コリウムから出ていくガスの温度はコリウム温度と等しくなると仮定する。

$$T'_{MLT} = T_{MLT} + \Delta Q_{MLT} / (MC)'_{MLT} \quad \text{式(3-61)}$$

次にコリウムの新たな質量・熱容量を決定する。（ガス流出後のコリウム質量、熱容量を更新）

$$M'_{MLT} = M_{MLT} + \Delta M_{MLT} \quad \text{式(3-62)}$$

$$\Delta M_{MLT} = \Delta M_{CaO} + \Delta M_{SiO_2} + \Delta M_{Al_2O_3} \quad \text{式(3-63)}$$

$$(MC)''_{MLT} = (MC)'_{MLT} - \Delta(MC)_{gas} \quad \text{式(3-64)}$$

ここで

T'_{MLT} : 更新後のコリウム温度 (K)

M'_{MLT} : 更新後のコリウム質量 (kg)

$(MC)'_{MLT}$: 更新後のコリウムの熱容量 (J/K)

$(MC)''_{MLT}$: 再更新後(ガス流出後)のコリウムの熱容量 (J/K)

(8) 気相又は液相に付加される質量、熱量の計算

コリウムから流出する気体の質量及びエンタルピは、水があれば液相に、水がなければ気相に付加される。更に、水があれば、コリウムから伝熱量が液相に付加される。水がなければ、気相及び構造物に輻射熱が付加される。

コンクリートへの伝熱モデルの検討

伝熱深さの計算はコンクリート分解量の計算に影響する。CCI 実験解析の結果から、コンクリート側の熱伝達評価は結果に大きく影響することがわかっている。ここではコンクリート内部の温度分布計算に、より現実的な融解を伴う伝熱問題の解析解[4.8]の利用について検討する。

融解を伴う伝熱問題の解析解

コンクリート分解層内及び非分解コンクリート層内のそれぞれの温度分布 T_L 及び T_S は次式で表される。

$$T_L(t, T_B) = \frac{(T_M - T_B)}{\text{erf}(\xi)} \text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{a_L t}}\right) + T_B \quad \text{(3-64)}$$

$$T_S(t, T_B) = T_0 - \frac{(T_0 - T_M)}{\text{erfc}(\xi\sqrt{a_L/a_S})} \text{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a_S t}}\right) \quad \text{(3-65)}$$

コンクリートの表面温度が分解温度を超えると分解が開始する。分解開始後の単純化した温度分布を図 4.3.3 の青線で示す。時刻 t_0 のときに「メルトと分解コンクリートの混合相」と「非分解コンクリート相」の界面位置が x_{intf}^{now} の場合、 Δt 後の界面位置 x_{intf}^{next} は次式で表される。

$$x_{intf}^{next}(t_0 + \Delta t) = x_{intf}^{now}(t_0) + \Delta x_{intf} \quad \text{(3-66)}$$

$$\Delta x_{intf} \equiv x_{intf}(t_0 + \Delta t, T_{MLT}(t_0 + \Delta t)) - x_{intf}(t_0, T_{MLT}(t_0)) \quad \text{(3-67)}$$

時刻 t 、メルト温度 T_{MLT} の場合の「メルトと分解コンクリートの混合相」と「非分解コンクリート相」の界面位置 x_{intf} は

$$x_{intf}(t, T_{MLT}) = 2\xi\sqrt{a_L t} \quad (3-68)$$

であり、係数 $\xi(T_{MLT})$ は次式の解である。

$$\begin{aligned} \frac{\exp(-\xi^2)}{\operatorname{erf}(\xi)} - \frac{\lambda_S\sqrt{a_L}(T_{CONC,INI} - T_{CONC,DEC})\exp(-a_L\xi^2/a_S)}{\lambda_L\sqrt{a_S}(T_{CONC,DEC} - T_{MLT})\operatorname{erfc}(\xi\sqrt{a_L/a_S})} \\ = \frac{\xi\Delta h_L\sqrt{\pi}}{C_L(T_{CONC,DEC} - T_{MLT})} \end{aligned} \quad (3-69)$$

ここで、 λ_L はコリウムと分解コンクリートの混合層の熱伝導率(W/m·K)、 λ_S は非分解コンクリート層の熱伝導率(W/m·K)、 a_L はコリウムと分解コンクリートの混合層の熱拡散率(m²/s)、 a_S は非分解コンクリート層の熱拡散率(m²/s)、 Δh_L はコンクリートの分解潜熱(J/kg)、 C_L はコリウムと分解コンクリートの混合層の比熱(J/kg·K)である。式中の係数 ξ は数値的に求める。 $F(\xi)$ を次式で定義する。

$$\begin{aligned} F(\xi) \equiv \frac{\exp(-\xi^2)}{\operatorname{erf}(\xi)} - \frac{\lambda_S\sqrt{a_L}(T_{CONC,INI} - T_{CONC,DEC})\exp\left(-\frac{a_L\xi^2}{a_S}\right)}{\lambda_L\sqrt{a_S}(T_{CONC,DEC} - T_{MLT})\operatorname{erfc}\left(\xi\sqrt{\frac{a_L}{a_S}}\right)} \\ - \frac{\xi\Delta h_L\sqrt{\pi}}{C_L(T_{CONC,DEC} - T_{MLT})} - \varepsilon \end{aligned} \quad (3-70)$$

式中の ε は求解のために導入したシフト量である。 $F(\xi^*) = 0$ となる ξ^* が係数 ξ の解となる。

係数 ξ の求解

ここで係数 ξ の解の存在について確認する。分解温度を 1500K とし、表 4.3.1 の物性値を設定して、表面温度 T_B を変更した場合の $F(\xi)$ を図 3-15(a)に示す。表面温度が 1900K 以上では解 ($F(\xi^*) = 0$) が存在しなくなる。グラフから $F(\xi)$ を 3 程度シフトさせることで解を得ることが期待できる。このシフト量は $10^0 \leq |F_0(\xi)| \leq 10^3$ ($0 \leq \xi \leq 0.3$) の範囲にある。シフト量について $\varepsilon = 3$ とした場合の $F(\xi)$ を図 3-15(b)に示す。シフト量を設定したときの ξ^* は二分法で求める。シフト量を導入して表面温度 T_B を変化させた場合の係数 ξ の近似解を求めた結果及び分解相と固相の界面位置をそれぞれ、図 3-16 及び図 3-17 に示す。

表 3-13 コンクリート分解温度試計算の設定値

項目	内容	設定値
T_M	分解温度(K)	1500
T_0	初期温度(一定)(K)	300
λ_L	分解相の熱伝導率(W/m·K)	0.1 (固相の熱伝導率 λ_S の 0.1 倍程度)
λ_S	固相の熱伝導率(W/m·K)	1.0
a_L	分解相の熱拡散率(m ² /s)	2.75E-08 ($a_L = \lambda_L / (\rho_L C_L)$)
a_S	固相の熱拡散率(m ² /s)	2.75E-07 ($a_S = \lambda_S / (\rho_S C_S)$)
Δh_L	分解潜熱(J/Kg)	3255457.0
C_L	分解相の比熱(J/Kg·K)	475.9 (固相の比熱 C_S を使用)
C_S	固相の比熱(J/Kg·K)	475.9 (構成要素の含有比から計算)
ρ_L	分解相の密度(Kg/m ³)	7654.3 (固相の密度 ρ_S を使用)
ρ_S	固相の密度(Kg/m ³)	7654.3

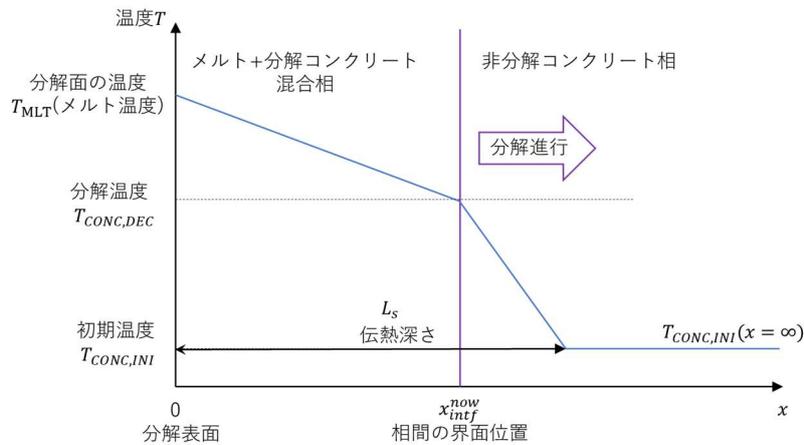


図 3-14 コンクリート分解開始後の温度分布

3.3.2 MCCI モジュールによる実験解析

3.3.2-1 MCCI モジュールによる MACE-MO 解析条件

ここでは、3.3.1 で構築したモデルをコードに実装し MACE-MO を対象に解析を行った。基本的な解析体系等は 3.2 と同様に設定した。

熔融物の総質量は 130 kg、初期温度を 2000 K、直接電気加熱は図 3-1 をテーブル入力した。熔融物（コリウム）の成分比及び各成分の密度は表 3-14 のように設定した。

床材であるコンクリートの分解温度は 1295 K、分解熱は 2.27 MJ/kg、熱伝導度は 1.0 W/(m·K)とした。熔融物と構造材（コンクリート床）の熱伝達率は 100 W/(m²·K)とした。コンクリート分解により発生したガス（CO₂, H₂O）のうち熔融物の金属成分と化学反応する割合は 100%とした。熔融物と水の間熱伝達率は 1000 W/(m²·K)とした。また、以上の設定をケース(a)として、熔融物の上部の水を気相にしたケース(b)の解析を行った。

表 3-14 コリウム成分比・密度

	weight %	kg/m ³
Fe	0	6980
Zr	0.04	5800
Cr	0	6300
Ni	0	7810
UO ₂	0.56	8640
ZrO ₂	0.11	4700
FeO	0	7080
CaO	0.03	3000
SiO ₂	0.03	2300
Al ₂ O ₃	0	2500
Cr ₂ O ₃	0	5000
NiO	0	6670
MgO	0	3580
SiO	0	2650

3.3.2-2 MCCI モジュールによる MACE-M0 解析結果

図 3-18 は解析結果の溶融物の温度である。ケース(a)では溶融物温度がおよそ 110 秒で床材であるコンクリートの分解温度を下回る結果となった。これは実験結果や MELCOR による解析よりもかなり早期にコンクリートの侵食が止まる結果となった。また、ケース (b)はケース(a)に比べて温度降下が緩やかである。現状では、コンクリートよりも水への熱移行が優越していることを示す。

図 3-19(1)は溶融物からコンクリートへの熱流束である。コンクリートの融点以下になった 100 秒以後も、熱移行が行われている。水を設定したケース(a)でコンクリートへの熱流束が早期に小さくなっている。これは、ケース(a)では溶融物の温度低下が早く、コンクリートとの温度差が小さくなったことによると考えられる。図 3-19 (2)は溶融物からの熱移行量の履歴である。どちらのケースでも水あるいは気相側への熱流出が主となっている。図 3-20 は解析によるコンクリートの侵食深さ(a)を示す。(b)は単位時間当たりのコンクリート分解の体積である。

図 3-21 はコンクリート分解時に、溶融物に含まれる未酸化の金属による反応 (式 3-31) の結果発生する可燃性ガスである水素 (H_2) 及び一酸化炭素 (CO) の累積の発生量を示す。コンクリートの分解が停止するまで発生が継続した。図 3-22 はケース(a)における式 3-31 の化学反応ごとのガス発生量を示す。 H_2 では式(3-31)-(1)による発生、COでは式(3-31)-(2)による発生のみであり、他の式による発生はなかった。これは、現状のモデルでは式の番号が若い反応を優先して計算するためである。

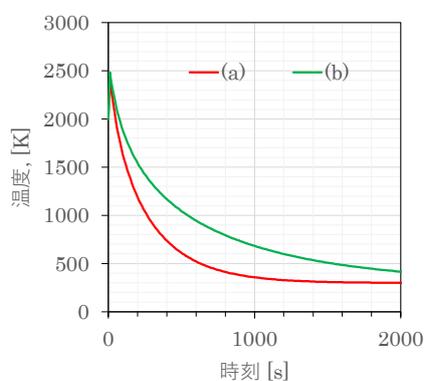
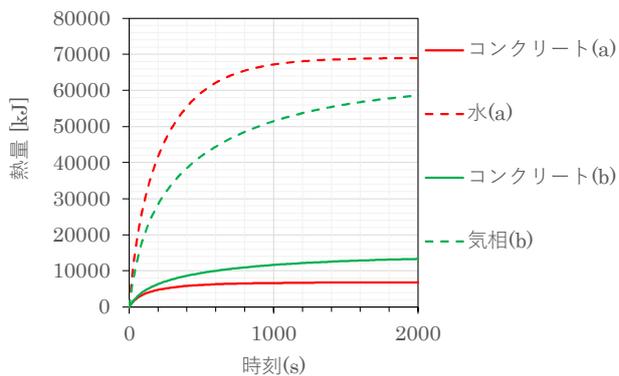
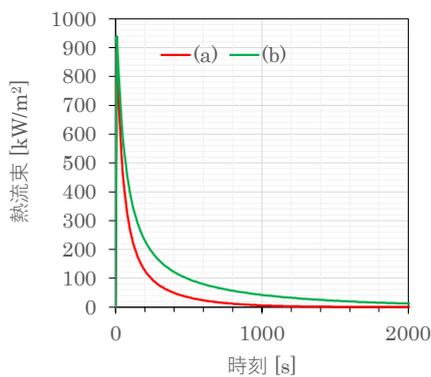
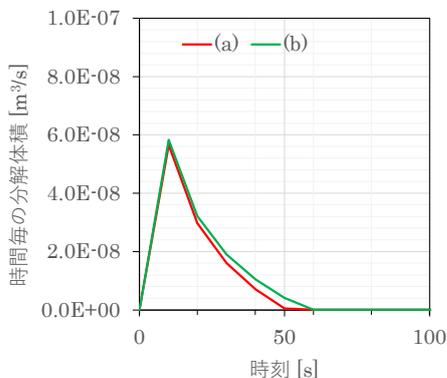
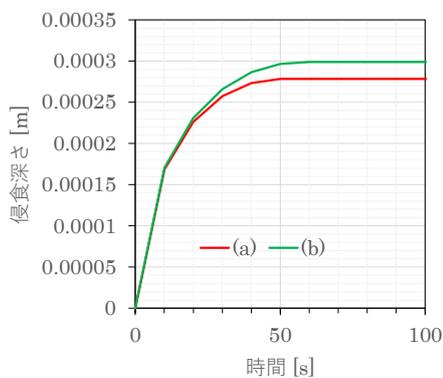


図 3-18 溶融物温度



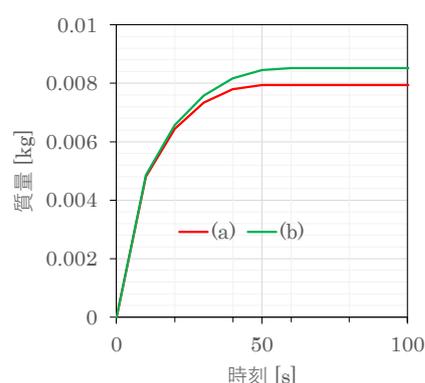
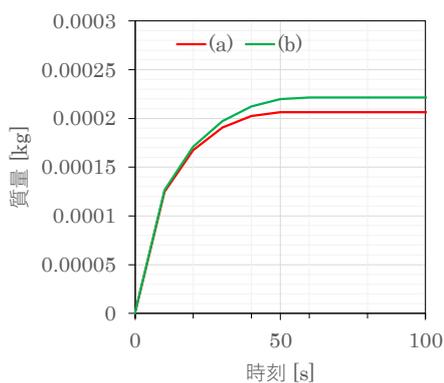
(1) 溶融物からコンクリートへの熱流束 (2) 溶融物からの熱移行量

図 3-19 溶融物からの熱流出



(a) コンクリートの侵食深さ (b) 時間毎のコンクリートの分解体積

図 3-20 コンクリートの侵食



(a) 累積の H₂ 発生量 (b) 累積の CO 発生量

図 3-21 コンクリート分解による累積のガス発生量

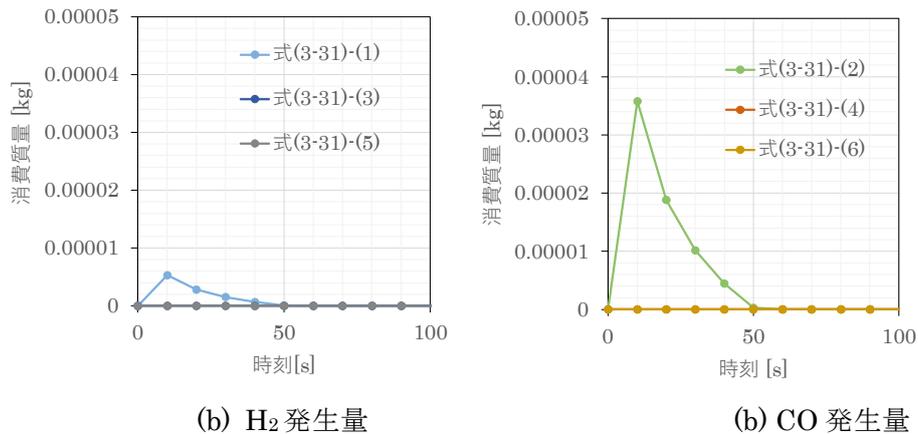


図 3-22 化学反応ごとのガス発生量

3.3.2-3 MCCI モジュールによる解析のまとめと課題

MCCI モジュールを用いて MACE-M0 実験を対象とした解析を行った。溶融物の温度がコンクリート融点以上でコンクリートの分解、発生したガスの化学反応等が計算されており、物質や熱移行そのものは行われている。しかしながら、現状ではコンクリートへの熱流束が早期に低下したことにより、溶融物温度が実験よりもかなり早期にコンクリート融点を下回り、コンクリートの溶融侵食が停止した。

この原因として考えられるのは、温度分布を考慮せず、熱の流出先であるコンクリートや水あるいは気相の温度の上昇がほとんどないためと考えられる。

また、可燃性ガスである水素や一酸化炭素は計算の結果取得できるが、Zr の反応のみが進んでいる状態である。ある状態でどの反応が進行するかは化学平衡や化学反応速度を考慮した計算が必要になるとと思われる。

3.4 まとめ

MELCOR コードによる MCCI 実験の解析

MELCOR2.2 を用いて MACE-M0 実験と VULCAN VF-U1 実験を対象とした解析を行った。MACE-M0 実験および VULCANO-VF-U1 実験を対象とした MCCI 実験解析では、コンクリート侵食に影響を及ぼすと予想されるパラメータを選定し、各パラメータを変更した解析 (15 ケースずつ) を実施した。入力パラメータと出力データの相関を分析した結果、HTRBOT、HTRSIDE、GFILMBOT、GFILMSIDE といった溶融コリウムとコンクリート間の熱伝達に関するパラメータはコンクリート侵食量に影響した。一方で、COND.CRUST と ERUPT については今回値を振った範囲ではコンクリート侵食量にほとんど影響は無い。MIXING を変更すると、コンクリート侵食量やクラスト厚みに対して底面方向と側面方向で差異が生じる。WATINGR を ON にして浸水モデルを適用すると水プールへの除熱量が増えて溶融コリウム温度が下がるが、融点以下まで温度が低下した後に

急激な温度上昇が見られるため、浸水モデルを適用した場合の挙動については更なる調査が必要である。

シビアアクシデント解析コードのMCCI計算モジュール整備

MCCI計算モジュールの、コリウム（溶融物）からコンクリートへの伝熱、コンクリート分解、生成ガスと金属との化学反応、気相及び液相との伝熱等の物理モデルをまとめた。昨年度検討したコンクリートへの伝熱モデルを組み合わせて単体の計算コードとして実装した。実装したMCCI計算モジュールを用いて、MACE-M0実験を対象に解析を行った。現状での結果は、熱の移行や、物質の状態変化、反応ガスの生成と化学変化自体は計算できているが、実験の再現性と同時に各モデルを個別に検証していくことが必要だと考えられる。

参考文献

- [1] “MELCOR Computer Code Manuals Primer and Reference Manual Version 2.2”, SAND2021-0241, Sandia National Laboratories.
- [2] “MELCOR Computer Code Manuals Primer and User’s Guide Version 2.2”, SAND2021-0726, Sandia National Laboratories.
- [3] M.T.Farmer, et. al., OECD MCCI Project, Final Report, OECD/MCCI-2005-TR06, Feb 28, 2006.
- [4] W. Spencer, “RESULTS OF MACE TESTS M0 and M1”, Second OECD (NEA) CSNI Specialist Meeting on Molten Core Debris-Concrete Interactions, NEA/CSNI/R (92) 10 (1992).
- [5] S. Levy, M.T. Farmer, “MELT ATTACK AND COOLABILITY EXPERIMENTS (MACE) SUMMARY REPORT”, December 5, 2002.
- [6] V. Bouyer, C. Journeau, J.F. Haquet, P. Piluso,” LARGE SCALE VULCANO MOLTEN CORE CONCRETE INTERACTION TEST CONSIDERING FUKUSHIMA DAIICHI CONDITION”, The 9TH European Review Meeting on Severe Accident Research (ERMSAR2019), Clarion Congress Hotel, Prague, Czech Republic, March 18-20, 2019.
- [7] WooHyun Jung, Byoungcheol Hwang, Hyun Sun Park, Kiyofumi Moriyama, “Simulation of CCI experiments for the sensitivity analysis with MELCOR 2.2”, Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting, Yeosu, Korea, October 25-26, 2018.
- [8] V. Bouyer, C. Journeau, J.F. Haquet, P. Piluso,” LARGE SCALE VULCANO MOLTEN CORE CONCRETE INTERACTION TEST CONSIDERING FUKUSHIMA DAIICHI CONDITION”, The 9TH European Review Meeting on Severe Accident

Research (ERMSAR2019), Clarion Congress Hotel, Prague, Czech Republic, March 18-20, 2019.

[9] 日本機械学会, "伝熱工学資料 改訂第4版", 1986.

4. JASMINE コードの改良とインターフェイス開発

4.1. 実施目的

軽水炉の過酷事故(シビアアクシデント)では、熔融炉心-コンクリート相互作用(MCCI)が発生する可能性がある。このとき、コンクリートの侵食により可燃性ガスが発生する。発生した可燃性ガスが原子炉建屋上部に滞留することにより、爆発的な燃焼が発生する可能性がある。総合シビアアクシデント解析コードでは、熔融物の粒子化、粒子化した熔融物の集積及び床面での拡がりといった熔融炉心の移行に伴う現象を考慮せず、瞬時に均一の形状及び構造で形成されたデブリベッドが堆積することを仮定して MCCI を解析する。熔融炉心の移行に伴う現象を考慮していないため、総合シビアアクシデント解析コードを用いた解析結果には不確かさが存在する。本事業では、熔融炉心の移行に伴う現象を考慮した MCCI を解析することにより、可燃性ガスの発生に関する不確かさを低減することを目的とする。

4.2. 実施内容

可燃性ガスの発生に関する不確かさを低減するためには、熔融炉心の移行に伴う現象を考慮する必要がある。熔融炉心の移行に伴う現象を考慮するために、JASMINE コードを用いて熔融物の粒子化、粒子化した熔融物の集積及び床面での拡がりを解析することとした。解析結果に基づき、熔融炉心の移行に伴うデブリの形状及び構造を把握する。本事業では、総合シビアアクシデント解析コードに組み込まれた MCCI コードと JASMINE コードとの連成解析により、可燃性ガスの発生量を定量化する手法を構築する。連成解析のために、JASMINE コードの改良を行うとともに JASMINE コードの解析結果を MCCI コードに受け渡すインターフェイスを開発した。

4.3. インターフェイスの概要

JASMINE コードでは、MCCI の解析を直接的に取り扱えないため、JASMINE コードの解析結果を初期条件もしくは境界条件として MCCI コードに受け渡す必要がある。MCCI コードは、入力ファイルとして json 形式のファイルを読み込む。このため、JASMINE コードより出力された解析結果を読み込み、指定する json 形式のファイルに書き込む入力ファイル作成ツール(以下インターフェイス)を作成した。インターフェイスの言語は Fortran90 とする。規格は Fortran90 以降とする。

インターフェイスは、指定する json 形式のファイルをテンプレートとして読み込む。テンプレートでは、JASMINE コードの解析結果を書き込む箇所にシンボル(e.g., @)が付されている。インターフェイスでは、シンボルが付された箇所を解析結果と置き換える。シンボルと解析結果を置き換えたファイルを入力ファイルとしてテンプレートとは別に出力する。

JASMINE の解析結果から MCCI へ受け渡すデータは、床に堆積した熔融物プールの質

量 (kg)、溶融物温度 (K)、床面温度 (K)、溶融物プール上部の気相及び冷却水温度 (K)、溶融物—床面間の熱伝達率 ($W/m^2 \cdot K$) 及び溶融物—冷却水間の熱伝達率 ($W/m^2 \cdot K$) である。床に堆積した溶融物プールの質量は、溶融部と表面及び底クラストの合計の質量とする。溶融物温度は、溶融部と表面及び底クラストの内部エネルギーの合計を溶融物プールの総質量で除した単位質量あたりの内部エネルギーからニュートン法を使用して算出する。床面温度は、床表面の温度の水平方向の平均を取る。JASMINE コードでは計算領域をメッシュに区切っている。計算領域の左側の計算メッシュ番号 1 から水平方向に存在するメッシュ番号 n までのデータの平均値を取ることで水平方向の平均を取る。溶融物プール上部の気相温度は、冷却水が存在しない場合に MCCI コードの入力で必要となる。指定した高さのメッシュに対して、気相温度の体積平均を水平方向に取る。溶融物プール上部の冷却水温度は、冷却水が存在する場合に MCCI コードの入力で必要となる。指定した高さのメッシュに対して、冷却水温度の体積平均を水平方向に取る。MCCI コードは、溶融物プールの上部はすべて気相もしくは冷却水のどちらかが存在することにしか対応していない。このため、MCCI コードの計算では、溶融物プール上部の気相温度もしくは冷却水温度のどちらかしか使用しない。溶融物—床面間の熱伝達率 λ_{mf} は、以下の式 (4-1)、式 (4-2) 及び式 (4-3) を使用して算出する。

$$\lambda_{mf} = \frac{\Delta q_{mftot} \times A_x}{\Delta T_{mftot} \times A_x} \quad (4-1)$$

$$\Delta q_{mftot} = \sum_{i=1}^X q_{mf} \quad (4-2)$$

$$\Delta T_{mftot} = \sum_{i=1}^M (T_{btm} - T_{fsurf}) \quad (4-3)$$

ここでは、 Δq_{mftot} : 溶融物—床面間の熱流束 q_{mf} の水平方向の合計 (W/m^2)、 A_x : 溶融ジェット落下地点から溶融物プールの拡がり方向の先端位置 (以下、溶融物先端位置) が存在するメッシュまでの流路面積 (m^2)、 X : 計算領域の右側の壁が存在するメッシュ番号 (-)、 ΔT_{mftot} : 床面と接する溶融物プール下端の温度 T_{btm} と床面の表面温度 T_{fsurf} との温度差の水平方向の合計 (K)、 M : 溶融物先端位置が存在するメッシュ番号 (-) をそれぞれ示す。JASMINE コードは 1 次元解析コードであるため、流路面積と溶融物プールの拡がり面積が同一となる。溶融物—冷却水間の熱伝達率 λ_{ml} は、以下の式 (4-4)、式 (4-5) 及び式 (4-6) を使用して算出する。冷却水が存在しない場合 (ボイド率 $\alpha > 0.999$) は、温度差を計算する計算式が変更になり式 (4-6) の代わりに式 (4-7) を使用する。

$$\lambda_{ml} = \frac{\Delta q_{mltot} \times A_x}{\Delta T_{mltot} \times A_x} \quad (4-4)$$

$$\Delta q_{mltot} = \sum_{i=1}^X q_{ml} \quad (4-5)$$

冷却水が存在する場合

$$\Delta T_{mltot} = \sum_{i=1}^M (T_{surf} - T_{liq}) \quad (4-6)$$

冷却水が存在しない場合

$$\Delta T_{mltot} = \sum_{i=1}^M (T_{surf} - T_{wsat}) \quad (4-7)$$

ここで、 Δq_{mltot} : 溶融物—冷却水間の熱流束 q_{ml} の合計 (W/m^2)、 T_{surf} : 冷却水と接する溶融物プール表面の温度 (K)、 T_{liq} : 溶融物プールと接する冷却水温度 (K)、 T_{wsat} : 冷却水の飽和温度 (K)、 ΔT_{mltot} : T_{surf} と T_{liq} もしくは、 T_{surf} と T_{wsat} との温度差の合計 (K) をそれぞれ示す。

床面温度は水平方向の平均、溶融物プール上部の気相及び冷却水温度では、指定した高さ方向のメッシュから水平方向の平均を取る。この水平方向の平均を取る範囲及び水平方向の平均を取る高さは、インターフェイス実行時のオプションで指定できる。水平方向の平均を取る範囲は、2つのオプションがある。1つ目は、範囲をペDESTAL領域とする。ペDESTAL領域とは、計算領域の左側のメッシュ番号 1 から計算領域の右側の壁が存在するメッシュ番号 X までの範囲をペDESTAL領域と呼称する。2つ目は、計算領域の左をメッシュ番号 1 として溶融物先端位置の存在するメッシュ番号 M までの範囲とする。2つのオプションの内、ペDESTAL領域がデフォルトとなっている。水平方向の平均を取る高さは、床面と接している計算メッシュ番号 1 から計算領域の最上部の計算メッシュ番号 Z の中から指定する。このオプションでは、高さ方向のメッシュ番号 3 がデフォルトとなっている。その他にインターフェイスを実行する際に、引数として JASMINE コードの解析結果を読み込む時刻もしくは時間幅（読み込み開始時刻と終了時刻）を指定する。時間幅を指定した場合には、JASMINE コードの解析結果の時間平均を出力する。

現状の JASMINE コードでは、溶融物から床面への熱伝達、床面内部における熱伝導及び熱分解ガスの発生を解析できる。ただし、熱分解ガスの発生は疑似的に取り扱う。床材にコンクリートを指定できる解析体系を 2 つ設定できる。有限の厚さを有する床面を解析体系に設定した場合及び無限の厚さを有する床面を解析体系に設定した場合である。有限の厚さを有する床面に設定した場合は、入力で床材の物性値をコンクリートの物性値に設定

しなければならない。無限の厚さを有する床面に設定した場合は、JASMINE コードでは、床内部の計算がコンクリートである前提で実行されるため、入力でコンクリートの物性値を設定しなければならない。MCCI コードの入力ファイルに記載するコンクリートの物性値（分解温度、熱伝導率及び輻射率等）は、JASMINE コードの入力ファイルの物性値と整合するように手動で書き込む必要がある。

4.4. JASMINE コード改良

MCCI コードに受け渡す 7 つの解析結果（床に堆積した溶融物プールの質量、溶融物温度、床面温度、溶融物プール上部の気相及び冷却水温度、溶融物—床面間の熱伝達率及び溶融物—冷却水間の熱伝達率）は、溶融物全般のデータのヒストリファイル `out.mlt` に出力するように改修した。`out.mlt` に出力される解析結果の内、床面温度、溶融物プール上部の気相及び冷却水温度は、それぞれデフォルトの範囲の平均値を出力する。インターフェイスでデフォルト以外の範囲を指定した場合は、二相流及び溶融物のバイナリ出力ファイルからデータを読み込んでインターフェイス内で床面温度、溶融物プール上部の気相及び冷却水温度の平均値を算出して MCCI コードの入力ファイルに書き込まれる。

4.5. まとめ

JASMINE コードでは、MCCI の解析を直接的に取り扱えないため、JASMINE コードの解析結果より、溶融物から床面への熱伝達に関する解析結果を境界条件として MCCI コードに受け渡す。この受け渡しを行うために、JASMINE コードの出力データ及び出力ファイルの追加等を行い、MCCI コードへのインターフェイスを作成した。

5. 実機を対象とした MCCI 解析

5.1 概要

この章では、整備しているシビアアクシデント解析コードの MCCI モジュールを用いて、実機の MCCI 解析について述べる。本解析では、JASMINE コードの入力パラメータとなる溶融物条件はシビアアクシデント (SA) 総合解析コード MELCOR1.8.5 による解析の結果から決定することとした。プラントの条件や、事故シナリオは公開資料を基に設定した。

解析結果から溶融物条件を抽出し、JASMINE コードによる格納容器内の溶融物堆積状態の解析を行った。さらに、JASMINE コードによる解析結果から、4 章で構築したインターフェイスを用いて、溶融物堆積条件から必要なデータを抽出し、3 章で構築した MCCI 解析モジュールによる解析を行った。ただし、現状の MCCI 解析モジュールは開発途中のものであることに留意が必要である。

5.2 MELCOR による溶融物条件解析

格納容器内に落下する溶融物条件はシビアアクシデント (SA) 総合解析コード MELCOR による解析で求める。ただし、ここで使用したのは、バージョン 1.8.5[5.1]である。公開資料を基に解析対象のプラントの条件、事故シナリオ等を設定した[5.2][5.3][5.4][5.5]。

解析対象は、Mark-I 型格納容器を持つ定格出力 840MWe の BWR4 である。入力ファイルを作成するにあたり、原子炉のデータを種々の公開文献から値を推定した。表 5.1 に主要なプラント条件を示す。図 5.1 及び図 5.2 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。

本解析では LOCA を解析対象として、事故シナリオを設定した。設定値は公開情報を基にしているが、現実と異なる場合もある。表 5.2 にはベースとした大破断 LOCA シナリオにおける発生イベントを示す。LOCA の破断箇所は原子炉再循環系の配管 (図 5.2 の LOOP A) とした。冷却材が流出すると、原子炉水位が低下する。原子炉水位が L1

(9.465 m) に到達時に低圧注水 (LPCI) が作動する。LPCI は原子炉水位が L2 (11.965 m) を超えると注水停止する。また、L1 を下回ると注水は再開される。LPCI のポンプは非常用ディーゼル発電機 (EDG) により作動する。EDG は LOCA 発生から最大 24 時間まで稼働するとして、LPCI による注水が不可能になると、LOCA の破断口から原子炉内冷却水が流出し、燃料被覆管の損傷後、原子炉下部ヘッドに損壊・溶融した燃料が堆積する。下部ヘッドを加温して、下部ヘッドの貫通部が破損温度 (TPFAIL) を超えた時下部ヘッド破損と判定される。本事故シナリオでは原子炉隔離時冷却系 (RCIC) 及び高圧注水系 (HPCI) は不作動とした。また、LOCA によって流出する冷却水は格納容器内ペデ

スタルの水位等に影響がする可能性があるが、MELCORの結果は溶融物の放出条件を取得するのみとして、JASMINE計算では事故対策として任意の水位を設定するものとした。

IDEJ オプションの設定

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

溶融物条件の抽出

MELCORからCOR-Mxx-DBのデータを溶融炉心の物質ごとの質量として抽出した。COR-MEJEC-TOTを溶融物放出量、COR-ABRCHを下部ヘッ드의損傷面積として抽出した。

不確かさパラメータ

下記の3つのパラメータを選択して解析を行ったが、練成解析の成立性の確認が目的のため、JASMINE計算で、計算が正常に終了したケースについて表5.3に掲載する。

- LOCA面積 (LOCAAREA：最大値：0.77m²、最小値：0.0127m²)
- EDG故障発生時間 (EDGFAILTIME：最大値：24h、最小値：0s)
- 下部ヘッ드의貫通物の破損温度 (TPFAIL：最大値 1400°C、最小値 900°C)

表 5.4 抽出した圧力容器から格納容器内に流出する溶融物条件を示す。

表 5.1 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 4.3.2 MELCOR 解析におけるボリューム分割参照	下部ヘッ드의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	ドライウエル空間 (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

表 5.2 大破断 LOCA シナリオにおける発生イベント

イベント	時間 [s] or 作動条件	イベントについての詳細情報
大破断 LOCA	0.0	破断箇所は、原子炉再循環系の配管。 破断面積の最大値：0.77m ² ←配管直径 0.7m の断面積 0.385m ² の 2 倍（ギロチン破断を想定） 破断面積の最小値：0.0127m ² ←NUREG-1150 より、直径 5 インチ以上の円の破断面を大 LOCA と定義 破断面積は、サンプリングにより決定。
原子炉スクラム	0.0	
LPCI 作動	原子炉水位が L1(9.465m)に到達時	20 秒の作動遅れの後に作動。 注水は、原子炉内の圧力が 3.1MPa(=31.7kg/cm ²)以下に達してから開始する。注水量は 500kg/s (=1800t/h)。 注水先は炉心上部（シュラウド内部に注水）
LPCI の注水停止/再開	原子炉水位が L2 を越えると注水停止、L1 を下回ると注水再開。	L2 の水位は、11.965m。 L1 の水位は、9.465m。
EDG 故障	大破断 LOCA 発生から 0 秒～24 時間後	EDG が故障すると、LPCI の注水は不可になる。 故障発生時刻は、サンプリングにより決定。
↓ LPCI が注水不可になれば、LOCA の破断口から原子炉内の冷却水が流出し、燃料被覆管の損傷、炉心溶融、下部ヘッドの破損に至る。		
下部ヘッド破損	下部ヘッドの貫通物が破損温度(TPFAIL)を越えた時	破損温度(TPFAIL)は、最小 900°C、最大 1400°C。破損温度は、サンプリングにより決定。

表 5.3 MELCOR による解析のパラメータ

case	LOCAAREA	EDGFAILTIME	TPFAIL
1	0.6908	82600	1255.45
2	0.02348	6364	1186.45
3	0.03371	85110	1628.15
4	0.09598	16810	1620.15
5	0.7202	19380	1466.15
6	0.1574	58790	1523.15
7	0.557	36010	1359.15

表 5.4 抽出した圧力容器から格納容器内に流出する主な溶融物条件

case	溶融物温度	UO2 質量割合	Zr 質量割合	SS 質量割合	ZrO2 質量割合	酸化 SS 質量割合	B4C 質量割合
1	2216.2	0.5307	0.0922	0.1939	0.1551	0.0218	0.0064
2	2386.9	0.6600	0.1247	0.0444	0.1606	0.0043	0.0060
3	2193.1	0.5362	0.1047	0.2009	0.1409	0.0108	0.0065
4	2098.0	0.5955	0.1511	0.0730	0.1485	0.0226	0.0094
5	2088.8	0.5582	0.1845	0.1090	0.1271	0.0095	0.0117
6	2074.0	0.5570	0.1050	0.1695	0.1497	0.0121	0.0067
7	2098.0	0.5626	0.1671	0.1396	0.1029	0.0181	0.0097

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

☺ 数字はセル番号を表す

図 5.1 MELCOR 解析における炉心部セル分割

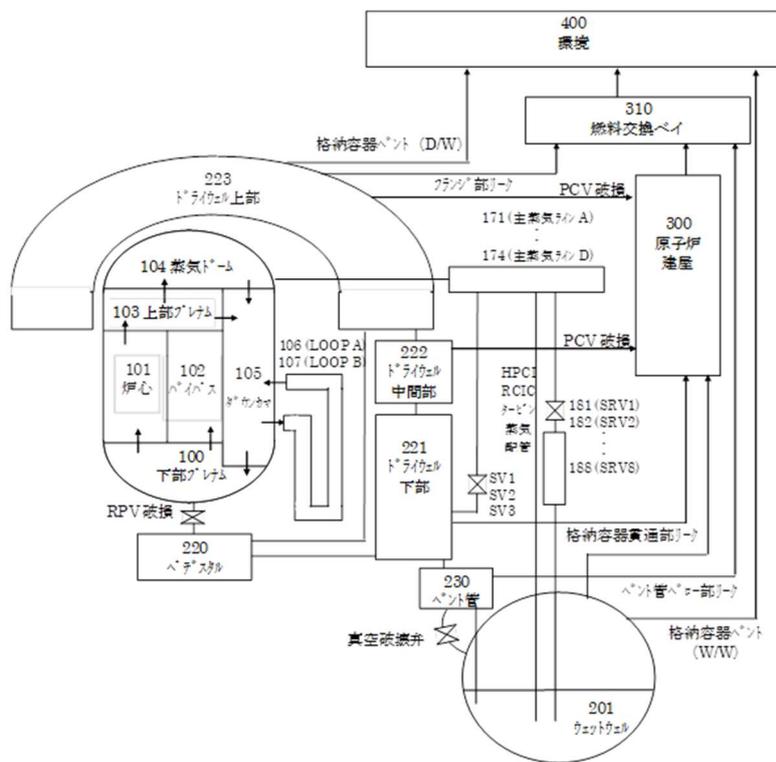


図 5.2 MELCOR 解析におけるボリューム分割

5.3 JASMINE による溶融物の堆積条件解析

MELCOR 解析結果から抽出した溶融物条件を用いて格納容器内における溶融物の挙動を JASMINE コードにより解析する。この解析は、MELCOR の解析とは切り離して実施しており、出力 820MWe の Mark-I 改良型格納容器のモデリングとした。格納容器内の床面はサンプピット等がない水平な平面とし、格納容器内の初期圧力は大気圧とした。

また、ここでは、ペDESTAL領域に事故対策として溶融炉心落下前に注水が行われているとして 1.0 m の水位を設定した。表 5.6 は JASMINE による解析結果から抽出した溶融物の堆積条件である。

表 5.6 抽出した JASMINE コードによる溶融物堆積条件

		1	2	3	7	5	6	7
溶融物質量	kg	524	779	543	811	1034	123	804
溶融物温度	K	2063.8	2307.1	2108.5	2050.6	2017.1	2068.1	1874.7
拡がり直径	m	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	2.0	6.0
床温度	K	1106.6	1100.5	1123.8	1092.0	1083.6	1477.1	1079.2
気相温度	K	370.6	377.5	341.8	378.4	386.1	304.7	401.4
冷却水温度	K	369.3	376.9	339.1	377.5	385.5	303.9	401.8
溶融物-床面の熱伝達率	W/(m ² K)	281.7	246.3	302.3	249.1	235.0	250.5	237.0
溶融物-冷却水の熱伝達率	W/(m ² K)	167.8	135.9	173.5	192.5	191.9	848.9	283.0

5.4 MCCI モジュールによる解析

ここでは、5.3 で抽出したデータを用いて MCCI モジュールによる解析を実施した。主要な結果を図 5.3 から図 5.8 に示す。3 章で示されたように、現状では熱移行が過大評価される。そのため、溶融物温度は早期にコンクリートの溶融温度以下となり、コンクリートの溶融侵食は停止する。図 5.5、図 5.7 及び図 5.8 より、ケース 2 は最もコンクリートの侵食が進み、可燃性ガスである H₂ 及び CO の発生量が多くなった。これはケース 2 が最も初期の溶融温度が高いケースであるためと考えられる。

表 5.7 は JASMINE の出力である溶融物の堆積状態と、解析結果の最終時刻のコンクリート侵食深さ、H₂ 及び CO の発生量との相関を示す。コンクリート侵食深さは溶融物の初期温度に相関が強いが、可燃性ガスの発生量に対しての相関はそれほど強くない。一方、溶融物質量はコンクリートの侵食深さに相関はあまりなく、可燃性ガスの発生量には相関が強いという結果になった。

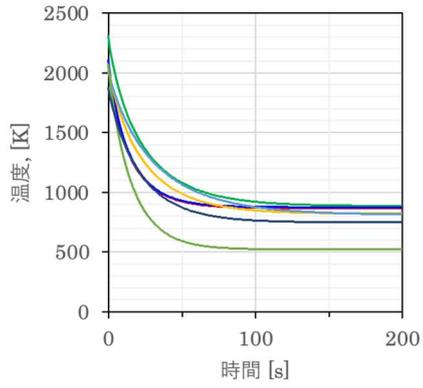


図 5.3 溶融物温度

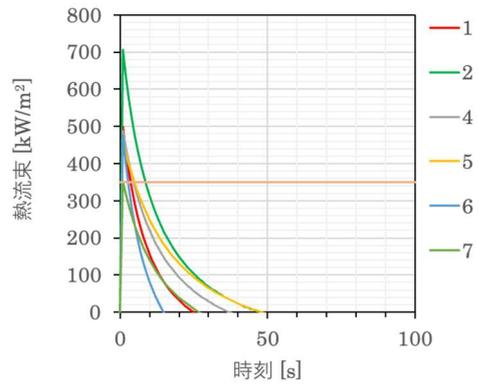


図 5.4 溶融物からコンクリートへの熱流束

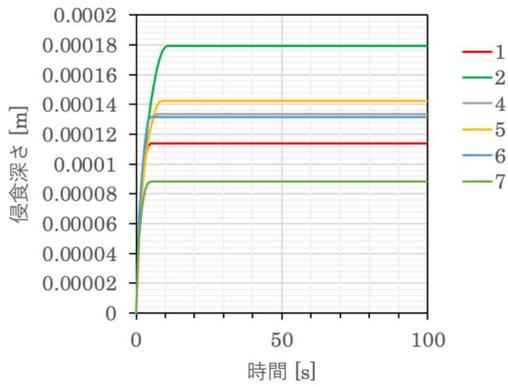


図 5.5 コンクリートの分解深さ

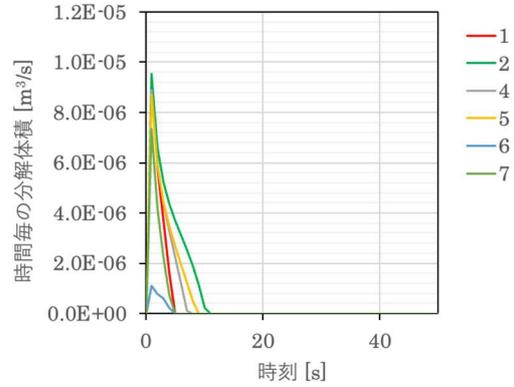


図 5.6 時間あたりのコンクリート分解体積

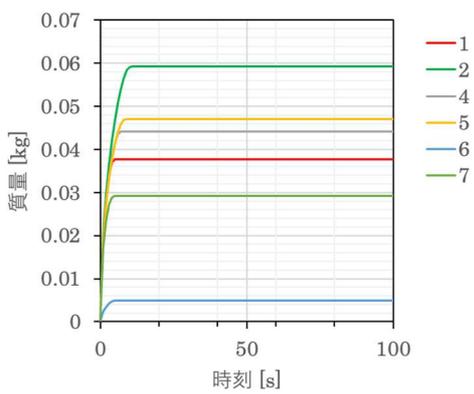


図 5.7 累積の H₂ 発生量

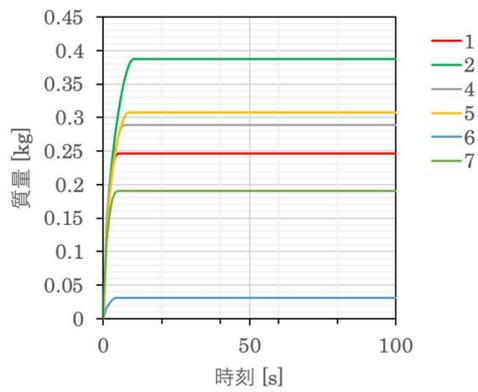


図 5.8 累積の CO 発生量

表 5.7 溶融物堆積状態とコンクリート侵食の相関

	溶融物 質量	溶融物 温度	床温度	冷却水 温度	溶融物-床 面の熱伝 達率	溶融物-冷 却水の熱 伝達率
コンクリート 侵食深さ [m]	0.131	0.901	0.028	-0.149	-0.095	-0.144
H2 発生量 [kg]	0.753	0.484	-0.830	0.615	0.053	-0.912
CO 発生量 [kg]	0.753	0.484	-0.830	0.615	0.053	-0.912

5.5 まとめ

3章で構築した MCCI 解析モジュールを用いて、実機を対象とした解析を行った。まず、MELCOR によるシビアアクシデント解析を行い、解析結果から圧力容器から放出される溶融物条件を抽出した。これを用いて JASMINE コードによる解析を行い、格納容器内の圧力容器下部に堆積する溶融物の状態を解析した。4章で構築したインターフェイスを用いて、必要なデータを抽出して MCCI 解析モジュールの解析のインプットを作成した。MCCI モジュールの解析を行い、結果を整理した。以上の一連の解析により、実機の MCCI 解析の見通しを得た。

今後は MCCI 解析モジュールの整備をすすめるとともに一連の解析を、さまざまな条件を対象にして実施することで、MCCI によるコンクリート侵食や発生する可燃性ガスの評価が可能になると考えられる。

参考文献

- [5.1] Sandia National Laboratories, “MELCOR Computer Code Manuals Primer and User’s Guide Version 1.8.5”, NUREG/CR-6119, Vol.1, SAND2000-2417/1
- [5.2] “Benchmark Study of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant (BSAF Project)”, NEA/CSNI/R(2015)18, February 2016
- [5.3] 石川 淳, 村松 健, 坂本 亨“THALES2 コードによる BWR Mark-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-Research 2005-021 (2005)
- [5.4] TEPCO et.al., Information Portal for the Fukushima Daiich Accident Analysis and Decommissioning Activities, <https://fdada.info/en/home2/>
- [5.5] 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)

6. おわりに

本事業においては、シビアアクシデント(SA)時における溶融炉心／コンクリート相互作用 (MCCI : Molten Core/Concrete Interaction) の影響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、MCCI によるコンクリート浸食量及び発生ガス量を科学的・合理的に評価する手法を構築する。今年度の事業では、MCCI に関する実験や解析事例について文献調査等を行い、従来の研究をまとめた。また、格納容器内溶融炉心挙動を評価する溶融炉心／冷却材相互作用解析コード JASMINE に関して、MCCI 解析モジュールとの連成解析のためのインターフェイスを整備した。MCCI 解析モジュールの

現状の MCCI 評価能力の確認のため、SA 解析コードである MELCOR を用いて、MCCI 実験である CCI 実験を対象とした解析を実施した。また、コンクリート浸食に影響するコンクリートへの熱伝達モデルに関する検討を行った。主要な成果は以下のとおりである。

6.1 従来の研究

MCCI に関する実験や解析事例に関して、MELCOR や CORQUENCH 等による解析や CFD との組み合わせによる連成解析の事例を調査した。実験を対象とした解析や事故耐性燃料 (ATF) の MCCI に与える影響の検討、1 次元モデルによる解析例を取り上げた。また、実機を想定し、他の解析コードと組み合わせた評価の事例について調査した。

6.2 シビアアクシデント解析コードによる MCCI 解析

MCCI の解析に重要な事象やパラメータを検討するため、MELCOR コードを用いて MACE-M0 実験及び VULCANO VF-U1 実験を対象に解析を行った。また、THALES2 コードをベースに MCCI 解析モジュールの物理モデルを整備し、昨年度検討したコンクリートへの伝熱モデルと組み合わせて実装した。これを用いて MACE-M0 実験の解析を行い課題の検討を行った。

6.2 JASMINE コード改良とインターフェイス開発

格納容器内の溶融物の堆積状態について、溶融物の粒子化、粒子化した溶融物の集積及び床面での拡がり等の溶融炉心の移行に伴う現象を考慮できる JASMINE コードの解析結果の出力データの追加等を行った。出力するのは、床に堆積した溶融物質量、溶融物温度、床の温度、溶融物上部の気相温度／溶融物上部の冷却水温度、溶融物 - 床面間の熱伝達率及び溶融物 - 冷却水間の熱伝達率である。これらの出力を MCCI 解析モジュールを用いた解析に利用した。

6.3 実機における MCCI 解析

構築した MCCI 解析モジュールを用いた解析の成立性の確認のために実機を対象とした

解析を実施した。圧力容器から放出される溶融物条件を MELCOR によるシビアアクシデント解析の結果から求めた。その条件を用いて JASMINE コードによる溶融物の堆積条件を解析した。解析結果から、整備したインターフェイスにより MCCI 解析の入力条件を抽出した。MCCI 解析モジュールにより MCCI 解析を行い、コンクリート侵食深さや発生する可燃性ガスの評価を行った。ただし、MCCI 解析モジュールは開発中のため、暫定的な結果である。複数の解析コードによる連成解析、将来的な不確かさを考慮した多ケース解析に適用可能であるという見通しを得た。

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。

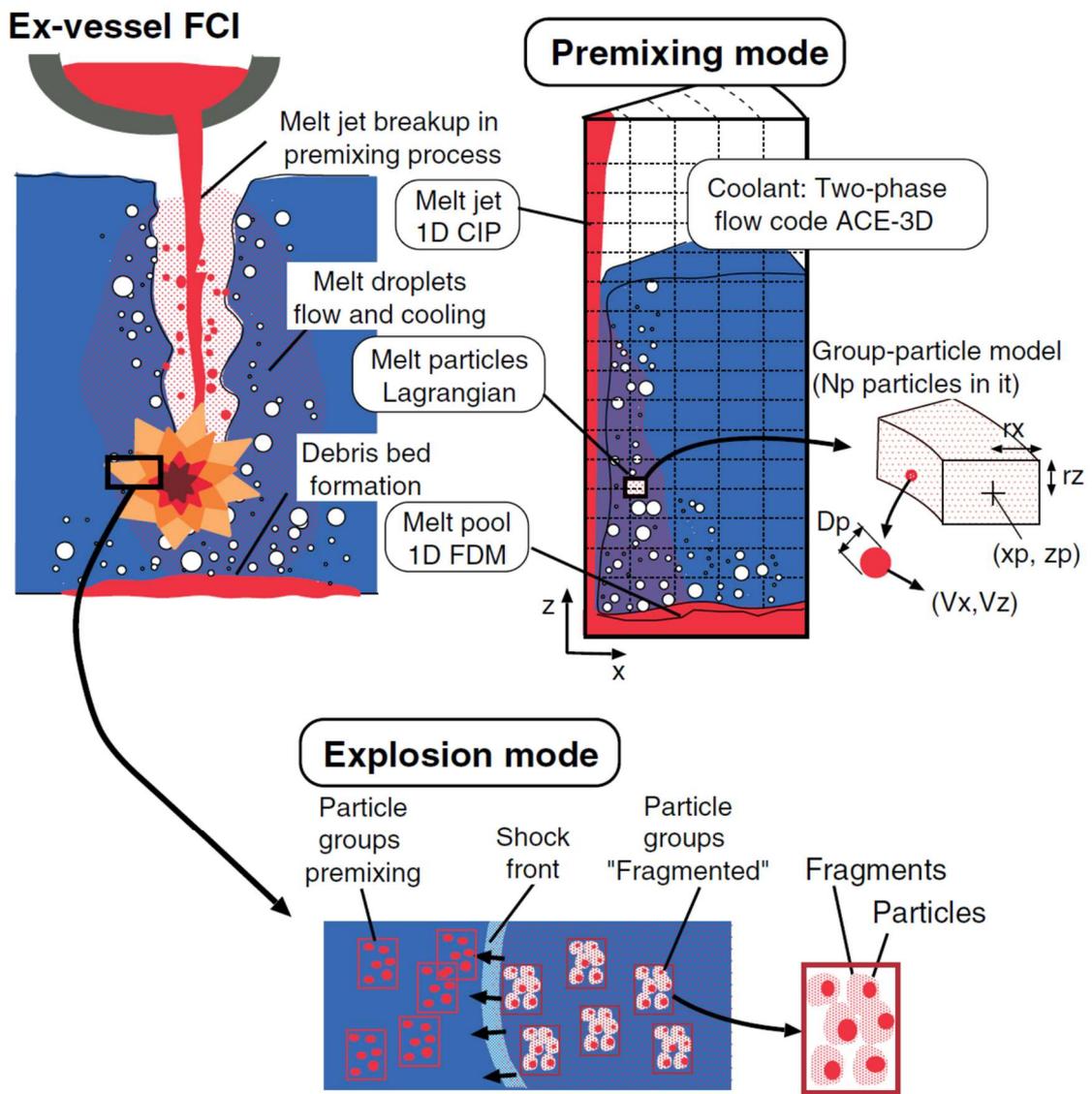


図 A.1 水蒸気爆発現象と JASMINE コードの解析モデル

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、

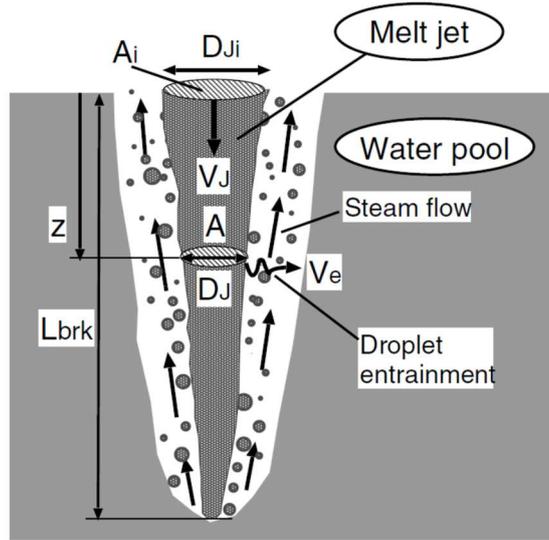


図 A.2 JASMINE コードにおける溶融物ジェットのモデル

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

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($v_{cr} = v_p$)

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

② 表面クラストが存在し、固定されている場合($v_{cr} = 0$)

$$\begin{aligned}
 \frac{v_{P,i+\frac{1}{2}}^{n+1} - v_{P,i+\frac{1}{2}}^n}{\Delta t} = & - \left[\max\left(v_{P,i+\frac{1}{2}}, 0\right) \frac{v_{P,i+\frac{1}{2}}^{n+1} - v_{P,i-\frac{1}{2}}^{n+1}}{x_{i+\frac{1}{2}} - x_{i-\frac{1}{2}}} + \min\left(v_{P,i+\frac{1}{2}}, 0\right) \frac{v_{P,i+\frac{3}{2}}^{n+1} - v_{P,i+\frac{1}{2}}^{n+1}}{x_{i+\frac{3}{2}} - x_{i+\frac{1}{2}}} \right] \\
 & - \frac{1}{\rho_{P,i+\frac{1}{2}}} \left[\frac{p_{a,i+1} - p_{a,i}}{x_{i+1} - x_i} \right. \\
 & + g \frac{[h_P \rho_P]_{i+1} - [h_P \rho_P]_{i-1} + [d_{cr} \rho_{cr}]_{i+1} - [d_{cr} \rho_{cr}]_{i-1} + [d_b \rho_{cr}]_{i+1} - [d_b \rho_{cr}]_{i-1}}{x_{i+1} - x_i} \\
 & \left. + \left[-\frac{f_{cr}}{h_p} \frac{1}{2} v_p |v_p| - \frac{f_w}{h_p} \frac{1}{2} v_p |v_p| + \frac{(v_{ms} - v_p) \max(m_{sp}, 0)}{h_p \rho_P} \right]_{i+\frac{1}{2}} \right] \quad (2.68)
 \end{aligned}$$

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

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

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。

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

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。

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

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

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

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

ここで

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

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

(6) 記号の説明

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

記号

- A : 断面積
- e : 比内部エネルギー
- g : 重力加速度
- h : 液深または比エンタルピー
- K : 摩擦係数
- m : 質量または質量速度
- p : 圧力
- R : 半径
- t : 時間
- v : 速度
- w : セクターモデルの周方向分割メッシュ幅長さ ($w = x\theta$)
- x : 水平方向座標
- z : 高さ方向座標
- α : ボイド率
- γ_k : 単位体積当たり質量変化
- κ : 熱拡散率
- λ : 熱伝導率
- ρ : 密度
- θ : セクターモデルの周方向分割メッシュ幅角度

添字

- a : 水プールを表す
- av : 平均を表す
- e : エントレインメント
- J : 溶融物ジェット (J_i 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部をグラフに示す。雰囲気圧力を大気圧とし、水プールのサブクール度をパラメータとして、溶融物の表面過熱度に対する熱流束を計算した。図 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。

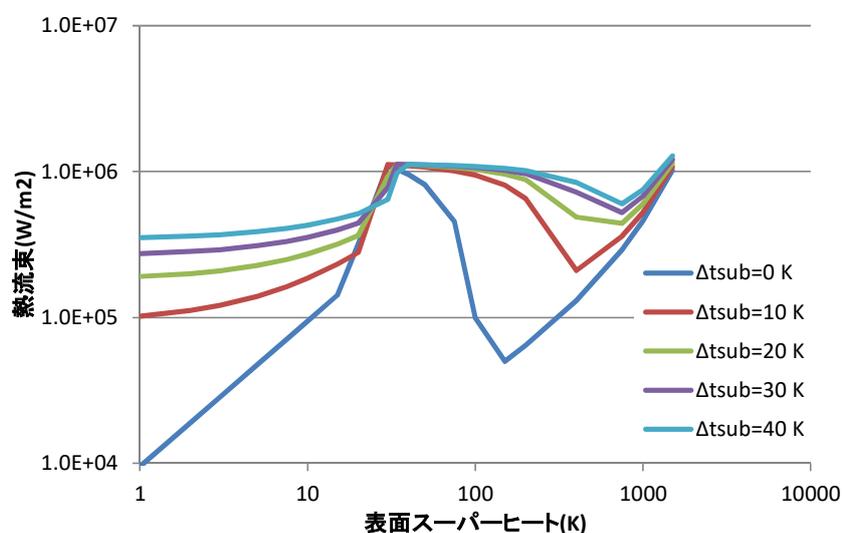


図 A.3 Jasmine 液滴表面熱流束 (大気圧, $d=3\text{mm}$, $v=0.3\text{m/s}$)

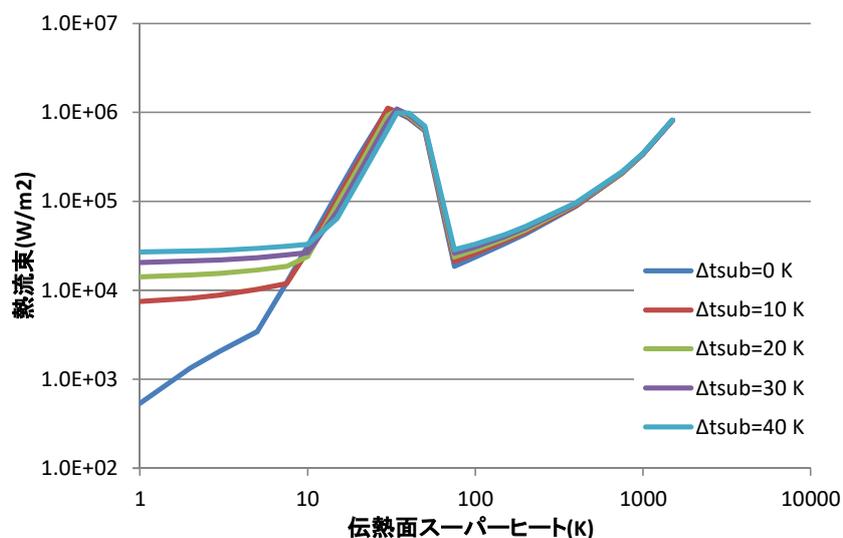


図 A.4 Jasmine プール表面熱流束 (大気圧)

C.4 コードの開発履歴と検証

JASMINE コードの開発・改良は長期間にわたり行われている。これまでの開発の経緯とコードバージョン名及び解析・比較の対象とした実験を表 A.4 に示す。JASMINE v.3 で、コードの基本式・計算手法・構成が固まり、その後、予混合過程での熔融物液滴の粒径分布考慮機能などの追加が行われてきた。平成 27 年度事業において改良したバージョンを JASMINE 4.0 とし、平成 28 年度事業において作成・改良したアグロメレーションモデル(ver. 4.0_agl) とメルトスプレッドモデル (ver. 4.0_msp) を結合したバージョンを JASMINE 4.1、とする。

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

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

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

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

表 A.4 JASMINE コードの開発・改良の経緯

バージョン名	発行/ 実施年 月	内容・参考文献	比較対象実験 及び 解析対象
JASMINE	1994	開発着手。 混相流解析コード MISTRAL を元 に予混合過程の解析部を作成。 [C.3]	Gilbertson らの非加 熱体系での実験 MAGICO 実験
JASMINE Pro	2000/12	爆発過程の解析部を作成。 ユーザーマニュアルを発行。 [C.4]	
JASMINE-pre	2004/1	水-蒸気系の計算に ACE-3D を利 用した予混合過程計算部を作成。 論文発行。 [C.5]	FARO-L24, -L31
JASMINE 3	2008/07	予混合過程・爆発過程を同一の計 算プロセスで扱うバージョンを作 成。ユーザーズマニュアルを発 行。 [C.1]	FARO-L14, -L28, - L31, -L33 KROTOS-K44, -42, - K37
JASMINE 3.3b	2010/07	プログラムの構成・変数名、説明 文書等を整理。	OECD/NEA SERENA Project Phase-1
JASMINE_NRA	2014/10	予混合過程の液滴粒径分布考慮。 ジェットの流れ抵抗計算式変更。 溶融物の物性値入力を可能とし た。	OECD/NEA SERENA Project Phase-2
JASMINE 3.3NW	2015/07	環境を LINUX (UNIX) から WINDOWS に変更。コンパイラを インテル Visual Fortran Composer XE に変更。入力マニ ュアル改訂。	
JASMINE 4.0		平成 27 年度事業において、ジェットブ レックアップにおける 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。	DEFOR-A PULiMS

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

A.5 参考文献

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

付録 B MELCOR コードによる MCCI 実験解析データ

B1 MACE-M0 ベースケースの解析結果 図

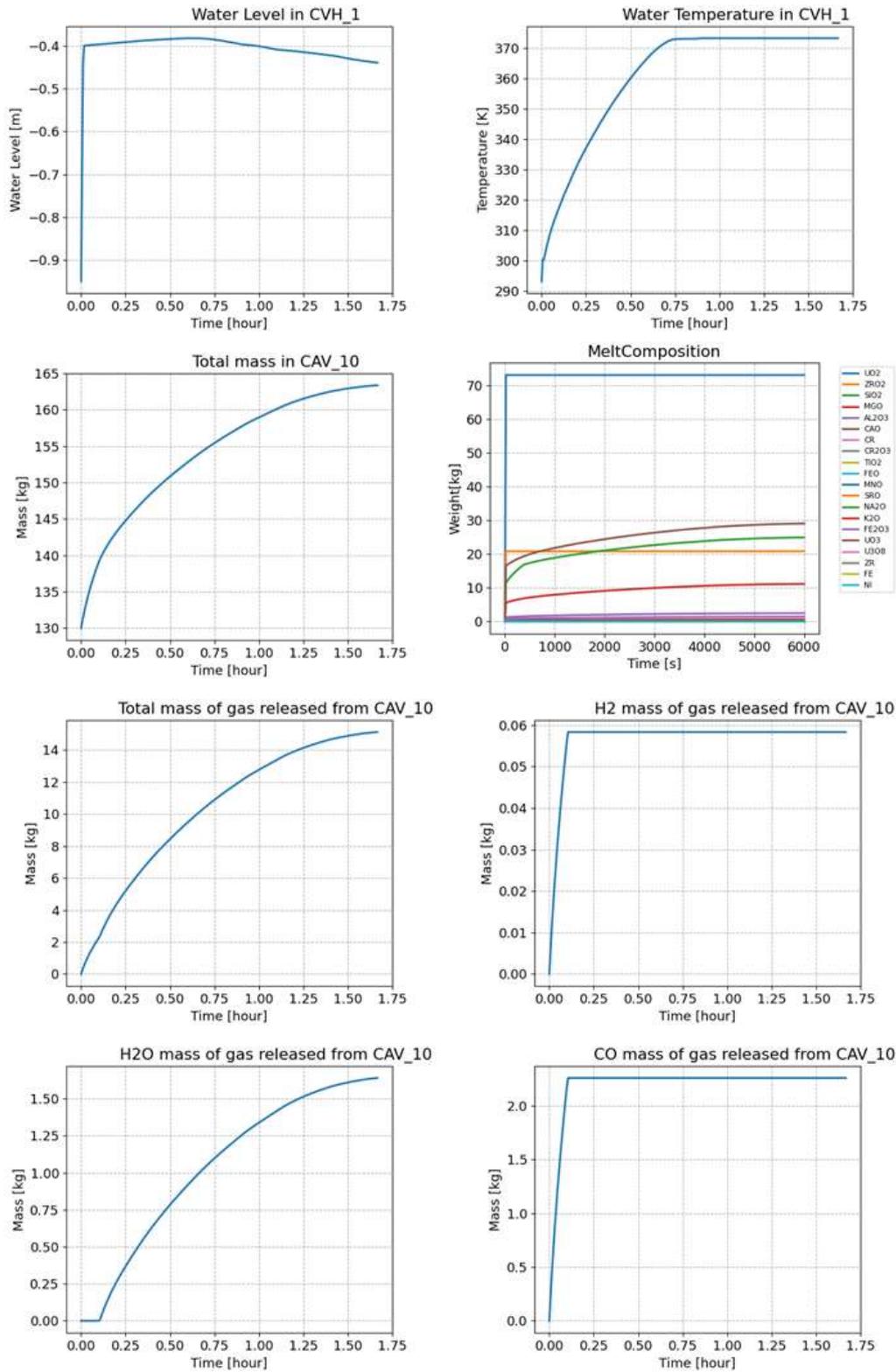


図 B1.1 MACE-M0 実験 MELCOR 出力データ (a)デフォルト設定 (1/3)

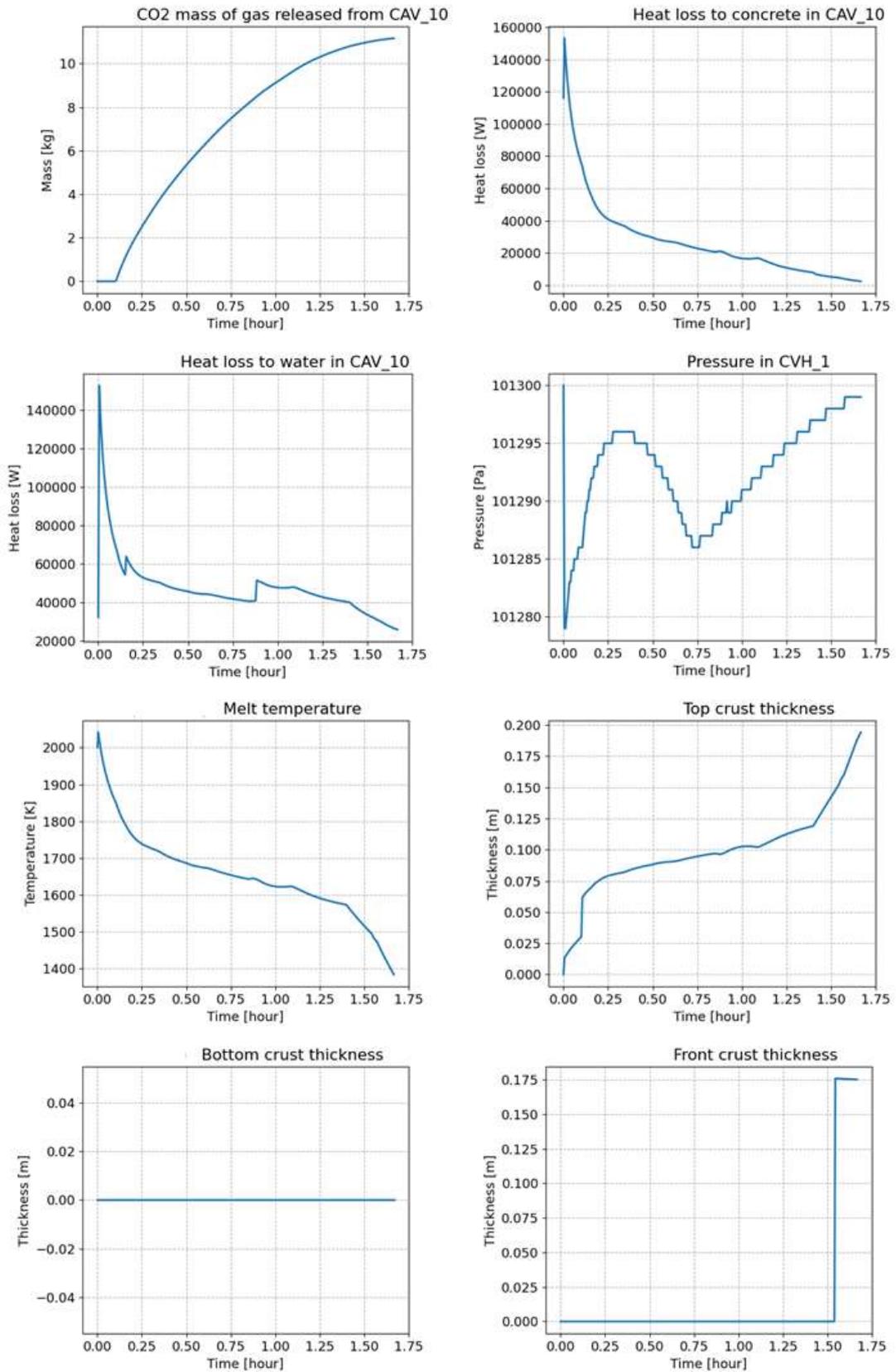


図 B1.1 MACE-M0 実験 MELCOR 出カデータ (a)デフォルト設定 (2/3)

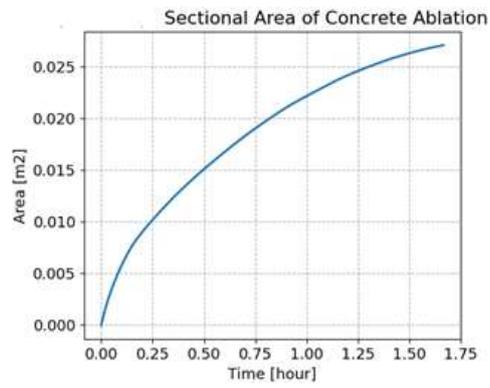


図 B1.1 MACE-M0 実験 MELCOR 出力データ (a)デフォルト設定 (3/3)

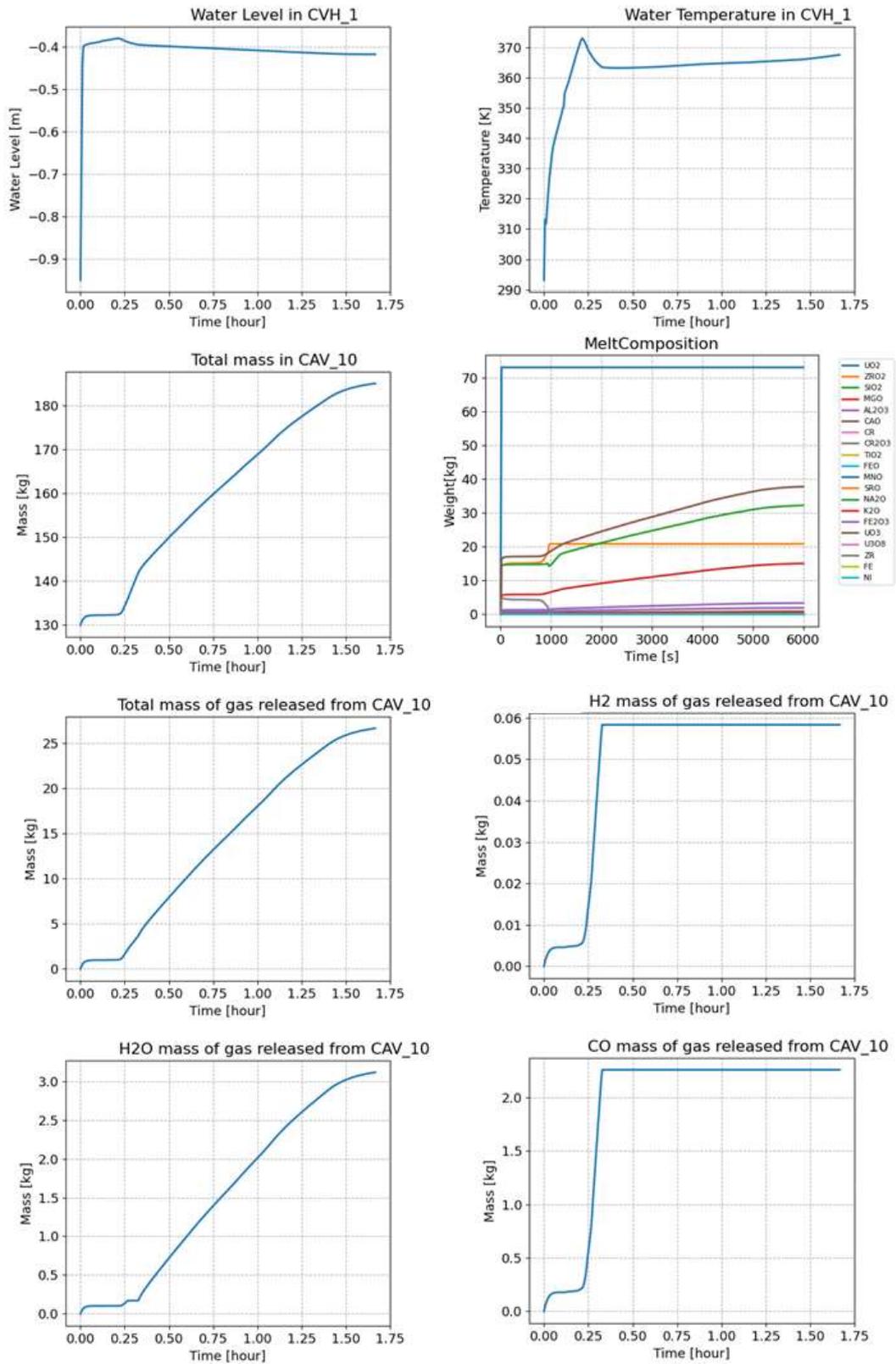


図 B1.2 MACE-M0 実験 MELCOR 出力データ
 (b) MIXING=calc, WATINGR=ON,ERUPT=ON (1/3)

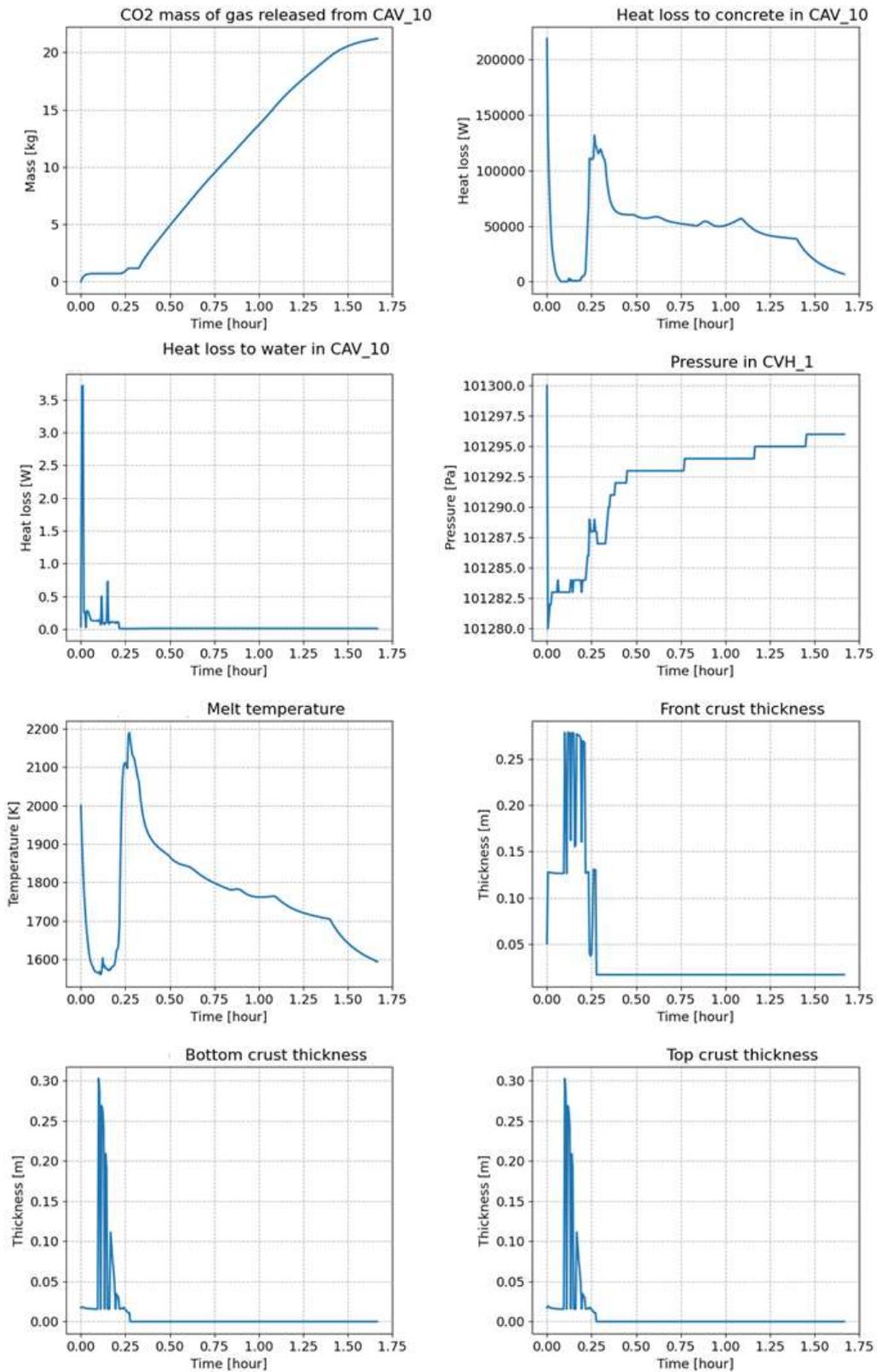


図 B1.2 MACE-M0 実験 MELCOR 出カデータ
 (b) MIXING=calc, WATINGR=ON,ERUPT=ON (2/3)

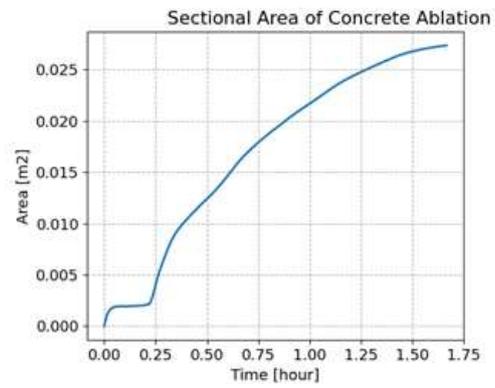


図 B1.2 MACE-M0 実験 MELCOR 出力データ
(b) MIXING=calc, WATINGR=ON,ERUPT=ON (3/3)

B2.1 MACE-M0 実験解析の結果 表

表 B2.1 MACE-MO 実験 解析終了時刻における出力データ一覧(1/12)

Case	Water Temperature[K]	Evaporation Mass[kg]	Melt Temperature[K]	Total Heat to water[kJ]	Total Heat to concrete[kJ]	Radial ablation[m]	Axial ablation[m]	Total mass of released gas [kg]
1	373.17	24.46	1384.28	284628.7	161007.9	0.0400	0.0913	15.12
2	368.54	0.08	1572.28	179787.3	226411.3	0.0590	0.1448	22.90
3	367.12	-0.16	1570.47	200407.1	230734.4	0.0387	0.2279	23.37
4	367.83	-0.15	1572.55	227602.3	227164.4	0.0437	0.1929	23.05
5	367.94	-0.54	1568.54	240861.9	233442.5	0.0495	0.1670	23.60
6	373.17	36.14	1266.89	282340.4	208076.3	0.0842	0.0813	19.96
7	367.26	-0.59	1572.87	251016.6	232684.2	0.0317	0.2269	23.63
8	367.86	-0.48	1569.50	272549.3	234632.5	0.0621	0.1388	23.77
9	367.85	-0.65	1572.73	202380.2	229141.5	0.0439	0.1931	23.21
10	367.84	-0.76	1572.69	198617.6	229517.1	0.0439	0.1932	23.23
11	373.00	58.79	600.55	324541.5	219707.6	0.0334	0.1997	21.95
12	373.00	58.79	600.55	324541.5	219707.6	0.0334	0.1997	21.95
13	373.17	34.05	1378.91	309758.0	178845.5	0.0445	0.0943	14.55
14	367.83	-0.15	1572.55	227602.3	227164.4	0.0437	0.1929	23.05
15	373.17	24.46	1384.28	284628.7	161007.9	0.0400	0.0913	15.12
16	370.24	55.04	1566.20	350650.5	87574.1	0.0137	0.1229	7.44
17	369.06	15.31	1581.33	252279.6	201717.5	0.0610	0.1279	18.81
18	367.11	5.75	1570.95	313077.7	234553.5	0.0391	0.2293	22.32
19	370.24	55.04	1566.20	350650.5	87574.1	0.0137	0.1229	7.44

表 B2.1 MACE-MO 実験 解析終了時刻における出力データ一覧(2/12)

Case	Water Temperature[K]	Evaporation Mass[kg]	Melt Temperature[K]	Total Heat to water[kJ]	Total Heat to concrete[kJ]	Radial ablation[m]	Axial ablation[m]	Total mass of released gas [kg]
20	367.81	4.38	1568.25	230467.8	239280.8	0.0556	0.1711	22.85
21	373.17	36.14	1266.89	282340.4	208076.3	0.0842	0.0813	19.96
22	370.24	55.04	1566.20	350650.5	87574.1	0.0137	0.1229	7.44
23	367.28	-5.77	1569.81	222270.6	241024.5	0.0487	0.2064	24.71
24	373.19	25.29	1396.97	265040.7	236204.8	0.0376	0.2049	23.85
25	367.90	-1.97	1574.45	238395.9	231932.3	0.0491	0.1903	23.56
26	373.17	44.71	1208.02	370561.7	160230.4	0.0595	0.0653	15.36
27	367.81	0.11	1572.54	208716.1	227525.6	0.0443	0.1933	23.00
28	367.82	-0.59	1572.49	225833.4	228737.7	0.0439	0.1933	23.18
29	372.95	59.19	598.65	368623.6	217605.3	0.0428	0.1549	21.76
30	372.71	59.15	600.08	337080.1	218115.3	0.0265	0.2332	21.79
31	373.00	58.79	600.55	324541.5	219707.6	0.0334	0.1997	21.95
32	372.57	59.35	599.97	360626.8	220542.2	0.0483	0.1737	21.93
33	372.25	1.91	1592.91	270050.1	295607.5	0.1255	0.1213	26.61
34	373.17	59.96	1256.96	436945.3	142862.2	0.0479	0.0625	11.06
35	371.94	7.75	1595.08	229562.2	271558.4	0.1105	0.1170	24.09
36	373.04	60.13	599.72	366476.8	212848.2	0.0324	0.1984	21.22
37	373.01	59.76	600.09	353463.6	214972.3	0.0325	0.1982	21.39
38	373.00	58.89	600.39	329797.5	219139.3	0.0335	0.2001	21.92

表 B2.1 MACE-MO 実験 解析終了時刻における出力データ一覧(3/12)

case	Water Temperature[K]	Evaporation Mass[kg]	Melt Temperature[K]	Total Heat to water[kJ]	Total Heat to concrete[kJ]	Radial ablation[m]	Axial ablation[m]	Total mass of released gas [kg]
39	373.17	42.88	848.23	280536.4	217220.1	0.0335	0.2001	21.74
40	372.99	58.64	600.26	399190.3	221215.0	0.0337	0.2005	22.07
41	373.00	58.33	600.28	396249.2	221411.7	0.0339	0.2005	22.21
42	373.05	59.51	599.93	322474.0	216771.3	0.0329	0.1990	21.57
43	373.01	60.13	599.88	352310.3	213572.9	0.0325	0.1986	21.27
44	373.05	59.45	600.23	329142.8	217369.4	0.0332	0.1997	21.67
45	373.01	59.99	600.05	355674.0	213867.4	0.0325	0.1984	21.32

表 B2.1 MACE-MO 実験 解析終了時刻における出力データ一覧(4/12)

case	UO2 Mass[kg]	ZRO2 Mass[kg]	SIO2 Mass[kg]	MGO Mass[kg]	AL2O3 Mass[kg]	CAO Mass[kg]	CR Mass[kg]	CR2O3 Mass[kg]	TIO2 Mass[kg]	FEO Mass[kg]
1	73.00	20.76	24.85	11.07	2.40	28.97	0.00	0.00	0.13	0.00
2	73.00	20.75	27.22	13.34	2.90	34.11	0.00	0.00	0.16	0.00
3	73.00	20.75	27.54	13.50	2.93	34.47	0.00	0.00	0.16	0.00
4	73.00	20.75	27.34	13.40	2.91	34.23	0.00	0.00	0.16	0.00
5	73.00	20.75	27.99	13.62	2.96	34.73	0.00	0.00	0.16	0.00
6	73.00	20.75	27.92	12.70	2.76	32.65	0.00	0.00	0.15	0.00
7	73.00	20.75	27.52	13.57	2.94	34.61	0.00	0.00	0.16	0.00
8	73.00	20.75	28.04	13.67	2.97	34.85	0.00	0.00	0.16	0.00
9	73.00	20.75	27.46	13.45	2.92	34.35	0.00	0.00	0.16	0.00
10	73.00	20.75	27.44	13.45	2.92	34.36	0.00	0.00	0.16	0.00
11	73.00	23.21	22.75	13.12	2.85	33.61	0.00	0.00	0.15	0.00
12	73.00	23.21	22.75	13.12	2.85	33.61	0.00	0.00	0.15	0.00
13	73.00	23.21	26.05	11.70	2.54	30.41	0.00	0.00	0.14	0.00
14	73.00	20.75	27.34	13.40	2.91	34.23	0.00	0.00	0.16	0.00
15	73.00	20.76	24.85	11.07	2.40	28.97	0.00	0.00	0.13	0.00
16	73.00	20.75	19.98	8.50	1.84	23.17	0.00	0.00	0.10	0.00
17	73.00	20.75	27.49	12.48	2.71	32.17	0.00	0.00	0.15	0.00
18	73.00	20.75	29.53	13.64	2.96	34.77	0.00	0.00	0.16	0.00
19	73.00	20.75	19.98	8.50	1.84	23.17	0.00	0.00	0.10	0.00

表 B2.1 MACE-MO 実験 解析終了時刻における出力データ一覧(5/12)

case	UO2 Mass[kg]	ZRO2 Mass[kg]	SIO2 Mass[kg]	MGO Mass[kg]	AL2O3 Mass[kg]	CAO Mass[kg]	CR Mass[kg]	CR2O3 Mass[kg]	TIO2 Mass[kg]	FEO Mass[kg]
20	73.00	20.75	30.01	13.83	3.00	35.21	0.00	0.00	0.16	0.00
21	73.00	20.75	27.92	12.70	2.76	32.65	0.00	0.00	0.15	0.00
22	73.00	20.75	19.98	8.50	1.84	23.17	0.00	0.00	0.10	0.00
23	73.00	20.75	27.76	13.87	3.01	35.30	0.00	0.00	0.16	0.00
24	73.00	20.75	28.05	13.69	2.97	34.90	0.00	0.00	0.16	0.00
25	73.00	20.75	27.62	13.56	2.94	34.60	0.00	0.00	0.16	0.00
26	73.00	20.75	24.17	11.04	2.40	28.90	0.00	0.00	0.13	0.00
27	73.00	20.75	27.30	13.38	2.90	34.19	0.00	0.00	0.16	0.00
28	73.00	20.75	27.39	13.44	2.92	34.31	0.00	0.00	0.16	0.00
29	73.00	23.21	22.63	13.06	2.83	33.46	0.00	0.00	0.15	0.00
30	73.00	23.21	22.73	13.08	2.84	33.51	0.00	0.00	0.15	0.00
31	73.00	23.21	22.75	13.12	2.85	33.61	0.00	0.00	0.15	0.00
32	73.00	23.21	23.23	13.18	2.86	33.74	0.00	0.00	0.16	0.00
33	73.00	23.21	33.70	15.76	3.42	39.57	0.00	0.00	0.19	0.00
34	73.00	23.21	22.85	10.45	2.27	27.58	0.00	0.00	0.12	0.00
35	73.00	23.21	32.10	14.91	3.24	37.65	0.00	0.00	0.18	0.00
36	73.00	23.21	22.50	12.91	2.80	33.12	0.00	0.00	0.15	0.00
37	73.00	23.21	22.49	12.94	2.81	33.21	0.00	0.00	0.15	0.00
38	73.00	23.21	22.74	13.11	2.85	33.59	0.00	0.00	0.15	0.00

表 B2.1 MACE-MO 実験 解析終了時刻における出力データ一覧(6/12)

case	UO2 Mass[kg]	ZRO2 Mass[kg]	SIO2 Mass[kg]	MGO Mass[kg]	AL2O3 Mass[kg]	CAO Mass[kg]	CR Mass[kg]	CR2O3 Mass[kg]	TIO2 Mass[kg]	FEO Mass[kg]
39	73.00	23.21	22.64	13.05	2.83	33.46	0.00	0.00	0.15	0.00
40	73.00	23.21	22.82	13.16	2.86	33.70	0.00	0.00	0.15	0.00
41	73.00	23.21	22.89	13.21	2.87	33.80	0.00	0.00	0.16	0.00
42	73.00	23.21	22.70	13.02	2.83	33.37	0.00	0.00	0.15	0.00
43	73.00	23.21	22.42	12.91	2.80	33.12	0.00	0.00	0.15	0.00
44	73.00	23.21	22.78	13.06	2.83	33.46	0.00	0.00	0.15	0.00
45	73.00	23.21	22.45	12.92	2.80	33.16	0.00	0.00	0.15	0.00

表 B2.1 MACE-MO 実験 解析終了時刻における出力データ一覧(7/12)

case	MNO Mass[kg]	SRO Mass[kg]	NA2O Mass[kg]	K2O Mass[kg]	FE2O3 Mass[kg]	UO3 Mass[kg]	U3O8 Mass[kg]	ZR Mass[kg]	FE Mass[kg]	NI Mass[kg]
1	0.03	0.00	0.30	0.53	1.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.02	0.00	0.36	0.64	1.62	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.02	0.00	0.36	0.65	1.64	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.02	0.00	0.36	0.64	1.62	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.03	0.00	0.37	0.65	1.65	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	0.03	0.00	0.34	0.61	1.54	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	0.02	0.00	0.37	0.65	1.64	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	0.03	0.00	0.37	0.66	1.66	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	0.02	0.00	0.36	0.65	1.63	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.02	0.00	0.36	0.65	1.63	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	0.02	0.00	0.35	0.63	1.59	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	0.02	0.00	0.35	0.63	1.59	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
13	0.03	0.00	0.32	0.56	1.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
14	0.02	0.00	0.36	0.64	1.62	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.03	0.00	0.30	0.53	1.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
16	0.02	0.00	0.23	0.41	1.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
17	0.03	0.00	0.34	0.60	1.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
18	0.03	0.00	0.37	0.65	1.65	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
19	0.02	0.00	0.23	0.41	1.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

表 B2.1 MACE-MO 実験 解析終了時刻における出力データ一覧(8/12)

case	MNO Mass[kg]	SRO Mass[kg]	NA2O Mass[kg]	K2O Mass[kg]	FE2O3 Mass[kg]	UO3 Mass[kg]	U3O8 Mass[kg]	ZR Mass[kg]	FE Mass[kg]	NI Mass[kg]
20	0.03	0.00	0.37	0.66	1.68	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
21	0.03	0.00	0.34	0.61	1.54	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
22	0.02	0.00	0.23	0.41	1.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
23	0.03	0.00	0.37	0.67	1.68	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
24	0.03	0.00	0.37	0.66	1.66	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
25	0.02	0.00	0.37	0.65	1.64	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
26	0.03	0.00	0.30	0.53	1.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
27	0.02	0.00	0.36	0.64	1.62	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
28	0.02	0.00	0.36	0.64	1.63	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
29	0.02	0.00	0.35	0.63	1.58	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30	0.02	0.00	0.35	0.63	1.58	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
31	0.02	0.00	0.35	0.63	1.59	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
32	0.02	0.00	0.36	0.63	1.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
33	0.04	0.00	0.43	0.76	1.91	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
34	0.02	0.00	0.28	0.50	1.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
35	0.04	0.00	0.40	0.72	1.81	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
36	0.02	0.00	0.35	0.62	1.56	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
37	0.02	0.00	0.35	0.62	1.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
38	0.02	0.00	0.35	0.63	1.59	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

表 B2.1 MACE-MO 実験 解析終了時刻における出力データ一覧(9/12)

case	MNO Mass[kg]	SRO Mass[kg]	NA2O Mass[kg]	K2O Mass[kg]	FE2O3 Mass[kg]	UO3 Mass[kg]	U3O8 Mass[kg]	ZR Mass[kg]	FE Mass[kg]	NI Mass[kg]
39	0.02	0.00	0.35	0.63	1.58	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
40	0.02	0.00	0.36	0.63	1.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
41	0.02	0.00	0.36	0.63	1.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
42	0.02	0.00	0.35	0.62	1.58	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
43	0.02	0.00	0.35	0.62	1.56	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
44	0.02	0.00	0.35	0.63	1.58	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
45	0.02	0.00	0.35	0.62	1.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

表 B2.1 MACE-M0 実験 解析終了時刻における出力データ一覧(10/12)

case	Total mass of released H2 [kg]	Total mass of released H2O [kg]	Total mass of released CO [kg]	Total mass of released CO2 [kg]	Top Crust Thickness [m]	Bottom Crust Thickness [m]	Front Crust Thickness [m]	Sectional Area of Concrete Ablation[m2]
1	0.02	2.83	0.95	19.25	0.0000	0.0000	0.0000	0.0327
2	0.02	2.81	0.94	19.12	0.0000	0.0000	0.0000	0.0285
3	0.02	2.87	0.95	19.52	0.0000	0.0000	0.0000	0.0362
4	0.02	2.83	0.95	19.25	0.0000	0.0000	0.0000	0.0327
5	0.06	2.35	2.26	15.99	0.1654	0.1654	0.3822	0.0305
6	0.02	2.91	0.86	19.83	0.0000	0.0000	0.0000	0.0362
7	0.03	2.90	1.08	19.76	0.0000	0.0000	0.0000	0.0282
8	0.02	2.85	0.97	19.37	0.0000	0.0000	0.0000	0.0328
9	0.02	2.85	0.95	19.40	0.0000	0.0000	0.0000	0.0328
10	0.03	2.64	1.32	17.96	0.0164	0.0164	0.1255	0.0331
11	0.03	2.64	1.32	17.96	0.0164	0.0164	0.1255	0.0331
12	0.14	1.15	5.42	7.84	0.2079	0.0000	0.1790	0.0293
13	0.02	2.83	0.95	19.25	0.0000	0.0000	0.0000	0.0327
14	0.06	1.64	2.26	11.16	0.1940	0.0000	0.1751	0.0271
15	0.02	2.83	0.95	19.25	0.0000	0.0000	0.0000	0.0327
16	0.06	0.69	1.99	4.70	0.0000	0.0000	0.0000	0.0184
17	0.03	2.40	0.07	16.31	0.0000	0.0000	0.0000	0.0262
18	0.03	2.84	0.10	19.35	0.0000	0.0000	0.0000	0.0371
19	0.06	0.69	1.99	4.70	0.0000	0.0000	0.0000	0.0184

表 B2.1 MACE-M0 実験 解析終了時刻における出力データ一覧(11/12)

case	Total mass of released H2 [kg]	Total mass of released H2O [kg]	Total mass of released CO [kg]	Total mass of released CO2 [kg]	Top Crust Thickness [m]	Bottom Crust Thickness [m]	Front Crust Thickness [m]	Sectional Area of Concrete Ablation[m2]
20	0.04	2.90	0.19	19.73	0.0143	0.0143	0.0882	0.0334
21	0.06	2.26	2.26	15.39	0.1928	0.1928	0.3372	0.0306
22	0.06	0.69	1.99	4.70	0.0000	0.0000	0.0000	0.0184
23	0.02	3.08	0.63	20.98	0.0000	0.0000	0.0000	0.0341
24	0.03	2.92	1.06	19.86	0.0001	0.0000	0.0000	0.0358
25	0.02	2.90	0.93	19.71	0.0000	0.0000	0.0000	0.0334
26	0.05	1.73	1.83	11.76	0.2048	0.2048	0.1865	0.0243
27	0.02	2.82	0.95	19.21	0.0000	0.0000	0.0000	0.0335
28	0.02	2.85	0.94	19.37	0.0000	0.0000	0.0000	0.0328
29	0.03	2.61	1.32	17.80	0.0024	0.0024	0.2582	0.0288
30	0.04	2.61	1.37	17.77	0.0203	0.0203	0.1275	0.0361
31	0.03	2.64	1.32	17.96	0.0164	0.0164	0.1255	0.0331
32	0.04	2.60	1.57	17.71	0.0041	0.0041	0.2044	0.0322
33	0.14	2.70	5.42	18.36	0.0010	0.0010	0.1362	0.0393
34	0.12	0.89	4.00	6.06	0.2365	0.2365	0.1787	0.0225
35	0.14	2.37	5.42	16.15	0.0000	0.0000	0.0245	0.0371
36	0.04	2.53	1.43	17.23	0.0161	0.0161	0.1256	0.0328
37	0.04	2.56	1.37	17.42	0.0161	0.0161	0.1249	0.0327
38	0.03	2.63	1.33	17.93	0.0161	0.0161	0.1253	0.0330

表 B2.1 MACE-M0 実験 解析終了時刻における出力データ一覧(12/12)

case	Total mass of released H2 [kg]	Total mass of released H2O [kg]	Total mass of released CO [kg]	Total mass of released CO2 [kg]	Top Crust Thickness [m]	Bottom Crust Thickness [m]	Front Crust Thickness [m]	Sectional Area of Concrete Ablation[m2]
39	0.03	2.61	1.33	17.76	0.0161	0.0161	0.1256	0.0329
40	0.03	2.65	1.31	18.07	0.0162	0.0162	0.1255	0.0331
41	0.03	2.67	1.31	18.19	0.0174	0.0174	0.1281	0.0335
42	0.04	2.58	1.42	17.53	0.0161	0.0161	0.1252	0.0329
43	0.04	2.54	1.38	17.31	0.0161	0.0161	0.1254	0.0327
44	0.04	2.59	1.43	17.62	0.0159	0.0159	0.1248	0.0330
45	0.04	2.55	1.37	17.36	0.0160	0.0160	0.1252	0.0327

B2.2 MACE-M0 実験解析の結果 図

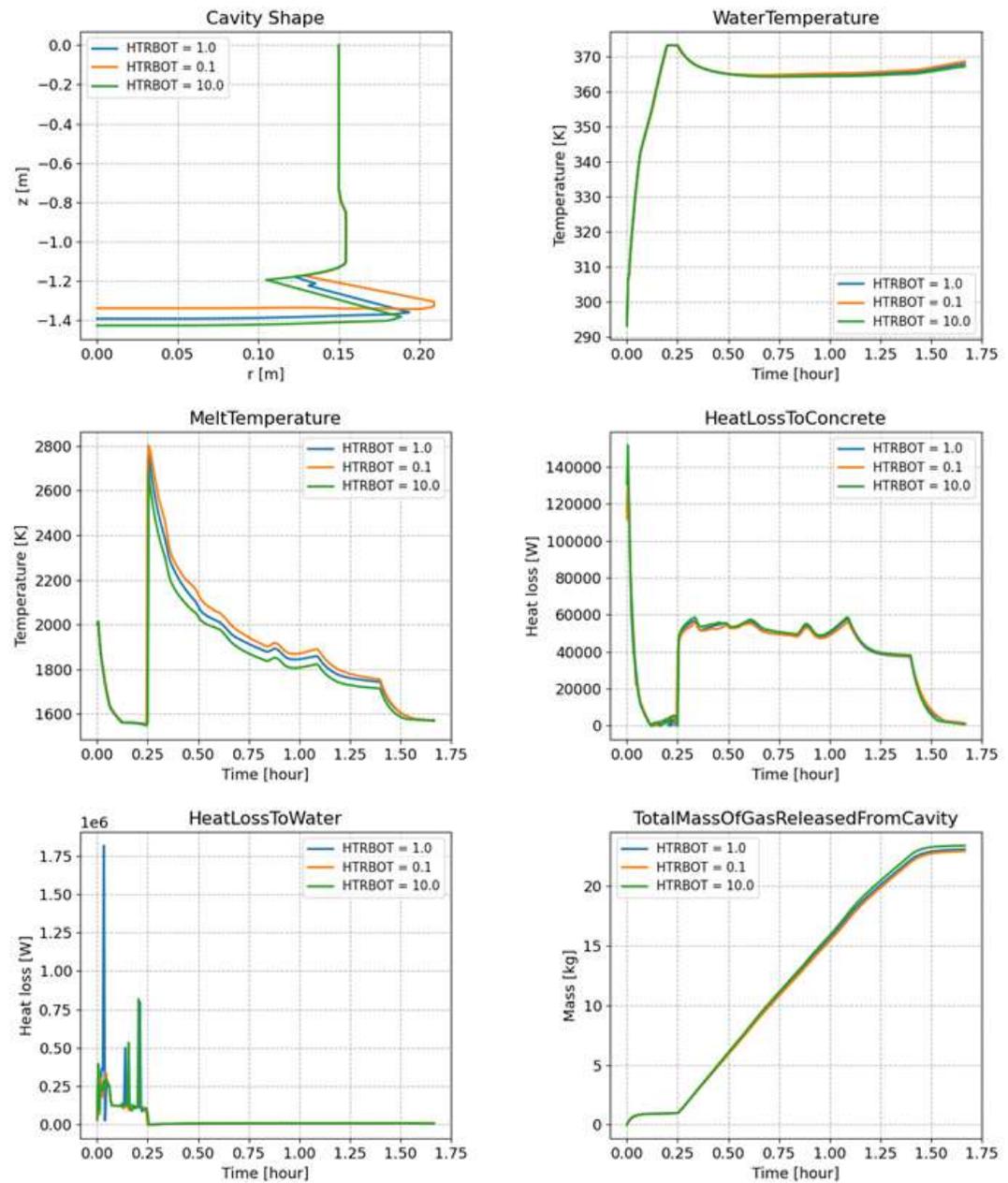


図 B2.1 MACE-M0 実験解析 出力データに対する”HTRBOT”の影響(1/2)

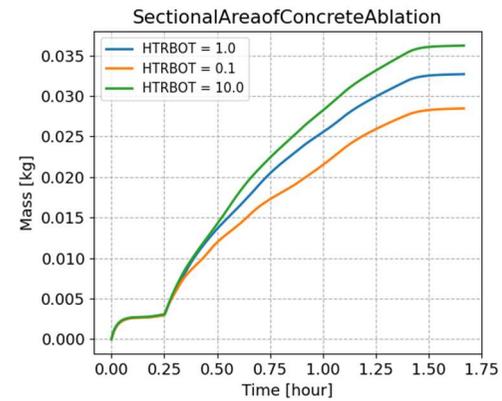
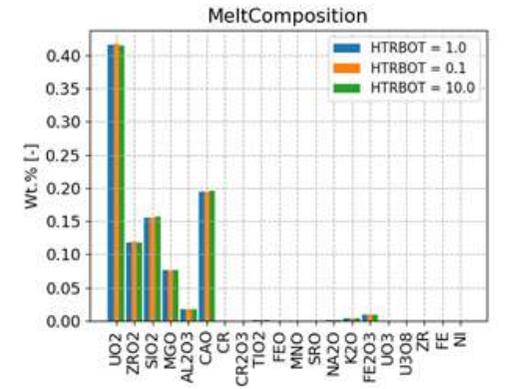
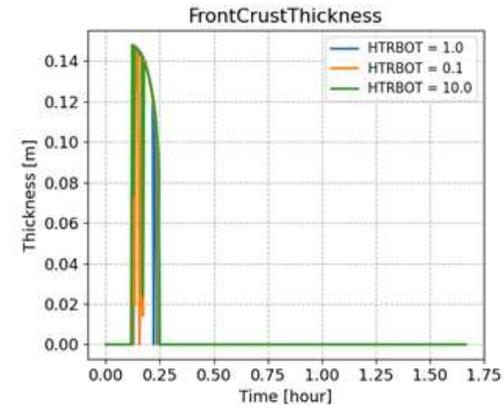
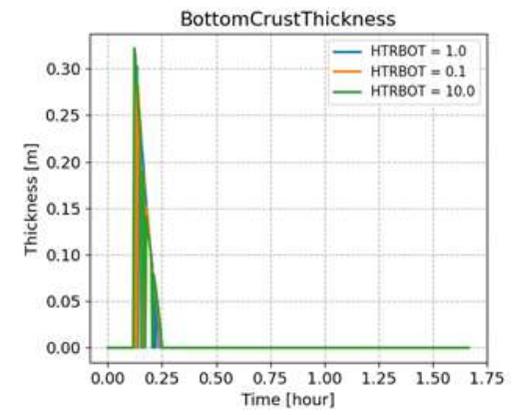
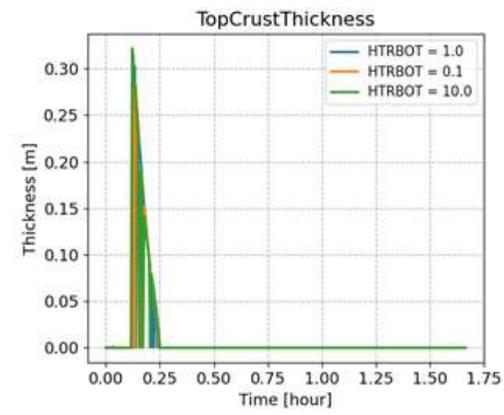


図 B2.1 MACE-M0 実験解析 出力データに対する”HTRBOT”の影響(2/2)

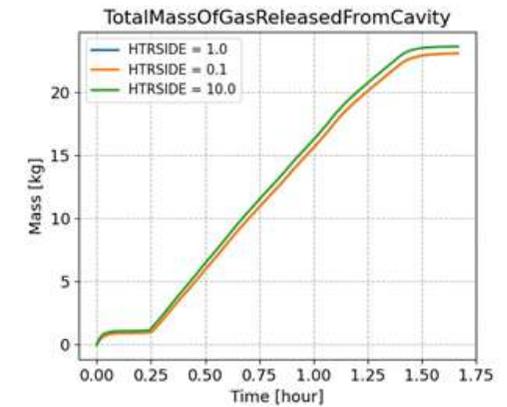
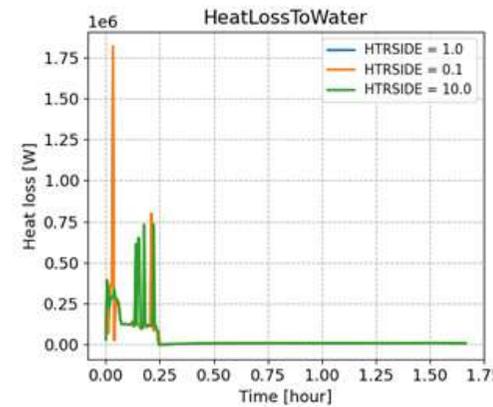
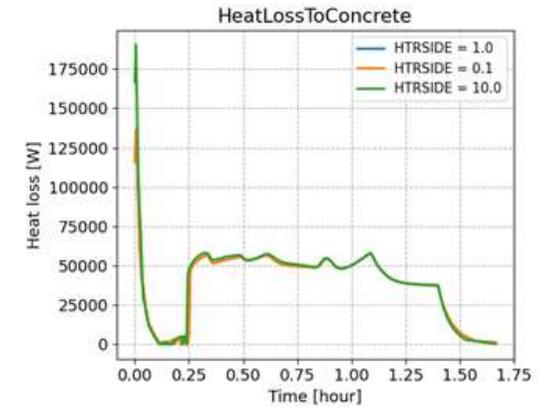
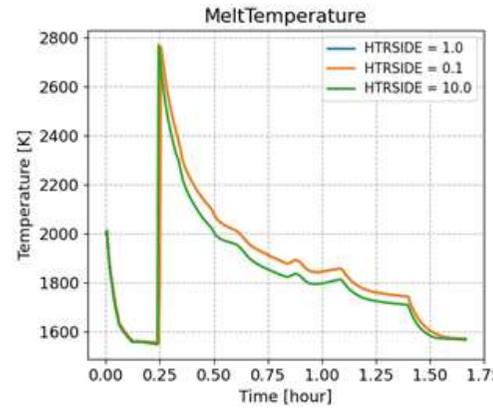
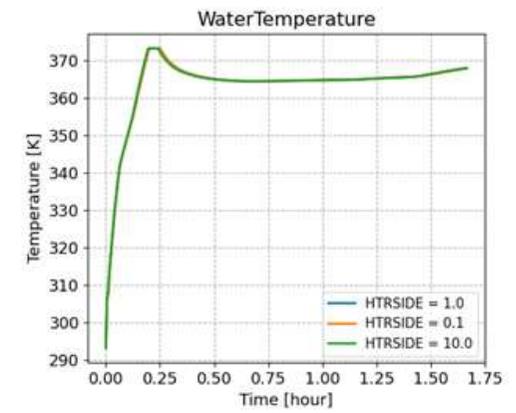
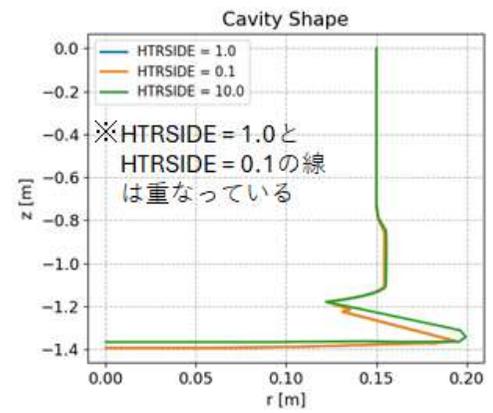


図 B2.2 MACE-M0 実験解析 出力データに対する” HTRSIDE” の影響(1/2)

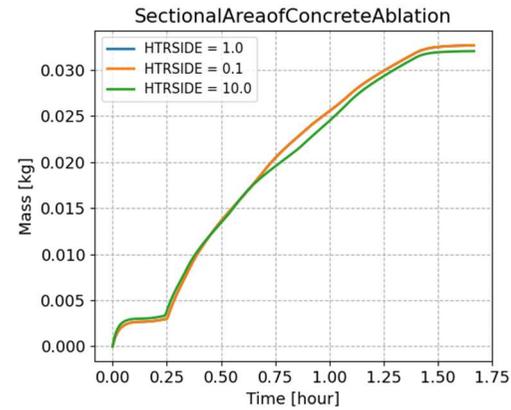
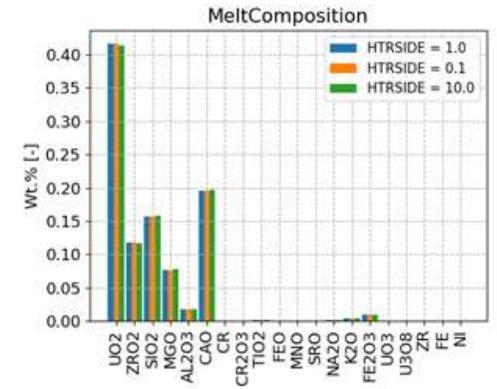
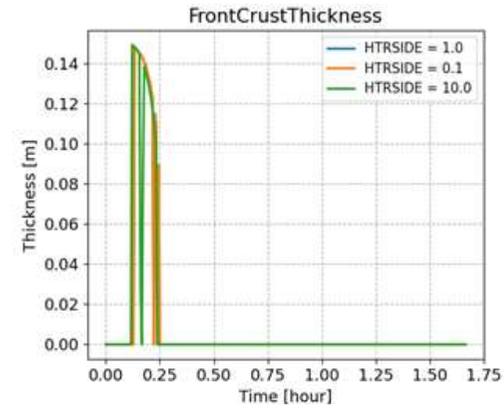
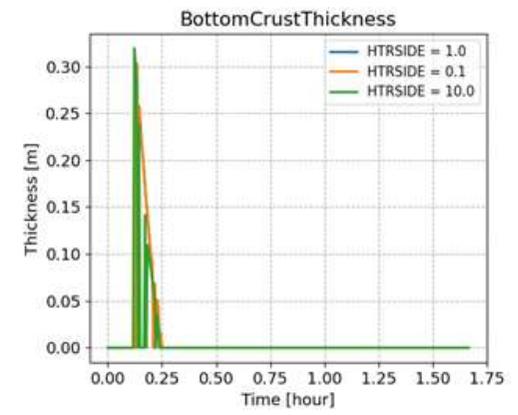
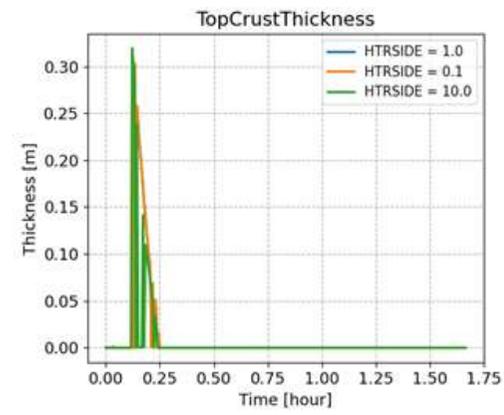


図 B2.2 MACE-M0 実験解析 出力データに対する” HTRSIDE” の影響(2/2)

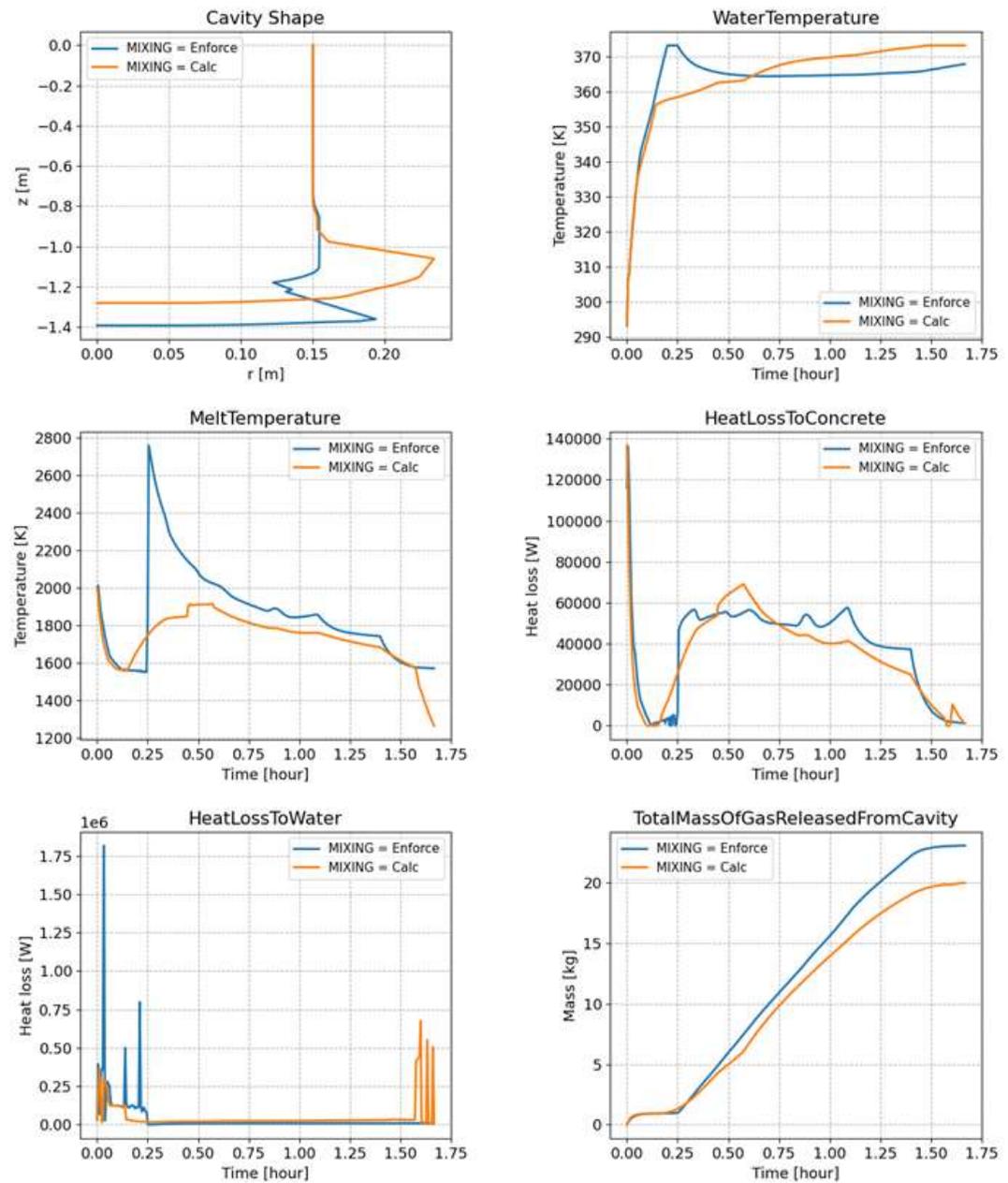


図 B.2.3 MACE-M0 実験解析 出力データに対する” MIXING” の影響(1/2)

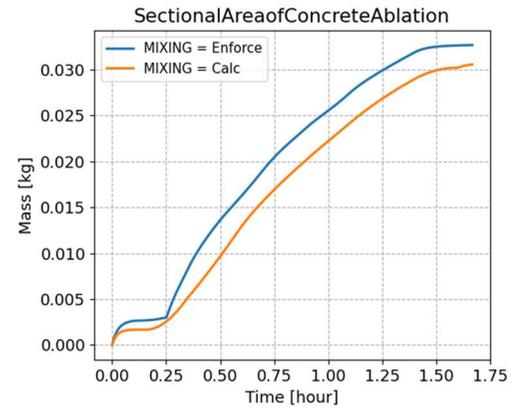
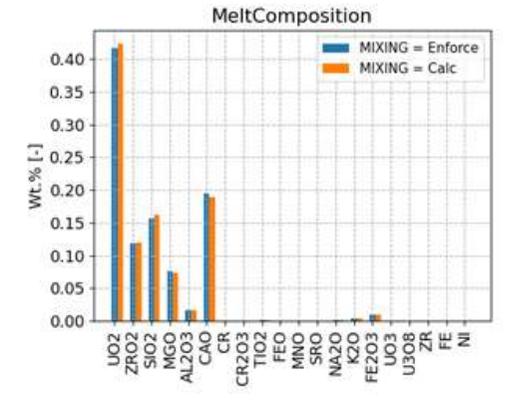
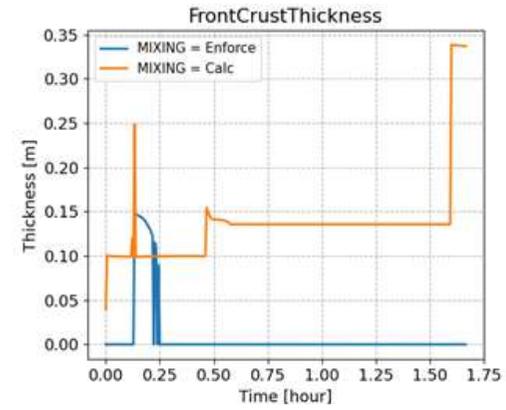
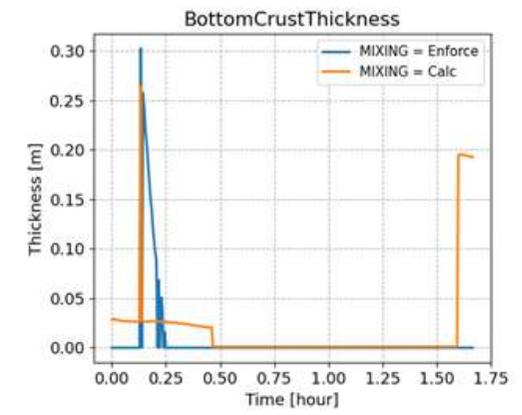
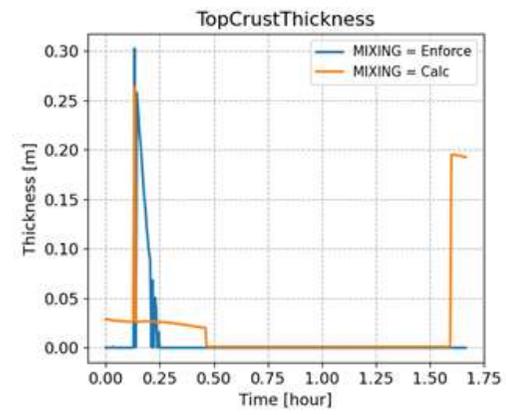


図 B2.3 MACE-M0 実験解析 出力データに対する”MIXING”の影響(2/2)

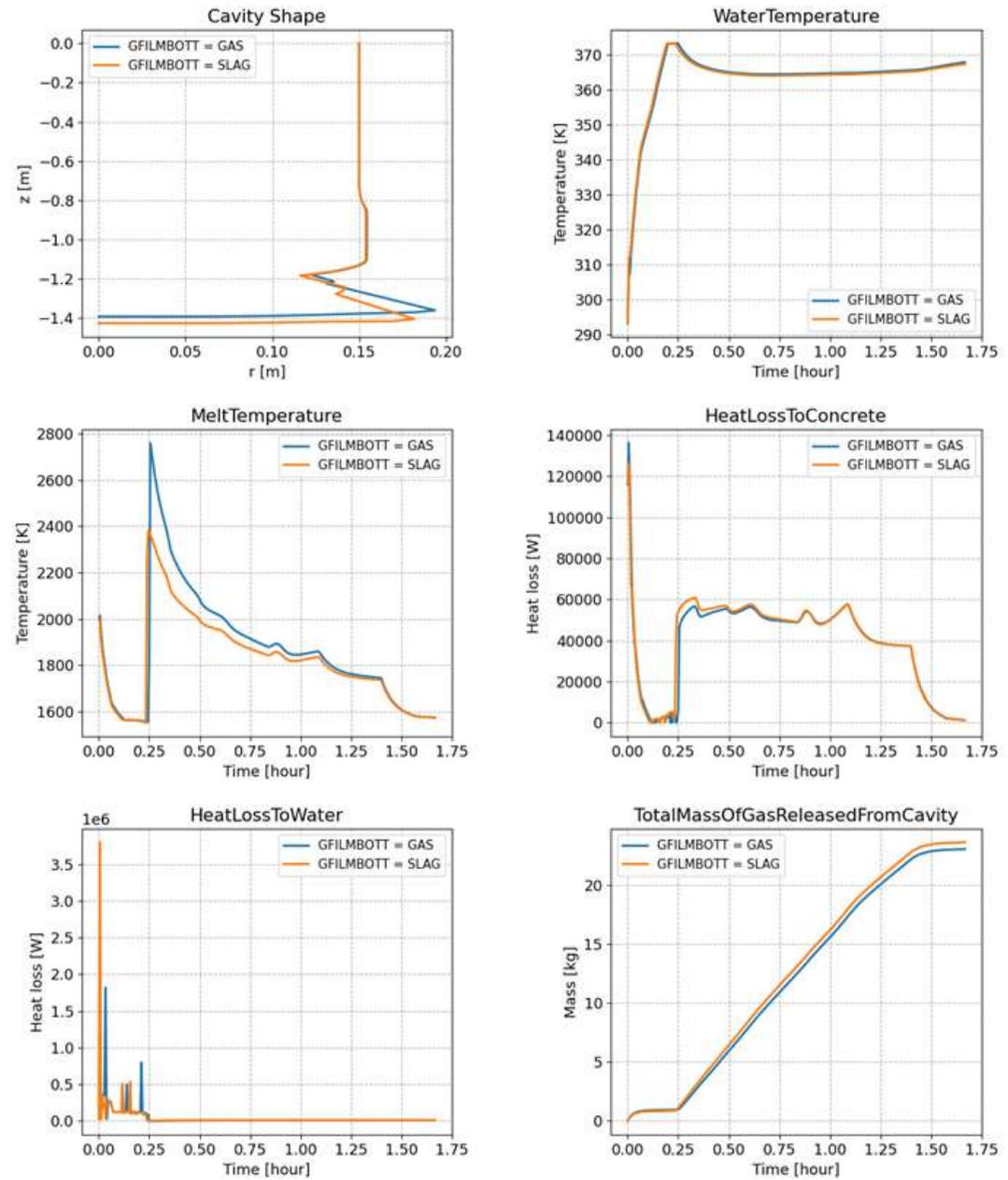


図 B2.4 MACE-M0 実験解析 出力データに対する” GFILMBOTT” の影響(1/2)

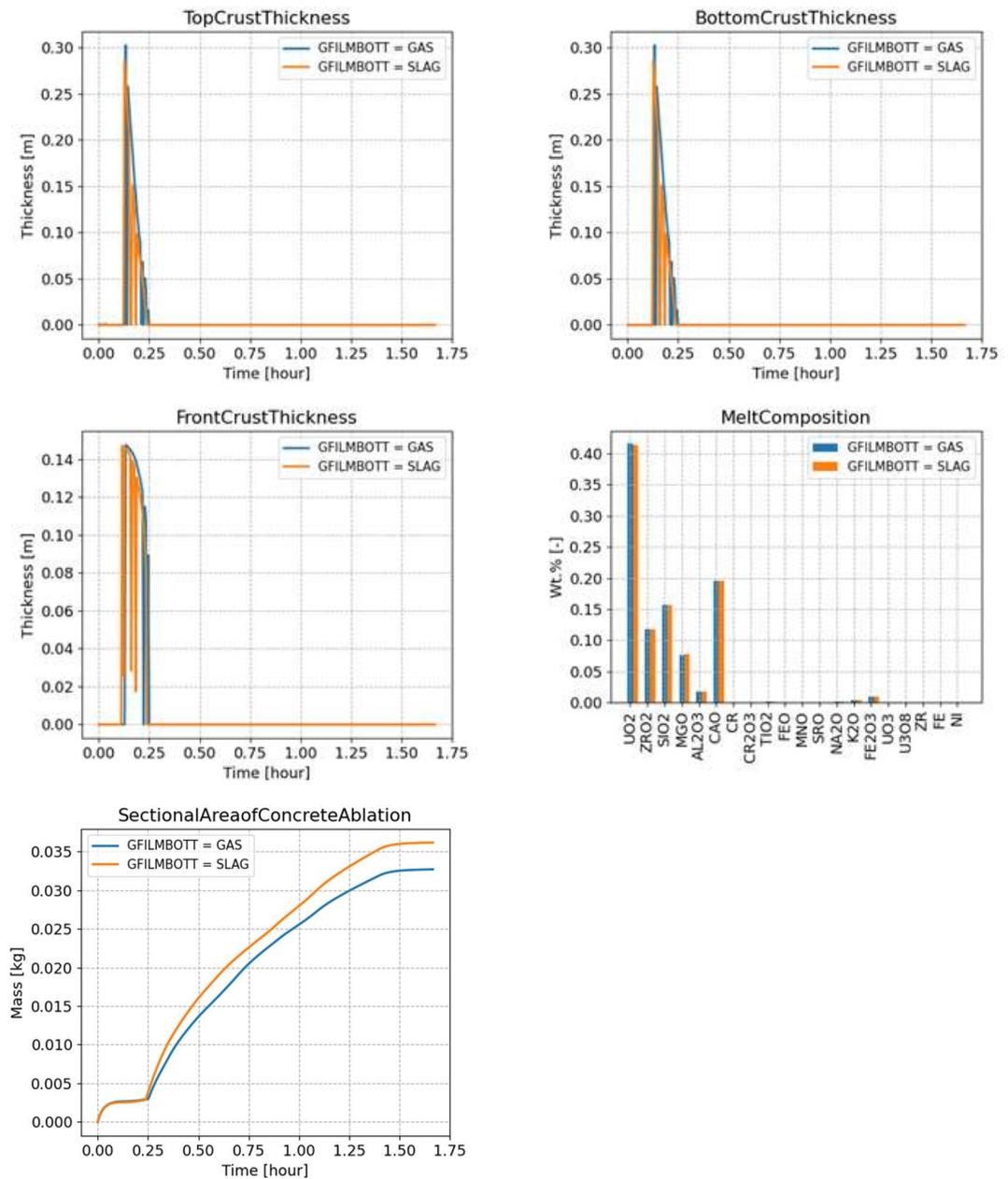


図 B2.4 MACE-M0 実験解析 出力データに対する” GFILMBOTT” の影響(2/2)

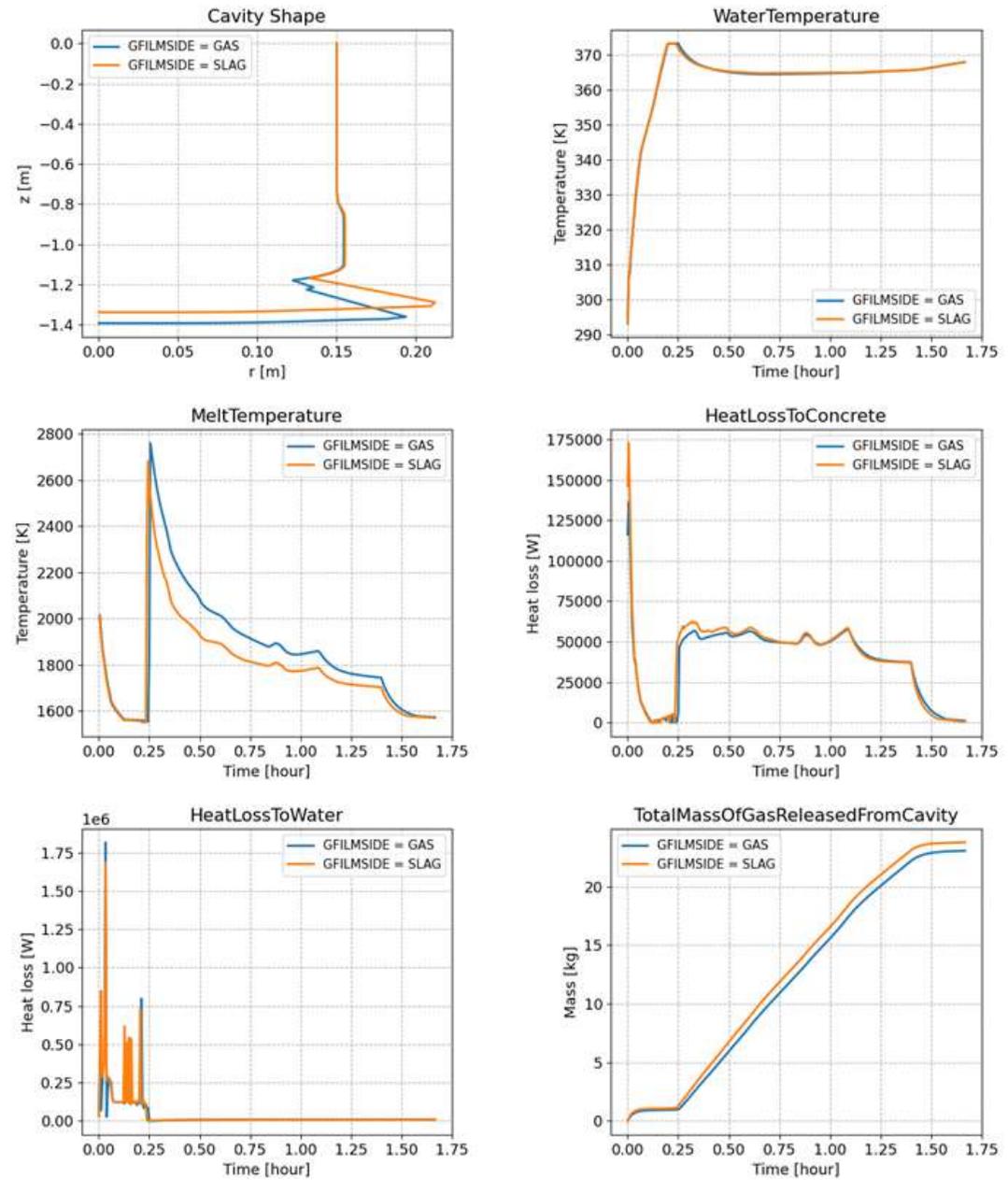


図 B2.5 MACE-M0 実験解析 出力データに対する”GFI LMSIDE”の影響(1/2)

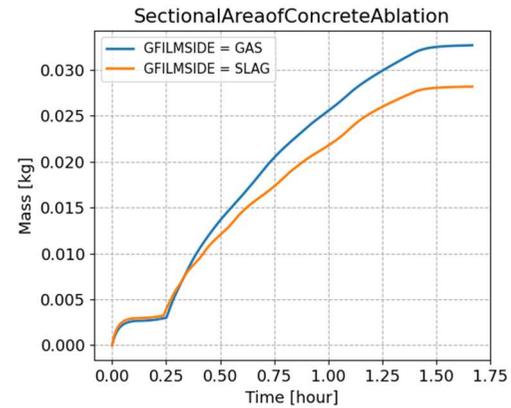
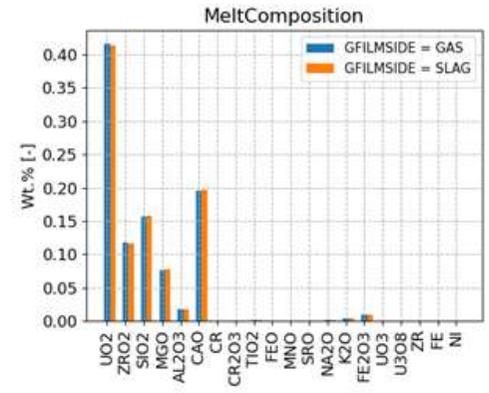
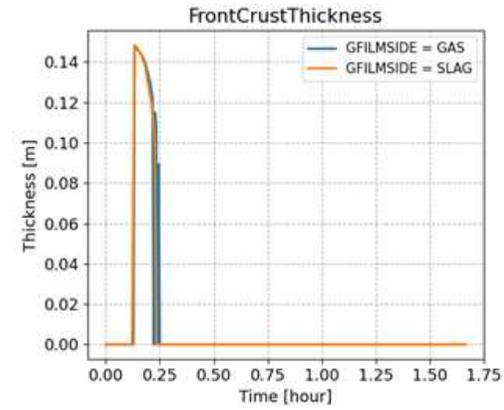
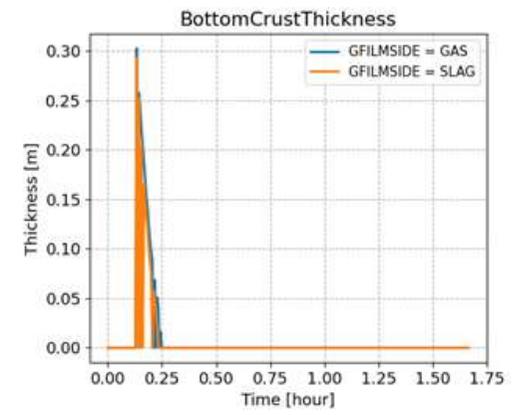
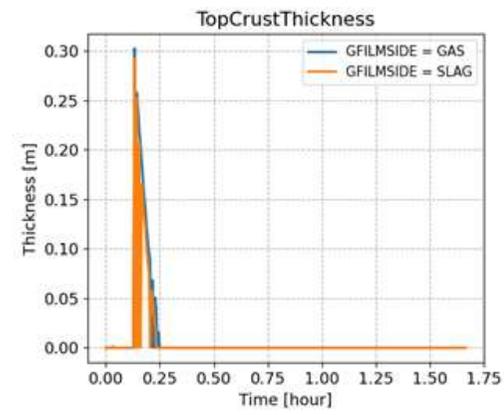


図 B2.5 MACE-M0 実験解析 出カデータに対する”GFILMSIDE”の影響(2/2)

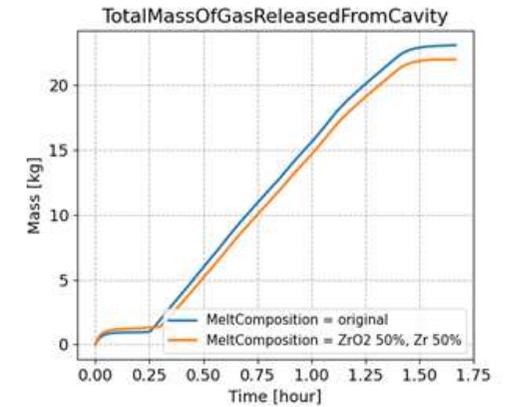
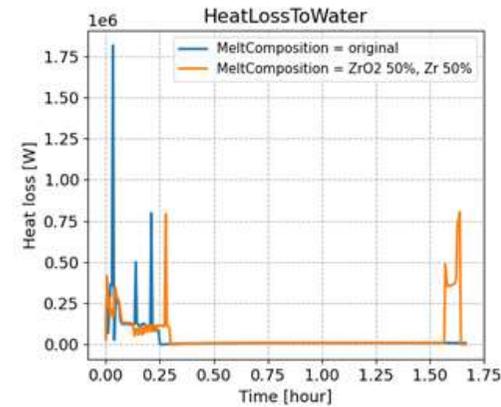
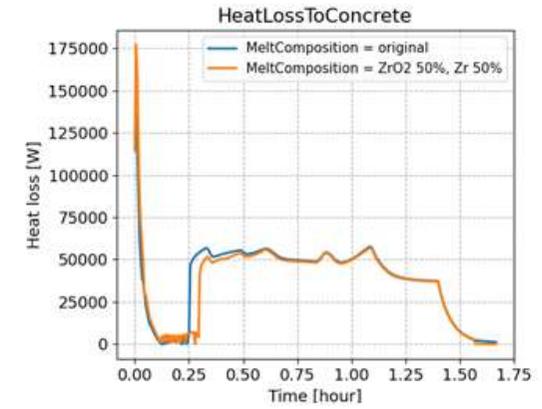
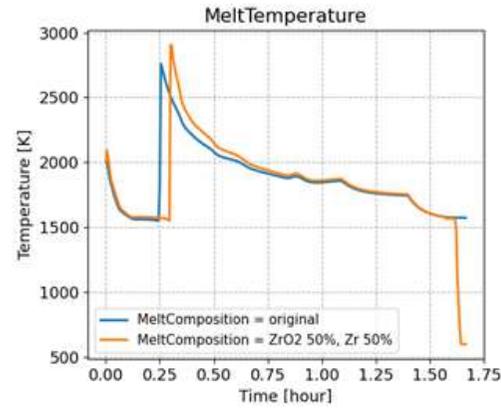
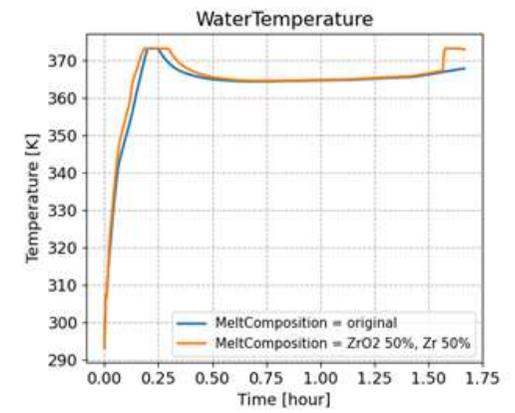
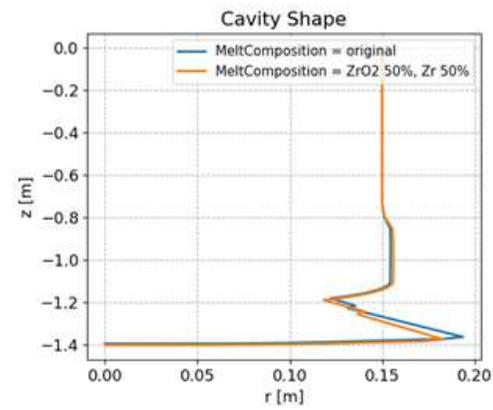


図 B2.6 MACE-M0 実験解析 出力データに対する”MeltComposition”の影響(1/2)

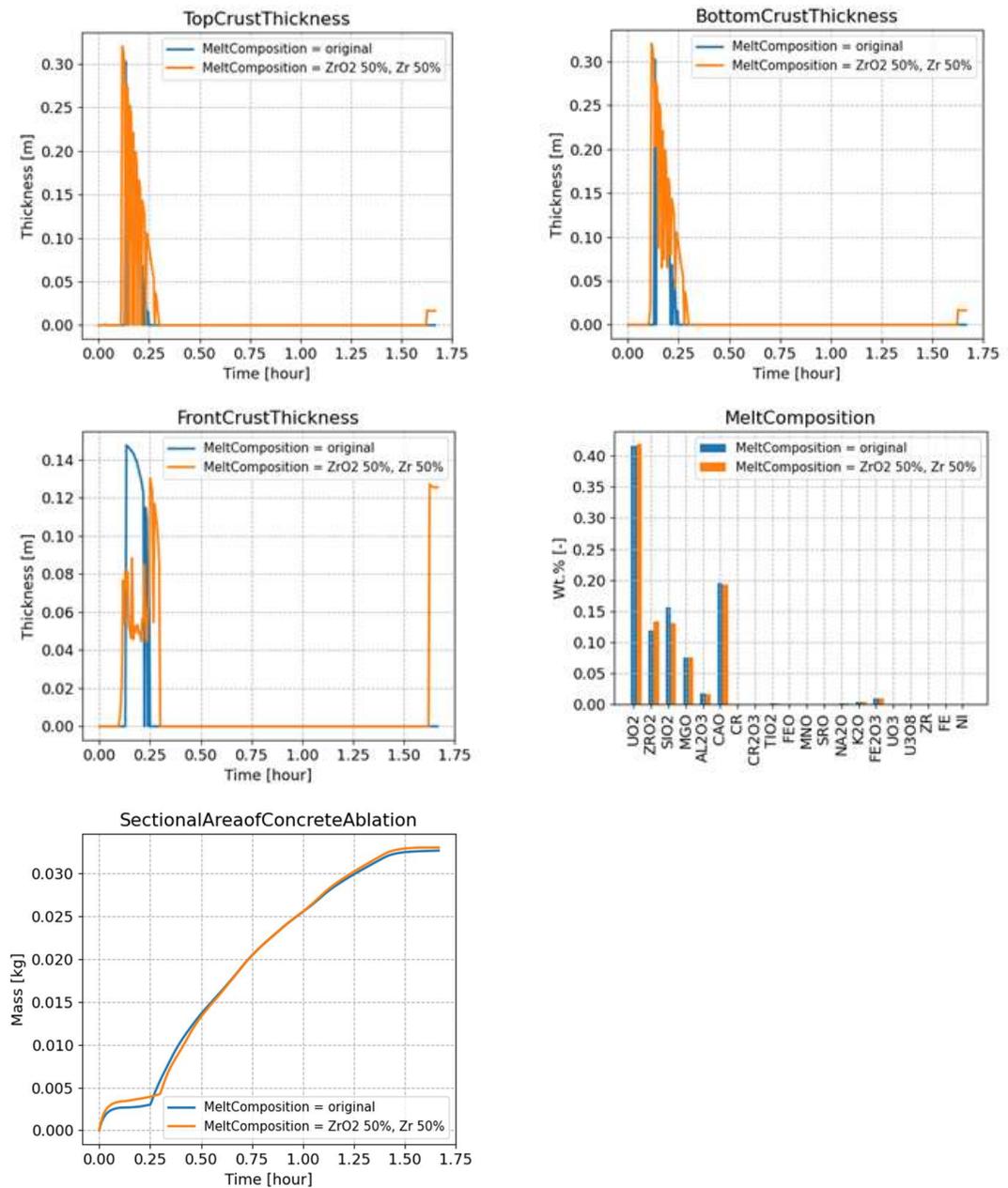


図 B2.6 MACE-M0 実験解析 出力データに対する”MeltComposition”の影響(2/2)

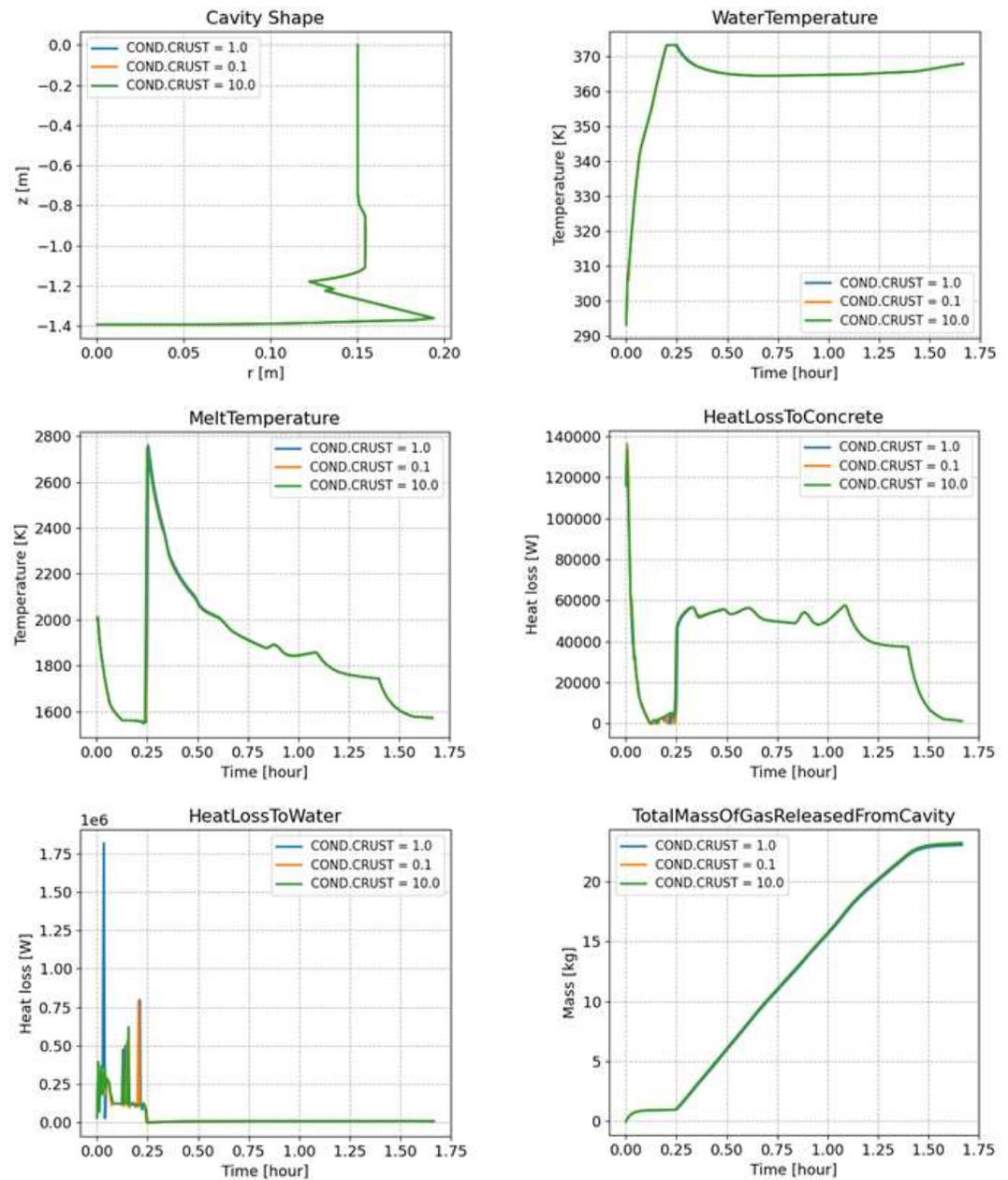


図 B2.7 MACE-M0 実験解析 出力データに対する”COND.CRUST”の影響(1/2)

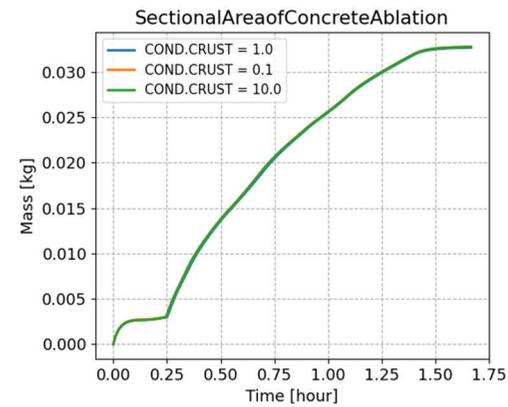
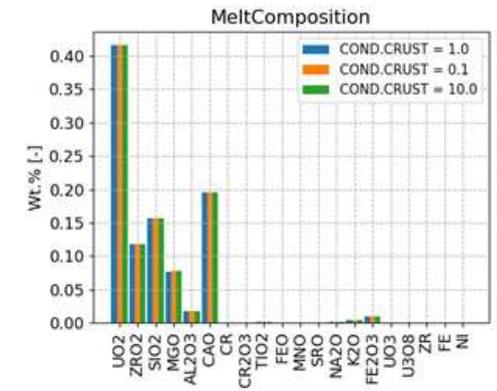
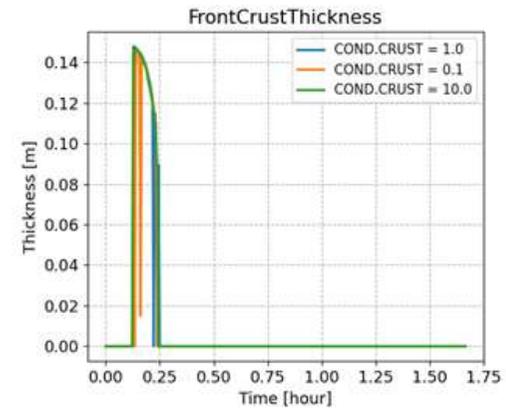
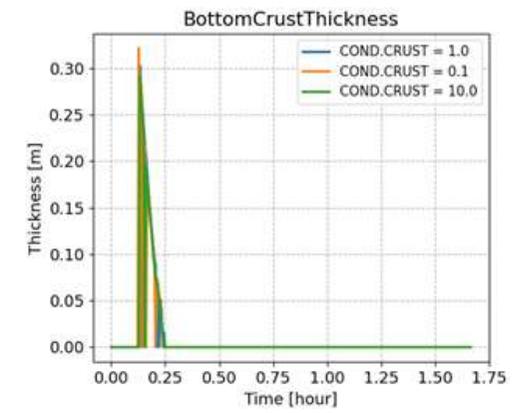
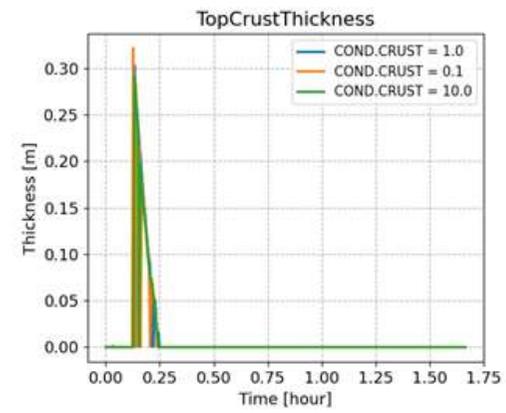


図 B2.7 MACE-M0 実験解析 出力データに対する”COND.CRUST”の影響(2/2)

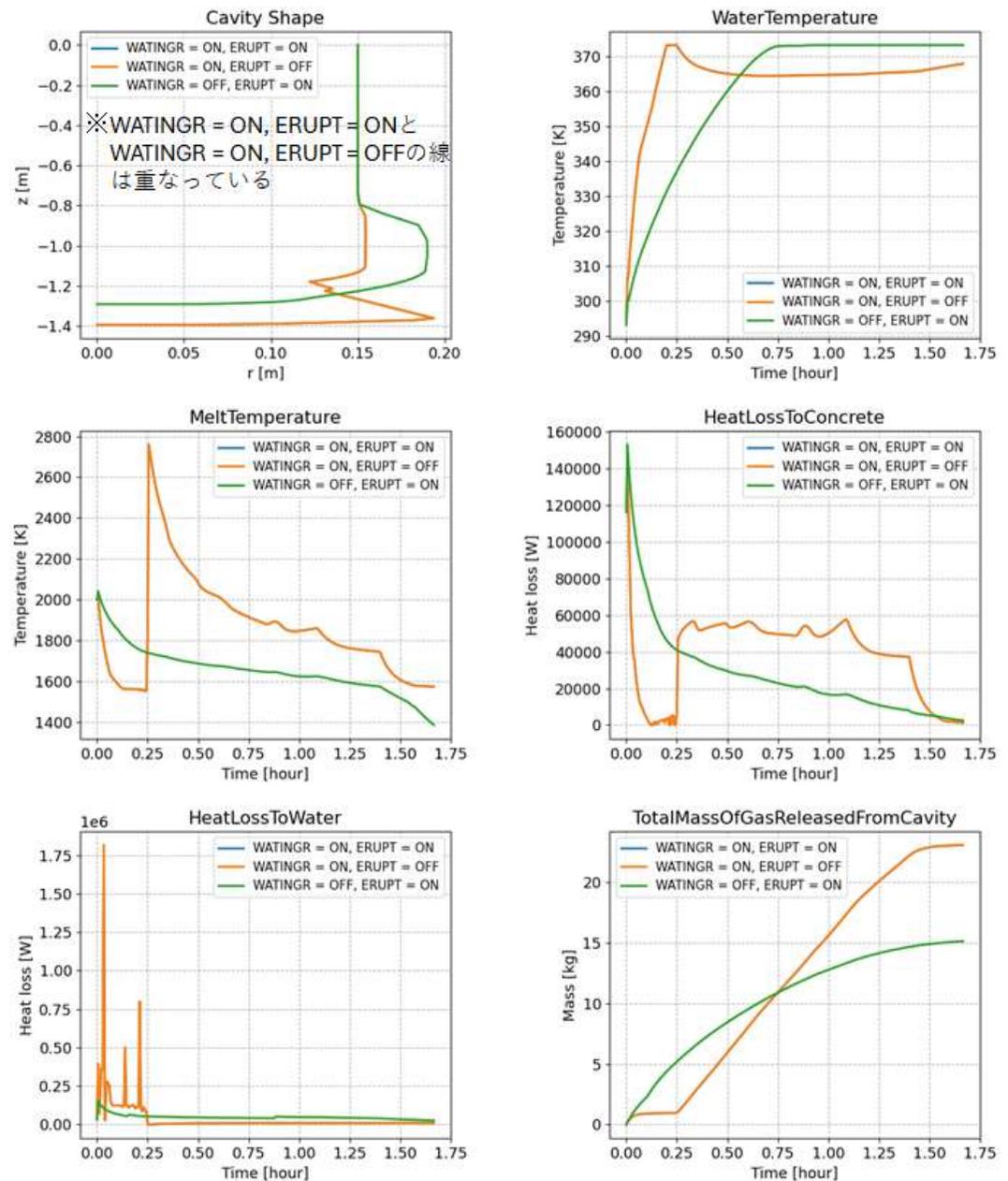


図 B2.8 MACE-M0 実験解析 出力データに対する”WATINGR”と”ERUPT”の影響 (MeltComposition = original) (1/2)

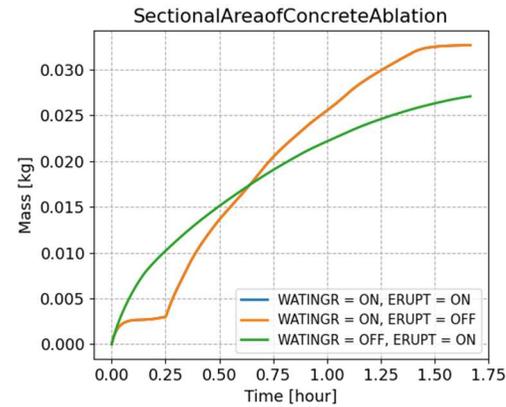
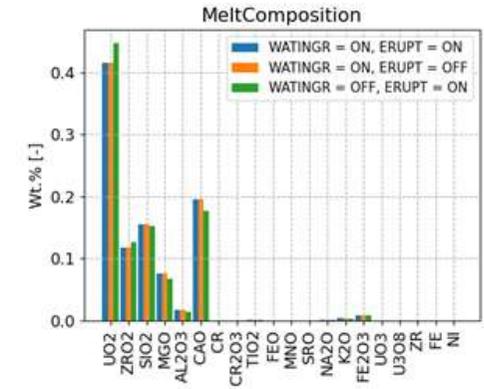
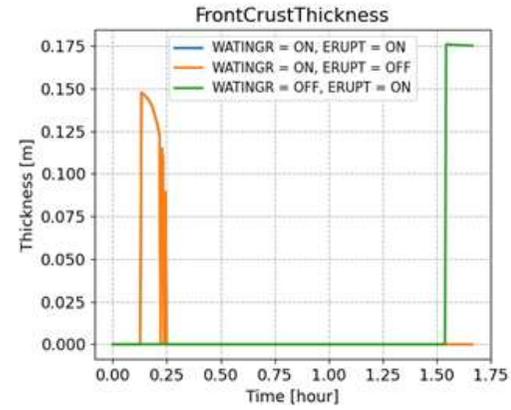
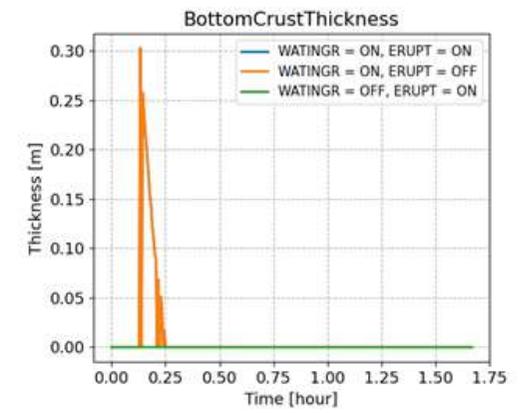
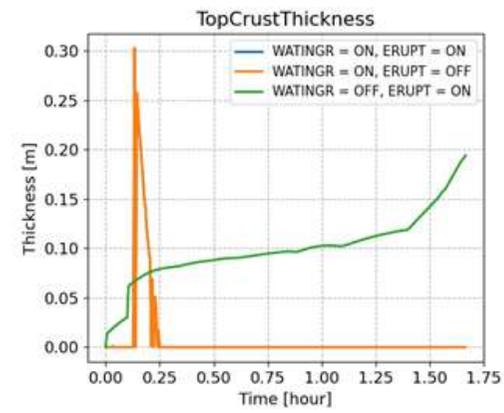


図 B2.8 MACE-M0 実験解析 出力データに対する”WATINGR”と”ERUPT”の影響 (MeltComposition = original) (2/2)

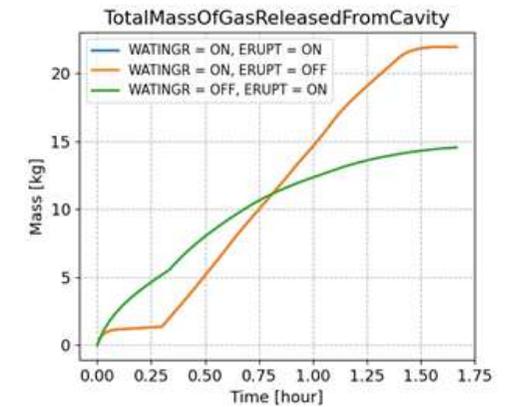
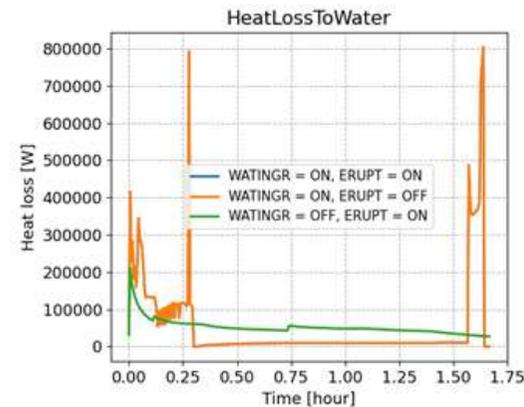
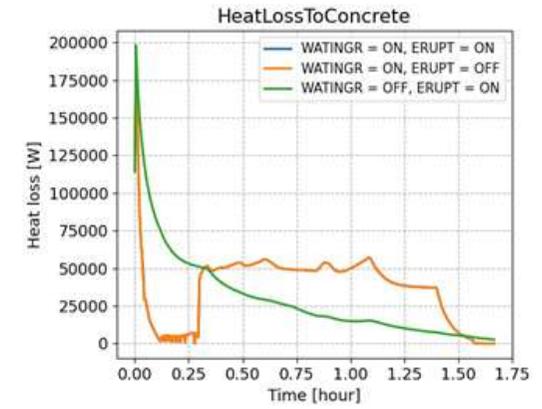
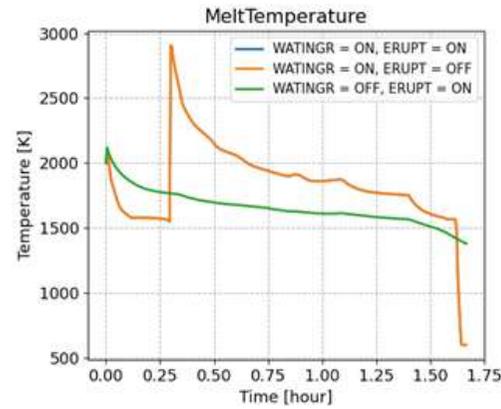
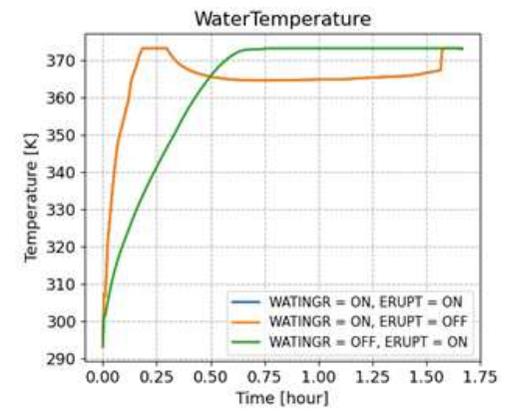
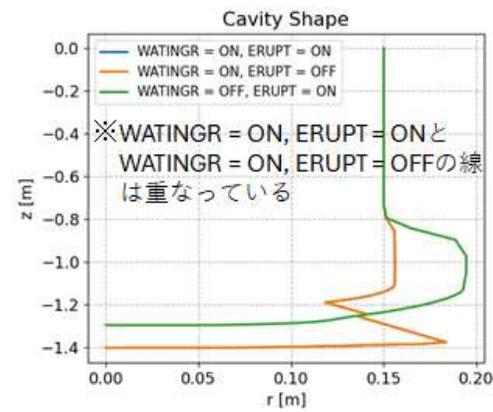


図 B2.9 MACE-M0 実験解析 出力データに対する”WATINGR”と”ERUPT”の影響
 (MeltComposition = ZrO2 50%, Zr 50%) (1/2)

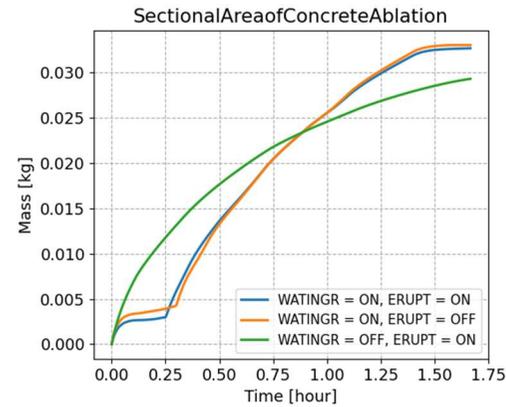
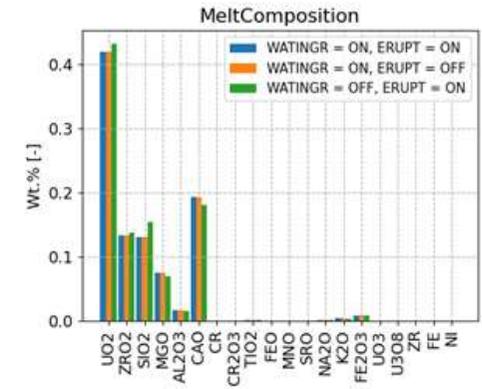
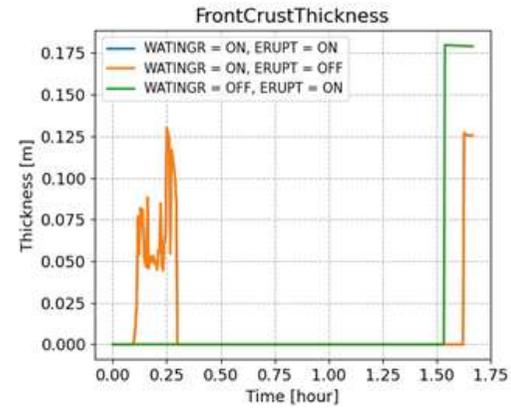
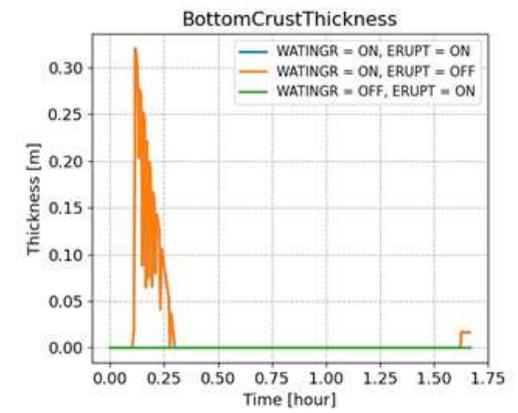
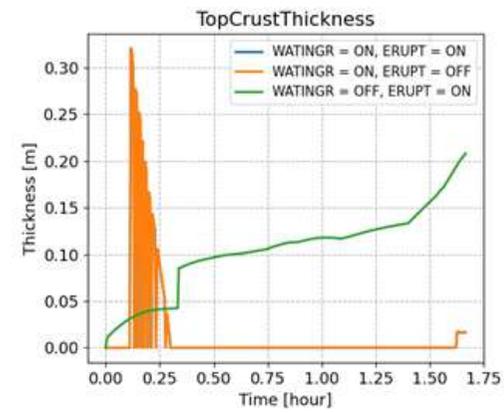


図 B2.9 MACE-M0 実験解析 出力データに対する”WATINGR”と”ERUPT”の影響 (MeltComposition = ZrO2 50%, Zr 50%) (2/2)

B3 VF-U1 ベースケースの解析結果 図

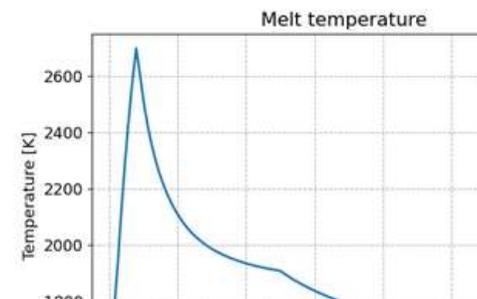
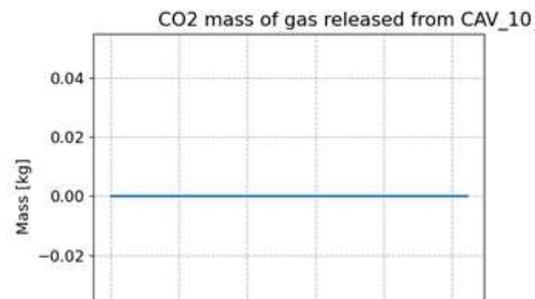
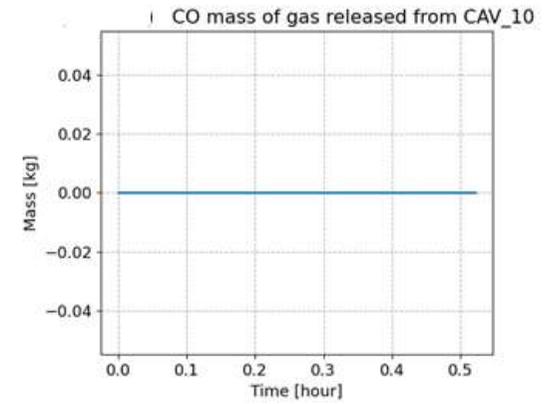
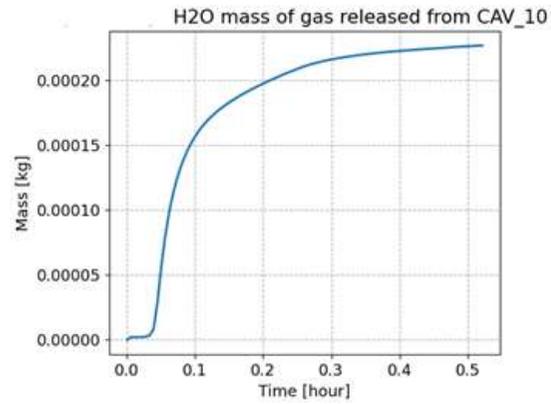
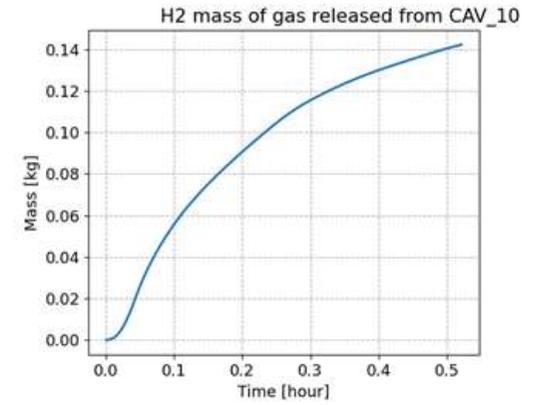
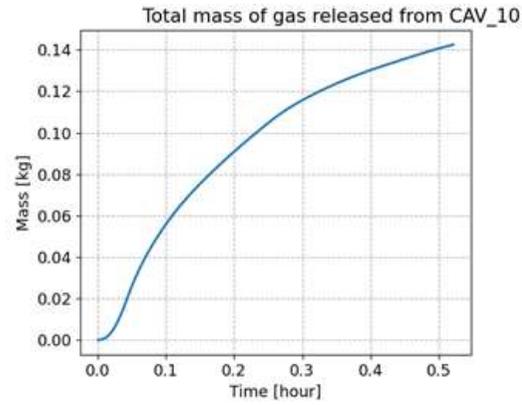
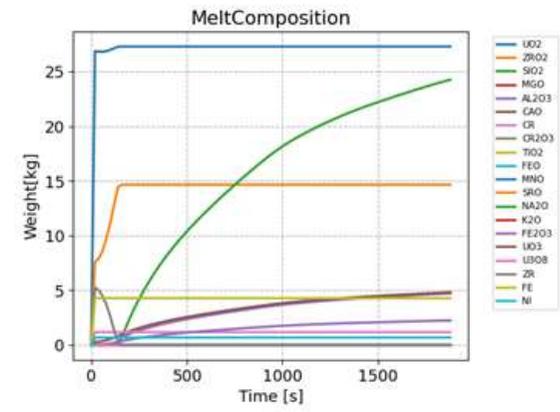
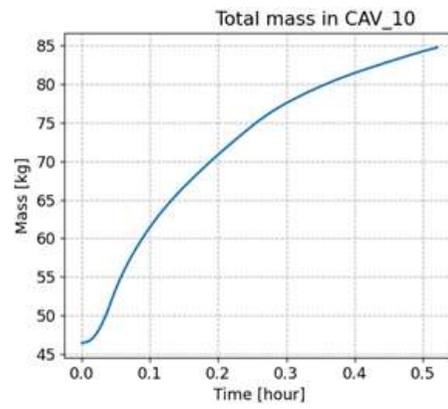


図 B3.1 VULCANO-VF-U1 実験 MELCOR 出力データ(1/2)

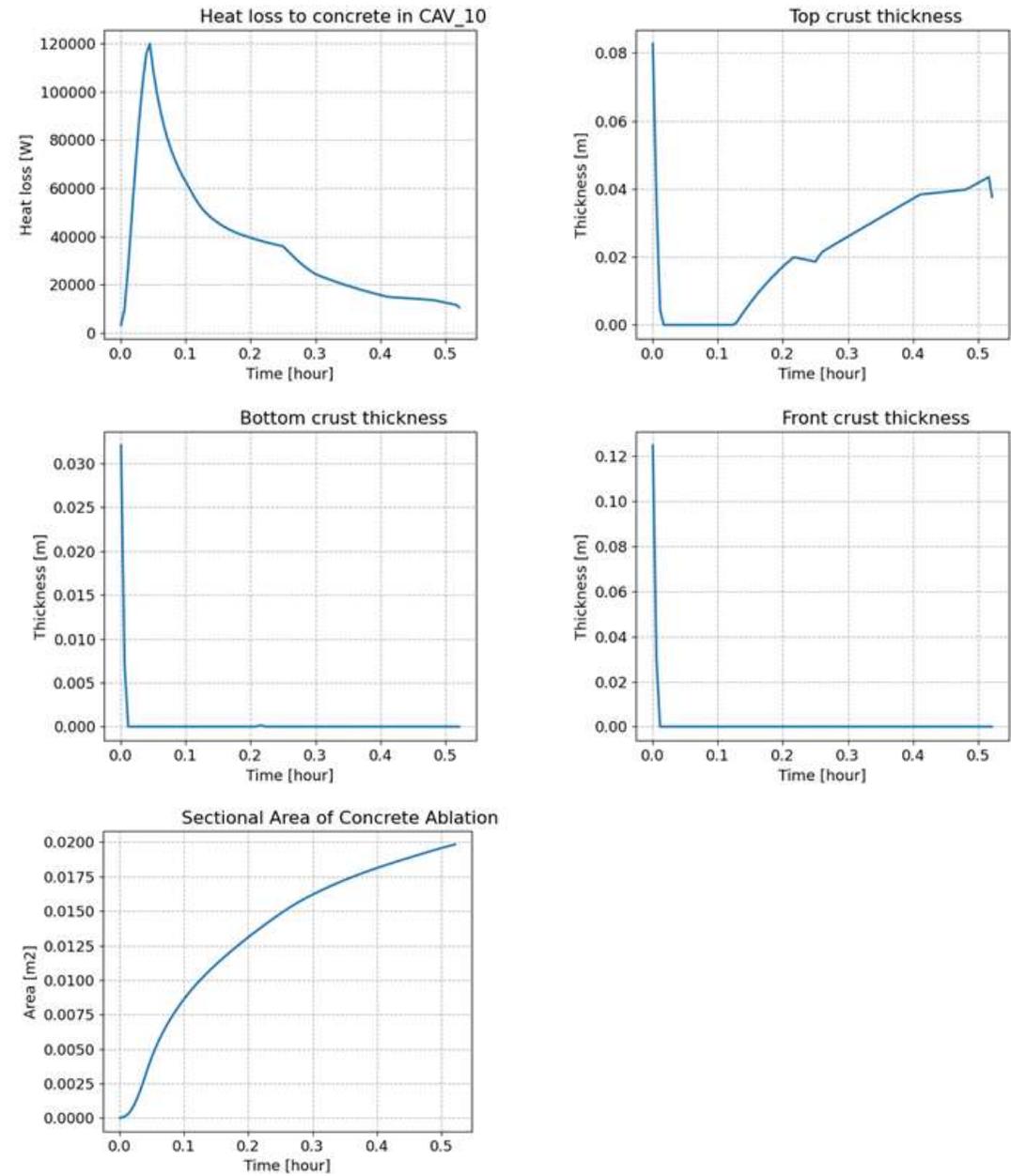


図 B3.1 VULCANO-VF-U1 実験 MELCOR 出力データ(2/2)

B4.1 VF-U1 実験解析の結果 表

表 B4.1 VULCANO-VF-U1 実験 解析終了時刻における出力データ一覧(1/12)

case	Melt Temperature[K]	Total Heat to concrete[kJ]	Radial ablation[m]	Axial ablation[m]	Total mass of released gas [kg]
1	1709.54	69225.7	0.0676	0.0672	0.1424
2	1709.54	69225.7	0.0676	0.0672	0.1424
3	1712.56	71036.3	0.0585	0.0914	0.1461
4	1709.54	69225.7	0.0676	0.0672	0.1424
5	1690.30	69503.2	0.0679	0.0775	0.1430
6	1711.30	68955.1	0.0680	0.0653	0.1419
7	1709.89	70158.8	0.0721	0.0654	0.1443
8	1709.54	69225.7	0.0676	0.0672	0.1424
9	1709.54	69225.7	0.0676	0.0672	0.1424
10	1719.62	76257.6	0.0735	0.0698	0.1567
11	1719.62	76257.6	0.0735	0.0698	0.1567
12	1704.36	67962.5	0.0673	0.0669	0.1397
13	1704.36	67962.5	0.0673	0.0669	0.1397
14	1733.77	71104.3	0.0701	0.0619	0.1463
15	1692.30	68135.9	0.0661	0.0705	0.1402
16	1709.54	69225.7	0.0676	0.0672	0.1424
17	1712.56	71036.3	0.0585	0.0914	0.1461
18	1709.54	69225.7	0.0676	0.0672	0.1424
19	1699.00	72550.1	0.0709	0.0627	0.1492

表 B4.1 VULCANO-VF-U1 実験 解析終了時刻における出力データ一覧(2/12)

case	Melt Temperature[K]	Total Heat to concrete[kJ]	Radial ablation[m]	Axial ablation[m]	Total mass of released gas [kg]
20	1709.54	69225.7	0.0676	0.0672	0.1424
21	1709.54	69225.7	0.0676	0.0672	0.1424
22	1709.54	69225.7	0.0676	0.0672	0.1424
23	1712.51	69374.8	0.0679	0.0666	0.1427
24	1682.43	67661.2	0.0643	0.0724	0.1392
25	1709.54	69225.7	0.0676	0.0672	0.1424
26	1709.54	69225.7	0.0676	0.0672	0.1424
27	1709.54	69225.7	0.0676	0.0672	0.1424
28	1723.40	78242.8	0.0619	0.0993	0.1609
29	1719.62	76257.6	0.0735	0.0698	0.1567
30	1705.85	80581.7	0.0774	0.0679	0.1657
31	1719.62	76257.6	0.0735	0.0698	0.1567
32	1719.62	76257.6	0.0735	0.0698	0.1567
33	1719.62	76257.6	0.0735	0.0698	0.1567
34	1721.46	75975.1	0.0739	0.0680	0.1561
35	1719.37	77479.8	0.0787	0.0673	0.1592
36	1719.62	76257.6	0.0735	0.0698	0.1567
37	1719.62	76257.6	0.0735	0.0698	0.1567
38	1722.72	76384.7	0.0739	0.0692	0.1570

表 B4.1 VULCANO-VF-U1 実験 解析終了時刻における出力データ一覧(3/12)

case	Melt Temperature[K]	Total Heat to concrete[kJ]	Radial ablation[m]	Axial ablation[m]	Total mass of released gas [kg]
39	1691.47	74896.4	0.0704	0.0756	0.1539
40	1719.62	76257.6	0.0735	0.0698	0.1567
41	1719.62	76257.6	0.0735	0.0698	0.1567
42	1722.72	76384.7	0.0739	0.0692	0.1570
43	1691.47	74896.4	0.0704	0.0756	0.1539
44	1719.62	76257.6	0.0735	0.0698	0.1567
45	1719.62	76257.6	0.0735	0.0698	0.1567

表 B4.1 VULCANO-VF-U1 実験 解析終了時刻における出力データ一覧(4/12)

kg]	ZRO2 Mass[kg]	SIO2 Mass[kg]	MGO Mass[kg]	AL2O3 Mass[kg]	CAO Mass[kg]	CR Mass[kg]	CR2O3 Mass[kg]	TIO2 Mass[kg]
30	14.66	24.27	0.00	4.70	4.82	1.16	0.00	0.00
30	14.66	24.27	0.00	4.70	4.82	1.16	0.00	0.00
30	14.66	24.97	0.00	4.82	4.93	1.16	0.00	0.00
30	14.66	24.27	0.00	4.70	4.82	1.16	0.00	0.00
30	14.66	24.38	0.00	4.72	4.83	1.16	0.00	0.00
30	14.66	24.16	0.00	4.68	4.80	1.16	0.00	0.00
30	14.66	24.63	0.00	4.76	4.87	1.16	0.00	0.00
30	14.66	24.27	0.00	4.70	4.82	1.16	0.00	0.00
30	14.66	24.27	0.00	4.70	4.82	1.16	0.00	0.00
30	15.93	24.69	0.00	5.17	5.27	1.16	0.00	0.00
30	15.93	24.69	0.00	5.17	5.27	1.16	0.00	0.00
30	11.04	23.73	0.00	4.61	4.73	1.85	0.00	0.00
30	11.04	23.73	0.00	4.61	4.73	1.85	0.00	0.00
30	14.66	25.00	0.00	4.82	4.94	1.16	0.00	0.00
30	14.66	23.83	0.00	4.62	4.74	1.16	0.00	0.00
30	14.66	24.27	0.00	4.70	4.82	1.16	0.00	0.00
30	14.66	24.97	0.00	4.82	4.93	1.16	0.00	0.00
30	14.66	24.27	0.00	4.70	4.82	1.16	0.00	0.00
30	14.66	25.59	0.00	4.92	5.03	1.16	0.00	0.00

表 B4.1 VULCANO-VF-U1 実験 解析終了時刻における出力データ一覧(5/12)

kg]	ZRO2 Mass[kg]	SIO2 Mass[kg]	MGO Mass[kg]	AL2O3 Mass[kg]	CAO Mass[kg]	CR Mass[kg]	CR2O3 Mass[kg]	TIO2 Mass[kg]
30	14.66	24.27	0.00	4.70	4.82	1.16	0.00	0.00
30	14.66	24.27	0.00	4.70	4.82	1.16	0.00	0.00
30	14.66	24.27	0.00	4.70	4.82	1.16	0.00	0.00
30	14.66	24.33	0.00	4.71	4.83	1.16	0.00	0.00
30	14.66	23.62	0.00	4.59	4.71	1.16	0.00	0.00
30	14.66	24.27	0.00	4.70	4.82	1.16	0.00	0.00
30	14.66	24.27	0.00	4.70	4.82	1.16	0.00	0.00
30	14.66	24.27	0.00	4.70	4.82	1.16	0.00	0.00
30	15.93	25.52	0.00	5.31	5.41	1.16	0.00	0.00
30	15.93	24.69	0.00	5.17	5.27	1.16	0.00	0.00
30	15.93	26.44	0.00	5.47	5.56	1.16	0.00	0.00
30	15.93	24.69	0.00	5.17	5.27	1.16	0.00	0.00
30	15.93	24.69	0.00	5.17	5.27	1.16	0.00	0.00
30	15.93	24.69	0.00	5.17	5.27	1.16	0.00	0.00
30	15.93	24.58	0.00	5.15	5.25	1.16	0.00	0.00
30	15.93	25.19	0.00	5.26	5.35	1.16	0.00	0.00
30	15.93	24.69	0.00	5.17	5.27	1.16	0.00	0.00
30	15.93	24.69	0.00	5.17	5.27	1.16	0.00	0.00
30	15.93	24.75	0.00	5.18	5.28	1.16	0.00	0.00

表 B4.1 VULCANO-VF-U1 実験 解析終了時刻における出力データ一覧(6/12)

kg]	ZRO2 Mass[kg]	SIO2 Mass[kg]	MGO Mass[kg]	AL2O3 Mass[kg]	CAO Mass[kg]	CR Mass[kg]	CR2O3 Mass[kg]	TIO2 Mass[kg]
30	15.93	24.14	0.00	5.08	5.18	1.16	0.00	0.00
30	15.93	24.69	0.00	5.17	5.27	1.16	0.00	0.00
30	15.93	24.69	0.00	5.17	5.27	1.16	0.00	0.00
30	15.93	24.75	0.00	5.18	5.28	1.16	0.00	0.00
30	15.93	24.14	0.00	5.08	5.18	1.16	0.00	0.00
30	15.93	24.69	0.00	5.17	5.27	1.16	0.00	0.00
30	15.93	24.69	0.00	5.17	5.27	1.16	0.00	0.00

表 B4.1 VULCANO-VF-U1 実験 解析終了時刻における出力データ一覧(7/12)

kg]	SRO Mass[kg]	NA2O Mass[kg]	K2O Mass[kg]	FE2O3 Mass[kg]	UO3 Mass[kg]	U3O8 Mass[kg]	ZR Mass[kg]	FE Mass[kg]
00	0.00	0.00	0.00	2.23	0.00	0.00	0.00	4.27
00	0.00	0.00	0.00	2.23	0.00	0.00	0.00	4.27
00	0.00	0.00	0.00	2.29	0.00	0.00	0.00	4.27
00	0.00	0.00	0.00	2.23	0.00	0.00	0.00	4.27
00	0.00	0.00	0.00	2.24	0.00	0.00	0.00	4.27
00	0.00	0.00	0.00	2.23	0.00	0.00	0.00	4.27
00	0.00	0.00	0.00	2.26	0.00	0.00	0.00	4.27
00	0.00	0.00	0.00	2.23	0.00	0.00	0.00	4.27
00	0.00	0.00	0.00	2.23	0.00	0.00	0.00	4.27
00	0.00	0.00	0.00	2.46	0.00	0.00	0.00	4.27
00	0.00	0.00	0.00	2.46	0.00	0.00	0.00	4.27
00	0.00	0.00	0.00	2.19	0.00	0.00	0.00	6.80
00	0.00	0.00	0.00	2.19	0.00	0.00	0.00	6.80
00	0.00	0.00	0.00	2.29	0.00	0.00	0.00	4.27
00	0.00	0.00	0.00	2.20	0.00	0.00	0.00	4.27
00	0.00	0.00	0.00	2.23	0.00	0.00	0.00	4.27
00	0.00	0.00	0.00	2.29	0.00	0.00	0.00	4.27
00	0.00	0.00	0.00	2.23	0.00	0.00	0.00	4.27
00	0.00	0.00	0.00	2.34	0.00	0.00	0.00	4.27

表 B4.1 VULCANO-VF-U1 実験 解析終了時刻における出力データ一覧(8/12)

kg]	SRO Mass[kg]	NA2O Mass[kg]	K2O Mass[kg]	FE2O3 Mass[kg]	UO3 Mass[kg]	U3O8 Mass[kg]	ZR Mass[kg]	FE Mass[kg]
00	0.00	0.00	0.00	2.23	0.00	0.00	0.00	4.27
00	0.00	0.00	0.00	2.23	0.00	0.00	0.00	4.27
00	0.00	0.00	0.00	2.23	0.00	0.00	0.00	4.27
00	0.00	0.00	0.00	2.24	0.00	0.00	0.00	4.27
00	0.00	0.00	0.00	2.18	0.00	0.00	0.00	4.27
00	0.00	0.00	0.00	2.23	0.00	0.00	0.00	4.27
00	0.00	0.00	0.00	2.23	0.00	0.00	0.00	4.27
00	0.00	0.00	0.00	2.23	0.00	0.00	0.00	4.27
00	0.00	0.00	0.00	2.52	0.00	0.00	0.00	4.27
00	0.00	0.00	0.00	2.46	0.00	0.00	0.00	4.27
00	0.00	0.00	0.00	2.60	0.00	0.00	0.00	4.27
00	0.00	0.00	0.00	2.46	0.00	0.00	0.00	4.27
00	0.00	0.00	0.00	2.46	0.00	0.00	0.00	4.27
00	0.00	0.00	0.00	2.46	0.00	0.00	0.00	4.27
00	0.00	0.00	0.00	2.45	0.00	0.00	0.00	4.27
00	0.00	0.00	0.00	2.50	0.00	0.00	0.00	4.27
00	0.00	0.00	0.00	2.46	0.00	0.00	0.00	4.27
00	0.00	0.00	0.00	2.46	0.00	0.00	0.00	4.27
00	0.00	0.00	0.00	2.46	0.00	0.00	0.00	4.27

表 B4.1 VULCANO-VF-U1 実験 解析終了時刻における出力データ一覧(9/12)

kg]	SRO Mass[kg]	NA2O Mass[kg]	K2O Mass[kg]	FE2O3 Mass[kg]	UO3 Mass[kg]	U3O8 Mass[kg]	ZR Mass[kg]	FE Mass[kg]
00	0.00	0.00	0.00	2.41	0.00	0.00	0.00	4.27
00	0.00	0.00	0.00	2.46	0.00	0.00	0.00	4.27
00	0.00	0.00	0.00	2.46	0.00	0.00	0.00	4.27
00	0.00	0.00	0.00	2.46	0.00	0.00	0.00	4.27
00	0.00	0.00	0.00	2.41	0.00	0.00	0.00	4.27
00	0.00	0.00	0.00	2.46	0.00	0.00	0.00	4.27
00	0.00	0.00	0.00	2.46	0.00	0.00	0.00	4.27

表 B4.1 VULCANO-VF-U1 実験 解析終了時刻における出力データ一覧(10/12)

Total mass of released H2 [g]	Total mass of released H2O [kg]	Total mass of released CO [kg]	Total mass of released CO2 [kg]	Top Crust Thickness [m]	Bottom Crust Thickness [m]	Front Crust Thickness [m]	Section of Crust Ablation
0.1422	0.0002	0.0000	0.0000	0.0376	0.0000	0.0000	0
0.1422	0.0002	0.0000	0.0000	0.0376	0.0000	0.0000	0
0.1458	0.0003	0.0000	0.0000	0.0463	0.0000	0.0000	0
0.1422	0.0002	0.0000	0.0000	0.0376	0.0000	0.0000	0
0.1428	0.0002	0.0000	0.0000	0.0069	0.0069	0.2458	0
0.1417	0.0002	0.0000	0.0000	0.0445	0.0000	0.0000	0
0.1441	0.0002	0.0000	0.0000	0.0438	0.0000	0.0000	0
0.1422	0.0002	0.0000	0.0000	0.0376	0.0000	0.0000	0
0.1422	0.0002	0.0000	0.0000	0.0376	0.0000	0.0000	0
0.1565	0.0002	0.0000	0.0000	0.0420	0.0000	0.0000	0
0.1565	0.0002	0.0000	0.0000	0.0420	0.0000	0.0000	0
0.1395	0.0003	0.0000	0.0000	0.0248	0.0000	0.0000	0
0.1395	0.0003	0.0000	0.0000	0.0248	0.0000	0.0000	0
0.1460	0.0003	0.0000	0.0000	0.0253	0.0000	0.0000	0
0.1400	0.0002	0.0000	0.0000	0.0368	0.0000	0.0000	0
0.1422	0.0002	0.0000	0.0000	0.0376	0.0000	0.0000	0
0.1458	0.0003	0.0000	0.0000	0.0463	0.0000	0.0000	0
0.1422	0.0002	0.0000	0.0000	0.0376	0.0000	0.0000	0
0.1489	0.0003	0.0000	0.0000	0.0266	0.0000	0.0000	0

表 B4.1 VULCANO-VF-U1 実験 解析終了時刻における出力データ一覧(11/12)

Total mass of released H2 [g]	Total mass of released H2O [kg]	Total mass of released CO [kg]	Total mass of released CO2 [kg]	Top Crust Thickness [m]	Bottom Crust Thickness [m]	Front Crust Thickness [m]	Section of Crust Ablation
0.1422	0.0002	0.0000	0.0000	0.0376	0.0000	0.0000	0
0.1422	0.0002	0.0000	0.0000	0.0376	0.0000	0.0000	0
0.1422	0.0002	0.0000	0.0000	0.0376	0.0000	0.0000	0
0.1425	0.0002	0.0000	0.0000	0.0419	0.0000	0.0000	0
0.1389	0.0002	0.0000	0.0000	0.0404	0.0000	0.0000	0
0.1422	0.0002	0.0000	0.0000	0.0376	0.0000	0.0000	0
0.1422	0.0002	0.0000	0.0000	0.0376	0.0000	0.0000	0
0.1422	0.0002	0.0000	0.0000	0.0376	0.0000	0.0000	0
0.1607	0.0002	0.0000	0.0000	0.0449	0.0000	0.0000	0
0.1565	0.0002	0.0000	0.0000	0.0420	0.0000	0.0000	0
0.1654	0.0002	0.0000	0.0000	0.0267	0.0000	0.0000	0
0.1565	0.0002	0.0000	0.0000	0.0420	0.0000	0.0000	0
0.1565	0.0002	0.0000	0.0000	0.0420	0.0000	0.0000	0
0.1565	0.0002	0.0000	0.0000	0.0420	0.0000	0.0000	0
0.1565	0.0002	0.0000	0.0000	0.0420	0.0000	0.0000	0
0.1560	0.0002	0.0000	0.0000	0.0425	0.0000	0.0000	0
0.1591	0.0002	0.0000	0.0000	0.0423	0.0000	0.0000	0
0.1565	0.0002	0.0000	0.0000	0.0420	0.0000	0.0000	0
0.1565	0.0002	0.0000	0.0000	0.0420	0.0000	0.0000	0
0.1568	0.0002	0.0000	0.0000	0.0399	0.0000	0.0000	0

表 B4.1 VULCANO-VF-U1 実験 解析終了時刻における出力データ一覧(12/12)

Total mass of released H2 [g]	Total mass of released H2O [kg]	Total mass of released CO [kg]	Total mass of released CO2 [kg]	Top Crust Thickness [m]	Bottom Crust Thickness [m]	Front Crust Thickness [m]	Section of Crust Ablation
0.1537	0.0002	0.0000	0.0000	0.0576	0.0000	0.0000	0
0.1565	0.0002	0.0000	0.0000	0.0420	0.0000	0.0000	0
0.1565	0.0002	0.0000	0.0000	0.0420	0.0000	0.0000	0
0.1568	0.0002	0.0000	0.0000	0.0399	0.0000	0.0000	0
0.1537	0.0002	0.0000	0.0000	0.0576	0.0000	0.0000	0
0.1565	0.0002	0.0000	0.0000	0.0420	0.0000	0.0000	0
0.1565	0.0002	0.0000	0.0000	0.0420	0.0000	0.0000	0

B4.2 VF-U1 実験解析の結果 図

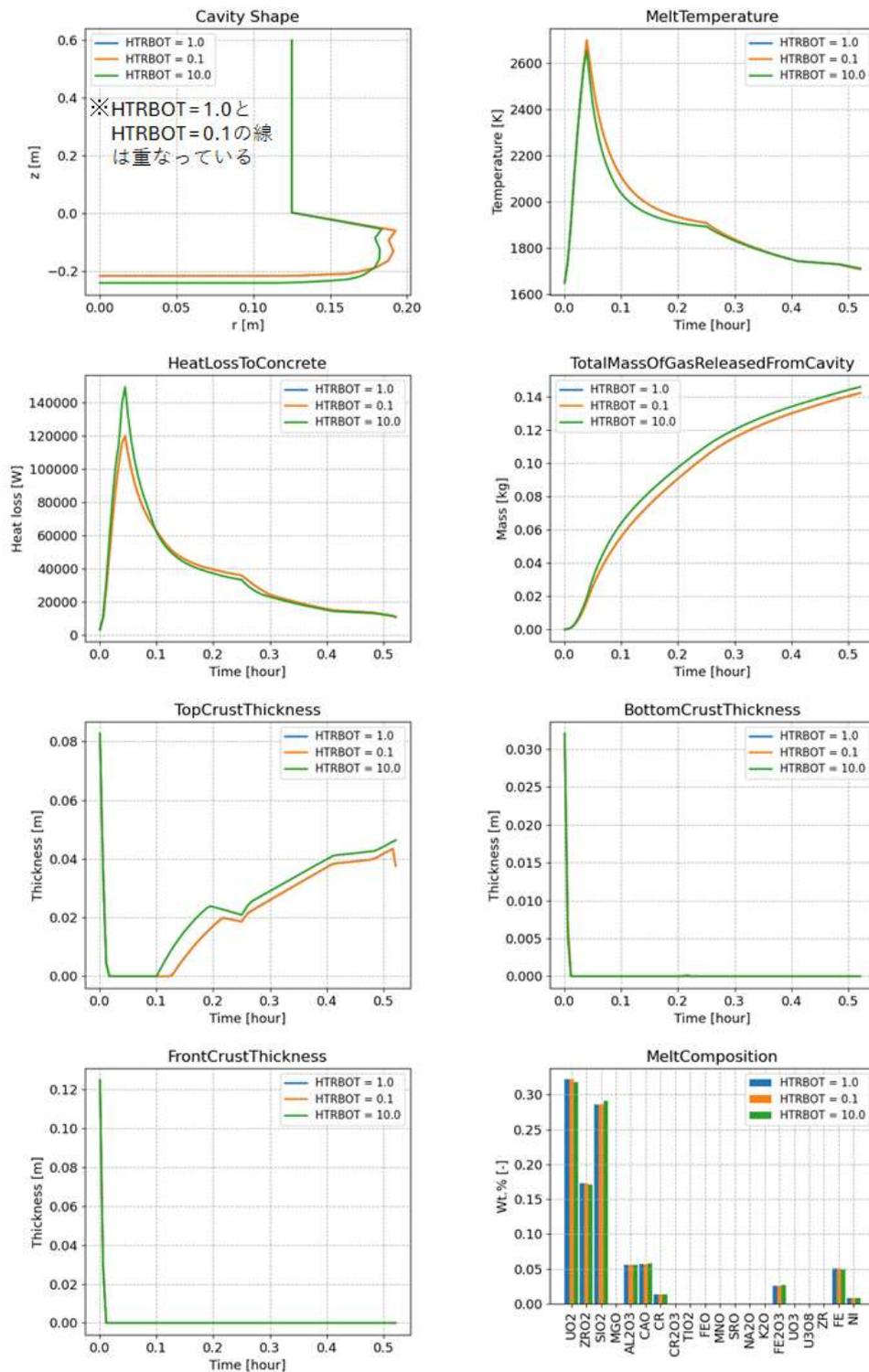


図 B4.1 VULCANO-VF-U1 実験解析 出力データに対する”HTRBOT”の影響(1/2)

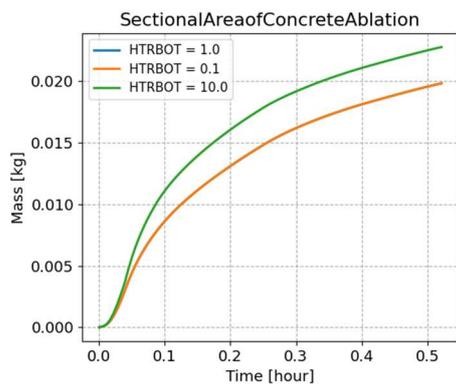


図 B4.1 VULCANO-VF-U1 実験解析 出力データに対する”HTRBOT”の影響(2/2)

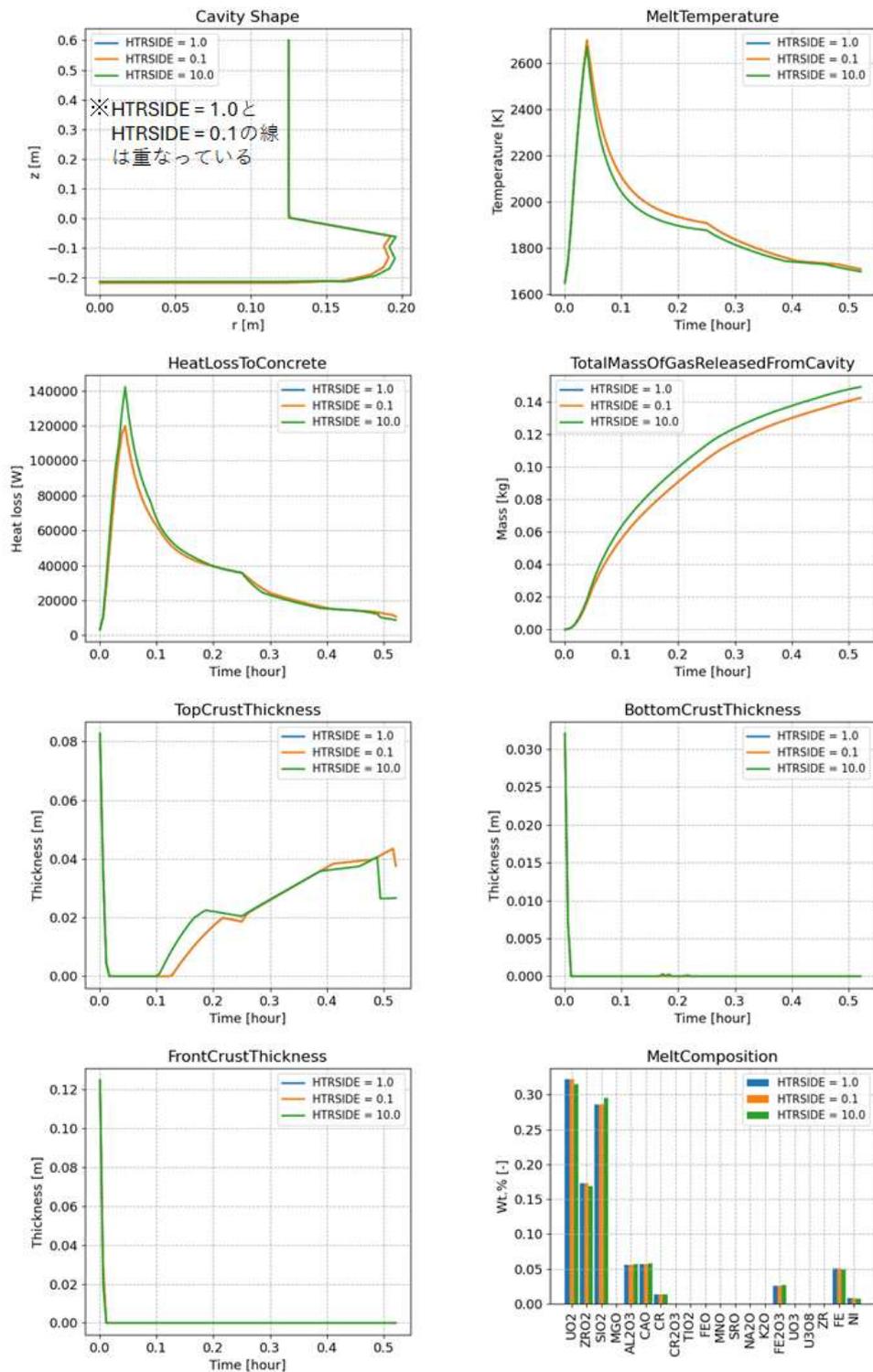


図 B4.2 VULCANO-VF-U1 実験解析 出カデータに対する”HTRSIDE”の影響(1/2)

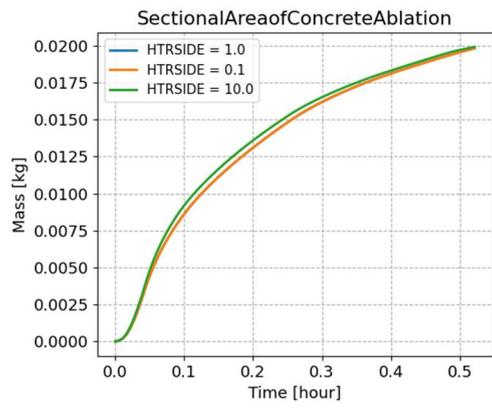


図 B4.2 VULCANO-VF-U1 実験解析 出力データに対する”HTRSIDE”の影響(2/2)

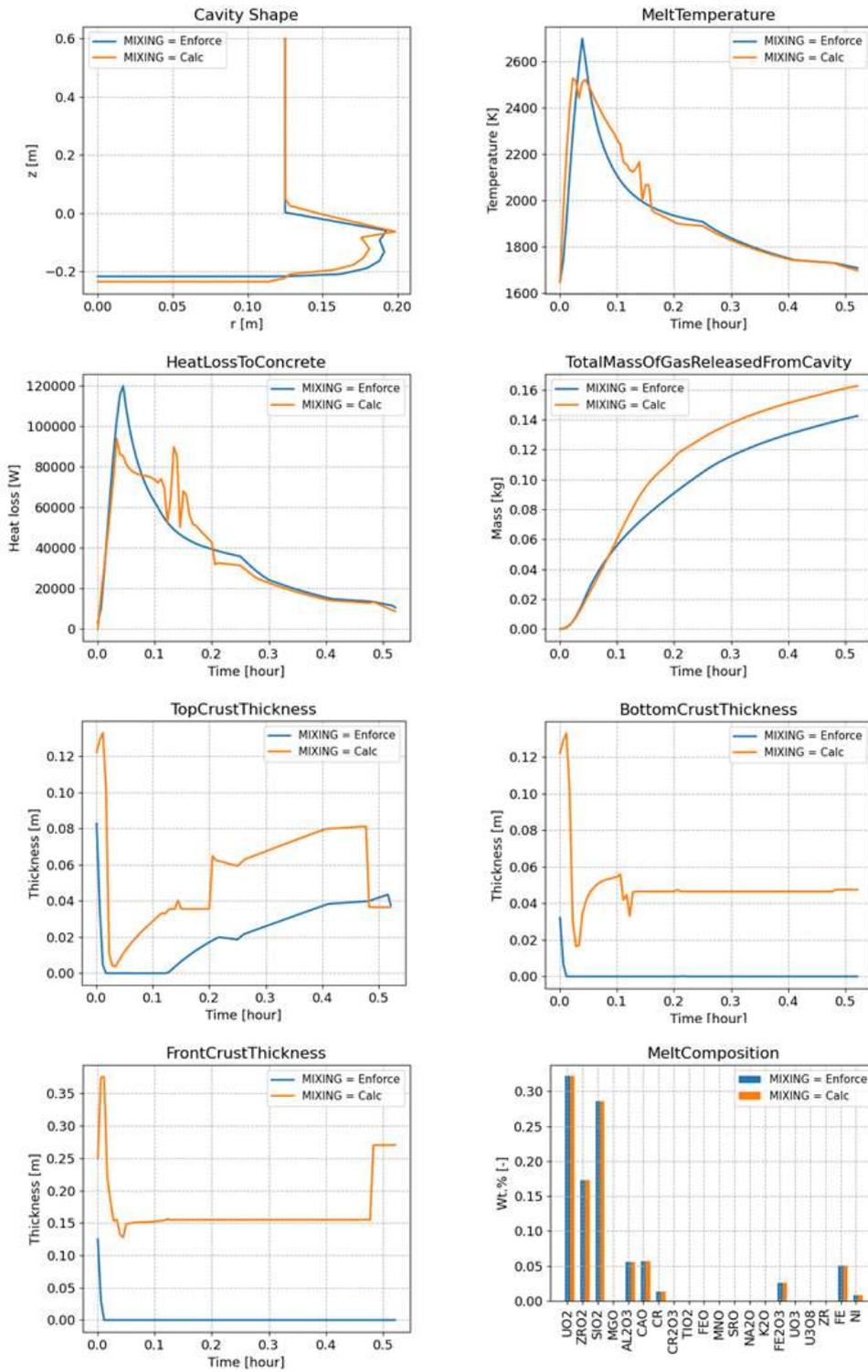


図 B4.3 VULCANO-VF-U1 実験解析 出力データに対する”MIXING”の影響(1/2)

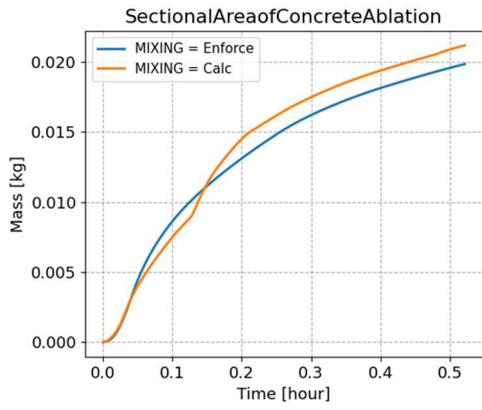


図 B4.3 VULCANO-VF-U1 実験解析 出力データに対する”MIXING”の影響(2/2)

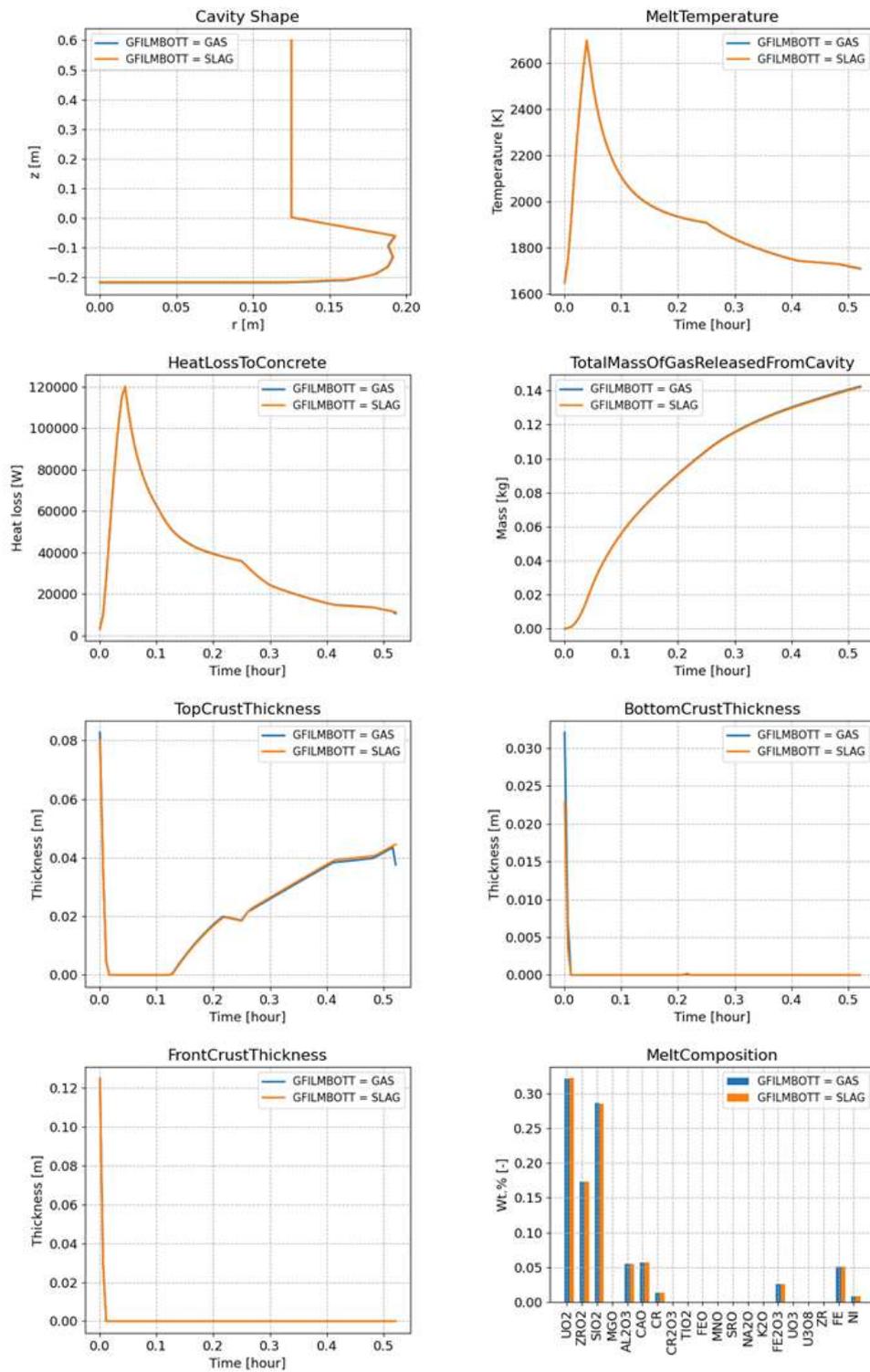


図 B4.4 VULCANO-VF-U1 実験解析 出力データに対する”GFILMBOTT”の影響(1/2)

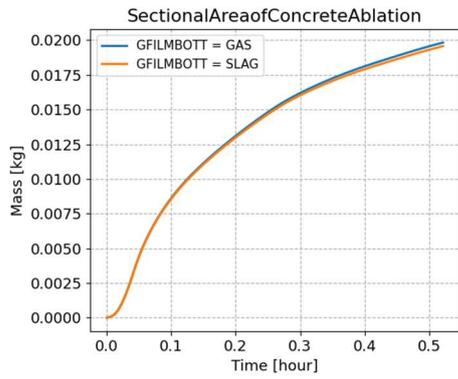


図 B4.4 VULCANO-VF-U1 実験解析 出力データに対する”GFILMBOTT”の影響(2/2)

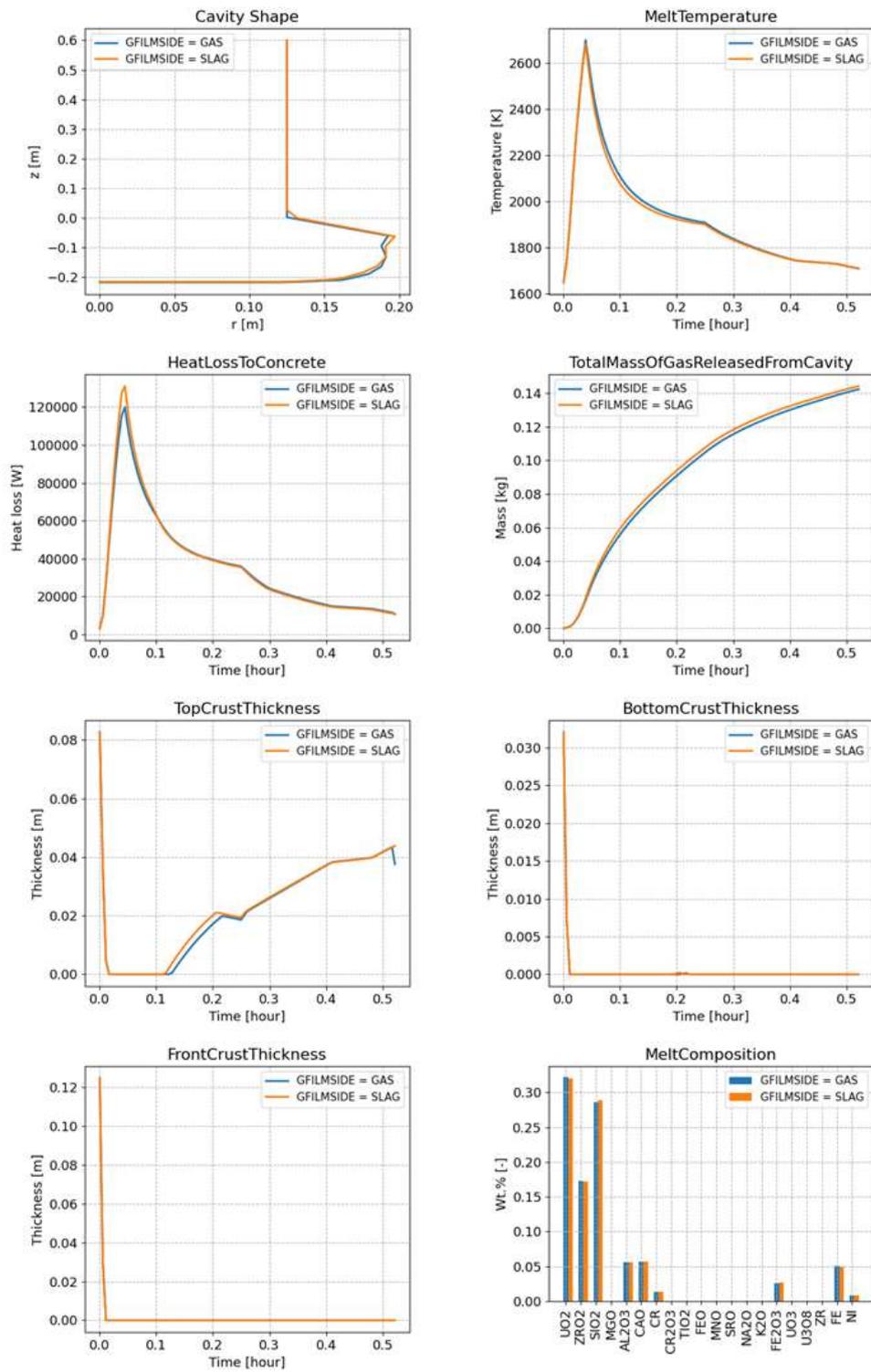


図 B4.5 VULCANO-VF-U1 実験解析 出力データに対する”GFILMSIDE”の影響(1/2)

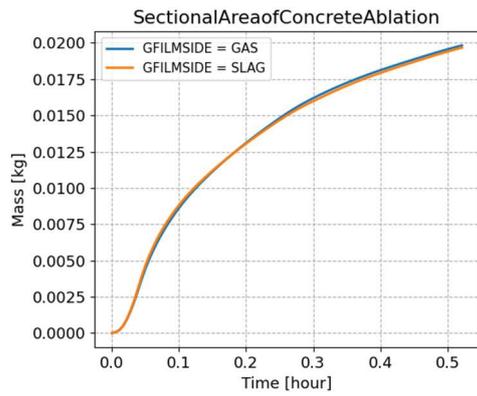


図 B4.5 VULCANO-VF-U1 実験解析 出力データに対する”GFILMSIDE”の影響(2/2)

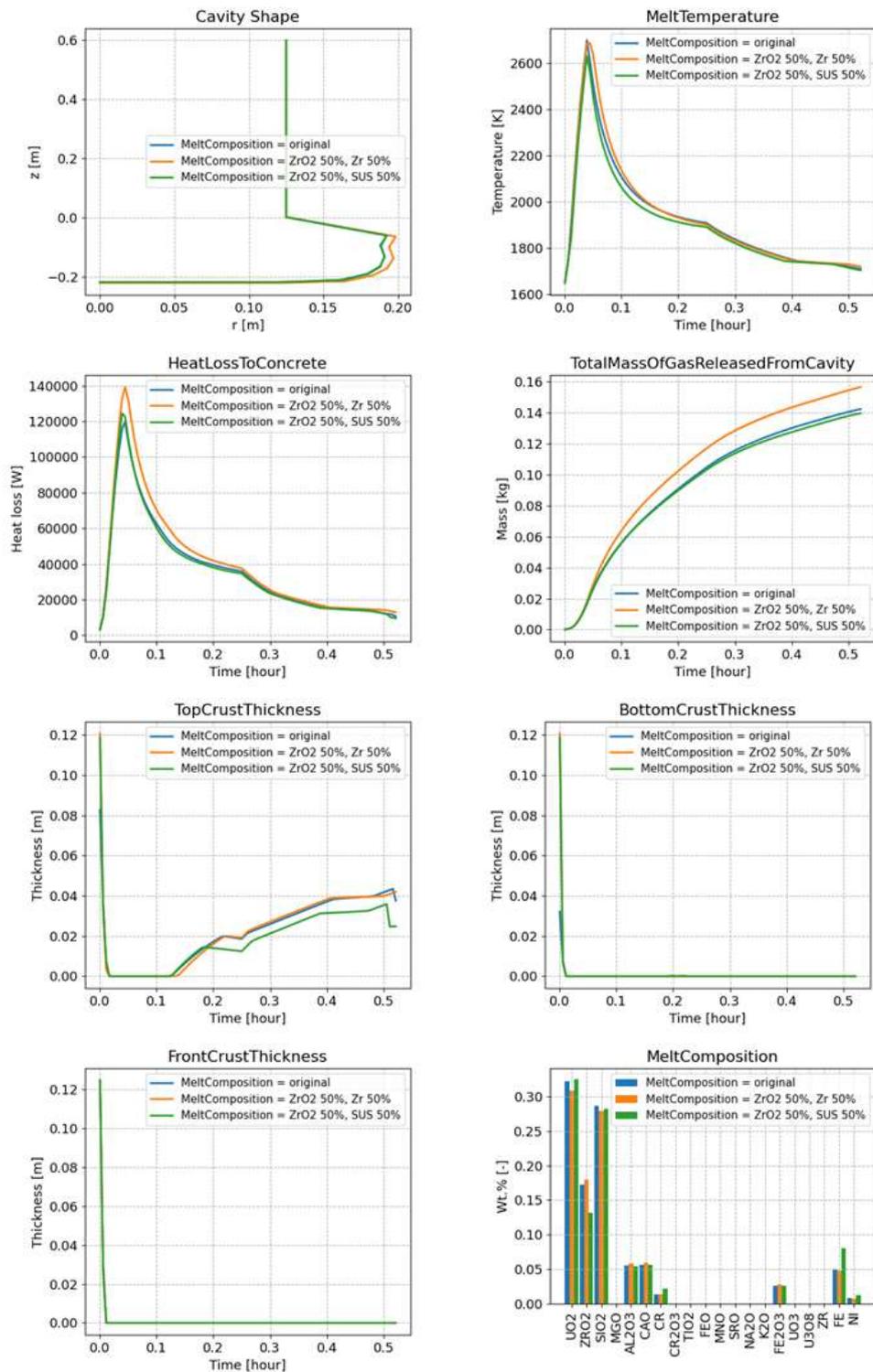


図 B4.6 VULCANO-VF-U1 実験解析 出カデータに対する”MeltComposition”の影響(1/2)

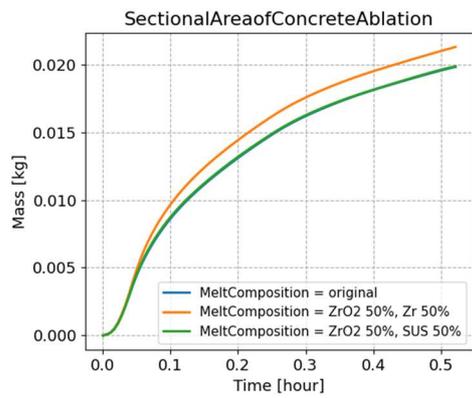


図 B4.6 VULCANO-VF-U1 実験解析 出力データに対する”MeltComposition”の影響(2/2)

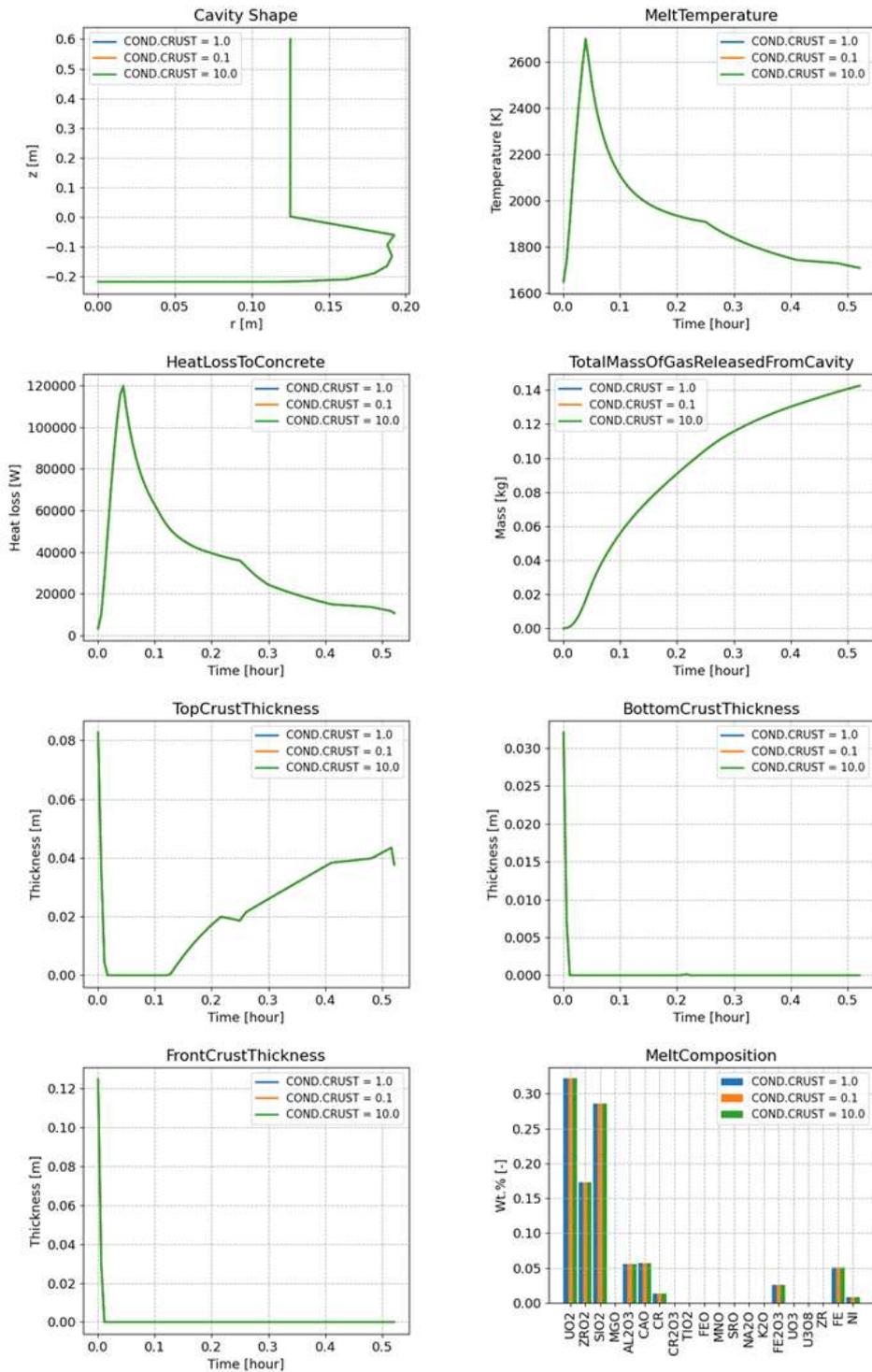


図 B4.7 VULCANO-VF-U1 実験解析 出力データに対する”COND.CRUST”の影響 (MeltComposition = original)(1/2)

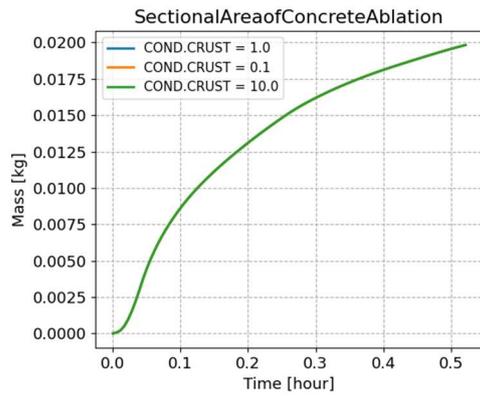


図 B4.7 VULCANO-VF-U1 実験解析 出力データに対する”COND.CRUST”の影響
(MeltComposition = original)(2/2)

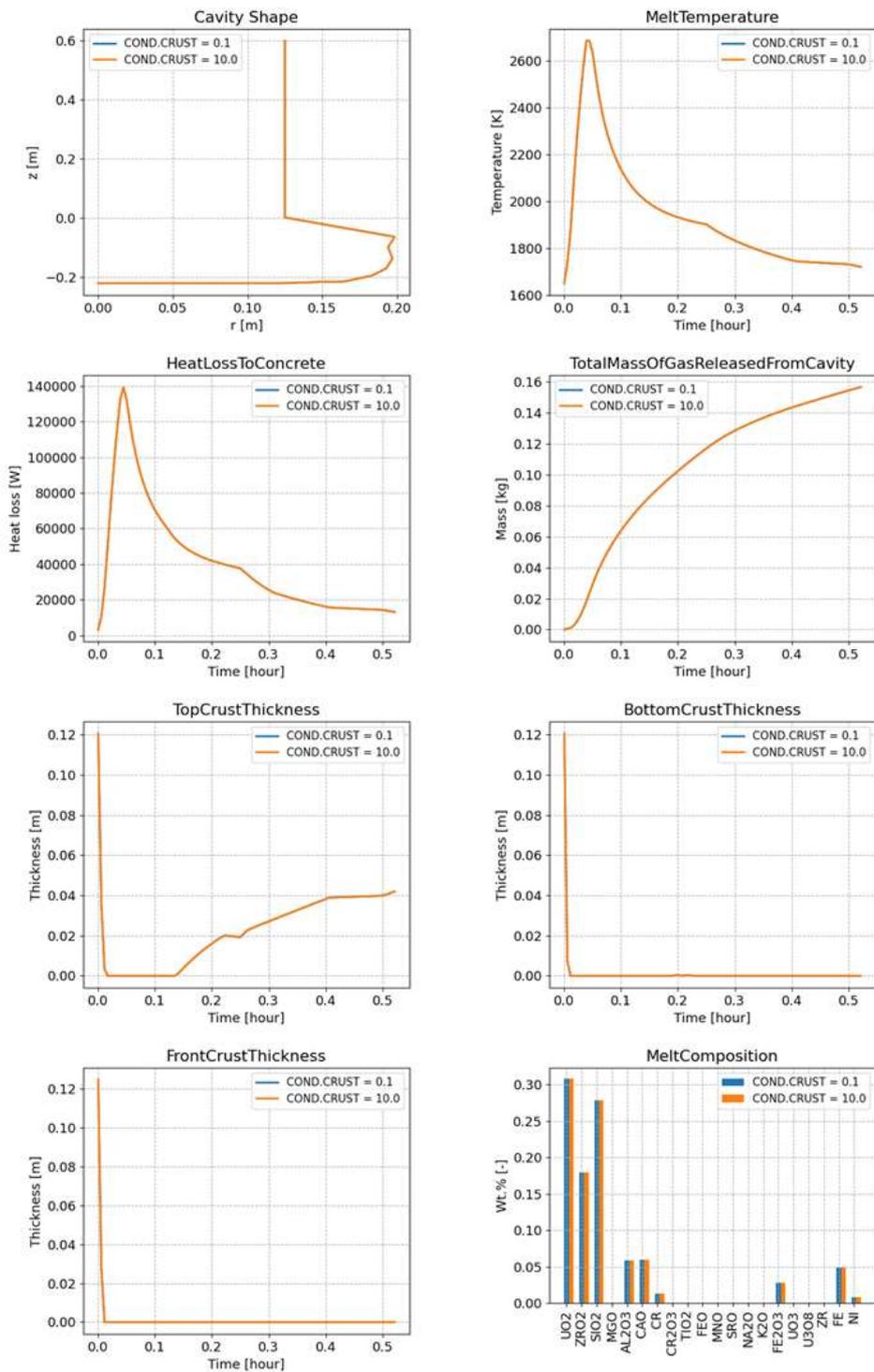


図 B4.8 VULCANO-VF-U1 実験解析 出力データに対する”COND.CRUST”の影響
(MeltComposition = ZrO2 50%, Zr 50%)(1/2)

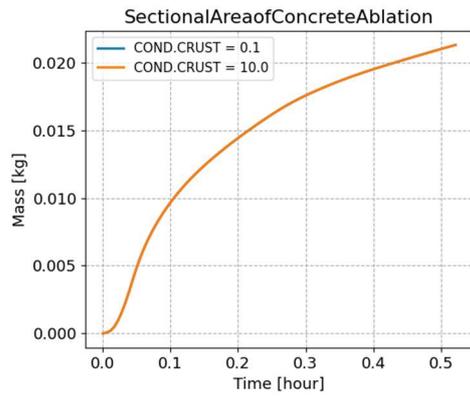


図 B4.8 VULCANO-VF-U1 実験解析 出力データに対する”COND.CRUST”の影響
(MeltComposition = ZrO2 50%, Zr 50%)(2/2)

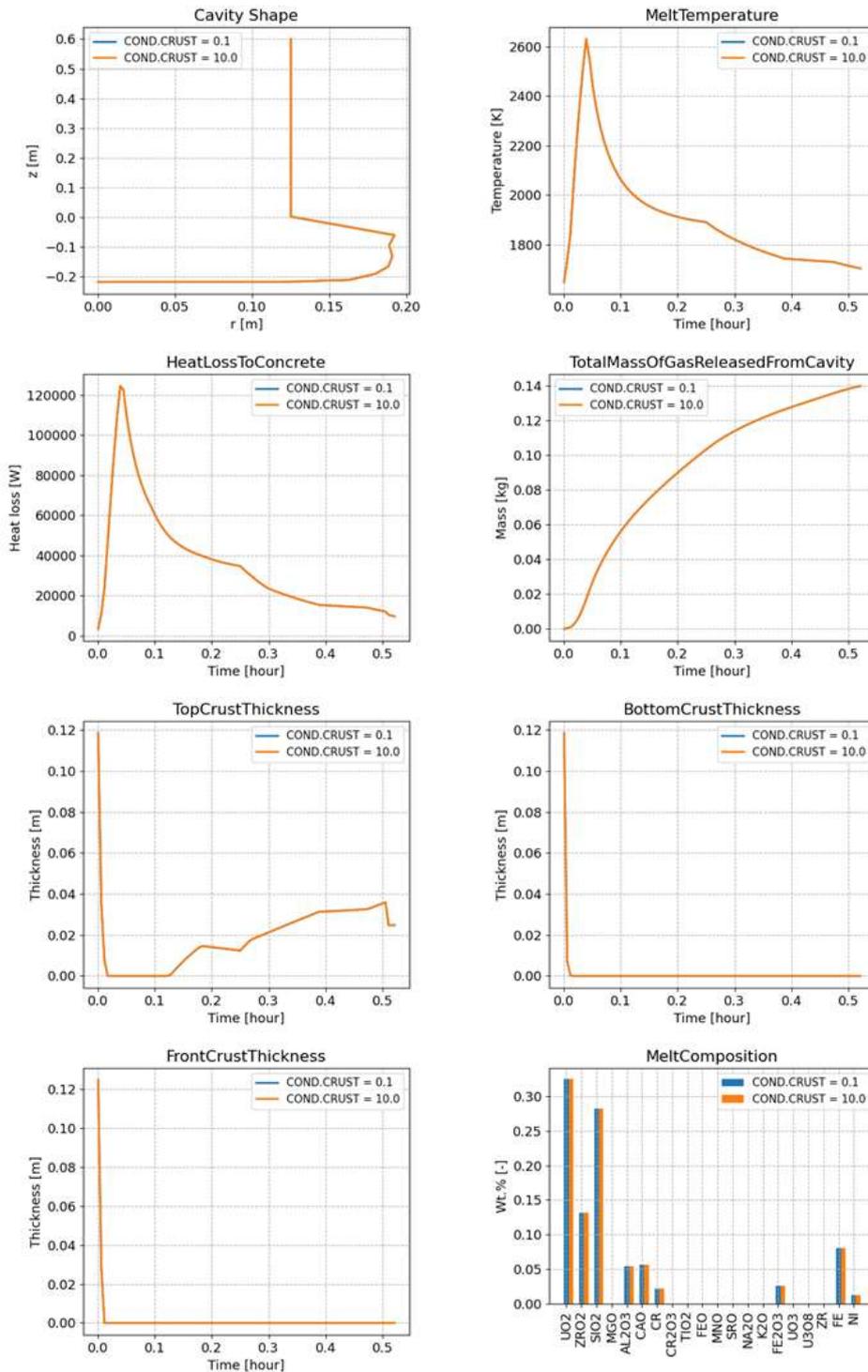


図 B.4.9 VULCANO-VF-U1 実験解析 出力データに対する”COND.CRUST”の影響
(MeltComposition = ZrO2 50%, SUS 50%)(1/2)

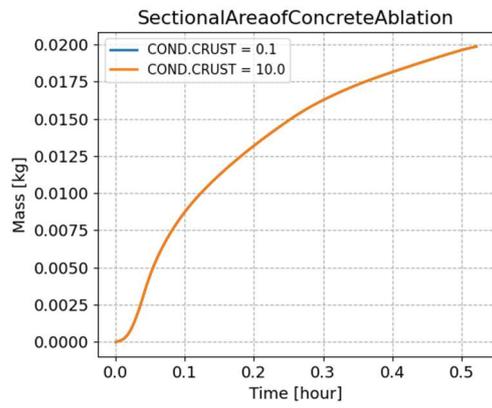


図 B4.9 VULCANO-VF-U1 実験解析 出力データに対する”COND.CRUST”の影響
(MeltComposition = ZrO2 50%, SUS 50%)(2/2)

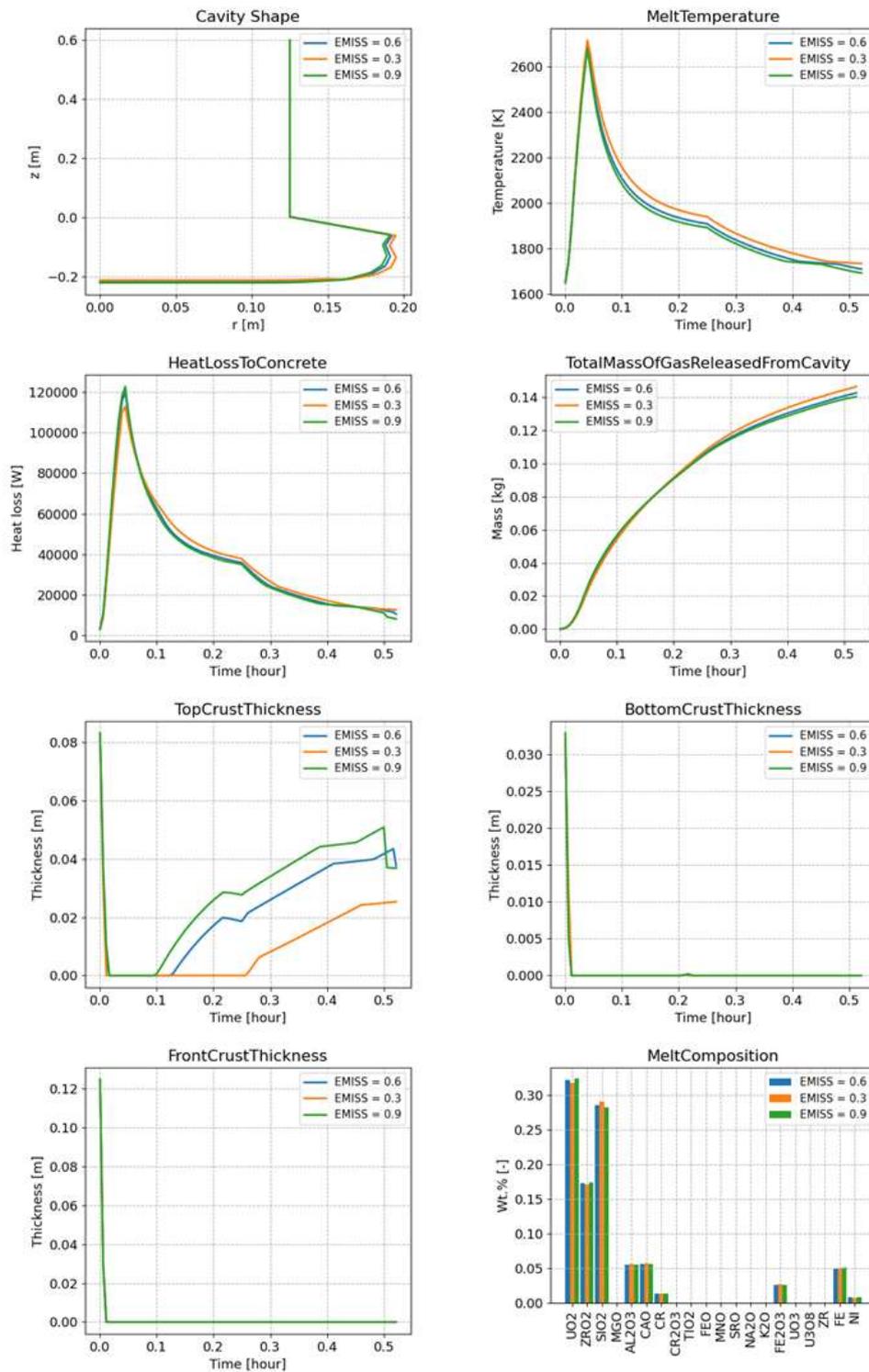


図 B4.10 VULCANO-VF-U1 実験解析 出力データに対する”EMISS”の影響(1/2)

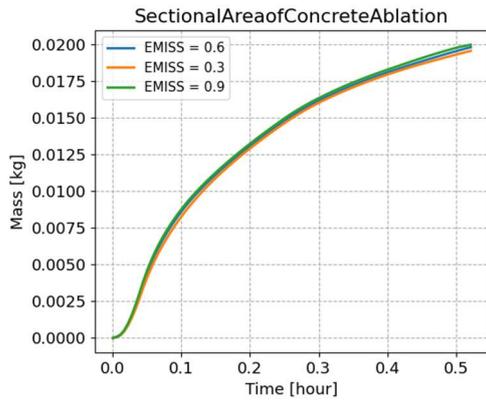


図 B4.10 VULCANO-VF-U1 実験解析 出力データに対する”EMISS”の影響(2/2)

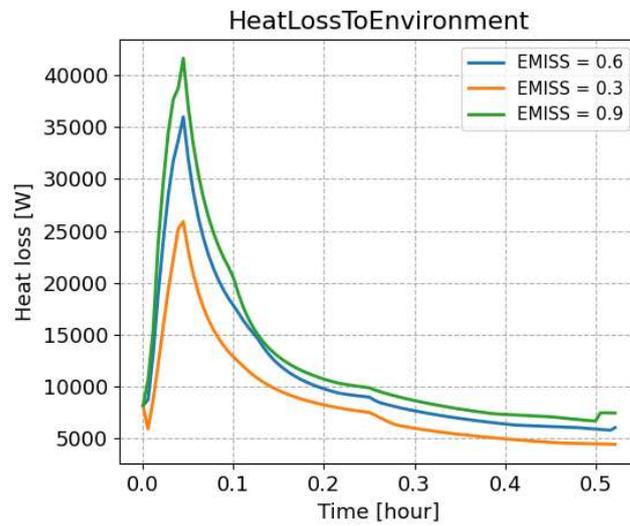


図 B4.11 VULCANO-VF-U1 実験解析 環境への徐熱量に対する”EMISS”の影響

付録 C 情報収集のための会合等出席報告

出席会合・会議 (1)

件名	ERMSAR2024 及び OECD/ COPS 会議
主催	ERMSAR2024 : SEAKNOT/ KTH COPS : OECD/NEA
出張先	スウェーデン・ストックホルム
期間	令和 6 年 5 月 13 日 (月) ~ 令和 6 年 5 月 17 日 (金)
参加者	研究員 1 名
概要	<p>シビアアクシデントに関する国際会議 ERMSAR2024 (5 月 13 日~16 日) 及び OECD/NEA の実験プロジェクト COPS の第一回会合 (5 月 17 日) に出席した。</p> <p>ERMSAR は原子力分野のシビアアクシデント (SA) を専門的に議論する国際会議である。JAEA/CLADS が参加している燃料デブリと FP の熱力学的な特性評価を行う OECD/NEA の TCOFF2 プロジェクト (2022 年~) の進捗について C.JOURNEAU 氏 (フランス CEA) が発表した。このプロジェクトでは、重要でありながらデータベースが不足している化学系を特定する System Identification Ranking Table (SIRT) が構築されており、COPS プロジェクトで参照されている。</p> <p>COPS は SA 解析の不確かさを低減を目的として、模擬コリウムの物性値を測定する実験プロジェクトでフランス CEA が実験を実施する。VITI-MBT による表面張力測定、VITI-TPV による粘度計測、ATTHILA による融点 (固・液相線温度) 測定等が計画されている。コリウムの物性値のデータ不足が SA 解析の不確かさの原因の一つであり、OECD/NEA の他のプロジェクト (TCOFF2、ROSAU 等) でも指摘されている。対象のコリウム組成は測定を行いながら段階的に決定する。7 月にオンラインで行われる技術会合で決定されることが決まった。</p> <p>また、組成の検討においては OECD/NEA プロジェクトの TCOFF2 で構築された System Identification Ranking Table (SIRT) を参照することとなった。インテグラルテストについては CEA で利用可能な実験装置から各機関が興味のある現象を対象とした実験を提案し、今後の会合で議論され決定される。</p>

出席会合・会議 (2)

件名	OECD/NEA WGAMA 第 27 回会合
主催	OECD/NEA
出張先	フランス・グレノー＝レ＝バン
期間	令和 6 年 9 月 9 日 (月) ～令和 6 年 9 月 11 日 (水)
参加者	嘱託職員 1 名
概要	<p>OECD/NEA WGAMA 第 27 回会合に出席し、溶融物冷却・MCCI・可燃性ガスに関する最新情報を取得した。本年会は毎年 9 月に開催され、SA を含む軽水炉事故に対する安全の確保・向上に資する安全情報の共有を目指した活動ならびに検討を行っている。</p> <p>WGAMA の取り組みとして「重大事故時の可燃性ガスの挙動と管理」に関する最新レポート (SOAR) を作成しており、その進捗について報告があった。本事業でも情報を収集している ROSAU についても、MCCI のデータが得られるプロジェクトとして重要視されている。</p>

出席会合・会議 (3)

件名	OECD/ ROSAU 会議
主催	OECD/NEA
出張先	米国・アルゴンヌ
期間	令和 6 年 9 月 30 日 (火) ～令和 6 年 10 月 1 日 (水)
参加者	研究員 1 名
概要	<p>OECD/NEA における実験プロジェクト ROSAU (Reduction Of Severe Accident Uncertainties) 第 10 回会合 (米国・アルゴンヌ) 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) において実施されている。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る DCAM 実験及び水中床面における溶融炉心の拡がりに係る MST 実験を実施する。以下の事項についての検討・議論が行われた。</p> <p>DCAM 及び MST 実験では予定されていたそれぞれ 5 つのケースの実験が終了した。ANL は実験結果と分析結果について報告した。</p> <p>2025 年 11 月にフランス・パリで第 11 回の会合を開催する。未分析の MST 実験を合わせて、全ケースを対象に議論が行われる予定とされた。</p>

出席会合・会議 (4)

件名	OECD/ ROSAU 会議
主催	OECD/NEA
出張先	フランス・パリ
期間	令和6年12月11日(水)～令和6年12月12日(木)
参加者	研究員1名
概要	<p>OECD/NEA における実験プロジェクト ROSAU (Reduction Of Severe Accident Uncertainties) 第11回会合(フランス・パリ)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>DCAM 実験及びMST 実験は全てのケースが終了した。ANLはCORQUENCHコード及びMELTSREADコードを用いた解析結果について報告した。</p> <p>2025年3月末にフランス・パリで最終会合を開催する。プロジェクトを総括するワークショップと併せて専門家会合を実施し、次期プロジェクト(ROSAU-2)についてNEAへの提案をまとめる予定とされた。</p>