令和5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6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.		2-1
2.	.1 MCCI における主要な現象	2-1
	2.1.1 コンクリートの分類	2-1
	2.1.2 ガスの生成	2-2
	2.1.3 コリウムブールの挙動	2-3
	2.1.4 まとめ	2-4
2.	<ol> <li>2 実験による研究</li> </ol>	2-4
	2.2.1 MCCI 実験の概要	2-4
	2.2.2 ドライ条件の VULCANO 実験	2-5
	2.2.3 ウェット条件の CCI 実験	2-12
	<b>2.2.4</b> 最新の知見	2-14
2.	.3 解析による研究	2-16
	2.3.1 MCCI コードの概要	2-16
	2.3.2 MCCI コードの比較	2-19
	2.3.3 連成解析に向けたインターフェース	2-24
2.	.4 不足と展望	2-24
	2.4.1 実験について	2-24
	2.4.2 解析コードについて	2-25
2.	.5 参考文献	2-27
3.	JASMINE コードと MCCI コードの連成解析に向けた検討	3-1
3.	.1 実施目的	3-1
3.	2 今年度の実施内容	3-1
3.	3 堆積した溶融物からコンクリート床面への熱伝達モデルの概要	3-1
	3.3.1 有限の厚さを有する床面の場合	3-2
	3.3.2 無限の厚さを有する床面の場合	3-4
3.	.4 解析条件	3-7
3.	.5 解析結果	3-10
3.	.6 まとめ	3-11
4	シビアアクシデント解析コードによる MCCI 解析	4-1
ч. Л	<ul> <li>シビノノノシノシーカ+10 ー ドによる MOOL 解析の構画</li></ul>	4 I 1-1
4. 1	・	4-1 1-1
4.	491 MFI COR コード MCCI エデルの概要	4 I 1-1
	4.2.1 MILLOON ~ 「MOOTE / / / / / / / / / / / / / / / / / / /	4-1 1-0
	4.4.4 UUI 大歌 VM女 4.9.9 MELCOD にとる COI 実験留任の判定	4-2
	4.2.9 MELUUNによるUUI天歌牌物の政化	4-0

4.2.4 CCI 実験解析ベースケース解析	4-8
4.2.5 CCI 実験感度解析条件	4-10
4.2.6 CCI 実験感度解析結果	4-14
4.2.7 CCI 実験解析のまとめ	4-19
4.3 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	420
4.3.1 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の概要	4-20
4.3.2 THALES2 コードのコンクリートへの伝熱モデル概要	4-20
4.3.3 コンクリートへの伝熱モデルの検討	4-22
4.4 まとめ	425
5. おわりに	5-1
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圧力容器の下部ヘッドに堆積し、相互作用により破損すると、炉心 溶融物は圧力容器下方の原子炉キャビティ(PWR)あるいはペデスタル(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、これらは炉心溶 融物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。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、続いて圧力容器が破損し、溶融炉心が格納容器内に放出さ れたとみられる。溶融炉心は圧力容器下部のペデスタル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]。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 デスタルに落下したことが確認されており、圧力容器に比較的大きな開口が生じたことが 示唆された[1.6]。また、ペデスタル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、ペデスタル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 MCCI に係わる対策として、ペデスタル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ークアップ(粒子化)し、冷却可能なデブリベッドが 格納容器の床面上に形成されることを期待するものである。我が国以外でも、例えばスウェ ーデンの BWR においてウェットキャビティ戦略が採られているが[1.8]、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。

実機プラントにおいて、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拡がったうえで MCCI が生じるかや生じた 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 わせて求めた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が途中で停止し 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。

シビアアクシデント時の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が発生したときに MCCI がどの程度コンクリートのベース マットを侵食するのか、また、それによって可燃性・非凝縮性ガスがどの程度発生するのか を評価する手段を持っていることは重要だと考えられる。本事業では、溶融物の冷却の成否 から先の現象に着目し、シビアアクシデントの結果とそれがどの程度の確からしさで生じ るのかの評価手法を開発することを目的として、以下のことを実施する。

(a) 機構論的な溶融炉心/冷却材相互作用解析コード JASMINE[1.10]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浸食、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 せて、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、JASMINE コードの整備を行い、格納容器内溶融物の挙動の解明を目的とした 実験を対象とした解析を実施し、JASMINE コードの解析結果から抽出できる MCCI 解析 に必要なデータを検討した。

また、MCCI 解析において重要な事象を検討するためにシビアアクシデント解析コード MELCOR の MCCI 解析モジュールである CAV パッケージを利用して、MCCI 実験を対象 とした解析を実施した。また、THALES2 コード[1.11]をベースとして MCCI モジュールの 整備について検討した。

## 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.
- 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溶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,ベースマット溶融貫通に至 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 に関する主要な物理的現 象、実験による研究及び解析による研究についてまとめた。

2.1 MCCI における主要な現象

2.1.1 コンクリートの分類

コンクリートはセメント、水と骨材(aggregate)から成る複雑な混合物である。原子 力発電所で使用される代表的なコンクリートの成分[2.1]を表 2.1 に示す。これらの特性の 違いは、コリウムの熱伝導および熱化学的特性に寄与し、MCCIの進展にも大きな影響を 与える。以下の三つの種類に大別できる。

- ・ 珪酸質コンクリート(Siliceous Concrete, SIL): このタイプのコンクリートは、一 般的に 60%以上が SiO<sub>2</sub>で構成される。 広く使用される玄武岩コンクリート(Basaltic Concrete)は、SiO<sub>2</sub>の含有率が約 50% 程度である。その分 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO や Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>など金属酸化物の含有率が高いことが特 徴であり、珪酸質コンクリートに分類される。
- 石灰質コンクリート(Limestone Concrete): 石灰質コンクリートの主成分は、 CaCO<sub>3</sub>や MgCO<sub>3</sub>などの炭酸塩である。CO<sub>2</sub>の含有量が多く、MCCI 時のガス発生 量が多くなる。

一般に使用される石灰石・砂コンクリート(Limestone/Common Sand Concrete,
 LCS)では、石灰質コンクリートの一種であるが、SiO<sub>2</sub>の含有率が 30%程度高く、
 CaCO<sub>3</sub>炭酸塩の含有率が 10%程度低い。

 蛇紋岩コンクリート(Serpentine Concrete): 多量の化学結合水を含む蛇紋岩鉱 (Mg<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub>・2H<sub>2</sub>O)を使用した蛇紋岩コンクリートは、コンクリートが加熱される と大量の水蒸気を放出する特性がある。

成分	含有割合(質量%)							
	珪 酸 質	玄 武 岩	石灰石・砂	石灰質	蛇紋岩			
	SIL	Basaltic	LCS	Limestone	Serpentine			
${ m SiO}_2$	69.0	54.84	35.80	3.60	35.2			
${ m TiO_2}$	0.8	1.05	0.18	0.12	-			
MnO	-	0.0	0.03	0.01	-			
MgO	0.7	6.16	0.48	5.67	29.3			
CaO	13.5	8.82	31.30	45.40	7.0			
$NaO_2$	0.7	1.80	0.08	0.0078	-			
$K_2O$	1.4	5.39	1.22	0.68	-			
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.0	6.26	1.44	1.20	-			
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.0	8.32	3.60	1.60	-			
$Cr_2O_3$	-	0.0	0.014	0.004	-			
$\mathrm{CO}_2$	4.23	1.50	21.15	35.70	1.2-1.5			
H <sub>2</sub> O(自由水)	3.10	3.86	2.70	3.94	5.0			
H <sub>2</sub> O(結晶水)	3.68	2.00	2.00	2.00	13.8			

表 2.1 コンクリート成分[2.1]

また、コンクリートの種類によって、固液相線温度や分解エンタルピーは異なる[2.1]。 例えば、表2-2に示されるように、石灰質コンクリートは珪酸質コンクリートよりも固液 相線の温度範囲が広く、分解に必要なエンタルピーも大きくなる。

コンクリート種類	固相線温度(K)	液相線温度	分解エンタルピー(MJ/kg)
		(K)	
珪酸質 SIL	1403	1523	1.6-2.7
玄武岩 Basaltic	1350	1650	1.5-2.3
石灰石・砂 LCS	1420	1670	2.3-3.2
石灰質 Limestone	1690	1875	2.9-5.1

表2.2 コンクリートの種類によって固液相線温度や分解エンタルピー[2.1]

2.1.2 ガスの生成

溶融炉心がコンクリートと接触し、コンクリートの温度が上昇すると、物理的な水分は 約 373 K (100℃)で蒸発する。十分な熱が除去されない場合、温度がさらに上昇すると、 コンクリートは化学分解反応を起こす。そして、温度が約 973 K (700℃)に達すると、 セメントと骨材から二酸化炭素が放出される。主な化学反応は以下の通り[2.2]:

 $CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2 - 177.82 \text{ kJ/mole } CaCO_3$  (2.1)

 $Ca(OH)_2 \rightarrow CaO + H_2O - 109.45 \text{ kJ/mole } Ca(OH)_2$ (2.2)

 $MgCa(CO_3)_2 \rightarrow MgO + CaO + 2CO_2 - 697.26 \text{ kJ/mole } MgCa(CO_3)_2$  (2.3)

コンクリート中には、通常、化学的に結合し、物理的に結合し、自由な水の形で存在す る水が約総重量の7%を占める。つまり、分解されたコンクリート 1m<sup>3</sup> あたり約 1000m<sup>3</sup> の水蒸気が生成される。この大きなガスの量が溶融物中の攪拌と熱伝達プロセスに強く影 響を与える。また、コンクリートが加熱される過程で、水分の損失により熱伝導率などの 熱物性が変化する。

さらに、最も重要な点として、分解された H<sub>2</sub>O と CO<sub>2</sub>はコリウム溶融物内の金属を部 分的に酸化し、可燃性ガス(H<sub>2</sub> と CO)を生成する。具体的には、コリウムプールで、ジ ルコニウム、クロム、鉄を含んでいるので、酸化反応ではジルコニウム、クロム、鉄が順 次酸化される。

最初に、以下のジルコニウムと水蒸気、二酸化炭素との反応が生じる。

$$Zr + 2H_2O \rightarrow ZrO_2 + 2H_2 + 6.4 \text{ MJ/(kg Zr)}$$
 (2.4)

$$Zr + 2CO_2 \rightarrow ZrO_2 + 2CO + 6.0 \text{ MJ/(kg Zr)}$$

$$(2.5)$$

次に、クロムが完全に反応する:

$$2Cr + 3H_2O \rightarrow Cr_2O_3 + 3H_2 + 2.4 \text{ MJ/(kg Cr)}$$
 (2.6)

$$2Cr + 3CO_2 \rightarrow Cr_2O_3 + 3CO + 2.0 \text{ MJ/(kg Cr)}$$

$$(2.7)$$

最後に、鉄が完全に酸化する:

$$Fe + H_2O \rightarrow FeO + H_2 + 5.1 \text{ MJ/(kg Fe)}$$
 (2.8)

$$Fe + CO_2 \rightarrow FeO + CO - 0.4 \text{ MJ/(kg Fe)}$$
 (2.9)

ジルコニウムは、溶融温度に応じてシリカと異なる反応を示す。温度が 2784 K 未満の 場合、反応は以下のようになる:

$$Zr + 2SiO_2 \rightarrow ZrO_2 + 2Si(\overline{k}) + 1.9 \text{ MJ/(kg Zr)}$$
(2.10)

溶融温度が 2784 K より高い場合、反応は以下のようになる:

$$Zr + 2SiO_2 \rightarrow ZrO_2 + 2SiO(氛) - 5.0 MJ/(kg Zr)$$
 (2.11)

2.1.3 コリウムプールの挙動

コリウムプールは、UO<sub>2</sub>、ZrO<sub>2</sub>などの酸化物や原子炉容器から放出された金属(Fe、 Cr、Ni等)が約2200℃で部分的または完全に溶融した状態である。大多数のコンクリー トでは、浸食は約1200℃から1450℃の間に発生する。そのため、MCCIの初期では、高 温のコリウムプールはコンクリートを加熱し、コンクリート壁の持続的な浸食を引き起こ す。次の段階では、プール内で発生した崩壊熱は、主にコリウムとコンクリートの界面に 伝達される。従って、MCCI 中のコリウムプールの挙動は、以下の要因に依存する [2.3][2.4]:

- 熱伝導および熱化学的特性:コリウムの組成とコンクリートの割合など。
- インターフェースの熱流束:崩壊熱、プールの体積など。
- インターフェース上のガス速度:熱流束、ガス発生量及びプール上部の圧力など。

2.1.4 まとめ

MCCI は、混合物中の酸化コンクリートの割合と界面で生成されるガスの速度に基づいて、以下の3つの段階に分けることができる[2.3]:

- 短期段階:酸化物の質量分率が約25%未満の段階で、MCCIが始まったばかりの数時間である。この段階では、物理的および熱化学的特性が元のコリウムに近く、高い熱伝達があり、激しい気泡生成が見られる(ガス速度は約数十センチメートル/秒)。
- 中期段階:酸化物の質量分率が約50%まで上昇し、MCCIが始まってから約5から 15時間後に該当する。この段階では、物理的および熱化学的特性が変化するが、依 然として高い熱伝達があり、ガス速度は数センチメートル/秒である。この段階では、 残存の金属であるジルコニウムと鉄が酸化され、追加の熱が発生する。
- 長期段階: MCCI が始まってから約 15 時間後以降の段階で、酸化物の質量分率が支配的である。この段階では、熱伝達が低下し、浸食によってケイ素の量が増えることでコリウムの粘度が上昇する。その結果、ガス速度は約1センチメートル/秒またはそれ以下に低下する。

簡単に説明すると、MCCI は多くの複雑な現象が強く結合している特徴を持っている。 これには、高温によるコンクリートの熱分解、浸食の進行、ガス生成とそれに伴うコリウ ムプールの熱伝導、さらに多成分溶融物の物理化学的特性の変化や金属の酸化反応などが 含まれる。

2.2 実験による研究

本章では、MCCI に関する実験の概要及びそこで得られた知見に関して整理を行う。

2.2.1 MCCI 実験の概要

表2.3では、MCCIに関する主要な実験をまとめた。MCCIはドライ条件(水による冷却 を伴わない実験)とウェット条件(溶融物上に事後注水した実験)の2つの主要な条件に 分類することができる。ドライ条件として、ドイツカールスルーエ工科大学(KIT)で実施 されたBETA実験[2.5]、米国アルゴンヌ国立研究所(ANL)で実施された ACE 実験[2.6]、 米国サンディア国立研究所(SNL)で実施された SURC実験[2.7]、韓国原子力研究所 (KAERI)で実施されたMEK-T1A実験[2.8]、フィンランド国立技術研究センター(VTT)
 で実施されたHECLA実験[2.9]、フランスCEAで実施されたVULCANO実験[2.10][2.11]
 及び西安交通大学(XJTU)で実施されたCINA実験[2.12]。ウェット条件としては、米国
 国立サンディア研究所(SNL)で実施された WETCOR実験[2.13]、米国電力研究所

(EPRI)の主催で実施されたMACE実験[2.14]、ドイツカールスルーエ工科大学(KIT)で
 実施されたCOMET実験[2.15]、原子力発電技術機構(NUPEC)により実施された
 COTELS実験[2.16]及び米国アルゴンヌ国立研究所(ANL)により行われたCCI実験
 [2.17][2.18]がある。

実験の主な目的について、ドライ条件では炉心溶融物とコンクリートの相互作用、ベー スマットと側壁の浸食、および核分裂生成物の性質と定量評価することである。一方、ウ ェット条件では、溶融炉心の冷却維持によるMCCI停止条件を特定し、溶融物の安定化に 必要な冷却水の有効性を評価することが焦点である。日本原子力学会が平成13年に発行 した「シビアアクシデント熱流動現象評価」[2.19]では、WETCOR実験、MACE実験、 COTELS実験など、多くの重要な実験が紹介された。ここでは、最近行われたドライ条件 のVULCANO実験[2.10][2.11]とウェット条件のCCI実験[2.17][2.18]について紹介する。 これらの実験は、MCCI現象を研究する上で、最新かつ重要な役割を果たした。

## 2.2.2 ドライ条件の VULCANO 実験[2.10][2.11]

表2.4に示されたVULCANO実験シリーズは、CEAで2003年から行われている、長期に わたるMCCIの挙動に関連する実験プログラムである。このプログラムは、コンクリート 径方向と軸方向の浸食及び高金属含有量が侵食挙動に与える影響に焦点を当てている。主 要な変化パラメータの一つはコンクリートの種類で、合計で5つの異なる組成とされた。 表2.5に示すように、FとGの組成はそれぞれシリカを豊富に含むコンクリートと石灰を豊 富に含むコンクリートである。コンクリートEは赤鉄鉱コンクリートであるが、コンクリ ートCはクリンカー骨材を使用し、二酸化炭素は含まれていない。モルタルFはコンクリ ートFに類似しているが、大きな骨材は含まれていない。これまでに、VULCANO施設で 5つの異なるコンクリートタイプを使用した2Dコア酸化物実験が6回行われた(表2.6参 照)。最初の4つの実験(VB-U4、U5、U6、U7)は従来のコンクリートを使用し、最後の 2つの実験(VBES-U2、U3)は効果の単独試験に専用のコンクリートを使用した。これ らの実験では、28 kgから55 kgの試料が使用され、16 cmから25 cmの浸食深度となった。

VULCANOプロジェクトにおける重要な知見の一つは、コンクリートの浸食が径方向 と軸方向で異なる速度で進行することが示された点である。図2.1に示されるように、珪 酸質コンクリートの場合、径方向の浸食が顕著に進行することが確認された。一方で、石 灰石コンクリートの実験(VB-U6)では、より均一な浸食が観察された。実験結果は、シ リカ骨材が浸食に主要な影響を与えることを示唆した。シリカ骨材はコンクリート内で溶 解せず、対照的に石灰石(CaCO3)は約700℃で分解する。VB-U6実験では、固化したコ ンクリートプールから細かい石灰(CaO)の粉が見つからなかった。VB-U4およびVB-U5 実験では、収集された試料の化学分析から、コンクリートプール内のシリカの量が少ない ことが明らかになった。これらの結果から、コンクリート内の大きな骨材は溶解したコン クリートと混ざっていない可能性が高く、より細かいモルタル部分のみが混合されている 可能性があると考えられる。この状況が、径方向と軸方向の浸食速度の違いに影響を与え ている可能性が高い。

さらに、実際の過酷事故で想定されるコリウム成分を再現するために、酸化物(UO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub>)+金属(Feなど)の組成を使用してVBSシリーズとVFシリーズの実験も行われた。 これらの実験では、小規模試験では見られなかった外観上の特徴が多く確認された。特に、 クラストの形成とその直下での空洞形成、気孔の密度が異なる層の出現などが観察され た。



図2.1 VULCANO VB-U7 および VBES-U2における空洞侵食プロファイル[2.11]

名称	実施機関	コンクリート	コリウム組成	体系	条件	着目点
BETA	KIT	SIL、LCS、蛇紋岩	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Fe, Zr, SiO2	2D	ドライ	コンクリート侵食, エアロゾル放 出
SURC	SNL	LCS, 玄武岩	UO <sub>2</sub> -ZrO <sub>2</sub>	1D	ドライ	コンクリート侵食, エアロゾル放 出
ACE	ANL	SIL, LCS, LL, 蛇紋岩	$UO_2$ - $ZrO_2$	1D	ドライ	コンクリート侵食,FP 放出
MEK-T1A	KAERI Korea	玄武岩	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe	1D	ドライ	コンクリート侵食
HECLA	VTT Finland	SIL, 酸化鉄	ステンレス鋼	2D	ドライ	コンクリート侵食
VULCAN O	CEA	SIL, LCS, 玄武岩,酸化 鉄	UO2-ZrO2, Fe	2D	ドライ	コンクリート侵食、金属の影響
CINA	XJTU	SIL	Fe, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,	2D (円筒形)	ドライ	コンクリート侵食
WETCOR	SNL	LCS	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1D	ウェット	コンクリート侵食, エアロゾル放出, デブリ冷却性
MACE	EPRI	LCS, SIL	UO <sub>2</sub> —ZrO <sub>2</sub>	1D	ウェット	コンクリート侵食, デブリ冷却性
COMET	KIT	SIL	Fe, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2D (円筒形)	ウェット	コンクリート侵食, エアロゾル放出, デブリ冷却性
COTELS	NEUPC	玄武岩	$UO_2$ - $ZrO_2$	2D (円筒形)	ウェット	コンクリート侵食, デブリ冷却性
CCI	ANL	LCS, SIL	$UO_2$ – $ZrO_2$	2D(長方形)	ウェット	コンクリート侵食、デブリ冷却性

表 2.3 MCCI に関する主要な実験

名称	コンクリートの種類	コリウム	着目点
VULCANO VB	SIL, LCS, 酸化鉄	UO <sub>2</sub> -ZrO <sub>2</sub>	コンクリート侵食
VULCANO VBES	SIL, LCS	UO <sub>2</sub> -ZrO <sub>2</sub>	コンクリート侵食
VULCANO VBS	SIL, LCS	UO2-ZrO2, Fe	コンクリート侵食, 金属の影響
VULCANO VF	玄武岩	UO <sub>2</sub> -ZrO <sub>2</sub> , Fe	コンクリート侵食, 金属の影響

表 2.4 VULCANO 実験シリーズ

表 2.5 コンクリートの組成

	wt% 含有	wt% 含有率						
	CaO	$\mathrm{CO}_2$	${ m SiO}_2$	$Al_2O_3$	$\mathrm{Fe}_{2}\mathrm{O}_{3}$	MgO	$H_2O$	
コンクリート C	49.2	-	29.6	3.9	2.1	0.9	10.7	
コンクリート E	12.7	1.4	45.5	3.3	32.9	0.3	3.7	
コンクリート F	16	9	63	5	-	-	3	
モルタル F	18	7	58	5	1	0.5	7.5	
コンクリートG	42	25	26	2	-	-	4	

	VB-U4	VB-U5	VB-U6	VB-U7	VBES-U2	VBES-U3
コンクリート	コンクリートF	コンクリートF	コンクリートG	コンクリートE	コンクリートC	モルタル F
最初質量	45kg	28kg	31kg	54kg	45kg	29kg
最初温度	2200K	2400K	2400K	2500K	2500K	2500K
パワー	14kW	12.5kW	9kW	22kW	15kW	9.4kW
加熱時間	100 min	150 min	120 min	160 min	180 min	160 min
浸食型	異方性	異方性	等方性	異方性	異方性	限定的な浸食

表 2.6 実験条件

表 2.7 CCI 実験[2.17][2.18]

パラメータ	CCI-1	CCI-2	CCI-3	CCI-4	CCI-5	CCI-6
コリウム	100% 酸化 PWR 燃料 + 8 wt% SIL	100% 酸化 PWR 燃料+ 8 wt% LCS	100% 酸化 PWR 燃料 +15 wt% SIL	78% 酸化 BWR 燃 料 +7.7 wt% ステ ンレス鋼 +10 wt% LCS	100% 酸化 PWR 燃料 +15 wt% SIL	100% 酸化 PWR 燃料 +6 wt% SIL
コンクリート種類	SIL (US- type)	LCS	SIL (EU-type)	LCS	SIL (EU-type)	SIL (EU-type)
ベースマット断面	50 cm x 50 cm	50 cm x 50 cm	50 cm x 50 cm	50 cm x 40 cm	50 cm x 79 cm	70 cm x 70 cm

メルトの最初質量 (深度)	400 kg (25 cm)	400 kg (25 cm)	375 kg (25 cm)	300 kg (25 cm)	590 kg (25 cm)	900 kg (28 cm)		
側壁構造	電極壁: 不活 性 その他の壁: コンクリート	電極壁:不活性 その他の壁 : コン クリート	電極壁:不活性 その他の壁:コン クリート	電極壁: 不活性 その他の壁 : コンク リート	電極壁:不活性 壁 1: コンクリー ト 壁 2: 不活性	電極壁:不活性 その他の壁:コン クリート		
径/軸方向の侵食限界	35/35 cm	35/35 cm	35/35 cm	45/42.5 cm	40/42.5 cm	24/32.5 cm		
溶融物の最初温度	1950 °C	1880 °C	1950 °C	1850 °C	1950 °C	2100 °C		
溶融物の形成	化学反応 (~30s)							
溶融物の加熱方法	直接電気加熱(	DEH)						
注水前のパワー	150 W(定数)	120 ㎏ (定数)	120 kW(定数)	95 kW(定数)	145 kW (定数)	210 kW(定数)		
注水の基準	1) 5.5 時間 2) 5 cm 浸食	1) 5.5 時間 2) 5 cm 浸食	1) 5.5 時間 2) 5 cm 浸食	1) 7.0 時間 2) 5 cm 浸食	1) 6.0 時間 2) 5 cm 浸食	2.5 cm 浸食		
注水時間	68 分	301 分	108分	380 分	N/A	0.6 分		
注水流量と温度	2 lps/20 °C							
溶融物上の水深	$50 \pm 5 \text{ cm}$							
試験終了基準	1)溶融物の温度 向の限界に達す	1)溶融物の温度がコンクリートの固相線以下になる、2)浸食が停止する、または3)最大の浸食深度が軸方向または径方 向の限界に達する。						

	一方の側壁で		一方の側壁で顕著	対称的な浸食;橋状	顕著な側方浸食;	
瓶亜	顕著な側方浸	対称的な浸食;注	な側方浸食が発	のクラストが形成さ	オフガスシステム	初不りなノノソ府
[	食が発生;注	水が成功	生;注水が成功し	れたため、溶融物と	の詰まりにより注	印合的
	水が成功した		た	水の接触がない	水が失敗した	限定的
径方向浸食速度	北:39.1, 南:		10	2 <b>7</b>		
(cm/hr)	8.4	4	10	2.7	9.8	
径方向浸食熱通量	北: 395, 南 S:	*0	07		~~~	
(kW/m2)	86	58	97	39	95	
軸方向浸食速度	0.0.1					
(cm/hr)	26.1	4	2.5	2.8	2.1	
軸方向浸食熱通量						
(kW/m2)	265	59	25	41	21	
径-軸方向熱通量比	-	1	4	1	4.7	

2.2.3 ウェット条件の CCI 実験[2.17][2.18]

CCI (Core Concrete Interaction)実験は、経済協力開発機構(OECD) MCCI プロジ ェクトの一部として、米国アルゴンヌ国立研究所(ANL)で実施された。この実験の主な 目的は、コンクリートの浸食が進行した状態で水を注入した際の溶融物の冷却挙動を調査 することである。

表2.7では、CCI実験の初期段階におけるコリウムの組成、温度、および浸食の深さなど がまとめられた。CCI-4を除くすべての試験で、完全に酸化したPWRのコア溶融物質が使 用された。CCI-4ではBWRの組成が使用され、金属被覆の78%が最初に酸化され、溶融物 質には7.7wt%のステンレス鋼が含まれた。また、CCI-2とCCI-4の実験ではLCS(石灰質) コンクリートが使用され、その他の実験ではSIL(珪酸質)コンクリートが使用された。 CCI-1からCCI-3までの試験では、溶融物の加熱後5.5時間が経過した時点、またはコンク リート浸食が5cm進んだ時点で注水を開始する。CCI-4とCCI-5では、それぞれ加熱後7.0 時間と6.0時間が経過した時点、またはコンクリート浸食が5cm進んだ時点で注水を開始 する。CCI-4では、コンクリート浸食が2.5cm進んだ時点で注水を開始する。コンクリー ト浸食の結果によれば、前節に述べたVULCANO実験から得られた知見と同じ。LCSコ ンクリートの場合、床方向と側壁方向の侵食はほぼ同程度である一方、SILの場合、側壁 方向の侵食が床方向より大きくなり、侵食に異方性(4倍程度大きさの差)が存在するこ とが示された。さらに、ドライ条件とは異なり、ウェット条件の実験の主要な目的の一つ は、冷却性の有効性を評価すること。つまり、注水により、以下の4つの冷却メカニズム を調査することが主要な目的であった。

- i) バルク冷却。
- ii) クラストのひび割れからの水の浸透。
- iii) 溶融物の噴出。
- iv) クラストの破損。

実験結果として、これらの4つのメカニズムに関する現象を観察された。さらに、テストCCI-2では、5番目の冷却メカニズムに関する情報も提供した。これは、コア材料とコンクリートの側壁との界面での水の浸入である。テストCCI-2で、水がこの界面に浸入し、コンクリートの側壁を効果的に冷却して飽和させ、これにより横方向の空洞の浸食プロセスが終了した。これは効果的な冷却メカニズムですが、その結果は原子力発電所の条件に 慎重にスケーリングする必要がある。表面積対体積の効果により、スケールが大きくなると全体的な効果が低下する可能性がある。



図 2.2 は CCI-1、CCI-2、CCI-3 実験での水への熱流束を示している。最初の 5 分間は、 限界熱流束に近い値となっており、CCI-1 および CCI-3 では約 1MW/m<sup>2</sup>、CCI-2 では約 3MW/m<sup>2</sup>に近い値になっている。この違いは、CCI-1 および CCI-3 では注水時にクラス トが形成されているためであり、CCI-2 では注水時にクラストが形成されず、溶融物と水 が直接接触してバルク冷却が行われたためと推測されている。CCI-2 実験でも、バルク冷 却期間(約5分)の後に安定したクラストが形成されている。



図2.3 CCI実験における溶融物の平均温度 [2.17]

図 2.3 を示すように、注水後の最初の 15~20 分は、クラストが熱流束を制限する期間 で、平均的な熱流束は以下の通り:

- LCS (ガス発生が多い場合、CCI-2): 0.65MW/m<sup>2</sup>
- SIL(ガス発生が少ない場合、CCI-1、CCI-3): 0.25 および 0.5MW/m<sup>2</sup>

この違いは、クラスト形成段階でコンクリート分解ガスが多いほど、クラストのひび割 れや空隙が大きくなる可能性が考えられている。これらの熱流束をクラストの熱伝導だけ で説明するには、クラストの厚さは約 3mm から 7mm 程度必要ですが、測定結果ではク ラストの厚さが約 5cm から 10cm と、1 桁大きいことが示されている。したがって、ク ラストからの水浸入が冷却を支配し、水浸入パスとなるクラストの空隙はコンクリートか らのガス発生が多いほど大きくなる可能性が考えられる。

水浸入メカニズム以外にも、CCI 実験は浸水後の溶融物の噴出メカニズムの性質と程 度に関するデータを提供した。特に、LCS を使用した CCI-2 試験と、早期のキャビティ 浸水を特徴とする CCI-6 試験では、顕著な噴出が観察された。一方、SIL を使用した CCI-1 および CCI-3 では、浸水後に自発的な噴出は観察されなっかた。溶融物の噴出は、コン クリート分解ガスが放出される際に巻き込まれることがあるため、ガス放出が少ない玄武 岩系コンクリートでは発生しなかったと考えられる。

2.2.4 最新の知見

既往の実験では、溶融物の組成、コンクリートの種類、溶融物が発する熱量、そして水 との接触時の注水タイミングなど、多様なパラメータが研究の焦点となっている。これら のパラメータを基に、溶融温度、局所的なアブレーション(浸食)速度、そしてウェット 条件下でのデブリと水の熱流束(これは蒸気生成速度に基づいて推定される)が測定され た。このように、MCCI実験は、ドライ条件とウェット条件の二つの設定で行われ、それ ぞれが異なる状況下での反応メカニズムや影響を探求している。

日本原子力学会は平成 13 年に「シビアアクシデント熱流動現象評価」[2.19]という文書を発行し、WETCOR 実験、MACE 実験、COTELS 実験など多数の実験結果や知見が 紹介されたが、本節では、ドライキャビティ条件の VULCANO 実験やウェットキャビティ条件の CCI 実験など、これら最近の実験から得られた最新かつ重要な知見をまとめた [2.4]。

## ◆ ドライキャビティ条件

炉心とコンクリートの相互作用、ベースマットと側壁の浸食、および同時に発生する 核分裂生成物の性質と定量評価を行う。以下のような点を明らかにしている。

1) 浸食(アブレーション)プロセスは、コンクリートの種類によって異なる影響を受け

ることが分かった。つまり、侵食には異方性が存在する。具体的には、石灰岩や一般 的なコンクリートと比べて、珪質コンクリートでは、半径方向から軸方向への浸食速 度とアブレーションの深さの比率が異なる。石灰岩コンクリート(LCS)ではこの比 率が約1であるのに対し、珪質コンクリート(SCC)ではこの比率が1よりもかな り大きくなることを示した。これは最新かつ非常に重要な知見であるが、現在利用可 能な2種類のコンクリートに関する調査のみでは、この現象に関する包括的な理論 モデルを確立するには不十分であり、実際の原子炉への外挿には依然として大きな 不確実性が残されている。

- 2) 低温コンクリート面上でのクラスト形成(初期数十分から1時間の反応期間)は、その後の反応過程に重要な影響を与える。初期段階では、の剥離が比較的少なく、クラストが断熱層の役割を果たすことで溶融温度が高く維持される。その後、クラストが破壊されると、コンクリートの剥離が激しく進行し、これによって溶融温度が低下する。クラストの不安定化において、分解ガスの役割は非常に重要である。
- 3) 未酸化 Zr 被覆の影響について、 Zr とコンクリート分解ガス(CO2、H2O)の酸化 反応が実験中に溶融温度を数十分間上昇させることが観察された。この一時的な挙 動は、実際の炉心材料だけでなく模擬材料でも同様に確認された。これは、クラッド が完全に酸化された後、溶融温度が完全に酸化された状態と一致する値まで低下す ることを示している。
- 4) 溶融物中の炭素鋼鉄(反応圧力容器(RPV)の構造材や鉄筋など)の酸化について、 石灰岩コンクリートでは珪質コンクリートよりも鉄の参加量が多いことが観察され た。この違いは、金属領域での浸食がより顕著になる現象と関連しており、酸化物/ コンクリート界面と金属コンクリート界面での熱伝達の差異によって説明が可能で ある。
- 5) 核分裂生成物 (FP) 放出について、ウラン (U) や低揮発性の核種は、金属やコンク リートに含まれる傾向があるため、放出エアロゾルの主成分はコンクリ元素になる と言われている。また、ケイ酸塩の存在は Ba や Sr などの FP 放出を低下させる傾 向ある。
- ◆ ウェットキャビティ条件

溶融安定化条件を達成するための冷却水の有効性を評価することが主な目的である。 以下の熱伝達メカニズムの証拠が得られた。

- 炉心デブリの上から浸水(初期冷却)に関して、初期の熱エネルギーの除去はクラス ト形成に大きく依存する。クラストの安定化には、以下の二つ条件が必要である。
  - (i) 熱的条件:界面温度が凝固温度を下回る

(ii) 機械的条件: 撹拌された溶融物によって壊れないこと。

融液と水の間の効率的な熱伝達は、融体液滴が水中にエントレインメントされる こと、または輻射によっても影響を受ける。バルク冷却熱伝達が続くと、溶融温度は 徐々に低下し、最終的にはアブレーションが停止する。これにより、熱的および機械 的に安定なクラストが形成される条件に至る。形成されたクラストは多孔質の特徴 を持ち、これによってコンクリートからの分解ガスが排出される。

- クラスト形成後の長期冷却に関して、単に熱伝導による除熱メカニズムだけでは不 十分であり、水がクラストを通じて内部に侵入することによる冷却メカニズムが必 要である。以下の3つのメカニズムが、このプロセスにおいて重要な役割を果たす。
  - (i) 相互接続された空隙や亀裂への侵入。クラスト内の空隙や亀裂を通じて水が侵入し、内部の溶融物に直接冷却効果をもたらす。
  - (ii) 溶融物の噴出による粒子床の形成。コンクリートからの分解ガスが溶融液滴 がクラストを通過する際に水中にエントレインされ、これにより粒子床が形 成される。
  - (iii) クラストの機械的破壊。水の浸入によって形成された厚いクラストは、原子 炉キャビティの壁に結合し、内部溶融物が MCCI によって下降するにつれて、 クラストがメルト領域から分離する。この"固定された"または"吊り下げ られた"クラスト構成は不安定であり、最終的には崩壊し、大量の水が浸入 することで新たな冷却経路が形成される。この一連の結果は、以前の一次元 試験(SSWICS など)に基づいて提案された熱伝達相関が保守的であることを 示唆している。つまり、実際には、これらのメカニズムによってもたらされ る効率的な冷却が、既存の理論モデルよりも大きい可能性があるということ。 この知見は、シビアアクシデント時の冷却戦略を再評価し、より効果的な安 全対策を策定する上で重要な意味を持つ。
- 3) 溶融噴出と水の侵入はどちらも、クラストが破壊されることによって生じる。形成したクラストは実験条件によるものの、不安定であり、最終的に壊れることが確実であれば、破壊メカニズムの重要性は低くなると考えられる。
- 2.3 解析による研究
- 2.3.1 MCCI コードの概要

原子力発電所の安全評価を行うために、これまでに多数のMCCI解析コードが開発され た。よく使用されているMCCI 解析コードには、以下のものがある。SNL(サンディア 国立研究所)は1981年から1993年にCORCON [2.20] を開発した。また、KIT(カールス ルーエ工科大学)も1981年からWECHSL [2.21] を開発した。さらに、最近ではCEA(フ ランス原子力庁)のTOLBIAC-ICB [2.22]、Areva(オラノ社)のCOSACO [2.23]、IRSN (放射線防護・原子力安全研究所)のASTEC/MEDICIS [2.24]、そしてSNLからの MELCOR [2.25] などが開発された。

日本原子力学会は、平成13年に発行した「シビアアクシデント熱流動現象評価」の中で、 CORCONコードを代表的な例として紹介した[2.19]。これらのコードでは、コリウムとコ ンクリートの間で起こるコンクリート浸食と、それに伴う移動境界面での熱伝達に焦点を 当てている。具体的には、境界面上の特定のポイント*i*でのコリウムからコンクリート への熱流束(*φ<sub>i</sub>*)を計算することで、侵食現象を評価することを目的としている。

$$\varphi_i = \mathbf{h}_i (\mathbf{T}_{\text{pool}} - \mathbf{T}_i) \tag{2.12}$$

ここで $h_i$ は対流熱伝達係数、 $T_i$ は着目点の温度、 $T_{pool}$ はコリウムのバルク温度である。 コリウムからコンクリートへの熱流束 $\varphi_i$ により、界面の点 *i* における局所的な侵食速度  $v_{浸食}$ が

$$\rho \cdot v_{\partial e} \Delta H_{\exists \nu \rho \forall \neg \flat} = \varphi_i \tag{2.13}$$

によって求められる。ここで、 $\rho$ はコンクリートの密度、 $\Delta H_{3\nu \rho J - F}$ はコンクリートの 分解エンタルピーである。これらの式を、熱流束と各点の面積 $S_i$ を掛けた合計が総発熱 量Qに等しいという条件:

$$\sum \varphi_i \cdot S_i = Q \tag{2.14}$$

と組み合わせ、界面の温度T<sub>i</sub>と熱伝達係数h<sub>i</sub>を別の相関式等から求めることにより、各 界面の点 *i* における浸食速度を計算することができる。

図2.4では、MCCIコードによるコリウムプールのモデリングが示されている。基本的 に、ほとんどのMCCIコードでは金属相と酸化物成分が区別され、さまざまな組成が考慮 されている。酸化物成分で形成されるクラストの熱伝導率は約 1W/mK 程度とされ、一 方で、クラストを形成しない金属成分の熱伝導率は約 10W/mK 程度である。このため、 これらの解析コードでは酸化物成分と金属成分それぞれの熱伝達率が評価されている。

MCCIコードが仮定している過程は、以下の通りである。

- MCCIが始まると、炉心由来の酸化物成分(UO₂-ZrO₂)が金属成分より重く、結果 として下部に沈んで両者は密度によって成層化する。
- MCCIの進行と共に、コンクリートの分解生成物(例えばSiO₂など)が酸化物成分に 混入し、これによって酸化物成分の密度が低下する。

- 酸化物成分の密度が金属成分の密度に近づくと、コンクリートからの分解ガスの影響でこれらの成分が混合し、コードではこれを単一の成分として扱う。
- さらに進行すると、溶融コンクリート(例えばSiO₂など)が酸化物成分に混入し、酸 化物成分の密度が金属成分の密度を下回るようになる。
- 成層化条件が満たされると、金属成分が底部に位置する層状構造へ移行し、初期の密 度成層化分布が逆転する。



図2.4 MCCI後期における層状構造

MCCI解析コードでは、流動を解析しないため、金属成分と酸化物成分の空間分布は解 析対象外となる。そのため、これらの成分の「成層化条件」は、実験結果から得られた相 関式[2.26][2.27]を使用して判定される。例えば、BALISE相関式[2.26]は気体の表面速度 J<sub>a</sub>以下に考察する

$$J_g \ge bHS \frac{\rho_H - \rho_L}{\rho_H} \tag{2.15}$$

ここで、bHS=0.054 m/s、 $\rho_H$ および $\rho_L$ はそれぞれ溶融コンクリート混合物の重い相と軽い相の密度である。一方、Epstein相関式[2.27]では、溶融コンクリート混合物の平均密度と軽い相の密度の比較である。

$$\frac{\rho_H(1-\alpha)}{1+V_l/V_H} \left[ 1 + \frac{\rho_l V_l}{\rho_H V_H} \right] \le \rho_l \tag{2.16}$$

図2.5は、MCCIにおける伝熱および質量伝達を示している。金属の溶融物にはZr、Cr、 Fe、Ni、Siなどが含まれる可能性がある。一方、酸化物層はUO<sub>2</sub>、ZrO<sub>2</sub>、CaO、SiO<sub>2</sub>、 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、FeOなどで構成されている。内部エネルギーは、崩壊熱や放熱的な化学反 応によって生成される。これらの関連する化学反応については、第2.2.2節で詳しく説明 された。溶融コンクリートが酸化性コリウムに混ざることで、一部の金属の化学的に酸化 され、これにより溶融物の質量と組成が変化する。エネルギーは、溶融プール上部からの 輻射伝熱や水の蒸発によって失われる。溶融物が冷却されると、プール/コンクリート界 面および上部プール界面で気体が透過可能なクラストが形成されると仮定される。



図2.5 MCCIにおける伝熱および質量伝達

2.3.2 MCCIコードの比較

様々なMCCI解析コードでは、一般的に伝熱および質量伝達モデルを共有しているが、 コリウムからコンクリートへの伝熱相関式、コリウムの熱化学データ、化学反応の取り扱 い、プールの成層モデル、空洞浸食モデル、およびプール/コンクリート界面モデルに関 する仮定が異なる。そのため、同じMCCI実験を対象とした解析でも、コンクリート浸食 の予測結果に大きな差異が生じることがあった。表2.8に示される最も一般的に使用され ているMCCIコードの主要な特徴を基に、MCCIコードにおける三つの重要なモデルにつ いて簡単に比較する[2.3]。

● プール/コンクリート界面モデル

WECHSL コード[2.21]では、プールからコンクリートへの熱伝達は、主にコンクリー

トが分解する際に放出されたガスに依存している。分解されたガスの表面速度が十分に高 い場合、溶融物とコンクリートの間に安定したガスフィルムが形成される。ガスの表面速 度がある制限値を下回ると、離散的な気泡の放出による核沸騰型の熱伝達が支配的にな る。また、溶融物の粘度については、液相温度を下回る場合には修正された Pinkerton-Stevenson 相関式に従うと仮定されている。クラストとコンクリートの間にはガスフィル ムが存在し、溶融物のバルクとクラスト内部との間の熱伝達は、離散的な気泡型の熱伝達 メカニズムによって決定される。この熱伝達の温度差は、バルク温度とクラスト界面での 溶融物層の凝固温度である Tfreez によって決定される。薄いクラストの場合、定常状態の 熱伝導が仮定され、厚いクラストの場合は一次元の非定常熱伝導によって計算する。

TOLBIAC-ICB コード[2.22]および COSACO コード[2.23]では、熱水力と物理化学が カップリングされている。TOLBIAC-ICB では、コンクリート壁にクラストが存在すると 仮定され、界面温度は溶融物の液相温度 T<sub>liq</sub>と同じに設定される。これは、コンクリート への熱伝達は主にガスと溶融コンクリートの影響を受ける。一方で、COSACO コードで は、プール内で大規模な固化が許容されており、これにより界面温度は液相線 T<sub>liq</sub>と固相 線 T<sub>sol</sub>の間にある。

ASTEC/MEDICIS コード[2.24]は、プールの外部にマッシー ゾーン (mushy zone) が 定義される。図 2.6 を示すように、ASTEC/MEDICIS コードではクラストがプールと熱 力学的に平衡状態にないと仮定に基づいている。熱はガスの気泡を通じてこの部分的に固 化した領域を伝達され、この領域では固体の割合が高くなり熱対流が抑制される。その結 果、熱はコンクリート表面へと伝導され、浸食が発生する。また、熱伝導と熱対流を区別 するために、プールの固化温度*T<sub>solidif</sub>*が選定される。この固化温度は、プール内の溶融物 の固相線と液相線に基づいて計算される。

 $T_{solidif} = \gamma T_{solidus} + (1 - \gamma)T_{liquidus}$ (2.17) ここで、γはユーザーが定義するパラメータである。





図 2.6 ASTEC/MEDICIS コードにおけるプール/コンクリート界面モデルとマッシー ゾーン[2.24] ● 伝熱相関式

伝熱相関式は、溶融プールとクラストの伝熱相関式、および酸化物層と金属層の伝熱相 関式が含まれている。各コードにおいて、使用される伝熱相関式は表 2.8 に示された。以 下は代表的な相関式を簡単な説明する。

◆ 溶融プールとクラストの伝熱相関式

ASTEC と TOLBIAC コードでは、主要な相関式が利用可能できるのに対し、COSACO では Bali 相関式[2.28]や Kutateladze 相関式[2.29]が利用可能である。また、CORCON コードでは Kutateladze 相関式が利用可能である。例として、BALI 相関式は以下を示 す。

上部:

$$N_u = 19.67 \left(\frac{\rho_{melt} V_g}{\mu_{melt} g}\right)^{0.136} P_{rmelt}^{-0.22}$$
(2.18)

下部

$$N_u = 24.75 \left(\frac{\rho_{melt} V_g}{\mu_{melt} g}\right)^{0.073} P_{r_{melt}}^{-0.29}$$
(2.19)

◆ 酸化物層と金属層の伝熱相関式

ASTEC および CORCON コードでは Greene の相関式[2.30]が使用される。一方、 TOLBIAC コードでは Bali 相関式が、COSACO コードでは酸化物に対して Bali 相関式 と金属に対して Kutateladze 相関式が採用される。例として、Greene 相関式は以下であ る。

$$N_u = 1.95(\rho_{melt}V_g c_{p,melt})^{0.72}$$
(2.20)

ここで、 $N_u$ はヌセルト数、 $P_r$ はプラントル数、 $c_{p,melt}$ はメルトの熱容量、 $\rho_{melt}$ は表面ガス 速度、 $\rho_{melt}$ は密度、 $\mu_{melt}$ はメルトの動粘性率、gは重力。

冷却性モデル

冷却性モデルはウェット条件で、トップクウェンチングと呼ばれる状況での水の侵入と 溶融物の噴出に焦点を当てている。水の侵入については、上部クラストのクラックから水 が浸透し、それによって熱フラックスが取り除かれる。この取り除かれる熱フラックスは、 クラストの透水性に依存し、この透水性はクラストの力学的特性および間接的には混合さ れたコンクリートの割合にも影響される。水の侵入の効率は、浸食したコンクリートの割 合が増加するにつれて低下し、高効率の水の侵入はMCCIの初期段階でのみ発生する可能 性がある。

一方で、溶融物の噴出がより効果的なメカニズムとされる。これに関しては、いくつか のモデルが提案されており、三つのタイプに分類できる。最も簡単なモデルでは、噴出さ れる溶融物の体積フラックスが気体の流量に比例すると仮定される。ASTECコードでは、 このような簡単なモデルが採用されている。より現実的なモデルでは、エントレインメン トを考慮に入れたものであり、例えばPERCOLAモデル[2.31]が挙げられる。PERCOLA モデルはTOLBIACコードに導入された。最近開発された三つ目のモデルでは、上部クラ ストの噴出孔のサイズと密度を評価できるようになった[2.32]。

• CORQUENCH  $\exists - k[2.33] \geq MAAP \exists - k[2.34]$ 

表2.8 に示されたコード以外にも、CORQUENCHコードとMAAPコードという2つの 簡易的なコードが広く使用されている。

CORQUENCHコード[2.33]は、ANLによって開発された。このコードは、前述のコードとは異なり、ウェット条件に向けた冷却性モデルはをほぼ全部導入された。ただ、 CORQUENCHでは、二次元の溶融モデルが過度に簡略化されており、熱の分布がコンク リート界面で均一であると仮定されている。このため、実機の場合は、軸方向の溶融に対 する長期にわたる非保守的な予測がなさると考えられる。

一方、MAAPコード[2.34]でEPRIが所有するシビアアクシデント解析コードで、簡略化 された形状や相関式などを使用する解析モデルに基づく"一点集中定数型近似モデル"と 分類される。従って、MAAPコードのMCCIモジュールは、前述の他のコードと比較して より簡単である。具体的には、熔融プールは均一であり、層状構造は考慮されていない。 プールから界面への熱伝達は、プール内の固体分率に主に依存する単一の全体熱伝達率を 使用してモデル化されており、プールの界面での固化は考慮されていない。また、キャビ ティの詳細な形状は評価されず、平均的な溶融深度の評価のみが行われているため、浸食 の精度が低いと考えられる。

特徴	ASTEC/MEDICIS	TOLBIAC	COSACO	CORCON	WECHSL
熱化学データベース	熱化学モジュールとのイ	熱化学モジュールと	熱化学モジュールと	関係式	関係式と入力表
	ンターフェース	のカップリング	のカップリング		
プールIクラスト温度	T <sub>sol</sub> とT <sub>liq</sub> の間でのユーザ	$T_{ m liq}$	T <sub>sol</sub> と T <sub>liq</sub> の間の特	$\mathrm{T}_{\mathrm{sol}}$	$T_{\rm sol} <\!\! T_{\rm freez} <\!\! T_{\rm immob}$
	ーパラメーター		定のモデル		
プール/クラスト界面	主要な相関式が利用可能	主要な相関式が利用	Bali/Kutateladz 相関	Kutateladze 相関式	_
でのhconv		可能	式		
酸化物/金属界面での	Greene ユーザーパラメ	Bali	Bali (酸化物) +	Greene	Werle
h <sub>conv</sub>	ーター		Kutateladze (金属)		
層状構造	あり (簡単な基準)	あり(簡単な基準)	あり (簡単な基準)	あり(詳細的なモデル)	なし
冷却性モデル	あり(簡単なモデル)	あり(詳細的なモデ	なし	なし	なし
		1レ)			

表 2.8 各 MCCI コードの主要な特徴[2.3]

2.3.3 連成解析に向けたインターフェース

本プロジェクトの主要な目的の一つは、総合的なシビアアクシデント解析コードに MCCI コードと JASMINE コードを統合し、連携解析を行うことにある。そのため、 JASMINE コードと MCCI コードのインターフェースについての検討が必要である。

安全評価では、反応圧力容器(RPV)の故障時におけるさまざまな初期条件の幅広い変動が考慮されるべきである。さらに、溶融炉心の特性に関しては不確実性が存在し、これには粘度や固相液相の温度などが含まれる。そのため、MCCI解析のための初期条件は十分には明らかではない。この不確実性は以下の要因に関連している:

- デブリの冷却プロセス(ドライ条件やウェット条件)
- デブリの組成
- デブリの重量
- デブリの温度
- デブリの形状
- デブリの層状状態
- コンクリートの組成
- 下部クラストとコンクリートの接触面積

これらの要因に関する不確実性は、MCCI 解析の結果に大きく影響を及ぼす。より詳細 な内容と検討については、第三章で説明されている。

### 2.4 今後の展望

2.4.1 実験について

これまでに実施された多くの実験にもかかわらず、コンクリートの浸食に関する理解に はまだ不足がある。特に、コンクリートの浸食は非常に不均一であり、加熱されたコンク リートが徐々に溶融物に取り込まれる過程は、実験的に観察することが難しく、このため 機構論的なモデル化が簡単ではないと考えられる[2.4]。未来の展望としては、以下の2点 について説明する。

1) 長期 MCCI

過去に行われたMCCI実験は、プロトタイプ材料を使用しており、実験期間は比較的短 かったものの、少なくとも部分的な溶融冷却とベースマットの浸食減少を確認できる十分 な期間であった。しかし、福島の事故からは、より長期間にわたる変化が発生する可能性 が示唆されている。特に、異なる解析コードによる溶融炉心の流入条件の予測は異なる。 この違いが原子炉圧力容器 (RPV)の破損時にMCCIプロセスに大きな影響を与えたこと が分かった。したがって、短期間の実験データを原子炉の状況に高い信頼性で外挿ができ ない場合、より長期間の実験データを取得する必要があると考えられる。例えば、以下の ような現象に役立つ:

- 断続的な溶融物質の噴出のような現象が再現可能であること。
- 水の侵入によって形成されるクラストが安定しているかどうかを調査すること。

これらの長期間にわたる実験から得られるデータは、相互作用の最終段階における、コ ンクリートへの熱フラックスがさらなる浸食なしに低下する時期や、コアキャッチャーの 特定の冷却回路に適用される熱フラックスなど、長期の挙動に関する重要な情報を提供す ると考えられる。

### 2) 現実的実機評価

MCCIの初期条件は、実際の原子炉の評価において極めて重要である。原子炉圧力容器 が損傷し、コリウムが原子炉ピットへ再配置された場合、通常は MCCI フェーズが開始 されると考えられている。この時、ドライ条件では溶融物が即座に全表面に広がるとされ、 これは軸方向への溶融進行の遅延をある程度保守的に見積もることにつながる。しかし、 原子炉キャビティが水で満たされている場合は、溶融物の広がりが制約され、コリウムが キャビティの特定部分に集中することがある。これはコンクリートへの熱フラックスの増 加を意味し、結果としてベースマットの溶解が早まる可能性がある。原子炉圧力容器の破 損箇所、コリウムの温度、流入速度、ピット内の水量などが、ピット内の局所的なコリウ ムの蓄積に影響を及ぼす。水中でのコリウム蓄積の形成と広がりは複雑であり、水が沸騰 し、コアデブリが乾燥して再溶融し、コンクリートの浸食が始まる可能性がある。浅い水 では溶融ジェットの破砕はほぼ起こらず、深い水プールではこの破砕が重要となり、粒子 ベッドに囲まれた状態が生じる。ベッドの深さや崩壊熱の量に応じて冷却が可能だが、こ の挙動に関する研究はまだ不十分である。多くの実験では、炉心デブリが一度に全て注が れ、格納容器全体に速やかに広がると仮定されているが、実際には複数回にわたって溶融 物質が注がれ、均一でない蓄積が生じることがある。

また、ウェット条件で注入される冷却水中の不純物の存在は、特に福島事故で使用され た海水の影響が示すように、重要な課題である。不純物が冷却メカニズムや核分裂生成物 の化学的挙動、冷却回路の性能に与える影響についてのさらなる研究が必要である。

2.4.2 解析コードについて

2.3節で紹介された全てのMCCIコードは、ドライ条件のコリウム拡がりを分析できる が、トップクエンチングの影響を適切にモデル化できるわけではない。また、現在のコー ドでは、特定の状況をシンプルに扱うことが難しく、例えばコリウムが特定の場所に局所 的に蓄積する、または時間を区切って複数回注入されたりするようなシナリオを簡単にモ デル化することができない。さらに、実験データの不足や現象の複雑性により、メカニズ ムが不明確であり、不確実性が残る状態である。

- i. 珪質コンクリートにおける異方性浸食は、現在の解析コードでは、2次元実験結果 に基づく熱伝達係数の経験的適用によってのみ再現される。
- MCCIの進行に対するトップフラッディングの影響はまだ明確ではない。多くの実験で観察されたが、原子炉の規模では予想されないクラストのアンカリング (anchoring)効果を考慮するのが難しく、ほとんどのコードではこの現象がモデル化されていない。
- iii. 酸化物と金属からなる溶融物の層状構成に関する不確実性があり、特に金属溶融物の熱物性による熱伝達の増加や、酸化物溶融物からの崩壊熱の伝達メカニズムが完全には理解されていない。
- iv. MCCI条件下での層状化と混合プロセスに関する知識が不足しており、特にコンク リート鉄筋が金属の連続供給源としてどのように機能するか、その浸食メカニズ ムへの影響が不明。

また、コンピュータの性能向上により、Navier-Stokes 方程式を直接解く Computational Fluid Dynamics (CFD)が様々な伝熱流動問題に適用されるようになった。 この背景に基づき、MCCI における酸化溶融物や金属溶融物の分布、流動様式、およびこ れらの溶融物からコンクリート壁面への熱流束を仮定せずに、コンクリートの浸食を予測 しようとする試みが増えている[2.35][2.36]。これらの試みの代表的な方法の一つが、離 散点の粒子が流れと共に移動する Lagrange 式の記述を使用した離散化する MPS

(Moving Particle Semi-implicit method) [2.37]である。このような CFD 手法は、経験 的相関式に依存することが少なく、あるいは全く必要ないため、MCCI の研究においても 注目され、大きな期待が寄せられると考えられる。 2.5 参考文献

[2.1] V. Strizhov, et al., "An Assessment of the CORCON-MOD3 Code Part I: Thermal-Hydraulic Calculations, NUREG/IA-0129,," NRC, 1996.

[2.2] T. Sevón, "Molten Core-Concrete Interactions in Nuclear Accidents. Theory and Design of an Experimental Facility," VTT, 2005.

[2.3] B. R. Sehgal, Nuclear Safety in Light Water Reactors: Severe Accident Phenomenology, Academic Press., 2011.

[2.4] Bonnet, Jean-Michel, et al. State-of-the-Art Report on Molten Corium Concrete Interaction and Ex-Vessel Molten Core Coolability. No. NEA--7392. Organisation for Economic Co-Operation and Development, 2017.

[2.5] Alsmeyer, H., et al. "Molten corium/concrete interaction and corium coolability: a state of the art report." EUR(Luxembourg) (1995).

[2.6] Alsmeyer, H. "Second OECD (NEA) CSNI specialist meeting on molten core debris-concrete interactions. Proceedings." (1992).

[2.7] Copus, E. R., et al. Core-concrete interactions using molten urania with zirconium on a limestone concrete basemat. No. NUREG/CR-5443; SAND-90-0087. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC (United States). Div. of Systems Research; Sandia National Labs., Albuquerque, NM (United States), 1992.

[2.8] Shin, Ki-Yeol, et al. "Thermo-physical properties and transient heat transfer of concrete at elevated temperatures." Nuclear Engineering and Design 212.1-3 (2002): 233-241.

[2.9] Sevón, Tuomo, et al. "HECLA experiments on interaction between metallic melt and hematite-containing concrete." Nuclear Engineering and Design 240.10 (2010): 3586-3593.

[2.10] Journeau, Christophe, et al. "Two-dimensional interaction of oxidic corium with concretes: The VULCANO VB test series." Annals of Nuclear Energy 36.10 (2009): 1597-1613.

[2.11] Journeau, Christophe, et al. "Contributions of the VULCANO experimental programme to the understanding of MCCI phenomena." Nuclear Engineering and Technology 44.3 (2012): 261-272.

[2.12] Xu, Zhichun, et al. "Experimental study on molten corium-concrete interaction with simulant metal and oxide." Annals of Nuclear Energy 167 (2022): 108767.

[2.13] Blose, R. E., et al. Core-concrete interactions with overlying water pools. The WETCOR-1 test. No. NUREG/CR-5907; SAND-92-1563. Nuclear Regulatory

Commission, Washington, DC (United States). Div. of Systems Research; Sandia National Labs., Albuquerque, NM (United States); Ktech Corp., Albuquerque, NM (United States), 1993.x

[2.14] Farmer, M. T., et al. "Status and future direction of the melt attack and coolability experiments (MACE) program at Argonne National Laboratory." (2001).

[2.15] Miassoedov, Alexei, et al. "The COMET-L3 experiment on long-term meltconcrete interaction and cooling by surface flooding." Nuclear engineering and design 240.2 (2010): 258-265.

[2.16] Maruyama, Yu, et al. "A study on concrete degradation during molten core/concrete interactions." Nuclear engineering and design 236.19-21 (2006): 2237-2244.

[2.17] M. T. FARMER et al., "OECD MCCI Project Final Report," OECD/MCCI-2005-TR06, Organisation for Economic Co-operation and Development (2006).

[2.18] M. T. FARMER et al., "OECD MCCI-2 Project Final Report," OECD/MCCI-2010-TR07, Organisation for Economic Co-operation and Development (2010).

[2.19] シビアアクシデント熱流動現象評価、社団法人日本原子力学会、平成 13 年 3 月。
[2.20] D.R. Bradley, D.R. Gardner, J.E. Brockmann, R.O. Griffiths, CORCON-Mod3:
An integrated computer model for analysis of molten core-concrete interactions,
USNRC Report NUREG/CR-5843 (1993).

[2.21] J.J. Foit, M. Reimann, B. Adroguer, G. Cenerino, S. Stiefel, The WECHSL-Mod3 Code: a computer program for the interaction of a core melt with concrete including the long term behavior; Model descriptions and User's manual, FZKA 5416 (1995).

[2.22] B. Spindler, B. Tourniaire, J.M. Seiler, Simulation of MCCI with the TOLBIAC-ICB code based on the phase segregation model, Nucl. Eng. Des. 236 (2006) 2264–2270.
[2.23] M. Nie, M. Fischer, G. Lohnert, Advanced MCCI modelling based on stringent coupling of thermalhydraulics and real solution of thermochemistry in COSACO, Proc. ICONE10, Arlington, VA (2002).

[2.24] M. Cranga, R. Fabianelli, F. Jacq, M. Barrachin, F. Duval, The MEDICIS code, a versatile tool for MCCI modelling, Proceedings of ICAPP '05, Seoul, KOREA (2005).

[2.25] R. O. Gauntt, J. E. Cash, R. K. Cole, C. M. Erickson, L. L. Humphries, S. B. Rodriguez, M. F. Young, "MELCOR Computer Code Manuals, Sandia National Laboratories, NUREG/CR 6119, SAND2005-5713," NRC, 2005.

[2.26] B. Tourniaire, J. M. Bonnet, "Study of the mixing of immscible liquids by sparging gas: results of the BALISE experiments,": 10th International Topical Meeting

on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH 10), Seoul, 2003.

[2.27] Epstein, M., et al. "Incipient stratification and mixing in aerated liquid-liquid or liquid-solid mixtures.[Reactor core meltdown mixtures]." Chem. Eng. Sci.;(United Kingdom) 36.4 (1981).

[2.28] J.M. Bonnet, Thermalhydraulic phenomena in corium pools for ex-vessel situations: The BALI experiment, Wiss. Ber. FZKA 6475 (2000).

[2.29] S.S. Kutateladze, I.G. Malenkov, Boiling and Bubbling Heat transfer under the conditions of free and forced convection, 6th Int. heat Transfer Conf. (1978). Toronto, Canada.

[2.30] G.A. Greene, T.F. Irvine, Heat transfer between stratified immiscible liquid layers driven by gas bubbling across the interface, ANS Proc. Nat. Heat Transfer Conf (1988).

[2.31] B. Tourniaire, J.M. Seiler, J.M. Bonnet, M. Amblard, Experimental study and modelling of liquid ejection through orifices by sparging gas, Nucl. Eng. Des. 236 (2006) 2281–2295.

[2.32] M.T. Farmer, Phenomenological Modeling of the Melt Eruption Cooling Mechanism during Molten Corium Concrete Interaction (ICAPP06), Reno, NV, USA, June 2006.

[2.33] M.T. Farmer, Modeling of Ex-Vessel Corium Coolability with the CORQUENCH Code, Proceedings 9th Int. Conf. on Nucl. Eng. (April 8–12, 2001). Nice, France.

[2.34] C.Y. Paik, R.W. Reeves, W. Luangdilok, R.E. Henry, Q. Zhou, Current status of molten corium concrete interaction modellling in MAAP, MCCI-OECD seminar, Cadarache, France, 2010.

[2.35] Li, Xin, and Yoshiaki Oka. "Numerical simulation of the SURC-2 and SURC-4 MCCI experiments by MPS method." Annals of Nuclear Energy 73 (2014): 46-52.

[2.36] 福田貴斉. MPS 法の改良と VULCANO VF-U1 実験の解析による MCCI の理 解の深化。博士論文、早稲田大学, 2022.

[2.37] 越塚誠一、柴田和也、室谷浩平:「粒子法入門 · 流体シミュレーションの基礎から 並列計算と可視化まで」、丸善、ISBN 978-4621088340, 2014
- 3. JASMINE コードと MCCI コードの連成解析に向けた検討
- 3.1 実施目的

軽水炉の過酷事故(シビアアクシデント)では、溶融炉心-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、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といった溶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。溶融 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、溶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。

3.2 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、溶融炉心の移行に伴う現象を 考慮する必要がある。溶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を解析することとし た。解析結果に基づき、溶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。今年度は、 JASMINE コードと MCCI コードとのインターフェイスの検討を行うことにより、連成解 析に向けた課題を抽出する。

3.3 床面に堆積した溶融物からコンクリート床面への熱伝達モデル

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。

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、自動でコンクリートが床 材に設定される。有限の厚さを有する床面と無限の厚さを有する床面のそれぞれに関して の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の解析方法 を示す。 3.3.1 有限の厚さを有する床面の場合

- 溶融物から床面への熱伝達
- ・底クラストが存在する場合

床面と接する溶融物の間に底クラストが存在する場合には、底クラストの底部の温度  $T_{base}$ を二分法を用いて推定する。二分法を使用するためには、推定したい温度の区間の上 限及び下限を設定する必要がある。上限を溶融物の平均温度  $T_{ave}$ とした。下限を  $T_{low}$ =1.0 ×10<sup>-8</sup> K とした。上限と下限の中間の温度  $T_{mid} = (T_{ave} + T_{low})/2.0$ を底クラストの温度  $T_{base}$ として収束させる。この収束のために溶融部から底クラストを通り床面へ流れる熱流 束を使用する。式 (3-1)を使用して区間の下限の時の熱流束  $q_{low}$ 及び式 (3-2)を使用し て区間の上限と下限の中間の時の熱流束  $q_{mid}$ を算出する。

$$q_{low} = k_{base} \frac{T_{melt} - T_{low}}{l_{base}} + \frac{Q_m \rho_{base} l_{base}}{2} - q_{bf}$$
(3-1)

$$q_{mid} = k_{base} \frac{T_{melt} - T_{mid}}{l_{base}} + \frac{Q_m \rho_{base} l_{base}}{2} - q_{bf}$$
(3-2)

ここで、 $k_{base}$ : 底クラストの熱伝導率( $W/m \cdot K$ )、 $T_{melt}$ : 溶融物の融点(K)、 $T_{low}$ : 区間の下限温度( $1.0 \times 10^8 K$ )、 $T_{mid}$ : 区間の下限と上限の中間の温度(K)、 $Q_m$ : 溶融物の発熱密度(W/kg)、 $\rho_{base}$ : 底クラストの密度( $kg/m^3$ )、 $l_{base}$ : 底クラストの高さ(m)、 $T_{flr}$ : 床表面温度(K)、 $\varepsilon_{flr}$ : 床材の放射率(-)をそれぞれ示す。 $q_{bf}$ は溶融物一床面間の熱流束を示す(式( $3 \cdot 3$ ))。

$$q_{bf} = \frac{T_{base} - T_{flr}}{R_h} + \sigma \frac{T_{base}^4 - T_{flr}^4}{\frac{1}{\varepsilon_m} + \frac{1}{\varepsilon_{flr}} - 1}$$
(3-3)

ここで、 $T_{base}$ :床面と接する溶融物の底部または底クラストの底部の温度(K)、 $T_{flr}$ :床表面温度(K)、 $R_h$ :溶融物—床面の接触熱抵抗(K·m<sup>2</sup>/W)、 $\sigma$ :シュテファン・ボルツマン定数(5.67×10<sup>-8</sup>)、 $\varepsilon_m$ :溶融物の放射率(-)、 $\varepsilon_{flr}$ :床材の放射率(-)をそれぞれ示す。式(3-1)で $q_{bf}$ を算出する際には、 $T_{base} = T_{low}$ とする。式(3-2)で $q_{bf}$ を算出するに際には、 $T_{base} = T_{mid}$ とする。

二分法では、算出した熱流束  $q_{low}$  と熱流束  $q_{mid}$  の積が  $q_{low} \cdot q_{mid} > 0$  となる場合に は、上限と中間温度との間に解が無いと判断して  $T_{low} = T_{mid}$  とする。 $q_{low} \cdot q_{mid} \le 0$  とな る場合には、中間と下限温度との間に解が無いと判断して  $T_{ave} = T_{mid}$  とする(表 3-1 参 照)。代入が終了した後に、再度、式(3-1)及び式(3-2)の計算を行う。これを区間の上 限温度と下限温度との差が 1.0×10<sup>-6</sup> K 以下になるまで計算を繰り返す。最終的に上限温度 と下限温度との中間の温度を床面に接する底クラストの底部の温度 Thase とする。

	上限温度	下限温度
初期	T <sub>ave</sub>	T <sub>low</sub>
$q_{low}  imes q_{mid} > 0$ の場合	T <sub>ave</sub>	$T_{low} = T_{mid}$
$q_{low}  imes q_{mid} <= 0$ の場合	$T_{ave} = T_{mid}$	T <sub>low</sub>

表 3-1 上限温度及び下限温度の代入について

算出した底クラストの底部の温度  $T_{base}$ 、床面の表面温度  $T_{flr}$  及び床材の放射率  $\varepsilon_{flr}$  から式(3·3)を使用して溶融物一床面間の熱流束  $q_{bf}$  を算出する。使用する床材の放射率  $\varepsilon_{flr}$ は、入力で指定する。このとき、放射率の温度変化を入力で指定する。床面の表面温度  $T_{flr}$ に基づき、床材の放射率を補間して求める。

・底クラストが存在しない場合

床面と接する溶融物の底部の温度  $T_{base}$  を二分法を用いて推定する。二分法を使用する ためには、推定したい温度の区間の上限及び下限を設定する必要がある。上限を溶融物の平 均温度  $T_{ave}$  とした。下限を  $T_{low} = 1.0 \times 10^{\cdot 8}$  K とした。上限と下限の中間の温度  $T_{mid} = (T_{ave} + T_{low})/2.0$  を溶融部の底部の温度  $T_{base}$  として収束させる。この収束のために溶融 部から床面へ流れる熱流束を使用する。式 (3-4) を使用して区間の下限の時の熱流束  $q_{low}$ 及び区間の上限と下限の中間の時の熱流束  $q_{mid}$  を算出する。

$$q_{low} = h_{mf}(T_{ave} - T_{low}) - q_{bf}$$

$$(3-4)$$

ここで、 $h_{mf}$ :溶融物一床面間の熱伝達率 (W/m<sup>2</sup>·K)、 $T_{ave}$ :溶融物の平均温度 (K)、 $T_{low}$ : 区間の下限温度 (1.0×10<sup>-8</sup> K)、 $q_{bf}$ :溶融物一床面間の熱流束 (W/m<sup>2</sup>) (式 (3-3)) をそれ ぞれ示す。式 (3-4) で  $q_{bf}$  を算出する際には、 $T_{base} = T_{low}$  とする。 $q_{mid}$  を算出する際に は、式 (3-4) を  $T_{low} = T_{mid}$  とし、 $q_{bf}$  を算出する際には、 $T_{base} = T_{mid}$  とする。

表 3-1 を参照にして区間の下限の時の熱流束  $q_{low}$  及び区間の上限と下限の中間の時の 熱流束  $q_{mid}$  の代入を行い、区間の上限温度と下限温度との差が  $1.0 \times 10^{6}$  K 以下になるま で式 (3-4) の計算を繰り返す。最終的に上限温度と下限温度との中間の温度を床面に接す る溶融物の底部の温度  $T_{base}$  とする。算出した溶融物の底部の温度  $T_{base}$ 、床面の表面温度  $T_{flr}$  及び床材の放射率  $\varepsilon_{flr}$  から式 (3-3) を使用して溶融物一床面間の熱流束  $q_{bf}$  を算出 する。使用する床材の放射率  $\varepsilon_{flr}$  は、入力で指定する。このとき、放射率の温度変化を入 力で指定する。床面の表面温度  $T_{flr}$  に基づき、床材の放射率を補間して求める。

### 床面内部の熱伝導

床面の分割数、床材の密度、比熱及び熱伝導率を入力で指定する。床材の物性値の温度変 化を入力で指定する。このことにより、床材の温度変化に基づき、床材の物性値を補間して 求めることができる。床面の初期温度を入力で指定する。一次元の熱伝導方程式を Crank-Nicolson 法及び Successive Over-Relaxation (SOR) 法を使用して解くことにより、床面 内部の温度分布の温度変化を求める。

### ③ 床面から発生する熱分解ガスの発生量

コンクリート床面から発生する熱分解ガスの発生量は、床面を拡がる溶融物及びクラストの空隙率として入力で指定する。空隙率は入力で指定した値で一定となる。床面を拡がる 溶融物及びクラスト内の空隙率を設定することにより、溶融物及びクラストの見かけの密 度が減少する。見かけの密度が減少すると、慣性力が低減するために水平方向への拡がりが 阻害されると考えられる。加えて、床面を拡がる溶融物が流動可能となる最小の液深が高く なることにより、床面を拡がる溶融物が停止し易くなる。

# 3.3.2 無限の厚さを有する床面の場合

溶融物から床面への熱伝達

床面と接する溶融物の間に底クラストが存在する場合には、底クラストの底部の温度、底 クラストが存在しない場合には、溶融物の底部の温度を二分法を用いて推定する。二分法を 使用するためには、推定したい温度の区間の上限及び下限を設定する必要がある。上限を溶 融物の平均温度  $T_{ave}$  とした。下限を  $T_{low} = 1.0 \times 10^8$  K とした。上限と下限の中間の温度  $T_{mid} = (T_{ave} + T_{low})/2.0$  を底クラストの底部の温度もしくは溶融物の底部の温度  $T_{base}$  と して収束させる。3.3.1 の①と同様に底クラストが存在する場合には、式(3-1)、式(3-2) 及び式(3-3) を使用して区間の下限の時の熱流束  $q_{low}$  及び区間の上限と下限の中間の時 の熱流束  $q_{mid}$  を算出する。底クラストが存在しない場合には、式(3-3) 及び式(3-4) を 使用して  $q_{low}$  及び  $q_{mid}$  を算出する。

表 3-1 を参照に、算出した区間の下限の時の熱流束  $q_{low}$  及び区間の上限と下限の中間の時の熱流束  $q_{mid}$  の代入を行い、区間の上限温度と下限温度との差が  $1.0 \times 10^6$  K 以下になるまで式 (3-1) 及び式 (3-2) もしくは式 (3-4) の計算を繰り返す。上限温度と下限温度との中間の温度を床面に接する溶融物もしくは底クラストの底部の温度  $T_{base}$  とする。算出した  $T_{base}$ 、床面の表面温度  $T_{flr}$  及び床材の放射率  $\varepsilon_{flr}$  から式 (3-3) を使用して溶融物一床面間の熱流束  $q_{bf}$  を算出する。計算に使用する床材の放射率  $\varepsilon_{flr}$  は入力で指定する。このとき、床材の放射率は入力で指定した値で一定となる。

② 床面内部の熱伝導

コンクリート内部の自由水の蒸発、CO2ガスの発生及び結晶水(骨材中の水分)の蒸発を

考慮する。コンクリート内部で熱分解ガスが発生する箇所を相転移点と呼称する(図 3-1 参照)。相転移点の温度及び床面から相転移点までの深さ方向(z 方向)の初期位置を入力で 指定する。各相転移点でのコンクリートの密度、比熱、熱伝導率、放射率及び吸熱量を入力 で指定する。相転移点間の床材の物性値は補間せずに一定とする。コンクリートの放射率は 各相転移点において一定とする。溶融物一床面間の熱流束 *q<sub>bf</sub>*、相転移点の温度及び床材の 密度、比熱、熱伝導率及び吸熱量等からノイマン境界条件を使用してコンクリートの一次元 の熱伝導方程式を解くことにより z 方向の相転移点の位置の1ステップの変化幅を算出す る。相転移点の位置と温度は紐づけられているため、相転移点の位置が変化すると床面内部 の温度分布も変化する。

③ 床面から発生する熱分解ガスの発生量

コンクリート床面から発生する熱分解ガス発生量について 3 つのオプションを使用でき る。1つ目は、コンクリート床面から発生した熱分解ガスの発生量に相当する体積を床面を 拡がる溶融物及びクラストの空隙率として入力で指定する。2 つ目は、各相転移点で発生す る熱分解ガスの種類を入力で指定して計算を行う。指定できる熱分解ガスの種類は、CO<sub>2</sub>及 び H<sub>2</sub>O である。JASMINE コードでは MCCI によるコンクリートの侵食を考慮していない ため、コンクリート内部の物性値は温度により変化するものの体積は変化しないと仮定す る。このことから、各相転移点間のコンクリートの密度の変化量  $\Delta \rho_{conc}$  (kg/m<sup>3</sup>) を各相転 移点から発生する単位体積当たりの熱分解ガスの質量  $M_{inpyg}$  (kg/m<sup>3</sup>) として使用すること ができる (式 (3-5))。

$$M_{inpyg} = \Delta \rho_{conc} \tag{3-5}$$

各相転移点で発生する熱分解ガスの密度 ρ<sub>pyg</sub> は、式(3-6)で算出する。

$$\rho_{pyg} = \frac{P_{top} M_{molpyg}}{RT_{dp}} \tag{3-6}$$

ここで、 $P_{top}$ :床面に堆積した溶融物の上部に作用する圧力 (Pa)、 $M_{molpyg}$ :熱分解ガスの モル質量 (g/mol)、R:気体定数 8.3144598×10<sup>3</sup> (Pa\*L/(K\*mol))、 $T_{dp}$ :相転移点の温度 (K)をそれぞれ示す。熱分解ガスのモル質量は、入力で指定したガスの種類により変化す る。各相転移点で発生する単位面積当たりの熱分解ガスの質量  $M_{inpyg}$  及び熱分解ガスの密 度  $\rho_{pyg}$ を式 (3-7)及び式 (3-8) に適応する。式 (3-7)及び式 (3-8) から算出した相転 移点で発生する熱分解ガスの質量  $m_{pyg}$ 及び体積  $v_{pyg}$ をコンクリート内部のすべての相 転移点での和をとることにより、コンクリート床全体から発生する熱分解ガスの質量  $M_{pyg}$ 及び体積  $V_{pyg}$ を算出する (式 (3-9)、式 (3-10))。

$$m_{pyg} = M_{inpyg} \Delta X_{pb} \Delta Z_{dp} W_p \tag{3-7}$$

$$v_{pyg} = \frac{M_{inpyg} \Delta X_{pb} \Delta Z_{dp} W_p}{\rho_{pyg}}$$
(3-8)

$$M_{pyg} = \sum_{p} m_{pyg} \tag{3-9}$$

$$V_{pyg} = \sum_{p} v_{pyg} \tag{3-10}$$

ここで、 $\Delta Z_{dp}$ :1ステップでの相転移点の変化幅 (m)、 $M_{inpyg}$ :相転移点から発生する単位 体積当たりの熱分解ガスの質量 (kg/m<sup>3</sup>)、 $\rho_{pyg}$ :相転移点から発生する熱分解ガスの密度 (kg/m<sup>3</sup>)、 $\Delta X_{pb}$ :x方向のメッシュの幅 (m)、 $W_p$ :メッシュの奥行 (m) をそれぞれ表す。 3 つ目は、各相転移点で発生する熱分解ガスの単位体積当たりの質量  $M_{inpyg}$ 及び密度  $\rho_{pyg}$ を入力で指定することで、任意の気体を指定して計算を行う。入力で指定した  $M_{inpyg}$ 及び  $\rho_{pyg}$ を使用して式 (3-7)、式 (3-8)、式 (3-9) 及び式 (3-10) の計算を行い、コンク リート床全体から発生する熱分解ガスの質量  $M_{pyg}$ 及び体積  $V_{pyg}$  を算出する。



図 3-1 コンクリート床面内部の熱伝導計算の概念図

3.4 解析条件

令和4年度に作成した沸騰水型軽水炉(BWR)を模擬した解析体系の入力データより溶 融物の投入条件及び物性値が異なる2ケース(Case001、Case194)[3.1]を選定した。熱分 解ガスの発生を解析するために、無限厚さを有する床面(コンクリート)に設定した。床材 は、珪岩質(Siliceous)骨材を使用したコンクリートを仮定する。熱分解ガスの発生の計算 のために、相転移点から発生する単位体積当たりの熱分解ガスの質量 $M_{inpyg}$ 及び熱分解ガ スの密度 $\rho_{pyg}$ を入力で指定する。これは3.3.2節の③で示したオプション3に相当する。 床面から発生する熱分解ガスは、CO<sub>2</sub>及びH<sub>2</sub>Oとした。

表 3-2 に Case001 及び Case194 の解析条件を示す。表 3-3 に Case001 及び Case194 の 溶融物の物性値、表 3-4 に Case001 及び Case194 の床材 (コンクリート)の物性値を示 す。コンクリートの組成は、OECD/MCCI 計画の CCI-3 試験[3.2]で使用されたコンクリー トと同一の組成を仮定した。表 3-4 では、相転移点の数と同じだけ放射率を除く物性値を設 定する。このことは、床材の放射率が相転移点の前後で一定となることを想定する。表 3-5 に Case001 及び Case194 の熱分解ガスの単位体積当たりの質量  $M_{inpyg}$  及び密度  $\rho_{pyg}$  を 示す。このとき、熱分解ガスの単位体積当たりの質量及び密度は、相転移点の数だけ設定す る。

ケース名	001	194
溶融物組成	UO <sub>2</sub> , Zircaloy, Steel, Z	rO <sub>2</sub> , SteelOxide, B <sub>4</sub> C
溶融物投入量(kg)	201923.0	121786.0
溶融物初期温度(K)	2238.47	2098.0
溶融ジェット直径(m)	0.09583	0.10270
投入時間(s)	4492.0	2449.0
投入速度(m/s)	1.0	
投入ノズル高さ (m)	4.0	
冷却水温度(サブクール)(K)	300.0 (73)	
水深 (m)	1.4	5
冷却水プール直径 (m)	6.0	)
気相組成	N <sub>2</sub> , H <sub>2</sub>	
気相体積(m <sup>3</sup> )	146.88	
気相圧力(MPa)	0.1	1

表 3-2 Case001 及び Case194 の解析条件

表 3-3 Case001 及び Case194 の溶融物の物性値

ケース名	001	194	
組成	UO <sub>2</sub> , Zircaloy, Steel, ZrO <sub>2</sub> , SteelOxide, B <sub>4</sub> C		
融点(K)	2036.76	2061.4	
固相線温度(K)	1508.94	1233.47	
液相線温度(K)	2783.96	3009.5	
固相密度(kg/m <sup>3</sup> )	6255.9	6167.0	
液相密度(kg/m³)	6232.2	6002.6	
固相比熱(J/kg・K)	1037.57	1035.22	
液相比熱(J/kg·K)	1039.78	1471.35	
凝固潜熱(J/kg)	336098.9	332228.4	
固相熱伝導率(W/m・K)	13.8425	10.4955	
液相熱伝導率(W/m·K)	11.8644	11.8553	

ケース名	001	194	
~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~	SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , CaO, 1	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO, MnO,	
<b>将旦刀义</b> 。	$K_2O$ , $Na_2O$ , $SrO$ , $TiO_2$ , $SO_3$ , $CO_2$ , $H_2O$		
相転移点の数 (-)	Į	5	
	1523.15 (コン	クリート融点)	
	1065.65 (	CO2放出)	
各相転移点の温度(K)	688.65(結	合水蒸発)	
	373.15(自	由水蒸発)	
	293.15(温度	変化開始点)	
	0.	.0	
冬 相転移 点の 初期位置 (m)	4.0×	< 10 <sup>-4</sup>	
(Fま西からの野難)	7.0  imes	< 10 <sup>-4</sup>	
(木衣面からの距離)	$1.1 \times$	< 10 <sup>-3</sup>	
	1.5  imes	< 10-3	
	67821	547.53	
	857871588.66		
各相転移点の吸熱量(J/K)	187137824.47		
	118971	945.45	
	0.	.0	
	0.	.0	
	1989.66		
各相転移点の密度(kg/m <sup>3</sup> )	2215.06		
	2274.26		
	2300.0		
	0.0		
	1.5		
各相転移点の熱伝導率(W/m・K)	1.1		
	1.5		
	1.5		
	0.	.0	
	$1.00  imes 10^{-3}$		
各相転移点の比熱(J/kg・K)	$1.10  imes 10^{-3}$		
	$1.05  imes 10^{-3}$		
	$0.82  imes 10^{-3}$		
放射率(-)	0.	.4	

表 3-4 Case001 及び Case194 の床材 (コンクリート) の物性値

ケース名	001	194
	0	.0
各相転移点から発生するコンクリートの単	22	5.0
位体積当たりの熱分解ガスの質量	32	2.2
$(kg/m^3) M_{inpyg}$	52	2.7
	0	.0
	0	.0
冬田転移占から発生する執公観ガスの密度	1	.0
谷相転移点から発生する熱力再力入の密度 (kg/m <sup>3</sup> ) ρ <sub>pyg</sub>	0.8	316
	0.5	578
	0	.0

表 3-5 Case001 及び Case194 の熱分解ガスの単位体積当たりの質量及び密度

3.5 解析結果

図 3-2 に Case001 及び Case194 の溶融物と冷却水の時間変化を示す。図中の赤い点は、 溶融状態の溶融物の粒子群を灰色の点は固化した状態の溶融物の粒子群を示す。図中のカ ラーバーはボイド率を示す。ボイド率は1 が気相、0 が液相を示すので、黄色い部分が気相、 青い部分が液相をそれぞれ示す。Case001 及び Case194 では、溶融物が 3.0 m の内壁まで 到達している。10000 秒時点で Case001 は水深が約 1.2 m まで下がり、Case194 では水深 が約 0.6 m まで下がった。

図 3-3 に Case001 及び Case194 の溶融物の状態別質量の時間変化のグラフを示す。 Case001 では、溶融物の投入終了後も溶融部の質量が増加しており、逆に表面クラストは 減少している。Case194 では、溶融物の投入終了後から溶融部の質量が減少して、表面クラ ストの質量が増加する。

図 3-4 に Case001 及び Case194 の溶融物の拡がりの先端位置のグラフを示す。Case001 及び Case194 共に約 1000 秒で溶融物の先端が内壁(3.0 m)まで到達する。溶融物の拡が り方も 2 ケース共ほぼ同一となった。

図 3-5 に Case001 及び Case194 の相転移点の位置の時間変化のグラフを示す。床面への 伝熱モデルが無限の厚さを有する床面の場合は、入力で指定した相転移点の初期位置から 値が変動することにより、間接的に床内部の温度変化を見ることができる。温度を計測する 位置は左端のメッシュ(溶融物の落下地点)の床面を対象とした。図の縦軸は床面からの深 さを示しており、値が大きいほど床面から離れていくことを意味する。Case001 と Case194 とを比較すると、Case194 の方が CO<sub>2</sub> 放出となる相転移点の位置が深くなる(熱がより深 く伝わる)ことが分かる。これは Case194 の方が溶融物の密度が小さいため、溶融物が重 力で押しつぶされ難くなり左端のメッシュに溜まったためと考えられる。

図 3-6 及び図 3-7 に Case001 と Case194 の床面から発生する熱分解ガスの質量及び体積 のグラフを示す。熱分解ガスの質量は、Case001 では約 2.1 kg、Case194 では約 2.6 kg の 熱分解ガスが発生した。熱分解ガスの体積は、Case001 では約 3.8 m<sup>3</sup>、Case194 では約 4.5 m<sup>3</sup>の熱分解ガスが発生した。これらのことから、熱分解ガスは、Case194 の方が多く発生 した。

# 3.6 まとめ

JASMINE コードと MCCI コードとのインターフェイスの検討を行うために、床材をコ ンクリートに設定した JASMINE コードの解析を行った。解析対象は、実機の BWR を模 擬した解析体系とした。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。MCCI コードは総合シビアアクシデント解析コード に組み込まれている MCCI 機能を参考にしている。MCCI コードへ受け渡す境界条件とし て次の項目が挙げられる。

- JASMINE コードの解析結果に出力されている物理量 床に堆積した溶融物の質量(kg) 溶融物の温度(K) 床の温度(K)
   溶融物上部の気相温度(K)(冷却水が存在しない場合に必要) 溶融物上部の冷却水温度(K)(冷却水が存在する場合に必要)
- ② JASMINE コードの解析結果に出力されていない物理量 溶融物一床面間の熱伝達率(W/m<sup>2</sup>·K)
   溶融物一冷却水間の熱伝達率(W/m<sup>2</sup>·K)

参考文献

- [3.1] 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構,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,令和5年3月
- [3.2] M. T. Farmer, S. Lomperski, D. J. Kilsdonk, and R. W. Aeschlimann, OECD MCCI Project Final Report, OECD/MCCI-2005-TR06, February 28, 2006





図 3-2 溶融物と冷却水プールの時間変化(1/2)





図 3-2 溶融物と冷却水プールの時間変化(2/2)



図 3-3 溶融物の状態別質量の時間変化



図 3-4 溶融物の拡がりの先端位置



図 3-5 相転移点の位置の時間変化



図 3-6 床面から発生する熱分解ガスの質量



図 3-7 床面から発生する熱分解ガスの体積 Case001

- 4. シビアアクシデント解析コードによる MCCI 解析
- 4.1 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解析コードの 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、MELCOR1.8.5(以下 MELCOR)による解析を実施した。解 析の対象としたのは OECD/NEA で実施された CCI 実験である。ベースケースの計算では 一通り実験条件を模擬した入力を作成し解析を行った。重要な現象や課題の抽出を目的と するため、実験を再現するための細かな条件変更及び解析は行わなかった。結果に影響を与 えるパラメータの抽出のために感度解析を行った。

また、MCCI 解析に必要な物理モデルの整備として、THALES2 コードの伝熱モデルに ついて検討した。まず、既存のモデルについて説明した。CCI 解析の結果に基づき、コンク リートへの伝熱に係わるコンクリート内温度分布のモデルについて、融解を伴う熱伝導問 題の解析解の適用性について検討した。

# 4.2 MELCOR コードによる MCCI 実験の解析

#### 4.2.1. MELCOR コード MCCI モデルの概要

MELCOR コードでは原子炉キャビティ内の溶融物に関する現象は CAV パッケージで計 算しており、MCCI に関するモデルについては CORCON-Mod3 コード[4.1, 4.2]をベース にして作成された。MELCOR コードは米国サンディア国立研究所で開発が進められている、 シビアアクシデントの総合解析コードである。炉心の損傷及び溶融、熱水力、放射性物質の 放出等のモデルごとにパッケージ化されており、キャビティにおける溶融物の MCCI に係 わる現象は CAV パッケージにまとめられている。パッケージで圧力容器内の燃料及び構造 物を含む炉心溶融物の挙動を計算し、圧力容器の下部ヘッドが破損(計装配管と下部ヘッド 構造部分のギャップ部の破損や下部ヘッド構造部分のクリープ破損などのモードがある。) すると圧力容器下部のキャビティ部分に落下するとしている。このときに温度に従って成 分ごとに融点以上である溶融状態のデブリのみ落下させるモードと、融点以下で固化して いるとみなす固化デブリのみを落下させるモードが選択できる。落下した溶融デブリのデ ータは CAV パッケージに渡され、キャビティ内での計算に使われる。

CAV パッケージでは以下の現象をモデル化している。なお、落下してきたデブリは瞬時 に最大面積まで拡がるとしており、クラスト形成等による拡がり停止は生じない。[4.3, 4.4]

- ① コンクリート分解反応
  - デブリから移行した熱により熱分解され、水蒸気と二酸化炭素が放出される。残留酸化 物は溶融してデブリと混合する。この際コンクリートからデブリへ質量が移動する。分 解ガスはデブリ中の未酸化金属と反応し、水素と一酸化炭素へ還元される。ガスはデブ リを通過し、デブリ上方の空気へ移動する。その分の質量がコンクリートから環境へ移 動する。
- ② デブリ・コンクリート・環境間の質量および熱の移動

デブリ温度がコンクリートの分解温度以下のとき、コンクリート床面は断熱境界とされる。デブリ-環境(水又は気相)間の熱移動は、水プールがあるときは沸騰曲線から 求められる。水プールが無いときは自然対流と輻射により計算される。デブリ-コンク リート間はガス層あるいはスラグ層が形成される。どちらのモデルを使用するかは入 力で選択し(デフォルト:ガス層モデル)、選んだモデルによりデブリ-コンクリート間 の熱伝達係数が決まる。分解ガスがデブリ中にあると、その分だけ体積が増え、デブリ - コンクリート間の面積が増加する。

③ デブリ層の混合

デブリは酸化物と未酸化物に分かれ、それぞれのグループ内で混ざるが、2 つのグルー プは混ざらないとしている。相対密度に基づき層を形成し、気泡が層間の界面を通過す る際に混合される。デブリ層上面の温度と圧力の境界条件は CVH(熱水力挙動を扱うモ ジュール・パッケージ)から取得される。発生ガスの質量や熱はソースとして CVH へ 供給される。ただし、コンクリートの浸食が進んでも、CVH の体積は不変としている。

- ④ キャビティ形状の変化
- キャビティ初期形状は、入力で Body Point とよばれる位置(r-z座標系)を設定して 定義する。Body Point におけるデブリ - コンクリート間熱流束の値から Body Point の 移動量、つまりコンクリート浸食量が決定される。浸食量の計算後、計算安定性のため に Body Point の移動方向を原点から元の Body Point 位置まで結んだ直線上へ補間す る。

4.2.2 CCI 実験の概要

CCI 実験は OECD/NEA 主導で実施された MCCI の実験プロジェクトである[4.5]。CCI-1 から 3 が実施され、プロジェクト外で 4 から 6 が追加で実施された。

ここで、解析対象とした CCI-1 から 3 では、バルク冷却、クラストひび割れの水侵入、 溶融物噴出、クラスト破損の 4 つの現象に焦点があてられた。

CCI 実験体系の試験部の概要図を図 4.2.1 に示す。試験部は矩形のコンクリート製の容器 である。キャビティ部の壁面は対面する 2 方向はコンクリートであるが、残りの 2 方向は 酸化マグネシウム (MgO) 製で、侵食されない。このため、コンクリート浸食の方向は制限 されており、侵食は 2 次元的に生じるようになっている。模擬コリウムの粉末をセットし、 ニクロム線の過熱によりテルミット反応を生じさせ、溶融コリウムを作り出す。コンクリー トの分解により生じたガスは排気系により試験部外へ排出される。また、ガスの燃焼を防ぐ ため、試験部にはヘリウムが常に供給される。

#### コンクリートとコリウムの組成

CCI-1 から CCI-3 実験におけるコンクリート組成とコンクリート物性を表 4.2.1、表 4.2.2 に示す。また、各 CCI 実験のコリウム組成(テルミット反応後)を表 4.2.3 に示す。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、今回の計算 ではコンクリート組成から SO<sub>3</sub> を除いた上で合計が 100 wt.%となるように換算した表 4.2.4 のコンクリート組成を使用することとした。

#### 実験条件及び事象のタイムテーブル

実験の手順を次に示す。まず、装置のキャビティ部分に模擬コリウムとテルミット反応の ための物質の粉末を装荷し、ニクロムワイヤーのスターターにより開始されるテルミット 反応により最初の 30 秒程度で溶融物(溶融デブリ)を作り出す。実験開始と同時に、内部 発熱を模擬するため直接通電加熱(Direct Electrical Heating, DEH)による加熱を開始す る。5.5 時間経過又はコンクリート浸食が 30cm に到達した時点で注水が開始される。溶融 デブリ温度 < コンクリート液相線温度となった場合又はコンクリート浸食が 35cm に到 達した時点で加熱を停止し、実験を終了する。各実験において発生した事象のタイムテーブ ルを表 4.2.5 から 4.2.7 に示す。



図 4.2.1 CCI 試験概要図[4.5]

酸化物	CCI-1	CCI-2	CCI-3
	wt%	wt%	wt%
Al2O3	0.77	2.49	3.53
CaO	8.54	25.88	16.79
Fe2O3	0.79	1.39	1.49
MgO	0.60	11.47	0.85
MnO	0.00	0.03	0.04
K20	0.12	0.55	0.81
SiO2	82.48	21.61	59.91
Na2O	0.00	0.31	0.66
SrO	0.00	0	0.04
TiO2	0.051	0.135	0.155
SO3	0.514	0.505	0.434
CO2	0.901	29.71	9.80
H2O, Free	1.808	3.255	2.293
H2O, Bound	1.92	1.11	1.40
Total	98.48	98.47	98.19

表 4.2.1 CCI 実験コンクリート組成[4.5]

(各成分を合計しても Total の行の値にならないため、誤植と思われる。)

コンクリート物性	CCI-1	CCI-2	CCI-3
Туре	SIL (US)	LCS	SIL (EU)
Liquidus Temperature (°C)	1250	1295	1250
Gas Content (wt%)	4.6	34.1	13.5
Decomposition Enthalpy	1.6	2.27	1.72
(MJ/kg)			
Density (kg/m3)	2300	2330	2270

表 4.2.2 CCI 実験コンクリート物性[4.5]

酸化物	CCI-1		CCI-2		CCI-3	
	wt%	Mass (kg)	wt%	Mass (kg)	wt%	Mass (kg)
UO2	60.97	243.88	60.62	242.48	56.32	211.41
ZrO2	25.04	100.16	24.9	99.6	23.13	86.82
SiO2	6.38	25.52	3.39	13.56	11.17	41.92
MgO	0.07	0.28	1.14	4.56	0.12	0.45
Al2O3	0.38	1.52	0.41	1.64	0.64	2.4
CaO	1.25	5	3.13	12.52	2.21	8.31
Cr	5.91	23.64	6.41	25.64	6.41	24.06
Total	100	400	100	400	100	375.37

表 4.2.1 CCI 実験コリウム組成[4.5]

表 4.2.4 CCI 実験で使用したコンクリート組成[4.5]

Oxide	CCI-1 wt.%	CCI-2 wt.%	CCI-3 wt.%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.79	2.54	3.61
CaO	8.72	26.42	17.17
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.81	1.42	1.52
MgO	0.61	11.71	0.87
MnO	0.00	0.03	0.04
$K_2O$	0.12	0.56	0.83
${ m SiO}_2$	84.18	22.06	61.28
$Na_2O$	0.00	0.32	0.68
SrO	0.00	0.00	0.04
${ m TiO_2}$	0.05	0.14	0.16
$SO_3$	0.00	0.00	0.00
$\mathrm{CO}_2$	0.92	30.33	10.02
H <sub>2</sub> O, Free	1.85	3.32	2.35
H <sub>2</sub> O, Bound	1.96	1.13	1.43
Total	100	100	100

Time (minutes)	Event
0.00	テルミット反応完了、メルト温度 2050℃
0.36-0.46	アブレーション開始
2.8	DEH 最大出力
65.83	クラスト貫通プローブによるクラスト破壊
67.65	注水(29.2cm アブレーション)
78.55	DEH 終了、アブレーションリミット (35 cm)
119.72	データ収集終了

表 4.2.5 CCI-1 事象タイムテーブル[4.5]

表 4.2.6 CCI-2 事象タイムテーブル[4.5]

Time (minutes)	Event
0.00	テルミット反応完了、メルト温度 2000℃
0.10-0.38	アブレーション開始
1.56	DEH 最大出力
5.0-23.0	安定したメルトの形成後、メルト噴出と撹拌
298.9	クラスト貫通プローブによるクラスト破壊
300.79	注水
312.6	DEH を一定電圧へ移行
$42\overline{3.1}$	データ収集終了

表 4.2.7 CCI-3 事象タイムテーブル[4.5]

Time (minutes)	Event
0.00	テルミット反応完了、メルト温度 1950℃
0.36-0.46	アブレーション開始
2.8	DEH 最大出力
65.83	クラスト貫通プローブによるクラスト破壊
67.65	注水(29.2cm アブレーション)
78.55	DEH 終了、アブレーションリミット (35 cm)
119.72	データ収集終了

# 4.2.3 MELCOR による CCI 実験解析の設定

# (1) CCI 実験体系のモデル化

CCI 実験体系を基に、MELCOR における CCI 実験モデルを作成した(図 4.2.2)。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 4.2.8 に示す。このうち CVH101、CVH102、CVH300、 FL601、FL602 の値は計算の都合上、便宜的に設定したものであり実際の寸法や面積を反 映したものではない。 (2) キャビティ形状のスケーリング

CCI 実験装置のキャビティ部分の底面は正方形場であるが、MELCOR の CAV パッケージ では円筒座標系としてモデル化されている。そのため、以下の条件を満たすようにスケーリ 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ようにする。

- 2) 浸食領域の底面と側面の比が変わらないようにする。
- 3) 溶融物中のコンクリート濃度の時間変化がスケーリングによって変わらないようにする。 ここでは、底面の直径を 100cm、高さを 25cm とし、発熱量をπ倍とすることでスケー リングを行った。







コンポーネント	説明	寸法、体積				
CAV01	TEST SECTION のうち	内径 0.5 m、高さ 1.2 m、				
	コリウム、コンクリートが存	コンクリート底面厚み 0.55 m、				
	在する領域	コンクリート側面厚み 0.55 m				
CVH100	TEST SECTION のうち	高さ 2.248 m、体積 1.766 m <sup>3</sup>				
	水、ガスが存在する領域					
CVH101	注水装置	高さ 10.0 m、体積 1.0e3 m <sup>3</sup>				
CVH102	ヘリウム供給装置	高さ 10.0 m、体積 1.0e3 m³				
CVH300	環境(大気圧)	高さ 100.0 m、体積 1.0e6 m³				
FL181	圧力逃し弁	流路面積 0.01824 m <sup>2</sup> 、流路長さ 2.0 m				
FL601	注水管	流路面積 1.0 m²、流路長さ 0.01 m				
FL602	ヘリウム供給管	流路面積 1.0 m²、流路長さ 0.01 m				
HS22001	下部壁面(コンクリート)	面積 0.6185 m <sup>2</sup> 、厚み 0.62 m				
HS22002	下部壁面(MgO)	面積 0.6185 m²、厚み 0.325 m				
HS22003	TRANSITION_PLATE (AI)	面積 0.0797 m <sup>2</sup> 、厚み 0.62 m				
HS22004	上部壁面(MgO)	面積 2.8726 m²、厚み 0.516 m				
HS22005	上部壁面(コンクリート)	面積 2.8726 m <sup>2</sup> 、厚み 0.516 m				
HS22006	天井(コンクリート)	面積 0.7853 m <sup>2</sup> 、厚み 0.254 m				

表 4.2.8 CCI 実験モデルのコンポーネント説明

#### 4.2.4 CCI 実験解析ベースケース解析

予備計算を行い、計算の安定性などを考慮して以下の設定を行った。作成したベースケー ス入力ファイルを使用して解析を実施し、実験結果[4.5]との比較を行う。溶融デブリ温度の 時刻歴を図 4.2.3 に示す。CCI-1 の解析結果では開始直後に溶融物温度が急速に高くなっ た。CCI-3 では開始直後の溶融物温度の低下がみられない。溶融デブリと水プール間の熱流 束の時刻歴を図 4.2.4 に示す。MELCOR 解析のグラフはそれぞれの注水開始時刻を 0 min. としている。解析での熱流束は CCI-2 では比較的大きく(700 kW/m<sup>2</sup>程度)評価されてい るのに対して CCI-1 及び 3 では 200 kW/m<sup>2</sup>程度までしか上昇しておらず、溶融物の除熱が 実験に比べて不十分という結果になった。今回の計算で使用した溶融デブリ・水プール間の 熱伝達モデルでは実験と差異があると考えられる。しかしながら、この差異が生じた原因と しては、モデルに不足があることによるもの、もしくは CCI-1 及び 3 において個別の状況 があったことによる可能性がある。

図 4.2.5 及び 4.2.6 に CCI 実験と MELCOR 解析によるコンクリート側面と底面の浸食 深さの時刻歴を示す。CCI-1 及び CCI-3 について、解析は側面方向の最終的な侵食深さ及

び侵食速度を実験に比べて過小評価した。解析の底面方向の侵食深さは実験に比べて過大 評価した。CCI-2 では側面及び底面の最終的な侵食深さとその深さへの到達時間は、実験と 解析は概ね同程度になった。表 4.2.9 にはグラフ等から読み取った最終侵食深さと到達時間 から求めた侵食速度を示す。ほとんどの結果は解析結果が過小評価となっていることから、 どのケースでも熱伝達のモデルは過小評価をしていたと考えられる。他の主要な出力とし て、水プール高さ、水温、コリウムの重量変化、各成分の重量、分解ガスの発生量、コリウ ム-コンクリート間の熱流束、圧力、コリウムの発熱量は付録 B に掲載した。



図 4.2.3 溶融デブリ温度の時刻歴







図 4.2.6 コンクリート底面侵食深さの時刻歴

	実	験	解析		
	側面, cm/min.	底面, cm/min.	側面, cm/min. (解析/ 実験)	底面, cm/min. (解析/ 実験)	
CCI-1	0.47	0.14	0.12 (0.26)	0.12 (0.83)	
CCI-2	0.10	0.07	0.09 (0.94)	0.06 (0.83)	
CCI-3	0.28	0.03	0.13 (0.47)	0.08 (2.80)	

表 4.2.9 CCI 実験の侵食速度概算

# 4.2.5 CCI 実験感度解析条件

CCI 実験の入力をベースに MELCOR 入力のパラメータを対象として感度解析を行った。既存の研究[4.6]を参考にして、溶融コリウムの組成、溶融コリウムと水の熱伝達、コンクリートの浸食に係わる入力パラメータを選定し、実験1ケースに対して 30 ケース、合計 90 ケースの入力を作成し、解析を実行した。感度解析に用いた MELCOR 入力パラメータを表 4.2.10 に示す。各入力パラメータの値の一覧を表 4.2.11 に示す。

パラメータ	説明	予測される効果
Boiling	沸騰曲線に乗じる係数	溶融コリウムから水プー
		ルヘ移動する熱量増加
HTRINT	溶融コリウムのデブリ層界面の熱伝達モデ	デブリ層分離時に径方向
	ルに乗じる係数	コンクリート浸食量増加
HTRBOT	溶融コリウム底面の熱伝達モデルに乗じる	底方向コンクリート浸食
	係数	量増加
HTRSIDE	溶融コリウム側面の熱伝達モデルに乗じる	径方向コンクリート浸食
	係数	量増加
EMISS.SUR	周囲環境の輻射率	溶融コリウムから上部ガ
		スへ移動する熱量増加
MIXING	デブリ層の混合モデル	各デブリ層厚みに応じた
	(Enforce:強制混合、Calc:層分離を計算)	コンクリート浸食形状
GFILMBOTT	溶融コリウム底面の熱伝達モデル	底方向コンクリート浸食
	(GAS:ガスフィルム、SLAG;スラグ層)	量増加
GFILMSIDE	溶融コリウム側面の熱伝達モデル	径方向コンクリート浸食
	(GAS:ガスフィルム、SLAG;スラグ層)	量増加
SC2306(1)	溶融コリウムの大気中における対流熱伝達	溶融コリウムから上部ガ
	係数	スへ移動する熱量増加
SC2306(2)	溶融コリウムの水プール中における対流熱	溶融コリウムから水プー
	伝達係数	ルへ移動する熱量増加
MeltComp.	溶融コリウム初期組成	コンクリート浸食量変化
COKE	コーキング(Zr酸化時の固体炭素析出)フラグ	溶融コリウム組成の変化
	(0:ON、1:OFF)	

表 4.2.10 CCI 感度解析パラメータ

case	Boiling	HTRINT	HTRBOT	HTRSIDE	EMISS.SUR	MIXING	GFILMBOTT	GFILMSIDE	SC2306(1)	SC2306(2)	MeltComp.	COKE
1	10	1	1	1	0.6	Enforce	GAS	GAS	10	1000	実験値	1
2	15	1	1	1	0.6	Enforce	GAS	GAS	10	1000	実験値	1
3	5	1	1	1	0.6	Enforce	GAS	GAS	10	1000	実験値	1
4	10	10	1	1	0.6	Enforce	GAS	GAS	10	1000	実験値	1
5	10	0.1	1	1	0.6	Enforce	GAS	GAS	10	1000	実験値	1
6	10	1	10	1	0.6	Enforce	GAS	GAS	10	1000	実験値	1
7	10	1	0.1	1	0.6	Enforce	GAS	GAS	10	1000	実験値	1
8	10	1	1	10	0.6	Enforce	GAS	GAS	10	1000	実験値	1
9	10	1	1	0.1	0.6	Enforce	GAS	GAS	10	1000	実験値	1
10	10	1	1	1	0.9	Enforce	GAS	GAS	10	1000	実験値	1
11	10	1	1	1	0.3	Enforce	GAS	GAS	10	1000	実験値	1
12	10	1	1	1	0.6	Calc	GAS	GAS	10	1000	実験値	1
13	10	0.1	1	1	0.6	Calc	GAS	GAS	10	1000	実験値	1
14	10	10	1	1	0.6	Calc	GAS	GAS	10	1000	実験値	1
15	10	1	1	1	0.6	Enforce	SLAG	GAS	10	1000	実験値	1
16	10	1	1	1	0.6	Enforce	GAS	SLAG	10	1000	実験値	1
17	10	1	10	10	0.6	Enforce	SLAG	SLAG	10	1000	実験値	1
18	10	1	0.1	0.1	0.6	Enforce	SLAG	SLAG	10	1000	実験値	1
19	10	1	1	1	0.6	Enforce	GAS	GAS	1	1000	実験値	1
20	10	1	1	1	0.6	Enforce	GAS	GAS	100	1000	実験値	1

表 4.2.11 MELCOR 入力パラメータ一覧(1/2)

case	Boiling	HTRINT	HTRBOT	HTRSIDE	EMISS.SUR	MIXING	GFILMBOTT	GFILMSIDE	SC2306(1)	SC2306(2)	MeltComp.	COKE
21	10	1	1	1	0.6	Enforce	GAS	GAS	10	100	実験値	1
22	10	1	1	1	0.6	Enforce	GAS	GAS	10	10	実験値	1
23	10	1	1	1	0.6	Enforce	GAS	GAS	10	1000	ZrO2 50%,	1
											Zr 50%	
24	10	1	1	1	0.6	Enforce	GAS	GAS	10	1000	ZrO2 50%,	1
											SUS 50%	
25	10	1	1	1	0.6	Enforce	GAS	GAS	10	1000	ZrO2 50%,	1
											Zr25 %,	
											$\rm SUS~25\%$	
26	10	1	1	1	0.6	Enforce	GAS	GAS	10	1000	ZrO2 25%,	1
											Zr 75%	
27	10	1	1	1	0.6	Enforce	GAS	GAS	10	1000	ZrO2 75%,	1
											Zr 25%	
28	10	1	1	1	0.6	Enforce	GAS	GAS	10	1000	ZrO2 50%,	0
											Zr 50%	
29	10	1	1	1	0.6	Enforce	GAS	GAS	10	1000	ZrO2 50%,	0
											SUS 50%	
30	MOD3	-	-	-	0.6	Enforce	GAS	GAS	10	1000	実験値	1

表 4.2.11 MELCOR 入力パラメーター覧(2/2)

#### 4.2.6 CCI 実験感度解析結果

全 90 ケースについて解析終了時間まで解析が実行できた。90 ケースの MELCOR 解析 結果について、解析終了時刻における水温、水蒸発量、溶融コリウム温度、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浸食量、底方向コンクリート 浸食量、コンクリート分解ガス放出量、溶融コリウム各成分の重量を出力した。表 4.2.12 に MELCOR 解析の出力 PLOT 変数と出力項目の対応を記載する。各出力項目の計算終了 時の値及び各入力パラメータを変更した場合の出力データの変化は付録 B に記載した。

CCI-1から3実験の解析の入力パラメータと出力の相関関係を図4.2.7から9に示す。 各実験ケースに対して与えた影響については以下の通りとなった。

### [Boiling]

沸騰曲線に乗じる係数を5から15倍まで変更した。CCI-1から3の全てのケースで、 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。

### [HTRINT]

溶融コリウムのデブリ層界面の熱伝達モデルに乗じる係数を 0.1 倍もしくは 10 倍にし て計算した。ただし、MIXING = Enforce の場合、デブリ層界面が存在せず、熱伝達が生 じないため出力データへの影響は無い。CCI-1 及び 3 では、MIXING = Calc とした場合 にはコンクリートへの熱伝達及びコンクリート浸食量に対する影響が大きい。CCI-2 では 影響はほとんどなかった。

#### [HTRBOT]

溶融コリウム底面の熱伝達モデルに乗じる係数を 0.1 倍または 10 倍に変化させた。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 ることから、底方向のコンクリート浸食量が多くなったと考えられる。一方で、底面へ多 く熱が移動した分だけ側面や水プールへ伝わる熱は少なくなるため、径方向のコンクリー ト浸食量は少なく、水温は低くなった。また、全体としてのコンクリート浸食量は多くな るため SiO2 や CaO 等のコンクリートに含まれる成分の重量が増加した。CCI-1 及び 3 で は、本来はほとんど変化がないと思われる UO2 重量の変化が大きくなった。

# [HTRSIDE]

溶融コリウム側面の熱伝達モデルに乗じる係数 0.1 倍または 10 倍に変化させた。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 浸食量が多くなり、底方向のコンクリート浸食量は少なくなったと考えられる。その他の 影響については HTRBOT と同様となった。

# [EMISS.SUR]

周囲環境の輻射率を変更した。CCI-1では出力データへの影響はほとんど無かったのに対して、CCI-2及び3では放出ガス量に変化が見られるが、最終的なキャビティの形状に 差は見られなかった。

# [MIXING]

デブリ層の混合モデル(Enforce:強制混合、Calc:層分離を計算)のモード選択に対する影響を 調べた。MIXING = Calc とした場合、CCI-1 から3 では径方向のコンクリート浸食量が少 なくなり、底方向のコンクリート浸食量は多くなった。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]

いずれのケースも、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浸食量が多 くなった。

# [GFILMSIDE]

溶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)を選択する。デ フォルトの 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浸食量は 多くなると予測されるが、実際は GFILMBOT を変更した場合とほぼ同様であり、底方向 のコンクリート浸食量が多くなった。

#### [SC2306(1)]

溶融コリウムの大気中における対流熱伝達係数をデフォルト値の10分の1もしくは10 倍に変更した。溶融コリウムから上部ガスへ移動する熱量に影響すると考えられるが、今 回変更した値の範囲ではいずれのケースでも出力データへの影響はほとんど無かった。

### [SC2306(2)]

溶融コリウムの水プール中における対流熱伝達係数を変更した。溶融コリウムから水プ ールへ移動する熱量が変化すると考えられるが、いずれのケースでも出力データへの影響 はほとんど無かった。

# [MeltComposition]

初期溶融物組成を変更した。非酸化物相を多くしたケースでは、コンクリート浸食量が 多くなった。非酸化物(金属)が多くなり、溶融コリウムの熱伝導率が高くなることによ ってコンクリートへの熱流量が大きくなったためと考えられる。

# [COKE]

COKE = 0 としてコーキングフラグを ON にしても最終的なコンクリート浸食形状にほ とんど影響はないが、ガス発生量はわずかに少なくなる。これは、コンクリート分解ガス に含まれる CO2 が Zr によって炭素に還元されるためと考えられる。

出力項目 MELCOR PLOT 変数 水温 [K] CVH-TLIQ\_100 水質量 [kg]  $\rm CVH\text{-}MASS.1\_100$ 注水量 [kg/s] FL-MFLOW\_601 水蒸発量 [kg] CVH-MASS.1\_100 - FL-MFLOW\_601×注水時間 HOX 層温度 [K] CAV-T.HOX\_1 MET 層温度 [K] CAV-T.MET 1 LOX 層温度 [K] CAV-T.LOX\_1 HMX 層温度 [K] CAV-T.HMX\_1 LMX 層温度 [K] CAV-T.LMX 1 溶融コリウム温度 [K] MAX(CAV-T.HOX\_1, CAV-T.MET\_1, CAV-T.LOX\_1, CAV-T.HMX\_1, CAV-T.LMX\_1) 水プールへの熱流量 [W] CAV-QSURF 1 コンクリートへの熱流量 [W] CAV-QCNCT\_1 水プールへの総熱移行量 [kJ] CAV-QSURF\_1 の時間積分 コンクリートへの総熱移行量 [kJ] CAV-QCNCT\_1の時間積分 キャビティ径方向最大座標 [m] CAV-MAXRAD 1 キャビティ底方向最小座標 [m] CAV-MINALT 1 コンクリート径方向浸食量 [m] CAV-MAXRAD\_1 - キャビティ初期半径 コンクリート底方向浸食量 [m] CAV-MINALT\_1 - キャビティ初期深さ コンクリート分解ガス放出量 [kg] CAV-TMEX\_1

表 4.2.12 MELCOR 出力項目と PLOT 変数の対応(1/2)

出力項目	MELCOR PLOT 変数
UO2質量 [kg]	CFVALU_103
ZRO2質量 [kg]	CFVALU_104
SiO2質量 [kg]	CFVALU_105
MgO 質量 [kg]	CFVALU_106
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 質量 [kg]	CFVALU_107
CaO 質量 [kg]	CFVALU_108
Cr 質量 [kg]	CFVALU_109
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 質量 [kg]	CFVALU_110
TiO2質量 [kg]	CFVALU_120
FeO 質量 [kg]	CFVALU_130
MnO質量 [kg]	CFVALU_140
SrO 質量 [kg]	CFVALU_150
Na2O 質量 [kg]	CFVALU_160
K <sub>2</sub> O 質量 [kg]	CFVALU_170
Fe2O3質量 [kg]	CFVALU_180
UO3質量 [kg]	CFVALU_190
U3O8質量 [kg]	CFVALU_200
Zr 質量 [kg]	CFVALU_210
Fe 質量 [kg]	CFVALU_220
Ni 質量 [kg]	CFVALU_230
水蒸気質量 [kg]	CVH-MASS.3_100
N2質量 [kg]	CVH-MASS.4_100
O2質量 [kg]	CVH-MASS.5_100
H2質量 [kg]	CVH-MASS.6_100
CO2質量 [kg]	CVH-MASS.7_100
CO 質量 [kg]	CVH-MASS.8_100
CH4 質量 [kg]	CVH-MASS.9_100
He 質量 [kg]	CVH-MASS.10_100

表 4.2.12 MELCOR 出力項目と PLOT 変数の対応(2/2)



図 4.2.7 CCI-1 実験解析パラメータ - 出力データ相関関係



図 4.2.8 CCI-2 実験解析パラメータ - 出力データ相関関係


図 4.2.9 CCI-3 実験解析パラメータ - 出力データ相関関係

4.2.7 CCI 実験解析のまとめ

この章ではまず、MELCOR コードの MCCI 解析モジュールである CAV パッケージに ついて概要を記載した。次に燃料溶融物コンクリート相互作用(MCCI)実験である CCI 実 験の概要、実験の重要なパラメータとなっているコンクリートと模擬コリウムの組成、実 験条件、実験時に生じた事象のタイムテーブルをまとめた。

CCI-1 から CCI-3 実験の MELCOR 解析のベースケース入力を作成して、解析を実行した。その結果、CCI-2 では実験の挙動を定性的に再現するような解析結果が得られたが、 CCI-1 と CCI-3 ではコンクリート浸食挙動が実験とは大きく異なる結果となった。

ベースケースの解析結果をもとに、コンクリートの浸食に影響すると思われるパラメー タを選定し、そのパラメータを変更した解析を実施した。その解析結果より、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 クリート浸食量に大きく影響するということが分かった。一方で、Boiling、

EMISS.SUR、SC2306(1)、SC2306(2)といった溶融コリウムと水・上部ガス間の熱伝達に 関するパラメータは本作業で値を振った範囲ではコンクリート浸食量にあまり影響は無 い。CCI-1 と CCI-3 ではコンクリート浸食量に対する MIXING の影響が大きいが、溶融 コリウムからコンクリートへの熱流量の時間変化に振動が見られるため、振動の原因や影 響を今後調査する必要がある。 MELCOR1.8.5 から MELCOR2.2 までのバージョンアップの間に表面クラスト層に関係 するモデルである Melt Eruption と Water Ingress のモデルが追加された。これらのモデ ルの詳細は、Reference Manual の CAV Package の"3.7 Water Ingress and Melt Eruption Models"に記載されている。クラスト層に生じたひび割れ箇所への水の侵入やそこからの 溶融デブリの噴出により、溶融物の除熱効果が変わるため、コンクリートの浸食にも大きく 影響するパラメータであると考えられる。

4.3 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

4.3.1. 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の概要

最終的に、様々な事故条件の下で、コンクリート浸食や発生ガスによる格納容器の健全性 への脅威がどの程度なのかを確率論的に評価することを目的としている。この評価では多 ケース解析を行うことを前提として考えており、MCCI の解析ではコンクリートの侵食に ついて CFD のような詳細な解析を必要としない。しかしながら、物理的に無理のない評価 ができる必要なモデルを備えている必要がある。ここでは、MCCI によるコンクリートの溶 融浸食及び発生ガスを評価するツールとしては、シビアアクシデント解析コードである THALES2 の MCCI 解析モジュールを利用して評価することとした。本年度は、今後必要 なモデルの組み込み等を行うために THLES2 コードの MCCI モジュールを整備し、侵食深 さの評価に重要と思われるコンクリート層の分解速度を「融解を伴う熱伝導問題」の解析解 に基づいて計算するモデルとすることを検討した。

4.3.2. THALES2 コードのコンクリートへの伝熱モデル概要

THALES2[4.7]のキャビティモデルの模式図を図 4.3.1 に示す。コリウムからコンクリ ート床面に伝熱し、コンクリートの熱分解量が計算される。分解して発生した反応熱及び 発生した CaO、SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> はコリウムに付加される。発生した二酸化炭素や水蒸気はコ リウム中の金属成分による還元作用を考慮して、一部が水素や一酸化炭素となり液相又は 気相へ放出されるモデルとなっている。また、コリウム上部のコリウム・気相等について は、MCCI 計算モジュール外の熱水力モジュール等によって計算される。THALES2 では 図 4.3.2 のようにコンクリート溶融部分については、溶融炉心、コンクリート(温度分布 あり)、コンクリート(初期温度)の層に分かれている。コリウムは一点集中近似として 均質を仮定している。温度分布のあるコンクリート層では単純化のために、温度勾配一定 で初期温度まで低下すると仮定している。伝熱の深さLはコンクリートの温度が初期温度 まで低下する深さとなる。そのとき、コンクリートへの伝熱量*q<sub>INC</sub>*は次式で表される。

$$q_{INC} = \frac{k_{CONC}}{L} (T_{CONC,SUR} - T_{CONC,INI})$$
(3.3.1)

 $q_{INC}$ はコリウムからコンクリートへの熱流束(W/m<sup>2</sup>-K)、Lはコンクリート伝熱深さ、 $k_{CONC}$ はコンクリートへの熱伝導率(W/m<sup>-</sup>K)、 $T_{CONC,INI}$ はコンクリートの初期温度(K)、 $T_{CONC,SUR}$ はコンクリートの表面温度(K)である。伝熱の深さLは次式で計算される。

$$q_{DEC,L} = L\rho_{CONC} Cp_{CONC} \left( T_{CONC,DEC} - \frac{T_{CONC,DEC} + T_{CONC,INI}}{2} \right)$$
(3.3.2)

 $q_{DEC,L}$ はコンクリートの分解開始に必要な熱流束 (W/m<sup>2</sup>)、 $\rho_{CONC}$ はコンクリートの密度 (kg/m<sup>3</sup>)、 $Cp_{CONC}$ はコンクリートの低圧比熱(J/kg-K)である。

また、式(3.3.1)において、表面温度 $T_{CONC,SUR}$ が分解温度 $T_{CONC,DEC}$ となるときにコンクリート分解が停止するかどうかの判定条件の熱流束 $q_{INC}$ を計算できる。コンクリートが分解温度に達して、分解開始のための顕熱が伝熱された後、コンクリート分解が継続しているならば、付加熱量は全てコンクリート分解に使用され、分解量 $\Delta M_{DEC}$  (kg)が次式で計算される。(3.3.6-19)

$$\Delta M_{DEC} = \Delta q_{DEC} \frac{(A_{MLT,FL} + A_{MLT,CV})}{\Delta h_{DEC,CONC}} \Delta t$$
(3.3.2)

 $\Delta q_{DEC}$ はコンクリートの分解に寄与する熱流束(W/m<sup>2</sup>)、 $A_{MLT,FL}$ はコリウム/コンクリート間の接触面積、 $\Delta h_{DEC,CONC}$ はコンクリートの分解に必要なエンタルピ(J/kg)、 $\Delta$ tはタイムステップ(s)を表す。



図 4.3.1 MCCI 計算モジュール模式図



図 4.3.2 MCCI 計算モジュールコンクリートへの伝熱

4.3.3. 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。

$$T_L(t, T_B) = \frac{(T_M - T_B)}{erf(\xi)} erf\left(\frac{x}{2\sqrt{a_L t}}\right) + T_B$$
(3.3.3)

$$T_S(t, T_B) = T_0 - \frac{(T_0 - T_M)}{erfc(\xi\sqrt{a_L/a_S})} erfc\left(\frac{x}{2\sqrt{a_S t}}\right)$$
(3.3.4)

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、 $\Delta t$ 後の界面位置 $x_{intf}^{next}$ は次式で表される。

$$x_{intf}^{next}(t_0 + \Delta t) = x_{intf}^{now}(t_0) + \Delta x_{intf}$$
(3.3.3)

 $\Delta x_{intf} \equiv x_{intf}(t_0 + \Delta t, T_{MLT}(t_0 + \Delta t)) - x_{intf}(t_0, T_{MLT}(t_0))$ (3.3.4) 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

$$x_{intf}(t, T_{MLT}) = 2\xi \sqrt{a_L t}$$
(3.3.5)  
であり、係数  $\xi(T_{MLT})$ は次式の解である。

$$\frac{exp(-\xi^2)}{erf(\xi)} - \frac{\lambda_S \sqrt{a_L} (T_{CONC,INI} - T_{CONC,DEC}) exp(-a_L \xi^2 / a_S)}{\lambda_L \sqrt{a_S} (T_{CONC,DEC} - T_{MLT}) erfc(\xi \sqrt{a_L / a_S})}$$

$$= \frac{\xi \Delta h_L \sqrt{\pi}}{C_L (T_{CONC,DEC} - T_{MLT})}$$
(3.3.6)

ここで、 $\lambda_L$ 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)、 $\lambda_S$ 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 (m<sup>2</sup>/s)、 $a_S$ は非分解コンクリート層の熱拡散率(m<sup>2</sup>/s)、 $\Delta h_L$ 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 $\xi$ は 数値的に求める。 $F(\xi)$ を次式で定義する。

$$F(\xi) \equiv \frac{exp(-\xi^2)}{erf(\xi)} - \frac{\lambda_S \sqrt{a_L} (T_{CONC,INI} - T_{CONC,DEC}) exp\left(-\frac{a_L \xi^2}{a_S}\right)}{\lambda_L \sqrt{a_S} (T_{CONC,DEC} - T_{MLT}) erfc\left(\xi \sqrt{\frac{a_L}{a_S}}\right)}$$
(3.3.7)
$$-\frac{\xi \Delta h_L \sqrt{\pi}}{C_L (T_{CONC,DEC} - T_{MLT})} - \varepsilon$$

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

#### 係数 (の求解)

ここで係数 $\xi$ 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<sub>B</sub>を変更した場合の $F(\xi)$ を図4.3.4(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<sup>0</sup>  $\leq |F_0(\xi)| \leq 10^3$ (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4.3.4(b)に示す。シフト量を設定したと きの $\xi^*$ は二分法で求める。シフト量を導入して表面温度 T<sub>B</sub>を変化させた場合の係数 $\xi$ 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4.3.5及び図4.3.6に示す。

#### MCCI 計算モジュールへの組み込みについて

融解を伴う熱伝導問題の解析解についてシフト量を導入することで、コリウムの温度 (2000K 程度)の範囲で求解できるようにした。界面の移動量を計算し、MCCI 計算モジ ュールへの組み込みの見通しを得た。

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
$\lambda_L$	分解相の熱伝導率(W/m-K)	0.1 (固相の熱伝導率 $\lambda_s$ の0.1倍程度)
$\lambda_S$	固相の熱伝導率(W/m-K)	1.0
$a_L$	分解相の熱拡散率(m²/s)	$2.75 \text{E-}08 \ (a_L = \lambda_L / (\rho_L C_L))$
$a_{S}$	固相の熱拡散率(m²/s)	$2.75 \text{E-}07 \ (a_s = \lambda_s / (\rho_s C_s))$
$\Delta h_L$	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 <sub>s</sub> 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)
$\rho_L$	分解相の密度(Kg/m <sup>3</sup> )	7654.3 (固相の密度psを使用)
$ ho_s$	固相の密度(Kg/m <sup>3</sup> )	7654.3

表 4.3.1 コンクリート分解温度試計算の設定値



図 4.3.3 コンクリート分解開始後の温度分布











図 4.3.6 表面温度を変更した場合の分解相と固相の界面位置

4.4 まとめ

### MELCOR コードによる MCCI 実験の解析

OECD/NEA によって実施された MCCI 実験である CCI-1,2 及び3を対象としてシビア アクシデント解析コードの MELCOR による解析を実施した。MCCI に係るインプットパ ラメータを対象に感度解析を実施した。コンクリート床面への伝熱に係るパラメータが、上 部の水・気相への伝熱に係るパラメータよりも影響が大きいという結果になった。

## 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

シビアアクシデント解析コード(THALES2)の MCCI 計算モジュールの整備の一環と して、コンクリートへの伝熱モデルの改良を念頭に、融解を伴う伝熱問題の解析解を利用す ることとして、MCCI 問題のにおけるコリウムの温度の範囲に対応するための検討を行っ た。 参考文献

- [4.1] D.R.Bradley, D.R.Gardner, J.E.Brockmann, R.O.Griffith, "CORCON-MOD3: An Integrated Computer Model for Analysis of Molten Core-Concrete Interactions User's Manual," NUREG/CR-5843, Sandia National Laboratories.
- [4.2] V. Strizhov, V. Kanukova, T. Vinogradova, E. Askenov, V. Nikulshin, "An Assessment of the CORCON-MOD3 Code Part I: Thermal-Hydraulic Calculations," NUREG/IA-0129 Part I, U.S. Nuclear Regulatory Commission.
- [4.3] Sandia National Laboratories, "MELCOR Computer Code Manuals Primer and User's Guide Version 1.8.5", NUREG/CR-6119, Vol.1, SAND2000-2417/1.
- [4.4] Sandia National Laboratories, "MELCOR Computer Code Manuals Primer and Reference Guide Version 1.8.5", NUREG/CR-6119, Vol.2, SAND2000-2417/2.
- [4.5] M.T.Farmer, et. al., OECD MCCI Project, Final Report, OECD/MCCI-2005-TR06, Feb 28, 2006.
- [4.6] 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.
- [4.7] 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)
- [4.8] 日本機械学会, "伝熱工学資料 改訂第4版", 1986.

#### 5. 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に関する主要な物理現象、実験や解析モデル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コードとの連成解析に向けた検討を行っ た。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。

#### 5.1 従来の研究

まず、MCCIにおける主要な現象に関して、溶融浸食されるコンクリートの種類とそれぞ れの特徴及び高温による分解反応について、放出するガスの量や反応による発生熱量への 一般的な影響を含めて調査した。また、既存の MCCI 現象を対象とした実験研究について 調査した。ドライ条件で代表的な VULCCANO 実験及び MCCI の生じているコリウムに注 水を行い冷却挙動を調査するウェット条件の CCI 実験では、径方向・軸方向でコンクリー トの侵食速度の異方性や、冷却メカニズムとして 4 つの現象 (バルク冷却、ひび割れへの浸 水、溶融物の噴出、クラスト破損)の重要性が指摘されている。

MCCI を評価する様々な解析コードについて調査し、コード間の差異や伝熱相関式及び 冷却性モデルについてまとめた。また、SA コードと個別コードをつなぐインターフェース や実機解析の課題等についても調査した。

5.2 JASMINE コードと MCCI コードの連成解析に向けた検討

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 コードによる解析 を利用することで、可燃性ガスの発生に関する不確かさを低減するために、溶融炉心の移行 に伴う現象を考慮できる。今年度は床材をコンクリートとして、実機体系を想定した解析を 実施し、MCCI コードとのインターフェース構築するための検討と連成解析に向けた課題 を抽出した。MCCI コードへ受け渡す境界条件として、JASMINE コードで既に出力が整 備されている物理量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である。また、JASMINE コードで出力を整備する候補とな る物理量は溶融物 - 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。 5.3 シビアアクシデント解析コードによる MCCI 解析

今後の MCCI 解析コード整備に必要な知見の取得を目的として、SA 解析コードの 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 コードによる CCI 実験解析を実施した。解析結果の溶融物の冷却速度やコンクリートの侵食速度等から コンクリートへの熱伝達に関連するパラメータの影響が、溶融物上部の水・気相への熱伝達 に関連するパラメータの影響が、容融物上部の水・気相への熱伝達

SA 解析コードの MCCI 解析モジュールの整備として、THALES2 の MCCI 解析モジュ ールをベースに、コンクリートへの伝熱モデルを調査した。また、融解を伴う伝熱問題の解 析解にシフト量の導入を検討し、MCCI 解析問題への適用の見通しを得た。

#### 付録A JASMINE コードの概要

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

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。

+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。

A-1



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:

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

運動量保存則:

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

ここで、質量保存式中の*m*eは予混合過程における液滴発生量であり、溶融物がすべて液 滴に変わり溶融物ジェット径がゼロになる深さ(ブレークアップ長さ。図 A.2 参照)*L*brk から計算する。ブレー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

 $m_e = C_{ent} \rho_I V_e$ 

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:

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

液滴位置について:

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

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vex、vezとする)は、次式で計算する。

$$v_{ex} = C_{vx}(2V_e)\{0.02 + 0.98\phi_r\}$$
  
$$v_{ez} = C_{vzwt}v_I + (1 - C_{vzwt})v_c$$

ここで、C<sub>px</sub>、C<sub>pzwt</sub>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、Ør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。

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

また、表面温度T<sub>sf</sub>は液滴平均温度T<sub>av</sub>と液滴半径から次式で決定される。

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

(4) 水プール

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

質量保存則:

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

エネルギー保存則:

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

運動量保存則:

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

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。

溶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/
		<i>Re</i> <sup>0.6</sup> , 0.44)
対流熱伝達	水平平面自然対流熱伝達	球まわりの対流熱伝達 Nu = 2 +
	式	$0.6Re^{1/2}Pr^{1/3}$
核沸騰熱流	Kutateladze	Kutateladze
限界熱流束	Zuber	Zuber
膜沸騰熱伝	Berenson	Liu-Theofanous
達		
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( $v_{cr} = v_p$ )

$$\frac{v_{P,i+\frac{1}{2}}^{n+1} - v_{P,i+\frac{1}{2}}^{n}}{\Delta t} = -\left[\max\left(v_{P,i+\frac{1}{2}}, 0\right) \frac{v_{P,i+\frac{1}{2}}^{n+1} - v_{P,i-\frac{1}{2}}^{n+1}}{x_{i+\frac{1}{2}} - x_{i-\frac{1}{2}}^{n+1}} + \min\left(v_{P,i+\frac{1}{2}}, 0\right) \frac{v_{P,i+\frac{3}{2}}^{n+1} - v_{P,i+\frac{1}{2}}^{n+1}}{x_{i+\frac{3}{2}} - x_{i+\frac{1}{2}}^{n+1}}\right]$$

$$-\frac{1}{\rho_{P,i+\frac{1}{2}}} \left[ \frac{p_{a,i+1} - p_{a,i}}{x_{i+1} - x_{i}} + g \frac{[h_{P}\rho_{P}]_{i+1} - [h_{P}\rho_{P}]_{i-1} + [d_{cr}\rho_{cr}]_{i+1} - [d_{cr}\rho_{cr}]_{i-1} + [d_{b}\rho_{cr}]_{i+1} - [d_{b}\rho_{cr}]_{i-1}}{x_{i+1} - x_{i}} \right] + \left[ \frac{K_{a-cr}}{h_{P}} (v_{a} - v_{cr})|v_{a} - v_{cr}| - \frac{f_{w}}{h_{P}} \frac{1}{2} v_{P}|v_{P}| + \frac{(v_{ms} - v_{P})\max(m_{s}, 0)}{h_{P}\rho_{P}} \right]_{i+\frac{1}{2}}$$
(2.67)

② 表面クラストが存在し、固定されている場合(
$$v_{cr} = 0$$
)  

$$\frac{v_{p,i+\frac{1}{2}}^{n+1} - v_{p,i+\frac{1}{2}}^{n}}{\Delta t} = -\left[\max\left(v_{p,i+\frac{1}{2}}, 0\right) \frac{v_{p,i+\frac{1}{2}}^{n+1} - v_{p,i-\frac{1}{2}}^{n+1}}{x_{i+\frac{1}{2}} - x_{i-\frac{1}{2}}^{n+1}} + \min\left(v_{p,i+\frac{1}{2}}, 0\right) \frac{v_{p,i+\frac{3}{2}}^{n+1} - v_{p,i+\frac{1}{2}}^{n+1}}{x_{i+\frac{3}{2}} - x_{i+\frac{1}{2}}^{n+1}}\right] \\ - \frac{1}{\rho_{p,i+\frac{1}{2}}} \left[ \frac{p_{a,i+1} - p_{a,i}}{x_{i+1} - x_{i}} + g \frac{[h_{p}\rho_{p}]_{i+1} - [h_{p}\rho_{p}]_{i-1} + [d_{cr}\rho_{cr}]_{i+1} - [d_{cr}\rho_{cr}]_{i-1} + [d_{b}\rho_{cr}]_{i+1} - [d_{b}\rho_{cr}]_{i-1}}{x_{i+1} - x_{i}} \right] \\ + \left[ - \frac{f_{cr}}{h_{p}} \frac{1}{2} v_{p} |v_{p}| - \frac{f_{w}}{h_{p}} \frac{1}{2} v_{p} |v_{p}| + \frac{(v_{ms} - v_{p})\max(m_{sp}, 0)}{h_{p}\rho_{p}} \right]_{i+\frac{1}{2}}$$
(2.68)

③表面クラストが存在しない場合

$$\frac{v_{p,i+\frac{1}{2}}^{n+1} - v_{p,i+\frac{1}{2}}^{n}}{\Delta t} = -\left[\max\left(v_{p,i+\frac{1}{2}}, 0\right) \frac{v_{p,i+\frac{1}{2}}^{n+1} - v_{p,i-\frac{1}{2}}^{n+1}}{x_{i+\frac{1}{2}} - x_{i-\frac{1}{2}}^{n+1}} + \min\left(v_{p,i+\frac{1}{2}}, 0\right) \frac{v_{p,i+\frac{1}{2}}^{n+1} - v_{p,i+\frac{1}{2}}^{n+1}}{x_{i+\frac{1}{2}}^{n+1} - x_{i-\frac{1}{2}}^{n+1}} + \min\left(v_{p,i+\frac{1}{2}}, 0\right) \frac{v_{p,i+\frac{1}{2}}^{n+1} - v_{p,i+\frac{1}{2}}^{n+1}}{x_{i+\frac{1}{2}}^{n+1} - x_{i-\frac{1}{2}}^{n+1}} + \frac{1}{\rho_{p,i+\frac{1}{2}}} \left[\frac{p_{a,i+1} - p_{a,i}}{x_{i+1} - x_{i}} + g\frac{[h_{p}\rho_{p}]_{i+1} - [h_{p}\rho_{p}]_{i-1} + [d_{b}\rho_{cr}]_{i+1} - [d_{b}\rho_{cr}]_{i-1}}{x_{i+1} - x_{i}}\right] + \left[\frac{K_{a-p}}{h_{p}}\left(v_{a} - v_{p}\right) |v_{a} - v_{p}| - \frac{f_{w}}{h_{p}}\frac{1}{2}v_{p}|v_{p}| + \frac{(v_{ms} - v_{p})\max(m_{s}, 0)}{h_{p}\rho_{p}}\right]_{i+\frac{1}{2}}\right]$$

$$(2.69)$$

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

$$\frac{v_{p,i+\frac{1}{2}}^{n+1} - v_{p,i+\frac{1}{2}}^{n}}{\Delta t} = -\left[ \max\left(v_{p,i+\frac{1}{2}}, 0\right) \frac{v_{p,i+\frac{1}{2}}^{n+1} - v_{p,i+\frac{1}{2}}^{n+1}}{x_{i+\frac{1}{2}} - x_{i-\frac{1}{2}}^{n+1}} + \min\left(v_{p,i+\frac{1}{2}}, 0\right) \frac{v_{p,i+\frac{3}{2}}^{n+1} - v_{p,i+\frac{1}{2}}^{n+1}}{x_{i+\frac{3}{2}} - x_{i+\frac{1}{2}}^{n+1}} \right] \\ -\frac{1}{\rho_{p,i+\frac{1}{2}}} \left[ \frac{p_{a,i+1} - p_{a,i}}{x_{i+1} - x_{i}} + g \frac{[h_{p}\rho_{p}]_{i+1} - [h_{p}\rho_{p}]_{i-1} + [d_{cr}\rho_{cr}]_{i+1} - [d_{cr}\rho_{cr}]_{i-1} + [d_{b}\rho_{cr}]_{i+1} - [d_{b}\rho_{cr}]_{i+1}}{x_{i+1} - x_{i}} \right] \\ + \left[ -\frac{f_{cr}}{h_{p}} \frac{1}{2} v_{p} |v_{p}| - \frac{f_{w}}{h_{p}} \frac{1}{2} v_{p} |v_{p}| + \frac{(v_{ms} - v_{p})\max(m_{sp}, 0)}{h_{p}\rho_{p}} \right]_{i+\frac{1}{2}} \right]$$

既知の状態の時刻nと求める時刻n+1を明確に分ける。

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

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

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。

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

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

$$B = -\frac{1}{\rho_{p,i+\frac{1}{2}}} \left[ \frac{p_{a,i+1}-p_{a,i}}{x_{i+1}-x_i} + \frac{g\left[\frac{(h_p \rho_p)_{i+1}-(h_p \rho_p)_{i-1}+(d_c r \rho_{cr})_{i-1}+(d_b \rho_{cr})_{i+1}-(d_b \rho_{cr})_{i-1}\right]}{x_{i+1}-x_i} \right] (A)$$

$$\frac{1}{2} v_p^2 = \frac{1}{2} \left( v_{p,i+\frac{1}{2}}^n + \frac{\Delta v}{2} \right)^2 = \frac{1}{2} \left( v_{p,i+\frac{1}{2}}^{n-2} + v_{p,i+\frac{1}{2}}^n \Delta v + \frac{\Delta v^2}{4} \right)$$

$$\cong \frac{1}{2} \left\{ v_{p,i+\frac{1}{2}}^{n-2} + v_{p,i+\frac{1}{2}}^n \left( v_{p,i+\frac{1}{2}}^{n+1} - v_{p,i+\frac{1}{2}}^n \right) \right\} = \frac{1}{2} v_{p,i+\frac{1}{2}}^n \cdot v_{p,i+\frac{1}{2}}^{n+1}$$
ここで

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

従って $\Delta v^2$ 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
- 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
- $\gamma_k$ :単位体積当たり質量変化
- κ:熱拡散率
- $\lambda:$ 熱伝導率
- *ρ*:密度
- Θ:セクターモデルの周方向分割メッシュ幅角度

添字

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

A.3 プログラムの特徴

(1) 計算手順

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

### (2) JASMINE コードで使用する物性値

(a) 溶融物

実機解析、実験解析に備えて、以下の物質に対する物性値の関数を用意している。

名称	物質
corium	UO2 80:ZrO2 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	UO2 70:ZrO2 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

表 A.2 JASMINE コードで用意されている溶融物

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。伝熱計算相関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。

変 数	タイプ	説 明	corium	corium3
			$UO_2$ - $ZrO_2$	$UO_2$ - $ZrO_2$
			80:20wt%	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
tliqu	実数	溶融物液相線温度 [K]	2850	2816
rhosol	実数	固相密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	9430	8285.1
rholiq	実数	液相密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	7960	7121.6
cpsol	実数	固相比熱 [J/kg/K]	445	566.2
cpliq	実数	液相比熱 [J/kg/K]	565	680.7
lheat	実数	凝固潜熱 [J/kg]	362.0E3	428.0E3
lamsol	実数	固相熱伝導率 [W/m/K]	2.88	1.911
lamliq	実数	液相熱伝導率 [W/m/K]	2.88	3.601
viscmm	実数	粘性係数 [Pa·s]	4.23E-3	3.489E-3
sftnmm	実数	表面張力 [N/m]	0.45	0.45
emssmm	実数	輻射率 [-]	0.79	0.79
	実数	粘性係数の温度依存性の	0	0
cf_visc		係数(温度の1次式の係		
		数)		
	実数	表面張力の温度依存性の	0	0
cf_sftn		係数(温度の1次式の係		
		数)		
	実数	輻射率の温度依存性の係	0	0
cf_emss		数(温度の1次式の係		
		数)		

表 A.3 JASMINE で使用されるコリウムの物性値

# (b) 蒸気表

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

## (c) 沸騰熱伝達

JASMINE コードで使用している沸騰曲線の一例をグラフに示す。雰囲気圧力を大気圧 とし、水プールのサブクール度をパラメータとして、溶融物の表面過熱度に対する熱流束を 計算した。図 A.3 が液滴表面熱流束、図 A.4 が溶融物プール表面熱流束である。液滴表面 熱流束の計算では、液滴径は 3 mm、液滴と水との相対速度は 0.3 m/s とした。

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





#### C.4 コードの開発履歴と検証

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

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

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

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

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

バージョン名	発行/	内容・参考文献	比較対象実験
	実施年日		及び
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	<ul> <li>水蒸気系の計算にACE-3Dを利</li> <li>用した予混合過程計算部を作成。</li> <li>論文発行。</li> </ul>	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。	FARO-L14, -L28, - L31, -L33 KROTOS-K44, -42, - K37
JASMINE 3.3b	2010/07	プログラムの構成・変数名、説明 文書等を整理。	OECD/NEA SERENA Project Phase-1
JASMINE_NRA	2014/10	予混合過程の液滴粒径分布考慮。 ジェットの流動抵抗計算式変更。 溶融物の物性値入力を可能とし た。	OECD/NEA SERENA Project Phase-2
JASMINE 3.3NW	2015/07	環境を LINUX (UNIX) から WINDOWS に変更。コンパイラを インテル Visual Fortran Composer XE に変更。入力マニュ アル改訂。	
JASMINE 4.0	平成 27年 クアップ モデル及 形成モデ	F度事業において、ジェットブレー における Rosin-Rammler 粒径分布 び床面拡がり挙動におけるクラスト 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

表 A.4 JASMINE コードの開発・改良の経緯

		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 CCI 実験解析データ

BO. ベースケース CCI-1,2 及び3の図及び表



図 B0.1 CCI-1 ベースケース MELCOR 解析結果



図 B0.2 CCI-2 ベースケース MELCOR 解析結果



図 B0.3 CCI-3 ベースケース MELCOR 解析結果

B1. CCI-1 の図及び表



図 B1.4 CCI-1 実験解析に対する"Boiling"の影響



図 B1.5 CCI-1 実験解析 出力データに対する"HTRINT"の影響



図 B1.6 CCI-1 実験解析 出力データに対する"HTRBOT"の影響



図 B1.7 CCI-1 実験解析 出力データに対する"HTRSIDE"の影響



図 B.1.8 実験解析 出力データに対する"EMISS.SUR"の影響


図 B.1.9 CCI-1 実験解析 出力データに対する" MIXING"の影響



図 B.1.10 CCI-1 実験解析 出力データに対する"GFILMBOTT"の影響







図 B.1.13 CCI-1 実験解析 出力データに対する"Melt Composition"の影響



case	Water	Evaporation	Melt	Total Heat	Total Heat	Radial	Axial	Total mass of
	Temperature[K]	Mass[kg]	Temperature[K]	to water[kJ]	to concrete[kJ]	ablation[m]	ablation[m]	released gas [kg]
1	372.86	56.12	1985.18	1511	2826	0.1595	0.1385	7.73
2	372.86	56.41	1985.11	1511	2826	0.1595	0.1385	7.73
3	372.86	55.96	1985.24	1509	2826	0.1595	0.1385	7.73
4	372.86	56.12	1985.18	1511	2826	0.1595	0.1385	7.73
5	372.86	56.12	1985.18	1511	2826	0.1595	0.1385	7.73
6	373.17	3.52	1913.16	1013	3708	0.0914	0.3906	14.54
7	367.88	67.24	1986.36	1698	2817	0.1708	0.1137	7.58
8	373.17	2.72	1850.84	1007	3991	0.2586	0.0881	17.77
9	372.86	56.12	1985.13	1511	2825	0.1595	0.1385	7.73
10	372.86	56.03	1985.38	1511	2815	0.1587	0.1392	7.71
11	372.85	56.01	1983.94	1502	2856	0.1617	0.1377	7.79
12	373.17	49.55	1769.47	2499	6343	0.0486	0.6635	13.63
13	1210.83	0	2084.65	1868	4491	0.0418	0.3399	5.68
14	373.17	36.69	1783.95	2892	8048	0.0401	0.6734	12.59
15	372.86	56.65	1985.42	1512	2832	0.1606	0.1351	7.73
16	372.86	55.89	1984.4	1510	2836	0.1599	0.1389	7.75
17	373.17	-12.87	1830.13	841	4015	0.1762	0.2307	18.85
18	367.37	67.05	1986.63	1695	2832	0.1727	0.1109	7.59
19	372.86	56.15	1985.1	1510	2826	0.1595	0.1384	7.73

表 B.1.1 CCI-1 実験 解析終了時刻における出力データー覧(1/6)

Case	Water	Evaporation	Melt	Total Heat	Total Heat	Radial	Axial	Total mass of
	Temperature[K]	Mass[kg]	Temperature[K]	to water[kJ]	to concrete[kJ]	ablation[m]	ablation[m]	released gas [kg]
20	372.86	56.05	1985.41	1512	2820	0.1590	0.1390	7.71
21	372.86	55.95	1985.27	1509	2826	0.1595	0.1384	7.73
22	372.86	55.95	1985.27	1509	2826	0.1595	0.1384	7.73
23	370.06	170.36	1942.29	2338	3119	0.2057	0.1618	9.23
24	373.13	125.03	1791.72	2139	2989	0.2268	0.1273	8.98
25	373.09	128.07	1831.4	2167	3294	0.2492	0.1302	9.91
26	360.65	146.33	1937.05	2332	3356	0.2254	0.1684	10.20
27	373.17	119.17	1946.79	2156	2990	0.1880	0.1507	8.60
28	373.17	146.32	1942.39	2351	3134	0.2088	0.1602	7.77
29	373.16	126.55	1791.94	2154	2987	0.2271	0.1270	8.49
30	372.86	55.79	1985.42	1505	2824	0.1595	0.1384	7.73

表 B.1.1 CCI-1 実験 解析終了時刻における出力データー覧(2/6)

case	UO2	ZRO2	SIO2	MGO	AL2O3	CAO	CR	CR2O3	TIO2	FEO
	Mass[kg]									
1	766.17	314.67	717.77	5.51	10.75	81.74	13.40	89.42	0.39	0.00
2	766.17	314.67	717.76	5.51	10.75	81.74	13.40	89.40	0.39	0.00
3	766.17	314.67	717.77	5.51	10.75	81.74	13.43	89.37	0.39	0.00
4	766.17	314.67	717.77	5.51	10.75	81.74	13.40	89.42	0.39	0.00
5	766.17	314.67	717.77	5.51	10.75	81.74	13.40	89.42	0.39	0.00
6	797.75	314.65	915.14	6.96	12.60	102.31	0.00	108.91	0.52	0.00
7	766.17	314.67	706.56	5.42	10.64	80.58	13.96	88.58	0.39	0.00
8	777.23	314.49	970.59	7.36	13.11	108.08	0.00	108.87	0.55	0.00
9	766.17	314.67	717.76	5.51	10.75	81.74	13.42	89.37	0.39	0.00
10	766.08	314.64	716.00	5.49	10.73	81.56	13.53	89.22	0.39	0.00
11	766.20	314.84	723.38	5.55	10.80	82.32	13.46	89.32	0.40	0.00
12	766.20	314.67	935.57	7.10	12.76	104.28	0.00	108.85	0.53	0.00
13	766.20	314.67	534.47	4.18	9.02	62.75	31.48	62.76	0.28	0.00
14	766.19	314.67	917.29	6.97	12.59	102.39	0.00	108.83	0.52	0.00
15	766.17	314.67	717.75	5.50	10.75	81.74	13.46	89.32	0.39	0.00
16	766.17	314.67	719.94	5.52	10.77	81.97	13.18	89.73	0.39	0.00
17	775.40	314.35	993.77	7.54	13.35	110.66	0.00	108.83	0.57	0.00
18	766.17	314.67	708.03	5.43	10.65	80.73	13.74	88.92	0.39	0.00
19	766.17	314.67	717.83	5.51	10.75	81.75	13.41	89.40	0.39	0.00

表 B.1.1 CCI-1 実験 解析終了時刻における出力データー覧(3/6)

case	UO2	ZRO2	SIO2	MGO	AL2O3	CAO	CR	CR2O3	TIO2	FEO
	Mass[kg]									
20	766.17	314.67	716.73	5.50	10.73	81.63	13.46	89.32	0.39	0.00
21	766.17	314.67	717.78	5.51	10.75	81.74	13.41	89.40	0.39	0.00
22	766.17	314.67	717.78	5.51	10.75	81.74	13.41	89.40	0.39	0.00
23	766.30	370.09	809.41	6.46	11.97	95.44	74.27	0.01	0.47	0.00
24	766.17	157.33	820.70	6.25	11.71	92.39	37.28	96.15	0.46	10.97
25	766.20	262.97	904.90	6.87	12.50	101.13	76.57	27.03	0.51	3.01
26	766.41	398.02	845.66	7.05	12.72	103.90	74.27	0.00	0.52	0.00
27	766.16	342.19	795.23	6.07	11.47	89.85	65.61	13.16	0.44	0.00
28	766.30	370.05	817.53	6.51	12.03	96.12	74.27	0.01	0.48	0.00
29	766.17	157.33	821.30	6.26	11.71	92.47	36.94	96.63	0.46	11.05
30	766.17	314.67	717.74	5.51	10.74	81.74	13.41	89.39	0.39	0.00

表 B.1.1 CCI-1 実験 解析終了時刻における出力データ一覧(4/6)

case	MNO	SRO	NA2O	K2O	FE2O3	UO3	U3O8	ZR	FE	NI
	Mass[kg]									
1	0.00	0.00	0.00	0.93	6.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	0.93	6.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00	0.93	6.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00	0.93	6.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.00	0.93	6.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	0.00	0.00	0.00	1.22	8.00	0.00	1.45	0.00	0.00	0.00
7	0.00	0.00	0.00	0.91	5.98	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	0.00	0.00	0.00	1.30	8.53	0.00	8.49	0.00	0.00	0.00
9	0.00	0.00	0.00	0.93	6.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.00	0.00	0.00	0.92	6.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	0.00	0.00	0.00	0.93	6.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	0.00	0.00	0.00	1.24	8.19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
13	0.00	0.00	0.00	0.66	4.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
14	0.00	0.00	0.00	1.22	8.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.00	0.00	0.00	0.93	6.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
16	0.00	0.00	0.00	0.93	6.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
17	0.00	0.00	0.00	1.33	8.77	0.00	0.53	0.00	0.00	0.00
18	0.00	0.00	0.00	0.91	6.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
19	0.00	0.00	0.00	0.93	6.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

表 B.1.1 CCI-1 実験 解析終了時刻における出力データー覧(5/6)

case	MNO	SRO	NA2O	K2O	FE2O3	UO3	U3O8	ZR	FE	NI
	Mass[kg]									
20	0.00	0.00	0.00	0.92	6.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
21	0.00	0.00	0.00	0.93	6.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
22	0.00	0.00	0.00	0.93	6.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
23	0.00	0.00	0.00	1.12	7.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
24	0.00	0.00	0.00	1.07	7.08	0.00	0.00	0.00	97.51	23.60
25	0.00	0.00	0.00	1.20	7.88	0.00	0.00	0.00	50.40	11.73
26	0.00	0.00	0.00	1.23	8.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
27	0.00	0.00	0.00	1.04	6.84	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
28	0.00	0.00	0.00	1.13	7.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
29	0.00	0.00	0.00	1.08	7.08	0.00	0.00	0.00	97.45	23.60
30	0.00	0.00	0.00	0.93	6.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

表 B.1.1 CCI-1 実験 解析終了時刻における出力データー覧(6/6)

case	Water	Evaporation	Melt	Total Heat	Total Heat	Radial	Axial	Total mass of
	Temperature[K]	Mass[kg]	Temperature[K]	to water[kJ]	to concrete[kJ]	ablation[m]	ablation[m]	released gas [kg]
1	359.30	856.80	1492.18	39894	29758	0.3172	0.2579	487.50
2	359.46	856.82	1492.02	39898	29758	0.3172	0.2579	487.50
3	365.82	777.06	1512.48	39300	29868	0.3189	0.2572	488.45
4	359.30	856.80	1492.18	39894	29758	0.3172	0.2579	487.50
5	359.30	856.80	1492.18	39894	29758	0.3172	0.2579	487.50
6	373.17	549.01	1553.42	25999	39386	0.1838	0.5727	628.88
7	373.17	1039.31	1321.03	44590	30459	0.4045	0.1468	470.16
8	372.02	444.97	1581.76	17274	61688	0.6492	0.1176	881.32
9	359.62	856.88	1492.39	39897	29764	0.3172	0.2579	487.54
10	354.78	817.14	1497.11	40116	29093	0.3147	0.2534	477.05
11	366.73	857.09	1498.85	38537	31907	0.3272	0.2833	531.66
12	373.17	873.46	1520.69	38774	29819	0.3044	0.2802	471.84
13	373.17	916.95	1516.44	39151	29763	0.3099	0.2838	477.32
14	373.17	874.07	1521.06	38777	29841	0.3037	0.2818	471.22
15	362.34	817.12	1489.48	40384	29579	0.3217	0.2497	484.44
16	361.79	896.82	1485.05	40260	29665	0.3370	0.2478	489.43
17	373.17	672.26	1495.97	29571	38010	0.3298	0.3778	638.59
18	373.17	1069.03	1310.91	44247	30740	0.4163	0.1395	476.48
19	359.67	856.86	1492.28	39284	29571	0.3174	0.2582	488.36

表 B.1.2 CCI-2 実験 解析終了時刻における出力データー覧(1/6)

case	Water	Evaporation	Melt	Total Heat	Total Heat	Radial	Axial	Total mass of
	Temperature[K]	Mass[kg]	Temperature[K]	to water[kJ]	to concrete[kJ]	ablation[m]	ablation[m]	released gas [kg]
20	357.19	856.75	1496.40	40521	29408	0.3155	0.2561	480.92
21	358.91	856.84	1492.37	39891	29759	0.3172	0.2579	487.51
22	358.91	856.84	1492.37	39891	29759	0.3172	0.2579	487.51
23	363.82	896.75	1505.42	41407	30541	0.3425	0.2963	521.61
24	373.17	879.51	1502.88	40020	28943	0.3064	0.2728	446.77
25	353.56	947.58	1505.76	40143	29610	0.3222	0.2887	485.73
26	373.17	1009.73	1502.20	43176	32598	0.3641	0.3344	572.22
27	357.34	896.61	1502.14	40009	30082	0.3279	0.2813	508.89
28	363.04	896.98	1510.93	40413	30237	0.3352	0.2996	525.17
29	1419.23	0.00	1879.13	1778	3634	0.1501	0.1213	121.78
30	373.17	791.10	1561.34	35830	30053	0.3249	0.2539	491.53

表 B.1.2 CCI-2 実験 解析終了時刻における出力データー覧(2/6)

case	UO2	ZRO2	SIO2	MGO	AL2O3	CAO	CR	CR2O3	TIO2	FEO
	Mass[kg]									
1	761.16	312.70	375.30	190.77	43.46	437.46	0.00	117.90	2.08	0.00
2	761.16	312.70	375.31	190.77	43.46	437.46	0.00	117.90	2.08	0.00
3	761.16	312.70	375.84	191.08	43.52	438.12	0.00	117.90	2.08	0.00
4	761.16	312.70	375.30	190.77	43.46	437.46	0.00	117.90	2.08	0.00
5	761.16	312.70	375.30	190.77	43.46	437.46	0.00	117.90	2.08	0.00
6	761.98	312.67	464.20	238.24	53.83	544.58	0.00	118.11	2.63	0.00
7	760.23	312.70	364.08	184.78	42.15	424.32	0.00	118.05	2.01	0.00
8	762.39	312.33	620.30	316.82	72.89	723.27	0.00	121.28	3.64	0.00
9	761.16	312.70	375.32	190.79	43.47	437.50	0.00	117.90	2.08	0.00
10	759.32	312.40	369.00	187.44	42.73	430.44	0.00	117.59	2.04	0.00
11	760.64	312.71	403.26	205.57	46.70	471.50	0.00	117.87	2.25	0.00
12	761.77	312.92	365.43	185.70	42.34	425.77	0.00	117.96	2.02	0.00
13	761.78	312.91	369.08	187.49	42.77	429.85	0.00	117.94	2.04	0.00
14	761.76	312.91	365.28	185.49	42.31	425.38	0.00	117.96	2.01	0.00
15	759.17	312.73	373.08	189.61	43.23	435.21	0.00	117.84	2.07	0.00
16	762.46	312.89	376.93	191.71	43.64	439.39	0.00	117.81	2.09	0.00
17	759.54	312.45	470.64	241.84	54.55	552.90	0.00	117.75	2.68	0.00
18	760.70	311.67	368.64	187.20	42.70	429.54	0.00	117.96	2.03	0.00
19	759.80	313.75	375.66	191.05	43.53	438.03	0.00	117.84	2.08	0.00

表 B.1.2 CCI-2 実験 解析終了時刻における出力データー覧(3/6)

case	UO2	ZRO2	SIO2	MGO	AL2O3	CAO	CR	CR2O3	TIO2	FEO
	Mass[kg]									
20	764.55	313.22	371.47	188.75	43.01	433.20	0.00	118.04	2.05	0.00
21	761.16	312.70	375.28	190.78	43.46	437.47	0.00	117.90	2.08	0.00
22	761.16	312.70	375.28	190.78	43.46	437.47	0.00	117.90	2.08	0.00
23	761.00	367.08	431.52	220.65	50.03	505.48	0.00	117.89	2.43	0.00
24	762.09	156.45	380.80	193.75	44.13	444.04	0.00	159.35	2.11	135.51
25	761.58	262.35	407.15	207.58	47.14	475.92	0.00	138.57	2.28	67.76
26	778.03	396.07	480.50	246.68	55.70	566.57	0.00	118.44	2.74	0.00
27	763.27	340.94	406.00	207.16	47.05	474.72	0.00	117.90	2.27	0.00
28	761.49	367.71	433.47	221.72	50.22	508.11	0.00	117.97	2.44	0.00
29	761.78	156.45	174.59	84.18	20.36	197.33	0.00	159.47	0.82	135.40
30	761.16	312.70	377.72	192.12	43.75	440.45	0.00	117.90	2.09	0.00

表 B.1.2 CCI-2 実験 解析終了時刻における出力データー覧(4/6)

case	MNO	SRO	NA2O	K2O	FE2O3	UO3	U3O8	ZR	FE	NI
	Mass[kg]									
1	0.46	0.00	4.77	8.47	21.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.46	0.00	4.77	8.47	21.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.46	0.00	4.78	8.48	21.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.46	0.00	4.77	8.47	21.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.46	0.00	4.77	8.47	21.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	0.59	0.00	6.05	10.74	27.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	0.45	0.00	4.61	8.18	20.67	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	0.72	0.00	8.54	14.69	36.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	0.46	0.00	4.77	8.47	21.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.45	0.00	4.68	8.31	20.97	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	0.50	0.00	5.17	9.17	23.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	0.44	0.00	4.63	8.22	20.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
13	0.45	0.00	4.68	8.31	21.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
14	0.44	0.00	4.63	8.21	20.74	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.46	0.00	4.74	8.40	21.24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
16	0.46	0.00	4.79	8.51	21.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
17	0.59	0.00	6.15	10.92	27.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
18	0.45	0.00	4.67	8.28	20.94	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
19	0.46	0.00	4.78	8.48	21.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

表 B.1.2 CCI-2 実験 解析終了時刻における出力データー覧(5/6)

case	MNO	SRO	NA2O	K2O	FE2O3	UO3	U3O8	ZR	FE	NI
	Mass[kg]									
20	0.46	0.00	4.72	8.36	21.13	0.00	0.27	0.00	0.00	0.00
21	0.46	0.00	4.77	8.47	21.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
22	0.46	0.00	4.77	8.47	21.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
23	0.54	0.00	5.58	9.90	25.00	0.00	0.18	0.00	0.00	0.00
24	0.47	0.00	4.85	8.59	21.72	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
25	0.51	0.00	5.23	9.28	23.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
26	0.61	0.00	6.28	11.20	28.26	0.00	0.76	0.00	0.00	0.00
27	0.50	0.00	5.21	9.25	23.35	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
28	0.54	0.00	5.61	9.97	25.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
29	0.18	0.00	1.89	3.35	8.47	0.00	0.00	0.00	0.08	1.98
30	0.47	0.00	4.81	8.53	21.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

表 B.1.2 CCI-2 実験 解析終了時刻における出力データー覧(6/6)

case	Water	Evaporation	Melt	Total Heat	Total Heat	Radial	Axial	Total mass of
	Temperature[K]	Mass[kg]	Temperature[K]	to water[kJ]	to concrete[kJ]	ablation[m]	ablation[m]	released gas [kg]
1	373.17	248.71	1799.55	4301	6100	0.2268	0.1453	95.91
2	373.17	248.70	1799.44	4301	6099	0.2268	0.1453	95.89
3	373.17	248.80	1799.63	4299	6101	0.2269	0.1453	95.91
4	373.17	248.71	1799.55	4301	6100	0.2268	0.1453	95.91
5	373.17	248.71	1799.55	4301	6100	0.2268	0.1453	95.91
6	372.70	149.30	1755.32	2637	7739	0.1134	0.4651	136.81
7	373.17	281.28	1796.17	4814	6328	0.2598	0.1046	96.94
8	372.95	203.93	1709.04	3258	7994	0.3517	0.0800	138.05
9	373.17	248.71	1799.55	4301	6100	0.2268	0.1453	95.91
10	373.17	258.30	1801.73	4405	6260	0.2281	0.1481	98.41
11	373.17	256.91	1803.40	4209	6495	0.2339	0.1518	104.16
12	372.96	180.23	1837.16	2912	6881	0.1307	0.4117	117.57
13	372.99	178.94	1838.76	2862	6547	0.1312	0.4126	117.66
14	372.75	114.35	1874.21	2310	5877	0.1215	0.3710	104.99
15	373.17	249.04	1800.10	4289	6109	0.2276	0.1435	95.69
16	373.17	257.82	1798.43	4304	6407	0.2338	0.1467	100.89
17	373.12	160.37	1685.61	2563	8475	0.2369	0.2805	157.37
18	364.67	276.67	1792.12	4772	6541	0.2672	0.1017	100.14
19	373.17	257.40	1801.89	4350	6305	0.2268	0.1453	99.51

表 B.1.3 CCI-3 実験 解析終了時刻における出力データー覧(1/6)

case	Water	Evaporation	Melt	Total Heat	Total Heat	Radial	Axial	Total mass of
	Temperature[K]	Mass[kg]	Temperature[K]	to water[kJ]	to concrete[kJ]	ablation[m]	ablation[m]	released gas [kg]
20	373.17	266.82	1804.80	4550	6576	0.2297	0.1485	104.14
21	373.17	248.58	1799.58	4299	6100	0.2319	0.1550	95.91
22	373.17	248.58	1799.58	4299	6100	0.2269	0.1453	95.91
23	373.10	260.40	1821.62	4311	8215	0.2269	0.1453	98.52
24	372.90	254.28	1740.69	4358	6889	0.2907	0.1673	75.76
25	373.12	243.94	1774.08	4197	7430	0.2660	0.1394	86.59
26	371.89	258.66	1824.47	4247	8767	0.2825	0.1484	97.31
27	373.17	258.88	1808.56	4265	7457	0.3073	0.1724	103.12
28	371.87	239.60	1887.07	5024	7863	0.2648	0.1611	89.48
29	372.04	280.85	1735.44	4763	6717	0.2716	0.1515	73.99
30	373.17	288.22	1799.80	4296	6100	0.2635	0.1368	95.91

表 B.1.3 CCI-3 実験 解析終了時刻における出力データー覧(2/6)

case	UO2	ZRO2	SIO2	MGO	AL2O3	CAO	CR	CR2O3	TIO2	FEO
	Mass[kg]									
1	658.97	271.80	707.14	9.65	41.78	189.15	0.00	111.23	1.50	0.00
2	658.97	271.80	707.07	9.65	41.78	189.13	0.00	111.23	1.50	0.00
3	658.97	271.80	707.15	9.65	41.78	189.15	0.00	111.23	1.50	0.00
4	658.97	271.80	707.14	9.65	41.78	189.15	0.00	111.23	1.50	0.00
5	658.97	271.80	707.14	9.65	41.78	189.15	0.00	111.23	1.50	0.00
6	663.74	272.64	889.40	12.16	52.22	238.54	0.00	110.70	1.96	0.00
7	664.84	272.90	715.01	9.67	41.87	189.32	0.00	110.96	1.51	0.00
8	664.31	272.90	896.75	12.26	52.60	240.39	0.00	110.79	1.98	0.00
9	658.97	271.80	707.14	9.65	41.78	189.15	0.00	111.23	1.50	0.00
10	664.11	273.04	722.58	9.81	42.43	192.03	0.00	110.81	1.53	0.00
11	663.60	272.81	746.28	10.14	43.82	198.63	0.00	110.70	1.59	0.00
12	664.17	272.75	809.05	11.02	47.44	215.92	0.00	110.63	1.75	0.00
13	664.17	272.75	809.35	11.03	47.46	216.04	0.00	110.64	1.75	0.00
14	664.18	272.85	745.49	10.43	44.44	203.59	0.00	113.52	1.63	0.00
15	659.16	272.82	706.54	9.65	41.77	189.06	0.00	110.53	1.50	0.00
16	663.89	272.57	735.34	9.98	43.17	195.53	0.00	110.83	1.56	0.00
17	664.15	272.71	981.00	13.46	57.62	264.18	0.00	110.66	2.20	0.00
18	669.86	272.66	729.30	9.88	42.75	193.58	0.00	110.81	1.54	0.00
19	663.68	272.71	727.32	9.88	42.72	193.40	0.00	110.79	1.54	0.00

表 B.1.3 CCI-3 実験 解析終了時刻における出力データー覧(3/6)

case	UO2	ZRO2	SIO2	MGO	AL2O3	CAO	CR	CR2O3	TIO2	FEO
	Mass[kg]									
20	662.14	277.31	757.86	10.18	44.02	199.42	0.00	111.97	1.60	0.00
21	658.97	271.80	707.13	9.65	41.78	189.15	0.00	111.23	1.50	0.00
22	658.97	271.80	707.13	9.65	41.78	189.15	0.00	111.23	1.50	0.00
23	663.17	320.94	936.45	12.77	54.83	250.95	0.00	111.01	2.07	0.00
24	664.19	136.38	806.80	10.96	47.33	215.27	0.00	147.24	1.74	117.58
25	664.05	228.55	880.81	12.00	51.64	235.80	0.00	129.18	1.93	59.25
26	664.27	344.59	1011.45	13.85	59.38	272.56	16.34	87.09	2.27	0.00
27	663.07	295.53	847.53	11.53	49.63	225.90	0.00	111.00	1.84	0.00
28	663.71	319.80	844.62	11.56	49.82	227.11	0.00	110.66	1.85	0.00
29	664.18	136.38	795.46	10.79	46.66	212.12	0.08	150.76	1.71	123.40
30	658.97	271.80	707.12	9.65	41.78	189.14	0.00	111.23	1.50	0.00

表 B.1.3 CCI-3 実験 解析終了時刻における出力データ一覧(4/6)

case	MNO	SRO	NA2O	K2O	FE2O3	UO3	U3O8	ZR	FE	NI
	Mass[kg]									
1	0.39	0.39	6.40	7.85	14.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.39	0.39	6.40	7.85	14.44	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.39	0.39	6.40	7.85	14.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.39	0.39	6.40	7.85	14.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.39	0.39	6.40	7.85	14.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	0.51	0.51	8.35	10.25	18.85	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	0.39	0.39	6.41	7.87	14.47	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	0.51	0.51	8.42	10.33	19.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	0.39	0.39	6.40	7.85	14.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.40	0.39	6.52	8.00	14.71	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	0.41	0.41	6.78	8.32	15.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	0.45	0.45	7.46	9.16	16.84	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
13	0.45	0.45	7.46	9.16	16.85	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
14	0.22	0.42	6.89	8.71	15.62	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.39	0.39	6.40	7.85	14.44	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
16	0.40	0.40	6.65	8.17	15.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
17	0.57	0.57	9.35	11.48	21.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
18	0.40	0.40	6.58	8.07	14.85	0.00	10.65	0.00	0.00	0.00
19	0.40	0.40	6.57	8.06	14.83	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

表 B.1.3 CCI-3 実験 解析終了時刻における出力データー覧(5/6)

case	MNO	SRO	NA2O	K2O	FE2O3	UO3	U3O8	ZR	FE	NI
	Mass[kg]									
20	0.41	0.41	6.81	8.35	15.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
21	0.39	0.39	6.40	7.85	14.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
22	0.39	0.39	6.40	7.85	14.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
23	0.54	0.53	8.82	10.82	19.91	0.00	0.09	0.00	0.00	0.00
24	0.45	0.45	7.41	9.09	16.73	0.00	0.00	0.00	0.67	9.91
25	0.50	0.50	8.22	10.09	18.56	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
26	0.58	0.59	9.66	11.85	21.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
27	0.48	0.48	7.85	9.64	17.73	0.00	0.08	0.00	0.00	0.00
28	0.48	0.48	7.88	9.67	17.78	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
29	0.44	0.44	7.28	8.94	16.44	0.00	0.00	0.00	10.30	19.20
30	0.39	0.39	6.40	7.85	14.44	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

表 B.1.3 CCI-3 実験 解析終了時刻における出力データー覧(6/6)

case	Boiling	Evaporation	UO2	ZRO2	SIO2	MGO	AL2O3	CAO	CR	CR2O3	TIO2	FEO
		Mass[kg]	wt.%									
1	10	56.12	0.382	0.157	0.358	0.003	0.005	0.041	0.007	0.045	0.000	0.000
2	15	56.41	0.382	0.157	0.358	0.003	0.005	0.041	0.007	0.045	0.000	0.000
3	5	55.96	0.382	0.157	0.358	0.003	0.005	0.041	0.007	0.045	0.000	0.000
30	MOD3	55.79	0.382	0.157	0.358	0.003	0.005	0.041	0.007	0.045	0.000	0.000

表 B.1.4 CCI-1 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する"Boiling"の影響(1/2)

表 B.1.4 CCI-1 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する"Boiling"の影響(2/2)

case	Boiling	MNO	SRO	NA2O	K2O	FE2O3	UO3	U3O8	ZR	FE	NI
		wt.%									
1	10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	15	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
30	MOD3	0.382	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000

case	HTRINT	Evaporation	UO2	ZRO2	SIO2	MGO	AL2O3	CAO	CR	CR2O3	TIO2	FEO
		Mass[kg]	wt.%									
1	1	56.12	0.382	0.157	0.358	0.003	0.005	0.041	0.007	0.045	0.000	0.000
4	10	56.12	0.382	0.157	0.358	0.003	0.005	0.041	0.007	0.045	0.000	0.000
5	0.1	56.12	0.382	0.157	0.358	0.003	0.005	0.041	0.007	0.045	0.000	0.000

表 B.1.5 CCI-1 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する"HTRINT"の影響(1/2)

表 B.1.5 CCI-1 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する" HTRINT"の影響(2/2)

case	HTRINT	MNO	SRO	NA2O	K2O	FE2O3	UO3	U3O8	ZR	FE	NI
		wt.%									
1	1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
4	10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	0.1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

case	HTRBOT	Evaporation	UO2	ZRO2	SIO2	MGO	AL2O3	CAO	CR	CR2O3	TIO2	FEO
		Mass[kg]	wt.%									
1	1	56.12	0.382	0.157	0.358	0.003	0.005	0.041	0.007	0.045	0.000	0.000
6	10	3.52	0.352	0.139	0.403	0.003	0.006	0.045	0.000	0.048	0.000	0.000
7	0.1	67.24	0.384	0.158	0.354	0.003	0.005	0.040	0.007	0.044	0.000	0.000

表 B.1.6 CCI-1 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する"HTRBOT"の影響(1/2)

表 B.1.6 CCI-1 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する" HTRBOT"の影響(2/2)

case	HTRBOT	MNO	SRO	NA2O	K2O	FE2O3	UO3	U3O8	ZR	FE	NI
		wt.%									
1	1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
6	10	0.000	0.000	0.000	0.001	0.004	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000
7	0.1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

case	HTRSIDE	Evaporation	UO2	ZRO2	SIO2	MGO	AL2O3	CAO	CR	CR2O3	TIO2	FEO
		Mass[kg]	wt.%									
1	1	56.12	0.382	0.157	0.358	0.003	0.005	0.041	0.007	0.045	0.000	0.000
8	10	2.72	0.335	0.136	0.419	0.003	0.006	0.047	0.000	0.047	0.000	0.000
9	0.1	56.12	0.382	0.157	0.358	0.003	0.005	0.041	0.007	0.045	0.000	0.000

表 B.1.7 CCI-1 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する"HTRSIDE"の影響(1/2)

表 B.1.7 CCI-1 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する" HTRSIDE"の影響(2/2)

case	HTRSIDE	MNO	SRO	NA2O	K2O	FE2O3	UO3	U3O8	ZR	FE	NI
		wt.%									
1	1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
8	10	0.000	0.000	0.000	0.001	0.004	0.000	0.004	0.000	0.000	0.000
9	0.1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

case	EMISS.SUR	Evaporation	UO2	ZRO2	SIO2	MGO	AL2O3	CAO	CR	CR2O3	TIO2	FEO
		Mass[kg]	wt.%									
1	0.6	56.12	0.382	0.157	0.358	0.003	0.005	0.041	0.007	0.045	0.000	0.000
10	0.9	56.03	0.382	0.157	0.357	0.003	0.005	0.041	0.007	0.045	0.000	0.000
11	0.3	56.01	0.381	0.156	0.359	0.003	0.005	0.041	0.007	0.044	0.000	0.000

表 B.1.8 CCI-1 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する"EMISS.SUR"の影響(1/2)

表 B.1.8 CCI-1 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する" EMISS.SUR"の影響(2/2)

case	EMISS.SUR	MNO	SRO	NA2O	K2O	FE2O3	UO3	U3O8	ZR	FE	NI
		wt.%									
1	0.6	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10	0.9	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
11	0.3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

case	MIXING,	Evaporation	UO2	ZRO2	SIO2	MGO	AL2O3	CAO	CR	CR2O3	TIO2	FEO
	[HTRINT]	Mass[kg]	wt.%									
1	Enforce,	56.12	0.382	0.157	0.358	0.003	0.005	0.041	0.007	0.045	0.000	0.000
	[1]											
12	Calc,	49.55	0.339	0.139	0.414	0.003	0.006	0.046	0.000	0.048	0.000	0.000
	[1]											
13	Calc,	0.00	0.428	0.176	0.298	0.002	0.005	0.035	0.018	0.035	0.000	0.000
	[0.1]											
14	Calc,	36.69	0.342	0.141	0.410	0.003	0.006	0.046	0.000	0.049	0.000	0.000
	[10]											

表 B.1.9 CCI-1 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する"MIXING"の影響(1/2)

表 B.1.9 CCI-1 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する" EMISS.SUR"の影響(2/2)

case	MIXING,	MNO	SRO	NA2O	K2O	FE2O3	UO3	U3O8	ZR	FE	NI
	[HTRINT]	wt.%									
1	Enforce,	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	[1]										
12	Calc,	0.000	0.000	0.000	0.001	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	[1]										
13	Calc,	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	[0.1]										
14	Calc,	0.000	0.000	0.000	0.001	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	[10]										

case	GFILMBOTT ,	Evaporation	UO2	ZRO2	SIO2	MGO	AL2O3	CAO	CR	CR2O3	TIO2	FEO
	[HTRBOT]	Mass[kg]	wt.%									
1	GAS,	56.12	0.382	0.157	0.358	0.003	0.005	0.041	0.007	0.045	0.000	0.000
	[1]											
15	SLAG,	56.65	0.382	0.157	0.358	0.003	0.005	0.041	0.007	0.045	0.000	0.000
	[1]											
17	SLAG,	-12.87	0.332	0.135	0.426	0.003	0.006	0.047	0.000	0.047	0.000	0.000
	[10]											
18	SLAG,	67.05	0.384	0.158	0.355	0.003	0.005	0.040	0.007	0.045	0.000	0.000
	[0.1]											

表 B.1.10 CCI-1 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する"GFILMBOTT"の影響(1/2)

表 B.1.10 CCI-1 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する" GFILMBOTT"の影響(2/2)

case	GFILMBOTT ,	MNO	SRO	NA2O	K2O	FE2O3	UO3	U3O8	ZR	FE	NI
	[HTRBOT]	wt.%									
1	GAS,	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	[1]										
15	SLAG,	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	[1]										
17	SLAG,	0.000	0.000	0.000	0.001	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	[10]										
18	SLAG,	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	[0.1]										

case	GFILMSIDE,	Evaporation	UO2	ZRO2	SIO2	MGO	AL2O3	CAO	CR	CR2O3	TIO2	FEO
	[HTRSIDE]	Mass[kg]	wt.%									
1	GAS,	56.12	0.382	0.157	0.358	0.003	0.005	0.041	0.007	0.045	0.000	0.000
	[1]											
16	SLAG,	55.89	0.381	0.157	0.358	0.003	0.005	0.041	0.007	0.045	0.000	0.000
	[1]											
17	SLAG,	-12.87	0.332	0.135	0.426	0.003	0.006	0.047	0.000	0.047	0.000	0.000
	[10]											
18	SLAG,	67.05	0.384	0.158	0.355	0.003	0.005	0.040	0.007	0.045	0.000	0.000
	[0.1]											

表 B.1.11 CCI-1 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する"GFILMSIDE"の影響(1/2)

表 B.1.11 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する" GFILMSIDE"の影響(2/2)

case	GFILMSIDE,	MNO	SRO	NA2O	K2O	FE2O3	UO3	U3O8	ZR	FE	NI
	[HTRSIDE]	wt.%									
1	GAS,	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	[1]										
16	SLAG,	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	[1]										
17	SLAG,	0.000	0.000	0.000	0.001	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	[10]										
18	SLAG,	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	[0.1]										

case	SC2306(1)	Evaporation	UO2	ZRO2	SIO2	MGO	AL2O3	CAO	CR	CR2O3	TIO2	FEO
		Mass[kg]	wt.%									
1	10	56.12	0.382	0.157	0.358	0.003	0.005	0.041	0.007	0.045	0.000	0.000
19	1	56.15	0.382	0.157	0.358	0.003	0.005	0.041	0.007	0.045	0.000	0.000
20	100	56.05	0.382	0.157	0.357	0.003	0.005	0.041	0.007	0.045	0.000	0.000

表 B.1.12 CCI-1 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する" SC2306(1)"の影響(1/2)

表 B.1.12 CCI-1 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する" SC2306(1)"の影響(2/2)

case	SC2306(1)	MNO	SRO	NA2O	K2O	FE2O3	UO3	U3O8	ZR	FE	NI
		wt.%									
1	10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
19	1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
20	100	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

case	SC2306(2)	Evaporation	UO2	ZRO2	SIO2	MGO	AL2O3	CAO	CR	CR2O3	TIO2	FEO
		Mass[kg]	wt.%									
1	1000	56.12	0.382	0.157	0.358	0.003	0.005	0.041	0.007	0.045	0.000	0.000
21	100	55.95	0.382	0.157	0.358	0.003	0.005	0.041	0.007	0.045	0.000	0.000
22	10	55.95	0.382	0.157	0.358	0.003	0.005	0.041	0.007	0.045	0.000	0.000

表 B.1.13 CCI-1 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する" SC2306(2)"の影響(1/2)

表 B.1.13 CCI-1 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する" SC2306(2)"の影響(2/2)

case	SC2306(2)	MNO	SRO	NA2O	K2O	FE2O3	UO3	U3O8	ZR	FE	NI
		wt.%									
1	1000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
21	100	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
22	10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

case	MeltComposition	Evaporation	UO2	ZRO2	SIO2	MGO	AL2O3	CAO	CR	CR2O3	TIO2	FEO
		Mass[kg]	wt.%									
1	実験値	56.12	0.382	0.157	0.358	0.003	0.005	0.041	0.007	0.045	0.000	0.000
23	ZrO2 50%,	170.36	0.354	0.171	0.374	0.003	0.006	0.044	0.034	0.000	0.000	0.000
	Zr 50%											
24	ZrO2 50%,	125.03	0.360	0.074	0.386	0.003	0.005	0.043	0.018	0.045	0.000	0.005
	SUS 50%											
25	ZrO2 50%, Zr25 %,	128.07	0.343	0.118	0.405	0.003	0.006	0.045	0.034	0.012	0.000	0.001
	$SUS \ 25\%$											
26	ZrO2 25%,	146.33	0.339	0.176	0.375	0.003	0.006	0.046	0.033	0.000	0.000	0.000
	Zr 75%											
27	ZrO2 75%,	119.17	0.365	0.163	0.379	0.003	0.005	0.043	0.031	0.006	0.000	0.000
	Zr 25%											
28	ZrO2 50%,	146.32	0.353	0.170	0.377	0.003	0.006	0.044	0.034	0.000	0.000	0.000
	Zr 50%											
29	ZrO2 50%,	126.55	0.360	0.074	0.386	0.003	0.005	0.043	0.017	0.045	0.000	0.005
	SUS 50%											

表 B.1.14 CCI-1 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する" MeltComposition"の影響(1/2)

case	MeltComposition	MNO	SRO	NA2O	K2O	FE2O3	UO3	U3O8	ZR	FE	NI
		wt.%									
1	実験値	56.12	0.382	0.157	0.358	0.003	0.005	0.041	0.007	0.045	0.000
23	ZrO2 50%,	0.000	0.000	0.000	0.001	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Zr 50%										
24	ZrO2 50%,	0.000	0.000	0.000	0.001	0.003	0.000	0.000	0.000	0.046	0.011
	SUS 50%										
25	ZrO2 50%, Zr25 %,	0.000	0.000	0.000	0.001	0.004	0.000	0.000	0.000	0.023	0.005
	${ m SUS}~25\%$										
26	ZrO2 25%,	0.000	0.000	0.000	0.001	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Zr 75%										
27	ZrO2 75%,	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Zr 25%										
28	ZrO2 50%,	0.000	0.000	0.000	0.001	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Zr 50%										
29	ZrO2 50%,	0.000	0.000	0.000	0.001	0.003	0.000	0.000	0.000	0.046	0.011
	SUS 50%										

表 B.1.14 CCI-1 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する" MeltComposition"の影響(2/2)
case	COKE,	Evaporation	UO2	ZRO2	SIO2	MGO	AL2O3	CAO	CR	CR2O3	TIO2	FEO
	[MeltComposition]	Mass[kg]	wt.%									
23	1,	170.36	0.354	0.171	0.374	0.003	0.006	0.044	0.034	0.000	0.000	0.000
	[ZrO2 50%, Zr 50%]											
24	1,	125.03	0.360	0.074	0.386	0.003	0.005	0.043	0.018	0.045	0.000	0.005
	[ZrO2 50%, SUS 50%]											
28	0,	146.32	0.353	0.170	0.377	0.003	0.006	0.044	0.034	0.000	0.000	0.000
	[ZrO2 50%, Zr 50%]											
29	0,	126.55	0.360	0.074	0.386	0.003	0.005	0.043	0.017	0.045	0.000	0.005
	[ZrO2 50%, SUS 50%]											

表 B.1.15 CCI-1 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する" COKE"の影響(1/2)

表 B.1.15 CCI-1 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する" COKE"の影響(2/2)

case	COKE,	MNO	SRO	NA2O	K2O	FE2O3	UO3	U3O8	ZR	FE	NI
	[MeltComposition]	wt.%									
23	1,	0.000	0.000	0.000	0.001	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	[ZrO2 50%, Zr 50%]										
24	1,	0.000	0.000	0.000	0.001	0.003	0.000	0.000	0.000	0.046	0.011
	[ZrO2 50%, SUS 50%]										
28	0,	0.000	0.000	0.000	0.001	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	[ZrO2 50%, Zr 50%]										
29	0,	0.000	0.000	0.000	0.001	0.003	0.000	0.000	0.000	0.046	0.011
	[ZrO2 50%, SUS 50%]										

## B2. CCI-2 の図及び表



図 B.2.1 CCI-2 実験解析 出力データに対する"Boiling"の影響



図 B.2.2 CCI-2 実験解析 出力データに対する"HTRINT"の影響



図 B.2.3 CCI-2 実験解析 出力データに対する"HTRBOT"の影響



図 B.2.4 CCI-2 実験解析 出力データに対する"HTRSIDE"の影響



図 B.2.5 CCI-2 実験解析 出力データに対する"EMISS.SUR"の影響







図 B.2.7 CCI-2 実験解析 出力データに対する"GFILMBOT"の影響



図 B.2.8 CCI-2 実験解析 出力データに対する"GFILMSIDE"の影響



図 B.2.9 CCI-2 実験解析 出力データに対する"SC2306(1)"の影響







図 B.2.11 CCI-2 実験解析 出力データに対する"MeltComposition"の影響

case	Boiling	Evaporation	UO2	ZRO2	SIO2	MGO	AL2O3	CAO	CR	CR2O3	TIO2	FEO
		Mass[kg]	wt.%									
1	10	896.73	0.334	0.137	0.165	0.084	0.019	0.192	0.000	0.052	0.001	0.000
2	15	896.75	0.334	0.137	0.165	0.084	0.019	0.192	0.000	0.052	0.001	0.000
3	5	816.99	0.334	0.137	0.165	0.084	0.019	0.192	0.000	0.052	0.001	0.000
30	MOD3	831.03	0.333	0.137	0.165	0.084	0.019	0.193	0.000	0.052	0.001	0.000

表 B.2.1 CCI-2 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する"Boiling"の影響(1/2)

表 B.2.1 CCI-2 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する"Boiling"の影響(2/2)

case	Boiling	MNO	SRO	NA2O	K2O	FE2O3	UO3	U3O8	ZR	FE	NI
		wt.%									
1	10	0.000	0.000	0.002	0.004	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	15	0.000	0.000	0.002	0.004	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	5	0.000	0.000	0.002	0.004	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
30	MOD3	0.382	0.000	0.000	0.002	0.004	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000

case	HTRINT	Evaporation	UO2	ZRO2	SIO2	MGO	AL2O3	CAO	CR	CR2O3	TIO2	FEO
		Mass[kg]	wt.%									
1	1	896.73	0.334	0.137	0.165	0.084	0.019	0.192	0.000	0.052	0.001	0.000
4	10	896.73	0.334	0.137	0.165	0.084	0.019	0.192	0.000	0.052	0.001	0.000
5	0.1	896.73	0.334	0.137	0.165	0.084	0.019	0.192	0.000	0.052	0.001	0.000

表 B.2.2 CCI-2 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する"HTRINT"の影響(1/2)

表 B.2.2 CCI-2 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する" HTRINT"の影響(2/2)

case	HTRINT	MNO	SRO	NA2O	K2O	FE2O3	UO3	U3O8	ZR	FE	NI
		wt.%									
1	1	0.000	0.000	0.002	0.004	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
4	10	0.000	0.000	0.002	0.004	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	0.1	0.000	0.000	0.002	0.004	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

case	HTRBOT	Evaporation	UO2	ZRO2	SIO2	MGO	AL2O3	CAO	CR	CR2O3	TIO2	FEO
		Mass[kg]	wt.%									
1	1	896.73	0.334	0.137	0.165	0.084	0.019	0.192	0.000	0.052	0.001	0.000
6	10	588.94	0.300	0.123	0.183	0.094	0.021	0.214	0.000	0.046	0.001	0.000
7	0.1	1079.24	0.339	0.139	0.162	0.082	0.019	0.189	0.000	0.053	0.001	0.000

表 B.2.3 CCI-2 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する"HTRBOT"の影響(1/2)

表 B.2.3 CCI-2 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する" HTRBOT"の影響(2/2)

case	HTRBOT	MNO	SRO	NA2O	K2O	FE2O3	UO3	U3O8	ZR	FE	NI
		wt.%									
1	1	0.000	0.000	0.002	0.004	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
6	10	0.000	0.000	0.002	0.004	0.011	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
7	0.1	0.000	0.000	0.002	0.004	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

case	HTRSIDE	Evaporation	UO2	ZRO2	SIO2	MGO	AL2O3	CAO	CR	CR2O3	TIO2	FEO
		Mass[kg]	wt.%									
1	1	896.73	0.334	0.137	0.165	0.084	0.019	0.192	0.000	0.052	0.001	0.000
8	10	444.97	0.255	0.104	0.207	0.106	0.024	0.242	0.000	0.041	0.001	0.000
9	0.1	896.81	0.334	0.137	0.165	0.084	0.019	0.192	0.000	0.052	0.001	0.000

表 B.2.4 CCI-2 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する"HTRSIDE"の影響(1/2)

表 B.2.4 CCI-2 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する"HTRSIDE"の影響(2/2)

case	HTRSIDE	MNO	SRO	NA2O	K2O	FE2O3	UO3	U3O8	ZR	FE	NI
		wt.%									
1	1	0.000	0.000	0.002	0.004	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
8	10	0.000	0.000	0.003	0.005	0.012	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
9	0.1	0.000	0.000	0.002	0.004	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

case	EMISS.SUR	Evaporation	UO2	ZRO2	SIO2	MGO	AL2O3	CAO	CR	CR2O3	TIO2	FEO
		Mass[kg]	wt.%									
1	0.6	896.73	0.334	0.137	0.165	0.084	0.019	0.192	0.000	0.052	0.001	0.000
10	0.9	857.07	0.337	0.139	0.164	0.083	0.019	0.191	0.000	0.052	0.001	0.000
11	0.3	897.02	0.323	0.133	0.171	0.087	0.020	0.200	0.000	0.050	0.001	0.000

表 B.2.5 CCI-2 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する"EMISS.SUR"の影響(1/2)

表 B.2.5 CCI-2 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する" EMISS.SUR"の影響(2/2)

case	EMISS.SUR	MNO	SRO	NA2O	K2O	FE2O3	UO3	U3O8	ZR	FE	NI
		wt.%									
1	0.6	0.000	0.000	0.002	0.004	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10	0.9	0.000	0.000	0.002	0.004	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
11	0.3	0.000	0.000	0.002	0.004	0.010	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

case	MIXING,	Evaporation	UO2	ZRO2	SIO2	MGO	AL2O3	CAO	CR	CR2O3	TIO2	FEO
	[HTRINT]	Mass[kg]	wt.%									
1	Enforce,	896.73	0.334	0.137	0.165	0.084	0.019	0.192	0.000	0.052	0.001	0.000
	[1]											
12	Calc,	913.40	0.339	0.139	0.163	0.083	0.019	0.189	0.000	0.052	0.001	0.000
	[1]											
13	Calc,	956.88	0.337	0.139	0.163	0.083	0.019	0.190	0.000	0.052	0.001	0.000
	[0.1]											
14	Calc,	913.80	0.339	0.139	0.163	0.083	0.019	0.189	0.000	0.052	0.001	0.000
	[10]											

表 B.2.6 CCI-2 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する"MIXING"の影響(1/2)

表 B.2.6 CCI-2 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する" EMISS.SUR"の影響(2/2)

case	MIXING,	MNO	SRO	NA2O	K2O	FE2O3	UO3	U3O8	ZR	FE	NI
	[HTRINT]	wt.%									
1	Enforce,	0.000	0.000	0.002	0.004	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	[1]										
12	Calc,	0.000	0.000	0.002	0.004	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	[1]										
13	Calc,	0.000	0.000	0.002	0.004	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	[0.1]										
14	Calc,	0.000	0.000	0.002	0.004	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	[10]										

case	GFILMBOTT ,	Evaporation	UO2	ZRO2	SIO2	MGO	AL2O3	CAO	CR	CR2O3	TIO2	FEO
	[HTRBOT]	Mass[kg]	wt.%									
1	GAS,	896.73	0.334	0.137	0.165	0.084	0.019	0.192	0.000	0.052	0.001	0.000
	[1]											
15	SLAG,	857.05	0.335	0.138	0.165	0.084	0.019	0.192	0.000	0.052	0.001	0.000
	[1]											
17	SLAG,	711.99	0.297	0.122	0.184	0.095	0.021	0.216	0.000	0.046	0.001	0.000
	[10]											
18	SLAG,	1108.96	0.337	0.138	0.163	0.083	0.019	0.190	0.000	0.052	0.001	0.000
	[0.1]											

表 B.2.7 CCI-2 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する"GFILMBOTT"の影響(1/2)

表 B.2.7 CCI-2 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する"GFILMBOTT"の影響(2/2)

case	GFILMBOTT,	MNO	SRO	NA2O	K2O	FE2O3	UO3	U3O8	ZR	FE	NI
	[HTRBOT]	wt.%									
1	GAS,	0.000	0.000	0.002	0.004	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	[1]										
15	SLAG,	0.000	0.000	0.002	0.004	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	[1]										
17	SLAG,	0.000	0.000	0.002	0.004	0.011	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	[10]										
18	SLAG,	0.000	0.000	0.002	0.004	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	[0.1]										

case	GFILMSIDE,	Evaporation	UO2	ZRO2	SIO2	MGO	AL2O3	CAO	CR	CR2O3	TIO2	FEO
	[HTRSIDE]	Mass[kg]	wt.%									
1	GAS,	896.73	0.334	0.137	0.165	0.084	0.019	0.192	0.000	0.052	0.001	0.000
	[1]											
16	SLAG,	936.75	0.334	0.137	0.165	0.084	0.019	0.193	0.000	0.052	0.001	0.000
	[1]											
17	SLAG,	711.99	0.297	0.122	0.184	0.095	0.021	0.216	0.000	0.046	0.001	0.000
	[10]											
18	SLAG,	1108.96	0.337	0.138	0.163	0.083	0.019	0.190	0.000	0.052	0.001	0.000
	[0.1]											

表 B.2.8 CCI-2 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する"GFILMSIDE"の影響(1/2)

表 B.2.8 CCI-2 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する" GFILMSIDE"の影響(2/2)

case	GFILMSIDE,	MNO	SRO	NA2O	K2O	FE2O3	UO3	U3O8	ZR	FE	NI
	[HTRSIDE]	wt.%									
1	GAS,	0.000	0.000	0.002	0.004	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	[1]										
16	SLAG,	0.000	0.000	0.002	0.004	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	[1]										
17	SLAG,	0.000	0.000	0.002	0.004	0.011	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	[10]										
18	SLAG,	0.000	0.000	0.002	0.004	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	[0.1]										

case	SC2306(1)	Evaporation	UO2	ZRO2	SIO2	MGO	AL2O3	CAO	CR	CR2O3	TIO2	FEO
		Mass[kg]	wt.%									
1	10	896.73	0.334	0.137	0.165	0.084	0.019	0.192	0.000	0.052	0.001	0.000
19	1	896.79	0.334	0.138	0.165	0.084	0.019	0.192	0.000	0.052	0.001	0.000
20	100	896.68	0.337	0.138	0.164	0.083	0.019	0.191	0.000	0.052	0.001	0.000

表 B.2.9 CCI-2 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する" SC2306(1)"の影響(1/2)

表 B.2.9 CCI-2 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する" SC2306(1)"の影響(2/2)

case	SC2306(1)	MNO	SRO	NA2O	K2O	FE2O3	UO3	U3O8	ZR	FE	NI
		wt.%									
1	10	0.000	0.000	0.002	0.004	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
19	1	0.000	0.000	0.002	0.004	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
20	100	0.000	0.000	0.002	0.004	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

case	SC2306(2)	Evaporation	UO2	ZRO2	SIO2	MGO	AL2O3	CAO	CR	CR2O3	TIO2	FEO
		Mass[kg]	wt.%									
1	1000	896.73	0.334	0.137	0.165	0.084	0.019	0.192	0.000	0.052	0.001	0.000
21	100	896.77	0.334	0.137	0.165	0.084	0.019	0.192	0.000	0.052	0.001	0.000
22	10	896.77	0.334	0.137	0.165	0.084	0.019	0.192	0.000	0.052	0.001	0.000

表 B.2.10 CCI-2 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する" SC2306(2)"の影響(1/2)

表 B.2.10 CCI-2 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する" SC2306(2)"の影響(2/2)

case	SC2306(2)	MNO	SRO	NA2O	K2O	FE2O3	UO3	U3O8	ZR	FE	NI
		wt.%									
1	1000	0.000	0.000	0.002	0.004	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
21	100	0.000	0.000	0.002	0.004	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
22	10	0.000	0.000	0.002	0.004	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

case	MeltComposition	Evaporation	UO2	ZRO2	SIO2	MGO	AL2O3	CAO	CR	CR2O3	TIO2	FEO
		Mass[kg]	wt.%									
1	実験値	896.73	0.334	0.137	0.165	0.084	0.019	0.192	0.000	0.052	0.001	0.000
23	ZrO2 50%,	936.68	0.305	0.147	0.173	0.088	0.020	0.202	0.000	0.047	0.001	0.000
	Zr 50%											
24	ZrO2 50%,	919.44	0.325	0.067	0.162	0.083	0.019	0.189	0.000	0.068	0.001	0.058
	SUS 50%											
25	ZrO2 50%, Zr25 %,	959.56	0.314	0.108	0.168	0.086	0.019	0.196	0.000	0.057	0.001	0.028
	$SUS \ 25\%$											
26	ZrO2 25%,	1012.32	0.289	0.147	0.179	0.092	0.021	0.210	0.000	0.044	0.001	0.000
	Zr 75%											
27	ZrO2 75%,	936.54	0.318	0.142	0.169	0.086	0.020	0.198	0.000	0.049	0.001	0.000
	Zr 25%											
28	ZrO2 50%,	936.72	0.304	0.147	0.173	0.089	0.020	0.203	0.000	0.047	0.001	0.000
	Zr 50%											
29	ZrO2 50%,	0.00	0.440	0.090	0.100	0.048	0.012	0.114	0.000	0.092	0.000	0.078
	SUS 50%											

表 B.2.11 CCI-2 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する" MeltComposition"の影響(1/2)

case	MeltComposition	MNO	SRO	NA2O	K2O	FE2O3	UO3	U3O8	ZR	FE	NI
		wt.%									
1	実験値	0.000	0.000	0.002	0.004	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
23	ZrO2 50%,	0.000	0.000	0.002	0.004	0.010	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Zr 50%										
24	ZrO2 50%,	0.000	0.000	0.002	0.004	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	SUS 50%										
25	ZrO2 50%, Zr25 %,	0.000	0.000	0.002	0.004	0.010	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	${ m SUS}~25\%$										
26	ZrO2 25%,	0.000	0.000	0.002	0.004	0.010	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Zr 75%										
27	ZrO2 75%,	0.000	0.000	0.002	0.004	0.010	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Zr 25%										
28	ZrO2 50%,	0.000	0.000	0.002	0.004	0.010	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Zr 50%										
29	ZrO2 50%,	0.000	0.000	0.001	0.002	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
	SUS 50%										

表 B.2.11 CCI-2 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する" MeltComposition"の影響(2/2)

case	COKE,	Evaporation	UO2	ZRO2	SIO2	MGO	AL2O3	CAO	CR	CR2O3	TIO2	FEO
	[MeltComposition]	Mass[kg]	wt.%									
23	1,	936.68	0.305	0.147	0.173	0.088	0.020	0.202	0.000	0.047	0.001	0.000
	[ZrO2 50%, Zr 50%]											
24	1,	919.44	0.325	0.067	0.162	0.083	0.019	0.189	0.000	0.068	0.001	0.058
	[ZrO2 50%, SUS 50%]											
28	0,	936.72	0.304	0.147	0.173	0.089	0.020	0.203	0.000	0.047	0.001	0.000
	[ZrO2 50%, Zr 50%]											
29	0,	0.00	0.440	0.090	0.100	0.048	0.012	0.114	0.000	0.092	0.000	0.078
	[ZrO2 50%, SUS 50%]											

表 B.2.12 CCI-2 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する" COKE"の影響(1/2)

表 B.2.12 CCI-2 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する" COKE"の影響(2/2)

case	COKE,	MNO	SRO	NA2O	K2O	FE2O3	UO3	U3O8	ZR	FE	NI
	[MeltComposition]	wt.%									
23	1,	0.000	0.000	0.002	0.004	0.010	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	[ZrO2 50%, Zr 50%]										
24	1,	0.000	0.000	0.002	0.004	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	[ZrO2 50%, SUS 50%]										
28	0,	0.000	0.000	0.002	0.004	0.010	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	[ZrO2 50%, Zr 50%]										
29	0,	0.000	0.000	0.001	0.002	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
	[ZrO2 50%, SUS 50%]										

## B3. CCI-3 の図及び表



図 B.3.1 CCI-3 実験解析 出力データに対する"Boiling"の影響



図 B.3.2 CCI-3 実験解析 出力データに対する"HTRINT"の影響



図 B.3.3 CCI-3 実験解析 出力データに対する"HTRBOT"の影響



図 B.3.4 CCI-3 実験解析 出力データに対する"HTRSIDE"の影響



図 B.3.5 CCI-3 実験解析 出力データに対する"EMISS.SUR"の影響



図 B.3.6 CCI-3 実験解析 出力データに対する"MIXING"の影響



図 B.3.7 CCI-3 実験解析 出力データに対する"GFILMBOT"の影響



図 B.3.8 CCI-3 実験解析 出力データに対する"GFILMSIDE"の影響



図 B.3.9 CCI-3 実験解析 出力データに対する"SC2306(1)"の影響


図 B.3.10 CCI-3 実験解析 出力データに対する"SC2306(2)"の影響



図 B.3.11 CCI-3 実験解析 出力データに対する"MeltComposition"の影響



図 B.3.12 CCI-3 実験解析 出力データに対する"COKE"の影響

case	Boiling	Evaporation	UO2	ZRO2	SIO2	MGO	AL2O3	CAO	CR	CR2O3	TIO2	FEO
		Mass[kg]	wt.%									
1	10	248.71	0.326	0.135	0.350	0.005	0.021	0.094	0.000	0.055	0.001	0.000
2	15	248.70	0.326	0.135	0.350	0.005	0.021	0.094	0.000	0.055	0.001	0.000
3	5	248.80	0.326	0.135	0.350	0.005	0.021	0.094	0.000	0.055	0.001	0.000
30	MOD3	288.22	0.326	0.135	0.350	0.005	0.021	0.094	0.000	0.055	0.001	0.000

表 B.3.1 CCI-3 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する"Boiling"の影響(1/2)

表 B.3.1 CCI-3 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する"Boiling"の影響(2/2)

case	Boiling	MNO	SRO	NA2O	K2O	FE2O3	UO3	U3O8	ZR	FE	NI
		wt.%									
1	10	0.000	0.000	0.003	0.004	0.007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	15	0.000	0.000	0.003	0.004	0.007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	5	0.000	0.000	0.003	0.004	0.007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
30	MOD3	0.000	0.000	0.003	0.004	0.007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

case	HTRINT	Evaporation	UO2	ZRO2	SIO2	MGO	AL2O3	CAO	CR	CR2O3	TIO2	FEO
		Mass[kg]	wt.%									
1	1	248.71	0.326	0.135	0.350	0.005	0.021	0.094	0.000	0.055	0.001	0.000
4	10	248.71	0.326	0.135	0.350	0.005	0.021	0.094	0.000	0.055	0.001	0.000
5	0.1	248.71	0.326	0.135	0.350	0.005	0.021	0.094	0.000	0.055	0.001	0.000

表 B.3.2 CCI-3 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する"HTRINT"の影響(1/2)

表 B.3.2 CCI-3 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する" HTRINT"の影響(2/2)

case	HTRINT	MNO	SRO	NA2O	K2O	FE2O3	UO3	U3O8	ZR	FE	NI
		wt.%									
1	1	0.000	0.000	0.003	0.004	0.007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
4	10	0.000	0.000	0.003	0.004	0.007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	0.1	0.000	0.000	0.003	0.004	0.007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

case	HTRBOT	Evaporation	UO2	ZRO2	SIO2	MGO	AL2O3	CAO	CR	CR2O3	TIO2	FEO
		Mass[kg]	wt.%									
1	1	248.71	0.326	0.135	0.350	0.005	0.021	0.094	0.000	0.055	0.001	0.000
6	10	149.30	0.291	0.120	0.390	0.005	0.023	0.105	0.000	0.049	0.001	0.000
7	0.1	281.28	0.327	0.134	0.351	0.005	0.021	0.093	0.000	0.055	0.001	0.000

表 B.3.3 CCI-3 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する"HTRBOT"の影響(1/2)

表 B.3.3 CCI-3 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する" HTRBOT"の影響(2/2)

case	HTRBOT	MNO	SRO	NA2O	K2O	FE2O3	UO3	U3O8	ZR	FE	NI
		wt.%									
1	1	0.000	0.000	0.003	0.004	0.007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
6	10	0.000	0.000	0.004	0.004	0.008	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
7	0.1	0.000	0.000	0.003	0.004	0.007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

case	HTRSIDE	Evaporation	UO2	ZRO2	SIO2	MGO	AL2O3	CAO	CR	CR2O3	TIO2	FEO
		Mass[kg]	wt.%									
1	1	248.71	0.326	0.135	0.350	0.005	0.021	0.094	0.000	0.055	0.001	0.000
8	10	203.93	0.290	0.119	0.391	0.005	0.023	0.105	0.000	0.048	0.001	0.000
9	0.1	248.71	0.326	0.135	0.350	0.005	0.021	0.094	0.000	0.055	0.001	0.000

表 B.3.4 CCI-3 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する"HTRSIDE"の影響(1/2)

表 B.3.4 CCI-3 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する" HTRSIDE"の影響(2/2)

case	HTRSIDE	MNO	SRO	NA2O	K2O	FE2O3	UO3	U3O8	ZR	FE	NI
		wt.%									
1	1	0.000	0.000	0.003	0.004	0.007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
8	10	0.000	0.000	0.004	0.005	0.008	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
9	0.1	0.000	0.000	0.003	0.004	0.007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

case	EMISS.SUR	Evaporation	UO2	ZRO2	SIO2	MGO	AL2O3	CAO	CR	CR2O3	TIO2	FEO
		Mass[kg]	wt.%									
1	0.6	248.71	0.326	0.135	0.350	0.005	0.021	0.094	0.000	0.055	0.001	0.000
10	0.9	258.30	0.325	0.133	0.353	0.005	0.021	0.094	0.000	0.054	0.001	0.000
11	0.3	256.91	0.319	0.131	0.359	0.005	0.021	0.096	0.000	0.053	0.001	0.000

表 B.3.5 CCI-3 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する"EMISS.SUR"の影響(1/2)

表 B.3.5 CCI-3 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する" EMISS.SUR"の影響(2/2)

case	EMISS.SUR	MNO	SRO	NA2O	K2O	FE2O3	UO3	U3O8	ZR	FE	NI
		wt.%									
1	0.6	0.000	0.000	0.003	0.004	0.007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10	0.9	0.000	0.000	0.003	0.004	0.007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
11	0.3	0.000	0.000	0.003	0.004	0.007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

case	MIXING,	Evaporation	UO2	ZRO2	SIO2	MGO	AL2O3	CAO	CR	CR2O3	TIO2	FEO
	[HTRINT]	Mass[kg]	wt.%									
1	Enforce,	248.71	0.326	0.135	0.350	0.005	0.021	0.094	0.000	0.055	0.001	0.000
	[1]											
12	Calc,	180.23	0.306	0.126	0.373	0.005	0.022	0.100	0.000	0.051	0.001	0.000
	[1]											
13	Calc,	178.94	0.306	0.126	0.373	0.005	0.022	0.100	0.000	0.051	0.001	0.000
	[0.1]											
14	Calc,	114.35	0.318	0.131	0.357	0.005	0.021	0.098	0.000	0.054	0.001	0.000
	[10]											

表 B.3.6 CCI-3 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する"MIXING"の影響(1/2)

表 B.3.6 CCI-3 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する" EMISS.SUR"の影響(2/2)

case	MIXING,	MNO	SRO	NA2O	K2O	FE2O3	UO3	U3O8	ZR	FE	NI
	[HTRINT]	wt.%									
1	Enforce,	0.000	0.000	0.003	0.004	0.007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	[1]										
12	Calc,	0.000	0.000	0.003	0.004	0.008	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	[1]										
13	Calc,	0.000	0.000	0.003	0.004	0.008	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	[0.1]										
14	Calc,	0.000	0.000	0.003	0.004	0.007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	[10]										

case	GFILMBOTT ,	Evaporation	UO2	ZRO2	SIO2	MGO	AL2O3	CAO	CR	CR2O3	TIO2	FEO
	[HTRBOT]	Mass[kg]	wt.%									
1	GAS,	248.71	0.326	0.135	0.350	0.005	0.021	0.094	0.000	0.055	0.001	0.000
	[1]											
15	SLAG,	249.04	0.326	0.135	0.350	0.005	0.021	0.094	0.000	0.055	0.001	0.000
	[1]											
17	SLAG,	160.37	0.276	0.113	0.407	0.006	0.024	0.110	0.000	0.046	0.001	0.000
	[10]											
18	SLAG,	276.67	0.323	0.132	0.352	0.005	0.021	0.093	0.000	0.053	0.001	0.000
	[0.1]											

表 B.3.7 CCI-3 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する"GFILMBOTT"の影響(1/2)

表 B.3.7 CCI-3 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する"GFILMBOTT"の影響(2/2)

case	GFILMBOTT ,	MNO	SRO	NA2O	K2O	FE2O3	UO3	U3O8	ZR	FE	NI
	[HTRBOT]	wt.%									
1	GAS,	0.000	0.000	0.003	0.004	0.007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	[1]										
15	SLAG,	0.000	0.000	0.003	0.004	0.007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	[1]										
17	SLAG,	0.000	0.000	0.004	0.005	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	[10]										
18	SLAG,	0.000	0.000	0.003	0.004	0.007	0.000	0.005	0.000	0.000	0.000
	[0.1]										

case	GFILMSIDE,	Evaporation	UO2	ZRO2	SIO2	MGO	AL2O3	CAO	CR	CR2O3	TIO2	FEO
	[HTRSIDE]	Mass[kg]	wt.%									
1	GAS,	248.71	0.326	0.135	0.350	0.005	0.021	0.094	0.000	0.055	0.001	0.000
	[1]											
16	SLAG,	257.82	0.322	0.132	0.356	0.005	0.021	0.095	0.000	0.054	0.001	0.000
	[1]											
17	SLAG,	160.37	0.276	0.113	0.407	0.006	0.024	0.110	0.000	0.046	0.001	0.000
	[10]											
18	SLAG,	276.67	0.323	0.132	0.352	0.005	0.021	0.093	0.000	0.053	0.001	0.000
	[0.1]											

表 B.3.8 CCI-3 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する"GFILMSIDE"の影響(1/2)

表 B.3.8 CCI-3 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する" GFILMSIDE"の影響(2/2)

case	GFILMSIDE,	MNO	SRO	NA2O	K2O	FE2O3	UO3	U3O8	ZR	FE	NI
	[HTRSIDE]	wt.%									
1	GAS,	0.000	0.000	0.003	0.004	0.007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	[1]										
16	SLAG,	0.000	0.000	0.003	0.004	0.007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	[1]										
17	SLAG,	0.000	0.000	0.004	0.005	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	[10]										
18	SLAG,	0.000	0.000	0.003	0.004	0.007	0.000	0.005	0.000	0.000	0.000
	[0.1]										

case	SC2306(1)	Evaporation	UO2	ZRO2	SIO2	MGO	AL2O3	CAO	CR	CR2O3	TIO2	FEO
		Mass[kg]	wt.%									
1	10	248.71	0.326	0.135	0.350	0.005	0.021	0.094	0.000	0.055	0.001	0.000
19	1	257.40	0.323	0.133	0.354	0.005	0.021	0.094	0.000	0.054	0.001	0.000
20	100	266.82	0.316	0.132	0.362	0.005	0.021	0.095	0.000	0.053	0.001	0.000

表 B.3.9 CCI-3 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する" SC2306(1)"の影響(1/2)

表 B.3.9 CCI-3 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する" SC2306(1)"の影響(2/2)

case	SC2306(1)	MNO	SRO	NA2O	K2O	FE2O3	UO3	U3O8	ZR	FE	NI
		wt.%									
1	10	0.000	0.000	0.003	0.004	0.007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
19	1	0.000	0.000	0.003	0.004	0.007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
20	100	0.000	0.000	0.003	0.004	0.007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

case	SC2306(2)	Evaporation	UO2	ZRO2	SIO2	MGO	AL2O3	CAO	CR	CR2O3	TIO2	FEO
		Mass[kg]	wt.%									
1	1000	248.71	0.326	0.135	0.350	0.005	0.021	0.094	0.000	0.055	0.001	0.000
21	100	248.58	0.326	0.135	0.350	0.005	0.021	0.094	0.000	0.055	0.001	0.000
22	10	248.58	0.326	0.135	0.350	0.005	0.021	0.094	0.000	0.055	0.001	0.000

表 B.3.10 CCI-3 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する" SC2306(2)"の影響(1/2)

表 B.3.10 CCI-3 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する" SC2306(2)"の影響(2/2)

case	SC2306(2)	MNO	SRO	NA2O	K2O	FE2O3	UO3	U3O8	ZR	FE	NI
		wt.%									
1	1000	0.000	0.000	0.003	0.004	0.007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
21	100	0.000	0.000	0.003	0.004	0.007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
22	10	0.000	0.000	0.003	0.004	0.007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

case	MeltComposition	Evaporation	UO2	ZRO2	SIO2	MGO	AL2O3	CAO	CR	CR2O3	TIO2	FEO
		Mass[kg]	wt.%									
1	実験値	260.40	0.326	0.135	0.350	0.005	0.021	0.094	0.000	0.055	0.001	0.000
23	ZrO2 50%,	254.28	0.277	0.134	0.391	0.005	0.023	0.105	0.000	0.046	0.001	0.000
	Zr 50%											
24	ZrO2 50%,	243.94	0.301	0.062	0.366	0.005	0.021	0.098	0.000	0.067	0.001	0.053
	SUS 50%											
25	ZrO2 50%, Zr25 %,	258.66	0.287	0.099	0.381	0.005	0.022	0.102	0.000	0.056	0.001	0.026
	$\rm SUS~25\%$											
26	ZrO2 25%,	258.88	0.264	0.137	0.402	0.006	0.024	0.108	0.006	0.035	0.001	0.000
	Zr 75%											
27	ZrO2 75%,	239.60	0.296	0.132	0.378	0.005	0.022	0.101	0.000	0.050	0.001	0.000
	Zr 25%											
28	ZrO2 50%,	280.85	0.293	0.141	0.373	0.005	0.022	0.100	0.000	0.049	0.001	0.000
	Zr 50%											
29	ZrO2 50%,	260.40	0.301	0.062	0.361	0.005	0.021	0.096	0.000	0.068	0.001	0.056
	SUS 50%											

表 B.3.11 CCI-3 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する" MeltComposition"の影響(1/2)

case	MeltComposition	MNO	SRO	NA2O	K2O	FE2O3	UO3	U3O8	ZR	FE	NI
		wt.%									
1	実験値	0.000	0.000	0.003	0.004	0.007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
23	ZrO2 50%,	0.000	0.000	0.004	0.005	0.008	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Zr 50%										
24	ZrO2 50%,	0.000	0.000	0.003	0.004	0.008	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004
	SUS 50%										
25	ZrO2 50%, Zr25 %,	0.000	0.000	0.004	0.004	0.008	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	$SUS\ 25\%$										
26	ZrO2 25%,	0.000	0.000	0.004	0.005	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Zr 75%										
27	ZrO2 75%,	0.000	0.000	0.004	0.004	0.008	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Zr 25%										
28	ZrO2 50%,	0.000	0.000	0.003	0.004	0.008	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Zr 50%										
29	ZrO2 50%,	0.000	0.000	0.003	0.004	0.007	0.000	0.000	0.000	0.005	0.009
	SUS 50%										

表 B.3.11 CCI-3 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する" MeltComposition"の影響(2/2)

case	COKE,	Evaporation	UO2	ZRO2	SIO2	MGO	AL2O3	CAO	CR	CR2O3	TIO2	FEO
	[MeltComposition]	Mass[kg]	wt.%									
23	1,	254.28	0.277	0.134	0.391	0.005	0.023	0.105	0.000	0.046	0.001	0.000
	[ZrO2 50%, Zr 50%]											
24	1,	243.94	0.301	0.062	0.366	0.005	0.021	0.098	0.000	0.067	0.001	0.053
	[ZrO2 50%, SUS 50%]											
28	0,	280.85	0.293	0.141	0.373	0.005	0.022	0.100	0.000	0.049	0.001	0.000
	[ZrO2 50%, Zr 50%]											
29	0,	260.40	0.301	0.062	0.361	0.005	0.021	0.096	0.000	0.068	0.001	0.056
	[ZrO2 50%, SUS 50%]											

表 B.3.12 CCI-3 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する" COKE"の影響(1/2)

表 B.3.12 CCI-3 実験解析 水蒸発量とデブリ組成に対する" COKE"の影響(2/2)

case	COKE,	MNO	SRO	NA2O	K2O	FE2O3	UO3	U3O8	ZR	FE	NI
	[MeltComposition]	wt.%									
23	1,	0.000	0.000	0.004	0.005	0.008	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	[ZrO2 50%, Zr 50%]										
24	1,	0.000	0.000	0.003	0.004	0.008	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004
	[ZrO2 50%, SUS 50%]										
28	0,	0.000	0.000	0.003	0.004	0.008	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	[ZrO2 50%, Zr 50%]										
29	0,	0.000	0.000	0.003	0.004	0.007	0.000	0.000	0.000	0.005	0.009
	[ZrO2 50%, SUS 50%]										

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	OECD/ ROSAU 会議
主催	OECD/NEA
出張先	スウェーデン・ストックホルム
期間	令和5年6月20日(月)~令和5年6月21日(火)
参加者	研究員2名
概要	OECD/NEA における実験プロジェクト ROSAU (Reduction Of Severe
	Accident Uncertainties) 第7回会合 (スウェーデン・ストックホルム) 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。
	ROSAU 実験は米国 ANL (Argonne National Laboratory) において実施され
	ている。2019年6月から開始され、2025年まで継続する予定である。本プ
	ロジェクトでは、模擬コリウム(ウラン酸化物やジルコニウム酸化物を含む
	模擬溶融物)を用い、注水による溶融炉心の冷却性に係わる DCAM 実験及
	び水中床面における溶融炉心の拡がりに係わる MST 実験を実施する。以下
	の事項についての検討・議論が行われた。
	DCAM-4 についての分析結果の速報の予定について報告された。DCAM-
	5 の実験条件について議論された。また、MST-2 の結果について議論され
	た。DCAM-5 及び MST-3 の実験条件の最終的な決定のために 9 月にオンラ
	インミーティングを開催することが決まった。

出席会合・会議(2)

件名	原子力学会 2023 年秋の大会
主催	日本原子力学会
出張先	名古屋
期間	令和5年9月6日(水)~令和5年9月8日(金)
参加者	研究員2名
概要	日本原子力学会 2023 年秋の大会(愛知県・名古屋)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最新情報を取得した。
	・コリウムに金属成分の影響については、下部ヘッドでのデブリの特徴につ
	いての研究があり、格納容器内への流入条件に関わる。
	・可燃性ガスについては、福島事故の関係から水素に関する発表が多い。CO
	はあまり着目されていない。(WGAMA でも指摘あり。)
	・燃料デブリに関係する熱力学平衡計算データベースの構築のための研究
	は相図構築、融点推定のために MCCI 現象にも重要と考えられる。福島事故
	におけるデブリの状態を推定する目的や、ATF を念頭においた研究を主眼
	とするものが見られる。

出席会合・会議(3)

件名	OECD/ ROSAU 会議
主催	OECD/NEA
出張先	オンライン
期間	令和5年9月8日(金)
参加者	研究員3名
概要	OECD/NEA における実験プロジェクト ROSAU (Reduction Of Severe
	Accident Uncertainties) 中間技術会合にオンライン出席し、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。
	本会合では主として DCAM-4 の結果を確認し、DCAM-5 の条件を決定し
	た。

出席会合・会議(4)

件名	OECD/NEA WGAMA 第 26 回会合出席
主催	OECD/NEA
出張先	フランス・パリ
期間	令和5年9月11日(月)~令和5年9月15日(金)
参加者	嘱託職員1名
概要	OECD/NEA WGAMA 第26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。
	進行中のシビアアクシデント時の可燃性ガスの最新情報報告書(SOAR)
	作成のプロジェクトについて報告が行われた。本事業にも関わる内容であ
	り、可燃性ガスに加えて MCCI についても言及される予定である。

出席会合・会議(5)

件名	OECD/ ROSAU 会議
主催	OECD/NEA
出張先	フランス・パリ(ハイブリッド開催)
期間	令和5年12月12日(火)~令和5年12月13日(水)
参加者	研究員3名
概要	OECD/NEA における実験プロジェクト ROSAU (Reduction Of Severe
	Accident Uncertainties) 第8回会合にオンライン出席し、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。
	次期 ROSAU についての計画にも言及があった。