

軽水炉の重大事故時における 不確実さの大きな物理化学現象に係る 解析コードの開発

事後評価 説明資料

令和5年4月

原子力規制庁長官官房技術基盤グループ
シビアアクシデント研究部門

目次

1. 背景
2. 目的
3. 研究概要
4. 研究期間を通じた主要成果
5. まとめ
6. 成果の活用について
7. 成果の公表等
8. 成果目標に対する達成状況
9. 今後の展開

1. 背景

重大事故時の格納容器機能維持への脅威となる物理化学現象については、解析コードによる予測に大きな不確実さを伴う領域が存在する。モデル開発上、不確実性が大きなものとして以下が挙げられる。

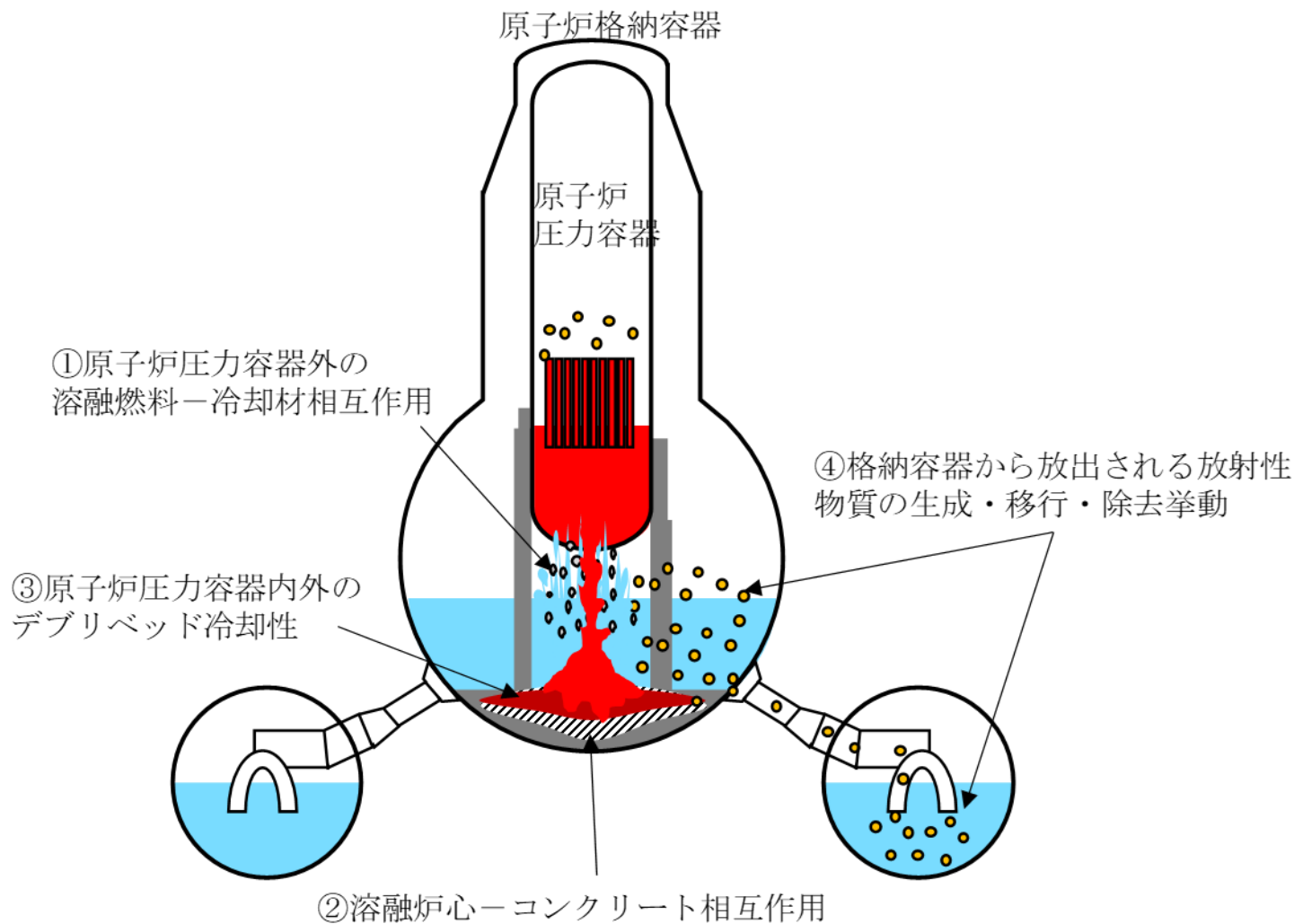
1. 原子炉圧力容器外の溶融燃料-冷却材相互作用 (FCI)
2. 溶融炉心-コンクリート相互作用 (MCCI)
3. 原子炉圧力容器内外のデブリベッド冷却性
4. 放射性物質の化学反応を含む発生、除去及び移行プロセス

2. 目的

モデル開発上、不確実性が大きな4つの領域を対象とし、幾何形状模擬性、物理化学現象における局所・非平衡性の考慮等のモデル高度化を実現した新たな解析コードを開発し、実験データの解釈、実機プラントの事故分析を更に進め、実験により得られる知見をプラントスケールの評価に適用する際の不確実さを低減することを目標とする。

3. 研究概要





3.1 対象とする物理化学現象



3. 研究概要

3.2 全体行程

	平成29年度 2017年度	平成30年度 2018年度	平成31年度 令和元年度 2019年度	令和2年度 2020年度	令和3年度 2021年度	令和4年度 2022年度
(1)溶融燃料-冷却剤相互作用解析コードの開発						
a.JBREAKの開発						
b.JASMINEの改良 (JAEAに委託)						
(2)溶融炉心-コンクリート相互作用解析コードの開発						
a.CORACAABの開発						
b.CFD解析に基づく対流熱伝達モデル開発						
(3)キャビティ注水時のデブリ冷却性解析コードの開発						
a.重要現象同定とモデル化方針						
b.決定論的アプローチによるデブリ冷却性評価手法開発						
c.確率論的アプローチによるデブリ冷却性評価手法開発 (JAEAに委託)						
(4)放射性物質生成・移行・除去解析コードの開発						
a.プラント内放射性物質移行解析コードの開発 (JAEAに委託)						
b.エアロゾルプールスクラビングモデルの開発 (筑波大学に委託)						

-  現象分析・モデル検討
-  コード設計
-  コーディング
-  妥当性確認

4. 研究期間を通じた主要成果

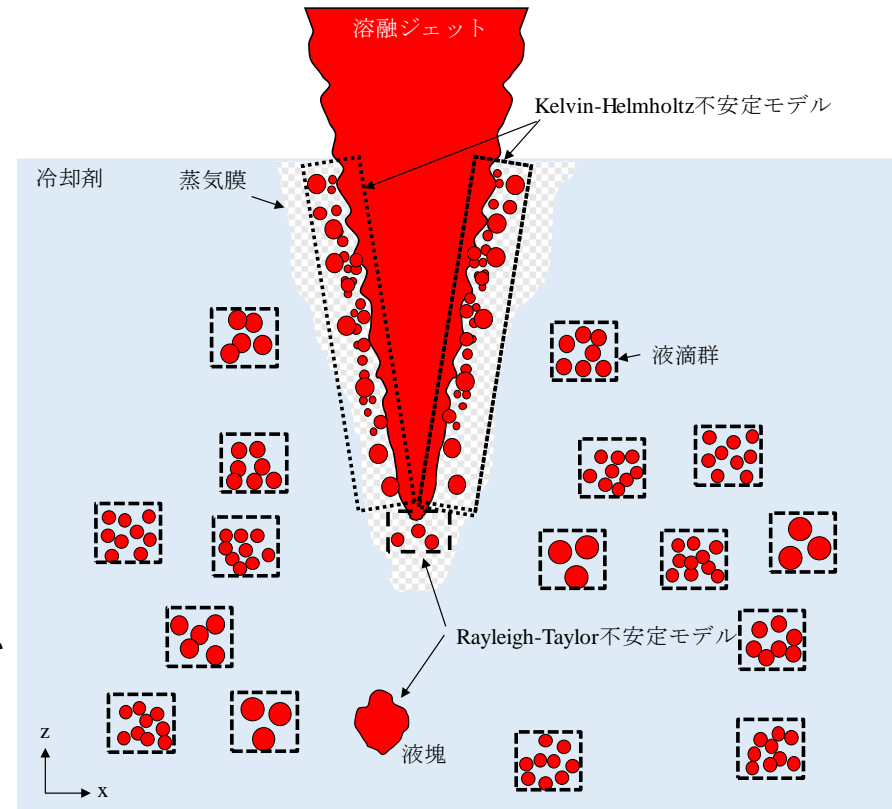
4.1 溶融燃料-冷却材相互作用解析コードの開発

4.1.1 JBREAKの開発(1/2)

- ◆ 実験体系における集積デブリの生成実験の解釈、実機プラントにおける複雑な三次元体系における溶融物落下時の挙動を解析するモデルの必要性が増している。



- ◆ JBREAKの開発
- ◆ 溶融物の分裂及び集積に関するモデル化
 - ✓ 三次元体系の保存則
 - ✓ THINC/WLIC法に基づく界面追跡法
 - ✓ 溶融ジェット及び粒子状デブリの同時放出を考慮
 - ✓ 液滴発生
 - ✓ 集積



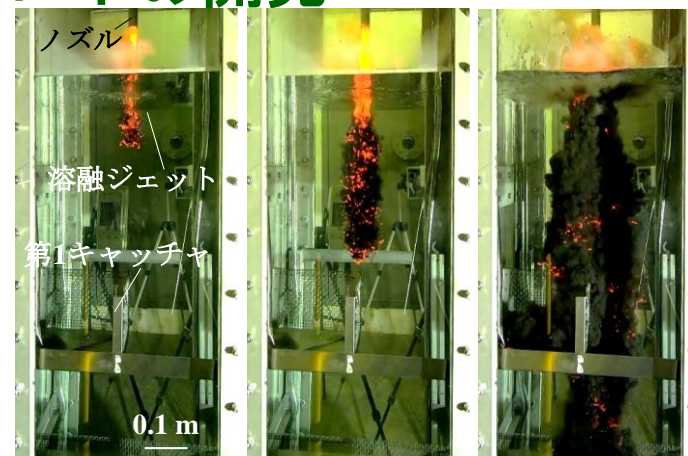
4. 研究期間を通じた主要成果

4.1 溶融燃料-冷却材相互作用解析コードの開発

4.1.1 JBREAKの開発(2/2)

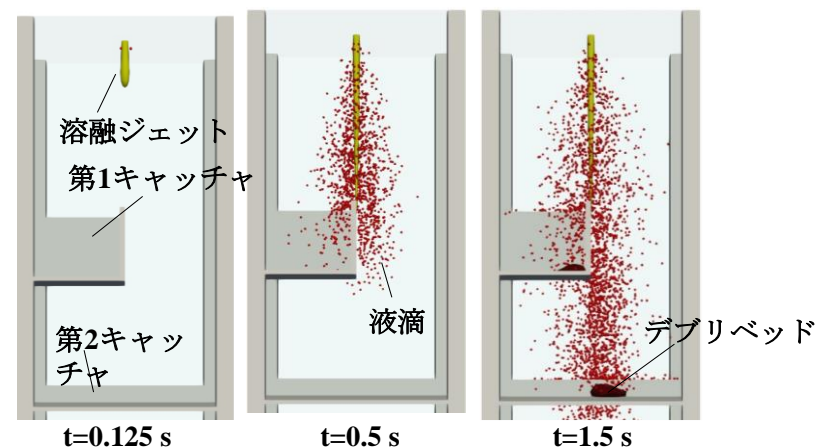
DEFOR-A実験に基づく妥当性確認:

JBREAKによって溶融ジェットと液滴挙動、集積デブリ質量割合を予測できることが示された。



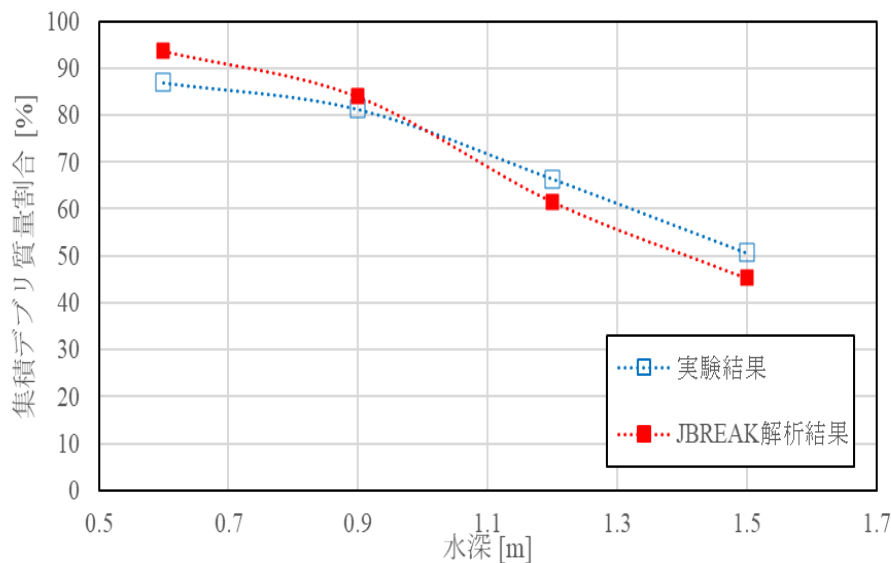
t=0.125 s t=0.5 s t=1.5 s

(a)DEFOR-A27実験



t=0.125 s t=0.5 s t=1.5 s

(b)JBREAK解析結果



集積デブリ質量割合

4. 研究期間を通じた主要成果

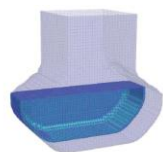
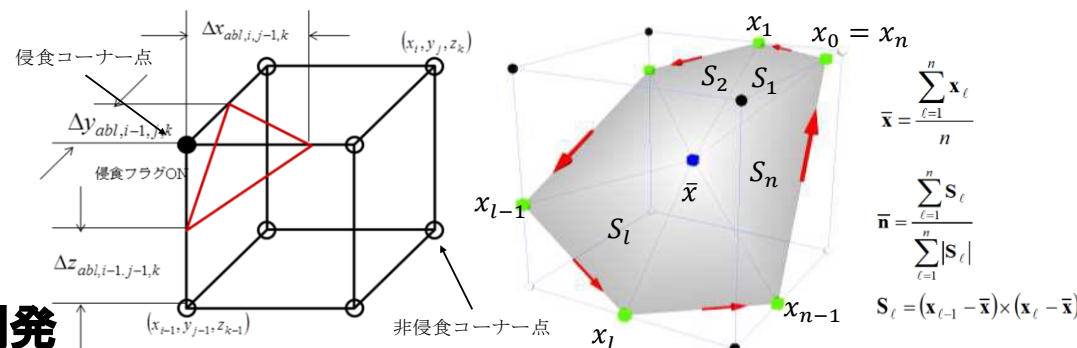
4.2 溶融炉心-コンクリート相互作用解析コードの開発

◆ 既往の実験及び実機プラントにおける複雑なキャビティ形状から、非対称性を伴う三次元MCCIコードの必要性が増している。

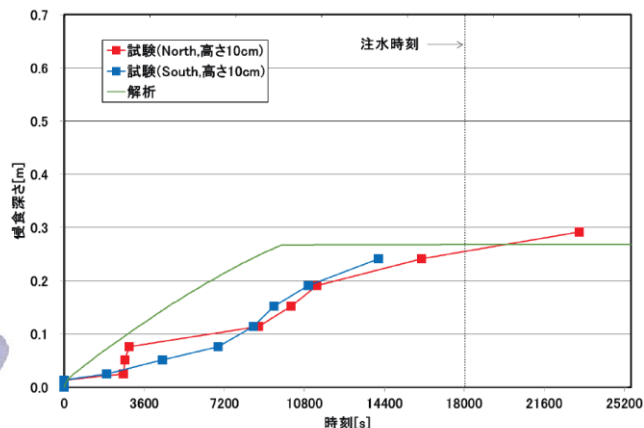
◆ 三次元解析MCCIコードCORCAABの開発

✓ 三次元コンクリート侵食フロント追跡アルゴリズムを開発

◆ 解析結果

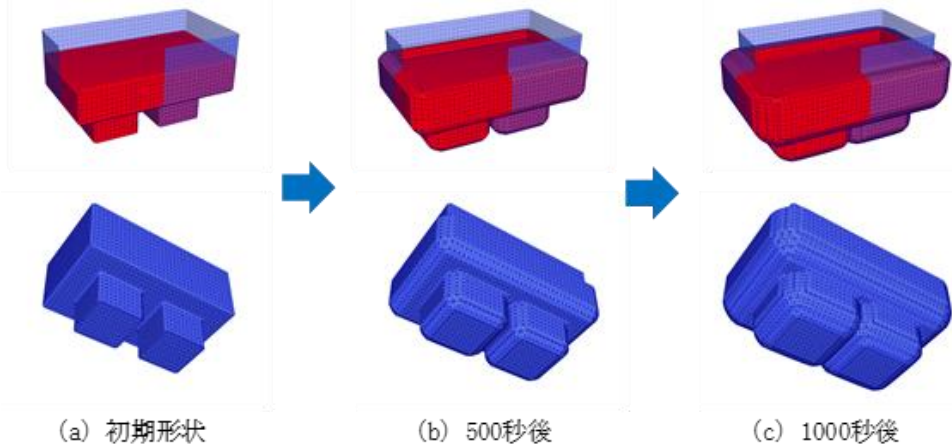


60分後



360分後

CORCAABに組み込んだ三次元侵食アルゴリズム



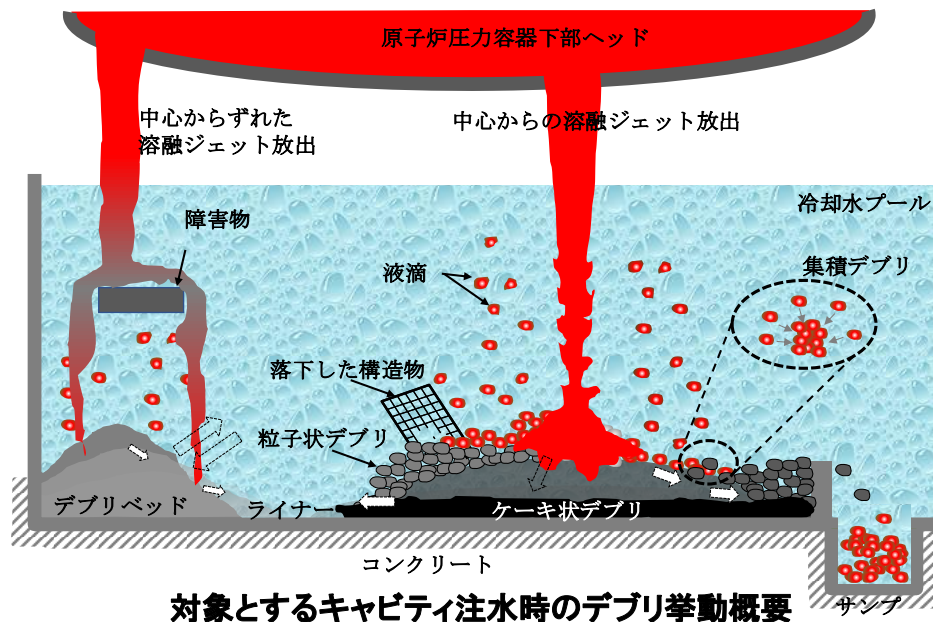
CORCAABによる実機相当キャビティ侵食解析

4. 研究期間を通じた主要成果

4.3 キャビティ注水時のデブリ冷却性解析コードの開発

4.3.1 重要現象同定とモデル化の方針

- ◆ 決定論的アプローチ: 大規模計算に基づく現象の最適評価を指向するもの。
→THERMOSによる評価
- ◆ 確率論的アプローチ: モデルパラメータ等の不確実性を考慮した多数の感度解析により現象の幅を予測すること指向するもの。
→JASMINEによる評価



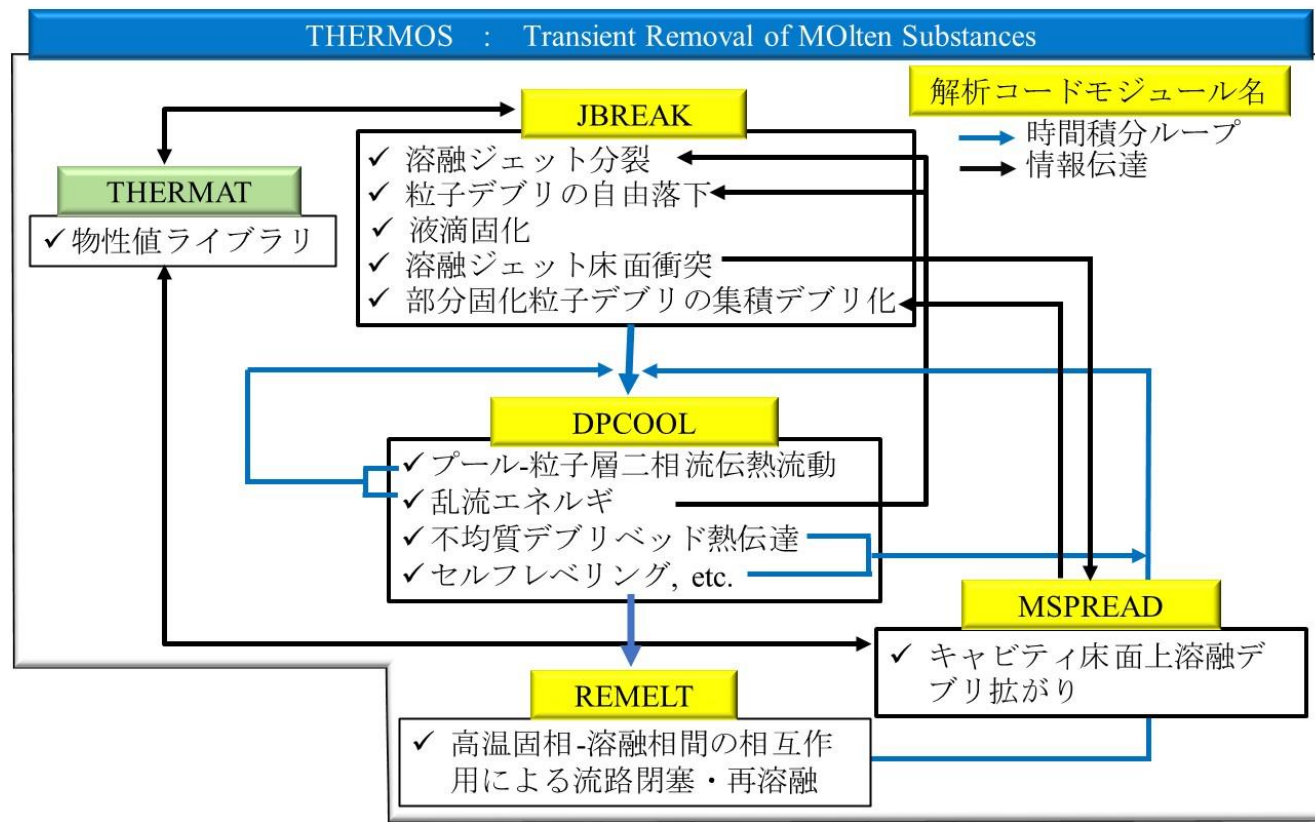
4. 研究期間を通じた主要成果

4.3 キャビティ注水時のデブリ冷却性解析コードの開発

4.3.2 決定論的アプローチに基づくデブリ冷却性評価手法開発 (1/6)

(THERMOSの開発)

- 4個のモジュールと物性値ライブラリから構成される。
- 各モジュールは個別現象のための詳細コードとしてスタンドアロンで実行することができる。
- 複数モジュールをカップリングした解析も可能とする。



THERMOSのモジュール構成

4. 研究期間を通じた主要成果

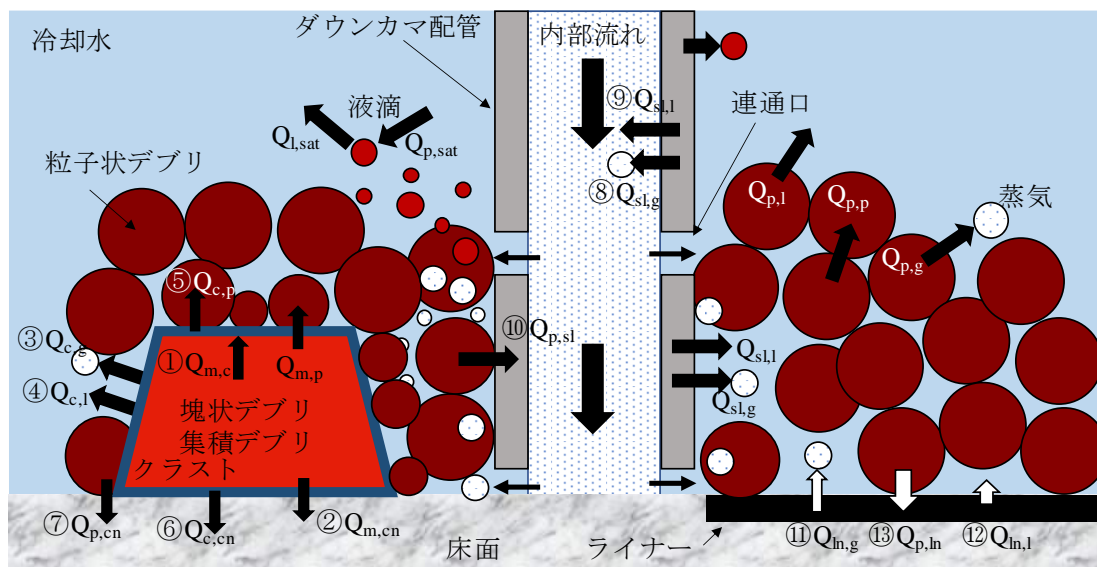
4.3 キャビティ注水時のデブリ冷却性解析コードの開発

4.3.2 決定論的アプローチに基づくデブリ冷却性評価手法開発 (2/6) (DPCOOLの開発)

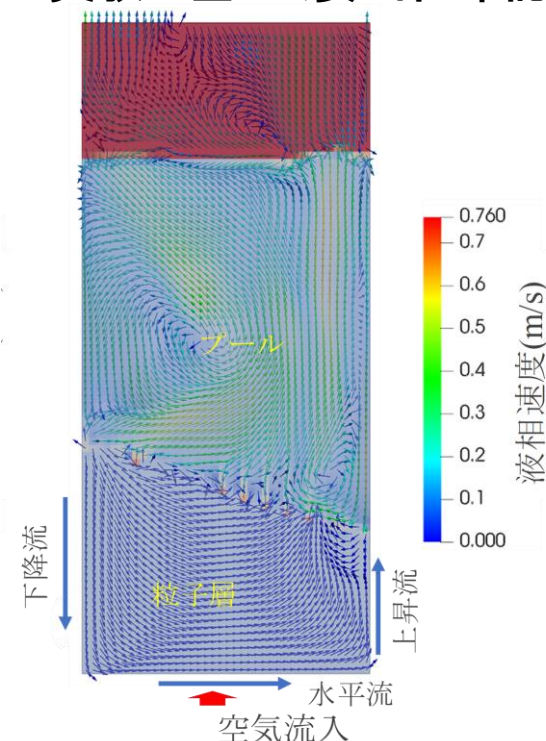
◆ デブリ冷却モデル組み込み

- ✓ 熱伝達係数
- ✓ セルフレベリング

◆ PDS-C実験に基づく妥当性確認



デブリベッドからの熱伝達経路



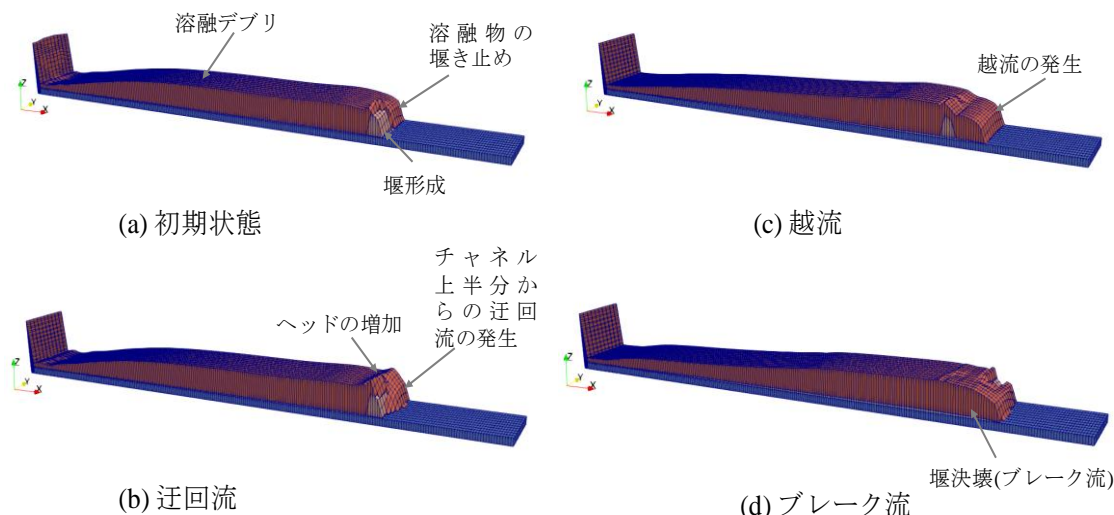
粒子相内外の液相速度解析結果

4. 研究期間を通じた主要成果

4.3 キャビティ注水時のデブリ冷却性解析コードの開発

4.3.2 決定論的アプローチに基づくデブリ冷却性評価手法開発 (3/6) (MSPREADの開発) (1/2)

- ◆ 溶融物拡がりに関するモデル化を行った。
 - ✓ サンプ等床面窪みモデル
 - ✓ 非等方拡がり(Weir Anchoring)モデル
 - ✓ メルトエラプションモデル
 - ✓ クエンチ(溶融ジェット分裂による急冷却)モデル



非等方拡がり(Weir Anchoring)モデルによる3パターンの非等方流れ

4. 研究期間を通じた主要成果

4.3 キャビティ注水時のデブリ冷却性解析コードの開発

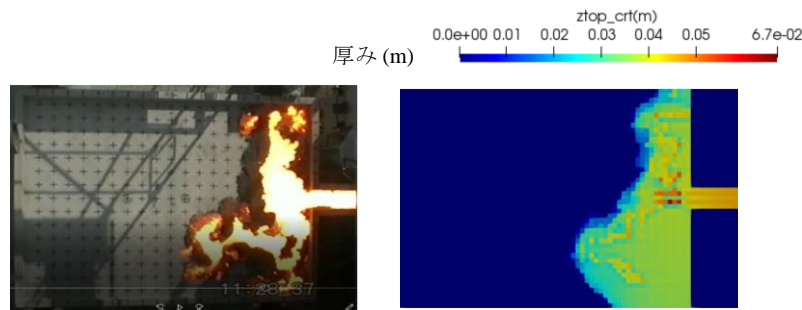
4.3.2 決定論的アプローチに基づくデブリ冷却性評価手法開発 (4/6)

(MSPREADの開発)(2/2)

- ◆ ドライ条件(ECOKATS-1実験)に基づく妥当性確認
- ◆ ウェット条件(PULiMS実験)に基づく妥当性確認



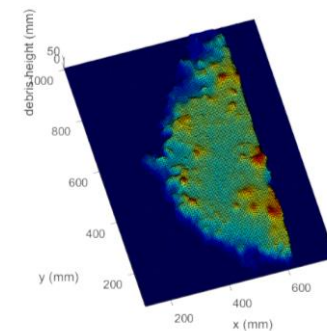
MSPREADによってドライ条件及びウェット条件の溶融物拡がりを予測できることが示された。



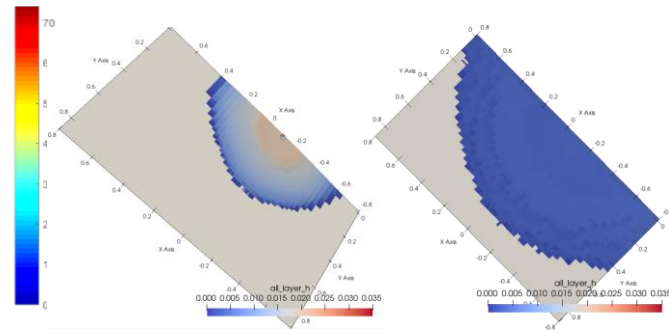
(b) 終了後拡がり形状

(d) Weir Anchoringモデル適用

ECOKATS-1実験とMSPREAD解析結果
ドライ条件



(a) 実験結果



(b) 解析結果
(クエンチモデル有効)

(c) 解析結果
(クエンチモデル無効)

PULiMS実験とMSPREAD解析結果
ウェット条件

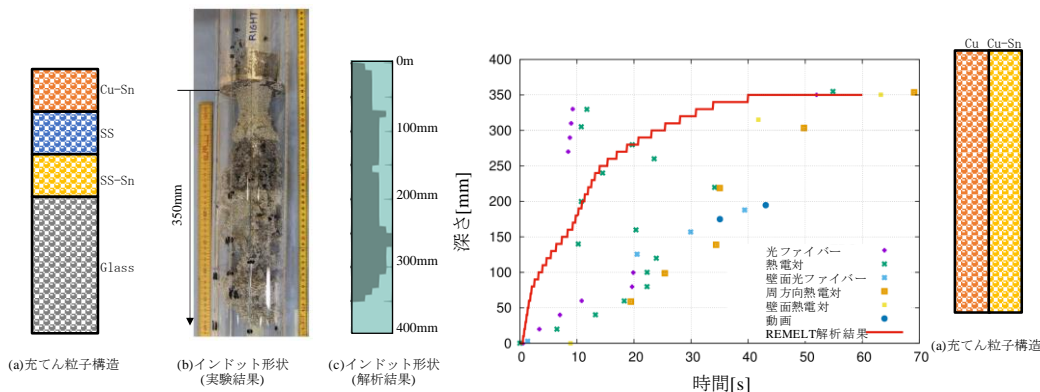
4. 研究期間を通じた主要成果

4.3 キャビティ注水時のデブリ冷却性解析コードの開発

4.3.2 決定論的アプローチに基づくデブリ冷却性評価手法開発 (5/6) (REMELTの開発)

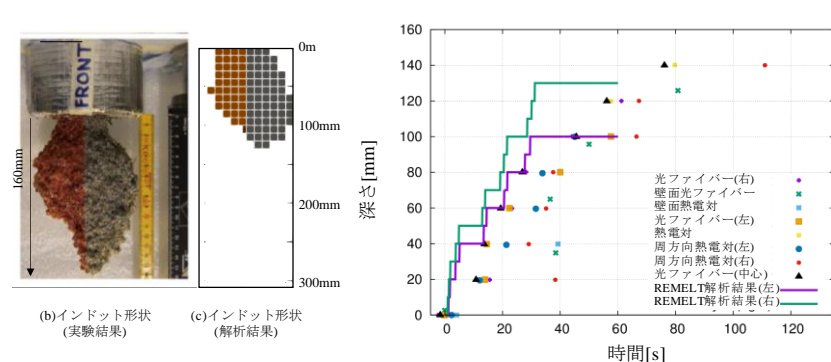
◆ REMCOD実験に基づく妥当性確認

- ✓ 規制庁がKTHと共同で実施したREMCODの妥当性確認を行った。
- ✓ 複数の材質の粒子堆積層が軸方向に層をなした体系であるE25実験では、解析最終時刻での固着粒子層形状、浸透深さは実験結果と一致した。
- ✓ 表面の状態が異なる銅の粒子堆積層が方位角方向に層をなした体系であるE27実験では、定性的に実験結果を再現できた。



E25における固着粒子層形状

E25における浸透履歴



E27における固着粒子層形状

E27における浸透履歴

4. 研究期間を通じた主要成果

4.3 キャビティ注水時のデブリ冷却性解析コードの開発

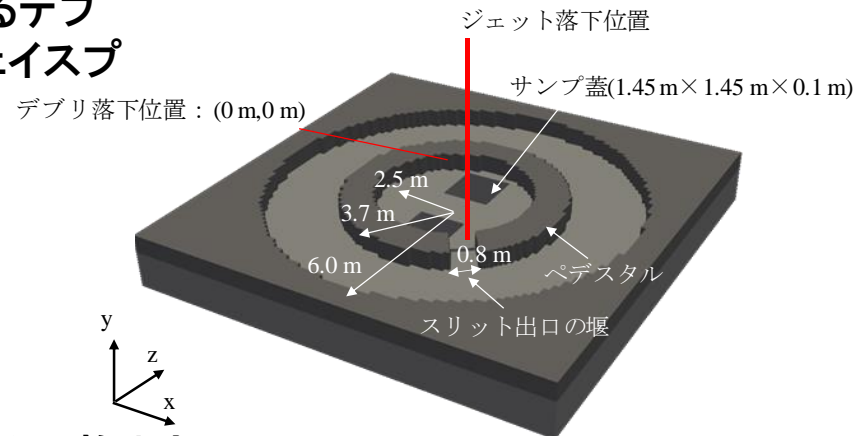
4.3.2 決定論的アプローチに基づくデブリ冷却性評価手法開発 (6/6)

◆ MELCOR-THERMOSインターフェイスプログラムMELTHERの開発

- ✓ MELCOR CORパッケージからRPVから放出されるデブリをTHERMOSの入口境界条件を得るインターフェイスプログラムMELTHERを開発した。

◆ 実機にて想定される現象のモデル開発

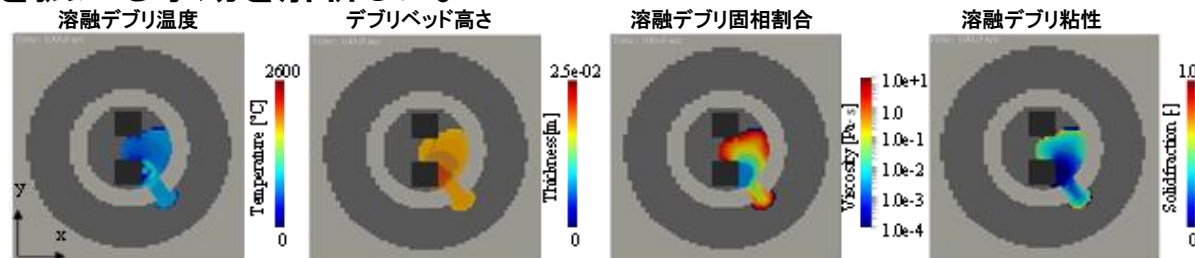
- ✓ 固液分離モデル
- ✓ サンプ浸食モデル



実機解析体系

◆ THERMOSによる実機解析

- ✓ 代表的なBWR3 Mark-Iの寸法に基づき下部ヘッドから放出されたデブリが、ペDESTAL床面を拡がる挙動を解析した。
- ✓ MELCORの履歴に基づき決定論解析コードTHERMOSによって多次元デブリ挙動を解析できることが示された。



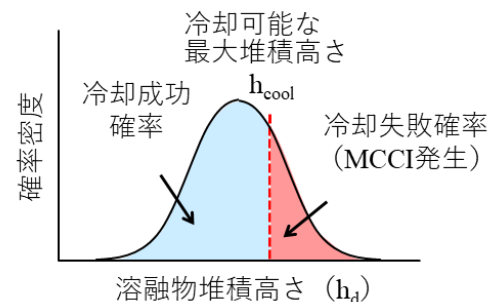
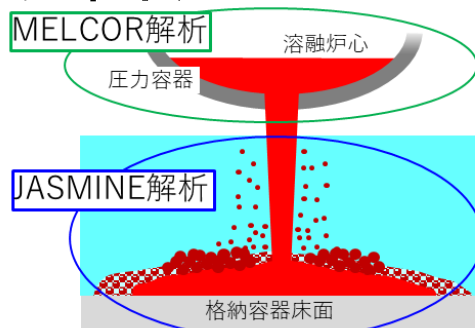
デブリ挙動解析結果(ジェット落下から100秒後)

4. 研究期間を通じた主要成果

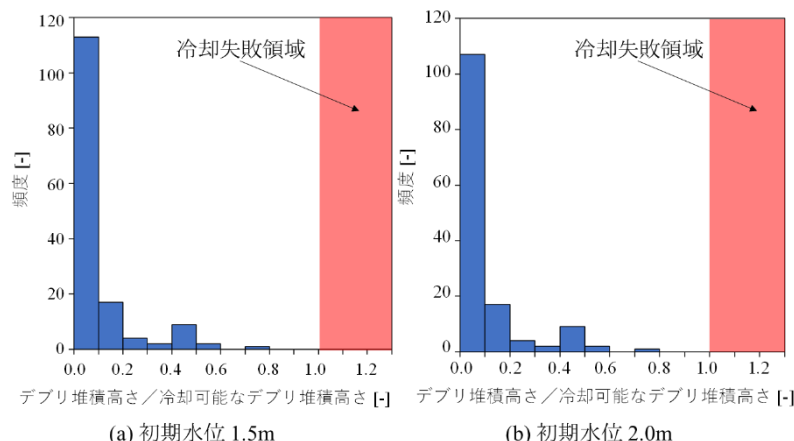
4.3 キャビティ注水時のデブリ冷却性解析コードの開発

4.3.3 確率論的アプローチに基づくデブリ冷却性評価手法開発 (JASMINE改良による実機冷却成功確率)

- ✓ JASMINEに溶融物の集積挙動及び溶融物床面拡がり挙動のモデルを追加
- ✓ デブリを上下面からの除熱のみを考慮した、床面との境界温度を求め、コンクリート溶融侵食温度以下に抑えられるか否か(=冷却成功/失敗)を判断する。
- ✓ JASMINEとMELCORを組み合わせた評価手法を構築した。
- ✓ 実機BWR Mark-I型の仮想的な事故を対象としたデブリの冷却性評価を行うことを可能とした。



実機溶融物冷却成功確率評価方法



実機BWRのSAを対象としたデブリの堆積高さ/デブリの冷却可能堆積高さのヒストグラム

5. まとめ (1/3)

「溶融燃料-冷却材相互作用」、「溶融炉心-コンクリート相互作用」、「キャビティ注水時のデブリ冷却性」及び「放射性物質生成・移行・除去」を評価するための解析コードを開発した。

- 「溶融燃料-冷却材相互作用解析コードの開発」では、3次元溶融ジェット分裂挙動解析コードJBREAKを開発した。DEFOR-A実験による妥当性確認により高温溶融物落下挙動が解析可能であることを確認した。
- 「溶融炉心-コンクリート相互作用解析コードの開発」では、三次元非対称コンクリート浸食挙動解析のためのCORCAABコードを開発し、CCI2実験に基づく妥当性確認によりMCCI挙動が解析可能であることを確認した。

5. まとめ (2/3)

- 「キャビティ注水時のデブリ冷却性解析コードの開発」では、
 - 「決定論的アプローチに基づくデブリ冷却性評価手法」の開発を行って、THERMOSを構成するデブリベッドの二相伝熱流動を扱うDPCOOL、溶融物拡がりを扱うMSPREAD、デブリベッド内の物質相互作用を扱うREMELT及びこれらのインターフェイスを開発し、KTHでの模擬溶融物実験により妥当性を確認した。開発した手法を用いて代表的なBWR3 Mark-Iの解析を行い、実機条件におけるデブリベッド形成挙動評価が可能であることを確認した。
 - 「確率論的アプローチによるデブリ冷却性評価手法」の開発において、2次元FCI解析コードJASMINEに格納容器内デブリ冷却成功確率の評価に必要な機能を整備し、実機の仮想的な事故を対象としてデブリの冷却性評価を行った。

5. まとめ (3/3)

- 「放射性物質生成・移行・除去解析コードの開発」については
 - 「化学挙動を考慮したソースターム評価手法の開発」として、詳細な化学反応速度及び化学平衡組成のモデル化について検討し、化学平衡組成については代替統計モデルをISA解析コードTHALES2に導入し、BWRプラントを対象として事故解析を実施した。
 - 「エアロゾルスクラビング除去モデルの開発」では、三次元エアロゾル移行挙動解析コードを開発し、エアロゾル移行挙動の詳細な評価を可能にした。

6. 成果の活用について (1/3)

6.1 プロジェクト期間内

6.1.1 有効性評価への活用

審査においては、評価に使用されるプラント挙動解析モデル並びにMCCI、FCI(圧カスパイク)等のモデルについて、組み込まれたモデルが実験等の最新知見に照らして、どのような不確実さを含んでいるかについて確認している。さらにキャビティ内への局所的なデブリ堆積とその冷却性等、過去の実験的知見に基づく評価がこれらを代表あるいは包絡することを確認している。こうした検討の過程において、本研究で得られたデブリベッド形成及び冷却性に関するメカニズム、溶融燃料と構造材の物質相互作用に関する知見の整理結果が活用されている。

6. 成果の活用について (2/3)

6.1 プロジェクト期間内

6.1.2 安全性向上評価等への活用

本研究では、重大事故進展において重要な現象について、モデル開発のための実験的知見を系統的に整理している。特に、安全性向上評価では、安全設備やその復旧等において、有効性評価とは異なるその時点における状態を考慮した評価が必要となる。これは、格納容器機能に対する負荷に関連したモデル化についても同様である。本研究で得られたFCI、原子炉圧力容器外でのデブリベッド形成及び冷却、放射性物質移行挙動及びプールのスクラビングに係る現象分析とモデル化等についての成果は、論文等により公開された最新知見として、必要な場合には安全性向上評価等において考慮されるものである。

6. 成果の活用について (3/3)

6.1 プロジェクト期間内

6.1.3 審査書案に対する科学的・技術的意見への回答

審査書案に対する科学的・技術的意見への回答では、本研究で得られた、デブリベッド形成及び冷却性に関するメカニズム、溶融燃料と構造材の物質相互作用に関する知見の整理結果が活用されている。

6.2 今後の見通し

東京電力福島第一原子力発電所の現地調査結果等に基づく事故分析から得られた結果を踏まえた溶融炉心挙動評価において、本研究で開発した複数の解析コードを活用していく。

7. 成果の公表等 (1/6)

7.1 原子力規制庁の職員が著者に含まれる公表

論文(査読付)

1. A. Hotta, M. Akiba, Y. Doi and A. Morita, “Development of debris bed cooling evaluation code, DPCOOL, based on heating porous media submerged in two-phase pool,” J. Nucl. Sci. Technol. 56(1), 2019.
2. 秋葉美幸、堀田亮年、阿部豊、孫昊旻、“粒子状放射性物質のプールのスクラビングに関する実験的研究”、日本原子力学会和文論文集、J18-042、2020.
3. 堀田亮年、森田彰伸、梶本光廣、丸山結、“JASMINE Version 3による溶融燃料—冷却材相互作用SERENA2実験解析”、日本原子力学会和文誌、2017年6月27日.
4. A. Hotta, H. Hadachi, W. Kikuchi, M. Shimizu, “Development of a horizontal two-dimensional melt spread analysis code, THERMOS-MSPREAD Part-2: Special models and validations based on dry spreading experiments using molten oxide mixtures and prototype corium,” Nuclear Engineering and Design Volume 387, 111598, February 2022.

7. 成果の公表等 (2/6)

5. A. Hotta, H. Hadachi, W. Kikuchi, M. Shimizu, “Development of a horizontal two-dimensional melt spread analysis code, THERMOS-MSPREAD Part-1: Spreading models, numerical solution methods and verifications,” Nuclear Engineering and Design Volume 386, 111523, January 2022.
6. A. Morita, A. Hotta, N. Yamazaki, “Algorithms of three-dimensional concrete ablation front tracking (CAFT) and crust growth,” Annals of Nuclear Energy, Vol. 158, 108297, 2021.
7. A. Hotta, M. Akiba, A. Konovalenko, W. Villanueva, S. Bechta, T. Matsumoto, T. Sugiyama and M. Buck, “Experimental and Analytical Investigation of Formation and Cooling Phenomena,” J. Nucl. Sci. Technol. , Volume 57, Issue 4, 2020.
8. S. M. Hoseyni, A. Konovalenko, S. Thakre, W. Villanueva, A. Komlev, S. Bechta , P. Skold, M. Akiba, A. Hotta, “Metallic melt infiltration in preheated debris bed and the effect of solidification,” Nuclear Engineering and Design, Vol. 379, 111229, 2021.
9. W. Villanueva, S. M. Hoseyni, S. Bechta , A. Hotta, “ Experimental investigation of melt infiltration and solidification in a pre-heated particle bed” Physics of Fluids Vol.34, 123326,2022

7. 成果の公表等 (3/6)

国際会議のプロシーディング(査読付)

1. W. Kikuchi and A. Hotta, “Extension of molten jet breakup evaluation code JBREAK by improving droplet agglomeration model and validation based on DEFOR-A test,” Extended Abstract of OECD/NEA Specialist Workshop on Reactor and containment cooling systems – long term management and reliability (RCCS2021), ON-LINE, RCCS 2021 1230, 18th – 20st, Oct., 2021.
2. A. Hotta and W. Kikuchi, “Extension of Debris Bed Cooling Evaluation Code DPCOOL for Evaluating Uncertainties in Long-term Debris Coolability,” Extended Abstract of OECD/NEA Specialist Workshop on Reactor and containment cooling systems – long term management and reliability (RCCS2021), ON-LINE, RCCS 2021 1240, 18th – 20st, Oct., 2021.

表彰・受賞

1. 森田彰伸「多次元溶融炉心-コンクリート相互作用解析手法の開発」日本原子力学会2019年秋の大会、第32回日本原子力学会熱流動部会奨励賞
2. 菊池航「JBREAKにおける溶融デブリ堆積及び集積モデル開発」日本原子力学会2021年秋の大会、第35回日本原子力学会熱流動部会優秀講演賞

7. 成果の公表等 (4/6)

7.2 委託先による公表

論文(査読付)

1. T. Matsumoto, R. Kawabe, Y. Iwasawa, T. Sugiyama, Y. Maruyama, “Improvement of JASMINE code for Ex-Vessel Molten Core Coolability in BWR,” *Annals of Nuclear Energy*, Vol.178, 109348, 2022.
2. H. Shiotsu et al., “Numerical analysis for FP speciation in VERDON-2 experiment; Chemical re-vaporization of iodine in air ingress condition,” *Annals of Nuclear Energy*, Vol.163, 108587, 2021.
3. Y. Abe, K. Fujiwara, S. Saito, T. Yuasa and A. Kaneko, “Bubble dynamics with aerosol during pool scrubbing,” *Nuclear Engineering and Design*, Vol.337, pp. 96–107, 2018.
4. K. Fujiwara, K. Yoshida, A. Kaneko, Y. Abe, “Experimental and numerical investigations of aerosol transportation phenomena from single bubbles,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.195, 123160, 2022.

7. 成果の公表等 (5/6)

国際会議のプロシーディング(査読付)

1. T. Matsumoto, R. Kawabe, T. Sugiyama, Y. Maruyama, “Improvement of ex-vessel molten core behavior models for the JASMINE code,” Proceedings of 10th Japan-Korea Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety (NTHAS-10, Kyoto, Japan, N10P1143), 27th – 30th, Nov, 2016.
2. T. Matsumoto, Y. Iwasawa, K. Ajima, T. Sugiyama, “The Analyses for Ex-Vessel Debris Coolability of BWR,” Proceedings of Asian Symposium on Risk Assessment and Management 2020 (ASRAM2020), Online Virtual Conference ASRAM2020-1025, 30, Nov. – 2, Dec.18, 2020 .
3. T. Matsumoto, Y. Iwasawa, T. Sugiyama, “Development of Evaluation Framework for Ex-Vessel Core Coolability,” Extended Abstract of OECD/NEA Specialist Workshop on Reactor and containment cooling systems – long term management and reliability (RCCS2021), ON-LINE, RCCS 2021 1260, 18th – 20st, Oct., 2021.
4. H. Shiotsu et al., “Analysis of transport behaviors of cesium and iodine in VERDON-2 experiment for chemical model validation,” Proceedings of 11th Korea-Japan Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety (NTHAS-11), 2018.

7. 成果の公表等 (6/6)

5. J. Ishikawa et al., “Evaluation of chemical speciation of iodine and cesium considering fission product chemistry in reactor coolant system,” Proceedings of Asian Symposium on Risk Assessment and Management 2018 (ASRAM 2018), 2018.
6. J. Ishikawa, et al., “Source term analysis considering B4C/Steel interaction and oxidation during severe accidents,” Proceedings of 25th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE-25) (CD-ROM), 7 Pages, 2017.

8. 成果目標に対する達成状況 (1/3)

① 溶融燃料－冷却材相互作用解析コードの開発

三次元溶融ジェット分裂挙動解析コードJBREAKを開発し、三次元詳細ジェット及び液滴挙動を扱う事を可能にした。JAEAへの委託により円筒座標系溶融燃料－冷却材相互作用解析コードJASMINEの溶融ジェット分裂モデルを改良し、水蒸気爆発を良好に再現できた。これにより、当初の目的を達成した。

② 溶融炉心-コンクリート相互作用解析コードの開発

三次元溶融炉心-コンクリート相互作用解析コードCORCAABを開発し、三次元のMCCIを詳細に解析可能とした。また、溶融デブリ内の対流熱伝達モデルの開発を行い、MCCIに関する不確実さの低減を図ることができた。これにより、当初の目的を達成した。

8. 成果目標に対する達成状況 (2/3)

③ キャビティ注水時のデブリ冷却性解析コードの開発

決定論的アプローチと確率論的アプローチに基づく二種類の解析コードを開発し、以下のように、当初の目的を達成した。

- 決定論的アプローチに基づくモジュール型コードシステム THERMOSを開発した。構成するJBREAK、DPCOOL、MSPREAD及びREMELTの4コード並びにこれら複数コード間のインターフェイスを開発した。THERMOSコードシステムによって実機BWRの詳細デブリ挙動を解析することを可能とした。
- 確率論的アプローチでは、JAEAへの委託作業によりJASMINEコードに集積デブリ形成及び溶融物の拡がり挙動モデルを追加し、格納容器内デブリ冷却成功確率の評価を可能とした。

8. 成果目標に対する達成状況 (3/3)

④ 「放射性物質生成・移行・除去解析コードの開発」では、以下の二分野について取り組み、当初の目的を達成した。

- 「化学反応を考慮したソースターム評価手法の開発」では、JAEA への委託作業により重大事故総合解析コードTHALES2に詳細化学反応速度及び化学平衡組成モデルを導入し、BWRプラント事故時におけるFP生成挙動評価を高度化した。これにより、放射性物質の化学形態を考慮してソースターム評価が可能となった。
- 「エアロゾルスクラビング除去モデルの開発」では、国立大学法人筑波大学への委託作業により「軽水炉の重大事故の重要物理化学現象に係る実験」で実施した「プールスクラビング実験」から得られた知見に基づき気泡から液相へのエアロゾル移行挙動解析コードを開発した。

9. 今後の展開

本研究で開発した3次元非定常のデブリベット形成に関する解析コードTHERMOSにより、高い空間及び時間解像度での溶融物の落下及び拡がり挙動の解析が可能となった。

令和5年度からの新規プロジェクトにおいて、総合重大事故解析コード等による事故進展解析結果を境界条件として、このTHERMOSコードを用いた溶融炉心挙動評価を実施する予定である。

これにより、溶融デブリの形態やその分布挙動に係る不確実さを低減することができる。特に、ペDESTALに冷却水がない条件及びある条件でのデブリ挙動について評価を行うことによって、溶融デブリの冷却促進のためのペDESTALへの事前注水等の重大事故緩和対策の有効性評価に資することが期待される。

END