

安全研究成果報告（中間）（案）説明資料

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

中間評価 説明資料

令和元年10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. 研究概要
2. 令和元年度までの主要成果
 - 2.1. 溶融燃料-冷却材相互作用解析コードの開発
 - 2.1.1. JBREAKの開発
 - 2.1.2. JASMINEの改良
 - 2.2. 溶融炉心-コンクリート相互作用解析コードの開発
 - 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
 - 2.3.1. 重要現象同定とモデル化の方針
 - 2.3.2. 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
 - 2.3.3. 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
 - 2.4. 放射性物質生成・移行・除去解析コードの開発
 - 2.4.1. プラント内放射性物質移行解析コードの開発
 - 2.4.2. エアロゾルプールスクラビング除去モデルの開発
3. まとめ
4. 今後の展開
5. 成果の活用について
6. 成果の公表等
7. 今後の研究計画(行程表)

1. 研究概要(1/2)

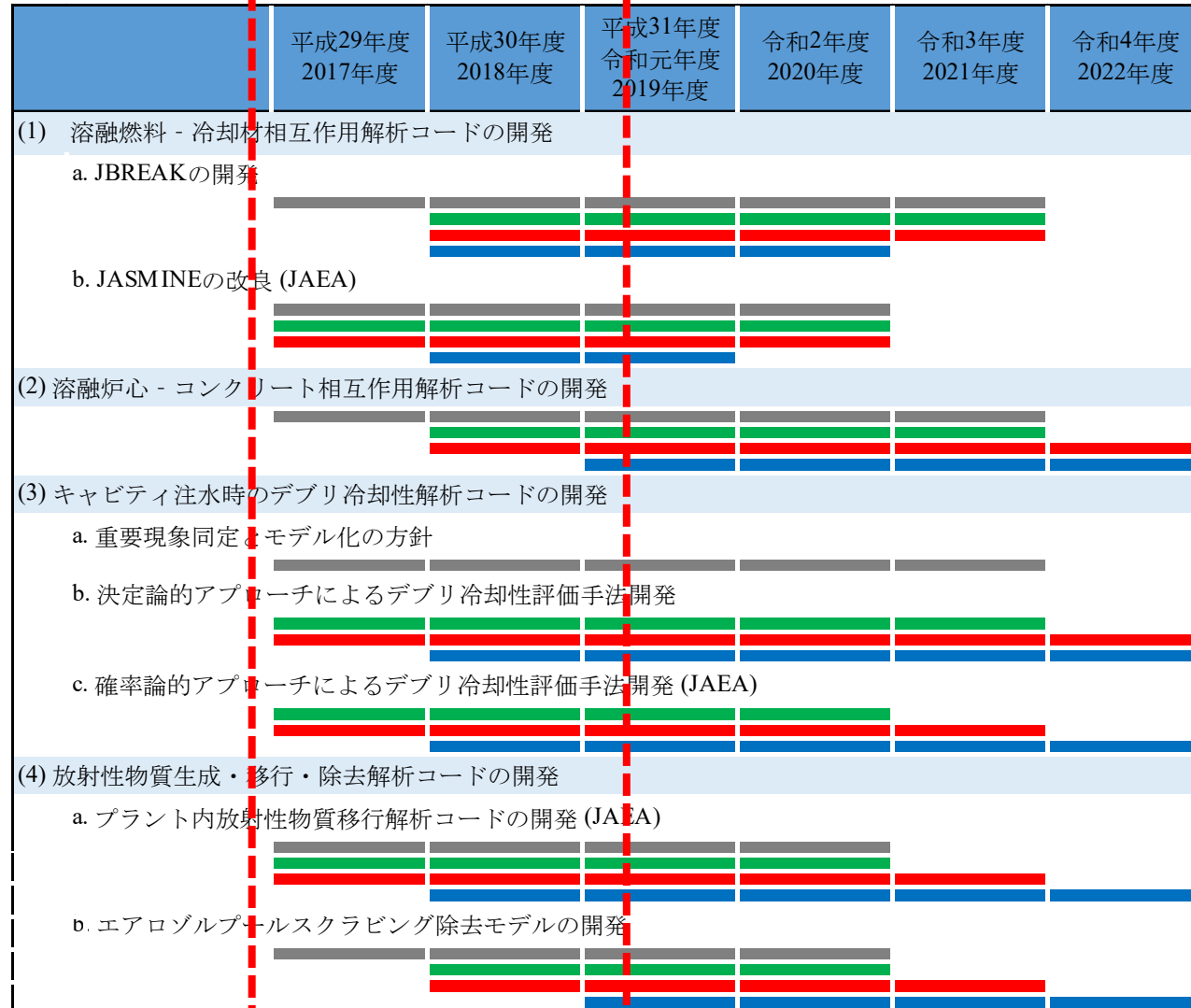
重大事故時の格納容器機能維持への脅威となる物理化学現象については、解析コードによる予測に大きな不確実さを伴う領域が存在し、これらに関するモデル化に必要な現象理解を進めるための研究が国内外において継続的に進められている。モデル開発上、不確実性が大きなものとして以下が挙げられる。

- a. 原子炉圧力容器外の溶融燃料-冷却材相互作用(FCI)及び溶融炉心-コンクリート相互作用(MCCI)
- b. 原子炉圧力容器内外のデブリベッド冷却性
- c. 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

以上の領域を対象とし、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。

1. 研究概要(2/2)

中間報告の範囲



2. 令和元年度までの主要成果(1/24)

2. 1. 溶融燃料 - 冷却材相互作用解析コードの開発

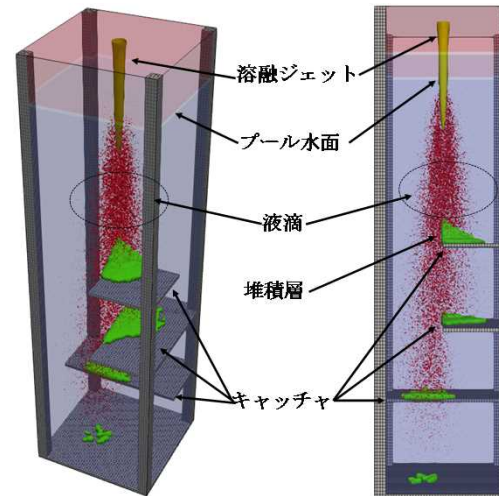
2. 1. 1. JBREAKの開発(1/2)

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。
これらの知見は、デブリベッド形成のみならず、FCI評価の不確実性低減につながる。

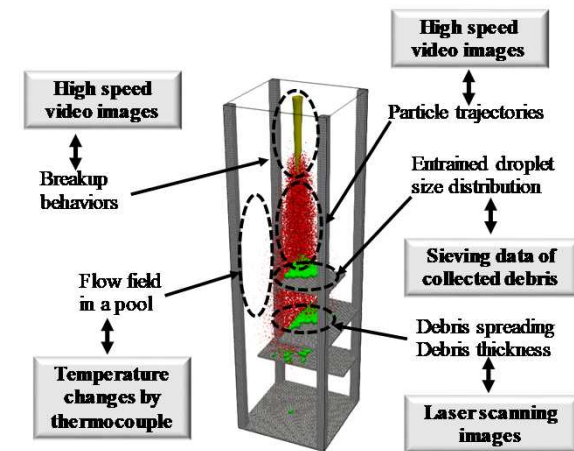


JBREAKコードの開発

- 三次元体系の保存則
- THINC/WLIC法に基づく界面追跡法
- 原子炉圧力容器(RPV)からの任意方向の溶融デブリ放出、溶融ジェット分裂挙動等



DEFOR-A試解析例



JBREAK妥当性確認計画

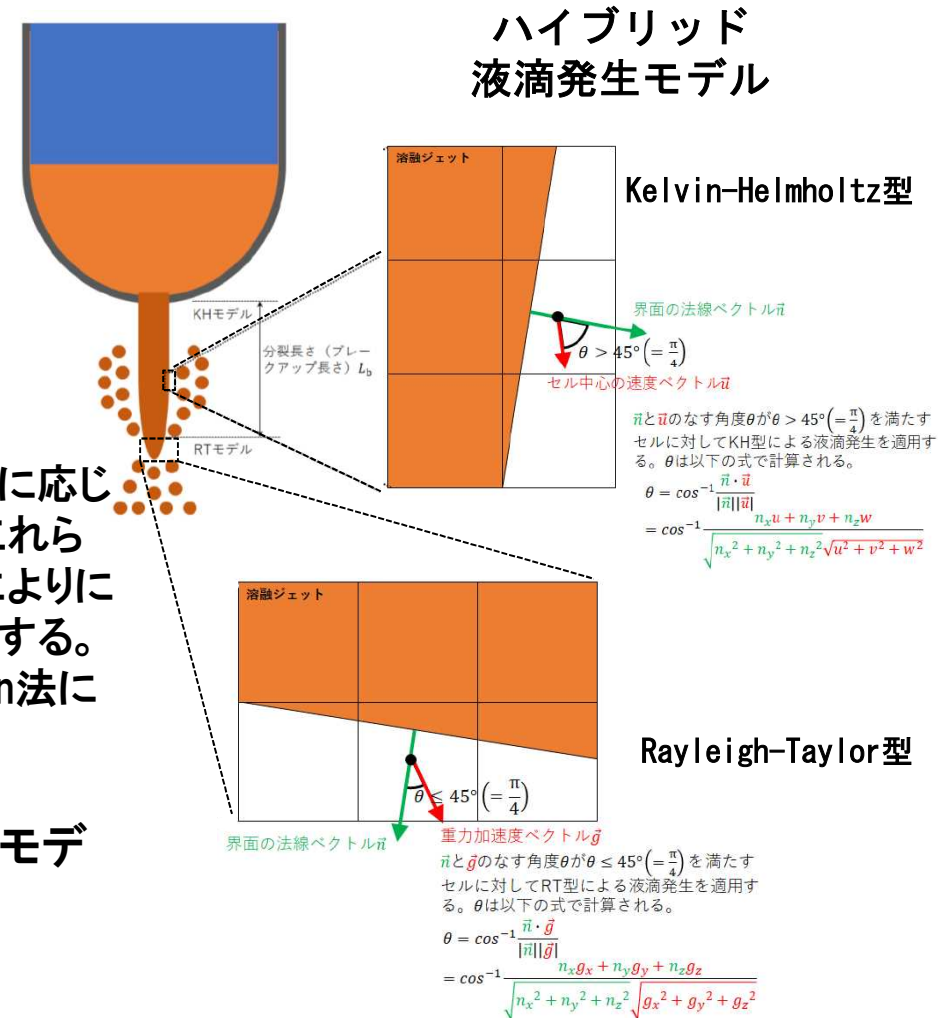
2.令和元年度までの主要成果(2/24)

2.1. 溶融燃料 - 冷却材相互作用解析コードの開発

2.1.1. JBREAKの開発(2/2)

これまでの実績

- 1) 溶融物放出モデル:
 - ✓ 中心軸近傍の貫通口から下方への放出
 - ✓ 金属層の成層化により周辺部に熱流束が集中する等の原因による中心からずれた位置からの斜め横方向放出を考慮した。
- 2) 液滴発生・ランダムウォーク:
 - ✓ 液滴発生は溶融ジェット-周囲冷却材の界面角度に応じ、Kelvin-Helmholtz型、Rayleigh-Taylor型、及びこれらをジェット分裂長に対する溶融ジェット内の位置により使い分けるハイブリッドモデルに基づきモデル化する。
 - ✓ 液滴飛跡をプール液相乱流場に基づくLagrangian法により追跡。
- 3) ジェット本体の周囲冷却水及び液滴冷却のモデルを組み込み。



2.令和元年度までの主要成果(3/24)

2.1. 溶融燃料 - 冷却材相互作用解析コードの開発

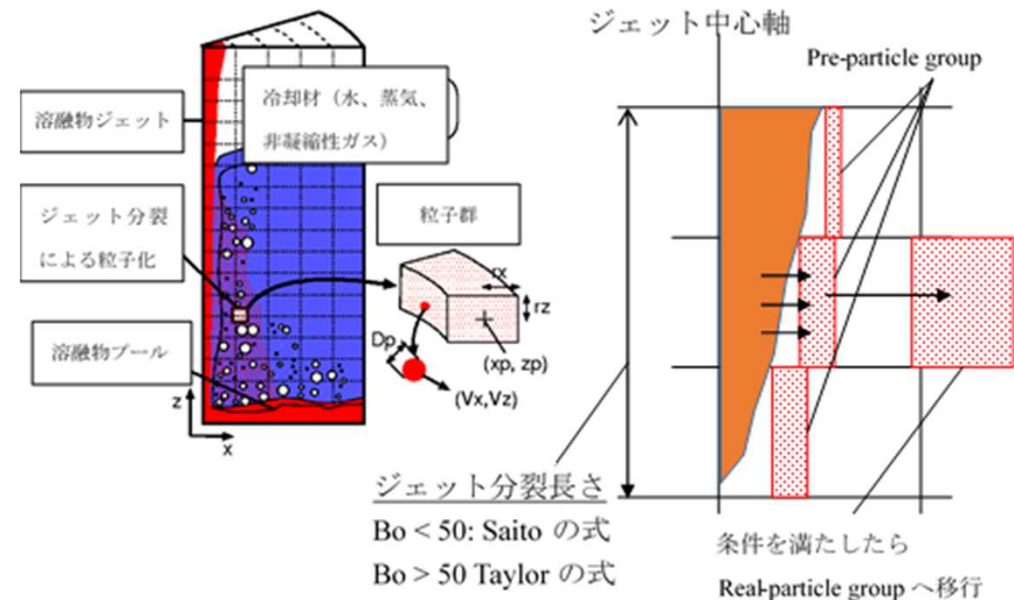
2.1.1. JASMINEの改良(1/2)

JASMINE(旧JAERIにおいて開発され溶融炉心-冷却材相互作用解析コード):

- 二次元軸対称(R-Z)体系
- 溶融物計算部と水・蒸気挙動計算部(水プール)に大別され定式化
- 液滴発生率 = ALPHA実験に既往実験データを加えたデータベースに基づく相関式。



JASMINEの液滴径分布の改良
オリジナルバージョンは単一液滴径であったが、本研究では、ALPHA実験等により液滴径分布をよく表すとされるRosin-Rammler分布を組み込むこととした。



JBREAKにおける液滴発生モデル概念

2. 令和元年度までの主要成果(4/24)

2.1. 溶融燃料 - 冷却材相互作用解析コードの開発

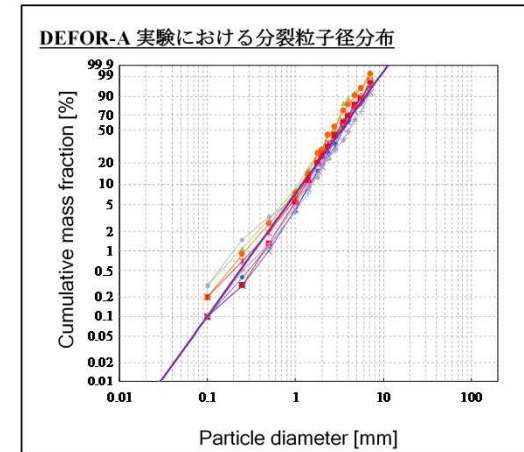
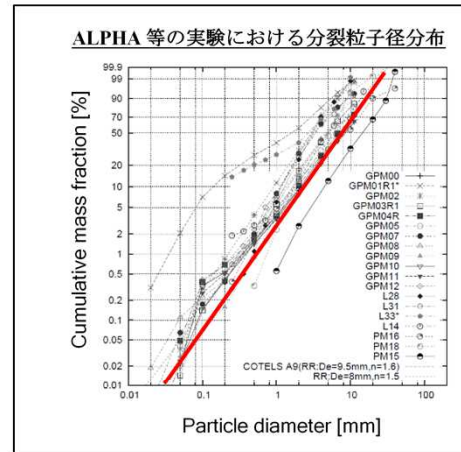
2.1.1. JASMINEの改良(2/2)

これまでの実績

Rosin-Rammler分布形によるALPHA等データベース及び規制庁がKTHと共同で実施したDEFOR-A実験にて得られたデータベースの再現解析により、統一のとれたパラメータ設定により液滴径分布を予測できることを確認し、集積デブリモデルとのインターフェイスを整備した。



FCI解析の初期条件として重要な予混合状態の予測精度が向上するだけでなく、後述するキャビティ内デブリベッド形成過程及び冷却性に対しても、有効な解析手法を提供することとなった。



Rosin-Rammler 分布の累積分布関数

$$F = 1 - \exp\left[-\left(\frac{D_p}{D_e}\right)^n\right]$$

D_p : 粒子直径

F : 粒子直径が D_p 以下の粒子の累積質量割合

D_e : absolute size constant

n : distribution constant

— Rosin-Rammler 分布累積分布関数 ($De=9.5, n=1.6$)

— Rosin-Rammler 分布累積分布関数 ($De=4.0, n=1.87$)

縦軸: 累積質量割合 ($\log(\log(1/(1-F)))$)でスケール修正

改良JASMINEによる液滴径分布と
ALPHAデータベース及びDEFOR-A実験結果の比較
(平成27年度成果)

2.令和元年度までの主要成果(5/24)

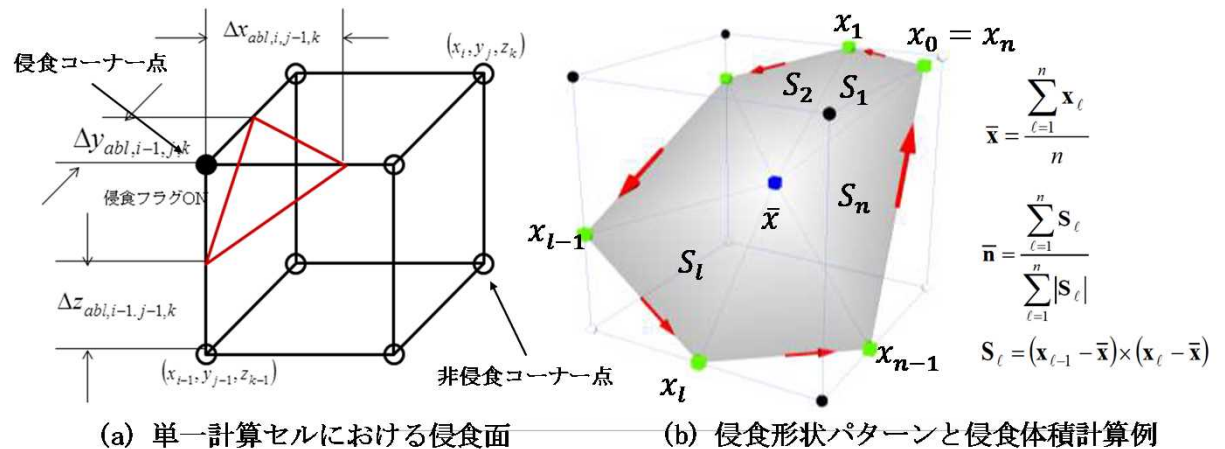
2.2. 溶融炉心 - コンクリート相互作用解析コードの開発 (1/2)

- OECD/CSNI/MCCI実験の一部ケースにおいて非等方侵食挙動が観察された。
- 縮小実験装置においてクラストが装置側壁に固着し溶融物とクラストの間に比較的大きな空間が生成され、冷却水が溶融デブリの直接接触による除熱を妨げる”アンカリング”と呼ばれる効果についても観察された。
- 実験結果を解釈し実機プラントに適用する場合に不確かさが存在する。
- 実機プラントのキャビティ形状は複雑であり、非対称浸食が発生する。



三次元解析MCCIコード
CORCAAB(CORium - Concrete
Anisotropic Ablation)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VOF法の一種であり、界面追跡誤差の小さいPLIC法をベースに開発した。



CORCAABに組み込んだ三次元侵食アルゴリズム

2.令和元年度までの主要成果(6/24)

2.2. 溶融炉心 - コンクリート相互作用解析コードの開発 (2/2)

三次元コンクリート侵食フロント追跡アルゴリズムの機能確認:

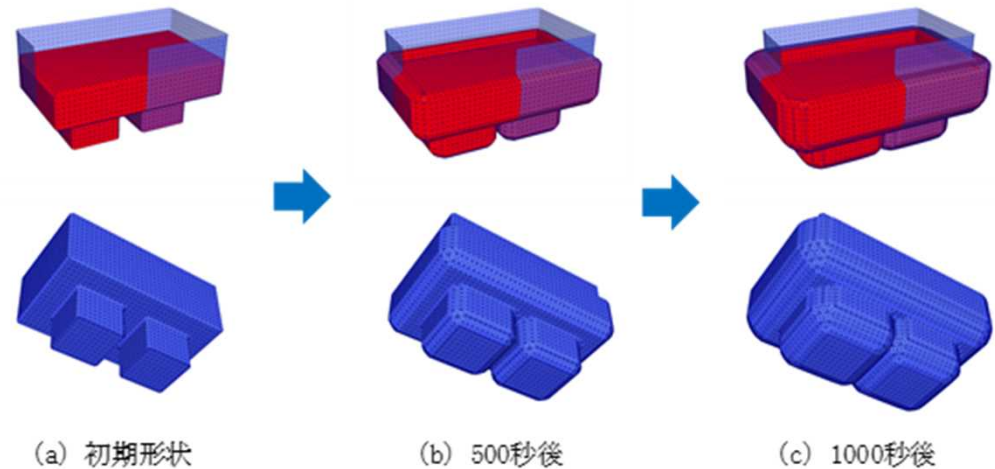
- 試解析のため、クラスト成長モデル、溶融デブリ-クラスト熱伝達モデル、溶融デブリ/クラスト - コンクリート熱伝達モデル等を組み込んだ。
- 実機プラントのキャビティにおいて想定される複数の非対称侵食体系に対する試解析を実施し、アルゴリズムとしての機能を確認した。

二箇所のサンプルを有するキャビティ形状に対する解析例

本図から、コンクリート侵食によって二つのキャビティ空間が合体するまでの過程を適切に追跡できることを確認した。その他、ドレイン管内溶融デブリ、キャビティ周辺、機器搬入口等の形状を想定した試解析を実施している。



今後は、溶融デブリ対流、コンクリート・スラグ境界における流動を考慮し、キャビティ内のグローバルな熱流束分布を求めるモデル化し、既往のMCCI実験に基づく妥当性確認を計画している。

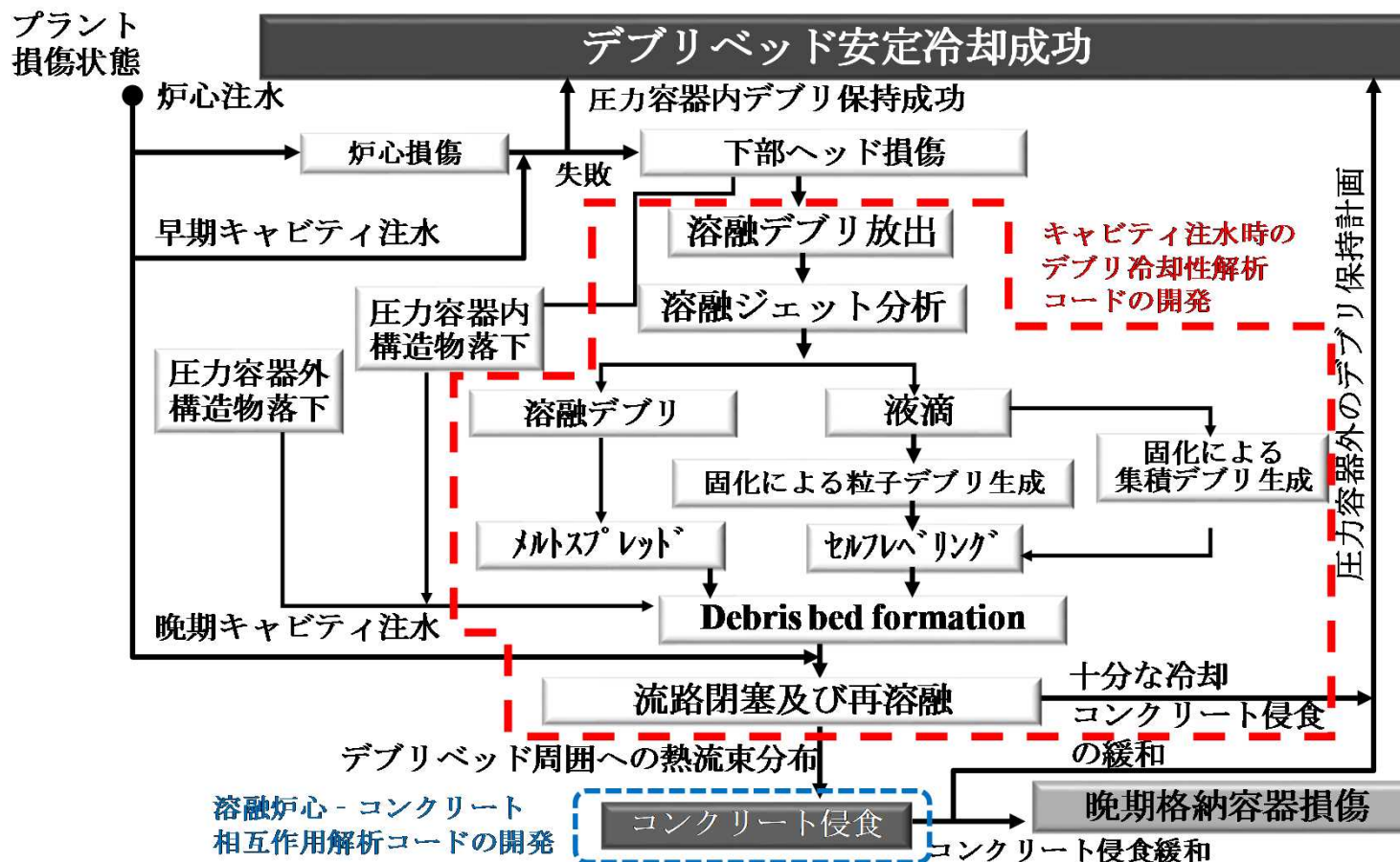


(a) 初期形状 (b) 500秒後 (c) 1000秒後
CORCAABによる2箇所サンプル付キャビティ侵食解析

2. 令和元年度までの主要成果(7/24)

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(1/14)

2.3.1. 重要現象同定とモデル化の方針(1/4)



2. 令和元年度までの主要成果(8/24)

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(2/14)

2.3.1. 重要現象同定とモデル化の方針(2/4)

1. 原子炉圧力容器下部ヘッド破損 ← FEM/CFDを組み合わせた解析手法が確立しており、コード開発の対象からは除外した。
2. 溶融ジェットのパール中での液滴化、液滴の固化・集積及び粒子デブリの堆積
3. パール中での溶融デブリ拡がり
4. キャビティ床面の堆積したデブリベッド内の二相流動を介した伝熱流動
5. デブリベッド内の形態変化(セルフレベリング)
6. デブリベッド内の形態変化(粒子層への溶融相浸透/酸化物、金属等の物質相互作用)

2.令和元年度までの主要成果(9/24)

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(3/14)

2.3.1. 重要現象同定とモデル化の方針(3/4) (重要現象ごとの実験データベース)

| 同定された重要現象 | 公開文献データ | 新たに実施した実験 |
|---|---|-------------|
| I: 溶融ジェットのパール中液滴化、液滴固化・集積及び粒子デブリの堆積 ブレークアップ長等の分裂挙動、液滴の飛跡、粒子デブリサイズ、集積デブリ生成割合等 | FARO, COTELS, JAEA | DEFOR-A |
| II: パール中での溶融デブリ拡がり 溶融ジェットの床面衝突、溶融デブリ温度過渡変化、上下面クラスト成長、溶融デブリ - クラスト - 床/パール・雰囲気熱伝達、非等方的拡がり等 | KATS, ECOKATS, VULCANO-VE-U7 | PULiMS |
| III: キャビティ床面の堆積したデブリベッド内の二相流動を介した伝熱流動 流体 - 粒子間摩擦、気液界面摩擦、流体 - 粒子熱伝達、粒子 - 構造他との熱伝達、CCFLによるドライアウト、粒子層ポロシティ等 | DEBRIS COOLOCE | 実験計画中 |
| IV: デブリベッド内の形態変化(セルフレベルリング) 粒子層 - 気体摩擦、重力、浮力 | ANL, PDS, JAEA | |
| V: デブリベッド内の形態変化(粒子層への溶融相浸透/ 溶融金属の粒子表面での接触角、粒子層ポロシティ、粒子層温度分布、物質相互作用(共晶等) | 酸化物、金属等の物質相互作用) MP-2, MASCA, PHEBUS-FP | REMCOD1/2/3 |

赤字は既に解析を実施した実験

2.令和元年度までの主要成果(10/24)

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(4/14)

2.3.1. 重要現象同定とモデル化の方針(4/4)

(二段階アプローチの選択)

- 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。
- 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。

| No. | 個別現象 | 高解像度 決定論的 | 中解像度 確率論的 |
|-----|---------------------------------|--------------|--------------|
| ① | 高温熔融ジェットのパール内の分裂に伴うデブリベッド形成関連現象 | | |
| a | 熔融ジェット分裂 | ○ | ○ |
| b | 熔融液滴集積 | ○ | ○ |
| c | 粒子状デブリ堆積 | ○ | ○ |
| d | 熔融デブリ着床 | ○ | ○ |
| ② | プール内に冠水したデブリベッド内二相流動を伴う伝熱現象関連現象 | | |
| a | プール-発熱粒子堆積層-熔融デブリ体系二相伝熱流動 | ○ | - |
| b | 粒子のセルフレベルリング | ○ | - |
| c | 蒸気流及び乱流中の微小粒子の浮遊拡散 | ○ | - |
| ③ | キャビティ床面上のメルトスプレッド挙動関連現象 | | |
| a | 熔融物のヘッドにより駆動される拡がり | ○ | ○ |
| b | 熔融デブリの上面及び下面における熱伝達 | ○ | ○ |
| c | 熔融デブリの上面及び下面におけるクラスト形成 | ○ | ○ |
| d | 熔融物内固化による粘性変化 | ○ | ○ |
| ④ | デブリベッド内の固化相-熔融相の相互作用関連現象 | | |
| a | 高温固相(酸化物)粒子堆積層内での低温熔融層(金属)の流動 | ○ | - |
| b | 粒子堆積層内の流路閉塞による高温固相の再熔融 | ○ | - |
| c | 温度勾配によるクラスト形成、熔融プール形成 | ○ | - |
| ⑤ | 熔融炉心-コンクリート相互作用(MCCI) | | |
| a | 側面等を含む非対称キャビティ内での浸食 | ○ | - |

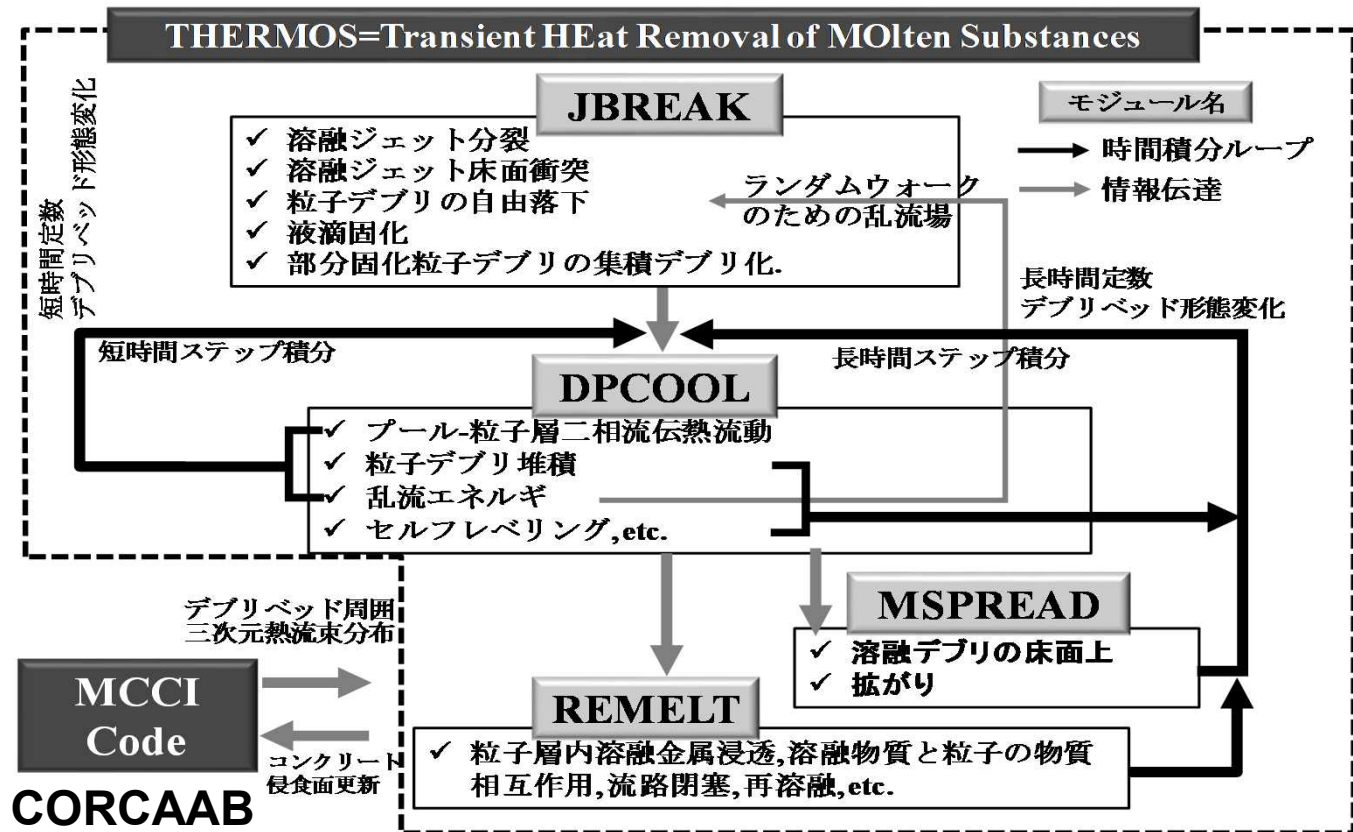
2.令和元年度までの主要成果(11/24)

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(5/14)

2.3.2. 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(1/7)

(THERMOSの開発)

- 4個のモジュールから構成される。
- 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。
- このようなコンセプトに基づき、扱う現象の幅を柔軟に選択できる。



THERMOSのモジュール構成と情報のやり取り

2.令和元年度までの主要成果(12/24)

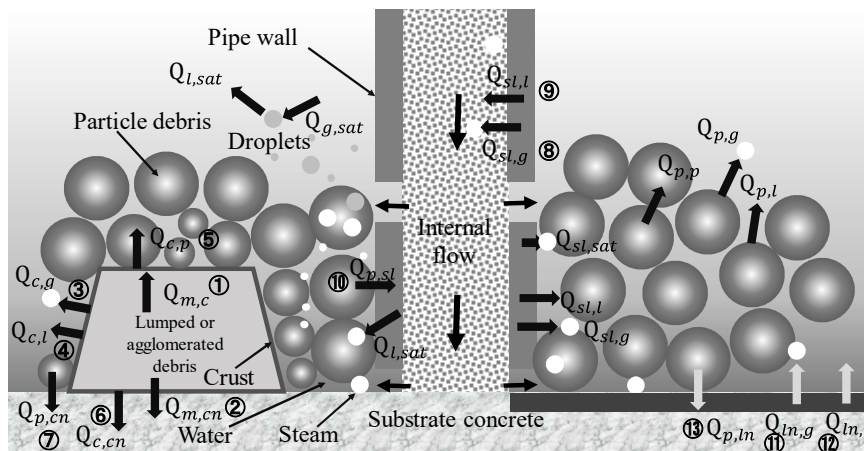
2.3. キャビティ注水時のデブリ冷却性解析コードの開発(6/14)

2.3.2. 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(2/7)

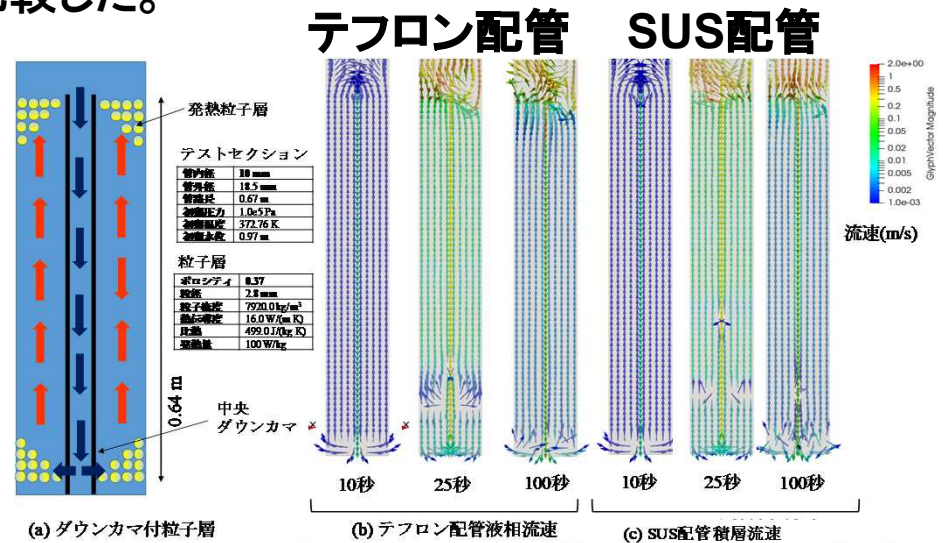
(DPCOOLの開発)

種々の構成要素間の熱伝達係数モデルを組み込んだ。特に、発熱粒子が構造材に接する場合の冷却性評価において重要な熱伝達モデルとして、Fukuoka等が提案した粒子-壁面接触に二相流対流熱伝達を組み合わせた熱伝達係数モデルを組み込んだ。

IKEが実施した中央ダウンカマ体系発熱粒子流動実験に基づき、構造壁面がテフロン又はステンレス鋼の場合の熱伝達の及ぼす効果を比較した。



非均質デブリベッド内の構成要素間熱伝達



(a) ダウンカマ付粒子層

(b) テフロン配管液相流速

(c) SUS配管液相流速

IKEによる中央ダウンカマ体系に対する解析

2.令和元年度までの主要成果(13/24)

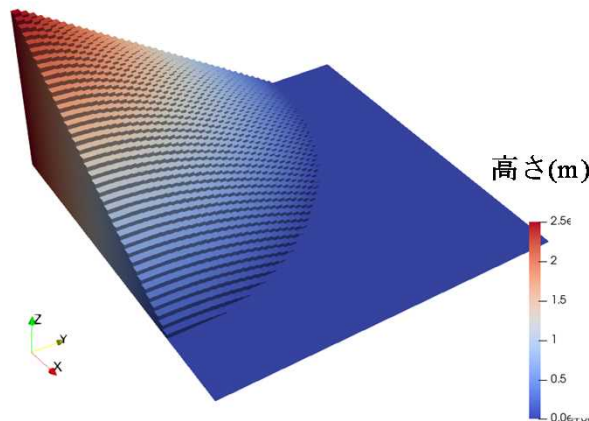
2.3. キャビティ注水時のデブリ冷却性解析コードの開発(7/14)

2.3.2. 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(3/7)

(セルフレベリングモデルの開発)

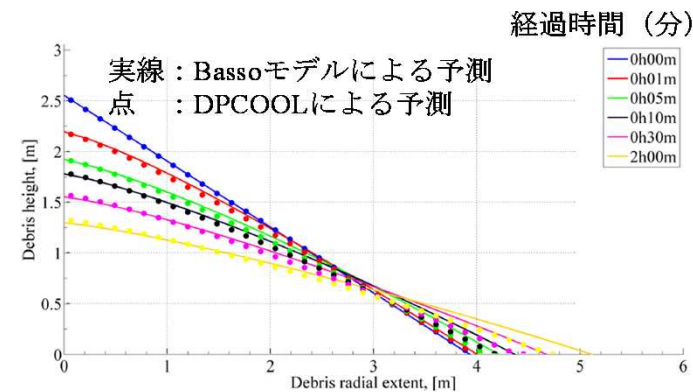
蒸気攪拌により発生する粒子デブリのセルフレベリングは、Basso等によって提案された重力、浮力、粒子間摩擦力及び蒸気攪拌のバランスに基づき発生する粒子層表層近くの粒子群のマクロな一次元的質量流束モデルを三次元体系に修正したモデルが組み込まれた。

回転対称コーン形状のデブリベッドについてKTH-PDS実験と同等の条件下にて機能確認のための計算を行った。



(a) 回転対象コーン型粒子層

回転対象コーン体系



(b) BassoモデルとDPCOOLの比較

KTH Basso等によるPDS実験との比較

2.令和元年度までの主要成果(14/24)

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(8/14)

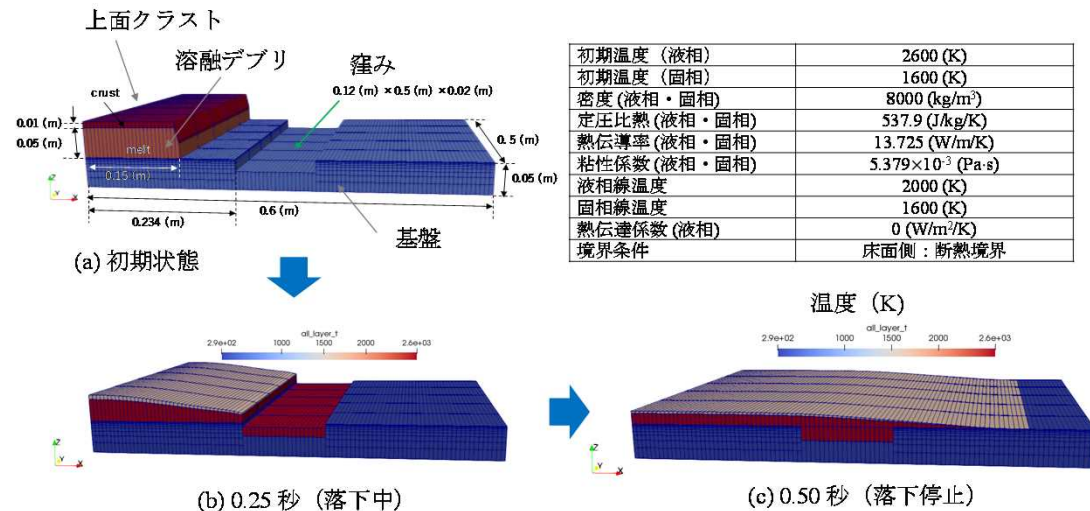
2.3.2. 決定論的アプローチに基づくデブリ冷却性評価手法開発(4/7)

(MSPREADの開発)(1/2)

既往実験解析及び実機プラント予測に必要な各モデルを組み込んだ。

- 溶融物又はクラスト上面とプール水間の摩擦及び溶融物抗力
- コンクリート分解ガス発生
- コンクリート分解ガスの溶融物攪拌による温度分布変化
- コンクリート分解ガスによる底面接触面積変化を考慮した床面/クラストとの摩擦
- コンクリート熱伝導
- Sump sinkモデル

窪みへの溶融物の落下量を溶融デブリが窪み部境界を通過する間の自由落下量として計算し、窪み部を飛び越える溶融物はこの落下量を差し引くことで求める。窪み部が満たされた場合には、窪み部への落下を停止させる。



Sump sinkモデルの機能確認

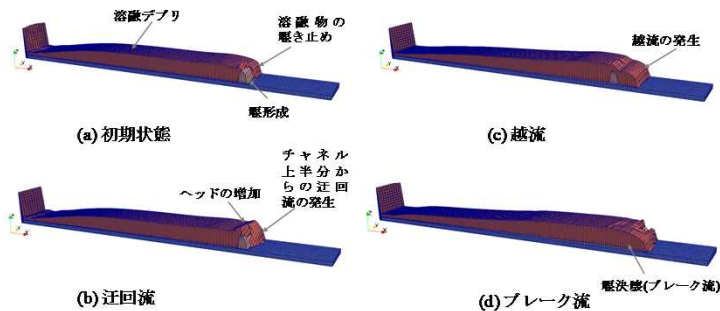
2.令和元年度までの主要成果(15/24)

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(9/14)

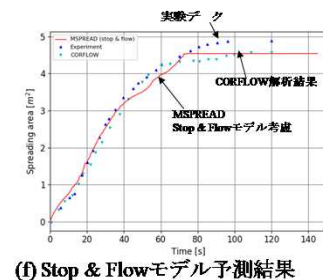
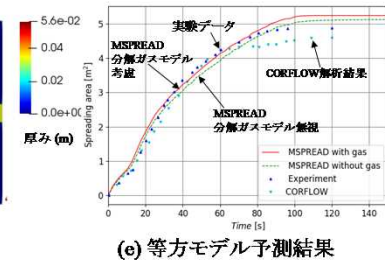
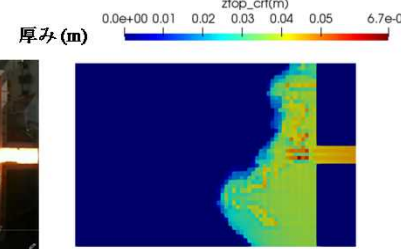
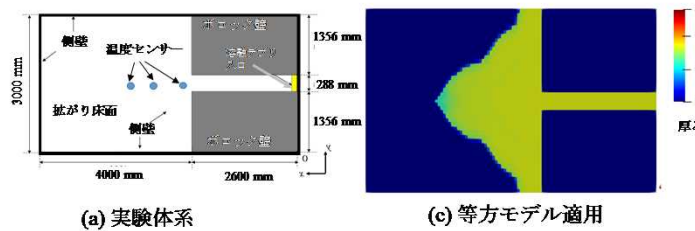
2.3.2. 決定論的アプローチに基づくデブリ冷却性評価手法開発(5/7)

(MSPREADの開発)(2/2)

平面床上の非等方流れを表すため、拡がり先端にフローティングクラストが集積し堰が形成され後続の流れをブロックし、越流、迂回流、堰の決壊による漏えい流により再流動化が発生し非等方に拡がる過程をStop & Flowモデルにより表現した。本モデルは、旧FZKが実施したECOKATS-1実験結果により機能を確認した。



Stop & Flowモデル
による3パターンの非等方流れ



ECOKATS-1実験に基づく
Stop & Flowモデルの機能確認

2.令和元年度までの主要成果(16/24)

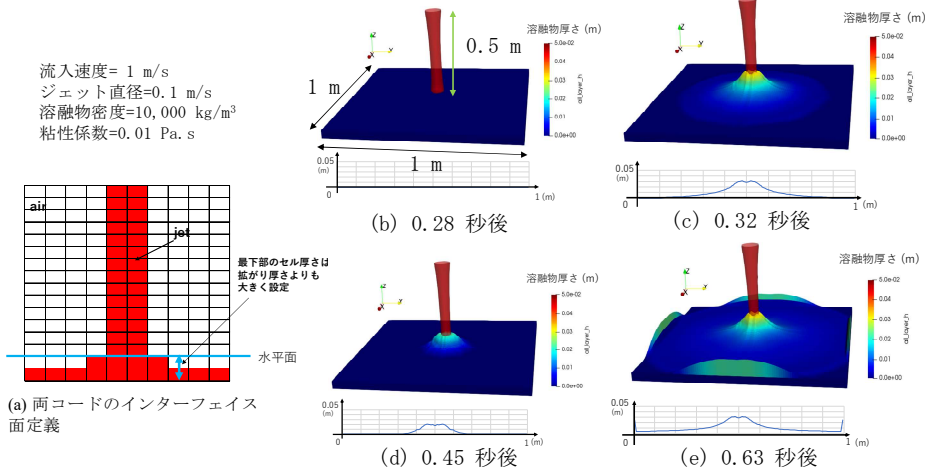
2.3. キャビティ注水時のデブリ冷却性解析コードの開発(10/14)

2.3.2. 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(6/7)

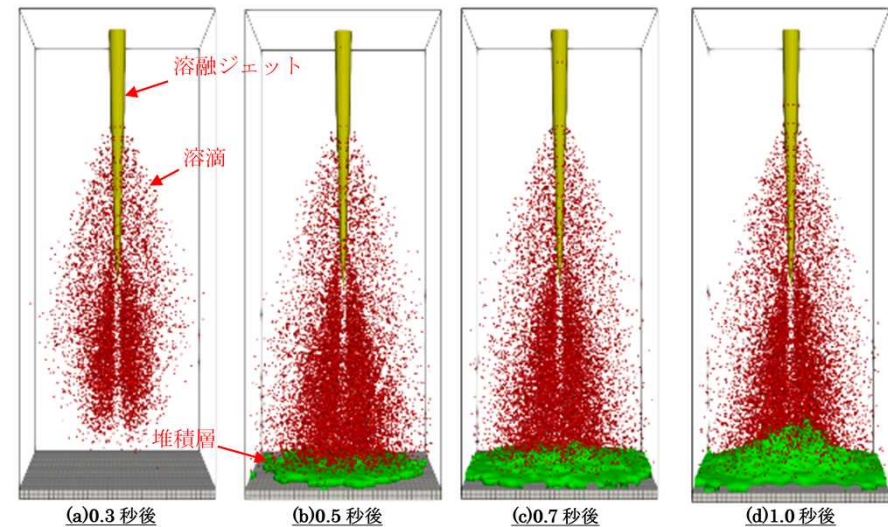
(JBREAKの開発)

デブリ堆積モデルにおける他モジュールとのインターフェイス構築を進めた。

- デブリ堆積ロジック (単一落下の範囲)
 - 粒子デブリ — DPCOOL又はMSPREADにおいてデブリベッドに吸収される。
 - 溶融デブリ — 面上セルでの溶融ジェットの径方向速度成分をMSPREADに受け渡す。
- 液滴落下飛跡 — 液相乱流場に基づき液滴のランダムウォークモデルを計算する。



JBREAK-MSPREADカップリング解析例



JBREAK-DPCOOLによるランダムウォーク計算例

2.令和元年度までの主要成果(17/24)

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(11/14)

2.3.2. 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(7/7)

(REMELTの開発)

炉心損傷後期とクラスト形成による溶融プール形成、再溶融等を対象とするモデル化情報を収集した。

1. 高温酸化物-溶融金属等の物質間相互作用現象に関する文献を調査し、

- 1) 炉心溶融物内の物質相互作用に関する重要現象と 関連する実験データベース
- 2) 既往コードにおけるモデリングアプローチ
- 3) 物質相互作用モデル化例

についてまとめるとともに、物質間相互作用の保存式及び構成方程式の定式化に必要な情報を整理した。

2. 以上の情報収集に基づき、コーディングの第一段階として、物質相互作用を含まない低融点金属の固体粒子層への浸透流を扱う範囲にてプロトタイプコードの開発を進めることとした。この体系では、溶融金属と粒子表面の接触角に支配される毛細管力、静水頭及び溶融金属-粒子層摩擦力のバランスに従って溶融金属の浸透流が支配される。

2.令和元年度までの主要成果(18/24)

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(12/14)

2.3.3. 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(1/3)

(JASMINE改良によるデブリベッド冷却性に関する基本的考え方)

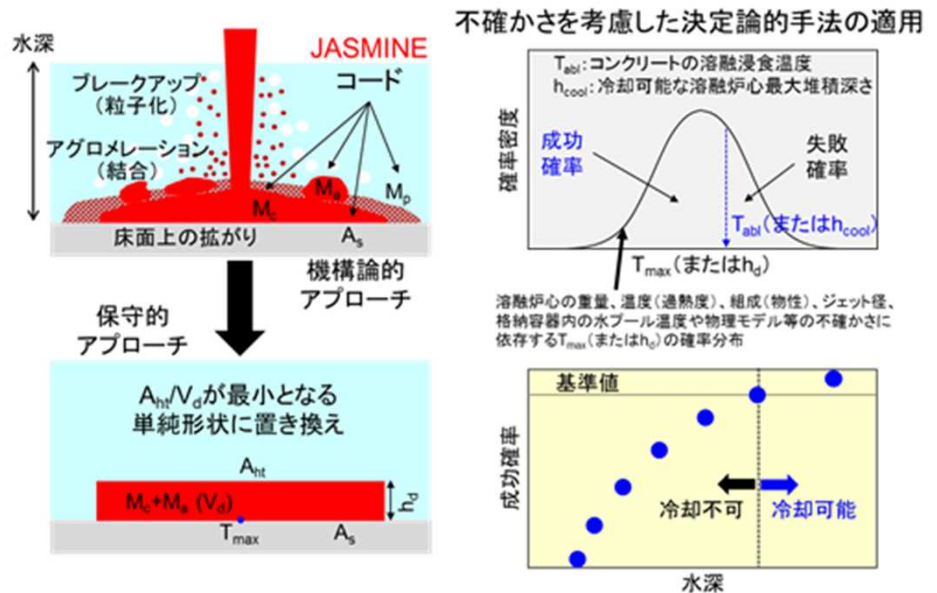
デブリベッドにおいて冷却性の観点で重要なものは、重量当たりの伝熱面積が小さく冷却されにくい塊状デブリと集積デブリであるため、これらをまとめて円盤状の堆積物と見なし冷却性の簡易評価を行う。



円盤の上下面からの除熱のみを考慮した場合、床面との境界温度は堆積高さ(図中の h_d)で決まるため、

- ◆ 塊状デブリ重量(図中の M_c)
- ◆ 集積デブリ重量(同 M_a)
- ◆ 床面拡がり面積(同 A_s)

が得られれば、境界温度が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)を判断できる。



JASMINE改良による溶融炉心冷却成功確率評価手法の概念図

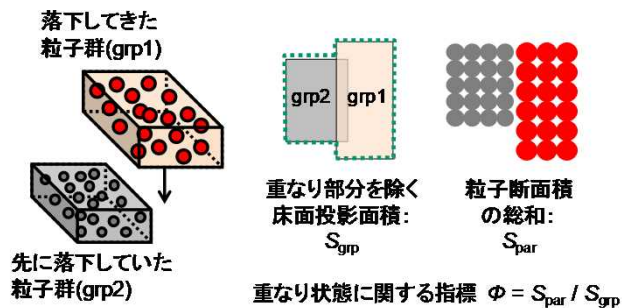
2.令和元年度までの主要成果(19/24)

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(13/14)

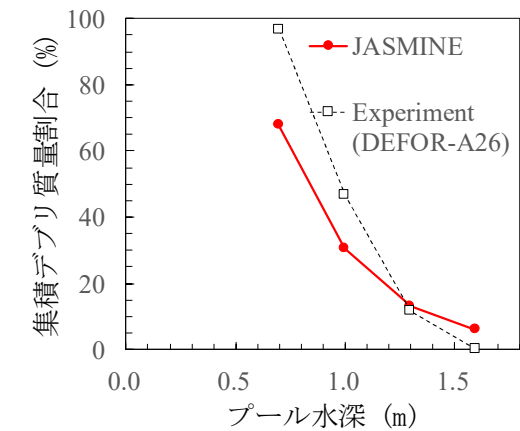
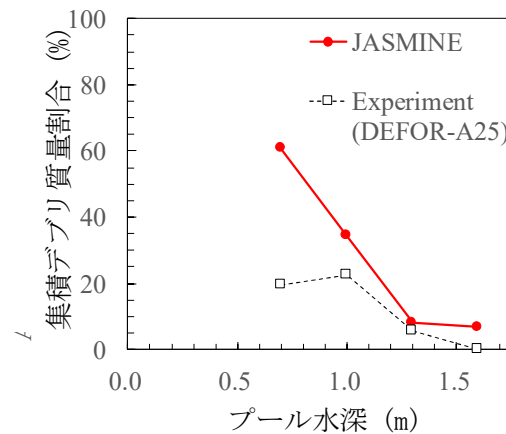
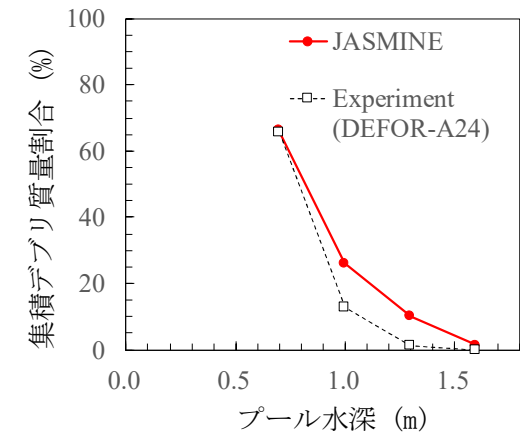
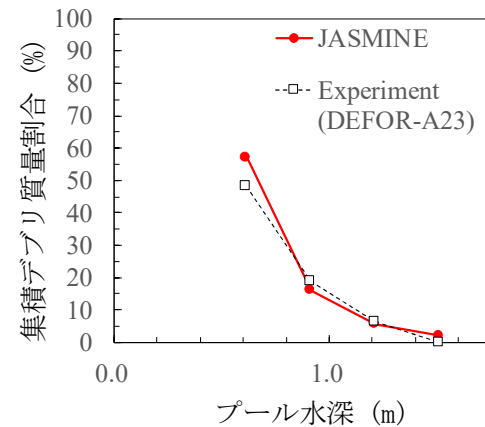
2.3.3. 確率論的アプローチに基づくデブリ冷却性評価手法開発(2/3)

(JASMINE改良による集積デブリ生成予測)

粒子群の位置や大きさで決まる粒子群同士の重なり状態を表す指標を導入し、これを判定基準と比較することで集積発生を機構論的に判定する。モデルの調整及び検証には、KTHで実施されたDEFOR-A実験で得られた集積デブリ割合データを用いた。



液滴群同士の相互作用



DEFOR-Aにおける集積デブリ質量割合予測結果

2.令和元年度までの主要成果(20/24)

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(14/14)

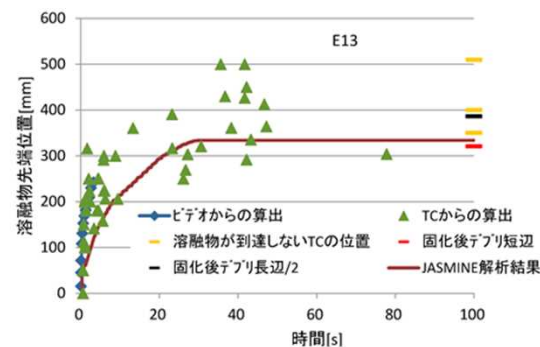
2.3.3. 確率論的アプローチに基づくデブリ冷却性評価手法開発(3/3)

(JASMINE改良による溶融物床上拡がり予測)

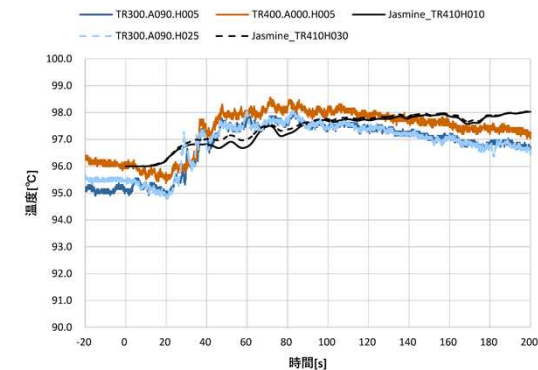
- 上面と下面クラスト成長モデルを組み込み。
- 熱伝達:クラストと溶融部境界は対流熱伝達、クラスト内部は熱伝導及びクラスト内浸水、クラストと水側境界は輻射及び沸騰熱伝達を考慮。
- 先端停止メカニズム:拡がり先端部のクラストの見かけの引張強度と拡がり駆動力とのバランスにより拡がりの停止を判断。
- 床面の熱伝導、コンクリート床材の分解による発生気泡による浮力を考慮。



PULiMS-E13実験結果との比較及びパラメータ調整により、最終的な拡がり面積を再現することに加えて、拡がりや水温上昇の時間変化をよく再現できることを確認した。



(a) 溶融物先端位置



(b) プール水温応答

PULiMS-E13における溶融デブリ拡がり及びプール水温予測結果

2. 令和元年度までの主要成果(21/24)

2.4. 放射性物質生成・移行・除去解析コードの開発(1/4)

2.4.1. プラント内放射性物質移行解析コードの開発(1/3)

総合SA解析コードTHALES2 をプラットフォームとして構築した化学モデルの検証を実施している。

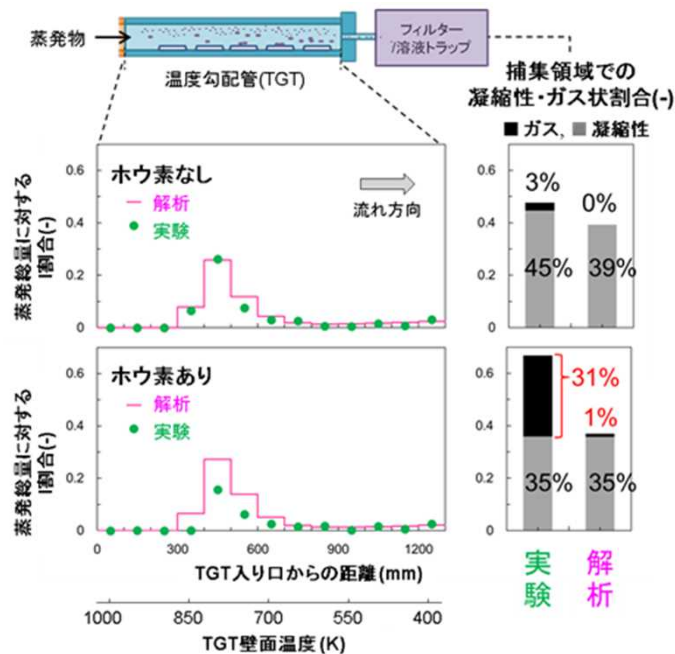
具体的アプローチ

1. **VICTORIA 2.0の化学モデルの妥当性確認**: 米国SNLが開発した原子炉冷却系内の化学挙動を考慮可能なVICTORIA2.0を用い、ホウ素影響に着目した仏CEAのVERDON実験及びJAEAの個別効果実験(AGF、TeRRa)を対象とした解析により同コードの妥当性確認を行っている。
2. **化学反応速度を考慮できるモデルの開発**: ヨウ素化学種については化学平衡近似が成立しない可能性を考慮し、化学種濃度を変数とした連立常微分方程式から成る支配方程式を解くモデルを開発し、本モデルに必要な化学反応経路及びその活性化エネルギーに関するデータベースの整備を進めている。
3. **化学平衡組成に関する代替統計モデルの開発**: 化学反応を考慮したSA解析時の計算負荷を削減するため、化学平衡近似の化学モデルを用いて広範囲の温度、元素組成条件に対する化学平衡組成を計算してデータベース化し、これに基づく代替統計モデルを構築した。

2.令和元年度までの主要成果(22/24)

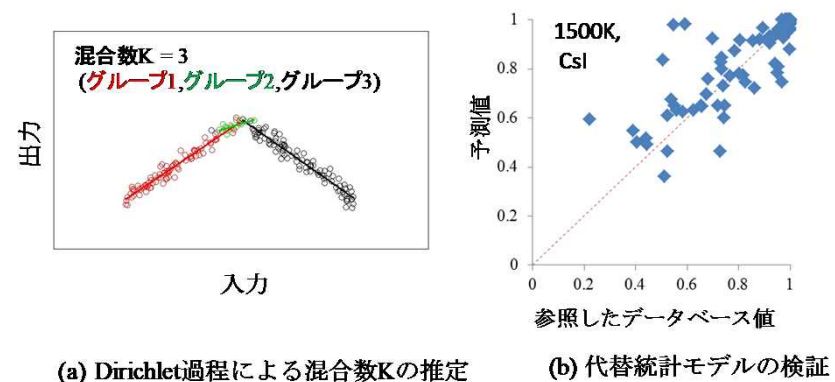
2.4. 放射性物質生成・移行・除去解析コードの開発(2/4)

2.4.1. プラント内放射性物質移行解析コードの開発(2/3)

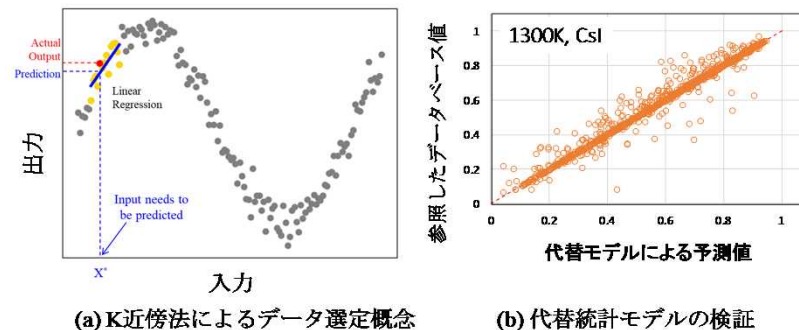


TeRRAコード実験(ホウ素環境ヨウ素沈着)に対するVICTORIA20予測結果

- * 温度勾配管内のヨウ素沈着分布
 - * 温度400 K以下の領域に到達したヨウ素化学種の凝縮性・ガス状別の割合
- 温度勾配管内のFP沈着分布はよく一致。凝縮性の移行化学種は実験で得られた沈着ピーク位置を解析により確認できた。



ノンパラメトリック・ベイズ法による線形回帰モデル



K近傍法による線形回帰モデル

各種代替モデルに関する適用事例

2.令和元年度までの主要成果(23/24)

2.4. 放射性物質生成・移行・除去解析コードの開発(3/4)

2.4.1. プラント内放射性物質移行解析コードの開発(3/3)

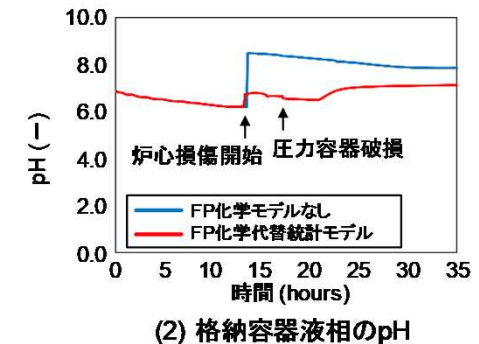
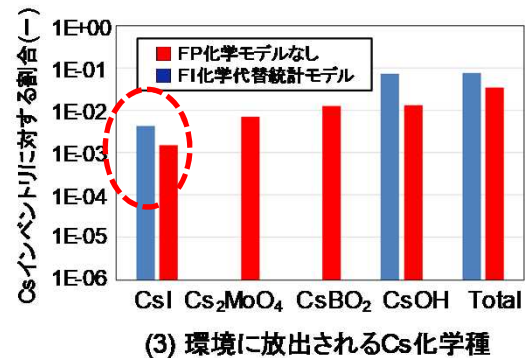
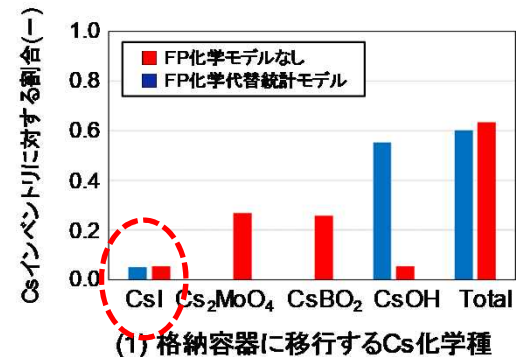
K近傍法を用いた代替統計モデルを導入することでISA解析コードTHALES2に原子炉冷却系内の化学計算機能を追加し、従来バージョンと比較を実施した。

BWR4/Mark-I全交流電源喪失:

- 従来バージョン:セシウム化学種が強塩基性のCsOHとして移行
- 制御材に含まれるホウ素の影響等によりセシウムがCsBO₂、Cs₂MoO₄等を含む様々な化学形で格納容器に移行



pHが1程度低下し、液相での分子状ヨウ素割合が増加する。
一方で、ヨウ素については化学反応度による評価が重要である。



注)「FP化学モデルなし」ではセシウムの化学形をCsIとCsOHに固定

2.令和元年度までの主要成果(24/24)

2.4. 放射性物質生成・移行・除去解析コードの開発(4/4)

2.4.2. エアロゾルプールスクラビング除去モデルの開発

別プロジェクトとして実施したプールスクラビング実験から得られたデータベースを
基に、総合SA解析コードのプールスクラビングモデルの改良方針を検討した。

小規模実験(筑波大学)

- 高解像度二相流計測
 - ✓ 移動型立体デジタル後続カメラ
 - ✓ ワイアメッシュセンサ (WMS)
 - ✓ 粒子画像流速測定法(PIV)
 - ✓ マッハ・ツェンダー干渉計
- 単一気泡挙動
 - ✓ 気泡上昇速度
 - ✓ プール内上昇中アスペクト比変化
 - ✓ エアロゾル補足速度
 - ✓ エアロゾル物質(BaSO₄ / シリカ / CsI)
- 気泡群挙動
 - ✓ 縦断面及び断面ボイド分布
 - ✓ 気泡スウォーム上昇速度
 - ✓ 気泡ブルームサイズの上昇中変化
 - ✓ 気泡サイズの上昇中変化
 - ✓ 界面面積濃度
 - ✓ 気泡合体・分裂
 - ✓ エアロゾル物質(BaSO₄ / シリカ)

中規模実験(JAEA/安全研究センター)

- 実機より小規模な体系におけるDFデータベース取得
- 他の要素との相互作用を確認すべきと判断される個別効果を含む総合効果実験データの取得
 - ✓ より実機に近い気泡ブルーム上昇時の挙動
- より広い範囲で確認すべきと判断される総合効果データの取得
 - ✓ プール水温及びエアロゾル物質のDFの変化をどこまでへの影響

プールスクラビングモデルの改良/開発

- 二相流動
 - ✓ 気泡ブルーム構造(グローブユール分裂損/ 気泡スウォーム上昇ゾーン)
 - ✓ 初期グローブユール形状
 - ✓ 安定気泡径及びアスペクト比
 - ✓ 気泡上昇速度
 - ✓ 気泡スウォーム上昇速度
- ベント出口近傍におけるエアロゾル捕捉
 - ✓ 衝突
 - ✓ 遠心力沈着
 - ✓ 拡散沈着
 - ✓ 蒸気凝縮
- 気泡スウォーム上昇ゾーンにおけるエアロゾル捕捉
 - ✓ 界面速度(V_s)
 - ✓ 重力沈降 (V_g)
 - ✓ 遠心力沈着 (V_c)
 - ✓ ブラウン拡散(V_d)
 - ✓ プール液相からの蒸气流束 (V_v)
- 可溶性エアロゾルを含む液滴成長(CsI / CsOH)
 - ✓ 修正Mason方程式 及び Jokiniemi活性度[X], [X]

大規模実験(東芝 磯子エンジニアリングセンター)

- 実機相当スケール装置によるDFデータベース取得
- シビアアクシデント時の減圧条件の模擬
- DFに対する影響因子の同定
 - ✓ 一定圧 vs 減圧(減圧率=大中小)
 - ✓ エアロゾル物質(BaSO₄ / ポリマ/シリカ)
 - ✓ 注入ノズルの水面からの深さ
 - ✓ プール水温
 - ✓ 蒸気: 窒素
 - ✓ インジェクションノズル形状 (ベント/クウェンチャ)
 - ✓ プール内二相流動

3. まとめ

1. 「溶融燃料－冷却材相互作用解析コードの開発」では、三次元溶融ジェット分裂挙動を解析するコードJBREAKの開発を進め、平行してR-Z 体系FCI解析コードJASMINEにおいて液滴径分布モデルを整備した。
2. 「溶融炉心-コンクリート相互作用解析コードの開発」では、三次元非対称コンクリート浸食挙動を解析するコードとしてCORCAABの開発を進め、非対称コンクリート浸食形態に対するアルゴリズムの機能を確認し、その他の基本的モデルを組み込んだ。
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、デブリベッド形成と冷却に関連する重要現象を5領域に分類した。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では、溶融ジェット分裂、プール水中デブリ冷却、メルトスプレッド及びデブリベッド内の再溶融について解析コードTHERMOSの開発を進め、各コードのカップリング解析を念頭においてコード間インターフェイスの整備を進めた。確率論的アプローチによるデブリ冷却性評価手法開発では、JASMINEに溶融物粒子の集積挙動及び溶融物床面拡がり挙動のモデルを追加した。
4. 「放射性物質生成・移行・除去解析コードの開発」については、VICTORIA 2.0コードの化学モデルの妥当性確認、化学反応速度モデルの開発、化学平衡論に対する代替統計モデルの開発を進めた。また、小規模、中規模及び大規模とした3段階のスケールの実験から得られるデータベースに基づきプールスクラビング解析コードを改良方針をまとめた。

本研究は、2017年年度(平成29年度)から2022年度(令和4年度)までの6年間の実施工程に基づき進めており、平成30年度終了時点で、以下の通り予定していた項目についてほぼ計画どおりに進んでいる。

4. 今後の展開

- 課題
 - ✓ 格納容器機能維持に関わる現象については、既存のISA解析コードでは十分に考慮できない高い空間・時間解像度及び非平衡性を考慮することにより、重大事故解析における不確かさを低減することが基本的課題である。
 - ✓ 放射性物質生成・移行・除去に関わる現象については、プラントの広範囲を扱う必要があり、多数の化学反応の平衡及び速度、スクラビング等の現象を、どのようにして既存のISA解析コードにモデルとして考慮するかが基本的課題である。



- 今後の展開

最終的にソースターム評価の不確かさを低減するには、本研究の成果である解析コードと、そこから得られる解析結果を、多数の事故シナリオに基づくプラント全体挙動解析の中で考慮する方法についての検討を平行して行う必要がある。

5. 成果の活用について

- **プロジェクト期間内**

本研究の文献調査及び実験解析等を通じて得られた知見は、FCI、MCCI、デブリベッド形成・冷却性、ソースターム等に関する最新知見として有効性評価、安全性向上評価等の技術支援等に活用された。

- **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に、本研究で開発した複数の解析コードを活用していく予定である。

6. 成果の公表等

5.1 NRA技術報告

なし

5.2 論文投稿

- A) A. Hotta, M. Akiba, A. Konvalenko, W. Villanueva, S. Bechta, T. Matsumoto, T. Sugiyama and M. Buck, Experimental and Analytical Investigation of Formation and Cooling Phenomena, J. Nucl. Sci. Technol. (to be published), 2019. (査読中)
- B) 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.(査読あり)
- C) 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スクラビングに関する実験的研究, 日本原子力学会和文誌, 2019. (査読済、掲載決定)

5.3 国際会議プロシーディングス

なし

5.4 学会発表

- D) 堀田亮年, 秋葉美幸, 森田彰伸, MSPREADコードによる溶融デブリの非等方的拡がりモデル化とECOKATS実験解析, 日本原子力学会 秋の大会 富山大学, Sep. 2019. (査読なし)
- E) 森田彰伸, 堀田亮年, 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 秋の大会 富山大学, Sep. 2019. (査読なし)

5.5 その他

なし

7. 今後の研究計画(行程表)

今後の実施範囲

当初計画どおり
に進んでいる。

| | 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 - 冷却材相互作用解析コードの開発 | | | | | | |
| a. JBREAKの開発 | | | | | | |
| b. JASMINEの改良 (JAEA) | | | | | | |
| (2) 溶融炉心 - コンクリート相互作用解析コードの開発 | | | | | | |
| (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の方針 | | | | | | |
| 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) | | | | | | |
| (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) | | | | | | |
| b. エアロゾルプールスクラビング除去モデルの開発 | | | | | | |

- 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

軽水炉の重大事故における格納容器機能喪失及び 確率論的リスク評価に係る解析手法の整備

中間評価 説明資料

令和元年10月

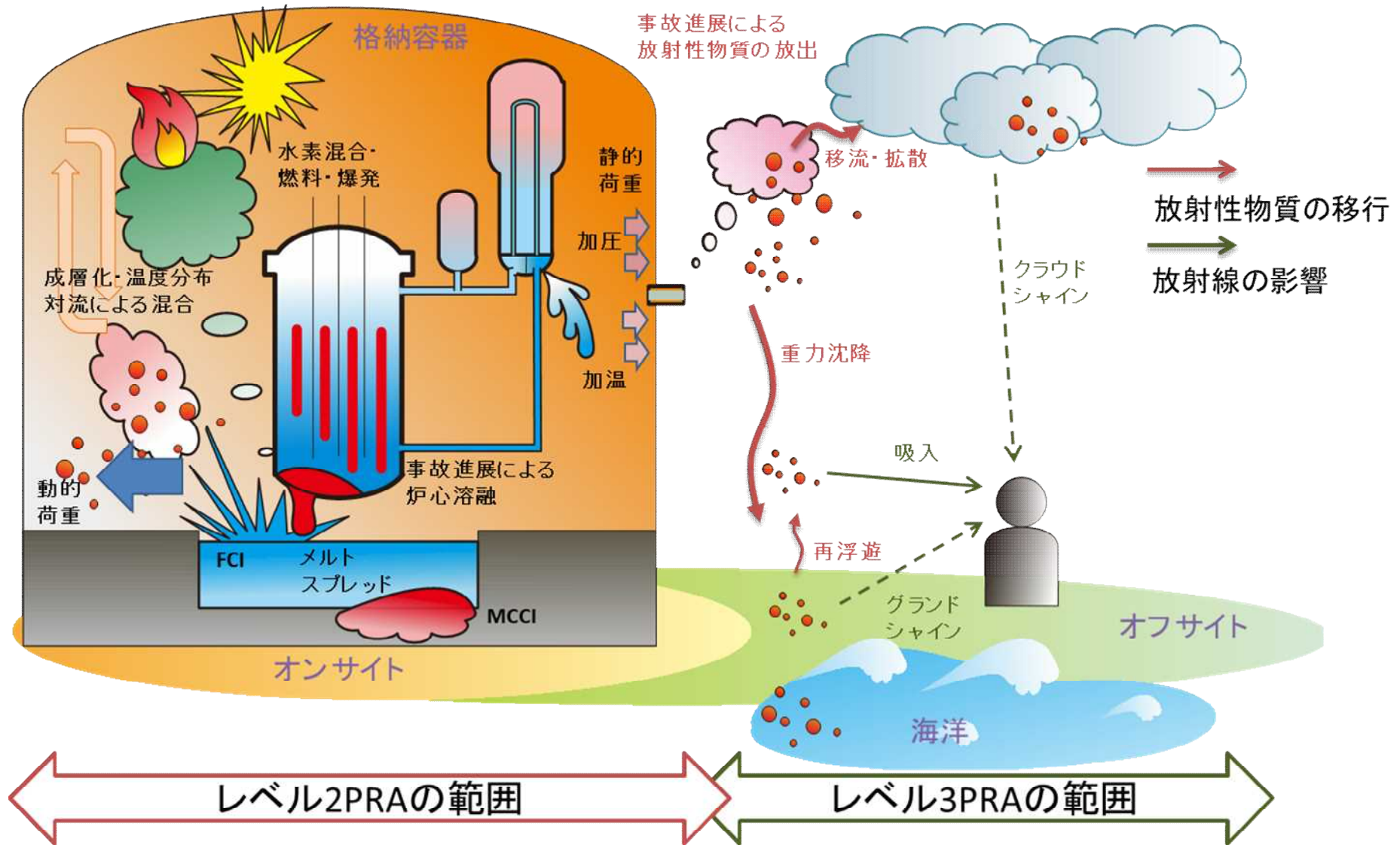
原子力規制庁長官官房技術基盤グループ

シビアアクシデント研究部門

目次

1. 研究概要
2. 令和元年度までの主要成果
3. まとめ
4. 今後の展開
5. 成果の活用について
6. 成果の公表等
7. 今後の研究計画(行程表)

1. 研究概要



2. 令和元年度までの主要成果

2.1 格納容器破損防止対策評価手法の整備

2.1.1 総合現象解析コードによる評価手法の整備

- (1) 事故進展解析とソースターム評価手法の高度化
- (2) 使用済燃料プールでの事象進展解析

2.2.2 個別現象解析コードによる評価手法の整備

- (1) 格納容器破損モード(水素燃焼)
- (2) 格納容器破損モード(メルトスプレッド/溶融炉心-コンクリート相互作用の重畳現象)
- (3) 格納容器破損モード(静的・動的負荷)
- (4) OECD/NEA/CSNI主催の実験、解析及び調査プロジェクトからの情報収集

2.2 確率論的リスク評価に関連する評価技術の整備

- (1) レベル2PRA手法の整備
- (2) レベル3PRA手法の整備

2.3 環境影響評価手法の整備

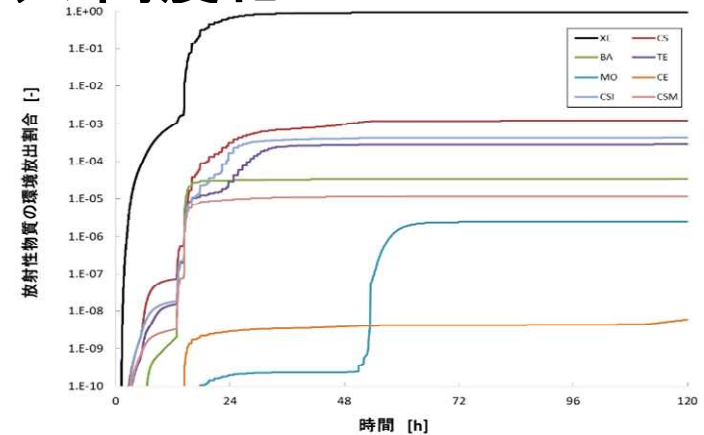
- (1) 放射性物質の環境拡散評価手法の整備
- (2) 遮蔽解析に係る技術的知見の整備

2.1 格納容器破損防止対策評価手法の整備

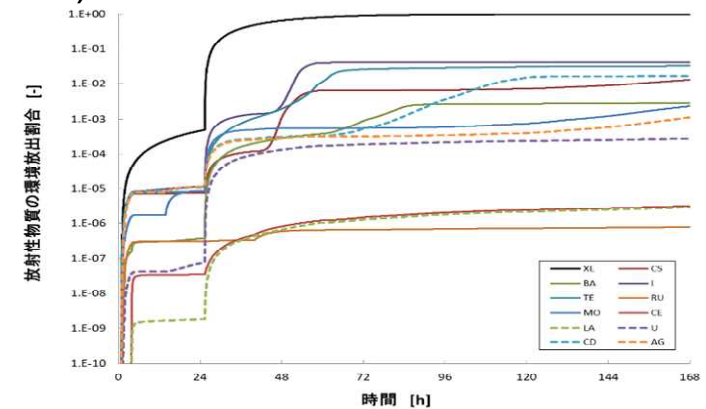
2.1.1 総合現象解析手法の整備

(1) 事故進展解析とソースターム評価手法の高度化

- 概要：最新知見を取り入れたMELCORモデルによる事故進展解析を実施し、格納容器機能喪失に伴い環境に放出されるソースタームを評価する。
- これまでの成果：
 - ・ 最新のMELCORver. 2.1は、主要モデルの違いにより、下部ヘッド破損が旧バージョンより遅れる傾向を確認
 - ・ 米国NRCが進めるSOARCA(最新知見を反映した原子炉における環境影響評価)プロジェクトを参考としたノーディング、モデルの高度化
 - ・ OECD/NEA MCCIプロジェクトのCCI-3実験データに基づくMCCIモデルパラメータ調整
- 今後の予定：解析対象事故シナリオの拡大と解析結果に基づいたソースターム評価、パラメータの感度解析、ソースターム及び放出タイミングへの影響確認



a) BWR Mark-II TQUVシーケンス



b) PWR 3-Loop AE- δ シーケンス

MELCOR2.1によるソースターム解析結果例

(2) 使用済燃料プール(SFP)での事故進展解析

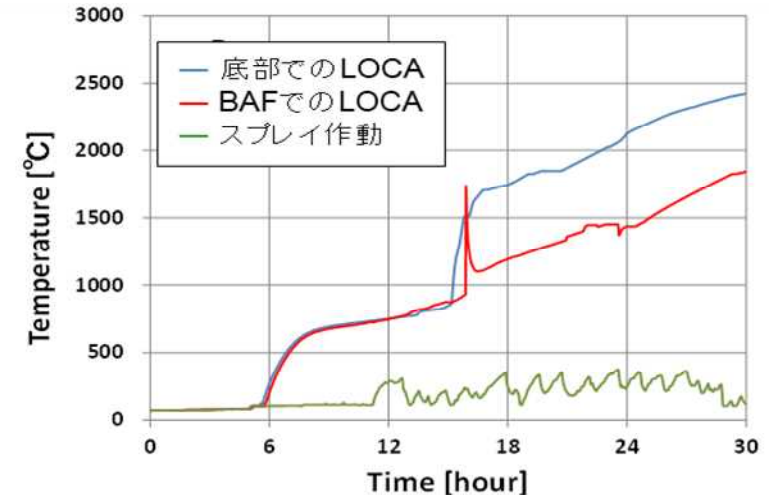
●概要：SFPの重大事故での、燃料集合体露出時における被覆管酸化反応モデルの高度化を行う。現行MELCORモデルに不足している空気と蒸気混在条件を考慮可能とする。(SFP-PIRT (NEA/CSNI/R(2017)18)の課題の一つ)

●これまでの成果：

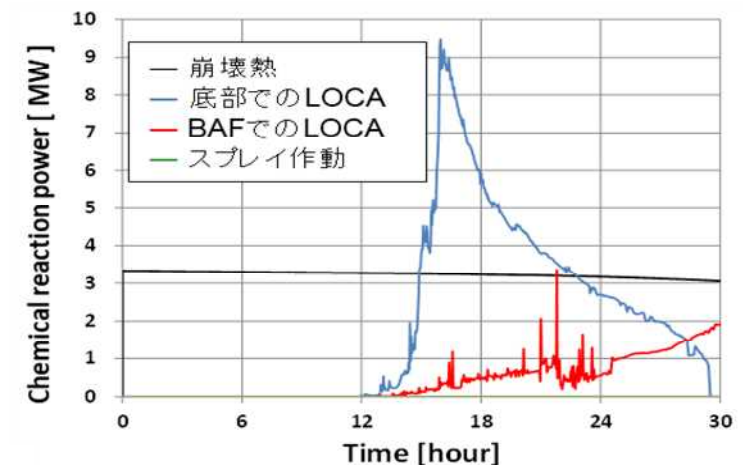
- ・ カールスルーエ工科大学(KIT)の空気-蒸気混合条件下での被覆管酸化実験データを用い、MELCORの被覆管酸化モデルを改良
- ・ 上記モデルにより、LOCAの発生位置をSFP底部または有効燃料長下端(BAF)とした解析を実施し、底部の方が酸化反応が早まる結果を得た。

●今後の予定：

- ・ 低い崩壊熱条件下における自然対流の影響評価、燃料集合体の配置の異なる条件での解析
- ・ SFP-PIRTの課題の一つであるスプレイ冷却のモデルの高度化



a) 被覆管最高温度の経時変化



b) 化学反応熱の経時変化

SFP事故進展解析の結果の例

2.1 格納容器破損防止対策評価手法の整備

2.1.2 個別解析手法の整備

(1) 格納容器破損モード(水素燃焼)(1/4)

水素混合挙動

a. 実機格納容器に対する水素濃度分布評価手法

●概要：炉心損傷に至る事故の事象進展を考慮した、水素濃度分布評価体系の構築を進める。

●これまでの成果：次の二つの手法により水素濃度評価体系の構築を進めた。

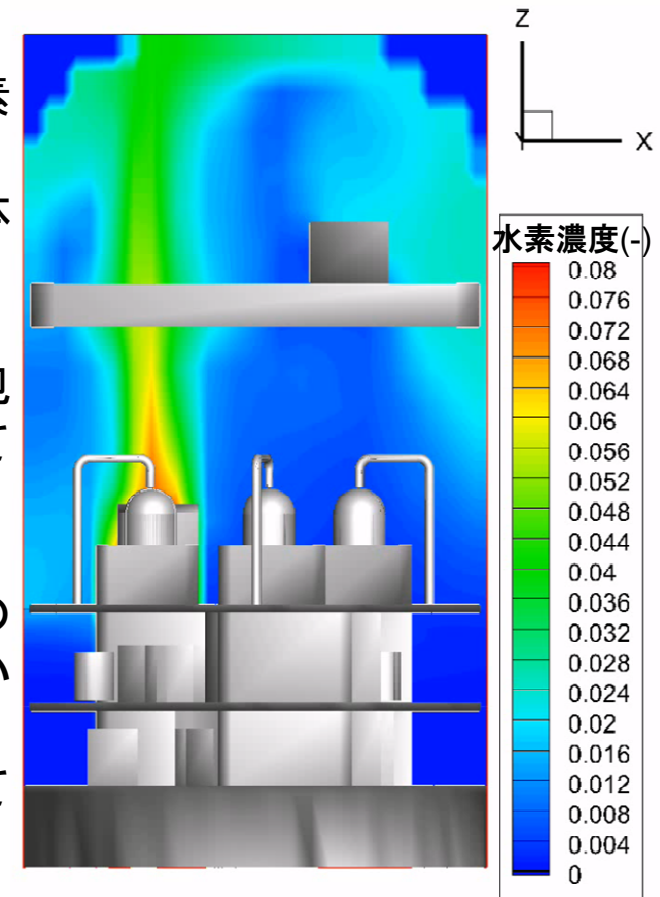
➤ 代表事故シーケンスの選定手法

シナリオクラスタリングを活用し、事故シナリオを概ね包絡する代表事故シーケンスの合理的な選定手法を検討している。

➤ 実機格納容器の水素濃度分布評価手法

GOTHICの分布定数モデルを用いた、格納容器の内部構造の形状の影響を考慮した水素濃度分布評価手法を検討している。

●今後の予定：事故進展解析のデータベース拡充に伴って代表事故シーケンス等を抽出し、右図に示すような3次元水素分布評価を進める。

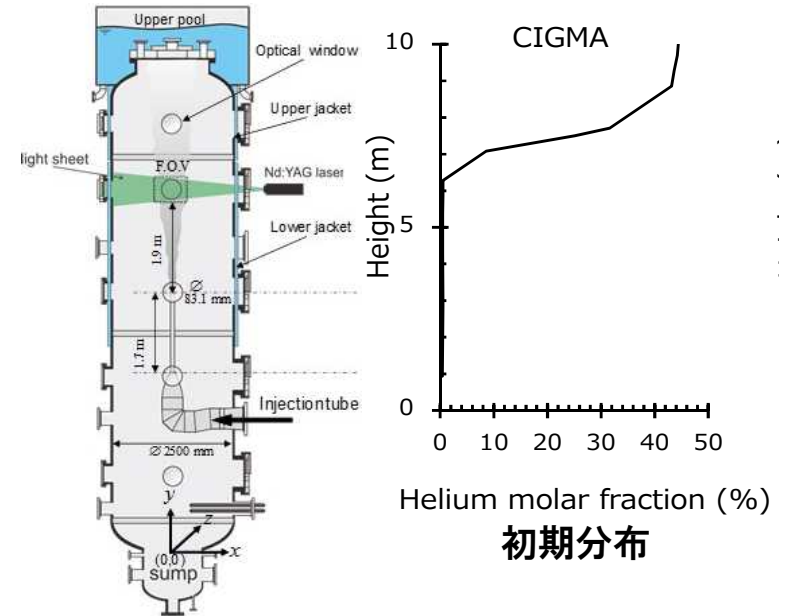


3L PWRの3次元水素分布解析例

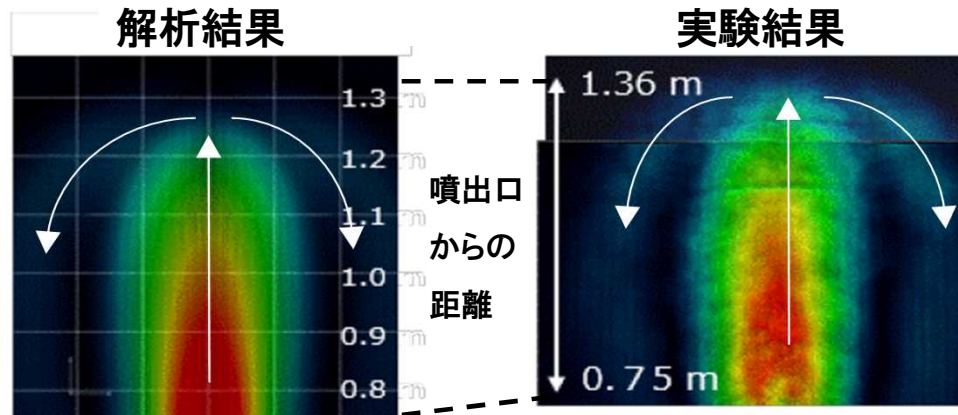
(1) 格納容器破損モード(水素燃焼)(2/4) 水素混合挙動

b. 重大事故時格納容器熱流動実験に関する実験解析 (JAEA委託)

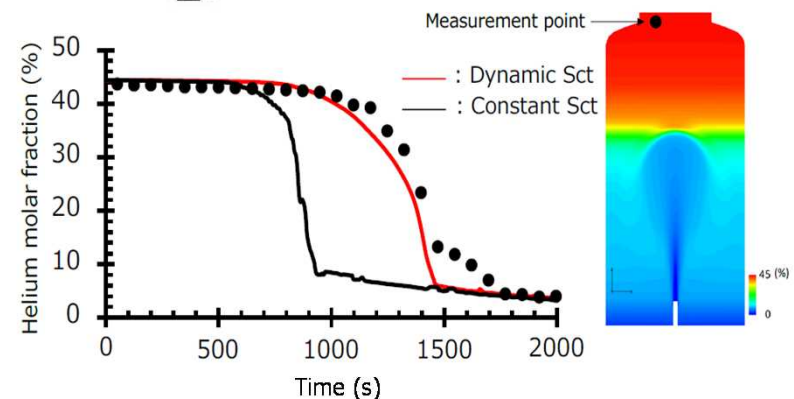
- 概要：安全研究プロジェクト「軽水炉の重大事故の重要物理化学現象に係る実験」でのCIGMA実験のデータを活用し、水素混合等の格納容器熱流動に関する数値流体力学解析の高度化を進める。
- これまでの成果：鉛直噴流による密度成層崩壊挙動について、標準k-ε乱流モデルをベースとして浮力と乱流が支配的な物質輸送現象を精度良く予測可能な手法の高度化を検討している。
- 今後の予定：格納容器外面冷却等により複雑な現象に対して適用範囲の拡大の検討を進める。



初期分布



VIMES実験(小型装置)による乱流モデル適用性確認



CIGMA実験と密度成層崩壊解析例

(1) 格納容器破損モード(水素燃焼)(3/4) 水素燃焼挙動

c. 火炎加速実験に関する感度解析

●概要：原子力発電所に関係する水素燃焼で重要な現象は、爆轟のみならずFast Deflagrationも含む (NEA/CSNI/R(2000)8)。Fast Deflagrationの詳細解析手法に適用する乱流モデルや燃焼モデルが、解析結果に及ぼす影響を把握するために、その感度を確認する。

●これまでの成果：火炎加速には火炎の伝播に先行して生じる乱流の発達が関与する。RANSでは燃焼に伴う瞬時的な速度変化が鈍く、乱流の発達が鈍化する結果が得られた。

●今後の予定：把握した物理モデルが有する感度の程度に応じ、解析評価に用いる物理モデルの選定を検討し、手法の妥当性、適用性等の確認を進める。



(a) 乱流エネルギー



(b) 乱流燃焼速度



(c) 火炎温度

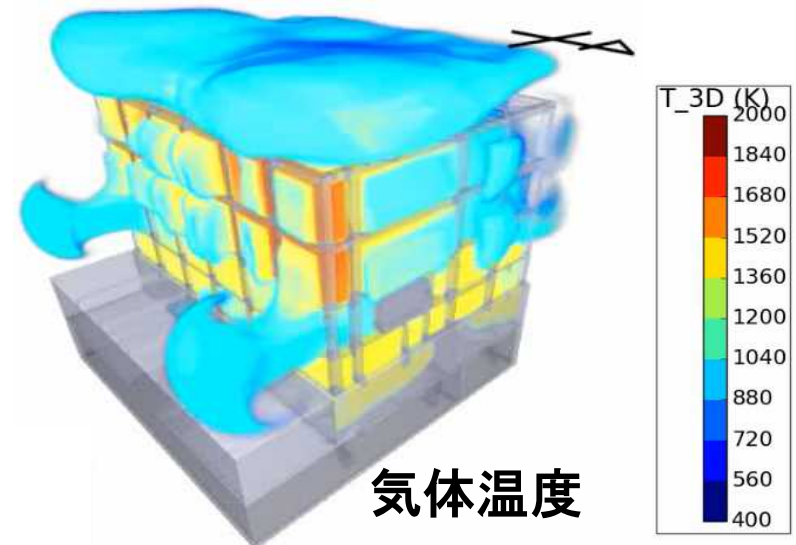
OpenFOAMによるENACCEF-2火炎加速実験に対する解析結果(左:RANS、右:LES)

(1) 格納容器破損モード(水素燃焼)(4/4)

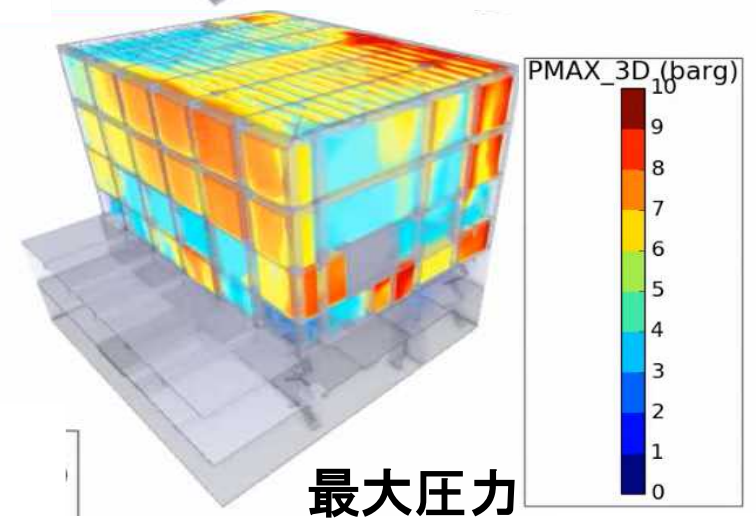
水素燃焼挙動

d. 1F事故で発生した水素爆発の分析

- 概要：1F4号機原子炉建屋での水素分布と火炎伝播の傾向把握を目的に、3次元解析を行う。
- これまでの成果：公表資料を参考に、大まかな機器形状や配置と、3階以上に設置の排気ダクトを考慮して解析体系をモデル化した。GEXCON FLACSにより水素濃度分布、火炎伝播等の挙動を解析
 - 排気ダクトからの水素流入挙動の解析結果は、流量に依存して分布傾向が異なる結果を示した。本解析では、代表的には水素を含む混合気流入後、一定期間経過後に概ね一様化する傾向が得られた。
 - 任意の着火点を与えた火炎伝播挙動の解析結果は、4号機R/B破壊の実態と比べ厳しい破壊の程度を示した。解析に設定した水素量が多すぎた可能性が考えられ、今後の検討課題である。
- 今後の予定：本解析を通じて得られた結果に基づき解析体系、条件等の見直し/拡充をするとともに、現地調査で得られた情報も活用し分析を継続する。



気体温度



最大圧力

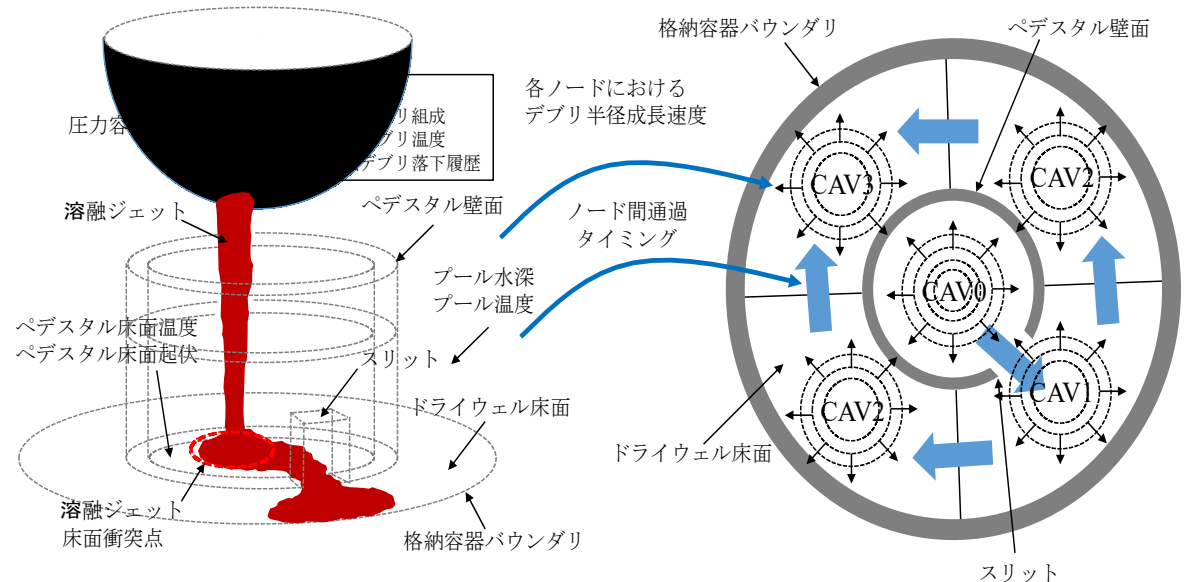
1F4水素爆発解析の例

(2) 格納容器破損モード(メルトスプレッド/溶融炉心-コンクリート相互作用の重畳現象)(1/2)

a. MELCORにおける溶融デブリ拡がりの考え方の整理

- 概要：コンクリート侵食や格納容器バウンダリ健全性の観点から、溶融デブリの拡がり挙動とコンクリート侵食挙動との重畳による不確実性要素について検討する。
- これまでの成果：高温溶融デブリの拡がり、MCCIによる侵食挙動より速い現象であることから、MELCORでは準静的に扱っている。そのため瞬時的にデブリが拡がり、冷却が促進され、MCCIによる侵食量を非保守的に評価する不確実さを有している。

→不確実さ低減の対策を検討し、別途開発しているデブリ冷却解析コードでの解析に基づき、各ノードでの“デブリ半径成長速度”と“ノード間通過タイミング”のパラメータ依存性を整理し、特定の事故シナリオについて適用可能なMELCORの制御関数を組み立てる方策を検討した。



(a) JBREAK/MSPREADによる非対称溶融デブリ拡がり解析 (b) MELCOR-CAVによる溶融デブリ拡がり解析

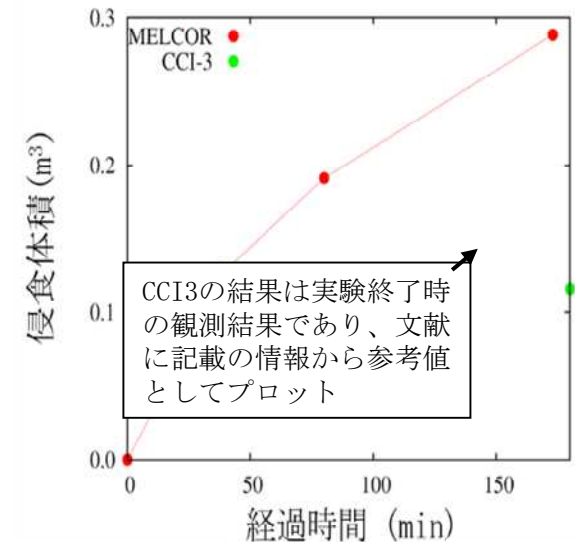
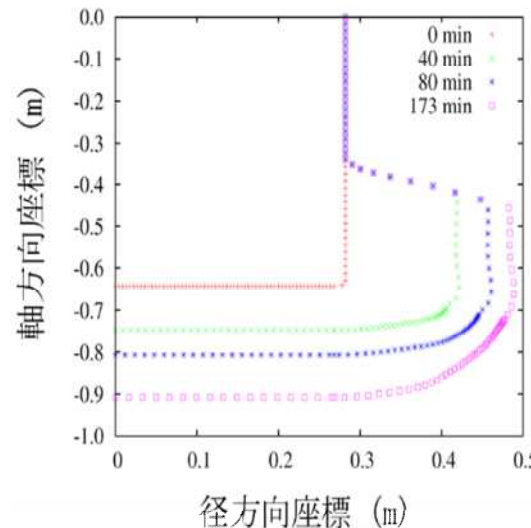
(2) 格納容器破損モード(メルトスプレッド/溶融炉心-コンクリート相互作用の重畳現象)(2/2)

b. MELCORにおけるMCCIモデルパラメータの検討

●概要：OECD/NEA-CCI実験では、一部の珪質岩系コンクリートで側壁方向の侵食が底面方向よりも顕著であるという異方性侵食挙動が観察され、同様な傾向がCEAのVULCANO実験でも観察された。この発生メカニズムについて、側壁方向の耐熱性コンクリート骨材の流下による底面熱抵抗の増加などの要因が提案されているが、専門家のコンセンサスが得られたメカニズムは存在しておらず、これを評価可能な方策を検討する。

●これまでの成果：CCI-3実験の侵食条件及び侵食期間において侵食体積が保守的になるように、かつ実験において観察された異方性侵食傾向が長期間継続しないという仮定に基づき、側面及び底面熱伝達係数、コンクリート侵食エンタルピ付加項等に関するモデルパラメータを検討している。

●今後の予定：a. 及びb. の検討に基づく詳細解析の結果から、MELCORのノード・ジャンクションモデルとの対応を制御関数により実現する手法の整備を進める



(3) 格納容器破損モード(静的負荷)

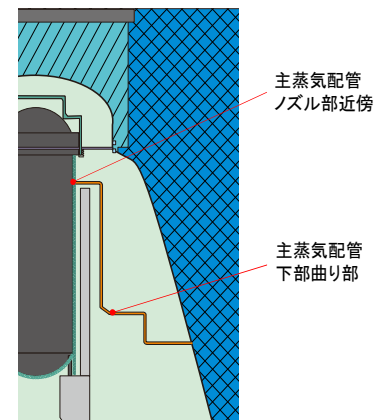
●概要：格納容器雰囲気及び構造の局所的な温度分布を考慮した、格納容器への負荷評価を実施するための手法を検討する。

●これまでの成果：格納容器内雰囲気及び格納容器バウンダリを形成する構造物それぞれの熱伝導と両者の熱伝達を考慮した解析に向けて、格納容器内温度分布をCFD解析により検討した。

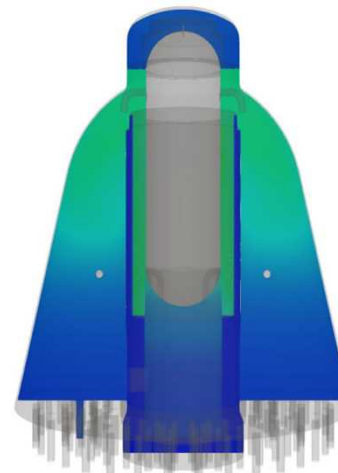
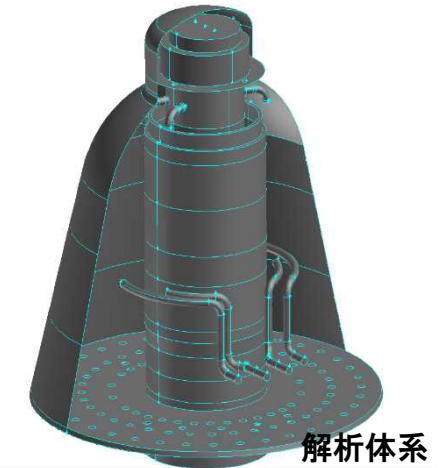
対象事故シナリオは、BWR格納容器のトップヘッドフランジに着目し、炉心損傷によって発生する高温蒸気による主蒸気配管の温度誘因破断を想定した。

●今後の予定：対象とする事故シナリオを増やし、事象を包絡するような温度分布を評価するための重要シナリオを特定する。

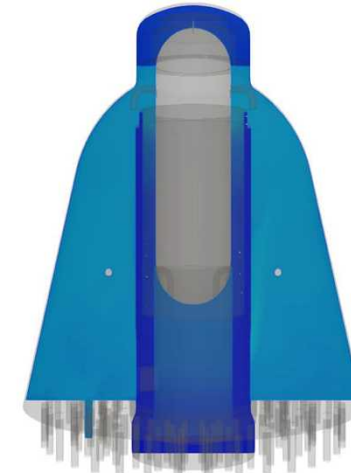
検討結果に基づき、MELCORによる事故進展解析に適用する、局所温度分布を考慮した格納容器バウンダリの過温破損を判定する制御関数の検討を進める。



圧力バウンダリからの漏洩を仮定する箇所

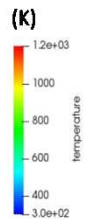


主蒸気配管ノズル部での漏洩



主蒸気配管下部曲がり部での漏洩

漏洩開始後30分における格納容器雰囲気温度



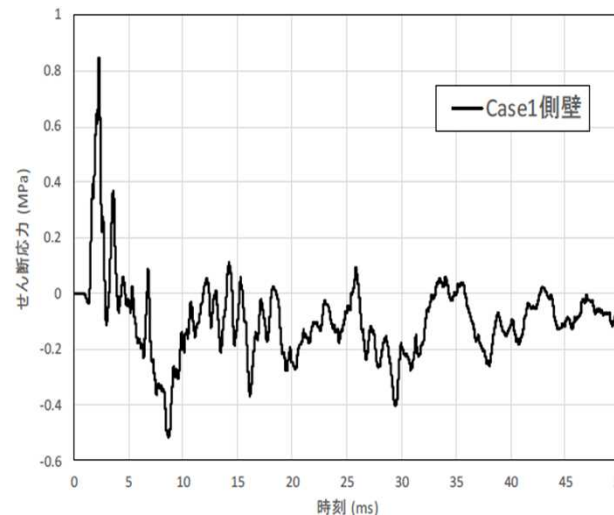
(3) 格納容器破損モード(動的負荷)

●概要：代表的なBWR Mark-II型プラントの鉄筋コンクリート製ペDESTALを対象として、水蒸気爆発によるコンクリート及び鉄筋が示す動的応答を、陽解法動的応答コードAUTODYNにより検討する。コンクリート構成則、水位、爆発源分布及び爆発力をパラメータとした感度解析を実施し、ペDESTALに発生する最大ひずみ等への影響を把握するとともに、評価手法のロバスト性について検討する。

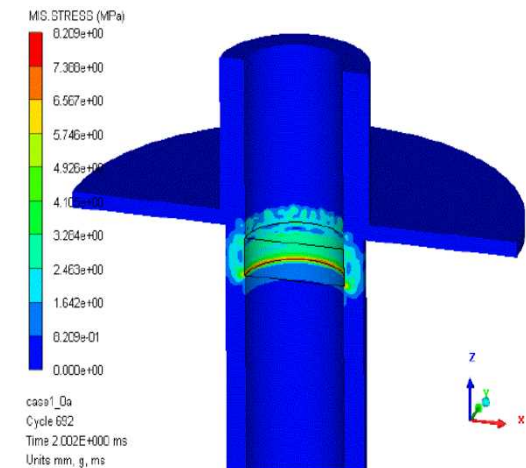
●これまでの成果：水位、爆発源分布及び爆発力を独立に変化させ、以下の傾向を得た。

- ・水位；深いほどペDESTALの変形大
- ・爆発源分布；爆発源高さやサイズによりペDESTAL変形モードに差異発生

●今後の予定：溶融燃料-冷却材相互作用との組み合わせにより、パラメータ相互の関係性について合理的な仮定を組み込んだ評価手法作成に向けた検討を進める。



(a) せん断応力時刻歴



(b) 2msにおける応力の分布図

(b) 2msにおけるせん断応力コンター

(4) OECD/NEA/CSNI主催の実験、解析及び調査プロジェクトからの情報収集

| 現象 | プロジェクト名称 | 概要・目的・着目点 | 得られた主な知見 |
|---------|--|---|--|
| 水素燃焼 | HYMERES-2計画 - Hydrogen Mitigation Experiments for Reactor Safety Project Phase 2 - | 原子炉施設の安全評価を実施する解析能力の向上のために、重大事故時の格納容器熱流動に係る現象論的理解を促進することを目的として、格納容器内水素成層化問題及び安全機器の作動を考慮した格納容器内での熱流動現象に着目した実験が進められている。 | これまでに、噴流や浮力乱流による密度成層の混合挙動について、グレーティング型の構造物の影響や、過熱蒸気が存在する場合の輻射熱伝達の影響を考慮する場合の重要パラメータ等に関する知見を取得中である。 国内での関連実験研究で得られている知見を紹介した。 |
| | THAI-3計画 - Thermal-hydraulics, Hydrogen, Aerosols and Iodine Project Phase 3 - | 格納容器内の狭隘部における水素燃焼、対向流条件下におけるPARの性能、水素燃焼に伴い構造表面等に付着した放射性物質の再放出、格納容器内温度上昇に伴う放射性物質の再放出等に着目した実験及び解析手法の検討を行う。 | プール水に溶存する粒子状ヨウ素がスクラビング等の流動に伴って雰囲気中へ再放出される挙動や、壁面等に付着する各種ヨウ素、エアロゾルが水素燃焼に伴って再揮発等して雰囲気中に放出される挙動に関する知見を取得した。 本プロジェクトで実施している水素燃焼解析のベンチマーク結果を海外専門家と共有した。 |
| 放射性物質挙動 | BIP-3計画 - Behaviour of Iodine Project Phase 3 - | 有機ヨウ素を含む放射性ヨウ素の化学的な形態変化及び移行挙動について実験を行う。 | 格納容器内表面での有機ヨウ素生成挙動及び格納容器表面へのヨウ素の吸脱着挙動に関する新知見を得た。 |
| | STEM-2計画 - Source Term Evaluation and Mitigation Project - | 重大事故時の酸化雰囲気におけるルテニウムの燃料からの放出・移行挙動及び放射線環境下でのガス状ヨウ素の安定性の確認を目的とした実験を行う。 | Ruの質量輸送の実験を通じて、RuO ₂ とRuO ₄ の高温での振る舞いに関する知見を得た。 |
| プラント挙動 | ARC-F計画 - Analysis of information from Reactor buildings and Containment vessels of Fukushima Daiichi nuclear power station - | 1Fの原子炉建屋及び格納容器内部のデータ及び情報を収集、管理するとともに、1F事故シナリオ及び放射性物質の移行及び拡散に関する解析の精緻化を行う。本プロジェクトへの参加により、1F事故に関する国際的にコンセンサスの得られた最新知見を取得する。 | プロジェクトが開始されて間もないため知見は今後取得することとなるが、得られた最新知見は重大事故時の燃料溶融、下部ヘッド破損、炉外でのデブリ拡がり、溶融炉心-コンクリート相互作用等の解析技術及びモデルの向上、解析の妥当性確認に供するための実験データベースとして活用されることが期待される。 |
| 1F事故分析 | PreADES計画 - Preparatory study on Analysis of fuel Debris - | 国内外の実験、過去の事故等から得られた知見を集約し、将来デブリを取り出した際にデブリの特性を評価するための予備検討を行う。本プロジェクトへの参加により、デブリ取り出しに関する国際的にコンセンサスの得られた最新知見を取得する。 | |

2.2 確率論的リスク評価に関連する評価技術の整備

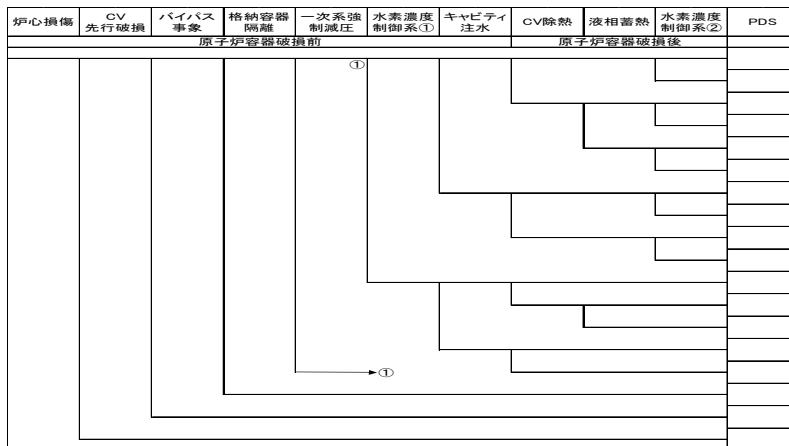
2.2.1 レベル2PRA手法の整備(1/2)

●概要：安全研究プロジェクト「規制へのPRAの活用のための手法開発及び適用に関する研究」での検討に引き続き、レベル1PRAにより炉心損傷頻度等を評価した後のレベル2PRAの格納容器機能喪失頻度等を評価するための手法について検討を進める。

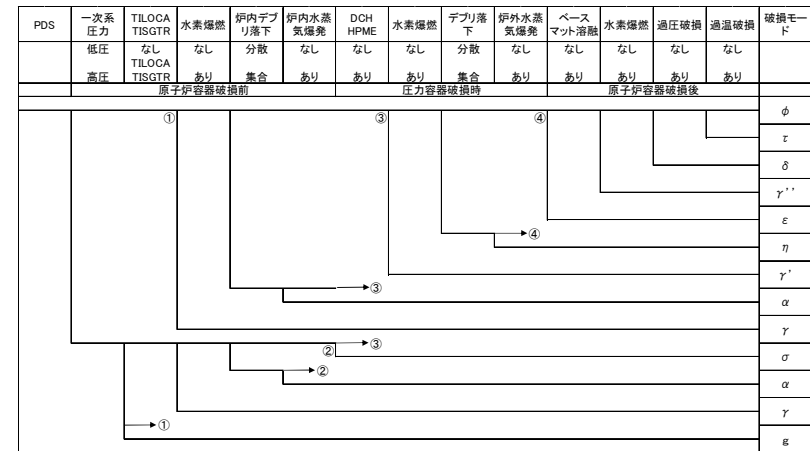
a. レベル1-レベル2PRA一貫解析で用いる格納容器イベントツリー(CET)の形態に関する検討

●これまでの成果：

- ・格納容器機能喪失頻度評価等で扱う事故シーケンスを合理的に削減するために、従来用いられているCETを、システム非信頼度を評価するCET(S-CET)とSA現象の発生を評価するCET(P-CET)に分離し、S-CETをブリッジツリーと同等に扱う方策を検討した。
- ・P-CETの各破損モードの発生確率はファクターとして、S-CETの終状態で評価される頻度と掛け合わせる検討を進めている。



S-CETの例



P-CETの例

2.2.1 レベル2PRA手法の整備(2/2)

b. 格納容器機能喪失に関する機器の重要度評価

●概要：レベル1PRAのイベントツリーからS-CETまでを定量化することによって、起因事象から格納容器破損防止対策までに対応する機器の組合せのみにより、格納容器機能喪失に対して重要となる機器を評価する手段を検討する。

●これまでの成果：代表的なPWRにおける起因事象のうち、大LOCA及び小LOCAを対象としたパイロット評価を実施し、以下の傾向が得られた。

- ・大LOCAを起因事象とした場合に、炉心損傷防止用の安全系の機能を喪失することが格納容器機能喪失に対しても大きく影響する可能性があること
- ・大小LOCAいずれの場合にも格納容器隔離失敗に関する機器の重要度が上位であった。

c. レベル1.5PRAのための評価ツールの整備

●概要：本研究で扱っているP-CETを係数行列化する処理等は、既存の汎用PRAコードでは取り扱うことができない。そのため、これまでに旧JNES等で開発されてきた地震PRA解析コードを改良して、それら評価手法を扱う機能の追加を検討する。

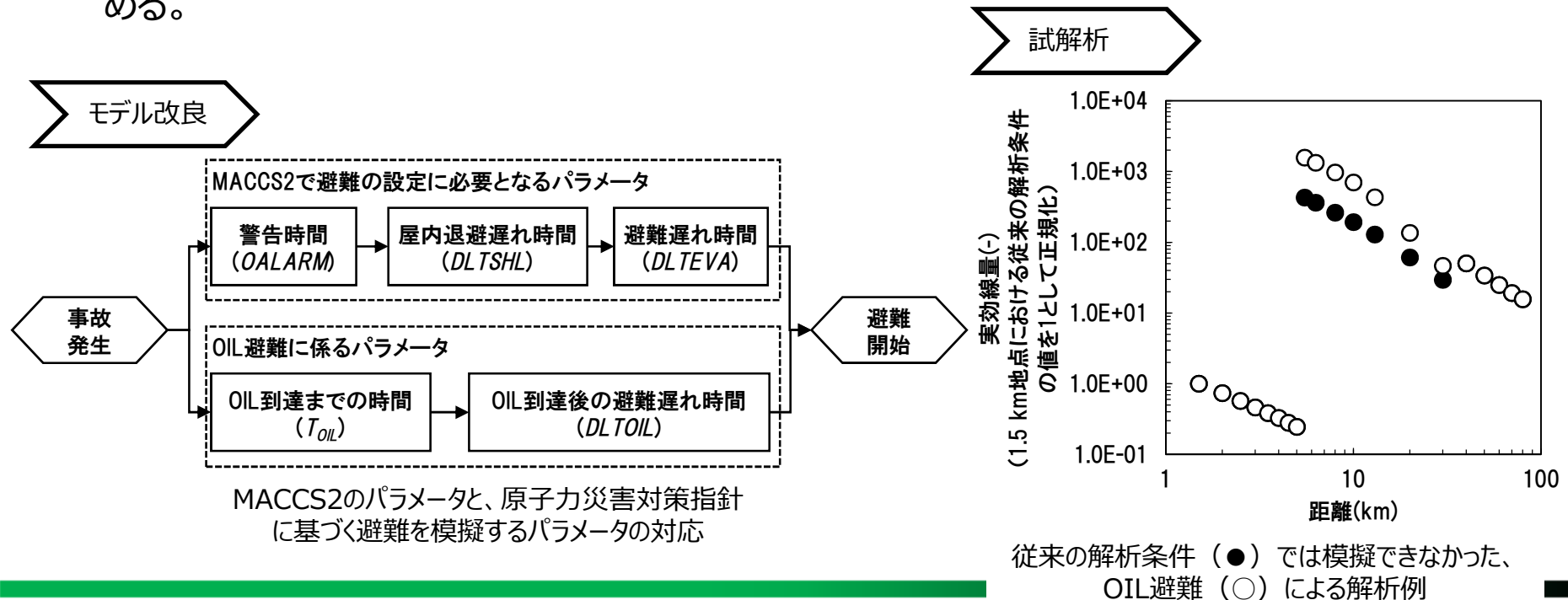
●これまでの成果：米国アイダホ国立研究所で開発されたSAPHIREコードにより作成したミニマルカットセットデータの入力部、P-CETを係数行列としてS-CETの評価結果に掛け合わせる機能、格納容器機能喪失に対する機器重要度等を評価する機能を実装完了し、機能確認としてパイロット計算を進めている。

●今後の予定：一貫解析による定量化範囲をすべての起因事象に拡大するとともに、CETのヘディングの構成要素と順番の適切性、分岐確率の精緻化等の検討を進める。

2.2 確率論的リスク評価に関連する評価技術の整備

2.2.2 レベル3PRA手法の整備

- 原子力災害対策指針における、運用上の介入レベルに基づく防護措置（OIL避難）モデルを導入したレベル3PRA手法の検討を進めている。これまでに、確率論的環境影響評価コードMACCS2に、OIL避難を模擬する機能を追加した。今後、事故進展と防護措置のタイムラインの観点から、導入したモデルの妥当性について、確認を実施する。
- また、レベル3PRAで評価の対象とするリスク指標として、濃度（セシウム-137地表面濃度）及び線量（実効線量）等を検討した。今後、代表プラントに対してサイト特性を踏まえた評価を実施するため、防護措置の設定方法、複数基立地の影響等についても検討を進める。



2.2 環境影響評価手法の整備

(1) 放射性物質の環境拡散評価手法の整備(1/2)

環境中に放出された放射性物質の拡散評価を目的として、最新知見を盛り込んだオープンソースのシミュレーションモデルを基に、統合的評価手法の検討を行っている。

①これまでの成果

- 大気拡散モデルWRF-Chemの仕様確定。試解析の結果も良好。
- 海洋拡散モデルROMSの性能評価中。
- WRF-ChemとROMSを結合し、大気由来トレーサの海洋拡散を評価できる仕様とした。

②今後の予定

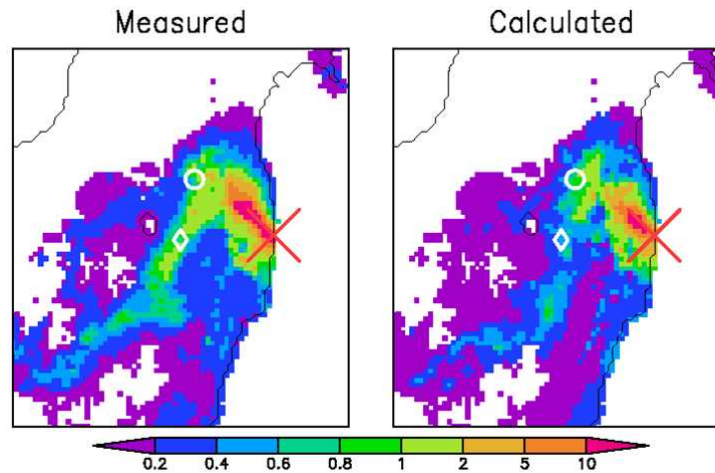
- ソースターム評価のため、海洋拡散モデルROMSのインターフェイスを最適化する。
- 大気拡散—海洋拡散結合モデルに陸上動態モデルを結合する。その際、分布型流出モデルを活用して河川によるトレーサの海洋への流出を考慮できる仕様とする。

(1) 放射性物質の環境拡散評価手法の整備(2/2)

③ これまでに整備した手法による試解析の結果

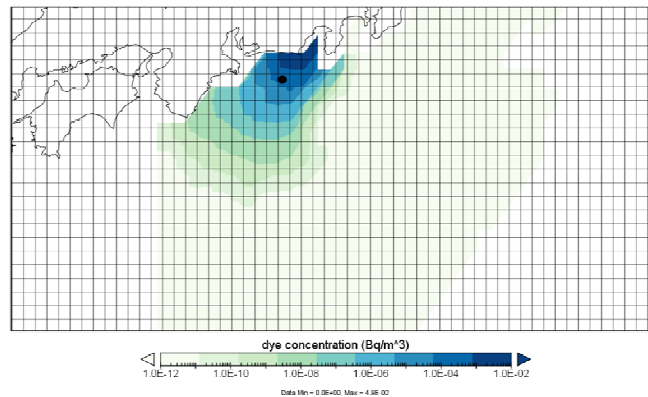
1. 大気拡散モデル WRF-Chem

1F事故後の空間線量率の計算値(右)は測定値(左)を概ね再現できている。

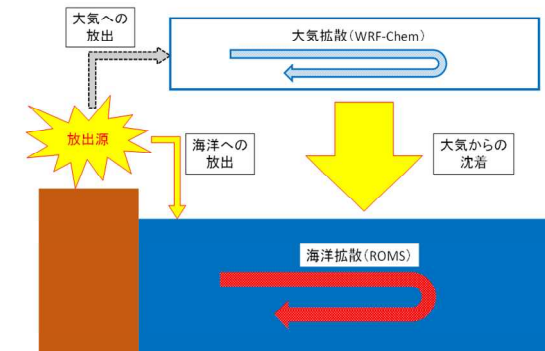


2. 海洋拡散モデル ROMS

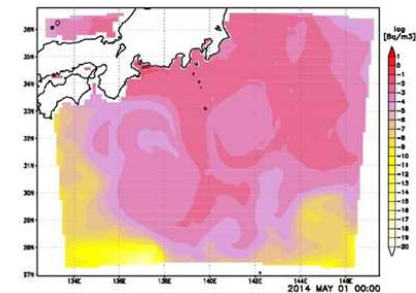
1地点からの放出開始5日後のトレーサの濃度場。黒潮外縁部の反流に乗って西進する。



3. WRF-ChemとROMSの結合



WRF-Chemにより計算されたトレーサの沈着量をROMSに入力することで、トレーサの大気由来成分の海洋拡散を評価できる。



(2) 遮蔽解析に係る技術的知見の整備

■モンテカルロ法による遮蔽解析結果の妥当性判断に資するため、分散低減法のパラメータ感度解析や統計誤差の変化等について検討した。

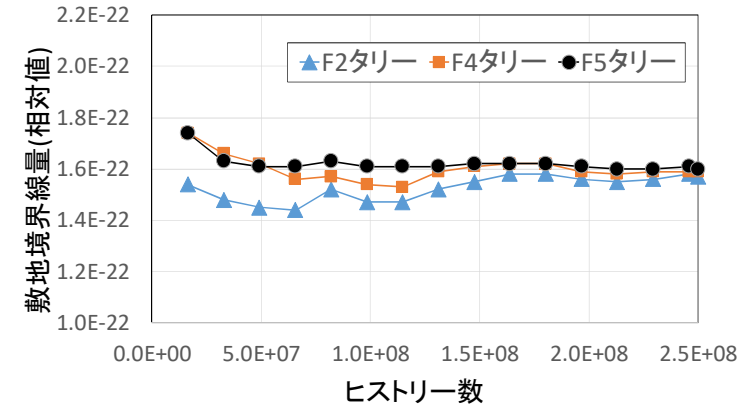
◎使用済燃料プールからの敷地境界ガンマ線量計算をモンテカルロ法コードMCNPで行い、計算経過における解析結果及び相対誤差の変化について検討した例を図に示す。

◎ヒストリー数 3×10^7 で統計誤差の判断基準を満足するが、ヒストリー数増加により、統計誤差及び3種類の検出器の一致が改善される。

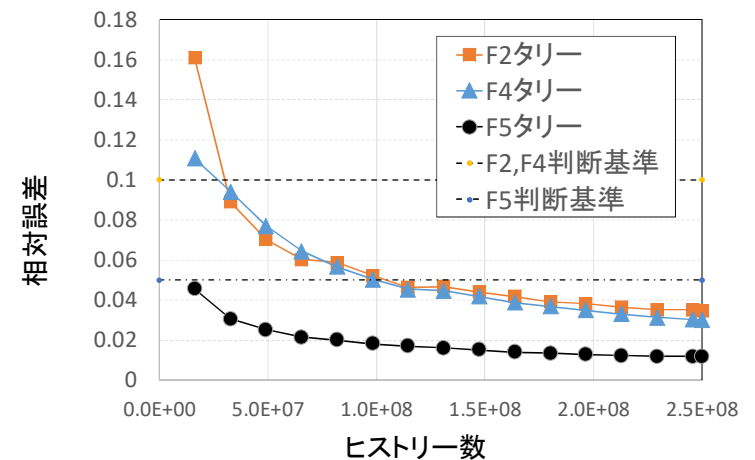
■解析結果の妥当性は、単一のエスティメータの統計誤差のみから判断するより、統計量の推移や異なるエスティメータによる評価値の一致を確認することが有効であると考えられる。

■今後は、モンテカルロ法による解析結果の妥当性確認に資する知見を蓄積するとともに、簡易計算法やSn計算法についても、最新知見を考慮して遮蔽評価の妥当性確認に資する検討を行う。

ヒストリー数に伴う線量評価値の推移



ヒストリー数に伴う線量評価値の統計誤差の推移



F2タリー：面を通過する粒子により線束を求める評価法
F4タリー：体積領域を通過する粒子から線束を求める評価法
F5タリー：各衝突点から評価点への散乱期待値から線束を求める評価法

3. まとめ(1/2)

| テーマ | 目的 | 主な成果 |
|-----------------------|---|---|
| 1 総合現象解析手法の整備 | (1) 格納容器機能喪失に伴い環境に放出されるソースタームの評価手法整備 (2) SFPの重大事故時に想定される特有の現象及び事故進展に着目した評価手法整備 | (1) ソースタームの類型化を行うために必要なMELCORモデル、解析の自動化ツール等の整備を進め、MELCORの最新バージョンと旧バージョンの間での主要なモデルの違い等を確認した。 (2) 実験解析を通じて空気-蒸気混合雰囲気による被覆管酸化を包絡する反応モデルのパラメータの整理を進め、実機SFPを想定した事故進展解析により被覆管冷却挙動を確認した。 |
| 2 個別現象解析コードによる評価手法の整備 | (1) 水素燃焼について、格納容器等の水素分布に影響する広範な事故シナリオを包絡する解析と火炎加速現象に着目した評価を実施するための手法整備 (2) メルトスプレッド/溶融炉心-コンクリート相互作用の重畳現象について、既往のMCCI実験に基づくMELCORで動作しているMCCIの解析モジュールのためのモデルパラメータの設定を最適化するための知見取得 (3) 静的・動的負荷について、格納容器雰囲気及び構造の温度分布を考慮した負荷評価の実施と、溶融物接触に伴う構造物変形に関する評価に関する手法検討 (4) (1)～(3)に関連する国際的にコンセンサスの得られた最新知見の取得 | (1) 水素燃焼について、シナリオクラスタリングを活用した代表事故シーケンスの抽出、火炎加速現象の解析手法等の整備を進めた。 (2) メルトスプレッド/溶融炉心-コンクリート相互作用の重畳現象については、既往のMCCI実験解析を行い、MELCORで動作しているMCCIの解析モジュールのためのモデルパラメータの設定を最適化するための知見の取得と、MCCIの現象論的な考察を進めた。 (3) 静的・動的負荷に対する評価手法については、数値流体力学により、主蒸気管破断時に格納容器へ噴出する過熱蒸気によって格納容器バウンダリが加熱される挙動の傾向について確認を進めた。また、沸騰水型軽水炉ペDESTALでの水蒸気爆発について検討し、コンクリート構成則等が発生する最大ひずみ等へ与える影響を把握するとともに、評価手法のロバスト性について確認を進めた。 (4) OECD/NEA/CSNIが主催する実験等の国際共同研究プロジェクトに参加し、水素燃焼、放射性物質挙動及び1F事故分析に関する、実験的知見及び解析的知見の両方の知見取得を進めた。 |
| 3 レベル2確率論的リスク評価 | 安全性に係る評価の高度化、新検査制度的確な運用等に資するため、レベル2PRAに関連する評価手法の整備 | レベル1 確率論的リスク評価に関する安全研究成果に基づき、レベル1PRA/レベル2PRAの一貫解析で使用する緩和系の信頼度と物理化学現象を分離したCETを検討し、格納容器イベントツリーの定量化の検討等を進めた。これまでに、パイロット解析を通じた適用性の確認、評価に用いる解析コードの改良等を進めた。 |

3. まとめ(2/2)

| | テーマ | 目的 | 主な成果 |
|---|-------------------|---|---|
| 4 | レベル3確率論的リスク評価 | 今後のPRAの成熟状況に応じて、将来的な実用発電用原子炉施設での立地特性を踏まえたサイト外のリスク評価を実施するために、レベル3PRA手法を活用したリスク評価に向けた検討 | OIL避難モデルを導入したレベル3PRA手法の検討を進め、MACCS2に、OIL避難を模擬する機能を追加した。また、レベル3PRAで評価の対象とするリスク指標として、濃度（セシウム-137地表面濃度）及び線量（実効線量）等を検討した。 |
| 5 | 放射性物質の環境拡散評価手法の整備 | 最新知見を盛り込んだオープンソースのシミュレーションモデルに基づく、環境中に放出された放射性物質の統合的拡散評価手法の検討 | (1)大気拡散モデルWRF-Chemを用いて1F事故に係る試解析を行い、概ね良好な結果を得た。 (2)海洋拡散モデルROMSを用いて、海洋に直接放出されたトレーサの挙動を確認した。 (3)WRF-ChemとROMSを結合し、大気から海面に沈着したトレーサの海洋拡散を評価できる仕様とした。 |
| 6 | 遮蔽解析に係る技術的知見の整備 | 緊急時対策所等の居住性等に係る被ばく評価について、直接線及びスカイシャイン線に対する建屋等による遮蔽評価の確認 | (1)モンテカルロ法計算コードMCNPを用いてスカイシャイン計算を行う場合の、分散低減法におけるパラメータ感度解析を行い、パラメータの変動が解析結果に与える影響を確認した。 (2)統計的手法であるモンテカルロ法による解析結果の妥当性を判断するため、計算経過における解析結果及び相対誤差等の統計指標の変化について検討した。 |

4. 今後の展開(1/2)

| テーマ | 目的 | 今後の計画 |
|-----------------------|---|---|
| 1 総合現象解析手法の整備 | (1) 格納容器機能喪失に伴い環境に放出されるソースタームの評価手法整備 (2) SFPの重大事故時に想定される特有の現象及び事故進展に着目した評価手法整備 | (1) 国内BWR及びPWRプラントに対する事故進展解析の結果に基づきPRAのための放出カテゴリの割り付け、ソースターム及び放出タイミングの不確かさ解析を実施する予定である。 (2) 崩壊熱を低くした場合の事故進展を支配する現象を探るとともに、自然対流による事故進展等の解析結果を拡充する。またスプレイ冷却のモデルの高度化を進める。 |
| 2 個別現象解析コードによる評価手法の整備 | (1) 水素燃焼について、格納容器等の水素分布に影響する広範な事故シナリオを包絡する解析と火炎加速現象に着目した評価を実施するための手法整備 (2) メルトスプレッド/溶融炉心-コンクリート相互作用の重畳現象について、既往のMCCI実験に基づくMELCORで動作しているMCCIの解析モジュールのためのモデルパラメータの設定を最適化するための知見取得 (3) 静的・動的負荷について、格納容器雰囲気及び構造の温度分布を考慮した負荷評価の実施と、溶融物接触に伴う構造物変形に関する評価に関する手法検討 (4) (1)～(3)に関連する国際的にコンセンサスの得られた最新知見の取得 | (1) 水素燃焼について、シナリオクラスタリングの適用性確認と代表事故シーケンス抽出を進めるとともに、火炎加速解析手法の妥当性、適用性等を確認し、1F事故での水素爆発の分析を継続する。 (2) メルトスプレッド/溶融炉心-コンクリート相互作用の重畳現象については、これまでの検討結果に基づきMELCORのノード・ジャンクションモデルとの対応を制御関数により実現する手法を整備する予定である。 (3) 静的・動的負荷に対する評価手法については、温度分布を考慮すべき重要なシナリオの特定、集中定数系の解析コードを用いた場合における局所温度の評価手法を検討する予定である。動的負荷に対する評価手法については、溶融燃料-冷却材相互作用との組み合わせにより、パラメータ相互の関係性について合理的な仮定を組み込んだ評価手法へと発展させていく予定である。 (4) 引き続きOECD/NEA/CSNIが主催する実験等の国際共同研究プロジェクトに参加し知見取得を進める。 |
| 3 レベル2確率的リスク評価 | 安全性に係る評価の高度化、新検査制度的確な運用等に資するため、レベル2PRAに関連する評価手法の整備 | 定量化計算の範囲をすべての起因事象に拡大して適用することにより、本手法により生じる誤差や予期せぬ不具合等の等の有無の確認を進めるとともにその成立性を確認し、一連の適用するPRAモデルの分岐確率等のより一層の精緻化のためのROAAM法による評価の見直し、緩和システムのフォルトツリー等モデルの確認、CETのヘディングの構成要素とその順番の適切性について、MELCORによる事故進展解析の結果も活用して、検討を進めていく予定である |

4. 今後の展開(2/2)

| | テーマ | 目的 | 今後の計画 |
|---|-------------------|---|--|
| 4 | レベル3確率論的リスク評価 | 今後のPRAの成熟状況に応じて、将来的な実用発電用原子炉施設での立地特性を踏まえたサイト外のリスク評価を実施するために、レベル3PRA手法を活用したリスク評価に向けた検討 | 事故進展と防護措置のタイムラインの観点から、導入したOIL避難モデルの妥当性について、確認を実施する。代表プラントに対してサイト特性を踏まえた評価を実施するため、防護措置の不確かさに係る解析手法、複数基立地の影響等についても検討を進める。 |
| 5 | 放射性物質の環境拡散評価手法の整備 | 最新知見を盛り込んだオープンソースのシミュレーションモデルに基く、環境中に放出された放射性物質の統合的拡散評価手法の検討 | (1) 海洋拡散モデルのインターフェイスをソースターム評価に適したものに変更する。 (2) 大気拡散—海洋拡散結合モデルに陸上動態モデルを結合する。その際、分布型流出モデルを活用して河川によるトレーサの海洋への流出を考慮できる仕様とする。 |
| 6 | 遮蔽解析に係る技術的知見の整備 | 緊急時対策所等の居住性等に係る被ばく評価について、直接線及びスカイシャイン線に対する建屋等による遮蔽評価の確認 | モンテカルロ法を用いた遮蔽解析により得られる解析結果とそれに関連する統計情報をより詳細に分析することにより、解析結果の妥当性確認に資する知見を蓄積する。また、点減衰核法及びSn法について、最新知見を考慮して原子炉施設の遮蔽評価に対する妥当性確認に資する検討を行う。 |

5. 成果の活用について

現在まで

- ◆ 安全性向上の継続的な改善に向けた取組みの議論を進める際に、レベル2PRAの格納容器破損モード(水素燃焼)に関する発生確率の不確かさの取り扱いについての議論を行った。
- ◆ 原子力規制検査における個別事項の安全重要度評価プロセスのガイド案の作成の際に、レベル2PRAの重要度評価手法の検討で蓄積した知見を踏まえたガイド試運用版付属書7の案を取りまとめた。

今後

- ◆ 本プロジェクトで得られた知見等は、適宜、審査の技術支援に活用する。
- ◆ 得られた成果を公表する等して広く専門家の意見を反映し、1F事故の分析等に活用する。

6. 成果の公表等

◆ NRA技術報告

なし

◆ 論文投稿(1件)

M. Andreani, T. Nishimura, et al., “Synthesis of a CFD benchmark exercise based on a test in the PANDA facility addressing the stratification erosion by a vertical jet in presence of a flow obstruction”, Nuclear Engineering and Design 354, (2019).

◆ 国際会議プロシーディングス

なし

◆ 学会発表(10件)

西村 健、堀田亮年、「東京電力福島第一原子力発電所4号機における水素爆発の感度解析」、日本原子力学会2019 春の年会、茨城大学、3月20日～3月22日、2I05(2019)

ほか9件

◆ その他(1件)

T. Nishimura, M. Akiba, “FLACS simulation for HD-44 Open Benchmark”, OECD/NEA THAI3 6th PRG Meeting, (2019).

7. 今後の研究計画(行程表)

| | 平成29年度 | 平成30年度 | 令和元年度 | 令和2年度 | 令和3年度 | 令和4年度 |
|--|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
| (1) 格納容器破損防止対策評価手法の整備 | | | | | | |
| 1) 総合現象解析コードによる評価手法の整備 | | | | | | |
| ○ MELCORによる実規模模擬解析技術の整備 | | | | | | |
| 国内BWR及びPWRプラントの事故進展解析 | | | | | | |
| 解析手法の妥当性確認 | | | | | | |
| SFPの事故進展解析 | | | | | | |
| 2) 個別現象解析コードによる評価手法の整備 | | | | | | |
| ○ 格納容器破損モード(水素燃焼)評価手法の整備 | | | | | | |
| 水素混合解析手法の整備 | | | | | | |
| 水素燃焼解析手法の整備、水素発生に関する知見整備 | | | | | | |
| ○ 格納容器破損モード(溶融炉心・コンクリート相互作用)総合評価手法の整備 | | | | | | |
| 炉外デブリの冷却性 | | | | | | |
| ○ 格納容器破損モード(雰囲気圧力・温度による静的負荷)評価手法の整備 | | | | | | |
| 格納容器等の静的・動的負荷に対する構造応答 | | | | | | |
| ○ OECD/NEA/CSNI主催の実験、解析及び調査プロジェクトからの情報収集 | | | | | | |
| 随時反映 | | | | | | |
| 新規規制基準に基づく重大事故等対処設備の有効性評価手法の妥当性確認等 | | | | | | |
| (2) 確率論的リスク評価に関連する評価技術の整備 | | | | | | |
| 1) レベル2PRA手法の整備 | | | | | | |
| ○ レベル2PRA手法の整備 | | | | | | |
| 一貫解析を考慮した格納容器イベントツリー定量化ツールの機能改良 | | | | | | |
| 外部事象の緩和策への影響評価 | | | | | | |
| 複数基地の影響評価 | | | | | | |
| 放射性物質放出挙動評価 | | | | | | |
| 随時反映 | | | | | | |
| 将来的な安全性向上評価等のガイドの改定等の要否の検討を含めた安全性に係る評価の高度化 | | | | | | |

| | 平成29年度 | 平成30年度 | 令和元年度 | 令和2年度 | 令和3年度 | 令和4年度 |
|-------------------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
| (2) 確率論的リスク評価に関連する評価技術の整備 | | | | | | |
| 2) レベル3PRA手法の整備 | | | | | | |
| リスク指標の検討 | | | | | | |
| リスク評価手法の整備 | | | | | | |
| 代表プラントにおけるリスク評価 | | | | | | |
| 適切な時期にガイド等への反映の要否を検討 | | | | | | |
| (3) 環境影響評価手法の整備 | | | | | | |
| 1) 放射性物質の環境拡散評価手法の整備 | | | | | | |
| 大気拡散モデル及び海洋拡散モデルの整備 | | | | | | |
| 陸上動態モデルの整備 | | | | | | |
| モデル統合化及び解析 | | | | | | |
| 2) 遮蔽解析に係る技術的知見の整備 | | | | | | |
| モンテカルロ法を用いた遮蔽解析に係る技術的知見の整備 | | | | | | |
| 点減衰核法及び S_N 法を用いた遮蔽解析に係る技術的知見の整備 | | | | | | |
| 随時反映 | | | | | | |
| 原子炉制御室等居住性に係る被ばく評価に関する新規規制基準への適合性評価 | | | | | | |

：今後の実施予定範囲