



Nuclear
Regulation
Authority, Japan

多次元溶融炉心 - コンクリート相互 作用解析手法の開発

2019年9月11日

日本原子力学会 秋の大会

原子力規制庁

長官官房技術基盤グループ

○森田 彰伸、堀田 亮年

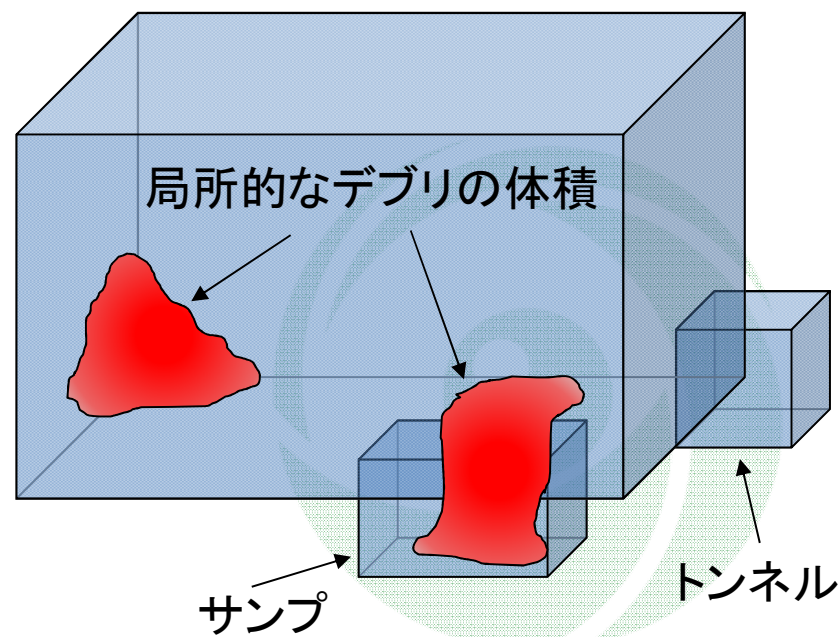


背景

- OECD/NEA MCCI実験において、非等的な侵食挙動や上面クラストが側壁に固着するアンカリングと呼ばれる現象が観察された。
- 実機プラントではサンプ、トンネル等の複雑な幾何形状を有している。
- キャビティ内で溶融物が十分に拡がらず、局所的に堆積した場合における溶融炉心-コンクリート相互作用(MCCI)評価手法が必要。



これらの現象や幾何形状の効果を実機プラントに外挿して評価するためには、3次元的なキャビティ形状を考慮可能な評価手法を用いることが望まれる。






3次元MCCI解析コードCORCAAB

MCCIを3次元的に評価するための解析手法として、3次元MCCI解析コードCORCAABの開発を進めている。

CORCAABは、以下の数値計算アルゴリズムを有している。

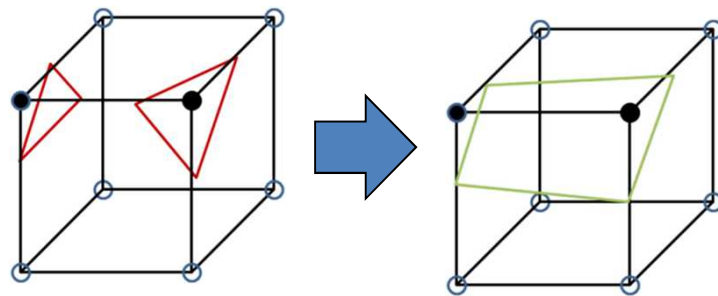
(本発表では、赤字を対象として報告する)

- **コンクリート侵食**
 - **溶融デブリ形状**
 - **クラスト成長**
 - 侵食速度
 - 上面クラストモデル
 - 溶融デブリ - クラスト/
コンクリート熱伝達
 - 崩壊熱
 - 分解ガス発生
 - 物性値ライブラリ
- 

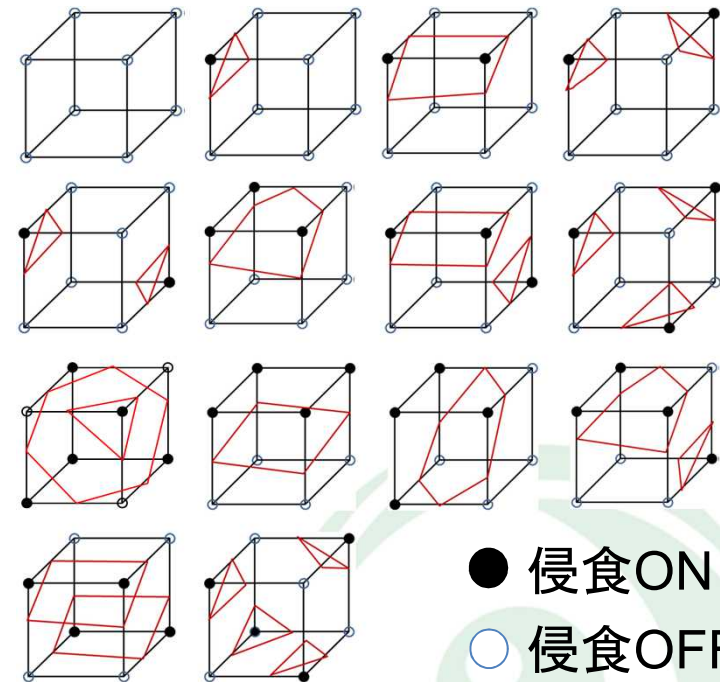
コンクリート侵食パターンの定義と分類

- 計算体系: 3次元直交デカルト座標
- PLIC(Piecewise Linear Interface Calculation)法※に基づき
コンクリート侵食面の進行を追跡

単一稜線上には最大で1つの侵食フロントが存在するものと仮定し、セル内の侵食面を14パターンに分類。



単一稜線上に複数の侵食フロントが存在する場合



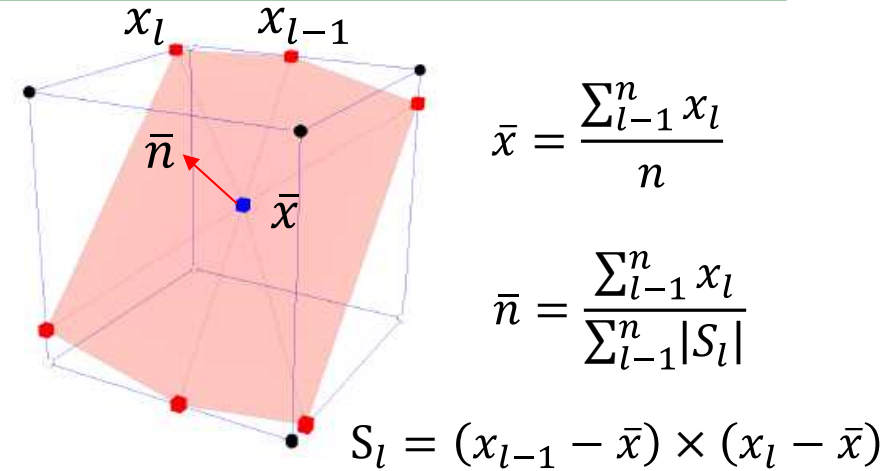
セル内での侵食パターンの分類
(赤線: 侵食面)

※Gueyffier et al., Volume-of-Fluid interface tracking with smoothed surface stress methods for three-dimensional flows, Journal of Computational Physics, Vol, 152, Issue 2, July 1999, Pages 423-456

侵食面積及び体積

侵食面積及び体積は、中心座標 \bar{x} と法線ベクトル \bar{n} を持つ平面を用いて計算する。

- 中心座標 \bar{x} ：各稜線上の侵食フロント座標の平均
- 法線ベクトル \bar{n} ：稜線上の2頂点と中心座標からなる n 個の三角形の法線ベクトルの平均



➤ 侵食面積 A_{abl}

$$A_{abl} = \frac{1}{2} \sum_{l=1}^n |(x_{l-1} - \bar{x}) \times (x_l - \bar{x})|$$

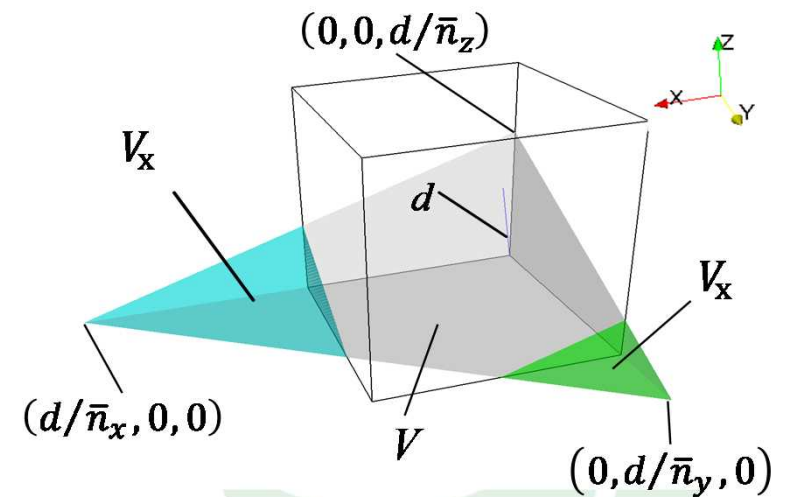
➤ 侵食体積 V_{abl} 、侵食体積率 β_{abl}

$$V_{abl} = \beta_{abl} \Delta x \Delta y \Delta z = V - V_x - V_y$$

$$= \frac{1}{6} \frac{d^3}{\bar{n}_x \bar{n}_y \bar{n}_z} - \frac{1}{6} \frac{(d - \bar{n}_x \Delta x)^3}{\bar{n}_x \bar{n}_y \bar{n}_z} - \frac{1}{6} \frac{(d - \bar{n}_y \Delta y)^3}{\bar{n}_x \bar{n}_y \bar{n}_z}$$

$$6 \bar{n}_x \Delta x \bar{n}_y \Delta y \bar{n}_z \Delta z \cdot \beta_{abl} = d^3 - (d - \bar{n}_x \Delta x)^3 - (d - \bar{n}_y \Delta y)^3$$

侵食面積計算例



侵食体積計算例

侵食形状(方向)

侵食平面が \bar{n} 方向に速度 v_{abl} で移動すると、稜線と交差する侵食フロントの移動量 δ_{abl} と座標は以下となる。

[x方向の例]

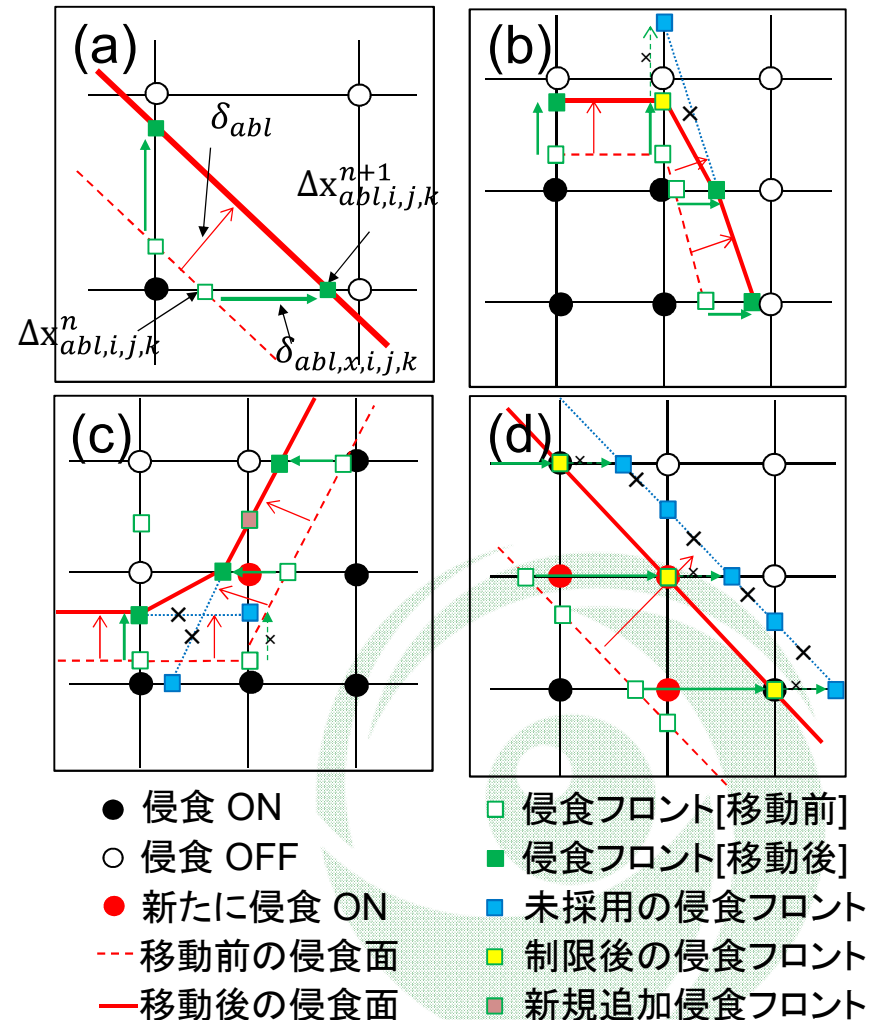
$$\delta_{abl,x,i,j,k} = \frac{v_{abl,x}\Delta t}{\bar{n}_x}$$

$$\Delta x_{abl,i,j,k}^{n+1} = \Delta x_{abl,i,j,k}^n + \delta_{abl,x,i,j,k}$$

侵食フロントがセル頂点を通過する場合、侵食フロント位置を調整する。

調整を加える場合の例:

- 侵食フロント移動量は隣接セルにおける最小値を採用[右図(b)]
- 侵食フロントがセル頂点を3方向同時に通過しない場合[右図(c)]
- 侵食フロントが2つ以上のセルの頂点を超える場合[右図(d)]





溶融デブリ形状

デブリ体積率 β_{deb} は以下の通り算出する
(セル内のデブリ上面は水平と仮定)

① [$Z_{i,j,k} \leq Z_{i,j}^{top}$ の場合] : $\beta_{deb} = \beta_{abl}$

② [$Z_{i,j,k-1} \leq Z_{i,j}^{top} \leq Z_{i,j,k}$ の場合] :

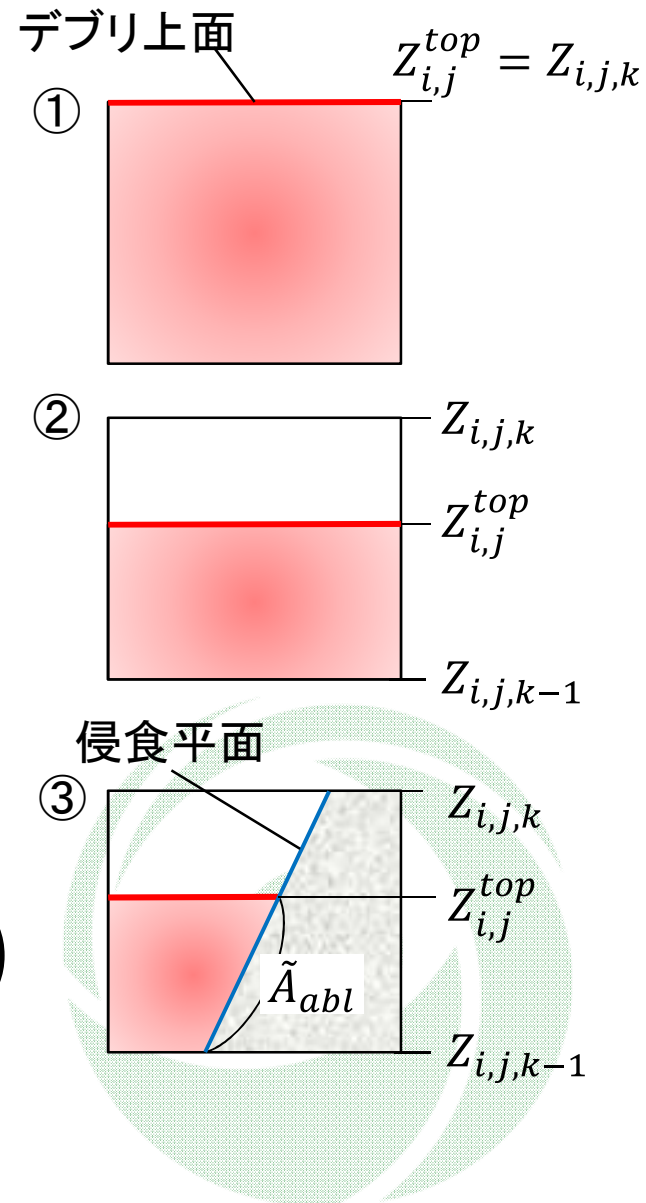
$$\beta_{deb} = \frac{Z_{i,j}^{top} - Z_{i,j,k-1}}{\Delta Z_k}$$

③ [侵食面が存在する場合] :

$Z_{i,j}^{top}$ を上端としたセル内で計算

$$V_{deb,i,j,k} = \tilde{\beta}_{abl,i,j,k} \Delta x \Delta y (Z_{i,j}^{top} - Z_{i,j,k-1})$$

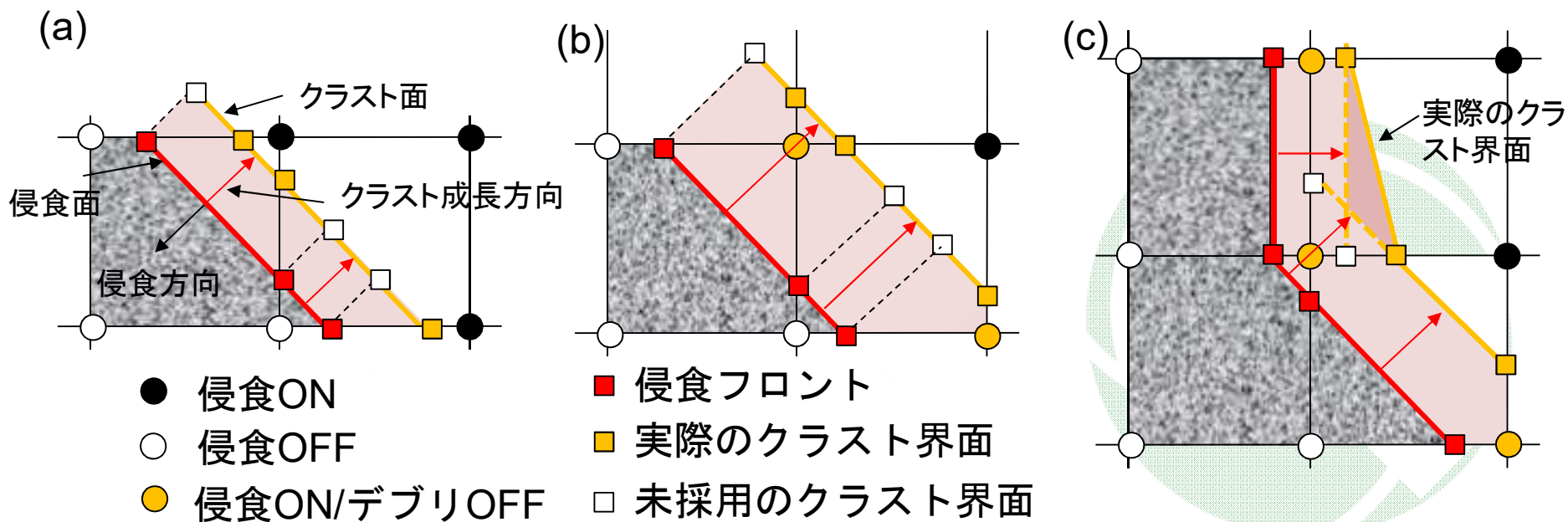
$$\beta_{deb,i,j,k} = \tilde{\beta}_{abl,i,j,k} \frac{Z_{i,j}^{top} - Z_{i,j,k-1}}{\Delta Z_k}$$





クラスト成長

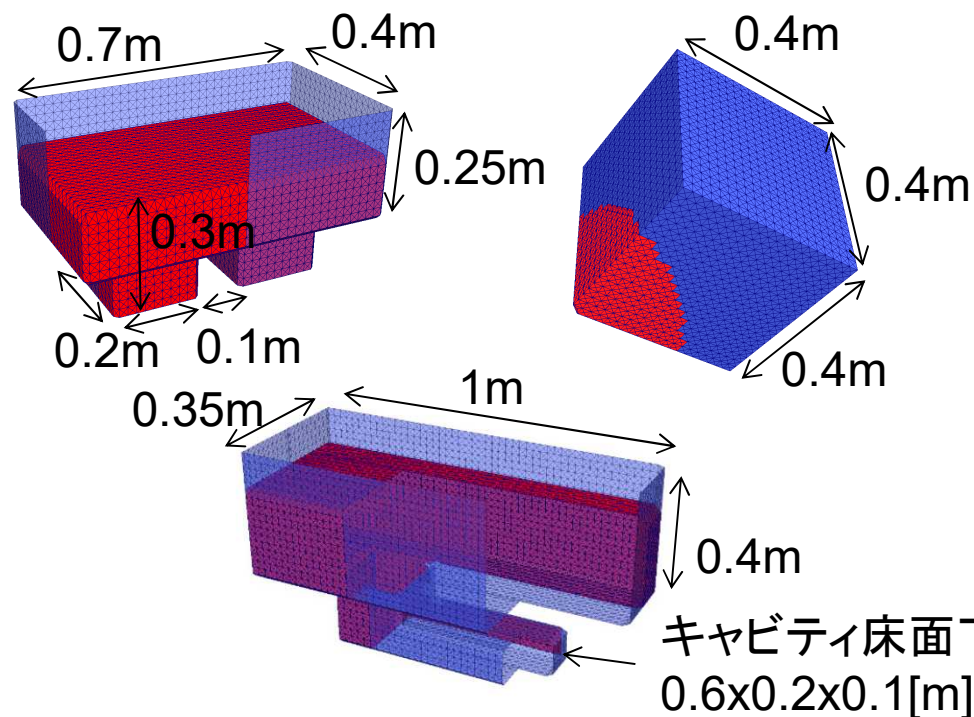
- 侵食面の法線ベクトル \vec{n} と反対方向にクラストが形成
- クラストの厚さはデブリ/クラスト/コンクリートの一次元熱収支計算より決定する。
- 侵食平面から平行移動した平面とセル稜線の交点をクラスト界面とする。[図 (a)(b)]
- 隣接するセルで侵食面の傾斜が異なる場合、クラスト面は図 (c)の形状とする。



機能確認解析

【解析対象】

- サンプを有する形状
- ドレイン管内溶融デブリ
- 局所への溶融物体積



青枠: キャビティ、赤枠: 溶融物

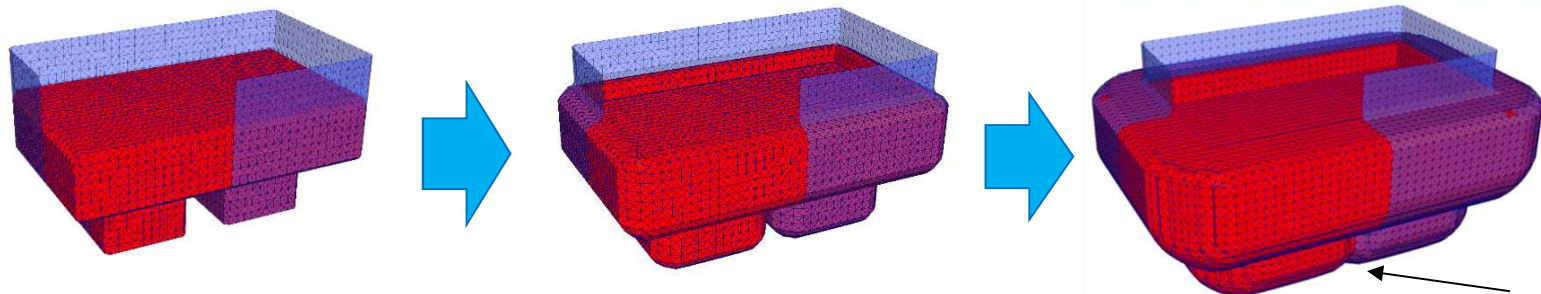
解析条件(共通)

パラメータ	値
メルト温度[K]	3000
発熱量[W/kg]	590
注水開始時間[s]	0
デブリ組成	単一組成
デブリ融点(K)	1600 K
コンクリート融点(K)	1400 K
コンクリート分解ガス	設定せず



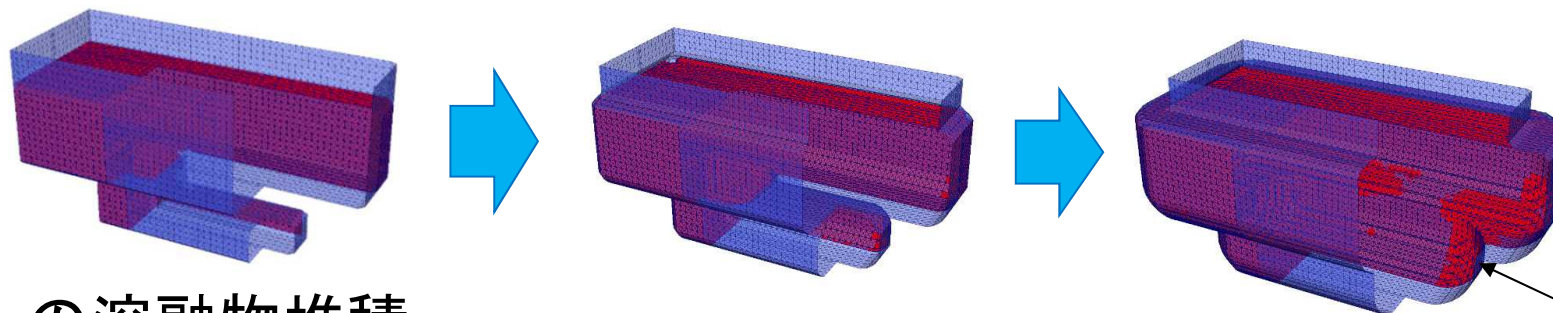
機能確認解析結果

サンプルを有する形状



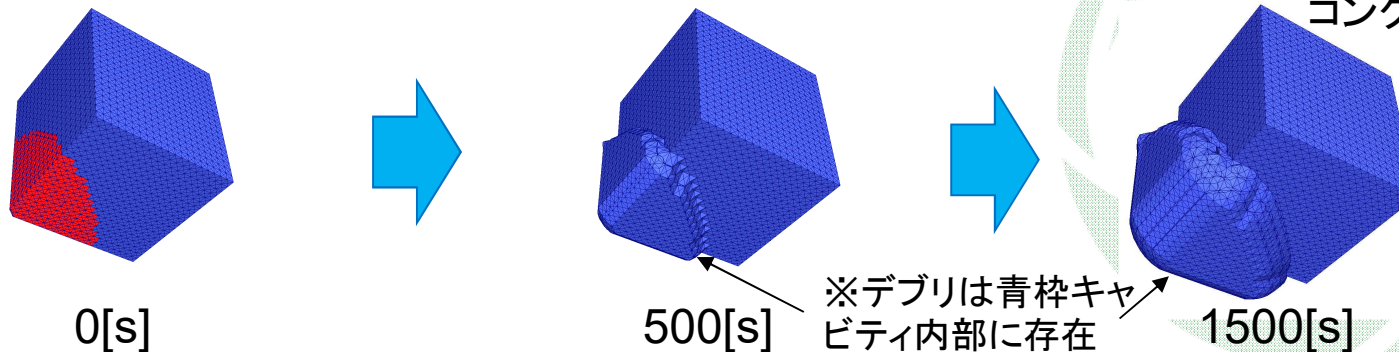
サンプルが合体

ドレイン管内溶融デブリ



上下からの侵食で
コンクリートが貫通

局所への溶融物堆積



0[s]

500[s]

1500[s]

※デブリは青枠キャ
ビティ内部に存在

まとめ

- 3次元MCCI解析コードCORCAABの開発を進めている。
- PLIC法に基づくコンクリート侵食アルゴリズムや、デブリ形状、クラスト成長に係る数値アルゴリズムをCORCAABコードへ組み込んだ。
- 侵食アルゴリズム等を組み込んだCORCAABコードを用いて機能確認解析を実施し、侵食アルゴリズムが適切に機能していることを確認した。
- 輻射による上部露出コンクリートの侵食や、局所的な侵食の進行等に課題があり、今後これらの課題に対する修正を進めていく。
- 今後、溶融デブリ中での金属／酸化物成層化モデル、クラストの破壊モデル等の組み込みを予定している。

ご清聴ありがとうございました。

