

# 燃料溶融複雑系シミュレーション

山下 晋

日本原子力研究開発機構  
原子力科学研究部門  
原子力基礎工学研究センター

## 燃料溶融複雑系シミュレーション

山下 晋, 高瀬 和之, 吉田 啓之

日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門・原子力基礎工学研究センター  
核工学・炉工学ユニット・熱流動研究グループ  
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4  
{yamashita.susumu, takase.kazuyuki, yoshida.hiroyuki}@jaea.go.jp

東京電力福島第一原子力発電所（1F）事故では、原子炉内でメルトダウンが発生し、溶けた燃料が原子炉圧力容器下部まで達していると言われている。今後の廃炉作業をできるだけ円滑に進めていく上で、溶け落ちた燃料がどの程度の量でどのように分布しているかを詳細に把握することは非常に重要であるが、高い放射線量により実際に確認することは困難である。

このような場合、数値シミュレーションによる予測が非常に有効であるといえる。これまで過酷事故時の数値シミュレーションは行われているが、溶融燃料の詳細な移行挙動を取り扱った例はほとんど報告されていない。また、1Fのような沸騰水型原子炉での過酷事故は世界に例がなく、ほとんどの数値シミュレーションは加圧水型原子炉を対象に行われているのが現状である。

そこで、本研究では、過酷事故時の炉内溶融物の移行挙動を詳細に再現することを目的として新たな数値シミュレーション手法 JUPITER の開発を行っている。溶融物の移行挙動に対して数値流体力学的手法を適用し、溶融物の炉内における熱伝導、溶融・凝固、流動挙動等を取り扱う。シビアアクシデント時に起こる現象は非常に多岐に渡り、その全てを数値流体力学的手法により再現することは極めて難しい。そこで、本研究では以下に示す現象を主に取り扱うこととする。

- 冷却材喪失による燃料の温度上昇（燃料の変形、熱伸び、亀裂、破断は対象としない）
- 融点を超える或いは下回る時の溶融・凝固挙動
- 溶融した物質の炉内構造物内の移行挙動
- 輻射伝熱、酸化反応（水-ジルコニウム反応など）、共晶による溶融

本研究では、現在までに、熱伝導、温度回復法による相変化、埋め込み境界法による炉内構造物界面表現手法並びに、複数の成分が存在する炉内構造物（ $UO_2$ 、 $B_4C$ 、 $Zry$ 、 $SUS$ 等）を区別するためのVOF（Volume Of Fluid）関数による多成分流体シミュレーション機能により、温度上昇による炉内構造物の溶融とその移行挙動をシミュレーションするための基本的な機能の妥当性を確認している。これにより、詳細な燃料の流動の取り扱いと、多成分の取り扱いが可能になり、発熱する物質である $UO_2$ 及び非発熱体である構造物（ $Zry$ 、 $SUS$ 、 $B_4C$ ）を含んだ体系での一貫したシミュレーションによって、既存のシビアアクシデント解析コードの結果を補足する情報を提供できる見通しを得ることができると考えられる。今後は、化学反応や輻射などに関するシミュレーション機能の導入や実験データによる検証を図り、炉内溶融物の移行蓄積挙動のより正確な把握に対応する予定である。

本発表では、JUPITER 開発に関わる研究背景、JUPITER コードの概要（離散化手法、物理モデル等）、JUPITER コードに対する検証計算及び複雑形状内の予備計算結果を示すとともに、今後の展望について述べる。

# 燃料溶融複雑系シミュレーション

原子力基礎工学研究センター  
核工学・炉工学ユニット  
熱流動研究グループ  
山下 晋

## 背景・目的



### 背景

炉内のデブリ蓄積分布、量等の詳細な予測  
→ 廃止措置への貢献



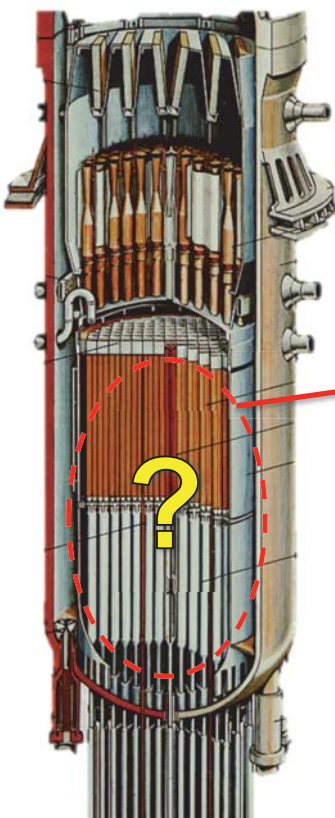
炉内溶融物移行挙動に関する知見不足のほか、BWRの燃料集合体、炉心支持板、下部プレナムの構造物は複雑。  
→ **溶融物移行挙動に大きな不確定性**



溶融燃料挙動を現象論的に評価し、構造の違い等の影響を評価できる数値解析手法の開発



目的 **炉心溶融進展シナリオの提示**



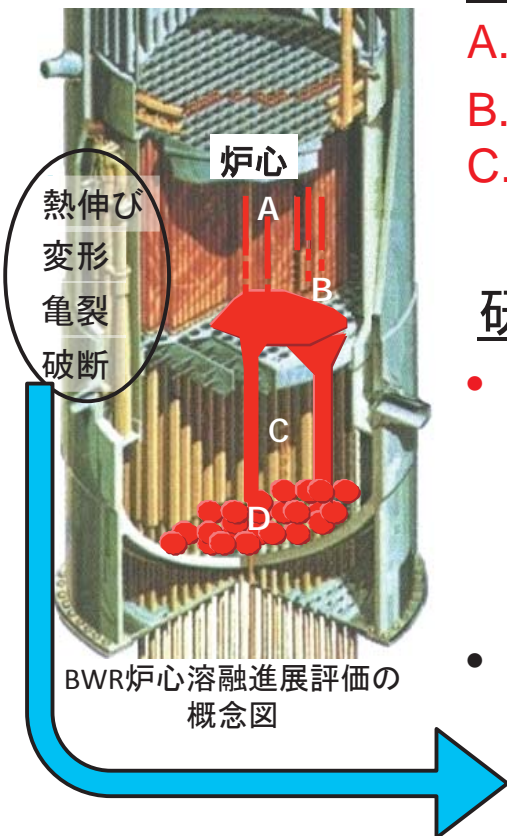
## 対象とする現象

- A. 冷却材喪失による炉心の温度上昇
- B. 燃料集合体の溶融（溶融特性、相変化）
- C. 燃料集合体の溶融移行挙動（水平方向の広がり、流下形態、経路）

## 研究実施項目

- A, B, Cに対して統一した現象予測シミュレーション手法の開発
  - 複雑な構造物表現
  - 熱流動と構造の複合挙動
  - 界面物理現象（輻射、酸化反応、共晶等）
- 事故時炉内溶融物移行挙動の評価

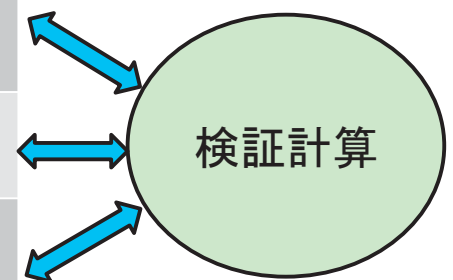
構造変形を伴う現象に関しては、粒子法により取り扱う。



## 現象の予測シミュレーション手法開発へ向けて

数値流体力学(CFD)的手法に基づく解析手法を適用

課題	解決策
1. 炉内溶融物移行挙動の取り扱い	非圧縮性流体解析手法の適用
2. 複雑な炉内構造物の取り扱い	埋め込み境界法の適用
3. 異なる金属・物質の複雑な相界面挙動	多成分解析機能 界面捕獲手法の適用
4. 相界面間物理モデル	相変化、輻射、酸化反応、共晶、界面物理特性等のモデル組込



炉心溶融挙動に関する3次元熱流動シミュレーション手法  
JUPITER\*コードの構築

\*Jaea Utility Program with Immersed boundary Technique and Equations of multiphase flow analysis for simulating Relocation behavior of molten debris

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \quad \text{— 流体モデル}$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho(\phi_k)} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho(\phi_k)} \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ 2\mu(\phi_k) \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right\} + F_i,$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = \frac{1}{\rho(\phi_k) C_v(\phi_k)} \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \lambda(\phi_k) \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \frac{Q}{\rho(\phi_k) C_v} \phi_k.$$

$$\frac{\partial \phi_k}{\partial t} + \frac{\partial (u_i \phi_k)}{\partial x_i} = \phi_k \frac{\partial u_i}{\partial x_i}, \quad k : \text{component} - k$$

物性値定義

$$Y(\phi_k) = \sum_k (Y_k^S \phi_k^S + Y_k^L \phi_k^L) + Y^G \left[ 1 - \sum_k (\phi_k^S + \phi_k^L) \right].$$

## 支配方程式

- 連続の式
- 非圧縮性流体のナビエ・ストークス方程式
- エネルギー方程式
- 界面捕獲方程式: 流体率関数により固・気・液三相の熱物性値を定義。

## 数学モデル

- 時間積分: 3次精度Runge-Kutta, 陰解法
- 移流項: 5次精度WENO, 3次精度風上
- 拡散項: 2次中心差分
- 界面捕獲手法: THINC, THINC/WLIC法

## 物理モデル

- 相変化: 温度回復法
- 表面張力: CSFモデル
- 固相表現: 埋め込み境界法

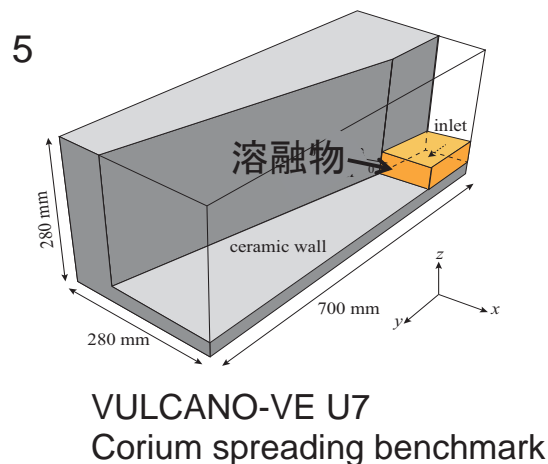
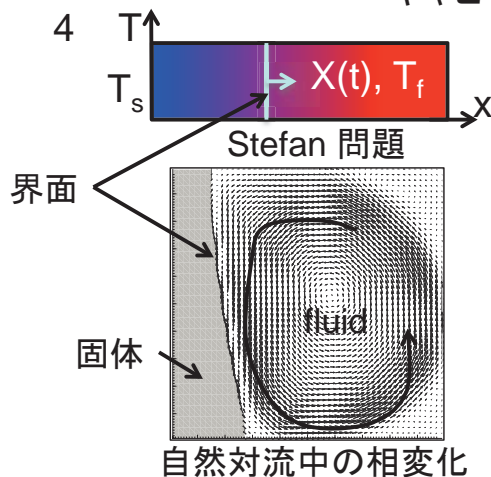
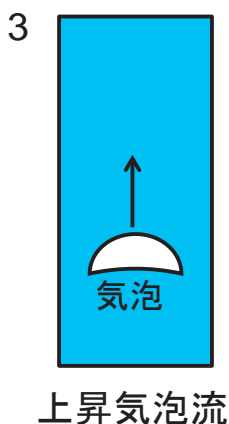
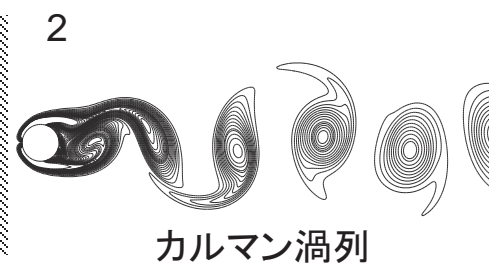
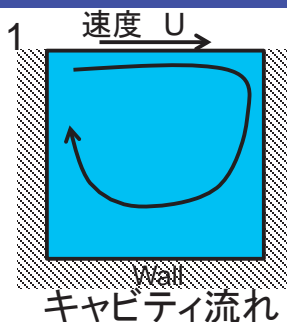
\*Jaea Utility Program with Immersed boundary Technique and Equations of multiphase flow analysis for simulating Relocation behavior of molten debris

5

## JUPITERコードの検証



1. 単相流
2. 流体中の個体境界
3. 自由界面挙動
4. 相変化問題
5. 複合事象  
(流動, 相変化, 自由界面)

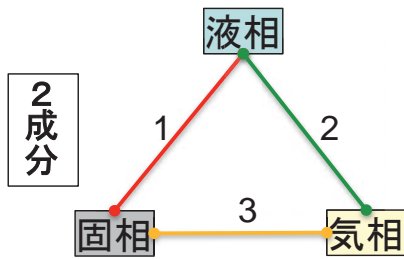


JUPITERの結果は、既往研究の結果と良好な一致を示した。

6

# 界面捕獲機能の多成分系への拡張

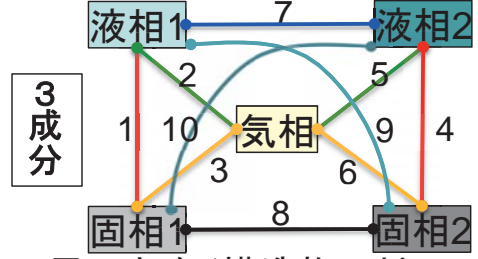
【燃料+構造物】+【冷却材】



3界面のみ(構造物に対して単一成分)

液相と固相界面が1つしか存在しない。  
→ 発熱体と非発熱体を区別できない。

【燃料】+【構造物】+【冷却材】



10界面存在(構造物に対して2成分)

発熱・非発熱体の界面を区別できる。  
→ 崩壊熱を持つ成分と持たない成分の区別。

拡張

**N成分(任意のN成分を扱えるようにした)**

Components :

$N = 2, 3, 4, 5, 6, \dots$

Total phase :

$N_p = 3, 5, 7, 9, \dots = 2N - 1$

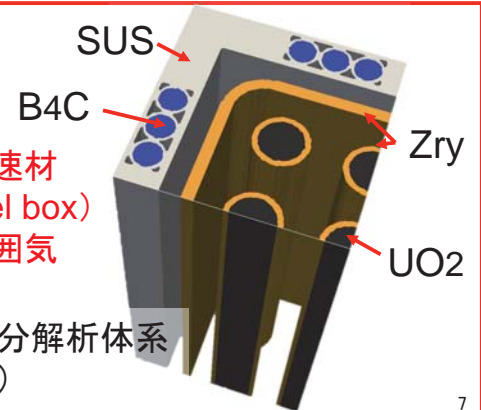
Interfaces :

$N_I = 3, 10, 21, 36, \dots = N_p(N-1)$   
 $= (2N-1)(N-1)$

例) 5成分体系

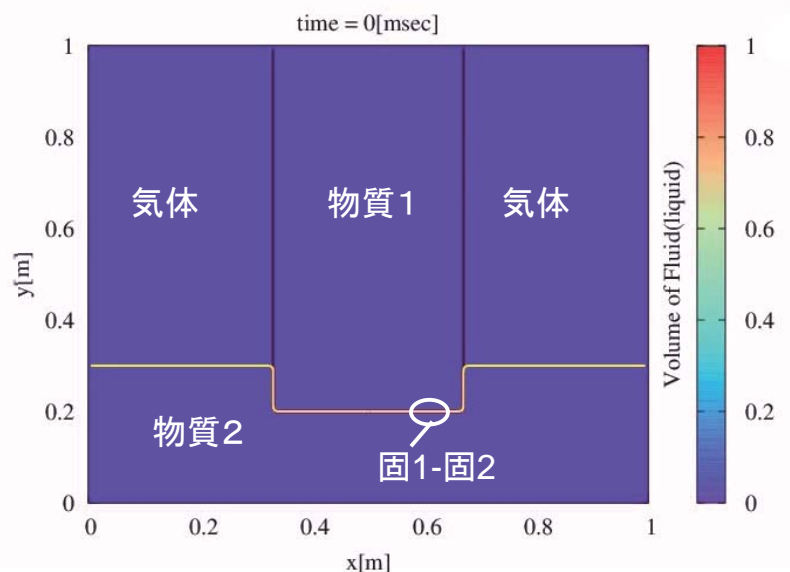
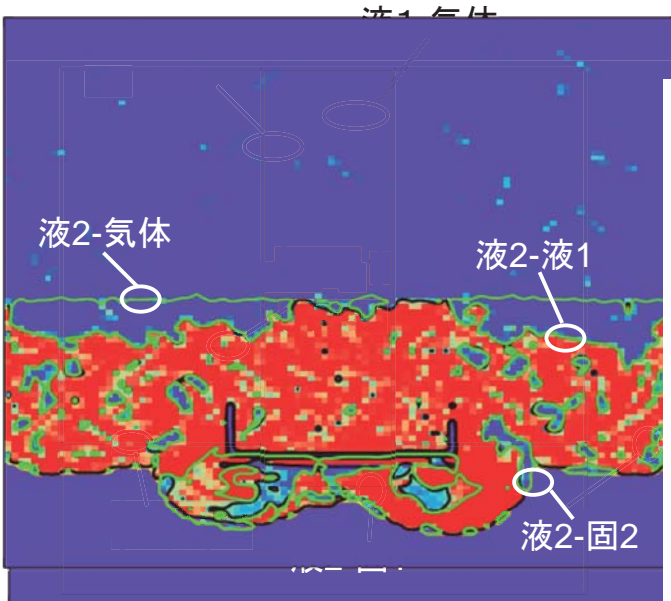
制御棒 + 中性子減速材  
+ (被覆管、channel box)  
+ 燃料棒 + 周囲雰囲気

JUPITERによる5成分解析体系  
(燃料集合体一部分)

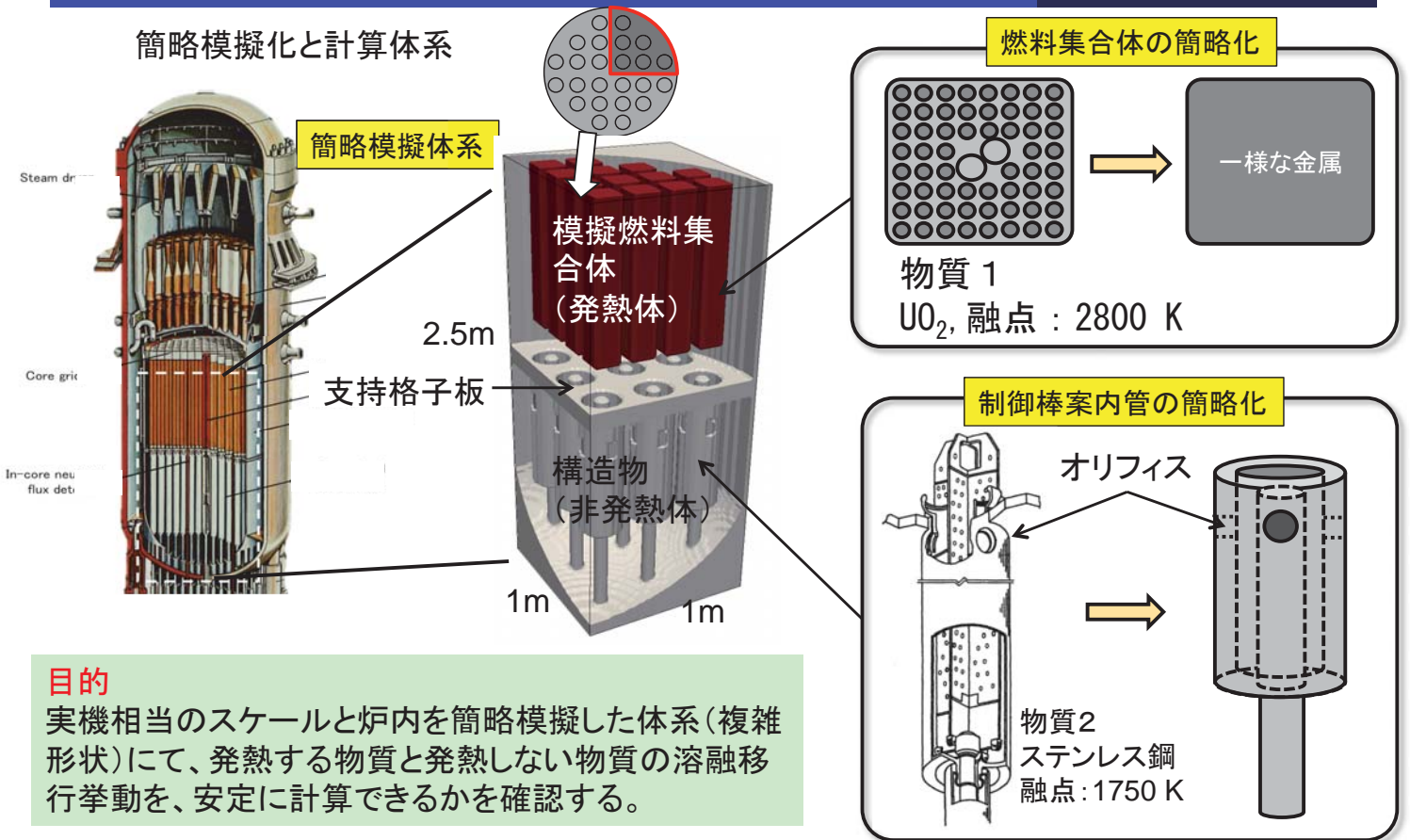


# 多成分解析機能の確認計算

密度: 物質1 > 物質2  
融点: 物質1 > 物質2



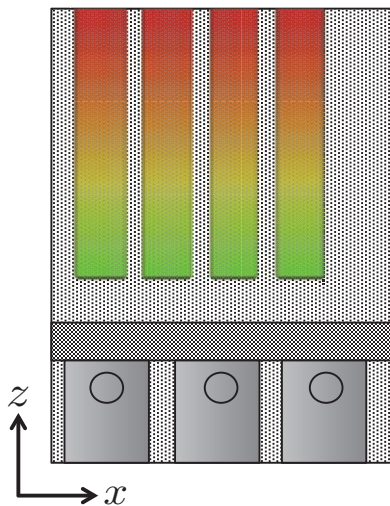
## 簡略模擬化と計算体系



### 目的

実機相当のスケールと炉内を簡略模擬した体系(複雑形状)にて、発熱する物質と発熱しない物質の溶融移行挙動を、安定に計算できるかを確認する。

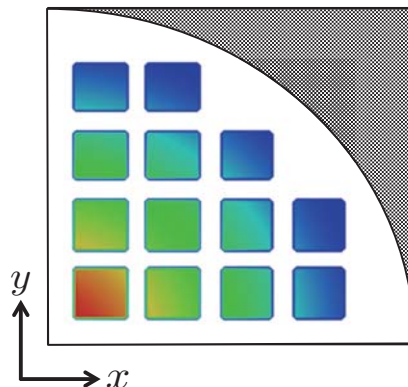
## 解析条件設定



初期温度分布(鉛直方向)

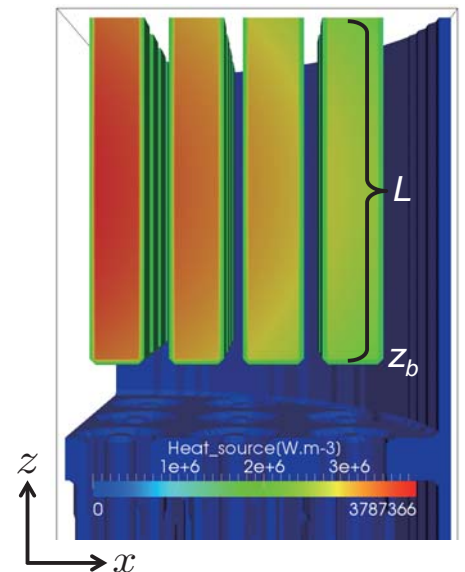
上部から下部へ  
温度勾配をつけた。  
2800 K ~ 2795 K

半径方向には温度一定分布  
を仮定。



発熱量分布(半径方向)

中心部:  $4 \times 10^6 \text{ W/m}^3$   
外周部:  $2.4 \times 10^6 \text{ W/m}^3$   
リニアに減少すると仮定。

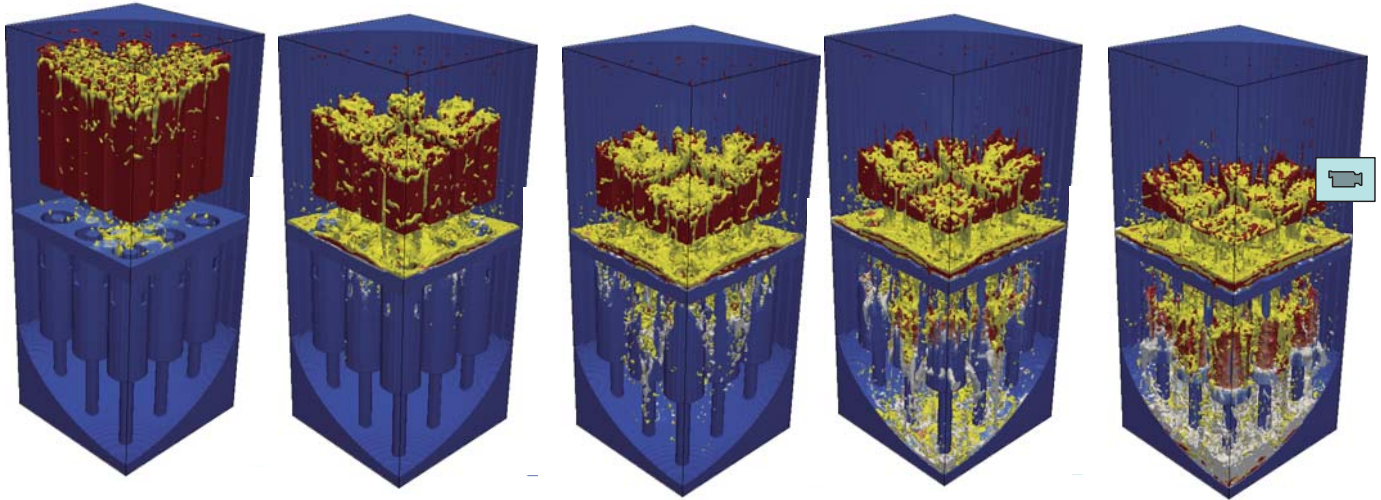


発熱量分布(鉛直方向)

$$Q(z) = Q_0 \cos[z - (z_b + L/2)]$$

$$Q_0 = 4 \text{ MW/m}^3$$

炉内溶融物移行挙動 (黄色:溶融ウラン、白色部分:溶融構造物)



構造物損傷過程

11

## 酸化反応モデル組み込み 水-ジルコニウム反応

ZrO<sub>2</sub>の生成量算出式としてBaker-Justの式を用いた

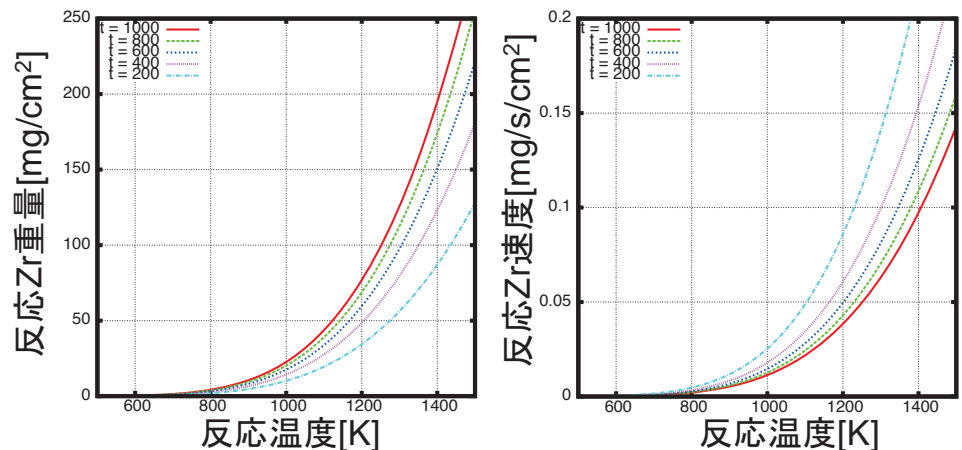
$$\omega(t)^2 = (33.3 \times 10^4) t \exp(-10875 / RT) \quad [\text{kg/m}^2]$$

R: 気体定数 (8.314 J K<sup>-1</sup> mol<sup>-1</sup>)

T: 温度 [K]

$\omega$ : 酸化量 [kg m<sup>-2</sup>]

上式を $t$ で微分し、接触面積濃度を掛けることにより、反応速度  $r = \partial(a_0\omega)/\partial t$ が求まる。



12

## Baker-Justの式をtで微分(酸化速度)

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \frac{33.3 \times 10^2 \exp(-1.902 \times 10^5 / RT)}{2\omega} \equiv \frac{f(T)}{2\omega} \quad [\text{kg/m}^2/\text{s}] \quad (1)$$

### 1. 酸化速度は(1)式で評価

$$\left(\frac{\partial \omega}{\partial t}\right)^n = \frac{f(T^n)}{2\omega^n}$$

R : 気体定数 8.314 J/K/mol  
 Zr分子量: 91.2 g/mol  
 ZrO<sub>2</sub>分子量: 123.2 g/mol

### 2. 時刻n+1における酸化量の計算

$$\omega^{n+1} = \omega^n + \left(\frac{\partial \omega}{\partial t}\right)^n \Delta t \quad n=1 \text{の時は、Baker-Justの式により}\omega \text{を求める。}$$

### 3. Δt間の酸化反応によるVOF値変化量の計算

$$\phi_{Zr}^{n+1} = \phi_{Zr}^{n+1} - \frac{a_0}{\rho^n} \left(\frac{\partial \omega}{\partial t}\right)^n \Delta t, \quad \phi_{ZrO_2}^{n+1} = \phi_{ZrO_2}^{n+1} + \frac{a_0}{\rho^n} \left(\frac{\partial \omega}{\partial t}\right)^n \Delta t$$

※ρはZrを使用、ZrとZrO<sub>2</sub>の密度差によるVOF値の差異に関しては今後検討

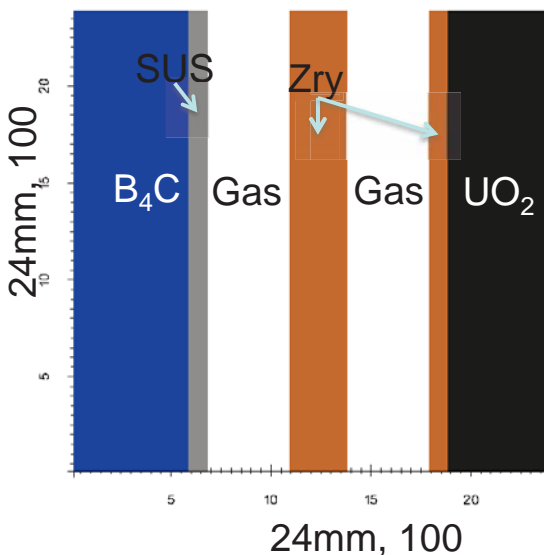
### 4. 発熱量

$$Q = a_0 \Delta H \left(\frac{\partial \omega}{\partial t}\right)^n \quad [\text{W/m}^3/\text{s}]$$

ΔH = 4.756 × 10<sup>6</sup> J/kg  
 a<sub>0</sub> : 接触面積濃度  
 (Δx<sup>2</sup>/Δx<sup>3</sup> = 1/Δx)

13

## テスト計算 (2D)

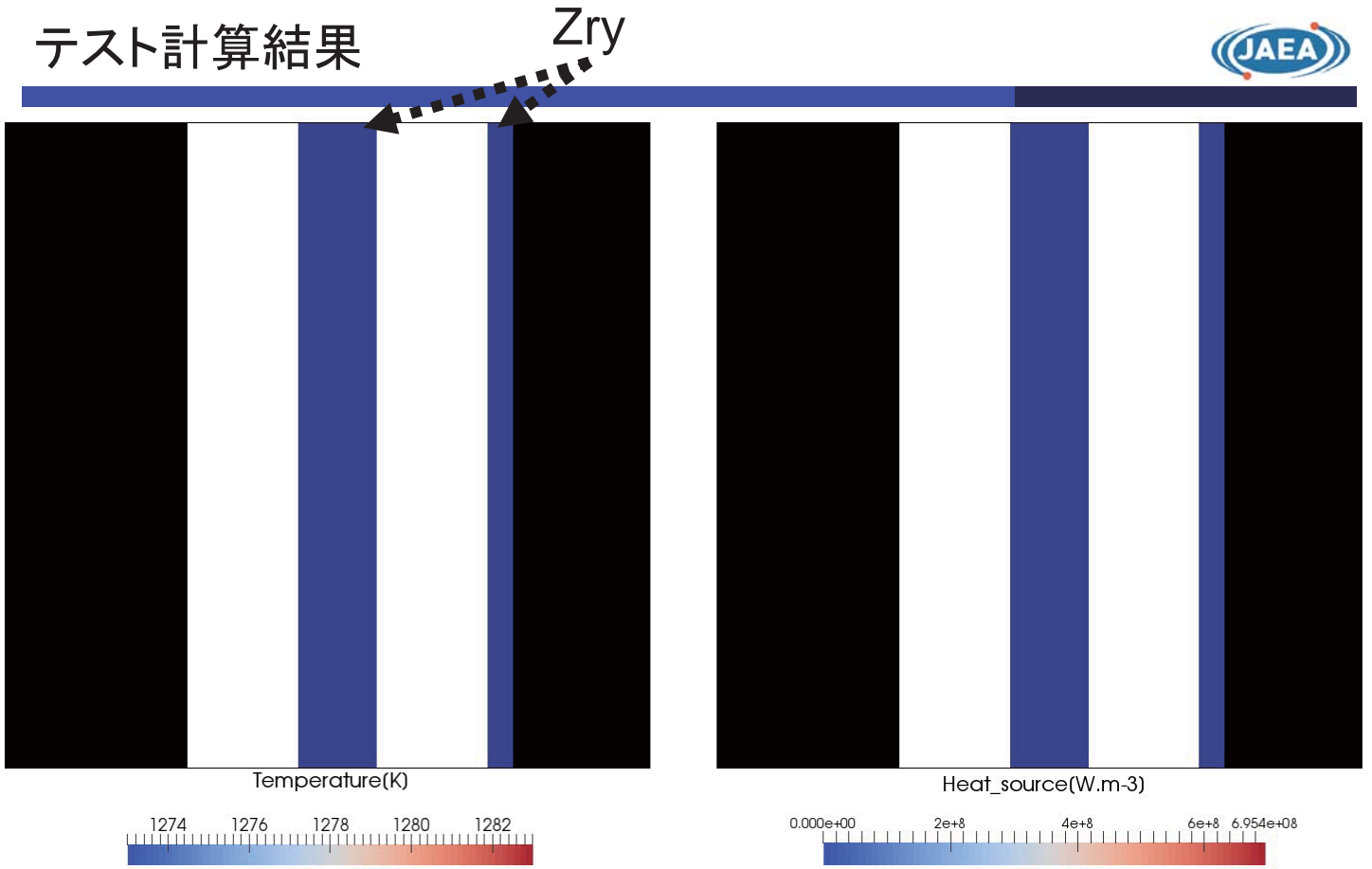


初期温度  
 すべて1273K

物質	密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	比熱 [J/kg K]	熱伝導率 [W/mK]	粘性係数 [Pa s]	融点[K]
UO <sub>2</sub>	10970	217.0	4.000	4.250e-3	3140
SUS	7700	750.0	28.00	6.000e-3	1723 → 1510
Zry	6520	278.0	22.60	6.000e-3	2128
B <sub>4</sub> C	2520	960.0	20.00	5.440e-3	3036 → 1500
ZrO <sub>2</sub>	6507	590	16.7	6.000e-3	2963
Air	1.225	1006	2.420e-3	1.790e-5	-

輻射無し

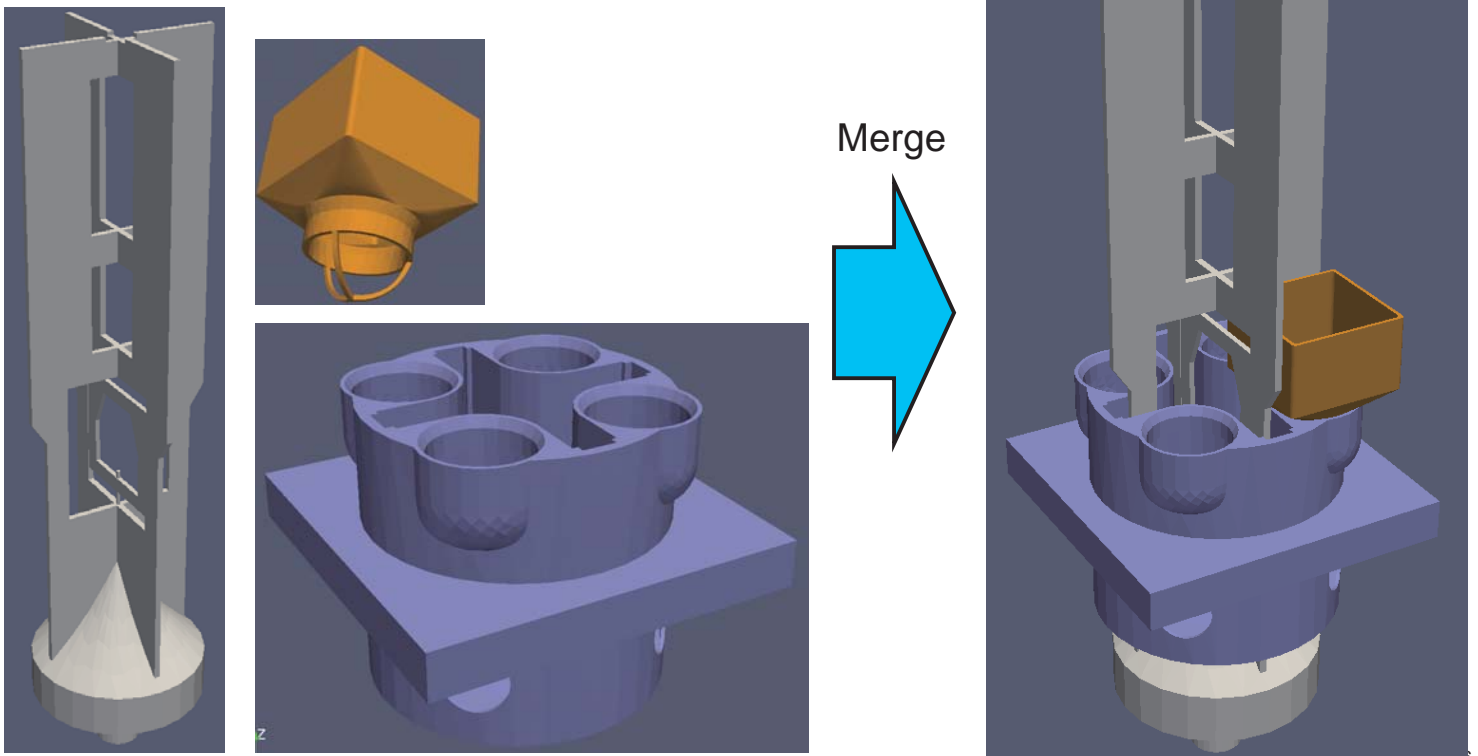
# テスト計算結果

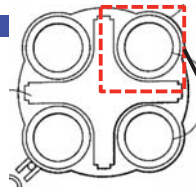
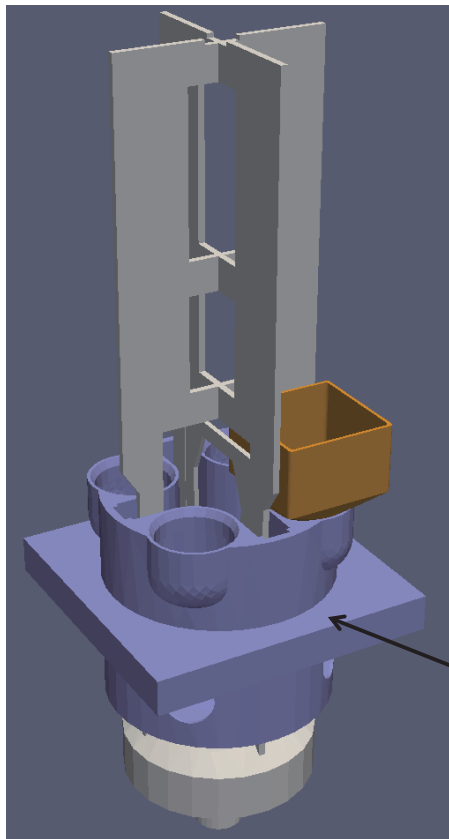


$T = 0 \sim 1.5 \text{ s}$

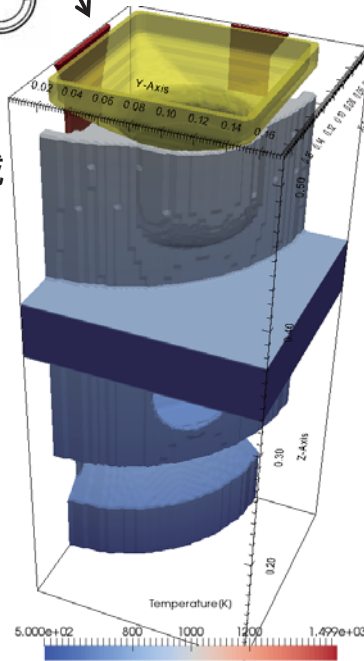
# 実機炉内構成材を用いた溶融物移行挙動計算

CAD data → STL → Converter → VOF (binary file)  
→ JUPITER or 3D printer



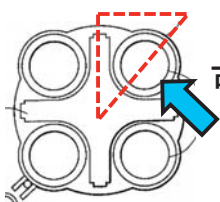
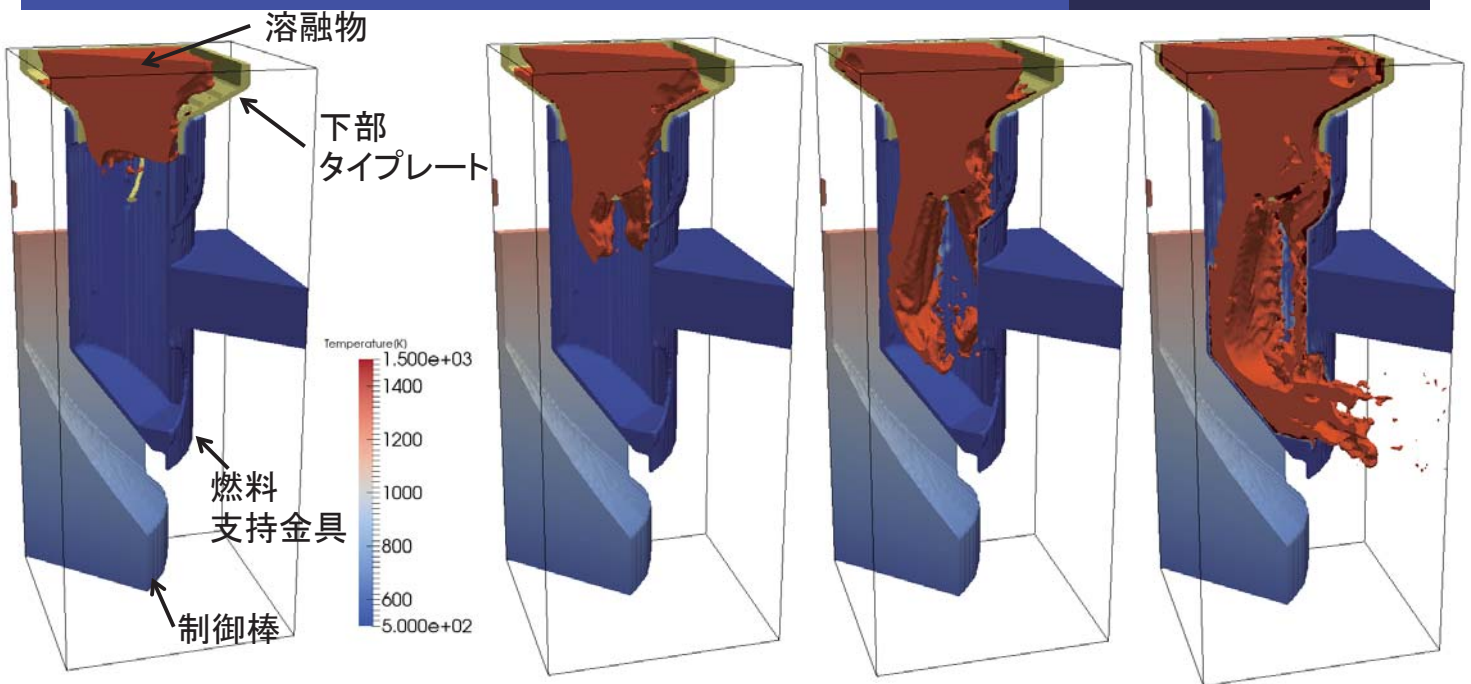


4分の1領域



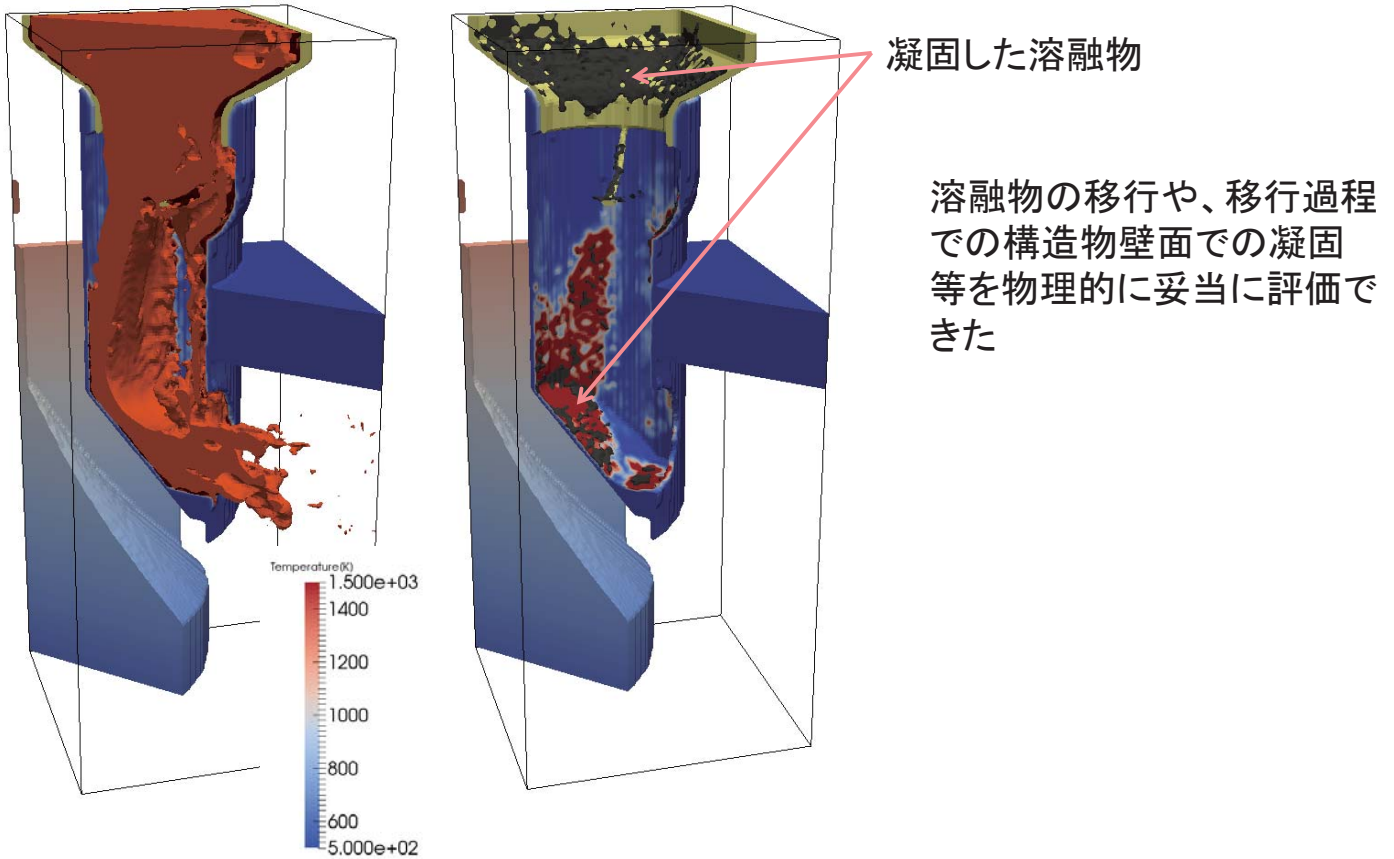
- 領域長:  
175×175×420mm
- 格子点数:  
100×100×240
- 下部タイプレート内の  
上境界から熔融UO<sub>2</sub>を  
0.5m/sで流入
- 速度境界: 流入領域以  
外は滑り無し境界
- 温度境界:
  - 下境界: 600K固  
定
  - x-z, y-z境界原点  
側: 1600K固定
  - 他: 断熱境界

# 計算結果



可視化断面

熔融物の支持金具内の流動場  
3次元CADデータを用いて作成した入力データに  
より計算が可能



19

## 将来のエクサスケール計算

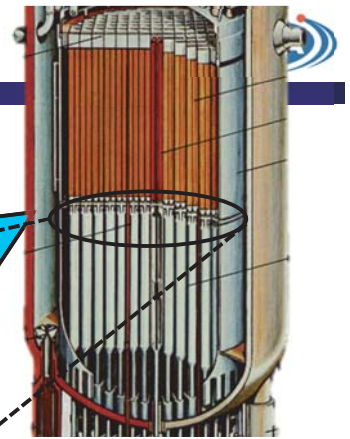
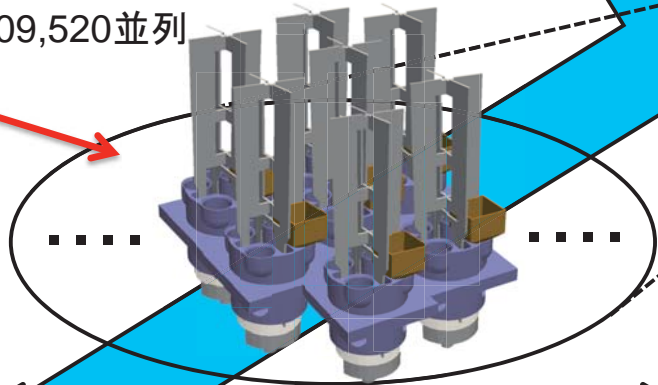
炉内構造物間の溶融移行挙動に着目する場合

3700×3700×1000mm

136億9000万点

1PE当たり $50^3$  : 109,520並列

ペタコンが必要



4800×4800×6000mm

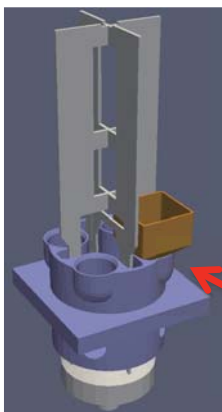
1382億4000万点

1PE当たり $50^3$  :

1,105,920並列

→ エクサコン?

1F1シュラウド径 3700mm



500×500×1000mm

格子幅1mmとすると、2億5000万点

1PE当たり $50^3$ とすると:2000並列

→ BX900で対応可能

20

BWR事故時の溶融物移行挙動の把握に向けて、溶融物移行挙動に対する現象予測シミュレーション手法を開発中

- 検証解析: 実験結果等とおおむね一致。妥当性を確認
- 複雑・大規模体系(形状簡略模擬)に対する機能確認計算  
大規模なスケールで複雑な溶融移行挙動を安定に計算できることを確認。
- 酸化反応モデルを導入し、Zryの温度上昇と発熱量の減少を
- 実機炉内構成材での溶融移行挙動において、支持構造物中の移行パスを機構論的に評価できる見通しを得た。

### 今後の予定

- 各種界面間物理モデルの構築・組込(輻射、酸化反応、共晶等)
- 実機炉内構成材でのパラメータ計算(流入量、構成材温度等)
- 詳細な解析を行い、SA解析コードの溶融解析モジュールの高性能化に貢献