

# ⑦デブリ取出時の未臨界確保方策 - H26-30年の成果概要 -

東京都市大学  
原子力安全工学科/共同原子力専攻  
竹澤 宏樹  
○高木 直行



# 各年度の検討題目

平成26年度：

◇燃料デブリの臨界性評価に必要な条件の検討と予備解析

平成27年度：

◇燃料デブリの臨界性評価に特有な解析手法とその予測精度検討

平成28年度：

◇デブリ取出時に想定される種々状況下での臨界性評価

平成29年度：

◇デブリ形態に応じた適切な臨界防止方策の検討

平成30年度：

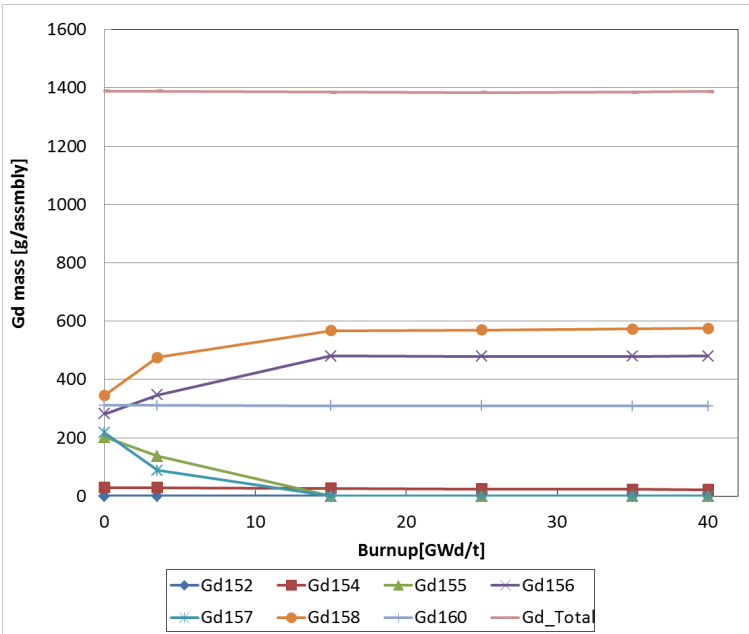
◇デブリ取出時の臨界防止方策の有効性評価

# 平成26年度

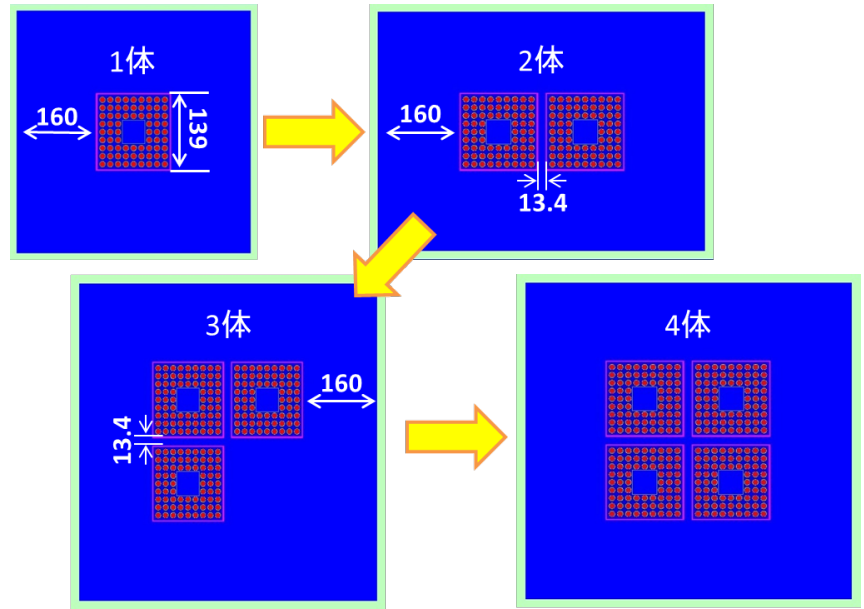
- 燃料デブリの臨界性評価に必要な条件の検討と予備解析
  - デブリには様々な化学形態、形状があると予想されているため、
  - 燃料デブリ臨界評価を行うにあたり必要なデブリ組成・形状・サイズ、燃焼後燃料組成等の条件について調査・検討を行う。

# 条件の検討と予備解析

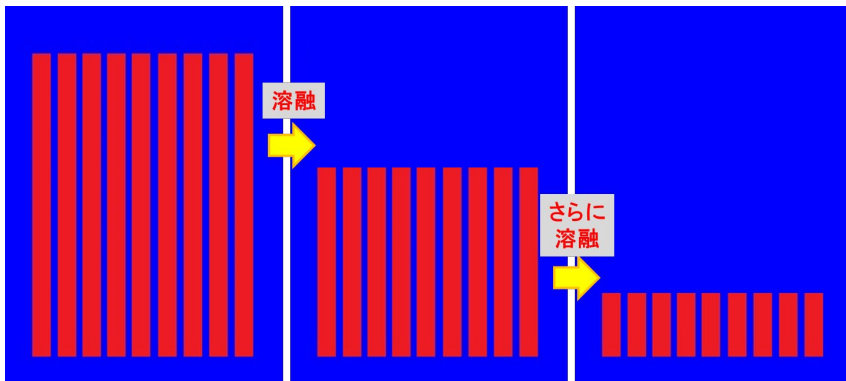
- 燃料組成の検討
  - 様々な燃焼度をもつ燃料集合体の混合物熔融組成の検討
  - 可燃性毒物残存量の検討
  - 燃料デブリ組成、ポロシティの検討
  - 水/デブリ体積比の検討
  - MCCI組成の検討
  - 様々な構造材物質を含む燃料デブリ組成の検討
- 燃料デブリの形状・寸法の検討
  - 残存燃料集合体の形状・配置・寸法の検討
  - 燃料デブリ堆積状況、形状、寸法の検討
  - 予備的臨界解析



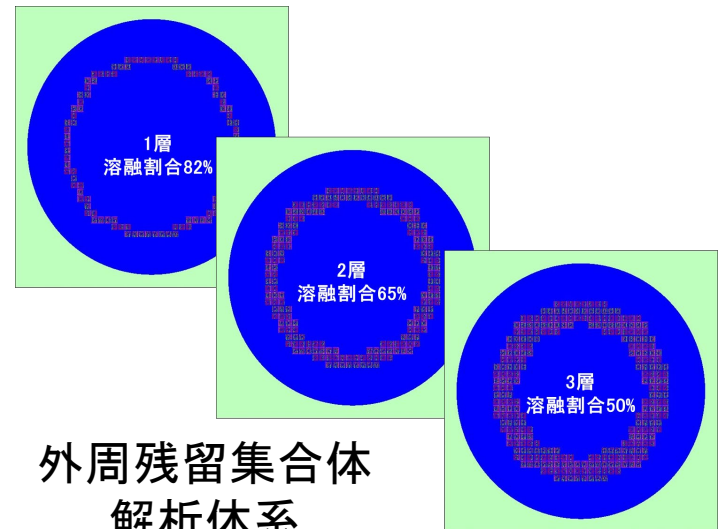
可燃性毒物残存量評価



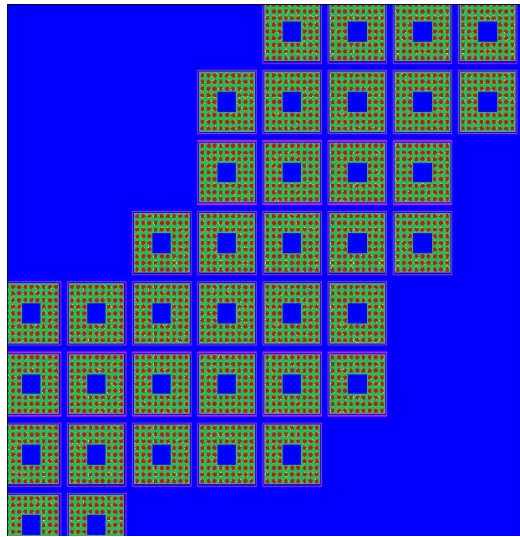
残存燃料集合体の形状・配置



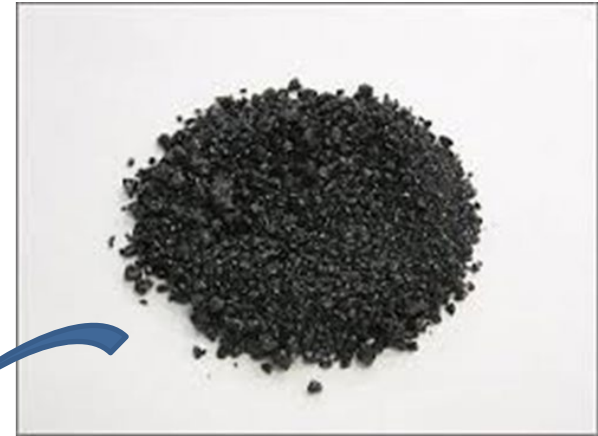
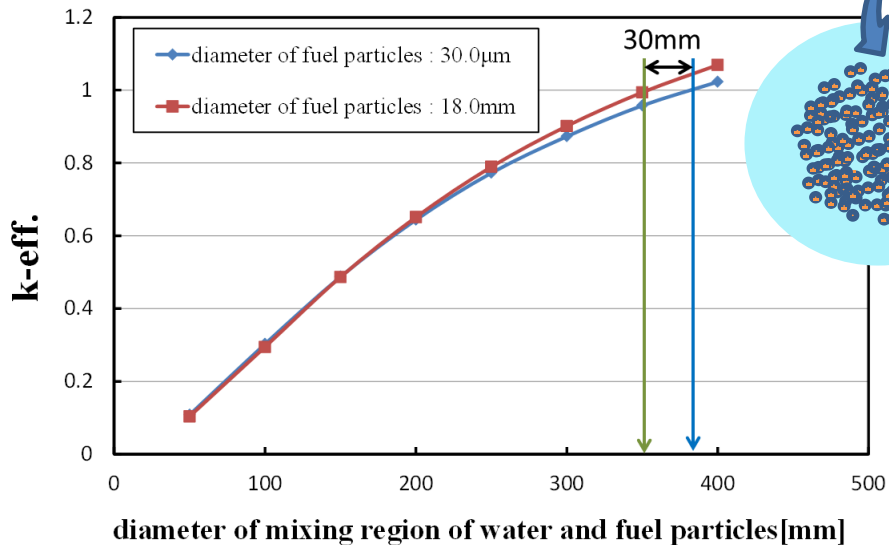
切り株状燃料の形状



外周残留集合体  
解析体系



外周残留集合体への  
凝固中性子吸収材投入効果解析



鉄鋼スラグ(非連続相)



溶岩石(連続相)

粉体デブリ・空孔ありデブリ形状

# 平成27年度

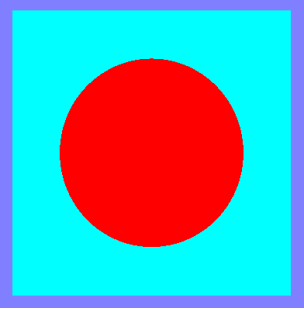
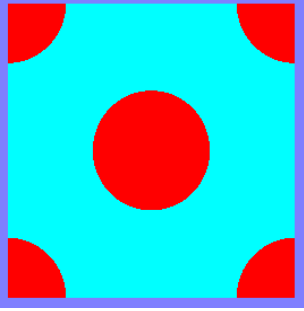
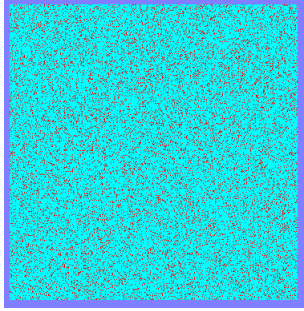
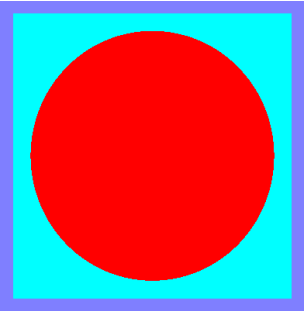
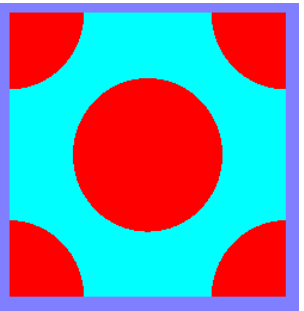
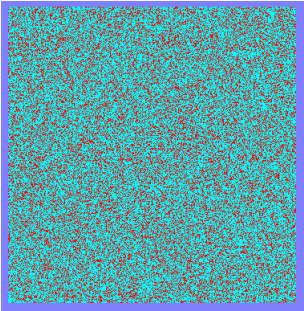
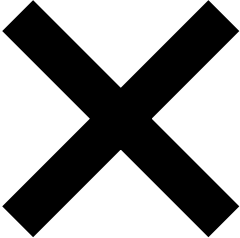
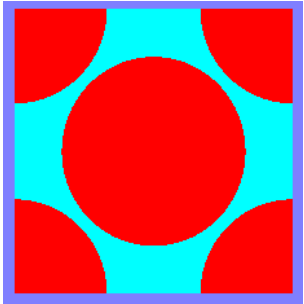
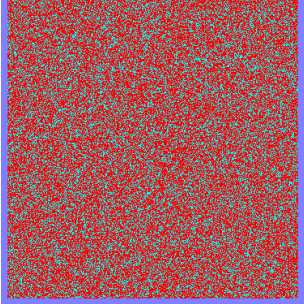
- 燃料デブリの臨界性評価に特有な解析手法とその予測精度検討
  - 燃料溶融プロセスの違いにより燃料デブリの均質性、サイズ、形状にはばらつきがあることが予想される。
  - また多数の粒子状デブリの空間位置を確率的に定めた場合と、任意に配置した場合では、臨界解析の結果に違いが生じることが分かっている。
  - 燃料デブリ特有の問題を踏まえ、臨界解析の妥当性や予測精度を調べるとともに、より高い精度で臨界解析を行うための解析手法を検討する。

# デブリ臨界性評価に特有な課題

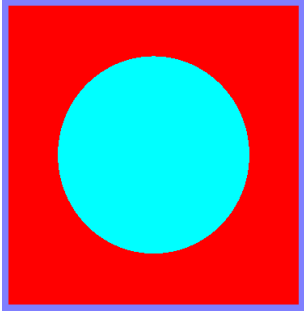
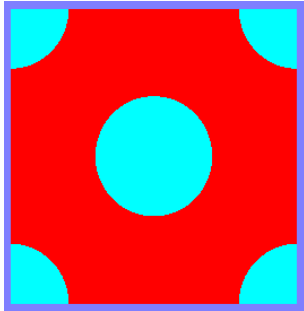
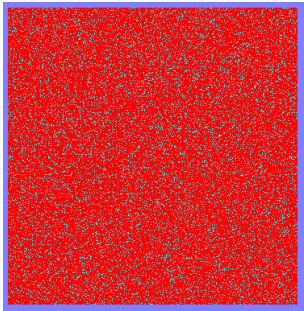
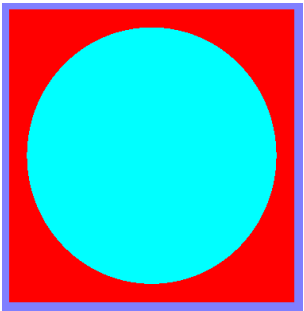
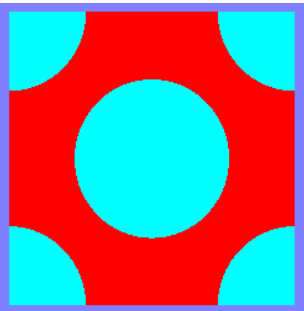
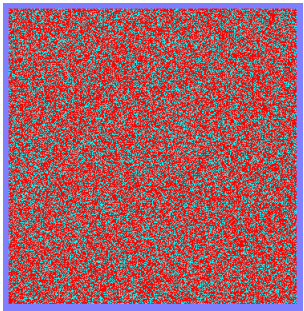
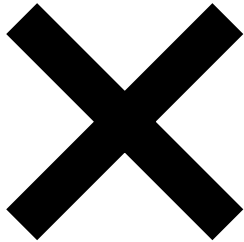
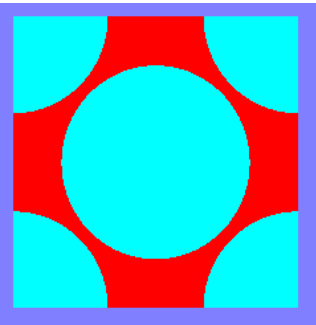
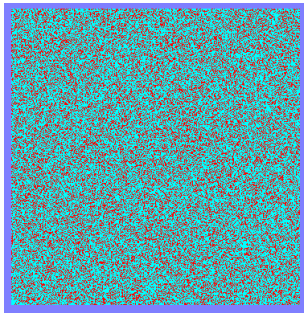
- 課題
  - 燃料デブリの均質性、サイズ、形状にばらつき
  - 燃料デブリの空間位置の定め方によって臨界解析結果に差異
- デブリ空間配置と臨界解析結果の相関について検討
  - 完全均質(溶液)
  - 球形固体デブリ
    - 正方格子状に配置
    - 面心立方格子状に配置
    - 確率論的に定められた空間に配置
      - ランダム配置(乱数により空間座標を決定)
      - モンテカルロ計算コードMVPの確率論的幾何形状モデル(Statistical Geometry Model: STGM)を用いた配置



# ①水霧団気中に粒子状デブリが存在する体系

	正方格子配置	面心立方格子配置	STGM
デブリ体積割合 15%			
デブリ体積割合 35%			
デブリ体積割合 65%			

## ② 固体デブリの空孔に水領域が存在する体系

	正方格子配置	面心立方格子配置	STGM
水体積割合 15%			
水体積割合 35%			
水体積割合 65%			

# H27年度成果まとめ

- A) 水体积割合が大きいと格子状配置とSTGMのk-inf.の差異は大きくなる。
- B) デブリ粒子半径が大きい(自己遮蔽効果の大きい)体系)ではk-inf.の差異は大きくなる
- C) STGMはk-inf.を過大評価する



- デブリ臨界解析評価では粒子配置方法の違いによってk-inf.に差異が生じる
- STGMを用いたデブリ臨界解析評価をもとにした、デブリ取出し作業には、合理化の余地がある

# 平成28年度

- デブリ取出時に想定される種々状況下での臨界性評価
  - 現在のところ、燃料デブリ取り出しは冠水後に行う方式が主概念とされている。
  - デブリ取り出し作業時においては、臨界性に大きな影響を与える水/燃料体積比が変化することが考えられるほか、燃料系の形状、寸法も変わり得る。
  - すなわちデブリ取り出し方法やそのプロセスとデブリ臨界性には強い関係性があるため、考え得る種々状況下での臨界性を把握しておく必要がある。

# シナリオの想定

- 冠水法
  - 燃料取り出し作業に伴う水体积やデブリ組成・形状の変化
  - 回収作業・移送中の燃料デブリの落下
  - 作業時の地震や振動
  - 冷却材流れや作業に伴う粉末状デブリ巻き上げ
  - 炉心外への流出
- 気中法
  - 減速材無し→臨界懸念無し

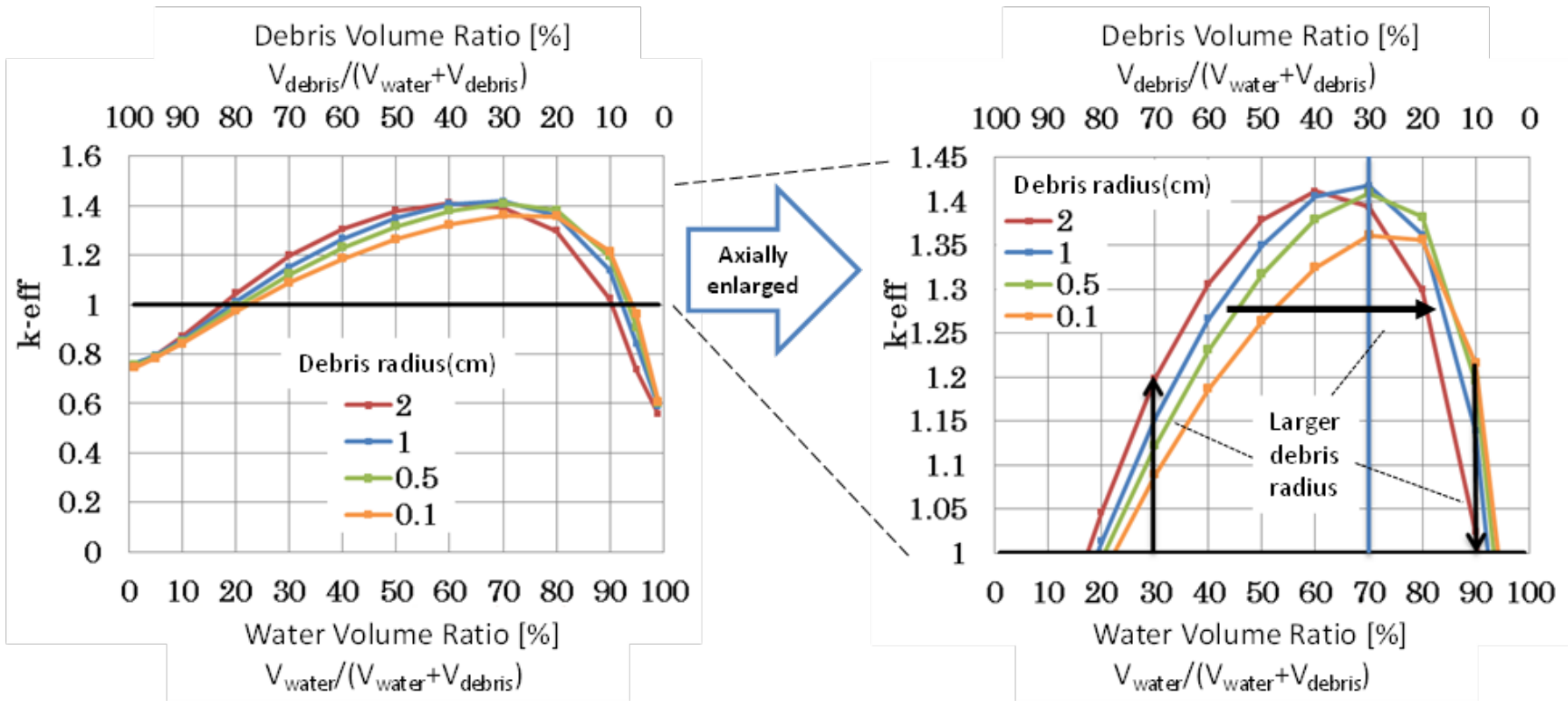


Figure. **Criticalities of fuel debris** as functions of water volume ratio and debris radius

The criticality of fuel debris was maximized at around 10mm of its radius and 60% of water volume ratio.

# 想定シナリオ

## STEP1

RPV下部ヘッド等に蓄積している  
デブリの破碎

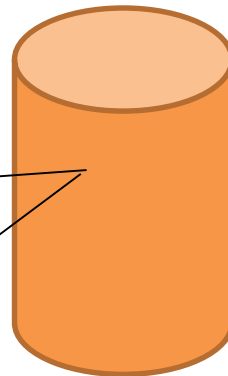
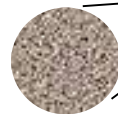


蓄積デブリ

## STEP2

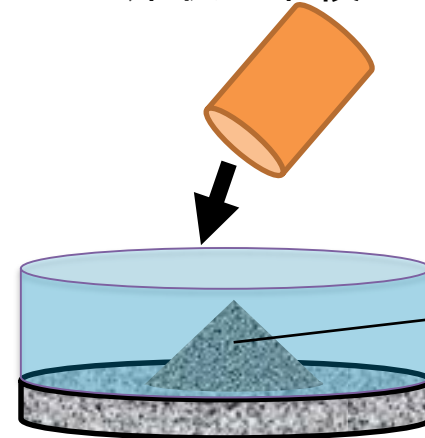
破碎したデブリを  
回収容器に  
収納

デブリ粒  
子



## STEP3

容器からデブリが  
全量落下し、  
構造材等に落下・  
円錐状に堆積



円錐堆積  
デブリ

# 円錐堆積角度 $\theta$ と臨界性

- 床-円錐デブリ系の臨界性は円錐堆積角度  $\theta$  に依存し、ピークを持つ
  - ✓ 床面が燃料を含まない場合：最大臨界角  $\theta_{\max} = 64^\circ$
  - ✓ 床面が燃料を含む場合：最大臨界角最小  $\theta_{\max} = 55^\circ$



床面の  $k_{\text{eff}}$  が増大すると、  
最大臨界角  $\theta_{\max}$  が安息角へ近接  
⇒ デブリ回収時 要注意！



例：ベルトコンベアから落下する砂\*6

\*5 青木隆一「IV. 粉体および煙霧体」[https://www.jstage.jst.go.jp/article/kakoronbunshu1953/25/3/25\\_3\\_199/\\_article/-char/ja/](https://www.jstage.jst.go.jp/article/kakoronbunshu1953/25/3/25_3_199/_article/-char/ja/)

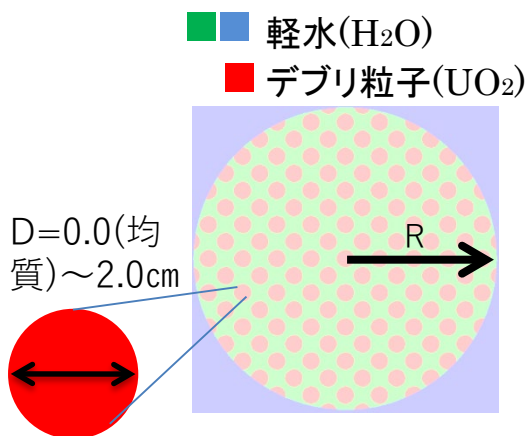
\*6 wikipedia「安息角」<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%AE%89%E6%81%AF%E8%A7%92>



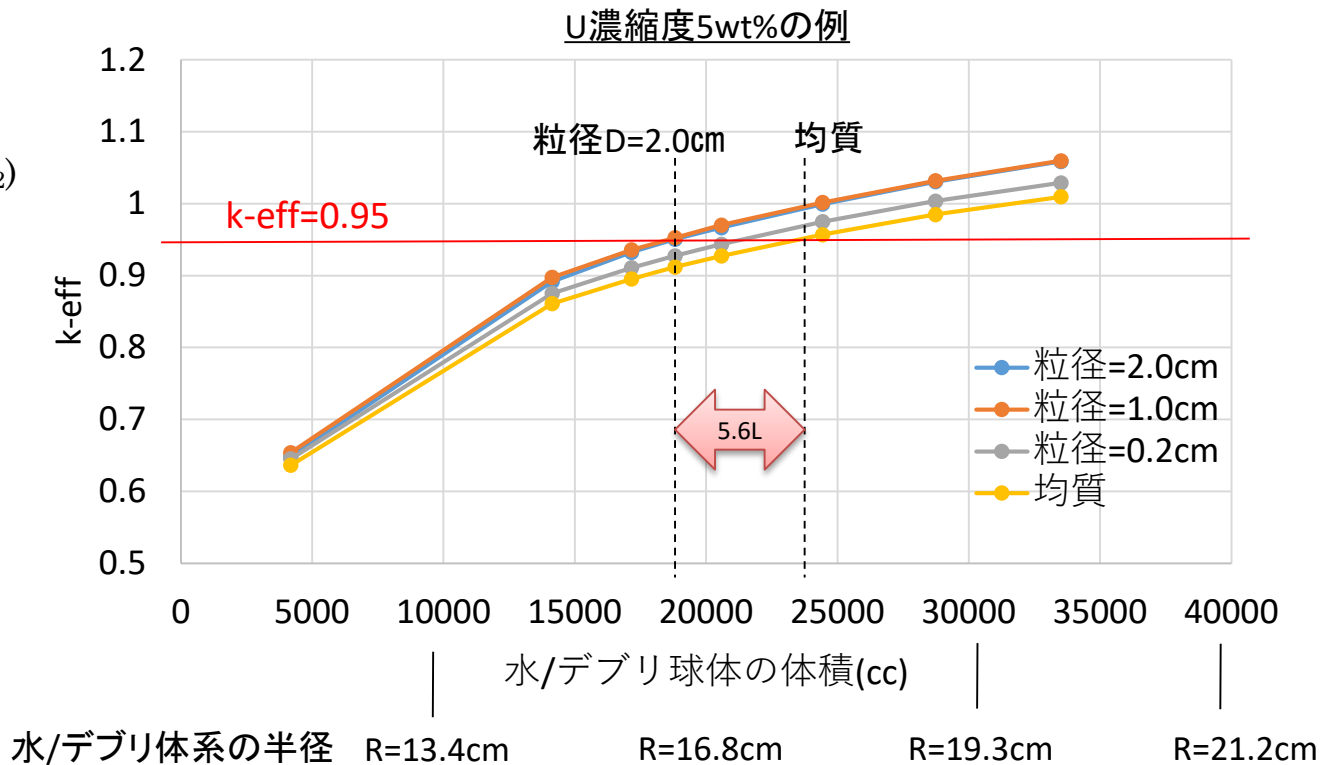
# 平成29年度

- デブリ形態に応じた適切な臨界防止方策の検討
    - 様々な組成、形態のデブリ取り出し作業にあたっての必要十分な未臨界度を設定し、それを確保するための方策を検討する。
    - デブリ状況に応じた中性子吸収材仕様やその必要量の評価、取り出し工法上の工夫等について検討する。
- 
- 再臨界防止策1（非溶解性中性子吸収材）
  - 再臨界防止策2（溶解性中性子吸収材）
  - 再臨界防止策3（減速材排除 & 中性子吸収材）

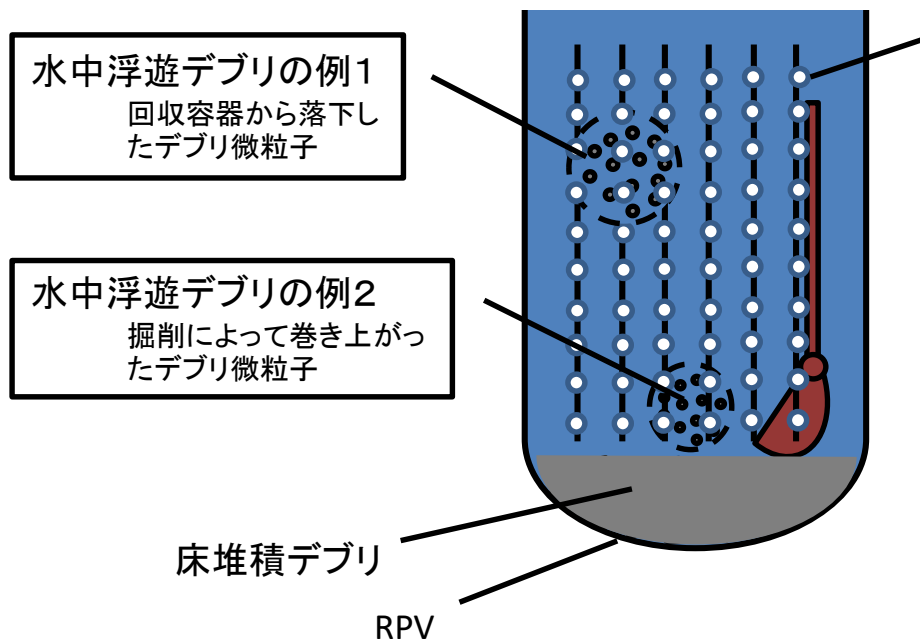
# 水中に浮遊するデブリ微粒子の臨界性



水中に浮遊する  
デブリ微粒子体系



# 定置型再臨界防止策の概念



- 中空または中性子吸収材を閉じ込めたアルミニウム製カプセル。
- 互いにワイヤなどで固定される。

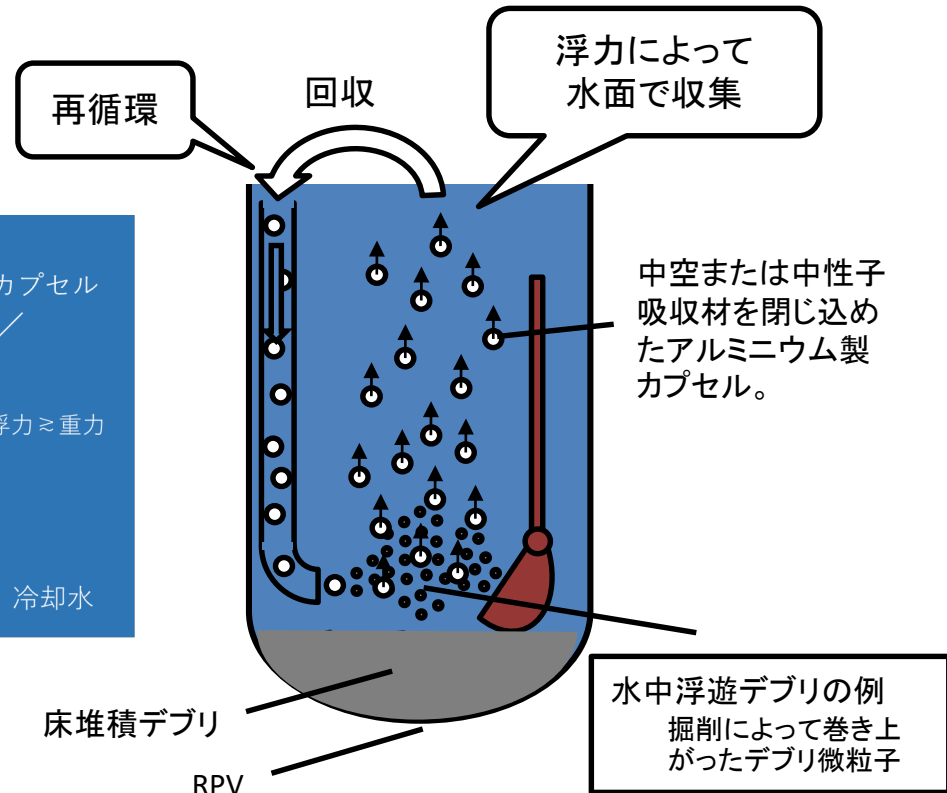
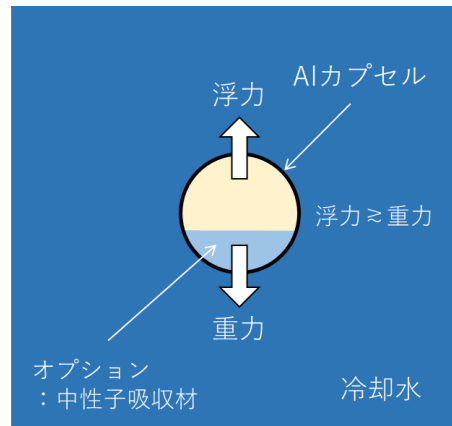
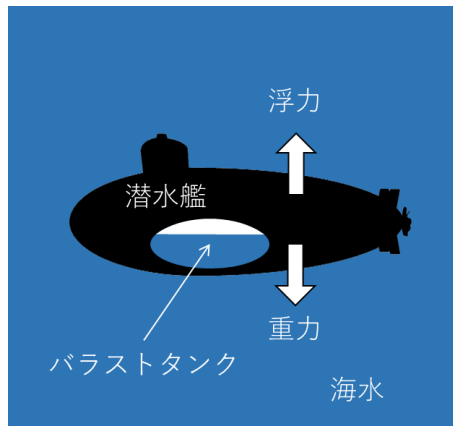
## メリット

- 中性子吸収材を空間的に配置可能

## デメリット

- 燃料デブリ取出し作業効率の低下

# 浮遊型再臨界防止策の概念



## メリット

- 中性子吸収材を空間的に配置可能

## デメリット

- 燃料デブリ取り出し作業効率の低下

# 解析条件

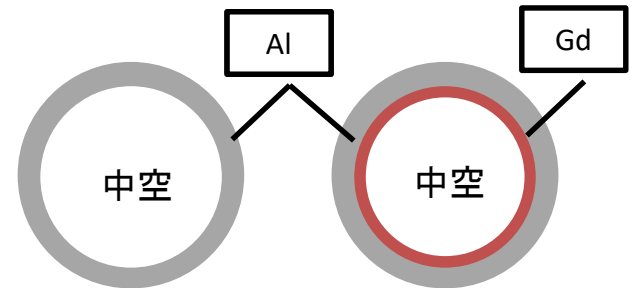
- 2つのアルミニウム製カプセルを想定

① 中空カプセル

② Gdコーティングカプセル

– パラメータ

- カプセル半径
- カプセルピッチ
- ガドリニウムコーティング厚さとカプセルAl厚さ(浮力 $\geq$ 重力)



①中空カプセル

②Gdカプセル

- 未臨界判定条件:  $k_{\text{eff}} \leq 0.95$

• 解析コード

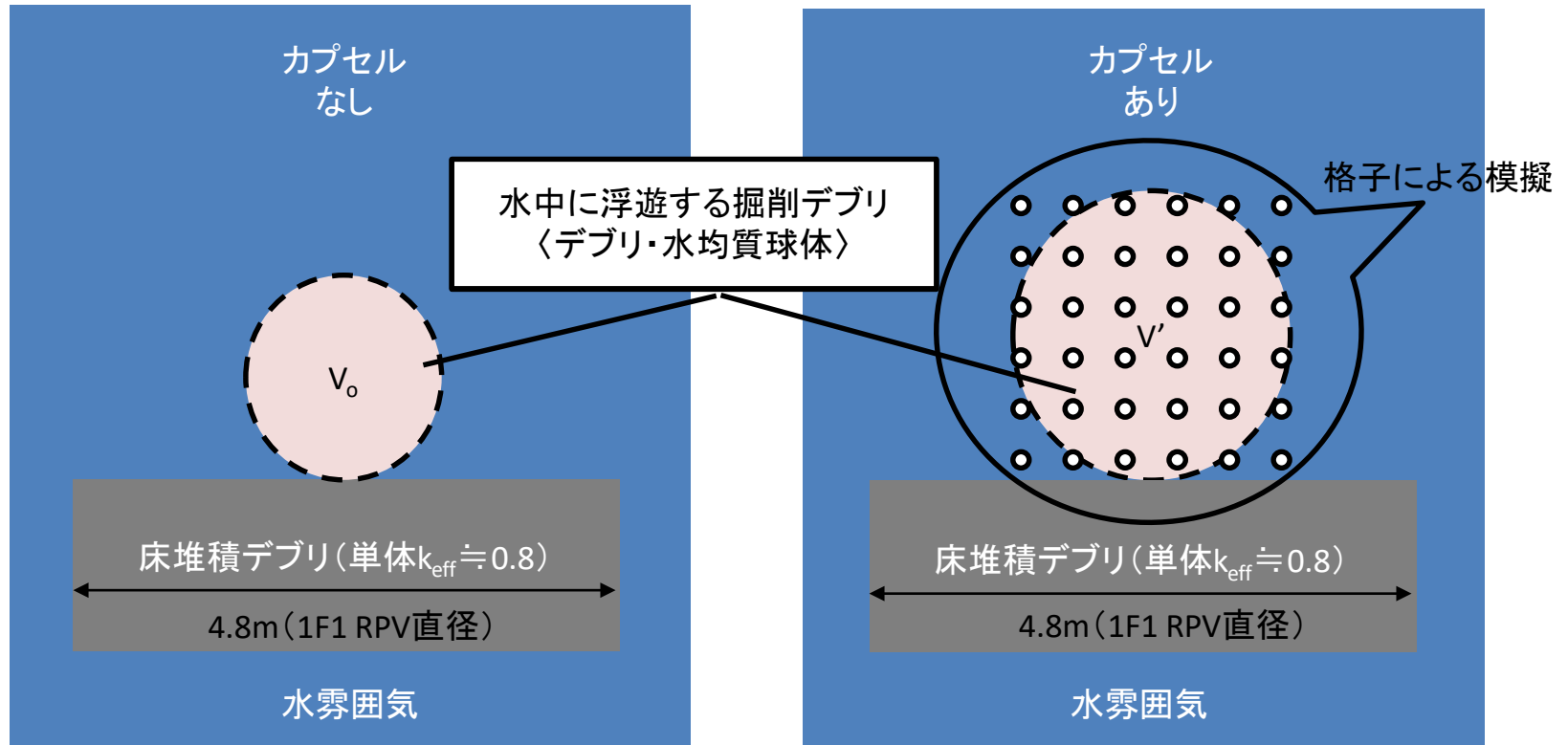
– 連続エネルギー中性子輸送モンテカルロ計算コード  
MVP2.0

- ヒストリ:10000、バッチ:200

• 核データ

– JENDL-4.0

# モデルと効果



100 $\mu$ mのGdコーティングした  
中空Alカプセル場合:

- 直径20cmのカプセルを  
10cm間隔で配置 $\rightarrow$   
 $V'/V_0$ : **約2.6倍**

メリット:

- 炉水へホウ酸を投入することなく中性子吸収材を炉内に配置
- 冷却水が止水されなくても臨界を抑制

課題:

- 燃料デブリ取出し作業機器の可動範囲を制限
- カプセル間隔の維持など

# 平成30年度

- デブリ取出時の臨界防止方策の有効性評価
  - 前年度までに検討した燃料デブリの臨界特性を踏まえ、提案された臨界防止方策の有効性評価を行う
  - さらに、臨界事故を生じさせることなく安全かつ速やかに熔融燃料デブリを回収する上で必要な中性子工学を基盤とする知見を整理する
  - 有効性評価のための課題：
    - 燃料デブリ粒子の組成
    - 燃料デブリ粒子の水中3次元ランダム粒子配置を模擬するMVP解析モデル

# デブリ粒子の 水中ランダム配置モデルの開発

- MVPの3次元ランダム粒子配置オプション
  - 確率論的幾何形状モデル(STGM)
    - 使用方法1:ユーザーが最近接粒子分布(NND)\*1を入力
    - 使用方法2:粒子の半径と充填率のみに依存する内蔵された最近接粒子分布関数を利用
- モデル開発方針
  - 3次元ランダム粒子配置に対する最近接粒子分布解析コードを開発する
    - 3次元剛体球空間分布計算コードMCRDF\*2を参考とする

\*1 Nearest Neighbor Distribution (NND)。中性子が飛行距離 $r$ までにデブリ粒子と衝突している累積確率の分布関数。

\*2 モンテカルロ法を用いた充填模擬法による3次元3次元剛体球空間分布計算コードMCRDF (JAERI-Data/Code 96-016)



# 最近接粒子分布解析コードの基本機能(概要)

- 3次元ランダム粒子配置の作成
  - 乱数を用いて粒子(同径)を体系内(立方体)に配置。
    - 体系サイズ: 任意に設定可能。
    - 充填率: <45vol%(計算環境に依存)
    - 下記の条件を満たす粒子は体系内に配置されない。
      - 粒子同士が重複する。
      - 粒子と体系境界が重複する。
- 最近接粒子分布(NND)の解析
  - 中性子とデブリ粒子との第一衝突点までの距離に基づきNNDを解析。
    - NND1: デブリ粒子表面から飛行を開始した中性子からみえるNND
    - NND2: デブリ粒子間の媒質から飛行を開始した中性子からみえるNND
    - NND3\*1: 3次元ランダム粒子配置領域に侵入する中性子からみえるNND
- 開発言語: Python\*2

\*1 今年度末までにコードに反映予定。

\*2 ライブラリの豊富さ、参考例の入手のしやすさなどから選択。

# 異なる粒子分布の無限増倍率の比較解析

表1:無限増倍率の解析条件

	条件
粒子分布	①体心立方格子、②MVP STGM(統計的一様分布関数)、③3次元ランダム粒子配置
燃料デブリ組成	UO <sub>2</sub> (新燃料、5wt%濃縮)
媒質	水
解析コード/核データ	MVP2.0(ヒストリ:10000、バッチ:200)/JENDL-4.0

表2:3次元ランダム粒子配置の作成条件

	条件	備考
燃料デブリ粒子の半径R	0.1cm、1cm、2cm、4cm	
体系(立方体)の一辺	15cm(15R)	
充填率	30%	実際の値:30.035%、粒子数:242個
3次元ランダム粒子配置パターン数	<b>1</b>	計算時間(約3時間)を考慮。今後パターン数を増加させて、統計的偏りを低減する。

表3:最近接粒子分布の解析条件

	条件	備考
中性子数	約70,000	各NNDの計算時間(約15時間)を考慮
中性子飛行開始点 NND1 NND2	体系中心に最も近いデブリ粒子の表面上に設定 体系中心付近の媒質中に設定	仰角:余弦分布、方位角:等分布 仰角・方位角:等分布

# 最近接粒子分布の解析結果(例)

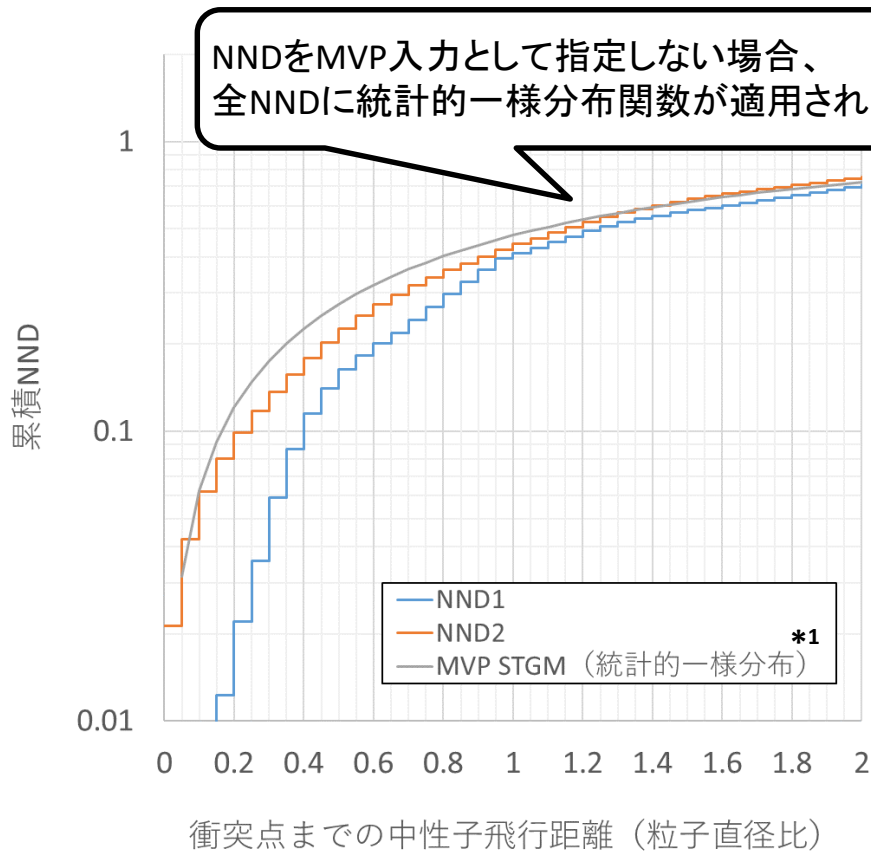


図1: 最近接粒子分布の比較例  
(粒子半径: 4cm、PF: 30%)

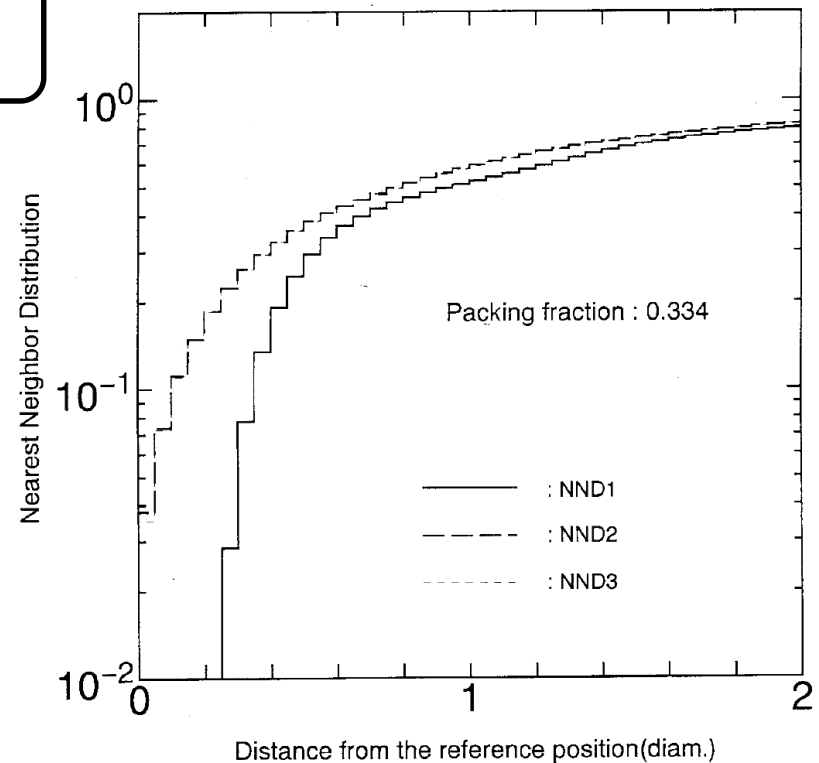
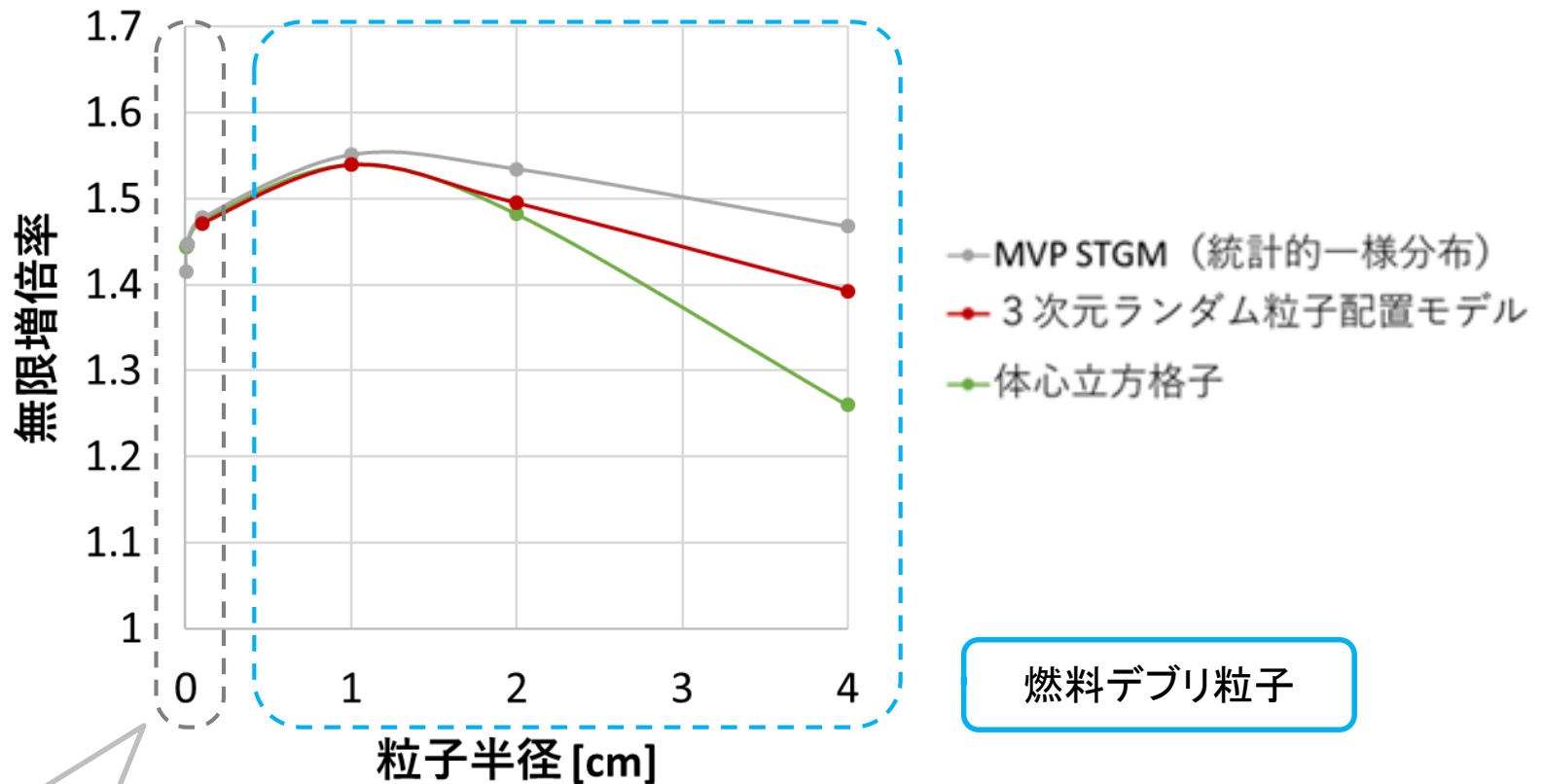


図2: MCRDFコード\*2による最近接粒子分布の解析例

\*1 Murata et al., "Continuous energy MC calculations of randomly distributed spherical fuels in high-temperature gas-cooled reactors based on a statistical geometry model", NSE123(1996)96

\*2 モンテカルロ法を用いた充填模擬法による3次元3次元剛体球空間分布計算コードMCRDF (JAERI-Data/Code 96-016)

# 無限増倍率の解析結果(例)



高温ガス炉用  
被覆粒子燃料  
(媒質:黒鉛)

図: 無限増倍率の比較例  
(PF:30%、媒質:水)

# まとめ

- 燃料デブリ回収作業中に臨界となり得る諸条件、それを回避する諸条件について検討
- 臨界解析に広く用いられているモンテカルロコード MVPの本問題(水中の燃料デブリ)への適用性検討



- 安全なデブリ取り出し作業の確実性・合理性を改善