

# 平成26年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業費補助金」 (燃料デブリ臨界管理技術の開発)

## 中間報告

平成29年4月

技術研究組合 国際廃炉研究開発機構(IRID)

# 1. 全体計画

## 1.1 「燃料デブリ臨界管理技術の開発」の目的と目標

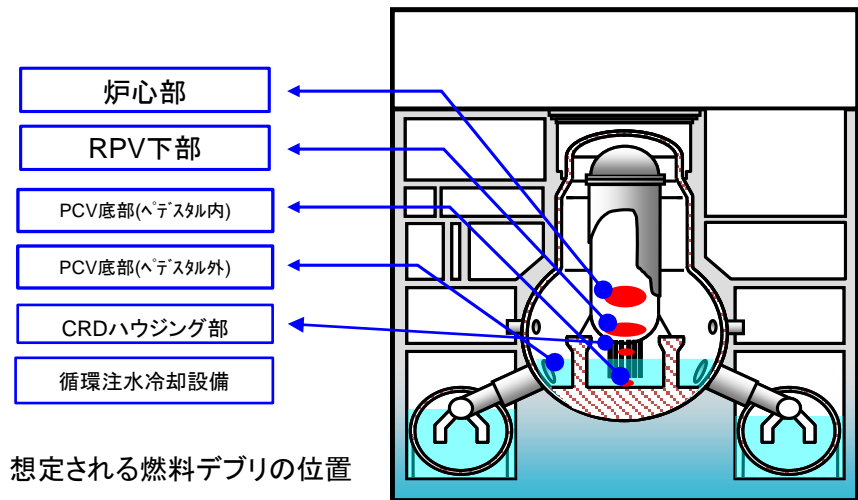
**【目的】**  
 現状の燃料デブリは臨界になっていないと推定しているが、今後の燃料デブリ取り出し作業等に伴い燃料デブリ形状や水量が変化する場合の臨界を防止し、万一臨界が生じた場合でも一般公衆及び作業員に過度の被ばくが生じることのないような臨界管理手法を確立する。



**【目標】**  
 ・ロードマップ上の2017年(平成29年)夏頃の燃料デブリ取り出し方針決定に向け、検討中の各工法ごとの臨界管理方法を策定し、適用する要素技術開発を進め、その成立性を確認する。



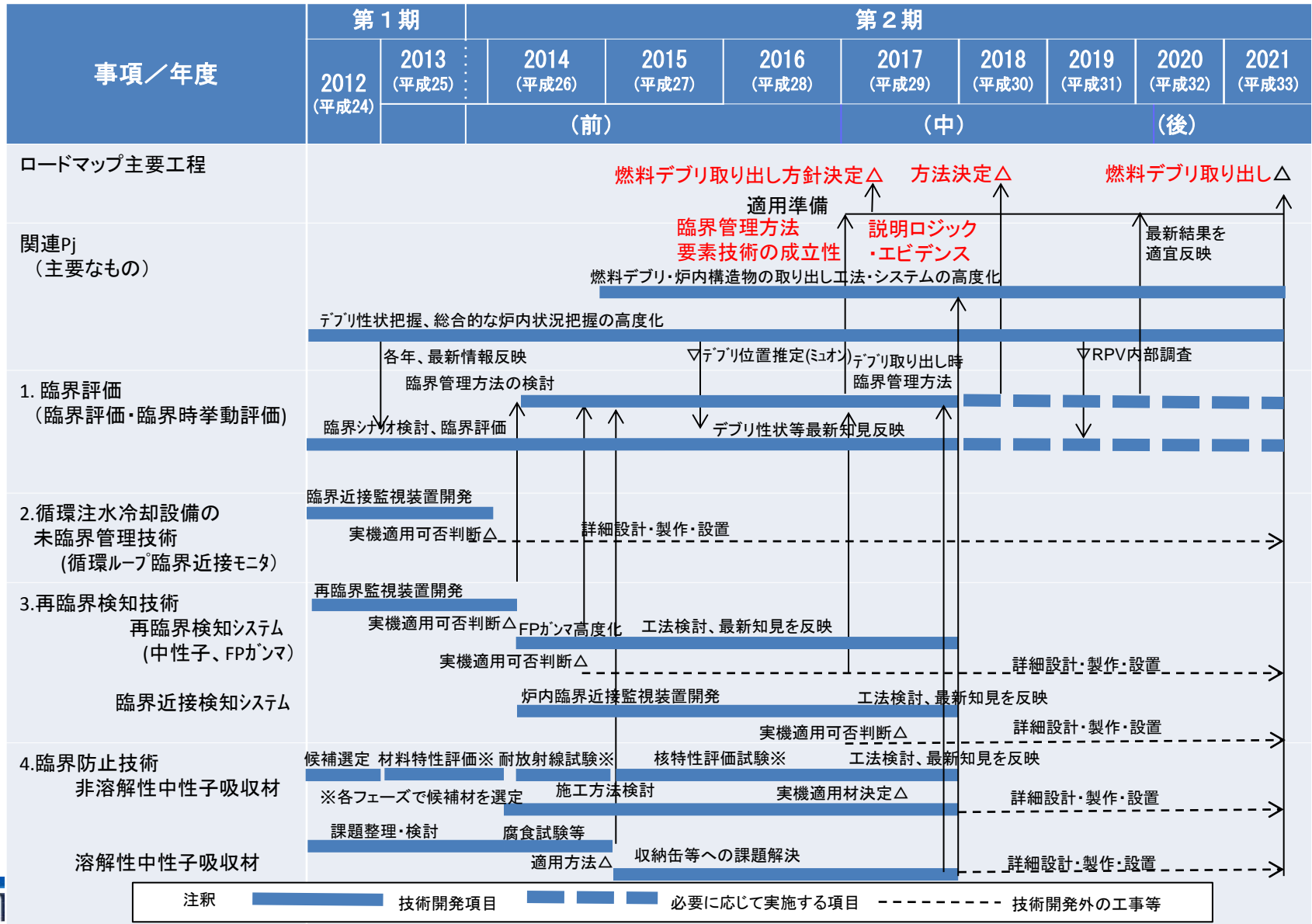
PCV水張り、燃料デブリ取り出しに向けて、以下の開発を実施する。



- 1. 臨界評価手法…… (1)臨界シナリオ及びその評価、(2)臨界時挙動評価、(3)臨界管理手法の策定
- 2. 臨界管理技術…… (1)臨界近接監視手法
  - (注)小循環ループ向け臨界近接モニタ開発は平成25年度完了)
  - (2)再臨界検知技術(ガスサンプリング系システム、中性子システム)
  - (3)臨界防止技術(非溶解性中性子吸収材、溶解性中性子吸収材開発)

# 1. 全体計画

## 1.2 ロードマップとの関係



# 1.3 平成28年度実施状況(1/2)

大分類	小分類	平成28年度												備考
		4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	
	全体工程(ロードマップ)													
1) 臨界評価 手法の確立	(1) 臨界シナリオの策定	最新情報確認						シナリオ見直し						
	<ul style="list-style-type: none"> <li>最新情報を踏まえた臨界評価の精緻化</li> <li>必要ホウ素濃度の確定</li> <li>デブリ取り出し作業による臨界評価(取り出し方法を反映した評価、細粉浮遊の影響等)</li> <li>確率的な実効増倍率評価</li> <li>説明性ロジック(不確定さ、条件の合理化など)検討</li> </ul>	見直し方針▽						最新版シナリオ▽						
	臨界評価最新情報反映	臨界評価見直し・合理化検討												
														最新版臨界評価▽
	(2) 臨界時挙動評価	・試験内容・方法、条件、判断基準をG1でレビュー受ける												
	PCV水張り時臨界時挙動評価(詳細評価)	・試験内容・方法、条件、判断基準をG1でレビュー受ける												
	デブリ取り出し用モデル整備	取り出し時評価モデル▽												
	デブリ取り出し時挙動評価							取り出し時評価結果(被ばく量)▽						
	(3) 臨界管理手法の策定	安全要求/設備検討						臨界管理方法検討						
	デブリ取り出し時臨界管理方法検討	設備への要求▽						取り出し時管理方法▽						
工法毎の臨界管理方法検討	(H27年度:PCV水張り時臨界管理方法検討)						工法検討への情報提供							
							工法毎の管理方法▽							

# 1.3 平成28年度実施状況(2/2)

大分類	小分類	平成28年度												備考			
		4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月				
2)臨界管理技術の開発	(1)臨界近接監視手法システム試作																
	高放射線環境下での動作試験																
	成立性確認試験																詳細試験はH30実施
	実機運用方法検討																
	臨界近接監視手法改良																KUCA試験はH29年度に実施
	(2)再臨界検知技術中性子システム適用方法検討																
	FPγ線高度化システム適用性確認試験																
	実機運用方法検討																
	再臨界検知手法技術調査																
	(3)臨界防止技術①非溶解性中性子吸収材																
	核的特性確認試験																KUCA試験はH29年度に実施 詳細試験の一部はH30へ継続
	候補材選定・適用性確認(均一性・保持性確認試験)																
	適用工法検討																
	適用性確認(長期照射試験)																
	②溶解性中性子吸収材																
	設備検討																
	高濃度ホウ酸核計算精度確認試験																KUCA試験はH29年度に実施
	第三者による確認	第三者検討会			▽				▽		▽	▽	▽				必要に応じてH29年度も継続(計測など個別分野など)
	進捗報告会		▽実施計画							▽中間報告							

# 1.3 平成28年度実施状況

## 1. 臨界評価手法の確立

### (1) 臨界シナリオの策定

- ① PCV水張り時臨界シナリオの見直し
- ② デブリ取り出し時臨界シナリオの検討
- ③ 統計的手法を取り入れた臨界評価

### (2) 臨界時挙動評価

- ① PCV水張り時
- ② デブリ取り出し時

### (3) 臨界管理手法の策定

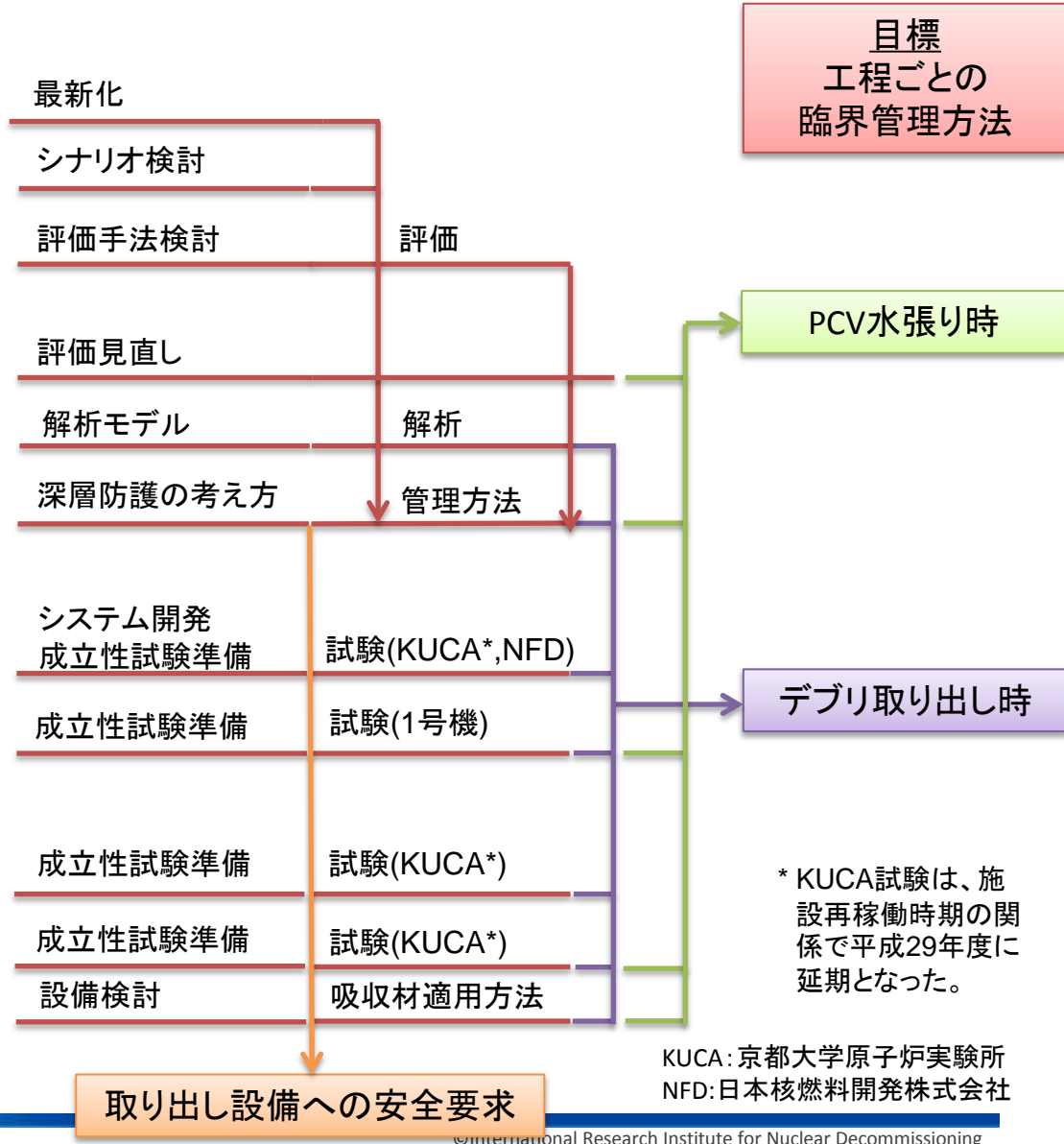
## 2. 臨界管理技術の開発

### (1) 臨界近接監視手法

### (2) 再臨界検知技術

### (3) 臨界防止技術

- ① 非溶解性中性子吸収材
- ② 溶解性中性子吸収材



## 2. 実施状況

### 2.1 臨界評価手法の確立 (1)臨界シナリオの策定

#### ①最新知見反映による臨界リスク(臨界管理の重要度)の見直し

- [目的]**
- ・複数工法を踏まえた各工程の臨界シナリオ整理、臨界リスク提示
  - ・最新情報を反映した臨界シナリオ・リスク評価の精緻化

**[実施状況]**

- ・炉内状況把握Pj 平成27年度成果、2号機ミュオン測定による最新知見の反映(表A)  
 炉内状況把握Pj 平成27年度成果に基づき、2号機PCV底部のリスクを極小→中に見直し  
 2号機ミュオン測定結果に基づき、2号機炉心部のリスクを小→中に見直し  
 2/3号機の炉心部のリスクの違いは、ミュオン測定の有無による
- ・臨界計算に見込む不確定さの整理  
 国際ベンチマーク計算に基づき臨界評価計算値のばらつきを整理し、燃料デブリを対象とした臨界評価に  
 燃焼度クレジットを適用する際の考え方や評価値に含むべき不確かさの考え方を整理した。

表A 号機毎の臨界管理の重要度のまとめ

部位	臨界リスク	1号機	2号機	3号機
炉心部	・残存燃料の水没	極小 (残存燃料ほとんどなし)	中 (炉心領域,, 外周部に燃料 残存可能性あり)	小 (外周部に燃料残存可能性 を否定できない)
RPV下部	・デブリの水没 ・取り出し時状態変化	水没: 小 取り出し: 極小 (残存量少)	水没: 中 取り出し: 小 (残存量多く、かつ露出)	水没: 中 取り出し: 小 (残存量多く、かつ露出)
CRD ハウジング	・付着デブリ水没	小～極小 (付着形状・量からリスク小)	小～極小 (付着形状・量からリスク小)	小～極小 (付着形状・量からリスク小)
PCV底部	・露出デブリ水没 ・取り出し時状態変化 (含、巻き上がり)	水没: 小 取り出し: 小 (存在量多い、露出量少)	水没: 中 取り出し: 小 (存在量多い、露出量大)	水没: 小 取り出し: 小 (存在量多い、露出量少)

( \* リスクの大きさに応じて臨界防止対策を実施する。極小は監視のみ、小、中は臨界近接検知システムや非溶解性中性子吸収材の適用など。)

# ①最新知見反映による臨界リスクの見直し

## [実施状況(つづき)]

- ・今後の精緻化のために、RPV/PCV内部調査等へのニーズを整理(表B)  
 →臨界リスク評価の精度を高めるには、燃料デブリの位置、量、組成、形状、水位、  
 についての情報が必要

表B 臨界リスク評価精緻化に向けたRPV/PCV内部調査ニーズ

取得情報	必要となる調査精度	調査対象部位
水位	水面の高さ(デブリの水没有無)	炉心部、RPV下部、PCV底部
燃料デブリの分布	燃料デブリの広がり、大きさ、厚さ	炉心部、RPV下部ヘッド、CRDハウジング、PCV底部
切株燃料(*)／健全燃料の有無、炉心領域の状況	燃料集合体が ・4層以上で外周リング状に残っているか ・4×4=16体より多く残っているか	炉心部
落下しそうな燃料デブリ／構造物の有無	対象物の大きさ	炉心部、RPV下部、CRDハウジング、PCV底部

(\* 切株燃料:完全には溶融せず下部は原形を保った燃料集合体)

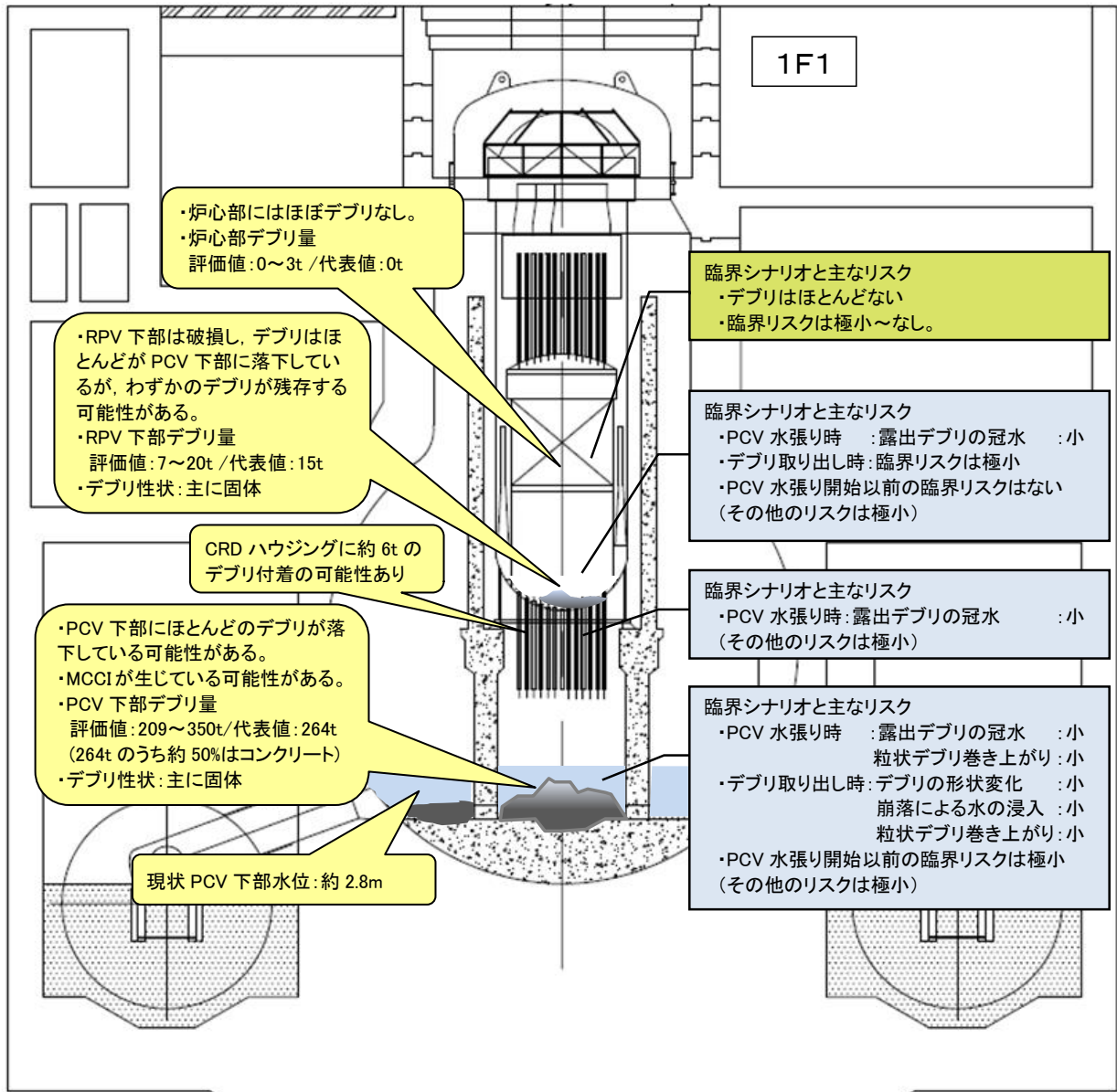
## [今後の予定]

- ・臨界評価に見込むべき不確かさの考え方を確立



# 2.1 臨界評価手法の確立 (1)臨界シナリオの策定

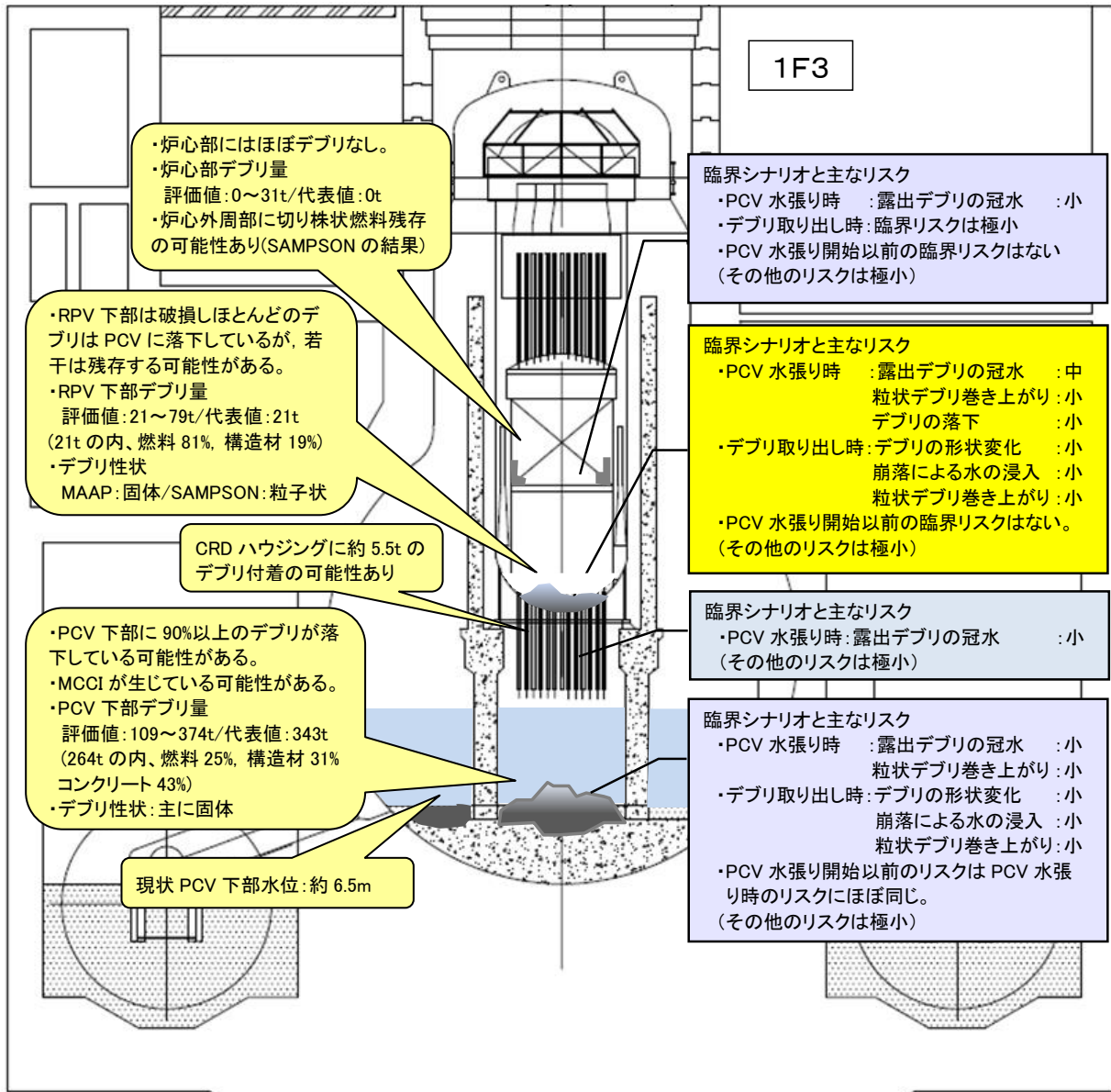
## ①最新知見反映による臨界リスクの見直し(1号機)



\* 1: デブリ分布は平成27年度に実施された「事故進展解析及び実機データによる炉内状況把握の高度化」の成果による  
2: 臨界リスクは完全冠水工法の取出ステップに対する評価



# 2.1 臨界評価手法の確立 (1)臨界シナリオの策定 ①最新知見反映による臨界リスクの見直し(3号機)



\* 1: デブリ分布は平成27年度に実施された「事故進展解析及び実機データによる炉内状況把握の高度化」の成果による

\* 2: 臨界リスクは完全冠水工法の取出ステップに対する評価

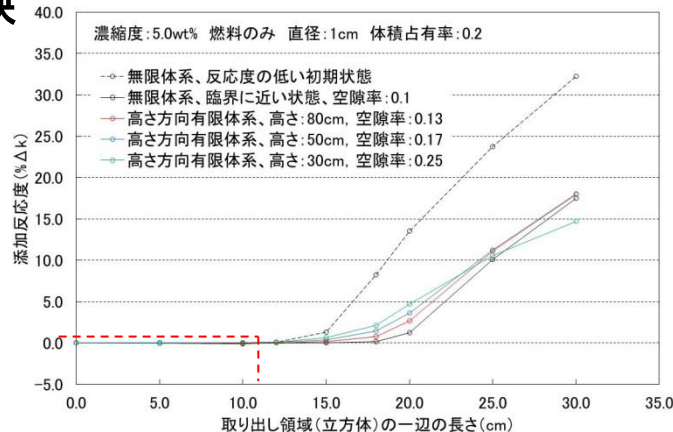
## 2.1 臨界評価手法の確立 (1)臨界シナリオの策定 ②燃料デブリ取り出し方法を反映した臨界評価

**[目的]** デブリ取り出し方法ごとに臨界評価を実施、安全要求に反映  
**[実施状況]**

**ボーリング加工:** 取り出し1回あたりに過剰な反応度が添加されないよう取り出し量制限を検討  
万ー臨界超過したとしても、  
即発臨界とならないよう、  
添加反応度を約0.1% Δk/k以下にする。



1回の取り出し量を一辺12cm以下とする。



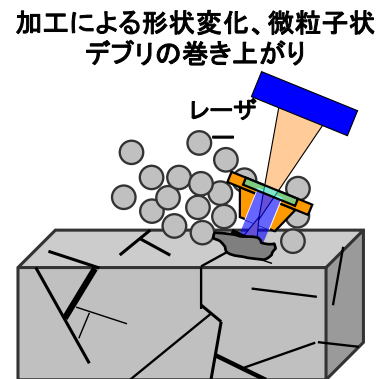
1回の取り出し量と添加反応度の関係

**レーザー加工:** 最新知見を調査し、加工速度が遅く、臨界量に到達しにくい。  
**プラズマ加工:** デブリ巻き上がり時最小臨界重量評価により、臨界リスクは小と判断。

デブリ細粉巻き上がりの最短臨界到達時間(評価例)(\*)

取り出し方法 (取り出し速度)	1 集合体最小燃焼度組成 (最小臨界量46kg)	炉心平均燃焼度組成 (最小臨界量109kg)
レーザー加工 (330g/min)	2時間19分	5時間30分
プラズマ加工 (850g/min)	54分	2時間8分

(この他にウォータージェット、超音波ドリル等の加工法があるが加工速度が遅いため  
レーザー加工、プラズマ加工を代表として記載)

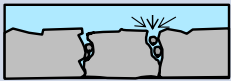
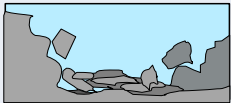
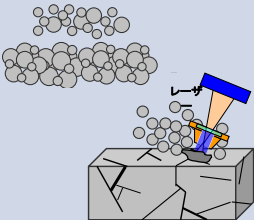
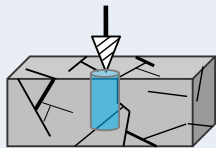


**[今後の予定]** ・取り出し工法毎の要求事項の整理(取り出し工法検討へ提示)

## 2.1 臨界評価手法の確立 (1)臨界シナリオの策定

### ②燃料デブリ取り出し方法を反映した臨界シナリオの検討

・デブリ取り出し時のデブリ加工にともなう崩落，形状変化の現実的な反応度変化を評価

デブリの崩落、形状変化のシナリオ	事象のイメージ	現実的な反応度変化
デブリに亀裂が入るなどにより水が浸入し減速効果によりデブリの増倍率が上昇		<ul style="list-style-type: none"> <li>・大きな塊状デブリに体積割合で1%程度の亀裂が入っても反応度増加は0.01 Δk程度。</li> <li>・デブリに構造材(SUS)を含む場合はさらに小さくなる。</li> </ul>
デブリの崩落により水対デブリの体積比が変化し、減速効果により増倍率が上昇		<ul style="list-style-type: none"> <li>・大きなデブリが崩落しても体積占有率は0.7程度以下に小さくはならないと想定され、反応度の印加量は0.1 Δk程度以下。</li> <li>・崩落するデブリ量が150kg程度以下であれば占有率が0.4程度に小さくなくても未臨界。</li> </ul>
粒状デブリの巻き上がり、デブリ加工に伴う微粒子状デブリの巻き上がりにより水対デブリ体積比が変化し、減速効果により増倍率が増加		<ul style="list-style-type: none"> <li>・デブリが巻き上がり、一旦最適臨界体系になったとしても粒子は比較的早い速度で沈降し、1～2秒以内で未臨界となり事象は収束する。よって、問題となるような臨界事象は生じないと考えられる。</li> </ul>
デブリのコアボーリングなどによる穴に水が浸入し、水対デブリの体積比が変化し減速効果により増倍率が増加		<ul style="list-style-type: none"> <li>・デブリ加工時のボーリングの穿孔速度は緩やかであるため、あいた穴に水が入り反応度が増加する事象は非常に緩やかであり、急激な臨界事象を生じないと考えられる。</li> </ul>

## 2.1 臨界評価手法の確立 (1)臨界シナリオの策定

### ③ 統計的手法を取り入れた臨界評価

#### [目的]

- 現実条件を反映し過度に保守的でない合理的な臨界評価の枠組みの構築

#### [実施状況]

- デブリ性状などのパラメータを確率変数として取り扱うことで、現実的な臨界性(中性子増倍率)を推定
- 統計的臨界評価の考え方・解析方法を策定
  - 確率変数として取り扱うパラメータ
    - デブリ粒径、空隙率、デブリ体積占有率、
    - デブリ組成(構造材等の混合割合)、Gd帯同割合
  - ケースの設定
    - 1号機PCV体系(炉内状況把握等の結果を反映)

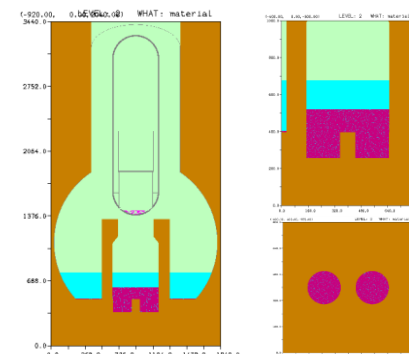
#### [結果]

- 統計的臨界評価結果を用いた現状推定方法を検討
  - 1号機のガス管理システムの放射能濃度比を用いた中性子増倍率推定結果を踏まえ、ベイズ推定法によりSUS\*混入割合の確率分布を推定し、臨界評価を実施(右図)
  - (\*Fe、Ni、Cr、Mnから成る溶融合金)
- 上記に基づく必要ホウ素濃度評価
  - デブリ取り出し時の添加反応度7%  $\Delta k$ まではホウ酸投入不要と推定

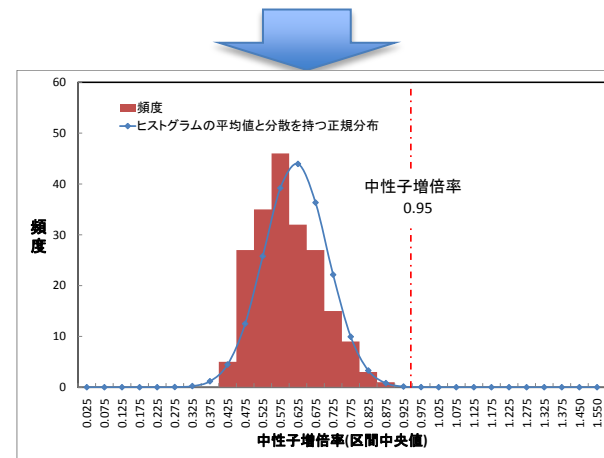
#### [今後の予定]

- ・統計的臨界評価方法の精緻化
- ・炉内調査結果等を反映した臨界評価

#### 統計的臨界評価例



解析体系(左:全体、右ペDESTAL床)



小 ← 実効増倍率 → 大

ガスサンプリング系システム測定結果から推定される中性子増倍率より現状のデブリ中のSUS混入割合を推定

## 2.1 臨界評価手法の確立 (2)臨界時挙動評価

### ①PCV水張り時挙動評価

#### [目的]

- 各工程における臨界時挙動及び被ばく影響評価
- 臨界時の被ばく影響緩和手段の有効性確認

#### [実施状況]

(1)最新情報(炉内状況、臨界検知システム検討成果)を反映したPCV水張り評価見直し

- 燃料デブリ量(UO<sub>2</sub>+構造材)は97トンと想定
- 臨界検知、臨界停止に係る設備パラメータの感度を評価  
被ばく影響緩和に有効な設備パラメータを選定
  - ◎FPガスによる臨界検知遅れ時間
  - ◎PCVから環境へのガスリーク率 →設備要求へ反映
- 臨界検知遅れ時間を1号機実機データ分析から推定される約3hr(暫定値)としても、事故時線量(5mSv)未滿となることを確認
  - 前年度検討した、PCV水張り時の臨界管理方法の有効性を確認

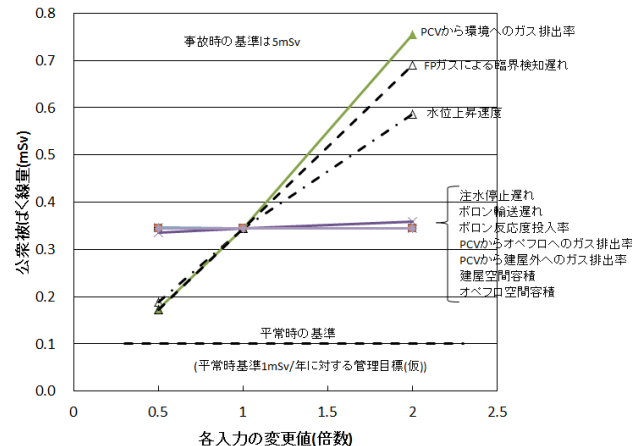
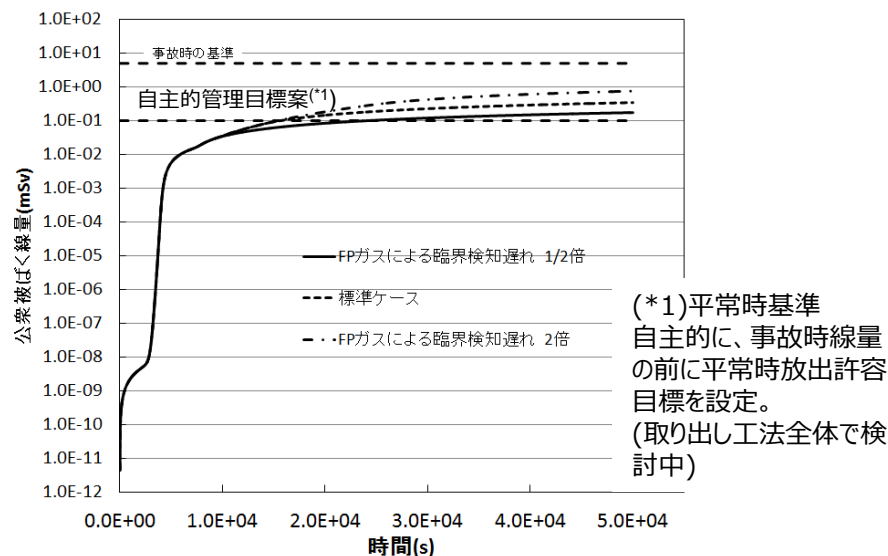
(2)燃料デブリ取り出し時評価モデル構築

- 前年度までに作成した、デブリ体系での熱水カモデルなどが、デブリ取り出し時にも適用できることを確認し、デブリ取り出し時の評価モデルを準備
- 燃料取出時の例として、デブリ落下事象を評価(次々頁)

#### [今後の予定]

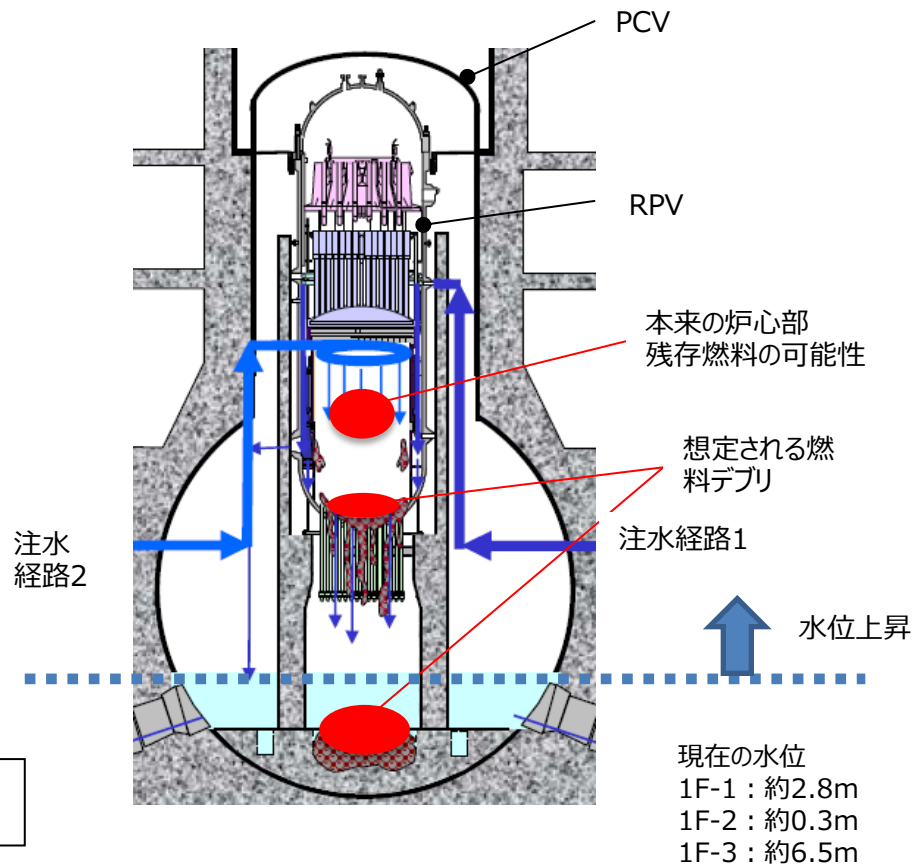
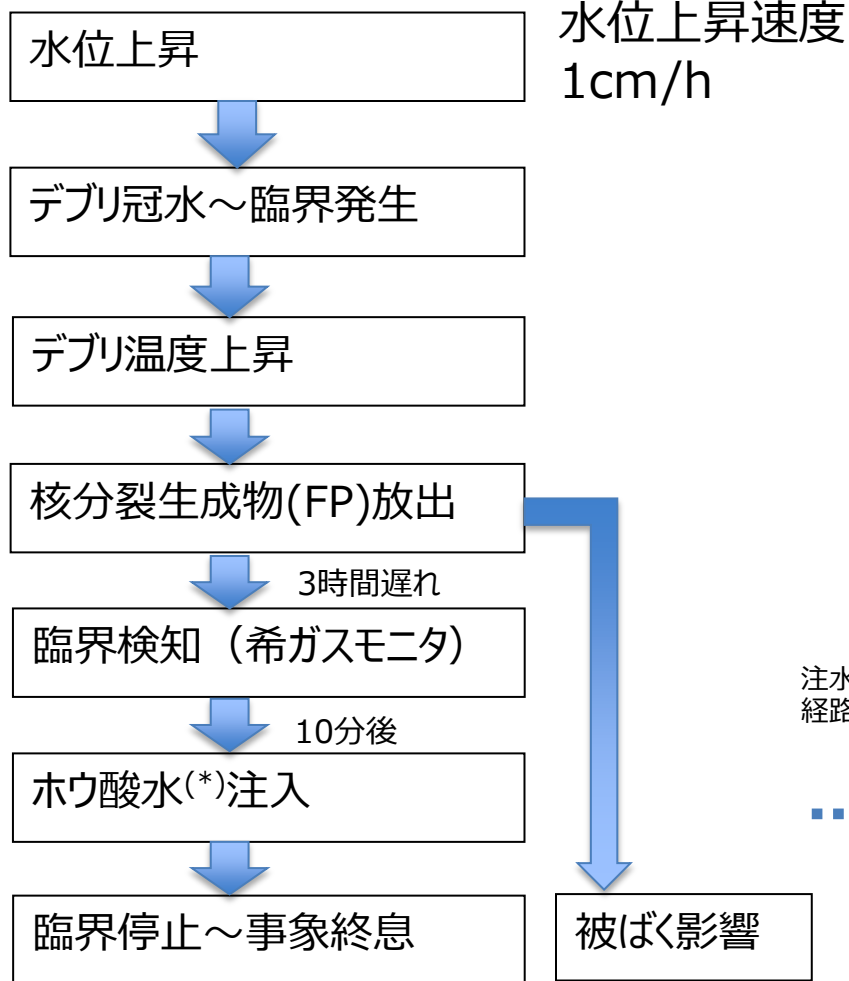
- 燃料デブリ取り出し時臨界時挙動・被ばく評価を実施し、影響緩和(MS)策の確立・有効性を評価
- 入力パラメータの確率的な取り扱いから生じる不確かさ検討、妥当性説明ロジック構築

### PCV水張り時評価結果のパラメータスタディ



# PCV水張り時臨界時事象進展

## [水位上昇時の臨界事象進展]





## 2.1 臨界評価手法の確立 (2)臨界時挙動評価

### ②デブリ取り出し時挙動評価

#### [目的]

- ・燃料デブリ取り出し時に臨界となった場合の被ばく評価への影響を確認
- ・燃料デブリが落下して臨界になる場合で代表させて評価  
(添加反応度、臨界重量の点から落下事象で包絡可能)

#### [想定事象]

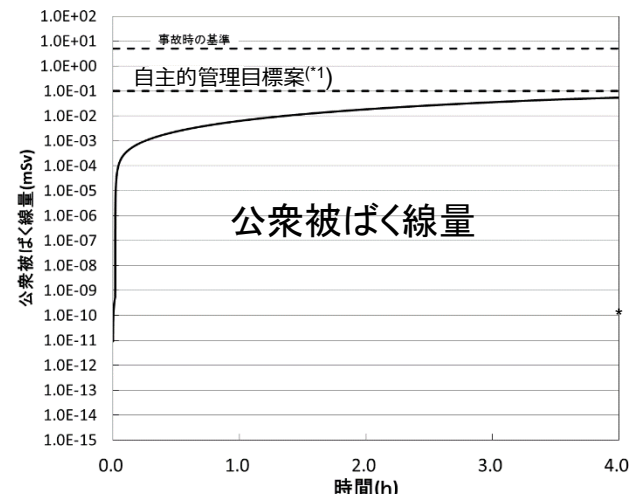
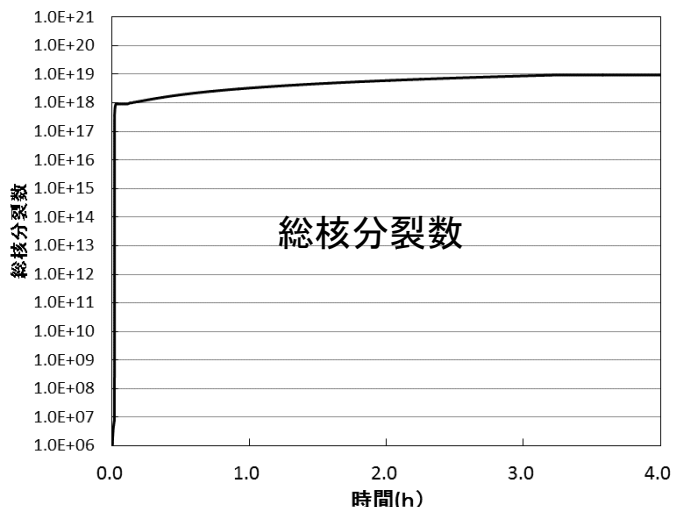
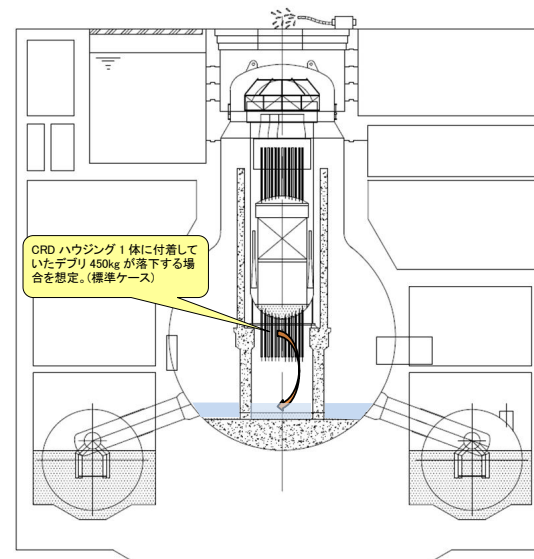
デブリ取り出し作業の際に、RPV下部のCRDハウジング1体に付着している燃料デブリが水中に落下して、ばらばらの粒子状となり、水と最適混合状態になって、臨界に至る事象

#### [解析条件]

- ・落下する燃料デブリ450kg (CRDハウジング1体の内外に付着)
- ・遅れ時間3時間で希ガスモニタにより臨界検知
- ・PCVで生じた希ガスがそのまま建屋外へ放出されると仮定

#### [解析結果]

- ・総核分裂数は $\sim 10^{19}$ 個程度
- ・敷地境界上の公衆被ばく線量は自主的管理目標(0.1mSv)未滿となることを確認



(\*1) 平常時基準  
自主的に、事故時線量の前に平常時放出許容目標を設定。  
(取り出し工法全体で検討中)

## 2.1 臨界評価手法の確立 (3)臨界管理手法の策定

### [目的]

- ・燃料デブリ取り出し方法決定に向けて、各工法ごとに、臨界を防止するとともに、万一の臨界の際にも過度の被ばくを防止する臨界管理方法の策定
- ・管理方法、設備要求提示

### [実施状況]

#### ・PCV水張りにおける臨界管理方法の策定

事故進展解析等の最新結果を反映、ガスサンプリング系システム臨界検知遅れ時間の見直し(\*)を考慮しても、水張り速度1cm/hにより臨界時に事故時線量未満となることを確認(昨年度検討手法の有効性を確認)

\*1号機実施データからの推定で約3時間と推定

#### ・深層防護整理、取り出し時臨界管理方法の考え方策定

外部有識者の意見も踏まえ、第2層までを中心に整理。  
取り出し工法ごとの臨界管理方法を策定

#### ・燃料デブリ取り出し工法検討に向けた設備に対する安全要求整理

安全の考え方、設備及びデブリ取り出し方法への要求をまとめ、取り出し基盤技術Pjと調整準備中

### [今後の予定]

- ・現実的条件の取り込みによる臨界管理方法の合理化
- ・燃料デブリ取り出し工法検討に向けた設備に対する安全要求に基づく、設備及びデブリ取り出し方法検討(取り出し工法高度化Pjと共同)
- ・現実条件の取り込みによる合理化及び説明ロジック補強

## 2.1 臨界評価手法の確立 (3)臨界管理手法の策定

- 外部有識者の意見を反映
- 深層防護の考え方は、デブリ取り出し工法全体で検討中。ここでは4層で提示
- 臨界管理は2層までに焦点を当てる（第3層以降は、臨界管理単独ではなく、他の安全要素と総合した対策を構築する）

	第一層 異常の発生防止		第二層 異常状態の把握と 異常の終息		第三層 一般公衆の 保護	第四層 想定を超える 事象への 施設外対応
<b>臨界管理</b>	パラメータ監視 Monitoring	異常発生防止 Prevention	異常検知 Detection	影響緩和 Mitigation	<ul style="list-style-type: none"> <li>放射性物質漏えい、火災など全体のリスク管理の一部として対応する。</li> <li>事故時の一般公衆および作業員の過剰な被ばく(放射線障害)を防止する。</li> </ul>	
具体的手段 (主要なもの)	<ul style="list-style-type: none"> <li>臨界近接検知システムによる臨界近接監視</li> <li>水位/ホウ素濃度等の監視</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1回のデブリ取り出し量制限</li> <li>ホウ酸/非溶解性吸収材適用</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>中性子束あるいはFPガス濃度による臨界検知</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ホウ酸水、あるいは非溶解性吸収材投入による臨界終息</li> </ul>		
目標	<ul style="list-style-type: none"> <li>臨界近接を監視し、臨界を防止する。</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>臨界を速やかに検知し、抑制する。 (平常時レベルを超える放射性物質の放出防止)</li> </ul>			

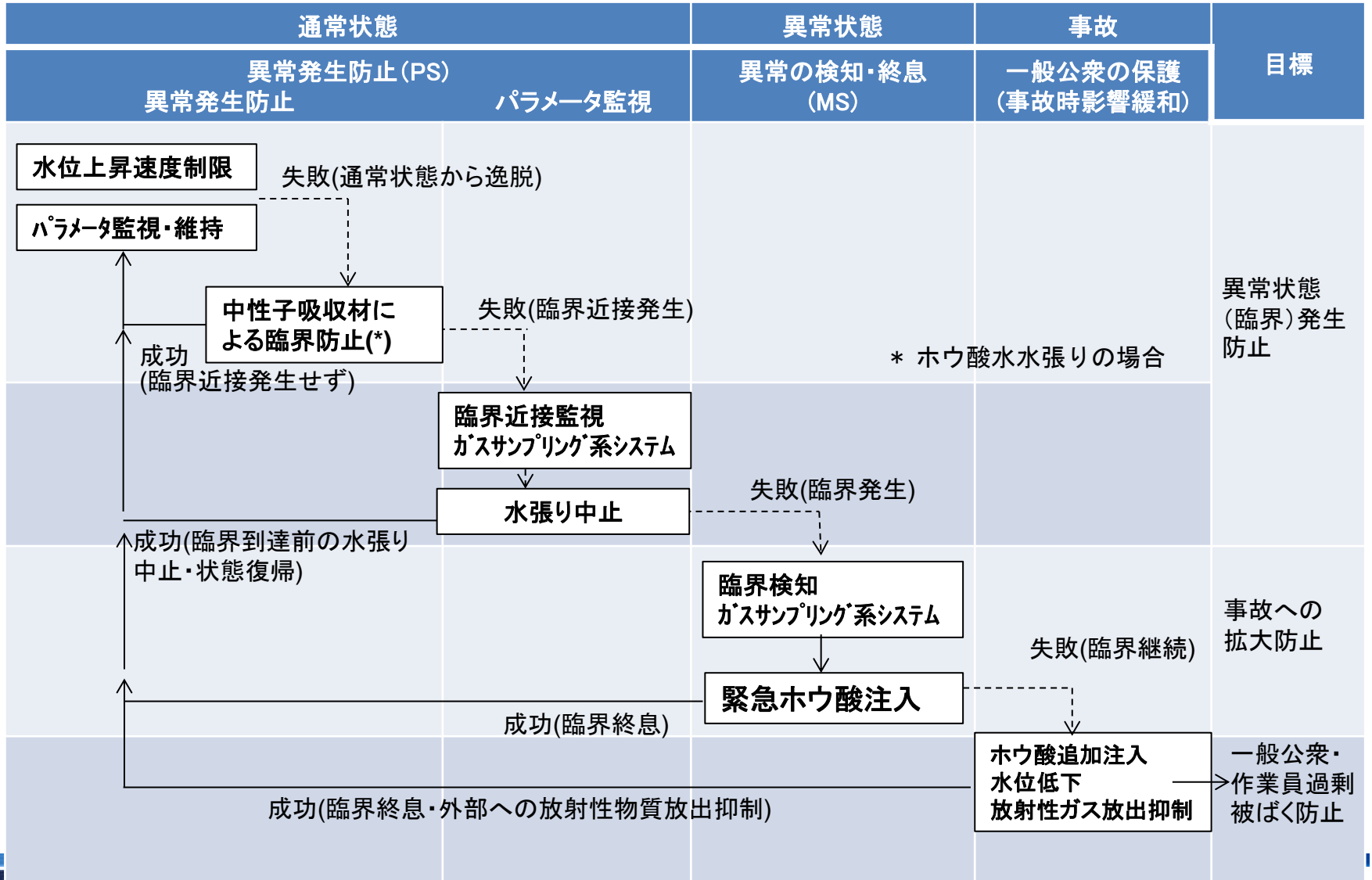
### 臨界管理の目標

臨界を防止するとともに、万一の臨界発生の場合にも、これを検知し抑制する。

全体で達成する目標

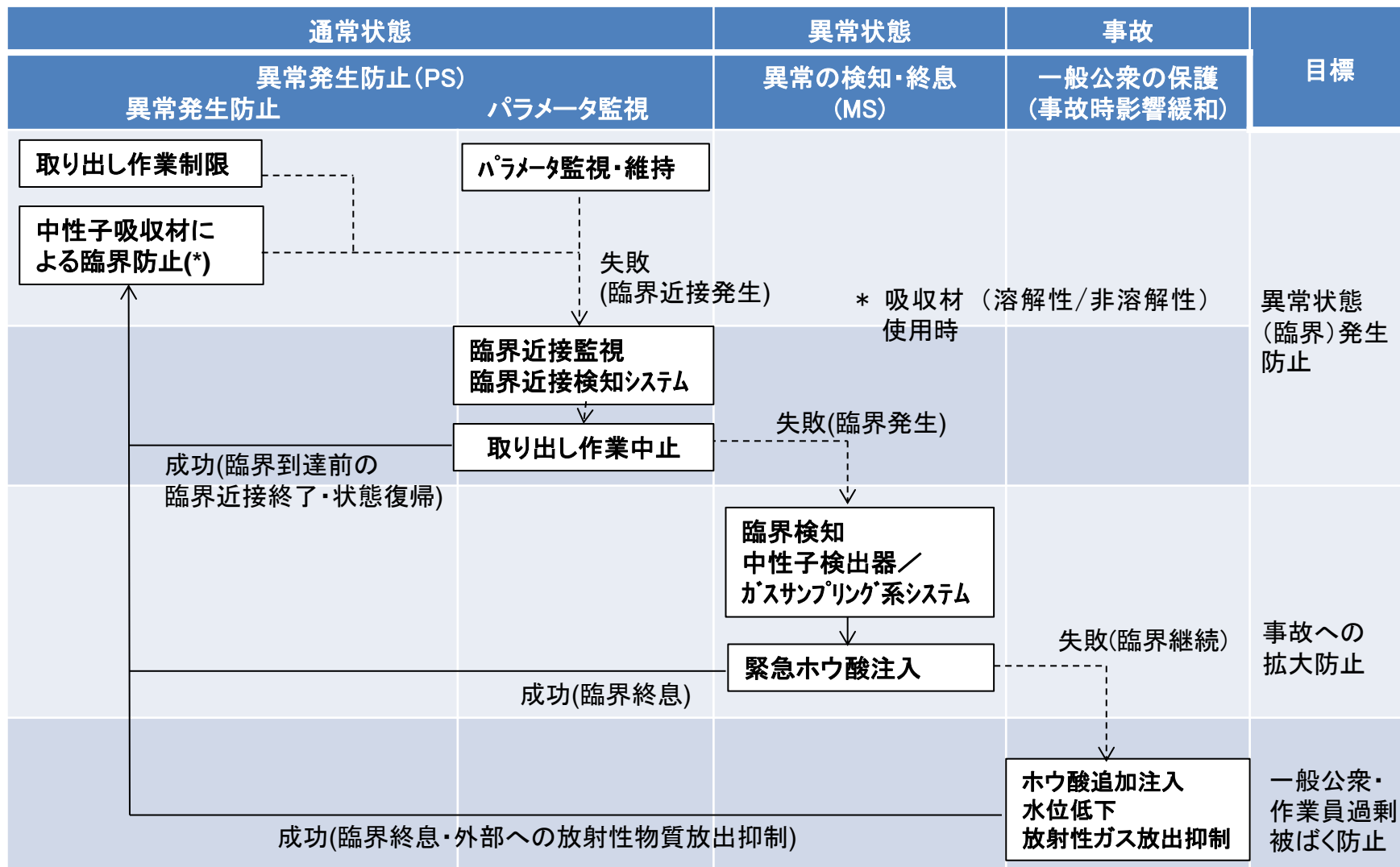
# 臨界管理方法の例

## PCV水張り：メインシナリオ：水位上昇に伴うデブリ水没・臨界発生



# 臨界管理方法の例

## メインシナリオ：デブリ取り出しに伴う臨界発生



## 2.1 臨界評価手法の確立 (3)臨界管理手法の策定

表 デブリ取り出しへの安全要求項目

項目	要求項目
取り出し作業	<ul style="list-style-type: none"> <li>・1回あたりの取り出し量(方法毎)</li> <li>・臨界近接時の作業中断</li> </ul>
臨界近接検知	<ul style="list-style-type: none"> <li>・中性子検出器仕様</li> <li>・取り出し位置近傍への設置(移動)</li> </ul>
臨界検知・終息	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ガスサンプリング系システム仕様</li> <li>・臨界時ホウ酸注入(緊急ホウ酸注入設備)</li> </ul>
溶解性中性子吸収材	<ul style="list-style-type: none"> <li>・冷却材バウンダリ形成(漏えい防止)</li> <li>・必要ホウ素濃度及び維持</li> </ul>
非溶解性中性子吸収材	<ul style="list-style-type: none"> <li>・使用材</li> <li>・投入孔設置、注入設備仕様</li> </ul>

## 2.2-1 臨界管理技術(臨界近接検知技術・臨界防止技術成立性確認試験)

### 【計画変更の経緯】

今年度、臨界近接監視システムの基本的な成立性と中性子吸収材の基本的な核的特性の確認のため、2月に京都大学原子炉実験所臨界集合体実験装置(以下、「KUCA」という。)にて試験を行う計画としていた。しかし、KUCAの新規制基準後の再稼働の遅れにより、2月の試験実施が困難となり、次年度4月以降に延期することとした。

### 【これまでの成果】

- ・KUCAを模擬した予備解析を行い、試験の実施要領を検討した。
- ・臨界近接監視システムについて試験用に検出器からの信号を処理する回路を製作した。
- ・中性子吸収材の核的特性確認のための試験用サンプルを製造した。

### 【次年度の計画】

- ・臨界近接監視システムについて、未臨界度と中性子検出器距離をパラメータとした基本的な成立性確認試験
- ・中性子吸収材について、異なるタイプの吸収材( B4C/金属焼結材,水ガラス/Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>造粒粉材、五ホウ酸ナトリウム水,etc)を対象とした基本的な核特性確認試験



臨界近接監視システムの  
B-10中性子検出器



中性子吸収材  
サンプル収納容器

## 2.2 臨界管理技術の開発 (1)臨界近接監視手法

### ①臨界近接検知システム開発

#### [機能]

- ・臨界に近接する状態を早期に検知、臨界到達前に警報発信、作業中止を促すことで、臨界を防止。

#### [システム構成]

- ・燃料デブリ取り出し位置近傍に設置する中性子検出器(B-10比例計数管)、信号処理部、未臨界度評価部から構成

#### [臨界近接検知手法]

- ・炉雑音法、中性子源増倍法など実績ある手法を中心に、臨界近傍での監視用にペリオド法、解析値をベースとするため参考として扱われるが比較的広い範囲で監視可能な仮想中性子捕獲法を組み合わせる(測定系は同一で、信号処理を並列に行う)。

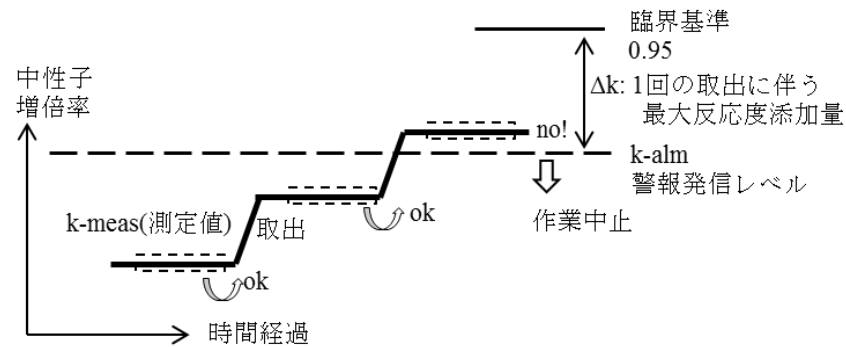


図 臨界近接検知による臨界防止

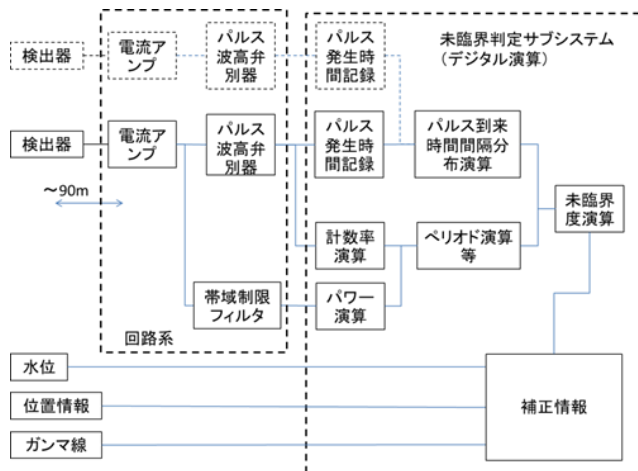


図 臨界近接検知システム構成

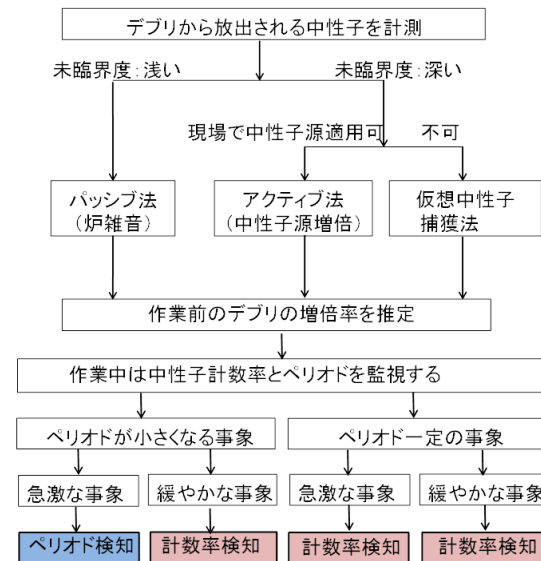


図 臨界近接検知手法案



## 2.2 臨界管理技術の開発 (1)臨界近接監視手法

### ①臨界近接検知システム開発

#### [開発状況]

- ・成立性確認試験用のシステム試作、成立性確認試験準備中
- ・炉雑音法による臨界近接検知性向上検討  
 AMETEK社が開発したTID(Time Interval Distribution法)法の導入による検知性向上を検討  
 同手法に基づき中性子信号を分析する技術導入のためのトレーニングを準備

#### [開発見通し]

- ・平成25年度に実施した試験結果(ガンマ線場での検出器応答、京都大学原子炉実験所(KUCA)での臨界近接模擬試験(\*)  
 の結果に基づいてシステム仕様検討

- ・成立性確認試験の結果にて、開発課題を確認すべく、準備中  
 試験結果に応じて、検出器仕様の見直し、複数手法の組み合わせを含めた検知手法の選定、適用方法(臨界管理手順)への反映等の対策を取る方針

#### 開発課題と対応案

課題	対応	確認試験
高放射線下での動作性	<ul style="list-style-type: none"> <li>・炉内状況推定に基づき検討</li> <li>・平成25年度試験結果を反映</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・使用済燃料保管設備で確認試験</li> <li>・結果により検出器仕様見直し</li> </ul>
未臨界度測定精度・必要時間	<ul style="list-style-type: none"> <li>・実績ある手法</li> <li>・平成25年度試験結果で設計</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・臨界集合体で確認試験</li> <li>・結果により複数手法組合せなど検討</li> </ul>



#### 複数手法の組み合わせ案

手法	特徴	適用方法
炉雑音法	<ul style="list-style-type: none"> <li>・デブリ特性への依存性小</li> <li>・未臨界度直接評価可能</li> </ul>	取り出し前の初期未臨界度を測定
中性子源増倍法	<ul style="list-style-type: none"> <li>・未臨界度の相対変化を短時間で判定可能</li> </ul>	取り出し中の相対変化を監視

## 2.2 臨界管理技術の開発 (1)臨界近接監視手法

### ②臨界近接検知成立性確認

#### [試験目的]

- ・開発した手法による臨界近接検知性の成立性確認(臨界集合体施設を用いた試験)試験に向けたシステム設計・試作
- ・燃料デブリ取り出し時に適用する炉内臨界近接検知方法の提示
- ・システム動作検証と開発手法の原理実証

#### [試験方法]

- ・試験場所: 京都大学原子炉実験所(KUCA)
- ・中性子検出器をKUCA炉室内に設置。  
信号処理回路とデータ分析装置は炉室外に設置
- ・未臨界度の異なる状態をKUCAで模擬し、測定された未臨界度と比較評価

#### [結果の使用方法]

- ・デブリ取り出し作業に対する適用性の評価

#### [実施状況]

- ・試験計画を策定し、試験を実施するKUCAと打合せを実施。  
提案した試験は、概ね実施可能

#### [臨界近接検知技術開発 今後の予定]

- ・詳細試験計画策定と試験実施(平成29年6月予定)
- ・炉雑音法(ASC法)による臨界近接検知性向上検討  
臨界近接検知手法確立

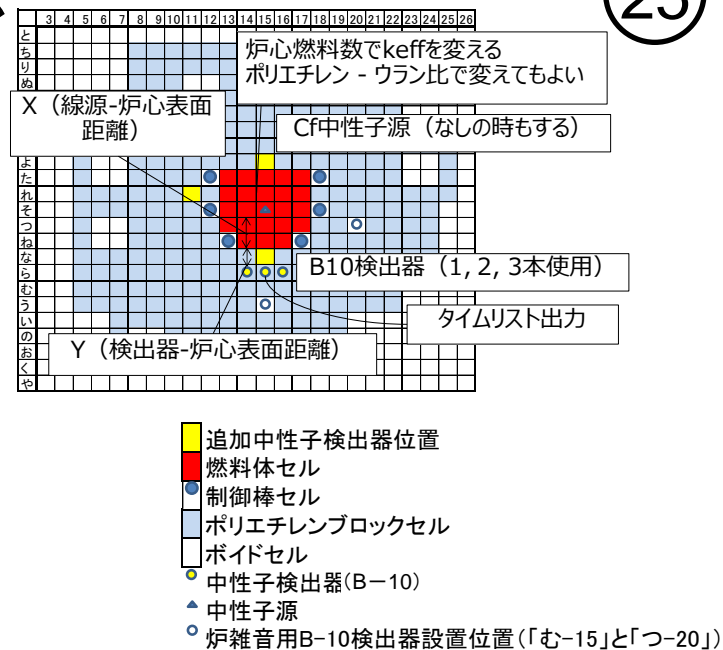


図 KUCA実験イメージ

表 試験ケース (○):標準ケースとの重複ケース

パラメータ		増倍率		
		0.95	0.8	0.7
水対ウラン比	小		○	
	標準	○	○	○
	大		○	
検出器の位置	0cm		(○)	
	10cm		○	
	15cm		○	

## 2.2 臨界管理技術の開発 (1)臨界近接監視手法

### ③高放射線下での動作性確認

#### [試験目的]

- ・高放射線下(<100Gy/h)での動作性確認
- ・臨界近接模擬試験(成立性確認のための簡略試験)

#### [試験方法]

- ・試験場所:使用済燃料保管設備(日本核燃料開発株式会社(NFD))
- ・B-10比例計数管と使用済燃料集合体との距離を変化させ、中性子計数率の変化を測定

#### [結果の使用方法]

- ・中性子検出可能なガンマ線量の評価、及び、遮へい体効果の評価から動作性を確認する

#### [実施状況]

- ・表1に示す試験ケースについて測定を完了し、結果評価中
- ・小型B-10検出器の感度は1000Gy/h環境下で遮へいありで0.2cps/nvを達成の見通しを得た。
- ・高感度B-10検出器は同条件で2cps/nvを達成の見通し

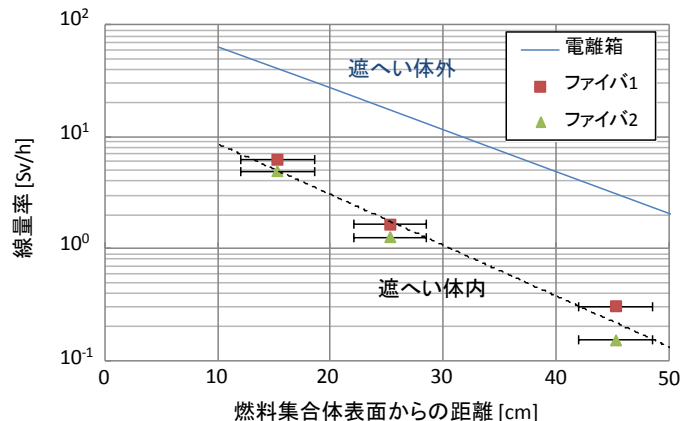


図 試験時のガンマ線環境

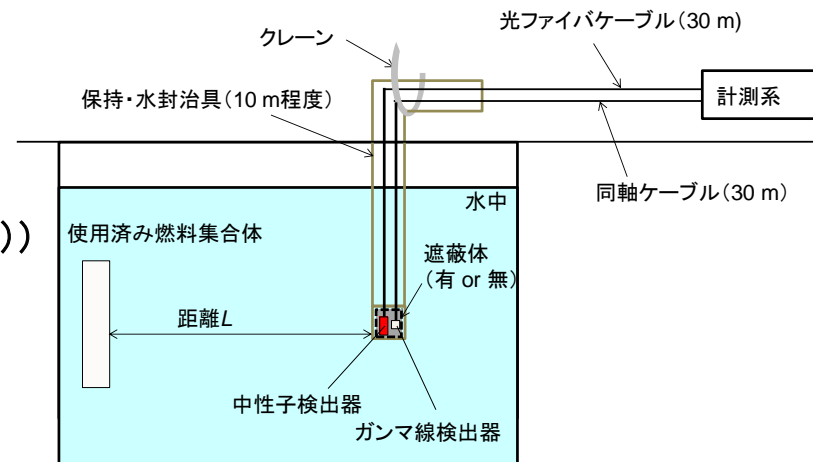


図 試験体系

表 試験ケース

線量率範囲	測定点数		
	中性子検出器	ファイバ型ガンマ線検出器	電離箱*1
<0.1Gy/hr (BG)	1	1	1
1.0~10 Gy/h	1	1	1
10~100 Gy/h	2	2	2
合計	16 (4 × 4*2)	8 (4 × 2*3)	4

\*1: γ線線量率測定

\*2: 中性子検出器2種類(高感度、小型) × 遮蔽体有無

\*3: 遮蔽体有無

## 2.2 臨界管理技術の開発 (2)再臨界検知技術の開発 高度化ガスサンプリング系システム実機試験(i)

### [試験目的]

- PCV水張りから燃料デブリ取り出しまでにおいて、再臨界を早期に検知するため、Kr-87、Kr-88を測定可能とする高度化システム構築のためのデータ収集

### [試験方法]

- 試験場所: 1号機
- 既設のガス管理システムに追加の分析装置を接続し、0~3MeVのγ線を測定

### [結果の使用方法]

- 再臨界検知の即応性向上、未臨界度推定による臨界近接監視可能化のための高度化システムの構築

### [実施状況]

- 高度化ガスサンプリング系システム実機試験
  - 試験計画を策定。東電殿より正式実施許可取得  
平成28年10月8日より仮設試験装置設置による測定を開始
  - Kr-87、Kr-88の高エネルギーピークに妨害核種がないことを確認  
Krの測定可能性、検知性向上の見通しを得た
- FPガス放出挙動解析によるガスサンプリング系システムの検知時間検討
  - 1号機のCFDモデルを構築し、Krガスの輸送挙動評価を開始し、前年度までの遅れ時間評価の妥当性、信号の立ち上がりをとらえることで更なる早期検知の可能性を確認した。
- 2/3号機への適用に際して追加の開発課題はなし

### [再臨界検知技術 今後の予定]

- 校正技術等、高精度化の為の技術調査
- KrガスCFDモデルの精緻化、臨界検知時間の短縮

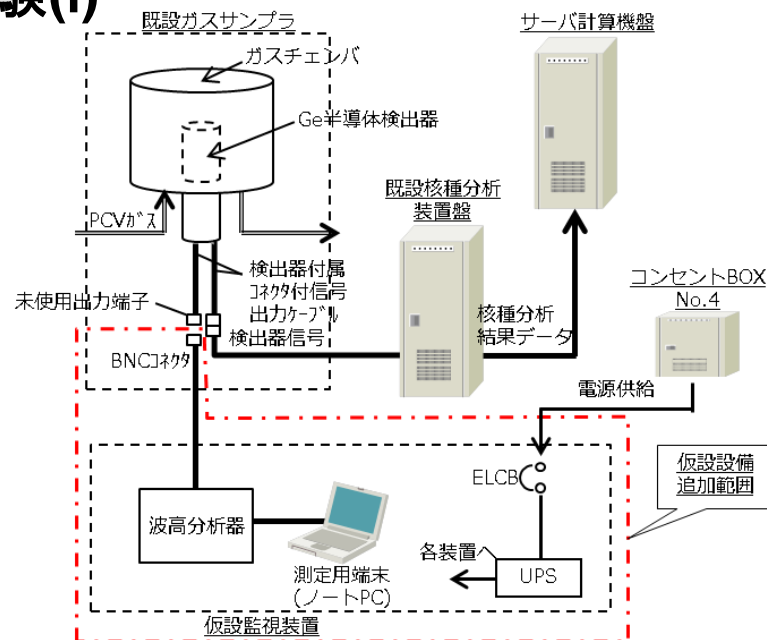


図 1号機ガスサンプリング系現地試験システム

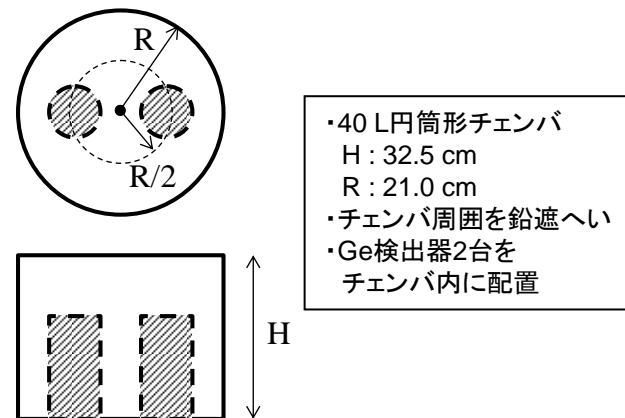


図 高度化システムのチェンバ形状案

# 高度化ガスサンプリング系システム実機試験(ii)

## [ガスサンプリング系システム実機試験]

- ・2016年10月8日より0~3MeVのスペクトル測定開始
- ・現校正曲線から着目核種の濃度を評価

核種	エネルギー (keV)	算出濃度 (Bq/cm <sup>3</sup> )
Xe-135	249.8	$(1.16 \pm 0.01) \times 10^{-3}$
	2554.8	$(8.39 \pm 1.54) \times 10^{-5}$
Kr-87	402.6	$(7.72 \pm 0.70) \times 10^{-5}$
	2554.8	$(8.39 \pm 1.54) \times 10^{-5}$
Kr-88	196.3	$(2.06 \pm 0.11) \times 10^{-4}$
	2392.1	$(1.69 \pm 0.06) \times 10^{-4}$

**[結果]**・Kr-87, Kr-88の高エネルギーピークが観測でき、近傍に有意な妨害核種はないことを確認。

### [今後の予定]

- ・低エネルギーと高エネルギーとで算出濃度に差有
- ⇒校正技術高度化により、精度向上を図る。

## [3次元流体解析によるKrガス挙動解析]

- ・放射線モニタ位置でのKr-87, Kr-88の濃度上昇挙動を評価
- ・流量実測データに基づき条件設定

流量実測データ(2016/10/11)	
N <sub>2</sub> 封入量	30.2 m <sup>3</sup> /h
抽気流量	21.8 m <sup>3</sup> /h

### [結果]

- ・Kr濃度は発生時刻から1h程度で急速に立ち上がり1.8~2.5hで最大となる見込み

### [今後の予定]

- ・CFD解析の精緻化と検知時間短縮の検討

最大濃度までの遅れ時刻	
Kr-87	1.8 h
Kr-88	2.5 h

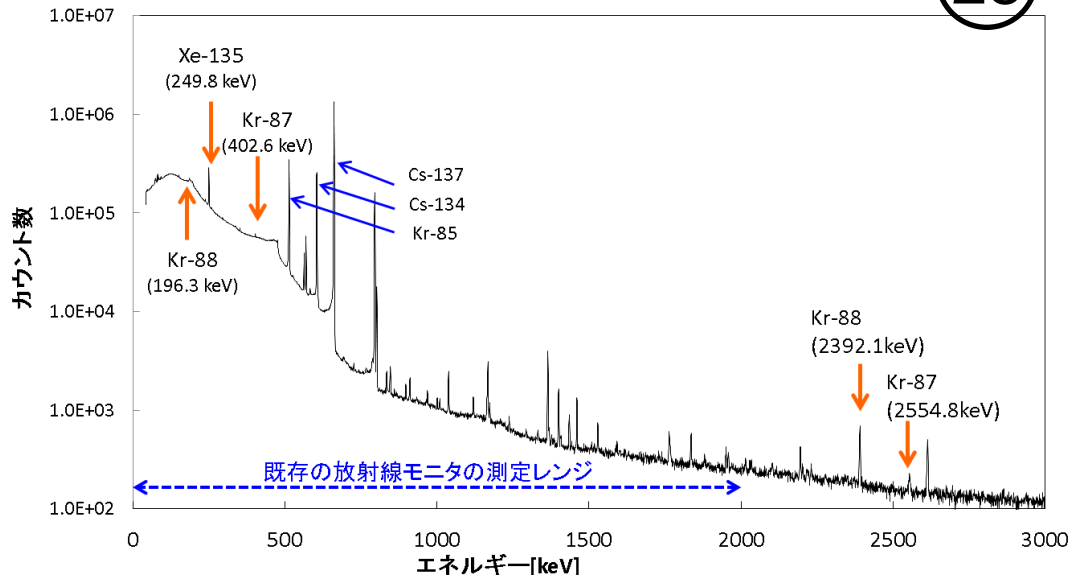


図 1号機ガスサンプリングシステムによるガンマ線スペクトル

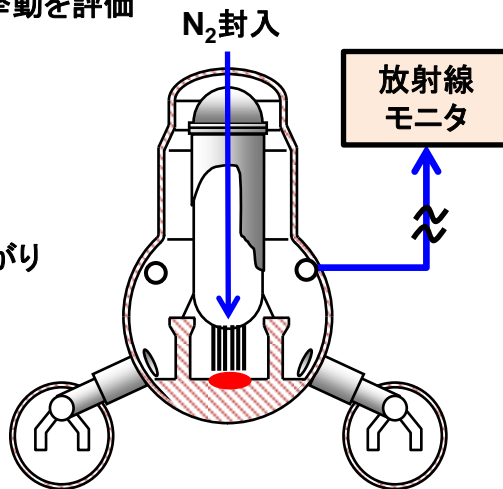


図 ガス挙動解析体系の概要

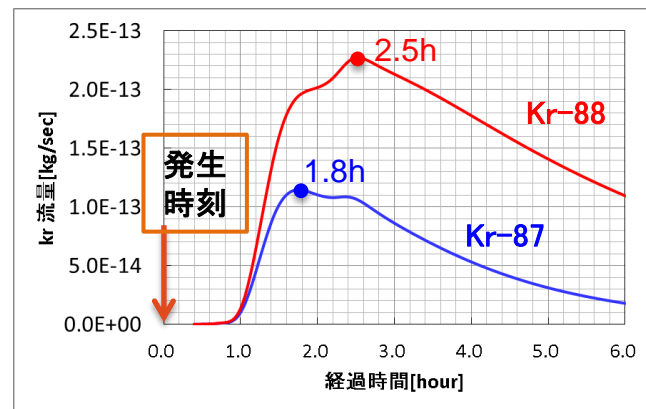


図 炉内発生時刻とモニタでの濃度の関係 (インパルス状に発生)

## 2.2 臨界管理技術の開発 (2)再臨界検知技術の開発 中性子検出器のRPV・PCV内設置検討

### [目的]

PCV水張り工程において、ガスサンプリング系システムによる再臨界検知のバックアップとして、中性子検出器のRPV・PCV内設置を検討

### [実施状況]

#### PCVペネトレーションの調査

約190箇所のペネトレーションの設計情報を調査して、ペネ内配管の内径、ペネ位置への作業員のアクセス性、ペネ内配管が圧力容器まで接続されておらずPCV内部で開放されている、ペネ外側の放射線量が高くない、の観点で23箇所の候補を抽出した。

#### 設置ルートの調査

抽出したペネトレーションから、燃料デブリが堆積していると推定される位置までの設置ルートを設計情報に基づき検討した(右表)。

### [検討結果]

- ・利用可能なペネトレーションの候補として23箇所を抽出した。
- ・ペDESTAL内部への設置は困難であるが、ペDESTAL外への設置は可能と考えられる。
- ・設置工事に向けて作業場所ごとに現場調査を行い、線量および作業における干渉物などの確認を行う必要がある。

### 中性子検出器のRPV・PCV内設置の施工難易度

燃料デブリの堆積位置	中性子検出器の設置(水中の場合)	検出器を挿入するペネトレーション位置	施工難易度
PCV下部ペDESTAL内	PCV下部ペDESTAL内	ペDESTALの開口部のある方向の1階における、内端開放タイプのペネトレーションより挿入し、ペDESTAL内に挿入し、内部に約1~2[m]間隔で配置	高(PCV内部調査の実績から、内部調査より難易度が高い)
PCV下部ペDESTAL外	PCV下部ペDESTAL外	1階又はB1階の開放型ペネトレーションより挿入し、設置	中
RPV下部	RPV下部	1階の内端開放タイプのペネトレーションより挿入し、制御棒案内管などの間からRPV下部へ挿入・設置	高
炉心部	原子炉遮蔽壁(RSW)とRPVの間	1階の内端開放タイプのペネトレーションより挿入し、RSW下部よりRPV間をロボットなどで挿入。(RSW上部にはペネトレーションがないことから下部挿入とする)	高高

## 2.2 臨界管理技術の開発 (3)臨界防止技術

### ①非溶解性中性子吸収材 (核的特性確認試験)

#### [試験目的]

- ・燃料デブリ取り出し時に適用する非溶解性中性子吸収材の選定
- ・核的特性の確認と解析手法検証のためのデータ取得  
京都大学臨界試験装置(KUCA)でのサンプル反応度値測定による臨界抑制効果確認

#### [試験方法]

- ・試験場所: 京都大学原子炉実験所(KUCA)
- ・燃料の一部を非溶解性中性子吸収材を封入した容器に置換し、反応度変化を測定

#### [結果の使用法]

- ・最終的な候補材選定、解析手法検証及び許認可に活用

#### [実施状況]

- ・核的特性確認試験
  - 核的特性確認試験の詳細計画を策定
  - 耐放射線性能を基に5種の候補材試験片を準備
  - KUCAによる試験は来年度実施予定
- ・取り出し方法ごとの適用性
  - 取り出し方法とデブリ形態ごとに適用可能な吸収材を分類
- ・後続工程の影響評価(長期影響確認試験の必要性)
  - 後続工程の期間等を踏まえ、収納缶保管時の副次効果を対象
  - 高崎研ガンマ線照射施設を使用した長時間照射試験計画を策定

#### [今後の予定]

- ・KUCAによる核的特性確認試験実施(平成29年5月、8月予定)
- ・施工性確認試験  
粘性体タイプの中性子吸収材の施工性の確認試験
- ・投入時の均一性担保のための適用工法検討(取り出し方法毎)
- ・投入設備概念の検討、取り出し工法検討への提示
- ・長期影響確認試験の実施(2力年の予定)

#### 候補材選定の流れ

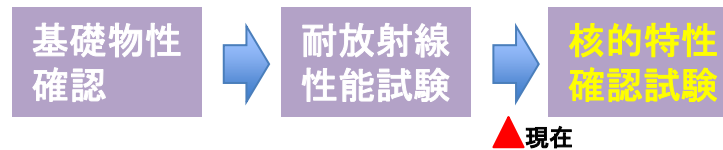


表 候補材スクリーニング結果(耐放射線性能試験後)

カテゴリ	候補材	評価		今後の方針
		気中	水中	
固体	B <sub>4</sub> C/金属焼結材	◎	○	核的特性評価候補
	B・Gd入ガラス材	○	○	核的特性評価候補(高性能)
	中空ボロン	-	-	取下げ
液体 ↓ 固体	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 粒子	○	○	核的特性評価候補(高性能)
	セメント/ Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 造粒粉材	△	△	取下げ
	水ガラス/ Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 造粒粉材	○	△	核的特性評価候補(無機系)
	水中硬化樹脂/ Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 粉末材	○	○	核的特性評価候補(有機系)
液体	水中硬化樹脂/ B <sub>4</sub> C粉末材	○	○	止水材候補
	スラリー/ Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 造粒粉材	△	○	720 kGy以上で固化のため(液体→固体)の核的特性評価有機系第二候補
	B <sub>4</sub> Cゲル材	△	-	照射材溶出特性の改善が必要

表 吸収材適用時の環境と想定される副次効果(長期影響確認)

時期	想定期間	対象量	環境	吸収材機能維持	想定される副次効果
デブリ取出時	1ヶ月	全投入量	水中, デブリ近傍	要	構造材の腐食, 水素発生, 冷却水循環系目詰まり
炉内残留	最大 10 年 (全取り出し作業期間)	残留分 (少量)	水中, デブリから距離	不要	構造材の腐食, 水素発生, 冷却水循環系目詰まり
収納缶保管	最大 30 年 (但し, 収納缶設計寿命は50年)	全投入量	水中/気中, デブリ近傍	不要	収納缶構造材の腐食, 水素発生

# ①非溶解性中性子吸収材（核的特性確認試験）

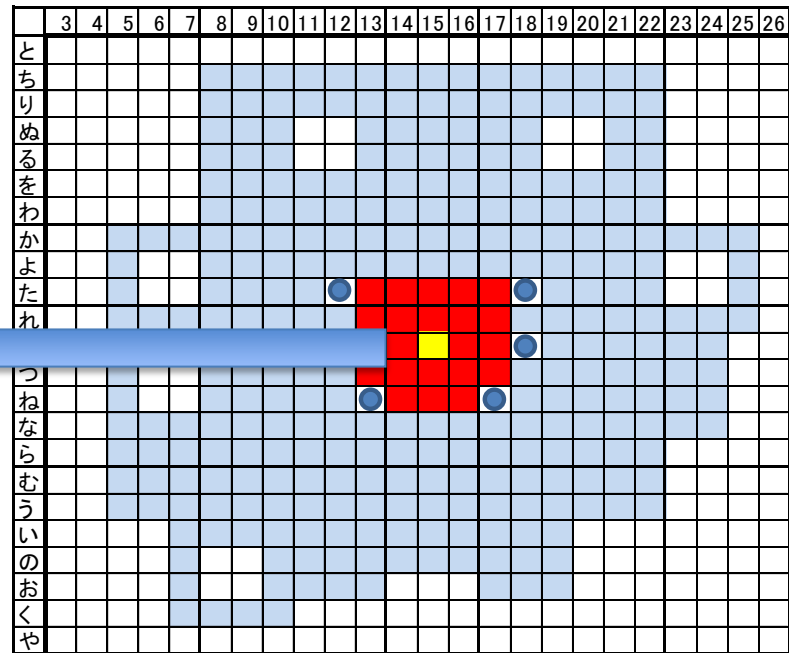
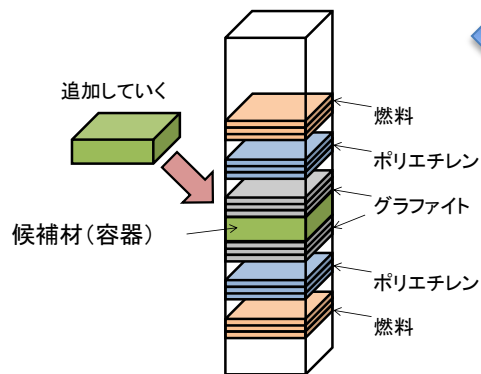


図 KUCA燃料セルへの候補材装荷イメージ

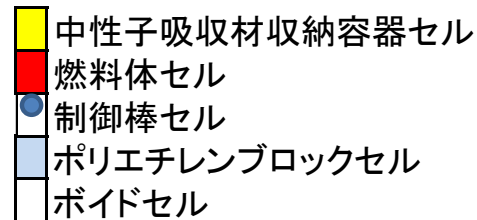


図 KUCAの試験体系イメージ  
固体減速架台 水平方向配置図



## 2.2 臨界管理技術の開発 (3)臨界防止技術

### ①非溶解性中性子吸収材 (適用性確認試験)

#### [試験目的]

- ・非溶解性中性子吸収材を燃料デブリ表面に施工する際の基礎特性の把握

#### [実施状況]

- ・吸収材の付着性能と搬送性能に影響を及ぼす粘度について、時間変化や温度による影響などの基礎的特性を測定した。

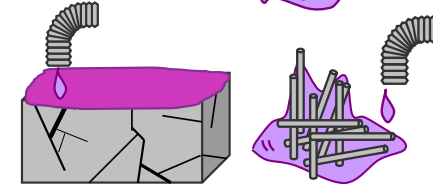
#### 【粘度測定試験】

- ・粘度をコントロールした吸収材をポンプとホースで搬送して、吐出時間や吐出量・圧力を測定し、搬送性を評価した。  
(水ガラス系吸収材)
- ・材料搬送後のポンプとホースの洗浄による効果をpH測定で確認した。

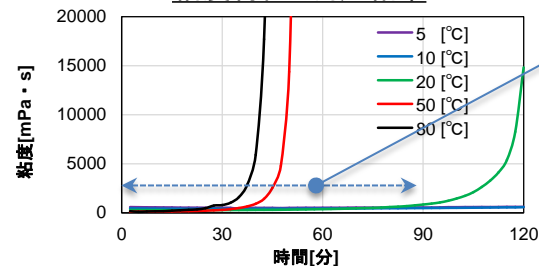
#### 【搬送プロセス基礎試験】

液体→固体タイプの利用方法

デブリの上から流し込み、  
デブリ表面上で硬化し、  
コーティングした  
状態



粘度特性 測定結果



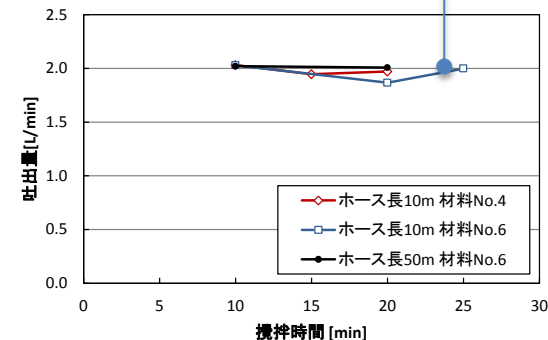
温度と撹拌時間で  
適正な粘度を持  
続可能

50m長ホースによ  
る水平移送可能

搬送試験装置外観



搬送プロセス基礎試験結果



## 2.2 臨界管理技術の開発 (3)臨界防止技術

### ①非溶解性中性子吸収材 (適用性確認試験)

#### [実施状況]

- ・デブリの凹凸面を想定した試験体(溶岩)に吸収材を滴下して、拡がり、膜厚、付着重量、を測定し、付着性を評価した。(水ガラス系吸収材)
- ・平板、粒状溶岩、岩盤状溶岩、塊状溶岩について試験実施。  
【付着性基礎試験】

#### [検討結果]

- ・デブリを模擬した岩盤状溶岩と粒状溶岩、塊状溶岩に対する必要投入量を評価した。  
→具体的必要量を施工対象に応じて設定する必要性

#### [結果の使用方法]

- ・非溶解性中性子吸収材の施工方法の検討
- ・最終的な候補材選定、  
デブリ取り出し設備要求、手順へ反映

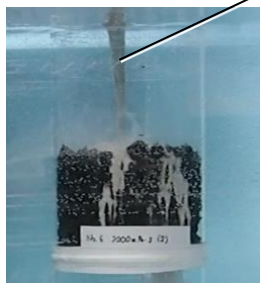
#### [非溶解性吸収材適用性検討 今後の予定]

- ・樹脂系吸収材を対象とした試験
- ・試験データに基づく適用工法の検討

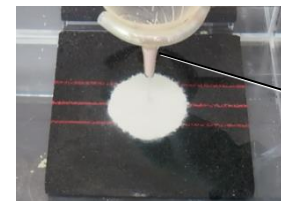
粒状溶岩



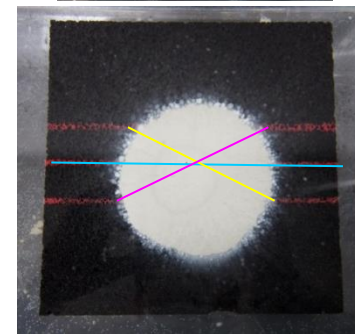
水中で流下する中性子吸収材



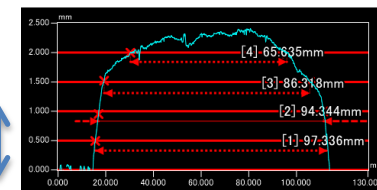
岩盤状溶岩



水中で流下し広がる中性子吸収材



所定の膜厚(暫定1mm)で付着した面積の評価



高さ方向の膜厚(約1mm)

水平方向の拡がり(約100mm)

岩盤状溶岩に付着した吸収材の断面形状 測定結果  
(粘度2000[mPa・s]、ノズル基板間距離70[mm])

粒状溶岩に付着した吸収材の重量 測定結果

粘度 [mPa・s]	投入量 [g]	試験回数	重量増 [g]	重量増(平均) [g]
500	2000	1	73.3	72.4
		2	71.4	
	100	1	11.3	21.1
		2	31.1	

## 2.2 臨界管理技術の開発 (3)臨界防止技術

### ②溶解性中性子吸収材 (高濃度ホウ酸水核計算精度確認試験準備)

#### [試験目的]

・臨界計算において、高濃度五ホウ酸ナトリウム水(以下「ホウ酸水」と略す)が従来と同様の精度で扱えることを確認するための核特性確認試験の準備を行う

#### [試験方法]

・KUCAの使用可能な期間が限定されているため、本年度の溶解性中性子吸収材の試験としては、核特性の把握に必要な最低限のケース(ホウ素濃度2,000ppm、6,000ppm、12,000ppm)のみ実施するための準備を行う。

・試験体系は非溶解性中性子吸収材の試験体系と同じ体系(試験は平成29年6月頃を予定)

#### [結果の使用法]

・核的特性試験結果を核計算によりベンチマーク解析し、高濃度ホウ酸水条件においても従来の核計算誤差に収まることを確認する。

#### [実施状況]

- ・試験方法の検討。
- ・ホウ酸水封入容器の設計・製作。ホウ酸水封入容器の仕様(材質、板厚および容器高さ)仕様決定のため、高濃度ホウ酸水サンプルの反応度効果を、MVPコードにより評価。
- ・ホウ酸水封入容器の製作(図1)

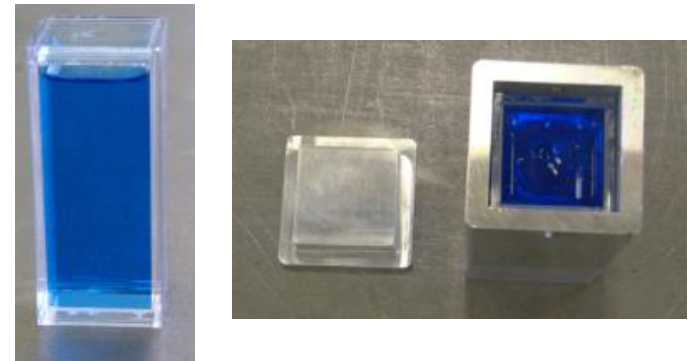


図1 ホウ酸水封入容器  
(アルミ容器内に試薬入りアクリル容器を設置)

## 2.2 臨界管理技術の開発 (3)臨界防止技術

### ②溶解性中性子吸収材 (ホウ酸水設備検討)

#### [検討目的]

・PCV水張りから燃料デブリ取り出し時に適用する溶解性中性子吸収材の適用時課題の解決として、ホウ酸水の濃度維持管理設備について検討する。

#### [実施状況]

・デブリ取り出し工法を考慮し、地下水の流入およびPCV からトラス室への冷却水の流出を考慮した場合のホウ素濃度維持設備について以下の条件で検討した。

PCV, S/Cからトラス室へのホウ酸水の漏えい量 $4.4\text{m}^3/\text{h}$

トラス室への地下水の流入量 $2.1\text{m}^3/\text{h}$

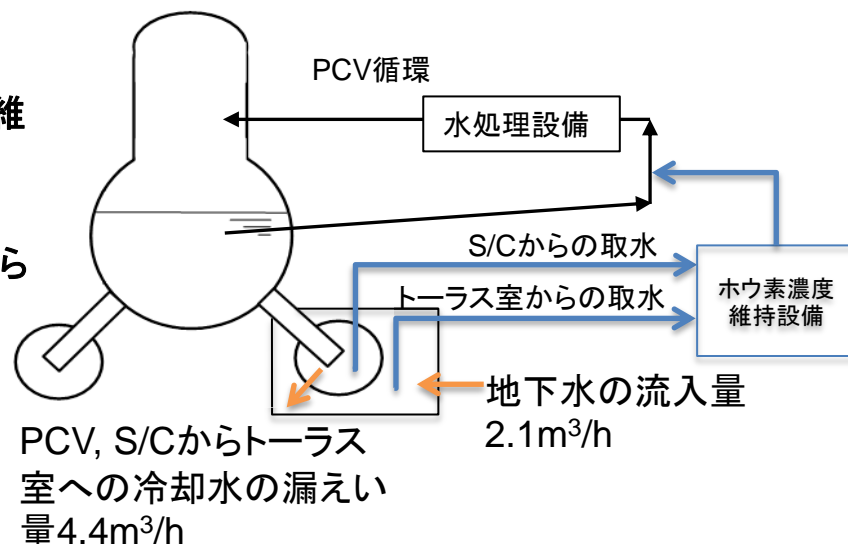


図 ホウ素濃度維持設備の検討の概要

#### [溶解性中性子吸収材]

- ・PCV内をホウ酸水で冠水させた場合にホウ素濃度分布が生じる可能性を検討した。
- ・プラント過渡解析コードを利用して、PCV空間をノード分割して、ノード間の対流、ホウ酸水の重力沈降を考慮したホウ素輸送解析を実施した。
- ・解析結果の一例として、PCV水位、注水/取水の位置、RPV漏洩面積、ベント管の抵抗係数、などの諸条件を仮定して、 $10,000\text{ppm}$ のホウ酸水を $5\text{m}^3/\text{h}$ で注水・取水する場合、D/W内のホウ素濃度が暫定目標である $6000\text{ppm}$ に到達するまで2~3カ月程度要することが示唆された。
- ・今後、解析モデルの見直しと、詳細解析との比較が望まれる。
- ・ホウ素濃度維持及び水質管理に必要な設備を、取り出し工法検討での設備検討と連携して合理化検討を行い、設備概念、現場適用性を確認

## 2.2 臨界管理技術の開発 (3)臨界防止技術

### ②溶解性中性子吸収材 (五ホウ酸ナトリウム水設備検討)

#### [溶解性中性子吸収材]

- ・溶解性中性子吸収材濃度維持及び水質管理に必要な設備を、取り出し工法検討での設備検討と連携して合理化検討を行い、設備概念、現場適用性を確認した。

#### ホウ素濃度維持設備の概要

- ・トールラス室より取水した冷却水(希釈された五ホウ酸ナトリウム水)は受槽へ貯留される。
- ・貯留された冷却水は濃縮缶により所定のホウ素濃度(運転条件として7,000ppmを設定)まで濃縮する。
- ・所定の濃度まで濃縮された冷却水を循環冷却システムへ戻す。

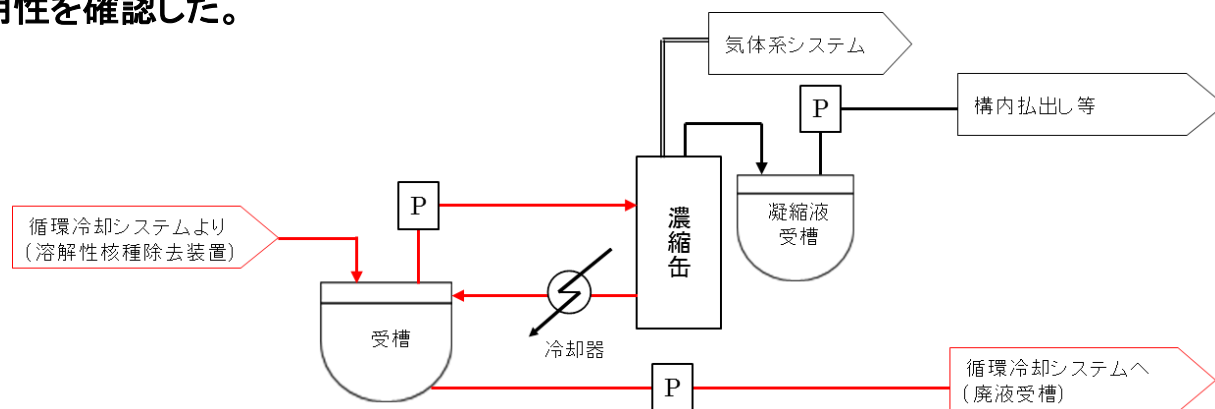


図 ホウ素濃度維持設備

### 3. まとめ(平成28年度末時点成果概要)(1/2)

#### ①臨界評価手法の確立

##### (臨界シナリオの策定)

- ・臨界シナリオ・臨界評価への最新知見を反映した見直しを実施し、臨界シナリオの有効性を確認。2号機PCV底部、炉心部のリスクを“中”に見直し。
- ・取り出し方法毎の臨界評価を実施し、臨界管理からの要求を整理。
- ・統計的臨界評価手法を確立。

##### (臨界時挙動評価)

- ・最新情報に基づく、PCV上部水張り時挙動評価・被ばく評価の見直しを実施。昨年度検討結果では、水張り速度1cm/hで万一の臨界時にも事故時線量未満となることを確認。
- ・デブリ取り出し時、デブリ落下時挙動評価実施。万一の臨界時にも事故時線量未満となることを確認。

##### (臨界管理手法の策定)

- ・外部有識者意見も踏まえて深層防護の考え方を整理、臨界管理方法に反映。サブシナリオの管理方法の検討。
- ・デブリ取り出し設備への要求整理、取り出し基盤技術Pjに提示。

### 3. まとめ(平成28年度末時点成果概要)(2/2)

#### ②臨界管理技術の開発

##### (臨界近接監視手法)

- ・臨界近接成立性確認試験(KUCA)の準備を完了。(試験は平成29年度実施)
- ・高放射線下動作性確認試験(NFD)を実施。使用済み燃料起因ガンマ線環境下での必要中性子検出性能達成見通しの確認

##### (再臨界検知技術)

- ・1号機でのガスサンプリング系システム実機試験を実施。Kr-87,88の測定可能性を確認、高度化の目途を付けた。
- ・3次元流体解析によるPCV内FPガス挙動解析により応答挙動を確認。検知時間検知遅れ時間想定の妥当性を確認。

##### (非溶解性中性子吸収材)

- ・核的特性試験(KUCA)の準備を完了。(試験は平成29年度実施)
- ・適用性確認試験を実施, 多孔性模擬デブリへの適用性を確認。

##### (溶解性中性子吸収材)

- ・核計算精度確認試験(KUCA)の準備を完了。(試験は平成29年度実施)
- ・ホウ素濃度維持に必要な系統・設備検討を実施。現場適用性を確認。

以上