

**平成29年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業費補助金」  
燃料デブリ・炉内構造物の取り出し工法・システムの高度化  
(臨界管理方法の確立に関する技術開発)**

**平成30年度実施分最終報告**

令和元年7月

技術研究組合 国際廃炉研究開発機構(IRID)

# 目次

- 1. 全体計画 . . . . . 2
  - 1.1 目的 . . . . . 2
  - 1.2 目標 . . . . . 4
  - 1.3 臨界管理技術の現場適用性検討内容 . . . . . 6
  - 1.4 実施体制 . . . . . 8
- 2. 実施成果 . . . . . 10
  - 2.1 未臨界度測定・臨界近接監視のための技術開発 . . . . . 11
  - 2.2 再臨界を検知する技術開発 . . . . . 27
  - 2.3 臨界防止技術の開発 . . . . . 35
  - 2.4 工法・システムの安全確保に関する  
最適化検討（臨界管理関連） . . . . . 45
    - ①臨界評価・影響評価手法の確立 . . . . . 45
    - ②臨界管理方法の検討 . . . . . 50
- 3. まとめ . . . . . 56

# 1. 全体計画

## 1.1 目的

### 【背景】

・2013～2017年度にかけて「燃料デブリ臨界管理技術の開発」として、燃料デブリ取り出し作業時の臨界管理に必要な要素技術の基本的な成立性を確認したが、「燃料デブリ・炉内構造物の取り出し工法・システムの高度化」において燃料デブリ取り出しに向けて開発を進めている工法・システムへの適用において、適用性の確認や具体化に向けた課題が残っている。

### 【目的】

・「燃料デブリ・炉内構造物の取り出し工法・システムの高度化」の一部として、臨界管理技術の燃料デブリ取り出しへの適用性を検討するために、**燃料デブリや炉内構造物の取り出し・工法システムの概念検討の一部として、現場適用性を検討する。**

- (1) 未臨界度測定・臨界近接監視のための技術開発
- (2) 再臨界を検知する技術開発
- (3) 臨界防止技術の開発
- (4) 工法・システムの安全確保に関する最適化検討(臨界管理関連)

・「燃料デブリ・炉内構造物の取り出し工法・システムの高度化」等、IRIDで推進しているPjとの連携を図り、工法・システムへの臨界管理システムの現場適用性検討を進める。

# 1.1 目的(技術開発成果の適用先)

事項/年度	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
ロードマップ主要工程							
【燃料デブリ臨界管理技術の開発】Pj							
1. 臨界評価手法の確立 (臨界評価・臨界時挙動評価)	臨界シナリオ検討	最新情報でのアップデート					
2. 臨界管理技術の開発							
(1) 臨界近接監視技術	手法検討	成立性試験(原理検証)					
(2) 再臨界検知技術	高度化システム検討	成立性試験					
(3) 臨界防止技術 非溶解性中性子吸収材	候補材選定・適用方法検討・成立性試験						
溶解性中性子吸収材	適用時影響評価・設備検討	成立性試験					
【燃料デブリ・炉内構造物の取り出し 工法・システムの高度化】Pj							
臨界管理方法の確立に関する技術開発							
1. 未臨界度測定・臨界近接監視のための技術開発							
2. 再臨界を検知する技術開発							
3. 臨界防止技術の開発							
4. 工法・システムの安全確保に関する最適化検討							
① 臨界評価・影響評価手法の確立							
② 臨界管理方法の検討							
【主要関連pj】							
「PCV内部詳細調査技術の開発」							
「燃料デブリ・炉内構造物の取り出しに向けたサンプリング技術の開発」							
「燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発」							

燃料デブリ取り出し方針決定 ▲ 取り出し方針の反映

取り出し方法確定 △

△ 初号機取り出し

開発成果を工法・設備検討に反映

工法・システム情報

工法・システム検討に反映

工法・システム情報

調査ニーズ  
臨界評価方法

各段階での臨界管理方法  
調査結果を用いた臨界評価合理化方法

## 1.2 目標（臨界管理の基本的な考え方）

### [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ことにより、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。

判断基準：敷地境界での一般公衆：5 mSv，作業員：100 mSv

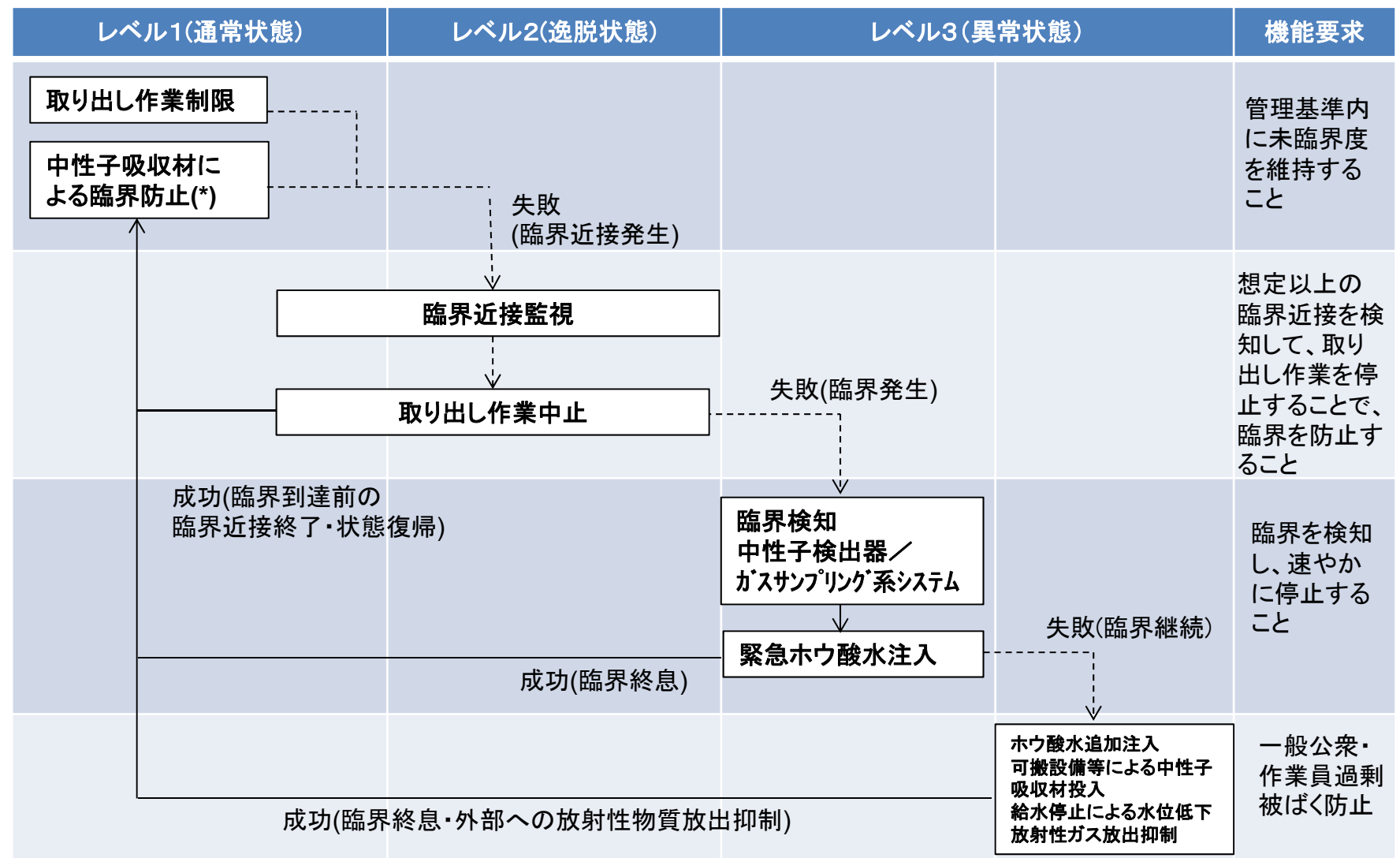
### [深層防護に基づいた臨界管理方法]

- ・工法・システムからの安全要求、機能要求：参考1参照
- ・工法・システム高度化(安全設計)の考え方に合わせ、レベル定義見直し(臨界発生をレベル3に設定)

安全要求	核反応による異常な放射性物質の生成防止			
深層防護	レベル1	レベル2	レベル3	
機能要求	管理基準内に未臨界度を維持すること	想定以上の臨界近接を検知して、取り出し作業を停止することで、臨界を防止すること	臨界を検知し、速やかに停止すること	
状態	通常状態(取り出し作業)	臨界近接状態	臨界超過	臨界継続
具体的手段 (主要なもの)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・燃料デブリ加工量制限</li> <li>・臨界近接を検知した場合の作業中断</li> <li>・中性子吸収材適用</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・臨界近接を検知した場合の作業中断、加工した燃料デブリの回収</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・臨界を検知した場合のホウ酸水注入による臨界終息</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ホウ酸水追加注入、可搬設備による中性子吸収材投入、水位低下など他の手段による臨界終息</li> <li>・放射性ガス放出抑制</li> </ul>
監視		<ul style="list-style-type: none"> <li>・取り出し位置近傍中性子束</li> <li>・PCV排気中FPガス濃度</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>・PCV排気中FPガス濃度</li> </ul>
レベル拡大防止	<ul style="list-style-type: none"> <li>・作業中断により臨界近接は停止しレベル2へ移行しない。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・作業中断により臨界近接は停止、レベル3(臨界)に至らない。</li> <li>・加工した燃料デブリを回収することでレベル1へ戻る。</li> <li>・未臨界状態では環境線量の過度の上昇は生じない(エリアモニタなどにより必要に応じて退避を行う)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ホウ酸水注入で臨界停止し、レベル2以下に戻る。</li> <li>・作業員を退避させることで過剰被ばくを防止</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・追加的対策により臨界は終息し、レベル2以下に戻る。</li> </ul>
備考	臨界発生防止、早期検知・終息(臨界管理の主要課題)			放射性物質閉じ込め(安全全体で取り組む)

# 1.2 目標（臨界管理の基本的な考え方）

## 燃料デブリ取り出し時臨界管理（中性子吸収材常時使用の場合）



# 1.3 臨界管理技術の現場適用性検討内容

・臨界管理の現場適用性検討としては、次の4つの観点で実施している。

①取り出し工法・設備への臨界管理の具体化(図1)

- 取り出し設備へ搭載可能な臨界近接検知システム仕様
- 中性子吸収材適用・運用方法
- 取り出し時システム構成・運用条件での臨界管理有効性確認

②1F現場体系を想定した実証

- 複雑体系での未臨界度測定成立性
- 臨界近接監視システムの実機適用までの実証試験計画
- PCVガス放射線モニタ高度化システム検出器校正技術

③内部調査等の結果を踏まえた最新臨界シナリオ・リスク評価

④本格取り出しまでの各工程での臨界管理方法(システム構成・条件)

次シートに検討の観点と実施内容の対応をまとめる。

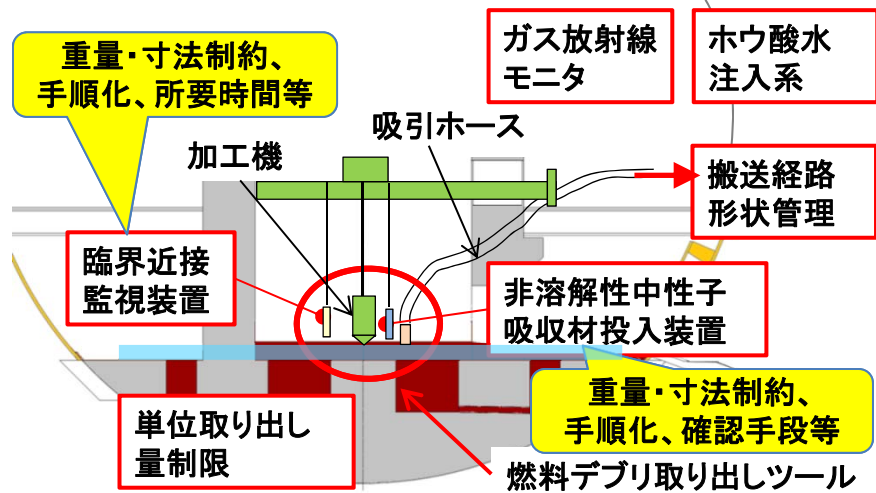


図1 臨界管理の実機適用項目例

# 1.3 臨界管理技術の現場適用性検討内容

## 臨界管理の現場適用性検討の観点から、実施内容を選定

現場適用性の観点 実施内容	a)取り出し工法・設備への 臨界管理の具体化 (前ページの図1)	b)1F現場体系を想定した 実証	c)内部調査等の結果を 踏まえた最新臨界シ ナリオ・リスク評価	d)④本格取り出しまでの 各工程での臨界管理方 法
(1)未臨界度測定・臨界近 接監視のための技術開 発	1) 取り出し装置への中性子 検出器適用性の検討	2) 1F実機の複雑体系を 模擬した未臨界度測定方 法成立性確認 3) 実機体系での計装シス テム成立性確認方法検討		
(2)再臨界を検知する技術 開発	1) 負圧管理システムの一環 として運用方法検討 2) 局所的な臨界近接事象 の検知適用性判断 3) 中性子検出器の設置可 能性検討	1)のうち 検出器校正方法検討		
(3)臨界防止技術の開発	1) 非溶解性吸収材の燃料 デブリへの散布方法や散 布後効果確認方法検討 2) 収納缶長期照射影響検 討、収納缶本数や廃棄物 量への影響評価	1)のうち 施工性確認試験		
(4)工法・システムの安全 確保に関する最適化検 討(臨界管理関連) ①臨界評価・影響評価 手法の確立			1) 臨界シナリオの検 討・臨界評価 2) 統計的臨界評価手 法高度化	
②臨界管理方法の検討	i-1) 取り出し工法毎の臨界 管理手順評価 i-2) 溶解性中性子吸収材を 用いた循環冷却システム 影響評価	i-2)のうち コンクリート起因元素によ るホウ素濃度影響確認試 験		ii) 燃料デブリサンプリン グから徐々に規模拡大 した各段階の臨界管理 方法検討



# 1.4 実施体制

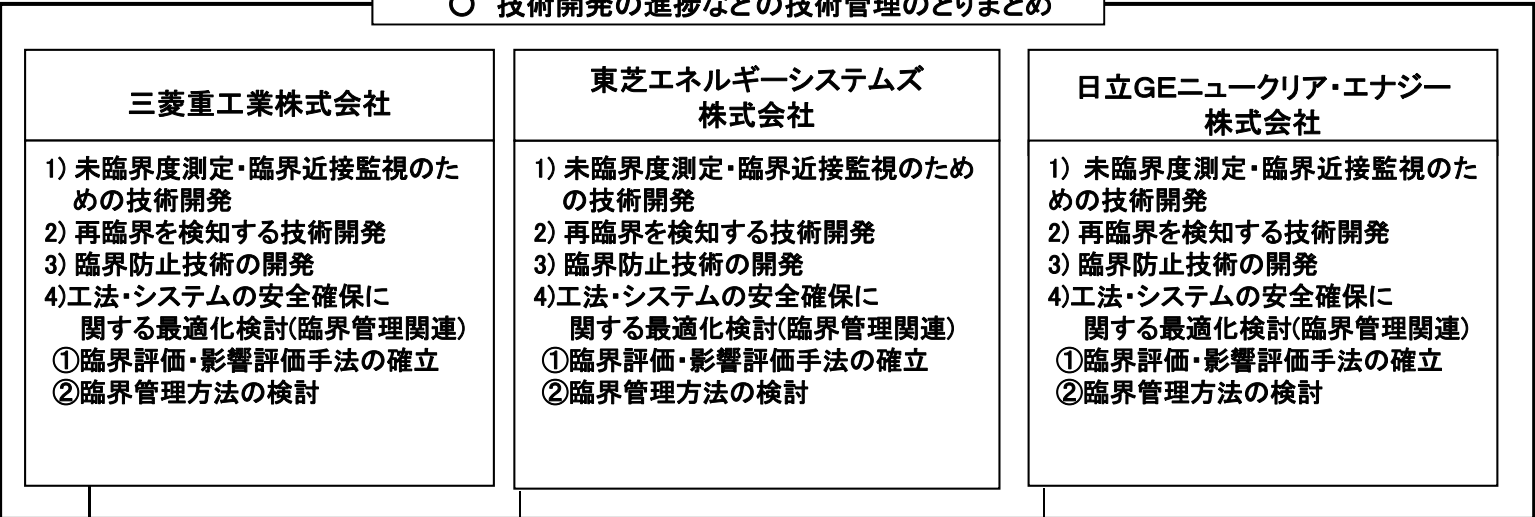
技術研究組合 国際廃炉研究開発機構(本部)

- 全体計画の策定と技術統括のとりまとめ
- 技術開発の進捗などの技術管理のとりまとめ

燃料デブリ・炉内構造物の取り出し工法・システムの高度化

原子炉格納容器内部詳細調査技術の開発

燃料デブリ・炉内構造物の取り出しに向けたサンプリング技術の開発



MHI NSエンジニアリング株式会社  
 ・臨界評価補助  
 ・臨界時挙動評価 解析補助

ニュークリアティヘ・ロップメント株式会社  
 ・溶解性中性子吸収材運用検討補助

株式会社テプコスシステムズ  
 ・臨界管理手法検討補助

京都大学原子炉実験所  
 ・臨界近接検知試験補助

原子燃料工業株式会社  
 ・臨界防止技術(Gd粒子)  
 ・臨界近接監視手法の改良検討

富士化学株式会社  
 ・臨界防止技術(水ガラス材)

東芝原子力エンジニアリングサービス株式会社  
 ・臨界評価・影響評価手法の解析補助

株式会社テプコスシステムズ  
 ・使用済燃料保管設備の試験の検討

京都大学原子炉実験所  
 ・臨界近接監視システムの複雑体系適用性確認試験

日立化成株式会社  
 ・非溶解性吸収材開発補助

株式会社 日立ハイテクノロジーズ  
 ・非溶解性中性子吸収材開発補助

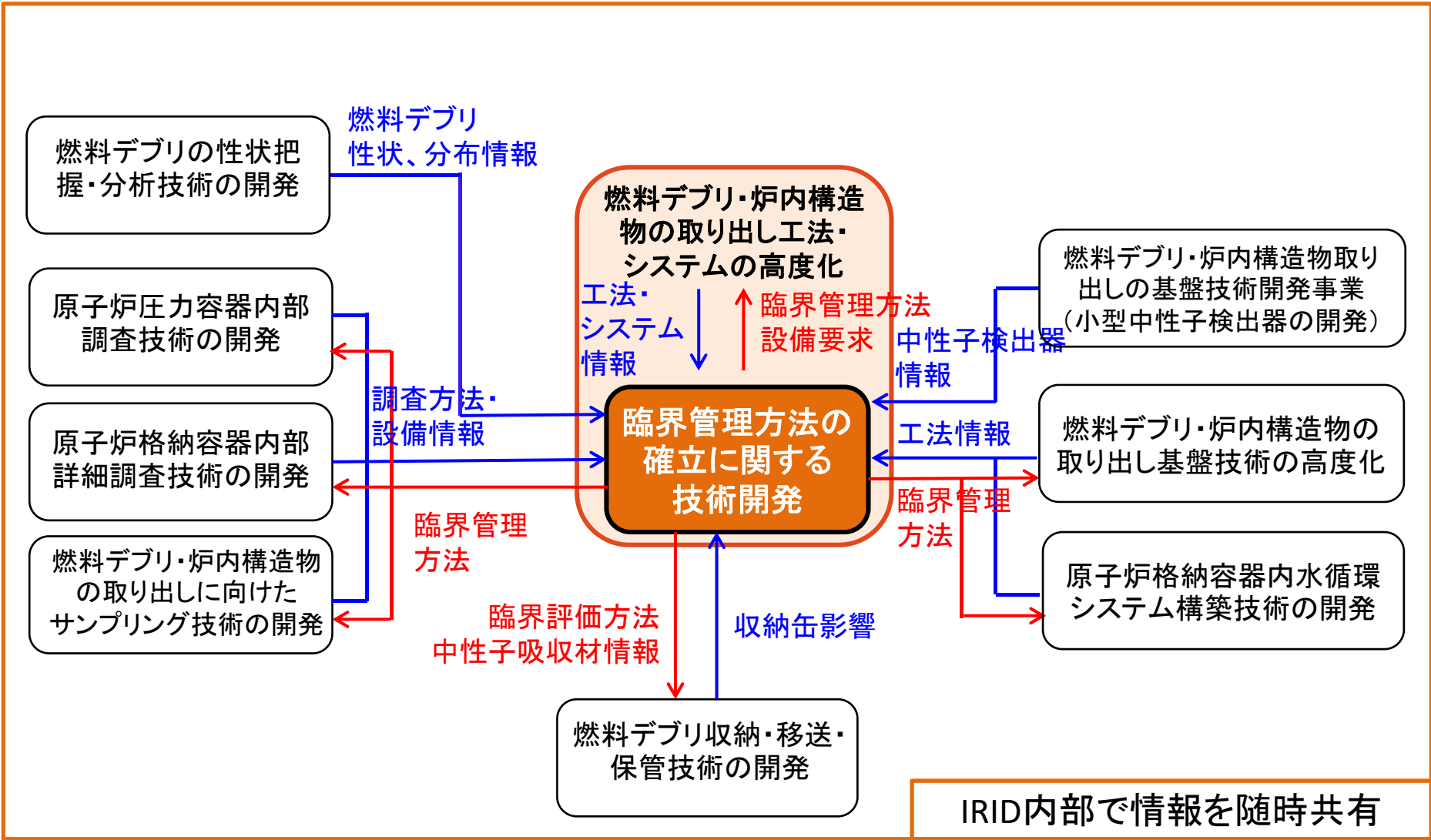
株式会社日立製作所  
 ・FPガス放射線モニタ(ガスサンプリング系)の校正技術の実験的検討

株式会社 ナイス  
 ・統計的臨界評価および臨界時挙動評価補助

京都大学原子炉実験所  
 ・臨界近接監視システムの複雑体系適用性確認試験

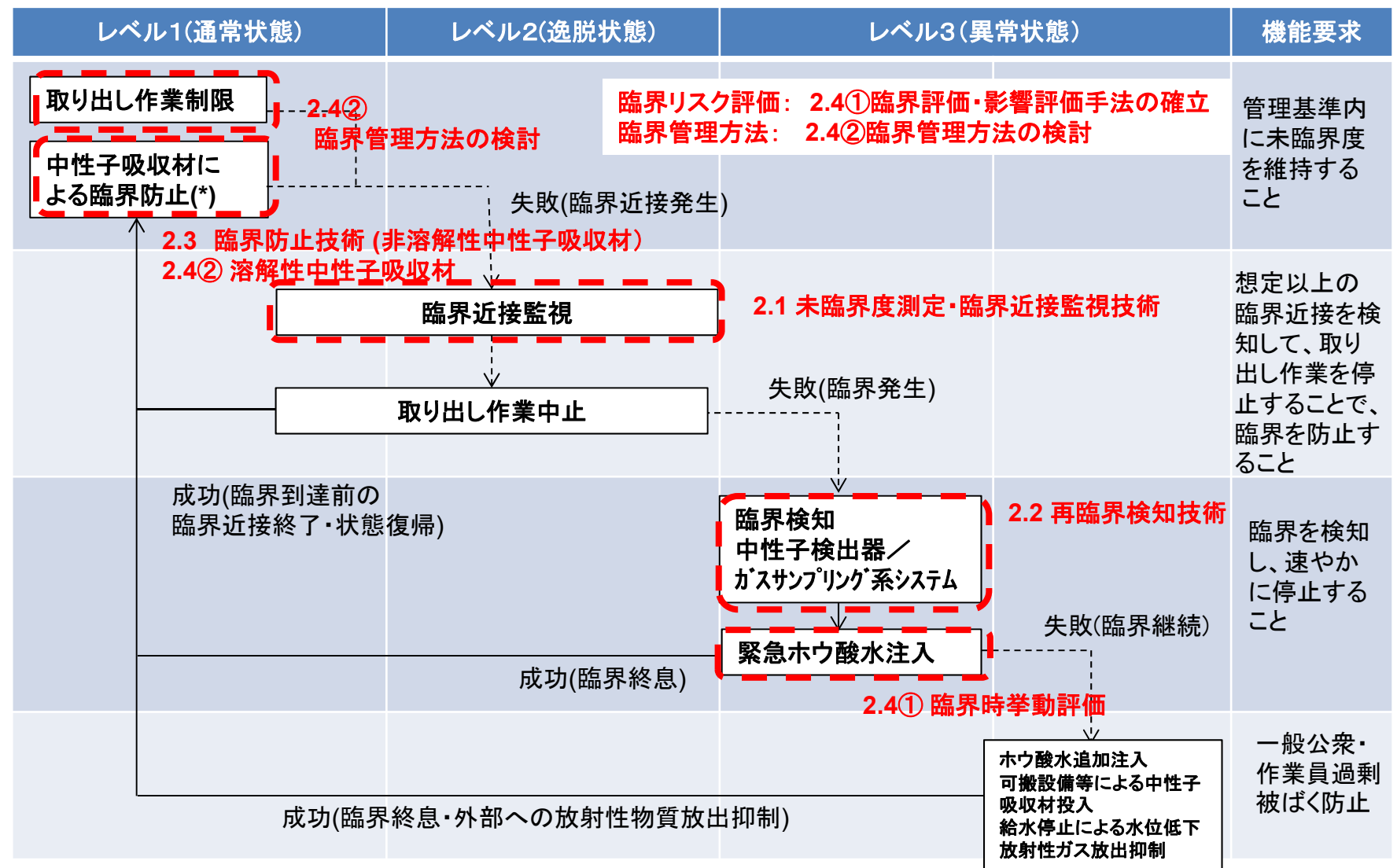
実施内容は主要なもののみ記載している。

# 1.5 実施体制（他研究との関連）



## 2. 実施成果

(参考)各実施内容(要素技術の適用先)



## 2. 実施成果

### 2.1 未臨界度測定・臨界近接監視のための技術開発

#### 概要

##### 【目的】

- ・臨界近接を検知し、取り出し作業を中止することで臨界を防止するための未臨界度測定・臨界近接監視のためのシステム

##### 【システム概要】

- ・中性子検出器を燃料デブリ近傍に設置して、核分裂による局所的な中性子のゆらぎを計測(図1)
- ・中性子のゆらぎを炉雑音分析して未臨界度を推定
- ・燃料デブリ取り出し作業による未臨界度の変化を中性子源増倍法でリアルタイム監視

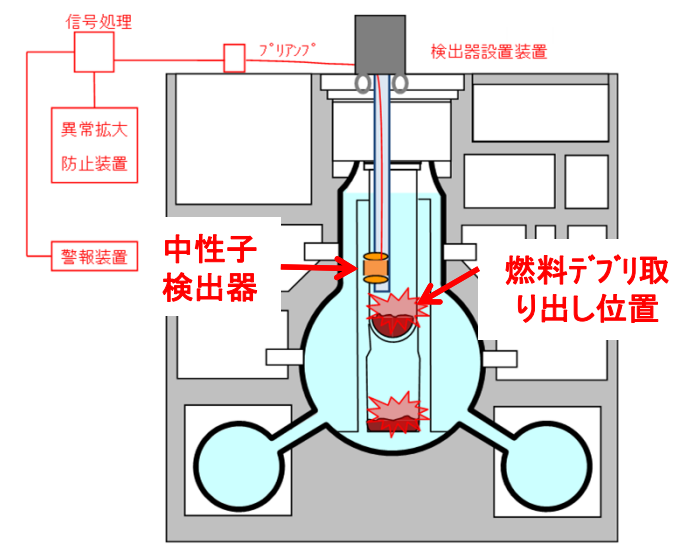
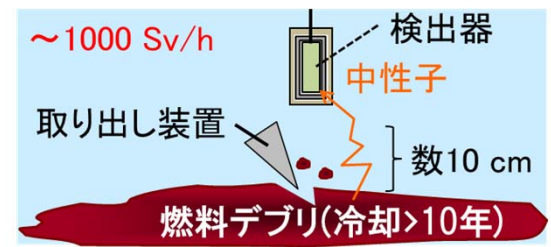
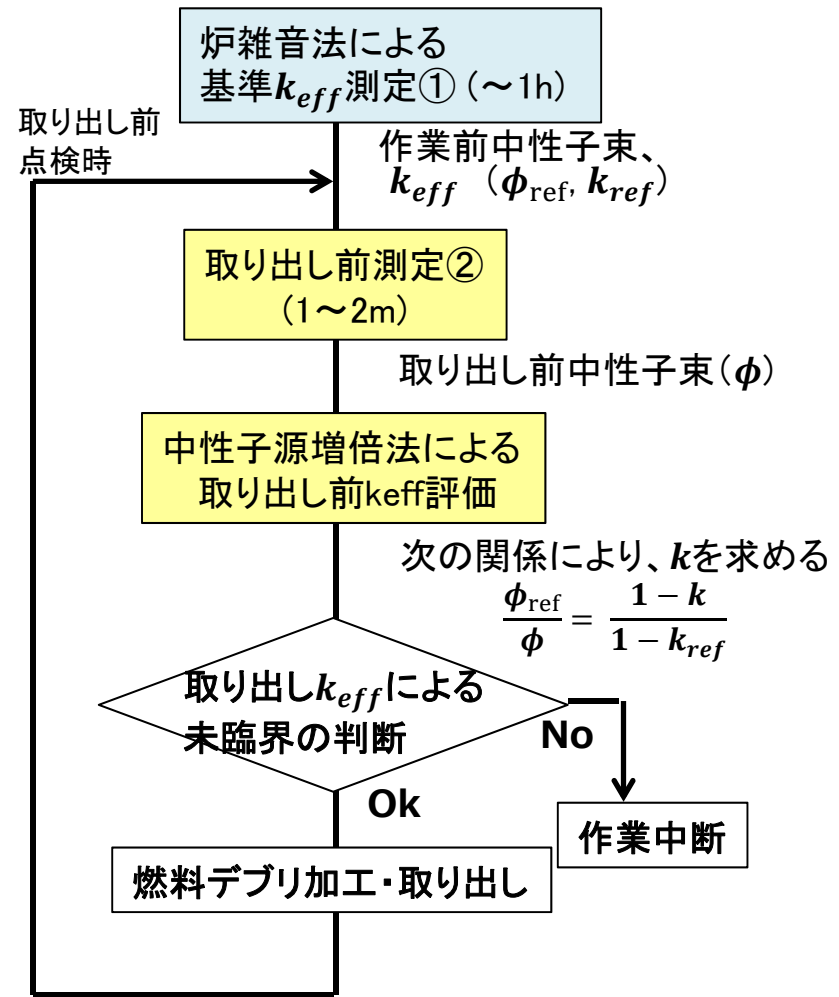
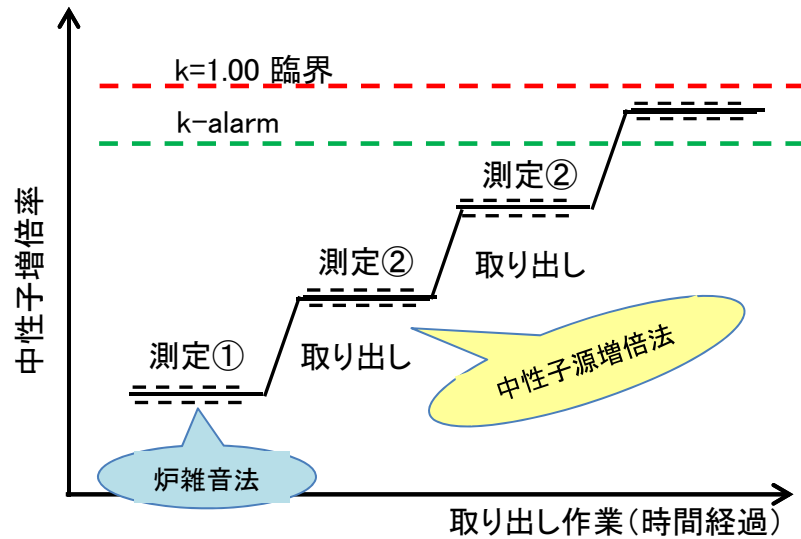


図1 未臨界度測定・臨界近接監視システム概要

## 2.1 未臨界度測定・臨界近接監視のための技術開発 概要

### 【監視の手順】

- ・燃料デブリ取り出し作業開始前に炉雑音法で基準となる中性子増倍率 ( $k_{eff}$ ) を測定①
- ・燃料デブリ取り出し作業中は中性子計数率をリアルタイム監視②
- ・中性子計数率が変化したら中性子源増倍法で中性子増倍率 ( $k_{eff}$ ) を評価
- ・中性子増倍率が判断基準に達したら作業中断
- ・中性子増倍率を下げる処置後に、炉雑音法で基準を再測定①



## 2.1 未臨界度測定・臨界近接監視のための技術開発

13

実施済の内容(黒), 本年度の内容(青)

表1 開発成果と実機適用までの課題

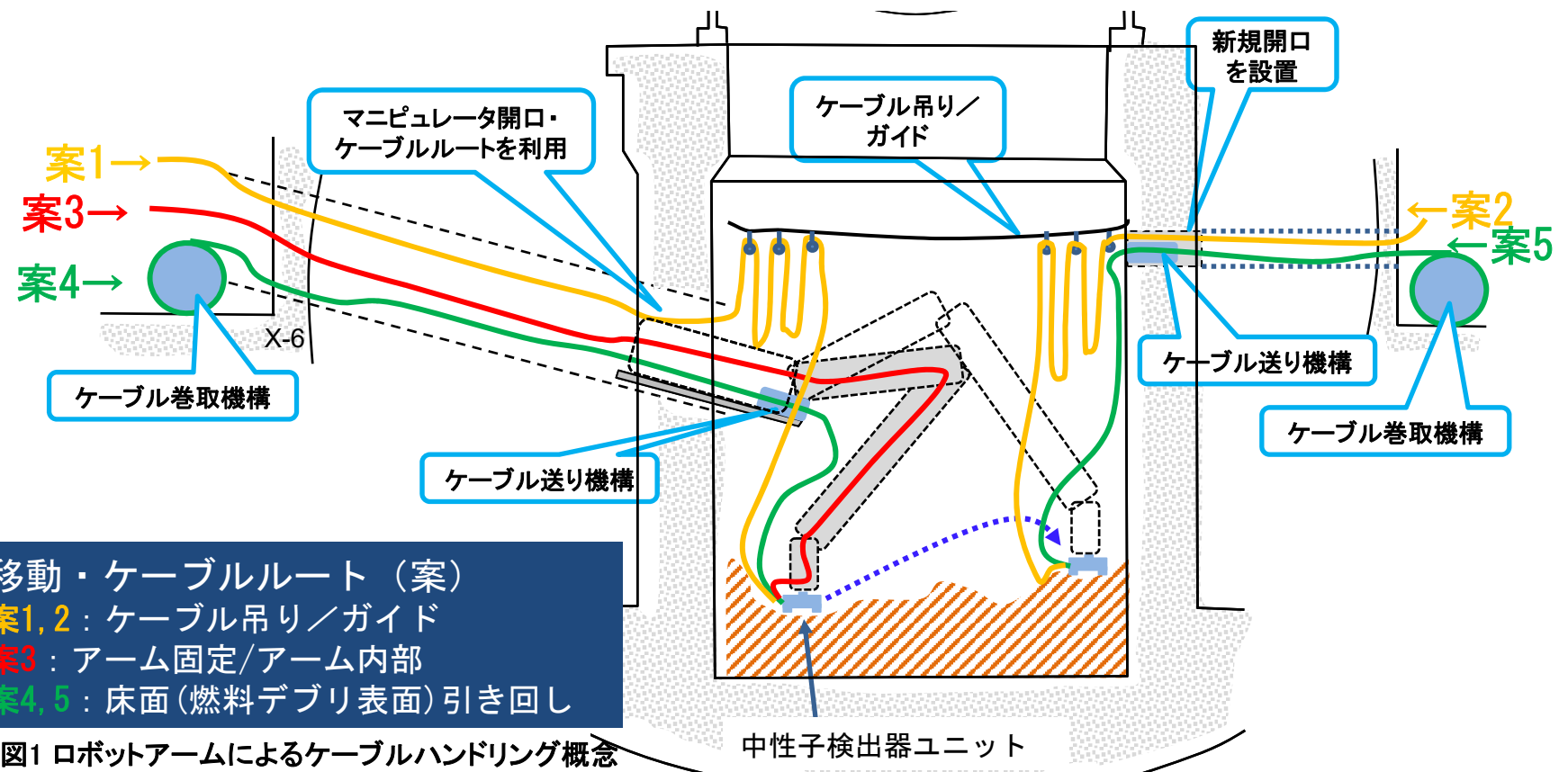
最終目標	実機適用までの達成目標	達成状況	実機適用までの課題
技術の成立性 確認 (未臨界度 測定技術の 確立)	① 測定手法の確立	炉雑音法と中性子源増倍法を組み合わせた手法を選定(完了) 測定誤差低減のための検出器感度・配置を検討	
	② システム仕様策定	検出器、測定回路等のシステム仕様を策定(完了)	
	③ 中性子検出器の仕様	中性子検出器の仕様策定と試作機用の検出器選定(完了)	
	④ システム設計・試作	試験用システムとして中性子検出器と測定回路と分析用PCで構成されるシステムを試作	
	⑤ 試作機の性能評価	高ガンマ線環境における中性子検出性能を確認 均一燃料デブリ模擬における未臨界度測定を確認 大型燃料デブリ模擬条件で未臨界度測定性能を確認(KUCA試験#3)	不均一な燃料デブリ/中性子吸収材を模擬した条件における未臨界度測定性能の確認試験(KUCA試験#4)
技術の適用性 (燃料デブリ取 り出しシステム への組み込 み)	① システム構成・ 配置設計	ロボットアームで移送するための中性子検出器ユニットの仕様項目を整理 ケーブルハンドリング概念を策定	設計・試作・要素試験 燃料デブリ取り出し装置との組み合わせ 検証
	② 電磁ノイズ対策	模擬ノイズによる影響を評価、対策案を整理	燃料デブリ取り出し装置との組み合わせ 検証
	③ 運用手順の策定	測定に要する時間を評価	燃料デブリ取り出し手順との組み合わせ による通常運転、保守作業の手順策定
	④ 模擬実証	2F-4使用済燃料プールにおいて実施可能な試験条件を解析評価	使用済燃料プール試験の要否判断 燃料デブリ取り出し装置との組み合わせ 検証

# 2.1 未臨界度測定・臨界近接監視のための技術開発

## 1) 取り出し装置への中性子検出器適用性の検討

### 【実施内容】

- ・臨界近接監視システムを燃料デブリ取り出しシステムに適用するためのシステム構成、配置設計を検討した。
- ・上取り出し工法よりも制約の厳しい横取り出し工法について検討した。
- ・ノイズ対策のためケーブルが硬くなり、ケーブルハンドリングが課題と判明した。
- ・開発中のロボットアームへの適用を想定して、ケーブルハンドリング概念案を比較した。(→頁16参照)



# 2.1 未臨界度測定・臨界近接監視のための技術開発

## 1) 取り出し装置への中性子検出器適用性の検討

(全頁よりの続き)

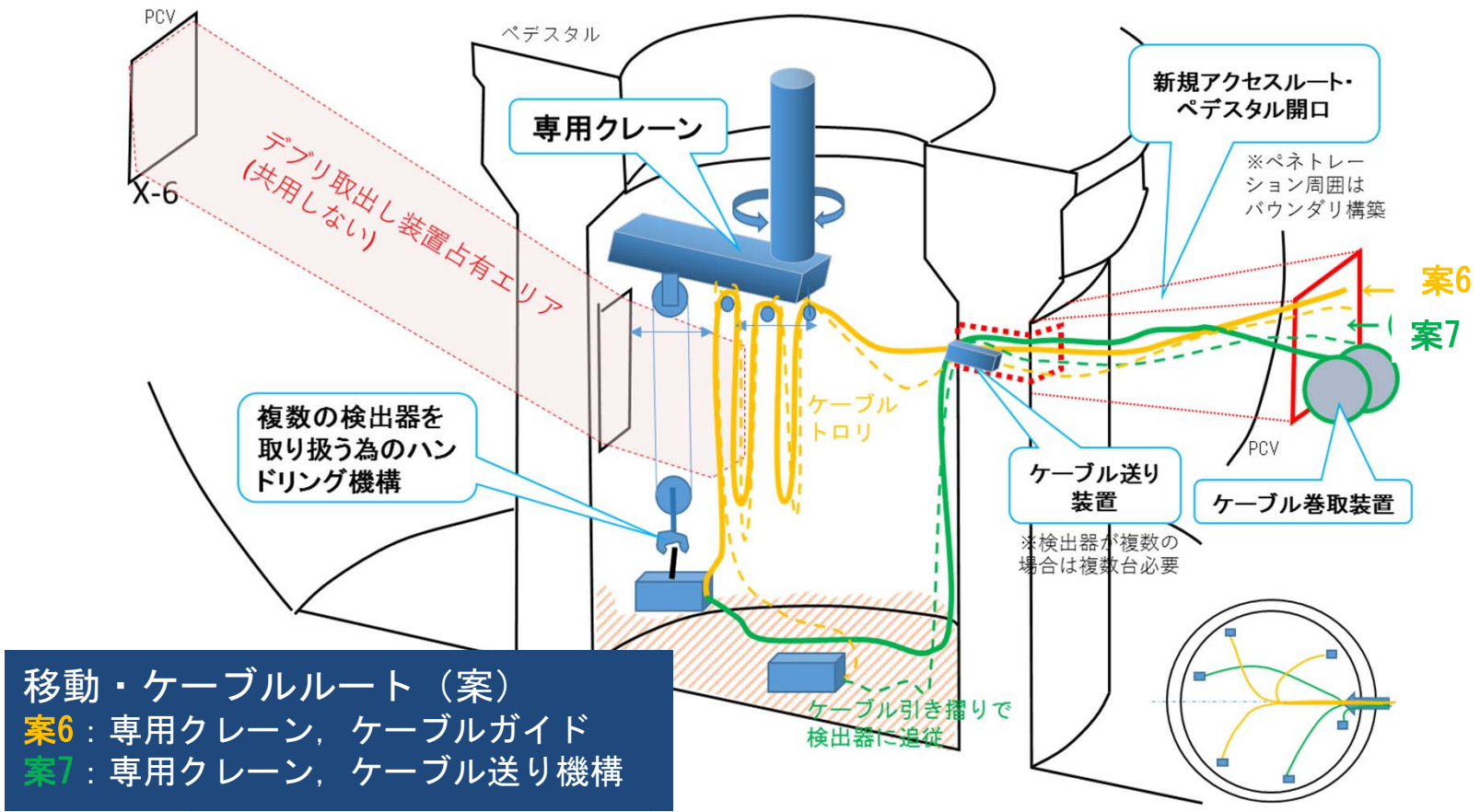


図2 専用クレーンによるケーブルハンドリング概念



## 2.1 未臨界度測定・臨界近接監視のための技術開発

### 1) 取り出し装置への中性子検出器適用性の検討

**【成果】**

・燃料デブリ取り出し装置へ適用するためのケーブルハンドリング案を策定し、実現性が高いと考えられる案を抽出した。

⇒ロボットアーム+ケーブル巻き取り機構+ケーブル送り機構による方式

**【実機適用までの課題】**

・検出器とケーブルのハンドリングに係る付帯設備の設計、試作、要素試験

項目\運用方法(案)		ロボットアーム使用案					専用クレーン使用案	
		案1	案2	案3	案4	案5	案6	案7
アクセス	新規開口の要否	○(不要)	×(必要)	○(不要)	○(不要)	×(必要)	×(必要)	←
検出器 ユニット /単体 検出器 移動方法	付帯設備@PCV の要否	× (ケーブル ガイド)	←	○(不要)	○(不要)	←	×(クレーン +ケーブル ガイド)	× (クレーン)
	付帯設備@アウター の要否	○(不要)	←	○(不要)	○* (ケーブル 送り機構)	←	○(不要)	×** (ケーブル 送り機構)
	検出器ユニット/ 単体検出器の取扱い	○(可)	←	×(不可)	○(可)	○(可)	○(可)	←
	操作の難易度	マニピュレータ に依存	←	←	←	←	△(移動 制限あり)	←
	位置決め精度(cm)	マニピュレータ に依存	←	←	←	←	△ (揺れが影響)	←
ケーブル 移動方法	操作の難易度	△ (ガイド配線)	←	○ (内部配線)	△ (引摺り)	←	○	△(引摺り)
	ケーブルへの ダメージの有無	○(接触なし)	←	×(屈曲多)	△(引摺り)	←	○	△(引摺り)

\* 燃料デブリ取り出しシステムに設置

\*\* 新規ペネ位置へ設置

# 2.1 未臨界度測定・臨界近接監視のための技術開発

## 1) 取り出し装置への中性子検出器適用性の検討

### 【実施内容】

・内部調査で観測された堆積物の外観情報に基づき、2号ペDESTAL内にて想定される中性子束(1/cm<sup>2</sup>/sec)を解析評価した

### ＜評価条件＞

評価目的は、ペDESTAL底部の中性子計測の可否を確認するためであり、ペDESTAL底部の燃料デブリ量が少なくなるような条件を設定する。

- ペDESTAL底部に堆積した燃料デブリの体積を推定
- 空隙率を考慮した燃料デブリの密度として小さ目の値を仮定(1.3g/cm<sup>3</sup>)
- 上記密度と体積によりペDESTAL底部の燃料デブリ量を算出、残りをRPV底部と仮定(現状の燃料デブリ分布の推定と直接リンクするものではない)

➢ 2号機はペDESTAL底部の他にRPV底部に多量の燃料デブリがあると推定されるため、ペDESTAL内部では上方からの中性子の寄与が予想される。(燃料デブリ組成と水の条件によって大きな不確かさあり)

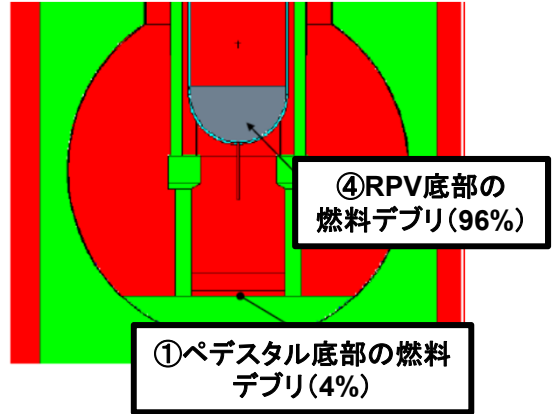


図1 中性子束解析モデル

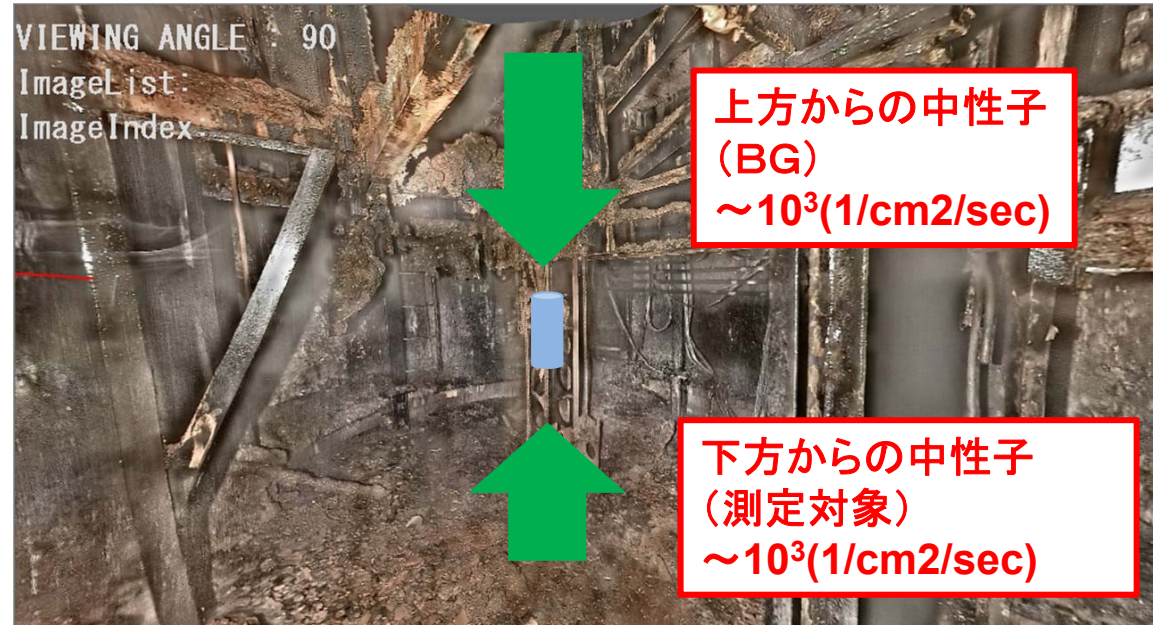


図2 中性子束解析結果イメージ

# 2.1 未臨界度測定・臨界近接監視のための技術開発

## 1) 取り出し装置への中性子検出器適用性の検討

### 【成果】

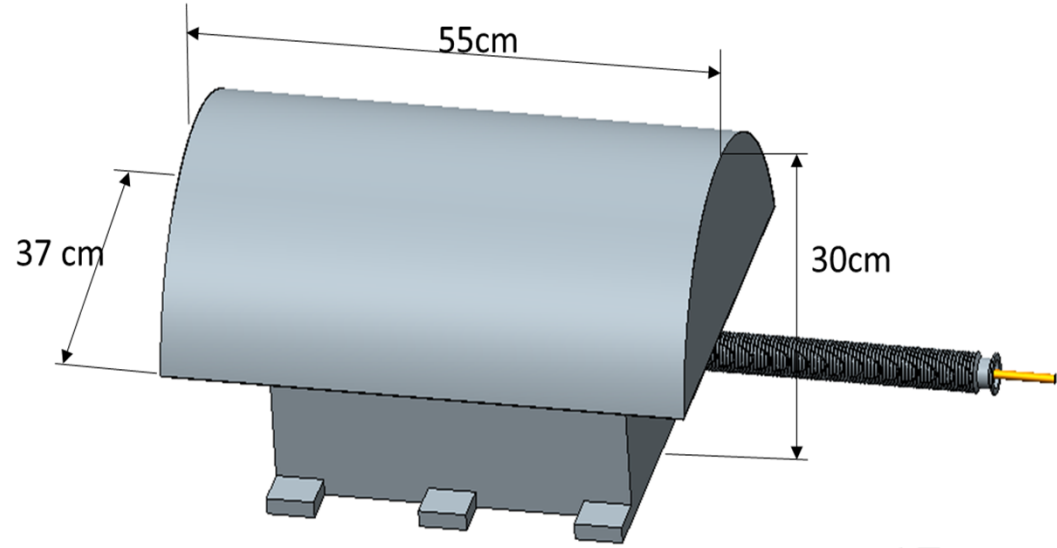
- ・ 2号ペDESTAL内にて想定される中性子束に基づき、中性子検出器を現場に適用するための遮蔽体・減速材を含む構造案を策定し、現場適用可能なサイズ・重量となる見通しを得た。

### 【実機適用までの課題】

- ・ 中性子検出器ユニットの設計、試作、要素試験

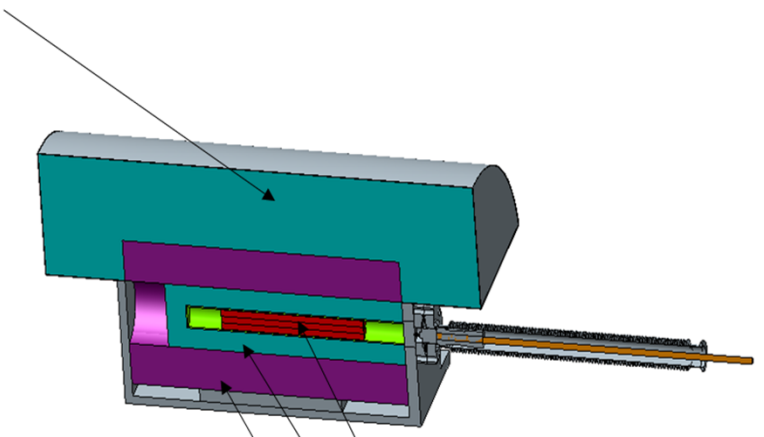
### ソフトケーブル、コネクタ直結型He3検出器タイプ

- 耐放射線性/耐水性を考慮
- 上方からのB.G中性子をカットするための構造を採用



重量  
120kg

ポリエチレン (厚さ100mm)



He3検出器

ポリエチレン (厚さ25mm)

Pb遮蔽体 (厚さ50mm)

- 図はHe-3検出器のケース  
この他、B10検出器のケースも策定

## 2.1 未臨界度測定・臨界近接監視のための技術開発

### 1) 取り出し装置への中性子検出器適用性の検討

#### 【実施内容】

- ・小型B-10比例計数管を対象として、隣接して敷設されるケーブル等から受ける誘導ノイズの影響を評価

#### 【成果】

- ・周波数300 kHz～400 kHzのノイズの影響が最も大きいと判明

#### 【実機適用までの課題】

- ・工法と連携して、ノイズ影響を緩和するケーブル、計測装置の対策、敷設等運用方法の策定

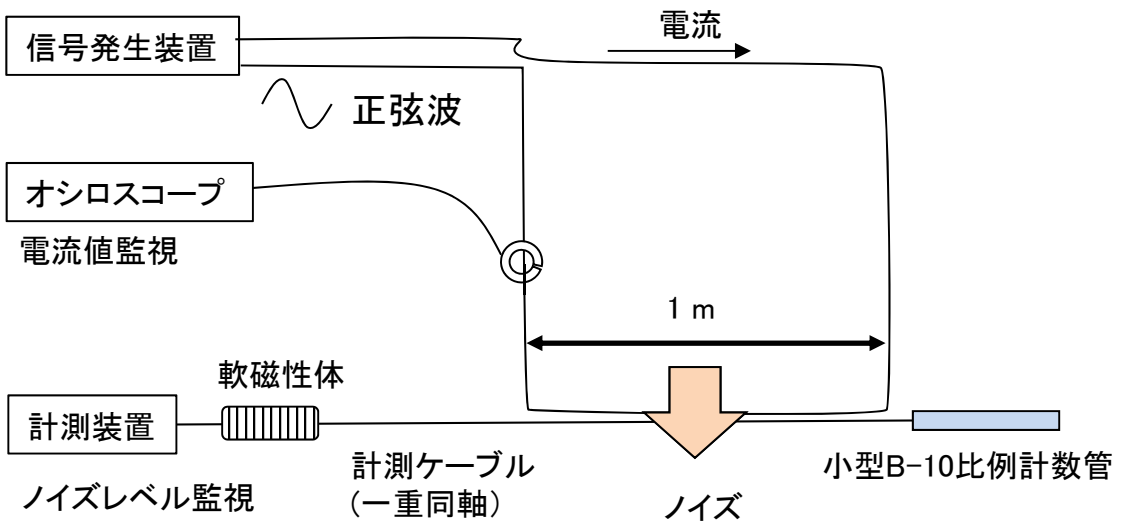


図1. 誘導ノイズ影響評価体系

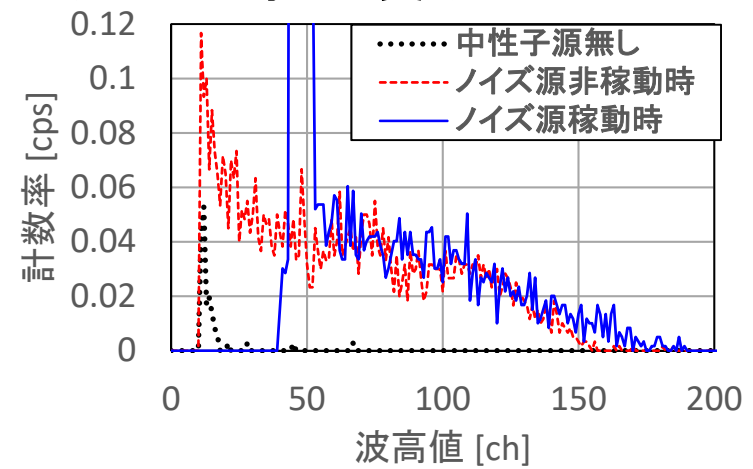


図2. 誘導ノイズによるノイズレベル上昇

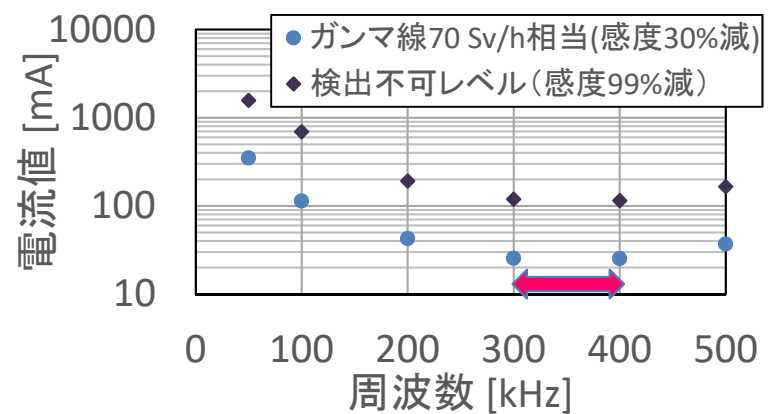


図3. 誘導ノイズの中性子計測への影響

## 2.1 未臨界度測定・臨界近接監視のための技術開発

### 1) 取り出し装置への中性子検出器適用性の検討

#### 【実施内容】

- ・電磁ノイズ対策案を整理した

#### 【実機適用までの課題】

- ・燃料デブリ取り出し機器と組み合わせてノイズ影響を評価し、ケーブル等のノイズ対策による効果を確認する

表1 電磁ノイズ対策案

対策案		内容
システム	配置	極力全体を金属で覆い電磁ノイズを抑制
検出器	シールド	検出器全体を金属で覆う検出器ユニットにより電磁ノイズを抑制
ケーブル	フェライトコアの設置	ケーブルにフェライトコアを取り付け、その磁化に応じてケーブルインピーダンスを増加させノイズを抑える。ノイズ帯域に合わせて最適なコアへ簡易交換できる試作改良を進めていく。
	新規ケーブル採用	マテハン系に適した可撓性の高い新規ケーブルとした場合、機器マッチング/耐ノイズ性を中性子測定試験等で評価が必要。
信号処理装置	基板部品	耐ノイズ性の高い部品の採用、ノイズフィルタの追加により耐ノイズ性を向上させることを検討する。EMC試験等で評価。
電源	耐ノイズ電源ユニットの採用	内蔵電源部の全体を専用筐体に収納する電源ユニットを製作し、耐ノイズ性を向上させる。

## 2.1 未臨界度測定・臨界近接監視のための技術開発

### 1) 取り出し装置への中性子検出器適用性の検討

**【成果】**

・ロボットアームで移送するための中性子検出器ユニットの仕様項目を整理

**【実機適用までの課題】**

・中性子検出器ユニットの設計、試作、要素試験

表1 ロボットアームで移送するための中性子検出器ユニットの仕様項目

要求事項		内容
測定時の要求	検出器タイプ／本数	ファインマンα法による測定に必要な検出効率を得られる検出器タイプ／本数か
	燃料デブリ-検出器間距離	ファインマンα法による測定に必要な検出効率を得られる距離に近づけられるか
環境条件への対応	耐放射線性	交換頻度を1回／1年程度に抑えられるか (1MGy以上(= 100 Gy/h × 365 d/y × 24 h))
	耐水・圧性	耐水・圧性を備えているか(3号現状水位6.5mを仮定)
	耐湿性	耐湿性を備えているか(湿度100%を仮定)
遠隔操作での取り扱い	アームとの接続	ロボットアーム等と接続が可能か
	可搬重量	ロボットアーム等での持ち運びが可能か (現在検討中のロボットアーム; 200kg未満)
	可搬サイズ	ロボットアーム等での持ち運びが可能か (現在検討中のロボットアーム; 径70cm, 長さ100cm未満)
	ユニットの除染	除染してアウトターに持ち出せるか
	検出器の校正	検出器の校正が可能か (強度既知の中性子源の測定必要)
	修理・部品交換	部品の修理や交換が可能か (人による作業が必要)

# 2.1未臨界面測定・臨界面近接監視のための技術開発

## 2)1F実機の複雑体系を模擬した未臨界面測定方法成立性確認

### 【実施内容】

- ・2号ペDESTAL燃料デブリを想定して大型で不均一な燃料デブリ状態を模擬した臨界面実験を実施した
- ・昨年度までに試作した中性子検出器と測定回路を用いて未臨界面測定性能を確認した

### 【成果】

- ・大型の燃料デブリに対しては、体系全体の監視は困難であるものの、検出器近傍の局所的な未臨界面度を監視できることを確認した

### 【実機適用までの課題】

- ・燃料デブリの不均一が大きい場合/中性子吸収材使用した場合における未臨界面測定への影響確認

京都大学原子炉実験所臨界面試験装置 (KUCA)

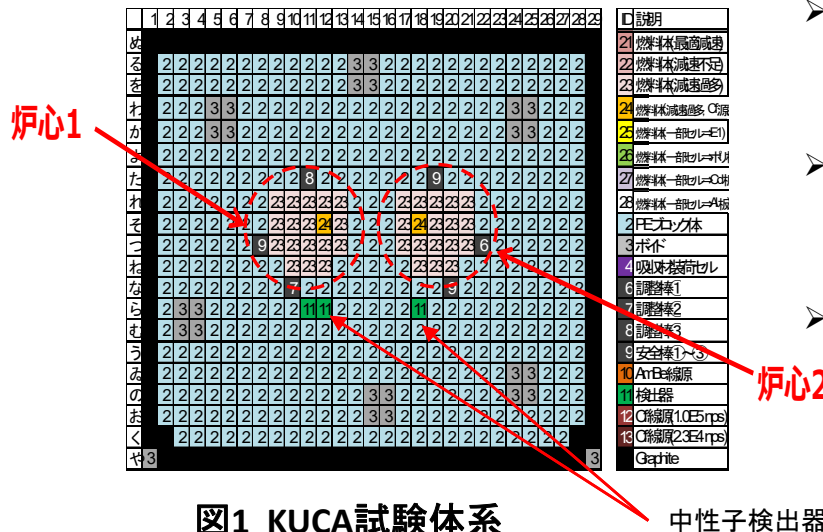
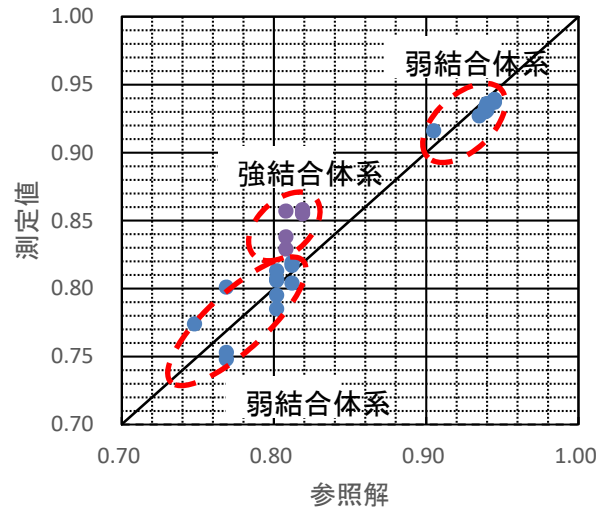


図1 KUCA試験体系

- 大型体系を模擬する指標として、核的結合の度合いをあらわす固有値間隔に着目
- 2号ペDESTALの燃料デブリを想定して解析評価した固有値間隔  $1 \times 10^{-1} \sim -3$
- KUCAの2分割炉心で模擬した固有値間隔  $1 \times 10^{-1} \sim -2$



測定値と参照解の比較(k-local)

図2 KUCA試験結果

## 2.1 未臨界度測定・臨界近接監視のための技術開発

### 2) 1F実機の複雑体系を模擬した未臨界度測定方法成立性確認

#### 【実施内容】

##### 中性子源増倍法の成立性確認試験

- ・KUCAにおいて燃料デブリ模擬性を高めるため、中性子源内包燃料を用いて未臨界体系を構築
- ・検出器位置依存性評価のため、2つの検出器を設置
- ・試験体系の燃料組み換え中も監視を継続し試験実施

#### 【成果】

- ・中性子源増倍法の評価誤差5%  $\Delta k$ を見込めば、検出器位置によらず臨界近接監視できることを確認した

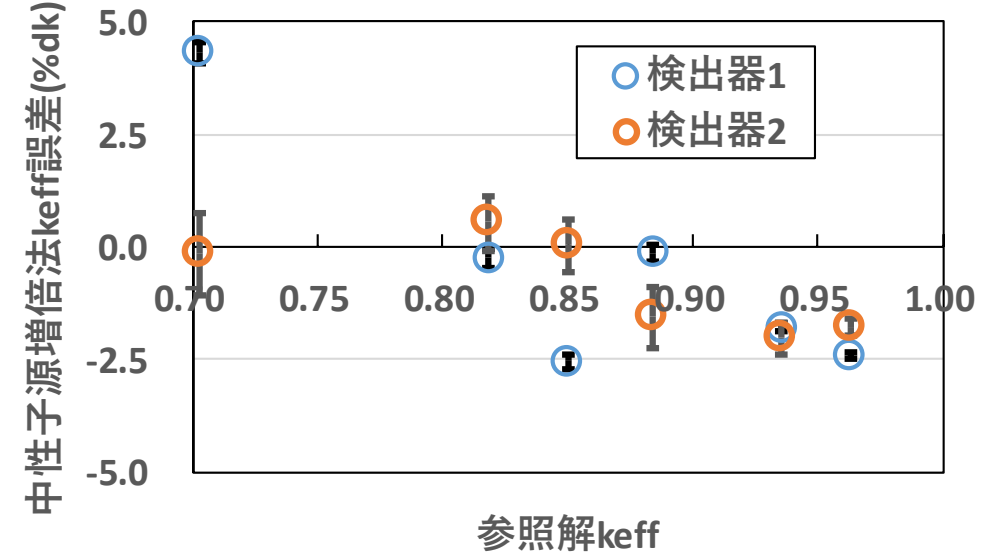


図1 中性子源増倍法による評価誤差

①  $k=0.7$

	11	12	13	14	15	16	17	18	19
た	2	2	2	2	2	2	2	2	2
れ	2	8	2	2	2	2	2	9	2
そ	2	2	2	2	2	2	2	2	2
つ	2	9	2	2	2	2	2	6	2
ね	2	2	23	29	23	23	29	15	2
な	2	2	7	23	23	23	9	2	2
ら	2	2	2	2	14	2	2	2	2
む	2	2	2	2	2	2	2	2	2
う	2	2	2	2	2	2	2	2	2



②  $k=0.95$

	11	12	13	14	15	16	17	18	19
た	2	2	2	2	2	2	2	2	2
れ	2	8	2	2	23	2	2	9	2
そ	2	2	23	23	23	23	23	2	2
つ	2	9	23	23	23	23	23	6	2
ね	2	2	23	29	23	23	29	15	2
な	2	2	7	23	23	23	9	2	2
ら	2	2	2	2	14	2	2	2	2
む	2	2	2	2	2	2	2	2	2
う	2	2	2	2	2	2	2	2	2

- 23 燃料
- 29 中性子源内包燃料
- 2 減速材
- 14 検出器1
- 15 検出器2

図2 試験体系



# 2.1 未臨界度測定・臨界近接監視のための技術開発 (参考)未臨界度測定のための中性子検出器の性能比較

**【目的】**

未臨界度測定の利用に適用可能な中性子検出器候補のリストアップ

**【成果】**

コロナカウンターを含む代替検出器の適用性を評価した

**【実機適用までの課題】**

- ・現場環境のガンマ線量率に応じて適切な検出器を選定
- ・コロナ/PCV詳細調査向けSiC型半導体検出器は要求仕様に対して未検証の項目があるため、KUCA試験で未臨界度測定性能の評価が必要
- ・PCV詳細調査向けSiC型半導体検出器の応用も検討する。

評価項目		検出器(型式)	B-10比例計数管 [高感度タイプ] (E6863-150)	B-10コロナカウ ンター	U-235核分裂 検出器 (CFUL01)	He-3比例計数 管 (E6862)
システム への 適合 性	中性子束測定範囲[1/cm <sup>2</sup> /sec]		0.1~10 <sup>4</sup>	~10 <sup>3</sup>	10 <sup>2</sup> ~10 <sup>8</sup>	0.1~10 <sup>3</sup>
	中性子検出感度 <sup>(*)</sup> [(c/s)/(1/cm <sup>2</sup> /sec)]		1.67 [γ未照射時]	(*)	1	23 [γ未照射時]
	センサ大きさあたりの中性子感度 [(c/s)/(1/s/cm <sup>2</sup> )/cm <sup>3</sup> ]		0.013	(*)	0.002	0.189
	識別可能な隣接パルス間隔[ns]		○ 100ns以下	(*)	○ 100ns以下	(*)
	パルス到達時間検出精度／パルス出 力遅延時間ばらつき[ns]		○ 10ns以下	(*)	○ 10ns以下	(*)
	センサ部形状[Φ(mm)×L(mm)]		25.4×245	(*)	48×337	25.4×245
環境 条件 への 対応	許容ガンマ線線量率[Gy/h]		△(遮へい要) 1.67cps/nv (<2.2Gy/h) 0.5cps/nv (<100Gy/h)	(*)	○ (1×10 <sup>4</sup> Gy/h)	(*)
	耐積算線量[Gy]／耐用年数		○ (3×10 <sup>10</sup> Gy)	○ (5×10 <sup>4</sup> Gy以上)	○ (1×10 <sup>9</sup> Gy)	(*)

(\*)ベンダーの商業機密につき公開不可。



## 2.1 未臨界度測定・臨界近接監視のための技術開発

### 3) 実機体系での計装システム成立性確認方法検討

**【実施内容】**

- ・本年度までに実施した試験成果を整理して、実機適用までに実施すべき試験課題を整理した
- ・模擬実証段階として想定されるSFP試験の成立性を評価した

試験	TRL*	目的	実施状況
NFD試験	3	使用済燃料による、高ガンマ線環境で中性子検出器が受ける影響を確認する	環境のガンマ線の線量率2.2Gy/hで、検出感度の低下が10%程度であることを確認
中性子源試験	3	中性子源の相関を測れることを確認する	初期相関のある中性子源(Cf)のY値を適切に測れることを確認
KUCA試験 (1回目, 2回目)	3	ウラン燃料による、小型の体系で未臨界度を測れることを確認する	$k_{eff}=0.7 - 0.95$ , $H/U=50 - 300$ の小型炉心の未臨界度が適切に測れることを確認
KUCA試験 (3回目)	4	ウラン燃料による、大型(均一)の体系で未臨界度を測れることを確認する	大型(均一)の体系でも、検出器近傍であれば局所的な未臨界度が測れることを確認
KUCA試験 (4回目)	4	ウラン燃料による、大型(不均一)の体系で未臨界度を測れることを確認する	未実施(実用化までに確認が必要)
アクセス性 確認試験	5	実機と類似した環境で、遠隔操作でシステムを設置できることを確認する	未実施(実用化までに確認が必要)
模擬実証 (SFP試験)	5	実機と類似した体系(高ガンマ+大型(不均一)の体系)で未臨界度を測れることを確認する	未実施(実用化までに確認が必要)
フィールド実証 (内部調査, サンプルング)	6	現場における課題把握	未実施(実用化までに確認が必要)

\* 技術成熟度。TRL-3は応用研究、TRL-4は実用化研究、TRL-5は模擬実証のフェーズを示す。

## 2.1 未臨界度測定・臨界近接監視のための技術開発

### 3) 実機体系での計装システム成立性確認方法検討

#### 【成果】

- ・福島第二原子力発電所4号機の使用済燃料プール(SFP)において実施可能な試験条件を解析により評価し、想定される現場環境と比べて中性子束・ガンマ線量率は小さいことがわかった。

#### 【実機適用までの課題】

- ・試験条件が限定されるため、試験実施の可否を判断

- 検出器を配置可能なスペースは限られる
- 燃焼の進んだ燃料を進んでいない燃料に8体配置変更した場合でも、未臨界度が深く、中性子束・ガンマ線量率は小さい

中性子増倍率 $k_{eff}$   $\sim 0.77$   
中性子束  $\sim 10^2(1/cm^2/sec)$   
ガンマ線量率  $\sim 10(Gy/h)$

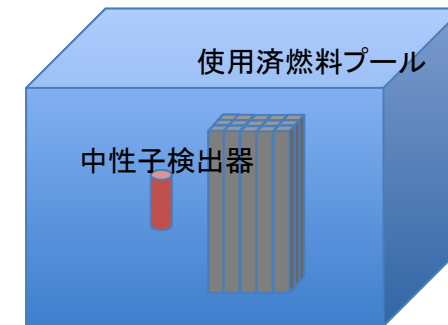


図1 SFPを利用した未臨界度測定  
実証試験のイメージ

## 2.2 再臨界を検知する技術開発

### 【目的】

- ・万一臨界や臨界に近接する事象が生じた場合、速やかに検知し、影響緩和策による終息を促す、再臨界検知システムの開発

### 【システム概要】

- ・現行監視対象のXeよりも未臨界度の変化に対する追随性の良いKrを測定することで早期の検知を可能とする、高度化システム(図1)を提案

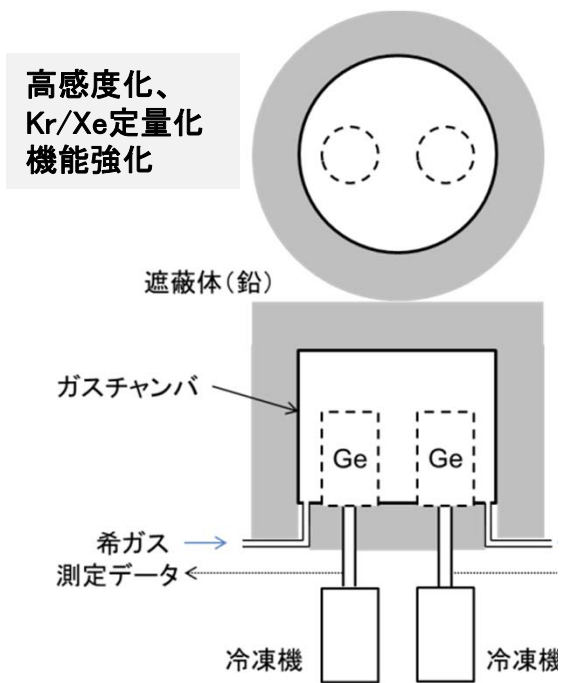


図1 高度化システムの構成案

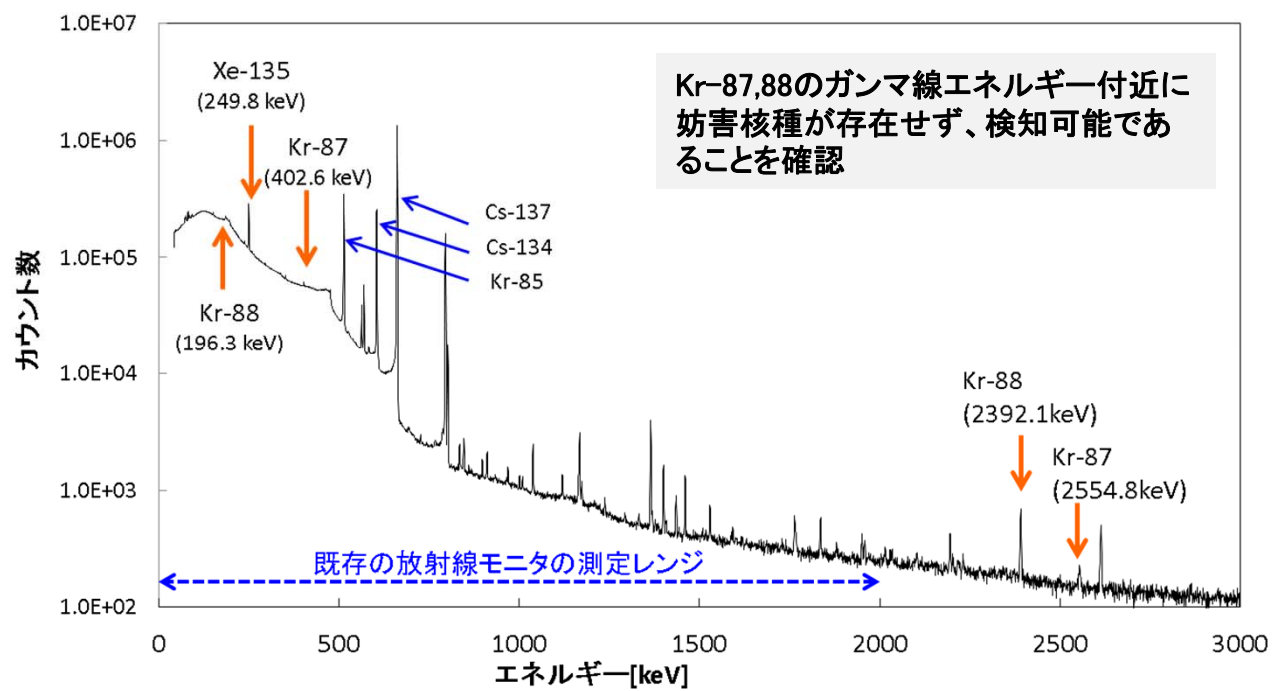


図2 1号機のガンマ線スペクトル測定結果(積算)

## 2.2 再臨界を検知する技術開発

実施済の内容(黒), 本年度の内容(青)

表1 開発成果と実機適用までの課題

最終目標	実機適用までの達成目標	達成状況(本年度成果)	実機適用までの課題
技術の成立性確認 (臨界検知性の確認、未臨界度推定)	① 臨界検知性の確認	・細粉蓄積時のKrによる検知の優位性確認	—
	② 臨界収束判定への適用性判断	・臨界終息検知性への適用性検討と課題抽出	・臨界終息判定への適用方法検討
	③ 未臨界度推定	・未臨界度推定手法の提案 ・1号機実測値より現状を推定:0.5~0.7 ・本格取り出し時流量でも高感度化により推定可能	—
技術の適用性 (気体系システムへの組み込み)	① 現状流量での検知性確認	・現状流量でのKr優位性を確認	—
	② 取り出し時想定流量での検知性確認	・遅れ時間が短縮されること確認 ・気中取り出し時未臨界度推定可能範囲を評価	気体系システム設計進捗との整合性確認(ローリング)
	③ 検出器校正技術の確立	・Kr-88高エネルギーピークまでの校正手法実験的確認と校正精度定量化	—

## 2.2 再臨界を検知する技術開発

### 1)負圧管理システムの一環としての運用方法の検討

#### 【実施内容】

現状～本格取り出し時希ガス濃度を評価し、未臨界度推定、臨界検知性を検討(図1, 2)

#### 【成果】

- (1) 現1号機相当Ge検出器の場合、本格取り出し時流量ではXe濃度定量困難
- (2) 高感度化した場合、Xe-135、Kr-88共に1時間で検出限界以上となる見通し
- (3) 2号機に設置した場合も同様。本格取り出し時の濃度モニタリングには高感度化が必要。

前提:D/W体積3600m<sup>3</sup>,排気流量21m<sup>3</sup>/h(現状)、2100m<sup>3</sup>/h(本格)

現1号機相当Ge検出器10%効率、高感度化120%効率×2,中性子源増倍係数1号機並み

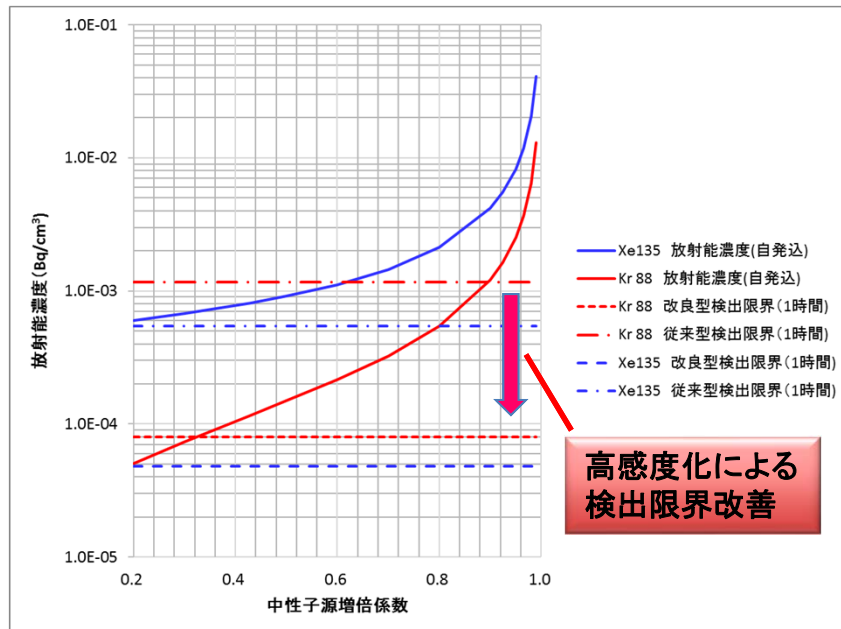


図1 1号機の中性子源増倍率とXe-135, Kr-88濃度の推定値(現状流量, 気相体積3600m<sup>3</sup>)

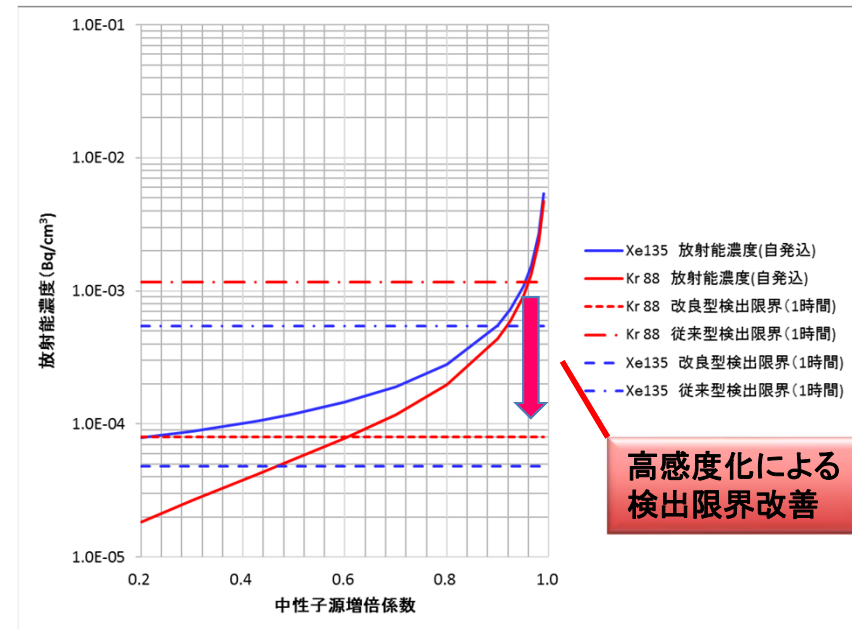


図2 1号機の中性子源増倍率とXe-135, Kr-88濃度の推定値(流量2100m<sup>3</sup>/h、気相体積3600m<sup>3</sup>)

## 2.2 再臨界を検知する技術開発

### 1)負圧管理システムの一環として運用方法検討

#### PCVガス放射線モニタの検出器校正技術開発

##### 【実施内容】

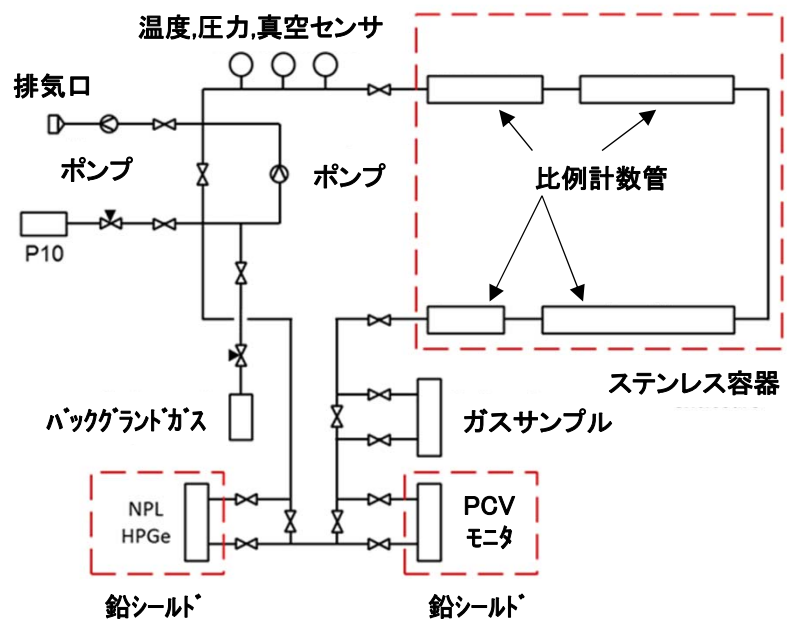
・現1号機相当の放射線モニタを対象に英国物理学研究所(NPL)にて放射能濃度の校正を実施

##### 【成果】

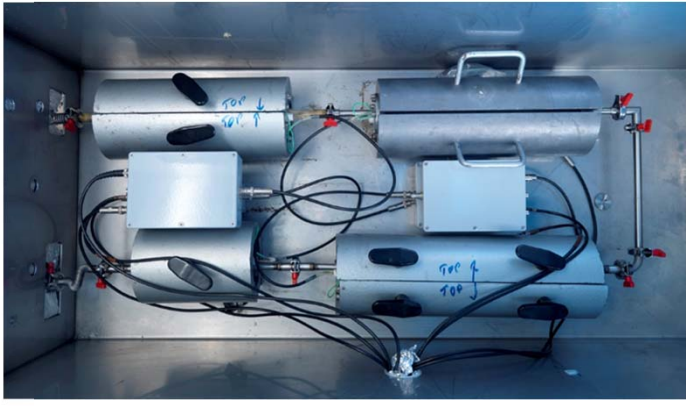
・2.5MeVまでのガンマ線に対する校正手順を実験的に確認し、不確かさは7~8%程度と定量した

##### 【今後の予定】

・福島適用時に本成果を活用する



(a) 全体構成



(b) 長さ保障型ガス比例計数管



(c) 1号機相当ガスモニタ (NPL試験時)

図1 ガス放射能濃度校正用回路

## 2.2 再臨界を検知する技術開発 PCVガス放射線モニタの検出器校正技術開発(続き)

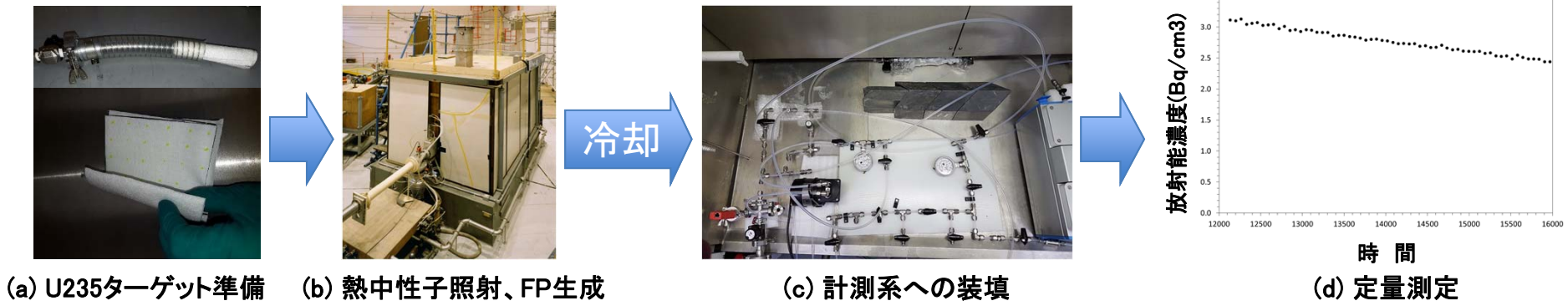


図1 校正手順の概要

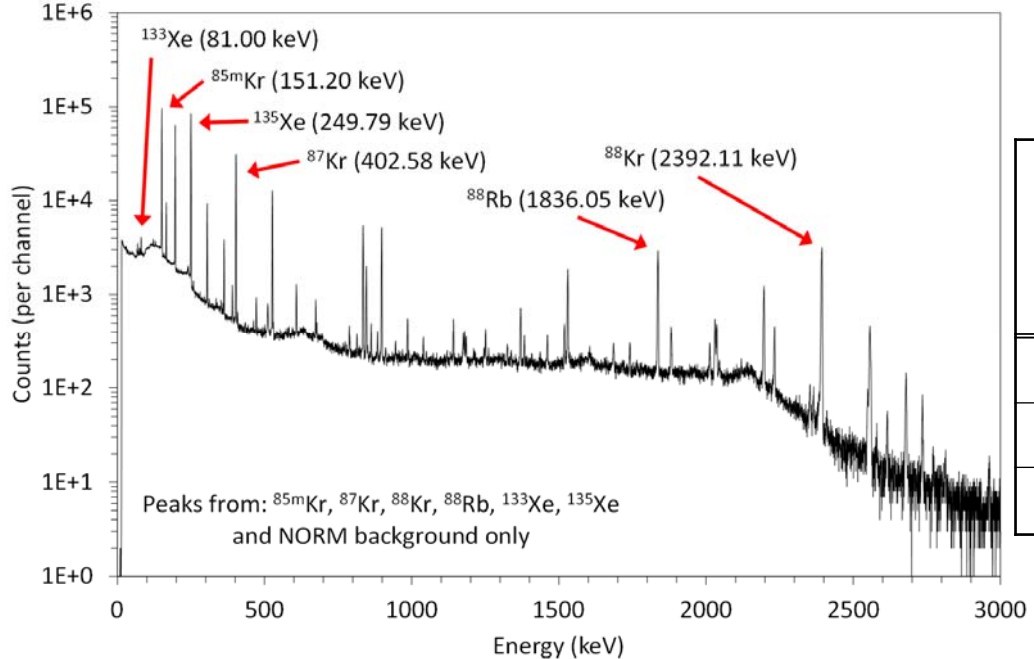


図2 校正対象ガス(Kr/Xe混合)のガンマ線スペクトル

表1 対象核種の放射能濃度と不確かさ

核種	NPL校正値		校正対象 計数 不確かさ (%)	全不確かさ (%)
	放射能濃度 (Bq/cm3)	不確かさ (%)		
Kr-87	0.440 ± 0.034	7.7	0.6	8.3
Kr-88	1.001 ± 0.070	7.0	0.9	7.9
Xe-135	0.405 ± 0.025	6.2	0.3	6.5



# 2.2 再臨界を検知する技術開発

## 2)局所的な臨界近接事象の検知への適用性を判断するための技術検討

### 【実施内容】

(1) 細粉蓄積(微小臨界)に対する検知性を検討(図1)

前提: 添加反応度:  $5.0E-03$  \$/h(加工量: 30 kg/day, 加工時間: 20 h/day, 移行率: 1.5%)

燃焼度および組成は1号機最小燃焼度燃料集合体平均相当

(2) 臨界終息後のKr-88減衰特性を評価し、臨界終息判定への適用を検討(図2)。

### 【成果】

(1) Kr-88により早期に臨界兆候検知可能であることを確認

(2) 適用性あり。但し、ダイナミックレンジ広く、臨界規模に応じて適用可能な範囲を明確化要

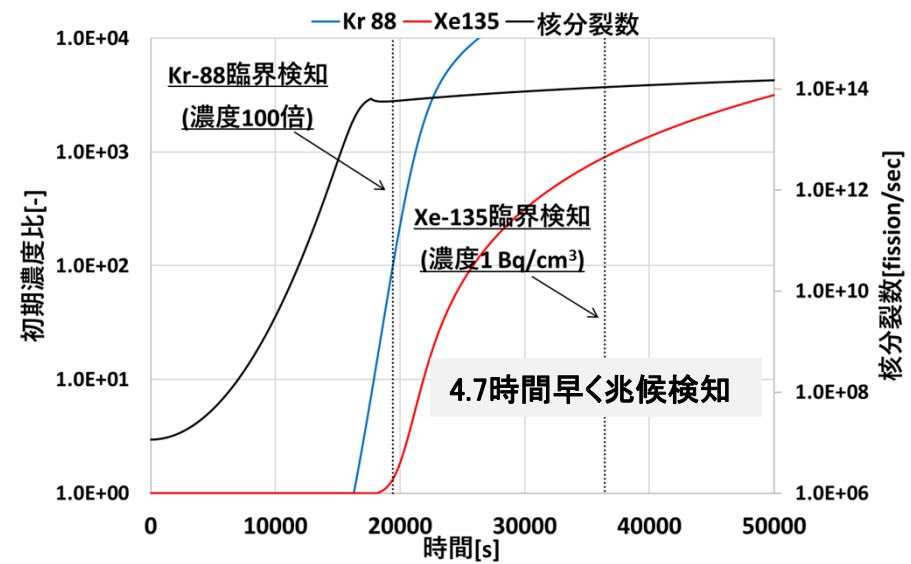


図1 細粉蓄積時の検知性の確認結果 (現状流量)

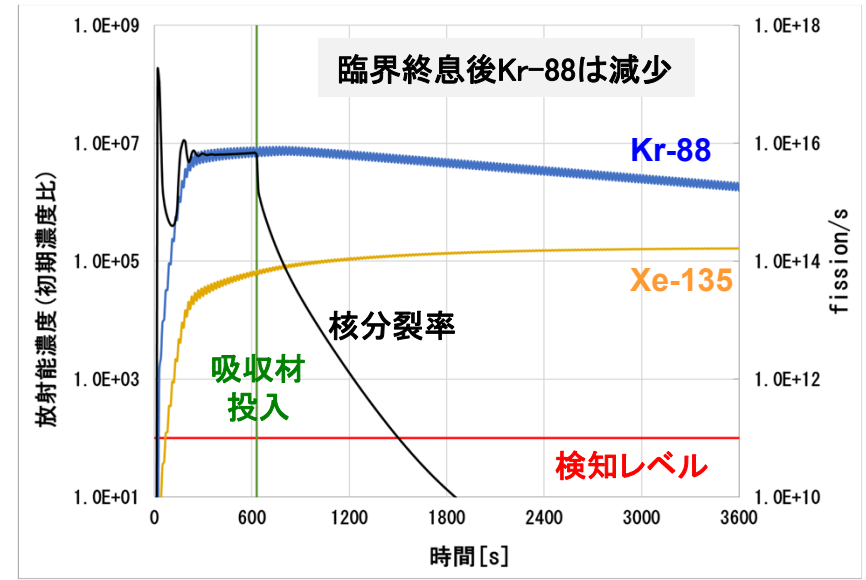


図2 臨界終息時のKr-88放射能濃度変化 (燃料デブリ落下想定、部分気中取り出し)

## 2.2 再臨界を検知する技術開発

表1 PCVガス放射線モニタ方式による機能の違い

項目	シンチレーション検出器 (現2,3号機)	半導体検出器	
		現1号機相当+Kr検知機能	高感度半導体
Xe135検出限界 (Bq/cm <sup>3</sup> ,1時間測定)	1.5~2.5×10 <sup>-1</sup> (2018年1月実績)	4.0~4.7×10 <sup>-4</sup> (2018年1月実績)	~5×10 <sup>-5</sup> (設計案)
Xe135濃度 (Bq/cm <sup>3</sup> )	2,3号機ともN.D.	1.1~1.2×10 <sup>-3</sup> (2018年1月実績)	(取り出し時濃度)
Kr88検出所要時間	検出不可	約30~70時間 (濃度、エネルギー依存)	約1時間 (取り出し時濃度依存)
Kr88濃度 (Bq/cm <sup>3</sup> )	2, 3号機ともN.D.	約2.0×10 <sup>-4</sup> (2016~2017年国の補助事業*)	(取り出し時濃度)
未臨界度の継時的評価	不可	(1号機現状0.4~0.7)	○
未臨界度評価所要時間 (体系の変化把握)	-	約30~70時間以上 (Kr88定量時間)	約1時間 (Kr88定量時間)
データ間隔	1時間毎	1分毎 (移動平均)	同左 (予定)
Kr88による臨界近接検知 (警報設定、吸収材投入)	不可	(Kr定量性に劣る)	○
課題	低感度、 未臨界度評価不可	低感度 校正精度向上要	校正精度向上要
取り出し時の機能	<b>臨界(異常)検知のみ</b>	<b>1. 系全体の未臨界度評価</b> <b>2. 臨界検知</b> <b>3. 万一の吸収材投入後の モニタリング (含む臨界終息)</b>	<b>1. 系全体の未臨界度評価</b> <b>2. 臨界兆候の継時的変化の把握</b> <b>3. 万一の吸収材投入後の モニタリング (含む臨界終息)</b>

## 2.2 再臨界を検知する技術開発

### 3) 気中工法での取り出し装置以外への中性子検出器の設置可能性検討

#### 【目的】

・PCV下部に存在する燃料デブリについて、気中で中性子検出器による臨界検知が可能であることを確認する

#### 【成果】

・シミュレーション解析によって、2号ペDESTAL空間内の中性子束は $10^3$  ( $1/cm^2/sec$ )程度と評価された。  
・再臨界を検知する観点からは検出感度 $10^{-3} ((cps)/(1/cm^2/sec))$ 以上の中性子検出器が適用可能であることがわかった。

#### 【実機適用までの課題】

・内部調査による中性子束の実測

#### <評価条件>

評価目的は、ペDESTAL底部の中性子計測の可否を確認するためであり、ペDESTAL底部の燃料デブリ量が少なくなるような条件を設定する。

- ペDESTAL底部に堆積した燃料デブリの体積を推定
- 空隙率を考慮した燃料デブリの密度として小さ目の値を仮定 ( $1.3g/cm^3$ )
- 上記密度と体積によりペDESTAL底部の燃料デブリ量を算出、残りをRPV底部と仮定 (現状の燃料デブリ分布の推定と直接リンクするものではない)

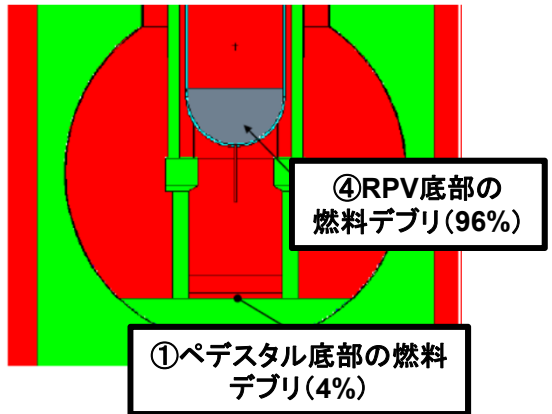


図1 中性子束解析モデル

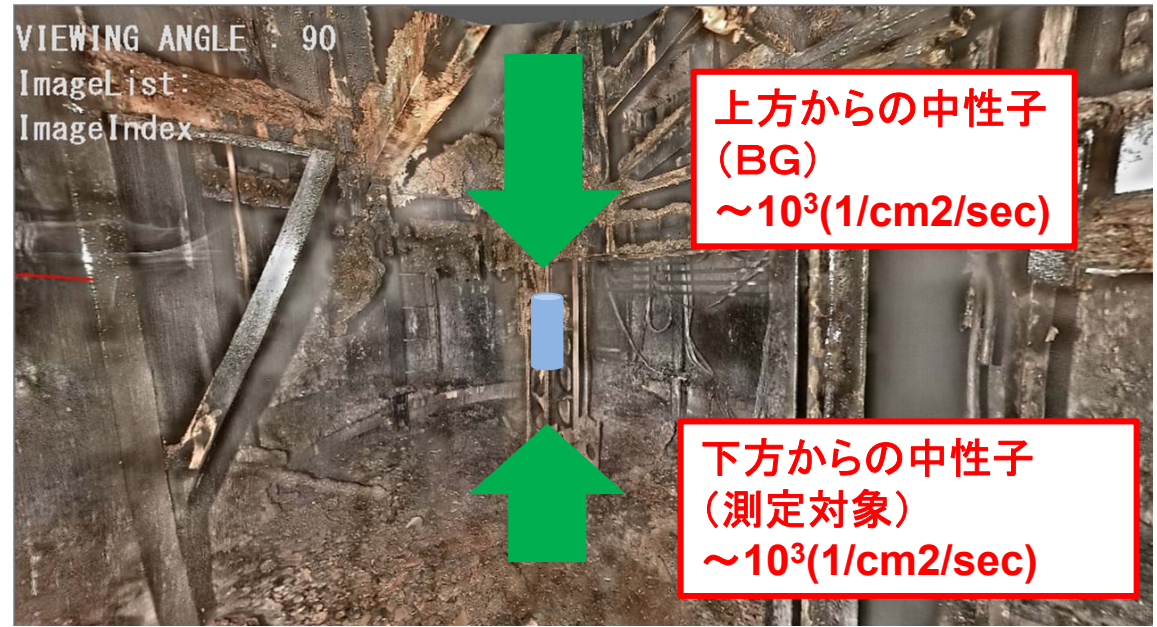


図2 中性子束解析結果イメージ

出典:東京電力ホールディングス HP

# 2.3 臨界防止技術の開発 概要(非溶解性中性子吸収材)

## 【目的】

- ・事前投入により臨界を防止するための中性子吸収材の開発。  
ホウ酸水などの溶解性中性子吸収材に代えて、局所的に負の投入反応度を添加可能な非溶解性中性子吸収材の適用方法の具体化

## 【これまでの成果・課題】 (実機適用に向けた課題を赤字で記す)

- ・基礎特性、照射特性、核的特性確認による非溶解性中性子吸収材候補材の選定 (表1、図1)  
[適用方法の具体化、燃料デブリ加工に対する施工性確認]
- ・収納缶健全性など適用時影響の評価(図2)  
[長期照射影響の確認、廃棄物量等の評価]



水ガラス/Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>造粒粉材(硬化後)

図1 候補材の外観

表1 候補材の選定結果

分類	候補材	評価			選定結果
		核的特性	施工性	長期照射	
固体	B <sub>4</sub> C金属焼結材	○	○	○	候補材
	B・Gd入ガラス材	○	○	○	候補材
	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 粒子	○	○	○	候補材
液体 ↓ 固体	水ガラス/Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 造粒粉材	○	○	○	候補材
	水中硬化樹脂/Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 粉末材	○	△*1	△腐食	取下げ

\*1:燃料デブリ模擬体系に投入時に収縮・浮き上がりが確認された

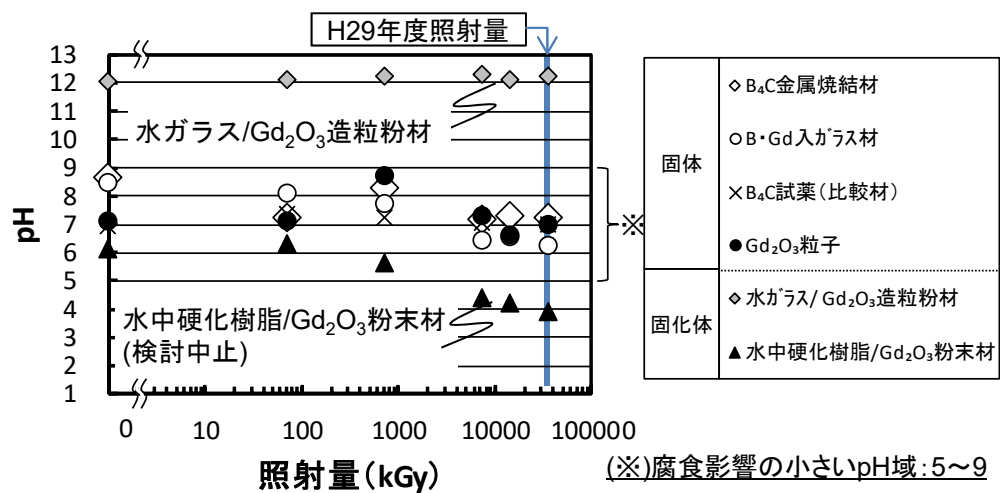


図2 長期照射試験結果(気中、H29年度まで)

## 2.3 臨界防止技術の開発

36

表1 開発成果と実機適用までの課題

実施済の内容(黒), 本年度の成果(青)

最終目標	実機適用までの達成目標	達成状況(本年度成果)	実機適用までの課題
技術の成立性 確認 (臨界防止 技術の確立)	① 候補材の選定	基礎特性、照射特性、核的特性の確認により非溶解性中性子吸収材の候補材を選定(4種類の候補材を選定)	—
	② 施工性の確認と未臨界維持条件の仕様	想定した使用法による投入必要量を試算 チゼルによる破砕燃料デブリでの施工性確認、および吸収材分布確認と未臨界維持評価(固体型吸収材)	チゼルによる破砕燃料デブリでの施工性確認、および吸収材分布確認と未臨界維持評価(固化型吸収材) 対象燃料デブリ毎の未臨界維持条件の仕様を策定
	③ 副次的影響の評価	長期照射試験から、水素発生G値は設計値未満および吸収材成分が溶出した希釈海水はpH6以上 収納缶本数および廃棄量は固体型吸収材で最大約10%、 固化型吸収材で最大約40%増加	照射下での防錆剤効果に及ぼす影響の評価 乾燥工程に及ぼす固化型吸収材の影響評価
技術の適用性 (燃料デブリ取り出しシステムへの組み込み)	① 吸収材投入方法・手順の検証	吸収材の投入方法を策定 チゼルによる燃料デブリ加工に対する吸収材投入手順を策定(ペDESTAL下でのMCCI燃料デブリを想定)	燃料デブリ取り出し工法の進捗を踏まえ他位置に対する手順を策定 必要量投入手法の実験的検討
	② 吸収材投入装置の設計	吸収材投入装置の重量・寸法制約、吸収材搬送経路制約を踏まえて吸収材投入装置概念を策定	設計検討 試作・要素試験
	③ 取り出し装置との組み合わせ検証	燃料デブリ位置毎の燃料デブリ加工方法に対する適用吸収材を整理	燃料デブリ取り出し装置との組み合わせ試験

## 2.3 臨界防止技術の開発

### 1) 燃料デブリへの非溶解性吸収材の散布方法や散布後の効果の確認方法の検討

#### 【目的】

- ・非溶解性吸収材の燃料デブリ破碎加工への影響の有無、破碎後の燃料デブリでの保持性の確認
- ・破碎に伴う水対体積比変化による添加反応度が吸収材の混入により打ち消されることの確認

#### 【実施内容】

- ・小径固体吸収材を散布した状態で、吸収材無の場合と同じ試験条件で模擬燃料デブリ(MCCI模擬)に対し水中チゼル加工する試験を実施。

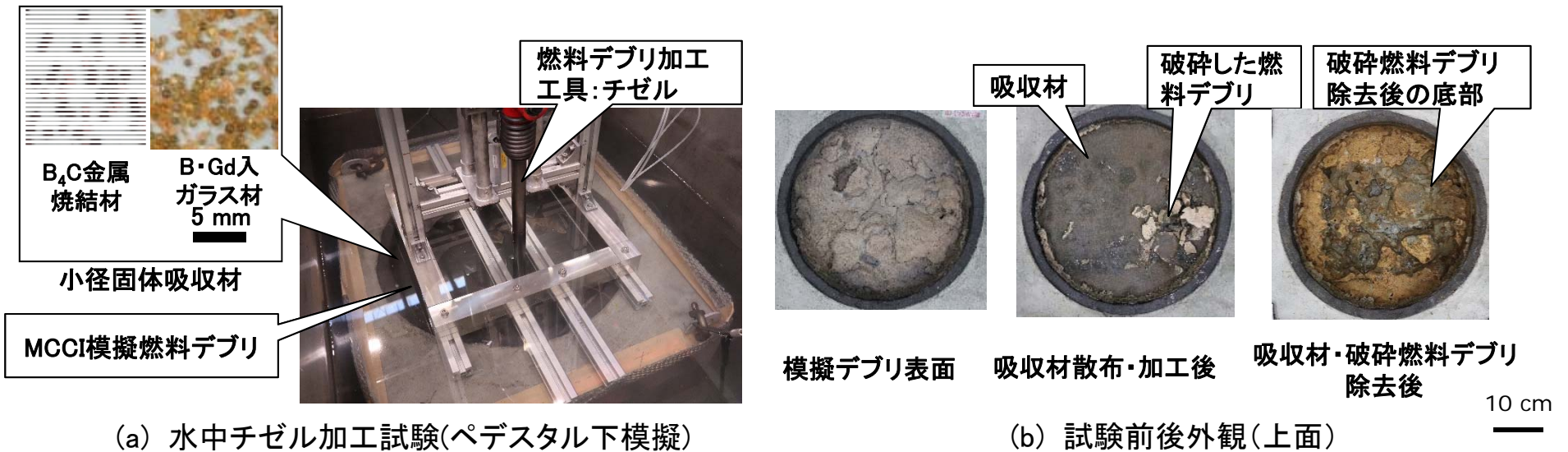


図1 非溶解性中性子吸収材散布燃料デブリ破碎試験

## 2.3 臨界防止技術の開発

### 1) 燃料デブリへの非溶解性吸収材の散布方法や散布後の効果の確認方法の検討

#### 【試験結果1】

・加工効率、加工後燃料デブリ寸法に、吸収材の影響がないことを確認。

表1 チゼル加工時間と模擬燃料デブリの破砕重量

試験	加工時間	破砕量(kg)
吸収材なし	11分5秒	6.8
B4C金属焼結材	11分41秒	6.3
B・Gd入ガラス材	10分9秒	8.8

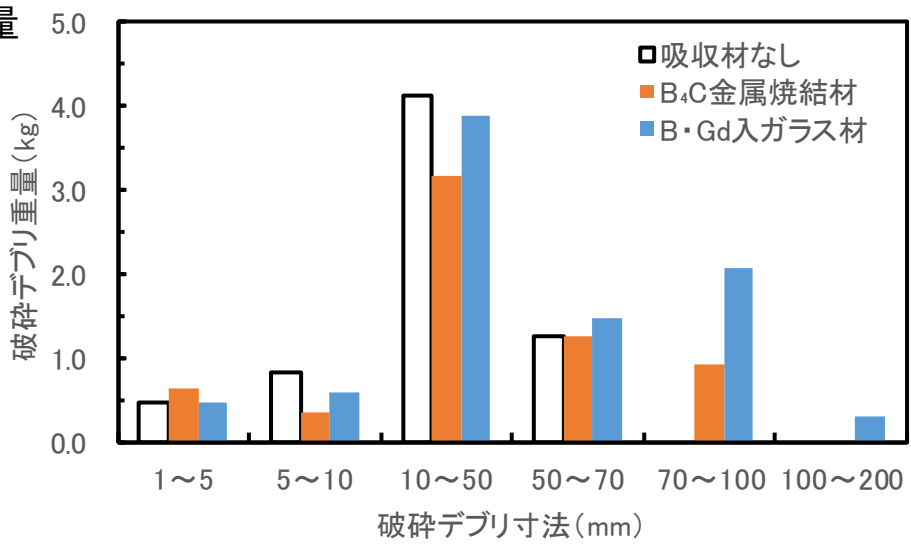


図1 模擬燃料デブリの破砕重量と寸法分布

## 2.3 臨界防止技術の開発

### 1) 燃料デブリへの非溶解性吸収材の散布方法や散布後の効果の確認方法の検討

#### 【試験結果2】

- ・吸収材が加工により生じた空隙部に進入し、添加反応度を打ち消すための必要量が破砕燃料デブリに混在していることを確認。

表1 吸収材の必要量と混在量

非溶解性中性子吸収材	破砕深さ3cmの場合の必要量* ×安全率2倍 (投入量、kg)	平均破砕深さ (cm)	平均破砕深さでの必要量* (kg)	破砕燃料デブリとの混在量 (kg)
B <sub>4</sub> C金属焼結材	9.0	1.1	1.7	2.9
B・Gdガラス材	3.6	1.9	1.1	2.7

\*: 燃料デブリが全て燃料(濃縮度5.0wt%)のみで最大添加反応度(破砕領域が最適減速状態)を仮定した場合の、添加反応度を打ち消すために必要な非溶解性中性子吸収材の量

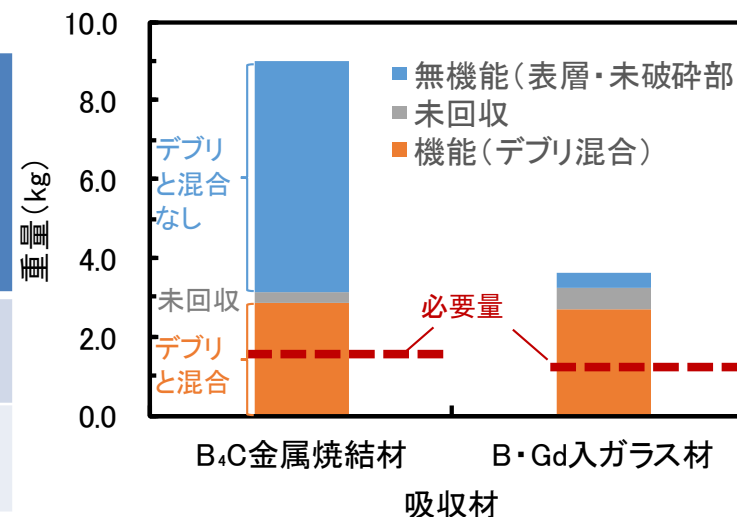


図1 吸収材の混在量と必要量

#### 【成果】

- ・燃料デブリ破砕加工への適用性、破砕後の燃料デブリでの必要量の保持を確認

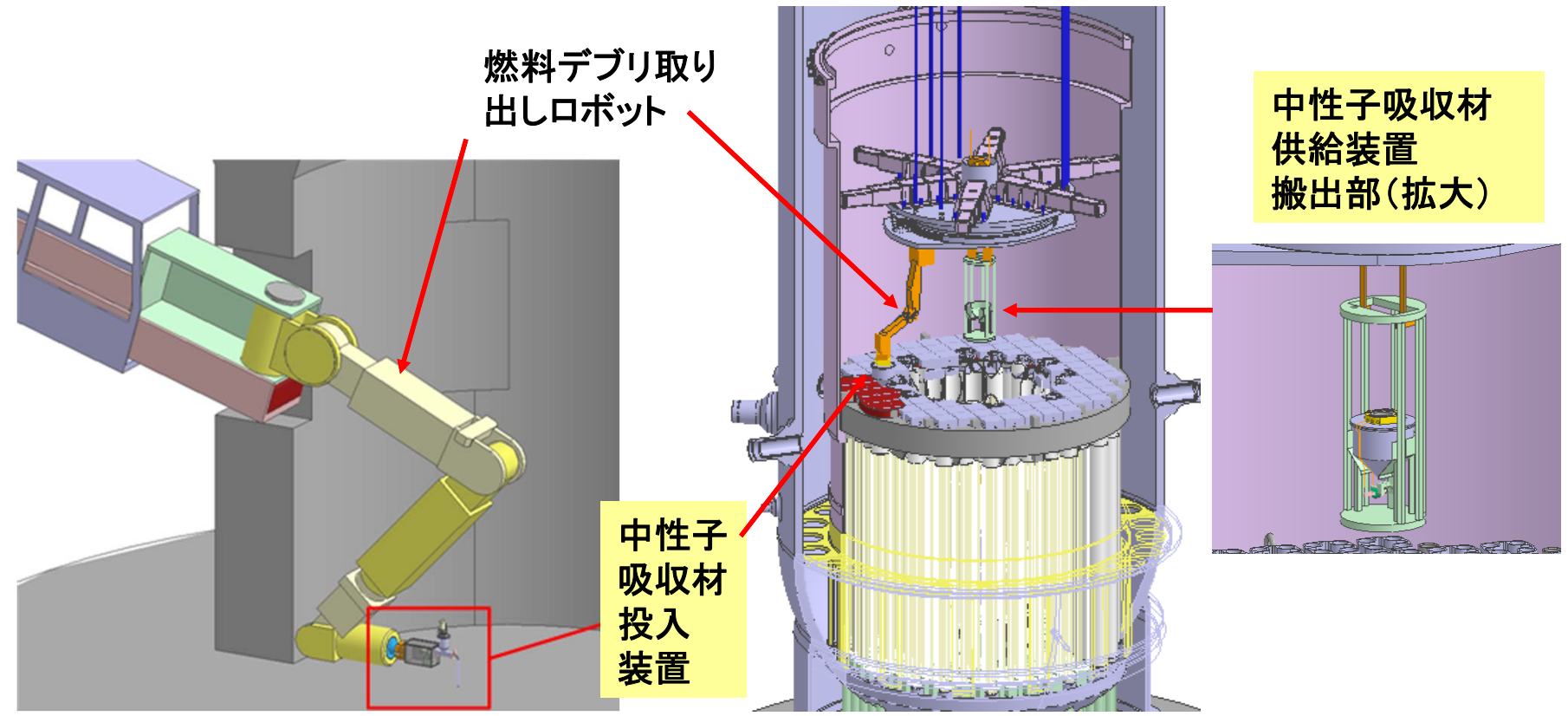


## 2.3 臨界防止技術の開発

### 1)燃料デブリへの非溶解性中性子吸収材の散布方法や散布後の効果の確認方法の検討

#### 【実施内容】

- ・本格横取り出し工法、および上取り出し工法を想定して、タンクタイプの投入装置をツールチェンジャー方式で燃料デブリ取り出しロボットに搭載する概念を策定



横取り出し工法への適用イメージ

上取り出し工法への適用イメージ

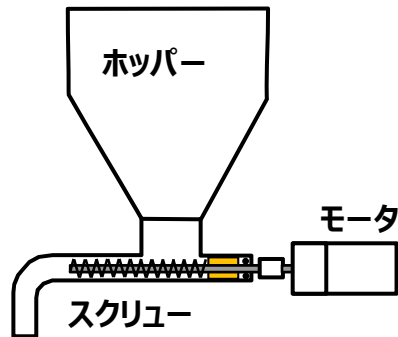
## 2.3 臨界防止技術の開発

### 1)燃料デブリへの非溶解性中性子吸収材の散布方法や散布後の効果の確認方法の検討

#### 【実施内容】

・異なる吸収材タイプ(固体・固化体)のそれぞれに適した投入機構を選定

固体( $B_4C$ 金属焼結材、 $B \cdot Gd$ 入ガラス材、 $Gd_2O_3$ 粒子)向け  
スクリーフィーダー方式



固化体(粘性体;水ガラス)向け  
スクイーズポンプ方式

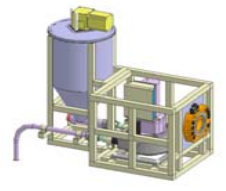
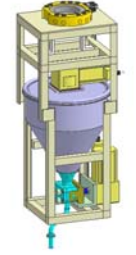

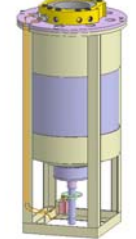


## 2.3 臨界防止技術の開発

### 1)燃料デブリへの非溶解性中性子吸収材の散布方法や散布後の効果の確認方法の検討

**【成果】**

・燃料デブリ取り出しロボットに搭載するための投入装置の概念案を策定し、開発課題を抽出した

	案1 標準ポンプ搭載	案2 小型ポンプ搭載	案3 ポンプレス1	案4 ポンプレス2
装置外観				
想定外形(mm)	1030×465×880	Φ450×960	Φ360×520	Φ320×673
想定重量(kg) 吸収材含まない	82	34	15	29
ホッパー容量(L)	25	15	15	15
備考	横アクセス スクイーズポン プ	上アクセス スクイーズポン プ バルブ	上アクセス ポンプレス	上アクセス ポンプレス ホッパー分離

主な開発課題

項目	内容
燃料デブリ取り出しロボットとの取り合い	ツールチェンジャー方式の整合性
遠隔操作	操作性
環境条件	耐放射線 防水
吸収材の搬送性	搬送量、速度
メンテナンス	ノズル、バルブ、タンクの遠隔分解洗浄

**【実機適用までの課題】** 吸収材投入装置の仕様策定、試作、要素試験

## 2.3 臨界防止技術の開発

### 1) 燃料デブリへの非溶解性吸収材の散布方法や散布後の効果の確認方法の検討

**【実施内容】**

- 燃料デブリ取り出し時に、必要量の非溶解性中性子吸収材が投入されたことを確認する手段を検討

**【成果】**

- 超音波による吸収材投入量の測定概念(図1)を策定
- 吸収材投入前/後の表面に対して超音波を照射し、反射波が伝わる時間差から吸収材の厚さを検出可能である見込みを得た

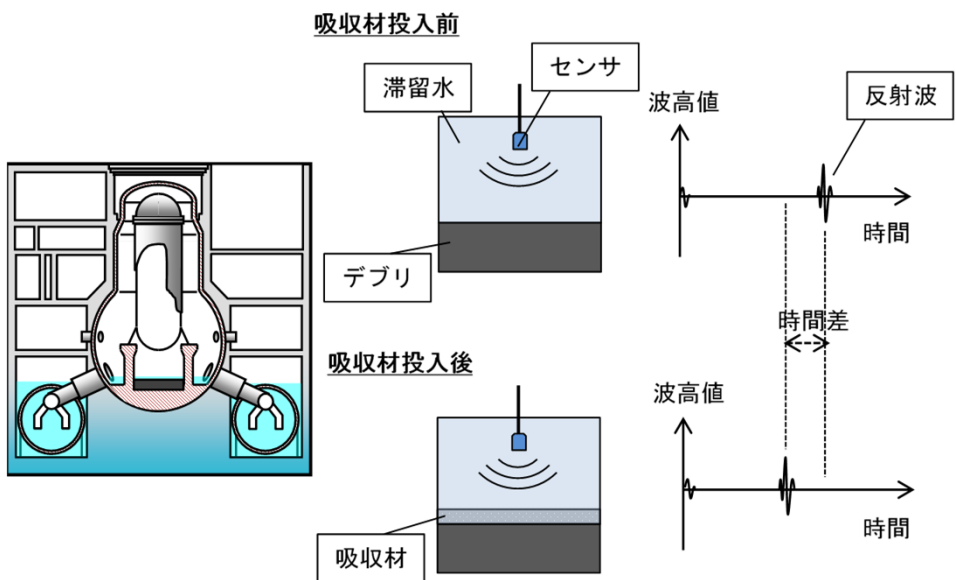


図1 超音波による吸収材厚さ測定の概念図

表1 超音波測定の必要条件

必要条件	備考
センサ部が水中であること	センサが着水するまで(気中)は、受信波形上に反射波が現れない。
大きな水流が無いこと	かけ流し工法の場合は一時的に水流を止める等の対応が必要。
水温が測定可能であること	厚さの測定精度を要する場合、音速を補正する為に水温測定が必要となる。
基準点の維持	厚さを算出するため、吸収材投入前/後でセンサ位置(基準点)の維持が必要となる。

**【実機適用までの課題】**

- 測定システムの仕様策定および取り出しシステムとの取り合い調整

## 2.3 臨界防止技術の開発

### 2) 収納缶の長期照射影響検討

#### 【実施内容】

- ・昨年度までに取得した副次的影響(材料腐食および水素発生)に関わる照射特性トレンドの信頼性向上を目的にデータ拡充のためのガンマ線照射試験を実施し終了
- ・気中照射試験(材料腐食評価): 照射に伴う吸収材成分溶出の変化を評価、照射量72 MGy(線量率10 kGy/hで10ヶ月)
- ・水中照射試験(水素発生) : 密閉した収納缶を想定して評価、照射量11 MGyまで(照射特性トレンドの候補材差が明確)のデータ補完

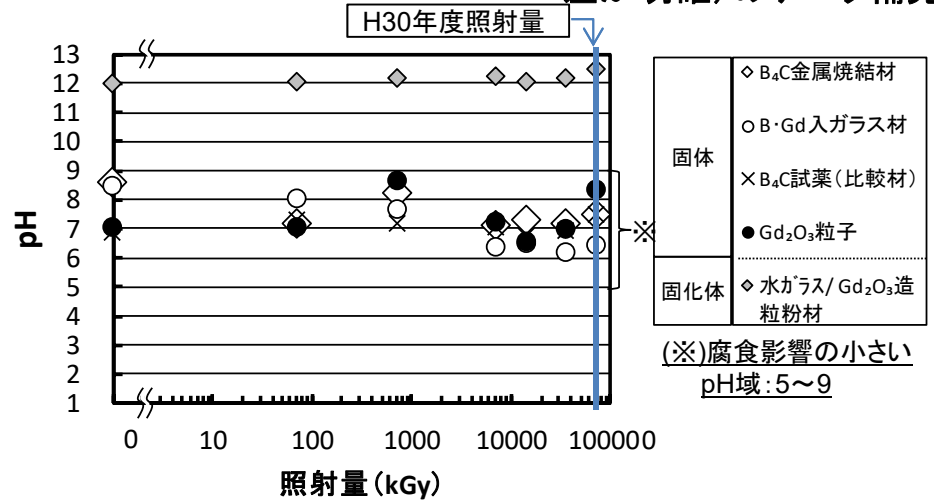


図1 溶出液pHの照射量依存性(気中)

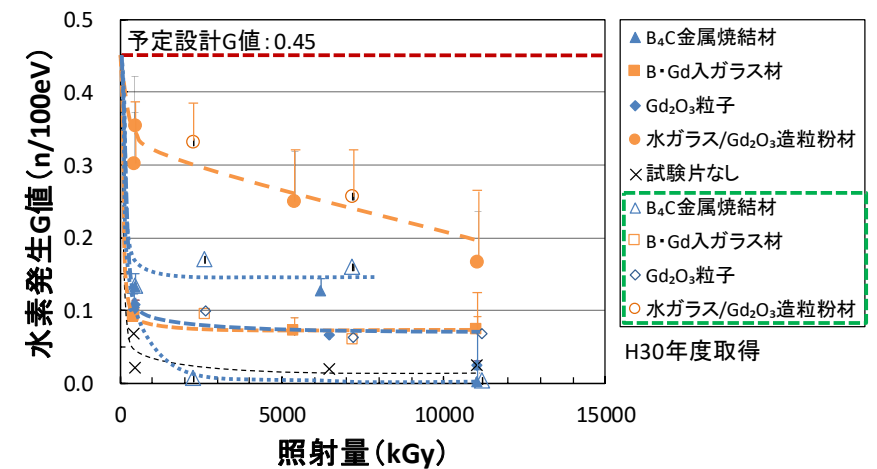


図2 水素発生G値(照射量に対する効率)の照射量依存性(水中)

#### 【成果】

- ・低材料腐食影響(溶出液pH6以上)、設計水素発生量内であることを確認、収納缶PJへデータ提供

## 2.4 工法・システムの安全確保に関する最適化検討(臨界管理関連)

### ①臨界評価・影響評価手法の確立

実施済の内容(黒), 本年度の内容(青)

表1 開発成果と実機適用までの課題

最終目標	実機適用までの達成目標	達成状況	実機適用までの課題
臨界シナリオ・臨界管理上重要度評価	<ul style="list-style-type: none"> <li>最新知見を反映した、1～3号の部位毎の臨界シナリオ・臨界管理上の重要度評価</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>最新知見を反映して臨界リスク図表を見直し。</li> <li>臨界評価/臨界挙動評価の結果を取り込み、臨界リスク図表を定量化。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>最新知見を反映したアップデートを継続する。</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>臨界評価合理化のため、内部調査、サンプリングへのニーズを提示。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>段階的規模拡大における取得データの使用方法、臨界評価の合理化方法整理。</li> </ul>	—
現実的リスクの把握	<ul style="list-style-type: none"> <li>統計的臨界評価に基づく現実的な臨界リスク評価(統計的臨界評価)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1号機ペDESTAL部評価及びPCVガス放射線モニタによる未臨界度推定の結果を反映した精緻化。</li> <li>2、3号機RPV下部評価</li> <li>2号機ペDESTAL評価(内部調査結果を反映した精緻化)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>最新知見を反映したアップデートの継続</li> <li>統計的臨界評価手法による、臨界防止対策の有効性確認</li> </ul>

## 2.4 工法・システムの安全確保に関する最適化検討(臨界管理関連)

### ①臨界評価・影響評価手法の確立

#### 1)臨界シナリオの検討・臨界評価

##### 【実施状況】

・PCV内部調査によって得られた映像に基づき、2号機ペDESTALに堆積する燃料デブリの臨界リスクを見直し。大きな変更はないとことを確認。

##### 【成果】

・統計的臨界評価の結果を反映して臨界リスク図表を見直し

表1 号機毎の臨界管理の重要度

部位	臨界シナリオ	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	・燃料デブリの水没 ・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	・付着燃料デブリ水没	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	・露出燃料デブリ水没 ・取り出し時状態変化 (含、巻き上げ)	水没: 小 取り出し: 小 (存在量多い、露出量少)	水没: 小 取り出し: 小 (存在量やや少、露出量大)	水没: 小 取り出し: 小 (存在量多い、露出量少)

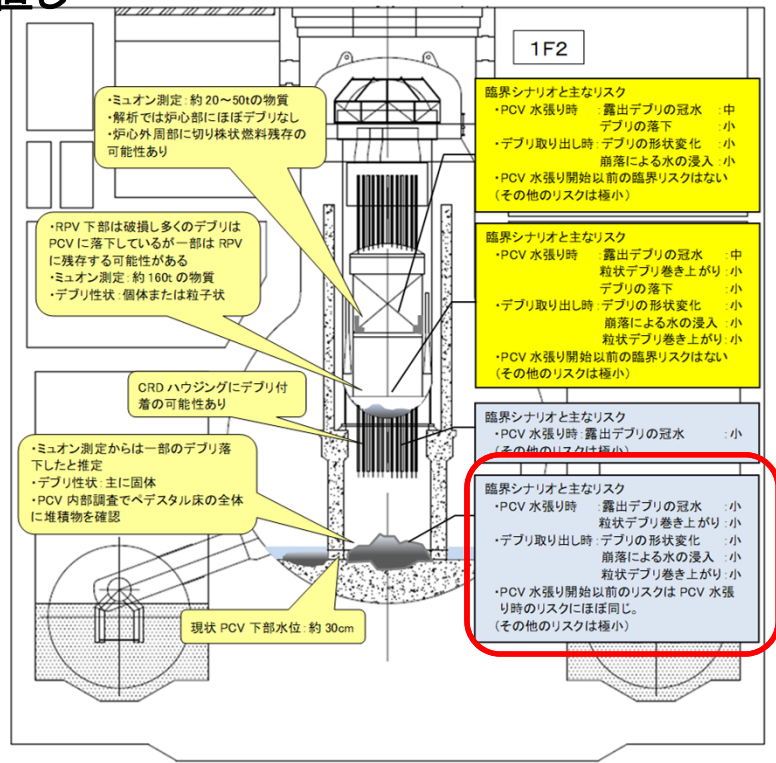


図1 1F2号機 臨界管理の重要度

\*ここでいう臨界リスクとは、今後の状態変化に備える臨界防止対策を検討する際の重要度を意味する

# 1) 臨界シナリオの検討・臨界評価(今後の調査データの活用方法)

ステップ	情報	適用先	活用方法
内部調査	外観情報 燃料デブリ分布、干渉物状況	サンプリング 小規模取り出し	・臨界リスク精緻化 ・付随リスクの具体化 (*1)
	γ線線量率、中性子束	サンプリング～ 本格取り出し	・臨界近接検知システム設計 想定線量の見直し(仕様緩和)
サンプリング	燃料デブリ組成 U235、Gd、SUS含有率等	本格取り出し	・臨界評価前提条件(燃料組成)の確認・見直し(*2)
	組成分布(下表) 燃料/非燃料区別 組成ばらつきの程度	本格取り出し	・状況に応じた臨界近接監視方法設定(*3) ・臨界評価前提条件(組成不確定さ)の確認・見直し
	作業中の中性子束、 FPガス濃度変化	小規模取り出し	・有意な臨界近接が生じていないことを確認し、 次ステップ作業の着手可否を判断(次ページ図)
小規模 取り出し	同上	本格取り出し	同上

\*1 付随事象として重量物落下による下部燃料デブリの変形を評価しておく必要あり、構造物落下の可能性・想定落下重量等によりリスクの大きさを具体化する。

\*2 臨界リスク評価(含、中性子吸収材必要量評価)には、事故前の炉心中最大反応度を有する集合体の平均組成やGdの含有など現実条件を織り込んでいる。この想定の妥当性の適切さを確認する。

\*3 非燃料堆積物除去により見かけ上の臨界近接が観測される可能性あり、非燃料である場合には監視方法を変えることが望ましいため

サンプリング	実施内容	使用方法
表面切削	2号機ペDESTAL 30点程度	・燃料/非燃料区別 ・均一性確認
ボーリング	同 6点	・組成データ確認

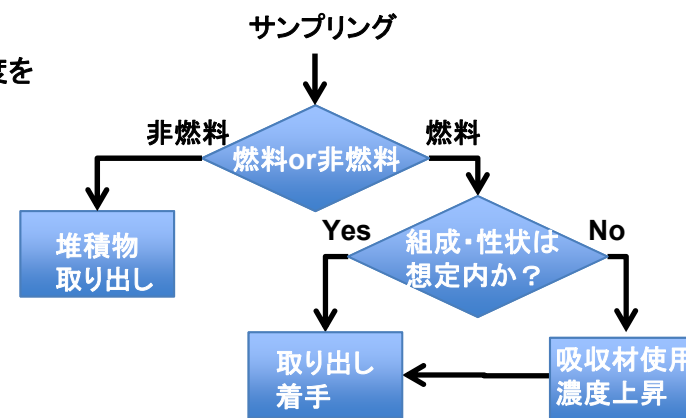


図1 サンプリングデータの使用方法



## 2.4 工法・システムの安全確保に関する最適化検討(臨界管理関連)

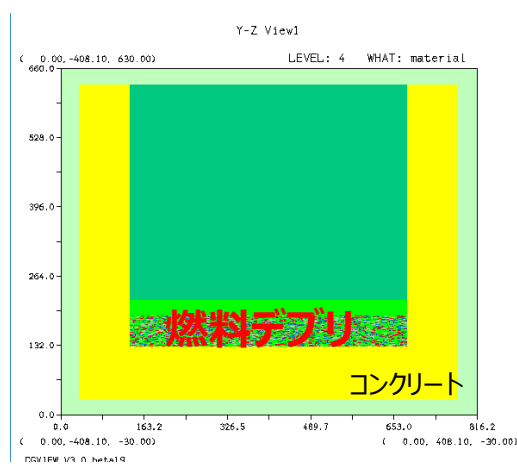
### ①臨界評価・影響評価手法の確立

#### 2) 統計的臨界評価手法高度化

##### 【実施内容】

- ・2号機ペDESTALに堆積している燃料デブリを対象として、加工制限無しで燃料デブリ形状を変化させた場合を想定して、臨界リスクを統計的手法に基づき評価した
- ・ペDESTAL映像(内部調査Pj成果)、燃料デブリ分布推定図(炉内状況把握Pj成果)、燃料デブリ特性リスト(性状把握Pj成果)を調査して、統計的臨界評価に必要な解析条件を整理(下表)

項目	値	根拠
燃料デブリの内訳(vol%)	UO <sub>2</sub> :30 ~70 構造材:70~30	事故解析コードの解析結果や燃料デブリ性状把握Pjの成果を参考にして設定
構造材の内訳(vol%)	Zr:40 ~60 SUS:60~40	事故解析コードの解析結果や燃料デブリ性状把握Pjの成果を参考にして設定
燃料デブリ体積占有率 (vol%)	50 ~ 90	PCV内部調査の画像, および今後想定される形状変化を仮定 (50以下は巻き上がり事象として扱う)
燃料デブリ球の大きさ(直径(cm))	UO <sub>2</sub> :4 ~9 Gd:0.5~4	燃料デブリ組成の局所的な偏りを表現するためのモデル 直径数cm程度が保守的 直径9cmの球の体積は燃料棒1本分に相当 Gd球はUO <sub>2</sub> 球に含まれるものと仮定
UO <sub>2</sub> 密度 (g/cm <sup>3</sup> )	9 ~ 10.5	燃料デブリ性状把握Pjとの協議を参考にして設定
燃料デブリ内空隙率(空気)(%)	0 ~ 15	燃料デブリ性状把握Pjとの協議を参考にして設定



計算モデル

2号機ペDESTAL統計的臨界評価のための解析条件(一様分布の確率分布を仮定)

## 2.4 工法・システムの安全確保に関する最適化検討(臨界管理関連)

49

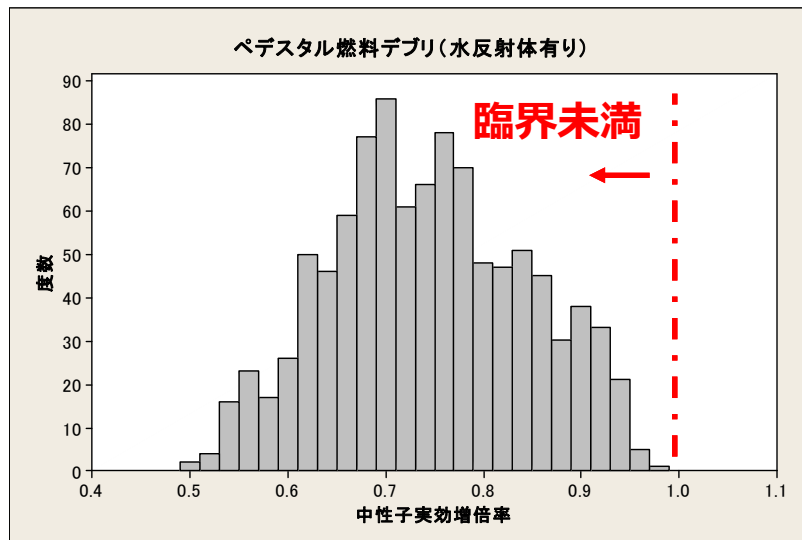
### ①臨界評価・影響評価手法の確立

【関係者外秘】

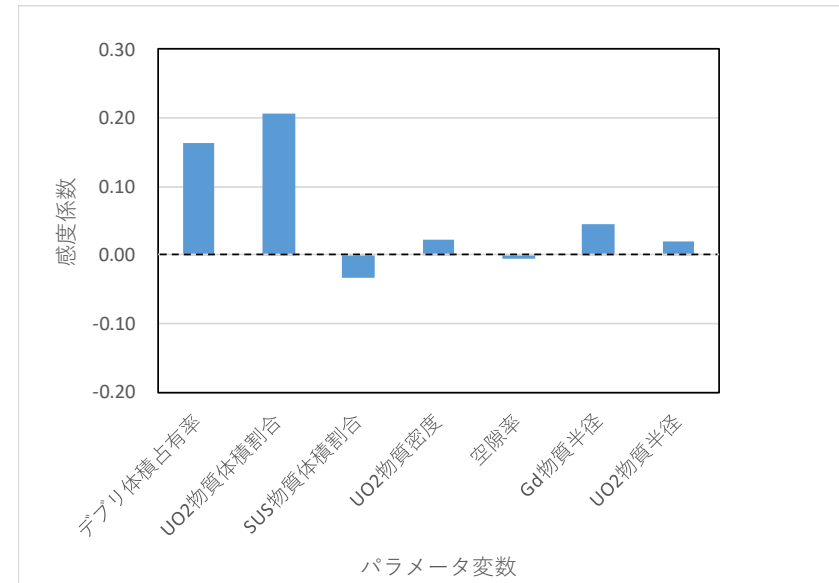
### 2) 統計的臨界評価手法高度化

#### 【実施内容】(続き)

- ◆ 燃料デブリは、直径5.4(m)×高さ0.6(m)の扁平な円柱状に堆積しているとした(PCV内部調査画像より)
- ◆ 燃料デブリのウラン濃縮度は、燃焼度の異なる6バッチに区分して、それぞれの存在割合を設定した(運転履歴データより)
- ◆ Gdは1バッチ目燃料のみに局所的に偏在するモデルとした(保守的)
- ◆ B4Cは考慮せず(保守的)
- ◆ 1000ケースの計算結果について中性子増倍率の頻度分布を得た



臨界評価の計算結果の頻度分布



仮定したパラメータの影響度合い

#### 【成果】

- ◆ 臨界判定基準 $k_{eff}=1.0$ を超過するケースは無し。(  $k_{eff}=0.95$ を超過するケースは約0.6%あり)
- ◆ 2号機ペDESTALに堆積している燃料デブリの臨界リスクは十分小さいことが定量的に試算された。(多くの仮定を含むので評価の信頼性には注意が必要)

#### 【実機適用までの課題】

今後行われるサンプリング結果を確率分布に反映して、評価の信頼性を向上する

## 2.4 工法・システムの安全確保に関する最適化検討(臨界管理関連)

50

### ②臨界管理方法の検討

#### i-1) 燃料デブリの取り出し工法の検討を反映した臨界管理方法・手順の検討

##### a) 深層防護の考え方見直し

- ・工法・システム高度化(安全設計)Pjで検討されている深層防護の考え方に合わせて、臨界管理の深層防護レベルを見直した。臨界をレベル3(事故)としてレベルを再定義(4、5ページに提示)。
- ・各レベルの管理パラメータ・基準値設定の考え方、レベルごとに使用する機器・設備を整理した(表1)

##### b) 本格取り出し時臨界管理方法

- ・本格取り出し時の臨界管理方法と、1日の取り出しスケジュールとの整合性を確認

取り出し量目標                      臨界評価の合理化(想定燃料デブリ組成の合理化)、1回あたりの加工サイズ制限を約6,900cm<sup>3</sup>とすることで、取り出し量目標(300kg/日)との合致を確認。

1日の作業スケジュール              臨界近接監視測定として、1日の作業開始前準備中に基準状態測定(1hr)、燃料デブリ加工毎に臨界近接監視及び作業継続判断(10min)を想定しても、作業スケジュールを阻害しないことを確認。

表1 深層防護レベルの見直し

レベル	状態	管理パラメータ	管理値	管理手段	対応手段
1 通常状態	keff < 0.80 (取り出し中に想定される未臨界度)	・取り出し位置近傍中性子束 ・PCV排気ガスFP濃度 ・中性子吸収材濃度	keff < 0.75 (keffに対応する中性子束、FPガス濃度)	通常状態からの逸脱防止 ・加工サイズ制限 ・中性子吸収材(オプション) ・臨界近接監視	・作業中断 ・吸収材濃度確認
2 異常状態	keff < 1.0 (未臨界状態)	同上	0.85 < keff	逸脱の検知・拡大防止 ・臨界近接監視	・作業中断・燃料デブリ回収 ・吸収材濃度上昇
3 事故	1.0 < keff (臨界発生)	同上	0.95 < keff	異常の検知・終息 ・臨界検知・終息	・ホウ酸水注入

## 2.4 工法・システムの安全確保に関する最適化検討(臨界管理関連)

### ②臨界管理方法の検討

#### i-2) 溶解性中性子吸収材を用いた場合の循環冷却システムへの影響評価

##### 【目的】

- ・五ホウ酸ナトリウム水を冷却材として常時使用する場合の影響評価(1F環境での課題整理)

##### 【これまでの成果】

- ・運用ホウ素濃度の評価 : 運用濃度7,000ppm
  - 臨界防止ホウ素濃度: 6,000ppm 最大反応度集合体平均組成燃料デブリ(Gdあり): 最適減速状態~ホウ素価値最小状態を考慮  
切り株燃料: 水没、燃料ピッチ変化を考慮
  - 1日当たりの濃度変化: 1,000ppm PCVからトラス室へ漏えい、地下水との混合による希釈を考慮  
コンクリート起因元素によるホウ酸析出(本年度評価)
  - 飽和溶解度: 12,000ppm@0°Cより低い濃度で運用
  - 構造材腐食影響: 4,000ppm以上であれば腐食影響なし
  - コンクリート・止水材への影響 : 10,000ppm以下であれば影響なし
  - 臨界評価上の不確定さ: 臨界実験で確認、発電プラント使用濃度(2,000ppm程度)から不確定さの増大は確認できず

- ・ホウ素濃度維持設備概念

##### 【実施内容】

- ・1F環境下でのホウ酸水適用時の課題評価
  - コンクリート起因元素によるホウ酸析出
  - 冷却水漏えい時の環境影響 など

## 2.4 工法・システムの安全確保に関する最適化検討(臨界管理関連)

### ②臨界管理方法の検討

#### i-2) 溶解性中性子吸収材を用いた場合の循環冷却システムへの影響評価

表1 開発成果と実機適用までの課題

実施済の内容(黒), 本年度の内容(青)

最終目標	実機適用までの達成目標	達成状況	実機適用までの課題
ホウ酸水適用方法検討	<ul style="list-style-type: none"> <li>・臨界防止のための適用方法検討</li> <li>・臨界防止ホウ素濃度決定</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・臨界シナリオごとにホウ酸水による防止方法を検討(完了)</li> <li>・臨界防止ホウ素濃度決定(完了) 現場状況を踏まえた見直し 現場で想定される状況を考慮した見直し</li> </ul>	—
適用時影響評価	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ホウ酸水適用による諸課題の確認</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・構造材腐食等影響評価 漏洩時影響、かけ流し状態など影響評価要検討 コンクリートとの接触、かけ流し状態での使用影響、外部漏洩時影響評価</li> </ul>	—
廃棄物影響	<ul style="list-style-type: none"> <li>・廃棄物影響が許容範囲にあること</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・小循環ループにホウ酸影響を受けない放射性核種除去設備(脱塩塔等)、漏洩ホウ酸回収設備設置(設備検討)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・水系システムの一部としての成立性確認 運用状態での廃棄物量評価、取り出し完了後の廃棄物(ホウ酸回収方法・物量、ホウ酸付着構造材などの扱い)検討</li> </ul>
ホウ酸水設備仕様確立	<ul style="list-style-type: none"> <li>・PCVからの冷却水漏えいを考慮した濃度維持設備仕様及び成立性確認</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ホウ酸水濃縮による濃度維持設備概念仕様検討</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・水系システムの一部としての成立性確認</li> </ul>
現場運用方法確立	<ul style="list-style-type: none"> <li>・濃度維持のための運用方法確立</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・運用のための濃度余裕評価 濃度監視用法など現場運用方法検討</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・水系システムの運用方法検討として、濃度監視方法、異常時対応など運用方法の検討</li> </ul>

## 2.4 工法・システムの安全確保に関する最適化検討(臨界管理関連)

### ②臨界管理方法の検討

#### i-2) 溶解性中性子吸収材を用いた場合の循環冷却システムへの影響評価

##### コンクリートと五ホウ酸ナトリウム水が接液した場合の析出影響

##### 【目的】

燃料デブリ取り出し時に、臨界防止を目的として五ホウ酸ナトリウムを使用した場合の、コンクリートからの溶出成分(Ca, Mg等)によるホウ素濃度の低下の影響を評価

##### 【評価条件】

- ✓ 五ホウ酸ナトリウム濃度: 4000ppm, 7000ppm
- ✓ Ca濃度: 0~1330mg/L(ppm) \*
- ✓ 水温: 0~5°C、65°C
- ✓ 海水濃度: 1/10000倍

##### 【評価結果】

- コンクリート起因元素によるホウ素の析出により、体系全体のホウ素濃度低下量は約3ppm/日程度であり、運用上問題となる変化は生じないことを確認

##### 【その他懸念事項の検討結果】

- ホウ酸水漏えい時の影響評価を実施し、地下水による希釈を考慮すればホウ素漏えいの影響は小さくなることを確認
- ホウ酸が析出しエアボーンとなって飛散する可能性は十分低いことを確認
- ホウ素濃度の変動要因について整理し、水系システムの運用ホウ素濃度設定へ反映

表1 評価結果

ケース	Ca濃度 (ppm)	ホウ素濃度低下量 (1日あたり)		五ホウ酸ナトリウム10水和物必要投入量 (1日あたり)	備考
		局所デブリ破砕位置近傍	全体体系全体の水量で均質化した場合		
1	1330	1050ppm	21ppm	115kg	保守的に24kg/日のCaが1hr分の循環水(18m <sup>3</sup> )中に溶出すると想定した場合
2	133	105ppm	21ppm	115kg	24kg/日のCaが1日分の循環水(18m <sup>3</sup> ×10hr)中に溶出すると想定した場合。24kg/10hr/18m <sup>3</sup> =133mg/L as Ca
3	665	約525ppm	11ppm	60kg	ケース1の条件を合理化 溶出速度を半分とする。
4	333	約263ppm	6ppm	33kg	ケース3の条件を合理化 粒度の大きいものは溶出せず、溶出量を1/2程度と仮定する。
5	176	約139ppm	3ppm	17kg	ケース4の条件を合理化 コンクリート中の粗骨材を考慮(53%程度)した場合。

## 2.4 工法・システムの安全確保に関する最適化検討(臨界管理関連)

### ②臨界管理方法の検討

#### ii)燃料デブリの取り出し作業の段階的な規模拡大への対応

- ・内部調査等の管理方法は関連Pjと連携して検討
- ・段階的に取り出し規模を拡大する場合(下表では“小規模取り出し”と表記)を想定

臨界管理			内部調査	堆積物/落下物除去NPL)	燃料デブリサンプリング			燃料デブリ取り出し	
					把持・吸引	表面採取	コアポーリング	小規模取り出し	本格取り出し
燃料デブリ状態変化			無状態変化なし	小堆積物が水に置換され反射体効果増	無変化する燃料デブリは少量	極小変化する燃料デブリは少量	小穴に水が浸入	中限定された範囲の掘削など	大掘削などによる燃料デブリ変形
作業に付随事象			上部からの燃料デブリ落下、落下物による水中の燃料デブリ変形						
通常状態から逸脱防止	作業制限	臨界評価	—	適切な作業方法を選択	適切な作業方法を選択	加工サイズ・ピッチ制限	加工サイズ・ピッチ制限	1回あたりの取り出し量制限	1回あたりの取り出し量制限
	臨界近接監視	臨界近接検知	—	—	—	—	中性子束監視(簡易)	中性子束監視(簡易)	未臨界度監視(詳細)
	非溶解性中性子吸収材	中性子吸収材	—	—	—	—	—	—	非溶解性吸収材
	溶解性中性子吸収材		—	—	—	—	—	—	五ホウ酸ナトリウム水(6000ppm)
異常時対策	PCVガス放射線モニタ	再臨界検知技術	● 現行	● 現行(*1)	● 現行(*1)	● 現行(*1)	● 中性子併用	● 中性子併用	● 中性子併用
	緊急ホウ酸水注入	臨界時挙動評価	● 現行	● 現行(*2)	● 現行(*2)	● 現行(*2)	● 現行(*2)	● 現行(*2)	● 現行(*2)
管理方法(参考)			11-1	11-5	11-2		11-3	5	

選択

\*1: Kr検知による高度化システムの導入必要時期を検討  
\*2: ホウ酸注入設備能力見直し、注入後の処置を検討

## 2.4 工法・システムの安全確保に関する最適化検討(臨界管理関連)

### ②臨界管理方法の検討

#### ii)燃料デブリの取り出し作業の段階的な規模拡大への対応

#### 【実施状況】

- ・各段階での想定状態、実施作業の臨界リスクに応じた臨界管理方法を検討
- ・内部調査： 調査自体に燃料デブリ状態変化は生じないが、付随事象の臨界リスク評価を実施  
 RPV内部調査： RPV切断片落下影響、PCV詳細調査： 障害物(梁)切断時影響評価
- ・サンプリング～本格取り出し： 燃料デブリ加工・取り出し規模に応じて管理方法を検討

	考え方	サンプリング・小規模取り出し	本格取り出し
加工サイズ制限	臨界防止・臨界近接監視の有効性から設定。実績を踏まえて拡大	・実績の少なさに鑑み小規模に制限(一辺16cm立方体相当)。	・実績蓄積を踏まえて、拡大(一辺19cm立方体相当)
臨界近接監視	加工毎に監視を行い、次回加工の可否を判断する。 監視間隔は、初期状態(未臨界度)が把握されていない場合には、細かくする。	・簡易手法) 中性子束レベル監視による相対監視 - 加工規模を段階的拡大しつつ細やかな監視を行う。	・詳細手法) 未臨界度の測定による直接監視 - 初期未臨界度の測定により、組成・性状が不明である領域でも、段階的な加工規模拡大を経ずに、取り出し作業を可能とする。
中性子吸収材	・臨界発生時の終息手段(緊急ホウ酸注入)としてはどの段階でも適用する。 ・事前投入による常時使用(臨界防止手段)としては、各時点での設備制約、臨界防止の必要性を踏まえて適用を判断。	・燃料デブリ加工・取り出し規模が小さく、中性子吸収材による臨界防止を必要としない。 ・想定外の臨界近接が生じた場合には、作業を中断し、中性子吸収材使用の判断を検討する。	・燃料デブリ取り出し完遂のため、中性子吸収材(溶解性、非溶解性)をオプションとして検討しておく。 ・吸収材適用の必要性は、前段階までの実績情報を踏まえて検討することが望ましい。



### 3 まとめ

- ・燃料デブリや炉内構造物の取り出し・工法システムの概念検討の一部として、臨界管理技術の成立性及び現場適用性を確認した。

項目	本年度成果	実機適用までの課題
臨界管理方法の確立	<p>1)取り出し工法検討を反映した管理方法・手順の検討 1日の取り出し量目標、スケジュールと臨界管理要求の整合性を確認した。</p> <p>2)段階的規模拡大時の臨界管理方法確立 内部調査から本格取り出しの管理方法を策定した。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・内部調査その他から得られる最新知見を、臨界評価の前提条件と照合し、今回策定した管理方法の有効性を確認、可能であれば合理化を進めていく(実機適用まで継続)。</li> </ul>
臨界管理技術の適用性	<p>1)未臨界度測定・臨界近接監視技術</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ロボットアームにより運用可能な検出器ユニット、監視システム仕様を策定した。</li> <li>・実機を模擬した大型体系での未臨界度測定の成立性を確認した。</li> </ul> <p>2)再臨界検知技術</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・負圧管理システムの一環としての運用方法を策定し、臨界検知性を確認した。</li> <li>・検出器校正技術を確立し、校正精度を定量化した。</li> </ul> <p>3)臨界防止技術</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・非溶解性中性子吸収材の散布方法の概念を策定し、散布後の効果を確認する測定概念を策定した。</li> <li>・非溶解性吸収材の長期照射によっても収納缶健全性に影響が出ないことを確認した。</li> <li>・溶解性中性子吸収材適用時影響(漏えい時環境影響、コンクリートとの共存性)を評価した。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・検出器ユニット試作、運用性確認</li> <li>・非均質複雑体系での確認試験により、未臨界度測定の成立性を確認する。</li> <li>・工法・システム検討進捗を反映した有効性確認を継続する。(実機適用まで継続)</li> <li>・防錆剤との共存性など現場適用時の影響評価</li> <li>・液体システム的设计・運用方法確立に反映する。</li> </ul>