

# 平成25年度実績概要

## 燃料デブリの臨界管理技術の開発

平成26年7月31日  
技術研究組合 国際廃炉研究開発機構

無断複製・転載禁止 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構  
©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

### 1. 全体計画

#### 1.1 燃料デブリ臨界管理技術開発の目的と目標

1

##### 【臨界管理技術開発の目的】

現状の燃料デブリは臨界になっていないと考えられるが、今後の燃料取り出し作業等に伴いデブリ形状や水量が変化した場合でも再臨界を防止するために、臨界管理手法及びモニタリング技術を開発する。

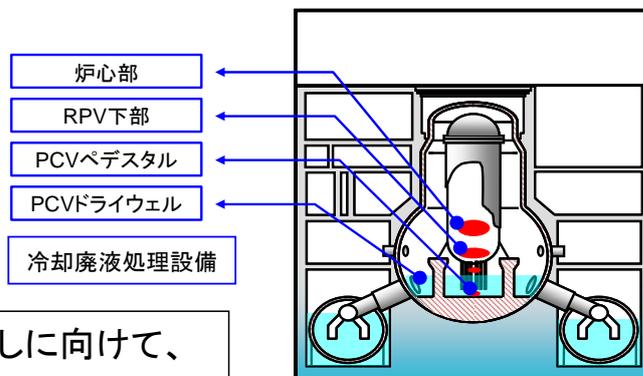
##### 【臨界管理技術開発の目標】

燃料デブリは、RPVを經由してPCV内に存在すると推定されている。廃液処理及び冷却設備への流出まで想定した臨界評価およびモニタリング技術の開発、および、燃料デブリ取出し時の再臨界防止のための中性子吸収材開発を目標とする。



ロードマップ：2020上半期の燃料デブリ取出しに向けて、以下の開発を実施する。

- ①臨界評価技術の開発
- ②廃液処理・冷却設備未臨界管理技術開発
- ③炉内の再臨界検知技術の開発
- ④臨界防止技術の開発

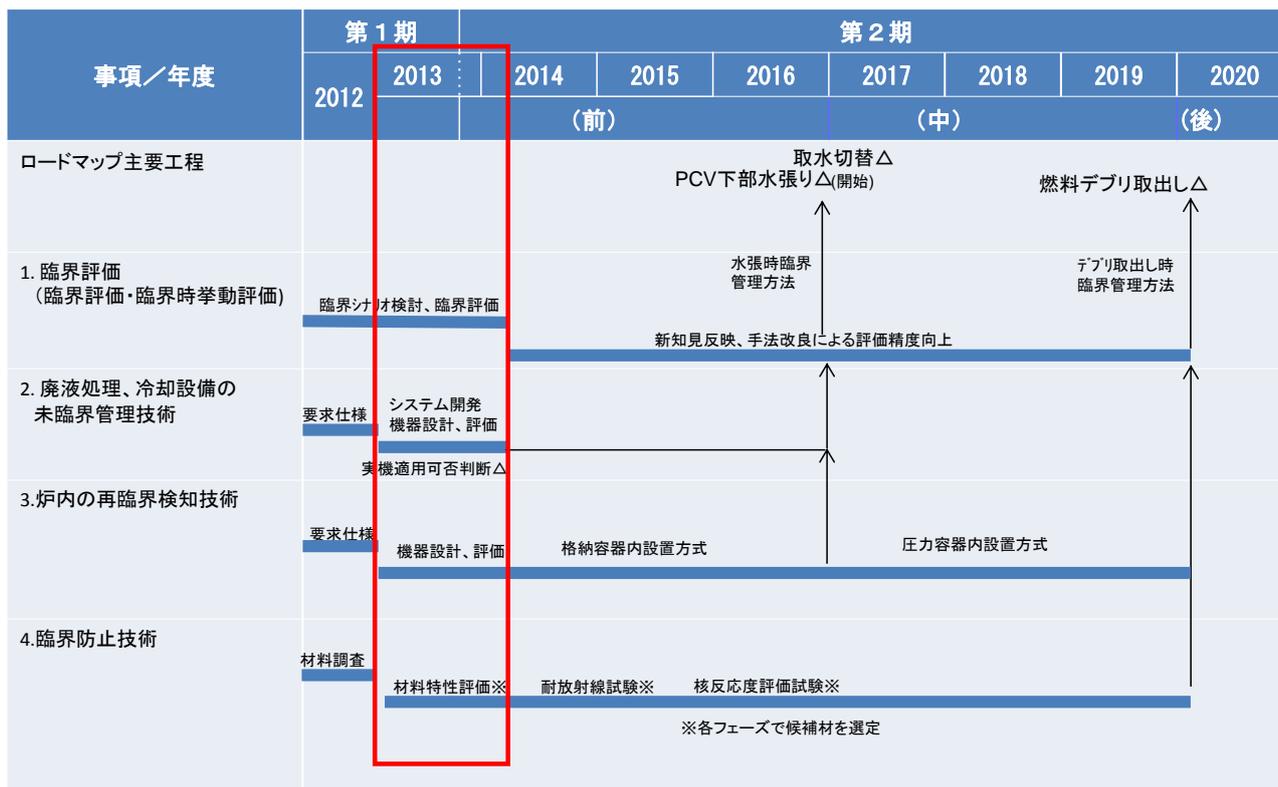


想定される燃料デブリの位置

# 1. 全体計画

## 1.2 ロードマップとの関係

- 2020年上半期の燃料デブリ取出しなど主要工程に向けて、臨界管理技術を開発する。



# 2. H25年度開発成果

## 2.1 臨界評価技術の開発

### 開発目標

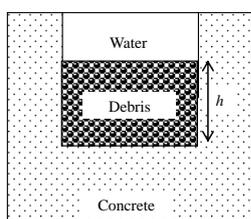
- 燃料デブリ取出し作業を安全に実施できるように、炉内の臨界状態を評価
- 廃液処理、冷却設備に燃料デブリが流出・蓄積する場合を想定し臨界状態評価
- 燃料デブリ再臨界時の影響評価のために、臨界時挙動解析手法を開発

### H25年度開発成果【臨界評価】

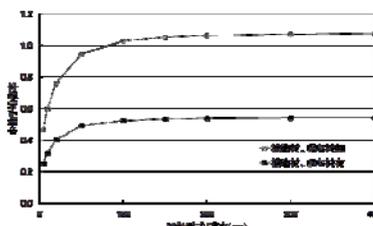
- 水張り工程までの臨界シナリオ・臨界評価(H24年度実施)に最新知見を反映
- 格納容器水張り以降燃料デブリ取り出しまでの工程について臨界シナリオ作成・臨界評価  
不明なデブリ性状をパラメータとして広範な条件での臨界性の評価を実施し、今後再臨界となるリスクのある条件範囲を調査。保守的に中性子を吸収する核分裂性核種や制御棒を考慮しない場合には再臨界となる条件範囲が見いだされたが、燃料に含まれるガドリニウムとSUSを考慮すれば実効増倍率は下がり、臨界となることはないことを確認
- コンクリートとの相互作用(MCCI)を起こした燃料デブリの臨界性評価モデル検討、代表ケースでの臨界評価実施(下図)

・H26年度、これらの成果を用いて、各工程での臨界管理手法を策定する。

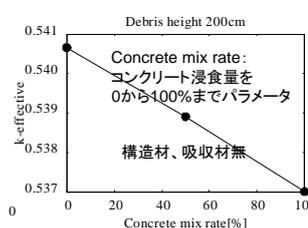
図 圧力容器下部における臨界評価の一例  
(構造材、吸収材が含まれれば臨界になりにくい、コンクリート混合比が増えると実効増倍率は小さくなる)



a) 評価モデル



b) デブリ高さと実効増倍率の関係



c) コンクリート割合と実効増倍率の関係

## 2. H25年度開発成果

### 2.1 臨界評価技術の開発（臨界シナリオに関する補足）

4

#### 臨界シナリオ

臨界シナリオとは、想定される初期状態及び状態変化(誘因事象)の組み合わせについて、臨界性の観点からのランク付けを行ったものであり、ロードマップ上の各工程について作成

**初期状態** デブリ分布(対象部位)ごとに、冠水／露出、冷却材沸騰／非沸騰、その他の状況を組み合わせたケースを設定

**誘因事象** 想定される状態変化のうち、臨界性に影響与える事象を抽出

**臨界性ランク付け** 初期状態と誘因事象の組み合わせ毎に、臨界性への影響を定性的に評価して、3段階(H/M/L)でランク付けし、厳しいケースを抽出

#### 臨界シナリオの活用

- ・ハイランクに抽出されたケースから代表ケースを選定し、デブリ性状などをパラメトリックに変化させて臨界性を評価
- ・今後の各種調査結果を反映して初期状態を絞り込むことで合理的な評価につなげる
- ・臨界性上厳しい結果を与える誘因事象を明確にすることで、デブリ取出しなどの工法検討において臨界管理の観点から留意すべき事項を明確にする

燃料デブリ取出し時臨界シナリオの一例

フェーズ	場所	初期状態		再臨界シナリオ
		燃料状態	冷却状態	
RPV冠水～燃料デブリ取出し	炉心部 デブリベッド層	炉心平均組成のデブリ(粒状、塊)	非沸騰で冠水状態	(臨界質量増加) ・上部からの非溶融燃料落下 ・上部からの燃料デブリ落下
		Pu含有率の高いMOXデブリが偏在		(減速材/燃料体積比変化) ・ポロシティへの浸水 ・作業に伴うデブリベッド撈拌
		燃焼度の低い燃料デブリが偏在した状態	非沸騰で冠水状態	(自然災害) ・地震によるデブリ・構造物の落下、移動
		制御棒由来のボロンが事故時に流出した状態		

IRID

### 2.1 臨界評価技術の開発

5

#### H25年度開発成果 [臨界時挙動評価]

- ・臨界時挙動評価モデルの精緻化  
動特性計算コード(PORCAS、JAEA開発)をベースとした臨界時挙動評価モデルについて、改良モデルを開発
  - 性状の異なる複数デブリの取り扱い、減速材沸騰状態を扱うための熱水力モデル改良
  - 作業員の被ばく量評価、再臨界検知性評価に使用するFP生成量評価モデル(下図)
- ・非溶融燃料など複雑な形状の燃料デブリを取り扱うための熱水力モデルの開発項目と課題を抽出・整理

- ↓
- ・改良したモデルを臨界時挙動評価に使用するPORCASコードに統合
  - ・改良したモデルを用いて、臨界時挙動(被ばく量評価、ボロン投入効果など)を評価し、臨界管理手法策定に活用する。

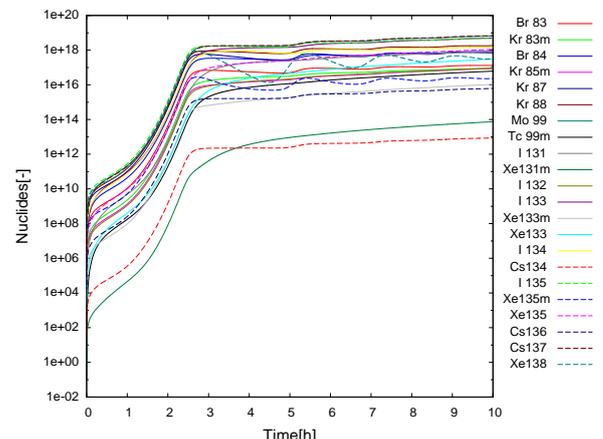
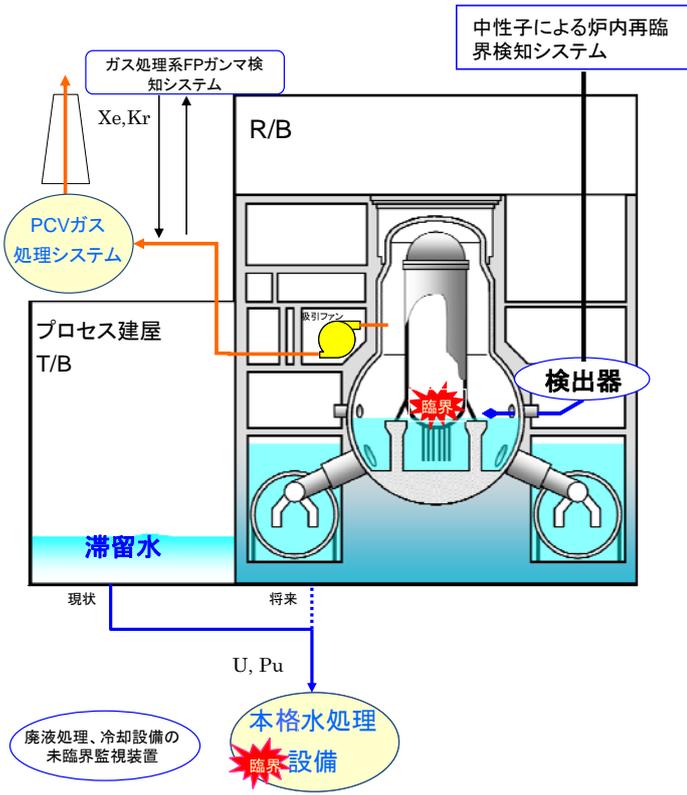


図 FP生成量評価結果の一例

IRID

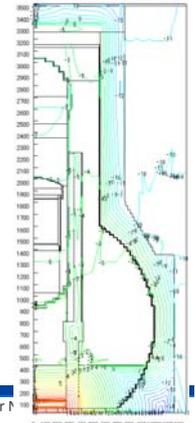
# (参考)未臨界監視および再臨界検知の概要



➤ PCV内部と外部で臨界管理の要求は異なるため、目的に応じて未臨界監視と再臨界検知を使い分ける。  
(デブリ取出し前の段階を想定)

➤ PCV外部の廃液処理、冷却設備においては、設備をメンテナンスする作業員の臨界による被ばくリスクを未然に防ぐ必要がある。  
=>未臨界監視(2.2参照)

➤ PCV/RPV内部において臨界になった場合、直接放射線はPCV壁外側に届かないため、被ばくリスクは極めて小さい。一方、比較的広い範囲の状況を監視することが重要である。  
=>再臨界検知(2.3参照)



PCV内臨界時の中性子線分布



©International Research Institute for

# 2.2廃液処理、冷却設備の未臨界管理技術の開発

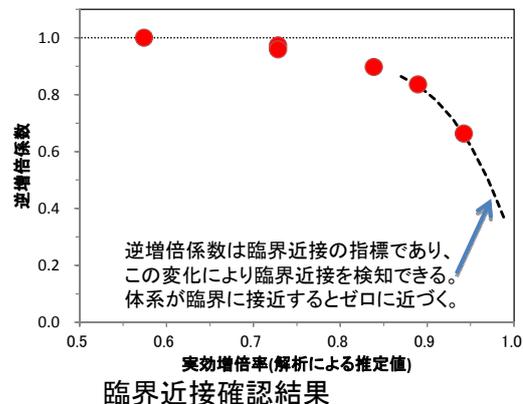
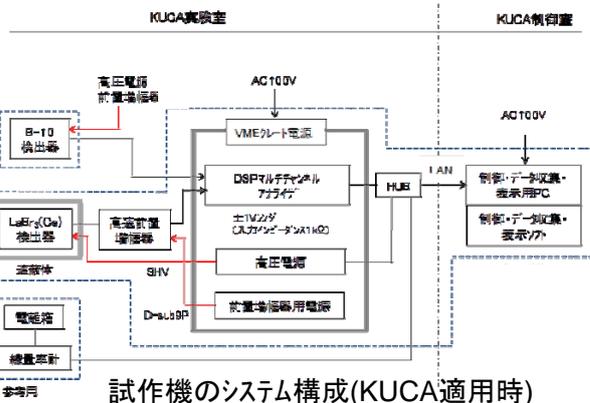
## 開発目標

- ・建屋内循環ループまたは本格水処理システムに燃料デブリが蓄積する事象を想定し、中性子及びγ線を測定する方法によって、臨界状態への近接を検知して警告する未臨界監視システムを開発する。

## H25年度開発成果

- ・H24年度に策定したシステム概念に基づき機器設計・試作実施(下左図)
  - 核分裂生成物のガンマ線を測定し、燃料デブリの蓄積をモニタ
  - デブリ中のCm等の自発核分裂中性子を測定し、中性子源増倍法により臨界近接判定
- ・京都大学臨界実験設備(KUCA)において適用性確認試験実施
  - 想定される放射線環境下での動作可能であることを確認
  - 臨界近接を模擬した測定を行い、実効増倍率0.5~0.7の範囲でも未臨界を監視可能であり、臨界近接モニタとしての成立性を確認(下右図)
- ・参考手法として炉雑音法の適用性を検討。適用可能な手法を抽出。

➡ H25年度で開発完了。今後、ループの設計を反映した実機適用システム詳細設計を実施



試作機のシステム構成(KUCA適用時)

臨界近接確認結果

## 2.3 炉内の再臨界検知技術の開発

**開発目標** RPV内又はPCV内において燃料デブリが再臨界となった場合を検知するため、中性子およびFP  $\gamma$  線による再臨界検知システムを開発する

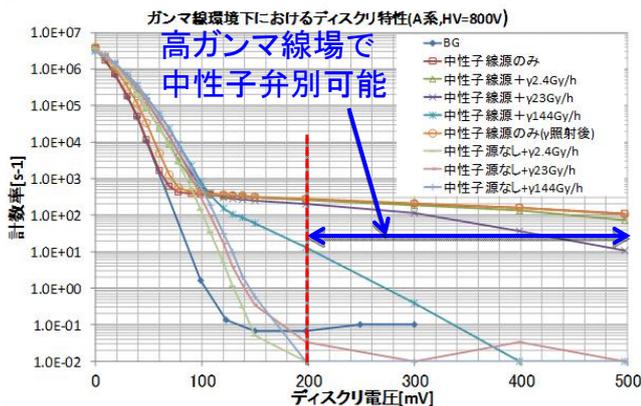
### H25年度開発成果 [中性子による再臨界検知システム]

・再臨界検知システム仕様の検討

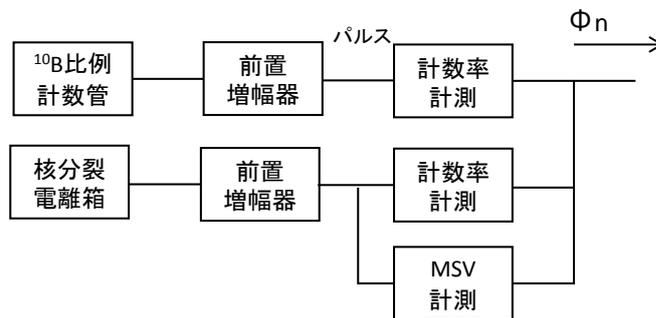
- RPV内又はPCV内において燃料デブリが再臨界となった場合に、放出される中性子を検知するシステム仕様策定
- PCV内外の中性子線量分布解析結果に基づき、PCV内設置を前提として
  - ・検出器選定 ( $^{10}\text{B}$ 比例計数管、原子炉用核分裂電離箱)
  - ・システム設計実施
  - ・システム試作、成立性確認試験

-  $^{10}\text{B}$ 比例計数管の耐 $\gamma$ 線試験、システム試験により成立性を評価 [産総研施設活用]

▶ H25年度で開発完了。水張り時の臨界検知性能を評価し、臨界管理手法に活用。



$\gamma$ 線照射時の $^{10}\text{B}$ 比例計数管の計数率変化



中性子による再臨界検知システム構成

## 2.3 炉内の再臨界検知技術の開発

### H25年度開発成果 [FP $\gamma$ 線による再臨界検知システム]

- ・検知時間短縮のため、監視対象核種として現行のXe-135に加えKr-87/88を測定可能とする。
- ・Kr-87/88は設置場所で濃度が大きく異なるため、条件毎に最適システム構成を検討
  - システム大型化と検出器数増加により、測定可能な見通しを得た。
- ・Kr-87/88測定時にもXe-135(従来測定核種)を同時に測定できることを確認
- ・感度向上の一方式である同時計数の効果を検証(下左図)
  - 条件によっては10%以上検出限界を改善できることを確認
- ・1F-1自発核分裂推定濃度に基づいて、推奨システム構成を検討(下右図)
  - ・水張り時間の短縮効果の評価
  - ・Kr/Xe比を用いた未臨界度推定法の検討
  - ・臨界管理手順への組み込み検討

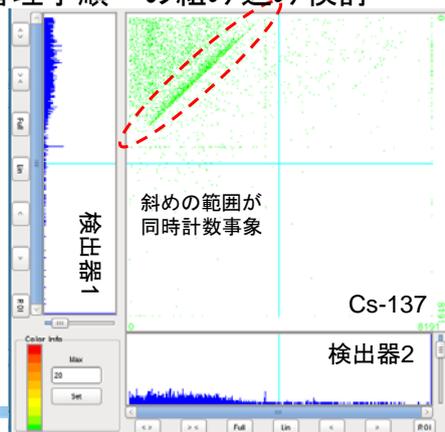


図 同時計数事象の二次元プロット

- ・40 L円筒形チェンバ  
H : 32.5 cm  
R : 21.0 cm
- ・チェンバ周囲を鉛遮へい
- ・Ge検出器2台をチェンバ内に配置

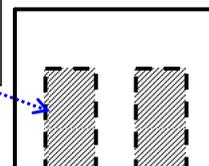
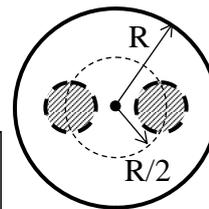


図 1F-1向け推奨チェンバ形状

## 2.4 臨界防止技術の開発

### 開発目標

- ・燃料デブリ取り出しの際に再臨界を防止するための手段として、溶解性および非溶解性の中性子吸収材を開発する。

### H25年度開発成果 [非溶解性中性子吸収材]

- ・候補案(吸収材、バインダ)の基礎的特性試験項目検討(次ページ)
- ・候補材の試作/調達。基礎的特性により燃料デブリ取り出し作業への適用性を評価(次ページ表)。基礎特性、機械的・熱的特性に課題はなく、溶出特性から候補材スクリーニング(次々ページ表)。
- ・今後の開発方針策定(耐放射線性確認試験計画立案)



耐放射線試験実施により第2次スクリーニング。デブリ取出し時の適用に向け、投入時の均一性担保のための適用工法を検討し、臨界管理手法に反映する。

### H25年度開発成果 [溶解性中性子吸収材]

- ・溶解性中性子吸収材(五ホウ酸ナトリウムなど)適用に伴う各種課題整理、検討計画立案
  - 炉内の材料健全性(耐食性)に及ぼす影響検討、ガルバニック腐食試験追加内容抽出
  - ほう素、塩素混入に伴う水の放射線分解による水素発生への影響確認のための放射線照射試験(JAEA高崎研におけるガンマ線照射試験)実施。影響は想定範囲内であることを確認。
  - 廃液処理手法における核種除去性能への影響、中性子吸収材の分離または回収方法の検討実施



追加腐食試験を実施し、溶解性吸収材適用方法を決定し、臨界管理手法へ反映  
燃料デブリ収納缶などへの影響評価



## 2.4 臨界防止技術の開発

### 中性子吸収材への要求項目

要求項目	要求仕様	評価項目
中性子吸収能力が高いこと	B, Gd, Dyなど吸収断面積の大きな元素を含む固体 吸収断面積の大きな元素の密度が高い物質	核的特性 単位体積当りの吸収物質の体積
運用性が高いこと	臨界に易い粒径のデブリに混合しやすい形状、密度	密度 機械的特性 粘度
容易に流出・減損しないこと	比重が1以上で、流出・溶出しにくい大きさ 熱や放射線で分解しにくい物質	密度 溶出特性 粘度 耐熱特性 耐放射線性能
施工が容易であること	加工しやすくRPV, PCVIに投入しやすい大きさ	密度 液層厚さ 沈降性 機械的特性 粘度
デブリ冷却を阻害しないこと	デブリ冷却を阻害しない高い熱伝導率	熱伝導率 比熱・熱容量
水質環境への悪影響がないこと	溶解度が小さく、溶け出しにくい	溶出特性
材料への化学的影響が小さいこと	水質環境下で、化学的に安定であること	溶出特性 pH
材料への機械的影響が小さいこと	流動しにくく、材料に損傷を与えないこと	密度 機械的特性
フィルタへの悪影響がないこと	廃液処理・冷却系に流出しにくい大きさ、密度 配管系の隙間に蓄積しにくい大きさ フィルタで目詰まりしにくい大きさ	密度 中性子吸収材サイズ 密度 中性子吸収材サイズ 密度 中性子吸収材サイズ
デブリ取出への悪影響がないこと	デブリの掘削等の機器に影響を与えない硬度、若しくは、サイズであること	密度 機械的特性
作業員に対する安全性	毒性がない物質	
廃棄の容易性	デブリとともに回収できる物質	
低コスト	安く入手できる物質(廉価性) 製造が容易な物質(製造性)	



Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>粒子



スラリー/Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>粒子



セメント/Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>粒子(硬化前)

図 非溶解性中性子吸収材候補材例

### 性能評価のための試験項目

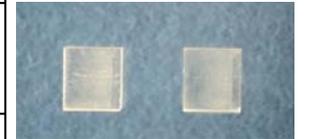
評価項目	測定項目	評価方法	条件	材 料						備 考		
				固 体		液体-固体		液 体				
				B4C/SUS	約珪酸ガラス	G203 粒子	セメント	水ガラス	高分子(塗料)	ゲル	スラリー	
基本特性	密度・比重	アルキメデス法など		○	○	○	○	○	○	○	○	ホウ珪酸ガラスは固体で取得
	単位体積、質量当りの吸収物質の体積	吸収材単位体積中のボロンB、ガドリニウムGdの密度、もしくは熱中子吸収断面積など		○	○	-	○	○	○	○	○	
	粘度	回転粘度計、レオメータなど		-	-	-	-	-	-	○	○	参考温度:室温、80℃ 粘度の合格指標は検討中
機械的・熱的特性	熱伝導率	熱伝導率測定、解析・計算評価など	環境:大気圧 温度:室温	○	○	注1	○	○	○	○	○	塗料はH26年度(2014年度)以降に計画 (注1)カタログ値を採用
	比熱	DSC、解析・計算評価など	環境:大気圧 温度:室温	○	○	注1	○	○	○	○	○	(注1)カタログ値を採用
溶出特性	分解物重量(固相) 溶出物重量(液相)	水中浸漬試験、溶出物分析、pHなど	温度:室温~140℃ 時間:24~240h	○	○	○	○	○	○	○	○	浸漬試験は高圧海中、80℃/72hを共通条件とする。他の条件については各候補材の仕様
耐放射線能	劣化特性	γ線照射試験	放射線種類、強度、照射時間、温度	○	○	○	○	○	○	○	○	H26年度(2014年度)に計画
核的特性	反応度係数	臨界試験		○	○	○	○	○	○	○	○	H27年度(2015年度)に計画

溶出特性を踏まえた候補材スクリーニング結果

カテゴリ	中性子吸収材候補	耐放射線性能試験	方針
固体	B <sub>4</sub> C/金属焼結材	実施	必要に応じて、コスト等を踏まえて基材金属を選定
	B、Gd入ガラス材	実施	溶出量の小さい亜鉛ホウ酸ガラスを選定
	中空ボロン	保留*	溶出特性の改善が必要 (特定工法(水中漂流)の候補材)
	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 粒子	実施	
液体→固体	セメント/ Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 粒子	実施	
	水ガラス/ Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 粒子	保留*	溶出特性の改善が必要
液体	B <sub>4</sub> Cゲル材	保留*	溶出特性の改善が必要
	スラリー/ Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 粒子	実施	

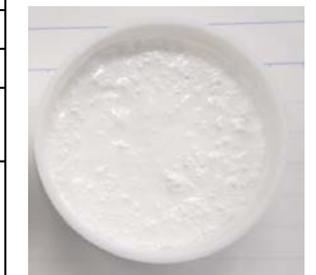


B<sub>4</sub>C/金属焼結材



B・Gd入りガラス

10mm



スラリー/Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>粒子

保留\*: 特性改善が示された上で、耐放射線性能試験実施を判断

図 選定候補材例

3. 内外観智の活用 / 中・長期的な人材育成

・内外観智の活用

- 国内外の学会などで発表・論文投稿を行い、技術開発の成果を発表するとともに、内外の有識者の意見を得る。

実施 ・日本原子力学会 2014春の年会(H26/3月): 4件口頭発表

準備中 ・国際学会PHYSOR2014(H26/9月): 1件口頭発表

・国際学会WRFPM2014(H26/9月): 1件発表

・日本原子力学会 2014秋の年会(H26/9月): 1件口頭発表

- 検出器等を実績/経験を有する海外メーカーより調達

・仏国CANBERRA社(未臨界モニタ用中性子検出器)

-IRIDにおける「炉内状況・燃料デブリ性状把握に関わる専門部会」にて、進捗状況報告(2月4日開催)及び海外調査結果の概要、課題等の成果報告(6月6日開催)し、客観的評価を受けると共に、技術的なアドバイスを得た。得られたコメントやアドバイスは、今後の研究開発活動に役立てる。

・中・長期的な人材育成

- 大学・研究機関へ研究委託を行い、若手技術者育成に寄与

・京都大学原子炉実験所 (廃液処理・冷却設備未臨界モニタ成立性確認試験)

**臨界評価:**

- ロードマップ上の各工程における臨界シナリオ作成完了、コンクリートとの相互反応も含めた臨界評価実施、再臨界に至る可能性のある状態変化を整理完了
- 臨界時挙動評価モデル改良(熱水力モデル、FP生成量評価モデル)により、臨界時挙動評価モデルを高度化し、臨界管理手法策定のための準備を整えた。

**廃液処理・冷却設備の未臨界管理技術:**

- 未臨界監視システムの試作、臨界近接試験によりシステムの成立性を確認(開発完了)
- 未臨界度監視に適用可能な炉雑音法を確認

**炉内の再臨界検知技術:**

- 中性子による再臨界検知システムのシステム成立評価実施(開発完了)
- FP $\gamma$ 線による再臨界検知システム応答速度向上手法の適用性評価

**臨界防止技術:**

- 非溶解性中性子吸収材候補材の基礎的物性に基づくスクリーニング実施、開発計画策定
- 溶解性中性子吸収材適用時の課題整理し、腐食試験追加等の必要な検討項目抽出

**H26年度計画**

- ・臨界シナリオ、臨界評価の成果を活用し、工法検討と連携して、PCV水張り、燃料デブリ取出し時の臨界管理手法を策定
- ・臨界抑制のためのボロン投入時の挙動評価、被ばく量評価モデルを開発し、臨界管理手法策定に活用
- ・炉内再臨界検知システム成果を臨界管理手法策定に活用するとともに、合理的な臨界管理のために炉内臨界近接検知システムの開発に着手
- ・非溶解性吸収材の耐放射線試験により第2次スクリーニング、適用工法検討  
追加腐食試験により溶解性吸収材適用方法を決定し、臨界管理手法へ反映