### IRID

# 平成27年度補正予算 「廃炉・汚染水対策事業費補助金 (燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発)」 平成29年度実施分報告

#### 平成30年6月

#### 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構(IRID)

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 <u>目次</u>

- 1. 研究の背景・目的
- 2. 研究の目標
- 3. 実施項目とその関連、他研究開発との関連
- 4. 実施スケジュール
- 5. 実施体制図
- 6. 実施内容
- 6.1.輸送・貯蔵に係る調査及び研究計画立案
- 6.2.燃料デブリ収納缶の移送・保管に係る安全要件・仕様及び保管システムの検討
- 6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証
- 6.4.燃料デブリの収納形式の検討
- 7. 全体まとめ
- 【補足-1】アウトプットの位置づけ

### 1. 研究の背景・目的

1.1.背景

福島第一原子力発電所(1F)の廃止措置に向けて取り出される燃料デブリを安全かつ合理的に収納・移送・保 管する技術が求められている。

燃料デブリには核燃料物質が含まれているため、特に放射性物質の閉じ込め(汚染拡大防止)、未臨界等に配 慮した取扱いを行う必要がある。

米国スリーマイルアイランド原子力発電所2号機(TMI-2)の廃止措置では回収した燃料デブリを専用の容器(収納缶)に収納して収納缶単位で取扱うことで、既存の使用済燃料の移送・保管技術や放射性廃棄物管理技術 を活用して放射性物質の閉じ込め他の要求を合理的に達成した事例がある等、個々の実情に合った収納缶を 開発することで従来技術を有効活用する手法は合理的と考えられる。1Fにおいても同様の考え方に基づき、 収納缶を中心に開発することとした。

TMI-2と比較して1Fではプラントの型式が異なることに加えて、事故初期の海水注入や溶融した炉心が原子炉 圧力容器下部のペデスタルに到達している等、収納缶に要求される条件はより複雑/高度となるため、燃料デ ブリを安全かつ合理的に収納・移送・保管するには1F向けに専用の収納缶を開発する必要がある。

これまでの検討では要素技術の検討を進めて収納缶の基本設計を行ったが、事故後の1Fに関する情報が限 られていることや、高線量廃棄物を含めた物量など1F廃炉工事の全体の最適化の観点から、収納缶設計条件 を設定し、知見の更新を踏まえて都度反映することが重要である。

1.2.目的

本事業は、IRIDの関連PJから本PJへ提供される情報や要求条件(インプット条件)、本PJから関連PJへ提供す る情報や要求条件(アウトプット条件)を関連PJと連携して調整・設定することで1Fの実情に適合した燃料デブ リ収納缶及び収納缶取扱い技術を開発する。

# 1. 研究の背景・目的

### (補足)先行事例との比較

先行して炉心溶融事故で生じた燃料デブリの収納・移送・保管を成し遂げたTMI-2の経験は大きな参考となるが、1Fとは下記の相違がある。

- 1F燃料デブリは原子炉圧力容器から格納容器内部のペデスタル部に分布している。
  - ⇒ コンクリートとの反応(MCCI)生成物や回収時にコンクリートへの付着考慮が必要である。
  - ✓ コンクリート中のアルカリ成分の考慮も必要である。
- ・ 1F炉内へ海水注入がなされた。
   ✓ 燃料デブリ中の塩分(塩素)が残留していることを考慮する必要がある。
- ・ 建屋損壊に伴う作業環境の厳しさ、RPV、PCVの損傷の可能性がある。
  - ⇒ 燃料デブリの気中-横アクセス工法等、冠水-上アクセス工法以外からの回収が検討されている。
  - ✓ <u>気中-横アクセス工法等、冠水-上アクセス工法以外の取扱い方法に対応した検討(燃料デブリ収納</u> <u>缶設計、収納缶取扱い技術など)が必要である。</u>
- 濃縮度が高い。
  - ⇒ 未臨界維持のため収納缶内径が小さくなる。収納缶同士の密接配置が難しい。
  - ✓ <u>燃料デブリの回収/収納に適した作業性や保管面積を小さくする配慮が重要である。</u>
  - ⇒ 燃料デブリ取り出し時の再臨界リスクの考慮が必要である。
  - ✓ 燃料デブリ取り出し時に中性子吸収材が添加される可能性も考慮する必要がある。
- 燃焼度(線源強度)が高い。
  - 水分の放射線分解による水素発生量増加に対する対策が必要である。
- ・ 燃料デブリの物量大
  - ✓ <u>燃料デブリの回収・収納に適した作業性や保管面積を小さくする配慮が重要である。</u>



# 2. 研究の目標

2.1. プロジェクト全体の目標

平成33年の燃料デブリ取り出しを想定し、燃料デブリの安全かつ合理的な収納・移送・保管方法を確立する。

2.2.平成30年度末の目標

本事業は、安全かつ合理的な燃料デブリの収納・移送・保管の目途付けを目的とし、平成27~28年度において 主に安全設計の観点から設定した収納缶仕様を、燃料デブリ取り出し工法や移送作業等の観点から評価、 改良するとともに、試験等による検証を行うことで収納缶仕様(プロトタイプ)を設定する。

(残された課題)

これまでの検討の結果、以下の課題が残されており対応が必要である。

(1)安全かつ合理的に収納・移送・保管する観点からの最適化

- 従前の技術開発では、TMI-2等の事例を参考に、安全評価の観点から課題を抽出し、有識者の意見を踏まえ て検討条件を仮定し収納缶仕様の暫定案、複数の保管方法の提案を行った。しかしながら、取り出された 燃料デブリを円滑に保管するため処理能力や設備の合理性の観点からの最適化が必要である。 また、燃料デブリの性状等、仮定を超える可能性に対して運営面/設備面等の観点から合理的な対応策の
- 立案が必要である。 (⇒次ページの実施項目(1)、(2)にて検討する。)

(2)安全性に対するシステムを考慮した検証

従前の技術開発では、収納缶や移送・保管システムの基本設計をまとめる観点から、要素試験を中心とした 検証を行っているが、システムとしての検証が必要である。また、一部の試験では従前の知見に追加した検証 が必要である。 (⇒次ページの実施項目(3)にて検討する。)

(3)水処理や気体処理の過程で回収される燃料デブリに対する処置

従前の技術開発では、装置で回収される塊状、粒状、粉状燃料デブリを対象としてきたが、燃料デブリ取り出し付帯設備の水処理や気体処理からも燃料デブリが回収されることからこれらを収納すべく対応が必要である。(⇒次ページの実施項目(4)にて検討する。)



# 3. 実施項目とその関連、他研究開発との関連

#### **No.5**

#### 3.1.実施項目

平成31年度からのモックアップ試験用収納缶プロトタイプの試作やモックアップ試験による安全性や取扱いの 最終的な検証に向けて以下を行う。

#### (1) 輸送・貯蔵に係る調査及び研究計画立案

関連PJや現場の最新状況・知見の収集、既入手情報に基づき海外の安全に関わる技術要件等の追加分析・整理を行い、IRID内の有識者意見も交えて研究計画に反映する。なお、さらなる情報が必要となった場合には、海外の技術者とのワークショップ等の開催など、追加の調査を行う。

#### (2) 燃料デブリ収納缶の移送・保管に係る安全要件・仕様及び保管システムの検討

収納缶による燃料デブリを安全かつ合理的に移送・保管する観点から前提となる移送容器、保管施設の安全上の技術要件を導出する。また、各作業の処理能力等を評価し取扱いフローや移送・保管システムに対する要求仕様に反映する。さらに、収納缶の取扱装置の仕様に反映する。

#### (3)安全評価手法の開発及び安全性検証

(2)(4)の検討を踏まえて解析や収納缶の部分モデル等による安全検証を行い、収納缶や移送・保管システムの成立性を確認する。

#### (4) 燃料デブリの収納形式の検討

(2)の検討を踏まえて安全かつ合理的に移送・保管する観点から関連する技術開発と連携して燃料デブリ取り出し工法・燃料デブリの性状に対応した収納方法を設定し収納缶各部位の仕様に反映する。



### 3. 実施項目とその関連、他研究開発との関連 本研究開発の位置づけ



# 3. 実施項目とその関連、他研究開発との関連

#### 3.2.実施項目の関連性(1/2)

平成33(2021)年中の初号機の燃料デブリの取り出しを想定し、以下の工程で開発する。



# 3.2.実施項目とその関連、他研究開発との関連 3.2.実施項目の関連性(2/2)



共有・連携して調整することで整合が取れた成果を得る。





#### 燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発

				_	-	-	平成2	9年度		-	-	-	
		4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
1	輸送・貯蔵に係る調査及び研究計画立案	他の研究開	発成果の分	析/海外の	安全要件の	評価 †画の詳細(	Ł						
2	燃料デブリ収納缶の移送・保管に係る安							ľ					
	全要件・仕様及び保管に係る安全要件・ 仕様の変更			安全要	車件検討								
	(1)移送・保管に係る安全要件・仕様の					11.					►+⇔=⊥«+ ⊞ □	5 n. <del>h.</del>	
	設定 (2)保管システムの検討					115			1		0 使討 結 未 /	、快	
				湿式/乾式	保管手法の	技術要件整	理(平成30年	度も継続)					
	(3)保管方式の検討			<u>д</u> "	+ <b>⇔</b> ≡ 4								
	(4)乾燥システムの検討			余竹	快討				モデル作成			乾燥要領検	討
	(5)取扱装置の仕様の検討・目前							工法	他の検討結	果反映			
-				水分量測定	技術に関す	る調査				水分量制限	の適用性検	寸	
3	安全評価手法の開発及ひ安全性検証 (1)未臨界の安全性検証					未臨界条	件サーベイ		1				
	(2)楼告始度の安全性徐証			蓋部他の	要求事項導出	Ľ		蓋	構造試験体	の材料手配	平成30年度	の試験に使	用)
	(2) 構造強度の女主に快証								実機	大収納缶に。	よる試験計画	策定	
	(3)経年劣化に関わる安全性検証			SCC条件机	貢討				s	ccへの影響	検討		
	(4)水素ガス対策の安全性検証		4		┍囲╈┎譝ᅔ				運用を	含めた腐食	対策最適化	(平成30年月	€も継続)
	発生量の検証		3	α−細の反応						γ線照	射試験		
	ᄵᅶᆂᆋᄷᇫᄻᆕ							使用	<u> </u> 猪燃料を用し	れた水素評価	訪験(平成	80年度も継絡	売)
	(5)水素対束の検証			理用面から 	の対応束検	高 <b>了</b>			Ι Ι Ι	幼年内法制	はたの検討		
4	燃料デブリの収納形式の検討								1 42				
	(1)燃料デブリ性状に合わせた 収納缶仕様の検討							-	燃料テ	ブリ性状に <sup>.</sup>	合わせた収得	内缶検討	
	(2)収納缶設計の見直し									収納缶	仕様の見直	し(平成30年	=度も継続)
	報告会/発表等					学	会発表 報↔	告会					報告会



©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

### 5. 実施体制図 (平成30年3月末現在)







- 6.1.輸送・貯蔵に係る調査及び研究計画立案
  - (1)他の技術開発の最新知見の収集
  - (2)海外知見の分析
  - (3)研究計画立案
- 6.2.燃料デブリ収納缶の移送・保管に係る安全要件・仕様及び保管システムの検討
  - (1)燃料デブリ収納缶の移送・保管に係る安全要件・仕様の設定
  - (2)保管システムの検討
  - (3)保管方式の検討
  - (4)乾燥システムの検討
  - (5) 取扱装置の仕様の検討・見直し
- 6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証
  - (1) 未臨界の安全性検証
  - (2)構造強度の安全性検証:蓋構造の検討
  - (3) 経年劣化に関わる安全性検証: 収納缶材料の検討
  - (4)水素ガス対策の安全性検証

#### a.発生量の検証

- b.水素対策の検証
- 6.4.燃料デブリの収納形式の検討
  - (1) 燃料デブリ性状に合わせた収納缶仕様の検討
  - (2) 収納缶設計の見直し



#### 6.1.輸送・貯蔵に係る調査及び研究計画立案

- (1) 関連する技術開発の最新知見の収集
  - 6.2.「燃料デブリ収納缶の移送・保管に係る安全要件・仕様及び保管システムの検討」において取り出された 燃料デブリの保管までのフロー策定にあたり工法PJ、基盤PJ、廃棄物PJ並びにIRID外部の計量管理の 専門家との合同会議により情報交換を実施し、最新知見(燃料デブリ取り出し工法からの制約条件、燃料デ ブリの物量、燃料デブリの計量管理方策等)を収集し反映した。

#### (2)海外知見の分析

- 6.2.「燃料デブリ収納缶の移送・保管に係る安全要件・仕様及び保管システムの検討」の安全要件設定にあたりTMI-2の事例を参考にした。
- また、6.4.「燃料デブリの収納形式の検討」において収納缶蓋形状等の検討実施にあたり、国内事例 (日本原燃㈱)再処理事業所廃棄物管理施設)について、許認可申請書を入手し参考にした。

#### (3)研究計画立案

研究立案として4.「実施スケジュール」を策定するとともに6.2.(2)「保管システムの検討」の議論や個別テーマ ごとに専門家の意見等を踏まえて見直しを行った。

6.2.燃料デブリ収納缶の移送・保管に係る安全要件・仕様及び保管システムの検討 (1)燃料デブリ収納缶の移送・保管に係る安全要件・仕様の設定

①目的/概要

燃料デブリの移送・保管システムを設計する上での要求事項を明確化する観点から、基本的な安全思想を共有する燃料デブリ 取り出し時の安全要求案を基に、核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律とその関連法規から使用済燃料の 取扱いや保管に関わる要求事項も参考しつつ、以下の観点から安全要求案を策定した。

・基本要求	
施設の安全性を損なうことのないように放射性物質の漏えい防止	核原料物質、核燃料物質及び原ナ炉の規制に関する法律
機能等の必要な機能を有する	
•外部事象•人的事象	核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に
地震、津波等の外部事象による損傷の防止、人の不法侵入等の防止	正   関する規則
・設計基準施設への一般設計要求	
環境条件・信頼性等の安全施設における設計上の考慮、誤操作防止	止、     使用済燃料貯蔵施設の性能に係る技術基準に関する
全交流電源喪失対策設備、異常時の運転操作保証 等	規則
・対象施設への個別設計要求	
放射性物質の漏えい防止、収納缶及び収納缶取扱い施設の健全性約	維持、
臨界管理、燃料デブリ冷却、火災・爆発防止等	
●作業員被ばく ] 神ばく組骨を可能な阻し低減 低く促つ	国外の成則
・公衆被ばく 」 (物は、緑重を可能な限り低減、低、休り	
・収納缶移送および保管作業	美田光竜田原ナ炉及びての附属施設の恒直、構道及
設計上要求される制約を逸脱した作業・操作が行われないよう管理	し設備の基準に関する規則
・設計基準事故(DBA)の拡大防止	
放射性物質の漏えい、再臨界等を引き起こす事故事象を抽出し、事象	· <b>象</b> 東京電力株式会社福島第一原子力発電所原子炉施設
発生時に拡大防止を行い、判断基準を満足する適切な対策をとる	の保安及び特定核燃料物質の防護に関する規則
•法令	
②今後の予定	使田済燃料貯蔵施設の設計及び工事の方法の技術其
○ 7 000 1 ~ 今回第定 た安全要求家を具体的な設計要求とすることが理解	
の7、総合フィリ取7山し时の一女王女不の使的と建筑しなから	で、ほう、ほう 図 検討にあたり特に参考とした法令類
田府燃料の  休官他設寺の安米事項も剐条し(具体化を進め)	

6.2.燃料デブリ収納缶の移送・保管に係る安全要件・仕様及び保管システムの検討 (2)保管システムの検討(1/13)

①目的

従来、安全要求の観点から移送・保管システムの設計に必要となる安全評価手法を重点的に検討を進めて きたが、これら施設を具体化するには処理能力(スループット)等の運営等の観点からの要望/要求も踏まえ る必要がある。そこで、これらの要望/要求を具体化することを目的に、IRID内の関連PJや有識者の意見を 踏まえて燃料デブリの保管までのプロセスフローを仮設定した。また、スループット検討の前提となる物量の 検討の作業中である。

②今後の予定

仮設定したフロー、物量に基づいて関連PJにて妥当性を仮評価し、収納缶や移送保管システムへの要求事 項を具体化する。



6.2.燃料デブリ収納缶の移送・保管に係る安全要件・仕様及び保管システムの検討 (2)保管システムの検討(2/13)

プロセスフローの設定

プロセスフロー設定にあたり基本的なバウンダリ(閉じ込め境界)の考え方、安全機能分担等について再確認した。



IRID

図 1Fでの収納缶の取扱い(気中-横アクセス工法の例)

6.2.燃料デブリ収納缶の移送・保管に係る安全要件・仕様及び保管システムの検討 (2)保管システムの検討(3/13)

プロセスフローの設定

前述のシステムの安全設計の基本的な考え方に基づき、安全性を担保する観点からIRID内の工法PJ、廃棄 物PJ等や有識者との意見交換を行いフローを仮定した。なお、仕分け、湿式(プール)保管等のプロセスで必要 となる可能性のあるフローは複数並行で抽出した。

No.16



No.	[1]	[2]	[3]	[•	4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9	Ð	シナリオ分岐A	シナリオ分岐B
取扱物	空収納缶	収納缶蓋	空ユニット缶	空収納缶	空ユニット缶	排出物	排出物	燃料デブリ	ユニット缶	収納缶	ユニット缶	【分岐内容】	【分岐内容】
作業内容·目的	燃料デブリを収納す る空収納缶を、燃 料デブリ取り出し収 納セルの所定位置 まで受入れる。	燃料デブリの収納に 向けて、空収納缶 の蓋を開放する。	燃料デブリを充填す る空ユニット缶を空 収納缶から取り出 す。	排出物を充填・」 収納缶、又はユ ブリ取り出し収納 ル内に搬入し、見 させる。	収納するため、空 ニット缶を燃料デ 」セルからペデスタ 所定位置で待機	排出物を収納缶、 又はユニット缶に充 填可能な形状・寸 法に切削・加工す る。	切削・加工した排 出物を燃料デブリと 廃棄物に仕分け る。	燃料デブリを回収 し、空収納缶、又は ユニット缶に充填す る。	水素発生量低減や乾燥処理の初期条件緩和等のために、燃料デ ブリ回収・充填時の同 伴水を低減させる。	燃料デブリを充填 はユニット缶を、/ 料デブリ取り出し 出する。	した収納缶、又 ペデスタル外の燃 収納セルまで搬	い約111を直接ペデスタル 内に搬入 or ユニット缶を ペデスタル内に搬入	臨界可能性の有無で排出物 を取り出し現場で燃料デブリ/ 廃棄物に仕分ける or 排出物 の存在エリアで燃料デブリと廃 棄物を予め分類しておき、取り 出し現場では仕分けない。

図 プロセスフロー例:燃料デブリ取り出し~ユニット缶への収納(工法PJにて詳細検討中)

6.2.燃料デブリ収納缶の移送・保管に係る安全要件・仕様及び保管システムの検討 (2)保管システムの検討(4/13)



No.	[10]	[11]	[12]	[13]	[14]	[15]
取扱物	ユニット缶	ユニット缶	収納缶	収納缶	収納缶	収納缶
作業内容・目的	水素発生量、(配列時の) 臨界リスク、腐食リスク等の低 減の観点から、ユニット缶の状 態で早期に同伴水を乾燥さ せ、水分量を低減する。	ユニット缶を収納缶に装荷す る。	収納缶の蓋を閉止する。	洗浄後の収納缶表面の汚染 の有無を確認する。 汚染が確認された場合、除染 する。	収納缶の蓋を閉止する。	収納缶表面を洗浄し、汚染 拡大を防止する。

シナリオ分岐C
【分岐内容】
ユニット缶の状態で乾燥処理を行う or 行わない。

No.17

図 プロセスフロー例:ユニット缶の収納缶への収納~蓋締め



# 6.2.燃料デブリ収納缶の移送・保管に係る安全要件・仕様及び保管システムの検討 (2)保管システムの検討(5/13)



No.	【16】	【17】	[18]	【19】	[20]	[21]	[22]	[23]	シナリオ分岐D	シナリオ分岐E
取扱物	収納缶	収納缶	収納缶	収納缶	密封容器蓋	密封容器	空密封容器	密封容器蓋	【分岐内容】	【分岐内容】
作業内容•目的	水素発生量、(配列) 時の)臨界リスク、腐 食リスク等の低減の観 点から、同伴水を乾燥 させ、水分量を低減す る。	保管施設への払出にあた り、個々の収納缶の状態・ データの収集・紐付のため に、確認(質量測定、表 面線量率測定、外観確認 (収納缶IDの確認含 む))を実施する。	保管施設までの移送 時に、収納缶内の水素 濃度が、規定時間内に 爆発下限界に達しない ことを確認するため、水 素発生量を実測する。	収納缶を密封容器 に装荷する。	密封容器の蓋を閉 止する。	収納缶装荷後の密封 容器表面の汚染の有 無を確認する。 汚染が確認された場 合、除染する。	容器における燃料デブ リ(ガス含む)の閉じ 込め性を早期に確保す るために、収納缶を密 封する空密封容器を 所定位置まで受入れ る。	収納缶の密封に向 けて、空密封容器 の蓋を開放する。	収納缶の払出前に、乾燥処理を 行う or 行わない。	収納缶を機能を分担させた2つの容器(密封 容器 + 遮蔽容器)に2重に収納する or 収納 缶を移送容器(蓋だけ2重)のみに収納する。

図 プロセスフロー例:蓋締めされた収納缶の確認~収納缶の移送準備



# 6.2.燃料デブリ収納缶の移送・保管に係る安全要件・仕様及び保管システムの検討 (2)保管システムの検討(6/13)



No.	[2	4]	[2	5]	[2	26]	[2	27]	[28]	[2	9]	[3	0]
取扱物	空移送容器	空遮蔽容器	移送容器蓋	遮蔽容器蓋	収納缶	密封容器	移送容器蓋	遮蔽容器蓋	移送容器	移送容器	遮蔽容器	移送容器	遮蔽容器
作業内容・目的	収納缶/密封容器 送にあたり、外部運動 遮蔽容器を所定位	・ の保管施設への搬 般用の移送容器/ 置に受入れる。	収納缶/密封容器 容器に装荷するにあ 放する。 (移送容器は、一次 の蓋を開放する。)	を移送容器/遮蔽 たり、容器の蓋を開 マ蓋/二次蓋の2つ	収納缶/密封容器 容器に所定数装荷	を移送容器/遮蔽 する。	所定数の収納缶/ 完了した移送容器, 止する。 (移送容器は、一) の蓋を閉止する。)	密封容器の装荷が /遮蔽容器の蓋を閉 欠蓋/二次蓋の2つ	払出しにあたり、移 送容器単位で水素 発生量を実測し、 規定時間内に水素 濃度が爆発下限界 に達しないことを確 認する。	1F構内を運搬する。 ないか、確認(閉じ 染確認・除染、表面 確認(ID確認含む	とで、容器に問題が 込め確認、表面汚 1線量率測定、外観 ))を行う。	移送容器/遮蔽容 載・固縛する。	器を運搬車両に積

図 プロセスフロー例:収納缶の装荷~移送容器の払出準備





#### 6.2.燃料デブリ収納缶の移送・保管に係る安全要件・仕様及び保管システムの検討 (2)保管システムの検討(7/13)



No.	(3	31]	[32	2]	[3	33]	[34]	[	35]	[36]		シナリオ分岐F
取扱物	移送容器	遮蔽容器	移送容器	遮蔽容器	移送容器	遮蔽容器	移送容器	移送容器蓋	遮蔽容器蓋	収納缶	密封容器	【分岐内容】
作業内容・目的	移送車両に積載され /遮蔽容器を乾式 る。	れた状態の移送容器 保管施設に受入れ	移送車両から移送容 所定の位置に下ろす。	器/遮蔽容器を、 。	受入れた移送容器 がないか、確認(表 染、表面線量率測 確認含む))を実	・ /遮蔽容器に問題 気面汚染確認・除 定、外観確認(ID 施する。	移送容器の蓋開放にあた り、移送容器内の水素濃 度を測定し、爆発下限界 に達していないことを確認す る。	移送容器/遮蔽容 (移送容器は、一 の蓋を開放する。)	- 7器の蓋を開放する。 欠蓋/二次蓋の2つ	移送容器/遮蔽容 封容器を取り出す。	、 器から、収納缶/密	一時的な湿式保管を実施する or 実施しない。

図 プロセスフロー例:構内移送~収納缶の乾式保管施設受入~収納缶の取出し



#### 6.実施内容 6.2.燃料デブリ収納缶の移送・保管に係る安全要件・仕様及び保管システムの検討 (2)保管システムの検討(8/13)



No.	[37]	[38]	[39]	[40]	[41]	[42]	[43]	[44]	シナリオ分岐G
取扱物	収納缶	収納缶	収納缶	収納缶	密封容器	密封容器	密封容器蓋	収納缶	【分岐内容】
作業內容·目的	受入れた収納缶に問題がない か、確認(表面汚染確認・除 染、質量測定、表面線量率 測定、外観確認(ID確認含 む))を実施する。	湿式保管を経た収納缶につい て、乾燥処理の初期条件を可 能な限り緩和するため、収納 缶内の残水をドレン管から可 能な限り排出する。	水素発生量、腐食リスク等の 低減の観点から、収納缶内の 水分を乾燥除去する。	収納缶の保管にあたり、収納 缶に問題がないか、確認(質 量測定、表面汚染確認・除 染、表面線量率測定、外観 確認(ID確認含む))を実 施する。	受入れた密封容器表面の汚 染の有無を確認する。 汚染が確認された場合、除染 する。	密封容器の蓋開放に あたり、密封容器内の 水素濃度を測定し、爆 発下限界に達していな いことを確認する。	密封容器から収納缶を 取り出すため、密封容 器の蓋を開放する。	密封容器から収納缶を 取り出す。	湿式保管を経由 or 経由 していない。

図 プロセスフロー例:収納缶の受入確認~保管前確認



6.2.燃料デブリ収納缶の移送・保管に係る安全要件・仕様及び保管システムの検討 (2)保管システムの検討(9/13)



No.	[45]	[46]	[47]	[48]	[49]	[50]	[51]	[52]
取扱物	空金属キャスク	金属キャスク蓋	収納缶	金属キャスク蓋	金属キャスク	金属キャスク	金属キャスク	金属キャスク
作業内容·目的	収納缶の収納して長期保 管する空金属キャスクを所 定位置に受入れる。	収納缶の収納に向けて、 空金属キャスクの蓋を開放 する。	空金属キャスクに所定数の 収納缶を装荷する。	所定数の収納缶の装荷が 完了した金属キャスクの蓋 を閉止する。	金属キャスクが規定の閉じ 込め機能を満足しているこ とを確認する。	金属キャスク内のガスを管 理された状態で外部に放 出するためのベント配管を 金属キャスクに接続する。	金属キャスクに接続したべ ント管が、規定の閉じ込め 機能を満足していることを 確認する。	収納缶を安定した状態で金属 キャスク内に長期間保管する。

#### 図 プロセスフロー例:乾式保管準備~乾式保管



#### 6.2.燃料デブリ収納缶の移送・保管に係る安全要件・仕様及び保管システムの検討 (2)保管システムの検討(10/13)



No.	No. [53]		[54]		54] [55]		5] [56]		57]	[58	3]
取扱物	移送容器	遮蔽容器	移送容器	遮蔽容器	移送容器	遮蔽容器	移送容器	移送容器蓋	遮蔽容器蓋	収納缶	密封容器
作業内容・目的	移送車両に積載され /遮蔽容器を湿式( る。	れた状態の移送容器 保管施設に受入れ	移送車両から移送容 所定の位置に下ろす。	器/遮蔽容器を、 。	受入れた移送容器, がないか、確認(表 染、表面線量率測) 確認含む))を実カ	/遮蔽容器に問題 ・面汚染確認・除 定、外観確認(ID もする。	移送容器の蓋開放にあた り、移送容器内の水素濃 度を測定し、爆発下限界 に達していないことを確認す る。	移送容器/遮蔽容 (移送容器は、一) の蓋を開放する。)	器の蓋を開放する。 欠蓋/二次蓋の2つ	移送容器/遮蔽容器 封容器を取り出す。	器から、収納缶/密

#### 図 プロセスフロー例:構内移送~収納缶の湿式(プール)保管施設受入~収納缶の取り出し



No.23

SH-8

6.2.燃料デブリ収納缶の移送・保管に係る安全要件・仕様及び保管システムの検討 (2)保管システムの検討(11/13)



#### 図 プロセスフロー例:湿式保管準備~湿式保管





#### 6.2.燃料デブリ収納缶の移送・保管に係る安全要件・仕様及び保管システムの検討 (2)保管システムの検討(12/13)



No.	[62]	[63]	[64]	[65]	[66]	[67]	[68]	シナリオ分岐H
取扱物	収納缶	収納缶	収納缶	収納缶	収納缶	収納缶	収納缶	【分岐内容】
作業内容・目的	乾式保管への移行に向けて、 ブール内から収納缶を取り出 す。	水素発生量や漏えいリスクの 低減、乾燥処理における初期 条件緩和等のために、収納缶 内に存在する水をドレン管から 排出する。	汚染拡大を防止するため、収 納缶表面を洗浄する。	滴下による汚染拡大を防止す るため、収納缶表面に付着し ている水を乾燥させる。	水素発生量、(配列時の) 臨界リスク、腐食リスク等の低 減の観点から、収納缶表面及 び収納缶内の水を乾燥させ る。	乾式保管施設への払出にあたり、 個々の収納缶の状態・データの再収 集・再紐付のために、確認(質量測 定、表面汚染確認・除染、表面線 量率測定、外観確認(収納缶IDの 確認合む))を実施する。	乾式保管施設までの移送時 に、収納缶内の水素濃度が、 規定時間内に爆発下限界に 達しないことを確認するため、 水素発生量を実測する。	収納缶の払出前に、燃料デブリの乾燥 処理を行う or 行わない。

図 プロセスフロー例:湿式保管施設での収納缶取出し~搬出準備



6.2.燃料デブリ収納缶の移送・保管に係る安全要件・仕様及び保管システムの検討 (2)保管システムの検討(13/13)

仮設定したプロセスフローに基づき、成立するための課題等を抽出した。(下図は代表的な議論のテーマ)



図 原子炉格納容器底部 気中-横アクセスエ法の例



# 6.2.燃料デブリ収納缶の移送・保管に係る安全要件・仕様及び保管システムの検討

(3)保管方式の検討

ー例として、収納缶開発において考慮要否が未決定となっている一時保管(湿式保管)の判断フローをIRID内外有識者、工法 PJ、廃棄物PJとの合同会議でケーススタディし整理した。その結果、現時点で湿式保管は選択肢として必要となる可能性が あることから平成30年度も引き続き協議し具体化に取り組むこととした。



#### 6.2.燃料デブリ収納缶の移送・保管に係る安全要件・仕様及び保管システムの検討 (4)乾燥システムの検討(1/6)

①目的

燃料デブリの長期保管方法として乾式保管が合理的と考えられている。一方で、乾式保管には燃料デブリの乾燥法の確立 が必須である。本検討は乾燥システムの概念案設定のため、基本要件となるスループット確保と安全性(特にFP放出)を 考慮した乾燥方法を仮定することを目的とする。

②目標とした乾燥条件

#### 自由水除去を乾燥目標として設定した。

乾式保管は燃料デブリを乾燥して不活性雰囲気で保管することにより腐食等の経年劣化や水の放射線分解による水素発生 を抑制することに特徴があり、これらは燃料デブリに含まれる自由水を除去することでほぼ達成できる。なお、コンクリート (MCCI生成物等)に含まれる結晶水は、腐食の要因となる電池形成に寄与しないこと、既往研究で水素発生に寄与しない データが得られていることから対象外とした。

#### ③平成29年度の検討概要

- TMI-2で行った加熱真空乾燥だけでなく収納缶内をより高温に加熱する高温加熱乾燥、さらに高温に温風を吹込む温風乾燥 も検討した。
- •1Fでは作業性の観点から回収した燃料デブリをいったんユニット缶に収納したうえで収納缶に収納する方法で検討が進められており、収納缶を加熱しても燃料デブリに熱が伝わりにくいことが想定される。
- ユニット缶状態での乾燥は、直接加熱により短時間での乾燥が期待できる。技術開発としては収納缶での乾燥手法の検討の成果を流用できるため、現時点では検討対象とはしないこととした。



### 6.2.燃料デブリ収納缶の移送・保管に係る安全要件・仕様及び保管システムの検討

(4)乾燥システムの検討(2/6) ④考え方

(Ⅲ)減率乾燥期間 (Ⅱ)定率乾燥期間 (Ⅰ)予熱期間

No.29

#### 定率乾燥期間(右図の領域II)に着目して蒸発速度を試算

a.予熱期間(真空乾燥では減圧期間)(I):加熱により内部の水が沸騰し始める (真空乾燥では容器内の減圧で内部の水が沸騰し始める)期間 所要時間は入熱量と燃料デブリの熱容量で決定される。(真空乾燥では真空 ポンプの吐出能力と容器の容量で決定される。)

⇒期間は短いため、今回の検討では無視した。

- b.定率乾燥期間(II):沸騰が始まり乾燥は外部入熱量と蒸発潜熱が釣り合うよう進むため、含水率は時間に対して一定割合で減少する。 蒸発時間は残水量を蒸発速度で除すことで計算できる。
  - ⇒外部入熱量を伝熱モデルで模擬して試算した。(水分量を水切り試験より 燃料デブリ体積に対して30vol.%相当の水が同伴、収納効率を30vol.%、 燃料デブリの発熱ゼロと仮定)
- c.減率乾燥期間(III):狭隘部の水が気化、膨張して染み出す等、乾燥が物質 移動量に支配される。燃料デブリの形状(狭隘部の水の存在状態)が不明で あり、実物による検証がないと精緻化は難しい。定性的にはIIが短ければIII も短い。
  - ⇒デブリ性状把握PJの要素試験では期間が短いため無視した。なお試験規 模が小さいため短期間の結果となった可能性もあるため、今後の課題とし た。



図 デブリ代替材による乾燥特性 デブリ性状把握PJ 平成28年度検討成果より引用 注:グラフは右から左方向へ含水量が減少する(乾燥が進む) につれて乾燥速度が変動することを示している。



6.2.燃料デブリ収納缶の移送・保管に係る安全要件・仕様及び保管システムの検討 (4)乾燥システムの検討(3/6)

⑤評価手法

平成28年度の燃料デブリの水切り予備試験で、水切りしても燃料デブリ体積に対し10vol.%~50vol.%相当の水 分が残留する結果が得られており、加熱を前提に減圧や缶内を流動すること等のパラメータサーベイを行い、 乾燥速度を比較した。乾燥速度は、燃料デブリへの入熱量を水の蒸発潜熱で除して求めた。





6.2.燃料デブリ収納缶の移送・保管に係る安全要件・仕様及び保管システムの検討 (4)乾燥システムの検討(4/6)

#### ⑥検討ケース

- 以下を検討ケースとして設定した。
  - 加熱乾燥(基本ケース)

#### 加熱真空乾燥

#### 高温加熱乾燥

#### 高温加熱+温風乾燥

表 検討ケース条件一覧

条件一覧	単位	加熱乾燥 (基本ケース)	加熱真空乾燥	高温加熱乾燥	高温加熱+温風乾燥
収納缶温度	°C	120	120	300 <sup>注1</sup>	300
温風入口温度	°C	-	-	-	<b>300<sup>注1</sup></b>
燃料デブリ温度 (水の沸点と仮定)	°C	100	11 <sup>注2</sup>	100	100
収納缶内径	mm	220	220	220	220
温風流速	m/s	-	-	-	0.2

注1:TMI-2燃料デブリの乾燥に関する情報から暫定的に上限値として設定した値 注2:真空乾燥時圧力として10mmHgと仮定して設定した値(10mmHg圧力での水の沸点)



6.2.燃料デブリ収納缶の移送・保管に係る安全要件・仕様及び保管システムの検討 (4)乾燥システムの検討(5/6)

⑦評価結果

乾燥システム別の乾燥時間を比較した。

1.00							
	0.20						
		0.05	0.02				
加熱乾燥	加熱真空乾燥	<mark>高温</mark> 加熱乾燥	高温加熱+温風乾燥				
(基本ケース)	(減圧の効果) #キキlデブリ温度11℃ 10	収納缶温度を300℃に	収納缶温度を300℃				
	☆ヘギ) ノリ温度   C: Tomm∩ぃ   加勢	。加索した場合の効果 とした場合の乾燥時間のH	に加えて強制対抗の効果				
(基本ケース:燃料デブリ温度100℃(大気圧)、収納缶温度120℃、温風なしの所要時間)							
基本ケースで <b>φ220mm</b> Ø	)収納缶に燃料デブリを充填	率30%充填するとともに燃料	トデブリ体積に対して30vol.%				
の水を同伴した場合の所	「要時間(領域IIのみ)は約3日 要する可能性まする	日間となる。不確定性の大き	な領域IIIの所要期間を				
窓正9 るとこらに口致をき	<sub>を</sub> 9つり能性ものる。 に <b>其づく処理能力の試質結!</b>	里(108年/日を仮定)より	施設合理化や期間短縮				
は重要となる可能性が	があり、この場合、高温加熱	吃燥、高温加熱+温風乾燥(	は有効な乾燥方法である。				
IRID		©Inte	rnational Research Institute for Nuclear Decommissioning				

6.2.燃料デブリ収納缶の移送・保管に係る安全要件・仕様及び保管システムの検討 (4)乾燥システムの検討(6/6)

⑧まとめ

・乾燥を効率的に行うには、減圧も効果があるものの加熱と収納缶内への温風導入が効果的である。

9今後の予定

- スループット確保の効果が期待できるためTMI-2で実績のある加熱真空乾燥と併せて高温加熱乾燥 や高温加熱+温風乾燥も含めて検討を進める。
- a.デブリ性状把握PJで検討している燃料デブリ内の核種のFP挙動(化学形態/揮発性)の成果を取り込み、乾燥温度条件を設定する。
- b.乾燥システムの装置化の観点から加熱方法等を検討し、乾燥設備への仕様案を検討する。



#### 6.2.燃料デブリ収納缶の移送・保管に係る安全要件・仕様及び保管システムの検討 (5)取扱装置の仕様の検討・見直し

①目的

収納缶の取扱いとして、蓋締め、吊上げ等の工程があり、これらに用いる取扱装置は収納缶専用のものとなるこ とからシステム検討の一環として、収納缶の仕様と並行して取扱装置の基本仕様を決定する。

#### ②平成29年度の検討概要

- 現時点での6.3(2)蓋構造の検討を踏まえた取扱装置(蓋締め装置、収納缶吊具)の例を以下に示す。 ③今後の予定
- 並行して検討する処理能力の観点からの要求を踏まえつつ蓋構造の最新化に合わせて継続検討する。





- 6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証
- (1)未臨界の安全性検証(1/5)
- ①未臨界維持方策の検討
- 目的:収納缶内径拡大に必須である未臨界維持方策を選定するため、

内径拡大効果と安全評価の説明性の観点から実現性を評価する。

	燃料デブリ条件	収納缶内径		安全評価の説明性			
ベース	最厳条件 (約5wt%UO2 +水の最適減速状態)	-	_ ●約220mm (10mm厚SUS製)		・説明性は問題ない。		
No.	未臨界維持方策 (設計条件制限項目)	内径拡大効果(目標内径:400mm)			安全評価の説明性		
1	濃縮度低下	Δ	・現実的な濃縮度設定の範囲では400mmに到達不可 (約5wt%から2wt%程度までの内径拡大効果は小さく、 内径400mmとするためには約1.7wt%まで低減必要)	×	<ul> <li>・燃焼実績や燃料設計仕様を根拠に説明することは可能だが、</li> <li>設計条件として担保することが必要。効果が期待できるほどの低濃縮度は設計条件として担保することは困難。</li> <li>・燃焼を考慮した炉内の最高濃縮度は臨界管理PJの成果によるが、大幅な低減は見込めない予定。</li> </ul>		
2	燃料デブリへの 構造材の混入の可能性を考慮	0	<ul> <li>一定の効果はあるが、収納缶内の燃料デブリと構造</li> <li>材の混合率に依存</li> </ul>	×	<ul> <li>・燃料デブリへの構造材の混合率や分布状態を設計条件として担保することが必要</li> </ul>		
3	燃料デブリへの 炉内中性子吸収材(Gd/B4C) の混入の可能性を考慮	0	・内径拡大の効果は大きく、条件によって400mmに達 するが、収納缶内の燃料デブリと炉内中性子吸収材 の混合率に依存	×	・混合率や分布状態を設計条件として担保することが必要		
4	ホウ酸水投入	0	・内径拡大の効果は大きく、条件によって400mmに到 達可能	0	<ul> <li>・濃度や分布状態を設計条件として担保することが必要 (知見の有無、条件を調査する)</li> </ul>		
5	水分量制限	0	・一定の効果はあるが、収納缶内の燃料デブリと水の 分布条件に依存	0	<ul> <li>・1F燃料デブリ取り出し現場へ適用する場合、水分量測定技術により、含水率や水分量(残水量)を担保することが必要</li> <li>・乾燥処理した場合、水切りよりも残水量の低減は見込めるが、</li> <li>乾燥後の水分量の担保が必要</li> </ul>		
6	収納缶内部に 中性子吸収材敷設	0	<ul> <li>B-SUS板やB4C管敷設により収納缶内径を400mmに することは可能</li> </ul>	0	<ul> <li>・変形等の事故時の影響確認が必要になるが、基本的には設計条件として設定できるものであり、説明性あり</li> </ul>		
Ø	収納缶材料変更	Δ	<ul> <li>B-SUS製にすると、20~30mm程度の内径拡大は可能</li> </ul>	0	<ul> <li>・ラック材、バスケット材として使用実績は十分あり、説明性あり</li> </ul>		
【効果】	効果】△:400mmの可能性小、○:400mmの可能性中、◎:400mmの可能性大、【説明性】×:説明性なし、△:説明性小、○:説明性中、◎:説明性大						

中性子吸収材の適用は収納缶内径拡大と燃料デブリ再臨界防止に説明性や効果の点で有効である。 一方、水分量制限は簡便だが説明性に課題がある。 ⇒ 燃料デブリ水切りによる水分量制限を検討する。
6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(1)未臨界の安全性検証(2/5)

②燃料デブリ水分量制限の運用検討(水分量測定技術の調査)

目的:収納缶内径拡大等に水分量制限を適用するには、水切りだけでは臨界管理上の余裕が少なく計測による定量的な 担保が必須と判断、水分量測定技術を調査し1F燃料デブリ取り出しにおける現場への適用性を評価した。

	電気抵抗式	電気容量式	マイクロ波式	近赤外(光)式	中性子式	乾燥重量式	化学測定法
水分測定 原理	測定対象である絶縁物 または半導体に電極を 刺して通電し抵抗値か ら算出	測定対象に交流電圧を 印加し、電気容量の変 化から算出	測定対象物にマイクロ 波を照射し、その通過 前後のエネルギー量を 測定することにより算出	測定対象物に赤外光を 照射しその反射率を測 定することにより算出	測定対象物に高速中性 子を照射し、熱中性子 への変化量を測定する ことにより算出	測定対象物の乾燥前後 の重量を測定	水分測定の標準方法 測定対象物の水分と カールフィッシャ試薬で 滴定し、遊離ヨウ素によ る分極電圧が急激に変 化する滴定量から測定
主な用途 (適用例)	木材、建材、砂・砂利	建材、紙、気体、液体	木材、建材、砂·砂利、 食品、汚泥、粉体	食品、鉱物、薬品、小 麦粉、汚泥	鉱石、焼結原料、コーク ス、砂、コンクリート	食品、木材、石炭、⊐一 クス、鉱石	食品、油脂、製薬・医薬 品
燃料デブリへ の適用性	以下の理由から適用性 なしと判断 > 燃料デブリに構造材 の金属(導電物)が 混入している可能性 が高く、測定不可 > ユニット缶(鋼製容 器)を介しての測定と なり、高精度の測定 が困難	電気抵抗式と同様の理 由から適用性なしと判 断	電気抵抗式と同様の理 由から適用性なしと判 断	以下の理由から適用性 なしと判断 > 測定対象物の表面し か測定できず、燃料 デブリ内部や、積み 重なった燃料デブリ の水分測定不可	以下の理由から適用性 なしと判断 > 燃料デブリの組成に より測定値が大きく 変動し、精度が担保 できないため未臨界 保証のための測定 技術としては不可 > 高放射線環境下で 性能が保証できない	以下の理由から適用性 なしと判断 > 水分量測定のために 燃料デブリの乾燥が 必要であるが、ペデ スタル/RPV内での 乾燥は不可能 > 乾燥前後の重量を測 定するだけであり、 乾燥後も水分が残っ ている可能性がある	以下の理由から適用性 なしと判断 > 試薬は大気の湿分 にも敏感に反応する ため、湿分環境から の隔離が必要であり ペデスタル/RPV内 では実施不可

● 1F燃料デブリ取り出し現場(遠隔、放射線環境下)で、収納缶を介して性状・組成・形状が不定の燃料デブリ に適用可能な計測技術は確認されなかった。水分量を定量的に担保できないため、水分量制限を臨界防止 機能の設計条件には適用できない。

- 6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証
- (1)未臨界の安全性検証(3/5)
- ③乾式貯蔵時を想定した臨界評価(無限配列条件)
- 目的:乾燥を前提とする乾式保管施設合理化を目的とし、収納缶の稠密保管条件を未臨界維持の観点から明確 した。

#### <評価条件>

- ◆ 燃料(ペレット初期最高濃縮度4.9wt%)と水(乾燥処理後の残留水)は、均質・均一混合状態と仮定
- ◆ 十分な乾燥処理により、水体積割合が0.2以下まで低減されるものと仮定
- ◆ 安全側の条件として、収納缶が無限に配列されているとしてモデル化(下図 計算モデル参照)

<評価結果>

収納缶単独で未臨界維持可能な内径220mmの収納缶であっても、複数体を配列することで実効増倍率が増加。 今回の評価条件では、未臨界維持のために、内径220mmの収納缶でも、裕度を考慮すると水体積割合0.1以下ま で乾燥処理で水分除去が必要 ⇒ 乾燥検討の前提として検討



- 6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証
- (1)未臨界の安全性検証(4/5)
- ④ホットセル内等、仮置きを想定した臨界評価(有限配列条件)
- 目的:R/Bのセル内等での収納缶の仮置きは、特にスペース確保が困難と予想されるため、稠密保管条件を 未臨界維持の観点から明確化する。

<評価条件>

- ◆ 燃料(ペレット初期最高濃縮度4.9wt%)と水(乾燥処理後の残留水)は、均質・均一混合状態と仮定
- ◆ 十分な乾燥処理により、水体積割合が0.2以下まで低減されるものと仮定
- ◆ 一時保管(仮置き)を想定し、収納缶の配列を有限配列(10×10配列)でモデル化

<評価結果>

内径220mmの収納缶において、水体積割合が0.2の 場合、収納缶の中心間距離を33cm以上確保すれば、 10×10配列時も未臨界維持が可能である。

一方、水体積割合を0.1以下に低減できれば、収納缶 同士を接触させた隣接配置が可能となる(面積効率 最大)。このときの貯蔵効率注1は、内径に依存せず 0.7注2で同程度であり、収納缶口径拡大は貯蔵効率の 向上には寄与しない。

注1:貯蔵効率は単位面積あたりに占める収納缶内の面積 注2:収納缶の厚さを10mmと仮定





6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証 (1)未臨界の安全性検証(5/5)

#### ⑤まとめ

#### a.未臨界維持方策の検討

- ●収納缶内径拡大時の未臨界維持方策について、拡大効果及び安全評価説明性の観点から検討した。
- ●内径拡大と燃料デブリ取り出し作業量は比例することから、今後、取扱いにおける要求等の未臨界維持以外の観点も踏まえ、適用する方策を設定する。

b.燃料デブリ水分量制限の運用検討

●収納缶内径拡大時の未臨界維持方策として、水分量制限の適用は困難であることを確認したが、燃料デブリの水切りは運用上のメリットが想定されることから、スループットや付帯設備に影響しない範囲で、燃料デブリ取扱いプロセスに水切りを組み込む前提として各検討で考慮する。

c.乾式貯蔵時を想定した臨界評価

●乾燥処理性能が得られれば、隣接状態での配列が可能となり、乾燥手法検討の要求条件として組み込む他、 残留水分の取扱い等について工法PJ、基盤PJ、臨界管理PJ等の検討成果を反映し、未臨界維持シナリオを 設定する。

⑥今後の予定

●工法PJ、基盤PJ、臨界管理PJ等の検討結果を反映し、未臨界維持シナリオを確定する。



6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(2)構造強度の安全性検証:蓋構造の検討(1/8)①目的

収納缶設計のひとつとして、燃料デブリを収納するために必要な<mark>蓋構造について検討</mark>する。 平成30年度末には安全性(必要な構造健全性)および作業性(必要なスループット)等が 成立できる<del>蓋構造設計案を提示</del>する。

②蓋要求仕様

収納缶に対する要求機能をもとに、平成28年度に遠隔操作を考慮した蓋構造に対する 要求仕様案を設定した(下表参照)。

⇒収納缶外部へ燃料デブリ片を放出しない閉じ込め性(それを担保する構造強度含む)と 遠隔操作による作業性が必要である。

平成28年度には、これら要求仕様案を満足する蓋構造として、簡易取付構造、ボルト構造、 溶接構造を候補として抽出、蓋構造を概略検討した。

表」	収納缶蓋構造(	こ対する	要求仕様案
----	---------	------	-------

項目	要求事項
閉じ込め性	燃料デブリ片を外部に放出しないこと注1。
構造強度	収納缶の転倒等による衝撃を受けた場合においても、蓋の外れや破損が起こらないこと。
	収納缶の内圧に対して健全性を維持できること <sup>注2</sup> 。
作業性	気中または(および)水中での遠隔操作による蓋締めおよび蓋開放が可能であること。
	作業性の観点から、蓋の回転など簡易な動作で蓋締めが可能であること。
注1. 収納先什水	表対策としてべい人を其太とすることから、英部にも気体に対する変対性は更ずしたい

注2:収納缶は気体に対する密封性を要求しないものの、蓋の構造設計のための条件として一定の内圧に耐えることを要求することとする。



6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証 (2)構造強度の安全性検証:蓋構造の検討(2/8)

③想定事象の整理

IRID内外有識者や工法PJ、基盤PJの最新の検討状況を踏まえ、取り出しから保管までの収納缶 取扱いフローを見直し、安全を確保する上で、評価すべき事象を再抽出した。



a.垂直落下高さが平成28年度までに設定した9mに包絡されていることを確認するとともに、新たな事象として、b.転倒、c.収納缶上への垂直落下(まずは包絡的に7mを仮定)を抽出。

IRID

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証 (2)構造強度の安全性検証:蓋構造の検討(3/8)

④蓋構造の設計例(1/2)

平成28年度の概略検討をもとに、放射性廃棄物容器等の実績を考慮しながら、蓋構造案を 検討した。特に、燃料デブリの閉じ込め性と1Fでの作業性の観点で検討した。



6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証
(2)構造強度の安全性検証:蓋構造の検討(4/8)
④蓋構造の設計例(2/2)

### 設計した蓋構造について、比較検討、今後の検討方針を決定した。

項目	簡易取付構造	ボルト構造	溶接構造		
概略図例		「 「 「 「 「 「 「 「 「 「 「 「 「 「	溶接開先等の 具体的検討と なるため今回 は未検討		
特徴	<作業性> ・単純な作業(押し込み、回転)で締付け可能。 <閉じ込め性> ・蓋の押し込みによるOリングのつぶしにより、閉 じ込め性確保。	<作業性> <ul> <li>・遠隔でのボルト締付けは可能と考えるが、</li> <li>トルク管理などノウハウが必要。</li> <li>・ボルトのかじり対策が必要。</li> <li>&lt;閉じ込め性&gt;</li> <li>・蓋の押し込み(ボルト構造1)またはボルト締付け(ボルト構造2)によるOリングのつぶしにより、</li> <li>閉じ込め性確保。</li> </ul>	<作業性> ・遠隔での溶接実績はあるが、1F環境での成立 性は要検討。 <閉じ込め性> ・溶接構造で閉じ込め性確保。		
使用実績例	<ul> <li>インテグラル構造自体は高超圧力容器で実績 あるが、シール方法など1F収納缶向けに変更 点あり。</li> <li>・廃棄物容器でも設計例あり。</li> </ul>	・遠隔操作でのボルト構造容器としては、六ヶ所 低レベル廃棄物容器などの例があり。	・六ヶ所ガラス固化体容器 ・使用済燃料用キャニスタ(国外)		
評価	取り付け作業の容易さから <mark>候補のひとつ</mark> として検 討を継続する。平成30年度に蓋構造案に対する 構造健全性など成立性を検証する。	蓋構造の堅牢性から <mark>候補のひとつとして検討を</mark> 継続する。平成30年度に蓋締付け作業に対する スループット評価などをおこない、適用性を検討 する。	溶接作業環境を考慮すると <mark>現時点での採用は難しい</mark> が、長期保管に向けた保管施設での溶接処 置の可能性はあるため、保管側の具体的な進捗 状況を見ながらすすめる。		

#### 表 検討した蓋構造案の比較例

**No.43** 

IKIV

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(2)構造強度の安全性検証:蓋構造の検討(5/8)

⑤蓋構造検証試験の検討(1/3)

設計した蓋構造案に対して、成立性検証のために確認すべき事項を検討した。

蓋の閉じ込め性(燃料デブリの放出)の観点 で、蓋の破損モードを検討した(図参照)。 落下等の衝撃荷重を受けるような事象に 対しての破損モードとして以下を抽出した。

a.蓋の変形 b.Oリングの破損 c.収納缶の変形 d.つめ/ボルトの破損

このうち、a.、c.、d.について、評価すべき事 象の検討で抽出された事象に対して動解析 による評価を実施した。なお、b.については 解析のみでOリングの破損挙動を精度よく 模擬することは現状困難であり、試験での 確認が必要と考える。





IRID

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証 (2)構造強度の安全性検証:蓋構造の検討(6/8)

⑤蓋構造検証試験の検討(2/3)

③で選定した事象に対して、設計した蓋構造案で動解析を実施。解析結果より抽出した



©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証 (2)構造強度の安全性検証:蓋構造の検討(7/8)

⑤蓋構造検証試験の検討(3/3)

解析結果から、蓋構造案に対して、閉じ込め機能の健全性を評価するとともに、評価結果お よび動解析の妥当性の検証方法について検討した。

表 蓋の閉じ込め機能に係る部位の動解析結果の例(簡易取付構造の場合)と妥当性検証方法案(収納缶内径400 mmの簡易取付構造の場合)

		事象	蓋の変形/ 収納缶の変形 <sup>注1</sup>	Oリングの破損	つめの破損
Ŧ	底部緩衝構	構造なし	塑性変形なし、すき間量:ほぼ 0 mm(O)		破損なし注2
<b>亜</b>	底部緩衝構	ちょうしん ちょうしん ちょうしん しんしょう しんしょ しんしょ	塑性変形なし、すき間量:ほぼ 0mm(O)	破損挙動の模擬は不可	破損なし注2
落下	収納物の盞	底部緩衝構造なし	塑性変形あり、すき間量:ほぼ 0mm(〇)	-	破損なし注2
Г	への衝突 <sup>注</sup>	<sup>:3</sup> 底部緩衝構造あり	収納物		
転倒			塑性変形あり、すき間量:約 0.9mm(×)	-	破損なし注2
収納	缶上への	底部緩衝構造なし	塑性変形あり、すき間量:約 0.02mm(〇)	解析のみでのリングの	破損なし注2
落下	注4	底部緩衝構造あり	塑性変形あり、すき間量:約 0mm(〇)	していた。 していた。	破損なし注2
妥当	性検証方法	案	要素試験により試験後のシール面近傍 の寸法測定をするとともに、漏えい検査 で漏えいの有無を確認	要素試験により試験後のO リングの状態を確認すると ともに、漏えい検査で漏え いの有無を確認	要素試験により試験後のつ め爪部の状態を確認するとと もに、漏えい検査で漏えいの 有無を確認

注1:シール面近傍の蓋および収納缶胴部の変形量からすき間量を評価。なお、JISに規定されるOリングのつぶれ代の1/2をすき間量の暫定判定値(0.325mm)とし、

暫定判定値より小さい場合を〇(漏えいなし)、暫定判定値を超える場合を×(漏えいあり)と評価。

注2:表中「破損なし」はひずみが0.3(30%)以下(暫定値)により破損しないと判断。

注3:垂直落下時に収納物が跳ね上がり、蓋内側に衝突する事象。

注4:閉じ込め機能の健全性評価では、被衝突側収納缶が対象。



6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証 (2)構造強度の安全性検証:蓋構造の検討(8/8)

### ⑥まとめ

- ・収納・移送・保管WGや工法PJ、基盤PJの最新の検討状況を踏まえ、取り出しから保管までの 収納缶取扱いフローを見直し、安全を確保する上で、評価すべき事象を再抽出した。
- ・1F環境での作業性と燃料デブリの閉じ込め性の観点で蓋構造案を検討した。
- ・抽出した事象に対して、**蓋の閉じ込め性(燃料デブリ放出)の観点から破損モードを検討した**。
- ・破損モードに対して、動解析を実施、蓋の健全性の観点から、評価すべき項目を設定した。
- ・設定した評価項目に対して、評価項目の妥当性および蓋の健全性を検証するための方法を検討した。

⑦今後の予定

平成29年度検討結果より得られた、設計した蓋構造の取扱い方法を含めた成立性の確認や蓋の 閉じ込め性に関する評価項目の妥当性および健全性の検証(特に簡易構造)に対して、平成30 年度に要素試験や解析により確認する。具体的には以下の項目を実施する。

・蓋構造試験体の設計・製作

・取扱い性確認試験

構造健全性確認試験(荷重試験)

これら結果に基づき、蓋構造設計案を提示する。

なお、遠隔蓋締め技術としては、遠隔での操作がしやすい機構とすることで蓋締め技術自体に開発 要素はないものと考え、取扱い性確認試験では機構面での確認を行うものとする。

また、蓋構造の検討とは別に平成32年度に計画する実機大落下試験に向けた準備(平成30年度は 試験体設計と試験計画の検討)を進める。



6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(3)経年劣化に関わる安全性検証:収納缶材料の検討(1/6)

#### ①目的

目的:収納缶材料を選定する。 燃料デブリには海水導入に伴う塩化物イオンが含まれており、これらを考慮してすき間腐食、 塩化物SCC発生の観点から材料候補案を選定する。

②平成28年度までの実施内容

- 燃料デブリ性状や環境等を余裕を見込んで想定し、Ni基合金やTi合金が候補となったが、
   燃料デブリ性状に不確定性を有している限り、腐食の可能性を完全に払拭することは不可能なだけでなく
   加工の難しさ等まで考慮すると必ずしも合理的な選択肢とはならないと判断した。
- これらを踏まえ、経験のある炭素鋼/SUS316Lの適用性を評価することとし、SUS316Lの経年劣化モードとなるすき間腐食と応力腐食割れ(SCC)の観点から冠水での取り出しや保管(プール)、気中での取り出し、乾式保管の環境を評価し劣化はほぼないことを確認した。また、未臨界の観点で適用可能性がある五ホウ酸ナトリウムは耐食性の観点からも有効であることを確認した。

③平成29年度の実施内容

- 炭素鋼は全面腐食の形態となって、腐食量の推算から腐食しろを設けることで構造健全性を維持する 手法が確立しているが、長期のプール保管の場合、外表面が腐食して、保管後の蓋の再開放等の作業性 に支障が生じる可能性がある。 ⇒炭素鋼は、長期のプール保管には適さない材料である。
- ●ニーズが残されているプール保管にも有利なSUS316Lを中心に、未検討の移送・乾燥の環境とともに水切りした燃料デブリを気中保管する可能性が想定されたため追加評価した。これら環境は、塩化物イオンの濃縮や高温環境が想定されるため期間が短いものの評価においては厳しい条件となる可能性がある。

参考: 塩化物イオン濃度実績(深谷他、福島第一の格納容器・配管類の腐食抑制に係る現状と課題、第63回材料と環境討論会、2016年) 1号機 19ppm(2012/10/12) 2号機 2.9ppm(2013/8/7) 3号機 <1ppm(2015/10/22)



6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証 (3)経年劣化に関わる安全性検証:収納缶材料の検討(2/6)

◆SUS316Lの収納缶の使用環境における耐食性の評価結果

50℃程度までであれば問題ないがすき間腐食やSCCによる割れは高温ほど顕在化しやすく発生は否定はできない。

ケース	工程	期間	温度	評価
	取出し	最大10日間	常温	(〇)すき間腐食発生の可能性も低く、SCC発生可能性も低い。
冠水 (燃料デブリは 冠水状態)	移送	最大10日間	常温~150℃	(△)常温~50℃程度は取り出しと同環境で可能性は低い。より高温ではすき間腐食の可能性があるが、発生しても期間が短いので軽微と想像される。塩化物イオン濃度の実績を考えるとSCCによる割れの顕在化は70℃を超えると考えられるが具体的な閾値を判断できる知見はない。なお、SCCは高温になるほど顕在化しやすい。
	湿式保管 (プール)	最大50年	最大40℃(プール 水による温度制御)	(〇)取出し環境と同じく収納缶内部が40℃以下であることから、すき間腐食感受性は低く、SCC発生可能性も低い。
乾式 (燃料デブリは 乾燥状態)	乾燥	最大10日間	最大300℃	(△)常温~50℃程度の乾燥であれば問題はない。塩化物イオン濃度の実績を考えると 乾燥過程でのSCCによる割れの顕在化は70℃を超えた温度と考えられるが具体的な 知見がない上、同イオンの濃縮挙動にも依存するので具体的な閾値は設定できない。 収納缶内の水溜り部は過酸化水素水による腐食電位上昇ですき間腐食も想定され るが、高温では過酸化水素は気相に抜けやすいことや期間が10日程度と短いため問 題となる可能性は小さいと考えられる。ただし直接判断できる具体的な知見はない。
	移送	最大10日間	常温~150℃	(O)乾燥後は腐食およびSCCは生じない。
	乾式保管	最大50年	常温~150℃	(O)乾燥後は腐食およびSCCは生じない。
	取出し	最大10日間	常温	(〇)すき間腐食発生の可能性も低く、SCC発生可能性も低い。また、積極的な乾燥、濃 縮環境ではないため、SCC発生可能性も低い。
気中	移送	最大10日間	常温~150℃	<ul> <li>(△)乾燥過程と同じ</li> </ul>
(燃料デブリは 水切りして 濡れた状態)	湿式保管 (プール)		∼40°C	(〇)温度が低いため、すき間腐食およびSCC発生の可能性は低い。
	気中保管 (ホットセル 内等)	最大50年	常温~150℃	(△)乾燥過程と比較して、水分が残っているため、長期間、温度が高く、水分が存在する状態であると過酸化水素水の発生も想定されるため、乾燥過程よりすき間腐食やSCCによる割れ発生の可能性は高くなる。

○:腐食発生可能性が低い △:現時点では腐食発生の可能性は否定できない

共通事項)雰囲気:窒素またはアルゴンガス雰囲気(湿式保管のプールは大気環境での設置を想定)

水質:塩化物イオン濃度1ppm前後(実績)、過酸化水素水3ppm前後(常温として文献等より設定。)



なお、過酸化水素水濃度は環境(温度等)の影響を受ける。



6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証 (3)経年劣化に関わる安全性検証:収納缶材料の検討(3/6)

- ◆ SUS316Lのすき間腐食感受性評価結果
  - 温度30~50°C程度では、過酸化水素による電位上昇が生じても、すき間腐食発生の可能性は低い。
  - 温度80℃程度では、過酸化水素による電位上昇によっては、塩化物イオン濃度1ppmでもすき間腐食発生の可能性がある。

No.50

#### ⇒すき間腐食の可能性は残る。しかし、短期間であれば軽微で、影響拡大しないよう設計で対応することも選択 と考えられる。



6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

- (3)経年劣化に関わる安全性検証:収納缶材料の検討(4/6)
  - SUS304/SUS316Lの大気応力腐食割れ評価
    - 大気中の応力腐食割れは相対湿度感受性があり、溶液の塩化物イオン他の濃度、相対湿度、温度に依 存し、臨界条件以下では割れ感受性がなくなる。(下図参照)

**No.51** 

- 収納缶内の塩化物イオンは、塩化ナトリウムに由来すると考えられ、SUS316Lでは、70℃、塩化ナトリウム 12,700mg/m<sup>2</sup>付着条件でも、2週間の試験では割れは生じていないことから、塩化物イオン濃度をより低減 させることでSUS316Lでは70℃以上の環境でも、短期間では割れが顕在化しないことが期待できる。
- ただし、SUS316Lに対して1F収納缶で想定される温度範囲(70℃以上)における、塩化物イオン濃度とSCC 発生の関係を定量的に示す知見は既往文献では得られていないため、現時点で閾値の設定はできない。



2週間ばく露したSUS304、SUS316のUベンド SCC試験結果注1

注2: 庄司ら、"ステンレス鋼の大気腐食割れに及ぼす塩化物付着量の影響"、第35回腐食防食討論会講演集(腐食防食協会)、263、(1988).

注1: 庄司ら、"ステンレス鋼の大気腐食割れに及ぼす湿度の影響"、防食技術、35、559-565、(1986).

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証 (3)経年劣化に関わる安全性検証:収納缶材料の検討(5/6)

- ◆ SUS304/SUS316Lの大気応力腐食割れ評価
  - ●1F1~3号機の格納容器内滞留水の塩化物イオン濃度は0.1~19ppm<sup>注1</sup>で、下図より、割れが生ずる付着量 となる溶液の塩化物イオン濃度より10,000倍希釈された淡水程度と推定される。ただし、収納缶内の乾燥環 境(付着環境)とは異なるため、収納缶内に実際どの程度の塩化物イオンが付着するかは不明である。
  - ●前頁での報告において、SUS316Lでは、SUS304で割れが生じている塩化ナトリウム12,700mg/m<sup>2</sup>付着条件 (70℃、60%RH)でも2週間の試験で割れが生じていないが、割れが生ずる付着量となる溶液の塩化物イオン 濃度に対し10,000倍希釈されていることを考えると、割れは極めて発生し難いことが期待できる。
  - ●一方で、前項の通り高温ほどSCCによる割れが発生しやすくなるため、SUS316Lの70℃以上の環境での割れ発生の可能性は否定できない。



11: 深谷祐一、熊谷兄彦(2010): 備島第一の俗納谷森・配官類の腐良抑剤に除る現状と課題、第63回材料と環境討論会、C=101 12: 篠原正、"大気環境の腐食性評価(腐食環境のモリタリングと腐食性の分類に関する考え方)"、(JWTC)1998年ウエザリング技術研究成果発表会講演集No.3、15-24、(1998).

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証 (3)経年劣化に関わる安全性検証:収納缶材料の検討(6/6)

#### ④今後の予定

- SUS316L材は高温環境において、すき間腐食やSCC発生の可能性が増す方向となるものの、腐食による影響が顕在化しないよう収納缶形状や取扱いに制約を加えることで対応可能と考えられること、より耐食性に 優れるニッケル基合金等は一方で加工性が難しい等の課題があること、さらに、収納缶に多少の損傷が生じた場合でも安全性に影響しないよう余裕を確保することもできると考えられることから、SUS316Lを候補材 と想定し、対応策(制約条件)の検討を優先することとする。
- なお、腐食の発生の可能性や程度を確認するにあたり、以下の通り要素試験を行っても腐食環境条件自体 が収納缶の設計条件に依存するため、上記検討を踏まえて試験の必要性を改めて判断する。
  - ・気中保管注1では高温かつ長期間水分が残留するため、すき間腐食発生に大きく影響を与える過酸化水素水が発生する可能性がある。一方、過酸化水素水の濃度は水の存在形態に依存するため収納缶形状の影響を受けることが予想される。また、気中保管注1の想定期間も明確ではない。
  - ・また、乾燥過程等の塩化物イオンの濃縮等は余裕があると考えられるものの乾燥方法や収納缶形状等の影響を受けることが予想される。

注1:燃料デブリは水切りして濡れた状態

- 6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証
- (4)水素ガス対策の安全性検証 a.発生量の検証:気相部の影響確認(γ線照射試験)(1/10)
   ①目的
  - 平成28年度までに、1F水質条件(海水成分、ヨウ素、コンクリート)を考慮した水素発生について γ線照射試験により検討してきた。その結果、γ線照射下での水素発生において、1F水質条件 を考慮しても水素の初期発生のG値(0.45個/100eV)を用いて評価できる見通しを得た。 しかし、気液比の大きな条件では、気相部窒素が放射線分解・酸化して生成された硝酸による 液相部のpH低下が水素発生に影響を与えている可能性が考えられた。また、水素発生量が少 なく、誤差の大きくなるような条件では、見かけのG値が水素の初期発生のG値(0.45個/100eV) を超えるケースもあった。
  - そこで、追加の γ 線照射試験を行い、硝酸生成の影響の影響を確認するとともに見かけのG値 が水素の初期発生のG値(0.45個/100eV)を超えた理由を検討し、必要に応じて水素発生量評 価に反映することを目的とした。

#### ②実施内容

- 気相部のガス種を変えた試験(空気、窒素、アルゴン)を実施し、その影響について確認する。 また、現状の塩化物イオン濃度を考慮し、平成28年度までの試験条件に対して塩化物イオン濃 度を低下させた試験を実施し、その影響を確認する。 さらに、平成28年度の試験において、見かけのG値が水素の初期発生G値(0.45個/100eV)を超
- えた条件に対し、得られた見かけのG値の妥当性を確認する。





6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(4)水素ガス対策の安全性検証 a.発生量の検証:気相部の影響確認(γ線照射試験)(2/10)
 ③試験方法

平成28年度までと同様、試験水を入れ密閉した容器に外部からア線を照射、圧力の変化から見かけのG値をもとめた。





図 試験状況

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(4)水素ガス対策の安全性検証 a.発生量の検証:気相部の影響確認(γ線照射試験)(3/10) ④気相部の影響評価試験(1/2)

平成28年度までに、γ線照射下で気相部窒素の放射線分解・酸化で生成された硝酸による液相 部のpH低下が、海水成分共存体系では水素発生を促進させることが分かった。

⇒気相部のガス種を変え、硝酸生成抑制および水素発生抑制の効果を確認する必要がある。

ケース	気相部ガス	海水成分濃度 <sup>注1</sup> (塩化物イオン濃度) [mol/L]	ヨウ化物イオン濃度 [mol/L]	気液比 <sup>注2</sup> [%]	温度	吸収線量[kGy]	試験数	備考
1	空気	2.8×10 <sup>-3 注3</sup>	1.0×10 <sup>-4</sup> 注4	900	室温注5	最大1,000注5	2	平成28年度と同条件
2	窒素	2.8×10 <sup>-3 注3</sup>	1.0×10 <sup>-4</sup> 注4	900	<b>室温</b> 注5	最大1,000注5	2	硝酸生成の要因となる
3	窒素	2.8×10 <sup>-3 注3</sup>	0	900	室温注5	最大1,000注5	2	初期酸素を排除した条件
4	アルゴン	2.8×10 <sup>-3 注3</sup>	1.0×10 <sup>-4</sup> 注4	900	<b>室温</b> 注5	最大1,000注5	2	硝酸生成の要因となる
5	アルゴン	2.8×10 <sup>-3 注3</sup>	0	900	室温注5	最大1,000注5	2	窒素を排除した条件
注1:人工海	水を希釈して使用	注2:気相部体積/液相部体積	注: 注3:塩化物イオン濃度で	で100 ppm相当、1F滞	留水の水質目安 <sup>注</sup>	『より設定		

#### 表 気相部の影響評価 試験条件

注2:気相部体積/液相部体積 注3 : 塩化物イオン濃度で100 ppm相当、1F滞留水の水質目安注゚より設定

:1F炉心燃料中のヨウ素のインベントリ注7の10%が溶出すると仮定し設定 注5:平成28年度と同条件

料3-1 循環注水冷却「建屋内循環ループの早期実現及び循環ライン縮小に向けた検討について」、平成25年3月28日 京雷力福島第一原子力発電所廢炉対策推進会議



No.56

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(4)水素ガス対策の安全性検証 a.発生量の検証:気相部の影響確認(γ線照射試験)(4/10) ④気相部の影響評価試験(2/2)

a.ヨウ素濃度が高い場合:pH(硝酸の生成度合い)によらず見かけのG値は誤差を考慮するとほぼ 0.20程度で同じとなる。

⇒ヨウ素が支配的な条件では気相部のガス置換は効果なしと推測される。

b.ヨウ素濃度が低い場合:pHが下がる条件(硝酸生成あり)では海水成分で水素発生を促進、pH が変わらない条件(硝酸生成なし)では水素抑制効果の可能性がある。

⇒ガス置換の効果ありと推測される。

ただし、ヨウ素は燃料デブリからの溶出が想定され、制限が難しいと考えられる。

⇒一定量のヨウ素の存在を考慮する必要がある。

表 気相部の影響評価 試験結果(気相部水素濃度測定値で補正した値をもとに評価 <sup>注1</sup> )									a.ヨウヨ	<b>素濃度が高</b>
		試験条	件				い条	件での比較		
ケース	気相部 ガス	海水成分濃度 <sup>注2</sup> (塩化物イオン濃度) [mol/L]	ヨウ化物 イオン濃度 [mol/L]	気液比 <sup>注3</sup> [%]	気相部 水素濃度 <sup>注4</sup> [vol/%]	液相部硝酸 イオン濃度 <sup>注4</sup> [mg/L]	試験水 pH <sup>注4, 注5</sup> [−]	見かけの G値 <sup>注6</sup> [個/100e\		
1	空気	2.8×10 <sup>-3</sup> 注7)	1.0×10 <sup>-4</sup> 注 <sup>8)</sup>	900	3.78/4.05	130/130	3.4/3.3	$0.09 \pm 0.2$	3 🔶	1
2	窒素	2.8×10 <sup>-3</sup> 注7)	1.0×10 <sup>-4</sup> 注 <sup>8)</sup>	900	3.92/4.82	92/110	4.4/3.4	$0.11 \pm 0.2$	9 ←	-
3	窒素	2.8×10 <sup>-3 注7)</sup>	0	900	2.44/4.13	120/140	3.1/3.1	$0.09 \pm 0.0$	4 ←	<u> </u>
4	アルゴン	2.8×10 <sup>-3 注7)</sup>	1.0×10 <sup>-4 注8)</sup>	900	6.53/7.20	13/13	6.1/6.4	$0.20 \pm 0.0$	5 ←	1
5	アルゴン	2.8×10 <sup>-3</sup> 注7)	0	900	1.94/2.93	14/16	5.6/6.4	$0.05 \pm 0.02$	2 ←	
										$\neg$

注1: 圧力測定値を気相部の水素濃度測定結果で補正 注2:人工海水を希釈して使用 注3:気相部体積/液相部体積

注5:水温25℃の値、なお試験前のpH測定値は6.5(ほぼ中性) 注4:ケースごとに2回試験を実施しており、それぞれの試験結果を併記 注6:2回分の試験結果を一つのデータとして見かけのG値を算出

注7:塩化物イオン濃度で100 ppm相当、1F滞留水の水質目安注9より設定

注8:1F炉心燃料中のヨウ素のインベントリ注10の10%が溶出すると仮定し設定

注9:東京電力福島第一原子力発電所廃炉対策推進会議 ┋(第1回) 資料3−1 循環注水冷却「建屋内循環ループの早期実現及び循環ライン縮小に向けた検討について」. 平成25年3月28日 注10:西原健司、岩本大樹、須山賢也、JAEA-Data/Code2012-18、福島第一原子力発電所の燃料組成評価、日本原子力研究開発機構、2012年9月より



6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(4)水素ガス対策の安全性検証 a.発生量の検証:気相部の影響確認(γ線照射試験)(5/10)

### ⑤海水の影響評価(1/2)

平成28年度までの試験では、原子炉建屋の滞留水の水質目安から設定したが、

原子炉格納容器内部調査結果を踏まえて、海水成分濃度を低減させた条件とし、水素発生への影響を確認する。

⇒平成28年度までの塩化物イオン濃度2.8×10<sup>-3</sup> mol/L(100 ppm相当<sup>注1</sup>)から0 mol/L(0 ppm) および塩化物イオン濃度で5.6×10<sup>-4</sup> mol/L(20 ppm相当<sup>注2</sup>)として試験を実施した。 表 海水の影響評価 試験条件

ケース	気相部ガス	海水成分濃度 <sup>注3</sup> (塩化物イオン濃度) [mol/L]	ヨウ化物イオン濃度 [mol/L]	気液比 <sup>注4</sup> [%]	温度	吸収線量[kGy]	試験数	備考
6	空気	0 (0 ppm)	0 <sup>注6</sup>	900	<b>室温</b> 注7	最大1,000 <sup>注7</sup>	2	
Ø	空気	5.6×10 <sup>-4 注5</sup>	0 <sup>注6</sup>	900	<b>室温</b> 注7	最大1,000 <sup>注7</sup>	2	

#### 注1:1F滞留水の水質目安注8より設定 注4:気相部体積/液相部体積

注 注2 :1号機測定結果(約19ppm)<sup>達9</sup>より設定 注3 :人工海水を希釈して使用 注5 :塩化物イオン濃度で20ppm相当 注6 :海水の影響をみるためにヨウ化物イオンは添加しない

注7:平成28年度と同条件

主8 : 東京電力福島第一原子力発電所廃炉対策推進会議 事務局会議(第1回) 資料3−1 循環注水冷却「建屋内循環ル―プの早期実現及び循環ライン縮小に向けた検討について」, 平成25年3月28日 主9 : 西原健司、岩本大樹、須山賢也、JAEA-Data/Code2012−18、福島第一原子力発電所の燃料組成評価、日本原子力研究開発機構、2012年9月より





図 圧力測定例(水素発生量による補正含む)

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(4)水素ガス対策の安全性検証 a.発生量の検証:気相部の影響確認(γ線照射試験)(6/10)

#### ⑤海水の影響評価(2/2)

本試験結果と平成28年度試験結果の比較により、pHが低下し水素発生が促進されるような条件 においても、海水成分濃度が低くなれば(塩化物イオン濃度で5.6×10<sup>-4</sup> mol/L

(20 ppm相当)以下)見かけのG値はほぼ0になる。

⇒海水成分およびヨウ素濃度が十分低い場合には、水素の再結合反応が進むことで、見かけのG値は低下することが分かった。

表 海水の影響評価 試験結果(気相部水素濃度測定値で補正した値をもとに評価<sup>注1</sup>(平成29年度結果のみ))

	試験条件				試験結果				
ケース	気相部 ガス	海水成分濃度 <sup>注2</sup> (塩化物イオン濃度) [mol/L]	ヨウ化物 イオン濃度 [mol/L]	気液比 <sup>注3</sup> [%]	気相部 水素濃度 <sup>注4</sup> [vol/%]	液相部硝酸 イオン濃度 <sup>注4</sup> [mg/L]	試験水 pH <sup>注4, 注5</sup> [−]	見かけの G値 <sup>注6</sup> [個/100eV]	
6	空気	0	0 <sup>注7</sup>	900	0.80/0.68	160/160	2.9/2.9	0	
Ø	空気	5.6×10 <sup>-4</sup> 注8	0 注7	900	0.93/1.68	150/130	3.0/2.9	$0.01 \pm 0.02$	
参考 (平成28年度試験結果)	空気	2.8×10 <sup>-3</sup> 注9	0	900	10.1	270	2.8	0.21±0.01	

注1: 圧力測定値を気相部の水素濃度測定結果で補正

注2:人工海水を希釈して使用

注3:気相部体積/液相部体積

注4:ケースごとに2回試験を実施しており、それぞれの試験結果を併記、ただし、平成28年度試験は1回のみ

注5:水温25℃の値、なお試験前のpH測定値は6.5(ほぼ中性)

注6:2回分の試験結果を一つのデータとして見かけのG値を算出、ただし、平成28年度試験は1回分の試験結果から評価

注7:海水の影響をみるためにヨウ化物イオンは添加しない

注8:1F炉心燃料中のヨウ素のインベントリ注10の10%が溶出すると仮定し設定

注9:塩化物イオン濃度で100 ppm相当、1F滞留水の水質目安注11より設定

注10: 西原健司、岩本大樹、須山賢也、JAEA-Data/Code2012-18、福島第一原子力発電所の燃料組成評価、日本原子力研究開発機構、2012年9月より

注11:東京電力福島第一原子力発電所廃炉対策推進会議事務局会議(第1回)資料3-1 循環注水冷却「建屋内循環ループの早期実現及び循環ライン縮小に向けた検討について」,平成25年3月28日



6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(4)水素ガス対策の安全性検証 a.発生量の検証:気相部の影響確認(γ線照射試験)(7/10)
 ⑥G値妥当性の確認(1/2)

平成28年度試験において、見かけのG値が水素の初期発生のG値(0.45個/100eV)を超えるよう な結果が数ケースで得られた。

その要因として、圧力上昇の小さな条件では、気圧や温度の変動による影響を受けやすく、 測定/評価精度に課題があることが分かった。

⇒見かけのG値の評価に影響の大きな照射初期の挙動は、直接水素濃度を測定することで 精度向上を図ることとした。

\* :これまで実施してきた圧力測定による見かけのG値の評価は、移送時の収納缶のように閉じた体系での評価に対しては、系を乱さずに経時変化を追えるため反応 の変化を捉えられるメリットがある。ただし、水素発生量が小さい場合には、気圧や温度の変動が水素発生量と同程度となり、測定に影響を与えるために誤差が大 きくなる。一定時間ごとに水素濃度を測定する方法は、その時点での水素発生量を精度よく評価できるが、サンプリングが必要なため系を乱してしまい、閉じた系の 場合は試験を打ち切ることになる。

ケース	気相部ガス	海水成分濃度 <sup>注1</sup> (塩化物イオン濃度) [mol/L]	ヨウ化物イオン濃度 [mol/L]	気液比 <sup>注2</sup> [%]	温度	吸収線量[kGy]	試験数	備考
8	空気	2.8×10 <sup>-3 注3</sup>	1.0×10 <sup>-4</sup> 注 <sup>4</sup>	500	室温注5	10	3	
9	空気	2.8×10 <sup>-3 注3</sup>	1.0×10 <sup>-4</sup> 注 <sup>4</sup>	500	室温注5	20	3	
10	空気	2.8×10 <sup>-3 注3</sup>	1.0×10 <sup>-4</sup> 注 <sup>4</sup>	500	室温注5	30	3	
1	空気	2.8×10 <sup>-3 注3</sup>	1.0×10 <sup>-4</sup> <sup>注4</sup>	500	室温注5	300	3	試験数3のうちひとつは圧力を 参考測定

表	G値妥当性の確認	試験条件
---	----------	------

注1:人工海水を希釈して使用

注2: 気相部体積/液相部体積

注3:塩化物イオン濃度で100 ppm相当、1F滞留水の水質目安注8より設定

注4:1F炉心燃料中のヨウ素のインベントリ注7の10%が溶出すると仮定し設定

注5:平成28年度と同条件

注6:東京電力福島第一原子力発電所廃炉対策推進会議 事務局会議(第1回) 資料3-1 循環注水冷却「建屋内循環ループの早期実現及び循環ライン縮小に向けた検討について」, 平成25年3月28日 注7:西原健司、岩本大樹、須山賢也、JAEA-Data/Code2012-18、福島第一原子力発電所の燃料組成評価、日本原子力研究開発機構、2012年9月より



6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証
 (4)水素ガス対策の安全性検証 a.発生量の検証:気相部の影響確認(γ線照射試験)(8/10)
 ⑥G値妥当性の確認(2/2)

平成29年度の試験より水素濃度測定結果に基づき評価した見かけのG値は0.32個/100eVと、 水素の初期発生のG値(0.45個/100eV)を下回ることが確認でき、平成28年度結果の 0.57個/100eVの1/2程度となった。また、参考値注1として圧力測定結果から評価した見かけの G値は0.23個/100eVとなり、水素濃度測定結果から評価した見かけのG値とほぼ同程度であった。

**No.61** 

⇒平成28年度の試験結果は見かけのG値が大きく評価された可能性があると推定される。

注1:照射初期の300 kGyまでのデータのため圧力測定点が3点しかなく、見かけのG値は参考値である。



6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(4)水素ガス対策の安全性検証 a.発生量の検証:気相部の影響確認(γ線照射試験)(9/10) ⑦解析との比較

放射線分解モデルおよび状態方程式とヘンリー則による気液分配を組合せた評価方法(平成 28年度までと同じ手法)を用いて、<mark>試験結果と比較</mark>した。なお、解析ではG値は水素の初期発生 のG値(0.45個/100eV)を用いた。

⇒それぞれの条件において、水素の初期発生のG値(0.45個/100eV)を用いることで、発生した 水素量は試験結果を包含する値となった。この結果からは、γ線照射下においては、1F水質 条件を考慮しても、水素の初期発生のG値(0.45個/100eV)を用いて評価できると考えられる



#### IRID

- 6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証
- (4)水素ガス対策の安全性検証 a.発生量の検証:気相部の影響確認(γ線照射試験)(10/10) ⑧まとめ
  - ・気相部の影響や塩化物について以下のことが分かった。
    - (a)ヨウ素濃度が高い場合には、水素発生への影響はヨウ素が支配的であり、気相部のガス種に よらないことが分かった。
    - (b)ヨウ素濃度が低い場合には、硝酸生成によるpH低下によって水素発生が促進されるため、 硝酸が生成しないアルゴン置換が水素発生の抑制に有効であることが分かった。
  - ・ヨウ素が共存しない体系においては、海水成分が塩化物イオン濃度として20 ppm程度になれば、 気相部が大気であっても水素発生の見かけのG値が低下することが分かった。
  - ・平成28年度に高い見かけのG値が観察されたが、水素発生量が少ない場合、圧力測定では気圧 や温度の変動によって誤差が大きくなり、大きく見積もられる可能性があることが分かった。また、 平成29年度に行った水素濃度測定に基づく見かけのG値は水素の初期発生のG値(0.45個 /100eV)を下回ることが確認できた。
  - ・初期発生のG値(0.45個/100eV)を用いた水の放射線分解モデルと状態方程式・ヘンリー則による 気液分配を組合せた評価手法は、試験結果を包含する水素発生量を評価できる見通しを得た。

以上の結果を踏まえ、平成29年度までに実施してきた1F水質条件(海水、ヨウ素、コンクリート)を 考慮したγ線照射下における水素発生量を評価した結果、γ線に対しては1F水質条件を考慮しても 水素の初期発生のG値(0.45個/100eV)を用いて評価できることが分かった。

なお、γ線に関する検討は平成29年度で終了し、別途実施しているα線の影響検討結果とあわせて、1F燃料デブリ収納缶内の水素発生を適切に評価できるようにしていく。

IRID

- 6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証
- (4)水素ガス対策の安全性検証 a.発生量の検証: α線の影響確認(1/6)
   ①目的
  - 収納缶内の水素発生量予測方法の検証のため、これまでγ線照射試験でデータ拡充を行って きた。しかしながら、燃料デブリでは被覆管による遮蔽が期待できないことからα線の影響を 考慮する必要がある<sup>注1</sup>。そこで、使用済燃料ペレット片を用いた試験により1F条件におけるα線 の影響について確認する。
  - 平成30年度末には、これら試験結果に基づき、1F条件(水質、燃料デブリ条件)に適した水素発 生量評価により収納缶内水素発生量を予測する。特に、移送時の水素発生量を予測し、移送時 間制限の設定に資する。
  - 注1:被覆管による遮蔽が期待できない場合にはβ線の影響も考えられるが、β線はLET(線エネルギー付与)効果がγ線と同程度であることが知られており (Spinks, J.W.T. and R.J. Woods, An introduction to radiation chemistry, 1990, Wiley)、水の放線分解による水素発生の観点からは、γ線の知見が適用可能と 考えられる。

#### ②実施内容

- 平成28年度までのγ線照射試験および解析により、1F条件(水質、コンクリート片の混在)を 考慮したγ線による水素発生量評価について見通しを得た。平成29年度からは、燃料デブリで はα線の寄与が予想されることから使用済燃料ペレット片を用いた試験を実施する(平成30年 度も継続)。以下に抽出された主な影響因子について示す。
  - ・
     *α* 線の有無(平成29年度に実施)
  - ・水分量の影響(平成29、30年度に実施)(平成29年度は予備検討)
  - ・粒径の影響(平成30年度に実施)
  - ・コンクリート(MCCI生成物回収時付随物)中水分の影響(平成30年度に実施)



6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(4)水素ガス対策の安全性検証 a.発生量の検証: α線の影響確認(2/6) ③試験内容

使用済燃料ペレット片を用いて、α線を考慮した場合と考慮しない場合で、水素発生量を測定し、 その差からα線の寄与について確認する。また、水分量を変えた予備試験を実施し、水分量の影響を概略把握するとともに、平成30年度の試験条件設定に資する。

表 試験条件

項目		ケース1、ケース2 ケース3		ケース4	備考
試験体系		ペレット片を水に浸漬	ペレット片を水に 接触させない(α線を遮蔽)	ペレット片を少量の水に浸漬	ケース2はケース1の再現性確認のため同条件
試料重量/粒径			80 g程度∕20~300 μm	洗浄、乾燥後(約100℃、延べ6.5時間)、分級	
	水分量	100 mL		8 mL(ペレット片の50 vol.%)	50 vol.%は平成28年度水切り試験による
試験	海水成分濃度	塩化!	物イオン濃度で5.6×10 <sup>-4</sup> mol/L(20	1号機測定結果(約19ppm)注1より設定	
水	ヨウ化物イオン濃度		1 × 10 <sup>-4</sup> mol/L	ヨウ素インベントリ注2の10%が水中に溶出と想定	
	рН		調整なし	試験前後で測定	
気相部ガス種/初期内圧			大気/大気圧程度(加圧しなし	ガス置換できない場合を想定し大気とした	
浸漬期間		最長20日間			想定移送期間10日間に対して裕度をもって設定
試験温度		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·			容器内温度(試験時測定結果):18.3℃~24.2℃

注1:東京電力株式会社、1号機原子炉格納容器(PCV)内部調査の結果について、平成24年10月22日 注2:西原健司、岩本大樹、須山賢也、JAEA-Data/Code2012-18、福島第一原子力発電所の燃料組成評価、日本原子力研究開発機構、2012年9月より



6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(4)水素ガス対策の安全性検証 a.発生量の検証: α線の影響確認(3/6)
 ④試験状況

試験中の試験容器内の圧力変化を測定した。また、試験後に気体および試験水の分析を実施した。



#### 表 使用した使用済燃料仕様

	試験に用いた使用済燃料注1(燃焼計算結果)	(参考)1F燃料(例:1号機) <sup>注2</sup>
燃焼度	約57 GWd/t(燃料要素平均)	約26 GWd/t(炉内平均)
冷却期間	約15年	10年
放射能量	2.12×10 <sup>7</sup> GBq/t	1.08×10 <sup>7</sup> GBq/t
発熱量	$2.18 \times 10^3  \text{W/t}$	$7.97 \times 10^2  W/t$
γ線強度	$5.56 \times 10^{15}$ photon/s/t	3.04 × 10 <sup>15</sup> photon/s/t
中性子強度	1.86 × 10 <sup>9</sup> neutron/s/t	1.07 × 10 <sup>8</sup> neutron/s/t

法1:BWR9×9燃料(A型)LUA(先行使用燃料集合体)から脱ミートした燃料ペレット片を使用。 注2:西原健司、岩本大樹、須山賢也、JAEA-Data/Code2012-18、福島第一原子力発電所の燃料組成評価、日本原子力研究開発機構、2012年9月より



6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

- (4)水素ガス対策の安全性検証 a.発生量の検証: α線の影響確認(4/6)
- ⑤試験結果
  - 試験後の気相中水素濃度測定結果から、水素発生速度を評価、以下を確認した。
    - α線を考慮した条件(ケース1、2)とα線を遮蔽した条件(ケース3)では、α線を考慮した条件の方が10倍以上大きな水素発生速度が得られた。
    - ・使用済燃料ペレット片を十分な水に浸漬させた条件(ケース1、2)に対して、少量の水(燃料デ

ブリ体積に対して水 50vol.%)に浸漬させた条件(ケース4)の方が水素発生速度は大きい。

なお、今回の試験条件では、試験中の圧力変化が小さく、どのケースも圧力測定からは水素発生 <u>速度の評価ができなかっ</u>た。

<b>人关关证()</b>				
へのなまたして たとえば、ケース4の場合、保守的な条件 <sup>注2</sup>		水素発生速度 <sup>注1</sup>	(参考)気相中水素濃度(測定値)	注1:気相中の水 素濃度(測定 値)から試験 容器容積、 ペレット片重 量、試験時 間等から算
で評価すると収納缶内水素濃度が爆発下限 の40%に達するまで約25日かかる	ケース1	約7.5×10 <sup>-8</sup> L/h/gUO <sub>2</sub>	約0.73 %	
⇒条件の精査等により安全に輸送可能な	ケース2	約6.0×10 <sup>-8</sup> L/h/gUO <sub>2</sub>	約0.51 %	
見通しあり 注2:収納缶内寸: Ø 220 mm×800 mm、燃料デブリ	ケース3	約4.6×10 <sup>-9</sup> L/h/gUO <sub>2</sub>	約0.04 %	
密度:11 t/m <sup>3</sup> (UO <sub>2</sub> 相当)、充填率:50 vol.%、水 分量:燃料デブリに対して50 vol.%。	ケース4	約1.1×10 <sup>-7</sup> L/h/gUO <sub>2</sub>	約0.78 %	出(25℃換算
4       ・微圧計指示値 > 0 kPa       エラーパー:±0.56 kPa         0 微圧計指示値 = 0 kPa (参考値)       破線: 0±0.56 kPa         2       ・       ・         2       ・       ・         2       ・       ・         2       ・       ・         2       ・       ・         3       ・       ・         4       ・       ・         5       ・       ・         4       ・       ・         0       ・       ・         0       ・       ・         0       ・       ・         0       ・       ・         0       ・       ・         0       ・       ・         0       ・       ・         0       ・       ・         0       ・       ・         0       ・       ・         0       ・       ・         0       ・       ・         0       ・       ・         0       ・       ・         0       ・       ・         0       ・       ・		4 ● 微圧計指示値 > 0 kPa ● 微圧計指示値 = 0 kPa (参考値) 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	4 ・微圧計指示値 > 0 ・微圧計指示値 = 0 (参考値) 2 (参) (参) (参) (参) (参) (参) (参) (参)	エラーパー:±0.56kPa 破線: 0±0.56 kPa



RID

図 試験中の容器内圧力変化(測定値)

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

- (4)水素ガス対策の安全性検証 a.発生量の検証: α線の影響確認(5/6)
   ⑥解析との比較
  - 測定から得られた水素発生速度(平均値)をもとに吸収線量率を設定、試験条件において 放射線分解モデルを用いた解析をおこない、水素発生量を評価した。その結果、気相部の 水素分圧において、試験結果と解析結果はおおむね一致する傾向が見られた。

**No.68** 



図 試験結果と解析結果の比較例 表 解析条件

項目		ケース1、ケース2	ケース3	ケース4	備考	
吸収	α線	21.5 Gy/h	-	263 Gy/h	試験結果から得られた水素発生速度(平均値)から設定	
線量率	β線、γ線	4.7 Gy/h	4.0 Gy/h	4.7 Gy/h		
水量		100 mL 8 mL			気相部の水素濃度算出に使用(放射線分解モデルによる解析上は未考慮)	
海水成分濃度		塩化物イオン濃度で5.6×10 <sup>-4</sup> mol/L(20 ppm)相当			試験条件	
ヨウ化物イオン濃度		1.0 × 10 <sup>-4</sup> mol∕L			試験条件	
温度		25°C			室温	
時間		20日			試験条件	

- 6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証
- (4)水素ガス対策の安全性検証 a.発生量の検証: α線の影響確認(6/6) ⑦まとめ
  - • $\alpha$ 線を考慮した条件(ケース1、2)と $\alpha$ 線を遮蔽した条件(ケース3)では、
    - $\alpha$ 線を考慮した条件の方が10倍以上大きな水素発生速度となり、 $\alpha$ 線の影響が確認できた。
  - ・燃料ペレットを十分な水に浸漬させた条件(ケース1、2)に対して、少量の水(燃料デブリに対して水50vol.%)に浸漬させた条件(ケース4)の方が水素発生速度は大きくなった。この結果より、今回の試験条件(燃料ペレット粒径20~300μm)では、水切り程度の水分量では
    - α線が支配的な条件となることが示唆された。
  - ・測定から得られた水素発生速度(平均値)に基づき設定した吸収線量率を用いた放射線分解モデルによる解析によって試験結果と解析結果はおおむねー致する傾向が見られた。
- ⑧今後の予定
  - 引き続き、使用済燃料を用いた試験により、以下に示す抽出された影響因子に対する α線の水素発生への影響を確認する。
    - 水分量の影響の検討
    - ・粒径の影響
    - ・コンクリート(MCCI生成物回収時付随物)中水分の影響
  - その際、平成29年度の検討で得られた課題(吸収線量率の設定・評価方法の検討、水素発生 速度の測定)に対して、試験方法や試験体系の見直しを行いながら試験・評価を実施する。 これら結果に基づき、1F条件での水素発生量評価方法をまとめるとともに、 収納缶内水素発生量を試算する。



- 6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証
- (5)水素ガス対策の安全性検証 b.水素対策の検証(1/6)

#### ①目的

- 収納缶は移送容器で原子炉建屋から保管施設まで運搬することが想定され、移送中、移送容器は密閉す る必要があることから滞留した水素の防爆対策が必要である。
- また、できるだけ収納缶を閉じ込めることが収納缶外の汚染抑制に有効である。
- そこで、水素対策の一案として収納缶内で発生した水素を収納缶内で処理する方法として、缶内で発生した水素と酸素を触媒で再結合する方策の可能性/有効性を明らかにする。

#### ②基本的な考え方

- 水素処理として触媒、水素吸着合金が考えられるが、
- 水素吸着合金は容量等の問題があることから、
- 触媒を基本に検討を進める。
- 触媒による再結合を効果的に行うには、以下を満足する必要がある。
- a.触媒自体の再結合に関わる性能が発生量に見合う能力を有していること。
  - ・再結合性能があること 触媒表面積当たりの水素の再結合速度が高く収納缶内に 設置可能な大きさであること。
  - ・使用環境に対して有効に機能できること
     温度、撥水性、耐放射線性、耐被毒性(海水由来の塩素成分、 核分裂で生成されるヨウ素に対する対被毒性能)の観点で
     必要となる性能が維持できること。
- b.触媒に対して対象のガス(水素/酸素)が効果的に供給されること。
- 収納缶内の流動により触媒に対してガスが供給され 収納缶内の水素濃度が爆発限界以下に維持できること。 ⇒平成29年度はb.に着目して検討を行った。



図 収納缶内の流動及び触媒配置例

#### IRID

- 6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証
- (5)水素ガス対策の安全性検証 b.水素対策の検証(2/6)③検討の進め方
  - 前項を踏まえて、以下のステップで検討を進める。
  - a.現実的な水素発生量を想定した場合のFSの実施(平成28年度実施済み)
    - 1Fにおける平均的な燃料デブリを想定(炉内燃料の平均の線源強度、TMI-2のコアサンプリングでの粒度 分布)し、水素発生量に対する必要触媒量、保守的に収納缶端部の触媒に拡散だけで再結合処理されると 仮定した場合の収納缶内の濃度分布を計算し、最も濃度の高い中央部の水素濃度が4vol.%を下回る結果 を得た。
  - b.より厳しい条件での水素発生を想定した場合のFSの検討(平成29年度の実施内容)
  - 水素対策シナリオを検討する上で燃料デブリ中の燃料の濃度分布等、より厳しい条件になる可能性は否定できないため、その場合のシナリオを構築する。
  - ・収納缶内の流動効果の検討
     ・収納缶内の流動効果を解析的に行い触媒の配置や収納缶内に必要なすき間等を検討する。
  - c.収納缶形状を想定した検証(平成30年度の実施内容)
    - ・収納缶内の流動の検証試験により触媒の有効性を確認する。
    - ・収納缶内に水素の再結合触媒を設置する観点から
       環境条件に対する耐性として、耐放性、被毒に対する
       耐性等の基礎データを取得する。また、耐放性、被毒等の観点から選定した触媒について収納缶内の流動を
       考慮し、有効性を検証する。



IRID

図 収納缶内の水素ガス対策の検討項目
- 6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証
- (5)水素ガス対策の安全性検証 b.水素対策の検証(3/6)
- ④水素が対流せずに拡散だけで拡散するとした場合の収納缶内の水素濃度

検討にあたり収納缶内で想定される水素発生量(試算)と拡散だけを前提とした収納缶中心部の水素濃 度を以下に示す。

#### a.水素の濃度分布

収納缶内の両端部に触媒を設置するとし、燃料デブリから水素が発生する場合について水素素分子の移動を 拡散のみと仮定し、収納缶内の任意の位置の水素濃度は水素発生量と拡散係数の関数で与えられ 放物線形状に分布し、中心部が最も高くなる。

#### b.水素濃度

水素発生量の評価はTMI-2でも用いられた発熱量とG値、吸収率から算出する方法とし、保守的にG値(0.45)、吸収率F(0.6)<sup>注1</sup>とした。 発熱量も保守的に最高燃焼度の集合体(55GWd/t)(10年冷却)のペレットのみが燃料デブリとなった場合を想定した。また、燃料 デブリの充填率は30vol.%と仮定した。端面の水素濃度は一般的な 触媒の性能から1vol.%とした。その結果、

中心部の濃度=6.4vol.%と評価される。

- ⇒実際には缶内に対流が発生し、こられを見込むことで厳しい 条件でも成立性が期待できる。
- ⇒流動を検討することとした。
- 注1:F=0.6は燃料デブリが微粉末となった場合を想定したもの (平成28年度検討結果より)



**No.72** 

図 収納缶内の濃度分布



IRID

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(5)水素ガス対策の安全性検証 b.水素対策の検証(4/6)

⑤対流効果の検討(1/2)

a.目標となる対流流速

前頁に示す通り、水素の拡散のみを仮定する場合、収納缶中心部の 最大濃度は6.4 vol.%となった。そこで対流の効果を見込むにあたり目 標とすべき対流流速を検討した。

- ・最大濃度が4 vol.%を下回る(右図)ようにするためには、水素を拡散 係数の2倍以上の効果で拡散できるような流動が必要である。
- ここで、拡散方程式での拡散項と対流項の関係を考えると、拡散係数と同じ0.01mm/s(=10<sup>-5</sup> m/s)レベルの自然対流流速があれば良いこととなる。ただし、この程度の流速は不確かさが大きいと考えられるため、暫定的に解析では1mm/s程度の流動が生じる可能性を検討した。

拡散方程式の拡散項  

$$\frac{D}{H^2}$$
 $\frac{D}{H^2} = \frac{5 \times 10^{-5}}{1.5^2} \approx 10^{-5}$   
 $u > 10^{-5} [m/s]$   
拡散方程式の対流項  
 $\frac{u}{H}$ 
 $\frac{u}{H} > \frac{D}{H^2} \times 2 \approx 10^{-5}$   
(2倍以上)



No.73

図 水素の拡散係数と水素濃度の関係

<u>一次元の拡散方程式</u>  $\frac{d\omega}{dt} + u \frac{d\omega}{dz} = D \frac{d^2 \omega}{dz^2}$ 対流項 拡散項 D:水素の拡散係数 [m<sup>2</sup>/s] H:収納缶高さ [m] (= 1.5m) t:時間 [sec] u:流速 [m/s] z:流れ方向距離 [m]  $\omega:水素濃度(質量分率)[-]$ 

- 6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証
- (5)水素ガス対策の安全性検証 b.水素対策の検証(5/6) ⑤対流効果の検討(2/2)
- b.解析による流動効果予測

熱流動解析の結果、すき間20mm(Case1~4)の平均上昇流速は10~100mm/s、すき間5mmは1~4mm/s(Case 5)との 結果が得られ、流動は期待できることが分かった。 ◆ Case1 220W/m3,20mm



- 6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証
- (5)水素ガス対策の安全性検証 b.水素対策の検証(6/6)
  - ⑥まとめ

収納缶内の流動は水素拡散の促進に有効でこの効果を見込むことで、保守的仮定に基づく水素発生 量でも収納缶内の水素濃度を爆発下限界の4vol.%以下の達成が期待できることがわかった。

⑦今後の予定

- 以下の検討により触媒による対応策を整理し、触媒を採用する場合の優劣を明らかにする。
- 収納缶内の流動の解析検証

解析により収納缶内とユニット缶の間に対流が生じることが期待できるが収納缶内とユニット缶内面 間は狭隘で自然対流に関わる公開の知見は見つかっていないため、必要に応じて試験等により 対流効果のデータを採取し確認する。

・触媒候補の整理(被毒、耐熱性、耐放性等の考慮を含む) 触媒には、塩化物イオン等による被毒への耐性、耐熱性、耐放性等の性能が求められることから、 これら性能を文献や試験等で入手し、触媒の採否も含めた判断に資するべく、移送中の環境も考慮 して触媒候補の得失を整理する。

No.75

6.4.燃料デブリの収納形式の検討 (1)燃料デブリ性状に合わせた収納缶仕様の検討

### ①目的

収納缶の開発として基本ケースとして、燃料デブリを掴む、掬い上げる等によりユニット缶に回収後、 ユニット缶ごと収納缶に入れる塊状燃料デブリ用収納缶の開発を進めている。一方で、燃料デブリには 粉状等の形態もあり、TMI-2の事例では収納缶内部にフィルター等を設置したタイプの収納缶が用い られた経緯があり、これら各種の燃料デブリ形態や回収方法に対応できる収納缶の開発を行う。

#### ②検討結果

現在、工法PJ、基盤PJにおいて粉状等の燃料デブリの回収方法が検討されており、現時点では、 塊状燃料デブリ収納缶を燃料デブリ形状に関係なく用いる方針で検討を進めることとした。

本PJとしては、塊状燃料デブリ収納缶の設計を進捗させ、平成30年度以降、粉状等の燃料デブリに 対して塊状燃料デブリ収納缶を用いる場合の課題を共有/調整を行う。

6.4.燃料デブリの収納形式の検討 (2) 収納缶設計の見直し

### ①目的

6.2.「燃料デブリ収納缶の移送・保管に係る安全 要件・仕様及び保管システムの検討」、6.3.「安全 評価手法の開発及び安全性検証」の成果を反映 した収納缶構造を設定する。

### (2)検討結果

IRID

現時点において6.3.(2)「構造強度の安全性検証: 蓋構造の検討」の検討を踏まえた蓋構造設計を 反映することとし反映例を右図に示す。 今後、取扱い性や安全評価を踏まえた要求事項 等を反映し、基本仕様としてまとめる(平成30年 度継続検討)。



収納缶組立状態

义

収納缶本体



No.77



ドレン管

7.全体まとめ

- ・燃料デブリ取り出し・収納・移送・保管を合理的に行う観点から各作業ス テップを定義づけし、合理的と判断されるプロセスフローを仮定した。 また、全体合理化の観点で処理すべき物量等を検討、今後スループット の観点から評価を行い収納缶への設計反映事項や移送・保管システム への要求事項として対応する。
- ・上記作業で新たに抽出された課題は関連PJと協議し、平成30年度以降の計画に反映する。
- ・従前研究から継続的に行っている移送・保管システムの安全評価に必要となる評価手法について、引き続き平成30年度に成果を得ることを目標に検証を進める。また、成果を収納缶仕様に反映する。

No.78

【補足-1】アウトプットの位置づけ 今後も安全上の要求事項、燃料デブリ性状の知見、最適化の要求など条件が変動する。 開発する収納缶をプロトタイプとし、収納缶設計のプロトコルを整備することで条件変更に 柔軟に対応する。

