

# 平成30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)」

# 2020年度最終報告

### 2021年6月

### 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構(IRID)

### <u>目次(1/2)</u>

- 1. 研究の背景・目的
- 2. 目標
- 3. 実施項目とその関連、他研究との関連
- 4. 実施スケジュール
- 5. 実施体制図
- 6. 実施内容
- 6.1 収納・移送・保管に係る調査及び研究計画立案
- 6.2 収納技術の開発
- 6.3 移送技術の開発
- 6.4 乾燥技術/システムの開発
- 6.5 評価まとめ

### <u>目次(2/2)</u>

【補足-1】収納缶開発の基本条件 【補足-2】安全要求に対する収納缶の設計条件 【補足-3】取扱い要求に対する収納缶の設計条件 【補足-4】収納缶の仕様案 【補足-5】触媒の性能データ採取の考え方 【補足-6】触媒試験結果の整理 【補足-7】燃料デブリ乾燥装置の安全機能分担と要求機能 【補足-8】一般産業で用いられている乾燥技術の整理 【補足-9】TMI-2燃料デブリの乾燥実績と本技術開発への適用性 【補足-10】燃料デブリ取り出しプロセスや併せて想定される回収物 【補足-11】燃料デブリ乾燥供試体(ゼオライト)のTG-DTA試験結果 【補足-12】乾燥要素試験の試験ケース一覧 【補足-13】実規模乾燥試験の試験ケース一覧 【補足-14】燃料デブリ乾燥挙動モデルの詳細 【補足-15】燃料デブリ乾燥装置概念のための除染性確認試験 【補足-16】水素測定技術詳細

# 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安全要求を合理的に達成してお り、個々の実情に合った収納缶により従来技術を活用する手法は有効と考えられる。そのため、1F においても同様の考え方に基づき、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 /高度となることや燃料デブリの搬出方法等も異なるため、燃料デブリを安全かつ合理的に収納・ 移送・保管するための1F専用の収納缶を開発する。

#### 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の収納・移送・保管技術を開発する。







### 1. 研究の背景・目的 1.3 これまでの検討と残された課題(3/4)

燃料デブリ収納缶の安全設計の2018年度までの検討成果と、残された検討課題を下表に示す。

	安全設計						
			2018年度までの検討	検討課題(2019、2020年度実施)			
吊り部	未臨界		<ul> <li>・燃料デブリ粒径、含水率を考慮した未臨界 維持評価手法に基づき、収納缶単体で未 臨界維持可能な収納缶内径(φ220mm)を 設定。</li> </ul>	_			
プラグ	冷やす	除熱	・課題なし。	-			
▶ (71/19-含) ▶ (71/19-含) ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ●	閉じ込める	閉じ込め	・実運用における汚染拡大防止のためにフィ ルター、水素滞留防止ロ(ベントプラグ)を 設置。	・シール材/フィルターの検討(保管時以外) (「収納技術の開発」として検討)			
山地在芙		遮蔽	<ul> <li>・課題なし。</li> </ul>	-			
4又称9 <b>田</b> 蓋 <i>ϕ</i> 220mm		構造	・収納缶取り扱い時における転倒、落下、移 送容器/保管容器内で収納缶上部への落 下の衝撃荷重に対する蓋、胴、緩衝構造の 各要素試験を行い健全性を確認。	・収納缶全体を組合せた状態における構造健全性確認 が必要。 (「収納技術の開発」として検討)			
□ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □		材料健全性	・1F水質環境、収納缶の取扱プロセス等を想 定し、収納缶材料(SUS316L材)の妥当性 を確認。	_			
<ul> <li>(収納缶材料:SUS316L)</li> <li>図 収納缶の構造案</li> <li>(2018年度仮設定構造案)</li> </ul>	その他 (止める、冷 やす、閉じ込 める機能の 維持)	水素	<ul> <li>・水素発生量:ガンマ照射試験で1F水質(ヨ ウ素他)を考慮した場合のG値の妥当性を 確認。また、使用済燃料を用いた水素発生 試験で、アルファ線の影響を確認。</li> <li>・触媒:収納缶環境(低温、高湿度、線量有) で水素再結合可能な触媒候補を抽出。</li> <li>・燃料デブリの形態として存在する可能性が ある多孔質体について、乾燥要素試験を 行った結果、平衡含水率がゼロにならない (水分が残った状態で乾燥が停止する)現 象を確認。</li> </ul>	<ul> <li>・1F燃料デブリ条件に適した水素発生予測法の検討。</li> <li>・触媒性能の詳細データの採取と収納缶内設置時の有効性の評価。</li> <li>(「移送技術の開発」として検討)</li> <li>・ベントロ径の検討</li> <li>(「収納技術の開発」として検討)</li> <li>・目標時間内に平衡含水率を目標含水率以下にする乾燥手段の開発が必要。また、保守性等を考慮した乾燥装置の基本仕様の設定が必要。</li> <li>・燃料デブリの乾燥は水素発生量の低減を目的とするため、確認の手段として水素濃度測定技術が必要。</li> <li>(「乾燥技術/システムの開発」として検討)</li> </ul>			
IRID	1	火災防止	・課題なし。	_			

### 1. 研究の背景・目的 1.3 これまでの検討と残された課題(4/4)

燃料デブリ収納缶仕様の2018年度までの検討成果と、残された検討課題を下表に示す。

取场性 / 全理化	如果我们的问题,我们就是我们的问题,我们就是我们的问题,我们就是我们的问题,我们就是我们的问题。" 第1993年,我们就是我们的我们就是我们的我们就是我们的我们就是我们的我们就是我们的我们就是我们的我们就是我们的我们就是我们的我们就是我们的我们就是我们的我们就是						
取 放住 / 百 垤 化	2018年度までの検討	検討課題(2019、2020年度実施)					
・収納缶の遠隔蓋閉め、遠隔 吊り上げ	<ul> <li>収納缶を遠隔で取り扱う際に必要となる吊り治具と蓋締め</li> <li>装置の構造案を検討。</li> </ul>	_					
・収納缶の内径拡大	・緩和策として内径拡大(φ400mm)できる条件を設定。	_ (実燃料デブリの実績を踏まえて採否を判断)					

2. 目標

2020年度末の目標達成判断指標は以下のとおりである。

1.収納・移送・保管に係る調査及び研究計画立案							
全般	関連する事業や実プロジェクト(実工事)の最新の検討状況・知見の収集、既入手情報に基づき海外( 等の追加分析・整理を行い、有識者意見も交えて研究計画に反映していること。						
2.収納技術の開発							
①収納缶仕様及び構造の検討	仮設定した収納缶仕様案および構造案について、構造検証試験または解析によって、構造健全性が 構造健全性の確認結果にもとづき、収納缶仕様案および構造案が提案されていること。 (	確認されていること。 (終了時目標TRL:レベル6)					
3.移送技術の開発							
①水素発生予測法の検討	燃料デブリ条件に適した水素発生予測法が提案されていること。 提案した水素発生予測法による評価結果にもとづき、移送条件案が示されていること。 (	(終了時目標TRL:レベル6)					
②水素対策の検討	候補触媒の代表的な被毒物質である塩化物イオン等への耐性を評価していること。収納缶内の流動 対策等の妥当性が評価されていること。 (	かを評価し、触媒による水素 〔終了時目標TRL:レベル6〕					
4.乾燥技術/システムの開発							
①乾燥装置の基本仕様の検討	燃料デブリ乾燥システムの基本仕様の一次案が提案されていること。	(終了時目標TRL:レベル4)					
②水素濃度測定技術の検討	収納缶へ適用可能な水素濃度測定技術の候補の選定が完了していること。	(終了時目標TRL:レベル3)					
5.評価まとめ	要請に応じて燃料デブリと廃棄物の仕分けの技術調査に参画、協力すること。	(TRL評価の対象外)					



### 3. 実施項目とその関連、他研究との関連

#### 3.1 実施項目

本補助事業は、1F燃料デブリの移送・保管のエンジニアリングに向けて、以下の技術開発課題に取り組んだ。

(1) 収納・移送・保管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、研究計画に反映する。

#### (2) 収納技術の開発

実機大収納缶を用いた構造検証試験により、収納缶全体を組合せた状態における評価事象時の安全機能(臨界防止、閉じ込め)の維持確認を行う。

#### (3)移送技術の開発

#### 水素発生予測法の検討

既往の水素発生予測法の分析や水素発生に影響する因子の分析等を行い、試験によりデー タを取得して水素発生量予測を行う。

#### ・水素対策の検討

触媒による水素対策として、候補とした触媒について収納缶内の環境を考慮して性能データを取得するとともに収納缶内の水素拡散を考慮して有効性を確認する。



# 3. 実施項目とその関連、他研究との関連

#### 3.1 実施項目

- (4)乾燥技術/システムの開発
  - ・乾燥装置の基本仕様の検討

燃料デブリの乾燥について、乾燥システム自体の安全要求事項を整理し、適用候補となる技術を抽出、実機大試験装置により乾燥挙動データの採取を行い、乾燥装置の基本概念と保守を考慮した乾燥システムの配置例を提案する。

#### 水素濃度測定技術の検討

移送容器払い出し前に、移送想定期間中、移送容器内の水素濃度が爆発下限界を超えない ことを確認するため、水素濃度測定技術を調査し、収納缶に適用可能な技術の候補を抽出・提 案する。

3. 実施項目とその関連、他研究との関連



<sup>©</sup>International Research Institute for Nuclear Decommissioning

### 3. 実施項目とその関連、他研究との関連 3.2 実施項目の関連性(1/2)

**No.12** 

(目標工程)2-③: 燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発





# 3. 実施項目とその関連、他研究との関連

3.2 実施項目の関連性(2/2)



#### 注記)

取り出し規模の更なる拡大PJ:「燃料デブリ・炉内構造物の取り出し規模の更なる拡大に向けた技術の開発※」PJ

燃料デブリ性状把握PJ :「燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発」PJ

廃棄物PJ 収納缶PJ :「固体廃棄物の処理・処分に関する研究開発」PJ :「燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発」PJ

IRID内の関連PJからの情報と本PJが発信する情報について、 共有・連携して調整することで整合が取れた成果を得る。 ※事業開始時の事業名称は「燃料デブリ・炉内構造物の取り 出しに向けた技術の開発」であるが、廃炉・汚染水対策チーム 会合/事務局会議(第75回)において公開された2020年度廃 炉研究開発計画に合わせ、「燃料デブリ・炉内構造物の取り出 し規模の更なる拡大に向けた技術の開発」と変更した。



### 4. 実施スケジュール 燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発



5. 実施体制図 (2021年3月末時点)

**No.15** 



IRID

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

**No.16** 

6.1 収納・移送・保管に係る調査及び研究計画立案

6.2 収納技術の開発

6.3 移送技術の開発(1)水素発生予測法の検討(2)水素対策の検討

6.4 乾燥技術/システムの開発(1)乾燥装置の基本仕様の検討(2)水素濃度測定技術の検討

6.5 評価まとめ

6.1 収納·移送·保管に係る調査及び研究計画立案 ①目的、目標

関連PJの最新動向、現場作業の最新動向を入手し、技術開発が有用となるよう連携する。また、海外の情報収集により技術開発の効率化を図る。

**No.17** 

#### ②既存技術との対比(必要に応じて)

技術としては個別に評価するものとし、本項での記載は省略する。

#### ③実施事項、成果(予実)

#### a.研究計画への最新動向の反映

技術開発が、関連PJとの整合や現場適用性の観点で有用なものとするため、合同会議 等により、取り出し規模の更なる拡大PJ、燃料デブリ性状把握PJ、廃棄物PJ等の最新 の知見や検討状況、東京電力ホールディングスにおける現場作業に関わる調整状況、 許認可に関わる調整状況等の最新動向/情報を入手し、研究計画に反映した。 2019年度は、例えば、取り出し規模の更なる拡大PJより、現状のユニット缶形状の計画 を入手し、乾燥試験計画への反映を行った。また、2020年度も東京電力ホールディング スとの情報交換等を踏まえて、計画に基づいて継続的に進めた。

#### b.海外情報の調査

2019年度は効率的な開発計画のため、既入手のTMI-2燃料デブリ乾燥にかかわる文献を再度評価した。(6.4 乾燥技術/システムの開発(1)乾燥装置の基本仕様の検討に記載)2020年度は追加の調査ニーズがなかった。

### 6.1 収納・移送・保管に係る調査及び研究計画立案

### ④成果の反映先への寄与

実施結果は本補助事業の個別の検討項目に反映する。

#### ⑤現場への適用性の観点における分析

個々の技術開発の現場への適用性については、個別技術の評価によるものとし、本項での記載は省略する。

#### ⑥目標に照らした達成度

他の事業や実プロジェクトの最新の検討状況・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・整理を行った。有識者意見も交えて 個々の研究計画に反映するという当初計画を達成した。

### ⑦今後の課題

技術としては個別に評価するものとし、本項での記載は省略する。

### 6.2 収納技術の開発 -実機大収納缶試作と構造検証試験-

### ①目的、目標

収納缶の仕様案および構造案を提案する。

そのために、2018年度に仮設定した収納缶の仕様案/構造案を必要に応じて見直し、実機大 収納缶の試作を行う。また、試作した収納缶を用いて評価事象における安全機能(臨界防止、 閉じ込め)の維持を確認するための構造検証試験を行う。

また、様々な事象における収納缶の構造健全性をシミュレートできる解析手法の適用性を、 構造検証試験の結果との比較・評価により確認する。

#### ②既存技術との対比(必要に応じて)

2018年度に検討した蓋構造のうち、ボルト構造は、ボルトの締付けにより蓋締めする方式であり、 既存技術の応用範囲内で設計が可能と考える。

一方、簡易取付構造は、蓋の回転により蓋締めする方式であり、超高圧力容器で実績がある ものの、落下・転倒等の事象発生時における収納缶全体(蓋構造、胴部、緩衝構造等を組み合わ せた状態)での構造健全性に懸念があるため、1Fでの収納缶の取扱いを踏まえた構造健全性の 確認が必要である。

### 6.2 収納技術の開発 -実機大収納缶試作と構造検証試験-

③実施事項、成果(予実)

a.構造検証試験の計画立案(1/2)

#### イ.試験を実施する事象の選定

収納缶の最新の取扱いフロー(横取り出し工法、乾式保管、金属容器保管)を事象選定の対象として、 各作業から事象を抽出することとした。

構造検証試験を実施する事象として、抽出した設計事象と評価事象のうち、構造強度への影響が大きい と考えられる収納缶の鉛直落下、傾斜落下、収納缶上部への収納缶の鉛直落下の事象を選定した。 落下高さは、建屋および移送容器の寸法を考慮して設定した。傾斜角度は予備解析の結果からシール部



IRID

# 6.2 収納技術の開発 -実機大収納缶試作と構造検証試験-

③実施事項、成果(予実)

a.構造検証試験の計画立案(2/2)

#### ロ.試験ケース・試験体系

各事象について、試験条件と実機大収納缶(試験体)構造の組合せで6ケースの構造検証試験を計画した。 試験は、実機で発生する事象を再現するために、下図の試験設備を準備して実施する計画とした。



IRID

#### 6. 実施内容 **No.22** 6.2 収納技術の開発 -実機大収納缶試作と構造検証試験-③実施事項、成果(予実) b.収納缶(試験体)の設計(1/4) イ.収納缶の仕様案 最新の収納缶取扱フローや取り出し規模の更なる拡大PJの検討状況等を考慮して、収納缶に対する 設計条件/設計方針を再整理し、収納缶の仕様案を設定した。 |吊り部 ・蓋の内部に収納缶吊上げ用の溝を設け、吊り装置を収納缶蓋外径より 蓋 も小さくすることで、収納スペースの形状(四角柱、円柱、プレート(抜き穴) ・遠隔操作が可能な構造として、蓋の回転で開閉できる簡易取付構造、TMI-2 )に影響されずに吊上げが可能な構造とした。 等で遠隔実績のあるボルト構造の2種類の蓋を設計した。 ・蓋上面の中央に設置していた吊り部を設置しないことで、緩衝構造の吊 ・万一、鉛直落下等の衝撃荷重を受けても、蓋の外れや大量の漏洩に至るよ り部への入り込みが発生しない構造とした。 うな損傷が起こらず、シール部からの継続的な漏えいが生じない構造とした。 シール ベント機構 保管中は保管施設で閉じ込め機能を担保するため、保管効率(蓋外径の 水ありの実測値ベースの水素発生量(乾燥するため水素発生量は、水ありの 最小化)、 蓋締め作業性や簡易取付構造への適用性などを優先して、エラ 実測値ベース以下まで低減すると想定)でカプラやフィルタなどを考慮した拡 ストマー系ガスケット(EPDM:エチレンプロピレンジエンゴム)を採用した。 散評価を実施し、カプラ内径1インチとした。また、収納缶取扱い時のベント開 閉操作等におけるリスク評価から常時開力プラを採用した。 セル間ポートと収納缶のシール方式 送気機構 ・セル間のエリア境界での汚染を極力抑止する方式として、収納缶本体の 上端平面をセル間ポートのシール部に押し付けてシールする構造とした。 ユニット缶状態で乾燥する場合は収納缶に送気機構は設置しないが、収納 ・セル間ポートから蓋締めまでの収納缶の取扱い中における汚染を極力 缶で燃料デブリを乾燥する場合は、胴部フランジに送気機構(送気用カプラ) 抑止する方式として、収納缶本体に内部蓋(水素ベント用フィルタ付)を設 を2ヶ所設置することとした。送気機構にはそれぞれ常時閉カプラを設置し、温 置する構造とした。 風が送気用カプラ(給気口)⇒配管⇒収納缶内部⇒送気用カプラ(排気口)の 順で収納缶下部から上部に流れるようにした。目詰まり防止のため送気用力 フィルタ プラにはフィルタを設置せず、系統側設備にフィルタを設置することとした。 水素拡散評価式による水素の放出評価を実施して、メッシュ径0.3 μm、 胴部 金網タイプ、SUS316のフィルタで水素濃度が4vol%未満を満足することを 確認した。なお、フィルタ径を拡大して流路の表面積を大きくすることで、目 ・内径は、未臨界維持が可能な220mmと、作業性向上のために内径を拡大し 詰まりの影響を受けにくい構造とした。 た400mmの2種類の胴部を設計した。 ・内部高さは、2体収納するユニット缶の高さ(400mm/体)と触媒ケース厚さ( 触媒 20mm(仮設定))に加え、ユニット缶の熱膨張、製作公差、およびユニット缶が ・触媒を内部蓋下部に設置することを想定し、触媒の設置スペースを設け 傾いて収納された場合の高さの合計寸法にマージンを考慮して設定した。 た構造とした。 ・胴部とフランジ部と底板のつなぎ目には衝撃荷重を受けた際の応力緩和の ためテーパ部を設けた構造とした。 緩衝構造 ・落下事象における収納物の跳ね上がりによる蓋内面への衝突防止、収 材質 図 収納缶の仕様案注 納缶の胴部の変形を低減するため、緩衝構造を設置する構造とした。製 耐SCC性、調達性、加工性などを考慮しSUS316Lを使用することとした。 (ボルト構造/内径220mm/送気機構ありの構造案) 作性が良いことなどから、DOE(スカート型)タイプを選定した。

■ ■ 1: 断面図については、構成部品を識別するため着色している。

# 5. 実施内容 6.2 収納技術の開発 -実機大収納缶試作と構造検証試験-③実施事項、成果(予実)

b.収納缶(試験体)の設計(2/4)

#### ロ.収納缶の構造案

収納缶は、蓋構造2種類(簡易取付構造、ボルト構造)、胴部内径2種類(220mm、400mm)、 送気機構 有/無の計8種類の構造案を検討した。



#### 6.2 収納技術の開発 -実機大収納缶試作と構造検証試験-③実施事項、成果(予実)

b.収納缶(試験体)の設計(3/4)

ハ.構造解析評価(1/2)

1)解析モデルおよび評価項目

収納缶の構造健全性の確認のため、評価事象のうち構造強度への影響が大きいと考えられる事象として、 収納缶の鉛直落下(9m)、収納缶の傾斜落下(9m、60°)、収納缶上部への収納缶の鉛直落下(7m)が 負荷された場合の影響を解析(汎用有限要素法解析ソフト:LS-DYNA)により評価した。なお、解析は収納缶 の形状・寸法で解析モデルを作成し、落下高さに相当する衝突速度(落下高さ9mの場合: √2gh = 13.3m/s) を付与した。



く評価項目>

(a)閉じ込め機能(相当塑性ひずみ)

ひずみの値から、蓋の結合部や胴部が破断に至らないこと(破断に 相当する塑性ひずみ(SUS316L:30%)が発生しないこと)を確認する。

#### (b)閉じ込め機能(シール部のすき間変位)

シール部のすき間の変位から、Oリングのつぶし代(0.8mm(上面)、 0.9mm(側面))を超えないことを確認する。なお、漏えいが発生する 継続時間が短い瞬間的な口開きは許容するものとする。



# 6.2 収納技術の開発 -実機大収納缶試作と構造検証試験-

③実施事項、成果(予実)

b.収納缶(試験体)の設計(4/4)

ハ.構造解析評価(2/2)

#### 2)解析結果まとめ

解析評価の結果、各収納缶の構造案について、安全機能(閉じ込め、臨界防止)が維持されることを確認 した。なお、傾斜落下においては、Oリングシール部で瞬間的な口開きが生じる可能性が確認されたが、 継続的なロ開きはなく、閉じ込め性は維持されると考える。

				衣 胜位	「桁朱のよ	.Ca)					
				簡易取付構造			ボル	ボルト構造			
事象	安全機能	機能 解析の評価項目	内径2	内径220mm		内径400mm		内径220mm		内径400mm	
			送気機構無	送気機構有	送気機構 無	送気機構有	送気機構 無	送気機構有	送気機構 無	送気機構有	
		相当塑性ひずみ	0	0	0	0	0	0	0	0	
収納缶の	閉じ込め	シール部のすき間	0	0	0	0	0	0	0	0	
	未臨界維持	胴部内径の変形量	0	0	0	0	0	0	0	0	
		相当塑性ひずみ	0	0	0	0	0	0	0	0	
収納缶の 傾斜落下	閉じ込め	シール部のすき間	0	0	ム 瞬間的な口開きの 可能性あり (最大0.65mm)	ム 瞬間的なロ開きの 可能性あり (最大0.83mm)	0	0	ム 瞬間的な口開きの 可能性あり (最大0.59mm)	0	
	未臨界維持	胴部内径の変形量	0	0	0	0	0	0	0	0	
山物先上		相当塑性ひずみ	0	0	0	0	0	0	0	0	
も 部への収 納缶鉛直	閉じ込め	シール部のすき間	0	0	0	0	0	0	0	0	
落下	未臨界維持	胴部内径の変形量	0	0	0	0	0	0	0	0	

#### 

#### 

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

### 6.2 収納技術の開発 -実機大収納缶試作と構造検証試験-

### ③実施事項、成果(予実)

### c.収納缶(試験体)の試作

### イ.収納缶(試験体)の構造・試作

構造検証試験の計画立案、収納缶(試験体)の設計の検討結果にもとづき、基本的に実機と同じ構造/ス ケールで6種類、計8体の実機大収納缶(試験体)を試作した。ただし、収納物(ユニット缶、燃料デブリなど) は、外形寸法と質量を模擬した模擬体を準備した。また、収納缶(試験体)内部に設置したひずみゲージと 加速度計の計測ケーブルを引き出すためのフランジを、強度評価上の影響が少ない箇所に設置した。

				公 大阪(心足木		Χ.				
	Į	目		実機(想定条件)	収納缶(試験体)	条件設定の考え方				
		从汉	内径 220mm	<u>Φ210mm (PLAN-A,C)</u> Φ200mm (PLAN-B)	φ210mm	取り出しPJの各PLANのうち、最大 寸法で設定				
		7111	内径 400mm	Ф390mm(PLAN-B)	ф390mm			フランジ ← 蓋		
	ユニット缶 (または収納 物模擬体)	高さ	内径 220mm	200mm (PLAN-A) 325mm (PLAN-B) <u>400mm (PLAN-C)</u>	400mm	取り出しPJの各PLANのうち、最大 寸法で設定				
					内径 400mm	400mm(PLAN-B)	400mm		(a)蓋	H AR
		員数		4個(PLAN-A) <u>2個(PLAN-B,C)</u>	2個	取り出しPJの各PLANのうち、1個 当たりの質量が大きい2個で設定		内部センサーケーブル 引き出し用フランジ		
	燃料デブリ	充填率 30% ブリ 収納		30%	50% (UO <sub>2</sub> 充填率50%相当 の質量を、収納物模 擬体で模擬)	構造強度の評価上、保守側の条 件として設定		胴部 <b>、</b> 緩衝構造 底相		
	物模擬体)	ą	密度	2.5×10 <sup>-6</sup> ~11×10 <sup>-6</sup> kg/mm <sup>3</sup> (コンクリート密度 ~UO <sub>2</sub> 密度)	11×10 <sup>-6</sup> kg/mm <sup>3</sup> (UO <sub>2</sub> 密度相当の質量 を、収納物模擬体で 模擬)	構造強度の評価上、保守側の条 件として設定	(b)蓋(内側)			
	内部センサー 引き出し用フ	・ケーブ ランジ	้าเ	なし	あり	ひずみゲージ、加速度計の計測 ケーブル引き出し用として設定	■■■■ 図 実機大収納缶(	(c)組立状態 (試験体)の試作状況		
							(ボルト構造/胴部内径22	0mm/送気機構なしの場合)		

表 実機(想定条件)と試験体の比較

### 6.2 収納技術の開発 -実機大収納缶試作と構造検証試験-

### ③実施事項、成果(予実)

- d.構造検証試験の実施(1/3)
  - イ.試験結果(代表例:鉛直落下、傾斜落下)

試験後の試験体は、蓋の外れ、蓋および本体部(フランジ、胴部、底板)に内外を貫通する割れは確認されず、漏えい率は目標値以下であった。また、胴部に有意な変形も確認されなかった。傾斜落下(簡易取付構造/内径400mm/送気管あり)では、試験後の蓋開放ができなかった。なお、送気機構のカバーが変形してエルボに接触したが、配管の損傷は確認されなかった。



6.2 収納技術の開発 -実機大収納缶試作と構造検証試験-

③実施事項、成果(予実)

- d.構造検証試験の実施(2/3)
  - ロ.試験結果(代表例:収納缶上部への収納缶の鉛直落下)

試験後の試験体は、蓋の外れ、蓋および本体部(フランジ、胴部、底板)に内外を貫通する割れは確認され ず、漏えい率は目標値以下であった。また、胴部に有意な変形も確認されなかった。



IRID

### 6.2 収納技術の開発 -実機大収納缶試作と構造検証試験-

#### ③実施事項、成果(予実)

d.構造検証試験の実施(3/3)

#### ハ.試験結果まとめ

試験の結果、各試験体について、安全機能(閉じ込め、臨界防止)が維持されることを確認した。なお、傾 斜落下においては、Oリングシール部で瞬間的な口開きが生じた可能性はあるが、継続的な口開きはなく、 閉じ込め性は維持されたと考える。ただし、傾斜落下の簡易取付構造は、試験後に蓋開放ができなかった ため、取扱性の観点では課題が残る結果となった。

**No.29** 

		試験結果								
		鉛直落下試験		傾斜落下試験		収納缶上部への収納缶の落下試験				
女王愤能	試験時の確認項目	簡易取付 内径400mm	ボルト 内径220mm	簡易取付 内径400mm	ボルト 内径220mm	簡易取付 内径220mm 上段	簡易取付 内径220mm 下段	ボルト 内径400mm 上段	ボルト 内径400mm 下段	
	漏えい試験	0	0	0	0	0	0	0	0	
	外観確認	0	0	0	0	0	内価上部への収納缶の落下試験         簡易取付 内径220mm 下段       ボルト 内径400mm 下段         0       0         0       0         0       0         0       0         0       0         0       0         0       0         0       0         0       0         0       0         0       0         0       0         0       0         0       0         0       0         0       0         0       0         0       0         0       0			
閉じ込め	ひずみ時刻歴計測 (Oリングシール面近傍の塑性変形有無確認)	0	0	- 計測データ欠落 <sup>注1</sup>	- 計測データ欠落 <sup>注1</sup>	0	0	0	0	
前易取付 内径400mmボルト 内径220mm簡易取付 内径400mm漏えい試験〇〇〇外観確認〇〇〇ひずみ時刻歴計測 (ワリングシール面近傍の塑性変形有無確認)〇〇〇ジジシール部の瞬間的な口開き確認 (蓋と本体部の相対変位測定)〇〇〇臨界防止寸法確認 (胴部内径の寸法測定)〇〇〇取扱い機能蓋開放の確認〇〇〇	ム 瞬間的な口開き の可能性あり	ム 瞬間的な口開き の可能性あり	0	0	0	0				
臨界防止	寸法確認 (胴部内径の寸法測定)	0	0	0	0	0	0	0	0	
(取扱い機能)	蓋開放の確認	0	0	× 蓋開放不可 <sup>注2</sup>	0	0	0	0	0	

表 試験結果まとめ(全試験ケース)

注1:ひずみ時刻歴計測にて計測データが欠落したが、漏えい試験等の他の確認結果から閉じ込め性の維持が確認できることから、計測データの欠落は問題ないと評価した。

注2:現状、収納缶の落下は評価事象と考えているため、蓋開放不可は、設備または運用により落下の発生を防止することで対応することを基本とする。万一、落下が発生して蓋が開放できなった場合は、切断等の特別な方 法で対応するものとする。設備または運用により落下の発生を防止できない場合には、収納缶の構造変更(例:蓋部に緩衝体を付ける等)での対応も考えられるが、設備(例:床を衝撃吸収材にする)または運用(例:収 納缶の吊上げ高さの制限)で対応する方が合理的であると考える。

### 6.2 収納技術の開発 -実機大収納缶試作と構造検証試験-

#### ③実施事項、成果(予実)

e.構造検証試験の評価(1/8)

#### イ.構造解析の解析手法

収納缶の構造健全性をシミュレートできる解析手法(解析コード、解析モデル、解析条件など)の適用性を 確認するため、構造検証試験の試験条件を模擬した構造解析(事後解析)を実施し、事後解析結果と試験 結果の比較により、事後解析の確からしさを確認する。

落下面は試験場の特性をモデル化し、落下姿勢はハイスピードカメラにて確認した実際の衝突角度とした。 衝突速度は全ての試験において概ね理論値通りであったことから、理論値とした。



IRID

### 6.2 収納技術の開発 -実機大収納缶試作と構造検証試験-

- ③実施事項、成果(予実)
- e.構造検証試験の評価(2/8)
  - ロ.落下時の挙動評価結果(1/3)
  - 落下時の挙動について、解析上での再現性を確認するため、試験体の変形に費やされたエネルギー評価 に係るパラメータを比較した。
  - 1) 収納缶の鉛直落下(代表例:ボルト構造/内径220mm/送気機構なし)

衝突直前の運動エネルギーは最大変形時点では全て緩衝構 造のひずみエネルギーとなり、その後、緩衝構造の変形による 吸収エネルギーと跳ね上がりの運動エネルギーになると仮定し た。試験と解析の<u>緩衝構造の変形量*δ*</u>および<u>跳ね上がりの速</u> 度v'を比較することによって、試験体に加わる荷重の解析妥当 性を確認する。









### 6.2 収納技術の開発 -実機大収納缶試作と構造検証試験-

- ③実施事項、成果(予実)
- e.構造検証試験の評価(3/8)
  - ロ.落下時の挙動評価結果(2/3)
  - 2) 収納缶の傾斜落下(代表例:簡易取付構造/内径400mm/送気機構あり)

傾斜落下では、一次衝突時に緩衝構造がエネルギーを吸収した後、底部側が跳ね上がり回転運動となる。二次衝突直前の回転運動エネルギーが蓋部側の衝突エネルギーになると仮定した。 試験と解析の<u>角速度ωと衝突角度</u>のを比較することによって、試験体に加わるエネルギーの解析妥当性を確認する。 傾斜落下時の挙動に係る二次衝突前の角速度と二次衝突角度 について、試験結果と解析結果の比較を実施した。角速度の差異 は約0.5%であり、二次衝突角度も概ね一致していることから解析 は傾斜落下挙動を概ね再現できていると考える。

二次衝突前の角速度

比較項目	試験結果	事後解析結果	差異
二次衝突前の角速度	20.5 rad/s	20.6 rad/s	0.5%



 $E: 衝突直前の運動エネルギー F: 緩衝構造(試験体)に加わる荷重<math>\omega$ :角速度 h: 落下高さ x: 緩衝構造変形量 I: 慣性モーメント $<math>v: 衝突速度 \delta: 最大変形時の緩衝構造変形量 \theta: 二次衝突角度$ W: 緩衝構造のひずみエネルギーK: 回転運動エネルギー

E-W=K

図 傾斜落下時の挙動







No.32

図 試験と事後解析の二次衝突角度の比較



- 6.2 収納技術の開発 -実機大収納缶試作と構造検証試験-
  - ③実施事項、成果(予実)
  - e.構造検証試験の評価(4/8)
    - ロ.落下時の挙動評価結果(3/3)
    - 3) 収納缶上部への収納缶の鉛直落下(代表例:簡易取付構造/内径220mm/送気機構なし)

衝突直前の運動エネルギーは最大変形時点では全て緩衝構 造のひずみエネルギーとなり、その後、緩衝構造の変形による 吸収エネルギーと跳ね上がりの運動エネルギーになると仮定し た。試験と解析の<u>緩衝構造の変形量*δ*</u>および<u>跳ね上がりの速</u> 度v'を比較することによって、試験体に加わる荷重の解析妥当 性を確認する。



鉛直落下時の挙動に係る緩衝構造の変形量と最大変形後の 跳ね上がり速度について、試験結果と解析結果の比較を実施し た。跳ね上がり速度の最大値の差異は約6%であり、解析は鉛 直落下挙動を再現できていると考える。

No.33

・<u>跳ね上がり速度</u>



IRID

### 6.2 収納技術の開発 -実機大収納缶試作と構造検証試験-

#### ③実施事項、成果(予実)

- e.構造検証試験の評価(5/8)
  - ハ.安全機能に係る解析の確からしさの評価結果(1/4)
  - 1) 収納缶の鉛直落下(代表例:ボルト構造/内径220mm/送気機構なし)

閉じ込め性能に係る蓋とフランジの軸方向の相対変位について、試験結果と解析結果の比較を実施した。蓋とフランジの軸方向の相対変位の最大値の差異は許容値の14%程度である。

#### ・蓋とフランジの軸方向の相対変位



図 試験と事後解析の蓋とフランジの軸方向の相対変位比較

臨界防止機能に係る胴部の内径寸法と胴部のひずみについて、試験 結果と解析結果の比較を実施した。

胴部の内径寸法に有意な差異はなく、胴部中央の周方向のひずみも 傾向が概ね一致していることから、解析上で臨界防止機能維持の評価 が可能であると考える。

#### ・<u>胴部の内径寸法</u>





IRID

### 6.2 収納技術の開発 -実機大収納缶試作と構造検証試験-

#### ③実施事項、成果(予実)

- e.構造検証試験の評価(6/8)
  - ハ.安全機能に係る解析の確からしさの評価結果(2/4)

2) 収納缶の傾斜落下(代表例:簡易取付構造/内径400mm/送気機構あり)

閉じ込め性能に係る蓋とフランジの軸・径方向の相対変位について、試験結果と解析結果の比較 を実施した。蓋とフランジの軸方向の相対変位の最大値の差異は軸方向で許容値の約44%、径方 向で許容値の約11%であった。変位が最大となるタイミング、波形共に良く一致しており、蓋部の 軸・径方向の挙動が解析上で再現できていると考える。許容値に対して裕度が小さいため、解析評 価の際には適切なマージンを設定する必要がある。 臨界防止機能に係る胴部の内径寸法と胴部 のひずみについて、試験結果と解析結果の比 較を実施した。胴部の内径寸法に有意な差異 はなく、胴部中央の周方向のひずみも傾向が 概ね一致していることから、解析上で臨界防止 機能維持の評価が可能であると考える。





#### No.35

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning
### 6.2 収納技術の開発 -実機大収納缶試作と構造検証試験-

- ③実施事項、成果(予実)
- e.構造検証試験の評価(7/8)
  - ハ.安全機能に係る解析の確からしさの評価結果(3/4)
  - 3) 収納缶上部への収納缶の鉛直落下(代表例:簡易取付構造/内径220mm/送気機構なし)

閉じ込め性能に係る蓋とフランジの軸方向の相対変位と蓋ボルトの軸方向ひずみについて、試験結果と解析結果の比較を実施した。蓋とフランジの軸方向の相対変位の最大値の差異は許容値の14%程度である。

・蓋とフランジの軸方向の相対変位

 ・胴部の内径寸法 比較項目 試験結果 事後解析結果 差異 許容値 試験結果 事後解析結果 比較項目 差異 許容値 上段最大:0.04mm 上段最大:0.27mm 蓋とフランジの軸方向の 残留変位:なし 残留変位:なし 上段:0.23mm 上段最大:222mm 最大:220mm 245mm以下 0.8 mm 胴部の内径寸法 有意な差異なし 相対変位 下段最大:0.06mm 下段最大:0.02mm 下段:-0.03mm (上下段共) 下段最大:223mm (目標232.5mm以下) 残留変位:なし 残留変位:なし ・胴部のひずみ 上段収納缶試験体 300°位置 下段収納缶試験体 300°位置 下段収納缶試験体 180°位置 上段収納缶試験体 180°位置 1 1 1000 1000 ——解析結果 ——解析結果 ——解析結果 —解析結果 ——試驗結果 — 試驗結果 — 試験結果 0.5 0.5 500 500 ひずみ[μ] **変位[mm]** ひずみ[μ] 0 0 0 -0.5 -0.5 -500 -500 -1 -1000 -1000 -1 0.000 0.005 0.010 0.015 0.020 0.025 0.030 0.000 0.005 0.010 0.015 0.020 0.000 0.005 0.010 0.015 0.020 0.000 0.005 0.010 0.015 0.020 0.025 0.030 時間[s] 時間[s] 時間[s] 時間[s] 試験と事後解析の蓋とフランジの軸方向の相対変位比較 义 試験と事後解析の胴部の周方向ひずみ比較 义



**奕位[mm]** 

臨界防止機能に係る胴部の内径寸法と胴部のひずみについて、

胴部の内径寸法に有意な差異はなく、胴部中央の周方向のひ ずみも傾向が概ね一致していることから、解析上で臨界防止機

試験結果と解析結果の比較を実施した。

能維持の評価が可能であると考える。

6.2 収納技術の開発 -実機大収納缶試作と構造検証試験-

③実施事項、成果(予実)

e.構造検証試験の評価(8/8)

ハ.安全機能に係る解析の確からしさの評価結果(4/4)

#### 4)評価結果まとめ

閉じ込め性能に係る蓋とフランジの相対変位について、試験結果と解析結果を比較した結果、 最大値、残留変位共に差異は0.6mm以下であり、概ね一致していることを確認した。ただし、許 容値に対する裕度が少ないため、解析評価の際には適切なマージンを設定する必要がある。 臨界防止機能に係る胴部の内径寸法および胴部のひずみについて、試験結果と解析結果を 比較した結果、概ね一致しており、解析上で評価できることを確認した。

中人爆化	计除效用上网长效用不比数百日	新年七计	鉛直落下		傾斜落下		収納缶上部への 収納缶の鉛直落下	
女主饿能		計ਘ力本	簡易取付構造 内径400mm	ボルト構造 内径220mm	簡易取付構造 内径400mm	ボルト構造 内径220mm	簡易取付構造 内径220mm	ボルト構造 内径400mm
閉じ込め	蓋とフランジの軸方向相対変位 閉じ込め		0.09 mm (残留変位なし)	0.11 mm (残留変位なし)	−0.35 mm (−0.6 mm)	0.28 mm (0.2 mm)	上段 0.23 mm (残留変位なし) 下段-0.03 mm (残留変位なし)	上段 0.08 mm (残留変位なし) 下段0.06 mm (残留変位なし)
	蓋とフランジの径方向相対変位	最大値 (残留変位)	-	-	0.09 mm (0.6 mm)	0.00 mm <sup>注1</sup> (0.4 mm)	-	-
臨界防止	胴部内径寸法	最大值比較	有意な差異 なし	有意な差異 なし	有意な差異 なし	有意な差異 なし	上段、下段とも に有意な差異 なし	上段、下段とも に有意な差異 なし
	胴部のひずみ	傾向比較	概ね一致	概ね一致	概ね一致	概ね一致	概ね一致	概ね一致

表 構造解析の確からしさの検証まとめ(試験結果と解析結果)

### 6.2 収納技術の開発 -実機大収納缶試作と構造検証試験-

③実施事項、成果(予実)

f.収納缶仕様および構造の検討(1/2)

### イ.収納缶の仕様案および構造案

落下試験および構造解析の結果、安全機能(閉じ込め、臨界防止)が維持されることが確認できたことから、収納缶の 仕様案/構造案は見直しは不要と判断した。ただし、送気機構のカバーは、過大変形時に配管を潰すリスク低減や目視 点検の実施等を勘案して削除するものとした。

最終的な蓋構造は、蓋の回転で蓋開閉できる『簡易取付構造』と、TMI-2等での遠隔操作による実績があり一般的な 固定方法である『ボルト構造』の2種類を提案する。



### 6.2 収納技術の開発 -実機大収納缶試作と構造検証試験-

③実施事項、成果(予実)

f.収納缶仕様および構造の検討(2/2)

### ロ.収納缶の構造案

収納缶は、蓋構造2種類(簡易取付構造、ボルト構造)、胴部内径2種類(220mm、400mm)、 送気機構 有/無の計8種類の構造案を提案する。



図 収納缶の構造案(全8種類)

注1:送気機構は、乾燥を収納缶状態/温風乾燥方式で実施する場合に、給気/排気ラインとして使用する。なお、取扱いフロー案では、乾燥はユニット缶状態で実施することをメインプロセスとしている。 注2:送気機構のカバーは、過大変形時に配管を潰すリスク低減や目視点検の実施等を勘案して削除するものとした。



### 6.2 収納技術の開発 -実機大収納缶試作と構造検証試験-

### ④成果の反映先への寄与

提案する収納缶の仕様案/構造案をもとに、実機収納缶の設計・製作に寄与できるものと考える。 また、収納缶の関連設備(増設建屋、保管施設、取扱装置など)の検討にも寄与できるものと 考える。

### ⑤現場への適用性の観点における分析

1Fにおける収納缶の収納から保管までの取扱い、および取扱い中に想定される評価事象を考慮 して収納缶の仕様/構造案を提案しており、現場への適用性に問題はないと考える。 ただし、傾斜落下の簡易取付構造は、試験後に蓋開放ができない事象が確認されたため、現場 適用時には設備側で落下事象の発生を防止する、または落下高さを低減するなどの対応が必要 と考える。

### ⑥目標に照らした達成度

目標達成を判断する以下の指標が満足できていることから、目標を達成できたと判断する。 ・仮設定した収納缶仕様案及び構造案について、構造検証試験または解析によって、構造健 全性が確認されていること。

・構造健全性の確認結果に基づき、収納缶仕様案および構造案が提案されていること。



# 6.2 収納技術の開発 -実機大収納缶試作と構造検証試験-

### ⑦今後の課題

本補助事業で提案した収納缶の仕様案/構造案を踏まえ、実機適用に向けた課題を整理した。

課題	<u>  実施時期<sup>注1</sup></u>		備考
粉状、スラリー・ス ラッジ状燃料デブ リの収納	開発	収納缶の仕様案/構造案は、粒状・塊状の燃料デブリ(粒径0.1mm以上)を収納対象として検討したものであり、粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリを収納した場合、仕様案/構造案の見直しが必要になる可能性がある。	次ステップ の補助事業 で実施中
収納缶フィルタの 性能評価	開発	粒状・塊状の燃料デブリに付随して収納缶内に収納される粉状の燃料デブリが、種々の取扱 いや処理(乾燥処理など)によって舞い上がり、フィルタからの水素放出性能の低下やフィル タが閉塞することが懸念される。粉状燃料デブリによるフィルタ性能(閉塞や劣化等)への影 響の検討が必要となる。	次ステップ の補助事業 で実施中
収納缶状態での乾 燥	開発 または実機	収納缶状態で乾燥する場合、設置した送気機構を使用して乾燥ガスを通気させるが、チャン バー方式(ユニット缶状態)での乾燥に比べて処理時間が増大することが懸念される。 乾燥装置の性能確認の結果、乾燥の処理時間が増大した場合は、収納缶の送気機構の構 造見直しが必要となる。	
水素放出の机上評 価の検証	開発 または実機	水の放射線分解により発生した水素の放出評価は、物質の拡散に関する基本法則である フィックの第一法則を用いた机上計算により評価しているが、要素試験等によって机上計算 の検証を実施することが望ましい。	
セル間ポート(ダブ ルドア相当)の検 討	実機	セル間ポートから蓋締めまでの収納缶の取扱い中における汚染を極力抑止する方式として、 収納缶本体に内部蓋を設置する構造案を設定したが、既存製品や他の補助事業で検討して いるダブルドアの技術を参考に、セル間ポート(ダブルドア相当)の仕様/構造の具体化検討 が必要である。	
収納缶の合理化	実機 または運用	収納缶の仕様案/構造案は、燃料デブリの性状が不確定であることや、収納缶の取扱い施設 等が具体化していないことから、保守的な条件で設定しているが、実機においては、費用面 での合理化も必要となる。例えば、落下事象の発生を設備側で防止することで緩衝構造を削 除するなど、収納缶への要求条件の削除や緩和によって、合理化の検討ができるものと考え る。	
	課題         粉状、スラリー・ス ラッジ状燃料デブ リの収納         収納缶フィルタの         収納缶フィルタの         収納缶での乾燥         水素放出の机上評         価の検証         セル間ポート(ダブ ルドア相当)の検討         収納缶の合理化	課題実施時期***粉状、スラリー・ス ラッジ状燃料デブ リの収納開発収納缶フィルタの 性能評価開発収納缶状態での乾 燥開発 または実機水素放出の机上評 価の検証開発 または実機セル間ポート(ダブ ルドア相当)の検 討実機 または運用	課題         実施時期本         内容           粉状、スラリー・ス ラッジ状燃料デブリ         開発         収納缶の仕様案/構造案は、粒状・塊状の燃料デブリ(粒径0.1mm以上)を収納対象として検 討したものであり、粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリを収納した場合、仕様案/構造案の 見直しが必要になる可能性がある。           収納缶フィルタの 性能評価         開発         粒状・塊状の燃料デブリに付随して収納缶内に収納される粉状の燃料デブリが、種々の取扱 いや処理(乾燥処理など)によって舞い上がり、フィルタからの水素放出性能の低下やフィル 夕が閉塞することが懸念される。粉状燃料デブリによるフィルタ性能(閉塞や劣化等)への影響の検討が必要となる。           収納缶状態での乾 燥         開発 または実機         収納缶状態で乾燥する場合、設置した送気機構を使用して乾燥ガスを通気させるが、チャン バー方式(ユニット缶状態)での乾燥に比べて処理時間が増大った場合は、収納缶の送気機構の構 造見直しが必要となる。           水素放出の机上評 価の検証         開発 または実機         水の放射線分解により発生した水素の加型時間が増大した場合は、収納缶の送気機構の構 造見直しが必要となる。           水素放出の机上評 価の検証         開発 または実機         水の放射線分解により発生した水素の加型時間が増大した場合は、収納缶の送気機構の構 造見直しが必要となる。           水素放出ののれ上評 備の検証         実機         水の放射線分解により発生した水素の放出評価は、物質の拡散に関する基本法則である フィックの第一法則を用いた机上計算により評価しているが、要素試験等によって机上計算 の検証を実施することが望ましい。           セル間ポートから蓋締めまでの収納缶の取扱い中における汚染を極力抑止する方式として、 収納缶本体に内部蓋を設置する構造案を設定したが、既存製品や他の補助事業で検討して いるダブルドアの技術を参考に、セル間ポート(ダブルドア相当)の仕様/構造の具体化検討 が必要である。           収納缶の合理化         実機 素たは運用         収納缶の仕様案/構造案は、燃料デブリの性状が不確定であることや、収納缶の取扱い施設           除するなど、収納缶のの要求条件の削除や緩和によって、合理化の検討ができるものと考え る。

表 実機適用に向けた課題

# 6.2 収納技術の開発 -実機大収納缶試作と構造検証試験-まとめ

収納技術の開発として、収納缶に対する安全要求を踏まえ、構造検証試験の計画立案、収納缶 (試験体)の設計・試作、及び構造検証試験の実施・評価を実施した。

また、構造検証試験の結果と構造解析の比較・評価を行った結果、落下時の挙動、安全機能維持に係わる蓋とフランジの相対変位、胴部内径、及びひずみが概ね一致していることが確認できたことから、解析手法の適用性を確認した。

構造検証試験および構造解析の結果から、設計した収納缶の仕様案/構造案について、安全 機能(閉じ込め、臨界防止)が維持されることを確認した。

構造検証試験及び構造解析の結果を踏まえ、最終的な収納缶の仕様案/構造案を提案した。



### 6. 実施内容 6.3 移送技術の開発 (1)水素発生予測法の検討

### ①目的、目標

1F燃料デブリ条件に適した水素発生予測法案、その水素発生予測法を用いた収納缶水素発生量予測値、および水素発生量予測値にもとづいた移送条件案を提案する。

そのために、これまでの検討結果に加え、過去の研究成果の調査・分析を行い、既往の水素 発生予測法の分析や水素ガス発生に大きく影響する因子の分析等を行う。また、水素発生試験 により評価に用いるデータを取得する。

#### ②既存技術との対比(必要に応じて)

水の放射線分解に対するα線の影響は確認されているものの、TMI-2含めβ線、γ線との 共存体系での知見は報告例が少ないため、1F固有の条件を考慮した検討が必要となる。 特に、水素発生量評価への影響が大きい因子と考えるエネルギー吸収率の設定方法および 妥当性確認方法の検討が必要である。

# **6.3 移送技術の開発**

(1)水素発生予測法の検討

- ③実施事項、成果(予実)
- a.移送条件案設定に必要な実施内容の検討(1/2)
  - 従来注1の水素発生量評価では、放射線の全エネルギーが水の放射線分解に寄与する保守的な評価 (R<sub>H2(max</sub>)としているが、燃料デブリの移送条件に過度な制限が必要となる。
  - 実際には、燃料デブリの自己遮蔽効果によって、放射線分解に寄与するエネルギーは限定されるため、 自己遮蔽効果を考慮した評価として、燃料デブリの粒子が微粒子の場合(R<sub>H2(PHITS)powder</sub>)と粒径依存性まで 考慮する場合(R<sub>H2(PHITS)d</sub>)について検討し、粒子輸送計算によるエネルギー吸収率を用いることで、移送条件 の制限緩和を検討することとした。

**No.44** 

なお、粒子輸送計算のコードは、輸出管理上の制約がないこと、計算の条件入力や結果出力の使いやすさなどを考慮してJAEAが中心で開発した "PHITS<sup>注2</sup>"を用いてエネルギー吸収率を評価する方針とした。



# **6.3 移送技術の開発**

(1)水素発生予測法の検討

- ③実施事項、成果(予実)
- a.移送条件案設定に必要な実施内容の検討(2/2)
- PHITSを用いたエネルギー吸収率評価の妥当性は、評価実績が確認できなかったことから、水素発生試験 から得られるエネルギー吸収率とPHITSの計算結果を比較評価することで、実際の現象に対してPHITSの 計算結果がどの程度の保守性を持つのかを確認する方針とした。
- なお、妥当性確認に使用可能な既存の試験結果として、2018年度に実施した使用済燃料ペレット片を用いた水素発生試験の試験結果が考えられるが、再評価の結果、水素発生速度を低下させる因子であるペレット片同士の接触やペレット片-試験水層の気泡の影響が含まれた試験結果となっていたと評価し、保守性が低い可能性がある2018年度の試験結果は、エネルギー吸収率評価の妥当性確認には適さないと考えた。 そのため、粒径や放射能が既知の放射線源を用いて、粒子同士の接触や粒子-試験水層の気泡の影響を 排除するために攪拌し、粒子を浮遊させた以下のような水素発生試験が必要と考えた。

#### 【水素発生試験(使用済燃料試験)】

使用済燃料ペレット片を用いた試験により、 α線、β線およびγ線の共存体系において、 PHITS計算結果から評価した線種ごとのエ ネルギー吸収率を入力値としたリニアモデ ルによる水素発生速度が、試験結果(水素 発生速度)に対して適度に保守的であること を確認する。





- (1)水素発生予測法の検討
  - ③実施事項、成果(予実)
  - b.水素発生試験の実施(1/3)
  - (i)水素発生試験(使用済燃料試験)の試験条件

ペレット片同士の接触やペレット片-試験水層の気泡の影響を排除 するために、攪拌により粒子を浮遊させ、粒径依存性を確認するた め粒径をパラメータとした試験を実施する。また、水への再結合の影 響を確認するため、再結合を抑制するハロゲンイオンを添加した試 験水(ハロゲン有)と添加しない試験水(ハロゲン無)を用いる。また、 攪拌の有無の影響を確認するため、攪拌無の試験も実施する。



表 使用済燃料試験の試験条件

図 使用済燃料試験の試験状況

			-						
ケースNo.	概要	ペレット片		試!	攪拌	討酴搢堷	試験	試験	
		質量	<b>粒径<sup>注1</sup></b>	水量	水質		H-13/1-4-30	期間	回数
ケース1	粒径0.015mm程度		0.0085mm		ハロゲン有 <sup>注2、注3</sup> )	有	<気相部ガス> 大気 <初期内圧> 大気圧程度	10日、20日	4回
ケース2	粒径0.1mm程度		0.123mm	ペレットドは待の				10日、31日	3回 <sup>注4</sup>
ケース3	粒径0.3mm程度	10。程度	0.415mm	ベレット方体積の 30倍程度 (撹拌可能な 水量)				10日、20日、31日	4回
ケース4	粒径0.1mm程度、 純水	TUG1±/Q	0.102		ハロゲン無 <sup>注3</sup>			10日、20日	2回
ケース5	粒径0.1mm程度、 攪拌無		0.123mm		·····································	無	<温度>	31日	1回
ケース6	ブランク試験	なし	-	ケース1~5と 同程度	ハロソノ有	有	至温	10日	1回
注1:試験前のペレット片に対して実施したSEM分析結果から評価した体積平均の粒径を記載する。									

注1:試験前のペレット片に対して実施したSEM分析結果から評価した体積平均の粒径を記載する。 注2:人工海水(塩化物イオン濃度で5.6×10<sup>-4</sup>mol/L、20ppm相当)、ヨウ化ナトリウム(ヨウ化物イオン濃度で1.0×10<sup>-4</sup>mol/L)を添加する。 注3:粒子の凝集対策として、pH調整剤(NaOH)を添加し、pH9~10に調整する。

注4:ケース4、ケース5終了後のペレット片を再使用する。

tional Research Institute for Nuclear Decommissioning

- (1)水素発生予測法の検討
  - ③実施事項、成果(予実)
  - b.水素発生試験の実施(2/3)

### (ii)水素発生試験(使用済燃料試験)の試験結果

使用済燃料試験の結果、PHITS計算結果から評価したエネルギー吸収率を入力値としたリニアモデルによる微粒子の水素発生量(R<sub>H2(PHITS)powder</sub>)が、試験結果に対して適度に保守的であったことから、PHITS計算による水素発生量評価の有効性が確認できた。

ー方で、粒径依存性まで考慮する水素発生量(R<sub>H2(PHITS)d</sub>)については、試験結果の平均値では保守的で あることが確認されたため有効性は期待できるものの、ばらつき(1σ)の上限値はPHITS計算結果よりも 高い値となった。



表 試験結果の凡例

	ハロ ゲン	攪拌	水/UO₂体積比	出典
0	有	有	33	
	無	有	33	本研究
$\bullet$	有	無	33	
	有	兼	14	
•	有	無	1	201/~2018年度 (
	有	無	1	医刀仍然补张外不

IRID

図 試験結果 水素発生速度と粒径の関係

- (1)水素発生予測法の検討
  - ③実施事項、成果(予実)
  - b.水素発生試験の実施(3/3)
  - (iii)水素発生試験(使用済燃料試験)の試験結果の評価

粒径依存性まで考慮する水素発生量(R<sub>H2(PHITS)d</sub>)について、試験結果のばらつき(1σ)の上限値がPHITS 計算結果よりも高い値となった要因を検討し、試験結果の補正による評価を実施した。



注1: S.Nilsson, M.Jonsson, J.Nucl.Mater, 372, p.160 (2008)より 注2: ヘンリーの法則より、試験液体積30mLと試験容器気相部体積279cm<sup>3</sup>の気液分配を考慮



⇒試験後のSEM画像から、粒径が0.005~0.256mm程度に減少していることを 確認。割れにより0.1mmまで減少したと仮定。 要因2:粒界の開きで接液面積が大きくなり実効的な粒径が減少 ⇒試験後のSEM画像から、粒界が開いたような表面に変化していることを確認。 粒界の開きに沿った割れにより実効的な粒径が1/3に減少したと仮定。 要因3:ペレット片が凝集して実効的な粒径が増加 ⇒試験後の試験水のpHが等電点付近になっていたため、ファンデルワールスカ により凝集していた可能性あり。凝集により実効的な粒径が1.2倍に増加した と仮定。 要因4:ペレット片が沈殿・付着による水素発生量の減少 ⇒試験中の撹拌状況の観察で、試験水が濁っていたため概ね撹拌できていた ことを確認。沈殿・付着により水素発生量が10%減少したと仮定。 要因5:Pd、Rhの再結合反応による水素発生量の減少 ⇒使用済燃料のPd、Rh含有量は0.12wt%程度。再結合反応により水素発生量が 反応速度定数k(1.3×10-3m/min注1×1/477注2)で減少したと仮定。

図 試験前後のSEM画像(粒径0.415mm)

**1 試験前後のSEM画像(粒径0.123mm)** 

(1)水素発生予測法の検討

③実施事項、成果(予実)

### c.水素発生予測法の検討

収納缶には0.1mm以上(目安)の燃料デブリを収納するが、0.1mm以下の燃料デブリも意図せず収納される可能性がある。燃料デブリの粒径を含む性状が不確定な状況下では、保守的に最大値となる微粒子の水素発生量(RH2(PHITS)powder)で評価することを提案する。

#### <評価手法:リニアモデル>

 $R_{H2(PHITS)powder} = R_{H2(PHITS)powder(\alpha)} + R_{H2(PHITS)powder(\beta)} + R_{H2(PHITS)powder(\gamma)}$  $R_{H2(PHITS)powder(i)} = E_{(i)} \times P \times M \times C \times F_{(PHITS)powder(i)} \times G_{(i)}$ 

R<sub>H2(PHITS)powder</sub>:水素発生速度、R<sub>H2(PHITS)powder(i)</sub>:線種ごとの水素発生速度、E<sub>(i)</sub>:崩壊熱、P:ピーキングファクター、M:燃料デブリ重量、 C:燃料含有割合、F<sub>(PHITS)powder(i)</sub>:エネルギー吸収率、G<sub>(i)</sub>:水素発生のG値、i=α線、β線、γ線

将来的には、燃料デブリ取り出し時の測定等によって燃料デブリの粒径を含む性状を明らかにする、もし くは、ユニット缶構造(ユニット缶内にメッシュ径以下の粒径が残留しない構造を想定)の具体化により収納 される燃料デブリの粒径を制限して、微粒子よりも大きな粒径を含めた粒径依存性まで考慮する水素発生 量(R<sub>H2(PHITS)d</sub>)で評価することを提案する。

#### <評価手法:リニアモデル>

 $R_{H2(PHITS)d} = R_{H2(PHITS)d(\alpha)} + R_{H2(PHITS)d(\beta)} + R_{H2(PHITS)d(\gamma)}$ 

 $R_{H2(PHITS)d(i)} = E_{(i)} \times P \times M \times C \times (F_{(PHITS)powder(i)} \times \frac{a}{100} + F_{(PHITS)d(i)} \times \frac{b}{100}) \times G_{(i)}$ 

 $R_{H2(PHITS)d}$ :水素発生速度、 $R_{H2(PHITS)d(i)}$ :線種ごとの水素発生速度、 $E_{(i)}$ :崩壊熱、P:ピーキングファクター、M:燃料デブリ重量、 C:燃料含有割合、 $F_{(PHITS)powder(i)}$ :微粒子のエネルギー吸収率、 $F_{(PHITS)d(i)}$ :粒径dのエネルギー吸収率、 $G_{(i)}$ :水素発生のG値、 i= $\alpha$ 線、 $\beta$ 線、 $\gamma$ 線、a:粒径 微粒子の割合、b:粒径d の割合



-	
	63 移送技術の開発
	(1)水麦発生予測法の検討
	③実施事項、成果(予実)
	d.収納缶水素発生量の推定
	•リニアモデルを用いて燃料デブリを収納した収納缶内の水麦発生量を推定
	・燃料テフリはすべてUO2、1F−1装荷燃料(燃焼度40GWd/t、冷却期間10年)で評価。

PHITS計算の水分量は、水切り量(50vol%)と乾燥目標量(1.1vol%(≒0.1wt%))で評価。

・各核種がペレット片内に一様に分布
 ・乾燥目標量は、粒子の周りに体積分の水膜を配置
 図 PHITS計算の体系

のペレット片を配置

・正六面体内に重心を同じくする1個

表 水素発生量の評価条件および評価結果 × × × × × × × × × × × × × × × × × × ×							PHIIS計昇の1本糸		
	パターン		P1	P2	P3	P4	P5		
(評価	- مد رو مد	水分量 (体積比)	水切り量 (粒子:水=1:1 <sup>注2</sup> )	水切り量 (粒子:水=1:1 <sup>注2</sup> )	水切り量 (粒子:水=1:1 <sup>注2</sup> )	乾燥目標量 (粒子:水=91:1 <sup>注3</sup> )	乾燥目標量 (粒子:水=91:1 <sup>注3</sup>		
		粒径分布	微粒子	粒径分布(微粒子 +0.1mm混合) <sup>注4</sup>	粒径分布(微粒子+0.1mm+ 数ミリオーダー混合) <sup>注5,注6</sup>	微粒子	粒径分布(微粒子 +0.1mm混合) <sup>注4</sup>		
	より評価)	<b>評価結果</b> (F) <sup>注1</sup>	α線:0.250 β線:0.160 γ線:0.158	α線:0.133 β線:0.142 γ線:0.134	α 線 : 0.021 β 線 : 0.064 γ 線 : 0.058	α線:0.004 β線:0.002 γ線:0.002	α線:0.004 β線:0.002 γ線:0.002		
	崩壊熱(E)		燃焼計算結果にもとづく評価値(α線:0.113W/kgUO <sub>2</sub> ,β線:0.383W/kgUO <sub>2</sub> ,γ線:0.221W/kgUO <sub>2</sub> ) <sup>注7</sup>						
	ピーキングフ	ファクタ(P)		燃焼計算結果に	もとづく評価値(α線:2.35,β	線:1.56, γ線:1.56) <sup>注:</sup>	8		
	燃料デブリ重量(M)		設計值(内径220mm収納缶:72.9kg)						
	燃料含有割合(C)		<b>最大値(1)</b>						
	水素発生0	OG値(G)		文献値(α線:	1.3個/100eV, β線およびγ約	泉:0.45個/100eV) <sup>注9</sup>			
評価 結果	水素発生	:量(R <sub>H2</sub> )	1.6 × 10 <sup>-16</sup> L/h/Bq	1.1 × 10 <sup>-16</sup> L/h/Bq	3.4 × 10 <sup>−17</sup> L/h/Bq	2.3 × 10 <sup>-18</sup> L/h/Bq	2.2 × 10 <sup>−18</sup> L/h/Bo		
注1:PHITS	計算結果の統計誤差が1%オ	<b>ミ満となるように計算した</b>	ため、評価結果の誤差は±1%と設	定した。					

注2:2016年度の水切り試験結果(最大残水量)をもとに設定した。

注3:乾燥目標値0.1wt%とペレット片の密度11g/ccおよび水の密度1g/ccより、体積比を設定した。

注4: 粒径0.1mmが最大限収納されたのち, 全空隙に微粒子が収納されると仮定した(微粒子: 26%, 0.1mm粒子: 74%)

注5:技術研究組合 国際廃炉研究開発機構、平成26年度補正予算 廃炉・汚染水対策事業費補助金 燃料デブリの性状把握 最終報告 2017年5月より、模擬燃料デブリから得られた粒径分布と仮定した(微粒子:4%, 0.1mm粒子:8%, 1mm粒子:12%, 4mm粒子76%)

注6:試験による数ミリオーダーの粒子のエネルギー吸収率の妥当性確認は困難と考える。

注7: 西原健司、岩元大樹,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、表5,8,11,43,45,47、日本原子力研究開発機構、2012年9月)より、1F-1の線種ごとに主要核種の発熱量を抽出し、足し合わせた。なお、崩壊熱はピー キングファクタを掛けることで最大燃焼度とするため保守的な評価となっているため誤差は設定しない。

注8:注7の文献をもと各核種のピーキングファクタを考慮して各線種ごとに設定した(α線は平均崩壊熱に対する最大崩壊熱の比、β線およびγ線は平均燃焼度に対する最大燃焼度の比)

注9: Hilbert Christensen and Erling Bjergbakke, NUCLEAR AND CHEMICAL WASTE MANAGEMENT, Vol.6, pp.265-270, TABLE 2, APPRICATION OF CHEMISIMUL FOR GROUNDWATER RADIOLYSIS, 1986より、G値を設定。なお、その他文献とのばらつきを加味し誤差は±10%と設定した。





- (i) 収納缶の拡散による水素放出評価結果
- ・収納缶のベント機構からの拡散による水素放出評価により、収納缶内の水素濃度 が4vol%以下で保たれるか評価し、設計成立性を確認
- ・数ミリオーダーを含めた粒径分布を考慮するケース(P3)と、乾燥目標値の水分量 のケース(P4、P5)で収納缶内の水素濃度4vol%以下となり設計成立性を確認



RD

注1:2018年度評価では全吸収のエネルギー吸収率を $\alpha$ 線:1、 $\beta$ 線:1、 $\gamma$ 線:0.02(粒径分布考慮の評価値)と設定していたが、 ©International Research Institute for Nuclear Decommissioning 2020年度は説明性が高く、保守的な条件として全ての線種を「1」として再評価した。





 ・燃料デブリを乾燥しない場合(P1~P3)は、移送条件を 制限することで移送が可能



	える 一般 「「「」」 「「」」 「「」」 「「」」 「「」」 「」」 「」」 「」」								
パターン	水分量 (休藉比)	│ 粒径分布	│ │ 水素発生速度 │ (↓(b/Ba)	水素濃度が 4vol%に達する時間		移送条件 (評価条件 : 水素濃度4vol%未満、移送時間7日間)			
				収納缶内	移送容器内注1	収納缶	移送容器	制約条件注1	
P1	水切り量 (粒子:水=1:1)	微粒子	1.6 × 10 <sup>-16</sup>	約0.2日 (約6時間)	約2日 (約53時間)	ベント 開放	密封	収納缶の本数を3本に減らす 必要あり。	
P2	水切り量 (粒子:水=1:1)	微粒子 +0.1mm混合	1.1 × 10 <sup>-16</sup>	約0.3日 (約8時間)	約3日 (約710時間)	ベント 開放	密封	収納缶の本数を5本に減らす 必要あり。	
P3	水切り量 (粒子:水=1:1)	微粒子 +0.1mm+数ミリ オーダー混合	3.4 × 10 <sup>-17</sup>	約1日 (約27時間)	約11日 (約259時間)	ベント 開放	密封	制約条件なし(ただし、収納缶 はベント開放)。	
P4	乾燥目標量 (粒子:水=91:1)	微粒子	2.3 × 10 <sup>-18</sup>	約17日 (約404時間)	約161日 (約3853時間)	密閉	密封	制約条件なし。	
Р5	乾燥目標量 (粒子:水=91:1)	微粒子 +0.1mm混合	2.2 × 10 <sup>-18</sup>	約17日 (約407時間)	約162日 (約3882時間)	密閉	密封	制約条件なし。	
	<b>全吸収(参考</b> ) <sup>注</sup>	2	8.0 × 10 <sup>-16</sup>	約0.05日 (約1時間)	約0.5日 (約11時間)	ベント 開放	密封	収納缶の本数を1本に減らし、 かつ収納缶内の燃料デブリを 7割まで減らす必要あり。	

|注1:移送容器内には収納缶が12本収納されると想定。(詳細は【補足−1】収納缶開発の基本条件(4/8)に記載)

注2:2018年度評価では全吸収のエネルギー吸収率をα線:1、β線:1、γ線:0.02(粒径分布考慮の評価値)と設定していたが、2020年度は説明性が高く、保守的な条件として全ての線種を「1」として再評価した。

#### **ビタル (家明 /家計司化吐明) の証はは**用

### 6. 実施内容 6.3 移送技術の開発 (1)水素発生予測法の検討

### ④成果の反映先への寄与

推定した水素発生量、提案する移送条件案をもとに、実機収納缶の移送や保管に係る運用計 画の策定、実機収納缶のベント構造の設計・製作、水素ガス処理設備の検討に寄与できるもの と考える。

### ⑤現場への適用性の観点における分析

現場への適用においては、本事業の成果となる水素発生予測法に加えて、水素発生量を低減 する乾燥処理、水素触媒による裕度確保、移送前の水素濃度の実測による移送可否の確認な どを組合せた検討が必要である。

#### ⑥目標に照らした達成度

目標達成を判断する以下の指標が満足できていることから、目標を達成できたと判断する。 ・燃料デブリ条件に適した水素発生予測法が提案されていること。

・提案した水素発生予測法による評価結果に基づき、移送条件案が示されていること。

### 6. 実施内容 6.3 移送技術の開発 (1)水素発生予測法の検討

### ⑦今後の課題

本補助事業で提案した水素発生評価手法案を踏まえ、実機適用に向けた課題を整理した。

課題 備考 実施時期注1 内容 No. 燃料デブリの 実機 実燃料デブリの粒径分布の測定、もしくは、ユニット缶構造(ユニット缶内に 1 **粒径分布把握** または運用 メッシュ径以上の粒径が残留する構造を想定)の具体化により、収納缶内に 収納される燃料デブリの粒径を制御することで、PHITSの粒径に対応したエネ ルギー吸収率を用いて、リニアモデルでの水素発生量予測値を低減する。 実機 燃料デブリの 実燃料デブリの崩壊熱、燃料含有割合、線源強度を測定し、リニアモデルの 2 または運用 入力値に、実測値から評価した値を用いることで、水素発生量予測値を低減 性状把握 する。

表 実機適用に向けた課題

注1:開発:技術開発 実機:実機エンジニアリング 運用:実機運用後

### まとめ

移送技術の開発として、水素発生予測法について国内外の知見の調査や専門家の意見聴取を 行いながら、移送条件案設定に必要となる検討項目・実施内容について検討した。また、エネル ギー吸収率の妥当性確認および評価手法(リニアモデル)の適用性確認のために水素発生試験 (使用済燃料試験)を実施し、水素発生予測法の検討をおこなった。

それらの検討結果にもとづき、燃料デブリに適した水素発生予測法として、リニアモデルおよび PHITSによるエネルギー吸収率の算出方法を提案し、実機収納缶の水素発生量の推定、安全に 移送可能な移送条件案を検討・提案した。



- 6.3 移送技術の開発
- (2)水素対策の検討

### ①目的、目標

- 移送時に燃料デブリから発生する水素の抑制は、早期の乾燥を基本に検討を進めるが、バック アップとして触媒で酸素と再結合させることによる手法を検討する。
- これまでの検討で、収納缶内の環境として以下を考慮する必要がある。
   〇多湿環境:再結合反応継続には水素再結合で生じた水分を速やかに除去する必要がある。
   〇常温環境:再結合反応が生じにくい。
   〇高放射線:水分除去のための撥水処理が劣化しやすい。
- 2018年度までの検討で、撥水性処理を施した触媒が収納缶内の環境条件にも対応できる可能性があることがわかった。
- 上記を踏まえて、2018年度の検討で抽出された触媒(撥水性処理を施した粒径3mm程度の白金系 触媒)を対象に、主に触媒を通過するガス流速に着目して水素の再結合性能を評価する。
- 今般の検討は水素発生量や収納缶内部構造等が未確定であるが、現時点の収納缶設計を対象に水素発生量に応じてケーススタディし水素対策の有効性を示すものである。

### ②既存技術との対比

- TMI-2燃料デブリ収納缶では、当時有効と考えられる触媒を採用したものであるが、撥水性を考慮したものではない。
- 国内では多様な触媒が開発されており、昨年度、国内で入手できる触媒から多湿、常温環境下での動作試験を行い、有力な撥水性処理を施した触媒を抽出、移送期間である7日以上の耐放性を確認した。



6. 実施内容 **6.3 移送技術の開発** (2)水素対策の検討

IRID

③実施事項、成果(予実)



### 基本的な考え方

触媒の性能(反応速度)は流速他のパラメータに 依存するため、流通式反応速度評価試験で把握し、 触媒の有効性評価を行う。

条件に対する触媒性能 :設置場所の制約、収納缶形状や 水素発生量等の条件に基づき、 収納缶内の水素濃度分布につい て流動/拡散の観点から評価し、 濃度の観点で支配的な部位を選 定する。(拡散が支配的なため実 際の評価は拡散のみとした。)

:試験により、流速条件等の環境

:上記のa.項及びb.項の触媒配置及 び触媒量の検討を踏まえ、収納缶 内の水素濃度の観点から有効な 配置を設定する。

- 6. 実施内容
- 6.3 移送技術の開発
- (2)水素対策の検討
  - ③実施事項、成果(予実)
  - a. 触媒の検討(1/3)

空塔内に触媒を充填しガスを流通させる試験(流通式反応速度評価試験)で、流通ガスの条件 (流速(空塔速度)、ガス温度、水素濃度、被毒成分)を変動させて総括反応速度係数データを 取得し、流速等の環境条件に対する触媒の総括反応速度係数の推算式を導出する。



図 流通式反応速度評価試験概念

流通式反応速度評価試験で取得した反応率から総括反応速度係数を計算で求める詳細な手順 は、次ページの(補足)参照。

IRID

- 6.3 移送技術の開発
- (2)水素対策の検討
  - (補足)反応速度式、総括反応速度係数の算出方法

反応速度(単位時間あたりの濃度変化量)、反応率 $\eta$ から総括反応速度係数Kを算出する式を 以下に示す。

反応式 :  $H_2 + 1/2O_2 \rightarrow H_2O$ 

ー次で表される場合の反応速度<sup>注1</sup> :  $-r = KC_{H2} \Rightarrow K = SVln\left(\frac{1}{1-n}\right)$ 

-r:反応速度 K:総括反応速度係数 C<sub>H2</sub>:水素濃度 C<sub>02</sub>:酸素濃度 C<sub>H2</sub><sup>0</sup>:入口水素濃度 η:反応率 SV:空間速度(=Q/Vcat) Q:ガス流量 Vcat:触媒層体積

空間速度(SV)はガス流量(Q)と触媒量(Vcat:触媒層体積)の比であることから、以下の手順で 触媒量と配置を設定、水素対策の有効性を評価/確認することができる。

- 試験段階:反応速度係数が、温度や流速等の環境条件に依存するため、これら条件と空間速度に対する反応率から総括反応速度係数を算出することで総括反応速度係数の推算式を構築する。
- ・収納缶内の触媒量/配置検討段階:収納缶内の水素ガス濃度、水素発生量から必要となる反応 速度を設定、反応速度係数の推算方法に基づいて触媒量を設定する。

注1: Y.IWAI et.al, Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY, vol.48, No.8, P.1184-1192



- **6.3 移送技術の開発**
- (2)水素対策の検討
- ③実施事項、成果(予実)
- a. 触媒の検討(2/3)
- 各パラメータ条件についての総括反応速度係数結果概要

試験を踏まえて今般検討の収納缶の使用環境条件範囲では、温度10℃、加湿あり、水素濃度100ppmの条件が最も総括反応速度係数は小さく保守的な設定となるため本条件を採用した。なお、収納缶内の触媒配置検討は、窒素パージした収納缶内に水の放射線分解で水素と酸素が生ずることを想定し酸素/水素濃度比0.5での反応速度係数値を最も保守的な値として検討することとした。

パラメータ	検討範囲	結果概要
温度(℃)	<u>10</u> ,30, 50	・温度の増加と共に反応速度係数Kが <mark>増加</mark> 。 アレニウス式に従う温度依存性であり、物質移動よりも触媒反応が支配的。 ⇒ 温度が低いほうが総括反応速度係数を保守的に設定する。
ガス空塔速度LV (m/sec)	0.03, 0.07, <u>0.14</u> , 0.28, 0.42	<ul> <li>・低温10℃環境下では、ガス空塔速度が反応速度係数Kに与える影響は小さい。</li> <li>⇒ LV依存性は小さい</li> </ul>
水素濃度(ppm)	<u>100</u> , 200, 500, 1000, 10000	<ul> <li>・加湿なしでは、100~1000ppmの範囲水素濃度の増加と共に反応速度係数Kが 低下したが、10000ppmではKが増加。反応熱による温度上昇が原因。</li> <li>・加湿ありでは、100ppmが最も反応速度係数が小さい。</li> <li>⇒ 加湿ありかつ100ppmが総括反応速度係数を保守的に設定する。</li> </ul>
酸素/水素濃度 (-)	0.25, <mark>0.50</mark> ,1.5, 1900	<ul> <li>・酸素濃度比の増加と共に反応速度係数Kが増加、酸素/水素1.5でKが最大。</li> <li>・一方で、酸素過剰の条件ではKが低下。</li> <li>⇒ 水の放射線分解(H<sub>2</sub>O→H<sub>2</sub>+0.5O<sub>2</sub>)を想定し、酸素/水素=0.5と想定。</li> </ul>
加湿	<u>なし</u> あり	・加湿ガス(ほぼ100%RH)により反応速度係数Kが <mark>低下</mark> 。 → 加湿ガス条件が最も保守的
IRID	配置検討で保守	的とした環境条件 ©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

表 触媒試験のパラメータとその評価結果

- 6. 実施内容
- 6.3 移送技術の開発
- (2)水素対策の検討
- ③実施事項、成果(予実)
- a. 触媒の検討(3/3)
- 代表例として湿度の影響データを示す。
  - ・乾燥ガス条件では、水素濃度の増加とともに、反応速度係数Kが低下。 水素濃度10,000ppm以上で反応速度が増加に反転。
    - 反応熱による温度上昇の効果が、再結合水の影響を相殺・超過したと推測される。
  - ・加湿ガス条件(ほぼ100%RH環境)でも、同様に水素濃度10,000ppmで反応速度が増加。
  - ⇒ 触媒配置検討では、水素濃度と湿分の観点から、水素100ppm&加湿ガスの測定値(K=2)を 最も保守的条件での反応速度係数とした。





- 6.3 移送技術の開発
- (2)水素対策の検討
  - ③実施事項、成果(予実)
  - b. 収納缶内の濃度分布(1/3)

### ・触媒充填層表面の濃度

UO<sub>2</sub>100%の燃料デブリが収納缶内のユニット缶部分に充填率30vol%で収納されるとし、水素発 生を「(1)水素発生予測法の検討」の成果を踏まえて燃料デブリの粒子が微粒子の場合 (R<sub>H2(PHITS)powder</sub>)条件での触媒層表面の水素濃度を以下に示す。 結果、触媒充填層表面の水素濃度は最大でも0.02vol%であり、水素の爆発下限界濃度(4vol%) よりも十分小さく、触媒としての能力は十分余裕があるものと考えられる。





- 6.3 移送技術の開発
- (2)水素対策の検討
- ③実施事項、成果(予実)
- b. 収納缶内の濃度分布(2/3)

前ページに述べた通り、触媒充填層表面の水素濃度は、水素の爆発下限界濃度(4vol%)よりも 十分低いことから、簡単のため触媒充填層表面の水素濃度はゼロとして、前ページと同一条件 で納缶内の水素濃度の評価を行った結果、燃料デブリ内の水素濃度は1vol%以下で爆発下限界 濃度よりも十分低く、触媒表面の水素濃度を考慮しても十分成立が期待できる結果となった。





### 6.3 移送技術の開発

(2)水素対策の検討

### ③実施事項、成果(予実)

b. 収納缶内の濃度分布(3/3)

### (補足)触媒/燃料デブリ充填層の有効拡散係数の考え方

- 土壌中の気体の拡散に関する研究事例から、適用範囲が広いMarshallの式を参照(下図)。 触媒/燃料デブリ充填層について以下の通り設定した。
- 燃料デブリ:燃料デブリ充填層の空隙率として、収納効率30vol%から空隙率0.70[-]を想定。これらの充填層内の拡散係数Deと、燃料デブリ周囲のすき間(アニュラス部)の気中拡散係数D<sub>0</sub>から、流路面積による重み付け平均の拡散係数D<sub>m</sub>を用いた。

文献の著者	有効拡散係数の評価式
Millington and Quirk <sup>[1]</sup>	$D_e/D_0 = \varepsilon^{4/3}$
Marshall <sup>[2]</sup>	$D_e/D_0 = \varepsilon^{3/2}$
Wesseling <sup>[3]</sup>	$D_e/D_0 = 0.9\varepsilon - 0.1$
Penman <sup>[4]</sup>	$D_{e}/D_{0} = 0.66\varepsilon$
Van Bavel <sup>[5]</sup>	$D_{e}/D_{0} = 0.6\varepsilon$
Akagi and Kondo <sup>[6]</sup>	$D_e/D_0 = 2.5\varepsilon^{2.5} + 0.04$
Buckingham <sup>[7]</sup>	$D_e/D_0 = \varepsilon^2$



#### 【記号】

【出典】

D<sub>0</sub>:一般的な気中での水素の拡散係数 [m<sup>2</sup>/s]

D<sub>e</sub>:充填層の空隙率, 流路の屈曲を考慮した有効拡散係数 [m<sup>2</sup>/s] *ε* :空隙率 [−]

図

- (1) R. J. Millington, J. P. Quirk, Transport in porous media, Transactions of 7th International Congr. Soil Sci. 1 (1960) 97-106.
- (2) Marshall, T. J., The diffusion of gases through porous media, J. Soil Sci. 10 (1959) 79-82.
- (3) J. Wesseling, Some solutions of the steady state diffusion of carbon dioxide through soils, Neth. J. Agr. Sci. 10 (1962) 109-117.
- (4) H. L. Penman, Gas and vapor movements in soil: The diffusion of vapours through porous solids, J. Agric. Sci. 30 (1940) 437-462.

充填層内の有効拡散係数評価式の事例

- (5) Van Bavel, Gaseous diffusion and porosity in porous media, Soil Sci. 73 (1952) 91-104.
- (6) 赤木 寛一, 近藤 智, 水素ガスの土中での移動特性とその検知, 第44回地盤工学研究発表会 (2009) 919-920.
- (7) E. Buckingham, Contributions to our knowledge of the aeration of soils, USDA Bur. Soil Bul. 25 (1904) 7-52.

### 6.3 移送技術の開発

(2)水素対策の検討

### ④成果の反映先への寄与

- 収納缶移送時における水素対策の候補案の一つとして検討する。
- (特に移送前の乾燥ができなかった場合の時間管理による水素対策のバックアック(緩和策))

#### ⑤現場への適用性の観点における分析

触媒設置にかかわり、触媒性能検討において想定される環境を織り込むことで実機適用において大きな負担にならないようにする。

#### ⑥目標に照らした達成度

以下により所定の目標を達成したと考える。

- ・触媒を流通式反応速度評価試験に供し、触媒性能の温度環境、水蒸気の有無、水素濃度依存 性、被毒等影響評価データを採取した。
- ・得られた触媒性能は、収納缶内として想定される温度、水蒸気環境、厳しい水素発生量を想定しても、水素の爆発下限界濃度(4vol%)に対して十分低く、必要な触媒性能が確保されることが確認できた。また、設定したよう素環境でも触媒性能に余裕があることが確認できた。以上より触媒による水素対策の有効性を確認した。
- ・収納缶内の濃度分布を評価し、水素発生量に応じた触媒配置設計ができるようにした。

### 6.3 移送技術の開発

(2)水素対策の検討

### ⑦今後の課題

- ・触媒の配置は、燃料デブリ充填層の水素発生量や充填率への依存が大きく、線源強度の合理化 や別途検討中の水素発生量予測の取り込み、充填率等の検討が必要である。
- ・今般の被毒条件は一例にすぎず、触媒被毒成分の量や化学形態等に影響を受けることが予想されることから、燃料デブリ回収初期に、含まれる被毒成分の量等のデータを採取し触媒性能への影響の把握が必要である。また、被毒物質の経時的な挙動は不明点もあるため、収納缶体系を 模擬した試験等での検証が必要である。

### まとめ

- ・触媒を流通式反応速度評価試験に供し、触媒性能の温度、被毒等影響評価データを採取した。
- ・得られた触媒性能を基に収納缶内の水素濃度分布を確認し有効性を確認した。
- 一方で、燃料デブリが有している触媒被毒成分の量や化学形態等の知見を充実させ、被毒物質の挙動も含めた触媒性能への影響の把握が必要である。
- ・今般の検討手法は、新規の触媒採用の場合にも有効な手法と考えられ、被毒対策等、将来、より 優れた触媒が開発された場合でも適用できると考えられる。

**No.66** 

6.4 乾燥技術/システムの開発(1)乾燥装置の基本仕様の検討①目的、目標

- 密封することが必須となる燃料デブリの保管施設までの建屋間移送では、燃料デブリの水分に 起因する水素の蓄積が課題であり、乾燥による水分除去が水素発生量低減に有効と考えられ る。
- そこで本技術開発は、移送をより安全に行うことを目的に、燃料デブリの形態として可能性がある多孔質体の乾燥挙動に着目して乾燥に有効なパラメータ条件を設定し、検証を行うとともに、 汚染区域内での装置保守、取り扱い等も考慮した、1F燃料デブリの乾燥装置の基本仕様案を 提案することを目標とする。
- これらの成果は、実機向けのエンジニアリング作業の段階で行われる実燃料デブリによる検証 試験や試験結果を踏まえた実機向け設計のベースとして活用されることが期待できる。

### ②既存技術との対比

- TMI-2燃料デブリの乾燥目的は、未臨界性を確保するための自由水除去で、高度な乾燥を指向した処理方法ではない。一方、1Fでは水素発生量の低減を目的とするため低含水率を達成可能な処理方法を具体化する必要がある。なお、TMI-2で選択された減圧加熱乾燥にかかわる知見(汚染対策等)は有用な情報と考えられる。
- 乾燥は一般産業で様々な手法が用いられており、TMI-2で用いられた手法以外にも1F燃料デブリに有効な手段があると考えられる。一方で、汚染区域での保守、取り扱い等を考慮した設計となるため、一般的な乾燥手法をそのまま燃料デブリの乾燥に適用するには課題がある。



- 6.4 乾燥技術/システムの開発
- (1)乾燥装置の基本仕様の検討
- ③実施事項、成果(予実)

#### 検討の進め方

#### a.基本条件の検討

- イ.性能要求に対する検討(対象物、目標時間、目標含水率)
  - 乾燥対象物や目標時間、目標含水率を設定し、乾燥装置性能への要求事項を整理

#### ロ.装置の概念検討

- ・安全要求を明確にし、乾燥装置に対する機能要求を整理【補足-7】
- TMI-2の乾燥技術を調査/一般産業の乾燥技術を整理し、燃料デブリ乾燥への適用性を検討【補足-8,9】

**No.67** 

・ 乾燥装置の概念(保守計画/装置系統/機器構成を含む)を検討

#### b.乾燥挙動データの採取

#### イ.要素試験の実施

- 効率的な乾燥条件と乾燥挙動データの採取
- ロ.実規模大試験装置の準備
- ・実規模大(収納缶または/及びユニット缶)で採取/検証すべき項目を抽出し、試験計画を策定
   ハ.乾燥挙動データ(保守性等含む)の採取
  - 実規模大試験装置によりc.イ.に必要な操作性や保守性を含めたデータ採取/検証を行う。

#### c.乾燥システムの基本計画

- イ.保守計画/装置系統/機器構成の検討
- ・機能要求を具体化し、システム概念を検討、採取/検証が必要な項目を抽出してb.項に反映 ロ.(データを反映した)装置の基本仕様の策定
  - ・ 試験結果を反映し、乾燥装置の基本仕様(案)を提示



6.4 乾燥技術/システムの開発

(1)乾燥装置の基本仕様の検討

③実施事項、成果(予実)

a.基本条件の検討(1/2)

#### イ性能要求の整理

乾燥システムの性能要求として、対象物、乾燥時間、含水率の目標値を以下のとおり設定した。 (対象物)多孔質体。TMI-2の回収物が多孔質体であったため想定したもの。試験は代表的な多孔 質体であるゼオライトで実施。

(目標時間)受入れ~払出し24hr

(目標含水率)0.1wt%注1

表 性能要求に対する評価

		性能要求	対応方針案		
注1:燃料デブリの密度を前提に した含水率。 試験はゼオライトで行うため、 ゼオライトの供試体密度で見 直す。	対象物	取り出し側で回収する燃料 デブリの性状に対応できる こと	細孔を有した多孔質体を主対象とする。 スラリについては、乾燥対象になる可能性がある ものの、現状性状が不明であることを考慮し、主 対象で検討する乾燥技術の適用可否を要素試験 等で検討する。		
		取り出し側から払い出され る方式で取り扱えること	ユニット缶もしくは収納缶での取り扱いを考慮する。		
	目標時間	燃料デブリ取り出しの スループットに応じた時間 内で乾燥できること	受入れから払出しまでの目標時間を24hrと仮定 する。		
	目標含水率	乾燥後に残存する水分量を 可能な限り低減すること	移送期間7日間で収納缶内の水素濃度が爆発下 限界(4vol%)となる含水率(1.5wt%)に対して余裕 を見込み、目標含水率を0.1wt%とする。		



- 6.4 乾燥技術/システムの開発
- (1)乾燥装置の基本仕様の検討
- ③実施事項、成果(予実)
- a.基本条件の検討(2/2)

#### ロ.装置の概念検討

- 安全要求への適合性、一般産業の乾燥装置調査等を踏ま え飛散等の観点から容器形状のままでの乾燥を前提とした。 (詳細は【補足-7.8】)
- ◆ ユニット缶で取り扱うことで未臨界を維持
- ◆ ユニット缶は通水/通気し易いメッシュによる網かご構造
   ⇒ 燃料デブリの水切りと乾燥促進を想定
- ◆ 蒸発促進;沸点に効率良く到達するため、直接加熱(温風)方式 、減圧方式を採用
- ◆ 物質移動促進;原則、掃気により濃度勾配を確保
- ◆ 面積向上;段積み時はユニット缶間にすき間を設ける等、 可能な限り表面積確保
- ◆ 減圧方式は蒸発潜熱を入熱する必要があるため、 外部熱源(ヒータ)を追加
- ◆設計パラメータ
  - ・加熱温度 内部圧力 温風流速 チャンバー容量
- ◆ 制限
  - ・加熱温度:熱源の機器容量はチャンバー又は収納缶が200℃まで昇温できるよう選定する。
  - ・形状:未臨界維持のため、燃料デブリを充填する処理装置の最大内径はφ220mmとする。
  - ・流速:燃料デブリ粒子の飛散に配慮した上で上限流速を設ける。
  - ・チャンバー:チャンバー内又は収納缶内は安全性を確保するため、負圧に維持する。



図 乾燥装置の基本概念



IRID

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

IRID

- 6.4 乾燥技術/システムの開発
- (1)乾燥装置の基本仕様の検討
- ③実施事項、成果(予実) b.乾燥挙動データの採取(2/6)
- イ. 要素試験 【試験結果】・温風及び減圧乾燥時の運転パラメータ感度を把握 ➡ 温度、圧力、ガス流速の影響大

・両方式とも13h程度で乾燥終点に到達 ➡ 通気乾燥では目標含水率0.3wt%達成の見込みあり



➡供試体乾燥面の熱伝導性が低下し、乾燥速度が低下
#### 6. 実施内容 **No.72** 6.4 乾燥技術/システムの開発 (1)乾燥装置の基本仕様の検討 ③実施事項、成果(予実) b.乾燥挙動データの採取(3/6) ゼオライト細孔範囲 ⊥ <sup>1.0E+01</sup> イ.要素試験 1.0E+00 【評価方法】 1.0E-01 Ŀ ①乾燥評価モデルで試験データから有効拡散係数を逆算(De') 1.0E-02 —乾燥面150℃ 1.0E-03 ---乾燥面100℃ ②充填層内における水蒸気拡散係数の理論値(De)と比較 ·····乾燥面50℃ 1.0E-04 蒸ぎ 1.0E-05 O評価結果(1/2) ЯD 1.0E-06 (1 [nm] = 0.001 [µm]) (1)乾燥期間の前半;De'/De>1 1.0E-07 0.1 10 100 1000 10000 水蒸気拡散よりも速い乾燥速度 細孔径[nm] 液状水の表面側への移動により乾燥促進と推察(モデル上、拡散係数が大きく算定) 図 細孔径と蒸気圧の関係 (2)乾燥期間の後半:De'/De<1 温度を上げれば比較 ・細孔部の乾燥速度が遅いためと推察(細孔のないSUSビーズではその傾向なし) 80 的高い圧力の減圧条 [mg/(mm2-hr) 0 0 0 0 0 2 0 減圧乾燥で顕著 件でも乾燥が可能と 7°C なる - 試料温度 1.0E+02 1.0E+02 0 液状水移動 100°C C C 0 $\Delta \Delta$ の影響 乾燥速度| 20 20 10 1.0E+01 1.0E+01 0 0 De'/De = 1De'/De = 11.0E+00 1.0E+00 乾燥可能 水蒸気移動 10 De-1.0E-01 De'/De な範囲 被乾燥物の比較 乾燥方法の比較 Ο 0 1.0E-01 0.001 0.01 0.1 0.0001 10 100 雰囲気圧力 [kPa A] 細孔の影響 7℃における 100℃における ゼオライト 温風乾燥 ゼオライト 温風乾燥 0 0 1.0E-02 1.0E-02 細孔蒸気圧 細孔蒸気圧 ゼオライト 減圧乾燥 △ SUSビーズ 温風乾燥 0 図 減圧乾燥における 1.0E-03 1.0E-03 雰囲気圧力と乾燥速度の関係 0 50 10 20 30 40 50 0 10 20 30 40 含水率 [wt%] 含水率 [wt%] 〇評価結果(2/2) 図 要素試験の有効拡散係数の算定結果 ・細孔径0.4~1nmのでは、蒸気圧が1/100~1/10程度 ・低温の1kPaA(乾燥面7℃程度)では細孔内の乾燥不可 ・試料温度を十分高くした上で減圧する処理方法が効率的

IRID

- 6.4 乾燥技術/システムの開発
- (1)乾燥装置の基本仕様の検討
- ③実施事項、成果(予実)
- b.乾燥挙動データの採取(4/6)

#### ロ.試験装置の準備

実規模大(収納缶または/及びユニット缶)で採取/検証すべき項目を抽出。

試験項目	目的
遠隔運転·操作性試験	<ul> <li>運転や保守は安全上の観点から遠隔操作を志向するため、マニピュレータを用いた操作が必要となる。これらの操作について、実機と同等の空間寸法での操作性や視認性の検証によって、遠隔操作による保守作業が可能であることを確認する。</li> <li>(確認事項)</li> <li>1 乾燥装置チャンバー内の異物除去の可否</li> <li>2 乾燥装置内ふき取り除染の可否</li> </ul>
実規模乾燥試験	要素試験に基づき構築した設計手法の適用性を総合的に確認する。 <確認事項>① 乾燥時間(余熱~乾燥~冷却)② 最終含水率③ 乾燥終了判断目安

#### 表 実規模乾燥試験項目

#### ハ.乾燥挙動データの採取

実規模大試験装置による乾燥試験を実施し、c.項で必要となる保守性や操作性も含めて実機乾燥システム に資するデータを取得する。





IRID

図 実規模乾燥試験装置 外観

missioning

**No.75** 

6.4 乾燥技術/システムの開発(1)乾燥装置の基本仕様の検討③実施事項、成果(予実)

## b.乾燥挙動データの採取(6/6) ハ.取扱い性/乾燥挙動データの採取

#### 表 実規模試験結果

No.	試験条件	乾燥時間	含水率(wt%) <sup>注1</sup>
#0	温風	14:00	0.31
#1	周期	16:00	<0.12
#2	温風·偏心	16:00	<0.13
#3-1	周期·充填率85%	14:00	<0.15
#3-2	温風·充填率85%	12:00	0.21
#5	減圧	16:00	2.54

注1: 含水率=含水量(g)/絶乾重量(g) 試験での絶乾重量は約16kg(UC4缶の合計、充填率100%の場合)

- ・充填率100%、14時間前後で目標含水率0.3wt%以下を達成
- ・ 乾燥方式の比較では、温風・周期で同等、減圧は乾燥時間が長い
- UC配置が偏心した場合、ほぼ同等の乾燥時間となる →缶内流速分布の 影響は小さい
- ・充填率を下げると乾燥時間が短縮→初期水分量が少ないことに起因注2

注2:充填高さ85%で乾燥時間も約85%となっている。

IRID





充填・配置条件による含水率経時変化の比較

6.4 乾燥技術/システムの開発(1)乾燥装置の基本仕様の検討③実施事項、成果(予実)

c.乾燥システムの基本計画(1/2)

イ.保守計画/装置系統/機器構成の検討

乾燥設備に対して系統設計を実施し、システム概念(案)を策定。また、遠隔保守方針(案)も策定。



- (4) オフガス系には排ガスフィルタを設置
- (5) 圧力調整弁で負圧維持し、安全確保のための逃し弁を設置

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

図 保守方針

6.4 乾燥技術/システムの開発(1)乾燥装置の基本仕様の検討③実施事項、成果(予実)

c.乾燥システムの基本計画(2/2)

## ロ.装置の基本仕様の検討

#### 表 乾燥装置の運転条件

温度	200°C(温風・ヒータ)
流速	3m/s(チャンバ内) 10m/s(冷却ジャケット)
圧力	大気圧~1kPaA
乾燥方式	温風or減圧(周期)
運転時間	16hr/バッチ
被乾燥物	0.1mm以上の固形物(細孔可) <sup>注1,注2</sup>

注1:スラリー、スラッジ除く 注2:コンクリート等、水和物、結晶水が多い物は検討が必要



サイズ	φ220mm(下部胴内寸) φ350mm(上部胴内寸) 1050mm(下部胴高さ) 700mm(上部胴高さ)
収納UC	φ210mm(外径)×H200mm、Max4段





## IRID

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

6.4 乾燥技術/システムの開発

(1)乾燥装置の基本仕様の検討

#### ④成果の反映先への寄与

燃料デブリの乾燥装置概念をまとめ、移送中における水素対策に寄与する。

#### ⑤現場への適用性の観点における分析

ホットでの取り扱い、保守を想定して検討項目に含めている。 今後の具体化の過程で適用性を判断していく予定である。

#### ⑥目標に照らした達成度

燃料デブリ乾燥システムの基本仕様案提示のための検討を実施し、計画に従って所定の成果が 得られた。

#### ⑦今後の課題

次ページに示す。

#### まとめ

TMI-2の燃料デブリ実績に基づき多孔質体を対象に要素試験による乾燥挙動データ取得及び実 規模試験による確認、汚染区域での保守、取り扱いの確認を行い、1F燃料デブリの乾燥装置の 基本仕様案を提案した。



## 6.4 乾燥技術/システムの開発 (1)乾燥装置の基本仕様の検討

表 実機適用に向けた課題

No.	課題	実施時期 <sup>注1</sup>	内容	備考
1	汚染管理のし やすい収納缶 での乾燥検討	開発	チャンバー式に比べ収納缶内は狭隘でガス流速分布に偏りが生じ乾燥時間が増 大することが懸念されるため、実規模試験装置を改造し、収納缶構造にてチャン バー方式と同等の乾燥性能(ゼオライト含水率0.3wt%以下)可否を確認する。	次ステップ の補助事 業候補
2	コンクリート等 混在時の乾燥 運転終了判断	開発	コンクリートが有する結晶水の放出で、乾燥中長期にわたる水分放出が想定され るため、コンクリートにて実規模乾燥試験で乾燥運転終了判断方法の適用性を確 認する。 なお、コンクリート以外に、実運用時に乾燥時間へ影響を与えるものがないか、炉 心周辺領域内外からの廃棄物の混入等についても調査・確認注2が必要である。	次ステップ の補助事 業候補
3	難乾燥物に対 する乾燥処理	開発	スラッジ、スラリーのような難乾燥物の適用性判断のためのデータの拡充が必要で ある。	次ステップ の補助事 業候補
4	遠隔作業時間 の検証	実機	運転~保守・機器更新を通した各遠隔作業について、建屋レイアウト等も考慮し標 準所要時間を設定し、モックアップ試験等も踏まえて遠隔操作方法の見直しや関連 設備の増設要否を検討する。	
5	実燃料デブリ物 性データの取 得・推定	実機,運用	実燃料デブリの物性・性状の知見が乏しいため、供試体との相違が不明である。 このため、実燃料デブリが採取できた段階で物性(熱伝導率等)を取得して設計を 再評価/改良する必要がある。	

注1:開発:技術開発 実機:実機エンジニアリング 運用:実機運用後 注2:当該調査・確認については、実機エンジニアリングまたは実機運用後



#### **No.80**

## 6. 実施内容

6.4 乾燥技術/システムの開発 (2)水素濃度測定技術の検討

#### ①目的、目標

1F構内移送時の水素燃焼・爆発の発生防止のため、収納缶及び(又は)移送容器内の水素 濃度を測定し、容器内の水素濃度が爆発下限界濃度(4vol%)未満を7日間注1満足することを、 保管建屋への払出前に確認する。

そのため、水素濃度測定技術を調査し、適用可能な技術の候補を抽出・提案する。

注1:1F-4号機使用済燃料取り出し時の移送時間の実績及び移送時の不具合発生で想定される復旧までに要する 時間を考慮して設定。

#### ②既存技術との対比

水素濃度測定は既存の技術を利用する。ただし、高線量環境下での水素濃度測定に関す る知見は乏しい。燃料デブリの収納・移送プロセスや収納缶/移送容器との取り合い、1Fの 環境条件等を考慮の上で、技術の適用性等を検討していく必要がある。

6.4 乾燥技術/システムの開発

(2)水素濃度測定技術の検討

#### ③実施事項、成果(予実)

a.要求技術仕様、適用性判断基準の検討(1/3)

- ✓「<u>常時監視」</u>/「<u>逐次監視</u>」の2つの観点で、水素濃度測定箇所を検討。
- ✓「逐次監視」は、想定される燃料デブリ取り出し~移送容器払出しまでの作業工程 (下図【1】~【32】)において、設備対応が最低限で水素濃度測定が可能な作業工程を抽出。





# 6. 実施内容 6.4 乾燥技術/システムの開発 (2)水素濃度測定技術の検討 ③実施事項、成果(予実) a.要求技術仕様、適用性判断基準の検討(2/3)

IRID

ハ.「常時監視」/「逐次監視」の水素濃度測定箇所(工程)の候補選定結果(まとめ)



issioning

©Internat

#### **No.83**

## 6. 実施内容

6.4 乾燥技術/システムの開発 (2)水素濃度測定技術の検討

## ③実施事項、成果(予実)

b.水素濃度測定技術の調査(3/3)

水素濃度測定技術の調査の結果、A, B, Cの各条件で、適用可能な水素濃度測定技術を 評価し、候補として以下を選定した。

#### <u>A 常時監視: 熱伝導式</u>

#### <u>B 乾燥処理時の逐次監視: ガスクロマトグラフィー式、又は、プロトン伝導体</u>

<u>C 不活性ガス注入時の逐次監視: ガスクロマトグラフィー式、又は、プロトン伝導体</u>



6.4 乾燥技術/システムの開発(2)水素濃度測定技術の検討

#### ③実施事項、成果(予実)

- c.関連する技術開発の進捗・成果のフィードバック
- 本事業で並行して進められる「移送技術の開発」や、「乾燥技術/システムの開発」の "乾燥システムの検討"の進捗・成果を確認し、2019年度の検討にフィードバックを検討 した結果、特に変更は不要であることを確認した。

#### ④成果の反映先への寄与

検討した水素濃度測定技術により、収納缶移送の安全性の担保に寄与する。 また、燃料デブリの乾燥状況の推定にも寄与できる可能性がある。

#### ⑤現場への適用性の観点における分析

現時点で想定される1Fの水素濃度測定点の雰囲気条件に基づき、その雰囲気条件に 適した水素濃度測定技術を選定しており、次頁に示す課題に対応する必要はあるが、 適用可能と考えられる。



- 6.4 乾燥技術/システムの開発
- (2)水素濃度測定技術の検討
  - ⑥目標に照らした達成度

目標どおり収納缶に適用可能な水素濃度測定技術の候補の選定を完了した。

#### ⑦今後の課題

今回選定した水素濃度測定技術には、実機適用上の課題として、それぞれ以下が考えられる。

- A 移送容器での常時監視
  - ・測定技術に関しては特になし。センサ設置による移送容器の構造強度への影響検討は必要。
- <u>B 乾燥処理時の逐次監視</u>
  - ・ガスクロマトグラフィの場合、ガスサンプリングが必要。
    - ⇒乾燥設備の排気ライン(フィルタ以降)に、ガスサンプリングラインの接続(設備対応)が必要。 作業員が直接操作できる遮蔽された汚染のないエリアに設置する必要。
      - 測定装置の感度向上対策が必要。
  - プロトン伝導体の場合、低濃度での感度確認が必要。
- C 不活性ガス注入時の逐次監視
  - ・ガスクロマトグラフィの場合、ガスサンプリングが必要。
    - ⇒不活性ガス注入ラインの排気側に、ガスサンプリングラインの接続(設備対応)が必要。
    - 作業員が直接操作できる遮蔽された汚染のないエリアに設置する必要。
  - ・プロトン伝導体の場合、特になし。

また、乾燥装置等の現場側の条件(形状、流速、圧力など)で未確定な部分が多く、現場条件が明確に なる都度、選定した水素濃度測定技術へのフィードバック要否を確認・検討する必要がある。



6.4 乾燥技術/システムの開発 (2)水素濃度測定技術の検討

#### まとめ

想定される燃料デブリ取り出し~移送容器払出しまでの作業工程において、水素濃度測定 が可能な作業工程を抽出し、適用可能な水素濃度測定技術を検討した結果、移送容器にお ける常時監視の場合には、熱伝導式の水素濃度計により測定できる見込みを得た。 また、各工程で測定する逐次監視の場合には、乾燥工程および不活性ガス注入工程でガ

スクロマトグラフィーまたはプロトン伝導体を適用することで測定できる見込みを得た。



# 6. 実施内容 6.5 評価まとめ

①目的、目標

関連PJ実施事項のレビュー及び6.1~6.4項の実施項目の反映を行う。また、関連する 技術開発として取り出し規模の更なる拡大PJにおいて実施する原子炉格納容器内か らの取り出し物を燃料デブリと放射性廃棄物へ仕分けする技術の調査について、要請 に基づいて参画、協力する。



# 6. 実施内容 6.5 評価まとめ

②実施事項、成果(予実) a.仕分けする技術の調査(取り出し規模の更なる拡大PJからの要請に基づいて適宜 実施)

#### (検討例)

## 表 収納缶内の核燃料物質量の特定ができた場合の収納缶制限の緩和

仕分け分類	仕分けしない場合 装荷燃料中の最高濃縮 度(U-235濃度:5wt%相当 の反応度)で設計	燃料デブリ中の U-235濃度 : 1.5wt%相 当の反応度以下を仕 分けできた場合	容器中のウラン量を3 ~4(Kg) <sup>注1</sup> 以下を仕 分けできた場合
収納缶(内径220mm)	0	—	—
緩和型収納缶 (内径400mm)	_	0	_
臨界管理不要	—	—	0

注1:角型容器の積み上げ設置を想定し、角部に濃縮度5wt%のUO2が存在すると仮定し、 最小推定臨界下限値(31.1kg)の1/8とした。



# 6.実施内容 6.5 評価まとめ

## b.評価まとめ

本補助事業のまとめを以下に示す。

- ・収納技術の開発では、構造検証試験および構造解析の結果から、設計した収納缶の仕様案/構造案について、安全機能(閉じ込め、臨界防止)が維持できる構造健全性があることを確認した。構造検証試験及び構造解析の結果を踏まえ、最終的な収納缶の仕様案/構造案を提案した。
- 移送技術の開発の水素発生予測法の検討では、使用済燃料試験によりエネルギー 吸収率評価法の妥当性を確認し、水素発生量を推定、移送条件案を設定した。また、 水素対策では、試験により被毒を含めて触媒性能を設定し、触媒配置と収納缶内の 水素濃度分布を検討、触媒による水素対策の有効性を確認した。
- ・乾燥技術/システムの開発の乾燥装置の基本仕様の検討では、要素試験、実規模 大試験を行い、得られた知見に基づいて乾燥装置の概念設計を行った。また、水素 濃度測定技術の検討では、濃度測定の要求技術仕様及び適用性判断基準を検討・ 設定の上で技術調査を実施し、水素濃度測定技術の候補を選定した。
- 燃料デブリと放射性廃棄物へ仕分けに対して移送や保管の効率向上に有効となる 条件及び利点を提示した。



# 6. 実施内容 6.5 評価まとめ

## ③成果の反映先への寄与

技術としては個別に評価するものとし、本項での記載は省略する。

## ④現場への適用性の観点に対する分析

技術としては個別に評価するものとし、本項での記載は省略する。

## ⑤目標に照らした達成度

関連PJとの合同打合せを実施し、仕分けする技術の調査に協力を行った。なお、技術は 個別に評価するものとし、本項での記載は省略する。

## ⑥今後の課題

技術は個別に評価するものとし、本項での記載は省略する。



# 【補足-1】収納缶開発の基本条件(1/8)

収納缶仕様は、現時点で得られた燃料デブリ性状の情報や燃料デブリ取り出し工法からの要求事項、燃料デブリ性状把握PJから提供された情報等に基づき主に安全評価の観点から設定した。これら条件には、仮定を含んでいるものもあるため、燃料デブリ性状把握PJや取り出し規模の更なる拡大PJの成果に基づいて検証、見直しする必要がある。また、具体的な手法、頻度他要領は実工事の段階で検討するものとする。 【燃料デブリの性状】

- ・燃料デブリ組成(MCCI生成物を除く):
  - 現時点で想定されるRPV/PCV内の構成物(二酸化ウラン(照射に伴うFPを含む)、ジルコニウム合金、 ステンレス、低合金綱、Ni基合金、コンクリート、B<sub>4</sub>C)
- 塩分濃度:最大100ppm程度
  - 滞留水の塩素濃度10~20ppmを保守的に設定したもの。なお、腐食評価では炉内水の実績より現実的に3ppm程度とした。
  - ⇒実燃料デブリの取り出しにおいて継続的に確認することを想定している。なお、腐食等では、点検等による確認も有効な手段である。
- ・ジルコニウム:金属状態で微量に残留
  - 火災の可能性を考慮するため。
  - ⇒技術開発としては検討の難易度を厳しく金属火災の可能性を想定した検討としたが、実燃料デブリを 継続的に確認してデータ蓄積し、対策の緩和も期待できる。
- MCCI生成物の物性:上記燃料デブリにコンクリートが混合したもの 燃料デブリの熱で結晶水喪失、ガス発生等の反応があったと考えられるが、評価上はコンクリート成分が 物理的に混濁したものとした。



## 【補足-1】収納缶開発の基本条件(2/8)

**No.92** 

#### 【燃料デブリの性状(つづき)】

- ・燃料デブリの安定性:-20~300℃(窒素雰囲気)では安定したもの
  - 燃料デブリが内包する成分の気化等による大幅な体積変動、腐食物質や放射性ガスの大量放出等の 安全に大きく影響する挙動は生じないものと仮定した。
    - ⇒実燃料デブリの安定性の知見は限られているので、安定性を継続的に確認することで安全確保すると ともに実績によっては温度条件緩和も期待できる。
- 形状:塊状・粒状・粉状の固形物
- 防錆剤/中性子吸収材:五ホウ酸ナトリウム
   現時点で採用が検討されているものとした。なお、非溶解性中性子吸収材は具体化した段階で検討するものとした。
  - ⇒特に非溶解性中性子吸収材は継続的に他PJの検討状況を確認し、必要に応じて再評価が必要であ る。

# 【補足-1】収納缶開発の基本条件(3/8)

収納缶の形状を設定するにあたり、取り出し規模の更なる拡大PJや有識者の意見を踏まえて以下の条件 を仮定した。

- ・塊状、粒状の燃料デブリ:掴む、掬う等の方法で回収して収納
- ・収納缶寸法:内径は220mmと400mm、全長1000mm
   収納缶内径は2018年度までの検討を踏まえて内径220mmと400mmを想定した。また、収納缶全長は、 取り出し規模の更なる拡大PJで想定している1m程度より設定した。
   ⇒収納缶全長の見直しが発生した場合には、必要に応じて再評価が必要である。
- ・粉体状の燃料デブリ:網状等の水切りできるユニット缶に回収し、ユニット缶ごと燃料デブリ収納缶へ収納 一般的な水処理では金属性のストレーナー形状のフィルターが用いられており、粉状燃料デブリの ポンプ回収も同様の構造のユニット缶が用いられることを想定した。なお、ユニット缶は収納缶に収 納できる大きさとし、ユニット缶の素材はステンレス、焼結ステンレス網等の熱的安定なもので構成さ れているとした。また、ユニット缶の形状は取り出し規模の更なる拡大PJで形状検討中であるため、 現時点では取り出し規模の更なる拡大PJが粒径0.1mm以上の燃料デブリを回収目標としていること を踏まえてメッシュサイズ0.1mmの網構造のユニット缶を想定することとした。
  - ⇒燃料デブリのサイズ(粒径)や水切り条件等の見直しが発生した場合には、必要に応じて再評価が 必要である。
- 収納場所:収納作業は非冠水、作業は、ホットセル等のバウンダリのある空間とする。

⇒回収方法など、将来、見直しが発生した場合には、必要に応じて再評価が必要である。

・燃料デブリの収納~搬出要領:燃料デブリの取り出し関連作業は半日を切削作業、半日を燃料デブリの回収、収納缶への収納・搬出作業に割り当てる。

⇒見直しが発生した場合には、必要に応じて再評価が必要である。



## 【補足-1】収納缶開発の基本条件(4/8)

【燃料デブリの移送方法】

・移送方法:キャスク方式:

TMI-2の事例や使用済燃料で実績があるため。

- ⇒実工事段階で見直しが発生した場合には、必要に応じて再評価が必要である。
- ・移送姿勢:縦置き姿勢

燃料デブリの飛散抑制や、水素が蓄積する場合の上方となる位置や残留水の溜まる位置を特定するため。

⇒実工事段階で見直しが発生した場合には、必要に応じて再評価が必要である。

移送容器条件:収納缶12本を収納可能 容器内の寸法:内径1,700mm,内部高さ1,200 mm
 容器内の雰囲気:不活性ガス

以上は、使用済燃料の乾式キャスク仕様より仮設定。

なお、高さは収納缶寸法に合わせて短縮化したもの。

⇒実工事で用いる容器の実設計に合わせて詳細寸法は見直しが必要。

#### 【燃料デブリの保管】

有識者等との議論を踏まえて以下の条件を仮定した。

•保管方法

湿式保管:現時点ではオプション

1F既設プールを利用した湿式保管は、改造費用・期間・技術的困難度等を考慮すると、想定される プロフィットが少なく、合理性は高くないと考えられるため。

⇒現状では湿式保管や移送を想定していない検討があり、湿式を対象とした場合には、必要に応じて再評価が必要である。



## 【補足-1】収納缶開発の基本条件(5/8)

【燃料デブリの保管(つづき)】

・乾式保管:基本的な保管方法

乾式保管は使用済燃料の保管方法として安全性に加えてメンテナンス等の運営管理面で合理的 方法とされており、燃料デブリでも有利と考えられるため。なお、海外では使用済燃料の乾式保管に コンクリートキャスク等も採用されるが、収納物に対する要求は同等なため、国内実績のある金属 キャスクでの保管を代表事例とする。

- ⇒現状では湿式保管や移送を想定していない検討があり、湿式を対象とした場合には、必要に応じて再評価が必要である。
- 燃料デブリの乾燥:微量の水分は残留
  - 移送や保管検討では、保守的に乾燥後であっても燃料デブリ内に若干の水分が残留していることを 想定した。
  - ⇒技術開発としては検討の難易度を厳しくする観点で想定した検討としたが、実燃料デブリを継続的に確認してデータ蓄積し、対策の緩和も期待できる。
- ・収納缶による燃料デブリの保管期間:50年
  - ロードマップで設定の燃料デブリの最終処理・処分決定までの30年間を包絡する期間として設定した。 なお、使用済燃料乾式貯蔵施設では50年程度の保管期間と搬出入10年を想定して長期健全性に関 するデータが整備されており参考にできる。
  - ⇒技術開発としては検討の難易度を厳しくする観点で想定した検討としたが、先に述べた通り燃料デブリの安定性等、知見が乏しいため経年変化状況は継続的に確認してデータ蓄積していく必要がある。一方で、実績を踏まえた対策の緩和も期待できる。



# 【補足-1】収納缶開発の基本条件(6/8)

**No.96** 

収納缶の開発にあたり、次頁の取り扱いフローを仮定するとともに、合理的に安全を確保するための機能分担を仮設定した。

安全機能		沈計日博	安全機能分担 <sup>注1</sup>		* - +
		() 〕 〕 〕 〕 〕 〕 〕 〕 〕 〕 〕 〕 〕 〕 〕 〕 〕 〕 〕	収納缶	他機器	「「「」「「」「」「」「」「」「」「」「」「」「」「」「」「」「」「」「」「
未臨界		未臨界の維持	0	0	<ul> <li>・収納缶単体の未臨界維持は、収納缶の幾何形状(内径)で確保する。(燃料デブリの詰替は大がかりで非合理)</li> <li>・収納缶配列時の未臨界維持は、他機器(例;仮置きラックでは、収納缶どうしの距離を適切に確保する)で行う。</li> </ul>
冷やす	冷やす 除熱 リ他の物性への影 – ( 響防止		0	<ul> <li>・発熱量は同レベルの使用済燃料以下であり、静的な自然冷却で収納缶を冷却できるので、収納缶や移送キャスクには特別な除熱装置等は設けない。</li> <li>・燃料デブリの乾燥処理時を含めて、安全阻害要因(有毒ガス発生等)が生じない燃料デブリの上限温度以下で取扱う。</li> </ul>	
閉じ込める	閉じ込め	作業員や公衆の被 ばく防止	0	0	・収納缶には水素滞留防止口を設けるため、実運用における汚染拡大防止のために防止口にはフィルター等を設置する。収納缶、他施設(保管施設、移送キャスク)で閉じ込め(ガスについては放出管理)ができるようにする。
	遮蔽	作業員や公衆の被 ばく防止	_	0	・収納缶に遮蔽機能を付与すると重量が増え、取扱機器の大型化や保管効率の低下につながること、TMI-2でも同思想は実績があり、想定する取扱フロー上大きなデメリットが認められないため、遮蔽機能は付与せず、他機器(移送キャスク、建屋)で担保する。
	構造	安全機能を維持す るための構造強度	0	0	・収納缶の取扱機器等の合理化を考慮しつつ、収納缶には想定される異常事象 に対して必要な強度を持たせる。
その他	材料健全性	構造強度他の維持	0	0	・他機器で収納缶への荷重条件や腐食条件を緩和する。
<ul> <li>(止める、冷</li> <li>やす、閉じ込</li> <li>める機能の</li> <li>維持)</li> </ul>	水素	水の放射線分解で 生ずる水素の爆発 防止	〇 (触媒)	0	・建屋間の移送中(構内輸送)は、移送キャスク外への水素放出は不可であることを想定して、水素対策(触媒、運用管理等)を行う。 ・収納缶内の空間は小さく水素濃度が上昇するため、収納缶外部に放出できる 構造(水素滞留防止口)として他機器で掃気等を行う。
	火災防止	残留ジルコニウム による火災防止	_	0	・収納缶内またはセル内を不活性ガス雰囲気として発火を防止する。

■ 注1:安全機能の分担は、燃料デブリ性状や収納缶の取扱要領の影響を受けるため見直す可能性がある。

# 【補足-1】収納缶開発の基本条件(7/8)

燃料デブリの収納・移送・保管プロセスと安全機能





│保管施設大物搬入口┿──受入エリア①┿──収納物確認エリア┿─乾燥エリア ┿──受入エリア②┿─保管準備エリア ┿──保管エリア │

安全機能		乳計口標	受入れエリ	ア①~受入れエリア②	保管準備エリア~保管エリア	
		ひ 前 日 保	収納缶	エリア/乾燥装置他の装置類	収納缶	保管容器
未臨界		未臨界の維持	〇 孤立での未臨界	〇 配列する場合は装置	0	〇 配列での未臨界
冷やす 除熱		収納缶、燃料デブリ他の物 性への影響防止	-	〇 装置の環境温度維持	_	O 環境温度維持
閉じ込め	閉じ込め	作業員や公衆の被ばく防止	〇 汚染拡大防止	〇 エリア(装置も汚染拡大防止)	〇 汚染拡大防止	0
ବ	遮蔽	作業員や公衆の被ばく防止	—	0	—	0
その他	構造	安全機能を維持のための構 造強度	〇 収納缶単体の強度	〇 取扱装置の高さ制限や衝撃吸収等	〇 収納缶単体の強度	〇 移送容器の衝撃吸収機能等
(止める、 冷やす	材料健全性	構造強度他の維持	〇 ステンレス鋼の採用	〇 早期の乾燥/乾燥環境維持	〇 ステンレス鋼の採用	O 乾燥環境維持
ポ 閉じ込め る機能の 維持)	水素	水の放射線分解で生ずる水 素の爆発防止	O ベント/触媒/(乾燥)	〇 装置の掃気または時間管理	O ベント/触媒/(乾燥)	〇 ベント管接続までの時間管理/ベント
	火災防止	残留ジルコニウムによる火 災防止	_	〇 エリア内を窒素雰囲気	_	O 窒素雰囲気

## 【補足-2】安全要求に対する収納缶の設計条件(1/3)

**No.99** 

表 安全要求に対する収納缶設計条件の設定(1/3)

安全機能	安全	収納缶要求事項	见了。""你们就是你们的问题,你们就是你们的问题,你们就是你们的问题。""你们,你们就是你们的问题。""你们,你们就是你们的问题。""你们,你们就是你们,你们就 你们,你们我们就是你们,你们我们就是你们,你们就是你们的你们,你们就是你们的你们,你们就是你们的你们,你们就是你们的你们,你们们不是你们的吗?""你们,你们们不是		
	機能要求		蓋部	本体部	
閉じ込め	放射性物質の閉じ込め	放射性物質 の閉じ込め 場合を除き、収納缶内部からの放射性物質 の漏えいを防止すること。 べント機構からの水素 ガスの放出に伴う放射 性物質の漏えいを適切 に低減すること。	①汚染拡大防止の措置として、収納缶の本体と蓋のすき間を通過する燃料デブリ片(固体)注を放出しない構造とすること。なお、液体および気体の閉じ込め性は収納缶では担保せず、セルや移送容器などで担保する。	②収納缶の本体部は、溶接構造などにより 気密が維持される構造とすること。	
			③移送期間中に想定される腐食、放射線 による経年劣化に対してシール部の健 全性が維持できること。	_	
			④移送期間および保管期間中に想定される 材の健全性が維持できること。	腐食、放射線による経年劣化に対して強度部	
			⑤汚染防止拡大の措置として、ベント機構 を通過する燃料デブリ片(固体) <sup>注1</sup> の放 出を抑制できる構造とすること。	_	
		に低減すること。 想定すべき落下事象 が生じた場合であって も、放射性物質の漏え いを適切に低減するこ と。	⑥落下や転倒等の衝撃荷重を受けても、 収納缶の蓋部において蓋部の外れや破 損などの重大な損傷を生じず、汚染拡大 防止の観点から、収納缶本体と蓋のすき 間を通過する燃料デブリ片(固体)注1を 放出しない構造とすること。なお、液体お よび気体の閉じ込め性は収納缶では担 保せず、セルや移送容器などで担保する。	⑦落下や転倒等の衝撃荷重を受けても、収納缶の本体部において破損などの重大な損傷を生じず、汚染拡大防止の観点から、燃料デブリ片(固体)注1、液体および気体を放出しない構造とすること。	

注1:燃料デブリ片(固体)の粒径は0.1mm以上と設定



# 【補足-2】安全要求に対する収納缶の設計条件(2/3)

**No.100** 

表 安全要求に対する収納缶設計条件の設定(2/3)

中全爆船	安全	収納缶要求事項	収納缶設計条件		
<u> </u>	機能要求		蓋部	本体部	
臨界防止	追加核分裂 反応の防止	四核分裂 臨界を防止可能な形 むの防止 状とすること。	_	⑧収納缶内径の幾何学形状により燃料デブ リの未臨界が維持される構造とすること。	
			_	⑨収納缶の配列時は、他機器(金属キャス クのバスケット等)で配列寸法を保持する ことで未臨界を維持すること。	
			①落下や転倒等の衝撃荷重を受けても、 収納缶の蓋部において蓋部の外れや破 損などの重大な損傷を生じず、未臨界維 持の観点から、収納缶本体と蓋のすき間 を通過する燃料デブリ片(固体)注1を放 出しない構造とすること。なお、液体およ び気体の閉じ込め性は収納缶では担保 せず、セルや移送容器などで担保するこ と。	①落下や転倒等の衝撃荷重を受けても、収納缶内径が未臨界を維持できる幾何学形状を維持できる構造とすること。また、収納缶の本体部において破損などの重大な損傷を生じず、未臨界維持の観点から、燃料デブリ片(固体)注1、液体および気体を放出しない構造とすること。	
除熱	異常な過熱 の防止	燃料デブリの温度を適 切に維持できること。	⑩収納缶の自然放熱で健全性を維持できる構造とすること。		
		想定すべき建屋温度 の上昇事象が生じた場 合であっても収納缶内 部温度が許容温度を 超えることのない設計 とすること。	13外電喪失やその他想定すべき事象におい いこと。	ても、収納缶内部温度が許容温度を超えな	

注1:燃料デブリ片(固体)の粒径は0.1mm以上と設定



# 【補足-2】安全要求に対する収納缶の設計条件(3/3)

表 安全要求に対する収納缶設計条件の設定(3/3)

安全機能	安全	収納缶要求事項	収納缶設計条件		
<b>幺土饭</b> 肥	機能要求		蓋部	本体部	
遮蔽	放射線によ る過大な被 ばく・内部 被ばくの防 止	(要求なし)	⑩遮蔽機能は収納缶では担保せず、建屋や	移送容器などで担保すること。	
水素爆発 防止	水の放射線 分解による 可燃性ガス による火災、 爆発への対 応(ハザード への対応)	線 収納缶内部の水素濃 度が設計値未満を維 、 持できる設計とするこ 、 と。	①燃料デブリによる水の放射線分解で発生 造とすること。	する水素を適切に収納缶外部へ排出する構	
			⑩燃料デブリによる水の放射線分解での水	素発生を抑制できる構造とすること。	
粉じん火 災防止	燃料 デブリ 取 り 出 し 切 断 る 金 酸 た の 反 炎 の 反 炎 (ハ ザ ん の 、 、 の 、 、 の 、 、 の 、 、 の 、 の 、 の 、 の	燃料デブリに想定され るジルコニウム微粉末 による発火を防止する ための手段について検 討する。	①収納缶内またはセル内を不活性ガス雰囲	気として発火を防止すること。	



# 【補足-3】取扱い要求に対する収納缶の設計条件

**No.102** 

表 取扱い要求に対する収納缶設計条件の設定

取扱い 機能要求	収纳在西戈東百	収納缶設計条件		
	<b>收</b> 附山安 <b>小</b> 尹項	蓋部	本体部	
取扱い性	遠隔操作による蓋締めおよび蓋開放 が可能であること。	(a)遠隔操作により蓋締めおよび蓋開放が 可能な蓋構造とすること。	_	
	作業性の観点から、簡易な動作で蓋 締めおよび蓋開放が可能であること。	(b)蓋の回転等の簡易な動作で、蓋締めお よび蓋開放が可能な蓋構造とすること。	—	
	その他、燃料デブリ収納・移送・保管 に関する取扱いが可能なこと。	(c)収納缶の吊り上げが可能な構造とするこ	と。	
		(d)(乾燥設備や)不活性ガス注入設備等と指	<b>接続できる構造とすること。</b>	
		(e)移送時や保管時に段積みが可能となるよ る構造とすること。	<う、蓋部と収納缶底部構造が取合いでき	
		(f)収納缶の取扱いフローにおける作業性を	考慮した寸法、構造とすること。	



図 収納缶の取扱いフロー案(横アクセスの例)



# 【補足-4】収納缶の仕様案(1/15)

表	収納缶の設計条件	と什様(案)	(1/10)
-			(1/ 10/

部位	安全機能 および 機能要求		設計条件	収納缶仕様(案)
蓋	<ul> <li>閉じ込め</li> <li>第下や転倒等の衝撃荷重を受けても、収 納缶の蓋部において蓋部の外れや破損 などの重大な損傷を生じず、汚染拡大防 止の観点から、収納缶本体と蓋のすき間 を通過する燃料デブリ片(固体)注1を放出 しない構造とすること。なお、液体および 気体の閉じ込め性は収納缶では担保せ ず、セルや移送容器などで担保する。</li> <li>簡易取付構造 ・インテグラル方式による蓋締め構造(廻り ・蓋外径口300mm(内径220mm収納缶)、</li> </ul>	<ul> <li>簡易取付構造</li> <li>・インテグラル方式による蓋締め構造(廻り止め機構搭載)</li> <li>・蓋外径口300mm(内径220mm収納缶)、口500mm(内径400mm収納缶)</li> <li>ボルト構造</li> <li>・ボルトによる蓋締め構造(ガイドピン搭載)</li> <li>・蓋外径φ300mm(内径220mm収納缶)、φ500mm(内径400mm収納缶)</li> </ul>		
	臨界防止	1	落下や転倒等の衝撃荷重を受けても、収 納缶の蓋部において蓋部の外れや破損 などの重大な損傷を生じず、未臨界維持 の観点から、収納缶本体と蓋のすき間を 通過する燃料デブリ片(固体)注1を放出し ない構造とすること。なお、液体および気 体の閉じ込め性は収納缶では担保せず、 セルや移送容器などで担保する。	<ul> <li>【仕禄選疋の考え万】</li> <li>・鉛直落下等の衝撃荷重を受けても、蓋の外れや大量の漏洩に至る重大な損傷が起こらない構造強度、継続的にシール部にすき間が生じない構造とした。</li> <li>・遠隔操作が可能な構造として、類似品で遠隔実績のあるボルト構造、簡易な動作(蓋の回転)で蓋開閉できる簡易取付構造の2種類を選定した。</li> <li>・作業性、収納効率を考慮して、可能な限り蓋外径を小さくするものとし、 内径220mmは□310mm、内径400mmは□510mmのバスケット内に収納できるサイズとした。</li> </ul>
	取扱い性	(a)	遠隔操作により蓋締めおよび蓋開放が可 能な蓋構造とすること。	・緩衝構造の設置で、収納物の跳ね上がりによる蓋内面への衝突を防止 することから、衝突による蓋の浮き上りは考慮不要とし、蓋と容器の差し
		(b)	蓋の回転等の簡易な動作で、蓋締めおよ び蓋開放が可能な蓋構造とすること。	込み重を極力小さい構造として加工時間(加工重)の低減を図った。 ・万一、ボルトのかじりが発生した場合は、蓋の側面から専用工具(円盤 状カッターを想定)でボルトを切断することで対応することとし、蓋の切り
		(f)	収納缶の取扱いフローにおける作業性を 考慮した寸法、構造とすること。	込み量を少なくするため、ボルトを可能な限り外側に配置するものとした。

注1:燃料デブリ片(固体)の粒径は0.1mm以上と設定



# 【補足-4】収納缶の仕様案(2/15)

表 収納缶の設計条件と仕様(案)(2/10)

部位	安全機能 および 機能要求	設計条件		収納缶仕様(案)	
ベント 機構	ベント 閉じ込め ⑤ 汚染拡大防止の措置として、ベント機構 ・開閉方式:カプラ方式(常時開カプラ) 機構 を通過する燃料デブリ片(固体)注1の放出 ・カプラのサイズ:1インチタイプ(最小断面積を抑制できる構造とすること。	・開閉方式:カプラ方式(常時開カプラ) ・カプラのサイズ:1インチタイプ(最小断面積:約490mm <sup>2</sup> )			
水素爆発 防止 り 取扱い性 (d) (乾燥設備や)不活性ガス注入設備等と接 続できる構造とすること。 いなりの実測値ベースのア カプラの影響を考慮した水 内の水素濃度が爆発下限 選定した。 ・収納缶取扱い時のベント閉 から、リスクを抑えるためす ・不活性ガス注入設備とのす	水素爆発 防止	15	燃料デブリによる水の放射線分解で発生 する水素を適切に収納缶外部へ排出す る構造とすること。	・燃料デブリ片(粒径0.1mm以上)の放出は、ベント機構に設置するフィル タで抑制する構造とした。 ・水ありの実測値ベースの水素発生量において、ベント流路上のフィルタ、	
	カノラの影響を考慮した水素の拡散評価式による放田評価から、収納缶 内の水素濃度が爆発下限界4 vol%以下になる仕様(カプラのサイズ)を 選定した。 ・収納缶取扱い時のベント開閉操作における水素濃度上昇のリスク評価 から、リスクを抑えるため常時ベント開放のカプラを選定した。 ・不活性ガス注入設備との接続は、ベント機構のカプラ1個で接続し、給気 と排気を交互に実施することで収納缶内をガス置換できる構造とした。				
送気 機構	取扱い性	(d)	(乾燥設備や)不活性ガス注入設備等と接続できる構造とすること。	<ul> <li>・ユニット缶状態で乾燥:送気機構なし</li> <li>・収納缶状態で乾燥:送気機構あり(接続口は給気と排気のため2ヶ所)</li> <li>【仕様選定の考え方】</li> <li>・燃料デブリの乾燥方式は減圧加熱乾燥方式と温風加熱乾燥方式、乾燥 状態はユニット缶状態と収納缶状態を検討しているが選定には至ってい ない。そのため、どの方式・状態にも対応できるように、送気機構なしと 送気機構ありの構造を検討した。</li> <li>・ユニット缶状態で乾燥する場合はユニット缶を乾燥チャンバー内に設置 して乾燥処理を実施するため、送気機構の設置は不要である。また、収 納缶状態(減圧加熱乾燥)ではベント機構(接続口1ヶ所)で給気と排気を 交互運転することで、送気機構の設置を不要にできる可能性がある。</li> <li>・収納缶状態(温風加熱乾燥)では、ベント機構(接続口1ヶ所)で対応でき ないため、収納缶に送気機構の設置が必要である。</li> </ul>	

注1:燃料デブリ片(固体)の粒径は0.1mm以上と設定



# 【補足-4】収納缶の仕様案(3/15)

表 収納缶の設計条件と仕様(案)(3/10)

部位	安全機能 および 機能要求	設計条件		収納缶仕様(案)	
<b>月</b> 同	閉じ込め	2	収納缶の本体部は、溶接構造などにより 気密が維持される構造とすること。	・内径:220mm、400mm ・板厚:10mm ・内部高さ:840mm(内径220mm収納缶) 845mm(内径400mm収納缶)	
		Ī	落下や転倒等の衝撃荷重を受けても、収 納缶の本体部において破損などの重大 な損傷を生じず、汚染拡大防止の観点か ら、燃料デブリ片(固体)注1、液体および 気体を放出しない構造とすること。	<ul> <li>・溶接構造:突合せ完全溶込み溶接</li> <li>【仕様選定の考え方】</li> <li>・暫定的にクラス3容器相当とし、JSME「設計・建設規格 PVD-4000 容器の 製造」に沿った溶接部の構造とした。</li> <li>・TMI-2の収納缶の肉厚が1/4インチ(6.35mm)であったことから、安全側に</li> </ul>	
	臨界防止	8	収納缶内径の幾何学形状により燃料デブ リの未臨界が維持される構造とすること。	収納缶の肉厚を10mmとした。なお、鉛直落下等の衝撃荷重を受けて 大量の漏洩に至る重大な損傷が起こらない強度を持つ構造とした。ま 胴とフランジとつなぎ目に蓋衝突時の応力緩和のためハブ部(テーパ)	
		9	収納缶の配列時は、他機器(金属キャス クのバスケット等)で配列寸法を保持する ことで未臨界を維持すること。	3000 クラス3容器の設計」に則った構造とした。 ・内径は、未臨界評価により、どの様な燃料デブリ粒径、含水率であっても 未臨界維持が可能であることを確認した220mmと、作業性向上などのた	
		1	落下や転倒等の衝撃荷重を受けても、収 納缶内径が未臨界を維持できる幾何学 形状を維持できる構造とすること。また、 収納缶の本体部において破損などの重 大な損傷を生じず、未臨界維持の観点か ら、燃料デブリ片(固体)注1、液体および 気体を放出しない構造とする。	<ul> <li>のに内径拡大を検討して仮設定した400mmの構造とした。</li> <li>・配列寸法は、収納缶内径220mmについて、ウラン濃縮度4.9wt%、水体 積割合0.2、有限配列(10×10)での臨界評価の結果、未臨界維持が可 能であることが確認されている330mm以上と仮設定した。</li> <li>・鉛直落下等の衝撃荷重を受けても、緩衝構造の設置により、収納缶内径 220mmが未臨界を維持できる範囲内での変形となる構造とした。</li> <li>・内部高さは、2体収納するユニット缶の高さ(400mm/1体)と触媒ケース 厚さ(20mm(仮設定))に加え、ユニット缶の熱膨張、製作公差、およびユ</li> </ul>	
	取扱い性	(f)	収納缶の取扱いフローにおける作業性を 考慮した寸法、構造とすること。	ニット缶が傾いて収納された場合の高さにマージンを考慮して、ユニ 缶の上方に空間を持たせて840mm(内径220mm収納缶)と845mm( 径400mm収納缶)と設定した。	

注1:燃料デブリ片(固体)の粒径は0.1mm以上と設定



# 【補足-4】収納缶の仕様案(4/15)

表 収納缶の設計条件と仕様(案)(4/10)

部位	安全機能 および 機能要求	設計条件		収納缶仕様(案)	
除熱 構造	除熱	12	収納缶の自然放熱で健全性を維持できる 構造とすること。	・除熱構造(冷却フィン等)なし 【仕様選定の考え方】	
		13	外電喪失やその他想定すべき事象にお いても、収納缶内部温度が許容温度を超 えないこと。	<ul> <li>・2014年度の除熱に関する検討で気中での取扱いを想定した評価を実知した結果、最高燃焼度の塊状燃料デブリを充填率50%で配置した場合おいて、TMI-2を参考とした燃料デブリの制限温度300℃を超えないことが確認できたことから、特別な除熱構造(除熱を向上させるフィン等)は設けないこととした。</li> <li>・他機器(移送容器/保管容器バスケット、冷却フィンなど)による除熱や知施設内の空調などで収納缶周囲の温度環境を担保するものとし、収納缶には特別な除熱構造(除熱を向上させるフィン等)は設けないこととした。</li> </ul>	
遮蔽 構造	遮蔽	1	遮蔽機能は収納缶では担保せず、建屋 や移送容器などで担保すること。	<ul> <li>・遮蔽構造なし</li> <li>【仕様選定の考え方】</li> <li>・収納缶重量の増加による作業性低下、および遮蔽構造設置による取扱 性低下を避けるため、収納缶には遮蔽構造を設置しないものとした。</li> </ul>	
不活性 雰囲気	粉じん火 災防止	1	収納缶内またはセル内を不活性ガス雰囲 気として発火を防止すること。	<ul> <li>・不活性ガス注入設備と接続できるカプラ(ベント機構のカプラと共用)を設置する</li> <li>【仕様選定の考え方】</li> <li>・ジルコニウム微粉末による発火防止対策については未定であるが、収納 缶内を不活性ガス雰囲気として発火を防止することを想定し、収納缶に カプラ(ベント機構のカプラと共用)を設けてガス注入設備が接続できる 構造とした。</li> </ul>	



# 【補足-4】収納缶の仕様案(5/15)

#### 表 収納缶の設計条件と仕様(案)(5/10)

部位	安全機能 および 機能要求	設計条件		収納缶仕様(案)
吊り部	取扱い性	(c)	収納缶の吊り上げが可能な構造とすること。	・蓋の内部に設けた吊上げ用溝を把持して、収納缶を吊上げる構造 (なお、収納スペースが四角柱(または制約なし)の場合は、胴フランジを 把持して吊上げることも可能)
				【仕様選定の考え方】 ・蓋の内部に吊上げ用の溝を設け、収納缶吊り装置の吊り治具を収納缶 蓋外径よりも小さくすることで、収納スペースの形状(四角柱、円柱、プ レート(抜き穴))に影響されずに吊上げが可能な構造とした。 ・蓋上面の中央に設置していた吊り部を設置しないことで、2018年度の収 納缶蓋構造成立性確認試験で見られた緩衝構造の吊り部への入り込み 事象が発生しない構造とした。
セル間 ポートと のか ル方式	取扱い性	(f) 収納缶の取扱いフローに 考慮した寸法、構造とする	収納缶の取扱いフローにおける作業性を 考慮した寸法、構造とすること。	・収納缶本体の上端を平面構造とすることで、セル間ポートに設置された シール部へ押し付けてシールできる構造 ・内部蓋(フィルタ付)を収納缶本体に設置する構造
				【仕様選定の考え方】 ・収納缶の取扱いフローにおけるセル間のエリア境界での汚染を極力抑 止する方式として、収納缶本体の上端平面をセル間ポートのシール部に 押し付けてシールできる構造とした。 ・セル間ポートから蓋締めまでの収納缶の取扱い中における汚染を極力 抑止する方式として、収納缶本体に内部蓋を設置する構造とした。なお、 内部蓋には水素ベント用にベント機構と同等のフィルタを設けた構造とし た。
## 【補足-4】収納缶の仕様案(6/15)

表 収納缶の設計条件と仕様(案)(6/10)

部位	安全機能 および 機能要求		設計条件	収納缶仕様(案)
フィルタ	閉じ込め	5	汚染防止拡大の措置として、ベント機構 を通過する燃料デブリ片(固体)注1の放出 を抑制できる構造とすること。	<ul> <li>・メッシュ径:0.3µm</li> <li>・タイプ:金網タイプ</li> <li>・材質:SUS316</li> <li>【仕様選定の考え方】</li> <li>・フィルタの仕様選定にあたって、安全機能に対する要求事項を整理し、フィルタの設計方針案として設定した。</li> <li>(1)収納缶で取扱う燃料デブリは0.1mm以上の粒径と設定しているため、メッシュ径は0.1mm未満にする。</li> <li>(2)収納缶内に発生する水素を適切に放出することが可能なメッシュ径とする。</li> <li>(3)耐火性、耐熱性、材料経年劣化等の観点から、フィルタ材質は収納缶と同等材とする。</li> <li>・上記の設計方針案から、現状想定される最小のメッシュ径(0.3µm)での水素拡散評価式による放出評価を実施し、収納缶内の水素濃度を爆発下限界4vol%以下に保つことが可能であることが確認できたことから、フィルタのタイプとして、金網タイプと粉末金属焼結タイプを展定した。</li> <li>・フィルタのタイプとして、金網タイプと粉末金属焼結タイプを展すとしたが、BWRフィルタベントでの実績等を考慮して金網タイプを選定した。</li> <li>・フィルタの材質は収納缶と同等材であるSUS316とした。</li> <li>・フィルタの目詰まり対策としては、フィルタの直径を可能な限り大きいサイズとすることでフィルタの表面積を大きくし、目詰まりの影響を受けにくい構造とした。万一、目詰まりした際は蓋を交換することでフィルタの交換をするものと想定した。</li> </ul>

## 【補足-4】収納缶の仕様案(7/15)

表 収納缶の設計条件と仕様(案)(7/10)

部位	安全機能 および 機能要求	設計条件	収納缶仕様(案)
シール	閉じ込め	<ul> <li>③ 移送期間中に想定される腐食、放射線に よる経年劣化に対してシール部の健全性 が維持できること。</li> </ul>	<ul> <li>・エラストマー系ガスケット(EPDM:エチレンプロピレンジエンゴム)</li> <li>【仕様選定の考え方】</li> <li>・保管中は保管施設で閉じ込め機能を担保するため、保管中の密封維持確認(定期的な漏洩検査など)が困難な収納缶については、保管中の閉じ込め機能を期待しない。そのため、保管効率(蓋外径の最小化)、蓋締め作業性や簡易取付構造への適用性などを優先して、エラストマー系ガスケット(EPDM)を採用した。</li> <li>・耐放性は、燃料デブリ燃焼度41(GWd/t)で収納缶内の燃料デブリを全てUO,と仮設定した場合の概算評価にて約2年程度であり、移送中や取扱い中(約7日と想定)の耐久性には問題はない。</li> <li>・約50年と想定される保管中には、経年劣化により閉じ込め機能が喪失する可能性があるが、閉じ込め機能が喪失しても、静置状態である保管中に燃料デブリ片がシール部から大量に放出されることは考えにくく、かつ、仮に放出されたとしても閉じ込め機能を担保している保管容器内(金属キャスク方式の場合)に留まることから、保管施設としての閉じ込め機能を損なうものではない。</li> <li>・なお、保管中(および保管後)の閉じ込め機能を担保させるための手段としては、金属ガスケットを採用する案が考えられるが、以下の課題があり、現状設計では採用しなかった。</li> <li>(ii)ボルト差構造には適用できるが、大きな締め付け力が必要となるため、蓋外径/ボルト径が大きくなり、収納缶の重量増加や保管効率が減少すること。</li> <li>(iii)エラストマー系ガスケットに比べて、シール面の清浄管理(傷付き防止や異物混入の管理)やボルトの締付け作業管理により慎重な配慮が必要であること。</li> </ul>

## 【補足-4】収納缶の仕様案(8/15)

**No.110** 

表 収納缶の設計条件と仕様(案)(8/10)

部位	安全機能 および 機能要求	設計条件		収納缶仕様(案)		
シール (続き)	閉じ込め	1	汚染拡大防止の措置として、収納缶の本 体と蓋のすき間を通過する燃料デブリ片 (固体) <sup>注1</sup> を放出しない構造とすること。な お、液体および気体の閉じ込め性は収納 缶では担保せず、セルや移送容器などで 担保する。	<ul> <li>簡易取付構造</li> <li>・外側円筒面:エラストマー系(EPDM)の0リング</li> <li>・上端平面(0リングは蓋に設置):エラストマー系(EPDM)の0リング</li> <li>【仕様選定の考え方】</li> <li>・蓋構造より、閉じ込め境界としての0リング設置位置は、収納缶の上端平面と外側円筒面が考えられるが、上端平面の0リング設置では萎の構造</li> </ul>		
		6	落下や転倒等の衝撃荷重を受けても、収 納缶の蓋部において蓋部の外れや破損 などの重大な損傷を生じず、汚染拡大防 止の観点から、収納缶本体と蓋のすき間 を通過する燃料デブリ片(固体)注1を放出 しない構造とすること。なお、液体および 気体の閉じ込め性は収納缶では担保せ ず、セルや移送容器などで担保する。	<ul> <li>上、のリングつぶし代の管理が難しいため、外側円筒面でののリング設置による閉じ込め境界とした。</li> <li>・なお、簡易取付構造は蓋の構造上、蓋と本体のはめ合い部のすき間が比較的大きい構造となっており、転倒等の衝撃荷重を受けた場合、外側円筒面シール部に瞬間的なすき間が生じる可能性があるため、上端平面にものリングを設置して瞬間的な漏えいを抑止できる構造とした。</li> <li>・経年劣化などの影響によりシールが機能しなくなった場合の対応も踏まえ、のリングの交換ができるように上端平面ののリングは蓋側に設置した。</li> </ul>		
	臨界防止	1	落下や転倒等の衝撃荷重を受けても、収 納缶の蓋部において蓋部の外れや破損 などの重大な損傷を生じず、未臨界維持 の観点から、収納缶本体と蓋のすき間を 通過する燃料デブリ片(固体)注1を放出し ない構造とすること。なお、液体および気 体の閉じ込め性は収納缶では担保せず、 セルや移送容器などで担保する。	<ul> <li>ボルト構造</li> <li>・上端平面(のリングは蓋に設置):エラストマー系(EPDM)ののリング</li> <li>【仕様選定の考え方】</li> <li>・ボルト締めでつぶし代が管理できる点、および蓋外径の目標寸法の制約 から、閉じ込め境界は収納缶本体の上端平面ののリングとした。</li> <li>・経年劣化などの影響によりシールが機能しなくなった場合の対応も踏ま え、のリングの交換ができるように上端平面ののリングは蓋側に設置した。</li> </ul>		

注1:燃料デブリ片(固体)の粒径は0.1mm以上と設定

(燃料デブリの粒径に応じた定義:粉状燃料デブリ(システムの液相系などで回収):0.1mm未満、粒状燃料デブリ(吸引などで回収):0.1mm~10mm、塊状燃料デブリ(ユニット缶で回収):10mm超え)



## 【補足-4】収納缶の仕様案(9/15)

表 収納缶の設計条件と仕様(案)(9/10)

部位	安全機能 および 機能要求		設計条件	収納缶仕様(案)
緩衝構造	閉じ込め	6	落下や転倒等の衝撃荷重を受けても、収納缶の蓋部にお いて蓋部の外れや破損などの重大な損傷を生じず、汚染 拡大防止の観点から、収納缶本体と蓋のすき間を通過す る燃料デブリ片(固体)注を放出しない構造とすること。なお、 液体および気体の閉じ込め性は収納缶では担保せず、セ ルや移送容器などで担保する。	・DOE(スカート型)タイプ 【仕様選定の考え方】 ・2018年度の収納缶蓋構造成立性確認試験において発 生した、落下時における収納物の跳ね上がりによる蓋 内面への衝突で簡易取付構造養が開かなくなる事象。
		Ī	落下や転倒等の衝撃荷重を受けても、収納缶の本体部に おいて破損などの重大な損傷を生じず、汚染拡大防止の 観点から、燃料デブリ片(固体) <sup>注1</sup> 、液体および気体を放出 しない構造とすること。	および収納缶上部への収納缶の落下事象における下 側収納缶の胴部の変形を低減するため、緩衝構造を 設置する構造とした。 ・緩衝構造は、既存のTMI(凹型)タイプ、Paks(ドーナッツ
	臨界防止①	1	落下や転倒等の衝撃荷重を受けても、収納缶の蓋部にお いて蓋部の外れや破損などの重大な損傷を生じず、未臨 界維持の観点から、収納缶本体と蓋のすき間を通過する 燃料デブリ片(固体)注を放出しない構造とすること。なお、 液体および気体の閉じ込め性は収納缶では担保せず、セ ルや移送容器などで担保する。	型)タイプ、DOE(スカート型)タイプを候補として、構造 が単純で製作性が良く、収納缶の段積みや水素ガスの 滞留防止用の穴を設けやすいことを考慮して、DOE(ス カート型)タイプを選定した。 ・拭取りによる除染作業やスミアによる表面汚染密度測 定が難しい課題もあるが、構造上の工夫(内面に凹凸
		1	落下や転倒等の衝撃荷重を受けても、収納缶内径が未臨 界を維持できる幾何学形状を維持できる構造とすること。ま た、収納缶の本体部において破損などの重大な損傷を生じ ず、未臨界維持の観点から、燃料デブリ片(固体) <sup>注1</sup> 、液体 および気体を放出しない構造とする。	形状を設けない等)や、取扱い時の汚染防止対策(開 ロ部に蓋をして養生する等)で対応できるものと想定す る。 ・収納缶取扱い時における緩衝構造の変形防止を考慮 した構造とするため、補強として下端リングを設置する
	取扱い性	(e)	移送時や保管時に段積みが可能となるよう、蓋部と収納缶 底部構造が取合いできる構造とすること。	情垣とし7こ。
		(f)	収納缶の取扱いフローにおける作業性を考慮した寸法、構 造とすること。	

注1:燃料デブリ片(固体)の粒径は0.1mm以上と設定

(燃料デブリの粒径に応じた定義:粉状燃料デブリ(システムの液相系などで回収):0.1mm未満、粒状燃料デブリ(吸引などで回収):0.1mm~10mm、塊状燃料デブリ(ユニット缶で回収):10mm超え)



©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

## 【補足-4】収納缶の仕様案(10/15)

表	収納缶	の設計	条件と	:仕様	(案)	(10/	10)
---	-----	-----	-----	-----	-----	------	-----

部位	安全機能 および 機能要求		設計条件	収納缶仕様(案)
触媒	水素爆発 防止	16	燃料デブリによる水の放射線分解での水 素発生を抑制できる構造とすること。	<ul> <li>内部蓋底面に触媒ケース(円盤状,厚さ20mm)を設置</li> <li>【仕様選定の考え方】</li> <li>水素発生の抑制対策として、触媒の有効性、必要量、設置位置などを別途、検討中であるが、暫定仕様として内部蓋底面に触媒ケース(円盤状、厚さ20mm)を設置する構造とした。</li> </ul>
材質	閉じ込め	4	移送期間および保管期間中に想定される 腐食、放射線による経年劣化に対して強 度部材の健全性が維持できること。	<ul> <li>・SUS316L</li> <li>【仕様選定の考え方】</li> <li>・現時点で収納缶内の環境を予想することは困難であるが、一般的に耐食性に優れた特性を持ち、調達性、加工性が比較的容易な材料としてオーステナイト系ステンレスを選定した。その中でSUS304Lよりも耐SCC管理(塩素イオン濃度、湿度管理)面で有利であることを考慮してSUS316Lを選定した。なお、溶接によるSCC鋭敏化を避けるため、低炭素鋼材料(L材)とした。</li> <li>・運用、設計の観点での配慮も交えたシナリオを構築し、乾燥での運用を前提としたすき間腐食や応力腐食割れについての評価で採用可能の見通しを得ている。</li> </ul>

# 【補足-4】収納缶の仕様案(11/15)

### **No.113**

### 1)蓋

- ・遠隔操作が可能な構造として、蓋の回転で蓋開閉できる簡易取付構造、TMI-2等で遠隔 実績のあるボルト構造の2種類の蓋を設計した。
- ・万一、鉛直落下等の衝撃荷重を受けても、蓋の外れや大量の漏洩に至るような損傷が 起こらず、シール部からの継続的な漏えいが生じない強度を持つ構造とした。



注1:断面図については、構成部品を識別するため、蓋、胴部、ベント機構、フィルタ、触媒およびOリングなどを着色している。



# 【補足-4】収納缶の仕様案(12/15) 2) 胴部

- ・胴部の内径は、燃料デブリがどのような粒径や含水率で あっても未臨界維持が可能な幾何学形状である220mmと、 作業性向上などのために内径を拡大した400mmの2種類 の胴部を設計した。
- ・胴部の板厚は、TMI-2収納缶の板厚1/4インチ(6.35mm)を 参考にして、万一、鉛直落下等の衝撃荷重を受けても、 大量の漏洩に至る重大な損傷が起こらず、収納缶内径 220mmが未臨界を維持できる範囲内での変形となる強度 を持つ構造として、板厚を10mmと設計した。
- ・胴部の内部空間は、ユニット缶(外径210mm、高さ400mm) 2個を段積みして収納可能な構造とした。
- ・胴部とフランジ部および底板のつなぎ目には、万一、鉛直 落下等の衝撃荷重を受けた際の応力緩和のためにテーパ 部を設けた構造とした。

RID



©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

# 【補足-4】収納缶の仕様案(13/15)

## 3)シール(1/2)

- ・収納缶のシールには、移送中および取扱い中(約7日間と想定)の閉じ込め機能が要求され ており、保管中(約50年と想定)には閉じ込め機能の要求はない(保管中は、保管施設で閉じ 込め機能を担保する)。
- ・そのため、移送中および取扱い中(約7日間と想定)の閉じ込め性と耐久性を満足する候補の うち、保管効率(蓋外径の最小化)、蓋締め時の作業性や簡易取付蓋構造への適用性などを 優先して、エラストマー系ガスケット(EPDM)を採用した。
- ・保管中(約50年と想定)は、シールの経年劣化により閉じ込め機能が喪失する可能性があるが、静置状態である収納缶のシール部から大量に燃料デブリが放出されることは考えにくい。 また、仮に放出されたとしても保管容器内(金属キャスク方式の場合)に留まることから、保管施設としての閉じ込め機能を損なうものではない。
- ・なお、保管中(および保管後)の閉じ込め機能を改善する手段としては、金属ガスケットを採用 する案も考えられるが、以下の課題があり、構造検証試験に用いる収納缶(試験体)としては 採用しなかった。ただし、将来的な採用も見据え、金属ガスケット(ボルト構造)も副案として候 補に残すものとする。
  - (i) 簡易取付蓋構造への適用ができないこと。
  - (ii)ボルト蓋構造には適用できるが、エラストマー系ガスケットに比べて大きな締め付け力が必要となる ため、蓋外径/ボルト径が大きくなり、収納缶の重量増加や保管効率が減少すること。
  - (iii)エラストマー系ガスケットに比べて、シール面の清浄管理(傷付き防止や異物混入の管理)やボルトの締付け作業管理により慎重な配慮が必要であること。



## 【補足-4】収納缶の仕様案(14/15)

## 3)シール(2/2)



表 収納缶蓋の各シールの比較

	エラストマー系ガスケット	金属ガスケット	メタルタッチ	溶接方式
閉じ込め性	・短期の閉じ込め性を確保できる。	・長期の閉じ込め性の確保できる。	・短期/長期ともに閉じ込め性の保証 が難しい。	・長期の閉じ込め性を確保できる。
シール材/面の長 期健全性	・移送時は問題ないが、保管時の 保証は難しい。	・移送時/保管時ともに問題ない。	・シール面は金属であり問題ない。	・移送時/保管時ともに問題ない。
耐放性	<ul> <li>移送時/保管時にシール部で想定 される照射量(~30Gy/h)では 約2年程度<sup>注1</sup>である。</li> </ul>	<ul> <li>・移送時/保管時にシール部で想定 される照射量(~30Gy/h)では問題 ない。</li> </ul>	<ul> <li>移送時/保管時にシール部で想定 される照射量(~30Gy/h)では問題 ない。</li> </ul>	<ul> <li>移送時/保管時にシール部で想定 される照射量(~30Gy/h)では問題 ない。</li> </ul>
耐熱性	・移送時/保管時にシール部で想定 される温度範囲(~200℃ <sup>注2</sup> )では 問題ない。	・移送時/保管時にシール部で想定 される温度範囲(~200℃ <sup>注2</sup> )では 問題ない。	・移送時/保管時にシール部で想定 される温度範囲(~200℃ <sup>注2</sup> )では 問題ない。	・移送時/保管時にシール部で想定 される温度範囲(~200℃ <sup>注2</sup> )では 問題ない。
作業性	・比較的容易である。 ・一定の締付け力が必要(金属ガス ケットより小)である。	・エラストマー系ガスケットに比べ、 締付け時に配慮が必要である。 ・一定の締付け力が必要(エラスト マー系ガスケットより大)である。	・容易である。	・原子炉建屋(増設建屋含む)での 溶接作業は難しい。
取り出し性	・取り出しは可能だが、状態によって はガスケットの交換が必要である。	・取り出しは可能だが、金属ガスケットの交換が必要である。	<ul> <li>取り出しは可能だが、同等の閉じ込め性能を常に確保するのは難しい。</li> </ul>	<ul> <li>取り出しは可能だが、再使用は不可である。</li> </ul>
蓋設計への影響	・簡易取付構造への採用は可能だ が、摺動部がある場合には注意が 必要である。	・簡易取付構造への採用はできない。 ・蓋外径が大きくなる(エラストマー系 ガスケットより大)。	・簡易取付構造への採用はできない。	<ul> <li>オーバーパック溶接であれば自由 度はひろい。</li> </ul>

注1:燃料デブリの燃焼度を照射履歴を考慮した第6パッチ照射燃料の燃焼度(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) から設定した燃焼度41GWd/t、冷却期間10年、収納缶内の燃料デブリをすべてUO₂とした場合。なお、炉内平均燃焼度である26GWd/t、冷却期間10年を使用して評価した場合には、約5年と評価される。 注2:2014年度の除熱解析の結果、収納缶単体で最高燃焼度(41GWd/t)、燃料デブリ充填率30%の条件で、燃料デブリ中心が209℃、収納缶胴部は約90℃となっており、シール部の温度は~200℃と想定する。



## 【補足-4】収納缶の仕様案(15/15) 4)ベント機構

- TMI-2の評価で用いられた拡散評価式と同様の評価式で、ベント流路上のカプラ、フィルタ等を考慮して収納缶内の水素濃度を算出し、爆発下限界4vol%以下になる仕様として1インチのカプラを選定した注1。
- 水素発生速度は、以下3つの条件が考えられるが、
   燃料デブリは乾燥する計画であるため(乾燥目標値
   0.1 wt%)、使用済燃料を水中に浸漬した試験の実測
   値以下までは低減できると想定し、条件②を評価条件と設定した。

条件①:2018年度のTMI-2評価式(粒子輸送計算)による 予測値:1.3×10<sup>-16</sup>[L/h/Bq] 条件②:2018年度の使用済燃料を用いた水素発生試験の

実測値に測定誤差・ばらつきを考慮した値

 $:1.2 \times 10^{-17} [L/h/Bq]$ 

条件③:2018年度の使用済燃料を用いた水素発生試験の 実測値:5.1×10<sup>-18</sup>[L/h/Bq]

・取り出し初期の使用が想定される内径 \$\phi 220mm収納缶は、フィルターの目詰まり等の不確定要因を考慮し、カプラは爆発下限界4vol%に対して裕度を持つサイズを選定した。



[%]



図 拡散評価式による収納缶内水素濃度評価結果(内径220mm)

**No.117** 

IRID

注1:現在の蓋構造では、閉止キャップの接続/取外しの遠隔操作性を考慮すると、カプラのサイズは現状の 1インチが最大と考えるが、今後の設計の見直しにより、2インチ程度まで大きくできる可能性はある。

## 【補足-5】触媒の性能データ採取の考え方(1/2)

(補足)ガス境膜物質移動と総括反応速度係数の考え方

触媒近傍の水素の移動・反応の段階



図 触媒近傍の水素の移動・反応の概念<sup>注1</sup>

- 触媒による水素の反応速度は以下の二つの段階で 説明される。
  - ①流体から触媒表面への物質移動
  - 2触媒での反応
- 使用条件により①②両者の速度は変わり、 総括の速度は、相対的に速度が小さい段階側の速度が 支配的となる。

〇流体から触媒表面への物質移動速度は、
 境膜物質移動(ガス境膜物質移動)で表現される。
 r<sub>G</sub> = k<sub>G</sub>(C<sub>H2b</sub>-C<sub>H2s</sub>)

○触媒表面での反応速度は、以下の式で表現される。 r<sub>R</sub> = k<sub>R</sub>C<sub>H2s</sub>

〇以上より総括反応速度係数Kは以下の式で表現される。

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{k_R} + \frac{1}{k_G}$$
 K:総括反応速度係数  
 $\frac{1}{C} = \frac{1}{k_R} + \frac{1}{k_G}$  k<sub>R</sub>:触媒反応速度係数  
k<sub>G</sub>:ガス境膜物質移動係数

注1:橋本健治,反応工学,培風館,P183 より作成



©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

**No.119** 

## 【補足-5】触媒の性能データ採取の考え方(2/2)

(補足)触媒の性能データ採取の考え方

前述のとおり水素の再結合反応の反応速度式は 以下の式で表現される。

### 反応速度式

ー次で表される反応の場合 :  $-r = KC_{H2}$ r:反応速度 C<sub>H2</sub>:水素濃度 C<sub>O2</sub>:酸素濃度 K:総括反応速度係数

✓ 上記の関係は、温度やガスの流速等の環境条件が 同一であることが前提である。総括反応速度係数(K) は、これら環境条件に依存するため対応できるように データ採取が必要である。特に、ガスの流速は、



(kp:触媒反応速度係数、kg:ガス境膜物質移動係数)

図 反応速度係数取得の考え方

触媒表面にガス境膜を形成する点についても考慮が必要と考えられる。

✓ そこでKの設定にあたり、触媒そのものの反応速度係数(k<sub>R</sub>:触媒反応速度係数)と境膜内の 拡散の影響(kg:ガス境膜物質移動係数)とを、個別に着目できるよう流通式反応速度評価試験 でデータ取得を行うこととし、任意の流速条件に対するKが推算できるようにする。

 $\frac{1}{K} = \frac{1}{k_R} + \frac{1}{k_R}$ (K:総括反応速度係数、k<sub>R</sub>:触媒反応速度係数、k<sub>G</sub>:ガス境膜物質移動係数)



## 【補足-6】触媒試験結果の整理結果(1/7)

### ①湿度の影響

- ・乾燥ガス条件では、水素濃度の増加とともに、反応速度係数Kが低下。
   水素濃度10,000ppm以上で反応速度が増加に反転。
   反応熱による温度上昇の効果が、再結合水の影響を相殺・超過したと推測される。
- ・加湿ガス条件(ほぼ100%RH環境)でも、同様に水素濃度10,000ppmで反応速度が増加。
- ⇒ 触媒配置検討では、水素濃度と湿分の観点から、水素100ppm&加湿ガスの測定値(K=2)を 最も保守的条件での反応速度係数とした。





## 【補足-6】触媒試験結果の整理結果(2/7)

### ②温度の影響

- ・温度Tの増加とともに、反応速度係数Kが増加。
   両者はアレニウス式に従い直線関係にあるため、活性化エネルギーを一定と見なせる。
   10~50℃の温度依存性は触媒反応であり、相対的にその他の現象である物質移動や
   それに含まれるパラメータの影響が小さいことを示している。
- ・収納缶内環境として想定される範囲で最も低い10℃を保守的条件とし、触媒配置検討は環境 温度10℃を想定することとした。



## 【補足-6】触媒試験結果の整理結果(3/7)

③空塔速度LVの影響(1/2)

- ・総括反応速度係数KへのLVの影響は小さい。
- このため、相対的に物質移動の影響が小さく、化学反応の影響が大きい。(反応律速)
- ・収納缶内ではLV0m/sの物質移動係数を考慮してKを算定できる。

(LV 0.03~0.14m/sのK=1.96 sec<sup>-1</sup> に対して、LV0m/sではK=1.91 sec<sup>-1</sup>)





## 【補足-6】触媒試験結果の整理結果(4/7)

③空塔速度LVの影響(2/2)

・物質移動係数k<sub>g</sub>は総括反応速度係数Kよりも1~2桁大きく、物質移動律速ではない。
 水素は触媒表面へ速やかに移動するものの、触媒表面での反応が遅いため、見掛け上は
 触媒反応速度(k<sub>R</sub>)で全体速度(K)が決まる。このため本試験条件でのLV依存性は小さい。





### 【補足-6】触媒試験結果の整理結果(5/7)

④酸素濃度/水素濃度比の影響

・酸素/水素比が0.25~1.5の範囲では、反応速度係数Kは増加。

- ・酸素過剰な場合には速度係数が低下。文献注によると、触媒吸着サイトに酸素と水素が競争
   吸着となるため、酸素過剰の場合には水素の吸着が妨げられることが明らかになった。
- ・今回の検討では、収納缶内を窒素で置換した後に、水の放射線分解による水素発生とし、 酸素/水素=0.5としている。

(酸素/水素比が変化する環境が想定される場合には、課題として検討が必要である)



#### 図 水素濃度/酸素濃度比の影響

■ RID 注1: 村田ら,「BWR用酸水素再結合触媒装置の開発」, 1968, 日立評論, 第50巻第12号, P1072

### 【補足-6】触媒試験結果の整理結果(6/7)

⑤被毒物質(ヨウ素)の影響

- ・現時点では、取り出し収納対象となる燃料デブリ中に含まれるハロゲン元素等触媒被毒成分量や同成分に関する化学形態などの知見がないため、ヨウ素(I<sub>2</sub>)注1にて試験した。
- ・ヨウ素による触媒の被毒により、反応速度係数は低下した。 ヨウ素供給量 0.05mg-I2/mL-触媒では、反応速度係数は1/3程度であった。 ヨウ素供給量が小さい場合には、反応速度は0にならず、水素再結合性能が維持される。



#### 図 水素濃度/酸素濃度比の影響



### **No.126**

## 【補足-6】触媒試験結果の整理結果(7/7)

⑥収納缶体系での性能確認(バッチ試験)

- ・触媒性能データの採取は空塔内に触媒を充填しガスを流通させる体系で行っている一方、実機の収納缶体系では静止したガス内に触媒が設置される形態となる。
- ・そこで、流通式反応速度評価試験の装置で移送期間の7日間分を超える水素量処理に供した 触媒を100%RH環境の反応器内に設置、10000ppm分の水素を注入/放置し濃度を確認した。
- ・その結果、強制通気しない体系でも水素再結合反応(10ppm以下)が維持されており、静止した ガス内でも触媒反応が確保できることを確認した。



図 バッチ式 再結合試験 試験結果

#### <試験条件>

触媒 TKK-H1P Φ3mm (再結合水飽和後の触媒を使用) ガス H2-10000ppm, O2-5000ppm, 水蒸気飽和 反応器 バッチ式。器内底部に水充填,器内中央部に触媒保持 温度 10°C冷却, 反応時間(1日目14時間,2日目15時間) 試験は2回実施(1日目実施後,水張り空間で保持,7日目に再試験)



バッチ式触媒反応器 概念図

义

## 【補足-7】燃料デブリ乾燥装置の安全機能分担と要求機能

本技術開発で考慮している安全機能に対する乾燥装置の要件を収納缶と同等とし次のとおり設定。

亡人世	. <u></u>		安全機	能分担
女王侬	\$ <b>H</b> 6		収納缶	他機器
未臨界		未臨界の維持	0	0
冷やす	除熱	収納缶、燃料デブリ他の物性への 影響防止	-	0
問いちんて	閉じ込め	作業員や公衆の被ばく防止	0	0
ヨロである	遮蔽	作業員や公衆の被ばく防止	_	0
	構造	安全機能を維持するための構造 強度	0	0
その他	材料健全性	構造強度他の維持	0	0
(止める、冷やす、 閉じ込める機能の 維持)	水素	水の放射線分解で生ずる水素の 爆発防止	〇 (触媒)	0
	火災防止	残留ジルコニウムによる火災防止	_	0

表 安全機能に対する乾燥装置への要求機能

E	要求機能				
乾燥機	備考				
0					
〇 (追加)	乾燥処理で加熱 (異常加熱防止)				
0	汚染拡大防止				
-	セル内設置				
0					
0					
〇 (乾燥)					
-					



## 【補足-8】一般産業で用いられている乾燥技術の整理

一般産業で用いられる乾燥手法を整理し、燃料デブリの乾燥に適用する乾燥手法を選定した。

<b>苏</b> 揭毛注	安全要求に対する対応の難易度				供来
11111111111111111111111111111111111111	未臨界維持	閉じ込め性	汚染拡大防止	異常加熱防止	1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1
温風(キャリアガス)	0	0	0	0	
熱伝導媒体	0	0	Δ	0	伝熱面に直接触れて入熱するので、 保守対象が直接汚染物になる。
輻射	0	0	0	0	
マイクロ波	0	△(セル大型化)	×(導波管密閉)	0	導波管は乾燥中に密閉できないため、 マイクロ波発生装置も汚染対象になる。
誘導加熱(IH)	0	0	0	0	
過熱蒸気		(水分を持ち込むこと			
減圧	0	0	0	0	
撹拌	×(UC取り出し)	0	×(汚染領域拡大)	0	UCから取り出して、攪拌/浮遊流動させ
浮遊流動	×(UC取り出し)	△(セル大型化)	×(汚染領域拡大)	0	ることで、粉末が舞い上がる。

表 一般産業の乾燥装置の調査・分析

凡例; ○···低難度 △···中難度 ×···高難度

絞り込みの考え方

- 前提としてユニット缶(UC)単位で取り扱う。
- UC取り扱いによって安全性を確保(未臨界維持)する。
- ・ 撹拌・浮遊流動はUCから取り出す必要があり、さらなる汚染対策及び、未臨界評価が必要。
- マイクロ波は導波管と乾燥機内部が同一雰囲気となるため、保守性を考慮するとさらなる汚染対策が必要。

【乾燥手法】 温風、熱伝導媒体、輻射、誘導加熱(IH)、減圧



# 【補足-9】TMI-2燃料デブリの乾燥実績と本技術開発への適用性<sup>No.129</sup>

本技術開発にあたり、TMI-2燃料デブリの乾燥実績を評価し、本技術開発への適用性を検討した。

項目	調查·検討対象	TMI-2燃料デブリでの実績	本開発への適用性
	目的/目標	目的:未臨界維持 目標:粒子間の水除去とし、許 容水分量を8ℓ/缶(収納缶内 容積あたり42cm <sup>3</sup> /ℓ)と設定	本開発目的は水素ガス発生抑制で、乾燥目標はTMI-2の1/20以下(2cm <sup>3</sup> /ℓ以下)と厳しい。
設計	事前検討に おける供試材	砂、軽石(多孔質体)	TMI-2より乾燥が難しい多孔質体を使用する方針
	乾燥方法	加熱真空 (シール材温度制限150℃) 加熱ガス(試験のみ実施)	・粒子間自由水の乾燥はTMI-2手法の適用が期待できる。 ・最適な乾燥条件を検討する必要があり、加熱・減圧・風速などを サーベイし決定。
	未臨界	乾燥炉の評価条件は情報なし	検討要
安全 対策	冷却	設計の考え方の情報はなし	検討要
	乾燥装置(系統)	収納缶へ金属フィルタ設置	<b>収納缶に金属フィルター設置</b> が装置汚染抑制効果的との教訓は ちかな情報である

17がい1月秋しのる。

表 TMI-2燃料デブリの乾燥技術の本開発への適用性検討

【まとめ】・粒子間の自由水除去にTMI-2の実績は参考となる。

- 本開発の乾燥目標は厳しく直接適用することは難しい。
- ・装置内の系統汚染対策として収納缶へのフィルタ設置は有効な情報。

IRID

いった刈沢

# 【補足-10】燃料デブリ取り出しプロセスや併せて想定される回収物130

主な回収物として以下のものが想定されるが、細孔を有した多孔質体や含水した細かい粒子(スラリ)は乾燥挙動に影響が想定され、かつ、多孔質体が回収物として多いことが推定される多孔質体の乾燥を対象にゼオライトを供試体として検討した。

発生源	名称	概要	イメージ	特徴
Ŧν	切株燃料デブリ	燃料集合体の一部が溶融せず に残留したもの		
り出し	塊状燃料デブリ、 MCCI	ゆっくりと冷却されて塊状となっ たもの	Z	・取り出しプロセスから回収される燃料 デブリが乾燥の主たる対象物。
プロセス	小石状/粉状燃料 デブリ	溶融した炉心材料が急冷され、 小片化したもの	念:《書	・性状把握PJの検討では、酸化物燃料 デブリは <b>多孔質体と推定されている</b> 。
	核燃物質の付着 した構造材	溶融せず残存した構造物に燃料 デブリが付着したもの		
系水 系処 斑	スラリ	粉状、細かい粒子状燃料デブリ		・細かい粒子状の燃料デブリが乾燥の 対象になる可能性がある。
その他	フィルター類	水処理系統/ガス処理過程で生 ずるフィルター類		・たたし、詳細な1275日や明でめる。 (そのため、多孔質体で検討する乾燥 技術の適用可否を検討する。)

#### 表 想定される回収物

### IRID

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

# 【補足-11】燃料デブリ乾燥供試体(ゼオライト)のTG-DTA試験結果<sup>31</sup>

燥挙動データの採取(2019、2020年度の検討)

IRID

- ■多孔質体の代表として合成ゼオライトの乾燥特性 データを取得
- ■200°C、10時間時点で含水率0.22wt%
   ■要素試験で運転条件や被乾燥物性状をパラメータとして乾燥特性の基礎データを取得する予定

表 TG-DTA試験条件

機器名称	RIGAKU TG TG-DTA8122 (OT6800049)
測定項目	時間、質量、温度
温度	200℃で10時間保持 (その後300℃で1時間保持して完全乾燥)
圧力	大気圧
使用ガス	Dry-N <sub>2</sub> 100mL/min
チャンバー形状	矩形15mm×10mm
試料容器	白金ルツボ
試料名	合成ゼオライト(HiSivTM-3000 1.6)
試料量	約16mg



©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

## 【補足-12】乾燥要素試験の試験ケース一覧

〇目的

- ビーカー規模の要素試験で乾燥法、被乾燥物をパラメータとした基礎データ取得
- ・パラメータは、通気:ガス・ヒーター温度、ガス流速、減圧:ヒーター温度、圧力
- ・ 被乾燥物の違い(細孔有無、熱伝導率等)の影響把握

Run	被乾燥物	粒径 [mm]	充填率 [vol%]	充填高さ [mm]	ガス流速 [m/s]	ガス温度 [℃]	ヒーター温度 [℃]	圧力 [kPa-A]	評価項目
1	ゼオライト	1.3	60	100	3	200	200	100	入熱条件の影響
2	$\uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	100	100	100	(温風)
3	$\uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	1	200	200	100	ガス流速の影響
4	$\uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	-	_	200	1	入熱条件の影響
5	$\uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	100	$\uparrow$	(減圧)
6	$\uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	200	50	圧力の影響
7	金属球	約1	約60	100	Run1の試験条件				神ち品物の影響
8	珪砂	$\uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$				版紀焼初の影音
9	珪砂	1, 3	成行	$\uparrow$	$\uparrow$			異径粒子混合の影響	
10	ゼオライト 金属球	1.3 1	$\uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$			異種材混合の影響 (体積比 1:1混合)	
11	ZrO2	成行	$\uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$			スラリー乾燥挙動	

#### 表 試験条件一覧



## 【補足-13】実規模乾燥試験の試験ケース一覧

表 試験ケース一覧

		試験パラメータ								
試験区分	目的	UC (数)	UC距離 (mm)	方式	圧力 (kPa)	温度 (℃)	風速 <sup>注1</sup> (m/s)	Run (数)	時間 <sup>注2</sup> (hr)	備考
0.温風乾燥試験	温風乾燥標準条件で目標性 能を達成できることを確認	4	50 (すき間無)	温風	100	200	3	1	14	
1.周期乾燥試験	周期乾燥標準条件で目標性 能を達成できることを確認	4	50 (すき間無)	周期 運転 <sup>注3</sup>	1	200	3	1	14	
2.UC偏心設置試 験	UCを軸中心に定置せず、チャ ンバー壁面に偏らせて偏心の 影響の有無を試験にて確認	4	50 (すき間無)	温風 <sup>注4</sup>	100	200	3	1	14	UC収納状態、缶内 ガス流速分布の影 響確認
31充填高さ試験	No.1のゼオライト充填高さを変 更して充填高さの影響を確認	4	50 (すき間無)	周期 運転 <sup>注3</sup>	1	200	3	1	14	UC充填高さNo.1 の約85%
32充填高さ試験	No.0のゼオライト充填高さを変 更して充填高さの影響を確認	4	50 (すき間無)	温風	100	200	3	1	14	UC充填高さNo.0 の約85%
4.減圧乾燥試験	データ拡充のため、減圧運転 モードで処理。ただし、乾燥に は長時間を要すため、2日程 度の時間の範囲で実施	4	50 (すき間無)	減圧	1	200	-	1	14	

注1: アニュラス部(UC-チャンバー内壁間)

注2: 処理時間は目安

注3: 周期運転は30分毎に温風と減圧を繰り返して運転する(右図参照)

注4: 乾燥時間に影響がある場合、周期運転でも実施





## 【補足-14】燃料デブリ乾燥挙動モデルの詳細

目的:要素試験 解析に基づく乾燥挙動の分析

乾燥終了の決め手となる「減率乾燥(第2段)」の評価モデルにより乾燥試験データの考察を行う。





#### 図 乾燥特性曲線(含水率と乾燥速度の関係) 出典:桐栄ら、粉体および粉体材料層の減率乾燥第2段の機構



IRID

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

#### **No.135** 【補足-15】燃料デブリ乾燥装置概念のための除染性確認試験(1/2)

### 〇試験目的

✓遠隔視認・操作性の確認 ⇒ 実スケールでのアクセス性を確認 ✔除染後の直接保守対応 ⇒ 拭き取りによる除去程度を確認

(3)マニピュレータを使用し、カメラ映像注2にて吸引作業、引き続き取り作業を実施

### 〇試験方法

【対象部】

b.シールフランジ部

- (1)ステンレス鋼にて乾燥機チャンバーを製作
- (2)着色材(例;水性顔料)を内面にマーカー等で塗布 及び底部に堆積物(例:サンドブラスト注)を模擬



注1 サンドブラスト材



#### マニピュレータ操作施設



### (4)吸引後、拭き取り後の着色程度を光沢計器<sup>注3</sup>、マイクロスコープ<sup>注4</sup> を用いて確認

注1 排気ライン逆洗時の粉体等、仮に残留物が存在した場合を想定 注2 操作は原則、カメラワーク

### 〇確認事項

- マイクロスコープの視界に反射光等の影響がないか 
   ・堆積物が残存していないか(底部等)
- 人手で拭き取った時の光沢と差があるか

### 〇結果

・ふき取りを確認した。

RID

### No.136 【補足-15】燃料デブリ乾燥装置概念のための除染性確認試験(2/2) 結果詳細



©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

## 【補足-16】水素測定技術詳細(1/18)

a.要求技術仕様、適用性判断基準の検討(1/12)

- ✓「<u>常時監視」</u>/「<u>逐次監視</u>」の2つの観点で、水素濃度測定箇所を検討。
- ✓「逐次監視」は、想定される燃料デブリ取り出し~移送容器払出しまでの作業工程(下図【1】~ 【32】)において、設備対応が最低限で水素濃度測定が可能な作業工程を抽出。



図 燃料デブリ取り出しプロセスフローを横取り出し工法のハンドリングフローへ展開した一例



## 【補足-16】水素測定技術詳細(2/18)

a.要求技術仕様、適用性判断基準の検討(2/12)

- イ.常時監視の場合の水素測定箇所 ユニット缶(UC)、収納缶、移送容器への水素濃度計の適用(設置)可否を検討。
  - ⇒下表から、移送容器に適用(設置)可能と判断。

常時監視では、水素が爆発下限界以下であることを確認できれば良く、既存の汎用 水素濃度計が利用可能。なお、水素濃度計設置による移送容器強度への影響評価が 別途必要。

		構造	発生数	信号伝送	常時監視
	ユニット缶 (UC)	メッシュ形状	多	×	× 構造上不可能
	収納缶	ベント管付き	中	×	× 本数∙伝送 困難
●●●●●●●●●●●●●●●●●●●●●●●●●●●●●●●●●●●●●	移送容器	密封	少	0	0
図 移送容器払い出し時の					

### 表 各容器の形状および発生数

イメージ



## 【補足-16】水素測定技術詳細(3/18)

a.要求技術仕様、適用性判断基準の検討(3/12)

- ロ. 逐次監視の場合の水素測定箇所(工程)(1/2) 逐次監視での水素測定技術の抽出のための判定基準として、以下を必要条件とした。
- ✓ 逐次監視を行うある工程で得られた水素濃度およびその工程のガス流量から算出される時間当たりの水素発生量が7日間継続した際の燃料デブリ近傍の容器の水素濃度が4vol%以下となること。
- ✓ 燃料デブリのスループットに影響を与えないこと(水素濃度測定のための新たな工程や別段の分析時間を設けず測定可能な水素濃度測定技術であること)。

以上より

<u>収納缶もしくは移送容器内部のガス置換を行う作業工程</u> <u>工程内にガスリークなどの原因となる動的作業が無い工程</u>を候補に抽出。

**No.140** 

## 【補足-16】水素測定技術詳細(4/18)

a.要求技術仕様、適用性判断基準の検討(4/12) ロ.逐次監視の場合の水素測定箇所(工程)(2/2)

- ・燃料デブリ乾燥工程
- ・不活性ガス注入工程(収納缶)
- ・不活性ガス注入工程(移送容器)

・上記の組合せ
 を選定。



- ✓ 選定した各作業工程で見込まれる水素発生量 (速度)から要求測定レンジを評価。
- ✓ 汎用水素濃度計の測定下限値を判断基準に、 要求測定レンジの対応可否を検討。

表 逐次監視の場合の作業工程検討結果

No.	作業工程	取扱い物	判定	判定理由
【8】	燃料デブリの乾燥	ユニット缶 /乾燥チャンバ	0	乾燥処理に伴い、乾燥チャンバー内がガス置換されるため、 その際に水 素濃度の測定が可能と判断
【16】	燃料デブリの乾燥	収納缶	0	乾燥処理に伴い、収納缶内がガス置換されるため、その際に 水素濃度の 測定が可能と判断
【18】	不活性ガス注入	収納缶	0	不活性ガス注入に伴い、収納缶内がガス置換されるため、 その際に水素 濃度の測定が可能と判断
【24】	収納缶ベント管開放	収納缶	×	ベント管開放のみでは収納缶内が十分にガス置換されず、 水素濃度の測 定は困難と判断
【26】	不活性ガス注入	移送容器 (キャビティ内)	0	移送容器内への不活性ガス注入に伴い、移送容器内がガス 置換されるた め、その際に水素濃度の測定が可能と判断



## 【補足-16】水素測定技術詳細(5/18)

a.要求技術仕様、適用性判断基準の検討(5/12) ハ.「常時監視」/「逐次監視」の水素濃度測定箇所(工程)の候補選定結果(まとめ)



IRID

©Internati

## 【補足-16】水素測定技術詳細(6/18)

a.要求技術仕様、適用性判断基準の検討(6/12)

二. 逐次監視で選定した水素測定工程で見込まれる水素発生量(速度)(1/3) 水素発生量(速度)については、下表に示す過去の評価結果から、最大値(ケースI)と 最小値(ケースVI)を使用。

ケース	収納缶内径 (mm)	燃料デブリ中UO <sub>2</sub> 率 (wt%)	水素発生速度を定義した 水素発生モデル	エネルギー 吸収率	収納缶当たりの単位時間で の水素発生量 (m <sup>3</sup> /h/収納缶)
I	220	26	TMI評価式	全吸収	$2.15 \times 10^{-4}$
II	220	26	TMI評価式	輸送計算	$3.83 \times 10^{-5}$
111	220	26	TMI評価式	試験結果	$1.50 \times 10^{-6}$
IV	220	26	放射線分解モデル	全吸収	$1.09 \times 10^{-4}$
V	220	26	放射線分解モデル	輸送計算	1.30×10 <sup>-5</sup>
VI	220	26	放射線分解モデル	試験結果	7.36×10 <sup>-7</sup>

表 時間あたりの水素発生量の評価結果

収納缶PJ 平成30年度検討結果から引用。



## 【補足-16】水素測定技術詳細(7/18)

a.要求技術仕様、適用性判断基準の検討(7/12)

二. 逐次監視で選定した水素測定工程で見込まれる水素発生量(速度)(2/3)

選定した水素濃度測定を行う各作業工程の容器体積(次頁参照)から、作業対象容器(乾燥チャン

バー、収納缶、移送容器)内部が7日間、爆発下限界濃度4vol%未満となる許容水素発生速度を評価。

作業工程No.	作業対象	工程内作業	<b>収納缶本数</b> (本)	気相部体積 (m <sup>3</sup> )	<mark>許容水素発生速度<sup>注4</sup></mark> (m <sup>3</sup> /h)
【8】	乾燥チャンバー (ユニット缶)	乾燥工程 (減圧・温風)	5	0.356 <sup>注1</sup>	$8.4 \times 10^{-5}$
【16】	収納缶	乾燥工程 (減圧・温風)	1	0.02 <sup>注2</sup>	$4.7  imes 10^{-6}$
【18】	収納缶	不活性ガス注入工程	1	0.02 <sup>注2</sup>	$4.7  imes 10^{-6}$
【26】	移送容器 キャビティー	不活性ガス注入工程	12	1.78 <sup>注3</sup>	$4.2 \times 10^{-4}$

#### 表 許容水素発生速度評価結果

注1:収納缶PJ 平成30年度検討結果を引用し、乾燥チャンバー寸法を仮定して設定

注2:収納缶PJ 平成30年度検討結果を引用

注3:収納缶PJ 平成30年度検討結果を引用し、移送容器寸法を仮定して設定

注4:許容水素発生速度 va=作業対象容器の体積 Va×爆発下限界濃度4vol%/保管時間168h


### 【補足-16】水素測定技術詳細(8/18)

a.要求技術仕様、適用性判断基準の検討(8/12) 二. 逐次監視で選定した水素測定工程で見込まれる水素発生量(速度)(3/3) 乾燥チャンバー、収納缶および移送容器キャビティ—の想定体積を以下に示す。



図 ユニット缶乾燥チャンバー、ユニット缶および移送容器の概要

- ユニット缶乾燥チャンバーの気相体積は、収納缶PJ 平成30年度検討結果を引用して試算。試算にあたり、記載の無いユニット缶収納コンパートメントの高さはUC2個分とし、ユニット缶収納コンパートメントの外径と乾燥チャンバーの内径は等しく、乾燥チャンバーの高さはコンパートメント高さの10%として試算。
- 収納缶PJ 平成30年度検討結果を引用し、移送容器の気相部体積は1.80m<sup>3</sup>、一次蓋と二次蓋の間の体積は輸送貯蔵兼用キャスク容積での体積比 率を参考に設定。



### 【補足-16】水素測定技術詳細(9/18)

a.要求技術仕様、適用性判断基準の検討(9/12)

ホ. 逐次監視における要求測定レンジと汎用水素濃度計の適用判定(1/4)

水素発生速度ケースI、VIおよび許容水素発生速度で水素が常時発生すると仮定した場合の、 対象(乾燥チャンバー、収納缶、移送容器)内の7日後の水素濃度を試算(次頁参照)。 許容水素発生速度の水素濃度から、以下の判断基準に基づき、既存の水素濃度計の適用可否を 判定した。

【判定基準】

許容水素発生速度での水素濃度 100ppm以上: ○(汎用水素濃度計利用可能) 許容水素発生速度での水素濃度 1~100ppm : △(高感度水素濃度計必要) 許容水素発生速度での水素濃度 1ppm未満 : ×(既存の水素濃度計では対応困難)

【判定結果】

- ・乾燥工程
- ✓ 温風乾燥:水素濃度は1ppm未満となり、既存のものでは対応困難。
- ✓加圧減圧:水素濃度は1~100ppmとなり、高感度水素濃度計が必要。

・不活性ガス注入工程

✓ <u>収納缶、移送容器ともに、許容水素発生速度での水素濃度が100ppm以上であり、</u> <u>汎用品が利用可能。</u>



# 【補足-16】水素測定技術詳細(10/18)

a.要求技術仕様、適用性判断基準の検討(10/12) ホ.逐次監視における要求測定レンジと汎用水素濃度計の適用判定(2/4)

工程	作業対象	ガス置換速度 (m <sup>3</sup> /h)	単位時間当たりの水素発生量 (m <sup>3</sup> /h)						判定
		@0°C 100kPa	ケースI	ケースVI	許容水素 発生速度	ケースI	ケースVI	許容水素 発生速度	
燃料デブリの乾燥 (加熱減圧)	乾燥チャンバー	2.95E+00 <sup>注1</sup>	1.07E-03	3.68E-06	8.48E-05	3.6E+02	1.2E+00	2.9E+01	$\bigtriangleup$
燃料デブリの乾燥 (加熱減圧)	収納缶	5.90E-01 <sup>注2</sup>	2.15E-04	7.36E-07	4.76E-06	3.6E+02	1.2E+00	8.1E+00	$\bigtriangleup$
燃料デブリの乾燥 (温風乾燥)	乾燥チャンバー	1.22E+03 <sup>注3</sup>	1.07E-03	3.68E-06	8.48E-05	8.8E-01	3.0E-03	7.0E-02	×
燃料デブリの乾燥 (温風乾燥)	収納缶	2.43E+02 <sup>注2,3</sup>	2.15E-04	7.36E-07	4.76E-06	8.8E-01	3.0E-03	2.0E-02	×
不活性ガス注入	収納缶	1.98E-02 <sup>注4</sup>	2.15E-04	7.36E-07	4.76E-06	1.1E+04	3.7E+01	2.4E+02	0
不活性ガス注入 (キャビティー内)	移送容器	1.76E+00 <sup>注4</sup>	2.58E-03	8.84E-06	4.24E-04	1.5E+03	5.0E+00	2.4E+02	0

#### 表 水素濃度評価結果

注1:収納缶PJ 平成30年度検討結果を引用し、0°C 100kPalこおけるガス置換速度を試算

注2:注1の乾燥チャンバーのガス置換速度がユニット缶収納コンパートメント本数に比例し、1本分が収納缶のガス置換速度に相当するものと仮定 注3:収納缶PJ 平成30年度検討結果を引用し、温風乾燥でも加熱減圧と同仕様の真空ポンプが使用されるものと仮定して、0℃100kPaにおける

ガス置換速度を試算

注4:不活性ガス注入前に容器内を1時間かけて1回真空引きする際の流量

注5:水素濃度(ppm)=単位時間当たりの水素発生量(m<sup>3</sup>/h)/ガス置換速度(m<sup>3</sup>/h)×10<sup>6</sup>



### 【補足-16】水素測定技術詳細(11/18)

a.要求技術仕様、適用性判断基準の検討(11/12)

ホ.逐次監視における要求測定レンジと汎用水素濃度計の適用判定(3/4)

要求濃度レンジの観点から、汎用水素濃度計の適用が可能と想定される下記作業工程を 第一候補として選定。不活性ガス注入により、測定雰囲気には酸素がほぼ存在しないため、 酸素を必要としない熱線型半導体式等を調査の主対象とする。

作業工程	想定される雰囲気条件		適用性判断基準
	測定対象注1	置換時吐出ガス/ポンプ排気ガス	流れ場での測定が可能
【18】不活性ガス注入 (収納缶)	雰囲気	室温 <sup>注2</sup> 、大気圧程度	動作温度10~40℃ 大気圧での動作
	ガス成分	窒素/水蒸気/水素	当該雰囲気で240ppmを 検知
	測定対象注1	置換時吐出ガス/ポンプ排気ガス	流れ場での測定が可能
【26】不活性ガス注入 (移送容器キャビティ内)	雰囲気	室温 <sup>注2</sup> 、大気圧程度	動作温度10~40℃ 大気圧での動作
	ガス成分	窒素/水蒸気/水素	当該雰囲気で240ppmを 検知

表 不活性ガス注入工程の評価結果

注1:不活性ガス注入方法が不明である為、想定される方式を併記 注2:10~40℃程度



# 【補足-16】水素測定技術詳細(12/18)

a.要求技術仕様、適用性判断基準の検討(12/12)

ホ. 逐次監視における要求測定レンジと汎用水素濃度計の適用判定(4/4) 要求濃度レンジの観点から、高感度水素濃度計の適用が可能と想定される下記作業工程を 第二候補として選定。 <u>乾燥工程で想定される雰囲気条件に基づき、適用可能な高感度水素濃度計</u> <u>の有無を調査する。</u>

作業工程	想	定される雰囲気条件	適用性判断基準
	測定対象	ポンプ排気ガス	流れ場での測定が可能
【8】燃料デブリの乾燥 (加熱減圧 乾燥チャンバー)	雰囲気	室温注1 大気圧以下	動作温度10~40℃ 大気圧以下での動作
	ガス成分	水蒸気/窒素/水素	当該雰囲気で28ppmを検知 露点近傍での測定が可能
	測定対象	ポンプ排気ガス	流れ場での測定が可能
【16】燃料デブリの乾燥 (加熱減圧 収納缶)	雰囲気	室温注1 大気圧以下	動作温度10~40℃ 大気圧以下での動作
	ガス成分	水蒸気/窒素/水素	当該雰囲気で8.1ppmを検知 露点近傍での測定が可能

#### 表 燃料デブリ乾燥工程の評価結果

注1:10~40℃を想定



### 【補足-16】水素測定技術詳細(13/18)

b.水素濃度測定技術の調査(1/4)

a項の整理結果を踏まえて、既存技術を中心に、広範に水素濃度測定技術を調査した。 また、選定した水素濃度測定箇所(工程)を想定雰囲気、想定水素濃度範囲の観点から下記A, B, C に分類し、各条件に適用可能な水素濃度測定技術を選定した。

分類	監視 方法	選定した水素濃度測定 箇所(工程)	想定雰囲気	想定水素 濃度範囲	測定方法
А	常時 監視	移送容器	室温大気圧 窒素/水蒸気/水 素	0~4vol%	移送容器に センサ設置
В	逐次 監視	乾燥工程 C-1 乾燥チャンバー C-2 収納缶	室温大気圧以下 窒素/水蒸気/水 素	0~100ppm	測定対象からポンプに よるガスサンプリング 又は 配管にセンサ設置
С	逐次 監視	不活性ガス注入工程 B-1 収納缶 B-2 移送容器キャビ ティ	室温大気圧程度 窒素/水蒸気/水 素	100ppm 以上	測定対象からポンプに よるガスサンプリング 又は 配管にセンサ設置

表 水素濃度測定箇所(工程)の分類と想定環境

A:移送容器での常時監視、B:乾燥処理時の逐次監視、C:不活性ガス注入時の逐次監視

g

# 【補足-16】水素測定技術詳細(14/18) b.水素濃度測定技術の調査(2/4)

センサ原理 1.		1. 熱伝導式	2. 接触燃焼式	3. 熱線型半導体式	4. ニューセラミック式	5. 半導体式
原理		水素の熱伝導率が空気等より大きいこ とを利用 温度低下によるPt抵抗値の減少をブ リッジ回路で測定	H2は貴金属触媒での燃焼開始温度が低 いことを利用 接触燃焼によるPtの温度上昇から生じ る抵抗値増大をブリッジ回路で測定	H2は貴金属触媒での燃焼開始温度が低いこ とを利用。金属酸化物半導体(ln2O3等)に吸 着した酸素イオンとH2との化学反応で生成 された電子による半導体の抵抗値減少をプ リッジ回路で測定	H2は貴金属触媒での燃焼開始温度が低いこ とを利用。超微粒化金属酸化物(ニューセラ ミック)を担持した貴金属線コイルが水素燃 焼による温度常用により電気抵抗が変化、プ リッジ回路で測定	金属酸化物半導体表面に吸着した酸素 が水素と接触した時に抵抗値が低下す る。この抵抗変化からガス濃度を求め る。ニューセラミック式より高感度。
測定範囲と精度		0~100vol % ±2%FS程度	0~100%LEL ±5%FS程度	0~2000ppm	ppm~100%LEL	0~200ppm
	А	0	0	△(要劣化確認,高濃度水素NG)	0	△(要劣化確認,高濃度水素NG)
評価	В	×	0	0	0	0
	С	△(事前のガス分離)	0	0	0	0
干渉ガス		He(0.78vol %),Ne,CH4, CO2(-0.05vol %),Ar,SO2, Cl2(-0.12vol %)など ※括弧内は+1vol %の変動による指示 値変化(概算値)	可燃性ガス (CH3OH[メタノール],CO,C2H5OH[エ タノール],i-C4H10[イソペンタン※プ ロパンガスの構成成分],C2H2[アセチレ ン])	可燃性ガス ただし、分子ふるいの役割を果たす SiO2のコーティングにより影響排除が 可能	可燃性ガス	可燃性ガス
	А	0	0	0	0	0
評価	В	0	0	0	0	0
	С	0	0	0	0	0
応答性		連続(数十秒と推定)	連続(90%応答時間5~10秒)	連続(90%応答時間約20秒)	連続(数十秒と推定)	連続(数十秒と推定)
設置方法	A	移送容器取付け	移送容器取付け	移送容器取付け	移送容器取付け	移送容器取付け
成區方法	В	排ガスライン取付け	排ガスライン取付け	排ガスライン取付け	排ガスライン取付け	排ガスライン取付け
	С	非ガスライン取付け	排ガスライン取付け	排ガスライン取付け	排ガスライン取付け	排ガスライン取付け
総合評価 A	常時監視には適用可能	ガス中に酸素が必要	ガス中に酸素が必要	ガス中に酸素が必要	使用環境での耐久性確認 要	
	0	×	×	×	×	
	В	×	×	×	×	×
С		△(事前のガス分離)	×	×	×	×



IRID

### 【補足-16】水素測定技術詳細(15/18) b水素濃度測定技術の調査(3/4)

IRID

	_ //		/	•			
センサ原理		6 业波工业一	7 非八斯刑主从纳十	8. 差分吸収分光法	9. ガスクロマトグラ	10.プロトン伝導体	
ビング原理		0. 儿放干沙式	7. 并力取至办外脉式	(DOAS)	フィー式	(プロトン伝導性固体電解質)	
原理		H2の屈折率がAir等より小さいこと を利用 LED光を2本に分岐し、試料ガス/ 標準ガスをそれぞれ透過した後合成 し、干渉縞の位置をCCDで測定	測定セルに対象のガスを流し、赤外 線を照射し、吸収による赤外線の変 化量から濃度を求める。	ガスの種類ごとに決まった波長 の光が吸収されることを利用し てガス濃度を測定。光源と検出 器の間に存在するガス濃度を測 定する	ガスクロによるH2と他の可燃性ガス との分離を利用 ガスクロでH2を分離した後、金属酸 化物半導体で検出	無機プロトン伝導体を用いた測定方法。 ネルンストの式より電位差を基準ガスと測 定ガスの水素分圧比へ換算。	
測定範囲と精度		0~100vol % ±1%FS~±4%FS程度	数百ppm~数十vol %	1000ppm~数vol %	0~100vol % ±10%FS程度	0~100vol % 1%±0.1% 10%±1%、100%± 3%	
	А	0	0	0	0	0	
評価	В	×	△(事前のガス分離)	△(要 光路長の調整)	△ (要 増感器)	△(要 確認)	
	С	$\bigtriangleup$	0	0	0	0	
干渉ガス		O2(0.16vol%), CO2(-0.96vol%), CI2等 ※括弧内は+1vol%の変動による指 示値の変化(概算値)	赤外線の吸収の大きなガス (H <sub>2</sub> O、CO <sub>2</sub> など)	ダスト、ヒューム、ミストなど 光の散乱、吸収を起こすもの	なし	酸素ガス(燃焼)	
	А	0	0	0	0	0	
評価	В	0	△(事前のガス分離)	△(事前のガス分離)	0	0	
	С	0	△(事前のガス分離)	△(事前のガス分離)	0	0	
応答性		離散(連続もあり)	連続(要 フィルタ再生)	連続	離散(1data/10分)	連続 応答時間1s以下	
設置方注	A	容器近傍設置し、ガス採取	容器近傍設置し、ガス採取分析	移送容器取付け(光源と検出 器)	容器近傍設置し、ガス採取分析	移送容器取付け	
<b>以</b> 固刀/五	В	排気ライン近傍に設置し、ガス採取	排気ライン近傍に設置し、ガス採取	排気ライン取付け	排気ライン近傍に設置し、ガス採取	排気ライン取付け	
	С	排気ライン近傍に設置し、ガス採取	排気ライン近傍に設置し、ガス採取	排気ライン取付け	排気ライン近傍に設置し、ガス採取	排気ライン取付け	
		CCDの分解能に依存し低濃度 難	干渉ガスのフィルタ再生 要	光路長の調整とダスト等のフィ ルタ	連続監視のための多重化	測定部が高温。 要ヒートショック対策	
総合評価	А	×	×	$\bigtriangleup$	△ (要 吸引ポンプ)	△(要 破損対策)	
	В	×	×	$\bigtriangleup$	△ (要 増感器)	△ (要 測定濃度)	
	С	$\bigtriangleup$	$\bigtriangleup$	$\bigtriangleup$	0	0	
	-	-					

### B:乾燥工程(減圧加熱)での逐次監視 C:不活性ガス注入工程での逐次監視

# 【補足-16】水素測定技術詳細(16/18)

b.水素濃度測定技術の調査(4/4)

水素濃度測定技術の調査の結果、A, B, Cの各条件で、適用可能な水素濃度測定技術を 評価し、候補として以下を選定した。

### <u>A 常時監視: 熱伝導式</u>

### B 乾燥処理時の逐次監視: ガスクロマトグラフィー式、又は、プロトン伝導体

<u>C 不活性ガス注入時の逐次監視:ガスクロマトグラフィー式、又は、プロトン伝導体</u>



# 【補足-16】水素測定技術詳細(17/18)

水素濃度測定技術の原理(熱伝導式)



#### 図 熱伝導式分析装置の原理図

ガス種によって熱伝達率が異なることを利用。

基準ガス雰囲気および測定対象ガス雰囲気にて一定電流で加熱した

白金線の温度の違いを電気抵抗の差として測定

出典:

1) 富士電機株式会社 HP「H2, Ar, Heガス濃度測定に最適な熱伝導ガス分析計 形式: ZAF」

https://www.fujielectric.co.jp/products/instruments/products/anlz\_gas/ZAF.html

2) 理研計器株式会社資料「理研センサ技術概論」

https://www.rikenkeiki.co.jp/cms/riken/pdf/support/PC9-0314-180610S.pdf

# 【補足-16】水素測定技術詳細(18/18) 水素濃度測定技術の原理の説明(プロトン伝導体)



#### 図 プロトン伝導型水素センサの原理図

水素イオン(プロトン)を選択的に透過する固体をプロトン導電型固体電解質と呼び、プロトン伝導型固体電解質の両端の水素ガス濃度が異なる場合、その分圧に応じて起電力が発生 発生する起電力は図中の式にて濃度へ換算可能

出典:東京窯業株式会社 HP「気相用水素センサー NOTORP-G」 http://www.tyk.co.jp/02ProductInfo/product02-04/details01.html

