

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)」
令和元年度実施分報告

令和2年8月

技術研究組合 国際廃炉研究開発機構(IRID)

目次

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
7. 全体まとめ
 - 【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】水素濃度測定技術の調査結果(詳細)
 - 【補足-6】水素濃度測定技術の原理の説明(熱伝導式)
 - 【補足-7】水素濃度測定技術の原理の説明(プロトン伝導体)

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有効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DESTAL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。

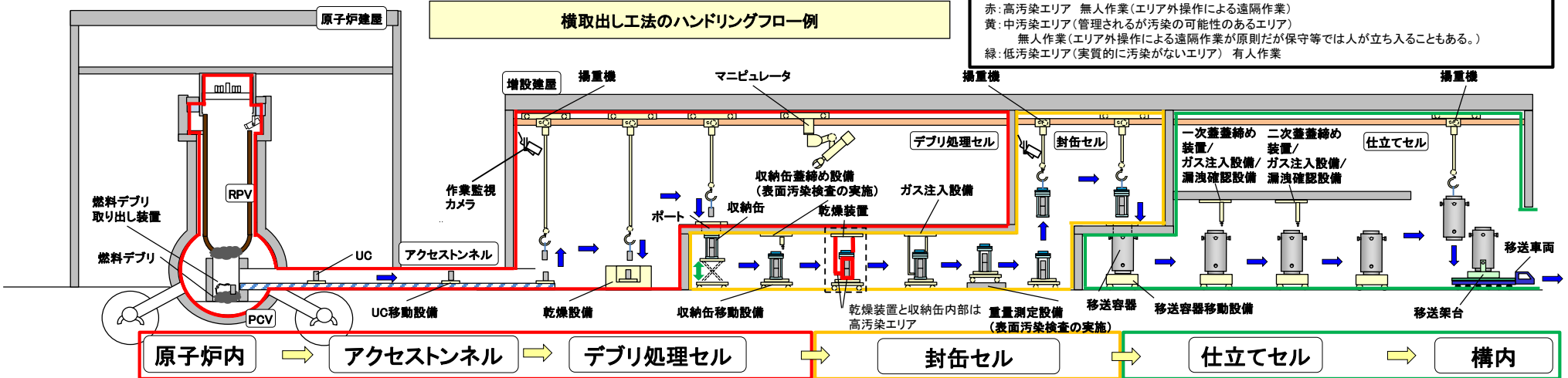
1.2 目的

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。

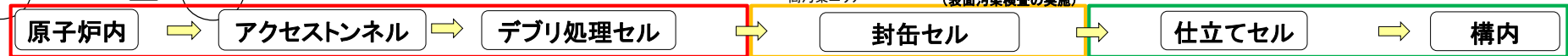
1. 研究の背景・目的

1.3 これまでの検討と残された課題(1/4)

燃料デブリの収納・移送・保管プロセスと課題を以下に示す。



<エリア区分>
 赤: 高汚染エリア 無人作業(エリア外操作による遠隔作業)
 黄: 中汚染エリア(管理されるが汚染の可能性のあるエリア)
 無人作業(エリア外操作による遠隔作業が原則だが保守等では人が立ち入ることある。)
 緑: 低汚染エリア(実質的に汚染がないエリア) 有人作業



エリア		封缶セル	仕立てセル(除乾燥装置)	構内
安全設計	収納缶	未臨界	収納缶の幾何形状で未臨界維持できる	収納缶の幾何形状と移送容器内の配列で未臨界維持できる
	除熱	通常のセル内換気で収納缶を自然冷却できる	移送容器ごと通常の建屋換気で自然冷却できる	移送容器ごと外気で自然冷却できる
	閉じ込め	収納缶のシール材/フィルタの検討/封缶セルで閉じ込める(ガスは管理放出)	収納缶のシール材/フィルタの検討/仕立てセルで閉じ込める(ガスは管理放出)	収納缶のシール材/フィルタの検討/移送容器で閉じ込める(ガスは管理放出)
	遮蔽	封缶セルでの遮蔽	仕立てセルでの遮蔽	移送容器での遮蔽
	構造	最大9mの落下/移送容器内での収納缶落下による損傷に対して安全機能を維持するための検討		移送中の事故に対応できる(落下に包絡できるよう設計)
	材料	経年劣化に対して安全機能が維持できる(金属材料を前提に腐食を検討。中性子束密度は小さく照射は影響しない)		
	水素	収納缶のフィルタ付ベント孔からセルへ放出するためのベント口径の検討/セルは換気により水素濃度を爆発下限以下に抑制できる ・密封移送時の水素対策のために燃料デブリの早期乾燥による燃料デブリの含水率の低減検討(デブリ処理セルでの乾燥タイミングが第一優先順位) ・移送時水素濃度4vol.%以下の担保のために移送容器内での水素濃度測定検討		・最大7日間の収納缶または移送容器の密封をするための検討 ・移送時の水素発生予測法の検討(評価式による) ・再結合触媒の検討
	火災防止	封缶セル/仕立てセル/移送容器内を不活性雰囲気維持できる		
	取り扱い性	遠隔搬送・蓋閉めができる	遠隔搬送ができる	移送容器に収納できる
	収納作業性の向上	収納缶内径を拡大し収納作業効率化する	なし	なし

黒字: 従来実績等から技術開発不要としたもの
 青字: 検討が終了したもの
 赤字: 課題が残るもの
 ⇒本PJで検討中

注記: “原子炉内～デブリ処理セル”での安全設計及び取り扱い性は取り出し規模の更なる拡大PJで検討

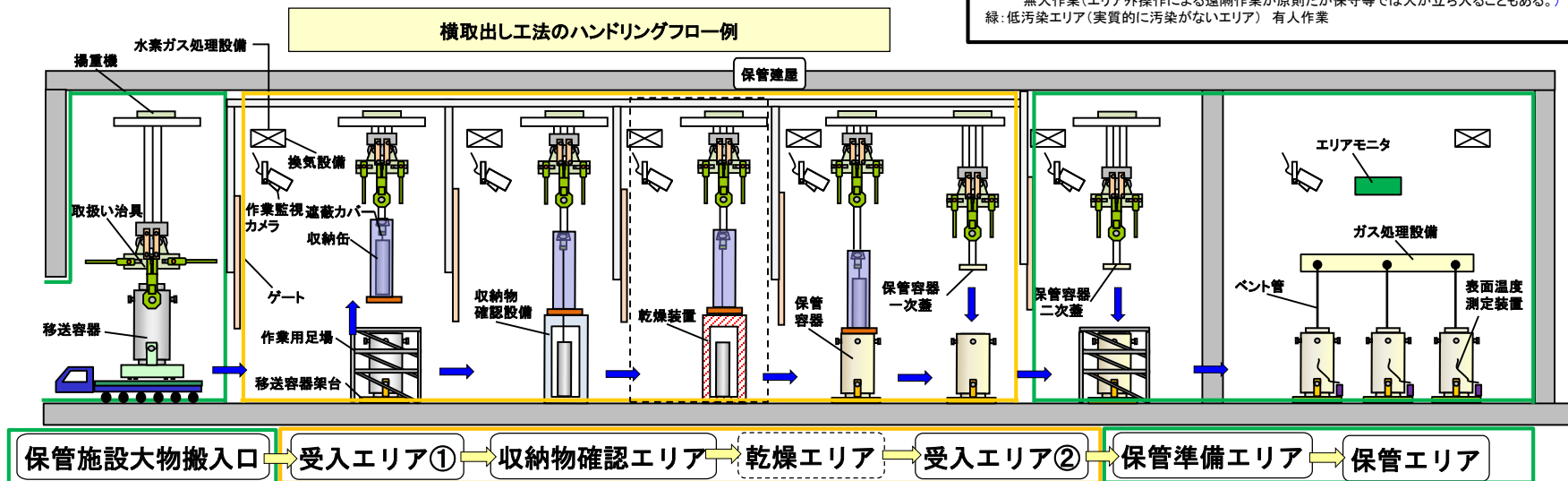
注記: RPV(原子炉圧力容器の略)
 PCV(原子炉一次格納容器の略)
 UC(ユニット缶の略)

1. 研究の背景・目的

1.3 これまでの検討と残された課題(2/4)

燃料デブリの収納・移送・保管プロセスと課題を以下に示す。

<エリア区分>
 黄: 中汚染エリア(管理されるが汚染の可能性のあるエリア)
 無人作業(エリア外操作による遠隔作業が原則だが保守等では人が立ち入ることもある。)
 緑: 低汚染エリア(実質的に汚染がないエリア) 有人作業



収納缶	エリア	受入れエリア①~同②(除乾燥エリア)	保管準備エリア	保管エリア	
安全設計	未臨界	収納缶の幾何形状で未臨界維持できる	収納缶の幾何形状と保管容器内の配列で未臨界維持できる		
	除熱	通常のセル内換気で自然冷却できる	保管容器ごと通常の建屋換気で自然冷却できる		
	閉じ込め	収納缶のシール材/フィルタの検討/建屋で閉じ込める (ガスは管理放出)	保管容器/建屋で閉じ込める (ガスは管理放出)		
	遮蔽	セルでの遮蔽	保管容器/建屋での遮蔽		
	構造	最大9mの落下/保管容器内での収納缶落下による損傷に対して安全機能を維持するための検討		保管中の事故に対応できる (落下に包絡できるよう設計)	
	材料	腐食を含めた経年劣化に対して安全機能が維持できる			
	水素	収納缶のフィルタ付ベント孔からセルへ放出するためのベント口径の検討/ 建屋内を掃気できる	保管容器内をベント/掃気できる		
	火災防止	建屋/移送容器内を不活性雰囲気維持できる			
	取り扱い性	遠隔搬送ができる		保管容器に収納できる	
収納作業性の向上	なし				

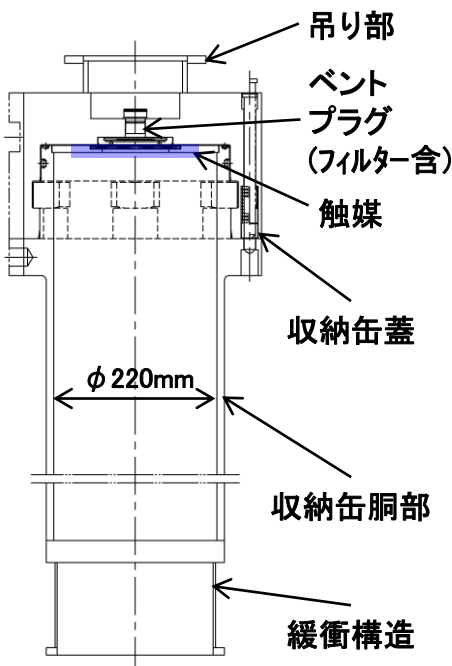
黒字: 従来実績等から
 技術開発不要としたもの
 青字: 検討が終了したもの
 赤字: 課題が残るもの
 ⇒本PJで検討中

注記: 乾燥エリアはデブリ
 処理セル内に乾燥
 装置が設置できな
 い場合に設置する

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。



(収納缶材料: SUS316L)

図 収納缶の構造案
(2018年度仮設定構造案)

安全設計		収納缶仕様	
		2018年度までの検討	検討課題(2019、2020年度実施)
未臨界		・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。	—
冷やす	除熱	・課題なし。	—
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、水素滞留防止口(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)
	遮蔽	・課題なし。	—
その他	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。	—
その他 (止める、冷やす、閉じ込める機能の維持)	水素	<ul style="list-style-type: none"> ・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。 ・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。 ・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。 	<ul style="list-style-type: none"> ・1F燃料デブリ条件に適した水素発生予測法の検討。 ・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。 (「移送技術の開発」として検討) ・ベント口径の検討 (「収納技術の開発」として検討) ・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。 ・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。 (「乾燥技術/システムの開発」として検討)
	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。

取扱性／合理化	収納缶仕様	
	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	・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装置の構造案を検討。	—
・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	<ul style="list-style-type: none">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の安全に関わる技術要件等の追加分析・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。 (TRL評価の対象外)
2. 収納技術の開発	
① 収納缶仕様及び構造の検討	<ul style="list-style-type: none">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、構造健全性が確認されていること。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。 (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	<ul style="list-style-type: none">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	<ul style="list-style-type: none">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。収納缶内の流動を評価し、触媒による水素対策等の妥当性が評価されていること。 (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	<ul style="list-style-type: none">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	<ul style="list-style-type: none">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	<ul style="list-style-type: none">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む計画である。

(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

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おこない、必要に応じて試験によるデータを取得して水素発生量予測を行う。

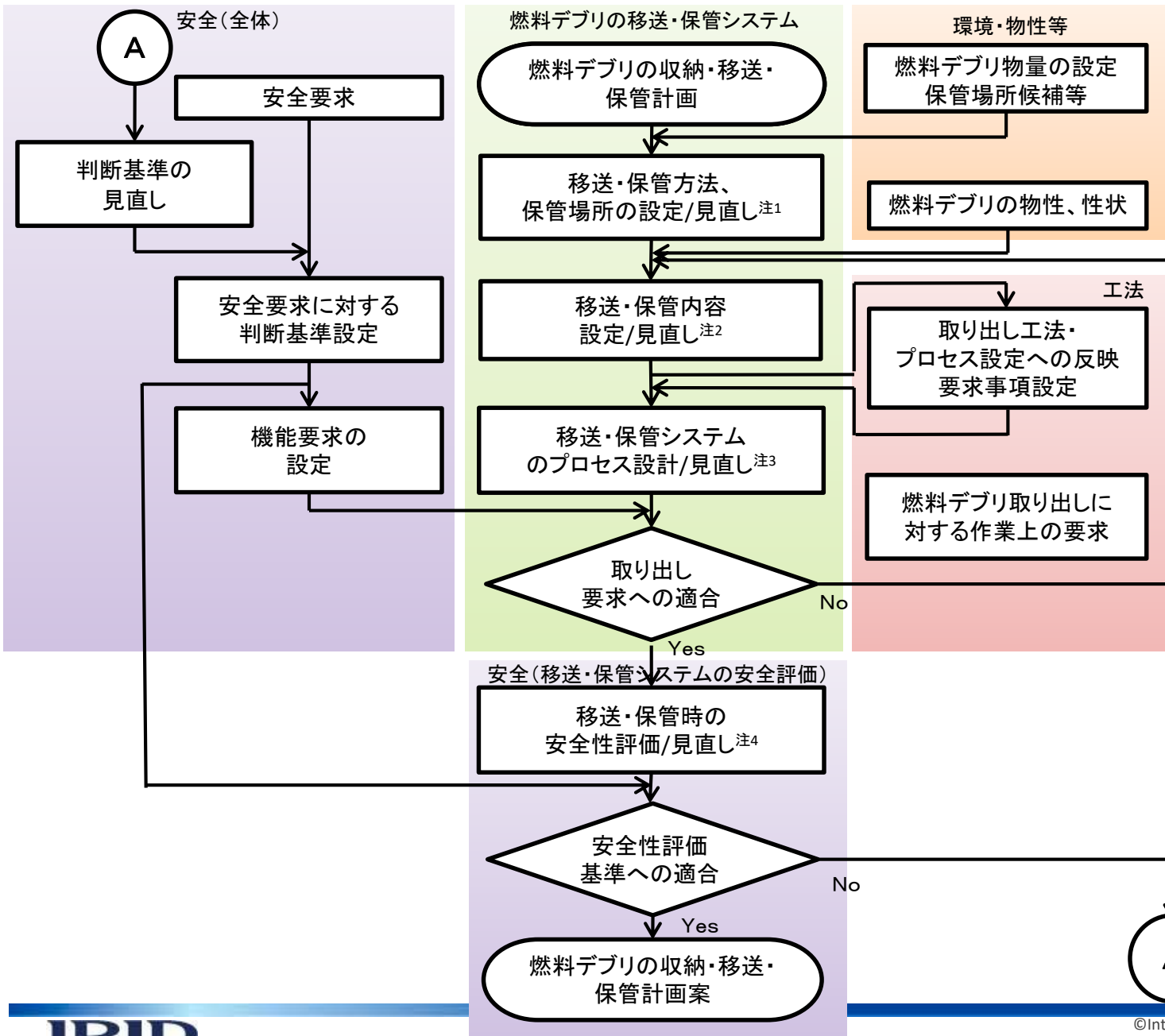
触媒による水素対策として、候補とした触媒について収納缶内の環境を考慮して性能データを取得するとともに収納缶内の水素拡散を考慮して有効性を確認する。

(4) 乾燥技術／システムの開発

燃料デブリの乾燥について、乾燥システム自体の安全事項を整理し、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おこない、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。

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

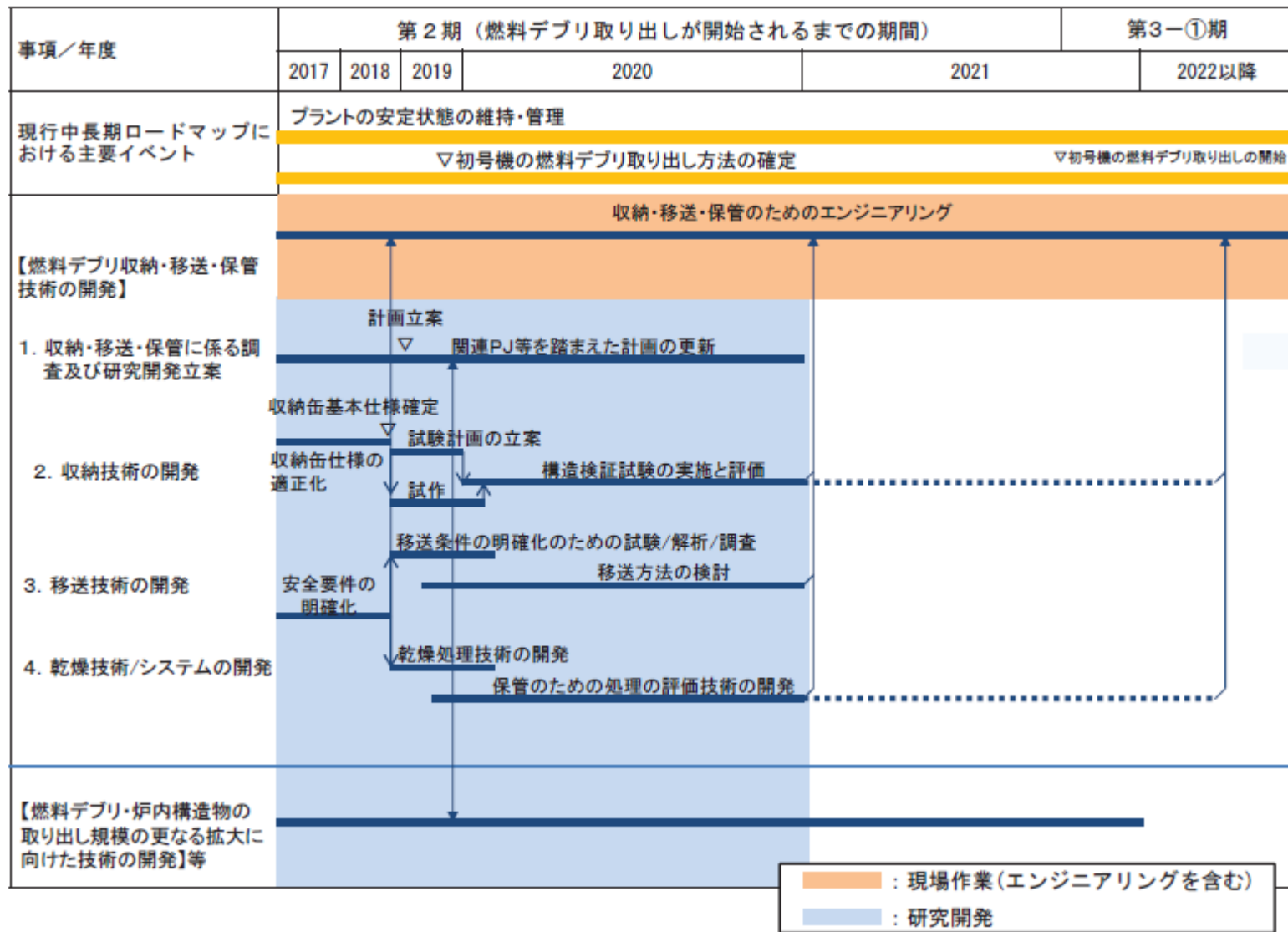


- ・注1: 湿式保管、新規施設での乾式保管等の基本的な保管方針の設定
- ・注2: 乾式ベント保管、乾式密封保管等の具体的な保管手法
関連する技術開発:
 水素発生量評価、水素対策
- ・注3: 乾燥等の移送や保管を行うための必要なプロセス
関連する技術開発:
 乾燥装置、水素測定技術
- ・注4: 安全評価
関連する技術開発:
 構造評価、水素発生量評価
- ・注5: 「移送・保管内容設定/見直し」の場合は上方向へ
 「全体に関わる安全の判断基準の見直し」の場合は下方向へ
 双方の場合は上下方向へ
- ・注6: 全体に関わる安全について、判断基準を仮設定して検討している場合、研究開発による知見の充実や検討の進捗を反映して、必要に応じ全体に関わる安全について、判断基準を見直すことがある

3. 実施項目とその関連、他研究との関連

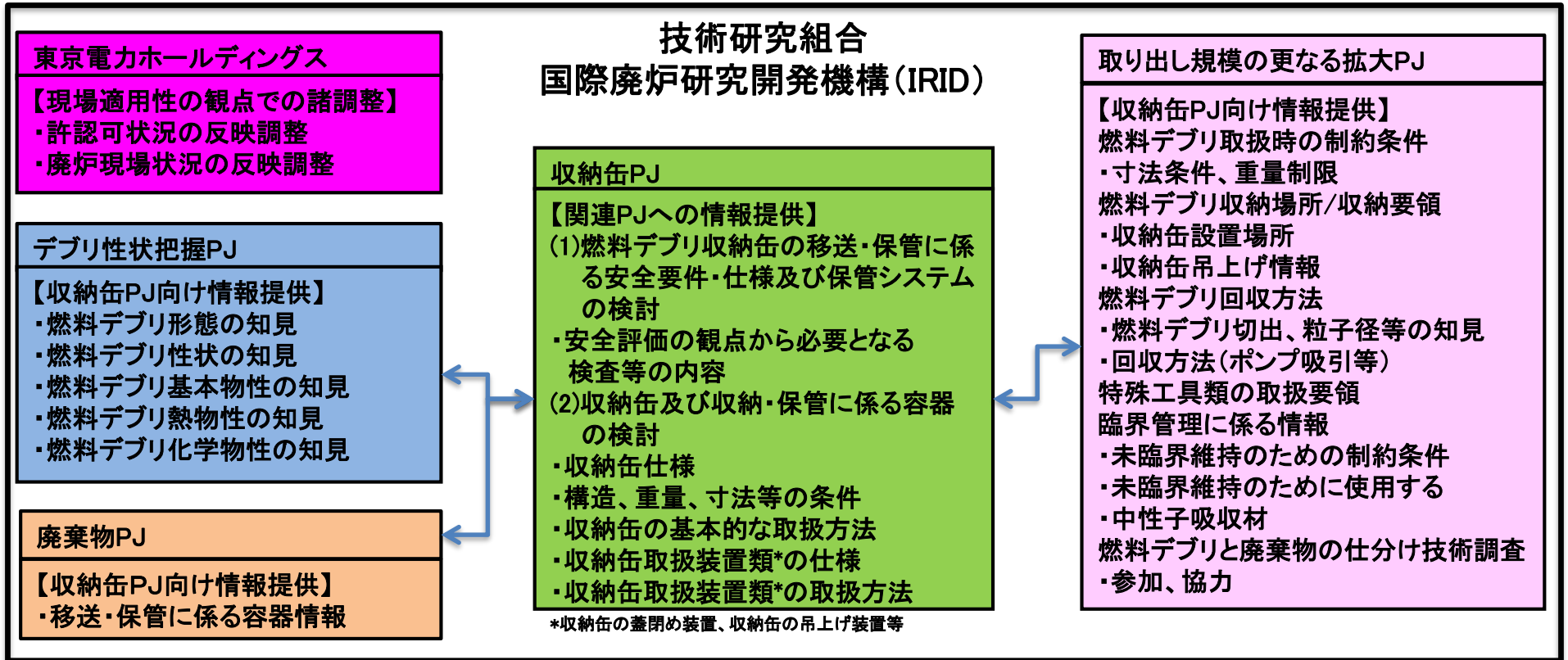
3.2 実施項目の関連性(1/2)

(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

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 :「固体廃棄物の処理・処分に関する研究開発」PJ

収納缶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。

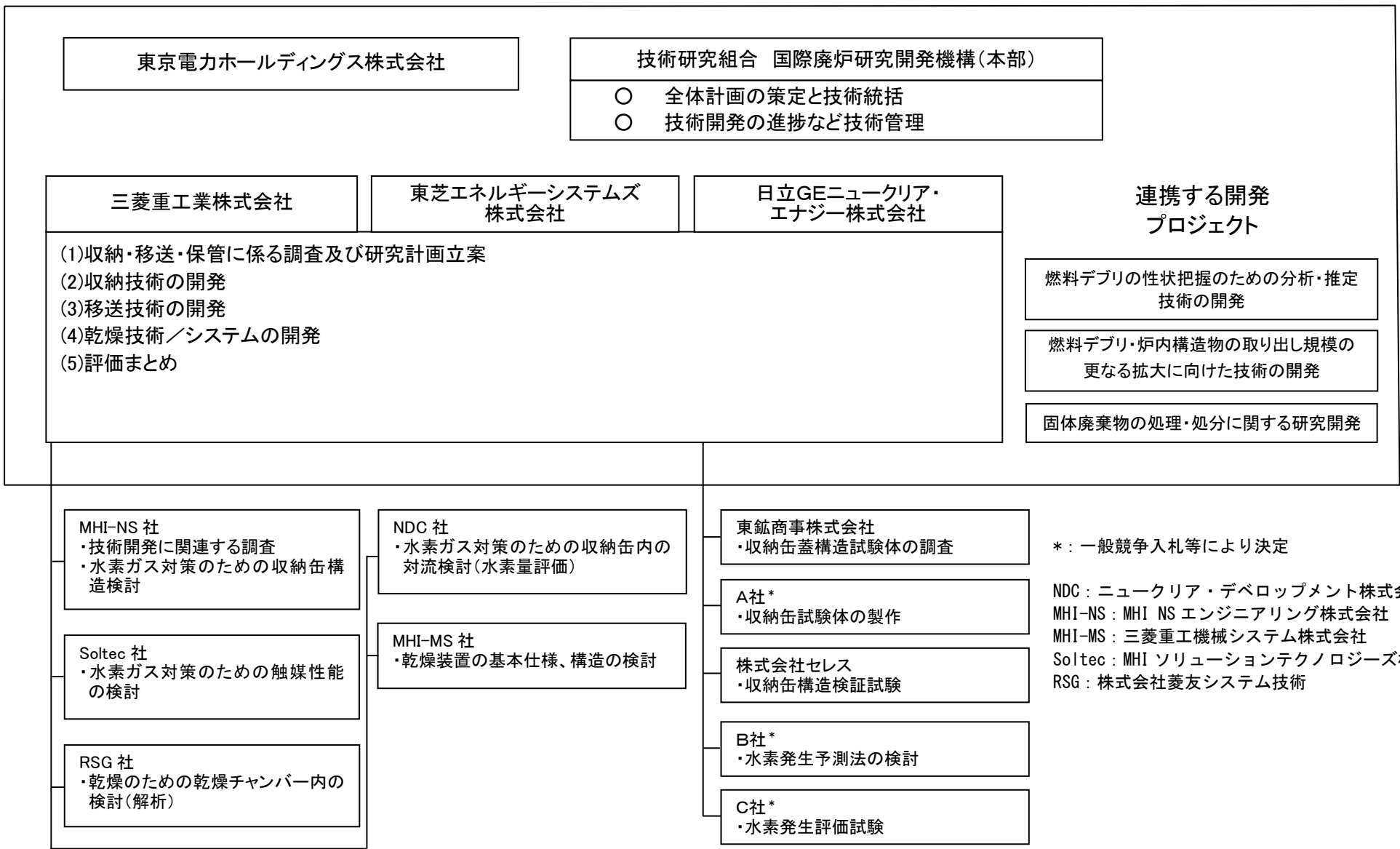
※事業開始時の事業名称は「燃料デブリ・炉内構造物の取り出しに向けた技術の開発」であるが、廃炉・汚染水対策チーム会合／事務局会議(第75回)において公開された2020年度廃炉研究開発計画に合わせ、「燃料デブリ・炉内構造物の取り出し規模の更なる拡大に向けた技術の開発」と変更した。

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

項目	2019年度		2020年度		備考
	上期	下期	上期	下期	
4.1 収納・移送・保管に係る調査及び研究計画立案	計画	調査	計画	調査	
4.2 収納技術の開発	構造検証試験の計画立案	収納缶(試験体)の設計	収納缶(試験体)の試作	構造検証試験の実施 構造検証試験の評価 収納缶仕様および構造の検討	材料調達を含む 確認試験の事前解析含む 必要に応じて
4.3 移送技術の開発 (1)水素発生予測法の検討	移送条件案設定に必要な実施内容の検討	水素発生試験の実施	水素発生予測法の検討	収納缶水素発生量の推定 移送条件の検討	
4.3 移送技術の開発 (2)水素対策の検討	触媒の検討	収納缶内の流動特性の詳細検討	触媒の配置検討		低濃度の水素を測定するための手法検討のため延長 触媒の検討結果(触媒性能)を反映する
4.4 乾燥技術/システムの開発 (1)乾燥装置の基本仕様の検討	基本条件の検討	乾燥挙動データの採取(試験装置の準備含む)	乾燥システムの基本計画(保守計画/装置系統/機器構成の検討)	乾燥システムの基本計画(装置の基本仕様の検討)	
4.4 乾燥技術/システムの開発 (2)水素濃度測定技術の検討	要求技術仕様、適用性判断基準の検討	水素濃度測定技術の調査	進捗・成果のフィードバック		必要に応じて実施
4.5 評価まとめ					

5. 実施体制図 (2020年3月末時点)



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. 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

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。

②実施事項、成果(予実)

a.研究計画への最新動向の反映(2019年度、2020年度)

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、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/情報入手し、研究計画に反映した。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。

b.海外情報の調査(2019年度、2020年度)

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)

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

③成果の反映先への寄与

実施結果は本補助事業の検討項目に反映する。

④現場への適用性の観点に対する分析

現場の最新の動向を本補助事業の検討項目に反映するものであり有益である。

⑤課題

現計画を遂行する上での課題はない。

⑥目標に照らした達成度




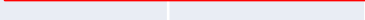

他の事業や実プロジェクトの最新の検討状況・知見の収集、既入手情報に基づき海外の安全に関わる技術要件等の追加分析・整理を行った。今後、有識者意見も交えて個々の研究計画に反映することで所定の成果を得る見込み。

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

⑦今後の予定

表 収納・移送・保管に係る調査及び研究計画立案の検討スケジュール

項目	2019年度		2020年度		備考
	上期	下期	上期	下期	
6.1 収納・移送・保管に係る調査及び研究計画立案					
a 研究計画への最新動向の反映	計画 		計画 		計画は、状況に応じて適宜見直す。
b. 海外情報の調査	調査  		調査 		一般の乾燥装置の調査/評価等を実施。

 : 計画  : 実績

6. 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-

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おこなう。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おこなう。

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

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. 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)

a. 構造検証試験の計画立案(2019年度)(2/10)

イ. 試験を実施する事象の選定(2/4)

収納缶の最新の取扱いフローにもとづき、各作業から設計事象を抽出した。

表 設計事象の抽出結果(代表例)

No.	設計事象	事象イメージ図	事象発生の可能性 ^{注1}	基本的安全機能および構造強度への影響 ^{注2}	構造検証試験を実施する事象	
					採否	選定の考え方
1	移送容器または保管容器内他への収納缶の異常着床	<p>吊り装置 収納缶 バスケット 移送容器または保管容器</p>	○	△	×	衝突時の巻下げ速度(0.025m/s程度を想定)に比べて、評価事象「No.5 収納缶の落下」の衝突速度が速いため、そちらの評価で包絡できると想定し、試験を実施する事象とはしない。
2	収納缶上部への収納缶の異常着床	<p>吊り装置 収納缶 バスケット 移送容器または保管容器</p>	○	△	×	衝突時の巻下げ速度(0.025m/s程度を想定)に比べて、評価事象「No.6 収納缶上部への収納缶の落下」の衝突速度が速いため、そちらの評価で包絡できると想定し、試験を実施する事象とはしない。
3	移送架台への移送容器または保管容器の異常着床	<p>移送容器または保管容器 吊り装置 バスケット 収納缶 移送架台 移送車両</p>	○	△	×	衝突時の巻下げ速度(0.025m/s程度を想定)に比べて、評価事象「No.5 収納缶の落下」の衝突速度が速いため、そちらの評価で包絡できると想定し、試験を実施する事象とはしない。

注1: 事象発生の可能性

×: 設備対応または運用対応により、事象発生が回避できる ○: 事象発生が回避できない

注2: 基本的安全機能および構造強度への影響

×: 影響がない事象 △: 影響はあるが、臨界あるいは放射性物質の放出には至らないと想定される事象 ○: 影響があり、臨界あるいは放射性物質の放出が想定される事象

6. 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)

a. 構造検証試験の計画立案(2019年度)(3/10)

イ. 試験を実施する事象の選定(3/4)

収納缶の最新の取扱いフローにもとづき、各作業から評価事象を抽出した。

表 評価事象の抽出結果(代表例)

No.	評価事象	事象イメージ図	事象発生の可能性 ^{注1}	基本的安全機能および構造強度への影響 ^{注2}	構造検証試験を実施する事象	
					採否	選定の考え方
4	収納缶の転倒 収納缶移動設備の固定機構破損などにより、移動中の収納缶が転倒する事象		×	○	×	予備解析の結果、評価事象「No.5 収納缶の落下」で傾斜落下させた場合、側面方向からの衝突速度が、転倒よりも速い結果(転倒:約7m/s、傾斜落下:18m/s)が得られたため、そちらの評価で包絡できることから、試験を実施する事象とはしない。
5	収納缶の落下 吊り装置の破損などにより、吊上げ中の収納缶が落下する事象		×	○	○	①収納缶の鉛直落下:他の事象に比べ、収納缶の底部側から受ける衝撃荷重が最も大きいと想定し、試験を実施する事象とする。 ②収納缶の傾斜落下:他の事象に比べ、収納缶の側面側から受ける衝撃荷重が最も大きいと想定し、試験を実施する事象とする。
6	収納缶上部への収納缶の落下 吊り装置の破損などにより、移送容器または保管容器内に装荷中の収納缶が、既に装荷済みの収納缶上部に落下する事象		×	○	○	他の事象に比べ、収納缶の上部側から受ける衝撃荷重が最も大きいと想定し、試験を実施する事象とする。

注1: 事象発生の可能性

×: 設備対応または運用対応により、事象発生が回避できる ○: 事象発生が回避できない

注2: 基本的安全機能および構造強度への影響

×: 影響がない事象 △: 影響はあるが、臨界あるいは放射性物質の放出には至らないと想定される事象 ○: 影響があり、臨界あるいは放射性物質の放出が想定される事象

6. 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)

a.構造検証試験の計画立案(2019年度)(5/10)

ロ.試験ケース

各事象について、試験条件と実機大収納缶(試験体)構造の組合せでの試験を計画した。

表 試験ケース(案)

No.	事象	試験条件			実機大収納缶(試験体)構造				試験の主な目的	実機大収納缶(試験体)構造の組合せ選定の考え方
		落下高さ	傾斜角度	試験回数	蓋構造	胴部内径	送気機構	員数		
1	収納缶の鉛直落下	9m	0°	1回	簡易取付構造	400mm	無	1体	・鉛直落下による収納缶の胴部への影響確認(胴部内径の変形量確認)、緩衝構造の有効性確認(収納物の蓋内面への衝突の抑制効果確認含む)を主な目的として実施する	・蓋構造は、各蓋構造への影響を確認(解析の妥当性確認含む)するため、簡易取付構造とボルト構造の2種類とする ・胴部内径は、鉛直落下による収納缶の胴部への影響確認(胴部内径の変形量確認)、緩衝構造の有効性確認(収納物の蓋内面への衝突の抑制効果確認含む)のため、重量/緩衝構造が異なる条件として、220mmと400mm ^{注1} の2種類とする ・送気機構は、無が主案(メインプロセスは、ユニット缶状態での乾燥であり送気機構は無)であるため、送気機構は無とする(送気機構有は解析による評価を実施する)
2					ボルト構造	220mm				
3	収納缶の傾斜落下	9m	60°(暫定)	1回	簡易取付構造	400mm	有	1体	・傾斜落下(傾斜落下後の床面への収納缶の衝突含む)による収納缶の蓋部、底板および送気機構への影響確認(蓋部のシール性確認、送気機構の健全性確認)を主な目的として実施する	・蓋構造は、各蓋構造への影響を確認(解析の妥当性確認含む)するため、簡易取付構造とボルト構造の2種類とする ・胴部内径は、傾斜落下(傾斜落下後の床面への収納缶の衝突含む)による収納缶の蓋部、底板および送気機構への影響確認(蓋部のシール性確認、底板および送気機構の健全性確認)のため、重量/底板構造/送気機構構造が異なる条件として220mmと400mm ^{注2} の2種類とする ・送気機構は、無が主案(メインプロセスは、ユニット缶状態での乾燥であり送気機構は無)であるが、床面への衝突などの影響確認のため、送気機構は有とする
4					ボルト構造	220mm				
5	収納缶上部への収納缶の鉛直落下	7m	0°	1回	簡易取付構造	220mm	無	2体	・収納缶上部への収納缶の鉛直落下による収納缶の胴部への影響確認(胴部内径の変形量確認)、緩衝構造の有効性確認(吊り部の変形、緩衝構造が吊り部へ入り込む事象の対策の有効性確認含む)を目的として実施する	・蓋構造は、各蓋構造への影響を確認(解析の妥当性確認含む)するため、簡易取付構造とボルト構造の2種類とする ・胴部内径は、胴部への影響確認(胴部内径の変形量確認)、緩衝構造の有効性確認(吊り部の変形、緩衝構造が吊り部へ入り込む事象の対策の有効性確認含む)のため、重量/緩衝構造が異なる条件として、220mmと400mm ^{注3} の2種類とする ・送気機構は、無が主案(メインプロセスは、ユニット缶状態での乾燥であり送気機構は無)であるため、送気機構は無とする(送気機構有は解析による評価を実施する)
6					ボルト構造	400mm				

注1:2018年度の収納缶蓋構造の成立性確認試験でφ400mmの簡易取付構造で蓋開け不可が確認されたことから、簡易取付構造を400mmとする(ボルト構造は220mmとする)

注2:胴部内径400mmは、重量が大きく、衝撃荷重が大きい条件とするため、蓋は簡易取付構造とする(胴部内径220mmはボルト構造とする)

注3:鉛直方向の衝撃荷重を受ける試験として、収納缶の鉛直落下の試験と逆の組合せとし、簡易取付構造を220mm、ボルト構造を400mmとする

6. 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)

a.構造検証試験の計画立案(2019年度)(6/10)

ハ.試験体系

構造検証試験は、実機で発生する事象を再現するために以下イメージの試験設備を準備して実施する計画とした。

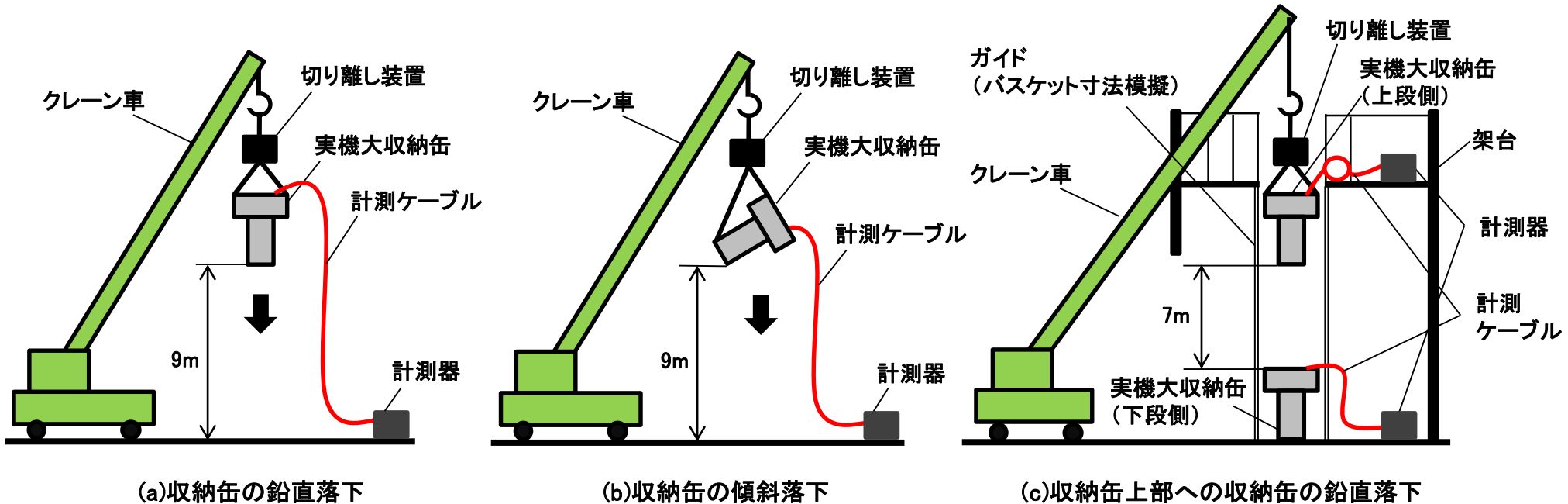


図 実機大収納缶の構造検証試験のイメージ図

6. 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)

a. 構造検証試験の計画立案(2019年度)(7/10)

二. 安全機能要求に関わる試験時の確認項目(1/3)

収納缶の安全機能要求を踏まえ、構造検証試験で確認する項目を設定した。

表 安全要求と試験時の確認項目(案)(1/3)

安全機能	安全機能要求	収納缶要求事項	試験時の確認項目			確認項目の選定の考え方
			内容	時期	評価目安値	
閉じ込め	放射性物質の閉じ込め	ベント機構を経由する場合を除き、収納缶内部からの放射性物質の漏えいを防止すること。	漏えい試験	試験前	・漏えい率:実測値で影響評価(目標: 3×10^{-2} (ref cm ³ /s)以下 ^{注1})	・通常状態(試験前状態)における閉じ込め性を漏えい試験により確認する
		ベ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。	外観確認	試験後	・フィルタ、カプラ:損傷程度を確認して影響評価	
		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。	漏えい試験	試験後	・漏えい率:実測値で影響評価(目標: 3×10^{-2} (ref cm ³ /s)以下 ^{注1})	・評価事象(収納缶の鉛直落下など)は、発生が想定されない事象であるが、安全上の観点から、発生した場合の放射性物質の閉じ込めへの影響を評価しておくため、評価事象の衝撃荷重を受けた後の漏えい率、リングシール部の試験前後の寸法差/塑性変形有無/相対変位を確認する ・評価事象(収納缶の鉛直落下など)は、発生が想定されない事象であるが、安全上の観点から、大量の放射性物質の漏えいに至る、蓋の外れ、重大な損傷(内外を貫通する割れなど)は許容しないものとする
			外観確認	試験後	・蓋:蓋の外れがないこと ・蓋、本体部(胴部、底板)、送気機構(配管):大量の漏えいに至る重大な損傷(内外を貫通する割れなど)がないこと ・その他(つめ、ボルト、廻り止めピン、リング、カプラ、送気機構(カバー)):損傷程度を確認して影響評価	
			寸法確認(リングシール部の試験前後の寸法差確認)	試験前 試験後	・試験前後の寸法差:実測値で影響評価(目標: $\pm 0.5\text{mm}$ ^{注2})	
			ひずみ時刻歴計測(リングシール面近傍の塑性変形有無確認)	試験中	・ひずみ:実測値で影響評価(目標: 9×10^{-4} 以下 ^{注3})	
瞬間的な口開き(リングシール部の試験前後の相対変位測定)	試験中	・蓋と本体の相対変位測定(または圧力変化測定):実測値で影響評価				

6. 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)

a.構造検証試験の計画立案(2019年度)(8/10)

ニ.安全機能要求に関わる試験時の確認項目(2/3)

収納缶の安全機能要求を踏まえ、構造検証試験で確認する項目を設定した。

表 安全要求と試験時の確認項目(案)(2/3)

安全機能	安全機能要求	収納缶要求事項	試験時の確認項目			確認項目の選定の考え方
			内容	時期	評価目安値	
臨界防止	追加核分裂反応の防止	臨界を防止可能な形状とすること。	外観確認	試験後	<ul style="list-style-type: none"> ・蓋:蓋の外れがないこと ・蓋、本体部(胴部、底板)、送気機構(配管):大量の漏えいに至る重大な損傷(内外を貫通する割れなど)がないこと ・その他(つめ、ボルト、廻り止めピン、Oリング、カプラ、送気機構(カバー)):損傷程度を確認して影響評価 	<ul style="list-style-type: none"> ・評価事象(収納缶の鉛直落下など)は、発生が想定されない事象であるが、安全上の観点から、未臨界維持が不可となる大きな変形や、大量の放射性物質の漏えいに至る、蓋の外れ、重大な損傷(内外を貫通する割れなど)は許容しないものとする
			寸法確認(胴部内径の寸法確認)	試験後	<ul style="list-style-type: none"> ・胴部内径(220mm)の寸法:245mm以下^{注1}(目標:232.5mm以下^{注2}) ・胴部内径(400mm)の寸法:実測値で影響評価 	
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。	外観確認	試験後	<ul style="list-style-type: none"> ・蓋、本体部(胴部、底板):損傷程度を確認して影響評価 	<ul style="list-style-type: none"> ・評価事象(収納缶の鉛直落下など)は、発生が想定されない事象であるが、安全上の観点から、発生した場合の自然放熱への影響を評価しておくため、評価事象の衝撃荷重を受けた後の蓋部、本体部の損傷程度を確認する
		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。	試験項目なし	—	—	

注1:2016年度の臨界評価において、材質SUSを考慮した場合、 $K_{eff}=0.925$ と等価になる内径は245mmと評価されており、その値で設定

注2:2016年度の臨界評価において、材質SUSを考慮しない場合、 $K_{eff}=0.925$ の内径は220mmであり、内径を10mm拡大させると K_{eff} が0.02増加することが確認されている。そこで、臨界安全設計評価基準の上限値である $K_{eff}=0.95$ となる内径は232.5mmと算出できる。保守的に材質SUSを考慮しない場合の232.5mmを設計上の目標値と設定。

6. 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)

a.構造検証試験の計画立案(2019年度)(9/10)

二.安全機能要求に関わる試験時の確認項目(3/3)

収納缶の安全機能要求を踏まえ、構造検証試験で確認する項目を設定した。

表 安全要求と試験時の確認項目(案)(3/3)

安全機能	安全機能要求	収納缶要求事項	試験時の確認項目			確認項目の選定の考え方
			内容	時期	評価目安値	
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)	試験項目なし	—	—	・収納缶への遮蔽機能の要求はないため、試験での確認項目はなし
水素爆発防止	水の放射線分解により発生す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)	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。	試験項目なし	—	—	・収納缶内部で発生する水素は、ベント機構から水素を放出できる設計とするため、試験での確認項目はなし ・触媒による水素濃度の低減は、別途実施する“水素対策の検討”で評価するため、試験での確認項目なし
		想定すべき事象が生じた場合でも水素濃度が規定値を超えることがない設計とすること。	外観確認	試験後	・フィルタ、カプラ: 損傷程度を確認して影響評価	・評価事象(収納缶の鉛直落下など)は、発生が想定されない事象であるが、安全上の観点から、発生した場合の水素放出への影響を評価しておくため、評価事象の衝撃荷重を受けた後のフィルタ、カプラの損傷程度を確認する
粉じん火災防止	デブリ取り出し切断時に発生する金属粉じんと酸素の反応による火災への対処(ハザードへの対応)	内部を不活性ガス雰囲気として発火を防止すること。	漏えい試験	試験前	・漏えい率: 実測値で影響評価(目標: 3×10^{-2} (ref cm ³ /s) 以下 ^{注1})	・収納缶内を不活性ガス雰囲気に置換することを想定し、通常状態(試験前状態)における閉じ込め性を漏えい試験により確認する
—	《取扱い機能要求》	遠隔操作による蓋締めおよび蓋開放が可能であること。	蓋締め/蓋開放の確認(蓋締め、蓋開放時の蓋回転およびボルト締め/回転トルク確認含む)	試験前 試験後	・蓋締め/蓋開放(試験前): 可能であること ・蓋開放(試験後): 可否を確認して影響評価	・通常状態(試験前状態)で、蓋締めおよび蓋開放が可能であることを手動工具を用いて確認する ・評価事象(収納缶の鉛直落下など)は、発生が想定されない事象であるが、事象発生後の処置方法を検討するための情報として、評価事象の衝撃荷重を受けた後の蓋開放の可否を手動工具を用いて確認する

注1: NFT-22B型使用済燃料輸送容器の最大許容空気漏洩率を参考に設定

6. 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)

a.構造検証試験の計画立案(2019年度)(10/10)

ホ.解析手法の適用性確認に関する試験時の確認項目

試験結果との比較による解析手法の適用性確認に必要なデータを取得するため、構造検証試験で確認する項目を設定した。

表 解析手法の適用性確認に関する試験時の確認項目(案)

解析手法の適用性確認に関するデータ項目	試験時の確認項目			確認項目の選定の考え方
	内容	時期	取得データ	
外観	外観確認	試験前 試験後	・蓋(つめ含む)、本体部(フランジ、胴部、底板、つめ含む)、ボルト、緩衝構造、送気機構(配管)の主要外観(事前解析で変形が確認された部位を重点的に観察)	・解析の確からしさを確認するため、試験時の変化状態を観察し、解析から得られた変形状態と試験結果の比較評価を実施する
寸法	寸法確認	試験前 試験後	・蓋(つめ含む)、本体部(フランジ、胴部、底板、つめ含む)、ボルト、緩衝構造、送気機構(配管)の主要寸法(事前解析で変形が確認された部位を重点的に計測)	・解析の確からしさを確認するため、試験時の変化量(寸法)を実測し、解析から得られた変形量と試験結果の比較評価を実施する
ひずみ	ひずみ 時刻歴計測	試験中	・蓋(つめ含む)、本体部(フランジ、胴部、底板、つめ含む)、ボルト、緩衝構造、送気機構(配管)の主要箇所のひずみ(事前解析で大きな(特徴的な)ひずみが確認された部位を重点的に計測)	・解析の確からしさを確認するため、試験時のひずみを実測し、解析から得られたひずみと試験結果の比較評価を実施する
加速度	加速度 時刻歴計測	試験中	・蓋、本体部、緩衝構造の加速度	・解析の確からしさを確認するため、試験時の加速度を実測し、解析から得られた加速度と試験結果の比較評価を実施する
速度	速度計測	試験中	・衝突直前の収納缶の速度	・解析の確からしさを確認するため、試験時の速度を実測し、解析の入力条件とした速度と試験結果の比較評価を実施する
蓋と本体の 相対変位	変位 時刻歴計測	試験中	・衝突時の蓋と本体の相対変位	・解析の確からしさを確認するため、試験時の蓋と本体の相対変位を実測し、解析から得られた相対変位と試験結果の比較評価を実施する
動画(ハイスピードカメラ動画)	ハイスピード カメラ動画撮影	試験中	・衝突時(衝突部近傍)のハイスピードカメラ動画	・解析の確からしさを確認するため、試験時の変形挙動を撮影し、解析から得られた変形挙動と試験結果の比較評価を実施する

6. 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-

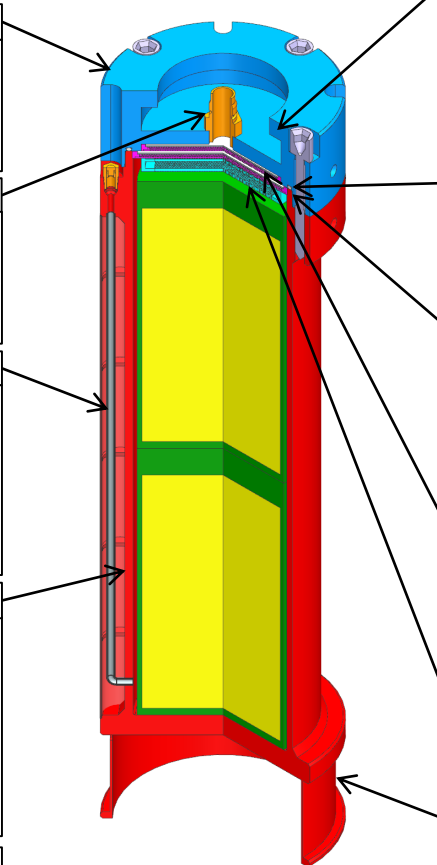
③実施事項、成果(予実)

b. 収納缶(試験体)の設計(2019年度)(1/7)

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。

<p>蓋</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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。
<p>ベント機構</p> <p>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カプラを採用した。</p>
<p>送気機構</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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)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カ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。
<p>胴部</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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(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。 ・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。
<p>材質</p> <p>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。</p>



<p>吊り部</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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、緩衝構造の吊り部への入り込みが発生しない構造とした。
<p>シール</p> <p>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:エチレンプロピレンジエンゴム)を採用した。</p>
<p>セル間ポートと収納缶のシール方式</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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。 ・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(水素ベント用フィルタ付)を設置する構造とした。
<p>フィルタ</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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0.3μm(HEPA相当)、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、目詰まりの影響を受けにくい構造とした。
<p>触媒</p> <ul style="list-style-type: none"> ・触媒を設置することを想定し、内部蓋下部に設置することで仮設定した。
<p>緩衝構造</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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。

図 収納缶の仕様案^{注1}
(ボルト構造/内径220mm/送気機構ありの構造案)

注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。

6. 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(2019年度)(2/7)

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。

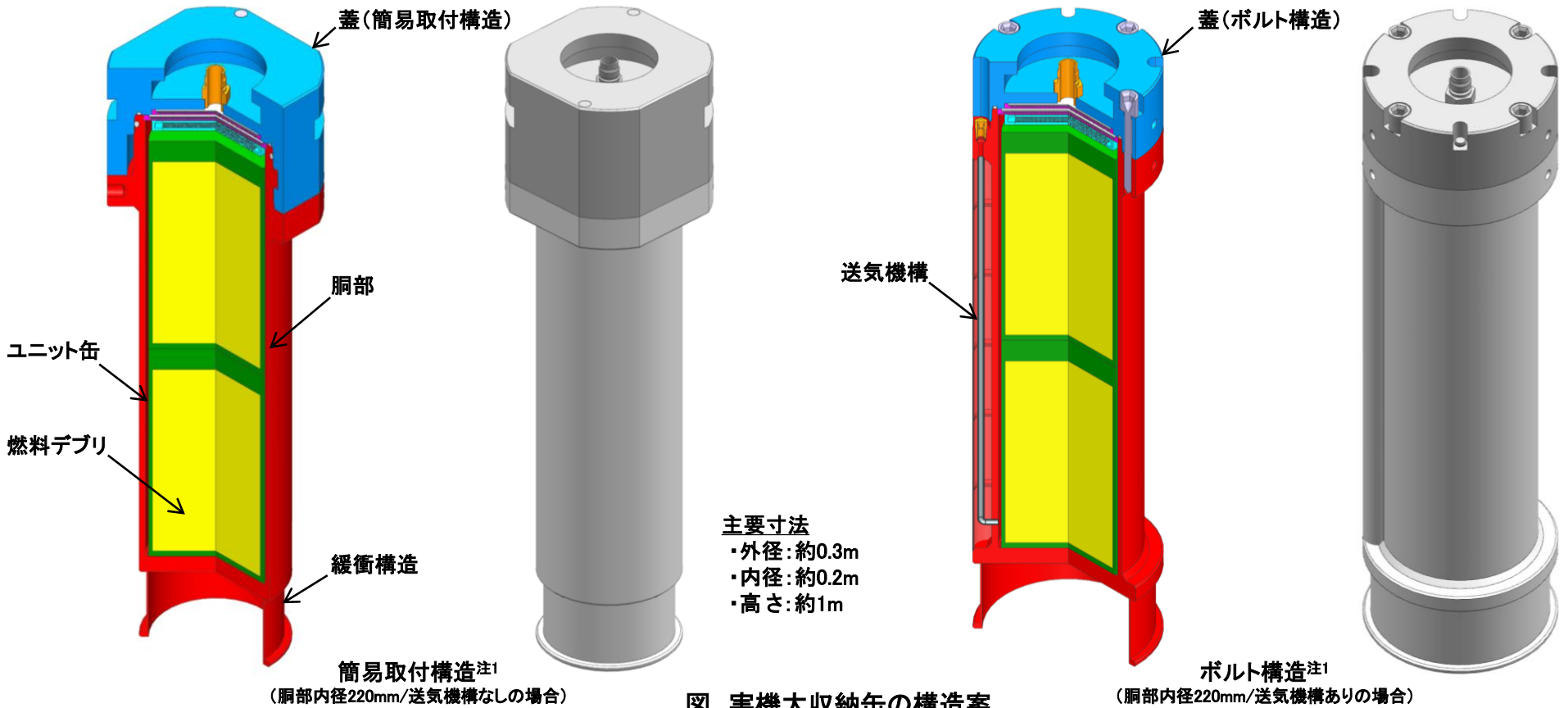


図 実機大収納缶の構造案

注1: 断面図については、構成部品を識別するため、蓋、胴部、ユニット缶および燃料デブリなどを着色している。

6. 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(2019年度)(3/7)

ハ. 主要な仕様案(1/5)

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。

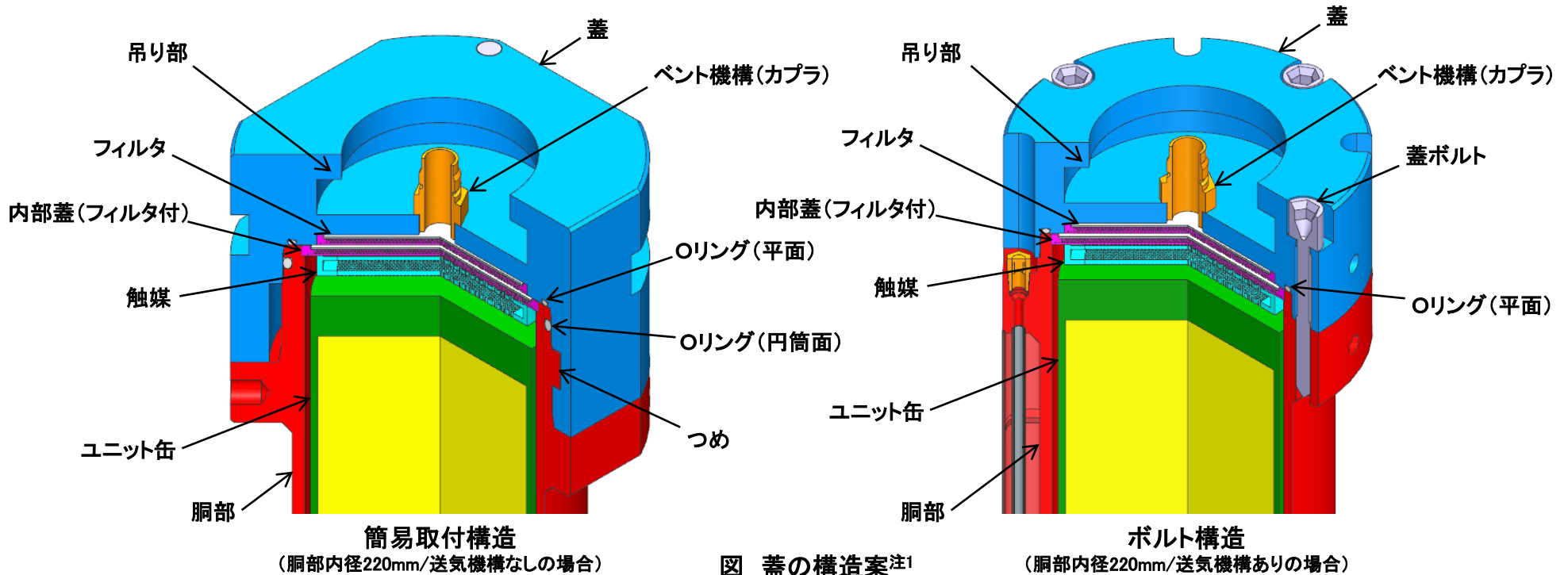


図 蓋の構造案^{注1}

6. 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(2019年度)(4/7)

ハ. 主要な仕様案(2/5)

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。

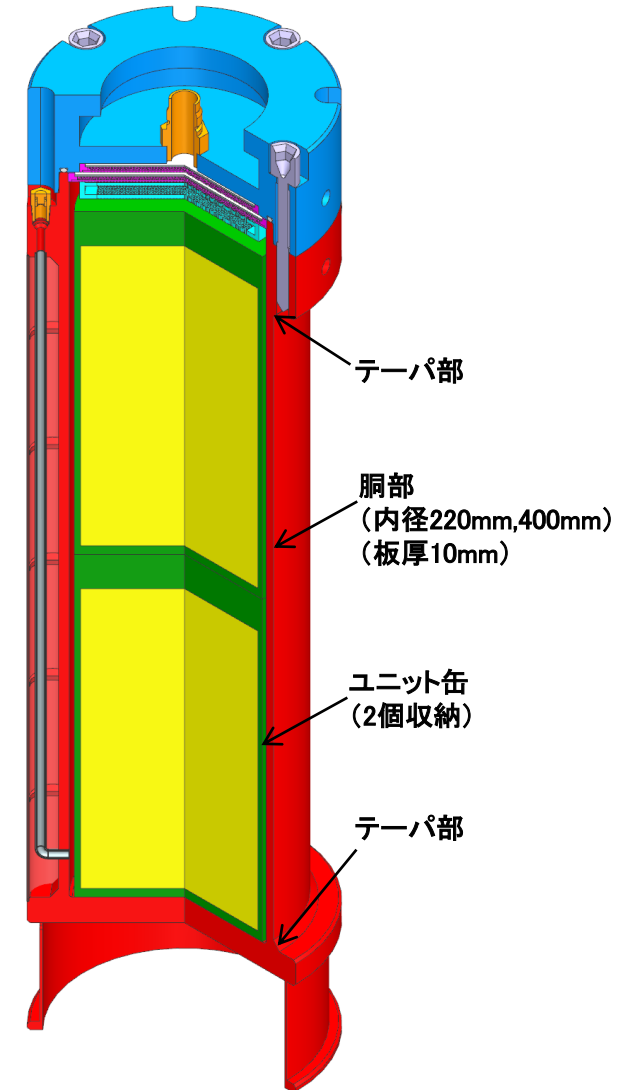


図 胴部の構造案^{注1}

(ボルト構造/胴部内径220mm/送気機構ありの場合)

注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。

6. 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(2019年度)(5/7)

ハ. 主要な仕様案(3/5)

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)やボルトの締め付け作業管理により慎重な配慮が必要であること。

6. 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(2019年度)(6/7)

ハ. 主要な仕様案(4/5)

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	・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 ^{注1} である。	・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。	・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。	・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。
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℃ ^{注2})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℃ ^{注2})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℃ ^{注2})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℃ ^{注2})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。	・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。	・取り出しは可能だが、再使用は不可である。
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。	・オーバーバック溶接であれば自由度はひろい。

注1: 燃料デブリの燃焼度を照射履歴を考慮した第6バ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。

6. 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(2019年度)(7/7)

ハ. 主要な仕様案(5/5)

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。

・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^{-16} [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
: 1.2×10^{-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^{-18} [L/h/Bq]

・取り出し初期の使用が想定される内径φ220mm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。

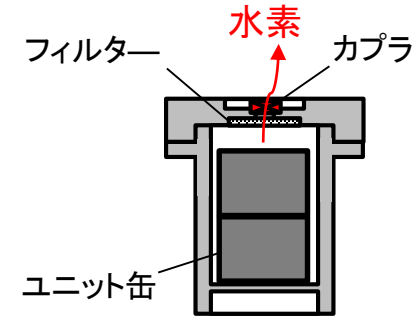


図 拡散評価モデル

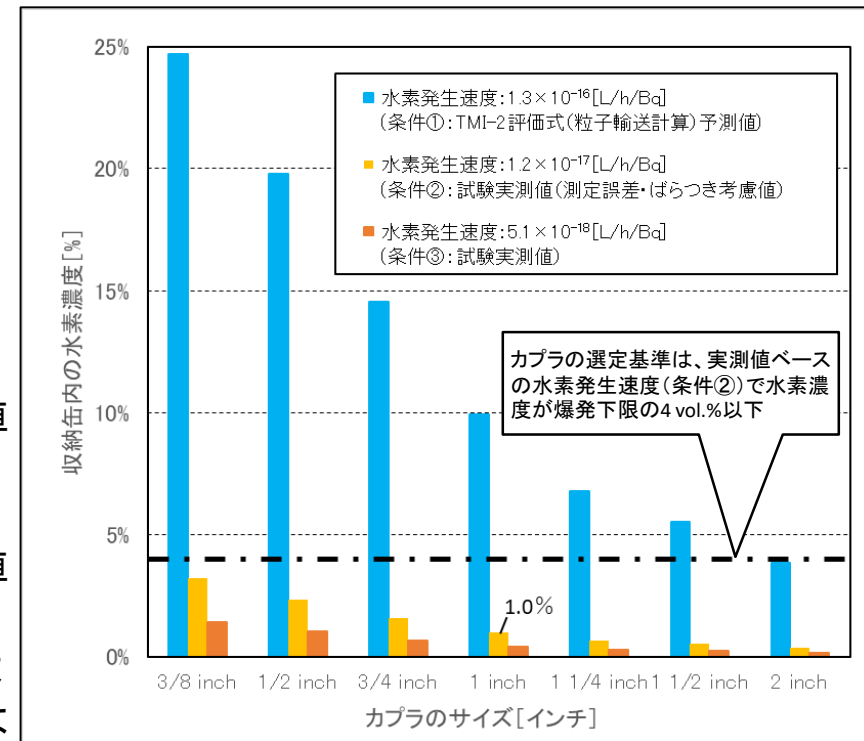


図 拡散評価式による収納缶内水素濃度評価結果(内径220mm)

6. 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)

c.収納缶(試験体)の試作(2019年度、2020年度)

b.項で実施した収納缶(試験体)設計にもとづき、実機大の収納缶(試験体)の試作に向けて材料手配等の準備を進めている。試作は2020年度におこなう。

d.構造検証試験の実施(2020年度)【予定】

c.項で試作した収納缶(試験体)を用いて、a.項で検討した構造検証試験の計画にもとづき、構造検証試験をおこなう。なお、構造検証試験の実施にあつては、安全機能維持に係る構造健全性を確認できるようなデータ等を取得する。

e.構造検証試験の評価(2020年度)【予定】

d.項で実施した構造検証試験の結果について、収納缶の安全機能維持(未臨界維持、燃料デブリの閉じ込め)の観点から、評価をおこなう。また、2018年度までに検討してきた構造解析手法をもとに構造検証試験を模擬した構造解析を実施し、構造検証試験の結果との比較・評価をおこない、収納缶仕様および構造について成立性を確認するとともに、解析手法の適用性を確認する。

f.収納缶仕様および構造の検討(2020年度)【予定】

e.項で実施した構造検証試験の評価の結果を反映し、必要に応じて収納缶仕様および構造について見直し・検討する。

以上の検討により、2020年度末に収納缶の仕様案/構造案(構造図)を提案する。

6. 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-

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する。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する。

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/構造を検討しており、現場への適用性に問題はないと考える。

⑥課題

現計画の遂行上、課題はない。

⑦目標に照らした達成度

構造検証試験の計画立案まで完了し、収納缶(試験体)の試作を進めている。概ね計画どおり進捗しており、2020年度末には目標である成果を達成できる見通しである。

6. 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-

まとめ

2019年度は、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、収納缶の構造検証試験で実施する試験項目の計画立案、及び収納缶(試験体)の設計を実施した。また、収納缶(試験体)の試作に向けて材料手配等を実施した。

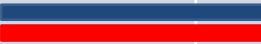





2020年度は、構造検証試験に用いる実機大の収納缶(試験体)を試作し、安全機能(臨界防止、閉じ込め)の維持を確認するための構造検証試験をおこなう。また、構造検証試験の結果と構造解析の比較・評価をおこない、解析手法の適用性を確認する。なお、必要に応じて収納缶仕様および構造について見直し・検討する。

6. 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-

⑧今後の予定

表 収納技術の開発スケジュール

項目	2019年度		2020年度		備考
	上期	下期	上期	下期	
6.2.収納技術の開発					
a.構造検証試験の計画立案					
b.収納缶(試験体)の設計					
c.収納缶(試験体)の試作					材料調達を含む
d.構造検証試験の実施					
e.構造検証試験の評価					検証試験の事前解析含む
f.収納缶仕様および構造の検討					必要に応じて

 :計画  :実績

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・分析をおこない、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おこなう。また、必要に応じて、試験により評価に用いるデータを取得する。

②既往技術との対比

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. 実施内容

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(2019年度)(1/14)

(i)評価手法の検討フローの設定

評価手法の検討フローを設定し、各実施項目の検討を実施した。

表 水素発生予測法の検討の実施内容(案)

検討項目		実施内容(案)
大項目	小項目	
①評価手法の検討	評価手法の調査	国内外の他評価手法(廃棄物等の評価手法等)を調査(6.3(1)③a.(ii)イ.参照)
	評価手法の検討	評価手法の調査結果およびデータの入手性などを踏まえて評価手法を決定(6.3(1)③a.(ii)ロ.参照)
②入力値の検討	入力値の評価方法の検討	エネルギー吸収率については、粒子輸送計算結果を用いて評価(6.3(1)③a.(iii)参照)
	入力値の評価	
③入力値の妥当性確認	入力値の妥当性確認方法の検討	エネルギー吸収率については、粒子輸送計算を用いたエネルギー吸収量評価が単線源試験/使用済燃料試験の結果に対して適度に保守的であることを確認(6.3(1)③a.(iv)参照)
	入力値の妥当性確認	
④評価手法の適用性確認	評価手法の適用性確認方法の検討	リアモデルによる水素発生速度が使用済燃料試験の結果に対して適度に保守的であることを確認(6.3(1)③a.(v)参照)
	評価手法の適用性確認	

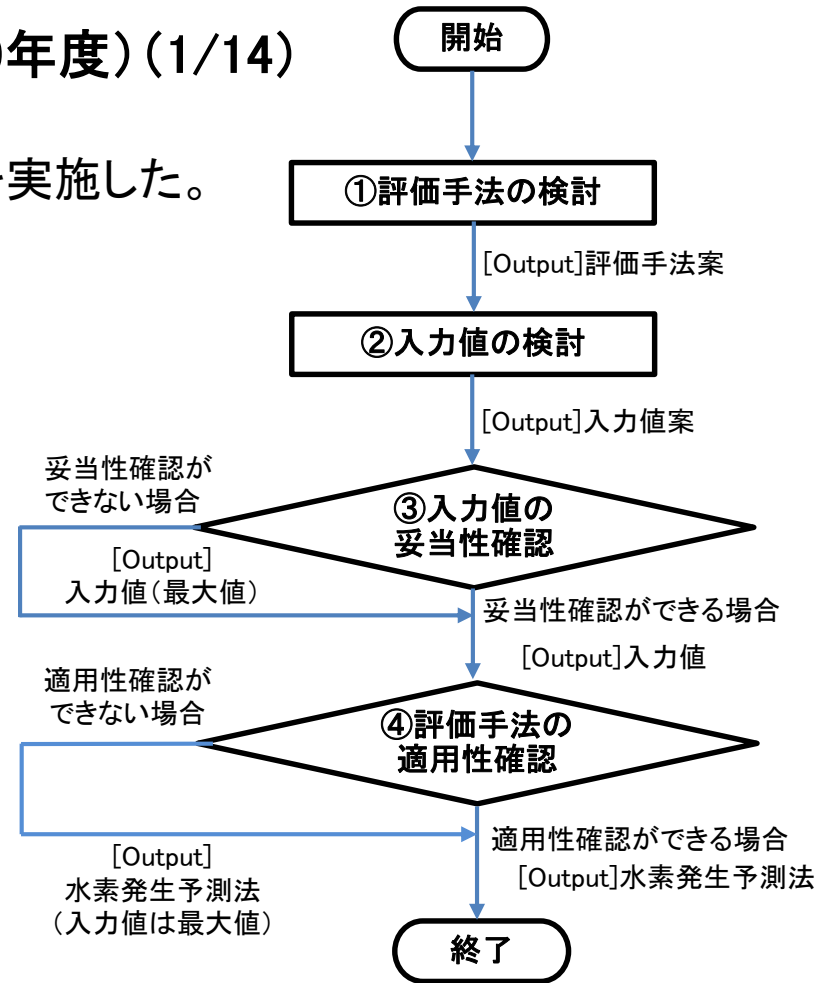


図 評価手法の検討フロー

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

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(2019年度)(2/14)

(ii)評価手法の検討(1/2)

イ.評価手法の調査

1Fの水素発生予測法に適用する評価手法を選定するため、国内外の評価手法を調査した。

【調査結果】

評価手法A:水素発生速度が時間に依存しない評価手法(リニアモデル)

- 「単位時間あたりの吸収エネルギー量」×「水素発生G値」といった簡潔な評価式
- 「単位時間あたりの吸収エネルギー量」には2種類

A-1:「放出エネルギー」×「エネルギー吸収率」

TMI-2(燃料デブリ)、サバンナリバー国立研究所(放射性スラッジ・スラリー)およびアメリカ合衆国原子力規制委員会(TRU廃棄物)で水素発生量評価の実績有

A-2:「吸収線量率」×「吸収媒体の重量」

TMI-2(低レベル放射性物質除去装置の充填物)で水素発生量評価の実績有

評価手法B:ラジオリシスモデルを用いた評価手法(ラジオリシスモデル)

- 化学種の経時変化を考慮することが可能であり、特に再結合反応を考慮することで水素発生速度を低減可能

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

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(2019年度)(3/14)

(ii)評価手法の検討(2/2)

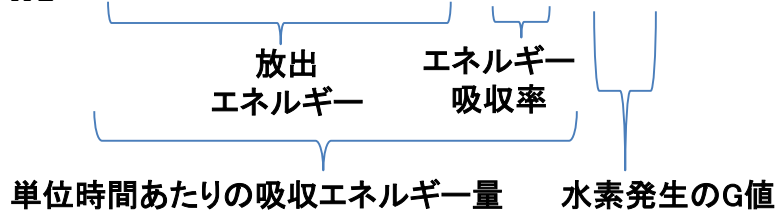
ロ.評価手法の検討

評価手法の調査結果を踏まえ、再結合反応を考慮しないため保守的な評価が可能である「評価手法A: リニアモデル」、TMI-2(燃料デブリ)他で実績がある「A-1:「放出エネルギー」×「エネルギー吸収率」」を採用した。

なお、TMI-2(燃料デブリ)では、 β 線および γ 線のみを考慮し、単位時間あたりの吸収エネルギー量に β 線および γ 線の水素発生G値を掛け合わせている。一方、 α 線が影響する可能性のある1Fでは、 α 線、 β 線および γ 線それぞれの単位時間あたりの吸収エネルギー量と水素発生G値から水素発生速度を算出し、合算するものとした。

【評価手法:リニアモデル】

$$R_{H_2} = E \times P \times M \times C \times F \times G$$



R_{H_2} : 水素発生速度、E: 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: エネルギー吸収率、
G: 水素発生G値

評価手法(リニアモデル)については、 α 線、 β 線および γ 線を含んだ体系において適用性を確認した実績が確認できなかったため、各入力値を考慮した適用性を確認する必要がある。

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

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(2019年度)(4/14)

(iii)入力値の検討(1/4)

イ.入力値の設定概要

評価手法(リニアモデル)の各入力値は、以下の方針のもと設定するものとした。

表 入力値の設定方針

記号	入力値	設定方針
E	崩壊熱	文献 ^{注1} をもとに、核種の崩壊熱を合算し、線種ごとに設定
P	ピーキングファクター	文献 ^{注1} をもとに最大崩壊熱と平均崩壊熱の比 または最大燃焼度と平均燃焼度の比を設定
M	燃料デブリ重量	設計値を設定
C	燃料含有割合	全燃料デブリが燃料で構成されていると仮定
F	エネルギー吸収率	水のエネルギー吸収量と燃料デブリが有するエネルギー量の比を設定 移送条件の緩和を目的に、水のエネルギー吸収量を粒子輸送計算により評価し実態に近づける方針(詳細は6.3(1)③a.(iii)ロ.参照)
G	水素発生のG値	文献 ^{注2} をもとに、線種ごとの水素発生の初期G値を設定

注1: 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

注2: Hilbert Christensen and Erling Bjergbakke, NUCLEAR AND CHEMICAL WASTE MANAGEMENT, Vol.6, pp.265-270, TABLE 2, APPRICATION OF CHEMISIMUL FOR GROUNDWATER RADIOLYSIS, 1986

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

③実施事項、成果(予実)

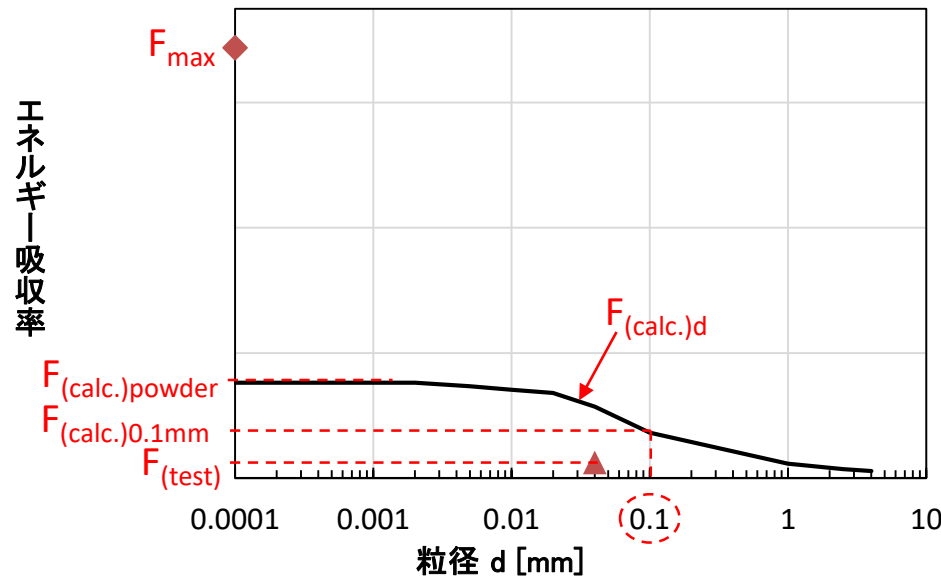
a.移送条件案設定に必要な実施内容の検討(2019年度)(5/14)

(iii)入力値の検討(2/4)

ロ.エネルギー吸収率(1/3)

全エネルギーが水の放射線分解に寄与する場合のエネルギー吸収率(F_{max})を用いた水素発生量の評価は、説明性は高いが過度に保守的で、燃料デブリの移送条件が厳しくなる(6.3(1)③a.(iii)ロ.(2/3)参照)。

そこで、移送条件を緩和するために、自己遮蔽を考慮できる粒子輸送計算の計算結果をもとに、実態に近いエネルギー吸収率($F_{(calc.)d}$)を評価し、移送条件を緩和することとした。



◆	全エネルギーが水の放射線分解に寄与する場合のエネルギー吸収率(F_{max})
—	粒子輸送計算結果から評価したエネルギー吸収率(水分量は水切り程度)($F_{(calc.)d}$)
▲	2018年度の使用済燃料を用いた水素発生試験の測定結果から評価したエネルギー吸収率($F_{(test)}$)

図 粒径とエネルギー吸収率の関係(イメージ図)

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

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(2019年度)(6/14)

(iii)入力値の検討(3/4)

ロ.エネルギー吸収率(2/3)

他の水素対策(乾燥、水素濃度測定、触媒)に頼らずに、水素発生予測法のみで粒子輸送計算のエネルギー吸収率をもとに評価する移送条件まで緩和することを目標とする。

表 2018年度に検討したエネルギー吸収率と移送条件^{注1}

評価手法	エネルギー吸収率	試算結果		移送条件 (評価条件:水素濃度は4vol.%未満、 移送時間は7日)
		収納缶内の 水素濃度が4 vol.%に 達する時間	移送容器内の 水素濃度が4 vol.%に 達する時間	
TMI-2 評価式	全吸収 (F_{max} 相当)	約0.04日 (約1.0時間)	約0.3日 (約7.1時間)	収納缶の密封移送不可。移送容器で密封移送する場合、収納缶本数を1本 ^{注2} に減らすとともに、収納燃料デブリ量を5割程度に減らす必要あり
	輸送計算 ($F_{(calc.)0.1mm}$ 相当)	約0.2日 (約5.5時間)	約1.7日 (約41時間)	収納缶の密封移送不可。移送容器で密封移送する場合、収納缶本数を2本 ^{注2} に減らす必要あり
	試験結果 ($F_{(test)}$ 相当)	約5.8日 (約139時間)	約43日 (約1029時間)	収納本数は12本 ^{注2} のままで、収納燃料デブリ量を8割程度に減らせば収納缶の密封移送可能。移送容器の密封移送可能

注1: 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構(IRID)、平成28年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業費補助金(燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発)」平成30年度実施分最終報告、令和元年6月

注2: 移送容器への収納缶収納本数は12本と仮定

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

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(2019年度)(7/14)

(iii)入力値の検討(4/4)

ロ.エネルギー吸収率(3/3)

収納缶には0.1mm以上(目安)の燃料デブリを収納するが、実運用においては0.1mm以下の燃料デブリも意図せず同伴されて収納されることを考慮して、粒径を考慮した輸送計算結果をもとにしたエネルギー吸収率から水素発生速度を算出するものとする。そのため、粒子輸送計算結果をもとに評価する粒径に対応したエネルギー吸収率の妥当性確認が必要である。

- 全燃料デブリが粒径0.1mm以上の場合

$$R_{H_2} = E \times P \times M \times C \times F_{(calc.)0.1mm} \times G$$

- 燃料デブリのa%が粒径0.1mm以上、b%が粒径0.1mm未満の場合

$$R_{H_2} = E \times P \times M \times C \times \left(F_{(calc.)0.1mm} \times \frac{a}{100} + F_{(calc.)powder} \times \frac{b}{100} \right) \times G$$

R_{H_2} : 水素発生速度, E: 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: エネルギー吸収率, G: 水素発生G値
 a: 粒径0.1mm以上の割合, b: 粒径0.1mm未満の割合

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

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(2019年度)(8/14)

(iv)入力値の妥当性確認(1/5)

イ.エネルギー吸収率の妥当性確認(1/2)

エネルギー吸収量の評価に用いる粒子輸送計算コード“PHITS^{注1}”は、物質中での様々な放射線挙動を核反応モデルや核データなどを用いて模擬するモンテカルロ計算コードであるが、固体と液体が混ざった複雑な体系における α 線、 β 線および γ 線に対する水のエネルギー吸収量を評価した実績は確認できなかった。

なお、PHITSの計算結果をもとに評価するエネルギー吸収量の妥当性が確認できない場合、過度に保守的なエネルギー吸収率 F_{\max} ^{注2}を用いることになって移送条件が厳しくなるため、移送条件を緩和するためには、PHITSの妥当性確認が必要である。

そのため、試験から得られるエネルギー吸収量と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ことでPHITSの妥当性を確認する方針とした。

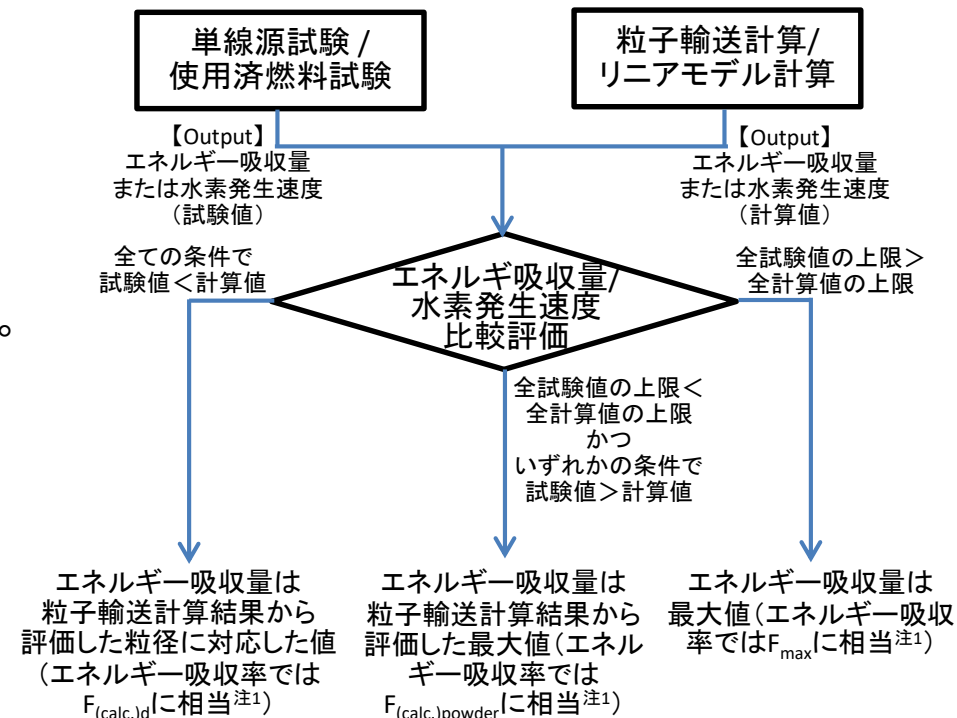


図 入力値(エネルギー吸収率)の妥当性確認の検討フロー(案)

注1: Particle and Heavy Ion Transport code System, 物質中での様々な放射線挙動を核反応モデルや核データなどを用いて模擬するモンテカルロ計算コード

注2: $F_{(calc.)d}$, $F_{(calc.)powder}$, F_{\max} は6.3③(1)a.(iii)ロ.(1/3)のグラフに記載のエネルギー吸収率

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

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(2019年度)(9/14)

(iv)入力値の妥当性確認(2/5)

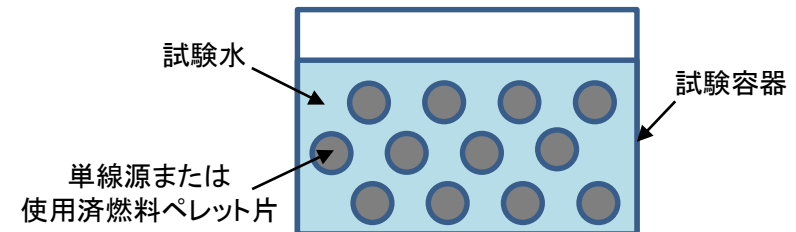
イ.エネルギー吸収率の妥当性確認(2/2)

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(6.3③(1)a.(iv)ロ.参照)、粒子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おり、保守性が低い可能性がある2018年度の試験結果は、エネルギー吸収量評価の妥当性確認には適さないと考えた。

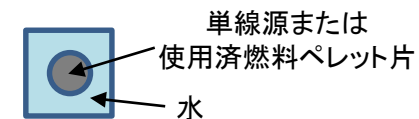
妥当性確認を試験で実施する場合は、粒径や放射能が既知の放射線源を用いて、粒子同士の接触や粒子-試験水層の気泡の影響を排除するために攪拌し、粒子を浮遊させた以下のような試験(試験案1または試験案2)が必要と考える。

試験案1:比較的、粒径を一定に揃えやすく、放射能を評価しやすい単線源を用いた試験(単線源試験)を実施し、粒子輸送計算を用いたエネルギー吸収量評価が試験結果に対して適度に保守的であることを確認する。

試験案2:使用済燃料ペレット片を用いた試験(使用済燃料試験(評価手法の適用性確認における使用済燃料試験と同一試験(6.3③(1)a.(v)参照)))により、 α 線、 β 線および γ 線の共存体系においても、粒子輸送計算結果が適度に保守的であることを確認する。



(a) 単線源試験または使用済燃料試験



(b) 粒子輸送計算モデル

図 試験体系のイメージ

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

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(2019年度)(10/14)

(iv)入力値の妥当性確認(3/5)

ロ.水素発生試験の再評価(再評価結果まとめ)

使用済燃料を用いた水素発生試験(2018年度実施)の結果を再評価し、計算結果と試験結果の差異は、ペレット片層内の気泡およびペレット片同士の接触が主な原因と推定した。

表 計算結果(粒子輸送計算による評価結果)と試験結果の差異の再評価結果

検討した差異要因		影響度合い	
		小粒径(平均粒径0.04mm)	大粒径(平均粒径2.5mm)
試験結果	①ペレット片洗浄による核種放出	最大10%程度	
	②ペレット片の燃焼度分布	ほとんどない	
	③気相部ガス中の成分偏在	ほとんどない	
	④ペレット片-試験水層への発生ガス残留	ほとんどない	
	⑤測定装置による誤差	最大10%程度	
粒子輸送計算	①ペレット片の放射能の過大評価	最大5%程度	
	② α 線、 β 線および γ 線の散逸の影響	10%程度	30%程度
	③ α 線のLET ^{注1} を考慮した水素発生のG値	10%程度	3%程度
	④ペレット片の粒径分布	10%程度	ほとんどない
	⑤ペレット片-試験水層の気泡溜り(詳細は6.3(1)③a.(iv)ハ.参照)	気泡含有率が高くなるにつれて数十%まで影響度が増加 ^{注2}	
	⑥ペレット片同士の接触(詳細は6.3(1)③a.(iv)ニ.参照)	接触が多くなるにつれて数十%まで影響度が増加 ^{注3}	評価なし

注1: Linear Energy Transfer(線エネルギー付与)。放射線が物質中を通過する際、飛程の単位長さ当りに平均して失うエネルギー

注2: 粒子輸送計算②の影響を考慮した水素発生速度に対して、気泡含有率0.3の場合には影響度が20%程度

注3: 粒子輸送計算②の影響を考慮した水素発生速度に対して、ペレット片同士の接触により生じた空隙径0.3 mmの場合には影響度が70%程度

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

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(2019年度)(11/14)

(iv)入力値の妥当性確認(4/5)

ハ.水素発生試験の再評価の例1(ペレット片-試験水層の気泡溜りの影響確認)

水の放射線分解で発生した気体(酸素、水素)や、試験水を投入後に残留した気体によって、気泡溜りが生じた場合の影響を粒子輸送計算により確認した結果、気泡含有率が高くなるにつれて水素発生速度が低下することを確認した(例えば、気泡含有率0.3で水素発生速度は20%程度低下)。

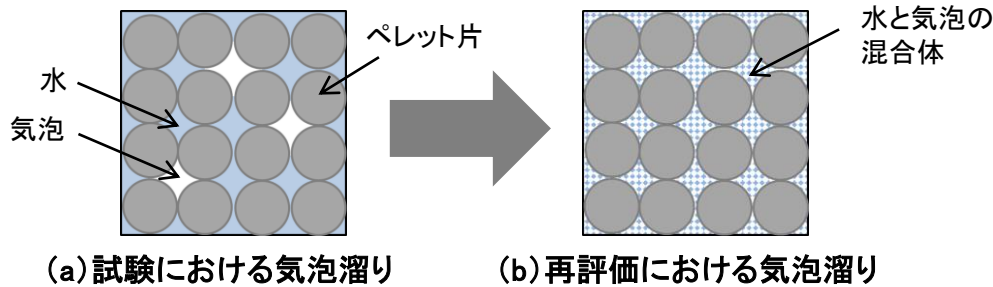


図 気泡溜りのイメージ

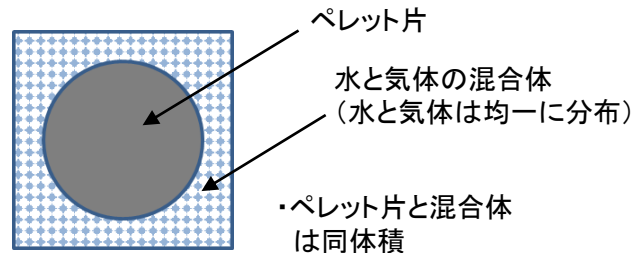


図 粒子輸送計算の単粒子体系イメージ

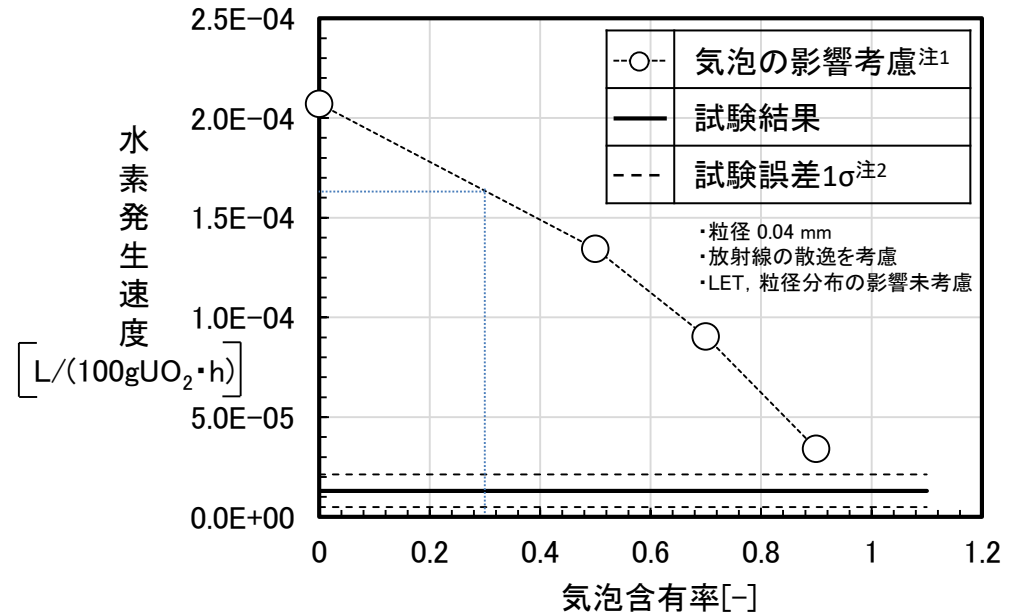


図 粒子輸送計算から評価結果:気泡含有率と水素発生速度

注1:粒子輸送計算より算出した水のエネルギー吸収量に水素発生G値を乗じて、水素発生速度を算出。(TMI-2評価式における発熱量に対するピーキングファクタの考慮なし)
注2:小粒径のペレット片を用いた4ケースの試験結果のばらつき。

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

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(2019年度)(12/14)

(iv)入力値の妥当性確認(5/5)

二.水素発生試験の再評価の例2(ペレット片同士の接触の影響確認)

小粒径(0.02~0.3mm)は、粒径分布が大きく、形状や寸法が異なるためペレット片同士が密に接触しやすいため、接触の影響を粒子輸送計算により確認した結果、接触面積が低くなるにつれて水素発生速度が低下することを確認した(例えば、空隙(水たまり)の径0.3mmで水素発生速度は70%程度低下)。

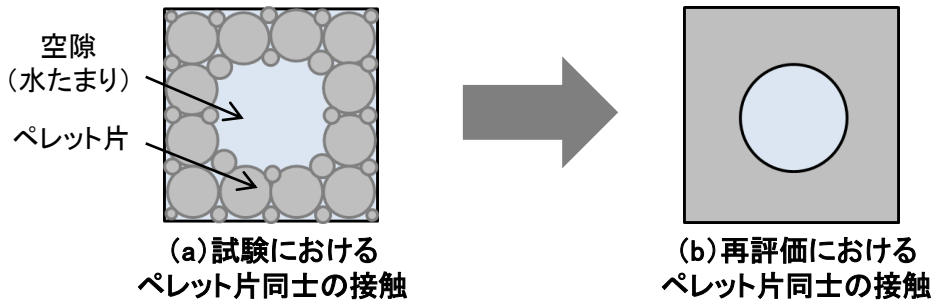


図 粒子同士の接触のイメージ

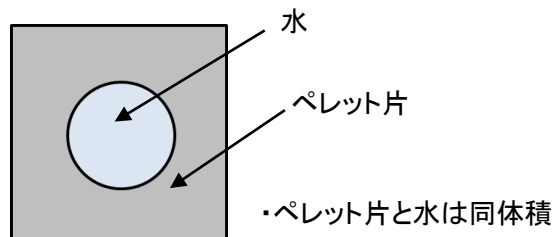


図 粒子輸送計算の単粒子体系イメージ

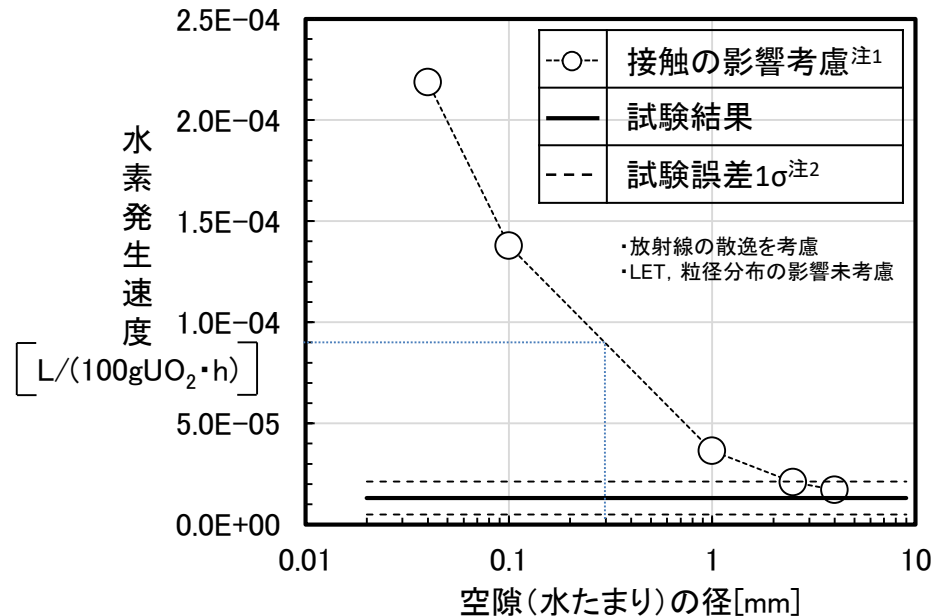


図 粒子輸送計算から評価結果:空隙(水たまり)の径と水素発生速度

注1:粒子輸送計算より算出した水のエネルギー吸収量に水素発生G値を乗じて、水素発生速度を算出。(TMI-2評価式における発熱量に対するピーキングファクタの考慮なし)

注2:小粒径のペレット片を用いた4ケースの試験結果のばらつき

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

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(2019年度)(13/14)

(v)評価手法の適用性確認(1/2)

評価手法(リニアモデル)については、 α 線、 β 線および γ 線を含んだ体系において適用性を確認した実績が確認できなかったため、各入力値を考慮した適用性を確認する必要がある。

1F条件への適用性確認は、実際の燃料デブリによる水素発生速度との比較が最も適切と考えるが、入手性の観点から現時点では困難である。

そのため、燃料デブリを模擬した α 線、 β 線および γ 線を含んだ試験において、粒子輸送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水素発生速度が、試験結果に対して適度に保守的であることを確認することで評価手法(リニアモデル)の適用性を確認する方針とした。

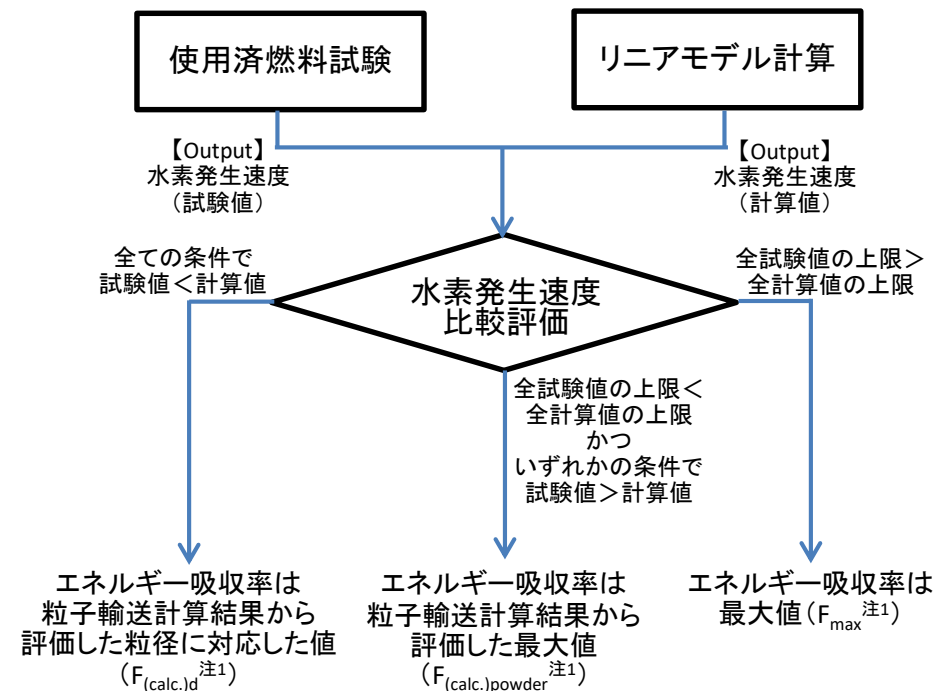


図 評価手法(リニアモデル)の適用性確認の検討フロー(案)

注1: $F_{(calc.)d}$, $F_{(calc.)powder}$, F_{max} は6.3③(1)a.(iii)ロ.(1/3)のグラフに記載のエネルギー吸収率

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

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(2019年度)(14/14)

(v)評価手法の適用性確認(2/2)

適用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(6.3③a.(iv)ロ.参照)、粒子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おり、保守性が低い可能性がある2018年度の試験結果は、評価手法(リニアモデル)の適用性確認には適さないと考えた。

適用性確認を試験で実施する場合は、 α 線、 β 線および γ 線含んだ燃料デブリの模擬体(放射線源)を用いて、模擬体同士の接触や模擬体-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試験が必要と考える。

試験案:使用済燃料ペレット片を用いた試験(使用済燃料試験(エネルギー吸収率の妥当性確認における使用済燃料試験と同一試験(6.3③(1)a.(iv)イ.参照)))により、 α 線、 β 線および γ 線の共存体系において、粒子輸送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水素発生速度が試験結果に対して適度に保守的であることを確認する。

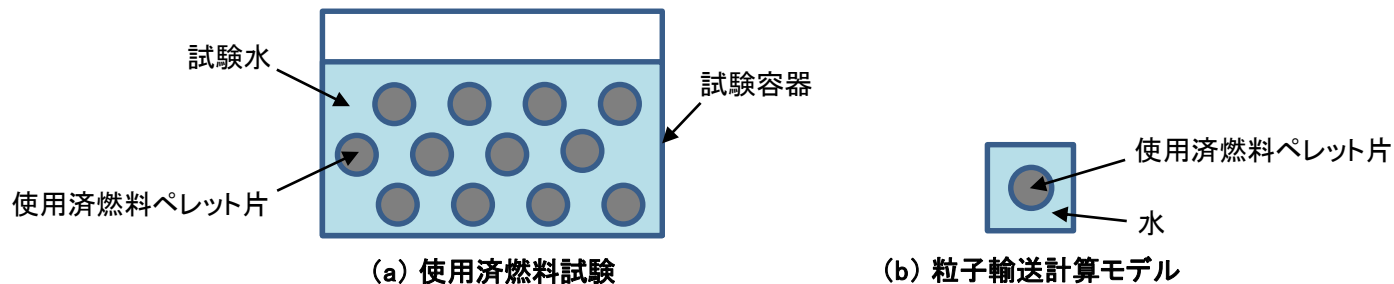


図 試験体系のイメージ

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

③実施事項、成果(予実)

b.水素発生試験の実施(必要に応じて実施)(2020年度)【予定】

a.項での検討の結果から、2020年度に水素発生試験を実施する方向で検討する。試験結果に対して、評価式や解析等を用いて評価し、結果の比較をおこなう。また、本試験結果の評価にあたっては、適宜、専門家の意見聴取をおこなう。

c.水素発生予測法の検討(2019年度、2020年度)

a.項での検討結果にもとづき、水素発生予測法案を検討している。また、検討にあたっては、b.項での水素発生試験結果(試験を実施した場合)も考慮する。さらに、必要に応じて解析等による評価もおこなう。

d.収納缶水素発生量の推定(2020年度)【予定】

c.項で検討した水素発生予測法案にもとづき、1F収納缶条件での水素発生量を推定する。

e.移送条件の検討(2020年度)【予定】

d.項の検討結果および別途実施する水素発生対策(再結合触媒の検討)や乾燥技術の検討結果等もふまえ、水素対策の観点から安全に移送可能な収納缶移送条件案を検討・提案する。

以上の検討により、1F燃料デブリ条件に適した水素発生予測法を提案するとともに、燃料デブリを移送するために必要な条件や制約、追加対策等を提案する。

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する。

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課題

現計画の遂行上、課題はない。

⑦目標に照らした達成度

移送条件案設定に必要な実施内容の検討として、水素発生予測法の入力値の妥当性確認、評価手法の適用性確認方法を検討している。概ね計画どおり進捗しており、2020年度末には目標である成果を達成できる見通しである。

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

まとめ

2019年度は、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おこないながら、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。

2020年度は、水素発生予測法の検討を進め、必要により水素発生試験を実施し、それらの結果にもとづき、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する。

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

⑧今後の予定

表 移送技術の開発/水素発生予測法の検討スケジュール

項目	2019年度		2020年度		備考
	上期	下期	上期	下期	
6.3.移送技術の開発					
a.移送条件案設定に必要な実施内容の検討	■				
b.水素発生試験の実施			■		
c.水素発生予測法の検討			■		
d.収納缶水素発生量の推定				■	
e.移送条件の検討				■	

■ :計画 ■ :実績

6. 実施内容

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。
 - 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。
 - 常温環境:再結合反応が生じにくい。
 - 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、昨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

③ 実施事項、成果(予実)

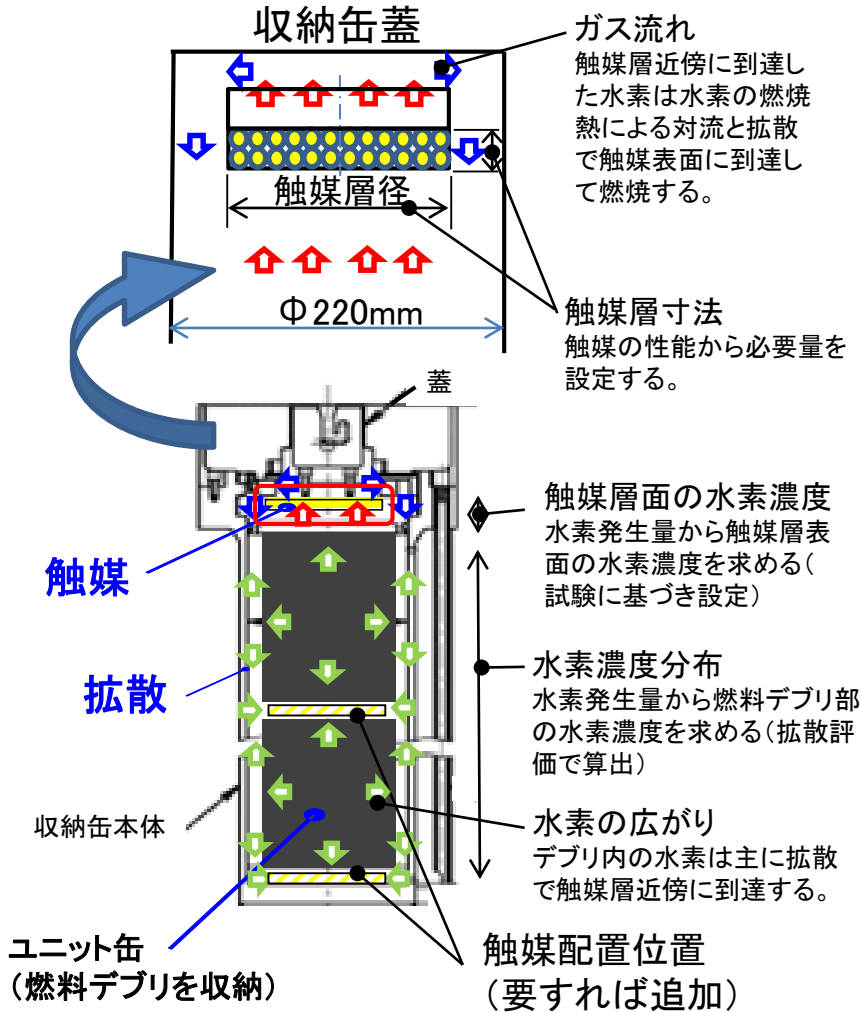
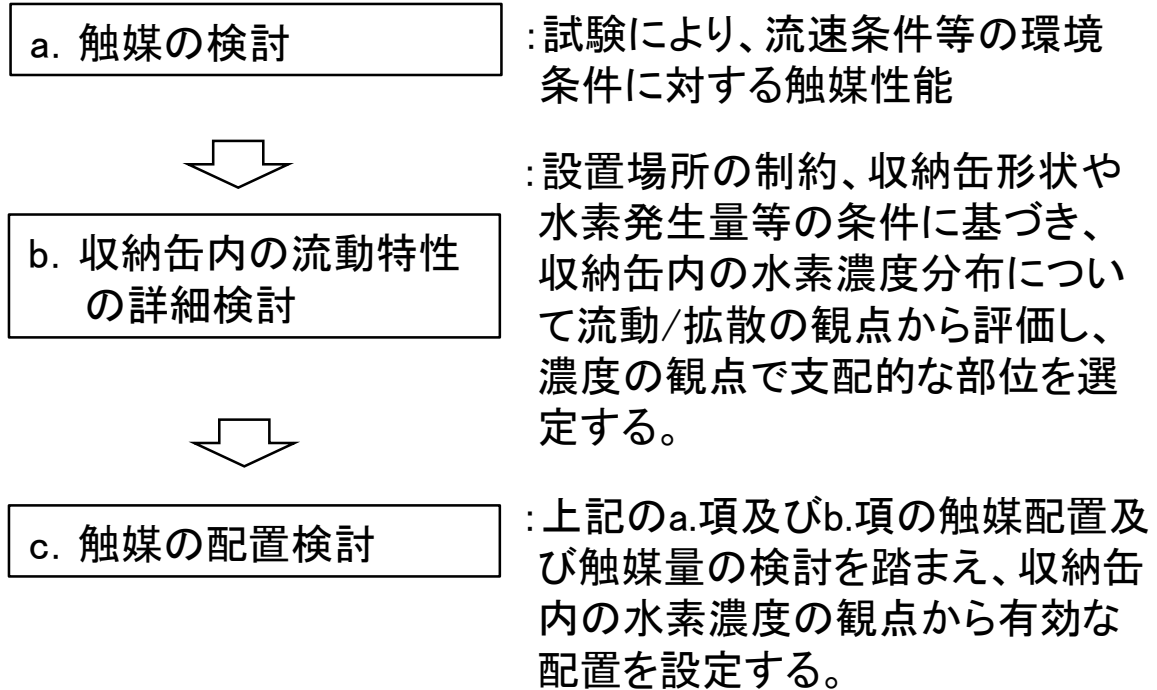


図 収納缶内の水素拡散イメージ図

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。

検討の進め方



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(1/2)

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。

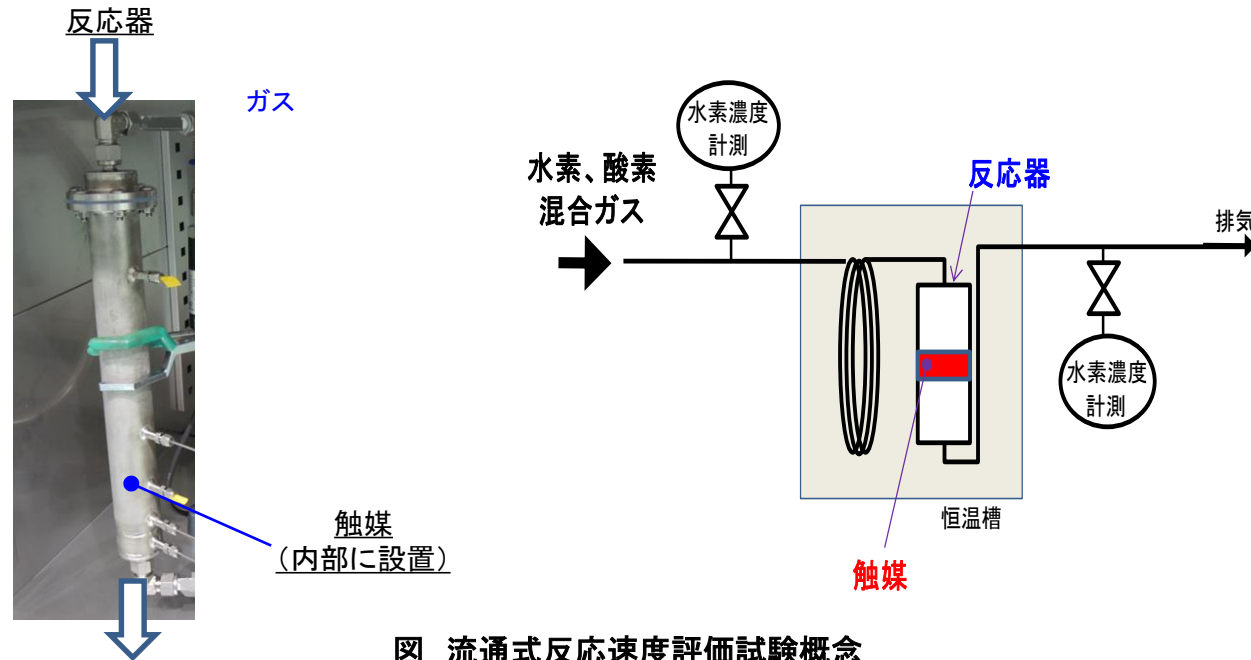


図 流通式反応速度評価試験概念

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、次ページ以降の(補足)参照。

6. 実施内容

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 η から総括反応速度係数 K を算出する式を以下に示す。



一次で表される場合の反応速度^{注1} : $-r = KC_{H_2}$ $\Rightarrow K = SV \ln\left(\frac{1}{1-\eta}\right)$

$-r$: 反応速度	K : 総括反応速度係数	C_{H_2} : 水素濃度
C_{O_2} : 酸素濃度	$C_{H_2}^0$: 入口水素濃度	η : 反応率
SV : 空間速度 (= Q/V_{cat})	Q : ガス流量	V_{cat} : 触媒層体積

空間速度 (SV) はガス流量 (Q) と触媒量 (V_{cat} : 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仮設定する。収納缶内の環境は触媒量や配置の影響も受けるため、設定した触媒条件で収納缶内の水素濃度を評価し水素対策の有効性を確認する。また、必要に応じて触媒量や配置の見直して再評価/確認する。

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

6. 実施内容

6.3 移送技術の開発

(2) 水素対策の検討

(補足) ガス境膜物質移動と総括反応速度係数の考え方

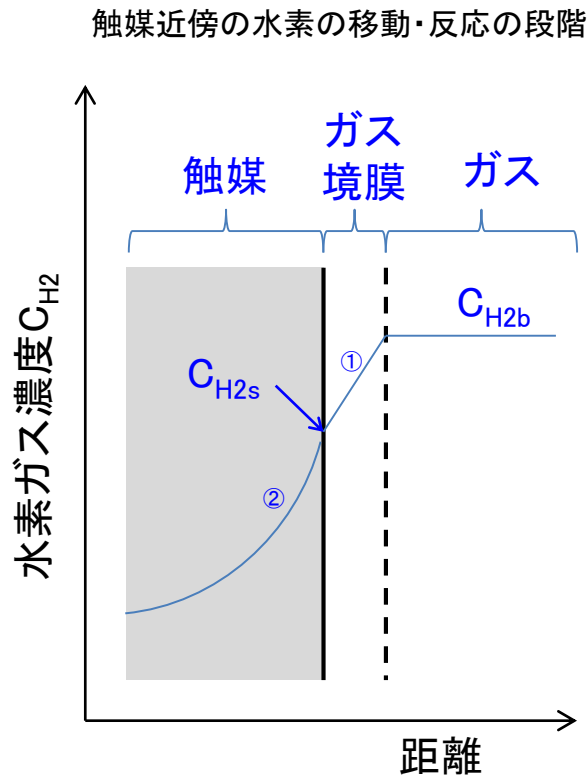


図 触媒近傍の水素の移動・反応の概念^{注1}

- 触媒による水素の反応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 触媒表面での反応
- 使用条件により①②両者の速度は変わり、相対的に速度が小さい段階が律速段階となり、総括の速度が定まる。
- 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。

$$r_G = k_G (C_{H2b} - C_{H2s})$$
- 触媒表面での反応速度は、以下の式で表現される。

$$r_R = k_R C_{H2s}$$
- 以上より総括反応速度係数Kは以下の式で表現される。

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{k_R} + \frac{1}{k_G}$$

K: 総括反応速度係数

k_R : 触媒反応速度係数

k_G : 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

6. 実施内容

6.3 移送技術の開発

(2) 水素対策の検討

(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

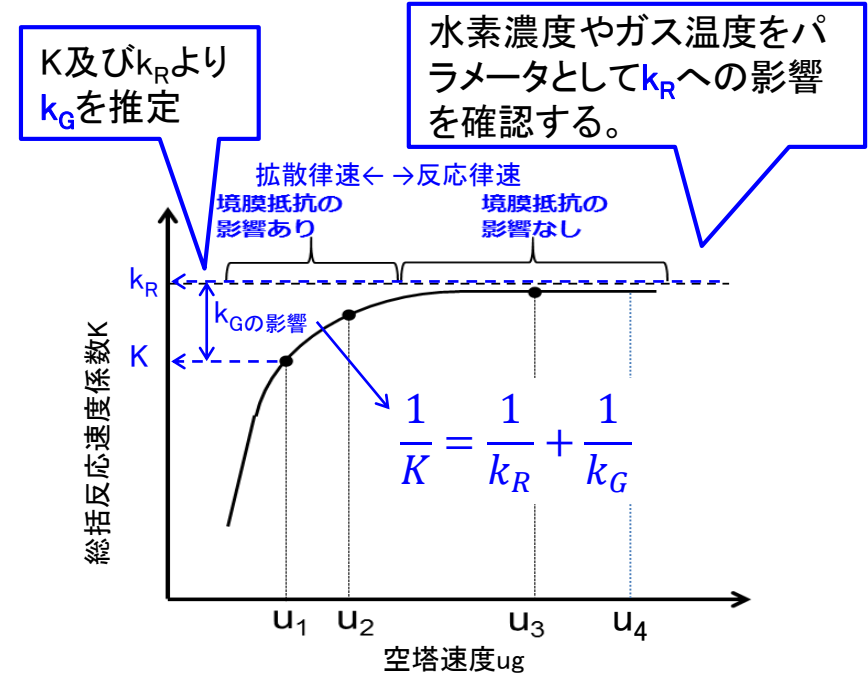
一次で表される反応の場合 : $-r = KC_{H_2}$

r: 反応速度 C_{H_2} : 水素濃度 C_{O_2} : 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、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_R : 触媒反応速度係数)と境膜内の拡散の影響(k_G : 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。

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{k_R} + \frac{1}{k_G} \quad (K: \text{総括反応速度係数、} k_R: \text{触媒反応速度係数、} k_G: \text{ガス境膜物質移動係数})$$



(k_R : 触媒反応速度係数、 k_G : ガス境膜物質移動係数)

図 反応速度係数取得の考え方

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(2/2)

試験により総括反応速度係数の空塔速度(流速)依存性データを取得中。

b. 収納缶内の流動特性の詳細検討

2018年度の検討を踏まえ、収納缶内の流動はわずかで拡散が支配的となるため拡散を主体とした評価を行うこととした。

c. 触媒の配置検討

a.項及びb.項の結果に基づき設定した触媒配置及び触媒量に対して、密閉された収納缶内の水素濃度を評価し、触媒による水素対策の有効性を確認する。

6. 実施内容

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プ(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 課題

触媒性能データ取得にあたり予備試験の結果、触媒通過後の水素濃度は低く、触媒性能を把握するには低濃度の水素を精緻に測定する手法が必要となったため、手法を確立したうえで2020年度に触媒性能データ採取を取得することとした。

⑦ 目標に照らした達成度

触媒性能をより精緻に取得できるように対応したうえで、触媒性能を触媒の被毒物質としてヨウ素による影響も含めて取得し、触媒による水素対策等の妥当性を評価することで所定の成果を得るべく検討を進めたい。

まとめ

2019年度は、触媒による水素対策として収納缶内の流動を検討した。また、触媒性能取得は手法の検討を実施中である。

2020年度は、試験により取得した触媒性能データ及び収納缶内の流動評価に基づき、触媒の必要量及び設置位置を検討し、収納缶内の水素濃度を評価して触媒の有効性を確認する。

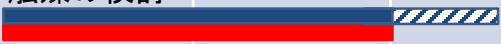


6. 実施内容

6.3 移送技術の開発

(2) 水素対策の検討

⑧ 今後の予定

表 移送技術の開発/水素対策の検討スケジュール

項目	2019年度		2020年度		備考
	上期	下期	上期	下期	
6.3 移送技術の開発 (2)水素対策の検討					
a.触媒の検討	触媒の検討 				低濃度の水素を測定するための手法検討のため延長
b.収納缶内の流動特性の詳細検討	収納缶内の流動特性の詳細検討 				
c.触媒の配置検討		触媒の配置検討（有効性評価） 			触媒の検討結果（触媒性能）を反映する

 :計画  :実績  :見直した計画

6. 実施内容

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、燃料デブリの代替材ながら汚染区域での保守、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、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. 実施内容

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. 安全要求に対する検討

- ・ 安全要求を明確にし、乾燥装置に対する機能要求を整理

ハ. 既存の乾燥技術の調査・分析

- ・ TMI-2での乾燥技術を調査/一般産業の乾燥技術を整理し、デブリ乾燥への適用性を検討

ニ. 装置の概念検討

- ・ イ～ハ.や要素試験^{注1}を踏まえ、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

注1: 必要に応じて実施

b. 乾燥挙動データの採取

イ. 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

ロ. 乾燥挙動データ(保守性等含む)の採取

必要に応じて要素試験を実施

- ・ 実規模大試験装置によりb.イ.及び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)、付帯設備の構成(案)を提示

6. 実施内容

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(1/8)

イ. 性能要求の整理(1/3)

乾燥システムの性能要求として、対象物、乾燥時間、含水率の目安値を以下のとおり設定した。

(対象物) 多孔質体

(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
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	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。

注1: 燃料デブリの密度を前提にした含水率。
試験における目標含水率は供試体密度で見直す。

6. 実施内容

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



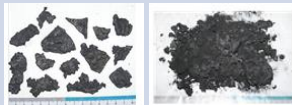



③ 実施事項、成果(予実)

a. 基本条件の検討(2/8)

イ. 性能要求の整理(2/3)

乾燥対象として検討するにあたり主な回収物として以下のものを抽出した。

表 検討対象とする主な回収物

発生源	名称	概要	イメージ	特徴
取り出しプロセス	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		<ul style="list-style-type: none"> ・取り出しプロセスから回収されるデブリが乾燥の主たる対象物。 ・性状把握PJの検討では、酸化物デブリは多孔質体と推定されている。
	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		
	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		
	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		
水処理系統	スラリ	粉状、細かい粒子状デブリ		<ul style="list-style-type: none"> ・細かい粒子状のデブリが乾燥の対象になる可能性がある。 ・ただし、詳細な性状は不明である。(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。)
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		

6. 実施内容

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(3/8)

イ. 性能要求の整理(3/3)

燃料デブリの性状把握PJにおいて、2016年度までに「燃料デブリの含水・乾燥特性評価」を実施し、以下の結果が採取されている。

- ✓ 多孔質体の場合は、微小な細孔の影響が大きい時に、乾燥プロセス終盤の乾燥速度が遅くなる。
- ✓ 粉粒体の場合、細かい粒子が含水すると粘土状になり、乾燥速度が低下する。

上記より、細孔を有した多孔質体や含水した細かい粒子(スラリ)といった性状は、乾燥挙動に影響することが想定される。

以上より、取り出しプロセスごとに対象と特徴を整理した結果(前頁)を踏まえて、乾燥対象物を以下の方針として開発を進める。

- ✓ 細孔を有した多孔質体を主対象とする。(多孔質体の代表 ⇒ 試験体をゼオライト)
- ✓ 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、主対象である多孔質体で検討する乾燥技術の適用可否を要素試験等により検討する。

6. 実施内容

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(4/8)

ロ. 安全要求の整理

本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。

表 安全機能に対する乾燥装置への要求機能

安全機能		設計目標	安全機能分担		要求機能	
			収納缶	他機器	乾燥機	備考
未臨界		未臨界の維持	○	○	○	
冷やす	除熱	収納缶、燃料デブリ他の物性への影響防止	—	○	○ (追加)	乾燥処理で加熱 (異常加熱防止)
閉じ込める	閉じ込め	作業員や公衆の被ばく防止	○	○	○	汚染拡大防止
	遮蔽	作業員や公衆の被ばく防止	—	○	—	セル内設置
その他	構造	安全機能を維持するための構造強度	○	○	○	
	材料健全性	構造強度他の維持	○	○	○	
(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	○ (触媒)	○	○ (乾燥)	
	火災防止	残留ジルコニウムによる火災防止	—	○	—	



6. 実施内容

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(5/8)

ハ. 既存の乾燥技術の調査・分析(1/2)

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。

表 一般産業の乾燥装置の調査・分析

乾燥手法	安全要求に対する対応の難易度				備考
	未臨界維持	閉じ込め性	汚染拡大防止	異常加熱防止	
温風(キャリアガス)	○	○	○	○	
熱伝導媒体	○	○	△	○	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	○	○	○	○	
マイクロ波	○	△(セル大型化)	×(導波管密閉)	○	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)	○	○	○	○	
過熱蒸気	(水分を持ち込むことになるため対象外)				
減圧	○	○	○	○	
攪拌	×(UC取出し)	○	×(汚染領域拡大)	○	UCから取り出して、攪拌/浮遊流動させることで、粉末が舞い上がる。
浮遊流動	×(UC取出し)	△(セル大型化)	×(汚染領域拡大)	○	

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。
- 攪拌・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

6. 実施内容

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(6/8)

ハ. 既存の乾燥技術の調査・分析(2/2)

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。

表 TMI-2燃料デブリの乾燥技術の本開発への適用性検討

項目	調査・検討対象	TMI-2燃料デブリでの実績	本開発への適用性
設計	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 ³ /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 ³ /ℓ以下)と厳しい。
	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る、加熱・減圧・風速などをサーベイし決定。
安全対策	未臨界	乾燥炉の評価条件は情報なし	検討要
	冷却	設計の考え方の情報はなし	検討要
	乾燥装置(系統)の汚染対策	収納缶へ金属フィルタ設置	収納缶に金属フィルタ設置が装置汚染抑制効果的との教訓は有効な情報である。

- 【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。

6. 実施内容

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(7/8)

ニ. 装置の概念検討(1/2)

- ◆ 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
- ◆ 乾燥促進要素は蒸発促進、物質移動促進、面積向上
⇒ 組み合わせて最大限活用
- ◆ 蒸発促進; 沸点に効率良く到達するため、直接加熱方式(温風)、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
- ◆ 基本的にチャンバー又は収納缶で閉じ込め性を確保(後段の負荷を低減)
- ◆ 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

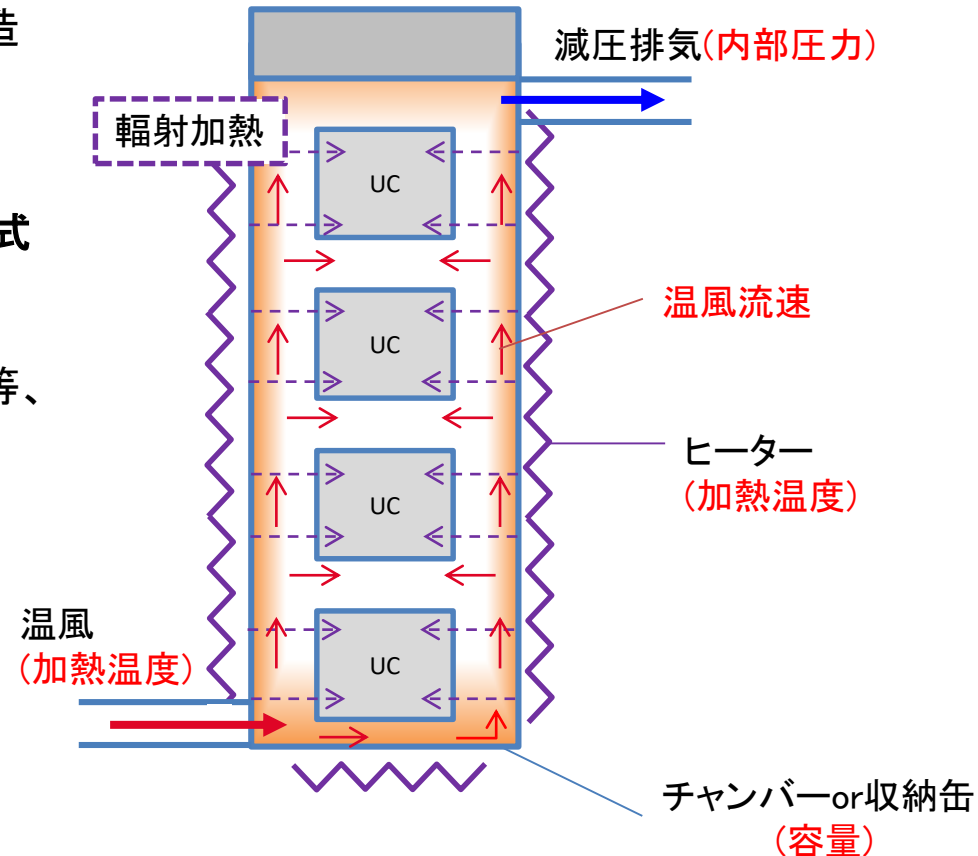


図 乾燥装置の基本概念

6. 実施内容

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(8/8)

二.装置の概念検討(2/2)

装置の基本仕様は安全要求より次のとおり設定する。

(1)加熱温度

熱源の機器容量はチャンバー又は収納缶が200°Cまで昇温できるよう選定する。

✓ 1F向け収納缶のシール材の耐熱温度⇒200°C程度

✓ 放射性核種の挙動⇒200°C超で放出

(2)保守への配慮

セル内・チャンバー内に設置する部品は保守対象点数を最少化

(3)形状

未臨界維持のため、デブリを充填する処理装置の最大内径はφ220mmとする。

(4)流速

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。

6. 実施内容

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(2019、2020年度の検討)(1/2)

イ. 要素試験

- 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%
- 今後は、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°Cで10時間保持 (その後300°Cで1時間保持して完全乾燥)
圧力	大気圧
使用ガス	Dry-N ₂ 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(HiSiv TM -3000 1.6)
試料量	約16mg

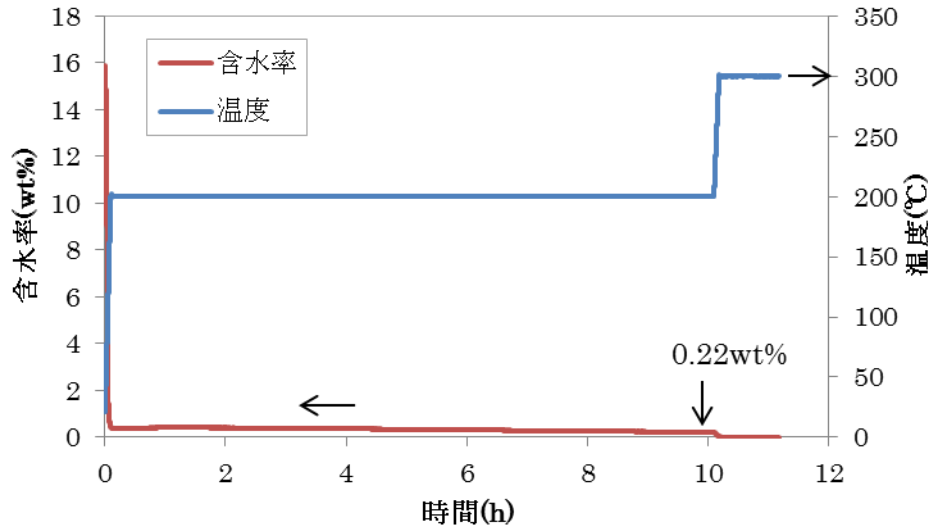


図 試験結果(含水率変化)

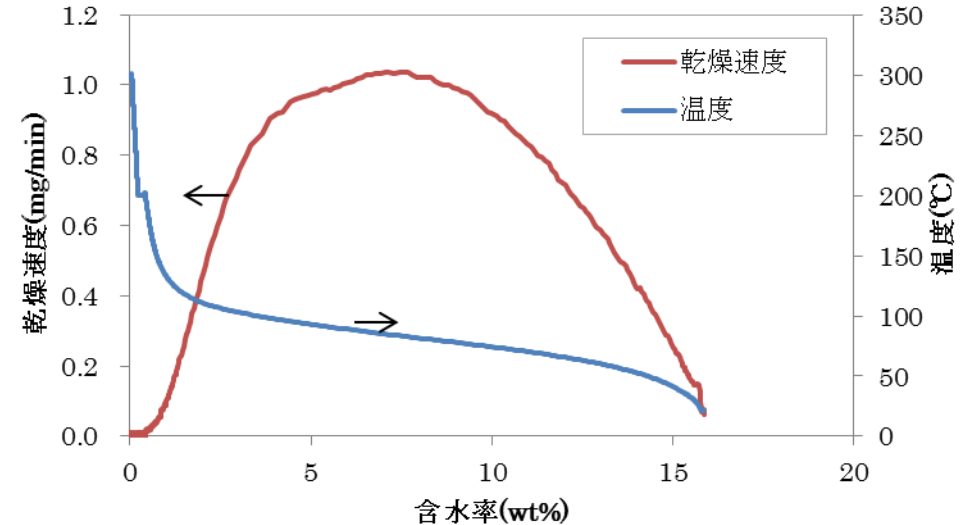


図 試験結果(乾燥特性曲線)

6. 実施内容

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(2019、2020年度の検討)(2/2)

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。今後、試験計画を具体化。

表 実規模乾燥試験項目

試験項目	目的
遠隔運転・操作性試験	<p>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、遠隔操作によるワンスルー運転・保守作業が可能であることを確認する。</p> <p>〈確認事項〉</p> <ul style="list-style-type: none"> ① 乾燥装置チャンバー内の異物除去の可否 ② 乾燥装置内ふき取り除染の可否 ③ 乾燥装置のシール交換(検討中)
実規模乾燥試験	<p>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。</p> <p>〈確認事項〉</p> <ul style="list-style-type: none"> 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

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。

6. 実施内容

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(2019-2020年度の検討)

イ. 保守計画/装置系統/機器構成の検討

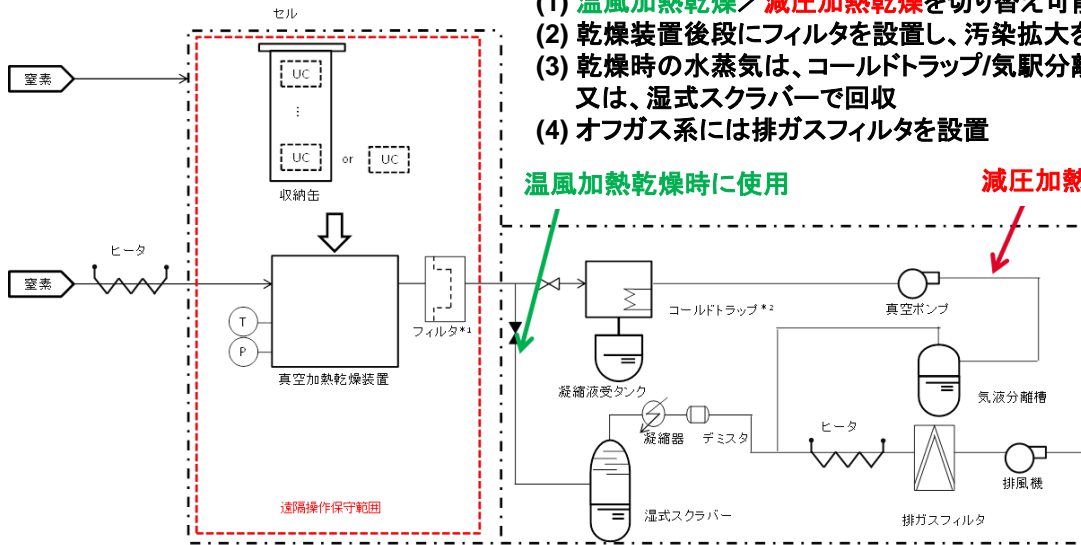
乾燥設備に対して系統設計を実施し、システム概念(案)を検討。また、遠隔保守方針についても検討。

【系統設計の考え方】

- (1) 温風加熱乾燥／減圧加熱乾燥を切り替え可能
- (2) 乾燥装置後段にフィルタを設置し、汚染拡大を最小化
- (3) 乾燥時の水蒸気は、コールドトラップ/気駅分離槽、又は、湿式スクラバーで回収
- (4) オフガス系には排ガスフィルタを設置

温風加熱乾燥時に使用

減圧加熱乾燥時に使用



*1: 収納缶又は、乾燥装置に設置する可能性
*2: 真空ポンプ型式によって、要否を判断

図 乾燥装置 系統図概念例(例;減圧加熱乾燥運転時)

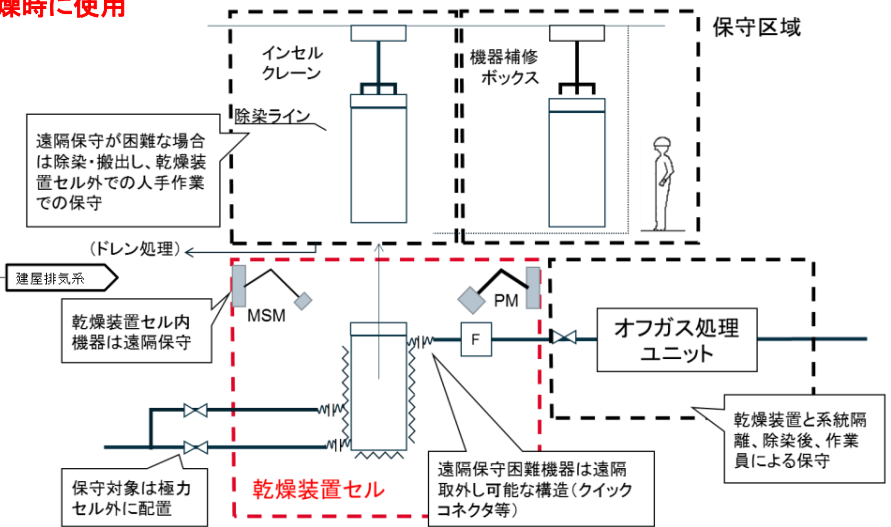


図 乾燥システム概念

ロ. 装置の基本仕様の検討

試験結果を反映し、乾燥装置の基本仕様(案)、付帯設備の構成(案)を提示する。

6. 実施内容

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 課題

現計画の遂行上、課題はなし。

⑦ 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中であり、計画に従って所定の成果が得られる見込みである。

まとめ

2019年度は、乾燥技術／システムの開発として、乾燥装置の機能要求、既存技術調査、乾燥装置の概念設計に必要な要素試験の計画検討を行い、試験に向けた検討を実施した。

2020年度は、乾燥装置概念に基づく実規模大試験装置乾燥試験を計画し、乾燥挙動データを取得するとともに、汚染区域での保守、取り扱い等を検討し、1F燃料デブリの乾燥装置の基本仕様案を提案する。

6. 実施内容

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

⑧ 今後の予定

表 乾燥装置の基本仕様の検討スケジュール

項目	2019年度		2020年度		備考
	上期	下期	上期	下期	
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					
a.基本条件の検討	基本条件の検討				
b.乾燥挙動データの採取		装置手配/データ取得			
c.乾燥システムの基本計画		保守計画/装置系統/機器構成の検討			
			装置の基本仕様の検討		

■ :計画 ■ :実績

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.%)未滿を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. 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(2019年度)(1/12)

- ✓「常時監視」／「逐次監視」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。

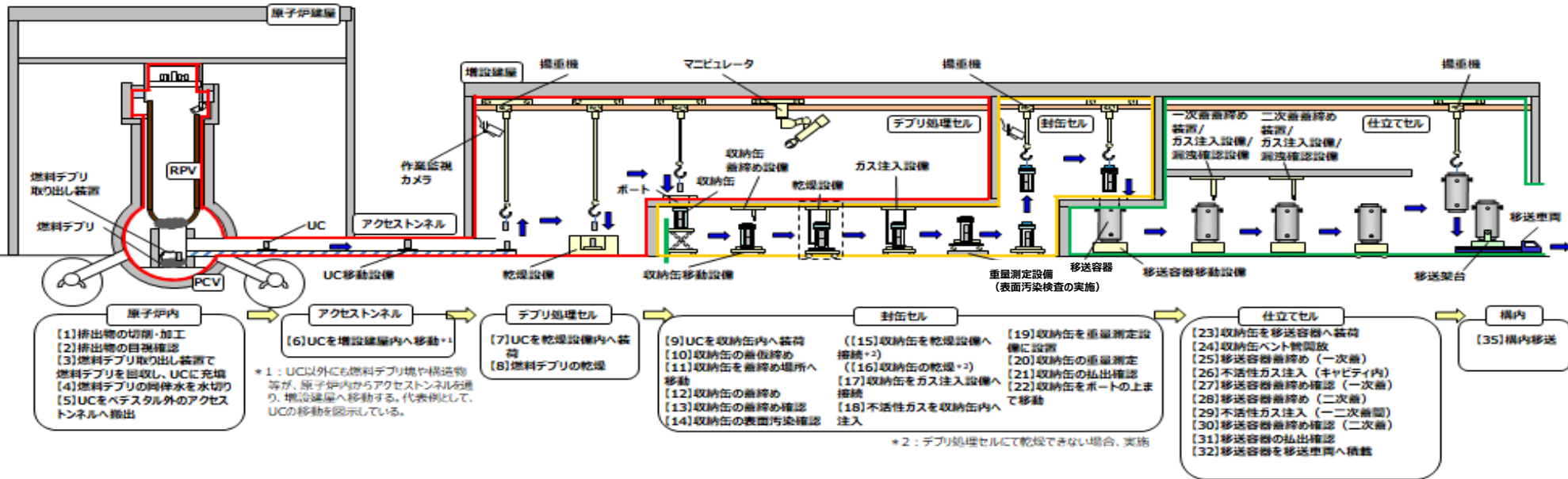


図 燃料デブリ取り出しプロセスフローを横出し工法のハンドリングフローへ展開した一例

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(2019年度)(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適用可能。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。

表 各容器の形状および発生数

対象容器	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	最多	×	×
収納缶	密閉 (フィルタ付ベン ト管あり)	多	×	×
移送容器	密封	少	○	○

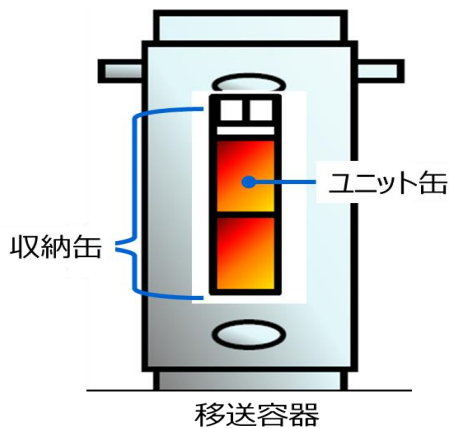


図 移送容器払い出し時のイメージ

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(2019年度)(3/12)

□. 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

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、
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を候補に抽出。

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(2019年度)(4/12)

□. 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	判定期由
【8】	燃料デブリの乾燥	ユニット缶 /乾燥チャンバー	○	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	○	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	○	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)	○	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

6. 実施内容

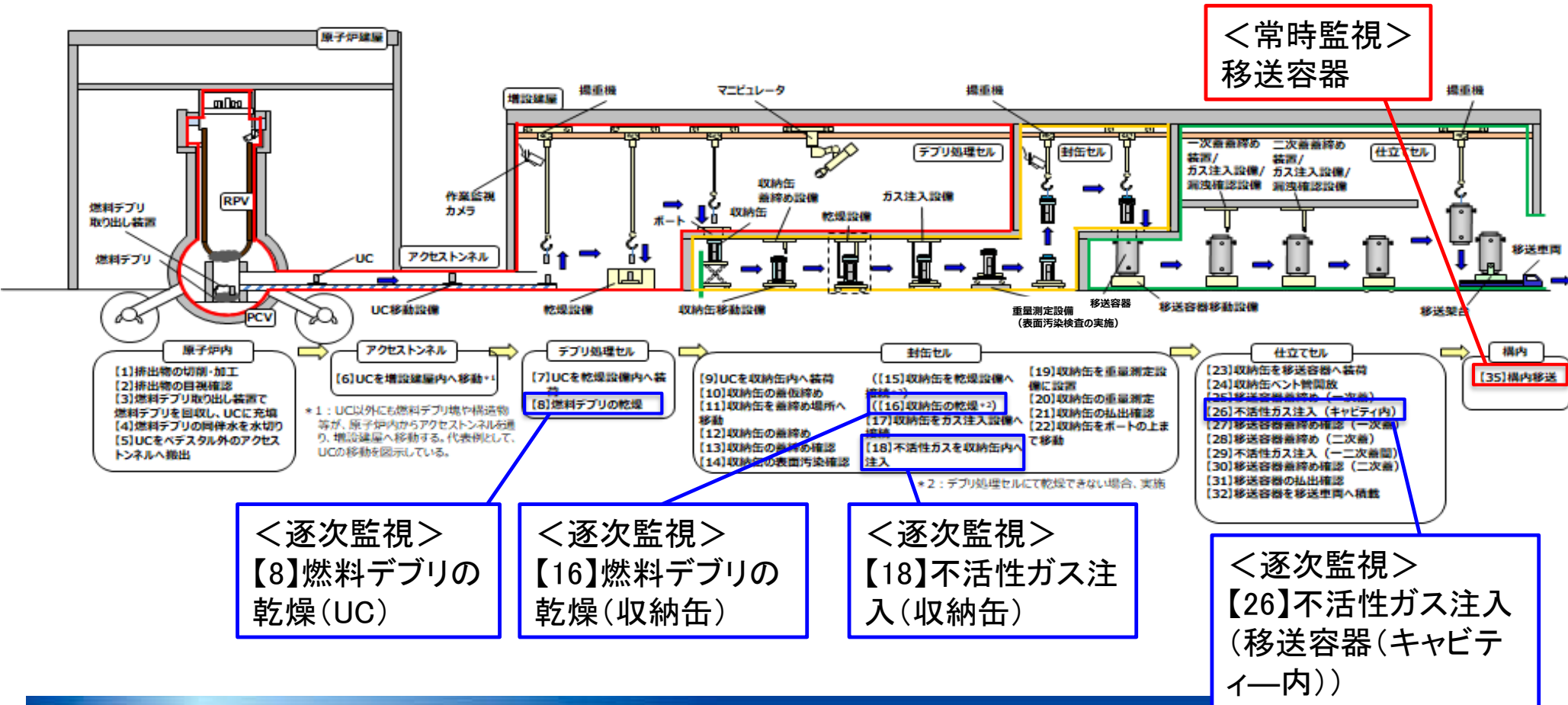
6.4 乾燥技術／システムの開発

(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(2019年度)(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)



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(2019年度)(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。

表 時間あたりの水素発生量の評価結果^{注1}

ケース	収納缶内径 (mm)	デブリ中UO ₂ 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 ³ /h/収納缶)
Ⅰ	220	26	TMI評価式	全吸収	2.15×10^{-4}
Ⅱ	220	26	TMI評価式	輸送計算	3.83×10^{-5}
Ⅲ	220	26	TMI評価式	試験結果	1.50×10^{-6}
Ⅳ	220	26	放射線分解モデル	全吸収	1.09×10^{-4}
Ⅴ	220	26	放射線分解モデル	輸送計算	1.30×10^{-5}
Ⅵ	220	26	放射線分解モデル	試験結果	7.36×10^{-7}

注1: 収納缶PJ 平成30年度検討結果から引用。「水素発生予測法の検討」の進捗・成果に基づき、2020年度に水素発生量を見直す予定

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(2019年度)(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.%未滿となる許容水素発生速度を評価。

表 許容水素発生速度評価結果^{注5}

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

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 $v_a = \text{作業対象容器の体積 } V_g \times \text{爆発下限界濃度 } 4\text{vol.\%} / \text{保管時間 } 168\text{h}$

注5: 「乾燥装置の基本仕様の検討」の進捗・成果に基づき、2020年度に乾燥チャンバー気相部体積等を見直す予定

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

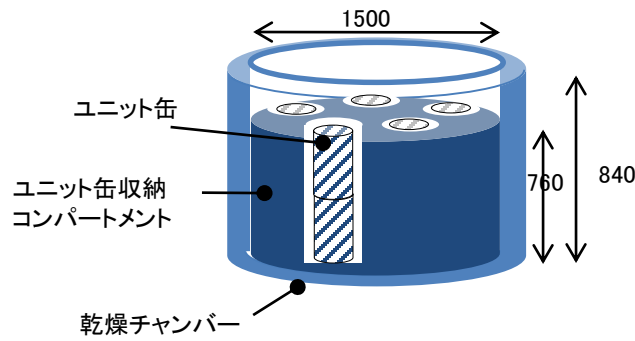
③実施事項、成果(予実)

a.要求技術仕様、適用性判断基準の検討(2019年度)(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)

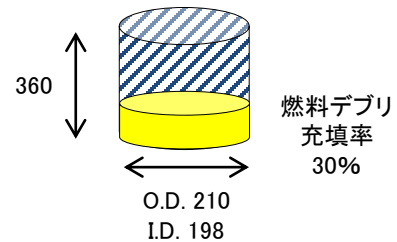
乾燥チャンバー、収納缶および移送容器キャビティーの想定体積を以下に示す。

形状・寸法は、「乾燥装置の基本仕様の検討」等の進捗・成果に基づき、2020年度に見直す予定



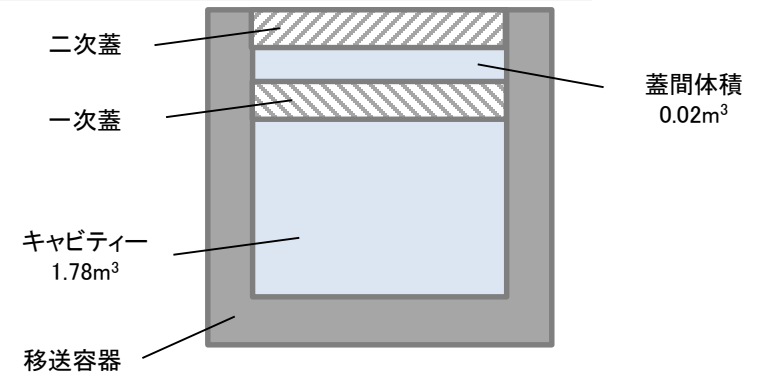
全体積	1480L
気相体積	356L

(a) ユニット缶乾燥チャンバー



筐体体積	11.1L
燃料デブリ体積	3.33L
気相体積	7.77L

(b) ユニット缶



容器体積	1.80m³
キャビティー体積	1.78 m³
蓋間体積	0.02m³

(c) 移送容器

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1.80m³、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。

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(2019年度)(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

- ✓ 温風加熱：水素濃度は1ppm未満となり、既存のものでは対応困難。
- ✓ 減圧加熱：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

- ✓ 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、汎用品が利用可能。

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(2019年度)(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)

表 水素濃度評価結果^{注6}

工程 No.	工程	作業対象	ガス置換速度 (m ³ /h) @0°C 100kPa	単位時間当たりの水素発生量(m ³ /h)			水素濃度 (ppm) ^{注5}			判定
				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	
【8】	燃料デブリの乾燥 (減圧加熱)	乾燥チャンバー	2.95E+00 ^{注1}	1.07E-03	3.68E-06	8.48E-05	3.6E+02	1.2E+00	2.9E+01	△
【16】	燃料デブリの乾燥 (減圧加熱)	収納缶	5.90E-01 ^{注2}	2.15E-04	7.36E-07	4.76E-06	3.6E+02	1.2E+00	8.1E+00	△
【8】	燃料デブリの乾燥 (温風加熱)	乾燥チャンバー	1.22E+03 ^{注3}	1.07E-03	3.68E-06	8.48E-05	8.8E-01	3.0E-03	7.0E-02	×
【16】	燃料デブリの乾燥 (温風加熱)	収納缶	2.43E+02 ^{注2,3}	2.15E-04	7.36E-07	4.76E-06	8.8E-01	3.0E-03	2.0E-02	×
【18】	不活性ガス注入	収納缶	1.98E-02 ^{注4}	2.15E-04	7.36E-07	4.76E-06	1.1E+04	3.7E+01	2.4E+02	○
【26】	不活性ガス注入 (キャピティ内)	移送容器	1.76E+00 ^{注4}	2.58E-03	8.84E-06	4.24E-04	1.5E+03	5.0E+00	2.4E+02	○

注1: 収納缶PJ 平成30年度検討結果を引用し、0°C 100kPaに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、温風加熱でも減圧加熱と同仕様の真空ポンプが使用されるものと仮定して、0°C 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(m³/h) / ガス置換速度(m³/h) × 10⁶

注6: 「水素発生予測法の検討」、「乾燥装置の基本仕様の検討」の進捗・成果に基づき、2020年度にガス置換速度等を見直す予定

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(2019年度)(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。

表 不活性ガス注入工程の評価結果

作業工程	想定される雰囲気条件		適用性判断基準
【18】不活性ガス注入 (収納缶)	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
	雰囲気	室温 ^{注2} 、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
【26】不活性ガス注入 (移送容器キャビティ内)	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
	雰囲気	室温 ^{注2} 、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

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

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(2019年度)(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。乾燥処理(減圧加熱)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の有無を調査する。

表 乾燥工程(減圧加熱)の評価結果

作業工程	想定される雰囲気条件		適用性判断基準
【8】燃料デブリの乾燥 (減圧加熱 乾燥チャンバー)	測定対象	ポンプ排気ガス	流れ場での測定が可能
	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	当該雰囲気中で28ppmを検知 露点近傍での測定が可能
【16】燃料デブリの乾燥 (減圧加熱 収納缶)	測定対象	ポンプ排気ガス	流れ場での測定が可能
	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	当該雰囲気中で8.1ppmを検知 露点近傍での測定が可能

注1:10～40℃を想定

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(2019年度)(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対象(容器、作業工程)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。

表 水素濃度測定箇所(工程)の分類と想定環境

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
A	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
B	逐次監視	乾燥工程(減圧加熱) 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
C	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

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

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(2019年度)(2/4)

表 水素濃度測定技術の調査結果(概要)(1/2)

センサ原理	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
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
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
	B 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
	C 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
総合評価	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
	A ○	×	×	×	×
	B ×	×	×	×	×
	C △(事前のガス分離)	×	×	×	×

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(2019年度)(3/4)

表 水素濃度測定技術の調査結果(概要)(2/2)

センサ原理		6. 光波干渉式	7. 非分散型赤外線式	8. 差分吸収分光法式 (DOAS)	9. ガスクロマトグラフィー式	10. プロトン伝導体 (プロトン伝導性固体電解質)
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%
設置方法	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	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
	C	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
総合評価		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
	A	×	×	△	△ (要 吸引ポンプ)	△ (要 破損対策)
	B	×	×	△	△ (要 増感器)	△ (要 測定濃度)
	C	△	△	△	○	○

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(2019年度)(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。

A 常時監視：熱伝導式

B 乾燥工程(減圧加熱)での逐次監視：ガスクロマトグラフィー式、又は、プロトン伝導体

C 不活性ガス注入工程での逐次監視：ガスクロマトグラフィー式、又は、プロトン伝導体

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)

c.関連する技術開発の進捗・成果のフィードバック(2020年度【予定】)

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、2020年度に2019年度の研究開発成果へフィードバックする予定。

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があるが、適用可能と考える。

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

⑥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、それぞれ以下がある。

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。

B 乾燥工程(減圧加熱)での逐次監視

✓ガスクロマトグラフィの場合、ガスサンプリングが必要。

⇒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 不活性ガス注入工程での逐次監視

✓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. 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

⑦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。

まとめ

2019年度に水素濃度測定の要求技術仕様及び適用性判断基準を検討・設定した。また、その結果に基づき技術調査を実施し、常時監視、逐次監視の対象(容器、作業工程)及び適用可能な水素濃度測定技術の候補を以下の様に選定した。

【常時監視】

対象容器：移送容器

候補技術：熱伝導式

【逐次監視】

対象作業工程：不活性ガス注入工程(第1候補)、乾燥工程(減圧加熱)(第2候補)

候補技術：ガスクロマトグラフィー式、又は、プロトン伝導体

2020年度は、水素発生量の推定や乾燥装置の検討の進捗・成果に基づき、適宜、要求技術仕様等の見直し、必要に応じて候補技術の再選定を行う。

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

⑧今後の予定

表 水素濃度測定技術の検討スケジュール

項目	2019年度		2020年度		備考
	上期	下期	上期	下期	
水素濃度測定技術の検討					
a.要求技術仕様、適用性判断基準の検討					
b.水素濃度測定技術の調査					
c.関連する技術開発の進捗・成果のフィードバック					必要に応じて実施

:計画

:実績

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おこなう。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。

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)

取り出し規模の更なる拡大PJからの要請に基づいて燃料デブリ保管の観点からの仕分け要求を提示した。要求内容は取り出し規模の更なる拡大PJにて関連事業からの仕分け要求の調査結果として取りまとめられた。

b.評価まとめ(2019年度末、2020年度末に実施)

収納技術の開発として収納缶仕様および構造の検討、移送技術の開発として水素発生量予測法の検討および水素対策の検討、乾燥技術／システムの開発として乾燥装置の基本仕様の検討および水素濃度測定技術の検討を行った。今後、研究開発を進めるうえで新たな知見等を反映し、2020年度も継続して検討を行うこととした。

6. 実施内容

6.5 評価まとめ

③成果の反映先への寄与

実施結果は本補助事業の検討項目に反映する。

④現場への適用性の観点に対する分析

取り出し規模の更なる拡大PJが行う仕分けする技術の調査は、臨界管理等の観点から放射性廃棄物に比べて取り扱いが困難となる燃料デブリの量を低減するものであり、収納缶PJの参画・協力は有益である。

評価のまとめは、本補助事業の成果を明確にするものであり有益である。

⑤課題

現計画を遂行する上での課題はない。

⑥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ていること、また、各年度末に個々の実施項目の評価まとめをすることで所定の成果を得る見込み。

6. 実施内容

6.5 評価まとめ

⑦今後の予定

表 評価まとめの検討スケジュール

項目	2019年度		2020年度		備考
	上期	下期	上期	下期	
評価まとめ					
a.仕分けする技術の調査	関連PJとの合同会議				仕分けに対して移送や保管の効率の観点からクライテリア及び利点をデブリ取り出し規模の更なる拡大PJへ提示した
b.評価まとめ		評価まとめ		評価まとめ	

■ :計画 ■ :実績

7. 全体まとめ

<2019年度の成果>

- 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、収納缶の構造検証試験で実施する試験項目の計画立案、及び収納缶(試験体)の設計を実施した。また、収納缶(試験体)の試作に向けて材料手配等を実施した。
- 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おこないながら、移送条件案設定に必要な検討項目・実施内容について検討した。また、触媒による水素対策として収納缶内の流動を検討した。また、触媒性能取得は手法の検討を実施中である。
- 乾燥技術／システムの開発として、乾燥装置の機能要求、既存技術調査、乾燥装置の概念設計に必要な要素試験の計画検討を行い、試験に向けた検討を実施中。また、水素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の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についてデブリ取り出し規模の更なる拡大PJへ提示した。
- 本補助事業を進めるうえで有効な知見等を反映し、2020年度も継続して検討を進めることとする。

7. 全体まとめ

<2020年度の予定>

- 構造検証試験に用いる実機大の収納缶(試験体)を試作し、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おこなう。また、構造検証試験の結果と構造解析の比較・評価をおこない、解析手法の適用性を確認する。
- 水素発生予測法の検討を進め、必要により水素発生試験を実施し、それらの結果にもとづき、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する。また、触媒性能データを採取し収納缶内の流動評価に基づいて触媒の配置を検討する。
- 乾燥装置概念に基づく実規模大試験装置乾燥試験を計画し、乾燥挙動データの取得するとともに、汚染区域での保守、取り扱い等を検討し、1F燃料デブリの乾燥装置の基本仕様案を提案する。
また、水素濃度測定技術については、水素発生量の推定や乾燥装置の検討の進捗・成果に基づき、適宜、要求技術仕様等の見直し、必要に応じて候補技術の再選定を行う。
- 燃料デブリと放射性廃棄物へ仕分けに関してデブリ取り出し規模の更なる拡大PJより新たな要求等の要請があれば対応していくこととする。

【補足-1】収納缶開発の基本条件(1/4)

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、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、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。

【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、低合金鋼、Ni基合金、コンクリート、 B_4C)
- 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。
- 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。
- 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。
- 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。
- 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、非溶解性中性子遮蔽材は具体化した段階で検討するものとした。

【補足-1】収納缶開発の基本条件(2/4)

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。

【燃料デブリの収納方法】

- 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。
- 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 $\Phi 0.1\text{mm}$ まで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。
- 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
- 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。

【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。
- 移送容器への水張り要否: 移送容器に対する制約条件は、技術検討に基づいて本PJで仮定

有識者等との議論を踏まえて以下の条件を仮定した。

【燃料デブリの保管】

・ 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。

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。

・ 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。

・ 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。

【補足-1】収納缶開発の基本条件(4/4)

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	設計目標	安全機能分担		考え方
		収納缶	他機器	
未臨界	未臨界の維持	○	○	<ul style="list-style-type: none"> ・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) ・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。
冷やす	除熱 収納缶、燃料デブリ他の物性への影響防止	—	○	<ul style="list-style-type: none"> ・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。 ・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。
閉じ込める	閉じ込め 作業員や公衆の被ばく防止	○	○	<ul style="list-style-type: none"> ・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	—	○	<ul style="list-style-type: none"> ・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で、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。
その他	構造 安全機能を維持するための構造強度	○	○	<ul style="list-style-type: none"> ・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。
	材料健全性 構造強度他の維持	○	○	<ul style="list-style-type: none"> ・他機器で収納缶への荷重条件や腐食条件を緩和する。
(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	○ (触媒)	○	<ul style="list-style-type: none"> ・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	—	○	<ul style="list-style-type: none"> ・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。

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	安全機能要求	収納缶要求事項	収納缶設計条件	
			蓋部	本体部
閉じ込め	放射性物質の閉じ込め	ベント機構を経由する場合を除き、収納缶内部からの放射性物質の漏えいを防止すること。	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。	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。	—
		ベ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。	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。	—
		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(デブリの定義: 粉デブリ(吸引などで回収):0.1mm未満、粒デブリ(吸引などで回収):0.1mm~10mm、塊デブリ(ユニット缶で回収):10mm超え)

表 安全要求に対する収納缶設計条件の設定(2/3)

安全機能	安全機能要求	収納缶要求事項	収納缶設計条件	
			蓋部	本体部
臨界防止	追加核分裂反応の防止	臨界を防止可能な形状とすること。	—	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。
			⑩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。	⑪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。	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。	
		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ても、収納缶内部温度が許容温度を超えないこと。	

注1: 燃料デブリ片(固体)の粒径は0.1mm以上と設定(デブリの定義: 粉デブリ(吸引などで回収):0.1mm未満、粒デブリ(吸引などで回収):0.1mm~10mm、塊デブリ(ユニット缶で回収):10mm超え)

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	安全機能要求	収納缶要求事項	収納缶設計条件	
			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)	⑭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)	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。	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。	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。
			⑰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。	
粉じん火災防止	デブリ取り出し切断時に発生する金属粉じんと酸素の反応による火災への対応(ハザードへの対応)	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。	⑰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。	

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	収納缶要求事項	収納缶設計条件		
		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接続できる構造とすること。		
		(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。		
		(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。		

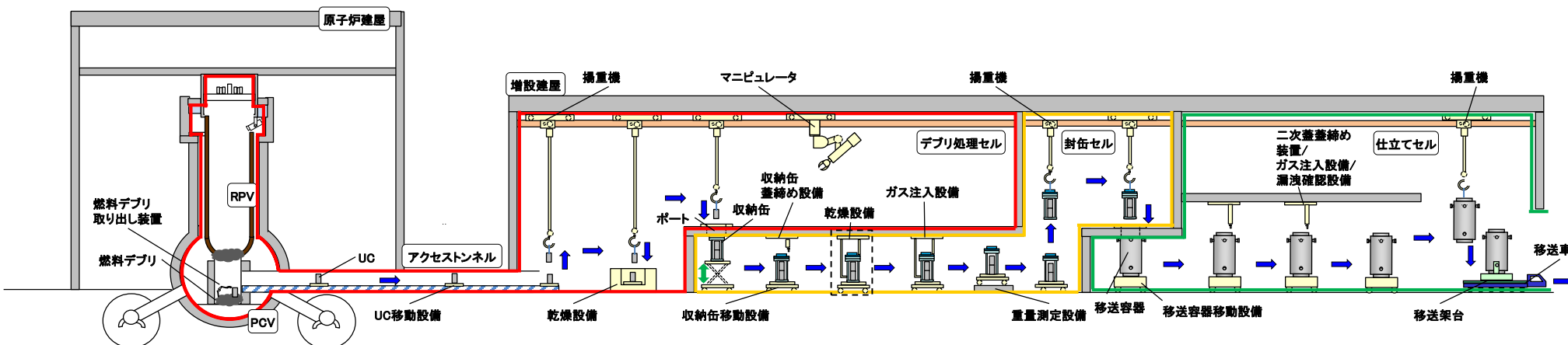


図 収納缶の取扱いフロー案(横アクセスの例)

表 収納缶の設計条件と仕様(案)(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	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。	簡易取付構造 ・インテグラル方式による蓋締め構造(廻り止め機構搭載) ・蓋外径□300mm(内径220mm収納缶)、□500mm(内径400mm収納缶) ボルト構造 ・ボルトによる蓋締め構造(ガイドピン搭載) ・蓋外径φ300mm(内径220mm収納缶)、φ500mm(内径400mm収納缶)
	臨界防止	⑩ 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。	【仕様選定の考え方】 ・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。 ・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。 ・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。
	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。 (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。 (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。	・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、蓋と容器の差し込み量を極力小さい構造として加工時間(加工量)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(デブリの定義: 粉デブリ(吸引などで回収):0.1mm未満、粒デブリ(吸引などで回収):0.1mm~10mm、塊デブリ(ユニット缶で回収):10mm超え)

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	閉じ込め	⑤ 汚染拡大防止の措置として、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 style="list-style-type: none"> ・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452mm²) <p>【仕様選定の考え方】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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、カプラの影響を考慮した水素の拡散評価式による放出評価から、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。
	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。	
	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。	
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 style="list-style-type: none"> ・ユニット缶状態で乾燥:送気機構なし ・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) <p>【仕様選定の考え方】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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。 ・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。 ・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。

注1:燃料デブリ片(固体)の粒径は0.1mm以上と設定(デブリの定義: 粉デブリ(吸引などで回収):0.1mm未満、粒デブリ(吸引などで回収):0.1mm~10mm、塊デブリ(ユニット缶で回収):10mm超え)

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)	
胴	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。	<ul style="list-style-type: none"> ・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) ・溶接構造：突合せ完全溶込み溶接 	
		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。		<p>【仕様選定の考え方】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・暫定的にクラス3容器相当とし、JISME「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。 ・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も、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。また、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(テーパ部)を設置した。ハブ部(テーパ部)の形状はJISME「設計・建設規格 PVD-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、どのような燃料デブリ粒径、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めに内径拡大を検討して仮設定した400mmの構造とした。 ・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。 ・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。 ・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、ユニット缶の上方に空間を持たせて840mm(内径220mm収納缶)と845mm(内径400mm収納缶)と設定した。
	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。	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。	
		⑪ 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。		
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。			

注1:燃料デブリ片(固体)の粒径は0.1mm以上と設定(デブリの定義：粉デブリ(吸引などで回収):0.1mm未満、粒デブリ(吸引などで回収):0.1mm~10mm、塊デブリ(ユニット缶で回収):10mm超え)

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。	<ul style="list-style-type: none"> ・除熱構造(冷却フィン等)なし <p>【仕様選定の考え方】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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施した結果、最高燃焼度の塊状燃料デブリを充填率50%で配置した場合において、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。 ・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、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。
		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。	
遮蔽構造	遮蔽	⑭ 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 style="list-style-type: none"> ・遮蔽構造なし <p>【仕様選定の考え方】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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。
不活性雰囲気	粉じん火災防止	⑰ 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 style="list-style-type: none"> ・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 <p>【仕様選定の考え方】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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。

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。	<ul style="list-style-type: none"> ・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） <p>【仕様選定の考え方】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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。
セル間ポートと収納缶のシール方式	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。	<ul style="list-style-type: none"> ・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 <p>【仕様選定の考え方】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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。

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 style="list-style-type: none"> ・メッシュ径:0.3μm(HEPA相当) ・タイプ:金網タイプ ・材質:SUS316 <p>【仕様選定の考え方】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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。 <ul style="list-style-type: none"> (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。 (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。 (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。 ・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(HEPA相当))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、フィルタのメッシュ径は0.3μmを選定した。 ・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候補としたが、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。 ・フィルタの材質は収納缶と同等材であるSUS316とした。 ・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。

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	<p>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。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・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) <p>【仕様選定の考え方】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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。 ・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UO₂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。 ・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。 ・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。 <ul style="list-style-type: none"> (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、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)やボルトの締め付け作業管理により慎重な配慮が必要であること。

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	<p>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。</p> <p>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。</p>	<p>簡易取付構造</p> <ul style="list-style-type: none"> ・外側円筒面: エラストマー系(EPDM)のOリング ・上端平面(Oリングは蓋に設置): エラストマー系(EPDM)のOリング <p>【仕様選定の考え方】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・蓋構造より、閉じ込め境界としてのO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Oリング設置では蓋の構造上、Oリングつぶし代の管理が難しいため、外側円筒面でのOリング設置による閉じ込め境界とした。 ・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O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。 ・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、Oリングの交換ができるように上端平面のOリングは蓋側に設置した。 <p>ボルト構造</p> <ul style="list-style-type: none"> ・上端平面(Oリングは蓋に設置): エラストマー系(EPDM)のOリング <p>【仕様選定の考え方】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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Oリングとした。 ・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、Oリングの交換ができるように上端平面のOリングは蓋側に設置した。
	臨界防止	<p>⑩ 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。</p>	<p>ボルト構造</p> <ul style="list-style-type: none"> ・上端平面(Oリングは蓋に設置): エラストマー系(EPDM)のOリング <p>【仕様選定の考え方】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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Oリングとした。 ・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、Oリングの交換ができるように上端平面のOリングは蓋側に設置した。

注1: 燃料デブリ片(固体)の粒径は0.1mm以上と設定(デブリの定義: 粉デブリ(吸引などで回収): 0.1mm未満、粒デブリ(吸引などで回収): 0.1mm~10mm、塊デブリ(ユニット缶で回収): 10mm超え)

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 style="list-style-type: none"> ・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蓋が開かなくなる事象、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(ドーナツ型)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(内面に凹凸形状を設けない等)や、取扱い時の汚染防止対策(開口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構造とした。
		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。	
	臨界防止	⑩ 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。	
		⑪ 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。	
	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。	
		(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(デブリの定義: 粉デブリ(吸引などで回収):0.1mm未満、粒デブリ(吸引などで回収):0.1mm~10mm、塊デブリ(ユニット缶で回収):10mm超え)

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 style="list-style-type: none"> ・内部蓋底面に触媒ケース(円盤状, 厚さ20mm)を設置 <p>【仕様選定の考え方】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・水素発生抑制対策として、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。
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 style="list-style-type: none"> ・SUS316L <p>【仕様選定の考え方】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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。 ・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ま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。

【補足-5】水素濃度測定技術の調査結果(詳細)(1/2)

センサ原理	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(In2O3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。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、ブリッジ回路で測定	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	
評価	A	○	△(要劣化確認,高濃度水素NG)	○	△(要劣化確認,高濃度水素NG)	
	B	×	○	○	○	
	C	△(事前のガス分離)	○	○	○	
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	
評価	A	○	○	○	○	
	B	○	○	○	○	
	C	○	○	○	○	
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	
	B	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	
	C	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		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
	A	○	×	×	×	×
	B	×	×	×	×	×
	C	△(事前のガス分離)	×	×	×	×



A: 移送容器での常時監視

【補足-5】水素濃度測定技術の調査結果(詳細)(2/2)

センサ原理	6. 光波干渉式	7. 非分散型赤外線式	8. 差分吸収分光法 (DOAS)	9. ガスクロマトグラフィ式	10. プロトン伝導体 (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%
評価	A ○	○	○	○	○
	B ×	△ (事前のガス分離)	△ (要 光路長の調整)	△ (要 増感器)	△ (要 確認)
	C △	○	○	○	○
干渉ガス	O2(0.16vol.%), CO2(-0.96vol.%), Cl2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 (H2O, CO2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 (燃烧)
評価	A ○	○	○	○	○
	B ○	△ (事前のガス分離)	△ (事前のガス分離)	○	○
	C ○	△ (事前のガス分離)	△ (事前のガス分離)	○	○
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
設置方法	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 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
	C 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
総合評価	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
	A ×	×	△	△ (要 吸引ポンプ)	△ (要 破損対策)
	B ×	×	△	△ (要 増感器)	△ (要 測定濃度)
	C △	△	△	○	○

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-6】水素濃度測定技術の原理の説明(熱伝導式)

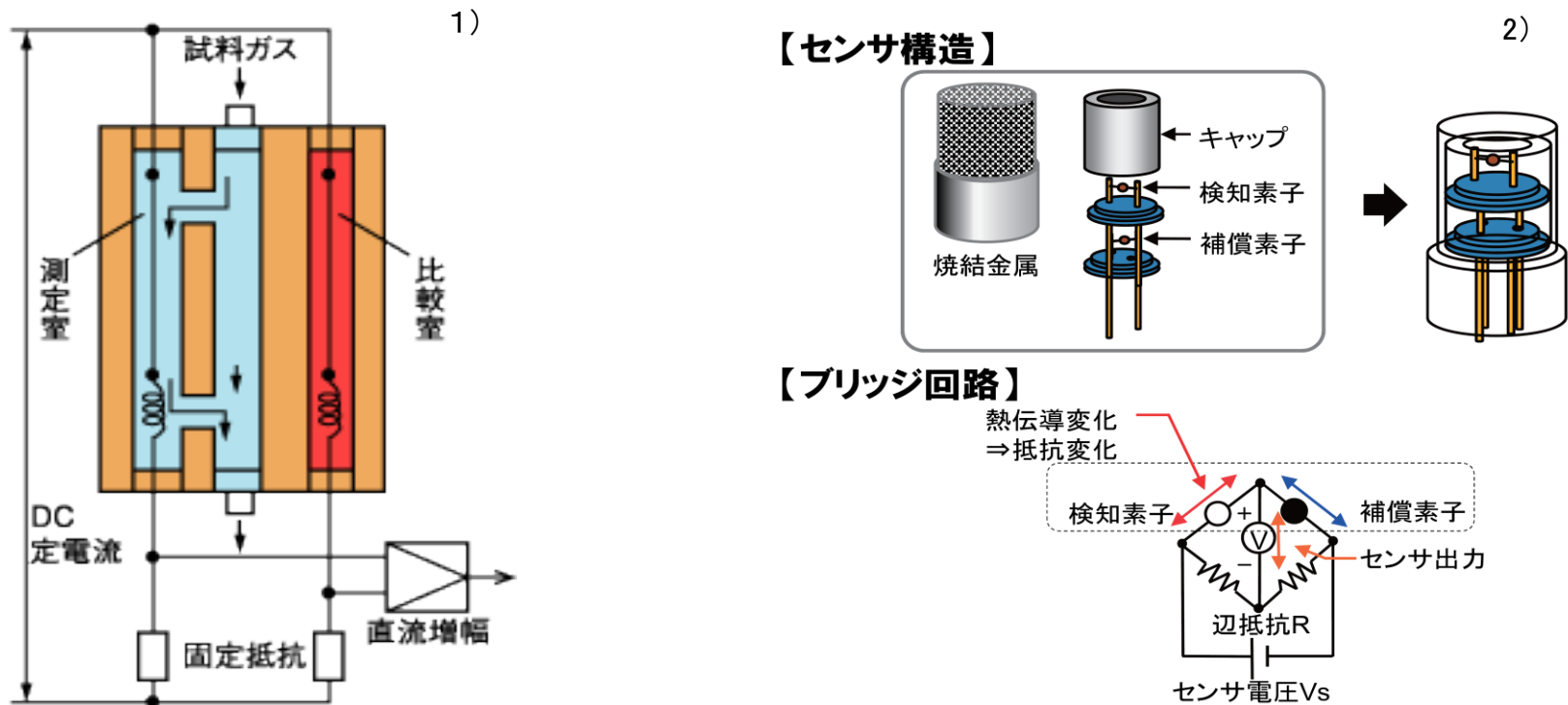


図 熱伝導式分析装置の原理図

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-7】水素濃度測定技術の原理の説明(プロトン伝導体)

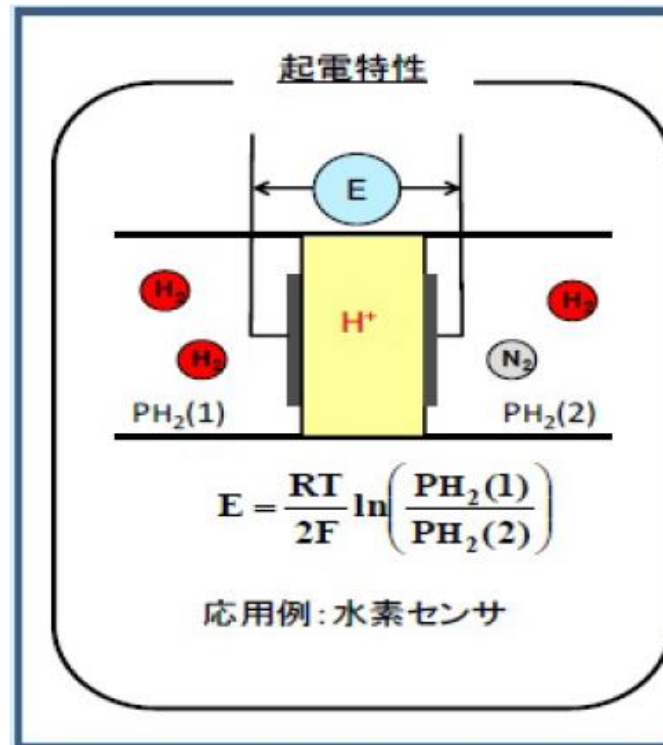


図 プロトン伝導型水素センサの原理図

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>