

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

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. 研究の目標
 3. 実施項目とその関連、他研究開発との関連
 4. 実施スケジュール
 5. 実施体制図
 6. 実施内容
 - 6.1. 輸送・貯蔵に係る調査及び研究計画立案
 - 6.2. 燃料デブリ収納缶の移送・保管に係る安全要件・仕様及び保管システムの検討
 - 6.3. 安全評価手法の開発及び安全性検証
 - 6.4. 燃料デブリの収納形式の検討
 7. 全体まとめ
-
- 【補足-1】燃料デブリ収納缶の取扱フロー案(原子炉の横側からアクセスする方法)
 - 【補足-2】プロセスフロー(更新結果)
 - 【補足-3】湿式・乾式保管の技術要件
 - 【補足-4】乾式保管を想定した臨界評価
 - 【補足-5】検討の前提条件

1.1.背景

- 福島第一原子力発電所(1F)の廃止措置に向けて取り出される燃料デブリを安全かつ合理的に収納・移送・保管する技術が求められている。
- 燃料デブリには核燃料物質が含まれているため、特に放射性物質の閉じ込め(汚染拡大防止)、未臨界等に配慮した取扱いを行う必要がある。
- 米国スリーマイルアイランド原子力発電所2号機(TMI-2)の廃止措置では回収した燃料デブリを専用の容器(収納缶)に収納して収納缶単位で取扱うことで、既存の使用済燃料の移送・保管技術や放射性廃棄物管理技術を活用して放射性物質の閉じ込め他の要求を合理的に達成した事例がある等、個々の実情に合った収納缶を開発することで従来技術を有効活用する手法は合理的と考えられる。1Fにおいても同様の考え方に基づき、収納缶を中心に開発することとした。
- TMI-2と比較して1Fではプラントの型式が異なることに加えて、事故初期の海水注入や溶融した炉心が原子炉圧力容器下部のペ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/高度となるため、燃料デブリを安全かつ合理的に収納・移送・保管するには1F向けに専用の収納缶を開発する必要がある。
- これまでの検討では要素技術の検討を進めて収納缶の基本設計を行ったが、事故後の1Fに関する情報が限られていることや、高線量廃棄物を含めた物量など1F廃炉工事の全体の最適化の観点から、収納缶設計条件を設定し、知見の更新を踏まえて都度反映することが重要である。

1.2.目的

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

＜先行事例との比較＞

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

- 1F燃料デブリは原子炉圧力容器(RPV)から原子炉格納容器(PCV)内部のペDESTAL部に分布している。
⇒ コンクリートとの反応(MCCI)生成物や回収時にコンクリートへの燃料デブリ付着考慮が必要である。
✓ コンクリート中のアルカリ成分の考慮も必要である。
- 1F炉内へ海水注入がなされた。
✓ 燃料デブリ中の塩分(塩素)が残留していることを考慮する必要がある。
- 建屋損壊に伴う作業環境の厳しさ、RPV、PCVの損傷の可能性がある。
⇒ 燃料デブリの気中一横アクセス工法等、冠水一上アクセス工法以外からの回収が検討されている。
✓ 気中一横アクセス工法等、冠水一上アクセス工法以外の取扱い方法に対応した検討(燃料デブリ収納缶設計、収納缶取扱い技術など)が必要である。
- 濃縮度が高い。
⇒ 未臨界維持のため収納缶内径が小さくなる。収納缶同士の密接配置が難しい。
✓ 燃料デブリの回収・収納に適した作業性や保管面積を小さくする配慮が重要である。
⇒ 燃料デブリ取り出し時の再臨界リスクの考慮が必要である。
✓ 燃料デブリ取り出し時に中性子吸収材が添加される可能性も考慮する必要がある。
- 燃焼度(線源強度)が高い。
✓ 水分の放射線分解による水素発生量増加に対する対策が必要である。
- 燃料デブリの物量が多い。
✓ 燃料デブリの回収・収納に適した作業性や保管面積を小さくする配慮が重要である。

2. 研究の目標

2.1. プロジェクト全体の目標

2021(令和3)年の燃料デブリ取り出しを想定し、燃料デブリの安全かつ合理的な収納・移送・保管方法を確立する。

2.2. 平成30年度末の目標

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

(残された課題)

これまでの検討の結果、以下の課題が残されており対応が必要である。

(1) 安全かつ合理的に収納・移送・保管する観点からの最適化

従前の技術開発では、TMI-2等の事例を参考に、安全評価の観点から課題を抽出し、有識者の意見を踏まえて検討条件を仮定し収納缶仕様の暫定案、複数の保管方法の提案を行った。しかしながら、取り出された燃料デブリを円滑に保管するため処理能力や設備の合理性の観点からの最適化が必要である。

また、燃料デブリの性状等、仮定を超える可能性に対して運営面/設備面等の観点から合理的な対応策の立案が必要である。(⇒次ページの実施項目(1)、(2)にて検討する。)

(2) 安全性に対するシステムを考慮した検証

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

(3) 水処理や気体処理の過程で回収される燃料デブリに対する処置

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

(⇒次ページの実施項目(4)にて検討する。)

3. 実施項目とその関連、他研究開発との関連

3.1.実施項目

モックアップ試験用収納缶プロトタイプを試作やモックアップ試験による安全性や取扱いの最終的な検証に向けて以下を行う。

(1) 輸送・貯蔵に係る調査及び研究計画立案

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

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

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

(3) 安全評価手法の開発及び安全性検証

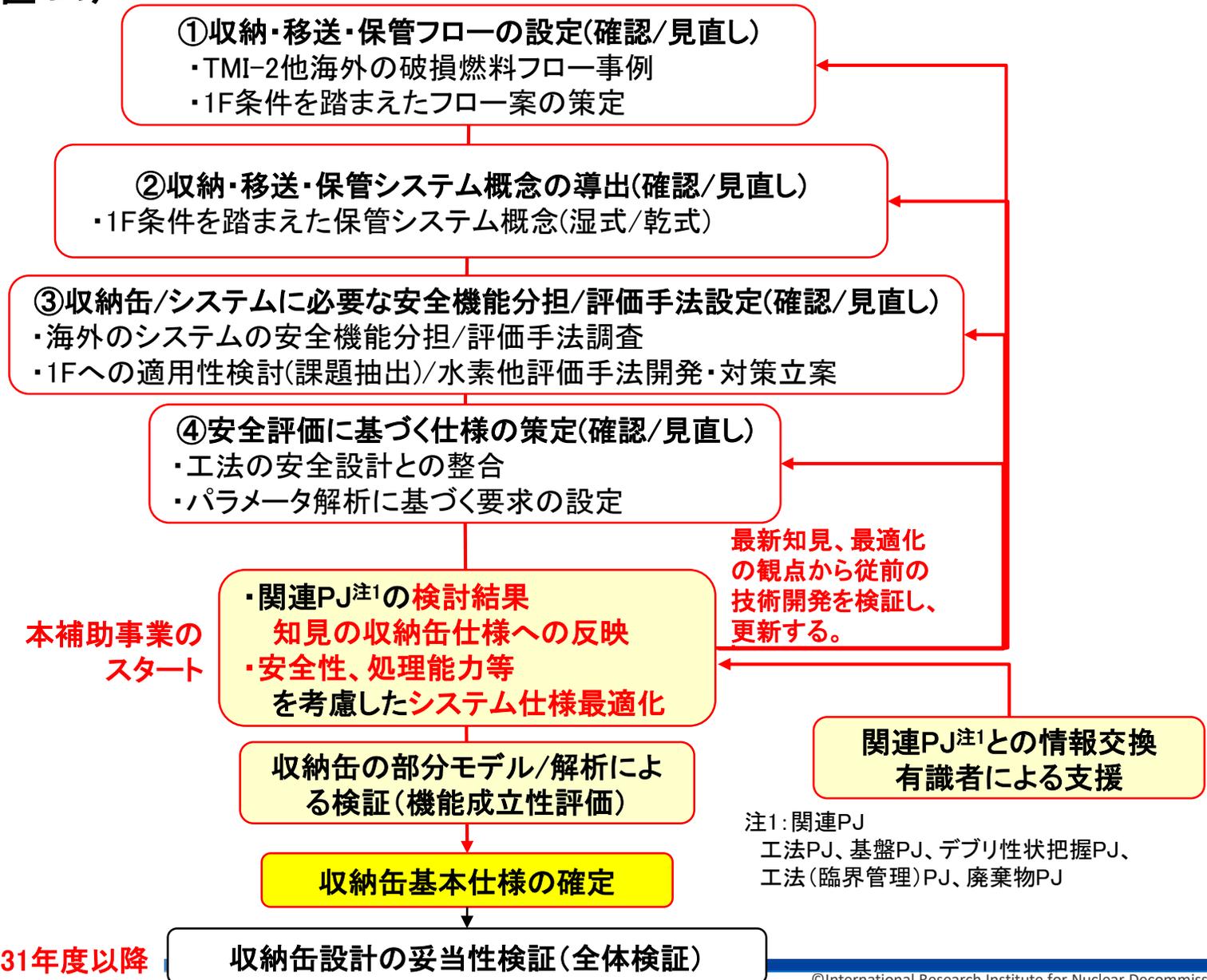
(2)(4)の検討を踏まえて解析や収納缶の部分モデル等による安全検証を行い、収納缶や移送・保管システムの成立性を確認する。

(4) 燃料デブリの収納形式の検討

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

3. 実施項目とその関連、他研究開発との関連

本研究開発の位置づけ



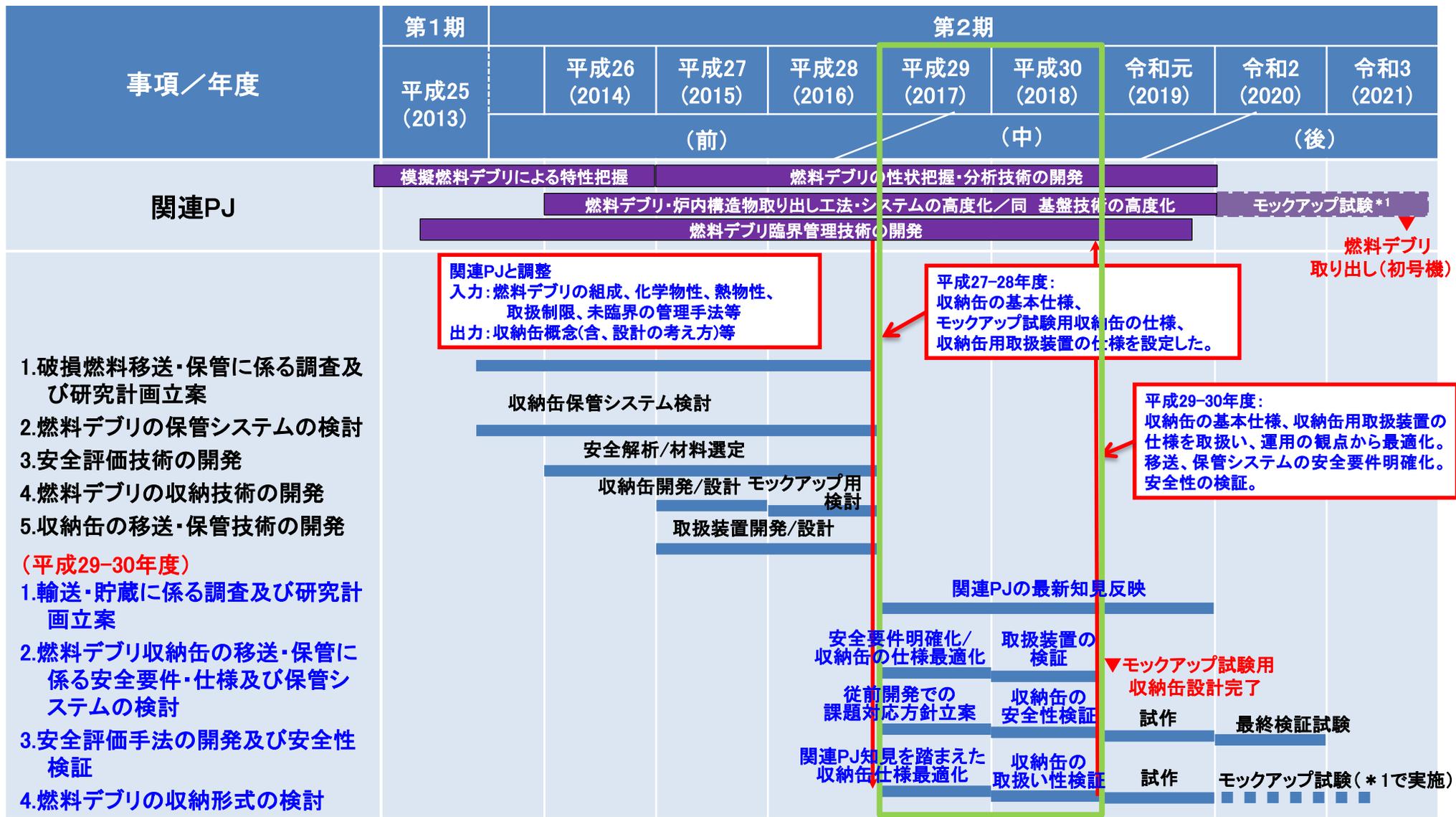
平成31年度以降

収納缶設計の妥当性検証(全体検証)

3. 実施項目とその関連、他研究開発との関連

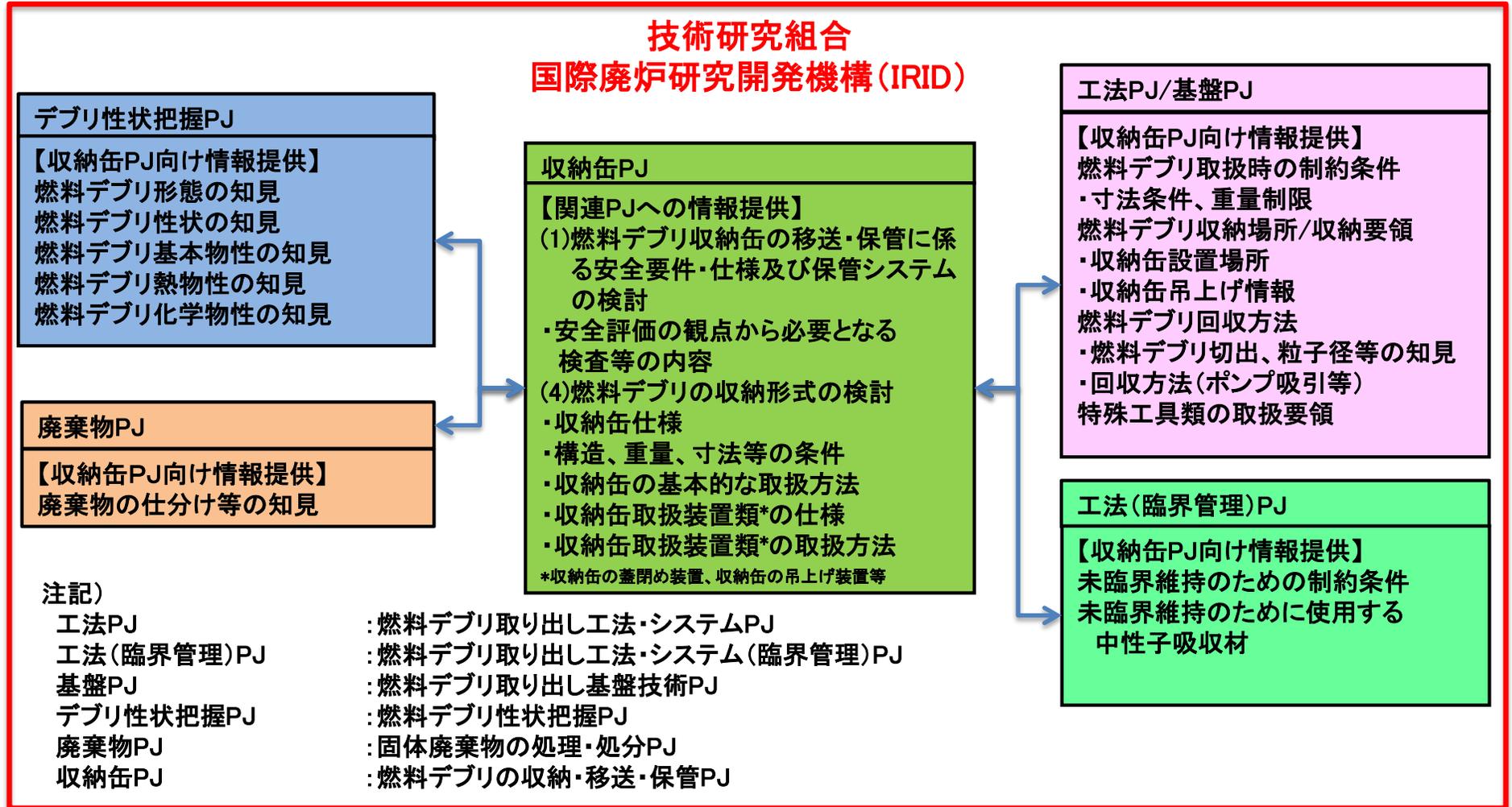
3.2.実施項目の関連性(1/2)

2021(令和3)年中の初号機の燃料デブリの取り出しを想定し、以下の工程で開発する。



3. 実施項目とその関連、他研究開発との関連

3.2.実施項目の関連性(2/2)



IRID内の関連PJからの情報と本PJが発信する情報を
共有・連携して調整することで整合が取れた成果を得る。

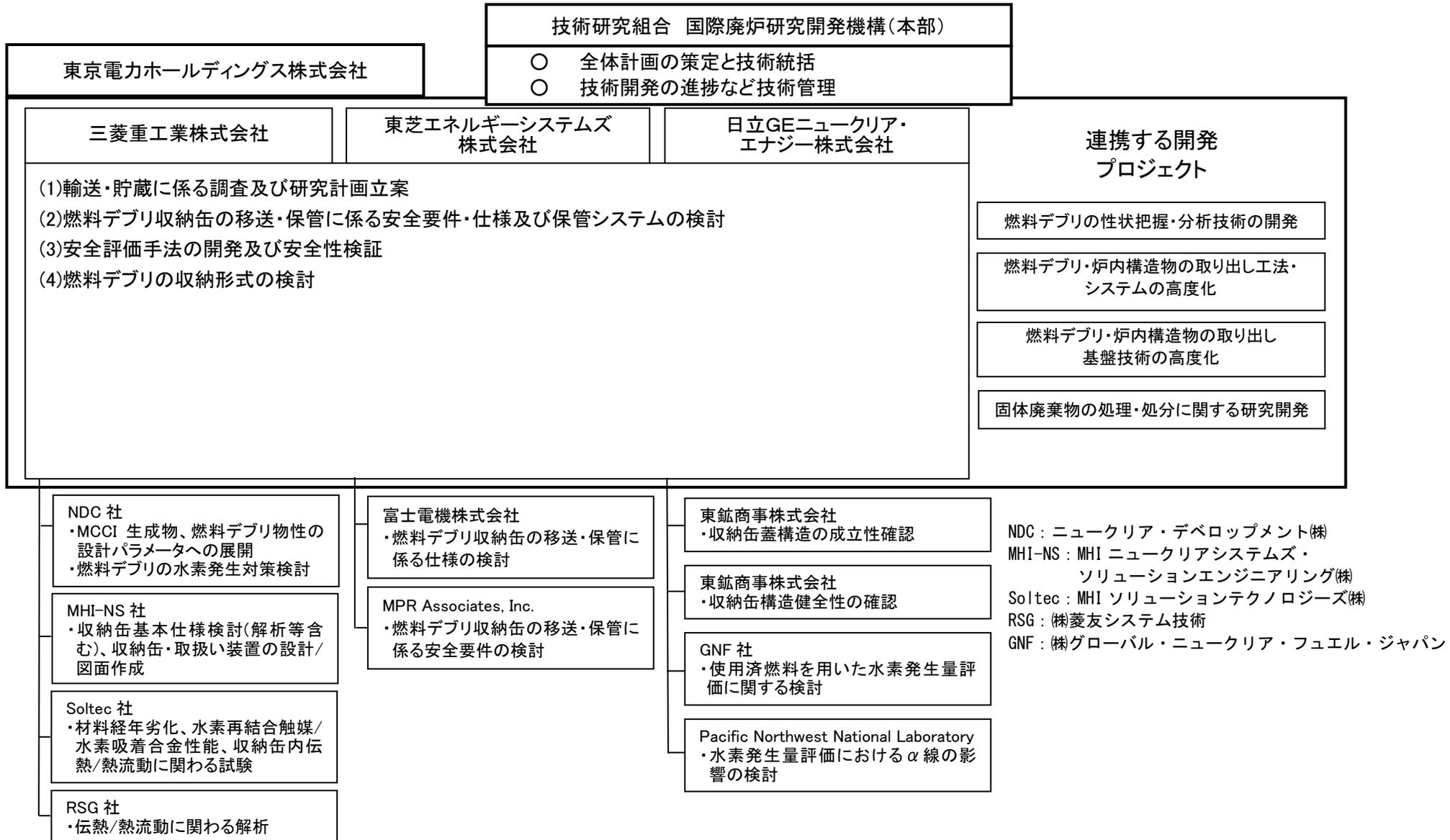
4. 実施スケジュール

燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発

		平成30年度											
		4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
1	輸送・貯蔵に係る調査及び研究計画立案	他研究開発成果の試験計画への反映							海外技術者とのワークショップ			研究計画の更新	
2	燃料デブリ収納缶の移送・保管に係る安全要件・仕様及び保管システムの検討	安全要求および仕様の更新											
	①移送・保管に係る安全要件・仕様の設定	フロー他システム最適化											
	②保管システムの検討	湿式／乾式保管手法の技術要件の更新											
	③保管方式の検討	乾燥方法の比較評価			乾燥設備の概念検討								
	④乾燥システムの検討	工法他の検討結果反映											
3	安全評価手法の開発及び安全性検証	未臨界シナリオの調整／導出											
	①未臨界の安全性検証	蓋構造試験準備											
	②構造強度の安全性検証	実機大収納缶試験体の設計						蓋構造成立性確認			蓋構造等の基本構造設定		
	③経年劣化に関わる安全性検証	運用を含めた腐食対策最適化			使用済燃料を用いた水素評価試験								
	④水素ガス対策の安全性検証 発生量の検証	水素評価結果の反映検討			収納缶内の流動状態の検証								
	水素対策の検証	評価モデルのための触媒特性データ取得											
4	燃料デブリの収納形式の検討	解析に基づく触媒の有効性評価						デブリ性状に合わせた収納缶仕様検討					
	①燃料デブリ性状に合わせた収納缶仕様の検討	収納缶仕様の見直し									報告会		
	②収納缶設計の見直し	学会発表 (日本原子力学会)					報告会		報告会				
	報告会/発表等												

■ :計画 ■ :見直した計画 ■ :実績

5. 実施体制図 (平成31年3月末時点)



6.1 輸送・貯蔵に係る調査及び研究計画立案

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

- (1)燃料デブリ収納缶の移送・保管に係る安全要件・仕様の設定
- (2)保管システムの検討
- (3)保管方式の検討
- (4)乾燥システムの検討
- (5)取扱装置の仕様の検討・見直し

6.3 安全評価手法の開発及び安全性検証

- (1)未臨界の安全性検証
- (2)構造強度の安全性検証
- (3)経年劣化に関わる安全性検証
- (4)水素ガス対策の安全性検証(水素ガス発生量の検証)
- (5)水素ガス対策の安全性検証(水素対策の検証)

6.4 燃料デブリの収納形式の検討

- (1)燃料デブリ性状に合わせた収納缶仕様の検討
- (2)収納缶設計の見直し

6.1.輸送・貯蔵に係る調査及び研究計画立案

①目的、目標

現場の最新状況や工法PJ、基盤PJなど、他研究開発の進捗を踏まえ、輸送・貯蔵に係る調査及び研究計画について立案・更新する。

②既存技術との対比

使用済燃料の輸送・貯蔵に対する技術要件や評価技術は確立しているが燃料デブリを想定したものではなく、1F燃料デブリ性状を考慮し、本技術開発を推進するための調査及び研究計画の立案・更新が必要である。

③実施事項、成果

1F燃料デブリ収納缶設計における安全評価や安全性検証の検討に関して、関係する技術開発の最新知見の収集、国内外事例調査及び廃炉の実績や知見を有する海外技術者と情報交換のためのワークショップ(WS)を実施。その結果を収納缶の技術開発への反映するとともに、収納缶基本仕様案に支持をいただいた。

a.関連する技術開発の最新知見の収集

取り出された燃料デブリの保管までのフロー策定にあたり工法PJ、基盤PJ、廃棄物PJとの合同会議及びIRID内の有識者レビューにより情報交換を実施し、最新知見を収集してフローに反映した。なお、参考として燃料デブリ収納缶の取扱フロー案(原子炉の横側からアクセスする方法)を補足-1に示す。

b.国内外事例の調査

日本原燃廃棄物管理施設の許認可申請書の調査及び海外施設での乾燥方法等の技術文献を確認し、収納缶や関連する取扱い装置等の検討の参考とした。

c.海外技術者とのワークショップ(1/2)

燃料デブリ性状等、知見が限られており仮定条件に基づく設計検討を進めているが、今後の検討で大きな手戻りとならないために、米国アイダホ国立研究所(INL)にて、廃炉の実績や知見を有する海外技術者とTMI-2での経験(含むINLでの乾式保管経験)の視点から意見を頂くためのWSを実施。固有技術の検討に対する提案を頂くとともに、収納缶基本仕様案に支持をいただいた。

6.実施内容

6.1.輸送・貯蔵に係る調査及び研究計画立案

③実施事項、成果

c.海外技術者とのワークショップ(2/2)

燃料デブリの収納・移送・保管における目標とする処理能力(以下、スループットという)、移送量/保管効率の律速が想定される固有技術についてWSで議論を実施した。

＜WSの主な議題と成果＞

- ・臨界評価:燃料デブリの粒径、含水量を考慮したこれまでの未臨界維持評価手法の適切性を確認
- ・水素対策:
 - ・水素発生量評価方法に対する提案と評価の参考になるTMI-2での水素発生量データを入手
 - ・TMI-2で実施した触媒に関する情報入手と水素対策として触媒を考慮する際の評価の提案
- ・乾燥方法:TMI-2で実施した加熱真空乾燥(乾燥装置のメーカー情報含む)に関する情報
- ・収納缶設計:上記の固有技術開発を含めて検討している収納缶仕様案(仮定条件含む)への支持

④成果の反映先への寄与

関連する技術開発の最新知見の収集、IRID内の有識者レビュー結果及び海外技術者から提示頂いた情報を各技術開発項目に反映し、計画を進める。

⑤現場への適用性の観点における分析

今後の具体化の過程で適用性を判断、調整していく。

⑥目標に照らした達成度

関連する技術開発の最新知見の収集、研究計画の有識者レビュー、海外技術者とのWS開催により収納缶開発の研究計画の確認・更新を行っており、目標を達成していると判断する。

⑦今後の課題

現計画の遂行上、課題はなし。

6.実施内容

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

(1)燃料デブリ収納缶の移送・保管に係る安全要件・仕様の設定(1/8)

①目的、目標

燃料デブリの移送・保管システムを設計する上での、安全機能の分担および要求事項を明確化する。

②既存技術との対比

使用済燃料の移送・保管の要求事項は確立しているが燃料デブリを想定したものではなく、使用済燃料と燃料デブリの相違を考慮した設定が必要である。

③実施事項、成果(1/7)

平成30年度は、燃料デブリの移送・保管システムを設計する上での安全に係る要求事項を明確化する観点から、前年度に検討した安全要求の内容を踏まえて、安全要求案を策定した。要求の整理にあたっては①移送中、②取扱い作業中、③保管中の各状態で達成されるべき安全要求を、以下に示す事故レベルの定義に基づき、レベル1～レベル3のプラント状態を想定した内容で策定した。

レベル1: 通常運転からの逸脱の防止、安全上重要な施設の故障の防止

レベル2: 通常運転からの逸脱の検知および制御

レベル3: 設計基準で想定する事象の制御

6.実施内容

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

(1)燃料デブリ収納缶の移送・保管に係る安全要件・仕様の設定(2/8)

③実施事項、成果(2/7)

以下に示すa.～d.項について、順に検討を実施した。

- a. 安全機能分担の整理
- b. 分担すべき機能を満足する要求事項の策定(レベル1要求)
- c. 満足すべき機能の喪失に至らしめる異常事象の抽出
- d. 異常事象発生時における要求事項の策定(レベル2/3要求)

a. 安全機能分担の整理(1/2)

燃料デブリ収納缶の移送・保管で、維持すべき安全機能として以下を検討対象とした。

イ. 放射性物質の過大な放出防止

- i. 放射性物質の閉じ込め(閉じ込め)
- ii. 放射性物質の異常な追加生成の防止
 - 追加核分裂反応の防止(臨界防止)
 - 異常な過熱の防止(除熱)

ロ. 放射線による過大な被ばく・内部被ばくの防止(遮蔽)

ハ. 設計上考慮すべき事項のうち、ハザードへの対応

⇒可燃性ガスによる火災、爆発への対応(水素爆発防止)

また、上記安全機能を次の機器で担保するものとした。

- ・ユニット缶(UC),
- ・収納缶,
- ・移送容器,
- ・保管施設

6.実施内容

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

(1)燃料デブリ収納缶の移送・保管に係る安全要件・仕様の設定(3/8)

③実施事項、成果(3/7)

a. 安全機能分担の整理(2/2)

安全機能の分担は、状態(移送中、取扱い中、保管中)にも依存するため、「検討対象とした安全機能が、各状態において、どの機器によって担保されるのか」(=機能分担)を、右表に整理することで明確化した。

なお、右表中のユニット缶(UC), 収納缶, 移送容器, 保管施設の関係性については、No.126「【補足-1】 燃料デブリ取扱フロー案」を参照。

表 通常状態における安全機能分担の整理結果

分担機能	状態	ユニット缶	収納缶	移送容器	保管施設
閉じ込め	移送中	×	○	○	/
	取扱い中	/	/	/	○
	保管中	/	×	/	/
臨界防止	移送中	○	/	△	/
	取扱い中	/	○	/	△
	保管中	/	/	/	/
除熱	移送中	○	/	○	/
	取扱い中	/	○	/	○
	保管中	/	/	/	/
遮蔽	移送中	×	/	○	/
	取扱い中	/	×	/	○
	保管中	/	/	/	/
水素爆発防止	移送中	×	/	○	/
	取扱い中	/	○	/	○
	保管中	/	/	/	/

○:対象の機器・設備にて安全機能を担保する

△:条件次第では対象の機器・設備にて安全機能を担保する

×:対象の機器・設備にて安全機能を担保しない

6.実施内容

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

(1)燃料デブリ収納缶の移送・保管に係る安全要件・仕様の設定(4/8)

③実施事項、成果(4/7)

b. 分担すべき機能を満足する要求事項の策定(レベル1要求)

a.項で整理した安全機能分担で、各安全機能を満足するために、「○」となった該当機器(ユニット缶, 収納缶, 移送容器, 保管施設)に要求される事項を、次ページの表に示すように策定した。

6.実施内容

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

(1)燃料デブリ収納缶の移送・保管に係る安全要件・仕様の設定(5/8)

③実施事項、成果(5/7)

表 安全機能を満足するために該当機器に要求される事項

分担機能	状態	ユニット缶	収納缶	移送容器	保管施設
閉じ込め	移送中	(要求なし)	<ul style="list-style-type: none"> ・ベント管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洩を防止すること ・ベント管からの水素ガスの排出に伴う放射性物質の漏洩を適切に低減すること 	<ul style="list-style-type: none"> ・放射性物質の漏洩を適切に低減すること 	—
	取扱い中				—
	保管中	—	(要求なし)	—	—
臨界防止	移送中	<ul style="list-style-type: none"> ・臨界を防止可能な形状とすること 	<ul style="list-style-type: none"> ・臨界を防止可能な形状とすること 	<ul style="list-style-type: none"> ・必要に応じて臨界を防止可能な収納缶の距離を維持すること 	—
	取扱い中			—	<ul style="list-style-type: none"> ・必要に応じて臨界を防止可能な収納缶の距離を維持すること
	保管中			—	—
除熱	移送中	<ul style="list-style-type: none"> ・燃料デブリの温度を適切に維持できること 	<ul style="list-style-type: none"> ・燃料デブリの温度を適切に維持できること 	<ul style="list-style-type: none"> ・デブリの温度上昇がないよう自然放熱できること 	—
	取扱い中			—	<ul style="list-style-type: none"> ・デブリの温度上昇がないよう自然放熱できること
	保管中			—	—
遮蔽	移送中	(要求なし)	(要求なし)	<ul style="list-style-type: none"> ・移送作業に係る作業員被ばくおよび公衆被ばくを低減する設計とすること 	—
	取扱い中			—	<ul style="list-style-type: none"> ・取扱いおよび保管作業に係る、作業員被ばくおよび公衆被ばくを低減する設計とすること
	保管中	—	—	—	—
水素爆発防止	移送中	(要求なし)	<ul style="list-style-type: none"> ・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 	<ul style="list-style-type: none"> ・移送容器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 	—
	取扱い中			—	<ul style="list-style-type: none"> ・保管施設における水素濃度が設計値未満を維持できる設計とすること
	保管中	—	—	—	—

6.実施内容

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

(1)燃料デブリ収納缶の移送・保管に係る安全要件・仕様の設定(6/8)

③実施事項、成果(6/7)

c. 満足すべき機能の喪失に至らしめる異常事象の抽出

b.項で特定された各機器への要求事項について、右表に示すように「要求された機能を維持できず異常事象に至らしめる起因事象」を特定した。

また、本表においては、
レベル3: 設計基準で想定する事象の制御を超える事象として3<(3以上)を定義した。
これは、落下事故による閉じ込め機能や遮蔽機能の喪失等、機器の多重故障よりもさらに発生頻度が低いと考えられるレベルとする。
(レベル3<についても、次頁にてレベル3と同様の扱いの要求事項を策定した。)

表 異常事象及び起因事象の抽出

項目	状態	異常事象に至る起因事象	レベル	レベル設定の考え方
閉じ込め	移送中	落下等による破損による閉じ込め機能喪失	3<	落下事故等による事象により閉じ込め機能を喪失することはないと想定し、仮に発生した場合、「レベル3:設計基準で想定する事象の制御」を超える事象と設定
	取扱い中			
	取扱い中	空調機器の多重故障による閉じ込め機能喪失	3	多重故障の可能性は十分小さいと想定し、「レベル3:設計基準で想定する事象の制御」と設定
	保管中			
保管中	空調機器の単一故障による閉じ込め機能喪失	2	空調機器の単一故障で発生すると想定し、「レベル2:通常運転からの逸脱の検知および制御」と設定	
臨界防止	移送中	(要求なし)	-	-
	取扱い中			
	保管中	含水量の増加または配列の失敗による臨界発生	3<	含水量の増加と配列失敗の同時発生は無いと想定し、仮に発生した場合、「レベル3:設計基準で想定する事象の制御」を超える事象と設定
除熱	移送中	外部環境が高温となり自然放熱ができず除熱機能の喪失	3	温度の異常上昇の発生頻度が十分小さいと想定し、「レベル3:設計基準で想定する事象の制御」と設定
	取扱い中			
	保管中			
遮蔽	移送中	収納缶の落下/重量物落下等(移送容器封入時を含む)による容器の破損にて遮蔽機能喪失	3<	落下事故等による事象により遮蔽機能を喪失することはないと想定し、仮に発生した場合、「レベル3:設計基準で想定する事象の制御」を超える事象と設定
	取扱い中			
	保管中			
水素爆発防止	移送中	車両トラブルなどによる規定移送時間の超過にて水死発生量が規定値を超過	3	発生頻度が十分小さくなるよう管理することを想定し、「レベル3:設計基準で想定する事象の制御」と設定
	取扱い中	重量物落下等によるベント機能の喪失にて水素濃度が規定量を超過	3	落下事故の可能性は十分小さいと想定し、「レベル3:設計基準で想定する事象の制御」と設定
		空調機器の多重故障にて水素濃度が規定量を超過		多重故障の可能性は十分小さいと想定し、「レベル3:設計基準で想定する事象の制御」と設定
保管中	空調機器の多重故障にて水素濃度が規定量を超過	3	多重故障の可能性は十分小さいと想定し、「レベル3:設計基準で想定する事象の制御」と設定	

6.実施内容

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

(1)燃料デブリ収納缶の移送・保管に係る安全要件・仕様の設定(7/8)

③実施事項、成果(7/7)

d. 異常事象発生時における要求事項の策定(レベル2/3要求)

c.項で特定された「要求された機能を維持できず異常事象に至らしめる起因事象」を受けて、「異常事象への対策として講ずるべき要求事項」を、レベル2/3要求として、右表に示すように策定した。

表 異常事象への対策として講ずるべき要求事項

項目	状態	安全要求
閉じ込め	移送中	想定すべき落下が生じても必要な閉じ込め機能を維持できる設計とすること(レベル3)
	取扱い中	
	取扱い中	空調機能喪失等による閉じ込め機能の喪失可能性を低く抑える設計とすること。また、多重故障等により閉じ込め機能の喪失を想定しても作業員、公衆被ばくのレベル3における判断基準を満たす設計とすること(レベル3)
	保管中	
保管中	保管中	空調機器の単一故障時においても作業員、公衆被ばくのレベル2における判断基準を満たす設計とすること(レベル2)
	移送中	(要求なし)
	取扱い中	想定すべき含水量と収納缶距離の組み合わせにおいても臨界を防止できる設計とすること。(レベル3)
保管中		
除熱	移送中	想定すべき建屋温度等の上昇事象時におい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(レベル3)
	取扱い中	
	保管中	
遮蔽	移送中	想定すべき落下等において遮蔽機能を維持できる設計とすること(レベル3)
	取扱い中	
	保管中	
水素爆発防止	移送中	移送中のあらゆる想定事象を考慮しても水素濃度が規定値を超えることのない設計とすること(レベル3)
	取扱い中	取扱い中の想定事象を考慮しても収納缶のベント機能を喪失することのない設計とすること(レベル3)
		想定すべき空調機能喪失においても水素濃度が規定値を超えることのない設計とすること(レベル3)
保管中	想定すべき空調機能喪失においても保管施設における水素濃度が規定値を超えることのない設計とすること(レベル3)	

6.実施内容

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

(1)燃料デブリ収納缶の移送・保管に係る安全要件・仕様の設定(8/8)

④成果の反映先への寄与

収納缶、移送容器、保管施設等における基本的な設計仕様に反映する。

⑤現場への適用性の観点における分析

今後の燃料デブリ移送・保管設計の具体化の過程で、適用性を判断、調整していく。

⑥目標に照らした達成度

No.16「表 通常状態における安全機能分担の整理結果」で安全機能の分担を明確化し、収納缶と施設・機器のインターフェースの整理を実施した。

また、収納缶による燃料デブリの移送・保管の安全の観点から施設・機器の技術要件及び備えるべき仕様を、No.18「表 安全機能を満足するために該当機器に要求される事項」及びNo.20「表 異常事象への対策として講ずるべき要求事項」で規定した。

以上のことから、目標は達成されたと判断する。

⑦今後の課題

収納缶の移送・保管に係る検討進捗に基づき、必要に応じて適宜、修正を行う必要がある。

6.実施内容

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

(2) 保管システムの検討(1/7)

①目的、目標

収納缶の保管に係る一連のシステム概念の構築に向けて、平成29年度に策定したプロセスフロー案に基づき、燃料デブリの収納～保管を安全かつ合理的に行う観点から、各プロセスの処理能力、リスク、施設の合理性等について分析・評価し、最適化する。

また、収納缶と保管施設(取扱設備、建屋)との安全機能分担に基づく安全上の技術要件を、合理的に達成する観点で必要に応じて見直す。

②既存技術との対比

TMI-2の燃料デブリ保管施設や、国内の使用済燃料中間貯蔵施設等の既存の保管施設の技術情報を参考にしつつ、1F固有の条件やそれに由来する既存保管施設との前提条件の相違を考慮した検討が必要である。

6.実施内容

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

(2) 保管システムの検討(2/7)

③実施事項、成果(1/5)

a. プロセス(シナリオ)の最適化(1/2)

関連PJと諮りつつ、各プロセスの処理能力、リスク、合理性等を分析・評価し、最適化の観点で以下の見直しを実施した。

1. 乾式保管を主案とし、湿式保管はオプションの位置付け

平成29年度は、乾式保管前に、1F既設プールを改造した湿式保管を経るプロセスを検討していたが、以下の前提条件、改造費用・期間・技術的困難度等を考慮すると、湿式保管の合理性は高くないと判断。乾式保管を主案とし、湿式保管はオプションの位置付けとするシナリオに見直した。

- ✓ 1F既設プールを利用する場合、現在保管中の使用済燃料等の代替保管先の確保が必要。
- ✓ 確保可能な収納缶保管容量が限定的。
- ✓ 収納缶からプール水への燃料デブリ成分(特に α 核種)の流出を想定した対策(プール水浄化機能強化、漏えい対策等)が必要。

6.実施内容

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

(2) 保管システムの検討(3/7)

③実施事項、成果(2/5)

a. プロセス(シナリオ)の最適化(2/2)

ロ. 収納缶への燃料デブリの充填は、必ずユニット缶を使用

平成29年度は、燃料デブリを収納缶に直接充填するシナリオも検討し、案としてプロセスに組み込んだが、収納缶に直接充填する場合、燃料デブリ取り出し現場へ収納缶を投入することになり、収納缶表面の汚染リスクが高くなる。また、工法PJ、基盤PJでは燃料デブリ取り出し時に収納缶よりも小型で取扱い性の良いユニット缶を使用することを前提に検討を進めていることから、収納缶表面の汚染リスクの低減、並びに工法PJ、基盤PJの検討進捗と整合を図り、燃料デブリの収納缶への充填では、必ずユニット缶を使用するシナリオに見直した。

ハ. 燃料デブリ取り出し現場での仕分けの見直し

平成29年度は、燃料デブリ取り出し現場で燃料デブリ/廃棄物の仕分けを行うシナリオを検討し、プロセスに組み込んだが、処理能力及び技術成立性の観点から、今後、仕分け技術の実現可否を含めた検討が進んだ段階で、改めてプロセスに組み込むものとし、平成30年度時点では、基本的にNo.25で示す様にエリアで燃料デブリと廃棄物を分類するが、燃料デブリとしたエリアの排出物について、目視確認で明確に廃棄物と判断可能なものを廃棄物として処理するシナリオに見直した。

6.実施内容

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

(2) 保管システムの検討(4/7)

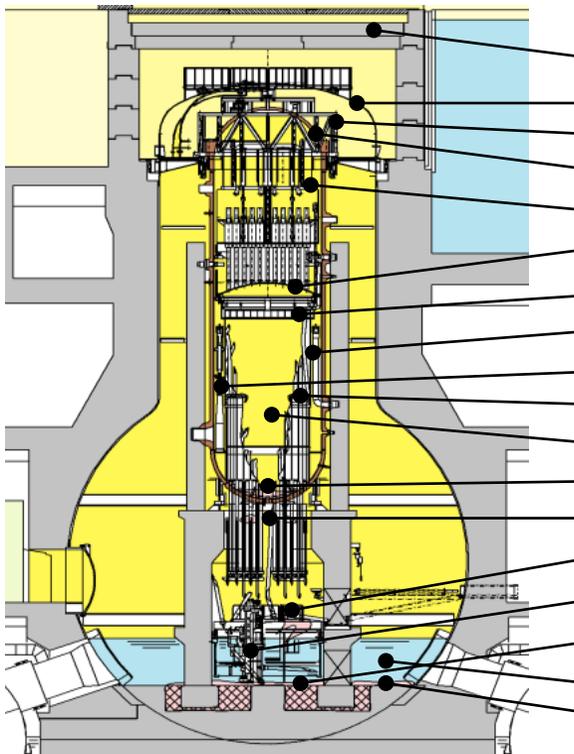
③実施事項、成果(3/5)

b. スループット検討条件の見直し要否の検討(1/2)

関連PJの検討進捗を確認した結果、燃料デブリ/廃棄物の分類の考え方や燃料デブリ重量・分布等の条件に変更はなく、平成29年度と同一の条件を使用するものとした。

<スループット検討の条件> (平成29年度と同一)

- ✓ 燃料デブリと廃棄物は発生エリアで分類し、上部格子板以下を「燃料デブリ」と仮定。



No.	排出物	分類
1	シールドプラグ	廃棄物
2	PCVヘッド	廃棄物
3	RPV保温材	廃棄物
4	RPVヘッド	廃棄物
5	蒸気乾燥器	廃棄物
6	シュラウドヘッド	廃棄物
7	上部格子板	燃料デブリ
8	シュラウド	燃料デブリ
9	ジェットポンプ	燃料デブリ
-	炉心支持板	燃料デブリ
10	炉心部燃料デブリ	燃料デブリ
11	RPV底部燃料デブリ	燃料デブリ
12	RPV下部/CRDハウジングに付着した燃料デブリ	燃料デブリ
13	ベDESTAL内部構造物	燃料デブリ
14	CRD交換機	燃料デブリ
15	ベDESTAL内部燃料デブリ	燃料デブリ
16	ベDESTAL外部構造物	廃棄物
17	ベDESTAL外部燃料デブリ	燃料デブリ

6.実施内容

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

(2) 保管システムの検討(5/7)

③実施事項、成果(4/5)

b. スループット検討条件の見直し要否の検討(2/2)

<スループット検討の条件(続き)> (平成29年度と同一)

- ✓ 燃料デブリ取り出しは、各号機共に10年間で完了
- ✓ 各号機が同時並行で、燃料デブリ取り出しを開始
- ✓ 1年の稼働日数:200日
- ✓ 1日の運転時間:24時間
- ✓ 燃料デブリ取り出し～保管まで、全て1系列
- ✓ 燃料デブリの充填率(収納効率):30%^{注1}
- ✓ 収納缶寸法:内径220mm×内部高さ800mm^{注2}
- ✓ ユニット缶寸法は収納缶寸法の90%。また、収納缶に2個装荷
- ✓ 移送容器には収納缶12本、保管容器(金属キャスク)には収納缶48本を装荷
- ✓ 燃料デブリの構成物質密度は、性状把握PJの検討結果を参考に以下と仮定
燃料(UO₂):11ton/m³ 金属:8ton/m³ コンクリート:2.5ton/m³

注1:TMI-2の実績値(20~30%)から仮定した目標値

注2:現在検討している収納缶高さ寸法の最小値(外寸1,000mm)から設定

6.実施内容

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

(2) 保管システムの検討(6/7)

③実施事項、成果(5/5)

c. プロセスフローの更新

a.項及びb.項で示した前提条件を反映し、平成29年度に作成したプロセスフローの更新を実施した。その結果を補足-2に示す。

d. 安全上の技術要件の見直し要否の検討

プロセス最適化検討の結果を踏まえても、収納缶と保管施設との安全機能分担に基づく安全上の技術要件に変更はなく、平成29年度までの検討結果から見直し(更新)の必要はないことを確認した。

④成果の反映先への寄与

今後の燃料デブリ保管施設の基本設計、詳細設計の要求仕様・インプット条件の設定に寄与する。

6.実施内容

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

(2) 保管システムの検討(7/7)

⑤現場への適用性の観点における分析

保管施設の設置に必要となるスペースの1F構内での確保等、検討結果の1Fの現場への適用性(可否)についての判断、調整が、今後、必要になると考える。

⑥目標に照らした達成度

目標達成を判断する指標に対して、燃料デブリの収納～保管までの各プロセスについて、処理能力、リスク、合理性等の観点から最適化検討を実施した。それに加えて、スループット検討条件の変更要否を検討し、プロセスフローの更新を行った。

また、プロセス最適化検討の結果等を踏まえても、収納缶と収納缶の取扱設備や建屋設備との安全機能分担に基づく安全上の技術要件が、平成29年度までの検討成果から見直す必要がなく、合理的に達成可能な観点から設定されていることを確認した。

以上のことから、目標を達成していると判断する。

⑦今後の課題

保管システムの更なる合理化、最適化の観点から、燃料デブリと廃棄物の仕分けや、精度の高い燃料デブリ重量・分布の把握が今後の研究開発課題となると考える。

6.実施内容

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

(3) 保管方式の検討(1/3)

①目的、目標

6.2.(2)項「保管システムの検討」の結果に基づき、平成29年度までに検討してきた乾式保管、湿式保管の各方式について、必要に応じて安全上の技術要件の更新を行う。

②既存技術との対比

TMI-2の燃料デブリ保管施設や、国内の使用済燃料中間貯蔵施設等の既存の保管施設の技術情報を参考にしつつ、1F固有の条件やそれに由来する既存保管施設との前提条件の相違を考慮した検討が必要である。

③実施事項、成果

6.2.(2)項「保管システムの検討」においてプロセスの最適化検討を実施したが、乾式保管、湿式保管の各方式の安全上の技術要件に影響を与えるような変更等はなく、平成29年度までの検討成果を更新する必要はないことを確認した。

6.実施内容

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

(3) 保管方式の検討(2/3)

④成果の反映先への寄与

今後の燃料デブリ保管施設の基本設計、詳細設計の要求仕様・インプット条件の設定に寄与する。

⑤現場への適用性の観点における分析

検討結果の1F現場への適用可否等の判断、調整が、今後、必要になると考える。

⑥目標に照らした達成度

目標達成を判断する指標に対して、平成28年度までに湿式・乾式の各保管手法、保管手法の技術要件の整理は完了しており(補足-3参照)、保管システムの検討結果(プロセス最適化)を踏まえても、これらを更新する必要がないことを確認した。

以上のことから、目標を達成していると判断する。

6.実施内容

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

(3) 保管方式の検討(3/3)

⑦今後の課題

No.23に示すとおり、今後は乾式保管を主案とし、燃料デブリ保管に関する、管理運用を含めた技術開発課題について、継続して検討していく必要がある。

6.実施内容

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

(4)乾燥システムの検討(1/12)

①目的、目標

燃料デブリの乾式保管は、水素発生源や腐食の原因となる水分量を減らすことができるため、水素対策や腐食による補修等の可能性を小さくすることが可能となり、合理的と考えられる。実現するためには燃料デブリの乾燥技術の確立が必須である。

本技術開発は、実デブリ向けの乾燥装置設計や検証に資することを目的として、シミュレーションや、コールドで行うことができる代替材による試験に基づき、乾燥設備の基本概念をまとめることを目標とする。

②既存技術との対比

燃料デブリの乾燥は、TMI-2で実績があるものの、1Fで想定されるMCCI生成物は含まれていない。また、実デブリ乾燥のデータ等は限定されているため、1F固有の条件を考慮した検討が必要である。

6.実施内容

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

(4)乾燥システムの検討(2/12)

③実施事項、成果(1/10)

これまでの検討

- ・燃料デブリの移送では同伴する水の放射線分解で発生する水素が収納缶内や移送容器内に蓄積する可能性があり移送容器の容量の制約になる可能性がある。文献及び本技術開発で行った試験でコンクリートに含まれる結晶水からの水素発生はほぼない知見を得ており、水素発生量抑制には乾燥による自由水除去が有効と考えられる。
- ・TMI-2の実績を踏まえると燃料デブリは多孔質体と想定され、破碎して収納されることを考えると収納缶(ユニット缶)内の燃料デブリの乾燥は粒子内の細孔に残留する水分と粒子間に残留する水分を考慮する必要がある。
- ・乾燥に関する試験は燃料デブリ性状把握PJにおいて粒子内の細孔に残留する水分の乾燥に着目した多孔質体の乾燥、粒子間に残留する水分の乾燥に着目し粉体による乾燥試験が行われた。
- ・多孔質体の乾燥試験では酸化アルミニウム、二酸化ジルコニウム、二酸化ウラン等での要素試験が実施され、細孔径 $0.1\mu\text{m}$ を含む二酸化ジルコニウムで他の供試体と比較して多少の時間延長が見られたものの $1\mu\text{m}$ 以上の細孔径を有する多孔質体はいずれの供試体でも水分量がほぼゼロまで乾燥できる結果が得られている。また、 $1\mu\text{m}$ の粉体を用いた乾燥試験でも加熱がチャネリング(乾燥プロセスにおいて、熱風が乾燥物を通過し熱の授受を行う際に熱風が均一性や万遍性を欠き、乾燥がラットホール状の進行になってしまう現象)等の事象があるもののいずれも乾燥ができる結果が得られている。

6.実施内容

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

(4)乾燥システムの検討(3/12)

③実施事項、成果(2/10)

本技術開発(補助事業)

検討フロー

代替材による要素試験(φ10mm)
(デブリ性状把握PJ)

多孔質セラミックス(Al_2O_3 等)、粉体による乾燥挙動
⇒定率乾燥が主体で乾燥性は期待できる。結晶水は乾燥困難。

乾燥目標の設定

コンクリート(結晶水)からの水素発生は小さいことを確認した。
(α 線の影響を追加検討)

乾燥条件の机上検討

⇒自由水除去を乾燥目標とした。

FP挙動等
(デブリ性状把握PJ)

乾燥特性の推定に着目して解析により乾燥法を検討した。
⇒効率的な乾燥法として温風乾燥、加熱減圧(真空)乾燥を選定した。

シミュレーション、代替材による試験等
に基づき乾燥条件を仮定し
装置の基本条件を設定

乾燥条件の検討
⇒要素試験により乾燥特性を検討。

模擬デブリ(コールド)による試験等
に基づく乾燥挙動検証/装置基本設計

スケールアップ(実規模等)での乾燥挙動を検証し、装置の基本設計を行う。

実デブリ(ホット)による試験等に基づく
乾燥条件検証/装置設計へ反映

小規模での実デブリによる乾燥時間、乾燥レベルの確認
エアロゾル等の放射性物質の飛散程度の確認

実デブリ/実装置での最終確認

実規模での実デブリによる乾燥時間、乾燥レベルの確認

6.実施内容

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

(4)乾燥システムの検討(4/12)

③実施事項、成果(3/10)

【参考】

a.予熱期間(真空乾燥では減圧期間)(I):

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

b.定率乾燥期間(II):

沸騰が始まり乾燥は外部入熱量と蒸発潜熱が釣り合うよう進むため、含水率は時間に対して一定割合で減少する。
蒸発時間は残水量を蒸発速度で除すことで計算できる。

c.減率乾燥期間(III):

狭隘部の水が気化、膨張して染み出す等、乾燥が物質移動量に支配される。燃料デブリの形状(狭隘部の水の存在状態)が不明であり、精緻化は実物による検証が前提。定性的にはIIが短ければIIIも短い。

(III) 減率乾燥期間 (II) 定率乾燥期間 (I) 予熱期間

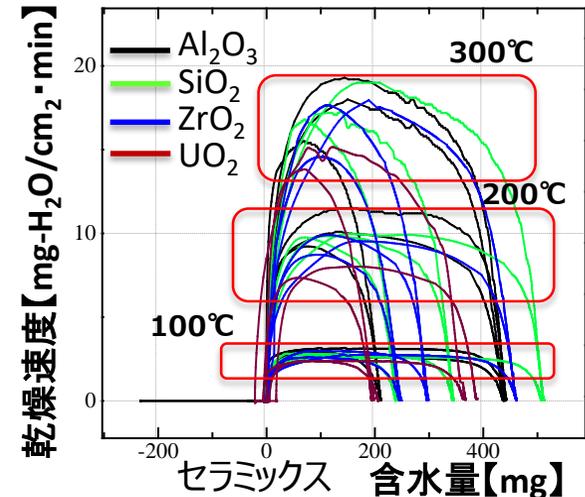
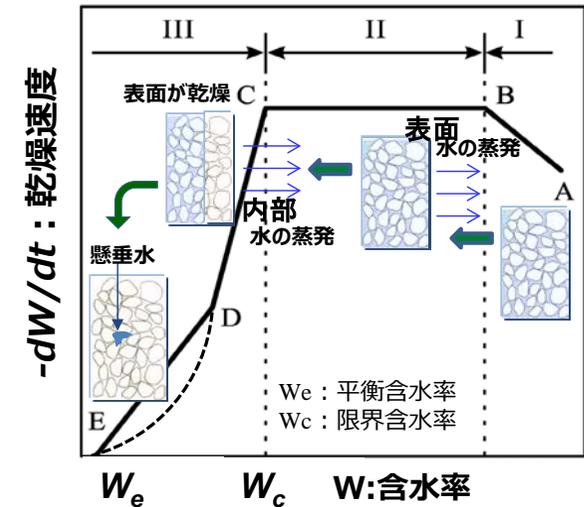


図 デブリ代替材による乾燥特性

デブリ性状把握PJ 平成28年度検討結果より引用

注: グラフは右から左方向へ含水量が減少する(乾燥が進む)につれて乾燥速度が変動することを示している。

6.実施内容

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

(4)乾燥システムの検討(5/12)

③実施事項、成果(4/10)

デブリ性状把握PJの検討では多孔質体(二酸化ジルコニウム他:細孔径 $0.1\mu\text{m}$ ~)の要素試験で乾燥することが確認されたが、細孔サイズがより小さい場合等も否定できない。

微小細孔径を有する供試体について乾燥挙動を確認する。

⇒微小細孔径のゼオライト($0.06\mu\text{m}$)で乾燥特性データを採取。また比較のために二酸化ジルコニウム、酸化アルミニウムのデータも採取した。

<試験要領>

○減圧環境

- ①水を含浸させた供試体(20~120mg程度)を秤量し、チャンバー内に設置。
- ②チャンバー内を 10^{-2} torrオーダまで減圧(30分間維持)。30分維持後、チャンバーを隔離。
- ③所定温度まで加熱し、所定温度到達後、温度を10時間保持。
- ④10時間経過後、再加熱し、昇温後、10分間維持し、重量を測定

○不活性ガス環境

- ①水を含浸させた供試体(20mg程度)を秤量し、チャンバー内に設置。
- ②窒素ガスを通気(30分間維持)。
- ③ガスを通気しながら所定温度まで加熱し、所定温度到達後、温度を10時間保持。
- ④10時間経過後、再加熱し、昇温後、10分間維持し、重量を測定。

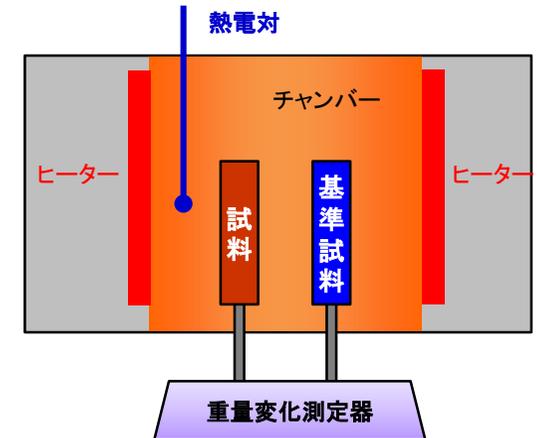


図 減率乾燥期間に関する試験概要

6.実施内容

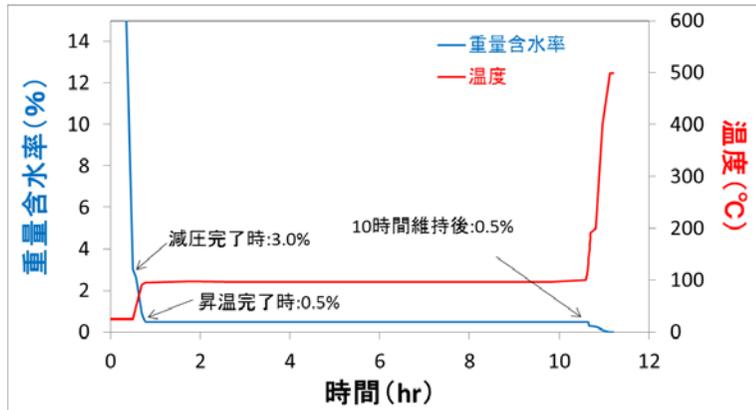
6.2.燃料デブリ収納缶の移送・保管に係る安全要件・仕様及び保管システムの検討

(4)乾燥システムの検討(6/12)

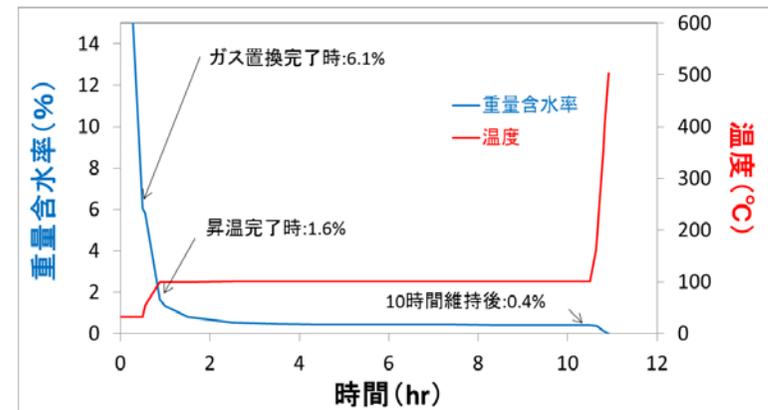
③実施事項、成果(5/10)

微小細孔径を有するゼオライト(細孔径 $0.06\mu\text{m}$)は 100°C で乾燥速度がゼロに漸近して乾燥が長引く事象が観察された。本事象は 200°C では観察されなかった。

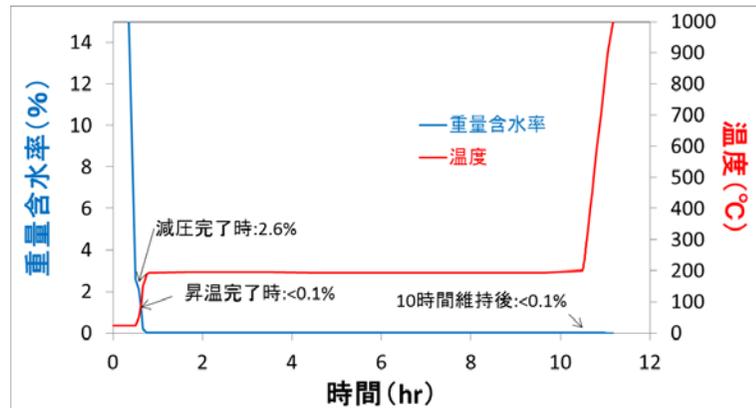
⇒微小細孔のある燃料デブリでは同様の事象が生じる可能性を考慮しておく必要がある。



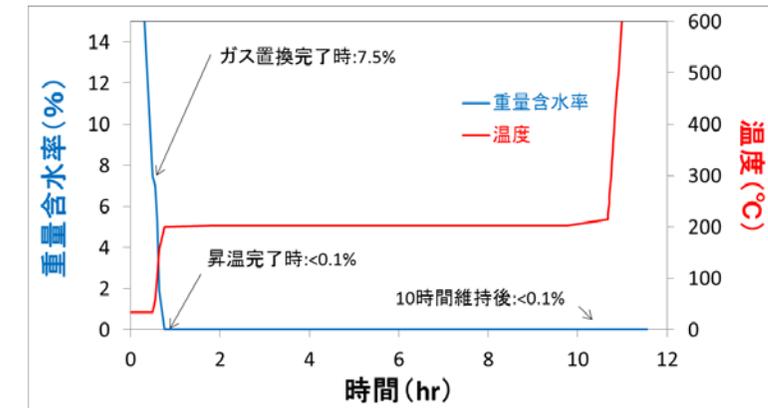
減圧乾燥(100°C)



不活性ガス環境(100°C)



減圧乾燥(200°C)



不活性ガス環境(200°C)

6.実施内容

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

(4)乾燥システムの検討(7/12)

③実施事項、成果(6/10)

表 各供試体の乾燥時の重量含水率

供試体の材質 (細孔径)	条件	重量含水率(%)		
		減圧または ガス置換完了時	昇温完了時	10時間維持後
ゼオライト 0.06 μm	減圧環境100°C	3.0	0.5	0.5
	減圧環境200°C	2.6	<0.1	<0.1
	不活性環境100°C	6.1	1.6	0.4
	不活性環境200°C	7.5	<0.1	<0.1
二酸化ジルコニウム 0.1~1 μm	減圧環境100°C	0.3	<0.1	<0.1
	減圧環境200°C	0.6	<0.1	<0.1
	不活性環境100°C	<0.1	<0.1	<0.1
酸化アルミニウム 10 μm	減圧環境100°C	<0.1	<0.1	<0.1
	不活性環境100°C	<0.1	<0.1	<0.1

6.実施内容

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

(4)乾燥システムの検討(8/12)

③実施事項、成果(7/10)

(加熱方法の検討)

200℃での加熱を前提に熱量的視点で乾燥時間を試算し検討した。

乾燥時間の算出は蒸発潜熱を入熱量で除して試算した。

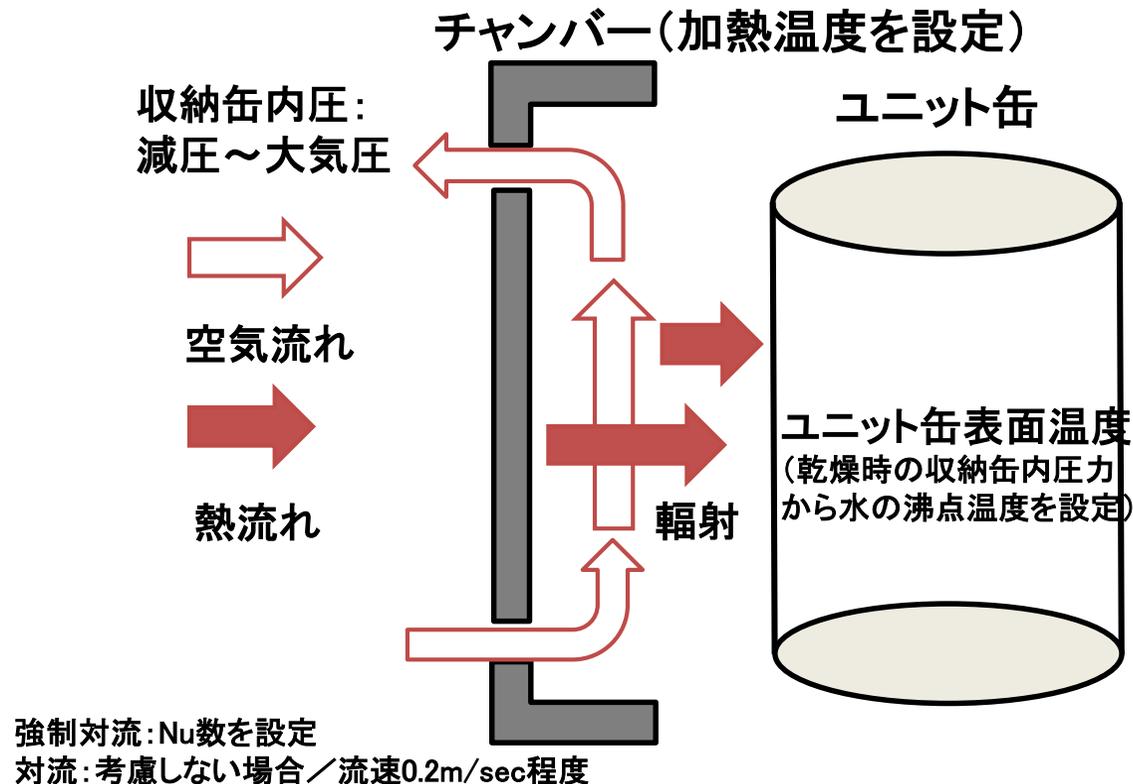


図 伝熱モデルの概要(ユニット缶での乾燥の場合)

6.実施内容

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

(4)乾燥システムの検討(9/12)

③実施事項、成果(8/10)

合理的な乾燥方法の一つとして蒸発潜熱を伝熱計算に基づく入熱量で除して得られる時間を試算し、装置化にあたり入熱方法を比較した。

入熱なしでは、乾燥時間が大きく延長することから加熱乾燥を前提に検討する。減圧乾燥は水の沸点を下げるため外面からの温度差による入熱がしやすいこと等、乾燥時間の短縮に効果が期待できる一方で、温風乾燥は一般的によく用いられている乾燥法であり装置化しやすいと考えられる。また、収納缶形態での乾燥は乾燥時間の面で不利であるが、汚染拡大抑制の観点で有利である。

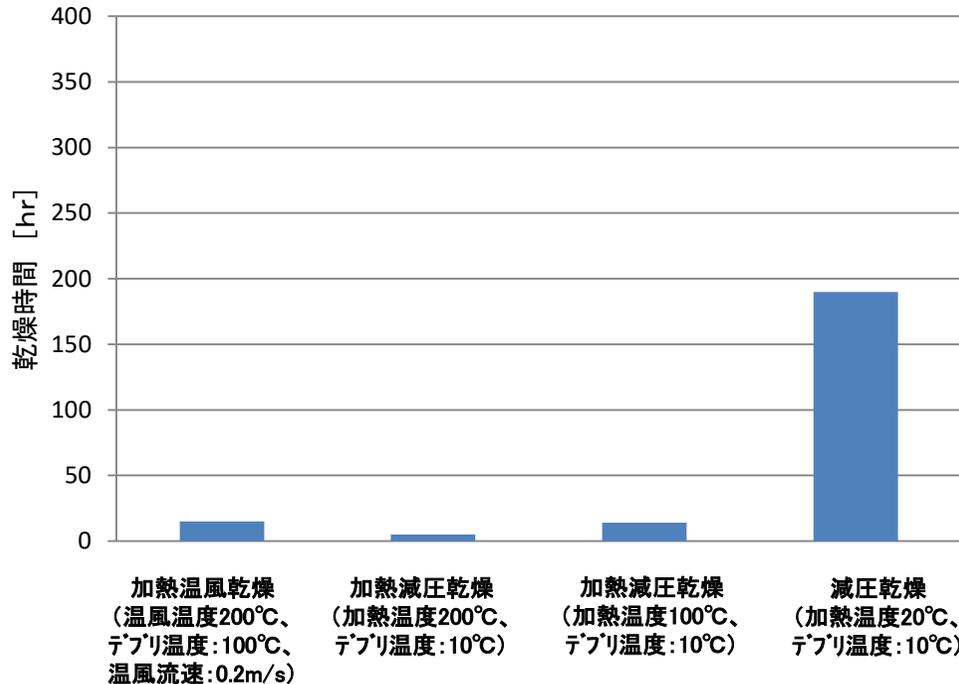


図1 燃料デブリを直接(ユニット缶で)加熱する場合の乾燥時間試算結果

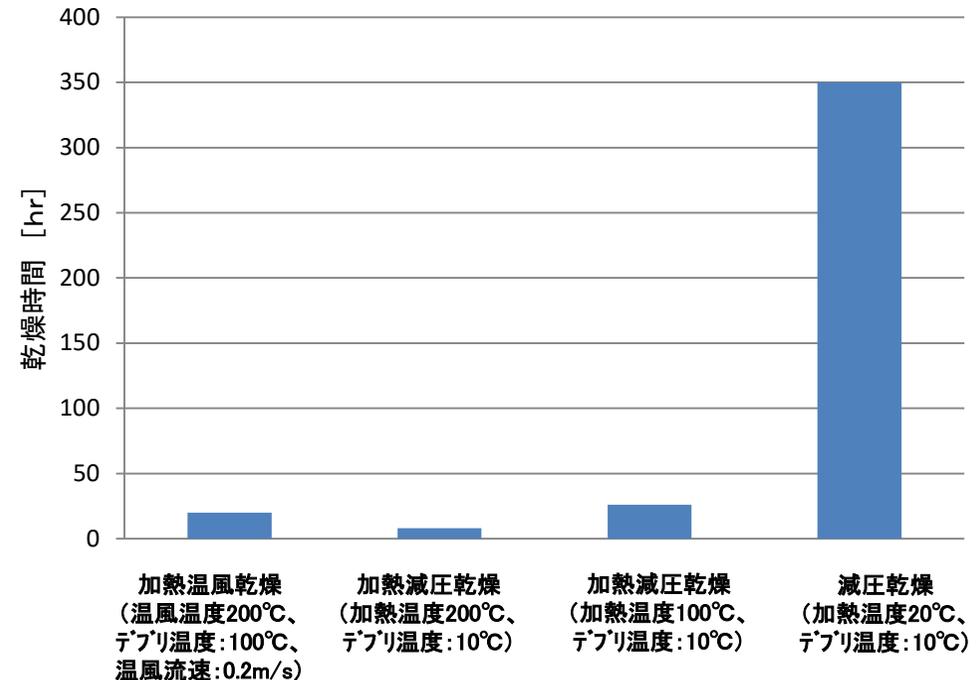


図2 収納缶に入れた状態での乾燥時間試算結果

6.実施内容

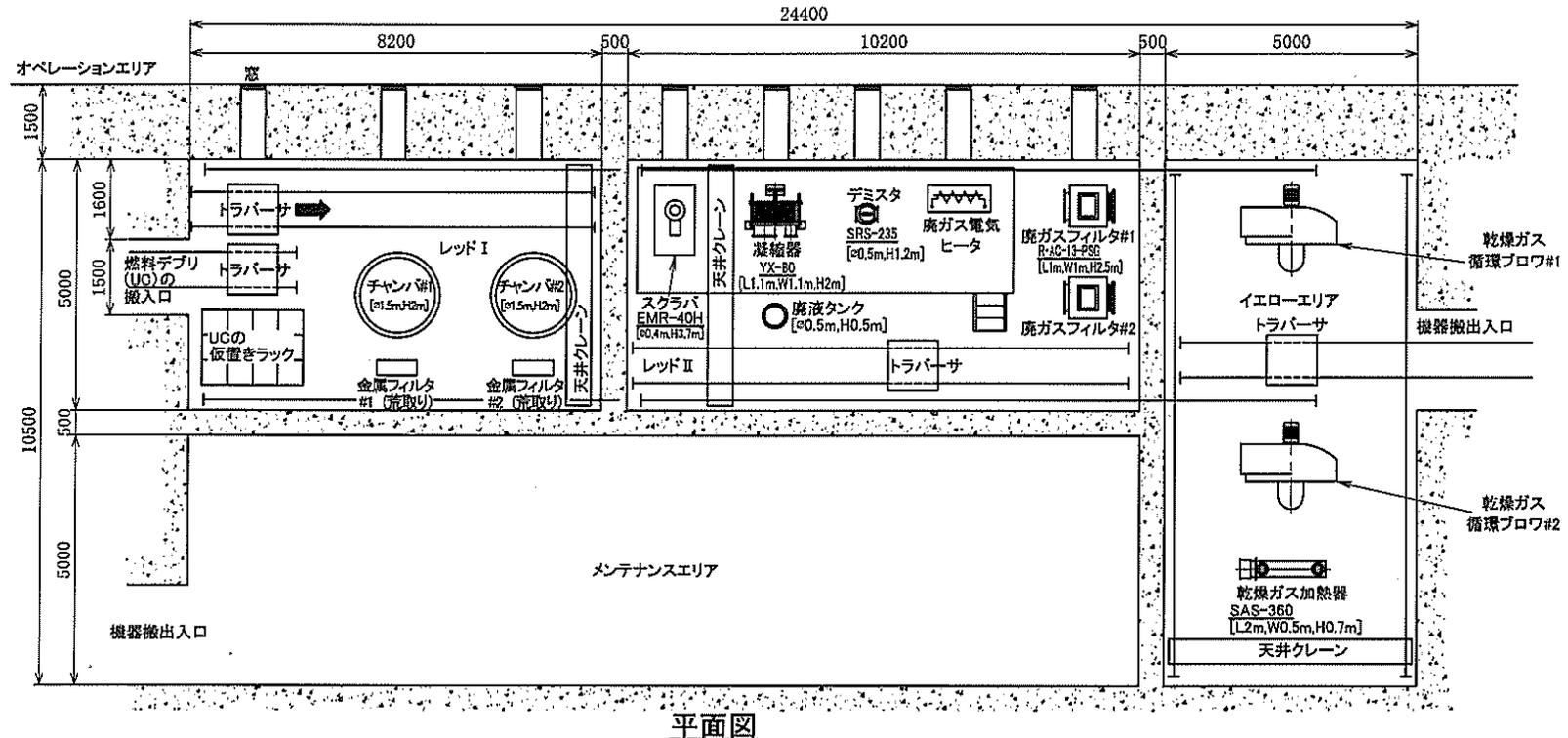
6.2.燃料デブリ収納缶の移送・保管に係る安全要件・仕様及び保管システムの検討

(4)乾燥システムの検討(10/12)

③実施事項、成果(9/10)

今後の課題抽出のため、蒸発量に基づいて想定される機器構成を検討し概念案をまとめた。

⇒乾燥過程中の燃料デブリの挙動データを採取し、改良するとともに個々の機器の仕様を具体化することが必要である。



平面図

図 乾燥装置の概念案の例

6.実施内容

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

(4)乾燥システムの検討(11/12)

③実施事項、成果(10/10)

まとめ

- ・ゼオライト(細孔径 $0.06\mu\text{m}$)は、 200°C で加熱することで乾燥速度がゼロに漸近して乾燥が長引く事象の発生を抑制する結果となり、燃料デブリがゼオライトと同等以上に乾燥が進みやすい物質と仮定できる場合には、 200°C での乾燥は有効な手段になると考えられる。
- ・燃料デブリは初期の含水率が大きい可能性があり、 200°C での加熱に基づいて乾燥時間を、見かけの燃料デブリ体積の30vol%を水分と仮定し、乾燥時間を伝熱計算に基づく入熱量と蒸発潜熱で試算すると加熱による時間短縮効果が期待できる結果となった。
- ・現時点で1F燃料デブリの形状、細孔形態、親水性等の情報は得られていないため、1F燃料デブリがゼオライトよりも難乾燥な物質である可能性も否定できない。また、乾燥に伴うFPガスや微細化した燃料デブリの気体への移行などの挙動についての知見も限定されている。そのため、1F燃料デブリが採取されて乾燥に関わる知見が得られるまでは、燃料デブリ側からの条件は絞らずに検討を進めることとする。
- ・平成29年度に乾燥効率の観点から温風乾燥、加熱減圧(真空)乾燥を選定したが、2019(令和元)年度以降も引き続き双方のケースで検討を進める。

6.実施内容

6.2.燃料デブリ収納缶の移送・保管に係る安全要件・仕様及び保管システムの検討 (4)乾燥システムの検討(12/12)

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、乾式保管の実用化に寄与する。

⑤現場への適用性の観点における分析

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

乾燥時間を熱量的視点で乾燥時間を試算しており、目標を達成していると判断する。

⑦今後の課題

2019(令和元)年度以降、装置として個々の構成機器の具体化の検討を行うこととなるが以下が課題である。

- ・燃料デブリの乾燥過程における乾燥挙動を踏まえた乾燥の制御方法
- ・オフガス処理システムへの条件設定
- ・装置の操作やメンテナンス方法等反映

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

(5)取扱装置の仕様の検討・見直し(1/6)

①目的、目標

収納缶の取扱いにおいて、遠隔での操作を前提とした取扱システムを構築する。特に、蓋締め、吊上げに用いる取扱装置は収納缶専用のもとなることからシステム検討の一環として、収納缶の構造検討と並行して取扱装置(蓋締め装置、収納缶吊り治具)の構造案を決定する。

②既存技術との対比

蓋締め装置自体は既存技術の応用範囲内で設計が可能と考えるが、蓋構造との取合い、遠隔による操作性、収納缶取扱システムにおける制約条件などを考慮した設計とする必要がある。

また、収納缶吊り治具においても、既存技術の応用範囲内で設計が可能と考えるが、蓋締め装置同様に、蓋構造との取合い、遠隔による操作性、収納缶取扱システムにおける制約条件などを考慮した設計とする必要がある。

なお、本技術開発では、蓋構造として、ボルト構造と簡易取付構造(回転による蓋締め)の2種類を検討している。

6.実施内容

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

(5)取扱装置の仕様の検討・見直し(2/6)

③実施事項、成果(1/4)

a.収納缶取扱装置の検討(蓋締め装置)

6.3(2)③a.1.項で検討した蓋構造(簡易取付構造、ボルト構造)の進捗にあわせて、取扱装置(蓋締め装置、収納缶吊り治具)を提案した。

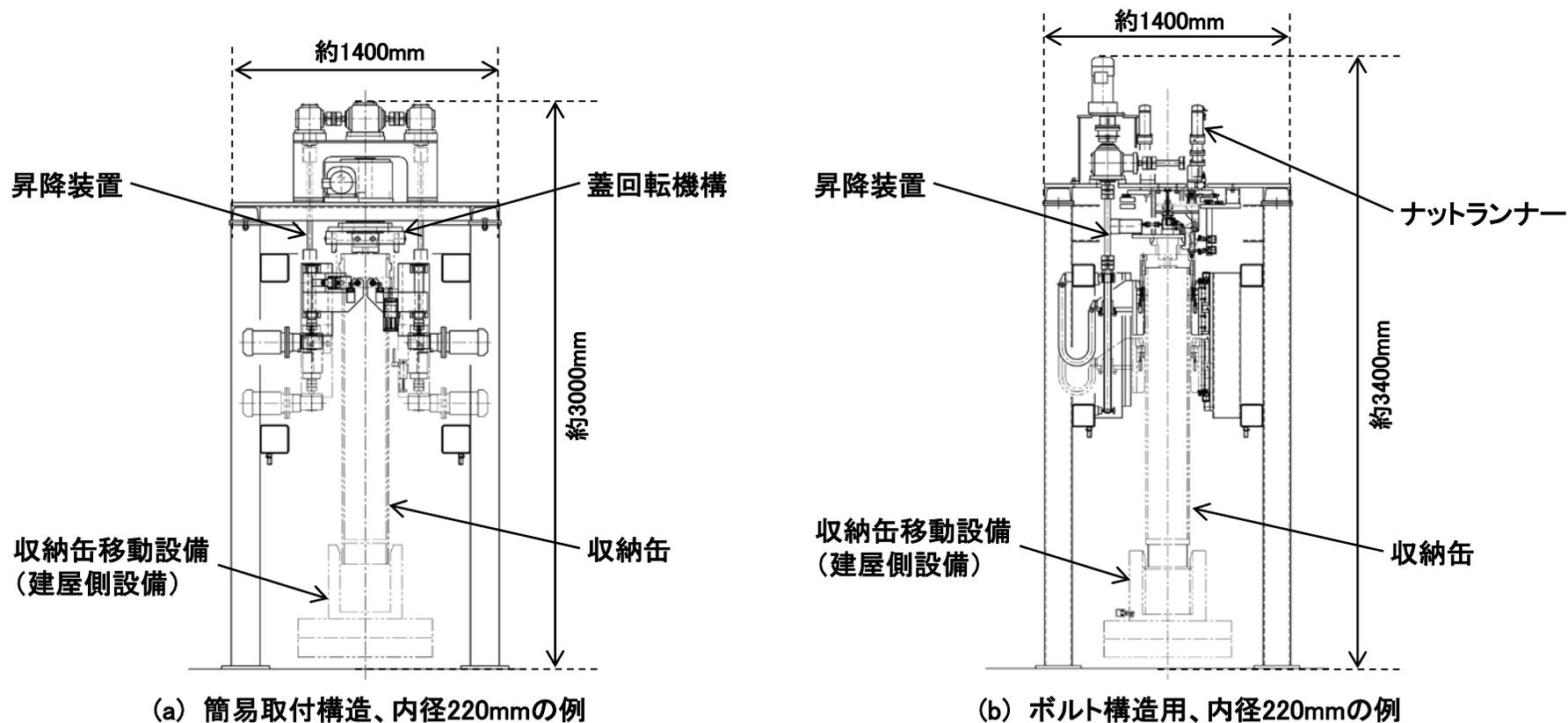


図 蓋締め装置の設計例

6.実施内容

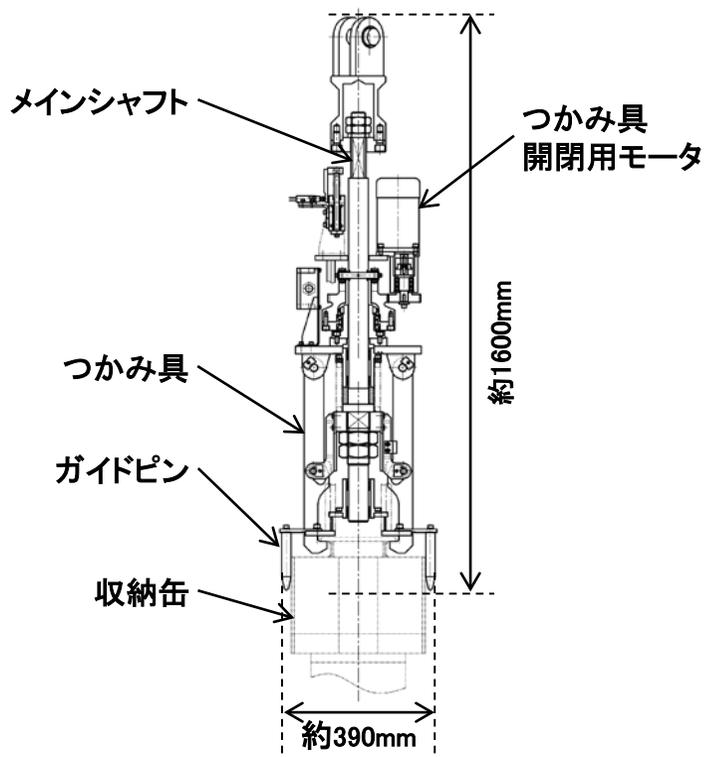
6.2.燃料デブリ収納缶の移送・保管に係る安全要件・仕様及び保管システムの検討

(5)取扱装置の仕様の検討・見直し(3/6)

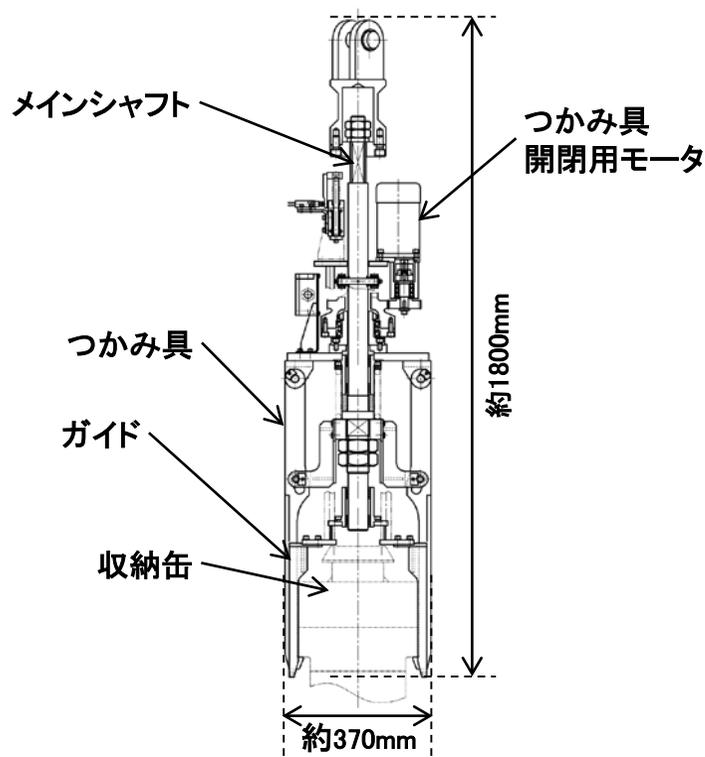
③実施事項、成果(2/4)

a.収納缶取扱装置の検討(収納缶吊り治具)

6.3(2)③a.1.項で検討した蓋構造(簡易取付構造、ボルト構造)の進捗にあわせて、取扱装置(蓋締め装置、収納缶吊り治具)を提案した。



(a) 簡易取付構造、内径220mmの例



(b) ボルト構造用、内径220mmの例

図 収納缶吊具の例

6.実施内容

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

(5)取扱装置の仕様の検討・見直し(4/6)

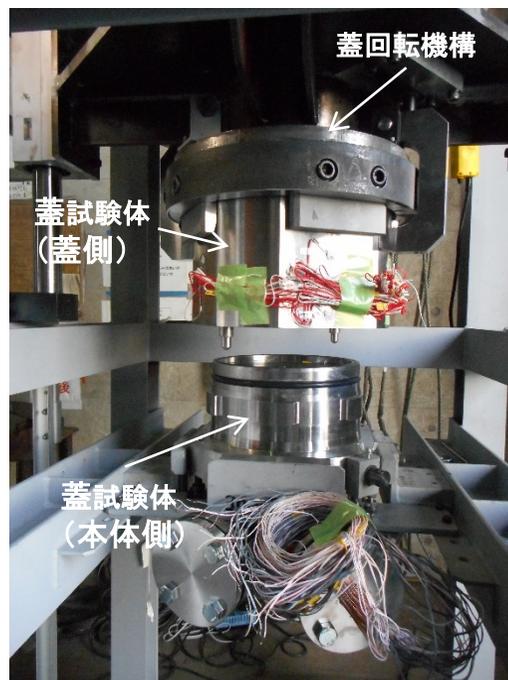
③実施事項、成果(3/4)

b.収納缶取扱装置の検証(蓋締め装置)

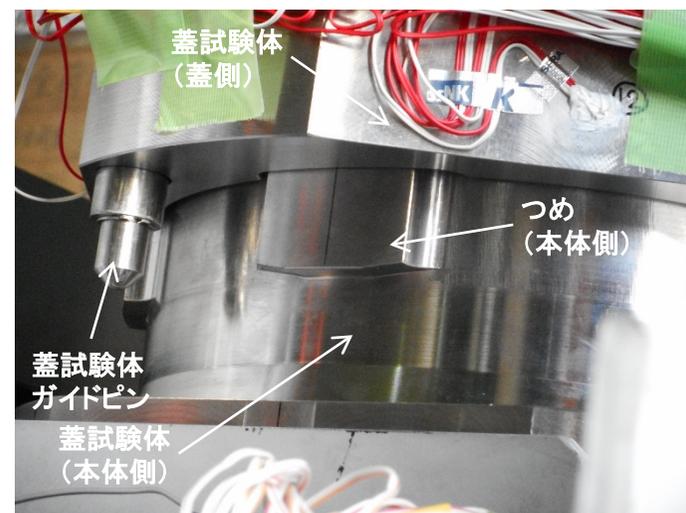
6.3(2)③a.ハ項で実施した蓋構造(簡易取付構造)の成立性確認試験の中で、取扱い性の確認を実施した。その際、取扱装置(蓋締め装置, 収納缶吊り治具)の一部を模擬した治具(蓋構造との取合部のみを模擬した手動操作の治具等)を準備し、試験を実施し、取扱性に関する基本動作を確認するとともに、実機取扱装置構成機器の仕様選定に資する基礎データとして蓋締め時の蓋回転トルクを取得した。



(a) 蓋締め装置外観



(b) 蓋締め試験状況1



(c) 蓋締め試験状況2

図 蓋締め試験の状況例

6.実施内容

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

(5)取扱装置の仕様の検討・見直し(5/6)

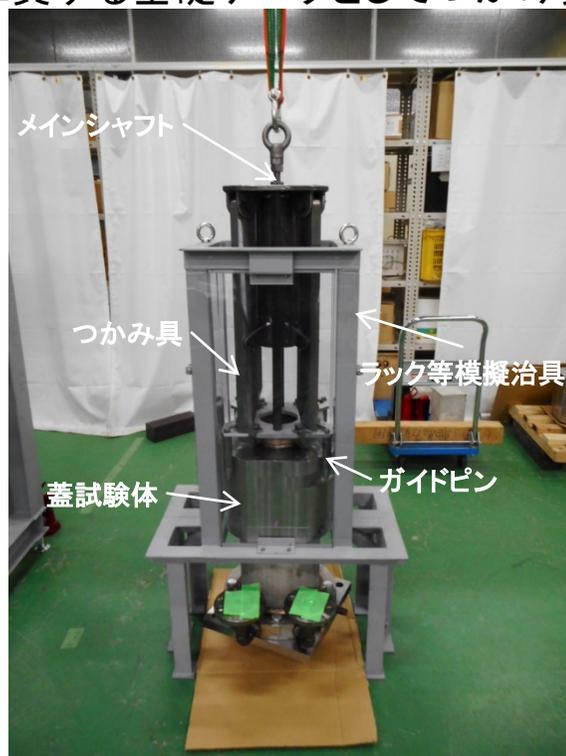
③実施事項、成果(4/4)

b.収納缶取扱装置の検証(収納缶吊り治具)

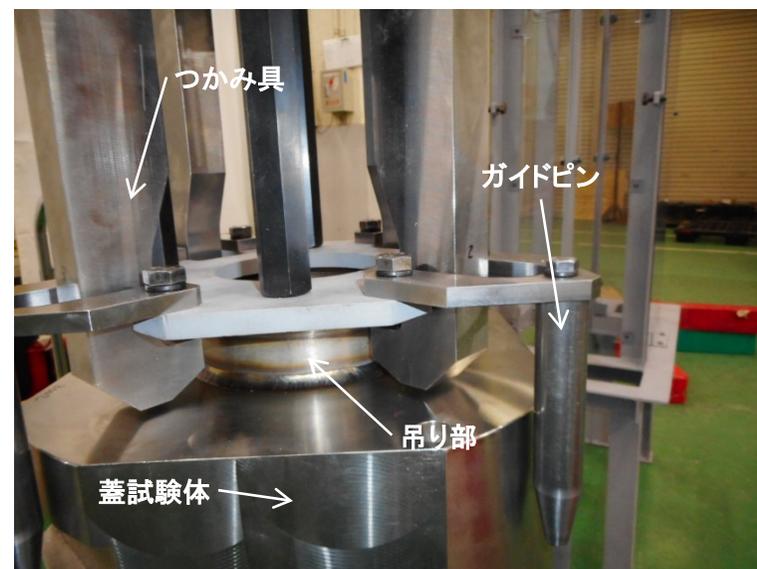
6.3(2)③a.ハ項で実施した蓋構造(簡易取付構造)の成立性確認試験の中で、取扱い性の確認を実施した。その際、取扱装置(蓋締め装置, 収納缶吊り治具)の一部を模擬した治具(蓋構造との取合部のみを模擬した手動操作用の治具等)を準備し、試験を実施し、取扱性に関する基本動作を確認するとともに、実機取扱装置構成機器の仕様選定に資する基礎データとしてつかみ具の開閉操作性やかかり具合を確認した。



(a) 収納缶吊り治具



(b) 収納缶吊り上げ状況



(c) 把持部

図 収納缶吊り試験の状況例(内径220mm用)

6.実施内容

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

(5)取扱装置の仕様の検討・見直し(6/6)

④成果の反映先への寄与

取扱装置(蓋締め装置、収納缶吊り治具)の構造案決定により、取扱装置およびその関連設備(増設建屋、保管施設、揚重機等)の検討に資する情報を提供する。

⑤現場への適用性の観点における分析

現場への適用を踏まえて遠隔操作を考慮した取扱装置仕様としているが、増設建屋等設置設備との取合い等を考慮しモックアップ等による最終確認が必要である。

⑥目標に照らした達成度

目標達成を判断する指標に対して、6.3(2)項で検討した蓋構造案や最新の取扱フロー案を踏まえ、取扱装置(蓋締め装置、収納缶吊り治具)の仕様を提案した。以上のことから目標を達成していると判断される。

⑦今後の課題

取扱装置自体の機構等に関する成立性は確認できたものの、実機取扱装置の設計・製作にあたり、遠隔操作を考慮した取扱装置設置場所である増設建屋等との取合いや実機での運用性を反映することが課題と考えられる。

6.実施内容

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(1)未臨界の安全性検証(1/5)

①目的、目標

燃料デブリ収納・移送・保管の一連のプロセスにおける、燃料デブリの未臨界維持シナリオの立案を目的に、平成29年度までに以下の検討を実施した。

- 安全側の条件による臨界評価結果に基づき、収納缶の形状管理(収納缶内径を220mm以下とする)による未臨界維持シナリオを立案。
- 合理性や取扱い性等の観点から、未臨界を維持しつつ収納缶の内径を拡大する方策を検討し、合理化シナリオを立案。

平成30年度は、平成29年度までに検討した収納缶の内径拡大方策に、工法PJ、基盤PJによる燃料デブリ収納方法の検討結果等の関連PJの検討進捗や新たな知見等を必要に応じて反映し、適切な未臨界維持シナリオの立案を完了する。

6.実施内容

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(1)未臨界の安全性検証(2/5)

②既存技術との対比

TMI-2の燃料デブリ収納缶設計では、安全側の条件として、TMI-2の装荷燃料中の最大濃縮度のペレットを想定した最適減速条件でも、未臨界状態を維持できるように収納缶の内径を制限した。現状、1Fの収納缶も同様の設計思想を踏襲している。

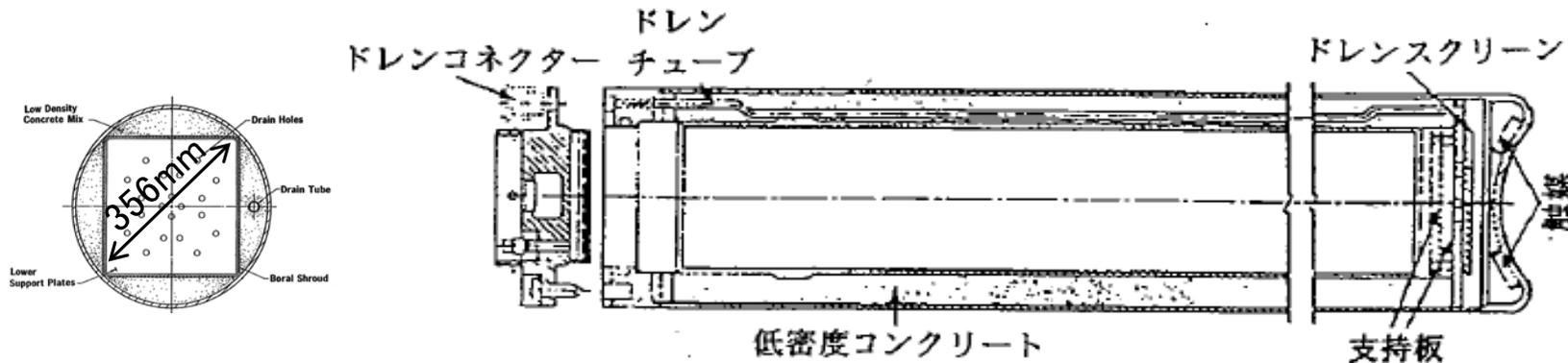


図 TMI-2燃料キャニスター

6.実施内容

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(1)未臨界の安全性検証(3/5)

③実施事項、成果(1/2)

平成29年度までに立案した収納缶の内径拡大方策に、関連PJの進捗や米国技術者とのワークショップの結果等を必要に応じて反映し、適切な未臨界維持シナリオの立案を完了した。

a. 関連PJの調査

関連PJを調査し、未臨界評価条件への適用を検討した。施工条件等から確実性をもって評価条件を緩和できる新たな知見は得られなかった。また、工法(臨界管理)PJで検討されている中性子吸収材は臨界防止の観点で有用ではあるものの、その運用は未確定であり、収納缶PJにおいて現時点で評価条件として考慮できないと判断した。

b. 米国技術者とのワークショップ

ワークショップの議論を通じて、BWR燃料の不均一性を考慮している現在の評価条件の適切性が確認された。評価条件の緩和には、それを裏付ける十分なデータが必要との認識で一致した。

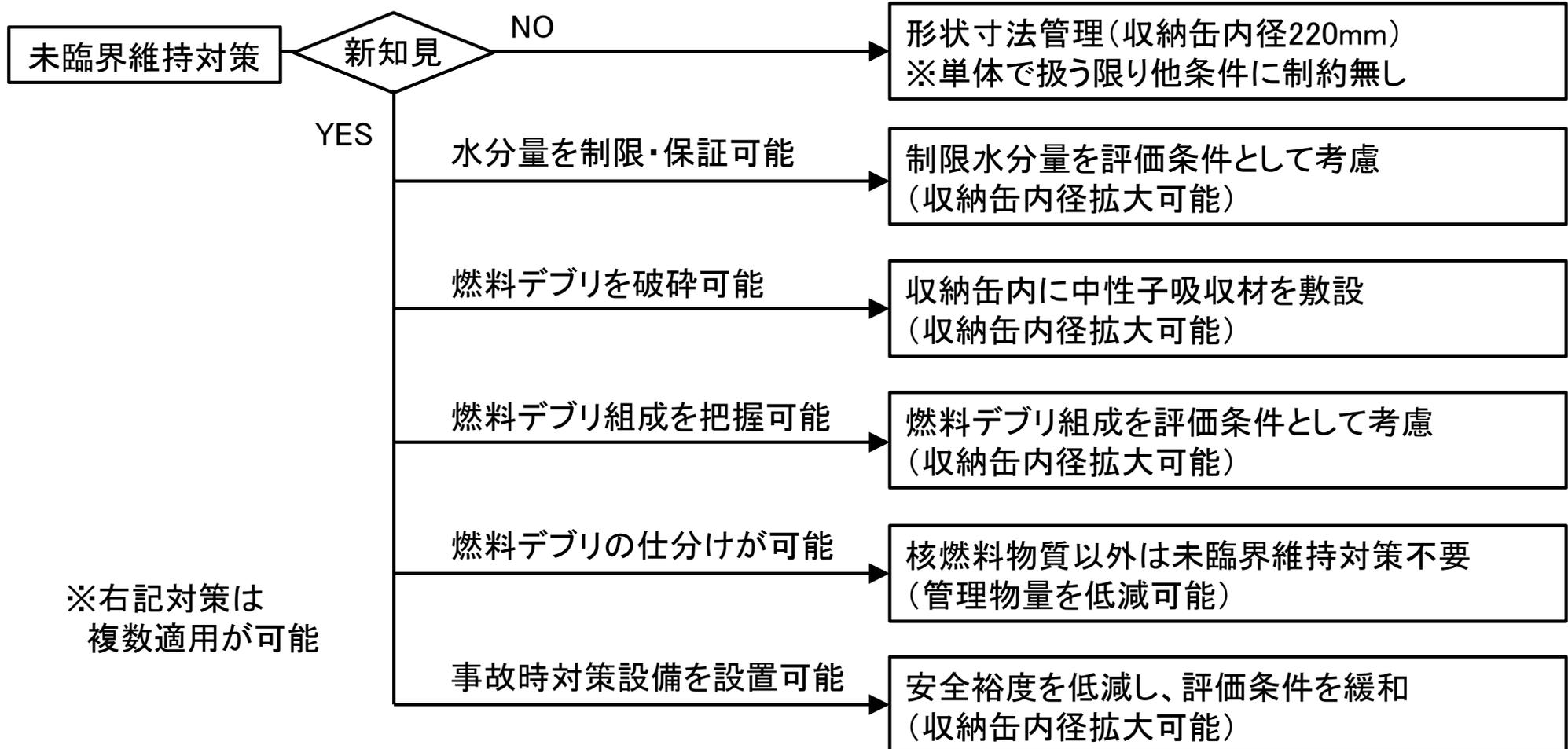
6.実施内容

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(1)未臨界の安全性検証(4/5)

③実施事項、成果(2/2)

c. 未臨界維持シナリオ



6.実施内容

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(1)未臨界の安全性検証(5/5)

④成果の反映先への寄与

- 未臨界維持シナリオを確立することで、設計の選択肢及び適用の条件が明確になる。
- 収納缶内径拡大方策が成立すれば、燃料デブリ取り出しのスループットが向上する可能性がある。

⑤現場への適用性の観点における分析

未臨界維持シナリオの立案に向け、今後、主に以下の観点から現場への適用性を分析する。

- 内部調査・サンプリング等の成果による燃料デブリ性状
- 燃料デブリ取り出し作業・保管等で想定される実運用上での制約条件

⑥目標に照らした達成度

工法PJ、基盤PJ等の関連PJの検討進捗状況を調査した。また、米国技術者とのワークショップを通じ、燃料デブリの粒径、含水量を考慮したこれまでの未臨界維持評価手法(一例を補足-4に示す)の適切性を検討した。これらの知見を取り込み、未臨界維持シナリオ案の導出を完了した。以上により、本年度計画は達成されたと判断する。

⑦今後の課題

特になし。

6.実施内容

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(2)構造強度の安全性検証(1/19)

①目的、目標

燃料デブリを収納・移送・保管するための収納缶の蓋構造案を決定する。そのために、平成29年度の検討結果を踏まえて蓋構造を再検討し、蓋構造試験体を用いた取扱い性確認および荷重試験により、蓋構造の成立性を検証する。これらの結果に基づき、平成30年度末に蓋構造の設計案を提示する。

また、2020(令和2)年度の実施を検討している実機大収納缶荷重試験に向けた準備として、実機大収納缶試験体を設計し、試験計画を立案する。

②既存技術との対比

平成29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、遠隔での取扱い性や転倒等の事象発生時における構造健全性に懸念があるため、1F条件に合わせた確認が必要である。

6.実施内容

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(2)構造強度の安全性検証(2/19)

③実施事項、成果(1/17)

a.収納缶蓋構造の成立性検証

Ⅰ.収納缶および収納缶蓋に対する要求事項(1/2)

蓋構造の検討にあたり、安全機能における収納缶要求事項に対して蓋要求事項を再確認した。

表 収納缶および蓋に対する要求条件

安全機能		収納缶要求事項	蓋要求事項
未臨界		収納缶単体での未臨界を維持する。配列時の未臨界は他機器で行う。	未臨界維持の観点から燃料デブリ片を収納缶外に放出しないこと。
冷やす	除熱	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除熱可能なため、特別な要求(除熱を向上させるフィン等の設置)はしない。	—
閉じ込める	閉じ込め	水素滞留防止口を設ける。実運用における汚染拡大防止の措置(フィルターを設置等)は講じるが、バウンダリとしての頑健さの観点で安全評価上は閉じ込め機能は要求しない。	汚染拡大防止の措置として、燃料デブリ片を収納缶外に放出しないこと。
	遮蔽	収納缶の取扱性などの観点から遮蔽機能は要求しない。	—
その他 (上記機能の維持)	構造	収納缶の安全機能を維持できる健全性を有するようにする。ただし、取扱性などの観点から最低限の強度を維持できるようにする。	閉じ込め性担保のため以下の構造強度を維持できること。 ・収納缶の内圧に対して健全性を維持できること ^{注1} 。 ・収納缶の転倒等による衝撃を受けた場合においても、蓋の外れや破損が起こらないこと。
	材料健全性		
	水素	発生する水素を収納缶外に放出できるようにする。	(必要に応じて蓋にベント機構を設ける。)
	火災防止	残留ジルコニウム火災に対して、収納缶に閉じ込め機能を要求しないため、不活性雰囲気や冠水状態の維持は要求できない。	—

注1: 収納缶は気体に対する密封性を要求しないものの、蓋の構造設計のための条件として一定の内圧に耐えることを要求することとする。

6.実施内容

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(2)構造強度の安全性検証(3/19)

③実施事項、成果(2/17)

a.収納缶蓋構造の成立性検証

1.収納缶および収納缶蓋に対する要求事項(2/2)

蓋構造の検討にあたり、収納缶の取扱フロー案をもとに、遠隔での取扱上の要求を以下のとおり設定した。

- ・気中(または(および)水中)での遠隔操作による蓋締めおよび蓋開放が可能であること。
- ・作業性の観点から、蓋の回転など簡易な動作で蓋締めが可能であること。

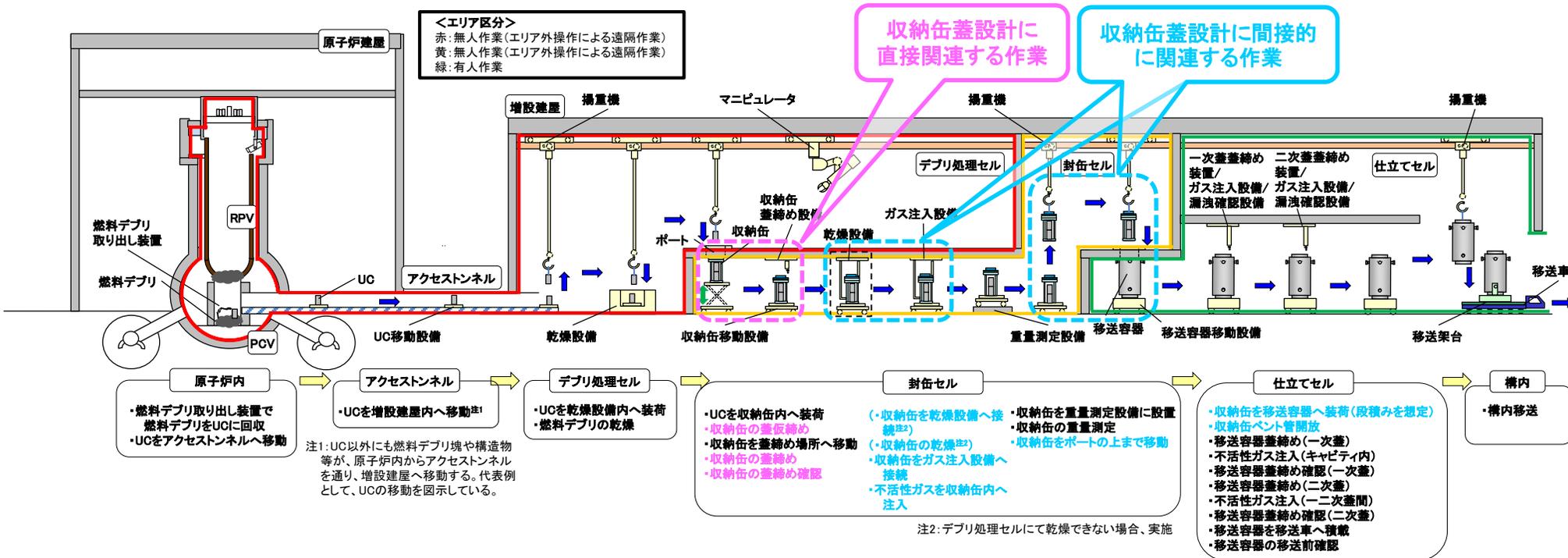


図 収納缶の取扱フロー案

6.実施内容

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(2)構造強度の安全性検証(4/19)

③実施事項、成果(3/17)

a.収納缶蓋構造の成立性検証

ロ.収納缶蓋構造の設計コンセプト(1/2)

収納缶蓋構造に対する要求事項をもとに、平成29年度の検討結果を踏まえて、蓋構造の設計コンセプト案を設定した。

表 収納缶蓋構造の設計コンセプト(1/2)

項目	蓋要求事項	設計条件	蓋構造の設計コンセプト案
未臨界 閉じ込め	未臨界維持の観点から燃料デブリ片を収納缶外に放出しないこと。	燃料デブリ片(固体)を閉じ込める設計とすること。 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、移送容器、保管容器、建屋などで担保する。	収納缶本体と蓋のすき間を通過する燃料デブリ片(固体)を放出しないようシール材を設ける。 なお、液体および気体の閉じ込め性は収納缶では担保しないが、設計としてはシール材で閉じ込める。 蓋部にベント機構を設ける場合には、ベント機構を通過する燃料デブリ片(固体)を、ベント機構の流路閉止およびフィルタにより閉じ込める。 なお、液体および気体の閉じ込め性は収納缶では担保しないが、設計としてはベント機構の流路閉止により閉じ込める。
構造	収納缶の内圧に対して健全性を維持できること。	温度上昇や水素発生による圧力上昇(1.3MPa程度注1)に対して、設計上の健全性を維持できること。	設計圧力条件に耐えられる板厚、締付力等を確保する。
	収納缶の転倒等による衝撃を受けた場合においても、蓋の外れや破損が起こらないこと。	蓋に吊上げ荷重(静的荷重3G程度注2)が負荷された状態で、蓋の把持部が破損しないこと。 収納缶の転倒により衝撃荷重(静的荷重100G程度注3)が負荷された場合でも、蓋の外れや破損が起こらないこと。	設計荷重条件に耐えられる板厚、締付力等を確保する。 転倒の衝撃荷重(静的荷重100G程度)を受けても、蓋の外れや破損が起こらないようにする。 また、シール面にすき間が生じないようにする。

注1: 温度上昇および水素発生による圧力上昇を考慮し暫定的に設定。
注2: 既存の使用済燃料移送容器の取扱い条件を参考に暫定的に設定。
注3: 既存の使用済燃料移送容器の落下条件を参考に暫定的に設定。

6.実施内容

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(2)構造強度の安全性検証(5/19)

③実施事項、成果(4/17)

a.収納缶蓋構造の成立性検証

ロ.収納缶蓋構造の設計コンセプト(2/2)

収納缶蓋構造に対する要求事項をもとに、平成29年度の検討結果を踏まえて、蓋構造の設計コンセプト案を設定した。

表 収納缶蓋構造の設計コンセプト(2/2)

項目	蓋要求事項	設計条件	蓋構造の設計コンセプト案
取扱性	気中または(および)水中での遠隔操作による蓋締めおよび蓋開放が可能であること。	遠隔作業で蓋の蓋締めが可能なこと。また、蓋締め確認が可能なこと。	遠隔で締付可能な構造を検討する。また、目視により蓋締め確認ができるようにする。
		その他、燃料デブリ収納・移送・保管に関する取扱が可能なこと。	蓋での吊り上げを可能なようにする。 乾燥設備やガス注入設備等と接続できるようにする。 移送時や保管時に段積みが可能ないように収納缶底部構造と取合いできる蓋とする。 移送時や保管時に水素を収納缶外に放出可能なようにする。
	作業性の観点から、蓋の回転など簡易な動作で蓋締めが可能であること。	数回の動作で蓋締めが可能なこと。	締付構造の1案として、蓋の回転で蓋締めができる簡易的な構造を検討する。

6.実施内容

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(2)構造強度の安全性検証(6/19)

③実施事項、成果(5/17)

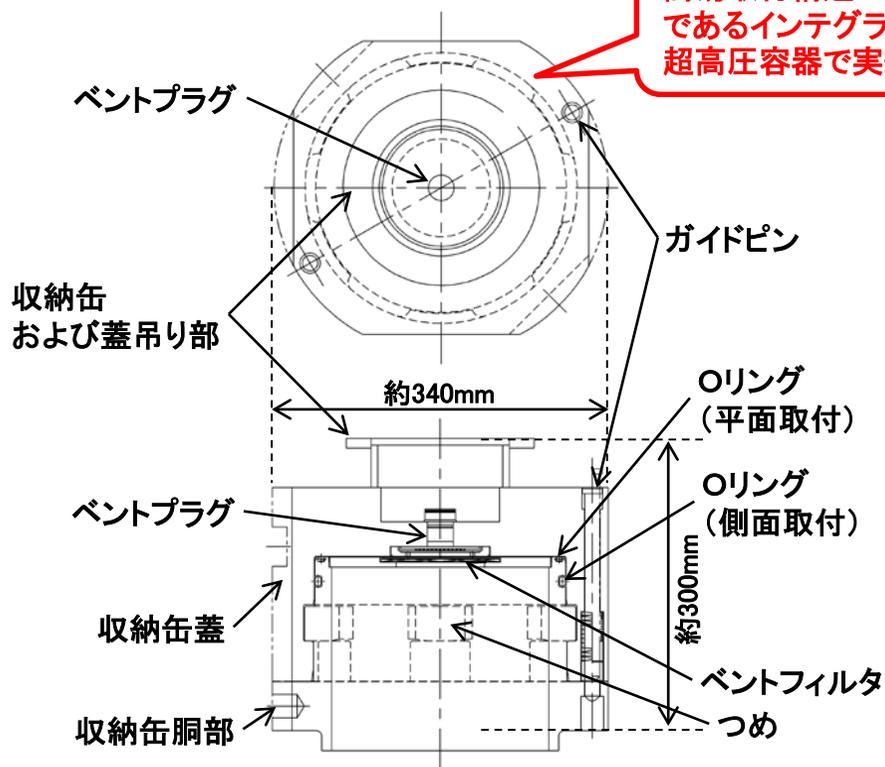
a.収納缶蓋構造の成立性検証

ハ.蓋構造の検討

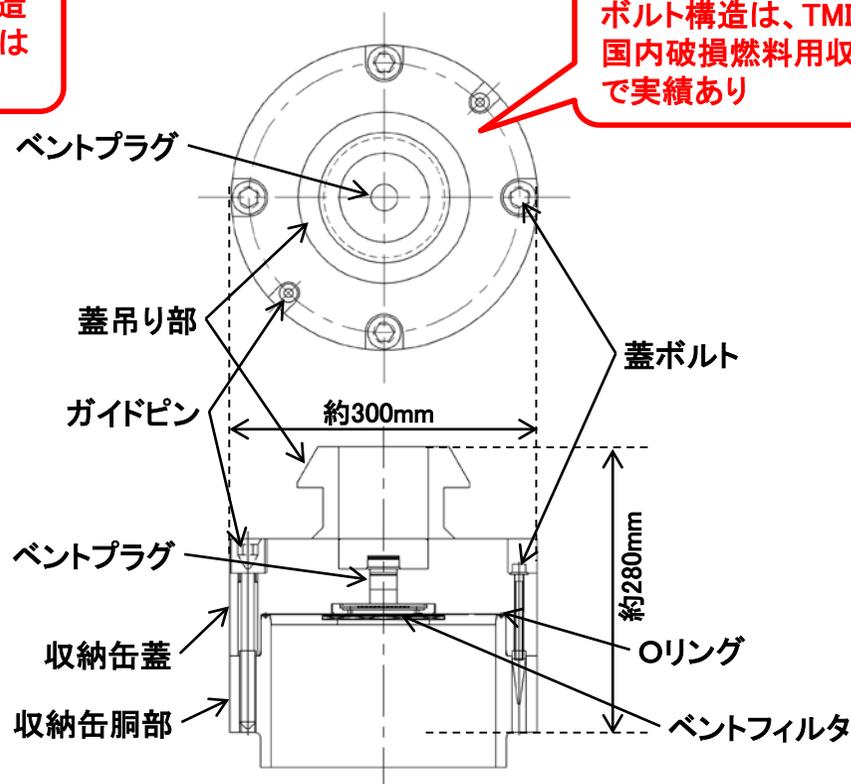
蓋構造の設計コンセプト案にもとづき、蓋構造案を設計した。なお、内径220mmと内径400mmともに基本形状・構造は同じである。

簡易取付構造の基本構造であるインテグラル方式は超高压容器で実績あり

ボルト構造は、TMI-2や国内破損燃料用収納缶で実績あり



(a)簡易取付構造



(b)ボルト構造

図 蓋構造の設計例(収納缶内径φ220 mmの場合)

6.実施内容

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(2)構造強度の安全性検証(7/19)

③実施事項、成果(6/17)

a.収納缶蓋構造の成立性検証

ニ.成立性確認試験の計画(1/2)

蓋構造の成立性を検証するため、成立性確認試験として取扱い性確認および荷重試験(平成29年度に抽出した評価すべき事象として、鉛直落下、転倒、収納缶上部への収納缶の鉛直落下)を実施する。試験実施にあたり、収納缶の取扱フローに基づき、試験条件を決定した。

なお、蓋構造試験体は、遠隔での取扱性や転倒等の事象発生時における構造健全性に懸念がある簡易取付構造で実施し、ボルト構造は解析により転倒等の事象発生時の評価を実施する。

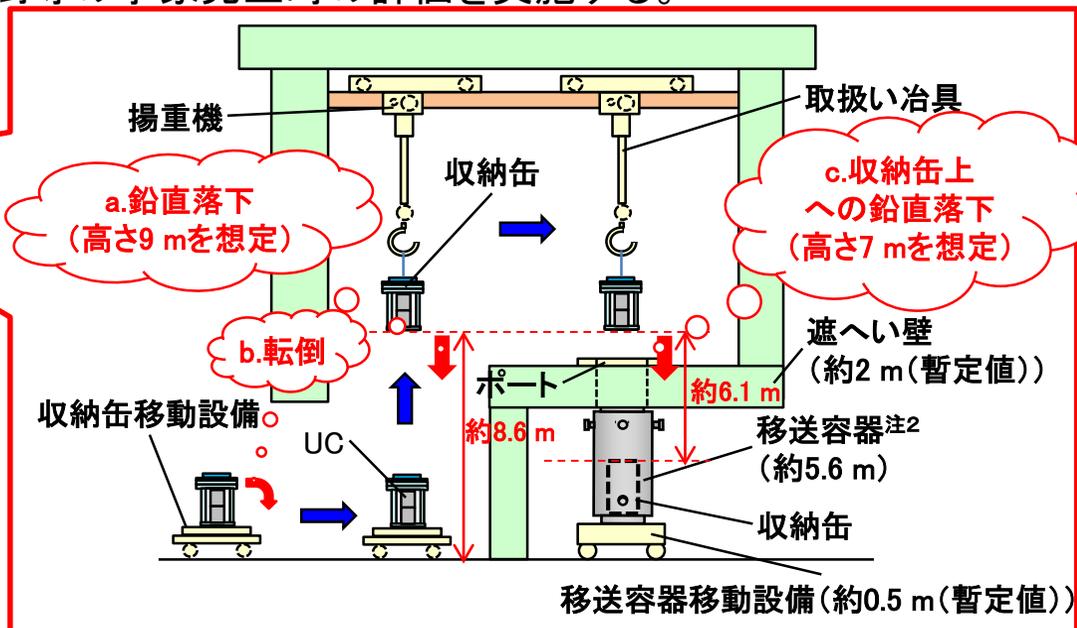
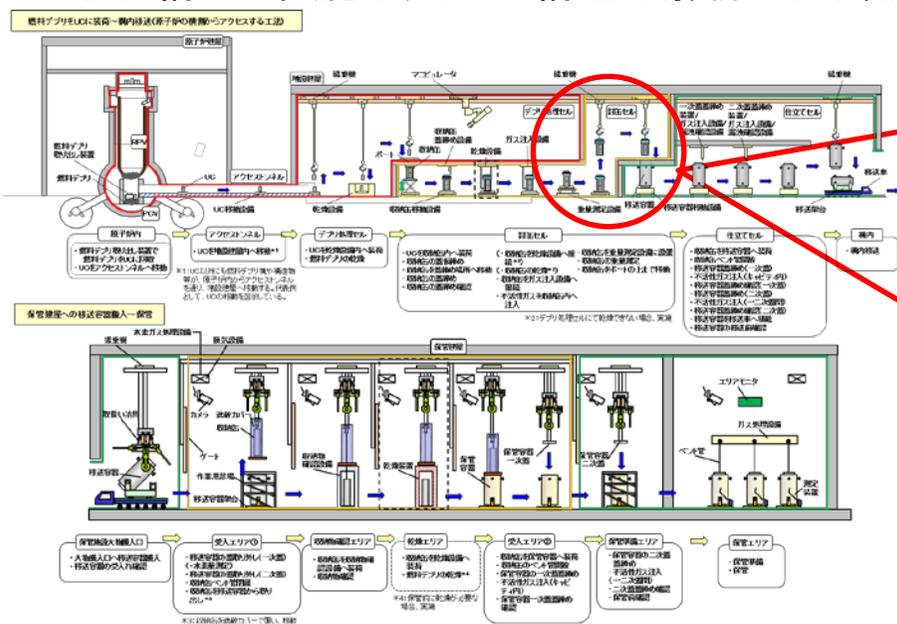


図 収納缶取扱いフロー案

図 事象の抽出例^{注1}

注1: 保管施設側事象もこれらと同じか包絡されていることを確認済み
注2: 既存の使用済燃料輸送容器を想定

6.実施内容

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(2)構造強度の安全性検証(8/19)

③実施事項、成果(7/17)

a.収納缶蓋構造の成立性検証

ニ.成立性確認試験の計画(2/2)

荷重試験では、試験上の制約等を考慮しながら、実機条件を模擬できるように試験体系を設定した。その際、実機条件と試験体系の動解析結果の比較により、実機条件を包絡した荷重試験であることを確認した。

表 実機条件と試験体系の比較

	鉛直落下(収納物の蓋への衝突)	転倒	収納缶上部への収納缶の鉛直落下
実機条件	<p>収納缶蓋 収納缶胴部 収納物 緩衝構造</p>	<p>収納缶蓋 収納缶胴部 収納物 緩衝構造 収納缶移動設備</p>	<p>収納缶蓋 収納物 収納缶胴部 緩衝構造</p>
試験体系	<p>収納物模擬体 ガイド ハンマー 蓋試験体(胴部側) 蓋試験体(蓋側)</p>	<p>蓋試験体(蓋側) 蓋試験体(胴部側) 収納物模擬体 転倒治具 蓋試験体(胴部側) 蓋試験体(蓋側)</p>	<p>収納缶模擬体 ガイド 緩衝構造模擬体 蓋試験体(蓋側) 蓋試験体(胴部側)</p>
試験体系設定の考え方	<p>実機体系では、収納物の衝突速度は不確定であり、測定も難しい。 ⇒上下を逆にし、収納物を落下させ、蓋内面に衝突させる試験を実施。動解析により、収納物の衝突速度を算出、衝突速度が同じとなるように落下高さを設定。</p>	<p>実機体系では、転倒時の支点が安定せず、蓋部を適切に床に衝突させることが難しい。 ⇒蓋構造試験体に転倒治具を取り付け、下端を支点として試験を実施。実機条件と負荷が同じとなるように、転倒治具の重さや長さ、収納物重量を設定。</p>	<p>実機体系では、蓋上面に適切に落下させることが難しい。 ⇒蓋構造上部に底部緩衝構造模擬体を設置、その上に重量模擬体を落下させる試験を実施。なお、被衝突側の収納缶の底部緩衝構造なしで保守的な試験を実施。</p>

6.実施内容

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

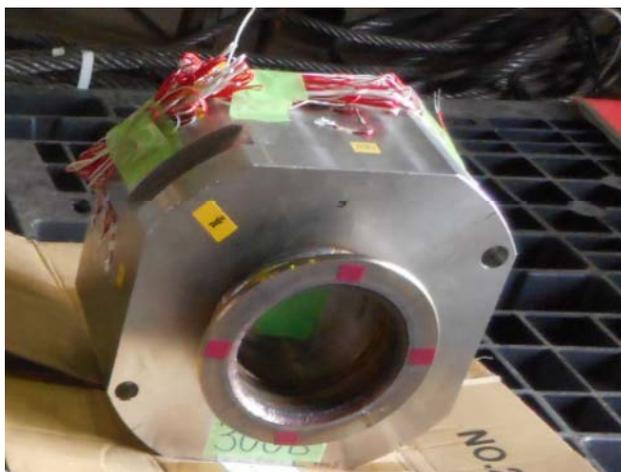
(2)構造強度の安全性検証(9/19)

③実施事項、成果(8/17)

a.収納缶蓋構造の成立性検証

ホ.成立性確認試験用蓋試験体の製作

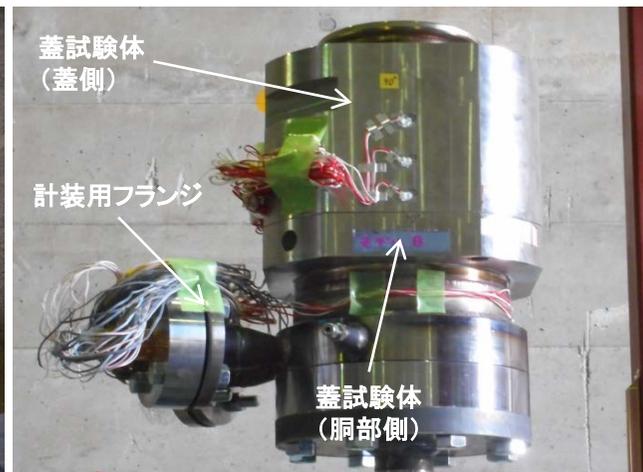
荷重試験に使用する蓋試験体を製作した。蓋試験体は、実機大とし、内径220 mmに加え、内径拡大を考慮した内径400 mmも製作し、試験を実施した。荷重試験にあたり、試験の前後で6.2(5)項で示した取扱い試験を実施し、取扱性について確認した。



(a) 蓋側



(b) 本体側



(c) 蓋取付状況

図 蓋構造試験体の例(転倒試験用)

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

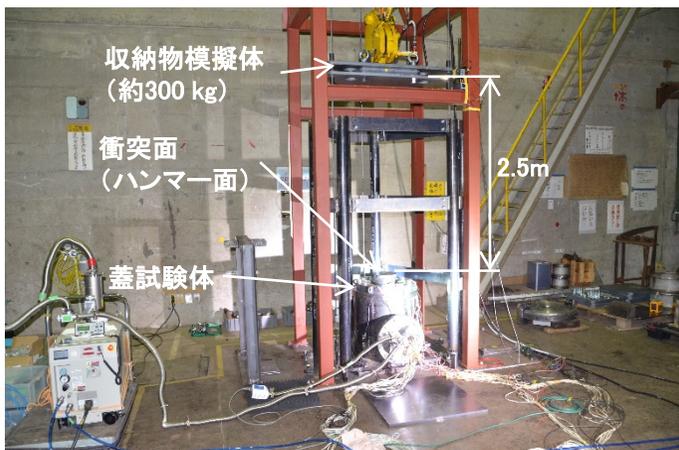
(2)構造強度の安全性検証(10/19)

③実施事項、成果(9/17)

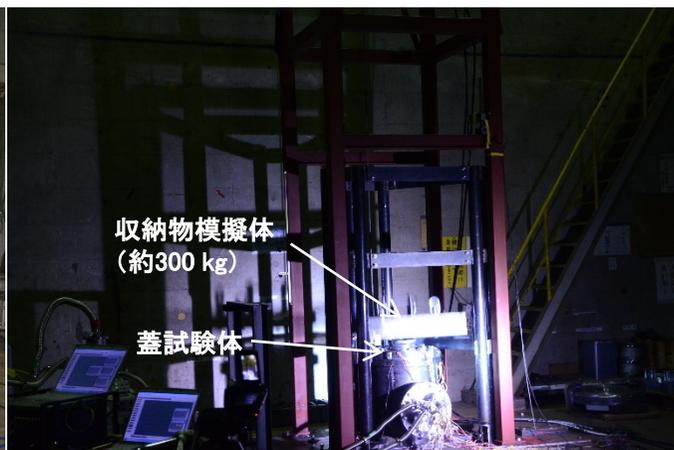
a.収納缶蓋構造の成立性検証

△.成立性確認試験の実施(鉛直落下(収納物の蓋への衝突))

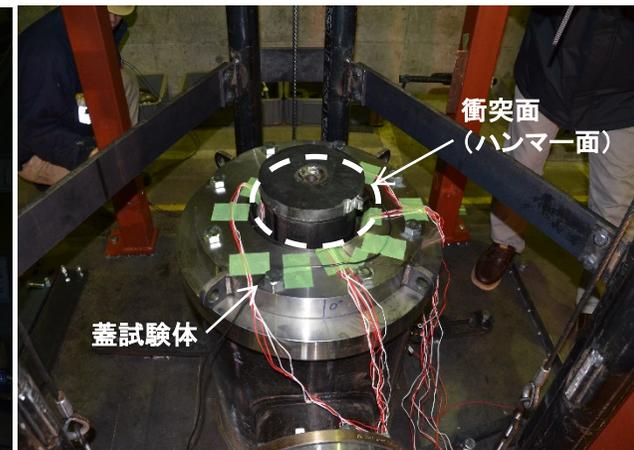
鉛直落下(収納物の蓋への衝突)を模擬した試験を実施した。収納物模擬体の落下速度の測定結果から、計画どおりの試験ができたと考えられる。



(a) 試験の概要



(b) 試験の状況



(c) 試験後の蓋試験体の状況例

図 蓋構造の成立性確認試験の状況(鉛直落下(収納物の蓋への衝突、収納缶内径220mm))

6.実施内容

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(2)構造強度の安全性検証(11/19)

③実施事項、成果(10/17)

a.収納缶蓋構造の成立性検証

△.成立性確認試験の実施(鉛直落下(収納物の蓋への衝突))

鉛直落下(収納物の蓋への衝突)を模擬した試験より、内径220 mmでは蓋構造の健全性を確認した。また、内径400 mmでは試験後蓋が開けられなかったが、実機を模擬した解析では蓋開けに影響がある変形は確認されなかったことから、実機では発生しない現象と推定、蓋の健全性に問題がないと考えられる。

表 鉛直落下(収納物の蓋への衝突)試験の結果概要

項目	評価目安値	内径220 mm		内径400 mm		備考
蓋の破損	変形が公差以下	試験前後の寸法差は公差以下	○	蓋開け不可のため未確認	—	
蓋の脱落	破損がないこと	つめ部に変形が確認されたが蓋の脱落に至るような破損なし	○	蓋開け不可のため未確認	—	
シール部からの漏えい	シール面近傍のすき間の変形が公差以下	試験前後の寸法差は公差以下	○	蓋開け不可のため未確認	—	
	漏えい率が 3×10^{-2} ref cm^3/s 以下	試験前後とも 1×10^{-7} ref cm^3/s 程度で漏えいなし	○	試験前後とも 1×10^{-7} ref cm^3/s 程度で漏えいなし	○	1 atm、25°Cの値、評価目安値は既存輸送容器を参考に設定した
	シール面近傍のひずみは弾性範囲内	測定されたひずみは弾性範囲内	○	一部塑性ひずみが測定された	△	内径400mmで一部塑性ひずみが測定されたが、漏えいは確認されなかった
	Oリングに破損がないこと	破損は確認されなかった	○	蓋開け不可のため未確認	—	
シール部からの瞬間的な漏えい	—	試験前後で圧力変動はなく瞬間的な漏えいは確認されなかった	○	試験前後で圧力変動はなく瞬間的な漏えいは確認されなかった	○	瞬間的な漏えい防止に対する要否は決まっていない
蓋開け	—	蓋開けが可能	○	蓋開け不可	×	内径400 mmでは試験を模擬した解析でも蓋開けに影響がある変形が確認されたが、実機を模擬した解析では変形が確認されなかった(実機に比べて試験の衝撃荷重が大きかったことが原因と推定)
吊り上げ	蓋吊り部に変形がないこと	蓋吊り部の変形なし	○	蓋吊り部の変形なし	○	

6.実施内容

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

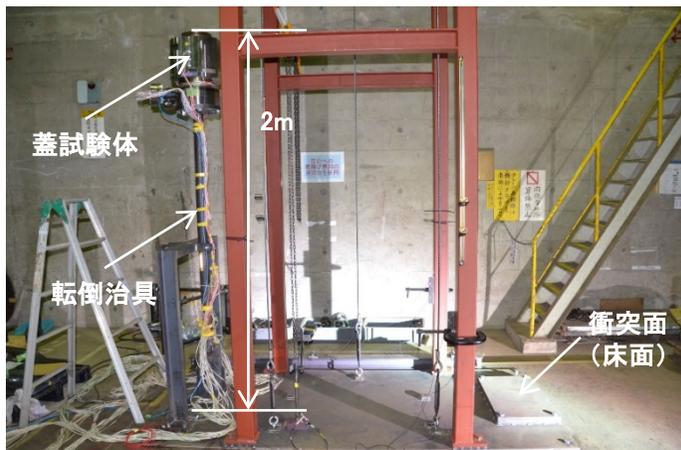
(2)構造強度の安全性検証(12/19)

③実施事項、成果(11/17)

a.収納缶蓋構造の成立性検証

△.成立性確認試験の実施(転倒)

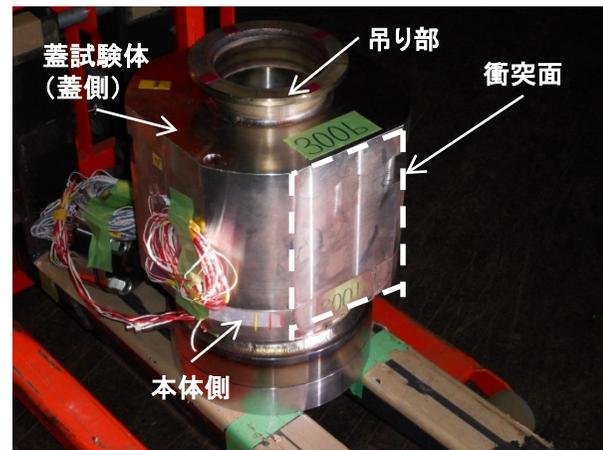
転倒を模擬した試験を実施した。蓋試験体の転倒速度の測定結果から、計画どおりの試験ができたと考えられる。



(a) 試験の概要



(b) 試験の状況



(c) 試験後の蓋試験体の状況例

図 蓋構造の成立性確認試験の状況(収納缶の転倒、収納缶内径220 mm)

6.実施内容

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(2)構造強度の安全性検証(13/19)

③実施事項、成果(12/17)

a.収納缶蓋構造の成立性検証

△.成立性確認試験の実施(転倒)

転倒を模擬した試験より、以下のとおり、蓋構造の健全性を確認した。

表 転倒試験の結果概要

項目	評価目安値	内径220 mm		内径400 mm		備考
蓋の破損	変形が公差以下	試験前後の寸法差は公差以下	○	試験前後の寸法差は公差以下	○	
蓋の脱落	破損がないこと	破損は確認されなかった	○	破損は確認されなかった	○	
シール部からの漏えい	シール面近傍のすき間の変形が公差以下	試験前後の寸法差は公差以下	○	試験前後の寸法差は公差以下	○	
	漏えい率が 3×10^{-2} ref cm^3/s 以下	試験前後とも 1×10^{-7} ref cm^3/s 程度で漏えいなし	○	試験前後とも 1×10^{-7} ref cm^3/s 程度で漏えいなし	○	1 atm、25°Cの値、評価目安値は既存輸送容器を参考に設定した
	シール面近傍のひずみは弾性範囲内	一部塑性変形が測定された	△	一部塑性ひずみが測定された	△	一部塑性ひずみが測定されたが、漏えいは確認されなかった
	Oリングに破損がないこと	破損は確認されなかった	○	破損は確認されなかった	○	
シール部からの瞬間的な漏えい	—	試験前後で圧力変動が確認されたが、衝撃等による体積変動が原因と判断	○	試験前後で圧力変動が確認されたが、衝撃等による体積変動が原因と判断	○	瞬間的な漏えい防止に対する要否は決まっていない
蓋開け	—	蓋開けが可能	○	蓋開けが可能	○	
吊り上げ	蓋吊り部に変形がないこと	蓋吊り部の変形なし	○	蓋吊り部の変形なし	○	

○:問題なし、△:評価目安値を超える結果も確認されたが他結果等より総合的に問題なしと判断、×:問題あり、—:確認できず

6.実施内容

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

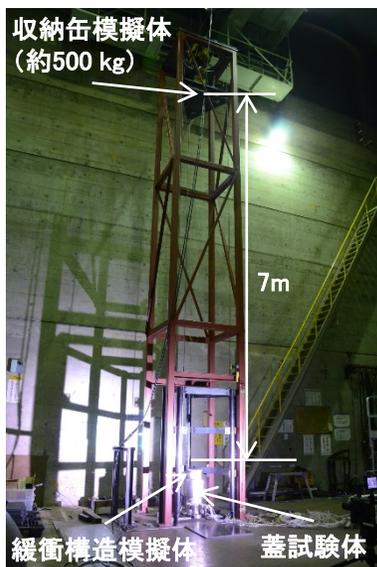
(2)構造強度の安全性検証(14/19)

③実施事項、成果(13/17)

a.収納缶蓋構造の成立性検証

△.成立性確認試験の実施(収納缶上部への収納缶の鉛直落下)

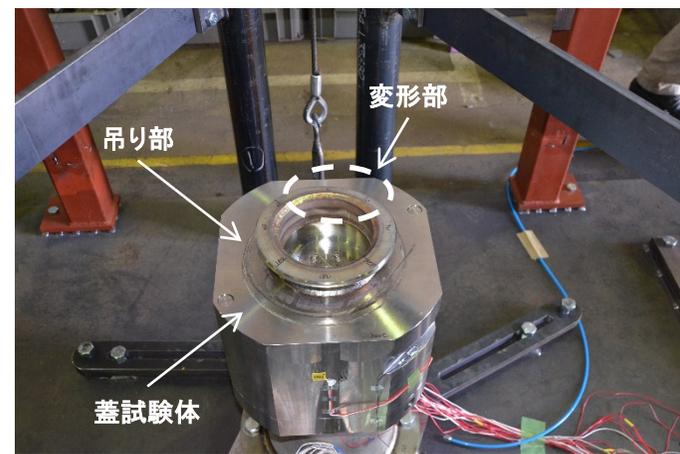
収納缶上部への収納缶の鉛直落下を模擬した試験を実施した。試験では、落下体をほぼ鉛直に落下させることができた。また、落下体の落下速度の測定結果から、計画どおりの試験ができたと考えられる。



(a) 試験の概要



(b) 試験の状況



(c) 試験後の蓋試験体の状況例

図 蓋構造の成立性確認試験の状況(収納缶上部への収納缶の鉛直落下、収納缶内径220 mm)

6.実施内容

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(2)構造強度の安全性検証(15/19)

③実施事項、成果(14/17)

a.収納缶蓋構造の成立性検証

△.成立性確認試験の実施(収納缶上部への収納缶の鉛直落下)

収納缶上部への収納缶の鉛直落下を模擬した試験より、蓋構造の閉じ込め機能に対する健全性を確認した。なお、吊り上げ不可となった蓋吊り部の変形については、緩衝構造または蓋吊り部を適切に設計することで対応可能と考えられる。

表 収納缶上部への収納缶の鉛直落下

項目	評価目安値	内径220 mm		内径400 mm		備考
蓋の破損	変形が公差以下	試験前後の寸法差は公差以下	○	試験前後の寸法差は公差以下	○	
蓋の脱落	破損がないこと	破損は確認されなかった	○	破損は確認されなかった	○	
シール部からの漏えい	シール面近傍のすき間の変形が公差以下	試験前後の寸法差は公差以下	○	試験前後の寸法差は公差以下	○	
	漏えい率が 3×10^{-2} ref cm^3/s 以下	試験前後とも 1×10^{-7} ref cm^3/s 程度で漏えいなし	○	試験前後とも 1×10^{-7} ref cm^3/s 程度で漏えいなし	○	1 atm、25°Cの値、評価目安値は輸送容器を参考に設定した
	シール面近傍のひずみは弾性範囲内	測定されたひずみは弾性範囲内	○	一部塑性ひずみが測定された	△	一部塑性ひずみが測定されたが、漏えいは確認されなかった
	Oリングに破損がないこと	破損は確認されなかった	○	破損は確認されなかった	○	
シール部からの瞬間的な漏えい	—	試験前後で圧力変動が確認されたが、衝撃等による体積変動が原因と判断	○	試験前後で圧力変動が確認されたが、衝撃等による体積変動が原因と判断	○	瞬間的な漏えい防止に対する要否は決まっていない
蓋開け	—	蓋開けが可能	○	蓋開けが可能(蓋吊り部にはまり込んだ緩衝構造模擬体撤去後、蓋開けを実施)	○	
吊り上げ	蓋吊り部に変形がないこと	蓋吊り部の変形あり	△	蓋吊り部の変形あり	△	解析上では変形がないため、斜め落下の影響と判断

6.実施内容

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(2)構造強度の安全性検証(16/19)

③実施事項、成果(15/17)

a.収納缶蓋構造の成立性検証

ト.まとめ

i.簡易取付構造の評価(成立性確認試験による評価)

・内径220 mm試験体

今回設計した蓋構造案において、想定した事象に対し、閉じ込め性が確保されることを確認した。また、事象後も問題なく、蓋開け、吊り上げの取扱性に問題がないことを確認した。

・内径400 mm試験体

蓋開け、吊り上げの取扱性の観点からは一部設計見直しが考えられるものの、今回設計した蓋構造案において、閉じ込め性が確保されることを確認した。

なお、収納缶上部への収納缶の鉛直落下において、収納缶模擬体が僅かに傾いて落下することが試験で確認されたことから、実機大収納缶の構造検証試験(No.71参照)においては、ガイドを設けて傾きを抑制する等の工夫が必要と考える。

ii.ボルト構造の評価(動解析による評価)

ボルト構造については、想定した事象に対して、動解析による評価を実施した。

・転倒、収納缶上部への収納缶の鉛直落下においては、閉じ込め性が確保されることを確認した。

・鉛直落下については、収納物の蓋への衝突によりボルトが伸びてシール部にすき間が生じ、現状の条件・構造案では閉じ込め性が確保できないことを確認した。ただし、緩衝構造を設けた場合は、収納物の蓋への衝突が発生しないことが確認できた。したがって、鉛直落下においては、収納物の蓋への衝突は発生せず、閉じ込め性が確保されると評価した。

以上の結果から、今回設計した蓋構造案の成立性を確認した。

6.実施内容

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(2)構造強度の安全性検証(17/19)

③実施事項、成果(16/17)

b.実機大収納缶の設計

イ.実機大収納缶の構造検証試験の計画

収納缶の健全性を確認するため、実機大収納缶の構造検証試験として、2020(令和2)年度に荷重試験(鉛直落下、転倒、収納缶上部への収納缶の鉛直落下)を実施する計画とした。

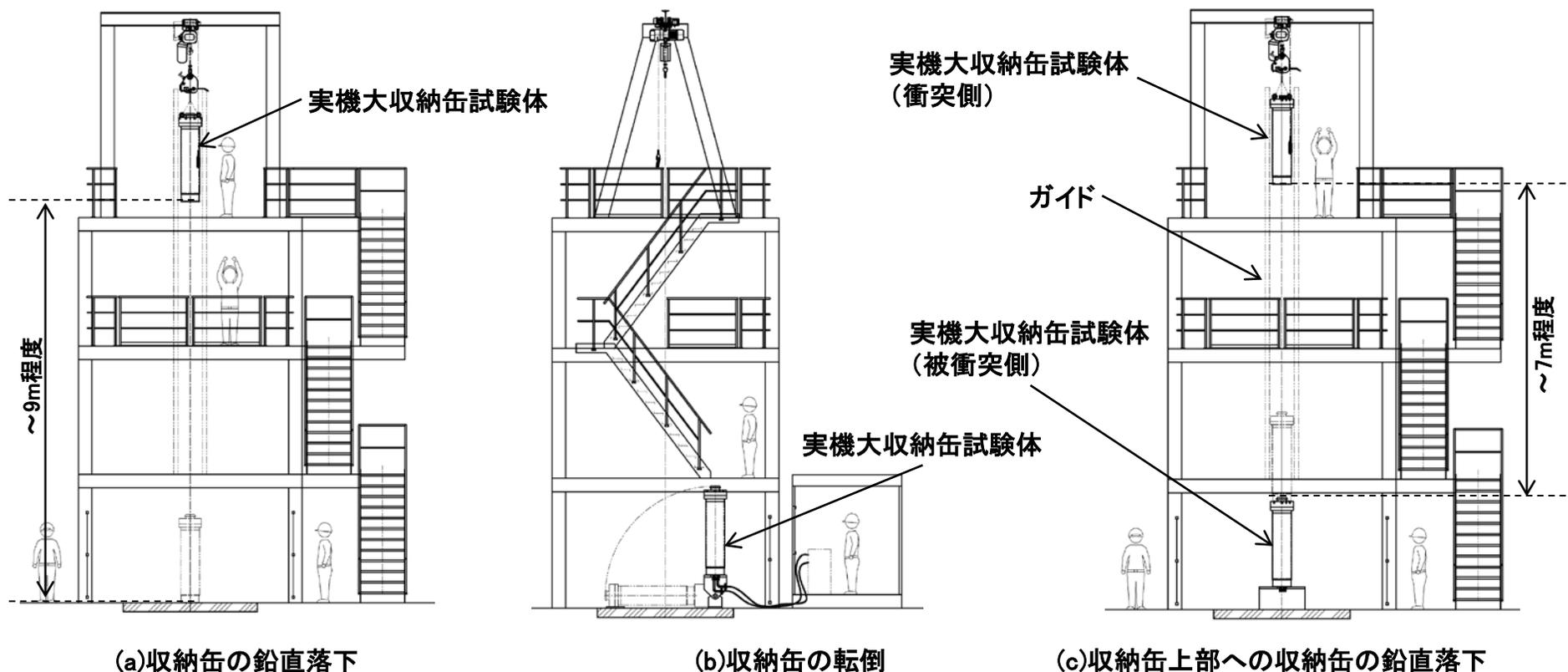


図 実機大収納缶の構造検証試験案の概略図

6.実施内容

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(2)構造強度の安全性検証(18/19)

③実施事項、成果(17/17)

b.実機大収納缶の設計

ロ.実機大収納缶試験体の概略設計

蓋構造の検討結果を反映し、収納缶構造検証試験を実施するに適切な実機大収納缶の構造について概略設計を行った。

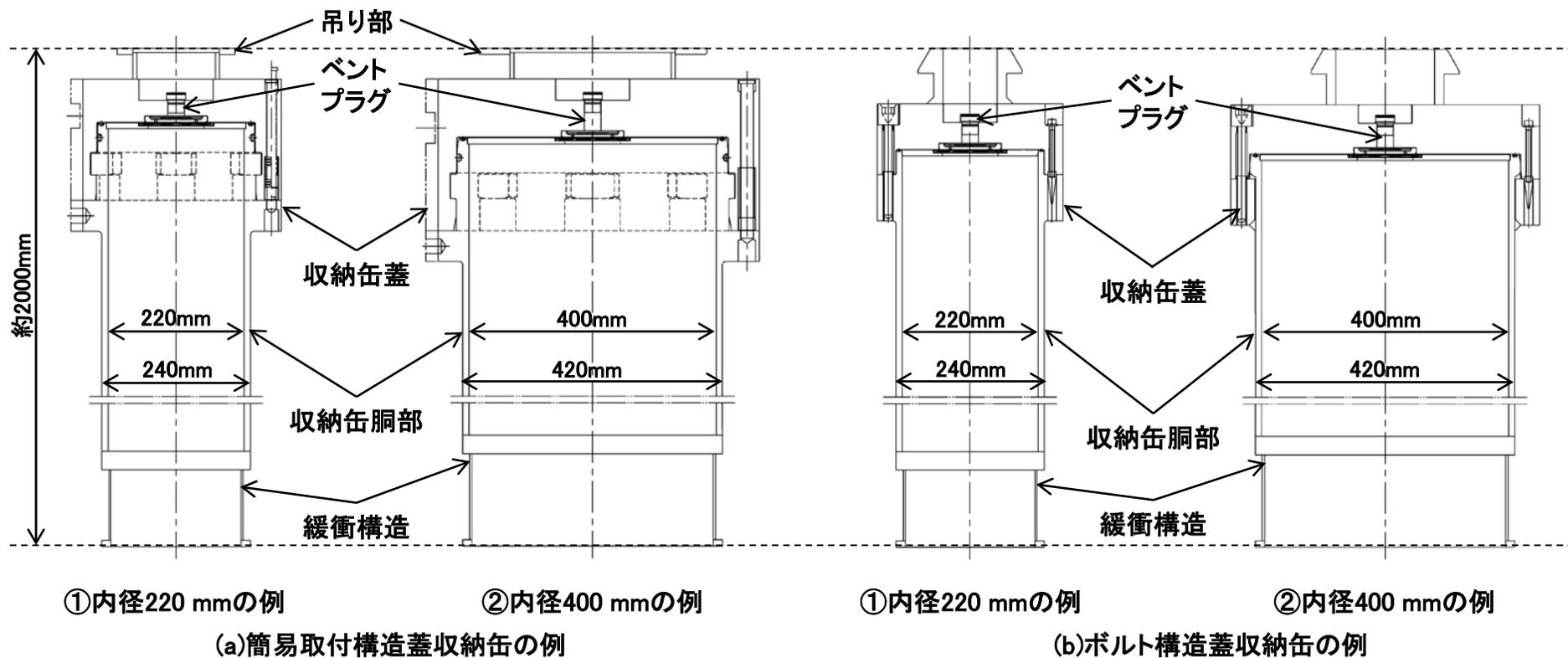


図 実機大収納缶の構造案

6.実施内容

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(2)構造強度の安全性検証(19/19)

④成果の反映先への寄与

収納缶(蓋構造含む)の構造案決定により、収納缶の関連設備(増設建屋、保管施設、取扱装置等)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

現場への適用を踏まえて収納缶の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目標に照らした達成度

目標達成を判断する指標に対して、蓋構造に対する取扱性や閉じ込めに関する要求事項を抽出、要求事項を満足する蓋構造の設計案を提案、試験及び解析により成立性を確認、目標を達成した。

また、2019(令和元)年度以降の実機大収納缶試験体を用いた構造健全性検証試験に向けて、試験計画案を策定、実機大収納缶試験体の概略設計を実施した。

以上のことから目標を達成していると判断される。

⑦今後の課題

これまでの各部位に対する要素試験から得られた収納缶設計仕様に関し、運用性等を考慮した収納缶全体での成立性の検証が課題と考えられる。

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(3)経年劣化に関わる安全性検証(1/7)

①目的、目標

1Fでの燃料デブリ取扱・保管時の環境条件を考慮した場合に、収納缶に想定される温度、塩化物イオン濃度等の環境下で燃料デブリを安全に保管する必要がある。

燃料デブリ取扱・保管時に想定される環境下において、安全、かつ安定的に保管できる収納缶材料を選定するとともに運用での対策を立案することを目的とする。

②既存技術との対比

収納缶材料の候補材として検討しているSUS304/SUS316Lに対する耐食性によるデータは多くあるものの、すき間腐食及びSCC(Stress Corrosion Cracking)が発生する個別の具体条件で閾値を判断できる知見はないため、1F固有の条件を考慮した検討が必要となる。

③実施事項、成果

候補材であるSUS316Lについて知見を追加するとともに収納缶材料としてSUS316Lについて運用を前提に再評価した。

6.実施内容

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(3)経年劣化に関わる安全性検証(2/7)

③実施事項、成果

a.各環境の評価結果(結論)

想定される環境に対する評価結果を以下に示す。すき間腐食やSCCは乾燥により生じない。また、冠水条件でも腐食は顕在化しにくいと考えられるが不確定性もあり早期に相対湿度20%以下の環境への乾燥が推奨される。

工程	収納缶内 ^{注1}	想定期間	温度	
取り出し	冠水	最大10日間	常温	(○)すき間腐食発生の可能性も低く、SCC発生可能性も低い。
	水付着	最大10日間	常温	(○)短期でありすき間腐食発生の可能性も低く、積極的な乾燥、濃縮環境ではないため、SCC発生可能性も低い。
乾燥	水付着	最大10日間	最大300℃	(○)過酸化水素水を想定しても常温～50℃程度の乾燥であれば問題はない。一般的に塩化物SCCの発生は70℃以上とされ、炉水の塩化物イオン濃度の実績を考えるとSCCによる割れの顕在化は100℃以上が期待できる。ただし、同イオンの濃縮挙動や過酸化水素水の濃度次第でより低温でも割れが発生する可能性もあるため、高応力となる溶接部を、同イオンの濃縮や過酸化水素水が生成しやすい水溜り部から避ける必要がある。また、乾燥するとSCCの可能性はなくなるため、実運用として70～100℃の環境となる期間を短縮することがより信頼性向上に有効である。
移送	冠水	最大10日間	常温～150℃	(○)常温～50℃程度は取り出しと同環境で可能性は低い。より高温ではすき間腐食の可能性はあるが、発生しても期間が短いので軽微と考えられる。塩化物イオン濃度の実績を考えるとSCCによる割れの顕在化は100℃以上が期待できる。過酸化水素水の濃度次第でより低温でも割れが発生する可能性もあるが短期間であるため顕在化はしにくいと考えられる。
	水付着	最大10日間	常温～150℃	(○)乾燥過程と同じ。期間が短いと顕在化はしにくいと考えられる。ただし、乾燥過程と異なり熱源が燃料デブリ側となるため燃料デブリが乾燥するまでの期間は収納缶に水分が残留しやすいため、移送後はできるだけ早期に乾燥させて水を排除することが有効である。
	完全乾燥	最大10日間	常温～150℃	(○)乾燥後は腐食およびSCCは生じない。
湿式保管(プール)	冠水	最大50年	最大40℃(プール水による温度制御)	(○)取出し環境と同じく収納缶内部が40℃以下であることから、すき間腐食感受性は低く、SCC発生可能性も低い。
	水付着	最大50年	～40℃	(○)温度が低いため、冠水保管と同様にすき間腐食およびSCC発生の可能性は低い。
気中保管(ホットセル内等)	水付着	最大50年	常温～150℃	(○)気中移送と同じ。温度が高く、水分が存在する状態で長期間置くことはリスクを高めるため溜り水を避けるとともに短期間に留めることが必要である。
乾式保管	完全乾燥	最大50年	常温～150℃	(○)乾燥後は腐食およびSCCは生じない。

注1: 冠水:収納缶内の水抜きを行ってない状態、水付着:水抜きを行ったが残留水が付着している状態、完全乾燥:完全に乾いている状態

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(3)経年劣化に関わる安全性検証(3/7)

③実施事項、成果

b.SUS304(L)/SUS316(L)のSCC発生実績

- 下図よりSUS316(L)では過酸化水素水の生成や塩化物イオンの濃縮を考えなければ塩化物イオン濃度7ppm程度、 $\sim 100^{\circ}\text{C}$ でSCC発生は抑制できる。前述のとおり1F1～3号機の格納容器内滞留水の塩化物イオン濃度は0.1～19ppm程度で、今後の水の浄化を考えると7ppm以下は期待できると考えられる。
- 水切りした燃料デブリの収納を考えると収納缶胴部等の一般部は付着水分もわずかと考えられ塩化物イオンが濃縮する可能性も少ない。一方、底部等の水溜り部は濃縮や過酸化水素水発生が生じやすいのでSCC要因となる残留応力を避けるため溶接部を避ける等の配慮を行うことが有効である。また、SUS316(L)では 100°C までSCCは顕在化しない一方で、水は常圧で 100°C 以上は気体となるので腐食の発生要因から外れる。

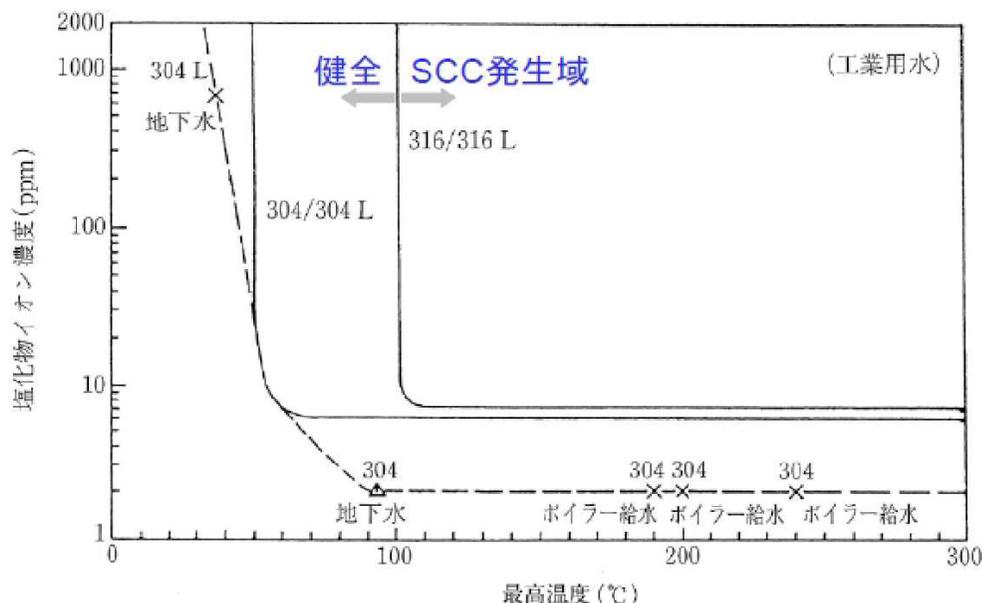


図 多管式熱交のSCC に対する系の最高イオン、温度およびpH の影響 温度と冷却・加熱媒体中のCl⁻イオン濃度の影響^{注1}

注1: 化学工学協会・腐食防食協会・ステンレス協会共同分科会: “多管式ステンレス鋼熱交の応力腐食割れ一使用実績データ集—”, 化学工学協会, 腐食防食協会, ステンレス協会, (1979), 32.

6.実施内容

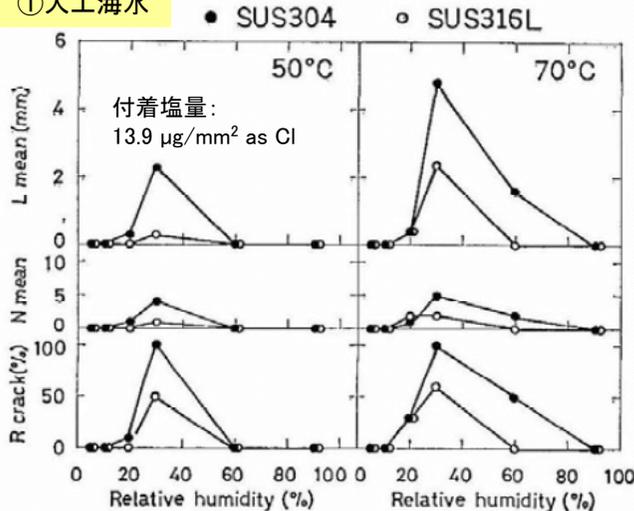
6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(3)経年劣化に関わる安全性検証(4/7)

c. SUS304/SUS316Lの大気応力腐食割れ評価

- 大気中の応力腐食割れは相対湿度感受性があり、溶液の塩化物イオン他の濃度、相対湿度、温度に依存し、臨界条件以下では割れ感受性がなくなる。(図1、2)
- 収納缶内の塩化物イオンは、塩化ナトリウムに由来すると考えられ、SUS316Lでは、70°C、塩化ナトリウム12700mg/m²付着条件でも2週間の試験では、割れは生じていないことから、濃度をより低減させることで乾燥環境ではSUS316Lでは70°C以上の環境でも、短期間では割れが顕在化しないことが期待できる。また、乾燥してしまえば割れが顕在化しないことが期待できる。

①人工海水



R_{crack}(%): 割れ発生率、N_{mean}: 割れ数の平均、L_{mean}(mm): 最大割れ長さの平均

図1 塩化物溶液を滴下し恒温恒湿条件下で2週間暴露したSUS304、SUS316のUバンド SCC試験結果^{注1}

②NaCl

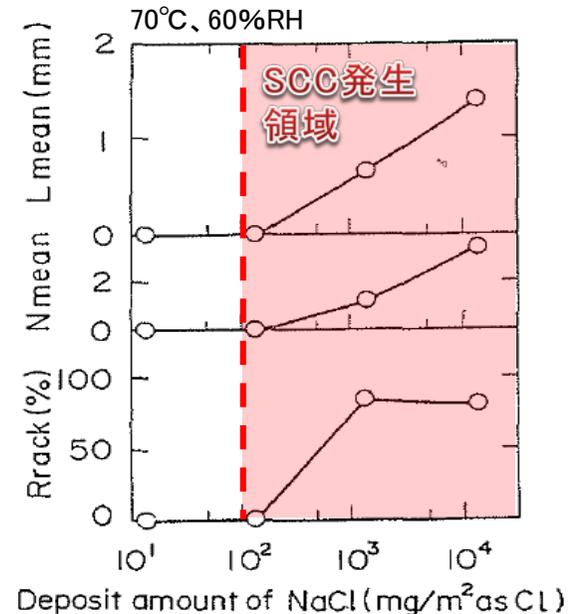
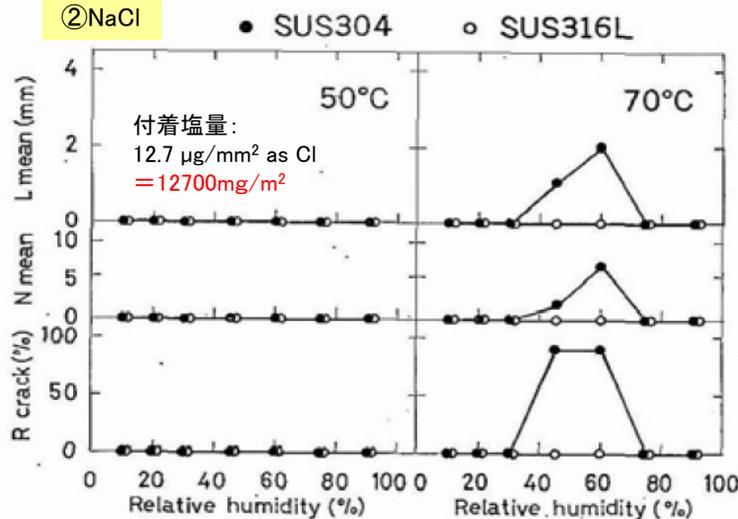


図2 NaCl溶液を滴下し恒温恒湿条件下で1週間暴露したSUS304のUバンド SCC試験結果^{注2}

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

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

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(3)経年劣化に関わる安全性検証(5/7)

d. SUS304/SUS316Lの大気応力腐食割れ評価

- 1F1～3号機の格納容器内滞留水の塩化物イオン濃度は0.1～19ppm^{注1}で、下図より、割れが生ずる付着量となる溶液の塩化物イオン濃度より10,000倍希釈された淡水程度と推定される。ただし、収納缶内の乾燥環境（付着環境）とは異なるため、収納缶内に実際どの程度の塩化物イオンが付着するかは不明である。
- 前頁での報告において、SUS316Lでは塩化ナトリウム12,700mg/m²付着条件（70℃、60%RH）でも2週間の試験で割れが生じていないが、割れが生ずる付着量となる溶液の塩化物イオン濃度に対し10,000倍希釈されていることを考えると、実質的に割れの発生は生じにくいと考えられる。

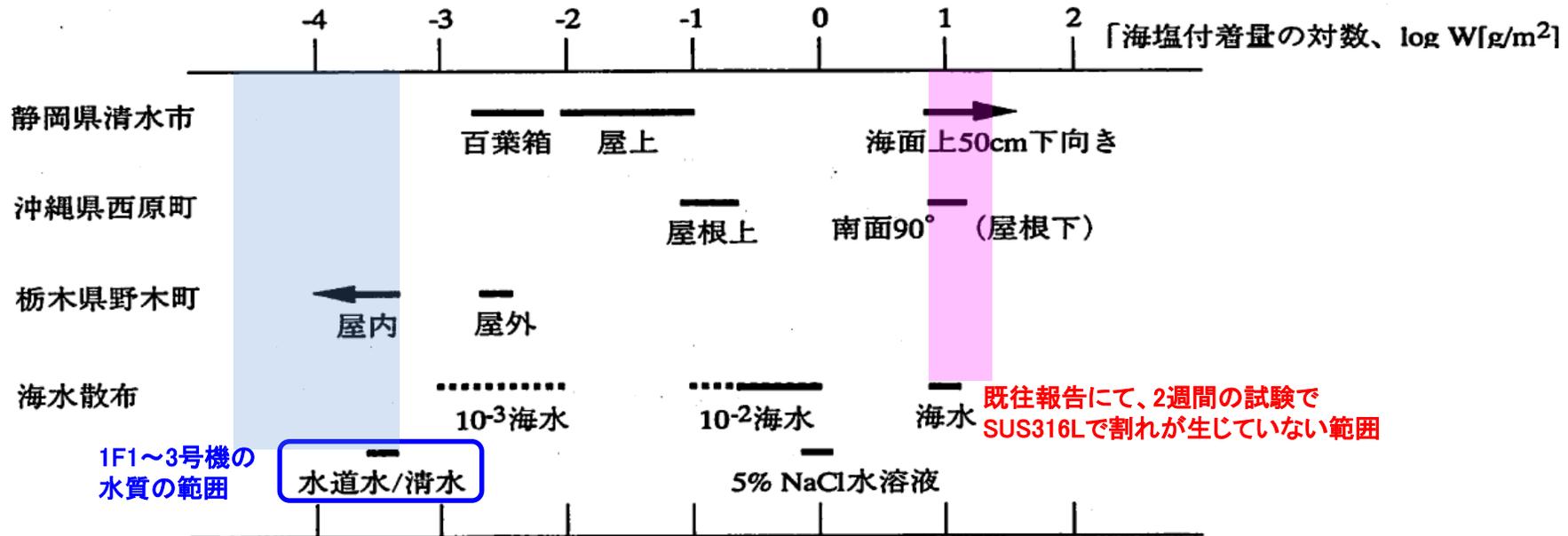


図 各種環境における付着海塩量^{注2}

注1: 深谷祐一、熊谷克彦(2016):“福島第一の格納容器・配管類の腐食抑制に係る現状と課題”、第63回材料と環境討論会、C-101

注2: 篠原正、“大気環境の腐食性評価(腐食環境のモニタリングと腐食性の分類に関する考え方)”、(JWTC)1998年ウエザリング技術研究成果発表会講演集No.3、15-24、(1998).

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(3)経年劣化に関わる安全性検証(6/7)

e. SUS316Lのすき間腐食感受性評価結果(冠水を条件とした場合)

- 温度30~50°C程度では、過酸化水素による電位上昇が生じても、すき間腐食発生の可能性は低いと予想。
 - 温度80°C程度では、過酸化水素による電位上昇によっては、塩化物イオン1ppmでも発生が推定される。
- ⇒すき間腐食の可能性は残るが短期間であれば実質的には顕在化しないので、設計/運用で対応する。
⇒ SUS316Lは採用できる。ただし、SCC発生の可能性は低いが、早期の乾燥による水溜り等の水分除去が必要である。

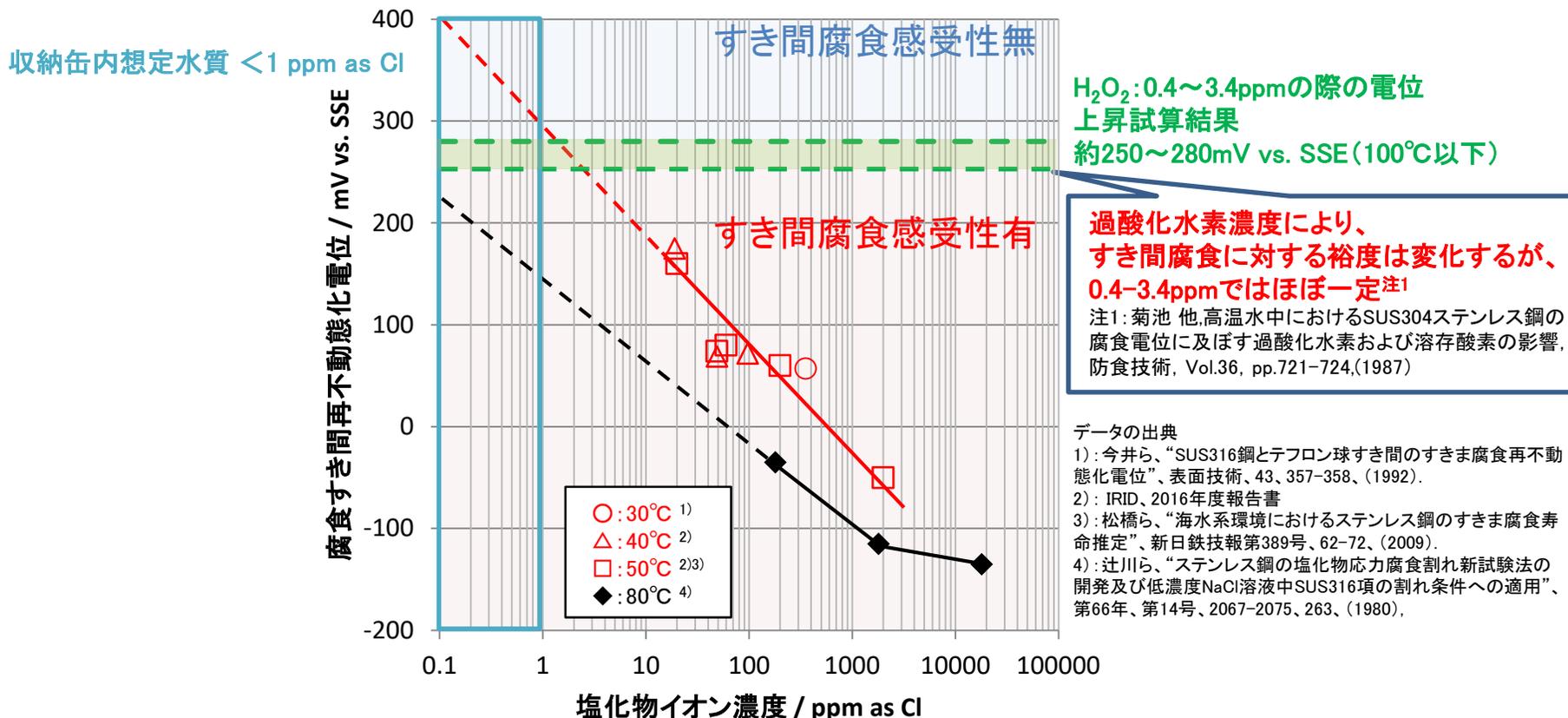


図 各塩化物イオン濃度における腐食すき間再不動態化電位を用いたすき間腐食感受性評価(SUS316L)

6.実施内容

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(3)経年劣化に関わる安全性検証(7/7)

④成果の反映先への寄与

収納缶の材料設計、現地での運用を含めた現実的な材料の選定、腐食対策を確立することで、収納缶の製作費、保守管理費用を抑制することができる。

⑤現場への適用性の観点における分析

現場への適用性を考慮した、運用面で腐食対策案を検討する。

⑥目標に照らした達成度

想定を超える塩化物イオンが導入される可能性は、燃料デブリ取り出し時に水質浄化が行われるため不要と判断した。そのうえで、すき間腐食やSCC発生が否定できない領域を整理し、最新の1Fの格納容器内滞留水の水質状況や移送及び乾燥条件の環境条件を反映した対応策シナリオ案をまとめており、目標を達成していると判断する。

⑦今後の課題

現計画の遂行上、課題はなし。

6.実施内容

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(4)水素ガス対策の安全性検証(水素ガス発生量の検証)(1/29)

①目的、目標

水の放射線分解により収納缶内で発生する水素に対して、安全に収納・移送・保管するための水素対策案を設定する。そのため、1F条件を考慮した収納缶内水素発生量を予測する。燃料デブリでは、健全な使用済燃料と異なり、被覆管による遮蔽効果が期待できないため、 α 線・ β 線・ γ 線の影響について確認する必要がある。とくに、 α 線については、下記の因子の影響が予想されることから、使用済燃料ペレット片を用いた試験により1F条件における α 線の影響^{注1}を確認する。

- ・ α 線の有無(平成29年度実施済み)
- ・水分量の影響(平成29年度一部実施済み、平成30年度追加実施)
- ・粒径の影響(平成30年度実施)
- ・コンクリート(MCCI生成物回収時付随物)中水分の影響(平成30年度実施)
- ・水質の影響(水が少ない条件での水質の影響確認)(平成30年度実施)

水素対策のひとつとして、特に移送時の水素発生量を予測し、移送時間の制限に関する検討に資する。

②既存技術との対比

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。

注1: 被覆管による遮蔽が期待できない場合には β 線の影響も考えられるが、 β 線はLET(線エネルギー付与)効果が γ 線と同程度であることが知られており(Spinks, J.W.T. and R.J. Woods, An introduction to radiation chemistry, 1990, Wiley)、水の放射線分解による水素発生量の観点からは、 γ 線の知見が適用可能と考えられる。

6.実施内容

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(4)水素ガス対策の安全性検証(水素ガス発生量の検証)(2/29)

③実施事項、成果(1/27)

a.試験体系

平成29年度に引き続き、水の放射線分解における水素発生に対する水分量、粒径、コンクリート中水分、水質の影響を使用済燃料を用いた水素評価試験等により確認する。また、水分量が水切り程度の条件での水質の影響についても検討する。

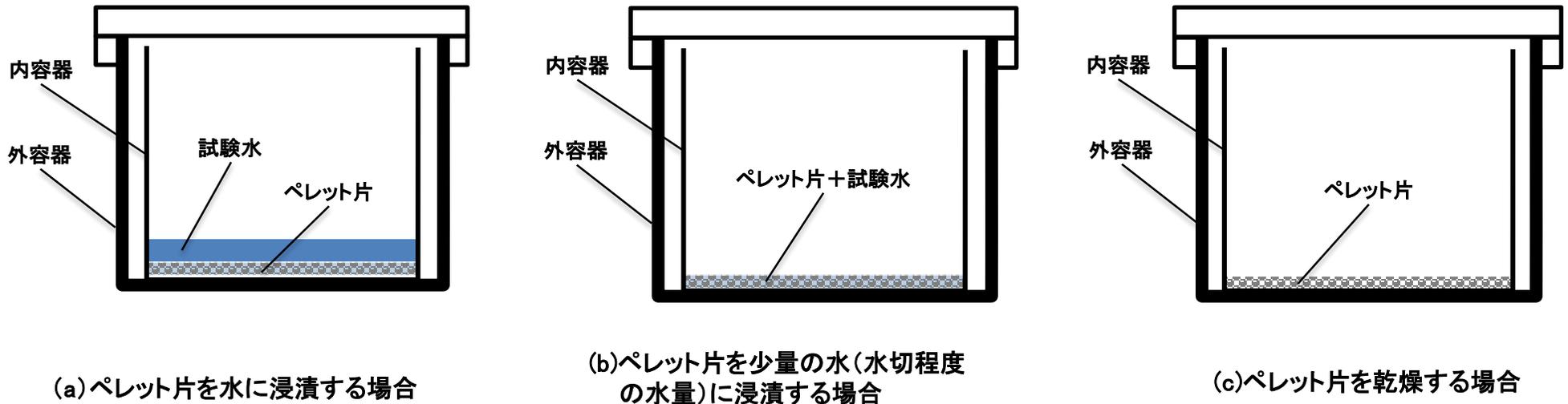


図 試験体系例(水分量の影響確認試験の例)

6.実施内容

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(4)水素ガス対策の安全性検証(水素ガス発生量の検証)(3/29)

③実施事項、成果(2/27)

b.試験条件(1/4)

平成29年度に引き続き、ペレット片を浸漬させる水の量を変化させ、水素発生に対するその影響を確認する。平成29年度の試験では、水切り程度に水分を減らした状態では、水素低減効果がない結果が得られており、試験結果の再現性を確認するとともに、さらに水の量を減らした状態(乾燥相当)での試験を実施する。

表 試験条件(水分量の影響確認)

項目	ケース1 (平成29年度実施済)	ケース2 (平成29年度再現性確認)	ケース3	備考	
試験概要	ペレット片を水に浸漬	ペレット片水切り程度	ペレット片乾燥	質量変化が±0.1%以下となるまで加熱(100°C程度)したものを乾燥状態と仮定	
試料	ペレット片重量(g)	約80	約100	平成29年度と同じ使用済燃料ペレット片を使用し、平成30年度はペレット片重量を増量	
	ペレット片粒径(μm)	20~300		洗浄、乾燥後(約100°Cで加熱)、分級	
試験水	水分量(mL)	100	10(ペレット片の50 vol.%)	0(乾燥相当)	50 vol.%は平成28年度水切り試験結果より設定
	海水成分濃度(mol/L)	塩化物イオン濃度で 5.6×10^{-4} (20 ppm)相当		-	1号機測定結果(約19 ppm) ^{注1} より設定
	ヨウ化物イオン濃度(mol/L)	1.0×10^{-4}		-	ヨウ素インベントリ ^{注2} の10%が水中に溶出と想定
	pH	調整なし		-	試験前後で測定(試験後はケース1のみ)
気相部ガス種/初期内圧	大気/大気圧程度(加圧しない)			ガス置換できない場合を想定し大気に設定	
浸漬期間(日)	20(最長)			想定移送期間10日間に対して裕をもって設定	
試験温度	室温			温度調整なし	

注1:東京電力株式会社、1号機原子炉格納容器(PCV)内部調査の結果について、平成24年10月22日

注2:西原健司、岩本大樹、須山賢也、JAEA-Data/Code2012-18、福島第一原子力発電所の燃料組成評価、日本原子力研究開発機構、2012年9月より

6.実施内容

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(4)水素ガス対策の安全性検証(水素ガス発生量の検証)(4/29)

③実施事項、成果(3/27)

b.試験条件(2/4)

飛程の短い α 線の影響(粒径が大きくなると自己遮蔽効果により相対的に α 線のエネルギー付与割合が小さくなる)を確認するために、ペレット片の粒径を変化させ、水素発生に対するその影響を確認する。平成29年度の粒径20~300 μm の試験に加え、粒径1,000~4,000 μm のペレット片を用い、試験を実施、その結果を比較する。

表 試験条件(粒径の影響確認)

項目	ケース2		ケース4	備考
	平成29年度実施分	平成30年度実施分		
試験概要	粒径小 (20~300 μm)		粒径大 (1,000~4,000 μm)	
試料	ペレット片重量(g)	約80	約100	平成29年度と同じ使用済燃料ペレット片を使用し、平成30年度はペレット片重量を増量
	ペレット片粒径(μm)	20~300	1,000~4,000	洗浄、乾燥後(約100°Cで加熱)、分級
試験水	水分量(mL)	8(ペレット片の50 vol.%)	10(ペレット片の50 vol.%)	50 vol.%は平成28年度水切り試験結果より設定
	海水成分濃度(mol/L)	塩化物イオン濃度で 5.6×10^{-4} (20 ppm)相当		1号機測定結果(約19 ppm) ^{注1} より設定
	ヨウ化物イオン濃度(mol/L)	1.0×10^{-4}		ヨウ素インベントリ ^{注2} の10%が水中に溶出と想定
	pH	調整なし		試験前に測定
気相部ガス種/初期内圧	大気/大気圧程度(加圧しない)			ガス置換できない場合を想定し大気に設定
浸漬期間(日)	20(最長)			想定移送期間10日間に対して裕度をもって設定
試験温度	室温			温度調整なし

注1:東京電力株式会社、1号機原子炉格納容器(PCV)内部調査の結果について、平成24年10月22日

注2:西原健司、岩本大樹、須山賢也、JAEA-Data/Code2012-18、福島第一原子力発電所の燃料組成評価、日本原子力研究開発機構、2012年9月より

6.実施内容

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(4)水素ガス対策の安全性検証(水素ガス発生量の検証)(5/29)

③実施事項、成果(4/27)

b.試験条件(3/4)

燃料デブリに付随して収納缶内に収納される可能性のあるコンクリート中に存在する水分の水素発生に対する影響を確認する。 α 線の有無で試験を実施し、コンクリート中の水分の影響を確認する。

表 試験条件(コンクリートの影響確認)

項目	ケース3	ケース5	ケース6	備考
試験概要	コンクリートなし	コンクリートあり (α 線あり)	コンクリートあり (α 線なし)	
試料	ペレット片重量(g)	約100		平成29年度と同じ使用済燃料ペレット片を使用し、平成30年度はペレット片重量を増量
	ペレット片粒径(μm)	20~300		洗浄、乾燥後(約100°Cで加熱)、分級
	コンクリート重量(g)	-	ペレット片と同体積となる重量	ペレット片と満遍なく混合するため
	コンクリート粒径(μm)	-	45~100	コンクリート中に自由水を保持し、かつペレット片と同程度
試験水	水分量(mL)	0(乾燥)	コンクリート中水分	同様に処置したコンクリートを加熱し重量変化から評価した結果、コンクリート中の自由水は約1 g(1 mL)と想定
	海水成分濃度(mol/L)	-		
	ヨウ化物イオン濃度(mol/L)	-		
	pH	-		試験前後で測定
気相部ガス種/初期内圧	大気/大気圧程度(加圧しない)		ガス置換できない場合を想定し大気に設定	
浸漬期間(日)	20(最長)		想定移送期間10日間に対して裕度をもって設定	
試験温度	室温		温度調整なし	

6.実施内容

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(4)水素ガス対策の安全性検証(水素ガス発生量の検証)(6/29)

③実施事項、成果(5/27)

b.試験条件(4/4)

水の少ない条件(再結合が発生しにくい条件)における水質(再結合を阻害する添加物(海水、ヨウ素))の影響を確認する。

表 試験条件(水質の影響確認)

項目	ケース2		ケース7	備考
	平成29年度実施	平成30年度実施		
試験概要	海水、ヨウ素あり		純水(海水、ヨウ素なし)	
試料	ペレット片重量(g)	約80	約100	平成29年度と同じ使用済燃料ペレット片を使用し、平成30年度はペレット片重量を増量
	ペレット片粒径(μm)	20~300		洗浄、乾燥後(約100°Cで加熱)、分級
試験水	水分量(mL)	8(ペレット片の50 vol.%)	10(ペレット片の50 vol.%)	50 vol.%は平成28年度水切り試験結果より設定
	海水成分濃度(mol/L)	塩化物イオン濃度で 5.6×10^{-4} (20 ppm)相当		1号機測定結果(約19 ppm) ^{注1} より設定
	ヨウ化物イオン濃度(mol/L)	1.0×10^{-4}		ヨウ素インベントリ ^{注2} の10%が水中に溶出と想定
	pH	調整なし		試験前に測定
気相部ガス種/初期内圧	大気/大気圧程度(加圧しない)			ガス置換できない場合を想定し大気に設定
浸漬期間(日)	20(最長)			想定移送期間10日間に対して裕度をもって設定
試験温度	室温			温度調整なし

注1:東京電力株式会社、1号機原子炉格納容器(PCV)内部調査の結果について、平成24年10月22日

注2:西原健司、岩本大樹、須山賢也、JAEA-Data/Code2012-18、福島第一原子力発電所の燃料組成評価、日本原子力研究開発機構、2012年9月より

6.実施内容

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(4)水素ガス対策の安全性検証(水素ガス発生量の検証)(7/29)

③実施事項、成果(6/27)

c.試験の状況

試験装置構成は平成29年度と同じ(圧カトランスデューサを追加)。試験中の試験容器内の圧力を測定するとともに、試験後に気相部気体等を分析する。

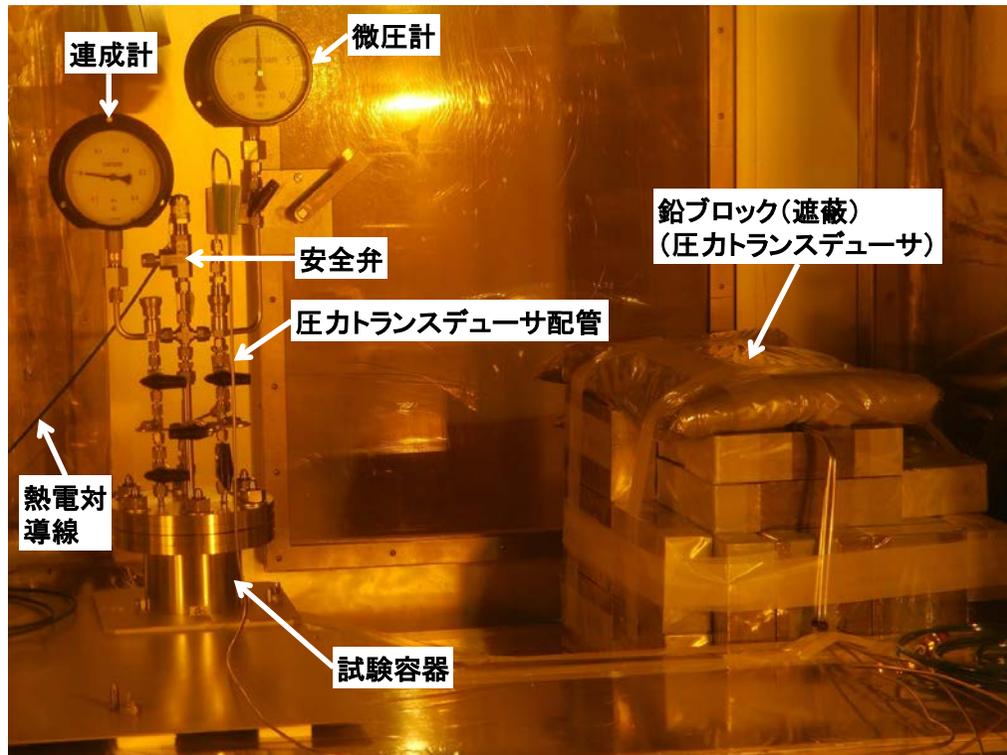
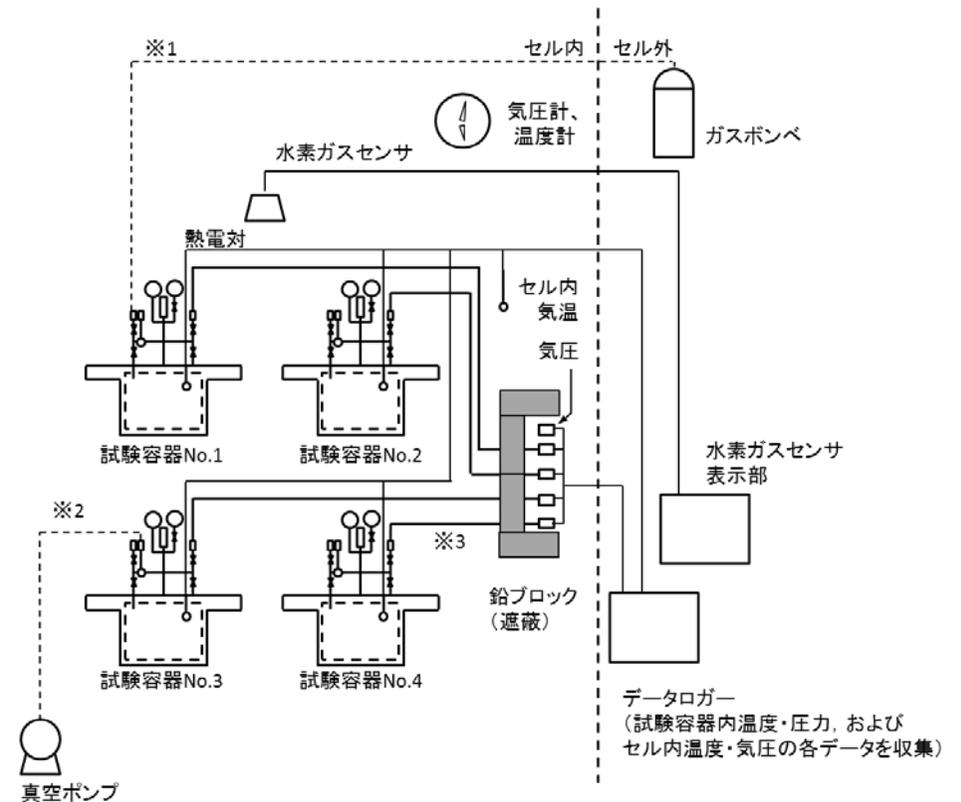


図 試験装置外観



- ※1 リークチェック時につなぎ替えて使用
- ※2 ガス採取時につなぎ替えて使用
- ※3 圧カトランスデューサ配管: 蓋開閉時に取り外し

図 試験装置構成

6.実施内容

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(4)水素ガス対策の安全性検証(水素ガス発生量の検証)(8/29)

③実施事項、成果(7/27)

d.試験結果(1/4)

- ・水切り程度の水分量の試験(ケース2(平成30年度実施分))では、平成29年度とほぼ同様の結果が得られ、平成29年度試験結果の妥当性が確認できた。その結果、水切り程度に水分量を減らしても、水素低減効果がないことを推定した。
- ・ペレット片を乾燥した試験(ケース3)では、水素は検出されなかった。その結果、乾燥により水素発生量を低減できることを確認した。

表 試験結果(水分量の影響確認:粒径小)

項目	ケース1注1 (平成29年度実施済)	ケース2		ケース3 (平成30年度実施)	備考
		平成29年度実施分	平成30年度実施分		
試験概要	ペレット片を水に浸漬	ペレット片水切り程度		ペレット片乾燥	質量変化が±0.1%以下となるまで加熱(100°C程度)したものを乾燥状態と仮定
評価結果	水素発生量(mL)注2	4/2 (5/3)注3	5 (6)注3	5	—
	水素発生速度(L/h/Bq)注2	$4.4 \times 10^{-18} / 3.5 \times 10^{-18}$	6.4×10^{-18}	6.1×10^{-18}	—
試験結果	気相部水素濃度(vol.%)	0.73/0.51 (0.91/0.64)注3	0.78 (0.98)注3	0.96	検出限界以下
	気相部酸素濃度(vol.%)	17.9/18.1	18.6	16.6	19.4
	気相部窒素濃度(vol.%)	80.9/79.3	78.9	77.0	76.3

注1:同条件で2回試験を実施

注2:25°Cで換算した値

注3:()内は平成29年度試験結果に対して線源強度(ペレット片重量)増分を補正した値

6.実施内容

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(4)水素ガス対策の安全性検証(水素ガス発生量の検証)(9/29)

③実施事項、成果(8/27)

d.試験結果(2/4)

- ・粒径小(ケース2)に比べ、粒径大(ケース4)では水素発生量が約1/2となった。その結果、本試験条件では粒径が大きくなると水素発生量が減ることを確認した。
- ・平均的なペレット粒径およびG値を用いて水素発生量を概略評価した結果、放出された全エネルギーが水に吸収されると仮定したケース(下図実線)に比べ、試験結果(下図黒丸)は粒径大に比べ粒径小のほうがその差が大きいことがわかった。粒径小のほうが充填率が高くペレット片粒子の周辺の水量が少なくなり、実条件での水に吸収されるエネルギーの割合は粒径が小さいほうが小さくなると推定される。

表 試験結果(粒径の影響確認)

項目	ケース2		ケース4 (平成30年度実施)	備考
	平成29年度実施分	平成30年度実施分		
試験概要	粒径小 (20~300 μm)		粒径大 (1,000~4,000 μm)	
評価結果				
水素発生量(mL)注1	5 (6)注2	5	2	
水素発生速度(L/h/Bq)注1	6.4×10^{-18}	6.1×10^{-18}	2.7×10^{-18}	
試験結果				
気相部水素濃度(vol.%)	0.78 (0.98)注2	0.96	0.41	
気相部酸素濃度(vol.%)	18.6	16.6	19.8	
気相部窒素濃度(vol.%)	78.9	77.0	74.9	

注1:25°Cで換算した値

注2:()内は平成29年度試験結果に対して線源強度(ペレット片重量)増分を補正した値

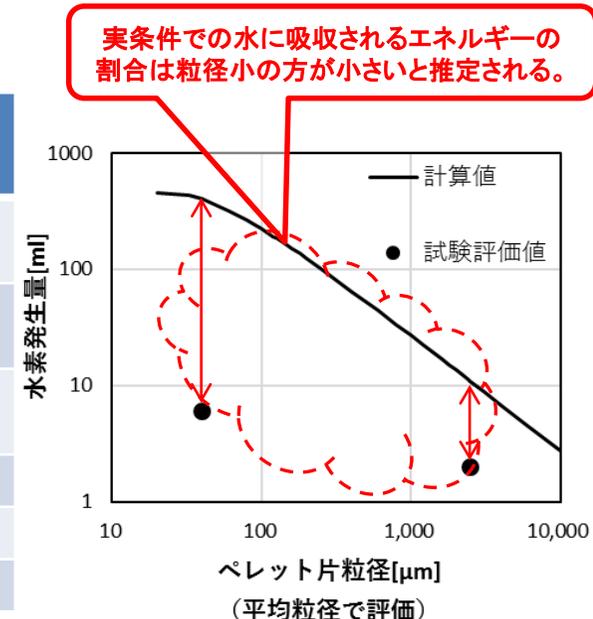


図 ペレット片粒径と水素発生との関係

6.実施内容

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(4)水素ガス対策の安全性検証(水素ガス発生量の検証)(10/29)

③実施事項、成果(9/27)

d.試験結果(3/4)

- ・ペレット片(乾燥)にコンクリート片(自由水あり)を混合させた試験において、 α 線を遮蔽した場合(ケース6)では水素発生量は検出限界以下であったのに比べ、 α 線がある場合(ケース5)では水素の発生が確認された。したがって、 α 線がある場合(ケース5)の水素発生は α 線の影響と推定される。
- ・水素発生はコンクリート細孔中の水の α 線放射線分解により水素が発生したと推定されるが、コンクリート中の自由水(約1 g^{注1})の量から考え、ペレット片水切り程度(ケース2、試験水量10 g)の試験結果に対して、水素発生量は大きいと考えられる(存在する水量約1:10に対し、水素発生速度は約1:2)。本原因については2019(令和元)年度以降に検討が必要である。

表 試験結果(コンクリートの影響確認:粒径小)

項目	ケース3 (平成30年度実施)	ケース5 (平成30年度実施)	ケース6 (平成30年度実施)	備考
試験概要	コンクリートなし	コンクリートあり (α 線あり)	コンクリートあり (α 線なし)	ペレット片は乾燥状態 コンクリート片は自由水(約1 g ^{注1})あり
評価結果	水素発生量(mol) ^{注2}	—	3	—
	水素発生速度(L/h/Bq) ^{注2}	—	3.2×10^{-18}	—
試験結果	気相部水素濃度(vol.%)	検出限界以下	0.49	検出限界以下
	気相部酸素濃度(vol.%)	19.4	18.8	19.9
	気相部窒素濃度(vol.%)	76.3	77.8	75.7

注1:同様に準備したコンクリート片を100℃程度で重量変化がなくなるまで乾燥した際の重量差を自由水量と推定
注2:25℃で換算した値

6.実施内容

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(4)水素ガス対策の安全性検証(水素ガス発生量の検証)(11/29)

③実施事項、成果(10/27)

d.試験結果(4/4)

- ・海水、ヨウ素を添加した条件(ケース2)に対して、海水、ヨウ素を添加していない条件(ケース7)のほうが2倍程度水素発生量が大きかった。他の試験では、試験水中にペレット片からのヨウ素の溶出が確認されており、本試験でもヨウ素が試験水中に溶出し、同条件の水質での試験となっていたと考えられる。
- ・粒径の影響確認で述べたように、粒子同士の接触条件によって、エネルギー吸収率が変化する可能性がある。本試験で、2倍程度水素発生量が大きくなったのは、粒子同士の接触条件の違いの影響によるものと推定されるが、2019(令和元)年度以降に更なる検討が必要と考えられる。

表 試験結果(水質の影響確認)

項目	ケース2		ケース7 (平成30年度実施)	備考
	平成29年度実施分	平成30年度実施分		
試験概要	海水、ヨウ素あり		純水(海水、ヨウ素なし)	
評価結果	水素発生量(mL) ^{注1}	5 (6) ^{注2}	5	13
	水素発生速度(L/h/Bq) ^{注1}	6.4×10^{-18}	6.1×10^{-18}	1.5×10^{-17}
試験結果	気相部水素濃度(vol.%)	0.78 (0.98) ^{注2}	0.96	2.2
	気相部酸素濃度(vol.%)	18.6	16.6	15.5
	気相部窒素濃度(vol.%)	78.9	77.0	77.9

注1:25°Cで換算した値

注2:()内は平成29年度試験結果に対して線源強度(ペレット片重量)増分を補正した値

6.実施内容

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(4)水素ガス対策の安全性検証(水素ガス発生量の検証)(12/29)

③実施事項、成果(11/27)

e.エネルギー吸収率の評価(1/2)

試験結果の評価にあたり、以下の3つの方法により、試験体系におけるエネルギー吸収率を評価した。

イ.試験結果より評価(以下、「試験結果」)

試験で得られた水素発生量とペレット片の燃料計算結果からエネルギー吸収率を評価した。本評価では、仮定と実体における体系等の違いはすべてエネルギー吸収率として表現される。

ロ.ペレット片粒径による評価(以下、「粒径考慮」)

ペレット片の粒径分布をもとに代表粒径を設定し、平成28年度に評価した各粒径における水の吸収エネルギーをもとに評価した。

ハ.輸送計算コードを用いた評価(以下「輸送計算」)

輸送計算コード(PHITS)による計算結果とペレット片の燃料計算結果からエネルギー吸収率を評価した。その際、正六面体(水)中に重心を同じくする1個のペレット片(球形と仮定)を配置したモデル(下図参照)で評価した。なお、本評価ではペレット片と水のそれぞれの領域の体積が等しくなるよう正六面体体積を設定し、境界条件は保守的に反射とした。

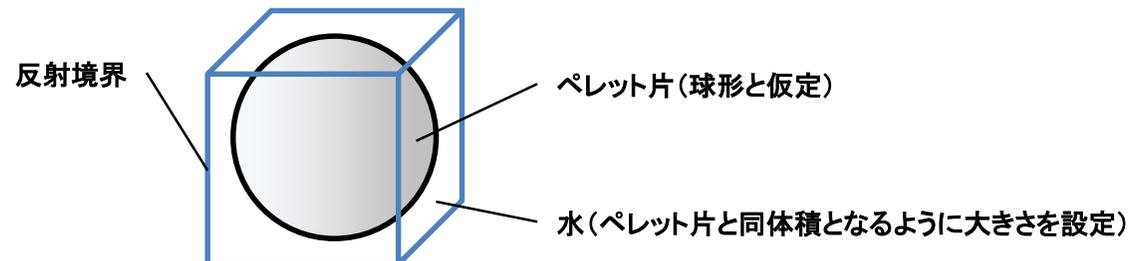


図 輸送計算における計算モデル

6.実施内容

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(4)水素ガス対策の安全性検証(水素ガス発生量の検証)(13/29)

③実施事項、成果(12/27)

e.エネルギー吸収率の評価(2/2)

粒径小(粒径40 μm と仮定)と粒径大(粒径2,500 μm と仮定)におけるエネルギー吸収率を評価した。とくに試験結果より評価したエネルギー吸収率が他の評価方法に比べ、小さい結果となった。これは、試験体系では、粒径考慮や輸送計算では考慮されないペレット片の状態や周辺に存在する水の状態など、水素発生に大きく影響するいろいろな要因がエネルギー吸収率の中に含まれているためと想定される。

表 エネルギー吸収率の評価結果

粒径	エネルギー吸収率 ^{注1}				備考
	評価方法	α 線	β 線	γ 線	
粒径小	試験結果	0.01	0.002	0.002	粒径小の試験における水素発生量より評価
	粒径考慮	0.90	1.00	0.02	粒径を40 μm と仮定し評価
	輸送計算	0.18	0.14	0.14	粒径を40 μm と仮定し評価
粒径大	試験結果	0.005	0.002	0.002	粒径大の試験における水素発生量より評価
	粒径考慮	0.02	0.42	0.02	粒径を2,500 μm と仮定し評価
	輸送計算	0.005	0.06	0.06	粒径を2,500 μm と仮定し評価

注1: それぞれの線種ごとのエネルギーに対する水への吸収割合

6.実施内容

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(4)水素ガス対策の安全性検証(水素ガス発生量の検証)(14/29)

③実施事項、成果(13/27)

f.水素発生速度の評価(1/2)

試験結果より得られた気相部水素濃度から評価した水素発生速度とTMI-2評価式および放射線分解モデルによる計算により評価した水素発生速度を比較する。TMI-2評価式および放射線分解モデルによる計算では、e.項で評価したエネルギー吸収率を使用する。

イ.TMI-2評価式

発熱量に対応する放射線のエネルギーが水に吸収されたとし、その吸収エネルギーに水素発生G値を乗じて水素発生速度 G_{H_2} を評価した。TMI-2燃料デブリ移送時の水素発生量評価に使用された下記の評価式をもとに評価した。

$$G_{H_2} = W \times P \times F \times (1 / (1.6 \times 10^{-19})) \times (G / 100) \times (22.4 / (6.0 \times 10^{23})) \times 3600$$

W	: 発熱量 [W]
P	: 発熱量のピーキング (= 1.9)
F	: エネルギー吸収率 [-]
G	: エネルギー100 eV あたりの水の分解量 [分子/100 eV]
3600	: 3600 [s/h]

ロ.放射線分解モデルによる計算

水質解析コード(SIMFONY)による計算結果と、エネルギー吸収率等の条件から水素発生速度を評価した。

6.実施内容

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(4)水素ガス対策の安全性検証(水素ガス発生量の検証)(15/29)

③実施事項、成果(14/27)

f.水素発生速度の評価(2/2)

- ・水素発生試験結果から得られたエネルギー吸収率を用いて評価すると、水素発生速度は評価方法によらず、試験結果より評価した水素発生速度とほぼ同程度となった(表中緑枠内)。
- ・計算(粒径考慮、輸送計算)から評価したエネルギー吸収率を用いて評価すると、水素発生速度は試験結果の20～100倍程度大きくなった(表中青枠内)。

表 水素発生速度の評価結果

粒径	水素発生速度 評価方法	エネルギー吸収率 ^{注1}			水素発生速度 (L/h/Bq)	備考
		α線	β線	γ線		
粒径小	試験結果	-	-	-	5.1×10^{-18}	粒径小の試験結果から評価した水素発生速度の平均値
	TMI-2評価式	0.01	0.002	0.002	9.7×10^{-18}	試験結果から評価したエネルギー吸収率を使用した場合
		0.90	1.00	0.02	1.0×10^{-15}	粒径を考慮した評価から得られたエネルギー吸収率を使用した場合
		0.18	0.14	0.14	2.1×10^{-16}	輸送計算による評価から得られたエネルギー吸収率を使用した場合
	放射線分解モデル	0.01	0.002	0.002	5.0×10^{-18}	試験結果から評価したエネルギー吸収率を使用した場合
粒径大	試験結果	-	-	-	2.7×10^{-18}	粒径大の試験結果から評価した水素発生速度
	TMI-2評価式	0.005	0.002	0.002	5.2×10^{-18}	試験結果から評価したエネルギー吸収率を使用した場合
		0.02	0.42	0.02	1.2×10^{-16}	粒径を考慮した評価から得られたエネルギー吸収率を使用した場合
		0.005	0.06	0.06	2.8×10^{-17}	輸送計算による評価から得られたエネルギー吸収率を使用した場合
	放射線分解モデル	0.005	0.002	0.002	2.7×10^{-18}	試験結果から評価したエネルギー吸収率を使用した場合
(参考)TMI-2の評価		-	0.2		7.7×10^{-17}	TMI-2燃料デブリ移送時評価のエネルギー吸収率を使用した場合

注1:それぞれの線種ごとのエネルギーに対する水への吸収割合

6.実施内容

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(4)水素ガス対策の安全性検証(水素ガス発生量の検証)(16/29)

③実施事項、成果(15/27)

g.実機収納缶の水素発生量の試算(1/6)

f.項で評価した水素発生速度をもとに、実機収納缶での移送中の水素発生量を試算し、収納缶内の水素濃度が4 vol.%を超えない時間を算出した。

イ.評価基準

試算にあたって使用した評価基準は以下のとおりとする。

- ・水素濃度:4 vol.%未満(爆発下限界未満)
- ・移送時間:7日(168時間)^{注1}(算出した時間が7日(168時間)未満となる場合には、収納缶(または移送容器)のベントや収納缶または移送容器への収納量削減等を検討する。)

ロ.水素発生量評価方法

f.項での評価同様に、試験結果より得られた気相部水素濃度からの評価に加え、TMI-2評価式および放射線分解モデルによる計算により評価をおこなった。

注1:東京電力HD福島第一原子力発電所4号機使用済燃料取り出し時の実績より、移送時の不具合等を考慮し裕度を持たせて設定

6.実施内容

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(4)水素ガス対策の安全性検証(水素ガス発生量の検証)(17/29)

③実施事項、成果(16/27)

g.実機収納缶の水素発生量の試算(2/6)

ハ.収納缶および移送容器の条件

試算にあたって使用した収納缶および移送容器の条件は以下のとおりとする。

表 試算に使用した収納缶条件

条件	単位	仕様	備考
収納缶内径	mm	220	臨界防止の観点からの本技術開発における仕様値 (No.25、No.26に示す<スループット検討の条件>と同条件)
収納缶内部高さ	mm	800	No.25、No.26に示す<スループット検討の条件>と同条件
収納缶内容積	m ³	0.030	内径と内部高さより算出
収納燃料デブリ体積	m ³	0.0067	No.25、No.26に示す<スループット検討の条件>と同条件
水量	m ³	0.0033	ユニット缶による水切りを考慮し、燃料デブリ体積の50 vol.%(平成28年度の水切り試験より設定)と設定し算出
収納缶気相部体積	m ³	0.020	収納缶内容積から燃料デブリ体積と水量を差引いた値

表 試算に使用した移送容器条件

条件	単位	仕様	備考
移送容器内径	mm	1,700	暫定値
移送容器内部高さ	mm	1,200	暫定値
移送容器内容積	m ³	0.030	内径と内部高さより算出
収納缶収納本数	本	12	収納缶と移送容器内寸を考慮し設定(1段積み) (No.25、No.26に示す<スループット検討の条件>と同条件)
収納燃料デブリ体積	m ³	0.080	収納缶内燃料デブリ体積の合計
水量	m ³	0.040	収納缶内水量の合計
移送容器気相部体積	m ³	2.2	移送容器内容積から収納缶体積、収納缶燃料デブリ体積および収納缶内水量を差引いた値

6.実施内容

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(4)水素ガス対策の安全性検証(水素ガス発生量の検証)(18/29)

③実施事項、成果(17/27)

g.実機収納缶の水素発生量の試算(3/6)

ニ.燃料デブリ条件

試算にあたって使用した燃料デブリ条件は以下のとおりとする。

- ・燃料デブリはすべて UO_2 とする。したがって、収納缶内燃料デブリ重量:73 kg/本、移送容器内燃料デブリ重量は878 kg/基となる。
なお、水素発生試験と実際の燃料デブリでは粒径などの条件が異なると推定されるが、本評価では試験結果がそのまま適用できるものとする。
- ・線源強度は、平成28年度に実施した燃焼計算結果より得られた燃料デブリの線源強度を用いた。計算し使用した線源強度を以下に示す。

表 試算に使用した燃料デブリの線源強度

項目	α 線	β 線	γ 線
線源強度 (MeV/s \cdot kg- UO_2)	1.68×10^{12}	5.02×10^{12}	4.98×10^{12}

6.実施内容

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(4)水素ガス対策の安全性検証(水素ガス発生量の検証)(19/29)

③実施事項、成果(18/27)

g.実機収納缶の水素発生量の試算(4/6)

ホ.エネルギー吸収率

試算にあたって使用したエネルギー吸収率は以下の3ケースとする。

i.全エネルギーが水に吸収されるとして設定(以下、「全吸収」)

全エネルギーが吸収されると仮定し設定した。なお、飛程が長い γ 線は別途設定した。

ii.燃料デブリの粒径を考慮して輸送計算コードで算出(以下、「輸送計算」)

収納缶に回収する燃料デブリ(粒径0.1 mm以上^{注1})の粒径から、保守的に全燃料デブリの粒径を0.1 mmと仮定して、輸送計算コードでエネルギー吸収率を算出、設定した。

iii.試験結果から設定(以下、「試験結果」)

試験結果による吸収線量とペレット片の燃焼計算結果による放出エネルギーの比から設定した。

表 試算に使用したエネルギー吸収率^{注2}

条件	α 線	β 線	γ 線
全吸収	1	1	0.02
輸送計算	0.09	0.13	0.13
試験結果	0.01	0.002	0.002

注1:工法PJの現状の暫定値

注2:それぞれの線種ごとのエネルギーに対する水への吸収割合

6.実施内容

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(4)水素ガス対策の安全性検証(水素ガス発生量の検証)(20/29)

③実施事項、成果(19/27)

g.実機収納缶の水素発生量の試算(5/6)

^G値

試算にあたって使用したG値は以下のとおりとする。

表 試算に使用したG値

条件	G値(室温、個/100eV)								
	e ⁻	H	H ₂	OH	H ₂ O ₂	HO ₂	O ₂ ⁻	H ⁺	OH ⁻
α線 ^{注1}	0.06	0.21	1.3	0.24	0.985	0.22	-	0.06	-
β線、γ線 ^{注2}	2.75	0.60	0.44	2.81	0.71	-	-	2.75	-

TMI-2評価式による試算
ではH₂の値のみ使用

注1: Pastina, B., and LaVerne, J. A., (2001): "Effect of molecular hydrogen on hydrogen peroxide in water radiolysis." The Journal of Physical Chemistry A, 105(40), 9316-9322.

注2: "The Reaction Set, Rate Constants and g-Values for the Simulation of the Radiolysis of Light Water over the Range 20 to 350° C Based on Information Available in 2008." 153-127160-450-001.

6.実施内容

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(4)水素ガス対策の安全性検証(水素ガス発生量の検証)(21/29)

③実施事項、成果(20/27)

g.実機収納缶の水素発生量の試算(6/6)

ト.試算結果

- ・保守的に飛程の短い α 線、 β 線が全吸収されるとして評価すると、移送容器へ収納する収納缶の本数を減らす必要に加え、収納缶への燃料デブリ収納量も減らす必要がある結果となった。
- ・輸送計算で評価したエネルギー吸収率を用いて評価すると、全吸収よりも裕度が増えるものの、移送容器へ収納する収納缶の本数を減らす必要がある結果となった。
- ・水素発生試験結果から得られたエネルギー吸収率を用いて評価すると、収納缶を密封して移送可能となる結果となった。

表 試算結果

水素発生量 評価方法	エネルギー 吸収率評価方法	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	評価	備考
試験結果	-	約9.3日(約224時間)	約69日(約1656時間)	・収納缶、移送容器ともに 密封移送が可能 ^{注1} 。	
TMI-2評価式	全吸収	約0.04日(約1.0時間)	約0.3日(約7.1時間)	・密封移送不可。仮に移送容器で密封すると仮定した場合、 収納本数を1本に減らすとともに、収納燃料デブリ量も5割程度に減らす必要あり。	試算結果A
	輸送計算	約0.2日(約5.5時間)	約1.7日(約41時間)	・密封移送不可。仮に移送容器で密封すると仮定した場合、 収納本数を2本に減らす必要あり。	試算結果B
	試験結果	約5.8日(約139時間)	約43日(約1029時間)	・ 収納燃料デブリ量を8割程度の減らせば収納缶の密封移送可 ^{注1} 。移送容器では 密封移送が可能 。	試算結果C
放射線分解モデル	試験結果	約13日(約305時間)	約94日(約2262時間)	・収納缶、移送容器ともに 密封移送が可能 ^{注1} 。	

注1: 保管時は、収納缶はベントが基本

6.実施内容

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(4)水素ガス対策の安全性検証(水素ガス発生量の検証)(22/29)

③実施事項、成果(21/27)

h.移送シナリオ(1/6)

g.項で示した収納缶内水素発生量試算結果にもとづき、水素対策の観点からの移送シナリオを検討する。

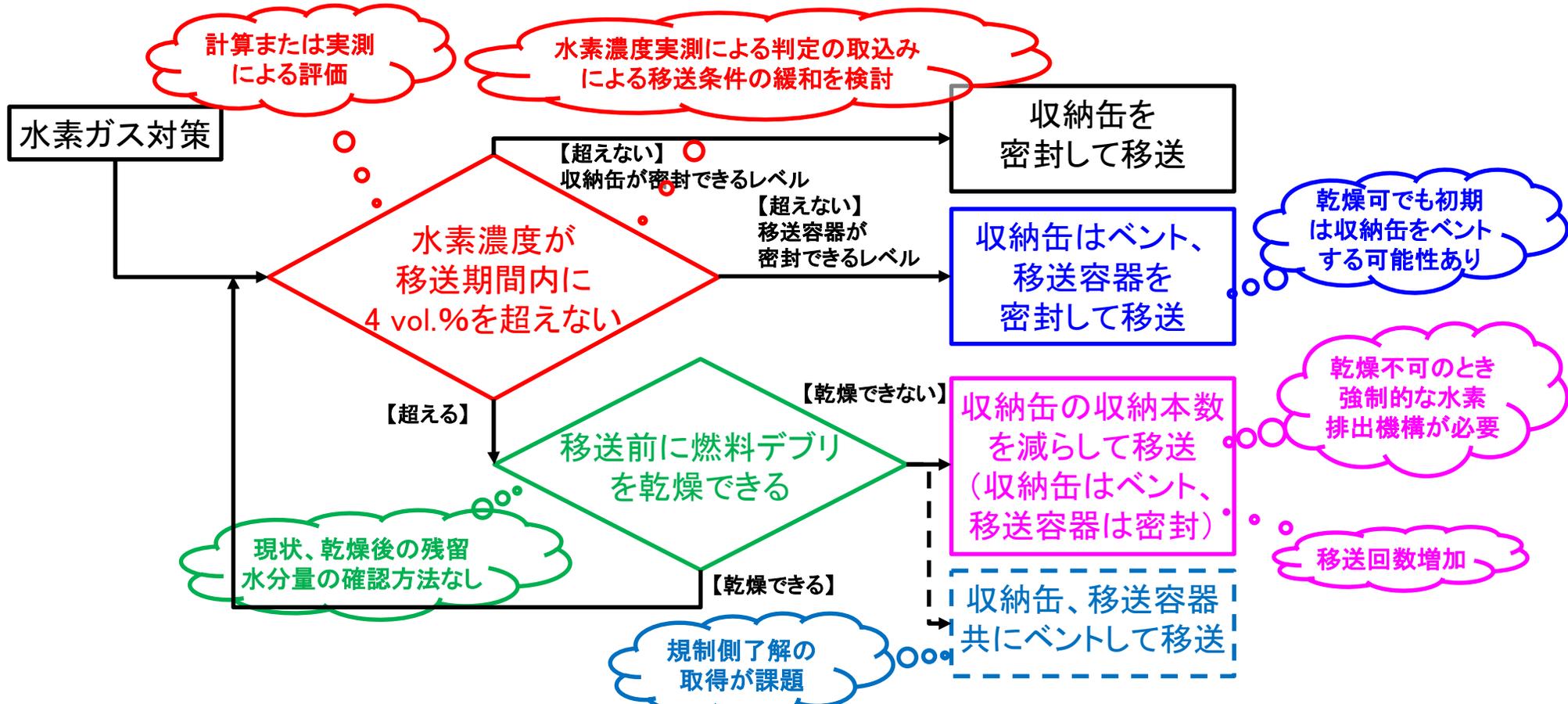


図 移送時の水素ガス対策の基本的な考え方

6.実施内容

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

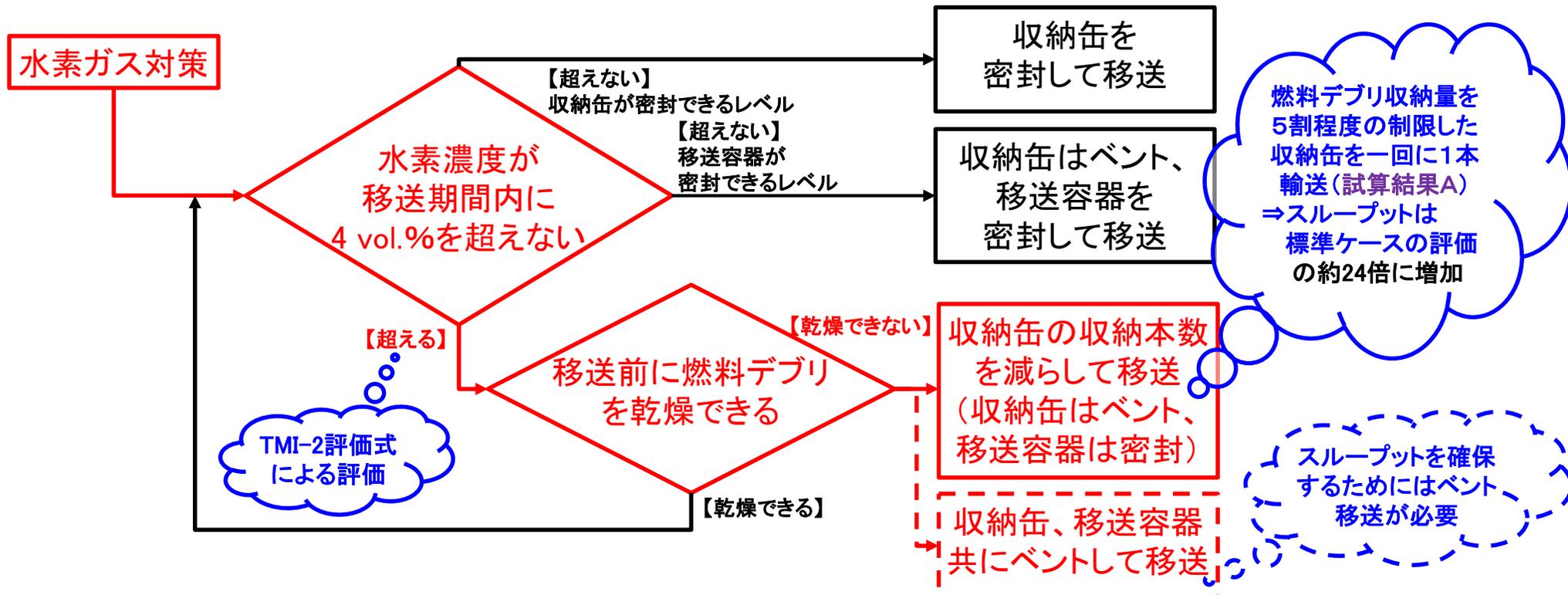
(4)水素ガス対策の安全性検証(水素ガス発生量の検証)(23/29)

③実施事項、成果(22/27)

h.移送シナリオ(2/6)

もっとも保守的な条件(α 線、 β 線は全吸収)で水素発生量を評価せざる場合(TMI-2評価式を使用)は、収納缶の収納本数を減らして移送。移送前に燃料デブリを乾燥できないと、g.t.項の試算結果Aから移送容器に収納缶1本を収納し移送(収納缶への燃料デブリ収納量も5割程度に減ずる必要あり。)

⇒ケースA



6.実施内容

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

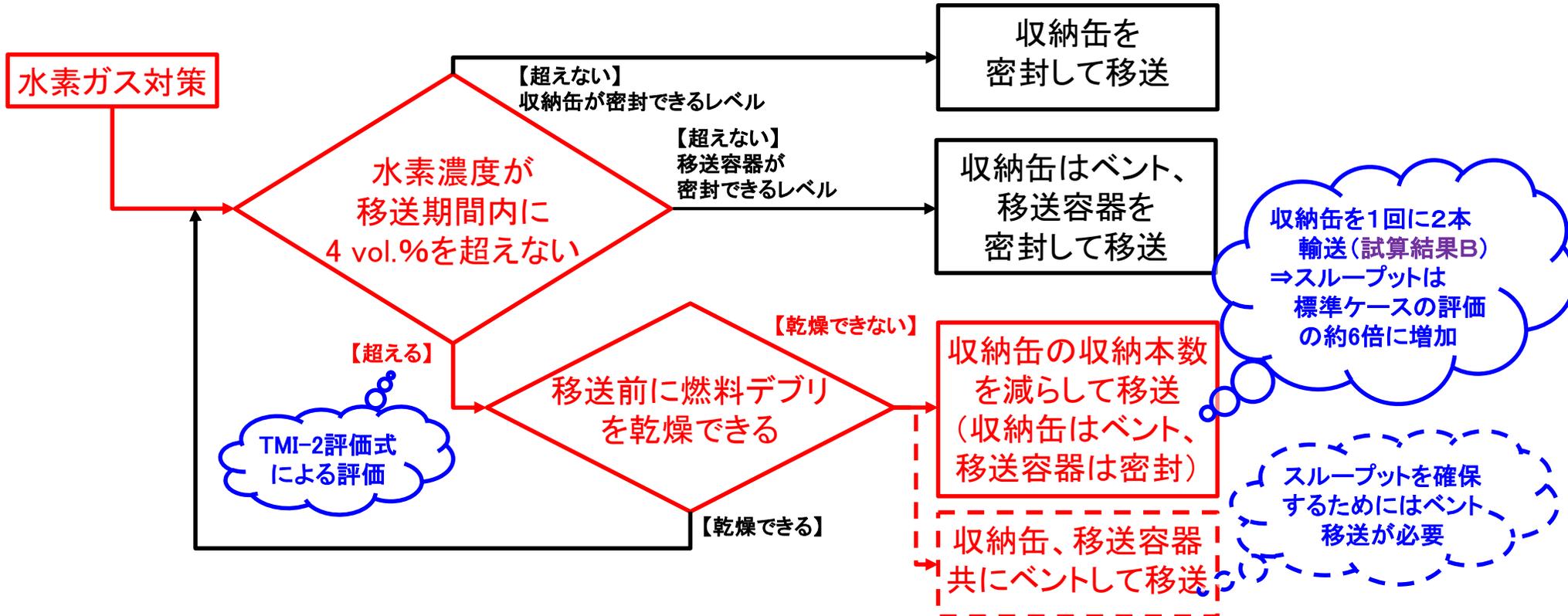
(4)水素ガス対策の安全性検証(水素ガス発生量の検証)(24/29)

③実施事項、成果(23/27)

h.移送シナリオ(3/6)

粒径を適切に考慮した条件(粒径考慮)で水素発生量を評価できる場合(TMI-2評価式を使用)は、収納缶の収納本数はケースAのもっとも保守的な評価に比べ増加。粒径を考慮した計算値によるエネルギー吸収率を使用することで、g.t.項の試算結果Bから収納缶を2本移送可能。

⇒ケースB



6.実施内容

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

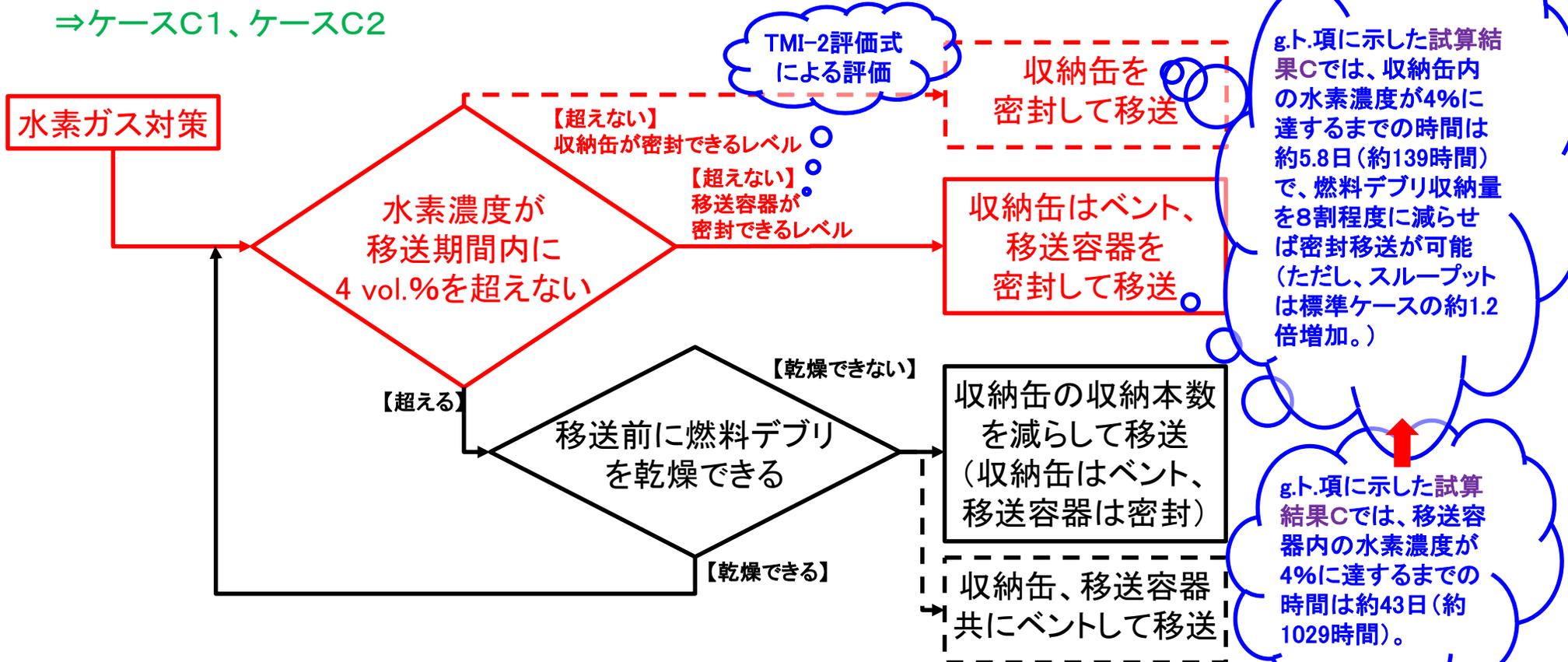
(4)水素ガス対策の安全性検証(水素ガス発生量の検証)(25/29)

③実施事項、成果(24/27)

h.移送シナリオ(4/6)

試験結果から得られたエネルギー吸収率の条件を使用して水素発生量を評価できる場合(TMI-2評価式を使用)は、移送前の燃料デブリ乾燥によらず、移送容器を密封して移送が可能。また、収納缶への燃料デブリ収納量を8割程度にすれば収納缶を密封して移送が可能。

⇒ケースC1、ケースC2



6.実施内容

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

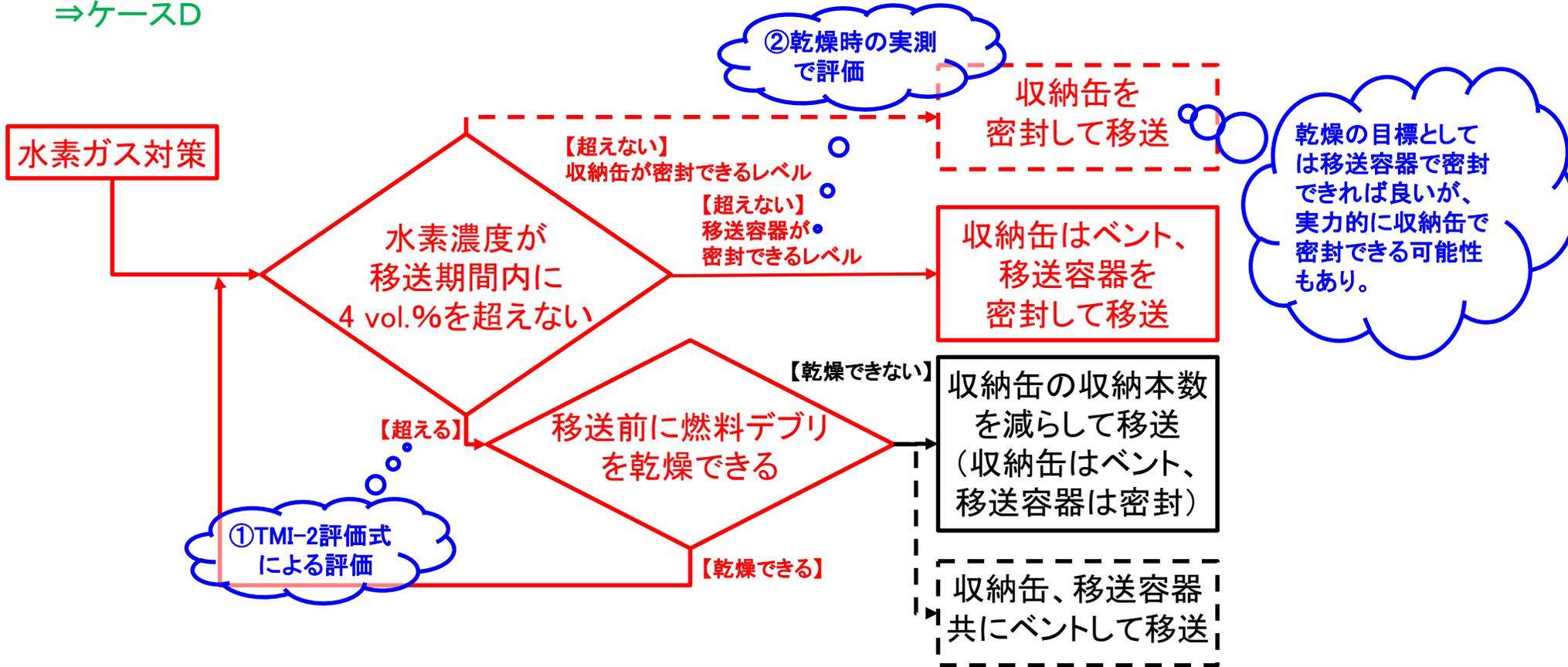
(4)水素ガス対策の安全性検証(水素ガス発生量の検証)(26/29)

③実施事項、成果(25/27)

h.移送シナリオ(5/6)

移送前に燃料デブリの乾燥ができれば、d.項に示した試験結果から、移送容器(または収納缶)を密封して移送可能と判断される。ただし、燃料デブリの乾燥は別途課題(6.2(4)項で検討を実施)。

⇒ケースD



6.実施内容

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(4)水素ガス対策の安全性検証(水素ガス発生量の検証)(27/29)

③実施事項、成果(26/27)

h.移送シナリオ(6/6)

・移送前乾燥の確立
(技術面、運用面)

ケースA
<移送条件> ・収納缶 収納量を制限 移送容器 収納本数を制限 ・移送容器で密封を確保 (収納缶はベント)
<水素発生量評価方法> ・TMI-2評価式 <水素発生量評価条件> ・燃料デブリは すべてUO₂ ・ 保守的なエネルギー吸収率 を採用
<スループットへの影響> ・標準ケースの 約24倍 に増加

ケースX
<移送条件> ・収納缶 収納量・移送容器 収納本数、ともに制限なし ・ 収納缶、移送容器ともにベント
<水素発生量評価方法> ・ 不要(安全評価として) <評価条件> -
<スループットへの影響> ・ 影響なし

ケースB
<移送条件> ・収納缶 収納量は制限なし 移送容器 収納本数を制限 ・移送容器で密封を確保 (収納缶はベント)
<水素発生量評価方法> ・TMI-2評価式 <水素発生量評価条件> ・燃料デブリの 線源強度を確定 ・燃料デブリ 粒径を考慮した エネルギー吸収率を採用
<スループットへの影響> ・標準ケースの 約6倍 に増加

・燃料デブリの線源強度(あるいは核物質質量)の設定
 ・燃料デブリ粒径を考慮したエネルギー吸収率設定方法(例:輸送計算コードの妥当性など)
 ・燃料デブリ粒径の推定

<スループットの確保を最優先>
 ・規制側の了解
 ・放射性物質放出対策

ケースC1
<移送条件> ・収納缶 収納量・移送容器 収納本数、ともに制限なし ・移送容器で密封を確保 (収納缶はベント)
<評価方法> ・TMI-2評価式 <評価条件> ・燃料デブリの 線源強度を確定 ・ 試験結果にもとづくエネルギー 吸収率を採用
<スループットへの影響> ・ 影響なし

ケースC2
<移送条件> ・収納缶 収納量を制限、 移送容器 収納本数制限なし ・移送容器で密封を確保 (収納缶はベント)
<水素発生量評価方法> ・TMI-2評価式 <水素発生量評価条件> ・燃料デブリの 線源強度を確定 ・ 試験結果にもとづくエネルギー 吸収率を採用
<スループットへの影響> ・標準ケースの 約1.2倍 に増加

・燃料デブリの線源強度(あるいは核物質質量)の設定
 ・試験結果および試験結果によるエネルギー吸収率設定の妥当性
 ・試験条件と実燃料デブリ条件の整合性

ケースD
<移送条件> ・収納缶 収納量・移送容器 収納本数、ともに制限なし ・移送容器で密封を確保 (乾燥レベルによって収納缶での密封も確保可)
<水素発生量評価方法> ・ 乾燥時の実測等 <水素発生量評価条件> -
<スループットへの影響> ・ 影響なし

6.実施内容

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(4)水素ガス対策の安全性検証(水素ガス発生量の検証)(28/29)

③実施事項、成果(27/27)

i.まとめ

水素ガス発生量の検証として、使用済燃料を用いた水素発生試験等より、以下の結果が得られた。

- ・粒径小(粒径20 μm ~300 μm)を用いた場合、 α 線有のケースの水素発生速度は α 線無のケースのものと比較して10倍程度大きかった。したがって、今回の試験条件において α 線の影響が確認できた。
- ・重量変化がなくなる程度までペレット片を乾燥させることで、水の放射線分解による水素発生を抑制できることがわかった。
- ・水の放射線分解による水素発生量は水素発生量評価方法よりもエネルギー吸収率評価方法の影響が大きいことがわかった。したがって、条件に応じてエネルギー吸収率が設定できれば、適切に水素発生量が評価できる見通しを得た。

6.実施内容

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(4)水素ガス対策の安全性検証(水素ガス発生量の検証)(29/29)

④成果の反映先への寄与

試験等の結果にもとづき、燃料デブリの乾燥の要否、判断基準や水素対策を検討する。また、実機収納缶水素発生量評価の評価条件の検討に資する情報とする。

⑤現場への適用性の観点における分析

実機収納缶条件と本試験条件との差異を考慮し、実機収納缶水素発生量の評価条件の検討に資する情報を本試験結果から得る。

⑥目標に照らした達成度

目標達成を判断する指標に対して、 γ 線照射試験を実施、収納缶気相部での反応の影響を考慮しても水素の初期発生量のG値を用いて評価できる見通しを得た(平成29年度報告済み)。

また、粒径が数mm以下で再結合が期待できないような水分量においては、水素発生に与える α 線の寄与レベルが、 β 線 γ 線に比べ大きくなることがわかった。そのような条件下でも、水へのエネルギー吸収量が適切に設定できれば、水素発生量が評価できる見通しを得た。

以上のことから目標を達成していると判断される。

⑦今後の課題

水素発生量予測法の提案に向けて、1F燃料デブリ条件を考慮した評価条件(燃料デブリ条件、エネルギー吸収率など)の設定に対する考え方等について検討が必要である。

6.実施内容

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(5)水素ガス対策の安全性検証(水素対策の検証)(1/12)

①目的、目標

収納缶は移送容器で原子炉建屋から保管施設まで運搬することが想定され、移送中、移送容器は密閉する必要があることから滞留した水素の防爆対策が必要である。また、できるだけ燃料デブリを収納缶に閉じ込めることが収納缶外の汚染抑制に有効である。そこで、水素対策の一案として収納缶内で発生した水素を収納缶内で処理する方法として、缶内で発生した水素と酸素を触媒で再結合する方策の可能性/有効性を明らかにする。平成29年度までに得られた成果を踏まえ、以下を目標として検討を行った。

a.収納缶内環境を考慮した触媒の選定

b.収納缶内の流動を考慮した発生水素の拡散効果(水素の触媒への運搬効果)の設定

6.実施内容

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(5)水素ガス対策の安全性検証(水素対策の検証)(2/12)

②既存技術との対比

水素再結合触媒は、流通試験(強制対流)による性能確認の事例はあるものの、収納缶内の拡散効果や自然対流を対象とした知見は報告例がほとんどない。このため1F固有の条件を考慮した検討が必要となる。

③実施事項、成果(1/10)

a.収納缶内環境を考慮した触媒の選定(1/6)

未乾燥状態の燃料デブリからは、残留水分の放射線分解による水素発生が想定される。

移送は移送容器を用いて行われるが、収納缶に設置された触媒は結露がある他、温度も比較的低温(常温程度)と一般的な触媒が用いられる環境よりも動作条件が厳しいと考えられる。

そこで水素発生が想定される収納缶内の環境下における水素再結合触媒の再結合性能への影響を確認するため、本試験では、水素再結合触媒の適用性の一次評価を目的として、高湿度環境下及び触媒表面への凝縮水存在下における触媒性能(酸化反応可否)の確認を行った。

6.実施内容

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(5)水素ガス対策の安全性検証(水素対策の検証)(3/12)

③実施事項、成果(2/10)

a.収納缶内環境を考慮した触媒の選定(2/6)

触媒メーカーの低温環境向けに開発された触媒他を環境温度を模擬したチャンバー(閉鎖系の反応容器)に設置し、所定量の水素他のガスを注入、内部の圧力、圧力変動が安定したところで水素濃度を測定し、再結合反応の有無を確認した。

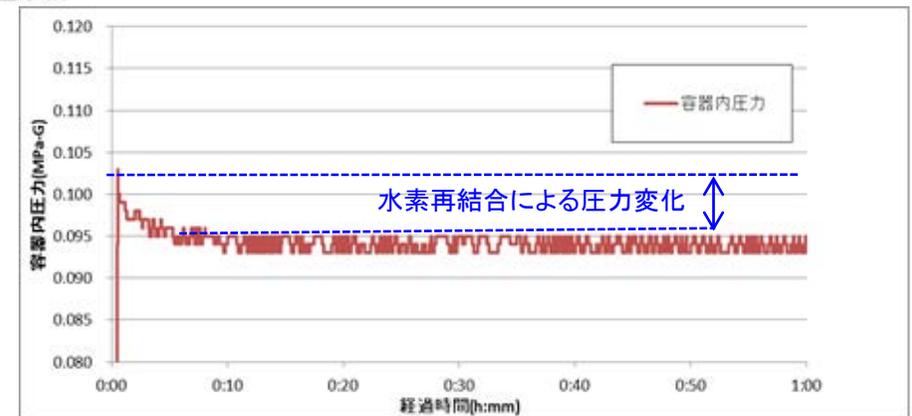
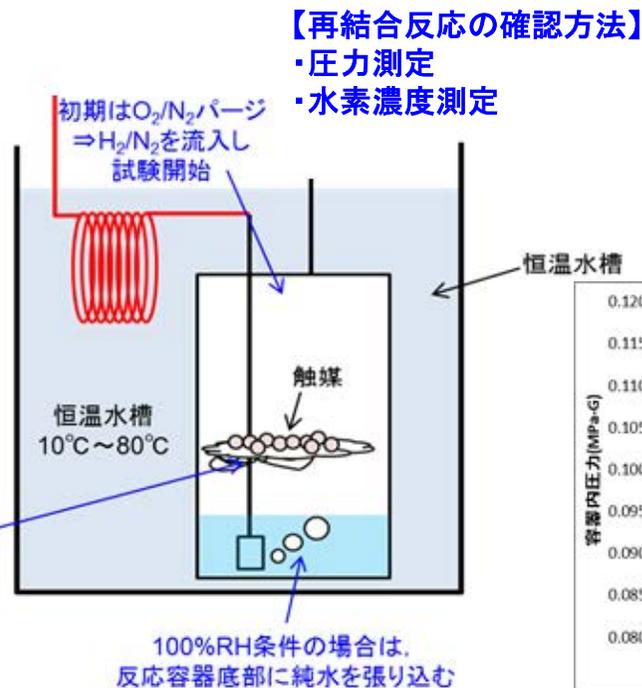


図 容器内圧の経時変化例

(ケース:触媒①(撥水性処理あり)、水素濃度2vol.%、相対湿度100%RH、温度10°C、容器内圧力0.2MPa-A、触媒浸漬あり)

図 触媒の性能確認要素試験の方法

6.実施内容

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(5)水素ガス対策の安全性検証(水素対策の検証)(4/12)

③実施事項、成果(3/10)

a.収納缶内環境を考慮した触媒の選定(3/6)

触媒の性能確認要素試験の対象として供試触媒の仕様を下表、形状を右図に示す。

なお、触媒は入手可能な触媒メーカーの市販品・試供品等を対象とし、収納缶内環境で使用可能な触媒の有無を試験にて確認した。

表 供試触媒の仕様

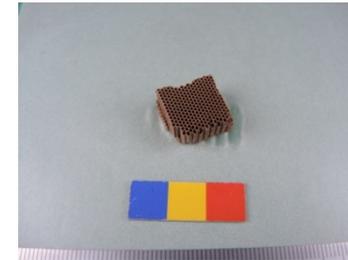
触媒 No.	名称	仕様
①	ペレット形状① (撥水性処理あり)	触媒メーカー開発品 触媒:Pt, 撥水性処理, 2mL相当 (撥水性処理品が特徴的な触媒として)
②	ペレット形状② (撥水性処理なし)	三菱重工開発品 触媒:Pt, 2mL相当 (撥水処理なしで比較的低温設計のもの)
③	ハニカム触媒① (撥水性処理なし)	自動車用触媒 触媒:Pt, メッシュが⑥より細かい, 2mL相当 (一般的に高性能とされているものとして選択)
④	白金ワイヤ (撥水性処理なし)	白金ワイヤ:0.05mmφ, 長さ1m (素材そのものの撥水性を期待)
⑤	白金綿 (撥水性処理なし)	白金ファイバ:0.04umφ, 2mL相当 (素材そのものの撥水性を期待)
⑥	ハニカム触媒② (撥水性処理なし)	触媒メーカー開発品 触媒:Pt, メッシュ:30cpsi, 2mL相当 (2cm ² *1cm)(撥水処理なしで比較的低温設計のもの)
⑦	ペレット形状③ (撥水性処理なし)	触媒メーカー開発品 触媒:Pt, 触媒担持 アルミ担体, 2mL相当 (撥水処理なしで比較的低温設計のもの)



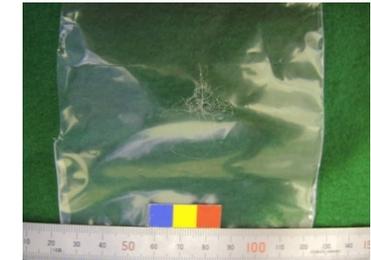
①ペレット形状①



②ペレット形状②



③ハニカム触媒①



④白金ワイヤ



⑤白金綿



⑥ハニカム触媒②



⑦ペレット形状③

図 供試触媒の形状

6.実施内容

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(5)水素ガス対策の安全性検証(水素対策の検証)(5/12)

③実施事項、成果(4/10)

a.収納缶内環境を考慮した触媒の選定(4/6)

触媒の性能確認要素試験の評価条件を以下に示す。

表 触媒の性能確認要素試験の評価条件

項目	単位	値	備考	
ガス組成	H ₂	vol.%	2	水素の燃焼下限界(4vol.%)を踏まえてより反応性が低い低濃度(保守側)を設定
	O ₂	vol.%	(0.25~1)	H ₂ :O ₂ =2:1となるように調整
	N ₂	vol.%	Balance	—
相対湿度	(%)	100	保守的評価として飽和水蒸気雰囲気にて実施	
触媒量	mL	2	実機収納缶の内寸:触媒設置可能容積比率から本反応容器での触媒容積を導出	
評価温度	°C	10	収納缶の移送環境として常温環境よりもやや低い温度として設定	
ゲージ圧	MPa-A	0.1+α, 0.2	常圧の容器へのH ₂ ,O ₂ ガス供給とガス採取時の汚染防止のため加圧(0.2MPa)を採用。保守側評価として常圧付近でも実施	
触媒水浸漬	—	有り, 無し	飽和水蒸気雰囲気条件にて水浸漬有りと無しを実施	

計測項目	分析方法
H ₂ 濃度, O ₂ 濃度	サンプリングラインからガスをサンプリングし, ガスクロマトグラフにて分析
反応容器内圧力	圧力計にて計測(データロガーにて記録)
反応容器内温度	熱電対にて計測(データロガーにて記録)

6.実施内容

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(5)水素ガス対策の安全性検証(水素対策の検証)(6/12)

③実施事項、成果(5/10)

a.収納缶内環境を考慮した触媒の選定(5/6)

- 触媒①(ペレット形状①、撥水性処理あり)では、98%以上の反応率^{注1}となることを確認
- 触媒②(ペレット形状②)、触媒⑥(ハニカム触媒(メッシュ:30cpsi))は40%程度の反応率で反応が停止した。
- その他の触媒については、反応率が10%以下であった。
⇒水素再結合反応に伴う凝縮水が触媒表面に付着することで、反応が阻害された可能性がある。
- 触媒③(自動車用)は、水浸漬を行わない場合も反応が生じなかった。
⇒ハニカムの孔径小さく、自然対流程度では孔内にガスが拡散せず、反応が生じなかったと推定される。

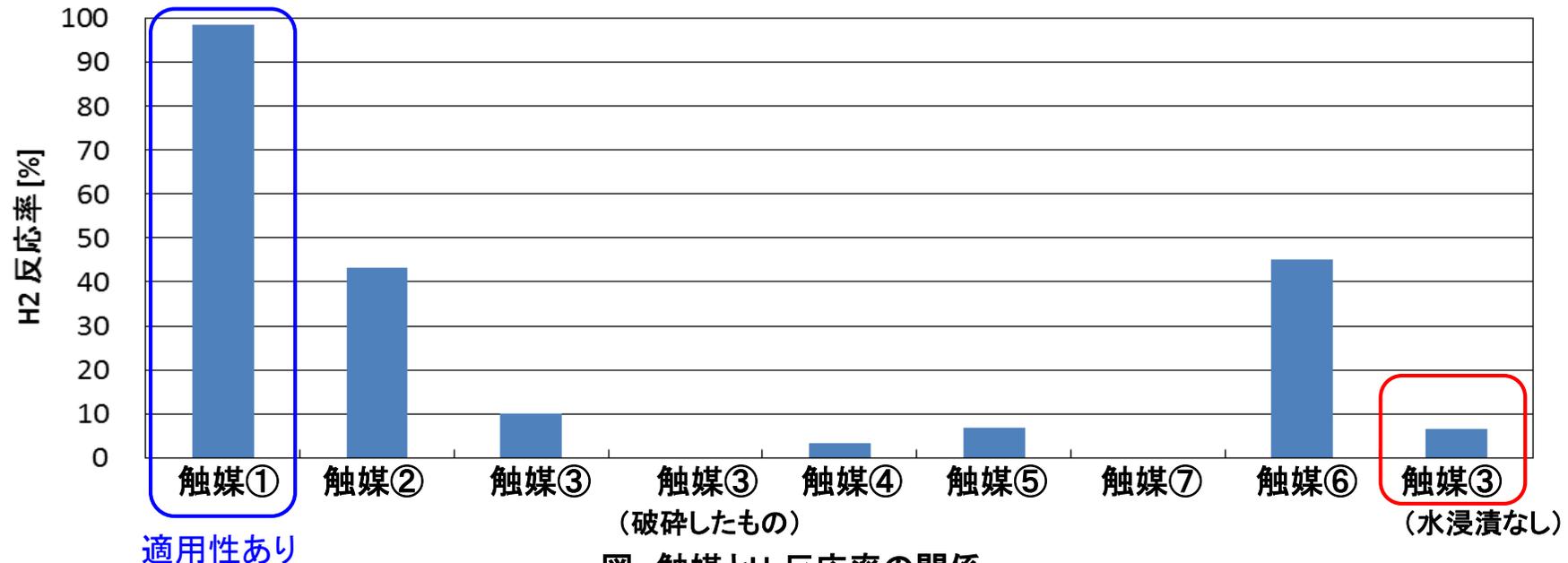


図 触媒とH₂反応率の関係

注1: 反応率 = (再結合反応で反応した水素濃度) / (再結合反応前の水素濃度) [%]

6.実施内容

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(5)水素ガス対策の安全性検証(水素対策の検証)(7/12)

③実施事項、成果(6/10)

a.収納缶内環境を考慮した触媒の選定(6/6)

触媒①(ペレット形状、撥水性処理あり)は撥水性処理が付与されていることから移送期間(7日間の想定)に対して、保守側に10日間相当の照射を行い反応の有無を確認した。

- γ 線を500kGy照射後も反応率95%以上であることを確認した。
- 圧力変化挙動からも、 γ 線照射の有無に関わらず水素再結合反応に伴う圧力低下を確認した。
- 照射前後の外観を比較しても、特に変化は確認されなかった。

⇒触媒①は、収納缶内環境を考慮しても期待できる触媒と考えられる。

表 触媒① 反応容器内ガス濃度

	H ₂ (%)	O ₂ (%)
反応前	2.1	0.9
反応後	<0.1	0.1

⇒反応率 95%以上

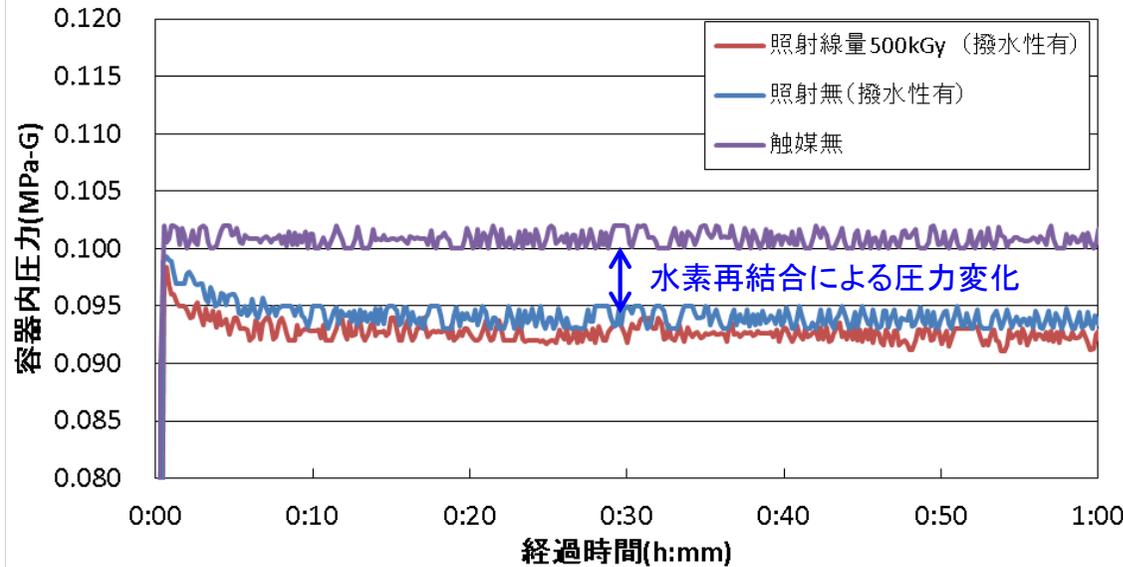
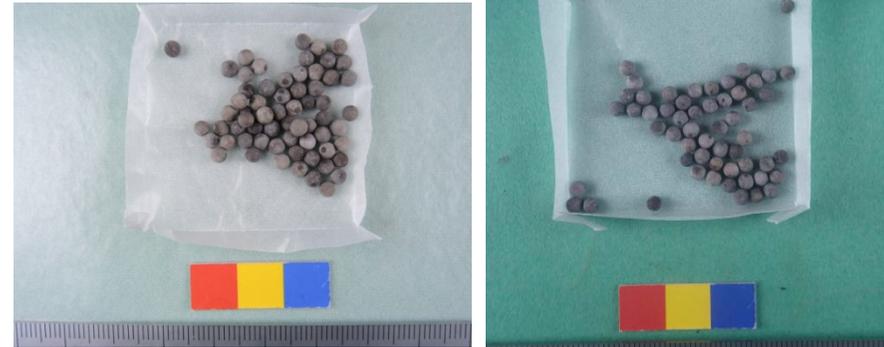


図 触媒① 反応容器内圧力挙動
(赤: γ 線照射あり, 青: γ 線照射なし)



γ 線照射前

γ 線照射後

図 触媒①の外観比較

6.実施内容

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(5)水素ガス対策の安全性検証(水素対策の検証)(8/12)

③実施事項、成果(7/10)

b.収納缶内の流動を考慮した発生水素の拡散効果(水素の触媒への運搬効果)の設定(1/3)

- ・高濃度の水素発生量の場合、収納缶内での流動を期待することが可能であるか別途行われた既往試験(No.119参照)より評価した。

(必要となる流速の検討)

発生する水素量は、発熱量に比例する。また、拡散の効果は流速に比例する。そこで収納缶中心部の濃度を4vol.%以下にするための発熱量と必要となる流速条件を整理した。

<検討条件>

- ・収納缶内部高さ: 1.5m
- ・発生水素量条件: G値=0.45、エネルギー吸収率=0.6(微粉末)

6.実施内容

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(5)水素ガス対策の安全性検証(水素対策の検証)(9/12)

③実施事項、成果(8/10)

b.収納缶内の流動を考慮した発生水素の拡散効果(水素の触媒への運搬効果)の設定(2/3)

【参考】必要流速の導出方法

水素再結合触媒を収納缶の両端に設置する場合、水素分子の移動を拡散のみと仮定する場合における、収納缶の中央高さの水素濃度は次式で与えられる。

$$C = \frac{G}{2D} \left(\frac{H}{2}\right)^2 + C_s \quad (1)$$

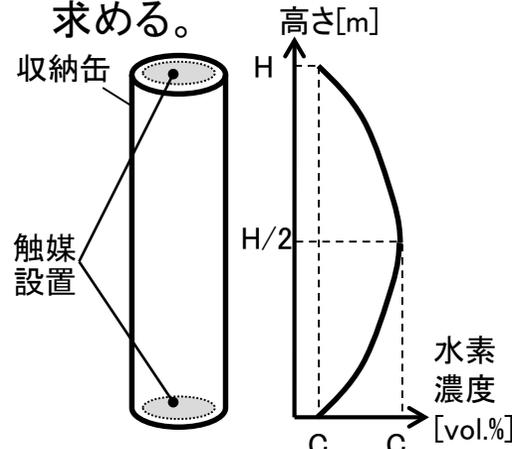
水素発生量は次式で与えられる。

$$G = \frac{Q}{V_{UC} + V_{\delta}} \times \frac{F}{E} \times \frac{G_e}{A_e} \times \frac{V_n}{N_A} \times 100 \quad (2)$$

移流拡散方程式から、拡散係数と流速値の大小関係は以下のオーダである。

$$u = \frac{D}{H} \quad (3)$$

式(1)~(3)により、デブリ発熱密度と必要な流速の関係を求める。



- (記号)
- C : 缶中心水素濃度 [vol.%]
 - G : 水素発生速度 [vol.%/s]
 - D : 拡散係数 [m²/s]
 - H : 缶高さ(=1.5m)
 - C_s : 触媒表面の水素濃度 [vol.%]
 - Q : デブリ発熱量 [W]
 - V_{UC} : UC缶内デブリの空隙(30%)の体積 [m³]
 - V_δ : アニユラス部の空間体積 [m³]
 - F : エネルギー吸収率(=0.6)
 - E : 電荷素量(=1.6 × 10⁻¹⁶ J/eV)
 - G_e : 水素発生G値(=0.45)
 - A_e : 吸収エネルギー(=100eV)
 - V_n : モル体積(=22.4 × 10⁻³ m³/mol)
 - N_A : アボガドロ数(=6 × 10²³ mol⁻¹)

図 缶内水素濃度分布

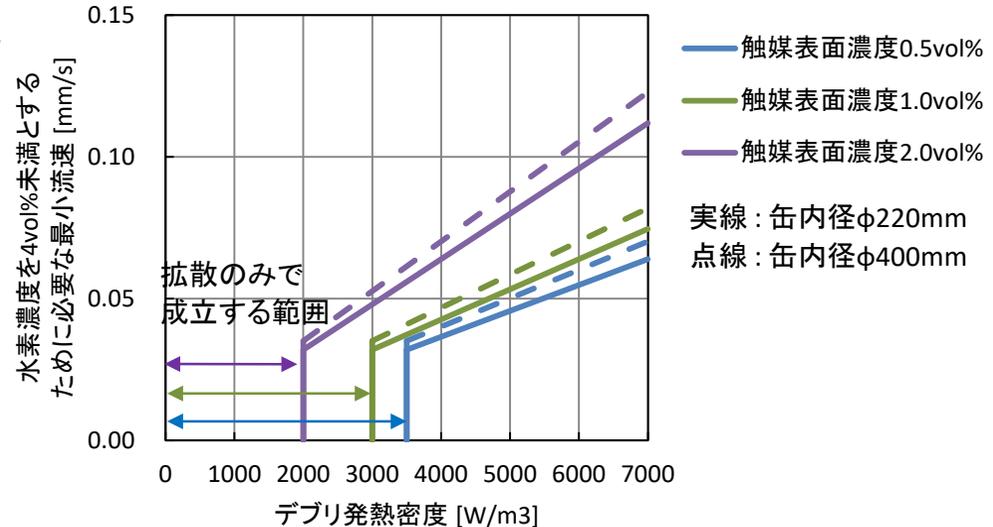


図 デブリ発熱密度と流速の関係

6.実施内容

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(5)水素ガス対策の安全性検証(水素対策の検証)(10/12)

③実施事項、成果(9/10)

b.収納缶内の流動を考慮した発生水素の拡散効果(水素の触媒への運搬効果)の設定(3/ 3)

・既往試験の概要

以下の供試体でアニュラス部の流動状況データを採取している。

結果:1000W/m³においては2.0mm/sの流動することが確認されている。

⇒前頁より、水素発生が小さく拡散だけで収納缶内の水素濃度(4vol%)以下が達成できるデブリ発熱密度(1000W)でありながら最も厳しい^{注1}と想定される発熱密度での必要流速(0.12mm/s)を上回っておりで十分な流動が期待できる。

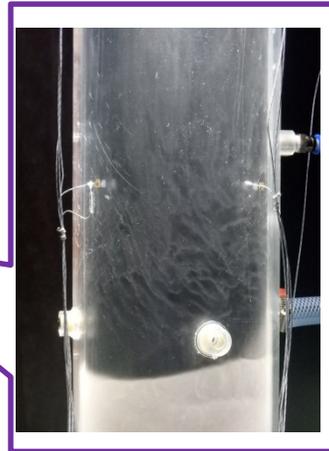
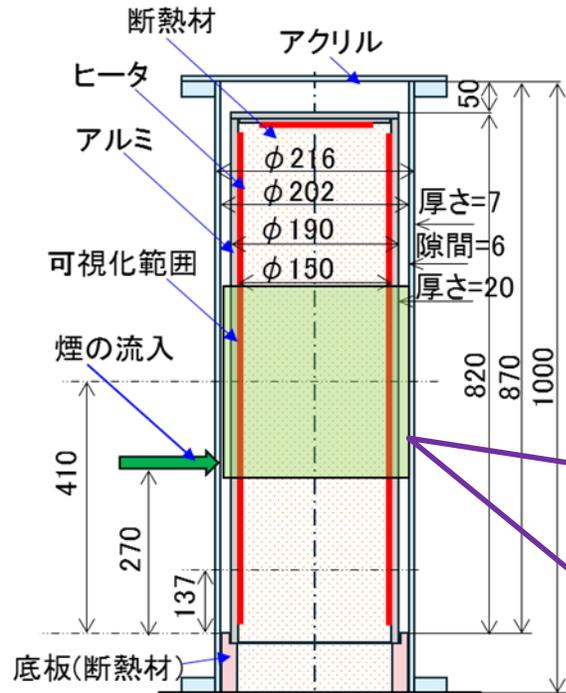


図 流動状況

表 実機(収納缶)と試験体の比較

項目	実機	試験体	
収納缶寸法	内径 [mm]	φ220~400	φ202
	アニュラス幅[mm]	5~30	6
	缶高さ [m]	0.8~4.0	0.87
	上部空間高さ [mm]	50~100	50
ユニット缶	缶厚み [mm]	約20(SUS)	7(アクリル)
	高さ[m]	0.7~3.95	0.82
	材質	SUSメッシュ	アルミ+ヒータ
	発熱密度 [W/m ³]	220~7000	220~6000
外部の流体	熱流束(1000、6000W/m ³) [W/m ²]	46、276	45、269
	外部の流体	大気	大気
アニュラス部圧力 [MPa]	0.1MPaより高い(デブリ発熱による内圧上昇)	0.1MPa(発熱密度220W/m ³ のため)	
缶内部ガス	N ₂ ,He,Ar	空気	

実機よりも保守的な条件

- ・アニュラス幅:実機と同等
- ・供試体高さ:実機(1.5m)より低い
(流速が発生しにくい。)
- ・熱流束:同一発熱密度で熱流束は実機より小さい
(流速が発生しにくい。)

注1:最高燃焼度の集合体(55GWd/t)(10年冷却)のUO₂ペレットを充填率30[vol.%]で収納した場合(発熱密度7000W/m³程度)

図 供試体形状

6.実施内容

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(5)水素ガス対策の安全性検証(水素対策の検証)(11/12)

③実施事項、成果(10/10)

まとめ

触媒メーカーからの提供他の触媒について、収納缶の移送環境を想定し、常温よりも低い温度条件、高湿度（初期の触媒は水濡れ）の環境で水素の酸化反応有無を確認した結果、これら環境下でも酸化反応する触媒のあることがわかり、候補として期待できる。

本技術開発はユニット缶が収納缶の中心に存在する理想条件の検討であるが、収納缶内は、発生する水素を収納缶の両端部に拡散するに十分な対流が期待できる。

6.実施内容

6.3.安全評価手法の開発及び安全性検証

(5)水素ガス対策の安全性検証(水素対策の検証)(12/12)

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。

⑤現場への適用性の観点における分析

触媒の信頼性に関しては、実績の蓄積が重要となるため、当面はバックアップとしての位置づけで検討する。

⑥目標に照らした達成度

上述の通り、炉内におけるも最も高い燃焼度の燃料集合体のペレットに相当する燃料デブリが収納されても水素の滞留しない流動が確認できており、目標を達成していると判断する。

⑦今後の課題

触媒については被毒に対する耐性、収納缶内にコンパクトに設置するための配置等の検討が必要である。また、収納缶内流動ではユニット缶の偏芯など、実運用で想定される条件に対する影響を評価し必要な対応策の策定が必要である。また、底部への触媒の設置は水溜り等の可能性があり、避けるための工夫が必要であるため、触媒を蓋側だけに設置する場合での流動の確認も有効である。

6.実施内容

6.4.燃料デブリの収納形式の検討

(1)燃料デブリ性状に合わせた収納缶仕様の検討

①目的、目標

収納缶基本仕様について、燃料デブリ性状に応じた最適な収納缶形式について仕様の検討・更新

②既存技術との対比

1F燃料デブリを想定した仕様はないため、1F固有の条件を考慮した設定が必要である。

③実施事項、成果

工法PJ、基盤PJにおいて粉状等の燃料デブリの回収方法が検討されており、現時点では、塊状燃料デブリ収納缶を燃料デブリ形状(塊状、粒状、粉状)に関係なく用いる方針で検討を進めることとした。現時点で収納缶仕様案はスループットや燃料デブリ性状・形状に適用可能であることを確認した。

④成果の反映先への寄与

燃料デブリ性状・形状に対応した基本仕様を設定。

⑤現場への適用性の観点における分析

今後の具体化の過程で適用性を判断、調整していく予定である。

⑥目標に照らした達成度

平成30年度の検討で目標達成を判断する指標を満足させているが、引き続き関連PJの最新の検討結果を踏まえて見直しを進める。

⑦今後の課題

現計画の遂行上、課題はなし。

6.実施内容

6.4.燃料デブリの収納形式の検討

(2) 収納缶設計の見直し(1/2)

① 目的、目標

収納缶設計について、燃料デブリ性状に応じた最適な収納缶形状の検討・更新

② 既存技術との対比

1F燃料デブリを想定した仕様はないため、1F固有の条件を考慮した設定が必要である。

③ 実施事項、成果

工法PJ、基盤PJにおいて粉状等の燃料デブリの回収方法が検討されており、現時点では、塊状燃料デブリ収納缶を燃料デブリ形状(塊状、粒状、粉状)に関係なく用いる方針で検討を進めることとし、6.2.項及び6.3.項の検討成果を反映した収納缶形状案を検討した(次ページ参照)。

④ 成果の反映先への寄与

燃料デブリ性状・形状に対応した収納缶形状を設定。

⑤ 現場への適用性の観点における分析

今後の具体化の過程で適用性を判断、調整していく予定である。

⑥ 目標に照らした達成度

平成30年度の検討で目標達成を判断する指標を満足させているが、引き続き関連PJの最新の検討結果を踏まえて見直しを進める。

⑦ 今後の課題

現計画の遂行上、課題はなし。

6.実施内容

6.4.燃料デブリの収納形式の検討 (2) 収納缶設計の見直し(2/2)

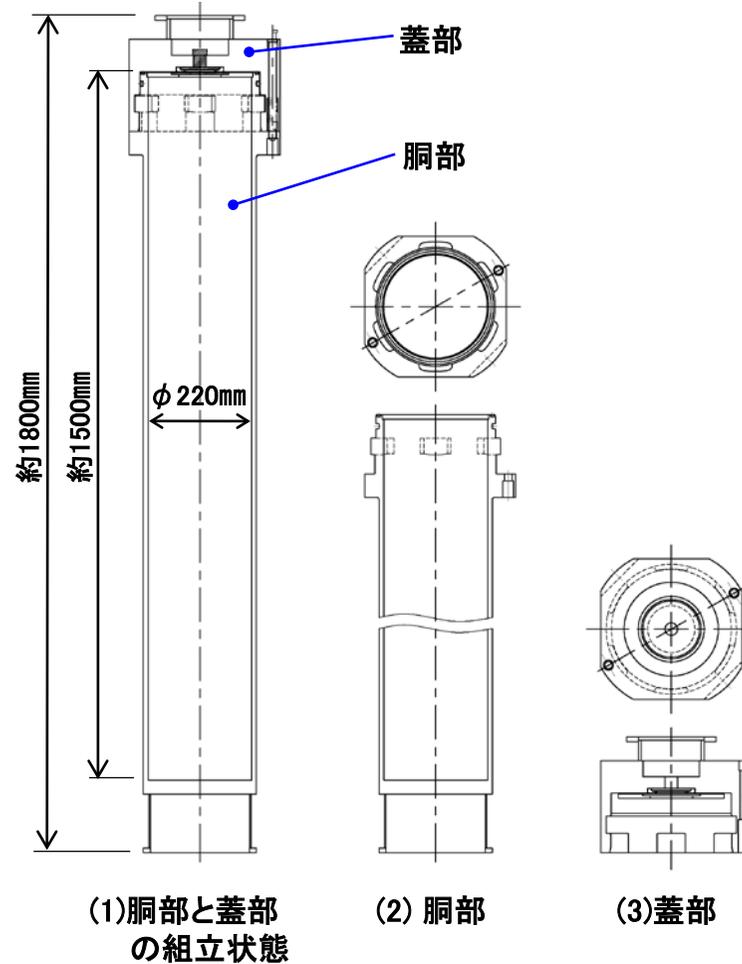


図 収納缶の基本計画形状案（簡易取付構造蓋(回転による蓋締め)、収納缶内径220mm)

7.全体まとめ

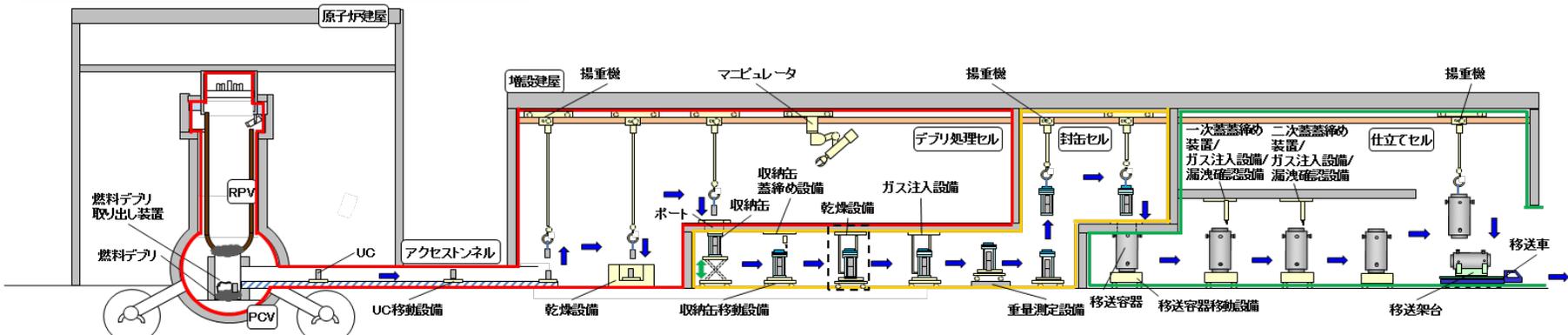
- 平成29年度仮定した燃料デブリ取り出し・収納・移送・保管を合理的に行う観点から各作業ステップ、プロセスフローについて最新の知見を踏まえた見直しを実施した。
- 従前研究から継続的に行っている移送・保管システムの安全評価に必要なとなる評価手法の検証を実施した。
- 塊状、粒状、粉状の燃料デブリの回収方法に対応した収納缶仕様を設定した。
- 以上を踏まえて、今後、より実用的観点の検証段階へ移行することが必要となった。

<今後必要となる検討>

- 移送・保管システムの安全評価に必要なとなる評価手法について、収納缶構造検証試験の立案および検証試験の実施／評価による検証を進め、収納缶設計への反映を行う。
- 移送時の水素計測方法や水素対策の検討による移送条件の明確化を行う。
- 乾燥処理技術および保管前処理評価術の検討による乾燥技術／システムの開発を行う。
- 各作業ステップ、プロセスフローの見直し等で新たに抽出された課題は関連PJと協議し、2019(令和元)年度以降の計画への反映を行う。

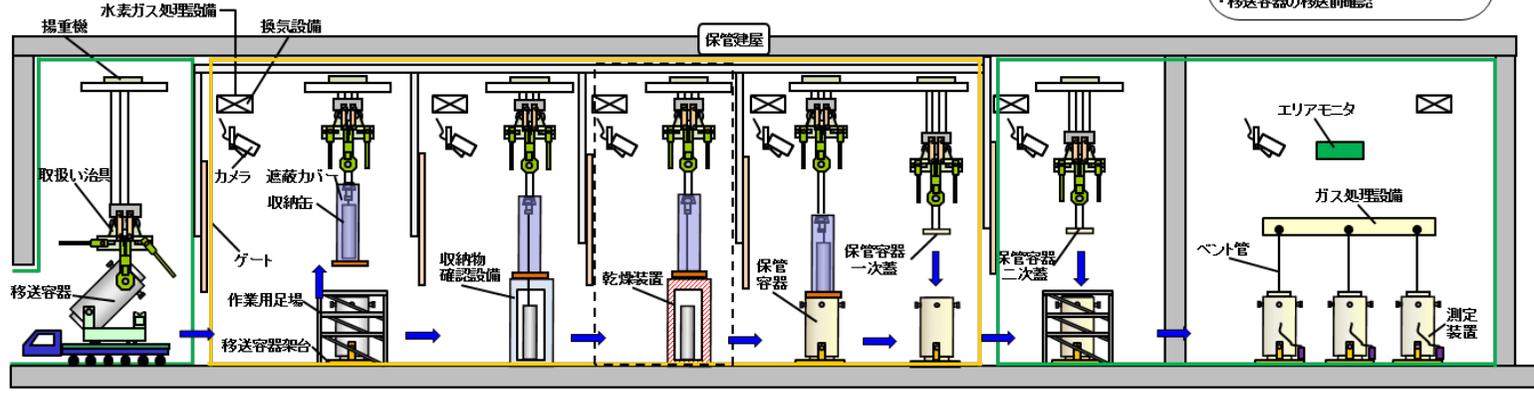
【補足-1】 燃料デブリ収納缶の取扱フロー案

燃料デブリをUCに装荷～構内移送(原子炉の横側からアクセスする工法)



- 原子炉内**
 - 燃料デブリ取り出し装置で燃料デブリをUCに回収
 - UCをアクセストネルへ移動
 - アクセストネル**
 - UCを増設建屋内へ移動*
 - デブリ処理セル**
 - UCを乾燥設備内へ装荷
 - 燃料デブリの乾燥
 - 封缶セル**
 - UCを取納缶内へ装荷
 - 取納缶の蓋締り
 - 取納缶を蓋締め場所へ移動
 - 取納缶をガス注入設備へ接続
 - 不活性ガスを取納缶内へ注入
 - 仕立てセル**
 - 取納缶を移送容器へ装荷
 - 取納缶ベント管開放
 - 移送容器蓋締め(一次蓋)
 - 不活性ガス注入(キベティ内)
 - 移送容器蓋締め確認(一次蓋)
 - 移送容器蓋締め(二次蓋)
 - 不活性ガス注入(二次蓋間)
 - 移送容器蓋締め確認(二次蓋)
 - 移送容器を移送車へ積載
 - 移送容器の移送前確認
 - 構内**
 - 構内移送
- *1: UC以外にも燃料デブリ塊や構造物等が、原子炉内からアクセストネルを通り、増設建屋へ移動する。代表例として、UCの移動を図示している。
 *2: デブリ処理セルにて乾燥できない場合、実施

保管建屋への移送容器搬入～保管



- 保管施設大物搬入口**
 - 大物搬入口へ移送容器搬入
 - 移送容器の受入れ確認
 - 受入エリア①**
 - 移送容器の蓋開け外し(一次蓋)
 - 水素量測定
 - 移送容器の蓋開け外し(二次蓋)
 - 取納缶ベント管閉鎖
 - 取納缶を移送容器から取り出し*
 - 取納物確認エリア**
 - 取納缶を取納物確認設備へ装荷
 - 取納物確認
 - 乾燥エリア**
 - 取納缶を乾燥設備へ装荷
 - 燃料デブリの乾燥*
 - 受入エリア②**
 - 取納缶を保管容器へ装荷
 - 取納缶のベント管開放
 - 保管容器の一次蓋締り
 - 不活性ガス注入(キベティ内)
 - 保管容器一次蓋蓋締め確認
 - 保管準備エリア**
 - 保管容器の二次蓋蓋締め
 - 取納缶のベント管開放
 - 不活性ガス注入(二次蓋間)
 - 二次蓋蓋締め確認
 - 保管前確認
 - 保管エリア**
 - 保管準備
 - 保管
- *3: 取納缶を遮蔽カバーで覆い、移動
 *4: 保管前に乾燥が必要な場合、実施

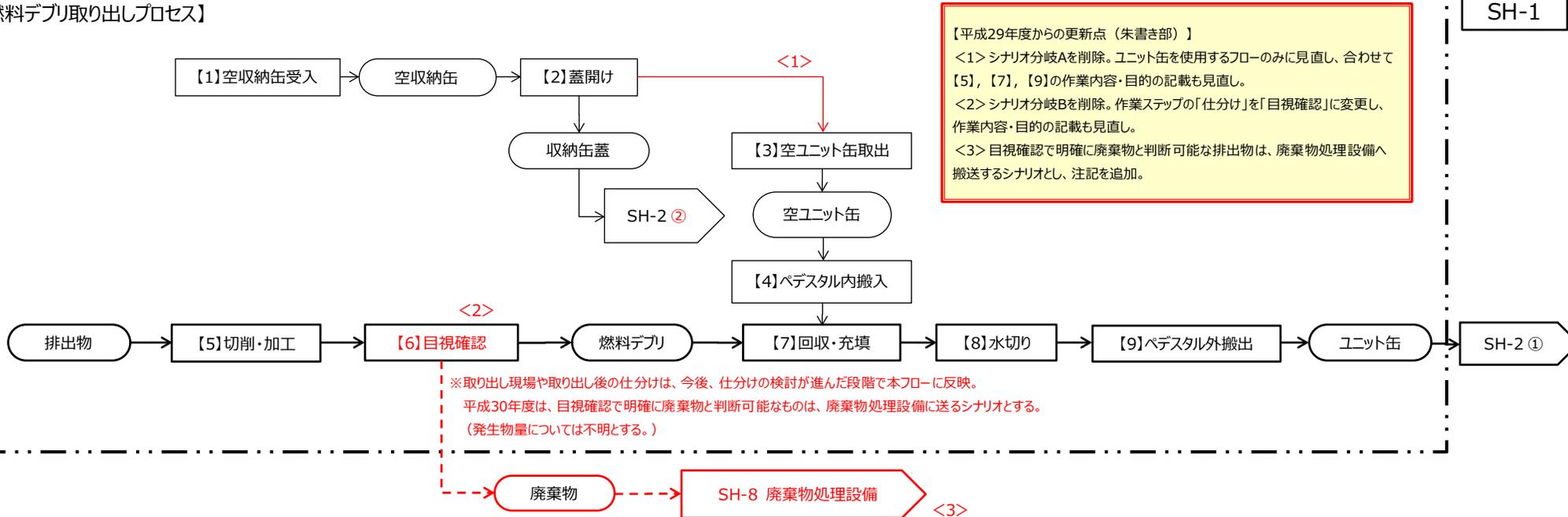
【補足-2】プロセスフロー(更新結果)

＜プロセスフロー作成の目的＞

- 収納・移送・保管の各システムにおける一連の作業ステップの流れ(シナリオ)を構築する。
- 基盤PJ等の関連PJの担当範囲も含めて検討することで、関連PJとの作業ステップ上の取合い(インターフェース)を明確する。
- 各作業ステップで想定される作業内容を明確にする。また、それにより、作業内容を達成するための技術課題の有無等を明らかにし、必要となる技術開発項目を抽出する。
- 作業ステップの流れ(シナリオ)の中で、現時点では複数の案が考えられる箇所(シナリオ分岐点)(例;燃料デブリの乾燥処理の実施有無、有の場合はどこで実施するのか(燃料デブリ取り出し建屋 or 保管施設))を明らかにし、シナリオ上の検討課題を抽出する。
- 各作業ステップの要求処理物量を別途評価することで、作業ステップにおけるボトルネックの有無、バッファ確保の要否等を明らかにする。

【補足-2】プロセスフロー(更新結果)

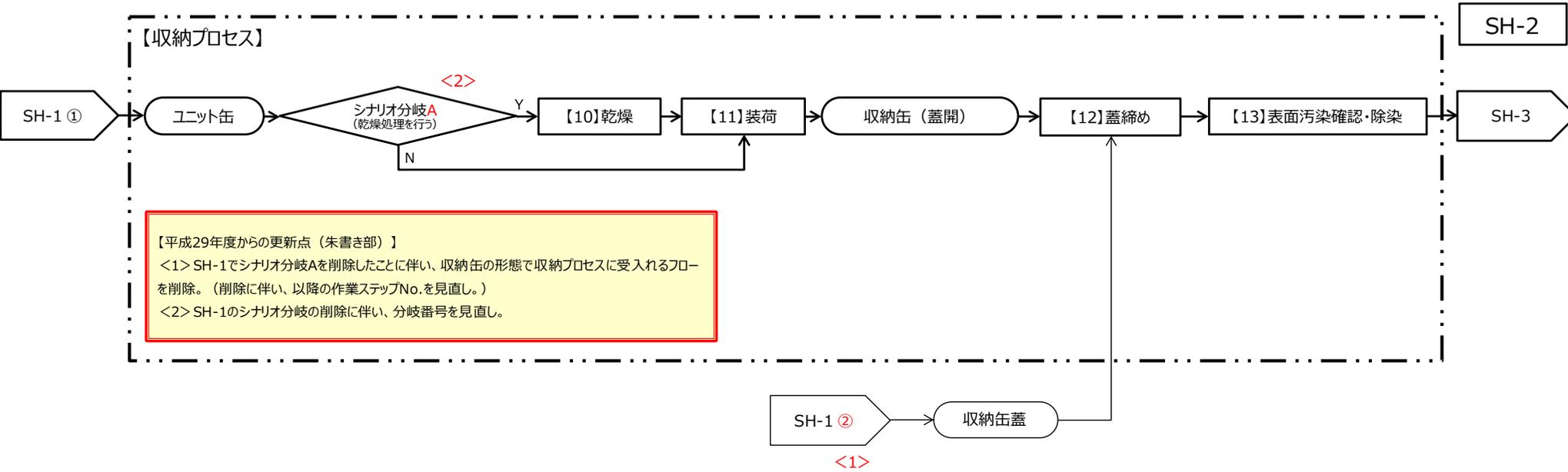
【燃料デブリ取り出しプロセス】



No.	【1】	【2】	【3】	【4】	【5】	【6】	【7】	【8】	【9】
取扱物	空収納缶	収納缶蓋	空ユニット缶	空ユニット缶	排出物	排出物	燃料デブリ	ユニット缶	ユニット缶
作業内容・目的	燃料デブリを収納する空収納缶を、燃料デブリ取り出し収納セルの所定位置まで受入れる。	燃料デブリの収納に向けて、空収納缶の蓋を開放する。	燃料デブリを充填する空ユニット缶を空収納缶から取り出す。	排出物を充填・収納するため、ユニット缶を燃料デブリ取り出し収納セルからペDESTAL内に搬入し、所定位置で待機させる。	排出物をユニット缶に充填可能な形状・寸法に切削・加工する。	切削・加工した排出物を目視確認する。（目視確認で明らかに廃棄物と判定できるものは、廃棄物処理設備へ搬送。）	燃料デブリを回収し、ユニット缶に充填する。	水素発生量低減や乾燥処理の初期条件緩和等のために、燃料デブリ回収・充填時の同伴水を低減させる。	燃料デブリを充填したユニット缶を、ペDESTAL外の燃料デブリ取り出し収納セルまで搬出する。
					<1>	<2>	<1>		<1>

プロセスフロー例：燃料デブリ取り出し～ユニット缶への収納

【補足-2】プロセスフロー（更新結果）

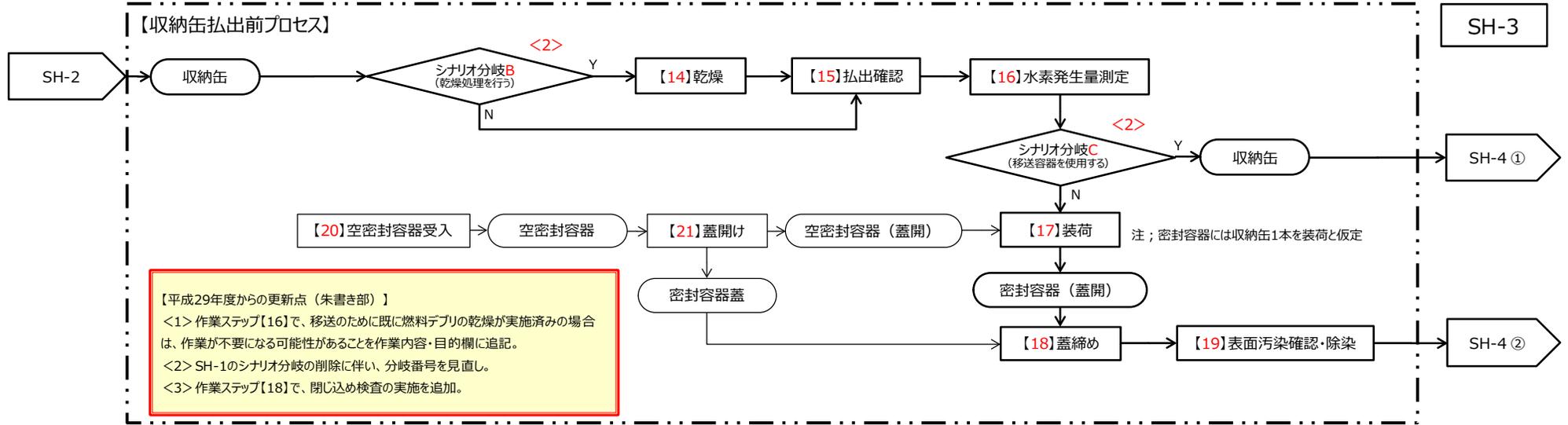


No.	【10】	【11】	【12】	【13】
取扱物	ユニット缶	ユニット缶	収納缶	収納缶
作業内容・目的	水素発生量、（配列時の）臨界リスク、腐食リスク等の低減の観点から、ユニット缶の状態を早期に同伴水を乾燥させ、水分量を低減する。	ユニット缶を収納缶に装荷する。	収納缶の蓋を閉止する。	洗浄後の収納缶表面の汚染の有無を確認する。 汚染が確認された場合、除染する。

シナリオ分岐A
【分岐内容】 収納缶に装填前に、ユニット缶の形態で乾燥処理を行う or 行わない。
【メリット・デメリット】 収納缶と比べて、ユニット缶の方が乾燥効率が高いと考えられる。また、ユニット缶の時点で乾燥処理を実施することで、以降のプロセスにおいて、水素発生や腐食等のリスクを早期に低減することが可能となる。但し、ユニット缶は閉じ込め機能がないことから、乾燥により燃料デブリ粉体の落下・飛散等のリスクが想定される。また、乾燥設備に加えて、スルーブット成立性の観点から収納缶の仮置きスペースの確保も必要になると考えられ、スペースを確保できることが前提となる。湿式保管を経由する場合、乾燥を払出前に実施する価値・必要性が低下する。 乾燥を行わない場合、エリアの確保が必要なく、スルーブット成立性にも影響しない。但し、水素発生等のリスクについて、継続して考慮が必要となる。

プロセスフロー例：ユニット缶の収納缶への収納～蓋締め
（作業ステップ【No.11】以降が「収納」）

【補足-2】プロセスフロー（更新結果）

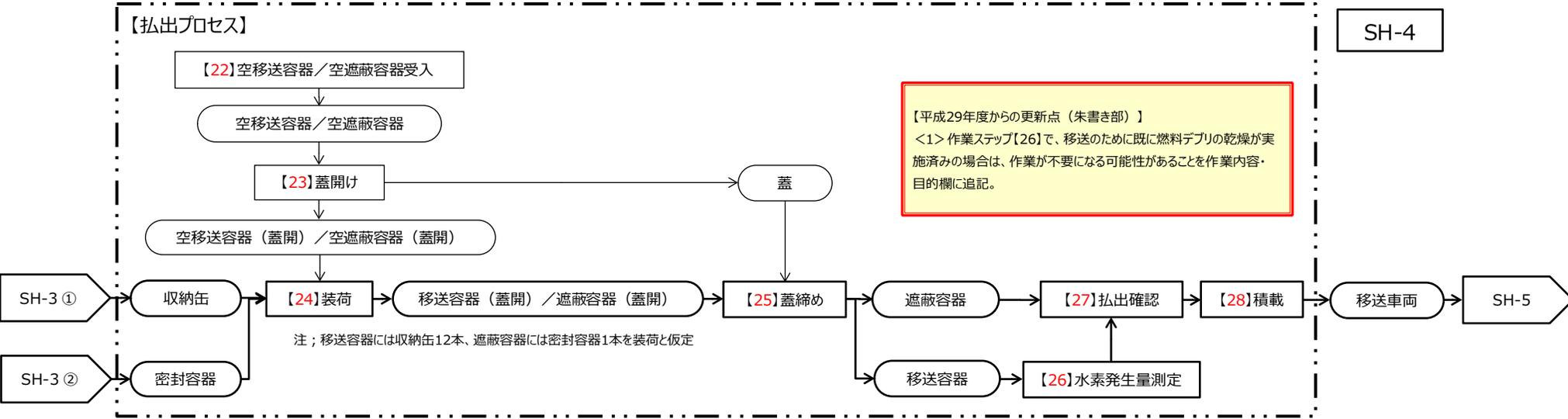


No.	【14】	【15】	【16】	【17】	【18】	【19】	【20】	【21】
取扱物	収納缶	収納缶	収納缶	収納缶	密封容器蓋	密封容器	空密封容器	密封容器蓋
作業内容・目的	水素発生量、（配列時の）臨界リスク、腐食リスク等の低減の観点から、同伴水を乾燥させ、水分量を低減する。	保管施設への払出にあたり、個々の収納缶の状態・データの収集・紐付のために、確認（質量測定、表面線量率測定、外観確認（収納缶IDの確認含む））を実施する。	保管施設までの移送時に、収納缶内の水素濃度が、規定時間内に爆発下限に達しないことを確認するため、水素発生量を実測する。 （既に乾燥済みの場合、不要となる可能性あり）	収納缶を密封容器に装荷する。	密封容器の蓋を閉止する。 閉止後、閉じ込め検査（例；リークチェック）を実施する。	収納缶装荷後の密封容器表面の汚染の有無を確認する。 汚染が確認された場合、除染する。	容器における燃料デブリ（ガス含む）の閉じ込め性を早期に確保するために、収納缶を密封する空密封容器を所定位置まで受入れる。	収納缶の密封に向けて、空密封容器の蓋を開放する。
			<1>		<3>			

シナリオ分岐B	シナリオ分岐C
【分岐内容】 収納缶の払出前に、 収納缶の形態で乾燥処理を行う or 行わない。	【分岐内容】 収納缶を機能を分担させた2つの容器（密封容器+遮蔽容器）に2重に収納する or 収納缶を移送容器（蓋だけ2重）のみに収納する
【メリット・デメリット】 払出前に乾燥を行うことで、特に水素発生量の観点からリスクを低減することができる。なお、乾燥を払出前に行う場合、乾燥設備に加えて、スルーブット成立性の観点から収納缶の仮置きスペースの確保が必要になると考えられ、スペースを確保できることが前提となる。また、湿式保管を経由する場合、乾燥を払出前に実施する価値・必要性が低下する。 ユニット缶と比較して乾燥が困難になることが想定される。 乾燥を行わない場合、エリアの確保が必要なく、スルーブット成立性にも影響しない。但し、水素発生等のリスクについて、継続して考慮が必要となる。	【メリット・デメリット】 2つの容器により収納缶を2重に収納することで、1F構内搬送時でも2重のバウンダリを確保できる。また、密封容器にガスを含めた燃料デブリの閉じ込め機能を、遮蔽容器に遮蔽機能をそれぞれ分担させるが、どちらにもある程度の閉じ込め／遮蔽機能を付与することで、どちらかの容器に不具合が発生しても、もう1方の容器で、ある程度の影響緩和が期待できる。一方、運用上、2つの異なる容器が必要になる。また、2回、容器の収納する作業が必要になることから、スルーブット成立性を圧迫する。 移送容器の場合、容器が1つしなく、収納作業が1回で済むため、スルーブット成立性への影響が小さい。但し、2重バウンダリが構成されているとは厳密には言えず、不具合発生時、閉じ込めと遮蔽の機能が同時に失われる可能性がある。

プロセスフロー例：蓋締めされた収納缶の確認～収納缶の移送準備

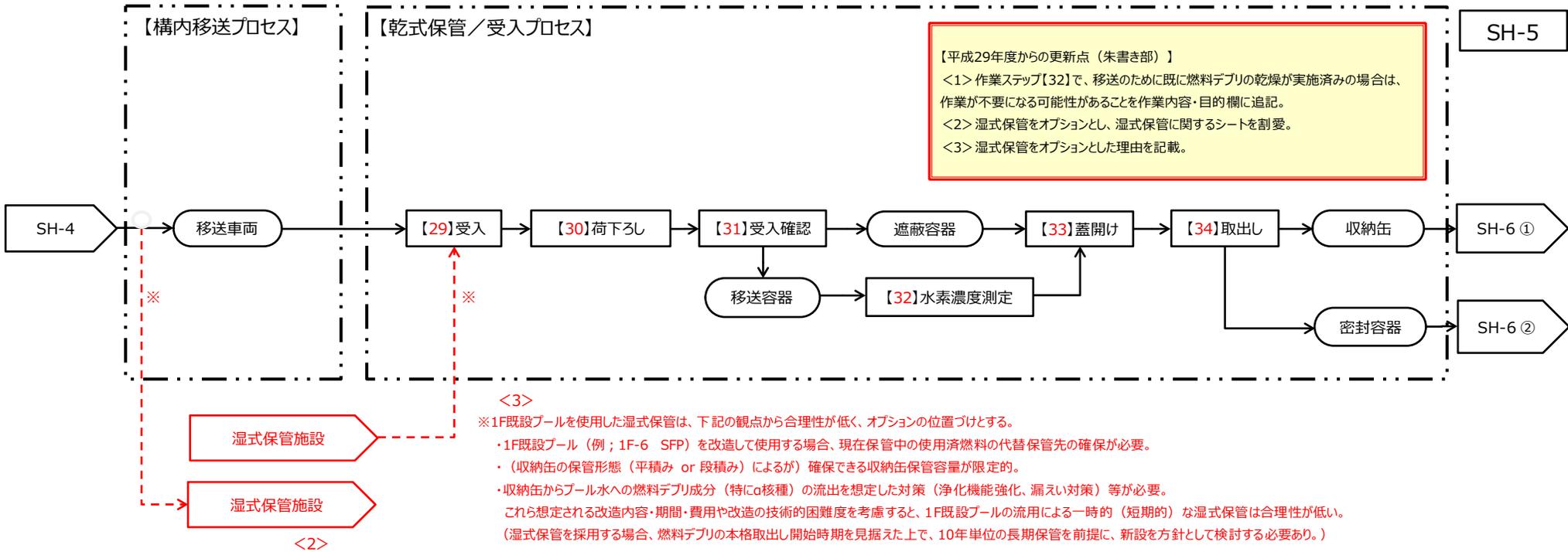
【補足-2】プロセスフロー(更新結果)



No.	【22】		【23】		【24】		【25】		【26】	【27】		【28】	
取扱物	空移送容器	空遮蔽容器	移送容器蓋	遮蔽容器蓋	収納缶	密封容器	移送容器蓋	遮蔽容器蓋	移送容器	移送容器	遮蔽容器	移送容器	遮蔽容器
作業内容・目的	収納缶／密封容器の保管施設への搬送にあたり、外部運搬用の移送容器／遮蔽容器を所定位置に受入れる。		収納缶／密封容器を移送容器／遮蔽容器に装荷するにあたり、容器の蓋を開放する。 (移送容器は、一次蓋／二次蓋の2つの蓋を開放する。)		収納缶／密封容器を移送容器／遮蔽容器に所定数装荷する。		所定数の収納缶／密封容器の装荷が完了した移送容器／遮蔽容器の蓋を閉止する。 (移送容器は、一次蓋／二次蓋の2つの蓋を閉止する。)		払出しにあたり、移送容器単位で水素発生量を実測し、規定時間内に水素濃度が爆発下限に達しないことを確認する。(既に乾燥済みの場合、不要となる可能性あり。)	1F構内を運搬する上で、容器に問題がないか、確認（閉じ込め確認、表面汚染確認・除染、表面線量率測定、外観確認（ID確認含む））を行う。		移送容器／遮蔽容器を運搬車両に積載・固縛する。	
									<1>				

プロセスフロー例：収納缶の装荷～移送容器の払出準備
(作業ステップ【No.28】以降が「移送」)

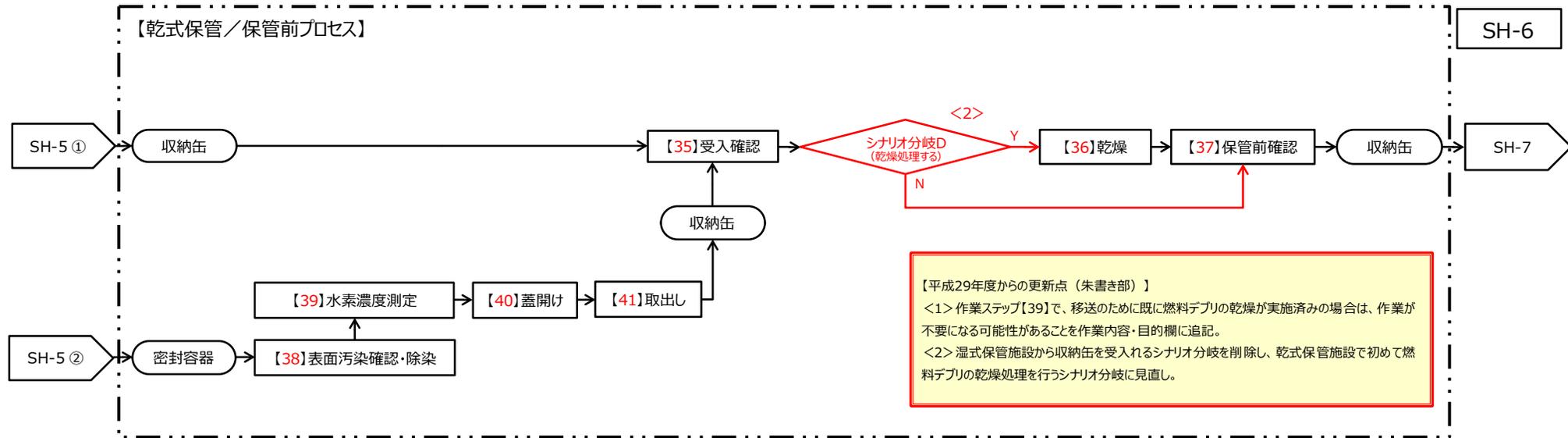
【補足-2】プロセスフロー(更新結果)



No.	【29】		【30】		【31】		【32】	【33】		【34】	
	移送容器	遮蔽容器	移送容器	遮蔽容器	移送容器	遮蔽容器	移送容器	移送容器蓋	遮蔽容器蓋	収納缶	密封容器
作業内容・目的	移送車両に積載された状態の移送容器／遮蔽容器を乾式保管施設に受入れる。		移送車両から移送容器／遮蔽容器を、所定の位置に下ろす。		受入れた移送容器／遮蔽容器に問題がないか、確認（表面汚染確認・除染、表面線量率測定、外観確認（ID確認含む））を実施する。		移送容器の蓋開放にあたり、移送容器内の水素濃度を測定し、爆発下限界に達していないことを確認する。 (既に乾燥済みの場合、不要となる可能性あり。)	移送容器／遮蔽容器の蓋を開放する。 (移送容器は、一次蓋／二次蓋の2つの蓋を開放する。)		移送容器／遮蔽容器から、収納缶／密封容器を取り出す。	
							<1>				

プロセスフロー例：構内移送～収納缶の乾式保管施設受入～収納缶の取出し
(作業ステップ【No.29】以降が「保管」)

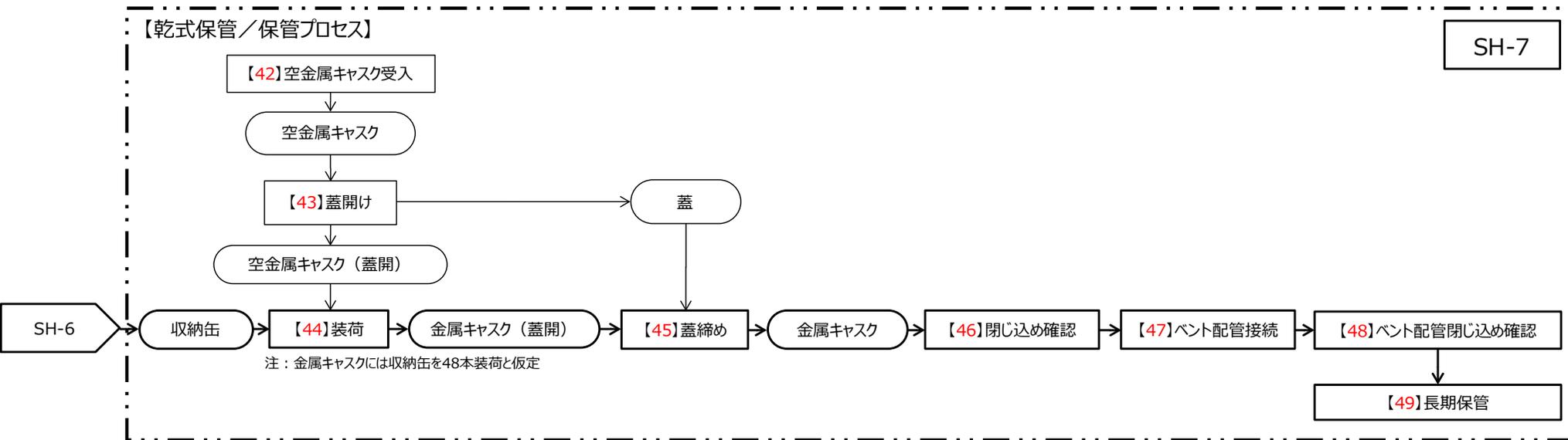
【補足-2】プロセスフロー(更新結果)



No.	【35】	【36】	【37】	【38】	【39】	【40】	【41】
取扱物	収納缶	収納缶	収納缶	密封容器	密封容器	密封容器蓋	収納缶
作業内容・目的	受入れた収納缶に問題がないか、確認（表面汚染確認・除染、質量測定、表面線量率測定、外観確認（ID確認含む））を実施する。	水素発生量、腐食リスク等の低減の観点から、収納缶内の水分を乾燥除去する。	収納缶の保管にあたり、収納缶に問題がないか、確認（質量測定、表面汚染確認・除染、表面線量率測定、外観確認（ID確認含む））を実施する。	受入れた密封容器表面の汚染の有無を確認する。汚染が確認された場合、除染する。	密封容器の蓋開放にあたり、密封容器内の水素濃度を測定し、爆発下限界に達していないことを確認する。 <i>（既に乾燥済みの場合、不要となる可能性あり。）</i>	密封容器から収納缶を取り出すため、密封容器の蓋を開放する。	密封容器から収納缶を取り出す。

シナリオ分岐D
【分岐内容】 乾式保管施設で初めて乾燥処理を行う or 既に乾燥処理済みのため行わない。
【メリット・デメリット】 乾式保管施設は新設のため、払出側（原子建屋内や増設建屋）よりもエリア確保、設備設置が容易となる。 一方、収納缶の形態のため、ユニット缶と比較して乾燥が困難と考えられ、乾燥にあたり収納缶の蓋を開放し、ユニット缶の取り出しが必要となる可能性がある。また、払出前に乾燥処理を行わないため、構内移送中の水素濃度管理（4%超過の防止）が課題となる。

プロセスフロー例：収納缶の受入確認～保管前確認



No.	【42】	【43】	【44】	【45】	【46】	【47】	【48】	【49】
取扱物	空金属キャスク	金属キャスク蓋	取納缶	金属キャスク蓋	金属キャスク	金属キャスク	金属キャスク	金属キャスク
作業内容・目的	取納缶の収納して長期保管する空金属キャスクを所定位置に受入れる。	取納缶の収納に向けて、空金属キャスクの蓋を開放する。	空金属キャスクに所定数の取納缶を装荷する。	所定数の取納缶の装荷が完了した金属キャスクの蓋を閉止する。	金属キャスクが規定の閉じ込め機能を満足していることを確認する。	金属キャスク内のガスを管理された状態で外部に放出するためのベント配管を金属キャスクに接続する。	金属キャスクに接続したベント管が、規定の閉じ込め機能を満足していることを確認する。	取納缶を安定した状態で金属キャスク内に長期間保管する。

プロセスフロー例：乾式保管準備～乾式保管^{注1}

注1：取納缶の保管に金属キャスクを使用すると仮定した場合のプロセスフロー案を記載。
 平成30年度時点で取納缶の保管方式は決定しておらず、今後、保管方式によってプロセスフローの見直しが必要。

【補足-3】湿式・乾式保管の技術要件(1/5)

【平成28年度までの検討成果】 No.135

燃料デブリを取扱う収納・移送・保管システムに備えるべき安全機能を下表の通り設定した。

表 収納・移送・保管システムに備えるべき安全機能

安全機能		必要となる安全機能
未臨界		未臨界の維持
冷やす	除熱	安全障害要因(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い
閉じ込める	遮蔽	放射線による作業員や公衆の被ばく防止
	閉じ込め	放射性物質の放出による作業員や公衆の被ばくの防止
止める、冷やす、閉じ込める、の安全機能を維持するために必要な機能	構造	取扱い等を考慮し、必要な安全機能を維持するための適切な構造強度
	水素	燃料デブリからの放射線により水の放射線分解で発生する水素の爆発防止(構造強度維持の前提)
	経年劣化	保管中の腐食に対する構造強度他の維持(構造強度維持の前提)
	火災防止	ジルカロイ等の粉体金属による火災防止(構造強度維持の前提)

【補足-3】湿式・乾式保管の技術要件(2/5)

【平成28年度までの検討成果】 No.136

燃料デブリを取扱う収納・移送・保管システムに備えるべき安全機能について、他機器との安全機能分担を下表の通り設定した。

表 収納・移送・保管システムに備えるべき安全機能分担(1/2)

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	○	○	未臨界条件である幾何形状の維持は取扱モード共通の容器(収納缶)で取扱ったほうが合理的なため。(燃料デブリの詰替は大がかり)配列時の未臨界は他機器で行う。
冷やす	除熱	収納缶、燃料デブリ他の物性の担保		○	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特別な除熱装置等は設けない。
閉じ込める	閉じ込め	作業員や公衆の被ばく防止		○	収納缶には水素滞留防止口を設ける。実運用における汚染拡大防止のためにフィルターを設置するが、バウンダリとしての頑健さの観点で安全評価上は閉じ込め機能は付与しない。
	遮蔽	作業員や公衆の被ばく防止		○	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。

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-3】湿式・乾式保管の技術要件(3/5)

【平成28年度までの検討成果】 No.137

燃料デブリを取扱う収納・移送・保管システムに備えるべき安全機能について、他機器との安全機能分担を下表の通り設定した。

表 収納・移送・保管システムに備えるべき安全機能分担(2/2)

安全機能		設計目標	安全機能分担		考え方
			収納缶	他機器	
その他 (止める、冷やす、閉じ込める機能の維持)	構造	安全機能を維持するための 構造強度	○	○	収納缶の取扱機器等の合理化のため最小限の強度が維持できるようにする。また、他機器で収納缶への荷重条件や腐食条件を緩和する。
	材料健全性	構造強度他の 維持	○	○	
	水素	水の放射線分解で生ずる水素の爆発防止	○ (触媒)	○	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		○	収納缶に不活性雰囲気、冠水状態の維持は付加できない。(閉じ込め機能を有してないため)

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-3】湿式・乾式保管の技術要件(4/5)

【平成28年度までの検討成果】 No.138

TMI-2の実績と比較し、1Fでの燃料デブリの湿式移送/湿式保管時における安全機能分担の妥当性を確認した。

閉じ込め以外は1Fと同じ考え方。

TMI-2の湿式保管の建屋はバウンダリ機能がなく缶内冠水のみをバウンダリとして環境に放出。1Fでは建屋にバウンダリ機能を設け収納缶内のガスも処理して排出、排出を監視。

表 湿式移送/湿式保管時におけるTMI-2と1Fの安全機能分担の比較

安全機能		設計目標	TMI-2		1F	
			収納缶	他機器	収納缶	他機器
未臨界		未臨界の維持	収納缶単体の場合	収納缶複数配列の場合 移送容器バスケット/ プールラック	同左	
冷やす	除熱	収納缶、燃料デブリ他の物性の担保	自然冷却	移送容器自然冷却/ プール冷却設備	同左	
閉じ込める	閉じ込め	作業員や公衆の被ばく防止	移送:なし	移送:移送容器/建屋	同左	
			保管: 缶内冠水	なし	内側: 缶内冠水、 ベント管	内側: セルや プール 外側:建屋 気体処理
	遮蔽	作業員や公衆の被ばく防止	なし	移送容器/建屋/ プール水	同左	

【補足-3】湿式・乾式保管の技術要件(5/5)

【平成28年度までの検討成果】 No.139

TMI-2の実績と比較し、1Fでの燃料デブリの乾燥/乾式保管時における安全機能分担の妥当性を確認した。

閉じ込め以外は1Fと同じ考え方。

TMI-2の湿式保管は収納缶とキャニスタのフィルタ経由でガス排出。

1Fではベント管接続時の汚染等を考慮して外側の建屋等にもバウンダリ機能を設けてガス処理する。監視も実施。

表 乾燥/乾式保管時におけるTMI-2と1Fの安全機能分担の比較

安全機能		設計目標	TMI-2		1F	
			収納缶	他機器	収納缶	他機器
未臨界		未臨界の維持	収納缶単体	バスケット (配列)	同左	
冷やす	除熱	収納缶、燃料デブリ 他の物性の担保	自然冷却	貯蔵モジュール	同左	保管容器
閉じ込める	閉じ込め	作業員や公衆の被ばく防止	フィルタ ^{注1}	キャニスタ (フィルタ)	(フィルタ)	気体廃棄物処理設備 /保管建屋
	遮蔽	作業員や公衆の被ばく防止	なし	貯蔵モジュール	なし	保管容器

注1: Filter型収納缶は収納缶内部のフィルタがその機能を担保するとし、ベント/ドレン孔へのフィルタの取り付けはなし。

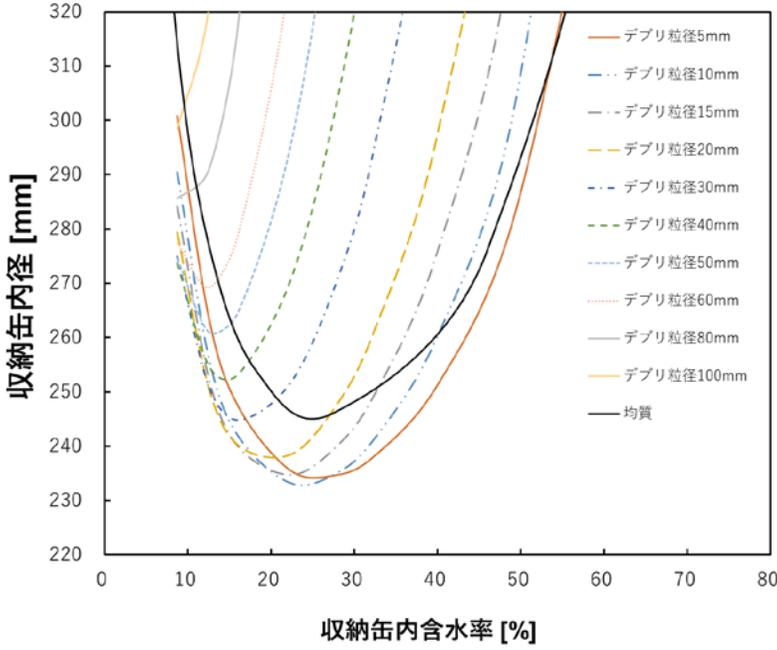
【補足-4】未臨界維持評価手法の検討(1/3)

① 含水率に対する収納缶内径の関係及び燃料デブリ濃縮度に対する収納缶内径の関係

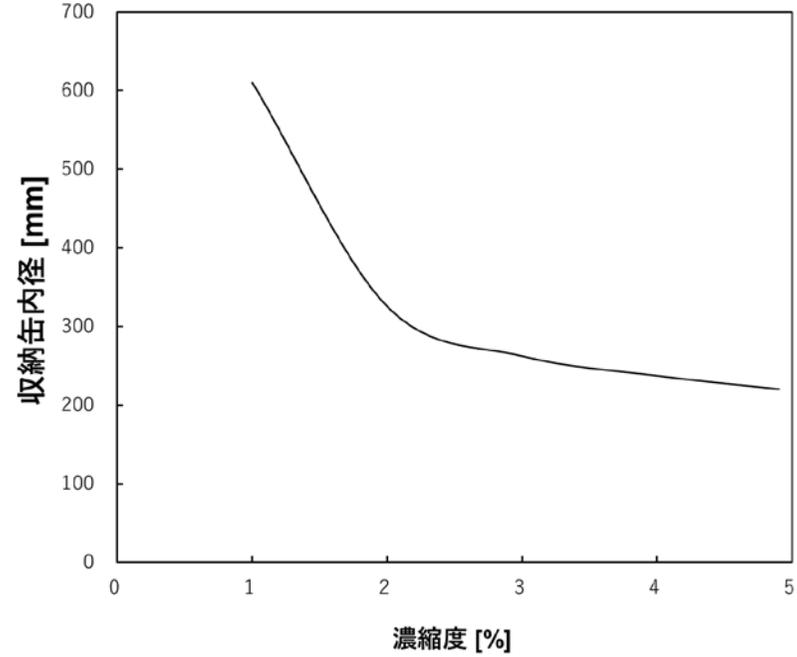
- (1) 燃料デブリ粒径を変化させ、含水率に対する収納缶内径を評価した。
- (2) 燃料デブリの濃縮度が把握可能な場合を想定し、濃縮度に対する最大半径を評価した。

<評価結果>

- (1) どの様な燃料デブリ粒径、含水率であっても、収納缶内径220mm程度にすることで未臨界を維持可能である。
- (2) 収納缶内径400mmとするためには、燃料デブリ濃縮度は1.7wt%未満であることが必要である。



(1) 燃料デブリ粒径毎による含水率に対する
収納缶内径の関係(非均質モデル)



(2) 燃料デブリ濃縮度に対する
収納缶内径の関係(均質モデル)

【補足-4】未臨界維持評価手法の検討(2/3)

② 乾式保管を想定した臨界評価(無限配列条件)

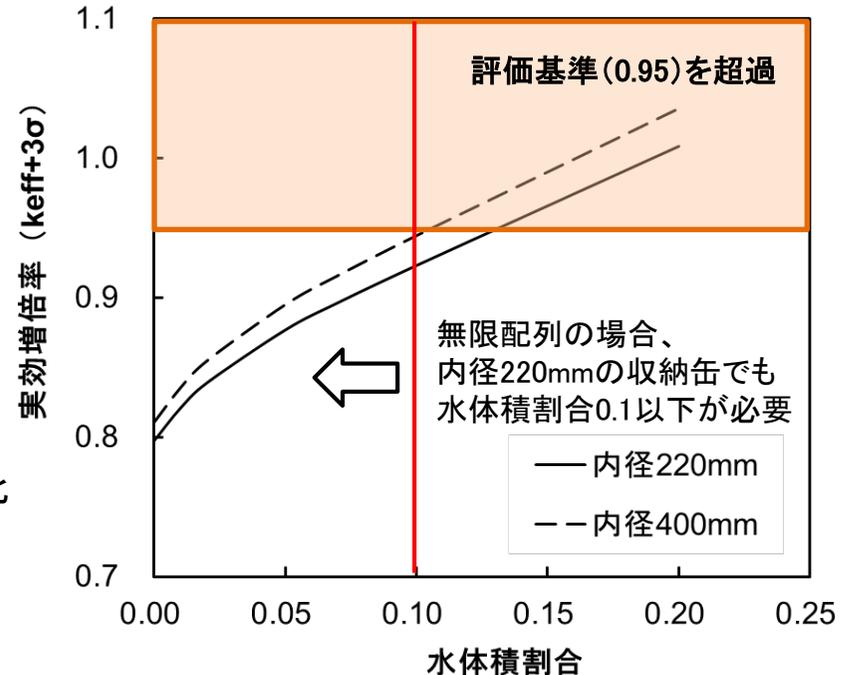
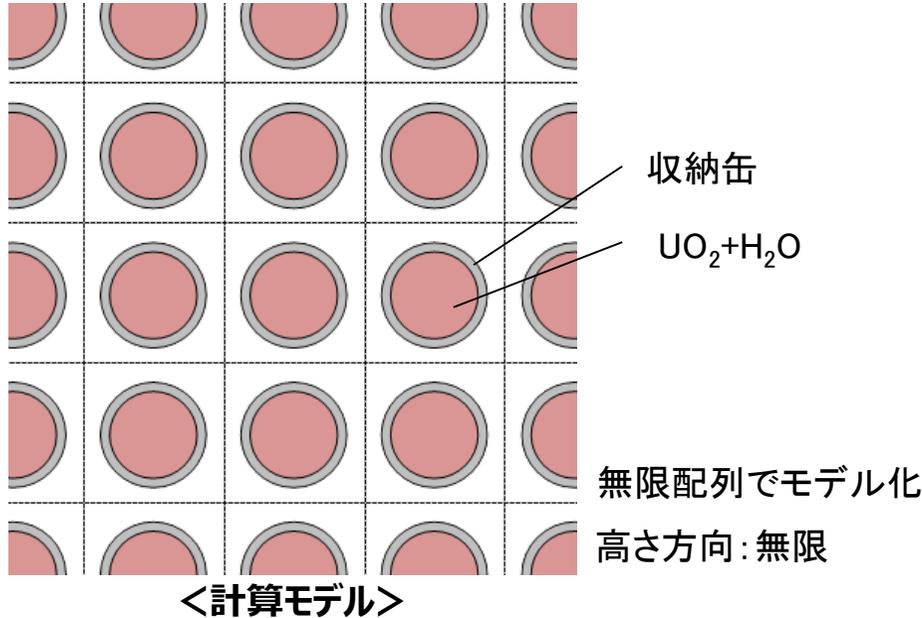
乾式保管を想定し、収納缶を無限個配列した状況をモデル化した臨界評価を実施した。

<評価条件>

- ◆ 燃料(ウラン濃縮度4.9wt%)と水(乾燥処理後の残留水)は、均質・均一混合状態と仮定
- ◆ 十分な乾燥処理により、水体积割合が0.2以下まで低減されるものと仮定
- ◆ 安全側の条件として、収納缶を無限配列でモデル化(下図 計算モデル参照)

<評価結果>

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



【補足-4】未臨界維持評価手法の検討(3/3)

③ 乾式保管を想定した臨界評価(有限配列条件)

一時的な収納缶保管(仮置き)を想定し、収納缶が有限個配列された状況をモデル化した臨界評価を実施した。

<評価条件>

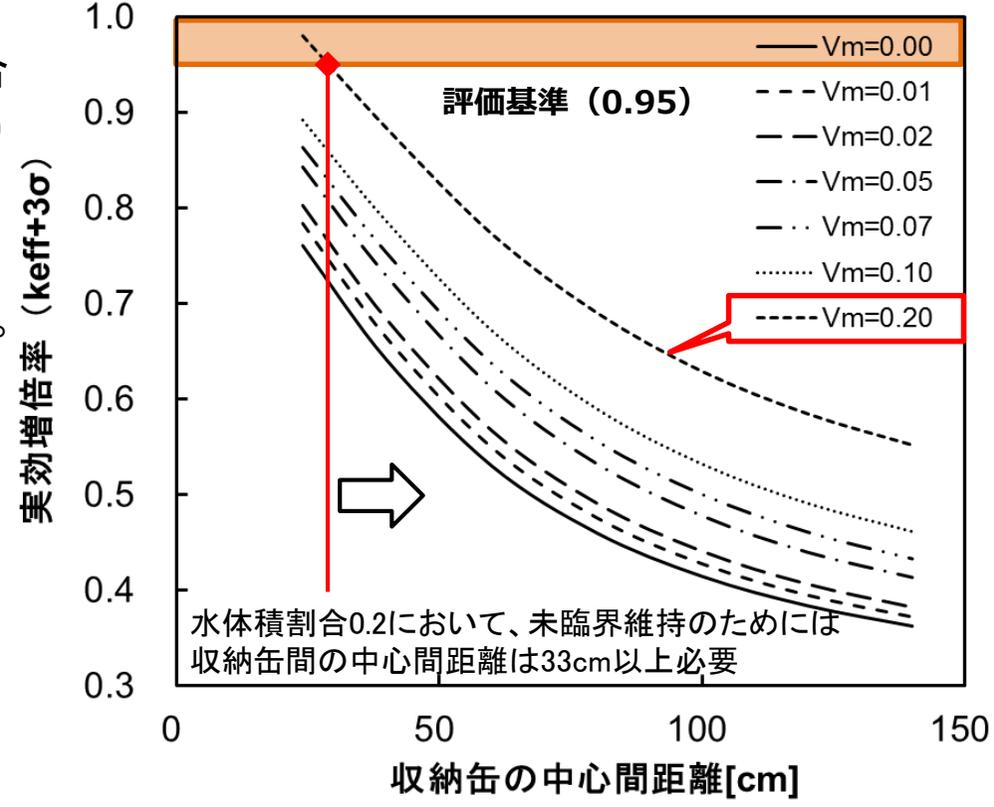
- ◆ 燃料(ウラン濃縮度4.9wt%)と水(乾燥処理後の残留水)は、均質・均一混合状態と仮定
- ◆ 十分な乾燥処理により、水体积割合が0.2以下まで低減されるものと仮定
- ◆ 一時的な保管(仮置き)を想定し、収納缶の配列を有限配列(10×10配列)でモデル化

<評価結果>

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

一方、水体积割合を0.1以下に低減できれば、収納缶同士を接触させた隣接配置が可能となる(面積効率最大)。このときの貯蔵効率^{注1}は、内径に依存せず0.7^{注2}と同程度という結果を得た。

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



水体积割合0.2において、未臨界維持のためには収納缶間の中心間距離は33cm以上必要

(内径220mm収納缶、10×10配列体系の例)

【補足-5】検討の前提条件(1/3)

本技術開発で設定する収納缶は、現時点で得られた燃料デブリ性状の情報や基盤PJ、工法PJからの要求事項に基づき主に安全評価の観点から収納缶仕様を設定した。今後、デブリ性状把握PJや基盤PJ、工法PJの成果の成果を反映して見直しを行う。

収納缶の形状を設定するにあたり、デブリ性状把握PJから提供された情報等に基づき、以下の条件を仮定した。

【燃料デブリの性状】

- 燃料デブリ組成(MCCI生成物を除く):
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 、海水
- 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)
⇒腐食評価ではより現実的に3ppm程度とした。
- ジルコニウム:
微量に金属状態で残留(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の物理的混濁と仮定。)
- 燃料デブリの安定性(-20~300°C(窒素雰囲気)環境における安定性)
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とする。(上記環境において物質は安定化されていると想定。)
- 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、他(必要に応じて対応は協議)

【補足-5】検討の前提条件(2/3)

収納缶の形状を設定するにあたり、基盤PJ、工法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。
- 粉体状の燃料デブリ
収納缶内に設置する網状等のユニット缶の一種として燃料デブリを回収し燃料デブリ収納缶へ収納する。
(粉状燃料デブリを効率的に回収する観点から、収納缶に収納できる大きさのフィルターカートリッジを前提に検討し、回収の観点から課題抽出するため。)
なお、フィルターは焼結ステンレス網等の熱的安定性を有するものとする。
- 収納場所
収納作業は非冠水とする。作業は、ホットセル等のバウンダリのある空間とする。
- 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、半日を燃料デブリを回収、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】

- TMI-2の事例や使用済燃料で実績のあるキャスク方式での移送とする。
- 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で設定する。

【補足-5】検討の前提条件(3/3)

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: 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。そのため、現時点ではオプションとする。

乾式保管: 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いることから、燃料デブリでも有利となる可能性が高く、最終的な保管方法とする。
海外では使用済燃料の保管にコンクリートキャスク等も実用化されているが、収納物に対する要求に差異はないため、金属キャスクを代表事例として検討する。

- 燃料デブリの乾燥

乾式保管の検討は、乾燥後も燃料デブリ内に水分が残留していることを想定する。なお、乾燥できない可能性を考慮しておけば完全乾燥の事例への展開は容易である。

- 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。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、参考とできる可能性あり。)