

**令和2年度開始「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
（粉状、スラリー・スラッジ状の燃料デブリ対応）」**

2021年度最終報告

2022年8月

技術研究組合 国際廃炉研究開発機構 (IRID)

目次

1. 研究の背景・目的
2. 目標
3. 実施項目とその関連、他研究との関連
4. 実施スケジュール
5. 実施体制図
6. 実施内容
 - 6.1 粉状及びスラリー・スラッジ状の放射性物質の取り扱い事例の調査
 - 6.2 粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの保管に関する課題の抽出
 - 6.3 収納缶のフィルタの性能評価
7. 全体まとめ

1. 研究の背景・目的

1.1 背景

福島第一原子力発電所の廃止措置において、取り出された燃料デブリを安全・確実に収納・移送・保管するためには、燃料デブリの条件に適した収納容器を含む設備・施設が必要である。

取り出し側(燃料デブリ・炉内構造物の取り出し規模の更なる拡大に向けた技術の開発)において、汚染水処理(液体系システム)が検討中でスラリー・スラッジ化した燃料デブリの回収が見込まれる。

一方で、スラリー・スラッジ化した燃料デブリの収納容器、移送や保管方法は未検討である。

1.2 目的

本補助事業は、技術課題解決へ向けた検討の一つとして、国内外のスラリー・スラッジの収納容器、移送や保管事例調査を行うとともに、既に先行している粒状・塊状燃料デブリの収納容器(収納缶)、移送や保管にあてはめた場合の技術課題の明確化を行う。

また、水素発生抑制対策のため、乾燥により水分を喪失した燃料デブリは、飛散しやすくなることが予想され、収納缶外部へのダスト飛散対策のため収納缶の蓋に設置するフィルタ性能(閉塞や劣化等)への影響の検討を行う。

1. 研究の背景・目的 (補足)

汚染水からのスラリー・スラッジの回収を検討中だが収納容器や移送方法、保管方法は未定。

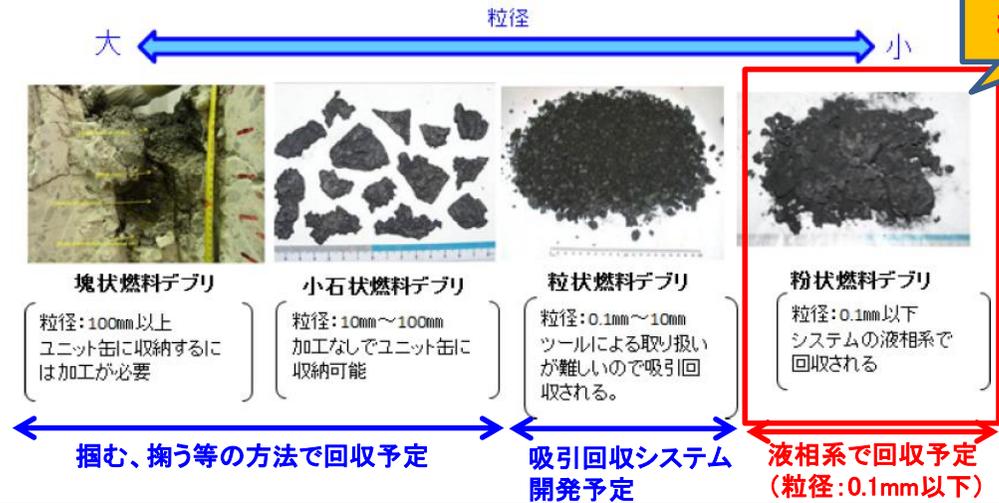


- ・国内外のスラリー・スラッジの収納容器や移送方法、保管方法を調査し着目点等の情報を収集する。
- ・収納缶を回収容器とするのも一案であり、収納缶を用いて粒状・塊状燃料デブリで検討中の移送や保管方法と同じ取り扱いを行う場合の課題を抽出する。
- ・収納缶蓋に設置するフィルタは、粉体化した燃料デブリを取り扱うことによる課題があるため、その検討を行う。

出典: IRID HP 2019年度研究開発「燃料デブリ・炉内構造物の取り出し規模の更なる拡大に向けた技術の開発」成果を引用、加工

No.3

検討対象



7. 本事業の実施内容

No.187

2) 燃料デブリ取り扱い技術の開発

(ii) 燃料デブリ・堆積物の処理に関わる技術開発

② PCV内から回収された堆積物等の処理技術

燃料デブリ取り出し時の汚染水処理システムの概念図を下段に示す。

■ : 本項目の事業で試験を行う設備

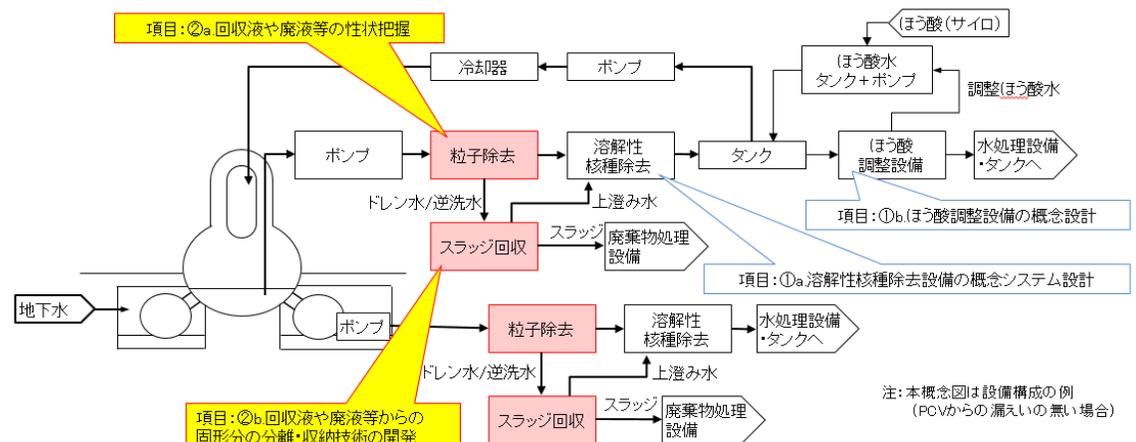


図. 燃料デブリ取り出し時の液体システム(概念図)と要素試験の実施対象

2. 目標

2021年度末の目標達成判断指標は以下のとおりである。

<p>1. 粉状及びスラリー・スラッジ状の放射性物質の取り扱い事例の調査</p> <ul style="list-style-type: none"> 海外の粉状、スラリー・スラッジ状の放射性物質の取り扱い事例を分析し、粉状、スラリー・スラッジ状の放射性物質固有の注意点、安全確保の考え方等が整理されていること。 (TRL評価の対象外)
<p>2. 粉状、スラリー・スラッジ状 燃料デブリの保管に関する課題の抽出</p> <ul style="list-style-type: none"> 燃料デブリを塊状、粒状燃料デブリと同様の収納缶を用いて乾式保管を行う場合について、安全、確実に合理的な保管状態に持ち込むための課題を抽出していること。 (終了時目標TRL:レベル1)
<p>3. 収納缶のフィルタの性能評価</p> <ul style="list-style-type: none"> 収納缶のフィルタの寿命に影響を与える環境や条件が整理されていること。また、寿命の評価のために試験が必要な事項があれば、その試験方法および試験条件を検討し、それらに関する既存の知見が整理されていること。 (終了時目標TRL:レベル1)

3. 実施項目とその関連、他研究との関連

3.1 実施項目

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

(1) 粉状及びスラリー・スラッジ状の放射性物質の取り扱い事例の調査

粉状、スラリー・スラッジ状の放射性物質等の取り扱いや保管に関する経験、知見および情報を収集、分析しておくことは、粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの保管に関する課題の抽出(下記(2)の実施項目)を行う際に有用と判断される。そのため、国内外における粉状の核物質や放射性廃棄物の取り扱い事例、保管方法、設備規模等の調査を行い、粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの取り扱いにおける注意点、安全確保のための考え方や設計への反映方法等、収納・移送・保管システムの確立に必要な経験、知見および情報の分析、整理を行う。

(2) 粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの保管に関する課題の抽出

実施項目(1)で行った経験、知見および情報の分析、整理結果を踏まえて、粉状、スラリー・スラッジ状が主体となる燃料デブリを塊状、粒状燃料デブリと同様の収納缶を用いて乾式保管を行う場合について、安全、確実に合理的な保管状態に持ち込むための課題を抽出する。また、それらの課題について、必要な安全機能が確保できるか、長期間安定して保管できるか、等の観点から解決すべき技術課題を明確にする。

3.1 実施項目

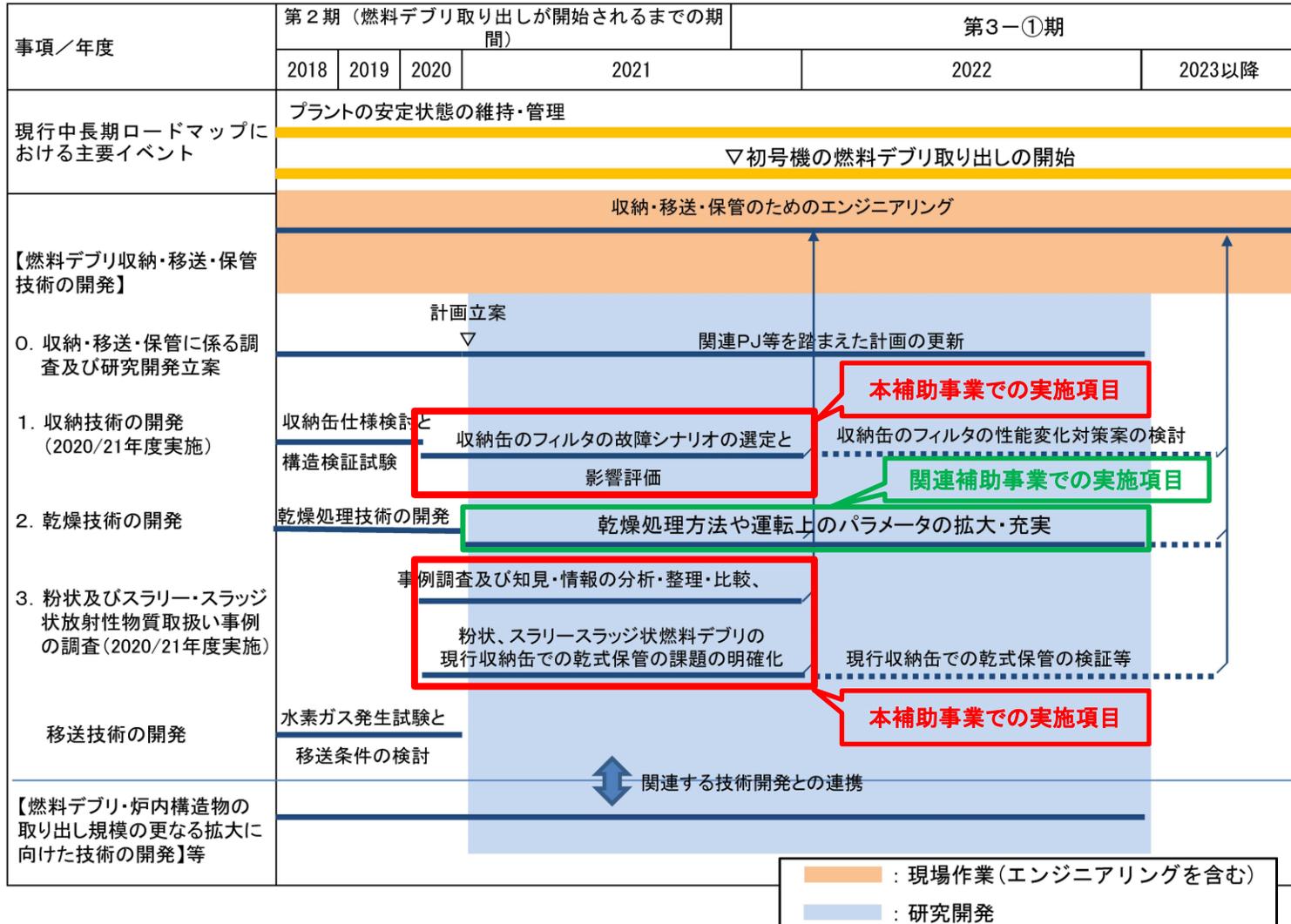
(3) 収納缶のフィルタの性能評価

他関連研究開発にて検討されてきたフィルタに対する要求仕様について確認するとともに、改めて広く要求仕様を検討し、検討されてきたフィルタの選定の考え方や実施されてきたフィルタの評価結果との整合性を確認する。さらに、フィルタの性能に影響を与える故障シナリオ(例えば腐食など)を選定して、そのシナリオを評価するための試験条件を検討する。

3. 実施項目とその関連、他研究との関連

3.2 実施項目間の関連性

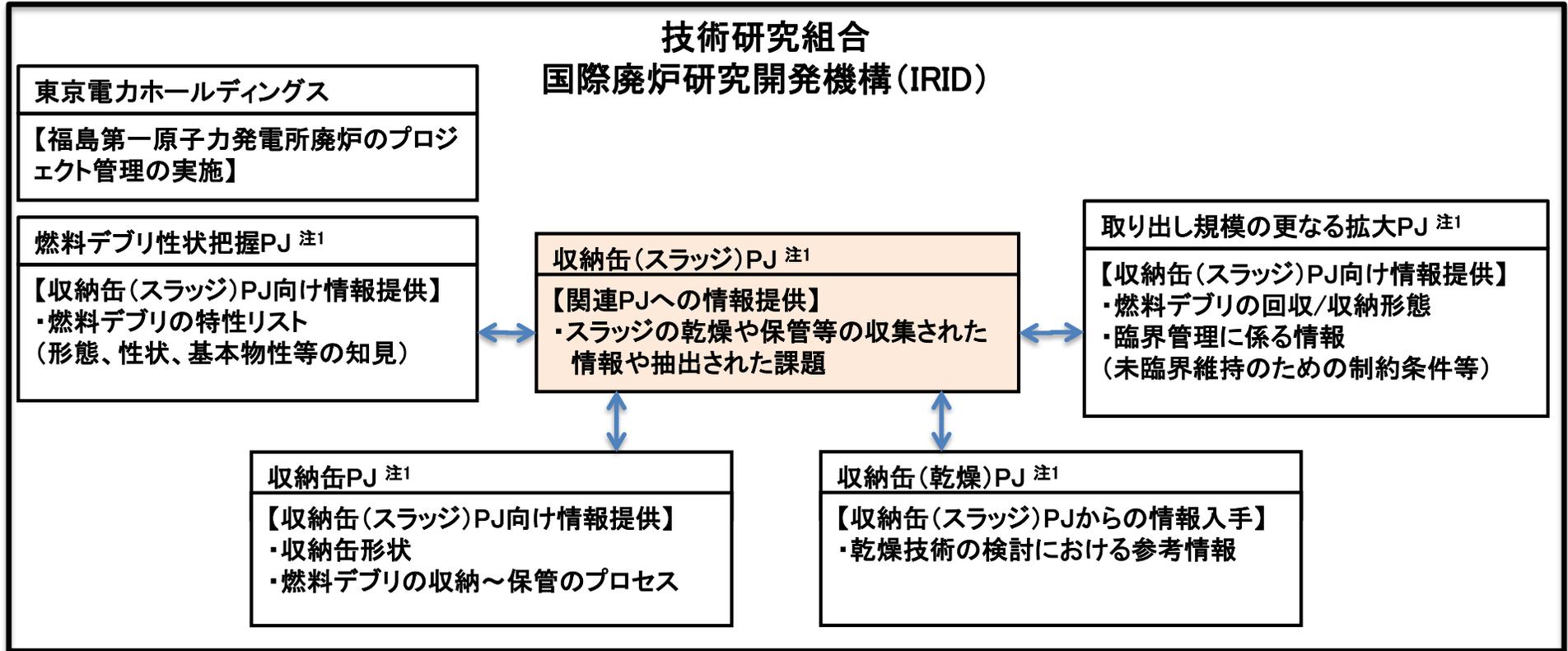
(目標工程)B3④: 燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発



廃炉・汚染水対策チーム会合/事務局会議(第86回)資料「2021年度廃炉研究開発計画について」、
 「(目標工程)B3④: 燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発」に追記

3. 実施項目とその関連、他研究との関連

3.2 実施項目間の関連性



- 注1:
- 取り出し規模の更なる拡大PJ : 「燃料デブリ・炉内構造物の取り出し規模の更なる拡大に向けた技術の開発」PJ
 - 燃料デブリ性状把握PJ : 「燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発」PJ
 - 収納缶PJ : 「燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発」PJ
 - 収納缶(乾燥)PJ : 「燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発(燃料デブリの乾燥技術)」PJ
 - 収納缶(スラッジ)PJ : 「燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発(粉状、スラリー・スラッジ状の燃料デブリ対応)」PJ

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

4. 実施スケジュール

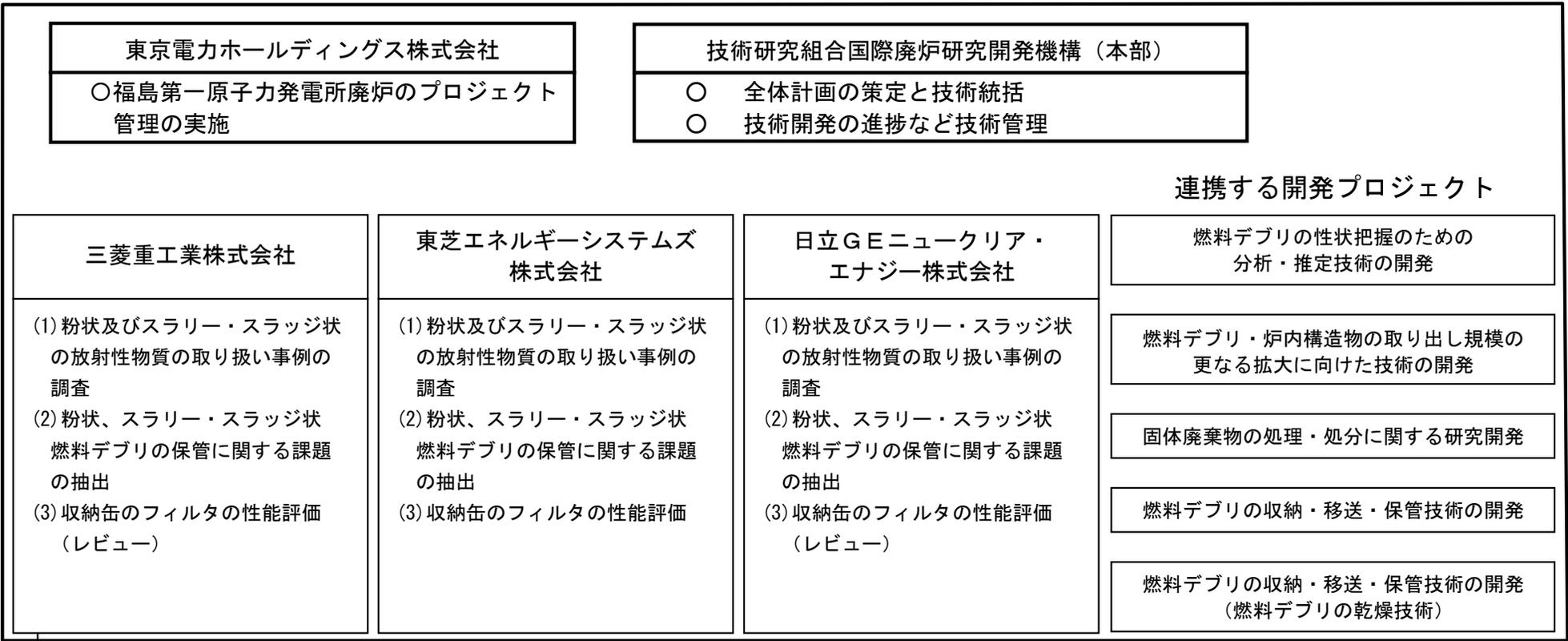
燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発(粉状、スラリー・スラッジ状の燃料デブリ対応)

	2020年度			2021年度												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	
1.粉状及びスラリー・スラッジ状の放射性物質の 取り扱い事例の調査																
①調査計画策定(調査先/調査項目等の検討)	■	■	■	■	■	■										
②調査の実施			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■				
③調査結果の整理											■	■	■	■	■	■
2.粉状、スラリー・スラッジ状 燃料デブリの保管に関する課題の抽出																
①整理対象/項目の抽出	■	■	■	■	■	■										
②評価/課題抽出			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
③国内外の調査結果を踏まえた評価											■	■	■	■	■	■
3.収納缶のフィルタの性能評価																
①環境と条件の抽出	■	■	■	■	■	■										
②フィルタの寿命評価方法の検討		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■				
③試験方法及び条件の検討											■	■	■	■	■	■
4.進捗報告等										▼		▼				▼

■ 計画

■ 実績

5. 実施体制図 (2022年3月末時点)



MHI-NS 社
・ 文献翻訳・整理

MHI-NS : MHI NS エンジニアリング株式会社

6.1 粉状及びスラリー・スラッジ状の放射性物質の取り扱い事例の調査

6.2 粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの保管に関する課題の抽出

6.3 収納缶のフィルタの性能評価

6. 実施内容

6.1 粉状及びスラリー・スラッジ状の放射性物質の取り扱い事例の調査

①目的、目標

粉状、スラリー・スラッジ状の放射性物質等の取り扱いや保管に関する経験、知見および情報等の検討を行うための情報、知見を得るために必要となる事例の調査を行い、粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの取り扱いにおける注意点等を抽出、整理する。

②既存技術との対比

2020年度までに燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発PJでは、塊状、粒状燃料デブリを収納缶を用いて安全に取り扱い、保管をするための技術開発を行った。

一方、燃料デブリの取り出し時には、粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの回収も見込まれることから、塊状、粒状燃料デブリと同様に安全に保管をするための課題を抽出し、解決すべき技術課題を明確にする必要がある。

上記を実施する観点から、粉状、スラリー・スラッジ状の放射性物質等の取り扱いや保管に関する経験、知見および情報を収集、分析しておくこと有用である。

6. 実施内容

6.1 粉状及びスラリー・スラッジ状の放射性物質の取り扱い事例の調査

③実施事項、成果

a.調査計画策定(1/2)

粉状、スラリー・スラッジ状の放射性物質等の取り扱いや保管に関する経験、知見および情報の入手のため、候補調査先および調査項目の検討を行った。

<候補調査先>

米国

TMI-2燃料デブリ取り出し時における汚染水処理から排出された放射性物質の事例
Hanford Site (K-Basin) の廃止措置におけるスラリー・スラッジの事例

英国

Sellafield施設の廃止措置におけるスラリー・スラッジの事例

国内

日本原子力研究開発機構 廃液処理から排出される放射性物質の事例
日本原燃株式会社 再処理施設における廃液処理から排出される放射性物質の事例

6. 実施内容

6.1 粉状及びスラリー・スラッジ状の放射性物質の取り扱い事例の調査

③実施事項、成果

a.調査計画策定(2/2)

<調査項目>

安全な移送や保管の観点からの調査項目

遮蔽、未臨界維持、除熱、閉じ込め、構造健全性、長期健全性、水素対策、火災

取り扱いやプロセスの観点からの調査項目

収納缶や取り扱う設備類の仕様(構造等)、乾燥等のプロセス、そのための設備類の仕様

6. 実施内容

6.1 粉状及びスラリー・スラッジ状の放射性物質の取り扱い事例の調査

③実施事項、成果

b.調査の実施(1/2)

調査項目を整理した調査フォーマットを策定し、国内外の放射性物質の取り扱いや保管に関する事例調査を実施した。

【プラント全体の概要】

・基本情報（背景、目的、対象物の情報など）

【各プロセスに関する整理】

・プロセスの概要(目的、フローなど)

・安全評価（構造、除熱、閉じ込め、遮蔽、臨界、除熱、水素対策など）

・許認可（規制要件、検査項目など）

<調査フォーマットサンプル(一例)>

プラント全体の概要

		調査結果(設定の考え方等含む)	出典(関連文献)
①	基本情報		
	a. 背景/経緯/目的等		
	b. 位置づけ(実用化済 計画中 研究目的等)		
	c. 対象物の情報(スラッジがどこの由来のものか)		
	(a) 燃料のタイプ(板状燃料、二酸化ウラン燃料、燃料デブリ等)		
	(b) スラッジの化学成分や組成(想定しているもの)		
	(c) 移送や保管のためにどう処理を行ったのか 乾燥の場合には機器の仕様、そのためのプロセス 固化等のための処理内容 濃縮する場合の機器の仕様 等		
	(d) スラッジを移送保管するために形態に加工したか(組成や含水率)		
	d. 保管設備(タンク等)までのスラッジの移送方法(パイプラインでの移送等)		
	e. スラッジの保管方法(タンク内での保管等)		
②	許認可		
	a. 規制要件の有無		
	b. 許認可手続方法および審査期間		
	c. 発送前または保管前/保管期間中の検査項目		
③	計画		
	a. 今後の計画		

6. 実施内容

6.1 粉状及びスラリー・スラッジ状の放射性物質の取り扱い事例の調査

③実施事項、成果

b.調査の実施(2/2)

粉状、スラリー・スラッジ状の放射性物質等の取り扱いや保管に関する調査は、粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの安全な移送や保管、および取り扱いやプロセスの観点から以下の項目について整理を行った。

<調査項目>

・未臨界維持、遮蔽、除熱、構造、水素、火災、閉じ込め、長期健全性、乾燥

<調査先>

米国

TMI-2燃料デブリ取り出し時における汚染水処理から排出された放射性物質の事例
Hanford Site (K-Basin)の廃止措置におけるスラリー・スラッジの事例

英国

Sellafield施設の廃止措置におけるスラリー・スラッジの事例

仏国

La Hague再処理施設におけるスラリー・スラッジの事例

国内

日本原子力研究開発機構 廃液処理から排出される放射性物質の事例

日本原燃株式会社 再処理施設における廃液処理から排出される放射性物質の事例

6. 実施内容

6.1 粉状及びスラリー・スラッジ状の放射性物質の取り扱い事例の調査

③実施事項、成果

c .調査結果の整理(1/8)

粉状、スラリー・スラッジ状の放射性物質等の取り扱いや保管に関する国内外の主な調査結果を以下に示す。

表 粉状、スラリー・スラッジ状の放射性物質等の取り扱いや保管に関する調査結果(1/8)

調査項目	調査先	調査結果
未臨界維持	TMI-2	<ul style="list-style-type: none"> ・キャニスタ(収納容器)へ凝固剤を投入した場合にも、キャニスタ内に設置したホウ素材料により臨界安全性を担保。 ・キャニスタ(収納容器)は移送キャスクにて移送される。キャニスタおよび移送キャスクを評価モデルを用い未臨界性が維持されることを解析により確認。
遮蔽	IAEA	<ul style="list-style-type: none"> ・使用済燃料／破損燃料の貯蔵は湿式貯蔵が主流であり、使用済燃料の80%以上が湿式貯蔵。湿式貯蔵での管理は、主にプールの水による冷却・除熱と遮蔽により実施。安全対策や検量検査を容易にし、プール水の状況・分析を通して、継続的な安全貯蔵を確立できると考えられている。

6. 実施内容

6.1 粉状及びスラリー・スラッジ状の放射性物質の取り扱い事例の調査

③実施事項、成果

c. 調査結果の整理(2/8)

表 粉状、スラリー・スラッジ状の放射性物質等の取り扱いや保管に関する調査結果(2/8)

調査項目	調査先	調査結果
除熱	IAEA	・使用済燃料／破損燃料の貯蔵は湿式貯蔵が主流であり、使用済燃料の80%以上が湿式貯蔵。湿式貯蔵での管理は、主にプールの水による冷却・除熱と遮蔽により実施。安全対策や検量検査を容易にし、プール水の状況・分析を通して、継続的な安全貯蔵を確立できると考えられている。
	Hanford (K-Basin)	・洗浄、脱水、乾燥処理等を実施した高放射性廃棄物をスクラップバスケット内へ同心円状に配置することにより除熱が容易となることを確認。
	Sellafield	・マグノックス燃料エレメントにあるフィンにより表面積を増加させることにより、除熱効率が向上されることを確認。

6. 実施内容

6.1 粉状及びスラリー・スラッジ状の放射性物質の取り扱い事例の調査

③実施事項、成果

c. 調査結果の整理 (3/8)

表 粉状、スラリー・スラッジ状の放射性物質等の取り扱いや保管に関する調査結果 (3/8)

調査項目	調査先	調査結果
構造	Hanford (K-Basin) [KW-Basin]	<ul style="list-style-type: none"> ・ポンプにより回収したBasinの底のスラッジを輸送配管 (Hose-in-Hose) により貯蔵容器に移送し、Integrated Water Treatment System (IWTS)による分別処理 (使用済燃料: 1/4inch (0.64cm) 以上の粒、微粒子(スラッジ): 凝集沈降、イオン: イオン交換樹脂)を実施。回収したスラッジのPu含有量が一定値以下であることを確認後、ドラム缶にセメント固化を実施。 ・凝集沈降で回収された微粒子は、臨界維持の観点から、外径20inch(0.5m)、長さ16ft(5m)のタンク (Settle Tanks)に回収し、高圧洗浄により余剰水を排出し、99.7%のスラッジを回収した。

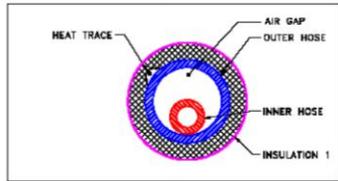


図1 スラッジ輸送に使用された Hose-in-Hose^{注1}

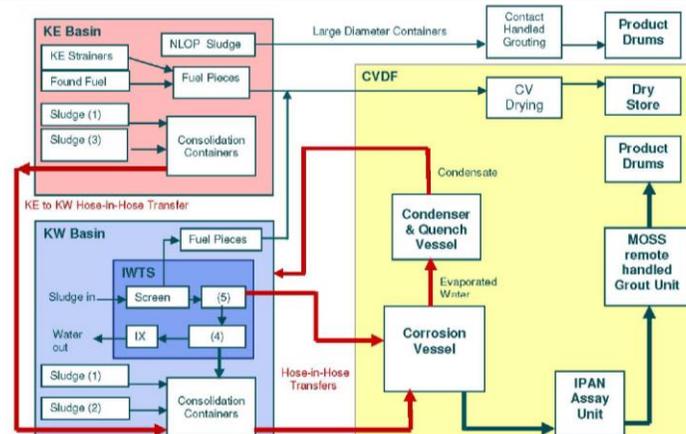


図2 K-West-Basinに設置されたスラッジ処理、固化システムの概要^{注1}

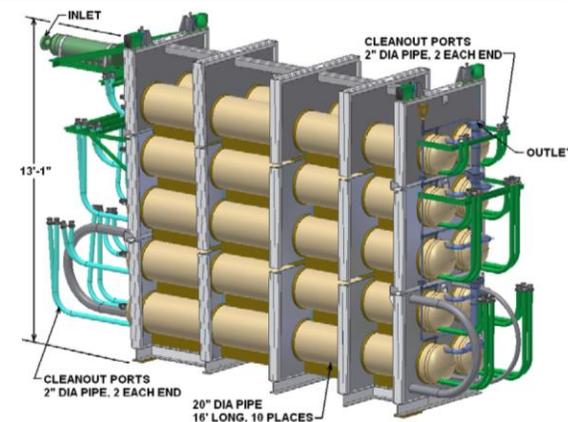


図3 Settle Tanks^{注2}

注1: P.Knollmeyer et al. Waste Management 2006 Conference, February 26-March 2, 2006, Tucson, AZ. Progress with K Basins Sludge Retrieval, Stabilization and Packaging at Hanford Nuclear Site. 2006. より。

注2: Eric G et al. Waste Management 2011 Conference, February 27 - March 3, 2011, Phoenix, AZ. Sludge Retrieval from Hanford K-West Basin Settler Tanks – 11449. 2011. より。

6. 実施内容

6.1 粉状及びびスラリー・スラッジ状の放射性物質の取り扱い事例の調査

③実施事項、成果

c. 調査結果の整理(4/8)

表 粉状、スラリー・スラッジ状の放射性物質等の取り扱いや保管に関する調査結果(4/8)

調査項目	調査先	調査結果
水素	Hanford (K-Basin)	<ul style="list-style-type: none"> ・高レベル放射性廃液貯蔵タンクにK-Basin スラッジを保管した場合の固液層内のガス溜まり生成の可能性を、物理モデルにより評価し、水素濃度の関係式を検討。 ・高レベル放射性廃液貯蔵タンク内の有機物の熱分解および水の放射性分解、タンク鋼材の腐食等を考慮した水素ガス発生速度と温度の関係式を検討。 ・放射性スラッジにより生成されたガスが放射性スラッジにより蓋をされ、放出されずガスだまりを生成する事象が確認された。スラッジのガス保持量とスラッジの降伏応力の関係を検討。

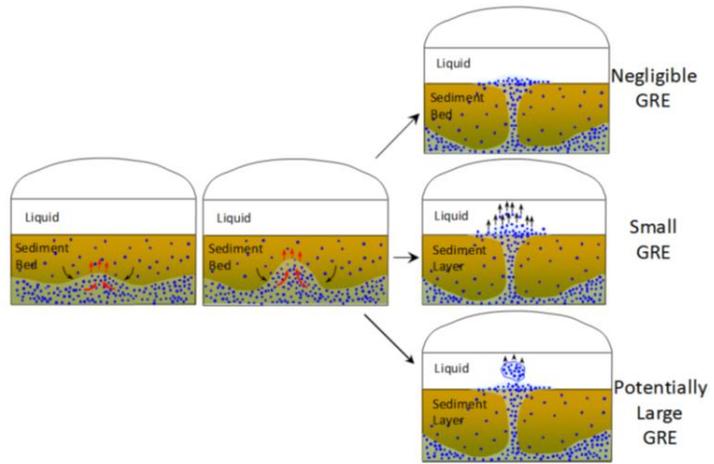


図1 Hanford Siteのタンク内における水素放出事象 (GRE: Gas Release Event) 注1

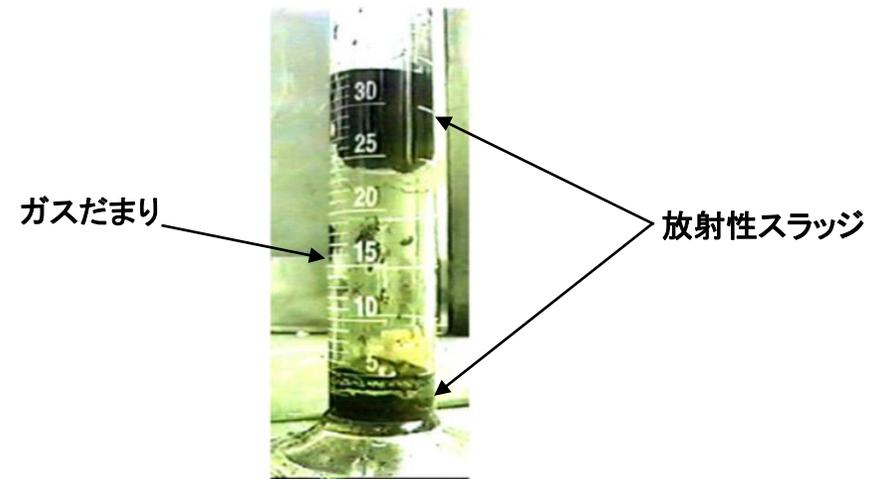


図2 放射性スラッジにより形成されたスラッジ層内のガスだまり注2

注1: PA Gauglitz et al. PNNL-24255 WTP-RPT-238 Rev.0. Hydrogen Gas Retention and Release from WTP Vessels: Summary of Preliminary Studies. 2015. より。

注2: G.Terrones et al. PNNL-13805. Vessel-Spanning Bubble Formation in K-Basin Sludge Stored in Large-Diameter Containers. 2002. より。

6. 実施内容

6.1 粉状及びびスラリー・スラッジ状の放射性物質の取り扱い事例の調査

③実施事項、成果

c. 調査結果の整理 (5/8)

表 粉状、スラリー・スラッジ状の放射性物質等の取り扱いや保管に関する調査結果 (5/8)

調査項目	調査先	調査結果
水素	Savannah River Site	・高レベル放射性廃液処理時において、攪拌装置が停止した際に、廃液中に蓄積した水素ガスが、攪拌再開に伴い放出される水素の挙動をモデル評価。
	Sellafield	・マグノックス燃料解体時に発生する削りくずの腐食によって生成する水素が、腐食生成物の $Mg(OH)_2$ スラリー内に蓄積する量、形態を試験で検討。
	JAEA	・炭酸スラリーへのガンマ線照射により、内部に水素ガスが蓄積され、体積が膨張することを確認した。

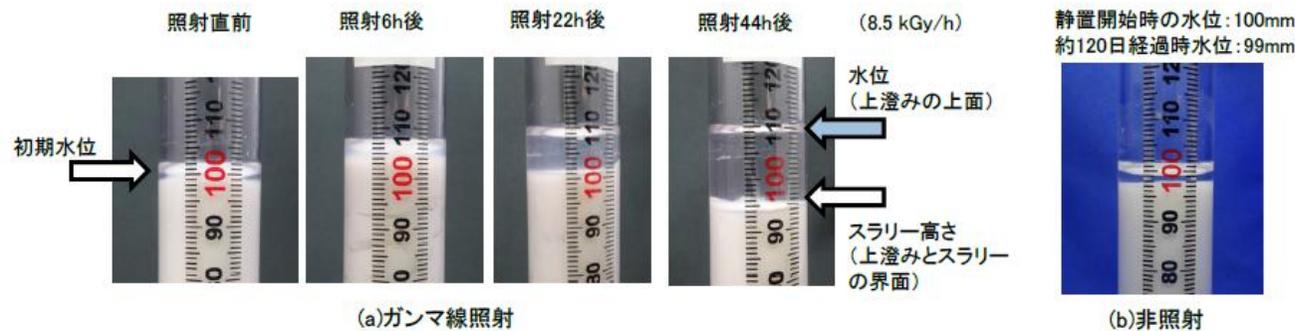


図1 HIC模擬炭酸塩スラリーへのガンマ線照射による水位上昇、たまり水増加^{注1}

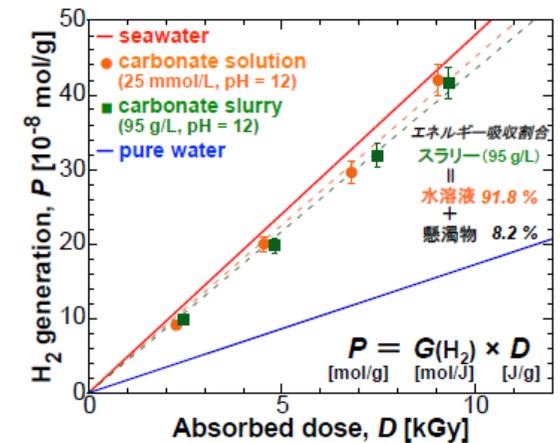


図2 HIC模擬炭酸塩スラリーへのガンマ線照射による水素発生量と吸収線量の関係^{注2}

注1: 本岡 隆文ら、2016年春の原子力学会予稿 2120、HIC模擬炭酸塩スラリーの照射実験 (2) ガンマ線照射下での模擬炭酸塩スラリーのガス保持挙動試験、2016年より。

注2: 永石 隆二ら、2016年春の原子力学会予稿 2121、HIC模擬炭酸塩スラリーの照射実験 (3) 模擬炭酸塩スラリーの放射線分解挙動に関する研究、2016年より。

6. 実施内容

6.1 粉状及びスラリー・スラッジ状の放射性物質の取り扱い事例の調査

③実施事項、成果

c. 調査結果の整理 (6/8)

表 粉状、スラリー・スラッジ状の放射性物質等の取り扱いや保管に関する調査結果(6/8)

調査項目	調査先	調査結果
火災	La Hague	<ul style="list-style-type: none"> 放射性スラッジの処理方法として、廃棄物充填量が多いアスファルト固化を検討したが、アスファルトの放射性分解に伴うガス発生の問題により仏国規制当局の許可を得られなかった。他の手段として、Drying/Compressプロセスでスラッジを乾燥させて、ペレット化し、砂と一緒に容器に収納することを現在も追加検討中。 La Hague再処理施設に貯蔵されていたウラン燃料の被覆管に使われたグラファイト、マグネシウム廃棄物(約600m³)の取り出しについて施設建設が終わり、取り出しを開始。

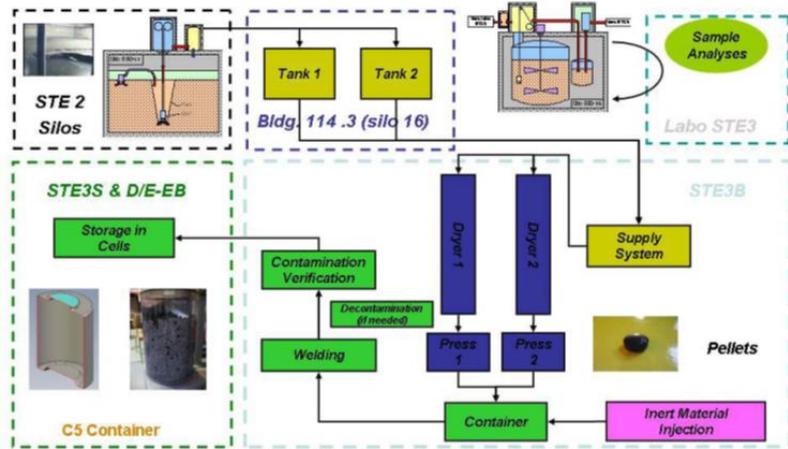


図1 Drying/Compressプロセス^{注1}



図2 マグネシウム廃棄物貯蔵容器^{注2}

注1: Elisa LEONI et al. WM2019 Conference, March 3 – 7, 2019, Phoenix, Arizona, USA. La Hague STE2 Sludge Retrieval and Conditioning Strategy-19229. 2019.より。
 注2: Bruno VILTARD et al. WM2020 Conference, March 8 - 12, 2020, Phoenix, Arizona, USA. Start-up of Silo 130 Waste Retrieval at La Hague: 1st Step Towards Reducing Legacy Inventory-20020. 2020. より。

6. 実施内容

6.1 粉状及びスラリー・スラッジ状の放射性物質の取り扱い事例の調査

③実施事項、成果

c. 調査結果の整理(7/8)

表 粉状、スラリー・スラッジ状の放射性物質等の取り扱いや保管に関する調査結果(7/8)

調査項目	調査先	調査結果
閉じ込め	Hanford (K-Basin)	・高放射性のスラッジを収納するMCO (Multi Canister Overpack) と称する容器は、ASME 第一種容器に基づき設計(原子力圧力容器相当)されており、スラッジの収納、移送、貯蔵(中間貯蔵施設内)における気密性を確保。
	Sellafield	・マグノックス使用済燃料や使用済酸化燃料を再処理した際に発生する高レベル放射性廃液を蒸発缶で濃縮し、廃棄物を脱硝後に微粉末化してガラス固化を実施。ガラス固化体はステンレス製容器に注入し、蓋を溶接して放射性物質を密封。
	TMI	・燃料デブリを取り出した後、対象物ごとに、専用の燃料デブリ収納缶に収納。 ・収納缶が落下時、又は、輸送時による圧力および温度の変動を解析し、燃料デブリが漏えいしないことを確認。
長期健全性	Hanford (K-Basin)	・MCOの長期健全性に係る影響因子として内圧荷重があり、水素ガスの発生低減を目的として、低温化(60℃以下に温度管理。乾燥時含む)、脱水(脱水剤として酸化マグネシウム、又は、酸化カルシウムを添加)、腐食反応の抑制(溶液に亜硝酸塩、又は、リン酸塩を添加)、補足剤の添加(溶液に硝酸塩又は亜硝酸塩を添加)を推奨。
乾燥	Hanford (K-Basin)	・回収したスラッジに対し、ウランの酸化反応が急速に進んで燃料の破損を抑制するため低温真空乾燥(圧力条件:8 Torr(1kPa)、温度条件:40~50℃、乾燥時間:50時間)を実施。

6. 実施内容

6.1 粉状及びびスラリー・スラッジ状の放射性物質の取り扱い事例の調査

③実施事項、成果

c. 調査結果の整理 (8/8)

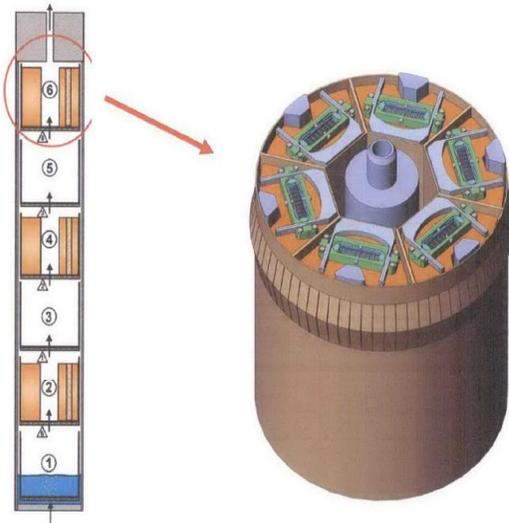


図1 HanfordのMCO (Multi Canister Overpack) と
MCOに収納するスクラップバスケット^{注1}

注1: JCH2MH ILL (2012): KNOCK OUT POT MATERIAL MULTI-CANISTER OVERPACK PROOF OF DRYNESS (OCRWM), SLUDGE TREATMENT PROJECT KOP DISPOSITION, PRC-STP-00210, Revision 2.

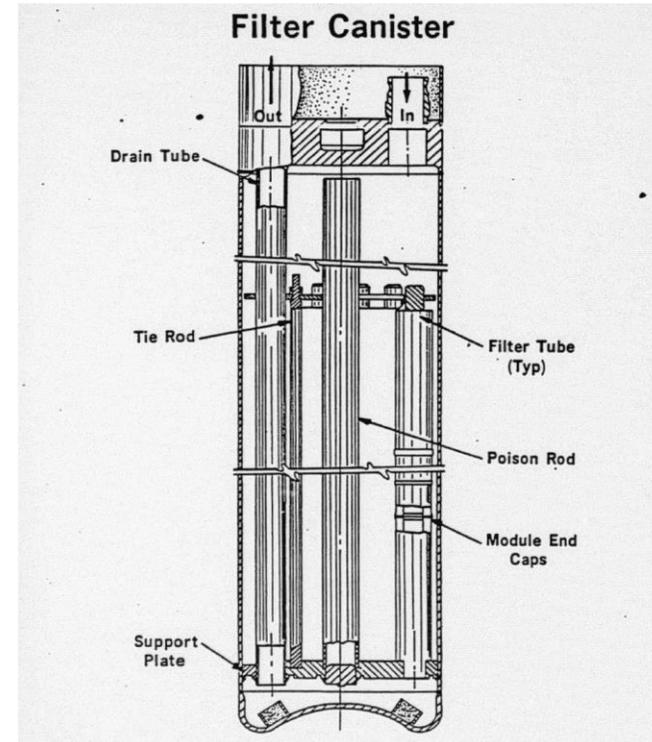


図2 TMI-2 フィルタ収納缶^{注2}
(収納粒径: 0.5~800 μ m)

注2: THI-2 DEFUELING CANISTERS FINAL DESIGN TECHNICAL REPORT, 77-1153937-04

6. 実施内容

6.1 粉状及びスラリー・スラッジ状の放射性物質の取り扱い事例の調査

④成果の反映先への寄与

粉状、スラリー・スラッジ状の放射性物質の取り扱いや保管に関する事例の調査結果をまとめ、粉状、スラリー・スラッジ状の放射性物質の取り扱いや保管における課題抽出に寄与する。

⑤現場への適用性の観点における分析

事例調査は、燃料デブリの取り出し時に回収が想定される粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの取り扱いの検討に際して参考になるものであり有益である。

⑥目標に照らした達成度

目標達成を判断する以下の指標が満足できていることから、目標を達成できたと判断する。

- ・ 海外の粉状、スラリー・スラッジ状の放射性物質の取り扱い事例を分析し、粉状、スラリー・スラッジ状の放射性物質固有の注意点、安全確保の考え方等が整理されていること。

⑦今後の課題

国内外の粉状、スラリー・スラッジ状の放射性物質の取り扱いや保管に関する調査事例として、主に米国TMI-2、Hanford Site、英国Sellafield施設を対象として調査を実施した。仏国La Hague再処理施設や国内の類似施設などを対象として更なる情報収集および分析は有用と考えられる。

6. 実施内容

6.1 粉状及びスラリー・スラッジ状の放射性物質の取り扱い事例の調査

⑧まとめ

- ・米国TMI-2、Hanford Site、英国Sellafieldなどの粉状、スラリー・スラッジ状の放射性物質等の取り扱いや保管に関して、文献等に基づく事例調査を行った。
- ・調査結果に基づき、粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリを安全に取り扱い、また保管するために必要な評価項目および評価方法、対策について、安全評価や取り扱いごとに分類(未臨界維持、遮蔽、除熱、構造、水素、閉じ込め、長期健全性、乾燥)し、注意点等を整理した。
- ・2022年度には、仏国La Hague再処理施設や国内の類似施設などを対象として、粉状、スラリー・スラッジ状の放射性物質等の取り扱いや保管に関する更なる経験、知見および情報を調査することが本補助事業の継続事業として計画されている。

6. 実施内容

6.2 粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの保管に関する課題の抽出

①目的、目標

粉状、スラリー・スラッジ状が主体となる燃料デブリを塊状、粒状燃料デブリと同様の収納缶を用いて乾式保管を行う場合について、安全、確実に合理的な保管状態に持ち込むための課題を抽出、解決すべき技術課題を明確にする。

②既存技術との対比

2020年度までに燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発PJでは、塊状、粒状燃料デブリを収納缶を用いて安全に取り扱い、保管をするための技術開発を行った。
一方、燃料デブリの取り出し時には、粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの回収も見込まれることから、塊状、粒状燃料デブリと同様に安全に保管をするための課題を抽出し、解決すべき技術課題を明確にする必要がある。

6. 実施内容

6.2 粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの保管に関する課題の抽出

③実施事項、成果

a.整理対象／項目の抽出(1/8)

粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの収納・移送・保管は、粒状・塊状燃料デブリとは異なった課題があるものと考えられる。課題を明確化する観点から、2020年度の技術開発成果である粒状・塊状燃料デブリの収納缶を用いて、同様の手法で移送・保管する場合を想定して項目抽出を行う。

そのため、候補案となる取り出し作業での回収スラッジ、水循環システムのスラッジ凝集沈殿物、フィルタ等の捕集物、構成材料各種の粉状酸化物、加工用のアプレシブおよび未臨界維持用の中性子吸収材などの粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリ(No.32,33参照)を安全かつ長期間安定保管に持ち込む際の課題を網羅的に抽出する観点から、粒状・塊状燃料デブリの一連の取り扱いプロセス(No.29,30参照)を考慮し、各取り扱いプロセス(原子炉内から燃料デブリ取り出し～長期保管までの全32プロセス)に対して評価すべき項目および整理方法を検討し、課題抽出フォーマット(No.31参照)を策定した。

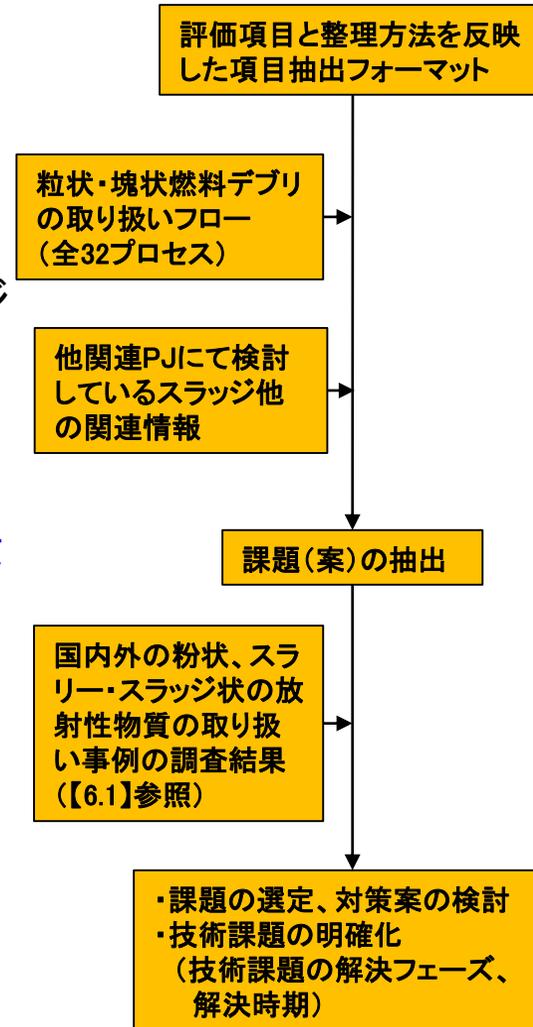
<評価すべき項目>

イ. 安全かつ長期間安定保管する観点からの分析/課題の抽出

評価の視点: 遮蔽、未臨界維持、除熱、閉じ込め(汚染)、構造健全性、長期健全性、水素対策、火災

ロ. 取り扱いやプロセスの観点からの分析/課題の抽出

評価の視点: 収納缶の構造(蓋構造、フィルタ等)、乾燥や水素濃度測定



6. 実施内容

6.2 粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの保管に関する課題の抽出

③実施事項、成果

a.整理対象／項目の抽出(2/8)

・粒状・塊状燃料デブリの一連の取り扱いプロセス
(原子炉内から燃料デブリ取り出し～構内移送:17プロセス)

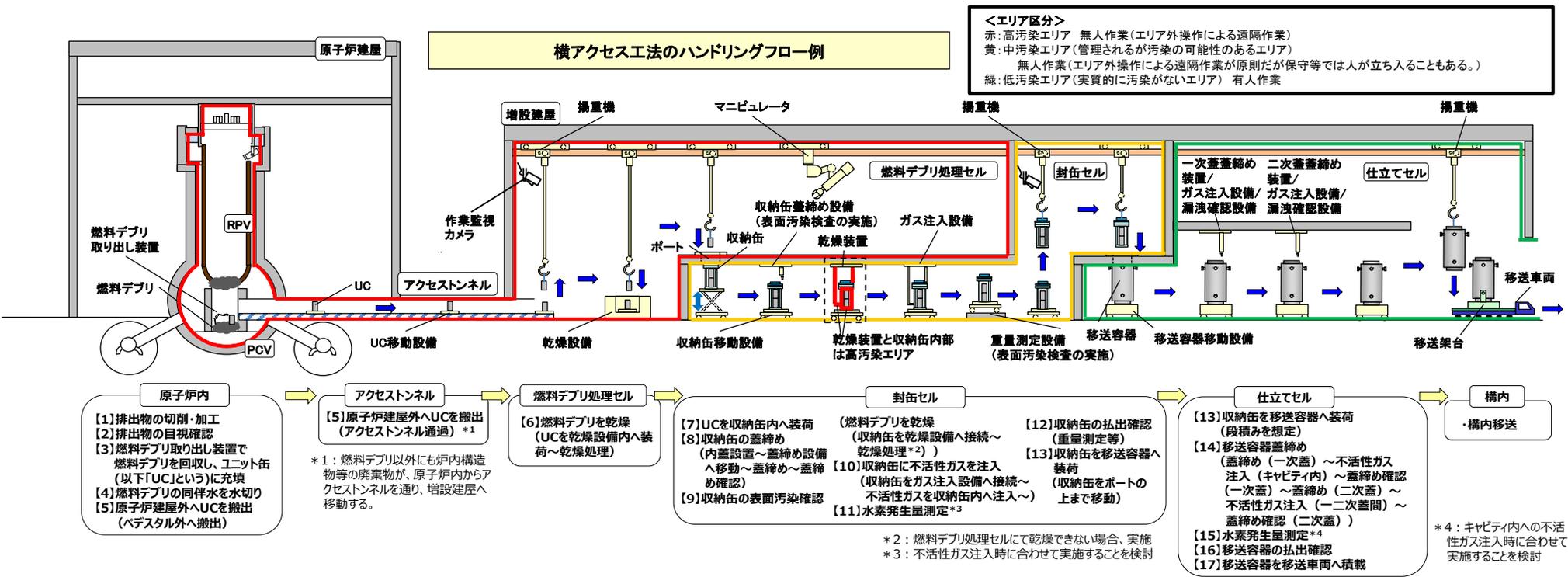


図 粒状、塊状燃料デブリの取り扱いプロセス(1/2)

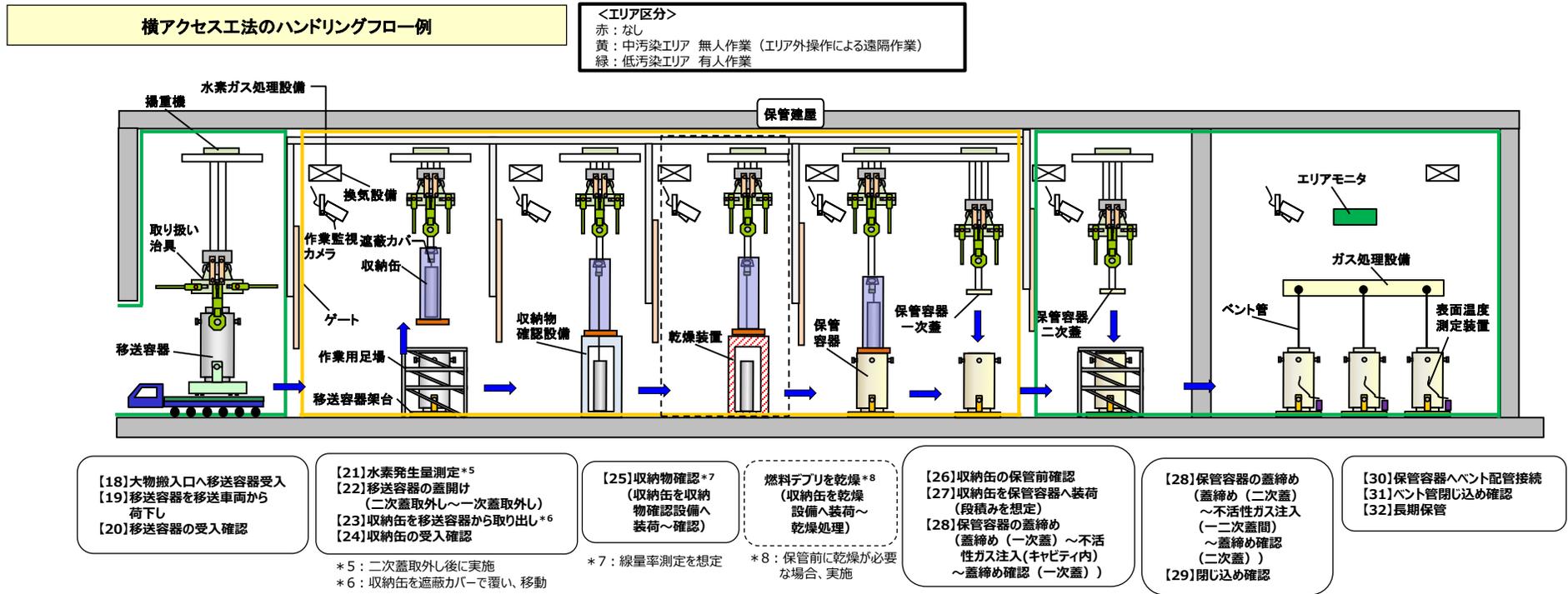
6. 実施内容

6.2 粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの保管に関する課題の抽出

③実施事項、成果

a.整理対象／項目の抽出(3/8)

- ・粒状・塊状燃料デブリの一連の取り扱いプロセス
(保管建屋への移送容器搬入～長期保管:15プロセス)



6. 実施内容

6.2 粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの保管に関する課題の抽出

③実施事項、成果

a.整理対象／項目の抽出(4/8)

【評価の対象機器】

・ユニット缶、収納缶、UCや収納缶の取り扱い設備

【評価の観点】

・設計の考え方、安全設計方針、課題

<課題抽出フォーマット>

ステップ			技術要素	技術的観点からの考え方、方針				課題案			
No	場所	実施内容		基本 要 求	基本 要 求 対 する 考 え 方	設 計 の 考 え 方		許 認 可 (安 全 設 計) 方 針		課 題 案	
					UC	収 納 缶	UC	収 納 缶	UC	収 納 缶	そ の 他 機 器 (UC や 収 納 缶 以 外 の 取 扱 設 備)
1	原子炉内	排出物の切削・加工	①構造	・想定すべき事象に伴う荷重に対して②～⑦の基本 要求を維持できる構造強度を有すること。 ・崩壊熱により燃料デブリが溶融しないこと。							
			②除熱	・①、③～⑦の基本 要求が維持できる除熱能力を有すること。							
			③閉じ込め(汚染)	・放射性物質の漏えいを防止すること。							
			④遮蔽	・放射線障害を防止するために必要な遮蔽能力を有すること。							
			⑤臨界	・燃料デブリが臨界に達するおそれがないこと。							
			⑥水素	・水素爆発を防止すること。							
			⑦火災	・火災発生を防止すること。							
			⑧計量	核燃料物質の計量管理/防護措置上の措置を講じること。							
			⑨長期健全性	・経年変化を考慮しても①～⑧の基本 要求が維持できること。							
			⑩取扱い操作上の必要事項他	・燃料デブリ取出し、収納をする上で必要な機能を備えていること。							
2	原子炉内	排出物の目視確認	①構造	・想定すべき事象に伴う荷重に対して②～⑦の基本 要求を維持できる構造強度を有すること。 ・崩壊熱により燃料デブリが溶融しないこと。							
			②除熱	・①、③～⑦の基本 要求が維持できる除熱能力を有すること。							
			③閉じ込め(汚染)	・放射性物質の漏えいを防止すること。							
			④遮蔽	・放射線障害を防止するために必要な遮蔽能力を有すること。							
			⑤臨界	・燃料デブリが臨界に達するおそれがないこと。							
			⑥水素	・水素爆発を防止すること。							
			⑦火災	・火災発生を防止すること。							
			⑧計量	核燃料物質の計量管理/防護措置上の措置を講じること。							
			⑨長期健全性	・経年変化を考慮しても①～⑧の基本 要求が維持できること。							
			⑩取扱い操作上の必要事項他	・燃料デブリ取出し、収納をする上で必要な機能を備えていること。							

対象機器に対して、
プロセス毎に課題を抽出

燃料デブリの取り扱いのプロセス毎(32プロセス)に課題抽出

【評価項目】

・安全評価
(構造、除熱、閉じ込め(汚染)、遮蔽、臨界、水素、計量、長期健全性)
・取り扱い操作上の必要事項

6. 実施内容

6.2 粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの保管に関する課題の抽出

③実施事項、成果

a.整理対象／項目の抽出(5/8)

・燃料デブリ取り出し時に排出が想定される粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリに関する情報(特徴、発生量、性状、要求される安全要件など)について、PJ合同会議にて情報交換を実施。

＜燃料デブリ取り出し時に排出が想定される粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの情報整理(表の一部を抜粋)＞

No.	種類	特徴	発生場所	発生量	発生頻度	発生時期	収納容器への収納時における対象物の性状 (燃料デブリ以外の添加物含む)					収納容器の候補 (ユニット缶、収納缶、それ以外)	収納容器への有無	左記、有りの場合、処理方法	収納容器への収納形態	収納場所	収納容器への移送経路案	収納容器の移送頻度	収納容器による取り扱い時 (保管を含む)の安全要件	
							含有物 (割合含む)	形状 (粒径含む)	密度	含水率	空隙率									
1	粗取りフィルタの減集沈殿物	粒径が大きく比重の大きい粒子の含有率が高い	増設建屋内の沈降分離設備	11[m ³ /y]	0.055[m ³ /day]	取り出し規模の更なる拡大 (1/3号機)	・溶融燃料 ・炉心構造物 ・コンクリート ・その他固形物(土砂、析出物、非溶解性中性子吸収材、固化材、アブレインプ等) ・硫酸アルミニウム (1000ppm) ・ホウ酸成分	・粒状(粒径: 100~数十μm)	約1[g/cm ³]	90~95[vol%]	ほぼ0[vol%]	・スラッジ回収容器 (Φ200×H400) ・廃棄物保管容器	無	—	直接回収	増設建屋内の沈降分離槽	増設建屋からホットセル内を通して移送	1[個/day]	・形状管理による未臨界維持 ・ベント等による水素濃度の爆発限界下限値維持	
2	中取り・最終処理フィルタ廃液の減集沈殿物	粒径が小さく比重の小さい粒子の含有率が高い	増設建屋内の沈降分離設備	54~7[m ³ /y]	0.27~0.035[m ³ /day]	取り出し規模の更なる拡大 (1/3号機)	・溶融燃料 ・炉心構造物 ・コンクリート ・その他固形物(土砂、析出物、非溶解性中性子吸収材、固化材、アブレインプ等) ・硫酸アルミニウム (1000ppm)	・粒状(粒径: 数十~0.1μm)	約1[g/cm ³]	90~95[vol%]	ほぼ0[vol%]	・スラッジ回収容器 (Φ200×H400) ・廃棄物保管容器	無	—	直接回収	増設建屋内の沈降分離槽	増設建屋からホットセル内を通して移送	1~8[個/day]	・形状管理による未臨界維持 ・ベント等による水素濃度の爆発限界下限値維持	
3	RO濃縮水の減集沈殿物	数μmオーダーの粉末吸着材が支配的	増設建屋内の沈降分離設備	310[m ³ /y]	1.6[m ³ /day]	取り出し規模の更なる拡大 (1/3号機)	・粉末吸着材(チタン酸、チタン酸イオン交換樹脂、活性炭、ヘマタイト、マグネタイト) ・高塩基PAC(1000ppm)	・粒状(粒径: 数μm)	約1[g/cm ³]	90~95[vol%]	ほぼ0[vol%]	・スラッジ回収容器 (Φ200×H400) ・廃棄物保管容器	有	技術開発中(目標含水率60vol%以下:仮設定)	直接回収	増設建屋内の沈降分離槽	増設建屋からホットセル内を通して移送	111[個/day]	・形状管理による未臨界維持 ・ベント等による水素濃度の爆発限界下限値維持	
4	気相系スラッジ	気中浮遊するダスト状デブリを気相系システムの金属HEPAフィルタで捕集し、逆流により払い出すことで発生する。一案として、液相系システムの沈降分離槽にて処理することを検討中。	気相系システムの金属HEPAフィルタ			取り出し規模の更なる拡大 (1/3号機)	・ダスト状デブリ ・その他	・粒状(粒径: 不明だが気中浮遊する程度の微粒子と想定される)												
5	未臨界維持用の中性子吸収材	固体タイプの吸収材 (Gd粒子、B・Gd入りガラス材) や固化体タイプの吸収材 (水ガラス) がデブリと共に加工されて粉状、スラッジ状に変化したもの	ベデスタル等のデブリ取り出し作業場所	Gd粒子、B・Gd入りガラス材の使用量はデブリ体積の2.5%と見積もられている。このうちのさらに1%がスラッジ状に変化するものと仮定すると、対デブリ体積比2.5%×1%=0.025%。水ガラスの使用量はデブリ体積の5%と見積もられているので、対デブリ体積比5%×1%=0.05%。(M3V-2019-000230, rev1, 非溶解性中性子吸収材の運用方法)	Gd粒子、B・Gd入りガラス材の1日あたりの使用量は1.5リットル (1.5E-3[m ³ /day])と見積もられている。このうちの1%がスラッジ状に変化するものと仮定すると、1.5E-5[m ³ /day]水ガラス材の1日あたりの使用量は3.0リットル (3.0E-3[m ³ /day])と見積もられている。このうちの1%がスラッジ状に変化するものと仮定すると、3.0E-5[m ³ /day] (M3V-2019-000230, rev1, 非溶解性中性子吸収材の運用方法)	取り出し規模の更なる拡大 (1/3号機)	・Gd2O3 ・ビスマスホウ酸ガラス (B・Gd入りガラス材) ・水ガラス (Na2O, SiO2, CaO, Al2O3, Fe2O3, CaSO4, NaH2PO4)	・Gd粒子: 粒状(粒径: ~500μm) ・B・Gd入りガラス材: 粒状(粒径: ~1mm) ・水ガラス: 固化後にスラッジ状になったもの (粒径~100μm)	・Gd203粒子: 4.3[g/cm ³] ・B・Gd入りガラス材: 4.29[g/cm ³] ・水ガラス: 2.1[g/cm ³ (M3V-2019-000230, rev1, 非溶解性中性子吸収材の運用方法)	Gd203.B/Gd入りガラス材、については含水率0% 水ガラスについては高いと思われるが不明 (2021-2022事業でデータが得られれば見直し)	Gd203.B/Gd入りガラス材、については含水率0% 水ガラスについては低いと思われるが不明 (2021-2022事業でデータが得られれば見直し)	吸収材を収納する容器に大きさの制限はない(取り出し後の吸収材を単独で収納することは不要と仮定)	無 (検討不要)	無 (検討不要)	無 (検討不要)	無 (検討不要)	無 (検討不要)	・Gd粒子: 1年に1回、5.5[L]を移送 1.5E-5[m ³ /day]×365[day]=5.5[L/年] ・水ガラス: 1年に1回、11[L]を移送 3.0E-5[m ³ /day]×365[day]=11[L/年]	無 (検討不要) 吸収材の安全性、収納・保管への影響については原子炉で確認済み。 (M3V-2020-000265, 非溶解性中性子吸収材の性能評価のまとめ)	

(備考) 表中の色付きセルの区分

- 黄色: 今後の机上検討等により仮設定が可能と考えられる項目
- 桃色: これ以上は判断(仮設定)が困難と考えられる項目(実燃料デブリ情報が必要)
- 青色: これ以上の検討は不要と考えられる項目(臨界管理不要で収納容器が不要)

排出が想定される粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリをリストアップ(19種類)発生量や性状、収納形態等を想定し、以下の分類で色分けを実施

- ・黄色: 今後の机上検討等により仮設定が可能と考えられる項目
- ・桃色: これ以上は判断(仮設定)が困難と考えられる項目(実燃料デブリ情報が必要)
- ・青色: これ以上の検討は不要と考えられる項目(臨界管理不要で収納容器が不要)



6. 実施内容

6.2 粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの保管に関する課題の抽出

③実施事項、成果

a.整理対象／項目の抽出(6/8)

＜整理した燃料デブリ取り出し時に排出が想定される粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの一例＞

No.	種類	特徴	発生場所	発生量	発生頻度	発生時期	収納容器への収納時における対象物の性状 (燃料デブリ以外の添加物含む)				
							含有物 (割合含む)	形状 (粒径含む)	密度	含水率	空隙率
1	粗取りフィルタ 廃液の凝集沈殿物	粒径が大きく比重の大きい粒子の含有率が高い	増設建屋内の沈降分離設備	11[m3/y]	0.055[m3/day]	取り出し規模の更なる拡大 (1/3号機)	・溶融燃料 ・炉心構造物 ・コンクリート ・その他固形物(土砂、析出物、非溶解性中性子吸収材、固化材、アブレシブ等) ・硫酸アルミニウム (1000ppm) ・ホウ酸成分	・粒状 (粒径：100～数十μm)	約1[g/cm3]	90～95[vol%]	ほぼ0[vol%]
2	中取り・最終処理フィルタ廃液の凝集沈殿物	粒径が小さく比重の小さい粒子の含有率が高い	増設建屋内の沈降分離設備	54～7[m3/y]	0.27～0.035[m3/day]	取り出し規模の更なる拡大 (1/3号機)	・溶融燃料 ・炉心構造物 ・コンクリート ・その他固形物(土砂、析出物、非溶解性中性子吸収材、固化材、アブレシブ等) ・硫酸アルミニウム (1000ppm) ・ホウ酸成分	・粒状 (粒径：数十～0.1μm)	約1[g/cm3]	90～95[vol%]	ほぼ0[vol%]
3	RO濃縮水の凝集沈殿物	数μmオーダーの粉末吸着材が支配的	増設建屋内の沈降分離設備	310[m3/y]	1.6[m3/day]	取り出し規模の更なる拡大 (1/3号機)	・粉末吸着材(チタン酸、チタンケイ酸塩、活性炭、ヘマタイト、マグネタイト) ・高塩基PAC(1000ppm)	・粒状 (粒径：数μm)	約1[g/cm3]	90～95[vol%]	ほぼ0[vol%]

No.	種類	収納容器の候補 (ユニット缶、収納缶、それ以外)	収納容器の処理の有無	左記、有りの場合、処理方法	収納容器への収納形態	収納容器への収納場所	収納容器の移送経路案	収納容器の移送頻度	収納容器による取り扱い時 (保管を含む)の安全要件
1	粗取りフィルタ 廃液の凝集沈殿物	・スラッジ回収容器 (Φ200×H400) ・廃棄物保管容器	無	—	直接回収	増設建屋内の沈降分離槽	増設建屋からホットセル内を通して移送	1[個/day]	・形状管理による未臨界維持 ・ベント等による水素濃度の爆発限界下限値維持
2	中取り・最終処理フィルタ廃液の凝集沈殿物	・スラッジ回収容器 (Φ200×H400) ・廃棄物保管容器	無	—	直接回収	増設建屋内の沈降分離槽	増設建屋からホットセル内を通して移送	1～8[個/day]	・形状管理による未臨界維持 ・ベント等による水素濃度の爆発限界下限値維持
3	RO濃縮水の凝集沈殿物	・スラッジ回収容器 (Φ200×H400) ・廃棄物保管容器	有	技術開発中(目標含水率60vol%以下;仮設定)	直接回収	増設建屋内の沈降分離槽	増設建屋からホットセル内を通して移送	111[個/day]	・形状管理による未臨界維持 ・ベント等による水素濃度の爆発限界下限値維持

【粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリに関して整理した情報】

- ・種類
- ・特徴
- ・発生場所、発生量、発生頻度、発生時期
- ・性状 (含有物、形状、密度、含水率、空隙率)
- ・収納容器の候補
- ・収納容器の処理の有無、処理方法
- ・収納容器への収納形態、収納場所
- ・収納容器の移送経路、移送頻度
- ・収納容器による取り扱い時／保管時の安全要件

6. 実施内容

6.2 粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの保管に関する課題の抽出

③実施事項、成果

a.整理対象／項目の抽出(7/8)

- ・粉状燃料デブリの乾燥処理におけるメリット／デメリットについて、PJ合同会議にて情報交換を実施

項目	メリット	デメリット
水素対策	<ul style="list-style-type: none"> ・乾燥処理により燃料デブリに含まれる水分量を低減することで、水素発生量を低減することできるため、収納容器(収納缶含む)で収納し、水素の爆発下限界(4vol%)以下を実現できる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・乾燥が不十分で水分が残留し、燃料デブリが粘土状になった場合、燃料デブリ内に水素だまりが発生し、下記の要因などで、水素だまりから水素が突発的に放出され、水素濃度が急上昇する可能性がある。 <ul style="list-style-type: none"> ○燃料デブリの取り扱いによる振動 ○水素だまりの膨張による放出(燃料デブリの粘度に依存) また、この水素だまりにより、気相部の水素濃度が不定期に増減することが想定されるため、水素濃度の測定結果に基づいた水素発生量の把握が困難になる可能性がある。
閉じ込め(汚染)	<ul style="list-style-type: none"> ・乾燥処理により燃料デブリに含まれる水分量を低減することで、収納容器(収納缶含む)で収納し、密封した状態での取り扱いが可能となり、放射性物質の放出を抑制することができる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・乾燥処理により、収納缶内で乾燥した粉状放射性物質が飛散し、蓋部に設けた水素放出フィルタを閉塞する可能性がある。 ・粉状放射性物質の飛散量が増加することにより、必要となるオフガス処理設備の規模が大きくなる可能性がある。また、移送容器や保管容器等の収納缶の取り扱い機器のメンテナンス(除染)の頻度が多くなる可能性がある。 ・乾燥温度が高い場合(200~300℃)、燃料デブリから放射性ガス(FP)が放出される可能性がある。
臨界	<ul style="list-style-type: none"> ・乾燥処理により燃料デブリに含まれる水分量を低減することで、未臨界性の維持の観点では有利になる。 	—
遮蔽	—	<ul style="list-style-type: none"> ・遮蔽効果のある水分が減るため、表面線量が大きくなり、被ばく量が増加する。 ・粉状放射性物質の飛散により、取り扱いエリアの線量が高くなる可能性がある。
長期健全性	<ul style="list-style-type: none"> ・乾燥処理により燃料デブリに含まれる水分量を低減することで、長期保管等における腐食の発生リスクを低減できる。 	—
火災	—	<ul style="list-style-type: none"> ・乾燥処理により粉状燃料デブリが舞い上がりやすくなるため、粉じん火災のリスクが高まる可能性がある。
その他	<ul style="list-style-type: none"> ・乾燥処理により燃料デブリが減容されるため、保管効率の向上が見込まれる。 ・水分量が減ること(理想は完全乾燥)することで均一に固形化しやすくなり、未乾燥や部分乾燥時の不均一な固形化と比較した場合、安定性が増し、性状等も推定しやすい。 	<ul style="list-style-type: none"> ・乾燥処理設備(乾燥設備、オフガス処理設備、乾燥処理速度にあった仮置き設備(エリア)など)が必要になる。 ・乾燥処理により、粉状燃料デブリがUCや収納缶に固着してしまい、最終的な処理方法が確定した時に取り出しができない可能性がある。

6. 実施内容

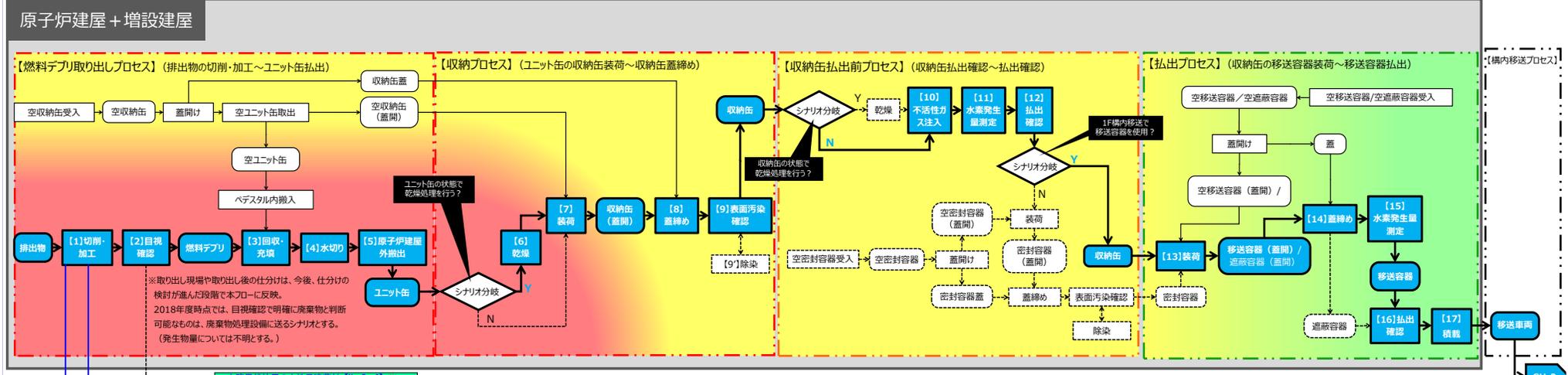
6.2 粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの保管に関する課題の抽出

③実施事項、成果

a.整理対象／項目の抽出(8/8)

- ・粒状・塊状燃料デブリの一連の取り扱いプロセスに対し、燃料デブリ取り出し時に排出が想定される粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの取り扱いを追加したプロセスフロー案を作成。

＜粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリに想定されるプロセスフロー(案)＞



- ※実施しない可能性があるプロセス。
- ・粉状のMOXI破砕片【No. 7】
 - ・粒状のMOXI破砕片【No. 8】
 - ・デブリ加工切りくず【No. 10, 11, 12】
 - ・気相系フィルタ【No. 18】

(注) 箇々の種類では、未臨界管理が不要な廃棄物であるが、目視確認で仕分けできない場合は燃料デブリとして管理する必要がある。

原子炉建屋内で発生が予想される粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリ及び廃棄物

・RPV、PCV内	気相系スラッジ【No. 4】【液体系】	アプレシブ【No. 13】【廃棄物】 ^(注)
	未臨界維持用の中性子吸収材(スラッジ状)【No. 5】【廃棄物】 ^(注)	ジオポリマー等固化材【No. 14】【廃棄物】 ^(注)
	未臨界維持用の中性子吸収材(スラリー状)【No. 6】【廃棄物】 ^(注)	切断時のヒューム等【No. 15】【廃棄物】 ^(注)
	粉状のMOXI破砕片(粒径0.1mm未満)【No. 7】【液体系/気体系】	ペントナイト重泥水【No. 16】(粒径数μm～5mm)【廃棄物】 ^(注)
	粒状のMOXI破砕片(粒径0.1～10mm)【No. 8】【ユニット缶】	PCV底部堆積物【No. 17】(粒径0.1μm～10mm)【収納缶(ユニット缶の代りにセパレータに装着)】
	デブリ加工切りくず(レダークガング:1μm以下)【No. 10】【液体系/気体系】	気相系フィルタ【No. 18】【気体系(金属HEPAフィルタ等)】
	デブリ加工切りくず(レダークガング:250μm～1mm)【No. 11】【回収容器】	液相系フィルタ【No. 19】【気体系(金属HEPAフィルタ等)】
	デブリ加工切りくず(デシカガング:0.5～100μm)【No. 12】【液体系/気体系】	

増設建屋内で発生が予想される粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリ・沈降分離設備

・粗取フィルタ廃液の凝集沈殿物【No. 1】【スラッジ回収容器/廃棄物容器】
・中取/最終処理フィルタ廃液の凝集沈殿物【No. 2】【スラッジ回収容器/廃棄物容器】
・RO濃縮水の凝集沈殿物【No. 3】【スラッジ回収容器/廃棄物容器】

(注) 箇々の種類では、未臨界管理が不要な廃棄物であるが、目視確認で仕分けできない場合は燃料デブリとして管理する必要がある。

6. 実施内容

6.2 粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの保管に関する課題の抽出

③実施事項、成果

b.評価／課題抽出(国内外の調査結果を踏まえた評価含む)(1/6)

・課題抽出フォーマットに基づく、粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの各取り扱いプロセスにおける課題の抽出を実施した。

<課題抽出フォーマットに基づく課題抽出の一例>

No	場所	実務内容	技術要素	技術的観点からの考え方、方針				課題案							
				基本 要 求	基本 要求に対する 考え方	設計の考え方	許認可(安全設計)方針	UC	その他機器 (UCや収納缶以外の取扱設備)						
3	原子炉内	燃料デブリ取り出し装置で燃料デブリを回収し、UCに充填	①構造	・想定すべき事象に伴う荷重に対して②～⑦の基本 要求を維持できる構造強度を有すること。	・②～⑦の基本 要求につ いて、UC、収納缶、移送器、保管容器、セルのいづれかで担保する。	・②⑤の基本 要求が維持 可能な構造とするが、収納 缶内にUCを収納した場合は 収納缶で維持する。	UC	収納缶	・設備の二重化等により、 取扱い時に転倒や落下な どの想定事象は生じない ものとし、考慮しない方針 とするが、万一考慮が必要 な場合、構造強度評価 を実施する必要がある。	・現状のUC構造案は水切りのためにメッシュ構造となっ ているため、スラリー・スラッジ状の燃料デブリの回収は困難 である。 ・現状のUC構造案は蓋なし(上部が開放状態)であるた め、UC内に収納するスラリー・スラッジ状の燃料デブリが 振動や揺れにより、UCからこぼれる可能性がある。	-	-			
				②除熱	・換熱熱により燃料デブリが溶融しないこと。 ・①、③～⑦の基本 要求が維持できる除熱能力を有 すること。	・建屋内セルはUC内の換 熱熱を除去できる十分な 換気能力を有する。	・発熱量は小さく換気によ り除熱するので種々の 除熱は担保しない。	UC	収納缶	・燃料デブリの発熱量は小 さいと考えられ、換気で 燃料デブリの融解等の許容 温度が満足できることを 確認する。	・燃料デブリの発熱量は小 さく、換気にて熱量は除去 できると考えるが、除熱面 で大きな課題はないことを 確認する。	<換熱(ホットセル)の課題> 建屋換気で燃料デブリの融解等の許容温度を担保することに大きな課題が ないことを確認する。 (換気量がいざと考えられるので大きな課題はないと考える)	-	-	
				③閉じ込め(汚染)	・放射性情質の漏えいを防止すること。	・建屋内セルは汚染(閉じ込め)を防止する十分な閉 じ込め性能を有する。	・UCは、閉じ込め性能は 担保しない。	UC	収納缶	・UCは、閉じ込め性能は 担保しない。	・UCは、閉じ込め性能は 担保しないので課題なし。	・閉じ込め性能は担保しないので課題なし。	<換熱(ホットセル)の課題> UC内へ放出された粉状燃料デブリが乾燥すると飛散しやすくホットセル内の閉 じ込め性能の強化が必要となる可能性がある。 (ただし、原子炉内での粉状燃料デブリの取扱いは他PJにて検討されており、 課題とならない可能性あり)	-	-
				④遮蔽	・放射線障害を防止するために必要な遮蔽能力を有 すること。	・デブリから発する放射線 による放射線障害(公衆 への放射線遮蔽)を防止 し、セルの遮蔽が担保設計 とする。 ・セルが主要な遮蔽機能を 担うことにより、収納缶 の重量は構造等の観点か ら必要となる厚さとする。	・セルのバンダリで担保 するので特に担保しない。	UC	収納缶	・セルのバンダリで担保 するので特に担保しない。	・担保しないので課題なし。	・担保しないので課題なし。	<遮蔽(ホットセル)の課題> セルのバンダリでの遮蔽担保を確認する。 (ただし、原子炉内での粉状燃料デブリの取扱いは他PJにて検討されており、 課題とならない可能性あり)	-	-
				⑤臨界	・燃料デブリが臨界に達するおそれがないこと。	・UCの幾何学的形状で未 臨界を維持する。 ・こぼれ等が生じても未臨 界を維持する。	・UCの幾何学的形状で未 臨界を維持する。 ・設備側でUCが転倒しな いような処置がされること を前提にする。	UC	収納缶	・UCの幾何学的形状で未 臨界を維持する。	・UCの幾何学的形状で未 臨界を維持する。	・臨界評価条件(デブリの分布、配列他)を考慮した上での UCの仮定寸法の妥当性の確認	・UC取扱いに際し、設備側で転倒しないような処置がされることを確認する。	-	-
				⑥水素	・水素爆発を防止すること。	・燃料デブリを収納・移送 保管する容器内の水素濃 度が爆発下限内である 4vol%未満を維持する。	・UCに蓋をしない場合、水 素を原子炉内に常時放出 するため、原子炉内を換 気することで、水素濃度を 爆発下限内である4vol% 未満を維持する。 ・UCに蓋をする場合、ユ ニット缶内に発生する水素 が適切に放出されること を水素監視評価等で確認 する。	UC	収納缶	・UCに蓋をしない場合、原 子炉内を換気することで 水素濃度を維持する。 ・UCに蓋をする場合、原 子炉内を換気することで 水素 濃度を維持する。必要に 応じて、水素監視評価等 で、UC内の水素濃度が爆 発下限の4vol%未満で あることを確認する。	・燃料デブリの微細化により、水の放射線分解への影響が 大きいα線の寄与が高まり、現状想定する0.1mm以上の 粒径に比べて水素発生量が増える可能性がある。 ・現状のUC構造案は蓋なし(上部が開放状態)であるため 問題はないが、蓋あり(密閉状態)に変更した場合は、UC 内の水素濃度4vol%未満達成が困難になる可能性がある。 ・スラリー・スラッジ状の燃料デブリは粘性があるため、内 部に水素たまりが発生し、同方向的に水素が放出されるこ とで、UC内の気相部の水素濃度が一気に上昇する可能性 がある。	・燃料デブリの微細化により、水の放射線分解への影響が 大きいα線の寄与が高まり、現状想定する0.1mm以上の 粒径に比べて水素発生量が増える可能性がある。 ・現状のUC構造案は蓋なし(上部が開放状態)であるため 問題はないが、蓋あり(密閉状態)に変更した場合は、UC 内の水素濃度4vol%未満達成が困難になる可能性がある。 ・スラリー・スラッジ状の燃料デブリは粘性があるため、内 部に水素たまりが発生し、同方向的に水素が放出されるこ とで、UC内の気相部の水素濃度が一気に上昇する可能性 がある。	・燃料デブリの微細化により、水の放射線分解への影響が 大きいα線の寄与が高まり、現状想定する0.1mm以上の 粒径に比べて水素発生量が増える可能性がある。 ・現状のUC構造案は蓋なし(上部が開放状態)であるため 問題はないが、蓋あり(密閉状態)に変更した場合は、UC 内の水素濃度4vol%未満達成が困難になる可能性がある。 ・スラリー・スラッジ状の燃料デブリは粘性があるため、内 部に水素たまりが発生し、同方向的に水素が放出されるこ とで、UC内の気相部の水素濃度が一気に上昇する可能性 がある。	-	-
				⑦火災	・火災発生を防止すること。	・原子炉内を不活性ガス 雰囲気とすることで、火災 発生を防止する。 ・燃料デブリの含水率が高 いため、粉塵火災の発生 は抑制されると考える。	・原子炉内を不活性ガス 雰囲気とすることで、火災 発生を防止する。 ・燃料デブリの含水率が高 いため、粉塵火災の発生 は抑制されると考える。	UC	収納缶	・原子炉内を不活性ガス 雰囲気とすることで、火災 発生を防止する。	・スラリー・スラッジ状の燃料デブリは水分を含有している ので、粉塵火災は抑制されるため、課題なし。	・スラリー・スラッジ状の燃料デブリは水分を含有している ので、粉塵火災は抑制されるため、課題なし。	-	-	
				⑧計量	・核燃料物質の計量管理/防護措置上の措置を講じる こと。	・燃料デブリを回収したUC の取扱い時は計量管理は 行わない。 (収納缶への装着後から 計量管理を実施)	・燃料デブリが極力こぼれ 落ちないようにUCにする。	UC	収納缶	・燃料デブリが極力こぼれ 落ちないようにUCにする。	UCでは計量管理を行わないので課題なし。	UCでは計量管理を行わないので課題なし。	<計量管理方法及び核燃料物質計量装置の課題> ・収納缶に収納するスラリー・スラッジ状燃料デブリに含まれる核燃料物質 の計量が、燃料デブリに含まれるコンクリートなどの他物質や水分などによ り正しくできない可能性がある。 (ただし、核物質計量方法については他PJにて検討されており、課題となら ない可能性あり)	-	-
				⑨長期健全性	・経年変化を考慮して①～⑧の基本 要求が維持できること。	・取扱いの環境において 構造部材の腐食等により 材料健全性に問題が生じ ない。	・想定されるUCの使用環 境に対し、構造健全性を 維持できる材料選定を行 う。	UC	収納缶	・環境条件を考慮した材料 選定(SUS16Lなど)を行 い、解析、試験等により健 全性を評価する。	・取出し期間は短期間であり、腐食リスクは顕在化しない と考えられる。	・取出し期間は短期間であり、腐食リスクは顕在化しない と考えられる。	<換熱(ホットセル)及び閉じ込め性能の課題> ・取扱いの環境において構造部材の腐食等により材料健全性に問題が生じ る可能性がある。 (ただし、原子炉内での粉状燃料デブリの取扱いは他PJにて検討されており、 課題とならない可能性あり)	-	-
				⑩取扱い操作上の必要 事項他	・燃料デブリ取出し、収納する上で必要な機能を備 えていること。										

燃料デブリの取り扱いのプロセス毎 (32プロセス)に対して、課題(案)から選定した課題を黄色マーカーで表示

6. 実施内容

6.2 粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの保管に関する課題の抽出

③実施事項、成果

b. 評価／課題抽出(国内外の調査結果を踏まえた評価含む)(2/6)

<抽出した粉状、スラリー・スラリー状燃料デブリの保管に関する主な課題>

【対象機器: ユニット缶(UC)】

項目	選定された課題	対策案	技術課題と解決フェーズと解決時期 ^{注1}
構造	・現状のUC構造案は水切りのためにメッシュ構造となっているため、粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリ(以下、「粉状燃料デブリ」)の回収は困難である。	・粉状燃料デブリを充填するためのメッシュなし構造の内容器を検討する。	・粉状燃料デブリ用の内容器(UCの代替容器)の検討 ⇒ 関連補助事業(乾燥PJ)および2022年度開始補助事業で検討* ※粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの排出を検討している関連する補助事業でもUCや収納缶などでの取り扱い時の安全要件の検討が必要である。
	・現状のUC構造案は蓋なし(上部が開放状態)であるため、取り扱い時に粉状燃料デブリがこぼれる可能性がある。	・UCを蓋付き構造にする等のこぼれ防止対策を実施する。	・粉状燃料デブリの乾燥システムの検討 ⇒ 関連補助事業(乾燥PJ)で検討
	・粉状燃料デブリは粒径が微少であるため、UCのメッシュ部から水を自重落下させる方法での水切りは困難である。	・自重落下による水切りは困難であるため、乾燥手法もしくは水切り方法を開発する。	
水素	・燃料デブリの微細化により、水の放射線分解への影響が大きい α 線の寄与率が高まり、現状想定する0.1mm以上の粒径に比べて水素発生量が増える可能性がある。	・粉状燃料デブリの水素発生量が粒状・塊状燃料デブリの水素発生量よりも増えるか確認する。 ・粉状燃料デブリから発生する水素の放出特性を検討する。 ・水素濃度を測定し、実測結果により以降の取り扱い方法(収納量を減らす等)を決定する運用とする。	・粉状燃料デブリの水素発生量および水素の放出特性の検討 ⇒ 2022年度開始補助事業および実機エンジニアリングで検討 ・粉状燃料デブリの水素濃度測定方法の検討 ⇒ 実機エンジニアリングで検討
	・粉状燃料デブリは粘性があるため、内部に水素だまりが発生し、間欠的に水素が放出されることで、UC内の気相部の水素濃度が一気に上昇する可能性がある。	・粉状燃料デブリから発生する水素の放出特性を検討する。	・粉状燃料デブリから発生する水素の放出特性の検討 ⇒ 2022年度開始補助事業および実機エンジニアリングで検討
	・UCを蓋あり(密閉状態)に変更した場合は、UC内の水素濃度4vol%未満達成が困難になる可能性がある。	・UCを蓋付き構造にする場合、ベント可能な蓋にする等を検討する。	・粉状燃料デブリ用の内容器(UCの代替容器)の検討 ⇒ 関連補助事業(乾燥PJ)および2022年度開始補助事業で検討

注1: ・関連補助事業(乾燥PJ) : 燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発(燃料デブリの乾燥技術)
 ・2022年度開始補助事業 : 燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発(粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの保管までに必要な技術の開発)
 ・実機エンジニアリング : 粉状燃料デブリの性状把握後^{*}に検討 (※補助事業では、粉状燃料デブリの性状は仮定条件で検討を実施)

6. 実施内容

6.2 粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの保管に関する課題の抽出

③実施事項、成果

b. 評価／課題抽出(国内外の調査結果を踏まえた評価含む) (3/6)

<抽出した粉状、スラリー・スラリー状燃料デブリの保管に関する主な課題>

【対象機器: 収納缶】(1/2)

項目	選定された課題	対策案	技術課題と解決フェーズと解決時期 ^{注1}
構造	・粉状燃料デブリを乾燥した場合、乾燥によって微細粉末化した粉状燃料デブリが舞い上がり、微細粉末がセル内に飛散して汚染が拡大することが考えられる。また、微細粉末が収納缶のベントフィルタを通過するため、収納缶フィルタの目詰まりのリスクが高まることが考えられる。	・乾燥後、微細粉末となった粉状燃料デブリを固化させる方法を開発する。ただし、最終処分を考慮し、可逆性を持つ固化方法とする必要がある。	・粉状燃料デブリの固化方法の検討 ⇒補助事業(未定)もしくは実機エンジニアリングで検討
閉じ込め(汚染)	・粉状燃料デブリを乾燥した場合、乾燥によって微細粉末化した粉状燃料デブリが舞い上がり、微細粉末が収納缶のベントフィルタを通過し、乾燥装置や収納缶の取り扱い装置などに高線量の汚染が発生することが考えられる。	・乾燥時の微細化した粉状燃料デブリの挙動(舞い上がりなど)を評価し、フィルタの目詰まりや通過量を評価する。	・粉状燃料デブリの収納缶形態での乾燥時の飛散特性の検討 ⇒2022年度開始補助事業で検討
		・フィルタを通過する粉状燃料デブリの量を抑制するような乾燥方法の検討、もしくは乾燥処理をしない取り扱い方法(安定保管のための収納方法など)収納を検討する。	・粉状燃料デブリの乾燥システムの検討 ⇒関連補助事業(乾燥PJ)および2022年度開始補助事業で検討 ・粉状燃料デブリの取り扱い方法(収納方法)の検討 ⇒2022年度開始補助事業で検討
水素	・燃料デブリの微細化により、水の放射線分解への影響が大きいα線の寄与率が高まり、現状想定する0.1mm以上の粒径に比べて水素発生量が増える可能性がある。 ・粉状燃料デブリは粘性があるため、内部に水素だまりが発生し、間欠的に水素が放出されることで、収納缶内の気相部の水素濃度が一気に上昇する可能性がある。	・UCの対策案における「水素」と同様の対応を収納缶で行う。(No.37を参照)	・UCの技術課題と解決フェーズと解決時期における「水素」と同様の対応を収納缶で行う。(No.37を参照)

注1: ・関連補助事業(乾燥PJ) : 燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発(燃料デブリの乾燥技術)
 ・2022年度開始補助事業 : 燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発(粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの保管までに必要な技術の開発)
 ・補助事業(未定) : 現状計画されていない、今後実施する可能性がある補助事業
 ・実機エンジニアリング : 粉状燃料デブリの性状把握[※]に検討 (※補助事業では、粉状燃料デブリの性状は仮定条件で検討を実施)

6. 実施内容

6.2 粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの保管に関する課題の抽出

③実施事項、成果

b. 評価／課題抽出(国内外の調査結果を踏まえた評価含む)(4/6)

<抽出した粉状、スラリー・スラリー状燃料デブリの保管に関する主な課題>

【対象機器: 収納缶】(2/2)

項目	選定された課題	対策案	技術課題と解決フェーズと解決時期 ^{注1}
火災	・粉状燃料デブリを乾燥する場合、乾燥することで燃料デブリが舞い上がりやすくなるため、粉じん火災のリスクが高まる可能性がある。	・セル内を不活性ガス雰囲気とする。	・粉状燃料デブリの取り扱いセル内雰囲気 の検討 ⇒ 実機エンジニアリング で検討
		・乾燥後、微細粉末となった粉状燃料デブリを固化させる方法を開発する。ただし、最終処分を考慮し、可逆性を持つ固化方法とする必要がある。	・粉状燃料デブリの固化方法の検討 ⇒ 補助事業(未定) もしくは 実機エンジニアリング で検討
計量	・収納缶に収納する粉状燃料デブリの性状によっては、収納缶外に核燃料物質が放出され、適切な計量管理が実施できない可能性がある。	・収納缶外へ放出する核燃料物質を踏まえた計量管理手法を検討する。	・収納缶での計量管理手法の検討 ⇒ 実機エンジニアリング で検討
長期健全性	・粉状燃料デブリを収納した収納缶(材料SUS316L)による移送など、短期間の取り扱いは腐食リスクは低いと考えられるが、長期保管時は、温度や残留水量、水分に含まれる成分などの環境条件により、収納缶の腐食リスクが高まる。	・粉状燃料デブリの長期保管時に想定される保管方法および環境を考慮し、収納缶の腐食発生有無を評価する。腐食が発生するリスクがある場合には、腐食管理等の対策を検討する。	・粉状燃料デブリの長期保管時に想定される環境および腐食対策の検討 ⇒ 補助事業(未定) もしくは 実機エンジニアリング で検討

注1: ・関連補助事業(乾燥PJ) : 燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発(燃料デブリの乾燥技術)
 ・2022年度開始補助事業 : 燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発(粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの保管までに必要な技術の開発)
 ・補助事業(未定) : 現状計画されていない、今後実施する可能性がある補助事業
 ・実機エンジニアリング : 粉状燃料デブリの性状把握後^{*}に検討 (※補助事業では、粉状燃料デブリの性状は仮定条件で検討を実施)

6. 実施内容

6.2 粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの保管に関する課題の抽出

③実施事項、成果

b. 評価／課題抽出(国内外の調査結果を踏まえた評価含む) (5/6)

<抽出した粉状、スラリー・スラリー状燃料デブリの保管に関する主な課題>

【対象機器:その他機器】

項目	選定された課題	対策案	技術課題と解決フェーズと解決時期 ^{注1}
構造	<ul style="list-style-type: none"> 乾燥ガスの流れにより、UC缶内の微粉末が乾燥装置(排ガス処理系統含む)内へ多量に飛散することが考えられる。 	<ul style="list-style-type: none"> 微細粉末が飛散しない遅い流速で、乾燥を実施する。 微細粉末の多量な飛散を想定して、複数系列のフィルタ構成、遠隔・短時間でフィルタが交換できる装置を開発する。 	<ul style="list-style-type: none"> 粉状燃料デブリの乾燥システムの検討 ⇒関連補助事業(乾燥PJ)もしくは実機エンジニアリングで検討 粉状燃料デブリの収納缶形態での乾燥時の飛散特性の検討 ⇒2022年度開始補助事業で検討 各機器のシステム検討および各機器内での粉状燃料デブリの飛散特性の検討 ⇒実機エンジニアリングで検討
	<ul style="list-style-type: none"> 粉状燃料デブリを乾燥した場合、収納缶の仕立て時に用いる装置(不活性ガス注入装置、水素濃度測定装置など)および取り扱い機器(移送容器、保管容器など)内に収納缶内の微細粉末が多量に飛散することが考えられる。 	<ul style="list-style-type: none"> 乾燥後、微細粉末となった粉状燃料デブリを固化させる方法を開発する。ただし、最終処分を考慮し、可逆性を持つ固化方法とする必要がある。 	<ul style="list-style-type: none"> 粉状燃料デブリの固化方法の検討 ⇒補助事業(未定)もしくは実機エンジニアリングで検討
閉じ込め(汚染)	<ul style="list-style-type: none"> 粉状燃料デブリを乾燥した場合、収納缶の取り扱いエリア(増設建屋内のホットセルなど)および取り扱い機器(移送容器、保管容器など)内に収納缶内の微細粉末が多量に飛散し、高線量の汚染が発生することが考えられる。 	<ul style="list-style-type: none"> 乾燥時の微細化した粉状燃料デブリの挙動(舞い上がりなど)を評価する。また、それら評価結果を踏まえて各エリア、各機器の閉じ込め性能および汚染拡大防止対策、メンテナンス方法などを検討する。 	<ul style="list-style-type: none"> 各エリア、各機器内での粉状燃料デブリの飛散特性の検討および閉じ込め性能、汚染拡大防止対策、メンテナンス方法の検討 ⇒実機エンジニアリングで検討
水素	<ul style="list-style-type: none"> 燃料デブリの微細化により、水の放射線分解への影響が大きいα線の寄与率が高まり、現状想定する0.1mm以上の粒径に比べて水素発生量が増える可能性がある。 粉状燃料デブリは粘性があるため、内部に水素だまりが発生し、間欠的に水素が放出されることで、各機器内の気相部の水素濃度が一気に上昇する可能性がある。 	<ul style="list-style-type: none"> UCの対応策における「水素」と同様の対応を各機器で行う。(No.37を参照) 	<ul style="list-style-type: none"> UCの技術課題と解決フェーズと解決時期における「水素」と同様の対応を各機器で行う。(No.37を参照)

注1: ・関連補助事業(乾燥PJ) : 燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発(燃料デブリの乾燥技術)
 ・2022年度開始補助事業 : 燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発(粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの保管までに必要な技術の開発)
 ・補助事業(未定) : 現状計画されていない、今後実施する可能性がある補助事業
 ・実機エンジニアリング : 粉状燃料デブリの性状把握後※に検討 (※補助事業では、粉状燃料デブリの性状は仮定条件で検討を実施)

6. 実施内容

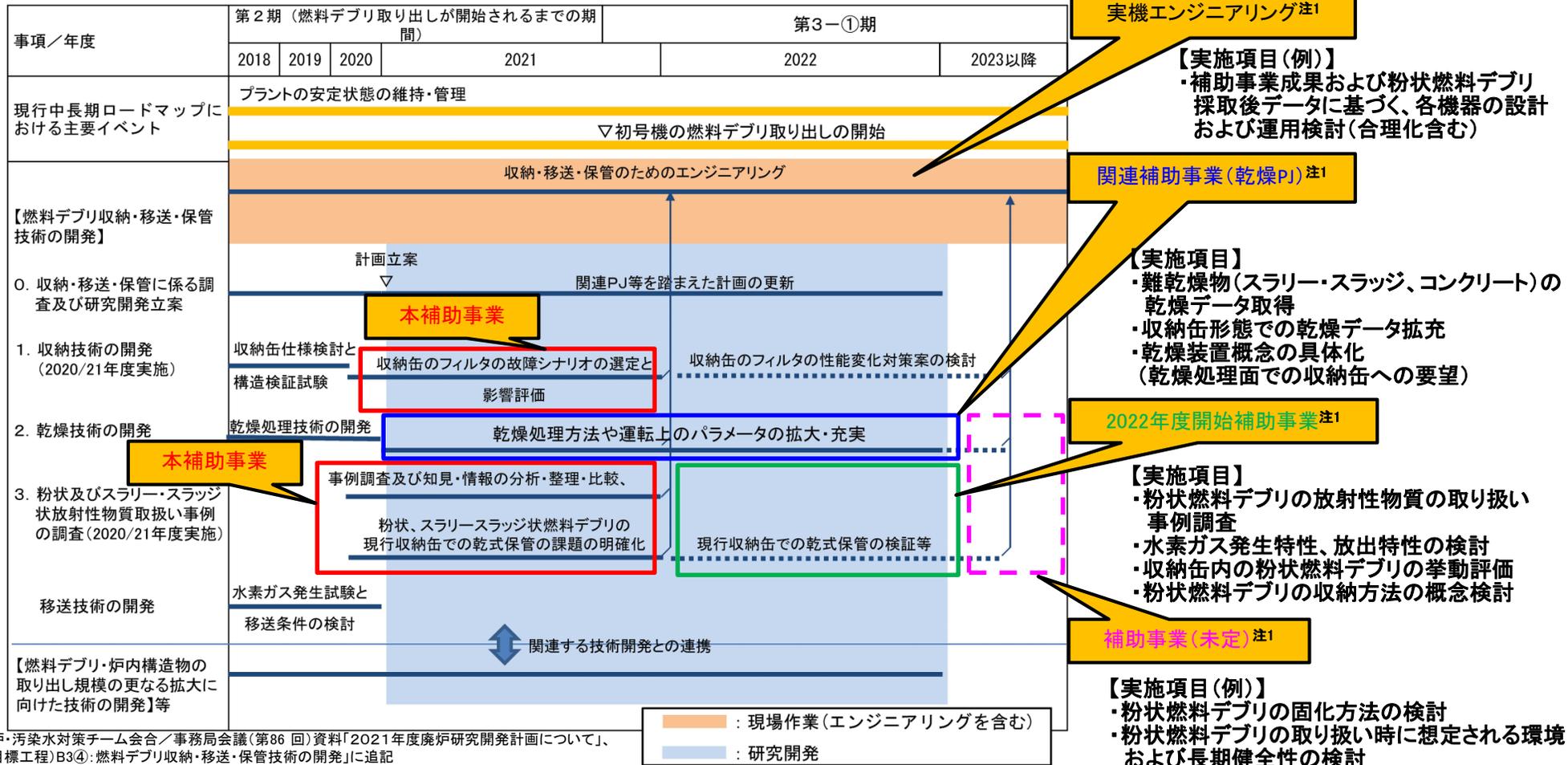
6.2 粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの保管に関する課題の抽出

③実施事項、成果

b. 評価／課題抽出(国内外の調査結果を踏まえた評価含む)(6/6)

・選定した課題に対する解決フェーズおよび解決時期を以下に示す。

(目標工程)B3④: 燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発



廃炉・汚染水対策チーム会合/事務局会議(第86回)資料「2021年度廃炉研究開発計画について」、
〔目標工程)B3④: 燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発〕に追記

- 注1: **関連補助事業(乾燥PJ)** : 燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発(燃料デブリの乾燥技術)
2022年度開始補助事業 : 燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発(粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの保管までに必要な技術の開発)
補助事業(未定) : 現状計画されていない、今後実施する可能性がある補助事業
実機エンジニアリング : 粉状燃料デブリの性状把握後※に検討 (※補助事業では、粉状燃料デブリの性状は仮定条件で検討を実施)

6. 実施内容

6.2 粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの保管に関する課題の抽出

④成果の反映先への寄与

粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの保管に関する課題の抽出結果をまとめ、必要な安全機能の確保および長期間安定した保管の実施に向けて、解決すべき技術課題の明確化に寄与する。例えば、スラッジの乾燥や保管等における参考情報など。

⑤現場への適用性の観点における分析

燃料デブリの取り出し時に回収が想定される粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの保管に対する技術課題の解決が、現場へ適用可能な技術につながることから有益である。

⑥目標に照らした達成度

目標達成を判断する以下の指標が満足できていることから、所期計画通り、TRLレベル1を達成できたと判断する。

- 燃料デブリを塊状、粒状燃料デブリと同様の収納缶を用いて乾式保管を行う場合について、安全、確実に合理的な保管状態に持ち込むための課題を抽出していること。

6. 実施内容

6.2 粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの保管に関する課題の抽出

⑦今後の課題

燃料デブリを塊状、粒状燃料デブリと同様の収納缶を用いて乾式保管を行う場合について、保管までの各プロセスにおける課題と対策案を検討し、解決すべき技術課題として以下を明確化した。

(No.37～40参照)

なお、2022年度以降に、上記の技術課題の解決に向けた関連補助事業および本補助事業の継続事業が計画されている。

【技術課題】

- ✓ 粉状燃料デブリ用の内容器(UC の代替容器)の検討
- ✓ 粉状燃料デブリから発生する水素の放出特性および水素発生量の検討
- ✓ 粉状燃料デブリの水素濃度測定方法の検討
- ✓ 粉状燃料デブリの乾燥システムの検討
- ✓ 粉状燃料デブリの収納缶形態での乾燥時の飛散特性の検討
- ✓ 各機器のシステム検討
- ✓ 各エリア、各機器内での粉状燃料デブリの飛散特性の検討および閉じ込め性能、汚染拡大防止対策、メンテナンス方法の検討
- ✓ 粉状燃料デブリの取り扱い方法(収納方法)の検討
- ✓ 粉状燃料デブリの取り扱いセル内雰囲気の検討
- ✓ 粉状燃料デブリの長期保管時に想定される環境および腐食対策の検討
- ✓ 収納缶での計量管理手法の検討
- ✓ 粉状燃料デブリの固化方法の検討

6. 実施内容

6.2 粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの保管に関する課題の抽出

⑧まとめ

- ・粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリを安全かつ長期間安定保管に持ち込む際の課題を網羅的に抽出するため、粒状・塊状燃料デブリの収納缶および一連の取り扱いプロセスに対して評価項目および整理方法を検討し、課題抽出フォーマットを策定した。
- ・関連するPJとの合同会議により情報交換を行い、燃料デブリ取り出し時に排出が想定される粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリに関する情報の整理を行った。
- ・上記の課題抽出フォーマットおよび情報に基づき、粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの保管に関する技術課題、ならびにその解決フェーズ、解決時期を明確化した。
- ・2022年度以降に、上記の技術課題の解決に向けた関連補助事業および本補助事業の継続事業が計画されている。

6. 実施内容

6.3 収納缶のフィルタの性能評価

①目的、目標

塊状・粒状燃料デブリに付随して収納缶に回収された粉状燃料デブリは、保管施設内での静置までの種々の取り扱いや処理(乾燥処理、検査・計測等)の間、収納缶内で舞い上がり等が想定されるものの収納缶蓋部に設置される予定のフィルタによって捕集されるよう設計が進んでいる。捕集される粉状燃料デブリの量によっては収納缶外に排出される水素ガスの流量低下や最悪の場合には閉塞して収納缶内の水素ガスの濃度が基準値を超えてしまう可能性がある。

関連する研究開発「燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発」において検討されてきたフィルタに対する要求仕様について確認するとともに、改めて広く要求仕様を検討し、検討されてきたフィルタの選定の考え方や実施されてきたフィルタの評価結果との整合性を確認する。

さらに、フィルタの性能に影響を与える故障シナリオ(例えば腐食など)を選定して、そのシナリオを評価するための試験条件を検討する。

②既往技術との対比

ベントフィルタに関しては、TMI-2における事例調査を実施し、知見の整理をしたが、フィルタの長期使用に伴う劣化がフィルタ性能に与える影響に関しては情報が不足している。

6. 実施内容

6.3 収納缶のフィルタの性能評価

③実施事項、成果

検討フローを設定し、各実施項目の検討を実施

a. 環境/条件の抽出

フィルタに求められる要件

- ・フィルタ仕様を選定するための一般的な考え方を整理する

フィルタ劣化要因の洗い出し

- ・処分施設の設計に用いられている安全評価シナリオ作成手法(FEP^{注1})を参考に発生する可能性のあるフィルタ劣化要因を洗い出す

入力条件の整理

- ・過去PJ（収納缶、燃料デブリ性状）から入力条件として環境、燃料デブリ性状、収納缶仕様を参照し整理する

劣化要因を取捨選択

- ・フィルタ劣化要因のうち、入力条件に合致する劣化要因を取捨選択し、起りうる劣化事象を抽出する

b. フィルタの寿命評価方法の検討

フィルタの分類整理

- ・一般的なフィルタの性状整理
- ・各フィルタの寿命評価に必要な要件の整理

収納缶環境を踏まえた劣化事象の選定

- ・フィルタの種類ごとにa.で抽出した劣化事象が、取り出し～保管までの入力条件の下で発生する可能性を検討し可能性の高い劣化事象を選定する

c. 試験方法及び条件の検討



理論式によるフィルタ劣化評価

- ・理論式により取り出し～保管までの劣化の影響を受けたフィルタ性能を評価する

※ 収納缶環境での劣化事象を推定する方法が確立されている

フィルタ劣化模擬方法の検討

- ・フィルタ劣化模擬方法の検討
- ・劣化度の判定方法の検討

フィルタ性能評価方法の検討

- ・一般的なフィルタ性能評価の方法（JIS等）を調査する
- ・一般的な方法の適用可否を検討（否⇒修正案を考える）
- ・試験に必要なパラメータ（入力）を整理する

注1：シナリオ特性（Feature）、イベント（Event）、プロセス（Process）をリストとして取り纏め個別事象を整理する手法

6. 実施内容

6.3 収納缶のフィルタの性能評価

③実施事項、成果

a.環境と条件の抽出(1/11)

(i)フィルタに求められる要件

・ 燃料デブリ微粒子を閉じ込める機能

→捕集対象となる燃料デブリ微粒子の粒径に対して、設定DFを確保できる捕集率を有するフィルタを選定した。

・ 水の放射線分解で発生する水素を逃がす機能

→収納缶内の水素濃度を爆発下限界(常温・常圧の場合、4vol%以下)となるように、発生した水素を拡散により逃がす水素透過性能を有するフィルタを選定した。

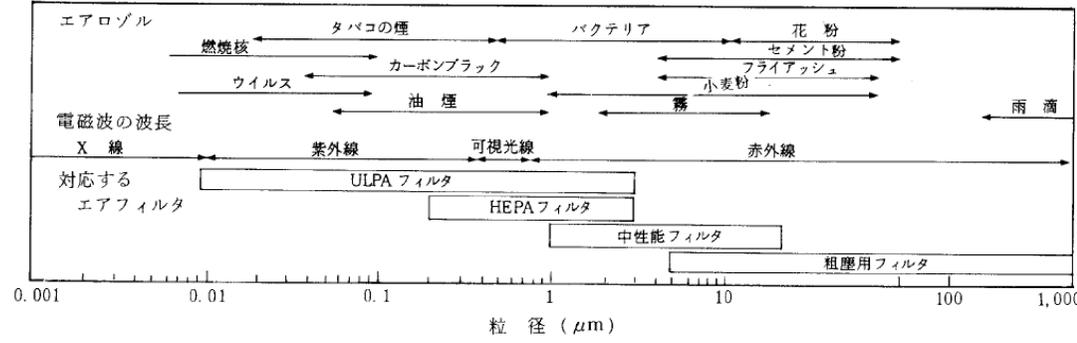


図1 フィルタユニットの性能と捕集粒径^{注1}

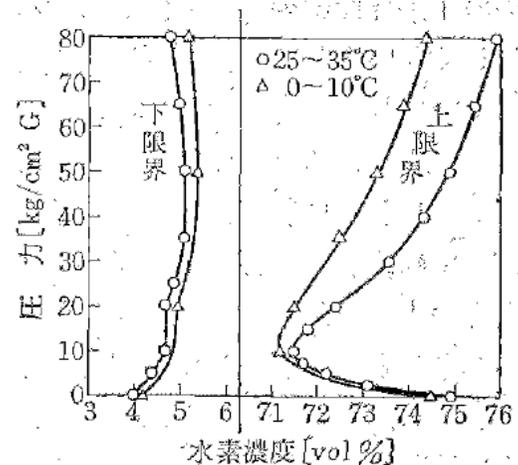


図2 水素-空気2成分系の爆発限界^{注2}

注1: 上島, “エアフィルタユニットの性能” エアゾール研究 Vol.4, No.4(1989)
注2: 柳生ら, “水素の爆発限界に及ぼす圧力の影響” 安全工学 Vol.8, No.5(1969)

6. 実施内容

6.3 収納缶のフィルタの性能評価

③実施事項、成果

a.環境と条件の抽出(2/11)

(ii) フィルタ劣化要因の洗出し

- ・安全評価シナリオ作成手法(FEP)を参考に、5つの環境分類として整理（放射線環境、熱的環境、応力環境、化学環境、外部環境）
- ・それぞれの環境分類において想定され得るフィルタ劣化の原因と事象を整理

環境分類	原因	事象	事象詳細	劣化モード
放射線環境	放射線分解	水素発生	燃料デブリの放射線分解により水素が発生し微粒子が舞い上がることで、フィルタが閉塞する。	閉塞
			燃料デブリの放射線分解により水素が発生し微粒子が舞い上がることで、フィルタが閉塞し、内圧が上昇してフィルタが破損する。	破損
	脆化	廃棄物に伴う水の放射線分解で生成する水素に長時間暴露することでフィルタが水素脆化し破損する。	破損	
	放射線	放射線劣化	燃料デブリの放射線によりフィルタ材料が劣化し破損する。	破損
熱的環境	崩壊熱	熱変質	崩壊熱により燃料デブリの温度が上昇し、熱伝導でフィルタの温度が上昇することでフィルタが熱変質して破損する。	破損
		熱変形(容器)	崩壊熱により燃料デブリの温度が上昇し、熱伝導で容器の温度が上昇することで容器が熱変形して、固定されているフィルタに応力がかかることで破損する。	破損
		熱対流	熱対流で燃料デブリの微粒子が舞いフィルタが閉塞する。	閉塞
応力環境	運搬時や地震による振動	衝撃	運搬時、地震発生時における衝突・落下などの衝撃により容器やフィルタが変形／破損しフィルタの機能を失う。	破損
		振動による発塵	運搬・地震などの振動により燃料デブリ微粒子が舞いフィルタが閉塞する。	閉塞
化学環境	腐食	減肉	腐食性物質の付着によりフィルタが腐食し、減肉する。	破損
		酸化膜発生	フィルタ繊維表面に腐食により、酸化膜が形成され線粒径が増加(孔径が減少)することで閉塞する。	閉塞
		塩析出	腐食性物質を含む蒸気に長時間暴露することで、フィルタに腐食性物質が蓄積することでフィルタが閉塞する。	閉塞
		電食	フィルタと容器または金属燃料デブリの接触面に電位差が生じ、フィルタが電気腐食することでフィルタ強度が低下し破損する。	破損
外部環境	収納缶内と外部環境の差	微生物膜	フィルタ内外でカビ等の微生物が繁殖し、バイオフィルタが形成されることでフィルタが閉塞し水素が透過しない。	閉塞
		水膜	フィルタ内外の温度差によりフィルタ表面に水膜が形成されることでフィルタが閉塞し水素が透過しない。	閉塞
		エアロゾル堆積	海塩粒子等のエアロゾルが飛散によりフィルタ外面に堆積し閉塞する。	閉塞
		微粒子の飛散	フィルタ内外の圧力差により流れが生じ微粒子が舞い、フィルタを閉塞する。	閉塞
	環境中のUV	UV劣化	環境のUVによりフィルタ材料が劣化し破損する。	破損

合計17の劣化事象を抽出

6. 実施内容

6.3 収納缶のフィルタの性能評価

③実施事項、成果

a.環境と条件の抽出(3/11)

(iii)インプット条件の整理(1/3)

過去PJの情報から、インプット条件(燃料デブリ性状、容器仕様、収納缶内/外環境の条件)を抽出した。

表 燃料デブリ性状の抽出結果

項目	性状	備考2
成分	溶融燃料デブリ 主成分1	UO2
	溶融燃料デブリ 主成分2	ZrO2
	MCCI 主成分1	SiO2
	MCCI 主成分2	Fe2O3
	MCCI 主成分3	UO2
	金属燃料デブリ 主成分1	Fe
	金属燃料デブリ 主成分2	Ni
	金属燃料デブリ 主成分3	Ru
物性	溶融再固化物 粉・小石状	6~11 g/cm3
	溶融再固化物 塊状	6~11 g/cm3
	溶融再固化物 岩盤状	6~11 g/cm3
	MCCI生成物 粉状・小石状	6~11 g/cm3
	MCCI生成物 塊状	2~11 g/cm3
	MCCI生成物 岩盤状	2~11 g/cm3
	粒径(粉状)	0.1mm未満
	粒径(粒状)	0.1mm~10mm
	粒径(塊状)	10mm~100mm
伴随液性	塩化物イオン	5.6 × 10 ⁻⁴ mol/L
	ヨウ化物イオン	1.0 × 10 ⁻⁴ mol/L
pH		9~10
含水率(乾燥前)		50vol.%
含水率(乾燥後)		0.1wt.%
水素発生	水素発生速度(乾燥前)	1.6 × 10 ⁻¹⁶ L/h/Bq
	水素発生速度(乾燥後)	2.3 × 10 ⁻¹⁶ L/h/Bq
その他	総インベントリ	2.18 × 10 ¹⁵ Bq/t

No.21

6. 本事業の実施内容

6.2 実施内容

1) 燃料デブリの拡散防止に係る技術開発

①燃料デブリの回収システムの開発

a.燃料デブリ回収方法(吸引、把持など)と手段

○燃料デブリの粒径による分類と回収方法

分類	粒径	回収方法	備考
粉状	0.1mm未満	遠程系システムによる吸引。	※1
粒状	0.1mm~10mm	ポンプによる吸引。	※2
塊状	10mm~100mm (加工せずにユニット缶に収納可能なサイズ)	バケツ状のツールで取り、または、トンダツのツールで掘む。	※3
	100mm以上 (ユニット缶に収納するには加工が必要なサイズ)	ユニット缶に収納可能なサイズに加工し、加工後の粒径に応じて加工後の処理の方法で回収。	※4

No.46

6. 実施内容

6.3 移送技術の開発

(1)水素発生予測法の検討

③実施事項、成果(予実)

b.水素発生試験の実施(1/3)

(i)水素発生試験(使用済燃料試験)の試験条件

ペレット同士との接触やペレット片・試験水層の気泡の影響を排除するために、攪拌により粒子を浮遊させ、粒径依存性を確認するため粒径をパラメータとした試験を実施する。また、水への再結合の影響を確認するための、再結合を抑制するハロゲンを用いる。また、攪拌の有無の影響を確認するための、攪拌無しの試験も実施する。

図 使用済燃料試験の試験状況

No.50

6. 実施内容

6.3 移送技術の開発

(1)水素発生予測法の検討

③実施事項、成果(予実)

d.収納缶水素発生量の推定

・リニアモデルを用いて燃料デブリを収納した収納缶内の水素発生量を推定。

・燃料デブリはすべてUO₂、IF-1装荷燃料(燃焼度40GWd/t、冷却期間10年)で評価。

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

パターン	P1	P2	P3	P4	P5	
水素発生量(体積比)	水切り量(粒子:水=1.1 ²⁵⁾	水切り量(粒子:水=1.1 ²⁵⁾	水切り量(粒子:水=1.1 ²⁵⁾	乾燥目標量(粒子:水=1.1 ²⁵⁾	乾燥目標量(粒子:水=1.1 ²⁵⁾	
粒径分布	微粒子	粒径分布(微粒子+0.1mm混合) ^{26,28}	粒径分布(微粒子+0.1mm混合) ^{26,28}	微粒子	粒径分布(微粒子+0.1mm混合) ^{26,28}	
評価結果	α線:0.250 β線:0.160 γ線:0.155	α線:0.133 β線:0.142 γ線:0.194	α線:0.021 β線:0.064 γ線:0.058	α線:0.004 β線:0.002 γ線:0.002	α線:0.004 β線:0.002 γ線:0.002	
熱生成(E)	燃焼計算結果に基づく評価値(α線:0.113W/kgUO ₂ 、β線:0.383W/kgUO ₂ 、γ線:0.221W/kgUO ₂) ²⁷					
ピーキングファクタ(P)	燃焼計算結果に基づく評価値(α線:2.35、β線:1.56、γ線:1.56) ²⁸					
燃料デブリ質量(M)	設計値(内径20mm収納缶:72kg)					
燃料含有割合(G)	最大値(1)					
水素発生量(G)	文獻値(α線:1.9個/100V、β線およびγ線:0.45個/100V) ²⁹					
評価結果	水素発生量(N ₀)	1.6 × 10 ⁻¹⁶ L/h/Bq	1.1 × 10 ⁻¹⁷ L/h/Bq	3.4 × 10 ⁻¹⁷ L/h/Bq	2.3 × 10 ⁻¹⁶ L/h/Bq	2.2 × 10 ⁻¹⁶ L/h/Bq

平成30年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業費補助金(燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発)」2021年6月 最終報告
 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・炉内構造物の取り出し基盤技術の高度化)」令和元年7月 最終報告
 JAEA/電中研「統計的インベントリ推定方法の高度化に関する研究」から抽出

6. 実施内容

6.3 収納缶のフィルタの性能評価

③実施事項、成果

a.環境と条件の抽出(4/11)

(iii)インプット条件の整理(2/3)

表1 収納缶仕様の抽出結果

項目	仕様	備考
主材質	ステンレス鋼 (SUS316L)	収納缶PJ 2021年6月 最終報告資料No.112
シール材	エラストマー系樹脂(EPDM)	収納缶PJ 2021年6月 最終報告資料No.115
除熱方式	乾式	収納缶PJ 2021年6月 最終報告資料No.106
内径	220mm	収納缶PJ 2021年6月 最終報告資料No.114
高さ	800mm	収納缶PJ 2021年6月 最終報告資料No.114
ユニット缶外径	210mm	収納缶PJ 2021年6月 最終報告資料No.114
ユニット缶高さ	400mm	収納缶PJ 2021年6月 最終報告資料No.114
容積	0.03m ³	上記寸法からの概算値
充填率	30% (燃料デブリ体積: 0.01m ³)	収納缶PJ 2021年6月 最終報告資料No.26
閉じ込め機能	フィルタ取付け	収納缶PJ 2021年6月 最終報告資料No.108
気体処理機能	再結合触媒	収納缶PJ 2021年6月 最終報告資料No.112

ベントフィルタ (暫定値)

項目	仕様	備考
材質	SUS316	収納缶PJ 2021年6月 最終報告資料No.108
メッシュ径	0.3 μm	収納缶PJ 2021年6月 最終報告資料No.108

再結合触媒 (暫定値)

項目	仕様	備考
材質	白金触媒 (TKK H1P)	収納缶PJ 2021年6月 最終報告資料No.120
触媒層厚さ	20mm	収納缶PJ 2021年6月 最終報告資料No.112

表2 移送容器仕様の抽出結果

項目	仕様	備考
主材質	明記なし	—
シール材	明記なし	—
除熱方式	乾式	収納缶PJ 2021年6月 最終報告資料No.94
内径	1700mm	収納缶PJ 2021年6月 最終報告資料No.94
高さ	1200mm	収納缶PJ 2021年6月 最終報告資料No.94
容積	収納缶12本を封入可能	収納缶PJ 2021年6月 最終報告資料No.94
閉じ込め機能	密閉	収納缶PJ 2021年6月 最終報告資料No.52
気体処理機能	なし	収納缶PJ 2021年6月 最終報告資料No.52

表3 保管容器仕様の抽出結果

項目	仕様	備考
主材質	明記なし	—
シール材	明記なし	—
除熱方式	乾式	収納缶PJ 2021年6月 最終報告資料No.5
内径	明記なし	—
高さ	明記なし	—
容積	明記なし	—
閉じ込め機能	ベント管	収納缶PJ 2021年6月 最終報告資料No.5
気体処理機能	後段にガス処理装置あり	収納缶PJ 2021年6月 最終報告資料No.5

6. 実施内容

6.3 収納缶のフィルタの性能評価

③実施事項、成果

a.環境と条件の抽出(5/11)

(iii)インプット条件の整理(3/3)

表 収納缶内/外の環境条件の抽出結果

収納缶内

プロセス	封缶セル	乾燥処理	仕立てセル	受入れエリア	保管エリア	備考
温度	～300°C	～300°C	～300°C	～300°C	～300°C	収納缶PJ 平成29年3月 最終報告資料No.50
圧力	負圧	明記なし	常圧	負圧	明記なし	収納缶PJ 2021年6月 最終報告資料No.4～5
湿度(乾燥前)	100%	—	100%	100%	—	収納缶PJ 2021年6月 最終報告資料No.4～5
湿度(乾燥後)	十分低い値	十分低い値	十分低い値	十分低い値	十分低い値	収納缶PJ 2021年6月 最終報告資料No.4～5、98
雰囲気ガス	建屋雰囲気と同じ	—	不活性ガス注入	不活性ガス注入	不活性ガス注入	収納缶PJ 2021年6月 最終報告資料No.4～5、100～101
冷却方式	乾式自然冷却	—	乾式自然冷却	乾式自然冷却	乾式自然冷却	収納缶PJ 2021年6月 最終報告資料No.4～5
外環境	建屋	乾燥装置	建屋→移送容器	移送容器→建屋→保管容器	保管容器	収納缶PJ 2021年6月 最終報告資料No.4～5
閉じ込め機能	フィルタ	フィルタ	フィルタ+密閉	フィルタ	ベント管からガス処理装置を通して建屋外へ	収納缶PJ 2021年6月 最終報告資料No.4～5
想定期間	記載なし(数日と予想)	最大10日間	記載なし(数日と予想)	記載なし(数日と予想)	最大50年	収納缶PJ 平成30年6月 最終報告資料No.49

外環境

プロセス	封缶セル	乾燥処理	仕立てセル	受入れエリア	保管エリア	備考
温度	常温	200°C	常温	常温	常温	収納缶PJ 2021年6月 最終報告資料No.4～5
圧力	負圧	明記なし	常圧	負圧	負圧	収納缶PJ 2021年6月 最終報告資料No.4～5
湿度	適切に管理	—	適切に管理	適切に管理	適切に管理	収納缶PJ 2021年6月 最終報告資料No.4～5

平成26年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業費補助金(燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発)」平成29年3月 最終報告
 平成27年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業費補助金(燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発)」平成30年6月 最終報告
 平成30年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業費補助金(燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発)」2021年6月 最終報告
 から抽出

6. 実施内容

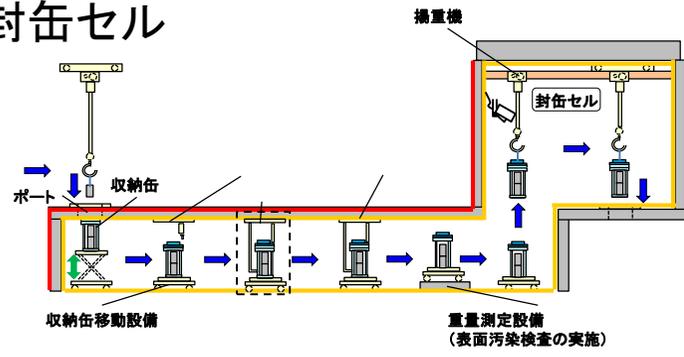
6.3 収納缶のフィルタの性能評価

③実施事項、成果

a.環境と条件の抽出(6/11)

(iv)劣化要因の取捨選択 (1/6)

・封缶セル



❌ 事象の進行速度が遅く、当該エリア滞在中に破損/閉塞に至らないため除外

❌ 燃料デブリ性状から塩濃度は十分低いため除外

✅ 当該エリアにおいて収納缶の内/外で圧力差は生じないため除外

❌ 当該エリアが屋内のため除外

17の劣化事象⇒10個除外により、検討すべき項目は7個

6. 実施内容

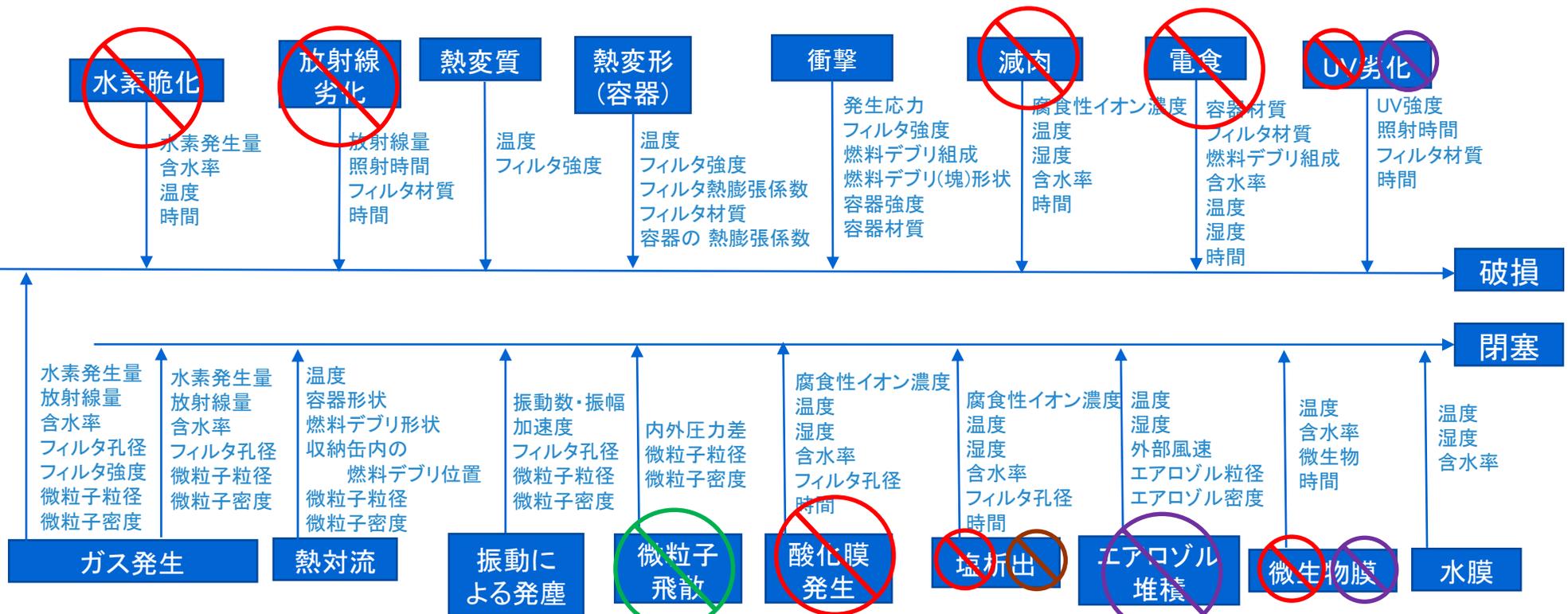
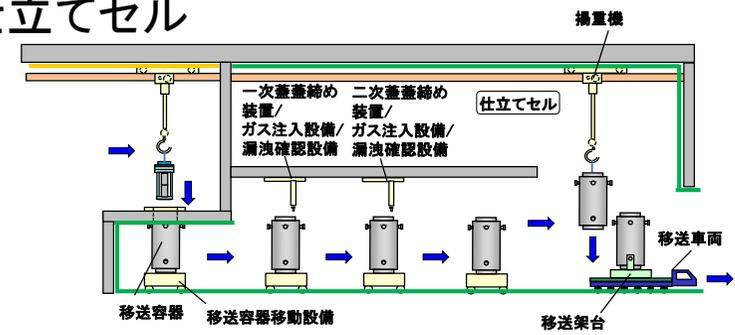
6.3 収納缶のフィルタの性能評価

③実施事項、成果

a.環境と条件の抽出(7/11)

(iv)劣化要因の取捨選択 (2/6)

・仕立てセル



⊘ 事象の進行速度が遅く、当該エリア滞在中に破損/閉塞に至らないため除外

⊘ 燃料デブリ性状から塩濃度は十分低いため除外

⊙ 当該エリアにおいて収納缶の内/外で圧力差は生じないため除外

⊖ 当該エリアが屋内のため除外

17の劣化事象⇒10個除外により、検討すべき項目は7個

6. 実施内容

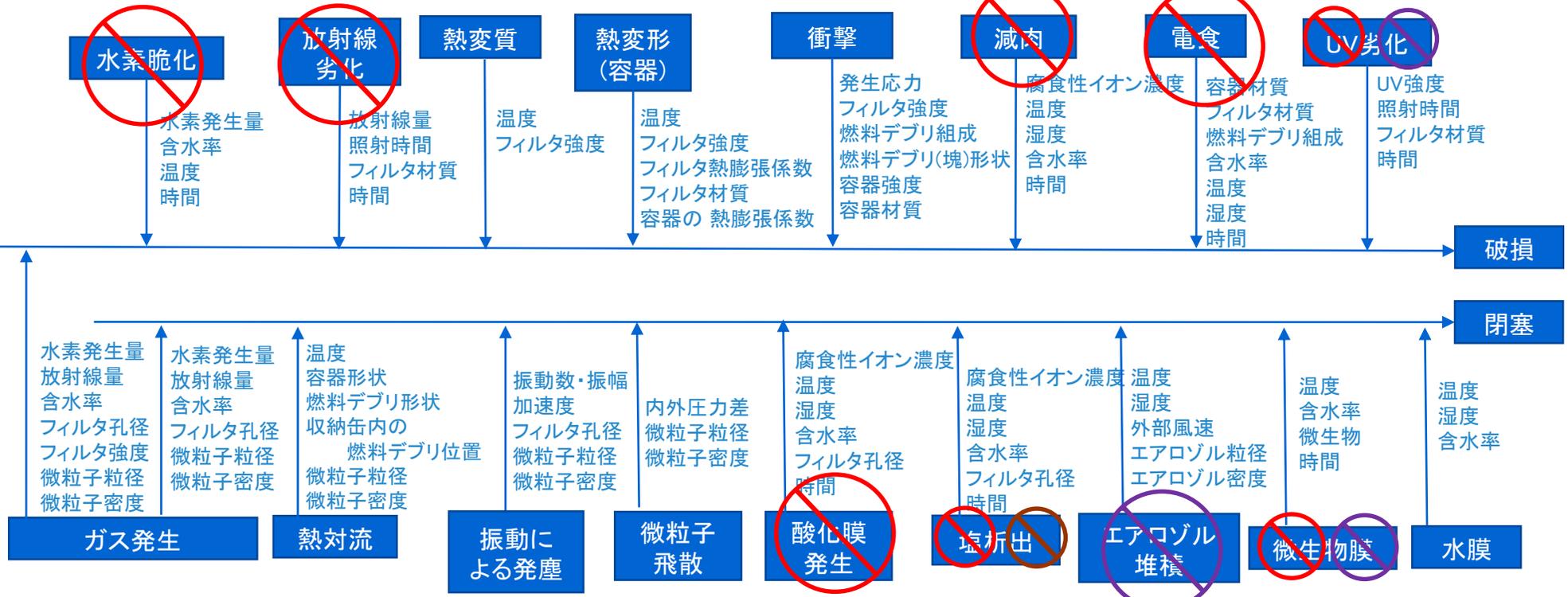
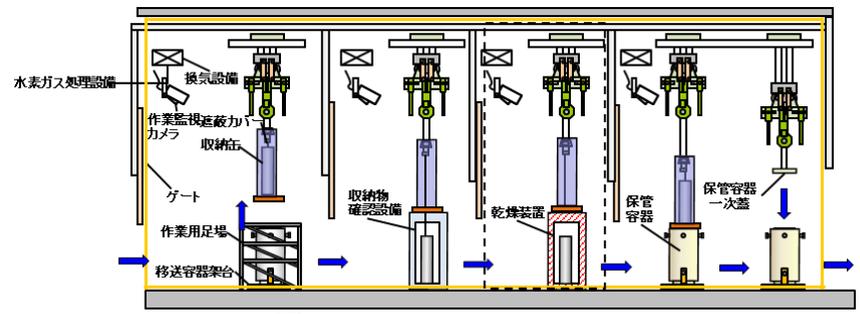
6.3 収納缶のフィルタの性能評価

③実施事項、成果

a.環境と条件の抽出(8/11)

(iv)劣化要因の取捨選択 (3/6)

・受入れエリア



- ⊘ 事象の進行速度が遅く、当該エリア滞在中に破損/閉塞に至らないため除外
- ⊘ 当該エリアが屋内のため除外
- ⊘ 燃料デブリ性状から塩濃度は十分低いため除外

17の劣化事象⇒9個除外により、検討すべき項目は8個

6. 実施内容

6.3 収納缶のフィルタの性能評価

③実施事項、成果

a.環境と条件の抽出(9/11)

(iv)劣化要因の取捨選択 (4/6)

・乾燥処理

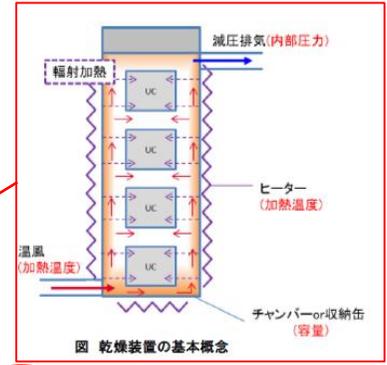
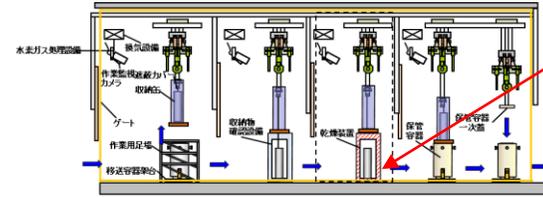
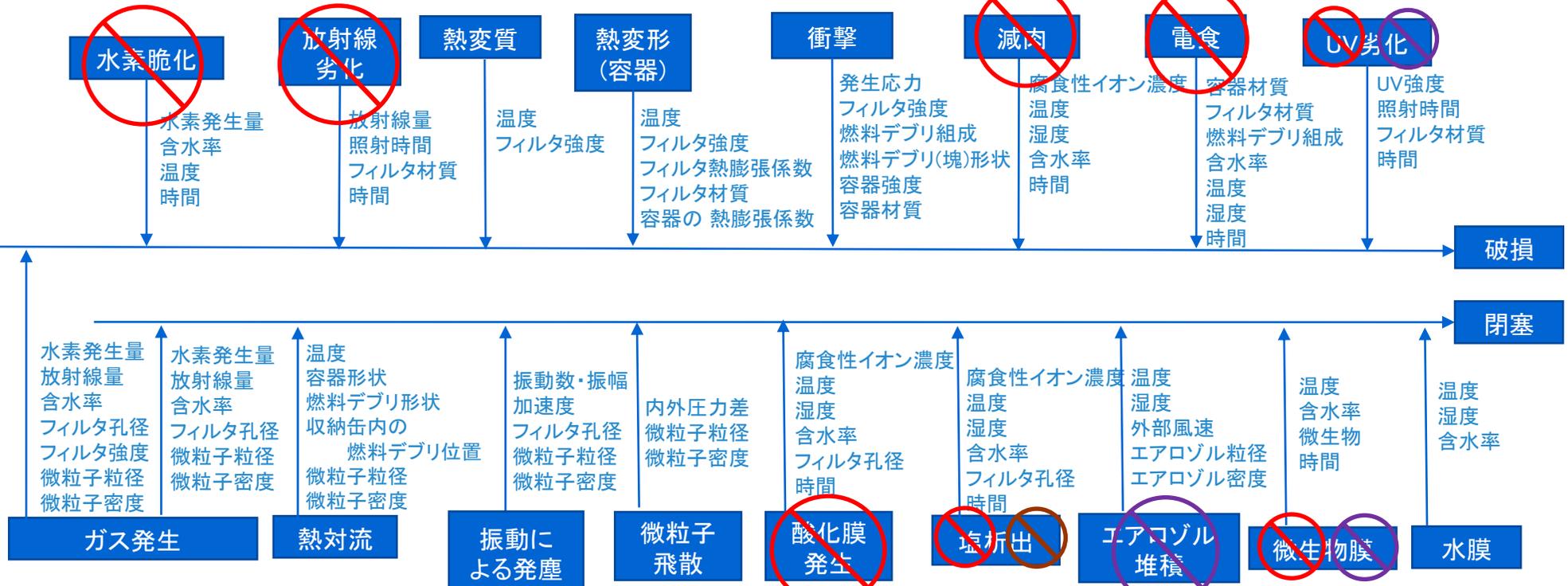


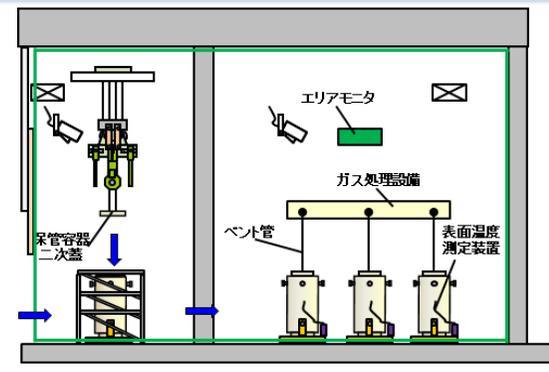
図 乾燥装置の基本概念



- 事象の進行速度が遅く、当該エリア滞在中に破損/閉塞に至らないため除外
- 当該エリアが屋内のため除外
- 燃料デブリ性状から塩濃度は十分低いため除外

17の劣化事象⇒9個除外により、検討すべき項目は8個

・保管エリア



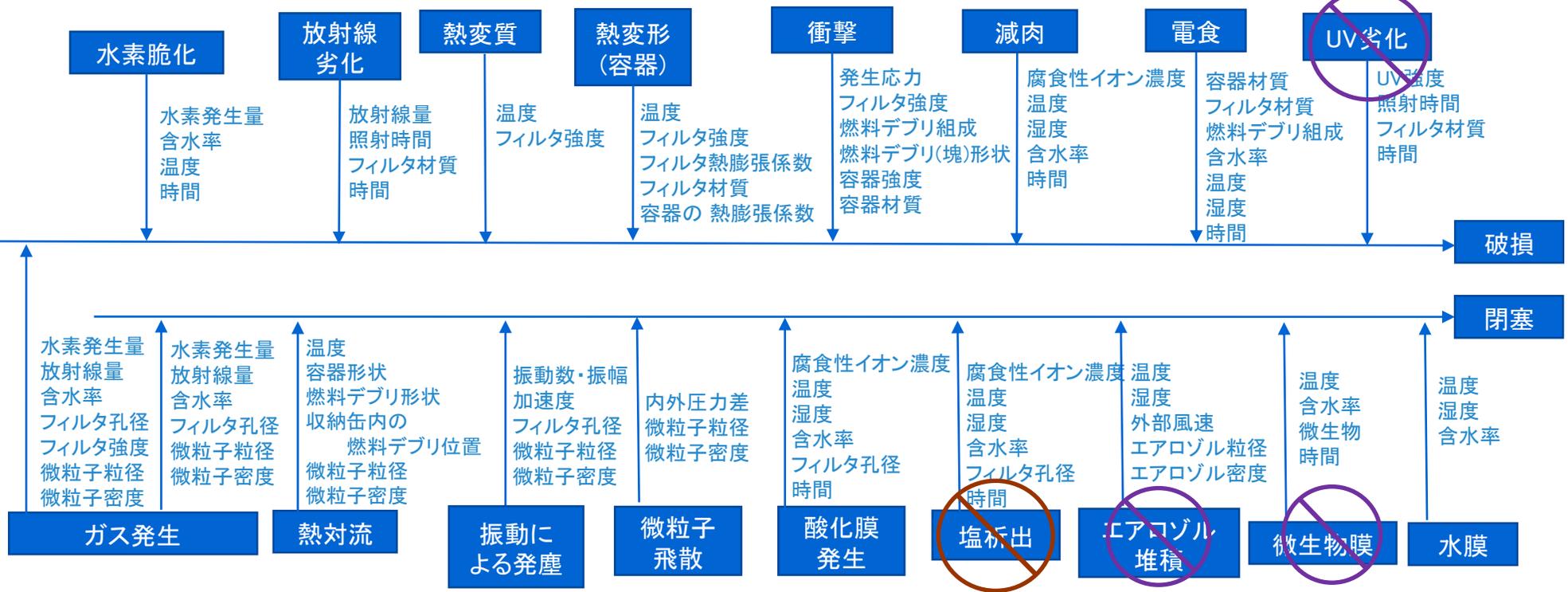
6. 実施内容

6.3 収納缶のフィルタの性能評価

③実施事項、成果

a.環境と条件の抽出(10/11)

(iv)劣化要因の取捨選択 (5/6)



- 当該エリアが屋内のため除外
- 燃料デブリ性状から塩濃度は十分低いいため除外

17の劣化事象⇒4個除外により、検討すべき項目は13個

6. 実施内容

6.3 収納缶のフィルタの性能評価

③実施事項、成果

a.環境と条件の抽出(11/11)

(iv)劣化要因の取捨選択 (6/6)

プロセス	封缶セル	乾燥処理	仕立てセル	受入れエリア	保管エリア
水素発生					
水素脆化	×	×	×	×	
放射線劣化	×	×	×	×	
熱変質					
熱変形(容器)					
熱対流					
衝撃					
振動による発塵					
減肉	×	×	×	×	
酸化膜発生	×	×	×	×	
塩析出	×	×	×	×	×
電食	×	×	×	×	
微生物膜	×	×	×	×	×
水膜					
エアロゾル堆積	×	×	×	×	×
微粒子の飛散	×		×		
UV劣化	×	×	×	×	×

×: インput環境条件から
検討不要と判断された項目

塩析出、微生物膜、エアロゾル堆積、UV劣化は全てのプロセスにおいて除外となるため、6.3③b.以降の検討から対象外とする。

6. 実施内容

6.3 収納缶のフィルタの性能評価

③実施事項、成果

b.フィルタの寿命評価方法の検討(1/27)

(i)フィルタの分類整理

用途	主要メーカー	製法・ろ材	粒子捕集機能	水素透過性能
原子力向けフィルタ 米 WIPP 仏 La Hague 日 1F HIC	NFT (Nuclear Filter Technology) Ultra Tech Poral など	焼結金属 カーボンコンポジット	0.3-0.5 μ m粒子に対して>99.97% (WIPPの例)	1.85-92.5 $\times 10^{-6}$ (m/s/mf)@NFT 3.66 $\times 10^{-6}$ (m ² /s)@Poral
金属製 ガスフィルタ	富士フィルタ 日本製線など	粉末焼結体 長繊維焼結体 短繊維焼結体 多層金属焼結体	0.1-1000 μ m フィルタ種類によって制御可能 精度については規定なし	フィルタスペック(圧損)より原子力向けフィルタと同等の水素透過性能と推察
セラミクス製 ガスフィルタ	日本ガイシ イビデンなど	アルミナ ゼオライト コージェライト	0.1-0.3 μ mの粒子の捕集効率低め 細孔制御でHEPA相当の性能発現が可能と推定	フィルタスペック(圧損)から原子力向けフィルタと同等の水素透過性能と推察
ガラス製・樹脂製 ガスフィルタ	日本エアーフィルター 日本ケンブリッジフィルターなど	ガラスファイバー ポリプロピレン オレフィン PTFE	HEPA:0.3 μ m粒子で99.97%以上 ULPA:0.15 μ m粒子で99.9995%以上	フィルタスペック(圧損)から原子力向けフィルタと同等の水素透過性能と推察

フィルタ仕様で最も異なるのはろ材の材質。

要求される粒子捕集性能に応じ、ろ材の製法、構成を決定する。

フィルタ寿命はフィルタろ材の材質に大きく依存する。

6. 実施内容

6.3 収納缶のフィルタの性能評価

③実施事項、成果

b.フィルタの寿命評価方法の検討(2/27)

(ii) 収納缶環境を踏まえた劣化事象の選定(1/26)

各劣化プロセスにおいて劣化に至るシナリオを整理した。

2段階の条件(緩和/過酷)を考慮することで、劣化シナリオ条件を幅広く検討した。

劣化プロセス	劣化に至るシナリオ	
	シナリオ1(緩和条件)	シナリオ2(過酷条件)
水素発生	乾燥後の廃棄物中に含まれる残留水分の放射線分解により水素が発生し、燃料デブリ微粒子が舞い、フィルタが閉塞し機能を失う。	未乾燥・乾燥が不十分な廃棄物の収納により、乾燥時よりも多くの水素が発生し、燃料デブリ微粒子が舞い、フィルタが閉塞し機能を失う。
水素脆化	発生した水素が吸収され、保管期間内に脆化を発生する濃度になり破壊する。	発生した水素が吸収されかつ水分が生成した状態になり、保管期間内に脆化を発生する濃度になり破壊する。
放射線劣化	放射線エネルギーを吸収劣化し、フィルタ材料の強度が低下する。	放射線エネルギーを吸収劣化し、フィルタ材料が破損する。
熱変質	熱崩壊により燃料デブリの温度が上昇。乾燥時の温度である200°Cに温度が到達、フィルタが変形して機能を失う。	熱崩壊により燃料デブリの温度が上昇。収納缶の仕様である300°Cまで温度が到達、フィルタが変形して機能を失う。
熱変形(容器)	熱崩壊により燃料デブリの温度が上昇。乾燥時の温度である200°Cに温度が到達。容器が熱変形して、固定されているフィルタに応力がかかることで破損する。	熱崩壊により燃料デブリの温度が上昇。収納缶の仕様である300°Cまで温度が到達。容器が熱変形して、固定されているフィルタに応力がかかることで破損する。
熱対流	熱崩壊により燃料デブリの温度が200°Cに達し、容器内の熱対流が発生することで、燃料デブリ微粒子が舞いフィルタが閉塞し機能を失う。	熱崩壊により燃料デブリの温度が300°Cに達し、容器内の熱対流が発生することで、燃料デブリ微粒子が舞いフィルタが閉塞し機能を失う。
衝撃	運搬時、地震発生時に穏やかな衝突/衝撃により容器やフィルタが変形/破損しフィルタの機能を失う。	運搬時、地震発生時における衝突/数mの高さからの落下などの衝撃により容器やフィルタが変形/破損しフィルタの機能を失う。

劣化プロセス	劣化に至るシナリオ	
	シナリオ1(緩和条件)	シナリオ2(過酷条件)
振動による発塵	運搬時、地震時の振動により、廃棄物微粒子が舞い、フィルタ表面を覆う/閉塞しフィルタの機能を失う。	運搬時、地震時の容器転倒により、廃棄物微粒子がフィルタ表面に圧着し、フィルタ表面を覆う/閉塞しフィルタの機能を失う。
減肉	結露等でフィルタに水分が存在し、かつ、塩化物イオンが付着するような現象がおきて、孔食が発生し腐食生成物が生成して閉塞する。	結露等でフィルタに水分が存在し、かつ、廃棄物由来の微粒子が多く付着するような現象がおきて、すき間腐食が発生し腐食生成物が生成して閉塞する。
酸化膜発生	熱崩壊により燃料デブリの温度が上昇。乾燥時の温度である200°Cに温度が到達、酸化膜が生じて閉塞する。	熱崩壊により燃料デブリの温度が上昇。収納缶の仕様である300°Cまで温度が到達、酸化膜が生じて閉塞する。
電食	結露等でフィルタに水分が存在し、かつ、塩化物イオンが付着するような現象がおきる。	結露等でフィルタに水分が存在し、かつ、塩化物イオンが付着し、部分的に腐食しその周辺で電位差が生じるような現象がおきる。
水膜	結露で発生した水膜によりフィルタの一部が閉塞し流路面積が減少する。	結露で発生した水膜によりフィルタの全部が閉塞する。
微粒子の飛散	収納缶保管建屋の換気により差圧により、保管容器内に流れが生じ、燃料デブリ微粒子が舞うことで、フィルタが閉塞する。	収納缶保管建屋の換気と移送容器の排気操作により、保管容器内に流れが生じ、燃料デブリ微粒子が舞うことで、フィルタが閉塞する。

劣化プロセスごとに劣化事象としての選定要否を検討した。

6. 実施内容

6.3 収納缶のフィルタの性能評価

③実施事項、成果

b.フィルタの寿命評価方法の検討(3/27)

(ii) 収納缶環境を踏まえた劣化事象の選定(2/26)

事象: **水素発生** 劣化モード: 閉塞 & 破損

- 水素発生による上昇流により粉状燃料デブリが浮上しフィルタが閉塞するか評価する。

⇒水素発生速度と粒子の沈降速度を計算・比較

- 水素発生流量

インプット条件から水素発生流量は、 9.03×10^{-5} [L/h]と計算

(計算式)

$$\text{水素発生速度[L/h/Bq]} \times \text{総インベントリ[Bq/ton]} \\ \times \text{燃料デブリ密度[ton/m}^3] \times \text{燃料デブリ容積[m}^3]$$

(インプット条件)

- ・水素発生速度: 2.3×10^{-18} [L/h/Bq] (乾燥後、含水率0.1wt.%)
- ・総インベントリ: 2.18×10^{15} [Bq/ton]、
- ・燃料デブリ密度: 4.0 [g/cm³](MCCI平均密度)
- ・燃料デブリ容積: 0.0045 [m³](ユニット缶体積の30%)

水素は内径210mmの収納缶断面 0.038 [m²]を上昇する

水素流速は 6.6×10^{-10} [m/s]と計算される。

水素流速が粒子の沈降速度よりも小さいため、水素発生によるフィルタ劣化は無視できる。

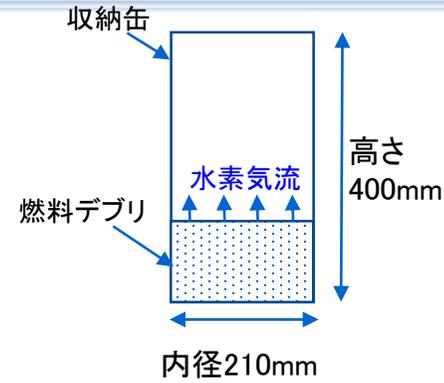


図1 ユニット缶の模式図

- 微粒子浮上速度

ストークスの式より粒子の沈降速度を計算

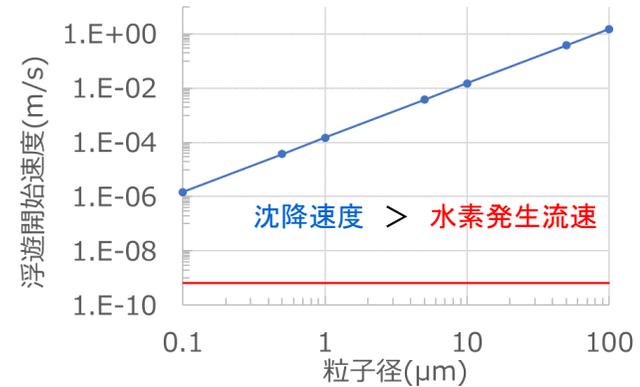


図2 沈降速度の計算結果

(計算式)ストークスの式 $v_s = D_p^2(\rho_p - \rho_f)g / 18\eta$
 (インプット条件)

- ・終端速度 v_s [m/s]
- ・微粒子径 D_p [m]: $0.1 \sim 100$ [μ m]
 上限: 微粒子の定義より0.1mm以下
 下限: フィルタ性能の規定(HEPA 0.3μ m、ULPA 0.15μ m)を鑑み設定
- ・粒子密度 ρ_p [kg/m³]: 燃料デブリ密度 4.0 [g/cm³]
- ・流体密度 ρ_f [kg/m³]: 1.205 (20°C空気)
- ・流体粘度 η [Pa·s]: 1.82×10^{-5} (20°C空気)
- ・重力加速度 g [m/s²]: 9.8

6. 実施内容

6.3 収納缶のフィルタの性能評価

③実施事項、成果

b.フィルタの寿命評価方法の検討(4/27)

(ii) 収納缶環境を踏まえた劣化事象の選定(3/26)

事象: **水素脆化** 劣化モード: 破損

• 容器内の水素分圧の評価

各種材料の水素溶解量を検討するために、水素発生速度と大気中の水素割合より、保管容器内における1時間ごとの水素分圧を求めた。

保管容器内水素圧 = 大気中の水素 + 保管容器内で発生した水素より、
 容器器外の水素圧: 大気中の水素の割合は0.00005%であるため、水素圧は0.05Paとなる。
 容器内の水素圧: $PV = nRT$ (P: 圧力、V: 体積、n: mol、R: 気体常数、T: 温度を用いて算出。
 温度300°Cと仮定すると、水素発生速度より、保管容器内の水素分圧は1.4Paとなる。
 従って、温度300°Cの場合の**容器内の水素圧は、1.45Pa** (1.4×10^{-5} atm)となる。

• ステンレス鋼およびNi基合金の場合

- SUS304Lの水素溶解度は容器内の水素圧を考慮すると、図1より、温度300°Cでも5ppmよりも低い^{注1}。オーステナイト系ステンレス鋼の水素溶解度は鋼種による差はほとんどないため、SUS316やSUS316Lでも溶解度は同じと考えられる。
- SUS316Lは常温でも数百ppm、85°Cでは数十ppm吸収しても水素脆化は発生しない^{注2}。
- Ni基合金の溶解度は組成によって異なるが、温度400°CでNi量85%程度で、Feの5倍程度になる。Feの水素の溶解度はSUSはあまり変わらないことが報告されているため^{注3}、そこから推定すると温度300°CにおけるNi量85%の水素溶解度は30ppm以下となる。

SUS316も同様と考えられる。

この濃度では、水素脆化は発生する可能性は低い。

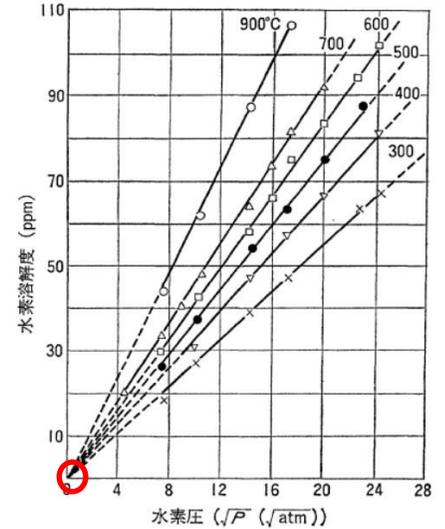


図1 304Lの水素溶解度と水素圧の関係^{注1}

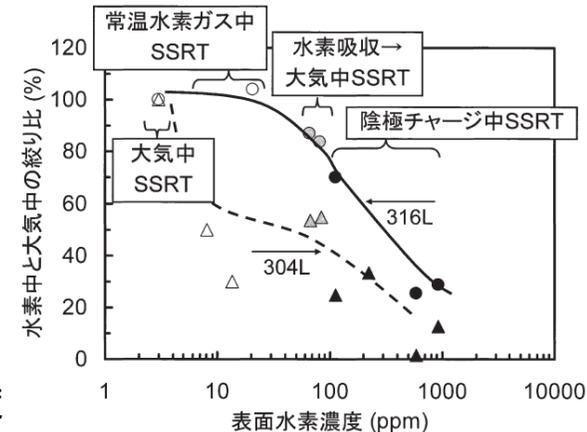


図2 水素脆化特性に及ぼす表面水素濃度の影響^{注2}

注1: 野村ら、日本金属学会会報、第15巻、第9号、p.563~570(1976)

注2: 大村、中村、材料と環境、60、241-247(2011)

注3: 吉田ら、日本金属学会会報、第11巻、第7号、p.533~548(1972)

6. 実施内容

6.3 収納缶のフィルタの性能評価

③実施事項、成果

b.フィルタの寿命評価方法の検討(5/27)

(ii) 収納缶環境を踏まえた劣化事象の選定(4/26)

事象: **水素脆化** 劣化モード: 破損

・ Tiの場合

図1より、Tiの水素溶解度は常温で10ppm程度、工業用Ti(Fe: 0.3%含む)で100 mass ppmであり、水素脆化を発生する濃度は100~300ppmであることを考慮すると種類によっては常温で水素脆化を発生する可能性はある^{注1}。

温度300°Cの高温になると水素の溶解度は1000ppmを超えるため、水素が常時発生する環境で長時間で使用した場合は脆化発生の可能性がある。加えて、温度が300°Cより低温になると水素化物が生成し、脆化発生の可能性がある^{注1}。

・ セラミックスの場合

表1に水素バリア機能膜の報告例を示す^{注2}。セラミックスであるアルミナは水素透過量を削減させる性質があり、金属等の水素脆化を抑制膜として適用が検討されている。また、水素環境で結晶性のアルミナに脆化は生じないとも報告されている^{注3}。コージュライト、ゼオライトの水素脆化に関する報告は認められなかった。

注1: 藤井ら、材料と環境、60、248-253(2011)

注2: NEDO 水素先端科学基礎研究事業 中間評価報告書(2008)

注3: JST/科学技術戦略推進費、「構造材料の環境脆化における水素の機能に関する研究」、平成13年~14年:第2期)

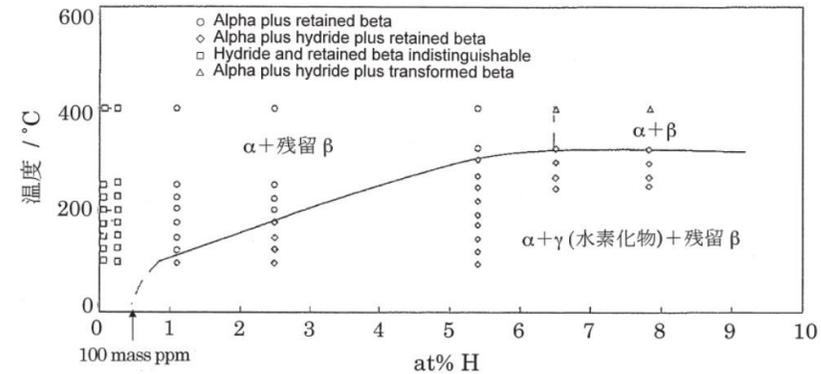


図1 Feを0.3%含む工業用純チタンASTM Gr.3の水素含有量と相構成

表1. 水素バリア機能膜の報告例

皮膜の種類	水素透過量の削減比率
Al ₂ O ₃	10 ~ 10000
TiC	10 ~ 10000
TiN	10 ~ 10000
Cr ₂ O ₃	10
BN	100

6. 実施内容

6.3 収納缶のフィルタの性能評価

③実施事項、成果

b.フィルタの寿命評価方法の検討(6/27)

(ii) 収納缶環境を踏まえた劣化事象の選定(5/26)

事象: **水素脆化** 劣化モード: 破損

・ ガラス繊維

ガラス繊維による水素による劣化挙動に関する報告は認められなかった。結晶性石英ガラスファイバーに関しては水素環境下では脆化しないことが報告されている^{注1}。

ただし、ガラス繊維の耐熱性は製品によって様々であるため、保管容器内の最大温度300℃を考慮して選定する必要がある。

・ 高分子

ポリプロピレンについては**報告はなく、挙動が不明**

ポリエチンは、水素ガス配管として利用可能であることが、高压ガス協会より報告されており、**脆化しない**^{注2}。

PTFEは、水素ガス環境下での使用が一般的に認められており、**脆化しない**^{注3}。

注1: JST/科学技術戦略推進費、「構造材料の環境脆化における水素の機能に関する研究」、平成13年～14年:第2期)

注2: 田畑、水素エネルギーシステム、Vol.35、No.4(2010)

注3: 中日技研工業(株)HPより出典

→考慮すべき劣化事象として、試験方法および条件の検討を行う。

流体	PTFE	継手材質				透過
		CS	SUS 304	SUS 316	Brass	
ジソプチレン	-	-	●	●	●	
ジエチルフタレート	●	-	●	●	●	
四塩化炭酸	●	×	△	△	△	
ジオクチルフタレート	●	●	●	●	●	
シクロヘキサノン	●	-	●	●	-	
シクロヘキサン	●	●	●	●	●	
ジメチルアニリン	●	-	-	-	●	
ジメチルフタレート	●	-	-	-	●	
重クロム酸カリウム	●	-	●	●	-	
シュウ酸	●	×	△	△	×	
臭素水	●	×	×	×	×	
硝酸 10%	●	×	△	△	×	
硝酸 70%	●	×	△	△	×	
硝酸塩第一鉄	●	-	●	●	-	
硝酸塩第二鉄	●	×	●	●	-	
硝酸カリウム	-	×	△	●	-	
硝酸カルシウム	●	●	●	●	●	
硝酸銀	●	△	●	●	△	
硝酸ナトリウム	●	●	△	△	△	
ジンクアセテート	●	●	●	●	●	
ジンククロライド	●	×	△	●	×	
酢	●	×	△	△	×	
水銀	●	●	●	●	×	
水素化マグネシウム	●	●	●	●	●	
水素ガス	●	●	●	●	●	C
スチーム	●	●	●	●	△	A
アセトン	●	△	△	△	△	

●:良好 △:限定された使用年数では使用可能 ×:推薦できない -:テストデータなし

図 各環境下におけるPTFEの使用可否^{注3}

6. 実施内容

6.3 収納缶のフィルタの性能評価

③実施事項、成果

b.フィルタの寿命評価方法の検討(7/27)

(ii) 収納缶環境を踏まえた劣化事象の選定(6/26)

事象: **放射線劣化** 劣化モード: 破損

収納缶に燃料デブリ収納後、燃料デブリから発生する放射線照射により、フィルタ材料の機械特性が変化する可能性について検討する。

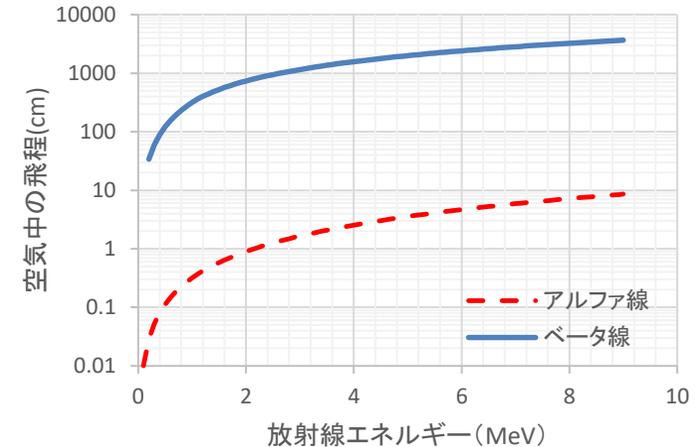


図 アルファ線、ベータ線の空気中の飛程

燃料デブリから発生する放射線

- 燃料デブリからはアクチニドや核分裂生成物、放射化物に由来する、アルファ線、ベータ線、ガンマ線が放出される。
- アクチニドのアルファ線(5~7MeV程度)の場合、飛程は空気中で数cm、固体中や水中では数 μ m程度。燃料デブリ表面のみから放出される。フィルタ近傍の燃料デブリ以外は影響なく、フィルタに付着しても、材料表面以外は影響を受けない。
- ベータ線、ガンマ線はアルファ線より飛程が長く、特にガンマ線は透過能が高いため、フィルタから離れた燃料デブリからも照射を受ける。

放射線劣化が発生すると考えられる作業

収納缶に燃料デブリを収納後、常に照射を受ける。

放射線がフィルタに及ぼす影響

材料が放射線照射を受けた場合、**機械特性が変化する可能性がある。**

放射線照射後により、**機械特性が変化した後に衝撃を受けた場合、フィルタが破損し**

フィルタの機能を失う可能性がある。

→考慮すべき劣化事象として、試験方法および条件の検討を行う。

6. 実施内容

6.3 収納缶のフィルタの性能評価

③実施事項、成果

b.フィルタの寿命評価方法の検討(8/27)

(ii) 収納缶環境を踏まえた劣化事象の選定(7/26)

事象：**熱変質**(最高温度200℃) 劣化モード：閉塞&破損

崩壊熱により燃料デブリの温度が上昇し、熱伝導でフィルタの温度が上昇することでフィルタが熱変質して破損する可能性について検討した。

最高温度とろ材の融点や軟化点とを比較して評価。耐熱温度等の情報があるものは、それらも加味した。

		融点[℃]	軟化点[℃]	その他[℃]	評価	
金属	SUS304	1398~1453 注1	-	-	○	200℃に対し融点が十分高く、熱変質は発生しない。フィルタの破損の可能性は低い。
	SUS316	1370~1397 注1	-	-		
	Alloy600	1371~1427 注1	-	-		
	Ti	1668 注2	-	-		
セラミクス	SiC	-	-	耐熱温度 1600 注4	○	200℃に対し融点や耐熱温度、耐火度が十分高く、熱変質は発生しない。フィルタの破損の可能性は低い。
	Al ₂ O ₃	2015 注3	-	-		
	コージュライト	-	-	耐火度 1400 注3		
ガラス	Eガラス	-	840 注5	最高使用温度 280 注6	(○)	200℃に対し軟化点や最高使用温度が十分高く、熱変質は発生しない。フィルタの破損の可能性は低い。 なお、製品個別の最高使用温度に留意が必要。
	Cガラス	-	749 注5	-		
	Sガラス	-	970 注5	-		
	Dガラス	-	771 注5	-		
高分子	ポリエチレン	65~140 注7	-	常用耐熱温度 70~110 注8	×	融点が200℃未満であることまた常用耐熱温度が200℃未満であることから、200℃での使用に耐えない。
	オレフィン	65~168 注7	-	常用耐熱温度 70~140 注8		
	PTFE(テフロン)	327 注7	-	常用耐熱温度 260 注8	○	200℃に対し融点や常用耐熱温度が高く、熱変質は発生しない。フィルタの破損の可能性は低い

○：発生可能性がないため試験方法の検討必要なし ×：試験方法の検討必要あり

注1：ステンレス鋼便覧

注2：大同特殊鋼：https://www.daido.co.jp/products/titanium/properties/index.html

注3：無機化学ハンドブック、技報堂出版株式会社

注4：SiCセラミック新材料、日本学術振興会

注5：セントラルグラスファイバー株式会社：http://www.centralfiberglass.com/jp/glass.fiber/outline/index.html

注6：フィルター/バグ用 - 日東紡 (nittobo.co.jp)：https://www.nittobo.co.jp/business/glassfiber/industrial/heatresistant/filter.html

注7：新版 プラスチック材料選択のポイント、日本規格協会

注8：日本プラスチック工業連盟：http://www.jpif.gr.jp/2hello/conts/youto.pdf

→考慮すべき劣化事象として、試験方法および条件の検討を行う。

6. 実施内容

6.3 収納缶のフィルタの性能評価

③実施事項、成果

b.フィルタの寿命評価方法の検討(9/27)

(ii) 収納缶環境を踏まえた劣化事象の選定(8/26)

事象：**熱変質**(最高温度300℃) 劣化モード：閉塞&破損

崩壊熱により燃料デブリの温度が上昇し、熱伝導でフィルタの温度が上昇することでフィルタが熱変質して破損する可能性について検討した。

最高温度とろ材の融点や軟化点とを比較して評価。耐熱温度等の情報があるものは、それらも加味した。

		融点[℃]	軟化点[℃]	その他[℃]	評価	
金属	SUS304	1398~1453 注1	-	-	○	300℃に対し融点が高い、熱変質は発生しない。フィルタの破損の可能性は低い。
	SUS316	1370~1397 注1	-	-		
	Alloy600	1371~1427 注1	-	-		
	Ti	1668 注2	-	-		
セラミクス	SiC	-	-	耐熱温度 1600 注4	○	300℃に対し融点や耐熱温度、耐火度が十分高く、熱変質は発生しない。フィルタの破損の可能性は低い。
	Al ₂ O ₃	2015 注3	-	-		
	コージュライト	-	-	耐火度 1400 注3		
ガラス	Eガラス	-	840 注5	最高使用温度 280 注6	(×)	300℃に対し軟化点が高い、ろ材の熱変質は発生しない。なお、最高使用温度が300℃を下回る材料もあり、 製品個別の最高使用温度に留意が必要。
	Cガラス	-	749 注5	-		
	Sガラス	-	970 注5	-		
	Dガラス	-	771 注5	-		
高分子	ポリエチレン	65~140 注7	-	常用耐熱温度 70~110 注8	×	融点が300℃未満であること(2種)、また常用耐熱温度が300℃未満であることから、300℃での使用に耐えない。
	オレフィン	65~168 注7	-	常用耐熱温度 70~140 注8		
	PTFE(テフロン)	327 注7	-	常用耐熱温度 260 注8		

○：発生可能性がないため試験方法の検討必要なし ×：試験方法の検討必要あり

注1: ステンレス鋼便覧

注2: 大同特殊鋼: <https://www.daido.co.jp/products/titanium/properties/index.html>

注3: 無機化学ハンドブック、技報堂出版株式会社

注4: SiCセラミック新材料、日本学術振興会

注5: セントラルグラスファイバー株式会社: http://www.centralfiberglass.com/jp/glass_fiber/outline/index.html

注6: フィルターバッグ用 - 日東紡 (nittobo.co.jp): <https://www.nittobo.co.jp/business/glassfiber/industrial/heatresistant/filter.html>

注7: 新版 プラスチック材料選択のポイント、日本規格協会

注8: 日本プラスチック工業連盟: <http://www.jpif.gr.jp/2hello/conts/youto.pdf>

→考慮すべき劣化事象として、試験方法および条件の検討を行う。

6. 実施内容

6.3 収納缶のフィルタの性能評価

③実施事項、成果

b.フィルタの寿命評価方法の検討(10/27)

(ii) 収納缶環境を踏まえた劣化事象の選定(9/26)

事象：**熱変形**(容器) 劣化モード：閉塞&破損

崩壊熱により燃料デブリの温度が上昇し、熱伝導で容器の温度が上昇することで容器が熱変形して、固定されているフィルタに応力がかかることで破損し、フィルタの機能を失う可能性について検討した。

収納缶およびフィルタろ材：下記条件を想定

- ・収納缶はSUS316L製(線熱膨張係数, 16.2×10^{-6} [$1/^\circ\text{C}$]^{注1})で形状は円筒形
- ・フィルタ外枠と収納缶は共材
- ・フィルタは収納缶に剛(リジッド)に固定
- ・フィルタろ材の外径200mm、収納缶(およびフィルタ枠)の外径300mm
- ・フィルタろ材は稠密

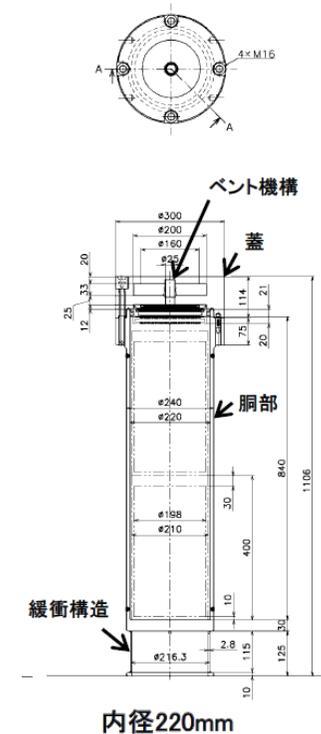


図 収納缶(想定)^{注2}

上記想定をもとに、シナリオ毎の使用最高温度におけるフィルタろ材の熱応力を評価した。

注1: ステンレス協会: <http://www.jssa.gr.jp/contents/faq-article/q6/>

注2: 平成30年度補正予算 廃炉・汚染水対策事業費補助金 燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発 2021年6月 最終報告資料より引用

6. 実施内容

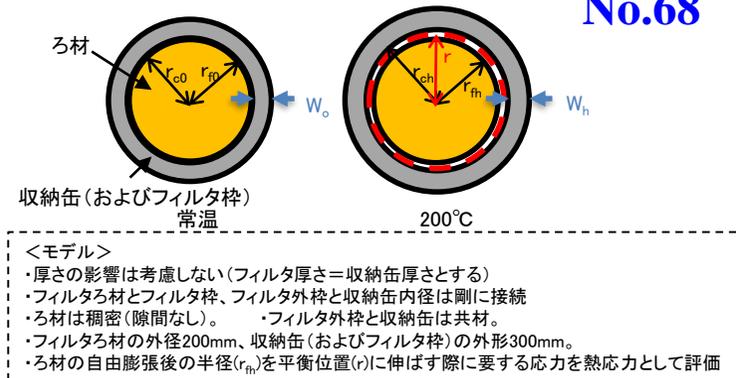
6.3 収納缶のフィルタの性能評価

③実施事項、成果

b.フィルタの寿命評価方法の検討(11/27)

(ii) 収納缶環境を踏まえた劣化事象の選定(10/26)

事象: **熱変形(容器)** (最高温度**200℃**) 劣化モード: **閉塞&破損**



		ろ材の線熱膨張係数 ^{注14} $\alpha_f [10^{-6}/^{\circ}\text{C}]$	ろ材のヤング率 ^{注14} $E_f [\text{GPa}]$	ろ材にかかる応力 σ [MPa]	ろ材の引張強度 ^{注14} $\sigma [\text{MPa}]$	影響評価 ^{注15}
金属	SUS316	16.2 ^{注1}	193 ^{注1}	0	470 ^{注4}	× 収納缶がSUS316Lでない(熱膨張が同等でない)場合、熱応力が生じ、 破損の可能性 がある。 収納缶がSUS316Lであれば、ろ材と収納缶の熱膨張が同等であり、ろ材にかかる応力は低く、ろ材引張強度と比較しても低いことから影響は小さいと考えられる。ただし、ろ材の 体積比率 が下がれば応力が高くなり、 破損の可能性 がある。
	SUS304	17.8 ^{注1}	193 ^{注1}	-36	470 ^{注4}	
	Alloy600	13.3 ^{注2}	157 ^{注2}	56	600 ~ 1200 ^{注2}	
	Ti	8.4 ^{注3}	106 ^{注3}	112	240 ^{注5}	
セラミクス	SiC	3.7 ^{注6}	447 ^{注8}	447	390 ^{注10}	× ろ材の熱膨張が収納缶に比較して小さいため、熱応力(引張)が生じる。熱応力は材料強度に比較して低いものの、ろ材の 体積比率 が下がれば応力が高くなり、 破損の可能性 がある。
	Al ₂ O ₃	7.7 ^{注6}	370 ^{注9}	277	120 ^{注11}	
	コージュライト	1.1 ^{注7}	88 ^{注7}	188	25 ~ 40 ^{注7}	
ガラス	Eガラス	5.5 ^{注12}	72.5 ^{注12}	113	3430 ^{注12}	× ろ材の熱膨張が収納缶に比較して小さいため、熱応力(引張)が生じる。熱応力は材料強度に比較して低いものの、ろ材の 体積比率 が下がれば応力が高くなり、 破損の可能性 がある。
	Cガラス	7.3 ^{注12}	68.6 ^{注12}	90	2744 ^{注12}	
	Sガラス	2.9 ^{注12}	84.3 ^{注12}	159	4655 ^{注12}	
	Dガラス	3.1 ^{注12}	51.9 ^{注12}	104	2450 ^{注12}	
高分子	ポリエチレン	-	-	-	-	× PTFEは、ろ材の熱膨張が収納缶に比較して大きいため、熱応力(圧縮)が生じる。ろ材の 体積比率 が下がれば圧縮応力が高くなり、 破損の可能性 がある。
	オレフィン	-	-	-	-	
	PTFE	100 ^{注13}	0.4 ^{注13}	-6	14 ^{注13}	

○: 発生可能性がないため試験方法の検討必要なし ×: 試験方法の検討必要あり

注1: ステンレス協会: <http://www.jssa.gr.jp/contents/faq-article/q6/>
 注2: 株式会社タカヤマ: <http://www.takayama-industry.com/inconel/>
 注3: 大同特殊鋼: <https://www.daido.co.jp/products/titanium/properties/index.html>
 注4: ステンレス鋼便覧
 注5: 神戸製鋼所: <https://www.kobelco.co.jp/products/titan/files/details.pdf>
 注6: 京セラ: <https://www.kyocera.co.jp/prdct/fc/ist/tokusei/bouchou/>
 注7: 無機化学ハンドブック, 技報堂出版株式会社 (コージュライト磁器として, 線熱膨張は20~100℃の値)
 注8: 株式会社フェローテックマテリアルテクノロジーズ: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwioqK3cTzAhWdwsBHZA-CkKQFNoECAQAQ&url=https%3A%2F%2Ffrt-mt.co.jp%2Fassets%2Fpdf%2Fcvd_sic%2Fcvd_sic_performance.pdf&usq=A0Vaw0eZT5AELG7hFkH0TskJ0
 注9: 日本ファインセラミクス株式会社: <https://www.japan-fc.co.jp/products/cate01/cate0101/al2o3-995-al2o3-999.html>
 注10: 藤沢, 松末, 高原: 材料 35巻397号 (1986) pp1112
 注11: 坂口電熱: https://sakaguchi-dennetsu.co.jp/assets/files/PDF/ineup/other/taikabutsu_sankou.pdf
 注12: 南条, 日本複合材料学会誌, 33巻4号 (2007) pp.141-149
 注13: 華陽物産株式会社: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwLi4DdtjtjzAhWSHXAKHStnQScQFnoECAYQAQ&url=https%3A%2F%2Fpkayo-corp.co.jp%2Fcommon%2Fpdf%2Fpla_propertylist01.pdf&usq=A0Vaw2vXk2pSVEW3Vcf-4040NL
 注14: 下線の数値は200℃以外の温度のデータの可能性あり
 注15: 設計条件で異なる

→考慮すべき劣化事象として、試験方法および条件の検討を行う。

6. 実施内容

6.3 収納缶のフィルタの性能評価

③実施事項、成果

b.フィルタの寿命評価方法の検討(13/27)

(ii) 収納缶環境を踏まえた劣化事象の選定(12/26)

事象: **熱対流** 劣化モード: 閉塞 & 破損

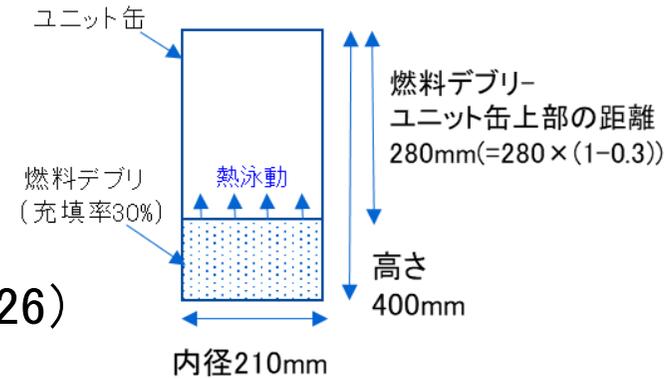


図1 熱泳動による発塵

- 燃料デブリが想定される最大温度300℃であり、ユニット缶上部が室温の場合、ユニット缶の気相部に温度勾配が生じ、燃料デブリに含まれる微粒子は低温側に向かう力を受け(熱泳動)、微粒子の沈降速度と比較しフィルタを劣化する事象が起こるか評価する。
- ユニット缶環境で熱泳動により微粒子が浮上する速度、熱泳動速度を評価し、ストークス式に基づく沈降速度と比較した。

熱泳動速度

Waldmannの理論式^{注1}

$$U_T = K_{th} \cdot v \cdot \nabla T / T$$

U_T : 熱泳動速度[m/s]

K_{th} : 熱泳動係数※

v : 気体の動粘度係数[m²/s]

= 流体の粘性係数[Pa·s] / 流体の密度[kg/m³]

⇒ 20℃、空気の値を使用

∇T : 温度勾配[K/m]

⇒ 燃料デブリ表面を300℃、ユニット缶上部を25℃(室温)

この間の燃料デブリ-ユニット缶上部間距離280mmで

除した値982K/mを使用

T : 絶対温度 [K]

※熱泳動係数 K_{th} について

- 微粒子が凝集した際の粗密さに依存。粗密さはかさ密度と真密度の比をとった無次元密度で表現される。無次元密度が小さいほど(微粒子の凝集が粗いほど)熱泳動の影響を受けやすく、熱泳動係数 K_{th} が大きくなる。
- 収納缶の燃料デブリ微粒子の無次元密度が不明であるため、ここでは熱泳動速度が大きくなるよう、保守的に $K_{th}=1$ とする。
- なお、燃料デブリ情報の詳細がわかり次第、再評価することが望ましい。

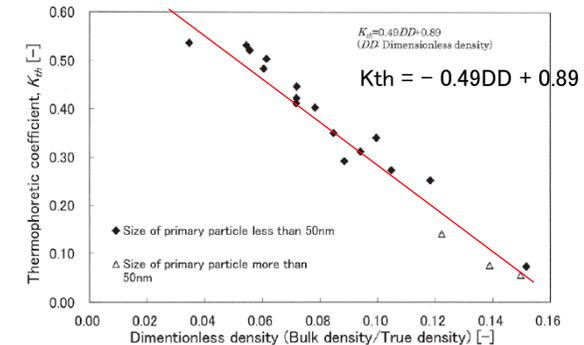


図2 無次元密度と熱泳動係数の相関^{注1}

注1: 鈴木、土橋ら、”すずの熱泳動挙動の予測手法に関する研究”、日本燃焼学会誌、第52巻59号(2010年)p68-75

6. 実施内容

6.3 収納缶のフィルタの性能評価

③実施事項、成果

b.フィルタの寿命評価方法の検討(14/27)

(ii) 収納缶環境を踏まえた劣化事象の選定(13/26)

事象: **熱対流** 劣化モード: 閉塞 & 破損

- 熱泳動速度は $5 \times 10^{-5} \text{m/s}$ で、 $1 \mu\text{m}$ 以下の粒子では粒子浮上速度を上回る(熱泳動により微粒子が飛散する)。
 - 熱泳動により飛散する微粒子の到達距離は $1 \times 10^{-8} \text{mm}$ と非常に小さく、フィルタに至る距離ではない。
- ⇒ **熱対流による微粒子浮上により到達する距離は十分小さいため、熱対流によるフィルタ劣化は無視できる。**

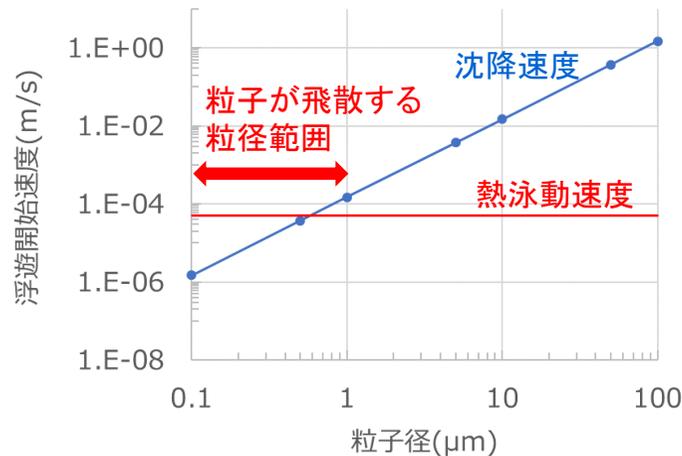


図1 熱泳動速度と沈降速度の比較

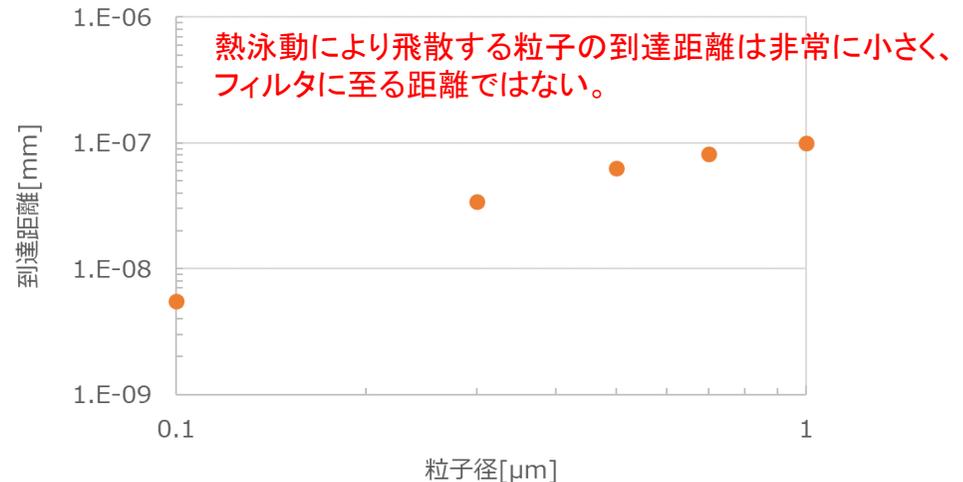


図2 微粒子の到達距離評価結果

6. 実施内容

6.3 収納缶のフィルタの性能評価

③実施事項、成果

b.フィルタの寿命評価方法の検討(15/27)

(ii) 収納缶環境を踏まえた劣化事象の選定(14/26)

事象: **衝撃** 劣化モード: 閉塞&破損

運搬時、地震発生時における衝突・落下などの衝撃により容器やフィルタが変形／破損しフィルタの機能を失う可能性について検討する。

収納缶重量

- 金属部については下記仕様を想定した。

	蓋	胴部	干渉構造	ユニット缶
材質	SUS316L (密度 8.0g/cm ³)	SUS316L (密度 8.0g/cm ³)	SUS316L (密度 8.0g/cm ³)	SUS316L (密度 8.0g/cm ³)
外形	Φ300mm × 114mm	Φ240mm × 840mm	Φ240mm × 840mm	Φ210mm × 400mm
厚さ	50mm	10mm	2.8mm	6mm

- 燃料デブリは、充填率50%、密度11g/cm³を想定した。

上記仕様をもとに、ユニット缶と燃料デブリを収めた収納缶の重量を算出した。
約300 kgと仮定して検討した。

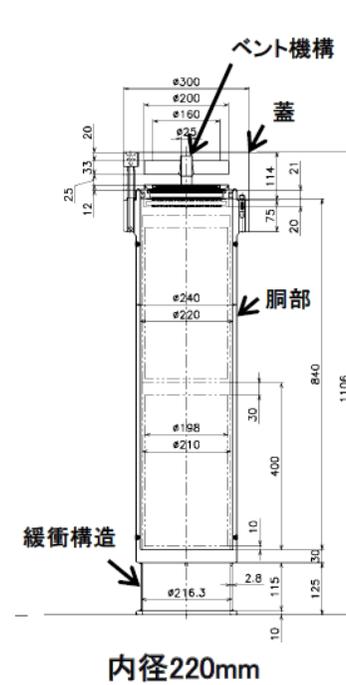


図1 収納缶構造例注1

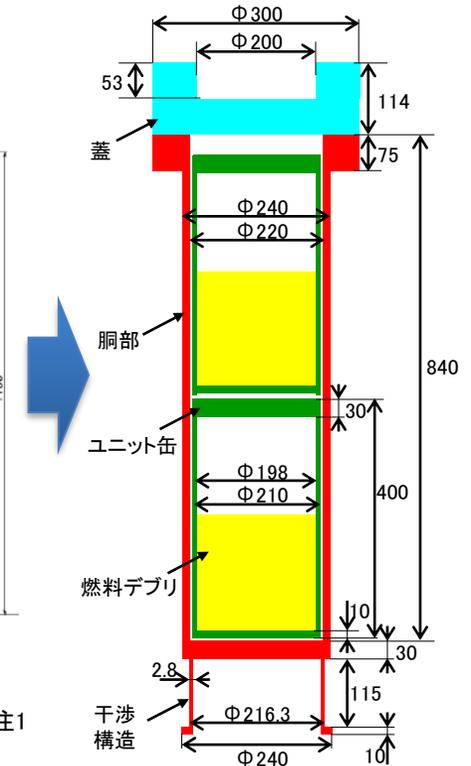


図2 想定した収納缶構造

注1:平成30年度補正予算 廃炉・汚染水対策事業費補助金 燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発 2021年6月 最終報告資料より引用

6. 実施内容

6.3 収納缶のフィルタの性能評価

③実施事項、成果

b.フィルタの寿命評価方法の検討(16/27)

(ii) 収納缶環境を踏まえた劣化事象の選定(15/26)

事象: **衝撃** 劣化モード: 閉塞&破損

衝撃が発生すると考えられる作業

- ・ 収納缶つり上げ後の落下(地震を含む)
- ・ 収納缶移送時の揺れや地震の揺れによる収納缶側面の衝突

衝撃がフィルタに及ぼす影響

- ・ 収納缶(約300kg)が数mの高さから落下した際には、**その衝撃や収納缶の変形により、フィルタが変形/破損しその機能を失う可能性がある**。なお、落下する高さ、移動速度、接地箇所(収納缶底部から落下、横転など)、フィルタの固定方法などにより変形/破損状況が異なる。
- ・ **衝突した際、フィルタが変形/破損しフィルタの機能を失う可能性がある**。なお、衝突した際の移動速度、衝突箇所、フィルタの固定方法などにより変形/破損状況が異なる。
- ・ ユニット缶の仕様やフィルタ取付部の仕様(取付部の形状、邪魔板の有無やその仕様など)によっては、**ユニット缶や燃料デブリの飛び跳ねによるフィルタの変形/破損や閉塞を考慮する必要がある**。

→考慮すべき劣化事象として、試験方法および条件の検討を行う。

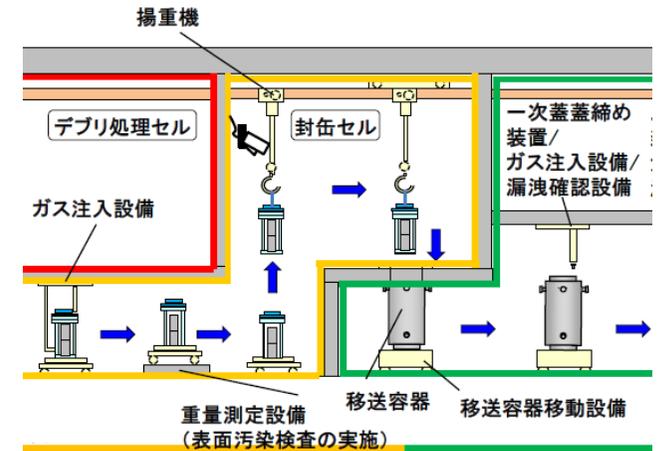


図 収納缶取り扱いフロー中の作業の例(想定)注1

6. 実施内容

6.3 収納缶のフィルタの性能評価

③実施事項、成果

b.フィルタの寿命評価方法の検討(17/27)

(ii) 収納缶環境を踏まえた劣化事象の選定(16/26)

事象: **振動による発塵** 劣化モード: 閉塞 & 破損

- ・地震動による発塵は、地震の振動加速度と地震の周期によって決まる初速度が微粒子に対して垂直に作用した場合、微粒子の到達する高さが、燃料デブリ-フィルタ間の距離を上回る場合に影響有、と考える。
- ・東日本大震災の初速度は以下の式より4.4m/sとなる。

$$\text{初速度[m/s]} = \text{最大地震加速度} 29.33[\text{m/s}^2] \times (\text{地震周期} 1/3.3[\text{s}] \times \text{上向きの力がかかる時間割合} 0.5[-])$$

- ・微粒子の浮上・沈降の運動方程式^{注2}を解き、初速度4.4m/s時の細孔到達高さを評価

- ・浮上中の粒子の運動方程式

$$\rho_P V_P \frac{dv}{dt} = -\rho_P V_P g + F_b - R_f \dots (1)$$

ρ_P, V_P, v は粒子の密度、体積、速度
 t は時間、 g は重力加速度、
 F_b は浮力、 R_f は流体抵抗

(符号は上向きを正とする)

東日本大震災の時の
 最大地震加速度 = 29.33m/s² 注1

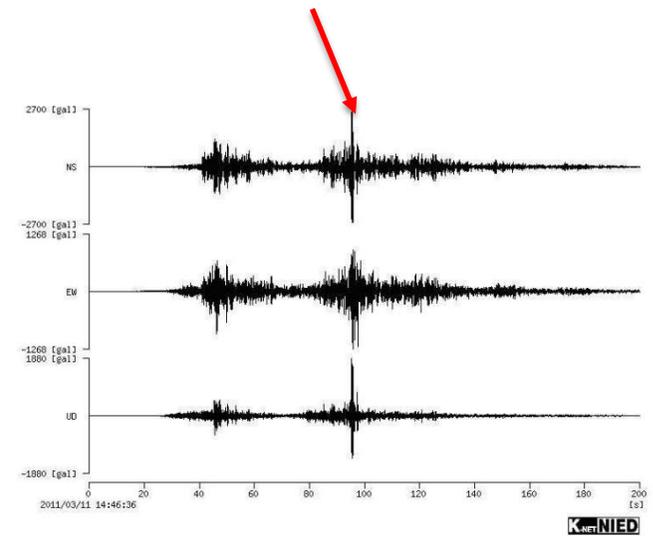
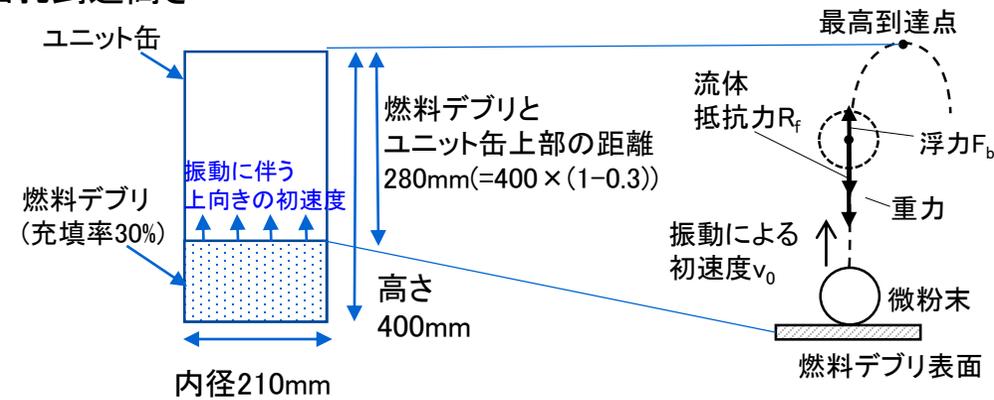


図1 東日本大震災の強振動^{注1}



ユニット缶模式図

物理モデル

図2 ユニット缶模式図と振動による発塵の物理モデル

注1: 功刀ら、”2011年東北地方太平洋沖地震による強震動”、防災科学技術研究所主要災害調査 第48号 (2012年)
 注2: 小川浩平、”シリーズ<新しい化学工学>1、流体移動解析”初版版、朝倉書店、(2011年) p58

6. 実施内容

6.3 収納缶のフィルタの性能評価

③実施事項、成果

b.フィルタの寿命評価方法の検討(18/27)

(ii) 収納缶環境を踏まえた劣化事象の選定(17/26)

事象: **振動による発塵** 劣化モード: 閉塞 & 破損

- 地震動により垂直上向きに4.4m/sの初速度を与えられた場合の燃料デブリの上昇運動により到達する距離を計算する。
- 対象とする $100\mu\text{m}$ 以下の微粒子は概ね到達距離が小さいが、 $100\mu\text{m}$ 相当で約320mmとなる。
- 本結果は概ね到達距離のオーダーが同程度であるため、**地震動による影響は無視できない。**

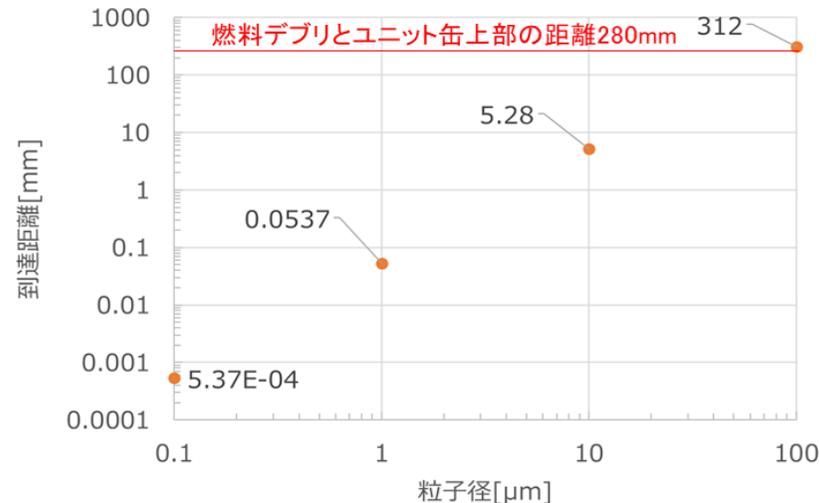


図 振動による微粒子の最大到達高さの計算結果

→考慮すべき劣化事象として、試験方法および条件の検討を行う。

6. 実施内容

6.3 収納缶のフィルタの性能評価

③実施事項、成果

b.フィルタの寿命評価方法の検討(19/27)

(ii) 収納缶環境を踏まえた劣化事象の選定(18/26)

事象: **減肉** 劣化モード: 破損

ここでは、100℃より高温の場合は水分が蒸発してしまうため、ここでは100℃以下の事象について検討した。

・ 金属フィルタの場合

図1に示す各種ステンレス鋼の孔食電位と耐孔食性指標より、耐食性はSUS304<SUS316L<Ni基合金である625合金であることが分かる。図2より、すき間腐食に関してSUSは、塩化物イオン濃度が300ppm以下であればすき間腐食は発生しない。また、図3および図4より、Ni基合金やTiについてはSUSよりも耐すき間腐食性が高いため、より発生しにくいと考えられる。

ただし、結露によって常時水分が発生し、局部的に塩化物や廃棄物に由来する微粒子が付着し、そのエリアのみ腐食電位が上昇し、**孔食電位や隙間腐食電位を超えてしまうと腐食する可能性がある**。比較的耐食性の低いSUSはその可能性があるため、試験評価を実施することが望ましい。

なお、耐孔食性指標、腐食電位に対してSUS316、SUS316Lの差はほとんどないため、減肉に対する評価は同じと考える。

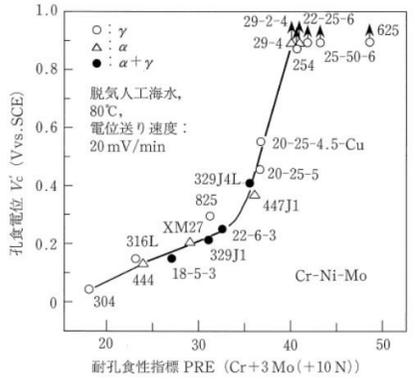


図1 各種ステンレス鋼の孔食電位と耐孔食性指標

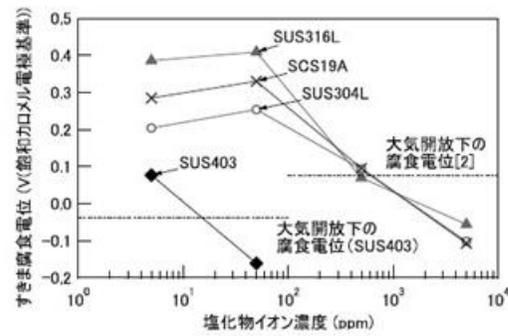


図2 すき間腐食電位と塩化物イオン濃度の関係^{注1}

注1: 電力中央研究所報告 Q12001 平成25年4月

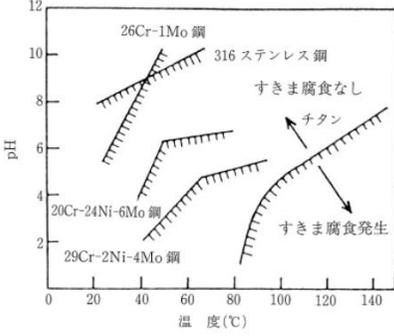


図3 飽和塩化Na水溶液環境におけるTiおよび各種ステンレス鋼のすき間腐食発生限界^{注2}

注2: 佐藤広士ら、配管技術、24、66(1982)

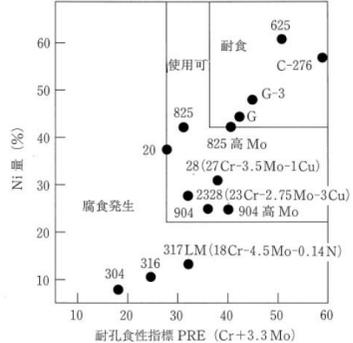


図4 各種Ni合金およびステンレス鋼の降温部ライン中の応力腐食割れおよびすき間腐食に対する適用性の相対比較^{注3}

注3: コンクリート工学年次論文集、Vol.30、No.1(2008)

6. 実施内容

6.3 収納缶のフィルタの性能評価

③実施事項、成果

b.フィルタの寿命評価方法の検討(20/27)

(ii) 収納缶環境を踏まえた劣化事象の選定(19/26)

事象：**減肉** 劣化モード：破損

・セラミックスの場合

アルミナ(Al_2O_3)

酸性溶液には耐食性有、アルカリ溶液での耐食性は劣る。

純度が高いほど**耐食性は良好**(高温水中での報告あり)。

コージュライト($2MgO \cdot 2Al_2O_3 \cdot 5SiO_2$)

アルミナよりも**耐食性は劣る**、アルカリには強いと報告あり。

ゼオライト (SiO_4 と AlO_4 四面体構造を基本)

耐食性に関する報告はなく、挙動が不明である。

・ガラスの場合

ガラス繊維フィルタとしては、E、C、S、Dの種類が挙げられるが、Cのみ耐食性を考慮して製作されているものである。**耐食性に関する報告はなく、挙動が不明である。**

MgO、ThO ₂	弱塩基性	耐	大
BeO	両性、Al ₂ O ₃ よりも塩基性	酸	↑
MgAl ₂ O ₄	Al ₂ O ₃ よりも塩基性	性	耐
Al ₂ O ₃ 、Cr ₂ O ₃ 、ZrO ₂	両性	↓	塩
SiO ₂ 、TiO ₂ 、SiC、B ₄ C、Si ₃ N ₄	弱酸性	大	基
			性

図1 酸および塩基に対するセラミックスの耐食性^{注1}

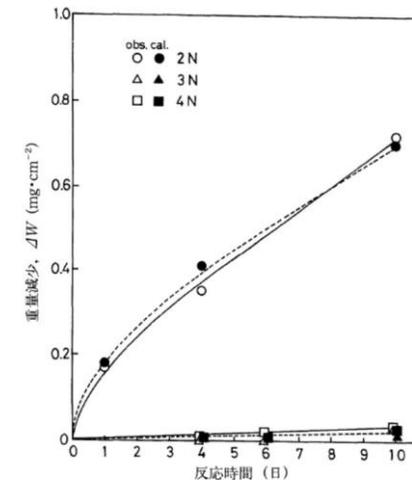


図2 アルミナセラミックスの300°C水中での腐食による重量変化反応時間の関係^{注1}

注1: 吉尾ら、材料と環境、44, 405-415(1995)

6. 実施内容

6.3 収納缶のフィルタの性能評価

③実施事項、成果

b.フィルタの寿命評価方法の検討(21/27)

(ii) 収納缶環境を踏まえた劣化事象の選定(20/26)

事象: **減肉** 劣化モード: 破損

- 高分子フィルタの場合

ポリエチン、ポリプロピレン、PTFEは、表に示すように塩水に対して**良好な耐食性を示す**。

従って使用温度に注意すれば、(ポリエチレン:130℃以下、ポリプロピレン:160℃以下、PTFE:260℃以下)適用可能である。

表1 ポリエチン,ポリプロピレン, PTFEの耐食性注1

プラスチック材質の種類 油・溶剤・薬品 (50種類) 【濃度重量%・温度℃】	熱可塑性樹脂															
	塩化ビニル樹脂		塩化ビニリデン	ポリビニルアルコール	ポリ酢酸ビニル	ポリスチレン	ABS	PE	PP	PIB	ポリアミド (ナイロン)	ポリアセチール (テフロン)	メタクリル (アクリル)	ポリカーボネート	フッ素 (テフロン)	
	軟質	硬質														
	PVC	PVC	PVC	PVA	PVAc	PS	ABS	PE	PP	PIB	PA	POM	PMMA	PC	PTFE	
塩化カリウム Potassium chloride	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	
塩化カルシウム Calcium chloride	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	
塩化(第二)水素 Marcuric chloride	○	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	
塩化第二錫 Stannic chloride	○	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	
塩化(第二)鉄 Ferric chloride	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	
塩化第二銅 Copper chloride	○	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	
塩化チオニル Thionyl chloride	×	×	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	
塩化ニッケル Nickel chloride	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	
塩化バリウム Barium chloride	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	
塩化ベンジル Benzyl chloride	×	△	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	
塩化マグネシウム Magnesium chloride	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	
塩化メチル Methyl chloride	×	×	×	×	×	×	×	×	△	×	×	×	×	×	◎	
塩酸 Hydrochloric acid [10・RT]	○	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	
塩酸 Hydrochloric acid [20・RT]	○	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	
塩酸 Hydrochloric acid [20・80]	×	△	△	△	×	×	△	△	○	△	×	×	△	△	◎	
塩酸 Hydrochloric acid [38・RT]	△	◎	◎	◎	◎	◎	△	◎	◎	◎	×	◎	◎	△	◎	
塩水 Salt water	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	
塩素ガス(乾) Chlorine gas (dry)	△	○	○	◎	◎	◎	×	△	△	×	×	×	○	×	○	
塩素ガス(湿) Chlorine gas (wet)	△	○	○	◎	◎	◎	×	△	△	×	×	×	△	×	○	
塩素化溶剤 Chlorinated solvents	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	◎	

ポリエチン,ポリプロピレン
PTFEの耐食性はいずれも◎で良好

注1: 華陽物産(株)より抜粋
<http://www.kayo-corp.co.jp/>

→考慮すべき劣化事象として、試験方法および条件の検討を行う。

6. 実施内容

6.3 収納缶のフィルタの性能評価

③実施事項、成果

b.フィルタの寿命評価方法の検討(22/27)

(ii) 収納缶環境を踏まえた劣化事象の選定(21/26)

事象: **酸化膜発生** 劣化モード: 閉塞

高分子材料は耐熱温度を超えているので、適用不可である。
金属フィルタ、セラミックス、ガラス繊維について評価する。

・ 金属フィルタ

Crを含む合金の高温酸化は700°Cまでは増加量も小さい。
Tiは1時間酸化処理を行っても数nmである。ただし、フィルタが50年間、ずっと200~300°C保持されている場合は、酸化膜が成長する可能性はあり、**フィルタを閉塞させる可能性はある**。

・ セラミックス

セラミックスは耐熱性に優れているため、200°Cや300°Cの環境下で**酸化膜を生成することはほとんどない**。

・ ガラス繊維

表に各種ガラス繊維の特性を示す。軟化点は高いが、一般的な耐熱温度は250~350°Cであり、**この温度域での使用可能性は低い**。

注1: 田中良平編:耐熱鋼高温特性データシート、ステンレス協会(1978)

注2: 島田ら、山口大学共同研究、H23-012

注3: 繊維概要【ガラス長繊維の一般的特徴】 | セントラルグラスファイバー株式会社 長繊維サイト (centralfiberglass.com)

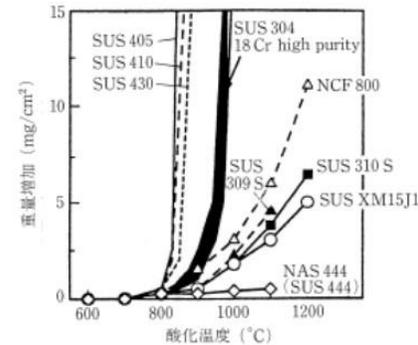


図1 各種ステンレス鋼の大気中での酸化挙動^{注1}

Table 1 Surface roughness and thickness of surface oxide layer of titanium samples with various oxidation conditions

Oxidation Temperature	Surface Roughness	Thickness of Surface Oxide Layer
Non	1.7 nm	5 nm
200°C	1.6 nm	6 nm
400°C	4.1 nm	12 nm
600°C	12.2 nm	40 nm

図2 各温度における酸化したチタン試料の表面粗さと表面酸化層厚さ^{注2}

表 ガラス繊維の特徴^{注3}

ガラスの種類	Eガラス	Cガラス	Sガラス	Dガラス	
化学組成 (wt%)	SiO ₂	53	65	64	72
	Al ₂ O ₃	15	4	25	1
	CaO	21	14	—	1.0
	MgO	2	3	10	—
	B ₂ O ₃	8	6	—	23
	Na ₂ O+K ₂ O	0.3	8	0.3	2.5
物性	比重	2.55	2.49	2.49	2.16
	軟化点 (°C)	840	749	970	771
	誘電率 1MHz22°C	6.13	6.79	5.21	4.00
	弾性係数 (GPa)	72.6	68.6	85.3	52.0
特徴	電気絶縁性、一般用	耐酸性	高強度	低誘電率	

6. 実施内容

6.3 収納缶のフィルタの性能評価

③実施事項、成果

b.フィルタの寿命評価方法の検討(23/27)

(ii) 収納缶環境を踏まえた劣化事象の選定(22/26)

事象: **電食** 劣化モード: 破損

電食が生じるのは、金属フィルタのみで、絶縁体であるセラミックス、ガラス繊維および高分子は生じない。従って、金属フィルタのみ検討する。

フィルタの構造例を図1に示す。フィルタハウジングがSUSおよびNi基合金製の場合は電食は生じない。Tiの場合は、Tiの方が貴な電位になるため、ハウジング側が腐食する。

このことは海水中の各種金属の電位差によって説明可能である。

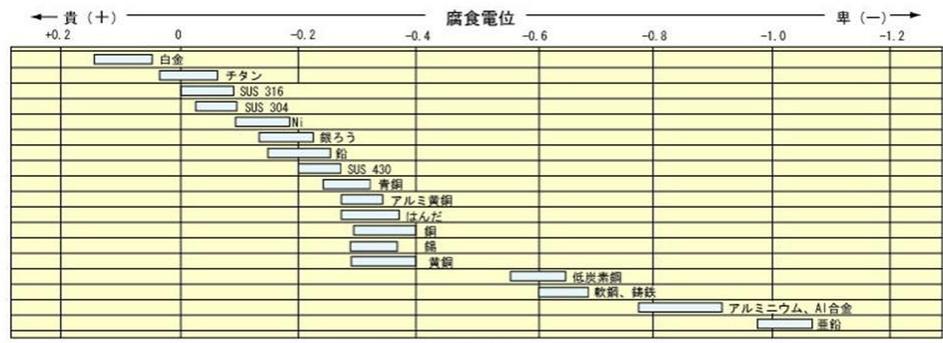


図2 海水中(温度25°C)の金属の電位差^{注1}
注1: アーバンスチール研究会「鉄鋼系景観材料ガイド」1997.7

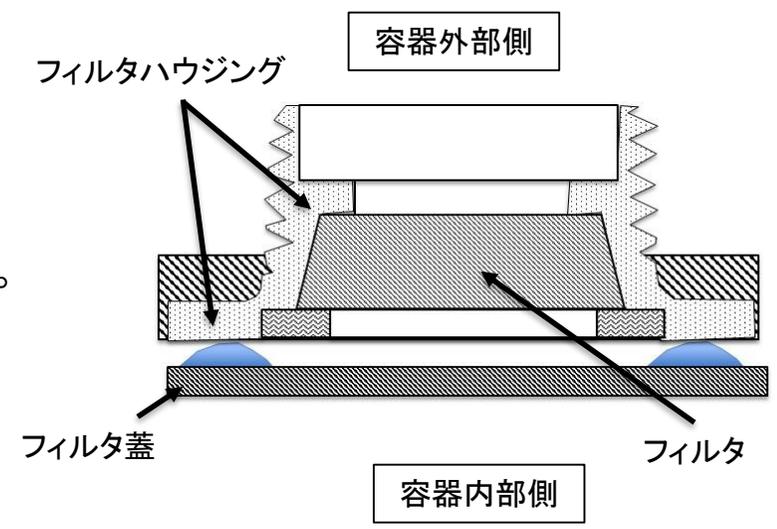


図1 フィルタ構造例

6. 実施内容

6.3 収納缶のフィルタの性能評価

③実施事項、成果

b.フィルタの寿命評価方法の検討(24/27)

(ii) 収納缶環境を踏まえた劣化事象の選定(23/26)

事象: **水膜** 劣化モード: 閉塞

フィルタ近傍の湿度が高く、かつ、空調設備の異常により、寒暖の差が大きい場合に、空気中の水分が結露し、フィルタ表面に水膜が形成されフィルタが閉塞される。

結露条件

- 結露発生の有無や結露により発生する水分量は、湿度と温度に依存する。
- 露点温度(空気中の蒸気の飽和温度)以下になった場合に、結露が発生する。
- 温度 T_1 (°C)での空気中の蒸気量 M_1 (g/m³)、温度 T_2 (°C) ($T_2 < T_1$)での飽和蒸気量を M_2 (g/m³)とした場合、 $M_2 < M_1$ であれば、 $(M_1 - M_2)$ 分の結露が発生する。
- $M_2 > M_1$ であれば、気温変化が大きくても結露は発生しない。
- 結露発生有無は環境に依存するため、経時的な劣化事象とは異なる。

6. 実施内容

6.3 収納缶のフィルタの性能評価

③実施事項、成果

b.フィルタの寿命評価方法の検討(25/27)

(ii) 収納缶環境を踏まえた劣化事象の選定(24/26)

事象: **水膜** 劣化モード: 閉塞

水膜が発生すると考えられる作業

収納缶に燃料デブリを入れて保管作業中。冬期に空調系に異常が発生し、収納缶近傍に気温変化が起こる場合。

水膜がフィルタに及ぼす影響

結露による水膜がフィルタ面を覆った場合、流路面積が減少するため、**水素排出性能が低下する可能性がある**。性能低下の度合いは、覆われる面積に依存する。

→考慮すべき劣化事象として、試験方法および条件の検討を行う。

6. 実施内容

6.3 収納缶のフィルタの性能評価

③実施事項、成果

b.フィルタの寿命評価方法の検討(26/27)

(ii) 収納缶環境を踏まえた劣化事象の選定(25/26)

事象: **微粒子の飛散** 劣化モード: 閉塞&破損

- 収納缶保管時の送気による微粒子飛散が生じるか評価する。
- 収納缶を保管する際は、水素のベント・送気が可能な構成が検討されており、収納缶の構成も送気機構付きのタイプとそうでないタイプの2種類が想定される(右図は送気機構があるタイプ)。
- 送気ガスを流し、収納缶内の水素をガス処理設備に送気する場合、ガスの流れの向きは、収納缶の下から上となり、流速によっては微粒子が浮上する可能性がある。
- 微粒子の浮上しやすさは、 $100\mu\text{m}$ 以下(粉状燃料デブリ)の範囲では大粒径ほど大きくなるため、 $100\mu\text{m}$ の微粒子の到達距離が燃料デブリとフィルタ間の距離に達する、送気流速を評価した結果、約 5 m/s であった。
- 従って、 5 m/s 以上の流速を流す場合には、**微粒子の飛散によるフィルタ劣化の可能性**がある。

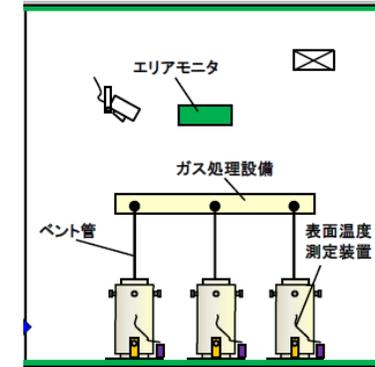


図1 収納缶と送気体系 模式図

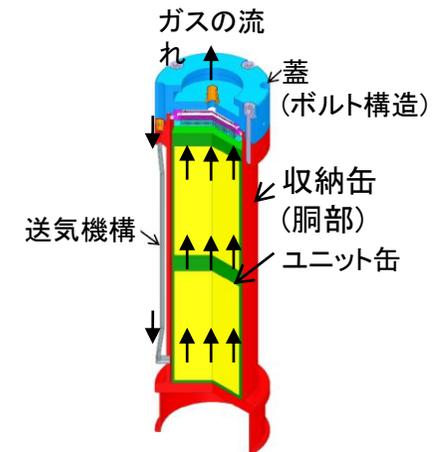


図2 送気機構付き収納缶 模式図

→考慮すべき劣化事象として、試験方法および条件の検討を行う。

6. 実施内容

6.3 収納缶のフィルタの性能評価

③実施事項、成果

b.フィルタの寿命評価方法の検討(27/27)

(ii) 収納缶環境を踏まえた劣化事象の選定(26/26)

まとめ

劣化要因	金属			セラミックス			ガラス				高分子		
	ステンレス	ニッケル基合金	チタン合金	アルミナ	コージュライト	ゼオライト	Eガラス	Cガラス	Sガラス	Dガラス	ポリエチレン	ポリプロピレン	PTFE
水素発生	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
水素脆化	—	—	◎	—	◎	◎	◎	◎	◎	◎	—	◎	—
放射線劣化	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	◎	◎	◎
熱変質	—	—	—	—	—	—	○	○	○	○	◎	◎	○
熱変形(容器)	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
熱対流	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
衝撃	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
振動による発塵	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
減肉	◎	◎	◎	—	◎	◎	◎	◎	◎	◎	—	—	—
酸化膜発生	○	○	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
電食	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
水膜	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
微粒子の飛散	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

◎:シナリオ1, 2とも試験方法の検討が必要

○:シナリオ2のみ試験方法の検討が必要

—:シナリオ1, 2とも発生可能性がないため試験方法の検討は不要

考慮すべき劣化要因と材質の組合せにて試験方法を検討する。

6. 実施内容

6.3 収納缶のフィルタの性能評価

③実施事項、成果

c.試験方法及び条件の検討(1/13)

(i)フィルタ劣化模擬方法の検討(1/10)

事象: **水素脆化**

試験概略(案)

- 各種材料にフィルタ使用期間に生じる水素量をもとに、2から3条件の水素をチャージさせ、フィルタ性能評価装置に設置し、試験を行う。チャージ方法は、電解法、高圧法等あるが、その材料に適正な手法を用いて行う。(図1)
- チャージさせたフィルタは性能評価とともに、チャージした水素量の確認を行う。その手法としては、昇温脱離分析を用いる。(図2)

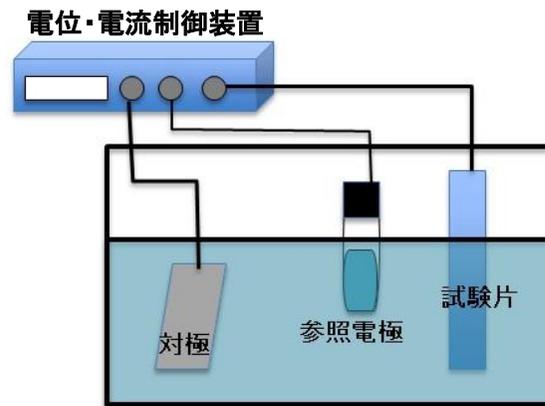


図1 水素チャージ例(電解水素チャージ例)

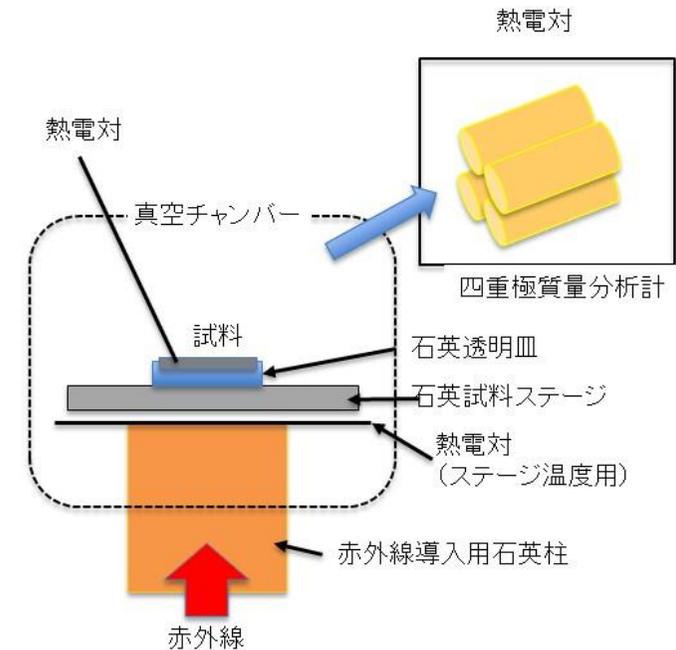


図2 昇温脱離分析装置例

6. 実施内容

6.3 収納缶のフィルタの性能評価

③実施事項、成果

c.試験方法及び条件の検討(2/13)

(i)フィルタ劣化模擬方法の検討(2/10)

事象:放射線劣化

収納缶に燃料デブリを収納した場合に想定される模擬照射をおこない、機械特性の変化を確認する。

試験概略(案)

- 対象材料に、想定される線量の放射線を照射し、照射前後の機械特性を調べる。
- フィルタとして使用中に想定される応力に対し、上記の機械特性が満足するかを調査する。
- 有機物(プラスチック)の引張試験については、JISに定められており、準拠した手法で評価する。

(JISK7161:2014 プラスチックー引張特性の求め方)

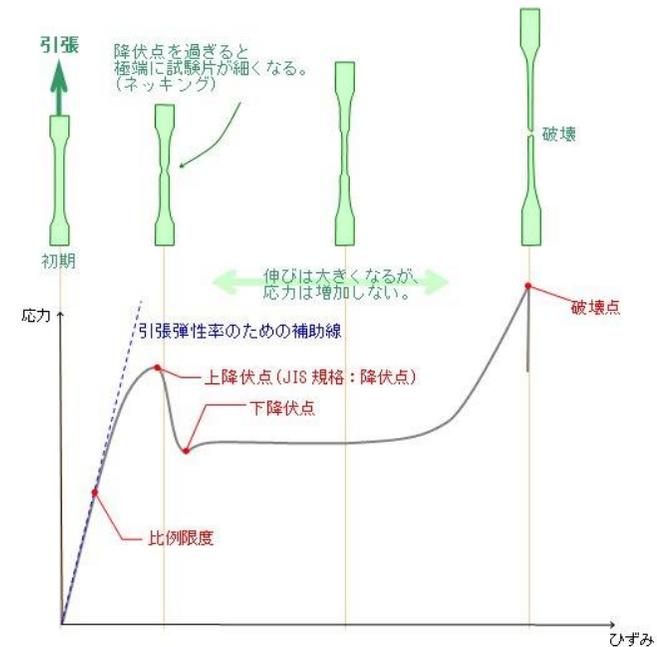


図1. 引張試験の応力-ひずみ線図例

図 引張試験の応力-ひずみ線図例^{注1}

注1: 株式会社DJKホームページ

<https://www.djklab.com/service/koubunshibussei/323>

6. 実施内容

6.3 収納缶のフィルタの性能評価

③実施事項、成果

c.試験方法及び条件の検討(3/13)

(i)フィルタ劣化模擬方法の検討(3/10)

事象：**熱変形**(容器)、**熱変質**

収納缶取り扱いフロー中の作業でフィルタが曝されると想定される。
温度環境でのフィルタの健全性を確認する。

試験概略(案)

- 収納缶を模擬した構造体(以下、収納缶模擬体)にフィルタを固定する。
- 収納缶模擬体に加熱機構を取り付ける、または、加熱装置内に収納缶模擬体を設置する。
- 収納缶模擬体を所定温度まで加熱する。
- 加熱後のフィルタの健全性を確認する。(外観、フィルタ性能試験など)

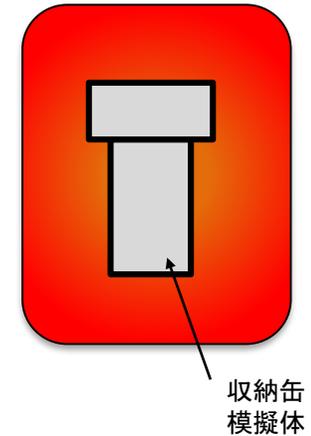


図 加熱試験概要

熱変形(容器)の影響については、試験を実施する前に、FEM(有限要素法)などを用いた解析を行うことも考えられる。

なお、フィルタの収納缶への固定方法、収納缶の形状・寸法、収納缶の蓋部の固定方法などにより結果が異なる可能性があり、詳細仕様決定の後試験を行うことが望ましい。

6. 実施内容

6.3 収納缶のフィルタの性能評価

③実施事項、成果

c.試験方法及び条件の検討(4/13)

(i) フィルタ劣化模擬方法の検討(4/10)

事象: **衝撃**

収納缶取り扱いフロー中の作業で発生すると想定される衝撃をフィルタに与える。衝撃を与えた後のフィルタの健全性を確認する。

試験概略(案)

- 収納缶を模擬した構造体(以下、収納缶模擬体)にフィルタを固定する。
- 吊具にて所定の高さまで収納缶模擬体を吊り上げる。
- 収納缶模擬体を吊具から切り離し、自由落下させる。
- 落下後のフィルタの健全性を確認する。(外観、フィルタ性能試験など)

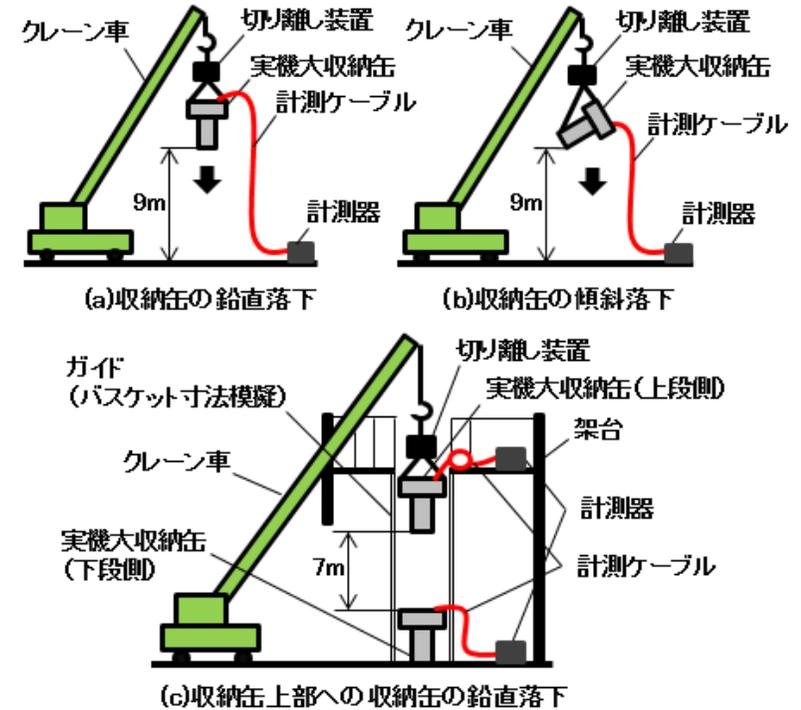


図 影響試験における収納缶模擬体の落下方向の例
(実機大収納缶の構造検証試験の試験体系図^{注1)})

なお、フィルタの収納缶への固定方法、収納缶の形状・寸法、収納缶の蓋部の固定方法、ユニット缶の形状などにより結果が異なる可能性があり、詳細仕様決定の後試験を行うことが望ましい。

6. 実施内容

6.3 収納缶のフィルタの性能評価

③実施事項、成果

c.試験方法及び条件の検討(5/13)

(i)フィルタ劣化模擬方法の検討(5/10)

事象：**振動による発塵**(地震動による発塵)

フィルタを設置した収納缶に粉状燃料デブリを含む燃料デブリ(模擬)を入れたユニット缶を入れ、地震動を模擬した加振試験を実施することで、地震動による発塵に伴うフィルタ劣化を模擬する。

試験概略(案)

- ・粉状燃料デブリを含む燃料デブリ(模擬)をユニット缶に充填する。
(燃料デブリの密度、粒子径、充填量を模擬する)
- ・ユニット缶を収納缶に入れ、フィルタを設置後、蓋を閉める。
- ・地震動を模擬できる加振台に収納缶を取付ける。
- ・容器の転倒防止のために、収納缶を固定治具で加振台に固定する。
- ・地震動を模擬した加振試験を行う。
(入力地震動は基準地震動相当波とするなど、
保管場所・設置環境を基準に準拠して実施することが望ましい)
- ・加振後に収納缶の蓋を開け、フィルタを取り出し、
フィルタの重量測定により付着量を評価する。
- ・別途性能評価試験で性能を評価する。

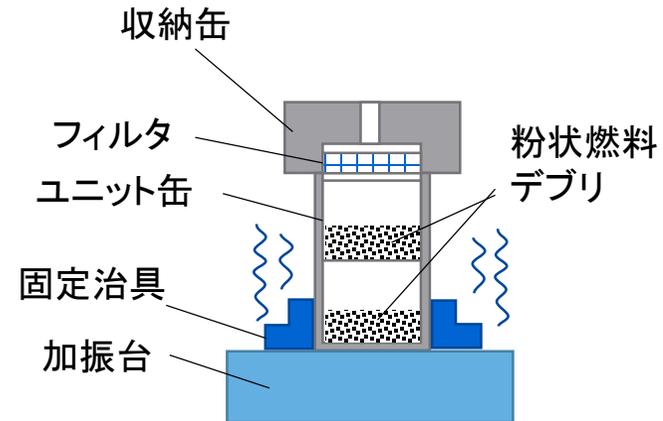


図 地震動に伴う発塵による
フィルタ劣化模擬試験 概略

なお、フィルタの蓋部への固定方法、保管容器の形状・寸法、保管容器の蓋部の固定方法、内容器の形状などにより結果が異なる可能性があり、詳細仕様決定後の試験が望ましい。

6. 実施内容

6.3 収納缶のフィルタの性能評価

③実施事項、成果

c.試験方法及び条件の検討(6/13)

(i)フィルタ劣化模擬方法の検討(6/10)

事象: **減肉**

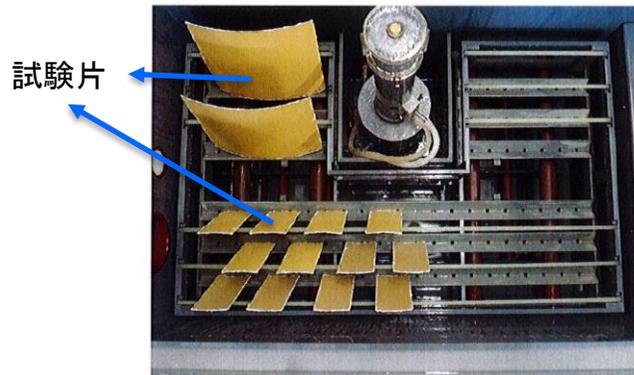
試験概略(案)

減肉評価は以下の2種が考えられる。

- ・想定される環境下にフィルタを浸漬して、時間とともに変化する重量変化量より腐食速度を算出し、減肉状態を予測
- ・乾湿環境が繰返されるとともに腐食性イオンが付着することを想定して、複合サイクル試験(JIS K 5600_7_9)用い、塩水噴霧、乾燥、加湿を1サイクルとして、繰返す方法

複合サイクル試験は、図の装置内にフィルタを設置して腐食させる。

ただし、性能評価の基礎として、腐食進行割合を変化させたフィルタを製作し、フィルタ性能維持可不可を評価する必要あり。腐食速度や複合サイクル試験の結果と上記の性能評価結果と合わせて検討することで、収納缶保管容器のフィルタとして使用可能かどうかを判断することが可能になる。



左図の装置内にフィルタを設置し、複合サイクルを行うことで、フィルタを腐食させる。

図 複合サイクル試験装置例

6. 実施内容

6.3 収納缶のフィルタの性能評価

③実施事項、成果

c.試験方法及び条件の検討(7/13)

(i)フィルタ劣化模擬方法の検討(7/10)

事象:酸化膜発生

試験概略(案)

酸化膜測定試験

温度300°C、大気中の条件下で、適用するフィルタ材の酸化膜成長速度を測定する。

熱処理炉に測定する材料を設置する。熱処理時間を3条件以上設定し、熱処理前後の重量増より、酸化膜成長速度を算出する。

その値より、50年後の酸化膜厚さを算出し、加速条件(高温酸素過多)でフィルタに算出した酸化膜厚の付与し、そのフィルタを用いて性能評価を行う。

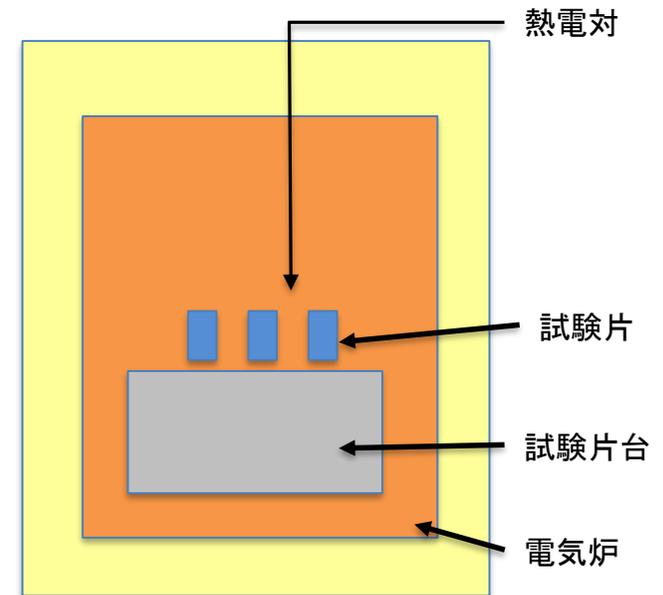


図 熱処理炉例

6. 実施内容

6.3 収納缶のフィルタの性能評価

③実施事項、成果

c.試験方法及び条件の検討(8/13)

(i)フィルタ劣化模擬方法の検討(8/10)

事象: **水膜**

フィルタに結露による水膜形成を模擬した条件で、通気性を確認する。

試験概略(案)

- フィルタに水膜が形成された場合に、容器内部の気体が排出されるための圧力を調べる。
- 繊維の防水性試験の手法を応用して評価できる。(右図参照)
- フィルタを固定して水で加圧し、排出された時の圧力を測定する。

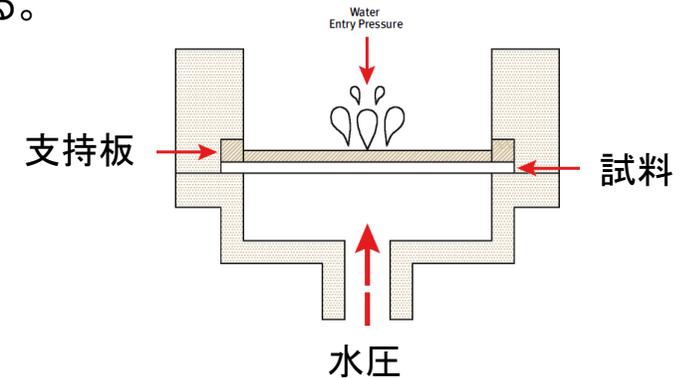


図 閉塞したフィルタの通気性試験概念図^{注1}

注1: GORE社資料 (<https://www.gore.co.jp/sites/g/files/ypyipe116/files/2016-04/PTV-TechInfo-WEP-Testing-US.pdf>)

6. 実施内容

6.3 収納缶のフィルタの性能評価

③実施事項、成果

c.試験方法及び条件の検討(9/13)

(i)フィルタ劣化模擬方法の検討(9/10)

事象：**微粒子の飛散**(換気による発塵)

フィルタを設置した収納缶に粉状燃料デブリを含む燃料デブリ(模擬)を収納缶送気時の上昇流を模擬する体系に充填し、上流から送気ガスを流すことで、換気による発塵に伴うフィルタ劣化を模擬する。

試験概略(案)

- ・粉末支持板と、フィルタと粒子濃度測定器を設置した右図のような縦型反応管を用意する。
- ・粉状燃料デブリ(模擬)を反応管に充填し、フィルタを設置する。
- ・換気相当の流速で送気する(送気に使用するガスを用いる)。
- ・フィルタ手前の粒子濃度測定器で、試験前の粒子個数を基準としてガス流通時の粒子カウントを確認し、微粒子が飛散するか確認。
- ・微粒子の飛散がある場合は、性能に与える影響がある可能性があり、この場合は、換気後に収納缶の蓋を開け、フィルタを取り出し、フィルタの重量測定により付着量を評価する。
- ・別途性能評価試験で性能を評価する。

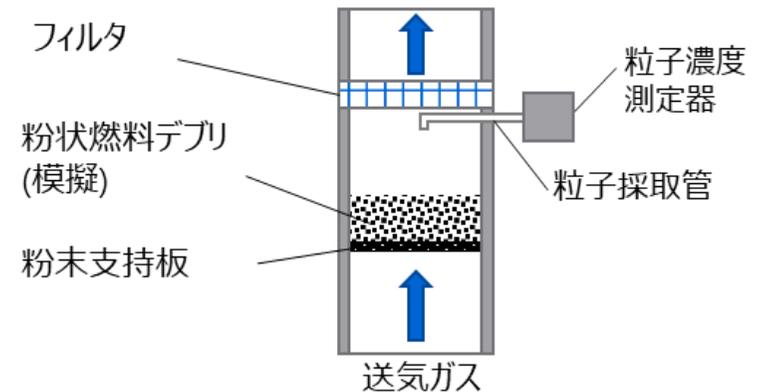


図 振動による発塵を模擬する試験体系概略

なお、換気流速、送気機構の取り付け位置、容器形状・寸法等の容器構成、燃料デブリの充填方法などにより結果が異なる可能性があり、詳細仕様決定後の試験が望ましい。

6. 実施内容

6.3 収納缶のフィルタの性能評価

③実施事項、成果

c.試験方法及び条件の検討(10/13)

(i)フィルタ劣化模擬方法の検討(10/10)

まとめ

・抽出した10項目の劣化プロセスにおける劣化度合いについて理論式での評価は困難であることから、劣化プロセスごとにフィルタの劣化を模擬する試験方法案を整理した。

・インプット(環境条件、燃料デブリ性状等)、処理プロセス、詳細仕様、要求性能およびフィルタ種類が決まらなるとフィルタ劣化を模擬することは困難である。これら情報が集約された際に各劣化プロセスの発生可能性の有無の再評価、劣化速度評価のための劣化模擬試験等を実施し、各種フィルタ寿命を評価してフィルタを選定していく必要がある。

6. 実施内容

6.3 収納缶のフィルタの性能評価

③実施事項、成果

c.試験方法及び条件の検討(11/13)

(ii)フィルタ性能評価方法の検討(1/3)

粒子捕集性能評価方法

・一般的なフィルタの性能評価方法では、粒子捕集性能評価方法が規定されており、JISでは以下のものがある。

JIS B 9908-2:2019換気用エアフィルタユニット・換気用電気集じん器の性能試験方法—第2部:粒径別捕集率および圧力損失の測定方法

・これによれば、右図に示すように、フィルタに粒子を含む気流を流し、フィルタ前後で粒子濃度を測定することで、フィルタにおける粒子捕集性能を評価することが可能である。

(試験方法)

- ・温度、湿度を一定にして、送風機で乾燥流体をフィルタ部に一定流速で流す。
- ・ある粒子径に調整された粒子を試験用粒子として流す。
- ・フィルタ前後で粒子の個数濃度を計測し、フィルタの捕集効率を評価する。

(判定基準)

- ・粒子捕集効率が所定の性能を満足することで判断する。
- ・性能の目安としてはJISのHEPAフィルタ相当(捕集性能99.97% $@0.3\mu\text{m}$)や、HICベントフィルタに適用されているフィルタ相当(NucFil®019-HCR、粒子捕集性能 $>99.97\%@0.3-0.5\mu\text{mDOP}$ 、規定流量:210ml/min $@330\text{Pa}$)が参考となる。

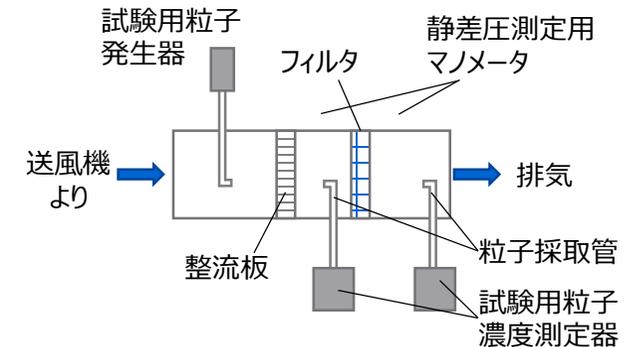


図 フィルタ性能評価試験 概略

6. 実施内容

6.3 収納缶のフィルタの性能評価

③実施事項、成果

c.試験方法及び条件の検討(12/13)

(ii)フィルタ性能評価方法の検討(2/3)

水素透過性能評価方法(一般産業)

1)一般的なフィルタ性能評価の方法

- ・ 一般的なフィルタの性能評価試験方法に関し、JISでは以下のものが規定されている。
JIS 9908:2011 換気用エアフィルタユニット・換気用電気集じん器の性能試験方法
この規格では、空気中に浮遊する粉じんを除去するために用いるエアフィルタの性能評価方法であり、水素透過性能の評価に関しては記載されていない。
- ・ 原子力施設向けのフィルタに関し、以下の規定がある。
JISZ 4812-1995 放射性エアロゾル用高性能エアフィルタ
この規格では、放射性エアロゾルを除去する目的で、原子力施設などの排気系、換気空調系統などで使用する。高性能エアフィルタ(以下、高性能エアフィルタという。)のうち、火災防護上難燃性を要求されるものについて規定されている。この規格でも、水素透過性能の評価に関しては記載されていない。

今回の調査では、JISでは、水素透過性の評価方法に関する規格は見当たらなかった。

6. 実施内容

6.3 収納缶のフィルタの性能評価

③実施事項、成果

c.試験方法及び条件の検討(13/13)

(ii)フィルタ性能評価方法の検討(3/3)

水素透過性能評価方法(原子力)

2)フィルタの水素透過性能評価の方法

米国では、放射性廃棄物やTRU廃棄物の容器向けの水素排出用のフィルタに関し試験方法が定められている^{注1}。フィルタ付き容器内に所定濃度(4%)の水素を封入、静置容器内水素濃度を5分毎に7回測定。以下の式で得られる水素透過係数(hydrogen diffusivity, D)で透過性能評価

$$D = \frac{PV}{tRT} \ln\left(\frac{H_0}{H_t}\right)$$

D:水素透過係数(Mol/sec/molFraction)、
 P:圧力(atm)、V:容器体積(L)、t:時間(秒)、
 R:理想気体のガス定数(0.082Latm/molK)、
 T:温度(K)、 H_0 :初期水素濃度、
 H_t :時刻tでの水素濃度

米国では、WIPP(Waste Isolation Pilot Plant 核廃棄物隔離試験施設)の廃棄物容器に使用するフィルタの性能を規定

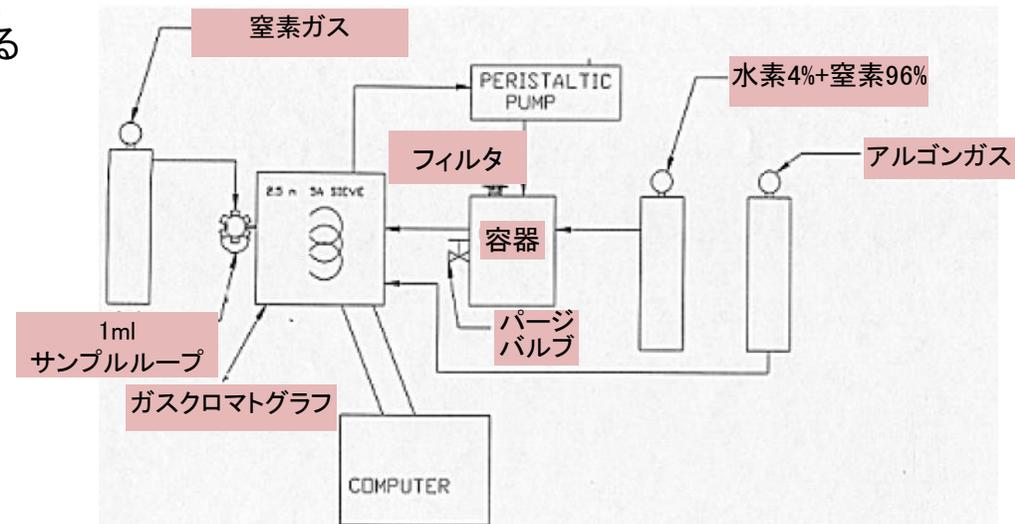


図 水素透過係数試験装置概略図

注1: Terry Wickland and John Schierloh "HYDROGEN DIFFUSIVITY THROUGH DRUM AND LINER VENTING FILTERS" WM98
 (<http://archive.wmsym.org/1998/html/sess27/27-37/27-37.htm>)

6. 実施内容

6.3 収納缶のフィルタの性能評価

④成果の反映先への寄与

設計フェーズにおいてフィルタを選定する際に有益なデータとなる。

⑤現場への適用性の観点における分析

現場への適用においては、本事業の成果となるフィルタ劣化模擬方法およびフィルタ性能評価方法に従い実施された試験結果に基づき劣化の影響を評価し、その評価結果から劣化後も性能を満たすフィルタを適用する。

⑥目標に照らした達成度

目標達成を判断する以下の指標が満足できていることから、所期計画通り、TRLレベル1を達成できたと判断する。

- ・ 収納缶のフィルタの寿命に影響を与える環境や条件が整理されていること。また、寿命の評価のために試験が必要な事項があれば、その試験方法および試験条件を検討し、それらに関する既存の知見が整理されていること。

⑦今後の課題

インプット(環境条件、燃料デブリ性状等)、処理プロセス、フィルタ要求性能等の情報が集約された際に各劣化プロセスの発生可能性の有無の再評価、プロセスの重ね合わせ影響評価、劣化速度評価のための劣化模擬試験等を実施し、各種フィルタ寿命を評価してフィルタを選定していく必要がある。

6. 実施内容

6.3 収納缶のフィルタの性能評価

⑧まとめ

- フィルタに求められる要件として燃料デブリ微粒子を閉じ込める機能と水の放射線分解で発生する水素を逃がす機能を抽出することができた。
- フィルタ劣化要因の洗い出しを実施し、17の劣化プロセスを抽出した。既往知見をインプット条件として燃料デブリ性状、容器仕様、収納缶内/外の環境条件から、塩析出、微生物膜、エアロゾル堆積、UV劣化の4プロセスを対象から除外した。選択した13プロセスが収納缶環境を踏まえた劣化に至るシナリオを定義した。
- 劣化プロセスのうち、水素発生、熱対流、電食の3事象は発生しないと評価、その他10事象について理論式によるフィルタ劣化評価を試みたが、劣化事象を推定する方法が確立されていないため、劣化を模擬する試験方法を検討し、各劣化プロセスに対するフィルタ劣化模擬方法案を提示した。
- 劣化度の判定方法として、フィルタ性能として求められる粒子捕集性能と水素透過性能について調査し、一般的な評価方法案として整備した。
- インプット(環境条件、燃料デブリ性状等)、処理プロセス、フィルタ要求性能等の情報が集約された際に各劣化プロセスの発生可能性の有無の再評価、プロセスの重ね合わせ影響評価、劣化速度評価のための劣化模擬試験等を実施し、各種フィルタ寿命を評価してフィルタを選定していく必要がある。

7. 全体まとめ

- 粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの保管に関する課題の抽出に有用と考えられる、米国TMI-2、Hanford Site、英国Sellafieldなどの粉状、スラリー・スラッジ状の放射性物質等の取り扱いや保管に関する経験、知見および情報を収集、分析を行った。
- 燃料デブリを塊状、粒状燃料デブリと同様の収納缶を用いて乾式保管を行う場合の保管までの各プロセスにおける課題、対策案を検討し、粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの保管に関する技術課題、ならびにその解決フェーズ、解決時期を明確化した。
- 収納缶のフィルタの置かれる環境と条件から発生可能性のある劣化プロセスを抽出した。劣化プロセスごとに模擬劣化方法案を提示するとともに、性能評価試験法案を策定した。